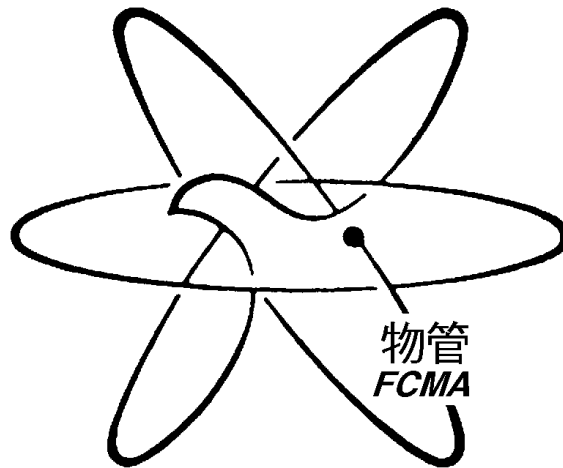


行政院原子能委員會放射性物料管理局
102 年度委託研究計畫

核能電廠除役作業意外事故安全評估
之審查技術研究
期末報告



計畫編號：102FCMA013

執行單位：義守大學 機械與自動化工程系

計畫主持人：王曉剛

報告日期：中華民國 102 年 12 月

目錄

摘要	3
Abstract	5
第一章 前言	7
第二章 國內對除役之意外事故之研究與擬定之相關法規	8
2.1 原能會擬定之施行計畫	8
2.2 委託核研所研究計畫	10
2.3 委託清華大學研究報告	15
第三章 國外相關之研究報告資料收集	18
3.1 IAEA	19
3.2 NEA/OECD	28
3.3 US/NRC	30
第四章 國外電廠實際經驗案例	33
4.1 Yankee Rowe	33
4.2 Fort St. Vrain	35
第五章 人為因素對除役安全之影響	38
第六章 建議計畫建立國內對除役意外安全評估 之審查技術	43
6.1 國外除役意外安全評估審查技術之比較	43
6.2 本研究計畫對國內除役意外安全評估之審查技術 之建議	44
References	46

摘要

核能電廠除役作業過程可能發生之意外事故大致上可分類為輻安相關事故及非輻安事故，均與除役作業之施工技術息息相關。本研究收集各國對除役時發生意外事故之經驗，以及各國對事故之安全評估及審核技術之建立，以應用於台灣核電廠除役時，對於防止事故之產生、事故發生後之安全處置等問題，提出初步之建議。由國外除役之研究與實際經驗得知，雖然與輻射有關之意外事故較可能發生於電廠運轉時(反應器在高壓高溫之情況下)，而除役時發生之意外主要是非關輻射(因為燃料棒已移除)，或與職業傷害有關之公安之意外。然而除役時之意外往往直接對人員造成傷害，並且可能造成輻射傷害而對大眾與環境造成威脅。故除役電廠應該針對於其電廠獨特之設計、建造及其除役時所用之技術、方法、時程等考量下，分辨出可能發生之意外事故、事故之分析與演變、事故造成之人員、大眾、與環境傷害(輻射劑量)、應具備一套完善之事故應變計畫，以及防止意外發生與降低意外傷害(災害)之方案，已使得除役工程能順利且安全地完成。綜觀國外有關除役意外安全評估之研究及經驗，本研究計畫對於國內核能管制機關有關審核技術方面，有下列幾點建議：

1. 雖然各國均將各種外在(external)與內在(internal)意外事故包含於其分析範圍內，但由除役經驗得知，外在(極端)意外事故其發生機率與其產生之人體輻射劑量均遠低於任何標準(此部分當然會因各別電廠設計、建造、及除役方法不同而異)，而真正造成人員傷害最頻繁之意外事故乃與工安有關之職災，故台電及管制單位應加強此方面之研究與應變、防治對策。
2. 因台電核電廠均為美規，核能法規亦主要參考 NRC，故建議審查技術以 NRC 方法為主，並加以修改以及擷取歐洲優點而實行之。在修改 NRC 作法方面包括：更新電廠之 FSAR 以加入台灣特殊之外在因素，如颱風、海嘯、土石流等。對於 plant-specific 之差異處與其他 FSAR 無參考紀錄之意外事故分析，可使用歐洲分析之方法，使用 deterministic 或 probabilistic 方法均可，例如台電各廠均有 IPE 甚至 IPEEE 之研究報告，若將其修改以符合除役狀況，且將最終結果不以爐心熔毀機率表示，而以人體輻射劑量表示。若用 deterministic 方法分析，則可使用 IAEA 之 Graded approach，以節省人力物力。

3. 由 Yankee Rowe 電廠除役經驗可知，除役時發生之意外可由各種方法降低其發生率，例如人員調動、事前 walk down、事前事後與每日之簡報、到包商之遴選等，均可作為台灣核能界參考。
4. 本研究認為人為因素(human factor)乃發生意外之重要原因之一，尤其台灣從政治、經濟，到民間與地方上反核趨勢與政治勢力介入等非科技之問題外，台電除役時人事更動產生之人心浮動及不滿，都是除役時應納入之安全考量，尤其由國外除役實際經驗得知，至今尚無類似天災等巨大外力對除役工程產生安全考量之意外發生，反而絕大多數對於除役工程造成安全考量之事件均為類似於職場工安之人為疏忽與意外有關，故本研究計畫將人為因素列為研究重要項目之一。本研究對於此方面之建議如下：
 - A. 電廠應及早與員工溝通，使員工了解除役之重要規劃，以安撫人心消除不確定感。
 - B. 電廠應及早選定除役時之原廠留置核心人員，以確保除役工作之順利進行，本研究極度不建議電廠除役工程完全交付與委外包商。
 - C. 電廠應更強安全文化，並於除役進行時不斷動態性地改進更新其執行安全文化之品質與人員安全文化之素養。
 - D. 電廠應即早建立” 緘默知識” 之取得與轉移，以使除役工程安全提高防止意外發生。

Abstract

A decommissioning plan should be followed by a qualitative and quantitative safety assessment of the very last phase of the life of a nuclear power plant before it completes its mission. The safety assessment of a decommissioning plan is applied to identify the potential (radiological and non-radiological) hazards and risks. Various external and internal events which may lead to safety concerns during decommissioning are evaluated and identified. Safety assessment methods, skills, tools are analyzed using European and US experience. This study makes a few suggestions and recommendations to the regulatory sector of Taiwan for consideration:

1. Although most studies consider external events to be the major issues which may compromise the safety of decommissioning; and consequently, lead to the release of radioactive material, however, in addition to their extremely low probabilities to cause safety issues during decommissioning, external events and their associate safety assessments are rather costly and unrealistic. Instead, it is recommended that internal issue such as OSHA and occupational hazards are more important to the safety of decommissioning.
2. In terms of regulatory evaluation and inspection on TaiPower's decommissioning plans, it is suggested that USNRC's guidelines are to be applied with some modifications such as some plant-specific issues, e.g., mudslide, to be included in the safety assessment using existing tool (DBAs, IPE, IPEEE, etc.). Either deterministic or probabilistic approach can be applied.
3. From previous experience such as Yankee Rowe Power Plant, accidents occurred during decommissioning can be reduced effectively by some administrative measures such as plant walk down before operation, brief meeting before and after operation, selection and training to the subcontractors, etc.
4. This study found that most reports on previous experience of decommissioning tend to focus on the technical issues rather than the human factors that are fundamental to, and can significantly affect, the success of the decommissioning process. Experience shows that the principal factor affecting the success of decommissioning projects is "poor or inadequate planning and management, including

unclear identification of roles and responsibilities". This uncertainty surrounding shut down and decommissioning of the plant can affect the organization in many ways. Experience of decommissioning shows that, aside from the various technical challenges that a plant faces when the decision is made to shut down, there are a number of human and organizational factors that also need to be addressed. It is suggested that the following issues need to be focused even before the decommission starts. These are:

A. Uncertainty about the future

Uncertainty about the future, and the subsequent impact this can have on staff morale and motivation, is one of the most significant issues that can affect decommissioning. The most effective way of managing uncertainty is by reducing it, and this can be done by developing a clear communication strategy whereby regular and accurate information is provided to staff about the future plans for the plant and for decommissioning.

B. Maintaining adequate competence for decommissioning

Decommissioning comprises many main stages in which various skills are needed and sub-contractors are usually hired. However, in order to maintain and achieve a dynamic competency for decommissioning, key plant staffs who have the experience and abilities to oversee the course of decommissioning should be identified and retained.

C. Maintaining safety culture

Safety culture is fundamental to the nuclear industry, and the importance of maintaining a positive safety culture is an established part of every nuclear power plant's daily regime. Therefore a change that impacts on the very core of the organization, such as a change from generation to decommissioning, can have a serious effect on the safety culture of that organization.

D. Retaining organizational memory

Other than "explicit" knowledge, "tacit" knowledge which is not usually documented elsewhere rather than staffs themselves should be transferred, maintained, and utilized by the decommissioning processes.

第一章 前言

核能電廠終其服務年限，最後之重要課題乃除役，使核能電廠廠址回復到建廠前之規貌。核能電廠除役作業過程可能發生之意外事故大致上可分類為輻安相關事故及非輻安事故，均與除役作業之施工技術息息相關。而除役作業施工技術包含汙染檢測評估技術、除汙技術、清理技術、拆除技術、廢棄物處理技術及工安作業技術等，在使用這些技術的過程中，稍有不慎就可能發生意外事故。例如由較輕微的放射線暴露、高處跌倒、掉落物、電擊、機器、重物、火災、爆炸，以及更嚴重反應器臨界、保護體失效、大量吸入放射線物質、以及造成環境汙染等。因此，除役計畫書應涵蓋各項假想事故之發生因果關係及其應變作業流程，進行除役計畫審查時更須審慎對待此一部份，確保除役作業能避免並預防重大事故之發生，所以除役作業意外事故安全評估之審查技術，實有必要進行檢討與研議，進行分類與歸納，讓審查作業更完備且有效率。由各國對除役時發生意外事故之經驗，收集各國對事故之安全評估及審核技術之建立，以有效之防止事故之產生。此類之研究與經驗，當為此研究吸取之重點，並將各國對於除役時發生事故之安全措施做出審慎之比較，並考量台灣之核能環境，建議出較適合之審查技術。本計畫乃針對核能電廠除役作業過程中可能發生之意外事故，對於電廠所提出之預防與處置之安全評估，管制機構之審查技術，提出初步建議。本研究報告內容分為：

第二章 國內對除役之意外事故之研究與擬定之相關法規

第三章 國外相關之研究報告資料收集

第四章 國外電廠實際經驗案例

第五章 人為因素對除役安全之影響

第六章 建議計畫建立國內對除役意外安全評估之審查技術

第二章 國內對除役之意外事故之研究與擬定之相關法規

2.1 原能會擬定之施行計畫

原能會規劃之核子反應器除役計畫內容中，與本研究計畫相關之項目有第五點：預期意外事件分析，與第十五點：意外事件應變方案，如下表所列。



核子反應器設施除役計畫之內容

項	除役計畫章節內容	項	除役計畫章節內容
01	設施概述運轉歷史	09	環境輻射監測
02	廠址輻射特性調查	10	組織及人員訓練
03	目標時程設備方法	11	核子保防物料管理
04	除役期間仍須運轉	12	廠房及土地再利用
05	預期意外事件分析	13	品質保證方案
06	除污方式廢液處理	14	保安措施
07	除役廢棄物管理	15	意外事件應變方案
08	輻射劑量評估	16	主管機關公告事項

在物管法之除役計畫之規定內容，與本計畫有關之項目為第十一點：

意外事件應變方案，如下表所示。

物管法除役計畫之規定內容

項	除役計畫章節內容	項	除役計畫章節內容
01	設施綜合概述	07	人員訓練
02	除役目標及工作時程	08	核子原、燃料料帳管理
03	除污方式及廢棄物減量	09	廠房或土地再利用規劃
04	除役廢棄物管理	10	品質保證方案
05	輻射劑量評估及輻防措施	11	意外事件應變方案
06	環境輻射監測	12	其他經主管機關指定事項

(Ref: 物管法施行細則第20條)

68

原能會參考美國核能管制委員會(NRC)及其他國家之核能管制機關針對核子設施除役作業所訂定之相關管制規範，並依據「核子反應器設施除役許可申請審核辦法」第三條規定，於101年12月7日訂定「核子反應器設施除役計畫導則」，提供台電公司作為撰寫除役計畫之重要依據。其中對於意外事故安全部分，大致界定除役時可能發生之意外事件，與意外發生時之應變方案，敘述於下列兩點[1]:

第七章 除役期間預期之意外事件安全分析

說明設施除役期間可能發生之意外事件，依性質可分為：意外事件（如，核安、輻安、工安、火災等）、自然災害事件（如，颱風、地震、豪雨及海嘯等）及人為破壞等，並敘述各項意外事件的發生原因、評估方法及影響分析。

第十六章 意外事件應變方案

一、應變組織編組與職責分工

說明應變組織體系及各單位權責，並提供有支援需求時可循體系動員之相關單位組織。

二、應變場所與設備

說明意外應變指揮作業地點、意外醫護救助、除污設施及聯絡系統等事項。

三、意外應變程序

說明預期之各類意外事件的應變導則或程序，並說明平時設備整備與演練、消防防護計畫及疏散路線等規劃。

國內有關除役安全之研究，有核研所與清華大學等參與之計畫，其研究重點簡述於下：

2.2 委託核研所研究計畫

核子反應器設施除役計畫導則(草案) [2]

計畫編號：101FCMA006 (2012)

第七章 除役期間預期之意外事件安全分析

說明設施除役期間可能發生之意外事件，依性質可分為：意外事件(如，核安、輻安、工安、火災等)、自然災害事件(如，颱風、地震、豪雨及海嘯等)及人為破壞等，並敘述各項意外事件的發生原因、評估方

法及影響分析。

第十六章 意外事件應變方案

一、應變組織編組與職責分工

說明應變組織體系及各單位權責，並提供有支援需求時可循體系動員之相關單位組織。

二、應變場所與設備

說明意外應變指揮作業地點、意外醫護救助、除污設施及聯絡系統等事項。

三、意外應變程序

說明預期之各類意外事件的應變導則或程序，並說明平時設備整備與演練、消防防護計畫及疏散路線等規劃。

4.6 第七章「除役期間預期之意外事件安全分析」

我國地處環太平洋地震帶及亞熱帶季風區，由於氣候及地質條件之差異，可能遭遇有颱風、地震、海嘯等天然災害。近年來全球氣候變遷，國內部分地區因大量降雨釀成災情，為能周全考量除役期間其可能造成之相關災害，特參考交通部中央氣象局針對大量降雨之定義，將「豪雨」納入除役期間預期意外事件安全分析需說明規畫之自然災害事件。

依據交通部中央氣象局93年11月25日修訂之「大雨」及「豪雨」

定義如下：

大雨 (heavy rain)：指24小時累積雨量達50毫米以上，且其中至少有1小時雨量達15毫米以上之降雨現象。

豪雨 (extremely heavy rain)：指24小時累積雨量達130毫米以上之降雨現象。此外，根據統計：若24小時累積雨量達200毫米以上，部分山區有發生土石流的可能性，另劃分為大豪雨 (torrential rain)；若24小時累積雨量達350毫米以上，則部分地區有發生淹水的可能性，因此另劃分為超大豪雨 (extremely torrential rain)。

主要國家核子反應器設施 除役相關法規研究 [3]

計畫編號：101FCMA006 (2012)

3.4 安全考量

下列事件為在個案基準下，由除役計畫安全觀點所被考慮與評估的

項目：

- 設施內火災
- 容器或系統之洩漏
- 負載下降
- 供應系統失效
- 臨界事故
- 水滲入安全封存

-外部影響(如地震、暴風雨、淹水、氣體滲入)

13.0 緊急應變

除役作業可能會增加發生緊急事件的風險，例如火災、爆炸、瞬間釋放未預期的污染物至環境，或者嚴重的人員傷亡。宜檢視各項工作發生緊急事件的可能性，以及發生這些事件的後果。於詳盡除役計畫中，宜有一個獨立章節摘要說明避免、減輕，以及應變這些緊急事件的措施。

三、 審查查證表

5. 除役期間預期之意外事件之安全分析

- 意外事故安全分析包括輻安、工安、颱風、地震、火災、人為破壞及除役作業之假想事故

15. 意外事件應變方案

- 明確說明意外應變組織編組與職責分工
- 明確說明意外應變程序__

5. 除役期間預期之意外事件之安全分析

核設施可能發生意外事故依性質分為輻安、工安、環保、火災、颱風及震災、人為破壞等，列出除役期間可能發生之假想事故並予以評估。

接受基準：

明確說明假想意外事故及評估

15. 意外事件應變方案

除役計畫需建立意外事件應變導則，以應付當意外事件發生並有影響到大眾健康安全顧慮時，除役計畫工作人員處理應變之指導方針。並建立應變組織體系，規劃各單位權責及應變作業程序，若有支援需求時，可循應變組織體系動員相關單位組織。規劃意外應變場所與設備包括意外應變指揮作業地點、意外救助及醫療裝備、除污設施、聯絡系統。平時設備整備及演練、消防防護計畫、疏散路線等均須於除役計畫中妥善規劃。

接受基準

- 明確說明意外應變組織編組與職責分工。
- 明確說明意外應變程序。

「核子反應器設施除役審查規範技術建立」計畫 [4]

計畫編號： 932004FCMA001 (2004)

5. 除役期間預期之意外事件之安全分析

核設施可能發生意外事故依性質分為輻安、工安、環保、火災、颱風及震災、人為破壞等，列出除役期間可能發生之假想事故並予以評估。

接受基準：

明確說明假想意外事故及評估

15. 意外事件應變方案

除役計畫需建立意外事件應變導則，以應付當意外事件發生並有影響到大眾健康安全顧慮時，除役計畫工作人員處理應變之指導方針。並建立應變組織體系，規劃各單位權責及應變作業程序，若有支援需求時，可循應變組織體系動員相關單位組織。規劃意外應變場所與設備包括意外應變指揮作業地點、意外救助及醫療裝備、除污設施、聯絡系統。平時設備整備及演練、消防防護計畫、疏散路線等均須於除役計畫中妥善規劃。

接受基準

- 明確說明意外應變組織編組與職責分工。
- 明確說明意外應變程序。

2.3 委託清華大學研究報告

核能電廠除役計畫審查技術之研究 [5]

計畫編號：101FCMA007 (2012)

4.3.2.6 事故評估

在除役計畫認可申請書中，檢附「當除役過程中發生人為疏失、機器或裝置發生故障、地震、火災時，針對可能引發的事故種類、程

度及影響相關說明書」作為附件，並加以說明。

具體而言，即使是除役過程中的假想事故，但為了確保不會發生任何意外狀況，須確實預防輻射可能引起的損害，進行事故時除役對象設施附近的民眾曝露劑量評估。

關於事故評估，當除役施工過程中發生操作上的疏失、機器或裝置發生故障、地震、火災或由其它災害可能引發的核子反應器事故時，考量事故種類、程度及影響等，去假設發生事故的起因現象。

據過去的檢討所得之經驗，將事故起因現象整理如下，並選定影響最大的事故，進行評估。

- 火災
- 爆炸
- 掉落
- 衝撞
- 運轉中機器停止功能
- 誤操作閥門開關
- 不正常切斷電源
- 外部電源喪失
- 海嘯或洪水
- 地震

關於核燃料設施，因應必要情況，考量因化學物質所引發的災害或臨界等問題。同時，在現行的制度方面，即使用過核燃料還殘留在廠址，但為了執行除役措施，也需要考慮於核子反應器設置許可申請書之附件十所記載的燃料處理事故。

關於這些事故，以事故對象設施的放射性物質總量為準，因應必要情況，廠房或排氣系統的過濾器，預防放射性物質釋出的設備功

能效果，大略評估被釋放出的放射性物質的量，也要考慮到發生頻率，再選定典型的情節。

轉移環境途徑包括：隨放射性氣體釋放的短期曝露途徑，及放射性氣體釋放後的長期曝露途徑。事故時，關於長期曝露途徑(由地表沉積物的體外曝露或因食物鏈的體內曝露)，認為透過對附近進出之管制、土地表面之除汙及限制農業和畜牧業產品等的出貨，能適切地加以管制。因此，事故時的曝露途徑評估，假設短時間會受到影響，評估無法控制的輻射雲的體外曝露，及因輻射雲而經由呼吸攝取所導致的體內曝露。此外，依必要情況，去篩選對曝露影響較大之典型評估對象的核種。

而作為評估時的天氣條件，通常是使用與核能電廠正常服役期間一樣的條件。

4.4.7 除役時的安全管理及事故預防

就除役的安全管理來說，作業者有關於輻射安全及一般安全相關的安全管理。就輻射安全而言，基本上和提供使用中的管理手法並沒有差異，但解體時產生的粉塵造成內部曝露的對策等部分則必須加強。

另外，就一般安全來說，基本上是根據勞動安全衛生法進行管理，但和使用火的切割作業、高處作業、重量物的搬運、石棉的處理等提供使用相比，仍要考量作業內容的差異。甚至，這些事故可能造成放射性物質的釋放意外，必須徹底採取考量此點的對策。

同時，由於會利用與提供使用不同的解體設備，所以亦必須確保這些設施的安全。

第三章 國外相關之研究報告資料收集

國外除役技術方面，已有非常成熟之經驗，在安全評估(safety assessment)的研究與技術方面，也建立非常嚴謹之審查機制。然其安全評估多界定於對於電廠除役時各項工程運行之安全規範，而對除役時意外事故之安全評估與規範著墨較少，甚至於對於”意外事故”之定義也與國內之定義不完全相同。我國所定義之意外事故較偏向於(accidents)，一般即在平時考慮之外之有關安全事故，而國外對於意外事故偏向於災變或職災(hazards)，而且也注重於事前之篩選(screening)、分析、與預防等事項。而其安全分析方法大致分為傳統之決定法(deterministic)，即分析災變所產生之事件演變及影響，與考慮其發生概率之概率法(probabilistic)，即將發生事故之起始事件(initiating events)之概率以事件樹(event trees)與故障樹(fault trees)之方法得出最終之結果，例如放射線釋放量等資料，以供電廠有效之運用資源以預防事故與改善安全之參考。

本計畫收集國外之資料機構，包括國際性的原子能總署(IAEA)，以歐洲國家為主及美加日韓等國之國際經發合作組織(OECD)之核能署(NEA)，美國的核能管制署(NRC)，能源部(DOE)，電力研究中心(EPRI)，以及以個人名義發表之研究論文等，精要敘述於下。

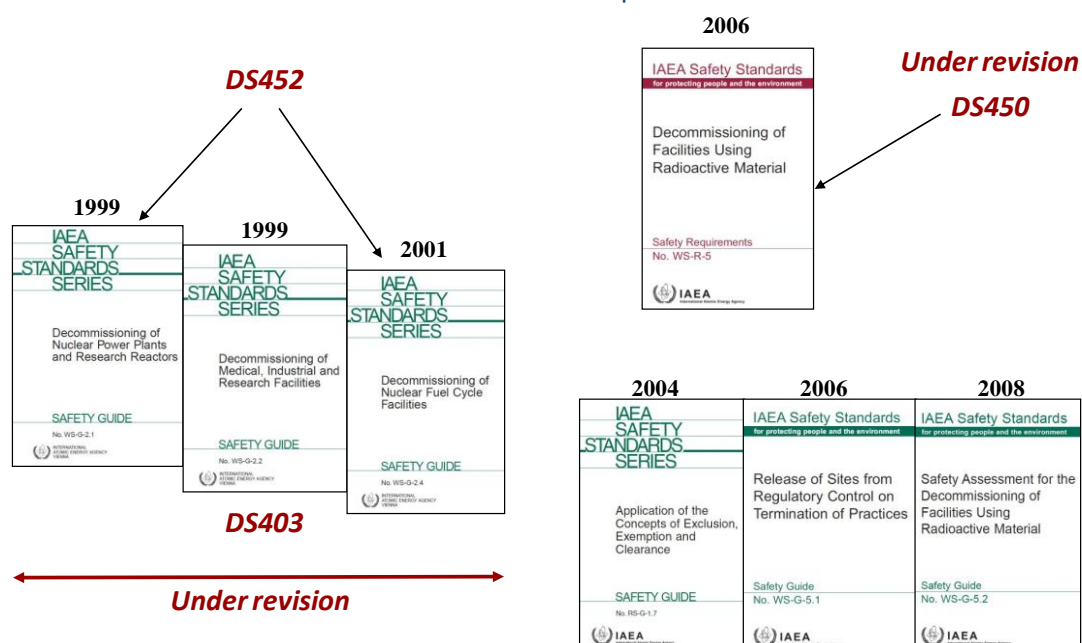
3.1 IAEA

IAEA在1980年初開始進行除役相關活動，主要內容是除役計畫及除役所需技術開發的相關資訊交換。其所推動提出之除役及放射性廢棄物處理處置相關的主要課題，透過各國專家的討論及國際會議上的議論，彙整成各種報告書，例如DeSa (Evaluation and Demonstration of Safety during decommissioning)計畫及FaSa (Use of SaFety Assessment in Planning and Implementation of DecommiSsioning of Facilities Using Radioactive Material)計畫，是針對除役的安全評估手法，進行國際性交流以加強與實證。DeSa為”核能設施除役上的安全評估手法之加強與實證的計畫，加強除役安全評估上之”階層漸進式”(Graded Approach)應用的相關報告，以及加強除役安全評估之管理當局的審查程序。FaSa為”使用安全評估於核子設施除役時之預備與執行的計畫。以下就IAEA之研究，做一整合式的精簡敘述[6 - 13]。

IAEA對於核電廠除役安全方面之研究，所發表之文獻示於下圖：

Safety Standards for Decommissioning

Press F5 to download pdf files



圖一 IAEA歷年所發表有關除役安全評估之文獻

上圖尚未包括最近(2013)所發表之”除役安全評估”(Safety Assessment for Decommissioning)。IAEA之意外事故安全架構乃安全評估之一部分，而安全評估為整個除役計畫之重要一部分。在安全評估之架構下，去鑑別認定正常除役以及潛在事故發生時產生之災變，並擬定從工程技術層面及組織管理層面之控制方法，進而預防、避免、減弱災變及其產生之影響，達到ALARA之目標，以確保人員、大眾、及環境的安全。所有之安全評估作業都經由圖二中八個步驟以疊代方式(iterative methodology)完成。簡述於下：

1. 安全評估架構

此第一步驟設定除役中各種符合法規、安全需要之各種條件，在除役進行之任何階段皆須符合此架構。

2. 設備與活動敘述

設備敘述包括設備地點、氣候、水文、附近居民分布，以及設備之設計、安全系統、結構、零件(次結構)、營運紀錄、及輻射線含量。除役活動之敘述應詳細以連接至各種現有之資料檔案供進行中與預期之除役參考，除役使用之技術，支援器具等均應敘述。

3. 災害認定與篩選

正常除役活動與意外發生時，各種具輻射或不具輻射，對人員，大眾，及環境造成威脅之災害均需辨別認定。各種可預測之誘發起始事件而導致災害，以及災害造成之事件演變均須認定。篩選的目的乃辨別會造成對安全有重要影響之災害。各種災害與事件演變隊人員與大眾遭受之輻射劑量均須量化。使輻射劑量達到安全標準之下所需之控制機構、條件、及其限制均需鑑定。各種預防及減低人員與大眾傷害之方法均應鑑定。

4. 災害分析

由災害發生到結果之分析均應用除役時電廠當時之狀況而改變。事件之時間演變、實際之輻射劑量，以及除役時可用之器具均應

考慮。此階段中將初步鑑定達到安全作用所需之工程技術與組織管理方法。所使用之分析方法通常以決定法(deterministic methodology)進行，但依除役工作之複雜度亦可用概率法(probabilistic methodology)進行。

5. 工程分析

前一步驟中之災害演變中安全措施所需之工程方法，在此步驟中詳細鑑定。除役時與安全有關之系統、結構、與器具均需評估其是否能達到要求。

6. 鑑定結果與鑑定安全措施

安全評估將符合法規需求，並確認此類控制安全措施確保危機降至可接受程度，以利除役之進行，故安全評估之結果需適當地修改。每一安全措施均須確保任一起始災害事件都不能達到危及安全的結果。此一安全措施均須獨力達成其安全作用，任一獨立安全措施可包括多項器具與指令動作。在此階段之研究應包含不確定性(uncertainty)與靈敏度(sensitivity)分析，不確定性與靈敏過高之災害與事件，則安全評估將重複執行以降低不確定性，此結果亦將於法規中詳列之。此除役安全評估步驟建議使用”階梯漸進式”(graded approach)方法，階梯漸進式之定義為：分析過程中其詳細度、複雜度、檔案紀錄、以及其他需符合法規與安

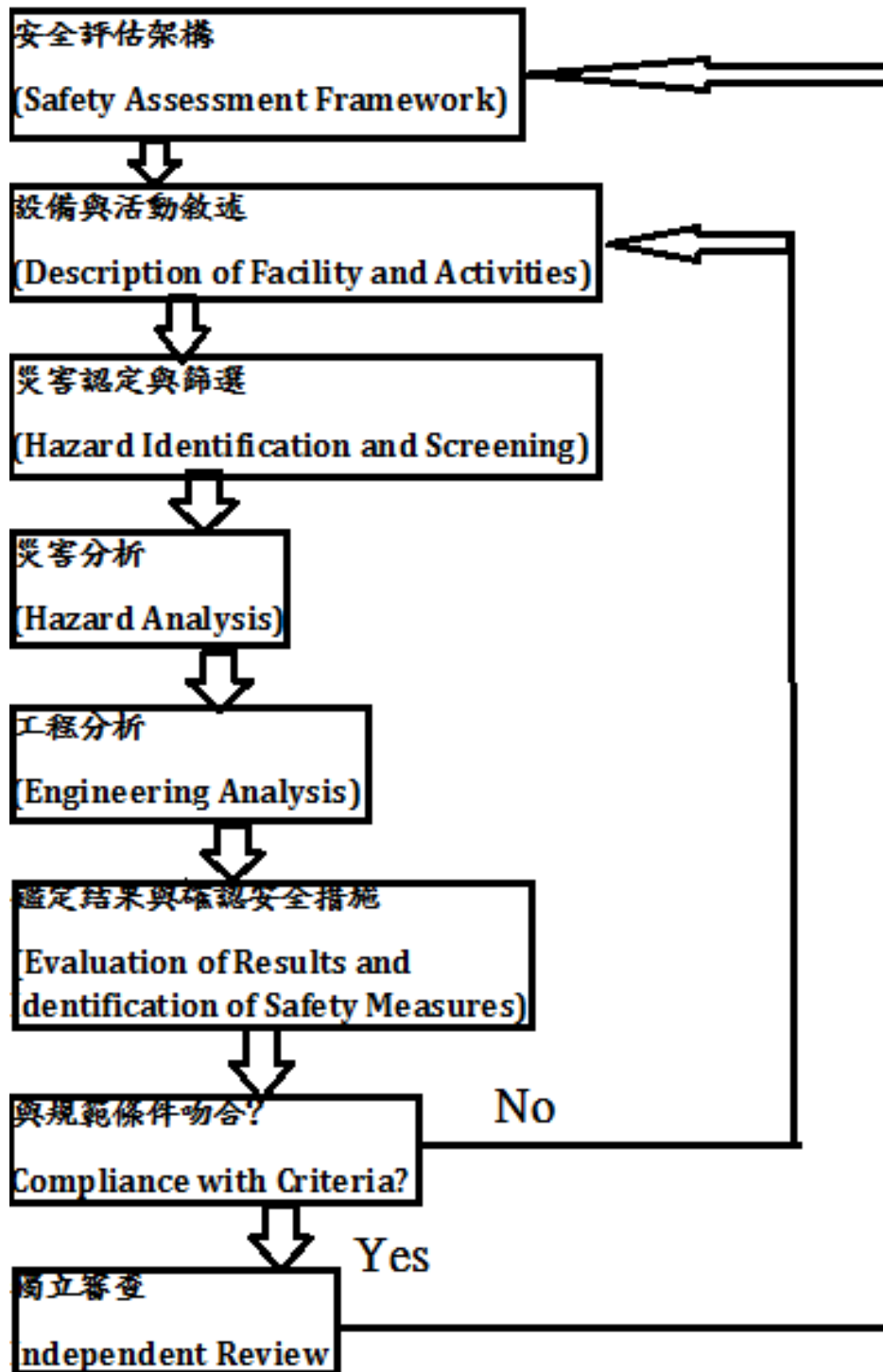
全之要求將依下列因素調整：(1) 災害之強度，(2) 除役設備之特殊性質，(3) 進行中之除役過程，及(4) 在具幅設與不具輻射災害間之考量。

7. 與規範條件吻合

若安全評估之結果與安全要求或管制法規條件不合，則評估步驟將如圖二重新修改。其結果乃鑑定在現有之除役計畫中需增加計畫、行動、以及工程方法以確保安全措施，並發掘其他安全措施已達成安全要求。除役工程若修改，安全評估亦需檢驗與修改以符合最新之除役計畫。

8. 獨立審查

安全評估在完成交付管制單位前需由運行設備者(電廠)或其代表做最後之審查，運行設備者應確保其安全評估之輸入資料、所用假設等均符合除役時設備之現狀，而所建議之安全方法適合當前之除役作業。



圖二 IAEA安全評估作業流程圖

在災害認定方面，宜由有經驗之各方人員行之，例如反應器控制員、控制工程師、幅防安全人員、核安人員、人均因素專家、以及除

役人員。此部分認定方面宜由組織與系統兩方面進行之，進行中應瞭解電廠運作歷史、期間重要發生事件、與當事人瞭解等。鑑定中符合人體工學(ergonomic)之現場巡禮乃必要手段。初步之災害與起始誘發事件清單可能包括如下：

場內誘發事件：

(輻射有關)：

放射線物質丟棄、建築物清洗、身體接受輻射(活化之物質與器具)、直接放射源、汙染物質、液體與氣體排放、不當移去屏蔽物。

(與輻射無關)：

火災(熱切割，例如zircaloy、除污過程例如以化學、機械、電力方式清除金屬、水泥等表面、可燃物品之堆積、可燃氣體與液體)、爆炸(氧氣、液態鈉、氫氣、火炬可燃氣體、除污過程、石磨、鋸合金粉末、壓縮之氣體、可爆炸物質)、淹水(液體槽漏洩、管路漏洩)、有毒及危險物品(隔熱之石棉與玻璃棉、油漆中之鉛、銻(beryllium)、PCBs、機油、除蟲劑)、與電有關災害(失去電源，此會失去通風，造成場內劑量微幅上升、高壓、雷射、負載過重、短路)、造成身體傷害(重物掉落、重物掉落於安全系統、重物掉落於含放射線物質上、

老舊建築崩落、拆除工作、高處工作、挖掘工作、高噪音區、尖銳物品、通路或出口障礙物、轉動滾動物、彈簧能、退化之器具、系統、結構、高溫蒸氣、高溫表面、冷凍劑、高壓系統、壓縮氣體、吊車、人工搬動、提高重物、照明不良、通風不良、灰塵、夾小空間、操作危險工具)、人為與組織(行為疏失、違反工作程序、不慎進入高劑量區、錯誤辨別、不熟廠區之包工與下游人員、進行與除役無關之工作、關閉其他工作所需之器具、不良工作文化、訓練不足、保護措施不足)。

場外誘發事件：

地震、淹水(河流、海嘯、地下水滲透)、外界火災(油庫、森林、化學工廠)、外界天氣(溫度、颱風、雨雪、冰暴、龍捲風、閃電、乾旱、高壓、高濕度、濃霧、霜害、土石流、山崩、火山)、飛機撞擊等、恐怖攻擊、電磁干擾等。

在管制單位之審查方面，IAEA的立場是，安全評估之管制規範屬於整體除役計畫之一部分，審核不應侷限於災害產生之輻射劑量等指標，在除役時能有效之安全執行還是要依靠電廠平時之安全管理計畫。安全評估及其品質乃電廠安全管理之指標，審查應檢視所有安全評估之過程，而非光是結果。審查之深度應為階級層次性(graded)的，以

將有限之審查資源用於最需要的地方。審查進行中，應將可能之審查問題以檢查表(check list)進行之，初期審查以概括性問題為主，有關除役器具、活動、災害認定與篩選、災害分析、工程分析、分析結果與安全措施、電廠品質管理及獨立審核等項目應個別深入審核之。

另外IAEA也提出對於電廠在轉換除役之過渡時期應注意之安全與預防意外之看法，茲敘述於下：

電廠由運轉到除役間之過渡時期，主要影響安全之主要工作為

- 處理與暫時儲藏核燃料
- 儲水系統之洩水
- 清潔與除污
- 放射性總量估計
- 運轉時產生之廢料處理
- 除役之新電廠狀態與規劃
- 任何輻射阻擋物之移除

其中對安全與意外事故影響最大乃燃料之處理與儲存，因為核燃料乃最大輻射與熱之來源，與燃料有關之意外也會對人員、大眾、及環境造成極大的威脅，進而對將來除役及除役後場址維護造成困難。故應絕對禁止在燃料棒附近抬高重物，其他意外事件導致有關燃料之災害與誘發事件均需考慮，意外事件例如：

- 重物破壞燃料
- 喪失燃料池冷卻功能
- 喪失燃料池水
- 喪失場內或場外電源
- 燃料產生臨界

其他可能產生意外並造成人員威脅之工作有清潔或除污時輻射污染源之擴散，均值得列入意外事故之安全考量。

3.2 NEA/OECD

OECD/NEA（經濟合作開發機構／核能機關）是以相互交換各國所進行的各種核能設施除役計畫所獲得的技術資訊與經驗為目的，於1985年9月簽訂為期5年的「核能設施除役計畫相關的科學技術資訊交換協助計畫協定」（Cooperative Program on Decommissioning: CPD）所開始的活動。當初的參加成員有8個國家，主要有試驗研究階段的核能發電廠及再處理設施的除役計畫10件參與活動。之後，協助協定每隔5年延長一次，截至2007年9月共有43個計畫（27座原子爐與16座核燃料循環設施）、11個NEA加盟國與1個非加盟地區（台灣）參加，進行範圍更廣的資訊交換。參加計畫當中，包含研究用核能設施、商業用核能發電廠、因事故而提早除役的設施、舊蘇聯製的核能設施等各種

計劃。另外，為了深入具體性技術課題方面的討論，還設置了作業部會，由各國的專家進行技術性的探討。最近，與WPDD合作的具體性探討則移往WPDD。除役的政策、規範、技術等相關綜合性探討為目的，在OECD/NEA的放射性廢棄物管理委員會（RWMC）旗下，於2001年設立了除役及解體工作小組（Working Party on Decommissioning and Dismantling：WPDD）。成員由管理者、事業者、研究者等所構成，IAEA也有參與計畫。以下就NEA/OECD及WPDD之研究，做一整合式的精簡敘述[14 - 17]。

WPDD 研究結論為，核電廠除役過程中之關鍵議題為 - 漸進式地消除意外災害之發生 - 而使得階梯式(step-wise)之除役與拆除工作能在一個經過認可之”安全箱” - safety case 內安全進行。此安全箱之概念乃 WPDD 對除役安全最主要論點。除役之安全箱乃是一個電廠發展出之策略性文件，此文件主要是專門設計用來分析除役時可能發生的意外災害，以及消除災害之個別階段，在此安全箱內，每一個器具或每一個除役活動，均有可驗證之安全分析與評估。此安全箱之法規條款乃為三個除役安全要素之一，其他兩個要素為預先評估災害，以及使用科技與管理方法消除災害。除役之安全箱與運轉所需之安全箱(如果存在)最大不同在於，它必須隨時保持更新狀態，例如考慮到除役活動進行與電廠現狀、以及管理階層之改變與發展等因素。

建構安全箱之第一步驟為將意外災害與其相關之設備特徵化(characterization)，其中包括收集在除役時各種可能發生之災變情況，分析各種設備之結構及其對人員安全與保護之影響，以及事故產生所導致之輻射劑量多寡、分布、與性質。WPDD 中所認定之災害與 IAEA

之所列災害大同小異。

建構安全箱之第二步驟為收集資料與災害分析，收集之資料包括：對每一個情況所產生之安全挑戰、消除或降低潛在災害危害之技術、驗證災害消弭之方法、以及預期產生之廢料與輻射劑量。其中所使用之災害分類、嚴重性排列、以及篩選等步驟均與 DOE 之研究類似。其他包含在安全箱之內容包括技術、管理及組織之調整，但一個完備可茲意外發生時使用之安全箱，取決於電廠平時之安全文化與周詳之管理才能達成，例如電廠平時之 EH&S(environment health & safety)執行與管理。

3.3 US/NRC

美國核能管制的聯邦法規是將權限授予各州的聯邦政府及機關，以一般規定的形式，通過立法(聯邦規定)施行法令。核物質處理與利用之相關的聯邦法規，即核能法(AEA)是將許可權限授予核能管制委員會(NRC)，其遵照聯邦規定法令之第 10 項(10 CFR：NRC 規定)，經由各項管制的實施，施行法令。這些 NRC 規定並透過 NRC 所出版的法規指引(RG)、NUREG 等管制導則，以及業界出版的國家工業規格等，進行了內容上的補全。

美國聯邦規定中與核能發電設施除役有關的法規包含：第 10 項(10 CFR：能源)、第 29 項(29 CFR：勞工)、第 40 項(40 CFR：環境保護)，以及第 49 項(49 CFR：運輸)。10 CFR，一般稱作 NRC 規定，是規定許認可基準(含安全基準)的施行法。核能法依此規定，透過 NRC 所進行的諸多管制，施行法令。

這些規定中確立了所有與除役相關的規定，包括：除役許可、輻射防護、副產物物質許可、低放射性廢棄物的包裝、運送及處置等。然對於意外災害之安全評估方面，則甚少著墨，個人認為此原因為，

美國在三哩島事故後，要求各電廠研究 IPE (Individual Plant Evaluation)，以及之後包括外在環境因素之 IPEEE (Individual Plant Evaluation of External Events)，概率分析方法求出各種起始事件(意外)而導致爐心熔毀之概率。此研究大大提升美國核電廠之安全度，美國同時亦大量且深入的研究”嚴重事故”(severe accidents)分析，即所謂之 DBAs (Design Based Accidents)，其中大部分之研究結果都趨於過度保守，一般電廠之設計大多均能有效之消弭嚴重事故所帶來對電廠產生類似三哩島之事故，也許此乃美國在除役之意外事故研究上，不像歐洲國家積極。但 NRC 唯獨對除役時用過燃料池 (Spent Fuel Pool) 及其相關系統之安全相當重視，因其認為當意外發生時其對人員、大眾、及環境有極大影響，此部分亦為原能會下年度之研究項目之一。以下就 NRC 對除役意外事故之法規部分簡述於下[18-21]:

NRC 首先對除役時潛在輻射意外的事件，列出下列數點: 燃料移除、組織改變、人員異動、化學污染、大件器具移除、除役與拆除、系統拆卸、掩埋、運輸等。此類事件發生之頻率遠大於電廠運轉時，故除役時意外發生也高於平時。當燃料移至 SFP 後，FSAR 中之 DBAs 能適用的只是與 SFP 有關之部分，故 NRC 建立一個適用於除役時超出 SFP 之 DBAs 意外事故機率，事故之起始誘因包括：地質事件(地震)、飛機撞擊、龍捲風與強風、重物掉落撞擊導致 SFP 池水流失等。其他考慮之事故有：除污時液體外洩、場外供電喪失等。其中 NRC 認為除役時最嚴重之事故乃燃料棒因為池水流失而導致燃料棒鋁合金氧化燃燒導致放射線外洩之意外，此意外發生機率非常低，但在日本福島電廠事故中，雖然事件演化不盡相同，但燃料棒失火之結果卻一致，故考慮意外事故永遠沒有過於保守之空間。

NRC 對其他非輻射相關意外研究顯示，其中導至場外最高輻射量

之意外事件為處理用過合成樹脂之人為疏失。NRC 並結論出，除了 SFP 之外，除役時意外產生導致之影響(例如輻射劑量)與電廠運轉時類似，故電廠之”緊急計畫與作業”(Emergency Plans and Procedures)應以足夠保障安全。故 NRC 僅要求電廠在發現或臆測出在除役時異於 10CFR50.59 所列之 DBAs 時，對意外事故分析評估，以及應變之道，而更新電廠之 FSAR (10CFR100)。相反地，與除役無關之 DBAs 亦可從 FSAR 中移除。

第四章 國外電廠實際經驗案例

國外除役電廠之案例已累積相當多，然對於除役中發生之意外事故(負面消息)及其應變措施，因屬各別電廠之不公開資料，所以可供參考之實例並不多，其中美國 DUKE ENGINEERING & SERVICES, INC. 擁有之 YAEC (YANKEE ATOMIC ELECTRIC COMPANY)所運轉之 Yankee Rowe 核電廠，與 EPRI 合作除役工程進行，最後由 EPRI 發表完整之除役經驗分享[22-24]，在除役意外安全事故發生與處理方面，茲概述於下。

4.1 Yankee Rowe

在除役第一年，Yankee Rowe 發生 15 件與職安(OSHA)有關之人員受傷意外，其中有 9 件屬於喪失工作時間意外 (LTA, lost time accidents)，因此 YAEC 啟動自我評估機制以發掘意外產生原因與預防再發生之方法，之後 Yankee Rowe 就無任何 LTA 發生。YAEC 發現手部受傷是最常發生，發生主要原因為過度操勞，與 OSHA 有關之受傷主要是背傷。YAEC 在選擇包商時亦以該包商之前之職安意外之紀錄為考量因素之一。

在除役安全方面，YAEC 在下列幾項機制中實行：

1. 建構安全法則。基於除役工程屬於”破壞”性質，電廠之安全手冊以及一些特殊程序必須修改。在除役初期就訓練一批管理人員以熟悉 OSHA 標準，並安排重要人員參加” OSHA 500” 等課程，以監督除役工程之安全進行。
2. 人員調整。安排現場安全專業人員監督工程之進行，每一進行之工程都有二至八位安全管理人員協助，尤其是對包商的監督，每一位安全管理人員均有基本之協助人員，包括一至二位的工安技

師，一位行政助理，一位部門經理，以及一位職衛護士。

3. 安全訓練。 YAEC 開設一系列的瞭解職災之交流課程，此類課程亦包括於提供包商瞭解電廠之訓練課程內。每週舉辦”安全工具箱會議”(Toolbox Safety Meeting)並要求所有現場工作人員參加。除役進行中非關輻射線之意外訓練課程遠多於與輻射相關之意外訓練課程。
4. 工作簡報。 YAEC 運用三種工作簡報支援除役安全工作：事前簡報、每日簡報、及事後簡報。事前簡報包括：審查工作性質、地點、與時程，介紹瞭解工作之工程師與工頭，指出電源供給狀況與工作需求，瞭解有關工作之書面記錄與報告，討論除污進行方法，宣布工作需求與防範措施，審查工作有關之意外以及其所需之安全控管，審查與鉛、石棉、燃燒等有關之工作許可，規劃儲存產生廢料之地點，審查放射線安全控管及實施 ALARA。每日簡報包括：當日之工作執行狀況，解決前一日發生之問題，輪班工作之瞭解與交接，審查當日工作可能發生之意外及安全防護。事後簡報包括：工作時程、ALARA、安全、獲得之教訓、工作環境控管、工程進行之控管、工具、材料等之總結。
5. 傷害管理。 傷害管理包括：事前損失準備、立即反應與急救、事件評估、討論獲得之教訓、返回工作等事項。強有效之傷害管理是防止 LTA 之最有效方法。確保每一件意外事故均提報，以及受傷之人員不被排斥，並充分討論獲得之教訓以防止事故再發生。
6. 包商之安全評估計畫納入投標考量。除了價錢、時程、資源、設計、經驗之考量外，決標時更納入包商之安全評估計畫。決標前先讓投標包商了解安全方面之期望值，故包商投標時必須呈送下

列資料：包商前兩年之理賠紀錄、前三年之 LTA 率、前三年 OSHA 有關紀錄、前三年包商在強化 OSHA 之作為、包商現場安全人員規畫、安全手冊或安全政策、傷害管理與及早返回工作崗位計畫、安全檢視與審核程序、及安全委員會組織。

7. 工作意外評估及實際工程控管。意外事故分析主要目的是分辨及衡量意外事故之程度，以達到消除或控制其影響至最低。除役工作進行時，意外事故分析主要是由執行工程之團隊進行現場繞行 (walk down) 動作，以瞭解現場進行除役工程時潛在之意外。工作意外評估是安全評估的另一層次，其關注焦點為特定之工作與其相關之意外事故與管控以減低傷害，並於每日工作簡報中討論，以提醒人員注意依些細節問題，例如在尖銳物旁、特殊物品之處理、使用適合之工具等。此部分需要書面安全意外事故評估，以及建立一個簡單之查核表 (checklist)。
8. 非關輻射線之特殊物質控管。例如石棉、PCB (polychlorinated biphenyl)、鉛、含毒油漆、焊接與切割時產生之金屬微物、噴漆、絕熱、侷限空間之進出、矽化物等。

4.2 Fort St. Vrain

對於極端意外事故之量化評估，美國 FSV (Fort St. Vrain) 核電廠曾對其廠內與場外之潛在極端事故，例如火災、重物掉落、停電、龍捲風等，對於人員產生之輻射劑量做定量化的分析 [25]。FSV 電廠除役工作大致分為三部分：拆除反應器強化水泥容器 (Pre-stressed Concrete Reactor Vessel) 及其除污，廠區其他部分拆除及除污，以及廠區清潔及最後放射線測量。FSV 除役時意外安全分析與其 FSAR 所作之分析不盡相同，因為除役時之工作、用具、情況等與運轉時不同，FSV 除役時使用之技術為先將 PCRV 注滿水當作

屏蔽，然後移除其內件，切割大件水泥乃使用鑽石線切割法 (diamond-wire cutting)，故其考慮之意外事故均與其除役使用之科技有關。故其考慮之意外事故及其分析如下：

- 阻圍體大塊水泥掉落

事故是假設吊車或人為疏失，假設一吊車容量之 10% 之 15 公分厚的水泥塊掉落，重量約 3400 公斤，其放射線物質主要為 Fe-55，Co-60，tritium，及 Eu-154。主要放射線傳遞路徑為人體呼吸，假設一成人站在離反應器 100 公尺處停留兩小時，計算出全身與骨頭之劑量為 0.049 mSv 與 0.547 mSv。

- 重物掉落

FSV 假設(不考慮吊送燃料棒時之掉落)最嚴重之重物掉落乃反應器建築內吊送 240 塊石墨中之一塊掉落，掉落高度為 30 公尺，其中釋出之放射性元素主要是 Fe-55，Co-60，tritium，其對人體與肺部之劑量為 0.046 mSv 與 1.33 mSv。

- 火災

FSV 假設 PCRV 內有 1.13 m^3 之柴油燃料燃燒 30 分鐘，並假設 PCRV 內石墨含之氫有 50% 氧化而釋出，其對人體與肺部之劑量為 1.21 mSv 與 2.15 mSv。

- PCRV 屏蔽水喪失

FSV 在除役時將 PCRV 凹陷洞穴內注滿水當作輻射防護，並不斷的循環乾淨水以降低水內輻射量。當循環系統遭破壞時，池水內含具有放射線之氫、鐵、鈷等元素將隨水面蒸發而進入反應器建築內，水中氫之濃度為 $6.24\text{E}+5 \text{ Bq/cc}$ ，以及氫洩漏率為 $2.5\text{E}+7 \text{ Bq/sec}$ ，計算出人體劑量為 0.384 mSv。

- 停電

場外供電假設被外在因素停止，當大塊石墨切割時 HVAC(heating, ventilation, and air conditioning)系統因停電而失效，石墨中釋出 $8.14E+9$ Bq 之放射線，其對人體與肺部之劑量為 0.015 mSv 與 0.4 mSv。

- 龍捲風

FSV 分析即使風速高達 325 km/h 之龍捲風，對包覆反應器爐心容器之反應器廠房(Reactor Building)都不會造成任何損害，FSV 又假設一個 3.66 m x 0.3 m x 0.1 m 重 48 kg 之物體被龍捲風夾帶撞擊穿透反應器廠房牆壁，擊中其中石墨塊，其總放射線 $2.74E+13$ Bq 之 1% 釋放出，其對人體與肺部之劑量為 0.0058 mSv 與 0.158 mSv。

FSV 之除役意外產生之輻射線對人體之劑量，均符合 NRC 與 EPA 之規範，NRC 10CFR100 之輻射劑量規範為 0.25 Sv(身體最高劑量)與 3 Sv(任何器官最高劑量)，EPA 雖然標準更嚴，但亦不構成任何環境考量。FSV 認為其所假設之極端意外，即使不考慮其極低之發生可能率，所產生之人體輻射劑量亦極低，其他較不嚴重之意外事故更不可能造成更嚴重之輻射劑量，故其除役時之安全分析考量，主要是放在非極端之日常意外事故，例如工安意外。

第五章 人為因素對除役安全之影響

台灣核能界與國外有一非常不同之處為 - 人為因素(human factor)，從各機構為人質疑之”球員兼裁判”之電廠/核能管制單位/研究機構之間關係，到民間與地方上反核趨勢與政治勢力介入等非科技之問題外，台電除役時人事更動產生之人心浮動及不滿，都是除役時應納入之安全考量，尤其由國外除役實際經驗得知，至今尚無類似天災等巨大外力對除役工程產生安全考量之意外發生，反而絕大多數對於除役工程造成安全考量之事件均為類似於職場工安之人為疏忽與意外有關，故本研究計畫亦將人為因素列為研究項目之一。

國外除役研究分析報告非常充足，然而對於人為因素對於電廠除役安全之影響研究則並不多，其中英國 Energy Institute 所提出之”GUIDANCE ON MANAGING HUMAN AND ORGANISATIONAL FACTORS IN DECOMMISSIONING” [26] 中對於除役時人員與組織結構對於除役安全考量作出指標性建議。IAEA 發表之”DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES: TRAINING AND HUMAN RESOURCE CONSIDERATIONS” [27] 則對於除役前人員之訓練與人力配置做出規範建議。此類報告可作為台灣電廠除役時之人員訓練與組織架構之參考，但對於實際人為因素在除役時之安全考量應該深入探討。

國外研究報告中已指出，除役工程往往著重於工程技術面，而除役經驗得知，影響除役安全最主要之因素乃”粗略或不適當之事前計畫與管理，包括無法釐清角色與責任” - 此乃人為因素。當電廠達到運轉壽命，或由於政治、經濟、或環境之考量而除役時，電廠基層員工與管理階層均會有一段非常不確定與不安之時期，因為其工作目標已不是發電，而是去除，或拆毀其工作環境，甚至是其事業未來。電廠面臨之考驗，乃是在繼續運轉電廠時還要規劃新的組織架構與其職

責以關閉與拆卸此同一電廠，此新組織架構並無(大多數)除役經驗，故電廠人員對於其將來之角色與任務(如果他們還保有職位)將充滿不確定感。由國外資料分析，工作人員對於除役安全方面之影響可細分為四個因素：

1. 對未來之不確定

對未來(職位之保留與將來之職責)之不確定，與其衍發對人員士氣與自發心，乃是影響除役安全進行之一大考量。除役工作對於絕大多數電廠人員是非常抽象的概念，而且其工作目標與其現有工作背道而馳，故對人員心理層面產生之衝擊極大。此不確定感首先會產生對於管理階層之不信任，而先入為主之觀念將使人員對工作產生負面想法，並對嚴苛之安全要求逐漸喪失自我要求。此心態與”只要我工作勤奮，公司就會報償我的忠心” - 此為正向安全文化之基石 - 背道而馳。而台電本身半公半私之定位，與員工部分有退休制度保障部分無此保障，而使此問題更加複雜。例如有退休保障(尤其年屆退休)人員可能產生怠惰心態，而無退休保障(尤其年紀較輕)人員可能產生茫然、失落、甚至憤恨報復之心。

由經驗案例而知，電廠高層人員對於不確定感最有效之處理方法乃是”消除不確定”，此部分可由建立起明確之溝通管道策略，藉此策略定時且明確地提供員工有關電廠及時與將來除役之相關訊息。此策略不但可消弭一些對電廠不利之耳語，並可適時並雙向的了解員工疑惑及給予適當之解答與情緒安撫。尤其當高層決定有關除役之重要決定時，當及時將此類訊息，例如除役時程、人員調度、甚至資遣人員等訊息傳達給員工，以免更負面之影響擴散。

在除役準備階段，電廠當邀請關鍵幹部參與除役工程之企劃與準備工作，以增加員工之參與感與向心力，員工可藉此機會對於除役工

作提出一些建議，此部分對於除役工作之安全非常重要，到底他們才是對電廠每日運作、維護、安全等項目最清楚的人，對於將來之除役工作，他們也對與電廠平時運轉時之改變最瞭解。

2. 保持對除役工作勝任之能力

一般除役工程分為三個時程：(1) 初期工作，包括燃料移除、可移動性之受輻射污染之元件器具，(2) 壓力槽及其他物件之除污與拆卸，(3) 其他廠房建築之剷除。每一時程均需不同之科技、工具、與對電廠之了解度，故對於人員配置當有效地規劃。有些除役工作非常類似平時電廠工作，例如燃料換新、元件移除等工作，此時使用電廠從事此類工作之員工進行除役工作完全合理，但此類人員將因除役工程進行而逐漸減少，尤其除役時第二、第三階段時，除役工程將完全由包商或有經驗、技術的人員進行，此時電廠留置人員當為了解多方技術、科技、與經驗之幹部，如何管理留置人員與包商以期保持對除役工作勝任之能力，乃除役主其事者重要挑戰之一。除役工作進行時因不同技術要求，人員組織架構將不斷改變，電廠人員亦將更精簡。此時由於組織架構改變而精簡人員，與之前提到的人員對未來不確定感，乃是對除役工作勝任能力之最大破壞力。所以在除役計畫時期，即應選定核心人員，並訓練此批核心人員，以期他們在除役每個階段均保持維持除役工程安全之進行。此不斷且長年之訓練過程，將更清楚讓有人事決定權之高層人員了解應當留置之核心人員，並認清不同除役階段所需科技之不足處，並適時加以養成。此部分之管理階層更應具有策略領導力、計畫執行力、與人員領導力，直到除役工作完成，因除役工程將延續多年，故電廠高層對於此管理階層人員之篩選、訓練、與經驗傳承等，皆要有完善之規劃，故電廠高層與管理階層人員，亦是”人為因素”之重要考量，核能管制單位當思考對台電除役安全

監督之方向。

除了電廠人員外，除役時之包商亦應給予適當之訓練，因為因除役進行，可能會有不同包商進行工程，故電廠在計畫除役時，當對包商選取條件規範，建立一定之標準程序，以及對將來包商之訓練(包括所需之外部訓練)等計畫，都應為核能管制單位審查重點之一。

3. 保持正面積極之安全文化

安全文化是核能工業核心文化，是每個核能電廠每日不言而喻之習慣，應深植於電廠管理結構與電廠員工行為思考中，但電廠由發電轉為除役時，此轉變將影響此安全文化。除役時即將離職的人員當然對此安全文化有極大衝擊，即使留置的人員也會產生壓力、方向不明確、對上司喪失信任而使得其對安全之態度變為消極，尤其他們對未來工作動向不明、自己的角色疑惑時。

電廠運行時往往是日常例行公事，而除役工程乃非經常重複之工作，往往需要新的技術與器具，工程進行時有可能發生之前未能預料之事，而工作人員(電廠人員與包商)可能先入為主認為除役時已無輻射安全考量，工作環境又改變等因素下，人員往往會發生不同形式之錯誤與違反安全規範。在此情況下，電廠平時運行時之一些安全規範、守則、命令等安全文化之實際執行，應隨除役進行不斷地重新評估與更新，以因應當前之實際電廠狀況。此部分可藉由工作前與工作後之工作會報中討論工作計畫、可能發生狀況、與經驗(好的與不好的)分享，而建立起動態式之安全文化。

4. “保留工作組織之記憶”

對於知識之研究可分為”外在”與” 緘默”兩種，外在知識可簡單的解釋、歸檔、與轉移並記錄於各種報告、手冊、步驟等文獻中，然而緘默知識往往深植於員工日常意識與親身經驗累積而成，很難去

公式化，去與別人溝通，也很難將其記錄於文獻中。對於除役工程，外在知識，例如電廠之各種歷史紀錄、改變紀錄、圖表、施行步驟、事件紀錄等，在除役前均將審視以保留對除役有關之紀錄。然而緘默知識可能只存留於有經驗之員工而往往無法將其記錄於任何文獻中，存有此類緘默知識之員工往往又是對同僚具影響力之核心人員，此類人員又往往是資深屆齡退休，其對於除役工作之改變無想去適應之心態，故可能在除役前選擇提早退休或離職，故管理階層欲將此人員留置可能遭拒，而具此知識之年輕人員可能亦選擇轉換工作而使得除役時具有緘默知識之員工減少，使得除役工作更困難，有關安全之意外事故更容易發生。故電廠人事高層人員應及早鑑識此類人員，而儘量將其留置為除役之核心人員，使用之方法可為施與其更大之職位、責任、薪水、工作保障等誘因。若種種方式都無法留置此類人員，責管理階層應及早提出獲得此”緘默知識”之策略，可實行之方法有：建立導師制度以監督員工在離職前轉移其為紀錄於文獻之經驗傳承、離職員工在離職前幫忙補足文獻紀錄之不足、或做一些個人私下訪問探討等方式。

由以上之分析中可知，”人為因素”對除役安全之影響，不但包括電廠員工、管理階層、最高決策人員與機構、包商、甚至核能管制單位等，都是嚴峻之考驗與挑戰，其影響不但可能波及除役之安全進行，更可能延誤工程進度，增加除役費用，甚至決定除役工程之成敗，故除役主其事者與核能管制單位不可不慎，並及早做計劃準備。

第六章 建議計畫建立國內對除役意外安全評估之審查技術

6.1 國外除役意外安全評估審查技術之比較

由國外除役之研究與實際經驗得知，雖然與輻射有關之意外事故較可能發生於電廠運轉時(反應器在高壓高溫之情況下)，而除役時發生之意外主要是非關輻射(因為燃料棒已移除)，或與職業傷害有關之公安之意外。然而除役時之意外往往直接對人員造成傷害，並且可能造成輻射傷害而對大眾與環境造成威脅。故除役電廠應該針對於其電廠獨特之設計、建造及其除役時所用之技術、方法、時程等考量下，分辨出可能發生之意外事故、事故之分析與演變、事故造成之人員、大眾、與環境傷害(輻射劑量)、應具備一套完善之事故應變計畫，以及防止意外發生與降低意外傷害(災害)之方案，已使得除役工程能順利且安全地完成。

綜觀國外對除役發生之意外的安全研究、分析、到管制單位之評審與規範方法，由本研究分析大致而言，”歐洲人謹慎，美國人講效率”，此不同之思考邏輯亦產生對除役意外事故之觀念與措施。歐洲人之思維可由 IAEA、WPDD、NEA 等機構做的研究中看出，IAEA 之 DeSa 計畫訂定出如何實施除役時之安全評估與其審查方法，FaSa 計畫更加強安全評估之審核方法與其施行方法。除役意外之安全評估之核心基植在下列步驟中：(1)詳盡之安全評估架構，(2)完整之設備與活動敘述，(3)精密的災害認定與篩選，(4)完整的災害分析，(5)科學的工程分析，(6)確實的鑑定結果與鑑定安全措施，(7)仔細審查與規範條件之吻合，(8)由公信機構做獨立審查。此詳盡之架構，為避免耗費過多人力物力，故其提議在加強除役安全評估上使用”階層漸進式”(Graded Approach)，而其安全分析方法大致分為傳統之決定法(deterministic)，即分析災變所產生之事件演變及影響，與考慮其發生概率之概率法(probabilistic)，即將發生事故之起始事件(initiating events)之概率以事件樹(event trees)與故障樹(fault trees)之方法得出最終之結果，例如放射線釋放量等資料，以供電廠有效之運用資源以預防事故與改善安全之參考。

相較於歐洲人，美國人在除役意外安全方面之措施更重視效率與資源(金錢)之使用效用(cost effective)。自從 TMI(Three Mile Island)事故後美國投入大量且深入的研究”嚴重事故”(severe accidents)分析，其中大部分之研究結果都趨於過度保守，一般電廠之設計大多均能有效之消弭嚴重事故所帶來對電廠產生類似 TMI 之

事故，也許此乃美國在除役之意外事故研究上，不像歐洲國家積極。但 NRC 唯獨對除役時用過燃料池 (Spent Fuel Pool) 及其相關系統之安全相當重視。NRC 並結論出，除了 SFP 之外，除役時意外產生導致之影響(例如輻射劑量)與電廠運轉時類似，故電廠之”緊急計畫與作業”(Emergency Plans and Procedures)應以足夠保障安全。故 NRC 僅要求電廠在發現或臆測出在除役時異於 10CFR50.59 所列之 DBAs 時，對意外事故分析評估，以及應變之道，而更新電廠之 FSAR (10CFR100)。但此邏輯可能不適用於台灣，因為美國除西岸加州一帶之電廠外，大多電廠無地震之考量，更不用提海嘯，故台灣欲用 NRC 較有效率之方法，則必須將其緊急手冊加入台灣之特殊外在因素，例如前述意外以及像土石流等災害考量。

NRC 在對電廠除役時之要求，與其他國家不同之處有：

- 電廠除役工程之啟動不須 NRC 之准許，在電廠呈送 PSDAR 後 90 天即可積極除役工程。
- NRC 對電廠除役意外分析之工程方法(Means and Methods)並無審查准許之要求，任何工程分析方法只要是包含於除役意外內，均可修改。
- NRC 對除役意外主要之考量為其對人體之最大輻射劑量，以及除役完成後最後之現場檢視以確定其達到法規標準。
- 運轉執照結束計畫(License Termination Plan, LTP)必須於執照到期之至少前兩年呈送。
- NRC 會不定期地檢查除役工程進行，主要目的是 ALARA 以及 FSS(Final Status Survey)之確實性。

6.2 本研究計畫對國內除役意外安全評估之審查技術之建議

綜觀國外有關除役意外安全評估之研究及經驗，本研究計畫對於國內核能管制機關有關審核技術方面，有下列幾點建議：

1. 雖然各國均將各種外在(external)與內在(internal)意外事故包含於其分析範圍內，但由除役經驗得知，外在(極端)意外事故其發生機率與其產生之人體輻射劑量均遠低於任何標準(此部分當然會因各別電廠設計、建造、及除役方法不同而異)，而真正造成人員傷害最頻繁之意外事故乃與工安有關之職災，故台電及管制單位應加強此方面之研究與應變、防治對策。

2. 因台電核電廠均為美規，核能法規亦主要參考 NRC，故建議審查技術以 NRC 方法為主，並加以修改以及擷取歐洲優點而實行之。在修改 NRC 作法方面包括：更新電廠之 FSAR 以加入台灣特殊之外在因素，如颱風、海嘯、土石流等。對於 plant-specific 之差異處與其他 FSAR 無參考紀錄之意外事故分析，可使用歐洲分析之方法，使用 deterministic 或 probabilistic 方法均可，例如台電各廠均有 IPE 甚至 IPEEE 之研究報告，若將其修改以符合除役狀況，且將最終結果不以爐心熔毀機率表示，而以人體輻射劑量表示。若用 deterministic 方法分析，則可使用 IAEA 之 Graded approach，以節省人力物力。
3. 由 Yankee Rowe 電廠除役經驗可知，除役時發生之意外可由各種方法降低其發生率，例如人員調動、事前 walk down、事前事後與每日之簡報、到包商之遴選等，均可作為台灣核能界參考。
4. 台灣核能界與國外有一非常不同之處為 - 人為因素 (human factor)，從各機構為人質疑之”球員兼裁判”之電廠/核能管制單位/研究機構之間關係，到民間與地方上反核趨勢與政治勢力介入等非科技之問題外，台電除役時人事更動產生之人心浮動及不滿，都是除役時應納入之安全考量，尤其由國外除役實際經驗得知，至今尚無類似天災等巨大外力對除役工程產生安全考量之意外發生，反而絕大多數對於除役工程造成安全考量之事件均為類似於職場工安之人為疏忽與意外有關，故本研究計畫將人為因素列為研究重要項目之一。本研究對於此方面之建議如下：
 - A. 電廠應及早與員工溝通，使員工了解除役之重要規劃，以安撫人心消除不確定感。
 - B. 電廠應及早選定除役時之原廠留置核心人員，以確保除役工作之順利進行，本研究極度不建議電廠除役工程完全交付與委外包商。
 - C. 電廠應更強安全文化，並於除役進行時不斷動態性地改進更新其執行安全文化之品質與人員安全文化之素養。
 - D. 電廠應即早建立”緘默知識”之取得與轉移，以使除役工程安全提高防止意外發生。

References

- [1]. “核能電廠除役安全及管制規劃報告”，行政院原子能委員會，中華民國 101 年 12 月 25 日。
- [2]. 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，“核子反應器設施除役計畫導則(草案)”，計畫編號：101FCMA006
執行單位：核能研究所，計畫主持人：周鼎，中華民國101年12月。
- [3]. 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，“主要國家核子反應器設施 除役相關法規研究”，計畫編號：
101FCMA006，執行單位：核能研究所，計畫主持人：周鼎，中華民國
101年12月。
- [4]. 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，“核子反應器設施除役審查規範技術建立計畫”，計畫編號：
932004FCMA001，執行單位：行政院原子能委員會核能研究所，計畫
主持人：謝榮春，中華民國九十三年十二月十五日。
- [5]. 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告，“核能電廠除役計畫審查技術之研究”，計畫編號：101FCMA007，執
行單位：國立清華大學 原子科學技術發展中心，計畫主持人：白寶
實，中華民國101年12月。

- [6]. P. Francois, J. Kaulard, V. Ljubenov, “Safety Assessment for Decommissioning – an International Approach” , Eurosafe.
- [7]. SAFETY ASSESSMENT FOR DECOMMISSIONING, Annex I, Part A Safety Assessment for Decommissioning of a Nuclear Power Plant INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.
- [8]. THE SAFETY CASE AND SAFETY ASSESSMENT FOR THE PREDISPOSAL MANAGEMENT OF RADIOACTIVE WASTE, GENERAL SAFETY GUIDE INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2013
- [9]. STANDARD FORMAT AND CONTENT FOR SAFETY RELATED DECOMMISSIONING DOCUMENTS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2005
- [10]. SAFETY REPORTS SERIES No. 77, SAFETY ASSESSMENT FOR DECOMMISSIONING, Internationa atomic energy agency, Vienna, 2013.
- [11]. SAFETY ASSESSMENT FOR THE DECOMMISSIONING OF FACILITIES USING RADIOACTIVE MATERIAL, SAFETY GUIDE, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2008 IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. WS-G-5.2.
- [12]. Safety Considerations in the Transition from Operation

to

Decommissioning of Nuclear Facilities, IAEA Safety Reports Series No. 36 (2004).

[13]. SAFETY ASSESSMENT FOR FACILITIES AND ACTIVITIES, GENERAL SAFETY REQUIREMENTS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY VIENNA, 2009 IAEA SAFETY STANDARDS SERIES No. GSR Part 4.

[14]. The Regulatory Challenges of Decommissioning Nuclear Reactors , OECD 2003, NUCLEAR ENERGY AGENCY, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT.

[15]. Achieving the Goals of the Decommissioning Safety Case, A Status Report Prepared on Behalf of the WPDD by its Task Group on the Decommissioning Safety Case, OECD 2005, NEA No. 5417 NUCLEAR ENERGY AGENCY.

[16]. Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD), Topical Session on the Decommissioning and Dismantling Safety Case, Paris, 5th December 2001, JT00129239, ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT.

[17]. Working Party on Decommissioning and Dismantling (WPDD), ACHIEVING THE GOALS OF THE DECOMMISSIONING SAFETY CASE, A

status report.

[18]. NUREG-0586, Supplement 1, Volume 1, Generic Environmental Impact Statement on Decommissioning of Nuclear Facilities , Supplement 1, Regarding the Decommissioning of Nuclear Power Reactors, Main Report, Appendices A through M, Final Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC 20555-0001.

[19]. U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, OFFICE OF NUCLEAR REGULATORY RESEARCH, Division 1, DECOMMISSIONING OF NUCLEAR POWER REACTORS.

[20]. NUREG-1757, Vol. 1, Rev. 2, Consolidated Decommissioning Guidance, Decommissioning Process for Materials Licensees, Final Report, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Washington, DC 20555-0001.

[21]. NUREG-1738, Technical Study of Spent Fuel Pool Accident Risk at Decommissioning Nuclear Power Plants, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Office Nuclear Reactor Regulation, Washington, DC 20555-0001.

[22]. Yankee Rowe Decommissioning Experience Record, Volume 2, TR-107917-V2, Final Report, December 1998, EPRI Project Manager C. J. Wood.

[23]. Conference on Lessons Learned from the Decommissioning of Nuclear Facilities and the Safe Termination of Nuclear Activities in 2006, Session 4 “Implementation of the Decommissioning Activities” , Tuesday, December 12, 2006, Decommissioning of Three U. S. Commercial Nuclear Power Plants, Wayne A. Norton, President/CEO: Connecticut Yankee Atomic Power Company, Yankee.

[24]. Maine Yankee Decommissioning - Experience Report, Detailed Experiences 1997 - 2004, 1011734, Final Report, May 2005, Atomic Electric Company, EPRI Project Manager C. Wood.

[25]. “Development of accident scenarios for the decommissioning of the Fort St. Vrain nuclear generation station” , Public Service Company of Colorado.

[26]. “GUIDANCE ON MANAGING HUMAN AND ORGANISATIONAL FACTORS IN DECOMMISSIONING, First edition, March 2010, Published by ENERGY INSTITUTE, LONDON.

[27]. “DECOMMISSIONING OF NUCLEAR FACILITIES: TRAINING AND HUMAN RESOURCE CONSIDERATIONS” , INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA 2008, IAEA NUCLEAR ENERGY SERIES No. NG-T-2.3.