

行政院原子能委員會
委託研究報告

「109 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全
評估及相關特性分析」

受委託單位：國立清華大學

計畫主持人：許文勝

報告日期：中華民國 109 年 12 月

行政院原子能委員會
委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

109 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全
評估及相關特性分析

子項計畫一：

核電廠除役期間除污策略和技術彙整

案號： AEC10903011L

執行單位： 國立清華大學

計畫主持人： 許文勝

共同主持人： 歐陽汎怡、林明緯、葉宗洸、
王本誠、李進得

報告日期：中華民國 109 年 12 月

摘要

核一廠在預備進行廠房、系統及設備的拆除作業前，必須先進行除污，將其受污染表層及下方的污染物予以隔離並移除，以降低或消除公眾與作業人員的輻射曝露，為了更深入瞭解各種除污方法與技術的適用性，本計畫延續 108 年度研究主軸，將持續蒐集、研讀國外電廠除污技術報告及國際案例的相關資料、有關除污技術之相關建議與決策原則並作重點彙整。研討與摘要目前主要應用於核電廠除污的各式化學與物理技術。藉由了解各項技術的運作原理、適用污染物質、適用表面材質、廢棄物管理、操作特性與除污成效等重要屬性，進行彙整使之成為審查除污技術的參考。探討各國核電廠除役過程所應用之非化學除污技術原理和優劣，針對機械、熔融、生物、複合方式等除污技術，進行彙整與分析，建立管制建議來作為我國後續進行除污管制作業之參考依據並強化管制能量。

Abstract

The structures, systems and components of Chin-shan Nuclear Power Plant will need to be decontaminated before dismantling, which to remove the material from areas where it is not wanted. Decontamination is used to reduce the dose that workers may receive from a component or surface, and the potential for airborne radionuclides. In order to better understand the applicability of various decontamination processes and technologies, the purpose of this project is to collect and integrate relevant information on the reports of international decontamination technologies, decommission decision and process, and the associated practices. This report aims at investigating a variety of chemical and physical technologies that have been commonly applied in the nuclear facilities and power plants for decontaminating radioactive surfaces. Through the understanding towards the working principles, target contaminants, applicable surfaces, waste managements, operating characteristics, and performance of these decontamination technologies, their properties and feasibilities are evaluated and compared as a reference for the regulatory authorities. Furthermore, in order to establish regulatory opinions of the subsequent decontamination process as the reference for regulatory agency, this study focuses on exploring the principles, advantages and disadvantages of non-chemical decontamination technology, such as, mechanical, melting, biological and compound methods, used in the decommissioning of nuclear power plants at various countries. The results of research are to provide recommendations and regulatory decisions related to decontamination technology for AEC.

目錄

摘要	2
目錄	4
圖目錄	16
表目錄	19
一、研討並摘要美國國家環境保護局(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)所出版之 “Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surface”報告，並依此為基礎研 析相關表面除污時之管制原則並彙整成為我國審查除污技術可接受標準之參考依據。	22
(一) 前言	22
(二) 化學除污技術	23
2.1 螯合劑與有機酸	24
2.1.1 技術簡介	24
2.1.2 過渡金屬與配位化學簡介 [6] [7]	25
2.1.3 適用污染物質	28
2.1.4 適用材質與表面特性	28
2.1.5 廢棄物管理	28
2.1.6 操作特性	28
2.1.7 除污成效	29
2.1.8 成本估算	29
2.2 強無機酸及相關物質	29
2.2.1 技術簡介	29
2.2.2 適用污染物質	31
2.2.3 適用材質與表面特性	31
2.2.4 廢棄物管理	31
2.2.5 操作特性	31
2.2.6 除污成效	32
2.2.7 成本估算	32

2.3 化學泡沫與凝膠	32
2.3.1 技術簡介	32
2.3.2 適用污染物質	33
2.3.3 適用材質與表面特性	33
2.3.4 廢棄物管理	33
2.3.5 操作特性	33
2.3.6 除污成效	33
2.3.7 成本估算	34
2.4 氧化還原法	34
2.4.1 技術簡介	34
2.4.2 氧化還原原理	35
2.4.3 適用污染物質	36
2.4.4 適用材質與表面特性	36
2.4.5 廢棄物管理	36
2.4.6 操作特性	36
2.4.7 除污成效	37
2.4.8 成本估算	37
2.5 TechXtract	38
2.5.1 技術簡介	38
2.5.2 適用污染物質	39
2.5.3 適用材質與表面特性	39
2.5.4 廢棄物管理	39
2.5.5 操作特性	39
2.5.6 除污成效	40
2.5.7 成本估算	41
2.6 化學除污技術市售可獲性彙整	42
2.7 國內已發展之化學除污技術相關資訊	42
(三) 物理除污技術	43

3.1 可剝塗層	44
3.1.1 技術簡介.....	44
3.1.2 適用污染物質.....	45
3.1.3 適用材質與表面特性.....	45
3.1.4 廢棄物管理.....	45
3.1.5 操作特性.....	45
3.1.6 除污成效.....	46
3.1.7 成本估算.....	46
3.2 離心噴砂	47
3.2.1 技術簡介.....	47
3.2.2 適用污染物質.....	48
3.2.3 適用材質與表面特性.....	48
3.2.4 廢棄物管理.....	48
3.2.5 操作特性.....	48
3.2.6 除污成效.....	49
3.2.7 成本估算.....	50
3.3 混凝土研磨機	51
3.3.1 技術簡介.....	51
3.3.2 適用污染物質.....	51
3.3.3 適用材質與表面特性.....	52
3.3.4 廢棄物管理.....	52
3.3.5 操作特性.....	52
3.3.6 除污成效.....	52
3.3.7 成本估算.....	53
3.4 混凝土刨除機	53
3.4.1 技術簡介.....	53
3.4.2 適用污染物質.....	54
3.4.3 適用材質與表面特性.....	54

3.4.4 廢棄物管理.....	54
3.4.5 操作特性.....	55
3.4.6 除污成效.....	55
3.4.7 成本估算.....	56
3.5 混凝土剝落機.....	56
3.5.1 技術簡介.....	56
3.5.2 適用污染物質.....	57
3.5.3 適用材質與表面特性.....	57
3.5.4 廢棄物管理.....	57
3.5.5 操作特性.....	57
3.5.6 除污成效.....	58
3.5.7 成本估算.....	58
3.6 乾冰噴砂.....	59
3.6.1 技術簡介.....	59
3.6.2 適用污染物質.....	60
3.6.3 適用材質與表面特性.....	60
3.6.4 廢棄物管理.....	60
3.6.5 操作特性.....	61
3.6.6 除污成效.....	61
3.6.7 成本估算.....	61
3.7 乾式真空吸塵.....	61
3.7.1 技術簡介.....	61
3.7.2 適用污染物質.....	62
3.7.3 適用材質與表面特性.....	62
3.7.4 廢棄物管理.....	62
3.7.5 操作特性.....	62
3.7.6 除污成效.....	63
3.7.7 成本估算.....	63

3.8 電動液壓粗琢	63
3.8.1 技術簡介	63
3.8.2 適用污染物質	64
3.8.3 適用材質與表面特性	64
3.8.4 廢液與廢棄物管理	64
3.8.5 操作特性	64
3.8.6 除污成效	65
3.8.7 成本估算	65
3.9 En-vac 機器人牆壁粗琢	65
3.9.1 技術簡介	65
3.9.2 適用污染物質	66
3.9.3 適用材質與表面特性	66
3.9.4 廢液與廢棄物管理	66
3.9.5 操作特性	66
3.9.6 除污成效	67
3.9.7 成本估算	67
3.10 噴砂處理	68
3.10.1 技術簡介	68
3.10.2 適用污染物質	71
3.10.3 適用表面材質	71
3.10.4 廢棄物管理	71
3.10.5 操作特性	71
3.10.6 除污成效	72
3.10.7 成本估算	72
3.11 高壓水噴射	73
3.11.1 技術簡介	73
3.11.2 適用污染物質	74
3.11.3 適用表面材質	74

3.11.4 廢棄物管理.....	74
3.11.5 操作特性.....	74
3.11.6 除污成效.....	75
3.11.7 成本估算.....	75
3.12 軟性介質噴砂.....	76
3.12.1 技術簡介.....	76
3.12.2 適用污染物質.....	77
3.12.3 適用表面材質.....	77
3.12.4 廢棄物管理.....	77
3.12.5 操作特性.....	77
3.12.6 除污成效.....	78
3.12.7 成本估算.....	79
3.13 蒸汽真空清潔.....	80
3.13.1 技術簡介.....	80
3.13.2 適用污染物質.....	81
3.13.3 適用表面材質.....	81
3.13.4 廢棄物管理.....	82
3.13.5 操作特性.....	82
3.13.6 除污成效.....	83
3.13.7 成本估算.....	84
3.14 活塞粗琢.....	85
3.14.1 技術簡介.....	85
3.14.2 適用污染物質.....	86
3.14.3 適用表面材質.....	86
3.14.4 廢棄物管理.....	86
3.14.5 操作特性.....	86
3.14.6 除污成效.....	87
3.14.7 成本估算.....	88

3.15 物理除污技術市售可獲性彙整.....	90
(四) 化學與物理除污技術摘要比較.....	90
參考文獻	95
附錄 1-1： 子項計畫 1-1 英文專有名詞縮寫一覽表	98
二、 搜羅探討各國核電廠除役過程所應用之非化學除污技術原理和優劣，針對機械、熔融、生物、複合技術除污等眾多方式做一全盤分析與瞭解，以及管制要項，製作報告成為我國後續進行除污管制作業之參考依據。	101
(一) 前言	101
(二) 機械除污	103
2.1 水沖洗(Flushing with water)	104
2.2 除塵/吸塵/擦拭/洗滌(Dusting/vacuuming/wiping/scrubbing)	105
2.3 可剝離塗層(Strippable coatings)	106
2.4 蒸汽清除(Steam cleaning)	107
2.5 噴砂清除(Abrasive cleaning or abrasive blasting).....	108
2.5.1 美國西屋電氣公司之濕式噴砂研究[6]	109
2.5.2 比利時噴砂除污成本比較[7]	110
2.5.3 德國某核電廠的濕式噴砂除污[18]	111
2.5.4 自動化及機械手臂應用(人員安全及避免接觸具放射性物質廢棄物) [19].....	112
2.5.5 義大利 JRC-Ispra Abrasive Blasting Unit (ABU).....	114
2.5.6 日本 JPDR 實例	115
2.5.7 瑞典實際濕式噴砂案例[8]	115
2.6 海綿噴砂(Sponge blasting)	116
2.7 二氧化碳噴砂(CO ₂ blasting)	118
2.8 高壓液氮噴砂(High pressure liquid nitrogen blasting)	120
2.9 氟噴流(Freon jetting)	121
2.10 濕冰噴砂(Wet ice blasting)	121
2.11 高壓與超高壓水噴流(High pressure and ultra high pressure water jets)	121
2.12 研磨/刮刨(Grinding/shaving)	123

2.13 翻動/加工/刨削(Scarifying/scabbling/planing).....	124
2.14 研磨(Milling).....	126
2.15 鑽孔與擊碎(Drilling and spalling).....	127
2.16 膨脹灌漿(Expansive grout).....	127
2.17 路面破碎機與鑿石錘(Paving breaker and chipping hammer)	127
(三) 熔融除污	128
(四) 電化學除污	130
4.1 各種用於電化學除污的電解質	131
4.1.1 磷酸[13][14][15].....	131
4.1.2 硝酸.....	133
4.1.3 有機酸.....	133
4.1.4 硫酸[14].....	133
4.1.5 硫酸鈉[14].....	134
(五) 泡沫除污	134
(六) 生物除污[16]	135
6.1 混凝土的生物降解(Biodegradation of Concrete).....	135
6.2 針對油漆和清漆表面的生物除污(Biotechnology for the Decontamination of Surfaces Coated with Paint and Varnish)	136
(七) 超音波除污	136
(八) 化學凝膠(Chemical Gels)除污	137
(九) 複合技術除污	138
9.1 超音波結合化學試劑(Ultrasound in conjunction with chemicals)	138
9.2 乾冰噴砂(dry-ice blasting)結合雷射除污	138
9.3 超音波結合電化學除污	138
參考文獻	141
(十) 原能會電化學儀器於本計畫之電化學除污研究成果	143
附錄 1-2： 子項計畫 1-2 英文專有名詞縮寫一覽表	144

三、評析並摘要 ASME Decommissioning Handbook Ch.17, “Decontamination” 和 Ch.13, “Decontamination Decisions and Process”，另因應我國情況根據其內容提出相應管制建議，以報告方式呈現。	147
(一) 前言[1]	147
(二) 執行方法及研究步驟[1]	147
(三) The Decommissioning Handbook[2]第 13 章及 17 章重點摘要彙整	148
3.1 第 13 章 - 除污決策及程序 (Decontamination Decisions and Process)	149
13.1 前言	149
13.2 決策過程	149
13.3 時機	150
13.4 成本效益分析的要素	150
13.5 評估直接除污成本	151
13.6 評估間接除污成本	152
13.7 除污的額外議題	152
3.2 第 17 章 - 除污 (Decontamination)	153
17.1 前言	153
17.2 前期規劃	153
17.3 作業考量	153
17.4 放射性污染物	154
17.5 除污因子	154
17.6 氧化物溶解	154
17.7 污染的性質	155
17.8 化學除污技術	156
17.9 機械除污技術	160
17.10 其它技術	162
17.11 小結	163
(四) 國際除役/除污案例資料蒐集	163

4.1 Nuclear News Special Section Decommissioning & Decontamination, Best Practices for Strategic Nuclear Plant Decommissioning 36, July 2019, Nuclear News, ANS(American Nuclear Society)[3]	163
4.1.1 規劃技術策略.....	164
4.1.2 運用 3-D 模型(Use of 3-D modeling)	165
4.1.3 一次側管路除污(Primary circuit decontamination).....	166
4.1.4 廢棄物減容(Reducing waste volume).....	168
4.2 "Breaking up Barsebäck," Nuclear Engineering International, 6 June 2018[4]	169
4.2.1 規劃反應器壓力槽內部組件的切割.....	169
4.2.2 切割策略.....	170
4.2.3 現場物流注意事項.....	170
4.2.4 資格鑑定.....	170
4.2.5 現場準備作業.....	170
4.2.6 切割及包裝.....	170
4.2.7 包裝及廢棄物處理.....	171
4.2.8 最後步驟：設備移除及水池淨化.....	171
4.2.9 持續成功.....	171
4.3 Innovative D&D at Bohunice V1, 7 March 2019 [5]	171
4.3.1 規劃與設計作業.....	172
4.3.2 設計及切割策略.....	172
4.3.3 拆解策略.....	172
4.3.4 準備切割.....	173
4.3.5 正在進行的準備作業.....	173
4.3.6 卸下反應器軸保護蓋.....	173
4.3.7 廢棄物管理.....	173
4.3.8 持續學習.....	174
(五) 與核電廠除役/除污相關的工安、輻安、廢棄物處理及機器人技術	174
5.1 Health Physics and Industrial Hygiene Aspects of Decontamination as a Precursor to Decontamination [6]	174

5.1.1 介紹.....	174
5.1.2 健康問題.....	174
5.1.3 工業衛生和安全問題.....	175
5.2 A Qualitative Identification and Analysis of Hazards, Risks and Operating Procedures for a Decommissioning Safety Assessment of a Nuclear Research Reactor [12].....	175
5.2.1 介紹.....	175
5.2.2 KRR-1	176
5.2.3 通過除役經驗獲得的專業知識.....	177
5.2.4 KRR-1 的除役技術	177
5.2.5 拆除反應器爐心可能的危害.....	177
5.2.6 減輕拆除反應器爐心有關於危害以及注意事項.....	177
5.3 A Study on Characteristics and Internal Exposure Evaluation of Radioactive Aerosols during Pipe Cutting in Decommissioning of Nuclear Power Plant [7].....	177
5.4 The Use of Robotics and Automation in Nuclear Decommissioning [8]	182
5.5 Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS of the Fugen Nuclear Power Station [10]	185
5.5.1 介紹.....	185
5.5.2 普賢核能發電廠(Fugen)工程支持系統概述	185
5.5.3 通過 3DCAD 數據進行數據庫連接和仿真	186
5.5.4 結論.....	190
5.6 Visualization of a Dismantling Environment for an Evaluation of a Worker's Dose during the Decommissioning of KRR-1&2 [13].....	190
5.6.1 KRR-1&2 除役期間透過可視化進行拆卸評估與環境劑量討論.....	190
5.6.2 虛擬拆卸環境的設計和建模對放射性測量和分佈.....	190
5.6.3 輻射劑量的計算和建模.....	191
5.6.4 放射性分佈圖.....	191
5.7 Decontamination of Concrete Waste from Nuclear Power Plant Decommissioning in South Korea [14]	193
5.8 Proposal for the Management Strategy of Metallic Waste from the Decommissioning of Kori Unit 1 by Using Melting and Segmentation Technology [15].....	194

5.9 Establishment of New Regulations for Radiological Protection for Decontamination Work Involving Radioactive Fallout Emitted by the Fukushima Daiichi APP Accident [16]	195
5.10 New Methods and Techniques for Decontamination in Maintenance or Decommissioning Operation [17]	196
參考文獻	199
附錄 1-3： The Decommissioning Handbook[2]第 13 章及 17 章全文翻譯	201
7.1 第 13 章 - 除污決策及技術(Decontamination Decisions and Process)	201
7.2 第 17 章 - 除污 (Decontamination)	208
附錄 1-4： 子項計畫 1-3 英文專有名詞縮寫一覽表	233
四、研究結果及管制相關建議.....	235
(一) 除污技術考量注意事項	235
(二) 廢棄物處理考量注意事項	240
(三) 環境、安全、健康等注意事項	241
(四) 其它注意事項	242

圖目錄

圖 1.1. 1 不同配位數下的錯離子構型[6].....	26
圖 1.1. 2 常見的單牙至多牙配位基及其結構[6].....	27
圖 1.1. 3 EDTA 與 M^{2+} 離子形成錯合物結構[6]	27
圖 1.1. 4NPOx 的裝置.....	37
圖 1.1. 5(上) US DOE 於 1998 年報告所示之用於驗證除污鉛磚的 TechXtract®技術設施 照片。(下) TechXtract 施用程序摘要。[DOE 1998a[23]	38
圖 1.1. 6 可剝塗層示意圖[1].....	45
圖 1.1. 7 離心噴砂系統示意圖 [1].....	47
圖 1.1. 8 混凝土研磨機照片與使用混凝土研磨機時之示意圖 [1].....	51
圖 1.1. 9 混凝土刨除機示意圖[1].....	54
圖 1.1. 10 典型的乾冰顆粒與乾冰噴砂機.....	59
圖 1.1. 11 Pentek 真空吸塵除污系統.....	63
圖 1.1. 12 En-vac 機器人牆壁粗琢示意圖	65
圖 1.1. 13 使用 En-vac 機器人除污牆壁	65
圖 1.1. 14 軟性介質噴砂技術示意圖.....	76
圖 1.1. 15Sponge-Jet's 海綿噴砂系統.....	76
圖 1.1. 16 凱利除污系統.....	81
圖 1.1. 17Pentek Remote Scabbler	86
圖 1.1. 18 Remote Scabbler Head.....	86
圖 1.1. 19 Piston head with bits for scabbler	86
圖 1.2. 1 實際除污情形與施作人員保護措施.....	107
圖 1.2. 2 AQUA-DYNE 公司噴砂儀器示意圖與實際照片	109
圖 1.2. 3 混凝土容器除污的噴砂設備.....	109

圖 1.2. 4 (a)注射方法 Injection method (b)懸浮方法 suspension method.....	112
圖 1.2. 5 (a)運用於 CANDU reactor 之蛇型手臂機器人；(b) 由薩凡納河國家實驗室開發的管件爬行機器人。.....	112
圖 1.2. 6 Brokk 遠程操控機器人.....	113
圖 1.2. 7 Dounreay 反應爐與拆除用的 Brokk 機器人.....	114
圖 1.2. 8 JPDR 系統除污	115
圖 1.2. 9 Fagerstrom Deco 濕式噴砂艙.....	116
圖 1.2. 10 海綿噴砂進料單元.....	117
圖 1.2. 11 二氧化碳噴砂過程與二氧化碳顆粒.....	119
圖 1.2. 12 加拿大 Gentilly-1 的鋼結構在水中經由 hydrolaser lance 除污	122
圖 1.2. 13 針槍(needle gun).....	124
圖 1.2. 14 七頭噴槍(scabblers)及其對混泥土除污之粗糙表面.....	126
圖 1.2. 15 磷酸再利用流程.....	132
圖 1.2. 16 超音波結合電化學除污裝置圖.....	139
圖 1.2. 17 超音波配合電化學電解的效率比較.....	139
圖 1.2. 18 不同除污方法的 β 粒子劑量	140
圖 1.2. 19 除污因子.....	140
圖 1.3. 1 子項計畫 1-3 研究流程及執行方法	148
圖 1.3. 2 除污成本效益模式的特定要素.....	151
圖 1.3. 3 BWR 與 PWR 於 1990 年~1998 年間進行化學除污的數量.....	156
圖 1.3. 4 各電廠於 1990 年~1998 年間進行的化學除污類型	157
圖 1.3. 5 IP-#2 機蒸汽產生器二次側手孔劑量率.....	159
圖 1.3. 6 西班牙何塞·卡布雷拉(JoséCabrera)拆除反應器爐穴與用過燃料池之間的牆體	165
圖 1.3. 7 利用 3-D 建模來幫助切割瑞典 Barsebäck-2 電廠的蒸汽乾燥器	166
圖 1.3. 8 斯洛伐克 Bohunice V1 移除的放射性活度(機組 2 的迴路 1 及迴路 4).....	167

圖 1.3. 9 斯洛伐克 Bohunice V1 核電廠位於汽機廠房的乾式切割工作室	168
圖 1.3. 10 具 2,000 噸作用力的超級壓實機.....	169
圖 1.3. 11 KRR-1(上視)結構圖	176
圖 1.3. 12 KRR-1 反應器池水的輻射劑量	176
圖 1.3. 13 不同切割技術所產生的氣溶膠特性.....	179
圖 1.3. 14 人體呼吸道結構圖.....	180
圖 1.3. 15 呼吸道區域與粉塵沉積模型示意圖.....	181
圖 1.3. 16 DEXUS 的設計概念	186
圖 1.3. 17 使設備可視化示例.....	187
圖 1.3. 18 透過 CAD 數據庫連接設備相關資料在已可視化的立體圖形上	187
圖 1.3. 19 拆除過程模擬.....	188
圖 1.3. 20 可視化拆卸作業.....	188
圖 1.3. 21 D-CAD 中的切割模擬.....	189
圖 1.3. 22 在 3D-CAD 中進行質量評估	189
圖 1.3. 23 KRR-2 熱柱水平門	190
圖 1.3. 24 放射性水平的採樣點(7cm 深).....	190
圖 1.3. 25 MCNP 劑量模擬結果	191
圖 1.3. 26 放射性分佈圖.....	192
圖 1.3. 27 現場拆卸熱柱門.....	192
圖 1.3. 28 工人拆除熱柱門模擬圖.....	193
圖 1.3. 29 拆除門期間所受的劑量與時間和距離的關係.....	193
圖 1.3. 30 隨著時間的增加，水泥溶液中 Co 的去污效率	194

表目錄

表 1.1.1 美國 US EPA-402-R-06-003 報告所介紹之化學與物理除污技術 [1].....	23
表 1.1.2 各元素標準還原電位表[14].....	36
表 1.1.3 TechXtract 除污成果與基本處置方法的結果比較[1]	41
表 1.1.4 TechXtract 之設備成本和供應商人員費率[1]	41
表 1.1.5 技術和基本技術在主要部分的單位成本和生產率比較[1].....	41
表 1.1.6 各項化學除污技術的市售可獲性摘要.....	42
表 1.1.7 ALARA™ 1146 對 α 與 β 污染的測試結果比較。數值單位為每 100 平方公分 下每分鐘的衰變數(dpm/100 cm ²) [1]	46
表 1.1.8 離心噴砂系統之物理特性 [1].....	48
表 1.1.9 離心噴砂裝置之效能結果 [1].....	50
表 1.1.10 滾筒刨除機與大型離心噴砂裝置的成本分析[1].....	50
表 1.1.11 機械粗琢與小型離心噴砂裝置的成本分析[1].....	51
表 1.1.12 混凝土研磨機與單活塞粗琢和氣動除銹器的性能比較[1].....	52
表 1.1.13 混凝土研磨機、氣動除銹器與單活塞粗琢之成本比較[1].....	53
表 1.1.14 混凝土研磨機、氣動除銹器與單活塞粗琢單位成本總結[1].....	53
表 1.1.15 混凝土刨除機與多活塞氣動粗琢之成本比較表 [1].....	56
表 1.1.16 混凝土剝落機與單活塞粗琢和氣動除銹器的性能比較[1].....	58
表 1.1.17 混凝土剝落機、氣動除銹器與單活塞氣動粗琢之成本比較[1].....	58
表 1.1.18 混凝土剝落機、氣動除銹器與單活塞氣動粗琢單位成本總結[1].....	59
表 1.1.19 研磨材料的化學成分.....	69
表 1.1.20 研磨材料的特性.....	70
表 1.1.21 能源部的性能比較.....	72
表 1.1.22 能源部的成本及生產速率比較.....	72
表 1.1.23 材料效能及成本：非回收熔渣 vs. 鋼砂.....	73

表 1.1. 24 DOE 成本分析的結論	76
表 1.1. 25 軟性介質噴砂系統的性能評估.....	79
表 1.1. 26 能源部成本比較.....	80
表 1.1. 27 與富有鈾元素材料的處置的成本比較.....	80
表 1.1. 28 凱利除污系統的性能結果.....	84
表 1.1. 29 能源部的成本分析.....	85
表 1.1. 30 活塞粗琢技術性能.....	88
表 1.1. 31 PentekMoose®的設備成本.....	89
表 1.1. 32 單位成本和生產率摘要(樓面 620 平方英尺).....	89
表 1.1. 33 各項物理除污技術的市售可獲性摘要.....	90
表 1.1. 34 主要化學除污技術之特性與除污表現比較[1].....	91
表 1.1. 35 主要物理除污技術之特性與除污表現比較[1].....	91
表 1.1. 36 依操作需求分類適用之化學除污技術與其成本與限制考量.....	235
表 1.1. 37 依操作需求分類適用之物理除污技術與其成本與限制考量.....	236
表 1.2. 1 General Overview of Decontamination Processes for Decommissioning	102
表 1.2. 2 機械除污技術的種類.....	103
表 1.2. 3 可剝離塗層在傳統與現代的技術發展.....	106
表 1.2. 4 因不同的研磨料對除污因子之影響.....	110
表 1.2. 5 309 噸金屬採用乾式噴砂的成本.....	110
表 1.2. 6 309 噸金屬採用濕式噴砂的成本.....	111
表 1.2. 7 JRC-Ispra 自 1996 年噴砂處理後放射性廢棄物含量	115
表 1.2. 8 海綿除污實例的除污因子.....	118
表 1.2. 9 各國熔融廠設施.....	129
表 1.2. 10 熔融廠設施資料.....	129

表 1.3.1 KRR-1 規格	176
表 1.3.2 不銹鋼管路運用不同切割工具所產生的輻射粉塵傳播速率	178
表 1.3.3 以不同切技術切割熱障管的結果比較表	179
表 1.3.4 內部曝露評估代碼一覽表	179
表 1.3.5 粉塵大小與沉積部位對照表	180
表 1.3.6 部暴露評估代碼總覽	181
表 1.3.7 核輻射劑量對健康的影響	183
表 1.3.8 機器人除役案例	185
表 1.3.9 熱柱水平門上的 Gamma 射線分析結果	191
表 1.3.10 同除污劑與除污因子之時間關係表	196
表 1.3.11 除污劑/支持劑(磷酸甘油)中重量百分比濃度對除污因子關係表(1hr)	197
表 1.3.12 除污劑/支持劑(輻照乳膠)中重量百分比濃度對除污因子關係表(1hr)	197
表 1.3.13 輻照乳膠除污效果	198

一、研討並摘要美國國家環境保護局(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)所出版之“Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surface”報告，並依此為基礎研析相關表面除污時之管制原則並彙整成為我國審查除污技術可接受標準之參考依據。

(一) 前言

核電廠除役作業中必然需要對廠房之混凝土牆面、地板、天花板與反應器及其相關設備之金屬表面先進行除污(decontamination)以達成減少目標物件放射性活度的目的。有效的除污作業既可降低除役工作人員在施工過程的輻射暴露風險，也有助於提高設備的再次使用可能性或降低後續放射性廢棄物處理所需之設施需求與成本。良好的除污作業更可確保廠址或廠房的恢復與再利用，並確保公眾與環境安全。因此，各核電廠除役工作規劃機關與管制單位皆需對放射性污染物質的除污成效訂定明確的要求，進而評估所採用之除污技術的材料適用性與除污效果以達成目標。除污效果可由除污因子(Decontamination Factor, DF)評估：

$$DF = \frac{\text{污染表面除污前的放射性活度}}{\text{除污操作後的放射性活度}} \quad (1.1.1)$$

完整的技術評估也需包含是否有市售來源及除污後放射性廢棄物處理之成本估算。

基於管制單位對進一步了解各項化學與物理除污技術特性之需求，本分項係以美國國家環境保護局(U.S. Environmental Protection Agency, US EPA)所出版之“Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surface”報告(EPA-402-R-06-003)[1]為依據，摘要與彙整多項已實用於核電廠放射性表面的化學與物理除污技術。表 1.1.1 詳列 EPA-402-R-06-003 報告所介紹之五項化學除污技術與十二項物理除污技術。化學除污技術以使用螯合劑(chelation)、強無機酸(strong mineral acid)或氧化與還原劑(oxidizing and reducing agent)溶液為主，輔以泡沫或凝膠為載體來溶解金屬表面氧化層中的金屬離子達到除污效果。物理除污技術則以機械元件藉由噴砂(blasting)、研磨(grind)、刨除(shave)或剝落(spall)等方式施力於待除污表面，藉使染層剝落並收集碎屑完成除污，較適合用於混凝土建築表面的除污工作。本分項工作將分別對各項除污技術做簡介後，再依該技術適用處理的污染物質、適用的材料表面性質、相應之廢棄物管理原則、技術操作特性、除污成效案例與成本估算做摘要彙整，並整理個別技術的發明機構或供應商作為管制機關擬定決策時的參考。

表 1.1.1 美國 US EPA-402-R-06-003 報告所介紹之化學與物理除污技術[1]

化學表面除污 (較適用於金屬材質除污)	物理表面除污 (較適用於建物混凝土除污)		
螯合劑與有機酸	可剝塗層	乾冰噴砂	高壓水噴射
強無機酸	離心噴砂	乾式真空清潔	軟性介質噴砂
化學泡沫與凝膠	混凝土研磨機	電動液壓粗琢	蒸汽真空清潔
氧化與還原劑	混凝土刨除機	機器人牆壁粗琢	活塞粗琢
TechXtract	混凝土剝落機	噴砂處理	

(二)化學除污技術

藉由使用適宜的化學藥劑以變換並移除污染物質，化學除污可視為最具多功能性(versatile)的放射性除污方法。雖然於理論上化學除污可用以清除各種污染物，但由於化學劑清除污染物時也可同時破壞表面材料，因此諸如多孔隙表面(porous surfaces)即不適合使用化學除污方法。

各化學除污方法皆發展自工業級大尺度化學清洗程序，因此皆使用類似的技術、設備、操作程序與基礎化學知識。然而由於極少量的放射性物質即可能造成輻射相關的健康影響顧慮，即使痕量(trace amounts)的放射性核種殘留仍可使表面被判定為污染狀態，因此在放射性除污工作中對清除污染物程度的要求往往會比一般工業級清潔來得高數個數量級以上。主要的化學除污技術為：(1)酸性或鹼性溶液(acid or alkaline dissolution)，(2)氧化與還原反應(oxidation/reduction - redox reactions)與(3)螯合作用(chelation)。此三種類化學劑通常同時(simultaneous)或接續(sequential)使用以提升除污成效，但此混合使用的情況也增加操作難度而需要專業知識以分辨相關利弊。

化學除污技術之優點為：

- 適當使用情況下較為快速與簡單。
- 類似於工業界常用並已累積相當多經驗之除污技術。
- 相對便宜的操作成本並且不需要額外的機械設備。
- 在適當化學劑的選擇情況下幾乎污染面上的各式核種皆可被有效清除。
- 除污因子 DF 可至 10,000。
- 可用於裂縫、接合點、管線、內部/隱藏空間等機械方法難以運作處之除污。
- 通常僅有少量甚至無空氣(傳播)污染。
- 適當操作下可儘量避免對被除污之設備/表面之影響並確保其再次使用之可能。

而化學除污技術之主要缺點為：

- 會產生液體廢棄物且需要相應之後處理(中和、離子交換、沈澱、過濾、蒸發)，因此會有產生二次廢棄物與額外的處理成本。
- 具有使用強酸或強氧化劑、或是除污過程中產生之氫氣等危險物質所致的操作安全顧慮。
- 通常無法針對多孔隙表面有效的除污。
- 增加除污後的下游污染(downstream recontamination)、設備交互污染，以及發

生施工意外時的環境污染風險。

- 有時需使用高溫加熱(70-90°C)以提升除污劑的反應動力與除污效果。
- 通常需要高度的化學專業知識/技術來執行複雜的除污操作與廢棄物管理。

有效的化學除污程序也會因所需處理的除污工作規模與難易程度而有所不同。譬如在少量液體噴濺或有限微粒污染而造成的小尺度待除污情況下即可使用簡單的化學除污程序—先使用清潔液(半公斤市售清潔劑混合半公斤焦磷酸鈉[sodium pyrophosphate]與100公升溫水)擦拭後再以簡單螯合劑(3公斤檸檬酸或EDTA [ethylenediaminetetraacetic acid]混合100公升溫水)擦拭—來達成良好的除污成效。然而在諸如清除核能系統中深植於腐蝕產物(corrosion product)內部的射性污染物時，即會相應的增加化學除污程序的複雜度。譬如在 Browns Ferry 核電廠(BWR)一號機的爐水清潔系統(Reactor Water Clean Up System)的除污工作中即使用 LOMI(Low Oxidation State Transition Metal Ion)與鹼性高錳酸鹽(alkaline-permanganate, AP)的 LOMI-LOMI-AP-LOMI 四步驟混合程序達成(NPJ 2003[2])。而在 Indian Point 核電廠的除污工作中，二號機(PWR)的主反應器冷卻系統、餘熱移除系統及化學與體積系統(chemical and volume control system)即採用 CANDEREM (Canadian Decontamination and Remediation Process)與 AP 復合使用的 CANDEREM-AP-CANDEREM-AP-CANDEREM 五步驟除污操作(ISOE 1996[3])。因此，化學除污的成效往往可了解該問題特性並依專業知識分析出因應之道的能力所影響。

注意執行欠佳(poorly performed)的化學除污操作反而會增加風險。譬如使用螯合劑做表面除污時，含污染核種的錯合物(complex)反而比原污染核種具有更高的生物利用度(bioavailability)與相應增高的毒性。生成的錯合物也具有較高的遷移性導致帶來更高的環境威脅與再次污染除污設備之風險。因此風險控管仰賴於妥善執行各種除污技術以及具有適當規劃考量的能力。

2.1 螯合劑與有機酸

2.1.1 技術簡介

螯合作用(Chelation)為有機化學物質與金屬離子形成鍵結，從而使該金屬離子得以被包覆並自氧化沈積物(oxide deposit)的不可溶狀態被移出至溶液中的反應途徑。此有機化學物質可稱為配位基(ligands)並通常意指為螯合劑(chelating agent or chelator)具有多個彎曲的鏈型結構在端點處帶有負電荷以與金屬離子的正電荷在多處形成強鍵結。因此，螯合劑具有抓住金屬的能力且可像爪子抓住物體一樣將其從表面拉出。術語螯合物(chelate)泛指金屬物質與螯合劑結合後的化學物種(chemical species)。螯合作用也常被稱作錯合(complexation)或以英文 sequestration 表示。

相較於其他化學除污方法，螯合作用在核電廠系統除污上的優點在於金屬離子污染物被牢固的結合在螯合複合物(chelate complex)中，因此發生污染物再沉積或與表面再結合的機率非常小。然而相應的風險來自於因污染物是由所形成得螯合複合物來移動，故需謹慎處理使用過的除污溶液及其廢棄管理以確保不會造成放射性核種的環境外釋，造成嚴重的健康、安全和環境的風險。

在除污中最常見的有機酸螯合劑為：

- 草酸(oxalic acid) •檸檬酸(citric acid) •葡萄糖酸(gluconic acid)
- 乙二胺四乙酸(EDTA) •羥乙基乙二胺三乙酸(HEDTA) •乙二胺二琥珀酸(EDDS)
- 氧基乙叉二膦酸(OEDPA) •二乙基三胺五乙酸(DTPA)

以化學清潔的角度而言螯合劑不一定要為有機酸。但就放射性除污來說，有機酸螯合劑的酸官能基(acid functionality)可使螯合劑達到類似於強無機酸的除污作用。由於許多有機酸易於被氧化，因此可作為還原劑並藉由氧化還原反應來除污。另外，許多螯合劑由碳、氫、氧組成，因而其可在廢棄物處理的過程中藉由被氧化破壞而產生二氧化碳及水，而有利於簡化除污工作。單獨使用螯合劑的除污範例有：

- 放射性設施內的少量溢漏常使用 EDTA 或草酸溶液做簡單擦拭清潔。
- 草酸可有效去除核子設施中的鐵銹，且易於和鈮與分裂變產物形成錯合物(DOE 1994 [4])。然而在過程中，在被除污得表面上可能形成含放射性核種的草酸鐵二次沉積物 (Ampelogova 1982[5])。
- 草酸過氧化物可同時溶解二氧化鈾以及用於金屬的除膜(defilming)和除污(DOE 1994[4])。

而螯合劑通常作較複雜或多階段的除污操作過程的一部分，與強酸溶解或氧化還原劑等合用。代表性的範例有：

- 英國 Central Electricity Generating Board 與 Electric Power Research Institute (EPRI)所發展的 Low Oxidation State Transition Metal Ion (LOMI)除污劑，其使用鈮(II)搭配吡啶甲酸螯合劑。
- 由 PN Services Inc.開發的 CITROX，同時使用檸檬酸及草酸為螯合劑。
- 由 PN Services Inc.開發的 NITROX，循環使用硝酸/高錳酸鹽(permanganate)NP 溶液加上草酸作為螯合劑。
- 由 EPRI 開發的 DfD(Decontamination for Decommissioning process)，以氟硼酸為基礎溶液中循環使用高錳酸鹽 permanganate (氧化劑)及草酸(螯合劑)。
- OPG (Oxalic acid-Peroxide-Gluconic acid process)循環使用草酸(螯合劑)、過氧化物(氧化劑)、葡萄糖酸(螯合劑)溶液及 NP 溶液來去除鈾和鈾氧化物
- 由加拿大 Atomic Energy of Canada Limited (AECL)開發的 CANDEREM，使用 EDTA 作為螯合劑及還原劑，搭配檸檬酸為螯合劑。
- 美國能源部出版之 Decommissioning Handbook (DOE 1994[4])中摘要多項使用檸檬酸銨、EDTA、草酸、檸檬酸與鹼性高錳酸鹽復合使用的除污案例。

2.1.2 過渡金屬與配位化學簡介 [6] [7]

核電廠除污中所需清除的氧化層多含鉻(Cr)、鐵(Fe)、鈷(Co)或鎳(Ni)的金屬離子。這些元素在週期表為第一列過渡金屬(transition metal)，它們特點為原子電子組態在填滿 4s 軌域後開始依序填入較內層的 3d 軌域，如鉻的電子外層組態為 $[Ar]4s^13d^5$ 、鐵為 $4s^23d^6$ 、鈷 $4s^23d^7$ 而鎳為 $4s^23d^8$ 。這些金屬原子在化學反應中會先失去 4s 層電子而成為金屬陽離子。以鎳為例，其第二(+2)氧化態(oxidation state)為失去兩個 4s 層電子而成為外層電

子組態為 $[\text{Ar}]3d^8$ 的 Ni^{2+} 離子。各過渡金屬皆有相對穩定的氧化態，如鉻為+2、+3與+6而鐵與鈷為+2、+3，進而成為 Cr^{2+} 、 Cr^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 Co^{2+} 、 Co^{3+} 等金屬離子。

過度金屬離子在溶液中容易與數個分子(如氨 NH_3)或離子(如氯 Cl^- 、氫氧 OH^- 、草酸根 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$)形成一個錯離子(complex ions)。此錯離子可以與溶液中的離子形成配位化合物(coordination compound)。以 $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]\text{Cl}_3$ 為例， $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ 是錯離子(此為陽離子錯合物)而 Cl^- 為陰離子。在此 $[\text{Co}(\text{NH}_3)_6]^{3+}$ 錯離子中包圍 Co^{3+} 離子的六個 NH_3 分子稱為配位基(ligands)。此為配位基的予體原子(donor atom)為N，其提供一對孤電子鍵結於金屬原子上形成配位共價鍵(coordinate Covalent Bond)。在此例中，共有六個予體原子N圍繞在中心金屬離子 Co^{3+} 上，因此 Co^{3+} 的配位數(coordination number)為6。一般常見的金屬離子可有的配位數為2、4或6，例如 Fe^{2+} 只有單一配位數6，而 Co^{2+} 的配位數可為4或6。隨著金屬離子提供的配位數不同，配位基與中心金屬離子鍵結而成的錯離子其構型可為線型(配位數2)、正四面體和平面四邊形(配位數4)或正八面體(配位數6)，如

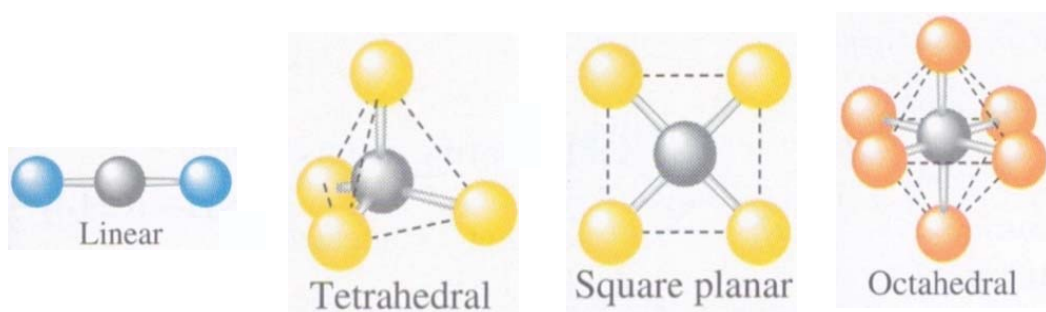


圖 1.1.1 所示。[6]

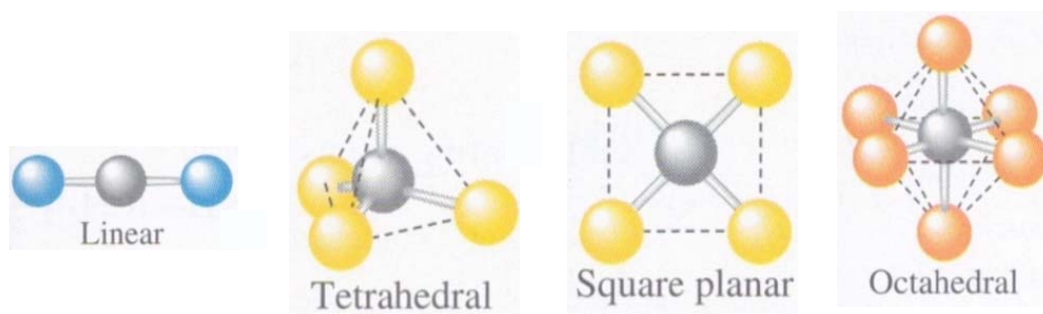


圖 1.1.1 不同配位數下的錯離子構型[6]

配位基可為單一離子如氟 F^- 、氯 Cl^- 與碘 I^- ，中性分子如氨 NH_3 和水分子 H_2O ，至草酸根(Oxalate) $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 、乙二胺 $\text{C}_2\text{H}_4(\text{NH}_2)_2$ 與乙二胺四乙酸 $\text{C}_{10}\text{H}_{16}\text{N}_2\text{O}_8$ (ethylenediaminetetra-acetic acid, EDTA)等結構複雜的離子或分子。依照所能提供的予體原子數，只有一個予體原子的稱為單牙配位基(mono-dentate ligands)，予體原子數為2的為雙牙配位基(bidentate ligands)，而予體原子數大於2的稱為多牙配位基(polydentate ligands)。圖 1.1.2 即摘要常見的單牙至多牙配位基及其結構[7]。雙牙配位基及多牙配位

基又稱作螯合劑(chelating agents)。其錯合物較單牙基和金屬鍵結時更加穩定，稱之為多牙基效應或螯合效應(chelate effect)。

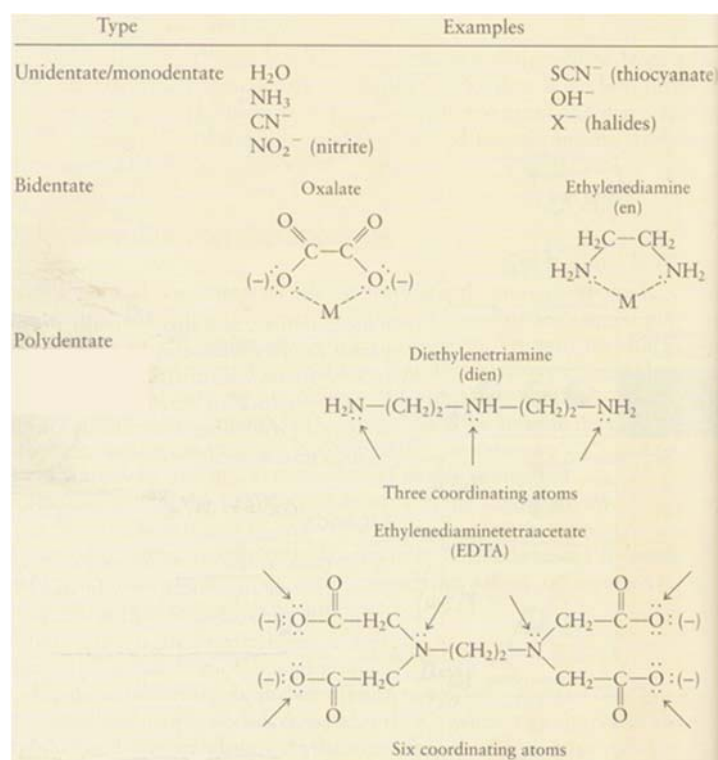


圖 1.1. 2 常見的單牙至多牙配位基及其結構[6]

因此，EDTA 及被視為一種有效與金屬離子形成穩固結合體的螯合劑。EDTA 常用以清除有毒金屬離子，如注射入人體與鉛結合而後再由血液中過濾出並排出人體。在核能產業界的除污上，EDTA 螯合劑即在多種化學除污技術中作為基礎除污劑，與所清除的金屬氧化層中的金屬離子結合達成除污目的。錯誤! 找不到參照來源。即舉例 EDTA 與一個配位數為 6 的氧化態為 2 的金屬離子形成錯合物之結構。

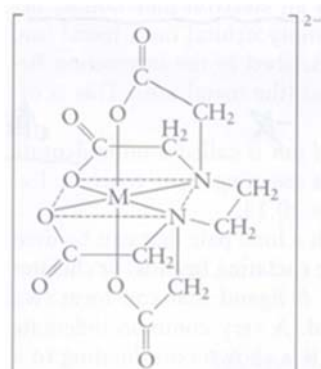


圖 1.1. 3 EDTA 與 M^{2+} 離子形成錯合物結構[6]

因此，EDTA 及被視為一種有效與金屬離子形成穩固結合體的螯合劑。EDTA 常用以清除有毒金屬離子，如注射入人體與鉛結合而後再由血液中過濾出並排出人體。在核能產業界的除污上，EDTA 螯合劑即在多種化學除污技術中作為基礎除污劑，與所

2.1.3 適用污染物質

螯合劑可如 EDTA 適用於大多數金屬材質或如雙環己酮草醯雙脒(cuprizone)對銅有選擇性的除污效果。新的螯合劑可以極高選擇性來設計，但可能帶來成本過高的問題。螯合通常用於清除固著污染(氧化層)而非用於可較簡單去除的塗抹污染(smearable contamination)。

2.1.4 適用材質與表面特性

螯合適用於金屬、水泥、木質等表面除污，並最適用於無孔隙表面。可有效除污地板、牆面、天花板、水路管道與通風管道。由於可透過噴灑、浸入或沖洗使用，因此適用於只可使用液體試劑除污、具複雜幾何的表面或設備。

2.1.5 廢棄物管理

除後的主要廢棄物為用過螯合溶劑。此時金屬污染物因處於螯合物中而有高的可移動性而增加其外釋至環境中的風險。螯合污染溶液可用離子交換處理，因金屬和離子交換樹脂的結合力遠強於螯合劑，而處理後的螯合劑可重複使用。更通常使用的處理方法為使用過氧化氫、高錳酸鹽或紫外線來氧化並破壞螯合劑。但因氧化作用會產生二氧化碳，需預防環境中的氣壓增加問題。當螯合物被破壞後，先前螯合的金屬物質在溶液中會成為沉澱物，可透過過濾或蒸發來處理以產生污泥並做最終處理。主要廢棄物管理重點為：

1. 主要和二次廢棄物如液體、固體、氣體、污染的表面碎屑、離子交換樹脂和金屬砂礫
2. 廢棄物數量
3. 廢棄物容量規範
4. 非典型之廢棄物處理或其他管理問題(文獻[1]並未明確說明)

2.1.6 操作特性

在操作上，可簡單的將螯合劑(草酸、檸檬酸或 EDTA)按適當比例和水混合後噴灑在受污染表面並收集產生之廢液。在此情況下，需考慮污染物的可移動性增高(及相應風險增加)問題，並做好障壁(barriers)和圍阻(containment)架設。

在使用對目標金屬有高度選擇性的螯合劑時，更需特別注意個別螯合劑的適用性。以腐蝕的鐵表面為例，其由未腐蝕的底層與位於底層上、以氧化亞鐵(ferrous oxide, FeO)、磁鐵礦(magnetite, Fe₃O₄)、赤鐵礦(hematite, Fe₂O₃)所形成的腐蝕層組成。此類氧化物層即含放射性污染物而需要清除，因此即會使用可與正二價氧化態金屬結合的螯合劑來與氧化亞鐵層和磁鐵礦層中的亞鐵Fe²⁺反應，在破壞氧化物晶格時卻仍可保護鐵基。此外，此種與正二價氧化態金屬優先結合的螯合劑也會清除形成水垢的鎂與鈣正二價氧化態金屬，進一步改善除污能力。Corpex 公司的 NOXOL 系列螯合溶液即提供可選用的選

擇性如：

- NOXOL®-100 用於氧化鐵(難處理的磁鐵礦和赤鐵礦)、碳酸鈣和氫氧化鎂
- NOXOL®-550 用於碳酸鈣和氫氧化鎂
- NOXOL®-678 用於鐵、鋁、銅的氧化物、磷酸鋅、碳酸鈣、氫氧化鎂和硫酸鈣
- NOXOL®-771 用於鋇、鋇和硫酸鐳

在使用部分螯合劑前需進行表面預處理。例如，以熱的鹼性高錳酸鹽(alkaline-permanganate)做第一階段作用後再以檸檬酸(0.2 莫耳)、草酸(0.3 莫耳)和腐蝕抑制劑的混合物做第二階段作用後可非常有效得除污不銹鋼。然而若無鹼性高錳酸鹽的預處理會使除污性能大幅降低(DOE 1994[4])。而因為部分螯合劑會隨著溫度升高而開始分解並，因此也需讓所選用的螯合劑操作於適當的工作溫度，以避免使除污效果變差，甚至因產生二氧化碳而使封閉系統中出現超壓。此外也應注意螯合劑與其他非污染物質之間的反應。例如草酸適用於去除鐵銹並與鈾和裂變產物錯合。在美國能源部的 Savannah River Site 案例中，以 2% 的草酸溶液在 70°C 下循環可有效除污不銹鋼熱交換器(stainless steel heat exchangers)。然而草酸在 90°C 下開始與鐵離子發生反應進而形成難以溶解的草酸亞鐵膜(ferrous oxalate film)，需後續使用強力的處理才能去除。

螯合劑除污時的接觸時間(Contact times)也應被考慮。例如以氨基磺酸(sulfamic acid)與抑制劑共用來除污碳鋼時，由於它們與底層金屬的反應性較低，因此可以透過增加接觸時間來補償低反應性而有效地除污。

2.1.7 除污成效

核能工業已廣泛應用螯合劑於除污工作。在 1990 年至 1998 年間(Pettit, 2004[8])，針對 65 個 BWR 與 22 個 PWR 共 87 個運轉中的核反應器進行化學除污操作，包含採用 LOMI 除污 57 次，CITROX46 次，CANDEREM21 次，總共 124 次的除污工作。這些除污處理皆使用螯合劑於其中步驟裡，相關內容並摘錄於本報告分項三之 17.8 節中。

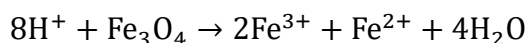
2.1.8 成本估算

使用螯合劑成本將取決於具體的應用、作業條件和所使用的代理商，但通常約為每平方英尺 1.00 美元(DOE 1997[9])。

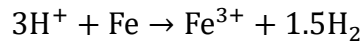
2.2 強無機酸及相關物質

2.2.1 技術簡介

用於化學除污的強無機酸主要為鹽酸(HCl)、硝酸(HNO₃)、硫酸(H₂SO₄)、磷酸(H₃PO₄)。這些酸大多可以完全或近乎完全在水溶液中解離而被稱為強酸。即使磷酸的第一個解離常數為較低的 7.5×10^{-3} ，但它仍比其他多數用於除污中的酸、如有機酸或酸式鹽強，因此通常將其與鹽酸、硝酸和硫酸一起使用。在使用單一強酸做除污時，其反應為酸提供的氫離子與污染物中的氧化物作用並破壞氧化物晶格的穩定性：



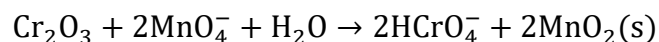
或氫離子直接與金屬表面作用從而移除污染物：



各式強無機酸可以稀釋後單獨使用，也可與其他材料和為化學配方製劑(chemical formulations)，或是多種酸混合使用。例如王水(HCl/HNO₃)即可藉由噴灑、浸泡、沖洗來做表面除污。強酸主要與含有污染物的金屬氧化層薄膜發生反應以溶解膜，但若增長作用時間、提高濃度、溫度下則可以溶解薄膜下的底層金屬。除活性較高的金屬(如鋅)外，在適當的安全和預防措施下可使用強無機酸除污絕大多數金屬表面。使用強酸的優點是相對便宜、快速有效，且特性已經被充分了解，並容易從化學供應商處獲得，相對的缺點包括安全及操作問題、中和廢液的必要性、反應過強使其難以控制僅去除污染物(傷及底層)，以及可能產生具爆炸性(氫)或有毒(NO_x)氣體。對於放射性除污操作，相關的無機酸特性摘要如下

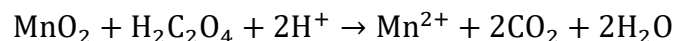
鹽酸(Hydrochloric acid)可用於去除金屬表面下達 90 微米深的放射性污染物和金屬氧化物層。除污(無機金屬氧化物)深度取決於金屬材質、酸強度和除污劑的作用時間，但對有機沉積物無效。70°C 試藥級(reagent grade) 溶液曾用以對 Bonus Reactor 進行除污(DOE 1994[4])。

硝酸廣泛用於溶解不銹鋼、英高鎳(Inconel)系統中的金屬氧化層薄膜，也可用於對鉬(molybdenum, Mo)鋼和 EP-630 合金進行除污(IAEA 1999[10])。通常以 75 °C、10 % 體積濃度的溶液除污(DOE 1994[4])。硝酸是強氧化劑，以洗浴法(bath)使用時可抑制氫氣產生，然而硝酸不能用於碳鋼，否則可能會引起火災和爆炸。硝酸是許多化學除污技術中的重要成分，Idaho National Laboratory 的研究顯示稀釋的硝酸-氫氟酸混合物是極為有效的除污容易。在硝酸高錳酸鹽(Nitric Acid Permanganate, NP)處理程序中即使用氧化溶劑去除鉻，此時硝酸用於調整 pH 值而高錳酸鹽用作氧化劑在 90-95 °C 的溫度下使用：



用稀釋草酸沖洗除以去除固體 MnO₂：

NP 處理本身是 PN Services Inc 開發的專有 NITROX 處理程序基礎，其循環應用 NP 溶劑和草酸，可有效清除核子設施中的大多數氧化物。



硫酸是一種氧化性酸。稀釋溶液可用於去除不含鈣化合物的沉積物(由於硫酸鈣的不溶性)，濃溶液則可用於去除有機物(Boing 1995[11])。亞硫酸(硫酸：硝酸 = 50 : 50)也可用於核電廠除污。然而硫酸並不被廣泛用於核電廠除污，因為它有很強的腐蝕性，卻沒有帶來極高的除污結果。

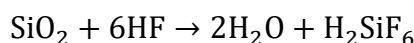
磷酸通常於溫度為 60-70 °C 的情況下用以去除碳鋼表面的薄膜。10% 的磷酸溶液可在大約 20 分鐘內清除達 99% 的污染物和所有可見薄膜。

氟硼酸(HBF)在工業上作為電鍍(galvanotechnology)中的金屬表面除污劑。氟硼酸會直接腐蝕金屬表面而可視為具有極高除污因子的優良除污劑。然而其主要缺點是會產生大量廢物，而可藉由如瑞士 Recytec 公司開發出的 DECOHA 程序(Demmer 1994[12])做再生和再循環酸的處理。在 EPRI 開發的 DfD 處理程序即基於氟硼酸，並利用氫氟酸控制 pH 值和氧化電位以達成表面污染(Pettit 2004[8])。也有文獻提及氟硝酸(氫氟酸與硝酸的比例為 50：50 的混合物)也可提供很好的除污效果(Demmer 1994[12])。

多種弱酸鹽和強酸鹽有時也可以用來替代酸本身，或與酸有效的混合後用於除污。最常用的鹽包括磷酸鈉(sodium phosphates)、多磷酸鹽(polyphosphates)、硫酸氫鈉(sodium bisulfate, NaHSO₄)、硫酸鈉(sodium sulfate, Na₂SO₄)、硫酸鐵(ferric sulfate, Fe₂(SO₄)₃)、草酸銨(ammonium oxalate, NH₄C₂O₄)、檸檬酸銨(ammonium citrate, (NH₄)₂HC₆H₅O₇)、氟化氫銨(ammonium bifluoride, NH₄HF₂)和氟化鈉(sodium fluoride, NaF)。它們的作用方式與其主體酸(parent acids)相似但可提高除污的多功能性與更好的除污因子，而且使用起來更安全，反應性較低也從而減少了材料相容性的問題。

2.2.2 適用污染物質

強無機酸與氧化沉積污作用後產生鹽和水並去除污染物。由於強酸可進一步與底層的金屬作用，因此可有效清除各類型底層上含污染物的氧化層。使用上也可特別考慮酸和特定污染物的化學反應，例如含氟化物的氟硼酸或氟硝酸即可有效的清除含二氧化矽(silica, SiO₂)的沉積物。



2.2.3 適用材質與表面特性

強無機酸通常用於金屬和其他無孔表面的除污。由於強酸在一定程度上會與金屬表面發生反應，因此材料相容性為使用強酸除污的重要問題。為核能工業界開發的強酸除污處理經常使用抑制劑來減少金屬和酸之間的反應。一般來說，硝酸可用於不銹鋼、鋁合金和英高鎳合金；硫酸可用於不銹鋼和碳鋼；鹽酸可用於不銹鋼、鉻鉬鋼和銅合金；磷酸可用於碳鋼；氟硼酸，氟硝酸和酸鹽製劑可用於大多數金屬表面。

2.2.4 廢棄物管理

使用單一強酸在核能工業界執行清洗與除污時需注意(1)酸性廢液的中和與(2)對除污過程中被溶解並增加可移動性的放射性核種與其他有害物質的安全管理。可使用標準試劑、程序與相關預防措施來執行廢棄物中和。對酸溶液中已增加可移動性的放射性核種的處理上，通常的做法是使廢液通過離子交換樹脂，將放射性核種轉換為固體形式後作為放射性固體廢物處理。關於最終廢物的形式，還應考慮酸的特性，例如在以玻璃固化(vitrification)為最終處置的規劃中，因磷會破壞玻璃結構，必須避免在此使用磷酸。

2.2.5 操作特性

使用強無機酸進行除污時多使用噴灑(spray)、將組件浸泡(immersion)在含酸的反應槽(reaction vessels)或沖洗(flushing)管道系統。一般情況下不需要對表面預先處理，但仍建議做酸與被除污表面的初步測試以評估適合性。設備的可攜性或移動性、設備重量、電源要求、裝置需求以及輔助技術等考量依特定應用需求而變。在執行噴灑除污後由溝槽或濕式吸塵器所收集的廢液處理上，專業人員所需具備的操作技能基本上與一般處理危險材料的操作程序相同。由於強無機酸可腐蝕人體組織，因此也需要大量的個人防護裝備並遵守相關的安全規範。

2.2.6 除污成效

由於已有多種針對核電廠除污的特定技術(如螯合劑)，近年核能工業已鮮少使用強酸執行除污。波多黎各的 Bonus reactor 除污使用試藥級(10%體積)鹽酸進行，除污因子約為 10。1967 年至 1983 年期間，Hanford 的 N-Reactor 每年使用磷酸除污碳鋼表面的除污因子為 3-6。愛達荷國家實驗室對鹼性高錳酸鹽、硝酸高錳酸鹽、有機酸、氟硝酸、氟硼酸、對熱不穩定的混合溶液(TUCS)和硝酸鋁等八種除污化學品測試與評估它們對模擬污染金屬試樣的除污因子、廢物產生值和腐蝕速率(Demmer 1994[12])。結果顯示氟硼酸有最好的除污效果但卻具有產生大量廢棄物之問題。氟硝酸(氫氟酸：硝酸，50：50)有次佳的除污效果且產生最少的廢棄物。

2.2.7 成本估算

使用強無機酸的除污成本的範圍取決於作業條件，但通常約為每平方英尺 2.00 美元(DOE 1997[9])。

2.3 化學泡沫與凝膠

2.3.1 技術簡介

泡沫與凝膠是作為化學除污劑-螯合物與強酸等除污劑的載體。泡沫與凝膠的技術被廣泛的應用於大型的組件以及複雜幾何的組件。泡沫可以用水、清潔劑(或是其他可用於產生泡沫的藥劑)以及除污劑混和，再藉由標準工業用的泡沫產生機產生泡沫。產生泡沫的裝置較為便宜、簡單且可靠。(DOE 1994[4])

泡沫可以適用於任何方向，任意角度的表面。產生較少的二次廢棄物以及可以避免在液體噴灑時產生潛在危險氣體的生成。泡沫除污的效率主要是藉由增加與物件接觸停留的時間，而相較於液態水溶液則是快速地流過物件表面。然而，因為與物件表面接觸的除污劑量較小，可能需要重複幾次或增加停留物件表面的時間才能達到良好的除污效果。

泡沫通常使用螯合劑或強酸作為除污劑，例如：用於石墨/氣體冷式反應器中的肥粒鐵和黃銅的除污(EC 1994[15])。特製的發泡設備和自動泡沫噴射裝置被開發用於處理高活性處理室，管路等(Boing 1995[11])。

泡沫也已用於軍事淨化設備，例如加拿大用於化學-生物製劑淨化(CASCAD)水系統，在粘性泡沫中添加去污化學品，同時銷毀化學和生物製劑並清除放射性顆粒(Allen-Vanguard 2005a[16]；Allen-Vanguard 2005b[17])。

凝膠也可作為化學除污劑的載體。可以將凝膠噴灑到組件的表面，不規則的表面，然後擦拭，沖洗(DOE 1994[4])。當化學除污劑產生的泡沫不夠穩定時，凝膠法可以替代泡沫作為介質。使用羧甲基纖維素作為膠凝劑時，要確保膠凝劑與去污劑的相容性。凝膠也可以搭配螯合劑或酸做為除污劑，例如硝酸/氫氟酸/草酸混合物以及硫酸/磷酸和鈾(IV)(Juan 1995[18])。其除污效果與水溶液相比，凝膠可以增加停留在物件的時間，以及多次使用可以產生有效的去污效果，同時可以避免有害氣體產生的風險(EC 1991[19])。

在不具放射性情況下，通常由填料，載體，磨料和酸組成的糊劑已被廣泛用於處理金屬表面。在機械作用下，磨料可以分解氧化物並增加強酸的溶解能力(IAEA 1993[20])。

2.3.2 適用污染物質

泡沫與凝膠可用於可以用於除去微粒以及腐蝕表面的污染物。可依目標除去的特定核種，選擇調配不同的除污劑來形成泡沫或凝膠。

2.3.3 適用材質與表面特性

泡沫與凝膠適用於金屬與無孔隙表面。由於泡沫的流動性傾向留在表面而不是深入孔隙，所以用於噴灑複雜幾何的組件時，遇到較深的孔隙無法滲入。泡沫和凝膠適用於金屬和其他無孔表面。唯一的例外是水泥，通過將銨鹽或碳酸鈉水溶液噴塗到表面上來清潔表面，待乾燥後，再次噴灑水性混合物，酸和清潔劑。酸與碳酸鹽反應形成泡沫，被清潔劑穩定，然後與污染物複合。泡沫傾向於移動到外表面而不是傾向進入多孔材料。但是，還是有一些滲透到多孔的基材之中，所以該技術很少使用。泡沫和凝膠適用於複雜的幾何形狀，但是由於它們的流動特性通常會使得無法有效地處理具有裂縫的物件。

2.3.4 廢棄物管理

泡沫與凝膠法產生的廢液較直接液體噴灑或浸泡的方式來的少。由於泡沫凝膠的移除主要是用水來清洗，故廢棄物處理方式與先前提到的廢液處理相同，包含使用標準試劑中和用過的液體廢棄物以及使含放射核種的廢液通過離子交換樹脂使之成為固體放射性廢棄物來處理。一般來說廢棄物的產生約為每平方英尺處理過的表面積產生 0.01 到 1 加侖的廢棄物。

以泡沫除污法來說，需要在最終以水漂洗的過程中添加去泡沫劑，並應注意廢水不會對下游廢棄物的管理產生影響。如果螯合劑是泡沫或凝膠中的除污成分，則必須注意強放射性核素的流動性。

2.3.5 操作特性

由於泡沫凝膠的流動性較低，故使用泡沫與凝膠法相較浸泡組件或沖洗管件的方法容易操作。一般來說，物件不需預先處理表面，操作人員通常也不須要求特殊訓練，也不

需要特製泡沫產生機(一般消防用、汽車用或工業用的即可)泡沫或凝膠的使用沒有特殊的法規問題或許可要求，但操作仍有風險須謹慎。

2.3.6 除污成效

利用泡沫或凝膠法除污，對於簡單幾何的管材的除污有效，包含幾個除污步驟：蘇打凝膠噴灑，靜置，漂洗，強酸凝膠噴灑，沖洗。結果指出凝膠噴塗方法用於簡單幾何形狀的鋼管上，可以有效達到目標的輻射劑量。化學凝膠也用於 Winfrith 的重水蒸氣反應器的退役。先對牆壁進行壓力清洗，再施加凝膠，並使其浸泡預定時間。之後再漂洗去除從表面凝膠，以達到目標輻射讀數。化學泡沫也被用於 Winfrith 用於對窩穴進行淨化處理，具有較大的污染和高風險。一個經驗豐富的操作員穿著全套壓力服進入窩穴，並可以在 30 分鐘內清理放射物質。化學泡沫也被成功地用於個人防護設備的除污。

2.3.7 成本估算

成本因情況而異，但通常為每平方英尺 2.00 美元(DOE 1997[9])。化學泡沫或凝膠本身並不昂貴，但會增加人員，廢棄物的管理成本等，使得總成本與其他方法差不多。選擇的使用泡沫和凝膠法除污通常是出於操作方便性而非成本。

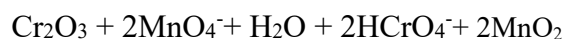
2.4 氧化還原法

2.4.1 技術簡介

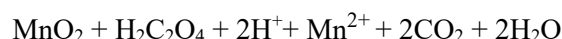
利用氧化還原的方式，移除放射性核種，達到除污的效果。由於不同的金屬氧化態具有不同的溶解度，故控制金屬的氧化態對於除污來說非常重要。一般來說，較高的金屬氧化態具有較大的溶解度，有利於除污。然而，若是以螯合物除污的方法的話，則傾向於較低的金屬氧化態有利與螯合物形成鍵結，藉此達到除污。

近幾年，已有發展出數個除污製程：

- 硝酸/過錳酸鹽製程(Nitric Acid/Permanganate (NP) process)：利用氧化劑溶劑移除氧化鉻。利用硝酸調節PH值過錳酸做為氧化劑將三價鉻(Cr^{3+})氧化成六價鉻(Cr^{6+})：



二氧化錳可以藉由草酸來移除：



- 化學氧化還原除污製程(Chemical Oxidizing Reducing Decontamination (CORD) process)：包含三步驟：
(1)藉由 NP 製程將三價鉻(Cr^{3+})氧化成六價鉻(Cr^{6+})

(2)再還原步驟中，利用草酸溶解以及螯合，Ni Mn Co 離子可以用陽離子交換來移除

(3)清除步驟，過量的草酸可以用 UV 光，NP，過氧化氫加催化劑來處理

- 愛達荷州國家實驗室開發的硝酸/高錳酸鉀/草酸(NPOx)，在使用上更具成本效益。
- Strong Ozone Decontamination Process(SODP)，是一個單一步驟的室溫製程，由 Studsvik RadWaste AB 在 1980 年代後期開發，並基於硝酸，鈾(Ce^{4+} 做為強氧化劑)和再利用臭氧來再生 Ce^{4+} (Lindberg1997[21])。
- REDOX 除污是類似於 SODP 的日本技術，使用 Ce^{4+} +硝酸，再利用電化學使 Ce^{4+} 的再生。 REDOX 比 SODP 的操作要快得多，它被用作浸漬方法以去除形狀相對複雜的設備(例如閥門，泵和小直徑)的污染物。
- (Metal Decontamination by Oxidation with Cerium (MEDOC)process)：是以 Ce^{4+} 作為強氧化劑，硫酸作為溶劑。MEDOC 法的操作較為快速，是較強除污方式。

2.4.2 氧化還原原理

氧化還原反應，是指元素的氧化數在反應前後具有相對應的升降變化的化學反應。氧化還原反應可以理解為「氧化反應」及「還原反應」兩個半反應所構成。其中氧化反應是指反應中的還原劑失去電子，使價數上升，而還原反應是指氧化劑得到電子，使價數下降，氧化反應與還原反應必然同時進行，且皆遵守電荷守恆[13]。

還原劑 + 氧化 → 氧化產物(氧化數升高)+ 還原產物(氧化數降低)

氧化劑	得到電子 價數下降	利用自身氧化能力 將還原劑氧化	本身被還原
還原劑	失去電子 價數上升	利用自身還原能力 將氧化劑還原	本身被氧化

氧化還原反應中的氧化數具有以下規則：

- 游離態的元素各原子的氧化數為零
- 對於單原子的離子，其氧化數等於電荷數
- O 在大多數的化合物中氧化數為-2，但在 H_2O_2 及 O_2^{2-} 中為-1
- H 的氧化數為+1，但他與金屬鍵結的二元化合物中的氧化數為-1
- F 在所有化合物中的氧化數為-1，其他的鹵素以鹵離子出現在其化合物中時，具有負的氧化數，而在與氧化合時，則具有正值的氧化數
- 中性分子的氧化數總和為零，且多原子離子中氧化數總和必定等於離子靜電荷

標準電極電位指的是當溫度為 25°C，金屬離子的有效濃度為 1 mol/L 時所測得的平衡電位。標準電極電位是以標準氫原子作為參考電極，即將氫的標準電極電位值定為 0，

與氫標準電極比較，電位較高的為正，電位較低者為負。標準電極電位越小，物質氧化態的氧化能力越強，標準電極電位越大，物質氧化態的還原能力越強。故我們可透過比較標準電極電位大小，判斷元素的氧化還原反應。由於大部分金屬的標準電極電位低於氧，故在自然界中金屬很容易與氧氣發生氧化還原反應，並被氧所氧化形成金屬氧化物，例如鐵被氧化形成鐵銹。表 1.1.2 為各元素的標準還原電位[14]。

表 1.1.2 各元素標準還原電位表[14]

	Reaction	Standard Potential, e° (volts vs. SHE)
Noble	$\text{Au}^{3+} + 3e^- = \text{Au}$	+1.498
	$\text{Cl}_2 + 2e^- = 2\text{Cl}^-$	+1.358
	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e^- = 2\text{H}_2\text{O (pH 0)}^\dagger$	+1.229
	$\text{Pt}^{2+} + 2e^- = \text{Pt}$	+1.118
	$\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 3e^- = \text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$	+0.957
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^- \text{ (pH 7)}^\dagger$	+0.82
	$\text{Ag}^+ + e^- = \text{Ag}$	+0.799
	$\text{Hg}_2^{2+} + 2e^- = 2\text{Hg}$	+0.799
	$\text{Fe}^{3+} + e^- = \text{Fe}^{2+}$	+0.771
	$\text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 4e^- = 4\text{OH}^- \text{ (pH 14)}$	+0.401
	$\text{Cu}^{2+} + 2e^- = \text{Cu}$	+0.342
	$\text{Sn}^{4+} + 2e^- = \text{Sn}^{2+}$	+0.15
	$2\text{H}^+ + 2e^- = \text{H}_2$	0.000
	$\text{Pb}^{2+} + 2e^- = \text{Pb}$	-0.126
	$\text{Sn}^{2+} + 2e^- = \text{Sn}$	-0.138
	$\text{Ni}^{2+} + 2e^- = \text{Ni}$	-0.250
	$\text{Co}^{2+} + 2e^- = \text{Co}$	-0.277
	$\text{Cd}^{2+} + 2e^- = \text{Cd}$	-0.403
	$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^- \text{ (pH 7)}^\dagger$	-0.413
	$\text{Fe}^{2+} + 2e^- = \text{Fe}$	-0.447
	$\text{Cr}^{3+} + 3e^- = \text{Cr}$	-0.744
	$\text{Zn}^{2+} + 2e^- = \text{Zn}$	-0.762
	$2\text{H}_2\text{O} + 2e^- = \text{H}_2 + 2\text{OH}^- \text{ (pH 14)}$	-0.828
	$\text{Al}^{3+} + 3e^- = \text{Al}$	-1.662
	$\text{Mg}^{2+} + 2e^- = \text{Mg}$	-2.372
	$\text{Na}^+ + e^- = \text{Na}$	-2.71
	$\text{K}^+ + e^- = \text{K}$	-2.931
Active		

[†]Not a standard state but included for reference.

Source: Handbook of Chemistry and Physics, 71st ed., CRC Press, 1991.

2.4.3 適用污染物質

氧化還原法主要適用於除去金屬腐蝕表面的污染物質（通常是鉻或是鐵的氧化物），金屬氧化物含有放射性污染物質，藉由移除氧化物(利用溶解的方式或是破壞其晶格形成小微粒再將其移除)來達到除污的效果。

2.4.4 適用材質與表面特性

氧化還原法適用於金屬表面。對於較小的組件，可以用沖洗或是浸泡的方式。

2.4.5 廢棄物管理

由於多個製程有用到強酸，所以須使用標準試劑中和用過的液體廢棄物，腐蝕的微

粒需要從廢液中分離。大部分的放射核種有毒物質都是由廢液通過離子交換樹脂，使之成為固體放射性廢棄物來處理，由於多個製程有用到螯合物，其具有高流動性與高風險，需要特別標示，鈾(Ce)與鈾(V)的氧化還原產物，也需要標示是否具有可溶性、流動性。

2.4.6 操作特性

大多數情況下，使用氧化劑和還原劑的過程複雜，需要專業技師和大量的科學和工程背景。雖然是簡單的漂白劑，噴灑和洗滌，或稀硝酸噴霧和洗滌，但過程中需要不斷的監視。



圖 1.1.4 NPOx 的裝置

CORD 製程和 NPOx 是操作複雜的例子。圖 1.1.4 描繪了 NPOx 製程的設備(Ramer 2001[22])。在硝酸/高錳酸鹽的第一步過程中，工程師必須不斷監測高錳酸鹽濃度並將其保持在 50-300 $\mu\text{g/L}$ 範圍。在步驟開始時，高錳酸鹽濃度應在濃度範圍逐漸下降。過高濃度高錳酸鹽並不會增加鉻的溶解度，反而會增加廢料總量。同時，工作溫度必須保持在 90-95 $^{\circ}\text{C}$ 範圍內，同時，鉻的濃度必須被監視以確定該步驟何時結束。當鉻濃度將迅速增加時，反應速率將迅速下降，此時可以終止該步驟。必須移出過多的高錳酸鹽和二氧化錳生成物，然後才能進行第二步：還原步驟。通過添加化學計量的草酸將高錳酸鉀和二氧化錳還原，兩種物質都轉化為相應的錳離子酸。然後加入剩餘的草酸，可以用於溶解赤鐵礦進行去污。草酸的最終濃度必須約為 1.5 g/L。在溶解步驟中，pH，溫度，草酸濃度和金屬離子濃度必須全部監控。這些參數的變化如下溶液通過離子交換器必須考慮在內。在最後的清理步驟中，過量草酸被除去並產生二氧化碳，過程中必須監測壓力。

2.4.7 除污成效

由於針對特定應用開發了許多製程，因此交叉比較相當難。總的來說，氧化還原製程的發展狀況是可實現非常高水平的去污效果。以比利時使用的(MEDOC)技術為例，處理 20 平方米的污染物料，使用分批技術可以成功地完成材料的除污任務。受污染的材料以平均腐蝕速率腐蝕大約 2.5 $\mu\text{m h}^{-1}$ ，當金屬表面去除大約 10 μm 時，可以除去絕大

部分受污染的材料。高污染的試片($20,000 \text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ beta/ gamma)經過氧化還原除污法(MEDOC)，77%的材料可以達到很低的輻射劑量($0.1 \text{ Bq}\cdot\text{cm}^{-2}$ beta/ gamma)。

2.4.8 成本估算

難以獲得有意義的成本數據。如在金屬表面上進行最簡單的氧化還原洗滌(例如，漂白劑或次磷酸鈉)，成本範圍取決於工作條件，但據估計約為每平方英尺 2.00 美元(DOE 1997[9])

對於更複雜的過程，成本將是高度取決於工作條件，必須與供應商協商後進行估算。

2.5 TechXtract

2.5.1 技術簡介

TechXtract®是一個由美國 Active Environmental Technologies 公司所發展的除污技術。其使用專有的化學配方，可以從混凝土、營建磚、木材、鉛、鐵和不銹鋼等材料中去除如放射性核種、多氯聯苯(PCBs)等固定的和非固定的污染物以及其他有害的有機和無機物質。依據美國能源部 US DOE 於 1998 年發布的 TechXtract 用於除污放射性核種的報告(DOE 1998a[23])，其除污過程完全安裝在拖車中，利用起重機和輕軌天車移動待除污物件依序浸入多種化學溶液中，並借助超音波(ultrasound)使除污化學除污劑透入被污染的積材中。在不適合浸泡除污的情況下，則可將 TechXtract™配方藥劑以細霧(fine mist)形式噴灑到表面上，然後使用研磨墊(abrasive pad)促使除污劑透入到積材表面上，最後用濕式吸塵器移除物件上、含污染物質之用過化學溶液。除了所包含的污染物質外，用過溶液本身不含有害的化學成分。



圖 1.1. 5(上) US DOE 於 1998 年報告所示之用於驗證除污鉛磚的 TechXtract®技術設施照片。(下) TechXtract 施用程序摘要。(DOE 1998a[23])

TechXtract®化學試劑可用以清除遷移入孔隙(pore)與微尺度空隙(void)中與基材形成化學鍵或靜電鍵之污染物。由於細孔可能會被塵垢和其他物質堵塞。因此此除污劑的化學成分設計目的含：(1)打開因塵垢而封閉的孔隙與細管、(2)盡可能透入孔隙深部、(3)破壞固著污染物的物理和化學鍵結與(4)捕捉污染物於除污劑中並避免再次污染。因此，TechXtract®配方包含粗滴(macro-)與微滴乳化劑(microemulsifier)、電解質(electrolyte)、

浮選劑(flotation)、潤濕劑(wetting agent)、緩衝有機/無機酸(buffered organic and inorganic acids)、螯合劑(sequestering agent)。除污劑化學混合物可在現場根據資料和污染物特性進行製備，並可依需求修改以去除包括多氯聯苯(PCBs)、有機物、重金屬和其他無機物以及放射性核種等特定的污染物。該技術基本上為依順序浸泡化學製劑的循環步驟，包括施用(application，如噴灑、浸泡)、擦洗(scrubbing，如人工、超音波、空氣噴射)、作用(setting)、沖洗(rinsing)和清除(removal，如真空吸塵) 如圖 1.1.5 所示。每個階段皆有不同 TechXtract 處理程序，這些階段的順序構成一個循環。如果有必要，可以重複該循環以達到所需的除污水準。

在 US DOE 於 1998 年發布的技術驗證報告中，TechXtract 技術於 Hanford Site C Reactor 對鉛磚進行除污處理。前兩個階段包含命名為“Pro”和“Clean”、含酸和其他試劑混合物的表面處理配方，可從表面清除污垢、油、油脂和其他干擾性(interfering)物質。第三階段是稱為“XT”的除污物合，其包含螯合劑以及與污染物在分子狀態可相互作用的其他化合物。

2.5.2 適用污染物質

TechXtract 技術適用於放射性核種、多氯聯苯(PCBs)和其他有害的有機和無機物質。除污化學配方可以在一定程度上進行修改，並根據特定的除污環境進行調整(Blauvelt 2001[24])。

2.5.3 適用材質與表面特性

該技術適用於混凝土、磚、瀝青(asphalt)、木質、鐵質、不銹鋼和其他金屬表面。可彈性應用於不同表面的除污，諸如有開放表面的物件或可分批浸泡的小型物件。

2.5.4 廢棄物管理

除了所含的污染物質(此為放射核種)外，使用過的化學溶液不含任何有害成分，可通過焚化、固化和土地掩埋進行處置，並排放至污水處理系統。在 Hanford Site C Reactor(DOE 1998a[23])的經驗中，使用配有高效率空氣微粒過濾器(High-Efficiency Particulate Air filter, HEPA filter)的真空系統移除含污染物的化學溶液。廢液被收集在真空桶(vacuum drum)後轉移到處置桶中。除污操作結束後留在超音波清洗槽(ultrasonic baths)中的溶液可成為另一種廢液，並可利用類似真空噴流(vacuumed streams)的方式處理。每除污一噸重的鉛塊約產生 2.7 公斤的液體廢棄物。

2.5.5 操作特性

此部分敘述主要摘要自 US DOE 於 Hanford Site C Reactor 對鉛磚進行的除污驗證測試成果(DOE 1998a[23])。所有材料處理，去污和廢物處理系統都安裝在 16 英尺×8 英尺(4.88 公尺×2.44 公尺)的拖車中，拖車的內部空間以 4 密耳(0.1 公釐)厚之高密度聚乙烯膜披覆以利後續設備除污。拖車的電源要求為 120 V，60 Hz，45 amp，可以從外部提供或與車載發電機一起提供。

待除污的鉛磚塊被分為四批進行處理，將各個鉛磚依序放入由不會與鉛反應的材料製成的吊籃中。各批料在拖車的起始端分階段進行裝載放入吊籃，然後通過輕軌天車起重機(light-rail hoist)將其抬起，該設施的工字樑(I-beam)與手動起重機結構的舉升承重能力為 91 公斤(200 磅)。工字樑軌道沿著拖車的天花板環繞運行，用於裝載和卸載吊籃。拖車內的除污站包含三個加熱超音波除污槽、兩個含真空乾燥功能的清洗站(rinse station)和一個最終真空乾燥站(vacuum drying station)。超音波除污槽經由電子加熱和恆溫控制在大約攝氏 60 度，尺寸為 51 公分×29 公分×28 公分(20 英吋×11.5 英吋×11 英吋)。超音波除污槽中共使用了 57 升(15 加侖)的 TechXtract®溶液。每站的批次停留時間(batch dwell time)最長為 15 分鐘，而各站皆可同時獨立運作。

在操作上，每一單位含一名技術人員和一名主管共兩名人員。雖然操作除污設備相對簡單，然而須有一位在由液體萃取(extraction)放射性同位素方面有經驗的化學專業人員來對化學溶液的比例提出建議。在此類除役與除污(Decontamination and Demolition, D&D)工作上，施作人員和輻射控制技術員(radiation control technician)應接受鉛危害(Lead Hazards and Awareness)、輻射工作人員(Rad Worker)、40 小時職業安全衛生法則(Occupational Safety and Health Administration, OSHA)和生物測定鉛血基準(Bioassay Lead Blood Level Baseline)的培訓。他們也需參加呼吸防護(respiratory protection)訓練計劃。其他操作注意事項包括：

1. 依待清潔的物件基質(substrate)、待清除放射核種之性質、密度與所處表面深度來最佳化所選用之化學劑、操作溫度與物件浸泡時間
2. 僅適用於除污鉛磚外部表面之污染而非內部活化或污染後再熔化過之鉛磚
3. 除污後未達外釋標準之鉛磚可再次執行除污、視為放射性廢棄物丟棄或選用其他方式除污
4. 為確保除污成效、可於除污操作後數日以擦拭取樣(smear sample)測試鉛磚表面可移除性污染物之活度

(DOE 表面釋放規範為： α 粒子小於 20 dpm/100 cm²、B 與 γ 粒子小於 1000 dpm/100 cm² DOE 1998a[23])

2.5.6 除污成效

此部分敘述摘要於 US DOE 於 Hanford Site C Reactor 對鉛磚進行的除污驗證測試成果(DOE 1998a[23])。該測試對 TechXtract®用於鉛除污的功能及設計特性具有以下目標：

- 每天至少除污 100 塊磚或達 9.1 平方公尺(100 平方英尺)的鉛板。
 - 高比例符合表面釋放標準的除污後磚或板材。
 - 可固化穩定各化學廢棄物以符合垃圾掩埋場的廢物處理規定。
 - 操作簡單且經濟。
 - 能在 3°C 至 40°C(37°F 至 104°F)的室溫下操作。
 - 在可移動式的封閉空間中使用一般設備(conventional equipment)並確保工作人員安全。
- 具體除污成果為：
- 每日清除 200 塊以上之鉛磚而除污因子 > 182。

- 在符合“合理抑低”(ALARA)原則的安全工作場所中進行除污工作。
- 二次廢棄物的產生率為每塊磚 0.038 公升，或每公噸鉛 2.7 公斤。

六塊磚(加工 80 塊磚中的 7.5%)在經過一次處理後不符合釋放標準。其中，四塊磚在第二次處理後達到釋放標準，另兩塊磚的表面污染程度增加。此兩塊磚可能是在除污過程中將污染物從基質深處帶到表面，若經過足夠多次處理後即能達到除污標準。

表 1.1. 3 比較 TechXtract®除污成果與以封裝及掩埋做基本(baseline approach)處置之結果[1]。此基本處置方法為將鉛磚置於儲存桶後以水泥灌漿成為低放射性廢棄物掩埋(DOE 1998a[23])。

表 1.1. 3TechXtract 除污成果與基本處置方法的結果比較[1]

功能	TechXtract	封裝及掩埋
設置	2 小時將電源連接到拖車並加熱除污槽	更多時間
產率	每天 5 小時 220 塊磚	約每天 1,000 塊磚
安全性	需有對放射性、鉛及有機蒸氣的預防措施	相同，除有機蒸氣部分
操作簡便性	相同	相同
廢物產生	較少(0.2 立方公尺或一個 55 加侖的桶)	多，約為 100 倍
公用設施要求	最少有暖氣及通風	無
資料來源：(DOE 1998a[23])		

2.5.7 成本估算

此部分敘述摘要於 US DOE 於 Hanford Site C Reactor 對鉛磚進行的除污驗證測試成果(DOE 1998a[23])。成本估算是基於在 A 與 B 兩種不同方案下對 1956 塊鉛磚進行除污，並與處理相同數量鉛磚的基本方案(水泥固化封裝與掩埋)做成本比較。A 方案對全部(100%)鉛磚皆執行除污前(pre)與除污後(post-decon)之放射性測量，而 B 方案則不執行除污前放射性測量而僅對 20%鉛磚做除污後放射性測量。A 方案的單位成本低於方案 B，因若預先測量鉛磚，則有大約一半的待處理鉛磚可不執行除污即外釋。成本效益分析包括技術設備的改進、現場動員(site mobilization)、除污、復員(demobilization)和二次廢物處理。每塊鉛磚重 11.8 公斤(26.0 磅)，尺寸為 5 公分×10 公分×20 公分(2 英吋×4 英吋×8 英吋)。鉛磚的基本處置方式是水泥封裝於桶中，價格為 0.22 美元/公斤(0.10 美元/磅)，然後在該廠址的環境復原處理設施(Environment Restoration Disposal Facility, ERDF)以每噸 60 美元處理包括鉛、水泥漿和桶的低階混合廢棄物。向供應商租用一台配有各式設備的拖車、購買除污液與一位技術人員的施工費摘要於表 1.1.4[1]。而表 1.1. 5 比較 TechXtract 技術和基本技術在主要部分的單位成本和生產率[1]。

表 1.1. 4 TechXtract 之設備成本和供應商人員費率[1]

種類	小時費率	購買價格	維修費用	技術人員生活費
除污拖車	192 美元	52,000 美元	3 年 3,000 美元	-
供應商技術人員	59 美元	-	-	每日 80 美元
資料來源：(DOE 1998a[23])				

表 1.1.5 技術和基本技術在主要部分的單位成本和生產率比較[1]

方案	方案生產率	方案單位成本	基本生產率	基本單位成本
A 方案	17.9 磚/小時 (包括 2 分鐘磚塊的預調查)	2.12 美元/公斤 (0.96 美元/磅)	194 磚/小時	0.36 美元/公斤 (0.165 美元/磅)
B 方案	44 磚/小時	2.18 美元/公斤 (0.99 美/磅)	194 磚/小時	0.36 美元/公斤 (0.165 美元/磅)
資料來源：(DOE 1998a[23])				

2.6 化學除污技術市售可獲性彙整

表 1.1.6 摘要整理 2.1 至 2.5 章節所介紹之 5 種主要的化學除污技術的市售來源。

表 1.1.6 各項化學除污技術的市售來源摘要

除污技術	技術發展機構或設備商資訊
螯合劑與有機酸	• LOMI : EPRI & Central Electricity Generating Board, UK • CITROX & NITROX : PN Services Inc., USA (似已停業), Westinghouse, USA • DfD : EPRI • CANDEREM : Atomic Energy of Canada Limited, Canada • NOXOL : EUROCORPEX Ltd., UK (https : //www.eurocorpex.com/1/en/1_2/1.htm)
強無機酸	• DECOHA (HBF₄) : Recytec, Swiss • HNO₃/HF process : Idaho National Lab
化學泡沫與凝膠	可由一般化學工業供應商獲得
氧化與還原劑	• CORD : Siemens KWU, Germany • SODP : Studsvik RadWaste AB, Sweden • MEDOC : SCK·CEN, Belgium • NPOx : Idaho National Lab • REDOX : JAERI & JPDR, Japan
TechXtract	Active Environmental Technologies, Inc., USA (https : //www.activeenv.com/)

2.7 國內已發展之化學除污技術相關資訊

我國核電場相關的化學除污技術發展計劃多由核能研究所執行，下列計劃資訊為依據政府「研究資訊系統」查詢相關計劃之結果：

- 邱太銘、童永黔、朱振寧、謝榮春等，「核設施除污與環境復育技術之發展與應用」，行政院原子能委員會/核能研究所 87-89 年度科技發展計畫（僅 87 年報告公開）。
- 郭明朝、門立中、謝榮春等，「核設施除役與環境復育技術之發展與應用」，行政院原子能委員會/核能研究所 90 年度科技發展計畫（報告未公開）。
- 童永黔、曾訓華、郭明朝等，「核設施除役與放射性廢棄物減量技術之發展及應用」，行政院原子能委員會/核能研究所 92 年度科技發展計畫（僅公開計畫書、報告未公

開)。

- 王詩涵教授，「化學氧化還原金屬除污以及廢液再生處理系統技術開發」，103 年科技部專題研究計畫 NSC 103-NU-E-214-001-NU。

相關計劃的核研所研究人員也將使用草酸螯合劑的除污結果發表於一篇期刊論文：

- 魏聰揚、鍾人傑、謝榮春，「草酸化學除污劑處理放射性污染金屬廢料之程序開發」，核能季刊，卷 42，頁 98-107，2002 年。

目前核能研究所圖書館所有的相關化學除污技術報告有：

- 甘金相、魏聰揚，「以選擇性離子交換法回收處理 Ce(IV)-H₂SO₄ 除污廢液之可行性研究」，技術報告 INER-2024 (2001)。
- 魏聰揚、鍾人傑等，「草酸化學除污劑處理放射性污染金屬廢料之程序開發」，技術報告 INER-2116 (2001)。
- 魏聰揚、甘金相等，「核研所研究用反應器拆除熱交換器之化學清洗」，技術報告 INER-2190 (2002)。
- 謝榮春、魏聰揚，「核能研究所除污減廢技術之發展現況」，技術報告 INER-2191 (2002)。
- 魏聰揚、甘金相，「鐵材在氟硼酸溶液中之溶解速率」，技術報告 INER-2195 (2002)。
- 魏聰揚、甘金相等，「放射性污染化學除污程序中設施材料選擇」，技術報告 INER-2372 (2003)。
- 謝榮春、許恆雄等，「台灣研究用反應器(TRR)設施除役經驗」，技術報告 INER-2827 (2004)。
- 魏聰揚、林國明等，「核研所放射性污染金屬廢棄物除污設施建立」，技術報告 INER-4040 (2006)。
- 陳鴻斌、謝榮春等，「台灣研究用反應器(TRR)核設施除役技術建立與應用」，技術報告 INER-4045 (2006)。
- 甘金相、李文成等，「金屬氧化物在氟硼酸溶液中之溶解速率」，技術報告 INER-9833 (2006)。
- 甘金相、魏聰揚等，「核設施除役性金屬廢棄物除污及其廢酸液回收之研究」，技術報告 INER-10764 (2014)。

依這些研究計劃與技術報告而言，核能研究所已累積使用草酸螯合劑、硫酸、氟硼酸等化學溶劑執行除污的技術經驗，也同時發展使用離子交換法處理廢液的相應技術。這些經驗與技術多發展自除役台灣研究用反應器的計劃，值得我國後續規劃核電廠除役時的除污技術時參考。

(三)物理除污技術

物理除污亦稱為機械除污(mechanical decontamination)，為透過去除表面放射性污染的物理過程，主要可以分為表面清潔(surface cleaning)技術和表面去除(surface removal)技術。表面清潔技術在清除污染物後，表面仍可保持完好無損，其包括刷洗(brushing)、擦拭(wiping)、沖洗(flushing)、吸塵(vacuuming) 和可剝塗層(strippable coatings)。表面去

除技術需藉由去除整個表面達成去除污染物，包括磨損(grinding)、噴砂(blasting)、刮擦(scabbling)、刨除(shaving)、剝落(spalling)、錘擊(peening)、去銹(scaling)。

物理除污可以是化學除污的替代或輔助方法。與化學除污相比，物理除污技術之優點為：

- 幾乎可對所有表面進行除污，但效益與該材質表面是否易於去除相關。例如灰泥或水泥漿的表面較容易去除，而鋼表面的去除則變得較困難和昂貴。
- 對於無障壁層(barrier layer)的混擬土多孔表面而污染物也已深入基材內部的情況下，物理除污是唯一的除污選擇。若使用化學方法可能促使污染物移至表面下更深之處而更難清除。
- 物理除污通常可以實現比化學除污更高的除污因子，因它能夠完全去除被污染的表面。
- 不需進行表面初步處理。
- 廢物管理較簡單，因為去除的表面物質材料可直接收集並送至廢棄物處理，不需進行如離子交換這樣的二次處理。

與化學除污相比，物理除污技術之缺點為：

- 無對放射性核種或化學性質的選擇性(specificity)。
- 對被清潔的表面具破壞性，因此不適和用於除污後需再次使用的設備，抑或是在除污後對表面進行後續的修補(refinishing)。
- 與表面的物理磨損過程中所產生之微粒(particulate)易逸散至空氣中，因此該技術需同時或藉由輔助措施防範微粒之空中傳播。
- 須考量是否易於接觸至待除污表面與其幾何結構。當表面距離較遠或具有複雜的幾何形狀則不利於應用物理除污技術。
- 工作人員多在污染表面附近操作，需更加關注輻射劑量相關之安全與健康問題。
- 廢棄物量可能大於化學除污，特別在需要移除較深的表面材質或使用較多磨損介質時。
- 若該物理除污技術僅適用於平坦表面，則需事先去除該表面上之障礙物或因管路(piping)或導管(conduit)所造成的環境阻礙。

一般而言，物理除污技術最適用於大型、規則、不受阻礙的表面，其主要由工業界的表面預處理(preparation)和表面修整(finishing)相關的經驗與技術發展而來。

3.1 可剝塗層

3.1.1 技術簡介

可剝塗層可為漆、高分子聚合物和相關的塗料，並將其塗佈至帶有鬆散、可移除微粒的表面或散佈污染物碎屑的表面上。塗層可滲入表面上的微孔以黏附或包覆污染物，待其凝固或固化後藉由移除塗層達到除污的目標。去除可剝塗層需從表面剝離或拉動塗層，或可使用鋒利的刀將塗層分段以便於去除。塗層可在移除時進行滾動，以利於處理並進一步將殘留的污染物捕獲在塗層表面。塗料通常為水性的有機聚合物，

可最大程度地減少有機蒸氣的釋放。而聚合物的相互連接覆蓋可提高污染物去除效率。塗料可藉由噴霧(spray)、刷塗(brush)、塗料輥(roller)或刮塗(squeegee)的方式來施加塗料，也可將纖維增強材料添加到塗層聚合物中來增強塗佈後的可剝離性。



圖 1.1.6 可剝塗層示意圖[1]

可剝離塗層能以三種方式使用：

- (1) 作為去污塗層
- (2) 作為易污染區域中未污染表面的保護塗層
- (3) 進行其他操作時，將鬆散的污染物固定於表面以防止污染物擴散

在必須避免空氣污染且無法處理液態二次廢棄物的情況下，可剝塗層具有產生單一固態廢棄物之優點。除用於放射性除污外，可剝塗層還可用於減少諸如多氯聯苯(PCBs)、石棉和有害金屬等有害廢物，。

3.1.2 適用污染物質

可剝塗層主要針對清除包含污染物的鬆散顆粒或其他鬆散碎屑。其與其他物理除污技術相同，沒有對放射性核種的選擇性。

3.1.3 適用材質與表面特性

可剝塗層可用於裸露和塗漆的混凝土、木材、碳鋼和不銹鋼、塑膠和絕緣材料。它們可以用於複雜的幾何形狀，但是形狀越複雜，剝離的過程也越複雜。

3.1.4 廢棄物管理

由可剝離塗層產生的唯一廢物是從除污表面去除的固化剝離塗層。另外，清潔設備將產生少量廢水。

3.1.5 操作特性

本節和以下各節中有關操作、成效和成本的資訊基本皆基於 2000 年美國能源部 US DOE 對 Williams Power Corporation 所生產的 Carboline 1146 ALARA™ 可剝塗層應用於 Savannah River Site S 的 321-M 燃料製造電廠進行的驗證測驗報告(DOE 2000[25])。測驗包含對 2845 平方英尺的塗漆碳鋼牆壁、未塗漆碳鋼牆壁和天花板以及有環氧塗層的混凝土表面的除污。

此項工作需三個全職工作人員和一位達四分之一工時的專業輻射人員。人員使用可剝塗層不需要特殊技術，但須對操作其噴塗系統進行培訓。ALARA 供應商建議採用以下規格的 Graco 電動無氣噴塗系統：最小泵速比 30：1，在 1800-2300 psi 時最小輸出為 3 加侖/分鐘，最小噴嘴尺寸為 0.021 英寸，以及 110 伏特的電力供應。此技術不需要表面處理。操作方法為將噴槍保持在距離表面 45 度和 10-12 英寸的位置，在表面上緩慢移動噴槍(10-15 秒)，每次通過有 50 % 重疊。適用環境溫度為 4°C 到 32 °C。建議在濕膜厚度為 45-50 密耳(約 1 公釐)時，覆蓋率為每加侖 26 平方英尺。乾燥 9 小時後可觸摸，18 小時後可踩踏、24 小時後可撕除。操作方面的問題包括噴槍尖頭可能堵塞以及拆卸和清潔造成延遲。噴槍使用可逆式噴頭可改善堵塞和延長清潔間隔時間。可要求噴灑塗層時人員使用全罩式供氣呼吸器以防止施作人員吸入過量噴霧與飛濺於空中之污染物。

3.1.6 除污成效

在 DOE 計畫中，ALARA™ 1146 證明其可安全且有效地去除金屬和混凝土表面污染物(DOE 2000[25])。對於可轉移(transferrable)的 α 污染，總除污因子(定義為初始污染值除以最終污染值，並求取所有測試位置的平均值)為 6.68，表示已除去 85 % 的初始 α 。對於可轉移的 β 或 γ 污染，總除污因子為 5.55，表示已除去 82 % 的初始污染物，表 1.1.7 為測試結果[1]。

表 1.1.7 ALARA™ 1146 對 α 與 β 污染的測試結果比較。數值單位為每 100 平方公分下每分鐘的衰變數(dpm/100 cm²) [1]

α 污染	除污前	除污後		β 污染	除污前	除污後
平均污染	2,044	417		平均污染	5,162	1,384
最大污染	60,000	10,000		最大污染	40,000	12,000

在超過三分之一的調查地點除污後可轉移 α 污染的量測值低於調查儀器的最低可檢測活度(Minimum Detectable Activity, MDA)。在超過三分之二的調查地點中可轉移 β 污染的量測值低於調查儀器的最低可檢測活度(MDA)。生產率為每人每小時 133 平方英尺，產生的可剝離塗層廢棄物為 70 加侖。

3.1.7 成本估算

DOE 報告將 1146 ALARA™ 可剝塗層與作為基礎技術的蒸汽真空清潔(steam vacuum cleaning)進行比較(DOE 2000[25])。因為承包商之間的間接費用率差異很大，分析省略了間接成本，也省略了工程、品質保證、行政成本和稅金。人工費用主要計算三名技師和一名輻射防護人員。在考量可剝塗層的一套設備成本 4,950 美元並將設備和材

料成本加入人工成本後，擴展設備成本(extended equipment cost)約為 0.95 美元/小時。

在測試中塗覆了約 2845 平方英尺的 ALARA™ 1146 可剝塗層，但最後僅剝除了 1,555 平方英尺的塗層，因此用於成本分析的單位生產率是基於 1,555 平方英尺的已除污表面積。單位成本要素的計算是基於以執行的除污量。將除污、個人防護裝備和廢物處理的成本相結合，單位成本(unit cost)為單位為美元/每平方英尺(\$/ft²)表示。

與蒸汽真空清潔相比，可剝塗層更易於動員與架設、不需要水源運作且在運作時不會受到內部污染。蒸汽清洗/真空設備需回收清洗液，並且從控制區域進行除污/清潔需要大量人力。另一方面，可剝塗層只需要用清水沖洗，而且易於從控制區域清除。測試的結果顯示，可剝塗層的總成本為 7539 美元而蒸汽真空清潔的總成本為 11582 美元。包含動員和復員之每平方英尺的單位成本為可剝塗層的 4.85 美元和蒸汽真空清潔 7.46 的美元，可剝塗層可節省 35% 的成本。

3.2 離心噴砂

3.2.1 技術簡介

離心噴砂是一種用於去除混凝土表面油漆和輕質塗層或直接磨蝕混凝土表面的除污技術。利用硬化鋼砂轟擊污染表面使之破裂並產生細小的粉塵顆粒，再藉由真空吸塵以清除混凝土表面之污染物。使用過的鋼砂由系統回收，因多次循環使用而得過小過輕的鋼砂可藉由真空抽吸(vacuum suction)移除，同時將足夠大的鋼砂再次使用。圖 1.1.7 顯示了典型的離心噴砂系統[1]。不同於許多除污技術，噴砂處理後的表面相對光滑，可重新塗刷塗層及再次使用(DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27])。

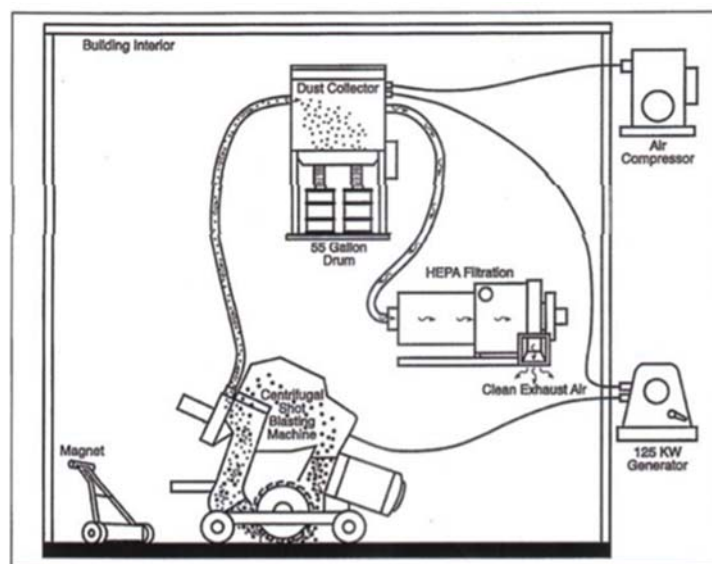


圖 1.1.7 離心噴砂系統示意圖 [1]

電動離心噴砂可清除深度達 0.5 至 1 英寸的輕質塗層或混凝土表面。系統內部的電動噴砂輪(motorized blast wheel)由助推馬達(booster motor)和風扇合力運作。當運轉組件時，噴砂會從儲料斗(storage hopper)中通過閘門釋放到系統中。系統移動速度、噴砂尺寸大小及釋放到系統中的數量可依據所需的清除程度而變化。裝置控制面板上的儀錶會告訴

操作者何時需向系統添加噴砂以及裝置的移動速度。釋放的噴砂量可由面板開關控制，控制面板上的撥動開關(toggle switches)用於控制裝置的轉向。噴砂裝置依靠集塵系統來清除磨損後的粉塵與顆粒，並在除污過程中減少空氣污染物。空氣清洗擋板系統(air wash baffle system)將可重複使用的噴砂從污染物中分離且使其循環回到系統中。污染物碎屑以及太小而無法使用的回收噴砂被收集在與集塵系統相連的集塵筒(collection drum)中。此外，系統的運作需 HEPA 過濾系統、空氣壓縮機和發電機(125 kW)或電源。額外的磁性滾輪用於收回從系統中逸出的噴砂。系統的運作需三名工作人員，一名操作離心噴砂裝置，另一名使用磁性滾輪回收逸出的噴砂，第三名則協助更換污集塵筒。

3.2.2 適用污染物質

離心噴砂用於混凝土表面的一般放射性除污，包括清除因污染而產生的有害油漆和輕質塗層。與其他噴砂除污技術相同，其沒有固有的放射性/非放射性物質選擇性。

3.2.3 適用材質與表面特性

離心噴砂可經由清除污染物和基質來對混凝土表面除污，尤其適用於清除油漆和輕質塗層。該技術可用於包含鐵絲網(wire mesh)、鋼筋和地面排水管的均勻混凝土表面，但對含有卵石(riverine pebble)的混凝土反應不佳。它可以磨碎表面達 1/16 至 1 英寸深，且因它使表面處於可重複使用的狀態，在去除薄層時有很好的效果。

3.2.4 廢棄物管理

真空過濾系統可顯著減少粉塵污染問題，且由於系統是在沒有液體輔助的情況下運作，因此僅可能產生極少量廢棄物。主要廢棄物通常包含油漆碎片和混凝土的粉塵混合物，其數量取決於處理前的表面狀況以及使用過的噴砂。次要廢棄物包括個人防護設備、HEPA 過濾器、使用過的噴砂(尺寸仍可用但已被污染)以及在除污過程中可能使用的任何其他材料如濕抹布、刷子、塑膠墊等。

3.2.5 操作特性

離心噴砂的主要裝置尺寸為 50 英寸×16.5 英寸×43 英寸到 72 英寸×80 英寸×34 英寸，重量從 650 磅到 2700 磅，且其切割寬度可達 13 英寸。即使在大型系統中，主機也可由一個人進行操作，並通過撥動開關(toggle switch)來驅動主機使其向右、向左、向前或向後移動。通常系統需另集塵系統、HEPA 過濾系統、空氣壓縮機(對於較大的機組)、堆高機和發電機等等五項主要次系統。表 1.1.8 摘要離心噴砂裝置的重要物理特性[1]。

表 1.1.8 離心噴砂系統之物理特性 [1]

系統	大小(英寸)	重量(磅)	其他
主機	50x16.5x43 至 72x80x34	650 – 2700	切割寬度達 13 英寸
集塵系統	60x27x113.25 至 127x76x57	700 – 1800	-----

HEPA 過濾器	44x79x45	1000	HEPA 過濾器可簡單地連接到較小的集塵系統
空氣壓縮機	-----	-----	所需容量不同
堆高機	-----	-----	5000 磅-8600 磅起重能力
125 kW 發電機	-----	-----	60-100 安培 三相 480 伏特電源
資料來源： DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27]			

磁性滾輪裝置可收集從系統中逸出的噴砂，集塵筒(23 加侖至 55 加侖)用於儲存集塵系統中的粉塵和碎屑。直徑 6 英寸、長度 50 至 75 英尺的吸塵膠管(dust hose)將集塵系統與主機連接起來。較小的噴砂裝置可有一個漏斗容納約 100 磅的鋼砂，而較大的裝置則可容納至 800 磅的鋼砂。雖然只需一人操作噴砂裝置，但應至少增派兩名工作人員在集塵筒裝滿時進行更換、設定操作堆高機、並使用磁性滾輪收集逸出的噴砂。操作系統所需的個人防護設備可包括工作服、鞋套、頭罩、手套襯墊、手套、耳塞、安全帽、空氣濾淨呼吸防護具、呼吸監測器(breathing zone monitors)和個人冷卻系統(Personal Ice Cooling System, PICS)。因離心噴砂裝置的尺寸限制，其只能用於距離地板和牆壁界面 2 到 6 英寸以及在距離角落 5 英寸的範圍內。因此可搭配如混凝土研磨機這樣設計用於小面積除污的裝置一起用於較小區域的除污工作。

3.2.6 除污成效

美國能源部 DOE 分別執行了兩項對離心噴砂的除污成效評估(DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27])。第一項為在 Fernald, Ohio 執行的 Fernald Environmental Management Project (FEMP)將大型噴砂裝置與滾筒刨除機(rotary drum planer)比較。第一項為在 Argonne National Laboratory (ANL)的 CP-5 Research Reactor 將小型噴砂裝置與機械粗琢(mechanical scabbling)比較比較。離心噴砂技術就以下 5 個方面和基準技術(分別為滾筒刨除機與機械粗琢)進行比較：

1. 清除混凝土地板的塗層
2. 減少必須在場外處置的混凝土數量
3. 減少混凝土拆除過程中產生的二次廢物數量
4. 提供具有成本效益的混凝土除污流程
5. 提供與基本混凝土清除技術的直接比較

較大的噴砂系統用來確定該系統清除達 1 英寸深之混凝土表面的效能。與滾筒刨除機相比，大噴砂裝置可閃避混凝土表面的障礙物，在較小的區域內移動並移除薄的表層，使地板處於可重複使用的狀態。然而，此噴砂系統無法如滾筒刨除機一樣將混凝土清除到所需的 1 英寸深度，這是由於地面下的混凝土中有大量的卵石而嚴重阻礙噴砂運作。小型離心噴砂系統的評估重點為其清除混凝土地板表面放射性污染塗層(油漆)的效能，使地板處於可重複使用的狀態。結果顯示其效能符合需求並可顯著降低工作人員的疲勞、暴露以及使污染降為背景水平。

在這兩種情況下，逸出系統的鋼砂對工作人員構成重大危險。即使在控制區域且採取了預防措施，逸出的鋼砂經常從牆壁和塑膠屏蔽反彈並擊中工作人員。此外，在被磁

性滾輪收集之前，在逸出的鋼砂可使工作人員有滑倒的危險。表 1.1. 9 摘要 DOE 的兩項測試中離心噴砂裝置的重要物理特性[1]。

表 1.1. 9 離心噴砂裝置之效能結果 [1]

性能因數	評估
生產率	小噴砂裝置為 310 英尺/小時；大噴砂裝置為 17.7 英尺/小時
用水量	無
操作方便性	須供應商培訓
個人防護裝置使用	需要一套個人防護裝置，大噴砂裝置對於聽力保護的要求較滾筒刨除機低
主要廢物	顯著少於基處技術，尤其是將大裝置和滾筒刨除機進行比較
次要廢物	少於基礎技術
空氣污染	因有真空過濾系統，因此較基處技術低
結束條件	當混凝土的稠度均勻且並留下光滑且可重複使用的表面
資料來源： DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27]	

3.2.7 成本估算

美國能源部 DOE 的研究提供了大量有關離心噴砂在 FEMP 和 ANL CP-5 研究反應器中除污的成本分析(DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27])。在測試驗證前確定了以下五個成本要素，並收集數據來進行成本分析：

1. 動員架設 Mobilization (包括將設備運送至演示現場和必要培訓費用)
2. 除污與除役 D&D 作業(包括勞動力成本、公用設施消耗(utilities consumed)、用品和清洗碎片設備等項目)
3. 廢棄物處理
4. 復原 Demobilization (包括臨時工作區和公用設施的拆除、技術設備的除污以及從現場移除)
5. 個人防護設備

研究提供了方法和假設條件的全部細節。設備成本是以擁有成本(the cost of ownership)為基礎。每小時的設備費率採用標準的美國陸軍部隊工程方法(U.S. Army Corps of Engineers method)計算。固定成本要素(與除污除役工作量無關的要素，如設備動員)以總額計算。可變成本要素(取決於 D&D 工作量的要素，如勞動成本)計算為每小時執行 D&D 工作的成本。

表 1.1.10 提供大型噴砂裝置與滾筒刨除機的成本分析結論且提供單位成本[1]。根據這項研究，設備除污導致大型離心噴砂的復員成本大幅上升。

表 1.1. 10 滾筒刨除機與大型離心噴砂裝置的成本分析[1]

成本動因	滾筒刨除機	大型離心噴砂
動員	3,386 美元	9,500 美元
除役除污作業	4.30 美元/平方英尺	30.21 美元/平方英尺
廢棄物處理	3.35 美元/平方英尺	2.23 美元/平方英尺
復員	5,895 美元	6,195 美元
個人防護設備	1.79 美元/平方英尺	1.82 美元/平方英尺

資料來源： DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27]

表 1.1. 11 提供了小型噴砂裝置與機械粗琢的成本分析結果[1]。在 1900 平方英尺的面積上，離心噴砂的總成本與機械粗琢相同，對於超過該面積的區域，離心噴砂的成本低於機械粗琢。此外，與機械粗琢的每平方英尺 0.22 美元的機械維護成本相比，小型噴砂在除污期間機械維護成本顯著降低至每平方英尺 0.03 美元。

表 1.1. 11 機械粗琢與小型離心噴砂裝置的成本分析[1]

成本動因	機械粗琢	小型離心噴砂
動員	4,308 美元	6,330 美元
除役除污作業	3,240 美元	6,480 美元
廢棄物處理	1,655 美元	1,399 美元
復員	3,702 美元	8,432 美元
個人防護設備	46.33 美元/每天	46.33 美元/每天

資料來源： DOE 1998b[26]; DOE 1999a[27]

3.3 混凝土研磨機

3.3.1 技術簡介

混凝土研磨機使用金剛石砂輪來除污及清除混凝土表面。使用這種輕型的手持式設備於平坦或微彎曲的表面除污時可產生光滑表面，且產生較少的振動。此設備並帶有真空附件，可有效地去除研磨過程中產生的粉塵(DOE 1998c[28])。圖 1.1. 8 為混凝土研磨機與工作人員正在使用混凝土研磨機時之示意圖[1]。

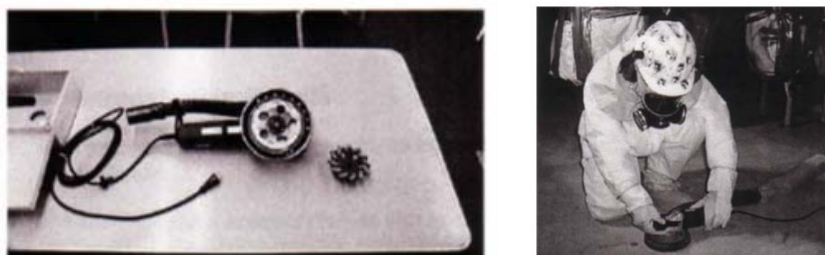


圖 1.1. 8 混凝土研磨機照片與使用混凝土研磨機時之示意圖 [1]

C.S. Unitec, Inc.銷售的輕型電動混凝土研磨機可快速研磨混凝土表面達 1.5 至 3 毫米之深度。使用研磨機時需搭配使用真空過濾系統，因此可藉由連接研磨機內的集塵圍板(dust collection shroud)至現場 HEPA 過濾系統的真空軟管上。金剛石砂輪有外部圍板孔(shroud holes)，使得空氣得以進入並冷卻工作葉片。外部圍板吸入的空氣進入內部排氣孔(discharge holes)後通入真空過濾系統。此技術可為一人操作，並可有效除污及剝除(strip)混凝土表面。

3.3.2 適用污染物質

混凝土研磨機適用於一般混凝土表面的放射性除污工作或表面熱點除污。因設備

可產生光滑表面，非放射性除污的用途包括深度清潔和混凝土表面再修飾。

3.3.3 適用材質與表面特性

混凝土研磨機可用於內部和外部空間內平坦或微彎曲的混凝土表面進行除污，尤其適用於地板和牆壁。其可在 3°C 到 40°C 的環境溫度下研磨表面至 1.5 到 3 毫米深。

3.3.4 廢棄物管理

搭配使用真空過濾系統可顯著減少粉塵污染問題，因為系統運作時並沒有使用液體，因此僅可能產生極少量廢棄物。產生廢棄物的其他因素包括個人防護設備、真空軟管的塑膠膜和套管以及真空收集出的混凝土粉塵。廢棄物處理費用低。

3.3.5 操作特性

系統由一個手持式單元組成因此便於攜行，僅受軟管和電源線長度限制。典型的混凝土研磨機重 6 磅(約 2.7 公斤)，金剛石砂輪直徑為 5 英寸(12.7 公分)，運作時以 10,000 rpm 之轉速旋轉，大約在研磨 10 小時後需更換砂輪(此估計主要取決於砂輪磨損和研磨去除率)。真空口直徑為 1.25 英寸(3.2 公分)，並分有內部和外部進氣口，可冷卻系統並減少粉塵進入到連接的真空軟管中。馬達以 110 VAC、11 安培額定電流運作，可插入任何標準電源插座。研磨深度取決於在該面積所施作的次數(the number of passes)與累積時間。

雖然研磨機可由一人操作，但建議有另一人協助監控真空過濾系統並確保軟管連接確實。操作此系統所需的個人防護設備包括空氣清淨面具、面罩、靴子、工作服、雙層工作服(5%的時間)、風罩、內外手套和手套襯墊以及膠鞋。操作時不需任何培訓。混凝土研磨機的效能可因其較小的尺寸而有所限制，因此可與設計用於大面積除污之除污裝置(如氣動粗琢 pneumatic scabblers) 搭配使用。而地板和牆壁界面可能需要專為裂隙(difficult crevices)設計的裝置，如空氣驅動式針擊槍(air-driven needle gun)。

3.3.6 除污成效

美國能源部 DOE 在其 Large Scale Demonstration and Deployment Project (LSDDP) 計劃中的 C Reactor Interim Safe Storage Project 子計劃將混凝土研磨機與氣動除銹器(pneumatic scaler)和單活塞氣動粗琢(single-piston scabblers)進行比較(DOE 1998c[28])。計劃目標為應證研磨機的重點效能：(1)磨損地板和牆壁的能力為 1.5 至 3 毫米深、(2)在 3°C 至 40°C 的環境溫度下操作、(3)使用常規設備進行除污與(4)操作人員的安全。表 3.3.1 摘要混凝土研磨機的總體性能評估[1]。

表 1.1. 12 混凝土研磨機與單活塞粗琢和氣動除銹器的性能比較[1]

性能因素	比較與差異
生產率和工作時間	混凝土研磨機：平均 4.5 平方公尺/小時，1.5 公釐的除污深度 單活塞粗琢：平均 1.13 平方公尺/小時，1.5 至 3 公釐的除污深度

	氣動除銹器：平均 1.1 平方公尺/小時，1.5 公釐的除污深度
除污成果	有效將表面除污至低於釋放的標準
個人防護設備(PPE)	三項大致相同
二次廢物	研磨機產生最少量粉塵，因為表面除污的深度更易於控制
溫度考量	皆可在 3°C 至 40°C 的周圍溫度下操作
工作人員的安全	研磨機比另兩項基準技術更有效，所以可減少工作人員接觸污染物和振動的機會。而它的重量也更輕。
資料來源：DOE 1998c[28]	

3.3.7 成本估算

依據美國能源部 DOE 的 LSDDP 計劃(DOE 1998c[28])，測試驗證混凝土研磨機的成本效益以下列五個成本要素為主，並收集數據來進行成本分析：

1. 動員架設(包括將設備運送至演示現場和必要培訓費用)
2. 除污與除役 D&D 作業(包括勞動力成本、公用設施消耗(utilities consumed)、用品和清洗碎片設備等項目)
3. 廢棄物處理
4. 復原(包括臨時工作區和公用設施的拆除、技術設備的除污以及從現場移除)
5. 個人防護設備

表 1.1. 13 比較混凝土研磨機和氣動除銹器去除混凝土牆面深度 1.5 毫米與單活塞粗琢去除混凝土牆面深度 1.5 至 3 毫米的成本比較 [1]。

表 1.1. 13 混凝土研磨機、氣動除銹器與單活塞粗琢之成本比較[1]

成本動因	混凝土研磨機	氣動除銹器	單活塞氣動粗琢
動員	1,293 美元	1,339 美元	1,391 美元
D&D work	1,592 美元	4,198 美元	4,101 美元
廢物處理	404 美元	404 美元	404 美元
復原	749 美元	750 美元	761 美元
個人防護設備(PPE)	94.36 美元	94.36 美元	94.36 美元
資料來源：DOE 1998c[28]			

表 1.1. 14 摘要混凝土研磨機、氣動除銹器與單活塞粗琢等三項技術之單位成本估算結果[1]。

表 1.1. 14 混凝土研磨機、氣動除銹器與單活塞粗琢單位成本總結[1]

成本估算	混凝土研磨機	氣動除銹器	單活塞氣動粗琢
生產率	4.5 平方公尺/小時 (48 平方英尺/小時)	1.11 平方公尺/小時 (11.8 平方英尺/小時)	1.13 平方公尺/小時 (12 平方英尺/小時)
單位成本	31.43 美元/平方公尺 2.92 美元/平方英尺	112.7 美元/平方公尺 10.47 美元/平方英尺	111.62 美元/平方公尺 10.37 美元/平方英尺

3.4 混凝土刨除機

3.4.1 技術簡介

混凝土刨除機是一種電動自走式系統，以刨除滾筒(shaving drum)上的金剛石去除混凝土地板上的污染物如圖 1.1.9 所示。在 Marcris 專利的混凝土刨除機中裝有寬 25 公分寬、直徑為 12.7 公分的刨除滾筒，並在其上配置金剛石刀片。依所需的表面光潔度(surface finish)選擇刀片數量。一套刨除刀片的額定工作時間為 156 小時。混凝土刨除機可實現從 0.01 公分(0.004 英寸)到 1.3 公分(0.5 英寸)的刨除深度。該裝置重 150 公斤(330 磅)，消耗 16 安培、380 伏至 480 伏的三相電源，並具有正向和反向動作。該系統可以在 3 °C 至 40 °C(37 °F 至 104 °F)的環境溫度下運行。市售的混凝土刨除機非常適合用於大型、敞開的混凝土地板和樓板(slabs)。

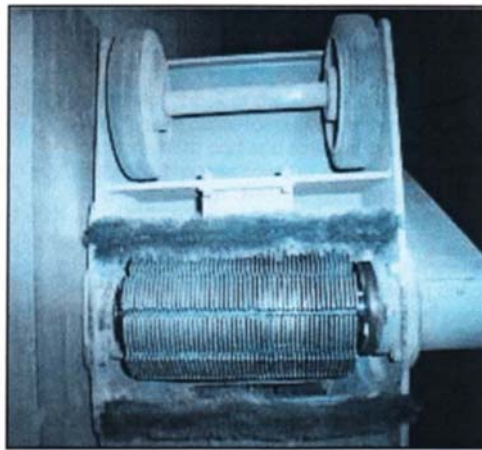


圖 1.1.9 混凝土刨除機示意圖[1]

3.4.2 適用污染物質

混凝土刨除機通常適用於大面積混凝土表面除污以及地板上的“熱點”除污。它們對放射性污染物和塗料有效。但不具特定放射性/非放射性物質的選擇性。

3.4.3 適用材質與表面特性

混凝土刨除機可用於一般平面或輕微彎曲的混凝土地板和樓板進行除污。其可以在內部和外部空間的表面使用。自走式電動混凝土刨除機在大面積、平坦、寬闊的區域上特別有用。由於混凝土刨除機的物理尺寸和幾何形狀，因此不適合在小面積或有大量阻礙物的的混凝土地板和樓板上使用。

3.4.4 廢棄物管理

搭配使用真空過濾系統可大幅減少粉塵污染的問題。混凝土刨除機產生的混凝土粉塵量比傳統常用的多活塞氣動粗琢(multi-piston pneumatic scabblers)要少一些。另外由於系統運作時並沒有使用液體，因此僅可能產生極少量廢棄物。主要廢棄物通常包含粉塵

狀的油漆屑和刨除的混凝土，個人防護設備是廢棄物的次要來源。使用 HEPA 過濾器、個人防護設備和真空系統可大幅減少工作人員接觸粉塵的機會。

3.4.5 操作特性

美國能源部 DOE 在 Hanford C Reactor 大樓內的空間將混凝土刨除機與多活塞氣動粗琢進行操作特性、性能和成本的比較(DOE 1998d[29])。所選的 X 和 Y 兩個測試室用以驗證 Marcris 公司的混凝土刨除機。多活塞氣動粗琢用於 A 和 B 兩個測試室以獲得比較基準。Marcris 的混凝土刨除機使用一個金剛石切割頭滾輪，該滾輪朝著設備的前方旋轉。切割頭封閉在金屬鍋(metal pan)中，以防止拋出的刀片擊中操作員。切割刀片可以幾種方式配置，以允許不同的切除方式。在啟動設備時，將切割頭保持在地面上方非常重要。可以將每次切割的深度設置為 0.1 到 15 毫米，並且可以透過旋轉控制旋鈕在把手上設置切割深度，每次通過的深度越大，完工表面越粗糙。切口的寬度也可以調節，在該測試中，選用最寬的 250 毫米切口寬度。

混凝土刨除機可以從緩慢上升到一般行走速度來移動，從而提高生產率。一旦起始運行，它就可以在沒有操作員的情況下持續刨除。可使用設備側面的旋鈕控制速度，該速度保持恆定直到重新調整。

3.4.6 除污成效

美國能源部 DOE 的測試驗證(DOE 1998d[29])將混凝土刨除機作為創新技術與基準技術多活塞氣動粗琢進行比較。粗琢是一種有五個活塞頭的手推式裝置，可移除大區域面積的混凝土表面至 3 公釐(1/8 英寸)到 6 公釐(1/4 英寸)的深度。單次清除 3.0 平方公分(11.5 英寸)的面積會於一分鐘內向混凝土表面施作 1200 次活塞撞擊。DOE 執行測試以確定混凝土刨除機是否可以達到下列條件：

1. 能使用金剛石刨除技術(diamond shaving technology)去除放射性污染的混凝土。
2. 可與集塵罩(dust collection shroud)相容並連接至現有的高效微粒 HEPA 過濾系統。
3. 可使用常規電力。
4. 能去除 3 毫米深(1/8 英寸)的潛在污染混凝土。
5. 能處理嵌入除污混凝土中的鋼筋和管路。
6. 在 3°C 至 40°C(37°F 至 104°F)的環境溫度下操作。
7. 能解決測試室中鉛基塗料的污染問題。需可以自大面積地板去除 1.5 到 3 毫米(1/16 英寸到 1/8 英寸)深的混凝土，在小面積地板則需去除達 6 毫米(1/4 英寸)的深度。

計畫結果驗證混凝土刨除機可比氣動粗琢更有效清除混凝土地板的放射性污染物質。刨除機的金剛石鑽頭滾筒(diamond-bit drum)可使單程的除污執行在精確的深度同時儘量減少廢物產生。粗琢作用後的地板表面粗糙且不規則，也並非總是切割到適當深度。這使操作者需降低設備運作速度，甚至需再次施工已達到要求。既產生更多的混凝土廢料，也增加處置成本。

相比活塞氣動粗琢，混凝土刨除機具有以下幾個優點：

1. 留下了比刮粗琢光滑的表面，因此最終釋放的量測更可靠。
2. 清除混凝土表面的速度比多活塞氣動粗琢快約為 5 倍。在 3 毫米(1/8 英寸)深度下，混凝土刨除機為 11.9 平方公尺/小時 (128 平方英尺/小時)，而多活塞氣動粗琢為 2.5 平方公尺/小時(27 平方英尺/小時)。
3. 操作時振動較小。
4. 除混凝土外，它還能磨損嵌入鋼筋。
5. 從兩個測試室清除深度達 0.3 公分(1/8 英寸)的混凝土後，未出現明顯磨損。

3.4.7 成本估算

美國能源部 DOE 的測試驗證(DOE 1998d[29])提供了混凝土刨除機技術的成本分析。混凝土刨除機技術的營運成本為 14.21 美元/平方公尺(1.32 美元/平方英尺)，而基準的多活塞氣動粗琢營運成本為 43.60 美元/平方公尺(4.05 美元/平方英尺)。表 3.4.1 比較這兩種技術的成本[1]。刨除機比粗琢節省約 50%的成本。主要因素為混凝土刨除機提高生產率，節省勞動力。與粗琢工具相比，混凝土刨除機刀片的壽命較長。可減少產生廢物。

表 1.1. 15 混凝土刨除機與多活塞氣動粗琢之成本比較表 [1]

成本要素	混凝土刨除機		多活塞氣動粗琢	
	生產率	單位成本	生產率	單位成本(\$)
清除 3 毫米混凝土	11.9 平方公尺/小時	14.21 美元/平方公尺*	2.52 平方公尺/小時	43.60 美元/平方公尺
更換刨除機刀片或更換粗琢鑽頭	1 組/1800 平方公尺或(20,000 平方英尺) 1 組/156 小時	7172 美元/組 (普通混凝土)	1 組/113 平方公尺或 1 組/45 小時	480 美元/組 (普通混凝土)
*單位成本包括刀片磨損成本；刀片壽命為用於清除 1860 平方公尺深度 3 毫米之混凝土或使用 156 小時。				

3.5 混凝土剝落機

3.5.1 技術簡介

混凝土剝落機用於除污和剝除微彎曲和平坦的混凝土表面(DOE 1998e[30])。此技術可有效執行大面積除污，並適用除污混凝土熱點和深度裂縫(in-depth decontamination of cracks)。其也可以用來收集待測混凝土樣品。儘管施用後的表面不平整，但剝落機的優勢在於它能比其他技術更快地達成 3 毫米以上的除污深度需求。剝落機採用 Pacific Northwest National Laboratory 設計的專利鑽頭，由一個壓力達 9 噸的液壓缸驅動。先以蜂巢狀的圖形預先在混凝土表面鑽孔，接著將剝落機鑽頭(spaller bit)插入鑽孔後打開液壓泵上的四通道液壓閥使鑽頭在孔中擴大並導致剝落。剝落的混凝土塊厚度可達 5 毫米，直徑達 18 至 41 公分並可由附著在剝落機周圍的金屬罩收集。此可拆卸金屬罩包括真空口，在需要控制粉塵時可藉由軟管連接到現場 HEPA 過濾系統。此技術需由兩人操作。在要剝落的表面上預先鑽孔是最耗時的程序。以每 20 公分(8 英寸)間距為中心鑽

孔，每個孔需 10 到 40 秒的時間。

3.5.2 適用污染物質

混凝土剝落機用於大面積混凝土表面的深層放射性除污、混凝土裂縫除污或混凝土表面熱點除污。非放射性除污劑的用途包含混凝土取樣。

3.5.3 適用材質與表面特性

混凝土剝落機可用於內部和外部空間的平坦或微彎曲的混凝土表面除污，尤其適用於地板和牆壁且可在嵌入混凝土中的管路或鋼筋周圍工作。在 3 °C 至 40 °C 的環境溫度下，它可以剝落深度達 3 毫米或更深的表面材質，最終留下已充分除污的粗糙、不平整表面，而可再執行拆除作業。

3.5.4 廢棄物管理

由於混凝土剝落機是設計用於清除深度表面的大塊混凝土，因此相較於其他除污技術，剝落會產生更多廢棄物。可同時使用真空過濾系統以減少空氣污染。若混凝土受到 α/β 污染，可以在鑽孔前對表面噴水。廢棄物的其他來源包括個人防護設備、真空軟管的塑膠包裝和套管以及真空收集的混凝土粉塵。

3.5.5 操作特性

混凝土剝落機系統由一個手持可攜的單元組成，重 13.6 公斤(30 磅)。建議使用吊索來幫助支撐裝置並減輕操作員的壓力。建議使用吊索來幫助支撐裝置並減輕操作員的壓力。鋼制剝落鑽頭的主要組件含滑動推杆(internal-tapered sliding push rod)、帶有觀察窗和真空口並用於控制粉塵和碎片的可拆卸金屬護罩(sheet metal shroud)、液壓缸(9 噸)、液壓缸延長手柄、連接泵和氣缸軟管、以及電動/液壓泵(19.5 安培，110 伏，50 公斤或 108 磅，額定 10000 磅/平方吋)。藉由一個自剝落機鑽頭末端伸出的推桿抵壓著預先鑽孔的底部而後張開剝落機鑽頭，此鑽頭的擴張即可使混凝土破裂。剝落的深度與預先鑽的導孔(pilot hole)間距有關，而此導孔的深度建議值為 5 公分(以避免鑽頭破裂)。在使用直徑為 2.54 公分(1 英寸)的導孔下，通常以 20 公分(8 英寸)為中心距離的三角形或蜂巢狀圖型來鑽孔。剝落機在清除深度為 3 毫米(1/8 英寸)以上的表面時有最佳成效。

使用者需將軟管連接到液壓缸上，檢查電源線和連接器是否有破口或磨損跡象，連接真空軟管和電源線，若需要預鑽孔則需準備噴水器。根據現場狀況，可能需要額外的安全檢查。預鑽孔需要較長的準備時間(估計 10-40 秒/孔)，所需孔的數量取決於待剝離區域的大小。系統的振動和噪音很小，無需聽力保護。操作此系統所需的個人防護設備包含空氣清淨面具、面罩、靴子、工作服、雙層工作服、頭套、內外手套和手套襯墊以及膠鞋。

混凝土剝落機可能受尺寸限制，有時與其他除污技術一起使用可能更有效。剝落機

可以與適合除污大表面區域除污的裝置一起使用以更有效的除污。地板和牆壁界面可能需要專為除污裂隙(crevices)設計的裝置，如空氣驅動式針擊槍(air-driven needle gun)。

3.5.6 除污成效

美國能源部 DOE 在 Large Scale Demonstration and Deployment Project (LSDDP) 計劃中的 C Reactor Interim Safe Storage Project 子計劃將混凝土剝落機與氣動除銹器(pneumatic scaler)和單活塞粗琢(single-piston scabblers)進行比較(DOE 1998e[30])。與基準的粗琢和除銹器相比，此測試驗證的目標剝落機可達到：

1. 磨損地板和牆壁的能力深達 3 毫米。
2. 在 3 至 40°C 的環境溫度下操作。
3. 使用常規設備進行除污。
4. 操作人員的安全。

表 1.1. 16 摘要混凝土剝落機與基準技術的氣動除銹器和單活塞粗琢比較結果。

表 1.1. 16 混凝土剝落機與單活塞粗琢和氣動除銹器的性能比較[1]

性能因素	比較與差異
生產率和工作時間	混凝土剝落機：平均 1.3 平方公尺/小時 單活塞粗琢：平均 1.1 平方公尺/小時 氣動除銹器：平均 1.1 平方公尺/小時，1.5 公釐的除污深度
除污成果	有效將表面除污至低於釋放的標準
個人防護設備(PPE)	三項大致相同
二次廢物	除了鑽孔外極少產生粉塵，並應控制粉塵。會產生大塊混凝土
溫度考量	皆可在 3°C 至 40°C 的周圍溫度下操作
工作人員的安全	剝落機的暴露時間與另兩項基準技術約略相等，但空氣粉塵與環境污染較少
資料來源：DOE 1998e[30]	

3.5.7 成本估算

美國能源部 DOE 在 LSDDP 計劃中對混凝土剝落機、氣動除銹器與單活塞氣動粗琢等三項技術以下列五個成本要素為主進行了成本分析(DOE 1998e[30])：

1. 動員架設(包括將設備運送至演示現場和必要培訓費用)
2. 除污與除役 D&D 作業(包括勞動力成本、公用設施消耗、用品和清洗碎片設備等項目)
3. 廢棄物處理
4. 復原(包括臨時工作區和公用設施的拆除、技術設備的除污以及從現場移除)
5. 個人防護設備

成本分析的結論摘要於表 1.1. 17 [1]。

表 1.1. 17 混凝土剝落機、氣動除銹器與單活塞氣動粗琢之成本比較[1]

成本動因	混凝土剝落機	氣動除銹器	單活塞氣動粗琢
動員	837.21 美元	1,293.99 美元	1,348.37 美元
D&D work	4,386.28 美元	4,263.48 美元	4,289.8 美元
廢物處理	403.6 美元	403.6 美元	403.6 美元
復原	121.91 美元	754.32 美元	767.34 美元
個人防護設備(PPE)	94.36 美元/天	94.36 美元/天	94.36 美元/天
資料來源：DOE 1998e[30]			

在去除混凝土牆面的最小深度為 3 毫米的情況下，表 1.1. 18 摘要三項技術之單位成本估算結果[1]。注意在表 3.5.3 中混凝土剝落機的單位成本高於另外兩項基準技術。此原因為操做人員經驗不足和實驗效率低下，致使顯著提高成本。該研究(DOE 1998e[30])估計，在最佳條件下與另兩種基準技術相比，剝落機可節省 15 % 的費用。

表 1.1. 18 混凝土剝落機、氣動除銹器與單活塞氣動粗琢單位成本總結[1]

成本估算	混凝土剝落機	氣動除銹器	單活塞氣動粗琢
鑽洞	142 美元/平方公尺/小時	無資料 N/A	無資料 N/A
去除的牆面	58 美元/平方公尺 (5.41 美元/平方英尺)	155 美元/平方公尺 (14.4 美元/平方英尺)	156 美元/平方公尺 (14.5 美元/平方英尺)
單位成本	200 美元/平方公尺 (18.52 美元/平方英尺)	155 美元/平方公尺 (14.4 美元/平方英尺)	156 美元/平方公尺 (14.5 美元/平方英尺)
資料來源：DOE 1998e[30]			

3.6 乾冰噴砂

3.6.1 技術簡介



圖 1.1. 10 典型的乾冰顆粒與乾冰噴砂機

乾冰噴砂或二氧化碳(CO₂)噴砂是一種工業清潔過程，其表面使用二氧化碳顆粒作為噴砂介質(Renard 1997[36]; May 2003)。二氧化碳顆粒(如圖 1.1. 10 所示)的直徑大小約為 1-3 毫米，長度可達 4.5 毫米，溫度低於-100°F。顆粒被裝在機器中，藉由壓力為 100-150 psi 的壓縮空氣加速噴出，使顆粒在受污染的表面上撞擊以去除污染物。乾冰噴砂藉由幾乎同時發生的三種機制去除污染物。在第一種機制中，加速的二氧化碳顆粒在高速下撞擊而使污染物離開表面，類似於傳統噴砂操作。在第二種機制中，低溫二氧化碳顆

粒會與污染物及表面產生熱差異，致使污染物和表面以不同的速率收縮，從而削弱它們之間的結合力。在第三種機制中，二氧化碳顆粒因撞擊處於室溫的表面而迅速膨脹成蒸氣。此氣體快速膨脹的過程即能將污染物從表面移除。美國能源部 DOE 及其承包商即改良市售的乾冰噴砂機以滿足表面除污的需求。圖 3.6.1 中右圖為 Alpheus 公司所生產的 MiniBlast model PLT-5X 乾冰噴砂機，其被應用於 DOE 在 Savannah River Site 的測試 (2003 年 5 月)。DOE 在 Oak Ridge National Laboratory 和 Hanford site 的除污工作也計畫使用 CryoGenesis 公司生產的遠程乾冰噴砂機(Renard 1997[31])。

通常電動或氣動的乾冰噴砂機透過將壓縮空氣和二氧化碳顆粒輸送到指向目標表面的噴嘴來運作。機器可為電動或氣動，顆粒的輸送速率可調節。一些機器使用一條軟管，將顆粒和高壓空氣沿同一路徑輸送。部分機器則使用兩條軟管，第一條使用約 40 psi 的空氣輸送顆粒，第二條軟管將高壓空氣輸送至噴嘴並在噴嘴處使顆粒和高壓空氣混合噴出。

乾冰噴砂可使二氧化碳氣體回至到大氣中，僅留下從表面清除的污染物和顆粒作為廢物。因此，乾冰噴砂機通常與過濾 CO₂ 氣體並收集廢棄物的其他系統一起使用。對於在放射性環境中的噴砂，美國能源部的測試讓乾冰砂射機與空氣壓縮機，空氣乾燥機和帶有 HEPA 過濾器的過濾通風系統一起使用。在設計遠程噴砂系統時，能源部及其承包商開發了一個單獨的真空系統，以收集污染物顆粒。

3.6.2 適用污染物質

乾冰噴砂以去除表面污染物和微粒為目標。根據供應商 Cold Jet，其乾冰砂射系統可用於去除多餘的油脂(grease)、污泥(sludge)、密封膠(sealant)和銲渣(weld slag)。該系統還用於去除煙、煙灰、汽化合成樹脂和炭。供應商還進一步聲稱，其乾冰噴砂處理可以從木材中去除 100 % 的黴菌孢子。CryoGenesis 公司的廣告內容為清除受損材料中的樹脂、膠、食物殘渣以及火和煙的殘留物。當美國能源部 DOE 測試 Alpheus MiniBlast Model PLT-5X 時，目標污染物是硝酸銫溶液中的銫 137。然而與其他物理除污技術一樣，乾冰噴砂沒有固有的放射性/非放射性物質選擇性。

3.6.3 適用材質與表面特性

乾冰噴砂設備的供應商聲稱此技術對水泥、混凝土、塑膠、木材、不銹鋼和其他金屬等多種材料皆有效。儘管污染物沉積方法和噴砂設備的操作方式可影響去污成效，但 DOE 的技術經驗已證明乾冰噴砂可用於不銹鋼。針對遙控噴射系統的初步 DOE 的初步測試結果也顯示乾冰噴砂可成功應用於混凝土除污。雖而並沒有關於不規則表面或介質成分會如何影響污染物清除效率的具體資訊。

3.6.4 廢棄物管理

在美國能源部 DOE 的測試中未發現任何明顯的廢棄物管理問題，供應商也未報告任何具體的廢棄物問題。然而在 DOE 的測試中都建立了有效收集微粒和氣體的系統和程序。如前所述，所有乾冰噴砂的操作原理是讓二氧化碳透過 HEPA 過濾器濾網回到

大氣中，只留下從表面清除的污染物和微粒作為廢棄物。然而在處理放射性物質時，必須有獨立系統來過濾二氧化碳氣體並容納和收集廢料。

3.6.5 操作特性

乾冰噴砂重要的特性如下：

- 氣壓通常為 100–150 psi，但某些機器可提供 300 psi 的壓力。
- 部分機器可於低壓(20–40 psi)操作。
- 噴射壓力通常是可調的。
- 在某些機器其顆粒的輸送速率是可變的。
- 噴嘴形式可能因機器而異，但未發現有關可調式噴嘴的報告。
- 乾冰噴砂設備可為固定式、安裝在手推車上，或作為遙控操作裝置。
- 機器可由一人操作。
- 需要獨立系統及設備(密封罩或外殼、HEPA 過濾器濾網、真空吸塵等)來容納和收集二氧化碳氣體和廢物。

3.6.6 除污成效

在美國能源部 DOE 曾對 CryoGenesis 公司所開發的遠程乾冰噴砂系統做過初步測試(Renard 1997[31])。然而關於乾冰噴砂對放射性物質的實際清除能力更應參考 DOE 於 2003 年 5 月應用 Alpheus MiniBlast Model PLT-5X 乾冰噴砂系統的試驗結果。在該試驗中，銫-137 以兩種方式應用於不銹鋼。直接式為硝酸銫溶液用於不銹鋼上並乾燥，而間接式為將銫-137 揮發並凝結到不銹鋼上。在間接式施加污染的情況下，乾冰噴砂在所有測試中清除銫至低於試驗設計要求。但當乾冰噴砂用以清除直接施加銫-137 於接不銹鋼的情形下，在 11 個測試案例中有 5 個未達到設計要求。對結果的統計分析顯示以下三個因素可能會影響乾冰噴砂去除污染物的效率：

1. 噴射壓力增加，污染物去除量增加。
2. 增加噴嘴間距、噴嘴與表面的距離會減少污染物的清除。
3. 增加運行速度，即噴嘴通過表面的速度會減少污染物的清除。

改變顆粒輸送速率對污染物清除上並沒有顯著的統計變化。實驗並無評估如噴嘴相對於表面的方向和顆粒輸送系統型態等其他因素

3.6.7 成本估算

關於此技術的成本沒有可靠的資訊。

3.7 乾式真空吸塵

3.7.1 技術簡介

乾式真空吸塵已有效用於建築物表面、地板、樑、樓梯和其他固體介質的表面放射性除污。除污後的表面會再作濕性擦拭。此技術通常不會產生廢水。目的是使混凝土和

鋼成為非危險性建築，以便建築物可以正常使用或拆除而不會產生大量有害廢棄物(DOE 1994[4];DOE 1997[9])。

乾式真空吸塵使用帶有高效微粒 HEPA 過濾系統的商業或工業級吸塵來清除建築物和設備表面上的灰塵和微粒。吸塵器將空氣和疏鬆表面的顆粒吸入真空組件的儲存部件內。排氣需先通過 HEPA 過濾系統後才排出到大氣中。HEPA 過濾系統可收集灰塵和碎屑，以防止空氣傳播性的污染，並防止空氣和剛被吸塵的表面再次受到污染。根據污染物的性質，乾式真空吸塵的過程通常發生在一個圍阻結構(containment structure)中，圍阻結構可包括兩層加固尼龍並將其綁在一個可重複使用的自支撐(self-supported)框架上。地板、牆壁和天花板通常是一體或密封以防止污染物逸出。隔離帳篷(tents)可能帶有拉鍊門。

含 HEPA 的吸塵器非常適合對有疏鬆污染物的表面進行除污處理。過濾器至少可清除 99.97 % 大於 0.3 微米的顆粒。在某些商用型號中，HEPA 過濾器完整放在套裝(bag-in/bag-out glove-box)組件中，使用過的過濾器直接移入可密封的處理袋中而不會暴露於大氣。乾式吸塵僅去除鬆散的顆粒，並且沒有去除固定的表面或表面下的污染物。因此，乾式真空吸塵可以用作初始的處理方法，然後可採用另一種技術進行進一步的處理以達到所需的防護水準。

3.7.2 適用污染物質

乾式真空吸塵通常用於從裸露和有塗層的混凝土表面上去除污染顆粒。它可用於去除鉛基漆料、多氯聯苯污染的顆粒、石棉和其他精細的危險和放射性物質，但僅適用於清除尺寸小的疏鬆的污染顆粒。

3.7.3 適用材質與表面特性

乾式真空吸塵對於去除表面上的疏鬆污染物特別有效。它不應該在多孔表面上使用，因為疏鬆沉積的物質可能會被推入更深的表面。

3.7.4 廢棄物管理

乾式吸塵不需使用任何液體以運作並僅產生很少量廢棄物。依據除污前的表面狀況，主要廢棄物通常由混凝土和其他成分的粉塵混合物組成。在 Pentek VAC-PAC 系統中，系統主件裝置於托板或抽屜形式的廢物桶上以安全地收納廢棄物。整個密封包裝的廢物桶可立即用於安全處置。去除的顆粒必須根據污染物的特定特性進行處置。

3.7.5 操作特性

乾式真空吸塵通常與其他除污技術結合使用。譬如可用研磨機和粗琢等工具來鬆散受污染的材料和混凝土，並使用帶有 HEPA 過濾系統的吸塵來收集疏鬆的顆粒。以圖 1.1. 11 所示的 Pentek 真空吸塵除污系統(DOE 1997[9])為例，其集成了一套遠程和手動操作的設備以從混凝土和鋼中去除放射性物質、鉛基漆料、多氯聯苯和其他受污染的塗層。該系統包括氣動粗琢和針尖除銹器(needle scaler)以鬆散受污染的材料後再吸塵收集

碎屑。空氣中的微粒可完全包覆在護罩內，並通過吸塵收集以防止污染物和灰塵的擴散。機械系統的運作不需要液體輔助，使得廢棄物僅單純為除污中移除的物質。灰塵和碎屑皆在切削工具運作的表面被收集在，從而防止了交叉污染並避免帳篷和操作員呼吸防護的需求。

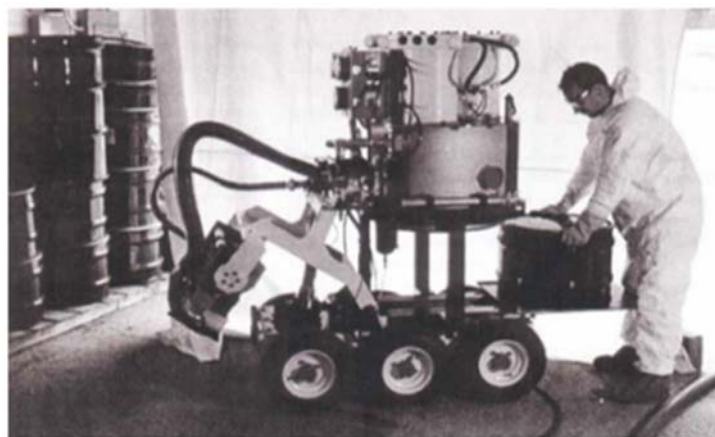


圖 1.1. 11 Pentek 真空吸塵除污系統

3.7.6 除污成效

吸塵系統的關鍵性能鍵指為實際運作時在真空操作點所可以提供的真空流量。由於真空流量是控制系統可捲入和運輸物質最主要的數值，因此系統在實際條件下產生的真空流量必須足以克服系統的總壓力損失或流動阻力。如果系統無法維持足夠的真空度來維持流量，則物質將不會通過軟管運輸也不會收集在真空主機內。越好的真空系統即可使介於噴嘴(或工作點)到真空主機的軟管內部保持在高的真空度。

Pentek 的高性能 HEPA 真空系統可對放射性物質和鉛基塗料等有害微粒進行兩階段過濾。依廠商提供資訊，第一階段 HEPA 可過濾 95 % 的 1 微米顆粒，而第二階段可過濾 99.97 % 的 0.3 微米顆粒。第一過濾段變包一個使用逆向高壓空氣的自動進行清潔設備以減少堵塞和維護的需要。其系統尚包含，集塵桶溢滿警告、多噴嘴同時操作、高流量、使用最長 200 英尺的軟管與方便移動等特性。Pentek 的 VAC-PA Model 24 可以 10 平方公尺/小時(125 平方公尺/小時)的速率執行除污，符合美國能源部 DOE 的要求 (DOE 1997[9])。

在乾式真空吸塵系統中，去除的污染物被收集在真空主機內的集塵袋中，廢氣通過 HEPA 過濾後排放到大氣中。後續可對集塵袋裝箱或其他處理後再作處置。除污過程中不會產生其他廢物。如果需要使用 HEPA 過濾系統，則該系統可能需要與污染的碎屑一起在低階放射性廢棄物(LLRW)設施進行處置。對工作人員則依所處理的污染物準備相應的安全眼鏡、呼吸保護器、手套和工作服等個人防護設備。

3.7.7 成本估算

依據美國能源部 DOE 的估算(DOE 1997[9])，乾式吸塵的成本為每平方英尺 2.00 美元。該估計值取決於實際的現場情況。

3.8 電動液壓粗啄

3.8.1 技術簡介

電動液壓粗啄(Electro-hydraulic scabbling, EHS)是在水中的兩電極間使用短時間(微秒)、高電流(數萬安培)、高電壓(數萬伏特)的放電去製造電漿氣泡(plasma bubble)和震波來刮除混凝土表面。電極放置在水表面下並靠近混凝土表面的位置，以每秒幾個脈衝的放電在電極間重複釋放。水用來扮演介質傳遞氣泡和震動，使混凝土表面層被剝離和刮除，也同時防止波被空氣分解並減少空氣中的污染(Goldfarb 1997[32])。

電動液壓粗啄是一種快速且可控制的混凝土粗啄技術，過程中產生非常少的二次廢物，且水的消耗遠低於傳統高壓噴水去污技術。藉由脈衝的不同能量、不同形貌和給定位位置的脈衝總數，我們可以控制粗啄的深度。EHS 主要用來去污混凝土牆面、地板和天花板(NETL1997[38])。此技術的優點為：

- 能夠執行單程深度刮除
- 減少空間浪費
- 減少空氣微粒造成的環境污染
- 低能量消耗
- 高處理效率
- 低人力需求
- 低廢物處理費用

3.8.2 適用污染物質

EHS 針對的是已深入到混凝土中的污染物。與其他物理除污技術一樣，該技術沒有特定的放射性核素，並通過大量去除混凝土基質中可能存在的污染物來作用。

3.8.3 適用材質與表面特性

該技術是專門為平坦的混凝土表面而設計的。它不適用於金屬、塑料、木材等，並且不適用於複雜形狀的空間中。

3.8.4 廢液與廢棄物管理

EHS 產生的主要廢棄物是碎屑和用水。如果水中不包含可溶性污染物，可以將其過濾並循環再利用，從而減少廢物量。碎屑的量則取決於混凝土被劃傷的深度。沒有特定的廢物處理要求，也沒有任何非典型的廢物處理、處置或其他管理問題。

3.8.5 操作特性

這項技術已在 Fernald 環境管理計畫的金屬製造廠 (Bldg. 6) 和佛羅里達國際大學 (NETL 1997[33]) 中展示。展示中使用的設備包括高壓電源櫃、製程控制櫃、具有 26 英寸寬的電極和定位器的刮除室/外壁、含泵與閥門和滾筒/收集器的水/細碎屑流系統，以及 HEPA 真空吸塵器，它可降低外壁氣壓，並清除將外壁轉移到下一個位置後殘留

的潮濕碎石。刮除室和流動控制系統安裝在常規鏟床上。

主要操作參數為：

單位大小	8'x 5'x 4'
單位重量	1700 磅
功率	30 千瓦
工作電壓	28-32 kV
脈衝能量	3-5 kJ
脈衝頻率	4-7 赫茲
刮除軌道寬度	30 英寸
每位置的刮除面積	6 平方英尺
划痕深度	高達 1 英寸
划痕速率(3/8'')	30 平方英尺/小時

3.8.6 除污成效

Fernald 環境管理計畫的數據顯示，除鈾的除污因子超過 10。殘留在混凝土的部分殘餘活性歸因於濕、碎石去除後所殘留的混凝土粉末。如果殘留活性需進一步降低，則應實施改進的濕式或乾式後段刮除製程。

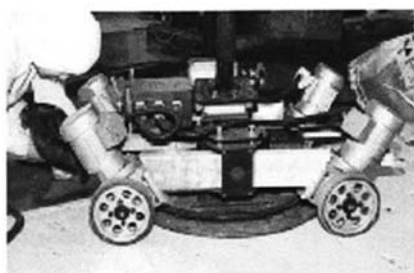
3.8.7 成本估算

每單位的估計費用為 120,000 美元。總運營成本估計在\$ 5-10 /平方英尺範圍內，並分配在消耗品(5%)、維護(12%)、5 年資本(8%)和人工(75%)。廢物管理成本會針對每個地點，並且取決於廢棄物的成分。

3.9 En-vac 機器人牆壁粗琢

3.9.1 技術簡介

機器人牆壁粗琢(En-vac Robotic Wall Scabbler, ERWS)實際上是一種遙控噴砂設備，專門設計在平坦表面上工作(圖 1.1. 12；圖 1.1. 13)。它也能夠在地板上工作。ERWS 通過在設備底座的密閉噴砂室內產生高真空吸力黏附在牆壁上。真空系統還可以防止爆破操作(blasting operation)的工作表面散發任何揚塵或沙礫。該裝置由安全帶系統支撐，並通過單獨的馬達控制輪沿地板、牆壁和天花板水平和垂直移動。完整的 En-vac 爆破系統包括 En-vac 機器人(執行刮除的單位)、回收單位、過濾器 and 真空單元(DOE 2001[34])。



En-vac Robotic Wall Scabbler



En-vac removing paint from wall in the Decon Shop

圖 1.1. 12 En-vac 機器人牆壁粗琢示意圖 圖 1.1. 13 使用 En-vac 機器人除污牆壁

機器人牆壁粗琢能夠比同類型基礎技術進行更深入的去污。En-vac 機器人的主要組件是噴砂罩、楔型密封器、四個馬達和車輪驅動轉向組件、帶有振盪器馬達的噴砂嘴以及真空控制裝置。ERWS 刮除是通過使用磨料鋼砂或鋼丸作為表面去除的介質並進行噴砂處理。真空單元產生的真空將機器人固定在牆上，並容納和運輸廢物。可回收的廢舊噴砂和爆炸殘留物通過真空軟管從機器人返回到回收裝置。刮除操作中產生的碎片由回收裝置、過濾器 and 真空單元處理，所有這些元件均與機器人分開。回收裝置通過噴砂軟管不斷向機器人提供磨料。

3.9.2 適用污染物質

機器人牆壁粗琢的目標是粉刷牆壁表面、地板和混凝土表面附近的污染物質。與其他物理除污技術一樣，該技術沒有特定的放射性核素。它是藉由去除污染物質所在的塗層和混凝土表面來工作。

3.9.3 適用材質與表面特性

該技術是專門為平坦且有塗層的混凝土和碳鋼表面所設計的。它不適用於裸露的金屬，塑料，木材等，並且不能適用於複雜形狀的空間中。

3.9.4 廢液與廢棄物管理

機器人牆壁粗琢產生的主要廢物是含有少量砂礫的刮擦混凝土和塗層碎片。砂礫被平均回收 10 次，因此僅佔廢料的一小部分。真空系統會自動收集廢物。可回收的砂礫在回收系統中分離，廢棄物則存儲在鐵桶中進行處置。廢物處理視具體情況而定，取決於存在的放射性核素以及塗料中是否含鉛或其他有害物質。在 DOE 設施進行的技術演示中(DOE 2001[34])，在 60 平方英尺的牆壁表面刮時，產生了 1.84 立方英尺的混凝土、塗層和砂礫廢物，這種情況下的估計處理成本為 159 美元/平方英尺。次要廢物包括一次性個人防護設備。ERWS 沒有任何非典型的廢物處理、處置或其他管理問題。

3.9.5 操作特性

En-vac 系統很重，總重量為 10,000 磅，其中包括機器人粗琢裝置和三個大型元件。所有裝置均設計為可通過工業鏟車或移動式隨車吊升和運輸。該系統需要三人工作組(兩名工人和一名設備操作員)。機器人除銹器是可移動的，但是一旦安裝了安全帶系統，它就無法移動，直到復原並重新安裝為止。操作過程中一定要準備安全帶並妥善安裝以適應具體情況，且必須計算機器人和支撐軟管的重量，以及由索具角度和力向量所施加的合力，所以必須嚴謹選擇線束連接點以實現最大的安全性。

En-vac 系統需要配備最大值 640scfm 壓縮空氣的空氣乾燥器和 440VAC 三相 60Hz 120kW 峰值電力。但是，不需要進行表面預處理。且由於該設備設計用於平坦表面，因此必須根據需要拆除牆上的管道和導管。在運行中，En-vac 機器人被放置在牆上並連接

到自動張緊絞車(auto tension winch)上，這是一種安全裝置，該裝置由絞車和電纜系統組成，它們拴在牆上並連接到機器人，以防止意外(斷電或真空)損傷機器人、設備和附近的人員。自動張力絞盤還可以使機器人在管道和導管移動後幫助它重新定位在牆壁上，因為機器人無法在小型管道上刮除。該機器人在八英寸的管道和其他障礙物之內，可以在牆壁上刮除 1/8 英寸的深度，清除多層塗層和表面混凝土。可以使用可選的轉角機器人，其與 En-vac 機器人有相同的支撐設備，將其快速安裝在同一工作帶上。轉角機器人是通過使用絞盤系統(winch system)沿牆角移動，從而移除 20 英寸的牆。ERWS 不需要結合使用其他補充技術，也沒有特殊的法規問題或許可要求。

3.9.6 除污成效

性能和成本數據基於 2000 年 3 月在美國能源部愛達荷州國家實驗室(INL)測試區北部(TAN)進行的 ERWS 展示。展示出除污和去除 TAN-607 牆壁中的塗層和混凝土。在展示中，將 ERWS 機器人的划痕性能與使用磨削技術的商用手持式划痕裝置進行了比較(DOE 2001[34])。

北測試區是由美國空軍和原子能委員會飛機核推進計劃於 1950 年代建立的，旨在支持核動力飛機的研究。這項研究終止後，該地區的設施也進行了改造以支持其他各種 DOE 的研究計畫。The Decon shop operations 開始於 1957 年，並持續了 30 年，對 INL 和非 INL 設施中的工具和小型設備進行了放射性去除。然而，由於商業活動和維護成本的下降，The Decon shop operations 於 1987 年終止。

牆上的測試區是一個 60 平方英尺的格框。ERWS 的安裝花費了三個小時，然後在 36 分鐘內擦洗了 60 平方英尺的格框。這大約比基準技術快五倍，並且 ERWS 的去污深度更深。在地板上未發現任何碎屑，並且空氣採樣器未檢測到任何空氣傳播的污染，因為所有操作都包含在封閉迴路系統中，該系統同時將塗層和混凝土殘留物以及用過的噴發性介質分開。真空裝置入口上的最終過濾器從系統排氣中清除了 99.999% 大於 1 微米的微粒。演示之後，整個 ERWS 系統(包括機器人)均被除污並檢查，沒有放射性污染。

與機器人牆壁粗琢相關的安全問題主要與機器人的電力和摔落危險有關。安全工程師可以輕鬆減輕這些危害。常規上使用 ERWS 相關的風險是被公眾所接受的。En-vac 機器人牆式粗琢是一項成熟的技術，在 INL 演示期間表現良好。操作機器人裝置不需要任何特殊技能。但是，En-vac 系統要求培訓用戶操作設備。根據運營商的說法，該技術比基準技術更容易，且能更快速地完成較大表面積的除污。該系統是用戶友善型的，並且能夠以比基準技術更快的速度去除塗層。但需要注意的是，在緊急電源關閉的情況下，需要錨點(anchor points)來支撐機器人。

3.9.7 成本估算

美國能源部 DOE 在 INL 示範期間對 ERWS 進行了深入的成本分析(DOE 2001[34])。成本分析是基於政府對 ERWS 的所有權以及空氣壓縮機和發電機的租金。ERWS 和基準技術進行了比較，項目包括動員、設置、穿戴/脫下個人防護設備、操作設備以除污牆體、放射學對牆壁進行勘測、復原和處置廢物。ERWS 的使用有基準技術不需要的設置，

例如對地腳螺栓安裝進行工程計算、安裝地腳螺栓、對設備進行操作調整以及在移至其他牆壁時拆除和更換牆壁上的設備。在演示中，ERWS 供應商的工作人員操作了最新的設備，而成本分析假設該設備是由現場人工操作的，並且需要由三名工人組成的工作人員，一名是放射控制技術員，一名是工業衛生員，和一名工作主管。為了消除因需要收集數據和首次在 INL 使用設備而對工作造成的一些人為影響，在進行成本分析之前有些活動持續時間會被調整。例如，設備安裝需要九個小時進行演示，但是在成本分析中使用了兩個小時代表典型的實際工作情況。而機組人員和設備的人工費率基於 INL 現場的收費標準。

整個系統的成本約為 390,000 美元。動員和復原費用分別為 1,313 美元和 1,142 美元。其中在牆壁障礙物區域(obstructed areas of wall)的生產率為 23 平方英尺/小時，在牆壁平坦區域(unobstructed areas of wall)的生產率為 146 平方英尺/小時。

ERWS 的動員和復原費用較高，設備費率也較高。DOE 成本分析假設購買了設備，這大大增加了成本。如果牆壁的平均尺寸相對較小(單個牆壁的平均面積為 60 平方英尺)，這些較高的成本會使此技術在中小型工作中的成本效益降低。但對於具有大面積牆壁的大型工作而言，ERWS 的生產率高得多(大約是原來的五倍)，變得具有成本效益。所以對於牆壁較大的大型工作，此技術的較高生產率可以補償設備成本，並可能比基準技術節省更多成本。

美國能源部基於 15 年使用壽命中的平均採購價得出的 ERWS 的小時費率為 52.74 美元 /小時，將該價格與基準技術的每小時 11.99 美元進行比較成本相對較高。因此 ERWS 成為超過 1,500 平方英尺的牆面的一種經濟高效的替代產品。

3.10 噴砂處理

3.10.1 技術簡介

噴砂處理是藉由氣動加速研磨顆粒並將其投注在表面上，讓這些高速顆粒去除表面的污染物，並調節表面以進行後續的拋光(DOE 1994[4])。典型的應用包括：

- 使表面粗糙以進行熱噴塗(spraying)、噴塗(painting)、鍵結(bonding)或其他塗層操作(other coating operations)
- 去除鐵銹、水垢、沙子或塗漆
- 去除毛刺
- 啞光表面處理
- 表面增強或蝕刻

在表面上噴灑研磨顆粒有助於清潔、除垢、去除毛刺、去除氧化物及其他表面污染物(可能來自金屬、合成材料及磚石的表面)。噴砂處理可用於地板和牆壁等開放性表面，以及用於形狀簡單的表面(例如機械零件)。噴砂處理的效率部分取決於所使用的磨料、運輸磨料所施的力、目標材料以及表面特性(NEA 1999[35])。

目前有許多種研磨材料是可商購的(Best of Blasting[36])。在噴砂處理中，傳統上使用的研磨顆粒是由鐵或氧化鋁所組成的金屬砂，但現在由於矽肺病的原因而很少使用。表 1.1. 19 詳細說明了一些常見研磨材料的化學成分。

表 1.1. 19 研磨材料的化學成分

	砂	恆星 石	石榴 石	黃綠 石	高光 赤鐵 礦	煤渣	銅渣	鎳渣	碎玻 璃	鋼砂	氧化 鋁
二氧化矽	90- 100 %	29%	36- 38%	39- 46%	<1%	45- 51%	45%	37- 51%	72.5 %	0.3- 1.3%	0.5- 1.7%
結晶矽石	49- 96%	<5.0 %	<0.8 %	<0.3 %	<1.0 %	<1.0 %	0.1%	<0.1 %			
氧化鋁		45%	20- 26%	0.2- 2.3%	0.34 %	14- 26%	7.2%	1.5- 6.6%	0.16 %		92- 97%
高光 赤鐵礦		14%	30- 33%	6- 11%	98.18 %	18- 21%	23.3 %	12- 20%	0.2%		0.1- 1.5%
氧化鈣		0.07 %	1.0- 2.0%	0.2- 1.2%	0.06 %	4.3- 8.2%	19.6 %	0.5- 2.5%	9.18 %		0.14- 0.18 %
氧化鎂		0.75 %	1.0- 6.0%	39- 49%	0.05 %	1.0- 2.0%	3.7%	4.7- 33%	3.65 %		
氧化鈦		4.2%	<=2.0 %		0.18 %	<1.3 %					1.6- 4.0%
氧化鉀		0.1%				<1.9 %		<1.3 %	0.12 %		0.05- 0.08 %
氧化鈉		0.18 %				<1.1 %			13.2 %		0.07 %- 0.12 %
氧化錳		0.1%	1.0%			<0.06 %					
鐵										>95.0 %	
碳						<0.4 %				0.7- 1.3%	
錳					0.026 %					0.5- 1.3%	
硫					0.026 %					<0.05 %	
三氧化硫						<0.6 %			0.39 %		
鋇		3.3%	<0.2 %								
氧化鋇			<=1 %								
磷					0.011 %					<0.05 %	
鉻				0.1- 0.4%	0.002 %					<0.2 %	
鎳				0.1- 0.3%	0.009 %					<0.2 %	

放射性 皮克/克						15- 19.8 %					
*矽砂磨料組合物的剩餘部分為水或水分含量及點燃後失去的部分											
**二氧化矽的化學組成包括非晶矽石及結晶矽石											
資料來源：Best of Blasting[36]											

任何含有乾重 2% 以上的結晶二氧化矽組成的物質不能當作研磨材料，包括河沙、海灘沙、白沙、游泳池過濾材料和石英岩產生的灰塵。任何含有超過 0.1% 銻、0.1% 砷、0.1% 鉍、0.1% 鎘、0.5% 鉻、0.5% 鈷、0.1% 鉛、0.5% 鎳或 1.0% 錫的物質也會受到限制。此外也禁止使用放射性物質、帶有可吸入灰塵的回收材料以及任何可能對人體呼吸道造成傷害的物質。表 1.1. 20 詳細介紹了各種研磨材料的形狀、硬度、密度及耐久性。

表 1.1. 20 研磨材料的特性

磨料	形狀	硬度(Mohs)	密度(lbs/ft ³)	使用次數
砂	圓形 不規則	5.0-7.0	100	1
恆星石	圓形 不規則	6.5-7.0	128-148	1* 5**
石榴石	次角形	7.0-8.0	130-147	3-5* 4-10**
橄欖石	角形	6.5-7.0	90-109	1
高光赤鐵礦	半圓形	6.5-7.0	183.5	6-7**
煤渣	角形	6.0-7.0	75-100	1
銅渣	角形	7.0-8.0	110	1* Many**
鎳渣	角形	7.0-8.0	110	1
碎玻璃	角形 不規則	5.5-6.5	75	1
鋼砂	角形	40-70 HRc	260	50-100* 200-1500**
氧化鋁	不規則	9.0	120-131	3-5* 15-20**
*鋼砂、氧化鋁和石榴石更保守估計的使用次數是 50-100、3-5 和 4-10 [Austin 1991 和 Williams1986]				
**噴砂供應商估計鋼砂、氧化鋁和石榴石可重複使用的次數為：1500、20 和 10 次，其次數取決於所用的材料等級。但是供應商列出的次數是考慮使用在理想的環境條件下，例如低濕度等，這種情況通常不會存在。				
資料來源：Best of Blasting[36]				

玻璃砂具有切割或清潔不同表面的能力，故也可作為研磨材料，而且它的處理成本與其他研磨材料相比更低。玻璃砂是一種可回收的玻璃顆粒，是一種無毒和具有惰性的材料，故可減少了呼吸系統和環境問題的可能性。玻璃砂不含氯化物和鹽，可減少表面腐蝕。

合成粗砂也可作為研磨材料。由 Bartlett, Inc. 獲得的 PlasTek 和從 Composition

Materials Co.,Inc.獲得的Plasti-Grit是兩種不同的合成粗砂。Composition Materials Co.,Inc.表示 Plasti-Grit 可安全用於基材、底漆、膠塗和電路板、無毒且對環境安全、不使用化學溶劑、具有一致的比重、持久耐用且可回收(可回收率高達 95%)。Plasti-Grit 具有 5 種硬度類型(3–4Mohs)以及五種標準篩孔尺寸。另外，供應商表示 Plasti-Grit 符合 MIL-P-85891 的要求，並已被美國陸軍、海軍、空軍和美國以外的武裝部隊批准使用。

商業上有許多噴砂系統可用於多種用途，有些系統設計用於噴射器的小零件，而其他系統則設計用於大型物體。PlasTek 系統具有移動式或固定安裝形式，可用於對地板和牆壁進行除污。而在機器人系統中，其中一些機器人系統可用於大型部件，其他則用於清潔房間的表面，包括天花板。

美國能源部 DOE 測試了 the En-vac 機器人牆壁粗琢(DOE 2001[34])。該系統包括 En-vac 機器人、回收系統、過濾器 and 真空裝置。該機器人利用吸力將自己固定在地板，牆壁或天花板上，並藉由電動輪在表面上推進。噴砂室使用的磨粒為鋼砂，透過密封以確保排出的顆粒不會溢出到周圍環境中，在除污後利用真空裝置收集使用過的噴砂和噴砂殘留物，再利用回收系統處理用過的磨料，分離噴砂殘留物，並收集儲存殘留物以備後用。En-vac 系統重 6800 磅，可利用叉車或移動式起重機搬運。它的成本約為\$390,000。

3.10.2 適用污染物質

噴砂處理的目的在於去除表面多餘或污染的材料，例如鐵鏽、油漆、沙子、水垢、混凝土和毛刺。與其他物理除污技術相比，噴砂處理沒有固有的放射性/非放射性物質選擇性。

3.10.3 適用表面材質

噴砂處理可用水泥、混凝土、鋼材及其他金屬和磚石。此技術已成熟使用在商業用途上，且能源部成功將此技術使用在混凝土上。

3.10.4 廢棄物管理

沒有發現明顯的廢棄物管理問題。關於 En-vac 系統的 DOE 測試報告指出，噴砂室外沒有明顯的廢棄物，並且由於所有操作都在閉鎖循環的系統中，該系統同時從乾淨的噴砂介質中分離出廢棄物及使用過的噴砂介質，因此空氣採樣器未檢測到任何空氣污染。然而，此系統仍應建立一個有效收集微粒和灰塵的系統和程序，噴砂設備也應當與帶有 HEPA 過濾通風系統的安全外殼等設備一起使用，以容納和收集廢物，特別是用於處理放射性物質的時候。

3.10.5 操作特性

如上所述，噴砂處理中，研磨顆粒被氣動加速並強行投注在表面，而這些高速的研磨顆粒可用於去除表面上的污染物和不需要的材料或不規則物，並調節表面以用於後續拋光。設備的大小不一，從便攜式的噴射器到可填充整個房間的固定系統。而 En-vac 系統相對較大，不應視為便攜式系統。美國能源部 DOE 測試表明 En-vac 系統具有以下

操作特性：

- 兩名工人、一名設備操作員、一位電工
- 24 小時可運送到現場，3 小時可設置完成
- 配備空氣乾燥器(最大 640scfm 壓縮空氣)
- 需要 440VAC、3 phase、60 Hz、120 kW 峰值的電功率
- 需配備個人防護設備
- 研磨顆粒需可回收，並能減少廢棄物
- 在牆壁、地板或天花板上的管道等周圍的物品，其機動性有限

3.10.6 除污成效

表 1.1. 21 將 En-vac 與被視為基本技術的 Pentek Hand-Held Scabbler 進行比較(DOE 2001[34])。

表 1.1. 21 能源部的性能比較

	Pentek Hand-Held (基本技術)	En-vac Robotic
時間/覆蓋面積	195 分鐘/45 立方英尺	36 分鐘/60 立方英尺
準備時間	2 小時運送 2 小時設置完成	24 小時運送 3 小時設置完成
成效(不包括準備時間)	4.33 分鐘/立方英尺	0.60 分鐘/立方英尺
優點	離物體較近 重量輕 更有流動性 產生較少廢棄物	更快 在混凝土中能更深入噴射 控制廢棄物較佳
資料來源：DOE 2001[34]		

3.10.7 成本估算

成本可能因所用設備的類型而異。En-vac 系統的資本成本約為\$390,000。Pentek 的資本成本為\$32,780。關於操作成本，用於淨化 180 ft² 的牆壁，基本技術成本約為 En-vac 成本的一半。對於工作面積超過 10,000 ft² 且牆壁較大(尺寸為 15ft x 40ft)，En-vac 可以比基本技術節省約 17%。

表 1.1. 22 顯示了 En-vac 和 Pentek 技術的單位成本、固定成本和生產率(DOE 2001[34])。這些費用是基於 180 ft² 的牆壁除污費用，並且是基於個人防護設備、設置輻射控制區、安裝固定錨、操作調整、牆壁表面除污、移除、移動和安裝裝置在下一堵牆、擦拭牆壁和測量牆的平均費用。

表 1.1. 22 能源部的成本及生產速率比較

	En-vac		Pentek	
	成本	生產速率	成本	生產速率
動員	每個 1313 美元		361 美元	

除役除污作業	37.41 美元/平方英尺	受阻區域 23 平方英尺/小時 未受阻區域 146 平方英尺/小時	20.52 美元/平方英尺	受阻區域 15 平方英尺/小時 未受阻區域 45 平方英尺/小時
復原	每個 1142 美元		133 美元	
廢物處理	150 美元/立方英尺		150 美元/立方英尺	
資料來源：DOE 2001[34]				

根據美國能源部 DOE 的分析，En-vac 技術的動員和復原成本較高(與租賃設備的運送有關)，且由於設備速率快而具有較高的成本。如果牆壁的平均尺寸相對較小(單個牆壁的平均面積為 60ft²)，那麼這些較高的成本會使中小尺寸作業的成本效益降低。En-vac 技術由於具有更高的生產率，因此對於較大尺寸的牆壁具有成本效益。在 1,500 ft² 的工作尺寸，且各個牆的尺寸大於 60 ft² 但小於 600 ft² 時，En-vac 和 Pentek 的成本效益大約相等。假設有 10,000 ft² 的大型工作並且由平均尺寸為 600 ft² 的牆組成，En-vac 技術將比基本技術節省了大約\$51,207，或節省\$5.12/ft² 在除污牆壁上。以這種節省率，將需要大約 69,770 ft² 的牆壁去污，以彌補 En-vac 和 Pentek 的設備購買價差(\$390,000 - 基本技術\$32,780 = \$357,220；\$357,220 / 5.12ft² = 69,770ft²)。

成本也可能根據所用的研磨材料類型而有所不同。表 1.1. 23 詳細說明了非回收熔渣及鋼砂的相關成本。該比較是基於使用一半英寸的噴嘴進行噴射，其壓力為 100 psi 和 330 CFM，而 SABAR 是一種便攜式的爆破及回復系統，可用於一般戶外的噴射。

表 1.1. 23 材料效能及成本：非回收熔渣 vs. 鋼砂

	熔渣	鋼砂
消耗速率	1500 lb/h	3500 lb/h
噴射時間	1500 PH*/yr/operator	1500 PH*/yr/operator
每年磨料使用(無回復)	1500 lb/h x 1500 PH/yr + (2000 tons/lb) = 1125 tons/yr	3500 lb/h x 1500 PH/yr + (2000 tons/lb)= 2625 tons/yr
每年磨料使用(使用 SABAR 回復系統)	1125 tons/yr (No recovery)	17.5 tons/yr (No recovery)
每噸磨料成本	\$50/ton	\$450/ton
每年磨料成本	1125 tons x \$50/ton=\$56,250	17.5 tons x \$450/ton=\$7,875
每年使用鋼砂作為磨料可節省的成本： \$56,250 - \$7,875 = \$48,375		
外加\$50/ton 的減少處理及處置成本： 每年可節省\$48,375 + (1125 tons - 17.5 tons) x \$50/ton=\$103,750		
*PH = Person Hours		
資料來源：Best of Blasting2005[36]		

3.11 高壓水噴射

3.11.1 技術簡介

簡單的用水沖洗是放射表面除污的最基本方法，可使易溶污染物被溶解並讓未結合的顆粒被清除帶走。若我們使水壓增加便提高了水流的沖洗作用，就能沖洗掉結合更緊

密或卡在表面的微粒，以及其他表面材料如油漆層和其他碎屑。隨著水壓的增加，去污的能力也增加，到大約 50,000 psi 的壓力可以去除混凝土，若再加入磨料，甚至可以切割金屬。

該技術有多種名稱，取決於所使用的壓力範圍。常用術語包括 water flushing (低壓), hydroblasting, hydraulic blasting, hydrolasing (最高約 15,000 psi), high-pressure water jetting, ultra- high-pressure water jetting, and water jet cutting (最高約 50,000 psi)。選擇的壓力範圍和流速通常針對特定的條件進行改變。例如，金屬表面的腐蝕沉積物可能需要較高的壓力，而從混凝土表面去除油漆就不用。在所有情況下，廢水均被收集並過濾，並再進一步處理可溶物質，或者進行再循環以減少耗水量和總廢物量(DOE 1994[4])。

此技術近幾年的發展歸功於製造業的進步，自 1970 年代初以來，該技術已被廣泛應用於各行各業。現今，用磨料進行高壓水噴射切割是機床行業中發展最快的部分，製造商生產各種各樣的系統、泵、噴嘴、配件和輔助設備。在熟練的技師手中，該技術非常有效。可以去除塗層、沉積物和鍍鋅層，而不損壞底部的基板金屬。典型的去污應用在難以觸及的表面，例如管道內部(Ramachandran 1996[37])、鋼結構工程、單元內部(EC 1994[15])以及過大的表面。這項技術已在英國伯克利發電廠成功使用，並證明是一種有效的方法(McIntyre 1998[38])。該技術的優化包括使用甘油作為加壓介質(Meservey 1994[39])或在水射流中夾帶沙粒，當夾帶砂粒時，其原理與噴砂一樣。

以下為該技術相關資料。更多的資訊在 Boing 1995[11]中。Ampelogova 1982[5]和 Nechaev 1998[18]中描述了歐盟和獨立國協的最新研究和開發，Bond 1996[40]中描述了匈牙利 Paks 核電站使用該技術的經驗。

3.11.2 適用污染物質

與所有物理去污技術一樣，高壓水噴射在去除污染物質方面是非指定的。它將去污表面上的物質以及表面本身，以實現非常好的除污效果。

3.11.3 適用表面材質

高壓水噴射技術可用於混凝土、磚、瓦和金屬等材料，並可在多孔和非多孔表面上正常工作。不建議用於木材，纖維或其他類似物質。該技術經常用於難以接近的表面，可通過使用噴槍或噴嘴，或者通過機器人和遠端操作系統來達成除污。因此只要有辦法接近目標物，就可以用來除污複雜的幾何結構。

3.11.4 廢棄物管理

高壓水噴射產生的主要廢棄物是含有微粒和碎屑的廢水。還會含有表面上存在的可溶性物質以及添加到清潔水中的添加劑，例如砂礫或化學藥品。廢水量可能很大，通常會嘗試淨化和循環利用廢水以減少廢物量。該技術本身產生的廢物沒有特殊處理問題。

3.11.5 操作特性

除污成功需要考慮到許多因素，例如正確調整壓力和流量、使用正確的噴槍頭、添

加研磨劑或其他化學藥品、清潔噴頭配置、控制噴頭到表面的距離以及噴頭在整個表面上的移動速度。這些因素的重要性可能會隨著所使用的壓力範圍和所考慮的污染物而發生顯著變化。例如，當使用清潔劑時，低壓鹼性清潔劑可能最適合油性污染，而高壓酸性清潔劑則最適合污垢污染物沉積。

高壓水噴射無需進行表面預處理。設備的便攜性或移動性、設備的重量、功率要求、安裝要求等，會隨著特定的設備和所選的專用附件而有很大的不同。例如，手持式噴槍是最常用的。表面清潔機則是用於地板和其他寬闊區域，這些開放的水平空間，可以大大提高效率。而專用的管道清潔機則用於管道。

工人需要個人防護設備，並且應確保了解高壓系統的潛在危險。一般的操作經驗顯示，在開始操作之前對每個工作場所進行危害評估可以消除幾乎所有問題。沒有與高壓水清洗相關的特殊法規問題或許可要求，且通常沒有與之結合使用的特殊補充技術。

3.11.6 除污成效

該技術非常有效，能夠去除大部分類型的表面和帶有污染物的污垢。能夠通過完全去除污染物並包含其基底材料層的髒污。混凝土高壓噴水噴射可以每小時約 40 平方碼的速度清除 3/16 英寸至 3/8 英寸之間的面積(DOE 1994[4])。水槍已成功用於幫浦的內部零件、閥門、腔壁、廢燃料槽、反應器容器壁和前端、燃料處理設備、給水噴射器、排水孔、污水坑、管道和儲罐。它也已應用於橋樑，建築物，輪船，有軌電車以及所有機械和加工設備的器具。

該技術尚無法獲得有據可查的性能和可除污性，尤其是與放射性污染清除有關的研究。所需信息包括：

- 來自實際項目的績效評估
- 有關清除效率的信息
- 開始和結束放射性含量或劑量率
- 與其他技術相比，放射性去除率或所覆蓋表面積的比較率
- 去除污染物的深度
- 表面破壞量
- 所需的操作人員數量
- 設置時間
- 能夠清潔角落，管道和其他障礙物的能力
- 使用後對技術設備進行消毒的難易度

還需要以下任何一項：

- NCP 標準的書面申請
- 有關放射性等級或特定放射性核素或有害成分的存在如何影響性能的信息
- 評估將技術應用於小面積與大面積區域對性能或成本的影響
- 描述未來發展的任何技術限制與需求

高壓水噴射系統已被當作基準技術與其他更具創新性的去污方法進行比較。Hot'syâ550B 型高壓水噴射系統是與與凱利去污系統(蒸汽真空清洗)比較的基本技術，並

且已被能源部進行了展示和深入分析(DOE 1999c[41])。兩種技術在俄亥俄州的能源部費納德環境管理項目(Fernald Environmental Management Project, FEMP)現場並列進行了測試驗證。

3.11.7 成本估算

根據美國能源部對高壓水噴射系統作為基礎技術的研究，可獲得以下成本分析資訊(表 1.1. 24；DOE 1999c[41])。

表 1.1. 24 DOE 成本分析的結論

成本動因	Hotsyâ550B 型(基本技術)
項目面積	1150 平方英尺
動員	2,317 美元
除役除污(D&D)作業	0.17 美元/平方英尺 (363 平方英尺/小時)
廢物處理	1.18 美元/平方英尺
復原	100 美元
個人防護設備	0.18 美元/平方英尺
總單位成本	3.63 美元/平方英尺
資料來源：DOE 1999c[41]	

3.12 軟性介質噴砂

3.12.1 技術簡介

軟性介質噴砂是利用軟性介質的動能來研磨表面並吸收污染物。透過壓縮空氣，將軟性介質推向表面，以鬆散、去除和吸收介質基質中的污染物，其中這些基質可回收利用，並會隨著時間而分解。由於介質為軟性，除污表面幾乎沒有反彈的顆粒(DOE 1999b.[48]；圖 1.1. 14)。



圖 1.1. 14 軟性介質噴砂技術示意圖

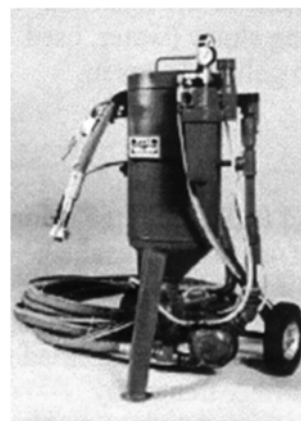


圖 1.1. 15 Sponge-Jet's 海綿噴砂系統

由 Sponge-Jet, Inc. 銷售的 Sponge-Jet's 海綿噴砂系統(Sponge-Jet's Sponge Blasting System)是利用氣動系統，經由軟管和噴嘴，推動從進料單元進來的介質(圖 1.1. 15)。此系統需額外利用空氣壓縮機提供每分鐘 250 立方英尺的清潔乾空氣以及進料單元的 120 psi 管路壓力。壓縮後的空氣藉由兩個裝置流入進料單元：一個是用於攪拌介質以確保其均勻分散的致動器，另一個則是用於限制流入氣流介質量的螺旋鑽。進料單元是便攜式的，並且可以根據用戶要求改變大小。標準軟管直徑為 1 英寸，最長 25 英尺，可通過風投式碳化鎢噴射噴嘴輸送介質氣流，噴嘴的直徑大小可以變化，以適應較大的表面積或難以清潔的較小區域。

有六種不同類型的介質浸有各種磨料(鋼、石榴石、塑料、氧化鋁、Starblast™)，可用於不同類型的表面清潔及除污。此外，可以將震動分類單元及噴砂介質清洗單元加入到該系統中，以回收或清潔用過的介質。震動分類單元是通過一系列篩網，以手動的方式收集用過的介質，將可重複使用的介質循環回系統，並清除較細的介質顆粒和污染物。根據供應商的說法，噴砂循環後大約有 60%至 90%的軟性介質可被重複使用。而噴砂介質清洗單元是在封閉的系統中離心去除舊介質中的油脂、油和材料，在此系統中清洗過的介質必須完全乾燥後才能重新使用。

3.12.2 適用污染物質

軟性介質噴砂可去除油漆、污垢和油污。它已用於清潔電動機和變壓器，並已成功從受污染的表面上去除濃縮鈾。在美國，此技術已應用在核工業上，並特別使用在管道和儲罐的除污。

3.12.3 適用表面材質

軟性介質噴砂已成功應用於混凝土和金屬表面的除污。與其他物理去污技術一樣，沒有固有的放射性/非放射性物質選擇性。

3.12.4 廢棄物管理

使用過的軟性介質會產生由固態基質組成的廢棄物流，這比液態或氣態容易收集，並可將其鏟入塑料袋中。在能源部演示項目(DOE 1999b.[42])中，對材料和表面除污已有充分的展示，可以將除污過的材料和表面處置到現場的處置設施中。此外，由於它是可回收的，因此與其他技術相比，經由除污所產生的廢棄物較少，且由於軟性介質具有吸收性，因此它比其他噴砂技術產生更少的灰塵和受污染的碎屑。

3.12.5 操作特性

軟性噴砂介質具有多達三個製程組件，但僅使用其中的進料單元即可運行。進料單元是一種便攜式裝置，具有可以容納 50 磅重的軟性介質袋，在大約 30 分鐘內以 45 psi 的爆破壓力清空。進料單元具有多種尺寸，可以針對不同需求進行選擇。送料桿上裝有一根噴砂棒，其軟管直徑必須至少為 1 英寸。此外，可以將分類單元和爆炸介質清洗單元添加到系統中，以便在噴砂後回收使用過的介質。

空氣壓縮機是用戶必須提供的附加組件，如上所述，它必須為系統提供 250ft³/min 的清潔乾空氣和進料單元上 120 psi 的管路壓力。在沒有分類單元或噴砂介質清洗單元的情況下，運行的基本系統需要三個人：一個人監視進料單元，第二人處理物料，第三人操作噴砂棒，皆須配備個人防護裝備，包括棉質工作服、頭罩、靴子、橡膠鞋套、帶襯裡的丁腈手套、棉質工作手套及雙重聽力保護。

美國能源部的研究報告(DOE 1999b[42])指出，與其他表面清潔和除污技術相比，軟性介質噴砂系統在操作上有很多優點和缺點。這些優勢包括：

- 此技術不會產生液態廢棄物
- 由於清潔後的調查結果表明輻射強度低於最低可檢測計數率，因此清潔效率得到了提高
- 減少個人防護設備的使用，因為在沒有液態廢棄物的情況下不需要防水衣物
- 省去了運送到檢驗場深埋的過程，從而節省了成本
- 使用靈活，因為例如表面幾何形狀之類的特徵不會帶來任何清潔問題

缺點是：

- 系統運行中的聲音很大，操作人員需佩戴雙重聽力保護裝置，並限制操作人員可以使用該設備的時間
- 爆破過程中空氣傳播的污染增加
- 這項研究同時使用了棕色和綠色介質，其中棕色介質產生了更多的粉塵
- 使用後需對設備進行消毒，因為軟管長度的要求限制下，設備不太可能位於污染區域之外

與其他技術相比，該技術的生產率很難評估，因為其他技術可以清潔表面到目視乾淨，而軟性噴砂介質雖然需要較多的時間，但能清潔並除污 100%的碎片表面。其他注意事項包括：

- 雖然在此演示中未使用噴砂介質清洗單元，但要求清洗後的介質在使用前必須完全乾燥
- 待除污區域中的任何濕度都可能導致系統被潮濕的介質堵塞
- 重複循環噴砂介質時，進料單元和分類單元都需被徹底消毒

值得注意的是，sponge-Jet 介質會像橡皮球一樣彈跳，故如果在爆炸現場沒有得到適當的管理，即使它們通常比典型的沙粒具有較少的空氣傳播，仍有可能會因此傳播污染物。

3.12.6 除污成效

美國能源部(DOE 1999b[42])測試及分析了軟性介質噴砂，並將其與視為基本技術的 Hotsy® Model 550B 型高壓水清洗系統進行了比較。在此演示中，未測試噴砂介質清洗單元和分類單元。兩種技術在美國能源部位於俄亥俄州費納德的費納德環境管理項目(FEMP)現場進行了並行演示。

與 Hotsy® Model 550B 基本技術相比，軟性介質噴砂應演示出：

- 提高生產率
- 減少液體廢物的產生
- 改善除污效果
- 減少個人防護裝備的要求
- 減少所需的勞動時間
- 減少運送放射性污染物料至內華達州檢驗場深埋的過程
- 減少空氣傳播污染

評估軟性介質噴砂的最重要因素是在於放射消毒中的有效性，讓較少的材料需運到檢驗廠進行處置，以節省總體成本。然而值得注意的是，執行完除污後將其與基本技術進行比較，其生產率較低且工時增加。

在美國能源部 DOE 研究文件(DOE 1999b[42])中，提供了大量的使用性能和成本數據，這些數據僅供參考，應與製造商聯繫以獲取有關該技術性能的特定資訊。下表 1.1.25 提供軟性介質噴砂的總體性能評估。

表 1.1.25 軟性介質噴砂系統的性能評估

項目	評估
生產率	平均 92 平方英尺/小時
工作時間	由於生產率降低而高於基本技術，但是需要注意的是，噴砂介質已除污並清潔的同時，基本技術只完成清潔但尚未除污。需要一名額外的工作人員。
用水量	無
清潔有效性	有效清潔和除污 100%的表面
個人防護配備使用	所需損耗低於基本技術，因為不需要防水配備，但需要配置雙重聽力保護
二次廢棄物	低於基本技術，因為噴射介質裝置可被完全除污，並無任何液態廢棄物產生，其固態基質也容易處置
運輸至檢驗場深埋	不需要，因為可將經過除污處理的儲存罐存放在現場的處置設施
空氣傳播污染	高於基本技術，但與現場操作的其他技術相比，其污染程度相近
資料來源：DOE 1999b [42]	

3.12.7 成本估算

能源部的研究報告(DOE 1999b [42])在 FEMP 演示中對軟性介質噴砂進行了廣泛的成本分析，有關成本的資訊和演示數據也收錄在軟性介質噴砂的技術報告(FEMP, 1997)中。不過該研究的分析有限，因為僅使用了在演示過程中觀察到的數據，並已消除或調整了一些觀察到的成本使估算更切合實際。

在測試驗證之前確定了以下成本要素，並以這些因素收集數據以提供成本分析：

- 動員(包括將設備運至示範地點的費用和必要的培訓)
- 除役除污(D&D)作業(包括人力成本、設備的水電消耗和用於清洗碎屑的設備等項目)
- 廢棄物處理
- 復原(包括撤離臨時工作區和公用設施、對設備進行消毒以及從現場撤離)

- 個人防護裝備(包括洗衣服成本和一次性物品的更換成本，考慮每個值班人員及機組人員需更換四次衣物)

該研究提供了使用方法和假設的完整細節。重點是設備成本是基於擁有成本的，且每小時的設備費率是使用標準的美國陸軍工程兵團方法計算的，而固定成本要素(與除役除污作業無關的要素，例如動員)以總價計算。可變成本要素(即取決於除役除污作業的要素，例如人力成本)被計算為除役除污作業每單位的成本。表 1.1.26 和表 1.1.27 提供了成本分析結果。

表 1.1.26 能源部成本比較

項目	Hotsy® Model 550B(基本技術)	軟性介質噴砂
動員	1,206 美元	9,034 美元
除役除污(D&D)作業	0.17 美元/平方英尺 (363 平方英尺/小時)	4.19 美元/平方英尺 (92 平方英尺/小時)
廢棄物管理	1.18 美元/平方英尺	0.25 美元/平方英尺
復原	100 美元	3,300 美元
個人防護配備(PPE)	0.18 美元/平方英尺	0.16 美元/平方英尺
資料來源：DOE 1999b [42]		

表 1.1.27 與富有鈾元素材料的處置的成本比較

項目	內華達檢驗場處置(基本技術)	軟性介質噴砂
動員	9,034 美元	0
除役除污(D&D)作業	4.19 美元/平方英尺 (92 平方英尺/小時)	0
廢棄物管理	0.25 美元/平方英尺	18.08 美元/平方英尺
復原	3,300 美元	0
個人防護配備(PPE)	0.16 美元/平方英尺	0
資料來源：DOE 1999b [42]		

3.13 蒸汽真空清潔

3.13.1 技術簡介

蒸汽真空清潔與高壓水噴射系統(HPWC)的相似之處，在於它一樣使用了流體的動能以機械方式從表面清除污染物。除了流體直接撞擊表面所產生的動能外，也將過熱水閃蒸成水蒸汽，進而幫助除污(DOE 1999c[41])。Container Products Corporation 銷售的凱利除污系統(The Kelly Decontamination System)(圖 1.1.16)使用了高溫(250°F至 300°F)且加壓(350 psi)的水流以除污表面，並使用真空回收子系統收集在除污過程中產生的廢棄物流。過熱水流藉由手持式噴霧棒或由一連串的蒸汽/真空清潔頭噴嘴所組成的噴霧器輸送到地面。這些清潔頭的組成包括 10 英寸旋轉地板工具、9 英寸手持式牆壁工具、6 英寸手持天花板工具，以及 18 英寸或 36 英寸的噴霧棒。過熱的水流在撞擊目標表面時會閃蒸成蒸汽，並帶走污染物。蒸汽/真空清潔頭捕獲並收集排出的污染物、蒸汽和水滴。

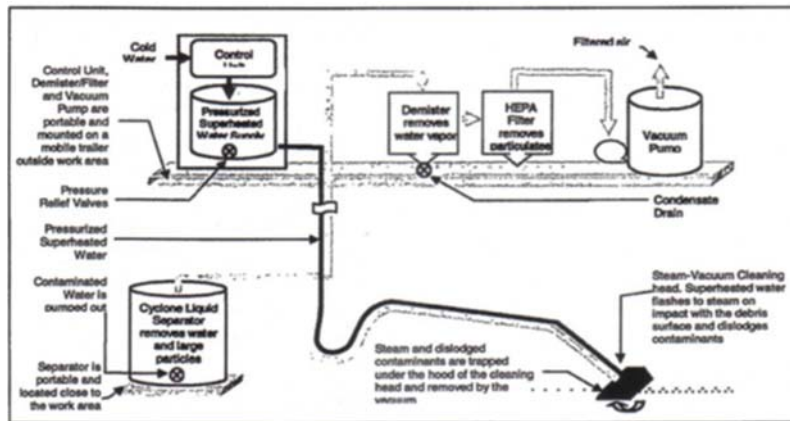


圖 1.1. 16 凱利除污系統

而廢棄物流通過一個由液體分離器、除霧器和高效微粒空氣過濾器(HEPA)所組成的真空回收子系統。其中，過濾器可去除污染物並將乾淨的空氣排放到大氣層。可以將洗滌劑加入加壓水流中以提高洗滌效果。

蒸氣真空清潔主控制台和過熱水供應裝置集中在一個單元內，且藉由固態的數字儀表板設置及監控諸如水流量、壓力和溫度等參數。過熱的加壓清潔流通過 300 英尺長的高壓軟管輸送到系統的清潔工具(噴霧棒或蒸汽/真空清潔頭)。過熱的水流在與表面碰撞時會閃蒸成蒸汽，並清除污染物。此系統可以作為 HPWC 系統獨立運行，也可以結合使用包括真空回收子系統的其他單元。其真空裝置通過旋風分離器將洗滌過程中排出的廢物流和碎屑吸走，該分離器將大碎屑收集在不銹鋼篩中，並從空氣/水/碎屑流中提取水滴，再利用蠕動泵週期性地將來自分離器的提取的廢液送到廢液池。廢氣流從旋風分離器抽到除霧器/ HEPA 過濾器單元，而排出氣流中的水蒸汽冷凝並收集在除霧器中的儲液器中，並由該儲液器定期排入廢液池。之後，除霧器的廢氣流會通過高效微粒空氣(HEPA)過濾器，而由 HEPA 過濾器單元所組成的「袋進袋出手套箱系統(bag-in/bag-out glove-box)」組件，可將用過的過濾器直接移入可密封的處理袋中，而無需暴露於大氣中。最後，經過清潔的乾燥空氣通過液環真空泵吸入並排到大氣中。

3.13.2 適用污染物質

該技術針對表面污染物和微粒。使用清潔劑可以收集油脂。與其他物理去污技術一樣，沒有固有的放射性/非放射性物質選擇性。

3.13.3 適用表面材質

凱利除污系統(DOE 1999c.[41])的目的在於徹底除污核能設施中的一般區域，包括金屬，混凝土和類似表面。它已在商業核能部門中得到廣泛使用，主要用於除污房間、水池壁、大型組件以及其他大型和/或光滑表面(如牆壁和地板)。

該系統的蒸汽/真空清潔頭不適用於清潔形狀不規則的物體，它們更適合除污大型的平坦表面。噴霧棒在不光滑的表面上操作性雖然較佳，但使用上卻失去了原先凱利除污系統所提供的主要優點：它能夠同時收集和容納被清除的污染物，從而減少空氣傳播的污染和對工人的風險。

3.13.4 廢棄物管理

凱利除污系統產生的主要廢棄物是被污染的液態廢棄物流。系統會自動將其分為兩個部分：收集的液態廢棄物和使用過的 HEPA 過濾器。這些廢棄物的後續處理和處置將取決於除污操作的具體情況。當具有遮罩的蒸汽/真空清潔頭用於光滑平坦的表面時，其空氣傳播污染的排放量實際上為零。在能源部演示中(DOE 1999c[41])，凱利除污系統所產生的二次廢棄物相較使用高壓水系統的基本技術來得少。其他廢物流則是指操作員使用過的個人防護設備及使用過的真空軟管。

3.13.5 操作特性

凱利除污系統是由四個獨立的單元組成(每個單元皆配有輪子以方便攜帶)：

- 控制台(高度 x 深度 x 寬度(英寸)= 44 x 30 x 46；重量= 950 磅；電源要求 480 V、60 A、3 相)
- 旋風分離器(45 x 28 x 25； 175 磅； 110 V、6 A、單相)
- 除霧器/過濾器(45 x 29 x 36； 375 磅)
- 真空裝置(42 x 21 x 55； 600 磅； 480 V，15 A，三相)

在 40 psi 下的最低供水量為 3 加侖/分鐘，並可在 250 psi(最大)和 300°F(最大)下提供水流量 0.4–2.0 加侖/分鐘的用水。基本系統需要兩個人進行操作，一個人使用蒸汽/收集頭，而另一個人操作控制台。使用蒸汽/真空頭時，個人防護裝備需要配備棉質工作服、兜帽、靴子，橡膠鞋套(兩對)，半透性的 Tyvek® 衣服和丁腈手套(兩副)。

美國能源部 DOE 研究報告(DOE 1999c[41])指出凱利淨化系統，具有以下優勢：

- 此系統易於學習和使用
- 可簡單、直接、快捷地設置系統
- 噴霧棒的操作與高壓水清洗系統非常相似，並且操作員能夠以正常直立的方式工作
- 蒸汽/真空清潔頭易於更換，因為軟管只能以一種方式連接，從而簡化設置並最大程度地減少錯誤
- 設備在維護的觀點上設計合理
- 由於使用過熱的水，被清洗的表面可迅速變乾

缺點包括：

- 蒸汽/真空清潔頭不適用於清潔縫隙、角落、不規則的表面和焊縫
- 蒸汽回收真空軟管會不停發熱，使工人容易不適，並有燒傷皮膚的危險
- 清潔工具無法清除表面上的油脂
- 真空軟管時常擋住工人，容易造成絆倒危險，並造成工作上的阻礙
- 使用凱利除污系統的蒸汽/真空附件時，工人必須彎腰，而隨著時間流逝會導致疲勞、不適和生產率下降
- 使用清潔工具的操作員與主控制台的操作員之間難以通訊，因為它們之間的距離通常長達 300 英尺

其他操作限制包括：

- 凱利除污系統最適合清潔大型平面
- 凱利除污系統需要兩個獨立的電源：20A、單相、110VAC、60Hz 和 100A、三相、480VAC、60Hz，這些設備在偏遠地區或已停用的公用設施中可能無法輕易獲得
- 如果選擇了凱利除污系統進行碎屑清洗，最好往後將此系統只使用於碎屑清洗，為真空和高壓軟管安裝高架支撐，從而消除絆倒的危險和高壓軟管所造成的工作障礙
- 可使用免提式的雙向通信設備，解決在主控制台的操作員及使用清潔工具的操作員之間的通訊問題。此方式已被驗證可行。

3.13.6 除污成效

能源部(DOE 1999c[41])將凱利除污系統與被視為基本技術的 Hotsy® Model 550B 的高壓水清洗系統進行比較。兩種技術都是在位於俄亥俄州的能源部費納德環境管理項目(FEMP)中並排演示。

與基準技術 Hotsy® Model 550B 相比，凱利除污系統應演示出：

- 提高生產力
- 減少工作時間
- 減少產生的廢液量(即降低用水量)
- 提高洗滌效率
- 減少個人防護裝備的要求
- 減少二次廢棄物
- 減少了運送至檢驗場深埋的過程
- 減少空氣污染

進行比較時，主要的考慮因素為其阻止廢棄物傳播的能力，比較是否可顯著減少空氣傳播污染，降低工人的風險，並減少二次廢棄物流的後續處理和處置。凱利除污系統的蒸汽/真空清潔頭並不是設計用於清潔不規則形狀的物體，然而在能源部的演示中，這些物體卻佔了建築碎屑和拆卸的設備很大一部份，因此需要更多的操作時間在角落、接縫、焊縫和其他障礙物。更長的操作時間，使得就單位面積成本而言，凱利除污系統的生產率較低。

美國能源部 DOE 的研究報告提供了此文件中所使用的成效及成本數據，但必須了解該數據來自於此技術未達設計目的的情況。因此，該數據僅供參考，應與製造商聯繫以獲取該技術使用在光滑平坦的表面上的相關資訊。

該技術雖然在演示中所存在缺陷，但或許在設計條件下使用時會變成優點。例如，該系統專為徹底清潔和除污所設計。蒸汽/真空清潔頭的操作方式類似於真空吸塵器，具有往復運動和重疊的路線，多次清潔了同一表面，且由於系統使用的蒸汽會導致表面迅速變乾，操作員無法確定哪些區域是否已經清洗過，因此某些區域可能已被多次清洗，甚至完全超出清潔標準的要求。表 1.1. 28 提供了凱利除污系統(DOE 1999c[41])的總體性

能結果。

表 1.1. 28 凱利除污系統的性能結果

項目	評估
生產率	平均 2.42 平方英尺/分鐘
工作時間	由於生產率較低而高於基本技術。需要一名額外的操作人員。
用水量	平均 0.37 加侖/平方英尺
清潔有效性	無法有效清潔表面上的油脂
個人防護配備使用	高於基本技術。雖然此技術的個人配備需求較少，但由於較高的工作時間及額外的操作人員，整體的各刃配備使用量較高。
二次廢棄物	低於基本技術，僅有使用過的真空軟管和 HEPA 過濾器。
運送至檢驗場深埋	不需要
空氣傳播污染	低於基本技術，使用蒸汽/真空清潔頭時大部分即被清除。
資料來源：DOE 1999b [42]	

測試驗證中顯示了一些待未來的技術開發來解決的需求，包括：

- 需在真空軟管周圍使用絕緣套，減少手把過熱給予操作員的不適，且絕緣套也能減少真空軟管燒傷操作員的風險，且需盡可能地減少手部保護裝備的限制性，進而提高生產率
- 使用更符合人體工學的設計，最大限度地減少需腰部彎曲的操作需求，減少工人的疲勞和不適，進而提高生產率。
- 增加洗滌水流的壓力，使沒有使用清潔劑下仍可去除表面油脂，進而提高生產率及有效性

3.13.7 成本估算

美國能源部(DOE 1999c[41])對於凱利除污系統在 FEMP 的演示中，用於清洗碎屑的演示進行了成本分析。此外，還包含在 FEMP,1997 的報告中有關蒸汽真空清潔的其他成本資訊及演示數據。該分析的呈現有限，因為它僅使用了在演示過程中所觀察到數據，並且一些觀察到的成本已被消除或調整，使得整體的估算更切合實際。

在測試驗證之前確定了以下的成本要素，並收集了基於以下項目的數據以提供成本分析：

- 動員(包括將設備運輸到演示地點的費用和必要的訓練)
- 除役除污作業(包括人力成本、消耗品、和用於清洗碎屑的設備等項目)
- 廢棄物處理
- 復原(包括撤離臨時工作區、設備的除污以及從現場撤離)
- 個人防護配備

該研究提供了使用方法和假設的完整細節。重點是設備成本是基於擁有成本的，且每小時的設備費率是使用標準的美國陸軍工程兵團方法計算的，而固定成本要素(即與除役除污作業無關的要素，例如動員)以總價計算。可變成本要素(即取決於除役除污作業的要素，例如人力成本)被計算為執行的每單位除役除污作業成本。表 1.1. 29 提供了

成本分析的結果。

表 1.1. 29 能源部的成本分析

項目	Hotsy® Model 550B(基本技術)	軟性介質噴砂
動員	2,317 美元	3,688 美元
除役除污(D&D)作業	0.17 美元/平方英尺 (363 平方英尺/小時)	0.5 美元/平方英尺 (145 平方英尺/小時)
廢棄物管理	1.18 美元/平方英尺	1.18 美元/平方英尺
復原	100 美元	3,207 美元
個人防護配備(PPE)	0.18 美元/平方英尺	0.21 美元/平方英尺
資料來源：DOE 1999c[41]		

3.14 活塞粗琢

3.14.1 技術簡介

活塞粗琢設計用於除污混凝土地板和樓板，它不會產生大量的空氣污染。在一般的機械刮除中，地板會因連接到活塞而破裂。進行操作時，將粉狀混凝土抽吸起，並將廢料存儲在鐵桶中以備之後使用。

目前有很多種類型的粗琢，美國能源部 DOE 在“遠端粗琢”的創新技術摘要報告中 (DOE 1998f [43])對該技術進行了測試並報告了其性能。報告的基準技術是一種手動的地板/甲板式除銹器，適用於除污有厚塗層和大面積的混凝土地板。它具有 11 個 1 英寸直徑的活塞，以每個活塞每分鐘 2,300 次的速度撞擊地板。周圍有鋁製圍帶圍繞著活塞以捕獲大塊碎片。該基準粗琢沒有附帶真空系統，因此未使用集塵/真空系統。而是採用圍堵系統(例如塑料帳篷)豎立在要除污的區域上，以最大程度地減少空氣中灰塵和污染物的潛在釋放。

美國能源部將該基準技術與遠端粗琢進行了比較。遠端操作的 Pentek,Inc.Moose®使用具有三個集成子系統的單樓層地板划痕技術，分別為除銹器前端組件、機載高效微粒空氣(HEPA)真空系統和六輪底盤(圖 1.1. 17)。Moose®的遠端操作是通過安裝在主機上的小型控制面板進行的，並用最長 300 英尺長的繩索相互連接。除銹器前端(圖 1.1. 18；圖 1.1. 19)用七個直徑 2 英寸、上面有九個碳化鎢尖端對表面進行來回的刮除作業，用每分鐘 1,200 錘將表面粉碎。正過濾 HEPA 真空系統會捕捉灰塵和碎屑，並將廢物直接沉積到機載 23 加侖的廢料桶中。六輪底盤具有獨立的防滑轉向系統，使 Moose®可以任意旋轉 360 度。



圖 1.1. 17Pentek Remote Scabblers



圖 1.1. 18 Remote Scabblers Head



圖 1.1. 19 Piston head with bits for scabblers

3.14.2 適用污染物質

活塞粗琢是一種有效的去污技術，適用於表面污染物，油漆和塗料。與其他物理去污技術一樣，它並非專門用於放射性材料。

3.14.3 適用表面材質

活塞粗琢可用於除污混凝土地板和混凝土平板，也可用於拆除混凝土和其他石砌材料。

3.14.4 廢棄物管理

真空過濾系統的存在大大減少了粉塵污染的問題，並且由於該系統在沒有液體的情況下運行，因此產生的廢棄物極少。造成廢棄物的其他原因包括個人防護設備，真空軟管的塑料包裝和套管，以及如果使用真空吸塵器所收集的混凝土粉塵。

3.14.5 操作特性

根據設計的配置，操作特性可能有所不同。如前面所述，典型的地板/甲板式除銹器是具有多個以高速率撞擊地板的活塞所組成的。除銹器頭部設計有鋁製圍帶圍繞著活塞以捕獲大塊碎片，並存在遠端操作系統。

Moose®的操作參數如下：

尺寸(長 x 寬 x 高)	66 英寸 x 29 英寸 x 74 英寸
重量	1,650 磅
馬達	雙 90 伏直流驅動馬達
切割寬度	14 英寸
供應商提供之生產率	250 至 450 平方英尺/小時在 1/16 英寸表面移除時
供應商額定真空流量	每分鐘 280 立方英尺(cfm)
主要濾芯	三個組件
二級 HEPA 過濾器	三個圓形組件(在 0.3 微米處的效率為 99.97%)

標準廢料桶	23 美製加侖
其他設備	375 CFM 空氣壓縮機
電源要求	110 VAC, 15A, 單相電源

3.14.6 除污成效

在 Argonne 美國國家實驗室(ANL)東部的 Chicago Pile-5(CP-5)研究室(DOE 1998f [43])進行的的大規模展示項目(LSDP)中，評估了基準技術機械粗琢和 Pentek, Inc.的遠端粗琢 Moose®。技術評估為清除 CP-5 Research Reactor 服務樓層上 620 平方英尺的地板。評估期(1997 年 8 月 25 日至 29 日)包括該技術的動員、展示和復原。且在演示前後立即進行放射性調查。這些調查的目的是為了確定通過遠端粗琢系統是否能完成清除多達 1/4 英寸的混凝土和塗料。

基準技術未與最新技術同時展示。基準技術數據來自在與遙控粗琢展示類似的條件下進行的實際除污活動。勞動力，設備，生產率和生產率損失係數(PLF)由 ANL 的現場人員或在其他地方進行的類似工作的人員所提供。基準技術資訊可參考以下：

- 現有的 CP-5 預算或計劃檔案
- ANL 的以往經驗，以及
- ANL 研發人員的豐富經驗和判斷

表 3.14.1(DOE 1998f [43])中總結了這兩種技術的性能。

遠端操作粗琢具有以下性能特徵：

- 通過車載真空系統同時收集灰塵和碎屑，這大大減少了 D&D 過程中產生的空氣傳播的灰塵量
- 遠端操作，使操作員可以距離設備 50 到 300 英尺
- 兩個人的工作組以平均 130 平方英尺/小時的速度從 620 平方英尺的地板上去除 1/8 英寸的混凝土
- 可從地板-牆壁接口的 7-8 英寸範圍內清除塗層
- 具有出色的機動性，只有 26 英寸的寬度且擁有任意轉動的能力
- 遠端操作消除了設備的手臂/手部振動，從而提高了工人的舒適度，減少了疲勞並提高了安全性

Moose®的缺點是只能容納 23 加侖的廢料桶。在經過 45 分鐘的除污之後桶子就會裝滿，因此需要兩個人穿戴個人防護裝備，進入該區域並更換廢料桶。雖然僅需一個人就能完成 5 分鐘的桶更換工作，但第二個人需要幫助將沉重的(超過 200 磅)的廢料桶降低到地板上。Moose®從地板上去除混凝土將演示中的污染水平從最大 105,000 dpm / 100 cm² 的總 beta / gamma 固定污染降低到新的最大 3500 dpm / 100 cm² 的污染水平，使污染達到或低於規定水準。展示後在設備上發現污染物位於移動組件上。

表 1.1. 30 活塞粗琢技術性能

規範項目	遠端遙控粗琢	手動機械粗琢
適用表面	從地板上清除 1/8 英寸混凝土	從地板上清除 1/4 英寸混凝土
生產率(僅去除)	兩人乘員時 130 平方英尺/小時	兩人乘員時 200 平方英尺/小時
主要廢物的數量和類型	37 立方英尺的粉末、小塊碎屑與混凝土的混合物	24 立方英尺的粉末、大塊油漆碎片與混凝土的混合物
產生的二次廢物的類型	粗濾器：三個組件 HEPA 過濾器：三個組件 真空軟管：4 英尺長	帳篷外殼材料，磨損的活塞和粗琢
設備產生的空中放射性	所有機載放射性測量值均在或低於背景水平	由於該技術未連接至真空系統，因此產生的碎片最多有 10% 會散播到空氣中
噪音程度	106 分貝，需要聽力保護	84 分貝(供應商提供，未測量)
靠近地板與牆壁夾腳的能力	不超過 7-8 英寸； 圓形牆周圍 14-16 英寸	不超過 1 英寸
發展狀況	有市售	有市售並提供兼容的真空系統
使用條件	培訓：提供服務。 操作員可以位於污染區域之外。	所需培訓：每人 2 個小時。中度到重度振動會導致操作員疲勞
完成條件	混凝土表面略粗糙但均勻	去除油漆塗層，留下粗糙，裸露的混凝土表面
工人安全	軟管引起的絆倒危險	飛揚的混凝土可能會危害眼睛
資料來源：DOE 1998f[43]		

3.14.7 成本估算

能源部的研究(DOE 1998f[43])在 LSDP 展示中提供了對活塞粗琢混凝土表面去污的廣泛成本分析。該研究表示，分析只是此技術的有限代表。

演示期間收集的成本數據包括：

- 活動持續時間
- 工作人員組成
- 用於執行工作步驟的設備和耗材
- 易損件的替換頻率和成本
- 性能消耗

在分析中，使用了 ANL 為估算 D&D 工作而建立的標準勞工費率，以分析當地手動技術所完成的部分工作。現場擁有設備的成本基於政府所有權的每小時費率，該費率是使用管理和預算辦公室(OMB)第 A-94 號通知計算的。在此分析中，將使用供應商成本的報價費率來執行工作，並包括供應商的管理費用、間接費用和加價成本。此外，ANL 將 9.3% 的採購成本添加到供應商費用中。該分析使用 8 小時工作日和 5 天工作週。成本分析中使用的生產率和觀察到的工期不包括“非生產性”項目，例如工間休息，靈活性下降(由於笨重的個人防護設備)和過熱疲勞。這些“非生產性”項目在分析中通過生產率損失因子(PLF)來說明。PLF 是對工人在非生產性活動上花費的工作日比例的並基於以往經驗估計。美國能源部(DOE 1998f[43])進行的成本分析總結於下面的

表 1.1. 31 和表 1.1. 32。

表 1.1. 31 PentekMoose®的設備成本

購置權	物品	成本
設備採購	Pentek Moose®	165,000 美元
供應商提供服務	每日費用，包括兩名受過培訓的操作員，Moose®遠端粗琢和軟管，交通以及差旅和生活費	1,995 美元
	每週費用，其中包括上面列出的每日費用，但以每週 40 小時工作制為基礎	8,125 美元
	加班費用	每小時\$270/小時 (超過 8 小時)
	更換零件(包括 HEPA 過濾器，粗濾器，更換軟管和磨損的除銹器)	一次統一費用為 2,400 美元，每個 23 加侖垃圾桶為 68.9 美元
設備租賃	Pentek 僅針對設備沒有確定的租金。	
資料來源： DOE 1998f [43]		

表 1.1. 32 單位成本和生產率摘要(樓面 620 平方英尺)

遙控遠端粗琢			基準技術		
成本要素	單位成本*	生產速率	成本要素	單位成本*	生產速率
在工作區設置設備	618.00 美元/每單位	2.5 小時/每單位	在工作區設置一個收納帳	3.11 美元/平方英尺	4.8 平方英尺/分鐘
使用 Moose®去除混凝土	6.68 美元/平方英尺	130 平方英尺/小時，用於 1/8 英寸的混凝土清除	將設備移至工作區並進行設置	211 美元/每單位	2 小時/每單位
			去除混凝土	1.85 美元/平方英尺	200 平方英尺/小時，用於 1/4 英寸的混凝土清除
			拆除臨時收納帳	0.8 美元/平方英尺	4.8 平方英尺/分鐘
資料來源： DOE 1998f [43]					
*去除混凝土的單位成本包括實際去除混凝土，更換廢料桶以及相關費用。但它不包括廢物處理費用，因為這些費用專門針對 ANL，並且兩種技術的費率均相同。單位成本還不包括安裝設備，技術人員費用，PPE，與生產力損失相關的成本或供應商服務獲取成本					

(對於 ANL，這是供應商產生的成本的 9.3%)。單位成本的計算方法是將相關成本相加，然後除以混凝土清除面積(約 620 平方英尺)。

美國能源部 DOE 進行的成本分析表明，使用 Moose®除污大於 2100 平方英尺的地板面積應比基準技術節省成本。

3.15 物理除污技術市售可獲性彙整

表 1.1. 33 摘要整理 3.1 至 3.14 節所介紹之 14 種主要的物理除污技術的市售來源。

表 1.1. 33 各項物理除污技術的市售來源摘要

除污技術	技術發展機構或設備商資訊
可剝塗層	- Stripcoat TLC Free : Bartlett Services, China (http : //www.numanco.com/) - ALARA™ 1146 : (1)Williams Power Company, U.S. (http : //www.williams.com/) (2)NLB Corporation, U.S. (3)Nilfisk-Advance America, U.S.
離心噴砂	Concrete Cleaning, Inc., U.S.
混凝土研磨機	- CS Unitec, U.S. (http : //www.csunitec.com/) - Andrews Machinery Construction, U.S.
混凝土刨除機	- The Marcrist Industries, United Kingdom - Kirk Sandall Industrial Estate, United Kingdom
混凝土剝落機	Pacific Northwest National Laboratory, U.S.
乾冰噴砂	- CryoGenesis, United Kingdom (http : //www.cryogenesis.com) - Cold Jet, LLC, U.S. (https : //www.coldjet.com)
乾式真空吸塵	- EQ Northeast Inc., U.S. (http : //www.eqonline.com) - Pentek, Inc., U.S. (https : //www.pentekusa.com) - Ion Technology, U.S.

(四)化學與物理除污技術摘要比較

表 1.1. 34 摘要比較 2.1 至 2.5 節所介紹之 5 種主要化學除污技術的優缺點、應用時之特殊考量與除污表現評估[1]。

表 1.1. 34 主要化學除污技術之特性與除污表現比較[1]

除污技術	優點	限制	特殊考量	除污表現品質	成本
螯合劑與有機酸	- 易於修改成分以除污大多數金屬離子 - 有較高的安全性	需要有較高的化學專業知識以達到最佳效果	- 因污染物的可溶解性因而需特別謹慎處理廢液 - 除污後有高移動性之污染物可能造成危害	較差 (poor)	10.76 美元/平方公尺
強無機酸	- 可去除附著性強的污染物 - 工業界已累積豐富的操作經驗	- 需極為注意操作安全 - 可能會破壞底層金屬	主要用於金屬腐蝕/銹蝕產物之除污	較差 (poor)	21.53 美元/平方公尺
化學泡沫與凝膠	- 增加附著操作時間可提升除污成效 - 可用以除污較隱匿的區域	可能須施作數次除污程序以達到最好的效果	沖洗時需注意避免泡沫飛濺至周遭區域	可 (adequate)	21.53 美元/平方公尺
氧化與還原劑	可裂解基質並有效去除微量的污染物	- 須依特定情境使用 - 若無適合的氧化還原化學作用則無效	常為多道複合除污程序中的其中之一步驟使用	可 (adequate)	21.53 美元/平方公尺
TechXtract	- 有很高的操作彈性 - 易於修改成分以除污特定的污染物	適用於批量除污小型物件或較小的區域面積	須依污染物與底層材料對除污劑成份做最佳化調配	好 (good)	2.13 美元/公斤

表 1.1. 35 摘要比較 3.1 至 3.14 節所介紹之 14 種主要物理除污技術的優缺點、應用時之特殊考量與除污表現評估[1]。

表 1.1. 35 主要物理除污技術之特性與除污表現比較[1]

除污技術	優點	限制	特殊考量	除污表現品質	成本
可剝塗層	- 產生單一固態廢物 - 無空氣污染 - 無二次廢液	以成本角度，可能較適合小型除污	僅適用於易清除(可塗抹的)之污染物	好 (good)	52.20 美元/平方公尺

離心噴砂	有效去除混凝土表面的油漆和輕質塗層(牆壁-地板界面外之開放區域)	- 逸出噴砂對工作人員可能構成危險 - 可能需要空氣壓縮機、集塵系統、空氣過濾系統、堆高機和發電機	可能受大尺寸限制，無法至角落	好 (good)	368.66 美元/平方公尺
混凝土研磨機	- 快速、可移動 - 振動少	效能受小尺寸限制	通常適合和其他技術合併使用	好 (good)	31.43 美元/平方公尺
混凝土刨除機	- 適用大面積、平坦、開放之混凝土地板及平板 - 快速有效	- 無法輕易越過障礙物 - 僅適用於混凝土地板及樓板	手持式粗琢的有利替代品	好 (good)	14.21 美元/平方公尺
混凝土剝落機	- 適用於深度污染 - 快速	- 需要預先鑽孔 - 留下粗糙、不均勻表面	市售可獲性低(Pacific Northwest National Laboratory 設計專利)	好 (good)	199.35 美元/平方公尺
乾冰噴砂	- 二氧化碳氣體產生很少額外廢物 - 非常適合表面污染	無法去除嵌入表面基質更深的污染物	需要支援系統：空氣壓縮器、乾燥機和過濾器。	可 (adequate)	無可靠的成本資訊
乾式真空吸塵	- 隨時可用 - 與其他物理除污技術配合效果好	僅適用於鬆散顆粒	通常和其他除污技術合併使用	可 (adequate)	21.53 美元/平方公尺

電動液壓粗琢	• 相較其他使用水的技術，產生的二次廢物更少 • 效率佳 • 可去除深層污染	• 需要熟練的操作員 • 會產生二次廢液	• 適合用在水平表面	差 (poor)	107.64 美元/平方公尺
En-vac 機器人牆壁粗琢	• 在開放空間(包括牆壁和天花板)上有很好的使用效果 • 可遠程操作及使用真空系統，以防止工人暴露在污染物	• 需要額外的附件以解決不規則表面、障礙物和狹窄的地方(例如牆頂和牆面的接口)	• 工人可利用遠程操作，對不安全的區域進行操作	好 (good)	52.74 美元/小時 除污 139.35 平方公尺
噴砂處理	• 完善的技術 • 不同類型的研磨顆粒和噴砂設備可用於多種應用	• 操作過程中會產生大量的灰塵和微粒	• 適用於特殊情況的粗砂和研磨材料種類繁多	好 (good)	機器人系統(合用)決定成本 (文獻[1]所列成本 2016 美元/平方公尺)
高壓水噴射	• 高壓設備技術成熟	• 產生大量二次廢水	• 可破壞基質、較適用於堅固的材質表面	可 (adequate)	39.07 美元/平方公尺
軟性介質噴砂	• 表面幾乎可被完全除污	• 產生可觀的空氣傳播污染 • 低生產率	• 僅適用於表面除污	好 (good)	49.51 美元/平方公尺
蒸汽真空清潔	• 操作簡單 • 清潔後的表面可迅速變乾 • 適用於大型平坦表面	• 不適用於複雜、不規則的表面 • 無法有效清除油脂 • 設計不符合人體工學	• 不建議使用在會被蒸汽高溫所破壞的表面	好 (good)	146.82 美元/平方公尺

活塞粗琢	• 現有標準可遠端操作之系統 • 適用平坦的混凝土地板和樓板	• 運作吵雜 • 遠程遙控運作時無法除污牆面與地板介面	• 工人可利用遠程操作，對不安全的區域進行操作	好 (good)	64.58 美元/平方公尺

參考文獻

1. US Environmental Protection Agency “Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surface,” EPA-402-R-06-003, Washington, DC, 2006.
2. NPJ 2003. Nuclear Plant Journal, Editorial Archive; “Chemical Decontamination at Browns Ferry Unit 1”; Papers, September-October 2003.
3. ISOE 1996. Information System on Occupational Exposure – European Technical Center; Information Sheet No.6 “Overview of the First Three Full System Decontaminations” April 1996; [http : //isoe.cepn.asso.fr/pdf/IS-06.pdf](http://isoe.cepn.asso.fr/pdf/IS-06.pdf).
4. DOE 1994. U.S. Department of Energy. Decommissioning Handbook, DOE/EM-0142P, Oak Ridge, TN, March 1994.
5. Ampelogova 1982. Ampelogova, N.I., et al., Decontamination in Nuclear Power Engineering, Energoizdat, Moscow (1982).
6. Steven S. Zumdahl, Chemical Principles, third edition, Houghton Mifflin Company, New York , 1998.
7. Raymond Chang, 普通化學 General Chemistry/3e, 普林斯頓國際有限公司, 台北, 2003.
8. Pettit 2004. Pettit, Paul, et al. “Decontamination,” Chapter 17 in “The Decommissioning Handbook” (Taboas, et al., Editors), American Society of Mechanical Engineers (2004).
9. DOE 1997. U.S. Department of Energy. Preferred Alternatives Matrices Decommissioning, Rev. 2, June 30, 1997.
10. IAEA 1999. International Atomic Energy Agency, Vienna, “State of the Art for Decontamination and Dismantling Nuclear Facilities,” Technical Reports Series No. 395, STI/DOC/010/395, 1999.
11. Boing 1995. Boing, L.E. and Coffey, M.J. “Waste Minimization Handbook, Vol. 1,” Rep. ANL/D&D/M96/1, Argonne National Laboratory, Argonne, IL, 1995.
12. Demmer 1994. Demmer, R. “Testing and Evaluation of Eight Decontamination Chemicals,” Westinghouse Idaho Nuclear Company Technical Report 1228, 1994.
13. General Chemistry : The Essential Concepts 3th, Raymond Chang (Author), Kenneth Goldsby (Author).
14. Handbook of chemistry and physics, 71st ed., CRC Press, 1991.
15. EC 1994. European Commission, The Community’s Research and Development Programme on Decommissioning of Nuclear Installations (1989–93) — Annual Progress Report 1993, Report EUR 15854, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1994.
16. Allen-Vanguard 2005a. Allen-Vanguard vendor information, [http : //www.allenvanguard.com/](http://www.allenvanguard.com/).
17. Allen-Vanguard 2005b. Allen-Vanguard vendor information,

[https : //www.thebigredguide.com/allen-vanguard-cascad-technical-details.html](https://www.thebigredguide.com/allen-vanguard-cascad-technical-details.html).

18. Juan 1995. Juan, A. and Roudil, S., “Innovative Decontamination Processes Applied to an Actual Decommissioning Operation,” Decommissioning of Nuclear Installations, Proceedings of the 3rd International Conference, pages 370–373 Luxembourg, 1994), Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1995.
19. EC 1991. Commission of the European Communities, Nouvelles techniques de décontamination : Gels chimiques, électrolyse au tampon et abrasifs, Report EUR 13497, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg 1991.
20. IAEA 1993. International Atomic Energy Agency, Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities : Results of a Co-ordinated Research Programme, Phase II : 1989–1993, IAEA-TECDOC716, Vienna 1993.
21. Lindberg 1997. Lindberg, M., et al. “Free Release Decontamination of SG Tubing from a VVER (Greifswald),” ICON-5, Proceedings of the 5th International Conference on Nuclear Engineering, Nice, 1997; American Society of Mechanical Engineers, New York 1997.
22. Ramer 2001. Ramer, R.J. and Demmer, R.L., “NPOx Decontamination Process Deployment at the Idaho National Engineering and Environmental Laboratory,” INEEL/EXT-01-00920, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho Falls, ID 83415, 2001.
23. DOE 1998a. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0454, 1998, “Lead TechXtract Chemical Decontamination”.
24. Blauvelt 2001. Blauvelt, R., et al. “The Mound Plant Tritium D&D Large Scale Demonstration and Deployment Project,” Presentation at Waste Management 2001 Conference, Tucson, AZ 2001.
25. DOE 2000. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0533, 2000 “ALARA 1146 Strippable Coating”.
26. DOE 1998b. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM 0346, 1998, “Centrifugal Shot Blast System”.
27. DOE 1999a. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0441, 1999, “Centrifugal Shot Blasting”.
28. DOE 1998c. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM 0374, 1998, “Concrete Grinder”.
29. DOE 1998d. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0397, 1998, “Concrete Shaver”.
30. DOE 1998e. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report, OST Reference #2152, 1998, “Concrete Spaller”.
31. Renard 1997. Renard, V. “Remote Operated Vehicle, Dry Ice Pellet Decontamination System,” Proceedings of the 1997 Conference on Industry Partnerships to Deploy

Environmental Technology.

32. Goldfarb 1997. Goldfarb, V. et al. "Progress of Electro-Hydraulic Scabbling Technology for Concrete Decontamination"; Conference Proceedings; 1997.
33. NETL 1997. National Energy Technology Laboratory, EWM Project Factsheet, "Concrete Decontamination by Electro-Hydraulic Scabbling".
34. DOE 2001. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0578, 2001, "En-vac Robotic Wall Scabblers".
35. NEA 1999. OECD Nuclear Energy Agency Task Group on Decontamination Report, 1999 "Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities".
36. Best of Blasting 2005. Wheelabrator Allevard Enterprise website - [http :
//www.bestofblasting.com](http://www.bestofblasting.com).
37. Ramachandran 1996. Ramachandran, N., "Technology used in the Cleanup of a Difficult-to-Remediate Facility," Proceedings, pages 1974–1976 : SPECTRUM '96 : Nuclear and Hazardous Waste Management, American Nuclear Society, La Grange Park, IL 1996.
38. McIntyre 1998. McIntyre, P.J., "Decommissioning of Berkeley Power Station," Proceedings of the International Conference on Dismantling of Nuclear Facilities - Projects Feed Back Experience, Avignon, 1998), Vol. 1, Société Française d'Energie Nucléaire, Paris (1998) 170–178.
39. Meservey 1994. Meservey, R.H., et al., Idaho National Engineering Laboratory Decontamination and Decommissioning Technology Logic Diagram, Vol. III, Rep. EGG-WTD-11104, Jan. 1994, Idaho National Engineering Laboratory, Idaho Falls, ID, 1994.
40. Bond 1996. Bond, R., and Makai, J., "Removal of Compensator Coating at Paks Nuclear Power Plant, Hungary," Proceedings of the 13th International Conference on Jetting Technology, Cagliari, 1996, Mechanical Engineering Publications, London (1996).
41. DOE 1999c. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0416, 1999, "Steam Vacuum Cleaning".
42. DOE 1999b. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report, OST DOE/EM-0463, 1999, "Soft-Media Blast Cleaning".
43. DOE 1998f. U.S. Department of Energy, Innovative Technology Summary Report DOE/EM-0467, 1998, "Remotely Operated Scabbling," OST Reference #2099.

附錄 1-1：子項計畫 1-1 英文專有名詞縮寫一覽表

技術名詞對照

英文縮寫	英文全名	中文翻譯
	Chelation and organic acid	螯合劑與有機酸
	Strong mineral acids and related materials	強無機酸
	Chemical foams and gels,	化學泡沫與凝膠
	Oxidizing and reducing agents	氧化與還原劑
	Strippable coatings	可剝塗層
	Centrifugal shot blasting	離心噴砂
	Concrete grinder	混凝土研磨機
	Concrete shaver	混凝土刨除機
	Concrete spaller	混凝土剝落機
	Dry ice blasting	乾冰噴砂
	Dry vacuum cleaning	乾式真空吸塵
EHS	Electro-hydraulic scabbling	電動液壓粗琢
ERWS	The En-vac robotic wall scabbler	機器人牆壁粗琢
	Grit blasting	噴砂處理
	High pressure water	高壓水噴射
	Soft media blast cleaning	軟性介質噴砂
	Steam vacuum cleaning	蒸汽真空清潔
	Piston scabbler	活塞粗琢

內文專有名詞對照

英文縮寫	英文全名	中文翻譯
AECL	Atomic Energy of Canada Limited	加拿大原子能有限公司 註：公司名稱
ALARA	As low as reasonably achievable	合理抑低
AP	alkaline-permanganate	高錳酸鹽
	Bioassay Lead Blood Level Baseline	生物測定鉛血基準
Bq	Becquerel	貝克(放射性活度單位)
CANDEREM	Canadian Decontamination and Remediation	加拿大除污與整治技術 註：除污技術專有名詞
CITROX	Citric acid – oxalic acid process	檸檬酸與草酸除污 註：除污技術專有名詞
CORD	Chemical Oxidizing Reducing	化學氧化還原除污

	Decontamination	註：除污技術專有名詞
D&D	Decontamination and Demolition	除役與除污
DECOHA	A fluoroboric acid process	含氟硼酸之除污程序 註：除污技術專有名詞
DfD	Decontamination for Decommissioning process	電廠除役除污 註：除污技術專有名詞
DTPA	Diethylenetriaminepentaacetic acid	二乙基三胺五乙酸
EDDS	Ethylenediaminedisuccinic acid	乙二胺二琥珀酸
EDTA	ethylenediaminetetraacetic acid	乙二胺四乙酸
EPRI	Electric Power Research Institute	美國電力研究所
FEMP	Fernald Environmental Management Project	Fernald 環境管理計畫 註：專有計畫名詞縮寫
FeO	ferrous oxide	氧化亞鐵
Fe ₃ O ₄	magnetite	磁鐵礦
Fe ₂ O ₃	hematite	赤鐵礦
HEDTA	Hydroxyethylenediaminetriacetic acid	羥乙基乙二胺三乙酸
HEPA	High-Efficiency Particulate Air filter	高效率空氣微粒過濾器
LOMI	Low Oxidation State Transition Metal Ion	低氧化態金屬離子 註：除污技術專有名詞
LSDDP	Large Scale Demonstration and Deployment Project	大規模驗證與部署計畫 註：除污技術專有名詞
LSDP	Large Scale Demonstration Project	大規模驗證計畫 註：除污技術專有名詞
MDA	Minimum Detectable Activity	最小偵檢活度
MEDOC	Metal Decontamination by Oxidation with Cerium	含銻氧化金屬除污 註：除污技術專有名詞
NITROX	Nitric acid-permanganate-oxalic acid process	硝酸高錳酸鹽草酸除污程序 註：除污技術專有名詞
NP	Nitric acid-permanganate process	硝酸高錳酸鹽除污程序 註：除污技術專有名詞
OEDPA	Oxyethylidenediphosphonic acid	氧基乙叉二膦酸
OPG	Oxalic acid-Peroxide-Gluconic acid process	草酸過氧化物葡糖醛酸除污程序 註：除污技術專有名詞
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	美國職業安全衛生管理局

PCB	polychlorinated biphenyl	多氯聯苯
PPE	Personal Protective Equipment	個人防護設備
REDOX	Reduction-Oxidation process	還原氧化除污程序 註：除污技術專有名詞
SODP	Strong Ozone Decontamination Process	強臭氧除污程序 註：除污技術專有名詞
US EPA	U.S. Environmental Protection Agency	美國國家環境保護局
US DOE	U.S. Department of Energy	美國能源部

二、搜羅探討各國核電廠除役過程所應用之非化學除污技術原理和優劣，針對機械、熔融、生物、複合技術除污等眾多方式做一全盤分析與瞭解，以及管制要項，製作報告成為我國後續進行除污管制作業之參考依據。

(一) 前言

除污(decontamination)是電廠除役過程中的重要工作，不同的目標物、除污標準和周遭工作環境均會對選取除污方式造成影響。污染的特性與污染體本身與表面的性質與特徵相關，像是金屬表面會存在著與污染元素類似的化學成分並擴散至金屬內層，變得難以去除。污染主要分為三種：一是無作用(Free)的污染，可以透過簡單的吹掃或是真空等類似方式去除；二是鬆散污染，可以透過常見的清除技術將其去除；三是固定污染，需移除表面層。在核反應器系統，內部表面的放射性污染通常是來自爐水中被活化的粒子與溶解的元素、分裂產物以及從失效的燃料護套釋出的超鈾元素，沉積後變成氧化層的一部分，形成於管件內部。污染層具有複雜的結構，取決於冷卻水化學、形成的溫度、系統材料與運轉時間等因素。在長時間的運轉下，污染層的放射性元素可能擴散至基材或是沿著晶界穿透管件。輕水式反應器除了接近爐心區域有組件活化的問題外，管件內部表面形成兩種形態的氧化層，一是基材本身腐蝕產生的內部氧化層，另一種是透過爐水沉積或沉澱的 CRUD，較為鬆散的外部氧化層。沸水式反應器與壓水式反應器主要的職業輻射劑量來自腐蝕產生的核種： ^{60}Co 、 ^{58}Co 、 ^{54}Mn 、 ^{51}Cr 、 ^{59}Fe 。如有燃料護套失效的狀況，也會有分裂產物的劑量貢獻。大部分的核種都是存在於管件/設備內部的氧化層中，除污時通常是連同氧化層一同溶解或是移除放射性物質，可利用化學、物理或是其他方法去除組件、系統與結構內外的表面放射性物質，依據除污表面的特性(如金屬、混凝土、油漆表面等)進行選擇。選擇除污基本上是基於折衷方案，在分離放射性物質與處理放射性物質的利弊之間進行，減輕污染程度讓材料清除至可無限制釋出的條件。

美國能源部 1980 年依據除役手冊將除污技術分類為四類：(1)化學除污，(2)手動與非化學除污，(3)電拋光，(4)超音波/化學除污。針對大體積封閉系統的除污技術主要為化學除污，將管件與設備內表面包含 Fe^{3+} 、 Ni^{2+} 、 Cr^{3+} 等尖晶石氧化膜溶解，像是 CAN-DECON/CAN-DREAM、LOMI 與 CORD/CORD UV 等技術。拆解後的組件可使用的除污技術，包含化學除污、電化學除污、噴射除污技術、超音波除污、泡沫/膠體/清潔膏除污、機械除污、熔融除污等。針對污染的混凝土表面的除污，從手動刨除程序，像是空壓式鑿機或是鑽孔去除技術，前者可用於鬆散污染的表面，後者可用於污染物較深處的混凝土。目前正在使用的技術包含：刮/洗/刷技術，可配合洗滌劑/溶劑；真空去除；研磨去除，適合薄的混凝土污染層(<10 mm)；熱能去除，像是火焰或是電漿撞擊污染表面；剝除去除，透過表面破碎機、氣動或是液壓作動的鑽頭、高壓水砲等技術[1]。另外，INEL 與 BNFL 也曾測試生物除污技術，透過適合的微生物，在混凝土表面進行裂解而去除污染，曾經在停機的 EBR-1 進行，現場測試結果顯示以 4-8 mm/年去除受污染的表面[2]。

為了降低拆除過程中人員接受的劑量與大幅度減少污染傳播的可能性，除污成為除役工作中重要的工作環節之一，不同的目標物、除污標準和周遭工作環境均會對選取除污方式造成影響，因應產生後續對於現場除役管制的要求。本子項計畫內容將分析各種元件、不銹鋼等金屬、水泥塊適用的非化學除污技術，包含各國核電廠除役過程的應用實例和對除污管制作業的影響，提供執行除污管制作業的參考。

在過去數十年間，大型核設施除役方面的經驗可作為參考，像是德國的 Kernkraftwerk Niederaichbach (KKN)、加拿大的 Tunney's Pasture、美國的 Shippingport NPP 與日本的 Japan power demonstration reactor (JPDR)等。透過營運商與政府決策單位向公眾展示核設施的除役可以在安全且具效益成本下進行。同樣地，這些除役工作可以測試並優化所採用的除污與拆除技術，並且其他工業領域也可平行發展相關的技術，像是電子、機器人與計算機工程等。未來將有更多的大型核設施達到使用執照的停止階段，後續也將進入除役階段。表 1.2.1 列出典型的除污技術及其主要的應用[3]。

108 年的除污技術研析主要針對化學除污的部分進行探討，化學除污通常是對無孔隙表面最有效，化學溶液的選擇會與基材/污染物的化學性質、處理過程產生的廢棄物處理有關。針對 LOMI Family、CORD、CAN-DECON、CITROX 等的 Multiphase treatment processes 除污技術。109 年主要針對機械除污、熔融除污、生物除污與複合技術等進行研析。

表 1.2.1 General Overview of Decontamination Processes for Decommissioning

Technique	Large volume and closed systems	Segmented parts	Building surface and structures ^a
Chemical decontamination			
Chemical solutions	× ^b	×	×
Multiphase treatment processes	×	×	
Foam decontamination	×		×
Chemical gels	×	×	×
Decontamination by pastes	×	×	
Decontamination by chemical fog	×	×	
Gas phase decontamination	×		
Mechanical decontamination			
Flushing with water	×	×	×
Dusting/vacuuming/wiping/scrubbing		×	×
Strippable coatings	×	×	×
Steam cleaning		×	×
Abrasive cleaning		×	×
Sponge blasting		×	×

CO ₂ blasting		×	×
High pressure liquid nitrogen blasting		×	×
Freon jetting		×	×
Wet ice blasting		×	×
High pressure and ultra high pressure water jets	×	×	×
Grinding/shaving		×	×
Scarifying/scabbling/planing			×
Milling		×	
Drilling and spalling			×
Expansive grout			×
Paving breaker and chipping hammer			×
Other decontamination techniques			
Electropolishing	×	×	
Ultrasonic cleaning		×	
Melting		×	
Emerging technologies			
Light ablation		×	×
Microwave scabbling			×
Thermal degradation			×
Microbial degradation	×		×
Electromigration			×
Exothermic, highly metalized powders			×
Supercritical fluid extraction			×

^a Including concrete, bricks or metal surfaces such as liners, fuel ponds, etc.

^b × denotes main uses.

(二) 機械除污

一般來說，可以在任何表面上使用機械除污，尤其是處理多孔表面時，機械方法可能是唯一的選擇。許多機械除污技術可用於組件和建築物，並且有一些機械除污技術甚至可用於去除表面層後的二次處理。

表 1.2.2 機械除污技術的種類

種類	適用之材料與情況	備註
水沖洗	面積太大，無法擦拭或擦洗	

除塵/吸塵/擦拭/洗滌	混凝土和其他表面	主要作為預處理
可剝離塗層	大型無孔表面	
蒸汽清除	形狀複雜，表面大的表面	
噴砂清除	金屬和混凝土表面，手動工具	
海綿噴砂	油漆，防護塗料，鐵鏽，金屬表面	
乾冰噴砂	塑料，陶瓷，複合材料，SS，CS， 混凝土，油漆	會損壞柔軟的材料
高壓液氮噴砂	金屬，混凝土	噴砂的變化
氟噴流	手套箱內單獨的組件	對環境不友善應避免
濕冰噴砂	塗層與混凝土表面	
高壓與超高壓水噴流	難以接近的表面，結構鋼和槽內	不易清除流入孔內的污染物
研磨/刮刨	地板和牆壁	用於去除薄層污染
翻動/加工/刨削	混凝土和鋼表面	
研磨	大量類似形狀的物品	
鑽孔與擊碎	只能用在混凝土	用於清除幾厘米的污染混凝土
膨脹灌漿	厚厚的受污染混凝土	表面需要鑽孔才能灌漿
路面破碎機與鑿石錘	地板和牆壁	

以下分別進行各項技術的說明[3][4][5]：

2.1 水沖洗(Flushing with water)

方法：

該技術通常在擦洗後進行，除污方法為以熱水覆蓋污染物表面，用熱水溶解污染物，然後將產生的廢水以刮刀推到中央收集區。廢水減量的方法可透過簡單地潤濕表面並在表面乾燥前進行沖洗來減少廢水量，或使用水處理系統回收沖洗水。此技術可與清潔劑或其他化學品一起使用，可增強此技術的效果。

優點	缺點
● 對鬆散沉積的顆粒(例如：樹脂)和易溶的污染物有效 ● 水沖洗可用於太大而無法擦拭(wiping)或是洗滌(scrubbing)的區域 ● 不會對基材表面造成損傷 ● 可作為侵蝕性除污前的表面處理	● 人員容易受到曝露 ● 若無法回收廢水，將產生更多二次廢棄物 ● 若使用清潔劑或其他化學品作為溶劑，將複雜化廢液處理

● 人員培訓容易	● 無法對固定的或不可溶的污染進行除污 ● 對縫隙中的污染物去除效果較差 ● 有交叉污染的可能

2.2 除塵/吸塵/擦拭/洗滌(Dusting/vacuuming/wiping/scrubbing)

此方法常用於去除建物與設備表面的灰塵、懸浮微粒或是微粒，吸塵清除可預先處理大量鬆散污染物，吸塵是透過高效率粒子空氣吸塵器 (high-efficiency particulate air vacuum cleaners, HEPA vacuum cleaners)抽真空，但若要吸取液體，必須使用替換過濾器系統，因為 HEPA 吸取液體會堵塞。如果無法真空吸取的物質可用清水或溶劑浸泡的濕布擦拭表面，以除去灰塵。抹布將作為受污染的廢棄物處理。如果灰塵和微粒被污染，需提供施作人員個人防護設備(Personal Protection Equipment, PPE)，以確保其健康和安

全。

除塵和吸塵技術適用於各種類型的污染，最適合用於光滑表面。但不建議在多孔或吸收性材料上擦洗，因為疏鬆沉積的材料可能被推入表面更深，也不建議針對不溶於水的污染物使用此技術。

污染物存在於真空吸塵器濾心、抹布、刷子或拖把中，根據污染的性質，可能需要先將其包裝或處理後再處置。

在應用這些技術之前，必須考慮幾個注意事項：擦拭技術可用於清除其他操作產生的灰塵。揚塵可能通過除塵或吸塵作用而產生，並傳播污染物。重要的是如果污染的顆粒源在工作區域之外，則在控制外部污染源之前，內部吸塵或除塵工作可能無效。

優點	缺點
● 最適合各種類型的光滑表面 ● 適用於乾燥與潮濕之污染物，尤其是大量鬆散顆粒污染物 ● 不會對基材表面造成損傷 ● 人員培訓容易 ● 吸塵的廢棄物易處理 ● 吸塵可對馬達除污	● ~~不是~~適用於多孔或吸收性材料之除污 ● 不易清除不溶於水的污染物 ● 若使用化學溶劑將會使廢棄物之處理複雜化 ● 需保持工作區域外無污染顆粒才能使用 ● 人員容易受到曝露 ● 施作人員應配戴個人防護設備(PPE) ● 動用較多人力

實際應用：

丹麥的 Risø 熱室的混凝土在進行除污之前先進行吸塵，車諾比核電廠也廣泛使用帶有空氣過濾系統的吸塵器。美國 Rocky Flats environmental technology site(原核武零件

製造電廠)使用了無塵除污系統配合手動控制的刮除器(Scabblers)與針槍(Needle gun)，用於去除混凝土表面的污染物。

2.3 可剝離塗層(Strippable coatings)

可剝離塗層分為兩個階段，一是將除污劑與聚合物混和後塗於被污染的表面，塗層會吸附並與表面污染物結合。二是固化後的聚合物塗層，使污染物被鎖在聚合物基質中，將其去除。可適用各種污染物與材料上，對於大型的無孔隙表面可以獲得很好的效果。可剝離塗料是水性乙烯基丁基塗料，可以噴塗，輥塗或刷塗在要去污的表面上。在受污染的表面上塗一層黏性塑料塗層，使可剝離塗層固化長達 24 小時，然後可以輕鬆剝離。可剝離的塗料是無毒的，不含揮發性化合物或重金屬。

依照技術發展可分為傳統與現代兩種，比較如表 1.2.3：

表 1.2.3 可剝離塗層在傳統與現代的技術發展

項目	傳統	現代
塗料	乳膠塗料(例如：ALARA 1146、TLC Stripcoat)	乳膠塗料(例如：PENTEK 604、Insta-Cote)
適合去除之污染物	去除鬆散的污染物	更好地清除鬆散和固定的污染物
二次廢棄物	極少的廢物產生	極少的廢物產生

優點	缺點
● 有效抑制空浮污染物 ● 二次廢棄物少且只有固體 ● 可作為待拆除結構的固定劑 ● 經工程控制後可降低個人防護乾洗設備之要求	● 只適用於無孔表面 ● 無法有效去除固定的污染物 ● 價格昂貴 ● 單位時間內除污面積小

實際應用：

曾應用於 Rocky Flats 的 gloveboxes 除污、Sellafield 核設施、車諾比核電廠、印尼的放射性同位素生產的熱室等。此技術也可當作是控制污染的固定劑，簡化後續的拆除過程。



圖 1.2.1 實際除污情形與施作人員保護措施

2.4 蒸汽清除(Steam cleaning)

蒸汽清洗適用於建築物和設備表面污染物之清除，且適用於多種污染物和結構材料。使用手持棒或自動系統施加蒸汽，並收集冷凝水進行處理。該技術用於複雜形狀和表面積大的區域，或從鑽井設備上去除污染的土壤顆粒。蒸汽清洗可以與洗滌結合使用，既可以作為初步步驟，也可以作為洗滌過程的一部分。

該技術將水的溶劑作用與噴砂的動能效應結合在一起。與水力噴射相比，由於溫度較高，提高了溶劑作用，減少了所需的水量。儘管使用這種技術產生的廢物量比水力噴射少，但可能需要安裝污水坑和使用廢水儲存容器。和水力噴射一樣，可以使用現有的污水坑或集水系統，但必須檢查是否有洩漏，以確保污染物不會無意間遷移到另一種介質上。此技術結合了水本身的溶劑特性加上噴砂的動能效應，可以使用在複雜形狀與大面積的污染去除，產生的二次廢棄物相對較低，可以透過真空收集蒸汽並進行凝結。

優點	缺點
● 適用於複雜形狀和表面積大的區域 ● 待除污組件大小無限制 ● 不會對基材表面造成損傷	● 不適用在會被蒸汽熱損壞之柔性材料上 ● 有交叉污染的可能

注意事項：由於蒸汽清除的高溫蒸汽會造成柔性材料(flexible material)裂解，例如：液壓管(hydraulic lines)、封口(seals)等不耐高溫之高分子材料，故使用蒸汽清除前應考慮是否會造成柔性材料的損壞[6]。

實際案例：

過熱蒸汽除污方式也成功應用於俄羅斯的 KT-50 運輸筒上。

2.5 噴砂清除(Abrasive cleaning or abrasive blasting)

此種除污方式主要透過使用研磨介質，像是塑膠、玻璃、鋼珠或是粗砂(石榴石、蘇打粉、氧化鋁等)，可用於去除金屬表面可抹去或是固定的污染物，像是結構鋼組件或是手動工具上的污染物，或是來自混凝土表面與塗層上的污染物，包含底層的材料也可以移除。此種除污方式用於平坦的表面最有效，或是難以到達的區域也可，像是天花板或是設備後方。

此種除污的過程可採用乾式或濕式進行，乾式噴砂以空氣作為物料輸送媒介使研磨的介質至待除污表面，濕式噴砂則以流體物料輸送媒介作為物料媒介，通常以水作為流體充當介質和組件之間的緩沖劑，延長研磨介質的壽命，且濕介質可溶解或懸浮污染物。推進研磨介質的動力包含震動拋光(透過小型震動床)或是使用水/壓縮空氣(可用於大面積)。濕式噴砂系統使用壓縮空氣用介質和水的漿液噴射要清潔的物品。

噴砂清除成熟且商業化，且具有非常高的除污因子，但是過程中產生相對大量的二次廢棄物。乾式噴砂可藉由收集研磨料，放入適當的容器中進行處置後，使研磨料再循環能讓二次廢棄物最小化。濕式噴砂則透過水過濾及再循環，減少二次廢棄物的產生，而且濕式噴砂可以不需要化學品或溶劑，可簡化水與磨料之回收。此外，濕式噴砂在密閉獨立之不銹鋼外殼內進行，可減少空浮問題。在噴砂過程中可能會產生靜電，因此，待除污的組件或設備本身均應接地。

優點	缺點
● 非常好的 DF ● 效率極高 ● 技術成熟且商業化，研發成本低 ● 磨料成本低 ● 有遠端遙控設備裝置 ● 替換磨料可移除黏附牢固的污染物以及腐蝕層 ● 藉由替換噴頭對難以到達的區域例如角落進行除污 ● 除污後物件表面粗糙度低 ● 適用於金屬表面可抹去或是固定的污染物、混凝土上塗層與混凝土本身 ● 高度通用的技術	● 若沒有回收磨料或水，將產生大量二次廢棄物 ● 磨料回收時，有交叉污染的風險 ● 不易清除表面油脂 ● 施作地點必須安裝通風與過濾系統 ● 乾式噴砂需採取防塵措施來控制空浮 ● 濕式噴砂可能產生難以處理的灰塵與水漿混合物



圖 1.2. 2 AQUA-DYNE 公司噴砂儀器示意圖與實際照片



圖 1.2. 3 混凝土容器除污的噴砂設備

實際案例：

噴砂技術與設備成熟且商業化，此技術已在多國使用，包含比利時、法國、德國、日本、英國與美國等。

2.5.1 美國西屋電氣公司之濕式噴砂研究[7]

美國西屋電氣公司針對塑料珠，玻璃珠和氧化鋁三種不同的磨料對模擬不銹鋼試樣上之污染物進行除污，結果顯示三種磨料的侵略性由小至大依序為塑膠珠、玻璃珠以及

氧化鋁。塑料珠傾向於將污染物從表面上擦去，而玻璃珠則利用磨料的衝擊來去除污染物，氧化鋁則有機會移除一部分的金屬基材，因此濕式噴砂的侵蝕性可以透過改變磨料來調整。

濕式噴砂之除污因子將被除污物件的材料、磨料成分、濃度和大小、撞擊角度和速度、距離所影響。西屋電氣公司在研究待除污物件因不同的研磨料對除污因子之影響，如表 1.2.4。

表 1.2.4 因不同的研磨料對除污因子之影響

Decontamination Factor Measurements for Various Abrasives		
Abrasive	Decontamination Factor Measurements	
	Laboratory	Field
Boron oxide	3-6	4
Magnetite	50-200	>6
Aluminum	250-4,000	200-300 (nominal)

2.5.2 比利時噴砂除污成本比較[8]

比利時在 1991 年拆除 Eurochemic 再處理廠後處理設施。當時使用乾式與濕式噴砂對碳鋼進行除污，並比較乾式與濕式噴砂之成本。結果顯示碳鋼處理成本由低至高依序為乾式噴砂、濕式噴砂以及不除污，如表 1.2.5 與表 1.2.6 所示。

表 1.2.5 309 噸金屬採用乾式噴砂的成本

Task	Decontamination by dry abrasive blasting	Supercompaction and disposal
Capital costs	2,867,-	
Installation costs	10,251,-	
Reducing and packaging	32,106,-	64,212,-
Decontamination Measurements	10,629,-	
Waste treatment	6,464,-	
Intermediate disposal	13,855,-	135,850,-
Final disposal	616,-	5,936,-
	3,520,-	33,920,-
TOTAL COSTS	80,308,-	239,918,-

表 1.2. 6 309 噸金屬採用濕式噴砂的成本

Task	Decontamination by wet abrasive blasting	Supercompaction and disposal
Capital costs	40,000,-	
Installation costs	10,658,-	
Reducing and packaging	32,106,-	64,212,-
Decontamination	22,169,-	
Measurements	6,464,-	
Waste treatment	10,467,-	135,850,-
Intermediate disposal	448,-	5,936,-
Final disposal	2,560,-	33,920,-
TOTAL COSTS	124,872,-	239,918,-

針對濕式噴砂後物料的外釋[17]，除了有些油漆及不銹鋼件被污染的比較嚴重，比利時採用濕式噴砂單元 ZOE 可以處理高達 3 噸和 3 公尺的元件，磨料和水不斷循環排除，以減少二次廢棄物的數量。到目前為止，在 ZOE 裝置中處理了 21 噸廢棄物，當中包含可立即外釋的 10 噸廢棄物、6.3 噸仍輕微活化(執行除污以降低劑量率並消除鬆動污染物)，對 2.8 噸的底座進行了部分除污處理，以去除大部分 alpha 污染物(alpha contamination)，並將其融化後外釋。通常大約 10%到 20%的材料難以清除污染物或難以測量其準確位置，因此無法外釋。無法外釋的材料通常數量非常少，可以直接送到核鑄造廠進行融化。

2.5.3 德國某核電廠的濕式噴砂除污[18]

為避免產生粉塵，故採用濕式噴砂。磨料通常在壓力小於 100 MPa 的噴水器中被加速。液體噴砂比乾式噴砂更精確地引導磨料，而為了精確進行噴砂，有必要採用自動化程序進行。有兩種方法可用來產生研磨噴射水流：在磨料中注水(AWIJ)(abrasive water injection jet)技術，將磨料添加到注水室的高壓注水孔中。在研磨水中懸浮液噴射(AWSJ)(abrasive water suspension jet)方法，高壓水和高壓磨料懸浮液混合。在 AWIJ 技術中，大量能量在注入腔內消散，並且空氣被高壓水槍吸收。在噴嘴的鬆弛時間(relaxation time)，釋放的空氣導致噴嘴破裂。AWIJ 的運作原理為透過對水施加高壓(約 300-600MPa)使其加速至一恆定體積流量後，將其通入管口內[23]。此時，在一側通入的空氣與磨料顆粒，兩者會因為高壓水噴流所產生的負壓而在腔體內混合並最終與被吸入的進水噴流混合成三相(空氣-水-磨料)噴流，之後此一噴流會在離開噴嘴前形成層流，離開噴嘴後則會表現的像自由噴射流並持續擴展直到衝擊待除污表面如圖 1.2. 4。

另一部分 AWSJ 技術對設備的要求更高。避免粉塵產生比乾式噴砂更具經濟優勢，儘管淨化廢水的要求帶來了額外的成本，使用過的磨料通常也都不回收。

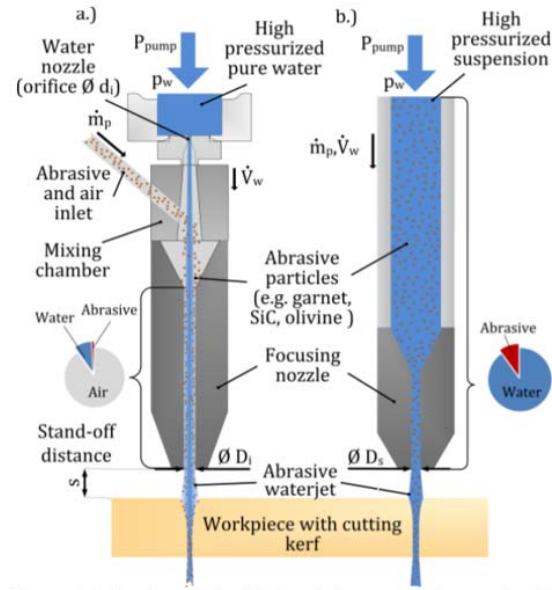


圖 1.2. 4 (a)注射方法 Injection method (b)懸浮方法 suspension method

2.5.4 自動化及機械手臂應用(人員安全及避免接觸具放射性物質廢棄物) [19]

在 2009 年時，安大略省發電廠(Ontario Power Generation, OPG)授予 UK-based OC Robotics 公司權限設計及開發蛇型手臂機器人，並且運用在 CANada Deuterium Uranium (CANDU) reactors 上，使得檢查管件及組件時方便有效。因為加裝了攝影鏡頭，觀察更為方便。如圖 1.2. 5 (a)所示，此機器人活動性高，可輕易得檢查管件，一次側水迴路等等。



(a)



(b)

圖 1.2. 5 (a)運用於 CANDU reactor 之蛇型手臂機器人；(b) 由薩凡納河國家實驗室開發的管件爬行機器人。

同樣在 2009 年，在歐盟的兩年計畫中，預計開發搭載新型超音波相探頭(novel ultrasonic phased array probe)，結合獨特的 3D 光束轉向之機器人，可輕易量測所有焊縫範圍。機器人使用真空抽吸系統(vacuum-suction locomotion system)和先進的導航系統使

其能夠檢查複雜的焊縫，此法應該可以大幅減少檢查時間以及盡可能降低員工受到輻射的風險。

在管件檢查與測試任務中，管件爬行機器人被廣泛使用，並進一步應用於一系列的除役任務。美國薩凡納河國家實驗室(Savannah River National Laboratory)正在開發一組大型機器人，該裝置如圖 1.2.5 (b)所示。此類機器人大部分都配有攝影機，有些則利用非破壞性(Non-destructive testing, NDT)技術，例如，德國監控系統 Rainer Hitzel GmbH 配備有雷射，超聲波或渦電流感測器(eddy-current sensors) 等一系列功能，用於核電廠系統中檢查焊縫並監控管道厚度的功能。在 2008 年，編號 6000 配有雷射及攝影機、渦電流探針(eddy-current probe)的爬行機器人在德國 Unterweser 電廠進行日常維護，用於檢查冷卻水管由於腐蝕、孔蝕以及內部和外部缺陷造成的壁厚減少。

英國 windscale advanced gas cooled reactor 因採取立即拆除反應容器將導致 1 Sv / hr 的劑量曝露，意味著工人將在 20 分鐘內達到他們可以允許的年劑量；該系統包括一個可擴展的機器人手臂，其末端帶有六個自由度操縱器的桅杆。透過使用該系統，在該項目的六年中，每名工人的劑量總計保持在 17 mSv；產生了 22 噸低放射性廢棄物和 10 噸中階放射性廢棄物。

Dounreay Site Restoration Ltd.正在開發一組創新的機器人系統稱為 Reactorsaurus，機器人重達 75 噸；這是一個大型遙控車，其中包含兩個具有機械臂的遙控操縱器可向下進入反應爐達 16 公尺。這些手臂能夠操作各種大小的設備減少人員危害，例如圓盤，液壓剪，氧氣/丙烷和等離子切割機器之內建系統，具有六個輻射耐受性攝影機和四個麥克風，它們能將圖像和聲音傳回到控制室。

Brokk 系列是遠程操控的機器人(圖 1.2. 6)，由瑞典的 Brokk AB 生產，這些被廣泛用於所有核電廠退役任務(像是日本等國家)。他們足夠堅固可勝任拆除工作，且小到足以在建築物內工作通常通過電纜供電，使室內操作更輕鬆。



(a) Brokk B90 unit



(b) Brokk 180 unit cutting pipes with steel shears in Japan

圖 1.2. 6 Brokk 遠程操控機器人

美國 Rancho Seco 電廠設計包括位於反應器內部的中心安裝方管，其具有六個自由度的機械手能夠精確定位並牢固地固定水刀切割頭。在手臂上安裝了兩個水平傾斜變焦相機，以利操作員透過監控控制面板查看切割操作過程及查看切割頭關節的位置；此系統曾用來切割 33 厘米厚的碳鋼容器。

除役期間在 Dounreay 反應爐中，使用了 Brokk 機器人如圖 1.2.7 拆除 32 個鋼筋混凝土基座；該基座是用來分隔裝有放射性液體的水槽。而電廠在 1996 年關閉之前，機器人也曾進入燃料池，處理超過 10,000 個用過燃料單元，並重新包裝剪裁相關的管件與容器。Brokk 機器人也被用於拆除 Dounreay 臨界試驗實驗室(Dounreay experimental criticality laboratory)。



圖 1.2. 7 Dounreay 反應爐與拆除用的 Brokk 機器人

2.5.5 義大利 JRC-Ispira Abrasive Blasting Unit (ABU)

噴砂處理設備通常位於腔室頂部，可以重新移動到地面並有足夠的空間可使人員操作。在這個改進的設計，額外的斗式提昇機(bucket elevator)和螺旋給料機 (screw feeder) 將被添加到設計中，以回收噴砂之後產生的廢棄物到噴砂輪 (blast wheels)。該設計圖顯示了第二個圍阻體，分隔了操作員的控制和 receipt/dispatch 區域，以保護操作員遠離機器運作的危險環境。操作時，牆壁會限制灰塵的傳播，隔離可能的污染源。如果增加磁性顆粒分離器，可以大大改善磨料過濾和收集系統之效率並且大幅減少二次廢物以及磨料用量。

噴砂除污之前應打開腔室裝載門(chamber loading door)及除塵系統，機器開始吸入空氣微顆粒，從而限制了灰塵或污染。如果排污系統(extraction system)無法啟動，或者運行期間發生故障，系統將立即關閉，並且無法重新啟動，直到故障解決。過程中產生的污染廢物通過斗式提昇機(bucket elevator)傳送到空氣分離器。來自分離器的污染廢棄物為空氣中的灰塵、沙子、細顆粒和無法使用的細磨沙粒，通過分離器循環多次，清潔及去除較大顆粒。空氣分離器中存在的任何大顆粒都會排出並重新回收流回 ABU。從噴砂室排出的顆粒通過輸送機到收集箱，這些收集箱將由操作員每天檢查並定期做清理的工作。從 1996 年來，其產生的放射性廢棄物含量如表 1.2. 7 所示[20]。

表 1.2. 7 JRC-Ispira 自 1996 年噴砂處理後放射性廢棄物含量

項目	重量
處理過(Treated material)金屬部分	903,000 kg(不包括二次污染物)
直接釋放(Free released)	835,000kg
金屬污染物(Metallic waste)灰塵	68,000kg
二次污染物(Secondary waste)	10,500 kg(保護衣、塑膠、過濾器 etc)

2.5.6 日本 JPDR 實例

日本 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)在爐水淨化管路(Water Cleanup Line)進行流動式噴砂處理，利用 B₄C 做為研磨粒，在室溫下進行 35 個小時，流速控制在 4.8~6.7 m/s。其除污因子約在 200~1,600 之間(平均為 1,100)，產生的廢棄物為研磨料、污泥、過濾器。圖 1.2. 8 顯示 JPDR 進行的系統除污，包含流動式噴砂處理[21]。

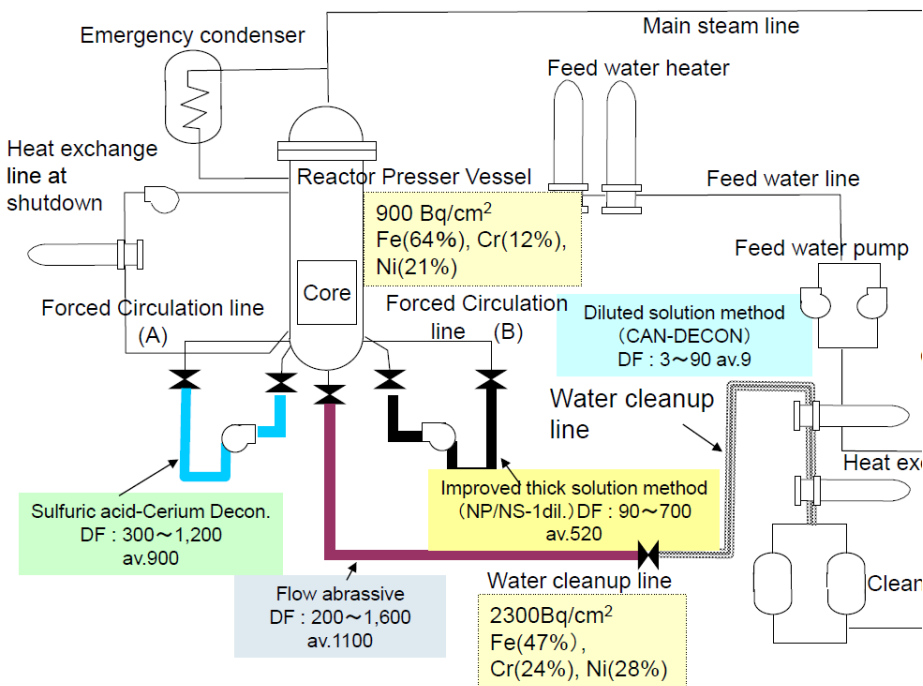


圖 1.2. 8 JPDR 系統除污

2.5.7 瑞典實際濕式噴砂案例[9]

Johan 針對 Barseback 與 Oskarshamn 兩座沸水式反應器核電廠進行濕式噴砂之探討，兩座電廠所使用濕式噴砂艙都是由 Fagerstrom Deco 系統所供給，噴砂艙主要目的為確保不會有污染物流出到外界，因此噴砂艙內將維持負壓，並加裝隔音材料減少噪音。噴砂艙如圖 1.2. 9 所示。

濕式噴砂研磨介質選用珍珠狀的玻璃，噴砂結果發現，珍珠狀的玻璃在較硬的表面上具有拋光效果，如同採用砂子研磨的效果，且可以去除氧化層而不損害元件或導致受

噴的金屬表面產生硬化，不過在噴砂過程中玻璃會開始慢慢產生變質的現象，導致噴砂效果降低。

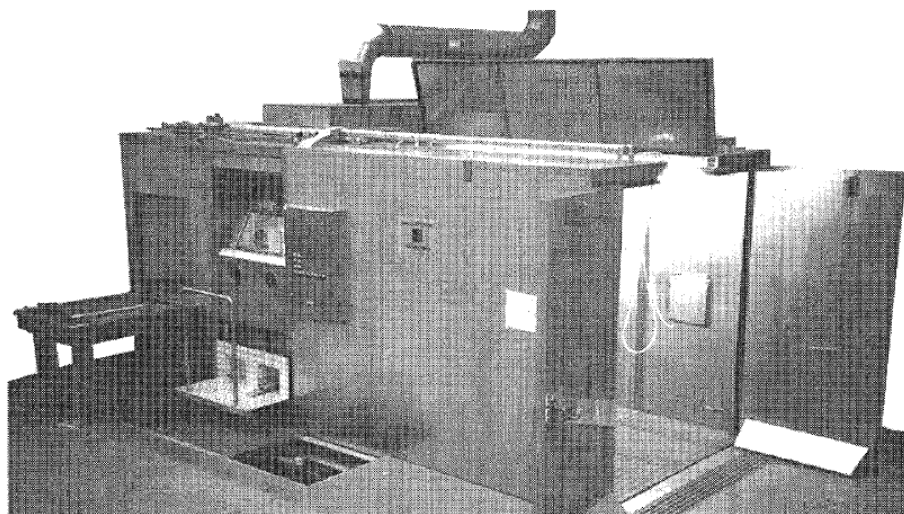


圖 1.2. 9 Fagerstrom Deco 濕式噴砂艙

2.6 海綿噴砂(Sponge blasting)

此技術透過水基氨基甲酸乙酯(Urethane)製成的海綿噴砂至表面，因海綿膨脹與收縮作用產生剝除效果。含有研磨材料的腐蝕性海綿可用於腐蝕塗料、保護層和銹垢。

海綿噴砂可對敏感表面(sensitive surface)進行非侵略性的除污，亦可對混泥土與金屬表面進行除污。海綿作為界面活性劑可透由捕捉、吸收清除腐蝕產物、鐵鏽、油與油脂、鉛化合物、塗層與低階放射性核種。由於海綿本身不導電因此可用於清理電動馬達、變壓器、水力與燃油管線[10][10]。

海綿介質與傳統的碰撞介質(例如，沙子，金屬砂礫等)相比，受到撞擊時會發生變形與彈性小很多，對於操作員和設備的回彈力影響較小。

海綿介質能夠保留去除的污染物。從而將降低粉塵生之可能，並減少了用過的介質和廢物在包裝處置過程中潛在的交叉污染風險。

海綿噴砂主要由四個部分組成：進料單元、篩子單元、清洗單元與蒸發單元。進料單元：氣動推進泡沫。裝備包含軟管與噴嘴，功用為輸送泡沫以及與氣體混合。篩子單元透過漸進式細化篩子將海綿中的碎屑過濾掉，篩子中的殘渣將被適當地處理。清洗單元為一個可攜帶式的封閉迴路的離心流槽，泡沫通常會在流槽中進行3~5次循環。蒸發單元目的為減少來自清洗單元之廢水的體積。圖 1.2. 10 為海綿噴砂進料單元，用途為推進泡沫到表面進行除污。

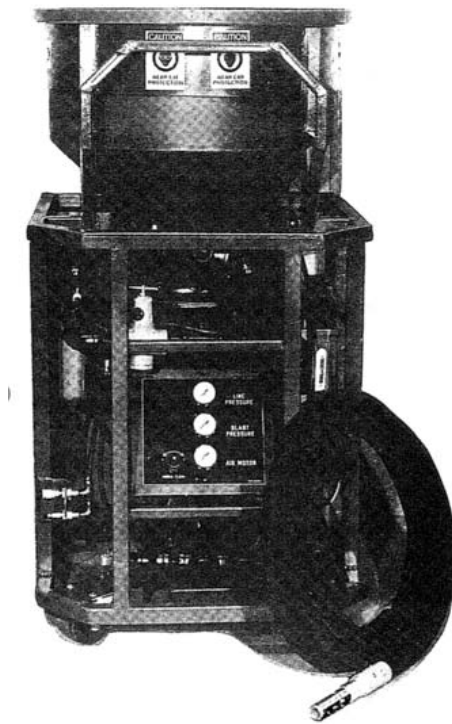


圖 1.2. 10 海綿噴砂進料單元

優點	缺點
● 無空浮與粉塵問題 ● 對於操作員和設備的撞擊回彈力影響與其他噴砂除污相比較小 ● 交叉污染風險低 ● 設備可攜式 ● 適用於多種污染物(包含油脂)與電力設備 ● 選擇性去除塗層 ● 去除混凝土薄層 ● 低安全要求 ● 適用於難以到達的區域 ● 適用於粗糙表面 ● 對金屬插件不敏感	● 高磨料成本 ● 二次廢物的產生 ● 無法連續回收磨料(由於磨料壽命有限) ● 噴砂材料必須手動收集 ● 效率低

實際應用：

當出於各種原因必須更換商業核發電設施時，蒸汽產生器(SG)主管路允許被切開移除，為了減少更換人員的輻射曝露，專門的核能相關公司，包括 Framatome Technologies 和 AEA Technologies Engineering Services 已在美國和國外的許多核電廠進行了管道末

端的除污處理，成效相當不錯。表 1.2.8 顯示海綿除污之前和之後組件採樣點的劑量與其除污因子(DF)[11]。

表 1.2.8 海綿除污實例的除污因子[11]

Facility	Pre-Decon Dose Rate (Mean, in mR/hr)	Post-Decon Dose Rate (Mean, in mR/hr)	Decon Factor	% Dose Rate Reduction
Maguire 1	1990	630	3.29	87.5%
Catawba	3055	850	3.83	82.3%
N. Anna	5400	1900	3.75	75.8%
V. C. Summer	6000	1000	4.94	74.8%
C. N. de Almaraz	2500	700	2.78	55.3%

2.7 乾冰噴砂(CO₂ blasting)

乾冰噴砂是噴砂處理的變化，採用二氧化碳顆粒(乾冰)作為清除的介質，可用於組件拆除前與拆除後之除污，拆除後之除污會在集中清理區域進行。乾冰藉由加壓空氣由噴嘴噴出，當乾冰撞擊表面時會破碎，產生的動能會使乾冰滲透到基材內部，乾冰碎片立即昇華，產生的舉升力(lifting force)足以移除污染物；移除的碎片會掉到地上，必須收集後處理，而 CO₂ 回到大氣中則無須額外處置。乾冰噴砂最大優勢為噴砂過程中不會變成放射性物質，因此沒有二次廢棄物的產生，但空浮問題依然如同其他噴砂除污技術[10]。

乾冰噴砂適用於塑膠、陶瓷、複合材料、不銹鋼，不適用於易受損的木頭、一些軟性塑膠或脆性材料上。若乾冰噴砂用於軟性污染物(例如：油脂、油滴)除污，為了避免噴濺問題，將使用特定的程序與收集系統。如果待除污之表面具有多孔性，軟性污染物可能在乾冰噴砂過程中被推入基材中。這種技術可能無法有效去除非常牢固的硬塗層，但對於去除烘烤硬化後的油脂非常有效。

典型的乾冰噴砂除污系統分為兩部分：第一部分為 CO₂ 造粒機，將 CO₂ 轉換成乾冰。第二部分為清理站，用途為貯存 CO₂ 並進行噴砂。清潔站的機動性較高，可用於清潔就地的設備，但也可用於清潔已運輸到造粒機所在之集中清潔區域的拆卸設備。

乾冰噴砂若用於熱衝擊而更容易分解的污染物，可能因為乾冰冷卻，導致清潔效果下降；使用在能重複使用的組件除污時，應考慮冷卻造成損壞的可能性。

在乾冰噴砂過程中，為了隔離噴砂過程產生的噪音與鬆散的碎片，會在室內空間進行；乾冰噴砂若在封閉區域進行，因二氧化碳比空氣重，需在靠近地面處加裝排風系統。乾冰噴砂過程中，有可能會產生靜電，故待除污物件需接地。圖 1.2.11 為二氧化碳顆粒與其噴砂過程[10]。

優點	缺點
● 沒有二次廢棄物的產生 ● 適用於(塑膠、陶瓷、複合材料、不銹鋼) ● 設備機動性高 ● 組件拆除前與拆除後都可使用 ● 可清除特殊設備(例如：馬達) ● 適用於清除可塗抹的污染物 ● 可保留基材	● 不適用於軟性塑膠、脆性材料與硬塗層 ● 應考慮乾冰冷卻是否對除污效果或組件造成影響 ● 除污物件需接地 ● 成本高 ● 需要在通風的場所 ● 無法剝離塗層或固定污染物 ● 高安全要求 ● 具缺氧的風險

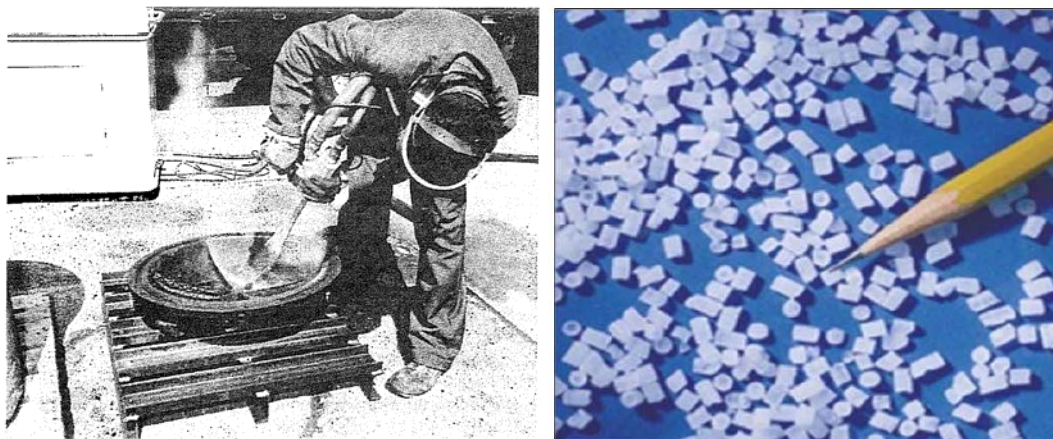


圖 1.2.11 乾冰噴砂過程與二氧化碳顆粒

實際應用：

美國橡樹嶺國家實驗室(Oak Ridge National Laboratory, ORNL)與 Idaho 化學電廠(ICPP)都曾使用，英國 Joint European Torus project 成功應用本項技術，比利時也應用本技術將 300 噸的碳鋼、不銹鋼與聚丙烯除污後釋出。

2.7.1 美國 ORNL 實際案例[7]

ORNL 在開發鉛除污技術，實驗室測試冰噴砂和乾冰噴砂對鉛的除污效果。冰噴砂會產生水的二次廢棄物，但水中沒有污染的鉛(廢水中殘留的總鉛低於 RCRA 含量)。在末端單元連接了一個 HEPA 單元，以防止通過空氣傳播污染物。在粗濾器和 HEPA 過濾器中檢測到鉛顆粒。乾冰噴砂過程，乾冰以低速度衝擊，由於接觸面積非常小，導致較大的衝擊壓力。

在表面受污染的鉛上進行了冰噴砂和乾冰噴砂測試，結果為乾冰噴砂和冰噴砂技術都僅適用於去除表面污染物，兩種系統的除污因子和使用時間基本相同。將表面污染去除至低於外釋的水平。除污因子與鉛之前的使用情形直接相關。

在評估成本上，乾冰噴砂的設備成本要比冰噴砂裝置的成本高。原因為壓縮氣體成本較高。不過 CO₂ 噴砂技術對於機械手零件和精密儀器尤為適用，特別是對於電氣組件。除污效果相似，但必須評估其對待除污材料和產生的二次廢物的影響。

2.7.2 美國 Rocky Flats Plant 實際案例[7]

Rocky Flats Plant 為位於美國之核武零件製造廠，其使用乾冰噴砂對受污染的金屬進行污染處理。乾冰在受到衝擊後會穿透表面塗層到達基材，並昇華成 CO₂ 氣體，膨脹量為原粒料體積的 400 倍。在 Rocky Flats Plant 除污結果中，發現乾冰噴砂除污可用於取代原有用於去除放射性物質的溶劑(二氯甲烷)；原因為採用二氯甲烷進行除污的方法效率低下，只有三分之一的金屬是可外釋的。

2.8 高壓液氮噴砂(High pressure liquid nitrogen blasting)

高壓液氮噴砂也是另一種噴砂處理的變化，可將研磨材料加入液氮流中，液氮流將顆粒推到要除污的表面，透過液氮的脆化與顆粒的研磨機制去除污染物，高壓液氮噴砂對待除污表面之效果：

1. 由於動能造成的機械效應
2. 材料表面接觸到-140°C 的液態氮變得硬而脆，且容易被剝除
3. 液態氮於噴砂過程中的膨脹效應(約膨脹為原體積的 700 倍)

優點	缺點
● 具有選擇性，可以只移除被覆或塗層，也能控制移除的混凝土深度(單次噴砂可移除 3~30mm 的深度) ● 沒有二次廢棄物產生 ● 不會造成表面粗糙 ● 清除塗層與混凝土的效率 ● 清除大表面積 ● 多功能(塗層剝離，去除厚混凝土層，切割) ● 效率高 ● 適用於難以到達的區域 ● 適用於粗糙表面 ● 對金屬插件不敏感	● 人員有缺氧風險 ● 避免污染物之空浮問題，被要求封閉性或抽真空 ● 由於液態氮會膨脹為原體積的 700 倍，因此需裝設通風設備 ● 液態氮系統與軟管必須絕熱 ● 高安全要求(個人和設施) ● 技術複雜 ● 成本高

實際應用：

美國 Idaho 化學電廠(ICPP)曾驗證過此法，並在 2003 年被 Nitrocision 公司商業化。

2.9 氟噴流(Freon jetting)

氟噴流除污是通過導引高壓噴流將含氟的清潔溶液至清除的表面上，通常用於手套箱內部單獨的組件。已開發出商用氟利昂(三氯三氟乙烷)清潔溶劑清除表面和設備上的鬆散污染物的系統。氟利昂(Freon)的粘度和表面張力低，可以滲透到裂縫和縫隙中，並清除污染物，包括脂溶性的污染物。氟利昂是不易燃的且具化學惰性，因此可用於許多類型的塗料，不會損壞精密的設備。大多數放射性污染物不溶於氟利昂，可以通過過濾或蒸餾除去，從而可以回收氟利昂。氟利昂(Freon)液體和污染物顆粒收集在一個集液槽中，然後將液體過濾以除去污染物，進行清潔和回收。根據需要將氟利昂進行蒸餾，以除去溶解在液體中的任何放射性物質。已開發實驗設備可直接於現場進行清除，但是對於含氟物質使用的法規會限制本項技術的應用。[12]

2.10 濕冰噴砂(Wet ice blasting)

濕冰噴砂也是另一種噴砂處理的變化，如同其他噴砂技術，都將細小介質以高速撞擊該物件表面進行除污，介質是使用高壓空氣將水與冰的混合物帶至除污體的表面。此項技術可以移除塗層與一些固定表面污染物，但是不會移除到混凝土表面層。由於介質為水和冰，冰溶化後轉變為水，二次污染物以水的形式存在，而水產生的最大速率被控制在 24 gal/hr(加侖/每小時)。由於在除污過程中產生的水量較少，因此蒸發與不循環利用可能更具經濟效益。

優點	缺點
● 二次廢棄物以水的形式存在，易處理 ● 選擇性去除塗層 ● 待除污組件尺寸無限制	● 有交叉污染的可能 ● 除污效果略差

實際應用：

美國 ORNL 曾使用濕冰噴砂，產生水的速率被控制在 11 gal/hr[10]。

2.11 高壓與超高壓水噴流(High pressure and ultra high pressure water jets)

高壓水噴流使用高壓水流去除工作件表面的污染物，透過噴流的力量去除污染物。典型的應用包含清除難以觸及的表面，如管道內部、鋼結構件與單元內部等。但只有混凝土，金屬部件，結構鋼和瓷磚可以承受高壓與超高壓水噴流。噴水可以清除鋼板上的油漆、塗料和難以清除的沉積物，甚至可以從鈹金上去除鍍鋅層，而不會損壞下面的表面。圖 1.2. 12 為在水中使用氫雷射噴槍(Hydrolaser Lance)對鋼結構進行除污[3]。



圖 1.2.12 加拿大 Gentilly-1 的鋼結構在水中經由 hydrolaser lance 除污

壓力可由 105 Pa 到超過 108 Pa 以上，壓力與水流可以針對個別需求進行優化，透過在水刀中添加磨料，可以增加滲透效果，但不能損壞或切穿材料。

污染物和廢水需分離進行處理，然後對廢水進行和回收可以降低二次廢棄物的產生。

動力單元與用於水刀切割的基本上相同。因此，只要稍作修改，搭配適當的噴嘴(即清潔頭或切割頭)，該裝置就可以用於任何一種技術。

優點	缺點
● 可去除(油漆、塗料、固定的沉積物、鍍鋅層) ● 有效去除縫隙中污染物 ● 藉由噴嘴替換可用於切割技術 ● 待除污物件無尺寸限制	● 只能用於混凝土，金屬部件，結構鋼和瓷磚上 ● 有過度侵蝕或讓表面粗糙之可能 ● 若無進行廢水回收，將導致二次廢棄物大量產生 ● 有交叉污染的可能。

實際應用：

此項技術曾使用在英國的 Berkeley 電廠，證明是個有效的方法。如果使用甘油當作加壓介質，或是水中夾帶粒砂(Grit)，就如同 2.5 節所提技術一樣。匈牙利 Paks 核電廠也曾應用本技術進行除污。

德國某核電廠，曾利用水刀技術使用超音速水噴流去除材料上廢棄物。根據機械衝擊原理，水射流的能量太大有可能導致材料破裂和剝落。噴嘴以雷射鑽孔的藍寶石或鑽石製成；孔口直徑範圍從 0.05 到 0.5 mm。所需的壓力必須在 150 和 400 MPa 之間，水速可達 500–1000 m/s。噴嘴支座的長度相差約 10 毫米；距離不得超過臨界特徵破裂的長度(通常約為直徑 175 毫米)。由於噴射的精準度高，無法使用手動操縱。根據零件

的幾何形狀，將一個或多個孔安裝在噴嘴中。由於高壓水噴流的直徑小，單噴嘴的去除率很低。對於大平面，可以使用旋轉噴嘴，以提高去除率。但是由於旋轉噴嘴的分布不均勻，會產生不均勻磨損的痕跡；通過使用多孔旋轉噴嘴，可以減少此問題。

JPDR 除役，反應器拆卸所需的技術分成八個部分開發，JPDR 退役程序第一階段大約為 100 億日元(6700 萬美元)兩種機械切割(diamond sawing and coring)和磨料加進高壓水柱被開發用於切割內部生物防護的混凝土。在法規制定上，主要原則是確保工人的安全並防止放射性物質的釋放。以下為實際拆卸程序：

1. 安裝適當的通風系統並使用遠程監控拆卸工作，可大幅減少工人曝露。
2. 在除役工作中，圍阻體和建築物牆壁可當作通風系統的限制邊界，防止放射性物質釋放。

根據計算和測量估算，JPDR 拆除將產生總計 3 萬噸固體廢物，其中約 4000 噸為低放射性廢棄物。該研究中抽取了 4000 多個樣本來評估整個 JPDR 中的放射性污染量設施。為了滿足上述程序，現有供水系統，排水系統和通風系統應在拆卸工作中持續運作，並且廢氣排放和液體廢棄物排放必須和反應爐運轉期間進行監控的方式相同。

2.12 研磨/刮刨(Grinding/shaving)

研磨/刮刨使用水冷或乾式金剛石砂輪，或使用多個碳化鎢堆焊盤形式的粗粒磨料對待處理的表面進行研磨。研磨採用落地式研磨機，其研磨頭以平行於地板的方向運作。通常使用於去除混凝土表面的薄層污染物。在許多情況下，污染僅於油漆塗層或混凝土密封劑上。如果污染很深，砂輪會很快磨損，這會降低該技術的整體效率。

在研磨之前和研磨期間可能會加濕表面以抑制灰塵，並以水注入研磨頭的中央進行冷卻與減少粉塵量。可以使用高效率粒子空氣吸塵器(HEPA vacuum cleaners)連接到機器或機器附近來控制空浮。

典型的金剛石砂輪(用於地板研磨機)每天能夠去除數千平方英尺的表面，深度約為 1/2 英寸。在較小的區域，砂輪每天最多可以清除 1 英寸的表面，機器可由操作員單獨操作。

優點	缺點
● 可去除油漆塗層或混凝土密封劑面漆 ● 可遠端操作 ● 效率高 ● 造成的振動小 ● 無二次廢棄物	● 不適合用於污染較深的物件 ● 需搭配真空或水注減少空浮 ● 有交叉污染的可能 ● 有過度侵蝕或表面粗糙之可能 ● 產生細塵 ● 不適用於粗糙表面 ● 對金屬插件敏感 ● 高消耗成本(磁盤)

實際應用：

曾使用金剛石磨具在 JPDR 與 Los Alamos 國家實驗室(LANL)的地板與牆面進行研磨除污。刮刨也曾用於 Eurochemic 設施與 Hanford C 反應器上。地面和手持式研磨機已在 San Onofre 1 核電站成功使用，以去除表面污染。

2.13 翻動/加工/刨削(Scarifying/scabbling/planing)

翻動/加工/刨削用於研磨混凝土結構表面以去除污染物，翻動是以物理方式磨損塗層和未塗層的混凝土和鋼表面。加工法是用於去除混凝土表面層的划痕法(scarification process)，通常會同時使用多個氣動活塞頭，敲擊(即切碎)混凝土表面，目前加工以發展出遠端施作。加工最適合去除受污染的混凝土的薄層。

另一種加工方式則是使用針槍(needle gun)(圖 1.2. 13)，針槍加工最適合用於清除鋼鐵表面，管道和導管上的表面污染和塗層。針槍是由幾毫米長的針組成，使用氣動驅動針組，針組使用往復動作來切屑表面污染。早期的使用效果不好，目前的技術可以有效的去除混凝土表面薄薄的污染層。除污速率取決於實際表面的輪廓，一般為 20~30 ft²/hr。

以上兩種加工法，都僅需收集清除下來的碎片進行處理。為了盡可能地減少兩種加工法皆有的交叉污染問題，一些製造商增加了專門的覆蓋層和真空附件以收集過程中去除的灰塵和碎屑。此外，高效率粒子空氣吸塵器(HEPA vacuum cleaners)的過濾設計採用了專利的填充密封桶更換方法，使操作員可以在真空條件下填充、密封、去除和更換廢物。一般而言，針槍加工比加工(scabbling)更通用，並且在混凝土牆壁和天花板上非常有效。

加工法根據除污設備可分為手持式(hand held)的一般加工(scabbling)、安裝於載體上的輔助型(assisted)一般加工(scabbling)與手持式(hand held)的針槍加工(Needle scaling)，三者個別與共同的優缺點如下：



圖 1.2. 13 針槍(needle gun)

個別優缺點		
設備	優點	缺點
手持式(hand held)加工 (scabbling)	-適用於難以到達的區域 -工具較輕巧	-效率低(覆蓋的表面積有限)
輔助型(assisted) 的一般加工(scabbling)	-適用於大表面積 -效率高或中等 -可遠端操作	-需要定制與重型載具的接口(垂直表面)
手持式(hand held)的針槍加工 (Needle scaling)	-適用於難以到達的區域 -工具較輕巧	-效率低(覆蓋的表面積有限)
共同優缺點		
優點		缺點
● 無二次廢棄物，僅需針對碎片進行處理 ● 可去除鋼鐵表面、管道和導管上的表面污染和塗層，以及混凝土表面薄薄的污染層		● 產生劇烈震動 ● 有交叉污染的問題，需增加覆蓋層和真空附件(例如：HEPA) ● 造成表面粗糙或有過度侵蝕之可能

實際應用：

現大量的工業設備可使用，也應用在 ICPP 與 ANL 的 CP-5 反應器。在 Rocky Flats 設施的混凝土表面也曾使用手動控制的噴槍(scabbler)/針槍進行除污，也曾應用在 KKN 設施的鋼製圓頂上。除污過程產生的粒子可以透過裝有高效粒子空氣過濾器的真空系統收集至容器中。

在 Eurochemic 設施除役期間，氣動手持式和地面噴槍(scabbler)已廣泛用於混凝土去污。使用五至七頭噴槍(scabbler)(圖 1.2. 14)對地板進行除污，使用一頭和三頭手持式噴槍(scabbler)對混凝土牆壁和天花板進行除污。

多頭手持式噴槍(scabbler)在 BR3 也廣泛被使用在輔助建築除礦室(auxiliary building demineralisation cells)的除污過程。



圖 1.2. 14 七頭噴槍(scabblers)及其對混凝土除污之粗糙表面

2.14 研磨(Milling)

金屬研磨採用旋轉的刀具來刮除材料，對於形狀相似的物件或是大面積需要除污的物品最有效。

有兩種研磨技術：一種用於金屬研磨，另一種用於混凝土研磨。金屬研磨是透過機器使用旋轉刀具從表面上刮掉一層材料(最大 1/8 英寸)，最常用的方法是將工件送入垂直於切割機軸線的靜止切割機上，或是使用其他類型的銑床(例如工件靜止，銑刀移動的模式)。廢棄物包括加工後的切屑、冷卻液或潤滑液，若有必要可以回收。

混凝土研磨(Milling)與混凝土翻動(Scarifying)或加工(Scabbling)類似，不同之處在於它可以應用於更大的表面積，通常使用大型攤鋪型設備刮除混凝土表面。用這種方法可以去除大約 2、1/2~10 英寸的厚度。混凝土研磨最為有效的方式為在開放的水平表面上使用。

金屬研磨最有效的方法為處理大量形狀相似的物品，研磨速率約為 2.5 ft² / hr。

優點	缺點
● 用於金屬與混凝土，對於形狀相似的物件或是大面積需要除污的物品最有效 ● 可遠端操作 ● 效率高 ● 對金屬組件不敏感 ● 造成中等程度的振動 ● 耗材成本低	● 有過度侵蝕或表面粗糙之可能 ● 有交叉污染的可能性 ● 需要訂做重型載具的接口或工程導向系統(垂直表面) ● 產生細塵

實際應用：

美國 ORNL K-25 電廠也使用金屬研磨技術來除污各個金屬組件。

2.15 鑽孔與擊碎(Drilling and spalling)

主要用於混凝土除污(不適用於混凝土砌塊)，建議用於去除距離表面 1-2 英寸的表面污染物。鑽孔與擊碎透過鑽出 25~40 mm 直徑且 75 mm 深的孔，插入具有擴張管的液壓擊碎工具與錐形軸，並使用液壓壓入孔中後撐開，以擊碎混凝土。此方式可以清除混凝土表面下數釐米的污染，而不破壞整個結構；去除的混凝土需被收集和處置。如果污染物的深度大於鑽孔與擊碎一次可以清除的厚度，則可能需要執行第二次；第二次鑽孔與擊碎的剝落面積與前一次重疊。在操作過程中，要求工人佩戴呼吸器。剝落速度為 2~10 平方英尺/小時，實際除污速度取決於工人施工經驗。

優點	缺點
● 可以清除混凝土表面下數厘米的污染，而不破壞整個結構	● 操作工人需佩戴呼吸器 ● 有過度侵蝕或表面粗糙之可能 ● 有交叉污染的可能性

實際案例：

已在太平洋西北實驗室(Pacific Northwest Laboratories, PNL)與 Hanford C 反應器上使用。PNL 曾在非放射性混凝土上進行測試，以便對操作人員進行動手培訓。在測試期間，發現如果先用乳膠漆塗在表面，則有與固定劑相同的效果，讓散裂的碎片聚集在一起。

2.16 膨脹灌漿(Expansive grout)

膨脹灌漿可作為一種拆除技術，但是也可以當成一種除污技術，因為能夠去除較厚的受污染混凝土。

優點	缺點
● 可去除較厚的受污染混凝土 ● 沒有交叉污染的可能性	● 有過度侵蝕或表面粗糙之可能

2.17 路面破碎機與鑿石錘(Paving breaker and chipping hammer)

路面破碎機與鑿石錘主要是應用於拆除上，也可稱為手鑽機。主要用於去除表面污染，最大清除厚度為 6 英寸厚的表面污染物。除污後的表面可能非常粗糙，可能需要重新表面處理。鑿石錘主要用於地板與牆面的除污。

優點	缺點
● 用於地板與牆面的除污 ● 可清除縫隙中的污染物 ● 易培訓操作人員	● 人員曝露可能性高 ● 有過度侵蝕或表面粗糙之可能 ● 有交叉污染的可能性

實際應用：JPDR 與車諾比電廠，以及 KKN 的地面走道都曾使用鑿石錘對地板與牆面除污。

(三) 熔融除污

熔融除污可以用來減少特定的污染。該方法完全破壞了組成的分佈，並且僅對~~在~~爐渣中比熔融金屬更易揮發(例如： ^{137}Cs)或更可溶的污染物(例如：銻)有效[4]。 ^{137}Cs 是一種半衰期為 30 年的揮發性元素。在熔化過程中， ^{137}Cs 會聚集成灰塵，可透過過濾器收集並被清除。在大多數反應器的金屬廢棄物中，鑄錠主要的剩餘放射性核種為 ^{60}Co ，該元素的半衰期僅為 5.3 年；其他殘留放射性核種的半衰期更短，因此可以貯存具有較低活性的錠料，以便未來外釋。此外，由於除去了 ^{137}Cs ，大幅度降低了鑄錠工人重熔期間的輻射曝露。二次廢物包括熔融產生的爐渣以及通風過濾器產生的灰塵，這種二次廢物僅佔熔融廢棄物重量的 1~4%[4]。

在核電廠除役期間，會產生大量輕微污染的金屬廢棄物(例如，熱交換器、水份分離器、蒸汽產生器等組件)，透過熔融可以回收大量有價值的金屬，同時在最終處置設施中節省空間。由於設備與組件具有複雜的幾何形狀，因此很難確定內表面上放射性核種的確切位置；然而在熔化之後，可以從每個鑄錠的樣品中精確地確定放射性[14]。

在某些情況下，當發現鑄錠放射性活度仍很高，以至於必須將其送到最終貯存場時，熔融將有效縮減組件體積，從而節省貯存場的空間使用。殘留在熔融材料中的放射性核種被均勻固定，從而降低了放射性核種擴散的可能性。另外，高於外釋條件的鑄錠可重新融化，或進行冷軋等工序加工成可貯存放射性廢棄物的容器，從而在核工業中進行回收[4]。

碳鋼和不銹鋼是可採用熔融除污技術回收的合金；鉛也很容易以熔融除污技術回收。由於鉛的熔化溫度低，故可進行現場回收，僅須規範工作人員健康與安全相關的防護措施，成本相對低廉。其他金屬(例如鋁，黃銅，肥粒鐵和鎳基合金)也可使用專用冶煉爐熔化[14]。

由於用於放射性廢金屬的冶煉廠的總體尺寸小於非放射性金屬的冶煉廠的尺寸，因此必須將放射性廢棄物切成足夠小的尺寸，以適合坩堝[14]。

然而，在過去的十年中，被污染的鋼在專用電廠中的熔化再利用已經發展成為一種新興產業。現有技術已用於最大限度地減少活性金屬廢物的數量。許多電廠已經是工業規模來熔化受污染的金屬，包括德國、瑞典、法國與美國(

表 1.2. 9 與

表 1.2. 10) [4] :

表 1.2. 9 各國熔融廠設施[4]

Operating melting facilities

Facility	Melted scrap (tons)	Recycled/released
CARLA ^a	7,000	6,800 tons recycled in nuclear industry, 50 tons free release
STUDSVIK ^b	1,500	230 tons released, remaining stored for decay (or disposal)
INFANTE ^c	3,600	Stored/recycling in nuclear industry
SEG ^d	2,000	Recycling in nuclear industry

^aCARLA Plant, Siempelkamp, Germany (start 1989)

^bSTUDSVIK Melting Facility, Sweden (start 1987)

^cINFANTE Plant, Marcoule, France (start 1992)

^dScientific Ecology Group (SEG) Plant, Oak Ridge, USA (start 1992)

表 1.2. 10 熔融廠設施資料[4]

Characteristics of operating melting facilities

Facility	Furnace type	Metal treated	Charge size (tons)	Products	Radiological limitations
INFANTE	Electric arc melting furnace	Carbon steel, stainless steel	12	Ingots, shield blocks, waste containers	Maximum 250 Bq/g for ⁶⁰ Co, other limits for other nuclides
STUDSVIK	Induction for steel, small electric arc for aluminum	Carbon steel, stainless steel, aluminum	3	Ingots	No specified limits
CARLA	Induction	Carbon steel, stainless steel, aluminum, copper, lead (R&D)	3.2	Ingots, shield blocks, waste containers	Maximum 200 Bq/g for beta-gamma nuclides, maximum 100 Bq/g for alpha nuclides, separate limits for uranium
SEG	Induction	Carbon steel, stainless steel, aluminum, (planning to melt copper and titanium)	20	Ingots and shield blocks at present, waste containers and reinforcing steel after 1994	Normally <2 mSv/h, greater dose rates with prior review and approval

以上作為處理放射性專用的熔煉廠都有採取安全預防措施(包括過濾通風和健康物理監督),並在管制區域內操作。此外,過濾器中濾出的爐渣和粉塵被視為放射性廢物。當中, Studsvik 熔煉廠將鑄錠儲存,在必要情況下允許鑄錠經過一段時間衰變後,在鑄造場重新熔煉直到可以外釋為止。在外釋之前,該材料已通過適當的輻射防護機構認證[4]。

除了以上幾個專用熔煉廠，對於較大型的待除污組件，有的國家也已經建立了集中熔煉設施，例如：Capenhurst(英國)和 SOCODEI(法國)。此外，世界各地都有大型的商業熔煉設施，也接受國外的廢金屬，例如：Siempelkamp (德國)、Studsvik(瑞典)和 Energy Solutions(美國)[14]。

優點	缺點
● 可處理幾何複雜的大型金屬組件 ● 在第一個熔融中已除去了例如 ^{137}Cs 之類的揮發性核種。因此，在進一步的重熔過程中，沒有粉塵空浮的問題。 ● 沒有表面污染問題	● 只適用於去除在爐渣中比熔融金屬更易揮發(例如：^{137}Cs)或更可溶的污染物(例如：銻)有效。 ● 放射性廢金屬的冶煉廠其總體尺寸小，必須將放射性廢棄物切成較小尺寸，以適合坩堝。

(四) 電化學除污

電解拋光技術是一種在 1950 年代開發的拋光技術，已廣泛用於金屬加工業；直到 1970 年代，核能工業才意識到此法可用於除污，故開始發展電化學除污技術。電化學拋光可以在多種金屬和合金上產生光滑的拋光表面，粗糙度在 0.02~0.03mm 之間。電解拋光與電鍍相反，金屬層是從表面去除而不是施加被覆層。通常要電解拋光的物體浸入電解槽中，作為系統中的陽極。電流的通過陽極導致表面材料的溶解，並且在正常操作條件下使表面逐漸平滑。電化學除污技術如同電解拋光，將待處理的材料作為陽極，如果陽極是金屬或合金之類的污染材料，則可以透過電化學除污清除表面上或表面缺陷中的所有放射性污染物並釋放到電解質中。而陰極可以是不銹鋼或銅電極，也可以是除污槽本身。在除污過程中，可對金屬表面進行一定厚度的溶解，並可帶走金屬表層的污染物。電化學除污在導電材料上特別有效，可將污染降低至接近背景水平，進行外釋處理。

設備上，電化學除污需要至少兩個(不銹鋼)水箱(tank)：其中一個水箱裝有電解液、電極和要待除污的組件；另一個水箱裝水，用於沖洗除污後組件。此外，為了控制在電化學除污過程中從電解液釋放出的蒸氣，在電解槽旁邊設有一個抽氣罩。還需要加裝加熱或攪動電解質以及沖洗水箱的裝置[4][13][14][15]。

電化學除污快速且容易控制，控制參數包含電壓、電流密度、電解質、溫度。在一定的電壓和電流密度範圍內，表面材料會逐漸溶解。如果電壓和電流密度太低，則表面會受到不均勻的侵蝕，從而導致蝕刻而不是拋光。過高的電壓也會導致表面嚴重腐蝕[12]。電解質的選擇對於電化學除污來說相當重要。共有三種基本的電解質系統：磷酸系統、硝酸系統和有機酸系統，以及由日本東芝公司開發出的硫酸與硫酸鈉(AEDSS)系統與瑞典 ABB Atom 硫酸鈉(ELDECON)系統，各系統說明如下：

優點	缺點
● 與化學淨化所需的化學溶劑使用量相比，用於電化學除污的電解液使用量相對較少。 ● 相關設備相對便宜，並且處理過程非常簡單。 ● 可以將導電表面的污染程度降至非常低甚至無法檢測。可以有效針對各種導電污染物的表面除污。	● 電解液如果不可回收，需先中和並在液態放射性廢物處理系統中進行處理 ● 管子內部的縫隙除污效率差。 ● 處理組件可能會導致工人遭受更多的曝露 ● 無法清潔非導電組件 ● 導電組件上若有非導電塗層(例如，油漆，環氧樹脂)必須去除才能進行除污 ● 曝露水平可能過高，除非在清潔高度污染的零件時採用遠端操控技術

實際應用：

Slovakian NPPs、VAK reactor、法國的 RM2、電化學除污方法在俄羅斯廣泛地被開發，並成功用於 Kola, Belojarsk, Kalinin, Leningrad 和其他俄羅斯核電廠和研究中心、德國的 Gundremmingen (KRB) NPP。

4.1 各種用於電化學除污的電解質

4.1.1 磷酸[13][14][15]

操作條件：

- 濃度：40~80 vol% H₃PO₄
- 操作溫度：40~80 °C
- 電壓：8~12V dc
- 電流密度：60~500 mA/cm²

在電流密度為 130 mA/cm² 情況下，除污時間介於 5~30 分鐘，大約去除材料表面 0.3~2 毫英吋(8~50 μm)的厚度。

PNL 已證明磷酸基體係對鋼，不銹鋼、碳鋼和許多合金有效。磷酸電解質的吸濕性有助於最大程度地減少空浮。磷酸的良好螯合特性可能使再污染減少。

磷酸電解液不能有效清除焊縫。焊接引起的冶金學變化使焊接區域的溶解性低於基體材料。以磷酸作為電解質，低電流密度會造成表面除污不均勻，而高電流密度產生過多的氧氣產生。

依據德國 Gundremmingen (KRB) 電廠使用磷酸進行化學或電化學除污的經驗，鐵在除污過程中持續溶解在磷酸溶液中，當溶液中的鐵濃度超過 100g/L 時會產生磷酸鐵沉澱，並停止除污過程。因此，磷酸必須定期交換或再生。磷酸的再生主要是透過 Fe²⁺ 與草酸的反應：(流程圖如**錯誤！找不到參照來源。**)

1. 對鋼進行電化學除污，會產生高濃度的 Fe^{3+} ，但 Fe^{3+} 無法與草酸的反應，鋼的電化學淨化會在磷酸中生成高百分比的鐵，而鐵不會沉澱為草酸鐵。必須以酸洗方式將高含量的 Fe^{3+} 還原成 Fe^{2+} 。
2. 獲得大量的 Fe^{2+} 後，將磷酸與草酸的水溶液混合使草酸亞鐵沉澱， ^{60}Co 透過沉澱(注意： ^{137}Cs 不會沉澱)與鐵一起從溶液中分離出來。
草酸亞鐵沉澱反應式： $\text{Fe}^{2+} + \text{C}_2\text{O}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{FeC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
3. 透過沉澱分離草酸亞鐵與磷酸後，再透過蒸發將稀釋的磷酸濃縮。
4. 草酸亞鐵在 250°C 中被熱解被破壞，並對產生的氧化鐵進行最終儲存。

注意事項：由於應避免草酸鹽存在於處理後的廢物中，因此該方法在處理二次廢水方面存在一定的複雜性。該過程還會釋放出 H_2 ，因此必須將氣體稀釋以避免爆炸的危險。

為了盡可能提升除污效率，德國制定了拆卸鋼製零件的程序。NPP Gundremmingen 單元 A，在處理材料之前，浸泡在鹼液(lye)(NaOH)浴中，以去除先前因機械拆卸而產生殘留物的油漆和油脂。預先清潔後，將低碳鋼組件完全浸泡在 40% 磷酸中處理；搭配電化學方法，可以大幅提高不銹鋼的除污效率，目前被視為一個經濟有效的方式。在回收磷酸的部分，可以通過以下方法(圖 1.2.15)加入草酸，使溶解的鐵沉澱為草酸鐵。該流程由 NPP Gundremmingen Unit A 開發並獲得專利。草酸鐵可以進一步處理，形成最終可接受及儲存的產物-氧化鐵，但有些放射性核種例如鈷 60，鎳 63，鐵 55 和銫 137 和鉬 241 等殘留在除污溶液中，必要時使用特殊化學方法去除。在 NPP Gundremmingen 單位 A 中，用此措施處理了超過 1000 Mg 的材料，可以輕鬆去除一次側高度污染的組件並且達到 100000 或更高的淨化係數。

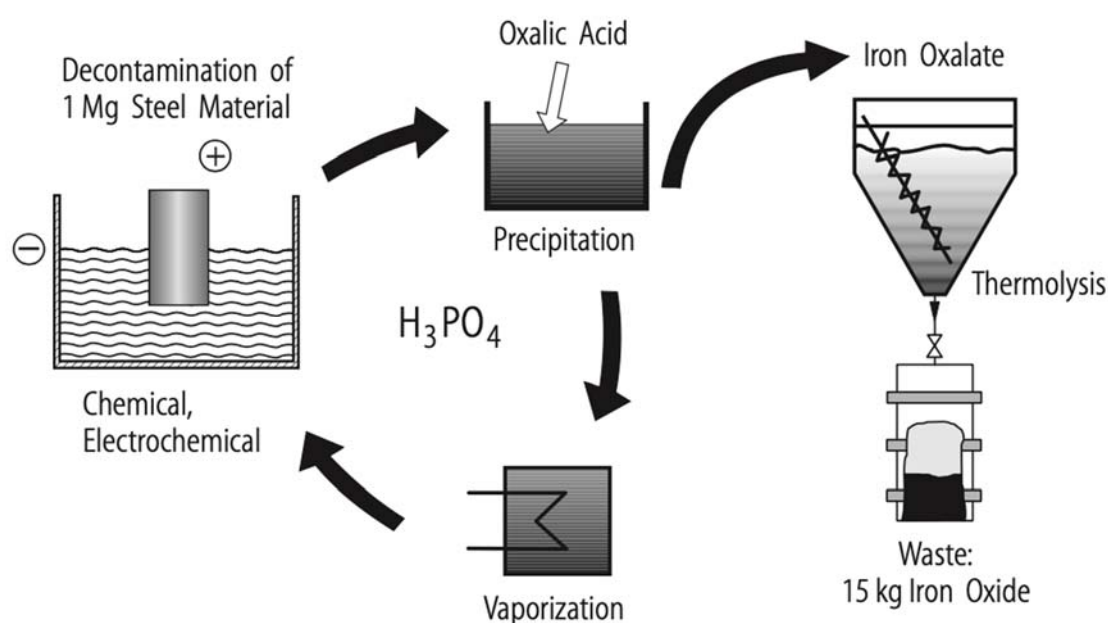


圖 1.2.15 磷酸再利用流程

4.1.2 硝酸

操作條件：

- 濃度：6~12M HNO₃
- 操作溫度：10~35 °C
- 電壓：5~8 V dc
- 電流密度：400~2000 mA/cm²

在電流密度為 400 mA/cm² 的低電流密度情況下，除污時間介於 1~2 小時，大約去除材料表面 0.3 毫英吋(8 μm)的厚度。

在低密度電流下，硝酸電解質在焊接表面上可提供良好的電化學除污。該系統會產生氫和氮氧化物氣體(NO_x)，但是可以使用適當的電極材料(例如 Ti)和電解質添加劑來控制或消除這些氣體。

硝酸電化學除污根據不同研究單位開發出不同的操作條件，以下為 AEA/Harwel 和 CEA/UDIN 兩個研究單位針對不銹鋼電化學除污的硝酸操作條件：[14]

AEA/Harwel：

- 濃度：1M HNO₃
- 電流密度：2~3 mA/cm²

操作方式：將待除污組件被放置在鈦製籃中。經過兩小時的除污獲得 10000 的 DF，可去除 5 mm 厚度。

CEA/UDIN：

- 濃度：2M HNO₃
- 除污時間：1~3 hr
- 電流密度：400~2000 mA/cm²

4.1.3 有機酸

- 電解質：乙醯丙酮+ KBr +正丙醇
- 工作溫度：20~40 °C
- 電極電位：15~24 V dc
- 電流密度：200 mA /cm²

在電流密度為 200 mA/cm² 的低電流密度情況下，除污時間介於 40~100 分鐘，可去除材料表面約 1~2 毫英吋(25~50μm)的厚度。

乙醯丙酮的優點：

- 乙醯丙酮在鹼性環境具有良好的穩定性，可以抵抗由氮氧化物形成引起的變化。
- 有機酸成分可以被破壞，產生非酸性廢物。
- 電解質的放射性含量會到達穩態，放射性含量由乙醯丙酮酸鹽決定。此特性對於需控制輻射的情況下可視為優點。

4.1.4 硫酸[14]

由日本東芝公司開發，可用於不銹鋼零件的電化學除污

- 濃度：5% H₂SO₄
- 操作溫度：60 °C
- 電流密度：300 ~1000 mA/cm²

腐蝕速率從除污初期的 240 mm/hr，隨著氫離子被消耗逐漸降至 60 mm/hr。電流效率也隨著溶解離子濃度的降低而降低(從 40%降至 20%)，因此 pH 必須保持在一定的範圍，才能將腐蝕速率和效率保持在最佳值。溶液的處理包含和氫氧化物的中和，如果存在 ¹³⁷Cs 則必須採用亞鐵氰化物結合氫氧化物中和進行處理。

4.1.5 硫酸鈉[14]

以硫酸鈉作為電解質的電化學除污技術分別有日本東芝開發的 AEDSS 與瑞典 ABB Atom 開發的 ELDECON。

AEDSS：

使用硫酸鈉作為電解質並交替極化電極。在陽極電解中，金屬被氧化並溶解，但氧化物(例如 Fe₂O₃)保持完整，僅當電解質滲透穿過膜時，才發生對位於氧化物層下方的金屬的侵蝕。在陰極電解時，表面的氧化膜被還原，三價鐵還原為二價鐵，基材金屬保持完整。兩種技術的結合，與對電極極化的定期轉換，加速了整體腐蝕速率。溶液中的鐵以攜帶 ⁶⁰Co 的氫氧化鐵形式沉澱。電流效率相對較差(約為 6%)，導致大量能耗約 4000 kWh/t(200 kWh/m² 移除 50 mm 厚度)。但是二次廢棄物非常少，大約 10 kg/t 廢棄物。

- 濃度：20 wt% H₂SO₄
- 電極電位：20 V

ELDECON：

- 濃度：5 wt% H₂SO₄
- 電位差：最大為 24 V
- 電流密度：100~600 mA/cm²
- pH：7
- 除污時間：15~60 min。在電流密度為 400mA/ cm² 時，腐蝕速率約為 60 μm/hr 在除污過程中，溶解的鐵以氫氧化物形式沉澱，並帶有 ⁶⁰Co。

(五) 泡沫除污

泡沫除污使用空氣，氮氣或惰性氣體，由酸或酸混合物生成的液體泡沫。泡沫還包含各種化學添加劑，例如抑製劑，泡沫穩定劑和表面活性劑(增加與表面的接觸來增強效果)。所使用的典型酸為鹽酸、硝酸、氫氟酸、硫酸、磷酸和有機酸。泡沫是在泡沫產生器中產生的，其密度會發生很大變化，通常使用 1 升酸溶液可產生約 20 dm³ 的泡沫[12]。增加停留時間，泡沫可以更好地利用發揮除污劑的功能。廢液的處理可以透過共沉澱去除放射性核種[4]。

當泡沫除污應用於一系列內部結構複雜的大型碳鋼閥門時，殘留的放射性劑量會非常低，使金屬可以在符合標準下，進到煉鋼廠中熔融。[3]

對於肥粒鐵和黃銅製成的石墨/氣體冷卻器進行除污時，泡沫除污可以有效地和硝酸與硫酸的混合物一起使用。[3]

在 DOE 的 Savannah River Site(SRS)開發泡沫除污結果顯示，泡沫除污在不銹鋼表面上比碳鋼或油漆混凝土上能獲得更好的 DF。

優點	缺點
● 對形狀複雜的大型部件、金屬壁和複雜組件有效，對於內部原位除污是一種很好的技術，可在拆卸前消除可抹去的污染 ● 易於透過遠端操作與再循環提高效率，減少操作員曝露於酸性腐蝕環境的可能性。 ● 設備價格便宜、簡單操作 ● 可運用於任何方向的表面，包含上表面 ● 產生少量的二次廢物	● 需要多次處理才能獲得良好的 DF ● 不適用於填充大型空腔，也不適用於有裂縫的表面，以及深或彎曲的縫隙。

注意事項：

當泡沫除污技術在封閉系統中製造泡沫時，應格外小心。對封閉的系統加壓使有機泡沫產生劑和除污劑的混物流過腔室，在腔室中施加空氣以製造泡沫並通過噴嘴將泡沫射出[4]。

SRS 在某次添加了大量的有機發泡劑，導致化學發泡劑與 HNO_3 (即去污劑)之間的化學反應速率不斷提高，產生的氣體量大於洩壓標準設定。系統壓力過大並破裂，因為該設備未配備洩壓閥；因此在事件後在設備安裝時多添加了一個洩壓閥[4]。

(六) 生物除污[16]

6.1 混凝土的生物降解(Biodegradation of Concrete)

混凝土的生物降解是由英國核燃料公司(BNFL)和愛達荷州國家工程和環境實驗室(INEEL)開發的一項技術，利用這種自然發生的現象來去除受放射性核種污染的混凝土表面材料。該過程是一種被動的過程，基本上透過細菌降解水泥基質，直到混凝土表面材料鬆散到能夠輕鬆被去除到目標深度為止。該過程需要 6-18 個月才能完成，具體取決於污染的深度和程度。

該技術可以分為三個階段：

1. 微生物和營養素的使用：

在細菌和營養物的使用前要求以物理方式除去混凝土表面材料。

2. 維持微生物活性：

維護階段主要由環境監控，僅需最低限度的監控，主要用於監視除污進度。

3. 去除並收集表面材料以進行廢物處理：

去除已經疏鬆的表面材料。另外，可以控制去除深度，減少廢物量。

混凝土的生物降解，其整體人力需求的減少可以使成本降低以及減少對人員的潛在曝露風險。如果用於高輻射劑量率場所，所有階段的操作都可採用遠端作業。

6.2 針對油漆和清漆表面的生物除污(Biotechnology for the Decontamination of Surfaces Coated with Paint and Varnish)

由俄羅斯的 Daymos 有限公司開發，針對塗有油漆和清漆的表面進行除污。透過微生物(微生物，細菌，真菌，酵母菌)的活動使油漆和清漆塗層破壞，從而讓被放射性污染的表層鬆散，並使表層變成多孔結構，然後可以使用機械除污方法輕鬆去除。

金屬、混凝土和其他材料上的油漆和清漆塗層的破壞伴隨著某些塗層成分被微生物作為營養源，也可能將有機塗層污染物作為養分。在真菌代謝產物中，產生的酵素和某些有機酸對破壞油漆和清漆塗料很有效。

(七) 超音波除污

超音波清洗系統的兩個主要組件是發生器和換能器(或振動器)。超音波發生器將通常的 50~60 Hz 頻率轉換為 18~25 kHz 範圍內的高頻電源。然後高頻交流電被饋送到換能器以在液體中產生振動。換能器通常由壓電材料製成(即將根據極性而伸長或收縮的材料)。由於振動的結果，溶液中存在壓縮相和稀疏相。在稀疏相，會產生空穴(cavities)主要來自成核點，而在壓縮相，這些空穴會塌陷，從而產生空穴現象(Cavitation)。當物品浸入溶液中時，空穴的塌陷會導致其表面擦洗，從而產生清潔作用。許多成核點的存在會導致空穴現象主要發生在零件表面。即使表面不均勻、複雜或位於難以接近的區域，也會發生空穴現象(Cavitation)。根據理論計算，在空穴現象(Cavitation)的過程中，局部壓力的峰值可達到 70 MPa，這會對任何表面都將產生強烈的清潔作用[12]。

在超音波作用有兩個重要的因素：空穴閾值(cavitation threshold)和擦洗因子(scrubbing factor)。空穴閾值是流體內部的壓力差，超過閾值才會發生空穴現象，並且與施加到溶液的超音波功率有直接的相關[12]。超音波除污最重要的參數包含超音波頻率、功率強度、清洗液粘度、溫度和流體再循環率。除空穴外，超聲波流(引起的液體循環)還有助於物體除污。可以透過加熱溶液、機械攪拌並將化學藥品添加到清潔溶液中來增強清潔效果，以下會再對化學藥品添加以說明[4]。

該技術主要應用於疏鬆沉積物和附著污染物的小型物件。它不適用於混凝土組件與會吸收超音波能量的材料(例如：塑料、橡膠)。若用於小型物件的超聲波設備可由一般

商購獲得。大型物件的超聲波設備則需設計和構造，但應注意超音波除污用於大型物件的除污效果會下降[4]。

超音波除污方法在比利時的 BR3 與西班牙的 JEN-1 進行了測試[3]。核電廠進行超音波淨化的效果不一。有些成功且定期使用，獲得 DF 在 5~100。其他電廠報告效果不顯著，有些電廠則已完全停止使用超音波除污。KWU-Service 對 Biblis A-B、Neckarwestheim、Unterweser、Borselle 和 Atucha 多核電廠進行主要循環泵的超音波除污。在德國 Karlstein 的 KWU 中心，也對大量的鷹架和小型工具進行了除污，直到外釋標準[12]。

(八) 化學凝膠(Chemical Gels)除污

化學凝膠被用作化學除污劑的載體，將凝膠噴塗或刷塗到組件或表面上，使其反應，然後擦洗、擦拭、沖洗或剝落。可以使用無氣壓縮機來噴灑凝膠，並且可以透過改變噴頭來進行沖洗[3]。可以透過收集、中和與沉澱進行化學凝膠產生的廢物處理[4]。化學除污劑通常為酸，例如：磷酸、硫酸、硝酸[12]。

典型的試劑組合是硝酸-氫氟-草酸混合物(nitric-hydrofluoric-oxalic acid mixture)和與羧甲基纖維素膠凝劑混合的非離子型洗滌劑(nonionic detergent mixed with a carboxymethyl cellulose gelling agent)，並以硝酸鋁用為氟化物螯合劑。步驟包含刮擦和吸塵固體廢棄物，使用熱水沖洗作為預處理，並在整個單元(cell)內噴塗凝膠[12]。

化學凝膠也已被用來對冷卻(cooling)二氧化碳管道和普通鐵基鋼管道進行除污[4]。此項目已使用以下過程：

- 蘇打凝膠噴霧(3 M NaOH)，漂洗 30 分鐘。
- 酸凝膠噴塗(3 M H₃PO₄、3 M H₂SO₄ 和 16% 二氧化矽)，漂洗 30~60 分鐘。

已經發現，在具有簡單幾何形狀的低碳鋼管上，凝膠噴塗是處理 β/γ 核種的好方法[4]。法國的 CEA-CEN-Cadarache 對來自德國 ISAR-BWR 中 17 Mg 的鋼(包括 11 Mg 的格架(frame)和 6 Mg 的管道)進行大型凝膠噴塗除污的測試。使用的化學藥劑是硫酸(2 mol/dm³)和氫氟酸(1.6 mol/dm³)，在除污過程中使用了 100 升凝膠[12]。在法國的 G2 / G3 反應器中，該技術確實產生只產生了少量的二次廢物[3]。

優點	缺點
● 可有效地從大型組件中清除可抹去的污染物 ● 僅產生少量的二次廢物 ● 可以通過遠程應用輕鬆應用，並且可以實現高達 100 的 DF。	● 化學凝膠是一種複雜的化合物，通常需要至少進行兩次塗佈和沖洗 ● 必需進行進一步研究才能最佳化凝膠組成和操作條件以符合特定場所的需求。

(九) 複合技術除污

複合技術除污主要是結合機械除污與化學除污的方式，如 Pastes + HP cleaning、Foams/Gels/HP cleaning、Vacuum cleaning(dry/wet)。

9.1 超音波結合化學試劑(Ultrasound in conjunction with chemicals)

在超音波清洗中，通常添加特定的化學試劑，並以超音波清洗將待除污表面上的液體空穴作用與液體的化學作用結合在一起。在室溫下使用純水，除污因子至少可達 2。隨著溫度升高至約 80°C，添加 2~5wt% 的螯合劑、清潔劑或濕潤劑(一種介面活性劑)可以大大提高水的清潔能力。添加少量檸檬酸或其他化學物質也可以增強清潔能力。結果表明，超音波和化學藥品的搭配將提高除污因子，並減少化學除污所需的時間[12]。

義大利 Garigliano BWR 對飼水預熱器的管束(tube bundle of a feedwater preheater)進行超音波搭配腐蝕性化學物質進行除污，使其活度低於外釋規範[3]。針對小型閥件(1~2 吋)，化學除污(例如 HCl, HF, HNO₃ 及其混合物)雖可以將污染平均值降至 1 Bq/g 以下，但是有較深的間隙仍殘留有放射性。因此，對於飼水預熱端的管束(tube-bundle)採用超音波搭配腐蝕性化學物質進行除污，一米長的上千根管子可以將污染程度降至 0.3 Bq/g 以下。

9.2 乾冰噴砂(dry-ice blasting)結合雷射除污

乾冰噴砂法已採用了幾年，可清潔表面和去除塗層卻不會損壞基材的表面。在德國為了提升乾冰噴砂(dry-ice blasting)的效率，採用雷射進行結合技術，使用雷射加熱乾冰噴砂待處理的區域周圍，而使其熱應力影響最大化。因雷射加熱的效應，對於某些情況下，材料開始軟化。清除狀況分別為混凝土的最高速率為 1500 立方公分/小時和陶瓷 650 立方公分/小時，除污的深度分別可達 5 毫米和 3 毫米[18]。

9.3 超音波結合電化學除污

除了用電化學的方式除污外，現階段正在發展搭配超音波，利用空穴效應加速清除元件表面污染物，而可使除污時間縮短之有效方法。在實驗過程中，陽極和陰極必須分開，否則短路會導致效率降低，如圖 1.2. 16。除污效率則根據法拉第定律，在相同電流密度下，單位時間內樣品質量的變化可以代表電解效率。

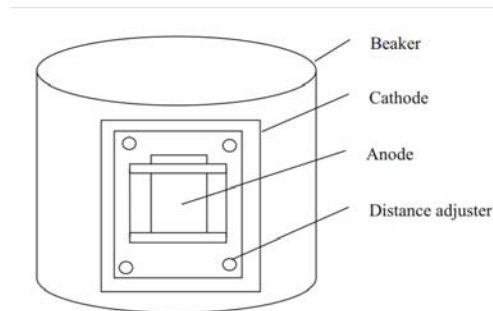


圖 1.2. 16 超音波結合電化學除污裝置圖

選擇 200 g/L NaNO_3 (pH~7.07)和電流密度 0.2 A/cm^2 的條件下，在超音波搭配電化學的結果如圖 1.2. 17 所示。電極間距選擇 1.1 公分，可以發現不論是選擇直流或是脈衝方式，加上超音波的協助，可以提升試片的電解效率，主要是增加傳輸速度。

針對不同的除污方法進行測試，選擇不銹鋼 201 做為試片，一是採用硝酸+過錳酸鹽除污(NP-201)，另一個採用 0.2 kHz 脈衝、200 g/L NaNO_3 (pH~8.9)和電流密度 0.2 A/cm^2 的條件進行(UED-201)，由圖 1.2. 18 可以發現在除污後試片的 β 粒子劑量(Beta particle count)接近環境值，而超音波結合化學除污的方式比硝酸+過錳酸鹽除污的方式更快達到環境值，其所需除污時間較短。利用超音波結合電化學來進行 UED-201 及 UED-Q345 的除污，並與 NP-201 相比，其除污因子各為 585、581 與 380，如圖 1.2. 19 顯示的結果，利用超音波結合電化學所需時間較短，而且在不同的導電材料上也是可用的[22]。

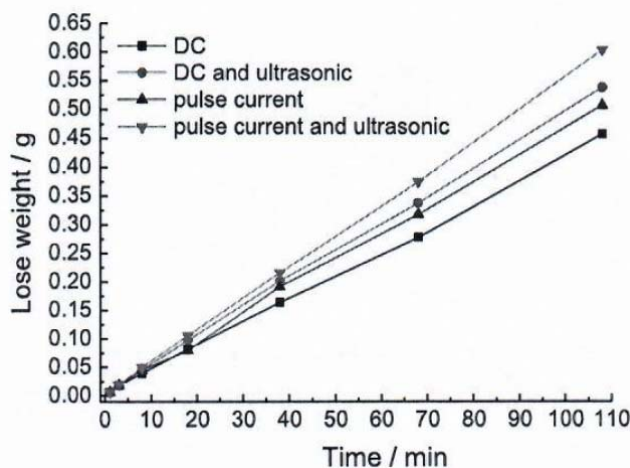


圖 1.2. 17 超音波配合電化學電解的效率比較

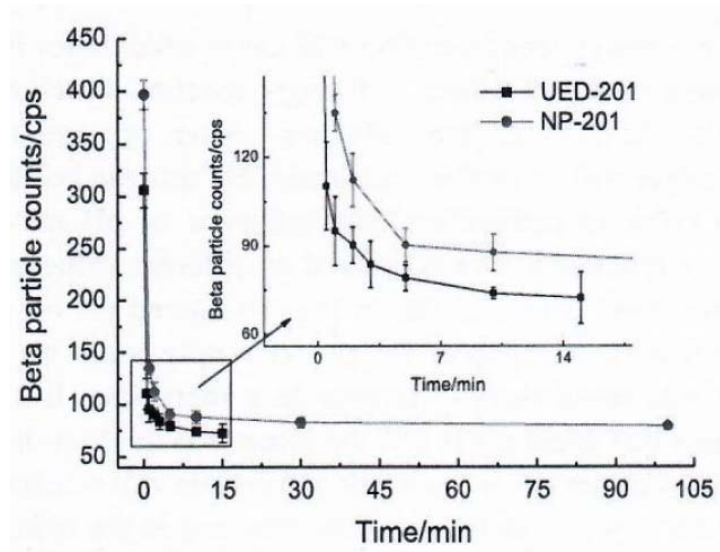


圖 1.2. 18 不同除污方法的 β 粒子劑量

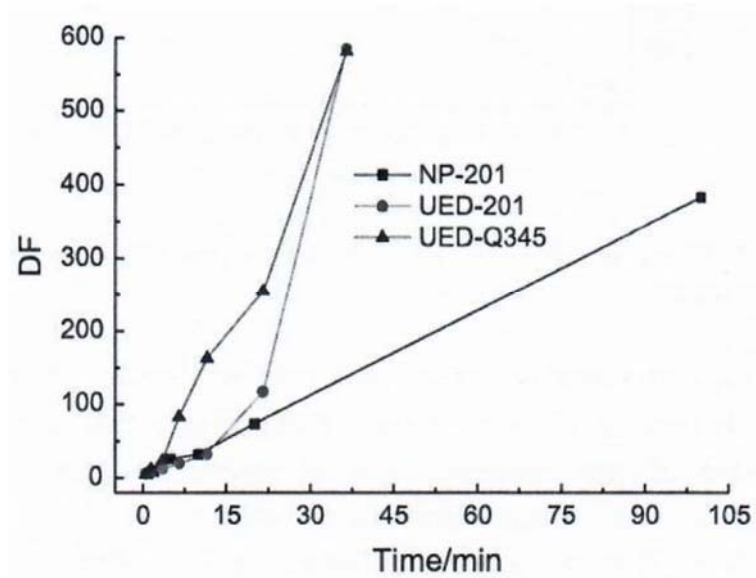


圖 1.2. 19 除污因子

參考文獻

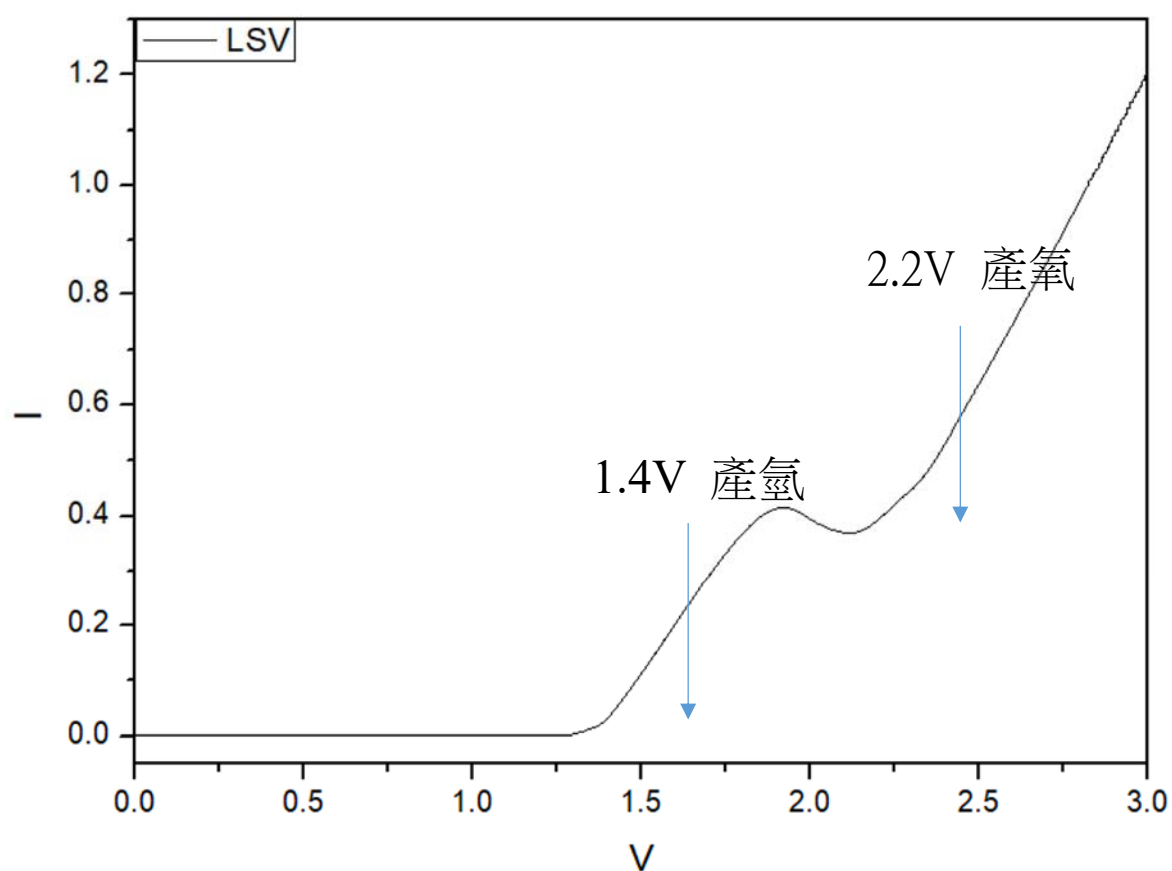
- [1] Anibal L. Taboas, A. Alan Moghissi and Thomas S. LaGuardia, Decommissioning Handbook, ASME, New York, 2004.
- [2] LaMar Johnson, et al., "Biodecontamination of Concrete Surfaces : Occupational & Environmental Benefits," INEL-96/00278, 1996.
- [3] International Atomic Energy Agency, "State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities," Technical Reports Series No. 395, VIENNA, 1999.
- [4] Dan Gabriel Cacuci, "Handbook of Nuclear Engineering," Vol. 1, Springer, 2010.
- [5] NEA Co-operative Programme on Decommissioning, "Decontamination and Dismantling of Radioactive Concrete Structures," NEA, 2011.
- [6] David M. Nielsen, Gillian Nielsen, "The Essential Handbook of Ground-Water Sampling," 2005.
- [7] Boing, L.E., Coffey, M.J., Waste Minimization Handbook, Vol. 1, Rep. ANL/D&D/M-96/1, Argonne Natl Lab., Argonne, IL (1995).
- [8] Teunckens, L., Walthery, R., Dresselaers, B., "Decontamination of Metal Components to Clearance Levels by Means of Abrasive Blasting", Experience in the Application of Exemption Principles, IAEA-TECDOC-807, IAEA, Vienna (1995) 193–200.
- [9] J. Hall, Study of Wet Blasting of Components in Nuclear Power Stations, ISRN/LUTMDN/TMVK-5321-SE, 1990.
- [10] US Department of Energy, Decommissioning Handbook, Rep. DOE/EM- 0142P, USDOE, Washington, DC (1994).
- [11] Beinstein, R.M., Compilation of Sponge Jet Use in Radiological Decontamination Applications, internal report, 30 Sept. 1997 Sponge-Jet, Eliot, ME (1997).
- [12] A. Kaul, M. Lasch, Landolt-Bornstein-Group VIII Advanced Materials and Technologies Radiological Protection, 8 Decontamination, Springer Nature, 2005.
- [13] NEA Co-operative Programme for Exchange of Scientific and Technical Information Concerning Nuclear Installations Decommissioning Projects, "Decontamination Techniques Used in Decommissioning Activities," NEA, 1999.
- [14] Michele Laraia, "Nuclear Decommissioning - Planning, Execution and International Experience," Woodhead Publishing Series in Energy, 2012.
- [15] Stang, W., Fischer, A., Rubischung, P. : Large-scale application of segmenting and decontamination techniques, Decommissioning of Nuclear Installations, Bruxelles (B), October 24-27, 1989, EUR 12690, 1990.
- [16] Steven J. Bossart, Danielle M. Blair, Decontamination technologies for facility reuse, WM'03 Conference, February 23-27, 2003.
- [17] Demeulemeester, M. Klein, S. Moers, V. Massaut, E. Rousseau (1), H. Binkhorst (2), Management of Decommissioning Wastes : The Management of High Active Waste and the Recycling of Low Active Metals and Concrete, WM'00 Conferenc, 2000.

- [18] Ralf Versemann, “Decommissioning nuclear plants : experiences in Germany”, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, 2008.
- [19] Robert Bogue, (2011), "Robots in the nuclear industry : a review of technologies and applications", Industrial Robot : AnInternational Journal, Vol. 38 Iss 2 pp. 113 - 118
- [20] Dr. Georg Braehler, “ABRASIVE BLASTING UNIT”, Proceedings of The 12th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, Paper No : ICEM2009-16270, pp. 217-227, 2009.
- [21] Satoshi Yanagihara,” Planning, Technical Issues, and Practical Experiences of Decontamination Activities,” 2018 Sino-Japanese Workshop on NPP Decommissioning Technology,” Sep. 12, 2018.
- [22] Chunhai Lu, “Study on Ultrasonic Electrochemical Decontamination”, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018.
- [23] M. Putz, ” Suspension Technology for Abrasive Waterjet (AWJ) Cutting of Ceramics” , 8th CIRP Conference, 2018.

(十) 原能會電化學儀器於本計畫之電化學除污研究成果

電化學儀器對電化學除污系統進行線性極化掃描，確定電化學除污操作電壓與電位與國外電化學除污文獻使用之區間相似。實驗參數如下表所示，線性極化掃描如下圖所示。

電化學除污參數		線性極化掃描參數	
待除污試片	電解液	掃描速率	量測電位區間
304 不銹鋼試片	60wt% 磷酸水溶液	2 mV/sec	0~3V



附錄 1-2：子項計畫 1-2 英文專有名詞縮寫一覽表

英文縮寫	英文全名	中文翻譯
	decontamination	除污
CRUD	Corrosion Related Unidentified Deposit	腐蝕污泥
BWR	boiling water reactor	沸水式反應器
PWR	pressurized water reactor	壓水式反應器
	jackhammer	空壓式鑿機
	chemical decontamination	化學除污
	mechanical decontamination	機械除污
	flushing with water	水沖洗
	dusting	除塵
	vacuuming	吸塵
	wiping	擦拭
	scrubbing	洗滌
	strippable coatings	可剝離塗層
	steam cleaning	蒸氣清除
	abrasive cleaning / abrasive blasting	噴砂清除
	sponge blasting	海綿噴砂
	CO ₂ blasting/dry-ice blasting	二氧化碳噴砂/乾冰噴砂
	high pressure liquid nitrogen blasting	高壓液氮噴砂
	freon jetting	氟噴流
	wet ice blasting	濕冰噴砂
	high pressure and ultra high pressure water jets	高壓與超高壓水噴流
	grinding	研磨
	shaving	刮刨
	scarifying	翻動
	scabbling	加工
	planing	刨削
	milling	研磨
	drilling and spalling	鑽孔與擊碎
	expansive grout	膨脹灌漿
	paving breaker and chipping hammer	路面破碎機與鑿石錘
HEPA	high-efficiency particulate air vacuum cleaners	高效微粒空氣吸塵器
PPE	dry cleaning of personal protection	個人防護乾洗設備

	equipment	
PCB	printed-circuit board	印刷電路板
	scabbler	括除器
	needle gun	針槍
	flexible material	柔性材料
	hydraulic lines	液壓管
	seals	封口
DF	decontamination factor	除污因子
AWIJ	abrasive water injection jet	磨料中注水
AWSJ	abrasive water suspension jet	研磨水中懸浮液噴射
	relaxation time	鬆弛時間
	bucket elevator	斗式提昇機
	screw feeder	螺旋給料機
	blast wheels	噴砂輪
	chamber loading door	腔室裝載門
	containment	圍阻體積
	extraction system	排污系統
	free released	直接釋放
	metallic waste	金屬污染物
	secondary waste	二次污染物
JPDR	Japan Power Demonstration Reactor	日本動力實驗反應器
	water cleanup line	爐水淨化管路
SG	steam generator	蒸汽產生器
	lifting force	舉升力
	Freon	氟利昂
	hydrolaser lance	氫雷射噴槍
	diamond sawing and coring	機械切割
	scarification process	划痕法
	auxiliary building demineralisation cells	輔助建築除礦室
	biodegradation of concrete	混凝土的生物降解
	biotechnology for the decontamination of surfaces coated with paint and varnish	針對油漆和清漆表面的生物除污
	ingot	鑄錠
	cavities	空穴
	cavitation	氣穴現象
	cavitation threshold	氣穴閾值
	scrubbing factor	擦洗因子

	ultrasound in conjunction with chemicals	超音波結合化學試劑
	tube bundle of a feedwater preheater	飼水預熱器的管
	chemical gels	化學凝膠
	nitric-hydrofluoric-oxalic acid mixture	硝酸-氫氟-草酸混合物
	nonionic detergent mixed with a carboxymethyl cellulose gelling agent	羧甲基纖維素膠凝劑混合的非離子型洗滌劑
	dry-ice blasting	乾冰噴砂
FSD	Full System Decontamination	全系統除污
CORD	Chemical Oxidation Reduction Decontamination	化學氧化還原除污
DFD	Decontamination For Decommissioning	電廠除役除污

三、評析並摘要 ASME Decommissioning Handbook Ch.17, “Decontamination” 和 Ch.13, “Decontamination Decisions and Process”，另因應我國情況根據其內容提出相應管制建議，以報告方式呈現。

(一) 前言[1]

在進行除污決策前，要如何針對結構、系統及組件進行除污，以及要選取何種技術，在決策上除了考量廠址特性外，亦取決於特定的任務需求，其往往為涉及廠址特徵與修復的循環過程，在作出除污決定前，明智的作法是至少進行半定量成本效益分析，若確定要進行除污，問題才轉向要採用的特定除污技術及程序。美國機械工程師學會(American Society of Mechanical Engineers, ASME)於 2004 年所出版的除役手冊(The Decommissioning Handbook)[2]，其中，第 13 章 “Decontamination Decisions and Process”有關除污技術與決策，即針對除污決策前，應考量如：污染源評估、時機等議題，提供務實的見解與說明，其內容亦闡述職業等效劑量(Occupational Dose Equivalent, ODE)、時間及廢棄物管理等對整體成本效益的影響，可提供管制機關以不同觀點瞭解國際案例的作法與考量，進而對核電廠除污所面臨的問題有更全面的掌握。除污作業所作的努力，都是為了將放射性污染物從既有的位置移除，無論污染的性質或程度為何，目前市面上有很多種可應用的除污方法，但各種特定情況必須經過評估後，才能針對個案決定出較適合的方式，以免選用技術在除污過程中所產生的廢棄物數量，遠高於其除污後所得到的好處，各種技術的優勢，將視個案情況而異，該手冊[2]第 17 章 “Decontamination”則提供關於這些考量的重點彙整，此外，對於各種除污技術亦有摘要性的描述。

(二) 執行方法及研究步驟[1]

本工作項目研究流程及執行方法如圖 1.3.1 所示，除了蒐集上述提及的 The Decommissioning Handbook[2]外，主要為利用網路資源蒐集有關核電廠除污的相關資料或案例，尤其是可能提供除污管制立場或技術案例資訊的網站，如：NRC、IAEA 及 EPRI 等，均為本子項主要參考途徑。

本研究除按照執行規劃完成第 13 章 “Decontamination Decisions and Process”及第 17 章 “Decontamination”，有關除污技術與決策章節的研讀及重點摘譯外，亦以 The Decommissioning Handbook[2]所提供的參考文獻為基礎，找出相關主題進行延伸閱讀，並針對除污案例及管制事項著手進行蒐集與彙整，以期因應我國情況，提出相應的管制建議。

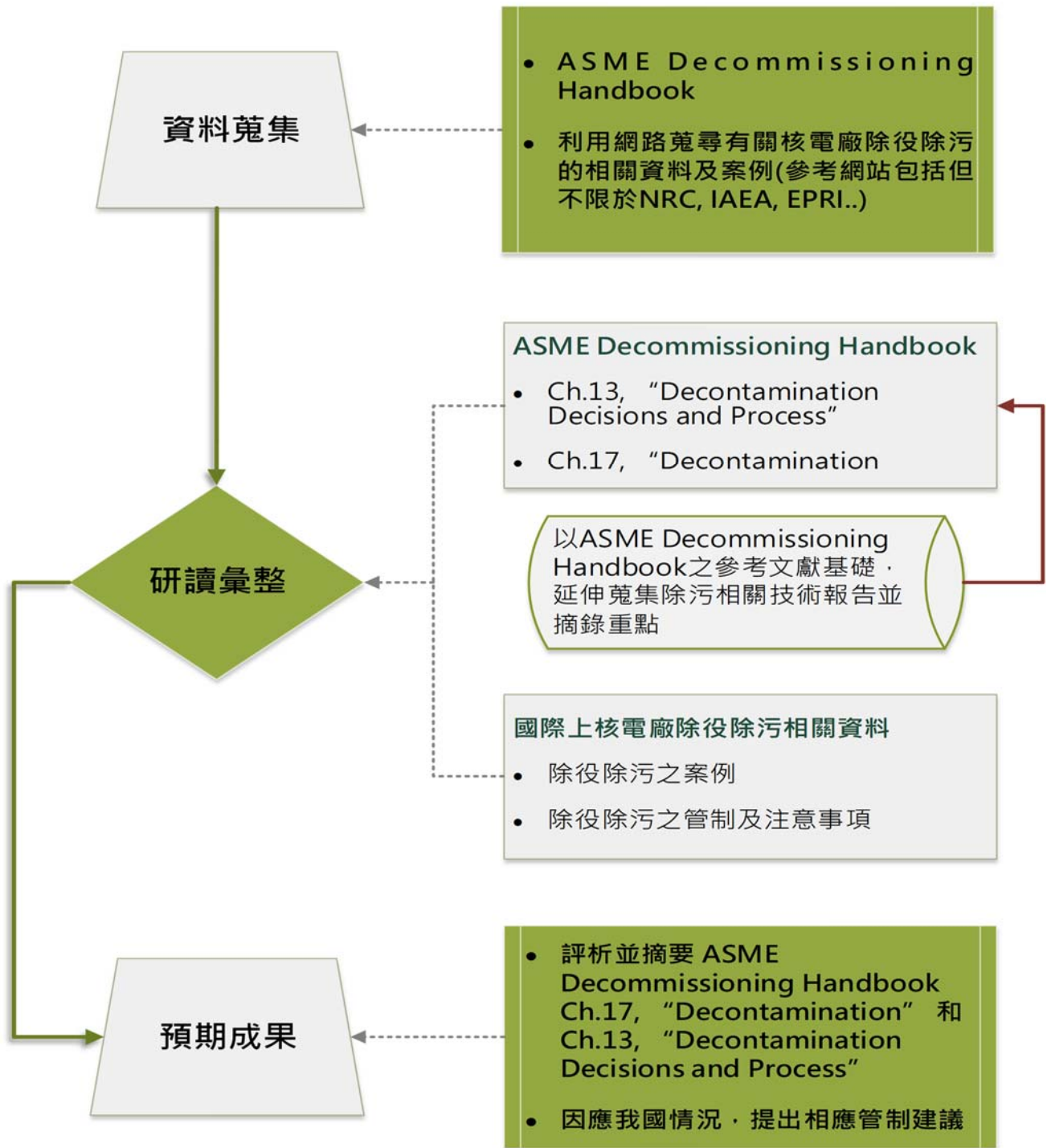


圖 1.3.1 子項計畫 1-3 研究流程及執行方法

(三) The Decommissioning Handbook[2]第 13 章及 17 章重點摘要彙整

本子項工作項目已完成 The Decommissioning Handbook[2]第 13 章 “Decontamination Decisions and Process”(除污決策與程序)及第 17 章 “Decontamination”(除污技術)的研讀及重點摘要，以下 3.1 及 3.2 節即針對這兩部份翻譯研讀後，所作的重點摘要彙整，完整翻譯內容請詳參本報告附錄。

3.1 第 13 章 - 除污決策及程序 (Decontamination Decisions and Process)

● 13.1 前言

核設施除污的相關決策及選用的方法，對輻射曝露控制具有決定性的影響。這類計畫的當務目標，主要是將表層及表面下的污染物予以隔離，從而降低或消除職業與公眾的輻射曝露，並使放射性廢棄物的管理及處置更具成本效益。對於設施中必須維持運轉任務的組件，通常使用稀釋的化學試劑，利用非破壞性的方式，將最外層遭受絕大部份污染的表面薄膜予以溶解；相反地，若該組件沒有再利用的需求，也可以將其基底金屬溶解。欲將設施恢復到所定義的最終狀態，其間過渡計畫的目標包括：

- 將鬆散的放射性污染物及殘餘的固定污染物移除
- 減少殘餘的放射性污染物所需的防護儲存
- 將設備及材料盡可能地回收再利用
- 減少放射性廢棄物的處置量
- 以限制最少且可接受的形式來隔離廢棄物，以進行運輸及處置(例如：無限制的、乾淨的瓦礫、衛生、特殊等級、僅表面污染、有害的、低放射活度、同時具有危害及放射性，遠端處理及超鈾的廢棄物)
- 縮短任何必須防護儲存或長期監控的時間

● 13.2 決策過程

化學除污會產生難以處置的二次廢棄物，還包括過程中所使用的任何設備及結構，明確要考慮的項目包括：保留足夠的放射性衰減時間、現場的屏蔽與固定、避免切割，並使用機器人技術及其他遠端處理技術。

外部輻射劑量率過高時，將存在曝露問題，此時應謹慎考慮將機器人應用於遠端切割、拆卸、剷除及包裝，高輻射場經常要求採用機器人及其他遠端處理與拆除技術。

延遲一段時間使放射性得以衰減，是使用化學除污以外，能限制職業劑量的合理替代方案，在除役區域中，當外部輻射劑量通常來自於相對大量的伽馬放射性同位素時，這方式特別適用。時間延遲對鈷這類的活化產物非常有用，但不適用於鉅等半衰期相對較長的分裂產物。

除污決策應謹記下列 9 個要點：

- 1、經由實際除污所獲取的除污因子(DF)，應與職業等效劑量(ODE)減少因子相互比較，並作仔細評估，例如，在一個小房間中，等效劑量率是來自其內部一條污染的管線，則 DF 與 ODE 因子相近；但若該空間的等效劑量，是由許多其它的放射性來源所造成，則僅對該區內的單一系統(即污染管線)除污，則未必具有成本效益，在此情況下，系統經除污後所得到的 DF 值，會明顯大於整個區域的 ODE 減少因子。
- 2、無論是多個系統、單一系統或是單一系統的局部，都可以進行除污，但應慎選除污的範圍及順序，以獲取最大效益。
- 3、若以石棉或其它有害物質作為管線或組件的絕緣材料，拆除時因為需要呼吸防護及其他人員防護設備，工時將大為增加，對於這類情況，進行組件的內部除污，或許可節省大量的等效劑量。
- 4、在工作區切割組件，可能形成空浮放射性，但若成功除污，則或許能修改人員的防護規定，工作人員可避免使用先前所要求的呼吸防護裝置。

- 5、 在拆除期間，無論該區是否受到污染，均應考量其它的劑量降低技術，例如屏蔽或高輻射點沖刷(hot spot flushing)。
- 6、 在除役期間，必須解決既有系統在此時所需提供的流徑及流率能力，透過危害評估可能會對現有管道、泵及其他設備進行改造，並發展出新的管制項目。
- 7、 應規劃除役作業的順序，才能先清出一條外部劑量率相對較低的通道，讓其他區域收集而來的組件與廢棄物容器，可立即且快速地經由該通道移至運輸區域。
- 8、 關於表面及潛在的空浮污染，則應謹慎規劃除污作業，避免已除污的區域，被鄰近區域後續的作業再次污染。
- 9、 可利用商用軟體(具不同程度的複雜性)模擬電廠的物理及放射線分佈，如此能合理且有效地排定工序及安排作業人員，將可能的輻射曝露降到最低。

● 13.3 時機

幾乎所有核電廠終止其主要運轉任務後，都會進行一些除污作業，驅動時機變數的關鍵因素就是輻射衰減。為了評估放射性衰變的影響，應在合理範圍內取樣，以確定放射性核種的混合物及總源項，在拆除作業進行前，應針對預期的放射性衰變，調整先前預估的等效劑量率。如果混合物的成份未知，則會使用造成職業輻射曝露最大的半衰期可操作核種，這類型的核種包括鈷-60 及銫-137。

● 13.4 成本效益分析的要素

成本效益分析是用來評估除污是否適當的實際方法，如果適當的話，應採用何種技術，此分析應考量個案的所有相關因素，包括：除污的直接成本、可能降低的人員輻射曝露、減少關鍵作業的時間所能節省的費用、放射性廢棄物處理及其處置費用。

圖 1.3.2 彙整除污成本效益分析中應考量的特定要素。

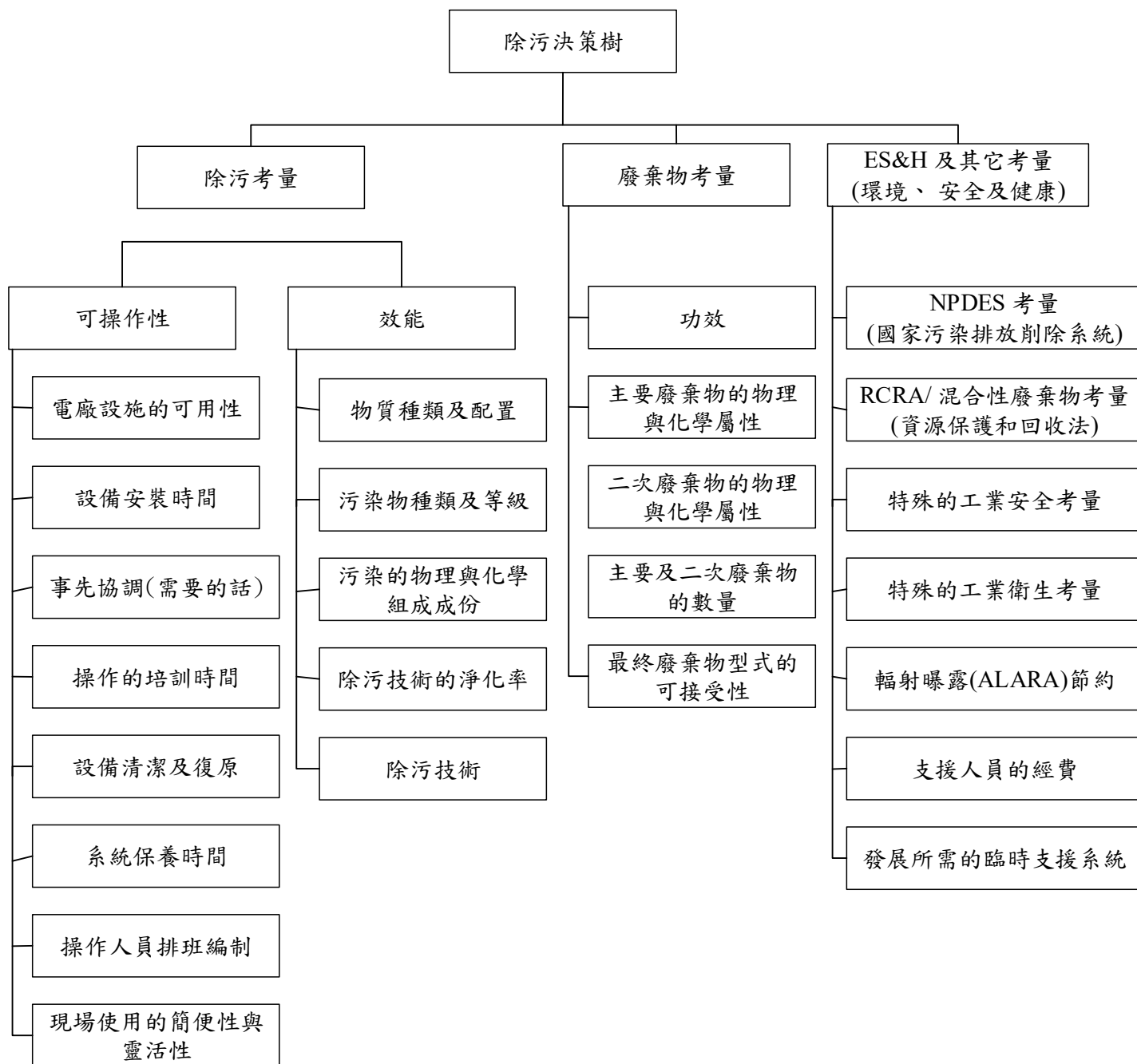


圖 1.3.2 除污成本效益模式的特定要素

● 13.5 評估直接除污成本

在進行整體成本評估時，亦應考量以下費用，此部份屬於電廠或顧問公司關注之議題：

- 如果是購買的，屬於資本設備；如果是租賃的，則為供應商費用。
- 動員及遣散設備，包括技術工(裝配工、管鉗工、電工)及設備(包括使用起重機及推高機)。
- 公用事業及其他消費品
- 除污設備的保養費用

- 直接人力及設備維護
- 合約及分包的工作範圍

● 13.6 評估間接除污成本

除污過程中，可能需要一些間接資源來支援，例如：

- 人力支援(即 ES&H 支援、管理監督、QA/QC 審查)
- 建立個廠的程序書(及相關培訓)
- 工程支援，以便臨時性系統能與電廠系統連結
- 個廠運作及 ES&H 培訓(對包商員工)

● 13.6.1 正職員工與約聘工

一般而言，更專業的設備或除污技術(即大規模液體系統的化學除污)，會需要用到包商人力。無論除污何時需要約聘工，都必須進行現場操作培訓，並有最基本的 ES&H 規定，建立並執行培訓所需的費用，應含在除污相關的間接成本內。

● 13.6.2 電廠所需系統的狀態

若電廠在停止運轉後很快進行除污，則可合理預期多數設施及支援系統仍是可操作的，重要的系統包括：

- 放射性及非放射性廢棄物管理
- 電源供應
- 壓縮空氣及/或其它氣體
- 通風
- 輻射監控
- 水及其它公用設施

● 13.7 除污的額外議題

除污會損壞結構，而無法確定其完整性，在這種情況下，除污完成後所需的任何結構、系統或組件，若能由合格工程師確認能安全地達成其預期功能，將非常有用。

在除役時，另一個要評估的項目是所選用的方法，能否配合整體計畫的進度，若最具成本效

益的除污方法會拖累整體計畫的進度，則可能需要採用速度更快但成本更高的方法。

3.2 第 17 章 - 除污 (Decontamination)

● 17.1 前言

除污是為了降低作業人員受到組件或其表面的輻射劑量、減少空氣中可能的放射性核種，或是降低處置相關的費用，雖然現在不常將材料除污後回收或再利用，但其中一個材料再利用的例子，是將輕度污染的鋼熔化，製成粒子迴旋加速器的屏蔽塊，該屏蔽塊能用來防止自然輻射源干擾粒子加速。

● 17.2 前期規劃

進行除污作業前，管理階層應思考可用的選項與流程的經濟性，並應考量下列問題：

- 該組件為何要除污？
- 其能否自由外釋？
- 其能否直接處置？
- 需要何種處置場所？
- 處置廠址可接受的輻射及污染程度為何？
- 除污是否具成本效益？
- 應採用何種除污技術？
- 該廠址先前是否曾進行該類零件或組件的除污？
- 會產生何種二次廢棄物？
- 二次廢棄物是否有害或具有放射性，亦或二者兼具？

● 17.3 作業考量

過去的經驗證實，為除污工人及其主管與領班，提供實地操作訓練的必要性及好處，該訓練可能包含使用模型設施、盡可能提高除污物品及除污過程中所使用的方法與設備之擬真度，在進行這項培訓時，人員在操作過程中，應實際穿戴防污染衣。

通常這種模型訓練，至少對負責計劃、工作進度，以及將設備與材料運往工作區的人有所幫助，亦有助於將要執行除污作業的工人及其上司與領班，這樣的訓練能確保作業的最高安全性、最佳效率並具最好的成本效益，其亦確保人員在符合法規要求下，能完成所需工作，且其輻射曝露維持在合理抑低(ALARA)水平。

除污操作必須根據詳細的作業計畫，其要素包含如下：

- 1、 預先規劃所有的工作項目，包括降低污染外釋的特定作業，例如：使用集水池、使用具 HEPA 過濾器的帳篷或利用其排氣、建製手套箱、嚴格遵守腳踏墊及其他管制措施，並遵守掛卡作業要求、排水、沖洗及其他必要的維護工作。
- 2、 污染組件在廠址內運輸進行清潔或處置，可能使原本乾淨的區域或組件受到污染，應必須儘可能避免，這些作法舉例包括，在進入污染區域前，先將所有包裝好的材料移除、運用滑軌縮短保養及操作人員更換衣物的時間、在開始前作業，謹慎選用工具及設備，以免組件接觸到不必要的污染。
- 3、 必須隨時注意每個人觀察及處理系統功能或程序操作中的任何差異，此應包括：立刻向保養人員報告任何洩漏或其他設備問題、每個人都願意向他人指出程序錯誤、公開的工作後匯報、或任何其他矯正或排除設備功能或人員錯誤的作業。

● 17.4 放射性污染物

除污通常是為了某個特定的原因，而作業人員應同時了解這個原因及污染的类型，若最終必須達到無限制外釋，則組件完成調查且自由外釋後，必須關注縫隙中放射性核種的滲濾，許多調查人員發現，污染會殘留在金屬及混凝土的裂縫與孔隙中，儘管在自由外釋的調查中未發現放射性，但經常在之後再次發現-表面內部滲濾出放射性核種，在最終調查時之所以未發現放射性核種，據信是由於污染嵌入太深，以致於無法偵測。應用除污技術亦可降低作業人員的輻射曝露或避免污染擴散，這種情況下，對調查規定的限制相對較少。

● 17.5 除污因子

測量輻射強度時，必須確保測量具備以下的再現性(reproducibility)：

- 1、 測量程序標準化。不同的技術人員，可能以不同的方式拿著儀器、儀器量測的方向稍為不同，或是測量的區域不完全相同。
- 2、 使用最近校準的儀器，進行除污前、後的測量。理想情況下，在整個除污期間，均應使用校準良好的儀器。
- 3、 每次測量的確切位置都相同。必要的話，應將每個位置都標註起來，讓不同的人盡可能在相同位置進行量測。
- 4、 找出由表面能重複量測的距離與方向。輻射測量應以接觸量測為主，以減少輻射源項對周圍及鄰近區域的影響。

● 17.6 氧化物溶解

腐蝕性產物的生成，取決於其所存在的環境類型，在 BWR 環境下，通常最接近冷卻水的腐蝕性薄膜是赤鐵礦(Fe_2O_3)，而其內表面是由鎳取代的磁鐵礦($\text{Ni}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$)組成；而在 PWR 電廠的水化學，因為包含可溶的氫，故溶解的氧氣相對少很多，腐蝕性薄膜由鉻及鎳取代的磁鐵礦($\text{Ni}_x\text{Fe}_{(3-x-y)}\text{Cr}_y\text{O}_4$)組成。

因為不同反應器的表面，各自具有相異的氧化物，故需使用不同的化學溶劑，才能達到最佳的移除效果，移除磁鐵礦或鎳取代的磁鐵礦，需運用還原法，但若薄膜是由高比例的鉻組成，則必須在氧化環境下，移除鉻的保護性基材。

● 17.7 污染的性质

若能確知污染的性质，則除污過程可大為簡化，應事先多了解其成份特徵，例如油性混合物、腐蝕產物薄膜、經過表面缺陷所造成的擴散，固定在表面基質中或是被塗抹在表面上，在許多情況下，過去的歷程記錄可能有助於找出許多相關參數。

商用核電廠的除役計畫，可運用機械或化學除污方法，因其可顯著減少高劑量或局限區域的整體外部輻射場，進而將工人的輻射曝露減至最低，若要完整運輸大型反應器的組件，可能需要進行大規模的化學除污，以將其輻射強度降低至符合運輸法規的標準。

在許多情況下，運轉期間使用的技術，可以直接或略經調整後應用於除役過程，針對特定任務所開發的化學除污技術，無論是在購買專用處理設備方面，或是在處置其所產生的額外液體及受污染廢棄物方面，可能都很昂貴。在評估化學除污的成本效益時，應將計畫的最終目標及其健康與安全等規定一併納入考量。

● 17.7.1 反應器的放射性腐蝕產物

在選擇應用的化學除污技術及其步驟前，必須先知道腐蝕薄膜的成分及特徵，沸水式(BWRs)與壓水式反應器(PWRs)中所發現的腐蝕薄膜類型不同，BWR 電廠在加氫水化學作用下運轉，亦會影響其所形成的腐蝕薄膜，二者的主要區別在於鉻的濃度及其氧化狀態。

BWR 的運轉化學，涉及的氧氣濃度為十億分比濃度(~200 ppb)，相較之下，PWR 的運轉化學包含百萬分之幾的氫，這使得 PWR 中的氧氣濃度，保持在較低的 ppb (10 ppb<)範圍內，這樣的氧濃度差異，導致腐蝕薄膜中的鉻濃度明顯不同。

移除腐蝕薄膜及相關放射性核種的化學除污類型，會受到腐蝕薄膜中的鉻濃度所影響，在標準的 BWR 環境中，可使用簡單的化學螯合方法，獲得 6~10 的 DF，這是因為腐蝕薄膜中幾乎沒有鉻離子可幫助其免受螯合劑的侵蝕。

如果目標是在標準的 BWR 環境中獲得高 DF，則建議採用多步驟程序，包括與某種高錳酸根離子有關的預處理步驟。

● 17.7.2 腐蝕產物的運輸、活化及沈積

核電廠在運轉階段或熱停機時，反應器冷卻水系統是處於連續循環狀態，這意謂該系統仍在持續運作、在化學上保持適當的濃度、溫度位於運轉參數，且水以預定的流速流經管路，基材金屬及腐蝕薄膜因為運轉參數的關係而受到腐蝕，系統隨後達成平衡，並且產生一些可溶及不可溶物質的沈積，但這些沈積的速率十分緩慢，電廠的運轉安全並不會受到任何腐蝕或侵蝕過程的影響，但這種腐蝕產物的平衡，對爐心外管道表面上的輻射強度具有重大影響。

因為持續不斷地發生的平衡，腐蝕與侵蝕產物可能沈積在管道、壓力槽及爐心表面，這些材料一旦沈積在壓力槽區並暴露於中子，就會被活化，一旦被活化，這些物質仍會繼續參與反應器冷卻水系統中的平衡，並從表面溶解或腐蝕，然後藉冷卻水輸送到系統的其他區域。

一旦粒子被固定在某處，似乎就能在金屬表面的沈積物中擴散，故經過數年的運轉後，可能會在整個沈積層中發現放射性物質，不僅在表面固體沈積的鬆散沈積物內，連鬆散沈積物下緊密附著的沈積物中，都能發現放射性物質。

放射性物質也會擴散到金屬顆粒間的孔隙中，進而限制稀釋化學法所能實現的除污量，在進行化學除污及預估潛在 DF 時，必須考量到此因素。

● 17.8 化學除污技術

化學除污係藉由化學物質溶解或使周圍環境鬆散以移除污染物質，然後同時或在隨後的步驟中，沖掉或洗去污染物，化學除污具有的潛在優勢包括：能夠清除縫隙、接頭、管道及受限於機械方法難以施作的位置；另一方面，化學藥品的使用必須考量處理設備及條件，同時也要留意與技術本身及產生的廢棄物處理與處置等相關的危害及環境問題，操作員穿戴額外的化學品防護裝備可能會降低其生產率。

1990 年~1998 年間，進行化學除污的 BWR 與 PWR 數量，如圖 1.3. 3 所示，兩種類型間的關係(BWR 較多)，亦適用於 1990 年前進行的結果，圖 1.3. 4 則表示各電廠進行的化學除污類型，LOMI 是商轉中核電廠最常使用的技術(有超過 70%的電廠除污)，它產生的放射性廢棄物最多，但由於受到 EPRI 的支持，因此受到大多數電廠的青睞。

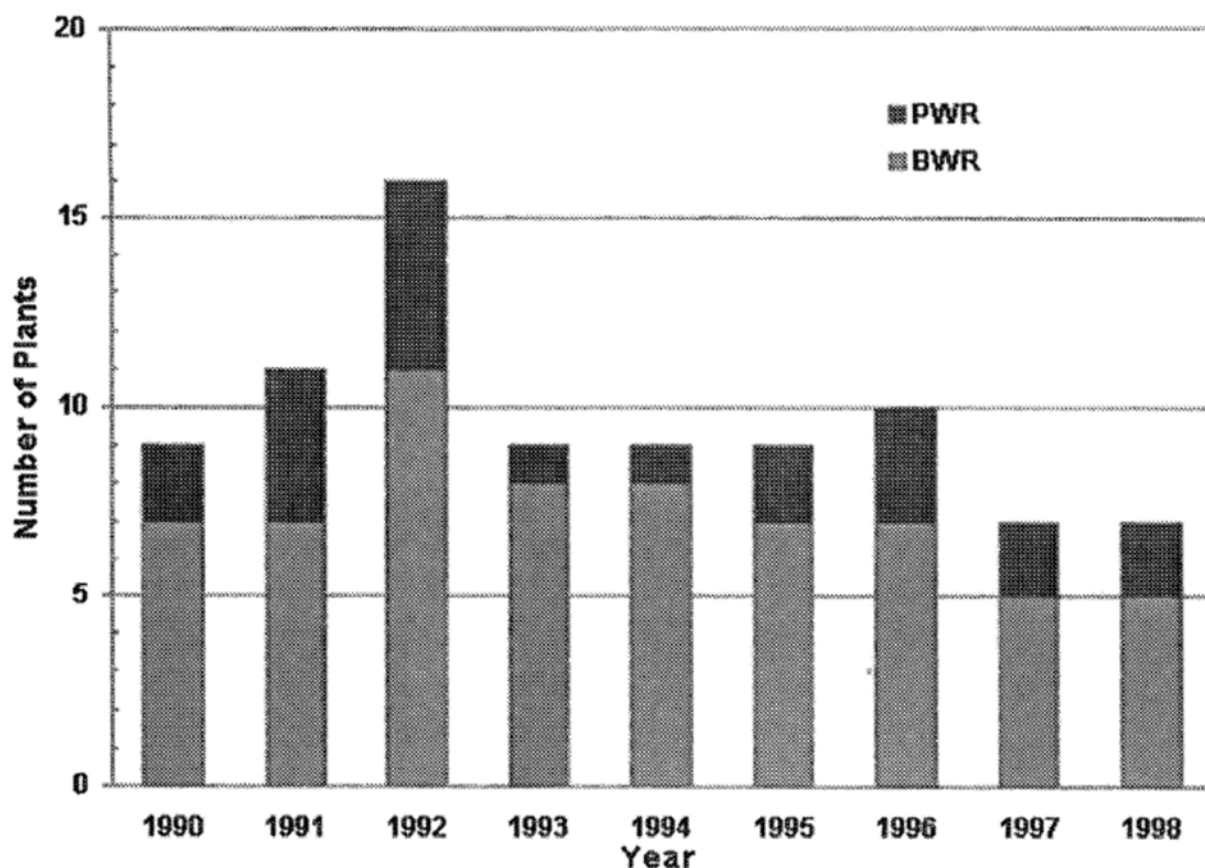


圖 1.3. 3 BWR 與 PWR 於 1990 年~1998 年間進行化學除污的數量[2]

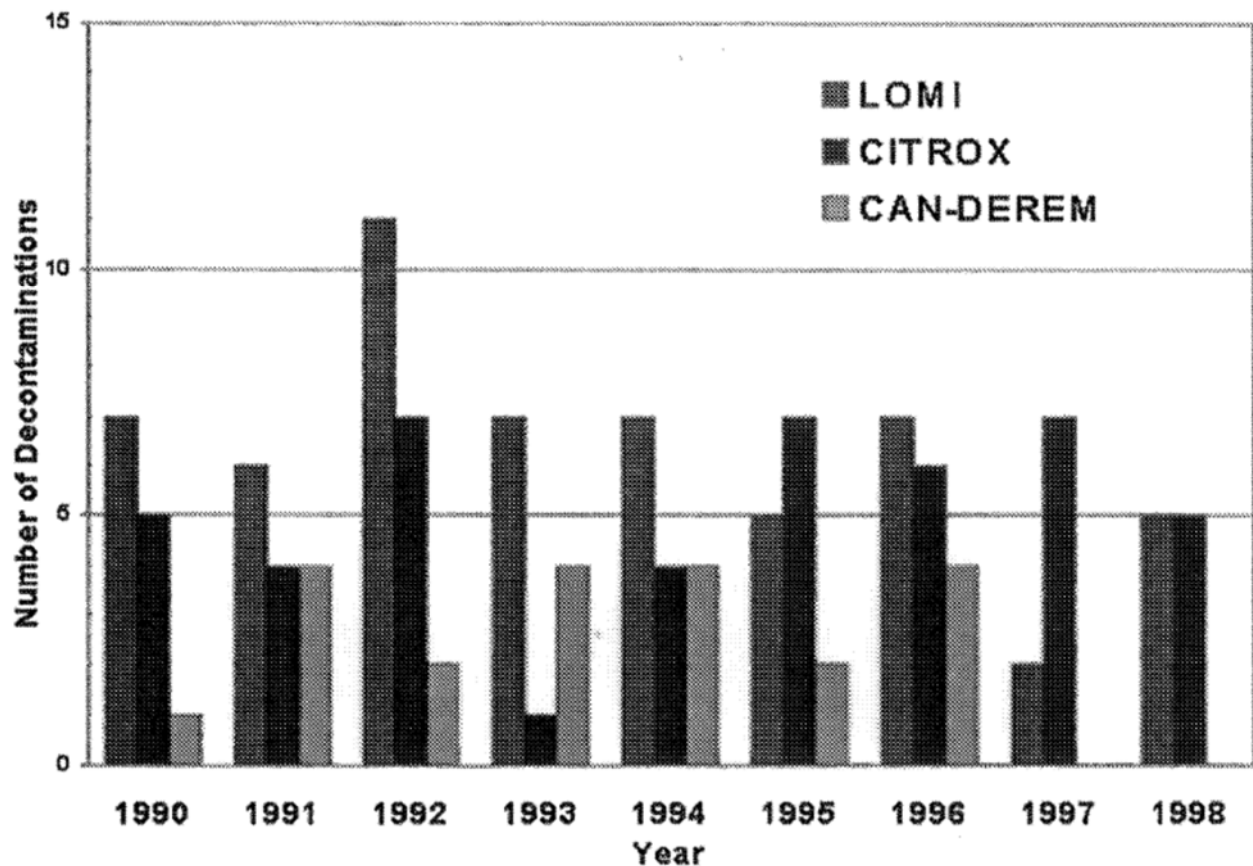


圖 1.3.4 各電廠於 1990 年~1998 年間進行的化學除污類型[2]

● 17.8.1 CAN-DECON 及 CAN-DEREM 技術

CAN-DECON 係由 EDTA、檸檬酸及草酸所組成，莫耳數比約為 2:1:1，AECL(Atomic Energy of Canada Limited, Canada)在 1970 年代開發了 CAN-DECON 技術，主要用於 CANDU 重水式反應器，這是一種低濃度化學除污技術，且放射性廢棄物只有離子交換樹脂，這在 CANDU 除污時很重要，因其為重水緩和反應器，在處理過程中無法承受昂貴的重水損失。

CAN-DEREM(AECL, Canada)技術不含草酸，因為積極性的測試結果顯示，這種酸在 CAN-DECON 溶劑中可能會對高度敏感的 304 不銹鋼(SS 304)造成 IGA / IGSCC。因此，不銹鋼系統只會採用 CAN-DEREM 技術。

使用 CAN-DECON 及 CAN-DEREM 技術，已觀察到 DF 可達 5~20，如果在 BWR 中不使用氧化步驟，DF 會比較低。鹼性高錳酸鉀的 DF 效果低於硝酸，由於 CAN-DEREM 技術的侵蝕性較小，故可以用在不銹鋼及碳鋼表面，而毋需擔心腐蝕。

● 17.8.2 CITROX 技術

由 R.D. weed 開發的 CITROX 試劑，由檸檬酸(citric)及草酸(oxalic)組成，故命名為 CITROX (CITROX & NITROX: PN Services Inc., USA)。由於其濃度較高並使用草酸，該方法比 CAN-DECON 或 CAN-DEREM 溶劑更具腐蝕性。根據各實驗室測試的結果，可以略微調整草酸與檸檬酸間的比例以優化 DF。在 CITROX 程序完成後，可利用陽離子及陰離子樹脂對溶液進行除礦處理，將除污溶液恢復成除礦水。

● 17.8.3 CORD 技術

CORD 是化學氧化還原除污(Cheical Oxidation Reduction Decontamination)的首字母縮寫，它是從 OZOX 技術(臭氧/草酸)演變而來的，該技術最早是用臭氧作為氧化劑，但由於技術上的困難，所以在現場都是用鹼性高錳酸鹽(Wille, 1986)，CORD 實際上是一個以高錳酸(HMnO₄)為氧化劑，草酸為溶解及螯合劑的技術類別，紫外線(UV)及過氧化氫是用來降低草酸的濃度，並進而減少廢棄物數量，所有產生的廢棄物都是離子交換樹脂，使用高錳酸作為氧化劑也降低了整體的離子交換需求。

● 17.8.4 LOMI 技術

英國中央電力局(Central Electricity Generating Board)在 1980 年代初期開發了 LOMI 化學除污技術(Bradbury, 1983 年)，LOMI 是低氧化態金屬離子的字母縮寫(Low Oxidation state Metal Ion)，其使用了一種強還原劑(溶液中的鈳離子與吡啶-2-甲酸(picolinic acid)螯合)來攻擊氧化物基質中的鐵離子，使二價鈳離子被氧化為三價鈳離子，鐵離子同時被還原為亞鐵離子。

LOMI 技術有 3 個缺點，其一是鈳離子在碳鋼體系中不穩定，如果除污量體中含有大量碳鋼，則應使用其它的技術，第二個缺點是必須移除大量的樹脂，將系統中添加的吡啶-2-甲酸與鈳的莫耳比降至 6:1，雖然能降低部份樹脂量，但絕大部分的樹脂負荷是來自溶液中的鈳離子，而其他除污技術沒有這種樹脂負擔，最後一個缺點是化學品的成本，鈳甲酸鹽是為每個客戶量身訂制的，儲存期限較短(6 個月)，此亦為其他技術所沒有的開銷。

● 17.8.5 DFD 技術

DFD 是除役用除污(Decontamination For Decommissioning)的代名詞，該技術以氟硼酸(fluoroboric acid)作為活性成份(Bradbury 1997, 1998)，利用腐蝕金屬表面來移除其面上的放射性，理論上，這種對基材金屬的一般腐蝕，會讓沈積在基材金屬內凹坑或縫隙中的任何放射性核種被釋出，組件在經過數次 DFD(8~10)循環後，其輻射強度會降低，且可能可以自由外釋。

DFD 是由 EPRI 核可的多步驟技術，其運用高錳酸鉀來提高溶液的氧化電位，以溶解某些類型不銹鋼的保護性鉻層。

DFD 技術的每個循環均包含 4 個獨立的步驟。

- 1、 啟動：第一步是當溶液達到 DFD 工作溫度 200°F 時，在溶液中添加氟硼酸來啟動化學除污，典型的氟硼酸濃度為 10 毫莫耳。在此過程中，會利用過濾器及陽離子樹脂柱進行溶液的再循環，直到移除顆粒材料且溶解的金屬濃度低於 10 ppm，此時可將陽離子樹脂柱從流徑中移除。
- 2、 氧化：在流徑中的陽離子柱移出後，將約 200 ppm 的高錳酸鉀加到氟硼酸溶液中，以溶解腐蝕薄膜中的鉻，該反應也要在 200°F 進行並持續到高錳酸鉀還原成二氧化錳，此反應耗時約 2~4 小時。
- 3、 破壞：該技術的破壞階段，需要添加化學計量的草酸以溶解二氧化錳，故當溶液中的可溶性錳離子濃度接近零時，即可終止該步驟。
- 4、 過渡：各個循環的最後步驟，是讓溶液恢復成氟硼酸，一旦陽離子濃度低於約 10 ppm，本次循環就完成了，並視需要再次啟動循環，通常要 6~12 個循環才能達到所需的 DF，循環次數將取決於各電廠的最終除污目標。

● 17.8.6 終止標準：

1、 CAN-DEREM，CAN-DECON，CITROX 及 CORD

通常是藉由分析鐵離子濃度或特定的放射性核種，或是監測管道特定區域的輻射強度來終止這些除污步驟，因為這些技術都是可再生的，將溶液通過線上的陽離子樹脂進行循環，來移除可溶性陽離子，但鐵離子的濃度不會增加，而是會不斷地被移除，因此，當鐵離子無論是否流經陽離子樹脂柱，濃度都接近時，則幾乎沒有新的鐵被溶解，如果處於此技術的最佳狀態下，則可以終止該步驟。

2、 LOMI

LOMI 技術使用活性成分釩離子，藉以驅動反應，要評估 LOMI 過程的終止點，必須至少監測 2 個參數，第一個是釩離子濃度，可利用紫外線/可見分光光度計進行監測，第二個參數是鐵濃度，另一個建議是監測每個樣品的總伽馬活性，並繪製釩離子、鐵及總活性的線型。

● 17.8.7 再次污染：

Indian Point 2 號機的化學除污計畫研究，提供有關全系統化學除污再污染的最佳資訊，該電廠在 1995 年移除反應爐內的燃料，並進行了化學除污，圖 1.3. 5 是蒸汽產生器(Steam Generator, SG)二次側手孔上的輻射強度圖，各組柱狀圖的第一條線是除污前的劑量率，第二條線是化學除污後立即測得的劑量率，第三條線則是化學除污後經過一個週期的劑量率，四分之三的蒸汽產生器在化學除污後的一個週期內，劑量率沒有明顯變化，但蒸汽產生器 SG24 在第一個週期中，劑量率大約增加了 50%，在 1997 年大修開始時，蒸汽產生器 SG24 是用作爐渣碎屑爆破的設備，或許是其輻射劑量率較高的原因。

Secondary Side Hand Holes

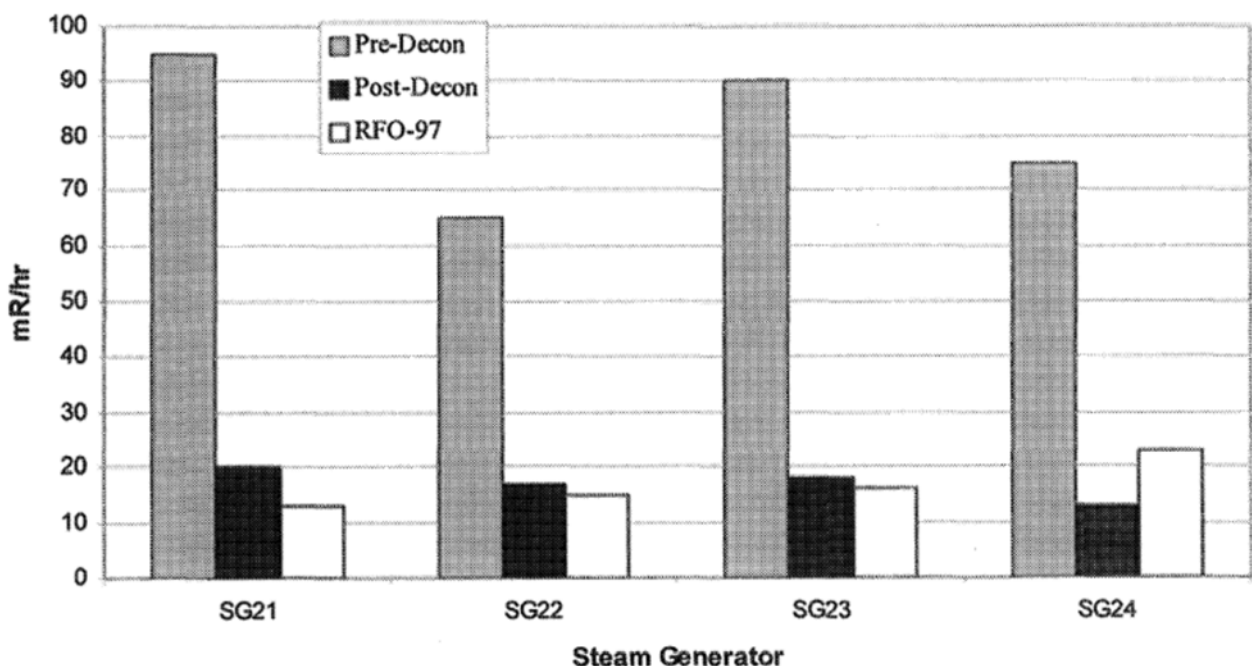


圖 1.3. 5 IP-#2 機蒸汽產生器二次側手孔劑量率[2]

● 17.9 機械除污技術

許多運轉員回報，機械除污用在大型、規則表面的效果最佳，因為除污設備能容易接近的這些表面且不受其他結構的干擾。縫隙、接頭及其他進入位置受限的污染，則可能很難或無法利用機械方法移除。

● 17.9.1 清潔除污

以下是核電廠內建築物/設施表面及結構構件最常用到的除污方法：

- 手擦拭(hand wiping)/刷洗(scrubbing)
- 水沖洗(water flushing)
- 高壓水沖洗(high pressure water lancing)
- 可剝塗層(strippable coating)
- 蒸汽清洗(steam cleaning)
- 用非導電溶劑清洗(cleaning with non-electrical conducting solvent)

其他方法包括研磨帶(abrasive belts)、磨料噴砂(abrasive grit blasting)、研磨機(grinders)、刨除(shavers)及粗琢(scabblers)，核能業中的所有電廠，實務上至少都使用 2 或 3 個前述技術來進行建築物與設施的除污。

● 17.9.2 先進可回收的研磨料介質系統

是一種採用軟性可回收介質的開放式噴砂技術，該介質由胺甲酸乙酯泡棉(urethane foam)基質所組成，可製成各種等級的磨料，纖維介質可重製及/或重複使用最多達 20 次，且幾乎可以清潔任何表面(木材、金屬或鉛)及幾何形狀，包括角落及風管內部。該系統分為三個裝置：介質供給設備、篩濾設備及介質重製設備，供給設備會將介質推向便攜式噴砂設備要清潔的表面，之後手工收集用過的介質並放入篩濾設備中，大的碎屑(> 0.25 in 或 64 mm)與細小顆粒(<1/16 in 或 16 mm)會被當作廢棄物丟棄，剩餘的介質則可重製，或是送回供給設備重新回收利用。

● 17.9.3 混凝土刨除機(concrete shaver)

Marcrist Industries Limited (U.K.)販售的 DTF-25 型混凝土刨除器，是一種自走(self-propelled)、手扶式(walk-behind)電動刨除機，其使用混有金剛石的鼓式刀片，以極精確的公差刨除混凝土表面，該刨除器適用在平坦的(或輕微彎曲的)牆壁與地板上，機器配有寬 10 in(23 cm)、直徑 5 in(12.7 cm)的刨除滾筒，上面裝有許多 Marcrist 專利、混有金剛石的刀片，刨除深度可調整從 0.004in(0.01 cm)到 0.5 in(1.3 cm)，該系統使用真空過濾系統，可達到無塵運作，運行速率可自由設定，具有高生產率，一組刨除刀片的額定工作時間為 156 小時，該技術特別適用於僅少數障礙物的大型開放區域-面積在 100 ft²(10 m²)以上。

- **17.9.4 混凝土剝落機(concrete spaller)**

太平洋西北國家實驗室(Pacific Northwest National laboratory, U.S.A.)的混凝土剝落機是一種手持式工具，能針對平坦或微彎曲混凝土表面進行除污處理，混凝土剝落機比傳統工具(如手持式氣動粗琢(pneumatic scabblers)及除銹器(scaler))的效率更高。例如，剝落機的剝除能力為 $0.23 \text{ ft}^2/\text{min}(1.3 \text{ m}^2/\text{hr})$ ，而粗琢(scabblers)的剝除底限為 $0.20 \text{ ft}^2/\text{min}(1.1 \text{ m}^2/\text{hr})$ ，除銹器(scaler)的剝除深度為 $1/8 \text{ in}(0.3 \text{ cm})$ ，亦比傳統工具更深入移除混凝土。

在最理想的條件下，剝落機的操作成本會比粗琢(scabblers)及除銹器(scaler)低 22%，且相對容易操作，振動幅度也較小。

- **17.9.5 電動液壓粗琢(electro-hydraulic scabbling)**

混凝土電動液壓粗琢是由兩個電極間的脈衝高壓放電產生的，水力震波藉由排水通道與混凝土之間的水來傳播，導致混凝土破裂及剝落，藉由改變脈衝能量、形狀及電極位置可控制剝除深度，水不僅能有效地傳遞能量，還可以作為碎屑護圈及傳輸介質，與傳統的高壓水噴射技術相比，耗水量要低得多。

電動液壓粗琢技術可用於嚴重污染的地板、牆壁或天花板，其優點包括：按規定需處置的廢棄物數量能減少、與此類技術相關的健康及環境危害能降低，因降低能源消耗、具較高的處理速率、對作業人員的要求較少等所節省的成本，以及更低的混合廢棄物處置成本。

- **17.9.6 重型旋轉砂輪(heavy duty roto peen)**

這種創新的技術是採用重型旋轉砂輪片來移除混凝土地板上的混凝土與塗料，該系統還能進階配備鉛探測器，如偵測到真空度降到安全臨界值以下，該系統會切斷混凝土剝除機的電源，被移除的顆粒會被同步收集到具有 HEPA 過濾之真空吸塵器的滾筒內。

旋轉砂輪技術能在樓地板面積約 $500 \text{ ft}^2(46.5 \text{ m}^2)$ 的範圍，以約 $71 \text{ ft}^2/\text{人}(6.6 \text{ m}^2/\text{人})$ 的速度，均勻的移除一層混凝土及塗料。由於專用珠粒的緣故，故只有從地板上清除的部份才會進入廢棄物流。

- **17.9.7 研磨除污(Milling decontamination)**

Pentek 研磨技術(milling technology)是一種移除污染塗層的方法，適用範圍包含地板、牆壁、天花板及結構組件上的混凝土與鋼材，該系統使用具有局部排氣功能的手持式旋轉噴頭除銹器(hand-held roto peen scaler)，旋轉式刮刀在清除碎屑的同時，亦被同步收集在 VAC-PACR 這個高性能 HEPA 真空/滾筒系統中。

- **17.9.8 遠端乾冰噴砂系統(Remote dry ice blasting system)**

其整合了兩種已驗證的技術：遙控車及乾冰(CO_2)噴砂系統，此外，由於該系統採用遠端操作，故降低了個人防護規定及工人曝露風險。

- **17.9.9 遙控粗琢 (Remotely Operated Scabbling)**

MOOSE 是 Pentek (Pentek, Inc., U.S.A.)的遙控粗琢技術，目的在劃破大型的混凝土地板及樓板。

在一項案例中，MOOSE 成功地在樓地板面積 $618 \text{ ft}^2(57.4 \text{ m}^2)$ 的範圍，移除了 $1/8 \text{ in}(0.3 \text{ cm})$ 標稱混凝土，兩個人使用的生產效率為 $130 \text{ ft}^2/\text{hr}(12 \text{ m}^2/\text{hr})$ ，MOOSE 已被證實是極具

機動性且易於操作，該區域在除污前，放射性污染包括熱點的固定 beta/gamma 值為 1,000 dpm/100 cm²~105,000 dpm/100 cm²，除污後，除了 1 個熱點外，其餘均降低到 3500 dpm/100 cm²。

- **17.9.10 軟性介質噴砂(Soft Media Blast Cleaning)**

軟性介質噴砂是從高壓水清洗系統演變而來，由氣動推進軟性介質撞擊表面的動能，提供其移除表面污染物的機制，具有高輸送速度的軟性噴射介質，會以高能量撞擊表面，但由於其結構柔軟，僅輕微反彈，在撞擊時，柔軟的介質會吸收並捕獲污染物，且將其帶離基材，以便於處置，軟性介質噴砂似乎適合作為濃縮鈾處理過程殘留物的清潔技術，實現此目標的主要障礙，是系統在操作過程中的噪音問題(測量值為 110 dBA)。

- **17.9.11 蒸汽真空清潔(Steam Vacuum Cleaning)**

Kelly Decon 系統(Container Products Co., U.S.A.)是從高壓水清洗系統演變而來，除污機制是在污染表面噴撒加壓過的熱水流。Kelly 系統主要應用在房間、游泳池、牆壁、大型組件及/或與光滑表面有關的類似應用，值得注意的是，即使相對平坦的桶槽斷片，也無法完全與 Kelly 系統相容，這些切割下來的組件，可能有很多焊接後的殘留物，使設計用在平坦表面的清潔頭，在使用上受到干擾。

- **17.9.12 噴射水 (Water Blasting)**

噴射水的基本設備包括高壓泵、液體輸送管及用於形成受控水柱，以噴嘴將其撞擊到受污染表面上，噴射水設備通常安裝在固定的基礎設施內，用來處理及淨化小型設備及被帶去除污設施的可拆卸組件，該區域可能配有集水坑、窗簾及其他用以減少污染擴散的設備並收集殘留物。

用來噴射的加壓水會有一些危險性，高能量的水流可能致命，且高壓沖洗的工安事故會造成死亡，操作人員培訓是不可或缺的，防護服的最低要求應包含護目鏡、聽力保護器及手套，但其規定必須與潛在的危害相稱，噴射水能有效移除附著在一般表面上的鬆散污染物，通常噴嘴必須與除污表面保持幾英寸的距離才會有效，且不易消除裂縫、縫隙或障礙物後面的污染，對於規則的且易於接近的表面，其生產率約為 100ft²/h。

- **17.10 其它技術**

除了化學與機械除污技術外，也有依賴其他原理的技術，以下技術經證實已被成功應用，或可列入考慮。

- **17.10.1 電動除污(Electrokinetic Decontamination)**

ISOTRON (ISOTRON Co., U.S.A.)是專為混凝土表面進行電動除污而開發的技術，藉施加電場以誘導離子污染物從多孔混凝土內部遷移到除污單元中，系統組件包括專用的表面電動抽取概念襯墊、電解液及電極。

電動除污技術提供混凝土現場除污的替代方案，讓結構或設施得以再利用，該技術產生極少的二次廢棄物，且不會產生傳統剷除或物理磨耗常見的空氣污染顆粒物。

● 17.10.2 雷射削磨(Laser Ablation)

工業用雷射能控制金屬及混凝土表面的塗層剝蝕(ablate)，不僅可有效地清除表面及表面孔隙中的塗層物質，且剝蝕材料的速度比熱波(thermal wave)傳播到基材更快，以防止熔融基材夾帶表面污染並留下冷卻表面，該特性亦可避免對基材造成損壞，也減少污染物的潛在揮發，氣體、蒸氣及顆粒抽取裝置會收集被剝蝕下來的物質，在過濾階段，真空系統會吸入剝蝕所夾帶的空氣及氣體、蒸氣與顆粒物。

● 17.11 小結

為各項作業選擇適當技術的人，應該就是在除污方法與技術方面有豐富運用經驗的人，所謂的除污工程師，並不是獲得學院或大學學位，而是與他人共同參與這個過程或技術，來獲得這個領域的相關經驗。某些技術若運用不當，所產生的污染物質，可能遠高於該過程所能清潔的量。

二次廢棄物的產生，取決於所選用的方法或技術，亦將影響該方法的整體成本，應特別留意各種溶劑使用後所產生的混合性廢棄物(兼具毒性及放射性)，必須確認除污過程中所移除的成份為何，若一旦產生混合性廢棄物時，才能給予適當的包裝及處理。

選用除污方法的主要因素是設備費用，初期應選擇執行作業者具備的設備且累積最多經驗的方法。對於非最佳選擇的技術，若對現場設備及人員經驗有好處，亦應予以考慮。

(四) 國際除役/除污案例資料蒐集

4.1 Nuclear News Special Section Decommissioning & Decontamination, Best Practices for Strategic Nuclear Plant Decommissioning | 36, July 2019, Nuclear News, ANS(American Nuclear Society)[3]

由於一些國家近來決定逐步淘汰核能、電廠的自然生命週期以及基於經濟因素等原因，而將電廠關閉，使得全球對除役及除污的需求增加，這情況在歐洲最為明顯，約有 90 座反應器因為各種原因(例如損壞、政治或經濟考量)而關閉，北美核電廠停機的數量正在增加，約有 8%的美國商業機隊(根據 2012 年的 104 座反應器數據)在 2013 年~2019 年間停機，而剩餘在運轉的電廠，約有 13%會在 2025 年左右除役；加拿大則是到 2025 年，將關閉 10 座(約一半)反應器，此一趨勢亦延伸到亞洲、日本、韓國及台灣。

西屋公司根據其在除役及廢棄物處理方面 30 多年的經驗為基礎，幫助核電廠渡過生命週期的最後階段。本文的目的是討論核電廠除役策略性規劃的最佳作法，重點如下：

- ◆ 制定除役計劃及策略。
- ◆ 優化除役計劃，並最盡可能減少廢棄物量及相關的處理成本。
- ◆ 規劃技術策略，以便在進行除役及拆除作業時，能充分利用電廠空間。
- ◆ 利用 3-D 建模優化除役策略。
- ◆ 在計畫開始時，即對一次側迴路進行全系統化學除污，以利後續採用手持工具進行拆除作業，並降低廢棄物處理成本。
- ◆ 使用專用的廢棄物處理系統以進一步減少廢棄物量，尤其是高放射性元素。
- ◆ 針對除役設置移動式廢棄物處理設備，並進一步在其他電廠重複使用(包含運轉中及正在除役的電廠)。

為了優化成本與進度，最重要的是建立詳細的除役計劃及策略(通常應在電廠停機前的 2~3 年開始)，這是整個除役計劃的基礎。整體除役計劃需要很多資料，包括：第一層最基礎的就是正確的電廠

數據，必須與電廠人員密切合作，以確保獲取正確的電廠數據。

西屋公司在西班牙的何塞·卡布雷拉(José Cabrera)電廠(BWR)執行了詳細的除役計劃，並與電廠人員密切合作。規劃過程包括進行“選擇(Optioneering)”研究，以找出最佳的拆除方案，Optioneering 讓電廠的合作夥伴能在初始階段，一同發想出具創造性的工程解決方案，這是一個運用工程技術來評估各種選項的反覆過程，而這些技術會將電廠數據及其他所需資訊納入考慮，使團隊能為電廠除役要經歷的一連串複雜作業，找出最佳的解決途徑。

4.1.1 規劃技術策略

有許多重要的因素會影響電廠拆除的最佳技術策略，其中包括評估及規劃出最有效率地運用電廠可用空間來進行拆除作業，以便每項作業都在預期進度下有效地執行，包括決定作業是要依序或是同時進行，以及每個作業的順序，電廠的放射性特性及與主要組件除污的相關決定，將影響電廠空間要如何安排平行作業、屏蔽、移動，及所需的工具與人員。

某些策略在電廠除役中已得到認可，在電廠拆除順序方面，應在其仍在運轉時就進行廠址及反應器的初步特性調查，在大修後應立即對反應器壓力槽及其內部組件進行劑量分析，通常會建議在取出燃料後首要執行的作業之一，是對一次側迴路進行全系統化學除污，使控制區內的劑量更低，讓拆除作業能更簡單快速，一旦完成化學除污，則反應器內部組件及反應器壓力槽的移除步驟，預計將成為該計畫關鍵路徑的一部分。

由於反應器內部的放射性條件相當嚴峻，故應在水下謹慎地進行切割，讓水可繼續作為輻射屏蔽，為了讓這項作業能進行，用來管理及清洗反應器與內部組件儲存池內水的支援系統，必須保持運轉或以臨時替代品取代。故會建議在計畫中盡早拆除反應器內部組件，以減少廠址的放射性存量及一般區域的劑量率，並釋放水管理系統及其相關的電源以便進行除役，如此可在最終處理燃料與切割內部組件的期間內，將維護這些系統或替代產品及其運營商的成本降至最低，對消除廠址絕大部份的放射性存量(燃料及被活化的組件)也具有潛在優點。藉由減少燃料，然後儘早拆除內部組件，可以減少現場的放射性存量，能夠大幅減少現場的總放射性危害。根據所適用的監管制度，大幅減少現場輻射或許能減少所需的核能安全措施，並且節省成本。

基於上述被公認的方法，反應器廠房內進行的第一個主要作業就是拆除反應器，除役前對一次側系統除污後即拆除反應器，能降低工人在拆除任務期間的曝露劑量，及計畫的整體放射性管控數量。

內部組件移除後，就可以繼續進行反應器廠房內的其他工作，並與現場其他區域(例如汽機廠房)的工作同時進行，隨著反應器廠房的進展，使其他系統變得多餘時，即可釋放進行除役，移除離散的受污染系統與組件後，可以根據管制機關所制定的除役策略，進行額外的表面除污，以支持正常的(露天)電廠拆除。

在某些情況下，某些關鍵基礎設施不存在或不適合用於電廠拆除，故除役策略對避免後續問題至關重要。西班牙何塞·卡布雷拉(José Cabrera)在實際進行切割作業前(如圖 1.3. 6 所示)，必須先進行許多其它的作業，例如，因為反應器爐穴中的水位不夠深，無法在切割作業期間提供屏蔽，故先將反應器爐穴與用過燃料池之間的牆壁切開，以便進入更深的用過燃料池；切割前的作業還包括確保用過燃料池的完整性(密封性)、特徵化內部組件、提取用過燃料架、安裝新的工作橋，並清潔池內的地板及水。

這項策略性的決策，大幅變更了反應器廠房的建築設計，故進行了詳細的結構分析，以證明拆除牆是安全的，反應器壓力槽因為這項土木變更，能藉由用過燃料池與反應器爐穴間所建立的新通道，整個移到用過燃料池內。



圖 1.3.6 西班牙何塞·卡布雷拉(José Cabrera)拆除反應器爐穴與用過燃料池之間的牆體[3]

4.1.2 運用 3-D 模型(Use of 3-D modeling)

一個專案成功與否，細部規劃的角色至關重要，而 3-D 模型能幫助完成此任務，目前已普遍利用雷射掃描建立電廠內主要區域的 3-D 模型，此舉有助於讓整個電廠的配置可視化，如圖 1.3.7 所示瑞典 Barsebäck-2 電廠的蒸汽乾燥器。

在反應器拆除作業的特殊情況下，作為反應器壓力槽內部組件切割與包裝計劃的一部分，3-D 模型有助於評估組件在反應爐穴的佈置及移動的精確計算。這是規劃中很重要的部分，因為這些高放射性碎片的移動、測量及包裝，是透過工作平台(working bridge)上的工具與鏡頭來進行，一旦反應器壓力槽內部組件被拆除後移出，反應器爐穴通常會變得非常擁擠。

切割與包裝計劃的主要目標，能用以評估分離組件的策略，使其可以最具成本效益的方式來處置，整體計劃會受到許多因素影響，包括必須使用哪些廢棄物容器、容器物流、處置方法的成本，以及當地的運輸規定，這些因素均應在規劃階段初期予以考慮，並使用 3-D 建模來準確規劃所有步驟。

瑞典 Barsebäck(BWR)反應器內部組件的切割計畫，第一年只專注於工程研究、設計工作項目，並製造完成該工作項目的設備，詳細的 3-D 建模是工具設計的基礎，其能將放射性與包裝容器納入考量，提供寶貴的支持，以找出組件切割及廢棄物處置容器的最佳策略。

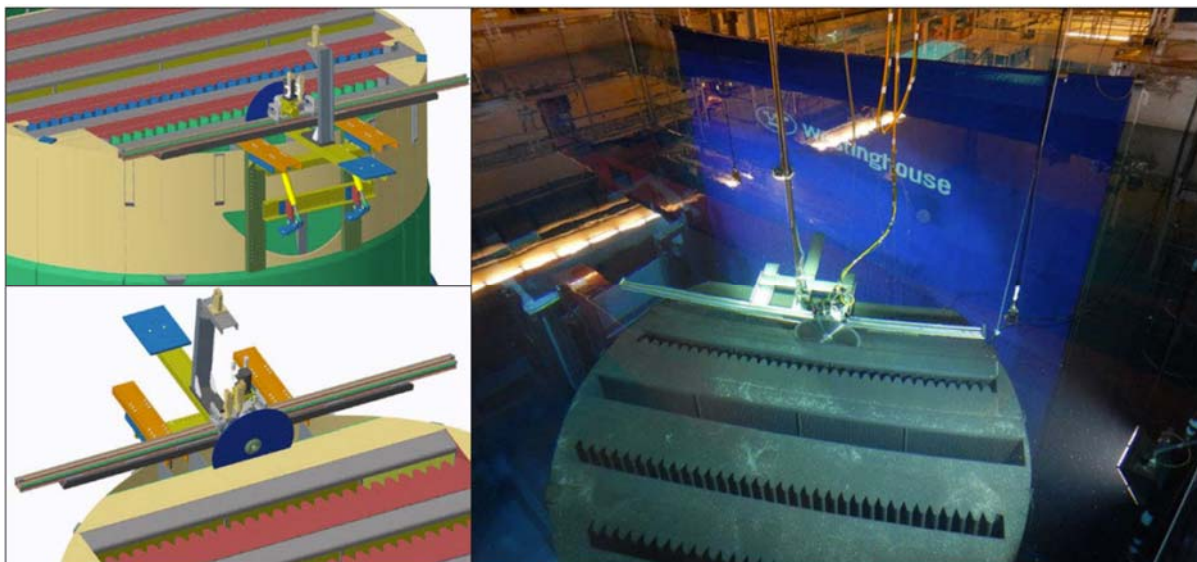


圖 1.3. 7 利用 3-D 建模來幫助切割瑞典 Barsebäck-2 電廠的蒸汽乾燥器[3]

4.1.3 一次側管路除污(Primary circuit decontamination)

核電廠預先拆除的一次側管路(蒸汽產生器、反應器冷卻水泵、調壓槽及連接管路)，會採用侵蝕性化學品來進行化學除污，例如美國電力研究所(EPRI)的除役除污技術(DFD)。此作法有一些重要的優點：

- ✓ 移除主要管路組件上的活性，使後續包裝更為容易。
- ✓ 減少在管道及組件周圍的工人劑量率。
- ✓ 更容易接近設備，能改以手持式技術進行拆卸，取代較昂貴的機器人或機械手臂。
- ✓ 盡可能地減少除役作業期間，污染物擴散的可能性。
- ✓ 降低處置成本。

在此提供斯洛伐克 Bohunice V1(PWR)核電廠案例，以說明一次側管路全系統化學除污的有效性及其好處。Bohunice V1 是 VVER-440 設計，具有 2 個機組，每個機組有 6 個迴路，化學除污一次同時處理 2 個迴路，且繞過(bypass)反應器爐心，另也對調壓槽及其洩壓槽(氣泡槽)單獨進行除污。

Bohunice V1 機組 2 的迴路 1 及迴路 4，被移除的活度顯示在圖 1.3. 8 的 Y 軸，這 2 個迴路都依照原先規劃，成功地進行除污，利用 NITROX-E 循環 3 次移除氧化物層，DFD 化學品循環 2 次移除表面微裂紋中殘留的污染物，最終的除污因子(DF)為 55.7(活度移除 98.2%)，在開始除污前及每個技術循環結束時，會在多個位置測量劑量率以便計算出 DF 值，以評估化學除污的進度及有效性。

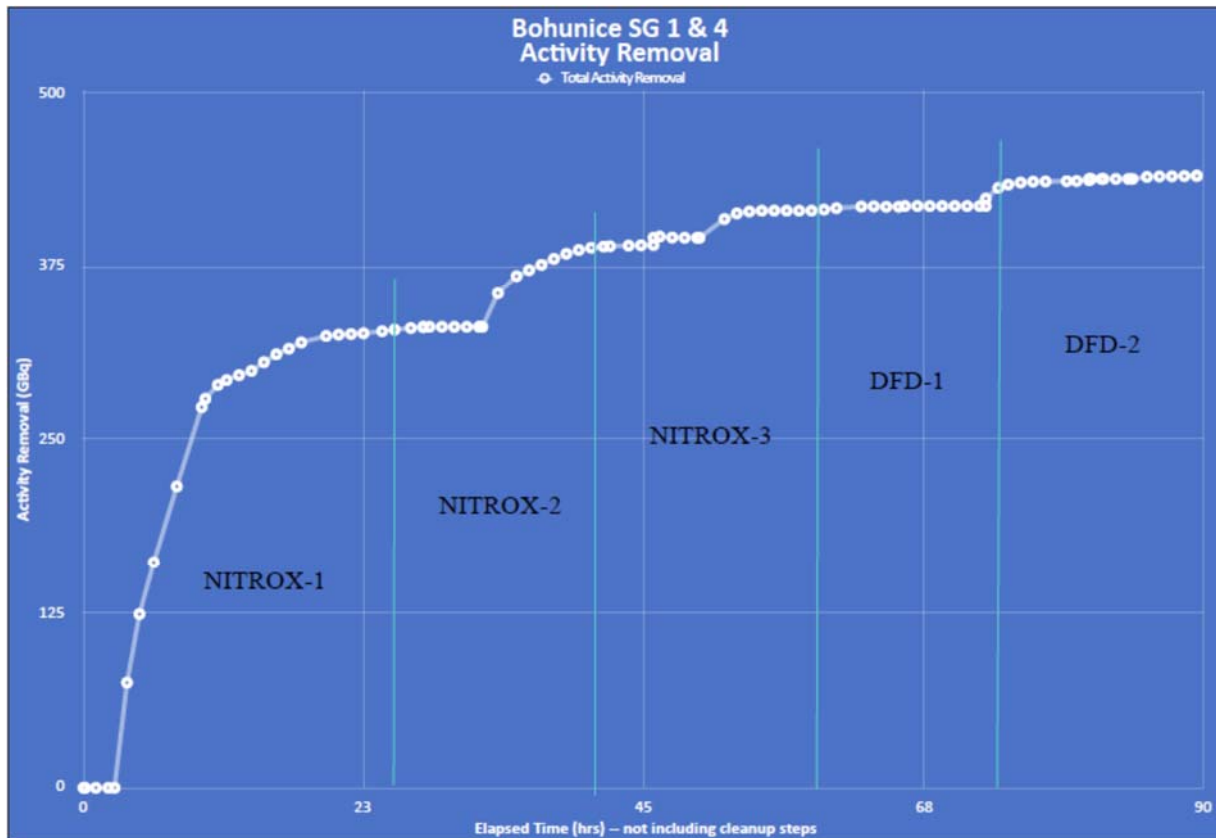


圖 1.3.8 斯洛伐克 Bohunice V1 移除的放射性活度(機組 2 的迴路 1 及迴路 4) [3]

Bohunice V1 機組 1 及 2 的除役計劃，因為包含了一次側管路的全系統化學除污，而可以手持式設備來拆卸反應器冷卻水迴路，使除役策略大為簡化。能手動拆卸反應器冷卻水迴路，還進一步提升進度與現場工作效率，好處包括能利用汽機廠房的大型空間，該空間用來配置並建造乾式切割工作室(如圖 1.3.9 所示)，兩個機組的所有蒸汽產生器(共 12 個)都可在此進行切割，由於先作了化學除污，所以在拆除蒸汽產生器時，並沒有作任何額外的屏蔽或保護措施。

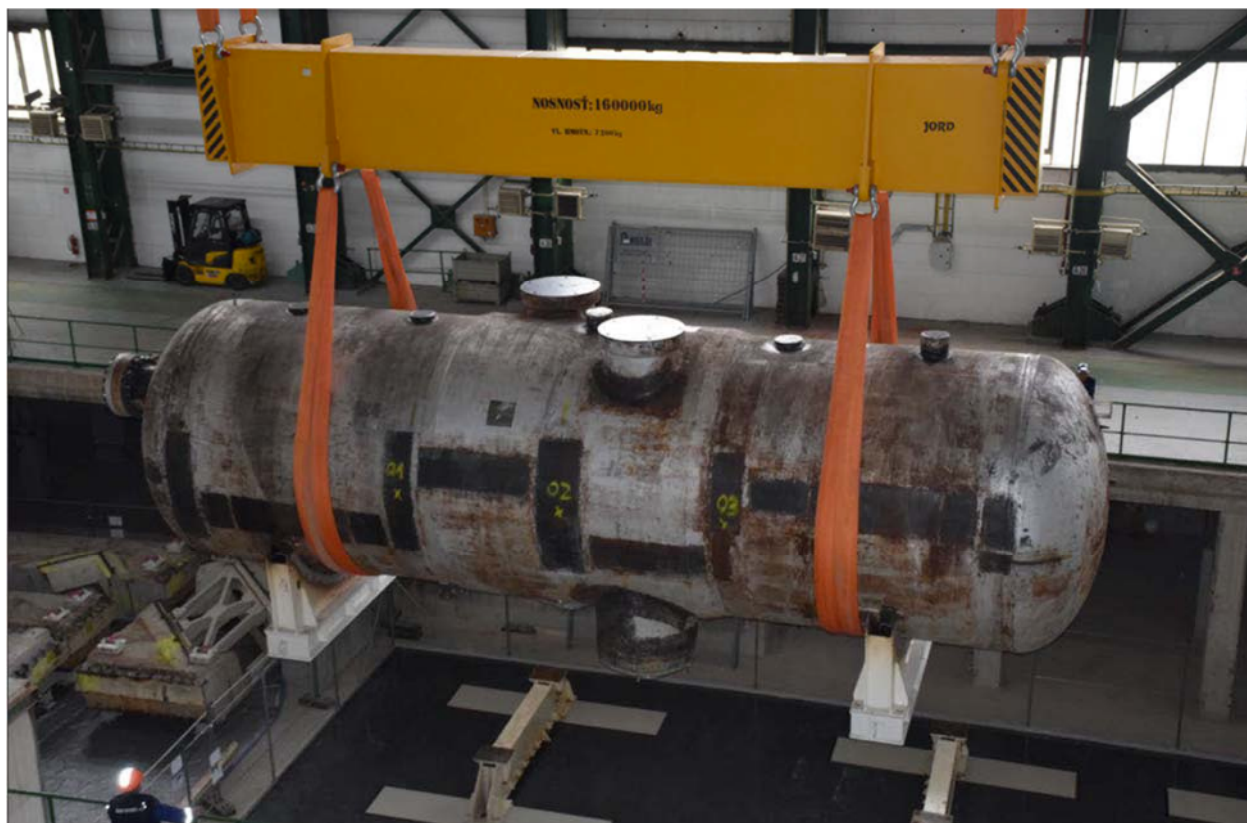


圖 1.3.9 斯洛伐克 Bohunice V1 核電廠位於汽機廠房的乾式切割工作室[3]

4.1.4 廢棄物減容(Reducing waste volume)

管理除役時的放射性廢棄物，是整個除役過程中很重要的階段，該階段的主要目標，是在合格的包裝中裝入經過處理的廢棄物，以便進行臨時儲存並等待最終處置，另一項重要的次要目標，是藉由除污或其他特定的處理方法來減少廢棄物的數量，並盡可能減少廢棄物的種類，從而減少處置成本。

根據廢棄物類型，有多種方式可用來減少放射性廢棄物的數量：

- ✓ 熱處理(Thermal treatment)，包括焚化(incineration)、熱水解(pyrohydrolysis)、針對有機材料的電漿(plasma)處理及針對混合性廢棄物的電漿加熱(plasma heating)處理。
- ✓ 將要處置的金屬，熔化成緊密結實的形狀。
- ✓ 將固體廢棄物壓密，包括金屬、玻璃、塑膠、小型設備及工具、過濾器、可壓實的垃圾、木材、管道、污泥、瀝青及絕緣材料。

壓實是一種機械性的減容技術，在處理滾筒內將廢棄物壓實，過程中所能達到的減容量，是廢棄物包裝內空隙、施加壓力、材料堆積密度及其回彈特性的函數。超級壓實機(如圖 1.3.10 所示)能夠壓實傳統的邊緣可壓縮廢棄物(marginal-compactable waste)，減容因子可達 2~4，而對於一般的可壓縮性廢棄物，減容因子可達 6-7。壓實技術的優點包括：

- ✓ 壓實是全世界核能產業中廣泛使用且成熟的技術。
- ✓ 壓實系統簡單、可靠且安全。
- ✓ 廢棄物壓實相對便宜。
- ✓ 該技術易於操作。
- ✓ 廢棄物密度增加能提升自我屏蔽。



圖 1.3. 10 具 2,000 噸作用力的超級壓實機[3]

4.2 "Breaking up Barsebäck," Nuclear Engineering International, 6 June 2018[4]

瑞典 Barsebäck 核電廠設有兩組 ABB 設計的 BWR，每組額定功率為 615MWe。1 號機及 2 號機分別於 1999 年及 2005 年關閉。西屋公司於 2015 年 7 月與 Barsebäck Kraft AB 簽訂合約，主要執行這兩個機組的反應器內部組件切割，這是機組除役的第一階段。2017 年 10 月，西屋公司在瑞典 Barsebäck 核電廠商用機組的 2 號機，以安全且提前地情況下，完成了第一個反應器內部組件的切割計畫，該公司在 2018 年 1 月開始進行 1 號機的切割作業，這歸功於從 2 號機作業所得到的寶貴經驗。

4.2.1 規劃反應器壓力槽內部組件的切割

Westinghouse 與 Barsebäck 合作，規劃了長達一年的切割與包裝計畫，於 2016 年 8 月開始在 Barsebäck 2 現場進行反應器內部組件的切割及包裝。

如同其他成功的反應器內部組件切割作業，西屋公司也需要擬定嚴密且全面的計畫，才能在反應器壓力槽這樣高輻射的環境下，完成現場工作。

第一年的計畫致力於確認從開始到最終的最佳戰略技術與流程方法，包括進行工程研究、設計及製造切割與包裝組件所需的設備及工具、規劃在水池中進行組件的拆除、移動及切割流程，以及將切割下來的零件裝好並移出水池、將水池環境恢復到初始狀態、且完成所有設備的除污後才運到 Barsebäck 1。

在此期間，西屋公司對切割時間與包裝容器的數量進行了優化研究，以決定出最具成本效益的切割及包裝計畫，為了將現場作業的風險降至最低，西屋公司亦針對工具、設備及人員擬定資格鑑定計畫，並在瑞典韋斯特羅斯的西屋測試設施(Westinghouse Test Facility in Västerås)內執行。

4.2.2 切割策略

Westinghouse 和 Barsebäck 認為，切割的最佳途徑是採用遠端水下機械切割，西屋公司已成功在瑞典、芬蘭、德國、西班牙、瑞士、法國及美國廣泛運用該技術。

機械切割只會產生不溶性的副產品，例如木屑及刨花，這些可利用簡易的收集設備輕鬆移除，且產生的二次廢棄物很少，該技術既安全且對人員的劑量較低。

西屋公司利用 3D 模擬來設計工具、找出切割組件的最佳策略，並制定包裝計畫。

4.2.3 現場物流注意事項

在規劃與進行複雜的切割及包裝作業時，現場物流扮演舉足輕重的角色，Barsebäck 各機組的反應器爐穴，都鄰近 10m 深的反應器內部組件儲存池，即使在切割最大型的內部組件及裝載切割後零件，這深度都能提供足夠的屏蔽，這些碎片在取出進行包裝前，會先放在池中的廢棄物嵌件中。

反應器內部組件的儲存池，兩側是既有的工作橋及燃料更換機的工作平台，Westinghouse 能利用這兩個工作平台，同時進行不同內部組件的切割作業。

4.2.4 資格鑑定

為了降低計畫及作業期間人員的風險，西屋公司在其瑞典韋斯特羅斯的測試設施內，對新的工具、設備、工作流程及人員進行了資格鑑定。其針對計畫擬定最具挑戰的情境，並製作組件形狀最複雜的模型，藉以測試人員的工作流程，以及為此目的所重新設計及生產的工具與設備，最後必須經過 Barsebäck 的批准，才會將所有工具及設備送到電廠。

4.2.5 現場準備作業

切割組件場地的準備，是在儲存池中安裝一個能將零件固定的轉盤，讓擁擠水池區內的切割作業更加容易些，該公司還在反應器內部組件用儲存池與反應器池之間，安裝了異物排除屏障，以防止碎屑(chips)及刨屑(shavings)在切割過程中遷移，控制棒導管會從反應器中移出並放在架子上。

西屋公司對池水上方既有的燃料更換機器進行改造，使其成為可單獨切割的平台，並在工作橋平台安裝了水下攝影監控系統、切割工具操縱及處理系統、水下照明系統支撐，以及氣動與電力的連接。

在反應器大廳的地面層，西屋公司安裝了封閉式維修站，以便進行工具保養、維修及除污。

4.2.6 切割及包裝

在現場配備了合格的設備、工具及人員，準備好反應器內部組件儲存池，且廢棄物包裝及處理設備與所有支援系統都已就位，即可開始對內部組件進行切割作業。

利用高架起重機將壓力槽內部的各個組件從反應器中抽出，並將其放置在轉盤上。

西屋設計的切割工具易於操作、切割迅速，且幾乎各種厚度與材料都能夠切割，在必須克服障礙

的情況下，其靈活度亦有助於維持進度，例如，當組件的形狀與圖面上顯示的不完全相同時，其能根據需求，在現場修改切割工具，而不會影響進度。

所有的分割及包裝作業，操作員都可以利用水下攝影系統提供的圖像，彌補工作橋的視線，以監視並指示組件的移動及切割操作。

西屋公司選擇先將蒸汽乾燥器與控制棒導管同時進行切割，為適應其複雜的幾何形狀，切割時使用了 18 種不同的圓盤鋸，從蒸汽乾燥器上切下來的一些零件，例如大型葉片組，之後會在池內地板上的獨立切割站中，進行進一步切割。控制棒導管則用圓盤鋸將切成五段，然後以衝孔機縱向切割，以減少廢棄物體積。

接下來將爐心側板蓋與其蒸汽分離器，從反應器壓力槽中取出並拆解，以專門設計的剪切工具，深入爐心噴撒系統，先切斷噴嘴管，然後將爐心側板蓋放在支架上的轉盤，以便進行切割。

一旦爐心側板蓋全部切割完成，西屋公司便將轉盤調整成固定爐心格柵，以使用圓盤鋸及剪切工具進行切割。

最後一個反應器內部大型組件是爐心側板，為適應其形狀，會用數個不同的圓盤鋸進行切割。

4.2.7 包裝及廢棄物處理

反應器內部組件被切割下來後，西屋公司使用相同的處理工具，來包裝位於池內嵌件中的切割碎片，根據包裝計劃，一旦嵌件內完全裝滿碎片，即可以具屏蔽的運輸容器，將其從池中取出，放在燃料更換樓層的廢棄物容器中，之後送到臨時倉庫。

容器會根據包裝計劃預先選擇，其具有不同的厚度及可包裝的內部容積(從 $5.4\text{m}^3 \sim 7.5\text{m}^3$)，主要是根據包裝的廢棄物活性及符合瑞典核准的廢棄物包裝流程來作選擇。

西屋公司從內部組件中取樣、分析樣本並將結果與 Barsebäck 提供的特徵報告進行比較，以驗證反應器內部組件的輻射特徵，這是包裝計劃的重要資訊。

4.2.8 最後步驟：設備移除及水池淨化

西屋公司在最終清潔時，移除了整個切割過程中的碎屑及刨屑，利用特殊的鏟子，清除累積在池底約 95% 的碎屑，剩餘的 5% 則用水下耙吸設施(suction device)移除，將水池恢復到初始狀態。

Barsebäck 2 用到的所有工具及設備清洗過後，西屋公司將其打包並運送到 Barsebäck 1。

4.2.9 持續成功

Barsebäck2 的所有組件都進行切割，共計包裝了 2,176 個片斷，代表大約進行了 1,500m 的線性裁切，西屋公司利用三維模擬，使切割及包裝效果最佳化，讓原本預估使用 40 個廢棄物容器，減少到 32 個。

西屋公司目前正在法國及德國的廠址進行類似的工作，切割及包裝技術的持續精進，對其當前與未來在斯洛伐克及德國進行的除役計畫有所幫助。

從這兩個機組作業中獲取的經驗，將有助於提高瑞典及其他地區商業反應器的除役效率。

4.3 Innovative D&D at Bohunice V1, 7 March 2019 [5]

西屋公司針對斯洛伐克 Bohunice V1 電廠的 VVER-440 反應器，啟動一個為期 5 年的拆除計畫。Bohunice V1 是具有兩個 V-230 型 VVER-440 機組(每個 440MWe)的核電廠，兩個機組個別運轉了 26、27 年後，分別於 2006 年 12 月 31 日及 2008 年 12 月 31 日停止，西屋公司與斯洛伐克公司 VUJE 合作，於 2017 年 10 月簽訂了 Jadrová a vyradovacia spoločnosť(JAVYS)的拆除合約，已開始著手拆除兩

個反應器冷卻水系統。

在簽訂合約時，JAVYS 要求投標人須具備經驗證的除污、拆除及廢棄物包裝的專業知識，且在創新規劃的同時，也必須滿足非常嚴格的時程表(約 5 年)，還要能達到最高的安全標準，在此期間，西屋及 VUJE 必須進行研究；設計新的工具、設備及程序；準備場地；並對 9,500 噸受污染及活化組件的廢棄物進行除污、拆卸、切割、包裝及管理。

這些組件包括一次側迴路(蒸汽產生器、主循環泵、主隔離閥、調壓槽、氣泡槽及一次側管路)，反應器壓力槽內部組件、反應器壓力槽、輔助設備、電廠系統及其他元件，例如環形水箱，另還包括被儲存在專屬地點的高活性運轉廢棄物。

為了滿足時程如此嚴格的工作計劃，專案團隊設計了特殊的技術策略，這些措施包括為水下切割作業創建兩個新的水池，並將汽機廠房改造後重新分類為乾式切割場，以便進行每個機組各 6 台蒸汽產生器的分段作業。

JAVYS 為確保現場作業能適當地執行，並且有可用的物流路線，故在開始前先對 Bohunice V1 的拆除及除污作業進行管理，這為專案團隊提供了現場作業開始的適當框架。

4.3.1 規劃與設計作業

在此複雜的計畫中，所有的作業都必須與客戶共同規劃，且各小組介面間的所有觀點，都能被充份瞭解及討論，根據內部組件的輻射強度及現場工作的具體規定，彼此密切合作，才能成功地規劃並設計工具、設備及程序。

該計畫的第一年，主要用於工程研究，找出切割各個組件的最佳技術及工具，以及設計並製造設備。專案團隊亦針對各切割項目編寫了程序書，在現場工作開始前，會先對設備及程序進行測試並確保人員具備資格，反應器內部組件及反應器壓力槽切割的測試及鑑定，會在設備運抵廠址前，先在西屋位於瑞典韋斯特羅斯的一個專門設計的測試機構中進行。

Bohunice 在開始進行拆除作業前，專案團隊進行了廣泛的標記與鎖定作業、石棉清除、放射性特性、取樣及除污，以確保拆除作業能盡可能安全地進行。

4.3.2 設計及切割策略

為了設計用於濕式切割作業的高階工具，西屋採用了詳細的三維(3D)建模，使其能決定切割組件最佳的策略，並考慮放射性及包裝方面的限制(根據斯洛伐克與歐盟法規)，制定出最經濟有效的處置方法。

西屋公司選擇機械切割作為濕切割的策略，因為它不會產生氣體、氣溶膠、擾流或大量二次廢棄物，該公司在許多歐洲電廠成功地運用機械切割，可將獲得的經驗教訓及獲取的效率，應用於 Bohunice V1 的組件切割與包裝，西屋公司將使用遙控圓盤鋸(disc saws)、帶鋸(band saws)及剪刀(shears)作為水下作業的主要工具。

為了切割一次側管路組件，VUJE 設計了一個乾式切割工作室，可在現場直接破碎一些組件，傳統的乾式切割技術(金剛石線、熱切割工具及帶鋸)即設計用來滿足核工業的特定需求，設計階段亦納入安全措施，以避免污染擴散到工作環境。

4.3.3 拆解策略

因為傳統的乾式切割技術並不被認為是安全的，故西屋公司針對放射性的組件，係採用遠端切割、包裝及水下作業，這是根據合理抑低(ALARA)原則，保護操作員免受高輻射曝露的一種安全措施。

在 Bohunice V1，具高放射性的組件包括反應器壓力槽及反應器內部組件，而遠端處理的廢棄物儲存區內的作業廢棄物亦具有高放射性，這些都將在水下進行切割。

作為獨立合約的一部分，西屋已經對一次側管路(不包括反應器壓力槽及內部組件)進行了全系統化學除污，成功地將受污染的一次側管路放射性降低到可接受的劑量率，使操作員能夠安全地使用乾式切割方法及手持式工具。

4.3.4 準備切割

專案團隊設計了一種濕式與乾式切割方法，有助於滿足被壓縮的時程及 ALARA 規定，由於反應器既有的池子太小，無法有效地分割組件及操作廢棄物，或者無法滿足 ALARA 的規定，故專案團隊決定拆除蒸汽產生器，並在該空間創建兩個大型水池，稱之為濕式切割工作室，讓高放射性組件及廢棄物能夠在水中同時進行拆卸、切割及包裝，避免工人受到高輻射強度曝露。

每個池子都配有兩組工作橋，4 名操作員可同時在這些工作橋上工作，操作員將使用切割工具操縱及處理系統，遠端操控切割及包裝，並利用水下攝影機觀察遠端操作的工具，將實況影像投影到工作橋上的螢幕。

VUJE 還分離了乾式切割作業，以提高效率並加快處理過程，例如，除了重新利用汽機廠房的可用空間，用以建造乾式切割工作室外，還在反應器廠房另外安裝兩個乾式切割工作室，這些將用於分割一次側管路中其餘的大型組件-主冷卻水泵、主隔離閥及一次側冷卻水管路-以及輔助系統組件，包括電纜拖網、閥及冷卻器。

其他大型組件，例如反應器軸保護蓋(reactor shaft protection lids)、反應器壓力槽上部模塊(upper blocks)，調壓槽及氣泡槽(bubble tank)，都在現場用乾式切割工具進行切割。

4.3.5 正在進行的準備作業

現場工作於 2018 年 7 月開始，並開始拆卸主要組件的準備作業，專案團隊已完成這 2 個機組的拆除、破碎，並包裝了反應器軸保護蓋及上部模塊，1 號機的氣泡槽已經拆除，第一階段的掛牌上鎖(tag-out and lock-out)作業已經完成，該小組目前正在拆卸反應器壓力槽頂蓋、移除蒸汽產生器，破碎一次側迴路管線，在汽機廠房內建造工作室，以及在反應器廠房內製造工作室。

4.3.6 卸下反應器軸保護蓋

兩個反應器軸保護蓋是用圓柱形螺栓垂直固定在反應器大廳混凝土底版上的半球形蓋，拆除它們的第一步是斷開所有與之連接的電纜及其他輔助設備及系統，並拆除將其固定在混凝土樓板的所有螺栓，一旦反應器軸保護蓋完全解開，就用 250 噸反應器大廳起重機，將每個蓋子運到反應器大廳大型帳篷下的拆卸位置，保護性帳篷是為了避免灰塵散佈所建造，其使用了便攜式過濾系統。

反應器軸保護蓋具有金屬襯裡，這部份使用氧-乙炔切割，利用高溫下氧與金屬的化學反應來分離或移除金屬，在氧氣中燃燒的燃氣火焰維持必要的溫度，金屬襯裡移除後，用機電鎚將蓋子上的混凝土蓋敲碎。

因為蓋子幾乎沒有污染，故廢棄物處理並不複雜，這些材料主要是金屬碎片及混凝土碎屑，以及在拆除過程中產生的少量二次廢棄物，包括塑料薄膜，多數材料均可淨化至自由外釋。

4.3.7 廢棄物管理

通過 3D 建模，可以規劃廢棄物容器及切割程序，這是切割計畫中不可或缺的步驟，因為切割後的碎片必須能裝入特定尺寸的廢棄物容器，Bohunice V1 被活化的組件碎片，是在水下裝入內部尺寸約為 1.3x1.3x1.3m³ 的金屬容器中。

該容器的尺寸與莫霍夫切(Mochovce)國家放射性廢料倉庫(National Radwaste Repository)許可運

輸及處置的纖維混凝土容器相容。

儲存庫可以接受固體及固定低劑量率和非常低劑量率的放射性廢棄物進行最終處置，必要時，西屋公司將為中度劑量率廢棄物的容器，增加外部屏蔽，被分類為中度劑量率的廢棄物，將被放在 Bohunice 的 JAVYS 暫存設施中。

西屋公司會用同一套水下切割組件的工具，來進行水下切割後的分段與打包，這些工具將由主起重機及工作橋式起重機來控制，起重機通常是並行使用，一方面用來處理工具，另一方面用來固定及吊起切割件，延長桿則用在將工具下降到池中並固定到位，借助平移及傾斜錄影機以及位於工作橋上的照明設備，操作員得以監督所有作業。

乾式切割作業所產生的碎片將被包裝在箱形托貨板、鐵桶及超大型袋子中。

4.3.8 持續學習

將反應器連同反應器冷卻水系統一起拆卸，提供了加速規劃並降低 Bohunice 拆卸計劃成本的絕佳效果，將乾式與濕式切割作業脫鉤的策略具有顯著的安全優勢，並將持續應用在 Bohunice。從瑞典、德國、芬蘭、西班牙、法國及美國的拆除計畫中獲得的經驗教訓也將如此，西屋公司、VUJE 及 JAVYS 團隊在斯洛伐克獲得的經驗，對於將來的拆除計畫也將具有寶貴的價值。

(五) 與核電廠除役/除污相關的工安、輻安、廢棄物處理及機器人技術

5.1 Health Physics and Industrial Hygiene Aspects of Decontamination as a Precursor to Decontamination [6]

5.1.1 介紹

由於除污的工作會在核電廠關閉數年後進行，所以極少有原本運營人員會成為除污人員。而新近機組人員普遍對電廠不熟悉，可能會在除污操作期間造成嚴重問題。

本文討論了一些重要的健康物理和工業衛生問題，這些問題對於實施完全成功的除污程序至關重要。考慮到這些問題，對規劃除污工作和培訓除污人員的培訓提供指導。

5.1.2 健康問題

(1) 內部曝露

內部輻射的曝露可能是由於吸入或攝入放射性核種，開放性傷口的污染或將觸覺轉移到口腔中引起的

- i. 裝有過濾通風系統的污染控制包膜也可用於控制空氣傳播的污染物的擴散
- ii. 應該使用呼吸防護設備來保護可能受到空氣傳播污染的工人。

(2) 外部曝露

- i. 通過減少高人員佔用區域的輻射劑量率來直接減少對工人的接觸
- ii. 通過去除外部鬆散的污染物間接減少職業曝露，從而減少所需的防護設備數量和工人進入高輻射場所所需的時間。

(3) 輻射防護

- i. 通過使用防護服，呼吸器和防護罩，可以使除污工人免受外部和內部輻射源的傷害。
- ii. 除役前的除污工作中使用的防護服與電廠運轉的除污時的使用有所不同。保護工作人員免受去污溶液洩漏，起火和放射性蒸氣侵害的更多衣服
- iii. 可使用遠程操作的設備和長柄工具減少除污過程中的職業曝露。

(4) 污染控制

- i. 已污染區域的再次污染。
- ii. 可剝塗層和其他密封清潔區域以免與放射性物質接觸的方法

5.1.3 工業衛生和安全問題

(1) 身體狀況

隨著除役活動的開始，反應器系統的惡化程度不僅極大地影響了所用除污方法的選擇，而且還極大地影響了除污操作過程中人員的風險。

在開始進行除污操作之前，應對通風系統進行評估，以確保其能夠充分防止在除污過程中產生的空氣中顆粒物和氣體積聚。對反應器系統和系統組件進行評估可以降低工人因洩漏、管道破裂和有害煙氣積累而帶來的風險。

- i. 系統功能調查
- ii. 評估電廠的配置
- iii. 須努力使工人熟悉電廠系統的配置、欲除污組件的位置、照明系統、逃生路線和應急設備。

(2) 化學處理

在可能發生洩漏的區域工作的工人，應使用耐化學腐蝕、防水的衣服和呼吸防護裝置，以防化學藥品侵害。

(3) 設備處理

使用機械除污設備所伴隨的危險包括工作空間和入口與出口路線的減少、顆粒物的釋放、電擊以及在操作重型設備和高壓設備時通常存在的其他危險。

- i. 訓練讓工人能夠正確的使用機械除污設備，以減少潛在的危險。
- ii. 機械除污設備所伴隨的職業危害是工人疲勞，可以通過適當的人員配置和工作分配，來最大程度地減少這種情況。

(4) 除污計劃和準備

i. 電廠的放射性和物理檢驗

- a. 調查應記錄整個電廠的輻射劑量率
- b. 到低流量區域、死角
- c. 紀錄電廠中的建築材料，以及照明或通風不良的區域。
- d. 供工人使用的緊急出口路線

ii. 反應器系統的改造

安裝反應器容器旁通管，並將主迴路分成較小迴路進行單獨除污，使反應器更易除污以降低工人的風險。

iii. 除污培訓

- a. 熟悉電廠以及要除污的特定系統和組件
- b. 熟悉進出路線以及高輻射區域的位置

5.2 A Qualitative Identification and Analysis of Hazards, Risks and Operating Procedures for a Decommissioning Safety Assessment of a Nuclear Research Reactor [12]

5.2.1 介紹

韓國第一個核研究反應器(KRR-1，TRIGA Mark-II 型反應器)的除役方法和程序應基於其結構條件和放射性特徵。此外，必須在除役工作的系統方法之後，對除役工人的安全進行審查和評估。在本文中，KRR-1 設施及其安裝的表徵是關注的焦點。測量電廠的預期輻射曝露數據，並製定適當的健康

和物理計劃。根據危險和可操作性(HAZOP)專業知識標準以及 KRR-2(這是韓國第一個完成的除役項目)除役項目的經驗數據，確定避免對工人造成傷害的危險和預防措施，還確定了放射性事故分析。最後，建立了 KRR-1 除役任務的操作程序。

5.2.2 KRR-1

圖 1.3. 11 為 KRR-1 的上視結構圖。該反應器是由美國 San Diego 的 General Atomic Co.製造的，並用作中子源進行實驗、同位素生產和輻照以進行活化分析。KRR-1 以最高 250 kW 的功率運轉。該反應器於 1962 年投入使用，最初設計和製造的功率等級為 100 kW。但是，它在 1969 年 7 月升級到 250 kW。在過去的 33 年中，總運行時間為 36,535 小時，KRR-1 的熱輸出為 3735 MWh。表 1.3. 1 列出了 KRR-1 的歷史和特徵。

表 1.3. 1 KRR-1 規格[12]

使用日期	1962/03/19
Power level功率階位	259kW
中子通量	1×10^{13}
鈾含量	8.5 w/o
Enrichment濃化	20 w/o
Cladding護套	Al
化學成分	U-ZrH _{1.0}
Moderator緩和劑	ZrH
冷卻劑	H ₂ O
控制棒	B ₄ C

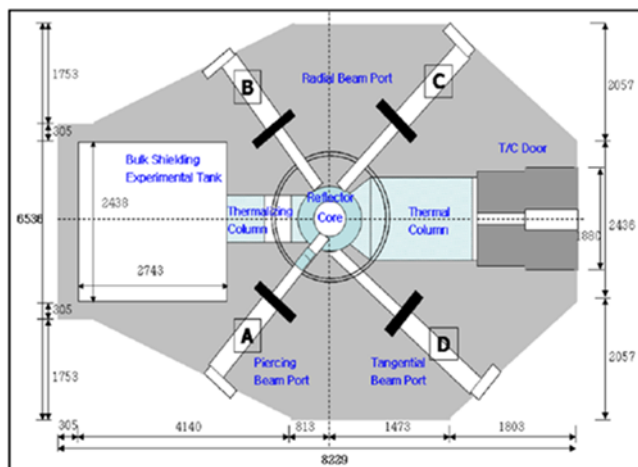


Fig. 2. The structure of KRR-1 (top view).

圖 1.3. 12 KRR-1(上視)結構圖[12]

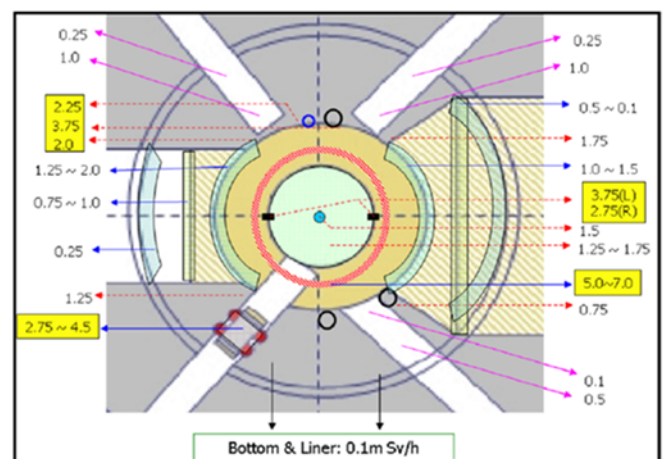


Fig. 5. The radiation dose of KRR-1's reactor pool.

圖 1.3. 13 KRR-1 反應器池水的輻射劑量[12]

在確定除役任務程序之前，Lee 等人(1999 年)，對反應器內部的放射性特徵進行測量和分析。使用水下探針(PR-7, Dositec)進行了多達 27 個點的測量，反應器池的內部管道系統通過使用測量儀(AD1 / Ad-t, Automess)進行了表面量測。圖 1.3. 14 顯示各測量點的輻射劑量率分別為反應器爐心的中心為 1.5 mSv / h，反應器爐心和反射鏡的連桿為 2.75–3.75 mSv / h，徑向穿刺管的連桿部分為 2.75–4.5 mSv / h，底部和襯板為 0.1 mSv / h。

5.2.3 通過除役經驗獲得的專業知識

根據韓國首個除役項目 KRR-2(TRIGA Mark-III 型)的經驗數據，確定了除役操作任務的 HAZOP 關鍵字。這些詞語被用作 KRR-1 每次除役任務的安全分析標準。

外部/內部/臨界/屏蔽/圍堵損失/通風。

火災/可維護性/遠程 or 手動處理/入口/出口。

廢水/洗滌物/廢棄物/腐蝕/侵蝕/結構穩定性/人為錯誤。

5.2.4 KRR-1 的除役技術

除役項目	設備	操縱器
反應器輔助設施	電漿弧	起重機
反應器內管	機械剪切/圓盤切刀/圓鋸	機械手臂
反應器核心	電漿弧	起重機/機械手臂
殘餘的物質	機械剪切	起重機/機械手臂
反應器襯套	電漿弧	起重機
混凝土牆	鑽石圓鋸/高壓水槍	起重機/挖掘機

5.2.5 拆除反應器爐心可能的危害

- 在除役工作時，某物掉入反應器爐心
- 不慎損壞爐心，從而導致釋放出活性石墨
- 空氣傳播污染
- 過量輻射劑量吸收
- 不正確的升降技術導致人員受傷

5.2.6 減輕拆除反應器爐心有關於危害以及注意事項

- 在整個操作過程中，衛生物理人員必須出席
- 在控制區域內僅允許從事該項目所需的人員
- 穿戴適當的防護服、工作服、安全帽、安全鞋、橡膠手套
- 在控制區內工作的所有人員將獲得膠片徽章和個人輻射警報劑量計
- 反應器上的所有工人都必須繫上安全帶
- 提供處理評估和適當的起重工具
- 在開始工作前，由專業人員進行電氣隔離
- 所有操作將通過許可證進行控制

5.3 A Study on Characteristics and Internal Exposure Evaluation of Radioactive Aerosols during Pipe Cutting in Decommissioning of Nuclear Power Plant [7]

本篇論文為核電廠除役管道切割過程中放射性粉塵的特性和內部曝露評估的研究，探討核電廠除役時，切割管線所造成的放射性粉塵(aerosol)與吸收的理論數據。粉塵的直徑由於溫度、濕度與環境等等因素決定，從 nm 到 mm 都有。

放射性氣粉塵在作業人員吸入後，會沉積在不同的位置，呼吸系統的各個部分取決於顆粒大小。

粉塵顆粒的尺寸 $>10-15\ \mu\text{m}$ ，沉積在嘴或鼻子上

粉塵顆粒的尺寸 $>5-10\ \mu\text{m}$ ，沉積在支氣管的上部

粉塵顆粒的尺寸 $>1\sim5\ \mu\text{m}$ ，沉積在肺泡中。

另外，沉積在肺泡中的放射性粉塵會因滲透作用被肺泡微血管運送至全身，造成體內全面性的輻射曝露危害。

通過採用理論方法來分析粉塵的直徑的增長以及動態行為，從而分析放射性粉塵相關的機制並估計預測值。

放射性粉塵顆粒半徑的增長機制主要為粉塵顆粒間的碰撞，其種類又可分為下列三者：

1. 布朗運動(Brownian motion)：粉塵之間的隨機碰撞
2. 引力團聚(Gravity drop)：因為粒子大小不同造成下沉速度的差異，進而產生碰撞
3. 擾流團聚(Turbulent motion)：由於氣流或其他因素造成的粉塵碰撞

日本的 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)是 BWR(沸水反應爐)型的發電系統，在 1991 年 3 月，水下電漿電弧切割(underwater plasma arc cutting)和水下電鋸切割(underwater arc saw cutting)的出現，反應器內部以及反應器壓力容器(RPV)才得以安全除役。表 1.3. 2 為輻射粉塵在相關作業下的數據資料。

表 1.3. 2 不銹鋼管路運用不同切割工具所產生的輻射粉塵傳播速率[7]

切割用具	管道尺寸(英寸)	放射性遷移率(%)		質量遷移率(%)	
		範圍	平均	範圍	平均
帶鋸機	2	5.8-37	13	-	$<10^{-2}$
帶鋸機	6	10-58	19	-	$<10^{-2}$
滑座式鋸機	12	7.0-24	9.9	-	$<10^{-2}$
電漿弧炬	12	0.23-0.78	0.44	0.53-0.82	0.66

比利時的 BR-3 因為實驗目的，針對內部組件進行過更換，該過程針對的組件包括：

- 熱障管的除役
- 舊反應器和實驗反應器。

為了熱障管的除役，使用了電漿弧炬(plasma arc torch)、放電加工(electric discharge machining, EDM)和 3 種銑削(milling)技術。表 1.3. 3 比較此三種技術所產生的二次廢棄物(粉塵)量、切割時間和工人的曝露情況。表 1.3. 3 以不同切割技術切割熱障管的結果比較表，圖 1.3. 15 顯示不同切割技術對切割速度與厚度、粉塵密度與厚度之比較。

表 1.3.3 以不同切技術切割熱障管的結果比較表[7]

項目	切割速度 (mm / min)		最佳平均切割速度 (mm / min)		曝露	二次廢棄物
切割方式	絕對值	相對比較	絕對值	相對比較	簡易比較值	簡易比較值
電加工	0.6	0.1	0.28	0.25	-3	-5
Mach.	6	1	1.13	1	1	1
電漿	300	50	1.83	1.6	-1	-5

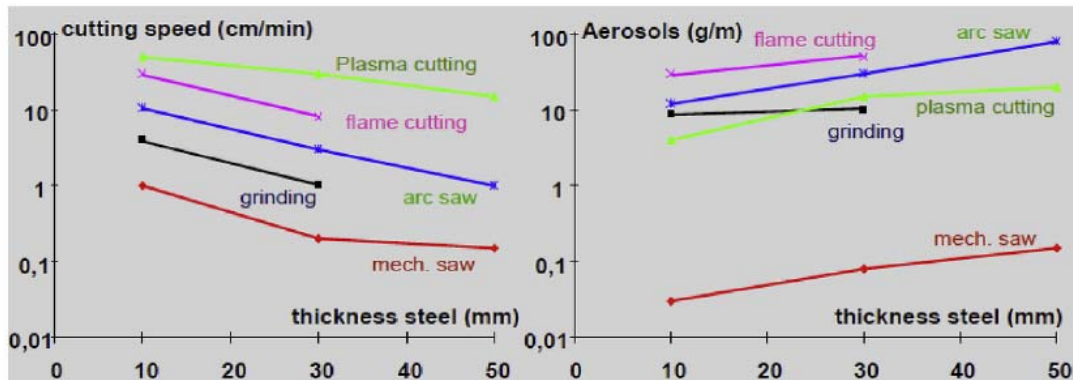


Fig. 2. Characteristics of aerosols generated in different cutting processes.

圖 1.3. 15 不同切割技術所產生的氣溶膠特性[7]

圖 1.3. 4 列出了內部曝露評估代碼(internal exposure evaluation codes)，以及選擇了適合本研究方向的代碼，並且透過 BiDAS(bioassay data analysis software)是選定的內部曝露評估代碼適用於推導最佳工作時間。

表 1.3. 4 內部曝露評估代碼一覽表[7]

Outline of internal exposure evaluation codes.				
Internal exposure evaluation code	ICRP model applied to the respiratory system	Calculable particle sizes	Number of considered nuclides	Absorption type
IMIE	ICRP-66 HRTM	0.001 ~ 20µm	28 elements 46 radionuclides	F, M, S
LUDEP	ICRP-66 HRTM	5µm (can be changed arbitrarily)	497 radionuclides	F, M, S
IMBA	ICRP-66 HRTM	5µm (can be changed arbitrarily)	IMBA libraryb (can be added arbitrarily)	F, M, S
BiDAS	ICRP-66 HRTM	0.01 ~ 10µm	30, including the nuclide proposed in ICRP 78	F, M, S

工人在作業過程中吸入的放射性粉塵，會根據粉塵顆粒的大小不同，以不同的的比例沉積在對應器官中。為了有效量化這方面的數據，國際放射防護委員會(ICRP)在 ICRP 66 上提出了 HRTM(人類呼吸道模型)，該模型用於計算核電廠除役人員和普通市民的劑量係數和生物測定辦法。

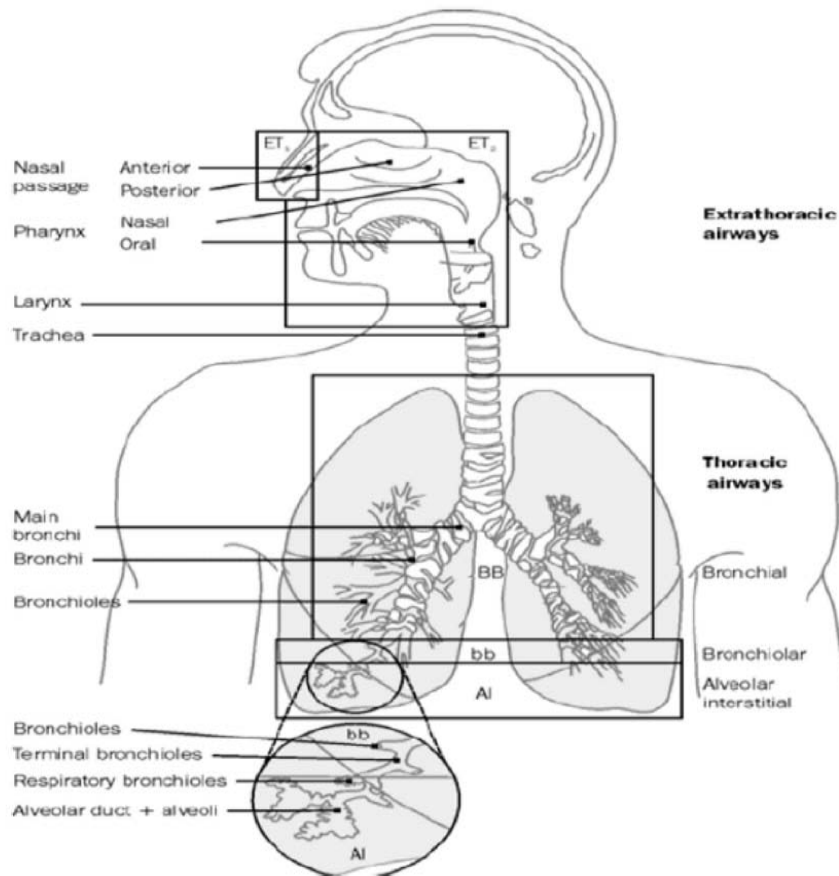


Fig. 3. Human respiratory tract model.

圖 1.3. 16 人體呼吸道結構圖[7]

在 ICRP-66 HRTM 中顯示了根據除役工人和一般民眾分類的粒徑，建議對於工人為 5 毫米 (AMAD)，而一般市民為 1 毫米(AMAD)。

根據 HRTM 的成年男性，HRTM 提供每個部分中顆粒轉移的空隙率，並且可以將可靠的數字應用於胸外(ET)、支氣管(BB)、細支氣管(bb)和人工呼吸系統區域。

ICRP-66 HRTM 的主要功能如下所述：

- 對呼吸系統的定性和定量描述，作為放射性核種滲透到人體之前的路徑
- 如何計算由於隨機曝露而引起的呼吸器官的輻射劑量
- 如何計算放射性核種向其他組織的轉移

另外，ICRP-66 HRTM 可以在以下情況下應用：

- 評估由於曝露引起的劑量，以及由於生物學分析和測量引起的攝入量
- 各種尺寸(0.0006-100 μ m)，氣體和蒸氣中的顆粒(粉塵)中包含的放射性核種
- 考慮到吸煙、疾病和污染物對人體各年齡段(3 個月，1、5、10 和 15 歲的兒童以及成人)的影響，提供參考指南。圖 1.3. 17 與表 1.3. 5 為 HRTM 的參考數據。

表 1.3. 5 粉塵大小與沉積部位對照表[7]

區域與組織	粉塵顆粒大小
口腔與鼻腔	5.8-9.0 μ m
咽喉	4.7-5.8 μ m

氣管與支氣管	3.3-4.7 μm
中段支氣管	2.1-3.3 μm
支氣管末端	1.1-2.1 μm
肺泡管	0.6-1.1 μm
肺泡	0.43-0.65 μm

S.I. Kim et al. / Nuclear Engineering and Technology 50 (2018) 1088–1098

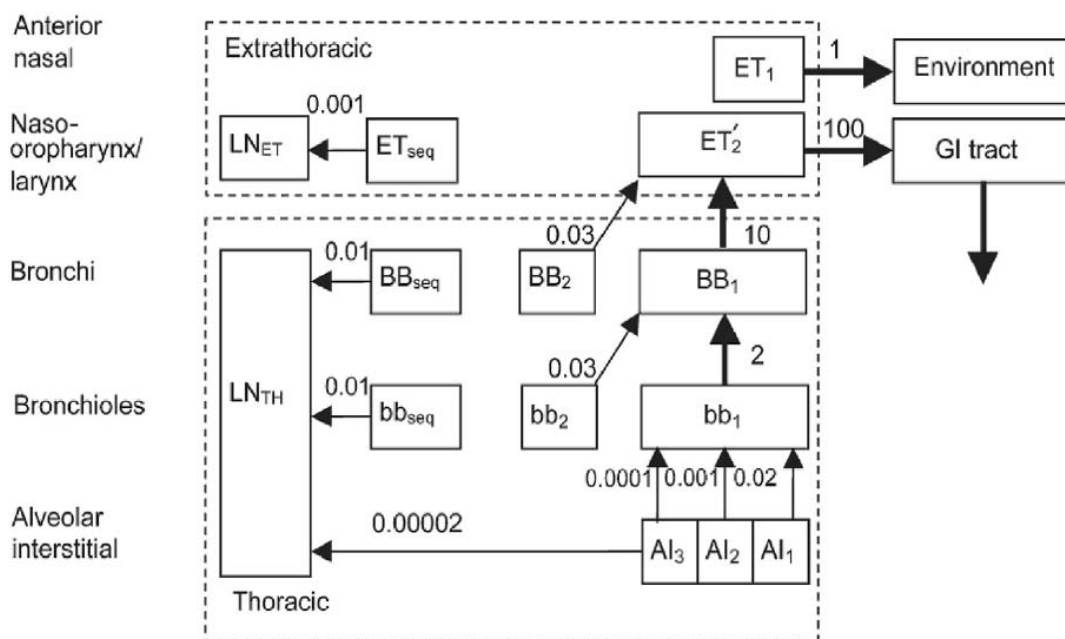


Fig. 4. Compartment model representing time-dependent particle transport from each respiratory tract region in the HRTM.

圖 1.3. 17 呼吸道區域與粉塵沉積模型示意圖[7]

評估由於放射性粉塵引起的內部曝露的代表性工具(軟體或數據庫)是 IMIE、LUDEP、IMBA 和 BiDAS。大多數內部曝露評估代碼的基本劑量數據庫都使用 ICRP Tract 模型，但不同代碼之間的區別不僅在於 ICRP 建議的粒徑(即 5 毫米)，還在於所有適用的粒徑。本節比較了可用於內部曝露評估代碼中，計算出的不同粉塵顆粒大小的管道模型以及不同的器官，表 1.3. 6 對其進行了總結。

表 1.3. 6 內部暴露評估代碼總覽[7]

Table 5
Outline of internal exposure evaluation codes.

Internal exposure evaluation code	ICRP model applied to the respiratory system	Calculable particle sizes	Number of considered nuclides	Absorption type
IMIE	ICRP-66 HRTM	0.001 ~ 20 μm	28 elements 46 radionuclides	F, M, S
LUDEP	ICRP-66 HRTM	5 μm (can be changed arbitrarily)	497 radionuclides	F, M, S
IMBA	ICRP-66 HRTM	5 μm (can be changed arbitrarily)	IMBA libraryb (can be added arbitrarily)	F, M, S
BiDAS	ICRP-66 HRTM	0.01 ~ 10 μm	30, including the nuclide proposed in ICRP	F, M, S

IMIE(individual monitoring of the internal exposure)：

主要目的是根據人體測量設備或生物測定數據的基礎以及已知的曝露條件(例如曝露日期、攝入途徑、AMAD 和物質類型(吸入情況))來重構多次攝入。在未知或不標準的曝露條件下，它可以比較各種曝露情況，例如攝入日期、攝入途徑(吸入，攝入等)、AMAD 和吸入的氣溶膠顆粒。

LUDEP(A lung dose evaluation program)：

英國國家放射防護委員會開發的軟體模組，用於使用新的 ICRP 呼吸道模型(ICRP 出版物 66)來計算內部劑量。IMBA 模組的降級版本是 ICRP-66 HRTM、ICRP-30 GI 管模型、NCRP 損傷模型和 ICRP-78 生物動力學模型。

IMBA(integrated modules for bioassay analysis)：

ACJ& Associates 和 HPA 共同開發的程序，它可以根據生物學測量數據評估攝入量，在攝入後的另一時間計算生物學分析量，並從單次攝入中計算出等效的器官劑量和有效劑量。使用 ICRPe66 / 30 胃腸道模型，NCRP 損傷模型和 ICRP-78 生物計量學模型。

BiDAS (bioassay data analysis software)：

2003 年由 KAERI(韓國原子能研究所)開發的輻射工人內部照射劑量評估計算軟體，在 2007 年將其升級到 BiDAS-2009，從而提高了軟體的功能、可靠性和便利性。

5.4 The Use of Robotics and Automation in Nuclear Decommissioning [8]

本篇論文提到核能除役和核能安全處置是全球性問題，如何安全地拆除和處理大量遺留物、粉塵、二次廢棄物是大家面臨的挑戰，若使用機器人及機器手臂，將可減少了人員時間、成本、及對工人的輻射劑量，另也可以執行調查和量測及快速的清理，高級訂制的機械手臂不僅可以作精密切割、清潔和重新密封惡化的管道及高輻射劑量條件下舊式儲水池的混凝土牆洩漏、高劑量環境中的裝卸和裝袋操作。

核能除役和核能安全處置所面臨的輻射問題。

- (1) 阿爾法(α)輻射：可以用一張紙、一層皮膚或約 5 厘米的空氣阻止。因此，大多數(α)輻射不會到達人體，不會滲透皮膚。但是，它會食入，例如通過呼吸被污染的粉塵或通過傷口。
- (2) Beta(β)輻射：在空氣中傳播數米，但可以被幾厘米的鋁和衣服擋住，提供一些保護。因此(β)粒子只會滲透皮膚的頂層。
- (3) 伽瑪(γ)輻射：對大多數材料的高穿透性。諸如鉛之類的緻密材料可用作屏蔽(γ)輻射。 γ 輻射可以在空氣中傳播數米，在人體組織中傳播數厘米，這對整個人體的細胞都非常有害。(與 X 射線極為相似)。
- (4) 中子輻射：與伽馬輻射相似，但可被含氫物質阻止。

大多數國家，當前輻射工作者的最大允許劑量為 5 年的平均值不超過 20 mSv，任何年份最大值一年不超過 50 mSv。表 1.3.7 顯示對過度曝露的人之健康影響：

表 1.3.7 核輻射劑量對健康的影響[8]

0.5 Sv	可能會有輕微的血液變化，無明顯作用。
0.5-1 Sv	輻射疾病嘔吐和噁心。預計不會死亡。
4 - 5 Sv	輻射疾病更為嚴重。50%的死亡率是在 3-8 週內因感染或貧血導致。倖存者康復約 6 個月。
≈10 Sv	1-2 小時內嘔吐和噁心。可能沒有倖存者。小腸內膜受損後 3-5 天內死亡。
≈50 Sv	發抖、抽搐幾乎立即發生。在不到 2 天的時間內，所有死亡均歸因於腦部損傷。

核監管委員會的 10 CFR 第 20 條規定，職業工人的全身劑量每年不得超過 50 mSv，一旦達到該劑量，該工人必須立即停止工作。為了完成必要的任務，必須僱用更多的工人。通過使用機器人，工人的數量減至最少，帶來許多額外的節省，包括減少了所需的防護服數量，並減少了管理工作。

機器人系統有三種不同類型的：1.自動機器人 2.監督機器人 3.遙控機器人。

在核工業的危險環境中工作，特別取決於兩個方面：環境的可變性和可達性。不同機器人系統使用的環境也不同。當可變性較低時，自動機器人將變得高效，而人類的參與將處於戰略決策水平。當可變性高時，人工感知和決策就變得更加重要，並且操作人員將承擔更多責任。

以下案例提供有關論文[9]機器人部署應用及機器人在放射性環境中執行的遠程操縱任務。

案例 1：

福島第一核電廠中部署了機器人，早期的機器人，容易被碎片絆住，甚至受地形影響，此機器人通過遙控器用於在建築物內高輻射環境中執行調查、測量等工作。

(1) 潛水爬行游泳機器人：

機器人可以通過控制推進器來游泳並改變其姿勢，從而避免障礙物並改善狹窄空間的可及性。攝影機和超聲波傳感器(聲納)可以安裝在機器人上，以在水環境中進行測量。該機器人有六個推進器和兩個履帶。四個垂直推進器用於垂直運動，兩個水平推進器用於水平運動。機器人還可以使用履帶在地板上移動並在垂直的牆壁上攀爬。機械手的尺寸為長 605 毫米、寬 450 毫米和高 330 毫米。其在空氣中的重量為 31.5 公斤，因為浮力的關係，在水中的重量減為 1.5 公斤。已連接 80 根臍帶電纜以供電並允許與操作員進行通訊。

(2) 變身機器人：

變形機器人的開發旨在穿越狹窄的空間並在粗糙的地面上爬行時進行測量。特別是，該機器人的開發旨在研究 PCV 的內部。該機器人由三個部分組成，主體和兩個緊湊型履帶。履帶通過可變形齒輪安裝在車身上。通過控制齒輪，履帶相對於其主體旋轉了 90 度。當兩個履帶排成一排(I 形)時，其外接圓直徑小於 100 毫米，重量為 7.5 公斤。最大推力為 100 N。

案例 2：

美國芝加哥阿貢國家實驗室(ANL)的 CP-5 反應器
雙臂工作模塊(DAWN)：

由兩個具有 5 DOF 基座的 Schilling Titan II 液壓操縱器，並設置為主/從配置，以在放射性環境中執行獨立的遠程操縱任務，例如反應器的機械拆除和生物防護結構、管道切割和水箱拆除。

未來的機器人部屬需考量各種因素，在論文[8]提到有效的機器人部署，需要更直觀的界面以及可以在操作員和機器人本身具有一些自主權或智慧。機器人技術和計算機視覺的飛速發展，人為因素研究與設計，比較容易被高級工程師和計算機科學家所忽視。開發新型的用戶友好型操縱系統，讓使用者可以輕鬆、快速地學習，以實現對大量剩餘遺留廢棄物的安全操縱，以高吞吐率實現及時除役。先進的人為控制的自主性，用於抓取、軌跡規劃和避免碰撞；並通過現代計算機視覺算法，提供增強的遠程呈現，例如觸覺反饋、增強現實和 3D 情境感知。例如論文[10]提到的 Lancaster 案例，當前在機器人技術方面的研究工作與推進，與用於除役任務的半自主式遙控機器人有關。在此項目中，目標是將人工智能、計算機視覺、改進的傳感器、車載智能和多機械手機器人技術相結合，以完成複雜的拆卸任務。這類研究的一個例子是開發改進的硬體和軟體系統，例如結合了硬體接口、伺服控制、軌跡生成、任務級程序、3D 仿真、圖形用戶界面、機器人接口(開放式軟體控制平台)的機器人平台，和一個數學庫。

案例 3：

另外論文[11]也提到了一些例子

■ 美國三哩島 PWR- ROVER、LOUIE I 和 LOUIE II

壓水式反應器 2 號核電廠，使用了三種不同的機器人 ROVER、LOUIE I 和 LOUIE II 進行檢查、除污、拆除工作。

- (1) ROVER(遠程偵察車，RRV)本質上是六個輪子的遠程操作多功能工具，包括環境監控、視頻傳輸、取樣和消毒。其中兩個部署在地下室，輻射劑量率在 25 mSv 至 10 Sv/h 之間；另一個則設置為培訓和設備測試。
- (2) LOUIE I 是一種輕巧的小型(主要)測量機器人，它用在 RRV 無法到達的地方，並且處於輻射範圍介於 10 至 30 Sv/h 之間。
- (3) LOUIE II 是專門為切割混凝土塊部署的機器人。

■ 瑞典國營林海斯(Ringhals Reactor no. 1)BWR 核電廠- 蛇形機器人

在 2004 年運轉期間，發現位於林海斯 1 號核反應器爐心的下方管道洩漏，使用兩種類型的蛇臂機器人進行的管道維修。

第一種 23 維度自由手臂繞著蜿蜒曲折阻塞管道，將攝影機放置在人無法觸及的位置，以提供理想的工作現場視野。較大的第二手臂則用來輸送、切割工具及檢查設備，並且還進行了點焊和連續焊接。

■ 韓國永光(Yongkwang)5 號核電廠 PWR 機組- KAEROT 機器人

反應器冷卻系統的安全相關設備必須進行監控和維護，以改善核電廠的效率、可用性、熱負荷、振動等。因此，KAEROT 系列被開發來檢查和維護核電廠主系統。

冷卻液系統中存在鬆動零件可能造成反應器安全性降低，並造成系統中材料磨損與其他零件損壞。另外，也可能造成控制桿卡住的可能性，及冷卻液中放射性雜質含量的增加。因此，開發水下機器人 KAEROT / uv1，用於核反應器中零散零件的檢測和清除。

小結：

綜合以上機器人除役案例，整理成如表 1.3.8 所示，透過機器人技術的應用，能有效幫助組件拆除，並找出除役的關鍵路徑，避免拆除作業受到干擾，以加速完成除污與除役作業。

表 1.3.8 機器人除役案例

實際案例	機器人類型	電廠	功能
福島第一核電廠[9]	潛水爬行游泳機器人	BWR	機器人可以通過控制推進器來游泳並改變其姿勢，從而避免障礙物並改善狹窄空間的可及性。
福島第一核電廠[9]	變身機器人	BWR	穿過狹窄的空間並在粗糙的地面上爬行時進行測量。
美國三哩島 2 號核電廠[11]	ROVER(遠 程 偵 察 車，RRV)	PWR	環境監控、視頻傳輸、取樣和消毒、培訓和設備測試
美國三哩島 2 號核電廠[11]	LOUIE I	PWR	輕巧的小型(主要)測量機器人，它用在 RRV 無法到達的地方
美國三哩島 2 號核電廠[11]	LOUIE II	PWR	切割混凝土塊
瑞典林海斯 (Ringhals Reactor)1 號核電廠[11]	蛇形機器人	BWR	管道維修、輸送、切割工具、檢查設備
韓國永光(Yongkwang)5 號核電廠機組[11]	水 下 機 器 人 KAEROT	PWR	核反應器中零散零件的檢測和清除

5.5 Development of Decommissioning Engineering Support System (DEXUS of the Fugen Nuclear Power Station [10])

5.5.1 介紹

除役重要的是要經濟合理地進行，因此，有必要採用系統工程方法，以便在除役的規劃階段通過選擇適當的拆除計劃來優化工作量、減少曝露劑量、廢棄物質量和成本。由於核設施具有大量的組件和結構，因此有必要在拆除之前評估過程，然後有效而精確地實施。

因此，通過採用 3D-CAD 系統、VR 系統等新的資訊技術，開發用於除役的工程輔助系統，以制定有效的除役計劃。

5.5.2 普賢核能發電廠(Fugen)工程支持系統概述

系統工程方法是一種優化方法，通過在計劃的規劃階段選擇適當的拆卸計劃來確定工作量、曝露劑量、廢棄物質量和成本。

(DEXUS)為使用 3DCAD、VR 和可視化技術來輔助除役工程的進行，設計概念如圖 1.3.18 所示。

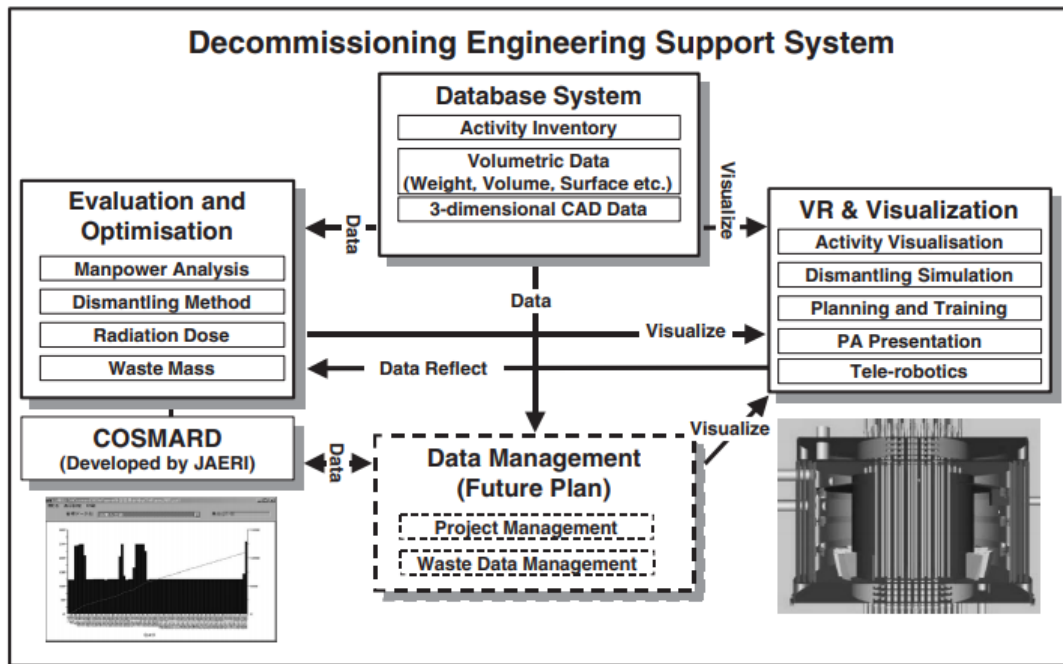


圖 1.3. 186 DEXUS 的設計概念[10]

DEXUS 由數據庫系統、評估和優化系統、VR 和可視化系統以及數據管理系統組成。CAD 數據、體積數據和活動清單數據，輸入到可視化系統，顯示複雜的結構和放射性。評估和優化系統數據也與除役計劃有關。通過系統除役計劃的輸出也可視化。而且，實現了高級仿真，例如在拆卸計劃期間進行干擾檢查。這意味著可以期望通過使用虛擬現實技術，在拆卸計劃中進行更精確的工作量評估、工人模擬和安全檢查，並獲得結果可以反映在評估系統上。這些子系統用於除役項目的計劃階段。未來，數據管理在實際拆卸階段需要項目和廢棄物數據管理系統。

5.5.3 通過 3DCAD 數據進行數據庫連接和仿真

3D-CAD 數據包含了反應器、輔助設施、渦輪機建築物等，以及組件的屬性數據，例如重量、材料、活性、污染、輻射劑量率，儲存在數據庫系統中，以便評估廢棄物的質量和水平。

可視化軟體顯示 3D-CAD 數據的準備，如圖 1.3. 19 所示。

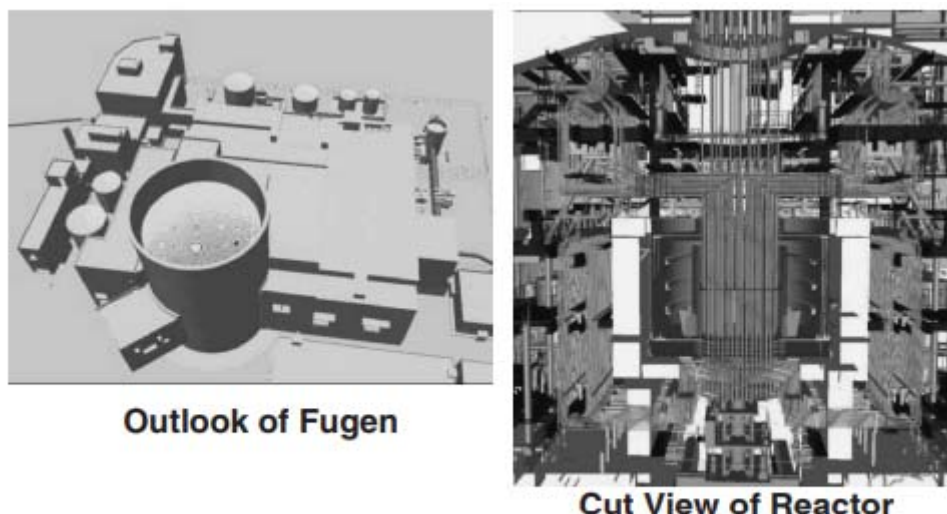


Fig. 3 Example of visualized equipment

圖 1.3.19 使設備可視化示例[10]

而透過 CAD 數據的連接，將已可視化的立體圖像與數據做連接，方便對除役工作進行分析，如圖 1.3.20 所示。

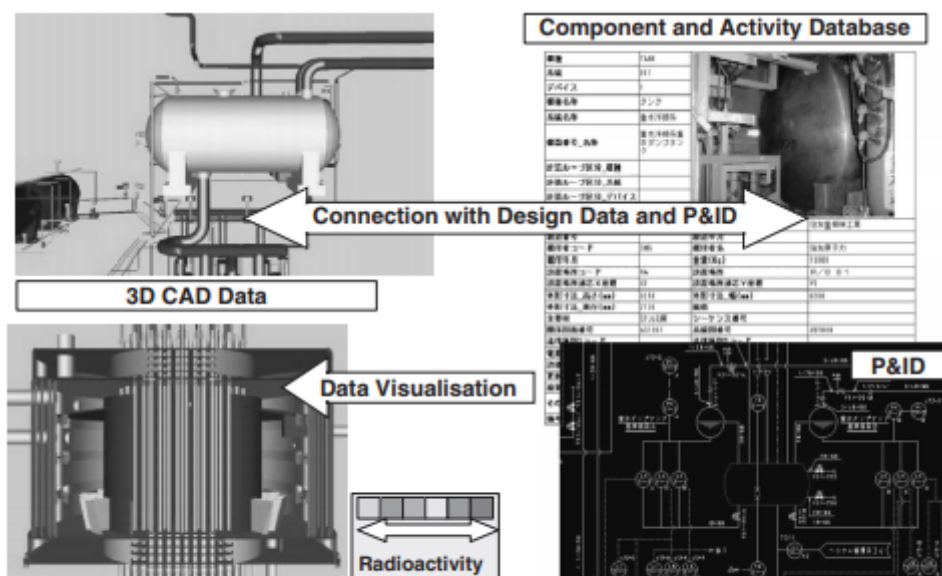


Fig. 4 Database connection from CAD data

圖 1.3.20 透過 CAD 數據庫連接設備相關資料在已可視化的立體圖形上[10]

根據數據庫中的放射性強度為對象著色。此外，通過選擇 3D-CAD 的對象，P&ID(管道和儀表圖)中利用不同顏色來標示不同儀器，來模擬拆除過程。時間表模擬和可視化動畫移動，使拆卸過程如圖 1.3.21 和圖 1.3.22 所示。

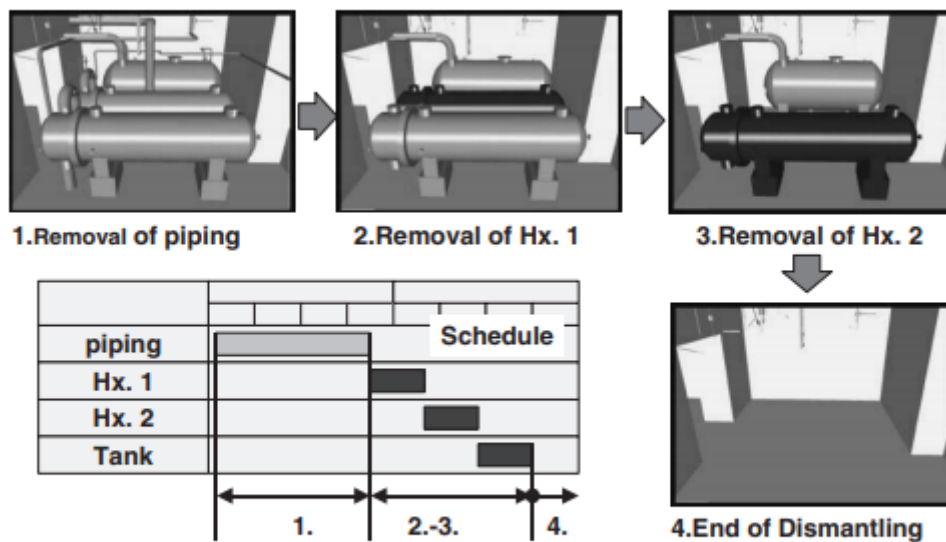


Fig. 5 Dismantling scheduling simulation

圖 1.3. 21 拆除過程模擬[10]

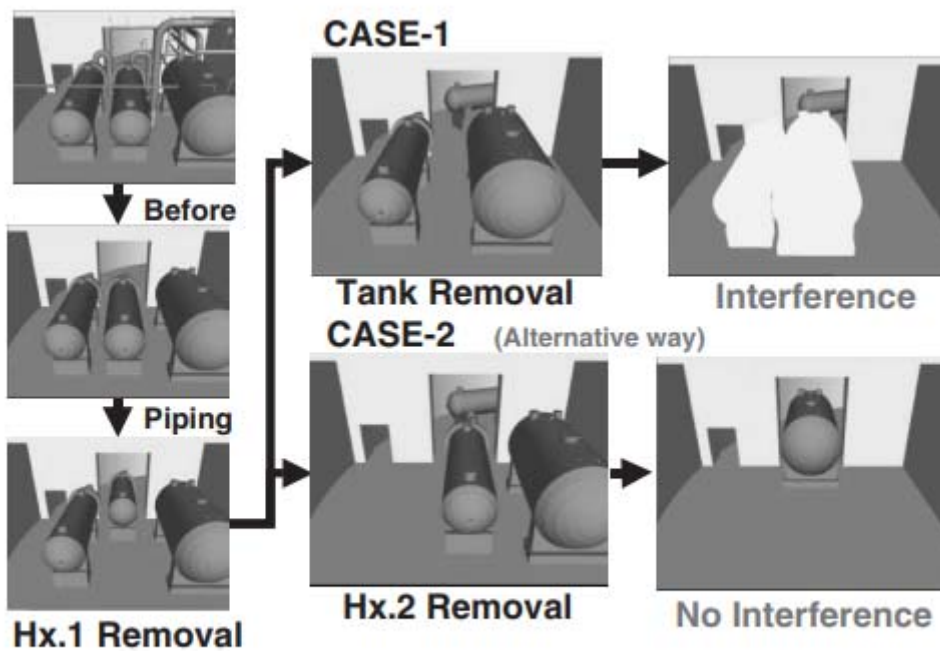


Fig. 6 Visualization of dismantling movement

圖 1.3. 22 可視化拆卸作業[10]

動畫系統主要評估 3D-CAD 軟體中的切割模擬，與剛剛的拆除元件模擬相關，但當遇到無法搬運的狀況時，可透過切割模擬推測更好的移動辦法，開發定制的切割功能。虛擬切割在 3D-CAD 軟體中可用，如圖 1.3. 23 所示。

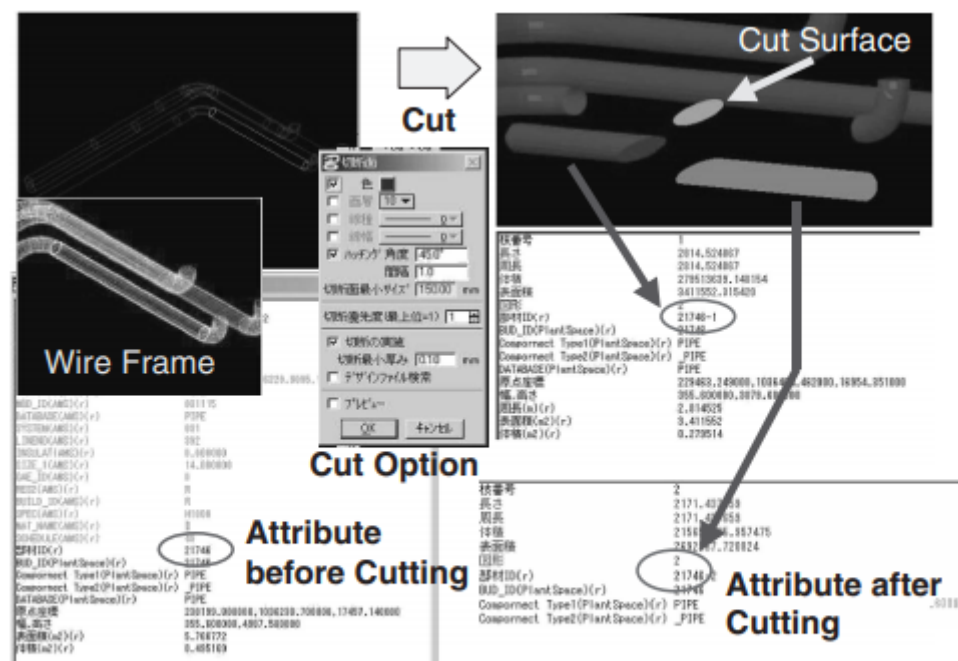


Fig. 7 Cutting simulation in 3D-CAD

圖 1.3. 23 D-CAD 中的切割模擬[10]

3D-CAD 中進行質量評估，主要說明例如總質量、重量、表面積等。在該區域的邊界處會自動剪切管道。該數據可用於所述拆卸工作量的計劃，如圖 1.3. 24 所示。

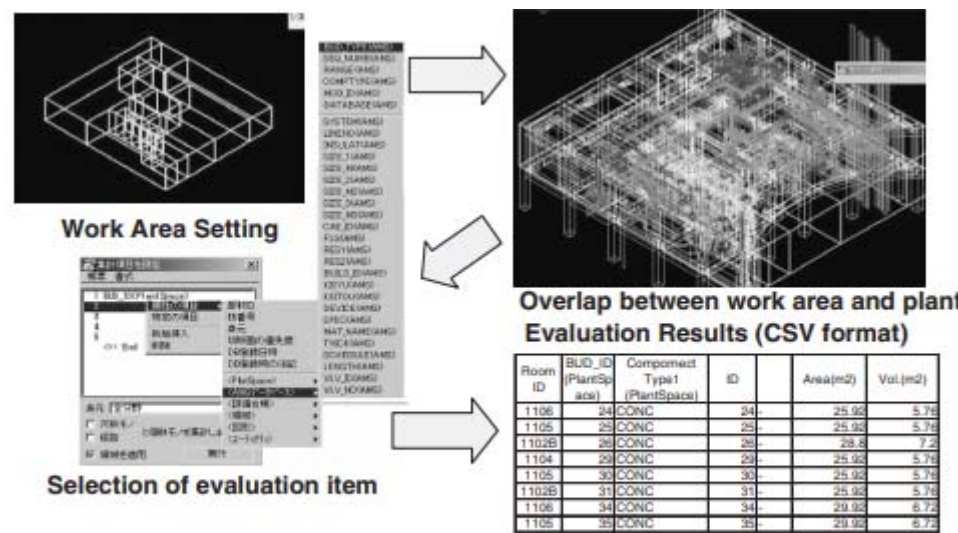


Fig. 8 Mass evaluation in 3D-CAD

圖 1.3. 24 在 3D-CAD 中進行質量評估[10]

5.5.4 結論

該系統支持從組件數據庫、廢棄物量估算、放射性可視化、拆卸時間表和其他有用功能的數量。此外，通過使用虛擬實境技術，可以更準確地評估照射劑量，並可以更輕鬆地估算在輻射環境中拆卸工作的工作量。將來，該系統將擴展為培訓系統，再加上遠程控制系統、數據庫和項目管理。該系統將非常有效地減少除役的總成本，並在拆除過程中提高安全性。

5.6 Visualization of a Dismantling Environment for an Evaluation of a Worker's Dose during the Decommissioning of KRR-1&2 [13]

5.6.1 KRR-1&2 除役期間透過可視化進行拆卸評估與環境劑量討論

本文的目的是為使用 3D CAD 動畫，模擬核設施的拆卸過程來降低除役的難度，還有提出了使用 MCNP-4C 識別已拆除物體和物體中是否存在放射性的方法，評估放射性劑量和放射性物質對工人的影響，目的為能了解放射性的變化，使我們了解指定拆卸物品中放射性最嚴重的位置，和在模擬拆卸模型時工人的實時曝露劑量率。

5.6.2 虛擬拆卸環境的設計和建模對放射性測量和分佈

針對 KRR-2 的熱柱水平門(thermal column horizontal door)來分析放射性的分佈，由門前半部和後半部共選出五個點收集數據(前部的正面：1、前部的側面：2、後部側面：2)，如圖 1.3. 25 所示。圖 1.3.26 顯示了在 7 cm 深處確定放射性強度的採樣點，抽樣的目的是比較表面和 7 cm 處的放射性的不同，結果顯示正面之放射性較高。表 1.3. 9 描述熱柱水平門上的 Gamma 射線分析結果，透過結果來描述門的放射性分佈。



圖 1.3. 25 KRR-2 熱柱水平門[13]

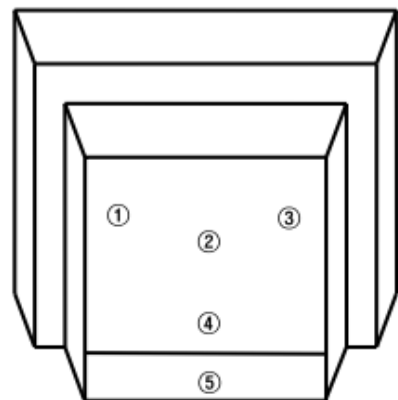


圖 1.3. 26 放射性水平的採樣點(7cm 深) [13]

表 1.3.9 熱柱水平門上的 Gamma 射線分析結果[13]

No. sampling	Measured radionuclide	Revised radioactivity concentration (Bq/g)	Remark (MDA)	Day of measurement (2004)
Horizontal-1	^{60}Co	0.152	0.00439	10.22
Horizontal-2	N/D	—	—	10.22
Horizontal-3	N/D	—	—	10.22
Horizontal-4	N/D	—	—	10.25
Horizontal-5	N/D	—	—	10.27
After polishing on surface	H1-1 ^{60}Co	0.044	0.03779	11.05
	H1-2 ^{60}Co	0.074	0.00424	11.05
	H1-3 ^{60}Co	0.042	0.00374	11.05
	H1-4 ^{60}Co	0.076	0.00426	11.05
	H1-5 ^{60}Co	0.011	0.00228	11.05
After crushing in depth, 7 cm	H1-1 N/D	—	—	11.03
	H1-2 ^{60}Co	0.005	0.00233	11.03
	H1-3 ^{60}Co	0.006	0.00252	11.03
	H1-4 N/D	—	—	11.03
	H1-5 ^{60}Co	0.005	0.00312	11.03

5.6.3 輻射劑量的計算和建模

為模擬工人拆除時的劑量評估，使用 MCNP4C 計算了熱柱水平門周圍的劑量，MCNP 是一種計算劑量學數據的實用方法，根據粒子相互作用對 3D 劑量分佈進行精確計算模擬，MCNP 的結果如圖 1.3.27 所示。

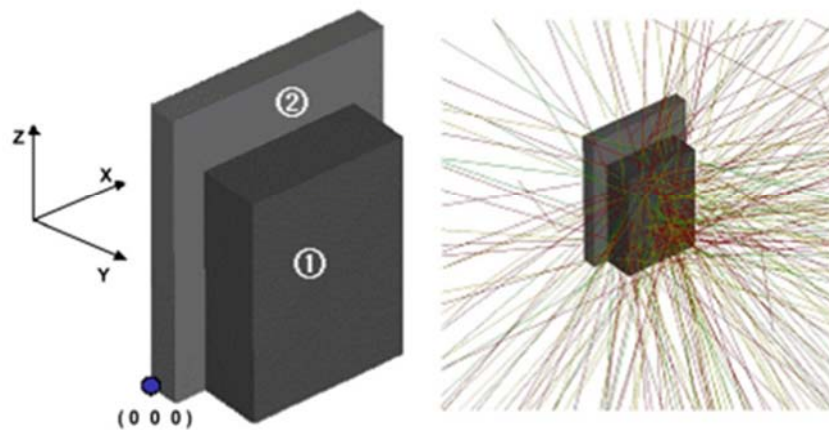


圖 1.3.27 MCNP 劑量模擬結果[13]

5.6.4 放射性分佈圖

在根據實際門進行建模後創建 KRR-2 的柱門，在門上照射了三十多年的放射性分佈，如圖 1.3.28 所示。

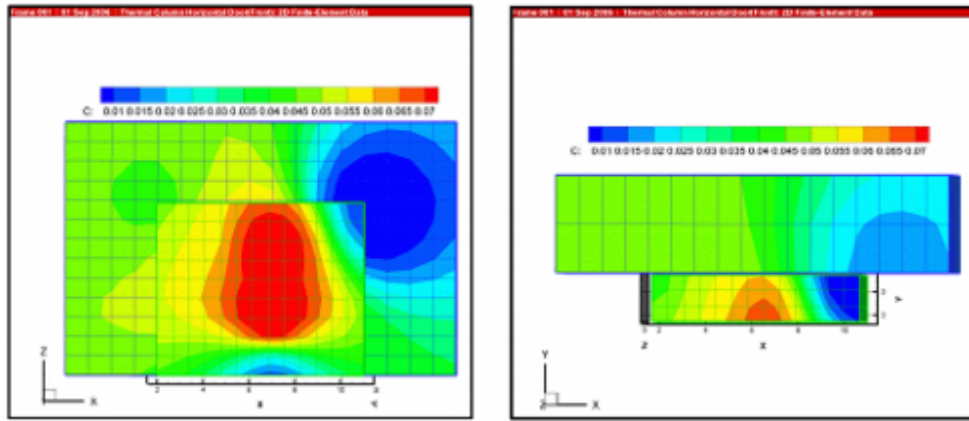


圖 1.3.28 放射性分佈圖[13]

門中央前部的放射性較高，評估該結構後使用金剛石輪鋸與手動破碎機拆卸熱柱門，現場狀況如圖 1.3.29 所示。



圖 1.3.29 現場拆卸熱柱門[13]

使用 MCNP-4C 計算拆除後每個結構的輻射劑量，可以標示出每個相對位置的輻射劑量。根據 MCNP 計算得出的輻射劑量，模擬評估工人在拆除過程中的劑量，主要是模擬一個虛擬工人拆除熱柱門的拆卸環境，並模擬工人每秒受到的曝露劑量，並顯示 Gamma 射線。圖 1.3.30 左側顯示拆卸過程。

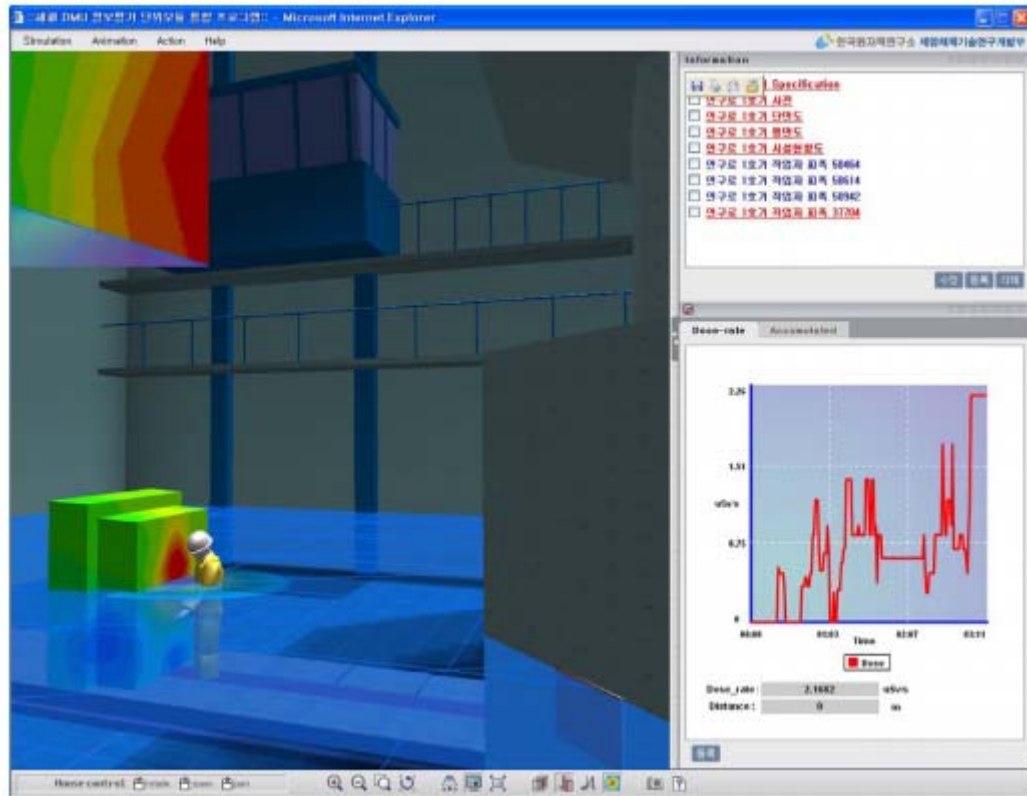


圖 1.3.30 工人拆除熱柱門模擬圖[13]

程式會自動將拆除門期間所受的劑量與時間和距離的關係，記錄在資料庫內，如圖 1.3.31 所示。從這些圖片中，可以看到工人移動距離及進行拆除持續時間，並顯示目前劑量、工人曝露的累積劑量。

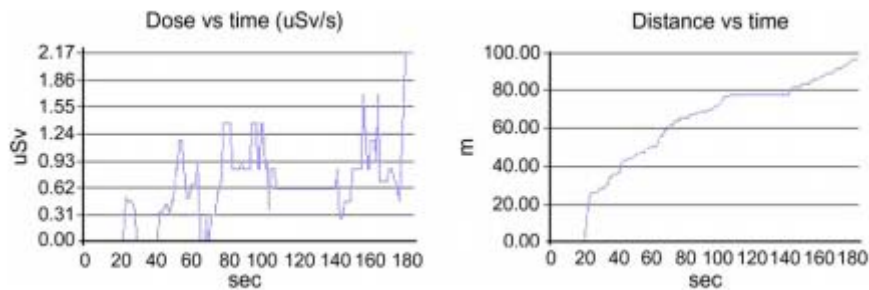


圖 1.3.31 拆除門期間所受的劑量與時間和距離的關係[13]

5.7 Decontamination of Concrete Waste from Nuclear Power Plant Decommissioning in South Korea [14]

● 韓國古里核電廠(PWR)混凝土廢棄物除污

大多數核電廠除役期間拆除後所產生的廢棄物都是混凝土和金屬建材，佔總固體廢棄物的 70% 以上。因此，去污過程應該進行以減少廢棄物量為目標。

根據歐盟報告，歐洲到 2060 年將有 5 億噸混凝土廢棄物產生，受污染的混凝土，隨著時間的流逝，放射性元素堆積在混凝土表面，與水結合在一起就形成了水泥漿，其中代表性的放射性元素會存在受污染的混凝土表面，其中含有 Co-60、Cs-137 和 Eu-152。為了有效地去除混凝土內部的放射性元素，並分離去除水泥骨架中的糊狀物，在淨化過程中至關重要。通常核電廠拆除後的混凝土廢料量很大，因此，去污過程應該以減少廢棄物量為目標。

- 去除混凝土廢棄物內部的放射性元素有 2 種方法

機械方法：去除混凝土的殘留物(例如灰塵或放射性微粒)

化學方法：高效的從混凝土中去除放射性元素

熱處理：減少體積的技術

由於韓國存儲庫的局限性，希望可以找到降低固體廢棄物體積的方法。因此，韓國 Kori 1 號機組，開發對於減少放射性廢棄物的數量及其安全處置。針對

- (1)根據韓國核電廠的類似質量分數來模擬混凝土表徵
- (2)研究熱處理在各種溫度下之優化條件及減少輻射量
- (3)找到最佳酸性溶液進行 Co 除污研究

- 發現透過熱和化學除污結合處理，增強從混凝土廢棄物中去除 Co 的能力

- (i) 透過熱處理減少污染混凝土的體積。(最佳溫度介於 500°C 和 550°C 之間。在熱處理過程中，Co 相從 Co_3O_4 變為 CoO ，體積減少約 60%)
- (ii) 進行比較有機和無機酸性溶液的化學除污實驗。無機溶液表現出比有機溶劑更高的除污效率；**最有效除污的無機酸溶液為 HCl**，持續 4 小時，濃度 99% 以上。因此，根據這些結果，可以同時使用熱和化學除污增強混凝土中去除 Co 的處理方法。

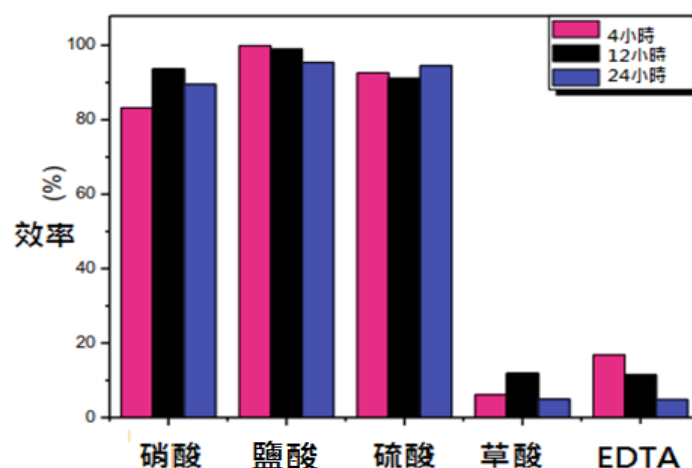
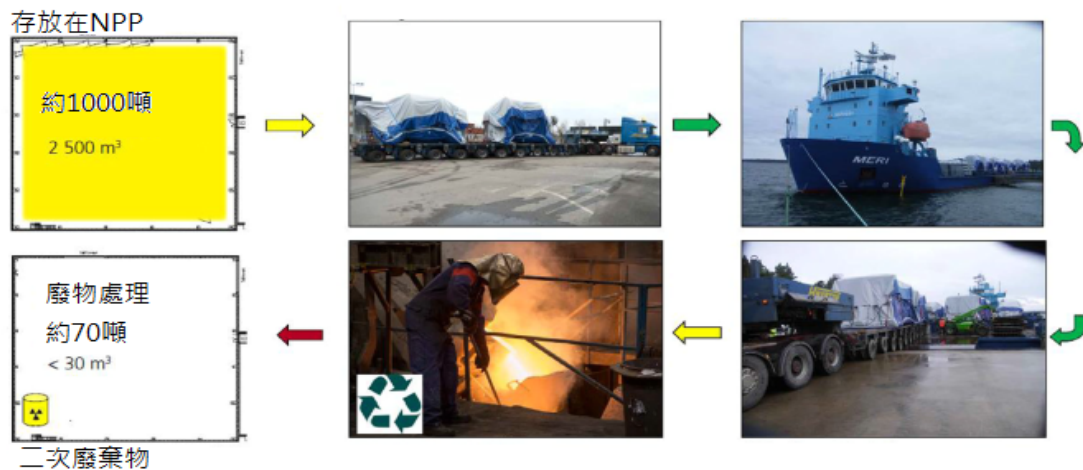


圖 1.3. 32 隨著時間的增加，水泥溶液中 Co 的去污效率[14]

5.8 Proposal for the Management Strategy of Metallic Waste from the Decommissioning of Kori Unit 1 by Using Melting and Segmentation Technology [15]

韓國古里核電廠 (Kori unit 1, PWR)透過熔融技術和分離處理核電廠除役產生的金屬廢棄物，除役廢棄物會佔用大量存儲庫空間及花費管理放射性物質的成本，透過熔融技術和分離處理有以下優點：

- i、 可以通過溶解原始成分在液態材料中，將液化的材料倒入模具中，冷卻以減少固體的體積。由於空隙消除密度增加、整體體積減少，減少廢棄物體積。
- ii、 熔融技術對放射性元素 Cs-137 有良好的去污效果。Cs-137 是一種揮發性元素，具有半衰期為 30 年，融化期間，灰塵中累積了 Cs-137，可由通風過濾器收集並清除。
- iii、 金屬可以被回收再利用，重複被製造成容器，或作為屏蔽塊產品。



5.9 Establishment of New Regulations for Radiological Protection for Decontamination Work Involving Radioactive Fallout Emitted by the Fukushima Daiichi APP Accident [16]

日本藉由福島第一核電廠事故制定除污工作的放射防護新法規

i、 根據內部暴露風險選擇個人防護設備

環境粉塵濃度	污染程度	
	超過 500,000 Bq/kg	低於 500,000 Bq/kg
超過 10 mg/m ³	HAZMAT呼吸防護設備，過濾效率達95%或更高，適合長袖襯衫，橡膠手套和橡膠靴子	過濾效率達80%或更高的呼吸防護設備，長袖襯衫，橡膠手套和橡膠靴
等於或低於 10 mg/m ³	過濾效率達80%或更高的呼吸防護設備，長袖襯衫，橡膠手套和橡膠靴	用無紡布製成的呼吸面罩，長袖襯衫，棉手套和橡膠靴

ii、 平均環境劑量率的測量

日本厚生勞動省(MHLW)決定環境劑量率測量的單位應為 1000 m²。如果工作空間大於 1000 m²，則應將其劃分為 1000 m² 的區域。在假定劑量率的變化較小的情況下，平均劑量率是根據 5 個點的劑量率計算得出的，其中包括 4 個角和單位面積的對角十字線。如果該區域的形狀不規則，則應選擇 5 個測量點，包括沿周長及其對角線的 4 個等距點。此測量稱為 (A 型測量)，若周圍劑量率的變化很大，則採用以下公式：

$$R = \left(\sum_{i=1}^n (B^i \times WH^i) + A \times \left(WH - \sum_{i=1}^n (WH^i) \right) \right) \div WH$$

R = 平均環境劑量率 (μSv/h)

n = 測量點數

A = 根據 A 型測量得出的平均環境劑量率 (μSv/h)

Bⁱ = 每個測量點的環境劑量率

WHⁱ = 在每個測量點附近地點從事除污工作人員中，預期有最高暴露劑量的人員的每

天工作時間(小時)

WH = 從事除污工作人員每天的工作時間(小時)

5.10 New Methods and Techniques for Decontamination in Maintenance or Decommissioning Operation [17]

可剝塗層(strippable coating)為將污染源轉換至塗層上，去除材料表面與孔洞內的污染。適合現地去污，僅使用很少的化學藥品($100-1000 \text{ g / m}^2$)，少量的二次廢棄物(約 5 l / m^2)，僅固體廢棄物避免污染擴散。可剝塗層由「支撐劑(supporting agents)」與「淨化劑(decontaminant)」組成：

a. 支撐劑：

i. 磷酸甘油(87 % , s.g. 1.23)與硝酸 (89 % , s.g. 1.75)。混和物(2：1)並加熱至 100°C 並維持 1 小時

ii. PAIR-BATAN 公司生產的輻照乳膠(irradiated latex)

b. 淨化劑：EDTA、檸檬酸、草酸和 KMnO_4 組成

應用目標為被 Cs-137 污染約為 $1.1 \times 10^{-3} \mu\text{Ci / cm}^2$ 的不鏽鋼。表 1.3. 10 結果顯示，可剝塗層的停留時間超過 30 分鐘後並不會有顯著的效益。

表 1.3. 10 除污劑與除污因子之時間關係表[17]

No	Decontaminating agent	Time (minutes)	A_0 (Bq/cm ²)	A_t (Bq/cm ²)	DF
1	EDTA	30	52.17	2.87	18.18
2		45	40.48	2.38	17.22
3		60	52.86	3.06	18.18
4		75	62.10	3.33	18.65
5		90	53.37	2.79	19.13
1	citric acid	30	46.08	1.44	32.00
2		45	44.85	1.30	34.50
3		60	48.45	1.37	33.63
4		75	45.24	1.38	32.78
5		90	54.80	1.55	35.35
1	oxalic acid	30	52.64	1.23	42.80
2		45	48.27	1.13	42.72
3		60	50.40	1.18	42.72
4		75	45.36	1.06	42.80
5		90	50.38	1.18	42.70
1	KMnO_4	30	55.20	2.30	24.00
2		45	48.00	2.00	24.00
3		60	52.26	2.04	25.62
4		75	56.09	2.10	26.71
5		90	69.68	2.60	26.80

表 1.3. 11 除污劑/支持劑(磷酸甘油)中重量百分比濃度對除污因子關係表(1hr) [17]

No	Decontaminating Agent	Concentration (%)	A ₀ (Bq/cm ²)	A _t (Bq/cm ²)	DF
1	EDTA	0	52.25	5.93	8.80
2		0.1	54.15	3.31	16.38
3		0.5	53.20	2.92	18.18
4		1.0	52.80	3.06	17.27
5		2.0	54.15	2.98	18.18
6		3.0	58.90	2.95	20.00
1	citric acid	0	52.25	5.93	8.80
2		0.1	54.62	4.62	11.81
3		0.5	60.80	1.80	33.63
4		1.0	48.45	1.37	35.45
5		2.0	50.35	1.29	39.09
6		3.0	53.20	1.31	40.72
1	oxalic acid	0	52.25	5.93	8.80
2		0.1	40.27	1.70	23.63
3		0.5	42.40	1.23	34.54
4		1.0	50.40	1.18	42.72
5		2.0	52.80	1.16	45.45
6		3.0	53.20	1.13	47.27
1	KMnO ₄	0	52.25	5.93	8.80
2		0.1	48.10	2.13	22.55
3		0.5	54.26	2.39	22.71
4		1.0	52.16	2.04	25.62
5		2.0	47.28	1.69	27.97
6		3.0	49.10	1.77	27.80

表 1.3. 12 除污劑/支持劑(輻照乳膠)中重量百分比濃度對除污因子關係表(1hr) [17]

No	Decontaminating agent	Concentration (%)	A ₀ (Bq/cm ²)	A _t (Bq/cm ²)	DF
1	EDTA-Na ₂	0	42.09	3.66	11.50
2		0.1	42.25	3.96	11.66
3		0.5	44.40	3.57	12.42
4		1.0	35.70	2.31	15.42
5		2.0	36.00	2.48	14.52
6		3.0	40.11	3.07	13.05
1	sodium citric	0	42.09	3.66	11.50
2		0.1	36.42	3.37	11.79
3		0.5	41.06	3.15	13.04
4		1.0	50.02	2.86	17.46
5		2.0	44.50	2.70	16.50
6		3.0	38.80	2.26	17.20
1	sodium oxalic	0	42.09	3.66	11.50
2		0.1	42.60	2.47	17.27
3		0.5	33.44	1.85	18.09
4		1.0	45.21	2.37	9.10
5		2.0	39.90	1.83	21.81
6		3.0	37.62	1.29	23.32
1	potassium permanganate	0	42.09	3.66	11.50
2		0.1	40.60	1.79	22.70
3		0.5	45.71	1.97	23.15
4		1.0	41.85	1.65	25.41
5		2.0	36.45	1.43	25.45
6		3.0	35.57	1.30	27.38

由表 1.3. 11~表 1.3. 12 可知，輻照乳膠對不銹鋼材料為最佳可剝塗層之支撐劑，
表 1.3. 13 顯示其除污效果。

表 1.3. 13 輻照乳膠除污效果[17]

Table 10. Decontamination by irradiated latex
Sample : SS
Contaminant : Cs-137

No Sample	First Activity (Bq/cm ²)	Final Activity (Bq/cm ²)	FD
1	14.51	1.68	8.61
2	20.08	2.44	8.18
3	24.20	1.38	17.45
4	23.48	2.50	9.41
5	27.20	2.63	10.90
6	24.56	2.81	8.73

參考文獻

1. ” 109 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析，勞務採購案服務建議書，行政院原子能委員會，109 年 3 月。
2. Anibal 2004. Anibal L. Taboas, A. Alan Moghissi and Thomas S. LaGuardia, “ The Decommissioning Handbook,” ASME, New York, 2004.
3. Nuclear News Special Section Decommissioning & Decontamination, Best Practices for Strategic Nuclear Plant Decommissioning | 36, July 2019, Nuclear News, ANS(American Nuclear Society)
4. Nuclear Engineering International 2018, ”Breaking up Barsebäck,” Nuclear Engineering International, 6 June 2018.
<https://www.neimagazine.com/features/featurebreaking-up-barsebck-6195729/>
5. Nuclear Engineering International 2019, “Innovative D&D at Bohunice V1,” 7 March 2019.
<https://www.neimagazine.com/features/featureinnovative-dd-at-bohunice-v1-7027178/>
6. C. Card 1982. C. Card, G. Hoenes, L. Munson, and G. Halseth, “Health Physics and Industrial Hygiene Aspects of Decontamination as a Precursor to Decommissioning,” Pacific Northwest Lab.1982.
7. S. I. Kim 2018. S. I. Kim, H. Y. Lee, J. S. J. N. E. Song, and Technology, "A Study on Characteristics and Internal Exposure Evaluation of Radioactive Aerosols during Pipe Cutting in Decommissioning of Nuclear Power Plant," vol. 50, no. 7, pp. 1088-1098, 2018.
8. D. W. Seward 2005. D. W. Seward and M. J. Bakari, "The Use of Robotics and Automation in Nuclear Decommissioning," in 22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction ISARC, 2005, pp. 11-14.
9. N. E. Hitachi-GE 2015. N. E. Hitachi-GE, "Survey Robots for Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," E-Journal of Advanced Maintenance, vol. 7, no. 3, 2015.
10. Y. Iguchi 2004. Y. Iguchi, Y. Kanehira, M. Tachibana, T. J. J. o. n. s. Johnsen, and technology, "Development of Decommissioning Engineering Support System (dexus of the fugen nuclear power station," vol. 41, no. 3, pp. 367-375, 2004.
11. I. Tsitsimpelis 2019. I. Tsitsimpelis, C. J. Taylor, B. Lennox, and M. J. Joyce, "A Review of Ground-Based Robotic Systems for the Characterization of Nuclear Environments," Progress in Nuclear Energy, vol. 111, pp. 109-124, 2019.
12. Jeong 2008. Jeong, K., et al., “A Qualitative Identification and Analysis of Hazards, Risks and Operating Procedures for a Decommissioning Safety Assessment of a Nuclear Research Reactor,” Annals of Nuclear Energy, 2008. 35(10) : p. 1954-1962.
13. Park 2008. Park, H. S., et al. (2008). "Visualization of a Dismantling Environment for an Evaluation of a Worker’s Dose During the Decommissioning of KRR-1&2." Annals of Nuclear Energy 35(6) : 1117-1124.
14. Han 2020. Han, S., et al. (2020). "Decontamination of Concrete Waste from Nuclear Power Plant Decommissioning in South Korea." Annals of Nuclear Energy 149 : 107795.
15. Seo 2017. Seo, H.-W., et al. (2017). "Proposal for the Management Strategy of Metallic Waste from the Decommissioning of Kori unit 1 by Using Melting and Segmentation Technology." Annals of Nuclear Energy 110 : 633-647.

16. Yasui 2013. Yasui, S., Establishment of New Regulations for Radiological Protection for Decontamination Work Involving Radioactive Fallout Emitted by the Fukushima Daiichi APP Accident. J Occup Environ Hyg, 2013. 10(9) : p. D119-24.
17. IAEA 1998. New Methods and Techniques for Decontamination in Maintenance or Decommissioning Operations IAEA, VIENNA, 1998 IAEA-TECDOC-1022 ISSN 1011-4289.
18. " Sweden Prepares for a Decade of Nuclear Decommissioning," NS ENERGY, Kristina Gillin, 27 Feb. 2020.
[https : //www.nsenergybusiness.com/news/nuclear-decommissioning-sweden/](https://www.nsenergybusiness.com/news/nuclear-decommissioning-sweden/)

附錄 1-3： The Decommissioning Handbook[2]第 13 章及 17 章全文翻譯

7.1 第 13 章 - 除污決策及技術(Decontamination Decisions and Process)

● 13.1 前言

核設施除污的相關決策及選用的方法，對輻射曝露控制具有決定性的影響。這類計畫的當務目標，主要是將表層及表面下的污染物予以隔離，從而降低或消除職業與公眾的輻射曝露，並使放射性廢棄物的管理及處置更具成本效益。除役作業的核心是決定各種方法與技術的適用性並作出決策，可用的技術包括洗滌、加熱、化學或電化學作用、機械清潔等，其中，大型設施及設備，大都適合採用化學或機械方法，而對於設施中必須維持運轉任務的組件，則通常使用稀釋的化學試劑，利用非破壞性的方式，將最外層承受絕大部份污染的表面薄膜予以溶解。相反地，若該組件沒有再利用的需求，也可以將其基底金屬溶解。小型受污染金屬棚屋的除污方式可能很簡化，因為壓實顯然是最可行的選擇，而大型的高放射性設施可能需要更複雜的方式，包括廣泛使用機器人等。欲將設施恢復到所定義的最終狀態，其間過渡計畫的目標包括：

- 將鬆散的放射性污染物及殘餘的固定污染物移除
- 減少殘餘的放射性污染物所需的防護儲存
- 將設備及材料盡可能地回收再利用
- 減少放射性廢棄物的處置量
- 以限制最少且可接受的形式來隔離廢棄物，以進行運輸及處置(例如：無限制的、乾淨的瓦礫、衛生、特殊等級、僅表面污染、有害的、低放射水平、同時具有危害及放射性，遠端處理及超鈾的廢棄物)
- 縮短任何必須防護儲存或長期監控的時間

當被指示要進行化學除污時，可能要有臨時專用於沈澱(precipitation)、過濾(filtration)、蒸發(evaporation)、除礦(demineralization)、穩定(stabilization)、再循環及/或回收的適當設施。在運往處理及/或處置前，殘餘濃度代表可能還有顯著的輻射量，每個步驟對預估的職業劑量經費都是一筆額外開銷，且增加了未預期的輻射外釋風險，例如：因為攝入(uptake)放射性物質，使得劑量比處理大量未除污系統還高。因此，會根據持續且反覆的成本效益分析，來規劃選用的方案。

● 13.2 決策過程

針對結構、系統及組件要如何進行除污，以及應選取何種技術，在決策上不僅要考量廠址特性，也要考量特定的任務需求，通常是廠址特性及修復的循環過程，在決定除污前，明智的作法是至少進行半定量成本效益分析，若最終確定要進行除污，則採用特定的除污技術及程序才會成為討論的重點。

與私人電廠相比，聯邦設施所能運用的決策方式更加多樣化，一部分歸因其作業廣泛，另一部份則因其能縱向整合所有單位，故具有較高的靈活度，使其從設施的土地使用乃至於處置廠址，都能更佳地掌控。Rocky Flats 環境技術廠址(Rocky Flats Environmental Technology Site)的案例，面臨一項重大挑戰--處置被放射性或有害物質污染的超大型設備，為了進行運輸與處置，必須將其裝入預先核准的標準廢棄物容器中，過去的作法是縮減設備尺寸，但耐久性設備的減容屬於勞力密集作業，將迫使工人受到工業、化學及放射性危害。事實證明，配製得宜的噴撒塑料能形成牢固的工業包裝，可用來取代除污，包裝後可用平板拖車將整個設備有效地運輸到低水平的廢棄物接收站，利用一套明確的決策程序，改採聚脲噴撒塗料(polyurea spray coating)(而非除污)，對除

污計畫的成本、進度及安全，都有極大程度的貢獻。

● 13.2.1 外釋結構的再利用

若計畫的目標是讓建築物或結構(即辦公空間)既有污染部份能自由外釋，則可能需要大範圍的除污，一般的技術可提供表面大量的物理性除污，使其外釋前能達到相當低的表面污染限度。

建築物表面除污完成後便可再次使用，即使結構性混凝土中及建築物下方土壤內的裂縫，仍存有污染物，只要封住這些狹窄區域內的污染通道，使其不會達到可能的受體，這樣就能為特定用途提供設施而無限制規定，像是辦公空間。剩餘的放射性最終仍需在未來解決，像是結構維修或拆除。例如：位於紐約長島的 Brookhaven Graphite 研究用反應器，在除役後進入最終處置程序前，曾有數年當作博物館使用。

要達到完全無限制外釋的情況、或是最終成為綠地(greenfield)，通常需要徹底清除地上與地下的結構，及其下方的任何污染，任何高於背景值的劑量，通常會促成適當的風險評估，以紀錄潛在風險的可接受性，因此，除污程度及所選用的方法或程序，通常與風險評估流程及支援報告密切相關。

● 13.2.2 職業性劑量的限制

化學除污通常能移除高放射性組件的潛在輻射劑量，在作這類考量時，決策者應進行成本效益分析，以確認是否還有其它更好的方式，能達成所欲降低的劑量，如前所述，化學除污會產生難以處置的二次廢棄物，還包括過程中所使用的任何設備及結構，明確要考慮的項目包括：保留足夠的放射性衰減時間、現場的屏蔽與固定、避免切割，並使用機器人技術及其他遠端處理技術。

外部劑量率過高時，將存在曝露問題，此時應謹慎考慮將機器人應用於遠端切割、拆卸、剷除及包裝，高輻射場經常要求採用機器人及其他遠端處理與拆除技術。

延遲一段時間使放射性得以衰減，是使用化學除污以外，能限制職業劑量的合理替代方案，在除役區域中，當外部輻射劑量通常來自於相對大量的伽馬放射性同位素時，這方式特別適用。

污染物的半衰期必須比除役開始前的延遲期短，才能看出時間所造成的顯著劑量減少，典型的伽馬發射體鈷-60 與銻-137 會導致較高的外部劑量，其分別具有約 5 年及 30 年的半衰期。從實務目的來看，電廠在正式除役前，可能約有 60 年處於延遲拆除的狀態，在這段期間內，鈷-60 的劑量將減為千分之一，但銻-137 的劑量只會減少為 1/4，銻-137 活度衰變為原來的 1/1000，將花費約 300 年的時間，由此看出時間延遲對鈷這類的活化產物非常有用，但不適用於銻等壽命相對較長的分裂產物。

● 13.2.3 9 個應謹記的要點

下列重點都是為了達成同一目標-評估真實的污染來源，根據經驗，污染源並非都顯而易見，例如，某一根管子的讀數是 500 mrem/hr，並不能假設污染源在內部，曾有計畫發現輻射源項與外部絕緣一同被移除。三哩島(TMI)修復計畫的管理，假設反應器廠房中的絕大部分劑量，是由於地下室的高污染水所造成，但將水移除後，劑量卻幾乎沒有變化，導致需要花費大量精力來查明並屏蔽污染源。

- 1、經由實際除污所獲取的除污因子(DF)，應與職業等效劑量(ODE)減少因子相互比較，並作仔細評估，例如，在一個小房間中，等效劑量率是來自其內部一條污染的管線，則 DF 與 ODE 因子相近；但若該空間的等效劑量，是由許多其它的放射性來源所造成，則僅對該區內的單一系統(即污染管線)除污，則未必具成本效益，在此情況下，系統經除污後所得到的 DF 值，會明顯大於整個區域的 ODE 減少因子。
- 2、無論是多個系統、單一系統或是單一系統的局部，都可以進行除污，但應慎選除污的範圍及順序，以獲取最大效益。
- 3、若以石棉或其它含有害物質作為管線或組件的絕緣材料，拆除時因為需要呼吸防護及其他人員防護設備，工時將大為增加，對於這類情況，進行組件的內部除污，或許可節省大量的等效劑量。
- 4、在工作區切割組件，可能形成空浮放射性，但若成功除污，則或許能修改人員的防護規定，工作人員可避免使用先前所要求的呼吸防護裝置。
- 5、在拆除期間，無論該區是否受到污染，均應考量其它的劑量降低技術，例如屏蔽或高輻射點沖刷(hot spot flushing)。
- 6、在除役期間，必須解決既有系統在此時所需提供的流徑及流率能力，透過危害評估可能會對現有管道、泵及其他設備進行改造，並發展出新的管制項目。
- 7、應規劃除役作業的順序，才能先清出一條外部劑量率相對較低的通道，讓其他區域收集而來的組件與廢棄物容器，可立即且快速地經由該通道移至運輸區域。
- 8、關於表面及潛在的空浮污染，則應謹慎規劃除污作業，避免已除污的區域，被鄰近區域後續的作業再次污染。
- 9、可利用商用軟體(具不同程度的複雜性)模擬電廠的物理及放射線分佈，如此能合理且有效地排定工序及安排作業人員，將可能的輻射曝露降到最低。

● 13.3 時機

先前已簡要探討過時間點對減少職業曝露的影響，在某些情況下，即使普遍存在中等程度的表面污染，也不會將大量的除污工作列為除役計畫的一部分。例如，以完全拆除一個小型、輕微污染，且在場外處置時，基本上全都是低放廢棄物的結構來說，既然所有材料都需要作為放射性廢棄物處置，沒有道理再額外花費對廢棄物進行大規模除污。但幾乎所有核電廠終止其主要任務後，都會進行一些除污作業，驅動時機變數的關鍵因素就是輻射衰減。

為了評估放射性衰變的影響，應在合理範圍內取樣，以確定放射性核種的混合物及總源項，各個所關注的主要工作區，其除役作業放射性等效劑量評估表，應包含除污及非除污情境，在拆除作業進行前，應針對預期的放射性衰變，調整先前預估的等效劑量水平。如果混合物的成份未知，則會使用造成職業輻射曝露最大的半衰期可操作核種，這類型的核種包括鈷-60 及銫-137。

影響人員輻射曝露的放射源項，應採用發展至最終的衰減因子，此外，如果該設施產生的廢棄物僅為短週期的放射性核種所組成，則採用相關的衰減因子亦表示將來的放射性廢棄物責任減少。

● 13.4 成本效益分析的元素

成本效益分析是用來評估除污是否適當的實際方法，如果適當的話，應採用何種技術，此分析應考量個案的所有相關因素，包括：除污的直接成本、可能降低的人員輻射曝露、減少關鍵作業的時間所能節省的費用、放射性廢棄物處理及其處置費用。

圖 13.1 本效益分析中應考量的特定要素(Demmer 2000)。

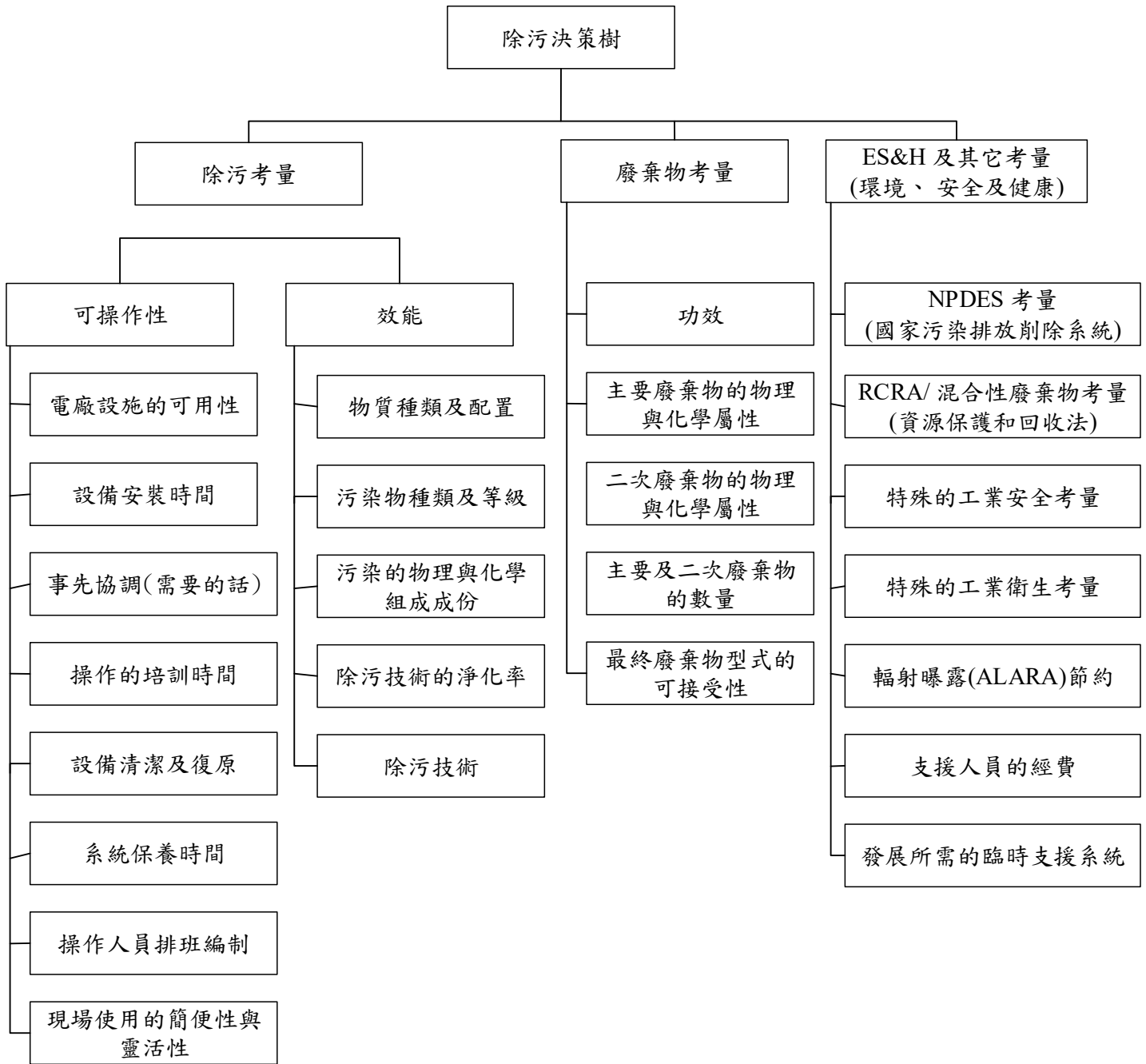


圖 13.1 本效益模式的特定要素

● 13.4.1 職業等效劑量(ODE, Occupational Dose Equivalent)的預估成本

對已知的除污方法進行經濟評估，必要假設是將幣值分配給輻射劑量，這是因為除污避免了人員在除役過程接收到輻射劑量，該值表示職業等效劑量所節省的成本，以美金/人倫目(person-rem)表示。

若專案願意避免已知的人員輻射曝露劑量率，則可在電廠的經濟分析中，利用該值算出因此要額外承擔的費用。例如，若電廠採用的值為\$2,000/人倫目，但提議花 5,000 美元來避免 300 人毫倫目(person-mrem)的曝露，則該提案應被批准，因為它的值低於\$2,000/人倫目。

- IAEA 用的值為\$20,000/PSv(人西弗, Person-Sievert), 該值介於\$10,000/PSv~\$ 40,000/PSv 之間, 視各國的社會經濟狀況而定(IAEA 1994)。
 - NRC 用的值為\$200,000/PSv(NRC 1998a)。
 - ANL 根據 10 CFR 50 Appendix I 及 NUREG-0880, 推導出的值為\$100,000/PSv, ANL 亦提供限制癌症風險的經費彙整表格範例。
 - 由 NRC 及 EPA 基準及導則所衍生, 每個癌症避免的價值在 100 萬美元~2 億美元間, 相當於輻射誘發癌症機率為 $1.24E-2 / \text{PSv}$ 時的 12,500 美元~2,500,000 美元/PSv。
- 從歷史上來看, 核設施全年的 ODE“可接受值”在持續下降, 而電廠的利害關係人可能是個廠決定該值的額外因素, 無論最終選用的數值為何, 均應用於所有廠址分析, 並與電廠規劃人員進行溝通, 這些溝通是很重要的, 因為\$/PSv 值將用於電廠執行輻射控制區任務與計畫的額外成本效益分析。

● 13.4.2 評估 ODE 節約

為了支持除污決策分析, 必須知道下列幾個因素, 才能評估工人所能避免的 ODE, 包括:

- 3、該區的 ODE 率, 包括“周圍”的等效劑量率, 及待除污的結構、系統或組件所測得的等效劑量率, 該因子稱為既有 ODE 率。
- 4、所選用除污方法的估計 ODE 減少因子, ODE 減少因子雖與 DF 相關但並非完全相同, DF 預估值通常由除污技術單位所提供, 而 ODE 因子是針對特定的工作區域, 該估計值應從熟悉工作區輻射狀況的保健物理人員那裡獲得。
- 5、估計工人在除污前或除污期間, 在受影響區域的曝露勞動時間, 但不包括進行除污作業的時間。
- 6、評估在受影響區域實際進行除污作業的人力工時。
- 7、除污完成後, 在受影響區域的人力工時估計, 未經除污的工作區, 若因污染等級過高, 必需提供工人呼吸防護, 若將其除污至不需要呼吸防護的水平, 或許能在該階段省下大量的時間。
- 8、因除役作業中額外的廢棄物管理作業, 所導致的 PSv 劑量估計。
- 9、若未進行除污, 則估計該區的人力工時, 這通常與除污前、後加總的工時相同, 雖然並非所有情況都如此。該值代表未除污的工時估算。

對於所選用的除污技術, 運用上述因子可以算出該技術讓劑量降低所節省的 ODE 總量(人倫目), 然後將此人員劑量降低的總合, 與選用技術的適當成本及能節省的經費作比較, 以決定所採取措施的相對成本與效益。

● 13.4.3 廢棄物管理

除污除了減少人員輻射曝露外, 潛在的好處還包括降低核設施除役時的放射性廢棄物處理與處置成本。放射性廢棄物管理成本評估, 是除役的重要決策之一, 電廠通常必須管理、處理及處置各種放射性廢棄物, 但各有不同的經費考量, 每種廢棄物流都反映不同的數量、

處理及處置費用，均應予以評估。

一般用於特定放射性廢棄物管理技術的評估方法，與評估人員曝露的方法一致，必須評估可能的廢棄物成本，並與是否進行除污進行比較，除污是由於移除放射性物質而產生廢棄物，此外，支援除污的介質，從紙巾到大量污染的液體，組成二次廢棄物流，這些也需要處置。除污因為使用了大量的水來清潔，隨即成為低階的液體放射性廢棄物，也需要經費來處理及處置，這些都會造成額外的成本。透過仔細的規劃及關注，可以讓二次廢棄物的數量只比主要廢棄物的數量大一個級數。除污也會產生非放射性廢棄物，這又是另一種廢棄物流，有其相關單位的處理費用，此額外的成本也應加以統計。

● 13.4.4 專案所需時間

工作區域在完成除污後，因為取消了呼吸防護的規定，作業人員的生產力通常會提升，同樣地，除污到連防護衣或其它設備都能減少的污染等級，生產力亦會提升-至少 25%，對於一個長期的計畫，提高這些生產力或許能加速完工，並因此降低成本。

為了估算潛在關鍵路徑節省的總體價值，應自問所用的除污作業將節省多少預估時間或專案時程，省下的時間成本效益，可能會根據工作區域任務對整體計畫時程的重要性而有所不同，儘早完成會直接影響整體工期的任務(關鍵路徑任務)，能帶來可觀的財務收益，應諮詢專案管理小組以獲取節省時間所帶來的經濟利益價值。

● 13.5 評估直接除污成本

除了前述章節提及與任務相關的成本外，在進行整體成本評估時，亦應考量以下費用：

- 如果是購買的，屬於資本設備，如果是租賃的，則為供應商費用。
- 動員及遣散設備，包括技術工(裝配工、管鉗工、電工)及設備(包括使用起重機及推高機)。
- 公用事業及其他消費品
- 除污設備的保養費用
- 直接人力及設備維護
- 合約及分包的工作範圍

除非會在整個電廠重複使用某種特定技術，否則租賃高價設備通常比購買設備更為可取，如此可能對技術供應者造成困難，因為合理預期所使用的設備本身可能會受到污染，購買的設備應在整個除污計畫期間分期償還。在某些情況下，除污技術公司也會支援人力來操作並保養租用的設備，維護費用包含在整體服務或租賃中。

除了評估供應商提供的生產率外，在預估特定技術方案的使用時間時，還應包括預防性維護及改善性維護；由於在現場通常無法實現特定廠商的最佳生產率，若能用權變因子(contingency factor)也很好，進行除污任務或計畫的整體除污直接成本，就是前述所有成本的總和。總費用可寫成下式：

應用成本=[(成本/人倫目)*(可避免的人倫目)]+[(放射性廢棄物處理節約)*(計畫時程節約)]-
[(除污直接成本)+(除污間接成本)]

● 13.6 評估間接除污成本

除污過程中，可能需要一些間接資源來支援，例如：

- 人力支援(即 ES&H 支援、管理監督、QA/QC 審查)。
- 建立個廠的程序書(及相關培訓)。
- 工程支援，以便臨時性系統能與電廠系統連結
- 個廠運作及 ES&H 培訓(對包商員工)

● 13.6.1 正職員工與約聘工

電廠停止運轉後，若預期會很快進行除污，則或許可利用電廠既有的人力，以具成本效益的方式支援該作業，許多機械除污技術，現場人員所需的訓練很少或幾乎沒有，但在某些情況下，像是當電廠已作為長期的安全存放點，以及現場僅剩少數永久員工時，運用包商人力則更具為經濟，一般而言，更專業的設備或除污技術(即大規模液體系統的化學除污)，會需要用到包商人力。

無論除污何時需要約聘工，都必須進行現場操作培訓，並有最基本的 ES&H 規定，建立並執行培訓所需的費用，應含在除污相關的間接成本內。

● 13.6.2 電廠所需系統的狀態

若電廠在停止使用後很快進行除污，則可合理預期多數設施及支援系統仍是可操作的，重要的系統包括：

- 放射性及非放射性廢棄物管理
- 電源供應
- 壓縮空氣及/或其它氣體
- 通風
- 輻射監控
- 水及其它公用設施

若既有的公用設施及支援系統不可用，則可能需要用臨時性的設備來替代，但這樣所費不貲，因為其經常包括工程設計(以確保能在場內的 ES&H 範圍內運作)、組件採購、安裝及維護，這些花費都應含在 13.5 節所提公式中的間接除污成本內。

● 13.7 除污的額外議題

影響最終選取技術的因素，並非全都能量化其成本，有些技術會移除局部的結構、系統或組件，例如：混凝土剷除(scabbling)每次操作可能會移除 2 公分厚度，若為了符合淨化規定而必須進行額外的操作，最後會移除的厚度可能很多；同樣的，化學除污亦可能造成管內的金屬表層被移除，連續操作可使管壁顯著變薄。這只是兩個例子，說明除污會損壞結構，而無法確定其完整性，在這種情況下，除污完成後所需的任何結構、系統或組件，若能由合格工程師確認能安全地達成其預期功能，將非常有用。

雖然一般在除役時並不常考慮，但另一個要評估的項目是所選用的方法，能否配合整體計畫的進度，若最具成本效益的除污方法會拖累整體計畫的進度，則可能需要採用速度更快但成本更高的方法。

7.2 第 17 章 - 除污 (Decontamination)

● 17.1 前言

除污是將不想要的物質予以移除，本章雖探討移除放射性核種，但相同或類似的技術可能也用於移除有害的化學性物質，該技術類似清潔污垢、油漬或腐蝕性產物，但與材料相關的放射性核種除外。清潔與除污需要類似的技術、方法、設備及製造商，只是清潔的程度不同，清潔度是由某些清潔標準所定義，而除污所根據的清潔標準，則通常與個人劑量率或欲清潔組件或表面相關的污染等級有關。為了處理清潔材料，必須了解廢棄物的化學成份及放射性核種的含量，其將影響處置方法及包裝。

除污是為了降低作業人員受到組件或其表面的輻射劑量、減少空氣中可能的放射性核種，或是降低處置相關的費用，雖然現在不常將材料除污後回收或再利用，但有一個材料再利用例子，是將輕度污染的鋼熔化，製成粒子迴旋加速器的屏蔽塊，該屏蔽塊能用來防止自然輻射源干擾粒子加速，許多噸的材料已被回收用於非放射性環境。為了達成無限制外釋的使用，材料不僅要清潔及調查，並確認是否低於該設施的外釋水平，需由聯邦政府或設施運轉所在的州來核發的自由外釋許可，執照及法規會指定該設施的外釋限制。

本文旨在介紹包含化學及機械方式在內的除污技術，並附參考文獻以提供讀者更多細節，內文所列舉的任何商業公司，不應被視為提供產品或服務的建議。

● 17.2 前期規劃

對任何可移除組件或零件進行除污作業前，管理階層應思考可用的選項與流程的經濟性，任一項工程評估，都應考量下列問題：

- 該組件為何要除污？
- 其能否自由外釋？
- 其能否直接處置？
- 需要何種處置場所？

- 處置廠址可接受的輻射及污染程度為何?
- 除污是否具成本效益?
- 應採用何種除污技術?
- 該廠址先前是否曾進行該類零件或組件的除污?
- 會產生何種二次廢棄物?
- 二次廢棄物是否有害或具有放射性，亦或二者兼具?

● 17.3 作業考量

所有除污努力都有一個共同的目標：將放射性污染物從既有所在的位置移除，無論污染的性質或程度為何，都有很多除污的方法可以使用，經由各種考量所作的評估，能決定出應採用何種方式，各種方式的優勢佔比，將視個案情況而異，有些則毋需考慮，這些考量重點彙整如下：

- 存在的放射性核種及其物理狀態
- 受污染表面及其表層下的材料類型
- 表面受污染的範圍、分佈與位置，及其與其它表面間的關係
- 受污染區域的可及性
- 受污染表面除污後的預定成效
- 表面除污後必須保留的功能特性
- 除污可用的設備及材料，包括現場有的及其他來源提供的
- 作業人員安全及輻射劑量最小化
- 各種替代方案的成本效益，包括處置、更換對比除污、再利用的相對成本
- 產生的廢棄物數量、性質(包括除污溶劑等所造成的二次廢棄物)及其處置費用
- 人力資源及培訓規定

各項考量的重要性，會隨個案情況改變，但也有很多時候不需要考慮這些要點。

過去的經驗證實，為除污工人及其主管與領班，提供實地操作訓練的必要性及好處，該訓練

可能包含使用模型設施、盡可能提高除污物品及除污過程中所使用的方法與設備之擬真度，在進行這項培訓時，人員在操作過程中，應實際穿戴防污染衣。

通常這種模型訓練，至少對負責計劃、工作進度，以及將設備與材料運往工作區的人有所幫助，亦有助於將要執行除污作業的工人及其上司與領班，這樣的訓練能確保作業的最高安全性、最佳效率並具最好的成本效益，其亦確保人員在符合法規要求下，能完成所需工作，且其輻射曝露維持在合理抑低(ALARA)水平。

除污操作必須根據詳細的作業計畫，其要素包含如下：

- 1、 預先規劃所有的工作項目，包括降低污染外釋的特定作業，例如：使用集水池、使用具 HEPA 過濾器的帳篷或利用其排氣、建製手套箱、嚴格遵守腳踏墊及其他管制措施，並遵守掛卡作業要求、排水、沖洗及其他必要的維護工作。
- 2、 污染組件在廠址內運輸進行清潔或處置，可能使原本乾淨的區域或組件受到污染，必須儘可能減少，這些作法舉例包括，在進入污染區域前，先將所有包裝好的材料移除、運用滑軌縮短保養及操作人員更換衣物的時間、在開始前作業，謹慎選用工具及設備，以免組件接觸到不必要的污染。
- 3、 必須隨時注意每個人觀察及處理系統功能或程序操作中的任何差異，此應包括：立刻向保養人員報告任何洩漏或其他設備問題、每個人都願意向他人指出程序錯誤、公開的工作後匯報、或任何其他矯正或排除設備功能或人員錯誤的作業。

這樣的方案能減少除污作業所需的勞力及用品、降低廢棄物處理費用，並減少了每年的人事開支，故很容易實現其成本效益。

● 17.4 放射性污染物

放射性污染物分成可擦拭性(可移除的)及固定性這二類，可擦拭性的污染物類似家裡的灰塵，通常以布擦拭其表面，如同在布上噴撒化學品以吸附灰塵，或許就能擦去污染；在進行或準備移除固定性污染時，可能也會產生可擦拭性污染，有些方法是將固定性污染弄得較為疏鬆，讓它更易清除，以表面擦拭(通常為 100cm^2)來確定污染程度，就屬於此類污染。

固定性污染牢附於表面，且通常與金屬或混凝土表面的腐蝕產物有關，對於這種情況，污染物已經擴散到材料中，或放射性核種與表面材料形成某種靜電或化學鍵結，移除固定性污染物通常需要嚴厲的技術，採用腐蝕薄膜的化學溶解或混凝土碎裂都是可用來移除固定污染物的技術；這些技術通常會導致產生可擦拭的污染。

除污通常是為了某個特定的原因，而作業人員應同時了解這個原因及污染的类型，若最終必須達到無限制外釋，則零件完成調查且自由外釋後，必須關注縫隙中放射性核種的滲濾，許多調查人員發現，污染會殘留在金屬及混凝土的裂縫與孔隙中，儘管在自由外釋的調查中未發現放射性，但經常在之後再次發現-表面內部滲濾出放射性核種，在最終調查時之所以未發現放射性核種，據信是由於污染嵌入太深，以致於無法偵測。應用除污技術亦可降低作業人員的輻射曝露或避免污染擴散，這種情況下，對調查規定的限制相對較少。

● 17.5 除污因子

除污效率是以除污因子(DF)來衡量，DF 係材料或組件在進行除污前、後的輻射等級比值，移除放射性物質的除污技術能讓 DF 大於 1，但實際上有些技術在某些區域留下了更多的污染；這些失敗的程序會讓 DF 小於 1，測量輻射強度時，必須確保測量具備以下的再現性(reproducibility)：

- 1、 測量程序標準化。不同的技術人員，可能以不同的方式拿著儀器、儀器量測的方向稍為不同，或是測量的區域不完全相同。
- 2、 使用最近校準的儀器，進行除污前、後的測量。理想情況下，在整個除污期間，均應使用校準良好的儀器。
- 3、 每次測量的確切位置都相同。必要的話，應將每個位置都標註起來，讓不同的人儘可能在相同位置進行量測。
- 4、 找出由表面能重複量測的距離與方向。輻射測量應以接觸量測為主，以減少輻射源項對周圍及鄰近區域的影響。

下列公式是用來決定移除表面放射性核種的百分比(Remark 1989)，DF 為 10 表示移除了 90% 的放射性核種，同樣地，DF 為 100 表示具有 99% 的移除率。

$$\text{活性移除率} = (1 - 1/DF) * 100$$

除污工程師會將除污目標列入考慮後，評估出最具成本效益的 DF，如果要減少整體劑量，則必須同時考慮周圍的輻射強度及工作位置，DF 即使高達 500(99.8% 的移除率)，也可能因為週邊的輻射強度太高，導致除污效率只有 5 人倫目，但若作業地點很接近被除污的區域，則人倫目也可以降低很多，除污工程師將相關資源的使用列入考慮後，與保健物理師共同決定出最佳的 DF。

有許多電子劑量測定法可用於量測人倫目的 DF 有效值，故可即時測得區域的輻射等級，並計算出人倫目的 DF 有效值，電子劑量測定法是在中央位置進行監測，其對線上的輻射強度監測非常有效，並在除污期間幫助保健物理師，限制其進入高輻射區域。值得注意的是，過去的應用結果顯示，電廠將低劑量區作為等待區使用，在除污後卻變成劑量較高的區域，這並不是因為“低劑量區”的輻射等級變高，而是電廠其它區域的等級降低的緣故。

● 17.6 氧化物溶解

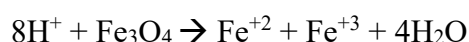
腐蝕性產物的生成，取決於其所存在的環境類型，在 BWR 環境下，通常最接近冷卻水的腐蝕性薄膜是赤鐵礦(Fe_2O_3)，而其內表面是由鎳取代的磁鐵礦($\text{Ni}_x\text{Fe}_{3-x}\text{O}_4$)組成，其中 x 大於 0 但小於 1。

而在 PWR 電廠的水化學，因為包含可溶的氫，故溶解的氧氣相對少很多，腐蝕性薄膜由鉻及鎳取代的磁鐵礦($\text{Ni}_x\text{Fe}_{(3-x-y)}\text{Cr}_y\text{O}_4$)組成，其中 x、y 為變數(Segal 1983)，在薄膜的最外層，x 與 y 合計值小於 1，但該值會隨著進入薄膜的深度而增加。

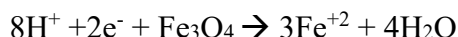
因為不同反應器的表面，各自具有相異的氧化物，故需使用不同的化學溶劑，才能達到最佳的移除效果，移除磁鐵礦或鎳取代的磁鐵礦，需運用還原法，但若薄膜是由高比例的鉻組成，則必須在氧化環境下，移除鉻的保護性基材。

● 17.6.1 還原溶解

腐蝕性薄膜的溶解基礎及其除污機制，係藉由攻擊質子使氧化物晶格失去穩定，其反應如下所示。



上述是基於礦物質或有機酸的化學除污法的基本方程式，一般需要提高化學物質的濃度，來增加溶解反應的速率，為使低濃度的藥劑也能達此成效，使用還原劑有助於降低薄膜基質的穩定性，以下列出的化學式，是使用具有還原劑的低濃度化學試劑會發生的典型反應。



應留意在反應產物側沒有三價鐵離子(Fe^{+3})，還原劑與氧化物基質中的鐵離子進行反應，將鐵離子還原為相應的亞鐵離子(Fe^{+2})，此還原作用會破壞氧化膜的穩定性，使其更易受到低濃度化學除污溶液中所含的螯合劑侵蝕，還原劑必須滿足以下三個條件：

- 快速的電子轉移機制
- 能螯合以提供足夠的金屬離子溶解度
- 具足夠的質子濃度，使氧化物陰離子快速溶解

● 17.6.2 氧化鉻溶解

腐蝕產物中發現的鉻為三價氧化態，非常不易溶解，故必須使其氧化或還原才能溶於水，以電廠條件而言，將鉻氧化為水溶性鉻酸鹽(Cr^{+6})比將其還原更為容易，在酸或鹼性條件，均可進行鉻的氧化，其反應的化學式如下：



在酸性條件下



在基本條件下

這些反應僅對氧化薄膜表面的鉻進行氧化，而不會浸入氧化物基質中，與表面下“層”中的鉻發生反應，因此，在化學除污過程中，如欲達到最大的 DF，必須進行多次還原溶解，緊接著鉻溶解的交替步驟。

鉻的酸性氧化(NP)及鹼性氧化(AP)都已用於核電廠，且至少有一個廠址是兩者同時使用，酸性溶解用在不銹鋼表面的效果最好，但在英高鎳-600 的表面就不那麼有效。在 Indian Point 3 號機的蒸汽產生器碗狀區進行化學除污期間，在基本條件下開始進行鉻氧化步驟，以從英高鎳-600 的管路表面移除鉻，然後將其變為酸性條件，以有效地氧化不銹鋼表面上的鉻 (Remark, 1986)。

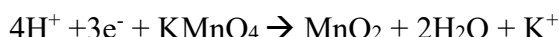
溶解鉻的鹼性溶液成份，是大約 1000 ppm 的高錳酸鉀，並以氫氧化鈉將 pH 值調節至 10.5 至 11.5，這是一個相對穩定的溶液，且通常在 6~12 個小時的步驟期間，毋需進行補充，最常見的酸性溶液成份是 1000 ppm 的高錳酸鉀，用硝酸將 pH 調節至 2.5。

歐洲的 Framatome ANP, GmbH(原西門子 KWU)使用高錳酸(permanganic acid)來溶解鉻 (HP)，高錳酸是高錳酸鉀中的鉀被氫離子(HMnO_4)取代。由於酸性高錳酸鉀在這些條件下不是很穩定，所以在反應過程中，必須仔細監控，補充硝酸及高錳酸根離子並不少見，在 AP、HP 或 NP 過程中的鉻氧化會導致高錳酸根離子還原，這種還原產物是二氧化錳(MnO_2)，為

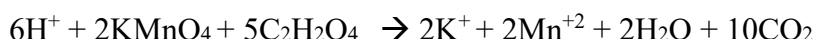
一種細微的深褐色沉澱，它似乎會聚積在組件的壁面及表面上，並傾向堆積在低流量區的污泥堆中，這種材料不應該留在運轉中的電廠，因為它將與隨後進行的鐵溶解步驟會用到的任何還原劑發生反應。在鐵溶解步驟之前，會使用草酸(oxalic acid)沖洗移除二氧化錳。

● 17.6.3 草酸(oxalic acid)沖洗(rinse)

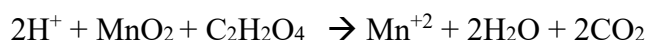
在進行草酸沖洗步驟前，必須先計算所需的化學品量，即將還原剩餘的高錳酸鉀以及將二氧化錳轉化成錳離子(Mn^{+2})所需的草酸量合計，必須先知道系統內添加的高錳酸鉀初始濃度及“結束時”的高錳酸鉀的“最終濃度”才能計算，可利用以下公式算出二氧化錳(MnO_2)的產生量(莫爾)：



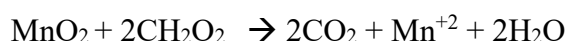
草酸與高錳酸鉀及與二氧化錳反應的化學計量關係式如下所示，可由此算出草酸的確切量。



及



應注意，高錳酸鹽及二氧化錳需在酸性條件下才能進行破壞反應，溶液的 pH 值必須在 3.5 左右，草酸才能溶解二氧化錳，為了在加入草酸後的破壞階段能達到該 pH 值，溶液必須以氫形式通過陽離子樹脂柱，陽離子樹脂柱將移除鉀及添加草酸後所產生錳(Mn^{+2})，這些離子將被水合氫離子(H_3O^+)取代，使 pH 值降低，在此過程中，必須經常監測 pH 值，如果連續使用陽離子樹脂柱，有機會將 pH 降到 3.0 以下，雖然這些化學條件有助於移除帶有相關放射性核種的腐蝕薄膜，但同時也導致侵蝕性狀況，例如被發現會導致高度敏感的 304 不銹鋼(SS 304)發生沿晶應力腐蝕劣化 (IGSCC, Intergranular Stress Corrosion Cracking)，1990 年代初期的研究發現，在破壞過錳酸根離子及二氧化錳方面，甲酸(formic acid)是草酸的良好替代品(Remark 1993)，使用甲酸可避免草酸在高敏感 SS304 上形成晶間腐蝕(IGA, intergranular attack)或 IGSCC 的情況發生。二氧化錳與甲酸之間的反應如下：



注意該反應不需要水合氫離子，故理論上可以在中性 pH 下使用。

二氧化碳是所有破壞反應的主要反應產物，在化學除污過程中，必須排出二氧化碳，以免系統或組件承受過度壓力，另一項擔憂是二氧化碳會在加壓系統中與水反應生成碳酸氫鹽(bicarbonate)。



然後，所生成的碳酸氫根陰離子，將導致需要額外的陰離子樹脂來淨化溶液，Indian Point 2 號機在 1995 年間進行全系統化學除污的研究及應用結果顯示，二氧化碳並不會導致碳酸氫根陰離子的形成。

● 17.7 污染的性質

若能確知污染的性質，則除污過程可大為簡化，但顯然沒有一種技術可適用於所有的情況或各種污染類型，雖然在特性分析過程中的其他測量，能進一步提供關於體積的特性，但亦應事先多了解其成份特徵，例如油性混合物、腐蝕產物薄膜、經過表面缺陷所造成的擴散，固定在表面基質中或是被塗抹在表面上，在許多情況下，過去的歷程記錄可能有助於找出許多相關參數。

商用核電廠的除役計畫，可運用機械或化學除污方法，因其可顯著減少高劑量或侷限區域的整體外部輻射場，進而將工人的輻射曝露減至最低，若要完整運輸大型反應器的組件，可能需要進行大規模的化學除污，以將其輻射強度降低至符合運輸法規的標準，若除役計畫的最終目標是回復為綠地狀態，則必須清除所有污染源並將其運離現場。

DOE 廠址較少使用化學技術，而較常在結構表面使用機械除污技術，以便保留在將來使用。DOE 計畫的典型目標是以機械方式來減少表面污染水平的 dpm/100 cm²，而毋需再考量污染物公告、防護設備或劑量配章(TLD, Thermo Luminescent Dosimeter)等規定，當這項技術不具成本效益時，DOE 會將輕度污染的成分及材料，運送到自己的放射性處置場所，即便如此，其成本也會比嘗試達到自由外釋的情況來得低。

對比在能源部的監管之下，達到無限制外釋並供人員重複使用的情況，商用電廠在執行輕微放射性污染物質的無限制處置任務，其面臨的挑戰要大得多，因此，商業用除役計畫針對管路與組件上所形成的表面污染層，以及用於減少這類污染水平的技術相關檢驗與應用，進行了廣泛的研究，要決定適當的除污技術，必須先了解表面污染的性質。在許多情況下，運轉期間使用的技術，可以直接或略經調整後應用於除役過程，針對特定任務所開發的化學除污技術，無論是在購買專用處理設備方面，或是在處置其所產生的額外液體及受污染廢棄物方面，可能都很昂貴。在評估化學除污的成本效益時，應將計畫的最終目標及其健康與安全等規定一併納入考量。

● 17.7.1 反應器的放射性腐蝕產物

在選擇成功應用的化學除污技術及其步驟前，必須先知道腐蝕薄膜的成分及特徵，沸水式(BWRs)與壓水式反應器(PWRs)中所發現的腐蝕薄膜類型不同，BWR 電廠在氫水化學作用下運轉，亦會影響其所形成的腐蝕薄膜，二者的主要區別在於鉻的濃度及其氧化狀態。

BWR 的運轉化學，涉及的氧氣濃度為十億分之幾(ppb)，相較之下，PWR 的運轉化學包含百萬分之幾的氫，這使得 PWR 中的氧氣濃度，保持在較低的 ppb 範圍內，這樣的氧濃度差異，導致腐蝕薄膜中的鉻濃度明顯不同。

在核電廠運轉期間，高溫的水經由反應器冷卻水系統循環，在 BWRs 電廠，液體是由含微量氧氣(200 ppb)的高純度水所組成，而 PWR 電廠的反應器冷卻水則包含鋰、氫及硼，但由於氫的濃度很高，所以氧含量少於 10 ppb。

反應器冷卻水管路內的腐蝕薄膜成份，分為兩層(如圖 17.1 所示)，基材金屬的原位腐蝕，形成了緊鄰基材的內部腐蝕層，內層的特性是基於基材金屬的化學成分，部份則取決於循環溶液的化學性質。內部腐蝕層在溫度下運轉的前 2~6 個月內會形成，在溫度較低或不同化學

環境中所形成的任何腐蝕層，都會因為溫度及溶液環境的變化而有所轉變，隨著腐蝕膜外層的發展，內層的生長會大為減少。

當冷卻水在整個系統內不斷循環時，流體中的腐蝕產物沈積以及冷卻水流中溶解金屬的沈澱，共同形成了外部腐蝕層，薄膜的成份取決於雜質的來源，在 PWR 電廠，大部分腐蝕產物來自於不銹鋼及英高鎳的緩慢溶解，進而構成曝露於冷卻水的主要表面，鈷也是形成腐蝕薄膜的主要成因，其由 stellite 硬質合金的表面腐蝕而產生，且通常是不可溶性顆粒。

在反應器系統中，會引起高輻射強度的主要同位素是鈷-58 及鈷-60，放射性鈷-60 的來源是鈷-59 的中子活化，在反應器冷卻水系統的各個區域中，會加入鈷-59 作為表面硬化材料，它也是鐵基和鎳基合金中的雜質(100~1000 ppm)，放射性鈷-58 則是藉由鎳-58(n,p)與鈷-58 反應後，從鎳-58 衰變所產生，因為 PWR 電廠在主要的冷卻水系統中，使用了高鎳合金作為結構材料(備註 1981)，故其鈷-58 的活性比 BWR 電廠更為顯著(Remark 1981)。

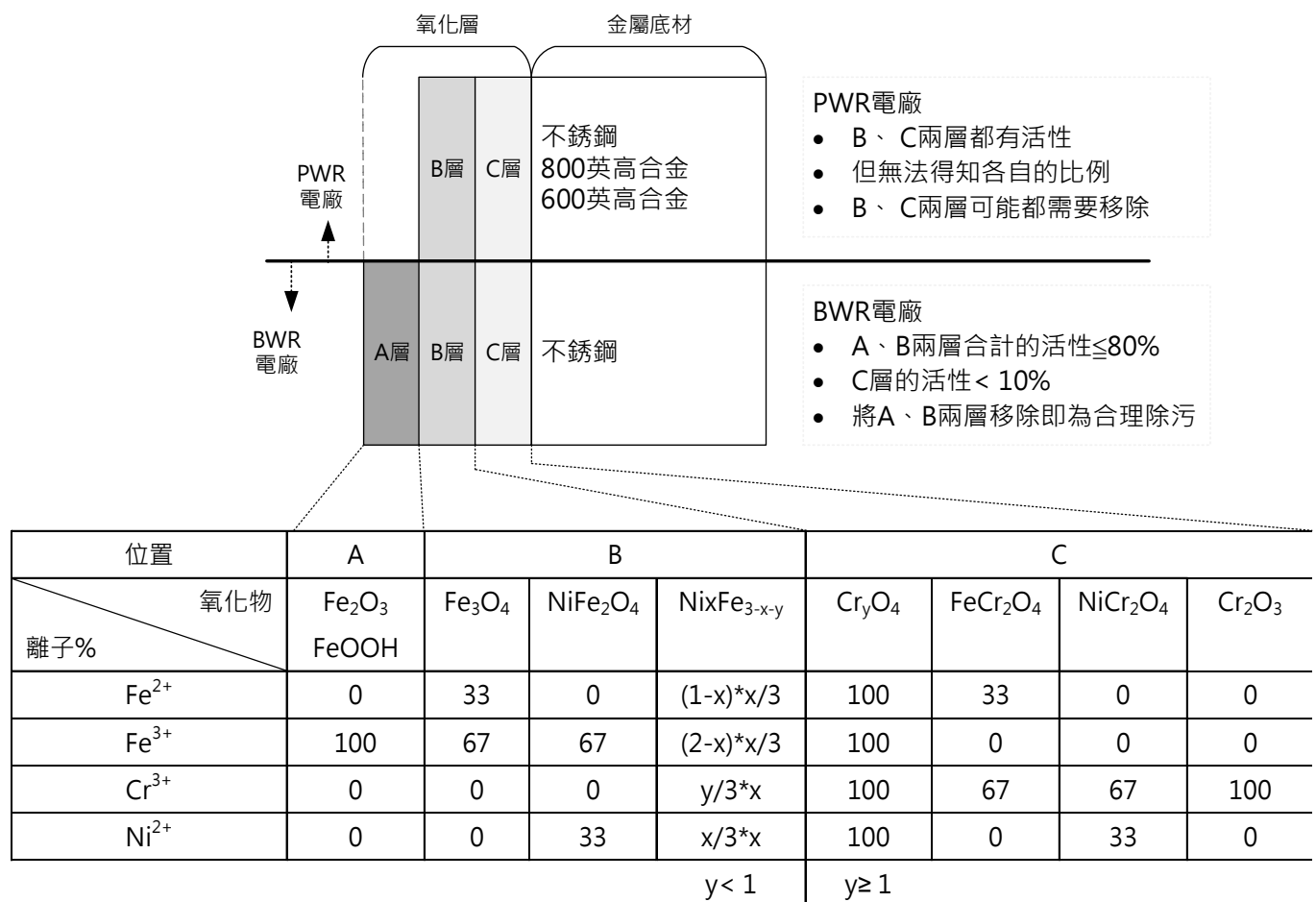


圖 17.1 輕水式反應器系統的氧化物類型

腐蝕薄膜中的鉻濃度，是反應器冷卻水化學性質的函數。在 PWR 化學環境中，隨著表面材料的腐蝕，鉻被氧化為三價鉻離子(Cr⁺³)，其不溶於水，並與腐蝕層結合成一體，有助於保護不銹鋼及英高鎳，避免受到進一步侵蝕；而在正常的 BWR 化學環境中，鉻離子被氧化為六價鉻離子，Cr⁺⁶為高度水溶性，故會從腐蝕薄膜中溶解，在 BWR 這樣具氫水化學性質的環境中，由於氧氣濃度較低，鉻將以 Cr⁺³ 的形式保留在腐蝕膜中。

移除腐蝕薄膜及相關放射性核種的化學除污類型，會受到腐蝕薄膜中的鉻濃度所影響，

在標準的 BWR 環境中，可使用簡單的化學螯合方法，獲得 6~10 的 DF，這是因為腐蝕薄膜中幾乎沒有鉻離子可幫助其免受螯合劑的侵蝕；在 PWR 或氫水化學 BWR 環境中，腐蝕薄膜中的 Cr^{+3} 可保護薄膜免受化學螯合劑的侵蝕，故在此化學環境下，必須使用預處理程序以獲得可接受的 DF，使用的預處理化學品通常是鹼性高錳酸鉀(alkaline potassium permanganate)、硝酸(nitric acid)、高錳酸鉀(potassium permanganate)或高錳酸(permanganic acid)，經過這些處理，能進一步將腐蝕薄膜中的 Cr^{+3} 氧化成水溶性的 Cr^{+6} ，使薄膜打開讓螯合物在下一個階段能作進一步的侵蝕及溶解。

根據腐蝕薄膜的厚度及除污目的，可能要經過許多步驟，故可能需要採取預處理與螯合步驟的交替化學反應，如果目標是在標準的 BWR 環境中獲得高 DF，則建議採用多步驟程序，包括與某種高錳酸根離子有關的預處理步驟。

● 17.7.2 腐蝕產物的運輸、活化及沈積

核電廠在運轉階段或熱停機時，反應器冷卻水系統是處於連續循環狀態，這意謂該系統仍在持續運作、在化學上保持適當的濃度、溫度位於運轉參數，且水以預定的流速流經管路，基材金屬及腐蝕薄膜因為運轉參數的關係而受到腐蝕，系統隨後達成平衡，並且產生一些可溶及不可溶物質的沈積，但這些沈積的速率十分緩慢，電廠的運轉安全並不會受到任何腐蝕或侵蝕過程的影響，但這種腐蝕產物的平衡，對爐心外管道表面上的輻射強度具有重大影響。

因為持續不斷地發生的平衡，腐蝕與侵蝕產物可能沈積在管道、壓力槽及爐心表面，這些材料一旦沈積在壓力槽區並暴露於中子，就會被活化，一旦被活化，這些物質仍會繼續參與反應器冷卻水系統中的平衡，並從表面溶解或腐蝕，然後藉冷卻水輸送到系統的其他區域。如果是在爐心的外表面，則爐心外會有放射性粒子，造成管道外部的輻射強度增加，隨著放射性物質(碎屑)持續沈積在這些區域，管道中的輻射強度也在不斷增加，此現象最早是由 Chalk River 實驗室(加拿大)發現，技術人員稱其為 Chalk River Undefined Deposit，故命名鏽垢(CRUD)。

一些放射性物質從表面溶解或剝落後，會沈積在另一個區域，但部份則與沈積物結合並保持在原位，一旦粒子被固定在某處，似乎就能在金屬表面的沈積物中擴散，故經過數年的運轉後，可能會在整個沈積層中發現放射性物質，不僅在表面固體沈積的鬆散沈積物內，連鬆散沈積物下緊密附著的沈積物中，都能發現放射性物質。

放射性物質也會擴散到金屬顆粒間的孔隙中，進而限制稀釋化學法所能實現的除污量 (Smee 1999)，在進行化學除污及預估潛在 DF 時，必須考量到此因素。

有許多學者針對 BWR 和 PWR 中的腐蝕產物，其產生、活化及運輸進行了大量研究，這些參考文獻(Lister 1979,1989,1996)(Berry 1979)(Cunnane 1978)能提供更多關於此議題的資訊。

● 17.8 化學除污技術

針對除污議題有許多評論，其中包括 J. A. Ayres(Ayres 1970a)著作的化學與機械除污，雖年代久遠卻是相當值得參考的論文。

1979 年的核設施除污及除役研討會論文集，具有寶貴的資訊(Osterhout 1980)，美國電力研究所(EPRI, Electric Power Research Institute)在許多除污會議上發表了各種評論性文章與論文(Remark 1981, 1989)，(Smee 1999)，(EPRI 1998,1991, 1993, 1995)。

化學除污係藉由化學物質溶解或使周圍環境鬆散以移除污染物質，然後同時或在隨後的步驟中，沖掉或洗去污染物，化學除污具有的潛在優勢包括：能夠清除縫隙、接頭、管道及受限於機械方法難以施作的位置；另一方面，化學藥品的使用必須考量處理設備及條件，同時也要留意與技術本身及產生的廢棄物處理與處置等相關的危害及環境問題，操作員穿戴額外的化學品防護裝備可能會降低其生產率。

1979 年之前，所有的化學除污作業都在政府設施中進行，且全都使用濃縮化學藥劑，最早期是在漢福德保留地(Hanford Reservation)的鈾循環測試反應器上進行，其實驗性燃料元件在 1962 年 8 月失效後，反應器必須進行除污，因為這是首次以化學處理來降低完整反應器的輻射強度，故格外令人感興趣，處理程序是用 APOX，即先用鹼性高錳酸鉀處理表面，接著再用草酸(Perrigo 1966)，加入草酸後發現，管路及組件表面會形成草酸亞鐵(ferrous oxalate)沈澱，因為該沈澱物難以移除，必須調整溶劑後再次添加應用，在稱為 APACE 的改進方法中，是先用鹼性高錳酸鉀，再用檸檬酸(citric acid)及乙二胺四乙酸(EDTA, Ethylenediaminetetraacetic acid)，該溶劑解決了草酸亞鐵沈澱問題，整體 DF 能達到 4~16。

另一個使用濃縮化學品的例子，是移除漢福德 N-反應器冷卻水表面的腐蝕產物，在這種情況下，最常用的溶劑是磷酸(phosphoric acid)，該反應器從 1967 年至 1983 年間，每年都會進行除污，其在碳鋼表面的 DF 約 3~6。

Shippingport PWR 是最早對主要管路進行除污，然後將用過的化學物質放在樹脂上的核反應器，該反應器在 1964 年初進行除污(Abrams 1966)，其使用的技術是 AP-AC，先使用鹼性高錳酸鉀，接著再使用檸檬酸銨(ammonium citrate)，這種除污首次應用稀釋溶劑，且藉由離子交換樹脂處理所有廢液，故具有重要的歷史意義。

此計畫低估了離子交換樹脂的數量，其由原先估計的 700 ft³ 增加到了 900 ft³，許多反應器冷卻水系統區域，其輻射強度降低了 50 倍，但其他區域的輻射強度在除污後卻更高了，這是由於未溶解的鏽垢被輸送到低流量或無流量的區域，稀釋的檸檬酸銨溶液似乎沒有足夠的腐蝕性，以至於無法及時溶解鏽垢，導致局部釋放到液體中，並且沈積在輕微流動或幾乎沒有流速的那些區域。

Shippingport 化學除污是該技術首次的全尺寸測試，其基本上是一個毋需許多額外輔助操作設施的循環或連續過程，例如溶液的製備及儲存，以及廢棄物的儲存及處置，這個案例特別值得讚揚，儘管仍需要進行大量的工作，但它證實了稀釋的化學除污技術是可行的。

美國第一個低濃度化學除污技術的商業應用是在 1979 年的 Vermont Yankee，倫敦核電公司使用 CAD-DECON 技術進行爐水淨化系統的除污，該次應用獲得的平均 DF 為 5，總共消除 80% 與管路表面輻射強度有關的活性，該作業產生的唯一廢棄物是約 25 ft³ 的離子交換樹脂(Beaman 1982)(LeSurf 1982)。

由 EPRI 出資發展出更有效率的化學除污技術-一種低氧化態金屬離子(LOMI)技術，該技術於 1983 年在 Monticello 核電站首次使用(Remark 1984)，這是一項創新技術，因為它使用鈳離子(V⁺²)將反應器內表面腐蝕薄膜的鐵離子還原為亞鐵(在還原過程中，鈳離子被氧化成鈳離子(V⁺²))，這個過程比以前的稀釋化學技術快得多，整個反應器再循環系統的 DF 值約可達 25，所獲得的 DF 範圍為 1.6~64.3，使用的技術稱 LOMI-NP-LOMI。

1985 年，Bechtel National 首次在 Indian Point 的 3 號機蒸汽產生器的通道頂蓋(channel head)進行重大的化學除污處理(Nielsen 1986)(Greenman 1986)。整個蒸汽產生器的通道頂蓋都進行除污，大約深入蒸汽產生器管內 6 ft，因為是 PWR 反應器，故 AP 及 NP 要一起使用，才能將不銹鋼及英高鎳表面的鉻移除，該技術第一步是先用 AP；經過約 12 小時的接觸時間後，添加硝酸將

pH 改為酸性條件。

1990 年~1998 年間，進行化學除污的 BWR 與 PWR 數量，如圖 17.2 所示，兩種類型間的關係(BWR 較多)，亦適用於 1990 年前進行的結果，圖 17.3 則表示各電廠進行的化學除污類型，LOMI 是商轉中核電廠最常使用的技術(在過去兩年中，有超過 70%的電廠除污)，它產生的放射性廢棄物最多，但由於受到 EPRI 的支持，因此受到大多數電廠的青睞。

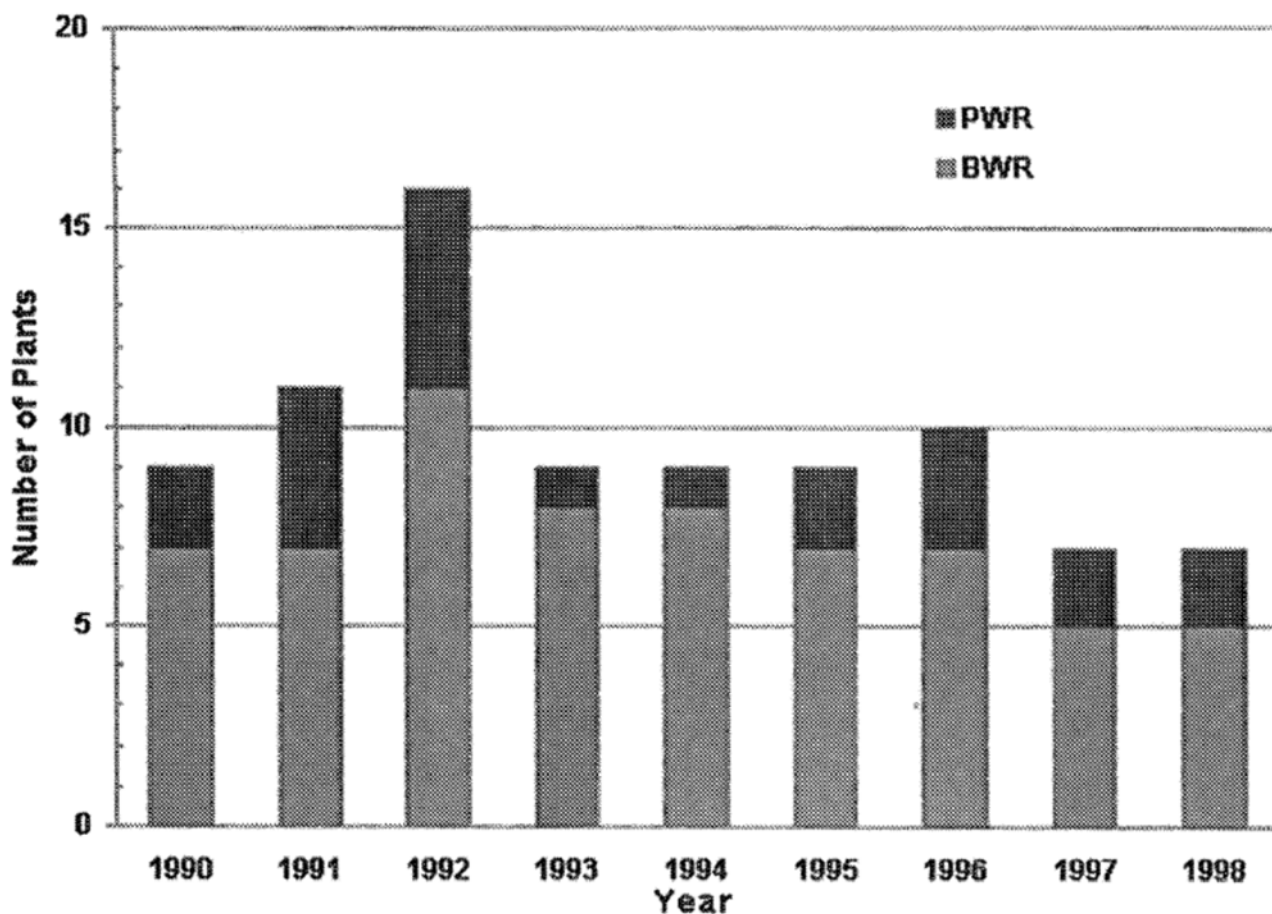


圖 17.2 BWR 與 PWR 於 1990 年~1998 年間進行化學除污的數量

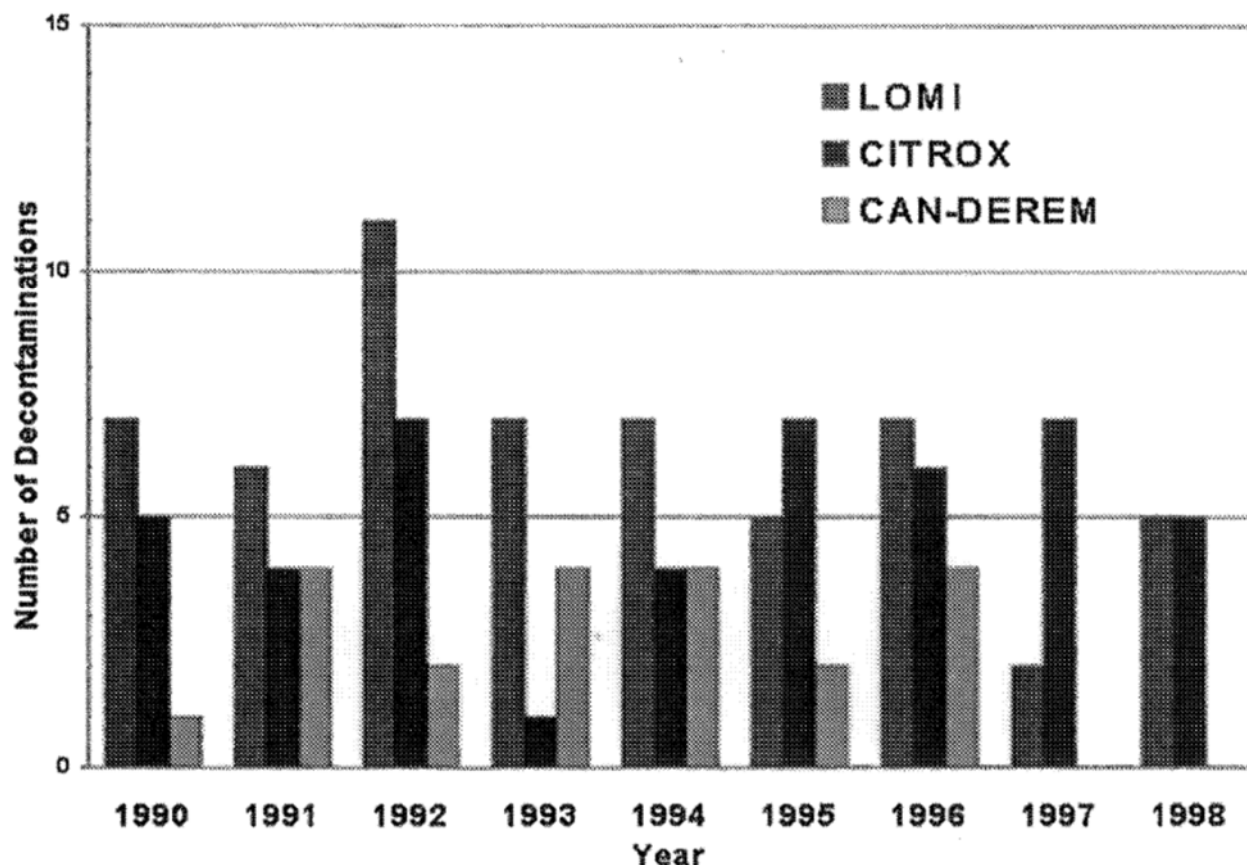


圖 17.3 各電廠於 1990 年~1998 年間進行的化學除污類型

● 17.8.1 CAN-DECON 及 CAN-DREAM 技術

CAN-DECON 係由 EDTA、檸檬酸及草酸所組成，摩爾比約為 2:1:1，AECL 在 1970 年代開發了 CAN-DECON 技術，主要用於 CANDU 重水式反應器，這是一種低濃度化學除污技術，且放射性廢棄物只有離子交換樹脂，這在 CANDU 除污時很重要，因其為重水緩反應器，在處理過程中無法承受昂貴的重水損失。

CAN-DEREM 技術不含草酸，因為積極性的測試結果顯示，這種酸在 CAN-DECON 溶劑中可能會對高度敏感的 304 不銹鋼(SS 304)造成 IGA / IGSCC。從那時起，不銹鋼系統只會採用 CAN-DEREM 技術，這些技術通常先在混合槽內溶解固體粉末，在添加任何化學物質前，將除污量體內的工作溫度加熱到約 200°F，待化學品溶於少量水後，將其添加到化學除污槽中。添加足夠的化學品，使其最終濃度約為 1,000 ppm 或 0.1%(重量)，也有一些案例是將化學物質添加到溢流容器中的除污量體，並隨著除污量體在容器內循環而溶解。

當 EDTA、檸檬酸及草酸在除污量體中溶解時，氧化物沈積物也開始被溶解，由於除污化學品會使沈積物鬆動，可能會觀察到一些碎屑，低濃度的化學品無法令大量的沈積物被螯合劑清除掉，因此，必須線上再生以從螯合劑(EDTA)中移除離子。

因為是利用除污量體流過氫形式的陽離子交換樹脂來完成移除，故當鐵與陽離子樹脂進行交換時，會根據要移除的鐵氧化態，在溶液中釋放出兩或三個氫離子(H_2O^+)，若沒有這種線上離子交換及再生活性除污成分，DF 將受到限制。

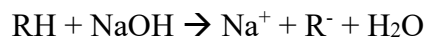
再循環及再生可以無限地繼續，但實務上，在添加化學品後的 12~24 小時內，化學除污就會終止，任何一個程序的終止，都是經過技術工程師敏銳的判斷，通常可以在化學除污程序中監控鐵的濃度，並評估出陽離子交換樹脂的移除率，假設陽離子交換樹脂尚未耗盡的

情況下，在鐵離子還原至陽離子交換樹脂出口的近似值時，則此步驟即可成功終止。

在 Indian Point 的全系統除污過程中，管路系統全都裝了線上輻射監測器，以便持續監測劑量率，則該過程不會因為某些部份的值降低就終止，一般而言，所有劑量率會達到顯著穩定，一旦終止該步驟，陰離子交換樹脂會與線上的陽離子交換樹脂並聯，使流徑先通過陽離子交換柱，接著再通過陰離子交換柱，混合床柱可用來代替這兩個交換柱。

移除所有在陽離子/陰離子樹脂柱或混合床樹脂柱剩餘的陽離子和陰離子，包括鐵離子、EDTA、檸檬酸及草酸，溶液將持續通過交換柱，直到水質達到或超過廠址規定，這些規範的 pH 值通常在 5~10 之間、總有機碳(TOC, total organic carbon) < 10 ppm，而傳導率 < 10 μmhos，TOC 是最難達到的。

所有用於化學除污的有機酸均為弱酸，當其通過離子交換樹脂時，因為是由濃度及平衡常數來決定平衡，故只有部分被移除，如果將 pH 值提高到 7~8，會促使平衡達到離解狀態，使有機酸可以通過離子交換樹脂並輕鬆移除，有機弱酸解離的通用方程式如下，可以觀察到，隨著在溶液中添加氫氧化鈉，有機酸趨於解離，R 是導致 TOP 濃度的有機酸，從下面的方程式可以看出，隨著酸的離解，R 可以在陰離子交換樹脂上被移除。



使用 CAN-DECON 及 CAN-DEREM 技術，已觀察到 DF 可達 5~20，如果在 BWR 中不使用氧化步驟，DF 會比較低，鹼性高錳酸鉀的 DF 效果低於硝酸，由於 CAN-DEREM 技術的侵蝕性較小，故可以用在不銹鋼及碳鋼表面，而毋需擔心腐蝕。

● 17.8.2 CITROX 技術

由 R.D. weed 開發的 citrox 試劑，首先用於 Handford Reservation(Weed 1968)300 區的鈾再循環試驗反應器(PRTR, Plutonium Recycle Test Reactor)，該試劑由檸檬酸(citric)及草酸(oxalic)組成，故命名為 CITROX。PRTR 化學除污的原始配方約為 0.3M(25,000 ppm)檸檬酸及 0.2M(58,000ppm)草酸，由於其腐蝕性，還向該溶液中添加了抑制劑。在應用稀釋化學除污的初期，PN Services, Inc.對這種溶液進行了改良，並以約 0.2 重量百分比的濃度應用於現場，該產品被稱為 PNS CITROX A，且不含抑制劑，PNS CITROX B 則包含抑制劑，且用於碳鋼系統，由於其濃度較高並使用草酸，該方法比 CAN-DECON 或 CAN-DEREM 溶劑更具腐蝕性，該方法在 BWR 及 PWR 組件的除污中仍然很受歡迎，但這兩種反應器都沒有獲得認可的全系統應用。

citrox 系統與 CAN-DECON 和 CAN-DEREM 系統的相似之處，是會先在混合槽中將粉末溶解，待化學品溶解在少量水中後，再將可溶性化學品緩慢添加到除污量體中，添加速率以控制在整個除污量體中都有添加到化學品，也可讓這些化學品流經能裝固體粉末的籃子或其他容器的旁路系統，添加足夠的化學品讓 CITROX 總除污體積的最終濃度達到 0.2 重量百分比，草酸及檸檬酸的摩爾濃度通常相近，根據各實驗室測試的結果，可以略微調整草酸與檸檬酸間的比例以優化 DF。

CITROX 亦可以線上再生，應保持夠高的線上除礦速率，以使鐵離子濃度保持在 10 ppm 以下，因為消除了試劑中的 EDTA，鐵離子在 CITROX 溶液中的錯合度不高，故會有三價鐵離子腐蝕，如果溶液中的鐵離子濃度保持在 10ppm 以下，則可大大減少腐蝕。

在除污操作期間，可以分析本體溶液中的草酸、各種金屬及 pH 值，亦應監測除礦陽離子樹脂容器的有效性，一旦鐵的濃度不再增加，且線上輻射強度停止降低時，即應終止除污過程。其他像是金屬鉻也應監測，如果在初次注入後，在除污溶液中觀察到鉻濃度增加，

即表示基材金屬可能正在腐蝕，技術工程師在此時應評估系統表面發生的反應，並採取適當行動，在 CITROX 技術終止時，可利用陽離子及陰離子樹脂對溶液進行除礦處理，將除污溶液恢復成除礦水。

添加到溶液中的所有試劑及所有溶解的物質，都是陽離子或陰離子，且會在離子交換樹脂上被移除，有機弱酸並非在所有 pH 值都可完全解離，故溶液需要通過離子交換容器進行一定程度的再循環，才能完全清潔水，要將水恢復到電廠規定的 10µmhos 及 TOC10 ppm，所需時間通常為 8 個半衰期。雖然可以不斷地進行除污溶液的再循環，但化學除污通常在將化學品添加到系統量體後的 12~24 小時內就會終止。

● 17.8.3 CORD 技術

CORD 是化學氧化還原除污的首字母縮寫，它是從 OZOX 技術(臭氧/草酸)演變而來的，該技術最早是用臭氧作為氧化劑，但由於技術上的困難，所以在現場都是用鹼性高錳酸鹽(Wille, 1986)，CORD 實際上是一個以高錳酸(HMnO₄)為氧化劑，草酸為溶解及螯合劑的技術類別，紫外線(UV)及過氧化氫是用來降低草酸的濃度，並進而減少廢棄物數量，所有產生的廢棄物都是離子交換樹脂，使用高錳酸作為氧化劑也降低了整體的離子交換需求。

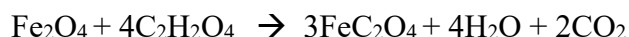
藉由以下的化學反應，高錳酸會將腐蝕薄膜中的保護性鉻，氧化為水溶性重鉻酸根陰離子：



高錳酸根離子亦傾向與水中的任何可氧化物質發生反應，該氧化在酸性介質中進行，高錳酸鹽的反應產物是二氧化錳、氧氣及水，工程師必須在 CORD 的高錳酸步驟中，監控高錳酸根離子的濃度保持在 50-300ppm 的範圍，才能適當地應用，最佳的應用溫度介於 190~200°F，在反應過程初期，高錳酸鹽的濃度必須保持在濃度範圍的上限，當步驟到達終止階段時，可以將濃度保持在下端，高濃度的高錳酸並不會提高可溶性鉻的含量，反而會增加廢棄物的產生量，故不應該在後期添加。

在氧化階段亦應監測鉻的濃度，其將決定何時要終止程序，該濃度會迅速增加，然後再急劇下降，當增加速率出現遞減時，即可終止氧化階段，並且在還原步驟進行前，先銷毀過量的高錳酸及所得的二氧化錳，將這兩種物質還原為錳離子(Mn⁺²)來破壞材料，並以理想配比的草酸添加到氧化溶液中來進行還原。該步驟並非除污過程中的獨立步驟，將草酸一次性地添加到溶液中，以減少殘留的高錳酸及二氧化錳。

將過量的草酸添加到最終濃度約達 1500 ppm，即完成除污步驟，如不添加過量草酸，則 pH 的酸性不足以發生破壞反應，pH 值必須介於 3.5~4.0 間，其他技術則是將溶液通過陽離子樹脂來達到 pH 值，該樹脂會移除溶液中的陽離子，並以水合氫離子(H₃O⁺)取代，一旦高錳酸鹽及二氧化錳還原為錳離子，草酸將通過以下反應，將腐蝕薄膜中的磁鐵礦溶解。



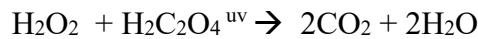
當除污程序啟動時，線上必須放置陽離子柱，其將移除所有被草酸溶解的金屬離子，並使草酸再生，且會進一步移除腐蝕薄膜，再生的草酸會產生水合氫離子，有助於維持反應，溫度應保持在 195°F 以達最佳條件。

此階段的除污過程，應監測金屬濃度及草酸濃度，以使化學反應保持在最佳濃度，如果鐵濃度降低的同時，草酸的量也大幅降低，則可能無法完成反應，在此情況下，可能需要增加草酸濃度以優化反應動力。

在降低金屬濃度(尤其是鐵)且草酸達到最佳濃度時，反應即會終止，必須注意的是，在

離子交換樹脂之前和之後，都應監測鐵的濃度，從這些分析中可以計算出離子移除率，因為可評估出腐蝕薄膜的溶解，所導致整體溶液中金屬離子增加的濃度，故可計算出終止的最佳時間。

在除污步驟結束時，溶液必須淨化為除礦水，此可藉由 CORD 技術的兩種方式完成，移除草酸的原始方法是使用離子交換樹脂，使草酸通過陰離子樹脂，以移除草酸根陰離子，接著由陰離子樹脂釋放出的氫氧根離子(兩種)與草酸中的銓離子反應並生成水。在美國，這個方法產生的少量離子交換樹脂並不成問題，但是在歐洲，任何離子交換樹脂的異地處置都很困難，因此，CORD 的發明者開發了另一種使用過氧化氫及紫外線來分解草酸的方法，以下反應列出了草酸分解的產物及反應物。



在該反應期間，會將溶液送進強紫外線的光室，藉以將草酸分解為二氧化碳與水(Bertholdt, 1994 年)，如果要在封閉系統中使用 CORD 技術，應計算出所生成的二氧化碳氣體所導致的壓力升高量，在高錳酸鹽及草酸破壞過程中，會因為所使用的排氣系統，導致所生成的二氧化碳氣體可能超過系統設計壓力。

以 10,000 加侖的除污量而言，CORD 各步驟所需的陰離子樹脂，通常為 25~60 ft³，這取決於被除污的系統及除污量體表面上的負載，所生成的陽離子及陰離子樹脂，或許能放入單一且高度完整的容器(8-120)，並留在美國處置

上述程序是針對單一的 CORD 應用，可以重複執行該程序，直到 DF 達到目標為止。如果使用離子交換淨化，典型的 CORD 過程需要 4~6 小時，但若是使用過氧化氫/UV 分解草酸，則會延長到 10~36 小時。

除污技術工程師必須與停機大修時程密切配合，以評估出最佳的處理方式，紫外線破壞技術最多會額外增加 20 小時，如果是在關鍵路徑進行除污，則生成離子交換樹脂的成本可能會大為降低，或者結合離子交換及紫外線破壞來減少所需的時間，對於 CORD 技術也有相關的額外資訊(Bertholdt 1998a, 1998b)。

● 17.8.4 LOMI 技術

英國中央電力局(Central Electricity Generating Board)在 1980 年代初期開發了 LOMI 化學除污技術(Bradbury, 1983 年)，LOMI 是低氧化態金屬離子的字母縮寫(Low Oxidation state Metal Ion)，其被認為與前述其他技術有根本上的差異，某種程度上是正確的，因為它使用了一種強還原劑(溶液中的釩離子與吡啶-2-甲酸(picolinic acid)螯合)來攻擊氧化物基質中的鐵離子，把二價釩離子氧化為三價釩離子，鐵離子同時被還原為亞鐵離子，其反應如下式所示。



在步驟開始時，會將吡啶-2-甲酸添加到溶液中，一旦各種金屬開始被溶解，即會與之錯合，該技術的 pH 值為 4~5；故需於注射前，先在濃縮的化學品中加入氫氧化鈉，該過程被認為是還原溶解，且比酸溶解過程快得多，典型 LOMI 應用的完全反應時間需約 6 小時，含釩離子在碳鋼系統似乎不太穩定，故不建議用於碳鋼管路系統。

典型的 LOMI 技術，是使用約 6 毫摩爾的釩離子溶液，在注入濃縮的釩離子前，會在除污量體中混入吡啶-2-甲酸溶液，然後將吡啶-2-甲酸混合在一個濃縮溶液中，該濃縮溶液的製備方式如下：1 莫耳的釩離子使用六莫耳的吡啶-2-甲酸，在注入除污量體前，氫氧化鈉也與酸混合，除了明顯的酸以外，甲酸釩包含甲酸(formic acid)，這是由於化學反應產生的雜質

而生成鈳離子，在添加吡啶-2-甲酸進行溶解前，先將氫氧化鈉添加到混合槽中，能將酸的溶解時間大為縮短。

1 個鈳原子與 1 個鐵原子錯合，必須要有 3 個吡啶-2-甲酸原子來合理處理吡啶-2-甲酸與鈳的摩爾比，假設每個鈳原子(或莫耳)都會產生一個亞鐵原子(或莫耳)的亞鐵(詳見上式)，一些研究人員得出的理論認為，可以使用莫耳比較低的吡啶-2-甲酸來維持離子的溶解度，但多數電廠在除污過程中，都維持較高的莫耳比。

要確認 LOMI 程序的終止點，必須同時監測鈳離子及鐵濃度，利用分光光度法(spectrophotometrically)監測鈳離子，其會隨著時間增加而減少，但鐵的濃度會隨著腐蝕薄膜的溶解而增加，即使鈳離子濃度可能為零，此驅動力仍是藉由鈳/鈳酸鹽氧化耦合的氧化電位的來溶解腐蝕膜，因為還發現該耦合對金屬具某種程度的腐蝕性，故在此模式下進行的反應時間不應超過 60~90 分鐘，此時，鐵的濃度應開始趨於漸近值，使過程終止，在終止時，溶液將被轉向陽離子及陰離子樹脂柱，以分別移除陽離子及陰離子。

LOMI 技術有 3 個缺點，其一是鈳離子在碳鋼體系中不穩定，如果除污量體中含有大量碳鋼，則應使用其它的技術，第二個缺點是必須移除大量的樹脂，將系統中添加的吡啶-2-甲酸與鈳的莫耳比降至 6:1，雖然能降低部份樹脂量，但絕大部分的樹脂負荷是來自溶液中每莫耳 3 當量的鈳離子，而其他除污技術沒有這種樹脂負擔，最後一個缺點是化學品的成本，鈳甲酸鹽是為每個客戶量身訂制的，儲存期限較短(6 個月)，這也是其他技術所沒有的開銷。

即使有樹脂負擔及化學品的額外成本，LOMI 仍是美國電力公司最常使用的除污技術，其廣受歡迎的原因，在於能縮短完成時間，但隨著系統變大，例如 10 萬加侖(378,000 公升)的量體要進行全系統除污，需要更多的樹脂用量及化學品的成本考量，使 LOMI 技術不再具備經濟優勢，迄今為止，在商轉中反應器上唯一使用過的全系統化學除污技術是 AP/CAN-DEREM。

● 17.8.5 DFD 技術

DFD 是除役用除污的代名詞，該技術以氟硼酸(fluoroboric acid)作為活性成份(Bradbury 1997, 1998)，利用腐蝕金屬表面來移除其面上的放射性，理論上，這種對基材金屬的一般腐蝕，會讓沈積在基材金屬內凹坑或縫隙中的任何放射性核種被釋出，組件在經過數次 DFD(8~10)循環後，其輻射強度會降低，且可能可以自由外釋。

DFD 是由 EPRI 核可的多步驟技術，其運用高錳酸鉀來提高溶液的氧化電位，以溶解某些類型不銹鋼的保護性鉻層，該技術一開始是先將除污量體加熱到 200°F，接著在系統內添加足夠的濃縮氟硼酸，使最終濃度達到 10mM(約 0.9 克/升)，pH 值約為 2，由於腐蝕產物的溶解，加入氟硼酸會提高溶液的 pH 值，溶液通過陽離子樹脂柱進行循環，讓 pH 值能維持在氟硼酸(2.0~2.4)的最佳性能，陽離子樹脂會移除溶解在溶液中的金屬，並以樹脂的質子(H_3O^+)來取代。

為了移除保護性鉻層(當腐蝕產物的溶解已大幅減少後)，會終止溶液通過陽離子柱，並將足夠的高錳酸鉀加入除污量體中，以保持高錳酸鉀的工作濃度為 100 ppm，通常全部需要 300 ppm，才能將所有曝露的保護性鉻，氧化為可溶性鉻酸根陰離子。

下一步驟涉及二氧化錳(MnO_2)的溶解，這些二氧化錳是由於高錳酸鉀還原或分解所產生，在溶液中添加化學計量的草酸可進行溶解，該溶液的 pH 值必須在 3.5 左右，始可有效地驅動該還原反應，在此步驟中，讓溶液通過陽離子樹脂柱可降低 pH 值，該離子交換樹脂會將溶液中的金屬離子移除(例如錳離子， Mn^{+2})，並以氫離子(H_3O^+)加以取代，需注意 Cr^{+3}

會與過量的草酸形成 $\text{Cr}(\text{C}_2\text{O}_4)_3^{3-}$ 化合物，陽離子交換樹脂無法將該化合物中的鉻離子移除，故在 DFD 應用過程中，溶液中往往會積聚鉻，但對其他化學除污應用，形成這類鉻化合物並不是問題，因為在草酸破壞步驟結束時，會將混合床樹脂插到水流中，混合床樹脂的陰離子對移除該草酸鉻錯合物具良好成效。

在所有二氧化錳溶解後，若溶液內有出現過量草酸，將化學計量的高錳酸鉀加到溶液中可將其移除，在陽離子樹脂柱上線後，會移除所有陽離子，以達到下一個氟硼酸步驟的化學平衡。

總而言之，DFD 技術的每個循環均包含 4 個獨立的步驟。

- 1、啟動：第一步是當溶液達到 DFD 工作溫度 200°F 時，在溶液中添加氟硼酸來啟動化學除污，典型的氟硼酸濃度為 10 毫莫耳。在此過程中，會利用過濾器及陽離子樹脂柱進行溶液的再循環，直到移除顆粒材料且溶解的金屬濃度低於 10 ppm，此時可將陽離子樹脂柱從流徑中移除。
- 2、氧化：在流徑中的陽離子柱移出後，將約 200 ppm 的高錳酸鉀加到氟硼酸溶液中，以溶解腐蝕薄膜中的鉻，該反應也要在 200°F 進行並持續到高錳酸鉀還原成二氧化錳，此反應耗時約 2~4 小時。
- 3、破壞：該技術的破壞階段，需要添加化學計量的草酸以溶解二氧化錳，此階段會讓陽離子樹脂柱上線，以維持破壞的最佳 pH 值，並能移除可溶性離子(預備下一個循環)，淨化半衰期(purification half-life)應少於 1 小時，最佳的半衰期為 30 分鐘，淨化半衰期定義為將任何一種物質的濃度降低 2 倍所需的時間，並假定移除效率為 100%，其計算方法是將系統體積乘以 $\ln(2)$ ，然後除以通過離子交換樹脂的流速，藉由測量溶液中的可溶性錳離子，可以確認該步驟是否完成，離子交換樹脂應將這些離子溶解並予以移除，故當溶液中的可溶性錳離子濃度接近零時，即可終止該步驟。
- 4、過渡：各個循環的最後步驟，是讓溶液恢復成氟硼酸，在此階段，可利用分析方法來評估草酸濃度，並添加化學計算量的高錳酸鉀將草酸氧化成二氧化碳與水，在此步驟中，會將陽離子樹脂容器再次置於流路中，以移除溶解的陽離子，一旦陽離子濃度低於約 10 ppm，本次循環就完成了，並視需要再次啟動循環，通常要 6~12 個循環才能達到所需的 DF，循環次數將取決於各電廠的最終除污目標。

在 DFD 程序終止時，溫度會降低到約 140°F ，且需要混合床樹脂或陽離子後加上陰離子樹脂的組合，才能移除殘留的溶解金屬及氟硼酸，陰離子樹脂亦會移除累積的草酸鉻錯合物。

● 17.8.6 終止標準：

所有化學步驟的終止，都是根據特定的分析終止標準，通常會使用 1 到 2 個參數。

- 1、NP 或 AP 步驟：高錳酸鉀步驟終止前，通常要評估溶液中的高錳酸鉀濃度及鉻離子濃度，只要鉻離子濃度持續增加，即應繼續進行該步驟，當高錳酸鉀濃度達到足夠水平時，則應終止該過程，但這是假設過程中的所有參數(例如溫度)，均保持在最佳工作範圍。
- 2、草酸破壞步驟：在草酸破壞步驟過程中，應同時監測草酸與可溶性錳離子的濃度，溶液會歷經幾次顏色變化，剛開始時，可能因為高錳酸鉀濃度仍偏高，溶液呈現紫色，當草酸加入後，高錳酸鉀會還原成二氧化錳，使溶液產生褐色沈澱，當溶液像水一樣清澈時，表示易還原的二氧化錳已經反應，剩餘的草酸會侵蝕金屬管道表面，

並存在低流量區域的污泥堆中。

一旦溶液像水一樣清澈，即應評估的錳濃度，如果在草酸接近零的同時，可溶性錳的濃度趨於穩定，則溶液中可能會有更多的二氧化錳，但草酸在與二氧化錳反應前，濃度即降為零，故應添加額外的草酸以移除所有固體的二氧化錳，在該破壞步驟終止時，溶液中應有 50~100 ppm 的可溶性草酸，以確保所有二氧化錳都已溶解，如果無法完全溶解，則可能會干擾下一次添加化學品，且若除污系統內仍有足夠的二氧化錳，則某些化學品可能會被消耗掉，一些電廠在化學除污後，重啟時發現管路內有奇怪的棕色物質；另外有些則是在更換管路將其切開時，發現棕色固體，化學除污過程中要移除所有二氧化錳是很困難的，但應根據應用後所需的條件，盡可能地將之除去。

3、CAN-DEREM，CAN-DECON，CITROX 及 CORD

通常是藉由分析鐵離子濃度或特定的放射性核種，或是監測管道特定區域的輻射強度來終止這些除污步驟，因為這些技術都是可再生的，將溶液通過線上的陽離子樹脂進行循環，來移除可溶性陽離子，但鐵的濃度不會增加，而是會不斷地被移除，因此，當鐵離子無論是否流經陽離子樹脂柱，濃度都接近時，則幾乎沒有新的鐵被溶解，如果處於此技術的最佳狀態下，則可以終止該步驟。

4、LOMI

LOMI 技術使用活性成分鈇離子，藉以驅動反應，要評估 LOMI 過程的終止點，必須至少監測 2 個參數，第一個是鈇離子濃度，可利用紫外線/可見分光光度計進行監測，第二個參數是鐵濃度，另一個建議是監測每個樣品的總伽馬活性，並繪製鈇離子、鐵及總活性的線型。

在整體的鈇離子氧化前，消除鐵的濃度及總活性水平，是各種 LOMI 的除污目標，若鐵及總活性濃度仍在增加，而鈇離子卻接近零，則表示添加的 LOMI 不足以消除管路系統中的所有活性，此時可以添加額外的鈇離子，最大濃度約為 10 毫莫耳。

當鈇離子濃度接近零時，必須將更多的鈇甲酸鹽加到除污量體中，或是必須在鈇濃度降為 0 的 1 小時內，開始進行除礦以移除 LOMI 的化學物質，當鈇的濃度等於 0 時，鈇的氧化還原電偶對結構材料具有腐蝕性，為了避免過度腐蝕，必須移除鈇的電偶或添加額外的鈇離子，將氧化還原電偶改變成不具腐蝕性。

● 17.8.7 再次污染：

在討論爐心輻射強度的再污染之前，必須了解流經反應器系統的循環水是處於平衡狀態，而管路上的腐蝕產物是該平衡的一部分，冷卻水進行任何除污或化學變化，都會使平衡失調，進而導致系統產生變化，例如添加貴金屬，BWR 水質從普通變成加氫水化學，或其他“改進水化學”的變化，或 GE 的加鋅水化學(GEZIP)技術。

當進行化學除污時，腐蝕產物傾向在整個系統中重新分佈，以再次建立平衡，因為核燃料從未被反應器冷卻水的表面淨化，故一直存在可用於重新建立平衡的腐蝕產物來源，Smee 與 LeSurf 的報告(LeSurf 1991)詳細介紹截至 1990 年的再污染數據，Smee 的報告則更新了 1990 年至今的再污染數據(Smee, 1999)。

Indian Point 2 號機的化學除污計畫研究(Parry, 1998)，提供有關全系統化學除污再污染的最佳資訊，該電廠在 1995 年移除反應爐內的燃料，並進行了化學除污，圖 17.4 是蒸汽產生器二次側手孔上的輻射強度圖，各組柱狀圖的第一條線是除污前的劑量率，第二條線是化學除污後立即測得的劑量率，第三條線則是化學除污後經過一個週期的劑量率，四分之三的

蒸汽發生器在化學除污後的一個週期內，劑量率沒有明顯變化，但#24 蒸汽產生器在第一個週期中，劑量率大約增加了 50%，在 1997 年大修開始時，#24 蒸汽產生器是用作爐渣碎屑爆破的設備，或許是其輻射劑量率較高的原因，圖 17.5 表示一般區域在化學除污前、後的劑量率，及 1997 年燃料更換時的劑量，經過化學除污後，一般區域的輻射劑量率大幅降低，而大修期間，一般區域的輻射劑量率仍遠低於化學除污前的劑量率。

經量測 55 個預選點的劑量率，所獲取的化學除污平均 DF 為 7.8，DF 7.8 表示移除了 87% 的放射性核種，在歷經一個運轉週期後，這 55 個相同位置的 DF 為 6.4，表示整體放射性核種減少了 84%。

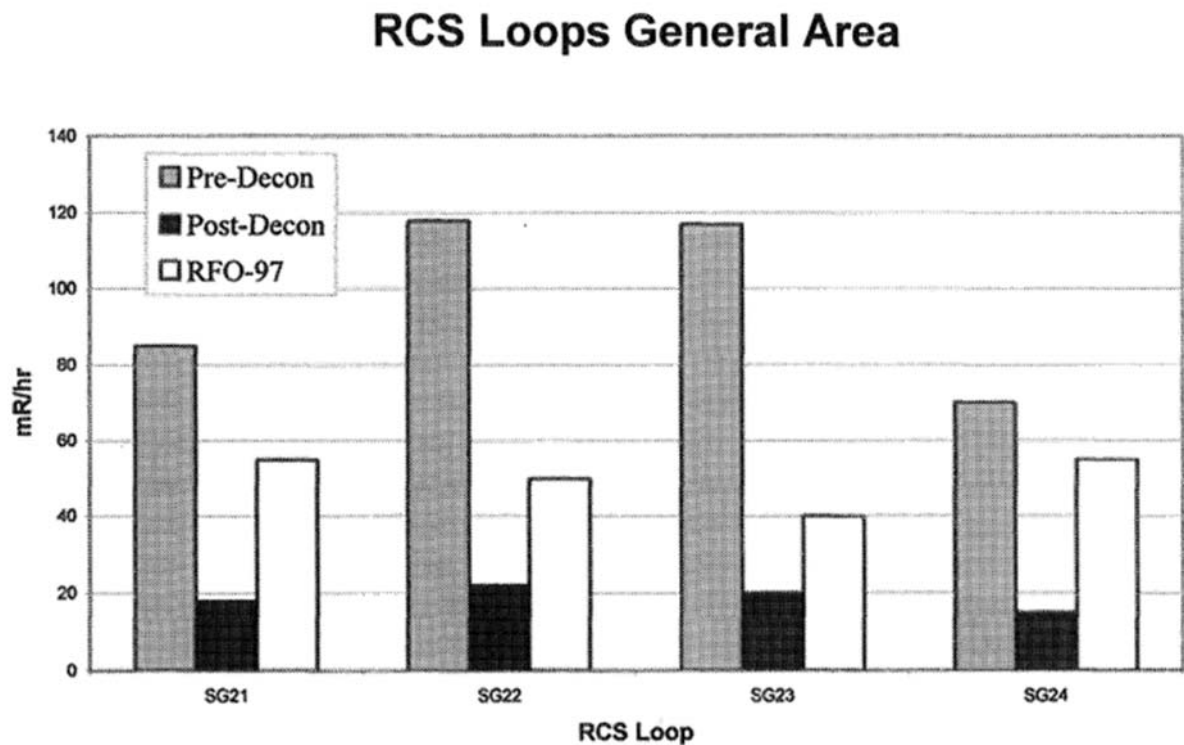


圖 17.4 IP-#2 機蒸汽產生器二次側手孔劑量率

Secondary Side Hand Holes

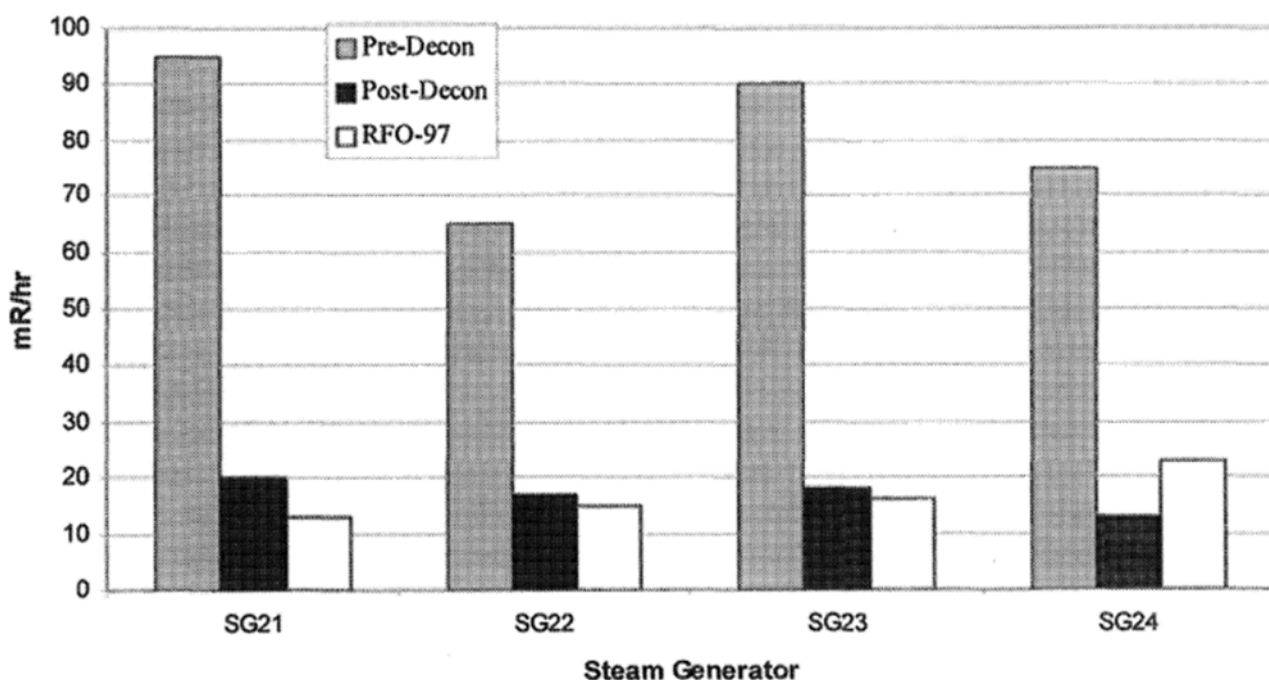


圖 17.5 IP-#2 機 RCS 迴路一般區域平均劑量率

● 17.9 機械除污技術

許多運轉員回報，機械除污用在大型、規則表面的效果最佳，因為除污設備能容易接近的這些表面且不受其他結構的干擾，縫隙、接頭及其他進入位置受限的污染，則可能很難或無法利用機械方法移除，要移除放射性污染還有許多其他的方法，例如使用雷射、聲波振動或熱效應，但是這些方法通常包含一種特殊的技術，能夠以機械性的方式移除污染物或其基材。

有許多機械方法可用來移除各類表面上的污染物，也有幾篇評論文章介紹了這些技術及其特定任務(Ayres 1970b)(Remark 1981, 1989)(Irving 1986)，移除污染物質所需的技術與去除非放射性灰塵、污垢或腐蝕產物所需的技術相似，不同之處在於如果發生交叉污染(以前沒有污染的表面受到污染)，則在清潔放射性污染表面時可能會產生更多廢棄物，為避免這種可能性，需要像抹布或化學品等額外用品。

隨著塵埃傳播到空氣中，放射性污染物也可能傳播到空氣中，為減少空氣傳播污染的可能性，可以用水潤濕組件表面，有些氣溶膠可用於重度污染的表面，以防止空氣中的污染物釋放，氣溶膠應作為污染控制的極端措施，截至目前為止，氣溶膠僅用於除污計畫。

在 1980 年代，核電廠使用機械除污技術的方向出現了變化，在 1980 年代初期，電廠對其所有的零件與組件進行除污，並在北卡羅來納州的橡樹嶺(Oak Ridge)建立了回收中心，這些中心受理污染材料的除污、減容及回收，自從這些中心成立以來，核電廠的機械除污工作量就減少了。

在進行除污前，必須了解其原因，是為了降低劑量或污染擴散而對組件進行除污，還是為了自由外釋而對零件或組件進行除污？如果是自由外釋為標準，則零件在經過調查及自由外釋後很久，都還必須考慮到裂縫中可能濾出的放射性核種，研究顯示，經過調查並清除任何放射性的區域，其殘留在金屬及混凝土裂縫與孔隙中的污染物可能會重新出現，後續的污染證據只是放射性核種從表面內部濾出的結果，因為這些污染深入內部，而無法在最終調查期間被發現。

管路、除污技術設備、建築地板與牆壁，設備及工具的外表面，可能會因冷卻水洩漏及例行維護作業而受到放射性污染，其中大部分污染物與一般建築物進行工業過程，所產生的非放射性灰塵及污染的散佈及沈積方式類似，即依照常識，所有裸露的表面都會受到不同程度的污染。

● 17.9.1 清潔除污

由於這種清潔的污染機制與普通非放射性的灰塵污垢類似，因此，清潔除污的技術、設備及程序，與許多業界標準電廠進行清潔應用有諸多相似之處，最明顯的差異是：

- 為避免作業人員無意間過度曝露於放射性物質，或在皮膚裸露處攝入及累積放射性核種，應格外留意對作業人員的監控。
- 改造除污設備，以保留(處置)大量被移除的污染物。
- 在對其餘受污染表面進行補救措施時，應格外注意，以防止表面再次污染。

以下是核電廠內建築物/設施表面及結構構件最常用到的除污方法：

- 手擦拭(hand wiping)/刷洗(scrubbing)
- 水沖洗(water flushing)
- 高壓水沖洗(high pressure water lancing)
- 可剝塗層(strippable coating)
- 蒸汽清洗(steam cleaning)
- 用非導電溶劑清洗(cleaning with non-electrical conducting solvent)

其他方法包括研磨帶(abrasive belts)、磨料噴砂(abrasive grit blasting)、研磨機(grinders)、刨除(shavers)及粗琢(scabblers)，核能業中的所有電廠，實務上至少都使用 2 或 3 個前述技術來進行建築物與設施的除污。

● 17.9.2 先進可回收的研磨料介質系統

由表面技術系統(Surface Technology Systems)所提供的先進可回收介質系統，是一種採用軟性可回收介質的開放式噴砂技術，該介質由胺甲酸乙酯泡棉(urethane foam)基質所組成，可製成各種等級的磨料，纖維介質可重製及/或重複使用最多達 20 次，且幾乎可以清潔任何表面(木材、金屬或鉛)及幾何形狀，包括角落及風管內部。該系統分為三個裝置：介質供給設備、篩濾設備及介質重製設備，供給設備會將介質推向便攜式噴砂設備要清潔的表面，之後手工收集用過的介質並放入篩濾設備中，大的碎屑(> 0.25 in 或 64 mm)與細小顆粒(<1/16 in 或 16 mm)會被當作廢棄物丟棄，剩餘的介質則可重製，或是送回供給設備重新回收利用。

● 17.9.3 混凝土刨除機(concrete shaver)

Marcrist Industries Limited 販售的 DTF-25 型混凝土刨除器，是一種自走(self-propelled)、手扶式(walk-behind)電動刨除機，其使用混有金剛石的鼓式刀片，以極精確的公差刨除混凝土表面，該刨除器適用在平坦的(或輕微彎曲的)牆壁與地板上，機器配有寬 10 in(23 cm)、直徑 5 in(12.7 cm)的刨除滾筒，上面裝有許多 Marcrist 專利、混有金剛石的刀片，根據所需的表面光潔度來選擇刀片的數量，將刀片安裝在滾筒上的設計可降低振動等級，刨除深度可調整從 0.004in(0.01 cm)到 0.5 in(1.3 cm)，該系統該系統使用真空過濾系統，可達到無塵運作，運行速率可自由設定，具有高生產率，該設備重 330 磅(150 kg)，使用電源為 3 相、電流 16 安培、電壓 380~480 伏特，可正反向操作，操作與數字面板連動的手動轉輪，可以設定刨除深度，一組刨除刀片的額定工作時間為 156 小時。

混凝土刨除技術在實務上沒有特殊的問題，只需工業用電壓(480 VAC)及電路，另需高效率空氣微粒過濾器(HEPA)，小型手持工具(例如金剛石砂輪打磨機)作業的狹小、擁擠混凝土地板及樓板，混凝土刨除技術並不適用，該技術特別適用於僅少數障礙物的大型開放區域-面積在 100 ft²(10 m²)以上。

● 17.9.4 混凝土剝落機(concrete spaller)

太平洋西北國家實驗室(Pacific Northwest National laboratory)的混凝土剝落器是一種手持式工具，能針對平坦或微彎曲混凝土表面進行除污處理，獲取混凝土樣本並將污染從混凝土裂縫深處移除，該混凝土剝落器包括一個 9 噸的液壓圓桶及剝除鑽頭，由液壓泵驅動的鑽頭會在混凝土內預鑽的孔膨脹，最後將掉落在附屬金屬側板的混凝土塊移除，混凝土剝落器比傳統工具(例如手持式氣動粗琢(pneumatic scabblers)及除銹器(scaler))的效率更高，例如，剝落器的剝除能力為 0.23 ft²/min(1.3m²/hr)，而粗琢(scabblers)的剝除底限為 0.20 ft²/min(1.1 m²/hr)，除銹器(scaler)的剝除深度為 1/8 in(0.3 cm)，剝落機亦能比傳統工具更深入移除混凝土。

在最理想的條件下，剝落機的操作成本會比粗琢(scabblers)及除銹器(scaler)低 22%，且相對容易操作，振動幅度也較小，但以移除厚度約 3 mm 的情況，其比金剛石研磨機更重且速度更慢，但能更快清除更多混凝土厚度，就生成的二次廢棄物而言，其混凝土粉塵量極少，但會產生大塊的廢棄物(受污染的混凝土)，必須控制預鑽孔中的灰塵，其性能值為 13.6 ft²/hr，可移除表面深度超過 1/8 in。

● 17.9.5 電動液壓粗琢(electro-hydraulic scabbling)

混凝土電動液壓粗琢是一種快速、可控制的方法，能移除受污染混凝土的表層，卻產生最少的二次廢棄物，該設備向混凝土表面傳遞強力震波，這是由兩個電極間的脈衝高壓放電產生的，水力震波藉由排水通道與混凝土之間的水來傳播，導致混凝土破裂及剝落，藉由改變脈衝能量、形狀及電極位置可控制剝除深度，水不僅能有效地傳遞能量，還可以作為碎屑護圈及傳輸介質，與傳統的高壓水噴射技術相比，耗水量要低得多。

電動液壓粗琢技術可用於嚴重污染的地面、牆壁或天花板，其優點包括：按規定需處置的廢棄物數量能減少、與此類技術相關的健康及環境危害能降低，因降低能源消耗、具較高的處理速率、對作業人員的要求較少等所節省的成本，以及更低的混合廢棄物處置成本。

- **17.9.6 重型旋轉砂輪(heavy duty roto peen)**

這種創新的技術是採用重型旋轉砂輪片來移除混凝土地板上的混凝土與塗料，砂輪片可以安裝在 EDCO CPM-4 型的地板單元上，該系統還能進階配備鉛探測器，如偵測到真空度降到安全臨界值以下，該系統會切斷混凝土鉋除機的電源，在柔性的砂輪片上的專用碳化鎢(tungsten carbide)珠粒(shot)，藉由其在受污染表面旋轉，機械式的破壞塗層，這些被移除的顆粒，接下來會被同步收集到具有 HEPA 過濾真空吸塵器的滾筒內，混凝土刨刀的切割寬度為 5.5 in (14 cm)，EDCO 還能提供更大的單元。

旋轉砂輪技術能在樓地板面積約 500 ft²(46.5 m²)的範圍，以約 71 ft²/人(6.6 m²/人)的速度，均勻的移除一層混凝土及塗料。其中一個例子的情況，是原本 6 個受污染的位置，在移除該層後，其中的 5 個均處於或低於背景值，而第 6 個位置的污染也已從 70,000 dpm/100cm² 減少到 16,000 dpm/100cm²，移除深度約為 1/16 in，旋轉砂輪拋光的表面外觀均勻，在示範過程中產生了約 2.1 ft³(0.06 m³)的粉末狀混凝土及打印碎片形式的廢棄物，由於專用珠粒的緣故，故只有從地板上清除的部份才會進入廢棄物流，真空系統足以容納產生的灰塵；調查髒污處也未顯示任何可移除的污染物。

- **17.9.7 研磨除污(Milling decontamination)**

Pentek 研磨技術(milling technology)是一種移除污染塗層的方法，適用範圍包含地板、牆壁、天花及結構組件上的混凝土與鋼材，該系統使用具有局部排氣功能的手持式旋轉噴頭除銹器(hand-held roto peen scaler)，並配備 3MTM 重型旋轉砂輪片，每個都裝有堅硬的碳化鎢銑刀，並安裝在旋轉的輪轂(hub)上，旋轉式刮刀在清除碎屑的同時，亦被同步收集在 VAC-PACR 這個高性能 HEPA 真空/滾筒系統中。

- **17.9.8 遠端乾冰噴砂系統(Remote dry ice blasting system)**

建築物內的混凝土表面污染是核設施中最嚴重的問題之一，其污染通常源自於洩漏及溢流，是由各種放射性核種、重金屬及有機沈積物共同構成，需要採用新技術移除混凝土的表面污染，以便建築物可以重複使用，或是若要拆除，能允許將大多數混凝土當作無危害、非放射性的廢棄物來處置。

ROVCO2 這種合併式系統，是以非核能用途的 ANDROS 遙控六輪車的設計為基礎，其整合了兩種已驗證的技術：遙控車(ROV)及乾冰(CO₂)噴砂系統，該車運輸所有車載的子系統並提供動力，包括 CO₂ XY 正交末端操作裝置(COYOTEE)、低溫乾冰噴砂系統，及真空/過濾/包封子系統，COYOTEE 利用一種裝有低溫噴射頭的特殊設計真空容器工作罩，能涵蓋矩形作業區內的每個點，由於 ROVCO2 使用的是 CO₂ 氣體，可排除噴砂技術所產生的廢棄物，此外，由於該系統採用遠端操作，故降低了個人防護規定及工人暴露風險。

- **17.9.9 遙控粗琢 (Remotely Operated Scabbling)**

MOOSE 是 Pentek 的遙控粗琢技術，目的在劃破大型的混凝土地板及樓板，該刮刀(Scabblor)主要包括三個子系統：剷除頭組件、車載 HEPA 真空系統以及六輪底盤，它的刀頭裝有 7 個獨立的往復式碳化鎢尖鑽頭，並利用壓縮空氣驅動活塞，以兩段式正壓過濾 HEPA 真空系統收集灰塵及碎屑，並直接將廢棄物放到 23 加侖(87.1 升)的廢料桶，獨立的防滑轉向裝置讓該裝置能圍繞中心旋轉 360 度，並能在 6 in 的牆壁範圍內進行粗琢作業。

在一項案例中，MOOSE 成功地在樓地板面積 618 ft^2 (57.4 m^2) 的範圍，移除了 $1/8 \text{ in}$ (0.3 cm) 標稱混凝土，兩個人使用的生產效率為 $130 \text{ ft}^2/\text{hr}$ ($12 \text{ m}^2/\text{hr}$)，利用 50 ft (15.2 m) 的電源及控制繫繩進行遠端操作，因為操作員與控制面板能夠位於作業區外，故操作員毋需個人防護設備即可進行工作，若受限於樓地板的形狀，則必須要有第 2 個操作員留在作業區內，才能就近管理繫繩及空氣軟管，MOOSE 已被證實是極具機動性且易於操作，該區域在除污前，放射性污染包括熱點的固定 beta/gamma 值為 $1,000 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2 \sim 105,000 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$ ，除污後，除了 1 個熱點外，其餘均降低到 $3500 \text{ dpm}/100 \text{ cm}^2$ 。

● 17.9.10 軟性介質噴砂(Soft Media Blast Cleaning)

軟性介質噴砂是從高壓水清洗系統演變而來，由氣動推進軟性介質撞擊表面的動能，提供其移除表面污染物的機制，具有高輸送速度的軟性噴射介質，會以高能量撞擊表面，但由於其結構柔軟，僅輕微反彈，在撞擊時，柔軟的介質會吸收並捕獲污染物，且將其帶離基材，以便於處置，軟性介質噴砂似乎適合作為濃縮鈾處理過程殘留物的清潔技術，實現此目標的主要障礙，是系統在操作過程中的噪聲問題(測量值為 110 dBA)。

● 17.9.11 蒸汽真空清潔(Steam Vacuum Cleaning)

Kelly Decon 系統是從高壓水清洗系統演變而來，除污機制是在污染表面噴撒加壓過的熱水流，Kelly 系統與原系統的差異在於：其提供超高溫(高達 $300^\circ\text{F} = 149^\circ\text{C}$)且加壓過($250 \text{ psi} = 175,765 \text{ kg}/\text{m}^2$)的水流，流量可能介於 $0.4 \sim 2.0 \text{ gpm}$ ($1.5 \sim 7.6 \text{ L}/\text{min}$) 間，但關鍵的不同在於，該系統的多數清洗頭(用來向表面噴水的工具)與真空罩及回水管整合成一體，以獲取並控制蒸汽、水滴，以及水噴撒後衝擊表面所產生的移除污染物。

Kelly 系統主要應用在房間、游泳池、牆壁、大型組件及/或與光滑表面有關的類似應用，該系統的優勢在於，其大多數清潔頭都具有清潔介質的真空收集功能，應在合適的平面上使用(例如，與清潔頭設計相容的大型平面)，才能發揮這些清潔頭的功效，值得注意的是，即使相對平坦的桶槽斷片，也無法完全與 Kelly 系統相容，這些切割下來的組件，可能有很多殘留的焊接點，使設計用在平坦表面的清潔頭，在使用上受到干擾。

● 17.9.12 噴射水 (Water Blasting)

噴射水的基本設備包括高壓泵、液體輸送管及用於形成受控水柱，以將其撞擊到受污染表面上的噴嘴，該噴嘴通常會連接到某些類型的竿子上，以便控制並引導水流，受污染設施可能經常帶入噴射水設備來作表面與設備的清潔，此外，噴射水設備通常安裝在固定的基礎設施內，用來處理及淨化小型設備及被帶去除污設施的可拆卸組件，該區域可能配有集水坑、窗簾及其他用以減少污染擴散的設備並收集殘留物。

用來噴射的加壓水會有一些危險性，高能量的水流可能致命，且高壓沖洗的工安事故會造成死亡，操作人員培訓是不可或缺的，防護服的最低要求應包含護目鏡、聽力保護器及手套，但其規定必須與潛在的危害相稱，噴射水能有效移除附著在一般表面上的鬆散污染物，通常，噴嘴必須與除污表面保持幾英寸的距離才會有效，且不易消除裂縫、縫隙或障礙物後面的污染，“視線”應用無法輕鬆清除障礙物或障礙物後面，噴射水最適合用在接近臨近區的“視線”應用，對於規則的且易於接近的表面，其生產率約為 $100 \text{ ft}^2/\text{h}$ 。

● 17.10 其它技術

除了化學與機械除污技術外，也有依賴其他原理的技術，以下技術經證實已被成功應用，或可列入考慮。

● 17.10.1 電動除污(Electrokinetic Decontamination)

ISOTRON 開發出一種電動技術，用於現場移除多孔混凝土中的污染物，其提供了一種可替代粗琢(scabbling)或物理磨耗(physical abrasion)的方法，這種為混凝土表面進行電動除污而開發的技術，是施加電場以誘導離子污染物從多孔混凝土內部遷移到除污單元中，系統組件包括專用的表面電動抽取概念襯墊、電解液及電極，電解液包含各種錯合劑及其他物質，以促進各種特定污染物形成可溶性離子錯合物，電解液經由襯墊與混凝土表面接觸，襯墊是類似織物或地毯的材料，能將電解液中的部份污染物移除並限制溶液的流量，所有污染物都收集在電解液及/或在襯墊內，這兩種都可經由常見的技術進行處理及處置，目前在評估系統的現有替代配置，以增強從混凝土中移除特定污染物的能力。

電動除污技術提供混凝土現場除污的替代方案，因而消除了混凝土的物理或機械性受損，讓結構或設施得以再利用，該技術產生極少的二次廢棄物，且不會產生傳統剷除或物理磨耗常見的空氣污染顆粒物，此外，與常見的系統相比，該磨削技術能移除深入擴散到混凝土中的污染物。

● 17.10.2 雷射削磨(Laser Ablation)

多年來，隨著建築物及設備表面受到鈾或其他放射性物質的粉塵或溢出物污染，或被PCBS等有害物質污染，利用現場塗上油漆，及在某些情況下使用可剝塗層，能讓表面污染得以穩定，早期多使用鉛基塗料，近年來則用烴基(hydrocarbon-based)及乳膠塗料(latex paints)進行固定，許多設施都重新粉刷多次，因此各個位置的塗層厚度及類型可能會有所不同。

工業用雷射能控制金屬及混凝土表面的塗層剝蝕(ablate)，雷射是結合適當的波長、脈衝持續時間、能量、對目標的功率密度、脈衝重複頻率及掃描速率，不僅可有效地清除表面及表面孔隙中的塗層物質，且剝蝕材料的速度比熱波(thermal wave)傳播到基材更快，以防止熔融基材夾帶表面污染並留下冷卻表面，該特性亦可避免對基材造成損壞，也減少污染物的潛在揮發，氣體、蒸氣及顆粒抽取裝置會收集被剝蝕下來的物質，在過濾階段，真空系統會吸入剝蝕所夾帶的空氣及氣體、蒸氣與顆粒物。

● 17.11 小結

為各項作業選擇適當技術的人，應該就是在除污方法與技術方面有豐富運用經驗的人，所謂的除污工程師，並不是獲得學院或大學學位，而是與他人共同參與這個過程或技術，來獲得這個領域的相關經驗。關鍵公差可能因不當使用而受損，或因腐蝕或磨蝕機制而受到破壞，如果運用不當，某些技術所產生的污染物質，可能遠高於該過程所能清潔的量。

二次廢棄物的產生，取決於所選用的方法或技術，亦將影響該方法的整體成本，應特別留意各種溶劑使用後所產生的混合性廢棄物(兼具毒性及放射性)，必須確認除污過程中所移除的成份為何，若一旦產生混合性廢棄物時，才能給予適當的包裝及處理。

除污具成本效益嗎？一旦除污目標經過評估，所選用的方法或技術即要達成該目標，於此之外的任何額外作業，都可能不符合成本效益，選用除污方法的主要因素是設備費用，初期應選擇執行作業者具備的設備且累積最多經驗的方法。對於非最佳選擇的技術，若對現場設備及人員經驗有好處，亦應予以考慮。

附錄 1-4 ： 子項計畫 1-3 英文專有名詞縮寫一覽表

英文縮寫	英文全名	中文翻譯
DF	Decontamination Factor	除污因子
ODE	Occupational Dose Equivalent	職業等效劑量
ES&H	Environmental, Safety and Health	環境、安全與健康
QA	Quality Assurance	品質保證
QC	Quality Control	品質控制
ALARA	As Low As Reasonably Achievable	合理抑低
HEPA	High-Efficiency Particulate Air	高效濾網
LOMI	Low Oxidation state Metal Ion	低氧化態金屬離子
DFD	Decontamination For Decommissioning	除役用除污技術
EPRI	Electric Power Research Institute	美國電力研究所
OKG	Oskarshamns Kraftgrupp	瑞典 Oskarshamn 核電廠
SSM	Swedish Radiation Safety Authority	瑞典輻射安全局
SKB	Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co	瑞典核燃料和廢棄物管理公司
VLLW	Very low-level Waste	極低放廢棄物
LLW	Low-Level Waste	低放廢棄物
ILW	Intermediate-Level waste	中放廢棄物
HLW	Higher-Level Waste (HLW)	高放廢棄物
ICRP	The International Commission on Radiological Protection	國際放射防護委員會
DAWN	Dual Arm Work Module	雙臂工作模組
ANL	Argonne National Laboratory	阿貢國家實驗室
D&D	Decontamination and Decommissioning	淨化與除役
KRR-1	Korea Research Reactor-1	韓國研究反應器
HAZOP	hazards and operability	危害與可操作性
MZFR	Multi-Purpose Research Reactor	多功能研究反應器
HRTM	Human Respiratory Tract Model	人類呼吸道模型
MMAD	Mass Median Aerodynamic Diameter	質量中數氣動粒徑
AMAD	Activity Median Aerodynamic Diameter	活性中數氣動粒徑
ET	extrathoracic	胸外
BB	bronchial tube	支氣管
bb	bronchiole	小支氣管
IMIE	individual monitoring of the internal exposure	內部暴露的個體監測
LUDEP	lung dose evaluation program	肺部劑量評估程序
IMBA	integrated modules for bioassay analysis	用於生物測定分析的集成模組
BiDAS	bioassay data analysis software	生物測定數據分析軟件

RRV	Remote Reconnaissance vehicle	遠端偵察車
3D-CAD	3-dimensional computer aided design system	3 維計算機輔助設計系統
VR	virtual reality system	虛擬實境系統
DEXUS	Decommissioning Engineering Support system	除役工程系統
NPS	Nuclear Power Station	核電站
COSMARD	Computer Systems for Planning and Management of Reactor Decommissioning	除役規劃和管理計算機系統
JAERI	Japan Atomic Energy Research Institute	日本原子能研究所
VEs	Virtual Environments	虛擬環境
APP	Atomic Power Plant APP	原子能發電廠
WH	working hours per day of the person engaged in the decontamination work (h)	從事淨化工作的人員每天的工作時間(h)
WH ⁱ	working hours per day at the workplace of the person expected to have the highest exposure dose, among persons engaged in the decontamination work at a location near each measurement point (h)	在每個測量點附近位置從事淨化工作的人員中，預期有最高暴露劑量的人員每天的工作時間
B ⁱ	ambient dose rate at each measurement point	每個測量點的環境劑量率
HEDPA	hydroxyethylidenediphosphonic	羥基乙二磷酸
EDTA	ethylenediaminetetraacetic	乙二氨基四乙酸
LL-SL RW	low-level short-lived radioactive waste	低水平短壽命放射性廢物
RW	Radioactive waste	放射性廢物
RWDF	Radioactive waste disposal facilities	放射性廢物處置設施
RS	Radioactive Substances	放射性物質

四、研究結果及管制相關建議

本分項計畫研討並摘要美國國家環境保護局(U.S. EPA)所出版之“Technology Reference Guide for Radiologically Contaminated Surface”報告；評析並摘要美國機械工程師學會(ASME)出版的Decommissioning Handbook 之 Ch.17 “Decontamination” 和 Ch.13 “Decontamination Decisions and Process”，並探討各國核電廠除役過程所應用之非化學除污技術原理和優劣，針對機械、熔融、生物、複合方式等除污技術，進行彙整與分析。同時針對以上之工作事項與除污技術，蒐集應用於國際核電廠除役除污相關的最新案例。經彙整本分項計畫研究成果，針對除污技術考量、廢棄物處理及有關環境、安全、健康的觀點，提供相關注意事項及管制建議，作為後續進行除污管制作業之參考依據並強化管制能量，以下彙整各子項研究成果對管制單位之建議。

(一) 除污技術考量注意事項

1.1 化學除污技術

本計畫以美國 US EPA 的 EPA-402-R-06-003[1, p.95]報告為主，對相對成熟且經過美國能源部 US DOE 測試驗證的化學與物理除污做一系列的彙整摘要。**錯誤！找不到參照來源。**以操作需求端的角度，對報告所介紹的 5 種化學除污技術作分類，並列出該選項下對應的成本比較與特殊限制作為參考。此類技術適用於金屬表面但不適合用於多孔隙的混凝土表面。

表 1.1.36 依操作需求分類適用之化學除污技術與其成本與限制考量

除污原理	操作需求	合適技術、成本比較與技術特殊限制
化學	易於修改成分以除污	螯合劑與有機酸膠(成本較低，需較高化學專業知識) 化學泡沫與凝膠(成本依所加入的除污劑為主) 氧化還原劑(成本較高，無適合化學作用則無效) TechXtract (成本無法與其他技術一起比較)
	安全性高	螯合劑與有機酸膠(成本較低，需較高化學專業知識) 化學泡沫與凝膠(成本依所加入的除污劑為主)
	去除附著性強的污染物	強無機酸(成本較高、可能會破壞底層金屬) 氧化還原劑(成本較高，無適合化學作用則無效)
	相對成熟技術	強無機酸(成本較高、可能會破壞底層金屬)
	除污較隱匿的區域	化學泡沫與凝膠(成本依所加入的除污劑為主)
	適用小面積物件	TechXtract (成本無法與其他技術一起比較)

US EPA 之報告在介紹強無機酸技術(本報告 2.2 節, p.30)時即已強調由於已有多種針對核電廠除污的特定技術，目前核能工業界已鮮少使用強酸執行除污，因此該類方法應可被視為過時技術，除非有特定、需強烈除污物件至底層金屬程度時再做考量。當今通用的化學除污技術多為混合氧化還原劑與螯合劑的複合專業技術如 LOMI、NITROX、DfD、CANDEREM、CORD，可藉由利用氧化反應溶解表面金屬氧化層並調變金屬離子氧化態來增加其溶解度，再使用螯合劑牢固附著放射性金屬離子(相應之還原反應)與利用陽離子交換樹脂去除放射性金屬離子達成除污。因此，此類複合式的化學除污技術可作為我國選用化學除污技術的主要考量對象。US EPA 報告所介紹之 TechXtract 技術應較適用於鉛磚等小型物件的除污，可視其為較特殊需求下的除污技術。

1.2 物理除污技術

而依操作需求，**錯誤！找不到參照來源。**分類彙整此報告介紹的 14 種物理除污技術，並以此作分類列出該技術的成本比較(分為高、較高、較低、低四等)與特殊限制作為參考。此類技術適用於除污混凝土表面，僅高壓水噴射、軟性介質噴砂、蒸氣真空清潔較適合除污金屬表面。其中離心噴砂、蒸氣真空清潔、活塞粗琢、混凝土刨除機屬於較成熟、適用大面積除污的技術。可剝塗層、混凝土研磨機適合小面積除污。電動液壓粗琢與離心噴砂為成熟且可進行較深層的除污(至一英吋深度)的技術。高壓水噴射與混凝土研磨機適合較複雜表面的除污，但高壓水噴射會產生大量二次廢水為其重要限制。軟性介質噴砂適用於管道和儲罐的除污，但會有大量空氣微粒污染的顧慮。En-vac 機器人牆壁粗琢與活塞粗琢可執行遠程控制，有利於較高輻射劑量區域的除污。乾式真空吸塵可用於其他研磨機、噴砂、粗琢、刨除機等技術除污後的再次表面清潔以去除鬆散碎屑。乾冰噴砂為較新穎的技術，其可快速有效除污淺層表面，然而成本因其乾冰產製設備而增高，顆粒的低溫特性也可能使除污後的材質表面碎裂，若在封閉環境使用也有人員缺氧的安全風險(參閱計畫二 2.7 節之應用實例)。而混凝土剝落機為較不成熟的技術因此建議不列入考量。

表 1.1. 37 依操作需求分類適用之物理除污技術與其成本與限制考量

除污原理	操作需求	合適技術、成本比較與技術特殊限制
物理	適用大面積區域	離心噴砂(成本高) 混凝土剝落機(成本較高、留下粗糙表面、市售可獲性低) 蒸氣真空清潔(成本較高、不適用複雜表面、蒸汽高溫可破壞表面) 活塞粗琢(成本較低、運作吵雜) 高壓水噴射(成本低、大量二次廢水) 混凝土刨除機(成本低)
	適用小面積區域	可剝塗層(成本較低)、混凝土研磨機(成本低)
	去除深度污染	離心噴砂(成本高) 電動液壓粗琢(成本較高,產生二次廢液) 凝土剝落機(成本較高、留下粗糙表面、市售可獲性低)
	快速去除淺層表面污染	可剝塗層(成本較低)、乾冰噴砂(成本較高，低溫可能使表面脆裂、高安全要求)
	產生振動小	混凝土剝落機(大面積、成本較高、留下粗糙表面、市售可獲性低) 混凝土研磨機(小面積、成本低)
	遠程操作	En-vac 機器人牆壁粗琢與噴砂處理合用)(成本高) 活塞粗琢(成本較低、運作吵雜)
	適用於管道和儲罐	軟性介質噴砂(成本低、空氣污染高)
	較複雜或難以接近的表面	高壓水噴射(成本低、大量二次廢水) 混凝土研磨機(成本低) En-vac 機器人牆壁粗琢(成本高)
	無二次廢液	可剝塗層、各式噴砂處理、研磨機、刨除機、剝落機、活塞粗琢
	與其他物理除污技術配合	乾式真空吸塵(成本低、僅適用於鬆散顆粒)
	非多孔或金屬表面	高壓水噴射(成本低、大量二次廢水)、 軟性介質噴砂(成本低、空氣污染高) 蒸氣真空清潔(成本較高、不適用複雜表面、蒸汽高溫可破壞表面)

1.3 化學與物理除污技術比較

待除污表面的多孔隙性質與否為主要決定適用化學或物理除污的材質特性。化學技術多用於非多孔隙的金屬表面除污而物理除污多適用於多孔隙的混凝土表面除污(僅高壓水噴射、軟性介質噴砂與蒸氣真空清潔適用非多孔材質)。而由於化學溶液可藉由噴灑、浸泡或沖洗執行除污，因此化學除污技術適用於除污裂縫、接合點、管線、內部/隱藏空間等具有複雜幾何表面的物體。相比物理除污技術多適用大面積、不受阻礙的表面除污(僅高壓水噴射、混凝土研磨機適用較複雜表面之除污)。依多項操作需求要點，表 1.1. 38 比較化學與物理除污技術之適用性與特性。

表 1.1. 39 化學與物理除污技術特性比較

需求要點	化學除污技術	物理除污技術
表面材質	• 適用非多孔隙的金屬表面 • 無適合化學作用則無效	• 適用多孔隙的混凝土表面 • 高壓水噴射、軟性介質噴砂與蒸氣真空清潔可用於非多孔材質
表面幾何	• 適用除污具複雜幾何表面的組件與管件	• 多適用大面積、不受阻礙的平坦表面 • 高壓水噴射、混凝土研磨機、En-vac 機器人牆壁粗琢可用於較複雜表面
除污後表面	• 強酸可侵蝕至底層，其餘除污技術不至嚴重損傷物件表面	• 表面去除技術(噴砂、研磨、剝落、刨除、粗琢)多破壞表面，不適和用於除污後需再次使用的設備 • 表面清潔技術(吸塵、水噴射、真空清潔)表面仍可保持完好無損 • 乾冰噴砂可能使除污後表面碎裂
放射性核種選擇性	• 可有選擇性	• 無選擇性
深入基材內部除污	• 較不適用並可能促使污染物移至表面下更深之處而更難清除	• 離心噴砂、電動液壓粗琢與凝土剝落機可用於去除較深度的混凝土污染
主要廢棄物	• 多產生液體廢棄物，需相應的中和、離子交換、沈澱、過濾等廢棄物處理	• 噴砂、研磨、剝落、刨除、粗琢等磨損表面的物理除污多產生粉塵和碎屑 • 需移除較深的表面材質或使用較多磨損介質時廢棄物可能多於化學除污 • 可剝塗層為固化廢棄物 • 高壓水噴射產生較多廢液
廢棄物管理要點	• 可能增加除污後的下游污染、設備交互污染，以及發生施工意外時的環境污染風險	• 噴砂、研磨、剝落、刨除、粗琢等技術需防範微粒造成的空氣(傳播)污染 • 去除的表面物質材料可直接收集並送至廢棄物處理
人員訓練	• 通常需要高度的化學專業知識	• 操作訓練較為簡單
操作安全	• 強酸、強氧化劑、或是除污過程中產生之氫氣可導致操作安全顧慮	• 物理磨損產生的微粒易逸散至空氣中，須搭配吸塵與過濾裝置，人員須配帶呼吸防護裝置。 • 離心噴砂中溢出的鋼粒也可能造成危害 • 乾冰噴砂可能造成人員缺氧

1.4 除污技術考量

考慮使用除污技術的主要原因有二，一是從組件或是設備中去除污染物，以降低設施的劑量程度，後續可以較為容易接近設施，可以採用手動技術進行拆卸，可以不必使用昂貴的機械人或是機械手臂。

另一個原因是有效降低組件或是設備的污染，可以更經濟的進行放射性廢棄物處置與處置類型，甚至免除管制。

除役選擇的除污方法為了能夠以某種破壞性技術來達到被除污物件可達釋出的標準，不同於電廠維護或是實驗室測試，需要能夠工業化(Industrialization)。通常除役過程會產生大量的污染物質，除污技術通常不會採用勞力密集或是難以處理，以及採用自動化時會遇到困難的技術。另外，選擇除污技術的因素也包含二次廢棄物的產生與除污過程中回收產品的可能性。可以有效達到將殘留污染水平降至外釋標準是主要的影響因素。即使有些技術可以針對複雜的幾何形狀(如彎管、小尺寸管路)進行除污，有些區域可能無法接近而進行直接測量以確認達到外釋標準。

除污技術由過去用於維護的目的轉而作為除役用，正處在過渡時期，對於能夠滿足外釋標準可用技術的除污效率，從除役中可獲得的數據有限，在大部分的情況中，是採用漸進式的方式來滿足外釋標準，並非所有的技術與方法都具有將污染降至要求的外釋標準的可能性。因此，在有些情況下，除污是在不同階段進行，最後的步驟在於能達到所訂定的目標。

基於上述的考量，進行系統/組件的除污技術選擇時需考量下列的要求：

- (1) 安全性：不能因為在實施的過程中形成的放射物懸浮微粒或是粉塵的吸入或是工作者的外部污染而導致輻射危害增加。也應避免增加其他的危害，如化學或是電氣等。
- (2) 效率：採用的方法應能將待除污物件表面的放射性去除到一定水平，能夠以手動進行不須採用機器人，或是可以進行再回收/再利用，或者可以降低放射物廢棄物處理與處置類別。
- (3) 成本效益：設備應能被除污與維修以備重複使用。無論如何，此方法的成本不應超過廢棄物處理與處置成本。
- (4) 廢棄物最小化：採用的方法不應產生大量的二次廢棄物，對其處理與處置將導致人員與成本的過度需求，從而導致額外的曝露。
- (5) 工業化的可行性：由於除役會產生大量的污染物件，採用的方法不應屬於勞力密集、難以處理，或是難以自動化。

從目前核電廠除役資料可以了解，為了大幅度降低人員的曝露，在拆除之前進行全系統除污(Full System Decontamination, FSD)是一可行的方法，主要採用的方式為化學除污，像是 AREVA 的 CORD(Cheical Oxidation Reduction Decontamination)技術或是 EPRI 的 DFD(Decontamination For Decommissioning)技術，已有多個除役電廠進行 FSD 的實例。雖有美國 Rancho Seco 電廠選擇未進行 FSD，但因其停機後至拆除的期間已超過十年以上，因經費考量而未進行。目前已進行除役的電廠(美國與日本等)，針對 FSD 的除污區域主要都是反應器冷卻系統與調壓槽、化學與體控制系統、餘熱移除系統或是爐水淨化系統等，少數電廠包含壓力槽(如濱岡電廠)。FSD 主要目的為降低人員劑量，以利後續拆除作業的進行，用以去除管路沉積的含放射性的腐蝕淤泥(crud)，實際進行 FSD 的電廠，主要移除的放射性核種占比最高的為鈷 60。因此，選擇進行 FSD 與否，或是那些區域要進行 FSD，應先進行各類設備的污染程度評估，考慮空間劑量對後續拆除上的困難度，可能對於工作人員造成的曝露劑量後才決定是否進行 FSD 與除污區域。

拆除之後的組件除污方式，商業化的技術則是以化學除污與機械除污為主。其中化學除污是以化學浸沒式為主，包含四價銻離子除污與磷酸(可配合電場輔助)除污為主，此兩種方法化學品可以透過回收再利用，降低二次廢棄物的生成。化學除污要考慮使用後液體廢棄物的處理，會有額外的處理成本，也應符合化學品管制的要求。如採用電化學除污，要注意符合電氣相關規定。

商業化機械除污的部分則是以噴砂除污與高壓水柱除污為主，這兩項技術因在傳統工業的應用廣泛且技術成熟，可以提供很高的除污因子，持續操作的時間愈長，破壞性就愈大。有些機械除污技術需考慮通風系統、粉塵收集問題與人員防護，如乾式噴砂清除、研磨、加工、刨削等，設置相關的圍阻設備以保護工作人員並防止污染擴散。以噴砂技術與高壓水柱而言，應考慮研磨料的回收與水的循環使用，以降低二次廢棄物的產生。另外，在噴砂除污的過程中可能會有靜電的影響，待除污物件與設備本身均應考慮接地。

熔融除污通常是除污最後一個步驟，歐洲有些電廠則採用這項技術，當有些金屬無法完全除污，後續會送至熔煉設施進行熔融，作為再回收或是再利用，在熔融過程中產生的鑄錠、爐渣與濾塵，其中放射性核種重新分佈，也簡化了放射性物質監測程序。依廢棄物金屬中放射性物質含量而定，決定可外釋或是有條件再利用。

1.5 除污決策

化學除污會產生難以處置的二次廢棄物，還包括過程中所使用的任何設備及結構，要明確考慮的項目包括[2, p.197]：保留足夠的放射性衰減時間、現場的屏蔽與固定、避免切割，並使用機器人技術及其他遠端處理技術。

外部輻射劑量率過高時，將存在曝露問題，此時應謹慎考慮將機器人應用於遠端切割、拆卸、剷除及包裝，高輻射場經常要求採用機器人及其他遠端處理與拆除技術。

延遲一段時間使放射性得以衰減，是使用化學除污以外，能限制職業劑量的合理替代方案，在除役區域中，當外部輻射劑量來自於相對大量的伽馬放射性同位素時，這方式特別適用。

除污決策應謹記下列 9 個要點[2, p.197]：

- (1) 經由實際除污所獲取的除污因子(DF)，應與職業等效劑量(ODE)減少因子相互比較，並作仔細評估。
- (2) 無論是多個系統、單一系統或是單一系統的局部，都可以進行除污，但應慎選除污的範圍及順序，以獲取最大效益。
- (3) 若以石棉或其它有害物質作為管線或組件的絕緣材料，拆除時因為需要呼吸防護及其他人員防護設備，工時將大為增加，對於這類情況，進行組件的內部除污，或許可節省大量的等效劑量。
- (4) 在工作區切割組件，可能形成空浮放射性，但若能成功除污，則或許能修改人員的防護規定，工作人員可避免使用先前所要求的呼吸防護裝置。
- (5) 在拆除期間，無論該區是否受到污染，均應考量其它的劑量降低技術，例如屏蔽或高輻射點沖刷(hot spot flushing)。
- (6) 在除役期間，必須解決既有系統在此時所需提供的流徑及流率能力，透過危害評估可能會對現有管道、泵及其他設備進行改造，並發展出新的管制項目。
- (7) 應規劃除役作業的順序，才能先清出一條外部劑量率相對較低的通道，讓其他區域收集而來的組件與廢棄物容器，可立即且快速地經由該通道移至運輸區域。
- (8) 關於表面及潛在的空浮污染，則應謹慎規劃除污作業，避免已除污的區域，被鄰近區域後續的作業再次污染。
- (9) 可利用商用軟體(具不同程度的複雜性)模擬電廠的物理及放射線分佈，如此能合理且有效地排定工序及安排作業人員，將可能的輻射曝露降到最低。

根據西屋公司在除役及廢棄物處理方面的經驗，認為核電廠除役策略性規劃的最佳作法，重點如下：

- (1) 制定除役計劃及策略。
- (2) 優化除役計劃，並盡可能減少廢棄物量及相關的處理成本。
- (3) 規劃技術策略，以便在進行除役及拆除作業時，能充分利用電廠空間。
- (4) 利用 3-D 建模優化除役策略。
- (5) 在計畫開始時，即對一次側迴路進行全系統化學除污，以利後續採用手持工具進行拆除作業，並降低廢棄物處理成本。
- (6) 使用專用的廢棄物處理系統以進一步減少廢棄物量，尤其是高放射性元素。
- (7) 針對除役設置移動式廢棄物處理設備，並進一步在其他電廠重複使用。

有許多重要的因素會影響電廠拆除的最佳技術策略[2, p.197]，其中包括評估及規劃出最有效率地運用電廠可用空間來進行拆除作業，以便每項作業都在預期進度下有效地執行，包括決定作業是要依序或是同時進行，以及每個作業的順序，電廠的放射性特徵及與主要組件除污的相關決定，將影響電廠空間要如何安排平行作業、屏蔽、移動，及所需的工具與人員。

某些策略在電廠除役中已得到認可，在電廠拆除順序方面，應在其仍在運轉時就進行廠址及反應器的初步表徵，在大修後應立即對反應器壓力槽及其內部組件進行劑量分析，通常會建議移除燃料後首要執行的作業之一，是對一次側迴路進行全系統化學除污，使控制區內的劑量更低，讓拆除作業能更簡單快速，一旦完成化學除污，則反應器內部組件及反應器壓力槽的移除步驟，預計將成為該計畫關鍵路徑的一部分。

而某些技術若運用不當，所產生的污染物質，可能遠高於該過程所能清潔的量。選用除污方法的主要因素是設備費用，初期應選擇執行作業者具備的設備且累積最多經驗的方法。對於非最佳選擇的技術，若對現場設備及人員經驗有好處，亦應予以考慮。

(二) 廢棄物處理考量注意事項

LOMI 技術的其中一項缺點[2, p.197]，是必須移除大量的樹脂，這是其他除污技術沒有的樹脂負擔。

藉由除污或其他特定的處理方法，可以減少廢棄物的數量，並盡可能減少廢棄物的種類，從而減少處置成本。根據廢棄物類型，有多種方式可用來減少放射性廢棄物的數量[3, p.197]：

- (1) 熱處理(Thermal treatment)，包括焚化(incineration)、熱水解(pyrohydrolysis)、針對有機材料的電漿(plasma)處理及針對混合性廢棄物的電漿加熱(plasma heating)處理。
- (2) 將要處置的金屬，熔化成緊密結實的形狀。
- (3) 將固體廢棄物壓密，包括金屬、玻璃、塑膠、小型設備及工具、過濾器、可壓實的垃圾、木材、管道、污泥、瀝青及絕緣材料。

壓實是一種機械性的減容技術，在處理滾筒內將廢棄物壓實，過程中所能達到的減容量，是廢棄物包裝內空隙、施加壓力、材料堆積密度及其回彈特性的函數。壓實技術的優點包括：

- (1) 壓實是全世界核能產業中廣泛使用且成熟的技術。
- (2) 壓實系統簡單、可靠且安全。
- (3) 廢棄物壓實相對便宜。
- (4) 該技術易於操作。
- (5) 廢棄物密度增加能提升自我屏蔽。

依據實際執行經驗，超級壓實機(如圖 10 所示, p.168)能夠壓實傳統的邊緣可壓縮廢棄物(marginal-compactable waste)，減容因子可達 2~4，而對於一般的可壓縮性廢棄物，減容因子可達 6-7。

二次廢棄物的產生，取決於所選用的方法或技術[2, p.197]，亦將影響該方法的整體成本，應特別留意各種溶劑使用後所產生的混合性廢棄物(兼具毒性及放射性)，必須確認除污過程中所移除的成份為何，若一旦產生混合性廢棄物時，才能給予適當的包裝及處理。

西屋公司利用 3D 模擬技術，實際應用於瑞典 Barsebäck 核電廠[4, p.197]，使切割及包裝效果最佳化，讓原本預估使用 40 個廢棄物容器，減少到 32 個；該技術同樣應用於斯洛伐克 Bohunice V1 核電廠，有助於規劃廢棄物容器及切割程序。

(三) 環境、安全、健康等注意事項

採用噴射水進行機械式除污，其用來噴射的加壓水會有一些危險性，高能量的水流可能致命，且高壓沖洗的工安事故會造成死亡，操作人員培訓是不可或缺的，防護服的最低要求應包含護目鏡、聽力保護器及手套[2, p.197]。

過去的經驗證實，為除污工人及其主管與領班，提供實地操作訓練的必要性及好處，該訓練可能包含使用模型設施、盡可能提高除污物品及除污過程中所使用的方法與設備之擬真度，在進行這項培訓時，人員在操作過程中，應實際穿戴防污染衣[2, p.197]。

通常這種模型訓練，至少對負責計劃、工作進度，以及將設備與材料運往工作區的人有所幫助，亦有助於將要執行除污作業的工人及其上司與領班，這樣的訓練能確保作業的最高安全性、最佳效率並具最好的成本效益，其亦確保人員在符合法規要求下，能完成所需工作，且其輻射曝露維持在合理抑低(ALARA)水平[2, p.197]。

根據瑞典 Barsebäck 核電廠的組件切割案例[4, p.197]，採用遠端水下機械切割是最佳途徑，因該技術只會產生不溶性的副產品，且可利用簡易的收集設備輕鬆移除，產生的二次廢棄物量亦很少，該技術既安全且對人員的劑量較低，但規劃與進行複雜的切割及包裝作業時，應特別留意現場物流狀況。

而斯洛伐克 Bohunice V1 核電廠的拆除經驗[5, p.197]亦證實，針對高放射性的組件，採用遠端的水下切割及包裝作業，能保護操作員免受高輻射曝露；而對於已進行全系統化學除污的一次側管路(不包括反應器壓力槽及內部組件)，因放射性已降低到可接受的劑量率，則操作員能夠直接使用乾式切割法及手持式工具進行組件的拆解。

除污作業進行前，應留意以下重點[6, p.197]：

(1) 身體狀況

在開始進行除污操作之前，應對通風系統進行評估，以確保其能夠充分防止在除污過程中產生的空氣中顆粒物和氣體積聚。對反應器系統和系統組件進行評估，可以降低工人因洩漏、管道破裂與有害煙氣積累所帶來的風險。這些評估包括：

- a. 系統功能調查
- b. 評估電廠的配置
- c. 須努力使工人熟悉電廠系統的配置，欲除污組件的位置、照明系統、逃生路線和應急設備。

(2) 化學處理

在可能發生洩漏的區域工作的工人，應使用耐化學腐蝕、防水的衣服及呼吸防護裝置，以防化學藥品侵害。

(3) 設備處理

使用機械除污設備所伴隨的危險包括工作空間和入口與出口路線的減少、顆粒物的釋放、電擊，以及在操作重型設備和高壓設備時通常存在的其他危險。

- a. 訓練讓工人能夠正確的使用機械除污設備，以減少潛在的危險。
- b. 機械除污設備所伴隨的職業危害是工人疲勞，可以通過適當的人員配置和工作分配，最大程度地減少這種情況。

(4) 除污計劃和準備

a. 電廠的放射性和物理檢驗

- i. 調查應記錄整個電廠的輻射劑量率
- ii. 到低流量區域、死角
- iii. 紀錄電廠中的建築材料，以及照明或通風不良的區域。
- iv. 供工人使用的緊急出口路線

b. 反應器系統的改造

安裝反應器容器旁通管，並將主迴路分成較小迴路進行單獨除污，使反應器更易除污以降低工人的風險。

c. 除污培訓

- i. 熟悉電廠以及要除污的特定系統和組件
- ii. 熟悉進出路線以及高輻射區域的位置

(5) 從研究用反應器的除役經驗[12, p.197]，在拆除反應器爐心時，應注意下列相關事項：

- a. 在整個操作過程中，衛生物理人員必須出席
- b. 在控制區域內僅允許從事該項目所需的人員
- c. 穿戴適當的防護服、工作服、安全帽、安全鞋、橡膠手套
- d. 在控制區內工作的所有人員將獲得膠片徽章和個人輻射警報劑量計
- e. 反應器上的所有工人都必須繫上安全帶
- f. 提供處理評估和適當的起重工具
- g. 在開始工作前，由專業人員進行電氣隔離
- h. 所有操作將通過許可證進行控制

(四) 其它注意事項

為各項作業選擇適當技術的人，應該就是在除污方法與技術方面有豐富運用經驗的人，所謂的除污工程師，並不是獲得學院或大學學位，而是與他人共同參與這個過程或技術，來獲得這個領域的相關經驗[2, p.197]。

瑞典輻射安全局(SSM)的高級專家建議[18, p.198]，其他國家/地區的管制機構在準備進行拆卸及拆除時，應儘早與持照者進行對話，以澄清規定且有助於提出問題；而電廠若已進行了長時間的維護與保養，則在授權進行大規模拆卸及拆除作業前，應增加視察頻率，以確認是否滿足要求，包括基本要求。

行政院原子能委員會

委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

109 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析

子項計畫二-分項 1：

核電廠除役期間安全評估技術強化

案號：AEC10903011L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：許文勝

子項計畫二主持人：許文勝

報告作者：許文勝、楊融華、陳韶萱、林上智

報告日期：中華民國 109 年 12 月

摘要

本計畫透過蒐集國際文獻報告，以了解核電廠嚴重事故下鋁合金火災現象之發生與原因，並針對核一廠除役階段之用過燃料池鋁合金燃料護套進行溫升現象的探討，透過關鍵因子特性進行靈敏度解析，並且評估我國目前核一廠除役階段一號機用過燃料池於完全喪失冷卻水條件下，鋁合金護套由 30°C 溫升至 900°C 必須確保有超過 10 小時之時間餘裕。根據 NUREG-2157、NUREG-1738 等文獻結論顯示：「用過燃料池發生嚴重事故之風險非常小」，其中用過燃料池因為外電喪失所導致的用過燃料束未被液態水所包覆之意外發生率落在 1.1×10^{-7} 到 2.9×10^{-8} 之間，而因為嚴重的地震事件所造成的用過燃料束暴露在空氣中之機率則介於 5.8×10^{-7} 和 $2.4 \times 10^{-6}/\text{yr}$ 之間；NUREG-2157 文獻提到，隨著電廠機組停機後時間越久，即使用過燃料池完全喪失冷卻水，但由於用過燃料束衰變熱隨著停機後時間越長而大幅下降，使得空氣冷卻性的可能性越來越高，也因此對於放置時間較長之用過燃料束，其鋁合金火災發生機率將有可能更低。

根據核一廠基本案例全黑(SBO)事故(假設無救援措施)分析結果中得知，電廠於事故後 786 小時用過燃料池水位才會低於有效燃料頂端(TAF)，此時少部分氫氣開始產生，在 1197 小時後用過燃料溫度溫升至 Boral 熔化溫度點 657°C，接著 1216 小時後溫升至 900°C，最後約 1233 小時後燃料及護套才會熔毀。因此可知以目前核一廠停機後超過 5 年，且衰變熱如此低的情況下，評估結果與 NUREG-1738 報告之分析結果為一致。

Abstract

This project collected international reports to understand the occurrence and causes of zirconium fire in severe accidents at nuclear power plant, and discussed the temperature rise phenomenon of the zirconium cladding in the spent fuel pool during the decommissioning phase of the Chinshan nuclear power plant. Sensitivity study was carried out through the characteristics of key factors, and it was evaluated that under the complete loss of cooling water in the spent fuel pool of unit 1 in the decommissioning phase of Chinshan nuclear power plant, the zirconium cladding must be guaranteed to have a temperature rise from 30°C to 900°C more than 10 hours of time margin. According to the conclusions of NUREG-2157, NUREG-1738 and other documents, "the risk of severe accidents in the spent fuel pool is very small." The spent fuel pool is not covered by cooling water due to the loss of external electricity, which rate is between 1.1×10^{-7} and 2.9×10^{-8} . The probability of exposing the spent fuel to the air due to severe seismic events is between 5.8×10^{-7} and $2.4 \times 10^{-6}/\text{yr}$. The NUREG-2157 mentions that as the power plant is shutdown for a longer period of time, the decay heat of the spent fuel decreases sharply and making the possibility of air cooling is getting higher and higher. Therefore, for the spent fuel that have been stored for a long time, the probability of zirconium fire will be lower.

According to the analysis results of the SBO accident (assuming no rescue strategies) in the basic case of Chinshan nuclear power plant, the water level of the spent fuel pool will be lower than the top of active fuel (TAF) at 786 hours after the accident and hydrogen starts to be produced. After 1197 hours, the temperature of the spent fuel will rise to the Boron melting point of 657°C. Then 1216 hours later, the temperature will rise to 900°C, and the fuel cladding will meltdown after 1233 hours. Therefore, it can be seen that assessment results are consistent with the analysis result reported by NUREG-1738 when the current

Chinshan nuclear plant has been shutdown for more than 5 years and the decay heat is so low.

目錄

摘要	I
目錄	IV
圖目錄	VII
表目錄	VIII
壹、前言	1
貳、研究方法	2
參、結果與討論	3
一、 用過燃料池鋁合金火災研析文獻	3
1. 用過燃料池失效機率與鋁合金火災	3
2. 不同型態燃料棒於不同環境發生鋁合金火災的影響性評估	9
3. 用過燃料棒事故下膨脹、破裂等現象評估	17
4. 鋁合金火災救援措施	24
二 建立核一廠用過燃料池 MELCOR 分析模式	28
1. COR/CV/FL 模式建立 :	28
2. 氧化模型建立	32
3. 衰變熱模式建立	35
三、 用過燃料池之事故模擬結果與暫態分析	42
1. 核一廠全黑事故評估(基本案例)	42
2. MELCOR 程式計算模式靈敏度分析	48
(1) 氧氣濃度對鋁合金火災之影響評估	48
(2) 蒸氣分壓對鋁合金火災之影響評估	53
(3) 氧化模型對鋁合金火災之靈敏度分析	58

(4) 氧化模型對鋁合金火災之靈敏度分析.....	64
四、研提核電廠除役階段之鋁合金火災管制建議.....	677
肆、結論.....	69
伍、參考資料.....	73
子項計畫 2-1 英文專有名詞縮寫一覽表.....	738

圖目錄

圖 1 核電廠除役期間安全評估技術強化之研究流程圖.....	2
圖 2 Hydrogen Pickup in Zircaloy-2 and Zircaloy-4 during Corrosion in Water.[14].....	15
圖 3 Reaction Rate Correlation For Air Oxidation of Zircaloy[15].....	16
圖 4 各現象發生點與用過燃料束溫度之關係[17].....	22
圖 5 FZK 淬火實驗之裂痕型成結果圖	22
圖 6 用過燃料溫度文獻之關鍵溫度對照	23
圖 7 核一廠用過燃料池 MELCOR/SNAP 模式	30
圖 8 3,083 束用過燃料棒等效於 MELCOR/SNAP 模式(均勻排列).....	30
圖 9 核一廠用過燃料池 MELCOR/SNAP 模式(均勻排列)	31
圖 10 Types of Air Oxidation Model.....	34
圖 11 核一廠一號機停機 10 年內衰變熱功率趨勢.....	41
圖 12 燃料池水位，單位:m.....	46
圖 13 燃料溫度，單位: °C	47
圖 14 不同氧氣濃度下護套峰值溫度(PCT)，單位:°C	49
圖 15 不同氧氣濃度下氧化熱功率，單位: W	50
圖 16 不同氧氣濃度下總氧化熱，單位: J.....	51
圖 17 不同氧氣濃度下總氫氣產量，單位: kg.....	52
圖 18 不同蒸氣分壓下護套峰值溫度(PCT)，單位:°C	54
圖 19 不同蒸氣分壓下氧化熱功率，單位: W	55
圖 20 不同蒸氣分壓下總氧化熱，單位: J.....	56
圖 21 不同蒸氣分壓下總氫氣產量，單位: kg.....	57
圖 22 MELCOR/SNAP 中 PSI 之不同空氣氧化模型(Air oxidation model)分析參數	59
圖 23 不同空氣氧化模型護套峰值溫度(PCT)，單位:°C	60
圖 24 不同空氣氧化模型氧化熱功率，單位: W	61
圖 25 不同空氣氧化模型總氧化熱，單位: J	62
圖 26 不同空氣氧化模型總氫氣產量，單位:kg.....	63

表目錄

表 1 用過燃料池發生機率與後果評估[1].....	6
表 2 反應爐意外事故與用過燃料池鋁合金火災之機率加權結果比較[1]	8
表 3 不同鋁合金之應用。	10
表 4 FZK 淬火實驗之結果表	21
表 5 鋁合金火災救援措施	24
表 6 燃料束節點化與對應控制體積、流道(均勻排列).....	29
表 7 燃料束節點化與對應組件質量分布(均勻排列).....	29
表 8 實驗之近似係數 [35].....	38
表 9 衰變熱計算	39
表 10 基本案例重要事件時序表	45
表 11 核一廠用過燃料池溫升至 900°C 於不同衰變熱、排列假設所需時間，單位:小時	66

壹、前言

核電廠在除役期間，其用過燃料池衰變熱仍需藉由餘熱移除系統將熱排出，當核電廠發生嚴重事故時，考量鋁合金燃料護套失去冷卻水移熱效果而造成鋁合金護套升溫，美國核管會(NRC)於 2013 年 9 月發布的報告 NUREG-2157[8]中指出，當燃料溫度上升到 1000°C ($1,832^{\circ}\text{F}$) 的溫度時，用過燃料的鋁合金護套將開始與蒸氣或空氣發生高度放熱的化學反應，即為非控制的鋁氧化反應或自催化點火，這種現象稱為“鋁合金火災”，由於此鋁合金火災現象在發生時，護套溫度會迅速上升，因此也稱為突偏氧化(breakaway)現象。本計畫將透過蒐集國際文獻報告，以了解核電廠嚴重事故下鋁合金火災現象之發生與原因，並針對核一廠除役階段之用過燃料池鋁合金燃料護套進行溫升現象的探討，透過關鍵因子特性進行靈敏度解析，例如：蒸氣環境與空氣環境下鋁合金護套的升溫現象、蒸氣與氧氣濃度對鋁合金護套的升溫現象、完全喪失冷卻水狀況下燃料池中的空氣自然對流的冷卻效應等。本計畫將建立國內自主分析技術，並針對計算結果進行歸類、探討，並彙整評估佐證結果及提供管制單位相關管制建議。

數十年來，美國核管會每年皆定時舉辦國際嚴重事故合作研究計畫(Cooperative Severe Accident Research Program, CSARP)結合世界各國的核安管制單位討論相關研究，並透過國際合作的方式共同維護及精進 MELCOR 程式。本計畫將使用美國桑迪亞國家實驗室(Sandia National Laboratory, SNL)於 2019 年釋出的最新 MELCOR(Version 2.2 15254)，建立核一廠用過燃料池模式，並進行用過燃料池嚴重事故之研究及分析，探討鋁合金護套升溫、火災之定量分析，以提供管制單位相關管制建議，以持續強化我國核安管制能量，增進民眾對核能電廠除役安全之信心，並確保民眾生命財產之安全。

貳、研究方法

本計畫透過蒐集研析國際間相關文獻，並發展核一廠除役期間用過燃料池 MELCOR 分析模式，以核一廠用過燃料池分析結果與國際相關文獻做比對研析，以及執行核一廠除役期間用過燃料池嚴重事故下特定現象分析、模擬與評估，並研議核一廠在除役期間用過燃料池相關安全議題，釐清核電廠於除役階段發生嚴重事故時之時序，提出建議事項以作為管制審查之參考依據，並強化國內支援管制審查之技術能力。圖 1 為本研究之流程圖，主要架構為蒐集研析國際間相關文獻與執行核一廠除役期間用過燃料池分析，其核一廠用過燃料池分析結果與國際相關文獻做比對研析與探討，並針對核一廠用過燃料池關鍵參數進行靈敏度分析。

本研究採用美國核管會委託美國桑迪亞國家實驗室所開發之工程級輕水式核能電廠熱水流與嚴重事故分析程式 MELCOR (Version 2.2 15254)，並結合 SNAP (Symbolic Nuclear Analysis Package) 圖形化介面程式，將視覺化展示核一廠用過核子燃料池 MELCOR 模式及其分析結果。

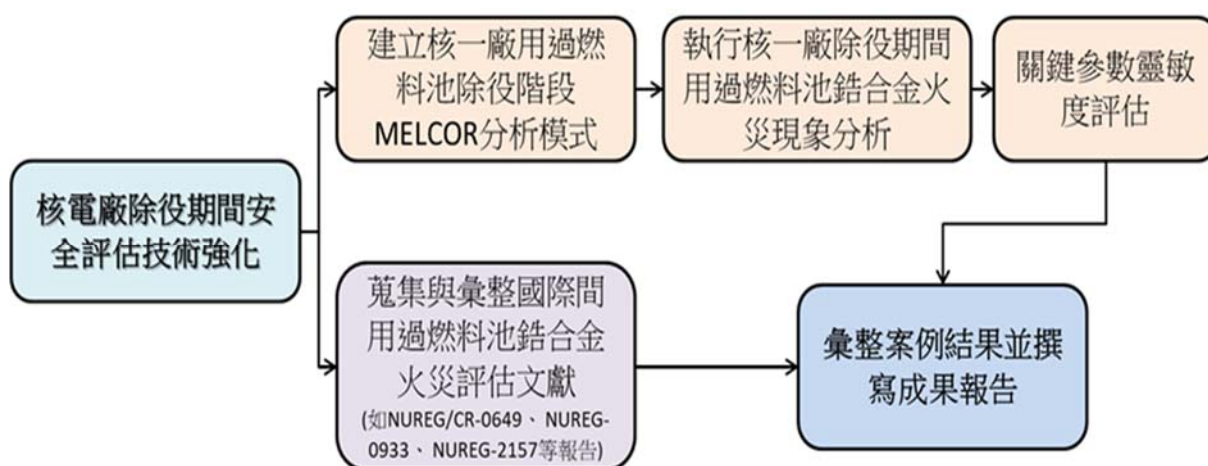


圖 1 核電廠除役期間安全評估技術強化之研究流程圖

參、結果與討論

一、用過燃料池鋁合金火災研析文獻

1. 用過燃料池失效機率與鋁合金火災

為了有效評估用過燃料池的安全性，將失效機率量化已是普遍被認可的慣用方法，在此蒐集了許多國際上針對用過燃料池失效機率之評估與建議，其中更包含美國核管會(NRC)對鋁合金火災之風險及影響進行的廣泛評估，如 NUREG-2157(Generic Environmental Impact Statement, GEIS) [1]中，便整理了在貯存階段之用過燃料束發生各項意外時之安全評估、意外事故發生機率以及可能造成之後續影響，其中更是針對鋁合金火災之風險於附錄中詳細探討。於該篇文獻中提到，由於用過燃料池事故可以藉由多種方式與事件發展成用過燃料池火災，如用過燃料池喪失冷卻、漏水、亦或是重物掉落至用過燃料池，因此 NRC 也以研究了各種發生事件，並分類成嚴重事故(Severe Accidents)、內部事件(Internal Event)、外部事件(External Event)、以及氣候變遷(Climate Change)等，其中甚至探討了關於恐怖主義的行動所造成的潛在危機(Potential Acts of Sabotage or Terrorism)。總結來說，該篇文獻認為，根據 NRC 多年來的研究報告所述，用過燃料池發生嚴重事故的風險，包括內部事件和外部事件，以及氣候變化，NRC 得出的結論是：「用過燃料池發生嚴重事故之風險非常小」，其中用過燃料池因為外電喪失所導致的用過燃料束未被液態水所包覆之意外發生率落在 1.1×10^{-7} 到 2.9×10^{-8} 之間，分別是因為惡劣天氣和電廠相關或電網相關事故所造成；而因為嚴重的地震事件所造成的用過燃料束暴露在空氣中之機率非常小，介於 5.8×10^{-7} 和 $2.4 \times 10^{-6}/\text{yr}$ 之間；在氣候變遷(Climate Change)章節中，NRC 認為由龍捲風所引起的意外事故機率極低(約為 $10^{-9}/\text{yr}$)。但由於此類型之評估與預測極為困難，未來的龍捲風的強度與頻率趨勢可能有巨變，長遠之貯存期間仍有可能出現嚴重天災事故，因此 NRC 認為在短期內，龍捲風所造成之風險將與 NUREG-1738(2001 年)[2]報告之結果相同。

如果發生事故導致用過燃料池內冷卻水流失，亦或是無法成功補充冷卻水等皆可能造成用過燃料束溫度顯著的升高，若情況繼續惡化，無法重新建立用過燃料束的移熱管道，則用過燃料束可能會加熱至 1000 °C 以上，在此溫度下，鋁合金護套開始與空氣發生劇烈之氧化反應，此事故通常被稱為“用過燃料池鋁合金火災”(Spent Fuel Pool Zirconium Fire)，此時受損壞的護套可能導致用過燃料束內部之放射性物質外釋，危害到周圍人口的健康以及財產(例如土地汙染等)。除此之外，在某些條件下，因為高溫而失控的鋁合金氧化反應也可能擴散至池中其餘燃料組件，導致事故更一發不可收拾，也因此避免發生鋁合金火災一直是確保用過燃料池安全的重要目標之一。也因為避免鋁合金火災之重要性，NUREG-2157 於附錄 F 中特別探討了關於在短期貯存期間，鋁合金火災之發生機率以及可能對環境之影響。該附錄中提到，NRC 在早期研究中(1975 年)認為用過燃料池內之冷卻水若要因意外而排空，需要同時發生多項救援系統故障，也因此其可能性將遠小於反應爐中喪失冷卻水事故。NRC 於 1989 年更量化了各種事故發生之可能性，並評估了其對周遭人口之健康以及經濟之影響。最終 NRC 選擇了 NUREG-1738(2001 年)作為定量評估之重要依據。其中定量評估在 NUREG-2157 文獻以及 NUREG-1738 中皆是以機率加權(Probability-Weighted)的結果表示，透過將事故造成的後果與事故發生之機率相乘來計算，是一種表達事故嚴重性與發生之可能性的指標。

表 1 即為用過燃料池事故發生機率以及可能造成之後果，可以從表中得知，用過燃料池鋁合金火災若在反應爐關閉 30 天內發生時，其造成的後果最為嚴重，除此之外，其結果亦包含受影響區域延遲疏散所造成的影響，較晚開始疏散之後果將明顯比較早開始疏散之結果嚴重。其中，NRC 在此表格中假設在 Surry 周遭 16 公里區域中延遲疏散了一定比例的人口、後期疏散的假設意味著在核種外釋以後才開始緊急疏散；表格中的低值對應於反應爐關閉後 10 年發生的鋁合金火災，而高值則對應於反應爐關閉後 30 天內所發生的鋁合金火災。

然而，由於用過燃料束僅會在喪失冷卻水且無法進行空氣冷卻的情況下，才容易發生燃燒（即失控的氧化反應），但在許多情況下，燃料都是可藉由空氣循環冷卻的。然而，NUREG-2157 的研究結果中，考慮了短期貯存的時間範圍可以超過其被許可的長達 60 年使用壽命，隨著時間的流逝，即使用過燃料池完全喪失冷卻水，但由於用過燃料束衰變熱隨著停機後時間越長而大幅下降，使得空氣冷卻性的可能性越來越高，也因此對於放置時間較長之用過燃料束，其發生機率將有可能更低。

表 2 代表了反應爐發生意外事故與用過燃料池鋁合金火災之機率加權結果比較，該表顯示用過燃料池火災的概率加權後果與嚴重的核電廠事故相當。如 NUREG-1738 所評估相同，在短期內，用過燃料池火災對電廠外的民眾健康影響，可與運轉時的核電廠發生嚴重事故的影響相當。而最近的研究，例如 NUREG-1935[3]、SOARCA 報告 SECY-12-0092(NRC 2012a) [4]和 SECY-13-0112 (NRC 2013a) [5]，都表明了概率加權健康影響核電廠事故和用過燃料池事故的發生率非常低，並且完全在核安委員會的安全目標之內。然而，雖然用過燃料池火災的經濟影響可能大於核電廠事故的經濟影響，但燃料池事故的可能性比核電廠事故的可能性較小。因此，兩者對廠區外的經濟影響的概率加權後果是接近的。

作為結論，NRC 根據 NUREG-1738 以及其他分析文獻，並以保守估計的方式評估用過燃料池鋁合金火災事故機率加權(Probability-Weighted)的人口劑量與經濟損失之評估結果，發現其與 1996 年及 2013 年的 License Renewal GEIS 中所計算的結果一致，由於用過燃料池的冷卻水喪失之可能性不高，在短期的貯存期間內，導致用過燃料池火災發生之總風險仍然較低，其對於環境的影響非常小。除此之外，在 NUREG-1738 報告發布以後，為了進一步減少用過燃料池火災之可能性，NRC 對於相關法規以及評估上更為嚴謹，包含執行法規之過程，因此該文獻認為，現今用過燃料池火災之風險應更低於 NUREG-1738 當時之評估結果。

表 1 用過燃料池發生機率與後果評估[1]

	意外發生頻 率(每年)	早期死亡 (1mi)	潛伏死亡 (10mi)	人員-西弗 總數/事件	早期死亡 事件 (10mi)	潛伏死 亡 (0- 500mi)	總體經濟影 響(萬/每事 件)
NUREG- 1738 (高濃度 Ru)	5.8×10^{-7} (e) ~ 2.4×10^{-6} (f)	4.68×10^{-3} ~ 4.43×10^{-2}	6.39×10^{-2} ~ 8.49×10^{-2}	1.34×10^5 ~ 2.37×10^5 (50mi)(c)	<1(0.360) ~ 191	-	-
NUREG- 1738 (低濃度 Ru)	5.8×10^{-7} (e) ~ 2.4×10^{-6} (f)	1.63×10^{-3} ~ 1.27×10^{-2}	1.29×10^{-2} ~ 1.88×10^{-2}	4.27×10^4 ~ 5.58×10^4 (50mi)(c)	<1 ~ 2	20,000 ~ 27,000	-
NUREG- 1353	2.0×10^{-6}	-	-	2.6×10^5 (50mi)(g)	-	-	55,700(h,i)
NUREG/ BR-0184	-	-	-	2.6×10^5 (50mi)(j)	-	-	57,800(h,k)

(a) 所有值都是近似值

(b) 5.8×10^{-7} 是科學記號，也可以表示為 0.00000058。此值表示在任何一年中發生該事故的機率是 1,700,000 分之 1 (或 1 / 0.00000058)。

(c) 結果值是從 NUREG-1738 (NRC 2001, 附錄 4B 的表 2 和 3) 獲得的。[注：類似值出現在 NUREG-1738 中 (NRC 2001, 表 3.7-1 和 3.7-2)，但錯誤報告來自附錄 4B。]

(d) 結果值是從 NUREG-1738 (NRC 2001, 附錄 4) 獲得的，並反映了所評估的七個案例的一系列結果。

(e) 電力研究所的數據來自 NUREG-1738 (NRC 2001)。

(f) 勞倫斯·利佛摩國家實驗室 (NUREG-1738) 中的數據 (NRC 2001)。

(g) 案例 2 的值是從 NUREG-1353 中獲得的 (NRC 1989, 表 4.8.3)。案例 2 假設已釋放了整個乏燃料庫清單。

(h) 該值基於 50mi 以內的影響，並使用“消費者物價指數通貨膨脹計算器”調整為 2010 dollars。

(i) 從 NUREG-1353 中獲得的價值 (302 億美元，以 1988 dollars ;不包括重置電力成本) (NRC 1989,

表 5.1.1 和 5.1.2)

(j) 從 NUREG/BR-0184 中獲得的數值(NRC 1997, 表 C.101)

(k) 從 NUREG/BR-0184 中獲得的數值 (264 億美元, 以 1983 dollars ;不包括重置電力成本)
(NRC1997, 表 C.95 和 C.101)

表 2 反應爐意外事故與用過燃料池鋁合金火災之機率加權結果比較[1]

意外類型	個人風險		總劑量 (SV Ryr ⁻¹ /每人)	人口風險		經濟損害 (\$Ryr ⁻¹)(a)
	早期死亡 (在 1mi) (Ryr ⁻¹)	潛伏死亡 (在 10mi) (Ryr ⁻¹)		早期死亡 (在 1mi) (Ryr ⁻¹)	潛伏死亡 (Ryr ⁻¹)	
反應堆嚴重事故	1.5×10^{-8}	1.5×10^{-9}	0.06	2.0×10^{-6}	5.2×10^{-3}	1.1×10^5 (c)
用過燃料池火災	3.9×10^{-9}	3.1×10^{-8}	0.11	1.9×10^{-7}	5.6×10^{-3}	1.0×10^{-5} (f)
	~ 3.0×10^{-8}	~ 4.5×10^{-8}	~ 0.13	~ 5.7×10^{-6}	~ 5.9×10^{-3}	~ 1.1×10^5 (g)
(a) 使用消費者物價指數通貨膨脹計算器將值調整為 2010 年美元。 (b) 自 NUREG-1150 起，用於 Surry 電站 (NRC 1990)，但經濟損失除外 (請參見註釋 (c))。 (c) 取自 NUREG-1437, 補充 6, Surry 電站 1 和 2 號機組 (NRC 2002)，無公共暴露費用。 (d) 從 NUREG-1738 (NRC 2001, 表 3.7-2 晚疏散和表 3.1 總燃料發現頻率，假設勞倫斯·利弗莫爾國家實驗室發生地震危險) 開始，排除人口潛在死亡和經濟損失風險。 (e) 根據 NUREG-1738 (NRC 2001, 表 A4-7 至 A4-9)，該範圍反映了所評估的三個 Surry 案例的範圍，最大距離為 160 km (100 英里)，衰減時間為 30 天至 1 年 事故發生之前。活動頻率為 2.4×10^{-6} Ryr (NRC 2001)。 (f) NUREG / BR-0184 (NRC 1997, 表 C.95 和 C.101)，無需更換電源。 (g) 取自 NUREG-1353 (NRC 1989, 表 4.8.3、5.1.1 和 5.1.2)，沒有更換用電成本。						

2. 不同型態燃料棒於不同環境發生鋁合金火災的影響性評估

在許多核安相關研究中，空氣環境中的氧化熱效應都是被重視的。例如：嚴重事故中反應器壓力槽可能被破壞，導致空氣侵入爐心造成護套嚴重氧化、乾貯桶和運輸桶的結構破損，也可能導致空氣侵入與造成用過燃料護套氧化、用過燃料池喪失冷卻水事故等等。在這些情況下，安全性評估和確定護套完整性時，都需要了解相對較低溫度下護套的空氣氧化效應模式。

鋁不易腐蝕，主要用作核子反應器燃料棒的護套材料及作為抗腐蝕的合金，且鋁的中子截面積非常小，中子幾乎可以完全透過鋁，因此鋁合金在核分裂反應器中，特別是輕水式反應器，作為核燃料的包覆管結構材料，如 Zircaloy-4 和 Zircaloy-2。核能用鋁合金的基本鋁成分占比大於 95%(重量比)。少於 2%的錫，鈮，鐵，鉻，鎳和其他金屬則用以改善護套機械性能和耐腐蝕性[6-8]。輕水式反應器提高了鋁合金的抗氧化與環狀腐蝕的要求，再者鋁與水的氧化反應會產生氫氣，氫氣會擴散到鋁合金中並形成氫化鋁[9]。材料由於吸氫或氫滲透而造成機械性能嚴重退化，氫化物比合金密度小，機械強度較弱，因此可能會導致護套膨脹和破裂-此現象稱為氫脆現象[10]。

核能用鋁合金鋁含量超過 95%，因此鋁合金護套大多數特性與純鋁相似。鋁的熱中子吸收截面為 0.18 barn，遠低於鐵(2.4 barn)和鎳(4.5 barn)等常見金屬的吸收截面[11]。一般核能反應器級的鋁合金護套組成和主要應用概述如下表 3。這些鋁合金都含有少於 0.3%的鐵、鉻以及 0.1-0.14%的氧[12]。

表 3 不同鋯合金之應用。

合金	Sn, %	Nb, %	供應商 (城市)	組件	反應器種類
Zircaloy 2	1.2–1.7	–	全部的供應商	護套，結 構組件	BWR,CANDU
Zircaloy 4	1.2–1.7	–	全部的供應商	護套，結 構組件	BWR,PWR,CANDU
ZIRLO	0.7–1	1	西屋	護套	BWR, PWR
M5	–	0.8–1.2	Areva	護套，結 構組件	PWR
Zr Sponge	–	–	日本及俄羅斯	護套	BWR
ZrSn	0.25	–	西屋	護套	BWR
Zr2.5Nb	–	2.4–2.8	Fabrica de Aleaciones Especiales(FAE)(Argentina)	壓力槽	CANDU
E110	–	0.9–1.1	俄羅斯	護套	VVER
E125	–	2.5	俄羅斯	壓力槽	RBMK
E635	0.8–1.3	0.8–1	俄羅斯	結構組件	VVER

*ZIRLO 代表低鋯含量。

NRC 監管研究辦公室 (Office of Regulatory Research, RES) 於 2002 年 7 月在美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory, ANL)進行了一項實驗研究計劃，並在 2004 年發布 NUREG/CR-6846 "Air Oxidation Kinetics for Zr-Based Alloys." [13]，目的是取得有關 Zircaloy-4、Zirlo 和 M5 護套的空氣氧化實驗數據。實驗材料為未經輻射線照射過的 Zircaloy-4、Zirlo 和 M5 護套，對這些護套進行在"不同溫度"與"無氧化層"、"蒸氣預先氧化形成氧化層"下進行"再氧化"實驗。其中一個實驗將這三種鋇合金護套區分"預先蒸氣氧化形成氧化層"與"無氧化層"，探討氧化層對護套在空氣中"再氧化"的影響。"預先蒸氣氧化形成氧化層"的護套代表模擬運轉期間反應器內的燃料護套；而"無氧化層"則為研究純金屬的在空氣中的氧化效應，並與以前的實驗結果進行比較與提供數據。另外一實驗則為研究護套在充氮環境中的氧化或催化效應，模擬在空氣中低氧氣濃度的情況下氮化對護套的影響。

以下列出 NUREG/CR-6846 結果。針對 Zircaloy-4、Zirlo 和 M5 研究高溫氧化的影響與結果。Zircaloy-4 和 M5 燃料護套由 Framatome 公司設計、Zirlo 護套由 Westinghouse 設計。

Zircaloy-4(由 Framatome 公司設計)：

- i. 在環境溫度於 600°C 左右，無氧化層之 Zircaloy-4 的氧化速率，在空氣中比在蒸氣中高 2~4 倍；而在空氣環境中，無氧化層之 Zircaloy-4 氧化速率比以蒸氣預先氧化(有氧化層)之 Zircaloy-4 高約 2 倍。
- ii. 在 $T \leq 500^{\circ}\text{C}$ 的溫度下，無氧化層之 Zircaloy-4 的氧化速率，在空氣中比在蒸氣中低 2~10 倍；在空氣中，無氧化層之 Zircaloy-4 氧化速率比有氧化層之 Zircaloy-4 相當(或略高於)。
- iii. 低氧環境下，無氧化層與有氧化層之 Zircaloy-4 氧化速率相當(或略低於)。

- iv. 在 $T \geq 600^{\circ}\text{C}$ ，在空氣中，無氧化層與有氧化層之 Zircaloy-4 都會迅速氧化。在蒸氣環境下，有氧化層之 Zircaloy-4 比無氧化層之 Zircaloy-4 氧化得更快，可能原因為蒸氣中形成的氧化層比空氣中形成的氧化層所產生裂紋的機率更高。

Zirlo(由 Westinghouse 公司設計)：

- v. 在蒸氣中氧化的過程來看，Zirlo 的氧化率比 Zircaloy-4 的氧化率低約 10%。在 550°C 溫度下暴露 140 小時後，氧化層厚度：在 Zirlo 中為 26-30 μm ，在 Zircaloy-4 中為 28-32 μm 。
- vi. 在 $T > 400^{\circ}\text{C}$ ，(以蒸氣預先氧化的) Zirlo 有達到"突偏點"(Post-breakaway)非控制氧化點，與 Zircaloy-4 實驗結果相似。而在 300°C 溫度下暴露 1013 小時後也沒有出現突偏現象。
- vii. 在 $T \leq 500^{\circ}\text{C}$ ，在突偏點範圍中 Zirlo 的氧化速率低於 Zircaloy-4； $T \geq 600^{\circ}\text{C}$ ，在突偏點範圍中 Zirlo 的氧化速率會超過 Zircaloy-4。
- viii. 在 $T \geq 600^{\circ}\text{C}$ 暴露後形成的氧化層明顯產生許多徑向裂紋，這些裂紋延生到內部合金。在 500°C 下，即使暴露 429 小時，徑向裂紋也僅在外表面散布一部分。

M5(由 Framatome 公司設計)：

- i. 在蒸氣中氧化的過程來看，M5 的氧化速率明顯低於 Zircaloy-4 和 Zirlo。
例如：
M5 在 550°C 下需 427 小時才能產生約為 25- μm 的氧化層，而在 Zirlo 和 Zircaloy-4 在 550°C 下在 140 小時內就可以產生相同的厚度。
- ii. 在突偏區域內， $300-500^{\circ}\text{C}$ 的溫度範圍，在空氣中(以蒸氣預先氧化) M5 的氧化速率與 Zirlo 相當，但比 Zircaloy-4 高，可能原因在於合金中的鈮(Nb)含量差異。在 600°C 下，M5 的氧化速率小於 Zircaloy-4 和 Zirlo。

- iii. 在突偏區域內，M5 和 Zirlo 在 500°C 的空氣氧化速率差異不大；在 600°C，M5 的空氣氧化速率小於 Zircaloy-4 和 Zirlo。在研究的時間段內，M5 在 400°C 和 300°C 的溫度下均未出現"突偏"現象。
- iv. 300°C~700°C 的所測得的氧化層厚度相近。600°C 暴露 161 小時~305 小時後，M5 上的氧化層出現明顯的軸向與橫向裂紋，其保護能力大幅下降。
- v. 在 500°C 或更低的溫度下，在當前研究中的時間段內，M5 空氣氧化產生的氧化層(相對 Zircaloy-4 和 Zirlo)無產生裂紋。

因此根據以上結果，顯示：

- (1) 三種合金"以蒸氣預先氧化形成氧化層"下，在空氣中還是會進一步氧化。氧化層的生長速率取決於護套溫度、暴露時間與合金成分。
- (2) Zirlo 和 M5 的數據和相關性表示這兩種材料較適用於高燃耗的燃料束。
- (3) 依實驗結果，發現在 300 ~ 900°C 的溫度範圍內，Zircaloy-4、Zirlo 和 M5 護套空氣氧化效應的相關性與國際用過燃料池事故風險研究中現象相當。
- (4) 氮催化的影響在實驗結果顯示，在特定溫度範圍內"預先蒸氣氧化形成氧化層"的護套在空氣環境中並無明顯有益或有害的效應。

由於 MELCOR 程式其燃料型態預設值為 Zircaloy-4，而台電公司核一廠用過燃料鋁合金護套大部分為 Zircaloy-4 護套；20 週期至 27 週期為 Zircaloy-2 護套，許多國際文獻將 Zircaloy-4 與 Zircaloy-2 兩者視為相同合金，如美國橡樹嶺國家實驗室發布之 ORNL-3281，"REVIEW OF ZIRCALOY-2 AND ZIRCALOY-4 PROPERTIES RELEVANT TO N.S.

SAVANNAH REACTOR DESIGN "[14]，提到 Zircaloy-4 是由 Zircaloy-2 開發出來的，Zircaloy-4 鎳含量限制在 0.007 % 以內、鐵含量被限制 0.12%~0.18% 以內，其餘成分皆為相同，主要目的為"減少吸收氫"的現象，如圖 2 所示。

ORNL-3281 在氧化與鋁水反應部分報告內皆已"Zirconium"描述外，NUREG/CR-0649[15]則很明確的說明" The differences between Zircaloy-4 and pure zirconium are small enough, from a chemical point of view, to assume that their oxidation characteristics will be very similar." NUREG/CR-0649 也整理了 Some Effects of Heating Zirconium in Air, Oxygen, and Nitrogen、reported in AEC Fuels and Materials Development Program、Study on High Temperature Steam Oxidation of Zircaloy-4 Cladding Tubes 等三份報告[16-18]於鋁合金氧化實驗的數據，如下圖 3 所示。因此依據 NUREG/CR-0649 文獻，本研究將視核一廠一號機用過燃料池內之燃料護套為相同材料。

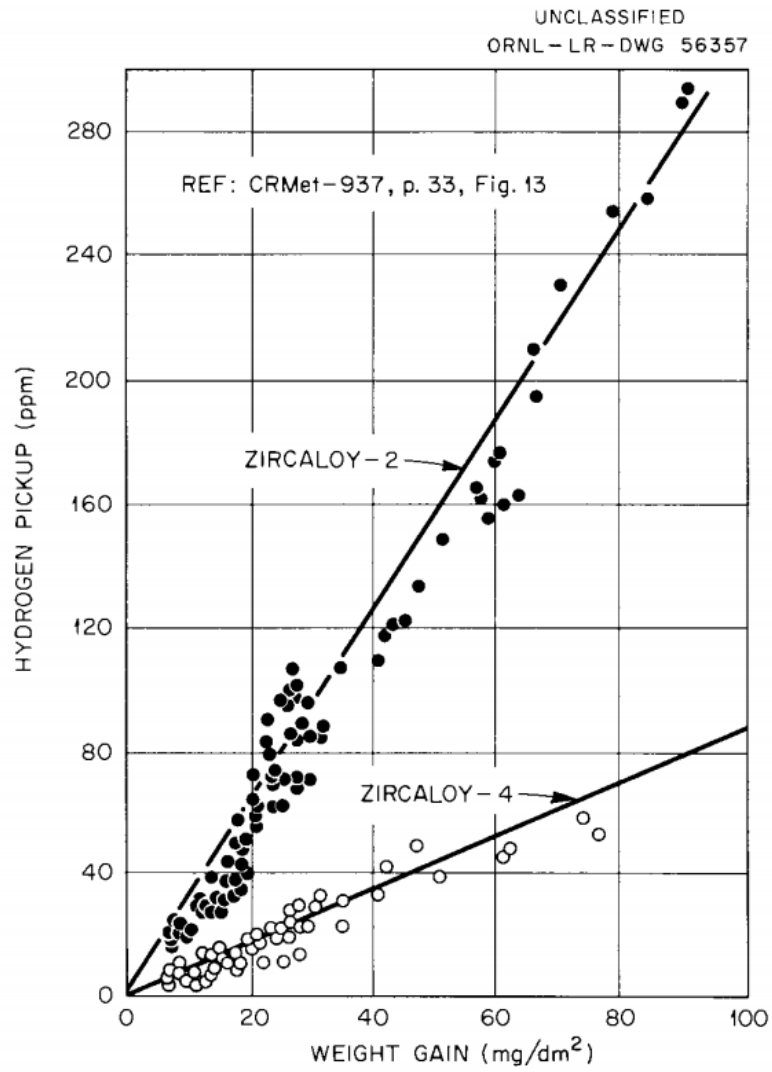


圖 2 Hydrogen Pickup in Zircaloy-2 and Zircaloy-4 during Corrosion in Water.[14]

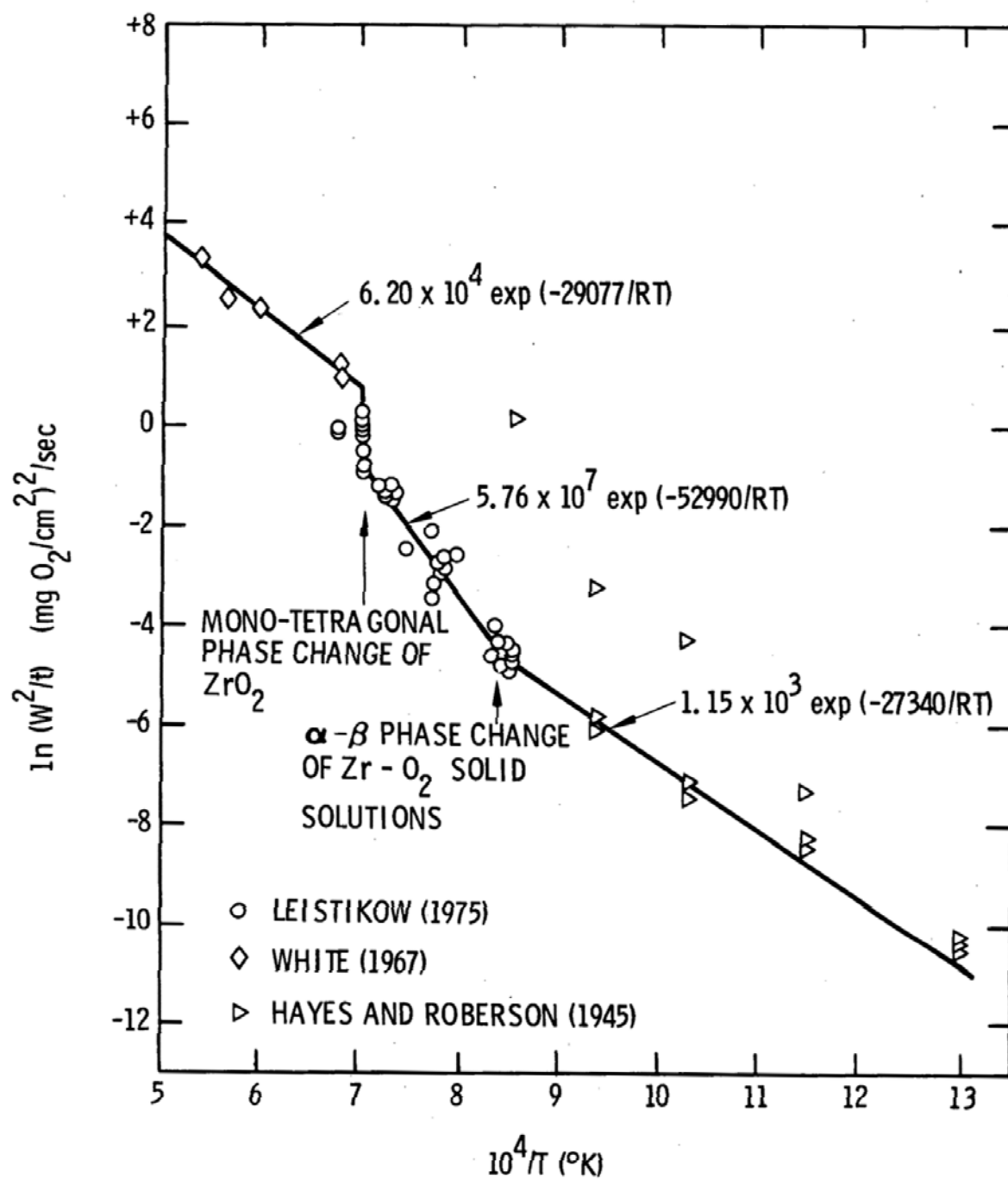


圖 3 Reaction Rate Correlation For Air Oxidation of Zircaloy[15]

3. 用過燃料棒事故下膨脹、破裂等現象評估

無論是運轉中的反應爐亦或是在貯存階段中的用過燃料池，在發生事故比如喪失冷卻水事故(Loss of Coolant Accident, LOCA)時，若無法建立與燃料束之熱傳導管道，很有可能導致用過燃料束持續升溫，並在各種不同熱水流條件的過程下，用過燃料束之膨脹程度、型態以及位置將可能有非常複雜的趨勢以及巨大差異，此差異不但會影響後續嘗試冷卻用過燃料束時的熱水流條件，也會影響到燃料束與束之間的機械作用與熱傳導。也因為任何細微之熱水流條件皆能影響此現象之後續趨勢，國際間也以進行各種條件下之實驗，試圖研究並精進反應爐以及用過燃料池之安全。俄羅斯科學院核能安全研究所(Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences, IBRAE)便在 2013 年的 Workshop on Fuel Safety, Safety Criteria and Changes in Fuel Design Characteristics During Operation[19]中特別介紹了在發生事故時，用過燃料束從初期到後期中包含膨脹、破裂、劇烈氧化等各個階段大致的發生溫度點如圖 4，雖其報告主要探討反應爐內之用過燃料束，與用過燃料池內衰變熱較低且溫升速度較慢之用過燃料束情況略有不同，但各現象發生之溫度點與可能造成之影響皆有一定程度之相關性。當發生事故時，若無法長期將用過燃料束之衰變熱移除，則隨著時間與溫度上升，將經過三個主要現象：膨脹與破裂、燃料護套劇烈氧化、重新補水後的材料淬火，在膨脹與破裂階段中，即使只是細微的熱水流條件差異皆能夠影響後續發展，此相關議題在 TECHNICAL REPORT SEMCA-2005-313 [20]中詳述了非常多不同條件下之用過燃料束溫升膨脹實驗，在該報告結論的部分便有提到在用過燃料束溫升的議題中，方位角的溫度分布極其能夠影響束膨脹以及破裂之狀況，於 EDGAR 實驗中由於是直接加熱護套，其具有均勻的方位角溫度分布，導致材料在 α 相中產生較高的破裂應變值，而在 REBEKA 和 ORNL 的單棒實驗中，由於是間接加熱護套，導致不可避免的方位角溫差，在這個過程中便導致了該材料在較熱的區域中產生了”弱化集中”的現象也讓材料在 α 相中產生異向性；而在多棒測試(Bundle Test)中牽扯到的是

相鄰的用過燃料束之間的熱傳導與機械相互作用，其可能導致護套在軸向膨脹的增加以及流動面積的阻塞。

除了膨脹與破裂將導致護套失效，可能使帶有輻射之物質外釋之外，重新補水後的材料淬火也是可能導致護套失效之主要原因。再注水(reflooding)可能會產生許多特定的影響，包含：

1. 增強鋁合金氧化以及氫氣的生成
2. 可能會有大量蒸氣產生，無法排除會發生蒸氣衝擊的危險
3. 由於熱衝擊而形成碎屑床
4. 其冷卻能力也有待商榷。

目前根據 Chung-Kassner 準則(ANL)：

1. 在 LOCA 事故中，能夠承受再注水所帶來的熱衝擊之條件是氧氣含量小於 0.9wt% 的燃料護套計算厚度需至少大於 0.1mm。
2. 能夠承受用過燃料束運輸、貯存之條件是氧氣含量為 0.7wt% 之燃料護套計算厚度應大於 0.3 毫米。

除此之外，在 Karlsruhe Research Center(FZK)的淬火實驗測試中，將模擬器材加溫至 1400°C 至 1700°C 放入水中，測量其溫度、氣體質量流率以及氫氣的濃度，最終將其結果整理成表 4。可以看到在氧化層厚度為零之情況下，測試的燃料護套可以在更高的溫度下淬火而燃料護套本身的損傷也較輕，在初始溫度 1200°C 下之案例，淬火後僅有些微裂痕，在初始溫度微 1600°C 時，也僅有些微剝落；於氧化層厚度為 150 至 350 μ m 之案例下，於初始溫度 1200°C 狀況下淬火後，便有了網狀裂痕，且如先前所述，再注水可能引起更劇烈之氧化反應，於裂痕中以及內部表面中皆有發生氧化痕跡，其實驗結果如圖 5 所示。

除此之外，在 Zirconium Fire in Pools of Spent Nuclear Fuel：High-Probability Scenarios and Phenomena[22]中詳細解釋了用過燃料池在發生事故後用過燃料束因溫升而產生的各種現象，其中也包含了其可能發生的溫度區間。在事故初期，因為 LOCA 或其他假設事故，導致無法與用過燃料束建立熱傳導管道，導致用過燃料束局部溫度開始升高，當局部燃料護套溫度生至約 677°C(1250°F)時，用過燃料束將可能開始膨脹、破裂，並釋放如氫與氦等惰性氣體。但在 NRC 所發布的 NUREG-1738 中也指出，在比 677°C 更低溫下，如 565°C(1049°F)至 600°C(1112°F)區間中，如果在此高溫條件下維持了約 10 小時，燃料護套仍有可能因為內部產生應力而引起潛變破裂，不過值得注意的是，NUREG-1738 內也特別提出，雖然在此相對較低之溫度的燃料護套失效也會導致裂變產物釋出，但這種釋放相比於在超過溫度標準後，燃料明顯發熱以及受到損壞之情況下所釋放出的相較還要小的許多。該報告也提到，在用過燃料池事故中，燃料護套的膨脹很有可能以香腸型的方式膨脹，就像在匈牙利在 2003 年的 Paks-2 事故中那些受損害的燃料組件圖，其燃料組件大多以香腸型膨脹為主並有著非常長的膨脹範圍（這與用過燃料護套膨脹的特性有關，因為在事故中燃料束內部會加熱使壓力升高導致劇烈膨脹，而用過燃料池事故下，其貯存環境之外部壓力將遠遠小於用過燃料束的內部壓力）。除此之外，由於在用過燃料池事故中，相比於發生於反應爐之事故，燃料棒的膨脹部分很可能是共面的（在同一高度，）在共面性的情況下，棒與棒之間也可能存在一定程度的局部接觸，因為在局部燃料護套溫度達到燃料棒膨脹的溫度時，這樣的溫度將趨於大致相同的高度。在用過燃料池事故中，最近裝載到用過燃料池中的燃料組件（最熱的組件），將是最先引起燃料護套膨脹的燃料組件。

然而，用過燃料池與運轉之反應爐不同，其在軸向並沒有明顯的餘弦熱通量分布，因此其在方向角的溫度分布中可能更於均勻，而如先前所說，方向角溫度分布均勻雖不會產生弱化集中之現象，但此特點將導致用過燃料護套膨脹之尺寸加大從而增加阻塞，此現象擁有共面性之用過燃料池下

將導致同一高度之阻塞更為嚴重。而此局部堵塞將可能加速堵塞區域附近之表面溫度升高至 900°C 或 1000°C 之時間點(燃料護套開始與蒸氣或空氣劇烈發生氧化還原反應之溫度點)。有趣的是，報告最後提到局部膨脹可能增加護套與燃料格架的接觸面積，而在 NRC 所發布的 NUREG-2121[24]中指出，燃料格架將可能”釘”住用過燃料束的膨脹現象，代表燃料格架可以一定程度的抑制用過燃料束的膨脹現象。

本計畫彙整與研析多篇國際文獻研究，透過實驗與研究發現鋁合金火災發生的溫度點並非為定值，會跟燃料護套所採用的型態、合金含量、環境條件等因子而影響鋁合金火災發生的溫度點，因此本研究歸納所研析之國際文獻並彙整成鋁合金火災發生溫度參考範圍圖(如圖 6)，並註明此溫度數值來源出處，清楚顯示溫度、現象、與相關文獻之對照。圖 6 中也包含中子吸收劑(Boral、Boraflex)開始融化之溫度點，是由於在事故發展的過程中，若用過燃料池溫度上升到使中子吸收劑(Boral、Boraflex)開始融化，則會影響到 SFP 的 K_{eff} ，因此本研究納入 Boral、Boraflex 開始融化的溫度，以供參考。

表 4 FZK 淬火實驗之結果表

氧化層厚度	初始溫度, °C		
μm	1200	1400	1600
0	鋁合金破裂。 局部剝落(水)。	鋁合金破裂。 局部剝落(水)。	鋁合金破裂。 局部剝落(水)。
100÷150	尚未有裂縫。 鋁合金破裂。 局部剝落(水)。	尚未有裂縫。 鋁合金破裂。 局部剝落(水)。	少許裂縫。 無破裂和內層氧化。
150÷350	有裂縫。 有破裂及內層氧化。	有裂縫。 有破裂及內層氧化。	少許裂縫。 有破裂和內層氧化。

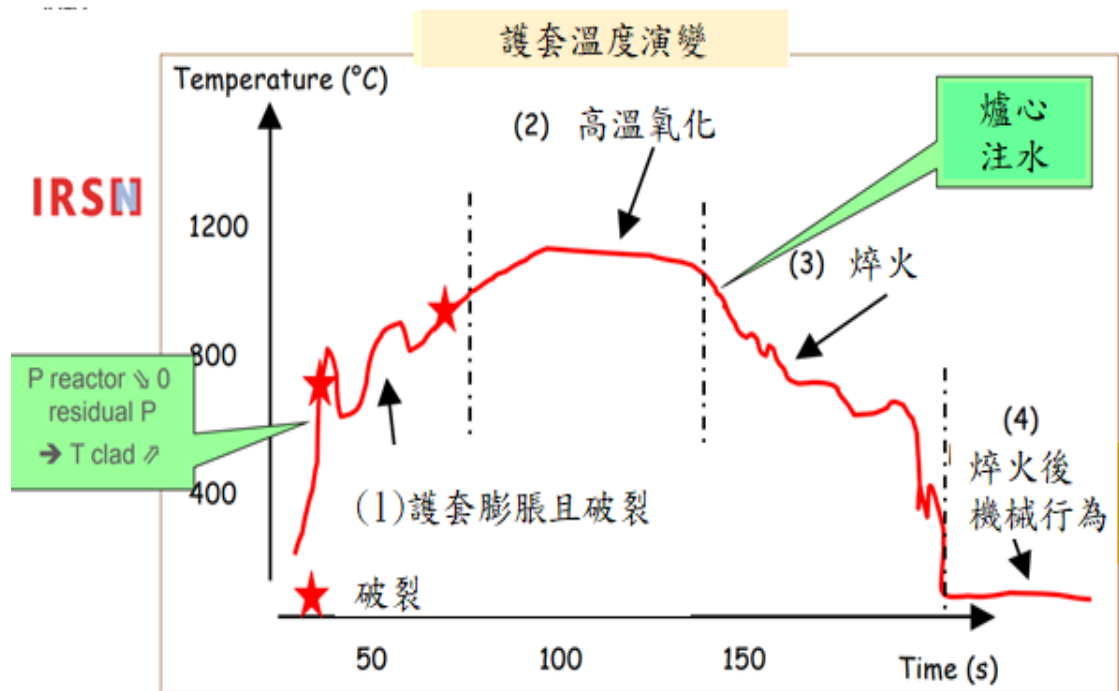


圖 4 各現象發生點與用過燃料束溫度之關係[17]

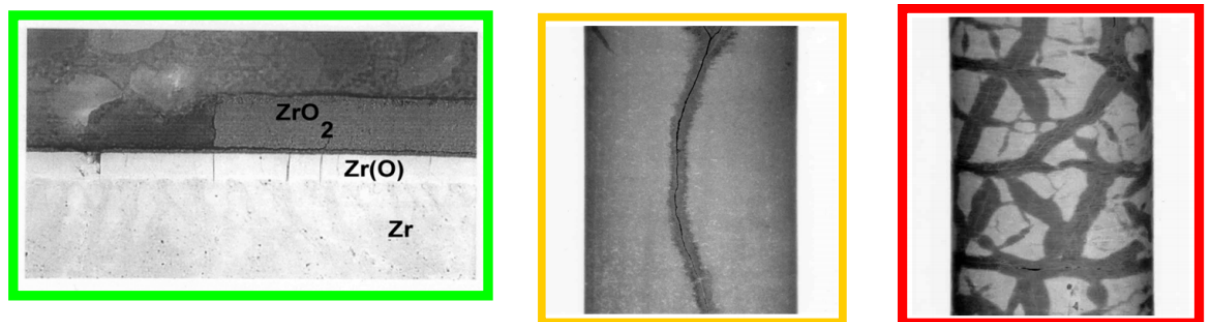


圖 5 FZK 淬火實驗之裂痕型態結果圖



圖 6 用過燃料溫度文獻之關鍵溫度對照

4. 鋁合金火災救援措施

針對鋁合金火災，NRC 發布了鋁合金火災救援措施報告[39]，詳細說明各種可用之滅火方式以及所對應之優缺點及成本效益成果，如下表 5:

表 5 鋁合金火災救援措施

可使用的滅火方法	優點	缺點	建議或成本效益結果
攜帶式滅火器	主要用於 D 類火災之滅火器或滅火劑能夠用於鋁合金火災	(1)發生火災時需要有工作人員留在火災現場附近。 (2)滅火器是被設計於處理初期火災現場(代表火焰被限制在小區域，且該區域仍能進出) (3)有限的滅火劑存量 (4)有限的滅火劑射程範圍	由於需要大量冷卻水存量以及人員數量上的限制，因此該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的
高膨脹泡沫	(1)利用泡沫覆蓋住燃料的表面來阻斷氧氣的供應	(1)在處理地震時，除了消防部門以外沒有其他可用的水源。 (2)高膨脹泡沫主要用途是撲滅 A 類火災 (3)紊流的空氣或上升氣流可能將泡沫帶	基於能否正確使用便攜式高膨脹泡沫系統之憂慮以及熱傳方面的議題，因此該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的

		離燃燒的區域。 (4)人員配備上的問題	
二氧化碳全淹沒系統	(1)利用稀釋空氣來撲滅火焰 (2)易於取得	(1)由於活潑金屬類仍能與二氧化碳發生氧化反應，因此無法撲滅該類火災。 (2)超出設計基準事故之地震，用過燃料池底部可能發生破裂並使新鮮空氣從破口流入。	該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的
海龍(化學物)	利用化學地破壞燃燒過程來撲滅火災	因為臭氧層破洞之相關議題，海龍已被禁止使用	該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的
用於金屬火災之乾式化學物全淹沒方式	1)透過悶熄火焰來抑制或破壞燃燒鍊的過程 (2)對 D 類火在有效的乾式化學物包含 Met-L-X 和 Pyromet	(1)只有經過美國保險商試驗所認證後才可與手動操作的軟管一同使用 (2)部分的乾式化學物將輕微的腐蝕作用物體表面 (3)若要完全填滿用過燃料池，將需要大量且昂貴的乾式化學物。	該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的

惰性氣體-氫	若能將所有空氣從該區域中排除，則利用“氣體覆蓋”(Gas Blanketing)將能夠有效的控制鋁合金火災	超出設計基準事故之地震，用過燃料池底部可能發生破裂並使新鮮空氣從破口流入。	該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的
安裝地震類別一之安全級灑水系統 (NUREG/CR-5281[25]和 NUREG-1353[26])	(1)用過燃料池灑水能夠去汙染釋放出的放射物質 (2)減少對廠外造成的後果 (3)減少因用過燃料束發生意外所造成的後果	(1)緩慢的灑水可能造成更劇烈的氧化 (2)系統無法承受超出設計基準之地震事件 (3)需要新的設備或是修改目前的用過燃料池安全系統 (4)在地震事故中沒有額外的水源	(1)在硬體設備上：每一座用過燃料池將花費一百二十萬(於1988年) (2)最佳估算花費與影響比：花費3340美元/每避免一位超出人員劑量之人員
使用固體材料覆蓋用過燃料束(沙子、黏土、白雲母、硼化合物、鉛等...)(NUREG-1353[28])	(1)減少用過燃料池的放射性物質釋放量 (2)若鋁合金進一步發生融化、下沉(relocation)、rubble bed時，可以覆蓋雜物	(1)要能夠及時運輸足量的材料以減少放射物質的釋放是高度的不可行的。(基於臨時措施) (2)材料無法被儲存於廠內	(1)成本無法明確地被量化 (2)該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的
流通氣體處理系統	(1)通風及過濾系統能夠在排放前有效地降低空氣中的放射性	(1)通風系統無法應對超出設計基準地震事故。能夠造成用過燃料池破洞之同一地震將能夠摧毀此系統	(1)成本無法明確地被量化 (2)該替代方案若要進行額外研究，在技術上認為是不可行的

NRC 建議[39]：

(1)最初將不採取任何緩解措施。根據我們員工的建議，只需將重點放在增加對重物和地震之預防措施即可。

(2)對於那些因過重負荷或地震等原因而被評估為較為脆弱之發電廠，或許可以進一步研究以下：

(A)制定通用的應急計畫可以讓這些發電廠做出聲明，未來如果發生了用過燃料池無法恢復之事件，它們有計畫能夠在合理時間內運送材料以覆蓋用過燃料池來避免輻射物質外釋或用過燃料束氧化。

(B)另一個選項則是讓他們修改用於用過燃料池的現有之 SR 程序。但是無論如何，這個系統仍然無法被保證其可以在超出設計基準事故下之不被影響，也代表其無法保證有足夠之可用水源。

A 類火災：普通可燃物質之火災，例如木材、紙張、橡膠和塑料。

滅火劑：水、水流、中/高膨脹泡沫

B 類火災：易燃液體/氣體、可燃液體如焦油、油、油漆中的溶劑中火災

滅火劑：二氧化碳、乾式化學物、AFFF(用於烴類燃料表面)

C 類火災：涉及通電的電器設備之火災

滅火劑：二氧化碳、乾式化學物

D 類火災：易燃金屬如鎂、鈦、鋯、鈉、鋰、鉀等...

滅火劑：乾式化合物

二 建立核一廠用過燃料池 MELCOR 分析模式

1. COR/CV/FL 模式建立：

MELCOR 程式包含了 Core (COR)、Control Volume Hydrodynamics (CVH)、Fuel Dispersion (FDI)、RadioNuclide (RN)、Cavity (CAV)等組件，可用來模擬與分析爐心裂解、氫氣產生、放射產物釋出、熱(水)流以及用過燃料護套熔毀等現象。

依據台灣電力公司最終安全分析報告(Final Safety Analysis Report, FSAR)[27]之核一廠用過燃料池幾何利用 MELCOR/SNAP 建立除役階段用過燃料池模式，模式如圖 7，內包含用過燃料池(含內部組件)、廠房內上層建築體積。

COR Package 依據使用者建立需求，可以建立 PWR、BWR 之爐心或用過燃料池組件，舉本研究建立用過燃料池完全為例，COR Package 可以假想為一個存放空間，由巨觀角度觀察包含了用過燃料池空間、用過燃料棒、格架、流道系統等等，再針對這些巨觀組件個別輸入詳細資料，進而建立等效的用過燃料池模式。

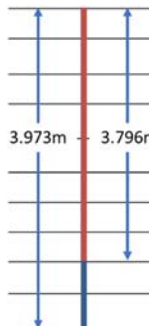
則本論文利用 MELCOR/SNAP 建立核一廠除役階段用過燃料池分析模式，其設定為燃料採用均勻排列，並假設 3,083 束用過燃料棒等效於"Ring 1"中，如圖 8 所示，且所有燃料衰變熱功率均勻地散布在用過燃料上，用過燃料池模式如圖 9 所示；

舉均勻燃料排列為例，如表 6 所示，用過燃料分割為 8 個節點，COR101~COR102 為格架底部與流道組件，COR103~COR108 為用過燃料散布其中。表 7 為均勻排料下用過燃料束各材料分布。

表 6 燃料束節點化與對應控制體積、流道(均勻排列)

					Core & CV Heights	
					inches	m
	Axial Level		Core Cell #	CV #	FL #	
	10	heated fuel 8	COR110	CV 2	FL003(out)	156.4501 3.97383
	9	heated fuel 7	COR109			137.9056 3.5028
	8	heated fuel 6	COR108			119.2048 3.0278
	7	heated fuel 5	COR107			100.504 2.5528
	6	heated fuel 4	COR106			81.80319 2.0778
	5	heated fuel 3	COR105			63.1024 1.6028
	4	heated fuel 2	COR104	CV 3	FL005(in)	44.4016 1.1278
	3	heated fuel 1	COR103			25.7008 0.6528
	2	baseplate, lower nozzle	COR102			7.000004 0.1778
	1	pipe, below baseplate	COR101			3.062994 0.0778
						0 0.0

表 7 燃料束節點化與對應組件質量分布(均勻排列)

		Height(m)	-----Mass Distribution, per assembly(kg)-----						
	Cell #	3.97383	Fuel Uranium	Zirc cladding	Supporting Steel	Non-Supporting Steel	Non-Supporting Steel	Shroud Steel	Former Steel
	COR110	3.5028	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR109	3.0278	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR108	2.5528	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR107	2.0778	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR106	1.6028	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR105	1.1278	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR104	0.6528	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR103	0.1778	66214.0694	17136.14	0	700	400	2000	400
	COR102	0.0778	0	0	7500.0	0	0	0	0
	COR101	0.0	0	0	0	0	0	0	0

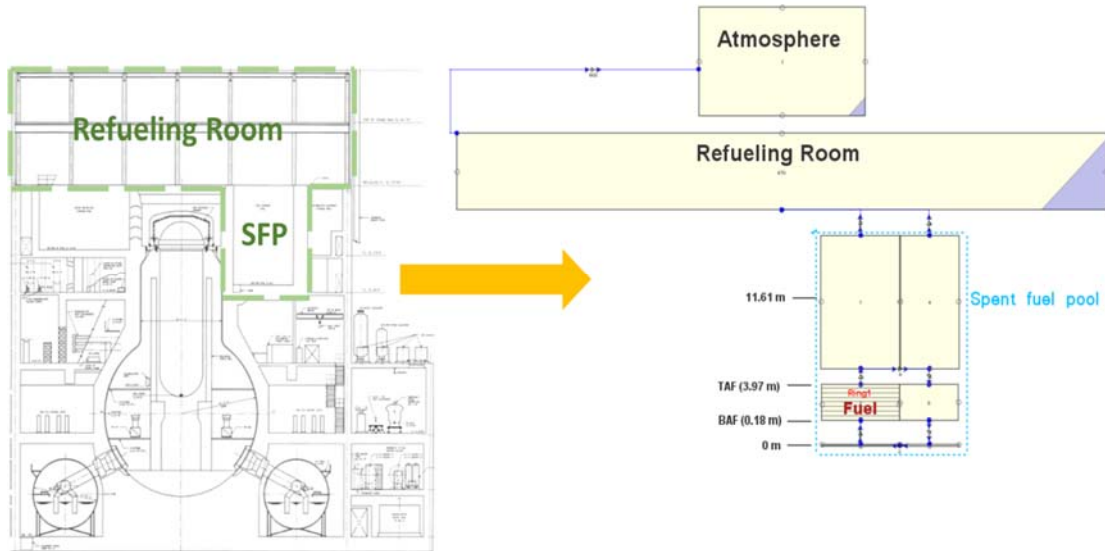


圖 7 核一廠用過燃料池 MELCOR/SNAP 模式

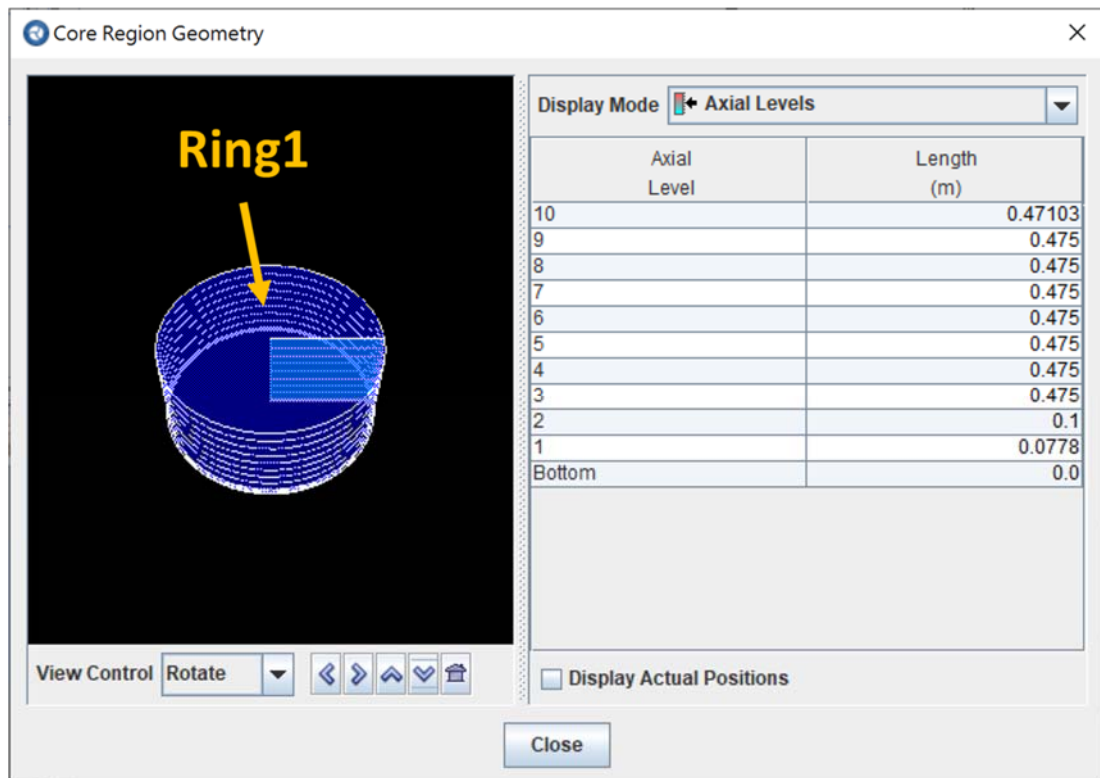


圖 8 3,083 束用過燃料棒等效於 MELCOR/SNAP 模式(均勻排列)

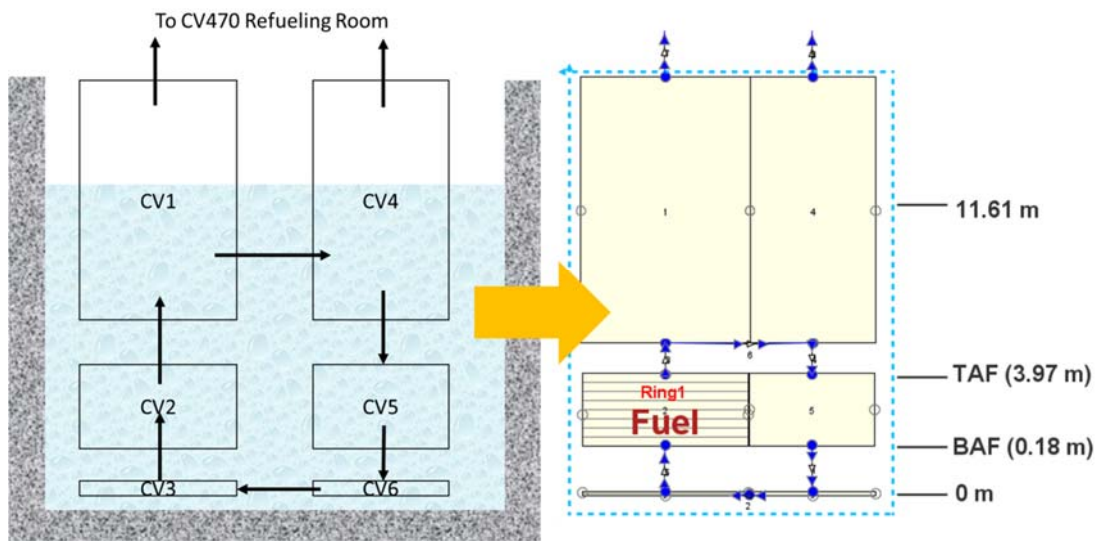
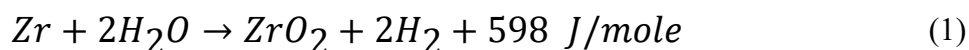


圖 9 核一廠用過燃料池 MELCOR/SNAP 模式(均勻排列)

2. 氧化模型建立

嚴重事故與過去探討的設計基準事故不同，事故期間要面對的熱源不只有衰變熱，當鋳合金護套溫度上升並達到發生劇烈氧化反應的臨界點也稱突偏點(Post-Breakaway)時，會產生所謂的鋳合金火災。鋳水反應化學式如方程式(1)：



氧化反應所產生的熱量有機率超過用過燃料衰變熱的 10 倍以上，當鋳合金護套溫度上升至造成快速氧化的溫度點時，衰變熱之比重已變得相對較低，必須緊急處理的事態變為鋳合金護套快速氧化所放出的化學熱。大量氧化熱造成鋳合金護套溫度快速上升，並帶來燃料與護套熔融等其他嚴重事故現象。當溫度大於 1537°C (1810K) 之突偏點後，與水的氧化因為高溫變成自發反應，更加加速燃料與鋳合金護套的熔解。值得一提，當護套到達突偏點後，此時注入冷卻水行為則需更加縝密的考量，原因在於冷卻水的注入並接觸正在高速氧化的鋳合金燃料護套，可能會因為水源的增加反而加劇鋳水反應，進而使鋳合金護套溫度產生更快速上升的現象，必須將更多冷卻水注入才能將其冷卻，故水源不足的情況下不該貿然對已達到或超過突偏溫度點的用過燃料束進行灌水。

美國阿岡國家實驗室 (Argonne National Laboratory, ANL) 對鋳合金 (包括 Zircaloy-2 合金與相似的 Zircaloy-4) 進行了相關氧化實驗研究 [28]：在低於 326.85°C (600 K) 的溫度下就可以觀察到鋳合金與空氣氧化的現象。實驗中，樣品維持恆定溫度下測量氧化物隨時間的變化，發現空氣氧化反應速率可以由拋物線描述，類似蒸汽氧化的速率。鋳合金氧化反應方程式(2)如下：

$$\frac{d(w^2)}{dt} = K(T) \quad (2)$$

其中 w 是單位面積的氧化金屬質量； $K(T)$ 為表面溫度 T 為變數的速率常數。在蒸氣環境下， $K(T)$ 利用 Urbanic-Heidrich 常數計算出之數值 [28]，如下方程式(3)和(4)

$$K(T) = 29.6 \exp\left(\frac{-16820}{T}\right) \text{ for } T < 1853K \quad (3)$$

$$K(T) = 87.9 \exp\left(\frac{-16610}{T}\right) \text{ for } T \geq 1853K \quad (4)$$

在美國桑迪亞國家實驗室在鋁合金火災的實驗中 [29]，確認達到突偏點後的護套氧化速度有所不同，故在 1580°C (1853K) 上下分為(3)及(4)兩個方程式。通常此差異稱之為 Break-away oxidation，當護套加熱到一定的高溫時，會因為外層氧化鋁的剝落使內層鋁合金大量裸露，產生一個區間加速的氧化效應。方程式(5)為空氣環境下的鋁合金護套氧化計算：

$$K(T) = 26.7 \exp\left(\frac{-17490}{T}\right) \quad (5)$$

MELCOR 氧化模式中計算因氧化造成鋁合金護套破損的函數，如下方程式(6)、(7)以及(8)：

$$LF = \int_0^t dt' \frac{t'}{\tau(T)} \quad (6)$$

$$\tau(T) = 10^{P_{Lox}} \quad (7)$$

$$P_{LOX} = -12.528 \log_{10} T + 42.038 \quad (8)$$

其中 P_{LOX} 為 MELCOR 對 Zirlo 與 Zircaloy-4 兩種合金為了符合 ANL 實驗所得出的方程式。而 LF 為計算鋁合金護套的生命週期，生命週期通常預設值為 1.0，但是比較用過燃料池實驗結果來說，設定為 1.2 可以更好地符合實驗結果。

MELCOR 中 Zircaloy-4 氧化模型其針對空氣氧化模型(Air oxidation model)包含了 Hofmann-Birchley [30]、Hayes-Roberson [31]/Leistikov-Berg [32]、Powers[33]、MELCOR、Mozart (Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety, IRSN)以及 Default，如圖 10 所示。

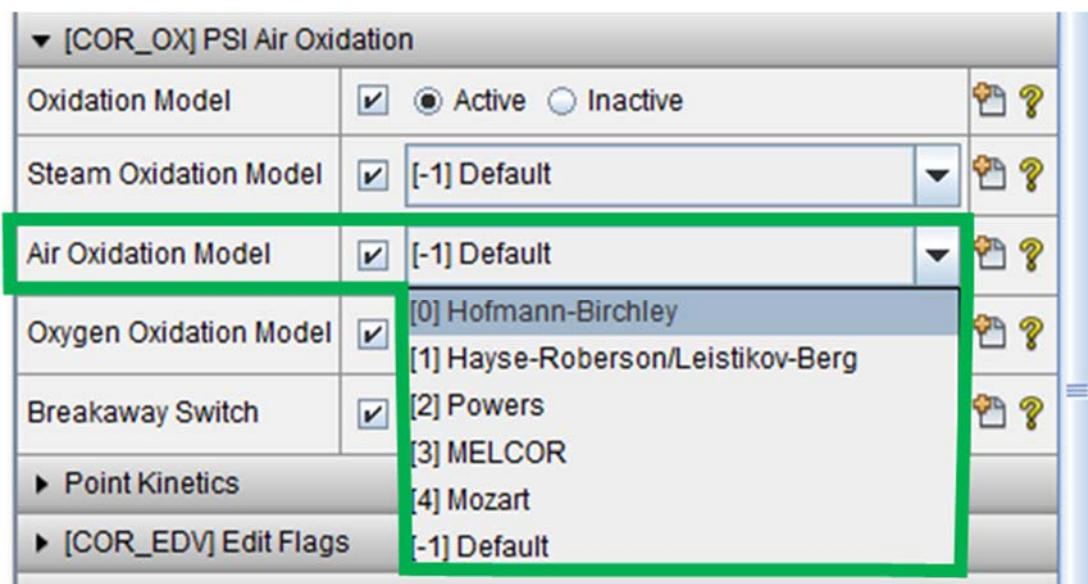


圖 10 Types of Air Oxidation Model

3. 衰變熱模式建立

於除役階段，由於用過燃料束仍存有一定之衰變熱，本研究依照目前核一廠用過燃料之數量以及運轉歷史，其參考資料為核電廠每一次大修之大修報告，其明確指出大修日期、每一週期之運轉時間、以及替換多少燃料束[34]。將蒐集資料整合後，根據國際報告 NUREG-0800[35]文件之計算衰變熱公式，估計核一廠目前之總衰變熱，其衰變熱公式以及說明如下：

本研究依據 NUREG-0800 中 ASB 9-2 公式進行燃料束衰變熱計算。ASB 9-2 於估算衰變熱功率，係將其分為分裂產物衰變熱(Fission Product Decay Heat)與重元素衰變熱(Heavy Element Decay Heat)功率兩部分，其衰變熱公式以及說明如下：

- 分裂產物衰變熱：

$$\frac{P}{P_0}(\infty, t_s) = \frac{1}{200} \sum_{n=1}^{n=11} A_n \exp(-a_n t_s) \quad (9)$$

$$\frac{P}{P_0}(t_0, t_s) = (1 + K) \left[\frac{P}{P_0}(\infty, t_s) - \frac{P}{P_0}(\infty, t_0 + t_s) \right] \quad (10)$$

其中，

$\frac{P}{P_0}$ = 功率因子(fraction of operating power)

t_0 = 運轉時間(cumulative reacting operating time, seconds)

t_s = 停機時間(time after shutdown, seconds)

K = 不準度因子 (uncertainty factor), $0.2 \text{ for } 0 \leq t_s < 10^3$ and $0.1 \text{ for } t_s \geq 10^3$

其中，P 為衰變熱功率； P_0 為衰變初始功率； t_0 為運轉開始到停機歷經的時間，單位為秒； t_s 為停機到計算時間點歷經的時間，單位為秒；K 為不準度因子(Uncertainty Factor)，若 $0 \leq t_s < 10^3$ ，則 $K=0.2$ ；若 $10^3 \leq t_s \leq 10^7$ ，則 $K=0.1$ ； A_n 和 a_n 為實驗的近似係數，其對應之係數值如表 8。值得注意的是，雖該公式所適用範圍僅在小於 10^7 秒，但在超出此範圍時，該實驗認為該公式與計算結果仍能保持在 10%以內的誤差。

- 重元素衰變熱功率：

$$\frac{P(U-239)}{P_0} = 2.28 \times 10^{-3} C \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{f25}} [1 - \exp(-4.91 \times 10^{-4} t_0)] \quad (11)$$

$$\times [\exp(-4.91 \times 10^{-4} t_s)]$$

$$\frac{P(N_p-239)}{P_0} = 2.17$$

$$\times 10^{-4} C \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{f25}} \{1.007[1 - \exp(-3.41 \times 10^{-6} t_0)] \quad (12)$$

$$\times \exp(-3.41 \times 10^{-6} t_s) - 0.007 [1$$

$$- \exp(-4.91 \times 10^{-4} t_0)] \times \exp(-4.91 \times 10^{-4} t_s)\}$$

其中，

$$\frac{P(U-239)}{P_0} = \text{U-239 的功率因子}$$

$$\frac{P(N_p-239)}{P_0} = \text{Np-239 的功率因子}$$

t_0 = 運轉時間(cumulative reacting operating time, seconds)

t_s = 停機時間(time after shutdown, seconds)

σ_{25} = effective neutron absorption cross section of U-235

σ_{f25} = effective neutron fission cross section of U-235

$C \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{f25}}$ 保守假設為 0.7

其中，P(U-239)和 P(Np-239)分別代表 U-239 和 Np-239 之衰變熱功率；P0 為衰變初始功率； t_0 為運轉開始到停機歷經的時間，單位為秒； t_s 為停機到計算時間點歷經的時間，單位為秒；C 為轉化比(Conversion Ratio)，當消耗一個 U-235 原子時，可以產生的 Np-239 原子數； σ_{25} 為 U-235 之有效中子吸收截面(Effective Neutron Absorption Cross Section)； σ_{f25} 為 U-235 之有效中子分裂截面(Effective Neutron Fission Cross Section)；根據 ASB 9-2 衰變熱功率計算式， $C \frac{\sigma_{25}}{\sigma_{f25}}$ 項保守假設為 0.7。

依照核一廠之現況輸入至上述公式後即可計算每一週期之衰變熱，並可依照不同觀測日期，計算總衰變熱隨時間之變化。本研究將觀測日期訂為 2020 年 11 月，而依照行政院視察報告，核一廠 1 號機之最後週期結束時間為 2014 年 12 月 10 日，其計算結果如表 9 所示，其總衰變熱約為 0.708MW。圖 11 為使用本研究所建立衰變熱計算之核一廠於最後批次退出後一年至十年間之總衰變熱變化趨勢。

表 8 實驗之近似係數 [35]

n	A_n	$a_n(\text{sec}^{-1})$
1	0.5980	1.772
2	1.6500	5.774×10^{-1}
3	3.1000	6.743×10^{-2}
4	3.8700	6.214×10^{-3}
5	2.3300	4.739×10^{-4}
6	1.2900	4.810×10^{-5}
7	0.4620	5.344×10^{-6}
8	0.3280	5.716×10^{-7}
9	0.1700	1.036×10^{-7}
10	0.0865	2.959×10^{-8}
11	0.1140	7.585×10^{-10}

表 9 衰變熱計算

第幾次大修	冷卻時間(s)	運轉天數(days)	運轉時間(s)	衰變熱(W)
1	1.27E+09	755	6.52E+07	2.09E+04
2	1.24E+09	380	3.28E+07	1.53E+04
3	1.20E+09	425	3.67E+07	8.47E+03
4	1.17E+09	287	2.48E+07	1.41E+04
5	1.13E+09	408	3.53E+07	1.76E+04
6	1.09E+09	485	4.19E+07	1.95E+04
7	1.04E+09	485	4.19E+07	1.90E+04
8	9.93E+08	535	4.62E+07	2.02E+04
9	9.49E+08	483	4.17E+07	1.71E+04
10	9.01E+08	523	4.52E+07	1.80E+04
11	8.65E+08	389	3.36E+07	1.40E+04
12	8.30E+08	369	3.19E+07	1.56E+04
13	7.91E+08	420	3.63E+07	1.94E+04
14	7.49E+08	464	4.01E+07	2.20E+04
15	7.03E+08	497	4.29E+07	2.47E+04
16	6.56E+08	517	4.47E+07	2.92E+04

17	6.02E+08	589	5.09E+07	2.87E+04
18	5.56E+08	503	4.35E+07	3.39E+04
19	5.07E+08	535	4.62E+07	2.73E+04
20	4.63E+08	489	4.22E+07	3.05E+04
21	4.10E+08	581	5.02E+07	2.69E+04
22	3.60E+08	543	4.69E+07	3.27E+04
23	3.11E+08	539	4.66E+07	2.79E+04
24	2.66E+08	494	4.27E+07	2.89E+04
25	2.18E+08	528	4.56E+07	2.95E+04
26	1.76E+08	449	3.88E+07	3.34E+04
27	1.30E+08	510	4.41E+07	1.41E+05
Total	7.35E+05W			

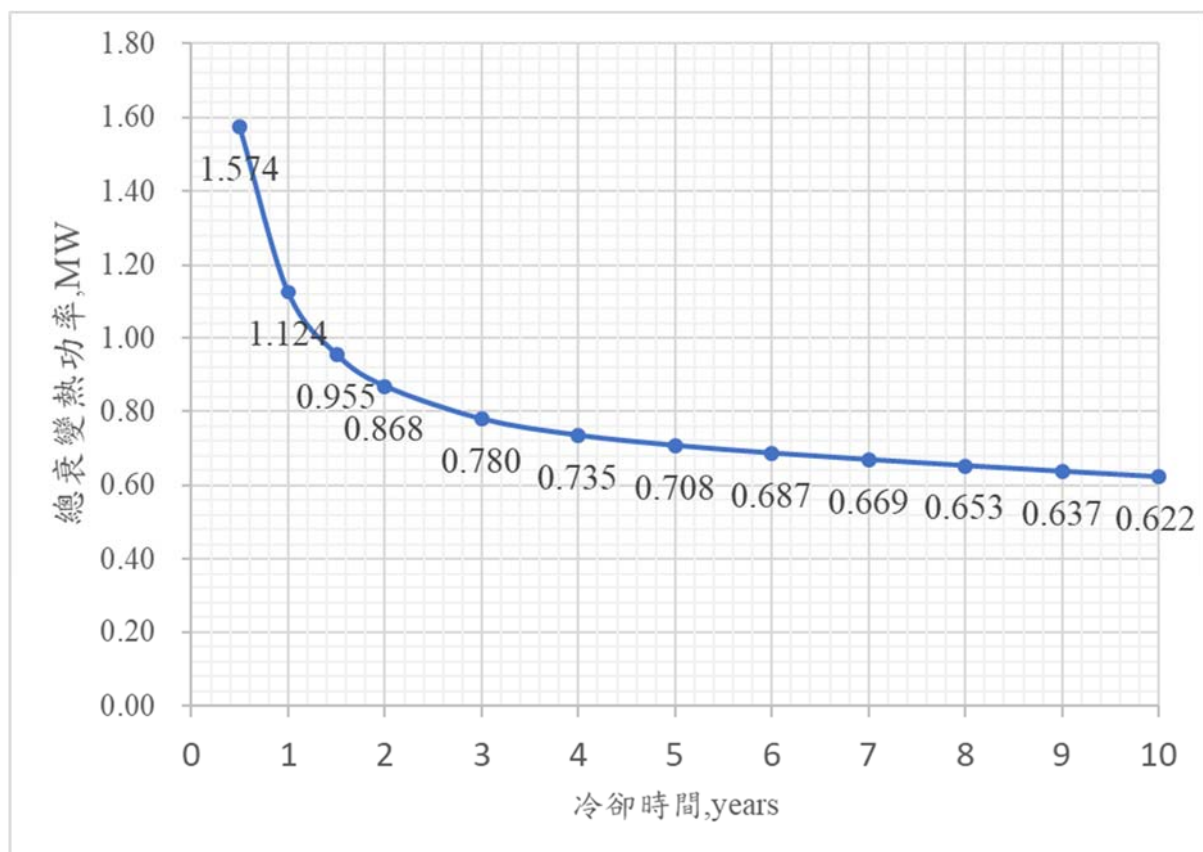


圖 11 核一廠一號機停機 10 年內衰變熱功率趨勢

三、 用過燃料池之事故模擬結果與暫態分析

1. 核一廠全黑事故評估(基本案例)

在進行核一廠除役階段用過燃料池事故安全評估時，依據核一廠現況條件進行基本案例設定，假設機組停機五年後且燃料全部退出至用過核子燃料池，並發生假想電廠全黑事件(SBO)，假設如下：

- (1) 假設核一廠停機後五年發生 SBO，衰變熱功率 0.66MW；
- (2) 用過核子燃料池所有的冷卻與補水系統均保守假設不可用；
- (3) 用過核子燃料池 3,083 束容量全滿；
- (4) 用過核子燃料池初始水位為燃料上方 7.1015 m；
- (5) 廠房、池壁為絕熱邊界；
- (6) 燃料、格架等池內組件均為 41°C；
- (7) 廠內均一大氣壓(0.1013MPa)；
- (8) 廠內氣體分布為氮氣 80%(粒子數比)、氧氣 20 %；
- (9) 蒸氣分壓 3564 Pa；
- (10) 啟用輻射熱傳效應；
- (11) 對外有空氣對流；
- (12) 用過核子燃料池與反應器爐穴分隔，即用過核子燃料池的閘門關上。

用過核子燃料池在冷卻系統喪失事件發生後，假設若無啟動任何補水系統，燃料池之池水將逐漸被加熱至飽和溫度(100°C)，燃料池水位因蒸發作用開始降低，直至燃料棒裸露，而液態水在常壓下之汽化熱為 2.26 MJ/kg-s，故少量水即可提供大量的移熱能力，因此燃料池中的燃料在未完全裸露

前，可藉由蒸氣冷卻之移熱能力將衰變熱移除，並使燃料護套與燃料丸溫度維持水的飽和溫度區間，而後因燃料棒完全裸露無法再藉由池水移走衰變熱，溫度將迅速升高。

通常用過燃料池的熱源只有用過燃料所產生的衰變熱，若有穩定的水源提供，則一定的注水量即可保持燃料池的安全；若用過燃料池喪失注水，水位下降至有效燃料頂端(TAF)，當 1/3 的用過燃料束裸露時，下方冷卻水因燃料加熱的所產生的水蒸氣向上流動並帶走熱量(蒸氣冷卻)，此時燃料仍處於安全的狀態。如水位持續下降，當蒸氣無法帶走足夠的熱量，此時鋁合金護套溫度開始上升，當溫度達到 527°C (800K) 以上後，護套與水蒸氣的反應速率會開始加速，到 815°C (1088K) 後開始大量產生氫氣，在溫度上升的同時，護套的氧化層開始加厚造與內部的放射氣體造成護套環應力的改變，導致護套膨脹且特定區域破損。在 MELCOR 的模擬計算中，程式計算護套溫度到超過設定值 900°C (1173K) 或者某一節點的鋁合金護套幾何因為氧化或熔化而消失，這代表護套已經失效，其任一情形發生後，MELCOR 會模擬護套損壞的情形，並將燃料間隙中的放射產物釋出至廠內；而每個用過燃料池節點的放射產物含量則透過 RN 組件輸入，參考軸向及徑向功率分布而計算出放射產物於用過燃料池各區域之比例。

當鋁合金護套的溫度因持續接受氧化熱而繼續上升，到達熔點時鋁合金護套開始液化，而氧化鋁的熔點高於鋁合金，會發現熔融鋁合金被外層氧化鋁包覆住的現象，此行為稱為鋁合金護套熔蠟下移(Candling)，此時鋁合金護套會變形失效，在 MELCOR 則是以熔點溫度來模擬此情形。

當燃料溫度上升至熔點 2840°C (3113K)，燃料開始熔化，此時液態核子燃料會繼續沿著下方完整的護套外壁進行熔蠟下移，而下移的過程有機率因氣體、水源被冷卻，在冷卻與熔化間重複循環，最後落至池底並成為固體液體混合的熔渣，MELCOR 在模擬液態燃料向下移動時，並沒有考慮動量方程式，而是使用單純的穩態流來進行計算。當特定質量的燃料因為

高溫液化並向下移動，MELCOR 會計算當它抵達下一節點後，部分質量被冷凝成固體，其餘質量的則繼續向下移動，MELCOR 每個節點都會進行凝固計算，其計算過程過於繁複且參雜許多經驗方程式，細節可參考 MELCOR 參考手冊 [36]。

本研究之核一廠用過核子燃料池 MELCOR 模式分析之水位結果如圖 12，由電廠全黑事故發生到燃料裸露之時間為 786 小時，平均水位降低狀況為每小時下降 0.009 公尺；燃料溫度如圖 13，為求保守，採用護套溫度升至 Boral 熔化溫度點 657°C 之時間為大約 1197 小時，而護套溫升至 900°C 時間點為 1216 小時。

表 10 為基本案例重要事件時序表，0 秒 SBO 事故發生，786 小時後低於 TAF，此時少部分氫氣開始產生，在 1197 小時後燃料溫度溫升至 Boral 熔化溫度點 657°C ，接著溫升至 900°C 為 1216 小時，最後燃料及護套熔毀於 1233 小時。

表 10 基本案例重要事件時序表

核一廠 SBO 案例	Time(hr)
SBO 發生	0
氫氣	784
水位低於 TAF	786
Boral 開始溶化(657°C)	1197
鋁合金火災發生溫度(900°C)	1216
燃料熔毀	1233

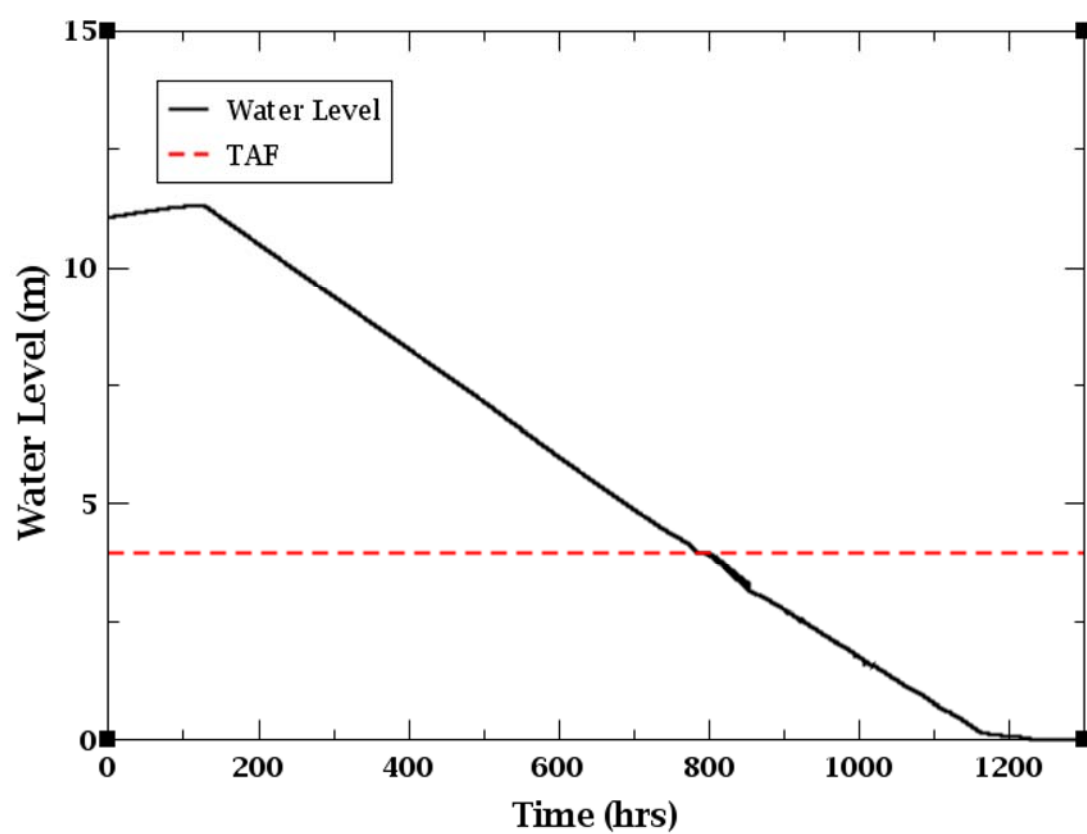


圖 12 燃料池水位，單位:m

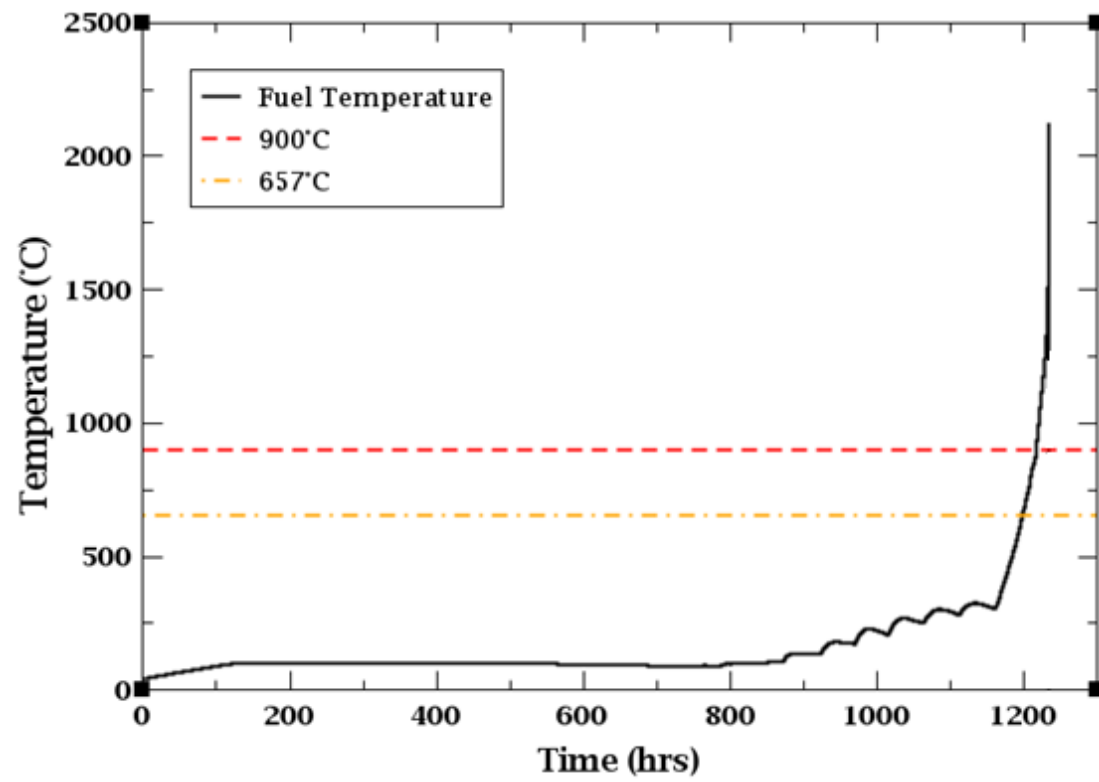


圖 13 燃料溫度，單位: °C

2. MELCOR 程式計算模式靈敏度分析

氧氣濃度對鋁合金火災之影響評估

在美國桑迪亞實驗室開發之 Zircaloy 氧化模型下分析不同氧氣濃度對用過燃料池溫升現象，固定蒸氣分壓 3564 Pa，結果如圖 14 至圖 17 為不同氧氣濃度下的計算結果，圖 14 為不同氧氣濃度下護套峰值溫度(PCT)，各氧氣濃度案例之護套峰值溫度溫升至 900°C 之時間分別為 89.7 小時(3%)，81.4 小時(5%)，73.3 小時(7%)，63.1 小時(10%)，61.6 小時(13%)，61.4 小時(15%)，61.3 小時(20%)，500°C 前溫升速率非常接近，而超過 500°C 後很明顯氧氣濃度越低越抑制氧化反應，氧氣濃度 7%以下即能有效減緩鋁合金護套因氧化熱溫升至 900°C 之時間；圖 15 為不同氧氣濃度下氧化熱功率，初始氧化時間點非常接近，但瞬間氧化熱功率就有所差異，如氧氣濃度越高則氧化熱功率越高；圖 16 為不同氧氣濃度下總氧化熱，不同氧氣濃度正相關於總氧化熱；圖 17 為不同氧氣濃度下總氫氣產量。

因此，總結以上分析結果，顯示不同氧氣濃度對於總產氫量結果而言影響性不大。而在整體 500°C 前溫升速率非常接近，而超過 500°C 後很明顯氧氣濃度越低越抑制氧化反應，氧氣濃度越低，抑制了突偏之溫升斜率，各氧氣濃度案例之護套峰值溫度溫升至 900°C 之時間分別為 89.7 小時(3%)，81.4 小時(5%)，73.3 小時(7%)，63.1 小時(10%)，61.6 小時(13%)，61.4 小時(15%)，61.3 小時(20%)，氧氣濃度 7%以下即能有效減緩鋁合金護套因氧化熱溫升至 900°C 之時間。

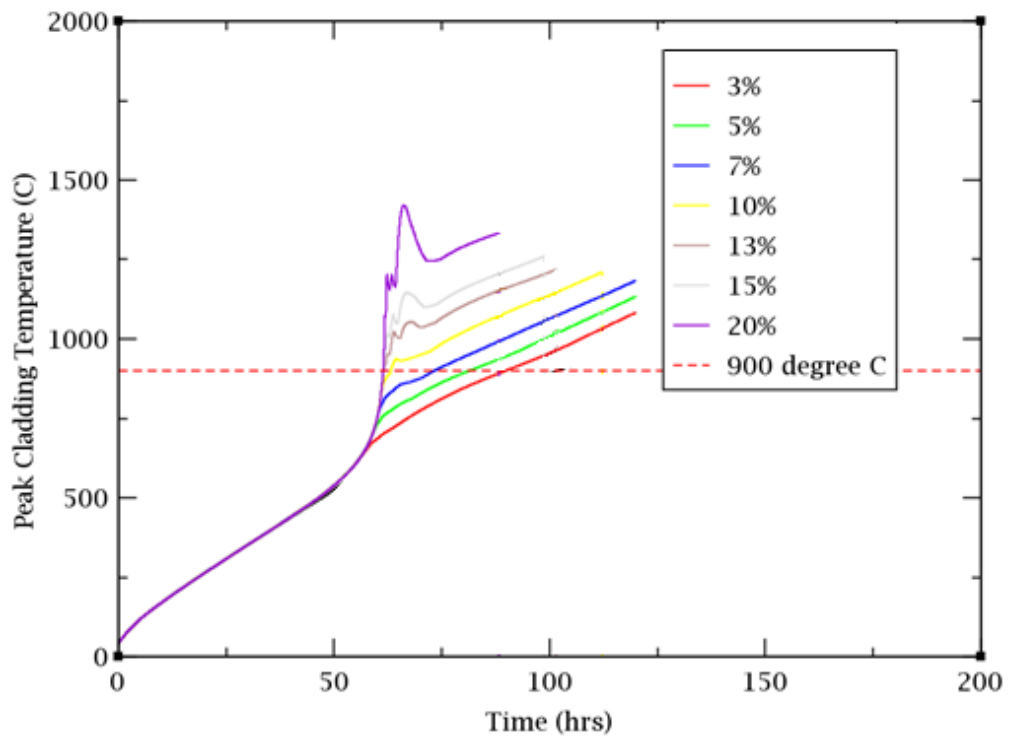


圖 14 不同氧氣濃度下護套峰值溫度(PCT)，單位:°C

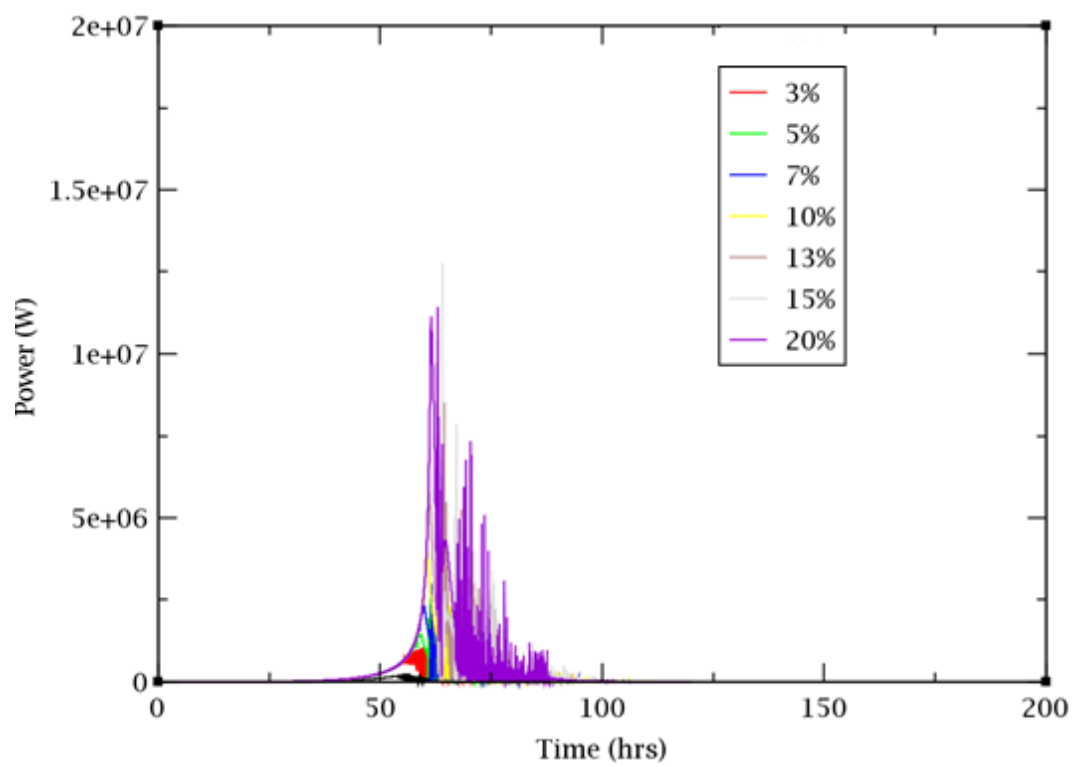


圖 15 不同氧氣濃度下氧化熱功率，單位: W

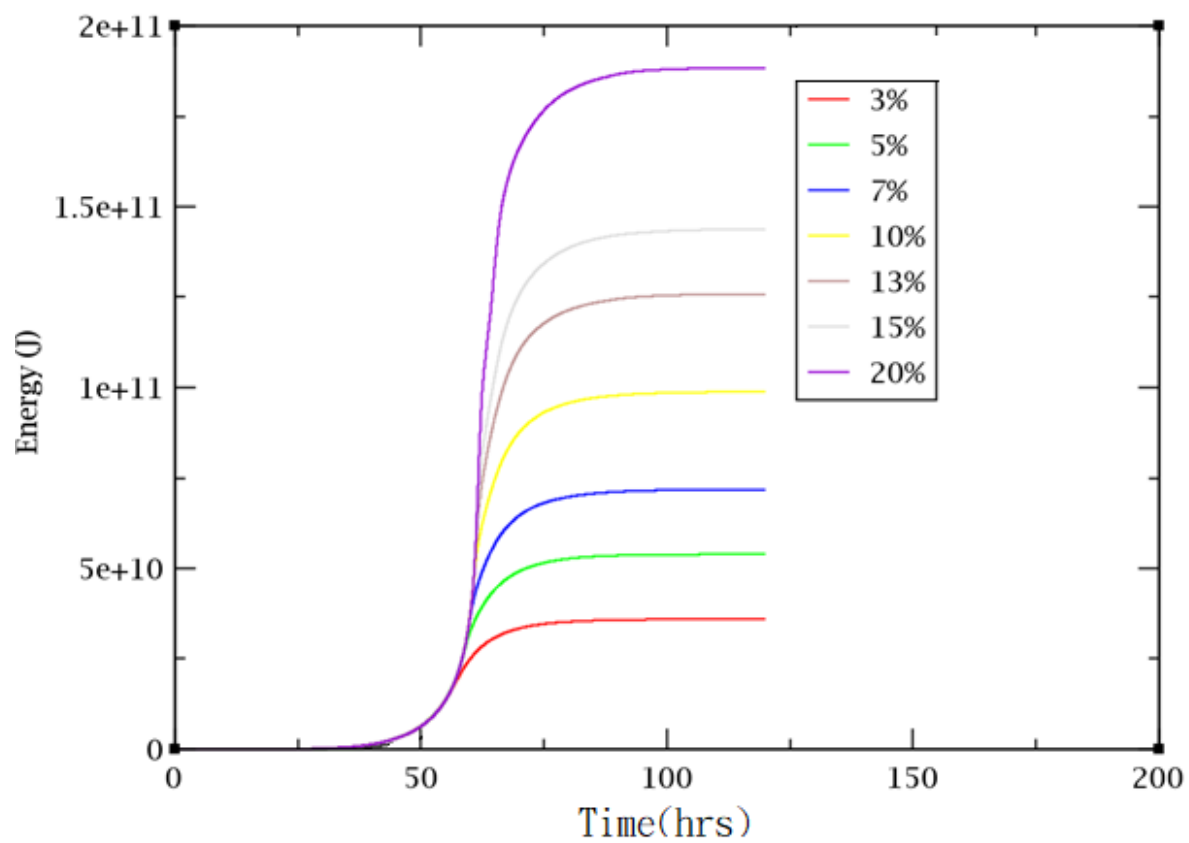


圖 16 不同氧氣濃度下總氧化熱，單位:J

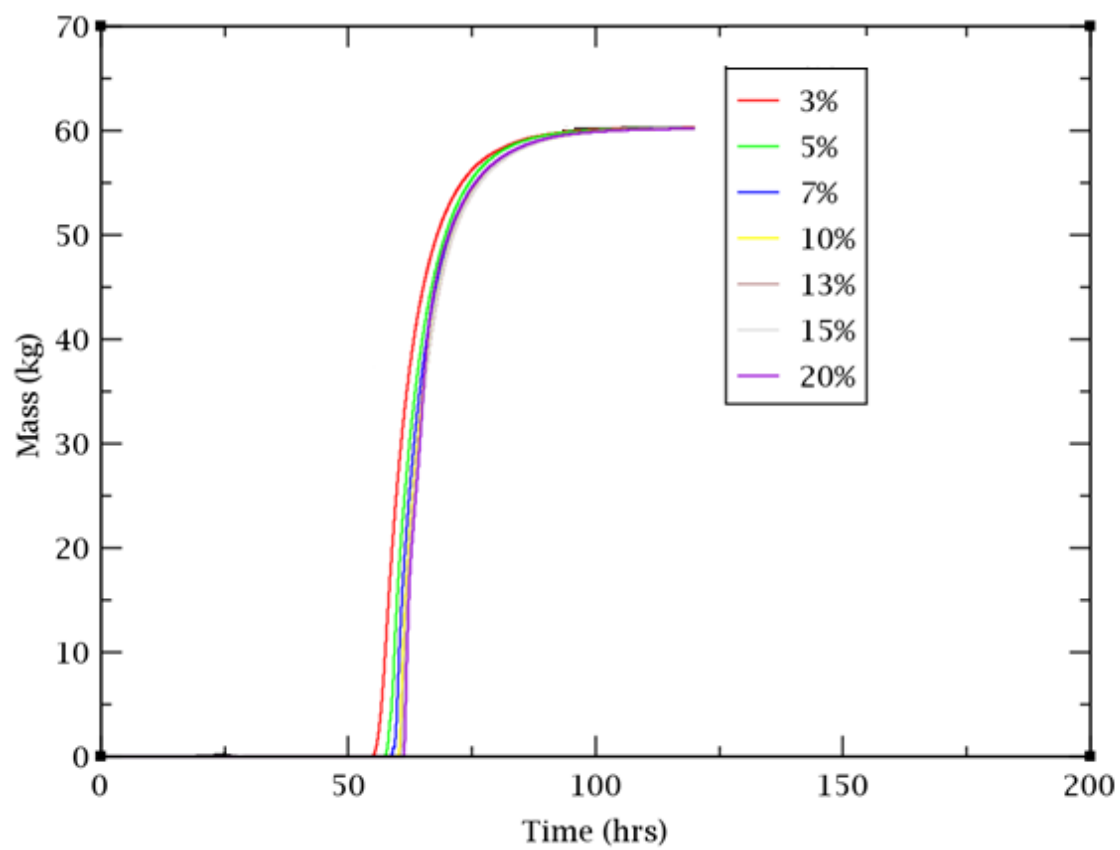


圖 17 不同氧氣濃度下總氫氣產量，單位: kg

蒸氣分壓對鋁合金火災之影響評估

在使用 Zircaloy 氧化模型下分析不同蒸氣分壓對用過燃料池溫升現象時，假設固定氧氣濃度 20%，結果如圖 18 至圖 21 為不同蒸氣分壓下的計算結果，圖 18 為不同蒸氣分壓下護套峰值溫度(PCT)，各蒸氣分壓案例之護套峰值溫度溫升至 900°C 之時間分別為 61.16 小時(225.4 Pa)，61.20 小時(610.4 Pa)，61.25 小時(1001 Pa)，61.27 小時(1497 Pa)，61.31 小時(2337 Pa)，61.37 小時(3564 Pa)，可以看出整體溫升速率非常接近，而在溫度 1250°C 左右有些微差異，但這差異不影響後續溫升結果；圖 19 為不同蒸氣分壓下氧化熱功率，初始氧化時間點非常接近，但瞬間氧化熱功率就有所差異，如蒸氣分壓於 1001 Pa 有出現高於 15MW 之衰變熱功率；圖 20 為不同蒸氣分壓下總氧化熱，不同蒸氣分壓之總氧化熱最終收斂於 187 GJ 左右；圖 21 為不同蒸氣分壓下總氫氣產量，可以看出蒸氣分壓越小氫氣產量越低之趨勢。

因此，綜合以上分析結果，顯示不同蒸氣分壓對於溫升結果、氧化熱功率、總氧化熱功率影響性不大，主要差異在於氫氣產生量。

各蒸氣分壓案例之護套峰值溫度溫升至 900°C 之時間幾乎都位於 61 小時左右，可以看出整體溫升速率非常接近，而在溫度 1250°C 左右有些微差異，但這差異不影響後續溫升結果。蒸氣分壓 3564 Pa 產氫量相對最大為 60 kg 左右，225.4 Pa 產氫量相對最小 4.8 kg 左右，蒸氣分壓越小越有效抑制氫氣產量之趨勢。

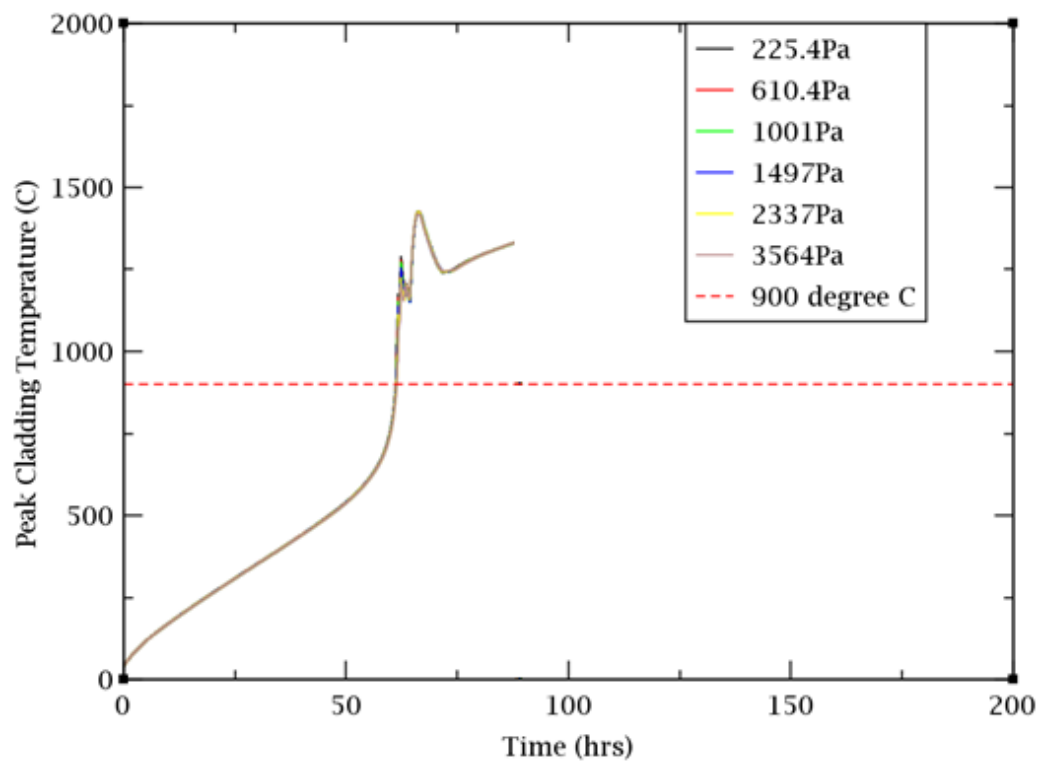


圖 18 不同蒸氣分壓下護套峰值溫度(PCT)，單位:°C

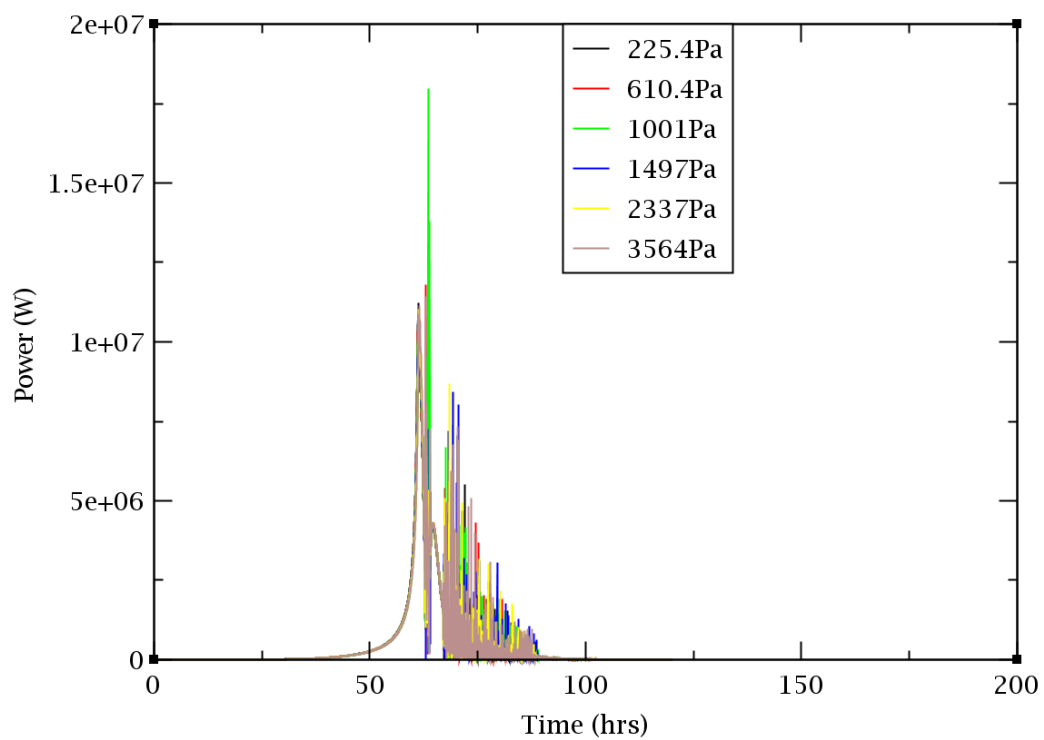


圖 19 不同蒸氣分壓下氧化熱功率，單位: W

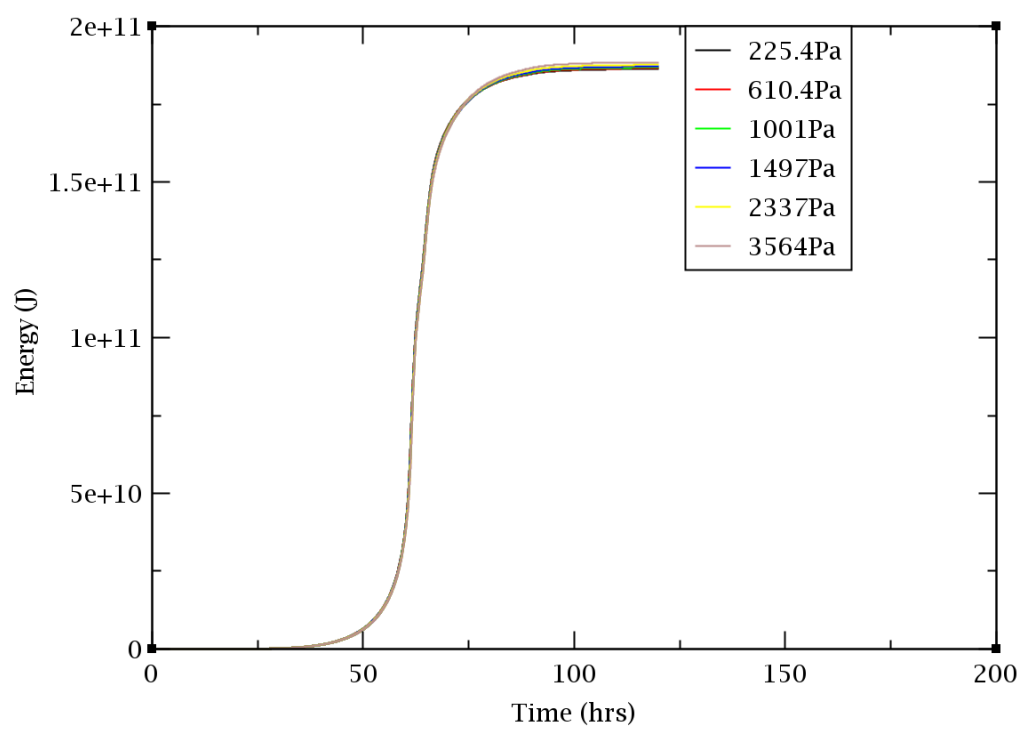


圖 20 不同蒸氣分壓下總氧化熱，單位: J

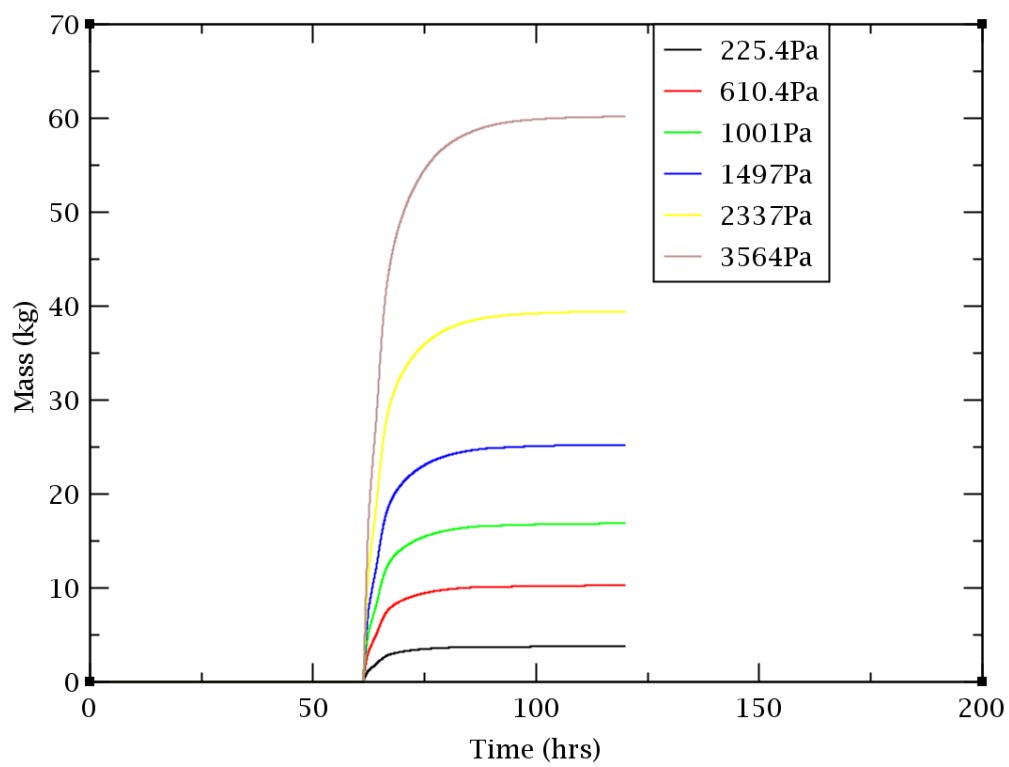


圖 21 不同蒸氣分壓下總氫氣產量，單位: kg

氧化模型對鋁合金火災之靈敏度分析

氧化計算發展有數年之久，國際也有許多實驗數據與經驗公式，而在 MELCOR 程式中提供多種氧化計算模式供選擇，包含有 Hofmann-Birchley [27] (Type[0])、Hayes-Roberson [28]/Leistikov-Berg [29] (Type[1])、Powers [30] (Type[2])、MELCOR(Type[3])、Mozart (Type[4])、Default (Type[-1])，如圖 22。

圖 23 為不同空氣氧化模型護套峰值溫度(PCT)，可以觀察出不同作者之空氣氧化模型於溫升速率、突偏發生溫度點皆不同。Default (Type[-1])溫升至 900°C 時間為 61.6 小時；Hofmann-Birchley (Type[0])為 75.6 小時；Hayes-Roberson /Leistikov-Berg (Type[1])為 55.4 小時；Powers (Type[2])為 89.6 小時；MELCOR(Type[3])為 40.5 小時；Mozart (Type[4])為 79.3 小時，結果而言 MELCOR(Type[3])溫升結果相對最為保守，500°C 前即發生突偏現象造成溫度加速上升；Powers (Type[2])之突偏現象發生溫度點較符合許多國際文獻之 900°C 描述[5][18]。圖 24 為不同空氣氧化模型氧化熱功率，MELCOR(Type[3])在 25 小時候即發生突偏氧化功率最早加速；不同作者氧化模型之最大氧化熱功率與速率皆不同外，最大氧化熱功率皆超過 15MW，且 Powers (Type[2])可以達到最大 40MW，遠遠大於用過燃料自身之衰變熱。圖 25 為不同空氣氧化模型總氧化熱，值得注意的是不同作者氧化模型的氧化熱最後都收斂於 187 GJ 左右。圖 26 為不同空氣氧化模型總氫氣產量，產氫時間點隨著氧化發生時間而有所變化，越早發生則越早開始產生氫氣，且所有作者之產氫量皆低於 60kg，其中 Hayes-Roberson /Leistikov-Berg (Type[1])、MELCOR(Type[3])與 Default (Type[-1])產氫量最高，Powers (Type[2])之計算結果 52kg 左右為最低值，可以判斷 Powers (Type[2])之抓取蒸氣進行氧化反應之機率最低(對於其他作者之空氣氧化模型)。

▼ [COR_OX] PSI Air Oxidation	
Oxidation Model	☒ Active ☐ Inactive
Steam Oxidation Model	☒ [-1] Default
Air Oxidation Model	☒ [-1] Default
Oxygen Oxidation Model	☒ [-1] Default
Breakaway Switch	☒ [0] Enable in Steam and Air

▼ [COR_OX] PSI Air Oxidation	
Oxidation Model	☒ Active ☐ Inactive
Steam Oxidation Model	☒ [-1] Default
Air Oxidation Model	☒ [2] Powers
Oxygen Oxidation Model	☒ [-1] Default
Breakaway Switch	☒ [0] Enable in Steam and Air

▼ [COR_OX] PSI Air Oxidation	
Oxidation Model	☒ Active ☐ Inactive
Steam Oxidation Model	☒ [-1] Default
Air Oxidation Model	☒ [0] Hofmann-Birchley
Oxygen Oxidation Model	☒ [-1] Default
Breakaway Switch	☒ [0] Enable in Steam and Air

▼ [COR_OX] PSI Air Oxidation	
Oxidation Model	☒ Active ☐ Inactive
Steam Oxidation Model	☒ [-1] Default
Air Oxidation Model	☒ [3] MELCOR
Oxygen Oxidation Model	☒ [-1] Default
Breakaway Switch	☒ [0] Enable in Steam and Air

▼ [COR_OX] PSI Air Oxidation	
Oxidation Model	☒ Active ☐ Inactive
Steam Oxidation Model	☒ [-1] Default
Air Oxidation Model	☒ [1] Hayse-Roberson/Leistikov-Berg
Oxygen Oxidation Model	☒ [-1] Default
Breakaway Switch	☒ [0] Enable in Steam and Air

▼ [COR_OX] PSI Air Oxidation	
Oxidation Model	☒ Active ☐ Inactive
Steam Oxidation Model	☒ [-1] Default
Air Oxidation Model	☒ [4] Mozart
Oxygen Oxidation Model	☒ [-1] Default
Breakaway Switch	☒ [0] Enable in Steam and Air

圖 22 MELCOR/SNAP 中 PSI 之不同空氣氧化模型(Air oxidation model)分

析參數

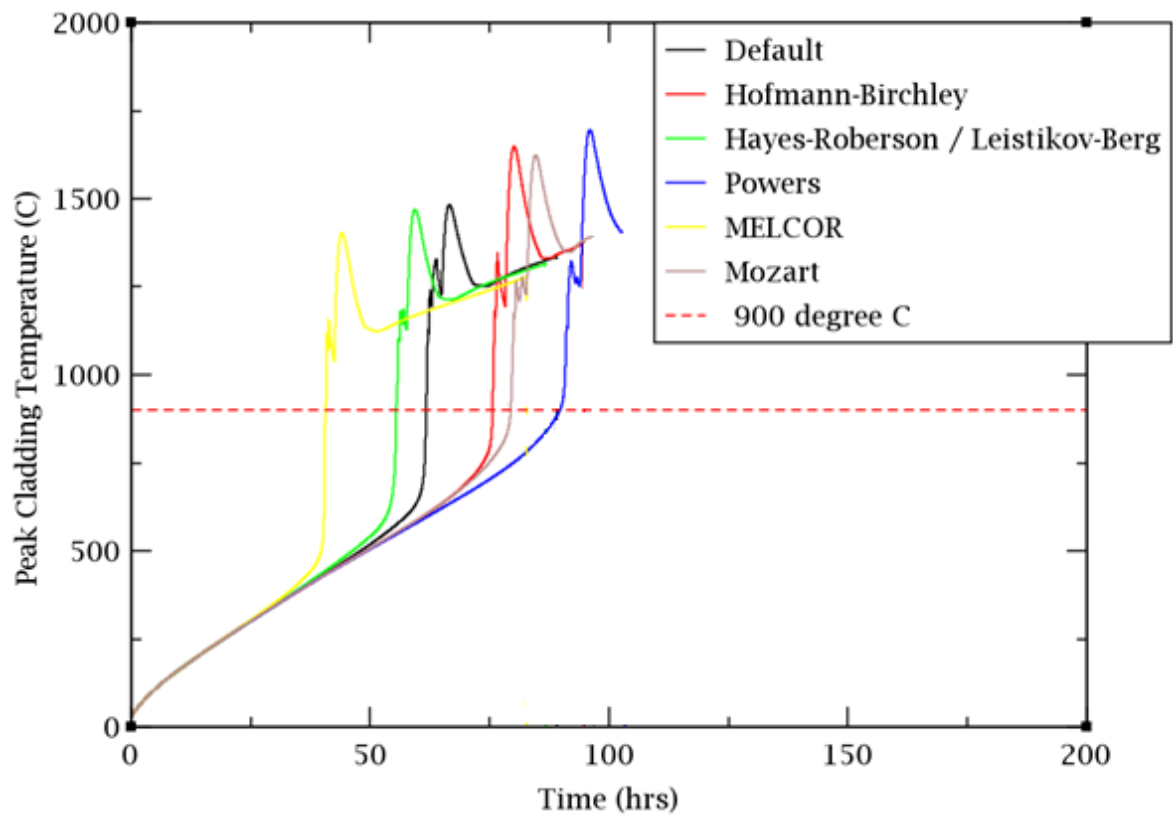


圖 23 不同空氣氧化模型護套峰值溫度(PCT)，單位:°C

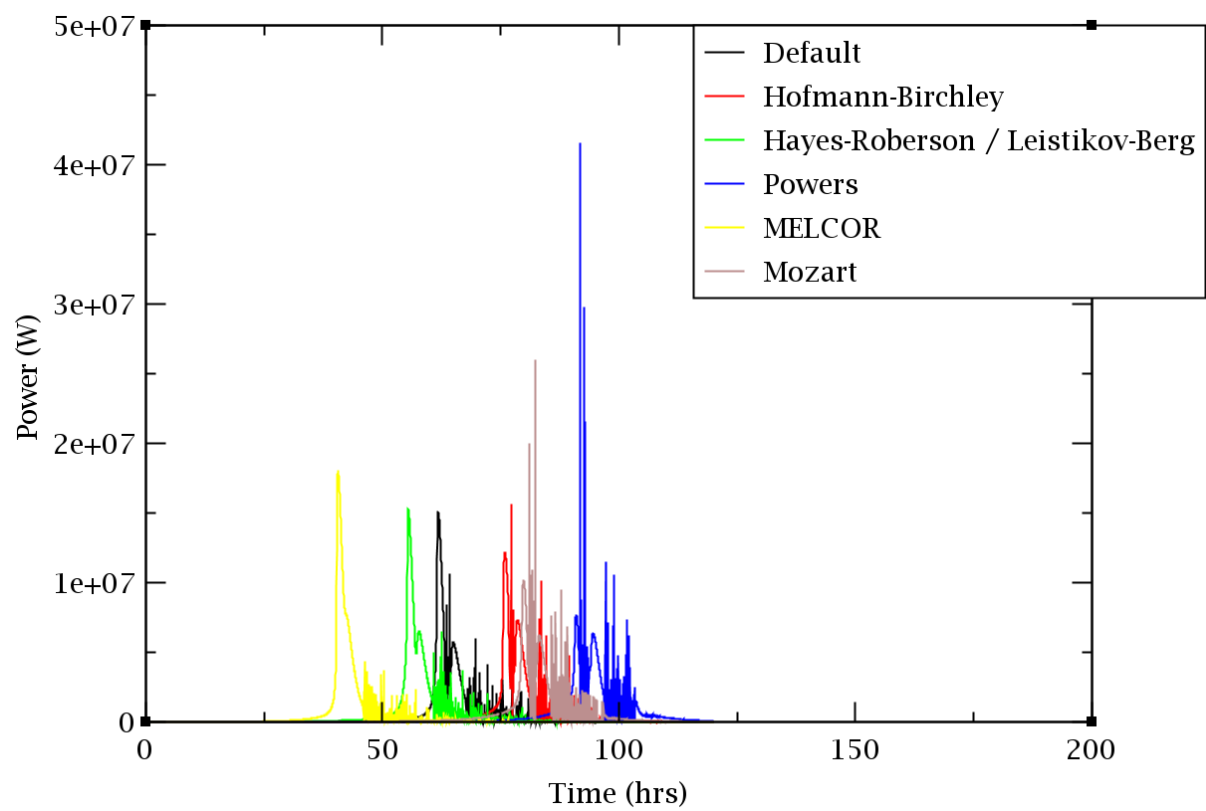


圖 24 不同空氣氧化模型氧化熱功率，單位: W

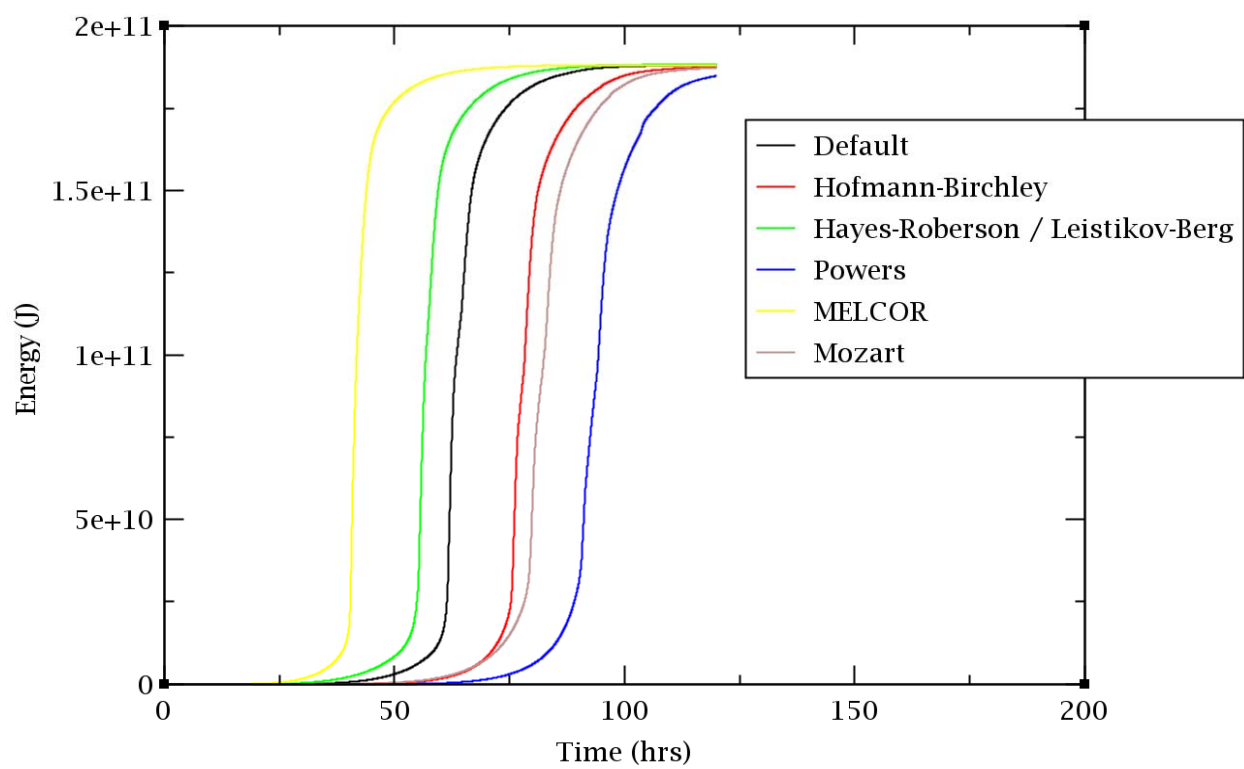


圖 25 不同空氣氧化模型總氧化熱，單位: J

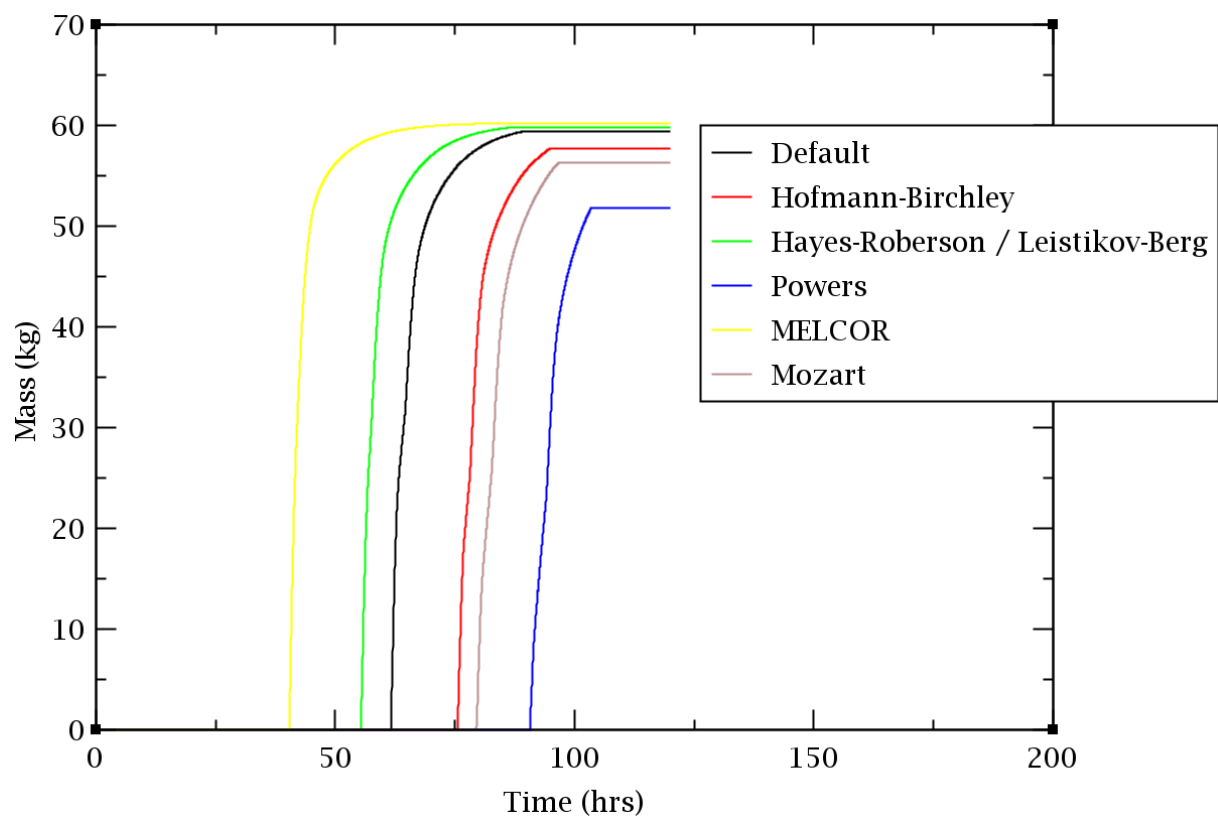


圖 26 不同空氣氧化模型總氫氣產量，單位:kg

(4)衰變熱對鋁合金火災之靈敏度分析

文獻 NUREG-1353 說明鋁合金火災的發生機率與衰變熱功率和燃料存放位置有高度的正相關性，例如：運轉中核電廠為了提高熱功率進而提高對核子燃料的燃耗，則之後取出的用過燃料則有更高的衰變熱功率，以及密集的用過燃料束擺放造成熱傳效應降低進而影響燃料快速升溫也是其中一個原因。評估用過燃料的存放位置對溫升結果的影響進行定性分析，用以確定鋁合金氧化火災的發生的可能性，此領域探討最廣泛的為美國核能管制委員會 2011 年發布的 NUREG-1353 [26] 中的 Generic Safety Issue (GSI) 82："Beyond Design Basis Accidents in Spent Fuel Pools" 為鋁合金氧化現象提供了許多的分析結果。

為評估核一廠用過燃料池於不同衰變熱條件下，燃料護套溫度是否在 10 小內溫升超過 900°C。本研究參考 RES/DSA/FSCB 2016-03 設計 MELCOR 用過燃料池之基本案例假設為：

- (1) 用過燃料放滿池中最大貯存數量 3,083 束用過燃料。
- (2) 第 0 秒用過燃料池完全喪失冷卻水，即初始水位為 0 公尺；
- (3) 廠房、池壁為絕熱邊界；
- (4) 初始大氣溫度、燃料、格架等廠內組件均為 30°C；
- (5) 廠內均一大氣壓(0.1013MPa)；
- (6) 廠內氣體分布為氮氣 80%(粒子數比)、氧氣 20 %；
- (7) 蒸氣分壓 3564 Pa；
- (8) 啟用輻射熱傳效應；
- (9) 對廠外無空氣對流；

(10)有無異物阻擋廠內自然空氣對流

(11)格架質量為 0；

本研究總共以核一廠 MELCOR 用過燃料池模式進行不同衰變熱之案例分析，包含(1)衰變熱採用 RES/DSA/FSCB 2016-03 中假設 60 GWd / MTHM 燃耗"單束"用過燃料束的功率乘上核一廠燃料池燃料總數 3,083 束之衰變熱，並採用均質排列(此為最保守之假設)；(2)將全池燃料之功率直接假設為核一廠最新退出之燃料，並以均質排列；(3)以核一廠實際各週期退出之燃料功率設定入燃料池模式，用過燃料束排列方式分為均質排列。並模擬冷卻 0.5 年、1 年、2 年、3 年、4 年至 5 年的燃料溫升結果。本研究之詳細分析成果整理於表 11

，其數值代表電廠停機多久冷卻時間(0.5 年~5 年)之燃料在事故發生後達到 900 °C 所需要之時間(小時)，採用假設 60 GWd / MTHM 燃耗之衰變熱，經 MELCOR 計算結果顯示停機後冷卻約 1.72 年後(內插法計算)之用過燃料在事故後 10 小時內不會由 30°C 溫升至 900°C；在假設全池均為最熱燃料(第 27 週期)之燃料溫升結果，停機冷卻 0.88 年後用過燃料不會在 10 小時內達 900°C；而實際核一廠用過燃料池衰變熱計算上升至 900°C 時間結果顯示依照目前核一廠實際燃料功率設計之案例，燃料護套溫度均不會在 10 小時內上升至 900°C。

然而核一廠一號機停機已近五年，依據 MELCOR 核一廠用過燃料池之溫升模擬，其停機五年後之計算結果顯示核一廠一號機用過燃料池在各種保守假設下，與 NUREG-1738 報告之分析結果為一致。

表 11 核一廠用過燃料池溫升至 900°C 於不同衰變熱、排列假設所需時間。(單位:小時)

停機後/年	Uniform (60 Burnup)	Uniform (All 27 Cycle)	Uniform (Actually)
0.5	3.9	5.5	26.7
1	6.9	11.4	38.3
2	11.2	22.7	50.2
3	16.3	31.9	56.2
4	19.9	38.3	59.7
5	23.6	41.9	62.1

四、研提核電廠除役階段之鋁合金火災管制建議

- 除評估核電廠於事故下發生鋁合金火災時，需考量鋁合金護套材料、型態、甚至燃料池排列、氧氣多寡、環境等，都會影響用過燃料池鋁合金火災之時序分析。
- 由於核一廠用過燃料鋁合金護套大部分為 Zircaloy-4 護套，而第 20 週期至 27 週期為 Zircaloy-2 護套，根據 ORNL-3281、NUREG/CR-0649 等文獻所顯示，國際將 Zircaloy-4 與 Zircaloy-2 兩者視為相同合金，Zircaloy-4 是由 Zircaloy-2 開發出來的，Zircaloy-4 鎳含量限制在 0.007 %以內、鐵含量被限制 0.12%~0.18%以內，其餘成分皆為相同。
- 由於國際上許多文獻將 Zircaloy-2 與 Zircaloy-4 在氧化溫升模型上視為接近的材料，但 Zircaloy-4 與 Zircaloy-2 抓取蒸氣反應之效率本質上有所區別，以及事故下發生氫脆之現象也會有所差異，所以建議須再評估對於抓取氫之後之溫升影響及氫脆造成護套提早脆化之影響。
- 而用過燃料池除了探討鋁合金溫度外，應將中子吸收材料之過熱融化現象列為重要考量因素之一。中子吸收材料(Boral、Boraflex 等)於用過燃料池中為防止用過燃料發生再臨界現象，如參考文獻[23]提到 Boral 融化之溫度點為 657°C (1214°F)、Boraflex 融化溫度點為 300°C (570°F)，以上溫度均在發生鋁合金火災之溫度點之下，假若中子吸收材料損毀而可能發生再臨界現象其臨界熱功率將會遠大於鋁合金火災之氧化熱功率，造成燃料更難以冷卻，故應考量其中子吸收材料之相對低溫安全性分析。(核一廠機組已停機多年，衰變熱已降至很低，無再臨界之考量)
- 於事故後期，高溫之鋁合金護套因氧化而脆化，當救援之冷卻水進入，便有可能使得已脆化之鋁合金護套因為淬火(quench)造成熱衝擊(thermal shock)而毀損，因此建議於事故救援策略中需考慮此現象。

- 值得一提，當護套到達突偏點後，此時注入冷卻水行為則需更加縝密的考量，原因在於冷卻水的注入並接觸正在高速氧化的鋁合金燃料護套，可能會因為水源的增加反而加劇鋁水反應，進而使鋁合金護套溫度產生更快速上升的現象，必須將更多冷卻水注入才能將其冷卻，故水源不足的情況下不該貿然對已達到或超過突偏溫度點的用過燃料束進行灌水。

肆、結論

本研究蒐集與彙整多篇有關鋁合金火災之重要國際文獻，例如 NUREG-2157、NUREG-1738、NUREG-1935、SECY-13-0112、NUREG/CR-6846 NUREG-2121、以及 NUREG/CR-5281 等，並成功以 MELCOR2.2 建立核一廠除役階段用過燃料池 MELCOR 分析模式進行安全性評估。以下條列說明本研究成果與結論：

- 一、根據 NUREG-2157、NUREG-1738 等文獻結論顯示：「用過燃料池發生嚴重事故之風險非常小」，其中用過燃料池因為外電喪失所導致的用過燃料束未被液態水所包覆之意外發生率落在 1.1×10^{-7} 到 2.9×10^{-8} 之間，分別是因為惡劣天氣和電廠相關或電網相關事故所造成；而因為嚴重的地震事件所造成的用過燃料束暴露在空氣中之機率非常小，介於 5.8×10^{-7} 和 $2.4 \times 10^{-6}/\text{yr}$ 之間；在氣候變遷(Climate Change)章節中，NRC 認為由龍捲風所引起的意外事故機率極低(約為 $10^{-9}/\text{yr}$)。
- 二、NUREG-2157 文獻提到，隨著電廠機組停機後時間越久，即使用過燃料池完全喪失冷卻水，但由於用過燃料束衰變熱隨著停機後時間越長而大幅下降，使得空氣冷卻性的可能性越來越高，也因此對於放置時間較長之用過燃料束，其鋁合金火災發生機率將有可能更低。
- 三、NUREG-1353 說明鋁合金火災的發生機率與衰變熱功率和燃料存放位置有高度的正相關性，例如：運轉中核電廠為了提高熱功率進而提高對核子燃料的燃耗，則之後取出的用過燃料則有更高的衰變熱功率，以及密集的用過燃料束擺放造成熱傳效應降低進而影響燃料快速升溫也是其中一個原因。
- 四、在研析鋁合金火災時，需考量鋁合金護套材料、型態、甚至燃料池排列、氧氣多寡、環境等，都會影響用過燃料池鋁合金火災之時序評估。由於核一廠用過燃料鋁合金護套大部分為 Zircaloy-4 護套，20 週期至 27 週期為 Zircaloy-2 護套，根據 ORNL-3281、NUREG/CR-0649 等文獻

所顯示，國際將 Zircaloy-4 與 Zircaloy-2 兩者視為相同合金，Zircaloy-4 是由 Zircaloy-2 開發出來的，Zircaloy-4 鎳含量限制在 0.007% 以內、鐵含量被限制 0.12%~0.18% 以內，其餘成分皆為相同。

五、當發生事故時，若無法長期將用過燃料束之衰變熱移除，則隨著時間與溫度上升，將經過三個主要現象：膨脹與破裂、燃料護套劇烈氧化、重新補水後的材料淬火。用過燃料池與運轉之反應爐不同，其在軸向並沒有明顯的餘弦熱通量分布，此特點將導致用過燃料護套膨脹之尺寸加大從而增加阻塞，此現象擁有共面性之用過燃料池下將導致同一高度之阻塞更為嚴重。而此局部堵塞將可能加速堵塞區域附近之表面溫度升高至 900°C 或 1000°C 之時間點(燃料護套開始與蒸氣或空氣劇烈發生氧化還原反應之溫度點)。

六、NRC 所發布的 NUREG-2121 中指出，燃料格架將可能”釘”住用過燃料束的膨脹現象，代表燃料格架可以一定程度的抑制用過燃料束的膨脹現象。

七、根據核一廠基本案例 SBO 事故分析結果中得知，電廠於事故後 786 小時用過燃料池水位才會低於 TAF，此時少部分氫氣開始產生，在 1197 小時後用過燃料溫度溫升至 Boral 熔化溫度點 657°C，接著 1216 小時後溫升至 900°C，最後約 1233 小時後燃料及護套才會熔毀。因此可知以目前核一廠停機後超過 5 年，且衰變熱如此低的情況下，電廠有充分的時間餘裕來進行救援措施之施行與準備，確保電廠之安全。

八、不同氧氣濃度(3%、5%、7%、10%、13%、15%、20%)對整體護套溫度峰值(PCT)在 500°C 前溫升速率非常接近，而超過 500°C 後很明顯氧氣濃度越低越抑制氧化反應，氧氣濃度越低，抑制了突偏現象之溫升斜率，延後溫升至 900°C 之時間，各氧氣濃度案例之護套峰值溫度溫升至 900°C 之時間分別為 89.7 小時(3%)，81.4 小時(5%)，73.3 小時(7%)，63.1 小時(10%)，61.6 小時(13%)，61.4 小時(15%)，61.3 小時(20%)，氧氣濃度

7%以下能有效減緩鋁合金護套因氧化熱溫升至 900°C 之時間。對於總產氫量結果而言整體影響性不大。

九、不同蒸氣分壓(225.4Pa、610.4Pa、1001Pa、1497Pa、2337Pa、3564Pa)於護套峰值溫度溫升至 900°C 之時間分別為 61.16 小時(225.4 Pa), 61.20 小時(610.4 Pa), 61.25 小時(1001 Pa), 61.27 小時(1497 Pa), 61.31 小時(2337 Pa), 61.37 小時(3564 Pa), 可以看出整體溫升速率非常接近, 而在溫度 1250°C 左右有些微差異, 但這差異不影響後續溫升結果, 對於溫升結果、氧化熱功率、總氧化熱功率影響性不大, 主要差異於產氫量, 蒸氣分壓 3564 Pa 產氫量相對最大為 60 kg 左右, 225.4 Pa 產氫量相對最小 4.8 kg 左右, 蒸氣分壓越小越有效抑制氫氣產量之趨勢。

十、分析目前我國核一廠一號機假設在完全喪失冷卻水之事故下, 必須確保鋁合金護套由 30°C 溫升至 900°C 有超過 10 小時之時間餘裕。分析結果而言, 採用 RES/DSA/FSCB 2016-03 [3] 中 60 GWd / MTHM 衰變熱、假設 3,083 束為第 27 週期(最熱)用過燃料之保守功率假設情形且核一廠用過燃料池在全池裝滿狀態下且均勻燃料排列, 於停機冷卻 1.7 年後之燃料護套溫度不會於 10 小時內溫升至 900°C; 在假設全池均為最熱燃料(第 27 週期)之燃料溫升結果, 停機冷卻 0.88 年後用過燃料不會在 10 小時內達 900°C; 而實際核一廠用過燃料池衰變熱計算上升至 900°C 時間結果顯示依照目前核一廠實際燃料功率設計之案例, 燃料護套溫度均不會在 10 小時內上升至 900°C。

總結來說, 核一廠一號機停機已近五年, 用過燃料池之燃料冷卻時間已達 5 年以上, 其衰變熱已經很低, 不論電廠於除役期間發生意外事故, 評估結果與 NUREG-1738 報告之分析結果為一致。而依據 MELCOR 計算結果顯示核一廠一號機用過燃料池, 確保電廠在完全喪失冷卻水下, 鋁合金護套由 30°C 溫升至 900°C 有超過 10 小時之時間餘裕。因此核一廠一號機停機已近五年, 依據 MELCOR 核一廠用過燃料池之溫升模擬, 其停機五

年後之計算結果顯示核一廠一號機用過燃料池在各種保守假設下，與 NUREG-1738 報告之分析結果為一致。

伍、參考資料

- [1] NUREG-2157, “Generic Environmental Impact Statement for Continued Storage of Spent Nuclear Fuel,” United States Nuclear Regulatory Commission, September 2014
- [2] T.E. Collins, G. Hubbard, “Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants,” NUREG-1738, United States Nuclear Regulatory Commission, February 2001.
- [3] NUREG-1935, Richard Chang, Jason Schaperow, Tina Ghosh, Jonathan Barr, Charles Tinkler, Martin Stutzke, “State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses (SOARCA),” United States Nuclear Regulatory Commission, November 2012.
- [4] SECY-12-0092, "I State-of-the-Art Reactor Consequence Analyses - Recommendation for Limited Additional Analysis," July 5, 2012.
- [5] SECY-13-0112, " Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor," October 9, 2013.
- [6] Mary Eagleson (1994) Concise encyclopedia chemistry. Walter de Gruyter. pp. 1199–. ISBN 978-3-11-011451-5. Retrieved 18 March 2011.
- [7] C. Duriez a, T. Dupont, B. Schmet, F. Enoch , “Zircaloy-4 and M5 high temperature oxidation and nitriding in air,” SCI, 10 July 2008
- [8] L. S. Rubenstein, "Properties of Zircaloy-2," Nucleonics 17 (3), 72 (March 1959)
- [9] Carpenter, G.J.C.; Watters, J.F. (1978) "An in-situ study of the dissolution of γ -zirconium hydride in zirconium". Journal of Nuclear Materials. 73 (2): 190–197.
- [10] Delayed hydride cracking in zirconium alloys in pressure tube nuclear reactors, Final report of a coordinated research project 1998–2002, IAEA,

October 2004

- [11]George S. Brady; Henry R. Clauser; John A. Vaccari (24 July 2002) Materials handbook (15th ed.) McGraw-Hill Professional. pp. 1063–. ISBN 978-0-07-136076-0. Retrieved 18 March 2011.
- [12]Peter Rudling; Alfred Strasser; Friedrich Garzarolli (2007) Welding of Zirconium Alloys . Sweden: Advanced Nuclear Technology International.
- [13]K. Natesan, W.K. Soppet., “Air Oxidation Kinetics for Zr-Based Alloys,” NUREG/CR-6846, United States Nuclear Regulatory Commission, June 2004.
- [14]ORNL-3281, "Review of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 Properties Relevant to N.S. Savannan Reactor Design," OAK Ridge National Laboratory, Dec 1962.
- [15]United States Nuclear Regulatory Commission, September 2014. Allan S. Benjamin et al., Sandia Laboratories, “Spent Fuel Heatup Following Loss of Water During Storage,” NUREG/CR-0649, United States Nuclear Regulatory Commission, March 1979.
- [16]E. T. Hayes and A. H. Roberson, "Some Effects of Heating Zirconium in Air, Oxygen, and Nitrogen," J1. Electrochem. -- SOC., 96, 142, 1949.
- [17]J. H. White, reported in AEC Fuels and Materials Development Program, Progress Report No. 67, GEMP-67, General Electric Co., 151, 1967.
- [18]S. Leistikow, et al., "Study on High Temperature Steam Oxidation of Zircaloy-4 Cladding Tubes," Nuclear Safety Project Second Semiannual Report, 1975, KfK-2262, Karlsruhe, 233, 1976.
- [19]Mikhail S. VESHCHUNOV, " Fuel Rod Failure under Accident Conditions," Workshop on Fuel Safety, Safety Criteria and Changes in Fuel Design Characteristics During Operation Islamabad, Pakistan 16-20 December 2013
- [20]Claude GRANDJEAN." A State of the art Review of Past Programs Devoted to Fuel Behavior Under LOCA Conditions Part One. Clad Swelling and

- Rupture Assembly Flow Blockage," TECHNICAL REPORT SEMCA-2005-313, Decrmbre 2005.
- [21]Zachary I. Franiewski et al., "Spent Fuel Pool Analysis of a BWR-4 Fuel Bundle Under Loss of Coolant Conditions Using TRACE," NucE431W S2013, Pennsylvania State University, May 2013.
- [22]Mark Leyse, "ZIRCONIUM FIRES IN POOLS OF SPENT NUCLEAR FUEL: HIGH-PROBABILITY SCENARIOS AND PHENOMENA," Atomic Safety Organization, December 2013.
- [23]EPRI, "Severe Accident Management Guidance Technical Basis Report," Volume 2: "The Physics of Accident Progression," 1025295.
- [24]Patrick A.C. Raynaud, "Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal During the Loss-of-Coolant Accident," NUREG-2121, United States Nuclear Regulatory Commission, March 2012.
- [25]J.H. Jo, P.F. Rose, S.D. Unwin, V.L. Sailor, K.R. Perkins, A.G. Tingle., "Value/Impact Analyses of Accident Preventive and Mitigative Options for Spent Fuel Pools," NUREG/CR-5281, United States Nuclear Regulatory Commission, March 1989.
- [26]E. D. Throm, "Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, "Beyond Design Basis Accidents in Spent Fuel Pools," NUREG-1353, United States Nuclear Regulatory Commission, April 1989.
- [27]Taiwan Power Company, Final Safety Analysis Report (FSAR), May 4, 1977.
- [28]V. F. Urbanic and T. R. Heidrich, "High-Temperature Oxidation of Zircaloy-2 and Zircaloy-4 in Steam," J. Nuc. Matls., 75, pp. 251-261 (1978)
- [29]Robert Beaton, A.V.L., Abdelghani Zigh, "Experiments on Ignition of Zirconium-Alloy in Prototypical Pressurized Water Reactor Fuel Assemblies in a Spent Fuel Pool with Complete Loss of Coolant," Sandia National Laboratory report.

- [30]P. Hofmann et al., "Reactor Core Materials Interactions at Very High Temperatures," Nuclear Technology, 87, pp. 146-186, August 1989.
- [31]E. T. Hayes and A. H. Roberson, "Some Effects of Heating Zirconium in Air, Oxygen, and Nitrogen," Bureau of Mines, U. S. Department of the Interior, Albany, Oregon, July 1949.
- [32]Leistikow, S., Schanz, G., and von Berg, H., "Kinetik und Morphologie der isothermen Dampf-Oxidation von Zircaloy 4 bei 700–1300°C," Kernforschungszentrum Karlsruhe Report No.2587, 1978.
- [33]D.A. Powers, "Thermochemistry of Core Debris: Partitioning of Uranium and Fission Products among Condensed Core Debris Phases", 2004.
- [34]行政院原子能委員會，「核一廠一號機第 27 次大修及 18 個月週期維護測試作業(EOC-27 Part 1&2)視察報告」, 2016.
- [35]U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, "STANDARD REVIEW PLAN" NUREG-0800, Revision 3 - March 2007.
- [36]SAND2017-5599, "QUICKLOOK OVERVIEW OF MODEL CHANGES IN MELCOR 2.2: Rev 6342 to Rev 9496," Sandia National Laboratories.
- [37]SECY-99-168, "IMPROVING DECOMMISSIONING REGULATIONS FOR NUCLEAR POWER PLANTS," United States Nuclear Regulatory Commission, October 9, 2013.
- [38]RES/DSA/FSCB 2016-03, "Spent Fuel Assembly Heat Up Calculations in Support of Task 2 of User Need NSIR-2015-001," United States Nuclear Regulatory Commission, April 2016. (ADAMS Accession No. ML16110A431)
- [39]U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Zirconium Fire Mitigation Methods", ML011310128, 2001.

子項計畫 2-1 英文專有名詞縮寫一覽表

英文縮寫	英文全名	中文翻譯
ANL	Argonne National Laboratory	阿岡國家實驗室
BWR	Boiling Water Reactor	沸水式反應器
CF	Control Function	控制函數
CSARP	Cooperative Severe Accident Research Program	國際嚴重事故合作研究計畫
CSNPP	Chinshan Nuclear Power Plant	金山核能電廠
DBA	Design Basis Accidents	設計基準事故
FSAR	Final Safety Analysis Report	最終安全分析報告
LOCA	Loss of Coolant Accident	喪失冷卻水事故
NPP	Nuclear Power Plant	核能電廠
IBRAE	Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Sciences	俄羅斯科學院核能安全研究所
PCT	Peak Cladding Temperature	最高燃料護套溫度
RES	Office of Regulatory Research	監管研究辦公室
SNL	Sandia National Laboratory	桑迪亞國家實驗室
SBO	Station Blackout	全黑
SFP	Spent Fuel Pool	用過燃料池
TAF	Top of Active Fuel	有效燃料頂端
U.S. NRC	United States Nuclear Regulatory Commission	美國核管會

行政院原子能委員會

委託研究計畫期末報告

計畫名稱：

109 年度核電廠除役期間除污策略技術彙整與安全評估及相關特性分析

子項計畫二-分項 2：

核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析

案號：AEC10903011L

執行單位：國立清華大學

計畫主持人：許文勝

子項計畫二主持人：許文勝

報告作者：陳韶萱

報告日期：中華民國 109 年 11 月

摘要

本子項計畫 109 年度的研究重點為摘譯數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)文件、研析如何實作符合 DQA 程序規範之電廠除役輻射偵檢與廠址調查計劃，並提供有關評估電廠除役期間輻射偵檢與廠址調查計劃是否符合 DQA 程序之管制建議。

DQA 包含 5 個步驟，包含(1)檢視數據品質目標的產出(Data Quality Objectives, DQOs)和取樣設計、(2)進行初步數據審查、(3)選擇統計檢定、(4)驗證統計檢定的假設，和(5)從數據得出結論。DQA 程序目的為使用科學及統計的方法來評估從環境中取得之數據，是否對預期用途來說，具備正確的種類、品質及數量。

本子分項計畫 109 年預定要完成之工作包含(1)蒐集美國核電廠有關輻射偵檢作業數據品質評估(DQA)之相關文獻、(2)進行 DQA 文件(EPA QA/G-9)中文摘譯、(3)研析並摘述美國核電廠有關輻射偵檢作業數據品質評估(DQA)之相關文獻，以及(4)彙整研究相關管制建議，提出審查要點建議。

Abstract

The reseach purposes of this project in 2020 include translating Data Quality Assessment (DQA) guideline document, studying how to implement the nuclear power plant radiation survey and site investigation(RSSI) that meets the DQA procedures and specifications, and providing recommendations about how to assess whether the RSSI activities during the decommissioning of the nuclear power plant comply with the recommendations of the DQA procedure.

There are 5 steps in DQA, which are : (1) review DQOs(Data Quality Obejectives) and the sampling design, (2) conduct a preliminary data review, (3) select the statistical test, (4) verify the assumptions of the statistical test, and (5) draw conclusions from the data. DQA is the scientific and statistical evaluation of data to determine if data obtained from environmental data operations are the right type, quality, and quantity to support their intended use.

The work scheduled to be completed in this year includes : (1) collecting relevant documents on the data quality assessment (DQA) produced by U.S. nuclear power plants, (2) conducting DQA documents (EPA QA/G-9) translation, (3) surveying and summaring the DQA relevant documents, and (4) providing review points and recmmendations about DQA procedure to the regulatory authority.

目錄

摘要.....	I
圖目錄.....	IV
表目錄.....	V
壹、前言.....	6
貳、研究方法.....	6
參、DQA 程序簡介.....	8
肆、MARSSIM 手冊中與 DQA 相關內容摘述.....	11
一、 輻射偵檢及廠址調查(Radiation Survey and Site Investigation, RSSI)綜覽	11
二、 數據品質評估(DQA)與偵檢結果評估	31
三、 評估結果：決策	35
四、 報告文件	36
伍、美國核電廠有關 DQA 相關文獻及摘述.....	39
一、 薩克斯頓核實驗公司	39
二、 Plum Brook 反應器.....	42
三、 錫安核電廠.....	44
陸、電廠輻射偵檢調查計劃及報告有關 DQA 流程之管制建議	56
柒、結論.....	62
捌、參考資料.....	63
子項計畫 2-2 英文專有名詞縮寫一覽表	64

圖目錄

圖 1 核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析研究流程圖.....	7
圖 2 數據生命週期圖	9
圖 3 輻射偵檢和廠址調查程序之區域分級流程示意圖.....	14
圖 4 最終狀態偵檢流程圖	18
圖 5 廠址歷史評估流程圖	21
圖 6 範圍偵檢流程圖	23
圖 7 特性偵檢及整治行動輔助偵檢流程圖	26
圖 8 最終狀態偵檢流程圖	30
圖 9 回溯檢定力圖	60

表目錄

表 1 輻射偵檢和現場調查(RSSI)各程序之計畫生命週期	17
表 2 調查基準表	29
表 3 各電廠輻射偵檢類別要確認的 DQOs.....	32
表 4 無背景污染時如何從偵檢結果得出結論	34
表 5 無背景污染時如何從偵檢結果得出結論	34
表 6 偵檢單元污染分級對應的調查基準	34
表 7 薩克斯頓核實驗公司最終狀態偵檢 DQO/設計參數	41
表 8 無背景污染時如何從偵檢結果得出結論	61
表 9 有背景污染時如何從偵檢結果得出結論	61
表 10 偵檢單元不同污染分級之調查基準	61

壹、前言

對於需要依據環境數據資料作出評估或決策之調查研究，美國環境保護署(EPA)為確保數據品質，開發出數據品質目標(Data Quality Objective, DQO)指引，以及數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)指引，提供給專案管理員及規劃人員參考使用。DQO 程序用於規劃階段，目的是幫助規劃人員製定可以蒐集到符合所需之數據種類、數量及品質的環境數據收集計劃，而 DQA 程序用於評估階段，用以評估所蒐集的數據是否達成 DQO 所規範的要求。

為確保核電成除役後使用廠址進行各項活動之民眾的安全與健康，在核電廠除役的相關作業中，調查評估以確保廠址之殘餘輻射劑量是否符合外釋法規標準，是重要的一環。依據多機構輻射偵檢和廠址調查手冊(MARSSIM)，核能電廠須進行電廠輻射偵檢與調查時，規劃階段應依照 DQO 程序進行調查之規劃設計。在執行階段必須依照規劃階段的設計進行數據蒐集和文件記錄。在評估階段要進行數據的驗證和確認，並進行照 DQA 程序評估所蒐集的數據是否符合 DQO 程序產出的規範(DQOs)，DQOs 也就是數據品質指標，最後再依據數據做出結論。

貳、研究方法

本子項計畫的研究流程如圖 1，研究方法先進行美國核電廠有關 DQA 文獻之蒐集，之後研讀美國環保署所著數據品質評估指引文件(EPA QA/G-9-2000)、除役核電廠之輻射偵檢與廠址調查指引文件(MARSSIM 手冊)與美國核電廠除役輻射偵檢計畫實際文獻範例等並進行摘述或摘譯，最後彙整數據品質評估所應遵照之規範提出給管制單位之建議。研究結果預期將產出 DQA 指引文件之摘譯及其他參考文獻有關 DQA 的內容之摘述與彙整，並將提出有關數據品質評估所應遵照之規範與建議導則供管制機關參考，以期精進除役相關輻射偵檢工作之數據品質。



圖 27 核電廠除役期間廠址取樣方法品質研析研究流程圖

參、DQA 程序簡介

數據品質評估 (DQA) 程序由美國環保署 (EPA) 所發展，對於需要依據環境數據資料作出評估或決策之調查研究，提供有關數據品質準則及做決策時要依據之效能標準的評估指引。專案管理員及規劃人員可根據 DQA 程序進行數據品質評估確認決策所根據的數據是否達到所需之數據種類、數量及品質。數據生命週期(如圖 2)包含三個步驟：規劃、執行，和評估。在規劃階段，使用數據品質目標(Data Quality Objectives，以下簡稱 DQO)程序來定義定量和定性的標準(DQOs)，規範樣本蒐集的時間、地點以及數量，以及所期望的信心度。規劃階段產出的品質保證計畫規劃(QA Project Plan，以下簡稱 QAPP)文件中除應包含以上這些資訊，還需再加上取樣方法、分析方法，和合適的品質保證(QA)和品質控制(QC)措施等內容。執行階段應根據 QAPP 的規範進行數據蒐集。在評估階段，數據將被確認及驗證，以確保 QAPP 所設定的取樣和分析方法有被遵守，且有依照 QAPP 所指定之標準進行量測。最後，使用 DQA 程序來評估經過驗證和確認過之數據的數據品質，是否有符合數據品質目標(DQO)的規範。

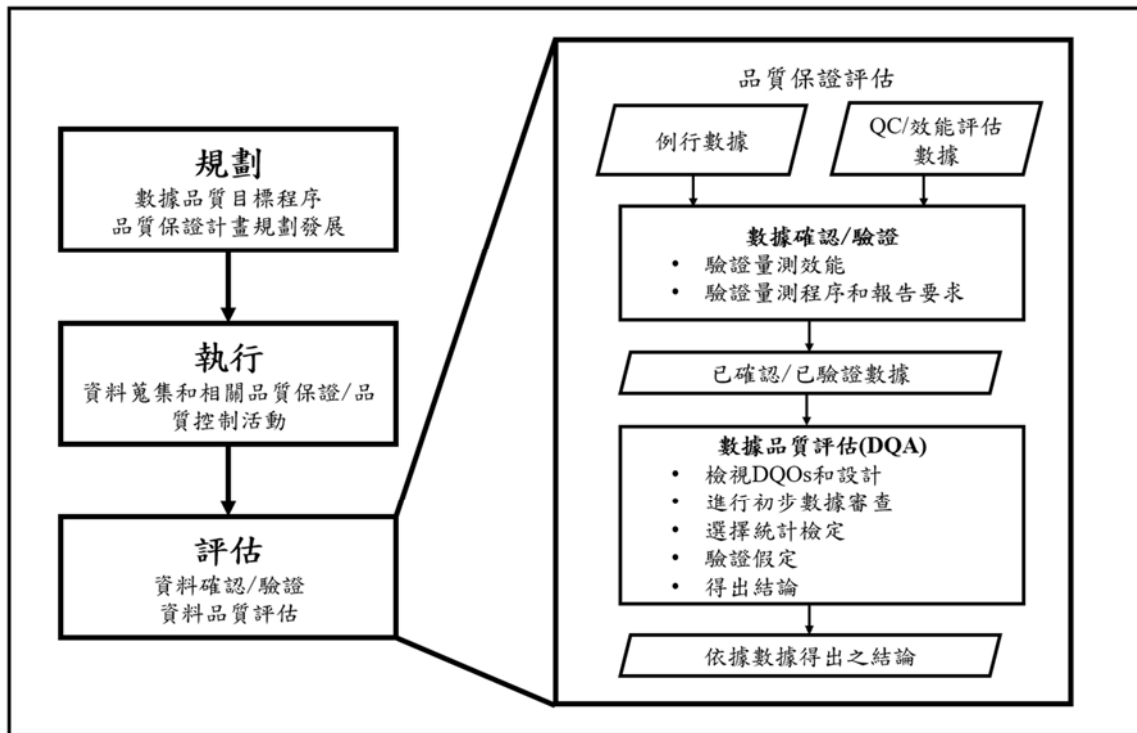


圖 28 數據生命週期圖

DQA 包含 5 個步驟[1]，包含 1. 檢視數據品質目標的產出(Data Quality Objectives, DQOs)和取樣設計，2. 進行初步數據審查，3. 選擇統計檢定，4. 驗證統計檢定的假設，和 5. 從數據得出結論。DQA 詳細內容請參考附件：DQA 指引摘譯，在指引中此 5 個步驟以順序的方式呈現，但 DQA 本質上是迭代的。譬如，若初步審查顯示數據的趨勢或規則性和 DQOs 不一致，則可能要重新考慮研究步驟 1 的某些部分。同樣地，若數據不支持統計檢定的基本假定，可能要重新進行 DQA 先前的步驟。DQA 指引和其他指引不同，它並不是設定為要按照順序來進行閱讀。而是設定做為數據品質評估技術的「工具書」。文件的整體架構將可協助分析者使用系統性的方法來探討各種問題。以下將簡單介紹 DQA 程序的 5 個步驟要進行的活動及目的：

步驟 1：檢視 DQOs 和取樣設計

DQA 步驟 1 的目的為檢視規劃階段 DQO 的產出(DQOs)、取樣設計，以及任何和數據蒐集相關的文件。所謂 DQOs 就是可以用來衡量數據品質目標的產出，包含統計假設及決策錯誤的容忍上限，為數據品質指標。若尚未發展 DQOs，要先定義統計假設並指名決策錯誤的容忍上限。要進行的活動包含 1. 檢視研究目的，2. 將研究目的轉換為統計假設，以及 3. 設定決策錯誤的容忍上限，以及 4. 檢視取樣設計。在 DQA 指引介紹步驟 1 的內容中會介紹統計假設的設定方法以及各種類的取樣設計之設計理念。

步驟 2：進行初步數據審查

DQA 步驟 2 的目的為繪製可代表及描述數據的統計量和圖形。使用這些資訊來了解數據的結構並辨認數據的趨勢及關連性。要進行的活動包含 1. 檢視品質保證報告書，2. 計算基本統計量，以及 3. 將數據圖形化。在 DQA 指引介紹步驟 2 的內容中會介紹各種統計量以及各種將數據圖形化方法。

步驟 3：選擇統計檢定

DQA 步驟 3 的目的為依據初步數據審查結果，選擇合適的數據分析程序。要進行的活動包含 1. 選擇統計假設檢定以及 2. 確認檢定的基本假設。在 DQA 指引介紹步驟 3 的內容中會介紹單一母體的假設檢定和比較兩個母體的假設檢定。

步驟 4：驗證統計檢定的假定

DQA 步驟 4 的目的為依據由環境取得的數據來檢驗統計檢定的基本假定(Assumption)。要進行的活動包含 1. 確定驗證假定的方法，2. 進行假定檢定，以及 3. 確定矯正措施。在 DQA 指引介紹步驟 4 的內容中會介紹分佈假定的檢定、獨立性和趨勢檢定以及分散程度假定檢定。

步驟 5：從數據得出結論

DQA 步驟 5 的目的為執行假設檢定，並說明針對於研究目的之議題，檢定的結果。要進行的活動包含 1. 執行統計假設檢定，2. 得出研究結論，以及 3. 評估取樣設計的效能。在 DQA 指引介紹步驟 5 的內容中會介紹可幫助理解和討論檢定結果的各項假設檢定議題。

肆、MARSSIM 手冊中與 DQA 相關內容摘述

多機構輻射偵查和廠址調查手冊(MARSSIM)[2]提供電廠除役時為證明符合法規規範而須進行之廠址輻射偵檢的指引，包含環境和設備輻射偵檢之規劃、執行和評估等。MARSSIM 的指引聚焦於最終狀態偵檢，最終狀態偵檢是於範圍偵檢、特性偵檢及或有需要進行之整治行動輔助偵檢完成後所要進行之偵檢，目的是證明廠址的殘餘輻射量符合外釋法規規範值。

偵檢的規劃、執行和評估程序稱為數據生命週期(Data Life Cycle)。偵檢的設計應使用數據品質目標(Data Quality Objectives, DQO)程序，以確保偵檢結果具備足夠支持最終決策的品質。數據品質評估(Data Quality Assessment, DQA)是評估偵檢結果、確認數據的品質是否符合偵檢目標，以及運用偵檢結果來做出決策時說明偵檢結果的程序。MARSSIM 手冊中有關品質相關的活動的介紹，除了 DQO 程序及 DQA 程序外，還包含有關品質保證計畫規劃(Quality Assurance Project Plan, QAPP)的說明。

一、輻射偵檢及廠址調查(Radiation Survey and Site Investigation, RSSI)綜覽

MARSSIM 手冊的目的是提供一個標準的方法可用來證明電廠的殘餘輻射符合外釋有關劑量之法規規範。MARSSIM 所建議的輻射偵檢和場址調查程序為由一序列的偵檢所組成的程序，每一個偵檢對協助最後作出是否符合法規之決策上，皆有其特定目標和目的。MARSSIM 所建議的一系列

輻射偵檢與廠址調查(RSSI)包含六個程序：廠址識別、廠址歷史評估、範圍偵檢、特性偵檢、整治行動支持偵檢以及最終狀態偵檢。最終狀態偵檢之前進行的偵檢結果，將決定偵檢單元的污染分級，污染分級共有三級，其中污染可能性最高的為第一級，最低的為第三級。偵檢單元的最終狀態偵檢設計會依據偵檢單元的污染分級而定，污染可能性越高的偵檢單元於最終狀態偵檢將會投入越多的資源。圖 3 為區域分級的流程示意圖，但實際上各電廠狀況不同，實際分級的流程也可能會有所不同。

MARSSIM 提到其所建議的流程未必對所有電廠都是最佳解，因此 RSSI 程序為建議採用程序，而非強制規定之程序，電廠可以實際狀況調整。電廠若想採用其他的偵檢方法，只要可以說明偵檢方法具備足夠的數據品質且經主管機關同意即可。

1. 依據偵檢調查結果做決策

偵檢單元是否符合外釋法規範的決策會根據偵檢調查的結果進行。因此，決策者必須確保偵檢所得的數據具備足夠的可信度。因為偵檢的不確定性是無法避免的，因此須採取積極的行動來管理偵檢的不確定度(uncertainty)。相關行動包含適當的偵檢規劃、執行階段合適的品質管控(quality control, QC)程序，以及對數據不確定度的仔細分析。

包含決策階段的話，數據生命週期共有四個階段：規劃階段、執行階段、評估階段，以及決策階段。

(1) 規劃階段

規劃階段要做的是運用 DQO 程序產出偵檢規劃和產出偵檢計畫文件。DQO 程序為七個規劃步驟(1.說明問題、2. 確立決定、3.確立輸入、4.定義邊界、5. 發展決定法則、6. 限定決定誤差和 7. 優化設計)。規劃階段的主要產出為品質保證規劃計畫(QAPP)，QAPP 內容為品質保證和品質控制

(QA/QC)程序並涵蓋 DQOs 的內容。DQOs 是數據品質要求的表述，包含數據之量測效能及目的。DQOs 內容應根據特定廠址來制定，且因廠址狀況之多樣，不可能有一致的規範。MARSSIM 使用 DOQ 程序來設計偵檢調查，DQO 程序提供系統性的程序來定義偵檢設計的規範，包含量測的種類、量測的時間和地點、可接受的決策錯誤率，以及要量測的數量等。

DQOs 為從 DQO 程序應產出之有關定性或定量的敘述，如：

- 說明研究目的
- 定義最合適的數據蒐集類別
- 定義最適合的蒐集數據之情況
- 定義數據決策錯誤率，此為據以做出決策之數據的定性與定量要求的基礎

MARSSIM 所建議的一系列輻射偵檢與廠址調查(RSSI)包含六個步驟：廠址識別、廠址歷史評估、範圍偵檢、特性偵檢、整治行動支持偵檢以及最終狀態偵檢。其中除廠址識別程序外，其他程序於規劃階段應依據 DQO 程序進行規劃。每一個偵檢的目的和應產出的 DQOs 皆不相同，由於 MARSSIM 所聚焦的內容為證明廠址是否符合外釋規範的最終狀態偵檢，在研讀 MARSSIM 時發現其內容所描述的 DQOs，當未特別指定是哪一個偵檢時，即代表是最終狀態偵檢。

輻射偵檢和廠址調查流程之區域分級流程圖

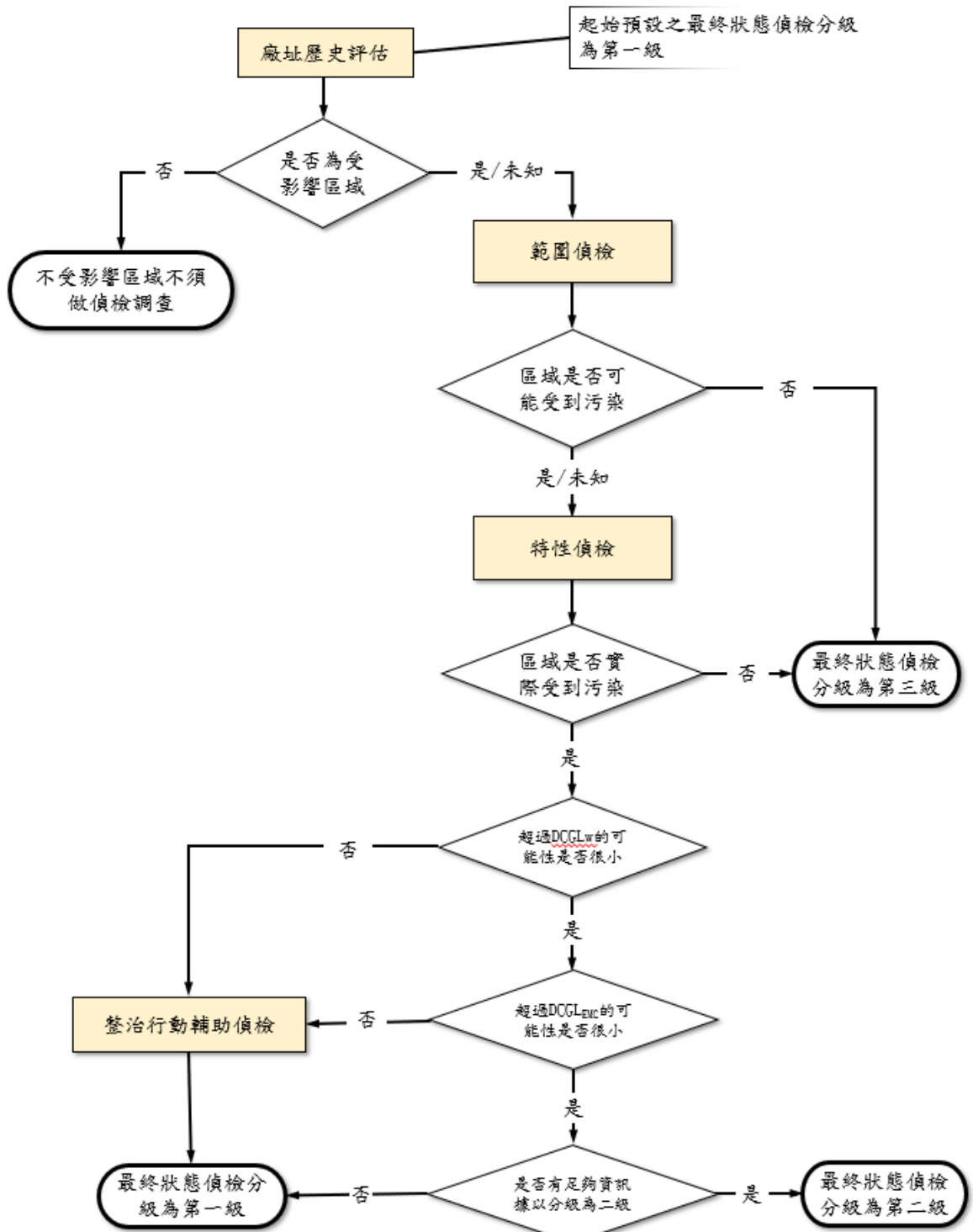


圖 29 輻射偵檢和廠址調查程序之區域分級流程示意圖

(2) 執行階段

偵檢設計完成後會產出包含執行偵檢 SOPs 的品質保證規劃計畫 (QAPP) 文件，執行階段應根據規畫產出的文件執行數據蒐集，取得原始數據。MARSSIM 中也描述了如何選擇合適的數據蒐集技術以及品質保證和品質控制的衡量等資訊。

(3) 評估階段

評估取得的數據是否符合偵檢目標以及依據數據是否符合外釋規範 (Derived Concentration Guideline Level, DCGL)。評估階段包含三個步驟：數據驗證 (Data Verification)、數據確認 (Data Validation)，以及數據品質評估 (DQA)。

數據驗證用是要確保有依照計畫文件執行數據蒐集。數據確認則是要確認所蒐集之數據有符合 QAPP 中所敘述的偵檢目標，或允許目標的變更。數據品質評估 (DQA) 使用統計方法來評估數據的種類、品質和數量是否足夠來支持要依據數據做出的決策並確認是否達成規畫階段的目標。評估階段要進行的工作流程請參考圖 2。

DQA 的設計的優點是以合理和有效率的方式來達到對數據是否符合預期用途的了解，總共有 5 個步驟：

- 檢視 DQOs 和取樣設計
- 進行初步數據審查
- 選擇統計檢定
- 驗證統計檢定的假定
- 從數據得出結論

(4) 偵檢結果的不確定度

偵檢結果的不確定性主要來自兩個方面：偵檢設計和量測錯誤。MARSSIM 透過使用要做為決策依據之數據的數據生命週期來控制和評估偵檢結果的不確定度。適宜的規畫應可減少已知來源的不確定度。執行階段的數據蒐集品質控制(QC)提供不確定度的估計。評估階段的統計假設檢定則提供最後決策之信賴度的估計。

(5) 偵檢結果之報告

在偵檢規劃中，偵檢結果的報告是很重要的考量。個別偵檢結果報告的要求應於偵檢規劃文件中(QAPP)，並詳細的說明。下面是美國健康物理學會建議報告中應包含的項目：

- 實際分析的結果。不要用「小於偵測限制」之類不確定的的字眼。
- 使用正確的單位和有效位數。MARSSIM 建議所有的結果使用和 DCGLs 相同的單位。
- 報告每一個分析結果的量測不準度(Measurement Uncertainty)。此種不準度不是直接使用於顯示是否符合外釋規範，而是用來評估量測系統的效能，也用來將個別的量測值和行動閥值做比較，對除役早期的偵檢(範圍偵檢、特性偵檢，和整治行動輔助偵檢)特別重要。
- 報告量測系統的最小檢測濃度(Minimum Detectable Concentration，MDC)以及計算 MDC 的方法。MDC 是特定量測系統的偵測活度濃度能力的先驗估計(Priori Estimate)。MDC 的最佳估計(使用理想狀態來估算)可能會高估偵測能力。MARSSIM 中有描述計算 MDC 較實際的方法。

2. 輻射偵檢及廠址調查程序

數據生命週期是 MARSSIM 效能指引的基礎。MARSSIM 建議使用一序列的偵檢來蒐集資料以顯示是否符合外釋規範。輻射偵檢與廠址調查程序(RSSI)程序是一序列偵檢的一個範例，共有六個程序。表 1 提供 RSSI 各個程序的概覽以及數據生命週期如何以迭代的方式運用於這些程序中，圖 4～圖 7 的流程圖說明 RSSI 各偵檢的主要步驟和要做出的決定，以及偵檢之間的關聯。如流程圖所示，RSSI 的偵檢步驟是有先後順序的，且後面進行的程序建立在前面進行之程序所提供的資訊上。

表 12 輻射偵檢和現場調查(RSSI)各程序之計畫生命週期

RSSI 程序	數據生命週期	MARSSIM 相關指引
廠址識別		提供識別廠址之資訊
廠址歷史評估 (HSA)	規劃 執行 評估 決策	提供蒐集與評估廠址已有資料 以及可能輻射污染源之資訊
範圍偵檢	規劃 執行 評估 決策	探討執行範圍偵檢的目的和一般方法，特別是以其作為規劃最終的狀態偵檢時之資訊來源
特性偵檢	規劃 執行 評估 決策	探討特性偵檢的目的和一般方法，特別是以其作為規劃最終的狀態偵檢時之資訊來源
整治行動輔助偵檢	規劃 執行 評估 決策	探討整治行動輔助偵檢的目的和一般方法，特別是以其作為規劃最終狀態偵檢時之資訊來源
最終狀態偵檢	規劃 執行 評估 決策	提供規劃最終狀態偵檢、選擇測量技術、以及評估最終狀態調查所收集數據的詳細指引

最終狀態偵檢流程圖

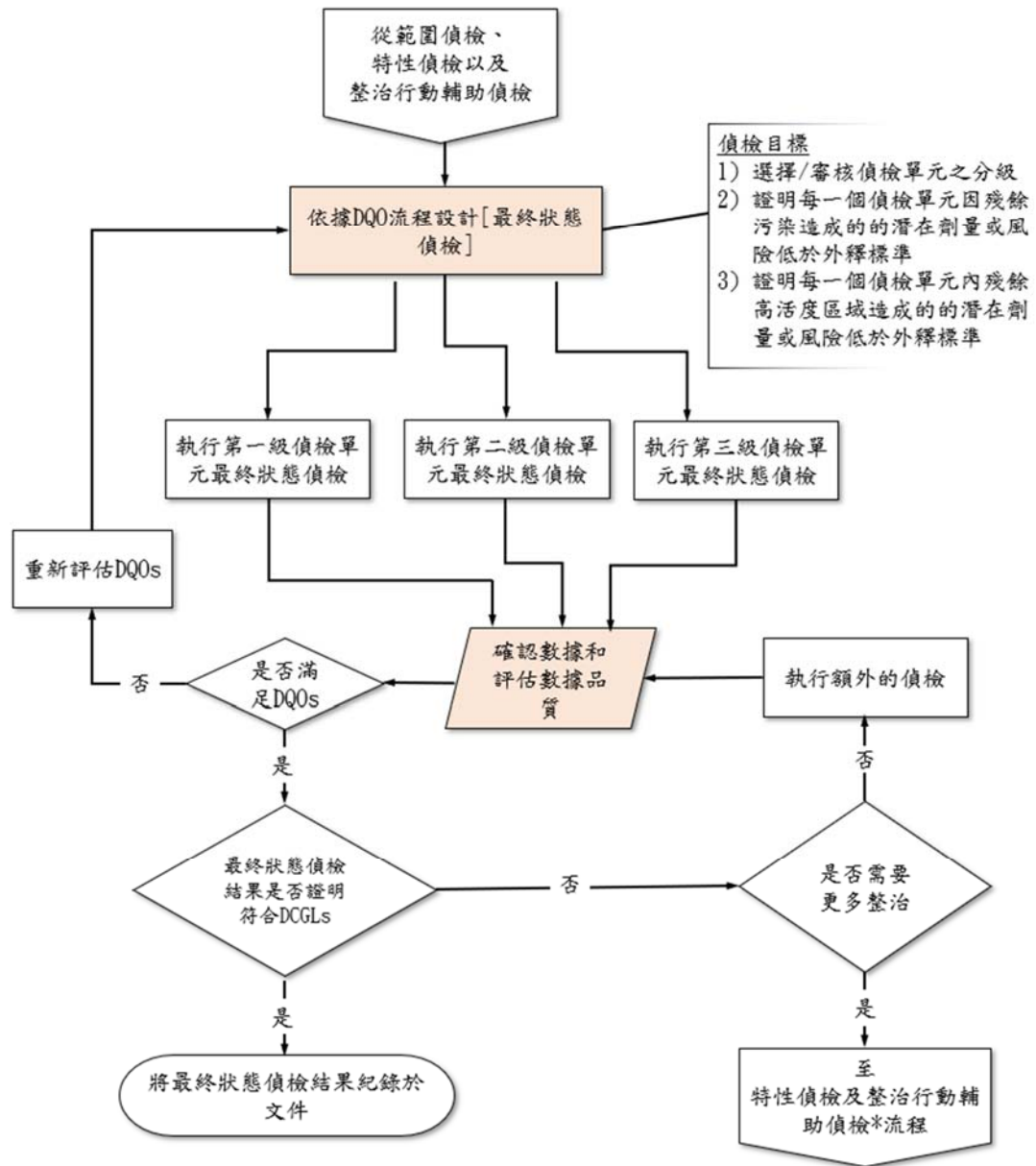


圖 30 最終狀態偵檢流程圖

(1) 廠址辨識

廠址辨識就是確認要進行除役的電廠。

(2) 廠址歷史評估(HSA)

廠址歷史評估的目的為蒐集電廠和其周邊環境已有的資訊，並據以鑑別受影響和不受影響區域。圖 5 為廠址歷史評估的流程圖，從流程圖中可以看到廠址歷史評估的主要目標，並根據調查結果將判斷為不受影響區域外釋，而判斷為受影響區域將進入下一個偵檢調查流程。

廠址歷史評估(HSA)依據 DQO 程序進行規畫，在於 HSA 蒐集的資訊也會支援其他接下來要進行之調查偵檢之 DQOs。有三個預期會產出之 HSA-DQO 結果：

- 確定規劃小組成員及決策負責人(DQO 步驟 1)
- 簡要的說明問題(DQO 步驟 1)
- 初步將廠區和偵檢單元分為受影響和不受影響區域(DQO 步驟 4)

規劃小組要說明和訂定廠址特定偵檢的 DQOs。在最後進行決策時，決策流程將根據規畫小組的建議。廠區初步分級包含根據所蒐集的資料建立一個概念模型。概念模型用來描述廠區或設施及其四圍環境並呈現已知核種和潛在殘餘污染的假設。概念模型基本上為一顯示已知污染位置、可能污染區域，受影響區域之核種的種類和濃度、潛在污染介質，和可能參考(背景)區域之廠區圖。

MARSSIM 中提供依據 DQO 程序進行 HSA 的指引，包含如何蒐集已有資料以及確認資料的可用性等。HSA 進行後可能會得到 DQO 程序的部分結果，此時的資訊和決定是根據有限且不完全的資訊。因 DQO 程序的迭

代特性，在後續取得更多資訊後可重新評估先前的決定。這點於廠址和偵檢單元的分級特別重要，直到最終狀態偵檢時才會決定最後的分級。

當歷史分析資料指出環境中有被污染時，即可作為設施或廠域有被放射性物質污染假設之支持。在此時做出的決定，並不需要判斷數據品質以及和背景污染程度的關聯。相反的，歷史分析資料也可以當作沒有釋出假設的支持，但卻不能作為單憑這樣的資料就做出沒有被污染的決定。

廠址歷史評估(HSA)完成後要進行的廠址調查程序會依照 HSA 提供的資訊而定，若 HSA 已提供範圍偵檢所要提供的資訊，則可不進行範圍偵檢，直接接著進行特性偵檢。範圍偵檢所要提供的資訊為確認 1)污染是否需要進一步的評估和 2)除污和更詳細的偵檢所需花費力量的初始評估。

MARSSIM 中提供廠址歷史評估報告的範本，並建議依照案本的架構和內容來撰寫廠址歷史評估報告。規劃小組應確保有人(第一審查者)執行廠址歷史評估報告的仔細審查，以達到內部的一致性和品質控管。另外應有有廠址經驗的審查者來整個資訊的一致性以及提供 HSA 結論的獨立評估。

廠址歷史評估流程圖

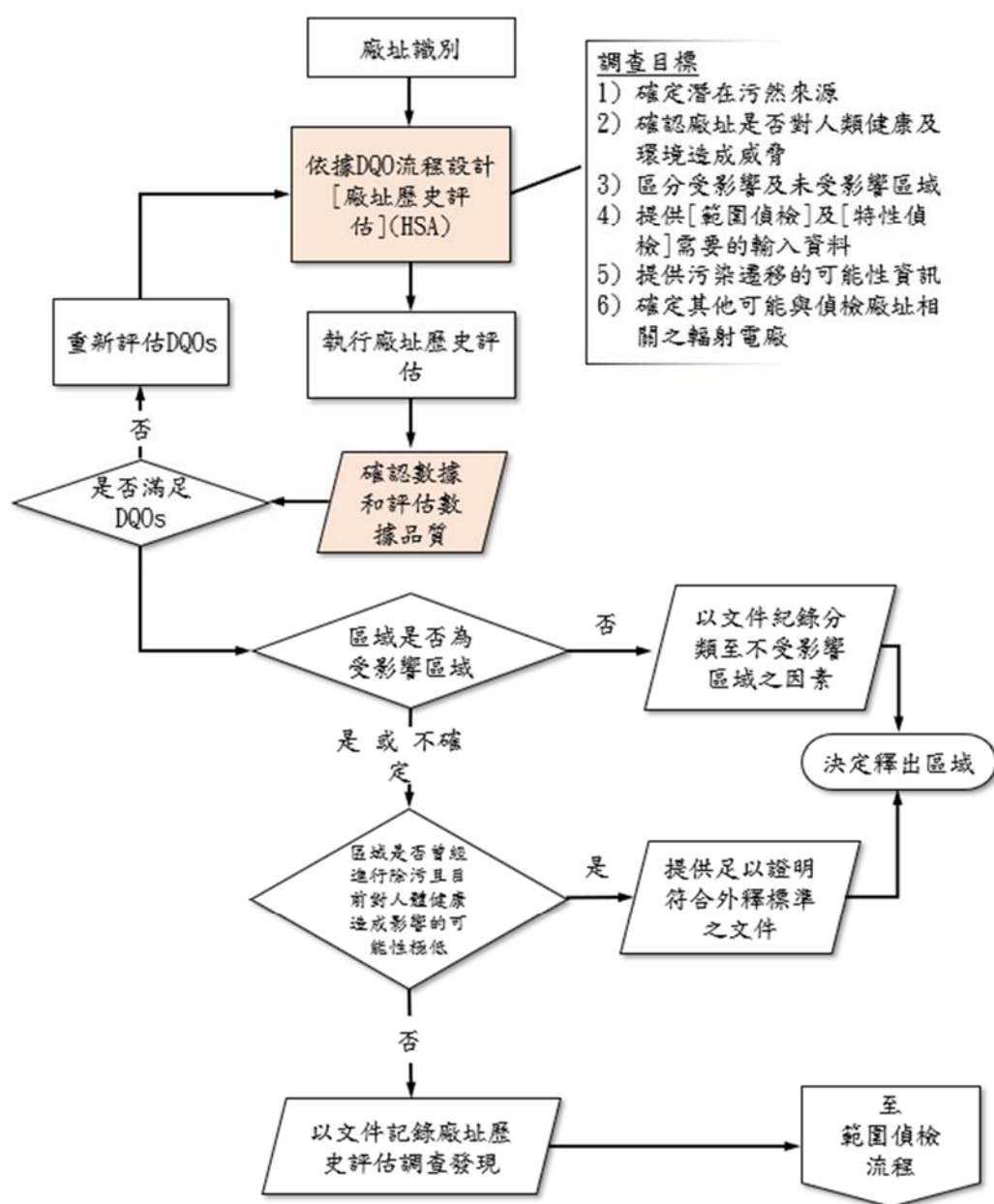


圖 31 廠址歷史評估流程圖

(3) 偵檢規劃和設計

輻射偵檢及廠址調查(RSSI)程序包含範圍偵檢、特性偵檢、輔助行動整治行動輔助偵檢和最終狀態偵檢。雖然範圍偵檢、特性偵檢、輔助行動整治行動輔助偵檢有多個目標，MARSSIM 手冊聚焦於這些偵檢如何協助最終狀態偵檢證明是否符合 DCGLs。一般來說，每一個偵檢會運用前一個偵檢所蒐集的資料進行規劃。最終狀態偵檢的目的是要證明沒有超過法規所規範的釋出標準。在進行所有偵檢規劃和設計時應牢記最後的釋出目標。舉例來說，範圍偵檢可以設計為符合最終狀態偵檢的目標，使得範圍偵檢報告也可以作為最終狀態偵檢的報告一部分。

(3)-1 範圍偵檢

圖 6 為範圍偵檢的流程圖，從流程圖中可以看到範圍偵檢的偵檢目的。當廠址歷史評估的結果認為有可能有污染的情況，可以執行範圍偵檢來提供除污和規劃更詳細偵檢(如特性偵檢)所需要花費力量的初始評估。表面活度和有限的樣本可能就可達到範圍偵檢的目的。

範圍偵檢的設計要參考廠址歷史評估(HSA)的結果。從 HSA 的結果中來判斷放射性物質可能污染的區域和位置，也就是範圍偵檢要進行的區域和位置。在審視完 HSA 後再選擇合適的 DCGLs，然 DCGLs 可能在之後取得更多廠區資訊後做調整。

範圍偵檢的資料蒐集規劃應根據特定的數據品質目標(DQOs)。偵檢取得資料要轉換為和 DCGLs 一樣的單位，並將之和 DCGLs 比較。範圍偵檢提供初步的廠區放射性風險評估，評估結果將判斷是否在最終狀態偵檢時分級為第三級或非第三級，分級為非第三級的區域將繼續進行特性偵檢。

MARSSIM 提供範圍偵檢要進行活動的確認清單範例，包含偵檢設計、

偵檢執行偵檢結果評估。其中偵檢規劃要列舉出 DQOs 包含說明範圍偵檢的目標以及偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求。在偵檢結果評估時應比較偵檢結果是否符合 DQOs 的要求。

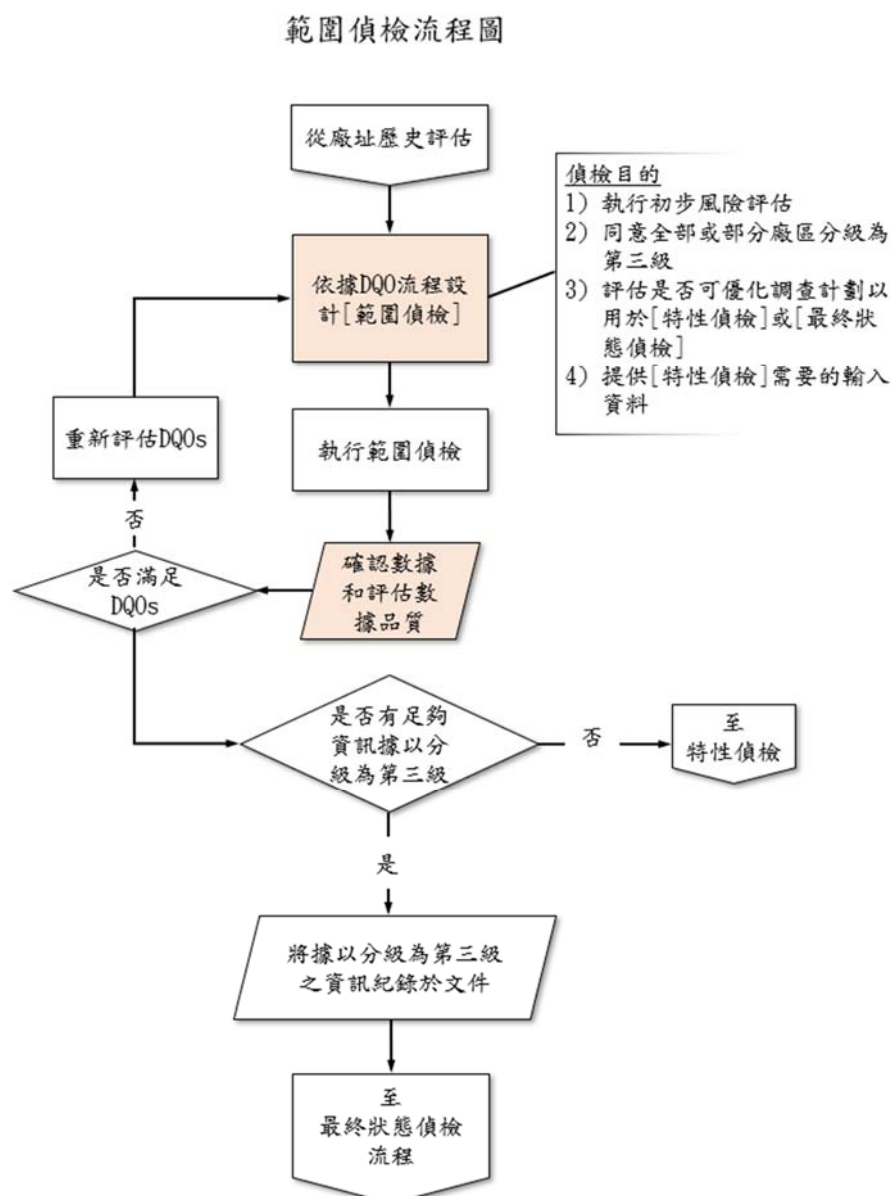


圖 32 範圍偵檢流程圖

(3)-2 特性偵檢

圖 7 為特性偵檢內含整治行動輔助偵檢的流程圖，從流程圖中可以看到特性偵檢的偵檢目的。特性偵檢的目的中，提供給最終狀態偵檢設計時的參考資料包含：1)評估最終狀態偵檢時的預估輻射狀態，如是否存在放射核種、活度範圍和變異性，以及空間分佈等，2)如有需要評估可能作為背景量測的參考區域，3)重新評估偵檢單元的初始分級，4)依據必要的 MDCs 來選擇儀器，和 5)和監管機構一起建立可接受的型 I 和型 II 錯誤率。

特性偵檢的資料蒐集規劃應根據特定的數據品質目標(DQOs)，並運用廠址歷史評估(HSA)和範圍偵檢的結果。廠區概念模型包含一般區域、尺寸，和廠區受污染的位置。廠區地圖應顯示廠區界線、路、水文地質特徵、主要結構，和其他可能影響除役的特徵。特性偵檢應清楚指出受廠區活動影響而受污染區域以及沒有受這些活動影響的區域。某些不須整治的案例，特性偵檢的結果可能可表明符合監管機關所訂定的 DCGLs。當規劃可能可作為最終狀態偵檢報告之一部分的特性偵檢時，特性偵檢取得的數據必須具備足夠的數量和品質。

特性偵檢也應提供偵檢區域之污染分佈的變異資訊。每一個偵檢單元所需的樣本數會根據其變異數和最終狀態偵檢所用的統計檢定來決定。此外，特性偵檢的數據也可能用來重新分級部分偵檢單元。

要注意的是，每一個廠的狀況都不同，不一定每一個廠都要依照 MARSSIM 所描述的特性偵檢進行量測。比如說若污染明顯高於 DCGLs，那麼不需要進行特性偵檢，由專案判斷就可決定要進行整治行動。

特性偵檢結果的資料要和 DCGLs 比較，若特性偵檢的數據要用做最終狀態偵檢數據，需依照統計方法來確認偵檢單元是否符合外釋標準。對特性偵檢的數據要用來協助進行整治行動，則特型偵檢資料應指出殘餘放射

性活度的位置。

MARSSIM 提供特性偵檢要進行活動的確認清單範例，包含偵檢設計、偵檢執行偵檢結果評估。其中偵檢規劃所列舉的 DQOs 包含說明特性偵檢目的以及偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求。

(3)-2 整治行動輔助偵檢

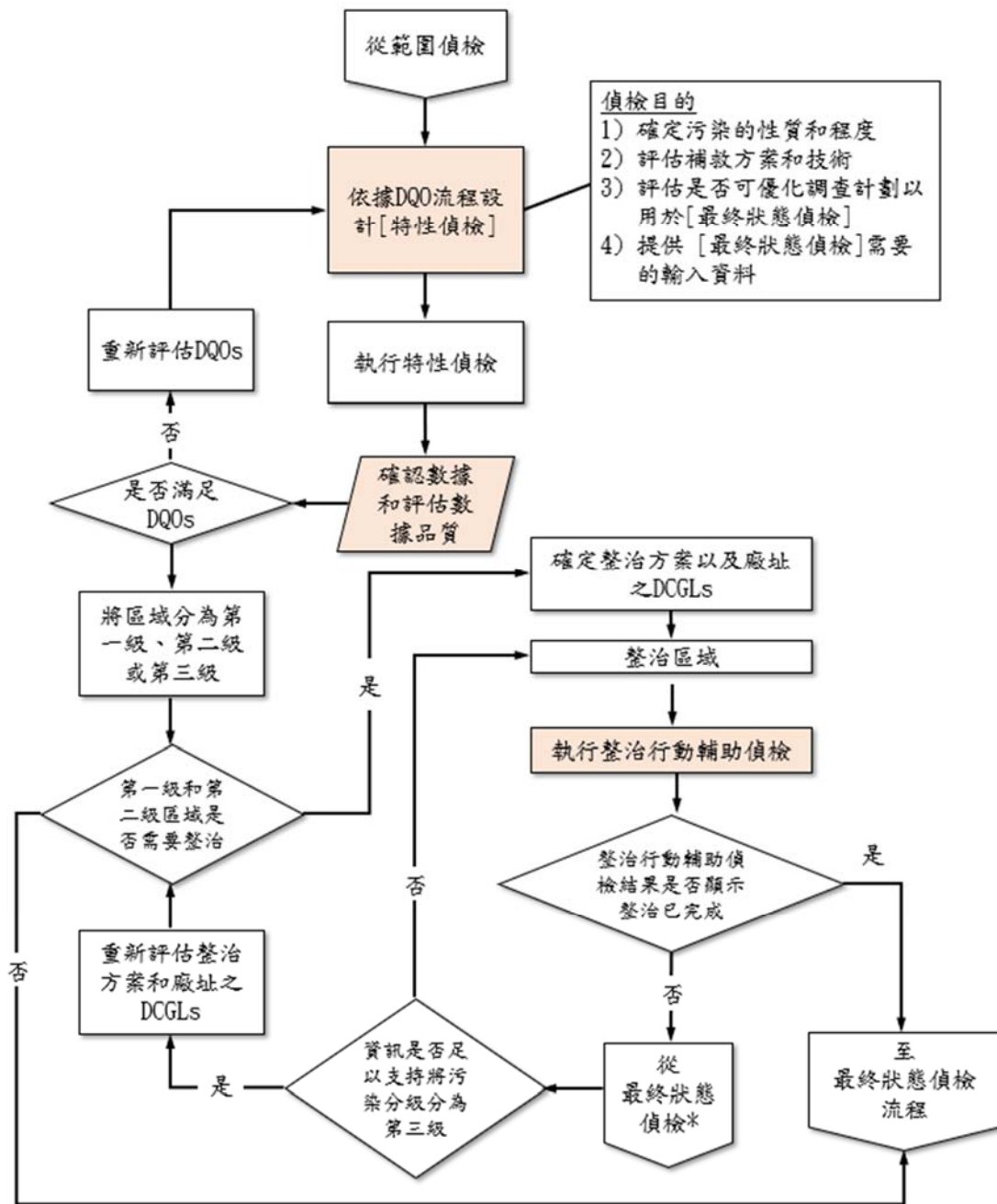
整治行動輔助偵檢進行的目的是 1)協助整治行動，2)確認廠區或偵檢單元是否預備好進行最終狀態偵檢，以及 3)提供最終狀態偵檢有關廠區參數最新的預估值。

整治行動輔助偵檢通常依靠簡單的輻射參數作為效用的指標，如表面的直接輻射。要注意的是，整治行動輔助偵檢是一個過渡的程序，不可作為符合 DCGLs 的證明。依據治行動輔助偵檢確認符合 DCGLs 的區域，會在最終狀態偵檢時進行仔細的偵檢。然而，根據整治行動輔助偵檢也可以設計為符合最終狀態偵檢的目標。

整治行動輔助偵檢會改變偵檢單元的污染分佈。最終狀態偵檢使用的廠區參數(如核種濃度的變異數)也會隨之改變，因而需要在整治後重新計算建立。

MARSSIM 提供特性偵檢與整治行動輔助偵檢要進行活動的確認清單範例，包含偵檢設計、偵檢執行偵檢結果評估。其中特性偵檢規劃所列舉的 DQOs 包含說明特性偵檢的目的以及偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求。整治行動輔助偵檢所列舉的 DQOs 則包含說明特性偵檢的目的以及偵檢儀器的檢驗能力必須可以檢測出殘餘輻射為 DCGL 值的量。在 MARSSIM 第 5 章所提供的特性偵檢及整治行動輔助行動偵檢要進行活動的確認清單中，並沒有特別寫出要比較偵檢結果是否符合 DQOs 的要求。

特性偵檢及整治行動輔助偵檢流程圖



*在[最終狀態偵檢]流程圖中未能證明符合法規規範之標準時重新進入此流程之進入點

圖 33 特性偵檢及整治行動輔助偵檢流程圖

(3)-3 最終狀態偵檢

最終狀態偵檢的執行是為要證明每一個偵檢單元的殘餘放射性滿足所訂定之無條件釋出或限制指定用途的釋出標準。此偵檢要提供數據來證明所有的放射性參數沒有超過所訂定的 DCGLs。在最終狀態偵檢，偵檢單元是呈現是否合規的基本元素，並透過使用統計檢定來判斷。

圖 8 是最終狀態偵檢的流程圖。此程序是從建立 DQOs 開始。在偵檢的目標以及廠區已知或預期會有的殘餘輻射狀態的基礎下，確認量測和取樣的點，這些量測和取樣的點會用於判斷是否符合外釋標準。最後，選擇合適的偵檢技術來執行偵檢。

最終狀態偵檢應包含和監管機構早期有關驗證或確認偵檢的討論。確認偵檢也就是所知的獨立驗證偵檢，可由權責監管機構或獨立第三方來提供數據來證實最終狀態偵檢的結果。可能會進行實地量測或取樣。另外一個確認活動的目的為，透過審查偵檢程序和結果。找出最終狀態偵檢文件中的不足之處。獨立確認偵檢活動通常會只做抽檢，比較抽檢和最終狀態偵檢的結果，並分別進行獨立確認偵檢及最終狀態偵檢的統計評估。

最終狀態偵檢的規劃內容包含以下幾點：

- 除役標準的應用

除役標準的訂定是 DQO 程序的一部分。最終狀態偵檢的目標為證明殘餘輻射水準符合外釋標準。證明的方法是透過統計檢定，所以要訂定虛無假設(H_0 ，殘餘輻射量超過釋出標準)和對立假設(H_A ，殘餘輻射量符合釋出標準)。

當有背景污染時，使用 WRS(Wilcoxon Rank Sum)統計檢定，當沒有背景污染時使用符號(Sign)檢定。偵檢規劃要建立可接受的型 I 錯誤率(α)和型

II 錯誤率(β)。

- 有背景污染時 – 確認統計檢定需要的數據數量
- 沒有背景污染時 – 確認統計檢定需要的數據數量
- 確認在小區域範圍內有較高活度時的數據數量

屬於污染等級 1(Class 1)的偵檢單元若檢測出較高活度，要進行 EMC 檢測。上述的統計檢定是在污染大致均勻分布於偵檢單元時，評估殘餘輻射是否超過 $DCGL_W$ (DCGL Wide)。而當有小區域範圍的活度高於 $DCGL_W$ 時，要計算 $DCGL_{EMC}$ ，並將小區域內的活度和 $DCGL_{EMC}$ 比較，判斷是否符合除役標準及是否需要進行除污。 $DCGL_{EMC}$ 是 $DCGL_W$ 的修正，計算方法和區域範圍的大小以及 $DCGL_W$ 值相關。

掃描儀器的最小檢測濃度(MDC)應小於 $DCGL_{EMC}$ 。當 MDC 小於 $DCGL_{EMC}$ 時，評估小區域較高活度時不須增加額外的樣本點。若 MDC 大於 $DCGL_{EMC}$ 時，則需增加掃描點數，需要增加的數目，透過 MARSSIM 提供的公式計算。

- 確認偵檢位置
- 確認調查基準

當量測值超過調查基準表需要進一步的調查，也代表可能之前的區域污染分級可能有誤或使用了不適當的儀器。表 2 為 MARSSIM 所建議的調查基準。

表 13 調查基準表

偵檢單元區域分級	直接量測或取樣結果之調查基準	掃描之調查基準
第一級	>DCGLEMC 或 >DCGLW 和 > statistical-based 參數值	>DCGLEMC
第二級	>DCGLW	>DCGLW 或 > MDC
第三級	>DCGLW 的某百分比	>DCGLW 或 > MDC

最終狀態偵檢報告應提供偵檢單元中完整且明確輻射狀態的紀錄，以及其相對之 DCGLs。此外，也應提供足夠將來若要進行獨立重現評估時足夠的資料和資訊。最終狀態偵檢報告應為一獨立的文件，並被獨立審查且被規畫者所認可。

最終狀態偵檢要進行活動的確認清單範例，包含偵檢預備、偵檢設計、偵檢執行偵檢結果評估。其中偵檢規劃所列舉的 DQOs 包含說明最終狀態偵檢的偵檢目的、說明虛無假設和對立假設、以及設定可接受的決策錯誤率(型 I 錯誤率(α)和型 II 錯誤率(β))。

最終狀態偵檢流程圖

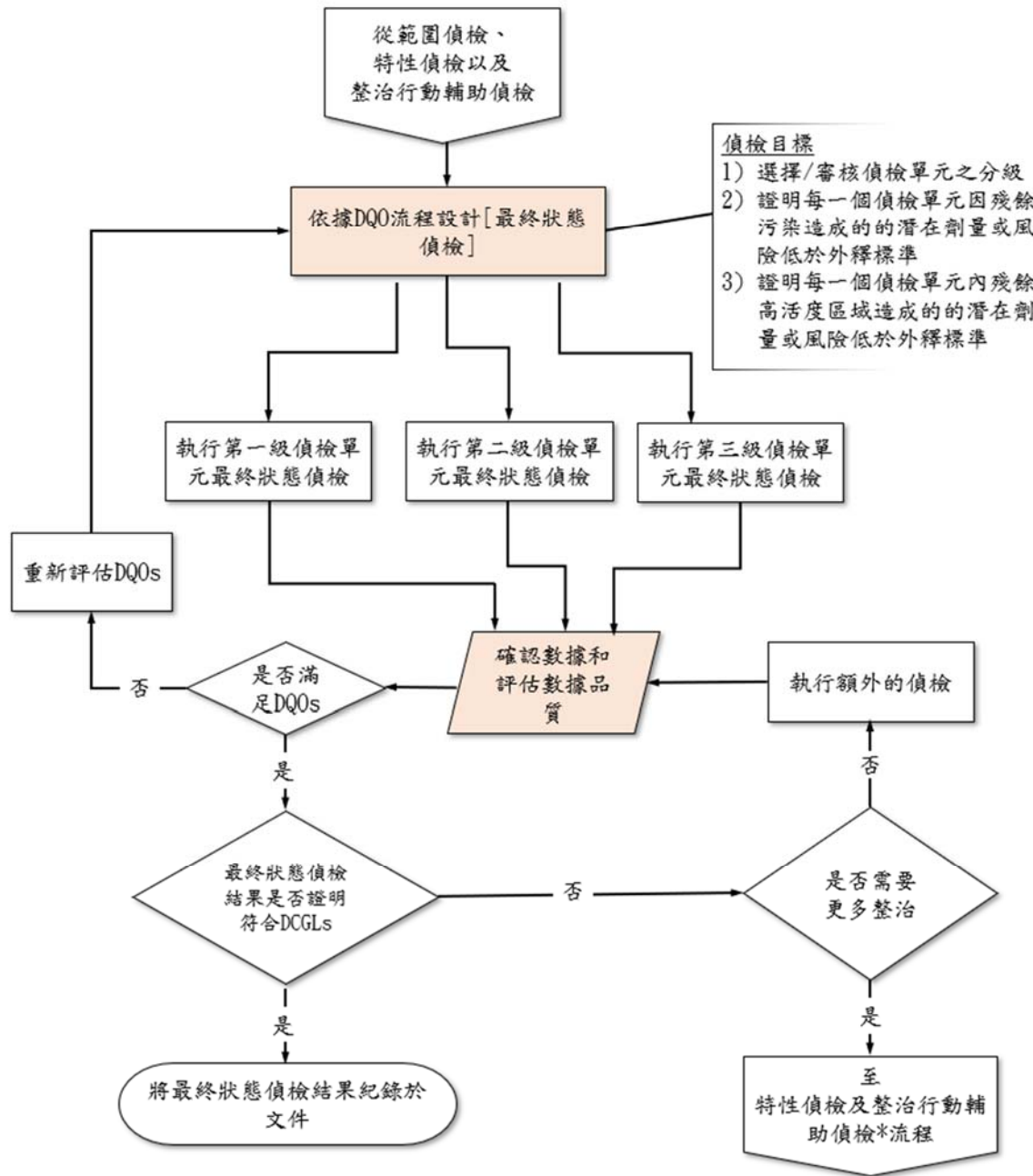


圖 34 最終狀態偵檢流程圖

二、數據品質評估(DQA)與偵檢結果評估

當所有的量測值都高於或低於 $DCGL_w$ 或平均量測值大於 $DCGL_w$ 時，不須進行統計檢定即可決定偵檢單元是否符合外釋標準。但當量測結果不是非常清楚的高於或低於 $DCGL_w$ 時，則需要使用統計檢定來進行判斷。然而，在偵檢規劃時皆必須使用統計檢定來確認取樣的點數和量測工具的敏感度是足夠的。

數據品質評估(DQA)採用科學和統計的評估方法來確認數據的種類、品質和數量是否正確。DQA 共有 5 個步驟，MARSSIM 第 8 章所描述 DQA 之 5 個步驟所要進行的事項分別於下面 5 個小節中介紹。在進行 DQA 程序前，必須先依照 MARSSIM 第 9 章的介紹驗證和確認數據。

1. DQA 步驟 1：檢視 DQOs 和取樣設計

DQA 第一個步驟是檢視 DQOs，DQOs 就是數據品質指標，並確保這些指標仍然適用。舉例來說，若數據判別偵檢單元錯誤的分級為第三級，而正確的分級應為第一級，則應重新訂定偵檢單元的 DQOs。

應審查取樣設計和數據蒐集文件和 DQOs 是一致的。舉例來說，要審查時要確認在正確的位置取出符合應取樣的數目且量測系統有合適的敏感度。表 3 為 MARSSIM 第 5 章所舉出要各電廠輻射偵檢類別要確認的 DQOs 列表。

確認取樣設計提供足夠的檢定力對做決策是很重要的，特別是當殘餘輻射接近 $DCGL_w$ 時。確認檢定力足夠可在偵檢設計時進行，也可在分析偵檢結果時進行。檢定力不足造成的風險為當偵檢單元實際情況符合外釋標準時，會有較高機率不正確的被判定為不符合外釋標準。

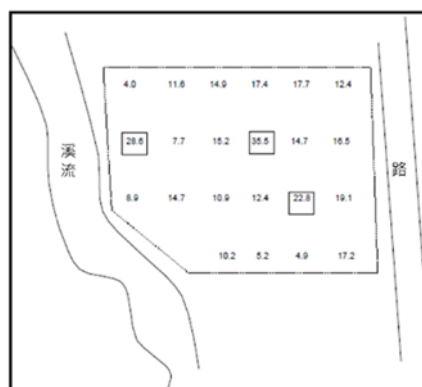
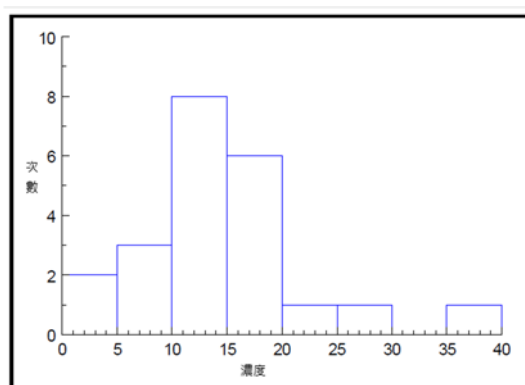
表 14 各電廠輻射偵檢類別要確認的 DQOs

偵檢類別	DQOs
範圍偵檢	● 說明偵檢目的 ● 偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求
特性偵檢	● 說明偵檢目的 ● 偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求
整治行動輔助偵檢	● 說明偵檢目的 ● 偵檢儀器的檢驗能力必須可以檢測出殘餘輻射為 DCGL 值的量
最終狀態偵檢	● 說明最終狀態偵檢的偵檢目的 ● 說明虛無假設和對立假設 ● 設定可接受的決策錯誤率(型 I 錯誤率(α)和型 II 錯誤率(β))

2. DQA 步驟 2：進行初步數據審查

為了解數據趨勢、關聯，或潛在的異常值，可以：

- 審閱品質保證(QA)和品質控制(QC)報告
- 用數據繪圖：如頻率圖和位置圖(posting plots)，下面分別為頻率圖和位置圖範例。



- 計算基本統計量：如平均值、標準差和中位數

3. DQA 步驟 3：選擇統計檢定

MARSSIM 建議當有背景污染時，使用 WRS(Wilcoxon Rank Sum)檢定，當沒有背景污染時則使用符號(Sign)檢定。

4. DQA 步驟 4：驗證統計檢定的假定

驗證統計檢定的假定(Assumption)是為要確認該統計檢定的使用是合適的。MARSSIM 所建議使用的 WRS 檢定和符號檢定為無母數檢定(Nonparametric Test)，其假定為數據來自偵檢單元或參考區域個別分佈的獨立樣本。透過位置圖(Posting Plot)可以評估樣本的空間獨立性。

另一個有關 MARSSIM 所描述的偵檢設計中更重要的假設為統計檢定所採用的樣本數可以達到數據品質目標所符合設定的型 I 錯誤率(α)和型 II 錯誤率限值(β)。驗證統計檢定的檢定力($1-\beta$)對檢測是否要進行整治行動特別重要。因為檢定力不足時會增加錯誤將偵檢單元評估為需要進行整治的機率。透過回溯性的檢定力圖可以評估檢定力是否足夠。

5. DQA 步驟 5：從數據得出結論

偵檢單元的偵檢量測方式有三：1)在不同位置的直接量測，2)在不同位置的樣本蒐集，3)掃描。統計檢定只能運用於不同位置的量測。表 4 和表 5 分別說明無背景污染及有背景污染時如何從偵檢結果得出結論。兩個表格中都有提到較高量測值比較(EMC)，進行 EMC 並不是要得出偵檢單元是否符合或不符合釋出標準的結論，而是作為是否要進一步進行調查的指標。調查可能包含進行更進一步的量測來確認區域是否符合外釋標準。有些狀況可能會需要重新分級全部或部分的偵檢單元。表 6 說明偵檢單元污染分級對應的調查基準。

表 15 無背景污染時如何從偵檢結果得出結論

偵檢結果	結論
所有量測值小於 $DCGL_w$	偵檢單元符合釋出標準
平均值大於 $DCGL_w$	偵檢單元不符合釋出標準
任一量測值大於 $DCGL_w$ ，但平均值小於 $DCGL_w$	執行符號檢定和較高量測值比較(EMC)

表 16 無背景污染時如何從偵檢結果得出結論

偵檢結果	結論
所有量測值小於 $DCGL_w$	偵檢單元符合釋出標準
平均值大於 $DCGL_w$	偵檢單元不符合釋出標準
任一量測值大於 $DCGL_w$ ，但平均值小於 $DCGL_w$	執行符號檢定和較高量測值比較(EMC)

表 17 偵檢單元污染分級對應的調查基準

偵檢單元分級	直接量測或取樣結果之調查基準	掃描之調查基準
第一級	$>DCGL_{EMC}$ 或 $>DCGL_w$ 和 $>$ 某統計參數相關值	$>DCGL_{EMC}$
第二級	$>DCGL_w$	$>DCGL_w$ 或 $>MDC$
第三級	$>DCGL_w$ 的某百分比	$>DCGL_w$ 或 $>MDC$

三、 評估結果：決策

取得偵檢和統計檢定結果後，要主管機關和廠址特定的 ALARA(合理可低及)考量來進行接下來的特定步驟。下面對應廠址或偵檢單元釋出規範的檢定結果評估方法建議。

6. 較高量測值比較(EMC)

EMC 為將偵檢單元的量測值和調查基準(Investigation Levels)比較。每一個系統取樣點和掃描時標記的區域都要進行 EMC。偵檢單元中任何等於或大於調查基準的量測值代表該區放射性活度相對較高，不論統計檢定的結果如何，該偵檢單元都需要進一步調查。EMC 目的是標記計出除污程序中可能有失誤處，而不是辨認廠區是否符合外釋標準的主要方法。EMC 的導出濃度指引公式為：

$$DCGL_{EMC} = A_m \times DCGL_w$$

A_m 為區域因子

要注意的是， $DCGL_{EMC}$ 應在偵檢規劃時就訂定好。但在完成進一步調查後，可以使用區域中實際的濃度重新設定區域因子和 $DCGL_{EMC}$ 。當量測到一個較高量測值時，該量測值可以代表量測格區域 4 倍大之區域，並依據測格區域 4 倍大之區域大小來決定區域因子。

若於掃描偵檢時沒有備標計的區域，卻於取樣或直接量測的量測值超過掃描 MDC(Scanning MDC)時，可能代表掃描方法不符合 DQOs。

EMC 主要是用於區域分級為第一級之偵檢單元。當區域分級為第二級或第三級的偵檢單元量測出超過 $DCGL_w$ 之量測值時，可能代表該偵檢單元的分級錯誤。當發生超過調查基準的狀況時，調查的結果應為下面兩者

之一：1)確保發現較高量測值區域符合外釋標準。和 2)提供沒有其他未發現較高量測值區域之合理的保證。若進一步的調查確認偵檢單元的污染分級錯誤，則可能要用合適偵檢單元區域分級的偵檢方法重新進行偵檢。

7. 解釋統計檢定結果

統計檢定的結果會決定是否要拒絕虛無假設。若有較高量測值發生時，在 EMC 完成後，統計檢定的結果若為拒絕虛無假設代表偵檢單元符合外釋規定。

當無法拒絕虛無假設時，回溯性的檢定力分析通常很有用。檢定力代表當實際狀況為虛無假設時，偵檢的結果為拒絕虛無假設的機率。檢定力和量測數目及標準差相關。通常偵檢設計會稍微高估所需的量測數來確保有足夠的檢定力。

8. 若偵檢單元未通過(Fails)

偵檢單元未通過最終狀態偵檢的原因有數個可能：可能是統計檢定的結果為不能拒絕虛無假各，也可能進行較高量測值比較(EMC)後，進一步的調查顯示可能有大範圍區域有不符合外釋標準的放射性濃度。

當偵檢單元無法證明符合外釋標準時，第一步要做的釋，檢視和確認決策所依據的數據並確認偵檢單元的殘餘輻射量以協助定義問題。完成後，可以使用 DQO 程序來評估可能的解決方法，並建立決策規則。接下來，決定是否需要其他額外的數據來說明偵檢單元符合外釋規定。應評估決策規則是否符合 DQOs，並選擇符合 DQOs 的決策規則。

四、 報告文件

最終狀態偵檢報告應提供輻射狀態完整清楚的紀錄，並使用和 DCGLs 相同的單位。此外，應提供足夠的數據和資訊使將來可以進行獨立的評估

或重新量測。報告應符合監管單位的要求。

從其他除役文件中可以取得很多最終狀態偵檢報告的資訊。然而，最終狀態偵檢報告應該為一份獨立的文件，並儘量減少來自參考文件的資訊。此份文件應描述使用的儀器或分析方法、如何將數據轉換回 DCGL 使用的單位、將結果和 DCGLs 比較的程式，以及確認數據品質目標是否符合的程式。

當有個別量測時或樣本超過調查基準時，所採取行動的結果應和額外數據、整治，或重新偵檢等一起列入報告。應描述使用統計方法確認是否符合外釋規定的數據評估結果。若不符合外釋標準或結果顯示需要和外的資訊，應由廠區主管在諮詢權責監管單位後，確認合宜的進一步行動。

數據解讀確認清單範例

將數據轉為標準單位

___ 結構活度 Bq/m²(dpm/100 cm²)

___ 泥土介質活度 Bq/kg(pCi/g)

評估較高活度量測值

___ 確認較高量測值數據

___ 將數據和導出較高區域標準(Derived Elevated Area Criteria)比較

___ 確認是否需要除污和/或重新調查較高活度的情況

___ 比較偵檢單元的數據和區域分級標準

___ 確認是否需要調查和/或重新分級

評估偵檢數據

- ___ 檢視 DQOs 和偵檢設計
- ___ 驗證數據具備足夠的品質和數量
- ___ 執行初步評估(使用圖形方法)來確認是否有不平常或可疑的趨勢

執行統計檢定

- ___ 選擇合適的統計檢定
- ___ 執行統計檢定
- ___ 比較統計檢定結果和假設
- ___ 確認檢定的檢定力

比較數據結果和 DCGLs

- ___ 確認濃度的平均值或中位數
- ___ 確認殘餘活度符合 DCGLs

比較數據和 DQOs

- ___ 確認是否滿足所有的 DQOs
- ___ 說明/描述和偵檢設計之 DQOs 的差異

伍、美國核電廠有關 DQA 相關文獻及摘述

我們將目前在 NRC 網站蒐集到蒐集到的美國核電廠有關 DQA 之相關文獻有薩克斯頓核實驗公司(Saxton Nuclear Experiment Corporation，簡稱 SNEC)、Plum Brook 反應器以及錫安核電廠(Zion Nuclear Generating Station)的資料，內容摘述說明如下：

一、薩克斯頓核實驗公司

薩克斯頓核實驗公司(SNEC)[3]位於賓夕法尼亞州薩克斯頓附近貝德福德縣的核電站(Station)，其淨發電量為 23.5 兆瓦，主要目的是研究各方面的核反應器技術並培訓人員。此核實驗站於 1961 年 11 月開始運營，1972 年除役。在 2005 年 11 月時，NRC 核准以無使用限制(Unrestricted Use)方式釋出此實驗站區域。DQA 指引發布的時間為 2000 年，SNEC 於 2005 依照 MARSSIM 之規範進行最終狀態偵檢，需依照 DQA 程序進行其所規範要進行的活動。我們參考薩克斯頓核實驗站有關 DQA 程序的文件，主要是最終狀態偵檢報告(FSS Report)相關文件。

薩克斯頓核實驗公司最終狀態報告中包含品質目標指標 DQOs 及數據品質評估(DQA)結果。數據品質目標指標 DQOs 如表 7，表中說明了 DQOs(Data Quality Objectives)以及其他偵檢設計相關參數。數據品質評估(DQA)結果說明最終狀態偵檢所蒐集的數據已經過實際性、紀錄合適性、以及品質等驗證，說明 DQA 之章節亦列出數據被接受的審查標準如下：

- 1) 蒐集數據用的儀器偵測能力，必須在有興趣核種的放射性等於或低於調查水平值之值時，可以檢測出其活度來。(DQA 步驟 1)
- 2) 用來蒐集數據之儀器應最近完成校準，並用於校準的輻射源應可追溯到公認標準或校準機構。(DQA 步驟 1)
- 3) 儀器的反應應先檢查，並且，若有需要，在儀器使用後應每日蒐集

數據。(DQA 步驟 1)

- 4) 偵檢團隊成員要經過適當的訓練，以具備偵檢技能，且應有訓練紀錄。(DQA 步驟 1)
- 5) 儀器應具備合適的最小可檢測濃度 (Minimum Detectable Concentrations, MDCs)。(DQA 步驟 1)
- 6) 蒐集數據的方法對於要量測輻射之種類及介質應合宜。(DQA 步驟 1)
- 7) 使用特殊的儀器量測方法來蒐集數據必須在特定的偵檢情況下，並且要根據被許可的偵檢程序。(DQA 步驟 1)
- 8) 樣本若在廠外保管，必須於樣本蒐集時到最終結果出來前都可追蹤。(DQA 步驟 1)
- 9) 最終狀態偵檢數據包含可代表目前設施狀態和根據合適的偵檢設計所得的合格的量測結果。(DQA 步驟 1)

表 18 薩克斯頓核實驗公司最終狀態偵檢 DQO/設計參數

DQO/Design Parameter	OL4-1	OL4-2	OL4-3	OL4-4
SNEC Design Calc. #	E900-05-019	E900-05-019	E900-05-019	E900-05-019
MARSSIM Classification	1	1	1	1
Survey Unit Area (m ²)	1100	1100	1200	1400
Statistical Test	Sign	Sign	Sign	Sign
Type 1 decision error (α)	0.05	0.05	0.05	0.05
Type 2 decision error (β)	0.1	0.1	0.1	0.1
LBGR (pCi/gm)	3.84	3.84	3.84	3.84
Estimated σ (pCi/gm)	0.32	0.32	0.32	0.32
Relative Shift (Δ/σ)	3.0	3.0	3.0	3.0
Number of static points	11	11	11	11
DCGLw (Cs137 pCi/gm)	6.46	6.46	6.46	6.46
75% Action Level(pCi/gm)	4.8	4.8	4.8	4.8
Scan MDC (pCi/gm)	6.2	6.2	6.2	6.2
SNEC Survey Request #	SR226	SR227	SR228	SR229
Scan Survey Instrument	L2350-1 w/ 44-10	L2350-1 w/ 44-10	L2350-1 w/ 44-10	L2350-1 w/ 44-10

二、Plum Brook 反應器

Plum Brook 反應器[4]位於亥俄州桑達斯基，是美國 NASA 的水冷式研究用核反應器，用於航太相關核動力研究和發展。於 1998 年開始除役，最後一個結構於 2012 年拆除。最終狀態偵檢(FSS)依照 NRC 指引文件(MARSSIM 手冊 NUREG1757)規劃。我們參考 Plum Brook 反應器有關 DQA 程序的文件，主要是最終狀態偵檢報告(FSS Report)相關文件。

在 Plum Brook 反應器的最終狀態偵檢報告中的附件，有一份 DQA 檢查表(DQA Check Sheet)，檢查表的檢查項目如下

DQA 檢查表(DQA Check Sheet)

數據審查(DQA 步驟 1)

1. 是否有依照偵檢調查設計中的規劃要求進行調查？
2. 量測結構儀器之靜態量測的最小檢測濃度(MDC)，在區域分級屬於第一級及第二級的偵檢單元是否小於 DCGLw，在區域分級屬於第三級的偵檢單元是否小於 0.5 倍的 DCGLw？
3. 量測埋管儀器之靜態量測的最小檢測濃度(MDC)是否小於 DCGLw？
4. 掃描結構、土地，和埋管儀器的最小檢測濃度(MDC)是否小於 DCGLw？
若否，依據偵檢調查設計的要求，是否需要增加靜態量測值或泥土樣本？
5. 體積量測和抹片分析儀器的 MDC 是否小於 10%的 DCGLw？
6. 用於發展 MDCs 之假設以及 MDCs 對於偵檢儀器以及執行調查的技術是否合適？

7. 蒐集資料之偵檢調查方法對於要調查的輻射種類和介質是否合適？
8. 被審查之偵檢單元，其用於蒐集數據的“特別方法”是否合適？
9. 依據偵檢調查設計，數據是否為合格的量測結果，且可準確地反應出設施的輻射狀態？

圖形審查(DQA 步驟 2)

1. 是否已製作散佈圖(Posting Plot)？
2. 是否已製作直方圖(Histogram)或頻率圖(Frequency Plot)？
3. 是否有製作其他圖表已協助數據分析？

數據分析(DQA 步驟 5)

4. 是否所有第一級和第二級區域的樣本量測值低於 DCGLw，且第三級區域的所有樣本量測值低於 0.5 倍的 DCGLw？
5. 樣本數據的平均值是否低於 DCGLw？
6. 若透過掃描和/或取樣找到輻射濃度較高的區域(Elevated Areas)，輻射濃度較高的區域的平均活度是否小於 DCGL_{EMC} (第一級)、小於 DCGLw(第二級)，或小於 0.5 倍的 DCGLw(第三級)？
7. 較高量測值檢定(Elevated Measurements Test)是否小於 1.0？
8. 統計檢定結果(Sign 檢定的 S+或 WRS 檢定的 W_r)大於等於臨界值？

三、錫安核電廠

美國錫安核電廠（Zion Nuclear Generating Station）[5]的 1 號和 2 號機組於 1998 年 2 月 13 日永久停機，於 2011 年開始進行除污和拆除工作，並於 2011 年 11 月 2 日至 2013 年 10 月進行並完成電廠輻射初始偵檢調查，其特性偵檢調查工作會在除役階段繼續進行。其最終狀態偵檢調查於 2016 年 3 月開始進行，分兩個階段進行－第一階段的偵檢範圍為戶外土壤，於 2018 年 10 月完成最終狀態偵檢第一階段報告；第二階段的偵檢範圍為 1 號機組和二號機組的地下結構體、渦輪機建築、輔助建築、用過燃料池、傳送通道、前池、禁區和廢水處理設施（WWTF）等，於 2019 年 2 月完成最終狀態偵檢第一階段報告。

我們使用參考錫安核電廠有關 DQA 的文件為「錫安核電廠最終狀態偵檢數據評估程序指引」，摘述如下：

錫安核電廠最終狀態偵檢數據評估程序指引的目的是，於最終輻射偵檢(FRS)的評估階段提供使用 DQA 程序來解讀偵檢結果的指引，重要章節摘述如下：

9. 目的和範疇範圍-說明文件的目的和引用及應用範疇

錫安核電廠的最終輻射偵檢(Final Radiation Survey, FRS)包含最終狀態偵檢(Final Status Survey, FSS)和源項偵檢(Source Term Survey, STS)，以下摘述以 FSS 相關內容為主。FSS 是要證明泥土、埋管和地下水的殘餘輻射濃度符合廠址的導出濃度指引水平(Derived Concentration Guideline Levels, DCGL)；STS 則是要證明建築物地下室、內建管路殘餘輻射的存量符合 10 CFR 20.1402. 所規範的劑量標準。此準則時做美國核管處相關指引規範，包含 NUREG-1757(除役指引)、NUREG-1575(MARSSIM)，以及錫安核電廠的執照中止計畫 (License Termination Plan, LTP) 第五章。會應用此程序到的人員包含參予在接收、管理、保存以及 FRS 數據蒐集和轉換的人員。數

據處理程序包含轉換量測數據資料的單位為報告用的單位、確認儀器的合用性和敏感度、計算相關統計量，和驗證符合所有的數據品質目標(DQO)。在完成數據確認、處理，和評估後，需依照錫安核電廠規定的最終輻射偵檢報告規範來撰寫報告。

10. 權責-說明不同身分應負責之工作

(1) 特性/執照終止(Characterization/License Termination(C/LT)) 主管

- 提供 FRS 結果和分析的審查、確認和解讀的技術支援。
- 審查和同意有關偵檢單元評估的結論。
- 確保有適當的將結論紀錄於報告文件中。

(2) 輻射工程師

- 確保偵檢資料的真實性且具備足夠的品質。
- 確保執行偵檢單元所有需要的偵檢且根據取樣計畫紀錄。
- 使用 DQA 程序進行 FRS 資料和結果的評估。

(3) 圖形專家

- 準備偵檢地圖、佈局圖、綜合視圖和其他資料分析需要的圖。

(4) 特性/最終輻射偵檢(Characterization/FRS)技術人員

- 根據 FRS 取樣計畫和所有應依照的程序取得及記錄偵檢量測值和樣本。

11. 事先規劃措施、限制和先決條件

(5) 事先規劃措施

- 包含 FRS 資料的文件和資料庫必須根據特性和最終輻射偵檢

品質保證計畫規劃(QAPP)來進行維護。

- 紀錄偵檢資訊時，所有人員皆應確保有好的品質的 QA 紀錄和資訊清晰。
- FRS 資料存取的權限設定。
- 評估 STS 結果時，若潛在劑量大於法規限制(2.5 mrem/yr)超過 10%，則為了找出不易檢測(Hard-to-Detect, HTD)的核種，需要取得和分析額外的樣本。若新增樣本的分析顯示核種分布和之前的分析不同，則新的混和比例須重新導出、紀錄和應用於受影響的區域。
- 若偵檢結果顯示泥土或埋管中會產生 gamma 射線之核種超過 DCGL 的 50%時，樣本應分析是否含有不易檢測(HTD)的核種。
- 在評估 STS 結果時，檢驗是否有 LTP 所列關注核種表內以外的核種之濃度超過 MDC。若有，則應執行調查以評估該核種是否會產生需被關注的劑量。
- 評估 FSS 結果時，若泥土樣本的分析或表面 gamma 掃描顯示殘餘放射性活度超過地下 DCGL_w 的 75%，則應在關注區域中，於合適的深度取得額外的泥土樣本，作為調查的一部分。
- 說明區域重新分級的依據和規範。

(6) 限制

- 被接受之 FRS 紀錄應被審查以確認其確實性、紀錄合宜性以及技術上的可信賴性。
- FRS 偵檢數據要被接受作為 FRS 數據要符合之要求：
 - ◆ 應用及達成 FRS 所要求的方法、技術和品質控制。

- ◆ 偵檢單元不須進一步的整治，或若執行整治，所有產生的污染物質要被管控，且整治後的區域要重新掃描。
- ◆ 隔離和管控措施應依據電廠所規範之隔離和管控措施的指引文件。
- 使用圖形工具來做數據分析
 - ◆ 頻率圖有助於找出異常值或檢驗數據分布之對稱性。
 - ◆ 位置圖對在有一或多個的量測值超過 DCGL，需進一步進行調查偵檢時有幫助。

(7) 先決條件

- 用來協助計算 FRS 數據之軟體(如 Excel)應通過測試以確認其計算正確後方可使用。
- 任何要用於協助 FRS 執行的現場數據蒐集表，應歸檔於合適的偵檢包。

12. 主體-說明評估工作內容

(8) 數據確認(Data Validation)

- 確保數據相關的偵檢區域和偵檢單元有清楚的寫於報告上。
- 執行數據確認包含：
 - ◆ 驗證每一個樣本的識別號碼於樣本分析報告、取樣設計和其他相關表格中是一致的。
 - ◆ 驗證樣本紀錄的日期和時間於偵檢紀錄和相關表格中是一致的。
 - ◆ 驗證數據是完整的且沒有遺漏的結果或支持資料，如 MDC、不確定度、背景，或分析方法。

- ◆ 驗證儀器的 MDC 對分析來說是合適於偵測所有關注的核種或 FRS 取樣計畫對該偵檢單元的計畫 MDC。
- ◆ 驗證量測結果和支持數據(如 MDC、不確定度等)沒有異常。
- 呈現偵檢數據時要使用和 DCGL 一樣的單位。
- 標示完成確認後的分析或量測結果，標示方式是瑜於分析報告的封面標註「完成確認」，並在其後簽名並標註日期。
- 分析或量測結果完成確認後，將文件放置於要進行 FRS 數據評估的偵檢單元偵檢包下。
- 若某分析結果、量測值或數據及無法確認，則將其標註於問題下。審查人員應於問題中的該項簽名並呈報 C/LT 主管。C/LT 主管或設計人員應：
 - ◆ 依據電廠「矯正行動計劃」中所列要進一步調查的來由，考量是否要起始調查。
 - ◆ 評估偵檢單元的有效數據，以確認是否其餘有效數據足以符合偵檢單元的 DQOs。
 - ◆ 若其餘有效數據不足，有需要時指示取得額外的量測值或樣本。

(9)DQO 檢查清單(Checklist)(DQA 步驟 1)

- 在得知 FRS 取樣計畫所要進行量測或取樣都完成後，起始「最終輻射偵檢數據品質(DQO)檢查清單」。(錫安電廠的「最終輻射偵檢數據品質(DQO)檢查清單」參見下一小節)
- 使用錫安核電廠 DQO 檢查清單來審查並確保偵檢設計的 DQOs 都有達成。

- 若審查發現和偵檢設計有所差異，則紀錄要解決差異的矯正方法。
- 若差異無法解決，則將紀錄文件發送給 C/LT 主管，以完成此項工作。C/LT 主管或設計者應：
 - ◆ 評估受差異影響的數據以確認是否仍為有效數據。
 - ◆ 評估其餘未受差異影響的數據以確認是否足以符合偵檢單元的 DQOs。
 - ◆ 若其餘未受差異影響之數據不足，有需要時指示取得額外的量測值或樣本。

(10)最終狀態偵檢(FSS)的初步數據審查(DQA 步驟 2)

- 使用錫安核電廠「FSS 初步偵檢數據摘要」表格，預備最終狀態偵檢之偵檢數據的摘要，包含掃描偵檢結果、邊側樣本(Biased Samples)以及因較高活度而進行調查所得之樣本。
- 確保所有有效量測值都有被記錄，包含低於 MDC 和負值。(在最終狀態偵檢。(在最終狀態偵檢，只有系統性取樣的量測值會用於統計。邊側、判斷和調查樣本直接和 DCGL 比較)。
- 計算及列出系統性樣本的基本統計量，統計量至少包括：
 - ◆ 最小值
 - ◆ 最大值
 - ◆ 平均值
 - ◆ 中位數
 - ◆ 標準差

■ 計算 SOF(Sum-of-Fractions)

- ◆ 註明每一個關注核種的 DCGL(s)。
- ◆ 將核種活度除以 DCGL 以計算每一個樣本的 DCGL 分數 (Fraction)。若依樣本中有超過一種的關注核種，則要將每一個核種的 DCGL 分數相加。
- ◆ 計算偵檢單元系統性樣本的平均 SOF，若 SOF 小於 1，則進行下一步驟，若大於 1，則停止分析並通知 C/LT 主管。
- ◆ 註明偵檢單元中任何偏差和判斷性樣本和/和量測值。
- ◆ 評估偵檢單元的掃描偵檢結果
 - 比較偵檢單元的掃描結果和調查基準。
 - 若掃描量測值超過調查基準，則確保在標計處取得邊側樣本和量測值。
- ◆ 預備偵檢單元的地圖，地圖需涵蓋以下資訊
 - 偵檢單元的邊界。
 - 系統性量測和樣本位置之對應座標。
 - 偵測到較高活度位置之對應座標。
 - 邊側樣本或量測或取樣調查度位置之對應座標。
- ◆ 使用「位置圖」和「頻率圖」來呈現數據。

(11)選擇和執行統計檢定(DQA 步驟 3、4、5)

- 若每一個系統性取樣樣本的值如下面三個情況之一，則不須執行統計檢定，直接進行到下面所列「(5) 調查」的第二點。
- ◆ 低於或等於 $DCGL_w$ 。

- ◆ 當有使用背景參考區時，最大量測值和參考區的最小量測值差距低於或等於 $DCGL_w$ 。
- ◆ SOF 小於一。
- ◆ 若背景參考區有發現關鍵核種，則執行 WRS 檢定。(DQA 步驟 3)
- 若背景參考區沒有發現關鍵核種，則執行符號檢定(Sign Test)。(DQA 步驟 3)
- 若偵檢單元通過統計檢定，則進行下面所列「(5) 調查」的第二點。若偵檢單元沒有通過統計檢定，則通知 C/LT 主管並進一步分析數據以確認為何沒有通過統計檢定。(DQA 步驟 4、5)
- ◆ 若沒通過的原因是因為核種的濃度太高須進行整治，則進行下面所列「(6) 最終輻射偵檢失敗時的矯正措施」。(DQA 步驟 5)
- ◆ 若沒通過的原因是因為統計波動，則可重新調查偵檢單元，蒐集更多的數據。當偵檢單元實際的情況是符合外釋標準，更多的量測值應可提高通過統計檢定的機率。(DQA 步驟 5)
- ◆ 若因量測數不足造成檢定力不夠，則可進行回溯性的統計檢定力分析，以確認是否需要蒐集額外的數據。(DQA 步驟 4)

(12)調查(DQA 步驟 5)

- 偵檢單元的最終狀態偵檢，若任何位置的樣本、掃描或量測值超過該偵檢單元的調查基準，則依據電廠的最終偵檢調查文件進行調查作業。

- 若偵檢單元通過統計檢定，且沒有任一位置的樣本、掃描或量測值超過該偵檢單元的調查基準，則依據「(7) 偵檢包結案」進行結案作業。
- 紀錄調查的原因。
- 列出超過樣本和量測值超過調查基準的位置。
- 使用樣本或量測座標，評估是否較高活度的區域是在可確定的範圍內。若較高活度的區域不在確定的範圍內，則依需要取得額外的樣本來確認較高活度之範圍區域。
- 列出較高活度區域的樣本和量測值。
- 若偵檢單元的最終狀態偵檢區域分級為第一級，則較高活度量測值比較(EMC)的詳細步驟如下：
 - ◆ 在每個較高活度區域，標示有較高活度樣本中關注核種的 $DCGL_w(s)$ 。
 - ◆ 參考區域因子計算文件計算較高活度區域的區域因子。
 - ◆ 將有較高活度量測值或樣本的區域因子和 $DCGL_w$ 相乘以 計算 $DCGL_{EMC}$ 。
 - ◆ 將有較高活度量測值或樣本終各核種活度除以 $DCGL_{EMC}$ 後相加，得出的值稱為 EMC SOF。
- 若偵檢單元的區域分級為第一級，且有任何量測值或樣本等於或超過 $DCGL_w$ ，同時，EMC SOF 超過 1，則進行「(6) 最終輻射偵檢失敗時的矯正措施」。若 EMC SOF 小於等於 1，則偵檢單元通過 EMC，調查完成，依據電廠規範文檢偵檢單元的最終狀態偵檢報告。

- 若偵檢單元的區域分級為第二級，且有任何量測值或樣本等於或超過 $DCGL_W$ ，則進行「(6) 最終輻射偵檢失敗時的矯正措施」。若未超過行動基準(Action Level)，則調查完成，依據電廠規範文件產出偵檢單元的最終狀態偵檢報告。
- 若偵檢單元的區域分級為第三級，且有任何量測值或樣本等於或超過 50% 的 $DCGL_W$ ，則進行「(6) 最終輻射偵檢失敗時的矯正措施」。若未超過行動基準(Action Level)，則調查完成，依據電廠規範文件產出偵檢單元的最終狀態偵檢報告。

(13)最終輻射偵檢失敗時的矯正措施

- 若偵檢單元沒有通過 FRS，則依據電廠的「最終輻射偵檢未通過之矯正措施」指引文件起始矯正措施。矯正措施可能包含整治、重新分級，和/或重新偵檢。
- 遞交完整之表格予 C/LT 主管以得到許可。
- 當 C/LT 主管許可矯正措施後，則準備最終輻射偵檢的取樣計畫之修訂。若從已有的偵檢單元中新增偵檢單元，則依據電廠的「建立最終輻射偵檢包指引」來建立偵檢計畫。

(14)偵檢包結案

- STS 偵檢包依據錫安核電廠「STS 偵檢計畫結案」指引文件進行結案動作。
- FSS 偵檢包依據錫安核電廠「FSS 偵檢計畫結案」指引文件進行結案動作。

13.錫安核電廠「最終狀態偵檢數據品質目標(DQO)檢查清單」

最終狀態偵檢數據品質目標(Data Quality Objectives)

檢查清單

偵檢區域：編號 _____ 描述： _____

偵檢單元：編號 _____ 描述： _____

審查人員： _____ 日期： _____ 時間： _____

- 1) 是否所有要用於 FRS 的量測值和/或分析結果都各別經過程序所規定的審查並被確認？
- 2) 是否所有系統性量測值和/或樣本都根據 FRS 取樣計畫和 FRS 取樣指引所指定的地點取得？
- 3) 是否所有掃描偵檢都根據 FRS 取樣計畫和 FRS 取樣指引所指定的區域執行？
- 4) 有否在每一個系統性取樣或量測的位置進行周圍一米範圍內的掃描？
- 5) 是否所有邊側量測值(Biased Measurements)和/或樣本都根據 FRS 取樣計畫和 FRS 取樣指引所指定的地點取得？
- 6) 是否重複和/或分裂樣本和量測值都是依據品質控制(QC)樣本來設計？
- 7) 是否用來量測或分析偵檢數據的儀器可以偵測關鍵核種或整體活度的 MDC 小於目標 MDC？
- 8) MDCs 和用來建立 MDCs 的假設對於儀器和使用於分析資料的方法是合適的？
- 9) 使用於量測和分析數據的校準儀器，是否有使用國家標準技術機構

(NIST)可溯源之源項來進行校準？

10) 儀器是否於使用前和量測後當日完成權責確認(Response-Checked)？

11) 要進行實驗室分析所蒐集的樣本是否從蒐集的時點到取得最後分析結果保存都可追蹤？

12) QC 樣本是否符合「品質保證計畫規劃」文件的接受標準？若沒有請描述其差異和矯正措施。

差異：

矯正措施：

13) 是否矯正措施可以解決數據和規定的差異？若「否」，則將此表轉送給 C/LT 主管。

14) 下面的問題由 C/LT 主管回答

a. 若問題 13 的答案為「否」，受影響的數據仍然有效？

b. 若上一小題(a 題)的答案為「否」，目前已有的有效量測值或樣本是否足以證明偵檢單元符合外釋標準？

c. 若上一小題(b 題)的答案為「否」，則指示取得額外量測值或樣本以證明偵檢單元符合外釋標準？

預備人員(工程師)： _____

批准者(C/LT 主管)： _____

陸、電廠輻射偵檢調查計劃及報告有關 DQA 流程之管制建議

根據所蒐集美國與 DQA 相關文獻，包含 MARSSIM 及除役核電廠相關文獻，DQA 的流程主要應用於最終狀態偵檢。其他的輻射偵檢程序，如範圍偵檢及特性偵檢，在確認數據品質時，進行的作業為確認是否符合該輻射偵檢規劃所訂定之數據品質目標 DQOs，並不需要完成全部的 DQA 流程。依據 MARSSIM 第五章內容，各類偵檢類別所應產出的數據品質目標指標(DQOs)如下：

偵檢類別	DQOs
範圍偵檢	● 說明偵檢目的 ● 偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求
特性偵檢	● 說明偵檢目的 ● 偵檢儀器必須符合偵檢目的的要求
整治行動輔助偵檢	● 說明偵檢目的 ● 偵檢儀器的檢驗能力必須可以檢測出殘餘輻射為 DCGL 值的量
最終狀態偵檢	● 說明最終狀態偵檢的偵檢目的 ● 說明虛無假設和對立假設 ● 設定可接受的決策錯誤率(型 I 錯誤率(α)和型 II 錯誤率(β))

最終狀態偵檢於評估階段於完成數據的驗證和確認後，將進行 DQA 程序，DQA 程序共有 5 個步驟，以下依序提供有關此 5 個步驟之管制建議：

14.DQA 步驟 1：檢視 DQOs 和取樣設計

DQA 第一個步驟是檢視 DQOs，此步驟應確數據蒐集的方式和取樣設計所規定的 DQOs 是一致的。每一個電廠對不同區域分級所規範之最終狀態偵檢 DQOs 可能不盡相同，下面是錫安核電廠之最終狀態偵檢 DQOs 確認清單，實際進行管制時，應參考要審查之核電廠的最終狀態偵檢相關規畫或指引文件：

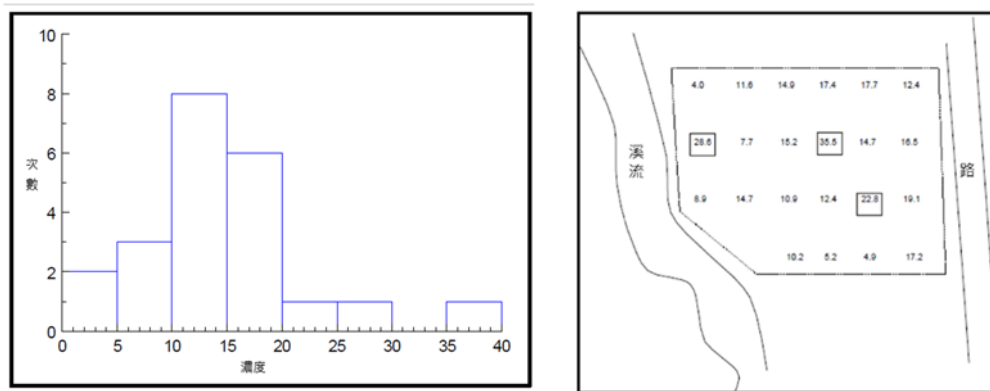
- 1) 是否所有要用於 FRS 的量測值和/或分析結果都各別經過程序所規定的審查並被確認？
- 2) 是否所有系統性量測值和/或樣本都根據 FRS 取樣計畫和 FRS 取樣指引所指定的地點取得？
- 3) 是否所有掃描偵檢都根據 FRS 取樣計畫和 FRS 取樣指引所指定的區域執行？
- 4) 有否在每一個系統性取樣或量測的位置進行周圍一米範圍內的掃描？
- 5) 是否所有邊側量測值和/或樣本都根據 FRS 取樣計畫和 FRS 取樣指引所指定的地點取得？
- 6) 是否重複和/或分裂樣本和量測值都是依據品質控制(QC)樣本來設計？
- 7) 是否用來量測或分析偵檢數據的儀器可以偵測關鍵核種或整體活度的 MDC 小於目標 MDC？
- 8) MDCs 和用來建立 MDCs 的假設對於儀器和使用於分析資料的方法是合適的？
- 9) 使用於量測和分析數據的校準儀器，是否有使用國家標準技術機構(NIST)可溯源之源項來進行校準？

- 10) 儀器是否於使用前和量測後當日完成權責確認(Response-Checked)？
- 11) 要進行實驗室分析所蒐集的樣本是否從蒐集的時點到取得最後分析結果保存都可追蹤？
- 12) QC 樣本是否符合「品質保證計畫規劃」文件的接受標準？若沒有請描述其差異和矯正措施
- 13) 是否矯正措施可以解決數據和規定的差異？若「否」，則將此表轉送給 C/LT 主管。
- 14) 下面的問題由 C/LT 主管回答
 - a. 若問題 13 的答案為「否」，受影響的數據仍然有效？
 - b. 若上一小題(a 題)的答案為「否」，目前已有的有效量測值或樣本是否足以證明偵檢單元符合外釋標準？
 - c. 若上一小題(b 題)的答案為「否」，則指示取得額外量測值或樣本以證明偵檢單元符合外釋標準？

15.DQA 步驟 2：進行初步數據審查

初步數據審查是要透過圖形以及基本統計量來了解數據趨勢、關聯，或潛在的異常值。

- 1) 常用的圖有頻率圖和位置圖，頻率圖可以判斷數據的分佈是否有偏向一方，位置圖可以判斷取樣的位置是否合理且互相獨立。下面分別為頻率圖和位置圖範例：



- 2) 常用的基本統計量有平均值、標準差和中位數。最終狀態偵檢規劃應規範要計算的基本統計量，最終狀態偵檢應計算最終狀態偵檢規劃所規定要計算的基本統計量。

16.DQA 步驟 3：選擇統計檢定

MARSSIM 建議當有背景污染時，使用 WRS(Wilcoxon Rank Sum)檢定，當沒有背景污染時則使用符號(Sign)檢定。

17.DQA 步驟 4：驗證統計檢定的假定

- 1) 透過位置圖(Posting Plot)可以評估樣本的空間獨立性。
- 2) 透過回溯性的檢定力圖，驗證統計檢定的檢定力($1-\beta$)是否足夠。
下面是錫安核電廠最終狀態偵檢中提供的回溯檢定力圖。

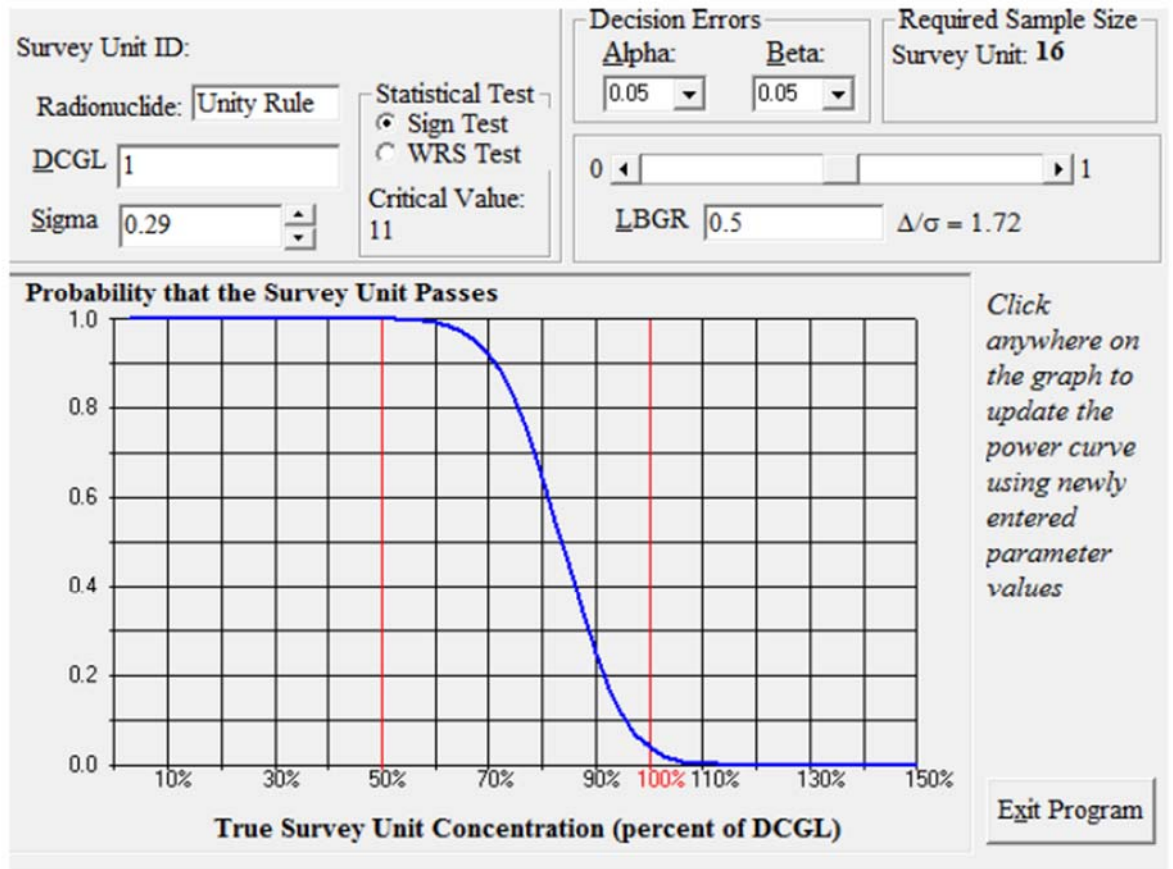


圖 35 回溯檢定力圖

18.DQA 步驟 5：從數據得出結論

- 1) 電廠應提供文件說明從數據得出結論的方法，表 8-10 為 MARSSIM 所建議得出結論的方法。
- 2) 電廠應提供數據發生超過調查基準的相關範例可參考本文第五章第三節第 4 小節中第(5)調查和第(6) 終輻射偵檢失敗時的矯正措施。應提供的規範包含：
 - b. 調查基準的規範
 - c. EMC 的進行流程以及 $DCGL_{EMC}$ 的計算方式

d. 當數據超過調查基準時的作業流程

e. 相關矯正措施進行方式

表 19 無背景污染時如何從偵檢結果得出結論

偵檢結果	結論
所有量測值小於 DCGL _w	偵檢單元符合釋出標準
平均值大於 DCGL _w	偵檢單元不符合釋出標準
任一量測值大於 DCGL _w ，但平均值小於 DCGL _w	執行符號檢定和較高量測值比較(EMC)

表 20 有背景污染時如何從偵檢結果得出結論

偵檢結果	結論
所有量測值小於 DCGL _w	偵檢單元符合釋出標準
平均值大於 DCGL _w	偵檢單元不符合釋出標準
任一偵檢單元和參考區域量測值的差大於 DCGL _w ，但偵檢單元和參考區域平均值的差小於 DCGL _w	執行 WRS 檢定和較高量測值比較(EMC)

表 21 偵檢單元不同污染分級之調查基準

偵檢單元分級	直接量測或取樣結果之調查基準	掃描之調查基準
第一級	>DCGL _{EMC} 或 >DCGL _w 和 > 某統計參數相關值	>DCGL _{EMC}
第二級	>DCGL _w	>DCGL _w 或 >MDC
第三級	>DCGL _w 的某百分比	>DCGL _w 或 >MDC

結論

本子分項計畫透過研讀 DQA 指引文件、MARSSIM 手冊以及美國除役核電廠的相關文獻，了解 DQA 程序之內涵與用途、輻射偵檢與廠址調查步驟與流程與 DQA 程序在輻射偵檢與廠址調查中扮演的角色。已完成《EPA QA / G-9 數據品質評估》摘譯，並提供有關廠輻射偵檢調查計劃及報告有關 DQA 流程之管制建議予管制單位參考。

柒、參考資料

- [1]. Guidance for Data Quality Assessment-Practical Methods for Data Analysis.
EPA QA/G-9, July 2000.
- [2]. Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (MARSSIM)
August 2000.
- [3]. Final Status Survey Report For Saxton Nuclear Experimental Corporation
Open Land Area OL4. 06, 2005.
- [4]. Survey Unit Release Record of Plm Brook Reactor(Survey Unit: WHB-111-
3) July 2011.
- [5]. Final Radiation Survey Data Assessment of Zion Reactor Plant. October
2015.

子項計畫 2-2 英文專有名詞縮寫一覽表

英文縮寫	英文全名	中文翻譯
AF	Area Factor	區域因子
C/LT	Characterization/License Termination	特性/執照終止
DCGL	Derived Concentration Guideline Level	導出濃度指引水平
DQA	Data Quality Assessment	數據品質評估
DQO	Data Quality Objective	數據品質目標
EMC	Elevated Measurement Comparison	較高濃度比較
EPA	Environmental Protection Agency	美國環境保護署
FSS	Final Status Survey	最終狀態偵檢
FRS	Final Radiation Survey	最終輻射偵檢
HSA	Historical Site Assessment	廠址歷史評估
LT	License Termination	執照終止
LTP	License Termination Plan	執照中止計畫
MDC	Minimum Detectable Concentration	最小檢測濃度
RSSI	Radiation Survey and Site Investigation Process	輻射偵檢及廠址調查
SOF	Sum-of-Fractions	分數和
STS	Source Term Survey	源項偵檢
QA	Quality Assurance	品質保證
QAPP	Quality Assurance Project Plan	品質保證計畫規劃
QC	Quality Control	品質控制
WRS Test	Wilcoxon Rank Sum Test	WRS 檢定

附件

數據品質評估指南-實用數據分析方法摘譯(EPA QA/G-9)

前言

此文件提供有關數據品質準則及做決策依據的效能標準的評估指引。美國環境保護署(EPA)已開發出一套流程提供給專案管理員及規劃人員用以進行數據品質評估程序，用以確認決策所根據的數據是否達到所需之數據種類、數量及品質。

此份文件和其他指引不同：它並不是設定為要按照順序來進行閱讀。而是設定做為數據品質評估技術的「工具書」。文件的整體架構將可協助分析者使用系統性的方法來探討各種問題。

此份文件是 EPA 一系列品質管理指引文件之一。其他相關文件包含：

EPA QA/G-4 數據品質目標指引

EPA QA/G- 數據品質目標決策錯誤可能性試驗軟體

EPA QA/G-4HW 危險廢物現場調查的數據品質目標程序

EPA QA/G-9D 數據品質評估統計工具(DataQUEST)

目錄

目錄

圖目錄	IV
第 0 章 介紹	1
第 1 章 步驟 1：檢視 DQOs 和取樣設計	5
1.3.2 概率取樣(Probability Sampling)	14
第 2 章 步驟 2：進行初步數據檢視	18
2.1.2 計算記本統計量	20
2.1.3 將數據圖表化	20
2.2 統計量	21
2.2.1 相對位置量數(Measures of Relative Standing)	21
2.2.2 集中趨勢量數(Measures of Central Tendency)	21
2.2.3 分散度量數(Measures of Dispersion)	21
2.2.4 相關性量數(Measures of Associaton)	22
2.3 圖形化呈現	23
2.3.1 直方圖/頻率圖 (Histogram Plots/Frequency Plots)	23
2.3.2 箱線圖(Box and Whisker Plot)	24
2.3.3 數據排序圖(Ranked Data Plot)	24
2.3.4 分位數圖(Quantile Plot)	25
2.3.5 兩個或兩個以上個變數的圖	25
2.3.6 時間性數據圖(Plots for Temporal Data)	27
2.3.7 空間數據圖	28
2.4 機率分佈	29
2.4.1 常態分佈(The Normal Distribution)	29
2.4.2 T 分佈(The t-Distribution)	30

2.4.3	對數常態分佈(The Lognormal Distribution).....	30
2.4.4	中央極限定理	30
第 3 章	步驟 3：選擇統計檢定	31
3.1	綜覽及活動	32
3.1.1	選擇統計假設檢定	32
3.1.2	確認統計檢定的基礎假定	32
3.2	單一母體的假設檢定	33
3.2.1	平均值的檢定	33
3.2.2	中位數檢定	35
3.3	雙母體比較之檢定	35
3.3.1	比較兩個平均數	36
3.3.2	雙樣本的無母數比較	37
第 4 章	步驟 4：驗證統計檢定的假定	39
4.1	綜覽及活動	40
4.1.1	確認驗證假定的方法	40
4.2	獨立性	41
第 5 章	步驟 5：從數據得出結論	42
5.1	綜覽及活動	43
5.1.1	執行統計假設檢定	43
5.1.2	得出研究結論	43
5.1.3	評估取樣設計的效能	44
5.2	對檢定結果進行解釋和溝通	45
5.2.1	p 值(p-value)的解釋.....	45
5.2.2	「接受」與「無法拒絕」虛無假設.....	46
5.2.3	統計顯著與實際顯著(Statistical Significance vs. Practical Significance)	46
5.2.4	「安全的證明」與「風險的證明」	47

圖目錄

圖 0-1 數據生命週期中的 DQA	錯誤! 尚未定義書籤。

第0章 介紹

0.1 目的及綜覽

數據品質評估(Data Quality Assessment，以下簡稱 DQA)是以科學及統計的方法來評估從環境中取得之數據，是否具備正確的種類、品質以及數量以符合數據的預期用途。此份指南說明如何使用 DQA 來評估環境數據並以應用圖表及統計工具的方式呈現如何執行 DQA。

DQA 所謂的數據品質，在概念上，只有在當數據連結於預期用途時才有意義。必須知道數據要如何應用，才能知道如何建立判斷數據是否合適的尺度。透過使用 DQA，將可回答兩個基礎的問題

1. 給定數據的品質的狀況下，所做的決策(或估計)是否具備所希望的信心度？
2. 取樣結果的可能範圍很大的狀況下，取樣設計的預期表現如何？若使用相同的取樣設計策略重新進行類似的研究，是否預期數據依舊具備所希望的信心度來支持同樣的預期用途，特別是當量測結果大幅的高於或低於目前研究所取得的數值。

第一個問題是有關數據使用者目前的需要，第二個文則是與數據使用者將來可能的需要相關。譬如說，若調查人員決定在不同的區域使用之前用過的取樣設計，且另一環境條件下取樣的環境和原先的不同情況下，調查人員應要確認該取樣設計在另一環境條件下的表現。

0.2 DQA 和數據生命週期

數據生命週期(如圖 1)包含三個步驟：規劃、執行，和評估。在規劃階

段，使用數據品質目標(Data Quality Objectives，以下簡稱 DQO)程序來定義定量和定性的準則，以確認於樣本蒐集的時間、地點以及數量，並所期望的信心度。品質保證計畫規劃(QA Project Plan，以下簡稱 QAPP)文件中應包含以上這些資訊，再加上取樣方法、分析方法，和合適的品質保證(QA)和品質控制(QC)措施。執行階段應根據 QAPP 的規範進行數據蒐集。在評估階段，數據將被確認及驗證，以確保 QAPP 所設定的取樣和分析方法有被遵守，且有依照 QAPP 所指定之標準進行量測。最後，使用 DQA 程序來評估經過驗證和確認過之數據的數據品質，是否有符合數據品質目標(DQO)的規範。

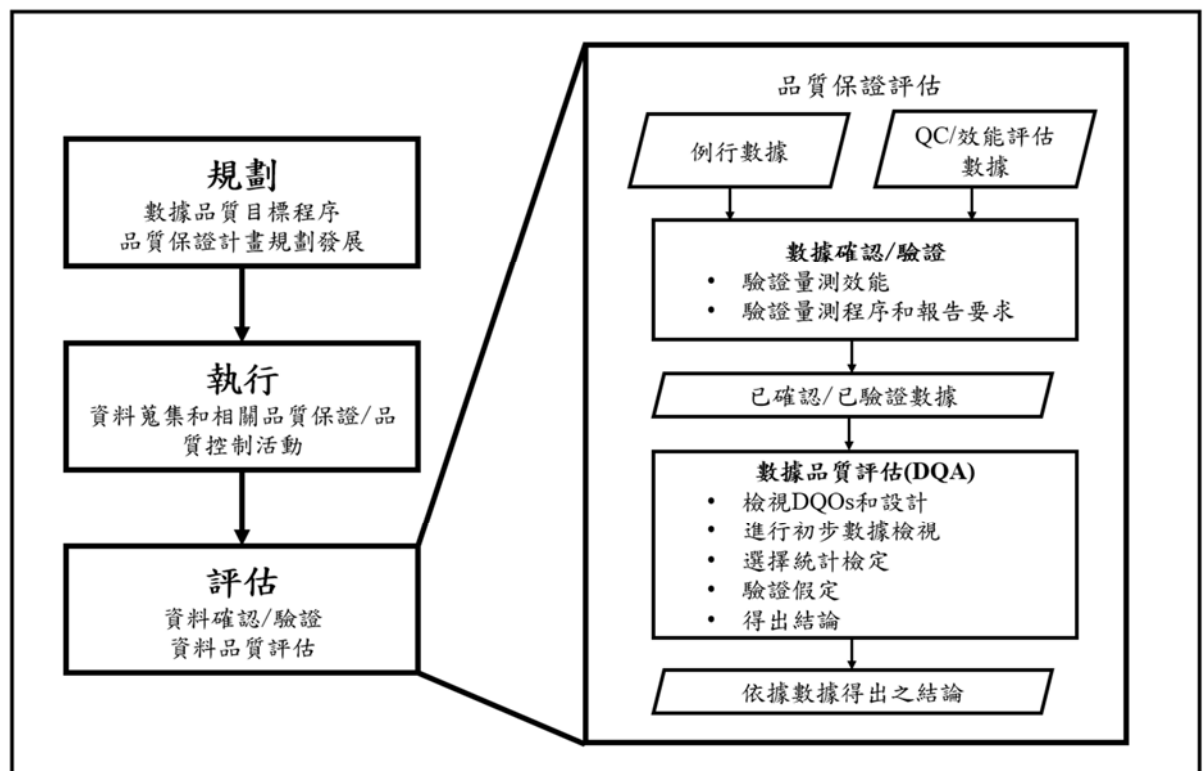


圖 36 數據生命週期中的 DQA

0.3 DQA 的 5 個步驟

DQA 包含 5 個步驟，起始於回顧規劃文件並完成於回答研究的規劃階

段所提出的問題。這些步驟大致上在環境統計學家分析數據時同時進行。此 5 個步驟會於後續章節中詳細說明，其簡要概述如下：

1. **檢視數據品質目標的產出(DQOs)和取樣設計：**檢視 DQO 的產出以確保它們仍舊適用。若 DQOs 尚未產出，在進行數據評估前先指定 DQOs(如，對決策問題，定義統計假設並訂定決策錯誤的容忍限度；對估計問題，訂定可接受的信賴度或機率區間)。檢視取樣設計和數據蒐集文件以和 DQOs 有一致性。
2. **進行初步數據審查：**審查 QA 報告，計算基本統計量，並製作數據的圖表。使用這些資訊來了解數據的架構和趨勢、關聯性，以及潛在不規則。
3. **選擇統計檢定：**根據 DQOs、取樣設計，和初步數據審查，選擇出最適合的數據分析程序。確認與統計程序有效性相關的關鍵基本假設。
4. **驗證統計檢定的假設：**依據研究實際取得的數據和資訊根據評估關鍵假設是否成立或是否可結束。
5. **從數據得出結論：**執行統計檢定必要的計算並記錄根據這些計算得出的推論。若取樣設計會被再次使用，評估取樣設計的效能。

此 5 個步驟以順序的方式呈現，但 DQA 本質上是迭代的。譬如，若初步審查顯示數據的趨勢或規則性和 DQOs 不一致，則可能要重新考慮研究步驟 1 的某些部分。同樣地，若數據不支持統計檢定的基本假定(Assumption)，能要重新進行 DQA 先前的步驟。

然而，我們應知道 DQA 並無法絕對證明是否達成規劃階段的 DQOs。原因是數據蒐集只能提供調查人員有關真實數值的估計值，而非真實的數值。此外，分析方法也非完美，僅能透過環境樣本提供有關真實數值的估

計值。因調查人員根據估計而非實際數值來進行決策，也就存在做出錯誤決策的風險。

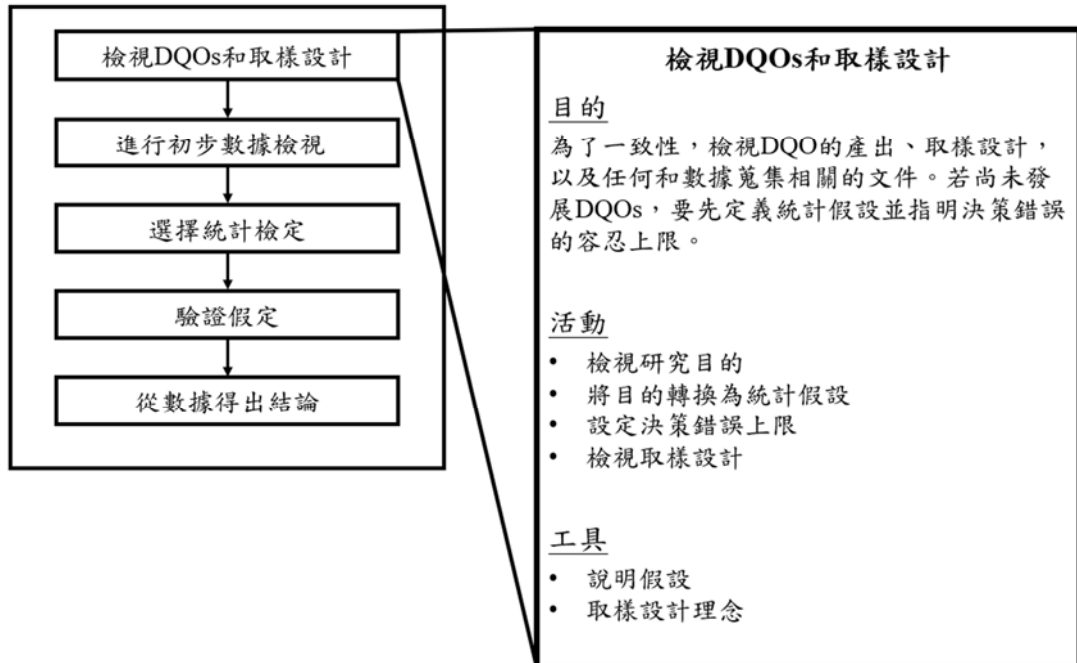
0.4 組織

此指引說明執行 DQA 的背景資訊以及統計工具。每一章對應 DQA 的一個步驟並於開頭提供該步驟所要進行行動的綜覽。在第一、二、三，及四章的綜覽，會說明具體的圖表或統計工具且程序的每一步驟會在範例中說明。

0.5 補充資源

此指引中許多圖形或統計工具會以個人電腦人性化軟體(Data Quality Evaluation Statistical Tools, DataQUEST, G-9D)來執行和呈現。DataQUEST 透過自動化許多建議使用的統計工具，簡化 DQA 的執行。

數據品質保證(DQA)程序



步驟 1：檢視 DQOs 和取樣設計

- 檢視研究目標
 - 若 DQOs 尚未建立，參考 1.1.1 節，並訂定 DQOs。
 - 若已建立 DQOs，檢視 DQO 程序的產出。
- 將目標轉換為統計假設
 - 若 DQOs 尚未建立，參考 1.1.2 和 1.2 節以及 Box 1-1，並依據數據使用者的目標發展統計假設的敘述說明。
 - 若已建立 DQOs，將其轉換為主要統計假設的敘述說明。
- 將數據使用者的目標轉換為型 I 及型 II 誤差的限值
 - 若 DQOs 尚未建立，參考 1.1.3 節並記錄決策誤差的容許限值。
 - 若已建立 DQOs，確認決策誤差的容許限值。
- 檢視取樣設計並標註任何特別狀況或潛在問題
 - 檢視取樣設計(1.1.4 和 1.3)。

1.1 綜覽及活動

DQOs 提供有關數據蒐集目標背景資訊並建立用以評估數據是否符合預期用途的定性和定量標準。取樣設計(紀錄於品質保證計劃規劃文件中)提供有關如何解釋數據的重要資訊。透過研讀取樣設計，分析人員可以得知設計的所採用的假設，以及這些假設和 DQOs 間的關係。透過檢視樣本蒐集、量測以及做成報告的方法，分析人員預備進行初步的數據審查以及 DQA 程序接下來的步驟。

仔細的規劃有助於取樣設計整體的品質與代表性、取樣執行與分析計畫的有效性與效率，以及接下來 DQA 作業的有用性。DQO 程序著重於規畫及發展可蒐集足夠種類、品質及數量的數據來支持決策的取樣設計。進行 DQO 及 DQA 兩個程序，將有助於確保據以進行決策的數據有足夠的品質。DQA 執行前必須先執行



圖 37 數據品質目標

DQO 程序，DQO 程序共有 7 個步驟，說明如圖 1-1。

本節後續會說明 DQA 步驟 1 建議要進行的行動以及相關技術考量。DQA 步驟 1 前三個要做的行動會依據 DQOs 是否已建立而有所不同。本章

第 2 節會說明如何選擇虛無假設，第 3 節則會介紹數種取樣設計。DQA 步驟 1 要進行的行動說明如下：

1.1.1 檢視研究目標

若在數據蒐集前有完成規劃程序，則此步驟將只需檢視數據目標之文件。反之，若先前未進行規劃程序，則需：

- 簡潔的定義數據蒐集要說明或解決的問題(DQO 程序步驟 1)以及要做出之決策(DQO 程序步驟 2)。
- 辨認是否有遺漏重要的資訊(DQO 程序步驟 3)。若是，則先蒐集所需之遺漏資訊或選擇另一種做決策的方法。
- 依據取樣設計，明定決策的規模和研究的限制(DQO 程序步驟 4)。決策規模為適用決策的最小區域或時間區間。

1.1.2 將目標轉換為統計假設

將蒐集數據之目標轉換為主要統計假設(Primary Statistical Hypotheses)。在此文中，主要統計假設對應的是要做的決策，主要統計假設相關的假定(Assumption)是否成立，則可透過其他統計檢定來檢驗。主要統計假設檢定的相關假設請參考第 3 章，如何檢驗這些假設則請參考第 4 章。統計假設檢定的敘述包含一個虛無假設，以及一個對立假設。根據蒐集的數據進行分析後，將判讀數據是否可提供足夠的證據來拒絕虛無假設，若是，接受對立假設，若否，則代表無法拒絕虛無假設。若已產出 DQOs，統計假設檢定應已記錄於文件中。若尚未產出 DQOs，可參考本文 1.2 節有關如何發展統計假設的詳細說明。一般來說，假設檢定包含以下元素：

- 描述環境特徵之一母體參數，也就是研究要調查的參數。
- 該參數值要與之比較的數值，如法規限值或風險限值。

- 該參數值和要與之必較數值的關聯(如相同或大於)。

1.1.3 建立決策錯誤限值

此是決定可容許的決策錯誤機率，包含錯誤拒絕，又稱型 I 錯誤(Type I Error)率以及錯誤接受，又稱型 II 錯誤(Type II Error)率。錯誤拒絕代表當實際情況符合虛無假設時，拒絕虛無假設的狀況。錯誤接受代表當實際情況不為虛無假設時，接受虛無假設的狀況。此為統計學所定義的錯誤拒絕以及錯誤接受之決策失誤(Decision Errors)。其他常用的專有名詞還有「顯著水準(Level of Significance)」，代表型 I 錯誤機率(錯誤拒絕)，和「檢定力的補數(Complement of Power)」，代表型 II 錯誤機率(錯誤接受)。若可容許的決策失誤率在數據蒐集前尚未訂定，則需：

- 訂定灰色區域，灰色區域代表在此區域內錯誤接受失誤的後果相對較小(DQO 程序步驟 6)。灰色區域的一側為門檻值(Threshold Value)，另一側的值代表當參數實際值為此值時，發生型 II 錯誤(錯誤接受)之失誤會開始有顯著後果。
- 灰色區域的範圍代表決策者對決策失誤的一個很重要的考量。較窄的灰色區域代表期望當參數實際值很接近門檻值時(Threshold Value)，能有高的機率可檢測出參數值的實際狀況。
- 訂定型 I 誤差(錯誤拒絕)和型 II 誤差(錯誤接受)機率的容許值(DQO 程序步驟 6)。型 I 誤差容許機率稱作 α ，型 II 誤差容許機率稱作 β 。

Box 1-1 中有灰色區域以及型 I 錯誤(錯誤拒絕)和型 II 錯誤(錯誤接受)的決策失誤範例。

若已產出 DQOs，則已有決策失誤率的容許值。此值可直接使用作為此步驟的產出。在此狀況下，行動門檻值(Action Level)便是門檻值(Threshold Value)；在此門檻值的錯誤拒絕率稱作型 I 錯誤率或 α ；在灰色區域另一側

之值的錯誤接受率稱作型 II 錯誤率或 β 。

1.1.4 檢視取樣設計

檢視取樣設計的目的是讓分析人員了解熟悉蒐集數據設計。包含完整的取樣設計以及在不同區域和限制下各類樣本蒐集或量測方法。第一章第三節提供有關各種常用環境研究取樣設計的資訊。

在檢視取樣設計時要考量數據要達成的目標，查看設計是否支持或違反這些目的。譬如說，若研究的目標是要看在一條溪流不同時間污染的平均水準，那麼組合樣本可能是適合的取樣方法。然若研究目標是要找出危險廢棄物點的污染熱點，那麼組合樣本的使用就要很小心，以免將熱點的數值給平均掉了。同時，查看取樣設計潛在可能的問題。譬如，若採用簡單取樣設計，要確認空間(或時間)的每一點有同樣被選取的機率。此外，若有部分樣本有明顯較大的數值偏離(和平均數差異)應被標明，且要在整個 DQA 程序中，小心考量這些點對分析結果的影響。

Box 1-1：回溯性應用 DQO 程序之範例

一廢棄物焚化廠想分辨焚燒後的灰燼包之鎘含量是否達到危害等級以致須丟棄到丟棄費用較昂貴的 RCRA(Resource Conservation Recovery Act)掩埋場。因此將每一個灰燼包取出 8 個組合樣本，每一個組合樣本包含 8 個取自該灰燼包的樣本。接著使用 40 CFR, Pt. 261, App. II. 中說明的方法將這些樣本的毒性溶出液進行分析。此範例中尚未建立 DQOs；因此在 DQA 程序中必須在分析數據前先建立 DQOs。

1. 檢視研究目標

- 定義問題 - 問題定義如上
- 辨認是否有遺漏的基本資訊 - 並未顯示有遺漏任何基本資訊
- 明定決策的規模 - 每一個灰燼包皆分別取樣，且分別做決策。因此決策規模為單一灰燼包。

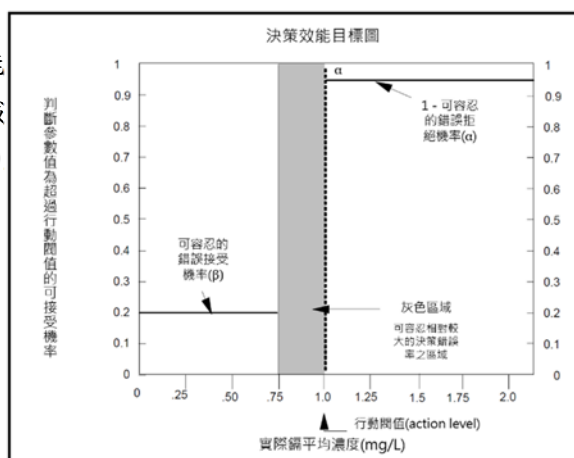
2. 將目標轉換為統計假設

此項研究要研究的參數為組合樣本的平均鎘濃度。根據 RCRA 法規標準，鎘的毒性溶出液限值為 1.0 mg/L。因此，兩個假設為「平均鎘濃度 ≥ 1.0 mg/L」和「平均鎘濃度 < 1.0 mg/L」。

統計假設檢測有兩種可能的決策錯誤，其一為當灰燼包實際平均鎘濃度 < 1.0 mg/L 時判定其達到危害等級(鎘平均濃度 ≥ 1.0 mg/L)，另一為當灰燼包實際平均鎘濃度 ≥ 1.0 mg/L 判定其未達到危害等級(鎘平均濃度 < 1.0 mg/L)。在此例中，將達到危害等級的灰燼包判定為無害較為嚴重，此種決策錯誤會危害到民眾健康以及環境。因此，將此種錯誤設為錯誤拒絕失誤(型 I 錯誤)，另一種錯誤則設為錯誤接受失誤(型 II 錯誤)。據此，虛無假設將會是「平均鎘濃度 ≥ 1.0 mg/L」，而對立假設則為「平均鎘濃度 < 1.0 mg/L」。(請參考第一章第一節有關建立虛無和對立假設更多的說明)。

3. 發展決策錯誤限值(請參考上頁決策效能

- 明定灰色區域 - 錯誤接受失誤會造成區域的寬度。目前先將灰色區域設定為 0 力來修改灰色區域範圍。
- 明定做出決策錯誤的機率限值 - 錯誤拒絕失誤的後果包含對民眾健康及環境的風險。另一個對地主造成後果為罰鍰或刑罰的風險。因此，設定嚴格的 0.05 作為錯誤拒絕機率的限值。



1.2 建立假設檢定的陳述

統計假設檢定的完整陳述包含兩個主要部分：虛無假設(H_0)和對立假設(H_A)。兩部分的內容中，都是一個母體參數和某固定值比較(單母體檢定)或和另一個母體參數比較(雙母體檢定)。母體參數為數據使用者要蒐集數據用以評估的對象，母體參數評估的結果會作為決策依據。在環境研究中，單母體檢定常見的例子是將污染程度和法規限值比較，雙母體檢定常見的例子為將可能受污染的垃圾場和一對照區域比較。

根據統計假設檢定規定，只有在數據提供的資訊，足以判定虛無假設是錯誤的時才會拒絕虛無假設，並接受對立假設。換句話說，預設會先接受虛無假設是正確的，直到有數據得出虛無假設是錯誤的結論。實務上，會將發生決策錯誤時，會造成較嚴重後果的實際狀況設為虛無假設。譬如說，考量兩種決策錯誤：「當公司符合法規的狀況下，判斷公司不符合法規」以及「當公司不符合法規的狀況下，判斷公司符合法規」。若第一項決策錯誤後果較嚴重，應將第一項的實際情況-「公司符合法規」設為虛無假設。若第二項決策錯誤後果較嚴重，則將第二項的實際情況-「公司不符合法規」設為虛無假設。

另一種決定虛無假設內容的方法是根據歷史資訊。若存在大量的資訊認定某假設的可能性極高，則應將此假設設為對立假設。此類案例中，可能不需大量的數據即可提供虛無假設為錯誤的足夠證明。譬如，若一個焚化廠的垃圾之前都達到危害等級且垃圾處理程序並未改變，那麼將對立假設設為「垃圾達到危害等級」並將虛無假設設為「垃圾未達到危害等級」可能可節省成本。

假設想知道某垃圾場的地下水除草劑的實際濃度是否高於固定值 C 。若數據使用者根據以往的資訊，推定因為可能的污染意外事故，實際平均濃度至少為 C 。那麼，數據必須足夠有力的證據若要推翻此假設，統計假設

可陳述如下：

假設文字陳述	使用標準符號陳述假設
<u>虛無假設(基準情況)</u> 地下水除草劑的濃度高於或等於 C；與	$H_0 : \mu \geq C ;$ 與
<u>對立假設</u> 地下水除草劑的濃度低於 C	$H_A : \mu < C ;$

另一方面，若數據使用者根據以往的資訊，推定因地下水過去未被污染過，實際平均濃度應小於 C。那麼，數據必須足夠有力的證據若要推翻此假設，統計假設可陳述如

假設文字陳述	使用標準符號陳述假設
<u>虛無假設(基準情況)</u> 地下水除草劑的濃度低於 C；與	$H_0 : \mu \leq C ;$ 與
<u>對立假設</u> 地下水除草劑的濃度高於或等於 C	$H_A : \mu > C ;$

在敘述主要假設時，使用標準統計符號會較為方便，如本文中所呈現的。然而，假設背後的邏輯一定會對應到要數據使用者要做出之決策。

表 1-1 含括了一般常見的環境決策極其對應的假設。在表 1-1 中，參數用 Θ 符號表示，兩個參數的差用 $\Theta_1 - \Theta_2$ 表示，其中 Θ_1 代表第一個母體的參數， Θ_2 代表第二個母體的參數。會使用 Θ 是為了避免重複使用「母體平均數」或「母體標準差」等詞，因不論母體參數為核，假設檢定的架構都是不變的。固定門檻值(Threshold Value)用 C 表示，而兩個參數值的差用 δ_0 表示

(通常虛無假設設為 $\delta_0=0$)。

在表 1-1 的第一個範例稱作單尾檢定，因為只有當參數估計值位於門檻值的其中一側時可拒絕虛無假設。第二、四和五行也是單尾檢定的範例。表 1-1 的第三和第六行為雙尾檢定的範例，因為當估計值位高於或低於門檻值都可能拒絕虛無假設。大部分和環境監測相關都是單尾檢定，因為高污染程度會傷害民眾或生態。

1.3 環境介質之取樣設計

取樣設計提供如何分析一組數據的基礎。不同的取樣設計需要不同的分析技巧和不同的評估程序。共有兩種主要的取樣設計：權威(判斷)式 (Authritative(Judgment))取樣和概率取樣(Probability Sampling)。其中第二種是最常見的取樣設計。

1.3.1 權威式取樣

要使用權威式取樣，必須有非常了解取樣現場(或流程)的專家。只有當研究的目標不具有統計性質時才可採用此種取樣方法，譬如，當研究的目標為確認洩漏的具體位置，或當研究只聚焦於取樣位置本身。一般來說，從權威式取樣得出的結論只能應用於個別樣本且取出的樣本可能有嚴重的偏差導致錯誤結論。因此，當研究目的涉及估計或決策，應使用概率取樣。

決策種類	虛無假設	對立假設
將環境狀況和一固定門檻值比較，如法規標準或可接受的風險水平；假設實際值小於門檻值。	$H_0 : \Theta \leq C$	$H_A : \Theta > C$
將環境狀況和一固定門檻值比較；假設實際值大於門檻值。	$H_0 : \Theta \geq C$	$H_A : \Theta < C$
將環境狀況和一固定門檻值比較；假設實際值等於門檻值，數據使用者相知道實際狀況是否為此一特定值。	$H_0 : \Theta \geq C$	$H_A : \Theta \neq C$
將環境狀況和另一母體的差和一固定門檻值(δ_0)比較；假設實際值小於門檻值。若假設兩母體情況相同，則門檻值設為 0。	$H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 \leq \delta_0$ ($H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 \leq 0$)	$H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 > \delta_0$ ($H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 > 0$)
將環境狀況和另一母體的差和一固定門檻值(δ_0)比較；假設實際值大於門檻值。若假設兩母體情況相同，則門檻值設為 0。	$H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 \geq \delta_0$ ($H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 \geq 0$)	$H_0 : \Theta - \Theta < \delta_0$ ($H_0 : \Theta - \Theta < 0$)
將環境狀況和另一母體的差和一固定門檻值(δ_0)比較；假設實際值等等門檻值。若假設兩母體情況相同，則門檻值設為 0。	$H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 = \delta_0$ ($H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 = 0$)	$H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 \neq \delta_0$ ($H_0 : \Theta_1 - \Theta_2 \neq 0$)

有效的推論統計規劃必須在選擇樣本位置或取樣時間時採用某種形式的隨機化。例如，要確認 SO₂ 的從鍋爐排放的最大值，取樣計畫要合理的聚焦，或大多著重於鍋爐最大使用或接近最大使用量的時間區間。相同的若要評估一住宅區域的污染，則取樣計畫可參考過去所之有被污染的區域，並對該區域增加取樣的比重。

1.3.2 概率取樣(Probability Sampling)

目標母體所有成員被選作樣本的機率為已知的前提下抽出的樣本稱作概率取樣。常見對蓋率取樣的誤解為認為要排除預先知道的資訊。事實上，剛好是相反。一個有效率的取樣設計應利用所有可得的已知資訊以進行區

域分層和設定合適的選取機率。另外一個常見的誤解為，認為使用概率取樣代表允許樣本點不適當的散布於區域中。然而，若沒有預先知道有關較可能污染區域之資訊，通常會建議用網格取樣方式(一種分層取樣)以確保取樣點可分散在區域中。

1.3.2.1 簡單隨機取樣(Simple Random Sampling)

最簡單的概率取樣為簡單隨機取樣，也就是每一個可能被取樣的單元被選到的機率都一樣。如其他的隨機樣本，可以是在不同時間或空間取樣，此種取樣通常適用於對現場或程序的變異性不太了解的調查早期階段。每一個取樣單位應有相同體積或重量，且最好是相同的形狀。採用簡單隨機取樣時「隨機」一詞解釋為偶然；比較正確的說法是選擇率相同。簡單隨機樣本通常會透過隨機數表(Random Number Table)來建立或透過電腦產生亂數。

1.3.2.2 依序隨機取樣(Sequential Random Sampling)

簡單隨機取樣通常有固定的樣本數，但有一些替代的方法，如依序隨機取樣。此種方法就不會預先訂好樣本數，而是會在每次樣本分析後進行統計檢定(或於完成某數量的樣本分析後)。這種策略適用於當取樣或分析相當昂貴時、當不知道樣本和/或量測變異時、當感興趣的特徵在不同時間取樣結果都很穩定時，或當取樣目標是要檢定某個特定假設時。

1.3.2.3 系統性樣本(Systematic Samples)

若是空間取樣，系統性取樣包含建立二維(或三維)空間格點以及在網格(Cells)中選擇一隨機起始位置。網格有時是隨機選取且可能選出不同的系統性樣本。譬如，點可以規劃為方形的(長方網格取樣)或等邊三角形(三角網格取樣)。

系統化取樣相較隨機取樣和其他幾種概率取樣相比，有幾個優勢。系統化取樣比較容易執行，譬如說，當現場有一個點是熱點或當要繪製濃度

趨勢時會傾向於使用此方法。另一方面，當場所或流程可能有某種週期性的模式，使用此方法也要特別注意。在此種情況，均勻取樣有可能導致取樣結果的偏差。

1.3.2.1 分層樣本(Stratified Samples)

另一種概率取樣為分層隨機取樣，適用於當現場或流程分為兩個或多個和不重疊的層級時。每一個層級個別定義取樣單元，且每個層級中使用簡單隨機取樣進行取樣。(若層級中採用系統性取樣，則此種設計稱為分層系統性取樣)。

分層取樣的好處包含可確保取樣更均勻的涵蓋整個目標母體以及有機會更精確的做出估計。即使當用來分層的資訊不完全時，分層隨機取樣通常還是比簡單隨機取樣更節省成本。一般來說分層取樣的統計計算較其他取樣方法的統計計算複雜，所以當使用分層取樣時應諮詢統計專業人員。

1.3.2.2 組合樣本(Composition Physical Samples)

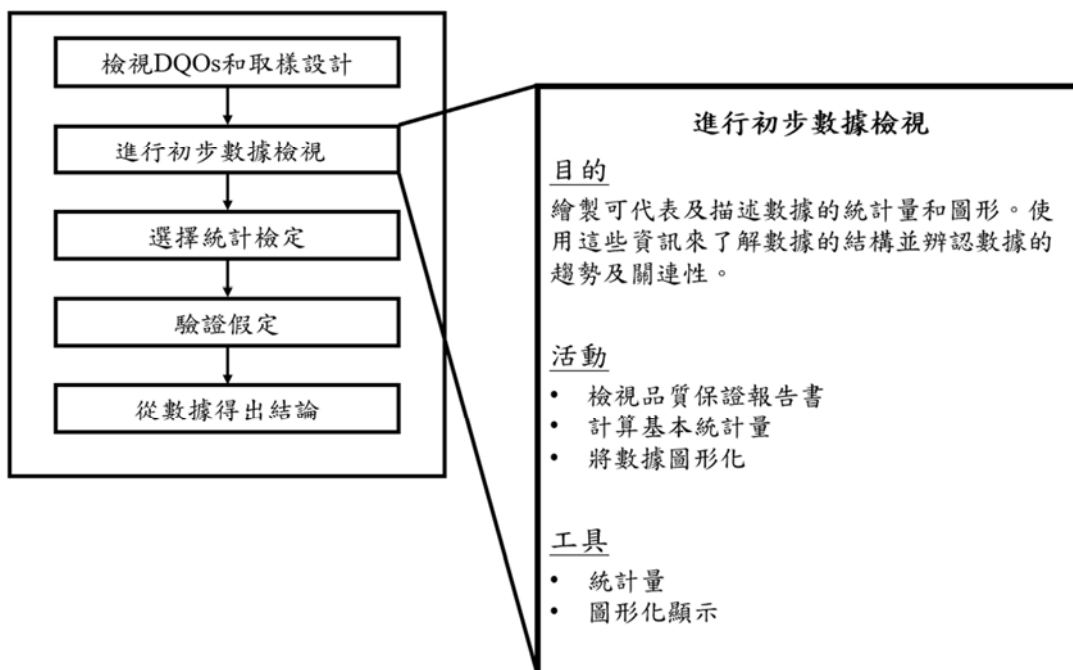
當分析成本遠大於取樣成本時，在進行分析前將數個樣品組合為一個樣本可達到節省成本之經濟效益，但前提是組合時沒有安全風險或造成潛在的偏差。

1.3.2.3 其他取樣設計

適應性取樣(Adaptive Sampling)會先取得一個樣本，再由此樣本得到的資訊來設計下一步的取樣。此流程可能會重複好幾次取樣和分析。環境問題的常見的適應性取樣涉及將想研究的區域分做較小的單元，在這些單元中取出一個概率取樣樣本，然後對所有從當中抽取樣本的樣本濃度大於某特定值 C 的單元進行取樣。此程序繼續進行直到所有的取樣單元的結果都小於 C 。適用進行適應性取樣的場地為正進行活動發展處，並預期所進行活動會對環境取樣造成顯著的影響。

排序取樣(Ranked Set Sampling, RSS)使用和欲使用之較昂貴量測方法相關的替代方法。此種方法利用相關性來取得比隨機取樣更有代表性的樣本，從而得到比隨機取樣更準確的母體參數估計。RSS 包含建立 n 個群組，每一個大小為 n (總共有 n^2 個起始樣本)，然後在群組中將取得的樣本從大到小排序。接著在每一個群組用特定的程序選擇一個樣本，最後將取得的 n 個樣本用欲使用之較昂貴的分析方法進行分析。

數據品質保證(DQA)程序



步驟 2：進行初步數據檢視

- 檢視品質保證報告
 - 查看樣本蒐集和分析程序是否有問題以及異常。
 - 檢視品質控制(QC)資料以驗證數據品質目標的假設、取樣和分析計畫，和品質保證計畫規劃(QA Project Plans)。
- 計算統計量
 - 考慮計算合適的百分位數。(2.2.1 節)
 - 選擇集中度(2.2.2 節)和趨勢(2.2.3 節)的度量方式。
 - 若數據包含兩個變數，計算相關係數(2.2.4 節)。
- 將數據圖形化
 - 選擇呈現出數據結構的圖表並凸顯數據品質目標(DQO)、取樣和分析計畫，以及品質保證計畫規劃(QA Project Plans)。
 - 使用各類圖表來呈現並檢視數據的不同特徵。

2.1 綜覽及活動

在此步驟，分析人員要進行初步的數據評估，計算一些基本統計量，並使用圖表呈現的方式來檢視數據資料。透過檢視數據的數值和圖表，可了解數據的「結構」並從而找出適合的數據使用方式和數據的限制。以下使用 DQA 軟體 – Data Quality Evaluation Statistical Tools(DataQUEST)(G-9D)(EPA, 1996)進行繪圖以及更複雜的統計檢定。

初步數據審查包含兩個主要部分：(1)基本統計量(敘述統計)；和(2)數據的圖形化呈現。統計量是將數據集進行某種函數的運算後得到的值，用以描述數據集的特性。統計量的範例包含平均數、中位數、百分位數、範圍和標準差。統計量可以協助建立對數據來源之母體的概念，並對後續要進行之推論有所幫助。圖表可用來辨別數據中的趨勢和關聯、確認或否定假設，並找出可能的問題。舉例來說，常態機率圖(Normal Probability Plot)可能可以讓分析人員快速的屏除常態分佈的假設且可能可找出潛在的離群值。

初步數據檢視步驟的設計是要讓分析人員對數據得以熟悉。檢視後應要能辨別異常值，異常值可能代表有發生異常事件並可影響數據的分析。依據 DQO 程序文件(QAPP)所說明的數據預期用途，分析人員可能可得知要尋找那些資訊。檢視的結果將用於選擇用以支持數據使用者決策的統計假設檢定之程序。

2.1.1 檢視品質保證報告

初步數據檢視第一個要做的事為檢視有關數據蒐集和執行數據蒐集程序的品質保證報告。這些品質保證報告內的數據可提供潛在問題或異常值的寶貴資訊。可能會有幫助的項目包含：

- 紀錄樣本蒐集、處理、數據減量，和報告程序之數據確認報告(Data Validation Reports)。
- 紀錄量測系統效能的實驗室或現場的品質管控報告，包含對照樣品

(Check Samples)、分開試樣(Split Samples)、加強試樣(Spiked Samples)，或其他內部品質管控量測值。

- 技術系統檢視、效能評估稽核，和數據品質稽核，包含來自效能評估樣本的數據。

當檢視 QA 報告時，要特別注意檢查 DQO 程序設定的假定(Assumptions)。其他重要的資訊包含紀錄的數據中的明顯異常值、缺少的數值、標準操作程序的誤差，和有使用到的非標準蒐集方法。

2.1.2 計算記本統計量

此項工作的目標是使用數據集的常用統計量來得出基本定量特徵。對分析有用的常見統計量包含：偵檢值數目；集中趨勢量數-如平均值、中位數，或眾數；分散度量數：如值域(Range)、變異數、標準差、變異係數，和四分位間距；相對位置量數-如百分位數；分佈對稱或形狀量數；以及兩個或兩個以上變數的相關性-如相關性。這些量數可用來描述、溝通，和檢定有關數據來源之母體的假設。2.2 節提供這些統計量詳細的描述和範例。

2.1.3 將數據圖表化

這一個步驟的目標為辨別單純使用數值方法無法發掘之數據的模式和趨勢。圖表可用以快速的確認或否定假設、發現新的現象、辨認潛在問題，和提供建議矯正措施。此外，一些圖形化呈現可以簡潔的方式記錄或儲存數據或傳達資訊。圖形化呈現包含顯示個別的數據點、統計量、時間數據、空間數據，和兩個或兩個以上的變數。2.3 節提供常用圖表的描述和範例。

最低限度，分析人員應選擇一個圖表來呈現個別資料以及一個圖表來呈現統計量。如果數據集有空間或時間成分，要再多選擇可以呈現空間或時間數據的圖表。若數據包含一個以上的變數，再發展多變數的呈現之前先個別處理每一個變數。若取樣計畫或建議使用的分析方法建立於某關鍵假定的基礎上，要考量是否有某種型態的圖表可以闡明此假定的有效性。

譬如說，若一小樣本的研究強烈的相關於常態分佈的假設，則可使用常態機率圖。(2.3.6 節)

2.2 統計量

2.2.1 相對位置量數(Measures of Relative Standing)

有時分析人員會想知道一個或數個偵檢值在所有偵檢值中的相對位置。百分位數是相對位置量數的一種。百分位數(Percentiles)為大於或等於某給定百分比所有數據值之值。用數學術語來說， p^{th} 百分位為大於或等於 $p\%$ 數據值之值。

分位數(Quantile)和百分位數的概念相似，然而，百分位數代表百分比，分位數代表一個比率。若 x 為 p^{th} 百分位，則 x 的分位數為 $p/100$ 。

2.2.2 集中趨勢量數(Measures of Central Tendency)

最常用的集中趨勢量數為平均數、中位數和眾數。對簡單取樣設計來說平均數可視作算術平均數，然而，對複雜的取樣設計來說，如分層取樣，樣本平均數為加權算數平均。樣本平均數可能會受極值影響。

樣本中位數是第二常用來衡量數據中心的量數。中位數代表將數據從小到大排序後，位於中間的數值，等於 50 百分位數。

第三個用來衡量數據中心的量數為眾數，眾數是樣本中發生數最多的值。對定量資料，可能不存在眾數，但眾數對定性的資料是有用的。

2.2.3 分散度量數(Measures of Dispersion)

若加上數據相對中心的分散資訊，集中趨勢的量數會更加有意義。分散度量數包含值域(Range)、變異數、樣本標準差，變異係數和四分位間距。

最簡單的分散度量值是樣本值域。對小樣本來說，值域很容易說明，也可能可合適的代表數值的分散度，對大樣本來說，值域並不合適，因為可

能被極值嚴重影響。

樣本變異數是數據集相對平均數分散度的量數。大的樣本變異數代表數據的分散度大，並非集中於平均值。小的樣本變異數代表大部分的數據集中於平均值附近。樣本變異數會受極值影響。樣本標準差是樣本變異數的平均且與量測值有相同的單位。

變異係數(Coefficient of Variation, CV)等於樣本標準差除以樣本平均數，是無單位的量數。CV 可用來比較不同數據集間的分散度。CV 常用於環境應用，因為代表變異程度的標準差值通常和平均值呈正比。

當極值發生時，四分位間距可能相較標準差會是較好的分散程度代表。此統計量不受極值的影響，因此對含有大量未被檢測之數據是很有用的。

2.2.4 相關性量數(Measures of Association)

每一個樣本點的數據常常包含數種特徵(變數)的量測值，且有時我們可能會想知道對兩個或兩個以上的變數之間的關係或相關性。常用的相關性量數之一為相關係數。相關係數可以度量兩個變數之間的關係，如兩組量測值之間的線性關係。然而，相關係數並無法指出因果關聯。分析人員可以說兩個變數之間的相關性高且關係強，但在沒有不能說其中一個變數造成另一個變數增加或減少。

2.2.4.1 皮爾森相關係數(Pearson's Correlation Coefficient)

皮爾森相關係數衡量兩個變數之間的關係。相關係數接近+1(正相關)時，代表一個變數增加時另一個變數也會線性增加，反之，當相關係數接近-1(正相關)時，則代表一個變數增加時另一個變數也會線性減少。當相關係數為+1 或-1 時，代表兩個變數為完美線性正相關或負相關。當相關係數接近 0 時則代表兩個變數的相關性很小。

相關係數無法偵測出非線性關係，所以相關係數應與散佈圖(2.3.7.2 節)

一同使用。散佈圖可用來確認相關係數是否有意義或是否應使用其他非線性相關量數。相關係數可以被極值明顯的影響，因此應先使用散佈圖來確認是否有極值發生。

皮爾森相關係數的一個重要的特色是當兩個變數(假設為 X 及 Y)同時增加一個常數或乘或除上一常數時， X 和 Y 的相關係數不會改變。舉例來說，若溫度變數原本用攝氏為單位，當改用華氏作單位時，相關性不會改變。但當 X 和/或 Y 之量測值進行非線性變化時， X 和 Y 的皮爾森相關係數便會隨之改變。

2.2.4.2 史皮爾曼等級相關係數(Spearman's Rank Correlation Coefficient)

皮爾森相關係數外的另一個選擇為史皮爾曼等級相關係數。它的計算方法是先將 X 值用其排序值取代(例如，最小的 X 值為 1，第二小的 X 值為 2...等等)，並將 Y 值用其排序值取代。這些成對的排序值將視為新的(X ， Y)值，然後使用和皮爾森相關係數同樣的公式套用在新的(X ， Y)值，便可得到史皮爾曼等級相關係數。史皮爾曼等級相關係數相對皮爾森相關係數對極值較不敏感，但皮爾森相關係數的檢定力較強。

2.3 圖形化呈現

2.3.1 直方圖/頻率圖 (Histogram Plots/Frequency Plots)

兩種最原始彙整資料分佈的方法為直方圖或稱頻率圖(圖 2-1)。直方圖將數據範圍劃分為數個單元，然後以直條的高度來呈現數據資料。直方圖提供評估數據對稱性和變異性的方法。若數據是對稱的，則圖形內條狀的結構將會是對稱於中心點(如平均值)。透過直方圖也可看出數據是否有偏向一側(Skewed)以及偏向的方向。

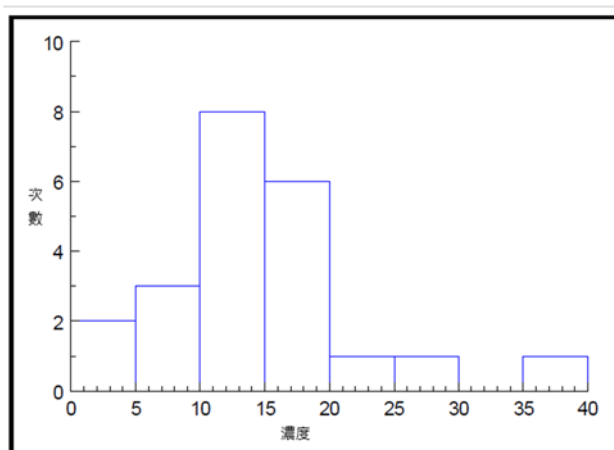


圖 2-1 直方圖/頻率圖範例

2.3.2 箱線圖(Box and Whisker Plot)

箱線圖是視覺化數據重要統計量有用的示意圖。箱型圖(Box Plot)在不需或無法繪製出數據分佈的細節時很有用。一個箱線圖由一個位於中間且內部有一條橫線的箱子加上上下兩條延伸的直線所構成。箱子的長度代表大部分數據的分佈區域(中間 50%)，上下兩條線顯示數據的尾端範圍。樣本中位數位於箱形中間的線，而樣本平均數所在位置用「+」號表示。任何不正常小或大的值用「*」號呈現於圖上。箱線圖可以用來評估數據的對稱性。

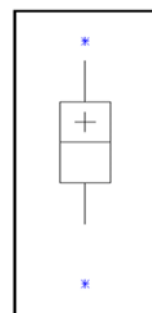


圖 2-2 箱形圖範例

2.3.3 數據排序圖(Ranked Data Plot)

數據排序圖是一容易製作、容易解說，且不需對數據模型做任何假定的圖表。此外，數據排序圖會呈現出每一個數據點，因此，它為數據的圖表呈現，而非數據的整理彙總。

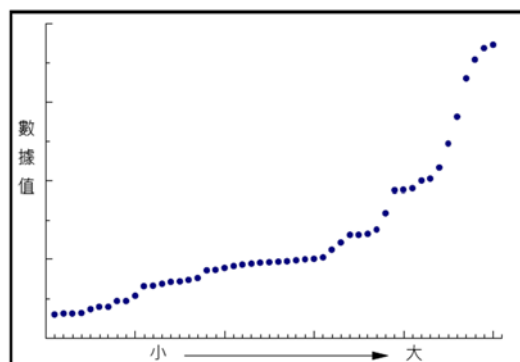


圖 2-3 數據排序圖範例

數據排序圖是將數據按均勻間隔從

最小到排最大的圖。圖表的呈現和 2.3.4 的分位數圖非常相似。數據排序圖較分位數圖容易製作，但數據排序圖提供的資訊較分位數圖少。此兩種圖都可用來確認數據點的密度和偏度，但分位數圖包含數據的四分位數的資訊而數據排序圖沒有包含。

數據排序圖可以用來確認數據值的密度(例如，所有的數據值都集中於數據值的中間地帶，僅有少數數值位於兩側，或大部分的數據值位於一側，而其他的數據值平均分布)。圖 2-3 數據排序圖範例中，在某點以下數據平緩的增加，該點以上則坡度增加，圖形上升相對較快。這代表有大量數據數值較小和相對較少數數據數值較大。

2.3.4 分位數圖(Quantile Plot)

分位數圖(圖 2-4) 是一容易製作、容易解說，且不需對數據模型做任何假定的圖表。此外，數據排序圖會呈現出每一個數據點，因此，它為數據的圖表呈現，而非數據的整理彙總。

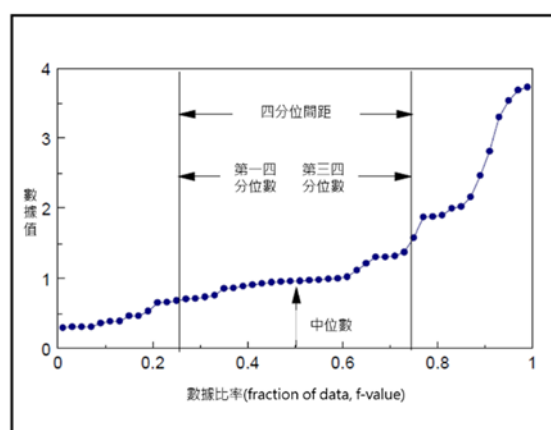


圖 2-4 分位數圖範例

分位數圖是數據的分位數圖。基本分位數圖在視覺上除了 X 軸的值為 0.0 到 1.0 外，和數據排序圖是一樣的，X 軸代表的的是比該點數據小之數據的比率。這樣的繪圖法可使圖上的垂直線代表不同的分位數。

2.3.5 兩個或兩個以上個變數的圖

數據集的樣本點中常常會包含數個特徵(變數)的量測值。譬如，一個數據及可能包含給一個樣本動物的重量、性別和年齡等資訊或包含城市每點各時段的氣溫紀錄。在這種情況下，圖形可要用來比較和對比不同變數。譬如說，分析人員可能希望比較和不同城市的氣溫變化，或不同樣本點(每

一個都包含數個變數，如高度、重量和性別)的跨個體研究。

為比較和對比個別數據點，已開發出一些特定的圖表來顯示多個變數。這些圖會在 2.3.5.1 節討論。要比較和對比多個變數，前面章節所介紹的單變數圖會很有用。舉例來說，分析人員可將多個變數的箱線圖或柱狀圖呈現於同一個圖中。

2.3.5.1 散佈圖(Scatter Plot)

對每一個樣本點包含一對量測值的數據(量測值為連續變數)，散佈圖是分析兩個變數關聯性最有力的工具之一。散佈圖很容易製作，且有許多電腦繪圖軟體可以製作 3 維的散佈圖。圖 2-5 為散佈圖的範例。散佈圖可以清楚的顯示兩個變數間的關係。單一變數和兩個變數的潛在離群值皆可在圖中識別出來。散佈圖也可呈現兩個變數間的關聯性。高度線性相關的兩個變數的圖會緊湊地圍繞在一條直線附近。此外非線性的關聯趨勢也可能可從散佈圖明顯的看出來。

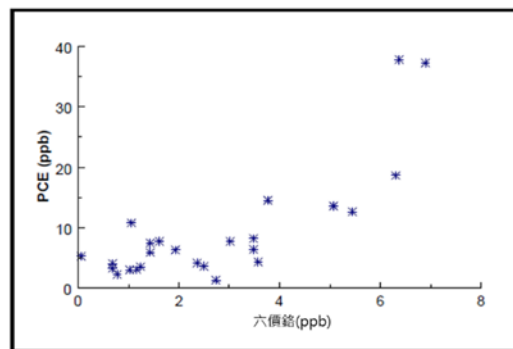


圖 2-5 散佈圖範例

2.3.5.2 分位數-分位數圖(Quantile-Quantile Plot, q-q Plot)

分位數-分位數圖涉及繪製兩個變數之偵檢值的分位數。此圖使用於比較兩個或兩個以上的變數；譬如說，分析人員可能希望能比較不同飲用水水井中樣本的鉛和鐵分佈。經驗 q-q 圖是將一個變數的分位數對應另一個變數的分位數。此圖可用來確認兩個變數分佈的吻合度。若兩個分佈大致吻合，則圖表會是線性的或接近線性。若兩個分佈不同，則圖表會呈現非線性。即使圖表為非線性，其對線

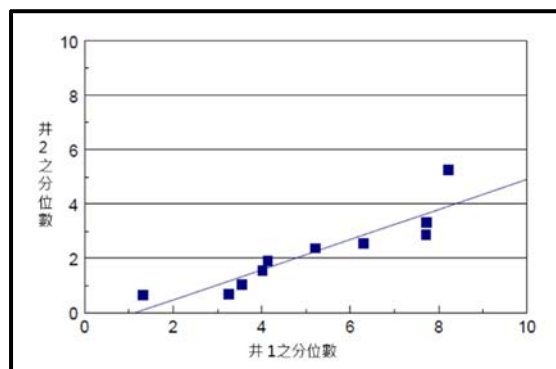


圖 2-6 分位數-分位數圖範例

性的偏離程度可提供有關兩個分佈差異的重要資訊。圖 2-6 為分位數-分位數圖的範例。

2.3.6 時間性數據圖(Plots for Temporal Data)

在固定時間間格(如：每月、每周，或每小時)進行數據蒐集時，數據會有時間的成分在裡面。舉例來說，污染物的空氣量測可能每分鐘或每天蒐集一次；水質汙染程度監控可能每周或每月量測一次。分析人員在檢視具時間性的數據時可能會對數據的時間趨勢、不同時間區間間的關聯性，和週期性的模式感興趣。可以呈現時間性數據的圖表有時間圖(Time Plot)、相關函數圖(Correlogram)，和多偵檢值圖(Variogram)。

在環境應用上的時間性數據有時會和結合統計假設檢定以確認污染程度是否改變。必須在達到穩定狀態(Steady State)時，假設檢定才能不考慮時間趨勢或季節性變化。

2.3.6.1 時間圖(Time Plot)

時間圖是最容易製作的圖之一且可提供大量資訊。數據圖呈現數據隨時間變化的曲線。此圖可讓我們很容易辨別大尺度和小尺度的時間趨勢。小尺度的趨勢在時間圖上顯示較小時間區間中的波動。舉例來說，一天當中的臭氧水平通常在中午前提高，然後下降，且重複這樣的過程。大尺度的趨勢，如每季的波動，在圖表中顯示為規則的上升和下降。譬如說，臭氧水平通常在夏天較冬天高，所以臭氧資料會顯示出每日的趨勢和季節的趨勢。時間圖還可以顯示方向趨勢及隨時間增加的變異度。可能的離群值也可輕易的用時間圖看出。

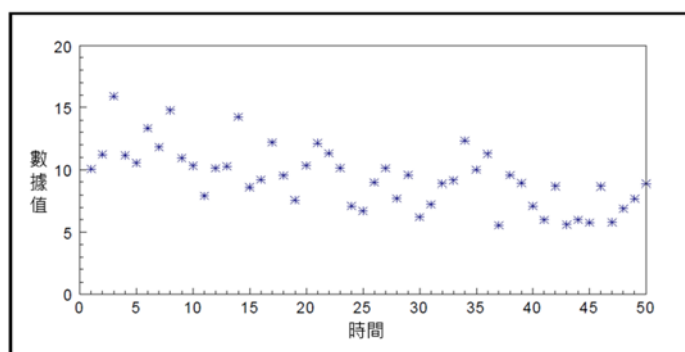


圖 2-7 時間圖範例

時間圖(圖 2-7)的 X 軸為時

間，並將並將相應時間的觀測值繪製在垂直軸上。為避免產生數據有連續性的錯誤觀感，建議不要將點之間的用線相連。

2.3.6.2 每個時段有多個偵檢值

蒐集環境數據時，有時在每一時間區間會蒐集多個數據值。舉例來說，取樣設計可能指定於三個月中每周三要蒐集和分析 5 各個飲用水樣本。在這種情況下，2.3.6.1 中介紹的時間圖可用來呈現每個數據、呈現每周平均值、呈現每一個平均值的信賴區間，或呈現每一個平均值的信賴區間及個別數據資料。呈現所有數具的時間圖可用來確認不同時間區間的變異性有所變動。呈現平均值的時間圖可用來確認時間區間間的平均值是否有改變。

2.3.7 空間數據圖

前面章節介紹的圖表在探索空間數據時可能會有用處，然而，當分析人員檢視空間數據時可能會相知道發生極值時的位置、整體空間趨勢、以及相鄰位置間的連續程度。常用空間數據的相關圖表包含位置圖(Posting Plots)和標記圖(Symbol Plots)。

2.3.7.1 位置圖(Posting Plots)

位置圖為一上面有數據值及對應位置的地圖。此圖可顯示數據位置明顯的錯誤和辨別可能的錯誤值。取樣的位置可讓分析人員得知數據如何蒐集(即取樣設計)而得的、無法進入的區域，以及對決策者來說特別著重而可能需要加強取樣的區域。標記最大值和最小值對看出數據是否有明顯的趨勢常常是有用的。

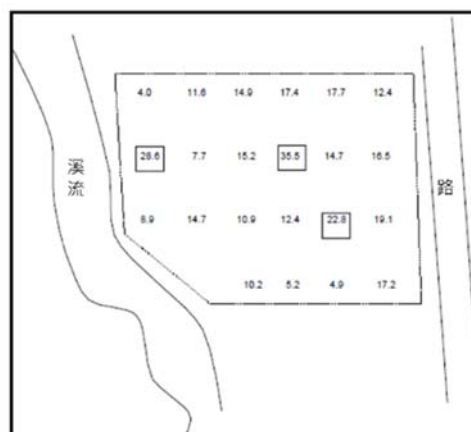


圖 2-8 位置圖範例

2.3.7.2 符號圖(Symbol Plots)

對大量的數據，使用位置圖可能是不可行的但可使用標記圖(圖 2-9)。符號圖基本上和位置圖(Posting Plot)是一樣的，除了標記在位置上的不是數據值而是數據值的所屬範圍編號。舉例來說，「0」代表濃度為小於 100ppm、「1」代表濃度介於 100 ppm 到 200 ppm。

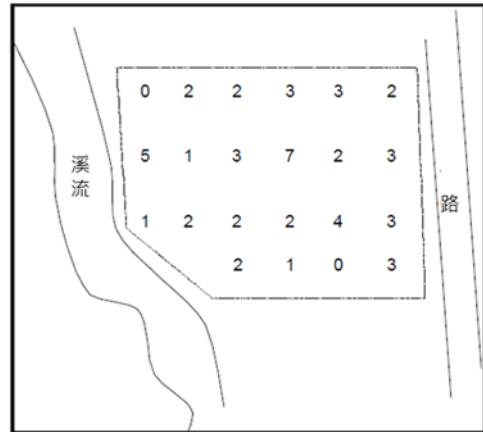


圖 2-9 符號圖範例

2.4 機率分佈

2.4.1 常態分佈(The Normal Distribution)

數據，特別是量測值，為自然發生的模式時可視為數據的分佈。在大多數的狀況下，數據值會集中於平均值或中位數。數據的分散度(定義為數據點到平均值的平方和)叫做變異數(變異數的平方根稱為標準差)。當分佈的變異數較大時的分散度較大，反之則較小(圖 2-10)。當數據值大部分落於平均值，而後向兩端快速的減少，通常是常態分佈或稱為鐘形曲線。

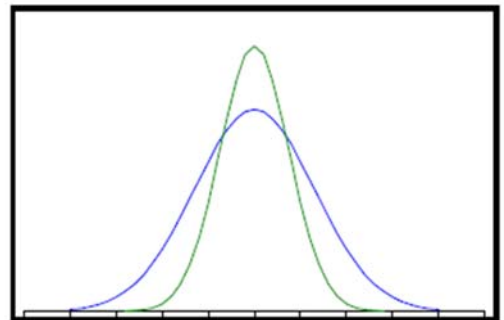


圖 2-10 常態分佈

常態分佈通常寫做 $N(\mu, \sigma^2)$ ，第一個參數(μ)代表平均值，第二個參數(σ^2)代表變異數。可將任一常態分佈轉換為標準常態分佈- $N(0, 1)$ ，標準常態分佈稱為 Z(圖 2-11)。在此指引文件中將會常常提到標準常態分佈的百分位數，Z 值

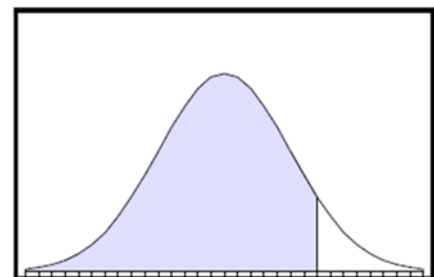


圖 2-11 標準常態曲線(Z-曲線)

(Z-value)用來表示標準常態的百分位數(從左邊向右累積，曲線下方的面積)。

2.4.2 T 分佈(The t-Distribution)

標準常態分佈是當母體確切的平均值和變異數資訊已知時使用，但當只能知道隨機樣本的樣本平均數和樣本變異數資訊，並據以做出決策時，適合使用的分佈為 T 分佈。T 分佈很類似標準常態分佈但中心的高度較低且兩端較胖。尾端的胖度是自由度的函數，自由度與樣本數相關。

2.4.3 對數常態分佈(The Lognormal Distribution)

另一環境中常見到的分佈為對數常態分佈，對數常態分佈相對常態分佈來說較為偏斜。對數常態分佈最小值為 0 且尾端較常態分佈胖。它和常態分佈關係為：若 X 是對數常態分佈，則 $Y=\ln(X)$ 是常態分佈。通常再進行統計檢定前會將數據轉換為近似常態分佈。

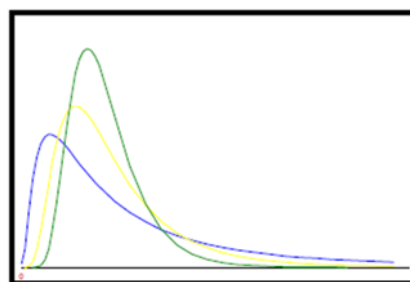


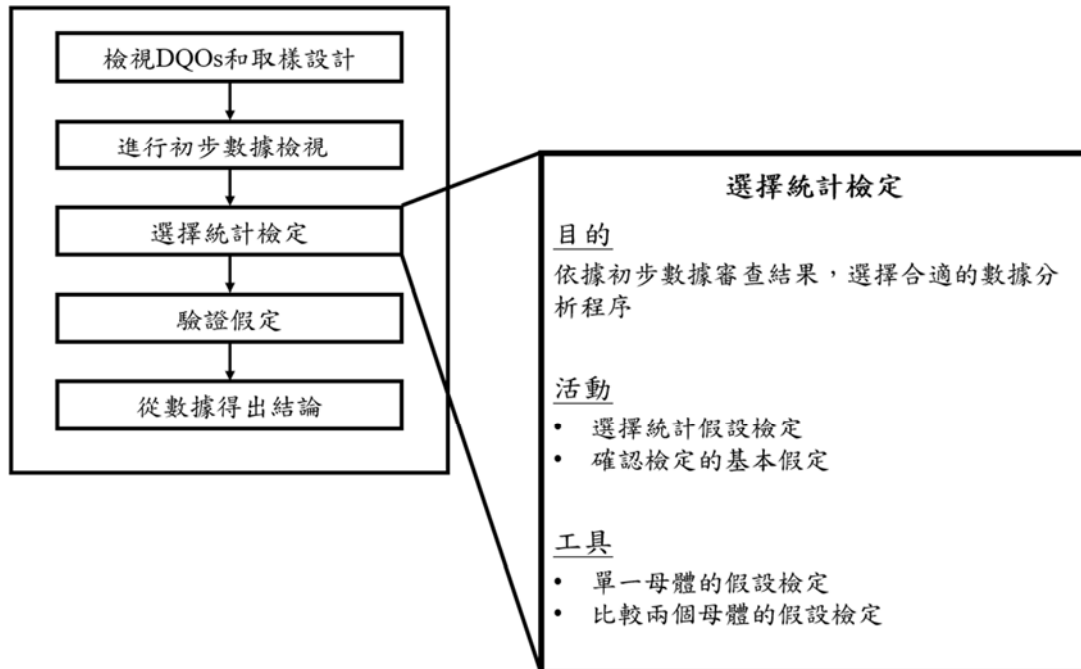
圖 2-12 3 種不同的對數常態分佈

2.4.4 中央極限定理

幾乎所有環境中所有的估計情況，調查中心都是關注偵檢值或量測值之隨機樣本的平均值。很少可以假設偵檢值為真正的常態分佈，因此是否使用基於常態假設上的統計檢定需加以考量。

在許多的情況下，除非顯示出整體的非常態性，基於常態假設的統計檢定不會因缺乏常態性而受影響。此外，當計算樣本平均數的樣本增加時，檢定對其常態偏移的容忍度也會增加。簡單來說，不論原本數據的實際分佈為何，當樣本數越增加時，樣本平均數會越來越接近常態分佈。大樣本使其平均數「穩定」，使平均數的分佈如同常態，因而依舊可做統計檢定。

數據品質保證(DQA)程序



步驟3：選擇統計檢定

- 根據選擇數據品質目標(DQO)和初步數據檢視來選擇統計假設
- 若問題涉及和固定門檻值的比較，如法規標準，考慮 3.2 節中所列的假設檢定。
- 若問題涉及比較兩個母體，如比較來自兩個不同區域或流程的數據，則考慮 3.3 節中所列的。假設檢定。
- 確認檢定的基本假設
 - 列出統計檢定的關鍵基本假設，如分佈形式、離散度、獨立性，或其他可適用的。
 - 注意任何微小偏差即可危害檢定結果的高敏感度假設。

3.1 綜覽及活動

此章提供分析人員有關選擇統計假設檢定之資訊。第一章中簡單介紹了統計假設檢定。此步驟中有兩個重要的產出：(1) 檢定本身，和(2)檢定的基礎假定，假定是否成立會決定檢定結論的有效性。

此節描述 DQA 此步驟中兩個主要活動，此章其餘的章節包含分析環境數據時可能有用的統計檢定。每一個統計檢定，會說明其目的、假定、限制，及穩健性等。

摘譯補充說明：MARSSIM 中建議採用的統計檢定有兩個，當沒有背景污染時，建議採用單樣本檢定中的符號檢定(Sign Test)；而有背景污染時，建議採用的是雙樣本檢定的威爾卡森等級和檢定(WRS Test, Wilcoxon Rank Sum Test)。其中，符號檢定在 DQA 指引文件中並未介紹。因此，補充單樣本符號檢定之介紹於 3.2.2.1 節。

3.1.1 選擇統計假設檢定

若在 DQO 程序、QAPP(品質保證計畫規劃)，或其他文件中已指定特定的檢定，分析人員應使用初步數據檢視的結果來決定其對所蒐集的數據是否合適。若檢定並不合適，分析人員應說明並紀錄為何其不合適並依據數據使用者的目的、初步數據審查，和其他可行的假定來選擇統計檢定。

3.1.2 確認統計檢定的基礎假定

所有的統計假設都會對數據做出假定。參數檢定(Parametric Tests)假設數據來自某分佈(例如，t 檢定假定數據來自常態分配)，而無母數檢定(Nonparametric Tests)並沒有做出這樣的假定(例如，威爾卡森檢定只假定數據是對稱的但不需要是常態)。然而，參數檢定和無母數檢定可能都會加訂數據是統計上獨立或數據沒有特定趨勢。當檢視數據時，分析人員應該都要列出統計假設檢定的基礎假定，例如分佈、分散度或其他。

另一統計檢定的重要特徵為當母體偏離假定時的敏感度(不穩健度)。當一統計程序的效能不會因母體偏離假定而被嚴重影響時，就稱為穩健。

3.2 單一母體的假設檢定

單樣本檢定為將一母體參數(如，平均數、百分位或變異數)和一固定門檻值(Threshold)做比較。門檻值及母體參數皆已於步驟 1(檢視 DQOs 和取樣設計)中說明。在此節中討論的統計檢定可能會用來確認是否 $\theta \leq \theta_0$ 或 $\theta > \theta_0$ 。 θ 代表母體平均數、中位數、某百分位數，或某比率； θ_0 代表門檻值。

3.2.1 平均值的檢定

母體平均數為母體分佈中間值的度量。在大樣本時，平均數的分佈是可知的，因此其為統計假設檢定最常使用的母體參數之一。在此節中所使用的統計假設為：

案例 1： $H_0: \mu \leq C$ 與 $H_A: \mu > C$ 和

案例 2： $H_A: \mu \geq C$ 與 $H_0: \mu < C$

C 代表給定的門檻值如法規限值，而 μ 代表母體(實際)平均污染程度。例如， C 可代表砷濃度水平。當母體平均值超過 C 值時，可能會需要採取行動。

這些檢定所需的資訊包含虛無和對立假設(如案例 1 和案例 2)；灰色區域(在案例 1 為某 μ_1 值($\mu_1 > C$)，案例 2 中為某 μ_1 值($\mu_1 < C$)， μ_1 和 C 代表灰色區域的界線)；在 C 值的錯誤拒絕率為 α ；在 μ_1 值的錯誤接受率為 β ；以及其他決策錯誤的其他限制。

3.2.1.1 單樣本(One-Sample) t 檢定(t-Test)

t 檢定又稱 Student Test。

目的(PURPOSE)

給定隨機樣本數 n (或一組和樣本數 n)，單樣本 t 檢定可用來做有關母體平均數(μ)的假設檢定。

假定(Assumption)及其確認(Verification)

可以採用單樣本 t 檢定的前提，也就是其主要假定為隨機樣本和樣本平均數 $\bar{x}$ 的分佈要近似常態分佈。因為樣本平均值和標準差對離群值非常敏感， t 檢定使用前應先做離群值檢定(4.4 節)。

樣本平均數近似常態分佈來自數據資料之近似常態分佈。此外，根據中央極限定理，當樣本數夠大時，即使母體分佈未知，其樣本平均數的分佈會近似常態分佈。

限制(Limitations)和穩健性(Robustness)

T 檢定對離群值並不穩健，因為樣本平均數和標準差會被離群值嚴重影響。威爾卡森符號等級檢定(The Wilcoxon Signed Rank Test)相對穩健，但檢定力相對較弱。也就是當虛無假設為錯時，威爾卡森符號等級檢定拒絕虛無假設的機率較小。

3.2.1.2 平均值之威爾卡森符號排序檢定(The Wilcoxon Signed Rank Test)

目的(Purpose)

給定隨機樣本數 n (或一組和樣本數 n)，威爾卡森符號排序檢定檢定可用來做有關母體平均數或中位數的假設檢定。

假定(Assumption)及其確認(Verification)

威爾卡森符號排序檢定假定隨機樣本來自對稱且連續的母體(對稱代表母體的機率分佈曲線對稱於平均數/中位數)。對稱性相對常態分佈是相對較不嚴格的，因為常態分佈是對稱的，但一些對稱分佈卻不是常態分佈。在對稱分佈中，平均數和中位數是相等的，所以虛無假設可以用這兩個參數來敘述都可。對稱性地檢定可以根據卡方分佈來設計，或使用常態檢定。

若數據不為對稱，可能可以透過數值轉換使其符合對稱的假定。

限制(Limitations)和穩健性(Robustness)

雖然對稱性相較常態性(Normality)為較弱的假定，仍然是一個很強的假定。若資料並非近似對稱，就不能使用這個檢定。

當許多數據相同時，威爾卡森符號排序檢定可能會造成結果判斷的誤導。當數據的數值相同時，其排序相同，會使威爾卡森符號排序檢定的統計檢定力稀釋。如果可能，數據的紀錄應有足夠的準確性使同值的狀況不會發生。

3.2.2 中位數檢定

母體中位數($\tilde{\mu}$)是另一個量測母體分佈中間值的度量，中位數也就是 50 百分位數。

。此母體參數對於極值較平均數不敏感。在此節中所使用的假設為：

案例 1： $H_0: \tilde{\mu} \leq C$ 與 $H_A: \tilde{\mu} > C$ 和

案例 2： $H_A: \tilde{\mu} \geq C$ 與 $H_A: \tilde{\mu} < C$

C 代表給定的門檻值如法規限值。

3.2.2.1 單樣本符號檢定(Sigh Test)

單樣本符號檢定可用來檢定母體中位數是否大於/等於/等於某特定值。符號檢定是無母數統計方法中最簡潔者之一。符號檢定也可用來檢定兩個關聯樣本所代表的兩個母群體的中位數是否有差異。採用符號檢定時，數據來源的母體分佈不須要求是為常態分佈或對稱分佈。

3.3 雙母體比較之檢定

雙樣本檢定包含比較兩個母體或「之前和之後」的比較。在環境應用

中，要比較的雙母體可能是一潛在污染區域和一背景區域，或是較高區域和較低區域之水井的濃度水平。母體的比較可能依據可代表兩區域之統計參數(如，平均值或中位數)，或依據和母體分佈無關的比較。當檢定不須假定母體分佈為特定分佈時，稱為無母數檢定。在比較兩個母體時，這樣的檢定通常比假定母體為某分佈的檢定更有用，因為其較無嚴格的假定。

通常，雙樣本檢定為將兩個母體參數的差異和一門檻值比較。對環境應用來說，門檻值通常為 0，代表要確認兩個母體參數是否相同。譬如說，比較某甲區域的濃度水平是否和背景區域。若甲區域的水平超過背景水平，則須對甲區域做更多的調查。

3.3.1 比較兩個平均數

令 u_1 代表母體 1 的平均數， u_2 代表母體 2 的平均數，在此節中所使用的假設為：

案例 1： $H_0: u_1 - u_2 \leq \delta_0$ 與 $H_A: u_1 - u_2 > \delta_0$ 和

案例 2： $H_A: u_1 - u_2 \geq \delta_0$ 與 $H_0: u_1 - u_2 < \delta_0$

一兩母體平均數的雙樣本檢定範例為比較平均除污後的區域和背景區域，在此案例中 δ_0 為 0。另一個範例為某甲區域除污結果必須每年減少 50 ppm。在此案例，不同年度視為不同母體， δ_0 為 50ppm。

此檢定所需的資訊包含虛無和對立假設(如案例 1 和案例 2)；灰色區域(在案例 1 的為某 δ_1 值 [$\delta_0 > \delta_1$] 或案例 2 中為某 δ_2 值 ($\delta_2 < \delta_0$)， δ_1/δ_2 和代表灰色區域的界線)；在 δ_0 值的錯誤拒絕率為 α ；在 δ_1 值的錯誤接受率為 β ；以及其他決策錯誤的其他限制。

3.3.1.1 雙樣本 t 檢定(相同變異數)

目的(Purpose)

雙樣本的 t 檢定可根據兩獨立隨機樣本(母體 1 之樣本為 $X_1, X_2, \dots, X_m$ ；

母體二之樣本為 $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ 來比較兩個母體的平均數。此檢定假定兩個母體的變異數是近似相同的。

假定(Assumption)及其確認(Verification)

雙樣本 t 檢定的基本假定為從母體 1 取出 m 個樣本($X_1, X_2, \dots, X_m$)，並從樣本二取出 n 個樣本($Y_1, Y_2, \dots, Y_n$)。應透過檢視樣本點的選擇來確認隨機抽樣和獨立假定的有效性。

第二個假定為樣本一的樣本平均數 $\bar{X}$ 和樣本二的樣本平均數 $\bar{Y}$ 的分佈接近常態分佈。若 m 和 n 都很大，我們不須做進一步的驗證，即可做出這樣的假定。當樣本數較小時，可以透過常態性檢定(Normality Test)來確認樣本平均數的常態性(Normality)。

限制(Limitations)和穩健性(Robustness)

雙樣本的 t 檢定，對常態性和變異數相同的穩健性佳。然而，若調查人員檢定的結果為拒絕其常態性或拒絕變異數相同的假定，便應改為使用無母數的檢定。

3.3.2 雙樣本的無母數比較

在很多案例，並不容易確認母體的分佈，在這種狀況下，便須使用不須有母體分佈假定前提的檢定。下面所描述的檢定中，虛無假設 H_0 為：母體 1 和母體 2 的分佈是一樣的；對立假設 H_A 為：母體 1 的部分分佈較母體 2 偏右(或廠區的污染較背景大)。對大部分的環境應用，母體 1 為要研究的區域(即，可能污染區域)，母體 2 為參考區域。

3.3.2.1 威爾卡森等級總合檢定(The Wilcoxon Rank Sum Test)

目的(Purpose)

威爾卡森等級總合檢定可根據母體 1 之 m 個隨機樣本($X_1, X_2, \dots, X_m$)，和母體 2 之 n 個隨機樣本($Y_1, Y_2, \dots, Y_n$)來比較兩個母體分佈。

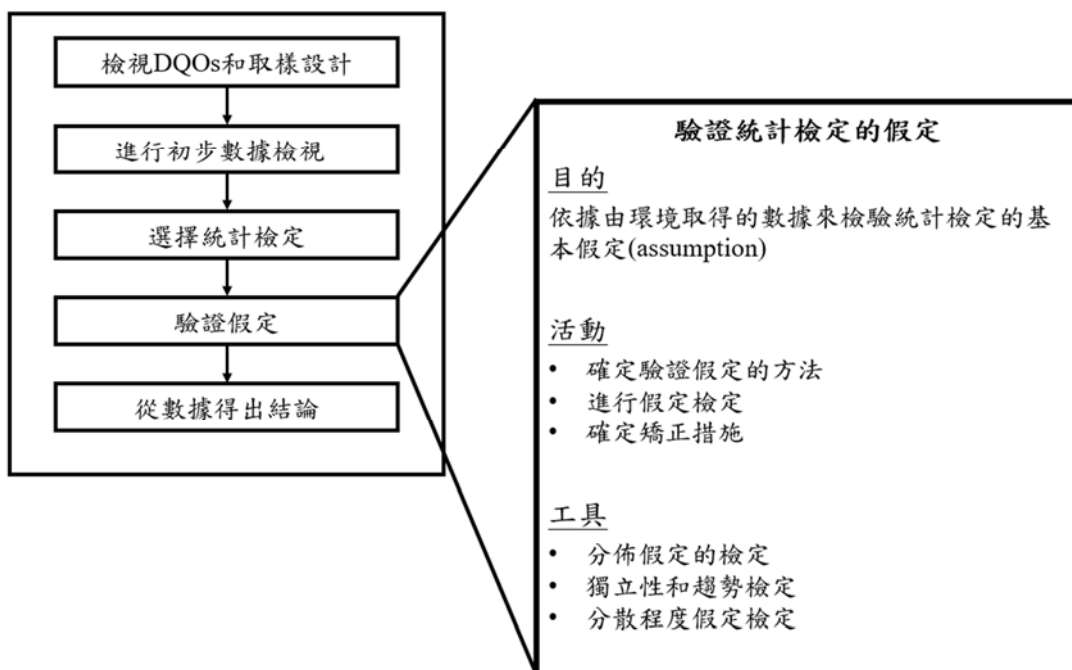
假定(Assumption)及其確認(Verification)

隨機取樣和獨立性的假定應透過檢視樣本點的程序來確認。對大樣本來說，要測試是否兩個母體的分佈有近似的形狀，可以透過製作樣本直方圖來比較。

限制(Limitations)和穩健性(Robustness)

當許多數據相同時，威爾卡森等級總合檢定可能會造成結果判斷的誤導。當數據的數值相同時，其排序相同，會使威爾卡森等級總合檢定的統計檢定力稀釋。因為考慮的為樣本數值的排序，使得離群值的影響有限，因此，威爾卡森等級總合檢定很大的一個好處是對離群值來說很穩健。

數據品質保證(DQA)程序



步驟 4：驗證統計檢定的假定

- 確認驗證假定(assumption)的方法
 - 確定從初步數據檢視得出之任何有力的圖形證據。
 - 檢視(或發展)數據統計模型。
 - 選擇確認假定的檢定。
- 執行確認假定之檢定
 - 執行檢定計算執行檢定。計算
- 若有需要，確認矯正措施
 - 確認是否數據轉換可修正問題。
 - 若數據遺失，考慮使用理論依據或蒐集新數據的可能性。
 - 考慮穩健程序或無母數假設檢定。

4.1 綜覽及活動

在此步驟，分析人員應評估步驟 3 所選用的統計檢定方法的有效性。評估方法為使用新產出的環境數據來檢驗檢定方法的基本假設是否成立。此章節的宗旨為，確認是否數據支持檢定的基本假設，或在進一步做統計分析前，數據是否需要先修正。

確認的方式可以使用定量的方法，也就是使用統計分析的方法來決定要接受或拒絕統計檢定的假定。然而，定量的方法幾乎總是需要有定性判斷(Qualitative Judgment)來支持。如第二章有關圖形化的呈現，可以提供有關假定的重要定性資訊。

若數據支持統計檢定的重要假定，則 DQA 的繼續走到下一步驟，並從數據得出結論。

摘譯註：MARSSIM 中建議採用的統計檢定有兩個，當沒有背景污染時，建議採用單樣本檢定中的符號檢定(Sign Test)；而有背景污染時，建議採用的是雙樣本檢定的威爾卡森等級和檢定(Wilcoxon Rank Sum Test)。此兩個檢定皆為無母數檢定，也就是不需對母體的分佈做任何假定。因此，此兩個檢定的假定只有樣本為隨機取樣和樣本間相互獨立的兩個假定。也就是說，根據 MARSSIM，電廠除役相關廠址偵檢數據所使用的檢定，在此一步驟，並不需要使用定量的統計檢定來確認檢定的基本假定是否成立。故此，摘譯的章節僅將著重於和 MARSSIM 中建議採用的統計檢定相關之假定，略過其他的假定檢定介紹。依據上一章節，確認樣本是否為隨機取樣，需透過檢視程序的方法來確認，樣本間互相獨立的確認則於 4.2 節中說明。

4.1.1 確認驗證假定的方法

大部分的案例，有關分佈形式、獨立性，以及分散性可以使用統計檢定來正式的驗證，在部分的情況中，也可能透過初步數據檢視即可提供足夠

支持假定的證據。

對每一個統計檢定來說，調查者必須要設定「顯著程度(Level of Significance)」。對檢定中的虛無假設，顯著程度代表當虛無假設為真時，拒絕虛無假設的機率，也就是錯誤拒絕率。這裡的顯著程度設定值不須和步驟 3 的相同。

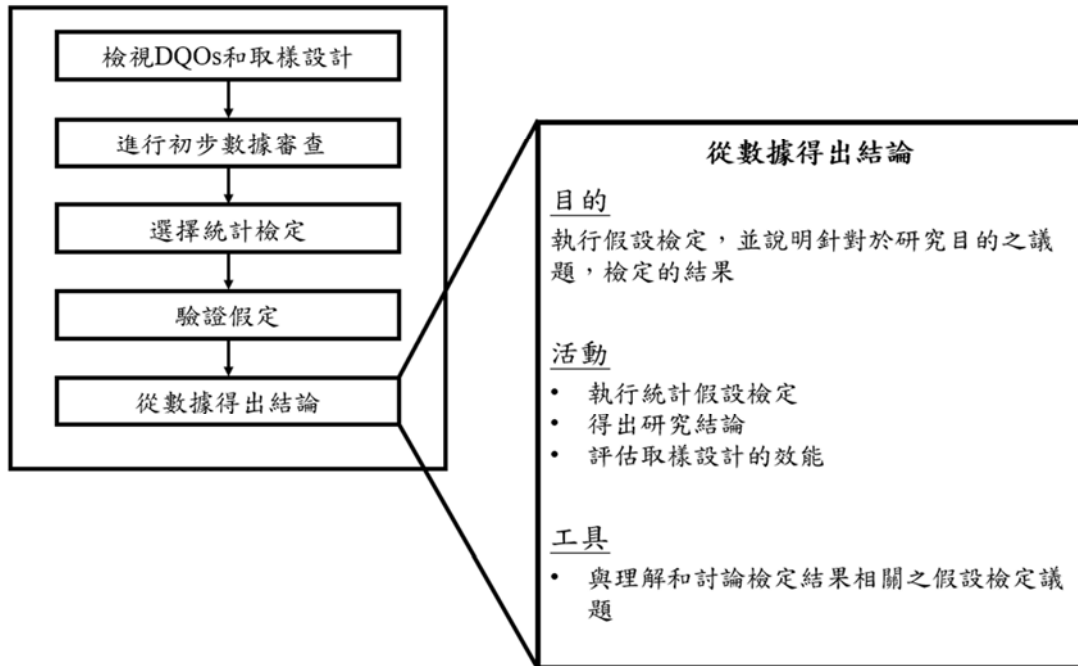
4.2 獨立性

數據獨立性的假定是統計檢定有效性(Validity)的關鍵。根據定義，當數據間真正互相獨立時，數據點之間的相關性為零，且統計檢定配合其決策錯誤率為有效的。當數據間存在相關性時，統計檢定的效力會減少。

數據間不獨立會造成統計檢定問題的原因是若偵檢值隨時間或空間呈正相關，則檢定的有效樣本數會較實際樣本數少，也就是說，因新增的偵檢值會和相近的偵檢值部分相關，故無法提供足夠的「新」資訊。

確認統計獨立性最有效的方法之一是使用 Rank Von Newmann 檢定。因相較其他統計獨立性檢定，Rank Von Newmann 檢定在各樣的案例有更好的檢定力。

數據品質保證(DQA)程序



步驟 5：從數據得出結論

- 執行統計假設檢定
 - 執行計算並清楚的將之紀錄於文件。
 - 若數據中有異常值或離群值，針對分異常值或離群值算入和不算入數據的情況，別進行統計檢定計算。
- 評估統計檢定結果並得出結論
 - 若虛無假設被拒絕，得出結論並將分析結果紀錄於文件。
 - 若虛無假設不被拒絕，確認是否符合錯誤接受的容許限值。若是，得出結論並將分析結果紀錄於文件；若否，若有需要確認矯正行動。
 - 解釋檢定結果。
- 若取樣設計要重複使用，評估取樣設計的效能
 - 評估設計中參數所有範圍的統計檢定力；若有需要諮詢統計學家。
 - 若數據遺失，考慮使用理論依據或蒐集新數據的可能性。
 - 考慮穩健程序或無母數假設檢定

5.1 綜覽及活動

在 DQA 的最後一個步驟，分析人員要執行統計假設檢定並得出結論。此步驟代表規劃、執行和評估階段的高點。在步驟 1，數據使用者的規劃目標及取樣設計將被檢視與查核。在步驟 2，取樣程序的執行將進行檢視並對取樣結果初步審查。在步驟 3，根據步驟 2 取得的資訊，將選擇合適的統計檢定。為確保所選擇的統計方法是有效的，在步驟 4 會驗證統計檢定的基本假設是否成立。在完成此 4 個步驟後，可確保在步驟 5 所得出的結論在科學上是足可辯護的。

5.1.1 執行統計假設檢定

此活動的目標為執行步驟 3 所選取的統計假設檢定。假設檢定的計算應清楚的紀錄於文件並要易於驗證。此外，檢定結果的文件應要容易理解使要使用結論來做出決策的人員可以有效的溝通。若執行計算時有使用電腦軟體，須確保程序有合宜的記錄下來，特別是當有使用特別的算法時。

進行計算時，分析人員應行使專業判斷。譬如，當數據中有異常值或離群值，針對異常值或離群值算入和不算入數據的情況，分別進行統計檢定計算。

5.1.2 得出研究結論

此活動的目標為解釋統計假設檢定的結果，使數據使用者可以從數據中得出結論。統計假設檢定的結果會是以下兩項之一：

- (a) **拒絕虛無假設**。在此種狀況，分析人員要考量可能的錯誤拒絕決策失誤(False Rejection Decision Error)。
- (b) **不拒絕虛無假設**。在此種狀況，分析人員要考量可能的錯誤接受決策失誤(False Acceptance Decision Error)。

在情況(a)，代表數據提供足夠拒絕虛無假設的證據。分析人員不須更

多的分析便可確定所做出的結論具備足夠的信心度。這是因為根據統計假設的設計，錯誤拒絕決策失誤率會在使用者所設定的容許限值內。

在情況(b)，代表數據未提供足夠拒絕虛無假設的證據，且須進一步的分析是否滿足錯誤接受決策失誤的容忍限值。以下兩種可能情況之一可能發生：

(1)數據不足以支持拒絕虛無假設且滿足錯誤接受決策失誤限值。在此情況下，結論為接受虛無假設。

(2)數據不足以支持拒絕虛無假設且不滿足錯誤接受決策失誤限值。在此情況下，統計檢定的檢定力不滿足數據使用者所設定的效能標準。數據使用者可選擇放寬錯誤接受決策失誤限值，並做出接受虛無假設的結論，或採取矯正措施，如取得更多的數據再做出結論。

當檢定的結果為不拒絕虛無假設，要驗證是否滿足錯誤接受決策失誤限值的最周全方法為計算統計檢定的預估檢定力(Estimated Power)。參數全部值域的檢定力的計算通常需要使用特定軟體。取樣設計的效能評估也需要作檢定力計算。因此，檢定力的計算會在後續 5.1.3 節討論。

檢驗統計檢定效能有一個簡單方法。使用實際數據計算所得的變異數估算值或變異數 95%信賴區間的區間上限值，可推算要滿足數據使用者目標所需的樣本數。若理論上所需的樣本數小於或等於實際取樣的數目，則檢定具備足夠的檢定力。若理論上所需的樣本數大於實際取樣的數目，則需要取得更多的樣本，才可使檢定具備足夠的檢定力。

5.1.3 評估取樣設計的效能

若取樣設計會再次被使用，分析人員將會對評估設計的整體效能感興趣。分析人員透過參數值全域的統計檢定力的分析來評估取樣設計。統計檢定力代表當實際情況不是虛無假設所假設的情況時，拒絕虛無假設的機率。評估檢定力的方法為計算當實際情況為對立假設各參數值域所對應的檢定力，並據以繪製出檢定力曲線。檢定力分析可協助分析人員評估當參

數的實際值在行動門檻值(Action Level)附近時，取樣設計的充分性。以此種方式，分析人員可以確認一統計檢定的效能並可和其他檢定進行比較。有關檢定力曲線更多的討論可參考「數據品質目標指引文件(Guidance for Data Quality Objectives(QA/G-4)(EPA 1994)」，該份文件的中文摘譯請參考「EPA QA G-4 使用數據質量目標程序進行系統規劃指南摘譯」。

5.2 對檢定結果進行解釋和溝通

有時統計檢定的解釋和說明的困難可能會提升。其中一個可能原因為術語的不一致；其他可能是缺乏對假設檢定基礎的一些基本概念的理解。例如，對數據使用者解釋結果時，分析人員可能使用和指引不同的術語。舉例來說，分析人員的報告不是寫說虛無假設被拒絕或不被拒絕，而是顯示 p 值(p-value)為 0.12。類似的解釋問題也可能發生在當數據使用者嘗試要理解檢定結果的實際意義或要將檢定結果說明給其他人時。以下章節所談到有關假設檢定的問題，可能對了解和溝通檢定結果會有所幫助。

5.2.1 p 值(p-value)的解釋

假設檢定的傳統方法為先指定檢定的顯著水準(Significance Level)(也就是型一錯誤率 α)。此錯誤率將用於訂定和統計檢定相關的決策規則。舉例來說，在檢定母體平均數 μ 是否超過門檻值(如 100 ppm)時，統計檢定會依據 μ 的估計值 $\bar{x}$ 來做出結論。當樣本的平均數 $\bar{x}$ 大於 100 ppm 時，有可能只是碰巧，真正的母體平均數 μ 依然有可能小於或等於 100；然而，若 $\bar{x}$ 遠大於 100 ppm，則實際情況符合虛無假設 $H_0(\mu \leq 100 \text{ ppm})$ 的可能性便會很小。因此，決策規則可能會是「若 $\bar{x}$ 大於 $100 + C$ 時拒絕虛無假設， C 為一和 α 大小以及 $\bar{x}$ 變異度相關的正數」。若取樣的結果符合，統計檢定的結果報告會是「拒絕虛無假設」；若不符合，結果報告便是「不拒絕虛無假設」。

另一種報告統計檢定結果的方法為報告其 p 值(p-value)。p 值的定義為，

當實際情況為虛無假設時，檢定的結果至少和樣本一樣的機率。例如上面的範例來說， p 值為若實際的母體平均數為 100 ppm 時，樣本平均數大於等於 $\bar{x}$ 的機率。顯然的，根據 p 值來做決策時，虛無假設 H_0 在 p 值小時會被拒絕，而當 p 值大時不被拒絕。所以， p 值和傳統假設檢定方法的關係為：若 p 值小於 α 則拒絕 H_0 。若數據使用者預先設定錯誤拒絕失誤率的限值為 0.05，當分析人員的分析結果顯示 p 值為 0.12，則數據使用者的報告應為「不拒絕虛無假設」；而當 p 值為 0.03 時，則數據使用者的報告應為「拒絕虛無假設」。分析人員的報告提供 p 值的好處為可以提供接受或拒絕虛無假設力度的衡量，也可讓數據使用者設定想要的錯誤拒絕失誤限值。

5.2.2 「接受」與「無法拒絕」虛無假設

如上節所述，傳統假設檢定的結果會是兩個結論之一：「拒絕 H_0 」(稱為顯著結果)或「不拒絕 H_0 」。(不顯著結果)。在後面的情況，可能有人會認為「不拒絕 H_0 」和「接受 H_0 」是一樣的。然而，依據檢定的基本原理，並不建議使用「接受 H_0 」的術語。此原理著重於對對立假設的證明，也就是說，只有在來自於數據的證據顯示對立假設的可能性比虛無假設大時，才會拒絕虛無假設。若檢定結果為不顯著，只能說明依據數據，虛無假設可能是對的，但不能認定是唯一的可能。換句話說，當檢定結果為高度不顯著時(如， p 值為 0.8)，我們可以說虛無假設為一可合理解釋數據的模型，但不必然代表虛無假設就一定是對的。

5.2.3 統計顯著與實際顯著(Statistical Significance vs. Practical Significance)

統計顯著和實際顯著此兩個概念有一個重要的分別。統計顯著僅代表假設檢定的結果：虛無假設是否被拒絕？達到統計顯著結論的可能性取決於被檢定的母體參數(例如 μ)、取樣數據偏離虛無假設的程度(例如 μ_0)，以及樣本數大小。5.1.3 節介紹了檢定力曲線，當樣本數越大的時候，檢定力曲線會越陡峭，檢定力曲線會越陡峭代表當母體的實際情況與虛無假設僅有些微不同時，仍有很大的可能性會被檢定出差異。換句話說，若樣本數

小，檢定力曲線會較不陡峭，代表只有當 μ 和 μ_0 有很大的差異時，才會有較大的機率可檢定出來。因此，假設有人不知檢定的檢定力，在檢定力曲線很陡峭時，有可能在事實的角度來看， μ 和 μ_0 差異是無關緊要的情況下，得出顯著的結論($\mu > \mu_0$)；或在檢定力曲線很平緩時，有可能既使 μ 和 μ_0 差異很大，卻得出不顯著的結論。這兩種情況都不是樂見的：在第一種情況會花費過多的資源，而第二種情況，很可能造成錯誤接受虛無假設的結果。

但參數值和虛無假設所設定的值要有多大的差異代表差異是明顯的？這和實際顯著的概念相關。理想上，這個問題會在規劃階段的 DQO 程序中被提出和回答。知道差異到多大可視為具有實際差異在設計階段是很重要的，因為如此才能在取樣規劃中決定合適的樣本大小。從純粹的統計設計觀點來看，這可被視為 DQO 程序最主要的目的。在合適的取樣規劃下，可減少發生前面一段所提到兩種不樂見情況的可能性。

5.2.4 「安全的證明」與「風險的證明」

因為假設檢定的基本原理，虛無假設通常設為現狀(例如，若虛無假設不被拒絕則維持現狀)。同時，因為傳統的方法為直接控制錯誤拒絕失誤率，且此失誤率通常和最需考量的失誤相關。

在一些例子，如何建立假設檢定的問題可能會導致很不同的取樣條件。比如，在危險廢棄物場整治活動後，我們可能會問「場地是否已清潔乾淨？」。假設某人透過將整治過後所取得樣本的平均值和一門檻值比較來回答此問題。若門檻值接近背景值(額外污染不存在時依舊會有的值)，可能造成非常困難來「證明」場地為「安全」的。這是因為在這樣的環境下，即使經過有效的整治，也無法預期和門檻值能有很大的不同。處理這種問題比較好的方法或許是將整治後的場地和一參考場地(未整治場地)比較。

為避免在蒐集和分析樣本時花費過多，有時需要有所妥協。譬如，顯著水準設為 0.05；但是，可負擔的樣本數只能使檢定達到 0.4 的檢定力。可能

的妥協方式可能為放寬顯著水準，如，採用 $\alpha=0.10$ 、 0.15 ，或 0.2 。透過放寬錯誤拒絕失誤率，可使檢定力提升(也就是降低錯誤接受失誤率 β)。

摘譯註：電廠除役偵檢檢定設定主要依據 MARSSIM 手冊之規範，為民眾及環境安全考量，此檢定最需考量的錯誤拒絕失誤率應為：實際狀況為殘餘輻射超過門檻值，但檢定結果卻為殘餘輻射不超過門檻值的機率。因此，MARSSIM 手冊有關殘餘輻射檢定的虛無假設為殘餘輻射超過門檻值，對立假設為殘餘輻射不超過門檻值；所建議的錯誤拒絕失誤率(α)為 0.05 。