

行政院原子能委員會
勞務採購案期末報告

109 年度國際除役案例蒐集及相關風險
洞悉管制

委託單位：行政院原子能委員會

執行單位：財團法人核能資訊中心

計畫主持人：朱鐵吉 博士

計畫編號：AEC10904017L

報告日期：中華民國 109 年 12 月

報告內容係研究者之研究觀點，不代表委託單位之政策或意見。

摘要

我國核能一、二、三廠，在經過 40 年的運轉期限後，於近年陸續進入除役階段。在「(當代)使用者付費」的普遍共識下，世界各國皆透過專案基金之設置來確保有足夠的預算依規劃時程完成核電廠除役工作，避免增加下一代的負擔。我國已設置「核能發電後端營運基金」，係由經濟部主管之非營業基金，此基金自核能發電之售價收入提撥部分財源等特定收入來源，供辦理核電廠除役、用過核子燃料貯存與處置、及低放射性廢棄物處理貯存及處置等特定政務所需；並設核能後端營運基金管理會，負責後端基金收支、保管及運用之審議；後端基金年度預算、決算之審議以及後端基金運用情形之考核。而依據我國「核子反應器設施管制法」第 23 條第 1 項第 4 款規定，核設施(電廠)經營者於提出除役申請時應檢附財務基礎足以勝任除役執行之相關佐證資料，經管制機關審核發給許可後，方得進行除役工作。

由於除役費用估算通常在除役前數年(或更早)就已提出，且核一廠除役是我國首次執行此類工作，所以當除役費用預估若因時程落差以及缺乏實務經驗等因素而與除役時實況有大幅差異時，有可能會導致除役工作無法如期如質進行。隨著我國核電廠相繼進入除役階段，針對除役費用議題應可參考已累積一段時間之國際相關實務經驗，經考量國內現況後彙整可行作法以供管制機關審查與管制相關議題之參考，促進此議題之管制效益及效能，順利完成國內除役工作。

目錄

摘要.....	i
目錄.....	ii
圖目錄.....	v
表目錄.....	vi
第一章、簡介.....	1
第二章、美國原子能產業論壇「商用核能電廠除役經費估計之製作指引」報告重點摘 述與研析心得.....	5
2.1 前言.....	5
2.2 除役方式、流程與工作項目（AIF 報告第一冊第 3 章）.....	8
2.3 工作單元（work unit）之定義（AIF 報告第一冊第 4 章）.....	9
2.3.1 管路之移除.....	9
2.3.2 閥之移除.....	10
2.3.3 泵浦之移除.....	10
2.4 單價因子（AIF 報告第一冊第 5 章）.....	15
2.4.1 簡介.....	15
2.4.2 單價因子的組成元素.....	15
2.4.3 單價因子的格式.....	16
2.4.4 單價因子的應用.....	19
2.4.5 非例行設備移除之費用.....	20
2.5 除役時程之擬定（AIF 報告第一冊第 6 章）.....	32
2.6 期程相關經費（AIF 報告第一冊第 7 章）.....	38
2.7 附屬經費（AIF 報告第一冊第 8 章）.....	41
2.7.1 未分配的(undistributed)廠區裝備.....	41
2.7.2 電廠照明、暖氣與冷氣所需能源.....	42
2.7.3 放射性廢液之處理.....	43
2.7.4 核能責任保險.....	44
2.7.5 稅款.....	44

2.7.6 申請執照與許可	44
2.7.7 保健物理設備與供應品	45
2.7.8 小型工具	45
2.8 可回收舊料與廢棄物料 (AIF 報告第一冊第 9 章)	46
2.9 低放射性廢棄物準則 (AIF 報告第一冊第 10 章)	47
2.10 放射性廢棄物之處置 (AIF 報告第一冊第 11 章)	48
2.11 個別廠區特性、電廠修改案與其他經費之調整 (AIF 報告第一冊第 12 章) ...	50
2.11.1 電廠修改案	50
2.11.2 通貨膨脹	50
2.11.3 多機組設計	50
2.11.4 特殊設備	51
2.11.5 單班制或兩班制	51
2.12 應變準備金 (Contingency, AIF 報告第一冊第 13 章)	53
2.13 經費估計結構 (AIF 報告第一冊第 14 章)	55
2.14 除役工作項目清單 (AIF 報告第二冊第 2 章)	57
2.15 單價因子之擬定 (AIF 報告第二冊第 3 章)	62
2.16 期程相關經費之因素 (AIF 報告第二冊第 4 章)	68
2.17 附屬經費 (AIF 報告第二冊第 5 章)	71
2.18 經費估計結構 (AIF 報告第二冊第 6 章)	73
2.19 小結	74
2.20 參考文獻	75
第三章、美國核管會「最小除役基金公式合適性評估」報告重點摘述與管制建議	76
3.1 前言	76
3.2 PWR 及 BWR 參考案例之除役費用估算轉換 (PNNL 報告第 2 章)	79
3.3 個別電廠除役費用估算 (PNNL 報告第 3 章)	81
3.4 四座已完成除役電廠之實際費用回顧 (PNNL 報告第 4 章)	92
3.5 個別電廠除役費用估算與實際除役費用之綜合比對 (PNNL 報告第 5 章)	109
3.6 最小除役基金公式修正建議 (PNNL 報告第 6 章)	115

第四章、經濟合作暨發展組織核能署「核能電廠除役費用」報告重點摘述與管制建議	117
4.1 前言	117
4.2 除役政策、策略、執行方式(NEA 報告第 2 章)	120
4.3 除役費用估算(NEA 報告第 3 章)	124
4.4 NEA 各會員國除役基金機制(NEA 報告第 4 章)	142
4.5 NEA 研究之結論與建議	146
4.6 芬蘭 Loviisa 電廠除役案例(NEA 報告第 6 章)	149
4.7 荷蘭 Dodewaard 電廠除役案例(NEA 報告第 7 章)	151
4.8 斯洛伐克 Bohunice V1 電廠除役案例(NEA 報告第 8 章)	152
4.9 西班牙 Jose Cabrera 電廠除役案例(NEA 報告第 9 章)	154
4.10 除役通用案例(NEA 報告第 10 章)	155
4.11 Magnox 電廠除役通用案例(NEA 報告第 11 章)	157
第五章、美國核管會「核能電廠除役費用管制指引與標準審查計畫」重點摘述與管制建議	159
5.1 前言	159
5.2 管制指引	160
5.3 標準審查計畫	164
5.4 研析心得與建議	176
第六章、管制建議彙整與總體說明	178

圖目錄

圖 2.1 BWR 除役時程範例	35
圖 2.2 除役專案工作分解結構範例	58

表目錄

表 2.1 管路移除之工作單元	9
表 2.2 閥移除之工作單元	10
表 2.3 泵浦移除之工作單元	10
表 2.4 熱交換器移除之工作單元	11
表 2.5 槽與小型容器移除之工作單元	11
表 2.6 機械與電氣設備移除之工作單元	12
表 2.7 強化鋼筋混凝土結構移除之工作單元	13
表 2.8 美國四種人力費用中須考慮的詳細項目	16
表 2.9 工作時間計算範例	18
表 2.10 單價因子計算範例	19
表 2.11 反應爐與內部組件運送容器範例	20
表 2.12 反應爐和內部組件移除所需的人力組成	23
表 2.13 反應爐和內部組件分割與裝運所需時間	23
表 2.14 反應爐和內部組件移除所需的人力工時(小時)	24
表 2.15 反應爐和內部組件移除所需的設備範例	24
表 2.16 SURRY 電廠移除三個蒸汽產生器的工作項目與工時	26
表 2.17 蒸汽產生器移除所需設備	27
表 2.18 生物屏蔽牆移除工作時間之計算	28
表 2.19 生物屏蔽牆移除單價因子之計算	29
表 2.20 核電廠除役主包商人員職位範例	40
表 2.21 核能電廠除役時使用的未分配廠區裝備及操作人員需求範例	42
表 2.22 立即拆除第一階段後半段建議準備的裝備	42
表 2.23 立即拆除第二階段前半段建議準備的裝備	43
表 2.24 應變準備金的類別與額度範例	54
表 2.25 除役費用估計報告目錄範例(立即拆除方式)	56
表 2.26 BWR 立即拆除方式之除役工作項目範例	59
表 2.27 移除未受污染及重量大於 10,000 磅之泵的單價因子範例	63

表 2.28 設備表面除污的單價因子範例	65
表 2.29 在污染區裝設鷹架的單價因子範例	66
表 2.30 地表下空洞回填的單價因子範例	67
表 2.31 美國電力公司在核電廠立即拆除之除役工作中各職位的工時範例	69
表 2.32 工作人員服務設施租金範例(供應 100 人使用)	71
表 2.33 除役第一階段後半段所需裝備租金範例	72
表 3.1 立即拆除(DECON)BWR 電廠之執照終止/廠區復原/用過燃料營運費用(2010 年幣 值)	84
表 3.2 立即拆除(DECON)PWR 電廠之執照終止/廠區復原/用過燃料營運費用(2010 年幣 值)	85
表 3.3 立即拆除(DECON)BWR 電廠之執照終止費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)	87
表 3.4 立即拆除(DECON) PWR 電廠之執照終止費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)	88
表 3.5 立即拆除(DECON) BWR 電廠之直接費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)	89
表 3.6 立即拆除(DECON) PWR 電廠之直接費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)	90
表 3.7 HADDAM NECK PLANT (HNP)除役廢棄物數量統計	95
表 3.8 HADDAM NECK PLANT (HNP)估算/實際除役費用(百萬美金)	95
表 3.9 MAINE YANKEE (MY)除役廢棄物數量統計	98
表 3.10 MAINE YANKEE (MY)估算/實際除役費用(百萬美金)	99
表 3.11 TROJAN NUCLEAR PLANT (TNP)除役廢棄物數量統計	102
表 3.12 TROJAN NUCLEAR PLANT (TNP)估算/實際除役費用(百萬美金)	102
表 3.13 RANCHO SECO GENERATING PLANT(RSGP)除役廢棄物數量統計	105
表 3.14 RANCHO SECO GENERATING PLANT(RSGP)估算/實際除役費用(百萬美金)	105
表 3.15 已完成除役電廠實際除役費用比較(2010 年幣值/百萬美金)	107
表 3.16 美國立即拆除(DECON)BWR 電廠之低放廢棄物運送及最終處置估算費用彙整 (百萬美金)	114
表 3.17 PNNL 報告中立即拆除(DECON)PWR 電廠之低放廢棄物運送及最終處置估算/ 實際費用彙整(百萬美金)	114
表 4.1 除役費用國際通用架構(ISDC)第一及第二階架構	126
表 4.2 NEA 問卷調查蒐集之立即拆除 PWR 及 BWR 費用估算(以 ISDC 分類呈現；2013 年美金幣值，單位百萬)	131
表 4.3 NEA 問卷蒐集之立即拆除 PWR 及 BWR 三大類主要費用統計(2013 年美金幣	

值，單位百萬).....	132
表 4.4 NEA 整理 PNNL 報告中立即拆除 PWR 及 BWR 三大類主要費用統計(2013 年美金幣值，單位百萬).....	134
表 4.5 NEA 會員國除役基金審查負責單位與審查頻率	143
表 4.6 斯洛伐克 BOHUNICE V1 電廠除役三大類主要費用統計(2011 年歐元幣值，單位百萬).....	153
表 5.1 標準審查計畫之除役工作項目細分清單(適用立即拆除 PWR 及 BWR).....	171
表 5.2 參考電廠之污染設備/管路分類及數量(立即拆除).....	172
表 5.3 參考 BWR 電廠之污染水泥及金屬數量	172
表 5.4 參考 PWR 電廠之污染水泥及金屬數量	172
表 5.5 參考 BWR 電廠之除役費用估算大項(2000 年幣值，百萬美金).....	173
表 5.6 參考 PWR 電廠之除役費用估算大項(2000 年幣值，百萬美金).....	173
表 5.7 參考 BWR 電廠之預估廢棄物數量及費用(立即拆除).....	174
表 5.8 參考 PWR 電廠之預估廢棄物數量及費用(立即拆除).....	174
表 5.9 參考 BWR 電廠各階段人力需求與費用(立即拆除；2000 年幣值，百萬美金) ..	175
表 5.10 參考 PWR 電廠各階段人力需求與費用(立即拆除；2000 年幣值，百萬美金).	175

第一章、簡介

我國核能一、二、三廠，在經過 40 年的運轉期限後，於近年陸續進入除役階段。在「(當代)使用者付費」的共識下，世界各國皆透過專案基金之設置，以確保有足夠的預算依規劃時程完成核電廠除役工作，而不致增加下一代的負擔。我國已設置「核能發電後端營運基金」，係由經濟部主管之非營業基金，此基金自核能發電之售價收入提撥部分財源等特定收入來源，供辦理核電廠除役、用過核子燃料貯存與處置、及低放射性廢棄物處理貯存及處置等特定政務所需；並設核能後端營運基金管理會，負責後端基金收支、保管及運用之審議；後端基金年度預算、決算之審議以及後端基金運用情形之考核。而依據我國「核子反應器設施管制法」第 23 條第 1 項第 4 款規定，核設施(電廠)經營者於提出除役申請時應檢附財務基礎足以勝任除役執行之相關佐證資料，經管制機關審核發給許可後，方得進行除役工作。

由於除役費用估算通常在除役前數年(或更早)就已提出，且核一廠除役是我國首次執行此類工作，所以當除役費用預估因時程落差以及缺乏實務經驗等因素而與除役當時狀況有大幅差異時，有可能會導致除役工作無法如期如質進行。隨著我國核電廠陸續進入除役階段，針對除役費用議題應可參考已累積一段時間之國際相關實務經驗，經考量國內現況後彙整可行作法以供管制機關審查與管制相關議題之參考，進一步提升除役工作之管制效益及效能，順利完成國內除役工作。

我國正著手執行國內首次核電廠除役工作，因此要瞭解除役費用規劃合理性的最佳方法，就是蒐集彙整國際上已累積的相關經驗與做法。本計畫規劃進行三項研析工作：第一是對美國電力公司或電力業主現有核電廠經費估算主要方法的了解；第二是對國際上目前最新除役經費估算之數據與經驗回饋有所掌握；第三則是研析與我國法規相近之美國核管會對核電廠除役費用估算之管制/審查標準。完成相關研析工作後，將國內現況納入考量並研提

適用我國之管制建議。本年度規劃研析之參考資料包括：

1. AIF-NESP-036 “Guidelines for Producing Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning Cost Estimates,” Atomic Industrial Forum (USA), 1986。此報告為美國電力公司或電力業主除役經費預估之主要方法依據，我國核一、二廠除役費用估算也有參考此方法進行。
2. PNNL draft “Assessment of the Adequacy of the 10CFR50.75(c) Minimum Decommissioning Fund Formula,” Pacific National Northwest Laboratory (USA), 2011。本報告彙整研析美國23個核電廠除役費用預估，以及4個當時(2011年)已完成除役工作核電廠之實際費用資訊。
3. NEA #7201 “The Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants,” OECD/NEA, 2016。本報告蒐集研析NEA (Nuclear Energy Agency)會員國共20個核電廠之除役費用預估資料，其中有7個為輕水式核電廠；為方便相互比較，NEA請各會員國以國際除役費用結構(International Structure for Decommissioning Costing, ISDC)格式，提供核電廠除役費用估算資料。
4. NRC之Regulatory Guide (RG) 1.202 “Standard Format and Content for Decommissioning Cost Estimates for Nuclear Power Reactors”及NUREG-1713 “Standard Review Plan for Decommissioning Cost Estimates for Nuclear Power Reactors”。此兩份規範為NRC審查美國各核電廠繳交除役費用之接受標準。

針對美國電力公司或電力業主現有核電廠經費預估方法之了解部分，本計畫將透過對 AIF-NESP-036 報告之研析，考量國內現況後提出我國相關管制之重點建議，以供管制單位參考。

在對國際上目前最新除役經費預估之數據與經驗回饋的掌握上，本計畫將針對 NEA #7201 報告研析以掌握 NEA 會員國(主要為歐洲國家)在除役經

費估算上的做法，而在美國核電廠的部分則透過 PNNL 報告之研析來掌握。NEA #7201 報告中所涵蓋的各個會員國除役費用案例大多以國際架構 (International Structure for Decommissioning Costing, ISDC) 呈現；而 PNNL 報告涵蓋之美國除役費用案例則是大多數採用 AIF-NESP-036 報告之方法論呈現。此兩份報告均就各國現行除役費用估算提報及更新機制、管制審查機制、各廠除役費用大項配置、以及尚待進一步研究之議題等提出彙整說明，雖然各個核電廠之除役費用皆有其特殊性(site-specific)而無法就費用細項逐一比對，但若將多個核電廠案例放在一起進行分析時，仍可看出其費用大項的分布趨勢(trend)。本計畫於研析上述報告並與我國核電廠除役費用估算初步比對後，將在除役費用估算作法、定期更新機制、經費大項配置等議題上，提出相關管制建議。

由於美國之核電廠管制法規與我國相近，在一般審查注意事項上，本計畫將研析美國核管會對核電廠除役費用估算之管制/審查標準(RG 1.202 及 NUREG-1712)，並彙整適用我國之除役費用審查注意事項及重點，提供管制單位執行相關管制之參考。

針對本計畫所提各項管制建議，將以風險洞悉(risk-informed)概念評估其優先順序，以供管制單位採納時之執行參考。各項管制建議分別在建議敘述最後給予 A、B、C 三類優先程度，其基本定義為：

- A 類：本類建議請管制單位優先考慮試行，並視執行效益再評估是否納入管制法規或例行管制作為。
- B 類：本類屬於核設施（電廠）經營者自行決策範圍。
- C 類：本類建議由於國際間尚未完全達成共識、未完全發展成熟或各國間存有較大差異，建議密切觀察其發展情況再考慮是否試行。

針對本年度研析的 5 份專書/報告，本期末報告將依序分別於第二至第五章敘述研析之內容重點，進行初步比對後提出管制建議；各項研析心得或

管制建議都以風險洞悉(risk-informed)的概念評估其優先順序，並分別在心得或建議敘述結束後用括弧附註 A、B、C 三類優先度，以便執行管制工作時參考使用。

第二章、美國原子能產業論壇「商用核能電廠除役經費估計之製作

指引」報告重點摘述與研析心得

2.1 前言

「商用核能電廠除役經費估計之製作指引」報告編號為 AIF-NESP-036，英文全名為「Guidelines for Producing Commercial Nuclear Power Plant Decommissioning Cost Estimates」。是美國原子能產業論壇（Atomic Industrial Forum）於 1986 年發布之報告（以下簡稱 AIF-NESP-036 報告）。美國電力公司、核能管制委員會（Nuclear Regulatory Commission，簡稱 NRC）、能源部（Department of Energy，簡稱 DOE）與一些顧問公司在 AIF-NESP-036 報告發布前已發展出一些估計除役經費的方法，但這些方法都未包含除役經費計算過程所需的單項費率與費率結構，因此管制單在審查驗證電力公司提出之除役經費估計結果時會有無法追溯的困難。此外過去發展的方法也比較不能區別不同電廠的差異性。因此 AIF-NESP-036 報告撰寫的重要目標包括：(1) 針對不同除役策略提出協助經費估計的指引；(2) 針對除役經費的估計提出完整、詳細與系統化的細項劃分方法；以及(3) 增進個別電廠除役經費估計的可驗證性、真實性與準確性。

AIF-NESP-036 報告所涵蓋的電廠形式以商用的沸水式（Boiling Water Reactor，簡稱 BWR）和壓水式（Pressurized Water Reactor，簡稱 PWR）核能電廠為主，除役的方式則包含立即移除/拆除（prompt removal/ dismantling）、安全貯存（entombment）後拆除、整廠安全封存（mothballing）後拆除等三種。因我國法規要求核能電廠必須在永久停止運轉後 25 年內完成除役工作，故本報告僅研析立即移除/拆除相關的資料並提出管制建議。

AIF-NESP-036 報告討論的除役經費分為下列三種：

- 工作相關（activity-dependent）經費

直接與除役工作相關的經費，例如除污、移除、封裝、運送和處置等。其中包含所有的人力、物料、能源、設備及實際工作相關的服務（運送和處置）。

- 期程相關（period-dependent）經費

與專案管理、行政、例行維護、輻安、環安、工安，和保安等相關的經費。這些經費無法指定與哪一項除役工作相關，但在除役專案進行期間卻須持續支出。

- 附屬（collateral）經費

非工作相關也非期程相關的一次性支出，例如重大設備採購、健康與安全供應品、能源經費(熱源、柴油、汽油等)、稅金，以及許可/執照支出等。

除了上述三種經費外，AIF-NESP-036 報告針對可回收再利用的舊料（salvage）提出對整體經費的影響評估建議。另也針對電廠中未受污染的廢棄物料（scrap）提出分類準則，且在假設這些廢棄物料的價值足以支付其廠外處置費用的前提下進行估算。而在各項工作所需經費的估計中，也有選擇應變準備金（contingency）比例的指引。根據這些經費估計的內容，AIF-NESP-036 報告建議準備與執行除役經費估計的步驟如下：

- 審核並選擇除役方式
- 進行電廠廠區訪查
- 擬定假設條件
- 擬定除役工作項目
- 盤點電廠設備和結構
- 擬定單價因子（unit factor）
- 計算設備/結構除污和移除經費
- 決定工作團隊人力
- 計算廢棄物處置經費
- 擬定除役時程

- 擬定除役人力配置
- 計算工作相關經費
- 計算附屬和特殊項目經費
- 計算期程相關經費
- 計算總經費

AIF-NESP-036 報告共有兩冊，第一冊第 1 章為簡介，第 2 章為使用該報告的指引，第 3 章至第 14 章則分別針對除役工作項目、工作單元定義、單價因子等 12 個項目說明估計經費的方式與注意事項。而第二冊除第 1 章為簡介外，從第 2 章至第 6 章則針對除役工作項目、單價因子、期程相關經費、附屬經費，以及經費估計結構等 5 個項目提出使用手冊。本報告以下 2.2 至 2.18 小節即分別針對上述第一冊的 12 個項目與第二冊的 5 個項目說明研析的重點與相關的研析心得。每小節標題之後列出對應的 AIF-NESP-036 報告中冊與章的號碼以利比對。

2.2 除役方式、流程與工作項目（AIF報告第一冊第3章）

重點摘述

AIF-NESP-036 報告第一冊第 3 章除了說明除役的方式與流程外，並針對三種除役方式（立即移除/拆除、安全貯存（entombment）後再拆除、整廠安全封存（mothballing）後再拆除）說明所需工作項目。其中除役的方式與流程請參閱本報告 2.1 節的說明，而除役所需工作項目則在 AIF-NESP-036 報告第二冊第 2 章（請參閱本報告 2.14 節）有較完整的陳述，因此僅將本章特別建議的除役初步規劃項目摘述如下以供參考：

- 系統與結構移除之一般程序書與整體順序；
- 反應爐與其內部組件移除與處置之概念計畫；
- 系統與結構除污方法之評估；
- 前置期長之特殊設備的設計、採購和測試；
- 特殊包商之鑑別與篩選；
- 放射性物質運送/處置之外包；
- 依序移除設備之規劃以避免同時執行工作之間的衝突；
- 準備廠區支援與貯存設施；
- 燃料與放射源之移除（AIF-NESP-036報告中不含此項工作經費之估計）；
- BWR控制棒之移除（AIF-NESP-036報告中不含此項工作經費之估計）；
- 廠區內低污染區之清理；
- 液體與固體廢料之處理；
- 決定放射性物質運送容器之要求。

2.3 工作單元 (work unit) 之定義 (AIF報告第一冊第4章)

重點摘述

AIF-NESP-036 報告第一冊第 4 章主要說明工作單元的類別、分類基準與應用方式，考慮的電廠零組件或結構包含管路、閥、泵浦、熱交換器、槽（含小型容器、過濾器、離子交換器）、機械與電氣設備、強化鋼筋混凝土結構之拆除、及非以大小分類之項目等 8 種。前 7 種零組件或結構再以尺度或重量進行分類，分類的基準則包括人力、吊車能量、搬運工具等之需求。上述 8 種零組件或結構的分類和需求摘述如下：

2.3.1 管路之移除

核能電廠中有許多不同種類的管路，從直徑為 0.25 英吋的取樣管到直徑為 48 英吋的主蒸氣管都有，拆除時須將未受污染的管路切成 10 英尺長以便大型廢金屬垃圾車載運，而受污染的管路則須切至 5 英尺以下之長度，以便裝入低比活度（Low Specific Activity，簡稱 LSA）容器（一般長寬高為 7.5 英尺、4 英尺、和 4 英尺）。管路移除的工作單元根據管路直徑的大小進行分類，其類別與工作資源需求如下：

表 2.1 管路移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
直徑小於2.5英吋	1. 一位工作人員 2. 能量為300磅的鏈式吊車或不需要 3. 若為受污染管路則需兩位工作人員
直徑2.5英吋到8英吋	1. 兩位工作人員 2. 能量為1.5噸的鏈式吊車 3. 若為受污染管路則須加管帽並裝入容器中
直徑大於8英吋	1. 三位工作人員 2. 能量為1.5至3噸的鏈式吊車 3. 所有管路都須切成5英尺長的管段，受污染管路則可能須再進行軸向切割以利封裝。

BWR（或PWR蒸汽產生器管束破裂）之主蒸汽管，PWR反應器冷卻管路	1. 大型工作團隊 2. 5噸之起重機 3. 此類管路污染嚴重須花較長時間進行切割與封裝
------------------------------------	--

2.3.2 閥之移除

閥移除的工作單元也是根據其直徑的大小進行分類，其類別與工作資源需求摘述如下：

表 2.2 閥移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
直徑小於2.5英吋	一般切除把手和閥桿後與2.5英吋的管路一併處理
直徑2.5英吋到8英吋	1. 兩位工作人員 2. 位置較高則須能量為1.5噸的鏈式吊車 3. 若為受污染管路則須用塑膠布包覆
直徑大於8英吋	1. 三位工作人員 2. 能量為5噸的起重機 3. 若為受污染管路則須用塑膠布包覆
主蒸汽管上或冷卻水進出口閥	1. 大型工作團隊 2. 10至20噸之橋式吊車(overhead crane) 3. 此類管路污染嚴重須用特製的LSA容器裝運

2.3.3 泵浦之移除

泵浦移除的工作單元是根據其重量進行分類，其類別與工作資源需求摘述如下：

表 2.3 泵浦移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
重量300磅以下	1. 兩位工作人員 2. 能量為500磅的鏈式吊車 3. 若為受污染泵浦則須用塑膠布包覆
重量300-1,000磅	1. 兩位工作人員但所需工作時間較長 2. 須能量為3噸的鏈式吊車

	3. 若為受污染泵浦則須用塑膠布包覆
重量1,000-10,000磅	1. 大型工作團隊 2. 能量為10噸的起重機 3. 須用大型堆高機運送
重量大於10,000磅	1. 大型工作團隊且所需工作時間較長 2. 能量為20噸之起重機 3. 通常為主飼水泵或冷卻水泵

2.3.4 熱交換器之移除

熱交換器移除的工作單元是以重量進行分類，其類別與工作資源需求摘述如下：

表 2.4 熱交換器移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
重量3,000磅以下	1. 三位工作人員 2. 能量為6,000磅的水力起重機 3. 若為受污染的熱交換器則須用塑膠布包覆
重量大於3,000磅	1. 三位工作人員但所需工作時間較長 2. 能量為5噸以上之起重機 3. 須用堆高機運送

2.3.5 槽(tank)、小型容器(thin vessel)、過濾器與離子交換器之移除

核能電廠內槽與小型容器的容積範圍為 300 加侖至 500,000 加侖，通常 300 加侖以上須先切割再移除，未污染的槽與小型容器可用手持式或軌道上移動型火炬進行切割。受污染的槽與小型容器須備妥防止污染擴散的設施後用動力弓鋸（hack saw）或火炬切割。這些設備移除的工作單元是以容積進行分類，其類別與工作資源需求摘述如下：

表 2.5 槽與小型容器移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
容積小於300加侖	1. 內含過濾器與離子交換器的槽與小型容器可以整體方式移除 2. 若為受污染的槽與小型容器則須將其內部空間填滿後再裝入LSA容器

容積300-3,000加侖	1. 此類槽與小型容器若未受污染則可以整體方式移除 2. 若受污染則須切割後再裝入LSA容器，切割時須備妥防止污染擴散的設施，如包封設施或帳棚等。 3. 此類所需工作人員比前一類多，所需時間也較長
容積大於3,000加侖	1. 此類槽與小型容器均須先切割再運送 2. 此類所需工作人員比前兩類多，所需時間也更長

2.3.6 機械與電氣設備之移除

這些設備包含電氣開關、馬達控制中心、控制盤、變壓器、儀器盤、柴油發電機、起重機、移動濾網等，其移除的工作單元是以重量進行分類，其類別與工作資源需求摘述如下：

表 2.6 機械與電氣設備移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
重量300磅或以下	1. 兩位工作人員 2. 能量為0.75噸的鏈式吊車 3. 可能須要一位專業人員將設備與系統解聯
重量300-1,000磅	1. 三位工作人員 2. 須能量為1.5噸的鏈式吊車 3. 須用堆高機運送
重量1,000- 10,000磅	1. 三位工作人員但所需時間比前一類多一倍以上 2. 能量為10噸以上的起重機 3. 須用重型車輛運送
重量大於10,000磅	此類設備將另行計算單價因子（unit factor）

2.3.7 強化鋼筋混凝土結構之拆除

一般工業界使用的強化鋼筋混凝土與核能電廠使用的耐震級鋼筋混凝土在強度方面有明顯的差異，前者可用傳統機械拆除，後者可能須用小型炸藥才能拆除。因此本項工作單元是以鋼筋混凝土的組成進行分

類，其類別與工作資源需求摘述如下：

表 2.7 強化鋼筋混凝土結構移除之工作單元

工作單元類別	工作資源需求
一般 (light) 與強化 (heavily) 鋼筋混凝土 (reinforced concrete)	使用裝設撞鎚之挖土機 (backhoe mounted ram) 或路面碎石機 (paving breaker) 即可拆除，拆除費率請參閱2-1項參考文獻中提供的數據。
使用外徑為1.125英吋之9號鋼筋的耐震級鋼筋混凝土 (seismically reinforced concrete)	1. 拆除費率計算的依據為在混凝土中鑽孔的速率。 2. 通常9位工作人員的團隊使用重型拆除機具工一天8小時約可拆除33立方碼 (cubic yards)。 3. 受污染的混凝土要調查受污染的深度與面積，也要建立防止污染擴散的設施。
使用外徑為2.25英吋之18號鋼筋的耐震級鋼筋混凝土	資源需求與前一類類似，但須用更大型鑽頭與更多炸藥，且8小時拆除體積降為27立方碼。

2.3.8 非以大小分類之項目

- 蒸汽產生器
- 冷凝器
- 調壓槽
- 汽機發電機
- 飼水加熱汽/除氣器 (deaerator)
- 馬達驅動泵
- 變壓器
- 汽機廠房通風器
- 柴油發電機
- 冷卻塔
- 汽水分離器/再熱器
- 電纜架

- 通風導管
- 小型（thin section）金屬零組件之手持式火焰切割
- 清潔（未受污染）水泥塊之移除
- 清潔（未受污染）水泥地板之移除
- 設備表面之除污
- 刮除（scarifying）水泥之表面
- 大體積零組件之除污
- 除污機具之連結

研析心得

1. 「工作單元（work unit）」為 AIF-NESP-036 報告估計除役經費的基礎參數，若採用不同之定義，則後續相關計算均應隨之調整。(B 類)
2. 參考 AIF-NESP-036 報告中以大小、重量或體積分類之「工作單元」時，要注意人員配置與使用工具之適用性。依據「工作單元」提出相關組件數量盤整的準確數據，以增進除役費用估計的準確性。(B 類)
3. 針對非以大小分類之項目，宜參照 AIF-NESP-036 報告提出之「非例行設備移除之費用」估計除役所需費用。(B 類)

2.4 單價因子 (AIF報告第一冊第5章)

重點摘述

2.4.1 簡介

- AIF-NESP-036報告蒐集運轉中電廠維護費用的數據(如更換蒸汽產生器費用)與已除役電廠拆除費用的數據(如管路切割移除費用)做為單價因子的參考費用，而針對尺寸較大且無拆除經驗之組件(如過去小型核設施除役只有拆除內含9號鋼筋混凝土牆的經驗，但功率為1,100MWe的電廠則使用內含18號鋼筋的混凝土牆)則採用外插法(如較大口徑的鑽孔機、較長的工時等)推算相關費用。
- AIF-NESP-036報告考慮三種型式的單價因子，包括清潔(未受污染)組件之移除、受污染/活化組件之移除、與非例行設備(如反應爐和內部組件、調壓槽、汽輪發電機等)之移除。

2.4.2 單價因子的組成元素

- 人力工時(labor hour)

人力工時採用許多過去除役的經驗數據進行估算，未來的使用者應考慮技術的進步、法規的改變等因素自行調整AIF-NESP-036報告中提供之數據。而為了反應輻射管制與環境因素，計算人力工時的時候要加計下列工作困難因素(work difficulty factors)：

- 高度因素(如在鷹架上工作，通常增加10%到20%的工作時間)
- 呼吸防護因素(如戴呼吸面罩或口罩工作，會影響周邊視界通、正常呼吸和快速溝通等行為，通常增加25%到50%的工作時間)
- 輻射/ALARA因素(工具箱會議或模型訓練，還有臨時屏蔽之裝設和拆除等通常增加10%到40%的工作時間)
- 防護衣因素(工作服、頭套、手套、和鞋套之穿脫，通常增加15%到30%的工作時間)
- 工作中休息(break)因素(管理協議中同意排定之休息，通常增加

約8.33%的工作時間)

- 人力費用(labor expenses)

AIF-NESP-036報告中考慮四種人力與美國聯邦和州政府稅收等因素，人力費用中須考慮的詳細項目如下表所示，其內容不一定適用於我國，但可參照訂定我國的人力費用。

表 2.8 美國四種人力費用中須考慮的詳細項目

項目	公司雇員	外部技術人員	工會勞工	下包商
1 底薪	X	X	X	X
2 額外福利*	X	X	X	X
3 聯邦失業稅法案	X	X	X	X
4 州失業稅法案				
5 聯邦保險貢獻法案	X	X	X	X
6 建造保險				X
7 公眾責任險				X
8 工作人員報酬	X	X	X	X
9 日支費	依適用狀況支付			
10 公司管理費	X			
11 下包商管理費				X
12 下包商利潤				X

*額外福利包含福利金、退休金、失業補助、保險和訓練基金等。

- 材料與設備費用

此項費用與電廠其他工作的材料與設備費用類似，通常採用國內的平均價格，並須列舉價格的參考資料。

2.4.3 單價因子的格式

AIF-NESP-036報告中為單價因子訂出一套標準格式，藉以確認所有相關因素都已考慮在內，另也可以方便不同類型的工作單元互相比較。例如未受污染管路的工作單元和受污染管路的工作單元之間的比較。此套標準格式可利用表2.9與表2.10的範例加以說明。

在表2.9中，第1列稱為標題(title)，代表一種工作單元。第2列則稱

為範圍(scope)，說明此項工作單元所採用的工作方式。第3列至第13列稱為操作(operations)，說明工作步驟與所需的時間。其中「工作時間」是每單項工作步驟所需的時間，而「關鍵時間」為關鍵路徑所需的時間，例如c項工作可與b項工作同時進行，所以「關鍵時間」中就不採計c項工作所需的時間。最後計算實際工作時間即採用「關鍵時間」的數值。接著第14列至第22列考慮工作困難因素(work difficulty factors)所需增加的時間。最後第23列求出以小時為單位的總工作時間。

表2.10則利用表2.9估計的總工作時間計算單價因子，其中第1列至第7列依照所需的工作人力計算人力費用；第9列至第16列計算設備與材料所需的費用；第18列為人力、設備與材料費用的總計。而因此案例是將直徑大於8英吋的受污染管路利用履帶式火炬切割成5英呎長的管段，所以將第18列的數字除以5就可得到第19列的「移除直徑大於8英吋受污染管路每英呎所需費用(\$/英呎)」，這個數值就是本項工作單元的單價因子。若配合全廠移除「直徑大於8英吋受污染管路」的總長度資料，即可估算移除全廠「直徑大於8英吋受污染管路」所需的全部費用。另第20列則計算出每英呎所需的人力工時以供管理單位使用。

表 2.9 工作時間計算範例

1	移除直徑大於8英吋的受污染管路			
2	直徑大於8英吋的受污染管路將利用履帶式火炬切割成5英尺長的管段，再加以封裝後裝入運送容器中。			
3	工作編碼	工作敘述	工作時間 (分鐘)	關鍵時間 (分鐘)
4	a	移除隔熱套	15	15
5	b	裝設履帶式電漿或氧乙炔火炬	15	15
6	c	為管路裝上索具	10	(b)*
7	d	裝設污染防範設備	15	15
8	e	切割管路	20	20
9	f	移除履帶式電漿或氧乙炔火炬	10	10
10	g	安裝管套	10	(f)
11	h	移除污染防範設備與污染物處置袋	10	10
12	i	封裝後送至待運區	15	15
13	小計		120	100**
14	工作時間調整因子			
15	工作高度因子(關鍵時間的15%)		15	
16	呼吸保護因子(關鍵時間的38%)		38	
17	輻射/ALARA因子(關鍵時間的15%)		15	
18	實際工作時間		100+15+38+15=168	
19	防護衣因子(實際工作時間的23%)		39	
20	有生產力之工作時間		168+39=207	
21	工作間休息因子(有生產力工作時間的8.33%)		17	
22	總工作時間		207+17=224	
23	總工作時間=3.733小時			

註： * 代表c項工作可與b項工作同時進行。

** 扣除可同時進行的工作所需的時間後加總所得的關鍵路徑時間，也是實際工作時間所採用的數值。

表 2.10 單價因子計算範例

1	團隊	數量	工作時間 (小時)	費率 (\$/小時)	費用(\$)
2	勞工	3.0	3.733	\$	\$
3	技術人員	1.0	3.733	\$	\$
4	領班	0.5	3.733	\$	\$
5	人力費用小計				\$
6	人力管理費用與利潤				\$
7	人力費用總計				\$
8					
9	設備費用				無
10	消耗品/材料費用				
11	吸水紙(數量50) \$0.63/sq ft				\$31.5
12	塑膠膜/袋(數量50) \$0.04/sq ft				\$2.00
13	氣體火炬消耗品(數量1) \$5.10/hr × 0.333hr				\$1.7
14	設備與材料小計				\$
15	設備與材料管理費用與利潤				\$
16	設備與材料費用總計				\$
17					
18	人力、設備與材料費用總計				A
19	移除直徑大於8英吋受污染管路每英呎所需費用(\$/英呎)				A/5
20	移除直徑大於8英吋受污染管路每英呎所需人力工時 =3.733(3.0+1.0+0.5)/5				3.36小時

2.4.4 單價因子的應用

- 計算單價因子時，對於高輻射強度的組件要仔細考慮工作人員的數目，以免工作人員接受的輻射劑量超過法規限值。
- 電廠設備與結構數量的完整性與準確性對單價因子的可信度影響很大，要善用電廠的P&ID、電氣單線圖、廠房布置圖、建廠紀錄、供應商手冊、及相關參考資料等決定組件或結構的尺寸、重量和體積等數據。
- 熱套管(thermowell)、壓力計、電導槽(conductivity cell)、流量計等儀器將與管路一起移除，不另外加計人力費用。
- 圍阻體的圓柱形部分的體積要計算至混凝土澆置平面以下3英呎深度。

倉庫、行政廠房、汽機廠房等可用拆除一般工業廠房的方法進行拆除。

- 要計算廠區內廠房拆除後需填補的空隙(voids)，以便決定有多少未受污染的混凝土碎屑可用於廠區的填補，有多少須運出廠外進行處理。

2.4.5 非例行設備移除之費用

此節所謂之非例行設備包含：反應爐與內部組件、蒸汽產生器與調壓槽、生物屏蔽牆、圍阻體混凝土、混凝土牆/地板、汽輪發電機、冷凝器、變壓器、柴油發電機、與冷卻水塔等設備。這些設備必須逐項配合其特性估計拆除的費用，估計方法的重點摘述如下(我國核電廠未使用大型冷卻水塔，故不摘述其移除費用之估計方法)：

2.4.5.1 反應爐內部組件之分割(segmentation)與移除

內部組件相關之人力和設備費用將於下個小節與反應爐一併估算，本小節謹說明分割、封裝和運送相關費用的估計方法。運送的容器須符合美國運輸部的法規要求，本小節假設有下列兩種容器可供使用：

表 2.11 反應爐與內部組件運送容器範例

物理特性	大重量容器 (high weight capacity)	高居里容器 (high curie capacity)
最高輻射強度(居里)	360	47,000
最大重量(磅)	20,000	9,000
容器內直徑(英吋)	62	36
容器內高度(英吋)	75	116

分割、封裝和運送相關費用的估計步驟如下：

- 估計每一項內部組件之輻射強度：各電廠可自行估計各項組件之輻射強度，也可參考美國核能管制委員會(NRC)發布的資料(NUREG/CR-0130^[2-2], NUREG/CR-0672^[2-3])，再根據各自電廠狀況進行調整。AIF-NESP-036報告的表 5.4a(第一冊5-31頁)複製前述NRC報告中提供的PWR與

BWR各項反應爐內部組件的輻射強度以供參考。

- 估計每一項內部組件之接觸劑量(contact exposure rate)：本項也可自行估計，或參考前述之表5.4a，再根據各自電廠狀況進行調整。
- 估計每一項內部組件之重量：本項估計方式與前兩項類似。
- 選擇運送容器：若以前述表5.4a中提供之PWR爐心側板(core shroud)為例，其輻射強度為1,904,748居里，重量為27,100磅，若以前述高居里容器運送則裝運次數為41次($1,904,748/47,000=40.5$)，若以大重量容器運送則裝運次數為5,291次($1,904,748/360=5,291$)。且用高居里容器運送41次，每次重量約為661磅(小於該容器可接受的最大重量9,000磅)，故選擇高居里容器較佳。
- 容器套筒(liner)：運送容器內須加裝套筒以便容器重複使用，且套筒將與裝於其內的物件一起進行最終處置。大重量容器的套筒體積約為131立方英尺，重量約973磅，價錢約為美金2200到2800元；高居里容器套筒體積約為68立方英尺，重量約540磅，價錢約為美金1620元^[2-4]。
- 驗證內部組件分割後的體積可裝入運送容器。
- 估計所有內部組件之運送次數與時間：PWR圍阻體的設計不能處理50噸以上的容器，故在假設上述兩種容器數量充足，且處理人員數目足夠的情況下，PWR每週可運送3個容器，BWR則每週可運送4個容器。配合所有內部組件的重量^{[2-2] [2-3]}，PWR至少須裝運82個容器，運送時間為27週；而BWR至少須裝運139個容器，運送時間為35週。
- 估計每一項內部組件之封裝費用：套筒價格與容器租金

可請供應商提供。

- 估計內部組件之運送費用：陸運費用請參考下列2.10節放射性廢棄物之處置(AIF-NESP-036報告第一冊第11章)
- 估計內部組件之處置(burial)費用：參考前一項之說明。

2.4.5.2 反應爐之分割與移除

反應爐分割、封裝和運送費用估計方式與內部組件類似一併估算，本小節另說明反應爐和內部組件移除相關人力和設備費用的估計方法。

- 估計反應爐之輻射強度、接觸劑量和重量：各電廠可自行估計這些參數，也可參考美國核能管制委員會(NRC)發布的資料(NUREG/CR-0130^[2-2], NUREG/CR-0672^[2-3])，再根據各自電廠狀況進行調整。
- 反應爐之分割與運送：PWR反應爐頂蓋和圓柱體外層要先除污，圓柱體部分切割後要用1至2英吋的鋼板密封上下開口，冷卻水進出噴嘴(nozzle)須用前述大重量容器裝運。整個PWR反應爐約須用49個容器裝運，以每週裝運3個容器計算，裝運時間至少需16週。BWR反應爐頂蓋較大，須分割後才能裝運，其他部分選擇大重量容器或高居里容器裝運。整個BWR反應爐約須用70個容器裝運，以每週裝運4個容器計算，裝運時間至少需18週。這些時間都是計算人力工時的依據。
- 反應爐之封裝、運送和處置：這些費用的估計方式與前述內部組件所用的估計方式類似。
- 反應爐和內部組件移除所需的人力工時：AIF-NESP-036報告中將反應爐和內部組件移除工作分成許多步驟(PWR分成45個步驟，BWR分成84個步驟)並估計各個步驟所需的時間。該報告根據這些估計建議執行的團隊分

成裝設(setup)、切割(cutting)與裝運(packing)三個小組，個小組人力組成如表2.12所示。其中裝設小組負責裝設切割設備和污染控制帳篷；修改起重或吊運設備；裝設反應爐模型；以及利用模型訓練切割小組等工作。這些工作所需時間約為15週(600小時)。另分割與裝運所需時間如前段所述，其結果整理如表2.13所示。最後根據表2.12與表2.13可估算總人力工時如表2.14。而此項工作尚需一位技術顧問，其人力工時對PWR為(600+1,760+1,760=) 4120小時，對BWR為(600+2,120+2,120=) 4,840小時。上述估計結果只能做為參考資料，各電廠仍應根據自己的資料進行調整與修改。

- 反應爐和內部組件移除所需的設備：AIF-NESP-036報告中建議的設備如表2.15所示，各電廠應根據自己的資料並隨技術的進展進行調整與修改。

表 2.12 反應爐和內部組件移除所需的人力組成

人力種類與數目	裝設小組	切割小組	裝運小組
勞工(laborer)	5	2	3
技術人員(craftsmen)	5	6	5
檢查員(supervisor)	1	1	1

表 2.13 反應爐和內部組件分割與裝運所需時間

反應器 型式	裝運所需容器數			每週裝運數	分割與裝運所需 時間	
	內部組件	反應爐	總計		週	小時
PWR	82	49	131	3	44	1,760
BWR	139	70	209	4	53	2,120

表 2.14 反應爐和內部組件移除所需的人力工時(小時)

反應器 型式	人力種類	裝設小組	切割小組	裝運小組
PWR	勞工	$5 \times 600 = 3,000$	$2 \times 1,760 = 3,520$	$3 \times 1,760 = 5,280$
	技術人員	$5 \times 600 = 3,000$	$6 \times 1,760 = 10,560$	$5 \times 1,760 = 8,800$
	檢查員	$1 \times 600 = 600$	$1 \times 1,760 = 1,760$	$1 \times 1,760 = 1,760$
	總計	6,600	15,840	15,840
BWR	勞工	$5 \times 600 = 3,000$	$2 \times 2,120 = 4,240$	$3 \times 2,120 = 6,360$
	技術人員	$5 \times 600 = 3,000$	$6 \times 2,120 = 12,720$	$5 \times 2,120 = 10,600$
	檢查員	$1 \times 600 = 600$	$1 \times 2,120 = 2,120$	$1 \times 2,120 = 2,120$
	總計	6,600	19,080	19,080

表 2.15 反應爐和內部組件移除所需的設備範例

項目	價格(元/美金)
反應爐內部組件切割設備	500,000
燃料傳送通道修改	
水清潔系統	45,000
水池/爐穴築堤	150,000
裝設屏蔽	100,000
起重機修改	50,000
移除非必要設備	10,000
反應爐底蓋支持結構(只用於噴嘴支撐反應爐的 PWR)	25,000
反應爐穴污染控制封套	10,000
反應爐切割設備	1,500,000
加裝屏蔽之工作平台	130,000
內部組件切割使用之消耗品	4,000
反應爐切割使用之消耗品	1,000
除污使用之雜項供應品	25,000
頂蓋密封架(closure head stand)修改	100,000
總計	2,650,000

2.4.5.3 蒸汽產生器與調壓槽(pressurizer)之移除

美國過去有一些電廠更換蒸汽產生器，這些經驗可參照估計移除蒸汽產生器的費用。在調壓槽方面較無過去經驗可供參考，建議用重量比例將移除蒸汽產生器的費用換算成移除調壓槽的費用。本節主要參考美國Surry電廠(775MWe)的經驗^[2-5]推估下列費用。

- 人力工時

表2.16列出Surry電廠移除三個蒸汽產生器的工作項目與工時，檢視各項內容可判斷其中1至9項、13項、及17至19項與蒸汽產生器的大小和重量無關，其他項目則需考慮重量因素，因此把所有工時除以3，再將重量相關項目除以Surry電廠蒸汽產生器的重量(375噸)，然後分別加總即可推算移除一個蒸汽產生器所需的工時為 $(17,350 + 16.5 \times \text{重量(噸)})$ 小時。

表 2.16 Surry 電廠移除三個蒸汽產生器的工作項目與工時

工作項目	人力工時
1. 準備/測試環形吊車	463
2. 安裝蒸汽產生器傳送系統	3,984
3. 安裝臨時通風系統	106
4. 安裝準備工作所需之臨時鷹架	4,846
5. 安裝臨時照明與電源	2,174
6. 清潔與除污	14,920
7. 環形吊車操作員	198
8. 安裝屏蔽	2,045
9. 安裝雜用空氣(service air)系統	627
10. 工作平台	1,930
11. 移除隔熱設施	2,606
12. 移除雜項管路	1,288
13. 切割主蒸汽/飼水管路	1,399
14. 分解蒸汽產生器支持結構	6,988
15. 移除蒸汽產生器水位儀器和沖放系統	1,472
16. 移除蒸汽產生器	4,341
17. 安裝移除所需之臨時鷹架	13,611
18. 安裝移除所需之臨時照明與電源	5,356
19. 環形吊車操作員	2,365
總計	70,683

- 工作團隊組成

蒸汽產生器移除工作團隊的組成建議包含12位勞工(laborer)、15位技術人員(craftsmen)及3位檢查員(supervisor)。

- 材料與設備

強力起重機(heavy duty crane)與多軸或履帶運送設備等費用將於2.7小節(附屬經費)中討論，此外尚需如表2.17所列之設備。

表 2.17 蒸汽產生器移除所需設備

項目	數量
切割用氣體	每切割1英吋需要2立方英呎
屏蔽用鉛毯	每個蒸汽產生器需要100份
塑膠布	每個蒸汽產生器需要4捲(100英呎)
吸水紙	每個蒸汽產生器需要4捲(100英呎)

- 裝運與處置

蒸汽產生器與調壓槽的裝運與處置費用的估計方式將於2.10節(放射性廢棄物之處置)中說明。

2.4.5.4 生物屏蔽牆之移除

生物屏蔽牆一般使用控制爆破(controlled blasting)方法拆除，AIF-NESP-036報告第二冊，表3.6b-1估算含9號鋼筋生物屏蔽牆移除的單價因子，表3.6b-2估算含18號鋼筋的單價因子。其中表3.6b-2翻譯如下列之表2.18與2-19以供參考。

表 2.18 生物屏蔽牆移除工作時間之計算

生物屏蔽牆之控制爆破(18號鋼筋強化混凝土)			
被污染或被中子活化的混凝土將以控制爆破方式移除。在混凝土牆的垂直方向將使用履帶式鑽孔機鑽20個直徑2英吋的圓洞。洞中將置放炸藥並將混凝土表面炸除。混凝土中的鋼筋和其他雜項鋼結構將用氧乙炔火炬切割。假設鋼筋為中心間距12英吋的18號鋼筋(直徑為2.5英吋)。每次工作序列可移除7.4立方碼的混凝土。混凝土碎石將裝入容器中，運送到裝運區並裝入運送和處置箱。			
工作 編碼	工作敘述	工作時間 (分鐘)	關鍵時間 (分鐘)
a	檢查設備(鑽孔設備、噴霧機、爆破墊等)	15	15
b	將鑽孔設備移至鑽孔位置	15	(a)
c	以2英呎為中心間距鑽孔，長寬深為(20英呎、20英呎、5英呎)	160	160
d	在圓孔中填裝火藥	100	100
e	裝設爆破墊(blast mat)並開啟噴霧機(fog spray)	30	30
f	疏散工作區並引爆火藥	15	15
g	驗證所有火藥皆被引爆	10	10
h	移除噴霧機與爆破墊	30	30
i	對混凝土碎石/鋼筋取樣以測量輻射強度	15	(j)
J	使用火炬切割鋼筋	120	120
k	將碎石移入傳送容器	60	60
l	將傳送容器移至裝運區	30	30
小計		600	570
工作時間調整因子			
工作高度因子(關鍵時間的15%)		86	
呼吸保護因子(關鍵時間的38%)		217	
輻射/ALARA因子(關鍵時間的15%)		86	
實際工作時間		570+86+217+86= 959	
防護衣因子(實際工作時間的23%)		221	
有生產力之工作時間		959+221= 1,180	
工作間休息因子(有生產力工作時間的8.33%)		98	
總工作時間		1,180+98= 1,278	
總工作時間=21.300小時			

表 2.19 生物屏蔽牆移除單價因子之計算

團隊	數量	工作時間 (小時)	費率 (\$/小時)	費用(\$)
勞工	4.0	21.300	\$	\$
技術人員	2.0	21.300	\$	\$
領班	3.0	21.300	\$	\$
人力費用小計				\$
人力管理費用與利潤				\$
人力費用總計				\$
設備費用				
爆破墊3個 (\$2.5/hr) ×21.300hr ×3				\$159.75
噴霧系統 (\$1.97/hr) ×1hr				\$1.97
空壓機/750CFM (\$10.72/hr) ×21.300hr				\$228.34
挖土機 (\$7.14/hr) ×21.300hr				\$152.08
履帶鑽孔機 (\$14.10/hr) ×21.300hr				\$300.33
消耗品/材料費用				
氣體火炬耗材 (\$5.10/hr) ×2hr				\$10.20
空壓機耗材 (\$21.00/hr) ×21.300hr				\$447.30
挖土機耗材 (\$4.66/hr) ×21.300hr				\$99.26
履帶鑽孔機耗材 (\$7.00/hr) ×2.667hr				\$18.67
塑膠布/袋 250平方英尺，每平方英尺\$0.04				\$10.00
炸藥40磅，每磅\$1.45				\$58.00
爆破蓋(caps)20個，每個\$1.5				\$30.00
設備與材料小計				\$1,515.90
設備與材料管理費用與利潤				\$
設備與材料費用總計				\$
人力、設備與材料費用總計				A
移除被污染或被中子活化的混凝土每立方碼所需費用(\$/立方碼)				A/7.4
移除被污染或被中子活化的混凝土每立方碼所需人力工時 =21.300(4.0+2.0+3.0)/7.4				25.91小時

2.4.5.5 圍阻體混凝土牆之拆除

圍阻體混凝土牆的拆除使用控制爆炸拆除技術(controlled explosive demolition techniques)，AIF-NESP-036報告第二冊表3.6b-3與表3.6b-4分別估算含9號與18號鋼筋圍阻體混凝土牆拆除的單價因子。

2.4.5.6 混凝土牆/地板之刮除(scarifying)

混凝土牆/地板之刮除有兩種方式，AIF-NESP-036報告第二冊表3.7c-1估算使用鑽孔與剝落法(drill and spall)刮除的單價因子，表3.7c-2估算使用鑿錘(scabbler)刮除的單價因子。

2.4.5.7 汽輪發電機之移除

AIF-NESP-036報告第二冊表3.3l-2與表3.4j分別估算PWR與BWR汽輪發電機移除之單價因子。該估算所參考的汽輪發電機有三個低壓汽機，重量為1,800噸。而因為工作項目中有些與重量無關，有些與重量相關，故若各電廠汽輪發電機重量不是1,800噸時，可利用下列關係式修訂人力工時：

$$\text{PWR關鍵路徑人力工時(分鐘)}=3,600+3.33\times\text{重量(噸)}$$

$$\text{BWR關鍵路徑人力工時(分鐘)}=4,000+3.87\times\text{重量(噸)}$$

2.4.5.8 冷凝器之移除

AIF-NESP-036報告假設電廠的冷凝器沒有殘餘價值，且假設PWR的冷凝器未受污染，而BWR的冷凝器則受到污染。該報告表3.3k與表3.4i分別估算PWR與BWR冷凝器移除之單價因子。該估算所參考的冷凝器有48,600根冷凝管，20,025平方英尺的外殼。故若各電廠冷凝管數目和外殼面積不同時，因冷凝管拆除與外殼拆除可同時進行，故可利用下列關係式修訂人力工時：

$$\text{PWR關鍵路徑人力工時(分鐘)}=3,360+[(0.165\times\text{冷凝管數目})\text{與}(0.381\times\text{外殼面積(平方英尺)})\text{兩者中較大者}]$$

$$\text{BWR 關鍵路徑人力工時(分鐘)} = 5,160 + [(0.165 \times \text{冷凝管數目}) + (0.381 \times \text{外殼面積(平方英尺)}) \times \text{兩者中較大者}]$$

2.4.5.9 變壓器之移除

AIF-NESP-036 報告假設電廠的變壓器沒有殘餘價值，該報告第二冊表 3.3i-1 與表 3.3i-2 分別針對小於 30 噸與 30 到 600 噸的變壓器估算移除的單價因子。

2.4.5.10 柴油發電機之移除

柴油發電機之移除費用與重量較無關係，AIF-NESP-036 報告第二冊表 3.3l-1 估算了移除的單價因子。

研析心得

1. AIF-NESP-036 報告中提出 5 種工作困難因素(work difficulty factors)，其對工作時間影響的幅度從 10% 至 40% 不等，使用這些因素時宜說明採用特定幅度的理由，以便判斷其合理性。(C 類)
2. AIF-NESP-036 報告提出的單價因子中，團隊組成與單項工作所需時間皆為參考美國除役經驗並做合理修訂後所得到的結果。採用這些數據時，在團隊組成方面要衡量工作人員的能力並做適當修訂，在單項工作所需時間方面要考慮工作環境並做適當修訂。(B 類)
3. AIF-NESP-036 報告提出的單價因子中，設備與工具費用均以美國國內報價為依據。採用這些數據時，宜根據國內或國外採購價格做適當修訂。(B 類)
4. AIF-NESP-036 報告估計某些設備(如變壓器、冷凝器等)之移除費用時，均假設該設備已無殘餘價值，宜再確認這種假設的適用性。(B 類)

2.5 除役時程之擬定（AIF報告第一冊第6章）

重點摘述

擬定除役時程之目的包括：(1)決定除役專案整體期程，(2)計算期程相關經費，以及(3)決定除役專案的人力配置。一般而言，擬定除役時程的步驟如下：

- 決定除役工作項目的順序。
- 利用單價因子與廠內相關組件數量計算各工作項目所需時間與人力。
- 審查工作人力配置是否可符合曝露劑量的法規要求。
- 計算各工作項目所需時間。
- 決定專案工作的關鍵路徑。
- 重新計算非關鍵路徑工作項目的人力需求。
- 決定整體專案時程。

AIF-NESP-036 報告針對三種除役方式及兩種反應器型式(PWR 與 BWR)提出專案時程範例以供參考。本報告將 BWR 立即拆除的範例(PWR 立即拆除的範例也非常類似)翻譯成圖 2.1 並說明其內容如下。首先該圖中的工作規範/程序書分成下列三類：

- A類：支援第2階段初期工作所需的工作規範/程序書
- B類：第2階段系統與結構移除工作所需的工作規範/程序書
- C類：支援反應爐與內部組件移除工作所需的工作規範/程序書

另為了有效配置工作人力，管控緊要系統的可用性，及控制污染系統的移除時程，電廠中的系統被分為下列四類：

- A類：未受污染且對除役專案不重要的系統，如主蒸汽系統、冷凝系統與循環水系統。
- B類：受污染但對除役專案不重要的系統，如高壓注水系統、爐水淨化

系統、及化學和體積控制系統等，這些系統的移除工作可以較慢執行，以便其他工作如NSSS除污等可先執行。

- C類：其他所有對除役專案重要的系統，如放射性廢液處理、固態廢棄物處理、與冷凝水貯存系統等。
- D類：其他所有未受污染且對除役專案重要的系統，如配電系統、廠用空氣系統、廠用水系統、通風空調(HVAC)系統等。

圖 2.1 將 BWR 立即拆除工作時程分成 3 張圖，第 1 張圖最右邊的數字代表接續至第 2 張圖的路徑，而第 2 張圖最左邊的數字即代表接續第 1 張圖的路徑，於類推。另圖 2.1 中粗寬線畫出之路徑為專案的關鍵路徑，也是估計整體專案時程最重要的路徑。該路徑上的重要工作摘述如下：

- 執照申請工作(永久停機前)

永久停機前要準備除役計畫並提送NRC，此時期的費用主要為執照申請與設計及規劃除役工作所需的電廠和包商的人力費用。

- 第一階段執照申請工作(永久停機後)

NRC審查除役計畫的時間約須預留一年，此時期也須完成一些第二階段前須完成的設計與規劃的工作。

- 準備C類工作規範

電廠/包商須撰寫並核准反應爐與內部組件移除工作所需的工作規範，其要項包括：反應爐內部組件之最終分解規範、燃料運送通道修改規範、反應器廠房修改規範(如進出管制、吊車修改、臨時屏蔽等)、分割工作規範等。

- 準備C類詳細程序書

電廠/包商須配合C類工作規範撰寫並核准C類詳細程序書。

- 反應爐與內部組件分割

此時期須執行的工作請參閱前述之2.4.5.2節的內容。

- 反應器廠房除污

此時期工作包含生物屏蔽牆之移除，燃料更換通道不鏽鋼內襯移除，反應器廠房混凝土牆之輻射調查與除污等工作。

- 移除D類系統

D類系統包含配電、照明、廠用空氣、廠用水、HVAC、可攜式水源、衛生及消防等系統。

- 移除反應器廠房

NRC最終廠區調查完成後即可利用爆炸拆除(explosive demolition)等方法拆除反應器廠房。

- 廠區造景美化

廠區因建物拆除造成之凹洞填平後，覆蓋表土並植草進行美化。

研析心得

1. 我國核電廠除役計畫分為四個階段，包含停機過渡階段約 8 年、除役拆廠階段約 12 年、廠區最終狀態偵測階段約 3 年，以及廠區復原階段約 2 年，共計 25 年。在除役計畫已提出詳細工作時程(類似圖2.1)，原能會審查核電廠除役計畫之重要管制事項，已要求在相關作業前一定時間提交該作業計畫。(A類)
2. 針對核電廠除役提出之詳細工作時程，宜注意關鍵路徑與非關鍵路徑工作時程和安排，人員配置等的合理性與完整性。特別須考慮工作人員所接受的輻射劑量與相關輻防規定的符合性。(A類)
3. 除役中的核電廠爐心內的燃料尚未移除，宜特別注意燃料移除工作對除役關鍵路徑時程的影響。(A/B類)
4. 工作時程的規劃宜有風險評估，並針對可能影響時程的風險，準備因應對策與計畫。另在除役工作進行中，若遭遇未預期的風險，則宜重新評估時程變更的影響，並執行適當的應變措施。(C類)

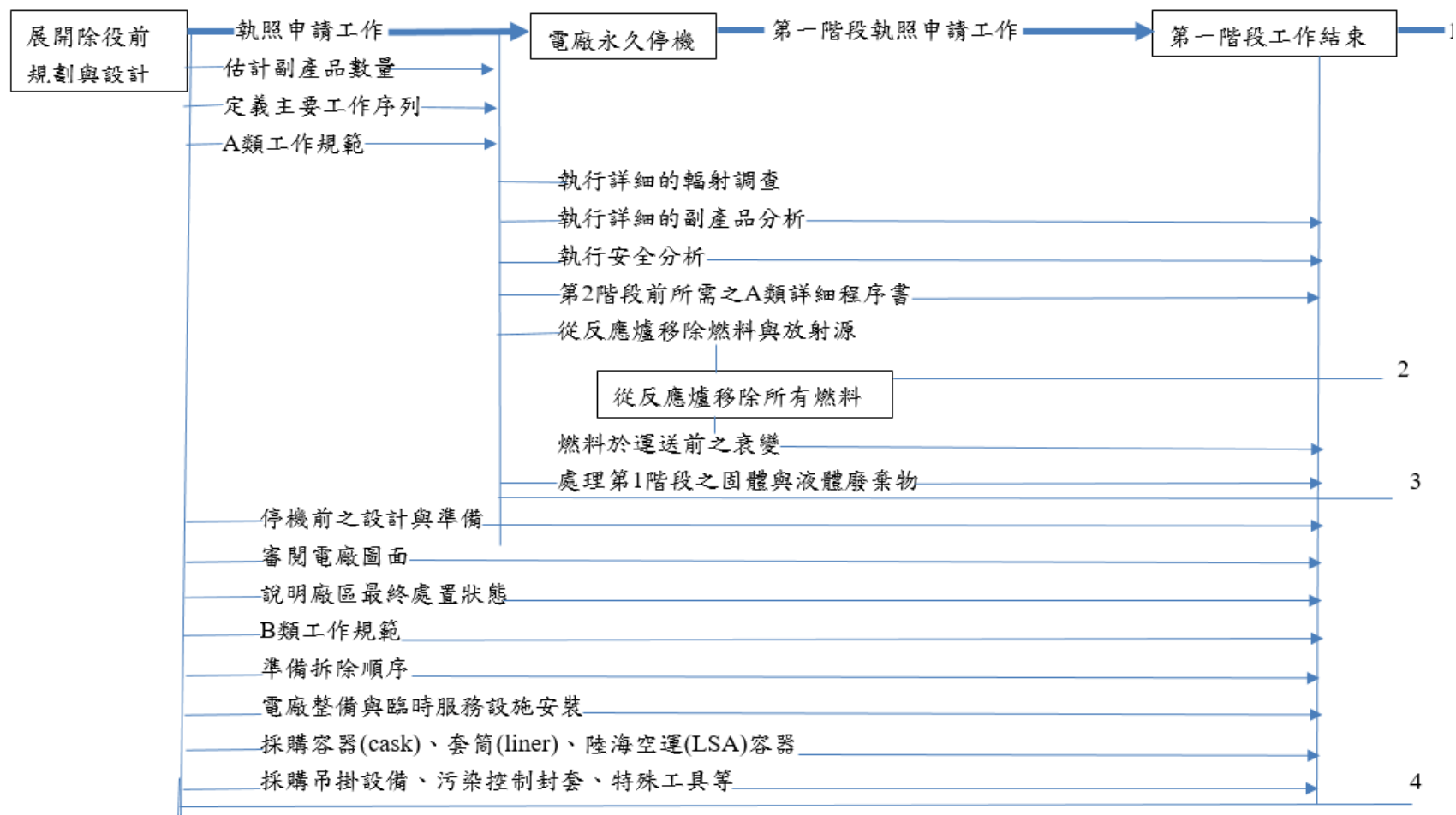


圖 2.1 BWR 除役時程範例

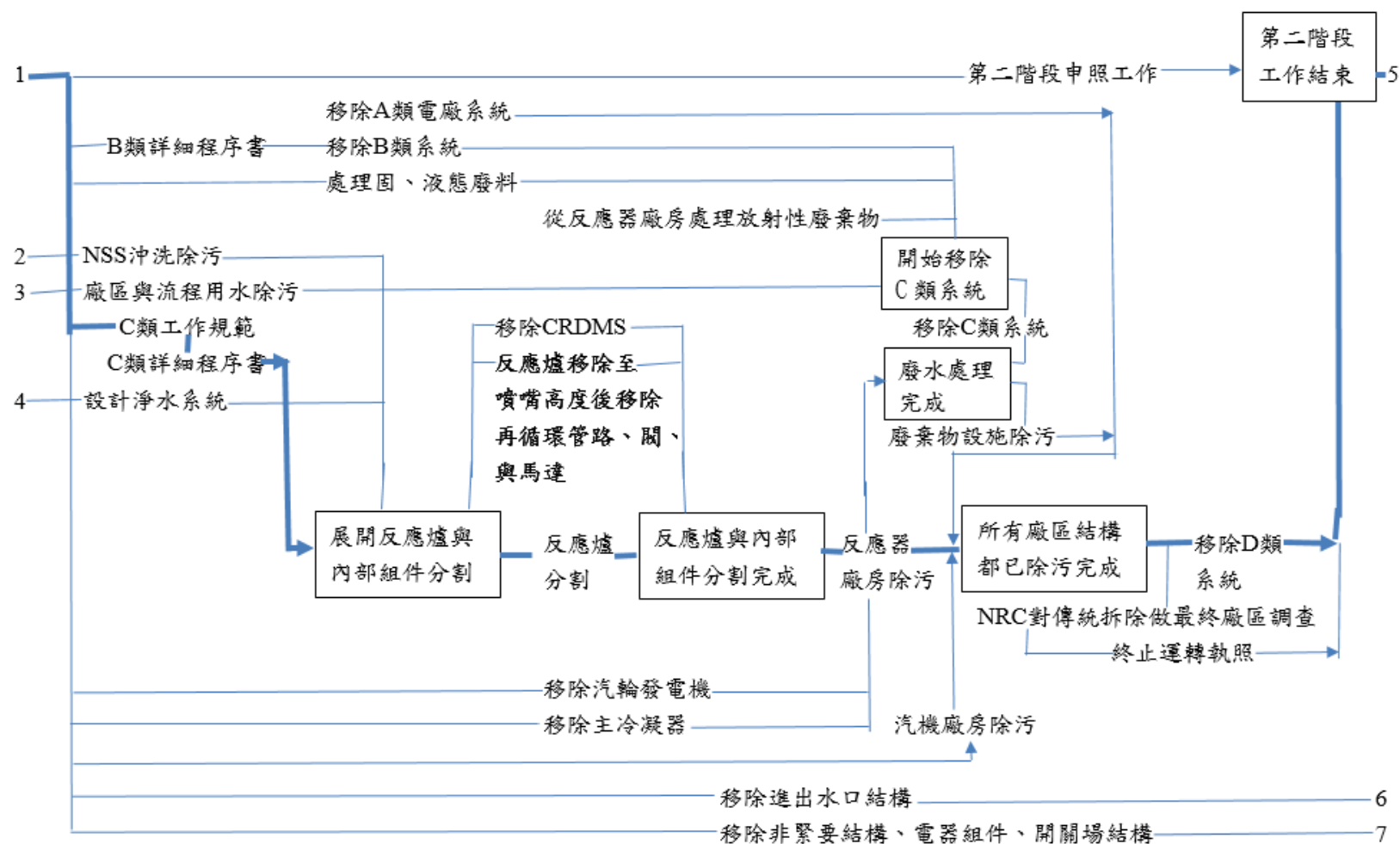


圖 2.1 BWR 除役時程範例(續 1)

2.6 期程相關經費（AIF報告第一冊第7章）

重點摘述

AIF-NESP-036 報告中的期程相關經費包含電力公司和主包商參與除役工作人員的薪資費用。這些人員的工作包括專案管理、行政、廠區保安、保健物理、輻射防護、及品質保證等。該報告將立即拆除方式的除役專案分為下列三個階段：

- 第一階段：設計與準備(約11至14個月)
- 第二階段：執行除役工作，終止運轉執照(約33至42個月)
- 第三階段：廠區復原(約22至28個月)

電力公司在第一階段投入的人員數目約為電廠正常運轉人員數目的一半，若電力公司自行負責除役工作，則將維持這些人力至完成除役專案為止；而若將除役工作交由包商負責，則電力公司在第二階段投入的人員數目將減為電廠正常運轉人員數目的 25%，到運轉執照終止後將減少更多。

若除役工作由一個主包商負責，則該主包商在第一階段投入的人員數目約為 25 人，他們主要負責採購、雇用下包商等工作；主包商在第二階段投入的人員數目可能增加至 50 人，到第三階段則又將減少至 25 人。

AIF-NESP-036 報告建議根據上述人力估計、電力公司人員職位與薪資、主包商人員職位與薪資等資料估計期程相關經費。該報告第 7 章提供了電力公司與主包商人員的職位表，第二冊的第 4 章又提供了各職位負責的事項與各階段參與的人數等資料。本節只翻譯美國電力公司主包商人員的職位如表 2.20 以供參考。

研析心得

1. 核電廠除役計畫將除役工作分為四個階段，與 AIF-NESP-036 報告分成

三個階段的做法不同時，核電廠可自行規劃各除役階段的人力需求，並據以估計期程相關的費用。(B 類)

表 2.20 核電廠除役主包商人員職位範例

Project superintendent	專案負責人
Assistant Project superintendent	專案助理負責人
Supervisor:	工地主任:
Administrative Service	行政服務
Engineering	工程
Health and Safety	健康與安全
Project	專案
Purchasing	採購
Quality Assurance	品保
Account Clerk	會計帳務員
Account Payable Clerk	出納帳務員
Administrative/personnel Asst.	行政/人事助理
Cost Control Accountant	費用控管會計師
Specialists:	專家:
Senior, Decontamination	資深除污專家
Industrial Safety	工安
Purchasing	採購
Engineers:	工程師:
Civil/Structural	土木/結構
Chemical	化學
Cost	預算
Electrical	電氣
Mechanical	機械
Planning and Scheduling	規劃與排程
Technicians:	技師:
Chemistry Lab	化學實驗室
Decontamination	除污
Instrumentation	儀器
Quality Assurance	品保
Sr. Health Physics	資深保健物理
Designer/Draftsman	設計師/繪圖員
Tool Crib Attendant	工具管理員
Secretary	秘書
Clerk Typist	打字員
Janitor	清潔員

2.7 附屬經費（AIF報告第一冊第8章）

重點摘述

本節討論的費用無法直接歸屬於某一項除役工作，可能產生於某一個除役階段，也可能跨越數個除役階段，這些費用一般稱為未分配的(undistributed)或附屬的(collateral)費用，通常包含下列事項相關的費用，後續小節則說明每一項費用估計的方式：

- 支援廠區工作的重裝備
- 電廠照明、暖氣與冷氣所需的能源
- 申請執照與許可
- 保健物理設備與供應品
- 小型工具
- 核能責任保險
- 不動產與資產相關稅款
- 放射性廢液之處理

2.7.1 未分配的(undistributed)廠區裝備

核能電廠除役時一般使用的未分配廠區裝備及操作人員需求如表2.21所示，這些裝備可長期租用或按月租用，後續之2.17節(AIF-NESP-036報告第二冊第5章)將提供租金相關資料。除了這些設備外，另須考慮工作人員更衣拖車、冷暖氣機、和移動廁所的需求，這些需求統稱為工作人員服務設施(crew services)。本節把除役工作的每一個階段分成前半段與後半段，分別說明每個半段所需的裝備。例如立即拆除第一階段的前半段不會移動任何電廠結構或組件，所以不需要任何裝備；而後半段則須為包商工作人員提供適當的工作區域，所以建議準備的裝備如表2.22所示。立即拆除第二階段的前半段已展開除役工作，其裝備需求建議如表2.23所示。其他階段也有類似的裝備需求

建議。雖然核電廠規劃的除役工作階段與AIF-NESP-036報告不同，但可考量電廠既有之裝備並參考本節說明的做法，規劃各除役階段所需的未分配廠區裝備。

2.7.2 電廠照明、暖氣與冷氣所需能源

電廠照明根據照度的要求、室內面積、與燈具特性等參數可推算電力的需求。AIF-NESP-036報告引用1970年代的手冊可能不適合目前的狀況，我國在照度方面訂有CNS國家標準，燈具特性則可參考供應商資料，因此電廠應可估計照明方面的能源需求。在暖氣與冷氣方面主要考慮熱損失、冷暖氣機特性等因素，而AIF-NESP-036報告引用的也是1970年代的手冊。我國電廠參考目前的資料估計這方面的能源需求應較符合現況。

表 2.21 核能電廠除役時使用的未分配廠區裝備及操作人員需求範例

裝備	操作人員需求
Crawler, diesel tractor 柴油牽引履帶車	1位操作員
Flatbed tractor trailer 平台式拖車	1位卡車駕駛員
Pickup truck 小卡車	無(廠區內人員使用)
Wheeled backhoe 挖土機	1位操作員
Crawler-mounted crane 履帶式吊車	1位操作員及1位加油人員
Dump truck 自動卸貨卡車	1位卡車駕駛員
Forklift 堆高機	1位操作員
Manitowoc ringer crane 馬尼托沃克吊車	1位操作員及1位加油人員
Multi-wheeled transporter with push-pull tractor 裝配推拉牽引機之多輪運輸車	4位卡車駕駛員及1位加油人員

表 2.22 立即拆除第一階段後半段建議準備的裝備

1台柴油牽引履帶車
2台平台式拖車
3台小卡車
2台堆高機
工作人員服務設施

表 2.23 立即拆除第二階段前半段建議準備的裝備

1台柴油牽引履帶車
2台平台式拖車
4台小卡車
2台堆高機
2台挖土機
2台履帶式吊車
2台自動卸貨卡車
10部軌道式電漿火炬切割機
20個氧乙炔氣體火炬
工作人員服務設施

2.7.3 放射性廢液之處理

除役工作中將會產生大量的放射性廢液，其來源包括管路和容器的化學除污、組件或建物表面鬆散污染物的移除、及反應爐和內部組件的切割等。一般核電廠都可利用既有的放射性廢液處理系統進行處理，也可外包給專門處理放射性廢液的公司。這些廢液可分為下列四種型式：

- 高純度/低導電度廢液：通常為反應爐和內部組件切割後的廢液，可經過濾器與除礦器處理後回收再利用。
- 中低純度/高導電度廢液：通常為人員沐浴、脫水工作和反洗工作等產生的廢液，也可經過濾器與除礦器處理後回收再利用。
- 高導電度化學廢液：通常為除污作業產生的廢液，可經由蒸發器將蒸餾水和沉澱物分離，其中蒸餾水可回收或排放，沉澱物則可固化成固體廢棄物。
- 清潔劑廢液：通常為洗衣廢水，可經過濾後排放至衛生廢液處理系統，也可加入消泡(defoaming)劑後用化學廢液蒸發器處理。

在放射性廢液的產量方面，AIF-NESP-036報告建議的數據如下：

- 高純度水：包含反應爐、燃料更換通道/反應器井(well)、用過燃料池、乾燥器與汽水分離器池(BWR)、抑壓池(BWR)、以及75%

的冷凝水貯存槽等加總的容量。

- 低純度水：假設每人每天淋浴與洗手各用20與1加侖的水量，若有150位工作人員則每天排水3,150加侖。
- 化學廢水：NSSS一次迴路體積的兩倍(一次沖洗加一次清洗)、安裝一次除污裝備排放300加侖、每沖洗10平方英尺牆面排放1加侖、高壓水除污則每10平方英尺排放2加侖。
- 洗衣清潔劑廢水：每天約8.6加侖。

另在放射性廢液過濾殘渣的固化方面，AIF-NESP-036報告建議的數據如下：

- 每處理135,000加侖的廢液，產生1立方英尺的過濾物質廢棄物。
- 每處理2,500加侖的廢液，產生1立方英尺的樹脂廢棄物。
- 每處理50加侖的廢液，產生1立方英尺的(蒸發器)沉澱廢棄物。
- 每個55加侖桶盛裝3立方英尺的廢棄物與4.7立方英尺的固化劑。

AIF-NESP-036報告也提供固體廢棄物運送與處置相關的參考費用，不過其來源均為美國公司在其國內的報價，對我國的情況較不具參考價值。

2.7.4 核能責任保險

AIF-NESP-036報告根據美國國家標準提供各除役階段應準備之保險金額。我國核電廠則應遵照我國「核子損害賠償法」提撥保險金額。

2.7.5 稅款

AIF-NESP-036報告建議費用估計者聯繫美國聯邦與州政府洽詢除役期間相關稅款規定。我國核電廠則應遵照我國稅務相關法規繳交稅款。

2.7.6 申請執照與許可

AIF-NESP-036報告依照美國NRC相關規定估計除役期間申請執照與許可之費用。我國核電廠則應遵照我國原子能委員會相關法規繳交申請執照與許可之費用。

2.7.7 保健物理設備與供應品

除役期間所需的保健物理設備包含人員防護裝備、輻射偵測與取樣設備、實驗室與分析設備、以及取樣偵測與實驗室分析所需的消耗品等。AIF-NESP-036報告以表列方式建議除役期間應準備的保健物理設備。我國核電廠既有之保健物理部門與放射實驗室應已備有許多相關設備，宜檢視確認供應除役期間需求的適切性。

2.7.8 小型工具

除役期間所需的小型工具較難逐項討論，AIF-NESP-036報告建議以人力費用的0.5%到1%的額度編列相關費用。

研析心得

1. 在支援除役工作的重裝備方面，可檢視各除役階段規劃租用或採購的裝備是否合宜。(B 類)
2. 檢視除役計畫中「耗用能源費用」是否包含照明、暖氣與冷氣所需能源費用，及此項費用是否有充裕的額度。(B 類)
3. 核電廠除役計畫規劃利用既有之四大廢液處理系統處理除役過程產生之放射性廢液，另對後續保留區產生之廢液則將利用新建之廢液處理系統加以處理。可檢視既有廢液處理系統之能量是否足以處理除役過程產生之放射性廢液，以及新建廢液處理系統之能量是否足以處理後續保留區產生之廢液。(A 類)
4. 檢視核電廠既有保健物理部門與放射實驗室已備有之保健物理設備供應除役期間需求的適切性。(B 類)

2.8 可回收舊料與廢棄物料（AIF報告第一冊第9章）

重點摘述

可回收舊料(salvage)的定義是保有使用價值且未受污染的設備或組件，廢棄物料(scrap) 的定義是既有形式無使用價值且未受污染的設備或組件。AIF-NESP-036 報告提出可回收舊料的判斷方式與包含之項目，也提出廢棄物料包含之項目。但在估計它們的價值時，先說明現在核能業界沒有回收舊料的市場，故建議把所有項目都考慮為廢棄物料；然後又說明廢棄物料的切割、封裝、與運送需花費許多人力費用，而且這些費用可能比廢棄物料的售價還高，因此最後建議請專收廢料的包商免費收走。

2.9 低放射性廢棄物準則（AIF報告第一冊第10章）

重點摘述

本節首先依據美國 NRC 的 RG1.86^[2-6]將除役後的廢棄物分成活化(activated)廢棄物、污染廢棄物、與非污染廢棄物三種。接著盤點電廠除役後三種廢棄物的數量。不過在計算體積時要配合封裝容器的型式與容量，例如管路須先切割裝入容器後才能獲得真正的處置體積。在低放射性廢棄物處置方面，要依據美國聯邦法規 10CFR61 進行分類^[2-7]，另運輸方面則須依據 49CFR171^[2-8]的要求。

我國核電廠在低放射性廢棄物的分類、運送與處置方面應遵守「游離輻射防護安全標準」、「放射性物質安全運送規則」、與「低放射性廢棄物最終處置及其設施安全管理規則」等相關法規，故前述美國法規僅供參考。

2.10 放射性廢棄物之處置（AIF報告第一冊第11章）

重點摘述

本節討論放射性廢棄物處置相關的封裝費用、運輸費用及處置費用，在封裝方面討論下列型式的容器：

- 鋼桶(steel drum)：大小範圍從30加侖到83加侖，最常用的為55加侖，其盛裝體積為7.5立方英呎。
- 箱(boxes)：製造材質為鋼或木頭，內裝體積分為44立方英呎(最大裝載重量4,000磅)與90立方英呎(最大裝載重量8,000磅)兩種，適合當作較大型廢棄物之LSA容器。
- 外包容器(overpacks)：是一種可回收的外包容器，例如55加侖鋼桶表面輻射強度超過法規限值時，即可利用此種容器降低表面輻射量。
- 加裝屏蔽容器(shielded casks)：通常用兩層不鏽鋼製成的容器，內外層之間則加入鉛或耗乏鈾以增加屏蔽輻射的效果。可用來封裝高輻射強度的物件，如切割後之反應爐內部組件等。
- 高完整性容器(high integrity containers)：通常用來盛裝穩定性較差的物件，如脫水的用過樹脂與固化的化學污染廢棄物等。

提供上述容器的美國公司包括 Chem-Nuclear System、NuPac Leasing、Hittman 及 Container Product Corporation 等，購買或租用容器的費用可諮詢這幾家公司。AIF-NESP-036 報告也提供了美國國內公路、鐵路與駁船運送放射性廢棄物的公司與價錢等資料，對我國核能電廠較不具參考價值。不過該報告提醒須考慮大型物件廠內短程運送的費用，值得我國參考。另在低放射性廢棄物最終處置方面，該報告提供了美國三家處置公司的計價方式，通常除了基本費用外尚須考慮下列附加費用(surcharge)：

- 輻射附加費用：容器表面輻射超過最低標準後隨強度增加而增加收費。
- 重量附加費用：容器重量超過最低標準後隨重量增加而增加收費。

- 居里附加費用：容器內居里數超過最低標準後隨居里數增加而增加收費。
- 特殊吊運附加費用：過大/過重容器之附加費用。
- 容器吊運附加費用：通常依據套筒(liner)的居里數計價。
- 場區停止營運費用：容器接觸劑量率超過每小時10倫目時，場區須停止營運所加收之費用。
- 永續代管基金(perpetuity escrow fund)：依據每立方英尺計價。
- 低放射性廢棄物最終處置稅：美國州政府稅。
- 營業執照稅：美國州政府稅。

此外 AIF-NESP-036 報告中也討論前述三家處置公司容量不夠時，美國政府已要求曾經享受核能電力的州政府考慮利用區域性協議建造地方性低放射性廢棄物處置場。這種做法對費用的影響包括：位於北方的州會因惡劣的天氣而有數個月不能運作；廢棄物運輸的費用可能減少；以及處置場建造費用可能增加等。若干研究顯示相關處置費用可能增加 100%至 800%，因此目前尚無此類處置場。我國目前尚無低放射性廢棄物最終處置場，未來確定場址後可參考國際經驗擬訂收費方式。

研析心得

1. 核電廠在遵守低放射性廢棄物最終處置等相關法規的前提下，可參考國際相關經驗估計低放射性廢棄物最終處置相關的費用。(C 類)

2.11 個別廠區特性、電廠修改案與其他經費之調整（AIF報告第一冊第12章）

重點摘述

本節針對個別電廠的修改案、通貨膨脹、多機組設計、特殊設備、及單班制或兩班制等狀況，提出除役經費調整的指引。

2.11.1 電廠修改案

在組件方面，若為組件修改案則變更相關系統的組件統計量即可；在系統方面，若為舊系統更新則更換原有系統之統計數據；若新增系統則須新增費用名稱與代號；若新建一個設施則其相關系統與組件都需新增費用名稱與代號。

2.11.2 通貨膨脹

通貨膨脹對人力費用的影響由電力公司與包商估計調整；對電廠能源費用之影響也可由電力公司估計調整；對設備、材料與消耗品的影響須由供應商提供資料；對租用裝備的影響也須請供應商提供資料。另若有特殊設備，最好將費用分成所需人力與設備組件兩部分進行調整。

2.11.3 多機組設計

假設多機組電廠中的機組每隔一至二年連續除役，則第一部除役機組應負擔而其餘機組不必負擔的項目如下：

- 初步拆除與工程規劃
- 工作規範之準備
- 最終拆除與工程規劃
- 特殊工具、設施與設備之設計與製造
- 詳細工作程序書之準備

相反的，則第一部除役機組不必負擔而其由第二或最後一部機組負擔的項目為：

- 廠區庫房、保安廠房、行政廠房及雜項支援結構之移除
- 進出水口結構之拆除
- 廠區回填與復原
- 送交管制單位之結案報告

此外若電廠中的機組為鏡像(mirror image)設計，則宜妥為安排除役時程，以免第一部機組除役的工作影響第二部機組的運轉。若多部機組共用較少設施(partially integrated units)如庫房、行政廠房、輔助廠房及保安和門禁管制設施等，則共用設備拆除的費用由所有機組分攤。而若多部機組共用較多設施(fully integrated units)則除了分攤共用設施拆除的費用外，尚須注意避免各機組拆除工作的互相干擾。另除役工作中一些附屬費用也須由所有機組分攤，如特殊設備費用、氣體、固體和液體廢棄物處理費用、保險費用、裝備租賃費用、電廠能源費用、輻射防護裝備費用、顧問費及日支費等。而若廠區內有不同型式的機組則除役費用的分配須進行個案分析。

2.11.4 特殊設備

有些電廠設置一些獨特的設備，這些設備的移除須個別分析其所需費用並納入整體預算中。這些設備的案例包括：機械通風冷卻水塔、混凝土冷卻水塔、BWR的抑壓池、冰冷凝器式(ice condenser)圍阻體、防護堤或海嘯牆、駁船碼頭、及放射性廢棄物貯存庫等。

2.11.5 單班制或兩班制

兩班制可大幅減少工作時間且不影響封裝、運送、處置、物料採購、保健物理設備等費用，但第二班之人力費用約須增加10%。通常第一階段的規劃與準備工作採用單班制即可，第二階段的除役工作則須採用兩班制，而第三階段的復原工作則可酌量減少第二班的人力。此外有些電廠考慮將每班8小時的工作時間改為10小時，如此可減少單價因子中的總費用，但須考慮加入加班費後是否仍可減少總費用。

研析心得

1. 除役核電廠爐心中的燃料尚待移除，以及廠區內將新建低放射性廢棄物貯存設施，這些都是 AIF-NESP-036 報告中所謂的獨特項目，檢視這些工作所需時程及其設施規劃。(A 類)
2. 核電廠雙機組採鏡像(mirror image)設計，但第一部機除役時程的安排不應影響第二部機的運轉。在除役費用的估計方面，可檢視共同與各別需求費用的編列與額度是否恰當，及是否已考慮通貨膨脹、電廠修改案等因素。(B 類)

2.12 應變準備金 (Contingency, AIF 報告第一冊第 13 章)

重點摘述

本節對應變準備金的定義是：在預定的專案範圍內，為無法預見的事項特別準備的經費。AIF-NESP-036 報告針對 15 類工作建議了應變準備金的額度(如表 2.4 所示)，每一類都詳列建議的理由，例如第一類工程設計編列的理由如下：

- 工作項目的排序有困難且影響專案時程
- 人力配置不足
- 專案範圍變更(如管制法規改變而要求更多分析)
- 為了補救進度的落後而採用兩班制
- 因方案領域改變而需額外的廠區工程設計
- 因管制的審查而須召開更多會議以便解決問題
- 工作規範或程序書須要更新，或管制單位要求更多資料

另本節也提出另一個估計預算相關的名詞，稱為備抵經費(allowance)，其意義是在預算估計初期因經驗不足或資訊不足而多準備的餘裕，這種餘裕應隨著資訊越來越多而減少，甚至到提出最終估計結果時應完全消失。AIF-NESP-036 報告也說明下列事項較可能出現上述情形：

- 廠區稅款
- 小型工具
- 防護衣與附屬供應品
- 設備租金
- 廠房牆面與地面之除污
- 回填土石之數量
- 管路吊架與防震阻尼器
- 電纜、電纜導架與導管之數量

表 2.24 應變準備金的類別與額度範例

工作類別	準備金額度(%)
工程設計	15
電力公司與包商人力	15
除污	50
受污染組件之移除	25
受污染混凝土之移除	25
蒸汽產生器/調壓槽循環泵之移除	25
反應爐之移除	75
反應爐之封裝	25
反應爐之運送	25
反應爐之處置	50
傳統LSA之封裝	10
傳統LSA之運送	15
傳統LSA之處置	25
未受污染組件之移除	15
附屬供應品/消耗品	25
平均應變準備金額度	24.2

2.13 經費估計結構（AIF 報告第一冊第 14 章）

重點摘述

本節針對除役費用估計報告提出目錄範例(立即拆除方式之範例如表 2.25 所示)以供參考，另亦建議費用估計應準備的文件如下：

- 專案聯絡信函
- 基準假設條件
- 參考文獻
- 結構(混凝土/鋼鐵)體積/重量
- 電廠系統數量
- NSSS移除計算書(封裝/運送/處置)
- 單價因子計算書
- 雜項支援計算書
- 工作相關費用計算書
- 期程相關費用計算書
- 附屬費用計算書
- 費用摘要

研析心得

1. 核電廠可參考 AIF-NESP-036 報告建議的除役費用估計報告目錄，訂定有關財務基礎報告的事項。(B 類)

表 2.25 除役費用估計報告目錄範例(立即拆除方式)

1. 摘要
2. 簡介
2.1 費用估計之目的
2.2 管制導則
2.3 一般採用之方式
3. 立即拆除之除役方式說明
3.1 第一階段：工程設計與準備
3.2 第二階段：除役作業與執照終止
3.3 第三階段：廠區復原
4. 費用估計
4.1 估計之依據
4.2 方法
4.3 廠區特別考量
4.3.1 主要組件之除役
4.3.2 運送方法
4.3.3 設施關閉時之廠區狀態
4.4 假設條件
4.5 費用估計摘要
5. 時程之估計
6. 放射性廢棄物之體積
7. 職業曝露
8. 結論
9. 參考文獻
附件
A 電廠系統與設備清單
B 單價因子之擬定
C 單價因子之輸入資料
D 單價因子之清單

2.14 除役工作項目清單 (AIF 報告第二冊第 2 章)

重點摘述

本節說明除役專案的工作分解結構(work breakdown structure 簡稱 WBS)與工作項目清單，WBS 是專案管理中一項重要的工具，可將專案工作分層次分解成可交付與可管制的小單元，而在費用估計方面，也可從這些小單元所需的費用累積加總成整個專案所需的費用，因此 WBS 的完整性與準確性可以直接影響專案費用估計的準確性。圖 2.2 顯示一個典型除役專案簡化的 WBS 範例，各電廠應針對自己特有的除役工作建立專屬的 WBS。另 AIF-NESP-036 報告也針對三種除役方式與兩種電廠(PWR 與 BWR)提供了詳細的除役工作項目清單，本節摘譯 BWR 立即拆除的工作項目清單(如表 2.26 所示)以供參考。

研析心得

1. 除役專案時程圖(圖 2.1，或稱計畫評核技術(PERT)圖)、WBS(圖 2.2)與工作項目清單(表 2.26)中的工作項目須有一致性，其中任何一種資料進行修訂時，其他兩種資料也要隨之修訂，以便確保除役專案管理的效能。
(B 類)
2. 除役專案管理團隊宜針對自己特有的除役工作性質建立專屬的 WBS，並宜確保 WBS 的完整性與準確性，以便確保專案費用估計的準確性。若 WBS 進行修訂時，費用估計也要隨之修訂。(B 類)

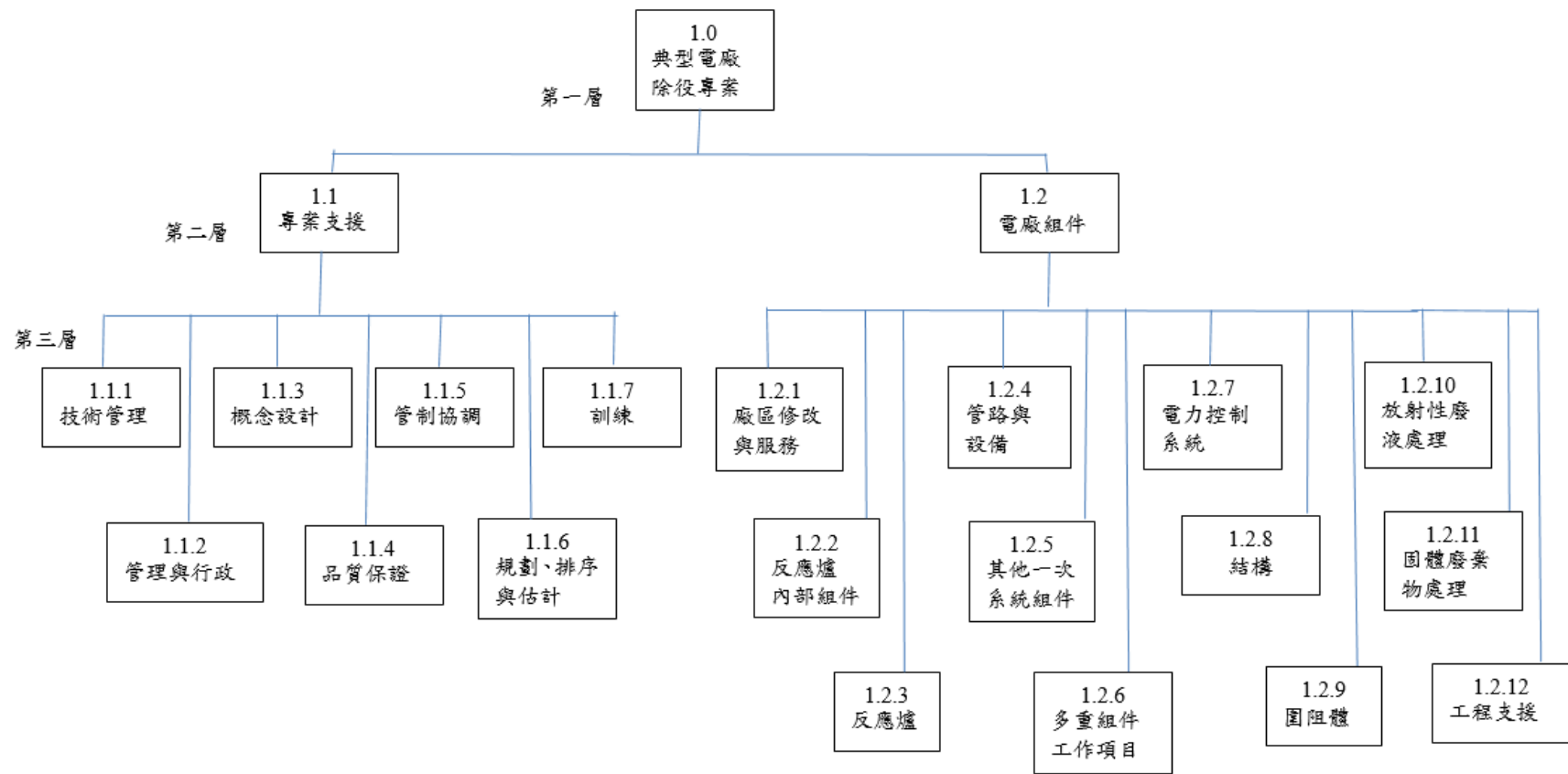


圖 2.2 除役專案工作分解結構範例

表 2.26 BWR 立即拆除方式之除役工作項目範例(1/3)

第一階段 設計與準備
初始工作項目
1. 準備工程
2. 電廠與流程用水之除污
3. 審閱電廠圖面與規範
4. 執行詳細之輻射調查
5. 估計副產品數量
6. 申請只有所有權(possession-only)執照修正文件
7. 說明廠區最終處置狀態
8. 副產品詳細數量
9. 訂定主要工作順序
10. 執行拆除作業安全分析
11. 準備工作規範
11.1 廠區整備
11.2 電廠臨時設施
11.3 NSSS除污
11.4 移除非必要系統
12. 繳交拆除計畫
13. 接收只有所有權執照
14. 接收拆除命令
第二階段 除役作業與執照終止
準備工作規範
15.1 電廠與臨時設施
15.2 電廠系統
15.3 反應爐內部組件
15.4 反應爐
15.5 生物屏蔽
15.6 汽水分離器/再熱器
15.7 鋼筋混凝土
15.8 汽機與冷凝器
15.9 抑壓結構
15.10 一次圍阻體
15.11 電廠結構與廠房
15.12 廢棄物管理
15.13 設施與廠區結案

表2.26 BWR立即拆除方式之除役工作項目範例(2/3)

第二階段 除役作業與執照終止
規劃與廠區整備
16. 準備整合性拆除順序
17. 電廠整備與臨時性服務設施
18. 設計淨水系統
19. 裝備、圍阻封套、工具
20. 採購容器與套筒(liner)
準備詳細工作程序書
21.1 電廠系統
21.2 反應爐頂蓋
21.3 反應爐內部組件
21.4 剩餘之廠房
21.5 CRD套管與儀器導管
21.6 爐內儀器
21.7 移除一次圍阻體
21.8 反應器壓力槽
21.9 設施結案
21.10 生物屏蔽
21.11 鋼筋混凝土
21.12 汽機與冷凝器
21.13 汽水分離器與再熱器
21.14 放射性廢棄物廠房
21.15 反應器廠房
系統除污與格架處置
22. 一次迴路除污(內部沖洗)
23. 用過燃料格架
核蒸氣供應系統
24.1 再循環系統管路
24.2 再循環泵與馬達
24.3 移除CRDMs與儀器導管
24.5 反應爐
電廠系統與主要受污染組件
25. 主汽機/發電機
26. 主冷凝器
27. 電廠系統處置(列出每一個系統)

表2.26 BWR立即拆除方式之除役工作項目範例(3/3)

第二階段 除役作業與執照終止
受污染混凝土
28.1. 反應器廠房
28.2 放射性廢棄物廠房
28.3 汽機廠房
執照終止
29. 最終輻射調查
30. 終止所有權(Ownership only)執照
第三階段 廠區復原
主要組件
31. 廠房吊車
廠區剩餘結構之拆除
32.1 反應器廠房
32.2 放射性廢棄物廠房
32.3 冷卻水塔
32.4 汽機廠房
32.5 行政廠房
32.6 門禁設施
32.7 雜項結構
32.8 進出水口結構與渠道
32.9 庫房
廠區結案工作
33. 廠區回填
34. 整地與造景
35. 結案報告

2.15 單價因子之擬定 (AIF 報告第二冊第 3 章)

重點摘述

AIF-NESP-036 報告第二冊第 3 章針對下列類別的工作提供單價因子計算表：

- 管路與閥門：包括移除未受污染的管路與閥門各以直徑分為3類與2類，因此共有5項計算表；受污染管路與閥門也類似有5項計算表，此類單價因子之計算範例請參考前述之表2.9與表2.10。
- 機械與電氣組件：包括移除未受污染組件(包括泵、汽機驅動泵、熱交換器、汽水分離器/再熱器、槽、雜項設備、電纜托架、電線導管、HVAC通風管、變壓器、天行吊車、PWR主冷凝器、備用柴油發電機、PWR汽輪發電機等)計算表28項，以及移除受污染組件(包括泵、汽機驅動泵、熱交換器、汽水分離器/再熱器、槽、雜項設備、電纜托架、電線導管、HVAC通風管、BWR主冷凝器、BWR汽輪發電機等)計算表21項，此類單價因子之計算範例請參考後續之表2.27。
- 鋼鐵與混凝土結構：包括移除未受污染結構計算表9項，以及移除受污染結構計算表18項，此類單價因子之計算範例請參考前述之表2.18與表2.19。
- 除污：計算表6項，此類單價因子之計算範例請參考後續之表2.28。
- 雜項設施與封裝：計算表3項，此類單價因子之計算範例請參考後續之表2.29。
- 整地、造景與廠區復原：計算表5項，此類單價因子之計算範例請參考後續之表2.30。

研析心得

1. AIF-NESP-036 報告針對管路與閥門之移除、機械與電氣組件之移除、鋼鐵與混凝土結構之移除、除污、雜項設施之移除與封裝、以及整地、造

景與廠區復原等六類工作之單價因子計算表，核電廠除役時可參考這些計算表估計相關費用，但其中之施工方法、人力工時、人力組成與設備費用等均須考慮各國人員素質與商業環境後，做適當的修訂。(C類)

表 2.27 移除未受污染及重量大於 10,000 磅之泵的單價因子範例(1/2)

移除未受污染及重量大於10,000磅之泵			
針對大於10,000磅的泵，將利用起重機或小型吊車分別移除其中的泵、馬達與框架。所有組件將送至安置區。			
工作編碼	工作敘述	工作時間 (分鐘)	關鍵時間 (分鐘)
a	將泵與馬達去能並移除電源	90	(c)
b	將冷卻器與油槽解離並洩空(drain)	120	(c)
c	移除絕緣設施並將進水管解聯	230	230
d	將馬達從泵與框架上拆離	150	150
e	吊舉馬達以便移除	45	(d)
f	移除馬達並送至安置區	45	45
g	將泵從框架上拆離	120	120
h	吊舉泵以便移除	120	(g)
i	移除泵並送至安置區	30	30
J	將框架從地基上拆離	120	120
k	吊舉框架以便移除	60	(j)
l	移除框架並送至安置區	240	240
小計		1,370	935
工作時間調整因子			
工作高度因子(關鍵時間的15%)		140	
實際工作時間		140+935=1,075	
有生產力之工作時間		1,075	
工作間休息因子(有生產力工作時間的8.33%)		90	
總工作時間		1,075+90=1,165	
總工作時間=19.417小時			

表2.27 移除未受污染及重量大於10,000磅之泵的單價因子範例(2/2)

團隊	數量	工作時間 (小時)	費率 (\$/小時)	費用(\$)
勞工	4.0	19.417	\$	\$
技術人員	3.0	19.417	\$	\$
領班	1.0	19.417	\$	\$
人力費用小計				\$
人力管理費用與利潤				\$
人力費用總計				\$
設備費用				無
消耗品/材料費用				
氣體火炬號材 (\$5.10/hr) ×3.833hr				\$19.55
設備與材料小計				\$19.55
設備與材料管理費用與利潤				\$
設備與材料費用總計				\$
人力、設備與材料費用總計				A
移除未受污染及重量大於10,000磅之泵的總費用				A
移除未受污染及重量大於10,000磅之泵所需人力工時 =19.417(4.0+3.0+1.0)				155.34小時

表 2.28 設備表面除污的單價因子範例

設備表面除污				
經過調查後，輻射污染程度低的設備將進行表面除污工作。假設以手持刷子或抹布執行除污，表面剝離的速率為每小時60平方英尺。除污所產生的廢棄物將裝入袋子後處置。任何因除污而流下的溶液將導入廠房地面洩水系統後，送至放射性廢棄物處理系統。				
工作編碼	工作敘述	工作時間(分鐘)	關鍵時間(分鐘)	
a	手動執行60平方英尺的表面除污	60	60	
小計		60	60	
工作時間調整因子				
工作高度因子(關鍵時間的15%)		9		
呼吸保護因子(關鍵時間的38%)		23		
輻射/ALARA因子(關鍵時間的15%)		9		
實際工作時間		60+9+23+9=101		
防護衣因子(實際工作時間的23%)		23		
有生產力之工作時間		101+23=124		
工作間休息因子(有生產力工作時間的8.33%)		10		
總工作時間		124+10=134		
總工作時間=2.233小時				
團隊	數量	工作時間(小時)	費率(\$/小時)	費用(\$)
勞工	2.0	19.417	\$	\$
領班	0.5	19.417	\$	\$
人力費用小計				\$
人力管理費用與利潤				\$
人力費用總計				\$
設備費用				無
消耗品/材料費用				
抹布/衣服/清潔液 (\$1.02/平方英尺)×60				\$61.20
設備與材料小計				\$61.20
設備與材料管理費用與利潤				\$
設備與材料費用總計				\$
人力、設備與材料費用總計				A
設備表面除污每平方英尺之費用				A/60
設備表面除污每平方英尺所需人力工時=2.233(2.0+0.5)/60				0.09小時

表 2.29 在污染區裝設鷹架的單價因子範例

在污染區裝設鷹架				
鷹架將在被指定的廠房與區域依據地板面積搭建。估計的數據來自第2-9項參考文獻。假設鷹架的長寬高各為5、7、及5英呎。本項工作需搭建兩層以達到10英呎的高度。但因同一鷹架可使用5次，所以本項工作使用的鷹架數為2/5=0.4				
工作編碼	工作敘述	工作時間(分鐘)	關鍵時間(分鐘)	
a	搭建與移除鷹架(2層)	26	26	
b	安置與拾取鋪板	20	20	
小計		46	46	
工作時間調整因子				
輻射/ALARA因子(關鍵時間的15%)		7		
實際工作時間		46+7=53		
防護衣因子(實際工作時間的23%)		12		
有生產力之工作時間		53+12=65		
工作間休息因子(有生產力工作時間的8.33%)		5		
總工作時間		65+5=70		
總工作時間=1.167時				
團隊	數量	工作時間(小時)	費率(\$/小時)	費用(\$)
勞工	3.0	1.167	\$	\$
領班	0.3	1.167	\$	\$
人力費用小計				\$
人力管理費用與利潤				\$
人力費用總計				\$
設備費用				
鷹架 \$50.00/組 ×0.4組				\$20.00
消耗品/材料費用				無
設備與材料小計				\$20.00
設備與材料管理費用與利潤				\$
設備與材料費用總計				\$
人力、設備與材料費用總計				A
在污染區裝設鷹架每平方英呎之費用				A/35
設備表面除污每平方英呎所需人力工時=1.167(3.0+0.3)/35				0.11小時

表 2.30 地表下空洞回填的單價因子範例

地表下空洞回填				
將使用推土機與16噸卡車將精選結構填土回填至廠區的地基與地表下空洞。根據第2-9項參考文獻的數據，推土機在距離2英哩以內的廠區回填速率約為每天600立方碼，而卡車在5英哩以內搬運的速率為每天335立方碼。因此每位推土機駕駛搭配兩位卡車駕駛，此為實際速率故不再計算工作時間調整因子。				
工作編碼	工作敘述		工作時間(分鐘)	關鍵時間(分鐘)
a	使用結構填土回填廠區地基		480	480
小計			480	480
工作時間調整因子				
實際工作時間			480	
有生產力之工作時間			480	
總工作時間			480	
總工作時間=8.000小時				
團隊	數量	工作時間(小時)	費率(\$/小時)	費用(\$)
勞工	4.5	8.000	\$	\$
領班	1.0	8.000	\$	\$
人力費用小計				\$
人力管理費用與利潤				\$
人力費用總計				\$
設備費用				
200HP的推土機 1台 (\$44.64/hr) ×8.000hr ×1				\$375.12
16噸卡車 4台 (\$13.54/hr) ×8.000hr ×4				\$433.28
消耗品/材料費用				
推土機耗材 (\$19.30/hr) ×8.000hr				\$154.40
16噸卡車耗材 (\$16.15/hr) ×8.000hr ×4				\$516.80
精選結構填土 600立方碼 (\$4.90/立方碼) ×600				\$2,940.00
設備與材料小計				\$4,401.60
設備與材料管理費用與利潤				\$
設備與材料費用總計				\$
人力、設備與材料費用總計				A
地表下空洞回填每立方碼所需費用(\$/立方碼)				A/600
地表下空洞回填每立方碼所需人力工時=8.000(4.5+1.0)/600				0.07小時

2.16 期程相關經費之因素（AIF 報告第二冊第 4 章）

重點摘述

AIF-NESP-036 報告第二冊第 4 章主要提供電力公司與包商在除役工作中的人員配置、職責與工時等方面的建議。由於包商部分通常由其管理部門自行決定，本節僅摘譯美國電力公司各職位的工時(如表 2.31)以供參考。

研析心得

1. AIF-NESP-036 報告中的期程相關(period dependent)經費主要考慮除役過程的人力費用，核電廠除役計畫分別針對停機過渡、除役執行、及除役完成與除役後復原等各階段編列人事費用。可參考 AIF-NESP-036 報告第二冊第 4 章提供的人力工時資料，檢視前述人事費用編列的合理性與完整性。(B 類)

表 2.31 美國電力公司在核電廠立即拆除之除役工作中各職位的工時範例(1/2)

職位	階段 月份	第1		第2	第3
		0~6	7~12	13~48	49~72
廠長(General Manager)		1	1	1	1
副廠長(Assistant General Manager)		1	1	1	1
經理(Superintendents)					
保健物理		1	1	1	1
維護		1	1	1	0
運轉		1	1	1	0
專案		1	0	0	0
課長(Supervisor)					
行政服務		1	1	1	1
電氣維護		1	1	1	1
工程		1	1	1	1
環境/化學		1	1	1	0
保健物理		1	1	1	1
保健物理(助理)		1	1	1	0
儀器		1	1	1	0
機械維護		1	1	1	1
運轉		1	1	1	0
規劃與排程		1	1	1	1
採購		1	1	1	1
品質保證		1	1	1	1
放射性廢棄物處理		1	1	1	0
紀錄管理		1	1	1	1
安全		1	1	1	1
保安		1	1	1	1
保安(助理)		4	4	4	4
值班		4	4	4	4
值班(助理)		1	0	0	0
值班(放射性廢棄物處理)		2	2	2	0
貯存		1	1	1	1
專家					
消防		1	1	1	1
採購		1	1	1	1
運轉、放射性廢棄物控管		1	1	1	0

表2.31 美國電力公司在核電廠立即拆除之除役工作中各職位的工時範例(2/2)

職位	階段 月份	第1		第2	第3
		0~6	7~12	13~48	49~72
協調人員(Coordinators)					
核能訓練資深人員		1	1	0	0
核能訓練人員		1	1	1	0
工程師					
土木/結構		1	1	1	1
預算		1	1	1	1
電氣		1	1	1	0.5
環境		1	1	0.5	0.5
執照申請		1	1	0.5	0.5
機械		1	1	1	0.5
核能		1	1	0	0
規劃與排程		1	1	1	1
品質保證		1	1	1	0
放射性評估		1	1	1	0
技術員					
資深化學		1	1	1	0
化學		1	1	1	0
除污		12	0	0	0
保健物理		20	20	20	3
防護衣		3	3	3	0
資深核能儀器		2	1	1	0
核能儀器		1	1	1	0
QA/QC		3	3	3	0
控制室運轉員		30	25	5	0
技術領班		3	3	3	0
技術勞工		10	10	10	0
設計師/繪圖員		1	1	1	1
勞工		10	10	10	0
保安警衛		40	40	40	15
打字員		2	2	2	2
清潔員		3	3	3	2
秘書		3	3	3	2
總計		194	174	151	51

2.17 附屬經費（AIF 報告第二冊第 5 章）

重點摘述

附屬經費的定義與內容如本報告的 2.7 節所述，AIF-NESP-036 報告第二冊第 5 章針對附屬經費的每一個項目提出費用估計的詳細內容。在未分配的(undistributed)廠區裝備方面，該報告根據參考文獻 2-9 提出每月租用的經費。本節摘譯工作人員服務設施租金範例(如表 2.32)與除役第一階段後半段所需裝備租金範例(如表 2.33)以供參考，其他階段的資料都類似故不再贅述。

在電廠照明、暖氣與冷氣所需能源方面，如 2.7.2 節所述，建議我國電廠參考目前的資料估計這方面的能源需求應較符合現況。在放射性廢液處理方面，我國核電廠除役計畫規劃利用既有之四大廢液處理系統處理除役過程產生之放射性廢液，因此核電廠應可根據自有經驗估計這方面所需的費用。在保健物理設備與供應品方面，我國核電廠既有之保健物理部門與放射實驗室應已備有許多相關設備，因此可根據過去採購的經驗估計除役時所需設備的經費。在小型工具方面本節仍建議以人力費用的 0.5%到 1%的額度編列相關費用。此外，在申請執照與許可、核能責任保險、與稅款方面我國核電廠應依照國內相關法規估計除役時所需的經費。

研析心得

本節在管制方面的建議與2.7節相同。

表 2.32 工作人員服務設施租金範例(供應 100 人使用)

設備(數量)	尺寸	每用租金
更衣拖車(5)	32 ft ×8 ft	\$165×5=825
拖車冷暖氣機(5)	N/A	\$30×5=150
移動廁所(5)	N/A	\$70×5=350
總計		\$1,325

表 2.33 除役第一階段後半段所需裝備租金範例

裝備	尺寸	每用租金
1台柴油牽引履帶車	140 hp	\$4,625×1=4,625
2台平台式拖車	3 tons	\$505×2=1,010
3台小卡車	0.75 ton	\$375×3=1,125
2台堆高機	3,000 lb	\$1,375×2=2,750
工作人員服務設(50人)	N/A	\$660×1=660
總計		\$10,170

2.18 經費估計結構（AIF 報告第二冊第 6 章）

重點摘述

AIF-NESP-036 報告第二冊第 6 章建議的經費估計結構分為工作相關費用、附屬費用、與人力費用三部分，在工作相關費用方面針對本報告表 2.26 所列的每一個工作項目，分別估計除污、移除、封裝、運送、及處置所需的費用，然後再分階段將三部分所需的費用加總求出每階段所需的總經費。

研析心得

1. AIF-NESP-036 報告將除役所需經費分為工作相關(activity-dependent)、期程相關(period-dependent)、與附屬(collateral)等三種經費，因此核電廠除役經費估計結構也以此三種經費為基礎，並考量經費估計之合理性與完整性。(B 類)

2.19 小結

AIF-NESP-036報告討論的除役所需經費分為工作相關(activity-dependent)、期程相關(period-dependent)、與附屬(collateral)等三種經費。在工作相關經費方面，考慮各除役階段的工作項目，提出工作單元與單價因子的概念，估計直接與除役工作相關的經費，例如除污、移除、包裝、運送和處置等；其中包含所有的人力、物料、能源、設備及實際工作相關的服務(船運和處置)，也特別考慮了個別電廠特有的經費需求。在期程相關經費方面考慮電力公司與包商在專案管理、行政、例行維護、輻安、環安、工安、和保安等相關工作的人力配置與人事費用。而在附屬經費方面則考慮重大設備採購、健康與安全供應品、能源經費(熱源、柴油、汽油等)、稅金、以及許可/執照等支出。若能依照該報告提出之架構估計除役所需的經費，則的確使管制單位易於追溯其完整性與正確性，也方便執行單位因應實際狀況的變化修訂經費估計的內容。

核電廠除役報告中提出之經費估計，可參照AIF-NESP-036報告，檢視核電廠經費估計項目之合理性與完整性。不過在互相比對時須考慮各國法規、人員素質、人力費用、設備採購環境、包商來源、放射性廢棄物處置環境等與美國均有差異，因此須詳細評估這些因素的影響後再做判斷。

2.20 參考文獻

- 2-1 Robert Snow Means Company, Inc., Building Construction Cost Data, Kinston, MA (1985).
- 2-2 Smith, R.I., et al.: Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Pressurized Water Reactor Power Station, Pacific Northwest Laboratories, NUREG/CR-0130 (1978).
- 2-3 Oak, D.H., et al.: Technology, Safety and Costs of Decommissioning a Reference Boiling Water Reactor Power Station, Pacific Northwest Laboratories, NUREG/CR-0672 (1980).
- 2-4 Chem-Nuclear Systems, Inc., 1985 Cask Inventory List for the CNS-8-120 Cask.
- 2-5 Final Radiological Report (Progress Report No. 5) for the Surry Power Station Unit 1 Steam Generator Repair Program, Virginia Power Corporation (1980).
- 2-6 US NRC Regulatory Guide 1.86, "Termination of Operating Licenses for Nuclear Reactors," June 1974.
- 2-7 Code of Federal Regulation: Licensing Requirements for Land Disposal of Radioactive Wastes, Title 10, Part 61.
- 2-8 Code of Federal Regulation: Transportation, Title 49, Part 173-178.
- 2-9 Robert S. Means, "Building Construction Cost Data 1985," 43rd Edition, Robert Snow Means Company, Inc., Kinston, MA.

第三章、美國核管會「最小除役基金公式合適性評估」報告重點

摘述與管制建議

3.1 前言

「最小除役基金公式合適性評估 (Assessment of the Adequacy of the 10 CFR 50.75(c) Minimum Decommissioning Fund Formula)」係由美國核能管制委員會(NRC)委託西北太平洋國家實驗室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)執行，規劃針對自上次相關研究(1996年)後累積之除役費用估算經驗進行彙整分析，以評估是否需更新 10 CFR 50.75(c)(1)之最小除役基金公式。本報告於 2011 年完成後，原規劃轉為 NUREG/CR 系列報告，但後來因故未轉為核管會正式報告，基金公式至今也尚未更動。

根據 2013 年 6 月 20 日美國核管會核能管制署(Office of Nuclear Reactor Regulation)給委員(commissioners)的 SECY-13-0066 文件顯示，核管會幕僚基於以下分析及事實，建議暫不採納 PNNL 建議對最小除役基金公式進行修正：

- 1) 公式計算之金額不代表任一特定機組的實際除役費用，而是一個參考數據(reference level)，以確保有適當財務保證使除役工作可在不造成公眾健康風險情況下順利完成。
- 2) 目前尚無沸水式(BWR)機組完成除役之實際費用資訊，而4座已完成除役之壓水式(PWR)機組則各有其「特殊」情況，不一定適用其它機組。
- 3) 2013/2/27核管會召開公聽會時，無出席代表贊成此時修改公式；2013/4/26代表多數經營者之美國核能研究院(Nuclear Energy Institute, NEI)正式致函核管會反對此時修正公式。
- 4) 幕僚對現有境內104座機組分別以PNNL建議的新公式及現有公式計算結果進行比對，發現新公式的結果(僅)高出現有公式6.8%(PWR)及

15.4%(BWR)。

5)核管會要求經營者(licensee)每兩年需更新一次公式計算值並送審，核管會有權於必要時(隨時)修正計算方式並要求經營者更新。

本報告在執行過程中，曾針對當時美國 4 座已完成除役機組之實際費用，以及 27 座核電機組已繳交至核管會之除役費用估算進行彙整比對。由於所蒐集彙整之資訊皆為壓水式或沸水式核電廠，與我國正/待除役核電廠型式一樣，因此本報告此部分相關資訊相當值得我國參考。

美國核管會為確保各核電廠有足夠資金進行除役工作，要求電廠經營者提供一定金額以上之財務保證，此金額稱為最小除役基金，針對壓水式機組(PWR)及沸水式機組(BWR)分別有不同計算公式。對 PWR，最小基金 = $(75 + 0.0088P)$ 百萬美金；對 BWR，最小基金 = $(104 + 0.009P)$ 百萬美金。此兩組公式中的 P 為機組熱功率(百萬瓦，MWt)，適用 1,200 到 3,400 MWt 之機組，超過 3,400 者以 3,400 MWt 計算，低於 1,200 者以 1,200 MWt 計算。另根據上述公式計算出之幣值為 1986 年元月之幣值，需要透過第二組公式調整為計算當年幣值： $0.65L + 0.13E + 0.22B$ ；其中 L 為計算當年勞力(labor)指數與 1986 年勞力指數的比值，E 為能源(energy)指數比值，B 為低放射性廢棄物最終處置指數比值，這 3 個指數都可在美國核管會持續更新版本(約每兩年一次)的 NUREG-1307 報告中查得，其中 L 及 E 指數系採用美國勞動部勞工統計局(Bureau of Labor Statistics, Department of Labor)相關統計數據計算而得，B 指數則由核管會自行蒐集低放廢棄物處置場資訊計算而得，目前此報告最新版本為 2019/2 發行之第 17 版。此公式自 1988 年啟用，當初是依據核管會委託 PNNL 執行之 PWR 參考廠案例(NUREG/CR-0130, 1978)及 BWR 參考廠案例(NUREG/CR-0672, 1980)之結果彙整而得，這兩本 NUREG/CR 在 PNNL 報告中稱為原始研究(original studies)。由第二組公式可看出當初制定此公式時，除役費用中之勞力相關費用、能源相關費用、低放廢棄物處置費用三者之比率。

最小除役基金公式在 1988 年啟用後，核管會在 1990 年代再度委託 PNNL 蒐集彙整當時之除役執行及費用估算經驗，針對 1980 年代之原始研究進行更新並完成 PWR 參考廠案例更新(NUREG/CR-5884, 1995)及 BWR 參考廠案例更新(NUREG/CR-6174, 1996)。這兩本 NUREG/CR 在 PNNL 報告中稱為更新研究(updated studies)，但完成更新研究後，核管會幕僚經評估後建議最小除役基金公式仍維持不變。

由於在 2000 年後進行/規劃除役機組大幅增加，因此除役相關經驗也有所累積，而在除役工法也有新的發展(如反應器壓力槽或蒸汽產生器的整體移除(one piece removal))，這也是美國核管會再度委託 PNNL 對最小除役基金公式的適用性進行評估的原因之一，PNNL 於 2011 年完成本評估報告。本評估報告主要章節及內容分別為：

- 第2章：將更新研究報告(NUREG/CR-5884及-6174)內之PWR及BWR參考案例之除役預估費用，轉換為2010年幣值以利相互比較。PWR參考案例是以Trojan核電廠為評估對象，BWR參考案例則是以Columbia Generating Station為評估對象。
- 第3章：對各核電廠繳交給美國核管會之個別電廠除役費用(site-specific decommissioning cost)估算進行彙整分析，就費用大類進行比對，並盡最大努力確認主要的費用影響因子(又稱費用動因，cost driver)。
- 第4章：2011年美國已有4個核電廠完成除役工作，都是PWR。本章針對這4個電廠的實際除役費用相關訊息進行彙整分析，並分析比對各廠之異同。
- 第5章：本章針對第2至第4章的所有估算/實際費用進行進一步綜整比對。
- 第6章：根據第5章的比對結論，提出最小除役基金公式之修正建議。

配合本計畫既定目標：彙整國際經驗，提出適合我國管制單位參考之管制建議，將針對 PNNL 各章節與既定目標密切相關部分提出研析心得及相關管制建議。

3.2 PWR 及 BWR 參考案例之除役費用估算轉換 (PNNL 報告第 2 章)

本章除了將更新研究兩本報告(NUREG/CR-5884 及-6174)內之 PWR 及 BWR 參考案例之除役估算費用，轉換為 2010 年幣值以利相互比較外，也彙整更新研究執行後至 2010 年之除役技術的重大變化。PWR 參考案例是以 Trojan 核電廠為評估對象，BWR 參考案例則是以 Columbia Generating Station 為評估對象，當初所估算之除役費用均為 1993 年幣值。本章分別計算 2010 年與 1993 年之勞力指數(L)、能源指數(E)、低放廢棄物最終處置指數(B)之比值後，將參考電廠之除役費預估轉換為 2010 年幣值。計算結果顯示各比值為：L=1.67 (PWR 及 BWR 同一個值)；E=2.22 (PWR)或 2.30(BWR)；B=3.30(PWR)或 2.82(BWR)。

費用轉換的假設條件包括：1)超 C 類廢棄物(GTCC)併同用過燃料進行中期貯存及最終處置；2)用過燃料之中期貯存及後續最終處置費用不屬於(美國核管會定義之)除役費用範圍；3)無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作不屬於除役費用之範圍；4)當地方政府或利害關係人要求比核管會規定更嚴格之除污標準時，該部份工作費用不屬於除役費用之範圍；5)個別電廠除役時，B/C 類低放廢棄物均假設有最終處置場可用。(編註：此處所指「除役費用」為核管會最小基金公式所涵蓋之範圍，又稱執照終止費用，其定義詳如本報告第 3.3 節所述)

本章也彙整自參考案例更新版於 1995-96 年完成後至本報告編寫(2010 年)期間的美國電廠重大除役策略/技術變化，共包括下列 5 項：

- 1) 低放廢棄物處置場已有更多選擇(美國目前有4個，但各有其限制使用條件)，應可降低除役費用。
- 2) 主冷卻水系統除污技術有實質進展，但對時程/費用的影響細節受限於公開資訊的稀少，未能有明確結論。
- 3) 實質除役經驗顯示，採統包方式交給下包商 (Decommissioning

Operations Contractor, DOC) 執行除役工作時，整體除役費用應會上升。

- 4) 大型系統/設備拆除技術的發展有助於除役費用的降低。若大型物件之運送及處置場接收均為可行時，蒸汽產生器及反應器壓力槽可以考慮採取整體移除方式(one-piece removal)拆除，此舉將節省大量時間與費用，並降低二次性廢棄物產生量。
- 5) 除役經驗顯示，地下水與土壤污染之監測與整治費用可占整體除役費用的2%(只需監測)到9%(需要監測及後續除污整治)。

經過轉換後，PWR 參考電廠之停機後立即拆除(DECON)費用由 1993 年幣值的 1.33 億美金轉換為 2010 年幣值的 2.71 億美金；BWR 參考電廠之停機後立即拆除(DECON)費用由 1993 年的 1.64 億美金轉換為 2010 年的 3.33 億美金；兩者皆提升一倍左右。另對不屬於除役費用範圍的完全無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作，PNNL 當初就有估算，此次也一併進行轉換，PWR 參考電廠由 1993 年的 0.38 億美金轉換為 2010 年的 0.64 億美金；BWR 參考電廠由 1993 年的 0.48 億美金轉換為 2010 年的 0.80 億美金。按停機後立即拆除為我國法規規定之除役策略，本計畫將專注於此除役策略之相關資訊彙整。

3.3 個別電廠除役費用估算 (PNNL 報告第 3 章)

本章蒐集並彙整報告撰寫時 (2010 年)，各電廠已繳交至美國核管會之個別電廠除役費用估算(site-specific decommissioning cost estimate)，共計有 19 座核電廠(27 部機組)共 60 組估算資料。按每部機組之除役費用估算可能不只一組，例如 Oyster Creek 機組就繳交停機後立即拆除(DECON)、待用過燃料有最終處置場可去時再除役(delayed DECON)、先封存一段時間再除役(SAFSTOR)等三種估算方式。本計畫將專注於跟計畫目標相關之立即拆除案例相關資訊彙整。

美國核管會要求各電廠(機組)應依照 10 CFR 50.75(f)(3)規定，於預計永久停機前 5 年繳交初步除役費用估算(preliminary decommissioning cost estimate)；並於永久停機後兩年內依照 10 CFR 50.82(a)(8)(iii)規定繳交個別電廠除役費用估算。在 19 座核電廠估算中，有 17 座是委託 TLG 公司編製，僅有兩座是由 Energy Solution (ES)編製。TLG 的編製方式是以除役工作分類編列，而 ES 則是依照除役工作時間序編列，所以兩種方式截然不同而無法進行相互比對。由於 TLG 方法占絕對多數，因此本章係以 TLG 方法編製之估算為主進行比對。於扣除 ES 方法編製之 5 組估算數據以及 13 組資料不全之 TLG 方法編製估算後，共對 42 組估算資料進行細部比對。在 42 組估算資料中，立即拆除(DECON)共 17 組，待用過燃料有最終處置場可去時再除役(delayed DECON) 占 9 組，先封存一段時間再除役(SAFSTOR)則有 16 組。本計畫將專注於適用我國之立即拆除費用估算數據之彙整上，其中有 6 組為 BWR，11 組為 PWR。

美國電廠繳交核管會之個別電廠除役費用估算涵蓋內容，一般而言均超出核管會要求之範圍，包括三大項：1)依照核管會除役基金相關規定編列之費用，又稱執照終止(license termination)費用，2)用過燃料處理費用(主要是中期貯存)，3)無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作費用，簡稱廠區復原費用。用過燃料處理費用編列雖屬核管會管制範圍，但

實際執行則屬美國能源部職權，故此費用不列入核管會定義之除役費用內。而廠區復原費用則不是核管會職權，所以也不屬於核管會所定義之除役費用。但核電廠基於營運管理之整體考量，通常會將第 2)及 3)項費用也納入繳交核管會之個別電廠除役費用估算內。本章原則上著重在第 1)項費用之比對分析，但也會將其他兩項納入評估。

當執照終止費用資料齊全時，應可再細分為 3 大類及 15 小類，這 3 大類費用將會進行比對評估，以擷取有用訊息。每一大類所涵蓋之小類分別是：

- 第1大類直接費用：涵蓋除污、拆除、(廢棄物)包裝、(廢棄物)運送、廢棄物最終處置、廢棄物處置之前處理、燃料池獨立支援系統建立(以跟除役工作隔離)、除役設備採購等8小類。
- 第2大類管理費用：涵蓋除役工作管理、用過燃料管理(僅包括自爐心移出及燃料池維護管理)、廠區管理等3小類。
- 第3大類其他費用：涵蓋保險及管制規費、特性分析及申請執照、能源、稅款等4小類。

由於取得之個別電廠除役費用估算的引用幣值年代分布甚廣(1996-2010 年)，因此需要將所有估算都轉換到 2010 年的幣值以能相互比對。3.2 節已說明如何將參考 PWR 及 BWR 案例由 1993 年幣值轉換到 2010 年幣值，即計算 2010 年與 1993 年之勞力指數(L)、能源指數(E)、低放廢棄物最終處置指數(B)之比值。為能快速轉換大量數據，PNNL 直接引用參考電廠之比值，並假設所有比值在 1993 年到 2010 年間每年均等比成長；例如 2010 年與 1993 之 L 比值為 1.67，所以某電廠費用估算若原為 2004 年幣值，其勞力相關費用轉換為 2010 年幣值時之 L 比值應為 1.67 的 6/17 次方；E 及 B 的比值也可以依照同樣方式推算而得。PNNL 聲明此種快速換算方式並未能完全反映實際狀況，但在缺乏費用細目數據下，只有採取這種權宜之計以進行轉換工作。也因此 PNNL 報告第五章進行執照終止費用綜合比對時，個別電廠除役費用估算是直接採電廠繳交當年數據，以相對值(與最小基金公

式計算值之比值)，而非以相關費用絕對值進行比對。

由於 60 組個別電廠除役費用估算數據中有某些因缺乏細部資訊而無法跟其他數據進行比對。於剔除不適用數據後，共有 42 組估算資料可供比對，其中立即拆除(DECON)共 17 組，待用過燃料有最終處置場可去時再除役(delayed DECON)有 9 組，先封存一段時間再除役(SAFSTOR)則有 16 組。在立即拆除之費用估算數據中，有 6 組為 BWR，11 組為 PWR。本計畫分別就 BWR 及 PWR 電廠，彙整每組數據之主要內容，包括名稱、功率、執照終止費用(即依照核管會除役基金相關規定編列之費用)、廠區復原費用、以及用過燃料處理費用，詳如表 3.1 及表 3.2。

按廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原費用，此費用於我國為除役費用一部分，但於美國則因非屬核管會之管制範圍故未納入執照終止費用內。這點是我國與美國在除役費用涵蓋範圍內第一項主要差異，未來本計畫也會談到第二項主要差異：低放廢棄物之最終處置(及運送)費用涵蓋在美國電廠除役費用估算內，而我國則因尚未有最終處置場等緣故，所以未納入除役費用估算內。

由表 3.1 數據，可觀察到對永久停機後立即拆除之 6 個美國 BWR 電廠，廠區復原費用約為執照終止費用的 6.0 到 11.3%(平均值為 8.3%)；而對美國 PWR 電廠而言(表 3.2)，則為 5.4 到 17.1%(平均值為 11.5%)。在比較我國與美國除役費用時，此項差異隨除役進展，未來可進一步瞭解。

表 3.1 立即拆除(DECON)BWR 電廠之執照終止/廠區復原/用過燃料營運費用
(2010 年幣值)

電廠(機組)/功率 (MWe)	執照終止 費用 (百萬美金)	廠區復原 費用 (百萬美金)	用過燃料處 理費用 (百萬美金)	廠區復原費用 與執照終止費 用之比值
Monticello/572	531	32	220	0.060
Vermont Yankee/620 (四個分析案例)	540	45-50	160-434	0.083-0.092 (取 0.083 計算)
Cooper/758 (兩個分析案例)	543	37	194-246	0.068
LaSalle 1/1,118	566	50	109	0.088
LaSalle 2/1,120	593	67	116	0.113
Oyster Creek/619	616	52	175	0.084
平均值				0.083

註：

1. 依照美國核管會除役基金相關規定編列之費用，通稱為執照終止(license termination)費用。
2. 廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原費用，此費用於我國定義為除役費用一部分。
3. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 3.5.

表 3.2 立即拆除(DECON)PWR 電廠之執照終止/廠區復原/用過燃料營運費用
(2010 年幣值)

電廠(機組)/功率 (MWe)	執照終止 費用 (百萬美金)	廠區復原 費用 (百萬美金)	用過燃料 處理費用 (百萬美金)	廠區復原費用 與執照終止費 用之比值
Braidwood 1/1,178	458	68	123	0.148
Byron 1/1,164	464	68	112	0.146
Prairie Island 1/551	522	34	213	0.065
Byron 2/1,136	539	92	122	0.171
TMI 1/819	540	78	169	0.144
Braidwood 2/1,152	547	91	122	0.166
Prairie Island 2/545	575	55	217	0.096
Salem 1/1,174	647	41	86	0.063
Salem 2/1,130	718	68	68	0.095
Diablo 1/1,122	719	39	未提供	0.054
Diablo 2/1,118	746	88	未提供	0.118
平均值				0.115

註：

1. 依照美國核管會除役基金相關規定編列之費用，通稱為執照終止(license termination)費用。
2. 廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原費用，此費用於我國定義為除役費用一部分。
3. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 3.5.

當針對執照終止費用進行比對分析時，就本計畫所關注之立即拆除案例而言，比對結論為：1) BWR 立即拆除之執照終止費用估算跟機組功率並沒有線性關係；2) PWR 立即拆除之執照終止費用跟機組功率似有線性關係，但不明顯；上述結論也可由表 3.1 及表 3.2 觀察到。由於單獨對執照終止總費用進行比對時，似乎無法得到較明確之結論，因此繼續再將執照終止費用往下細分比對。前曾提到當執照終止費用資料齊全時，應可再細分為 3 大類及 15 小類，以擷取有用訊息。每一大類所涵蓋之小類分別是：

- 第1大類直接費用：涵蓋除污、拆除、(廢棄物)包裝、(廢棄物)運送、廢棄物最終處置、廢棄物處置之前處理、燃料池獨立系統建立(以跟除役

活動隔離)、除役設備等8小類。

- 第2大類管理費用：涵蓋除役工作管理、用過燃料管理(僅包括自爐心移出及燃料池維護管理)、廠區管理等3小類。
- 第3大類其他費用：涵蓋保險及管制規費、特性分析及申請執照、能源、稅款等4小類。

表 3.3 將 6 組立即拆除 BWR 之執照終止費用估算再細分為三大類，雖然數據量(僅 6 組)尚未達到可取得明確結論之程度，但仍可看出大致趨勢為：1)直接費用與管理費用大類占執照終止費用之比率大致相當(6 組數據平均值分別是 49%及 43%)，2)其他費用所占比例小於 10%(平均值為 8%)。類似的結論也可在立即拆除 PWR 數據中(表 3.4)觀察到：1)直接費用與管理費用大類占執照終止費用之比率大致相當(六組數據平均值分別是 44%及 49%)，2)其他費用所占比例小於 10%(平均值為 7%)。

為了能擷取更多訊息，PNNL 將第一個大類「直接費用」再細分為三個中類，第一個中類稱為「除污與移除」，涵蓋除污、拆除、(廢棄物)包裝、(廢棄物)運送等四個小類；第二個中類稱為「廢棄物處理與處置」，涵蓋廢棄物最終處置及廢棄物處置之前處理兩個小類；第三個中類稱為「其他直接費用」，涵蓋燃料池獨立系統建立(以跟除役活動隔離)及除役設備採購兩個小類。表 3.5 彙整立即拆除 BWR 之直接費用再細分為三個中類之相關統計資訊，而立即拆除 PWR 之細部資訊則呈現於表 3.6 中。

表 3.5 所列之(直接費用中的)廢棄物處理與處置費用涵蓋兩個項目(小類)：廢棄物最終處置及廢棄物處置之前處理費用。我國目前核電廠除役時廢棄物將先暫存廠內，未來待最終處置場啟用時再移至該處，故廢棄物最終處置(及運送)費用並未涵蓋在我國除役費用估算內，未來在比較我國與美國除役費用時，此項差異值得注意處理，以提升比對的合理性。另外一項主要差異為廠區復原費用，此費用於我國為除役費用一部分，但於美國則因非屬核管會之管轄範圍故未納入執照終止費用內，廠區復原費用差異之相關統計

數據詳如表 3.1 及表 3.2 所示。

回過頭來看管理費用，由表 3.3 及表 3.4 可觀察到其占執照終止費用之比例平均值分別是 43% (立即拆除 BWR，表 3.3)及 49% (立即拆除 PWR，表 3.4)。PNNL 報告敘述管理費用中約有 70%是廠內及下包商員工之人事費用，但未提供明確之資訊來源。根據表 3.3 及表 3.4 所顯示之數據，立即拆除電廠之管理費用與電廠功率並沒有很明顯的線性關係，但仍呈現隨機組功率大小上升的趨勢。

至於其他費用部分，平均約占執照終止費用之 8% (立即拆除 BWR，表 3.3)或 7% (立即拆除 PWR，表 3.4)。PNNL 報告認為此項所涵蓋項目(保險及管制規費、特性分析及申請執照、能源、稅款)，應該跟電廠(機組)功率大小及機組型式無關。

表 3.3 立即拆除(DECON)BWR 電廠之執照終止費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)

電廠(機組)/功率 (MWe)	直接費用(占 執照終止費 用百分比)	管理費用(占 執照終止費 用百分比)	其他費用(占 執照終止費 用百分比)	總和
Monticello/572	243 (46%)	242 (45%)	46 (9%)	531
Vermont Yankee/620	253 (46%)	258 (47%)	30 (7%)	540
Cooper/758	246 (47%)	246 (48%)	51 (6%)	543
LaSalle 1/1,118	274 (48%)	243 (43%)	48 (9%)	566
LaSalle 2/1,120	298 (50%)	253 (43%)	43 (7%)	593
Oyster Creek/619	355 (58%)	218 (35%)	43 (7%)	616
平均值	278 (49%)	243 (43%)	44 (8%)	565

註：

1. 由於數字進位緣故，三項費用加總後可能會與總和差 1；三項費用比率加總可能等於 99 或 101%。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Figure 3.2 及 3.3；Table 3.6 及 3.7.

表 3.4 立即拆除(DECON) PWR 電廠之執照終止費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)

電廠(機組)/功率 (MWe)	直接費用(占 執照終止費 用百分比)	管理費用(占 執照終止費 用百分比)	其他費用(占 執照終止費 用百分比)	總和
Braidwood 1/1,178	204 (45%)	209 (46%)	45 (10%)	458
Byron 1/1,164	200 (43%)	216 (47%)	47 (10%)	464
Prairie Island 1/551	184 (35%)	290 (56%)	48 (9%)	522
Byron 2/1,136	244 (45%)	251 (47%)	44 (8%)	539
TMI 1/819	249 (46%)	255 (47%)	36 (7%)	540
Braidwood 2/1,152	251 (46%)	252 (46%)	44 (8%)	547
Prairie Island 2/545	212 (37%)	313 (54%)	50 (9%)	575
Salem 1/1,174	312 (48%)	297 (46%)	37 (6%)	647
Salem 2/1,130	339 (47%)	347 (48%)	33 (5%)	718
Diablo 1/1,122	327 (45%)	367 (51%)	26 (4%)	719
Diablo 2/1,118	353 (47%)	370 (50%)	23 (3%)	746
平均值	261 (44%)	288 (49%)	39 (7%)	589

註：

1. 由於數字進位緣故，三項費用加總後可能會與總和差 1；三項費用比率加總可能等於 99 或 101%。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Figure 3.2 及 3.3；Table 3.6 及 3.7.

表 3.5 立即拆除(DECON) BWR 電廠之直接費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)

電廠(機組)/功率 (MWe)	除污與移除 費用(占直接 費用百分比)	廢棄物處理 與處置費用 (占直接費用 百分比)	其他直接費 用(占直接費 用百分比)	總和
Monticello/572	112 (46%)	115 (47%)	16 (7%)	243
Vermont Yankee/620	125 (50%)	125 (50%)	2 (1%)	253
Cooper/758	110 (45%)	122 (49%)	14 (6%)	246
LaSalle 1/1,118	162 (59%)	96 (35%)	16 (6%)	274
LaSalle 2/1,120	186 (63%)	99 (33%)	12 (4%)	298
Oyster Creek/619	156 (58%)	184 (52%)	15 (4%)	355
平均值	142 (51.1%)	123 (44.4%)	13 (4.5%)	278

註：

1. 由於數字進位緣故，三項費用加總後可能會與總和差 1；三項費用比率加總可能等於 99 或 101%。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Figure 3.4 及 3.5；Table 3.8 及 3.9。

表 3.6 立即拆除(DECON) PWR 電廠之直接費用再細分(2010 年幣值，百萬美金)

電廠(機組)/功率 (MWe)	除污與移除 費用(占直接 費用百分比)	廢棄物處理與 處置費用(占直 接費用百分比)	其他直接費 用(占直接費 用百分比)	總和
Braidwood 1/1,178	132 (65%)	68 (33%)	4 (2%)	204
Byron 1/1,164	128 (64%)	68 (34%)	4 (2%)	200
Prairie Island 1/551	106 (58%)	68 (37%)	10 (5%)	184
Byron 2/1,136	162 (66%)	66 (27%)	16 (7%)	244
TMI 1/819	142 (57%)	92 (37%)	15 (6%)	249
Braidwood 2/1,152	169 (67%)	66 (26%)	16 (6%)	251
Prairie Island 2/545	130 (61%)	72 (34%)	10 (5%)	212
Salem 1/1,174	153 (49%)	140 (45%)	19 (6%)	312
Salem 2/1,130	181 (53%)	143 (42%)	15 (5%)	339
Diablo 1/1,122	146 (45%)	180 (55%)	0 (0%)	327
Diablo 2/1,118	173 (49%)	181 (51%)	0 (0%)	353
平均值	147 (56.4%)	104 (39.8%)	10 (3.8%)	261

註：

1. 由於數字進位緣故，三項費用加總後可能會與總和差 1；三項費用比率加總可能等於 99 或 101%。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Figure 3.4 及 3.5；Table 3.8 及 3.9。

PNNL 最後提出以下幾點比對綜合結論：

- 廢棄物處理與處置費用正比於除役廢棄物數量(屬合理邏輯推論，但未提供細部佐證資料)。
- 占管理費用約70%的人事費用，基本上跟機組功率成正比，但不是明顯的線性關係(也未提供細部佐證資料)。
- 其他費用(保險及管制規費、特性分析及申請執照、能源、稅款)跟機組功率無關。

3.4 四座已完成除役電廠之實際費用回顧（PNNL 報告第 4 章）

本節針對 2010 年已完成除役工作之 4 個美國核電廠之實際費用進行回顧。這 4 座電廠為 Haddam Neck Plant (HNP)，Maine Yankee (MY)，Trojan Nuclear Plant (TNP)，以及 Rancho Seco Generating Plant (RSGP)，均為單一 PWR 機組。本節分別依序說明各電廠跟除役費用相關的主要內容，並分析主要除役費用大類之配置。

Haddam Neck Plant (HNP)

- 機組：西屋四迴路PWR，額定功率590 MWe，1968/1/1商轉，1996/12/4永久停機。
- 除役時程：1996/12/4永久停機，規劃採立即拆除策略(DECON)；1997/8/22繳交停機後除役活動報告(Post Shutdown Decommissioning Activity Report, PSDAR)，1998/6/30核管會核准其進入除役狀態；1998/7開始進行一次側化學除污及相關設備拆除工作；1999/4/5統包除役工作給下包商(Decommissioning Operations Contractor, DOC)，2003/7因故收回自行管理；1999-2004年陸續完成蒸汽產生器、反應爐冷卻水泵、調壓槽、反應器壓力槽內部組件、以及反應器壓力槽本體等大項設備拆解移除工作；2004/4-2005/3所有用過核子燃料及超C類廢棄物(部分反應器壓力槽內部組件)均移至廠內乾式貯存場；2007/10/11繳交最終狀態偵檢(Final Status Survey, FSS)報告，2007/11/16核管會終止其執照，但仍保留乾式貯存場之部分。實際除役時程較PSDAR規劃時程延遲約3年，主要原因為：1)原規劃用過燃料可直接由燃料池運至最終處置場，後因形勢變更改為於廠內建立乾式貯存場，2)除役工作原統包給DOC，4年後收回自行統籌管理，3) 地方政府對土壤及地下水復原要求與核管會相關規範不完全一致，4)反應器壓力槽內部組件切割難度較預期為高。
- 廠區外釋策略：分7階段逐步外釋為非限制性用途，原占地212.5公頃廠區目前僅保留1.86公頃之乾式貯存場，其餘皆已外釋。
- 除役廢棄物：根據HNP內部統計，除役工作共產生A類廢棄物235,031立

方米、B類144立方米、C類581立方米。但根據美國能源部資訊顯示管理系統(Manifest Information Management System, MIMS)統計之廢棄物最終處置場接收數量顯示，直接由HNP送到處置場之廢棄物數量分別是A類31,625、B類61、C類636立方米。前述相關數據詳如表3.7，比對結果顯示：1)有將近205,000(235,031- 31,625)立方米之A類廢棄物是由HNP送到廢棄物處理公司進行除污減量處理，但這些送到廠外處理的廢棄物最後有多少還是屬於放射性廢棄物，則因缺乏資訊而不得而知；2)MIMS統計之C類數量較HNP內部數據為高，兩個數據其中一個顯然有錯誤，但缺乏佐證資料去確認那一個有誤。

- 估算與實際執照終止費用比較：表3.8列出HNP在1997年提出之停機後除役活動報告(PSDAR)時所附之除役執照終止費用估算為337.4百萬美金(1996幣值)，表3.8同時列出1997-2007年執行除役之實際費用則為720.5百萬美金(以實際支出當年幣值計算)。依照PNNL報告分析數據，1993-2000年間平均每年之勞務相關支出年度物價上漲(通膨)率(Annual Escalation Factor, AEF)約為3%，廢棄物處理/處置相關支出年度物價上漲率約為5%，能源相關支出年度物價上漲率約為7%。若合理簡化假設所有費用之年度物價上漲率皆為5%，則當其他因素不變時，實際執照終止費用(以1997-2007年之中間年2002年為計算基準)應為估算值的 $(1.05)^6$ 的6次方(2002-1996)= 1.34倍。但實際費用為估算值的2.13倍，多出的79%，相當於約270百萬美金的差異。在統包商未能提供1999-2003年費用支出細目的情況下，只能根據有限的訊息推斷可能是由下列因素造成：1)先統包再收回自行管理的兩次交接，對時程及費用皆會造成衝擊；2)因應形勢改變，於除役開始後再決定建立廠內乾式貯存設施，是造成較原規劃時程延遲3年完成的主因，延遲必然造成費用上升；3)對地方政府的額外承諾也對費用造成衝擊。
- 實際執照終止費用與核管會最小除役基金之比較：表3.8也將實際執照終止費用再換算為2010年的幣值，以方便跟核管會最小除役基金比較；

PNNL提醒本章採用換算至2010年幣值之方式並未能完全反映實際狀況，但在缺乏費用細目數據下，只有採取這種權宜之計以進行比對工作，也因此PNNL報告第五章(本報告3.5節)進行執照終止費用綜合比對時，4座電廠實際除役費用是直接採當年數據，且以相對值(與最小除役基金公式計算值之比值)而非以相關費用絕對值進行比對。依照前所提及之(核管會)最小除役基金公式計算，HNP之除役基金應為414百萬美金(2010年幣值)，遠較實際執照終止費用918百萬美金(2010年幣值)為低。經分析比對，發現公式嚴重低估除污及拆除費用(公式計算值81相對實際值381百萬美金)、高估廢棄物處理/處置費用(計算值278相對實際值121百萬美金)、嚴重低估計畫管理費用(計算值50相對實際值376百萬美金)。公式低估部分經分析發現，主要因為公式內建之各項除役工作之人年需求計算值明顯較實際需要為低，因此對需求大量人力的計畫管理及實質除污/拆除工作產生了嚴重低估。而在高估廢棄物處理/處置費用的部分，PNNL分析認為公式是照各個廢棄物處理場之公告單價計算費用，但實際運作時，以除役廢棄物之大宗數量，處置場通常都會給予折扣價。此種價差有時可達5倍之多，典型的例子為大量之低污染土壤。

表 3.7 Haddam Neck Plant (HNP)除役廢棄物數量統計

廢棄物類別	HNP 內部資料(立方米/總活度 Ci)	MIMS 之最終處置場接收數據(單位同左)	備註
A 類	235,031/802	31,625/289	約有 205,000 立方米送至廢棄物處理公司進行除污減量處理
B 類	144/3,498	61/3,468	
C 類	581/30,941	636/31,811	其中一項資訊有誤，但無法確認為何者

註：

1. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.3 及 4.5。

表 3.8 Haddam Neck Plant (HNP)估算/實際除役費用(百萬美金)

除役費用	PSDAR 預估(1996 幣值)	實際除役費用(1997-2007 年當之幣值加總)	實際除役費用(換算為 2010 年幣值)
執照終止費用	337.4	720.5	918.5
用過燃料暫貯費用	82.3	115.2	144.6
(非輻射相關)廠區復原費用	7.0	43.4	51.8
總計	426.7	879.1	1114.9

註：

1. 執照終止費用為依照美國核管會除役基金相關規定編列之費用；廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作費用，此項費用與用過燃料暫貯費用均不屬核管會所定義之除役費用，但核電廠基於整體營運管理之考量，通常會將這兩項(實質的除役)費用也納入繳交核管會之個別電廠除役費用估算內。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.7、4.9 及 4.10。

Maine Yankee (MY)

- 機組：燃燒工程(CE)三迴路PWR，額定功率931 MWe，1972/12/28商轉，1996/12/6永久停機。
- 除役時程：1996/12/6永久停機，規劃採立即拆除策略(DECON)；1997/8/27繳交停機後除役活動報告(Post Shutdown Decommissioning Activity Report, PSDAR)；1998/8/4統包除役工作給下包商(Decommissioning Operations Contractor, DOC)，2000/7因DOC宣告破產而收回自行管理；1999-2003年陸續完成蒸汽產生器、反應爐冷卻水泵、調壓槽、反應器壓力槽內部組件、以及反應器壓力槽本體之大項設備拆解移除工作；2004/2所有用過核子燃料及超C類廢棄物(部分反應器壓力槽內部組件)均移至廠內乾式貯存場；2005/9/30核管會終止其執照，但仍保留乾式貯存場之部分。雖然地方政府對土地及地下水復原要求較核管會相關規範嚴苛，但實際除役時程仍符合停機後除役活動報告(PSDAR)規劃時程。
- 廠區外釋策略：分4階段逐步外釋為非限制性用途，原占地820公頃廠區目前僅保留8.5公頃之乾式貯存場，其餘皆已外釋。
- 除役廢棄物：根據MY內部統計，除役工作共產生A類廢棄物103,479立方米、B類20立方米、C類9立方米；但由於內部資料缺了1998-2005年間的1998、2000、2001、2003年的資訊，PNNL研判上述數據明顯低估。PNNL由其他管道取得之美國電力研究有限公司(Electric Power Research Institute, EPRI)資料顯示MY電廠除役廢棄物總量應為140,000立方米，但仍缺乏各類廢棄物之詳細數量及總活度。而根據美國能源部資訊顯示管理系統(Manifest Information Management System, MIMS)統計之廢棄物最終處置場接收數量顯示，直接由MY送到處置場之廢棄物數量分別是A類96,961、B類75、C類334立方米。前述相關數據詳如表3.9，比對結果顯示：1)有將近42,630(140,000- 97,370)立方米之(A類)廢棄物是MY送到廢棄物處理公司進行除污減量處理，但這些送到廠外處理的廢棄物最後有多少還是屬於放射性廢棄物，則因缺乏資訊而無法

得知；2)MY在1997年繳交之PSDAR估算除役廢棄物數量為5,920立方米，實際數量為此估算數量兩倍左右。

- 估算與實際執照終止費用比較：表3.10列出MY在1997年提出之PSDAR時所附之除役執照終止費用估算為274.9百萬美金(1997幣值)，表3.10同時列出1997-2005年執行除役之實際費用則為384.6百萬美金(以實際支出當年幣值計算)。依照PNNL報告分析數據，1993-2000年間平均每年之勞務相關支出年度物價上漲(通膨)率(Annual Escalation Factor, AEF)約為3%，廢棄物處理/處置相關支出年度物價上漲率約為5%，能源相關支出年度物價上漲率約為7%。若合理簡化假設所有費用之年度物價上漲率皆為5%，則當所有其他因素不變時，實際執照終止費用(以1997-2005年之中間年2001年為計算基準)應為估算值的(1.05)的4次方(2001-1997)= 1.22倍。實際費用為估算值的1.40倍，扣除通膨因素後實質差異為0.18倍(相當於1997年幣值的49.4百萬美金)，也就是說MY在執照終止費用的控管上做的相當不錯。但PNNL進一步研析發現，MY曾因DOC宣告破產解約而取得DOC賠償約69百萬美金，所以實質上MY在執照終止費用上應超支約100百萬美金左右，此超支推斷可能是由下列因素造成：1)先統包再收回自行管理的兩次交接，對費用會造成部分衝擊；2)對地方政府的(超出核管會標準)額外承諾也會對費用造成衝擊，典型的例子為承諾於取得核管會執照終止許可後仍對地下水進行60個月的監測。
- 實際執照終止費用與核管會最小除役基金之比較：表3.10也將實際執照終止費用再換算為2010年的幣值，以方便跟核管會最小除役基金比較。換算過程中將DOC解約賠償金額(69百萬美金)納入非直接加總之複雜計算後，得到2010年幣值之執照終止費用為575百萬美金。依照前所提之(核管會)最小除役基金公式計算，MY之除役基金應為449百萬美金(2010年幣值)，較實際執照終止費用575百萬美金(2010年幣值)為低。經分析比對，發現公式低估除污及拆除費用(公式計算值88相對實際值170

百萬美金)、高估廢棄物處理/處置費用(計算值302相對實際值122百萬美金)、低估計畫管理費用(計算值54相對實際值228百萬美金)。公式低估部分經分析主要因為公式內建之各項除役工作之人年需求計算值明顯較實際需要為低，因此對需求大量人力的計畫管理及實質除污/拆除工作產生了低估。而在高估廢棄物處理/處置費用的部分，PNNL分析認為公式是照各個廢棄物處理場之公告單價計算費用，但實際運作時，以除役廢棄物之大宗數量，處置場通常都會給予折扣價，典型的例子為大量之低污染土壤。

表 3.9 Maine Yankee (MY)除役廢棄物數量統計

廢棄物類別	MY 內部資料(立方米/總活度 Ci) (註 1)	MIMS 之最終處置場接收數據 (單位同左)	備註
A 類	103,479/298	96,961/1,420	MY 內部資料不全而低估
B 類	20/578	75/1,586	同上
C 類	9/131	334/149,483	同上
小計	140,000 立方米	97,370/152,489	

註：

1. MY 內部資料缺 1998、2000、2001、2003 年資訊；內部資料小計之總體積採 EPRI 資料，但仍缺活度資料。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.15 及 4.17。

表 3.10 Maine Yankee (MY)估算/實際除役費用(百萬美金)

除役費用	PSDAR 預估 (1997 幣值)	實際除役費用(1997- 2005 年當年之幣值 加總)	實際除役費用(換算 為 2010 年幣值)
執照終止費用	274.9	384.6/424.1(註 3)	521.2/575(註 3)
用過燃料暫貯 費用	53.4	106.4	148.4
(非輻射相關) 廠區復原費用	49.2	17.9	22.4
總計	377.6	508.9/548.4(註 3)	692.0

註：

1. 執照終止費用為依照美國核管會除役基金相關規定編列之費用；廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作費用，此項費用與用過燃料暫貯費用均不屬核管會所定義之除役費用，但核電廠基於整體營運管理之考量，通常會將這兩項(實質的除役)費用也納入繳交核管會之個別電廠除役費用估算內。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.19、4.20 及 4.21。
3. 將DOC解約後賠償金額(分年分次給付共69百萬美金)納入非直接加總之複雜計算後，實際執照終止費用為424.1百萬美金(當年幣值)，換算為2010年幣值之執照終止費用為575百萬美金。

Trojan Nuclear Plant (TNP)

- 機組：西屋四迴路PWR，額定功率1,130 MWe，1976/5商轉，1992/11/9永久停機。
- 除役時程：1992/11/9永久停機，規劃採立即拆除策略(DECON)；1993/12/7繳交燃料移除狀態安全分析報告(Safety Analysis Report for Defueled Condition，相當於後來的停機後除役活動報告(PSDAR))，1995/3/31核管會同意其進入除役狀態；1995-1999年陸續完成蒸汽產生器、反應爐冷卻水泵、調壓槽、以及反應器壓力槽本體之大項設備拆解移除工作，其中蒸汽產生器、調壓槽、以及反應器壓力槽本體都是整體移除(one piece removal)，而反應器壓力槽內部組件也未進行拆解，而是隨同壓力槽槽體一起運送至最終處置場；2003/3所有用過核子燃料均移至廠內乾式貯存場；2005/5/23核管會終止其執照，但仍保留乾式貯存場之部分。實際除役時程較原規劃時程延遲3年，主要原因是乾式貯存場興建啟用時程延遲。
- 廠區外釋策略：外釋為非限制性用途，僅保留乾式貯存場，其餘皆已外釋。
- 除役廢棄物：根據TNP內部統計，除役工作共產生廢棄物12,376立方米(無A/B/C類個別體積與活度資訊)。而根據美國能源部資訊顯示管理系統(Manifest Information Management System, MIMS)統計之廢棄物最終處置場接收數量顯示，直接由TNP送到處置場之廢棄物數量分別是A類12,202、B類35、C類283立方米，總計體積為12,520立方米，與TNP內部統計資料吻合，因此研判所有TNP產生之除役廢棄物都直接送到處置場掩埋，應未如HNP及MY一樣將一部分送至外部廠家進行除污減量。前述相關數據詳如表3.11，比對結果顯示：1)TNP內部除役計畫估算廢棄物總量為8,850立方米，較實際產生量短估約30%；2)若以核管會最小除役基金之內建公式估算，廢棄物數量應為18,328立方米，較實際廢棄物高估約46%。
- 估算與實際執照終止費用比較：表3.12列出TNP在1993年提出之PSDAR

時所附之除役執照終止費用估算為216.7百萬美金(已換算為1997年幣值)，表3.12同時列出1993-2005年執行除役之實際費用則為207.6百萬美金(以實際支出當年幣值計算)。依照PNNL報告分析數據，1993-2000年間平均每年之勞務相關支出年度物價上漲(通膨)率(Annual Escalation Factor, AEF)約為3%，廢棄物處理/處置相關支出年度物價上漲率約為5%，能源相關支出年度物價上漲率約為7%。若合理簡化假設所有費用之年度物價上漲率皆為5%，則當所有其他因素不變時，實際執照終止費用(以1993-2005年之中間年1999年為計算基準)應為估算值的 $(1.05)^2$ 次方 $(1999-1997)= 1.1$ 倍。實際費用為估算值的0.96倍，扣除通膨因素後實質差異為-0.14倍，也就是說TNP在執照終止的花費比估算值還少了14%! PNNL報告並未就此差異進一步說明其可能的理由。

- 實際執照終止費用與核管會最小除役基金之比較：表3.12也將實際執照終止費用再換算為2010年的幣值323.8百萬美金。依照前所提之(核管會)最小除役基金公式計算，TNP之最小除役基金應為371.1百萬美金(2010年幣值)，略高出實際執照終止費用323.8百萬美金(2010年幣值)。經分析比對，發現除污及拆除費用之公式計算值(87.3百萬美金)與實際值90.3百萬美金相當、公式高估廢棄物處理/處置費用(計算值222.8相對實際值60.2百萬美金)、公式低估計畫管理費用(計算值61.0相對實際值161.5百萬美金)。公式低估部分經分析主要因為公式內建之各項除役工作之人年需求計算值明顯較實際需要為低，因此對需求大量人力的計畫管理及實質除污/拆除工作產生了低估。而在高估廢棄物處理/處置費用的部分，PNNL分析認為公式是照各個廢棄物處理場之公告單價計算費用，但接收TNP廢棄物之美國生態處置設施有所謂的「年度收入上限(annual revenue constraint)」，因此在實際運作時，此部分費用較計算值為低。

表 3.11 Trojan Nuclear Plant (TNP)除役廢棄物數量統計

廢棄物類別	TNP 內部資料(立方米/總活度 Ci)	MIMS 之最終處置場接收數據(單位同左)	備註
A 類	無資料	12,202/339	HNP 內部資料僅有總數，未分類
B 類	無資料	35/1,224	同上
C 類	無資料	283/1,544,877	同上
小計	13,376/無資料	12,520/1,546,460	

註：

1. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.25。

表 3.12 Trojan Nuclear Plant (TNP)估算/實際除役費用(百萬美金)

除役費用	PSDAR 預估 (1997 幣值)	實際除役費用 (1993-2005 年當年 之幣值加總)	實際除役費用(換 算為 2010 年幣值)
執照終止費用	216.7	207.6	323.8
用過燃料暫貯 費用	112.5	無資料	無法換算
(非輻射相關) 廠區復原費用	46.4	無資料	無法換算
總計	383.6		

註：

1. 執照終止費用為依照美國核管會除役基金相關規定編列之費用；廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作費用，此項費用與用過燃料暫貯費用均不屬核管會所定義之除役費用，但核電廠基於整體營運管理之考量，通常會將這兩項(實質的除役)費用也納入繳交核管會之個別電廠除役費用估算內。
2. 資訊來源：PNNL報告之Table 4.27、4.29、4.30及4.31。

Rancho Seco Generating Plant (RSGP)

- 機組：Babcock & Wilcox (B&W) PWR，額定功率913 MWe，1975/4商轉，1989/6永久停機。由於全功率運轉總時間略少於6年，累積之除役基金有所不足，原規劃採安全貯存後再除役策略(SAFSTOR)。後來由於安全貯存時期人事及維護費用偏高，於1997年起改採「逐步試行立即拆除(incremental decommissioning)」策略，試行成功後於1999年改採立即拆除(DECON)策略。由於中途改變策略，故B/C類廢棄物於除役時未能找到適當處置場掩埋，因此建立廠內中期暫貯建物(Interim Onsite Storage Building, IOSB)貯放B/C類廢棄物。
- 除役時程：1992/11/9永久停機，1997年起採立即拆除方式(DECON)策略；2001/4-2002/8將用過燃料自燃料池移至廠內乾式貯存場；2002-2006年陸續完成蒸汽產生器、反應爐冷卻水泵、調壓槽、以及反應器壓力槽本體之大項設備切割拆解移除工作，其中部分切割後之反應器壓力槽內部組件為超C類(GTCC)廢棄物，單獨裝在一個貯存筒連同用過燃料放在乾式貯存場；2008/12完成所有實質除役工作，2009/9/25核管會終止其執照，但仍保留乾式貯存場及貯放B/C類廢棄物之IOSB部分。
- 廠區外釋策略：外釋為非限制性用途，僅保留乾式貯存場及貯放B/C類廢棄物之IOSB部分，其餘皆已外釋。
- 除役廢棄物：根據RSGP內部統計，除役工作共產生A類廢棄物17,936立方米，B及C類共93立方米暫存於廠內IOSB內。而根據美國能源部資訊顯示管理系統(Manifest Information Management System, MIMS)統計之廢棄物最終處置場接收數量顯示，直接由RSGP送到處置場之廢棄物數量僅有A類19,888立方米，較RSGP內部統計數量為高，研判RSGP統計數應該有錯誤或缺漏。前述相關數據詳如表3.13，比對結果顯示：1) RSGP內部除役計畫估算廢棄物總量為5,630立方米，較實際產生量(能源部MIMS資料)短估約72%；2)若以核管會最小除役基金內建公式估算，廢棄物數量為18,328立方米，與實際廢棄物數量相當。
- 估算與實際執照終止費用比較：表3.14列出RSGP在2000年提出之停機

後除役活動報告(PSDAR)時所附之除役執照終止加用過燃料乾貯總費用估算為433.4百萬美金(1999幣值)，但並未說明兩大項費用各為多少。至於1997-2009年執行除役之實際費用跟PSDAR提供之費用類似，僅有執照終止加用過燃料乾貯總費用(482.2百萬美金，實際花費當年幣值)。PNNL經拮取相關資料分析計算後估計其中用過燃料暫貯費用為110.3百萬美金，執照終止費用為394.1百萬美金(加計暫貯B/C類廢棄物之IOSB維護及除役費用22.2百萬美金)。上述相關數據整理如表3.14，由於缺乏相關細目(breakdown)，所以無法進行比對分析。

- 實際執照終止費用與核管會最小除役基金之比較：表3.14也將實際執照終止費用再換算為2010年的幣值512.4百萬美金。由於缺乏相關細目，所以無法跟(核管會)最小除役基金公式計算值進行比對分析。

表 3.13 Rancho Seco Generating Plant(RSGP)除役廢棄物數量統計

廢棄物類別	RSGP 內部資料 (立方米/總活度 Ci)	MIMS 之最終處 置場接收數據 (單位同左)	備註
A 類	17,936/632.1	19,888/436.2	RSGP 內部資料應有 錯誤
B 類	B、C 合計 93/16,000	0/0	暫貯於廠內 IOSB
C 類	同上	0/0	同上

註：

1. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.33 及 4.35。

表 3.14 Rancho Seco Generating Plant(RSGP)估算/實際除役費用(百萬美金)

除役費用	PSDAR 預估 (1999 幣值)	實際除役費用(1997- 2009 年當年之幣值 加總)	實際除役費用(換算 為 2010 年幣值)
執照終止費用	433.4 (含用過燃 料暫貯費用，無 細目)	394.1(PNNL 估算 值，含 IOSB 維護及 除役費用，無細目)	512.4(PNNL 估算 值，含 IOSB 維護及 除役費用，無細目)
用過燃料暫貯 費用	無資料	110.3(PNNL 估算值)	未換算(資訊不全)
(非輻射相關) 廠區復原費用	無資料	無資料	無法換算

註：

1. 執照終止費用為依照美國核管會除役基金相關規定編列之費用；廠區復原費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原工作費用，此項費用與用過燃料暫貯費用均不屬核管會所定義之除役費用，但核電廠基於整體營運管理之考量，通常會將這兩項(實質的除役)費用也納入繳交核管會之個別電廠除役費用估算內。
2. 資訊來源：PNNL 報告之 Table 4.37 及 4.38。

四座已除役電廠執照終止費用之比對分析

由於 Rancho Seco 電廠缺乏實際除役費用之細目(breakdown)，因此無法就實際執照終止費用進行詳細比對，故 PNNL 僅針對 Haddam Neck (HNP), Maine Yankee (MY) 以及 Trojan (TNP) 三個電廠進行綜合比對，相關數據彙整如表 3.15，比對結論總結如下：

- 三座廠均採停機後立即拆除(DECON)策略；HNP及MY原採統包一段時間後，收回自行執行除役管理工作，TNP則自始即自行管理。
- TNP之蒸汽產生器、調壓槽、以及反應器壓力槽本體均是整體移除(one piece removal)，而反應器壓力槽內部組件也未進行拆解而是隨同壓力槽槽體運送至最終處置場；此為特殊案例，按HNP及MY廠都對上述設備進行切割拆解後，再送處置場掩埋。
- 就執照終止(總)費用而言，僅TNP實際費用接近公式計算值，HNP及MY都高於公式計算值。PNNL認為主要理由是TNP所採除役策略跟最小基金公式假設策略一致：即先將設備/建物除污至符合法規之外釋標準再拆解；而HNP及MY則是直接先把設備/建物拆除後，將所有廢棄物直接送處置場掩埋或送至外部廠家進行除污減量。
- PNNL將執照終止費用再細分為三大部分，分別是除污/拆除/其他費用、除役計畫管理費用、以及廢棄物處理費用，再就三大部分比對以拮取進一步資訊。單獨就除污/拆除/其他費用項目比對時，可以發現TNP實際費用與公式計算值相近，而HNP及MY實際費用則明顯較公式計算值為高。PNNL推斷主要因為：A)同上一點之結論，B) HNP及MY所在州政府要求較核管會規範更嚴格之廠區外釋標準。
- 單獨就計畫管理費用進行比對時，可清楚觀察到最小除役基金公式明顯低估此項費用。若就三個廠之計畫管理實際費用進行比對，也看到HNP及MY費用較TNP為高，PNNL認為主要理由為：A)同上一點結論，B) HNP及MY曾一度統包下包商管理，後因故收回自行管理。

- 單獨就廢棄物處理費用比對時，TNP實際廢棄物數量接近公式計算值，因為TNP所採除役策略跟最小基金公式假設策略一致；但在費用評估上，公式計算值則為實際費用的3.5倍，顯示公式內建單價未能反映市場價格。由表3.15可看出，TNP的實際廢棄物數量為公式計算值的15倍左右，但相關實際費用則不到公式計算值的一半；MY的廢棄物數量為公式計算值的8倍左右，但實際相關費用為公式計算值的40%左右。上述比對再次確認最小除役基金內建公式明顯高估廢棄物處置之市場單價。

表 3.15 已完成除役電廠實際除役費用比較(2010 年幣值/百萬美金)

電廠 實際費用	Haddam Neck/ 590MWe	Maine Yankee/ 931Mwe	Trojan/ 1,130MWe
執照終止(總)費用	918.5 (414.0)	575.2 (449.0)	323.8 (371.1)
除污/拆除/其他費用	420.5 (85.4)	225.5 (92.7)	102.1 (87.3)
計劃管理費用	376.7 (50.0)	228.0 (54.2)	161.5 (61.0)
低放廢棄物處置費用	121.3 (278.6)	121.7 (302.1)	60.2 (222.8)
廢棄物數量(立方米)	240,084 (15,894)	135,382 (17,239)	18,328 (20,917)

註：

1. 括弧內數字為美國核管會最小基金公式所得之相關計算值。
2. 資訊來源：PNNL報告之Table 4.39。

經研析比對PNNL報告相關資料，謹提出下列幾點心得：

- 1) 四座已完成除役電廠中，有 3 座之實際費用遠超出原估算，唯一的例外是 TNP。推斷造成 TNP 實際除役費用較估算費用低 14%的主要原因可能是：TNP 是少數具備資格將 A/B/C 類廢棄運送至美國生態最終處置設施(US Ecology Disposal Facility)的電廠之一，該處置設施位於華盛頓州之 Richland，距離 TNP 所在地約 400 公里(公路)，但也可循水路進行大型物件之運輸。若以駁船進行水路運輸時，可免除經陸運之物件尺寸限制，也因此可將大型物件(如蒸汽產生器、調壓槽、以及反應器壓力槽)不經拆解切割而直接整體移除(one piece removal)後運送至處置場掩埋。TNP 就是採取此種方式進行大型物件之拆除工作，因為可如此操作，連最不好

處理的反應器壓力槽內部組件也因而不必進行切割拆解，而是隨同壓力槽本體一起送至處置場。研判 TNP 此種「特殊」條件應可在廢棄物拆解、包裝、運送、以及處置費用上節省大量經費。PNNL 也認為接收 TNP 廢棄物之美國生態處置設施有所謂的「年度收入上限(annual revenue constraint)」會降低部分費用，但應僅限於廢棄物之掩埋費用，廢棄物包裝及運輸費用應該還是會因整體移除及水路運輸而大幅降低。(C 類)

- 2) 由表 3.15 可觀察到三個廠之執照終止(總)實際費用跟功率大小無直接關係，若將僅有總費用數據之 Rancho Seco 廠數據(913MWe/512.4 百萬美金)納入比對時，還是觀察到同樣的現象。由於數據樣本有限，此現象是否適用所有 PWR 廠，有待進一步觀察。(C 類)
- 3) 將 4 個電廠之執照終止費用再細分為除污/拆除/其他費用、除役計畫管理費用、以及廢棄物處理費用三個分項並逐一相互比對時，PNNL 報告未提及一個明顯的事實：TNP 之蒸汽產生器、調壓槽、以及反應器壓力槽本體均是整體移除(one piece removal)，而反應器壓力槽內部組件也未進行拆解而是隨同壓力槽槽體運送至最終處置場。此事實不但可直接降低除污/拆解費用及廢棄物處理費用，也應該會間接降低計畫管理費用的支出。(C 類)

3.5 個別電廠除役費用估算與實際除役費用之綜合比對 (PNNL 報告第 5 章)

第 3.3 節曾對報告撰寫時(2010 年)各電廠已繳交至美國核管會之個別電廠除役費用估算(site-specific decommissioning cost estimate)進行比對，共計有 19 座核電廠(27 部機組)共 60 組估算資料，其中有 17 組屬於適用我國現況的停機後立即拆除(DECON)估算，17 組數據中有 6 組為 BWR，11 組為 PWR。第 3.4 節也曾對報告撰寫時已完成除役工作的四個電廠之實際除役費用進行比對，這 4 個電廠均為 PWR。在第 3.3 及 3.4 節進行比對時，都是採絕對值(費用本身)比對方式進行，就是將所有個別電廠除役費用估算或實際除役費用先換算為同一個年份(2010 年)，再就費用絕對值直接進行比對。在換算過程中，為簡化繁瑣轉換程序並遷就資料不全之現實，採取了一些不完全符合現況的假設(如每年物價上漲率都一樣)，PNNL 了解這種轉換過程未盡完善。所以在進行綜合比對時，轉為採用比值(ratio)方式處理，也就是取估算或實際除役費用與核管會最小除役基金公式之內建計算值之比值，然後再就此比值進行比對。對每一個別電廠除役費用估算，就取跟該估算同一年份之公式計算值來算比值，如 Cooper 電廠之估算年份為 2008 年；對每一個實際除役費用，則取該廠除役高峰之年份為比值基準，如 Maine Yankee (MY) 在 1997-2005 年執行除役，其高峰期為 2002 年(即除役費用最高之年份)。在個別電廠除役費用估算部分，原 17 組停機後立即拆除(DECON)數據中有共有 6 組為 BWR，11 組為 PWR；在進行綜合比對時納入 2 組資訊不十分完整的數據以擴大樣本數：Duane Arnold (BWR)及 Kewaunee (PWR)，故合計共有 7 組 BWR 及 12 組 PWR 之個別電廠除役費用估算數據。而第 3.4 節所提到 4 個已完成除役電廠之實際費用，當有適當數據時(不一定都有)，則併入 PWR 數據組一併分析。

PNNL 進行綜合比對之項目包括：

A) 廢棄物數量

B) 執照終止(總)費用：即核管會最小除役基金公式定義之費用

- C) 計畫管理：主要為人事費用、安全/工程分析、廠房保安等
- D) 輻射相關設備/建物除污及拆除費用：含設備採購
- E) 保險費及管制規費
- F) 稅金
- G) 能源費用
- H) 廢棄物包裝
- I) 廢棄物運送
- J) 廢棄物掩埋(最終處置)

其中 E)、F)、G)等 3 項由於屬各國特定制度/情況議題，對我國之參考價值相當有限，故本計畫將專注於其他項目之比對結論。

低放廢棄物數量之比對結論：

- BWR電廠預估之廢棄物總量通常較PWR電廠為高。
- BWR電廠7組數據並未與功率呈現線性關係；但若把規畫處理污染土壤的Vermont Yankee及Oyster Creek電廠之污染土壤數量扣除後，的確呈現線性關係，且相當符合最小除役基金公式計算值，只是仍缺乏BWR廠實際除役數據來對內建公式之準確性進行驗證。
- PWR 12組預估數據都較最小除役基金公式計算值為低；但4個已完成除役之電廠則有3個的廢棄物數量遠高出公式計算值，其中Haddam Neck (HNP)為計算值的2.5倍，Maine Yankee (MY)為計算值之1.7倍，Rancho Seco (RSGP)為1.15倍，只有Trojan (TNP)較計算值低30%。PNNL認為造成HNP及MY電廠廢棄物總量遠超出公式計算值的主要因為地方政府對廠區外釋之要求標準較核管會之規定嚴格，但PNNL未提及公式在PWR廢棄物數量計算的準確性結論。(編註：PNNL報告未提廢棄物數量估算內建公式內容，經查閱該報告Figure 5.1及5.2，推算BWR內建公式應為 $(3.8 + 3/2200(P-1200)) \times 1.0E+5$ 立方英尺；PWR內建公式為 $(3.1 + 3.2/2200(P-1200)) \times 1.0E+5$ 立方英尺，其中P為電廠熱功率(MWt)，小於

1,200時取1,200，大於3,400時取3,400。另一立方英尺等於0.02832立方米。)

執照終止總費用比對結論：

- BWR之個別電廠預估值落在最小基金公式的94-120%，平均值約與公式計算值相當。
- PWR個別電廠預估值均較公式計算值高出5-60%，平均高出約33%；就4座已完成除役電廠而言，其費用較公式計算值高出10-25%；結論是公式可能低估PWR執照終止總費用10-25%。

計畫管理費用比對結論：

- BWR之個別電廠預估值落在最小基金公式的2.05-2.3倍，平均值為公式計算值的2.2倍，結論是公式低估此費用100-130%。
- PWR個別電廠預估值為公式計算值的2.5-4.5倍，平均值為3.6倍；就4座已完成除役電廠而言，HNP、MY、TNP費用為公式計算值的1.0-1.75倍(RSGP無資料)；結論是公式可能低估PWR計畫管費用100-200%。

輻射相關設備/建物除污及拆除費用比對結論：

- BWR之個別電廠預估值為最小基金公式的1.8-3.0倍，平均值約為公式計算的2.4倍，結論是公式低估此費用130-150%。
- PWR個別電廠預估值為公式計算值的2.5-4.1倍，平均為計算值的3.3倍；就4座已完成除役電廠而言，其費用分別為：HNP(公式計算值8倍)、MY(3.7倍)、TNP(2倍)、RSGP(無資料)；結論是公式可能低估PWR輻射相關設備/建物除污及拆除費用100-250%。

低放廢棄物包裝費用比對結論(由於包裝費用與廢棄物數量密切相關，故此項比對基礎為「包裝單價」，即將包裝費用除以廢棄物數量後再比對)：

- BWR之個別電廠預估值為最小基金公式的52-102%，平均值約為公式計算的79%，結論是公式高估此費用20%。
- PWR個別電廠預估值為公式計算值的72-355%，平均為計算值的173%，PNNL認為應剔除其中不合理之Diablo Canyon 1&2高單價數據，剔除後重新計算此單價平均應是公式計算值的135%；就4座已完成除役電廠而言，只有TNP有此數據，其單價為公式計算值的120%；結論是公式可能低估PWR包裝單價20-35%。

低放廢棄物運送費用比對結論(由於運送費用與廢棄物數量、運送距離、運送方式均密切相關，但因缺乏後兩項資訊，故此項比對基礎「運送單價」，還是比照包裝單價處理，即將運送費用除以廢棄物數量後再比對)：

- BWR之個別電廠預估值為最小基金公式的26-76%，平均值約為公式計算的46%，結論是公式高估此費用20-80%。(編註： PNNL比對結論範圍相當大(高估20-80%)，主要是因為這跟各除役電廠距離可用處置場多遠相關)。
- PWR個別電廠預估值為公式計算值的50-1,000%， PNNL認為應剔除其中不合理之Diablo Canyon 1&2、Salem 1&2高單價數據，剔除後此單價平均應是公式計算值的76%；就4座已完成除役電廠而言，只有TNP有此數據，其單價為公式計算值的300%；結論是當採一般常用之長途鐵路運輸時，公式可能高估PWR運送單價10-25%；但當距處置場較近(800公里內)而採低運量之貨車或駁船時(TNP模式)，公式可能低估此單價3倍。

低放廢棄物掩埋/處置費用比對結論(由於處置費用與廢棄物數量及特定處置場密切相關，但因缺乏第二項資訊，故此項比對基礎「處置單價」，還是比照包裝單價處理，即將處置費用除以廢棄物數量後再比對)：

- BWR之個別電廠預估值為最小基金公式的25-46%，平均值約為公式計

算的33%，結論是公式高估此費用60-80%。(編註：2010年當時美國有亞利桑那州之Clive、華盛頓州Richland、南卡羅來納州Barnwell等三處低放廢棄物處置場，其中Clive只收A類廢棄物，其他兩個收A/B/C廢棄物。但後兩者有接收地區/數量之限制，單價也不盡相同，情況相當複雜。2011年底德州Andrew處置場開放接收任一州的A/B/C類廢棄物)。

- PWR個別電廠預估值為公式計算值的48-312%，平均為公式計算值的118%。PNNL認為應剔除其中不合理之Diablo Canyon 1&2、Salem 1&2高單價數據，剔除後此單價平均應是公式計算值的50%；就4座已完成除役電廠而言，只有TNP有此數據，其單價為公式計算值的26%(送至華盛頓州Richland處置場)；結論是若送到華盛頓州Richland處置場，公式可能高估此單價300%，若送至其他處置場，公式可能高估此單價100%。

經研析 PNNL 報告內容之除役費用估算資料後，有下列心得：

- 1) 廠區復原費用(指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原費用)，於美國則非屬核管會所定義之除役費用。有關廠區復原費用差異之相關統計數據詳如表 3.1 及表 3.2 所示：PNNL 報告中之 BWR 之廠區復原費用平均約為執照終止費用之 8.3%；PWR 平均值則約為 9.6%。
(C 類)
- 2) 低放廢棄物之最終處置(及運送)費用部分，PNNL 報告雖列出相關數據但並未針對此項目進行細部分析。編者參考 PNNL 報告之 Table 5.2 相關數據並彙整分析廢棄物運送及最終處置費用占執照終止總費用之百分比，分析結果如表 3.16 及 3.17 所示。表 3.16 顯示 6 個 BWR 電廠之廢棄物運送及處置費用占其執照終止總費用的 18.8-29.2%間，平均值為 22.9%。PWR 電廠資訊則如表 3.17 所示，廢棄物運送及處置費用占其執照終止總費用的 11.5-24.0%間，平均值為 17.5%。按 PWR 電廠除 Trojan 為已除役電廠之實際費用外，其餘皆為個別電廠之預估值。(C 類)

表 3.16 美國立即拆除(DECON)BWR 電廠之低放廢棄物運送及最終處置估算費用彙整(百萬美金)

電廠(機組)/功率 (MWe)	運送費用	最終處置費用	執照終止 總費用	運送及處置 費用占執照 終止總費用 百分比(%)
Monticello/572	7	91	447	21.9
Vermont Yankee/620	13	104	469	24.9
Cooper/758	9	111	506	23.7
LaSalle 1/1,118	12	92	547	19.0
LaSalle 2/1,120	13	95	573	18.8
Oyster Creek/619	6	134	480	29.2
平均值				22.9

註：

1. 原始資料來源：PNNL 報告 Table5.2。

表 3.17 PNNL 報告中立即拆除(DECON)PWR 電廠之低放廢棄物運送及最終處置估算/實際費用彙整(百萬美金)

電廠(機組)/功率 (MWe)	運送費用	最終處置費用	執照終止 總費用	運送及處置 費用占執照 終止總費用 百分比(%)
Braidwood 1/1,178	11	65	442	17.2
Byron 1/1,164	11	65	448	17.0
Prairie Island 1/551	7	62	488	14.1
Byron 2/1,136	9	63	521	13.8
TMI 1/819	15	84	504	19.6
Braidwood 2/1,152	9	63	529	13.6
Prairie Island 2/545	7	66	538	13.6
Salem 1/1,174	12	98	489	22.5
Salem 2/1,130	12	99	545	20.4
Diablo 1/1,122	5	126	545	24.0
Diablo 2/1,118	5	126	566	23.1
Trojan/1,130	11	13	208	11.5
平均值				17.5

註：

1. 原始資料來源：PNNL 報告 Table5.2。
2. 四個已除役PWR電廠中僅Trojan有相關資訊，另表中其餘11個均為估算值。

3.6 最小除役基金公式修正建議 (PNNL 報告第 6 章)

本研究由核管會委託 PNNL 執行，原本規劃重點是針對自上次相關研究(1996 年)後累積之除役費用估算研究經驗進行彙整分析，以評估是否需更新 10 CFR 50.75(c)(1)之最小除役基金公式(Minimum Decom-missioning Fund Formula)。對 PWR 電廠，現行最小基金 $= (75 + 0.0088P)$ 百萬美金，其中 P 為機組熱功率(百萬瓦，MWt)；對 BWR 電廠，最小基金 $= (104 + 0.009P)$ 百萬美金。此兩組公式中的 P 為機組熱功率(百萬瓦，MWt)，適用 1,200 到 3,400 MWt 之機組，超過 3,400 者以 3,400 MWt 計算，低於 1,200 者以 1,200 MWt 計算。另根據上述公式計算出之幣值為 1986 年元月之幣值，需要透過第二組公式調整為當年幣值： $0.65L + 0.13E + 0.22B$ ；其中 L 為當年勞力(labor)指數與 1986 年勞力指數的比值，E 為能源(energy)指數比值，B 為低放廢棄物最終處置指數比值，這 3 個指數都可在美國核管會持續更新版本(約每年一次)的 NUREG-1307 報告中查得，其中 L 及 E 指數系採用美國勞動部勞工統計局(Bureau of Labor Statistics, Department of Labor)相關統計數據計算而得，B 指數則由核管會自行蒐集資訊計算，目前此報告最新版本為 2019/2 發行之第 17 版。

最小基金公式自 1988 年啟用，當初是依據核管會委託 PNNL 於 1980 年代執行之相關研究結果彙整而得，此項研究稱為原始研究(original studies)。由幣值調整公式可看出當初制定此公式時，勞力相關費用、能源相關費用、低放廢棄物處置費用三者之比率。核管會再度於 1990 年代委託 PNNL 蒐集彙整當時之除役執行/費用估算經驗，針對原始研究進行更新這項研究稱為更新研究(updated studies)，但完成更新研究後，最小除役基金公式仍維持不變，理由如 3.1 節所述。

為達成美國核管會交付任務，PNNL 將 3.5 節之除役估算/實際費用與最小除役基金估算值之比對結果，用來修正更新研究中之 PWR 及 BWR 廠參考案例的費用，再運用修正過之參考案例費用來提出最小基金公式修正建議。

由於美國核管會最小基金公式修正過程與結果並非本計畫中心議題，而該公式也不適用我國電廠除役基金之計算參考，再加上 PNNL 報告於 2011 年完成後，原規劃轉為 NUREG/CR 報告，但後來因故未轉為核管會正式報告，基金公式至今也尚未更動，因此將僅扼要摘錄最後之結果以供參考。對 BWR 電廠，PNNL 建議新公式為 $438 + 0.025 P$ (2010 幣值，百萬美金)；PWR 電廠新公式為 $416 + 0.023 P$ ；P 為電廠熱功率(MWt)；公式適用 1,200 到 3,400 MWt 之機組，超過 3,400 者以 3,400 MWt 計算，低於 1,200 者以 1,200 MWt 計算。

第四章、經濟合作暨發展組織核能署「核能電廠除役費用」報告重

點摘述與管制建議

4.1 前言

本報告(NEA-7201 Costs of Decommissioning Nuclear Power Plants)由 OECD/NEA 之除役費用專家小組(Expert Group on Costs of Decommissioning, COSTSDEC)主導，並與內部相關小組及委員會合作進行約兩年半之相關研究後於 2016 年發行。經濟合作暨發展組織(Organization for Economic and Development, OECD)成立於 1961 年，目前有 36 個會員國；OECD 組織中之核能署(Nuclear Energy Agency, NEA)則有 31 個 OECD 會員國參與。

除役費用專家小組彙整 NEA、國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA)、歐盟委員會(European Commission, EC)相關資訊，並發出問卷調查向 NEA 會員國蒐集進一步資訊，經分析整理後出版此報告。NEA/IAEA/EC 於 2012 年曾密切合作共同推廣各國採行除役費用國際架構 (International Structure for Decommissioning Cost, ISDC)，以利各國除役費用之相互比對。此報告可算是 ISDC 的後續推廣工作之一。

根據 IAEA 於 2013/8 統計資料顯示，當時全球 434 座運轉中核電機組之平均運轉時間約為 28 年，換言之若未獲准延役，大部分機組在 2020 年時已接近其設計壽命(30-40 年)；在 2011 年福島事件後，更有不少國家(如德國與義大利)作出核電機組提前除役的決定。IAEA 統計資料顯示在 2013/8 全球已有 147 座商用核能機組永久停機，包括美國 32 座、英國 29 座、德國 27 座、法國 12 座、日本 9 座等。雖然有多座商用機組已停機，但實際完成除役工作的僅有 16 座，其中德國有 3 座，美國有 13 座，所以值得參考的實際除役經驗仍然十分有限。(編註：本報告不含任何德國機組細部資訊，顯然德國未回應 NEA 問卷調查)

當時在美國已完成除役之 13 座核電機組中，有 6 座為功率小於 100 MWe 的實驗型先導機組，包括 Big Rock Point (71 MWe), Elk River (24), Carolina-Virginia Tube Reactor (19), Pathfinder (63), Saxton (3), 以及 Shippingport (68)。其餘 7 座機組中，Fort St Vrain 為高溫氣冷反應器(HGTR)；Shoreham 於 1984 年建造完成後從未商轉；Yankee Rowe 為壓水式機組(PWR, 180 MWe)但缺乏除役經費相關資料。其餘 4 座已完成除役工作之機組均為 PWR，包括 Haddam Neck, Maine Yankee, Trojan, Rancho Seco。

NEA 認為在福島事件後，部分國家民眾要求應將已永久停機之核能機組盡速完成除役，在此種民意壓力下，如何確保有足夠之經費來源以完成除役工作成為關鍵議題。由於各國在除役經費估算各有其不同之格式、內容、以及分類，因此在相互比較或參考上產生極大的困難，也因此對到底需要多少除役經費才夠用有相當的不確定性。這種不確定性對已陷入困境的核能工業是相當不利的，本研究的主要目的也就是試圖將這些不確定性降到最低。2010 年間 NEA 曾跟 IAEA 及 EC 密切合作並於 2012 年完成除役費用國際通用架構(International Structure for Decommissioning Cost, ISDC)，期望推廣各國採用以利除役費用之相互比對。

本研究的主要目標為：1)蒐集各國除役費用資訊以了解除役費用如何隨時間變化、不確定性如何反映在意外準備金(contingency)上、以及影響除役費用的因子(cost driver 或 cost driving factor)等議題；2)回顧 NEA 會員國的除役基金管理機制；3)以實際的除役費用案例來評估建立除役費用標準分類之可行性。在分析工作上除引用 NEA/IAEA/EC 過去研究資料外，也透過問卷調查方式向會員國蒐集更多除役費用相關資訊。問卷內容主要分成 3 大部分：1)國家除役政策與財務安排，2)個別機組的除役策略，3)個別機組以 ISDC 格式編製之除役費用資訊。NEA 研究報告中各章主要內容為：

- 第2章：各NEA會員國之除役政策、策略、執行方式。
- 第3章：專注於透過問卷蒐集之各國除役經費估算的分析比對。

- 第4章：探討各會員國除役基金管理機制。
- 第5章：結論與建議。
- 第6至11章：6個透過問卷調查取得之除役案例探討，依序包括芬蘭Loviisa機組(前蘇聯VVER440/213型式)、荷蘭Dodewaard機組(奇異公司BWR，58 MWe)、斯洛伐克Bounice V1機組(前蘇聯VVER440型式)、西班牙Jose Cabrera機組(西屋PWR，160 MWe)、瑞士(PWR及BWR機組，通用案例)、以及英國Magnox機組(天然鈾燃料/二氧化碳冷卻/石墨緩和劑)。

配合計畫目標及我國現況，本計畫將專注於第 1-5 章內容之研究分析，第 6-11 章內容則將選擇跟計畫目標相關部分摘要呈現。

4.2 除役政策、策略、執行方式(NEA 報告第 2 章)

核電機組除役工作之總體目標為確保工作人員與大眾健康以及環境之風險已降至可接受之程度。為確保可達成此目標，在 IAEA 倡議之「用過燃料與核廢棄物管理安全聯合公約 (Joint Convention on the Safety of Spent Fuel Management and on the Safety of Radioactive Waste Management)」也指出應該遵行以下 7 項原則進行除役工作：

- 世代正義(intergenerational equity)：不應把問題留到下一代。
- 使用者付費(user/polluter pays)；核電機組經營者(licensee)需負責籌措除役經費。
- 除役經費必須夠用(sufficiency)。
- 資金於需要時應及時到位(availability)。
- 除役相關資訊應公開透明(transparency)。
- 利害關係人/團體及地方政府應充分參與(participation)。
- 應將機組所在地之長期經濟發展納入除役規劃考量。

本研究根據問卷調查第一部分(國家除役政策與財務安排)之回應資訊，彙整各國之除役相關規範現況如下：

- 各NEA會員國都將除役政策明訂於法規中，雖位階各有不同，但皆遵循前述IAEA聯合公約之7項原則。
- 各會員國都於法規中明訂權責區分、基金籌措及管理、基金用途限制、基金不足時之補救等機制。
- 大部分會員國給予經營者選擇除役方法的彈性(如立即或延後拆除)，但法國、瑞士、瑞典則於法規中明確要求一定要採立即拆除策略。
- 所有會員國都明訂電廠經營者應負責提出除役經費估算、籌措除役基金、定期更新除役經費估算等工作。

- 大部分國家於機組永久停機時不需事前取得許可，但於進行實質除役工作(如除污)前皆被要求取得許可，而在(永久停機後)執行實質除役前之過渡階段也會被要求繳交相關安全分析文件(如除役計畫)。

各國對經營者應提出的除役計畫要求內容略有不同，但大致涵蓋下列內容：

- 目標、時程、主要工法。
- 廢棄物營運管理。
- 安全分析。
- 環境影響評估。
- 設計變更細節。
- 除役費用估算及財務安排。
- 工作人員輻射劑量評估。
- 廠內緊急應變計畫。
- 廠區保安防護。
- 品保計畫。
- 組織及人為因素評估：是否有足夠之人力及能力。

各國在完成除役工作後可解除管制(或稱(運轉)執照終止)之要件上也略有差異，但大致之基本要求為：

- 除役工作全部完成。
- 確認廠址現狀符合原規劃之狀態。
- 確認沒有輻射風險。
- 放射性廢棄物營運管理符合法規要求。
- 備齊相關分析文件。
- 確認符合廠區外釋標準。

前述之管制程序可適時納入公眾的參與。

針對目前採行的各種除役策略，NEA 認為只有永久停機後立即拆除 (DECON) 及延後拆除 (或稱安全封存一段時間後再拆除，SAFSTOR) 兩種可行策略；至於先固封一段時間再拆除 (ENTOMBMENT) 方式則被定義為特殊狀況下的除役策略，通常只用於發生重大意外之核電機組 (如車諾比爾)。法國、瑞士、瑞典於法規中明確要求一定要採立即拆除方式，其他國家則允許經營者選擇立即拆除或延後拆除方式、或先固封一段時間再拆除方式 (註：依國際上案例，僅有發生事故之機組採固封之方式)。在除役年限方面，大部分國家均未硬性規定，但美國規定要在永久停機後 60 年內完成，法國則要求「盡快 (as soon as possible)」完成除役。

NEA 也對各國除役執行機制進行彙整，其中有兩個會員國成立專責機構執行除役工作，分別為西班牙的 ENRESA 及英國的核能除役署 (Nuclear Decommissioning Authority, NDA)；其他國家則由電廠經營者自行執行或委託下包商執行。在除役計畫的準備上，大部分國家要求經營者於機組運轉期間就要提交初步規劃 (新建機組於設計階段就要提交)，但美國及荷蘭例外。美國要求經營者於預計永久停機五年前或 (提前) 停機後兩年內繳交除役計畫；荷蘭則要求於永久停機後立即提交。

在除役放射性廢棄物的管理上，各國策略不一，NEA 認為採取的策略將會大幅影響除役所需的費用。各國目前採用之策略不外乎兩大類型，一是盡最大努力除污、分離、減容以將絕大部分放射性「再集中 (re-concentration)」於最少數量的廢棄物上，然後進行最終處置；另一種方式則是只將不含放射性或污染性物料由具放射性設備/建物中分離，然後對較大量的放射性廢棄物進行最終處置。採行何種方式取決於有無適當的最終處置場、可處置容量、以及廢棄物特性是否符合最終處置場接收標準等因素。

各國在除役時都會面對最難處理的「混和型」廢棄物，這類廢棄物同時

包含放射性及非放射性有害物質，各國對此種廢棄物的規範不一，但通常最後都是在進行再包裝後放置於放射性廢棄物處置場，或是暫貯於廠房內待適當時機再行處理/處置。

經研析 NEA 相關資訊並考量我國現況後，僅提出以下兩點研析心得與建議：

1. NEA 對除役策略之定義與美國之相對定義略有差異；對立即拆除兩者定義相同；對延後拆除方式，NEA 認為就是 SAFSTOR，但美國 PNNL 報告定義延後拆除為等待用過燃料有最終處置去處，而 SAFSTOR 則是跟用過燃料去處較無關。(A/B 類)
2. 混和型廢棄物議題值得特別關注，最佳處理方式可選擇在低階(或高階)最終處置場進行處置，惟仍須瞭解各國處理的經驗。(C 類)

4.3 除役費用估算(NEA 報告第 3 章)

NEA 報告第 3 章聚焦在經由問卷調查及已公開資訊(主要是美國 PNNL 2011 年之報告，詳如本報告第 3 章)所蒐集除役費用估算之研析比對，重點如下：

- 除役費用估算方法概述。
- 對經問卷調查取得之除役費用估算案例進行研析，發現各國提供資料雖依照除役費用國際通用架構(ISDC)格式，但詳細程度不一，很難進行細部比對。本來規劃要將由 PNNL 報告取得之資訊與問卷調查資訊綜整比對，但後來發現雖經格式轉換，但兩種不同來源數據仍然無法相互比對，最後只有分別呈現。
- 應變準備金之編列。
- 各國案例分析。
- 除役費用隨時間之變化研析。
- 經驗回饋與總結。

NEA 認為除役費用估算的詳細程度跟該估算之目的密切相關，估算通常用來：1)籌措除役基金，2)比較不同除役策略(如立即或延後拆除)所需經費，3)長程財務安排，4)作為除役執行之計畫管控工具，原則依上述順序要提高其詳細程度，即計畫管控用之估算應該是最詳細的。參考世界各國使用之除役費用估算方法不外乎兩大類，一是參考過去實際除役經驗/費用以建立新的估算；而當無法取得實際數據時，通常只有依靠所謂的「專家判斷」。實務經驗顯示，由於商業機密考量，取得跨國甚或同國跨廠細部資訊十分困難，隨除役工作執行過程自行建立實際費用之資料庫可能是目前較可行之路。

目前世界上並沒有一套大家認可的標準做法，也因此除役費用估算可說是處於一個不透明的狀態，這種現象相當可能會讓利害關係人(stakeholders)對除役工作缺乏足夠的信心。NEA 跟 IAEA 合作推行的 ISDC 架構之終極目

標就是希望能匯集大家的智慧建立一套標準做法，ISDC 將除役費用分為 11 大類(第一階)，每一大類再分成數個中類(第二階)，每一個中類還可再分為數個小類(第三階)；而每個小類為方便估算可涵蓋勞務費用(人員薪資與福利)、設備費用、其他費用(耗材/備品/稅)、以及應變準備金(contingency)等 4 個費用類別。表 4.1 列出 ISDC 第一及第二階的內容，其中第一階的第三項(編號 03)為安全貯存後再進行拆除，不適用立即拆除案例；第一階的第七項(07)為非控制(非污染)區拆除工作，NEA 會員國將其列入除役費用內(編註：與美國管制規範定義不同)；第一階第十項(10)為用過燃料及核物料處理，NEA 會員國也將其列入除役費用內(編註：與美國管制規範定義不同)。

雖然各國採用之估算方法/細節不一，但原則上都是先將除役工作由上而下細分到可以估算的單項工作，再針對各單項工作進行費用估算。就管制單位立場而言，很少會在法規中規範要如何進行估算的細節，大部分僅要求對估算過程要清楚說明。過去實務經驗顯示，依照功率大小，把它廠實際除役經費放大/縮小的做法未能反映實際狀況；而直接假設除役費用為建廠費用的一定百分比也不是可行的做法。NEA 認為除役經費必須定期更新，更新時要盡可能將獲取的實務經驗回饋納入參考，但 NEA 也知道取得可靠且夠詳細的實務經驗(數據)在目前仍有相當大的難度。

表 4.1 除役費用國際通用架構(ISDC)第一及第二階架構

ISDC 第一階 (Level 1)	ISDC 第二階 (Level 2)	備註
01 除役前活動	01.0100 除役規劃 01.0200 廠區設施特性調查 01.0300 安全/保安/環境研究 01.0400 廢棄物處理規劃 01.0500 申請許可(若需要) 01.0600 籌組除役團隊及/或發包作業	
02 永久停機	02.0100 機組停機及檢查確認作業 02.0200 系統管路排水 02.0300 封閉系統之除污 02.0400 放射性廢棄物特性調查 02.0500 運轉期間廢棄物及除役不需要物件之移除	封閉系統指(一次側)主冷卻水系統
03 安全貯存後再拆除	N/A	不適用立即拆除機組
04 控制(污染)區拆除工作	04.0100 除污及拆除(含設備採購) 04.0200 拆除準備及相關支援工作 04.0300 拆除前除污 04.0400 移除需特殊程序之設備/材料(如隔熱石棉) 04.0500 拆除主要系統(如主冷卻水系統等) 04.0600 拆除次要系統 04.0700 建築物除污 04.0800 建築物外之區域除污 04.0900 建築物外釋最終檢查	
05 放射性廢棄物處理/包裝/最終處置	05.0100 建立(放射性)廢棄物管理系統 05.0200 運轉期間留下之高階廢棄物管理 05.0300 運轉期間留下之中階廢棄物管理 05.0400 運轉期間留下之低階廢棄物管理 05.0500 運轉期間留下之極低階(very low level)廢棄物管理 05.0600 運轉期間留下之可外釋廢棄物管理 05.0700 除役期間產生之高階廢棄物管理 05.0800 除役期間產生之中階廢棄物管理	- 高階廢棄物通常指超 C 類(GTCC)，一般併同用過燃料處理；用過燃料之相關費用則屬第 10 類。 - 中階通常指我國(及美國)

	05.0900 除役期間產生之低階廢棄物管理 05.1000 除役期間產生之極低階廢棄物管理 05.1100 除役期間產生之極短半衰期(very short-lived)廢棄物管理 05.1200 除役期間產生之可外釋廢棄物管理 05.1300 控制(污染)區外之除役廢棄物管理	定義之 B/C 類。 - 極低階與極短半衰期廢棄物，通常在我國與低階統稱 A 類廢棄物。
06 廠區基礎設施/活動管理	06.0100 廠區保全及巡視 06.0200 廠區基礎設施(如圍籬及道路)運作及維護 06.0300 廠區基礎設施支援系統(如水電)運作 06.0400 環境輻射偵檢系統	
07 非控制(非污染)區拆除工作	07.0100 傳統拆除工具/設備購置 07.0200 系統與建築物內部設備拆除 07.0300 建築物拆除 07.0400 最後清除工作及場地復原 07.0500 最終輻射偵檢 07.0600 未外釋廠區/建物之管理維護	
08 計畫管理	08.0100 人員設備進駐及準備工作(如額外之辦公室、運輸工具、水電基礎設施等) 08.0200 計畫管理(主要是人力費用) 08.0300 相關工程、安全分析、除污、保健物理、廢棄物管理、行政等支援服務 08.0400 工安及輻安設備及耗材 08.0500 人員及臨時設備之撤離 08.0600 統包/下包商之人員設備進駐及準備工作(如有) 08.0700 統包/下包商之計畫管理(如有) 08.0800 統包/下包商之工程、安全分析、除污、保健物理、廢料管理、行政等支援服務(如有) 08.0900 統包/下包商之工安及輻安設備及耗材(如有)	- 此類與 06 類皆屬廣義之計畫管理，06 類專注於基礎設施管理，08 類則聚焦跟除役工作直接相關者 - 08.0600 至 08.1000 可能會彙整成與下包商合約中之一大項

	08.1000 統包/下包商之人員及臨時設備之撤離(如有)	
09 除役相關研發	09.0100 除役活動相關研究發展 09.0200 特殊設備之模擬操作(mock-up)： 如反應器壓力槽切割	
10 用過燃料及核物料處理	10.0100 由廠房內移出用過燃料及其他核物料(如中子源等) 10.0200 用過燃料及其他核物料暫貯護箱/設施 10.0300 暫貯護箱/設施之除役	
11 其他	11.0100 經營者其他相關費用(如敦親睦鄰費用) 11.0200 稅 11.0300 保險 11.0400 回收再利用物料販售所得	- 11.0400 應為負值

註：

1. 第二階尚可再細分為第三階，詳如 NEA No. 7088 "International Structure for Decommissioning Costings (ISDC) of Nuclear Installations", 2012。
2. 不論細分到哪一階，每個項目的費用可再分為勞務費用、設備費用、其他費用、以及應變準備金等 4 小項。

NEA 設計問卷調查是以 ISDC 格式請求各會員國提供已完成除役之實際費用或待執行除役之預估費用資訊，共回收 20 組，皆為預估費用(其中一組西班牙機組正除役中，所以是已發生之實際費用加上未發生之估算費用，下詳)。20 組回收資料中，4 組為壓水式(PWR)機組數據，3 組為沸水式(BWR)機組數據，2 組為前蘇聯 VVER 機組數據，11 組為英國氣冷式(Magnox)機組數據。本計畫將專注在 PWR 與 BWR 相關數據上。

由於問卷回收資訊並未完整提供細節、也未完全依照 ISDC 格式填報、以及各國對除役費用涵蓋範圍的定義不同等因素，可用於比對分析的資料相當有限。按 NEA 請各會員國填具至 ISDC 第二階的資訊，但絕大部分僅填到第一階。考量到問卷回收資訊有限，NEA 當時規劃將美國 PNNL 2011 年報告之美國機組資訊轉換為 ISDC 格式，併同問卷回收資訊綜整進行比對，

但在完成格式轉換後發現有實質之困難而無法進行量化比對，最後只能單獨就美國機組資料檢視而在趨勢及現象上得到一些定性結論。以下將就相關議題，分別敘述問卷回收資訊與 PNNL 資訊研析之結果。

問卷調查蒐集之除役費用估算數據分析：

NEA 請各會員國填具至 ISDC 第二階的問卷，絕大部分僅提供第一階的資訊，而其中僅 3 個案例對每個第一階大類的費用又再細分為勞務費用(人員薪資與福利)、設備費用、以及其他費用(耗材/備品/稅)。表 4.2 整理出適用我國參考之 4 個 PWR 及 2 個 BWR 的 ISDC 第一階數據(均採立即拆除策略)，其中用過燃料處理費用(第 10 大類)不一定都包含在會員國之除役費用定義範圍內。由表 4.2 可看出，除西班牙外，其他國家均僅提供「通用」案例，這也再次證明取得除役費用詳細內容的難度。NEA 將表 4.1 的第 4 及第 7 大類加總統稱「拆除作業」、第 6 類及第 8 類加總統稱「計畫管理」、以及第 5 類的「廢棄物管理」等三項除役主要費用彙整進行比對，詳如表 4.3。由於數據組數過少，因此未再細分 PWR 及 BWR 群組分別分析。就拆除作業費用(ISDC 04 + 07)來看，此大項費用占總費用比率分布甚廣(0.12 到 0.50)，平均比率為 0.34。綜整而言，NEA 認為此大項費用的影響因子有：1)除役廠址最終狀態(end state)的定義，2)廠址受污染的程度，3)管制法規之外釋標準，4)大型設備(如反應器壓力槽)是否採整體移除(這又與是否符合廢棄物處置場接收標準相關)。NEA 的最終結論是：此大項跟各廠特性密切相關(site specific)，無法從蒐集到的數據中取得定量結論。

就計畫管理費用(ISDC 06 + 08)來看，除法國數據外，其他 5 組數據占總費用比率分布在 0.33 到 0.55 之間，6 組數據平均比率為 0.40。NEA 認為法國的計畫管理費用之所以較其他國家明顯偏低的主要因為「艦隊效應(fleet effect)」，法國的核能機組皆為 PWR，且僅有數種型式，除役的經驗可快速累積並在後續的類似除役工作展現其效應。事實上法國所提通用案例的參考對象為位於同一廠區之 4 部同型機組，這種累積並善用除役經驗的做法

(lead and learn)也可在英國的氣冷式機組(Magnox)的團隊除役中觀察到。NEA 認為影響此大項經費的主要因子包括：1)是否委託統包商執行(若是則此項費用較高)，2)是否有同廠區多機組或不同廠區但同型機組的狀況(若是則此項費用較低)。NEA 也強調，各種訊息顯示計畫管理費用與機組功率幾乎沒有關係。在定性分析方面，NEA 也審視各國提供之相關資訊，並彙整其計畫管理策略如下：

芬蘭 Loviisa 廠(2 部 VVER)：機組經營者調整原運轉團隊自行執行除役計畫管理；電廠團隊人力與下包商人力比為 57：43；實質除役期約 9 年，期間電廠總人力維持在 140 到 300 人之間。

法國(同廠區 4 部 PWR)：法國電力公司自組內部除役團隊(Centre ingenierie deconstruction et environnement, CIDEN)執行各電廠除役工作。

西班牙：法律規定核電廠除役與廢棄物處理由國營公司 Enresa 負責。

斯洛伐克(VVER 機組)：2014/5 加入歐盟時之附帶條件為須將老舊 VVER 機組除役，因此部分除役費用由歐盟支應，也因此費用支出行政程序耗時較久，進而墊高計畫管理費用；此案例說明時程與費用一定會相互影響。

在廢棄物處理費用(ISDC 05)上，表 4.3 顯示其占總除役費用比率分布在 0.04 到 0.19 間，平均值為 0.09。NEA 認為影響此費用之因子包括：1)除役廢棄物數量(但跟機組功率無關)，2)各國費用歸類方法(如西班牙將廢棄物運送及最終處置費用歸於它處)，3)是否有廠內最終處置場(僅芬蘭 Loviisa 有)，4)是否需先暫貯廠區內(法國及西班牙)，5)是否將最終處置場建立費用攤於除役費用內(瑞士採此做法)。

表 4.2 NEA 問卷調查蒐集之立即拆除 PWR 及 BWR 費用估算(以 ISDC 分類呈現；2013 年美金幣值，單位百萬)

國家/機組及費用估算 型式/MWe	ISDC 01 類	ISDC 02 類	ISDC 04 類	ISDC 05 類	ISDC 06 類	ISDC 07 類	ISDC 08 類	ISDC 11 類	總計
西班牙 Jose Cabrera/ PS/ 160	16.9	5.3	55.5	12.8	87.2	19.6	69.5	18.8	285.5
西班牙/ PG/ 1,066	18.2	1.5	70.3	22.6	89.7	108.6	95.3	11.3	417.5
瑞士/ PG/ 1,000	57.8	481.2	96.4	116.9	338.1	46.8	55.8	7.6	1,200.6
法國/ PG /900	-	30.4	149.4	69.0	21.4	31.7	30.0	33.1	365.0
西班牙 S. M. Garoña/ BS/ 466	18.2	4.2	64.4	18.6	123.7	28.0	52.7	13.7	323.6
西班牙/ BG/ 1,092	17.9	1.5	74.4	34.0	87.3	109.9	88.7	11.2	424.8

註：

1. PS: PWR 個別機組費用估算；PG: PWR 通用(generic)機組費用估算；BS: BWR 個別機組費用估算；BS: BWR 通用(generic)機組費用估算；通用案例指非針對特定機組所作之除役費用估算。
2. ISDC 各分類定義詳如表 3.1，其中 03 類為不適用立即拆除之停機後安全貯存再拆除；09 類研發費用皆未提供；10 類用過燃料處理費用數據不全。
3. 西班牙 Jose Cabrera 費用估算有一部分在報告編寫時為已支出之實際費用，有一部分為尚未支出之預估值。
4. 法國之通用參考案例為同一廠址 4 部 900 MWe 機組。

表 4.3 NEA 問卷蒐集之立即拆除 PWR 及 BWR 三大類主要費用統計(2013 年美金幣值，單位百萬)

國家/機組及費用估算型式/MWe	除役工作: ISDC 04 + 07 (占總費用比率)	廢棄物管理: ISDC 05 (占 總費比率)	計畫管理: ISDC 06 + 08 (占總費用比率)	總費用
西班牙 Jose Cabrera/ PS/ 160	75.1(0.26)	12.8(0.04)	156.7(0.55)	285.5
西班牙/ PG/ 1,066	178.9(0.43)	22.6((0.05)	185.0(0.44)	417.5
瑞士/ PG/ 1,000	143.2(0.12)	116.9(0.10)	393.9(0.33)	1,200.6
法國/ PG/ 900	181.1(0.50)	69.0(0.19)	51.4(0.14)	365.0
西班牙 S. M. Garoña / BS/ 466	92.4(0.29)	18.6(0.06)	176.4(0.55)	323.6
西班牙/ BG/ 1,092	184.2(0.43)	34.0(0.08)	176.0(0.41)	424.8
占總費用比率平均值	0.34	0.09	0.40	

NEA 引用 PNNL 2011 年報告之除役費用數據分析：

由於 NEA 問卷調查回收結果不如預期，因此 NEA 試圖擷取已有之除役費用相關資訊以擴大取樣，當時選定同為本計畫參考資料之一的 PNNL 2011 年報告(詳如期末報告第 3 章)。PNNL 報告所蒐集之除役費用(數十組個別電廠除役費用估算及四座已完成除役機組之實際費用)所採格式與定義與 ISDC 大不相同，為便於相互比較，NEA 委請專家針對資料較齊全之部分機組資訊進行轉換，轉換的做法略述於 NEA 報告第三章的附錄 3A.2。轉換程序大致為：1)將 PNNL 報告蒐集之費用項目於了解其內涵後，視其分類詳細程度將其歸類(mapping)到 ISDC 第一階或第二階的對應項目，由於定義的不同，這種歸類有時是一對一，有時則是一對多，即 PNNL 某個項目分別依比例歸類到幾個 ISDC 第一/二階的項目裡，2)為方便與 NEA 蒐集資料比對，也將 PNNL 數據換算至 2013 年美金幣值。NEA 於執行轉換過程中發現最多僅能勉力將 PNNL 的數據歸類到 ISDC 第一階的項目中，鑒於資料不夠詳細所以無法歸類到第二階的項目。基於上述困難，NEA 並未如原規劃將 PNNL 數據與 NEA 數據進行比對，而僅針對 PNNL 數據說明其與 NEA 會員國普

遍做法的差異，以及可由 PNNL 資訊觀察到第一一些較值得注意的現象，這些結論與觀察綜整如下：

- 美國定義之廠區復原(site restoration)費用指無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠區復原費用，此費用於NEA會員國(主要為歐洲國家)為除役費用一部分，於美國則因非屬核管會之管制範圍，故未納入除役(執照終止)費用內，但電廠經營者為方便管理均將此費用涵蓋於除役計畫中(但與執照終止費用分開單獨列出)。
- 能否找到合適的廢棄物運送及最終處置路徑，將決定大型組件(如反應器壓力槽)需切割的程度，換言之這也將影響所需之拆除及廢棄物管理費用。美國Trojan電廠將大型組件採不切割而整體移除方式(one piece removal)以駁船送到距離不遠的華盛頓州的最終處置場，這是其實際除役費用較其他已完成除役電廠為低的主要原因之一。
- 地方政府較美國核管會嚴苛之環境保護要求可能大幅影響除役費用，典型的例子為美國Haddam Neck及Maine Yankee均因此而有較高的相關費用。
- PNNL數據顯示，廢棄物處理費用跟廢棄物數量有線性關係，但廢棄物數量跟機組功率關係並不明確。
- NEA整理轉換過的PNNL數據如表4.4，NEA報告中並未針對PNNL數據跟NEA問卷調查數據進行比對。

表 4.4 NEA 整理 PNNL 報告中立即拆除 PWR 及 BWR 三大類主要費用統計
(2013 年美金幣值，單位百萬)

機組型式/MWe	除役工作: ISDC 04 + 07 (占總費 用比率)	廢棄物管 理: ISDC 05 (占總費 比率)	計畫管理: ISDC 06 + 08 (占總費 用比率)	總費用
Haddam Neck (PWR)/ 590	366(0.44)	112(0.13)	341(0.41)	836
Maine Yankee (PWR)/ 931	160(0.31)	110(0.22)	204(0.40)	509
Trojan (PWR)/ 1,130	94(0.31)	52(0.17)	151(0.49)	308
Braidwood #1 (PWR)/ 1,178	204(0.38)	98(0.18)	214(0.39)	544
Braidwood #2 (PWR)/ 1,152	281(0.43)	92(0.14)	259(0.39)	661
Byron #1 (PWR)/ 1,164	200(0.36)	98(0.18)	222(0.40)	551
Byron #2 (PWR)/ 1,136	274(0.42)	92(0.14)	258(0.40)	652
Diablo Canyon #1 (PWR)/ 1,122	168(0.23)	180(0.25)	361(0.49)	732
Diablo Canyon #2 (PWR)/ 1,118	255(0.31)	180(0.22)	365(0.44)	821
Prairie Island #1 (PWR)/ 551	136(0.24)	94(0.17)	293(0.52)	561
Prairie Island #2 (PWR)/ 545	183(0.29)	98(0.15)	317(0.50)	636
Three Mile Island (PWR)/ 819	228(0.36)	120(0.19)	256(0.41)	625
Cooper (BWR)/ 758	159(0.27)	143(0.25)	248(0.43)	583
LaSalle #1 (BWR)/ 1,118	228(0.36)	132(0.21)	250(0.39)	635
LaSalle #2 (BWR)/ 1,120	262(0.38)	137(0.20)	261(0.38)	683
Oyster Creek (BWR)/ 619	226(0.35)	187(0.29)	214(0.33)	655
Vermont Yankee (BWR)/ 620	160(0.28)	145(0.25)	256(0.44)	577
占總費用比率平均值	0.34	0.20	0.42	

註：

1. 除役工作(ISDC 04 + 07)費用涵蓋非污染區之廠區復原費用，此費用非屬美國核管會規範之除役費用範圍。
2. 美國所定義之廢棄物管理(ISDC 05)費用涵蓋廢棄物之包裝、運送以及最終處置。

除役費用估算不確定性探討：

NEA 認為目前各會員國之除役經費估算存在相當的不確定性 (uncertainty)，各會員國通常都以編列應變準備金(contingency)來處理不確定

性的議題，但在處理/計算方式上各有不同做法。NEA 認為應該建立一套各國皆可採用之處理方式，也因而特別針對不確定性議題進行討論。NEA 認為由於缺乏對除役工作/費用細節的全盤掌握，因此所有除役費用估算均多少存在所謂的「因缺乏適當知識而產生之不確定性」，而要降低這種不確定性的唯一方法只有隨時蒐集經驗回饋及新技術發展，以定期更新除役費用估算。NEA 理解要蒐集跨國或跨廠實際除役廢資訊有其難度，但還是十分肯定定期更新除役費用估算的必要性。

NEA 由問卷調查回應資料中發現各會員國在處理不確定性議題上做法不一，包括有法律規定固定應變準備金比例(瑞士，為總費用 30%)、運用工程經驗編列應變準備金(芬蘭，平均約為總經費 9%)、以風險評估方法計算應變準備金比例(斯洛伐克，平均約為總經費 8%)、結合風險評估與專家判斷訂定應變準備金比例(英國，平均為總經費 17%)等方式。

ISDC 在架構上是將應變準備金放在每一個可以估算的項目內，不論可估價項目是細分到哪一階，該項目都可依照標準分類分別估算該項目之勞務費用、設備費用、其他費用、以及應變準備金。這種方式算是一種決定性(deterministic)估算方法，跟以蒙地卡羅(monte carlo)隨機取樣的機率(probabilistic)方式不太一樣。按採機率方式處理不確定性的方式通常用於風險分析(risk analysis)，這是一個比較複雜的過程，不在此 NEA 報告討論範圍內。

NEA 報告特別提醒，不論是採決定性或機率性方式處理不確定性，其涵蓋的範圍僅限於(除役)計畫工作內已知存在的不確定性(uncertainty，如切割反應器壓力槽所需費用)以及不可預測但根據過去經驗相當可能會發生的狀況(unforeseeable，如拆除工作時發現不確定來源之污染)。所以應變準備金僅涵蓋上述兩種未完全掌握之情況，至於計畫範圍之外的情況，如通貨膨脹與管制法規因故改變(如外釋標準)等外在因素，通常需要另行利用社會經濟學的風險分析方法去處理。NEA 認為對除役費用估算來說，不確定性是重

大議題而需要妥善處理。本報告提到當時 NEA 正規畫與 IAEA 合作進行此議題(與風險)的研究，預計 2016 年底會出版相關報告。

NEA 報告(第 3.5 節)針對提供較詳盡訊息之 6 個國家進行案例分析(case studies)，這 6 個國家(機組)分別為：芬蘭 Loviisa 廠兩座運轉中 VVER-440 機組；荷蘭 Dodewaard 一座於 1997 年永久停機之 BWR(55 MWe)；斯洛伐克 Bohunice V1 電廠兩座於 2006 年永久停機之 VVER-440 機組；西班牙 Jose Cabrera 一座於 2006 年永久停機之 PWR(160 MWe)；瑞士通用案例(參考電廠為一座 1000 MWe 之 PWR)；英國通用案例(氣冷式 Magnox 機組)。這 6 個案例分析會在後續章節中擇要討論，而各案例詳細內容則分別詳列於本報告第 4.6 至第 4.11 節，每節之主要內容包括：該國除役法規、除役費用隨時間之變化、影響除役費用因素、不確定性處理方式、以及經驗回饋等。

除役費用隨時間之變化：

NEA(報告 3.6 節)首先聚焦在除役費用隨時間變化的議題上，前面提到的 6 個案例中有 3 個提供此方面的訊息，分別是瑞士、英國及芬蘭。芬蘭的除役費用估算自 1983 年第一次提出後每 5-6 年更新一次，本報告蒐集之最新資訊為 2012 年更新版。當把每次更新估算費用都轉換成 2012 年幣值再比對時，發現只在 2008 年有較大幅度的增加(約 20%)，這是因為當時管制單位修正廢棄物外釋規定(修正後為 100 貝克/公斤)。

瑞士法規要求除役計畫需每 10 年更新一次，而除役費用估算及廢棄物處理費用則應每 5 年更新一次；比較 2011 年及 2001 年之除役費用估算(均已調整為 2011 年幣值)，平均約增加 17%，本報告認為主要原因為法規要求在除役過程中仍要維持運轉活動 (operational activities required during dismantling)。而在與除役費用分開的廢棄物處理費用(post operational phase cost)上，2011 年僅較 2001 年平均增加 2%。有關瑞士在此議題之較詳細訊息，將於第 4.10 節瑞士案例分析中詳述。

英國氣冷式(Magnox)機組係採延後拆除策略，平均安全貯存(SAFSTOR) 85 年後再進行實質除役工作，英國認為屆時除役技術應更成熟，所以可以進一步節省經費。

NEA 綜整此 3 個案例分析及過去相關研究經驗後，提出下列 5 項建議：

- 至少每5年更新一次除役費用估算，遇有重大變化時(如外釋法規改變)應立即更新。
- 除役經驗回饋可有效降低除役費用。
- 當大家都用相同/類似費用估算方法時，才可能進行相互比對。
- 目前要盡一切努力將除役費用預估控制在與實際費用差異在-15%到+30%間。
- 應善用艦隊效應(同一型機組之經驗回饋)以降低除役費用。

NEA 結論與建議：

NEA 報告(第 3.7 節)彙整除費用資訊分析心得(lessons learned)，分成 7 個主題分別提出：

- 除役所需資源及管理策略：NEA認為除役需要專業的大型工業計畫管理人才；為應對多變的工作本質，管理系統要具備充分的彈性與機動應變能力；除役為勞力密集工作，但又要具備相關的專業能力，因此如何選擇適當的外包策略十分關鍵；運轉階段原有人力如何在停機後之過渡階段有效轉為除役人力也是關鍵議題；下包商對核電廠作業要求的熟悉度會影響其效率；不同下包商之間，以及電廠本身團隊與下包商之介面處理要特別重視；嚴密控制除役進度是節省除役費用的不二法門。NEA認為上述各項議題之妥善處理有助於除役所需時程與經費。
- 污染特性調查與廢棄物數量：特性調查的詳細程度與準確程度將影響廢棄物數量，而廢棄物數量將直接影響所需除役費用；外釋標準

也會影響除役費用；就算符合外釋標準，外界回收可外釋廢棄物的意願仍然很低。

- 廢棄物管理：廢棄物最終去處最好在除役前就已明確化；廢棄物若需中期貯存會造成除役費用增加。
- 政策與管制法規：法規要明確且保持一致性；管制範圍及程度均會衝擊除役費用；廠址在何種標準下可外釋仍缺乏足夠的國際通用經驗。
- 除役工作執行：用過燃料處理的延遲會嚴重衝擊除役費用；若缺乏完善的前置作業，除役費用估算通常不確定性偏高；重複型工作第一次執行時要特別注意；反應器壓力槽及其內部組件的切割工作需要完善的事前整合。
- 強化掌握：善用別人的實際經驗；費用估算技術要隨發展趨勢隨時更新。
- 其他：及早跟利害關係人溝通。
- 艦隊效應(fleet effect)有集中式管理與可擷取並善用除役經驗 (lead and learn) 等優點，但採行時須充分了解各機組間的異同。

NEA 在總結中提出以下幾點結論：

- 透過問卷調查及公開資訊以取得除役費用之全貌(細節)目前有其無法克服的障礙：商業機密。
- NEA在此報告展現誠意公布所有資訊，期望可拋轉引玉。
- PNNL數據較NEA數據有更高的一致性。(編註：因為PNNL數據中，除有兩個電廠是由Energy Solution公司編製外，其餘皆由TLG公司編製)。

編者研析心得與建議(含延伸閱讀)：

- 1) 透過各國管制機關之資訊交換或許是解決除役費用詳細資訊難以取得的

方案之一，前提要件是：A)雙方對等交換，B)各國電廠經營者及其下包商不反對或不消極「抵制」。另一較可行解決方案為「鼓勵」核電廠經營者自行建立實際除役費用資料庫。(B 類)

- 2) 利害關係人(stakeholders)對除役工作的信心在我國已是一個重要議題，在可見的未來其重要性應會逐步提高。
- 3) 比對表 4.3 及 4.4 可發現在除役作業費用(ISDC 04 + 07)上，NEA 與 PNNL 數據占總除役費用之比率同為 0.34；PNNL 數據之廢棄管理費用(ISDC 05)則明顯高出 NEA 國家平均值(0.20 對 0.09)，主要的理由應是美國所定義之廢棄物管理費用包括廢棄物包裝/運送/最終處置，而 NEA 大部分數據僅涵蓋廢棄物包裝(場內暫貯)；在計畫管理費用(ISDC 06 + 08)上，兩者占除役總費用平均值也是相當(0.42 對 0.40)。(C 類)
- 4) (延伸閱讀)經查 NEA 與 IAEA 於 2017 年共同具名發表 NEA No.7344 報告"Addressing Uncertainties in Cost Estimates for Decommissioning Nuclear Facilities"(核設施除役費用不確定性評估)，該報告重點內容如下：(C 類)
 - 不確定性來源包括工作本質(如工作環境)之變化、估算者對相關狀況的掌握不足、除役計畫外部影響因素等，前兩者在該報告定義為計畫範圍內(in scope)不確定性(uncertainty)，後者則定義為計畫範圍外(out-of-scope)風險(risk)。
 - 不確定性及風險都需要透明化估算，以提升所有利害關係人對除役工作的信心。
 - 當不考慮不確定性及風險時，電廠經營者所提出的除役費用估算稱為「基礎費用(base cost)」，當加入不確定性後稱為「(除役)計畫基本費用(project baseline cost)」；當再加計風險後，才是除役總費用。
 - (計畫內)不確定性的處理方式可再分為兩大區塊：估算餘裕(allowance)及應變準備金(contingency)。估算餘裕用於在短時間內會明朗化的估算(如反應器壓力槽之拆除總價將於決標後

明確知道)；不屬於估算餘裕的計畫內不確定性則由應變準備金涵蓋。

- 應變準備金通常可針對整個除役計畫以專家判斷方式給一個基礎費用的百分比，或針對不同性質工作群組各給一個百分比，或針對每項可估算費用之工作項目各給一個百分比(ISDC標準做法)。三者精確度有差異，在所需付出的努力/資源上當然也有差異，經營者通常會衡量得失後採行最適當方式進行。意外準備金之處理也因此通常為決定式(deterministic)，此與風險之通用處理方式有所不同。
- 計畫外風險通常採機率式(probabilistic)方法來評估，評估後通常會針對發生機率較高的部分編列經費以備不時之需，這種經費稱為風險準備金。物價上漲、管制法規修正、政策改變等均屬這些已編列經費之風險(funded risk)的涵蓋範圍。
- 理論上除役計畫總經費應該是：基礎費用+估算餘裕+應變準備金+風險準備金。估算餘裕跟應變準備金有很大的機會被完全支用；相對而言，風險準備金則不一定會用到。

- 5) 除役所需之大型工業計畫管理人才：核電經營者內部之(非核能部門)應具備此種專業人員；管制單位則可藉由新進人員專業要求或委外方式建立。下包商介面管理、管理系統應變/彈性機制、以及除役時程控管機制等可列為管制視察重點。(A類)
- 6) 污染特性調查十分關鍵，除役計畫中之初步特性調查應於停機後、實質除役前再次執行以儘可能反映實際狀況。(A類)
- 7) 廢棄物管理：需考量各國特有情況，研擬各種可能發展(scenarios)之相關對策，各對策應該有對應之後續廢棄物處理/置費用估算。(B類)
- 8) 「鼓勵」經營者建立持續蒐集國際相關資訊與累積國內實務資訊之機制。(A類)
- 9) 核一、二廠有其相似之處，核一除役經驗應可為核二廠參考；對不同型

式之核三廠，如投入適當資源整理核一、二廠經驗，應也有可供借鏡之處。在跨國資訊難以取得的現況下，自行建立艦隊效應或許是最佳選擇。

(B 類)

4.4 NEA 各會員國除役基金機制(NEA 報告第 4 章)

本章聚焦於經由問卷調查所蒐集之各 NEA 會員國如何籌措及管理除役基金，也同時將 NEA/IAEA/EC 過去所彙整的相關資訊一併納入參考。綜整資料顯示各會員國均已將除役相關基金法制化，內容包括基金籌措機制、管理機制、管控與監督機制、以及基金不足時之補足機制等。

在基金籌措機制方面，大致可分為將除役及廢棄物處理合併為一個後端基金，或將兩者分開為兩個獨立基金等兩大做法。基金來源都是由售電收入徵收一定百分比，但有些國家只由核能發電之售電徵收，有些則是由所有售電收入中去徵收。基於使用者付費原則，核電機組經營者要負責基金之籌措，例外的狀況為由政府負責老舊設施(legacy site)的除役基金，另一個例外是斯洛伐克當初加入歐盟承諾停止部分 VVER 機組之運轉，所以這些機組的除役基金由歐盟支應一大部分。大部分國家均要求除役基金應於機組永久停機前全數到位(包括美、韓等 9 國，其他 5 國則要求更早)，而籌措時程規劃則交由經營者自行決定。

在基金審查機制上，各國做法不同，表 4.5 整理出 12 個國家除役基金的審查負責單位與審查頻率。審查頻率為 1 至 6 年一次，而管制單位除自行審查外，也會要求經營者或除役專責組織進行內部(委託獨立第三者)審查。

在除役基金管理上，給予回覆的 13 個會員國中有 4 國是由機組經營者自行管理(捷克、法、韓、西班牙)，有 7 國由獨立之第三者管理(比利時、義大利、斯洛伐克、瑞典、瑞士、英、美)，另 2 國(加拿大及荷蘭)則無特別規定。由獨立第三者管理的優點包括透明度較高、基金破產風險低、公眾信心較高，較常為各國採用。

表 4.5 NEA 會員國除役基金審查負責單位與審查頻率

國家	除役基金審查負責單位	審查頻率 (年)	備註
比利時	機組經營者	3	
捷克	N/A	5	未回覆審查負責單位
義大利	機組經營者	1	
英國	除役專責組織	1 或 5	成立除役專責組織(NDA)；NDA 負責機組每年審查，法國電力(EDF)負責之新機組為每 5 年一次
加拿大	機組經營者及核能管制單位	5	
芬蘭	機組經營者及核能管制單位	6	
法國	機組經營者及核能管制單位	1	
韓國	N/A	2	未回覆審查負責單位
荷蘭	機組經營者及核能管制單位	N/A	未回覆審查頻率
西班牙	除役專責組織及核能管制單位	1	成立除役專責組織(Enresa)
斯洛伐克	除役基金管理專責組織(非機組經營者)	N/A	未回覆審查頻率
瑞士	除役基金管理專責組織(非機組經營者)	5	
瑞典	核能管制單位	3	
美國	核能管制單位	1	

在除役基金之管控與監督機制上，普遍面對的挑戰是機組因故提早除役、通貨膨脹、除役費用因故大幅上升、基金投資獲利不如預期等現象。在某些特殊情況下(如基金被挪用或發生戰爭)，也可能會使基金面臨危機。一般而言，由機組經營者自行(內部)管理的機制比由獨立第三者管理的機制存有較高風險。在基金管控上各國做法不一，但不外乎在基金可投資項目、基金可借用對象及比例、基金用途、基金於特定期間之使用比例上限等議題上訂定明確規範。在基金可投資項目上，機組經營者當然希望可投資(高風險)高報酬項目以降低需籌措之資金，但管制單位則相對希望投資(低風險)合理報酬項目。所以各國大多規範只能投資比較可靠的債券、股票、不動產等，且嚴禁投資跟機組經營者相關的任何產業；例如瑞士就明文規定各項可投資項目之百分比上下限以分散風險。部分國家允許機組經營者或政府借用除役基金，但均明訂上限；芬蘭除有類似比利時之規定外，政府也可借用未被經營者借用之基金。原則上各國均規範除役基金不得挪用於非除役相關工作上。

在進行除役基金審查時，在與除役費用估算比較後若發現有不足現象，就需要設法補足。在此議題上需要先釐清的應該是除役基金累積跟除役費用估算的更新審查頻率要先設法保持一致，在基金有不足之現象時才能及時發現。當發現基金不足時，大部分國家均規範機組經營者須於一定時間(1-5 年不等)內設法補足。補足的方法大致是採提高自售電籌措之百分比，但若機組已處於除役階段才發現基金不足、且已無法自售電收入籌措時，就只能由經營者自其現有資產或收入一次撥付補足。

於探討前述議題後，NEA 總結下列結論：

- 基於使用者付費原則，核能機組經營者應負起籌措除役基金的完全責任；基金來源絕大都是逐年由售電收入提取一定之百分比。
- 除役費用估算為確認除役基金是否足夠的關鍵比對數據，其精準度需要確實掌握。
- 除了要確保除役基金是否足夠外，也要確認資金是否可於需要支用

時及時到位。

- 除役基金之審查應持續進行直至除役工作結束，以降低基金不足之風險。
- 應建立基金不足時之補救機制。

NEA 報告第 4 章之附錄 4.A1 列出瑞典、瑞士以及英國較詳細之除役基金運作方式，主要重點分別敘述如下：

- 瑞典：只有一個由政府管控之基金，以支應除役及廢棄物處理所需費用；各機組除役費用估算及基金籌措/支用現況每3年由管制機關 (Swedish Radiation Safety Authority, SSM) 審查一次，審查結果上報基金管理單位(Nuclear Waste Fund, NWF)；目前基金收取費率是每度電0.04瑞典克朗(約0.132台幣)，除此之外，核電經營者尚須繳交兩筆保證金，一筆供機組若提早除役時之用，另一筆供萬一基金不足時使用；基金在1996-2012年間之平均投資報酬率為5%。
- 瑞士：除役及廢棄物處理分別成立基金；每5年審查一次機組除役費用估算及基金結餘現況；鑒於過去除役費用估算年年快速增加的經驗，2014年立法強制要求編列30%的應變準備金(contingency)。
- 英國：就除役及廢棄物處理成立共同基金，但共同基金有3個，第一個是除役專責機構(NDA)所擁有之氣冷式反應器Magnox機組專用，由政府出資，此基金每年審查一次；第二個是8座由法國電力公司(EDF)運轉之較新機組專用，資金來源大部分政府提供，少部分由EDF自售電收入徵收，此基金每5年審查一次；第三種是新建機組專用，建造前就須提出獨立基金的完整規劃。

4.5 NEA 研究之結論與建議

本項由 NEA 主導之研究，原規劃達成 3 項目標：1)蒐集各國除役費用資訊以了解除役費用如何隨時間變化、不確定性如何反映在應變準備金上、以及影響除役費用的因素等議題；2)回顧 NEA 會員國的除役基金管理機制；3)以實際的除役費用案例來評估建立除役費用標準分類之可行性。為達成這些目標，本研究設計問卷向會員國蒐集相關資訊，問卷內容涵蓋 3 大部分：1)國家除役政策與財務安排，2)個別機組的除役策略，3)個別機組以除役費用通用國際架構（ISDC）格式編製之除役費用資訊。本研究最終收到 16 個會員國對問卷的回覆，但其中只有 5 個會員國有對問卷第 3)部分的定量問題做出回應，分別是法國、西班牙、芬蘭、瑞士以及斯洛伐克。而美國及德國這兩國雖已有近 10 個商用核電機組除役經驗，但都未給予回覆。

本研究探討會員國不踴躍/樂意提供定量數據的原因可能為：1)除役市場未來商機很大，除役費用估算或實際除役費用為重要商業資產/機密，2)核電機組經營者跟政府正處於一種緊張關係中，不太願意公開敏感訊息，這現象在已確認採行非核政策的國家中更是明顯，3)雖然各國認為有 ISDC 這種通用平台很好，但由於缺乏實際運用經驗，要花不少功夫才可能將用其他方法建立的除役費用數據轉換成問卷請求的 ISDC 格式。在定量數據回收不如預期的情況下，NEA 研究團隊轉而設法取得已公開之相關資訊，最後鎖定 2011 年美國核管會委託 PNNL 國家實驗室執行之相關研究。原本研究團隊期盼將 PNNL 數據轉換成 ISDC 格式後，兩組數據可彙整進行綜合評估，但基於下列理由及事實，最後還是選擇將 NEA 問卷調查定量資訊與 PNNL 數據分別呈現：1) PNNL 蒐集之美國機組除役費用之格式與 ISDC 不同，2) PNNL 數據組數多於 NEA 問卷調查取得之組數，若放在一起評估，恐無法呈現 NEA 會員國的數據特性，與研究目標略有不符，3) PNNL 數據大部分是估算，只有 4 組是已完成除役之實際費用，但此 4 組實際費用又缺乏可比對之原始估算數據，對本研究設定目標之助益有限。

在前述限制下，除役費用定量比對未能完全達成本研究之原始設定目標，但在定性分析方面仍有一些結論與建議。研析 NEA 與 PNNL 數據後可發現影響除役費用的主要因子(cost driver 或 cost driving factor)有 9 個，本研究針對這些因子分別提出處理建議：

- 應盡速建立國際通用之除役策略，此策略應盡早確立(如於新機組建造前)以利後續之除役基金籌措、管理、運用。
- 除役管制法規應明確且有可預測性(長期之一致性)，因法規之改變將衝擊除役費用。
- 除役前之準備作業(如廠區輻射特性調查等)十分關鍵，應盡可能詳盡精準。
- 高階廢棄物處置雖通常不計入除役費用中，但其與除役費用涵蓋範圍應該明確釐清。
- 除役產生之廢棄物處理要有完善之事前規劃，其路徑(暫貯廠內或直接送處置場)要事先確認，管理手段要機動保持彈性以應對非預期事件。
- 廢棄物最終處置雖通常非屬除役費用範圍，但其規劃、接收標準、何時可啟用等均將影響除役作業/費用；另廢棄物之外釋標準應清楚定義，以利相關除役作業之執行。
- 廠區復原/外釋標準要及早確定並明確定義。
- 人力費用占除役費用相當比例，應規劃如何將原運轉人力轉為除役團隊之最佳做法；除役作業大部分自行執行或統包下包商也要仔細做好評估。
- 除役費用之風險、不確定性、應變準備金編列等議題值得投入資源進行研析。

有關除役基金的籌措、管理、監督等議題，NEA 也提出下列結論：

- 現有的各國除役基金籌措方式都已法制化，雖然各國細部做法不完

全一樣，但架構上應沒有大問題。基金(以及對應的費用估算)定期審查/更新機制一定要確實執行，以確保基金足夠且能及時到位。

- 基金籌措之責任分工務必要明確，使用者付費仍然是各國通用的基本原則。
- 除役費用估算的精確性是關鍵中的關鍵，現有估算仍存有相當之不確定性，目前只能透過定期更新以納入最新估算方法及經驗回饋來逐步提升估算準確度。
- 為確保除役基金足夠且能及時到位，除役費用的相關不確定性及風險務必要設法處理。
- 應建立完善的除役基金監管機制，基於風險及不確定性的存在，基金萬一不夠時的補足機制要明確可行。

NEA 認為只有充分提升除役費用估算之透明度，才可能在可見的未來將除役費用的不確定性及風險降到最低。目前在此議題最大的障礙有二，一為各國對除役費用估算之假設及邊界條件(boundary condition)相當不一致，第二則為各國基於種種考量不是很願意釋出除役費用估算或實際除役費用之細部資訊。NEA 認為 ISDC 經適度修正後或可為各國採用而有較統一的估算做法；而在解決無意願釋出詳細資訊的障礙上，NEA 也建議可參考國際上蒐集職業輻射暴露資訊的 ISOE (Information System for Occupational Exposure)系統之架構及作法，逐步建立適用核能機組除役費用相關資訊整合系統。

編者謹就 NEA 研究提及之 ISOE 進行延伸閱讀。按 ISOE 由 NEA 於 1992 倡議成立，IAEA 於 1993 加入成為共同贊助單位(co-sponsor)。ISOE 官網資訊顯示，至 2017 年底共有 31 個會員國的 76 個電廠經營者(擁有 347 座運轉中機組及 55 座已停機機組)與 26 國管制單位加入 ISOE。ISOE 為職業輻射暴露資訊交換平台，加入此平台之機組的發電量占全世界的 85%，ISOE 每年出版年報分享所蒐集之相關資訊，最新一期為 2017 年。

4.6 芬蘭 Loviisa 電廠除役案例(NEA 報告第 6 章)

芬蘭 Loviisa 共有兩座前蘇聯 VVER440 機組(440 MWe)，分別自 1977 年及 1980 年起商轉，原設計運轉壽命為 30 年，已被核准延役至 50 年。除役計畫(Decommissioning Plan, DP)於 1983 年編製，爾後每 5-6 年更新一次，目前採停機後立即拆除策略。

1 號機預計於 2027 年永久停機，2 號機則於 2030 年永久停機。機組停機後將先進行 2 年之準備(過渡)作業，此期間之主要工作是將用過燃料移至濕式暫貯池、一次側系統沖洗除污、以及新建輔助建築等。準備作業完成後，規劃於 2035 年完成(第一階段)廠區除役作業，僅保留用過燃料濕式貯存池與液體廢棄物固化及暫貯廠，待相關最終處置場備便後再於 2065-2069 年進行第二階段除役作業。

本電廠之特有除役情況包括：廠區最終狀態為限制性使用(工業用途)、用過燃料暫貯於廠區內 35 年、廠區內設有中低階廢棄物處置場故大型設備(如反應器壓力槽、蒸汽產生器、壓力槽等)皆不用切割而可整體移除等。

除役固體廢棄物分為活化(activated)廢棄物與污染廢棄物兩大類，兩部機組之除役活化廢棄物總量預估為 2,744 公噸(4,323 立方米)；除役污染廢棄物總量預估為 15,850 公噸(23,746 立方米)；液體廢棄物約為 2,080 立方米。

該電廠預估除役共需要 2,955 人年(含第一及第二階段)，其中電廠團隊為 1,695 人年，下包商為 1,260 人年。尖峰人力出現於 2 號機停機後，2031 年預估共需 427 人，其中電廠團隊 297 人，下包商 130 人。人力(事)費用為影響除役費用主要因子，電廠除役團隊及下包商人力之費用約占除役總費用之 70%。

兩部機組除役費用估算(2012 版)為 3.59 億歐元，內含 10%之應變準備金。根據電廠提供資訊顯示，自 1983 年以來之除役預估費用大致僅依照物

價上漲率(Annual Escalation Factor)增加，但在 2008 年曾大幅增加約 20%，其主要原因是管制單位修正輻射物質外釋標準：由原 10,000 貝克/公斤下修為 100 貝克/公斤。

4.7 荷蘭 Dodewaard 電廠除役案例(NEA 報告第 7 章)

此電廠擁有單一機組 GE BWR，額定功率為 55 MWe，於 1968/10 商轉，1997/3 因機組過小缺乏市場競爭力而永久停機。目前採先安全封存再除役規劃，預計於 2045 年開始實質除役工作。

運轉期間低放廢棄物於停機後送至廠外集中式暫貯場(COVRA)；用過燃料則是送到英國進行再處理，回送之 28 罐高階玻璃固化廢棄物也暫貯於 COVRA。另規劃除役後廠區最終狀態為無限制使用。

目前估算之除役費用為 1.8 億歐元，其中除役廢棄物處理/運送/處置費用約占 25%。預期於 2045 年開始時除除役時可採新的除役技術而降低部分費用，但也很可能因下列因素而使除役費用上升：廢棄物處理費用近年大幅提升、核電機組保險費用於福島事件後調漲、保全/安相關法規要求趨嚴、一般回收廠家接收符合外釋標準廢棄物的意願偏低。

4.8 斯洛伐克 Bohunice V1 電廠除役案例(NEA 報告第 8 章)

斯洛伐克於 1999 年申請加入歐盟時，承諾會將 Bohunice V1 兩座 VVER 440 機組提前除役(分別於 1978 及 1980 年開始商轉)。斯洛伐克遵守承諾將 1 號機於 2006/12 永久停機，2 號機也於 2008/12 永久停機，為彌補提前停機之損失，歐盟透過歐洲復興開發銀行(European Bank for Reconstruction and Development, EBRD)撥款協助其除役工作。

此電廠採立即拆除策略，規劃於 2011 年展開實質除役作業，並 2025 年完成所有除役工作，除役後廠區將釋出為工業用途。由於受到歐盟資助，此電廠之除役費用估算採 NEA/IAEA 倡議之 ISDC 格式。

兩部機組估算將產生共 243,000 公噸之(中低)放射性廢棄物，其中活化廢棄物有 1,390 公噸，活度共 $2.03\text{E}+17$ 貝克；污染廢棄物有 241,610 公噸，活度共 $1.17\text{E}+13$ 貝克。斯洛伐克當時在 Mochovce 有一座低放廢棄物處置場，而未能符合該處置場接收標準之廢棄物(大部分應是活化廢棄物)則貯存於廠內新建之暫貯廠內。

在除役經費估算上，應變準備金以總經費 10%計算，而跟其他 NEA 國家較不相同的是廢棄物運送及最終處置都涵蓋在除役經費中。表 4.6 列出各項主要費用占總除役經費(11.41 億歐元，2011 年幣值)之比率，同時列出以供比較的為 NEA 及 PNNL 輕水式電廠(BWR 及 PWR)的平均比率。由表 4.6 可看出「除役工作」占總經費比率(0.29)與 NEA 及 PNNL 平均值相當(同為 0.34)；廢棄物管理費用比率(0.29)與 PNNL 平均值(0.20)也相當，但較 NEA 平均值(0.09)為高，主要原因是 NEA 會員國通常未將廢棄物運送及最終處置費用計入除役費用中；而在計畫管理費用上，占總除役經費比率(0.29)雖較 NEA(0.40)及 PNNL(0.42)為低，但其絕對值(333.6 百萬歐元，2011 幣值)仍較 NEA(平均約為 200 百萬美金左右，2013 幣值)及 PNNL(平均約為 250 百萬美金左右，2013 幣值)為高，這是因為所有費用均需先經 EBRD 繁複審核程

序所造成。

NEA 研究提出一個有趣的現象：依照 EBRD 標準作業程序，任一計畫之預算於執行時若有不足，需再度進行評估審查程序，因此所有估算費用均有高估現象。由 2011-2014 年預算執行結果來看，標餘款共計有 40 百萬歐元。

表 4.6 斯洛伐克 Bohunice V1 電廠除役三大類主要費用統計(2011 年歐元幣值，單位百萬)

機組型式/MWe	除役工作: ISDC 04 + 07 (占總費用比率)	廢棄物管理: ISDC 05 (占總費比率)	計畫管理: ISDC 06 + 08 (占總費用比率)	總費用
VVER /440(兩部)	332.6 (0.29)	326.6 (0.29)	333.6 (0.29)	1141.3
表 3.3 NEA 輕水式電廠平均值(占總費用百分比)	(0.34)	(0.09)	(0.40)	N/A
表 3.4 PNNL 輕水式電廠平均值(占總費用百分比)	(0.34)	(0.20)	(0.42)	N/A

4.9 西班牙 Jose Cabrera 電廠除役案例(NEA 報告第 9 章)

西班牙 Jose Cabrera 電廠為該國第一座核電廠，1969 年起商轉，2006/4 永久停機，該廠擁有一座 160 MWe 的西屋單迴路壓水式反應器(PWR)。機組永久停機後先進行一次側管路化學除污以及將用過燃料由燃料池移到廠區內乾式貯存場等過渡階段工作，於 2010/2 取得管制單位核可後將整廠依照法律規定移交給除役(及廢料處理)專責單位 Enresa。根據 NEA 報告資訊，原規劃於 2017 年完成實質除役工作並將整廠移交回運轉單位作為工業用途(編註：據 World Nuclear News 2019/11/1 報導，Enresa 稱當時已完成 89%除役工作，故應較原規劃時程略有延遲)。

除役產生之中低階廢棄物估計共有 4,000 公噸，將全數送往位在 El Cabril 之最終處置場；不符合接收標準之超 C 類(主要是切割後壓力槽內部組件)已裝在 4 個密封鋼筒中，跟用過燃料一起放在廠區內乾式貯存場。

除役作業尖峰人力估計約在 250 人(2011-2015 年)，其中下包商人力約占一半。在除役經驗回饋議題上，該電廠針對下列議題提出其觀點：

- 計畫規劃：通常會低估放射性及有害工業廢棄物之數量、對除役期間尚須運轉系統之評估通常過度樂觀。
- 與管制單位互動：通常會低估管制單位審查核可議題(如新增系統、設計變更或除污標準)所需時間、非預期法規修改常導致須修改與下包商之合約內容。
- 下包商管理：下包商需要一段時間以熟悉核能文件/程序要求、不同下包商之介面需用心注意協調。

4.10 除役通用案例(NEA 報告第 10 章)

瑞士聯邦政府於 2011 年福島事件後宣布停止接受新建核電機組之申照，當時運轉中 5 部機組則可運轉至執照到期(通常為 50 年)，此政策於 2017 年公民投票中複決通過。根據世界核能協會(World Nuclear Association, WNA)網路資訊顯示，Muhleberg (BWR)機組已於 2019 年永久停機，其餘 4 部機組(3 部 PWR 及 1 部 BWR)之運轉執照應於 2019 至 2034 年間分別到期。

瑞士設立兩個除役相關基金，一為除役專用基金(decommissioning fund)，涵蓋除役廢棄物之處理及處置費用；另一為專用於運轉期間廢棄物及用過燃料處置之廢棄物處置基金(waste disposal fund)，均由核能機組經營者負責籌措。瑞士法令規範此兩個基金結餘每 5 年需重新評估一次，本章編寫時的最新版本為 2011 年。

跟其他國家(或 ISDC 定義)較不相同的是瑞士另外定義一個「停機後運轉階段(post-operational phase)」，這相當於其他國家定義的停機後(實質除役前)之「過渡階段」。瑞士法令規範此階段最長為 5 年，主要工作為處理運轉時期累積之廢棄物，以及將用過燃料自廠房內移到中期乾式貯存廠(室內)。停機後運轉階段之相關費用不屬於前述兩個基金之範圍，而是由機組經營者自行支付(就像自行支付運轉期間相關費用的模式)。瑞士法令也規範機組於永久停機後 15-20 年內必須完成除役作業，再將廠區復原至無限制使用狀態。

瑞士提供之除役費用估算相關資料中，有比對 2011 年最新版及前一版(2006 年)除役費用，結果顯示平均增加 17%(已扣除通膨因素)。分析上升的因素是因為以前低估了「拆除期間之運轉相關費用(costs for operations during dismantling)」，這是指運轉新建廢棄物集中處理設施以及廢棄物暫貯設施所需之費用，這一點是依據德國實際除役經驗而來。

瑞士核能管制單位(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)已審查接受經營者所提之 2011 年版除役費用/基金估算，ENSI 於審查結論中認

為未來實際除役費用應該會落在此估算值的-15%到+30%之間，這也是後來瑞士法令規定除役費用之應變準備金(contingency)應直接設定為 30%的主要理由。

瑞士目前已有最終處置場可容納核能機組運轉期間產生的廢棄物，但預計要到 2035 年才會有中低階廢棄物最終處置場可供除役廢棄物使用，而高放廢棄物處置場則規劃至 2065 年方可啟用。所以各機組之除役廢棄物、用過燃料、以及 2003 年送至國外再處理用過燃料之返還玻璃固化廢棄物目前均暫貯於廠區內或廠區外集中式暫貯設施中。瑞士目前除役規劃都假設為永久停機後立即拆除策略，但仍保留延後拆除之可能性，本報告所有提到之除役費用估算均假設採用立即拆除策略。

4.11 Magnox 電廠除役通用案例(NEA 報告第 11 章)

英國除役專責機構(Nuclear Decommissioning Authority, NDA)成立於 2005 年，專責英國公有 19 座核能設施之除役及廢料處理工作。英國公有核設施中有 11 座為早期氣冷式商用反應器(Magnox)，除 Calder Hall 機組於本報告編寫時尚在運轉(2015 年停機)外，其餘 10 座 Magnox 機組均由 NDA 負責規劃除役工作。

英國 Magnox 機組除役策略為延後拆除，平均延後時間約為 85 年。Berkeley 機組於 1989 年成為第一座永久停機之 Magnox 機組，而最後一座(Wylfa)則是於 2015 年永久停機。NDA 規劃於 2028 年將所有 Magnox 機組置於安全封存狀態(care and maintenance phase)，等到 2070 至 2105 年再依序完成各機組除役工作。NDA 的策略是採逐步除役以善用「邊做邊學(lead and learn)」所能汲取的經驗，合理降低整體除役所需時程與經費。在進入安全封存狀態前的主要工作包括將用過燃料移出廠房外、拆除燃料池、拆除安全封存用不到的系統、安全封存準備等。為落實「邊做邊學」概念，NDA 針對共通性關鍵議題成立了 4 個中型計畫：

- 1) 用過燃料碎屑回收及處理；
- 2) 燃料池清理拆除；
- 3) 中階廢棄物(主要是石墨)管理；
- 4) 設備/廠房拆除技術。

NDA 宣稱透過這些計畫與其他配合措施的落實，已成功降低總除役費用達 18 億英鎊(約 666 億台幣)，並縮短全部時程達 30 機組-年。

NDA 面對的特有挑戰有二，一是機組運轉中產生的中階廢棄物暫貯於年代已久的地窖中，取出重新包裝有其技術難度；二是有一些廠區仍有其他機組在運轉或新建中，須注意處理介面議題。在除役經驗回饋議題上，英國提出下列觀點：

- 將執行安全分析、風險評估、費用估算、與管制單位互動等支援功能集中化(centralization)，可節省可觀之人事經費。
- 除役資金若未能及時到位，將先衝擊相關時程，並進而導致費用增加。
- 要深入了解特定工作之內涵與性質，並經詳細評估以決定是要採自行培養執行團隊或直接下包專業團隊之策略，評估是否精準將嚴重衝擊所需費用。
- 「邊做邊學」概念已證實有其成效，要盡可能善用。
- 延續「邊做邊學」概念，可考慮在特定工作上建立「流動團隊(mobile teams)」，輪流到各機組執行特定工作。
- 廢棄物數量預估至為關鍵，其精確度對除役總費用預估有重大影響；外在(不可控制)因素對除役整體時程及經費的影響可能相當大，NDA經歷的典型案例為用過燃料移出廠區之時程延遲。

第五章、美國核管會「核能電廠除役費用管制指引與標準審查計畫」重點摘述與管制建議

5.1 前言

美國核能管制委員會(Nuclear Regulatory Commission, NRC, 簡稱核管會)在相關法規定義各項(不同時期)之除役費用估算,包括:1)初步費用估算(preliminary cost estimate),2)預期費用估算(expected cost estimate),3)個別電廠除役費用估算(site-specific decommissioning cost estimate),4)最新個別電廠除役(尚餘)費用估算(updated site-specific cost estimate)。為使各電廠經營者(licensee)在準備此 4 項費用估算時有所依據,核管會發行管制指引 1.202 "Standard Format and Content of Decommissioning Cost Estimates for Nuclear Power Reactors";相對的,核管會也發行標準審查計畫(NUREG-1713: Standard Review Plan for Decommissioning Cost Estimates for Nuclear Power Reactors),以供核管會幕僚審查各項除役費用估算之依據。

上述管制指引與標準審查計畫涵蓋內容相似且相互呼應,本計畫因此將此兩份報告於本章一併討論。5.2 節聚焦於管制指引之介紹,5.3 節則針對標準審查計畫內容討論,5.4 節提出研析心得及管制建議。

5.2 管制指引

本指引共分三大部分：簡介、討論、以及管制立場，以下將分別就這三大部分摘錄其重點：

簡介

本管制指引僅適用核管會所定義之放射性除役 (radiological decommissioning) 費用，此費用通常被稱為執照終止 (license termination) 費用。按美國電廠繳交至核管會之除役費用估算，一般而言均包括三大項：1) 依照核管會所定義之放射性除役 (又稱執照終止) 費用，2) 用過燃料處理費用 (主要是中期貯存)，3) 無輻射污染或低於外釋標準之設備/建物拆除及廠址復原工作費用，簡稱廠址復原費用。用過燃料處理費用編列雖屬核管會管制範圍，但實際執行則屬美國能源部職權，此費用不列入核管會定義之除役費用內。而廠址復原費用則不是核管會職權，所以也不屬於核管會所定義之除役費用。但核電廠基於營運管理之整體考量，通常會將第 2) 及 3) 項費用也納入繳交核管會之除役費用估算內。本指引也允許各電廠採此做法，但要求將第 2) 及 3) 項與執照終止費用做出明確區隔。

討論 (discussion)

此部分首先敘述目前 3 種主要除役策略，第一種是停機後立即拆除 (DECON)，第二種為先封存一段時間再拆除 (SAFSTOR)，第三種則為封存較長時間後再拆除 (ENTOMB) 等三種策略。ENTOMB 策略通常會用一個大罩子將放射性設備/廠房全部蓋住一段較長時間 (100 年或更久)，本指引提及核管會現行法規要求永久停機後應於 60 年內完成除役工作，故若採此策略，核管會將會採個案審查原則 (case-by-case basis) 處理 (編按：ENTOMB 通常用於曾有重大事故機組，如車諾比爾，算是特例；美國電廠通常不是採 DECON 就是採 SAFSTOR 除役策略)。接下來本指引摘要敘述法規對除役費用估算的要求，這些要求詳列於 10CFR50.75 及 50.82 中，主

要規範彙整如下：

- 除役專用基金：自1999/3/31起，每2年要繳交基金現況(更新)報告；離預計永久停機5年內頻率則提高為每年1次。由於除役基金跟除役費用估算密切相關，故必須同時繳交更新版除役費用估算。
- 除役費用預估：任一時期之除役費用估算都不得小於核管會所訂定之最小除役基金公式計算值(下詳)，各時期之除役費用估算分別有不同之名稱(下詳)。依據相關規定，在永久停機前或其後2年內應繳交停機後除役活動報告(Post Shutdown Decommissioning Activity Report, PSDAR)，報告內容應包括個別電廠除役費用估算(Site-Specific Cost Estimate, SSCE)，若未包括，得於停機後2年內另行補繳(編按：經營者通常會隨PSDAR送交SSCE，但若為因故提前永久停機時，則可能出現PSDAR與SSCE分別繳交的情況)。
- 要申請執照終止2年前，需繳交執照終止規劃(License Termination Plan, LTP)，LTP要附上個別電廠尚需費用估算(site-specific estimate of remaining decommissioning cost)。
- 除役基金動用限制：可支用除役基金總數之3%於除役規劃上；繳交PSDAR至核管會90天後可動用另20%；餘77%要等到SSCE繳交至核管會方可動支。

管制立場(regulatory position)

此部分主要針對簡介中提到的 4 項不同時期除役費用預估分別詳細說明其應涵蓋內容：

- 初步費用估算(preliminary cost estimate)：在維持除役基金結餘時，一定需要一個對應的費用估算以確認有充足基金。所以當法規要求在預定停機前5年須繳交「初步費用估算」時，經營者可由前述費用估算稍加修正後提供。若屬於非預期之提前因故停機狀況，則可

豁免提出而改於停機後2年內提交PSDAR時一併提交。初步費用估算應涵蓋除役策略(DECON或SAFSTOR)、影響除役費用估算的主要影響因子、已知或可能的建物/土壤污染、大略除役時程、分階段(過渡/實質除役/廠區復原等)之除役費用預估、跟最小除役基金公式結果之比對、如何確保有足夠基金支付除役費用、除役大項費用分列(設備移除/除污及拆除/管理及支援/廢棄物管理)等說明。

- 預期費用估算(expected cost estimate)：永久停機後2年內應隨PSDAR繳交預期費用估算，也可直接繳交個別電廠除役費用估算(SSCE)。隨PSDAR繳交之除役費用預估一定不能小於10SFR50.75(c)(1)所列之最小除役基金公式，針對壓水式機組(PWR)及沸水式機組(BWR)分別有不同計算公式。對PWR，最小基金 = $(75 + 0.0088P)$ 百萬美金；對BWR，最小基金 = $(104 + 0.009P)$ 百萬美金。此兩個公式中的P為機組熱功率(百萬瓦，MWt)，適用1,200到3,400 MWt之機組，超過3,400者以3,400 MWt計算，低於1,200者以1,200 MWt計算。另根據上述公式計算出之幣值為1986年元月之幣值，需要透過第二組公式調整為當年幣值： $0.65L + 0.13E + 0.22B$ ；其中L為當年勞力(labor)指數與1986年勞力指數的比值，E為能源(energy)指數比值，B為低放廢棄物最終處置指數比值，這3個指數都可在美國核管會持續更新版本(約每兩年一次)的NUREG-1307報告中查得，其中L及E指數系採用美國勞動部勞工統計局(Bureau of Labor Statistics, Department of Labor)相關統計數據計算而得，B指數則由核管會自行蒐集低放廢棄物處置場資訊計算而得，目前此報告最新版本為2019/2發行之第17版 (編按：法規規範永久停機2年內要繳交SSCE，除非有特別考量，否則經營者通常會於繳交PSDAR時一併附上SSCE)。
- 個別電廠除役費用估算(SSCE)：SSCE應涵蓋除役策略、費用估算方法、分階段費用統計、跟最小除役基金公式計算結果比較、如何

籌措足夠除役基金、主要費用大項統計等基本資訊。若選擇立即除役(DECON)策略時，應同時涵蓋主要設備(如反應器壓力槽等，下詳)除役費用、除污及拆除費用(設備應盡可能分類列出，如不同口徑管路等)、管理(人事)及支援費用、廢棄物處理(置)費用、地下水及土壤除污費用、廠址最終檢查費用、以及應變準備金(contingency)等進一步資訊。若是選擇安全貯存再除役(SAFSTOR)策略，則應提供除役前工程規劃、安全貯存期間監測維護規劃、實質除役執行規劃等資訊。BWR電廠之主要設備包括反應器壓力槽及內部組件、反應爐冷卻水管路、主汽機/發電機、汽水分離再熱器、飼水加熱器、主飼水泵、用過燃料貯存格架、其他大型設備等。PWR電廠之主要設備包括反應器壓力槽及內部組件、一次側環路、反應爐冷卻水泵、生物屏蔽、壓力調節槽、蒸汽產生器、用過燃料貯存格架、其他大型設備等。對除役廢棄物之說明應著重在廢棄物特性調查、減量處理程序、預期產生數量、以及最終處置或暫貯方式等說明。經營者也應對如何估算應變準備金、如何估算通膨因素、如何籌措除役基金、除役期間每年所需人力等議題提供額外資訊。

- 個別電廠尚需費用估算：當機組預期將終止執照2年前，經營者應繳交執照終止規劃(License Termination Plan, LTP)，並應附上個別電廠尚需費用估算。若除役基金平衡不足以支應所需剩餘費用時，則應同時提出補足/補救機制。

5.3 標準審查計畫

本標準審查計畫(Standard Review Plan, SRP)主要功能為指引美國核管會幕僚如何對各電廠經營者繳交之各項除役費用估算進行審查；與此 SRP 相對的管制法規指引(Regulatory Guide 1.202)則是指引經營者如何準備應繳交之各項除役費用估算。本 SRP 共分 3 個主要章節，章節 A 為簡介；章節 B 討論(discussion)則說明各項主要名詞與參考資訊之定義；至於如何審查各項除役費用估算則詳述於章節 C。以下將分別就此 3 個部分摘要敘述其重點。

簡介

本節敘述三種核管會接受之除役策略，包括停機後立即拆除(DECON)、先封存一段時間再拆除(SAFSTOR)、以及封存較長時間後再拆除(ENTOMB)等三種策略。ENTOMB 策略通常會用一個大罩子將放射性設備/廠房全部蓋住一段較長時間(100 年或更久)。本 SRP 主要針對 DECON 及 SAFSTOR 說明審查標準作業程序；至於 ENTOMB 策略，由於核管會現行法規要求永久停機後應於 60 年內完成除役，故若採此策略時核管會將會採個案審查原則(case-by-case basis)處理。本 SRP 及對應之管制法規指引僅針對商用反應器，也僅涵蓋核管會所定義之執照終止費用，不包括用過燃料處理費用及(非放射性物質相關之)廠區復原費用。

討論

本節首先提到經營者須提供財務保證以確保除役工作可順利進行，此財務保證通常以獨立基金型式呈現，基金一定不能小於於 10SFR50.75(c)(1)所規範之最小除役基金公式。針對壓水式機組(PWR)及沸水式機組(BWR)分別有不同計算公式；對 PWR，最小基金 = $(75 + 0.0088P)$ 百萬美金；對 BWR，最小基金 = $(104 + 0.009P)$ 百萬美金。此兩個公式中的 P 為機組熱功率(百萬瓦，MWt)，適用 1,200 到 3,400 MWt 之機組，超過 3,400 者以 3,400 MWt 計

算，低於 1,200 者以 1,200 MWt 計算。另根據上述公式計算出之幣值為 1986 年元月之幣值，需要透過第二組公式調整為計算當年幣值： $0.65L + 0.13E + 0.22B$ ；其中 L 為當年勞力(labor)指數與 1986 年勞力指數的比值，E 為能源(energy)指數比值，B 為低放廢棄物最終處置指數比值，這 3 個指數都可在美國核管會持續更新版本(約每兩年一次)的 NUREG-1307 報告中查得，其中 L 及 E 指數採用美國勞動部勞工統計局(Bureau of Labor Statistics, Department of Labor)相關統計數據計算而得，B 指數則由核管會自行蒐集低放廢棄物處置場資訊計算而得，目前此報告最新版本為 2019/2 發行之第 17 版。以費用項目來區分，低放廢棄物(LLW)之最終處置費用應引用 B 指數來調整；LLW 之運送(至最終處置場)、化學除污、廠區電力使用等 3 項費用應以 E 指數來調整；其餘費用皆是以 L 指數來調整，詳細調整方法如 NUREG-1307 "Report on Waste Burial Charges: changes in decommissioning waste disposal costs at low-level waste burial facilities"。

接下來本審查計畫敘述管制法規對經營者應繳交除役費用估算的要求，包括：1)除役專用基金：自 1999/3/31 起，每 2 年要繳交基金現況(更新)報告；離預計永久停機 5 年內頻率則提高為每年 1 次。由於除役基金跟除役費用估算密切相關，故必須同時繳交更新版除役費用估算以供比對；2)除役費用預估：任一時期之除役費用預估都不得小於核管會所訂定之最小除役基金公式計算值，各時期之除役費用預估分別有不同之名稱(下詳)。依據相關規定，在永久停機前或其後 2 年內應繳交停機後除役活動報告(Post Shutdown Decommissioning Activity Report, PSDAR)，報告內容應包括個別電廠除役費用估算(Site-Specific Cost Estimate, SSCE)，若未包括，得於停機後 2 年內另行補繳；3)要申請執照終止前 2 年，需繳交執照終止計畫(License Termination Plan, LTP)，LTP 要附上個別電廠尚需費用估算(site-specific estimate of remaining decommissioning cost)。

如何審查各類型除役費用估算

本節針對不同時期之各項除役費用估算分別提出標準審查計畫，以提供核管會幕僚進行審查時之主要依據。每個標準審查計畫皆包括審查責任分工、審查範圍、接受標準、審查程序、審查發現彙整等說明。此節針對下列除役費用預估分別提出標準審查計畫：1)初步費用估算(preliminary cost estimate)；2)預期費用估算(expected cost estimate)；3)個別電廠除役費用估算(SSCE)；4)個別電廠尚需費用估算。

● 初步費用估算之標準審查計畫：

- 法規要求：在預定停機前 5 年須繳交初步費用估算，經營者可由每兩年提報之除役基金結餘與相對費用估算稍加修正後提供；若屬於非預期之提前停機狀況，則可豁免提出而改於停機後 2 年內提交 PSDAR 時一併提交。此初步費用估算只需提供初步資訊以證明除役基金可及時支應除役所需費用。
- 審查責任分工：分成主要(primary)跟次要(secondary)審查單位。
- 審查範圍：此估算應提供最新除役費用數據及影響費用之主要因子/項目，審查者須確認此估算不小於最小除役基金公式計算值，也需確認所有影響因子/項目之完整性。
- 接受標準：1)此費用估算值不小於最小除役基金公式計算值；2)估算內容反映最新狀況；3)涵蓋所有影響費用之因子/項目。
- 審查程序：1)先以該廠/機組額定熱功率計算最小除役基金值，再依照 NUREG-1713 轉換至繳交當年幣值，再確認此估算值不小於公式計算值；2)確認此估算內容是否涵蓋除役策略、已知或可能存在之環境污染、低放廢棄物(LLW)之最終處置規劃、除役主要時程、以及其他可能影響費用的因子；3)確認此估算是否有分不同階段分別列出其所需費用，本標準審查計畫列有參考核電廠(reference plant)之相關資訊以供審查者比對用。本標準審查計畫於 Table 5-6 列出之立即拆除參考 BWR 資訊為：第一階段停機前準備 2.5 年，費用占總執照終止費用之 4.3%；

第二階段停機後部分系統除污及拆除 1.2 年，費用占 22.3%；
第三階段用過燃料處理(移到乾式貯存場)3.4 年，費用占 2.1%；
第四階段主要除役工作 1.7 年，費用占 71.3%。參考 PWR 資訊為：第一階段 2.5 年，費用占總執照終止費用之 6.1%；第二階段 0.6 年，費用占 24.3%；第三階段 6.3 年，費用占 4.6%；第四階段 1.7 年，費用占 64.9%。

- 審查發現彙整：當初步費用預估有下述情形時應視為有瑕疵：
1)費用預估小於最小基金公式計算值，2)未涵蓋所有主要影響因子。當發現有瑕疵時，應以書面方式向經營者要求提供補充資訊或澄清。

● 預期費用估算之標準審查計畫：

- 法規要求：永久停機後 2 年內應隨 PSDAR 繳交預期費用估算，也可直接繳交個別電廠除役費用估算(SSCE)。此初步費用估算只需提供初步資訊以證明除役基金可及時支應除役所需費用。
- 審查責任分工：分成主要(primary)跟次要(secondary)審查單位。
- 審查範圍：此估算應提供最新除役費用數據及影響費用之主要因子/項目，審查者須確認此估算不小於最小除役基金公式計算值。
- 接受標準：1)此費用估算值不小於最小除役基金公式計算值。
- 審查程序：1)先以該廠/機組額定熱功率計算最小除役基金值，再依照 NUREG-1713 最新版內容轉換至繳交當年幣值，確認此估算值不小於公式計算值
- 審查發現彙整：當初步費用預估小於最小基金公式計算值時視為有瑕疵，應以書面方式向經營者要求提供補充資訊或澄清。
(編按：由於經營者須於永久停機 2 年內繳交個別電廠費用預估，因此本標準審查計畫在個別電廠費用預估之審查有最詳細敘述)

- 個別電廠費用估算(SSCE)之標準審查計畫：
 - 法規要求：SSCE 應涵蓋除役策略、費用估算方法、分階段費用統計、跟最小除役基金公式計算結果比較、如何籌措足夠除役基金、主要費用大項統計等基本資訊；若未隨同 PSDAR 一併繳交時，應於永久停機後 2 年內繳交。
 - 審查責任分工：分成主要(primary)跟次要(secondary)審查單位。
 - 審查範圍：此估算屬於最詳細的除役費用估算，應涵蓋所有相關訊息。
 - 接受標準：此估算應涵蓋費用估算方法、除役計畫概述、各階段或主要工作之費用分列、除役時程、各除役階段人力配置、除役低放廢棄物(LLW)產生量等詳細資訊。
 - 審查程序：1)確認應提供資料完整性、主要費用影響因子皆已考量、各項費用估算合理；2)以該廠/機組額定熱功率計算最小除役基金值，再依照 NUREG-1713 轉換至繳交當年幣值，確認此估算值不小於公式計算值；3)確認接受標準所列 6 大項資訊是否夠詳盡。
 - 在執行第 3)項審查程序時，應特別注意以下各點：
 - A) 除役策略是否明確定義，除役期限若規劃超過法定之 60 年，是否附上詳細說明；
 - B) 除役費用評估方法是否為核管會已認可之單價因子方式(unit cost factor approach，即 AIF/NESP-036)或以活動為基準之估價法(activity-base cost estimate)，如否，應提供所用方法之說明。
 - C) 各項工作是否細分到可供與參考電廠數據驗證比較之程度；參考電廠之工作項目細分清單如表 5.1。
 - D) 此估算應提供污染設備清單，PWR 及 BWR 參考電廠之對應清單如表 5.2。

- E) 此估算應提供污染房間/區域之清單，BWR 及 PWR 參考電廠之清單如表 5.3 及 5.4。
- F) 此估算應提供已存在或可能存在之環境污染相關敘述。
- G) 此估算應分階段分主要項目列出費用之統計，主要項目包括放射性主要設備(如壓力槽及內部組件)之拆除、其他放射性(或污染)設備/建物之拆除、管理及支援、LLW 包裝、LLW 運送(至處置場)、LLW 最終處置、以及應變準備金等。表 5.5 及 5.6 為 BWR 及 PWR 參考電廠之分階段分大項經費，審查者在與 SSCE 比對時應注意兩者之實質差異，如應變準備金之編列、假設之年度物價上漲率(Annual Escalation Factor)、所採幣值(參考電廠為 2000 年幣值)、其他主要估算假設等。
- H) 除役廢棄物數量應跟參考電廠進行比對，BWR 及 PWR 參考電廠之除役廢棄物數量及相關費用如表 5.7 及 5.8。比對時若發現有不甚合理之處，應以書面文件要求經營者澄清。
- I) 此估算應提供除役期間之每年人力需求(人年)及費用資訊，此資訊應與參考電廠對應資訊(表 5.9 及 5.10)進行比對以評估其合理性。

- 審查發現彙整：當個別電廠費用估算有下述情形時應視為有瑕疵：1)費用估算小於最小基金公式計算值，2)未提供審查所需之完整資訊，3)跟參考電廠比對時有明顯不合理之處。當發現有瑕疵時，應以書面方式向經營者要求提供補充資訊或澄清。

- 個別電廠尚需費用估算之標準審查計畫：

- 法規要求：當機組預期將終止執照 2 年前，經營者應繳交執照終止計畫(License Termination Plan, LTP)，並應附上個別電廠尚需費用估算。。

- 審查責任分工：分成主要(primary)跟次要(secondary)審查單位。
- 審查範圍：此估算應提供最新之尚需除役費用資訊。
- 接受標準：此費用估算值應涵蓋仍需支出之除污、拆除、LLW 最終處置、最終廠區檢測、以及(廠區若為限制性使用時之)控制/維護等費用。
- 審查程序：1)確認估算為當年幣值，且已考量物價上漲因素；2)確認涵蓋所有待支應費用及可能影響費用的因素；3)確認需要進行土壤復原的區域；4)確認此估算至少涵蓋估算假設、應變準備金、主要支應項目、設備除污/拆除分項費用、LLW 處置分項費用、廠區最終檢測分項費用、總費用等資訊。
- 審查發現彙整：當個別電廠尚需費用估算有說明不清楚或不完整之處時，應以書面方式向經營者要求提供補充資訊或澄清。

表 5.1 標準審查計畫之除役工作項目細分清單(適用立即拆除 PWR 及 BWR)

細分工作項目	備註
- 準備與規劃 - 廠區特性調查 - 離子交換器樹脂之處置 - 用過燃料貯存格架之除污、包裝、拆除 - 硼化廢棄物之濃縮與運送 - 主冷卻水系統化學除污 - 用過燃料池之洩水及後續處理 - 用過燃料池冷卻系統之拆除 - 反應器壓力槽(RPV)內部組件之切割、包裝與拆除 - RPV 除污 - (受污染)主吊車之拆除 - 用過燃料池池壁襯墊之除污、包裝、拆除 - 反應器主冷卻水系統(RCS)管路與設備之拆除 - 調壓槽之拆除 - 蒸汽產生器拆除 - 控制棒驅動系統拆除 - RPV 切割與包裝 - 生物屏蔽拆除 - 汽機本體拆除 - 汽機冷凝器拆除 - 水汽分離再熱器拆除 - 飼水加熱器拆除 - 飼水冷凝系統拆除 - 飼水泵拆除 - 樓層洩水孔之除污與拆除 - 污染表面之除污 - 污染混凝土之移除 - 通風系統管路及設備拆除 - 其他受污染系統之拆除(分別列出各系統) - 受污染地表水及地下水復原 - 受污染土壤復原 - 廠區最終偵測 - LLW 包裝、運送、最終處置費用，含處理 (processing)費用 - GTCC 的運送及處理費用	- 廠區特性調查原文為 characterization survey of facility and site

表 5.2 參考電廠之污染設備/管路分類及數量(立即拆除)

設備/管路分類	參考 PWR 電廠數量	參考 BWR 電廠數量
大於 3 英吋管路	15,110 英尺	55,654 英尺
小於等於 3 英吋管路	34,631 英尺	66,160 英尺
大於 3 英吋閘門	235	1,103
小於等於 3 英吋閘門	779	7,962
所有桶槽(tank)	76	80
超過 100 磅之泵	43	87
低於或等於 100 磅之泵	2	8
超過 100 磅之熱交換器	25	16
低於或等於 100 磅之熱交換器	0	0
超過 100 磅之電器設備	69	0
低於或等於 100 磅之電器設備	34	0
超過 100 磅之其他設備	13	1,323
低於或等於 100 磅之其他設備	26	282
用於超過 4 英吋管之懸吊器(hanger)	2,204	5,000
用於小於或等於 4 英吋管之懸吊器	10,608	7,500

表 5.3 參考 BWR 電廠之污染水泥及金屬數量

建築物	污染水泥面積 (平方英尺)	需移除之污 染水泥量 (立方英尺)	污染金屬面積 (平方英尺)	需移除之污染金 屬量(立方英尺)
反應器廠房	30,537	1,304	33,906	541
廢棄物廠房	21,711	388	1,526	16
汽機廠房	8,042	123	1,526	16

表 5.4 參考 PWR 電廠之污染水泥及金屬數量

建築物	污染水泥面積 (平方英尺)	需移除之污 染水泥量 (立方英尺)	污染金屬面積 (平方英尺)	需移除之污染金 屬量(立方英尺)
燃料廠房	22,864	548	15,428	161
圍阻體	127,124	433	4,690	49
輔助廠房	43,860	819	0	0

表 5.5 參考 BWR 電廠之除役費用估算大項(2000 年幣值，百萬美金)

除役大項活動	第一階段 除役前規劃及準備 (2.5 年)	第二階段 部分系統 除污及拆除(1.2 年)	第三階段 用過燃料 處理 (3.4 年)	第四階段 主要除役 工作(1.7 年)	總計 (8.8 年)
被活化設備拆除	0.0	1.2	0.0	6.6	7.8
系統除污及拆除	0.0	20.8	0.0	15.8	36.6
管理及支援	14.8	34.7	7.2	40.0	96.8
LLW 包裝	0.0	0.2	0.0	5.5	5.7
LLW 運送	0.0	1.1	0.0	0.4	1.5
LLW 最終處置	0.0	18.1	0.0	174.8	192.8
小計	14.8	76.1	7.2	243.2	341.3

表 5.6 參考 PWR 電廠之除役費用估算大項(2000 年幣值，百萬美金)

除役大項活動	第一階段 除役前規劃及準備 (2.5 年)	第二階段 部分系統 除污及拆除(0.6 年)	第三階段 用過燃料 處理 (6.3 年)	第四階段 主要除役 工作 (1.7 年)	總計 (11.1 年)
被活化設備 拆除	0.0	0.7	0.0	11.8	12.5
系統除污及 拆除	0.0	22.5	0.0	10.4	32.9
管理及支援	14.3	14.7	10.8	40.5	80.2
LLW 包裝	0.0	0.2	0.0	3.5	3.6
LLW 運送	0.0	1.5	0.0	4.3	1.5
LLW 最終處 置	0.0	17.3	0.0	81.3	98.5
小計	14.3	56.9	10.8	151.7	233.6

表 5.7 參考 BWR 電廠之預估廢棄物數量及費用(立即拆除)

除役工作範圍	廢棄物體積 (立方英尺)	包裝費用 (2000 年幣 值，百萬美 金)	運送費用 (2000 年幣 值，百萬美 金)	處置費用 (2000 年幣 值，百萬美 金)
蒸汽供應系統 (NSSS)拆除	293,200	3.04	1.37	113.85
圍阻體拆除	149,000	2.06	0.07	53.77
其他建築物拆除	57,700	0.42	0.08	16.48
其他廢棄物	34,200	0.19	0.02	8.74
小計	534,100	5.72	1.53	192.84

表 5.8 參考 PWR 電廠之預估廢棄物數量及費用(立即拆除)

除役工作範圍	廢棄物體積 (立方英尺)	包裝費用 (2000 年幣 值，百萬美 金)	運送費用 (2000 年幣 值，百萬美 金)	處置費用 (2000 年幣 值，百萬美 金)
蒸汽供應系統 (NSSS)拆除	123,700	1.38	5.22	49.00
圍阻體拆除	75,500	1.14	0.28	25.52
其他建築物拆除	72,500	1.00	0.28	19.25
其他廢棄物	19,500	0.11	0.06	4.74
小計	291,200	3.63	5.84	98.52

表 5.9 參考 BWR 電廠各階段人力需求與費用(立即拆除；2000 年幣值，百萬美金)

團隊/ 階段	第一階段 (人年/費用)	第二階段 (人年/費用)	第三階段 (人年/費用)	第四階段 (人年/費用)	總計 (人年/費用)
拆除現場人力	0.0/0.0	16.7/22.0	0.0/0.0	168.7/22.4	185.4/44.5
管理支援人力	55.5/8.9	219.6/26.2	27.5/3.8	176.6/27.2	479.2/66.1
小計	55.5/8.9	236.3/48.2	27.5/3.8	345.3/49.7	664.6/110.5

表 5.10 參考 PWR 電廠各階段人力需求與費用(立即拆除；2000 年幣值，百萬美金)

團隊/ 階段	第一階段 (人年/費用)	第二階段 (人年/費用)	第三階段 (人年/費用)	第四階段 (人年/費用)	總計 (人年/費用)
拆除現場人力	0.0/0.0	16.0/23.2	0.0/0.0	122.0/22.2	138.0/45.4
管理支援人力	55.5/8.5	112.7/9.4	42.9/4.5	169.0/26.2	380.1/48.6
小計	55.5/8.5	128.7/32.7	42.9/4.5	290.9/48.4	518.1/94.1

5.4 研析心得與建議

- 1) 核能機組經營者所準備之除役費用估算，應說明各項指數之參考基準，例如，行政院主計總處公布之躉售物價指數內之某特定指數。(B 類)
- 2) 美國核管會在 1990 年代委託 PNNL 蒐集彙整當時之除役執行及費用估算經驗，針對 1980 年代之原始研究進行更新並完成 PWR 參考廠案例更新(NUREG/CR-5884, 1995)及 BWR 參考廠案例更新(NUREG/CR-6174, 1996)。BWR 參考案例係以 Columbia Generating Station 為評估對象，該廠為 GE BWR-5 (Mark 2)機組，額定功率 3486 MWt (1160 MWe)，自 1984/12 起商轉，運轉執照經延役 20 年後將於 2043/12 到期，目前仍運轉中。PWR 參考電廠為 Trojan，該廠為西屋 4 迴路 PWR 機組，額定功率 3411 MWt (1130 MWe)，自 1976/5 起商轉，於 1992/11/9 提前永久停機，1993-2004 年完成除役工作。按標準審查計畫所引用之參考電廠除役費用(2000 年幣值)為 PNNL 自行研究分析成果，並非經營者提出之除役費用預估或實際除役費用。(A/B 類)
- 3) 根據 BWR 參考廠案例更新(NUREG/CR-6174, 1996)內容，除役工作共分 4 個階段(period)，每階段之假設期程及主要工作內容為：(A/B 類)
 - 第一階段準備與規劃：假設為永久停機前2.5年，含主要除役設備採購費用。
 - 第二階段部分系統除污與拆除：停機後1.2年，主要工作包括將爐心燃料移到燃料池、主冷卻水系統進行化學除污、切割RPV內部組件並裝箱移到廠區內乾式貯存場、以及全面除污(general cleanup)。
 - 第三階段用過燃料處理：停機後第1.2至第4.6年，共3.4年，這是基於最熱的用過燃料需要冷卻4.6年方能移到乾式貯存場的假設而訂定。此階段之主要工作包括維持燃料池正常運作以及陸續將用過燃料移至乾式貯存場。此階段相關費用有90%歸到「非除役費用(即用過燃料處理費用)」，僅有10%歸到核管會所定義之除役(執照終止)

費用中。

- 第四階段主要除役工作：停機後第4.6年至第6.3年，共1.7年。此階段所有用過燃料都已移到乾式貯存場，主要工作就是將反應器廠房、廢棄物廠房、汽機廠房之建物及內含設備全數(切割)拆解。此階段假設不需進行污染土壤之移除工作，故沒有涵蓋此部分費用。

第六章、管制建議彙整與總體說明

本報告分別於第二至第五章敘述相關指定文件研析之內容重點，並與我國現行「法規/管制作為」進行初步比對後提出多項研析心得或管制建議，並依風險洞悉(risk-informed)的概念評估其優先順序，分別在第二至第五章加以論述。本報告所研析相關文件係美國及經濟合作暨發展組織會員國等國家之核電廠除役資訊，考量國情、法規面、技術面及政策面等特定狀況之差異性，不同研析文件所揭櫫之技術內涵可供管制單位參考，惟在引用相關數據時應謹慎為之，不宜直接採用相關文件之估算數據。

美國原子能產業論壇「AIF-NESP-036」報告內容重點包括：(1)針對不同除役策略提出協助經費估計的指引；(2)針對除役經費的估計提出完整、詳細與系統化的細項劃分方法；以及(3)增進個別電廠除役經費估計的可驗證性、真實性與準確性。依據所蒐集美國核電廠除役經費估算案例資料，顯示大多數係採用 AIF-NESP-036 報告之方法論，雖此方法論主要僅針對執照終止相關項目，包括結構、系統、組件之除污、拆除等費用估算之技術內涵，仍可供我國管制單位參考。

美國核管會「最小除役基金公式合適性評估」報告(草案版)係規劃針對 1996 年研究報告發表後，累積之除役費用估算經驗進行彙整分析，以評估是否需更新 10 CFR 50.75(c)(1)最小除役基金公式。此報告於 2011 年完成後，原規劃發表 NUREG/CR 系列報告，後因故未轉為核管會正式報告，並依據 SECY-13-0066 文件指出相關實務及考量，而未採納此報告建議對最小除役基金公式進行修正；然此報告彙整比對美國 4 座已完成除役機組之實際費用，以及 27 座核電機組已繳交至核管會之除役費用估算等相關資訊，技術內涵可供我國管制單位參考。

經濟合作暨發展組織核能署「核能電廠除役費用」報告就推廣 2012 年提出之除役費用國際架構(International Structure for Decommissioning Cost, ISDC)，透過問卷調查方式向會員國蒐集更多除役費用相關資訊。問卷內容主要分成 3 大部

分：1)國家除役政策與財務安排，2)個別機組的除役策略，3)個別機組以 ISDC 格式編製之除役費用資訊。雖然目前國際間對除役費用之通用格式尚未建立共識，此研究報告所提出之議題及相關資訊，技術內涵可供我國管制單位參考，另國際間對 ISDC 架構之趨勢亦值得持續掌握並了解。

美國核管會「核能電廠除役費用管制指引(RG 1.202)」係提供經營者準備除役費用估算且為管制機關幕僚接受之作法，而「標準審查計畫(NUREG-1713)」係提供核管會幕僚審查各項除役費用估算之依據。雖然此兩者主要針對除役期間不同時期執照終止相關項目，包括結構、系統、組件之除污、拆除等費用估算，其技術內涵仍可供我國管制單位參考研議。另美國核管會針對美國除役核電廠提交之相關文件，採用此指引及標準審查計畫執行之安全審查報告，未來仍可持續蒐集了解並掌握後續之發展。