

行政院原子能委員會放射性物料管理局  
委託研究計畫研究報告

**核子反應器設施除役安全議題研究**

計畫編號：103FCMA008

報告編號：103FCMA008-02

執行單位：核能研究所

計畫主持人：張淑君

子項計畫負責人：張淑君

報告作者：游鎮帆、張淑君

報告日期：中華民國 103 年 12 月

(本頁空白)

# **Research of decommissioning radioactive waste inventory management and regulation**

By

Zhen-Fan You, Shu-Jun Chang

## Abstract

This report is focused on collecting and analyzing the case about decommissioning radioactive waste inventory in the US and Europe. The first part introduces decommissioning radioactive waste sources and classification. And the second part is analyzed case about decommissioning radioactive waste inventory of PWR and BWR in the US. Final, the report offered a Forsmark nuclear power plant in Sweden decommissioning case about material inventory, radioactivity inventory and resulting waste amounts as a reference for Atomic Energy Council.

Keywords: Nuclear power plant, Decommissioning waste, Waste inventory

Institute of Nuclear Energy Research

# 除役放射性廢棄物盤點管制技術研究

游鎮帆、張淑君

## 摘 要

本研究報告著重於搜集與研析美國與歐洲之除役放射性廢棄物盤點實際案例，先對除役廢棄物種類進行來源及其分類介紹，接著則是對美國大型 PWR 及 BWR 電廠除役作了除役廢棄物相關的研析，最後以歐洲瑞典的 Forsmark 電廠之物料盤點、活度盤點及產生的廢棄物數量完整的實際案例來作為主管機關審查除役放射性廢棄物盤點之參考案例。

關鍵字：核電廠、除役廢棄物、廢棄物盤點

核能研究所

# 目 錄

1. 前 言 .....	1
1.1 研究目的 .....	1
1.2 研究內容 .....	1
2. 除役廢棄物之種類 .....	2
2.1 中子活化廢棄物 .....	2
2.2 放射性污染廢棄物 .....	4
2.3 其它放射性廢棄物 .....	4
3. 美國電廠除役廢棄物案例 .....	5
3.1 PWR .....	5
3.2 BWR .....	12
4. 歐盟電廠除役廢棄物案例 .....	17
Forsmark 電廠簡介 .....	17
Forsmark 電廠除役廢棄物數量 .....	18
物料盤點 .....	18
活度盤點 .....	50
5. 結 論 .....	70
參考文獻 .....	73
附件 .....	74

## 圖目錄

圖 4- 1 forsmark 核電廠的位置圖 .....	17
-------------------------------	----

## 表目錄

表 2- 1 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考電廠採取立即拆除之中子活化廢棄物分類 .....	3
表 2- 2 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考電廠採取立即拆除之中子活化廢棄 物分類.....	3
表 3- 1 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考電廠採取立即拆除及封存 30,50,100 年後再拆除所產生中子活化廢棄物之掩埋體積.....	7
表 3- 2 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考電廠採取固封除役所產生中子活化廢 棄物之掩埋體積.....	8
表 3- 3 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考廠除役所產生污染性廢棄物之掩埋體 積.....	8
表 3- 4 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考廠除役過程所產生污染性廢棄物之掩 埋體積.....	9
表 3- 5 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考廠各種除役方式之總除役廢棄物掩 埋體.....	11
表 3- 6 OECD 所估算各國採取立即拆除之總除役廢棄物掩埋體積.....	11
表 3- 7 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠立即拆除及封存 30,50,100 年再拆 除所產生中子活化廢棄物之掩埋體積.....	13

表 3- 8 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠除役所產生污染性廢棄物之掩埋體積 .....	14
表 3- 9 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠除役過程所產生污染性廢棄物之掩埋體積 .....	14
表 3- 10 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠各種除役方式之總除役廢棄物掩埋體積 .....	16
表 4- 1 RPV 及內部盤點 .....	19
表 4- 2 廠址金屬盤點 .....	19
表 4- 3 電廠建築資料及混凝土盤點 .....	20
表 4- 4 廠址砂石盤點 .....	20
表 4- 5 估計溶解鈾重 .....	22
表 4- 6 反應器系統表面的核種譜，一年衰變時間(Jonasson 2012a, b, c) ....	24
表 4- 7 F1 反應器壓力槽及其內部組件之中子活化活度(衰變時間為 1.6 年)(Jonasson 2012a) .....	26
表 4- 8 F2 反應器壓力槽及其內部組件之中子活化活度(衰變時間為 1 年)(Jonasson 2012b) .....	28
表 4- 9 F3 反應器壓力槽及其內部組件之中子活化活度(衰變時間為 1 年)(Jonasson 2012c) .....	30
表 4- 10 F1 一些汽機系統的核種譜(衰變時間為 1.6 年) (Jonasson 2012a) .....	32



表 4- 11 F2 一些汽機系統的核種譜(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012b).	34
表 4- 12 F3 一些汽機系統的核種譜(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012c).	36
表 4- 13 F1 反應器停機後，廢棄物系統的活度(衰變時間為 1.6 年) (Jonasson 2012a).....	38
表 4- 14 F2 反應器停機後，廢棄物系統的活度(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012b).....	40
表 4- 15 F3 反應器停機後，廢棄物系統的活度(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012c).....	42
表 4- 16 不同排氣系統之惰性氣體子核種活度盤點(衰變時間為一年) .....	44
表 4- 17 生物屏蔽體之中子活化活度(Jonasson 2012a, b, c) .....	48
表 4- 18 比活度分類.....	51
表 4- 19 F1- RPV, RPV 絕熱及內部組件活度盤點.....	53
表 4- 20 F2- RPV, RPV 絕熱及內部組件活度盤點.....	54
表 4- 21 F3- RPV, RPV 絕熱及內部組件活度盤點.....	55
表 4- 22 F1 及 F0 金屬活度盤點 .....	56
表 4- 23 F2 金屬活度盤點 .....	57
表 4- 24 F3 金屬活度盤點 .....	58
表 4- 25 混凝土活度盤點 .....	59
表 4- 26 鋼筋混凝土活度盤點 .....	60
表 4- 27 砂石活度盤點.....	61

表 4- 28 廢棄物容器數據：Farmark 電廠之所有廢棄物.....	62
表 4- 29 廢棄物容器數據：Farmark 電廠之處理設備廢棄物.....	64
表 4- 30 廢棄物混凝土數據：混凝土廢棄物 .....	65
表 4- 31 F1 - 廢棄物活度數據：混凝土廢棄物.....	65
表 4- 32 F2 - 廢棄物活度數據：混凝土廢棄物.....	66
表 4- 33 F3 - 廢棄物活度數據：混凝土廢棄物.....	66
表 4- 34 廢棄物容器數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物 .....	67
表 4- 35 F1 廢棄物活度數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物.....	68
表 4- 36 F2 廢棄物活度數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物.....	68
表 4- 37 F3 廢棄物活度數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物.....	68
表 4- 38 廢棄物活度數據：除役廢棄物 .....	69
表 A- 1 F0 和 F1 的 Nuclide vectors.....	74
表 A- 2 F2 的 Nuclide vectors .....	76
表 A- 3 F3 的 Nuclide vectors .....	78

(本頁空白)

## 1. 前 言

### 1.1 研究目的

基於管制業務技術研發需求，行政院原子能委員會放射性物料管理局爰委託核能研究所執行「103 年度精進放射性物料安全管理技術發展」計畫(103FCMA008)。本報告「除役放射性廢棄物盤點管制技術研究」即為該計畫所屬子項計畫「核子反應器設施除役技術安全評估研究」之核子反應器設施除役安全議題研究的工作成果。

### 1.2 研究內容

核子反應器設施除役安全議題研究於 103 年規劃完成「除役放射性廢棄物盤點管制技術研究」報告一冊。研究內容包含：

蒐集國外核設施除役計畫申請與執行過程的相關重要安全議題及挑戰，透過解析除役計畫執行過程的經驗回饋現況資訊。本年度將著重於蒐集與研析美國與歐洲除役實際案例，著重探討除役放射性廢棄物盤點、評估技術與分類技術，並依據國內低放射性廢棄物處置相關規範，探討廢棄物盤點、活度估算技術與分類技術，確保符合國內低放射性廢棄物最終處置管理之需求。

## 2. 除役廢棄物之種類

在核能電廠除役期間，將產生大量的低放射性廢棄物。一般而言，這些低放射性廢棄物可歸類為三種：中子活化廢棄物，放射性污染廢棄物，及其他放射性廢棄物。以下將詳細討論此三種廢棄物之來源及其分類。

### 2.1 中子活化廢棄物

中子活化廢棄物是指爐心周圍受中子照射過的組件，包含反應器壓力槽，爐心內組件，結構鋼，及反應器壓力槽周圍的混凝土。由於這些組件及材料被中子輻射穿透過，整個體積內均被活化，而無法利用表面除污來降低其活性。如果根據美國核管會 10CFR61.56 之低放射性廢棄物分類方式，則 PWR 及 BWR 電廠若採取立即拆除之除役方式，其各種中子活化廢棄物之分類分別如表 2-1 及表 2-2 所示。由此二表可知不管是 PWR 或 BWR，大部份的中子活化廢棄物均可歸類為 A 或 B 類。對於 PWR 電廠而言，頂部爐心格板及底部支柱由於含有高濃度的 Ni-63 及 Nb-94 而歸類為 C 類。底部爐心筒，熱屏蔽，底部格板，及爐心側板所含的 Ni-59, Ni-63, 及 Nb-94 之濃度超出 C 類之限值而被歸類為超 C 類。

對於 BWR 電廠而言，其控制棒及爐內儀器，噴射泵，以及頂部燃料導架所含的 Ni-63 及 Nb-94 之活性在 C 類範圍內而被歸類為 C 類。爐心側板所含的 Ni-59, Ni-63, 及 Nb-94 之活性則超過 C 類之最大限值，因此被歸類為超 C 類。由於這些核種之半衰期很長，即使封存 100 年後再進行拆廠，其所含的活性仍不可能顯著衰減，仍可能維持在超 C 類或 C 類之狀態。

表 2- 1 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考電廠採取立即拆除之中子活化廢棄物分類

中子活化分類	廢棄物分類
1.壓力槽圓柱型壁	A
2.壓力槽頂部	A
3.壓力槽底部	A
4.頸部支持組件	A
5.頂部爐心支柱	A
6.頂部爐心筒	B
7.頂部爐心格板	C
8.導管	A
9.底部爐心筒(lower core barrel)	GTCC
10.熱屏壁	GTCC
11.爐心側版(core shroud)	GTCC
12.底部格板(lower grid plate)	GTCC
13.底部支柱(lower support column)	C
14.底部爐心鍛件	B
15.雜項內部組件(不包含上述者)	B
16.活化混凝土	A
17.爐腔內襯	A

表 2- 2 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考電廠採取立即拆除之中子活化廢棄物分類

中子活化分類	廢棄物分類
1.汽水分離器	B
2.燃料墊塊	B
3.控制棒及爐內儀器	C
4.控制棒導管	A
5.噴射泵	C
6.頂部燃料導架	C
7.爐心底板	A
8.爐心側板(core shroud)	GTCC
9.反應器壓力槽壁	A
10.活化混凝土	A

## 2.2 放射性污染廢棄物

核能電廠之污染源有兩種。第一種是腐蝕性產物(crud)，細微的金屬粒子從反應器冷卻、冷凝、及飼水系統的管路內壁剝落，然後流經爐心受中子照射後變成具有放射性。這些活化後的腐蝕產物將散布到和反應器冷卻系統連接的所有系統。腐蝕產物在管路中積存的數量視液體的流速、溫度、及系統的幾何形狀等因素而定。如果這些系統有滲漏的話，則污染可能散布到地板，洩水坑，泥土等。第二種可能的污染源為燃料破損而造成少量的分裂產物外釋到反應器冷卻系統，然後再流到其他相關系統，並可能由於管路滲漏而污染地板、牆面、洩水坑及土壤等。

PWR 電廠除役其污染性廢棄物幾乎包括圍阻體、燃料、輔助、廢棄物及控制廠房之所有管件及設備，以及這些建築物表面。據美國核管會之估計，為了除污這些建築物表面必須敲掉約 50 mm 深。

BWR 電廠除役其污染性廢棄物幾乎包括反應器廠房，主圍阻體，汽機廠房、輔助廠房、廢棄物及控制廠房之所有管件及設備，以及這些廠房進行表面除污所需敲掉約 50 毫米(mm)的深度之混凝土。

## 2.3 其它放射性廢棄物

核能電廠在進行拆除設備及廠房前，必須先進行除污，及把廠內各系統所積存的放射性廢液加以處理後排放掉。這些直接因除役動作所產生的除役廢棄物稱為放射性廢棄物，包含濕性廢棄物及乾性廢棄物。濕性廢棄物為處理除污溶液及電廠內各系統已有的放射性廢液所造成，包含濃縮廢液、過濾器殘渣、廢樹脂，以及各種除污過程所產生的中性化學溶液。這些濕性廢棄物將用水泥固化後裝桶。乾性廢棄物則包含丟棄的污染材料，如除污布、拖把、吸附紙、塑膠套、除污工具、及防範污染所用的衣物。

### 3. 美國電廠除役廢棄物案例

美國核管會曾委託 Pacific Northwest Laboratory(PNL)分別對大型 PWR 及 BWR 電廠除役作了深入的研究。有關 PWR 電廠除役的研究結果發表在 NUREG/CR-0130 而 BWR 電廠除役的研究結果則發表在 NUREG/CR-0672。此外，經濟合作發展組織(OECD)亦進行大型核能電廠除役有關的研究。

#### 3.1PWR

##### Trojan 電廠除役廢棄物數量

美國核管會有關 PWR 電廠除役之報告 NUREG/CR-0130 是以位於美國奧勒岡州的 Trojan 電廠為參考廠，該廠為功率 1,175 MWe(3,500MWt)之 PWR 電廠。下面將敘述此參考廠針對不同除役方式估算除役時所產生之中子活化廢棄物、放射性污染廢棄物、及其他放射性廢棄物之掩埋體積。

##### (1) 中子活化廢棄物之掩埋體積

表 3-1 及 3-2 分別表示採用立即拆除(DECON)、封存 30 年再拆除、封存 50 年再拆除、封存 100 年再拆除及固封除役所產生的中子活化廢棄物中各個組成廢棄物之掩埋體積(burial volume)，及其總掩埋體積。由這些表可看出立即拆除、封存 30 年再拆除、封存 50 年再拆除及封存 100 年再拆除等四種除役方式所造成的中子活化廢棄物之總掩埋體積均為 1,192 立方公尺。此外，若採取固封除役，則由表 3-2 可看出所產生之中子活化廢棄物之總掩埋體積則為 471 立方公尺。

##### (2) 放射性污染廢棄物之掩埋體積

PWR 電廠採取各種除役方式所產生的污染性廢棄物之掩埋體積，分別



列於表 3-3。由該表可知若採取立即拆除或封存 30 年再拆除其所產生的污染性廢棄物之總掩埋體積均為 16,078 立方公尺；若封存 50 年或封存 100 年再拆除，其所產生的污染性廢棄物之總掩埋體積則降為 100 立方公尺。若採取固封除役，則其所產生之污染性廢棄物之總掩埋體積為 1,974 立方公尺。

### (3) 其他放射性廢棄物之掩埋體積

不管採取何種除役方式，均須進行的必要除污，把廠內所積存的放射性廢液加以處理後排放掉，然後才能進行進一步的除役工作。因此假設每一種除役方式在除役操作過程所產生的濕性固體廢棄物之體積均相同，由表 3-4 可得知濕性固體廢棄物總其體積為 332 立方公尺，其中包括 57 立方公尺的廢樹脂，9 立方公尺的用過匣式過濾器，及 266 立方公尺的濃縮廢液。各種除役方式在除役過程所造成的乾性廢棄物之掩埋體積亦列於表 3-4 中。將濕性固體廢棄物之掩埋體積及乾性廢棄物之掩埋體積相加，則得到各除役方式直接因除役動作所產生的放射性廢棄物(如表 3-4 所列)。由表 3-4 可知對於立即拆除、封存 30 年再拆除及固封除役等除役方式在除役過程所產生的放射性廢棄物之掩埋體積為 618 立方公尺。封存 50 年再拆除及封存 100 年再拆除所產生之放射性廢棄物體積則分別為 538 立方公尺及 488 立方公尺。

表 3- 1 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考電廠採取立即拆除及封存 30,50,100 年後再拆除所產生中子活化廢棄物之掩埋體積

中子活化分類	材質	掩埋體積(m <sup>3</sup> )
1.壓力槽圓柱型壁	碳鋼	108
2.壓力槽頂部	碳鋼	57
3.壓力槽底部	碳鋼	57
4.頸部支持組件	不銹鋼	11
5.頂部爐心支柱	不銹鋼	11
6.頂部爐心筒	不銹鋼	6
7.頂部爐心格板	不銹鋼	14
8.導管	不銹鋼	17
9.底部爐心筒(lower core barrel)	不銹鋼	91
10.熱屏壁	不銹鋼	17
11.爐心側版(core shroud)	不銹鋼	11
12.底部格板(lower grid plate)	不銹鋼	14
13.底部支柱(lower support column)	不銹鋼	3
14.底部爐心鍛件	不銹鋼	31
15.雜項內部組件(不包含上述者)	不銹鋼	23
16.活化混凝土	混凝土	707
17.爐腔內襯	碳鋼	14
總和		1,192

表 3- 2 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考電廠採取固封除役所產生中子活化廢

棄物之掩埋體積

中子活化分類	材質	掩埋體積(m <sup>3</sup> )
1.壓力槽圓柱型壁	碳鋼	108
2.壓力槽頂部	碳鋼	57
3.壓力槽底部	碳鋼	57
4.頸部支持組件	不銹鋼	11
5.頂部爐心支柱	不銹鋼	11
6.頂部爐心筒	不銹鋼	6
7.頂部爐心格板	不銹鋼	14
8.導管	不銹鋼	17
9.底部爐心筒(lower core barrel)	不銹鋼	91
10.熱屏壁	不銹鋼	17
11.爐心側版(core shroud)	不銹鋼	11
12.底部格板(lower grid plate)	不銹鋼	14
13.底部支柱(lower support column)	不銹鋼	3
14.底部爐心鍛件	不銹鋼	31
15.雜項內部組件(不包含上述者)	不銹鋼	23
總和		471

表 3- 3 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考廠除役所產生污染性廢棄物之掩埋體

積

除役方式	污染性廢棄物之掩埋體積(m <sup>3</sup> )
1.立即拆除(DECON)	16,078
2.封存/延遲除役	
(1)封存30年再拆封	16,078
(2)封存50年再拆封	100
(3)封存100年再拆封	100
3.固封(ENTOMB)	1,974

表 3- 4 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考廠除役過程所產生污染性廢棄物之掩埋體積

除役方式	放射性廢棄物		
	濕性固態廢棄物 (m <sup>3</sup> )	乾性廢棄物 (m <sup>3</sup> ) <sup>(a)</sup>	總和(m <sup>3</sup> )
1.立即拆除	332	286	618
2. 30 年封存再延遲除污			618 <sup>(b)</sup>
(1)封存前準備工作	332	56	
(2)延遲除污	-	230	
3. 50 年封存再延遲除污			538 <sup>(b)</sup>
(1)封存前準備工作	332	56	
(2)延遲除污		150	
4. 100 年封存再延遲除污			488
(1)封存前準備工作	332	56	
(2)延遲除污	-	100	
5.固封	332	286	618

註：(a)假設減容前後之體積轉換關係為 5:1。

(b)封存前準備工作所產生的放射性廢棄物加上延遲除污過程所產生的放射性廢棄物。

### PWR 電廠各種除役方式之總除役廢棄物掩埋體積

各種除役方式所產生的總除役廢棄物掩埋體積乃是前節中所討論之中子活化廢棄物、污染性廢棄物、及其他放射性廢棄物之掩埋體積總和，其值如表 3-5 所示。由該表可知若參考美國核管會之研究報告 NUREG/CR-0130，則一座 1,175 MWe 之 PWR 電廠若採取立即拆除，或封存 30 年再拆除，則其總除役廢棄物掩埋體積為 17,888 立方公尺。若採取封存 50 年再拆除，封存 100 年再除役，或固封除役，則所產生的總除役廢棄物掩埋體積分別為 1,830、1,780 及 3,063 立方公尺。若將前述各除役方式的總除役廢棄物掩埋體積除以 PWR 參考廠之功率 1,175MWe，則可得

到每一 MWe 所產生之除役廢棄物掩埋體積。對於立即拆除、封存 30 年再拆除、封存 50 年再拆除、封存 100 年再拆除、及固封除役等除役方式而言，每 MWe 所產生之除役廢棄物掩埋體積分別為 15.2、15.2、1.6、1.5、及 2.6 立方公尺。

經濟合作暨開發組織(OECD)所作的核能電廠除役可行性研究報告中所估算之德國、瑞典、及美國等國大型 PWR 電廠採取立即拆除所產生的除役廢棄物掩埋體積分別列於表 3-6 所示。由該表可看出德國及瑞典所產生的除役廢棄物遠較美國為少，主要原因乃是各國除役時採用的減容程度不同，以及廢棄物無限制再使用的法規限值不同。不過 OECD 仍建議採用較保守的美國值為除役廢棄物估算之依據，由表 3-6 可知對於 1,000 MWe PWR 電廠而言，其值為 15,200 立方公尺。實際上 OECD 所建議的 1,000 MWe PWR 電廠除役廢棄物體積乃是將前節所述美國核管會 NUREG/CR-0130 對 1,175 MWe PWR 參考廠所估算的立即拆除之除役廢棄物掩埋體積除以其功率 1,175 MWe，再乘以 1,000 MWe 而得。此外，美國核管會曾建議採用 NUREG/CR-0130 的值以估算 PWR 電廠除役廢棄物之掩埋體積，因此在估算我國核能電廠之除役廢棄物體積時，建議 PWR 電廠將以 NUREG/CR-0130 所估算的值為依據，即每一 MWe 將產生 15.2 立方公尺之除役廢棄物。

表 3- 5 NUREG/CR-0130 中 PWR 參考廠各種除役方式之總除役廢棄物掩埋體

除役方式	除役廢棄物掩埋體積(m <sup>3</sup> )				每 MWe 之 除役廢棄物體積 (m <sup>3</sup> /MWe) <sup>(b)</sup>
	中子活化 廢棄物 <sup>(a)</sup>	污染性 廢棄物	放射性 廢棄物	總體積	
1.立即拆除	1,192	16,078	615	17,888	15.2
2.封存/延遲 除役					
(1)封存30年 再拆封	1,192	16,078	618	17,888	15.2
(2)封存50年 再拆封	1,192	100	538	1,830	1.6
(3)封存100年 再拆封	1,192	100	488	1,780	1.5
3.固封	471	1,194	615	3,063	2.6

註：(a)均包含 133 立方公尺大於 C 類之中子活化廢棄物。

(b)乃將各除役方式之總除役廢棄物掩埋體積除以 PWR 參考廠之功率 1,175MWe 而得。

表 3- 6 OECD 所估算各國採取立即拆除之總除役廢棄物掩埋體積

國別	德國		瑞典		美國	
	1200MWe PWR	800MWe BWR	900MWe PWR	1000MWe BWR	1000MWe PWR	1000MWe BWR
總除役廢棄物 掩埋體積(m <sup>3</sup> )	6,900	12,400	7,000	15,000	15,200	16,300
每 MWe 之除 役廢棄物體積 (m <sup>3</sup> /MWe)	5.80	15.50	7.78	15.00	15.20	16.30

## 3.2BWR

### WNP-2 電廠除役廢棄物數量

美國核管會有關 BWR 電廠除役之報告 NUREG/CR-0672 是以華盛頓州的 WNP-2 為參考廠，該廠為功率 1,155 MWe(3,320 MWt)之 BWR 電廠。下面各節將敘述此參考廠針對不同除役方式所產生之中子活化廢棄物、污染性廢棄物、及其他放射性廢棄物之掩埋體積。

#### (1) 中子活化廢棄物之掩埋體積

表 3-7 表示出 BWR 參考廠採用立即拆除、封存 30 年再拆除、封存 50 年再拆除、封存 100 年再拆除、及固封除役等除役方式所產生的中子活化廢棄物中各個組成廢棄物之個別掩埋體積及其總掩埋體積。由這些表可看出立即拆除、封存 30 年再拆除、封存 50 年再拆除、封存 100 年再拆除所造成的中子活化廢棄物總掩埋體積均為 228 立方公尺。此外，若採取固封除役，則其中子活化廢棄物之總掩埋體積僅為 130 立方公尺。

#### (2) 放射性污染廢棄物之掩埋體積

BWR 電廠採取各種除役方式所產生的污染性廢棄物之掩埋體積分別列於表 3-8。由該表可知若採取立即拆除，或封存 30 年再拆除，其所產生的污染性廢棄物之掩埋體積均為 17,229 立方公尺。若封存 50 年或封存 100 年再拆除，則污染性廢棄物降為 150 立方公尺。若採取固封除役，則其所產生之污染性廢棄物總掩埋體積為 6,420 立方公尺。

#### (3) 其他放射性廢棄物之掩埋體積

假設 BWR 電廠除役時，不管採取何種除役方式，均須進行必要的除污，並把廠內所積存的放射性廢液加以處理後排放掉的，然後才能進行進一步的除役工作。除污過程所產生的廢液及廠內原有的放射性廢液在排放

前必須經過放射性廢棄物處理系統加以處理。因此假設每一種除役方式在除役操作過程所產生的濕性固體廢棄物之體積均相同。由表 3-9 可得知濕性固體廢棄物總體積為 814 立方公尺，其中包括 640 立方公尺的濃縮廢液，120 立方公尺的除污廢液，及 54 立方公尺的過濾器殘渣及廢樹脂。各種除役方式在除役過程所產生的乾性廢棄物之掩埋體積亦列於表 3-9 中。將濕性固體廢棄物之掩埋體積及乾性廢棄物之掩埋體積相加，則得到各除役方式直接因除役動作所產生的放射性廢棄物掩埋體積(如表 3-9 所列)。由表 3-9 可知立即拆除，封存 30 年再拆除，及固封除役等三種除役方式在除役過程所產生的放射性廢棄物為 1,492 立方公尺。封存 50 年再拆除及封存 100 年再拆除所產生之放射性廢棄物體積則分別為 1,405 及 1,295 立方公尺。

表 3- 7 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠立即拆除及封存 30,50,100 年再拆除所產生中子活化廢棄物之掩埋體積

中子活化廢棄物	材質	掩埋體積(m <sup>3</sup> )
1.汽水分離器	不銹鋼	10
2.燃料墊塊	不銹鋼	5
3.控制棒及爐內儀器	不銹鋼	15
4.控制棒導管	不銹鋼	4
5.噴射泵	不銹鋼	14
6.頂部燃料導架	不銹鋼	24
7.爐心底板	不銹鋼	11
8.爐心側板(core shroud)	不銹鋼	47
9.反應器壓力槽壁	碳鋼	8
10.生物屏蔽體	混凝土	90
總和		228



表 3- 8 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠除役所產生污染性廢棄物之掩埋體積

除役方式	污染性廢棄物之掩埋體積(m <sup>3</sup> )
1.立即拆除(DECON)	17,229
2.封存/延遲除役	
(1)封存30年再拆封	17,229
(2)封存50年再拆封	150
(3)封存100年再拆封	150
3.固封(ENTOMB)	6,420

表 3- 9 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠除役過程所產生污染性廢棄物之掩埋體積

除役方式	放射性廢棄物		
	濕性固態廢棄物 (m <sup>3</sup> )	乾性廢棄物 (m <sup>3</sup> ) <sup>(a)</sup>	總和(m <sup>3</sup> )
1.立即拆除	814	678	1,492
2. 30 年封存再延遲除污			
(1)封存前準備工作	814	241	1,492
(2)延遲除污	-	437	
3. 50 年封存再延遲除污			1,205
(1)封存前準備工作	814	241	
(2)延遲除污	-	350	
4. 100 年封存再延遲除污			1,295
(1)封存前準備工作	814	241	
(2)延遲除污	-	240	
5.固封	814	678	1,492

註：(a)假設減容前後之體積轉換關係為 5:1。

(b)封存前準備工作所產生的放射性廢棄物加上延遲除污過程所產生的放射性廢棄物。

## BWR 電廠各種除役方式之總除役廢棄物體積

BWR 參考廠除役所產生的除役廢棄物之總掩埋體積乃是第 3.3.3 節中所討論之中子活化廢棄物、污染性廢棄物、及放射性廢棄物之掩埋體積和。各除役方式之總掩埋體積如表 3-10 所示。由該表可知若參考美國核管會之研究報告 NUREG/CR-0672，則一座 1,155 MWe 之 BWR 電廠若採取立即拆除，或封存 30 年再拆除，則其總除役廢棄物掩埋體積為 18,949 立方公尺。若採取封存 50 年再拆除，封存 100 年再拆除，或固封除役，則其所產生的總除役廢棄物掩埋體積分為別 1,783、1,673、及 8,042 立方公尺。若將前述各除役方式的總除役廢棄物掩埋體積除以 BWR 參考廠之功率 1,155 MWe，則可得到每一 MWe 所產生之除役廢棄物掩埋體積。對於立即拆除，封存 30 年再拆除，封存 50 年再拆除，封存 100 年再拆除，及固封除役等除役方式，其每 MWe 所產生除役之廢棄物掩埋體積分別為 16.4、16.4、1.5、1.4、及 7.0 立方公尺。OECD 對德國、瑞典、及美國等國所估算的大型 BWR 電廠採取立即拆除所產生的除役廢棄物體積列於表 3-6。由該表可看出各國的 BWR 電廠除役廢棄物體積估算值較為接近，不過仍以美國最高。若換算成每一 MWe 之掩埋體積，則德國、瑞典、及美國分別為 15.5、15、及 16.3 立方公尺。為了保守起見，OECD 仍建議採用美國值來估算除役廢棄物之掩埋體積，其值與表 3-10 中 NUREG/CR-0672 的值極為接近。美國核管會曾建議採用 NUREG/CR-0672 的值以估算 BWR 除役廢棄物之掩埋體積。因此在估算我國核能電廠之除役廢棄物體積時，建議以 UREG/CR-0672 所估算的值為依據，即每一 MWe 將產生 16.4 立方公尺之除役廢棄物。

表 3- 10 NUREG/CR-0672 中 BWR 參考廠各種除役方式之總除役廢棄物掩埋體積

除役方式	除役廢棄物掩埋體積(m <sup>3</sup> )				每 Mwe 之 除役廢棄物體積 (m <sup>3</sup> /MWe) <sup>(b)</sup>
	中子活化 廢棄物 <sup>(a)</sup>	污染性 廢棄物	放射性 廢棄物	總體積	
1.立即拆除	228	17,229	1,492	18,949	16.4
2.封存/延遲 除役					
(1)封存30年 再拆封	228	17,229	1,492	18,949	16.4
(2)封存50年 再拆封	228	150	1,492	1,783	1.5
(3)封存100年 再拆封	228	150	1,295	1,673	1.4
3.固封	130	6,420	1,492	8,042	7.0

註：(a)均包含 47 立方公尺大於超 C 類之中子活化廢棄物。

(b)乃將各除役方式之總除役廢棄物掩埋體積除以 BWR 參考廠之功率 1,155MWe 而得。

## 4. 歐盟電廠除役廢棄物案例

### Forsmark 電廠簡介

Forsmark 核電廠位於 Östhammar 農村地區，距烏普薩拉東北 60 公里處。

電廠區域中有三個反應器，Forsmark 1, 2 和 3。圖 4-1 為 forsmark 核電廠的位置圖。

F1, F2 和 F3 皆為 ASEA-ATOM 的沸水式反應器，F1 及 F2 功率為 1010MWe，F3 功率為 1190MWe。

Forsmark 有共同的服務大樓，倉庫及車間，都屬於 F0，而 F0 有工作人員臨時工作的區塊。另外與 Forsmark 電廠相連接的是 SFR(final repository for short-lived low and intermediate level waste)。F1、F2、F3 及 SFR 會共同利用一些設備，如道路、汙水處理廠(F0)，水塔(F0)，行政大樓(F0)及水淨化廠(F0)。

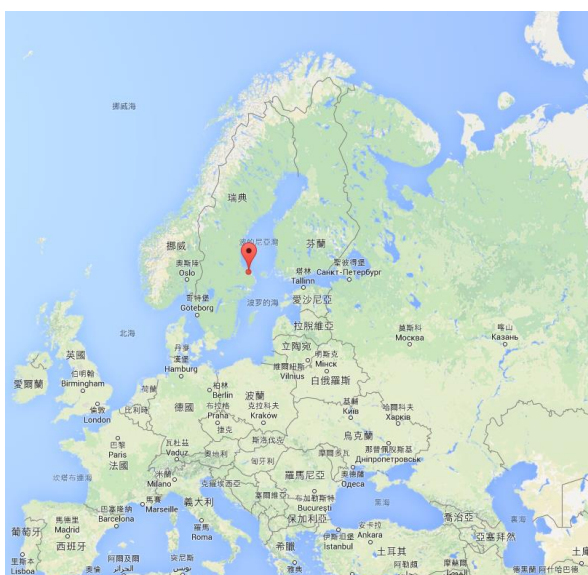


圖 4-1 forsmark 核電廠的位置圖

## **Forsmark 電廠除役廢棄物數量**

### **物料盤點**

在拆除作業過程中產生出來的廢棄物產量及活度和相關的輻射積存量之準確估算需要藉由徹底清查所有的電廠系統與組件受到的潛在之放射性污染。此外，對於非污染的材料和廠址結構合理精確的計算是對於整個廠址拆除時程與成本的先決條件。

這節呈現盤點 Forsmark 核電廠的系統結構與組件的結果，執行使用電廠操作人員數據庫、圖紙、利用聲音假設的應用及知情的工程判斷結果。這個章節將會以表格的形式來呈現評估結果。主要分為兩大類，一個是可以在拆除過程中移除的金屬組件，另一個是專門用於必須拆卸的混凝土，鋼材等建築結構。

### **廠址金屬盤點**

在 Forsmark 核電廠估算金屬量是以下列來分類：

機械及管路系統，包含所有電廠處理液體系統，及其相關設備、管路、閥和配件。

結構及各種鋼材，包含處理設備，起重機，襯墊，支撐和其他鋼材。

空氣處理系統，包括其相關的管道，設備，閥門和配件。

電氣設備和電纜，包括電纜，電纜橋架和管道，及所有電氣和 I&C 顯著設備。

這些分類用這個方式來定義，來反應所用數據庫的結構及便於和其他類似的研究比較。這種分類方式也有利於大型組件資料的建立。

### **機械管路系統盤點**

機械管路系統在這的盤點，對應了流體系統。

## 反應器壓力槽及其內部

表 4-1 為反應器壓力槽及其內部之盤點摘要。反應器壓力槽總重為 2170 噸，包括了碳鋼及不鏽鋼襯墊。反應器壓力槽(RPV)絕熱(Insulation)重達 61 噸。RPV 內部總重 904 噸。

表 4-1 RPV 及內部盤點

分類/噸	Plant F1(Forsmark reactor 1)	Plant F2	Plant F3	Forsmark NPP
RPV	705	705	760	2,170
Insulation	21	21	20	61
Internals	264	264	377	904
總共	989	989	1,157	3,135

表 4-2 為 Forsmark 電廠所有廠址金屬的簡述。

表 4-2 廠址金屬盤點

分類/噸	Plant F0	Plant F1	Plant F2	Plant F3	Forsmark NPP
RPV and Internals	0	989	989	1,157	3,135
機械管路	34	9,973	9,524	9,255	28,786
鋼材	40	5,803	5,036	4,564	15,443
空氣處理	0	503	376	1,237	2,116
電氣設備和電纜	0	4,217	4,100	4,081	12,398
總共	74	21,485	20,025	20,294	61,878

\*Forsmark 核電廠盤點總種量為 61,878 噸，不包含表 4-3 的鋼筋。

## 廠址建築資料及混凝土盤點

Forsmark 核電廠需要整體建築資料知識來估計花費及除役活動的時程。此外，拆除建築期間預期產生的放射性廢棄物需要個建築的內表面暴露面積。這些表面區域在拆除前需要哪些行動，和這些操作預期產生的放射性廢棄物，連同輻射特性小節給的訊息，這些被用來估計。

### 建築資料及混凝土盤點

這裡提供的數據為 Forsmark 核電廠建築物的總和。提供了每棟建築物的鋼筋和混凝土之總重量及體積。對應建築物的資料列於表 4-3。

所有建築物的混凝土體積為 358,195 m<sup>3</sup>，重量為 859,668 噸。鋼筋重量 39,174 噸。F1 常用建築包含以下的建築，廢棄的建築、活躍的廠房、員工建築、下水道、主要冷卻水通道、進氣建築及維護建築。

表 4-3 電廠建築資料及混凝土盤點

分類/噸	Plant F0	Plant F1	Plant F2	Plant F3	Forsmark NPP
鋼筋(噸)	58	12,094	9,904	17,118	39,174
混凝土(噸)	2,066	315,053	238,409	304,140	859,668
混凝土(m <sup>3</sup> )	861	131,272	99,337	126,725	358,195

### 廠址砂石盤點

排氣處理延遲系統的沙床，包含了 5,550 m<sup>3</sup> 的砂石，有些是被惰性氣體子核種污染。每個工廠都會放置一個延遲桶槽存放沙床。

表 4-4 列出 Forsmark 核電廠的砂石盤點總結。

表 4-4 廠址砂石盤點

分類/噸	Plant F1	Plant F2	Plant F3	Forsmark

				NPP
砂石體積(m <sup>3</sup> )	1,700	1,700	2,100	5,500
砂石重量(噸)	2,576	2,576	3,182	8,333

## 輻射特性

這節介紹了 Forsmark 廠址的除役廢棄物之輻射特性。每個過程的活度盤點將會在下一節中呈現。

## 設備污染過程

設備污染的過程由計算模型來決定，並且透過合理抑低工程來進行，包含了誘發活化及表面污染。模型藉由一系列的量測及估算產生出來的。模型被認為可以得到電廠污染特性的精確結果。

## 一般前提條件

活度資料是計算假設電廠有 50 年的操作壽命。例如 F1 運轉到 2030 年初，F1 運轉到 2031 七月，F3 運轉到 2053 八月。在考慮的濃度下，長半衰期核種在這個研究被假設可在反應器內部接近爐心的地方發現。

在最後電廠停機後一年，F1 將會開始除役。相關設備流程提供了活度資料，假設 F1 的衰變時間為 1.6 年，F2、F3 為 1 年。活度資料顯示系統除污錢的活度。活度計算的基準日期，F1 及 F2 為 2032/07/07，F3 為 2036/08/21。

當每座電廠停機時所產生的廢料(燃料、檢測探針、控制棒、離子交換樹脂、過濾器及催化劑)將會被移除，拆除之前，將會對系統除污。廢棄物系統將在整個除役過程中最後拆除。

## 活化腐蝕產物

活化腐蝕產物為停機後處理系統中主要的輻射產物來源，特別是鈷 60。



系統 321(停機冷卻系統)為對電廠操作人員貢獻最多幅射的系統之一。除役時間之腐蝕產物的量是由 BWR-CRUD 估算的。

F1 停機的鈷 60 參考值在 2030/12 的時候:  $1.7 \times 10^9$  Bq/m<sup>2</sup>

F2 停機的鈷 60 參考值在 2031/07 的時候:  $1.7 \times 10^9$  Bq/m<sup>2</sup>

F2 停機的鈷 60 參考值在 2035/08 的時候:  $4.5 \times 10^9$  Bq/m<sup>2</sup>

### 分裂產物及鈾系元素

F1、F2 及 F3 電廠曾經多次發生燃料破損。因此分裂產物及鈾系元素相對於活化腐蝕產物在廢棄物的量是顯著的。預測燃料破損的歷史模型已經發展了(Jonasson 2012a, b, c)。從 Barsebäck 1 and 2 系統除污的經驗得到大約有 10%的不溶解的分裂產物及鈾系元素是從爐渣中溶解的鈾來的。Table4-5 估計各個電廠從燃料破損的鈾量。反應器系統表面的 Nuclide spectra 列在表 4-6。

表 4-5 估計溶解鈾重

	停機後估計溶解鈾重* (g)	停機後估計爐渣中溶解鈾重* (g)
F1	296	29.6
F2	566	56.6
F3	422	42.2

\*系統除污之前

### 反應器系統

反應器系統的所有處理系統是最具有放射性的。活度主要來源為表面污染的活化腐蝕產物。其中最具放射性的系統是反應汽水迴路(系統 321 及系

統 331)。基於主要系統表面及不同反應系處理系統間的活度資料，411(F1, F2)/ 421(F3)(主要蒸氣線路系統), 321(反應器停機之冷卻系統), 324(燃料儲存之冷卻和過濾系統), 331(反應器水之淨化系統), 354(液壓系統的穩定器)，反應器系統的污染核種譜以列在表 4-6。

### 反應器壓力槽及其內部組件

Forsmark 三個反應器的反應器壓力槽及其內部組件之活度列於表 4-7, 4-8,及 4-9。重量是活化的重量並不是全部組件的重量。

### 反應器壓力槽保溫層

F1 的反應器壓力槽保溫層厚度 20 公分，由 Caposil 塊狀石綿(主要部分)及碳鋼組成。F2 的反應器壓力槽保溫層厚度 20 公分，由塊狀礦物棉、一個反應器壓力槽內不鏽鋼板及混凝土壁外的碳鋼組成。F3 的反應器壓力槽保溫層厚度 20 公分，由塊狀 PV-PAL、一個反應器壓力槽內不鏽鋼板及混凝土壁外的碳鋼組成。中子活化保溫層的資料在 Jonasson (2012a, b, c)中。

### 汽機系統

汽機系統與反應器系統相比有較低的污染。主要污染源為活化腐蝕產物。汽機系統活度主要是由反應器蒸氣中的水分造成的。從經驗來看，被活化最多的系統是包含通過蒸氣乾燥及輸送高壓排水系統前的高壓蒸氣系統。位在蒸氣乾燥下游的系統，被認為活化程度較低。經過適當除污及清潔後，是有可能直接釋出的。不同汽機系統的污染應該是在主蒸氣管道(F1 及 F2 的 411 系統，F3 的 421 系統)的來源強度及反應器蒸氣的水分含量相關。一些有代表性汽機系統的核種譜列於表 4-10,表 4-11 及表 4-12。

表 4-6 反應器系統表面的核種譜，一年衰變時間(Jonasson 2012a, b, c)

核種	F1					F2					F3				
	321 Bq/m <sup>3</sup>	324 Bq/m <sup>3</sup>	331 Bq/m <sup>3</sup>	354 Bq/m <sup>3</sup>	411 Bq/m <sup>3</sup>	321 Bq/m <sup>3</sup>	324 Bq/m <sup>3</sup>	331 Bq/m <sup>3</sup>	354 Bq/m <sup>3</sup>	411 Bq/m <sup>3</sup>	321 Bq/m <sup>3</sup>	324 Bq/m <sup>3</sup>	331 Bq/m <sup>3</sup>	354 Bq/m <sup>3</sup>	411 Bq/m <sup>3</sup>
Fe-55	3.6E+08	7.2E+07	4.7E+08	3.6E+06	3.6E+06	4.2E+08	8.3E+07	5.4E+08	4.2E+06	4.2E+06	2.4E+09	2.4E+08	2.4E+09	2.4E+07	2.4E+07
Co-60	1.4E+09	2.7E+08	1.8E+09	1.4E+07	1.4E+07	1.5E+09	2.9E+08	1.9E+09	1.5E+07	1.5E+07	3.9E+09	3.9E+08	3.9E+09	3.9E+07	3.9E+07
Ni-59	2.4E+06	4.8E+05	3.1E+06	2.4E+04	2.4E+04	2.4E+06	4.8E+05	3.1E+06	2.4E+04	2.4E+04	2.8E+07	2.8E+06	2.8E+07	2.8E+05	2.8E+05
Ni-63	3.2E+08	6.5E+07	4.2E+08	3.2E+06	3.2E+06	3.3E+08	6.5E+07	4.2E+08	3.3E+06	3.3E+06	3.8E+09	3.8E+08	3.8E+09	3.8E+07	3.8E+07
Sr-90	6.6E+06	1.3E+06	8.5E+06	6.6E+04	6.6E+04	1.3E+07	2.5E+06	1.7E+07	1.3E+05	1.3E+05	9.7E+06	9.7E+05	9.7E+06	9.7E+04	9.7E+04
Zr-93	2.4E+03	4.8E+02	3.1E+03	2.4E+01	2.4E+01	2.6E+03	5.1E+02	3.3E+03	2.6E+01	2.6E+01	1.3E+04	1.3E+03	1.3E+04	1.3E+02	1.3E+02
Nb-93m	5.1E+08	1.0E+08	6.6E+08	5.1E+06	5.1E+06	5.2E+08	1.0E+08	6.8E+08	5.2E+06	5.2E+06	8.1E+08	8.1E+07	8.1E+08	8.1E+06	8.1E+06
Nb-94	5.5E+05	1.1E+05	7.2E+05	5.5E+03	5.5E+03	5.5E+05	1.1E+05	7.2E+05	5.5E+03	5.5E+03	1.0E+06	1.0E+05	1.0E+06	1.0E+04	1.0E+04
Mo-93	2.5E+04	5.1E+03	3.3E+04	2.5E+02	2.5E+02	2.5E+04	5.1E+03	3.3E+04	2.5E+02	2.5E+02	7.4E+03	7.4E+02	7.4E+03	7.4E+01	7.4E+01
Tc-99	5.9E+03	1.2E+03	7.7E+03	5.9E+01	5.9E+01	7.8E+03	1.6E+03	1.0E+04	7.8E+01	7.8E+01	4.4E+03	4.4E+02	4.4E+03	4.4E+01	4.4E+01
Ag-108m	2.7E+05	5.4E+04	3.5E+05	2.7E+03	2.7E+03	2.7E+05	5.4E+04	3.5E+05	2.7E+03	2.7E+03	1.0E+05	1.0E+04	1.0E+05	1.0E+03	1.0E+03
Sn-126	8.1E+01	1.6E+01	1.0E+02	8.1E-01	8.1E-01	1.5E+02	3.1E+01	2.0E+02	1.5E+00	1.5E+00	1.2E+02	1.2E+01	1.2E+02	1.2E+00	1.2E+00
Sb-125	4.0E+06	8.1E+05	5.2E+06	4.0E+04	4.0E+04	4.7E+06	9.4E+05	6.1E+06	4.7E+04	4.7E+04	1.6E+07	1.6E+06	1.6E+07	1.6E+05	1.6E+05
Pm-147	1.2E+06	2.3E+05	1.5E+06	1.2E+04	1.2E+04	2.6E+06	5.1E+05	3.3E+06	2.6E+04	2.6E+04	1.9E+06	1.9E+05	1.9E+06	1.9E+04	1.9E+04
Sm-151	5.2E+04	1.0E+04	6.8E+04	5.2E+02	5.2E+02	1.0E+05	2.0E+04	1.3E+05	1.0E+03	1.0E+03	7.3E+04	7.3E+03	7.3E+04	7.3E+02	7.3E+02
Eu-152	4.6E+02	9.2E+01	6.0E+02	4.6E+00	4.6E+00	9.1E+02	1.8E+02	1.2E+03	9.1E+00	9.1E+00	6.3E+02	6.3E+01	6.3E+02	6.3E+00	6.3E+00
Eu-154	2.0E+05	4.0E+04	2.6E+05	2.0E+03	2.0E+03	4.0E+05	7.9E+04	5.2E+05	4.0E+03	4.0E+03	3.1E+05	3.1E+04	3.1E+05	3.1E+03	3.1E+03
Eu-155	4.4E+04	8.7E+03	5.7E+04	4.4E+02	4.4E+02	9.1E+04	1.8E+04	1.2E+05	9.1E+02	9.1E+02	7.1E+04	7.1E+03	7.1E+04	7.1E+02	7.1E+02
Ho-166m	6.5E-01	1.3E-01	8.5E-01	6.5E-03	6.5E-03	1.2E+00	2.5E-01	1.6E+00	1.2E-02	1.2E-02	1.9E+00	1.9E-01	1.9E+00	1.9E-02	1.9E-02

U-232	9.6E-01	1.9E-01	1.3E+00	9.6E-03	9.6E-03	1.9E+00	3.7E-01	2.4E+00	1.9E-02	1.9E-02	1.6E+00	1.6E-01	1.6E+00	1.6E-02	1.6E-02
U-236	4.2E+01	8.4E+00	5.5E+01	4.2E-01	4.2E-01	8.0E+01	1.6E+01	1.0E+02	8.0E-01	8.0E-01	6.2E+01	6.2E+00	6.2E+01	6.2E-01	6.2E-01
Np-237	4.8E+01	9.6E+00	6.2E+01	4.8E-01	4.8E-01	9.2E+01	1.8E+01	1.2E+02	9.2E-01	9.2E-01	7.2E+01	7.2E+00	7.2E+01	7.2E-01	7.2E-01
Pu-238	3.8E+05	7.5E+04	4.9E+05	3.8E+03	3.8E+03	7.2E+05	1.4E+05	9.4E+05	7.2E+03	7.2E+03	6.1E+05	6.1E+04	6.1E+05	6.1E+03	6.1E+03
Pu-239	4.5E+04	9.0E+03	5.9E+04	4.5E+02	4.5E+02	8.6E+04	1.7E+04	1.1E+05	8.6E+02	8.6E+02	6.5E+04	6.5E+03	6.5E+04	6.5E+02	6.5E+02
Pu-240	6.0E+04	1.2E+04	7.7E+04	6.0E+02	6.0E+02	1.1E+05	2.3E+04	1.5E+05	1.1E+03	1.1E+03	8.5E+04	8.5E+03	8.5E+04	8.5E+02	8.5E+02
Pu-241	6.7E+06	1.3E+06	8.7E+06	6.7E+04	6.7E+04	1.3E+07	2.6E+06	1.7E+07	1.3E+05	1.3E+05	9.8E+06	9.8E+05	9.8E+06	9.8E+04	9.8E+04
Pu-242	3.4E+02	6.7E+01	4.4E+02	3.4E+00	3.4E+00	6.4E+02	1.3E+02	8.3E+02	6.4E+00	6.4E+00	5.1E+02	5.1E+01	5.1E+02	5.1E+00	5.1E+00
Am-241	6.9E+04	1.4E+04	9.0E+04	6.9E+02	6.9E+02	1.2E+05	2.4E+04	1.6E+05	1.2E+03	1.2E+03	8.8E+04	8.8E+03	8.8E+04	8.8E+02	8.8E+02
Am-242m	1.5E+03	3.1E+02	2.0E+03	1.5E+01	1.5E+01	3.0E+03	5.9E+02	3.9E+03	3.0E+01	3.0E+01	2.2E+03	2.2E+02	2.2E+03	2.2E+01	2.2E+01
Am-243	4.4E+03	8.8E+02	5.7E+03	4.4E+01	4.4E+01	8.4E+03	1.7E+03	1.1E+04	8.4E+01	8.4E+01	7.3E+03	7.3E+02	7.3E+03	7.3E+01	7.3E+01
Cm-243	1.6E+03	3.2E+02	2.1E+03	1.6E+01	1.6E+01	3.1E+03	6.2E+02	4.0E+03	3.1E+01	3.1E+01	2.8E+03	2.8E+02	2.8E+03	2.8E+01	2.8E+01
Cm-244	2.9E+05	5.7E+04	3.7E+05	2.9E+03	2.9E+03	5.6E+05	1.1E+05	7.3E+05	5.6E+03	5.6E+03	5.5E+05	5.5E+04	5.5E+05	5.5E+03	5.5E+03
Cm-245	5.5E+01	1.1E+01	7.1E+01	5.5E-01	5.5E-01	1.0E+02	2.1E+01	1.4E+02	1.0E+00	1.0E+00	1.3E+02	1.3E+01	1.3E+02	1.3E+00	1.3E+00
Cm-246	1.9E+01	3.8E+00	2.5E+01	1.9E-01	1.9E-01	3.7E+01	7.3E+00	4.8E+01	3.7E-01	3.7E-01	3.5E+01	3.5E+00	3.5E+01	3.5E-01	3.5E-01

表 4- 7 F1 反應器壓力槽及其內部組件之中子活化活度(衰變時間為 1.6 年)  
(Jonasson 2012a)

Part	Reactor Containment concrete	Reactor Containment reinforcement	RPV	RPV Insulation	Core Shroud	Instrumentation	TIP-detector
Active Weight [tonne]	700	49	750	8.4	65.1	0.4	0
Nuclide	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
H-3	1.1E+12					5.2E+07	1.0E+03
Be-10	1.9E+02						
C-14	2.5E+08	3.1E+07	6.5E+08	3.0E+07	4.2E+13	1.1E+11	1.8E+05
Cl-36	8.3E+06	4.2E+04	4.8E+05	1.4E+04	6.7E+09	3.5E+07	2.0E+02
Ca-41	8.2E+08			6.9E+07			
Fe-55	1.2E+11	8.8E+11	8.2E+12	2.8E+11	8.1E+16	3.3E+15	2.7E+10
Co-60	4.0E+10	6.2E+10	8.5E+11	1.2E+11	1.3E+16	9.5E+14	1.7E+09
Ni-59	1.9E+06	6.0E+07	2.4E+09	1.4E+08	1.1E+14	7.0E+11	4.6E+05
Ni-63	2.0E+08	6.3E+09	2.4E+11	1.4E+10	1.6E+16	1.1E+14	6.1E+07
Se-79	3.9E+02					2.6E+03	5.1E-02
Sr-90	4.0E+06					9.8E+09	1.9E+05
Zr-93	6.4E+03					2.2E+05	4.2E+00
Nb-93m	2.5E+08	2.1E+08	7.2E+10	5.5E+08	7.0E+13	1.8E+12	1.0E+07
Nb-94	2.1E+06	1.7E+06	4.5E+07	1.1E+06	1.9E+11	1.9E+09	1.1E+04
Mo-93	5.2E+03	4.7E+06	2.6E+08	3.1E+06	2.0E+12	1.6E+10	4.2E+04
Tc-99	1.1E+03	9.7E+05	3.5E+07	5.8E+05	3.0E+11	2.0E+09	6.9E+03
Ru-106						2.6E+09	5.0E+04
Ag-108m	1.9E+08					5.4E+00	1.1E-04
Pd-107						1.8E+03	3.5E-02
Cd-113m	1.1E+06					1.5E+04	3.0E-01
Sn-126						2.3E+04	4.4E-01
Sb-125	2.2E+06	1.8E+07	5.3E+08	1.5E+07	1.3E+12	1.6E+11	9.6E+05
I-129						3.0E+03	5.8E-02
Cs-134	4.7E+09					1.2E+10	2.2E+05
Cs-135						3.5E+04	6.8E-01

Cs-137	4.2E+06					1.0E+10	1.9E+05
Ba-133	1.4E+08					2.9E+03	5.7E-02
Pm-147	1.7E+08					7.3E+09	1.4E+05
Sm-151	2.4E+09					1.6E+07	3.0E+02
Eu-152	7.5E+10					6.8E+04	1.3E+00
Eu-154	4.4E+09					3.8E+08	7.4E+03
Eu-155	1.9E+09					2.4E+08	4.7E+03
Ho-166m	2.5E+07					8.0E+00	1.5E-04
U-232						2.3E+05	4.4E+00
U-236						4.3E+04	8.3E-01
Np-237						5.7E+04	1.1E+00
Pu-238						4.6E+08	9.0E+03
Pu-239	1.2E+06					6.5E+05	1.3E+01
Pu-240	0.0E+00					5.8E+05	1.1E+01
Pu-241	0.0E+00					2.6E+08	5.0E+03
Pu-242	0.0E+00					7.4E+03	1.4E-01
Am-241	0.0E+00					1.1E+06	2.0E+01
Am-242m	0.0E+00					1.0E+04	2.0E-01
Am-243	0.0E+00					9.7E+04	1.9E+00
Cm-243	0.0E+00					5.4E+04	1.0E+00
Cm-244	0.0E+00					1.7E+07	3.3E+02
Cm-245	0.0E+00					2.1E+03	4.2E-02
Cm-246	0.0E+00					8.4E+02	1.6E-02

表 4-8 F2 反應器壓力槽及其內部組件之中子活化活度(衰變時間為 1 年)  
(Jonasson 2012b)

Part	Reactor Containment concrete	Reactor Containment reinforcement	RPV	RPV Insulation	Core Shroud	Instrumentation	TIP-detector
Active Weight [tonne]	700	49	750	8.4	65.1	0.4	0
Nuclide	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
H-3	1.1E+12					5.4E+07	1.0E+03
Be-10	1.9E+02						
C-14	2.5E+08	3.1E+07	6.5E+08	3.0E+07	4.2E+13	1.1E+11	1.8E+05
Cl-36	8.3E+06	4.2E+04	4.8E+05	1.4E+04	6.7E+09	3.5E+07	2.0E+02
Ca-41	8.2E+08			6.9E+07			
Fe-55	1.4E+11	1.0E+12	9.5E+12	3.3E+11	9.3E+16	3.8E+15	3.2E+10
Co-60	4.3E+10	6.7E+10	9.2E+11	1.3E+11	1.4E+16	1.0E+15	1.8E+09
Ni-59	1.9E+06	6.0E+07	2.4E+09	1.4E+08	1.1E+14	7.0E+11	4.6E+05
Ni-63	2.1E+08	6.3E+09	2.4E+11	1.4E+10	1.7E+16	1.1E+14	6.1E+07
Se-79	3.9E+02					2.6E+03	5.1E-02
Sr-90	4.0E+06					1.0E+10	1.9E+05
Zr-93	6.4E+03					2.2E+05	4.2E+00
Nb-93m	2.6E+08	2.2E+08	7.4E+10	5.6E+08	7.1E+13	1.9E+12	1.1E+07
Nb-94	2.1E+06	1.7E+06	4.5E+07	1.1E+06	1.9E+11	1.9E+09	1.1E+04
Mo-93	5.2E+03	4.7E+06	2.6E+08	3.1E+06	2.0E+12	1.6E+10	4.2E+04
Tc-99	1.1E+03	9.7E+05	3.5E+07	5.8E+05	3.0E+11	2.0E+09	6.9E+03
Ru-106						3.8E+09	7.3E+04
Ag-108m	1.9E+08					5.4E+00	1.1E-04
Pd-107						1.8E+03	3.5E-02
Cd-113m	1.1E+06					1.6E+04	3.1E-01
Sn-126						2.3E+04	4.4E-01
Sb-125	2.5E+06	2.1E+07	6.2E+08	1.8E+07	1.5E+12	1.9E+11	1.1E+06
I-129						3.0E+03	5.8E-02
Cs-134	5.7E+09					1.4E+10	2.7E+05
Cs-135						3.5E+04	6.8E-01

Cs-137	4.2E+06					1.0E+10	2.0E+05
Ba-133	1.4E+08					3.0E+03	5.9E-02
Pm-147	2.0E+08					8.5E+09	1.7E+05
Sm-151	2.4E+09					1.6E+07	3.1E+02
Eu-152	7.7E+10					7.0E+04	1.4E+00
Eu-154	4.6E+09					4.0E+08	7.7E+03
Eu-155	2.0E+09					2.6E+08	5.1E+03
Ho-166m	2.5E+07					8.0E+00	1.5E-04
U-232						2.3E+05	4.5E+00
U-236						4.3E+04	8.3E-01
Np-237						5.7E+04	1.1E+00
Pu-238						4.7E+08	9.0E+03
Pu-239	1.2E+06					6.5E+05	1.3E+01
Pu-240	0.0E+00					5.8E+05	1.1E+01
Pu-241	0.0E+00					2.6E+08	5.1E+03
Pu-242	0.0E+00					7.4E+03	1.4E-01
Am-241	0.0E+00					8.1E+05	1.6E+01
Am-242m	0.0E+00					1.0E+04	2.0E-01
Am-243	0.0E+00					9.7E+04	1.9E+00
Cm-243	0.0E+00					5.5E+04	1.1E+00
Cm-244	0.0E+00					1.7E+07	3.4E+02
Cm-245	0.0E+00					2.1E+03	4.2E-02
Cm-246	0.0E+00					8.4E+02	1.6E-02



表 4-9 F3 反應器壓力槽及其內部組件之中子活化活度(衰變時間為 1 年)

(Jonasson 2012c)

Part	Reactor Containment concrete	Reactor Containment reinforcement	RPV	RPV Insulation	Core Shroud	Instrumentation	TIP-detector
Active Weight [tonne]	700	49	750	8.4	65.1	0.4	0
Nuclide	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]	[Bq]
H-3	1.3E+12					5.4E+07	1.0E+03
Be-10	2.7E+02						
C-14	3.5E+08	4.5E+07	7.4E+08	1.6E+07	1.3E+13	1.1E+11	1.6E+05
Cl-36	1.2E+07	6.1E+04	5.6E+05	9.4E+03	4.2E+09	3.6E+07	1.8E+02
Ca-41	1.2E+09			4.8E+07			
Fe-55	1.5E+11	1.2E+12	1.0E+13	1.8E+11	5.8E+16	3.9E+15	2.7E+10
Co-60	4.4E+10	7.0E+10	8.0E+11	4.4E+10	7.4E+15	1.0E+15	1.5E+09
Ni-59	2.7E+06	8.6E+07	3.5E+09	6.6E+07	9.3E+13	7.1E+11	4.0E+05
Ni-63	2.8E+08	8.8E+09	3.6E+11	6.6E+09	1.1E+16	1.1E+14	5.3E+07
Se-79	3.9E+02					2.6E+03	5.1E-02
Sr-90	5.1E+06					1.0E+10	1.9E+05
Zr-93	8.0E+03					2.2E+05	4.2E+00
Nb-93m	2.8E+08	2.4E+08	3.6E+10	1.7E+08	3.2E+13	1.7E+12	8.5E+06
Nb-94	2.3E+06	1.8E+06	2.6E+07	4.3E+05	1.2E+11	1.8E+09	9.2E+03
Mo-93	4.3E+03	4.0E+06	1.2E+08	1.1E+06	1.1E+11	1.5E+10	3.4E+04
Tc-99	8.3E+02	7.7E+05	1.5E+07	2.0E+05	1.9E+10	1.9E+09	5.5E+03
Ru-106						3.8E+09	7.3E+04
Ag-108m	2.3E+08					5.4E+00	1.1E-04
Pd-107						1.8E+03	3.5E-02
Cd-113m	1.1E+06					1.6E+04	3.1E-01
Sn-126						2.3E+04	4.4E-01
Sb-125	1.6E+06	1.4E+07	2.7E+08	4.6E+06	9.1E+11	1.7E+11	8.8E+05
I-129						3.0E+03	5.8E-02
Cs-134	4.2E+09					1.4E+10	2.7E+05
Cs-135						3.5E+04	6.8E-01

Cs-137	5.4E+06					1.0E+10	2.0E+05
Ba-133	1.3E+08					3.0E+03	5.9E-02
Pm-147	2.0E+08					8.5E+09	1.7E+05
Sm-151	2.8E+09					1.6E+07	3.1E+02
Eu-152	9.2E+10					7.0E+04	1.4E+00
Eu-154	4.3E+09					4.0E+08	7.7E+03
Eu-155	1.9E+09					2.6E+08	5.1E+03
Ho-166m	2.9E+07					8.0E+00	1.5E-04
U-232						2.3E+05	4.5E+00
U-236						4.3E+04	8.3E-01
Np-237						5.7E+04	1.1E+00
Pu-238						4.7E+08	9.0E+03
Pu-239	8.5E+05					6.5E+05	1.3E+01
Pu-240						5.8E+05	1.1E+01
Pu-241						2.6E+08	5.1E+03
Pu-242						7.4E+03	1.4E-01
Am-241						3.8E+05	7.4E+00
Am-242m						1.0E+04	2.0E-01
Am-243						9.7E+04	1.9E+00
Cm-243						5.5E+04	1.1E+00
Cm-244						1.7E+07	3.4E+02
Cm-245						2.1E+03	4.2E-02
Cm-246						8.4E+02	1.6E-02

表 4- 10 F1 一些汽機系統的核種譜(衰變時間為 1.6 年) (Jonasson 2012a)

Ident Unit	411.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	411.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	412.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	413.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	413.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	414.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	415.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	415.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	418.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	419.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	421.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]
Fe-55	3.6E+06	3.6E+06	5.4E+05	3.6E+05	1.4E+05	1.4E+05	1.8E+06	7.2E+04	7.2E+06	3.6E+05	5.4E+05
Co-60	1.4E+07	1.4E+07	2.0E+06	1.4E+06	5.4E+05	5.4E+05	6.8E+06	2.7E+05	2.7E+07	1.4E+06	2.0E+06
Ni-59	2.4E+04	2.4E+04	3.6E+03	2.4E+03	9.7E+02	9.7E+02	1.2E+04	4.8E+02	4.8E+04	2.4E+03	3.6E+03
Ni-63	3.2E+06	3.2E+06	4.9E+05	3.2E+05	1.3E+05	1.3E+05	1.6E+06	6.5E+04	6.5E+06	3.2E+05	4.9E+05
Sr-90	6.6E+04	6.6E+04	9.9E+03	6.6E+03	2.6E+03	2.6E+03	3.3E+04	1.3E+03	1.3E+05	6.6E+03	9.9E+03
Zr-93	2.4E+01	2.4E+01	3.6E+00	2.4E+00	9.6E-01	9.6E-01	1.2E+01	4.8E-01	4.8E+01	2.4E+00	3.6E+00
Nb-93m	5.1E+06	5.1E+06	7.6E+05	5.1E+05	2.0E+05	2.0E+05	2.5E+06	1.0E+05	1.0E+07	5.1E+05	7.6E+05
Nb-94	5.5E+03	5.5E+03	8.3E+02	5.5E+02	2.2E+02	2.2E+02	2.8E+03	1.1E+02	1.1E+04	5.5E+02	8.3E+02
Mo-93	2.5E+02	2.5E+02	3.8E+01	2.5E+01	1.0E+01	1.0E+01	1.3E+02	5.1E+00	5.1E+02	2.5E+01	3.8E+01
Tc-99	5.9E+01	5.9E+01	8.9E+00	5.9E+00	2.4E+00	2.4E+00	3.0E+01	1.2E+00	1.2E+02	5.9E+00	8.9E+00
Ag-108m	2.7E+03	2.7E+03	4.1E+02	2.7E+02	1.1E+02	1.1E+02	1.4E+03	5.4E+01	5.4E+03	2.7E+02	4.1E+02
Sn-126	8.1E-01	8.1E-01	1.2E-01	8.1E-02	3.2E-02	3.2E-02	4.0E-01	1.6E-02	1.6E+00	8.1E-02	1.2E-01
Sb-125	4.0E+04	4.0E+04	6.0E+03	4.0E+03	1.6E+03	1.6E+03	2.0E+04	8.1E+02	8.1E+04	4.0E+03	6.0E+03
Pm-147	1.2E+04	1.2E+04	1.7E+03	1.2E+03	4.6E+02	4.6E+02	5.8E+03	2.3E+02	2.3E+04	1.2E+03	1.7E+03
Sm-151	5.2E+02	5.2E+02	7.8E+01	5.2E+01	2.1E+01	2.1E+01	2.6E+02	1.0E+01	1.0E+03	5.2E+01	7.8E+01
Eu-152	4.6E+00	4.6E+00	6.9E-01	4.6E-01	1.8E-01	1.8E-01	2.3E+00	9.2E-02	9.2E+00	4.6E-01	6.9E-01
Eu-154	2.0E+03	2.0E+03	3.0E+02	2.0E+02	7.9E+01	7.9E+01	9.9E+02	4.0E+01	4.0E+03	2.0E+02	3.0E+02
Eu-155	4.4E+02	4.4E+02	6.5E+01	4.4E+01	1.7E+01	1.7E+01	2.2E+02	8.7E+00	8.7E+02	4.4E+01	6.5E+01
Ho-166m	6.5E-03	6.5E-03	9.8E-04	6.5E-04	2.6E-04	2.6E-04	3.3E-03	1.3E-04	1.3E-02	6.5E-04	9.8E-04

U-232	9.6E-03	9.6E-03	1.4E-03	9.6E-04	3.9E-04	3.9E-04	4.8E-03	1.9E-04	1.9E-02	9.6E-04	1.4E-03
U-236	4.2E-01	4.2E-01	6.3E-02	4.2E-02	1.7E-02	1.7E-02	2.1E-01	8.4E-03	8.4E-01	4.2E-02	6.3E-02
Np-237	4.8E-01	4.8E-01	7.2E-02	4.8E-02	1.9E-02	1.9E-02	2.4E-01	9.6E-03	9.6E-01	4.8E-02	7.2E-02
Pu-238	3.8E+03	3.8E+03	5.7E+02	3.8E+02	1.5E+02	1.5E+02	1.9E+03	7.5E+01	7.5E+03	3.8E+02	5.7E+02
Pu-239	4.5E+02	4.5E+02	6.8E+01	4.5E+01	1.8E+01	1.8E+01	2.3E+02	9.0E+00	9.0E+02	4.5E+01	6.8E+01
Pu-240	6.0E+02	6.0E+02	8.9E+01	6.0E+01	2.4E+01	2.4E+01	3.0E+02	1.2E+01	1.2E+03	6.0E+01	8.9E+01
Pu-241	6.7E+04	6.7E+04	1.0E+04	6.7E+03	2.7E+03	2.7E+03	3.3E+04	1.3E+03	1.3E+05	6.7E+03	1.0E+04
Pu-242	3.4E+00	3.4E+00	5.0E-01	3.4E-01	1.3E-01	1.3E-01	1.7E+00	6.7E-02	6.7E+00	3.4E-01	5.0E-01
Am-241	6.9E+02	6.9E+02	1.0E+02	6.9E+01	2.8E+01	2.8E+01	3.4E+02	1.4E+01	1.4E+03	6.9E+01	1.0E+02
Am-242m	1.5E+01	1.5E+01	2.3E+00	1.5E+00	6.2E-01	6.2E-01	7.7E+00	3.1E-01	3.1E+01	1.5E+00	2.3E+00
Am-243	4.4E+01	4.4E+01	6.6E+00	4.4E+00	1.8E+00	1.8E+00	2.2E+01	8.8E-01	8.8E+01	4.4E+00	6.6E+00
Cm-243	1.6E+01	1.6E+01	2.4E+00	1.6E+00	6.4E-01	6.4E-01	7.9E+00	3.2E-01	3.2E+01	1.6E+00	2.4E+00
Cm-244	2.9E+03	2.9E+03	4.3E+02	2.9E+02	1.1E+02	1.1E+02	1.4E+03	5.7E+01	5.7E+03	2.9E+02	4.3E+02
Cm-245	5.5E-01	5.5E-01	8.2E-02	5.5E-02	2.2E-02	2.2E-02	2.7E-01	1.1E-02	1.1E+00	5.5E-02	8.2E-02
Cm-246	1.9E-01	1.9E-01	2.9E-02	1.9E-02	7.7E-03	7.7E-03	9.6E-02	3.8E-03	3.8E-01	1.9E-02	2.9E-02

表 4- 11 F2 一些汽機系統的核種譜(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012b)

Ident Unit	411.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	411.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	412.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	413.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	413.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	414.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	415.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	415.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	418.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	419.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	421.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]
Fe-55	4.2E+06	4.2E+06	1.7E+06	4.2E+05	8.3E+04	9.4E+04	3.8E+06	8.3E+04	6.3E+06	4.2E+05	4.2E+05
Co-60	1.5E+07	1.5E+07	5.8E+06	1.5E+06	2.9E+05	3.3E+05	1.3E+07	2.9E+05	2.2E+07	1.5E+06	1.5E+06
Ni-59	2.4E+04	2.4E+04	9.7E+03	2.4E+03	4.8E+02	5.4E+02	2.2E+04	4.8E+02	3.6E+04	2.4E+03	2.4E+03
Ni-63	3.3E+06	3.3E+06	1.3E+06	3.3E+05	6.5E+04	7.3E+04	2.9E+06	6.5E+04	4.9E+06	3.3E+05	3.3E+05
Sr-90	1.3E+05	1.3E+05	5.1E+04	1.3E+04	2.5E+03	2.9E+03	1.1E+05	2.5E+03	1.9E+05	1.3E+04	1.3E+04
Zr-93	2.6E+01	2.6E+01	1.0E+01	2.6E+00	5.1E-01	5.8E-01	2.3E+01	5.1E-01	3.9E+01	2.6E+00	2.6E+00
Nb-93m	5.2E+06	5.2E+06	2.1E+06	5.2E+05	1.0E+05	1.2E+05	4.7E+06	1.0E+05	7.8E+06	5.2E+05	5.2E+05
Nb-94	5.5E+03	5.5E+03	2.2E+03	5.5E+02	1.1E+02	1.2E+02	5.0E+03	1.1E+02	8.3E+03	5.5E+02	5.5E+02
Mo-93	2.5E+02	2.5E+02	1.0E+02	2.5E+01	5.1E+00	5.7E+00	2.3E+02	5.1E+00	3.8E+02	2.5E+01	2.5E+01
Tc-99	7.8E+01	7.8E+01	3.1E+01	7.8E+00	1.6E+00	1.7E+00	7.0E+01	1.6E+00	1.2E+02	7.8E+00	7.8E+00
Ag-108m	2.7E+03	2.7E+03	1.1E+03	2.7E+02	5.4E+01	6.1E+01	2.5E+03	5.4E+01	4.1E+03	2.7E+02	2.7E+02
Sn-126	1.5E+00	1.5E+00	6.2E-01	1.5E-01	3.1E-02	3.5E-02	1.4E+00	3.1E-02	2.3E+00	1.5E-01	1.5E-01
Sb-125	4.7E+04	4.7E+04	1.9E+04	4.7E+03	9.4E+02	1.1E+03	4.2E+04	9.4E+02	7.1E+04	4.7E+03	4.7E+03
Pm-147	2.6E+04	2.6E+04	1.0E+04	2.6E+03	5.1E+02	5.8E+02	2.3E+04	5.1E+02	3.8E+04	2.6E+03	2.6E+03
Sm-151	1.0E+03	1.0E+03	4.0E+02	1.0E+02	2.0E+01	2.2E+01	9.0E+02	2.0E+01	1.5E+03	1.0E+02	1.0E+02
Eu-152	9.1E+00	9.1E+00	3.6E+00	9.1E-01	1.8E-01	2.0E-01	8.2E+00	1.8E-01	1.4E+01	9.1E-01	9.1E-01
Eu-154	4.0E+03	4.0E+03	1.6E+03	4.0E+02	7.9E+01	8.9E+01	3.6E+03	7.9E+01	6.0E+03	4.0E+02	4.0E+02
Eu-155	9.1E+02	9.1E+02	3.6E+02	9.1E+01	1.8E+01	2.0E+01	8.2E+02	1.8E+01	1.4E+03	9.1E+01	9.1E+01
Ho-166m	1.2E-02	1.2E-02	5.0E-03	1.2E-03	2.5E-04	2.8E-04	1.1E-02	2.5E-04	1.9E-02	1.2E-03	1.2E-03

U-232	1.9E-02	1.9E-02	7.4E-03	1.9E-03	3.7E-04	4.2E-04	1.7E-02	3.7E-04	2.8E-02	1.9E-03	1.9E-03
U-236	8.0E-01	8.0E-01	3.2E-01	8.0E-02	1.6E-02	1.8E-02	7.2E-01	1.6E-02	1.2E+00	8.0E-02	8.0E-02
Np-237	9.2E-01	9.2E-01	3.7E-01	9.2E-02	1.8E-02	2.1E-02	8.3E-01	1.8E-02	1.4E+00	9.2E-02	9.2E-02
Pu-238	7.2E+03	7.2E+03	2.9E+03	7.2E+02	1.4E+02	1.6E+02	6.5E+03	1.4E+02	1.1E+04	7.2E+02	7.2E+02
Pu-239	8.6E+02	8.6E+02	3.5E+02	8.6E+01	1.7E+01	1.9E+01	7.8E+02	1.7E+01	1.3E+03	8.6E+01	8.6E+01
Pu-240	1.1E+03	1.1E+03	4.6E+02	1.1E+02	2.3E+01	2.6E+01	1.0E+03	2.3E+01	1.7E+03	1.1E+02	1.1E+02
Pu-241	1.3E+05	1.3E+05	5.3E+04	1.3E+04	2.6E+03	3.0E+03	1.2E+05	2.6E+03	2.0E+05	1.3E+04	1.3E+04
Pu-242	6.4E+00	6.4E+00	2.6E+00	6.4E-01	1.3E-01	1.4E-01	5.8E+00	1.3E-01	9.6E+00	6.4E-01	6.4E-01
Am-241	1.2E+03	1.2E+03	4.8E+02	1.2E+02	2.4E+01	2.7E+01	1.1E+03	2.4E+01	1.8E+03	1.2E+02	1.2E+02
Am-242m	3.0E+01	3.0E+01	1.2E+01	3.0E+00	5.9E-01	6.6E-01	2.7E+01	5.9E-01	4.4E+01	3.0E+00	3.0E+00
Am-243	8.4E+01	8.4E+01	3.4E+01	8.4E+00	1.7E+00	1.9E+00	7.6E+01	1.7E+00	1.3E+02	8.4E+00	8.4E+00
Cm-243	3.1E+01	3.1E+01	1.2E+01	3.1E+00	6.2E-01	6.9E-01	2.8E+01	6.2E-01	4.6E+01	3.1E+00	3.1E+00
Cm-244	5.6E+03	5.6E+03	2.2E+03	5.6E+02	1.1E+02	1.3E+02	5.0E+03	1.1E+02	8.4E+03	5.6E+02	5.6E+02
Cm-245	1.0E+00	1.0E+00	4.2E-01	1.0E-01	2.1E-02	2.3E-02	9.4E-01	2.1E-02	1.6E+00	1.0E-01	1.0E-01
Cm-246	3.7E-01	3.7E-01	1.5E-01	3.7E-02	7.3E-03	8.2E-03	3.3E-01	7.3E-03	5.5E-01	3.7E-02	3.7E-02

表 4- 12 F3 一些汽機系統的核種譜(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012c)

Ident Unit	311.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	403.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	421.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	422.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	423.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	424.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	461.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]	461.2 [Bq/m <sup>2</sup> ]	463.1 [Bq/m <sup>2</sup> ]
Fe-55	2.4E+07	2.9E+06	2.4E+07	6.3E+06	2.4E+06	2.4E+07	5.9E+05	3.9E+06	4.9E+06
Co-60	3.9E+07	4.7E+06	3.9E+07	1.0E+07	3.9E+06	3.9E+07	9.4E+05	6.3E+06	7.8E+06
Ni-59	2.8E+05	3.4E+04	2.8E+05	7.3E+04	2.8E+04	2.8E+05	6.8E+03	4.5E+04	5.6E+04
Ni-63	3.8E+07	4.5E+06	3.8E+07	9.8E+06	3.8E+06	3.8E+07	9.0E+05	6.0E+06	7.5E+06
Sr-90	9.7E+04	1.2E+04	9.7E+04	2.5E+04	9.7E+03	9.7E+04	2.3E+03	1.5E+04	1.9E+04
Zr-93	1.3E+02	1.5E+01	1.3E+02	3.3E+01	1.3E+01	1.3E+02	3.0E+00	2.0E+01	2.5E+01
Nb-93m	8.1E+06	9.7E+05	8.1E+06	2.1E+06	8.1E+05	8.1E+06	1.9E+05	1.3E+06	1.6E+06
Nb-94	1.0E+04	1.2E+03	1.0E+04	2.6E+03	1.0E+03	1.0E+04	2.4E+02	1.6E+03	2.0E+03
Mo-93	7.4E+01	8.8E+00	7.4E+01	1.9E+01	7.4E+00	7.4E+01	1.8E+00	1.2E+01	1.5E+01
Tc-99	4.4E+01	5.3E+00	4.4E+01	1.1E+01	4.4E+00	4.4E+01	1.1E+00	7.0E+00	8.8E+00
Ag-108m	1.0E+03	1.2E+02	1.0E+03	2.6E+02	1.0E+02	1.0E+03	2.4E+01	1.6E+02	2.0E+02
Sn-126	1.2E+00	1.4E-01	1.2E+00	3.1E-01	1.2E-01	1.2E+00	2.8E-02	1.9E-01	2.4E-01
Sb-125	1.6E+05	2.0E+04	1.6E+05	4.3E+04	1.6E+04	1.6E+05	3.9E+03	2.6E+04	3.3E+04
Pm-147	1.9E+04	2.3E+03	1.9E+04	4.9E+03	1.9E+03	1.9E+04	4.5E+02	3.0E+03	3.8E+03
Sm-151	7.3E+02	8.8E+01	7.3E+02	1.9E+02	7.3E+01	7.3E+02	1.8E+01	1.2E+02	1.5E+02
Eu-152	6.3E+00	7.6E-01	6.3E+00	1.6E+00	6.3E-01	6.3E+00	1.5E-01	1.0E+00	1.3E+00
Eu-154	3.1E+03	3.8E+02	3.1E+03	8.1E+02	3.1E+02	3.1E+03	7.5E+01	5.0E+02	6.3E+02
Eu-155	7.1E+02	8.5E+01	7.1E+02	1.8E+02	7.1E+01	7.1E+02	1.7E+01	1.1E+02	1.4E+02
Ho-166m	1.9E-02	2.3E-03	1.9E-02	5.0E-03	1.9E-03	1.9E-02	4.6E-04	3.1E-03	3.9E-03

U-232	1.6E-02	1.9E-03	1.6E-02	4.1E-03	1.6E-03	1.6E-02	3.8E-04	2.5E-03	3.2E-03
U-236	6.2E-01	7.4E-02	6.2E-01	1.6E-01	6.2E-02	6.2E-01	1.5E-02	9.9E-02	1.2E-01
Np-237	7.2E-01	8.7E-02	7.2E-01	1.9E-01	7.2E-02	7.2E-01	1.7E-02	1.2E-01	1.4E-01
Pu-238	6.1E+03	7.3E+02	6.1E+03	1.6E+03	6.1E+02	6.1E+03	1.5E+02	9.8E+02	1.2E+03
Pu-239	6.5E+02	7.8E+01	6.5E+02	1.7E+02	6.5E+01	6.5E+02	1.6E+01	1.0E+02	1.3E+02
Pu-240	8.5E+02	1.0E+02	8.5E+02	2.2E+02	8.5E+01	8.5E+02	2.0E+01	1.4E+02	1.7E+02
Pu-241	9.8E+04	1.2E+04	9.8E+04	2.6E+04	9.8E+03	9.8E+04	2.4E+03	1.6E+04	2.0E+04
Pu-242	5.1E+00	6.1E-01	5.1E+00	1.3E+00	5.1E-01	5.1E+00	1.2E-01	8.1E-01	1.0E+00
Am-241	8.8E+02	1.1E+02	8.8E+02	2.3E+02	8.8E+01	8.8E+02	2.1E+01	1.4E+02	1.8E+02
Am-242m	2.2E+01	2.6E+00	2.2E+01	5.6E+00	2.2E+00	2.2E+01	5.2E-01	3.5E+00	4.3E+00
Am-243	7.3E+01	8.7E+00	7.3E+01	1.9E+01	7.3E+00	7.3E+01	1.7E+00	1.2E+01	1.5E+01
Cm-243	2.8E+01	3.3E+00	2.8E+01	7.2E+00	2.8E+00	2.8E+01	6.7E-01	4.4E+00	5.6E+00
Cm-244	5.5E+03	6.6E+02	5.5E+03	1.4E+03	5.5E+02	5.5E+03	1.3E+02	8.7E+02	1.1E+03
Cm-245	1.3E+00	1.6E-01	1.3E+00	3.4E-01	1.3E-01	1.3E+00	3.2E-02	2.1E-01	2.6E-01
Cm-246	3.5E-01	4.2E-02	3.5E-01	9.1E-02	3.5E-02	3.5E-01	8.4E-03	5.6E-02	7.0E-02



## 廢棄物處理系統

不同清理系統的廢棄物射源強度列於表 4-13,表 4-14 及表 4-15。射源強度被用來估算廢棄物處理系統的活度，假設有少量的離子交換樹脂在這個系統。長半衰期核種 C-14 及 Cl-36 包含在廢棄物活度估算中。離子交換樹脂在系統 332 的 C-14 比系統 331 累積更多。

表 4- 13 F1 反應器停機後，廢棄物系統的活度(衰變時間為 1.6 年) (Jonasson 2012a)

F1 Ident Unit	324 [Bq/m <sup>3</sup> ]	331 [Bq/m <sup>3</sup> ]	332 [Bq/m <sup>3</sup> ]	342 [Bq/m <sup>3</sup> ]
Be-10	1.9E-03	9.6E-04	4.4E-06	2.0E-04
C-14		1.4E+05	3.1E+05	1.9E+05
Cl-36		1.3E+02	6.8E-01	2.1E+01
Fe-55	3.3E+08	7.5E+07	2.9E+05	2.1E+07
Co-60	1.4E+09	1.1E+09	3.9E+06	2.1E+08
Ni-59	3.5E+05	3.0E+05	1.0E+03	5.6E+04
Ni-63	4.8E+07	4.1E+07	1.4E+05	7.6E+06
Se-79	2.6E+01	1.3E+01	5.8E-02	2.7E+00
Sr-90	2.8E+07	1.4E+07	6.3E+04	3.0E+06
Zr-93	3.2E+02	2.8E+02	9.4E-01	5.2E+01
Nb-93m	7.2E+07	6.2E+07	2.1E+05	1.2E+07
Nb-94	8.0E+04	6.9E+04	2.3E+02	1.3E+04
Mo-93	3.7E+03	3.2E+03	1.1E+01	5.9E+02
Tc-99	1.2E+06	3.7E+05	1.5E+03	9.0E+04
Ru-106	4.3E+09	6.3E+07	1.2E+05	1.3E+08
Ag-108m	3.9E+04	3.4E+04	1.2E+02	6.3E+03
Pd-107	9.1E+05	7.9E+05	2.7E+03	1.5E+05
Cd-113m	2.1E+08	1.8E+08	6.2E+05	3.4E+07
Sn-126	4.3E+06	3.7E+06	1.3E+04	7.0E+05
Sb-125	5.1E+05	4.4E+05	1.5E+03	8.2E+04
I-129	8.2E+03	4.7E+02	1.3E+02	3.7E+02

Cs-134	3.5E+09	5.1E+07	7.3E+04	1.1E+08
Cs-135	3.7E+04	1.3E+04	5.2E+01	3.0E+03
Cs-137	8.4E+09	1.3E+08	2.3E+05	2.5E+08
Ba-133	1.8E+00	2.7E-02	5.0E-05	5.4E-02
Pm-147	7.2E+09	1.1E+08	2.0E+05	2.2E+08
Sm-151	3.4E+07	5.2E+05	9.4E+02	1.0E+06
Eu-152	6.8E+05	1.0E+04	1.9E+01	2.0E+04
Eu-154	4.2E+08	6.5E+06	1.2E+04	1.3E+07
Eu-155	1.6E+08	2.5E+06	4.5E+03	4.8E+06
Ho-166m	3.6E+02	5.5E+00	9.9E-03	1.1E+01
U-232	6.6E+02	1.0E+01	1.8E-02	2.0E+01
U-236	2.3E+04	3.5E+02	6.3E-01	6.9E+02
Np-237	2.6E+04	4.0E+02	7.2E-01	7.8E+02
Pu-238	2.1E+04	3.7E+05	1.5E+03	5.8E+04
Pu-239	2.2E+03	5.3E+04	2.2E+02	8.2E+03
Pu-240	2.9E+03	6.2E+04	2.6E+02	9.7E+03
Pu-241	6.9E+05	9.3E+06	4.0E+04	1.5E+06
Pu-242	1.3E+01	1.8E+02	7.7E-01	2.8E+01
Am-241	3.2E+03	6.0E+04	2.3E+02	9.3E+03
Am-242m	8.3E+01	2.2E+03	7.4E+00	3.3E+02
Am-243	2.1E+02	5.6E+03	1.9E+01	8.5E+02
Cm-243	1.3E+02	3.3E+03	1.1E+01	5.1E+02
Cm-244	2.6E+04	3.6E+05	1.5E+03	5.6E+04
Cm-245	2.3E+00	3.1E+01	1.3E-01	4.9E+00
Cm-246	8.0E-01	1.1E+01	4.6E-02	1.7E+00

表 4- 14 F2 反應器停機後，廢棄物系統的活度(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012b)

F2 Ident Unit	324 [Bq/m <sup>3</sup> ]	331 [Bq/m <sup>3</sup> ]	332 [Bq/m <sup>3</sup> ]	342 [Bq/m <sup>3</sup> ]
Be-10	1.9E-03	9.6E-04	4.4E-06	2.8E-04
C-14		1.4E+05	3.1E+05	2.7E+05
Cl-36		1.3E+02	6.8E-01	2.9E+01
Fe-55	3.8E+08	8.7E+07	3.3E+05	3.4E+07
Co-60	1.5E+09	1.2E+09	4.2E+06	3.1E+08
Ni-59	3.5E+05	3.0E+05	1.0E+03	7.8E+04
Ni-63	4.8E+07	4.1E+07	1.4E+05	1.1E+07
Se-79	2.6E+01	1.3E+01	5.8E-02	3.7E+00
Sr-90	2.8E+07	1.4E+07	6.4E+04	4.1E+06
Zr-93	3.2E+02	2.8E+02	9.4E-01	7.2E+01
Nb-93m	7.4E+07	6.4E+07	2.2E+05	1.6E+07
Nb-94	8.0E+04	6.9E+04	2.3E+02	1.8E+04
Mo-93	3.7E+03	3.2E+03	1.1E+01	8.2E+02
Tc-99	1.2E+06	3.7E+05	1.5E+03	1.2E+05
Ru-106	6.3E+09	9.3E+07	1.7E+05	2.6E+08
Ag-108m	3.9E+04	3.4E+04	1.2E+02	8.8E+03
Pd-107	9.1E+05	7.9E+05	2.7E+03	2.0E+05
Cd-113m	2.2E+08	1.9E+08	6.4E+05	4.8E+07
Sn-126	4.3E+06	3.7E+06	1.3E+04	9.6E+05
Sb-125	5.9E+05	5.1E+05	1.7E+03	1.3E+05
I-129	8.2E+03	4.7E+02	1.3E+02	5.2E+02
Cs-134	4.3E+09	6.2E+07	8.9E+04	1.8E+08
Cs-135	3.7E+04	1.3E+04	5.2E+01	4.2E+03
Cs-137	8.5E+09	1.3E+08	2.4E+05	3.6E+08
Ba-133	1.8E+00	2.8E-02	5.1E-05	7.7E-02
Pm-147	8.4E+09	1.3E+08	2.3E+05	3.5E+08
Sm-151	3.4E+07	5.2E+05	9.4E+02	1.4E+06
Eu-152	7.0E+05	1.1E+04	1.9E+01	2.9E+04
Eu-154	4.4E+08	6.8E+06	1.2E+04	1.9E+07
Eu-155	1.7E+08	2.7E+06	4.8E+03	7.3E+06

Ho-166m	3.6E+02	5.5E+00	9.9E-03	1.5E+01
U-232	6.6E+02	1.0E+01	1.8E-02	2.8E+01
U-236	2.3E+04	3.5E+02	6.3E-01	9.5E+02
Np-237	2.6E+04	4.0E+02	7.2E-01	1.1E+03
Pu-238	2.1E+04	3.7E+05	1.5E+03	8.1E+04
Pu-239	2.2E+03	5.3E+04	2.2E+02	1.1E+04
Pu-240	2.9E+03	6.2E+04	2.6E+02	1.3E+04
Pu-241	7.1E+05	9.6E+06	4.1E+04	2.1E+06
Pu-242	1.3E+01	1.8E+02	7.7E-01	3.9E+01
Am-241	2.5E+03	5.2E+04	1.9E+02	1.1E+04
Am-242m	8.3E+01	2.2E+03	7.4E+00	4.6E+02
Am-243	2.1E+02	5.6E+03	1.9E+01	1.2E+03
Cm-243	1.3E+02	3.4E+03	1.1E+01	7.1E+02
Cm-244	2.7E+04	3.6E+05	1.5E+03	7.9E+04
Cm-245	2.3E+00	3.1E+01	1.3E-01	6.7E+00
Cm-246	8.0E-01	1.1E+01	4.6E-02	2.4E+00

表 4- 15 F3 反應器停機後，廢棄物系統的活度(衰變時間為 1 年) (Jonasson 2012c)

F3 Ident Unit	324 [Bq/m <sup>3</sup> ]	331 [Bq/m <sup>3</sup> ]	332 [Bq/m <sup>3</sup> ]	342 [Bq/m <sup>3</sup> ]
Be-10	1.9E-02	3.9E-02	1.0E-04	6.4E-03
C-14		1.2E+05	2.9E+05	1.8E+05
Cl-36		1.2E+02	1.8E-01	1.8E+01
Fe-55	4.7E+09	6.3E+08	1.7E+06	2.3E+08
Co-60	5.7E+09	1.8E+09	4.8E+06	4.4E+08
Ni-59	3.2E+06	3.0E+06	7.7E+03	5.4E+05
Ni-63	4.4E+08	4.1E+08	1.1E+06	7.4E+07
Se-79	6.6E+00	1.3E+01	3.6E-02	2.2E+00
Sr-90	6.6E+06	1.3E+07	3.6E+04	2.2E+06
Zr-93	1.4E+03	1.3E+03	3.3E+00	2.3E+02
Nb-93m	9.0E+07	8.4E+07	2.2E+05	1.5E+07
Nb-94	1.2E+05	1.1E+05	2.8E+02	2.0E+04
Mo-93	8.4E+02	7.8E+02	2.0E+00	1.4E+02
Tc-99	5.9E+05	2.7E+05	6.6E+02	5.7E+04
Ru-106	4.7E+09	9.1E+07	9.7E+04	1.5E+08
Ag-108m	1.1E+04	1.1E+04	2.7E+01	1.9E+03
Pd-107	6.2E+07	5.8E+07	1.5E+05	1.1E+07
Cd-113m	2.5E+08	2.4E+08	6.0E+05	4.3E+07
Sn-126	2.9E+08	2.7E+08	6.9E+05	4.8E+07
Sb-125	1.6E+06	1.5E+06	3.9E+03	2.8E+05
I-129	4.9E+03	4.3E+02	5.4E+01	2.3E+02
Cs-134	3.2E+09	5.9E+07	5.2E+04	9.7E+07
Cs-135	2.1E+04	1.0E+04	2.5E+01	2.1E+03
Cs-137	4.5E+09	1.0E+08	1.1E+05	1.4E+08
Ba-133	2.3E+03	5.2E+01	5.7E-02	7.1E+01
Pm-147	4.3E+09	9.9E+07	1.1E+05	1.3E+08
Sm-151	1.7E+07	3.9E+05	4.3E+02	5.4E+05
Eu-152	3.4E+05	7.7E+03	8.4E+00	1.1E+04
Eu-154	2.4E+08	5.6E+06	6.1E+03	7.6E+06
Eu-155	9.4E+07	2.2E+06	2.4E+03	2.9E+06

Ho-166m	3.8E+02	8.8E+00	9.6E-03	1.2E+01
U-232	3.9E+02	9.0E+00	9.8E-03	1.2E+01
U-236	1.2E+04	2.8E+02	3.0E-01	3.8E+02
Np-237	1.4E+04	3.3E+02	3.6E-01	4.4E+02
Pu-238	6.9E+03	4.3E+05	1.1E+03	6.4E+04
Pu-239	6.1E+02	5.2E+04	1.3E+02	7.8E+03
Pu-240	8.0E+02	6.0E+04	1.5E+02	9.0E+03
Pu-241	2.3E+05	1.0E+07	2.7E+04	1.6E+06
Pu-242	4.6E+00	2.1E+02	5.3E-01	3.1E+01
Am-241	7.5E+02	4.8E+04	1.1E+02	7.2E+03
Am-242m	2.3E+01	1.9E+03	4.4E+00	2.8E+02
Am-243	6.8E+01	5.7E+03	1.3E+01	8.5E+02
Cm-243	4.3E+01	3.6E+03	8.3E+00	5.4E+02
Cm-244	1.1E+04	5.1E+05	1.3E+03	7.8E+04
Cm-245	1.2E+00	5.6E+01	1.4E-01	8.5E+00
Cm-246	3.2E-01	1.5E+01	3.8E-02	2.3E+00

## 氣體處理及通風系統

排出氣體系統的活度主要來自於惰性氣體的子核種 Sr-90, Cs-135 及 Cs-137(在較短的衰變時間, Ba-140 及 La-140 為主)。惰性氣體沉積的排氣系統之活度盤點列於表 4-16。

表 4-16 不同排氣系統之惰性氣體子核種活度盤點(衰變時間為一年)

Ident	341, before T1, distribution lines in T1 and the bottom of T1	341 T1 (sand)
Nuclide/Unit	[Bq]	[Bq]
F1		
Sr-90	2.5E+08	4.8E+09
I-129	1.3E+04	2.4E+05
Cs-135	1.7E+06	3.3E+07
Cs-137	7.0E+09	1.3E+11
F2		
Sr-90	2.6E+08	4.9E+09
I-129	1.3E+04	2.4E+05
Cs-135	1.7E+06	3.3E+07
Cs-137	7.1E+09	1.4E+11
F3		
Sr-90	2.1E+08	4.0E+09
I-129	7.6E+02	1.5E+04
Cs-135	7.6E+05	1.5E+07

## 建築物污染

在拆除瑞典 BWR 的研究中, 電廠不同水泥結構的污染程度已被提出。污染同時存在活化的生物屏蔽體及因溢出的污染介質的表面。在 Barsebäck 收集的資料被認為是通用的, 因此也適用在 Forsmark 三個廠中。

## 混凝土表面

在 Barsebäck 1 污染的混凝土結構盤點已經完成了。盤點結果將會在修改後用在 Forsmark 電廠區。該區分為三個級別：

### 級別 1 局部污染

主要是反應器廠房，由該地區的活化系統散播活化廢棄物。例如，沉積排氣過程及通風區域的廢棄物。

### 級別 2 可能發生污染

汽機廠房、除汙間及通風區域。

### 級別 3 可外釋

服務建築、電氣建築及辦公建築。

對於混凝土表面的污染用以下的方式估算其滲透和活化的傳播

### *圍阻體*

潮濕牆壁在其 100% 表面的 1 公分

潮濕底部在其 100% 表面的 2 公分

乾燥牆壁在其 5% 表面的 2 公分

生物屏蔽體全部的結構

### *燃料及處理池*

底部 100% 表面的 2 公分

牆面 100% 表面的 1 公分

幫浦所在之混凝土污染深度估計五公分

### *處理設備的房間*

處理設備的數量有限之房間

5% 地板表面 1 公分



高洩漏風險的房間，如有過濾組的房間、廢水桶槽、幫浦等

5%地板表面 2 公分

### **生物屏蔽體**

生物屏蔽體的活度分布是根據 Barsebäck 1 and 2 鑽取樣品得到的。而核種盤點是從 Forsmark 三個反應器計算的(Jonasson 2012a, b, c)。表 4-17 列的是生物屏蔽體的核種盤點(Jonasson 2012a, b, c)。資料呈現將基於以實驗數據進行調整的計算。



表 4- 17 生物屏蔽體之中子活化活度(Jonasson 2012a, b, c)

	F1			F2			F3		
	Concrete [Bq]	Reinforecement [Bq]	Total [Bq]	Concrete [Bq]	Reinforecement [Bq]	Total [Bq]	Concrete [Bq]	Reinforecement [Bq]	Total [Bq]
H-3	1.1E+12		1.1E+12	1.1E+12		1.1E+12	1.3E+12		1.3E+12
Be-10	1.9E+02		1.9E+02	1.9E+02		1.9E+02	2.7E+02		2.7E+02
C-14	2.5E+08	3.1E+07	2.8E+08	2.5E+08	3.1E+07	2.8E+08	3.5E+08	4.5E+07	4.0E+08
Cl-36	8.3E+06	4.2E+04	8.3E+06	8.3E+06	4.2E+04	8.3E+06	1.2E+07	6.1E+04	1.2E+07
Ca-41	8.2E+08		8.2E+08	8.2E+08		8.2E+08	1.2E+09		1.2E+09
Fe-55	1.2E+11	8.8E+11	1.0E+12	1.4E+11	1.0E+12	1.2E+12	1.5E+11	1.2E+12	1.3E+12
Co-60	4.0E+10	6.2E+10	1.0E+11	4.3E+10	6.7E+10	1.1E+11	4.4E+10	7.0E+10	1.1E+11
Ni-59	1.9E+06	6.0E+07	6.2E+07	1.9E+06	6.0E+07	6.2E+07	2.7E+06	8.6E+07	8.8E+07
Ni-63	2.0E+08	6.3E+09	6.5E+09	2.1E+08	6.3E+09	6.5E+09	2.8E+08	8.8E+09	9.1E+09
Se-79	3.9E+02		3.9E+02	3.9E+02		3.9E+02	3.9E+02		3.9E+02
Sr-90	4.0E+06		4.0E+06	4.0E+06		4.0E+06	5.1E+06		5.1E+06
Zr-93	6.4E+03		6.4E+03	6.4E+03		6.4E+03	8.0E+03		8.0E+03
Nb-93m	2.5E+08	2.1E+08	4.7E+08	2.6E+08	2.2E+08	4.8E+08	2.8E+08	2.4E+08	5.2E+08
Nb-94	2.1E+06	1.7E+06	3.9E+06	2.1E+06	1.7E+06	3.9E+06	2.3E+06	1.8E+06	4.1E+06
Mo-93	5.2E+03	4.7E+06	4.7E+06	5.2E+03	4.7E+06	4.7E+06	4.3E+03	4.0E+06	4.0E+06
Tc-99	1.1E+03	9.7E+05	9.7E+05	1.1E+03	9.7E+05	9.7E+05	8.3E+02	7.7E+05	7.8E+05
Ag-108m	1.9E+08		1.9E+08	1.9E+08		1.9E+08	2.3E+08		2.3E+08
Cd-113m	1.1E+06		1.1E+06	1.1E+06		1.1E+06	1.1E+06		1.1E+06

Sb-125	2.2E+06	1.8E+07	2.1E+07	2.5E+06	2.1E+07	2.4E+07	1.6E+06	1.4E+07	1.5E+07
Cs-134	4.7E+09		4.7E+09	5.7E+09		5.7E+09	4.2E+09		4.2E+09
Cs-137	4.2E+06		4.2E+06	4.2E+06		4.2E+06	5.4E+06		5.4E+06
Ba-133	1.4E+08		1.4E+08	1.4E+08		1.4E+08	1.3E+08		1.3E+08
Pm-147	1.7E+08		1.7E+08	2.0E+08		2.0E+08	2.0E+08		2.0E+08
Sm-151	2.4E+09		2.4E+09	2.4E+09		2.4E+09	2.8E+09		2.8E+09
Eu-152	7.5E+10		7.5E+10	7.7E+10		7.7E+10	9.2E+10		9.2E+10
Eu-154	4.4E+09		4.4E+09	4.6E+09		4.6E+09	4.3E+09		4.3E+09
Eu-155	1.9E+09		1.9E+09	2.0E+09		2.0E+09	1.9E+09		1.9E+09
Ho-166m	2.5E+07		2.5E+07	2.5E+07		2.5E+07	2.9E+07		2.9E+07
Pu-239	1.2E+06		1.2E+06	1.2E+06		1.2E+06	8.5E+05		8.5E+05
Total	1.3E+12	9.5E+11	2.3E+12	1.4E+12	1.1E+12	2.5E+12	1.6E+12	1.2E+12	2.9E+12

## 活度盤點

這節介紹 Forsmark 三個機組拆除的廢棄物分類及數量，其中活度分類也包含了 0 號機組。主要探討分為三類：電廠金屬活化盤點，混凝土活化盤點及砂石活化盤點。活化分類基於特定的活化數據。活化評估參考的日期，F1、F2 為 2032/07/07，而 F3 為 2036/08/21。

根據國際原子能總署，放射性廢棄物可以分為高階廢棄物、中低階廢棄物及自由外釋廢棄物。高階廢棄物定義為熱功率為  $2\text{kW/m}^3$  以上的廢棄物。中低階廢棄物定義為需要屏蔽的廢棄物，但對散熱需求不高。低階廢棄物在過去定義不需要在正常處理及運送下屏蔽。廢棄物包裝的表面劑量率小於  $2\text{mSv/h}$  一般稱為低階廢棄物，而若其表面劑量率高於  $2\text{mSv/h}$  則分為中階廢棄物。

中低階廢棄物根據國際原子能總署又分為短生及長生廢棄物。短生的中低階廢棄物包含低濃度的長生核種。儘管廢棄物可能包含高濃度的短生核種，顯著的放射性衰變發生在控制期間。長生的中低階廢棄物包含長生核種(半衰期超過 30 年)是需要與生物圈隔離的。

自由外釋廢棄物為活度階級低於低於許可級別，因此不被認為放射性廢棄物，可以免於核監管控制而自由外釋。儘管從物理的角度來看是具有放射性的，但這種廢棄物不需要考慮輻射特性，即藉由常規的技術及系統來安全的處理。

除役廢棄物及控制區域的自由外釋物料定義為特定核種比活度為  $100\text{Bq/kg}$ 。但是在這節裡的除役廢棄物則用以下的假設：

自由外釋限值： $500\text{Bq/kg}$ 。

為了可以包含非控制區域之活度分類非活化物料的廢棄物，已經加比活

度層級到表 4-18，這種沒有活度廢棄物分類是不需要被監視的。

### 射源資訊

F1(F0)及 F2 的組件資料，如：重量，是基於 Lytsy and Björklöf (2010) 及 Hall (2009)。F3 的組件資料是基於 Lindow (2009a, b)。

表 4- 18 比活度分類

廢棄物比活度分類	比活度分類(Bq/kg)	描述
紅	$>10^6$	需要輻射屏蔽的放射性物料
黃	$10^4 \sim 10^6$	不需要輻射屏蔽的放射性物料
綠	$500 \sim 10^4$	處理後可以自由外釋的物料
藍	$<500$	控制區域之非活化物料
白	-	非控制區域之非活化物料

### 輻射水平

最具有放射性的系統為反應器系統，而汽機系統大部分組件可以自由外釋。被認為是放射性的系統可以從 Jonasson (2012a, b, c)取得。在 F0 中所有系統都是自由外釋的水平。

### 電廠金屬活度盤點

在 Formark 核電廠估算金屬量是以下列來分類：

機械及管路系統，包含所有電廠處理液體系統，及其相關設備、管路、閥和配件。

結構及各種鋼材，包含處理設備，起重機，襯墊，支撐和其他鋼材。

空氣處理系統，包括其相關的管道，設備，閥門和配件。

電氣設備和電纜，包括電纜，電纜橋架和管道，及所有電氣和 I&C 顯著設備。

這些分類用這個方式來定義，來反應所用數據庫的結構及便於和其他類似的研究比較。

### **電廠區域**

Forsmark 每個機組其廠房及房間分為五個區域及 0 號機組。

Forsmark 1, 2 及 3：

區域 A：反應器限制區。

區域 B：反應器廠房。

區域 D：汽機廠房。

區域 K：控制區剩餘的房間。

區域 OK：非空置區的房間。

Forsmark 0：

區域 OK：非空置區的房間。

### **機械及管路系統活化盤點**

活度盤點將會在 Forsmark 電廠的液體處理系統對應列出。

### **反應器壓力槽及其內部組件**

表 4-19，表 4-20 及表 4-21 呈現三部機組之反應器壓力槽、反應器壓力槽絕熱及其內部組件、活度盤點總結。從 Jonasson (2012a, b, c) 可以得到總活度。

表 4- 19 F1- RPV, RPV 絕熱及內部組件活度盤點

廢棄物活度 分類活度分 類(Bq/kg)		F1 RPV	RPV 絕熱	內部組件	總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq	705.2 9.1E+12	8.4 4.2E+11	264.4 1.1E+17	978.1 1.1E+17
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq				
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸 總活度，Bq				
<500	重量，噸 總活度，Bq		12.1		12.1
-	重量，噸 總活度，Bq				
總和	重量，噸 總活度，Bq	705.2 9.1E+12	20.5 4.2E+11	264.4 1.1E+17	990.2 1.1E+17



表 4- 20 F2- RPV, RPV 絕熱及內部組件活度盤點

廢棄物比活度分類 (Bq/kg)		F2 RPV	RPV 絕熱	內部組件	總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq	705.2 1.0E+13	8.4 4.8E+11	263.5 1.3E+17	977.2 1.3E+17
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq				
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸 總活度，Bq				
<500	重量，噸 總活度，Bq		12.1		12.1
-	重量，噸 總活度，Bq				
總和	重量，噸 總活度，Bq	705.2 1.0E+13	20.5 4.8E+11	263.5 1.3E+17	989.3 1.3E+17

表 4- 21 F3- RPV, RPV 絕熱及內部組件活度盤點

廢棄物比活度分類 (Bq/kg)		F3 RPV	RPV 絕熱	內部組件	總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq	760.0 1.4E+13	10.6 2.3E+11	376.7 8.1E+16	1,147.3 8.1E+16
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq				
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸 總活度，Bq				
<500	重量，噸 總活度，Bq		9.4		9.4
-	重量，噸 總活度，Bq				
總和	重量，噸 總活度，Bq	760.0 1.4E+13	20.0 2.3E+11	376.7 8.1E+16	1,156.7 8.1E+16

內部組件為電廠中活化程度最高的部分，很明顯的高過反應器壓力槽的活度。內部組件的活度接近爐心，如主要被中子活化的爐心隔板及爐心護套。位在爐心底部的，控制棒導引管線距離爐心 0.5 公尺處為長半衰期的放射性廢棄物，而其餘的部分為短半衰期廢棄物。這兩種的廢棄物均分類在表格中紅色的分類。遠離爐心的部分，則活度的來源是表面污染。反應器壓力槽靠近爐心 4.5 公尺的部分視為中子活化廢棄物，而其餘的活度來源主要來自於表面污染。

## 電廠金屬活度總結

Fosmark 電廠的金屬活度總結呈現在表 4-22、表 4-23 及表 4-24。

表 4- 22 F1 及 F0 金屬活度盤點

比活度分 類(Bq/kg)		F1&F0					OK	總和
		A	B	D	K			
>10 <sup>6</sup>	重量，噸	988	148		5		1,142	
	總活度，Bq	1.1E+17	1.7E+12		3.9E+10		1.1E+17	
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸	217	118	1,631	294		2,259	
	總活度，Bq	1.7E+10	3.8E+10	2.4E+11	3.0E+10		3.3E+11	
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸		0.2	82	33		115	
	總活度，Bq		3.1E+06	6.3E+08	1.5E+08		7.9E+08	
<500	重量，噸	1,386	1,697	6,550	6,414		16,047	
	總活度，Bq							
-	重量，噸					1,990	1,990	
	總活度，Bq							
總和	重量，噸	2,591	1,963	8,263	6,746	1,990	21,552	
	總活度，Bq	1.1E+17	1.7E+12	2.4E+11	6.8E+10		1.1E+17	

表 4- 23 F2 金屬活度盤點

比活度分 類(Bq/kg)		F2 A	B	D	K	OK	總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸	993	152	0.1	0.6		1,146
	總活度，Bq	1.3E+17	1.2E+12	1.9E+08	6.8E+09		1.3E+17
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸	213	114	1,713	169		2,209
	總活度，Bq	1.7E+10	3.2E+10	1.9E+11	8.4E+08		2.4E+11
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸		0.2		18		17.69
	總活度，Bq		3.8E+06		1.2E+08		1.2E+08
<500	重量，噸						
	總活度，Bq	1,384	1,697	6,550	5,726		15,357
-	重量，噸						
	總活度，Bq					1,296	1,296
總和	重量，噸	2,590	1,963	8,263	5,913	1,296	20,025
	總活度，Bq	1.3E+17	1.2E+12	1.9E+11	7.8E+09		1.3E+17

表 4- 24 F3 金屬活度盤點

比活度分 類(Bq/kg)		F3 A	B	D	K	OK	總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸	1,178	352	1,023	1		2,554
	總活度，Bq	8.1E+16	7.7E+12	1.6E+12	2.9E+10		8.2E+16
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸	181	140	1,130	95		1,726
	總活度，Bq	4.1E+10	3.8E+10	3.1E+11	5.9E+09		3.9E+11
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸	11		6	143		160
	總活度，Bq	0.0E+00		1.1E+07	7.1E+08		7.2E+08
<500	重量，噸	1,463	1,638	5,852	985		9,939
	總活度，Bq						
-	重量，噸					5,867	5,867
	總活度，Bq						
總和	重量，噸	2,833	2,129	8,191	1,224	5,867	20,245
	總活度，Bq	8.1E+16	7.7E+12	2.0E+12	3.6E+10		8.2E+16

### 混凝土活度盤點

Forsmark 廠址的建築物將會拆除到地下一米，因此這裡的混凝土活度盤點都是高於這個水平。表 4-25 為 Fosmark 電廠混凝土活度盤點的總結。生物屏蔽體的混凝土活度分類與在 Barsebäck 1 (Ericsson 2005) 鑽孔取樣測試得到的活度資料不同。然而總活度計算是基於 Jonasson (2012a, b, c)。所有汽機廠房的混凝土都認為是可以自由外釋的。表 4-26 為 F1, F2, F3 及 F0 的鋼筋活度盤點清單。鋼筋的活度來自於污染及生物屏蔽體。

表 4- 25 混凝土活度盤點

廢棄物比活 度分類 (Bq/kg)		F1&F0 總和	F2 總和	F3 總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq	365 1.3E+12	230 1.24E+12	240 1.8E+12
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq	496 1.5E+11	496 1.6E+11	891 2.4E+11
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸 總活度，Bq	230 1.15E+09	230 1.15E+09	240 1.2E+09
<500	重量，噸 總活度，Bq	284,774 1.24E+08	222,906 1.24E+08	175,224 3.60E+07
-	重量，噸 總活度，Bq	31,262	14,546	127,545
總和	重量，噸 總活度，Bq	317,128 1.4E+12	238,409 1.4E+12	304,140 2.0E+12

表 4-26 鋼筋混凝土活度盤點

廢棄物比活度分類 (Bq/kg)		F1&F0 總和	F2 總和	F3 總和
>10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq	49 9.49E+11	39 1.09E+12	56 1.24E+12
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq			
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸 總活度，Bq			
<500	重量，噸 總活度，Bq	11,187	9,428	11,612
-	重量，噸 總活度，Bq	916	437	5,450
總和	重量，噸 總活度，Bq	12,152 9.49E+11	9,904 1.09E+12	17,118 1.24E+12

### 砂石活度盤點

排氣處理延遲系統、系統 374 的沙床包含將近 8,300 噸的砂石，其中 947 噸被惰性氣體子核種污染。砂石總活度盤點大約為  $2.62 \cdot 10^{11}$  Bq。表 4-27 為 F1, F2 及 F3 砂石活度盤點。

表 4-27 砂石活度盤點

廢棄物比活度分類 (Bq/kg)		F1	F2	F3
10 <sup>4</sup> ~10 <sup>6</sup>	重量，噸 總活度，Bq			
500~10 <sup>4</sup>	重量，噸 總活度，Bq	341 1.39E+11	341 1.41E+11	265 1.21E+11
<500	重量，噸 總活度，Bq	2,235	2,235	2,916
-	重量，噸 總活度，Bq			
總和	重量，噸 總活度，Bq	2,576 1.39E+11	2,576 1.41E+11	3,182 1.21E+11

## 廢棄物數量及活度分類

### 廢棄物容器

這節內容為除污系統之金屬、混凝土、砂石及離子交換樹脂的廢棄物體積。如同之前所描述的處理設備，混凝土，砂石及除污廢棄物已經做了廢棄物分類。分類標準是基於廢棄物的比活度，並列於表 4-18。廢棄物分類為藍色及白色的將會被回收或處置。表 4-28 顯示了 Fosmark 電廠之廢棄物容器的數量及處置場的儲存容量。



表 4- 28 廢棄物容器數據：Farmark 電廠之所有廢棄物

建議處置設施	淨儲存容量 (m <sup>3</sup> )	廢棄物容器數量	容器種類	廢棄物分類	尺寸(m)
SFL	385	39	BFA-tank	Red (LL)	3.30×2.30×1.30
SFR	2,703	391	Large steel BOX	Red (SL)	2.40×2.40×1.20
SFR	36	21	Steel BOX	Red (SL)	1.20×1.20×1.20
SFR	12,979	659	ISO-type Container	Yellow & Green	6.06×2.50×1.30
Recycling	305,518	15,512	ISO-type Container	Blue & White	6.06×2.50×1.30

\*SFL(The Swedish Final Repository for Long-lived Low and Intermediate Level Waste)

SFR(The Swedish Final Repository for Short-lived Low and Intermediate Level Waste)

### 處理設備廢棄物

紅色的比活度分類(>10<sup>6</sup> Bq/kg)的處理設備廢棄物為，包含了長半衰期及短半衰期廢棄物。長半衰期廢棄物主要是接近爐心的組件。在這項研究中，爐心護套和爐心護套外殼及其組件假設為長半衰期，如爐心隔板，控制棒導管的組件及爐心內的管路設備。爐心護套，爐心護套外殼，爐心隔板及控制棒導管為系統 212 的一部分，而爐心內的管路設備屬於系統 216。運輸和儲存用的 0.1 公尺厚鋼容器 (BFA-tanks)為短半衰期廢棄物，其外圍尺寸為 3.30×1.30×2.30 公尺。內部體積大約為 7 立方公尺而最大重量為 34 噸(包含了 12 噸的廢棄物)。長半衰期廢棄物假設存放在未來的最終處置場；SFL。

運輸和儲存用的 5mm 厚不鏽鋼容器為紅色比活度分類(10<sup>6</sup> Bq/Kg)的短半衰期廢棄物，其外圍尺寸為 2.40×2.40×1.20 公尺，最大重量為 20 噸。這是 1.20×1.20×1.20 公尺鋼容器的放大版本，而最大重量基於現今最終儲存場的起重裝置限制為 20 噸。運輸的屏蔽運輸容器為短半衰期廢棄物，儲存在

短半衰期最終儲存場；SFR。

當計算屬於紅色比活度分類之處理設備廢棄物的廢棄物容器數量(不包含內部組件)，每個包裝度為 1.1 噸/立方公尺。包裝度世基於西班牙經驗估算的。如 ENRESA 假設 1.1 噸/立方公尺的包裝度填裝廢金屬廢棄物在鋼桶中，其外尺寸為 1.74×0.87×0.87 公尺。

從 Oskarshamn 之內部組件置換的經驗表明，內部組件尺寸為 3.30×2.30×1.30 公尺的鋼桶，其包裝度小於 1.1 噸/立方公尺。對於內部組件的包裝，先前西屋切割計畫已經使用了經驗數據及計算結果。包裝度取決於內部組件的切割。

在黃色及綠色分類處理設備廢棄物假設會運輸並儲存在 SFR 儲存庫，同時在藍色及白色分類的廢棄物假設運輸到合適的處理或回收設施。用於這類的廢棄物容器假設為 20 英尺半高的 ISO 型容器，包含頂部開口及外部，尺寸為 6.06×2.50×1.30 公尺。這些容器的內部體積大約為 15 立方公尺，總重量限制為 20 噸。當計算低活度處理設備廢棄物的容器需要的數量，包裝度為 1.1 噸/立方公尺。假設包裝度為 1.1 噸/立方公尺及 20 英尺半高容器結果會比 20 英尺全高容器有更好的體積利用。由於是總重量的限制。即使使用 10 英尺全高的 ISO 容器，也會導致與相同的 20 英尺半高的容器，20 英尺半高是較好的選擇。大多數 10 英尺全高的容器為單個儲存目的之構造使用，並不具有與 20 英尺容器的強度。大多數儲存在 20 英尺半高 ISO 型的容器之低活度廢棄物，為 SFR 中現有放射性運行廢棄物的最終儲存庫。

外釋的廢棄物假設為優先選擇最合適的處理金屬回收公司及其所使用的容器。為了獲得清楚的自由外釋廢棄物量，這裡假設 20 英尺半高容器適用於自由外釋廢棄物。計算自由外釋廢棄物處理設備廢棄物容器需求是使用包裝度 1.1 噸/立方公尺。

表 7-29 為處理設備廢棄物所需之容器數量及其在處存場的淨儲存體積。

表 4- 29 廢棄物容器數據：Farmark 電廠之處理設備廢棄物

建議處置設施	淨儲存容量 (m <sup>3</sup> )	廢棄物容器數量	容器種類	廢棄物分類	尺寸(m)
SFL	385	39	BFA-tank	Red (LL)	3.30×2.30×1.30
SFR	2,219	321	Large steel BOX	Red (SL)	2.40×2.40×1.20
SFR	8,942	454	ISO-type Container	Yellow & Green	6.06×2.50×1.30
Recycling	106,904	5,428	ISO-type Container	Blue & White	6.06×2.50×1.30

### 混凝土廢棄物

紅色分類的混凝土廢棄物(>10<sup>6</sup> Bq/kg)源自於靠近爐心的生物屏蔽體 (Ericsson 2005)。這種廢棄物被認為是短半衰期並推定運輸及儲存在 5mm 鋼製容器，外部尺寸為 2.40×2.40×1.20 公尺。生物屏蔽體被認為需要切割成塊狀分配到廢棄物容器中。放置並不會是完美的，生物屏蔽體之混凝土總包裝度被認為跟壓碎混凝土一樣，大約 1.5 噸/立方公尺(Ericsson 2005)。2.40×2.40×1.20 公尺的廢棄物容器將會在屏蔽的運輸容器中被運送到最終儲存場。

黃色(104 - 106 Bq/kg)及綠色(500 - 104 Bq/kg) 比活度分類的混凝土廢棄物來自於生物屏蔽體外圍部分及電廠控制區域之污染混凝土。這種廢棄物容器假設為 20 英尺半高 ISO 型容器包含頂部開口即內部體積為 15 立方公尺。廢棄物料為壓碎的混凝土形式，包裝度大約為 1.5 噸/立方公尺 (Ericsson 2005)。當計算容器數量最大負荷為 18 噸/容器，則為 ISO 型容器

體積利用率為 80%。

混凝土廢棄物容器數量及在儲存場之淨儲存體積列於表 4-30。

大多的混凝土廢棄物不具有活度，其來源為控制區域及非控制區的建築物。這些自由外是廢棄物的總量約為 872,500 噸，其中有 698,000 噸會被用來填充場址，例如填充地面以下一公尺(Ericsson 2005)。

表 4-30 到表 4-32 列出了混凝土廢棄物的活度、分類及重量數據。Identity 為系統編號，Nuclide vectors 為核種分類詳見附件表 A-1 到表 A-3。

表 4-30 廢棄物混凝土數據：混凝土廢棄物

建議處置設施	淨儲存容量 (m <sup>3</sup> )	廢棄物容器 數量	容器種類	廢棄物分類	尺寸(m)
SFR	484	70	Large steel BOX	Red (SL)	2.40×2.40×1.20
SFR	2,994	152	ISO-type Container	Yellow & Green	6.06×2.50×1.30
Municipal Deposit	190,479	9,671	ISO-type Container	Blue & White	6.06×2.50×1.30

表 4-31 F1 - 廢棄物活度數據：混凝土廢棄物

Identity	Nuclide Vector	關鍵 核種	關鍵核種 活度	廢棄物 總重(噸)	平均 比活度 (Bq/kg)	容器種類	容器 數量	廢棄物分類
R.1	1	Co-60	3.70E+10	230.1	5.40E+06	Large steel BOX	23.0	Red (SL)
D.1	4	Co-60	1.40E+10	120.4	1.90E+05	ISO-type Container	6.7	Yellow & Green
V.1	4	Co-60	5.90E+08	15	6.40E+04	ISO-type Container	0.8	Yellow & Green

R.1	1	Co-60	4.30E+09	517.7	2.80E+05	ISO-type Container	28.8	Yellow & Green
R.3	3	Co-60	7.10E+09	199.7	5.50E+04	ISO-type Container	11.1	Yellow & Green

表 4- 32 F2 - 廢棄物活度數據：混凝土廢棄物

Identity	Nuclide Vector	關鍵核種	關鍵核種活度	廢棄物總重(噸)	平均比活度 (Bq/kg)	容器種類	容器數量	廢棄物分類
R.1	1	Co-60	3.80E+10	230.1	5.40E+06	Large steel BOX	23.0	Red (SL)
R.1	1	Co-60	4.40E+09	517.7	2.80E+05	ISO-type Container	28.8	Yellow & Green
R.3	3	Co-60	7.60E+09	208.4	5.80E+04	ISO-type Container	11.6	Yellow & Green

表 4- 33 F3 - 廢棄物活度數據：混凝土廢棄物

Identity	Nuclide Vector	關鍵核種	關鍵核種活度	廢棄物總重(噸)	平均比活度 (Bq/kg)	容器種類	容器數量	廢棄物分類
R.1	1	Co-60	4.90E+10	240.0	7.50E+06	Large steel BOX	24.0	Red (SL)
R.1	1	Co-60	4.10E+09	540.0	2.80E+05	ISO-type Container	30.0	Yellow & Green
R.3	3	Co-60	1.30E+10	352.1	8.50E+04	ISO-type Container	19.6	Yellow & Green
D.1	3	Co-60	2.40E+10	212.2	2.50E+05	ISO-type Container	11.8	Yellow & Green
V.1	3	Co-60	1.00E+09	26.5	8.50E+04	ISO-type Container	1.5	Yellow & Green

## 砂石廢棄物

沙床的排氣處理延遲系統含有 8,333 噸的砂石，其中有 947 噸是被惰性氣體子核種污染的。F1 及 F2 之被污染的砂石廢棄物估計平均比活度為  $4.1 \cdot 10^5$  Bq/kg，所以屬於黃色比活度分類( $10^4 - 10^6$  Bq/kg)。F3 估計的平均比活度為  $4.6 \cdot 10^5$  Bq/kg，因此也屬於黃色比活度分類( $10^4 - 10^6$  Bq/kg)。

沙床的排氣處理延遲系統含有 8,333 噸的砂石，其中有 947 噸是被惰性氣體子核種污染的。F1 及 F2 之被污染的砂石廢棄物估計平均比活度為  $4.1 \cdot 10^5$  Bq/kg，所以屬於黃色比活度分類( $10^4 - 10^6$  Bq/kg)。F3 估計的平均比活度為  $4.6 \cdot 10^5$  Bq/kg，因此也屬於黃色比活度分類( $10^4 - 10^6$  Bq/kg)。活度主要來源為短半衰期核種(Jonasson 2012a, b, c)，並假定廢棄物容器為  $6.06 \times 2.50 \times 1.30$  公尺，20 英尺半高 ISO 型的容器。因砂石的高密度容器將會填充約 70%，並不會超過容器最大重量的負荷。活化的砂石廢棄物將存放在 SFR。每個容器可以裝 18 噸的砂石，砂石廢棄物的容器數量及淨儲存體積將列於表 4-34。

表 4-35 到表 4-37 列出了砂石廢棄物的活度、分類及重量數據。

表 4-34 廢棄物容器數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物

建議處置設施	淨儲存容量 (m <sup>3</sup> )	廢棄物容器 數量	容器種類	廢棄物分類	尺寸(m)
SFR	1,044	53	ISO-type Container	Yellow & Green	6.06×2.50×1.30
Municipal Deposit	8,134	413	ISO-type Container	Blue & White	6.06×2.50×1.30

表 4- 35 F1 廢棄物活度數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物

Identity	Nuclide Vector	關鍵 核種	關鍵核種 活度	廢棄物 總重(噸)	平均 比活度 (Bq/kg)	容器種類	容器 數量	廢棄物分類
341.2	15	Co-60	1.3E+11	340.9	4.1E+05	ISO-type Container	18.9	Yellow & Green

表 4- 36 F2 廢棄物活度數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物

Identity	Nuclide Vector	關鍵 核種	關鍵核種 活度	廢棄物 總重(噸)	平均 比活度 (Bq/kg)	容器種類	容器 數量	廢棄物分類
341.2	14	Cs-137	1.4E+11	340.9	4.1E+05	ISO-type Container	18.9	Yellow & Green

表 4- 37 F3 廢棄物活度數據：排氣處理延遲系統的砂石廢棄物

Identity	Nuclide Vector	關鍵 核種	關鍵核種 活度	廢棄物 總重(噸)	平均 比活度 (Bq/kg)	容器種類	容器 數量	廢棄物分類
341.2	13	Cs-137	1.2E+11	265.1	4.6E+05	ISO-type Container	14.7	Yellow & Green

### 除役廢棄物

如同前面章節所述，某些系統在除役前會先進行除污。約 1/3 的反應器壓力槽也將會進行除污。基於 Oskarshamn 及 Barsebäck 除污之花費離子交換樹脂體積的經驗，廢棄物容器的數量設置為 7 個。從除役過程中以離子交換樹脂形式的廢棄物將會送到最終處置。

除役廢棄物將會在紅色比活度分類，被認為是短半衰期的。他被認為以

5mm 鋼製容器運輸，外部尺寸為 1.20×1.20×1.20 公尺。離子交換樹脂將會與在鋼製容器的瀝青混和。混和比例為瀝青與離子交換樹脂等分，瀝青的密度假設為 1.1 噸/立方公尺。

儲存場的除役廢棄物容器數量及其淨儲存體積列於表 4-38。

表 4- 38 廢棄物活度數據：除役廢棄物

建議處置設施	淨儲存容量 (m <sup>3</sup> )	廢棄物容器數量	容器種類	廢棄物分類	尺寸(m)
SFR	36	21	Steel Box	Red(SL)	1.20×1.20×1.20



## 5. 結論

研究結論：

在蒐集美國主要除役實際案例所產生除役放射性廢棄物量，其中 PWR Trojan 電廠之估算為  $15.2 \text{ m}^3/\text{MWe}$ ，BWR WNP-2 電廠之估算為  $16.4 \text{ m}^3/\text{MWe}$ 。此外，美國核管會曾建議採用 PWR Trojan 的值以估算 PWR 電廠除役廢棄物之掩埋體積，BWR WNP-2 電廠的值以估算 BWR 電廠除役廢棄物之掩埋體積，因此在估算我國核能電廠之除役廢棄物體積時，建議 PWR 電廠將以 PWR Trojan 電廠所估算的值為依據，BWR 電廠將以 WNP-2 電廠所估算的值為依據。另外，美國核管處鑒於除役技術日益更新且有更新的除役經驗，因此對 NUREG/CR-0130(PWR)與 NUREG/CR-0672(BWR)提出更新版本，分別為 NUREG/CR-5884(PWR)與 NUREG/CR-6174(BWR)。此二版本之間最主要差異在於早期技術報告所評估之數量較為保守(如 PWR 參考廠，新舊報告數量差距達兩倍左右)，新版評估報告於除役時所使用的除污技術使得混凝土廢棄物(concrete debris)數量大量減少，亦同時考量低放射性廢棄物裝填密度(packaging densities)之技術增進。新版的除役體積估算每單位機組發電量分別修訂為 PWR Trojan 電廠： $7.02 \text{ m}^3/\text{MWe}$ ，BWR WNP-2 電廠： $13.09 \text{ m}^3/\text{MWe}$ 。

Forsmark 電廠除役盤點則是將電廠以金屬、混凝土及砂石分類來進行盤點。金屬盤點依據其系統功能分為四類，包括機械及管路系統、結構及各種鋼材、空氣處理系統、電氣設備和電纜；這種分類方式也有利於大型組件資料的建立，且因採系統功能分類，可藉由其污染來源相似而便於分析。而混凝土盤點則是將廠區分為三個級別，包括局部污染、污染發生、沒有特定行動的釋出可能區域，便於了解不同建築物污染程度，以進行盤點。

砂石盤點則是排氣處理延遲系統的沙床，包含了 5,550 m<sup>3</sup> 的砂石，有些是被惰性氣體子核種污染。活度盤點則先介紹了國際原子能總署對放射性廢棄物分類的定義，接著盤點分類方式也是與物料盤點一樣。最後則是對於廢棄物容器儲存後的數量及其活度進行分類進行探討。

成果效益：

本研究具有下列效益：

- (1)學術成就：完成除役放射性廢棄物盤點管制技術研究之研究報告一冊。著重對除役廢棄物盤點技術與國際案例之相關國際文獻資料進行技術研析與整理。美國案例部分，針對 Trojan 電廠及 BWR WNP-2 電廠除役案例，完成放射性廢棄物分類與數量結果之整理。歐洲案例部分，針對 Forsmark 電廠除役案例，分析其盤點技術之方法論。
- (2)技術創新：除役放射性廢棄物盤點為重要的核子反應器設施除役安全議題之一，我國尚未有電廠除役相關經驗，藉由美國及歐洲電廠實例，進而分析相關的重要技術議題，並提出我國應考慮的技術要項。對於後續我國管制規範之建立，具有關鍵性的意義，可提供做為擬定規範之科技基準。
- (3)社會影響：本報告蒐集與研析除役放射性廢棄物盤點實際案例，主要著重於美國與歐洲電廠除役實際案例，探討廢棄物盤點、活度估算技術與分類技術，確保符合國內低放射性廢棄物最終處置管理之需求，有助於民眾了解國際核電廠低放射性廢棄物的處置，提升盤點管制技術的公信力。
- (4)非研究類成就：透過完整電廠除役案例，研析廢棄物盤點、活度估算技術與分類技術，能更了解整個執行過程的相關重要議題及挑戰，並作為主管機關審查除役放射性廢棄物盤點之參考案例。

(5)其它效益：本研究以管制機關立場，蒐集之美國與歐洲電廠除役實際案例，可提供作為委託單位後續參考應用之資訊參考。

後續研發建議：

本研究透過美國與歐洲除役實際案例，讓國內對於除役放射性廢棄物之盤點能有更實際面的了解。並透過 Forsmark 廢棄物盤點、活度估算技術與分類技術，能更了解整個執行過程的相關重要議題及挑戰，並作為主管機關審查除役放射性廢棄物盤點之參考案例。

## 参考文献

1. Murphy E.S., 1978, "Technology Safety and Costs of Decommissioning a Reference Pressurized Water Reactor Power, Classification of Decommissioning Wastes", NUREG/CR-0130, Addendum 3, PNL/USNRC.
2. Oak, H.D., Holter, G.M., Kennedy, W.E., Jr., and Konzek, G.J., 1980, "Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station", UREG/CR-0672, Volume 1 and 2, PNL/USNRC.
3. OECD, 1986, "Decommissioning of Nuclear Facilities: Feasibility, Needs and Costs", Paris.
4. Smith, R. I., Komek, G.J., and Kennedy W.E., Jr., 1978, "Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Pressurized Water Reactor Power Station", NUREG/CR-0130, Volumes 1 and 2, PNL/USNRC.
5. U.S.NRC, 1983, "The Impact on LLRW Burial Site of Decommissioning Commercial Light Water Power Reactors", in the memorandum from the USNRC Office of State Programs to State Officials.
6. U.S.NRC, 1988, "Final Generic Environmental Impact Statement of Decommissioning of Nuclear Facilities", NUREG-0586.
7. Å ke Anunti, Helena Larsson, Mathias Edelborg, Westinghouse Electric Sweden AB, "Decommissioning study of Forsmark NPP", SKB R-13-03, June 2013.
8. Konzek G.J., Smith, R.I., Bierschbact M.C. and McDuffie P.N., 1996, Revised Analyses of Decommissioning a Reference Pressurized Water Reactor Power, Classification of Decommissioning Wastes, NUREG/CR-5884, Volume 1 and 2, PNL/USNRC.
9. Smith, R.I., Bierschbact M.C., Konzek G.J. and McDuffie P.N., 1996, Revised Analyses of Decommissioning for the Reference Boiling Water Reactor Power Station, NUREG/CR-6174, Volume 1 and 2, PNL/USNRC.

## 附件

表 A- 1 F0 和 F1 的 Nuclide vectors

Vector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
H-3	2.70E+01									5.50E-08	5.80E-07	2.50E-01				
Be-10	4.80E-09		9.50E-14	8.50E-14	1.10E-12								1.40E-12	8.90E-13		8.70E-13
C-14	6.30E-03	5.10E-04	9.40E-04	8.40E-04	8.10E-02		3.10E-04	2.40E-04	3.20E-03	1.20E-04	1.10E-04	5.20E-04	0.00E+00	1.30E-04		8.30E-04
Cl-36	2.10E-04	6.90E-07	1.00E-07	8.90E-08	1.70E-07		2.30E-07	1.10E-07	5.10E-07	3.70E-08	1.20E-07	3.30E-07	0.00E+00	1.20E-07		8.80E-08
Ca-41	2.10E-02							5.50E-04								
Fe-55	3.00E+00	1.40E+01	1.00E-01	1.10E-01	7.40E-02	2.70E-01	4.00E+00	2.30E+00	6.20E+00	3.50E+00	1.60E+01	7.00E+00	2.40E-01	7.00E-02		1.20E-01
Co-60	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00		1.00E+00
Ni-59	4.90E-05	9.70E-04	2.70E-04	2.40E-04	2.60E-04	1.80E-03	2.20E-03	1.10E-03	8.80E-03	7.30E-04	3.10E-04	4.20E-03	2.50E-04	2.80E-04		2.40E-04
Ni-63	5.20E-03	1.00E-01	3.70E-02	3.30E-02	3.60E-02	2.40E-01	2.60E-01	1.10E-01	1.30E+00	1.10E-01	4.10E-02	5.70E-01	3.40E-02	3.80E-02		3.30E-02
Se-79	9.80E-09		1.30E-09	1.10E-09	1.50E-08					2.80E-12	2.90E-11		1.90E-08	1.20E-08		1.20E-08
Sr-90	1.00E-04		1.40E-03	1.30E-03	1.60E-02	4.90E-03	2.90E-03		1.70E-06	1.10E-05	2.30E-04	4.80E-06	2.00E-02	1.30E-02	3.60E-02	1.30E-02
Zr-93	1.60E-07		2.50E-07	2.20E-07	2.40E-07	1.80E-06	1.10E-06		6.10E-10	3.30E-10	4.60E-08	1.70E-09	2.30E-07	2.60E-07		2.20E-07
Nb-93m	6.40E-03	3.50E-03	5.60E-02	5.20E-02	5.50E-02	3.80E-01	2.60E-01	4.40E-03	5.50E-03	2.00E-03	1.50E-02	8.40E-03	5.20E-02	5.80E-02		5.20E-02
Nb-94	5.40E-05	2.80E-05	6.20E-05	5.60E-05	6.00E-05	4.10E-04	2.70E-04	8.70E-06	1.50E-05	2.00E-06	1.70E-05	1.10E-05	5.70E-05	6.40E-05		5.50E-05
Mo-93	1.30E-07	7.70E-05	2.90E-06	2.60E-06	2.80E-06	1.90E-05	1.40E-04	2.50E-05	1.60E-04	1.70E-05	2.50E-05	1.60E-04	2.60E-06	2.90E-06		2.50E-06
Tc-99	2.70E-08	1.60E-05	4.20E-05	3.70E-05	3.90E-04	4.40E-06	1.90E-05	4.60E-06	2.30E-05	2.10E-06	4.10E-06	2.50E-05	8.30E-04	3.50E-04		3.80E-04
Ru-106			6.00E-02	1.10E-01	3.00E-02					2.70E-06	2.90E-05		3.10E+00	5.80E-02		1.20E+00

Ag-108m	4.70E-03		3.10E-05	2.80E-05	3.00E-05	2.00E-04	1.20E-04		6.90E-08	1.20E-08	4.90E-06	2.00E-07	2.80E-05	3.10E-05		2.70E-05	
Pd-107			6.90E-05	6.20E-05	6.90E-04					1.90E-12	2.00E-11		6.60E-04	7.30E-04		6.30E-04	
Cd-113m	2.70E-05		1.60E-02	1.50E-02	1.60E-01					1.60E-11	1.70E-10		1.50E-01	1.70E-01		1.50E-01	
Sn-126			3.20E-04	2.90E-04	3.30E-03	6.00E-08	3.60E-08		2.00E-11	2.80E-11	1.70E-09	5.80E-11	3.10E-03	3.40E-03		3.00E-03	
Sb-125	5.60E-05	3.00E-04	4.00E-04	4.40E-04	3.80E-04	3.00E-03	2.00E-03	1.20E-04	1.00E-04	1.70E-04	6.30E-04	3.50E-04	3.70E-04	4.10E-04		4.50E-04	
I-129			1.70E-07	1.60E-07	3.40E-05					3.10E-12	3.30E-11		5.90E-06	4.40E-07	1.80E-06	1.60E-06	
Cs-134	1.20E-01		4.90E-02	6.00E-02	1.90E-02					1.20E-05	1.30E-04		2.50E+00	4.80E-02		6.40E-01	
Cs-135			1.40E-06	1.30E-06	1.30E-05					3.70E-11	4.00E-10		2.60E-05	1.20E-05	2.40E-04	1.30E-05	
Cs-137	1.10E-04		1.20E-01	1.10E-01	6.00E-02					1.10E-05	1.10E-04		6.10E+00	1.20E-01	1.00E+00	1.10E+00	
Ba-133	3.50E-03		2.50E-11	2.40E-11	1.30E-11					3.10E-12	3.30E-11		1.30E-09	2.50E-11		2.40E-10	
Pm-147	4.30E-03		1.00E-01	1.20E-01	5.20E-02	8.50E-04	5.10E-04		2.90E-07	7.80E-06	1.00E-04	8.40E-07	5.20E+00	1.00E-01		1.20E+00	
Sm-151	6.00E-02		4.80E-04	4.30E-04	2.40E-04	3.80E-05	2.30E-05		1.30E-08	1.90E-08	1.10E-06	3.80E-08	2.40E-02	4.80E-04		4.40E-03	
Eu-152	1.90E+00		9.50E-06	8.90E-06	4.80E-06	3.40E-07	2.00E-07		1.20E-10	9.20E-11	9.20E-09	3.40E-10	4.90E-04	9.60E-06		9.20E-05	
Eu-154	1.10E-01		6.00E-03	5.70E-03	3.00E-03	1.50E-04	8.80E-05		5.00E-08	4.10E-07	7.90E-06	1.40E-07	3.10E-01	6.00E-03		5.90E-02	
Eu-155	4.70E-02		2.30E-03	2.30E-03	1.10E-03	3.20E-05	1.90E-05		1.10E-08	2.60E-07	3.50E-06	3.20E-08	1.20E-01	2.30E-03		2.40E-02	
Ho-166m	6.20E-04		5.00E-09	4.50E-09	2.60E-09	4.80E-10	2.90E-10		1.70E-13	3.70E-14	1.20E-11	4.70E-13	2.60E-07	5.10E-09		4.60E-08	
U-232			9.20E-09	8.40E-09	4.70E-09	7.10E-10	4.30E-10		2.40E-13	2.40E-10	2.60E-09	7.00E-13	4.70E-07	9.30E-09		8.60E-08	
Normalized against	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Cs-137	Co-60

表 A- 2 F2 的 Nuclide vectors

Vector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
H-3	2.60E+01								5.20E-08	5.60E-07	2.40E-01			
Be-10	4.50E-09		8.80E-14	1.00E-12								1.30E-12	8.30E-13	
C-14	5.90E-03	4.70E-04	8.70E-04	7.50E-02		2.80E-04	2.20E-04	3.00E-03	1.10E-04	9.90E-05	4.90E-04		1.20E-04	
Cl-36	1.90E-04	6.40E-07	9.20E-08	1.60E-07		2.10E-07	1.00E-07	4.70E-07	3.50E-08	1.10E-07	3.10E-07		1.10E-07	
Ca-41	1.90E-02						5.10E-04							
Fe-55	3.20E+00	1.50E+01	1.10E-01	7.90E-02	2.90E-01	4.30E+00	2.40E+00	6.60E+00	3.80E+00	1.70E+01	7.50E+00	2.50E-01	7.50E-02	
Co-60	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	
Ni-59	4.50E-05	9.00E-04	2.50E-04	2.40E-04	1.70E-03	2.00E-03	1.00E-03	8.10E-03	6.80E-04	2.90E-04	3.90E-03	2.30E-04	2.60E-04	
Ni-63	4.80E-03	9.50E-02	3.40E-02	3.30E-02	2.20E-01	2.40E-01	1.10E-01	1.20E+00	1.00E-01	3.80E-02	5.30E-01	3.20E-02	3.50E-02	
Se-79	9.10E-09		1.20E-09	1.40E-08					2.60E-12	2.70E-11		1.70E-08	1.10E-08	
Sr-90	9.40E-05		1.30E-03	1.50E-02	8.70E-03	5.20E-03		3.00E-06	1.00E-05	3.20E-04	8.60E-06	1.90E-02	1.20E-02	3.60E-02
Zr-93	1.50E-07		2.30E-07	2.30E-07	1.80E-06	1.10E-06		6.00E-10	3.20E-10	4.60E-08	1.70E-09	2.10E-07	2.40E-07	
Nb-93m	6.10E-03	3.30E-03	5.30E-02	5.20E-02	3.60E-01	2.50E-01	4.20E-03	5.20E-03	1.90E-03	1.50E-02	8.00E-03	4.90E-02	5.50E-02	
Nb-94	5.00E-05	2.60E-05	5.80E-05	5.60E-05	3.80E-04	2.50E-04	8.10E-06	1.40E-05	1.90E-06	1.50E-05	9.90E-06	5.30E-05	5.90E-05	
Mo-93	1.20E-07	7.10E-05	2.70E-06	2.60E-06	1.70E-05	1.30E-04	2.30E-05	1.40E-04	1.60E-05	2.30E-05	1.50E-04	2.40E-06	2.70E-06	
Tc-99	2.50E-08	1.50E-05	3.90E-05	3.60E-04	5.30E-06	1.90E-05	4.30E-06	2.10E-05	2.00E-06	3.90E-06	2.40E-05	7.70E-04	3.20E-04	
Ru-106			8.20E-02	4.10E-02					3.70E-06	3.90E-05		4.20E+00	8.00E-02	
Ag-108m	4.40E-03		2.80E-05	2.80E-05	1.90E-04	1.10E-04		6.40E-08	1.10E-08	4.60E-06	1.80E-07	2.60E-05	2.90E-05	
Pd-107			6.40E-05	6.40E-04					1.80E-12	1.90E-11		6.10E-04	6.80E-04	
Cd-113m	2.60E-05		1.50E-02	1.50E-01					1.60E-11	1.70E-10		1.40E-01	1.60E-01	

Sn-126			3.00E-04	3.00E-03	1.10E-07	6.30E-08		3.60E-11	2.90E-11	2.80E-09	1.00E-10	2.90E-03	3.20E-03	
Sb-125	6.00E-05	3.20E-04	4.20E-04	4.10E-04	3.20E-03	2.20E-03	1.30E-04	1.10E-04	1.80E-04	6.80E-04	3.70E-04	3.90E-04	4.30E-04	
I-129			1.60E-07	3.10E-05					2.90E-12	3.10E-11		5.50E-06	4.10E-07	1.80E-06
Cs-134	1.30E-01		5.60E-02	2.10E-02					1.40E-05	1.50E-04		2.90E+00	5.40E-02	
Cs-135			1.30E-06	1.20E-05					3.50E-11	3.70E-10		2.50E-05	1.10E-05	2.40E-04
Cs-137	9.90E-05		1.10E-01	5.70E-02					1.00E-05	1.10E-04		5.70E+00	1.10E-01	1.00E+00
Ba-133	3.40E-03		2.40E-11	1.20E-11					3.00E-12	3.20E-11		1.20E-09	2.40E-11	
Pm-147	4.60E-03		1.10E-01	5.60E-02	1.80E-03	1.10E-03		6.00E-07	8.40E-06	1.30E-04	1.70E-06	5.60E+00	1.10E-01	
Sm-151	5.60E-02		4.40E-04	2.30E-04	6.90E-05	4.10E-05		2.40E-08	2.00E-08	1.80E-06	6.70E-08	2.30E-02	4.50E-04	
Eu-152	1.80E+00		9.10E-06	4.60E-06	6.20E-07	3.70E-07		2.10E-10	1.10E-10	1.60E-08	6.10E-10	4.70E-04	9.20E-06	
Eu-154	1.10E-01		5.80E-03	2.90E-03	2.70E-04	1.60E-04		9.40E-08	4.10E-07	1.10E-05	2.70E-07	3.00E-01	5.80E-03	
Eu-155	4.80E-02		2.30E-03	1.20E-03	6.20E-05	3.70E-05		2.10E-08	2.60E-07	4.30E-06	6.10E-08	1.20E-01	2.30E-03	
Ho-166m	5.80E-04		4.70E-09	2.40E-09	8.50E-10	5.10E-10		2.90E-13	5.90E-14	2.10E-11	8.40E-13	2.40E-07	4.70E-09	
U-232			8.60E-09	4.40E-09	1.30E-09	7.60E-10		4.40E-13	2.30E-10	2.40E-09	1.20E-12	4.40E-07	8.70E-09	
Normalized against	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Cs-137



表 A- 3 F3 的 Nuclide vectors

Vector	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
H-3	3.00E+01							5.30E-08	6.70E-07	2.90E-01					
Be-10	6.10E-09		5.00E-12								3.40E-12	2.10E-11		1.50E-11	2.20E-11
C-14	8.00E-03	6.40E-04	4.10E-04	1.80E-04	3.50E-04		1.70E-03	1.10E-04	1.00E-04	4.60E-04		6.30E-05		4.10E-04	6.00E-02
Cl-36	2.60E-04	8.70E-07	4.20E-08	1.40E-07	2.10E-07		5.70E-07	3.60E-08	1.10E-07	2.70E-07		6.60E-08		4.20E-08	3.60E-08
Ca-41	2.60E-02				1.10E-03										
Fe-55	3.50E+00	1.70E+01	5.20E-01	3.00E+00	4.00E+00	6.20E-01	7.80E+00	3.90E+00	1.80E+01	6.60E+00	8.30E-01	3.40E-01		5.20E-01	3.50E-01
Co-60	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00	1.00E+00		1.00E+00	1.00E+00
Ni-59	6.20E-05	1.20E-03	1.20E-03	6.70E-03	1.50E-03	7.20E-03	1.30E-02	7.10E-04	2.60E-04	3.60E-03	5.70E-04	1.60E-03		1.20E-03	1.60E-03
Ni-63	6.30E-03	1.30E-01	1.70E-01	8.60E-01	1.50E-01	9.60E-01	1.50E+00	1.10E-01	3.50E-02	4.90E-01	7.70E-02	2.20E-01		1.70E-01	2.20E-01
Se-79	8.80E-09		1.70E-09					2.60E-12	3.30E-11		1.20E-09	7.20E-09		5.00E-09	7.40E-09
Sr-90	1.20E-04		1.70E-03	2.00E-03		2.50E-03	5.50E-06	1.20E-05	1.30E-04	7.60E-06	1.20E-03	7.20E-03	3.40E-02	5.00E-03	7.40E-03
Zr-93	1.80E-07		5.40E-07	2.60E-06		3.20E-06	7.10E-09	3.30E-09	2.70E-09	9.80E-09	2.40E-07	7.00E-07		5.40E-07	6.90E-07
Nb-93m	6.30E-03	3.40E-03	3.50E-02	1.70E-01	3.90E-03	2.10E-01	4.80E-03	1.90E-03	5.50E-03	1.10E-02	1.60E-02	4.60E-02		3.50E-02	4.50E-02
Nb-94	5.10E-05	2.60E-05	4.50E-05	2.20E-04	9.80E-06	2.60E-04	1.70E-05	2.00E-06	6.00E-06	1.10E-05	2.00E-05	5.90E-05		4.50E-05	5.80E-05
Mo-93	9.70E-08	5.70E-05	3.20E-07	3.10E-05	2.40E-05	1.90E-06	1.60E-05	1.40E-05	2.20E-05	2.00E-04	1.50E-07	4.30E-07		3.20E-07	4.20E-07
Tc-99	1.90E-08	1.10E-05	4.50E-05	4.70E-06	4.40E-06	1.10E-06	2.50E-06	1.90E-06	3.60E-06	3.10E-05	1.00E-04	1.50E-04		1.30E-04	1.40E-04
Ru-106			1.10E-01					3.70E-06	4.70E-05		8.40E-01	5.00E-02		3.30E-01	2.00E-02
Ag-108m	5.20E-03		4.40E-06	2.10E-05		2.60E-05	5.70E-08	2.50E-08	6.80E-14	7.90E-08	2.00E-06	5.80E-06		4.40E-06	5.70E-06
Pd-107			8.30E-03					1.80E-12	2.30E-11		1.10E-02	3.20E-02		2.40E-02	3.10E-02
Cd-113m	2.40E-05		3.30E-02					1.60E-11	2.00E-10		4.40E-02	1.30E-01		9.80E-02	1.30E-01

Sn-126			3.80E-02	2.40E-08		3.00E-08	6.70E-11	5.10E-11	2.90E-10	9.30E-11	5.00E-02	1.50E-01		1.10E-01	1.40E-01	
Sb-125	3.60E-05	1.90E-04	6.40E-04	3.40E-03	1.00E-04	4.20E-03	1.30E-04	1.80E-04	5.70E-04	4.90E-04	2.90E-04	8.40E-04		6.40E-04	8.20E-04	
I-129			1.80E-07					2.90E-12	3.70E-11		8.70E-07	2.40E-07	1.20E-07	5.30E-07	1.10E-05	
Cs-134	9.60E-02		7.70E-02					1.40E-05	1.80E-04		5.60E-01	3.20E-02		2.20E-01	1.10E-02	
Cs-135			1.70E-06					3.50E-11	4.40E-10		3.70E-06	5.50E-06	1.20E-04	4.90E-06	5.20E-06	
Cs-137			1.10E-01					1.00E-05	1.30E-04		8.00E-01	5.70E-02	1.00E+00	3.20E-01	2.40E-02	
Ba-133	3.00E-03		5.60E-08					3.00E-12	3.80E-11		4.00E-07	2.90E-08		1.60E-07	1.20E-08	
Pm-147	4.60E-03		1.10E-01	3.90E-04		4.80E-04	1.10E-06	8.90E-06	1.10E-04	1.50E-06	7.60E-01	5.40E-02		3.10E-01	2.20E-02	
Sm-151	6.30E-02		4.20E-04	1.50E-05		1.90E-05	4.10E-08	3.30E-08	2.00E-07	5.70E-08	3.00E-03	2.10E-04		1.20E-03	8.90E-05	
Eu-152	2.10E+00		8.30E-06	1.30E-07		1.60E-07	3.60E-10	2.20E-10	8.80E-10	5.00E-10	6.00E-05	4.20E-06		2.40E-05	1.80E-06	
Eu-154	9.70E-02		6.00E-03	6.40E-05		8.00E-05	1.80E-07	4.70E-07	5.00E-06	2.50E-07	4.30E-02	3.00E-03		1.70E-02	1.30E-03	
Eu-155	4.40E-02		2.30E-03	1.40E-05		1.80E-05	4.00E-08	2.80E-07	3.30E-06	5.50E-08	1.70E-02	1.20E-03		6.70E-03	4.90E-04	
Ho-166m	6.50E-04		9.40E-09	4.00E-10		4.90E-10	1.10E-12	4.80E-13	1.00E-13	1.50E-12	6.80E-08	4.80E-09		2.80E-08	2.00E-09	
U-232			9.60E-09	3.20E-10		4.00E-10	8.90E-13	2.30E-10	2.90E-09	1.20E-12	6.90E-08	4.90E-09		2.80E-08	2.00E-09	
Normalized against	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Co-60	Cs-137	Co-60	Co-60