

行政院原子能委員會核能研究所

委託研究計畫期末報告

核電廠除役技術編彙 (II)

計畫編號：NL1080481

受委託機關(構)：財團法人中華民國輻射防護協會

計畫主持人：張似璫 博士

聯絡電話：0936252795

E-mail address：szulichang@rpa.org.tw

計畫參與人員：張似璫、陳瑋、顏麗娜

研究期程：中華民國 108 年 5 月 13 日至 108 年 11 月 30 日

研究經費：新臺幣 59 萬 2 千 5 百元

核研所聯絡人員：陳家貫

報告日期：108 年 11 月 15 日

目 錄

目 錄.....	i
圖目錄.....	iii
表目錄.....	iii
中文摘要.....	iv
英文摘要.....	v
壹、計畫背景與目標.....	1
貳、國內除役相關研究計畫成果.....	3
一、國內政府單位補助之除役相關研究計畫.....	3
二、台電公司委託之除役相關研究計畫.....	5
三、初步研析.....	6
參、國際除役技術資料.....	8
一、更新 IAEA、OECD/NEA、US-NRC、UK-NDA 資料庫.....	8
二、US-EPRI 除役相關出版品.....	11
三、其他除役相關出版品.....	13
肆、除役各階段視察員訓練要求與資格認證資訊.....	15
一、IMC 1248, APPENDIX F -核電廠除役視察員訓練要求與資格 認證.....	16
二、IMC 1248, APPENDIX G - 核電廠除役專案經理及審查員的 訓練要求與資格認證.....	23
三、初步研析.....	28
伍、蒐集拆除與拆卸技術資料及國際拆解規劃及案例.....	32
陸、其他成果.....	36

一、撰寫新書書摘	36
二、邀請學者專家辦理除役專題演講	37
柒、結論與未來工作建議	38
捌、資料來源	40
玖、附錄	41
附錄 一 國外核能電廠除役案例 - 比利時 BR 3 核能電廠	41
附錄 二 新書介紹-核設施除役之歷史發展與現況	51
附錄 三 新書介紹-除役計畫之風險管理	67
附錄 四 「雷射放射性除汙之應用技術開發」專題演講	74
附錄 五 「MARSAME 基本方法與應用經驗」專題演講	85
附錄 六 光碟片資料清單	94

圖目錄

圖 1 台電核一廠除役時程.....	2
圖 2 2019 年主辦之除役專題演講海報.....	37

表目錄

表 1 107-108 年國內除役相關研究計畫一覽表	3
表 2 95-107 年台電除役相關研究計畫清單	5
表 3 IAEA、OECD/NEA、US-NRC 新增資料清單	9
表 4 已下載之 EPRI 除役經驗相關報告清單	11
表 5 國際除役視察資料資料清單.....	15
表 6 拆除與拆卸技術資料.....	32
表 7 近三年重要參考資料.....	36

中文摘要

核一廠一號機運轉執照已於 107 年 12 月 5 日到期，我國核電廠正式進入除役階段，為協助主管機關原子能委員會奠定管制與審查的專業職能，並提供國內從事除役工作人員之參考，遂進行核電廠除役技術編彙工作。

本研究本年度為核電廠除役技術編彙計畫的第二年，資料蒐集方面共完成 1. 更新並擴充國內除役相關研究計畫成果；2. 更新 IAEA、OECD/NEA、US-NRC、UK-NDA 等國際組織除役相關資料；3. 新增 US-EPRI 除役相關資料；4. 更新除役專書目錄等工作。所蒐集的除役技術資料可做為日後建立除役知識管理系統之基礎。

本年度並針對美國 NRC 除役視察員和專案經理/審查員訓練要求與資格認證資訊、核設施拆除與拆卸技術資料以及國際拆解規劃及案例進行蒐集，以作為我國未來管制的參考。

此外，本研究於今年發表二篇除役新書書摘，並辦理二場除役專題演講有助於從事除役工作人員在繁忙之餘，更有效率的吸收新知。

英文摘要

The nuclear power plants in Taiwan has moved to the decommissioning phase from Dec. 2018. The regulatory control of decommissioning of power reactor is a new task to Atomic Energy Council (AEC). In order to help the regulatory authority to build the professional competence, the decommissioning references of nuclear power plant on all aspects is highly desirable.

This study is the 2nd year of the references compiled work. We have updated the domestic research reports and the IAEA, OECD/NEA, US-NRC, UK-NDA publications, and decommissioning reference book list concerning decommissioning of NPP based on the result of 2018's work. We further collect and compile the US-EPRI technical reports and few other international references. The results of this study could help the regulatory authority to build the decommissioning knowledge management system in the future.

This year's study focuses on collecting references on "Training Requirements and Qualification Journal for Decommissioning Inspectors" and "the international experiences on dismantling of nuclear facilities" to give some suggestions to the regulatory authority.

We also invite experts to write the executive summary of the recent references, and to give lectures on the topic of D&D (Decontamination and Decommissioning).

壹、計畫背景與目標

核電廠除役對國內而言為一全新課題，為協助主管機關奠定管制專業職能，遂進行核電廠除役技術彙編工作。核設施除役技術是由不少專業領域整合而成的技術，進行資料蒐集與彙編是一龐大且複雜的工作。107 年度核電廠除役技術編彙研究計畫完成了國內歷年除役相關研究計畫成果及核電相關國際組織除役相關出版品蒐集及初步研析工作。除役技術資料更新及擴充仍須持續進行，並進行整理分類工作，建置除役技術資料庫，以做為日後建立除役知識管理系統之基礎。

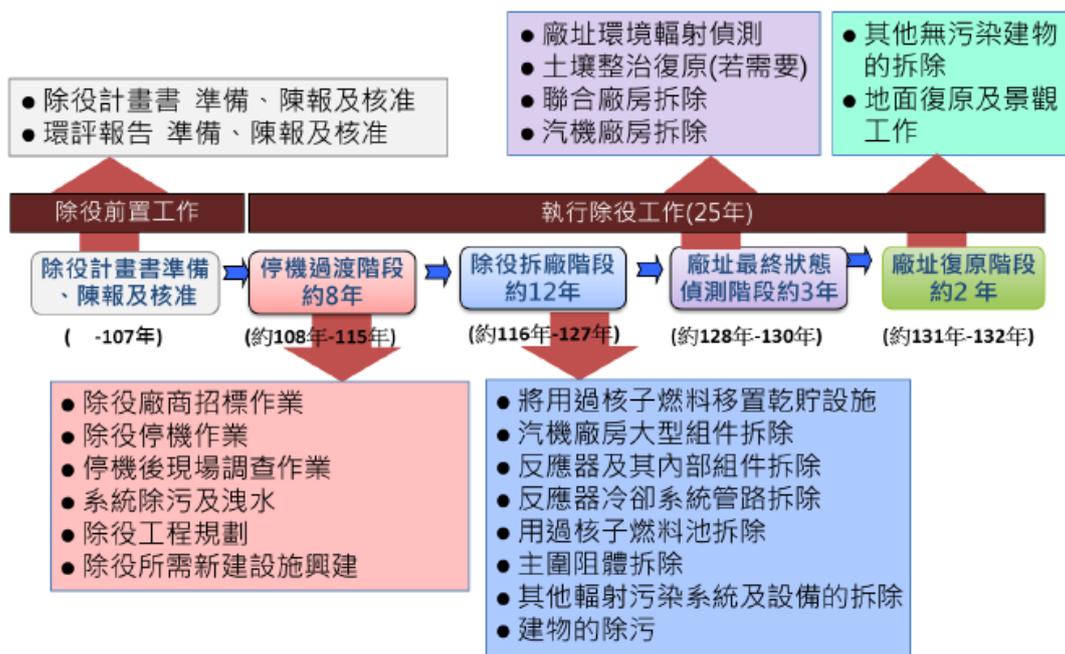
核一廠一號機運轉執照已於 107 年 12 月 5 日到期，正式進入除役期間。依據台電公司的核一廠除役策略規劃之除役時程為停機過渡階段(現更名為除役過渡階段)約 8 年、除役拆廠階段約 12 年、廠址最終狀態偵測階段約 3 年、廠址復原階段約 2 年共 25 年(如圖 1)。107 年度已針對停機過渡階段相關國際資訊進行蒐集，本年度則將為除役拆廠階段提早準備，針對國際上核電廠拆解規劃及案例進行蒐集。此外，為協助管制單位建立除役各階段(不包含爐心有燃料狀態)的視察員訓練需求及拆除審查等專業能力，將針對除役各階段視察員訓練要求與資格認證等文獻進行蒐集彙整，以作為我國未來管制的參考。

本研究奠基於107年之成果，持續精進核電廠除役技術編彙工作。本年度工作主要為：

1. 更新並擴充國內除役相關研究計畫成果
2. 更新並擴充國際除役技術資料

3. 蒐集除役各階段視察員訓練要求與資格認證等資訊
4. 蒐集國際拆解規劃及案例
5. 撰寫新書書摘
6. 邀請學者專家辦理除役專題演講

藉由執行上述工作將有助於國內核電廠除役知識管理系統之建置，並協助建立主管機關的管制與審查能力，及增加國內除役工作人員學習新知的效率。



資料來源：台電核電廠除役規劃

圖 1 台電核一廠除役時程

貳、國內除役相關研究計畫成果

國內核電廠除役計畫主要的委託單位為原子能委員會(含物管局及核能研究所)、國科會及科技部等政府單位，另外台電公司為核電廠除役工作之執行者，為完整蒐集國內除役相關研究成果，本年度進行 107 年所建立之國內歷年除役相關研究計畫成果彙編的更新工作，並增加台電公司委託之除役相關研究計畫清單。

一、國內政府單位補助之除役相關研究計畫

本研究沿用 107 年計畫之資料蒐集方法：利用 GRB 政府研究資訊系統(<https://www.grb.gov.tw/index>)，搭配原子能委員會資訊公開/研究計畫 (https://www.aec.gov.tw/category/資訊公開/研究計畫/219_314.html)進行國內歷年研究計畫成果資料庫更新。自 107 年至 108 年原子能委員會(含物管局及核能研究所)、國科會及科技部共計委託 35 個研究計畫，列於表 1，完整的研究計畫 excel 表格及所蒐集到的所有研究計畫報告電子檔另附於光碟片中。本研究提供 107 年所開發的搜尋引擎供使用者利用分類及關鍵字查詢，並可連結至研究報告全文。

表 1 107-108 年國內除役相關研究計畫一覽表

報告年度	計畫名稱	主持人	執行單位	委託單位
107	精進核電廠除役低放射性廢棄物安全審查研究	吳裕文	義守大學	物管局

107	精進用過核燃料室內乾式貯存設施安全審查技術之研究	許榮鈞	清大工科系	物管局
107	核能電廠安全管制法規與技術研究計畫(3/4)	廖俐毅	核管技支中心	原能會
107	核設施除役與輻射防護劑量評估驗證技術研究(2/4)	袁明程	核能研究所	原能會
107	107 年核能安全管制及安全度評估技術能力建立	曾永信	清大原科中心	原能會
107	噴砂除汙技術於核電廠除役之應用探討	曾永信	清大原科中心	原能會
107	除役期間停機過渡階段用過燃料池火災暨消防管制技術研究	馮玉明	清大工科系	原能會
107	除役中核能電廠之核子保安管制要求與國際實施現況研究	宋大崙	龍華科大化工與材料工程系	科技部
107	核電廠除役各階段公民參與模式及民意溝通之研究	梁世武	世新大學公共關係暨廣告學系	科技部
107	核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行	黃東益	政大公共行政學系	科技部
107	大範圍深穿透輻射遷移計算的技術與應用研發	許榮鈞	清大核工所	科技部
107	跨國核電廠除役管理個案分析及利害關係人之研究	張四明	臺北大學公共行政暨政策學系	科技部
107	龍華科技大學原子能學程與原子能人才培訓	周源卿	龍華科大化工與材料工程系	科技部
107	研析核電廠除役所涉法制基礎之比較研究	高仁川	台北大學法律學系	原能會
107	「核能電廠除役與室內乾貯安全審查技術之研究」有關除役部分之研究	裴晉哲	清大原科中心	原能會
107	運轉中核電廠廠內與廠外事件安全度評估模式之整合與精進	羅崇功	台電公司	國營會
107	核電廠除役技術編彙委託研究	張似璫	輻射防護協會	原能會
107	應用擴增實境(AR)推廣多元族群輻射教育之研究	古建國	北市大學應用物理暨化學系	科技部
107	大型核設施除役關鍵技術奠基計畫	程貴仁	核能研究所	原能會
108	除役作業場所輻射分析之審查技術研究	劉鴻鳴	清大原科中心	原能會
108	除役中核能電廠之適職方案管制要求與國際實施現況研究	宋大崙	龍華科大化工與材料工程系	科技部
108	核能電廠除役及風險量化之熱流分析技術研究與應用	梁國興	核能資訊中心	國營會
108	除役階段前期的水化學狀態對於結構組件腐蝕行為的影響評估	葉宗洸	清大工科系	科技部

108	核電廠除役利害關係群體意見探詢與溝通機制之設計及執行(II)	黃東益	政大公共行政學系	科技部
108	核設施除役後場址仍有處理/貯存設施者之輻射劑量管制及分析研究	蔡世欽	清大原科中心	科技部
108	核能異質銲接組件於除役過渡階段之加凡尼加速腐蝕評估	王朝正	臺科大機械工程系	科技部
108	108 年核電廠除役之室內乾貯安全分析平行驗證研究	許榮鈞	清大工科系	原能會
108	核三廠鄰近社區核安溝通之研究	楊永年	成大政治學系	科技部
108	核電廠除役階段之輻射安全管理與規劃技術研究	梁鑫京	核能研究所	原能會
108	核電廠除役管制各階段工程技術與分析應用研究	梁正宏	清大能環中心	原能會
108	除役期間設備與機具環境影響參數評估	林洸銓	清大工科系	原能會
108	108 年核能安全管制及安全度評估技術能力建立	曾永信	清大原科中心	原能會
108	原子能系統工程跨域整合發展計畫	施建樑	核能研究所	原能會
108	放射性廢棄物鹼熔分離技術之改善以測定 I-129 核種	趙君行	清大原科中心	科技部
108	小型光纖雷射在金屬表面進行放射性除污之應用技術開發	蔣安忠	清大原科中心	科技部

二、台電公司委託之除役相關研究計畫

為擴充國內除役相關計畫資料庫，本計畫蒐集台電公司所委託之核電廠除役相關研究計畫資料，以完整國內除役相關研究計畫資料庫。表 2 為目前所蒐集到之 95-107 年之清單。但由於台電公司基於智慧財產權之考量，無法提供研究成果供外界使用，因此，國內除役相關研究計畫資料庫中僅能提供台電相關研究計畫清單。

表 2 95-107 年台電除役相關研究計畫清單

計畫年度	計畫名稱
------	------

	除役組織與人員規劃
96	核一廠全廠區廠址現況及歷史資料初期蒐集與分析
97	核一廠全廠區廠址現況特性調查初步規劃與驗證試作
97	核一廠反應爐壓力容器及大型組件現況特性初期調查研究、運輸與處置方式之評估
100	核一廠低放射性固體廢棄物數量歷史資料蒐集及分析
102	國外核能資訊蒐集與分析研究案
102-107	核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作技術服務案
102-104	核一廠除役之大組件及混凝土結構拆解程序研究
102-104	GTCC 類廢棄物裝載至乾貯系統之規劃
102-104	核一廠用過核子燃料再取出之評估
102-104	核一廠除役成本評估模式建立
102-104	除役低放射性廢棄物容器評估
102-104	核一廠除役計畫資訊管理系統之研發及維護
103-105	核一廠反應器壓力槽及其內部組件中子活化分析評估案
103-105	本土植物之放射性核種污染土壤復育及其核種遷移係數評估案

三、初步研析

新增計畫主要來自物管局科技發展綱要計畫、原能會科技發展綱要計畫、原子能科技學術合作研究計畫、核研所除役相關科技發展計畫等，少數為向科技部申請的研究計畫，主題偏向除役實務相關，包含安全審查、管制法規、除汙技術、核安溝通、公民參與等研究主題。清華大學(15 個計畫)與核能研究所(5 個整合型大計畫)為其中最主要的執行單位，研究團隊均已成型。龍華科大、義守大學、政治大學、世新大學等其他學校亦有團隊投入核電廠除役相關研究。

台電公司後端處關於除役方面的研究計畫主要聚焦於核一廠除役計畫的編寫，近年的研究計畫全部包含於「核一廠除役許可申請及除役作業規劃工作技術服務案」中，由核能研究所執行該計畫，內容為以核一廠整個廠區為範圍(包含放射性污染之設備、結構及物質，及非屬放射性之部份均應進行規劃)，並依照我國「核子反應器設施除役計畫導則」規定，編寫「核一廠除役計畫」以進行除役許可申請。(備註：核一廠除役許可已於 108 年 7 月 12 日由原子能委員會核發。)

參、國際除役技術資料

核電廠除役是一項複雜的工程，除役技術更是由不少專業領域整合而成的技術，進行資料蒐集與彙編是一龐大且複雜的工作。107 年度核電廠除役技術編彙工作已系統性蒐集國際原子能總署(IAEA)、經濟合作暨發展組織轄下的核能安全總署(OECD/NEA)、美國核管會(US-NRC)及英國核設施除役機構 Nuclear Decommissioning Authority (UK-NDA)等國際組織在網路上公開之除役相關技術報告、安全指引及法規等資料，本年度進行資料庫的更新。美國電力研究院(US-EPRI)亦出版相當數量之除役相關研究報告，本年度將蒐集其相關出版品以擴充資料庫。除此之外，美國能源部(US-DOE)、法國原子能安全委員會(The French Nuclear Safety Authority, France-ASN)所出版的除役相關出版品，2018 年-2019 年出版之除役專書亦一併列入資料庫。

一、更新 IAEA、OECD/NEA、US-NRC、UK-NDA 資料庫

奠基於 107 年度計畫所進行之系統性蒐集 IAEA、OECD/NEA、US-NRC、UK-NDA)國際組織在網路上公開之除役相關技術報告、安全指引及法規等資料，本年度持續更新資料庫。表 3 為新增之資料清單，共計 38 筆。完整的資料清單 excel 表格及所蒐集到的報告電子檔另附於光碟片中。

未來核研所計畫開發知識管理系統(Knowledge Management, KM)以活用所蒐集到的資訊，本研究特別將 NRC 及 IAEA 相關 KM 系列資料納入資料庫中，列於表 3 之下半部，提供參考。

表 3 IAEA、OECD/NEA、US-NRC 新增資料清單

出版年	組織	編號	標題
2019	IAEA	Nuclear Energy Series No. NW-T-2.10	Decommissioning after a Nuclear Accident: Approaches, Techniques, Practices and Implementation Considerations
2019	IAEA	Nuclear Energy Series No. NF-T-3.3	Storing Spent Fuel until Transport to Reprocessing or Disposal
2019	IAEA	Safety Reports Series No. 95	Methodologies for Assessing the Induced Activation Source Term for Use in Decommissioning Applications
2019	IAEA	Safety Reports Series No. 97	Management of Project Risks in Decommissioning
2018	IAEA	Safety Reports Series No. 93	A Methodology for Establishing a National Strategy for Education and Training in Radiation, Transport and Waste Safety
2019	IAEA	Specific Safety Guide No. SSG-49	Decommissioning of Medical, Industrial and Research Facilities
2019	IAEA	IAEA TECDOC No. 1867	Handbook for Regulatory Inspectors of Nuclear Power Plants
2019	IAEA	IAEA TECDOC No. 1878	Demonstrating Performance of Spent Fuel and Related Storage System Components during Very Long Term Storage
2019	IAEA	Proceedings	Proceedings of an International Conference Held in Vienna, Austria, 15–19 Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors
2019	OECD/NEA	NEA No. 7460	Cost Benchmarking for Nuclear Power Plant Decommissioning
2010	OECD/NEA	NEA News, Vol. 28-2	Decontamination and dismantling of radioactive concrete structures
2011	OECD/NEA	NEA News, Vol. 29-1	International structure for decommissioning costing
2009	OECD/NEA	NEA News, Vol. 27-2	Cost estimation for decommissioning: a review of current practice
2009	OECD/NEA	NEA News, Vol. 27-1	Applying decommissioning experience to the design and operation of new nuclear power plants
2012	OECD/NEA	NEA News, Vol. 30-1	Radiological characterisation for decommissioning
2013	OECD/NEA	NEA News, Vol. 30-2	Estimation and comparability of nuclear facility decommissioning costs

2016	OECD/NEA	NEA News, Vol. 34-1	Nuclear power plant decommissioning costs in perspective
2017	OECD/NEA	NEA News, Vol. 34-2	Costing for decommissioning: Continuing NEA engagement
2018	NRC	NUREG/CR-7250	Thermal-Hydraulic Experiments Using A Dry Cask Simulator
2018	NRC	NUREG/CR-7251, ORNL/TM-2018/782	Margins for Uncertainty in the Predicted Spent Fuel Isotopic Inventories for BWR Burnup Credit
2019	NRC	NUREG/CR-7260	CFD Validation of Vertical Dry Cask Storage System
2012	NRC	RG 4.22	Decommissioning Planning During Operations
2012	NRC	RG 4.25	Assessment of Abnormal Radionuclide Discharges in Ground Water to the Unrestricted Area at Nuclear Power Plant Sites
知識管理系統相關出版品			
2016	NRC	NUREG/KM-0001, Revision 1	Three Mile Island Accident of 1979 Knowledge Management Digest
2016	NRC	NUREG/KM-0001, Supplement 1	Three Mile Island Accident of 1979 Knowledge Management Digest – Recovery and Cleanup
2014	NRC	NUREG/KM-0002, Revision 1	The Browns Ferry Nuclear Plant Fire of 1975 Knowledge Management Digest
2014	NRC	NUREG/KM-0003	Fire Protection and Fire Research Knowledge Management Digest, 2013
2013	NRC	NUREG/KM-0004	Fuel Behavior under Abnormal Conditions
2014	NRC	NUREG/KM-0005	2002 Davis-Besse Reactor Pressure Vessel Head Degradation Knowledge Management Digest
2013	NRC	NUREG/KM-0006	Fundamental Theory of Scientific Computer Simulation Review
2014	NRC	NUREG/KM-0007	NRC Program on Knowledge Management for Liquid-Metal-Cooled Reactors
2014	NRC	NUREG/KM-0008	Reflections on Fukushima: NRC Senior Leadership Visit to Japan, 2014
2016	NRC	NUREG/KM-0009	Historical Review and Observations of Defense-in-Depth
2016	NRC	NUREG/KM-0010	WASH-1400 – The Reactor Safety Study – The Introduction of Risk Assessment to the Regulation of Nuclear Reactors
2019	NRC	NUREG/KM-0011	Critical Heat Flux Data Used to Generate the 2006 Groeneveld Lookup Tables

2019	NRC	NUREG/KM-0013	Credibility Assessment Framework for Critical Boiling Transition Models: A generic safety case to determine the credibility of critical heat flux and critical power models, Draft for Comment
2018	IAEA	Proceedings	Summary of an International Conference Held in Vienna, 7–11 November 2016 Nuclear Knowledge Management Challenges and Approaches
2019	IAEA	IAEA TECDOC No. 1880	Planning and Execution of Knowledge Management Assist Visits for Nuclear Organizations

二、US-EPRI 除役相關出版品

蒐集美國電力研究院(EPRI)所出版的技術報告，蒐集方式為利用 EPRI 網站(網址：<https://www.epri.com/#/research/landing?lang=en-US>)，主要使用關鍵字「decommissioning」搜尋相關研究報告。由於 US-EPRI 並非政府機構，大多報告須付費，因此本年度所建立的 EPRI 除役相關研究報告清單提供連結網址供使用者決定是否購買，並下載免費報告來擴充國際除役技術資料庫。此外，EPRI 出版相當數量的核電廠除役相關經驗的報告，非常值得研讀以了解美國核電廠除役時的實務面。本年度蒐集自 1982 年迄今的 EPRI 報告共 189 筆，其中與電廠除役經驗相關的報告共 33 筆，目前已下載之除役經驗相關報告共 20 筆列於表 4，完整的資料清單 excel 表格及所蒐集到的所有報告電子檔另附於光碟片中。

表 4 已下載之 EPRI 除役經驗相關報告清單

報告編號/出版日期/頁數	題目
Product Id: TR-107917-V1 Date Published: Dec 31, 1997 Pages: 161	Yankee Rowe Decommissioning Experience Record: Volume 1

Product Id: TR-107917-V2 Date Published: Dec 18, 1998 Pages: 244	Yankee Rowe Decommissioning Experience Record: Volume 2
Product Id: TR-109036 Date Published: Dec 31, 1998 Pages: 98	Review of Experience with the EPRI DFD Process: Decontamination for Decommissioning of Reactor Coolant Systems and Plant Components
Product Id: TR-112877 Date Published: Nov 08, 1999 Pages: 116	Experience in the Testing and Application of the EPRI DfD Process: Decontamination for Decommissioning of Reactor Coolant Systems and Plant Components
Product Id: 1000920 Date Published: Oct 16, 2000 Pages: 228	Trojan Nuclear Power Plant Reactor Vessel and Internals Removal: Trojan Nuclear Plant Decommissioning Experience
Product Id: 1000908 Date Published: Oct 19, 2000 Pages: 48	Remediation of Embedded Piping: Trojan Nuclear Plant Decommissioning Experience
Product Id: 1000884 Date Published: Nov 30, 2000 Pages: 111	Decommissioning Technology Experience Reports
Product Id: 1003026 Date Published: Nov 05, 2001 Pages: 86	Decontamination of Reactor Systems and Contaminated Components for Disposal or Refurbishment: Developments and Experience with the EPRI DFD Chemical Decontamination Process
Product Id: 1003426 Date Published: Oct 28, 2002 Pages: 216	Summary of Utility License Termination Documents and Lessons Learned: Summary of License Termination Plan Submittals by Three Nuclear Power Plants
Product Id: 1009411 Date Published: Apr 28, 2004 Pages: 94	Decommissioning License Termination Plan Documents and Lessons Learned: Summary of LTPs for Two Reactors and Nuclear Regulatory Commission Safety Evaluation Reports for Three Nuclear Power Plant LTPs
Product Id: 1011733 Date Published: Dec 12, 2005 Pages: 104	Decommissioning San Onofre Nuclear Generating Station Unit 1 (SONGS-1) Reactor Vessel Internals Segmentation
Product Id: 1011734 Date Published: May 04, 2005 Pages: 126	Maine Yankee Decommissioning - Experience Report: Detailed Experiences 1997-2004
Product Id: 1013510 Date Published: Nov 15, 2006 Pages: 84	Decommissioning Planning Experiences from US Utilities
Product Id: 1013511 Date Published: Nov 20, 2006 Pages: 106	Connecticut Yankee Decommissioning Experience Report
Product Id: 1015122 Date Published: Jul 10, 2007 Pages: 86	Reactor Internals Segmentation Experience Report

Product Id: 1015121 Date Published: Dec 19, 2007 Pages: 90	Rancho Seco Nuclear Generating Station Decommissioning Experience Report
Product Id: 1015501 Date Published: Mar 18, 2008 Pages: 64	Rancho Seco Reactor Vessel Segmentation Experience Report
Product Id: 1016773 Date Published: Dec 04, 2008 Pages: 136	San Onofre Nuclear Generating Station - Unit 1 Decommissioning Experience Report
Product Id: 1023456 Date Published: Jul 08, 2011 Pages: 56	Power Reactor Decommissioning Experience
Product Id: 1025663 Date Published: Jun 06, 2012 Pages: 2	EDF Implements U.S. Technologies and Lessons Learned to Optimize Nuclear Decommissioning Projects

三、其他除役相關出版品

本年度另外蒐集美國能源部(US-DOE)、法國原子能安全委員會(The French Nuclear Safety Authority, France-ASN)所出版的除役相關出版品，2018年-2019年出版之除役專書亦一併列入資料庫。相關資料清單如下，所蒐集到的資料電子檔另附於光碟片中

■ US-DOE除役相關報告

- DOE (1982)_Decommissioning of the Shippingport Atomic Power Station
- DOE (1984)_SHIPPINGPORT STATION DECOMMISSIONING PROJECT Overview and Justification
- DOE (1990)_Nuclear Research and Development Shippingport Decommissioning--How Applicable Are the Lessons Learned

■ France-ASN 除役相關出版品

- ASN policy concerning the decommissioning (2009)
- ASN Annual Report 2012, Ch.15-Safe decommissioning of basic nuclear installations
- France Report 2013 - RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND DECOMMISSIONING IN FRANCE
- France Report 2015 - RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT AND DECOMMISSIONING IN FRANCE

■ 2018年-2019年出版之除役專書

書 名	作 者	出版年	頁數
The Technological and Economic Future of Nuclear Power	Reinhard Haas (Editor), Lutz Mez (Editor), Amela Ajanovic (Editor)	2019	385
Beyond Decommissioning: The Reuse and Redevelopment of Nuclear Installations	Michele Laraia (Author)	2019	369
Nuclear Decommissioning and Society: Public Links to a New Technology	Martin J. Pasqualetti (Editor)	2019	258
Decommissioning Planning (US NRC) (2018 Edition)	The Law Library (Author)	2018	271
Nuclear Decommissioning Funds (US IRS) (2018 Edition)	The Law Library (Author)	2018	103

肆、除役各階段視察員訓練要求與資格認證資訊

基於核一廠已進入除役期間，原子能委員會核能管制處對於除役期間之視察相關資訊需求增加，本研究特別針對核電廠除役的監管工作，以美國核管會為主進行資料蒐集(如表 5)，提供給管制單位參考。並針對視察員訓練要求與資格認證部分(IMC-1248 APPENDIX. F/G)進行文獻初步研析。

表 5 國際除役視察資料資料清單

出版時間	組織或作者	編號	標 題
2013.04.19	NRC	IMC 1248	Formal Qualifications Program for Federal and State Material and Environmental Management Programs
2016.10.07	NRC	IMC 1248, APPENDIX F	Training Requirements and Qualification Journal for Decommissioning Inspectors
2016.01.13	NRC	IMC 1248, APPENDIX G	Training Requirements and Qualification Journal for Decommissioning Project Managers/Technical Reviewers
2017.03.28	NRC	IMC 2515	Light-Water Reactor Inspection Program - Operations Phase
2016.02.01	NRC	IMC 2515, APPENDIX G	Baseline Inspection Guidance for Power Reactors Preparing for Transition to the Decommissioning Phase
2018.03.06	NRC	IMC 2561	Decommissioning Power Reactor Inspection Program
2008.07.29	NRC	IMC 2602	Decommissioning Oversight and Inspection Program for Fuel Cycle Facilities and Materials Licensees
1996.11.12	NRC	IMC 2605	Decommissioning Procedures for Fuel Cycle and Materials Licensees (IMC 2605 has been deleted and incorporated into IMC 2602)
2004.02.03	NRC	IP 69013	Research and Test Reactor Decommissioning
1997.08.11	NRC	IP 71801	Decommissioning Performance and Status Review at Permanently Shutdown Reactors

2014.09.04	NRC	IP 82401	Decommissioning Emergency Preparedness Scenario Review and Exercise Evaluation
2014.09.04	NRC	IP 82501	Decommissioning Emergency Preparedness Program Evaluation
2002.07.29	NRC	IP 87104	Decommissioning Inspection Procedure for Materials Licensees
2002.03.19	NRC	IP 87654	Uranium Mill Site Decommissioning Inspection
2002.07.03	NRC	IP 88104	Decommissioning Inspection Procedure For Fuel Cycle Facilities
2019	IAEA	TECDOC No. 1867	Handbook for Regulatory Inspectors of Nuclear Power Plants
2001	P. W. Harris, NRC	INIS-FR--933	United States nuclear regulatory commission program for inspection of decommissioning nuclear power plants
1999	I F Robinson	J. Radiol. Prot. Vol. 19 No. 3	A nuclear inspector's perspective on decommissioning at UK nuclear sites

一、IMC 1248, APPENDIX F -核電廠除役視察員訓練要求與資格認證

IMC 1248, APPENDIX F - Training Requirements and Qualification Journal for Decommissioning Inspectors 為核電廠除役視察員訓練要求與資格認證之手冊。主要內容摘述如下：

➤ 除役視察員須具備之能力

- a. 了解達成 NRC 管制目標之法規基礎及程序 (Understand the legal basis and the processes used for achieving the NRC's regulatory objectives)
- b. 了解 NRC 的組織結構、任務、目的及目標 (Acquire a fundamental understanding of the NRC's organizational structure, mission, goals, and objectives)

- c. 了解機構所握有之職權(Understand the basis for the authority of the agency)
- d. 了解如何建立程序以達成管制目標 (Understand the processes established to achieve the regulatory objectives)
- e. 具備蒐集、分析及整合資訊所需之技術及能力以獲得管制結論 (Master the techniques and skills needed to collect, analyze, and integrate information using a safety and security focus to develop a supportable regulatory conclusion)
- f. 具備獨自或團隊執行監管活動之能力(Have the personal and interpersonal skills to carry out assigned regulatory activities, either individually or as a member of a team)

規劃之課程可分為**推薦線上課程**(Recommended Online Training Courses)、**必修訓練課程**(Required Training Courses)、**專業訓練課程**(Specialized Training Courses (optional))三大類，必須完成所有的必修訓練課程才能獲得除役視察員的資格，此外視工作需要選修專業訓練課程，課程名稱如下：

➤ **推薦線上課程**

- Computer Security Awareness
- Ethics Overview for Employees
- Ethics Training for NRC Employees
- Annual Personally Identifiable Information (PII) Responsibilities
- Notification and Federal Employee Antidiscrimination and Retaliation Act of 2002(No FEAR Act)
- Information Security (INFOSEC) Awareness Training

➤ 必修訓練課程

- Conducting Inspections Course (G-105)
- Inspection Procedures (G-108)
- Root Cause/Incident Investigation Workshop (G-205)
- Gathering Information for Inspectors through Interviews (Course 135)
- Effective Communication for NRC Inspectors (Course 100)
- Site Access Training (H-100) or Site Access Refresher Training (H-101)
- MARSSIM: Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (H-121)
- Transportation of Radioactive Material Course (H-308)
- Environmental Monitoring for Radioactivity (H-111)
- NRC Materials Control & Security Systems & Principles (S-201)
- Advanced Health Physics (H-201)

➤ 專業訓練課程

- Characterization and Planning for Decommissioning (H-115)
- MARSAME: Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment (H-120)
- Fundamental Health Physics (H-122)
- Respiratory Protection (H-311)
- Internal Dosimetry and Whole Body Counting (H-312)
- Health Physics Statistics (H-401)
- RESRAD Training Workshop (H-410)
- RESRAD-OFFSITE Training Workshop (H-411)

- Air Sampling for Radioactive Material (H-119)
- Visual Sample Plan (H-500)
- Evaluation of Dose Modeling for Compliance with Radiological Criteria for License Termination (C-1026-webbase)
- Licensing Practices and Procedures Course (G-109)

合格的視察員每 24 個月必須完成 24 小時的繼續教育訓練 (Refresher Training)，內容可為輻射安全或保安主題，例如保健物理專題(H-401)、NRC 技術訓練課程等。繼續教育訓練內容由視察員的直屬上司決定。對於已獲得 IMC 1246 - Formal Qualification Programs in the Nuclear Material Safety and Safeguards Program Area 認證之視察員，由 IMC 1246 視察員過渡至 IMC 1248，視察員須符合新的繼續教育訓練要求之規定時限可延長至多 1 年。

此外，除役視察員應依序完成下列個人學習活動 (Individual Study Activity, ISA) 以及在職訓練活動 (On-the-Job Activity, OJT)

- (ISA-1) History and Organization of the U.S. Nuclear Regulatory Commission
- (ISA-2) Overview of Title 10 of the Code of Federal Regulations
- (ISA-3) Generic Communications
- (ISA-4) NRC Inspection Manual Chapters (IMC), Inspection Procedures (IP), and other References
- (ISA-5) Open, Collaborative Working Environment & Ways to Raise Differing Views
- (ISA-6) Review of Significant Events at Material Licensees
- (ISA-7) The NRC's Response to an Emergency at a Nuclear Facility

- (ISA-8) The Enforcement Program
- (ISA-9) Allegations
- (ISA-10) Inspector Objectivity, Protocol, and Professional Conduct
- (ISA-11) The Office of Investigations
- (ISA-12) Understanding How the Commission Operates
- (ISA-13) NRC Interagency Agreements
- (ISA-14) Interaction with the Public
- (ISA-15) Contacts with the Media
- (ISA-16) The Freedom of Information Act and the Privacy Act
- (ISA-17) Entrance and Exit Meetings
- (ISA-18) Documenting Inspection Findings
- (ISA-19) Fitness-for-Duty Rule
- (OJT-1) Inspection Accompaniments at Complex Materials Facilities
- (OJT-2) Inspection Accompaniments at Reactor Facilities
- (OJT-3) Documenting Inspection Issues

視察員須完成上述所有訓練，並填寫下表，經考核後得以授予除役視察員證書(表格及證書摘錄自 IMC 1248, APPENDIX F)。

Decommissioning Inspector Signature Cards and Certification

Decommissioning Inspector's Name: _____	Employee Initials/Date	Immediate Supervisor's Signature/Date
<u>A. Required (R) and Specialized (S) Training (title and course number)</u>		
Training: Conducting Inspections (G-105) (R)		
Training: Inspection Procedures (G-108) (R)		
Training: Root Cause/Incident Investigation Workshop (G-205) (R)		
Training: Gathering Information for Inspectors through Interviews (Course 135) (R)		
Training: Effective Communication for NRC Inspectors (Course 100) (R)		
Training: Site Access Training (H-100) (R)		
Training: MARSSIM: Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual Course (H-121) (R)		
Training: Transportation of Radioactive Materials Course (H-308) (R)		
Training: Environmental Monitoring for Radioactivity Course (H-111) (R)		
Training: Health Physics Technology (H-201) (R)		
<u>B. Individual Study Activities</u>		
ISA-1 History and Organization of the U.S. Nuclear Regulatory Commission		
ISA-2 Code of Federal Regulations		
ISA-3 Generic Communications		
ISA-4 NRC Inspection Manual Chapters (IMC)		
ISA-5 Open, Collaborative Working Environment & Ways to Raise Differing Views		
ISA-6 Review of significant events at facilities being decommissioned		
ISA-7 The NRC Response to an Emergency at a Nuclear Facility		
ISA-8 The Enforcement Program		
ISA-9 Allegations		

Decommissioning Inspector's Name: _____	Employee Initials/Date	Immediate Supervisor's Signature/Date
ISA-10 Inspector Objectivity, Protocol, and Professional Conduct		
ISA-11 The Office of Investigations		
ISA-12 Understanding How the Commission Operates		
ISA-13 NRC Interagency Agreements		
ISA-14 Interaction with the Public		
ISA-15 Contacts with the Media		
ISA-16 The Freedom of Information Action and the Privacy Act		
ISA-17 Entrance and Exit Meetings		
ISA-18 Documenting Inspection Findings		
ISA-19 Fitness-for-duty Rule		
<u>C. On-the-Job Training Activities</u>		
OJT-1 Inspection Accompaniments at Complex Materials Facilities		
OJT-2 Inspection Accompaniments at Reactor Facilities		
OJT-3 Documenting Inspection Issues		

Decommissioning Inspector Certification

(name)

has successfully completed all of the requirements
to be certified as a

DECOMMISSIONING INSPECTOR

Immediate Supervisor Signature: _____ Date: _____

二、IMC 1248, APPENDIX G - 核電廠除役專案經理及審查員的訓練要求與資格認證

IMC 1248, APPENDIX G - Training Requirements and Qualification Journal for Decommissioning Project Managers/Technical Reviewers 為核電廠除役專案經理及審查員的訓練要求與資格認證手冊。主要內容摘述如下：

➤ 除役專案經理/審查員須具備之能力

- a. 了解達成 NRC 管制目標之法規基礎及程序 (Understand the legal basis and the processes used for achieving the NRC's regulatory objectives)
- b. 了解 NRC 的組織結構、任務、目的及目標 (Acquire a fundamental understanding of the NRC's organizational structure, mission, goals, and objectives)
- c. 了解機構所握有之職權 (Understand the basis for the authority of the agency)
- d. 了解如何建立程序以達成管制目標 (Understand the processes established to achieve the regulatory objectives)
- e. 具備蒐集、分析及整合資訊所需之技術及能力以獲得管制結論 (Master the techniques and skills needed to collect, analyze, and integrate information using a safety and security focus to develop a supportable regulatory conclusion)

- f. 具備獨自或團隊執行監管活動之能力(Have the personal and interpersonal skills to carry out assigned regulatory activities, either individually or as a member of a team)

規劃之課程可分為**推薦線上課程**(Recommended Online Training Courses)、**必修訓練課程**(Required Training Courses)、**進階訓練課程**(Specialized Training Courses (optional))三大類，必修訓練課程為獲取除役專案經理/審查員資格的最低要求，此外視工作需要選修進階訓練課程，與物料安全相關之人員進階課程中的 NRC Materials Control & Security Systems & Principles (S-201)為避選課程，課程名稱如下，：

- **推薦線上課程**(與視察員相比增加之項目以螢光筆標記)
- Computer Security Awareness
 - Ethics Overview for Employees
 - Ethics Training for NRC Employees
 - Allegations Training
 - Annual Personally Identifiable Information (PII) Responsibilities
 - Notification and Federal Employee Antidiscrimination and Retaliation Act of 2002(No FEAR Act)
 - Notification and Federal Employee Antidiscrimination and Retaliation Act of 2002(No FEAR Act)
 - Agencywide Documents Access and Management System (ADAMS) Overview for NRC Staff
 - Information Security (INFOSEC) Awareness Training

➤ 必修訓練課程

- Licensing Practices and Procedures Course (G-109)
- Characterization and Planning for Decommissioning (H-115)
- Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation (MARSSIM) (H-121)
- Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment (MARSAME) (H-120)
- Fundamental Health Physics I and II (H-122)
- Visual Sample Plan (H-500)
- OSHA Indoctrination Course (G-111) Conducting Inspections Course (G-105)

➤ 專業訓練課程(選修)

- Site Access Training (H-100) or Site Access Refresher Training (H-101)
- Inspection Procedures (G-108)
- Environmental Monitoring for Radioactivity (H-111)
- Air Sampling for Radioactive Materials (H-119)
- NRC Materials Control & Security Systems & Principles (S-201)
- Root Cause/Incident Investigation Workshop (G-205)
- Transportation of Radioactive Materials (H-308)
- Respiratory Protection (H-311)
- Internal Dosimetry and Whole Body Counting (H-312)
- Health Physics Topics (H-401)
- RESRAD Training Workshop (H-410)
- RESRAD-OFFSITE Training Workshop (H-411)
- Media Training Workshop
- Effective Communication for NRC Inspectors

- Gathering Information for Inspectors Through Interviews
- Facility Decommissioning -Argonne National Laboratory Course

合格的專案經理/審查員每 24 個月必須完成 24 小時的繼續教育訓練(Refresher Training)，內容可為輻射安全或保安主題，例如保健物理專題(H-401)、NRC 技術訓練課程等。繼續教育訓練內容由視察員的直屬上司決定。對於已獲得 IMC 1246 - Formal Qualification Programs in the Nuclear Material Safety and Safeguards Program Area 認證之視察員，由 IMC 1246 視察員過渡至 IMC 1248，視察員須符合新的繼續教育訓練要求之規定時限可延長至多 1 年。

此外，除役專案經理/審查員應依序完成下列個人學習活動 (Individual Study Activity, ISA) 以及在職訓練活動 (On-the-Job Activity, OJT)

- (ISA-1) History and Organization of the U.S. Nuclear Regulatory Commission
- (ISA-2) Overview of Title 10 of the Code of Federal Regulations
- (ISA-3) Generic Communications
- (ISA-4) NRC Inspection Manual Chapters (IMC), Inspection Procedures (IP), and other References
- (ISA-5) Differing Views Programs
- (ISA-6) The NRC's Response to an Emergency at a Nuclear Facility
- (OJT-1) Inspection Accompaniments
- (OJT-2) Licensing Case Work
- (OJT-3) Decommissioning Process

完成上述所有訓練，並填寫下表，經考核後得以授予除役專案經理/審查員證書。(表格及證書摘錄自 IMC 1248, APPENDIX G)

Decommissioning PM/TR Signature Cards and Certification

Decommissioning Project Manager or Technical Reviewer's Name: _____	Employee Initials/Date	Immediate Supervisor's Signature/Date
<u>A. Required (R) and (S) Specialized Training (title and course number)</u>		
Training: Licensing Practices and Procedures Course (G-109) (R)		
Training: MARSSIM: Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual Course (H-121) (R)		
Training: Fundamental Health Physics I and II (H-122) (R)		
Training: MARSAME: Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment (H-120) (R)		
Training: Visual Sample Plan (H-500) (R)		
Training: OSHA Indoctrination Course (G-111) (R)		
Training: Characterization and Planning for Decommissioning (H-115) (S)		
Training: RESRAD Training Workshop (H-410) (S)		
Training: RESRAD-OFFSITE Training Workshop (H-411) (S)		
Training: Facility Decommissioning -Argonne National Laboratory Course (S)		
Training: Evaluation of Dose Modeling for Compliance with Radiological Criteria for License Termination (C-1026-webbase) (S)		
<u>B. Individual Study Activities</u>		
ISA-1 History and Organization of the U.S. Nuclear		
ISA-2 Code of Federal Regulations		
ISA-3 Generic Communications		
ISA-4 NRC Inspection Manual Chapters (IMC)		
ISA-5 Differing Professional Opinion		
ISA-6 The NRC Response to an Emergency at a Nuclear Facility		

Decommissioning Project Manager or Technical Reviewer's Name: _____	Employee Initials/Date	Immediate Supervisor's Signature/Date
C. <u>On-the-Job Training Activities</u>		
OJT-1 Inspection Accompaniments		
OJT-2 Licensing Case Work		
OJT-3 Decommissioning Process		
OJT-		
OJT-		

Decommissioning Project Manager/Technical Reviewer Certification

_____ (name)

has successfully completed all of the requirements to be certified as a

DECOMMISSIONING PROJECT MANAGER/TECHNICAL REVIEWER

Immediate Supervisor Signature _____ Date: _____

三、初步研析

除役期間輻射安全為非常重要的課題，由上列訓練課程可看到視察員及專案經理/審查員必選修課程中均包含基礎保健物理(H-122)及應用保健物理(H-201)，而 MARSSIM、RESRAD 等其他訓練課程的內容，與保健物理亦多有關聯。考量我國除役階段的視察員與運轉階段的視察任務有所差異，保健物理的基礎較為不足，因此建議增加保健物理(或稱輻射安全)與輻射度量等相關課程。以下列出美國核管

會「H-122 基礎保健物理」及「H-201 應用保健物理」訓練課程大綱及講義連結，作為規劃我國核電廠除役視察員保健物理相關訓練課程之參考。

■ **H-122 - 基礎保健物理(Basic Health Physics)**

- 01 - Introduction to Radioactivity and Radiation. (147 page(s), 1/18/2011)
- 02 - Interaction of Charged Particles with Matter. (96 page(s), 3/1/2011)
- 03 - Interaction of Photons with Matter. (110 page(s), 7/5/2011)
- 04 - Radiation Safety Principles. (35 page(s), 8/17/2011)
- 05 - Radiation Detectors - Overview. (26 page(s), 7/6/2010)
- 06 - Gas Detectors. (99 page(s), 9/15/2010)
- 07 - Solid Scintillators. (108 page(s), 1/6/2010)
- 08 - Semiconductor Detectors. (164 page(s), 1/6/2010)
- 09 - Survey Instruments. (66 page(s), 10/25/2010)
- 10 - Counting Statistics. (81 page(s), 9/30/2010)
- 11 - Decay Rates. (52 page(s), 10/25/2010)
- 12 - Dosimetric Quantities and Units. (91 page(s), 10/25/2010)
- 13 - Calibration of Survey Meters and Measurements of Contamination. (171 page(s), 1/18/2011)
- 14 - Radiation Surveys. (47 page(s), 4/30/2010)
- 15 - Effects of Radiation at the Cellular Level. (131 page(s), 10/25/2010)
- 16 - Early (Acute) Effects of Radiation. (128 page(s), 10/25/2010)
- 17 - Late (Delayed) Effects of Radiation. (117 page(s), 10/25/2010)
- 18 - Natural Background and Man-Made Radioactivity. (116 page(s), 2/28/2011)

- 19 - External Dosimetry. (65 page(s), 1/18/2011)
- 20 - Film Dosimetry. (52 page(s), 3/2/2011)
- 21 - Thermoluminescent Dosimeters. (100 page(s), 3/1/2011)
- 22 - Gamma Spectroscopy Overview. (71 page(s), 6/1/2011)
- 23 - OSL Dosimeters. (86 page(s), 2/11/2011)
- 24 - Gamma Spectrum Features. (66 page(s), 2/4/2011)
- 25 - Neutron Sources. (64 page(s), 10/13/2010)
- 26 - Interaction of Neutrons with Matter. (52 page(s), 2/4/2011)
- 27 - Neutron Detectors. (125 page(s), 10/13/2010)
- 28 - Neutron Activation and Activation Analysis. (57 page(s), 11/26/2009)
- 29 - Air Sampling Introduction. (80 page(s), 10/25/2010)
- 30 - Air Sampling Equations. (47 page(s), 7/5/2011)
- 31 - Liquid Scintillation Counting. (87 page(s), 6/21/2011)
- 32 - Shielding Radiation. (112 page(s), 7/5/2011)
- 33 - NRC Regulations and Guidance for Internal Dosimetry. (32 page(s), 1/18/2011)
- 34 - Radionuclide Pathways. (94 page(s), 4/22/2010)
- 35 - Radioactive Waste. (151 page(s), 7/5/2011)
- 36 - Medical Sources of Radiation. (95 page(s), 7/31/2009)
- 37 - Three Selected Accidents. (49 page(s), 1/18/2011)

- **H-201 – 應用保健物理(Health Physics Technology)**
 - 00 - Math Review. (62 page(s), 9/19/2011)
 - 01 - Health Physics Fundamentals. (79 page(s), 9/19/2011)
 - 02 - Radiation Protection Philosophy & Sources of External Radiation. (42 page(s), 9/19/2011)

- 03 - Radioactive Decay & Specific Activity. (38 page(s), 9/19/2011)
- 04 - Series Decay & Equilibrium & Neutron Activation. (39 page(s), 9/19/2011)
- 05 - Shielding - Gamma Constant - Point Source/Inverse Square - Line Source, Area Source & Volume Source. (113 page(s), 9/19/2011)
- 06 - Effective Dose Equivalent (EDE) for External Radiation Exposure - Submersion Dose - Skin Dose. (66 page(s), 9/19/2011)
- 07 - Mean Life. (46 page(s), 9/19/2011)
- 08 - ALARA. (54 page(s), 9/19/2011)
- 09 - Detectors and Instruments. (54 page(s), 9/19/2011)
- 10 - Contamination Surveys & Monitoring. (34 page(s), 9/19/2011)
- 11 - Internal Dosimetry - Effective Half-Life - Bioassay - Air Sampling. (76 page(s), 9/19/2011)
- 12 - ICRP-26 30 & 10 CFR Part 20, Appendix B, Table 1. (42 page(s), 9/19/2011)
- 13 - Lung Model & Particle Size. (36 page(s), 9/19/2011)
- 14 - Intake Retention Fractions. (35 page(s), 9/19/2011)
- 15 - EPA Federal Guidance Report No 11 & Effluents. (29 page(s), 9/19/2011)
- 16 - MIRD & Embryo/Fetal Dose. (86 page(s), 9/19/2011)
- 17 - External Dose Evaluation & Reconstruction. (52 page(s), 9/19/2011)

伍、蒐集拆除與拆卸技術資料及國際拆解規劃及案例

除役拆廠階段最主要的工作就是除污與拆除，拆除部分包括金屬組件拆除(dismantling)與分割(segmentation)以及混凝土結構切割(cutting)與拆卸(demolition)(註 1：名詞翻譯摘錄自「國際核電廠除役資訊整合專題研究報告」，邱太銘 2016。Dismantling 亦翻譯為拆解，建議國內未來統一翻譯，減少混淆)，核設施拆除相關工作需要了解各種拆除與拆卸技術。本研究針對國際上各種拆除與拆卸技術進行資料蒐集，共蒐集 41 份拆除與拆卸技術資料，部分清單列於表 6 中，完整的資料清單 excel 表格及所蒐集到的報告電子檔另附於光碟片中。其中 Laraia 於 2012 年出版的 *Nuclear Decommissioning-Planning, Execution and International Experience* 一書中的第 12 章，及「國際核電廠除役資訊整合專題研究報告」4.2 節針對各種除役拆除與拆卸技術進行整理，非常適合作為入門參考資料。

表 6 拆除與拆卸技術資料

出版年	編號	標題
IAEA		
2001	Technical Reports Series No. 401	Methods for the Minimization of Radioactive Waste from Decontamination and Decommissioning of Nuclear Facilities
1999	Technical Reports Series No. 395	State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities
2005	Technical Reports Series No. 440	State of the Art Technology for Decontamination and Dismantling of Nuclear Facilities
OECD/NEA		
2002	NEA No. 3714	The Decommissioning and Dismantling of Nuclear Facilities
2006	NEA/RWM/WP DD(2006)10	A Map on International Activities on Decommissioning and Dismantling

2009	NEA/RWM/WP DD(2008)12/REV1	A Map of International Activities on Decommissioning and Dismantling
2010	NEA/RWM/WP DD(2009)9	A Map of International Activities on Decommissioning and Dismantling
2010	NEA/RWM/WP DD(2010)10	A Map of International Activities on Decommissioning and Dismantling
2011	NEA/RWM/CP D(2010)3	DECONTAMINATION AND DISMANTLING OF RADIOACTIVE CONCRETE STRUCTURES
2011	NEA/RWM/R(2011)1	Decontamination and Dismantling of Radioactive Concrete Structures
2012	NEA/RWM/WP DD(2012)4	A Map of International Activities on Decommissioning and Dismantling
2012	NEA/RWM/WP DD(2012)5	Summary of the Special Seminar Commemorating the 10th Anniversary of the OECD/NEA Working Party on Decommissioning and Dismantling
2010	NEA News, Vol. 28-2	Decontamination and dismantling of radioactive concrete structures
US-EPRI		
2001	1003029	Decommissioning: Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation
2007	1015122	Reactor Internals Segmentation Experience Report
2012	1026514	Proceedings: The 10th EPRI International Decommissioning and Radioactive Waste Management Workshop
2013	3002001797	Proceedings: The 11th EPRI International Decommissioning and Radioactive Waste Workshop: In collaboration with Sogin S.p.A.
2016	3002007087	Proceedings: 14th EPRI International Nuclear Power Plant Decommissioning Workshop
其他		
Laraia (2012)_Nuclear Decommissioning-Planning, Execution and International Experience_Ch12		
105 年_國際核電廠除役資訊整合專題研究報告_邱太銘_核資中心_Ch 4.2		
A Novel Approach to Spent Fuel Pool Decommissioning, 2011		
Bluegrass_Diamond wire cuts		
洪毓翔(2017)_106 年除役訓練_機械切割		
陳勝朗(2017)_核電廠退役作業遙控切割及除汙技術與設備系統		
羅文璉(2011)_核設施混凝土結構體拆除及減廢實務經驗		
102 年_核設施拆除方式及技術發展之國際資訊研究_周鼎 張淑君 黃志中等_核研所		
103 年_拆除方式技術能力與安全評估研究_張淑君 吳帝頡_核研所		

104 年_核能電廠除役計畫拆除與除污研究之審查驗證研究_蔣安忠等_清華原科中心

106 年_核反應器切割拆解最佳化設計_陳湘鳳_台大機械

本年度並特別針對國際上核電廠拆解規劃及案例進行蒐集。資料清單如下，資料電子檔另附於光碟片中。其中「國際核電廠除役資訊整合專題研究報告第七章-國外核能電廠除役案例」提供美國、歐洲、日本等國包含拆除規劃等資訊的除役案例。摘錄報告中比利時 BR 3 核能電廠的案例於附錄一以供參考，並規劃於明年初邀請陳勝朗顧問進行「西班牙 José Cabrera 核電廠除役案例」之專題演講。

■ 國際拆解規劃及案例資料清單

- EPRI 1000920 (2000)_Trojan Nuclear Power Plant Reactor Vessel and Internals Removal
- EPRI 1003029 (2001)_Decommissioning-Reactor Pressure Vessel Internals Segmentation
- EPRI 1003426 (2002)_Lessons Learned Summary of LTP Submittals by Three NPP
- EPRI 1009411 (2004)_Summary of LTPs for Two Reactors and NRC Safety Evaluation Reports for Three NPP LTPs
- EPRI ppt (2015)_Lessons Learned from Demolition
- German-Japanese Symposium on Technological and Educational Resources on the Decommissioning of Nuclear Facilities, 2015
- 邱太銘 (2016)_國際核電廠除役資訊整合專題研究報告 - Ch 4.2 & Ch.7
- 2017-3-5_赴瑞典參加核電廠除役技術訓練及參訪 SKB 核設施、Barseback 核電廠_INER-F1159

- 陳勝朗 (2019)_圖說西班牙 José Cabrera 核電廠除役案例
- 20191028_2019 台日除役技術交流研討會

陸、其他成果

一、撰寫新書書摘

為善加利用除役技術編彙工作之成果，自所蒐集的資料中篩選出近3年重要參考資料，邀請國內經驗豐富之專家學者，協助進行資料的研讀及分析，撰寫書摘並提供個人心得，供國內除役工作人員參考，藉由這項工作，將有助於從事除役工作人員在繁忙之餘，能更有效率的吸收新知。

表7為近三年重要參考資料，篩選標準為專書性質或為較宏觀之技術報告。目前已邀請原能會輻防處退休處長尹學禮先生撰寫完成 *Nuclear Decommissioning- Its History, Development, and Current Status* 及 *Management of Project Risks in Decommissioning* 兩書之書摘。書摘成果列於附錄二、三中。

表 7 近三年重要參考資料

編號	書名	作者	出版年	頁數
1	Advances and Innovations in Nuclear Decommissioning	Michele Laraia (Editor)	2017	420
2	Nuclear Decommissioning- Its History, Development, and Current Status	Michele Laraia	2018	127
3	Lessons Learned from Deferred Dismantling of Nuclear Facilities	IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-2.11	2018	116
4	Decommissioning Planning (US Nuclear Regulatory Commission Regulation) (2018 Edition)	The Law Library	2018	271

5	Beyond Decommissioning: The Reuse and Redevelopment of Nuclear Installations	Michele Laraia	2019	393
6	Management of Project Risks in Decommissioning	IAEA Safety Reports Series No. 97	2019	57

二、邀請學者專家辦理除役專題演講

出席專題演講為學習新知非常有效的途徑，本計畫邀請國內外專家學者辦理除役相關議題專題演講，以豐富國內除役資訊來源。本年度邀請清華大學原科中心講安忠博士與美國能源與環保顧問公司 ES&H Solutions 負責人吳全富博士辦理 2 場除役相關專題演講，題目分別為「雷射放射性除污的應用技術開發」與「MARSAME 基本方法與應用經驗」，圖 2 為演講海報。主講人簡歷及演講講義詳見於附錄四及附錄五。



圖 2 2019 年主辦之除役專題演講海報

柒、結論與未來工作建議

藉由 107-108 年度核電廠除役技術編彙計畫之執行，本研究完成蒐集 82 年至 108 年間，由原子能委員會(含物管局和核能研究所)與科技部(含國科會)等政府機構所補助之除役相關研究計畫成果，並建立資料庫。此資料庫將可提供國內從事除役工作人員之參考，以及協助建立主管機關管制與審查的專業職能。本年度並新增台電公司委託之除役相關研究計畫清單以完整國內除役相關研究資料庫。

國際除役技術資料庫方面，完成的工作項目如下：

1. 系統性蒐集 IAEA、OECD/NEA、US-NRC、UK-NDA、USEPRI 等組織截至 2019 年 10 月在網路上公開之除役相關技術報告、安全指引及法規等資料。
2. 整理截至 2019 年 10 月核設施除役參考專書目錄。
3. 蒐集整理部分國內外所舉辦的核電廠除役研討會與訓練課程。
4. 整理停機過渡階段管制參考資料。(107 年計畫)
5. 整理美國 NRC 除役視察員訓練要求與資格認證資訊。
6. 蒐集拆除與拆卸技術資料及國際拆解規劃及案例。

針對除役各階段所需的技術資料進行整理，將有助於投入除役工作者節省資料檢索的時間。參考美國 NRC 針對除役視察員的訓練要求，建議規劃國內除役視察員訓練課程時，特別加強保健物理

與輻射度量等基礎課程，以因應未來除役視察之需要。

為實現「資料→資訊→知識」的目標，建議相關單位應建置核設施除役知識管理系統，以善加利用本研究兩年來所蒐集之國內外除役相關資料。

此外，本研究於今年發表二篇除役新書書摘，並辦理二場除役專題演講應有助於從事除役工作人員在繁忙之餘，更有效率的吸收新知，建議未來應繼續執行。

捌、資料來源

1. GRB 政府研究資訊系統 <https://www.grb.gov.tw/index>
2. 原子能委員會資訊公開 https://www.aec.gov.tw/category/資訊公開/研究計畫/219_314.html
3. 台電公司核後端處
4. IAEA 網站 <https://www.iaea.org/publications>
5. OECD/NEA 網站 <https://www.oecd-nea.org/pub/>
6. NRC 網站 <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/>
7. NDA 網站 <https://tools.nda.gov.uk/publications/>
8. GOV.UK 網站 <https://www.gov.uk/government/publications>
9. EPRI 網站
<https://www.epri.com/#/search/decommissioning/?to=1577557861463&from=480778138536>
10. 法國 ASN 網站 <http://www.french-nuclear-safety.fr/Information/Publications>
11. amazon Books <https://www.amazon.com/>
12. 原能會物管局郭火生組長
13. 核能學會核設施除役學術委員會邱太銘召集人
14. 核能科技協進會陳勝朗首席顧問

玖、附錄

附錄 一 國外核能電廠除役案例 - 比利時 BR 3 核能電廠

摘錄自「國際核電廠除役資訊整合專題研究報告_邱太銘_核資中心」

第七章 國外核能電廠除役案例

預估 2030 年全球目前運轉中的核能電廠 50%將關閉，此意味著將產生龐大核能電廠除役市場。除役是複雜程序來停用、除污、拆除、拆卸與處置核能電廠至環境復育廠址，這也就為何除役比建廠需較長時間。此外，核能電廠永久封閉需在嚴格法規下與充分的計畫包括費用與時程估算，此乃因核能電廠具有放射性污染(Lee et al., 2013)。

7.1 比利時 BR3 核能電廠

比利時 BR3 核能電廠是西歐與比利時第一座壓水式反應器(PWR)電廠，1962 年開始運轉，功率為 10.5 MWe，運轉 25 年後於 1987 年 6 月 30 日永久停止運轉。除役計畫於 1989 年開始，同時被選為歐盟核設施除役研發計畫四個先導計畫之一。除役工作雖已持續進行約 22 年，整個除役計畫準備延長至 2020 年，最終目標為綠地(Green field)且廠址內沒有暫存設施。BR3 核能電廠除役主要里程碑如表 7-1 所示(Dadoumont, 2004；Valenduc, 2007；Cantrel, 2009；Braeckveldt, 2014)。

BR3 核能電廠曾進行立即拆除與延遲拆除兩種除役策略之評估，結果採用立即拆除，其理由如下(Thierfeldt et al., 2006)：

- 放射性廢棄物處理及處置費用逐年增加；
- 輻射管制與規範發展及改變具有不確定性；
- 延遲拆除雖可降低輻射劑量，但是約需 80 年，此長時間的財務負擔甚具不確定性。

表 7-1. 比利時 BR3 核能電廠除役主要里程碑一覽表

項目	起始/完成日期
永久停止運轉	1987 年 6 月
熱屏蔽遙控切割	1989~1991 年
高度活化爐內組件拆除	1991~1995 年
污染環路與設備拆除	1995~2000 年
反應爐壓力槽拆除	1999~2000 年
反應爐壓力槽蓋頂與底部、水蒸汽產生器、中子屏蔽槽、及加壓器等除污與除役	2001~2009 年
更換燃料水池金屬內襯及反應器廠房機電拆除	2010 年
殘留埋入主管線與反應器廠房埋入地面管線移除、主環路室混凝土清理	2011~2012 年
活化混凝土拆卸準備	2013~2014 年
活化混凝土拆卸、整備與移除	2015~2016 年
極地起重機拆除	2017 年
反應器廠房傳統拆卸、運輸區域殘留公用系統與設施最後拆除	2018 年
完成機電拆除與輔助廠房清理	2019 年
傳統與無核廠房拆卸、廠址復育	2020 年

7.1.1 主環路全系統除污

反應爐停止運轉與燃料移除後，1991 年進行主環路全系統除污，包括反應爐壓力槽、蒸汽產生器與加壓器及純化環路。第一個除污目的是降低與非活化零組件附近輻射劑量率，並限制後續拆解期間表面污染物傳輸。採用的除污程序為德國西門子公司發展的化學氧化還原除污 CORD 程序，CORD 程序包括氧化、還原與清洗等三個連續循環，共去除 2 TBq 加馬放射體，除污因素為 10(NEA, 2002; Thierfeldt et al., 2006)。

比利時BR3壓水式核能電廠主環路Co-60放射性為18,000 Bq/cm²，經CORD程序系統除污後Co-60放射性為1,800 Bq/cm²，再經10年Co-60放射性降為450 Bq/cm²，Co-60再以MEDOC程序除污後Co-60放射性降為< 0.4 Bq/cm²，可以自由釋出(Noynaert et al., 2013)。

1995年開始拆除輔助環路，1996年建造濕式研磨除污工廠，1998~2000年拆除28噸重反應爐壓力槽，所有水平切割採用圓鋸，垂直切割採用帶鋸，切割作業於水中進行(Klein et al., 2001)。

7.1.2 高活性內部零件拆除

1991年開始拆除5.4噸高活性熱屏蔽，切割係在水中進行，採用的切割方法有放電加工切割機(EDM)、銑刀及電漿弧火炬。高活性西屋內部組件及Vulcain內部組件拆除採用機械切割，主要為銑刀(milling cutter)及帶鋸(band saw)，此拆除工作至1995年(資料來源：<http://ec-cnd.net/eudecom/BR3-DismantlingReactorInternals.pdf>; Ponnet et al., 2000)。

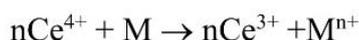
7.1.3 拆除後金屬組件除污

7.1.3.1 MEDOC 程序

拆解後下一個操作是進行大量低放射性殘留金屬零組件與管件除污，以評估作為非放射性廢料。BR3工作團隊進行不同除污程序比較評估，包括CORD程序、氟代硝酸(fluoronitric acid)程序、銻程序或MEDOC程序，銻程序或MEDOC程序係利用四價銻高氧化電位，BR3工作團隊選用銻程序或MEDOC程序來進行拆解物件除污，此程序可溶解氧化物被覆膜與母材金屬，三價銻可利用電化學或化學方法再生，以回收用過的除污溶液，可減少二次廢棄物產生。另外，亦進行陽極電拋光進行簡單幾何形狀不銹鋼物件除污試驗(資料來源：<http://ec-cnd.net/eudecom/BR3-DecontaminationProcesses.pdf>);

Braeckveldt, 2014)。

1999 年建造 MEDOC 程序除污工廠。MEDOC 程序是利用四價鈾在硫酸溶液是一強氧化劑及可用臭氧連續再生。四價鈾可溶解氧化被覆膜及母材金屬，其反應式如下所示(Klein and Moers, 2000；SCK·CEN, 2000)：



此處 n 為考慮金屬價數。除污溶液含 $50\text{mol}/\text{m}^3$ 四價鈾、 $1,000\text{mol}/\text{m}^3$ 硫酸及除礦水，除污溫度為 80°C ，批式除污時間為 5 小時。在除污過程中四價鈾消耗還原成三價鈾，除污劑喪失其氧化能力，為維持除污效率，消耗之四價鈾必須再生。四價鈾再生方法有電再生及臭氧再生，MEDOC 程序採用臭氧再生法，臭氧將三價鈾氧化成四價鈾，其反應式如下所示：



三價鈾臭氧氧化係在靜態混合器(static mixer)內進行(Ponnet et al., 2001)。

除污溶液隨使用時間增加其污染程度及鹽類含量亦逐漸增加，使用一段時間後除污溶液必須更換，形成廢除污溶液或用過除污溶液。廢除污溶液具有化學浸蝕性，添加雙氧水將存在的三價鈾氧化成四價鈾，同時添加一些硝酸，使廢除污溶液可貯存於不銹鋼製運送與貯存槽，最後將廢除污溶液運送至 Belgoprocess 處理廠處理，處理係採用中和/凝絮法，所產生淤泥以柏油固化(Ponnet et al., 2000；Ponnet et al., 2001)。

7.1.3.2 濕式噴砂沖洗

比利時 BR3 核能電廠拆除後的金屬組件採用濕式噴砂沖洗

(abrasive blasting)法進行除污，噴砂沖洗設施於 1996 年 5 月 9 日開始運轉，至 2001 年 5 月底，經 6 年操作已除污 523 噸污染金屬，其中 182 噸無條件釋出，因表面形狀無法測量之 303 噸金屬採用熔融方式處理，熔融係在管制熔融設施內進行，熔融後可無條件釋出，38 噸金屬組件無法除污。除污上述污染金屬共使用 12 噸金屬粒(metal grit) (Walthery et al., 2001)。

7.1.3.3 濕式研磨除污

比利時 BR3 利用濕式研磨(或稱 ZOE 程序)來進行金屬除污，系統基本元素包括含水水坑及程序介質如塑膠粒或微粉(氧化鋁)，塑膠粒主要應用於處理金屬組件，微粉主要應用於複合物處理。介質、氧化物抑制劑及脫脂劑利用渦流泵(vortex pump)循環至程序噴嘴，由噴嘴排出，在壓力 0.7~5bar 利用壓縮空氣使水蒸發。使用完後混合物利用重力重回水坑，清洗介質，破碎粒子及屑利用旋風分離器、淘分(elutriation)及磁性分離器(magnetic separator)等去除。對於厚度大於 5mm 物件採用濕式研磨除污較不經濟(資料來源：<http://www.ec-decom.be/europe/pilot/br3/deconta/zoe/zoe.htm>)。

7.1.4 混凝土除污與拆除

設備均移除後必須進行建物牆壁、地板及天花板等之除污。早期對有限污染深度混凝土牆壁除污時採用商業化氣動手提機械鏟除器(pneumatic hand scabblers)，另外，3 頭、5 頭與 7 頭手操作地板機械鏟除器亦常使用。比利時採用具有金剛石尖端旋轉頭之削刮機器(shaving machine)進行混凝土除污，採用此機器除污後之表面較平滑，同時具有較高效率，且可減少 30%二次廢棄物，由於無機器振動可減輕操作人員身體荷載(Baumann et al., 2001)。

混凝土拆除採用金剛石纜鋸、金剛石鋸或遙控操作液壓氣錘，拆除作業時配備高通風流量與高效率過濾系統(Klein et al., 2001)。

7.1.5 BR3 除役廢棄物管理

核設施拆除會產生大量放射性物質，必須將其全部移除，移除基本原則是放射性廢棄物體積最小化。在移除過程中這些物質必須確保可追溯，因而物流必須有一定手續。拆除之物質會經過下列步驟：

- 切割、分類與確認
- 暫時貯存
- 處理
- 特性分析
- 暫時貯存
- 移除

切割是放射性固體廢棄物常用的前處理，以減少廢棄物體積因子，進而減少整個廢棄物體積。常用的切割方法有鋸斷、剪斷、電漿切割等。

拆除後大物件移至密閉且有通風裝置之切割室，將大物件切割成小物件，切割方法有許多種，移除方式會影響切割技術選擇。待除污物件不能採用電漿與氧乙炔切割，因切割時污染會被包封在物件熔渣內。帶鋸與往復鋸用來切割管或大物件，nibbling 技術用來切割桶槽，切割速率快但切割後物件會有尖末端產生。

物質切割成小件後依不同移除方式分成廢棄物、熔融及除污。其中廢棄物再分為可壓縮及不可壓縮，可壓縮性廢棄物以 200 公升桶盛裝，不可壓縮性廢棄物以 400 公升桶盛裝。在技術上或經濟上進行除污不具可行性的金屬送至熔融設施熔融，例如直徑小於一吋的管與閥、薄板與

金屬樑、小物件如螺絲釘等，熔融後可分為在核設施內再利用及自由釋出。物質選用除污與下列兩個條件有關：

- 必須技術可行及具經濟性；
- 必須可能示範物質可符合自由釋出標準。

物質採用除污處理的分類如表 7-2 所示，經除污後物質分為自由釋出或熔融後自由釋出兩種(資料來源：<http://www.ec-decom.be/europe/pilot/br3/initbr3.html>)。

表 7-2. 待除污廢棄物分類標準

	幾何形狀	污染	實例
手工除污(清洗、洗淨)	簡單	低污染	電纜線、下部結構元素
濕式噴砂	簡單易到達及表面/重量比小	固定污染至 5,000 Bq/cm ²	大下部結構元素、重固體物件
化學除污	簡單至複雜	固定污染至 35,000 Bq/cm ²	大於一吋管與閥、泵與桶槽
Scabbling	-	-	混凝土塊

物質經除污後，先用手提探測器測量(測量表面積為 25cm² 與 200cm²)，物質所有表面必須經探測器測量，若未經測量之物質則排除，經測量後物質符合自由釋出條件(自由釋出條件為表面β, γ污染小 0.4Bq/cm² 及α污染小於 0.04Bq/cm²)將貯存以待進行第二次測量，第二次測量將由不同的人持不同的儀具進行測量。

由於物質可能需經化學除污，兩次測量間貯存時間約為 3 個月，如此可偵測到物質冒出水氣所釋出放射性。自由釋出測量結果及物質已往

歷史收集至自由釋出文件，在真正自由釋出前，該文件須經保健物理部門主管核准。對表面無法 100%到達之物質將不接受進行自由釋出測量。

為使拆除所產生的放射性廢棄物量最少化，比利時採用兩種替代移除路徑，一是循環路徑，另一是豁免路徑，除污程序較豁免路徑優先。減廢程序關鍵是物質分類，建立規範協助操作人員作選擇，物質分類會導致產生批次，亦即物質跟隨相同移除路徑，利用相互作用資料庫來追隨自批次產生至最後移除之物質。

利用放射性鑄造場循環低污染金屬，所產生鑄塊可用來製造屏蔽磚或製成廢棄物容器，比利時將 26 噸低污染金屬如軟鋼及不銹鋼運送至美國 Duratek 公司進行熔融處理。有些污染很低卻很難測量或非均勻污染之物質，則送至核能鑄造場熔融，熔融可進一步除污，其出污係利用核種揮發(如 Cs-137)或傳送至熔渣，經熔融後金屬較均勻可較準確測量核種含量，比利時將污染很低卻很難測量或非均勻污染之金屬送往瑞典 Stusvik 熔融，包括第二再加熱器與銅管、大宗碳鋼組件及碳鋼與不銹鋼零件，這些金屬利用 200 公升桶盛裝，經熔融產生的鑄塊達到無條件釋出，二次廢棄物約佔原送重量的 5.9%，運回比利時進行狀態調整(Klein and Moers, 2000；SCK·CEN, 2001；Klein et al., 2001)。

依據國際參考值，自管制區釋出物質之活度限制比利時 SCK·CEN 採用

- 表面污染限制

對 $\beta\gamma$ ：0.4Bq/cm²

對 α ：0.04Bq/cm²

表面量測係整個表面直接量測，可指出表面熱點及對表面污染非常靈敏，適用於具 100%可量測表面之物件。

- 重量比活度限制

建議值隨核種不同而不同，且與物質最終目的地有關，限制或允許值在 0.1~100Bq/g 之間，依核種而定，例如 Co-60 限制值為 0.3Bq/g。

為達到清潔基準，BR3 除役計畫採用除污技術，對金屬採用的除污技術有人工清洗或超音波清洗槽洗淨、濕式噴砂沖洗、及硬化學除污等。人工清洗或超音波清洗槽洗淨主要應用於外部表面輕微污染組件，例如除礦水管線、儀器箱等。濕式噴砂沖洗主要應用於簡單幾何形狀生鏽或塗裝組件，且污染主要在氧化被膜或塗料中，BR3 除役計畫現有濕式噴砂沖洗設施可進行重可達 3 噸及最長 3 公尺組件之除污。硬化學除污程序稱為 MEDOC，MEDOC 應用於不銹鋼材質較具除污效果，經除污後約有 80%廢棄物可達到清潔標準，其餘再以熔融處理，BR3 主冷卻系統拆除下來之不銹鋼廢棄物約 21 噸，利用 MEDOC 來進行除污。

部分拆除物質很低污染但很難量測或不均勻污染，這些物質送至核能鑄造場熔融，熔融具有下列優點(Klein and Moers, 2000)：

- 部分核種(如 Cs-137)揮發或傳送至熔渣(例如重核種如阿伐放射體)，使金屬被除污。
- 金屬熔融均勻化可允許精確測定核種。
- 二次廢棄物少。

對於表面稍微污染的物質在拆除前或尺寸減少(size-reduction)後利用人工簡單清洗進行除污，已除污物質在自由釋出之前必須經下列量測方法之一量測：

- 直接 100%表面量測兩次，第二次於第一次量測後 3 個月進行。
- 若物質均勻採用 Canberra Q2 200 公升桶加馬光譜儀進行質量量測。

比利時 BR3 利用上述方法自由釋出 60 噸物質，其中 15 噸金屬送至廢金屬工業，45 噸混凝土送至建築工業(Klein and Moers, 2000)。

對受較高污染(至 1,000Bq/cm²)已塗裝、生鏽或不銹鋼物件無法利用簡單清洗來除污，可採用濕式研磨除污去除污染層，唯此法僅適用於簡單幾何，因為整個處理表面必須研磨料可到達。比利時 BR3 利用 ZOE 除污方法處理 21 噸物質，其中有 10~20%物質無法自由釋出，其原因包括污染很難去除或因量測位置困難，無法自由釋出的物質送至核能鑄造場熔融後再自由釋出。污染鉛磚很容易利用濕式研磨來除污(Klein and Moers, 2000)。

高污染(至 20,000Bq/cm²)碳鋼或不銹鋼物件可利用化學除污處理，比利時 BR3 利用 MEDOC 程序來進行高污染不銹鋼物件之除污。BR3 已處理 3.5 噸，其中 1.5 噸經手提探測器表面量測後自由釋出。大部分物件量測結合總加馬計數與 Q2 加馬光譜儀，總加馬計數可單一個物件量測或小型批式(20 公斤)量測，Q2 加馬光譜儀量測係批次進行，每批次為 250 公斤(Klein and Moers, 2000)。

BR3 反應爐壓力槽上更換燃料池安置 28 個防飛彈重混凝土板，經特性分析發現所有重混凝土板均污染，部分甚至被活化。利用機械鏟除、剝除與氣動錘進行 22 個板除污，重量為 247 噸，經除污後 205 噸可無條件自由釋出，送至建築工業再利用，42 噸仍輕微活化，進行狀態調整。切割操作所產生可能污染淤泥或懷疑混凝土塊利用電纜鋸或金剛石鋸切割，乾淤泥利用 Q2 系統量測後自由釋出(Klein and Moers, 2000)。

放射性混凝土經壓碎與篩分，篩分後混凝土與新水泥、水及流體劑(fluidifier)等混合產生新灰泥，可作為非均勻廢棄物狀態調整之基質(Klein et al., 2001)。

7.2 法國

截至 2011 年 7 月 26 日為止，法國有 13 座實驗與動力反應爐需要除役，其中有 9 部為第一代氣冷與石墨緩衝類型。法國電力公司(EdF)所屬 Brennilis

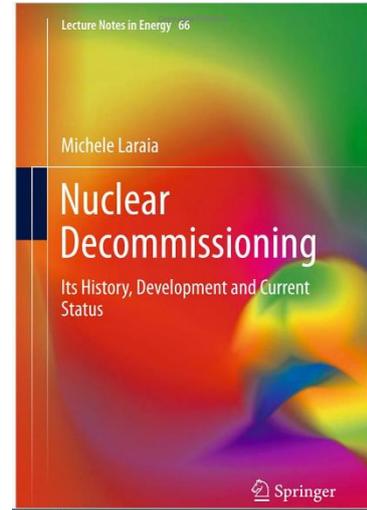
附錄 二 新書介紹-核設施除役之歷史發展與現況

Nuclear Decommissioning- Its History, Development and Current Status Nuclear Decommissioning

書籍資料

作者: [Michele Laraia](#) 2018

- **Series:** Lecture Notes in Energy (Book 66)
- **Hardcover:** 127 pages
- **Publisher:** Springer; 1st ed. 2018 edition (April 15, 2018)
- **Language:** English
- **ISBN-10:** 3319759159
- **ISBN-13:** 978-3319759159



目錄

- Chapter 1 Introduction: How a New Industry Comes About
- Chapter 2 Nuclear Decommissioning as “Combination” of Different Industries with One and Same Objective
- Chapter 3 The Historical Evolution of Decommissioning
- Chapter 4 The Beginnings: 1960s
- Chapter 5 The Awareness: 1970s
- Chapter 6 Research and Development: 1980s, 1990s
- Chapter 7 The Maturity (1990s, 2000s)
- Chapter 8 New Issues Emerge
- Chapter 9 Founders and Early Scientists
- Chapter 10 Take Stock of Progress and Look Ahead

「核設施除役之歷史發展與現況」書摘

作者：尹學禮

這本書 Nuclear Decommissioning- Its History, Development and Current Status 是研究能源一系列報告中的一本，於 2018 年 8 月出版，目的是作為教科書與第一線研究之間的橋樑。由一位義大利人 Michele Laraia 所編寫，主要是說明除役工作以往歷史中發展的情形，可供核設施除役各領域工作者參用，使除役工作成為更健全的學科以及更安全的工業。

本書除前言外，共分為十個章節，包括第一章簡介，

說明除役是一個新型的工業，第二章說明核設施除役是一個相關工業的組合，第三章說明除役工作的歷史演化，第四章說明 1960 年代的創始期，第五章說明 1970 年代的覺醒期，第六章說明 1980 與 1990 年代的研究發展期，第七章說明 1990 與 2000 年代的成熟期，第八章說明新出現的課題，第九章說明除役工作奠基者與早期的科學家們，第十章對相關進展做彙總並提出前景。

這本書的前言之中，首先說明世界上與核設施除役相關的一些組織，包括 IAEA，OECD，EC，美國的 DOE 及 NRC 等，以及這些單位以往在除役領域的相關貢獻。由於作者在核設施除役相關工作中，有 40 年以上的經驗，所以這本書的目的，作者除了說明在過去幾十年中，所參與工作的一些單位與實務經驗的回顧之外，主要是對除役的發展歷史，做了完整的回顧，包括相關技術的發展，以及各國的一些特色，並包括所面對的一些問題，及以往解決的經驗與發展出來的有關技術。本書的特色，是反映了除役在實務上的一些歷史經驗，依發展的時間過程作完整敘述。報告的本身，並沒有很深入技術細節的說明，只是於各章節列出了發展過程，並於各章節之後詳列了有關技術課題的參考文獻，可以根據整個歷史發展的脈絡，去尋找相關技術的參考文獻。正如本書的書名所說，這本書主要的目的，是要說明除役工作的過去歷史、現在狀況、以及未來發展的前景。有句拉丁文說，歷史是我們生活的老師，研讀過去的一些發展經驗，可以幫助我們評估未來，並作出對應的規劃。所以在看這本書的時候會發現有許多的重複之處，目的是要說明完整的前因後果。

第一章是簡介。作者由賓士汽車經過了數十年之努力，才推出了第一台

專利之三輪賓士汽車，說明量產是評量工業化的要件，而除役工業即是集合不同之專業、功能、經驗、知識等，合成的一項新型工業。核設施之除役，包括了工業技術、知識、以及經濟等各方面之因素。創新是推動新型工業，或是促進原有工業成長最主要推動的力量，而技術之改變，是創新中最關鍵的部分，技術發展於新工業領域之應用，往往會大於其在原有工業領域之應用，例如真空管的發明最早是為了無線電工業，而其後它對電視及大型電腦主機工業，有巨大的貢獻。支持創新的三項因素包括確定的需求性、相關領域能勝任的專業人員、以及充分的財務能力。研發計畫當然是支持創新重要的一環，但是不可忽略由市場、財務、設計、製造、與研究發展之間的複雜性與資訊回饋。推動創新之計畫，通常包含有改進品質的管理、提供新的市場、改進程序、工業之讓產易股(spun-off)、減少對環境之影響、減少能源之消耗、以及符合法規等因素。

創新之成敗，與組織文化關係甚為密切，造成創新失敗除了外在的原因外，其內部的原因約可分為兩類，一類是與組織文化環境有關，另外一類則是與創新的程序有關，而與創新程序有關者大概有五種形態，就是目標的模糊不清、規劃不良、團隊合作不足、監控回饋與評估之不良、以及溝通的不良等。技術創新在社會面相上有三個要點，包括社會的需求，社會的資源，以及社會同理心的態度。當然政治層面的考慮，也是工業創新不可忽略的一環，創新要維持競爭力，一定需要政治上的支援才能做到。

第一章的附錄，說明除役計畫之成長率。自 1963 年第一座核電廠關閉後，核電廠關機之因素很多，包括有技術、政治、經濟、以及民意等。首先是核電廠的老化，以及新型的核電廠介入服務；其次，第一波於 1990 年代的關廠潮，是因為德國政治的因素，車諾堡事故的影響，以及美國環境形式的改變；再則是 1995 年至 2010 年核電廠關機的曲線大幅上升，包括的因素是採用更嚴格的安全規範，英國廢止 Magnox 反應器計畫，以及一些國家核能計畫的停滯與廢核等；最後一項趨勢，是在 2011 年日本福島核電廠事故後的影響，包括德國的廢核，日本採用更嚴格的安全規範，以及石化能源的競爭，與老的核電廠在經濟上無法滿足後福島的相關需求等。

第二章說明核設施除役是一個相關工業的組合，而具有相同的目的。在沒有核工業之前，已有使用除役字眼，其原有的定義是指移除而不再服務，特別是針對戰艦而言。除役的相關技術課題，包括防治環境污染之輻射防護方

法，廢棄物管理，人員訓練與成本估算等，最後才逐漸整合成除役這專門的學科領域。IAEA 長久以來，對除役工作有廣泛而持續的努力，大家均認知除役之內容，絕不是只包括廢棄物的相關技術而已。

由字義而言，decommission 的字首 de，其意義就是分開或是移除，而 commission 本身的意思是指將責任賦予某人的行為，因此，除役 decommission 所指的就是將設施運轉的執照予以收回的意思。

第三章說明除役工作的歷史演化。 除役是科學與工業的整合，早期未做除役計畫，所以許多研究用反應器及核燃料相關設施，都處於半廢棄的狀態。相關的研究工作在 2000 年之後並未再持續加強，因此除役之研究工作就不再蓬勃發展。除役工作在英國的歷史發展，就是一個典型包括科學、工業與政治相互糾纏的課題。也因為許多核設施的除役作業拖延了數十年未處理，造成如今除役的費用更加高昂，英國的氣冷式的反應器，其除役費用與用過燃料再處理費用非常昂貴。英國在 1970 年前，並未慎重考慮除役與廢棄物的管理，而多是將廢棄物作現場貯存。雖然在 1970 與 1980 年代有些作為但並不積極，因此或是再處理廠為了營運賺錢，或是因為屬於研究單位，並沒有處理廢棄物的動機。英國在 1980 年代後期，由於電力要私有化，雖然有探討以往遺棄的廢設施與廢棄物，以及其所需的費用，但是並未採取相關行動，這期間持續之用過燃料再處理，使得廢棄物持續的增加。雖然英國於 1990 年代開始重視除役的工作，但是並未全力積極為以赴，迄其轉折點是 2002 年，政府出版了管理核能殘留物的白皮書，才成立了國家級的除役專責單位，使得除役工作受到了相當的重視。而其他國家，在其他工業上發展的技術與工具，均可應用於除役的計畫。於 1975 年第一次召開的除役會議，內容均著重於相關技術，在 1980 年代與 1990 年代，除役相關的研究發展計畫相當的多，其目的是向民眾證明除役與其技術的可行。至 2000 年時，已有一些電廠開始進行除役，目前對大的核設施除役，已累積了相當的經驗。除役工作有可能碰到許多新的問題，由今日來看，文化面與民眾的需求考量是特別需要重視的新課題。

第四章說明除役於 1960 年代創始期的進展。 在有除役正式名稱之前，早期已有相關之除役活動，最早之除役計畫，即是二次大戰期間美國曼哈頓計畫之 CP-1 反應器，其於 1942 年完成後，於 1943 年改建為 CP-2 反應器，並持續運轉至 1954 年，才加以拆除掩埋。在 1960 年代之前，除役相關之技

術，主要是各研究室與生產設施除役的方法與程序，以及發展遙控之相關技術，以減低人員於高輻射作業情況下之劑量。SL-1 反應器於 1961 年事故後是第一個全尺寸的除役計畫，為因應作業時的高輻射，也設計了離地 26 英尺之吊車，並採用了屏蔽以保護工作人員。

美國針對 Hanford 反應器的除役策略，是採取安全貯存，就是為了封存放射性的核種，由於其屏蔽材料、鋼筋及混凝土結構，均具有很良好之屏障效果，故問題不大。1960 年代後期，發展出具有爭議性的安全封存(entombment)策略，其目的是經由放射性之衰減，以使廠址做非限制性的開放使用。此安全封存策略，包括先將特殊核物料移至廠區外，然後將反應器壓力槽與其內部組件加以安全封存，再將安全封存體外之部分進行除污。美國核管會目前已不再使用安全封存策略，惟美國能源部仍在使用此種除役方式。早期於除役時，重視的是容易量測的核種，例如鈷-60，銫-137 等，其曝露途徑為體外照射與呼吸，漸漸亦開始考量廢棄物處置時較長半化期之核種。針對較難偵測的核種，也發展出比例因數的關係，例如鎳-63 核種與化性相近鈷-60 核種之產生比例關係，另外有些核種則與銫-137 核種的產生率有一定的關係。

第四章的附錄，說明除役策略之演化。核電廠自永久停止運轉後，首先會將燃料運至用過燃料貯存池，準備將來作再處理或運送至獨立之用過燃料貯存設施。在此期間是核電廠除役的初始期，電廠維持各系統之正常運作，包括儀控系統、輻射監測系統、散熱系統與抽風系統等，均與核電廠大修時之情況相近。IAEA 於 1975 年，確認了核電廠除役的三階段，包括監管下之貯存，限制性之場址使用，以及非限制性之場址使用。而各階段是依據電廠與設施之物理狀態，以及州政府必要之監測、檢查與測試。至 1990 年代末期，IAEA 放棄了前述除役的三階段分類方式，而採取了包括立即拆除，長期安全密封延後拆除，以及安全封存(即是就地處置)等三項除役的策略。雖然各電廠之除役計畫策略不盡相同，但一般均不建議採用安全封存方式，而指出安全封存僅適用於設施有重大意外事故之後。事實上，IAEA 於 2014 年說明除役最好採立即拆除的方式，若實際情況不可行時，方可由業者判斷另行作規劃。

在美國，許多反應器之除役是採取立即拆除，原因是處置場的可獲得性減少了，以及對未來除役經費的不確定性。而在法國，則是先做部分拆除，並將完整的拆除工作延後 50 年，後來因為拆除費用的降低等，有考量國家之除役政策是否要調整，目前官方政策仍是採立即拆除。東歐許多國家是採取延後拆除的策略，因為核設施並未於其運轉時期存下足夠的除役經費。選擇除役策略的主要標準，包括輻射的因素、廢料管理與處置、土地之使用、公眾之

意見、相關之法規、合乎道德的因素、與國家其他核能與非核能計畫之相互關係、經驗與專業知識、研究發展及技術創新、以及計畫的複雜性等。除役方案的選擇雖具有彈性，仍需要多方的考量，可以用科學的方法找出最佳的除役策略，或規劃幾種方案再加以比較選擇。雖然民眾多希望拆除後取得土地之使用權，惟迄目前為止，立即拆除與延後拆除計畫之比例仍約各佔一半。

第五章說明 1970 年代覺醒期的進展。包括除污、管路切割等作業，均為除役技術的一部分，惟直到 1975 年才有正式會議整合相關技術，討論核設施之除役。主要包括有政府及企業的政策與計畫、核設施關閉後之監測、廢棄物之處置以及相關法規等課題。由於除役是世界各國均將面臨的問題，所以 IAEA 開始著手建立相關的指引、建議事項與標準。IAEA 於 1975 年的報告中，說明了除役相關的因素，包括除役各階段之定義、場址限制性與非限制性釋出的標準、核設施除役之設計、設備與技術的發展、除役產生之廢棄物、除役之費用以及國際合作等事項。IAEA 於 1978 年的研討會中指出，專家們均認為核子反應器與其他核設施，可以安全而經濟地除役，不會影響人類與其生活之環境，並可恢復廠址作非限制性之使用。

1980 年代初期 OECD/NEA 出版了四本報告，說明在設計核設施時如何考量除役之需求、切割技術、除役的方法，以及立即除役與貯存監測方案之差異比較。1974 年美國明尼蘇達州 Elk River 是第一台進行除役的核能電廠，證明核電廠可以成功的被拆除，並樹立了除役的典範。早期的除役只規範個人劑量的限度，後來逐漸開始也重視集體劑量，有一個例子是美國奧立岡州 Trojan 核能電廠的除役工作，是採取立即拆除的方式，總集體劑量為 3.35 人西弗，這比預期的劑量低了很多，可以看出對除役工作的重視，以及 ALARA 技術的貢獻。

第五章的附錄 1，說明除役時的清潔標準。因為非限制性釋出，就是除役後之場址可以做任何無限制的使用，因此必須導出可允許之核種殘餘活度值以及體外劑量的標準作為依據，而且需要國際上都採用一致的標準。在 1970 與 1980 年代，各國之非限制釋出限值均不相同，對貝他-加馬射源其典型數值為 1-4 貝克/公克，但是各國對可允許劑量並無法達成共識。於 1989 年國際的共識是每一個豁免的作業，其關鍵群體的個人劑量限度約為 $10\mu\text{Sv}/\text{y}$ ，IAEA 並於 1990 年代開始發展通用的清潔標準，出版了一些報告說明相關工業上應用的因素以及情境，作為非限制釋出除役之物料與廢棄物時參用。IAEA 於

2004 年發行之標準 RS-G-1.7 提供了不同核種的清潔標準值，其單位是 Bq/g。雖然看似統一了這些標準，但是魔鬼藏在細節中，由於相關參數例如平均品質、監測方法、使用儀器、統計方式等之使用解釋，仍需要其他的一些輔助指引來完成評估。美國亦於 1993 年撤回了 BRC 的草案，目前美國是採用劑量標準，其值約為 1mSv/y 的一部分，美國並於聯邦法規中說明除役作業解除管制的標準為 0.25mSv/y。因為這劑量值相當低無法量測，故通常是用 RESRAD 程式做評估，其考量的曝露途徑包括體外的照射，以及呼吸、食用肉、牛奶、水產品、水及土壤等，目前 RESRAD 程式是美國管制單位所接受用以評估除役劑量的有效工具。

第五章的附錄 2 說明核設施嚴重事故後之除役。事故後包括安定化、恢復以及最終除役等作業階段。大多數 IAEA 的報告並未包括意外事故後之除役作業，而事故後最大的問題是污染的擴散，以及系統結構與組件 SSC 的損害，事故後除役所面對的不確定性因素，包括 SSC 的物理狀態、輻射污染的程度、廢棄物的產生及其管理、可分裂物質的數量、相關法規的規定、除污及拆除的技術、紀錄及相關數據的管理、所需要的人力與財力資源、除役作業的組織管理及利益相關者介入的問題等。

美國的 TMI-2 事故後 6.5 年才開始作安定化處理，又花了 4.5 年才將燃料碎片完全移出，最後又花了三年的時間，才達到安全貯存的狀況。英國的 Windscale 電廠，於 1957 年 10 月大火燃燒了三天，衍生的安全課題，包括有可能爐心內的空泡、氫化物燃燒的問題、石墨粉塵爆炸的可能性以及臨界的可能性等，因此至少要 2037 年後才可能開始最終除役。蘇聯之車諾堡核電廠，係於 1977 年開始運轉，而其 4 號機於 1986 年發生事故，其他三部機組則持續運轉至 1991 至 2000 年間，由於附近的環境受到嚴重的污染，廠址未來仍規劃以建造核設施為宜。其相關除役工作，第一階段是穩定化相關的結構物，已於 2008 年完成，第二階段工作目前正在執行，目的是建立相關的防護屏障，並取出燃料及高放射性廢棄物，將在 2023 年完成，並預計分三個階段完成全部之除役計畫。日本福島核電廠於 2011 年發生事故，目前只能做初步之構想，需要持續進行相關之研究工作才能提出其除役計畫。

第五章的附錄 3 說明核設除役之決策。由於除污作業並非只有絕對的好處，特別是它產生的二次污染及除污廢棄物需要考量，除污過程遇到阿伐粒子更需要特別注意，因此，除污工作必須將總體劑量及成本加以綜合考量。是否於拆除前要做除污，以及除役作業是選擇循環再使用或處置何種策略時，必須考量國家的政策、民眾的意見、技術的妥適性、風險分析以及總體經濟之

效益等因素。實務作業上，可先做 ALARA 分析，來決定是否於拆除前先進行除污。而對於採取循環再使用或處置的考量，也必須先分析再使用時會有化學致癌物的問題，而採取處置方式則會浪費一些可以再使用的資源等。至於是否要做除污或除污的程度，主要是依成本效益分析，相關的成本考量包括處理切割之成本、欲再使用物料的殘值、處理貯存或處置二次廢棄物之成本、工作人員成本、未預期事件發生之情形等，最重要的就是考量所採取的策略，是否能達成除役預期的目標。

第六章說明 1980 與 1990 年代的研究發展期。研究發展分為基礎研究、應用研究、與試驗發展三個階段，而在此年代中有三種擴散有關資訊之國際合作方式，包括有雙邊合作協定、區域形態的合作協定、以及透過網路的國際合作等。其益處包括分享與學習、較為可靠並產生串級效應、可利用同儕審查強化可靠性、以及透過合作與資訊的交換查核相關的進度等。目前世界上著名之除役工作研究發展機構與單位，包括歐盟、美國能源部、日本之動力反應器示範計畫 JPDR、以及國際原子能總署 IAEA。

相關組織與歐盟之研究計畫，目的是建立科學與技術基礎，以提供安全、社會可接受、且可經濟管理之除役技術。早期之研究發展項目，包括除污與拆除技術、廢棄物減量、除役策略、遙控處理能力、以及規劃與管理工具等。彙總而言 1984-1989 年間歐盟之相關計畫包括建物與系統的長期穩定、除污與拆除、鋼材混凝土等物料之處理、發展貯存廢棄物之大型容器、除役期間廢棄物產生量之估算、以及設計特性對除役之影響等。美國能源部啟動了針對環境管理的相關研究發展計畫，並提供了 223 份創新之技術報告，其目的是提供各式之創新科技，以供參考是否適用於某特殊的除役計畫使用。日本之 JPDR 計畫是用以測試與比較除役之相關技術，其研究的領域包括計畫管理、除污、遙控、拆除工具、與放射性核種盤存估算等之電算模式，有關反應器內部組件、壓力槽、管路、生物屏蔽等拆除程序之展示，以及安全評估的相關電算方法等。IAEA 針對研究發展是透過合作研究計畫 CPR 來推動，在 1990 年代 IAEA 推行的一些計畫，包括核設施之除污與除役，除污之新方法與新技術，研究用反應器之除役技術等。

隨著除役市場的擴大，有了許多會議與報告的發表，例如，美國之 PNL 實驗室，就為美國核管會寫了許多有關除役的報告。1980 年代，許多研究也著重於確認除役的相關參數，包括職業曝露、廢棄物產生量、除役成本等。在

美國由佛羅里達國際大學 FIU 與能源部等單位，成立的 D&D KM-IT 知識平臺，是一個網站型的知識交換中心，也經常邀請有關者加入，提供除役相關之經驗。

今日除役之相關研發，需要平衡考量的因素多，包括減低成本、控制廢棄物的產生量、減少職業曝露、增加工業安全以及特殊的材料處理等。可是一些國家在採用外來之技術應用上，也有許多會受到干擾的因素，包括要考量社會經濟環境的不同、外來技術吸收的不易、要花許多的經費去購買、智慧財產權的問題、缺乏政治上的互信、內需市場的不足、需要保護本土的研發工作、以及需要發展本土化之低成本技術等。2000 年後相關除役研發工作之趨勢，包括聚焦於特定某些領域的研究、重視機器人的研究發展與應用、以及配合去適用既有之工具與設備為主要原則。

第七章說明 1990 與 2000 年代成熟期的進展。1980 年代之除役多為小型研究用反應器，到了 1990 年代，大的反應器除役已證明是安全、可管理、而且具有成本效益的，因此也建立了除役行業的市場，到了 20 世紀末，由於電子機器人與電腦的發展，使得除役的技術更為強大，也解除了某些人對核設施除役可行性的疑惑。自 1980 年的除役工作開始，人們瞭解了石棉造成的風險，由於其用量很大，例如 1973 年其用量即超過 80 萬公噸，因此歐盟自 2005 年開始開始禁止使用石棉作為建材。

技術的成熟度，是一個質化的概念，並沒有辦法加以量測，因此用技術妥適性水平 TRL，代表技術成熟度的指標，通常將 TRL 分為九級，由 TRL1 代表可觀察到基本原理，一直到 TRL9，代表實際的系統，可以證明在操作環境中運作。雖然除役技術上有很大的進展，但仍有許多反應器停機後並未進行除役作業，例如剛果的 TRICO-II 於 1971 年完工，惟自 2004 年後就一直處於停機的狀態，因為除役工作不僅涉及輻射，亦有其他環境上的價值意義需要考量。

第七章的附錄 1 說明早期之除役規劃。由於除役工作是多面向的，會受到核電廠自規劃、建造以及運轉期間的影響，因此在 1975 年，即認知在設計階段甚至選址階段，即應對除役做適當之規劃，到了 1990 年 IAEA 說明應於法規中規範早期規劃，分為最初之規劃，運轉期間之定期修正規劃，以及永久停機時作最終規劃等三類。早期之核能工業僅有原子能法，用以管制核設施之選址、設計、建造、試運轉及運轉，由於法規的不完整，造成除役不能夠有

明確的程序，而對除役工作考量不受重視，總像尾巴搖狗一般。除役工作的原則，應該是由搖籃到墳墓能作一致而完整的考量。儘早提出除役計畫的好處，包括可節省時間與經費、可以有系統的進行規劃、電廠運轉時就可以準備相關資料、技術人員不至於停機後馬上流失、避免一開始進行除役原有之工作人員會失去工作的動力、除役相關的問題可以及早確認加以規劃、以及停機後至開始除役的時間可以縮短等。IAEA 於 2014 年說明，自建造核設施開始，就需要提出除役計畫，以確保未來可以安全處理至最終狀態，同時於運轉期間應每五年定期更新除役計畫，並送請管制單位審查。此外，要確保財務規劃無缺，可以支援除役的工作，並要能有效的預估廢棄物的產生量，包括除役過程所產生的廢棄物。

第七章的附錄 2 說明有助於除役的設計規劃。設施建造時就應該考量未來除役的便利性，例如要便於切割、防止污染、減少廢棄物的產生量等。歸納而言，除役困擾的問題一般均可克服，惟若是規劃不佳，亦有可能會造成延誤、增加費用、及額外的安全危害，例如，若只考慮管路除役時除污的便利性，則很可能會增加管路安裝的複雜性。在設計時減少材料中的化學雜質，可以避免或減少中子活化的問題，但是也需要注意過分減少鋼材中鈷、鎳等元素時，會造成影響鋼材力學特性與防止腐蝕的問題。設計時有效的空間安排，會有助於未來拆除時，面對複雜形狀，大件設備，以及高輻射產生的困擾。例如，西屋公司 AP-100 反應器設計的核島區體積較小，雖然未來除役時廢棄物會少，但因空間小，拆除時會增加許多困擾。模組化的設計會增進施工的便利性，並減少職業曝露，但可能會更為昂貴，也容易減少結構的可靠性，並產生防漏與防震的問題，新型的 AP-1000 反應器，其生物屏蔽就採用模組化的設計，有助益於除役時的作業。除役時將大件設備整體移走是一件很困擾的工作，但如要在現場做切割與拆除，除了需要考量切割設備的位置，也必須要考慮作業的空間以及組件內高核種活度的問題。德國 Gundremmingen 核電廠採用了冰鋸的技術，首先將水注入組件內並冷凍至攝氏零下 20 度，再進行鋸切，其優點是，由於先於組件內灌了水，所以管線不會震動，且有很好的屏蔽效果，減少了空浮粒子的產生，同時也提供了鋸切時的冷卻效果。設施內的管路特別是在低層與轉彎處，累積的污垢會造成除役時輻射的熱點，如果核設施停止運轉後沒有立即進行除役，相關之沉積物會更形嚴重，造成後續除役時除污作業與人員劑量的困擾。經驗顯示，供除役使用的相關紀錄常常不完整，其原因包括不瞭解除役所需要的圖樣及電廠相關資料、相信運轉期間的資料應該已經足夠、沒有確定轉移相關資料的責任、以及最終停止運轉後，由於工作人員的離散，造成紀錄的流失。由於紀錄是品質保證中重要的一環，建造及

運轉期間之紀錄，特別是相關變動的情形，對除役作業是非常有參考價值的。

第七章的附錄 3 說明研究用反應器與其他小型之核設施。研究用反應器除了支援核能發電計畫外，常用於核醫藥物同位素之生產，以及工業、中子特性與活化等研究工作。1980 年後，由於研究工作縮減，研究用反應器因數量過剩而除役數量益增，研究用反應器的特性是形式繁多、實驗廣泛、缺乏除役之經費、以及常靠近人群居住處所。由於這些特性，加上大多數有關除役的資訊是針對核電廠而非研究用反應器者，許多國家多是首次面對研究用反應器的除役，常忽略其他國家的相關經驗。由於缺少規劃，未能及時除役而常常拖了很久，以致團隊解散，結構劣化，需要花更多的錢來做除役的工作。

第七章的附錄 4 說明極低微廢棄物 VLLW 之情況。直到 2000 年代早期，廢棄物是依可壓縮性，可燃性，及表面劑量率來做分類，美國之低放射性廢棄物，分為 A、B、C 三類，而大於 C 類者應做地質處置。IAEA 於 2009 年提出了極低微廢棄物 VLLW 類別，是放射性廢棄物最低活度的類別，其最大的好處是可以很方便的做淺表掩埋處置，只需要最少的管制措施，因此 VLLW 可選擇在除役現場或附近地區作處置，以減少運送以及人員作業的成本。日本之 VLLW 設施位在 JPDR 拆除場址之開放壕溝內，並不需任何的固化與包裝程序，另外法國、西班牙與英國也都有類似的處置作業。由於 LLW 處置場受到容量限而且成本較高，所以 VLLW 有其存在的原因。

第八章說明新出現的課題。2000 年代初期，已大致具有除役的相關技術，咸認為可以獲得管制單位許可進行除役，而且對工作人員安全，以及對一般民眾與環境，不會有不良之輻射影響。現在已注意到，除役計畫最大的限制，是由於規劃與管理的不足，以及對責任的確認與轉移不夠清楚。IAEA 提出了有關除役規劃與執行的六個重點，第一點說明除役計畫是動態而且易變動的，特別是運轉至除役期間轉換有關的管理作業，美國能源部針對此提出了三本技術指引。第二點說明與利益相關者的溝通，對除役計畫的成功與否至為關鍵。第三點說明明確的最終狀態是除役的最高指標，且此最終狀態應該是可量測、稽查、並可依時提報的。第四點說明進行除役前，必須準備充足之經費。第五點說明除役計畫之人員與組織要及早定案，並應具有必要資格與專業能力。第六點說明除役計畫之組織會因應工作需求與國家政策做調整，要重視聘用之專業人士與外包商，唯要注意執照持有者是需要負除役主要的責任。

第八章的附錄說明除役成本的估算。早期對核設施除役成本的估算，是以其建造成本的 10-15% 為依據，美國有法規有要求核電廠除役時，要提出財務保證，惟實際之支出常會高出很多。美國核管會有提供公式，可以依核電廠之熱功率估算其 1986 年幣值之除役成本，並可依物價上升情形，評估出所需年分之除役成本。美國核管會說明各核設施除役經費會有所不同。由於除役所需之費用與廢棄物的數量相關，最好是先估算每一項工作需要的費用，再累加出整個除役所需的成本。美國之核電廠為私有化，因有破產之虞，而政府要負最終之責任，故 1970 至 1980 年代，即很重視除役所需之費用，若法規、政府的政策、以及利益相關團體的意見不同時，會造成除役費用的不同。

OECD, IAEA 與 EC 於 1999 年出版了黃皮書，說明規劃之除役成本項目清單，該書並於 2012 年更新，名稱為國際之除役成本結構。該書中重新規劃了相關的費用類別，並針對各種核設施均可適用，也依照 IAEA 最新的廢棄物分類方式作說明。書中對除役活動分為 11 項類別，大致包括運轉前之措施、設施停止運轉的措施、拆除的措施、廢棄物之處理、計畫之管理、研究與發展、以及燃料與核廢棄物等相關事項。OECD 之 NEA 於 2013 年成立了除役費用專家小組，探討除役所需的各項費用，並包括如何管理除役基金以及費用增加的有關事項。以往因除役的費用涉及商業敏感性，故無法多作交流，NEA 之努力已使此情況有所改善。為應付有些除役費用的不確定性，NEA 於 2017 年更新之報告中說明，可先建立初始費用估算情境，而後再定期評估會增加之費用，評估的內容包括與預期費用支出差異之情形，如何能分享較敏感資訊特別是專利相關者，以及與非核能工業交換經驗，確保除役費用的估算能夠合宜且完整無缺。

第九章說明除役工作之奠基者與早期的科學家們。介紹了七位在除役領域中，有很豐富經驗的資深研究工作人員。

André Crégut 先生，自 1957 年開始在法國從事核子反應器運轉之工作，後來加入了法國的 CEA，有 18 年直接負責除役計畫的工作。直到退休後，加入美國之 NEXI 公司為技術主任，提供美國相關除役工作之技術服務。在其職業生涯中，有從事建造了 18 座核子反應器，並直接管理超過 30 座以上核子設施之除役工作。

Chuck Negin 先生，是位除役界的老將，在工程與運轉上都很有成就，曾在船上、造船廠及潛艇上工作，並於 1970 年代至 1990 年代，在商用核電工

業界工作，主要是負責核電廠之改造計畫。是開啟核電廠延役至 60 年的先驅，亦曾參與 EPRI 先進輕水式反應器發展計畫，以及參與 TMI-2 清理計畫之技術與策略規劃，也是 MicroShield 屏蔽分析程式最初主要的發展者，其成就十分令人敬佩。

Paul Woolam 先生，自 1975 年開始加入研究用反應器除役計畫，一直都在從事除役與廢棄物管理相關之研究工作，曾協助美國、法國、西班牙、日本等國除役計畫的審查工作，在 OECD/NEA 擔任除役政策、策略及成本專家小組的主席。並且獲得監測空氣中銻系元素濃度之方法與設備的專利。

Richard Meservey 先生，從事除役相關工作長達 40 年，工作於美國愛達荷州國家工程與環境實驗室，具有多年之除役工作經驗，並長期為 ASTM 委員草擬多項之工業標準。

Shankar Menon 先生，是一位堅持自己道德倫理的前輩，他曾質疑為何核子設施除役時要採用不合理而嚴格的清潔標準，並指出實務上物料循環再使用之活度標準是不合理的低，會使得需要開更多的礦取得原物料。並認為要避免民眾可能受到微西弗等級的劑量，會造成更多工作人員因非輻射事故而喪失生命。

Tom La guardia 先生，具有超過 48 年有關除役規劃與管理的工作經驗，是核設施除役界的先進，參與過許多除役相關的重要工作，包括美國 Shippingport 核電廠的除役計畫，編寫過 Elk River 反應器除役計畫之 EIS，於 1986 年，編寫第一本核電廠除役成本之教科書。他除了編寫多本之除役手冊外，並與同事設計了電弧鋸並取得專利，是快速而成本效益高的切割工具。

Axel Bäcker 先生，其職業生涯是在德國 Greifswald 核能電廠，東西德統一後，電廠永久停止運轉，面對缺少除役計畫，缺乏財務資源，以及不好的經濟狀況，於 1993 年開始加入電廠除役工作，擔任概念設計與策略部門之副主管，負責準備除役相關報告、編撰運轉手冊、環境評估申照程序、以及計畫管理與資訊系統等。

第十章對相關進展做彙總並提出前景。除役工作已有很大的進展，相關技術已接近成熟，但仍有一些工作，例如事故後嚴重污染的除污技術仍待解決，而除役工作之全套解決方案，仍待持續努力。由於除役方案涉及的外在因素很多，對第一次面臨除役的國家仍是挑戰。雖然 90 年代後不太有相關的研

發項目，惟除役之工具發展已有相當之經驗。對除役方法之要求是快速、安全、可靠、且費用合宜。除役已是一項成熟的科技，但仍有相當之改進空間，且各項技術，尚未達到標準化的程度。其他非技術層面待改善者，包括了減少成本及財務風險、簡化廢棄物之管理、以及減少輻射曝露及工業風險等。IAEA 於 1975 年說明除役作業並無特別之技術課題，惟相關之政策、規劃、時程、費用、廢棄物處置、安全標準、與管制工作，仍待持續發展。以下將分類說明除役待改善之技術與管理領域，特別是目前核設施除役作業之經費，已經超過了 10 億美金，更需特別重視與成本費用相關的改善方向。

首先是要強化確認位置與輻射特性的技術，包括使用 GPS 確認現場設備與狀況的位置，使用輻射探頭以瞭解管線內輻射狀況，發展可攜式之加馬能譜分析儀，提升儀器之靈敏度以量測更低的污染狀況，以及是否符合清潔標準，使用遙控量測儀器作難測位置輻射狀況之確認等。其次可加強研究污染的化學特性以利除污作業，也應研究防止二次污染數量的方法，以及發展表面之雷射掃描、遙控刮刀、以及可遙控使用泡沫與膠等材料供除污作業。再則，要發展除役時所使用的遙控作業與機器人等，例如更擬人化之機器人應用、提升探頭功能以取得更具特性之資料、二維與三維之模擬軟體、更佳的人機界面、以及虛擬實境的應用，虛擬實境亦可用於工作人員的訓練，以提升除役作業 ALARA 的效率。

目前用過燃料與用過射源之運送與處置都十分困難，反應器設施內亦無足夠空間供用過燃料長期貯存，最終處置場之進度目前也遇到了興建的障礙，或可先發展採用用過燃料乾式貯存設施於此過渡期間。另一項是輻射與傳統安全的作業考量，可加強降低輻射劑量之策略、工程上之量測、以及實務上之工作程序等。安全與產能之平衡，是未來除役計畫之挑戰。透過風險分析，可消除與減少除役作業可能之危害，並加強輻射防護之功能。此外，非輻射之影響，與輻射影響具有相同的重要性，工安與意外的防止，是未來核設施除役面臨的一項挑戰。有關減少廢棄物方面，國際上之趨勢是儘量做物料之再循環使用，也需要加強分離各類廢棄物的能力。可再加強的工作包括發展廢棄物分離的偵檢儀器，以應對更嚴格難測的清潔標準，發展針對不同場址外釋物料之標準量測方法，以因應不同目的有條件物料外釋的需求。早期認為必須先有處置場，才開始做除役的工作，目前因國情不同，處置場址獲得不易，也開始考慮可以先做現場之貯存，待處置場興建完成再進行最終處置。

法規之清潔標準對除役作業影響很大，因為涉及需要國際上標準的一致性，但針對量測之平均以及統計方式等，仍然沒有一致性的規範，造成了許多

混淆與爭議。此外，法規應要求業者定期更新除役計畫，美國核管會擬於核電廠之除役規定中，加入緊急應變、網路安全、人員訓練、除役信託基金、以及賠款等事宜。有關現代化安全評估的標準，是採漸進方式進行，其意義是指分析的程度、檔案管理、以及符合之安全需求與標準，要與危害之大小、設施的特性、除役的程序相稱，並應平衡輻射與非輻射的危害。雖然可以採取漸進式的管理，但是計畫與程序之審查規範，有關之法規也需要進一步加強。

核設施由運轉進入除役階段，保留與傳承相關知識、專業人才與安全文化是三項相互關連且最重要的事項。工作人員常會認為除役較運轉時為安全而失去警覺，可以保留原有運轉經驗的人以為提醒，同時要加強除役技術的人員訓練，也可以考慮聘用退休的人員協助除役工作進行。對於未來擬不再使用核能的國家，保留專業人力與知識十分重要，以確保除役作業的順利。最好於核設施停止運轉後立即進行除役，以避免相關之設施資料、專業知識與專業人力的流失。針對多機組的廠址，可以將整個廠址作合併考量，包括是否會互相干擾、成本的估算、以及除役作業的方便性等因素。另外，許多有多組反應器之廠址，機組停止運轉後因其他因素，並未立即進行除役，需考量技術、人力、財務、及風險管理策略等，決定機組除役之優先順序。評估其優先順序時，應考量設施之狀態、設施之任務、預期之工作、以及安全控制等因素。

核設施及周圍污染土地的除污工作，必須要符合未來規劃用途之使用標準，據以執行除污與復原作業，需加強除役各階段的輻射偵測作業，以確認污染的位置與程度，使能達到最佳的除污效果。核設施由運轉進入除役階段，必須確保有可靠之除役經費基金，未來的趨勢是業者應定期向主管機關報告其財務狀況，並告知除役之利益相關者或關心團體。與除役計畫利益相關者的全面磋商是很重要的課題，以往之決定、宣佈、辯論(Decide-Announce-Defend)的DAD管理模式，最終常以放棄(Abandon)結束而成了DADA。目前，針對除役作業已更重視與利益相關者之對話，利益相關者除了地方社群的代表外，亦會包括例如歷史學家、考古學家、投資者、大學與研究人員等。針對設施與廠址之再利用，許多建築物與設備均可再做其他目的使用，不僅可減少廢棄物的量，也會增加一些收益。

要注意有關除役資訊的法律問題，雖然因為許多人都需要使用除役的資料，而必須要正確透明，但是例如用過燃料具有許多敏感資訊，必須依法予以保護。在英國，若洩露未經授權敏感之核子資訊時，是可能觸犯反恐或犯罪法律的。另外，除役相關的資料，有可能會涉及智慧財產權的問題，例如材料中

微量元素之濃度，或許是建造廠商的智慧財產。美國的 Hanford 除役計畫的相關資訊，在許多 IAEA 報告中可以公開使用，但可能會有許多資訊仍會涉及不公開的情形。最後要討論有關除役文化層面的考量，以往均認為除役僅是技術與組織層面的事，然而有些隱藏的因素包括動機、行為、心態等，可以總括為文化層面需考量的因素。由於這涉及人的感覺，不容易加以確認、量測與評估。於除役作業中，兩個示範案例為失業症候群與需不斷調整工作環境，前者的解決方案可透過訓練相關人員去適應除役相關的工作，後者則需透過文化層面的和解，讓員工能與拆除作業的承包商等共同合作。

心得與建議：

1. 這本書是作者長期從事除役工作的經驗分享，以編年的方式說明核設施除役發展進程與現況，內容沒有很深層的技術說明。若有需要可由其參考文獻中去瞭解相關的技術內容。值得一提的是本書有些像作者的回憶錄，所以特別開闢了一個章節，感謝許多在除役領域中共同工作的專業老友。

2. 這本書的第十章是作者彙總說明除役的發展現況與展望，特別提出了 18 點有關技術與管理上仍待改善的項目，每一項都能切中要點，可以看出作者的語重心長。

3. 由於除役作業效率與現場輻射劑量的考量，遙控方式的操作以及機器人的發展，是技術上應持續重視的項目。

4. 要重視專業人力的維持與傳承，以及設施紀錄的完整保存，而面對除役成本的持續上升，建議要考量於設施停止運轉後，儘快開始除役作業。尤其是未來不打算再使用核能的國家，更要特別重視能維持足夠的專業人力，以執行除役計畫之作業。

5. 面對愈趨嚴格之劑量與活度的清潔標準，以及為減少資源浪費擬採行之資源再使用措施，如何能達到互相平衡，似乎不僅是透過立法與溝通就能立即解決的問題。

6. DADA 似乎正是臺灣今日面對的的窘境，任何決策經公告後，就開始爭辯，最後常就是以胎死腹中結束，面對目前興建用過燃料乾式貯存場的卡關，以及低放射性處置場的位置仍未決定，這使得核設施的除役，不僅無法確

保其順利完成，甚至連開始推動都會有相當的困擾。

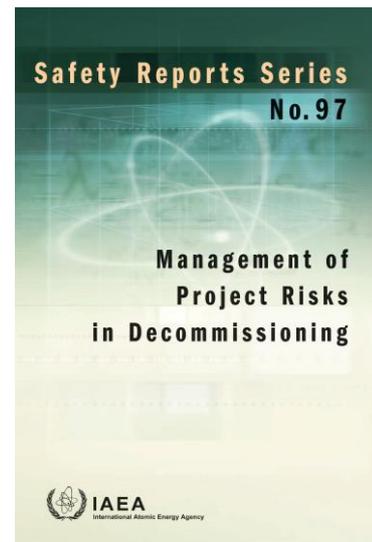
7. 國外亦有核設是先進行設施之拆除並做現場貯存，於最終處置場完成後再進行最終處置作業。惟此種做法，亦可能會遭受社會上強大的反對壓力。

附錄 三 新書介紹-除役計畫之風險管理

Management of Project Risks in Decommissioning

書籍資料

- **Series:** IAEA Safety Reports Series No. 97
- **Paperback:** 57 pages
- **Publisher:** Printed by the IAEA in Austria, April 2019
- **Language:** English
- **ISBN 978-92-0-108918-2**



目錄

1. INTRODUCTION
2. RISK MANAGEMENT
3. RISK MANAGEMENT SPECIFIC TO DECOMMISSIONING
4. RISK MANAGEMENT AT THE STRATEGIC LEVEL
5. RISK MANAGEMENT AT THE OPERATIONAL LEVEL
6. RELATIONSHIP BETWEEN RMSL AND RMOL
7. CONCLUDING REMARKS

「除役計畫之風險管理」書摘

作者：尹學禮

除役計畫之風險管理 Management of Project Risks in Decommissioning 是國際原子能總署於 2019 年 4 月出版之第 97 號安全系列報告(Safety Reports Series No. 97)。

第一章是簡介。說明許多核設施因運轉屆期，或因經濟、政治、社會因素，或因意外事件而停止運轉，需進行除役，相關之廢棄物需進行貯存、處理或處置。業者需先準備最終除役計畫 FDP，經主管機關核准後據以執行除役工作，由於有內在與外在的風險，會影響除役計畫之安全、成本與時程，故必須加以管理。負責除役的單位，常常沒有除役之經驗，不能瞭解風險管理的益處，所以建立了除役風險管理國際計畫 DRiMa (International Project on Decommissioning Risk Management)，以分享除役管理之方法與經驗。

這本報告的重點，即在針對除役規劃與執行階段有關風險管理方法的應用。由於除役計畫之規劃與執行期間的不確定因素，使得除役風險具有動態之特質，必須定期審查與更新，以反應各項特性改變之情形。除役計畫風險管理的方法可適用於所有的計畫，但是應採漸進的方式，小的設施可作簡單一些的評估。報告第二章是風險管理的概述，第三章說明針對除役的風險管理，第四章說明策略層次的風險管理 RMSL(Risk Management at the Strategic Level)，第五章說明執行層次的風險管理 RMOL(Risk Management at the Operational Level)，第六章說明 RMSL 與 RMOL 的關係，第七章為結論。

第二章是風險管理的概述。說明針對風險的確認、評估、處理與監測等程序，達到控制風險的作法。風險本身包括具有正面意義的機會，與具有負面意義的威脅，風險的管理即是要求達到機會的最大化，以及威脅的最小化，並且瞭解其發生的機率與可能的影響。採用風險管理的優點，包括能有效管理除役作業、確認關鍵重點以確定保有資源、可以協助有效的決策、強化組織對除役程序的瞭解、以及可供與外界利益相關者溝通說明等。風險管理的程序，包括瞭解風險的內容、定性定量的分析、建立控制風險的處理規劃、及建立計畫以確保對風險的監測、審查及修訂等。

針對風險管理要先定義影響計畫之內部與外部因素，外部因素是指會影響組織之目的者，而內部因素是指組織內會影響計畫之目的者。建立之風險

標準，要反映組織的價值、目的與資源，也需要考量管制法規的需求；需考慮之因素包括發生的原因與影響、發生的可能性、發生可能性與影響的時序關係、如何決定風險的層次、利益相關者的觀點、可接受的風險水平、以及有多重風險時如何考量等，而所定的標準必須要明確。

可藉由有經驗者透過腦力激盪方式的討論會，來確認除役計畫可能之風險，再分析其可能發生的機率與影響，將機率之數值與代表影響嚴重性的數值相乘，即得到代表風險的值，並可與風險標準值作比較。相關風險要處理時，必須先考量處理後之殘餘風險是否可容忍接受，若仍不能接受，則需規劃做進一步的風險處理。有關威脅類的風險處理，其可能之處理策略，包括避免、消滅、轉移、以及接受等；而機會類的風險處理，其可能的處理策略，包括利用，強化，分享，或忽略等。針對發生機率較高的風險，亦可先行準備替代方案，以備及時應用。

除役計畫於規劃及執行階段，均需定期實施監測與審查，其重點是當狀況改變、有新的資料、除役計畫改變，或是於風險處理過程需要之監測等。風險管理的結果應作風險登錄，內容包括處理策略與採取之措施等；風險登錄應依監測與審查程序之結果經常更新，若相關之風險登錄項目於過期不須再作追蹤時，僅須註明其現況而不須予以刪除，以供後續瞭解除役之風險管理過程。風險管理程序中，須包括與內部與外部利益相關者之溝通與諮商，不僅是提供經由風險管理之決策資訊，亦可確保相關之利益關心者受到重視，而且也是確保計畫透明的重要措施。

第三章說明針對除役的風險管理。針對核設施之除役，其計畫之風險管理特色，須特別重視安全相關之風險。除役之程序，自準備最初除役計畫 IDP (Initial Decommissioning Plan)，經持續更新修正為最終除役計畫 FDP (Final Decommissioning Plan)，於經管制單位核准後據以執行包括拆除、除污、與清潔復育等工作，至完成執照終止之目的。除役之規劃時間很長，而且最初規劃之不確定因素較多，因此於規劃及執行層次，均需考量風險之管理。除役計畫於執行期間產生風險的原因，包括面對第一次的工作、對原設施之資訊不足、設施內有高危險的狀況或材料、拆除過程中產生新的危險狀況、以及進入高輻射的工作區域等。

最初除役計畫 IDP 之內容較粗略而假設性高，會需要持續作更新，其內容包括除役之不同方案及其可行性、除役工作之財務、廢棄物的類別數量及

其處理貯存與處置之規劃、以及除役紀錄資料之保存等事項。因此 IDP 之關鍵假設，包括各方案的可行性、廢棄物之管理政策與相關基礎建設、除役工作之財源機制、相關法規、組織架構與人力資源、安全環境與健康因素、以及利益關心團體與社會民意的影響等。編撰最終除役計畫 FDP 時不確定因素已減少，經核准後會成為策略決定，必須遵守以進行除役工作。雖然風險管理與安全評估均是針對除役計畫，但是兩者之程序不同，風險管理是控制風險以達成計畫之目的，而安全評估則是強調除役計畫可以安全地完成。

第四章策略層次的風險管理 RMSL。說明採用 RMSL 於除役之規劃，以確保其關鍵假設與策略決定是基於最佳的資訊，RMSL 包含了針對關鍵假設與策略決定的確認、分析、評估、處理、監測及審查等程序，以及與有興趣團體之溝通與諮商。RMSL 之優點除了是透過系統的程序外，亦可確保 FDP 策略的決定是合理可行。RMSL 程序的主要步驟，包括先建立一組合宜的關鍵假設，由專家評估各關鍵假設的不確定性，並評估改變各關鍵假設時對結果之影響，據以定出減少各關鍵假設不確定性的處理行動，並於過程中建立各關鍵假設的登錄，以及做後續的監測等。自準備除役之 IDP 到 FDP 均採用 RMSL，會發揮最大的管理效果。

建立的關鍵假設對除役計畫之成本與廢棄物產生量影響很大，例如假設運轉的時間很長，可以存下足夠之除役費用，或是假設處置場之容量足夠大等。其次於評估各關鍵假設的不確定性時，可分別設定為低、中、高三種層次，例如處置場之完工時程延誤，則有可能會改變原除役計畫。接著要定出減少各關鍵假設不確定性的處理行動時，應先針對不確定性高且對除役策略影響較大者，期以減少其不確定性，並做後續的監測。業者應對各關鍵假設做定期之審查，若關鍵假設仍屬正確，則不需進一步之行動，若關鍵假設有改變時，應評估其對結果之影響，而當關鍵假設不正確時，則需作必要之修改並加以登錄。綜合而言，於除役計畫中採用 RMSL 是有效而重要的，能有效管控關鍵假設的不確定性，而 RMSL 程序需經常作監測審查以及記錄。

第五章說明執行層次的風險管理 RMOL。其目的是控管除役計畫執行期間之風險，亦即是於除役計畫執行期間協助執行 FDP，而 RMOL 包括確認、評估、監測、與處理相關之風險，儘可能去完成除役計畫之目標。啟動除役計畫風險管理之關鍵步驟，是要先定義計畫之環境、範圍與邊界，其所需要之資

料，包括計畫背景、設施資訊、計畫啟始時間、計畫時程、最終除役計畫 FDP、安全評估與分析報告、與民眾與利益相關者之溝通狀況、以及法規資訊等。

風險評估的步驟，需先確認包括威脅與機會之計畫風險，其次應分析風險之機率與影響，並據以評估風險之水平及風險之優先順序。RMOL 通常由專業人員透過討論進行，專業人員包括計畫經理、工程人員、除役團隊主管、設施運轉人員代表、安全專家、管制專業人員、環保專業人員、溝通專家、廢棄物管理專家、運轉與人力資源專家、安全與輻射防護專業人員、以及其他類似計畫之獨立性質專業人員等。風險確認的目的是確保計畫所有之風險與影響，均經過確認、討論以及記錄，可以採用計畫工作分析或類似計畫之類別資料，也可參用本報告附錄的風險族群提出包括威脅與機會的各類風險。風險分析是要計算包括威脅與機會的機率與影響，例如風險的機率可由其範圍為 0-20%、21-40%、41-60%、61-80%及 81-100%，分為極低至極高五類；風險的影響或可由費用占剩餘預算範圍之 <1%、1-5%、6-10%、11-20%及 >20%，分為極低至極高五類。作風險影響分析時，通常考量之因素可包括時程、成本、安全與品質等，實務上要考量風險標準與計畫目標，以定出組織實際上擬採用之標準。於風險評估時，要先定出風險之標準，再決定風險之水平分數，並排出風險之優先順序。而在作機會之影響評估時，通常是依成本與時程之節省程度來考量。

接下來是決定風險處理的策略，針對威脅性的部分，可依風險嚴重性的分數，依次分為避免、減輕、轉移與接受等策略，而針對機會性的風險，則會以採用來增進其效應。風險處理的步驟包括，選取處理策略，擬定計畫，分析成本與時程需求，執行並記錄相關事項。對簡單型的計畫，可以接下去做相關之追蹤監測，但對較複雜之計畫，可以再評估殘餘之風險是否可以接受，是否需要再做進一步處理等。風險之登錄是將計畫過程之風險，作完整記錄，其內容可包括，風險之代碼，風險內容及影響，風險的類別與狀況，風險的所有者，風險對計畫成本、時程、品質與安全之影響，處理措施前的風險分析與結果，風險處理之策略，處理後之殘餘風險，以及相關討論的註記等。後續之風險監測工作，包括執行處理策略時之監測，以及定期審查風險登錄的狀況。當相關之風險已過了有效期或與計畫不再相關時，並不需要將此風險由登錄上刪除，只要註明不再適用即可。

風險之模式，有助於評估風險處理後成本與時程之容差，可採用一般商用之軟體工具，針對會影響成本與時程各參數之機率分佈函數，利用蒙地卡羅方式去模擬，以確認符合計畫之預算與時程。彙總而言，採用 RMOL 作業

時要注意之事項包括，使用風險登錄使有助於計畫之風險管控，要建立有價值的風險資料庫，由組織內各計畫經理人參與風險登錄之討論，要求計畫主管定期報告風險與相關之措施，與承包商合作時，要有共同參與之風險登錄討論，期終與年度報告時，要包括風險管理之建議、發現與經驗回饋，以及可同時考量 RMSL 與 RMOL 之項目，以助於確認風險。

第六章說明 RMSL 與 RMOL 的關係。由於最初除役計畫 IDP 內之關鍵假設，會成為最終除役計畫 FDP 內之策略決定，因此 RMSL 是保證 FDP 是依最佳資訊而得，而 RMOL 是保證相關決策之執行，對計畫之風險是最低的。RMOL 有比較量化考量風險水平或分數，而 RMSL 由於對假設的影響較不明確，所以只考量不確定性的水平。所以 RMSL 假設之成分較高，但是 RMOL 之資料比較明確，尤其是 FDP 有經過管制單位之核准，是執行階段的正式決策，必須據以執行。任何改變之決策需確認符合 FDP 之目的，必要時需重新申請核准新的 FTP。

某些情況下，相關之事件會使得風險造成之威脅與機會，超出了計畫團隊能管控的範圍，必須由計畫外更高之管理階層來處理。例如除役計畫開始日期，將於另外一個計畫完成後才能執行；或者經風險確認，將由除役單位移轉至廢棄物管理單位來負責；或者幾個計畫共用人力，要如何整合考量人力之分配等情況。

第七章為結論。這本報告說明將風險管理應用於除役計畫之規劃與執行階段，包括策略層次的風險管理 RMSL 與執行層次的風險管理 RMOL，其中 RMSL 用於規劃期以管理關鍵假設與策略決定的不確定性，亦即是自最初除役計畫 IDP 至最終除役計畫 FDP 階段；而 RMOL 則是用於執行 FDP 過程之風險管理。RMSL 與 RMOL 之合併應用，有助於除役計畫 IDP 與 FDP 之真實性與可辯護性，並可在即時且符合成本效益下，協助達成除役計畫之目標。

附錄說明風險的族群。為便於討論時之做腦力激盪，於附錄中列出範例，以協助思考得到更完整且符合需求的計畫風險。其第一階包含的風險共分為十類，包括設施初始條件，除役計畫最終狀態，廢棄物之管理，組織與人力資源，財務狀況，與承包商之介面，策略與技術，法規架構，安全以及有興趣團

體等。相關之風險，又可細分為第二階與第三階。以廢棄物之管理類為例，其第二階之風險，包括廢棄物管理政策(其第三階包括廠址釋出標準，清潔標準，與廢棄物接收準則等)，廢棄物之估算與特性(其第三階包括運轉廢棄物，除役廢棄物，與其他廢棄物等)，以及廢棄管理基礎設施(其第三階包括，處理設施，貯存設施，處置設施，以及運送等)。

心得與建議:

1. 隨著核設施除役作業的蓬勃發展，此一報告是國際原子能總署針對除役計畫，指出其規劃與執行階段風險管理的重點。
2. 策略層次之風險管理，著重在不確定性的水準，而執行層次的風險管理，因數據較明確，是推行最終除役計畫 FDP 的重要管理工具。
3. 面對除役計畫成本與時程的需求，以及其交互關係的複雜性，除役計畫的管理高層，當更為重視如何在規劃之經費與時程內達到除役之目的。本報告提供了很好的風險管理策略、步驟與方法，透過量化的風險分析，使能作出最佳的決策，與輻射防護中的 ALARA 計畫，對促使計畫更優化有類似之處。
4. 於除役計畫之規劃及執行期間，遵循風險管理，不僅可使相關作業過程之資訊達到透明化，而且與內部與外部利益團體溝通時，是非常有效的資訊。

附錄四 「雷射放射性除汙之應用技術開發」專題演講



蔣安忠

AN-CHUNG CHIANG

學歷

2002 博士 國立清華大學電機工程學系
1999 碩士 國立清華大學原子科學系
1997 學士 國立清華大學原子科學系

經歷

2007/01-今 國立清華大學原科中心 核能技術師
2006/08-2007/01 國立清華大學光電科技研究所 博士後研究員
2004/04-2006/07 國立清華大學生科系/生技所 博士後研究員
2004/02-2005/02 明新科技大學光電系 兼任助理教授
2002/09-2004/03 國立清華大學電機工程學系 博士後研究員
曾任台電核一廠除設計畫審查委員
106 年度國立清華大學優秀職技人員

代表著作

- 林元堯、林彥穎、林碩泰、蔣安忠, 「螺旋相位調制共振腔渦旋雷射光產生器及渦旋雷射光的產生方法」, 中華民國專利, 發明第 1651906 號, Feb 21(2019), 國立清華大學。
- Y.J. Lin, Y.Y. Lin, A.C. Chiang, "A Compact and Portable Laser Radioactive Decontamination System Using a Fiber Laser and a Polygon Scanner," Conference on Lasers and Electro-Optics, CLEO 2018, San Jose, USA, 13-18 May 2018; and Optics Photonics and Laser Technologies (Optics & Laser-2019) June 03-05, 2019 in San Francisco, CA, USA.
- Y.J. Lin, Y.Y. Lin, Y.H. Huang, A.C. Chiang "Fiber-based Portable Laser System for Radioactive Decontamination," 2018-SAT-S1005-O002, Optics & Photonics Taiwan, International Conference - Annual Meeting of Taiwan Photonics Society, Tainan, Taiwan, 8 Feb 2018.
- A.C. Chiang and Y.Y. Lin, "Line-narrowed electro-optic periodically-poled-lithium-niobate Q-switched laser with intracavity optical parametric oscillation using a grazing-incidence grating" Chin. Opt. Lett., 12 041401 (2014).
- Yen Y. Lin, Yuan Y. Lin, S.W. Zhu, A.C. Chiang, M.S. Lee, and C.H.

現職

核能技術師

國立清華大學原科中心

負責人

國立清華大學水池式反應器

委員

台電核二廠除設計畫

聯絡資訊

Phone: +886-3-5742867

Email: acchiang@mx.nthu.edu.tw

Add: 新竹市光復路二段 101 號-

清華大學原科中心反應器館 208 室

專長

- 雷射光學
- 射束物理
- 反應器物理
- 除役核能電廠

國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY



雷射放射性除污之應用技術開發

國立清華大學
報告人：蔣安志
中華民國 108 年 5 月

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 1

1

國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

大綱

- 放射性除污概述
- 雷射光學的基本原理
- 雷射除污應用技術開發與目前研究成果

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 2

2

國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

放射性除污概述

- 基本概念
 - 利用清洗、加熱、機械、化學(或電化學)作用或其他方式來除去核設施或相關設備表面上的放射性污染物。
 - 相關技術的研究已經超過70年。1970年初開始大規模發展化學除污技術。
 - 近年發展方向：縮短除污時間、減少廢料量和提高除污效果。

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 3

3

國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

放射性除污概述

- 放射性除污的主要目標
 - 隔離物質表面或表面下的污染
 - 降低輻射曝露
 - 回收利用舊設備和材料
 - 減少需要特別處置的廢棄物體積
 - 使場地和設施恢復到不受限制使用的狀況

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 4

4

國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

放射性除污概述

- 進行除污工程前的評估項目
 - 為何此組件需被除污？
 - 此組件能否無條件外釋？
 - 此組件能被直接處置？
 - 需要何種處置之場所？
 - 處置場所可接受之輻射劑量及污染程度為何？
 - 除污費用符合成本效益嗎？
 - 應使用何種除污方法？
 - 產生之二次廢棄物為何？
 - 產生之二次廢棄物有輻射傷害嗎？

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 5

5

國立清華大學
NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

放射性除污概述

- 執行除污作業實務操作面的考量點
 - 出現的核種及其物理狀態
 - 受污染之物質及表面形式
 - 受污染表面之大小、組態及位置及與其它表面之關係
 - 受污染區域之可接近性
 - 期望受污染表面在除污完成時之情形
 - 期望除污達到之程度
 - 在表面除污後需保有之功能特性
 - 可用於除污之設備及物質，包括目前在廠區及在他處而可用者
 - 工作人員安全及輻射劑量降至最少
 - 經濟有效之替代方案，包括處置、替換或除污、再利用等之有關費用
 - 將產生之廢棄物數量、性質及其處置費用，包括由除污溶劑所產生之二次廢棄物
 - 人力資源及訓練需求

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 6

6

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

除污因子

■ 除污因子(Decontamination Factor, DF)的定義

$$DF(\%) = \frac{(\text{初始活度}) - (\text{剩餘活度})}{(\text{剩餘活度})} \times 100\%$$

或

$$DF = \frac{(\text{初始活度})}{(\text{剩餘活度})}$$

$$DF(\%) = \frac{DF-1}{DF} \times 100\%$$

DF	DF(%)
1	0
20	95
50	98
100	99
200	99.5
500	99.8
1000	99.9

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 7

7

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

實際應用: 除役核能電廠的放射性除污

台電核能月刊第341期, 民國100年5月
© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 8

8

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

台電核能月刊第341期, 民國100年5月
© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 9

9

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

除污技術概述

■ 定義

- 透過物理、化學或其他方法移除核設施組件、系統、結構物內、外表面存在的放射性物質
- 須先理解放射性核種如何與物體表面結合, 才能選擇適合的除污方法。

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 10

10

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

放射性核種與物體表面的結合形式

- 以分子間作用力結合的非固定性污染。
 - 容易去除 ☺
- 以化學吸附或離子交換形式結合的弱固定性污染。
 - 除污難度略高 ☹
- 放射性核種擴散滲入基材內部或基材材料內微量元素被中子活化產生放射性核種。
 - 難以除污 ☹

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 11

11

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

一般的放射性除污技術分類

除污方法	說明
物理法	利用沖洗、吸塵、機械擦拭、高壓水/蒸氣噴射、磨料噴射表層剝離、超音波除污等方法, 對污染物進行物理效應的處理。
化學法	利用化學溶劑清洗污染區域和設施, 以達到除污的目的。
電化學法	利用電解反應, 使造成表面污染的放射性核種進入電解槽中, 達到除污的目的。
熔融法	將低度污染的金屬廢料經熔煉處理後, 使大部分的放射性核種進入爐渣或尾氣中, 少部分殘留於鑄錠內呈現均勻分佈。
生物法	利用微生物對放射性污染物的生物分解或吞食作用, 除去這些物質, 達到除污的目的。

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 12

12

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

物理法

- 常見的物理除污方法
 - 沖洗、吸塵、擦拭、高壓水/蒸氣、噴砂、超音波



© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2018/11/13 13

13

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

化學法

- 利用化學溶劑清洗污染區域和設施。
- 氧化>還原>除污>淨化
- 常用的除污劑
 - 有機溶劑、酸液、鹼液、氧化劑、還原劑、配位化合物、介面活性劑
- 可採用浸泡、或塗布
- 除污效果取決於除污劑的種類、濃度、作用時間、反應溫度



Decontamination thixotropic gel AREVA, France (脂溶性膠體)

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2018/11/13 14

14

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

國際間常用的化學除污方法

- Low Oxidation-state Metal Ion (LOMI)
 - 西屋
 - 以草酸為除污劑
- Classical Oxidation-Reduction Process (CORD)
 - 西門子、AREVA
 - 以草酸為除污劑
- CAN-DECON
 - 加拿大原子能總署
 - 以硝酸或檸檬酸加EDTA為除污劑

$$\text{Cr}_2\text{O}_3 + 2\text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HCrO}_4^- + 2\text{MnO}_2(\text{s})$$

$$\text{MnO}_2 + \text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Mn}^{2+} + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$$

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2018/11/13 15

15

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

電化學法

- 利用電解反應、將欲除污之物件作為陽極、電解槽為陰極，通電後污染表層均勻溶解，放射性污染核種進入電解槽中
- 適用形狀複雜、小體積的金屬組件
- 電解過程昂貴，需考量經濟因素



© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2018/11/13 16

16

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

熔融法

- 材料科學冶金技術
- 將低度污染的金屬廢料經熔煉處理後，大部分的放射性核種進入爐渣，少部分殘留於鑄錠內呈現均勻分布
- 鑄錠可轉用於製造放射性廢料容器或屏蔽、圍阻體之用
- 需經過主管機關評估同意



© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2018/11/13 17

17

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

各種新型放射性除污技術的特點和適用對象

除污技術	基本說明和特性	適用對象
化學泡沫	以泡沫載除污劑，效率高，二次廢物少，略帶腐蝕性。	大體積容器、結構複雜度高的設備。
超臨界流體	具備高擴散性、低黏度、良好的溶解能力。	小型且結構複雜度高的設備。
臭氧	利用臭氧將難溶的腐蝕產物氧化。	表面腐蝕物。
雷射	表面的薄氧化膜吸收雷射能量，受熱分解從而消除。	污染相對使用雷射之波長具有良好吸收能力。
液態放電	電解溶解一層很薄的金屬表面。	金屬、不銹鋼類。
電漿	噴射氣電漿，使污染核種部分發生氧化反應再以化學方法回收。	金屬表面的銹氧化層。
蒸餾水	使用沸騰氣流將水蒸餾，強化除污過程。	大型污染表面。
空氣轉輸	使用特殊結構膠除空氣受污染。	管線、溝槽、水渠。

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2018/11/13 18

18

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射放射性除污：一種新的除污技術

雷射剝蝕(Laser ablation)原理：熱效應與機械效應

WM2012 Conference, February 26 – March 1, 2012, Phoenix, Arizona, USA
Surface Decontamination Using LASER Ablation Process – 12932
Fabrice Mogge, Xavier Lecardone, Frederic Damerval
AREVA – Back End Business Group - Clean Up Business Unit, France

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 19

19

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射表面處理的形式和相關應用的產值

Different type of Laser material processing Revenue of Material processing & lithography Laser

Year	2013	2014	2015	2016	2017
Revenue	3530	3663	3804	4072	4362

Annual Growth ~ 5%
Source: Laser Market Research/Stratistics Unlimited, GrandView Research

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 20

20

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

不同光源對「氯化橡膠塗層」的除污特性比較

光源	剝蝕閾值 Ablation Threshold (J/cm ²)	移除效能 Removal Efficiency (m ² /J)	移除速率(*) Removal Rate (m ² /hr)
弧光燈	37.4	4×10^{-10}	0.24
連續式CO ₂ 雷射	0.3	10^{-8}	6
準導體雷射	38	6.7×10^{-10}	0.4
Excimer雷射	0.04	8×10^{-10}	0.5
Nd:YAG雷射	4.8	10^{-9}	0.6

由頻譜特性決定 作用機制(熱效應)的強度 綜效評比

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 21

21

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

不同雷射對「金屬材料」的吸收譜線

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 22

22

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

典型的雷射除污系統示意圖

LIU, M.J., Schmidt and J.T. Spencer, "Comparison of the characteristics of HPDL, CO₂, Nd:YAG and excimer lasers for paint stripping", Laser Institute of America Proceedings, Laser Materials Processing (CALEP 2000), Vol. 89A, 2000, pp. 40-43.

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 23

23

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

例：使用雷射進行放射性避雷針的除污

■ 放射性避雷針

- 避雷針在尖端處製造一個電場，將閃電吸引過來，將電流引至地面釋放掉(接地)，傳統避雷針保護半徑小(大約安裝高度的1-1.5倍)。
- 在避雷針的中空腔體內塗佈放射性物質(Am-241)，它是一種α射源，可以游離空氣，產生帶電離子，從避雷針尖端處逸出時就會建立電場，吸引落雷。
- α粒子空氣游離能力：~4萬對離子/cm，射程短，不影響建築物內。
- Am-241半衰期432.6年，以其作為放射性避雷針可使用一兩百年。
- 優點：構造簡單，不需要其他電子裝置，不用擔心被落雷打壞。
- 缺點：活度已超過豁免管制(大約數MBq)，使用時需要經過游離輻射安全訓練，經主管機關登記備查，觀摩處理廢項(先經核准後送核研所處理)。
- 觀摩時往往發現避雷針表面有放射性物質(因避雷針受雷擊而剝落逸出)。
- 附贈圖紙141張

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 24

24

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

例：使用雷射進行放射性避雷針的除污

Plate	Surface	Before cleaning (cpm)	After cleaning (cpm)	SP (%)
1	Upper	20775	8175	69
	Lower	19862	19652	91
6	Upper	13775	246	98
	Lower	10754	238	98
4	Upper	10224	922	91
	Lower	868	233	73
2	Upper	5205	1238	76
	Lower	4055	246	94
7	Upper	1071	212	80
	Lower	153	3	97
8	Upper	45	2	98
	Lower	832	147	82
7	Upper	306	38	87
	Lower	10260	4209	59
3	Upper	4194	885	79

After 25-min cleaning

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 25

25

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射的基本原理

雷射(激光) LASER

由愛因斯坦提出

Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation

“被輻射的受激發射所放大的光線”

- 方向、波長、相位都一致的人工光線
 - 導向性、單色性、同調性
 - 能量密度高

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 26

26

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的導向性

氦氖雷射 HeNe Laser

光路直徑 ~ 1 mm

100 m

光路直徑 ~ 6 cm

380,000 km

10 cm

2.4 km

應用
光通訊、雷射雷達、雷射測距儀、攝磁器、光碟機、等等。

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 27

27

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的單色性

一般光源：含有各種不同波長的光
雷射光源：僅含單一波長的光

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 28

28

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的同調性

空間的同調性 → 導向性 雙狹縫干涉儀

時間的同調性 → 單色性 麥克遜干涉儀

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 29

29

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的能量密度

能量密度 = 單位面積的能量 = $\frac{\text{光的能量(焦耳)}}{\text{受光面積(平方公分)}}$

自然光：能量密度逐漸減少 (就導向性而言)

雷射光：能量密度幾乎固定 (就導向性而言)

自然光：色散現象 聚焦不易 (就單色性而言)

雷射光：單一波長 容易聚焦 (就單色性而言)

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 30

30

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

催生雷射的七位關鍵人物

賽奧度·H·梅曼 1960年成功研發人類最早的雷射光
 亞伯特·愛因斯坦 1916年提出受激放射
 高登·克爾特 1957年設計光雷射裝置，並命名為LASER
 查爾斯·H·湯蘭斯 雷射基本原理之專利
 亞瑟·L·謝朗 雷射基本原之專利
 亞歷山大·M·普洛赫洛夫 雷射電子學專家
 尼可萊·G·巴賽夫 雷射發明之路
 量子電子學專家 雷射發明之路

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 31

31

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的來源: 受激輻射

原子被激發
 原子回到穩定狀態
 $E = h\nu$
 自發輻射 spontaneous emission
 受激吸收 stimulated absorption
 受激輻射 stimulated emission

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 32

32

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的產生過程

- 雷射物質處於穩定的基態 (ground state)
- 外來能源激發基態原子 (excited state)
- 原子回到基態放出光 (spontaneous emission)
- 自發輻射引發受激輻射 (stimulated emission)
- 光放大作用 (optical amplification)

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 33

33

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射光的產生條件: 居量反轉

居量反轉: Population Inversion

2-level system
 3-level system
 4-level system

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 34

34

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

紅寶石雷射

外來激發
 $R = 100\%$
 $R = 9\%$
 高壓電源
 高反射鏡
 氬氣閃光燈
 水冷系統
 紅寶石
 部份反射鏡
 強力雷射光

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 35

35

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

產生雷射光的三個要素

雷射物質
 適當的激發能源
 雷射共振腔

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 36

36

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射表面除污系統概念圖

15W, 250μl, 60 kHz, 25 kW

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 43

43

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

光束掃描機構的選用

Different structure laser surface machining comparison

	Cylindrical lens type	Galvo motor type	Ours
Structure			
Laser power	>500W	10-20W	10-20W
Maximum scanning speed	N/A (Not scanning)	6000 mm/s	88500 mm/s
Power consumption	~1000W	~110W	~80W
Issue	Expensive, large size	Poor surface roughness	

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 44

44

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射除污器的原型機

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 45

45

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

雷射除污器的運作參數

Voltage on DC Motor (V)	Spinning Speed (RPM)	Line Frequency (kHz)	Number of Pulses per Scan Line ¹	Processing Speed (mm/s)
6.6	5735	1.15	52	57350
7.3	6035	1.21	50	60350
8.1	6745	1.35	44	67450
8.8	7415	1.48	40	74150
9.6	7885	1.58	38	78850
10.4	8850	1.77	34	88500

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 46

46

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

放射性污染樣本的製備

Nuclear equation
 $^{60}\text{Co} + n \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e + \text{gamma rays}$

Sample preparation process

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 47

47

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

清大原子爐的淨水設施

清華水氘式反應器冷卻水迴路
Tsing-hua Open-pool Reactor (THOR) Coolant Circuit

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 48

48

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

實際進行中的雷射除污作業

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 48

49

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

處理前後的樣本照片

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 50

50

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

使用HPGe計數的實驗結果

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 51

51

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

活度變化情形與除污因子

Samples	Cu-60 activities (Bq)		Decontamination Factor	Surface Roughness (μm)	
	Before	After	DF(%)	Before	After
Stainless Steel -1	5.7405	0.444	92.27 %	0.6	3.1
Stainless Steel -2	8.083	0.292	96.38 %		
Brass -1	6.006	0.046	99.23 %	15.0	2.5
Brass -2	5.475	0.228	95.84 %		
Iron -1	21.715	2.093	90.36 %	5.2	7.1
Iron -2	22.63	4.219	81.36 %		
Aluminum -1	69.575	34.25	50.78 %	14.0	33.3
Aluminum -2	74.1	39.73	46.39 %		

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 52

52

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

初步研究結論

- 光纖雷射可以很有效率地進行表面除污
 - 短脈衝、高重複率、高峰值功率
 - 與高速掃描機構結合
- 系統小型化、可攜化
 - 總耗電低(41.7W)、電池驅動
 - 12.8-V, 18-AH 鋰電池(重2 kg), 可連續使用2小時
 - 輕量化、可遠端操控
 - 系統總重<5 kg

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 53

53

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

未來研究方向

- 高功率光纖雷射
- 掃描光型的調整
- 管徑內部的除污

pipeline pigging technology

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 54

54

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

光孤立波的研究

- 光孤立波 (Optical Soliton)
 - 渦旋光 (vortex beam)
- 維持一定波型，能持續傳遞很遠的距離而不發散
- 相關專利由清華大學與中山大學合作開發
 - 台灣 (「螺旋相位調制共振腔渦旋雷射產生器及渦旋雷射的產生方法」，中華民國專利，發明第1651906號，2月21日 (2019))
 - 美國 (申請中)

Propagation of vortex beam with complex envelope $E^{(m)}$ in which m is the number of topological charges, follows the paraxial equations:

$$E^{(m)}(s, r, z) = E_0 \frac{r^m}{\sqrt{2\pi} w(z)} \exp\left[-i\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi r^2}{2\lambda z}\right)\right] \exp\left[ikz - i\left(\frac{\pi}{2} + \frac{\pi r^2}{2\lambda z}\right)\right]$$

$$R_1(s, r, z) = -\frac{1}{2k} \left[\frac{1}{w(z)} \frac{dw(z)}{dz} + \frac{1}{R(z)} \right] + \frac{1}{2k} \frac{d^2 w(z)}{dz^2} + \frac{1}{2k} \frac{d^2 R(z)}{dz^2}$$

$$w(z) = \sqrt{\frac{2\lambda z}{\pi}} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{1 + \frac{4\lambda z}{\pi R_0^2}} \right]$$

$$R(z) = z + \frac{z^2}{R_0}$$

$R_0 = \sqrt{\frac{2\lambda z}{\pi}}$ is the radius of intensity maximum

Transverse mode for different m

Propagation $m=1$ mode

Courtesy of Yuan Yao Lin

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 55

55

國立清華大學 NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY

謝謝指教

© NATIONAL TSING HUA UNIVERSITY 2019/11/13 56

56

附錄五 「MARSAME 基本方法與應用經驗」專題演講



現職

負責人

美國能源與環保顧問公司
ES&H Solutions

保健物理師、會士

美洲保健物理學會
Health Physics Society

專長

- 核能設施營運、安全、延役、除役
- 放射性廢棄物料管理與環境偵測
- 輻射安全
- 保健物理
- 擁有美國專案管理學會專案管理師 (PMP)、保健物理師(CHP)照，經美國能源部檢定為最高級聯邦專案主管。

吳全富

CHUAN-FU WU

學歷

- 1987 博士 美國麻省理工學院核子工程
- 1997 碩士 美國新墨西哥州立大學企管
- 1979 碩士 國立清華大學原子科學研究所
- 1977 學士 國立清華大學核子工程系

經歷

- 2013- 今 美國能源與環保顧問公司 ES&H Solutions 負責人
- 2011-2013 美國 ATL International 顧問公司 副總裁
- 2000-2011 美國能源部 聯邦高階主管(2007-2011)
- 1988-2000 美國橡嶺國家實驗室及西屋公司 技術部門經理
- 國際電工委員會核能儀器技術組(TC 45)國家委員會代表、分組召集人
- 國際廢料管理會議議程指導委員會委員
- 美國環保署輻射諮詢委員會委員
- 美國保健物理學會國際合作委員會委員
- 美國核能學會塞瓦納河分會會長 (2016)、卡斯貝分會會長 (2004)

代表著作

- 國際電工委員會 (IEC) 核能儀器標準 6 份
- 美國國家標準局 (ANSI) 輻射防護儀器標準 5 份
- 科技期刊文章、國際會議論文、專題演講及技術報告 56 份。

演講摘要

MARSAME 是“Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment Manual (美國多部會物質與設備偵檢與評估手冊)”的縮寫。於 2009 年 1 月發布的 MARSAME (NUREG-1575, Supplement 1) 是美國能源部 (DOE)、美國國防部 (DOD)、美國核管會 (NRC) 和美國環保署 (EPA) 等四個聯邦機構共同努力的成果，用來協助核能相關設施物質和設備的清理。MARSAME 手冊補充了 1997 年出版的美國多部會輻射偵測暨場(廠)址調查手冊 (Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)，MARSSIM 適用於不動產 (例如建築物和土地)，而 MARSAME 則適用於物質和設備等非不動產，它是一個多功能的工具，不僅可以幫助清除物質和設備，也可以防止意外將受到放射性污染的物件移交給民眾的情形。

MARSAME 適用對象包括以下三類：(1) 金屬、混凝土、工具、儀器、管路、導管和家具，(2) 散裝材料如垃圾、碎石、屋頂材料和污泥，(3) 儲存在容器中的固體、液體和氣體。MARSAME 輻射檢測涵蓋多個技術領域，包括初始評估 (Initial Assessment, IA)、測量質量目標 (Measurement Quality Objectives, MQO)、調查方法與考慮因素、調查計劃、調查實施和數據質量評估 (Data Quality Assessment, DQA)，這些主題通常包含在數據生命週期的四個階段中，即規劃、執行、評估和決策。

由於核設施通常存在大量可能受放射性影響的物質和儀器設備，因此業主需要訂定可接受的需要檢測、評估以及處置方案。MARSAME 運用靈活性和分級方法來設計、施行清理計劃，它定義了十三種處置選項，包括兩個用於再循環、兩個再利用、四個處置、一個“維持現狀”及四個“禁制 (Interdiction)”選項。

10 年來 MARSAME 已經成功地應用在許多官方核能設施及商用核能電廠，隨著從業人員對這個工具熟悉度的提高，其應用將會更普遍、更廣泛。MARSAME 方法得到適當的規劃和實施，它的點優包括加強對工作人員和民眾的保護、減少處置放射性廢物的數量、增加材料的再利用 (導致環境和材料可持續性優勢) 和節省經費。

此次研討包括兩個小時針對 MARSAME 的基本架構、檢測方法與設計、特性和優點、以及應用經驗做重點式的解說，並有一個小時的時間供參加人員提問與討論。

MARSAME Overview

Workshop Co-sponsored
by
Radiation Protection Association
National Tsing-Hua University
Health Physics Society Taiwan Chapter

Chuan-Fu Wu, PhD, CHP

Hsinchu, Taiwan
August 27, 2019

1

PRESENTATION OUTLINE

- Introduction
 - What is MARSAME?
 - MARSAME – MARSSIM Relationship
- Materials and Equipment
- The MARSAME Manual
- MARSAME Phases
- MARSAME Applications & Benefits

2

What is MARSAME?

- MARSAME is an acronym for “Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment”.
- The MARSAME Manual was published in January 2009.



3

What is MARSAME?

- MARSAME was a collective effort of the Department of Energy (DOE), Department of Defense (DoD), Environmental Protection Agency (EPA), and the Nuclear Regulatory Commission (NRC).
- It is a tool to aid nuclear/radiological facilities in the contamination survey and disposition of materials and equipment (M&E).

4



U.S. NRC
Multi-Agency Radiation Survey and Assessment of Materials and Equipment (MARSAME)

Purpose: provide Federal guidance on acceptable methods for surveying materials and equipment for disposition

Primary objectives:
Establish consensus among DoD, DOE, EPA and NRC on acceptable methods for surveying materials and equipment for disposition
Publish standardized guidance for investigation of radioactively contaminated sites, material and equipment

Status:
Published in January 2009
Developing training for users

5

MARSAME - MARSSIM Relationship

- The MARSAME manual supplements the Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual (“MARSSIM”).
- While **MARSSIM** is applicable to **real property (buildings and land)**, **MARSAME** applies to **materials and equipment (M&E)**.

6

Materials and Equipment

- 1st Group – metals, concrete, tools, equipment, piping, conduit, furniture
- 2nd Group – dispersible bulk materials such as: trash, rubble, roofing materials, sludge
- 3rd Group – Liquids, gases, and solids stored in containers (e.g., drums of liquid, pressurized gas cylinders, containerized soil)

7

The MARSAME Manual

8

MARSAME Manual Chapter Breakdown

- [Roadmap](#)
- [Chapter 1: Introduction and Overview](#)
- [Chapter 2: Initial Assessment of Materials and Equipment](#)
- [Chapter 3: Identify Inputs to the Decision](#)
- [Chapter 4: Develop a Survey Design](#)

9

MARSAME Manual Chapter Breakdown

- [Chapter 5: Implement the Survey Design](#)
- [Chapter 6: Evaluate the Survey Results](#)
- [Chapter 7: Statistical Basis for MARSAME Surveys](#)
- [Chapter 8: Illustrative Examples](#)

10

MARSAME Manual Appendices

- [Appendix A: Statistical Tables](#)
- [Appendix B: Sources of Background Radioactivity](#)
- [Appendix C: Examples of Common Radionuclides](#)
- [Appendix D: Instrumentation and Measurement Techniques](#)
- [Appendix E: Disposition Criteria](#)

11

What's Expected of a MARSAME User?

12

MARSAME Fundamentals

- Uses a graded approach & flexibility in the design and implementation of surveys
- Employs the data life cycle

13

MARSAME Data Life Cycle

1. Planning
2. Implementation
3. Data Assessment
4. Decision Making

14

1. Planning

- Team concept is encouraged to successfully plan a MARSAME contamination survey
- Depending on complexity, significant effort is often required
- Also encouraged is the seven-step process of the EPA "Data Quality Objectives" (DQOs)

15

Initial Assessment (IA)

- IA is the 1st step in the investigation of M&E, similar to the Historical Site Assessment (HSA) in MARSSIM
- The purpose of the IA is to collect and evaluate information about the M&E to support a categorization decision and support potential disposition of the M&E (e.g., release or interdiction)

16

Initial Assessment (IA)

- IA employs
 - Initial categorization of the M&E (impacted vs. non-impacted)
 - Visual inspections
 - Historical records reviews
 - Process knowledge evaluations

17

IA: Classes of Impacted M&E

- Three classes of impacted M&E, equivalent to the MARSSIM approach
 - Class 1
 - Class 2
 - Class 3
- The classification determines the relative level of survey effort (greatest effort for Class 1)

18

IA: Preliminary Surveys

- Preliminary surveys are conducted to acquire the missing data in case data gaps exist
- Preliminary surveys describe the physical & radiological characteristics of the M&E
 - 4 attributes of physical characteristics: dimensions, complexity, accessibility, inherent value
 - 4 attributes of radiological characteristics: radionuclides, activity (or concentration), distribution, location

19

MARSAME Disposition Options

Two disposition scenarios for impacted M&E:

1. Release Scenario (9 options)

- Reuse in a controlled environment
- Reuse without radiological controls (clearance)
- Recycle for use in a controlled environment
- Recycle without radiological controls
- Disposal as industrial or municipal waste
- Disposal as low-level radioactive waste
- Disposal as high-level radioactive waste
- Disposal as transuranic (TRU) waste
- Maintain current radiological controls

20

MARSAME Disposition Options

2. Interdiction Scenario (4 options)

- Remove M&E from general commerce and initiate radiological controls
- Decide to accept M&E for a specific application
- Decide NOT to accept M&E for a specific application
- Continue unrestricted use of M&E (no action)

21

Measurement Quality Objectives

- MQOs can be viewed as the measurement portion of the overall project DQOs (Data Quality Objectives)
- MQOs are characteristics of a measurement method required to meet the objectives of the survey
- Two key words are “measurement method” as this relates directly to the development of a survey design
- MQOs are not used in MARSSIM

22

What is a “Measurement Method”?

In MARSAME, a measurement method refers to the combination of an instrument (e.g., GM counter, NAI detector, etc.) and a measurement technique (e.g., scan, in situ measurement, sample collection followed by a separate laboratory analysis, etc.)

23

Examples of Radiological Survey Instruments



24

MQOs: The Big Six

- Measurement Method Uncertainty
- Detection Capability (MDC)
- Quantification Capability (MQC)
- Range
- Specificity
- Ruggedness

25

Implementation Phase

- Refers specifically to implementation of the selected survey design
- The implementation phase includes
 - Health and safety considerations
 - Handling, preparing, transporting & segregating M&E
 - Control of Measurement Uncertainty & MQOs

26

Principal Survey Designs

1. Scan-only survey designs (Section 4.4.1)
2. In situ survey designs (Section 4.4.2)
3. Survey designs that combine scans and static measurements (MARSSIM-type surveys, Section 4.4.3)
4. Method-based survey designs (Section 4.4.4)

27

MARSAME Assessment Phase

- The assessment phase follows the implementation phase
- Assessment refers to "Data Quality Assessment" (DQA)
- DQA is used to evaluate generated data and determine if they are of the right type, quality and quantity
- Preferred assessment approach is **independent verification & validation**

28

MARSAME Decision-Making Phase

- The decision-making phase follows the assessment phase
- This phase is designed to reach a "technically defensible decision regarding disposition of the M&E"

29

MARSAME Applications

Examples of applications of the MARSAME approach at a DOE site and a NRC licensee facility:

- Rail car survey at the Hanford Site in Richland, Washington
- M&E surveys at the Humboldt Bay nuclear power plant in Eureka, California

30

Hanford Rail Car Survey

- Utilized an in situ monitoring system to survey over 160 km of rail track with possible surface contamination
- The MARSAME approach included a reuse scenario, consistent with its intended purpose, and a disposal option

31

Hanford Rail Car Survey



32

Hanford Rail Car Survey

The Hanford rail car survey resulted in several quantified benefits –

- Reduction of 80,000 cubic feet of waste disposed, resulting in projected savings of US\$500,000
- significant cost reduction (88%) by surveying the rails with a moving monitoring system rather than a hand survey

33

Application of MARSAME at Humboldt Bay NPP

At Humboldt, a survey package was developed based on the MARSAME methodology to specifically evaluate several large transformers at the facility –

- Initial Assessment
- Categorization into impacted and non-impacted surfaces
- Classification of impacted surfaces as Class 3
- Description of physical and radiological characteristics

34

Application of MARSAME at Humboldt Bay (continued)

- Implementation of preliminary surveys
- Selection of a preferred disposition option
- Detailed survey design –
 - Measurement quality objectives
 - Survey implementation approach
 - Survey results
 - DQA to determine a disposition decision

35

Conclusions (I)

- MARSAME methodology was developed to promote consistency among federal agencies in the design and implementation of contamination survey and disposition for Materials and Equipment.
- MARSAME is an evolutionary outgrowth of the MARSSIM approach for applications in non-real property.
- MARSAME methodology employs a greater reliance on statistical approaches.

36

Conclusions (II)

- Benefits of proper application of MARSAME methodology include:
 - Protection of workers & the public
 - Reduced impact to the environment
 - Radioactive waste reduction
 - Reuse of materials with associated environmental and material sustainability advantages)
 - Cost reduction

37

Group Discussions – Q&As

38

附錄 六 光碟片資料清單

-  EPRI free report
-  France-ASN除役相關資料
-  IAEA除役相關資料
-  Inspection 相關資料
-  OECD-NEA除役相關資料
-  SearchEngine-3
-  UK-NDA除役相關資料
-  US-EPRI Experience Report
-  US-NRC除役相關資料
-  主辦之專題演講資料
-  拆除與拆卸技術相關資料
-  拆解案例及規劃
-  核設施除役參考書
-  除役相關研討會
-  國內82-107年研究計畫報告
-  108年核電廠除役技術彙編計畫期末報告(初稿送核研所)_slc1081114
-  EPRI 資料清單_20191112
-  IAEA除役相關資料清單_slc20190912
-  Inspection 相關資料清單_20191112
-  OECD-NEA除役技術資料清單_slc20190912
-  UK-NDA除役技術資料清單_20190912
-  US-EPRI experience report 資料清單_20191112
-  US-NRC除役相關資料清單_slc20190912
-  拆除與拆卸技術資料清單_slc20191114
-  核設施除役相關研討會清單_slc20191114
-  核設施除役參考書目錄_20191107
-  核設施除役參考書清單_slc20191017
-  國內除役相關研究計畫清單_slc20190731
-  視察員等訓練課程清單_slc20191113