

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

除役期間留用設備管路系統維護策略研究

Studies on Maintenance Strategy of
Retaining Equipment and Piping System
during Decommissioning

計畫編號：108B007

受委託機關(構)：龍華科技大學

計畫主持人：丁鯤教授

聯絡電話：0936206969

E-mail address：Kuenting@mail.lhu.edu.tw

協同主持人：沈志陽助理教授

研究期程：中華民國 108 年 5 月至 108 年 12 月

研究經費：新臺幣 43 萬元

核研所聯絡人員：胡進章

報告日期：108 年 12 月 6 日

目錄

中文摘要	1
英文摘要	2
壹、計畫緣起與目的	3
一、計畫背景	3
二、計畫目的	4
貳、研究方法與過程	9
一、除役期間停機過渡階段(爐心仍有燃料)之留用設備維護管理規範彙整。	9
二、管路設備(明管與埋管)之老劣化(維護管理)評估研究報告彙整	38
三、搭配未來除役作業可能未預期事件(unexpected events in decommissioning)，蒐集國外電廠在運轉中及停機中之管路老化研究案例	43
四、除役期間對於可能之封閉管路積水可能造成腐蝕洩漏，或除役中該管路液體積存含放射性污染物之案例研究。地下管路造成污染的問題及除役期間的案例探討	48
參、主要發現與結論	51
一、除役期間停機過渡階段(爐心仍有燃料)留用設備之維護管理規範彙整	51
二、管路設備(明管/埋管)之老劣化(維護管理)評估研究報告彙整	60
三、搭配未來除役作業可能未預期事件(unexpected events in decommissioning)，蒐集國外電廠在運轉中	

及停機中之管路老化研究案例.....	63
四、除役期間對於可能之封閉管路積水可能造成腐蝕洩漏，或 除役中該管路液體積存含放射性汙染物之案例研究-防止除役中 地下管路洩漏，在永久停機過渡階段間的注意事項	66
肆、參考文獻.....	71

圖目錄

圖 1 台電公司核一廠除役階段及作業規劃 ⁽³⁾	5
圖 2 美國核電廠氙洩漏的途徑 ⁽¹¹⁾	8
圖 3 美國氙洩漏的分布圖 ⁽¹³⁾	8
圖 4 美國除役成本的分類 ⁽¹⁷⁾	37
圖 5 在燃料卸載條件下 SSC 的再分類 ⁽²⁰⁾	57

中文摘要

由於目前國內用過核燃料乾式貯存設施仍未啟用，而核電廠執照到期且已停機，但用過核燃料卻無法完全由反應爐內移出。為因應上述狀況，台電公司所規劃的除役時程為「停機過渡階段」(8 年)、「除役拆廠階段」(12 年)、「廠址最終狀態偵測階段」(3 年)、「廠址復原階段」(2 年)共25 年。

在除役期間之過渡階段雖無法將用過核燃料自爐心退出，為確保輻安與核安的原則下，機組仍需長期視為大修運轉安全模式的維護層級，屬於我國較為特殊的情況。當反應爐內和用過燃料池內存有核燃料時，為維持核燃料處於安全狀態，其所須之相關結構、系統及組件之老化管理策略，均需要相關資料作為我國管制參考方向。故本計畫期望在過渡階段之留用設備的管路維護安全上，藉由國外相關規範與案例之彙整，以精進管制作業和品質。

英文摘要

When license of the nuclear power plant expires, the reactor must be shut down and spent fuels will completely remove from the reactor. However, the dry storage system cannot be activated beyond post shut down, the spent fuels still stayed in the reactor. Corresponding to this situation, TAIPOWER company considered total of 25years of planned decommissioning schedule as four stages: the shutdown transition phase (8 years), the decommissioning and demolition phase (12 years), the final state detection phase of the site (3 years), and the site restoration phase (2 years). In the transitional period during decommissioning without withdrawing used spent fuel from the reactor core, nuclear unit still needs to be regarded as the maintenance level of the overhaul operation safety mode, which is a special case in Taiwan.

When spent fuels were stored in the reactor and in the spent fuel pool, the relevant aging management strategies of the relevant structures, systems and components require to study in the relevant information as the reference of regulatory. Therefore, this project will be expected to reveal the maintenance strategy of the retained equipment and piping system during the transition period, and to improve the operation and quality through the consolidation of relevant foreign regulations and cases.

壹、計畫緣起與目的

一、計畫背景

核一廠 1 號機與 2 號機運轉執照已分別於 107 年 12 月 5 日與 108 年 7 月 15 日屆期，並分別自隔日起進入除役期間。業主台電公司依法於運轉執照屆期前 3 年提出核一廠除役許可申請，管制單位原能會於 106 年 6 月審查完成，環保署於 109 年 3 月通過環評初審，原能會依法於 108 年 7 月 12 日核發核一廠除役許可，並自 108 年 7 月 16 日起生效。台電公司進入為期 25 年的除役期，並應在除役期內完成除役工作，依規定須將放射性污染物質予以拆除並妥善管理，使廠址土地復原再利用。管制單位持續監督業主除役工作是否符合規範，確保核能安全⁽¹⁾。

核一廠雖已進入除役期，因乾式貯存設施尚未被地方政府核准使用，反應爐內核子燃料無法移出，爐心內目前仍有核子燃料，因此現階段台電公司除須比照運轉期間之作法，針對與核子燃料安全有關之設備執行相關維護與測試作業，然為進一步強化核子燃料之安全。原能會要求需再針對現階段之安全與環境需求，提出除役過渡階段前期維護管理方案，就相關設備之維護與測試作業進行檢討。此外由於機組已不再發電，部分系統設備已無功能或使用需要，為專注於反應器與用過燃料池有關設備之監控與維護，以進一步提升其內核子燃料之安全，台電公司目前亦正依除役計畫進行 1 號機可停用系統設備之停用隔離作業，2 號機部分亦於進入除役期間後展開可停用系統設備之停用隔離作業。

國際原子能總署將核能電廠除役策略分成立即拆除 (DECON)、延遲拆除 (SAFSTOR) 及現場固封 (ENTOMB)⁽²⁾。立即

拆除採用永久停止運轉後立即進行除污與除役，將廠內受到輻射污染的系統設備組件拆除和解體，移到廢棄物倉庫暫存或永久處置場貯存，並在核電廠原址進行除汙工作，讓原地復原後可以不限制使用；延遲拆除採用先讓核電廠內的輻射劑量衰退至安全水準再進行除役，延遲解體期間可分為短期小於15年、中期15~40年及長期大於40年；現場固封先將用過核燃料與核廢料移出，再將具有輻射的核電廠設施原地密封在混凝土內，持續監測與維護，直到廠區輻射減低。我國原子能相關法規是取得主管機關核發之除役許可後25年內完成。

參考美國核電廠過渡階段到除役作業及安全管制，台電公司雖不全面開始核一廠除役計畫之現場拆除作業，但仍可辦理除役準備作業及重要管制事項，例如：除役期間品質保證方案、人員訓練方案、廠址環境輻射特性調查、除役工程管理組織與資訊系統、系統設備停用隔離等作業。

二、計畫目的

由於目前國內用過核燃料乾式貯存設施仍未啟用，而核電廠執照到期且已停機，但用過核燃料卻無法完全由反應爐內移出。為因應上述狀況，台電公司所規劃的除役時程為停機過渡階段(8年)、除役拆廠階段(12年)、廠址最終狀態偵測階段(3年)、廠址復原階段(2年)共25年等階段。如圖1所示⁽³⁾。

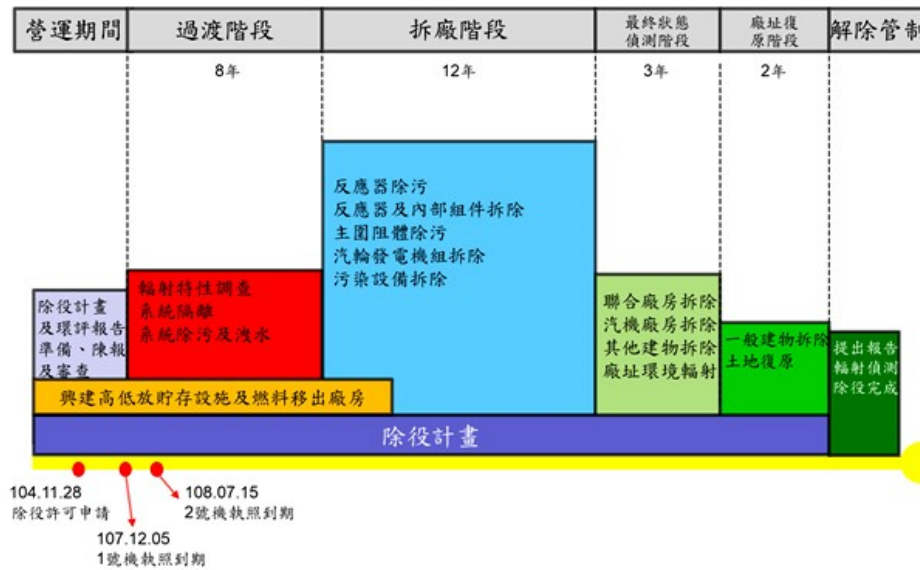


圖 1 台電公司核一廠除役階段及作業規劃⁽³⁾

在除役期間之過渡階段雖無法將用過核燃料自爐心退出，為確保輻安與核安的原則下，機組仍需長期視為大修運轉安全模式的維護層級，屬於我國較為特殊的情況。當反應爐內和用過燃料池內存有核燃料時，為維持核燃料處於安全狀態，其所須之相關結構、系統及組件之老化管理策略，均需要相關資料作為我國管制參考方向。故本計畫期望在過渡階段之留用設備的管路維護安全上，藉由國外相關規範與案例之彙整，以精進管制作業和品質。

因此，留用設備與管路的評估，本計畫須完成項目有下列各項：

1. 除役期間停機過渡階段(爐心仍有燃料)之留用設備(如冷卻、餘熱移除及燃料池補水、注水之管路系統)維護管理規範彙整

因用過核燃料暫無法移出爐心與用過燃料池，因此燃料池的冷卻系統的相關安全等級設備與管路就必須與運轉期間具有相同的功能，此部分是提出評估的重要項目。因爐心中仍有燃料暫存，

因此餘熱移除系統就必須保持正常,其設備與管路的評估就非常重要。

2. 管路設備(明管/埋管)之老劣化(維護管理)評估研究報告彙整。

地下埋管在NRC 的紀錄中有氙外洩的事件發生，是一項重要的監測項目⁽⁴⁾。自 2004 年美國核能電廠發現安全相關以及非安全相關地下埋管的洩漏事件，包含低輻射物質以及柴油機油的外洩，對某些電廠造成地下水的污染，但所洩漏的放射性物質種類與數量都在管制要求的限制範圍內，這些管路的洩漏對公眾健康與安全是屬於低顯著性的(low significance)。儘管如此，美國核管會審查這些事件，以確保核電廠業主採取適當行動，並確定該機構的規則和法規需要做出改變。

2006 年，核能研究院(Nuclear Energy Institute，NEI)提議美國的核設施開始對地下水進行氙監測⁽⁵⁾。這項建議是在美國幾個核設施發現高濃度氙地區進行監測。

2009 年11 月NSIAC（核策略議題諮詢委員會）批准了地下埋管完整性自主提案(Buried Piping Initiative)，其涵蓋範圍為直接與土壤接觸的管路，因此類管路無法直接檢查，若有洩漏發生時，會對環境和公眾信心造成衝擊⁽⁶⁾。然而，也有其他運轉上的經驗顯示，某些地下管路，即使不直接與土壤和地下桶槽接觸，也有可能帶來潛在不利後果的劣化現象。因此，將此地下埋管完整性的創新提案擴大，發展出地下管路和桶槽完整性創新提案，其範圍更涵蓋了不與與土壤與特定地下桶槽直接接觸的特定管路。

針對此目標，2010 年 9 月核能業界提出了地下管路和桶槽完整性的自主提案，即 NEI-09-14 導則⁽⁷⁾。2014 年 7 月，NRC 完成臨時導則 TI-182⁽⁸⁾，證實所有美國核電廠都會依據地下埋管完整性與地下管路與桶槽完整性自主提案去執行檢測與分析。包含程序、風險排序、檢查計畫與資產營運等，提供業界所需資訊，以及強化核能安全。

本計畫將針對管路老劣化的評估，將以核電廠埋管或地下管線在除役期間的管理⁽⁹⁾，提出相關文獻的報告與整理。

3. 搭配未來除役作業可能未預期事件(unexpected events in decommissioning)，蒐集國外電廠在運轉中及停機中之 管路老化研究案例。

本項目將參考美國 Pilgrim 電廠的 PSDAR 報告 (Post-Shutdown Decommissioning Activities Report)⁽¹⁰⁾，該電廠採用延遲拆除，在用過燃料尚未一道乾式貯存設施時，電廠是處於休眠狀態(Dormancy)。此部分電廠之管理與處理可作為本計畫設備留用之參考。

4. 除役期間對於可能之封閉管路積水可能造成腐蝕洩漏，或除役中該管路液體積存含放射性汙染物之案例研究。

美國幾個美國核電廠地下或埋管道的腐蝕，導致少量放射性物質外洩，污染地下水。儘管有這些洩漏事件發生，洩漏所涉及的放射性物質的類型和數量達不到 NRC 為維護公眾健康和 safety 而設定的限制，因此洩漏不會給公眾帶來風險，核電廠的安全系統仍能正常運行⁽¹¹⁾。

這些埋管的洩漏主要涉及氚含量高於正常水的氚含量，這是一種溫和的放射性氫同位素，通常以每升微微(萬億居里)為單位測量。NRC 審查受影響的電廠地下水監測計劃，以確認洩漏不會影響公共健康和安全以及環境。NRC 對埋管問題的整體監督著重於確保核電廠操作員正確監控並在必要時修復管路。氚洩漏的途徑參閱圖 2，美國發生氚洩漏的分布⁽¹²⁾，如圖 3⁽¹³⁾。

本項將針對 Vermont Yankee⁽¹⁴⁾、Pilgrim⁽¹⁵⁾核電廠有關氚洩漏之情節做一說明，並提出在除役期間，地下埋管避免積水外洩的情形做一說明。

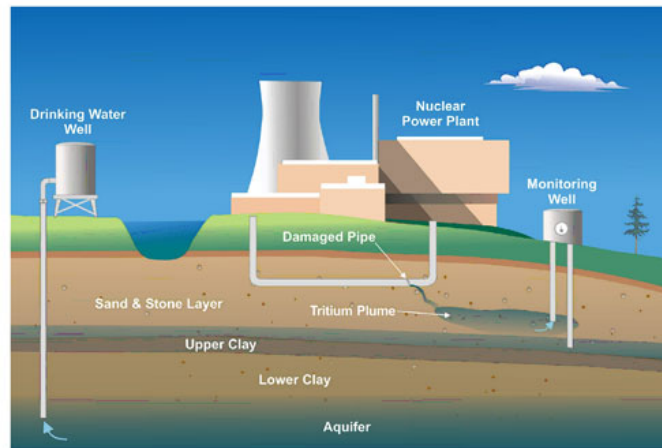


圖 2 美國核電廠氚洩漏的途徑⁽¹¹⁾

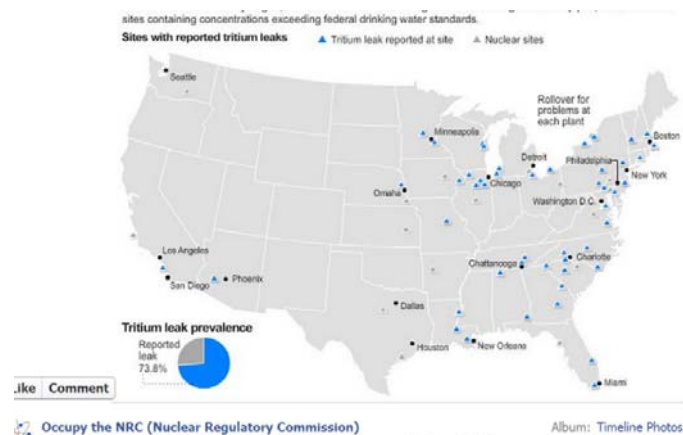


圖 3 美國氚洩漏的分布圖⁽¹³⁾

貳、研究方法與過程

一、除役期間停機過渡階段(爐心仍有燃料)之留用設備維護管理規範彙整

此部分參考NRC2017年發布RIN No. 3150-AJ59 報告⁽¹⁶⁾，探討停機過渡階段所需注意的法規與規範，主要針對用過燃料池的維護管理。

(一) 1996年以來之動力反應器除役作業-除役規則

在1997年至2001年期間美國核管會委員會發布的一系列文件，NRC 官員向委員會提供了有關核電廠除役相關的法規修訂之備選方案和建議，在SRM-SECY-99-168 報告中，「工作人員要求-SECY-99-168-改進核電廠除役法規」-1999年12月21日(ADAMS 登記號ML003752190)，委員會指示NRC 官員以單一、整體的風險告知除役規則，涉及反應器除役的EP、保險、保安、人員配備和培訓、以及背景保護等領域。規則制定的目的是澄清和取消反應器除役的某些規定，這在很大程度上降低放射性風險(以運轉中反應器為基準)。

1. 用過燃料池探討(Spent Fuel Pool Studies)

在從反應器中移除用過燃料後，主要的輻射風險與現場用過核燃料的貯存有關。通常，在反應器永久關閉後幾個月內，設計基準事件導致輻射釋放超過美國環境保護署(EPA)早期保護行動指南(PAGs)規定的限值(在禁區邊界上1rem)。在除役反應器中唯一可能導致顯著的輻射外釋的事故是鋇火(zirconium fire)。鋇火情景是一種假設的，而且極不可能發生，是種超過設計基礎事故的情景，涉及

用過燃料池(SFP)的池水存量大量流失，導致用過燃料顯著升溫，最終導致大量鋁護套氧化和燃料損壞。這種用過燃料升溫的情景可能導致鋁火取決於儲存在用過燃料池中的用過燃料的衰變熱。因此，鋁火情景的機率隨著除役反應起永久關閉的時間而持續下降。1980 年NRC 以通用公告82 號「用過燃料池之超過設計基準事件」來檢視燃料池事件的風險。因為在燃料池中使用高密度儲存格架的數量增加，實驗室研究格架間僅靠空氣冷卻，會增加鋁火的機率⁽¹²⁾。

藉由此報告制定了風險評估和成本效益分析(Section 6.2 of NUREG-1353, “Regulatory Analysis for the Resolution of Generic Issue 82, ‘Beyond Design Basis Accidents in Spent Fuel Pools,” issued April 1989 (ADAMS Accession No. ML082330232)。得出結論認為，SFP 發生嚴重事故的風險很低，符合委員會安全目標政策聲明的公共衛生目標，沒有新的法規必須訂定(51 FR 30028; August 21, 1986)。

NRC 重新評估了 20 世紀 90 年代末發生 SFP 事故的風險以支持美國永久關閉或除役核電廠的風險告知規則制定。NRC 官員在 NUREG-1738「除役核電廠用過燃料池事故風險技術研究」(2001 年 2 月發佈的 ADAMS 登記號 ML010430066) 中的評估，保守地假設如果 SFP 中的水位低於用過燃料的頂部，將發生所有用過燃料的鋁火事件，但仍在用過燃料的空氣冷卻（包括部分脫水情況）

的範圍下有足夠能量防止銼火的產生。即使有了這種保守的假設，該研究發現SFP火災的風險很低，完全符合歐盟委員會的安全目標。

儘管NUREG-1738並未完全排除銼火的可能性，但它確實證明在SFP中以高密度配置存儲用過燃料是安全的，並且存在大量輻射物質意外釋放到環境很低。該研究使用簡化的、有時採用高標的假設和模型，來描述超過設計基礎SFP事故的可能性和後果。隨後的NRC監管活動和研究重申了儲存在池中的用過燃料的安全性和保安性，明SFP有效地設計用於預防事故並最大限度地減少惡意攻擊造成的損害。

2001年9月11日的恐怖襲擊之後，NRC採取了若干行動，以進一步減少SFP火災的可能性。NRC立即發布有效的非公開要求(ADAMS登記號ML020510637的封面信件)。要求持照者實施更強，化的保安作法，包括巡邏、增強保安能力與能量、以及限制性更嚴格的站點控制以減少由恐怖主義發起的事件導致的SFP事故。NRC在2001年9月11日恐怖襲擊事件後的監管行動大大提高了SFP的安全性。2010年2月4日委員會的備忘錄“關於大型火災和爆炸緩解措施的商業核電廠安全要求的演進文件”(ADAMS登記號ML092990438)提供了對這些的全面性討論，其中一些專門針對SFP的安全和保安。

在2001年9月11日的恐怖主義襲擊之後，還訂定了可能造成的SFP池水存量損失的新要求，要在銼火發

生前，提升燃料冷卻性、以及時恢復 SFP 水位和冷卻功能。基於這些額外策略的實施，發生 SFP 鎔火初始事件發生的機率以及相對應的公共健康和安全風險已經降低，並且預計將比 NUREG-1738 和之前的研究分析的結果要更低。關於 SFP 的安全性和飛機撞擊影響的可能性，2001 年 9 月 11 日事件發生後，NRC 再次發布規定檢討之前曾關注的議題，持照者要有策略緩解核電廠大火或爆炸。核能研究院 (NEI) 在 2006 年 12 月發布的 NEI 06-12 修訂 2 版「B.5.b 第 2 和第 3 階段提交指南」(ADAMS 登記號 ML070090060) 中提供了詳細導則。NRC 在 2006 年 12 月 22 日為此導則背書 (ADAMS 登記號 ML063560235 不公開)，NRC 在 2009 年 3 月 27 日發行最後規範「核電廠保安要求」將此變為通則要求。在該最終規則中，NRC 增加了 10 CFR 50.54 (hh)(2)，要求持照者要實施緩解措施，以便在火災或爆炸造成電廠大面積損失的情況下維持或恢復 SFP 冷卻能力，進一步要降低 SFP 火災的可能性。

根據 10 CFR 50.54 (h)(2)，核反應器持照者所需實施的策略，在 NEI 06-12 中都有說明。NEI 導則規定，移動式、獨立於電廠的泵送能力必須能夠為 SFP，提供每分鐘至少 500 加侖的散裝水，並且至少每分鐘向 SFP 噴灑 200 加侖的水。了解到當用過核燃料處於非分散配置時，SFP 更容易被安全處理。該導則還規定移動式設備應能夠在 2 小時內部署以用於非分散配置。NRC 認

為 NEI 導則是減緩火災或爆炸造成的大面積潛在損失的有效手段。

此外，其他組織，如 Sandia 國家實驗室 (SNL) 已經確認了此額外的緩解策略的有效性，防止池水排放，以及其原始池水存在完全喪失的情況下，仍能維持用過核燃料的冷卻。SNL 進行的分析 (通稱為“Sandia 研究”) 是敏感的保安資訊，不向公眾開放。Sandia 研究考慮了用過核燃料負載模式、壓水反應器 SFP 和沸水反應器 SFP 的其他方面，包括了空氣循環在用過核燃料冷卻中的作用。Sandia 研究說明，在起始事件 (即導致 SFP 水位下降的事件) 和用過核燃料組件部分或完全未被覆蓋的點之間存在一定量的時間。

此外，Sandia 研究表明，對於空氣冷卻可能無法有效防止鎔火的假設條件下，在用過核燃料未被覆蓋和導致鎔火可能發生之間，存在一定的時間，從而為減緩事件提供了一個機會。Sandia 研究有計算相關熱傳及流體流動機制，也說明空氣冷卻使用過核燃料會有相當的時間才產生鎔火 (例如在 NUREG-1738 所敘述者)。

NRC 在 2014 年 9 月公告 NUREG-2161, 「Consequence Study of a Beyond-Design-Basis Earthquake Affecting the Spent Fuel Pool for a U.S. Mark I Boiling Water Reactor」 (ADAMS 編號 ML14255A365), NRC 評估了 10 CFR 50.54 (h,)(2) 所要求策略的潛在益處，該報告解釋說，成功實施緩解策略可顯著降低 SFP 冷卻水損失的可能性。

此外，NRC 發現在 SFP 中用過核燃料分散放置，例如 1x4 模式，將對促進自然循環產生積極效應，這增強了空氣的可冷卻性，從而降低了完全 SFP 喪失池水風險的可能性。NRC 於 2014 年 11 月 14 日向所有持照者發布了 2014-14 號注意事項「用過核燃料池儲存的潛在安全增強」(ADAMS 登記號 ML14218A493)，以告知他們 NUREG-2161 的見解。此資訊注意事項說明燃料擺置成分散型態，當爐心燃料立即卸載後，對燃料池的儲存是有利的，也是一種緩減策略的改良。

在 2013 年 NRC 針對法規進行分析，如 COMSECY-13-0030 報告「Staff Evaluation and Recommendation for Japan Lessons Learned Tier 3 Issue on Expedited Transfer of Spent Fuel」(ADAMS 登記號 ML13329A918)，考慮了 NRC 監督用過核燃料儲存和 SFP 運轉經驗(國內和國際)的廣泛歷史，並依賴於 NUREG-2161 中彙編的資訊。在 COMSECY-13-0030 中，NRC 官員得出結論認為，SFP 是具有較大安全裕度的強大結構，並建議委員會針對用過核燃料從 SFP 快速移轉到乾式貯存罐中不需要採取管制措施。委員會隨後同意了官員的建議，可查閱 2014 年 5 月 23 日的 SRM-COMSECY-13-0030 報告 (ADAMS 登記號 ML14143A360)。

另外針對福島一號機事件，NRC 採用管制措施，進一步強化反應器與 SFP 的安全性。2012 年 3 月 12 日，

NRC 公布命令 EA-12-051 「Issuance of Order to Modify Licenses with Regard to Reliable Spent Fuel Pool Instrumentation」 (ADAMS 登記號 ML12054A679)，要求被許可人安裝可靠的廣泛遠程監控 SFP 水位的方法，以在超出基礎設計的外部事件的情況下，有效確定事件以緩解和恢復作業的優先性。雖然命令要求的主要目的是確保運轉員不會因事故發生期間與 SFP 條件相關的不確定性而分心，但改進的監控能力將有助於診斷和響應 SFP 完整性的潛在損失。此外，NRC 公布命令 EA-12-049 「Order Modifying Licenses with Regard to Requirements for Mitigation Strategies for Beyond-Design-Basis External Events」 (ADAMS 登記號 ML12054A735)，要求持照者在發生超基礎設計事件時，要發展、實施以及維護導則與策略，以維持或回復 SFP 冷卻能力，而與正常的交流電系統無關。更進一步，NRC 官員於 2016 年 12 月陳送超基礎設計事件緩減草案(Mitigation of Beyond-Design-Bases Events, MBDBE)給委員會，除其他外，MBDBE 規則將使發布的兩個命令一般適用。這些要求確保了更可靠和強大的緩解能力，以解決由某些重大但不太可能發生的事件導致的 SFP 中的惡化條件。

如上所述，2001 年 9 月 11 日恐怖襲擊事件後實施的其他緩解策略，如頒布 10 CFR 50.54 (hh) (2)和 NRC 審查和批准 NEI 06-12，以及發布在福島第一事故之後的命令

EA-12-049 和 EA-12-051 以強化 SFP 的冷卻能力、回復 SFP 的水位以及在發生鎔火前的冷卻條件。Sandia 研究也確認有效的外加減緩策略，可以維護燃料池放空事件中用過燃料的冷卻條件。根據更多最近的資料以及這些外加策略，使得池水放空事件中 SFP 鎔火初始發生的機率要比 NUREG-1738 以及先前的研究要低。

2. SECY-00-0145

2000 年 6 月 28 日 NRC 官員陳送 SECY-00-0145 「Integrated Rulemaking Plan for Nuclear Power Plant Decommissioning」(ADAMS 登記號 ML003721626)給委員會，官員提出一個整合性除役規則制定方案以及請求委員會認可，專注於EP的監管領域、保險、保安，人員配備和培訓、以及反應器除役的後備保護。此規則制定方案對上述在 2001 年 2 月 28 日公布的鎔火風險研究的完成視情況而定。在 2001 年 6 月 4 日，NRC 官員陳送 SECY-01-0100 「Policy Issues Related to Safeguards, Insurance, and Emergency Preparedness Regulations at Decommissioning Nuclear Power Plants Storing Fuel in Spent Fuel Pools」(ADAMS 登記號 ML011450420)給委員會。考慮到 2001 年 9 月 11 日恐怖襲擊的安全影響，以及鎔火災風險研究結果顯示 SFP 火災的風險很低且完全符合委員會的安全目標，NRC 後來改變了規則制定的優先順序，專注於與保安(safeguard)和保全(security)有關的

計劃性監管改變的資源。

在委員會 2002 年 8 月 16 日發布的議題為「除役電廠監管豁免狀況」的備忘錄中（ADAMS 登記號 ML030550706），NRC 官員藉由觀察到預計不會發生額外的永久性反應器停機，來證明這種重定向是合理的。在可預見的未來，並沒有立即需要進行除役管制改進工作的修訂。NRC 官員得出結論認為，如果在規則制定工作暫停後，任何其他反應器永久停機，將通過執照修訂和豁免程序，繼續為每個設施建立除役管制框架。

3. 2014 年 12 月委員會的決策

在 SRM-SECY-14-0118 中，委員會指示 NRC 官員著手制定反應器除役規則，並確定 2019 年初的目標，以實現其完整性。委員會也說明了下列規則要注意，說明如下：

- SECY-00-0145 中所討論的議題，如 EP 的分級方法。
- 從已經或正在進行除役過程的電廠中汲取經驗教訓。
- 要求持照者的 PSDAR 要得到 NRC 的批准是正確的。
- 維持除役的三個現有選項（立即解體、延遲解體和固封除役）的適當性以及與這些選項相關的時間範圍。
- 中央政府和地方政府以及非政府利益團體在除役過程中的適當角色。
- NRC 官員認為相關的任何其他問題

在 2015 年 1 月 30 日的 SECY-15-0014「動力反應器

除役規則制定的預期時間表和預計資源」(ADAMS 登記號 ML15082A089)中，NRC 官員承諾繼續制定關於核電廠除役和提供了完成除役規則制定所需資源的預期時間表和估算。在 2015 年 10 月 7 日的 SECY-15-0127「核電廠除役規則制定的時間表，資源估算和影響」(未公開發布)中，NRC 官員向委員會提供了有關資源估算和工作的進一步資訊，以使 NRC 官員能夠按照委員會的指示及時取得進展，但在 2016 財政年度被延遲或緩議。在 SECY-15-0127 中，NRC 官員表示，將「繼續關注當前的除役過渡執照作業，同時按照 2019 年的最終確定核電廠除役規則的時間表」。

4. 擬議規則制定的進一步注意事項

為收集核電廠反應器除役規則制定的資訊，NRC 於 2015 年 11 月 19 日在聯邦紀事上公佈了 ANPR (80 FR 72358)。ANPR 開始考慮修訂 NRC 的法規，以解決過渡到除役的反應器的管制改進問題。ANPR 就可能修訂 NRC 要求的具體問題徵求公眾意見。NRC 工作人員在制定管制基礎草案時考慮了 ANPR 的意見。基礎草案第 5 節 (ADAMS 登記號 ML17047A413) 總結了 ANPR 收到的公眾意見。

5. 除役經驗回饋報告

NRC 工作人員於 2016 年 10 月發布了「動力反應器

從運轉到除役的過渡階段：經驗回饋報告」(ADAMS 登記號 ML16085A029)。該報告記錄了 NRC 官員和利益相關者在 2013 年至 2016 年期間與最近的永久性反應器停機有關的經驗回饋。特別是，該報告重點介紹了 Kewaunee 電廠、Crystal River 三號機從反應器運轉到除役的過渡階段相關作業。核能電廠 SONGS 二號機和三號機、以及 VY。NRC 官員審查並批准了對 NRC 法規的豁免請求以及這些電廠的執照修改請求，以修改運轉中的執照基礎，以反映除役反應器的執照基礎。然後，NRC 官員將專案管理和管制責任從核反應器管制辦公室轉移到核材料安全和保安辦公室 (Nuclear Material Safety and Safeguards, NMSS)。NMSS 為這些除役反應堆提供專案管理支持，直到相應執照終止為止。該報告還提供了最近從反應器停機和除役過渡經驗中確定的一些最佳做法。

該報告強調了 NRC 官員在 2013 年至 2016 年除役過渡執照審查期間遇到的一些挑戰以及 NRC 官員應對這些挑戰的反應。該報告還討論了外部利益相關者對 NRC 官員在除役過渡執照活動的審查的興趣，特別是與 SONGS 2 和 3 和 VY 相關的活動，以向公眾聽證會和會議提出的要求以及向 NRC 官員提出的問題為代表。

除了上面討論的經驗回饋和最佳實務之外，該報告還提供了詳細的專案管理指導、經驗回饋、建議以及與 NRC 期望在期間處理的執照類型相關的審查和評估相關

的先例文件。除役過渡階段，包括管制作業和資訊。在制定核電廠反應器除役規則制定的管制基礎時，NRC 官員已經考慮了本報告中描述的許多經驗回饋和建議。

6. 草案法規基礎

為了收集有關動力反應器除役規則制定的更多資訊，NRC 於 2017 年 3 月 15 日在聯邦紀事上公佈了管制基礎草案（82 FR 13778）。在管制基礎草案中，NRC 官員審議了 NRC 法規的修正案，該法規涉及過渡到除役的反應器的管制改進。管制基礎草案中包含的主題與本文件附錄 A 至 K 中討論的主題相同。管制基礎草案就可能修訂 NRC 要求的具體問題徵求公眾意見。NRC 官員在制定管制基礎時考慮了管制基礎草案的意見。本文件的第 5 部分總結了在管制基礎草案上收到的公眾意見。

(二) 除役核電廠反應器最新執照經驗總結

NRC 官員針對近期在過渡階段或者目前在由運轉到除役過渡階段的持照者，已經處理了大量執照作業，包括豁免、執照修改和其他作業（例如，命令取消）。

1. 核反應器除役過渡階段之法規程序(Current Regulatory Process for Power Reactor Decommissioning Transition)

反應器除役要求編入 10 CFR 50.82 和 10 CFR 52.110。相關的除役資金要求編入 10 CFR 50.75。核電廠

反應器持照者當要證明其永久停機並從反應器移走核燃料，就開始除役過程，一切都根據 10 CFR 50.82(a)(1)或 52.110(a)。一旦 NRC 發文認證，10 CFR Part 50 或 10 CFR Part 52 執照就不再授權反應器運轉。儘管撤銷了運轉權，但除役核電廠可繼續保留 10 CFR Part 50 或 10 CFR Part 52 授予的執照。

因為，除役電廠要繼續進行許多適用於 10 CFR Part 50 或 10 CFR Part 52.2 法規運轉電廠的要求，這些要求旨在保護公眾免受反應器運轉相關的設計基礎事件，包括正常運轉條件、預期運轉事件和設計基準事故（DBA）的事件。這些作業不適用於永久停機和移走核燃料的反應器。例如，正在運轉的反應器的某些事故序列，諸如冷卻劑喪失事故和沒有急停的預期暫態，這些都與永久停機和移走燃料的反應器無關。此外，某些法規可能與某些 SSC 無關，因為 SSC 不再需要維護、操作或減緩某些事故、事件或暫態，無論它們是安全相關的還是與保安相關的 SSC。其他法規雖然基於電廠的運轉，可能會在有限的時間內繼續適用於永久性無燃料設施，諸如需要根據 10 CFR Part 50 或 10 CFR Part 52 進行場外輻射緊急準備（Radiological Emergency Preparedness，REP）計畫。通常，NRC 要求的範圍可以簡化為主要與 SFP 中用過核燃料的安全儲存相關的法規和要求，如場址最終安全分析報告中所述。

在反應器永久停止運轉並從反應器容器中取出核燃

料後，持照者方可能會向 NRC 提交大量執照作業(修訂和豁免請求)，以便主要根據降低的公共衛生風險進行審查和批准。如此報告中第 2.1 與 2.2 節所說明地在反應器除役時，可能性意外事故的型態是很少的，而且與運轉的反應器來比較輻射外洩的風險也很低。所以，未反映這些風險的降低，除役持照者將請求修訂其執照，以及針對運轉電廠要求某種程度的豁免。這些從運轉到除役的過渡階段，經 NRC 規劃的執照作業，建構成反應器永久停機以及移走燃料的法規框架。

此外，請求執照修訂與豁免，若獲 NRC 核准，持照者進行某些改變時就不需事前經 NRC 核定。持照者主要使用 10 CFR 50.59 中的門檻進行篩選，以更新最終安全分析報告(更新版)中描述的設施(或程序)，包括更改 PSDAR，而無需事先獲得 NRC 批准。持照者修改最終安全分析報告必須反映除役設計基準分析、SSC、持照者組織、過程與程序的改變。持照者也可使用 10CFR50.12 所提供的「特定豁免」、10CFR50.90「申請修改執照、建造許可或早期場址許可」、10CFR73.5「特定豁免」、10CFR50.54(p)以及 10CFR50.54(q)在改變設施執照基準，以獲得 NRC 核准。

這些除役執照作業的時間和實施，取決於在永久停機和從反應器中移除燃料後風險降低的認知。這些風險降低與幾個因素有關，但也不限於此：(1) 在停止反應器運轉和從反應器中移除燃料後減少放射源項；(2)永久停

機後所經過的時間；(3)在現場長期的燃料貯存模式。在早期除役過程中考慮這些額外風險降低的兩個領域是 EP 和設施保險和賠償。NRC 不批准 EP 和保險範圍要求的豁免，直到分析證實沒有 DBA(在禁區邊界釋放的放射性物質的劑量超過 EPA 的 PAG)需要對公眾採取保護措施。分析還必須評估假設的、非常低機率的超設計基準的錯火災情景。

2. 除役規劃

NRC 設計了當前 10 CFR Part 50 關於反應器除役的規定，這些規定預計將在其運轉執照結束時永久關閉。除役計畫流程預計將在執照期限結束前 5 年開始。無論電廠何時永久關閉，持照者必須向 NRC 提交永久停機證明、永久性燃料清除證明、以及其 PSDAR，向 NRC 和公眾傳達持照者除役反應器計畫的關鍵作為。以下資訊提供了在反應器除役過渡階段間處理的預期執照的重要摘要。本管制基礎的附錄提供了有關這些主題領域的更詳細資訊。

3. 停機後除役作業報告

根據 10 CFR 50.82 (a)(4)(i)，NRC 要求持照者在永久停止運轉之前或之後的 2 年內向 NRC 提交 PSDAR(**Post-shutdown Decommissioning Activities Report**)並將副本發送給受影響的區域地方政府。2013 年

6 月發布的管制導則(RG)1.185 修訂 1 版「停機後除役活動報告的標準格式和內容」(ADAMS 登記號 ML13140A038)，說明 PSDAR 的內容。PSDAR 必須包含對計畫除役作業的描述，完成這些作業的時間表，這些作業的預期成本估算，以及對與特定場地除役作業相關的環境影響得出結論的原因的討論 將受先前發布的環境影響聲明的約束。

根據 10 CFR 50.82，NRC 必須注意到聯邦公報中的 PSDAR，並將其公之於眾。此外，NRC 官員必須在場址附近舉行公開會議。自持照者根據 10 CFR 50.82(a)(1)和 PSDAR 提交其認證之日起至持照者可以執行 10 CFR 中定義的任何「主要除役作業」之日起，有 90 天的等待期。主要除役作業在 10CFR50.2「定義」中有定義、或完全探詢 DTF 內的資金。雖然現行法規不要求 NRC 批准持照人的 PSDAR，但 NRC 確實根據 10 CFR 50.82(a)(4)(i)中的要求以及 RG 1.202 中的導則和接受準則審查了 PSDAR 的內容。此導則與接受準則「標準核動力反應器除役成本估算的格式和內容」是 2005 年 2 月發布 (ADAMS 登記號 ML050230008)，和 NUREG-1713「核電反應器除役成本估算標準審查計畫」2004 年 12 月發布 (ADAMS 登記號 ML043510113)。NRC 官員還發布了一份 PSDAR 結束信函，該信函在很高的層級上涉及收到的任何利益相關方面的意見。在 NRC 官員對 PSDA 的審查完成後，盡快發出信函，以結束此案件。

4. 輻射燃料管理方案

與除役計畫有關的另一個項目是持照者按照 10 CFR 50.54(bb)的要求提交輻射燃料管理計畫(Irradiated Fuel Management Program, IFMP)，以供初步工作人員批准。具體而言，10 CFR 50.54(bb)要求持照者在反應器運轉永久停止後2年內或在反應器運轉許可證到期前5年(以先發生者為準)向 NRC 提交 IFMP 初步批准。持照者通過提交 IFMP 和初步 SSCE 來滿足此要求。

IFMP 的目的是合理保證持照者有一個計畫或策略，以符合 NRC 要求的方式管理和提供除役期間輻射燃料管理的資金，並及時實施。雖然除役的持照者可能先前提交過 IFMP 並在永久停機前 5 年（或在延役期間）獲得初步批准，但持照者必須根據 10 CFR 50.82(a)(8)(vii) 在永久關閉時更新程序。持照者必須包括更新的 IFMP，作為支持每 10 CFR 50.82 (a) (4) (i) 的 PSDAR 所需資訊的一部分。持照者還可以使用 IFMP 來支持豁免請求，以允許將 DTF 用於輻射燃料管理費用。

5. 執照變更

(1) 移動燃料技術規範 - 所有技術規格的綜合修訂

永久停機的反應器的所有持照者都建議對其設施

的 TS 進行全面修改，以反應其永久停機和燃料移出狀態。反應器持照者的 TS 規定了適用於反應器運轉條件的方式，或僅在燃料處於反應器爐心中時適用。對於永久停機和移除燃料的反應器，這些模式是不再可能，因為反應器不能運轉並且燃料不能放入反應器容器中。在這種情況下，可以從執照中刪除具有適用模式的 TS，而不會影響設施的安全性。此外，還可以對 TS 的管理控制部分進行實質性更改，包括更改設施員工職責、人員配置和人員配備水平。還刪除或修改了僅適用於操作反應器的一些程序和報告要求。

除了上述運行反應器 TS 的與除役相關的修正之外，被持照者還可以在除役過渡階段的早期請求兩個範圍較窄的 TS 執照修改。一個涉及使用 CFH，如上所述。可能需要另一項修正來支持輻射燃料處理。

(2) 執照條件

所有 10 CFR Part 50 反應器執照都包含 NRC 根據 10 CFR 50.50 “執照和建造的發放”在適當和必要時對持照者施加的條件，當反應器永久停機並移除燃料時，許多執照條件不再相關，可以從執照中修改或刪除。

在大多數情況下，可以取消防火程序執照條件，因為它旨在確保在發生火災時能夠實現安全關閉的保護措施。10 CFR 50.48 “防火”中規定的除役反應器

的要求事項，要求持照者要維持電廠其餘部分的防火能力，以解決可能產生放射性後果的火災事件。因此，取消運轉中的反應器防火執照條件不應影響除役反應器的防火。

目前，MBDBE 最終規則草案已提交委員會批准，如果委員會批准 MBDBE 規則，該規則將使與減輕大型火災和爆炸策略相關的許可條件在行政程序上被刪除，而持照者將繼續遵守 MBDBE 草案最終規則文本中的相同要求。10 CFR 50.155 (b) (3) 在從 SFP 中移除所有燃料之前，這些緩解策略的要求將保持有效。值得注意的是，NRC 官員對 EP 法規相關豁免的評估，在很大程度上依賴於持照者實施 SFP 的緩解策略容許條件。

對於已獲延役許可的反應器，可能需要根據特定地點的條件修改或刪除某些許可條件。

(3) 緊急準備

在除役過渡階段間，持照者通常會請求多次 EP(Emergency Preparedness,EP)許可作業，以解決與永久停機和移除燃料設施相關的風險降低。這些作業包括根據 10 CFR 第 50 部分的現行管制要求修改持照者的初始停機後修訂和緊急應變組織（ERO）人員配置的應急計劃。許多 EP 法規的豁免，以及批准的永久性無燃料加強緊急應變計劃（Permanently Defueled Emergency Plan，PDEP）和實施 EP 管制豁免的緊急作

業計畫。隨後，持照者還可以提交執照修訂，反映出根據 EP 要求進一步減少 ERO 人員配置，諸如豁免，以反映用過燃料從 SFP 轉移到獨立用過燃料儲存裝置（ISFSI）。

(4) 永久關閉和卸載時的暫備和緊急響應組織人員變動

在除役過渡階段的早期，持照者可以要求修改其緊急應變計畫，以根據設施的永久關閉和卸載狀況，可移除某些輪班和強化 ERO 位置。一旦設施處於這種狀態，就不再需要某些工作人員（例如，核心或熱力工程師）來負責操作設施處理的事件。在持照者擁有以下條件後，將不再需要這些輪班和強化 ERO 職位：

(1)根據 10 CFR 50.82(a)(1)認證，反應器已永久停止運行並且燃料已從反應器中永久移除(2)確定不再存在需要這些功能的可靠事故。但是，必須保持適當的輪班和強化 ERO 的人員配置，以及時處理緊急應變事件，並可與異地組織的作及時有效的溝通和協調。

(5) 緊急應變豁免和永久性的卸載方案以及緊急作業修正案

在持照者永久停機後，10 CFR 50.47「緊急應變計畫」中的異地 REP 計畫標準繼續適用。然而，NRC 在許多豁免中採取了這一立場，經過一段時間（通常為 15 至 18 個月）後，這種正式的異地 REP 計畫會變成不需要的。這段時間取決於存儲在 SFP 中的用過核燃

料的衰減以及滿足 EP 豁免標準所需的特定場地因素。這些標準包括：（1）假定的放射性釋放不會超過適用於永久停機和卸載反應器的 DBA 在禁區邊界的 EPA PAGs;（2）運轉員有足夠的時間採取迅速的緩解措施作為響應對於 SFP 中假定的鎔火災事故情景，如果有必要，官員採取適當的應對行動，使用全面的應急管理計劃（CEMP）來保護公眾健康和安全³一旦獲得 EP 豁免，NRC 就具有充分行地不再需要聯邦緊急事務管理局（FEMA）正式確定異地 REP 計劃。

針對 10CFR50，永久停機和卸載燃料的反應器持照者通常要求 10 CFR 50.47 中的某些標準的管制豁免和附錄 E “生產和使用設施的應急計劃和準備” 中的要求。除役持照者提交特定場址的分析支持，可根據上述門檻，要求豁免緊急應變計劃規定。持照者還提交了相應的執照修改請求，以修改其緊急計劃，以實施上述豁免作為 PDEP 的一部分。與 PDEP 修正案一起或作為其一部分，持照者可以對緊急行動級別計劃進行更改。

一旦實施，PDEP 將不再要求 10 CFR 50.47 中央政府和地方當局維持正式的 FEMA 批准的異地 REP 計劃，包括 10 英哩 plume exposure pathway 和 50 英哩 ingestion pathway 緊急應變規劃區（EPZ）。持照者將繼續維持現場緊急計劃和響應能力，包括通知當地政府官員的緊急聲明。如果需要，場外當局可以使用

CEMP (所有危害) 方法為公眾實施保護措施。在宣布緊急情況分類後，持照者還會繼續通知 NRC 和指定的場外機構，並與異地響應組織保持溝通和接口責任，這些組織可能會在緊急聲明時被要求在現場提供幫助。消防，救護車和醫療服務的規定繼續通過持照者與當地實體之間的協議書達成協議。

在處理 EP 豁免申請時，NRC 官員必須根據委員會在 SRM-SECY-08-0024 中的指示，獲得委員會批准「官員要求項目- SECY-08-0024-委員會授權官員批准或拒絕緊急計劃-代表有效性下降的變化」日期為 2008 年 5 月 19 日(ADAMS 登記號 ML081400510)。具體而言，委員會指示官員“要求委員會批准減少持照者緊急計劃的有效性，該計劃要求免除 10 CFR 50.47(b)和 10 CFR 第 50 部分附錄 E 的要求”。

(6) 停止緊急反應資料系統

附錄 E，第 VI 節，10 CFR 第 50 部分要求運轉的反應器持照者要維護緊急反應資料系統(Emergency Response Data System，ERDS)，並與 NRC 相連結。持照者在永久停止運轉並永久性地從反應器中取出燃料時，無需維護 ERDS。因此，一旦滿足這些條件，持照者可以根據 10 CFR 50.54(q)，且未經 NRC 批准的情況下，將 ERDS 刪除。但是，根據 10 CFR 50.54(q)(5)，持照者必須保留其未經 NRC 批准而在 3

年內製定的緊急計劃的每次變更記錄。

在持照者發出停止 ERDS 數據鏈接意圖的通知後，NRC 官員將向除役反應器持照者發出一封信，確認終止 ERDS 數據鏈接。在某些情況下，NRC 與設施所在的中央/地區建立了諒解備忘錄，NRC 根據該諒解備忘錄向各州提供 NRC 通過 ERDS 接收的信息，以支持異地保護行動決策。在這種情況下，NRC 將向各州發出信函，通知他們被持照者停止了 ERDS 的意圖。

(三) 除役過渡階段的相關法規探討

美國電力綜合研究所(EPRI)建立電廠過渡階段到除役間的導則⁽¹²⁾，在核電廠永久停機前，業主必須展開廣泛的關鍵作業，然後才能開始進行拆除，這段時間通常被稱為過渡階段(transition period)。我國的過渡階段是與 EPRI 具有相同的定義。

理論上來說，這些作業是根據法規訂定的，但在某種狀況下，是可以更實際地來考量，而且是有選擇性的。不論如何，過渡階段各種作業的計畫，應在最終停機之前進行規劃。此外，可以在電廠停機前執行一些過渡階段的相關作業，例如填寫所需繳交的管制文件。除了一般的過渡階段措施，如卸載用過燃料、廢棄物的管理、符合管制單

位的要求和電廠技術規範的變更外，還有一些可選擇性的作業，可能對未來的除役產生長期影響者，包括減少人員的工作時間和化學除污的執行等。

過渡階段作業的規劃，將對降低成本和縮短過渡階段提供立即的效益，並對整個電廠除役的長期績效提供直接效益。雖然 EPRI 導則對近期停機的電廠有很大的效益，但最近停機但仍處於安全貯存的電廠也是有益的。

美國過渡階段間的管制(Transition Period Regulations in the US)與其他國家不同，美國沒有正式的從運轉過渡到除役的過渡階段間的管制。美國的除役流程主要由提交的管制文件來處理，包括：

1. 永久停止運轉和永久性清除燃料的許可證明
2. 停機後除役措施報告 (PSDAR)
3. 特定場地除役成本估算
4. 電廠設計基礎文件的修訂
5. 卸載燃料之安全分析報告

這些文件是由目前美國在過渡階段間的電廠提出的，每個電廠也可以提出項目豁免請求（也是 NRC 對於豁免的規定的關注）：

1. 緊急應變 (Part 50, Appendix E)
2. 保安計畫和程序 (CFR Part 73)
3. 使用除役信託基金 (CFR 50.82)
4. 保險和金融保護 (CFR 50.54 Part 140)

提交這些文件後，可允許業主可使用部分除役信託基

金的部分，並允許業主開始某些拆除活動。為了簡化除役許可程序，NRC 正在考慮制定法規，以取代目前使用上述豁免的程序。NRC 通告描述了 NRC 關於此擬議法規制定的規定：

1. SRM SECY-14-0066，委員會指示工作人員報告其對除役綜合規則制定的必要性的看法。
2. SRM SECY-14-0118，委員會指示工作人員在 2019 年完成法規制定。
3. SECY-15-0014，NRC 工作人員針對兩個 SRM，並提供了時間表和資源需求。

委員會要求 NRC 官員要注意以下問題：

1. 緊急應變的分級方法
 - ✓ 燃料池中燃料
 - ✓ 乾式儲存燃料
2. 經驗學習回饋
3. NRC 批准停機後除役措施報告
4. 保持三個現有除役選項和相關時間表
5. 國家和地方政府以及非政府利益相關者的角色扮演

NRC 已經確定了在 2019 年完成這一規則制定過程的目標。NRC 將在整個規則制定過程中尋求公眾參與和評論。

在美國以外的國家，在歐洲有相當多的經驗，但是要

到所有乏燃料從用過燃料池中移除之後，方進行拆除活動。使用最佳化的儲存罐裝載乏燃料，將新卸載的燃料與較舊的燃料混合，使燃料具有較低的熱量輸出，在工廠最終停機後，這個週期可能長達4至5年，直到所有乏燃料都可以轉移到乾式貯存場。加拿大，法國，德國，西班牙和瑞典，允許在過渡時期，根據營運許可進行規劃活動。但在法國，某些規定受到國家安全局在資訊或授權方面的約束，其目的在降低風險或做拆除階段的準備；包括：從廠址移走燃料、建立輻射特徵、系統淨化、在運轉階段執行放射性廢物處理、系統和組件更換以及設備停用需要。對過渡時期的法規要求，英國在除役方面的管制非常有限。

西班牙在將所有乏燃料從用過燃料池中移出，進入乾式貯存罐儲存之前，僅在 JoséCabrera 工廠進行了全系統化學除污和放射性表徵工作等準備工作。搬遷完成後，電廠運轉執照被轉移到 ENRESA，隨後由西班牙管制機構批准，才開始除役動作。

德國核電廠除役的主要文件是依據其“原子能法”（Atomic Energy Act，AtG）。該文件指出，在電廠永久停機後，除與發電有關的以外，所有正常的要求和法規仍然適用。此外，該文件指出，正常的電廠運轉執照在除役期間仍然適用。由於運轉執照通常不包括除役，因此在永久停機後，德國電廠不能開始主要的除役活動（即拆除），直

到獲得新的除役執照。所以，在永久停機後，德國工廠進入“運轉後階段”（即過渡階段）。該運轉後階段將持續到電廠申請並獲得相應的 Länder¹ 權威機構的除役執照。

在運轉後階段，正常的電廠運轉執照仍然有效，因此德國電廠仍然可以開展正常運轉執照所涵蓋的活動。這些活動包括：

1. 從反應器中移出核燃料
2. 將核燃料裝入儲存罐，並存放在現場臨時儲存設施中（類似於美國工廠的 ISFSI）
3. 放射性物質的利用和運轉中廢物的處置
4. 設施和系統的淨化
5. 系統和組件的採樣
6. 拆除非核設施（例如辦公樓，停車場等）

瑞士的 Mühleberg 核電廠是屬於 BWR，用過燃料池在反應器大樓中，計畫於 2019 年永久停機。這將是瑞士第一個除役的核電廠。瑞士正在訂定從運轉過渡到主動除役的法規和管制導則。

在核電廠永久停機之前，必須開展廣泛的關鍵措施，然後才能開始對電廠進行主動拆除。例如：燃料卸載、運轉中廢料管理，要符合管制要求、人員配置計畫、電廠技術規範的變更以及全系統化學除污等等。在某些情況下，這些活動是由法規規定的，而在其他情況下，它們可能更實際地執行，甚至是可選擇的。在最終停機之前最佳地進行過渡計畫，並且可以在電廠停機之前執行一些過渡階段

措施，例如提交所需的管制文件。

有鑑於此，EPRI 規劃訂定核電廠過渡到除役的導則，包括以下內容：

1. 審查所需和建議的過渡階段措施，對於具有明確核能管制制度的國家，包括了特定的需求；
2. 審查美國和其他迄今尚無明確的過渡到除役具有管制制度的國家，相關待決的管制措施；
3. 針對過去的與現階段正在除役的廠址，以及現階段已有除役措施的廠址進行以執行措施的整理；
4. 訂定從運轉狀態轉變為除役狀態的過渡計畫的導則。

此導則所涵蓋的目標是：

1. 訂定針對具體國家的過渡階段規定
2. 將選擇可提供廣泛的法規的國家(即結構化對應非結構化轉型)
3. 歸納業主在過渡階段運轉經驗
4. 確定在停機前可以執行或計畫的措施
5. 確定應優先考慮的長期主導措施
6. 確定應在停機後儘早執行的節省成本的措施
7. 為訂定從運轉狀態過渡到除役狀態的計畫提供導則

EPRI 計畫的動機在考量除役的成本在很大程度上受到總體人員配置成本的影響，這與除役的期程長度有關。EPRI 報告 #1023025⁽¹⁷⁾中的圖 4 顯示，人員成本平均占美國除役總成本的 43.5%。EPRI 工作中訂定的導則將有助於縮短過渡階段的時間，從而縮短除役的總期程和成本。

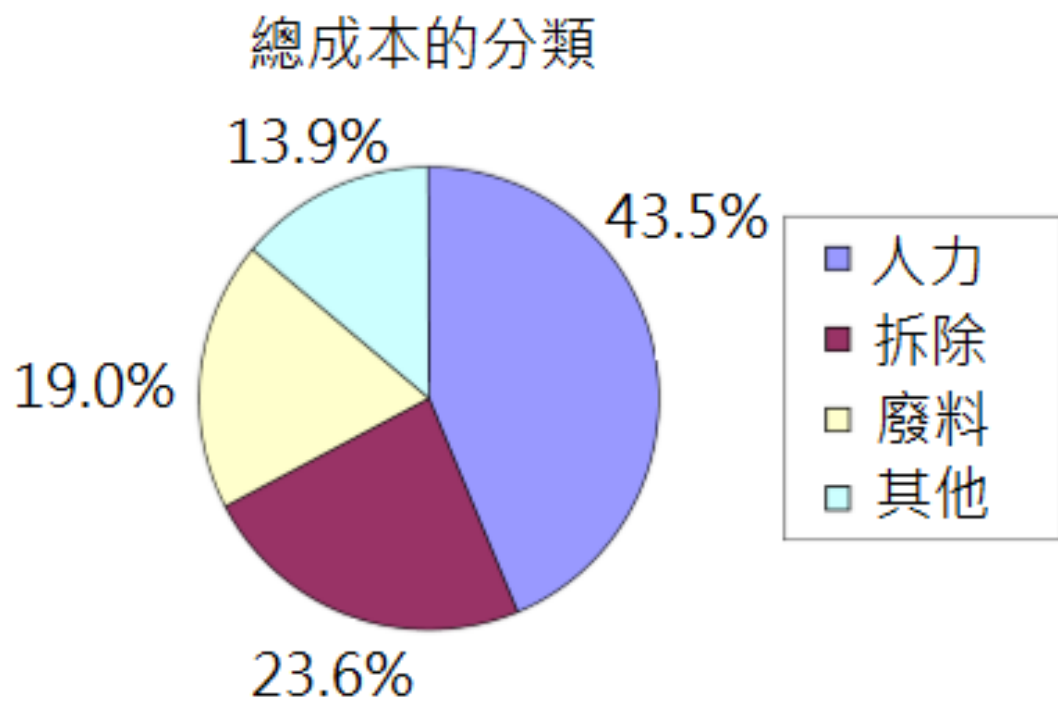


圖 4 美國除役成本的分類⁽¹⁷⁾

二、管路設備(明管與埋管)之老劣化(維護管理)評估研究報告彙整

(一) 地下埋管洩漏之背景說明

自 2004 年美國核能電廠發現安全相關以及非安全相關地下埋管的洩漏事件，包含低輻射物質以及柴油機油的外洩，對某些電廠造成地下水的污染。這些因地下埋管劣化造成洩漏的事件，經美國核管會績效基準風險告知反應器監督程序進行評估，因所洩漏的放射性物質種類與數量都在管制要求的限制範圍內，所造成的後果很低、對管路所執行安全功能並未降低，對核電廠安全系統運轉不會有任何影響，所以這些管路的洩漏對公眾健康與安全是屬於低顯著性的(low significance)。

針對核電廠輻射物質外洩事件，2006 年 5 月核能研究院(Nuclear Energy Institute, NEI)提出工業地下水保護自主提案(Groundwater Protection Initiative, GPI)供核能電廠進行檢討，8 月正式提出 NEI-07-07 工業地下水保護自主提案-最終導則文件。各核能電廠承諾下列事項：確定採取行動以改善電廠對意外外洩事件的反應；放射性物質雖然很低，但在土壤與水次表面中可偵測到與電廠相關的放射性物質；GPI 提供行動方案，電廠要撰寫地下水保護方案、改善與利益相關者的溝通、以及方案監督。GPI 的一個目標就是要能針對意外釋放的放射性物質，在接近法規限值時，要能偵測到洩漏。

2009 年 11 月，NSIAC(核策略議題諮詢委員會)批准了地下埋管完整性自主提案(Buried Piping Initiative)，其涵蓋範圍為直接與土壤接觸的管路，因此類管路無法直接檢查，若有洩漏發生時，會對環境和公眾信心造成衝擊。然而，也有其他運轉上的經驗顯示，某些地下管路，即使不直接與土壤和地下桶槽接觸，也有可能帶來潛在不利後果的劣化現象。因此，將此地下埋管完整性的創新提案擴大，發展出地下管路和桶槽完整性創新提案，其範圍更涵蓋了不與與土壤與特定地下桶槽直接接觸的特定管路。NSIAC 於 2010 年 9 月批准了地下管路和桶槽完整性的自主提案，即 NEI-09-14 導則。

2010 至 2011 年，地下埋管與地下管路的管制工作也經過美國政府財政局(Government Accountability Office, GAO)的審議。2011 年 8 月核管會發佈官員要求備忘錄(Staff Requirements Memorandum, SRM)強調核管會與工業界自主提案以及與規範標準間達成共識。備忘錄也說明：「在共識標準行動中，官員決定法規的修訂要納入 ASME 規範有關地下水保護相關的意見，並應尋求核管會的批准」。2013 年 2 月工業界發佈有關地下埋管以及地下水管路與桶槽完整性自主提案的修訂。到 2014 年 7 月，NRC 完成臨時指引 TI-182，證實所有美國核電廠都會依據地下埋管完整性與地下管路與桶槽完整性自主提案去執行檢測與分析。2015 年 11 月，NRC 完成此作業項目審議。

NEI 09-14 為業界提出針對核電廠地下管路與桶槽完整性管理方案之導則，包含程序、風險排序、檢查計畫與資產營運等，提供業者所需作為。

(二) 相關法規彙整說明

針對 NEI 09-14 導則，美國管制單位、業界、電廠都有相關的作業，本計畫將針對重要的報告與導則進行探討、彙整，提出建議，以作為管制單位在審查地下管路與桶槽作業之參考。

1. SECY-90-0174 報告探討與提出建議

2009 年 9 月 3 日美國核管會主席針對地下埋管洩漏事件的處理方式提出要求，並對下列各項要進行充分的評估：

- (1)美國核管會對安全相關地下埋管的設計、檢測與維護的要求；
- (2)ASME規範對安全相關地下埋管的設計、檢測與維護的要求；
- (3)業界對安全與非安全相關地下管路設計、檢測與維護的方案。

2009 年 12 月 2 日核管會官員完成地下埋管劣化的相關規範、標準、法規以及工業經驗的審查 (SECY-90-0174)，以及訂定持續進行的工作項目。本計畫將參考對此審查內容，進行探討並提出對國內核能管制參考之建議。

2. 「NUREG/CR-6876 核能電廠地下埋管系統劣化之風險告知評估」探討與提出建議⁽¹⁸⁾

此報告評估地下埋管之腐蝕損傷，即使產生較高層次的管路薄化，也仍然會維持住管路完整性。因地下埋管的腐蝕是局部的，最早都是由塗層局部區域的損傷，所導致的劣化是局部的。從結構完整性的觀點來看，局部腐蝕要較管路薄化的效應為低。地下埋管的局部腐蝕僅會引起小的洩漏，不會導致結構完整性的問題發生。根據運轉經驗此部分與觀察結果是一致的，這些安全相關的地下埋管的劣化，不會挑戰功能性或結構完整性。

3. 核電廠地下埋管塗層相關標準探討及提出建議

在運轉的核能電廠中非安全相關的地下埋管中，塗層都已經過相當的時間，但目前仍沒有完整的標準，美國將針對此議題提出新的標準，以作為地下埋管修補或更換之依據。所規劃的標準為 ASTM WK36282，「核能電廠地下埋管塗層更換以及修復導則」(Guide for Selection of Coating for Repair and Rehabilitation of Buried Pipe Coatings for Nuclear Power Plants)。該標準將提供判定既有地下埋管塗層系統選擇換管或修復的指引。此標準的技術議題包含下列各項：

- 地下埋管塗層功能
- 地下埋管塗層修補與翻新的方法與型式

- ASTM與其他標準再塗層修補與翻新評估

4. 地下埋管檢測技術探討及提出建議

為確保地下埋管結構完整性，加上新技術的發展，很多技術服務公司建立各類型的檢測能量，管路內檢測工具包刮超音波(6-24 吋管)以及電磁波(12-48 吋管)，更配合機器人的操作，以及具有高解析度與高鑑別度。

三、搭配未來除役作業可能未預期事件 (unexpected events in decommissioning)，蒐集國外電廠在運轉中及停機中之管路老化研究案例

以下敘述描述了與 Pilgrim 核電廠除役相關的基本作業。根據專案內的主要排程或年度預算的重大變化，劃分為 phase 或 period。以下小節對應於估計中的五個主要除役周期來討論。

(一) 休眠的準備工作

Pilgrim 核電廠採用延遲拆除方法，其中核設施的安置和維護條件允許設施安全儲存並隨後淨化(延期淨化)到允許不受限制使用釋放的水平。而燃料尚未移出時，為休眠狀態。可視為本計畫之設備留用階段。

此階段設施仍保持完整(在休眠期間)，結構保持在非常穩定的狀態。：

將電廠置於安全儲存的過程，包括但不限於以下活動：

- 建立組織架構以支持除役計畫並製定緊急準備計畫和場址保安要求。
- 修訂技術規範與運轉程序，以適應運轉條件與要求。
- 訂定設施與主要組件的特徵，以滿足休眠期的規劃與準備。
- 隔離用過核燃料池並重新配置燃料池支撐系統。
- 休眠期間不再需要系統的停用(斷電和/或排放)。
- 水、水過濾器 and 處理介質的處理與處置不需要。
- 在休眠期開始之前可能存在意外廢棄物的處置，例

如：過量的工具和設備，以及在停用系統和準備休眠設施時產生的廢棄物。

- 重新配置電源、照明、供暖、通風、防火以及支持長期存儲和定期工廠監視和維護所需的任何其他服務。
- 通過固定或消除零星附帶表面污染來穩定區域內的輻射，以便於將來進入建築物和工廠來維護，但不會對高劑量區域進行淨化。
- 在適當情況下，對電廠進行臨時輻射調查，發布警告標誌並建立准入要求。
- 維護受污染和輻射區域的適當屏障。
- 根據需要重新配置安全邊界和監視系統。

以下是電廠永久停機後，在休眠期系統規劃重新配置的一般性討論。

- 電氣系統

電氣系統將在停機和所有用過核燃料轉移到乾式存儲罐之時間內，進行一系列的重新配置，以提高系統靈活性和操作控制，降低操作和維護費用，並提供各種方式將電源與電廠負載上線，特別是對於用過燃料池相關系統和關鍵安全設備。 ISFSI 設施將需要安裝獨立於現有電廠服務的新配電系統，並且還將包括新的柴油發電機和不間斷電源系統。

- 機械系統

在電廠永久停機後，裝填流體的系統要將流體排放和處理，並將樹脂移走，這些都要經過系統功能性分類、電廠配置的評估來決定。系統分類包括：1) 電廠平衡(BOP)；2) 緊急爐心冷卻系統(ECCS)，3) 核能蒸汽安全系統(NSSS)，4) 用過燃料池冷卻(SFPC)，和5) 乾燃料存儲(DFS)。電廠配置包括：1) 電廠停機後(燃料還在反應器中)，2) 燃料卸載後(燃料不在反應器中)；3) 後閘內反應器中沒有燃料，用過燃料池與反應器為物理性隔離；4) 反應器容器排放；5) 降低錯火的風險；6) 乾式燃料儲存後(所有用過燃料全部儲存在乾式貯存罐中)。每個系統將以其在整個電廠中的配置以及功能性，來決定何時排放與廢棄。

● 通風與加熱系統

渦輪機廠房(TB)和反應器廠房(RB)將重新配置通風，以支持剩餘系統和適居性。TB 中的流體填充系統將被排出或安裝防凍保護，並確保加熱蒸汽。RB 通風系統將進行重新配置，以維持廠房的溫度，以確保燃料池冷卻系統、消防系統和乾式儲存場的適居性和功能。

● 火災保護系統

消防(Fire Protection, FP)系統的火災危險分析進主動和被動功能將根據行修訂，火災危險分析可全面評估設施的火災災害、相對性災害防火能力，以及保護用過核燃料和其他放射性物質免受潛在火災釋放的可

能性。火災危險分析將根據需要進行重新評估和修訂，以反映與退役相關的獨特或不同的防火問題和策略。預計隨著電廠系統的排水和斷電，可燃負載範圍縮小，危害被消除，FP 系統的功能和要求將被減少或消除。

- 對除役具有關鍵系統的維護

目前尚無確定的機械系統對最終除役過程至關重要，因此，在將所有用過燃料轉移到乾式燃料儲存之後，機械系統將被放棄，除了在休眠期間保持可適居性所需的系統。除了需要支持通風和照明的電機控制中心之外，現場配電系統將被放棄。負責最終拆除的組織將建立必要的臨時服務，包括電氣和起重機。

(二) 休眠期

在燃料還放在燃料池的休眠早期所需的作業，與在乾式貯存的作業是完全不同的。

早期的作業包括用過燃料池及其相關系統的運轉與維護，包括 ISFSI 的重新安置、以及將用過燃料從水池移送到 ISFSI。假設及時收到所需的管制批准，合併的 ISFSI 的建設估計將於 2020 年完成。預計燃料轉移將在 2022 年年中完成。燃料轉移完成後，燃料池和系統將排空和斷電。

休眠活動將包括 24 小時安全部隊、持續改良的風險反應計畫、保安系統的預防性和矯正性維護、區域照明、一般建築維護、防凍加熱、建築物通風之適居性、受汙染結

構例行輻射檢查、結構完整性的維護以及現場環境和輻射監測計劃。一個消防計劃也要維護好。

休眠期間的保安將主要是為了保護現場的用過核燃料，並防止未經許可進入。將根據需要維護保安，要提供保安屏障、偵測器、警報和其他監視設備。

在休眠期間將開展環境監測計畫，以監測環境中的放射性物質。將為超出規定限度的潛在釋放建立和啟動適當的程序。環境監測計畫將包括在正常電廠運營期間生效的計畫的版本，該計畫將被修改以反映當時電廠的狀況和風險。

休眠後期的作業，將包括將用過燃料從 ISFSI 轉移到 DOE。出於規劃目的，ENG C 目前所使用 PNPS 用過燃料的用過燃料管理計畫，一般基於以下預測：1) DOE 開始將商業用過燃料轉移到聯邦設施的 2030 年開始日期，2) 相應的 2030 年開始從 PNPS 中移除乏燃料，以及 3) 2062 完成日期以移除所有 PNPS 乏燃料。如果能源部成功實施其目前的乏燃料管理和驗收戰略，可以提前進行轉移。¹ 在電廠除役時或在能源部從工地上清除所有乏燃料後，ISFSI 設施將除役。

四、除役期間對於可能之封閉管路積水可能造成腐蝕洩漏，或除役中該管路液體積存含放射性污染物之案例研究。地下管路造成污染的問題及除役期間的案例探討

2010 年，Vermont 州 Yankee 核電廠發現了地下管線中的氚洩漏。氚是氫的放射性同位素，當中子被反應堆中含有核裂變的控制棒吸收時，偶爾會在核反應器中產生。在 Vermont Yankee 的情況下，氚能夠與冷卻水中的氧氣結合，產生氚化水(Tritiated water)。這種類型的水具有腐蝕性，能夠通過地下管道洩漏。雖然該電廠持照者，最初否認氚洩漏，但在 2010 年 1 月還是承認，攜帶這種“氚水”的管道存在，並承認 2005 年以前就有氚洩漏的事件發生。2005 年洩漏的源頭，Vermont Yankee 的工程師尚未發現。

NRC 表示，這種氚洩漏不會對人類健康構成任何風險，也沒有發現飲用水井中的樣本含有可檢測量的氚。雖然這種氚洩漏沒有健康和 safety 風險，但這一事件確實對 Vermont Yankee 核電廠的未來產生了很大影響。鑑於此事件，Vermont 參議院投票贊成在該電廠的運營執照將於 2012 年到期時關閉，無法進行延役的計畫。2013 年 8 月，業主 Entergy 宣布 Vermont Yankee 電廠於 2014 年 12 月正式停止運轉，主要原因在於天然氣價格很低。Vermont Yankee 核電廠將進行除役與重建。

另外，發生氚外洩的還有 Pilgrim 電廠，其他相關的氚洩漏如圖所示。因此，在除役各個階段，要持續有地下水的監測，以避免放射線外洩的事件發生。於 2007 年開始在 Pilgrim 開設了 6 口監測井。公共衛生部（DPH）官員已經自監測計劃開始以來提供了結果。2007 年測試開始後，Pilgrim 的地下水中就檢測到了氚。這有可能在此之前可能發生洩漏，只是沒有進行監測。

由於 2010 年 #205 井中氚的含量上升（2010 年 7 月發現超過 25,000 微微升/升 (pCi / L)），DPH 建議 Entergy 安裝更多的井並開始測試地表水。截至 2010 年 8 月，又安裝了 6 口井。隨著時間的推移（以及由於 Pilgrim 現場額外檢測到氚），Entergy 已經安裝了更多的監測井，總數達到 24 個。

在除役期間地下水的監測方案與運轉中的不同，主要原因說明如下：

- (1) 在除役期間，地下水監測計畫的重點可能從判別和跟踪污染轉移到確定需要補救的區域，並在實施後進行監測。
- (2) 在運轉期間和除役過渡的早期階段，受污染且可能影響地下水區域的位置，可能包含電廠運轉所需的系統和/或含有洩漏到電廠的污染流體的系統，這些可能會造成環境污染。這種擔憂可能妨礙監測井的位置或土壤樣品的收集，直到工廠永久關閉並且系統斷電或排放。

在永久停機後，很短時間所做的一些作業，不是在運轉期間就有在進行，要看地下水污染的大小來決定樣品的取樣與增加監測井的設置。為了整治場址外洩的限制，監測井的網路有可能需要擴充：

- (1) 要確定污染群在一個限定範圍內
- (2) 要提供更多的資料，利用流體輸送模型，以進一步了解場址的特性

以 Vermont Yankee 電廠的一個狀況來說明，當電廠永久關閉後，一些條件的改變，會讓地下水面臨挑戰。當電廠永久關閉後，廠房內的溫度降低，導致地下水侵入地下室，這些入侵水蒸發量不大，電廠需要收集這些水並將其作為液體放射性廢物處理。由於該電廠是“零釋放”，電廠並且沒有許可的廢液排放通道，相對大量的入侵水，可能需要利用場外運輸以進行處理和/或處置。

參、主要發現與結論

一、除役期間停機過渡階段(爐心仍有燃料)留用設備之維護管理規範彙整

(一) 美國法規相關規定

美國核管理委員會(NRC)指示官員在2014年12月30日的工作人員要求備忘錄(Staff Requirement Memorandum, SRM) (ADAMS 登記號 ML14364A111)中進行關於動力反應器除役的綜合規則制定與 SECY-14-0118 相關，2014年10月29日，Duke Energy Florida Inc。要求免除某些緊急計劃要求(ADAMS 登記號 ML14219A444)。委員會進一步指出，該規則制定應解決2000年6月28日 SECY-00-0145 “核電廠退役綜合規則制定計劃”(ADAMS 登記號 ML003721626)中討論的問題，例如緊急應變準備的分級方法(EP)，從已經或正在經歷除役過程的電廠中汲取的經驗教訓，要求持照者關閉後除役活動報告(PSDAR)得到 NRC 批准的適當性，維持三者的適當性除役的現有備選方案和與這些備選方案相關的時間框架，國家和地方政府以及非政府利益攸關方在除役過程中的適當作用，以及 NRC 工作人員認為相關的任何其他問題。

因此，NRC 修改這些法規的目標是提供有效的除役過程；減少現有的法規和執照修改請求的豁免；解決 NRC 官員認為相關的其他除役問題，並支持良好監管的原則，包括開放性、清晰度和可靠性。

在核動力反應器中永久停止運轉，並從反應器容器中移除燃料，而不是放在運轉的動力反應器中，但非現場放射性釋放的風

險顯著降低，並且可能的事故類型明顯更少。直接的結果是，對於本規則制定中涉及的監管領域，沒有必要強加新的要求來解決已確定的安全或安全問題。相反，需要使除役的要求與長期發生的風險降低保持一致，同時保持安全性。通過減少對許可行動（即執照修訂和豁免請求）的依賴，在除役期間實現可持續的監管框架，可以改進除役過程並使其更加高效、開放和可預測。此外，根據委員會在 SRM-SECY-14-0118 中的指示，NRC 工作人員認為網絡安全是一個需要解決的相關問題。正如本監管基礎附錄 C 所述，“網絡安全”，該領域的規則制定將確保以合理保證充分保護公眾健康的方式妥善處理安全問題（例如，假定的鋁火災情景）。安全和共同的防禦和安全。

NRC 官員於 2015 年 11 月 19 日(80 FR 72358)在聯邦紀事(Federal Registr, FR)中發布了“提議規則制定的預先通知：除役電廠的監管改進”，以獲取利益團體對 SRM-SECY 監管問題的反饋 SRM-SECY-14-0118。NRC 在動力反應器除役規則制定中收到了各個領域的利益相關者的意見。NRC 收到了關於目前除役、EP 和除役信託基金(Decommissioning Trust Funds, DTF)監管方法的最多利益相關方意見。NRC 工作人員審查了每個監管領域收到的意見，並利用利益相關方提供的意見制定了監管基礎草案中提出的備選方案，該備選方案於 2017 年 3 月 15 日發布，為期 90 天的公眾意見徵詢期（82 FR 13778）。NRC 在監管基礎草案中收到了各個領域的利益相關方的意見。NRC 收到了關於目前除役、EP 和 DTF 監管方法的最多利益相關方意見。在製定本文件時考慮了收到的關於監管基礎草案的意見。

NRC 官員的監管基礎得出結論認為，有足夠的基礎來履行委員會在 SRM-SECY-14-0118 中的明確指示，並著手制定規則，以解決與動力反應器過渡到除役相關的監管要求。但是，通過制定監管基礎，NRC 工作人員已確定 SRM-SECY-14-0118 中討論的範圍內的某些領域可以使用其他監管備選方案來解決。

NRC 官員已建立了足夠的監管基礎，以繼續在以下領域制定規則：

- EP
- 實質保安(physical security)
- 網路安全(cyber security)
- 藥物和酒精測試(drug and alcohol testing)
- 燃料操作人員證照之培訓要求training requirements for certified fuel handlers (CFHs)
- DTFs
- 場外和現場財務保護要求和賠償協議
- 回溯規定

NRC 官員建議制定規則以實現以下目標：

- 聯邦法規(10 CFR)第10章，第50.54 (bb)條、10 CFR 50.82，的“執照終止”、以及10 CFR 52.110 “的執照終止”或組合實體中的除役文件，包含有關用過核燃料管理計劃的信息，符合10 CFR 72.218 “執照終止”中的監管要求。
- 修訂10 CFR 51.53，“建築後環境報告”和10 CFR 51.95，“建築後環境影響聲明”，以澄清環境報告要求並添加對10 CFR 52.110的參考。
- 修訂10 CFR 50.82(a)和10 CFR 52.110，以澄清持照者必須在

PSDAR中評估除役的環境影響，以及它們是否有界限。

- 修訂10 CFR 50.59 (d)(3)、 10 CFR 50.71 (c)、附錄A “核電廠通用設計標準”的一般設計標準1，“品質標準和記錄”；10 CFR第50部分，“生產和使用設施的國內許可”，附錄B “核電廠和燃料後處理廠質量保證標準”的標準XVII，“品質保證記錄”、10 CFR第50部分和10 CFR 72.72 (d)刪除在退役期間不再使用的結構，系統和組件(SSC)的某些記錄保留要求，以及用過核燃料存儲記錄的重複要求。
- 修訂10 CFR第20部分，“防輻射標準”附錄G，“許可土地處置設施和清單中用於處置的低放射性廢物轉移的要求”，第III.E部分，用於調查低價貨物的運輸 如果托運人在轉移後20天內未收到收貨通知，則允許基於運行經驗的45天通知窗口顯示這是LLW運輸的合理延遲。

NRC 工作人員的監管基礎得出結論認為，除了製定規則之外的其他選擇，例如制定監管指導，可以解決以下監管領域：

- 非執照運營商的最低人員配置，包括CFH
- 中央和地方政府在除役過程中的適當作用
- NRC對PSDAR的審查水平
- 修訂60年電力反應器退役限制
- 核燃料老化管理

NRC 官員的監管基礎建議 NRC 維持疲勞管理的現狀，而不是將 10 CFR Part 26，Subpart I 中的要求擴展到除役持照者。

正如在此監管基礎中所討論的一樣，NRC 對最近與除役動力反應器相關的許可行動的見解進行的評估使 NRC 得出結論，現

有要求的變化對於除役過程中的效率、清晰度和開放性是必要的。此時批准了動力反應器除役規則，制定框架的任何具體要素，因此，關於動力反應器除役規則制定要素的任何結論都可能發生變化。

(二) 韓國處理燃料卸載後之規定⁽²⁰⁾

在 10 CFR 50.2 ⁽²¹⁾中，安全相關的 SSC 定義為在以下所述的設計基準事故期間仍維持正常功能，以確保反應器冷卻水壓力邊界的完整性，可以達成安全停機的功能以及預防或減緩意外事故的後果，這些事故可能導致如 10 CFR 50.34 (a) (1) 或 10 CFR 100.11 ⁽²²⁾潛在的輻射外洩到廠外的規定。核安全委員會第 2016-15 號公告⁽²³⁾描述了反應器設施安全等級及其標準的規定，其中將 SSC 的分類分為安全等級 1，安全等級 2，安全等級 3 和非安全等級。燃料卸除後的 SSC 分類應符合運轉狀態下的規定。

在燃料卸載的狀態下，10CFR50.2 所定義的安全功能中，前兩個功能會不適用。燃料卸載狀態下的意外事故應進行評估，以確保事故後果可能導致潛在輻射廠外洩漏。SSC 要能防止為防止或減緩事故後果，而能履行其 SSC 的安全功能。

針對 Zion NPP ⁽²⁴⁾，在燃料卸載狀態下，沒有如 10CFR50.2 中所定義為安全相關 SSC 的 SSC，因此針對卸載燃料後要維支燃料安全或輻射防護安全功能的 SSC，指定為燃料卸載後重要條件 (Important To Defuel Conditions, ITDC)。針對 ITDC 確定 SSC 的四個準則說明如下：

準則 1：SSC 是否與處於安全條件下的核燃料的存儲、控制或維護相關？或處理放射性廢料相關？這包括了直接和間接的影響。

準則 2：SSC 是否與放射性安全相關(Radiological Safety)？

準則 3：SSC 是否對管制單位做了承諾，在安全條件下相關核燃料的儲存、控制或維護？或處理放射性廢料等。

準則 4：SSC 是否符合法規之規定，這與技術規範(Technical Specification)事無關的。

上述準則只要符合任何一個，就是 ITDC 的正面反應，若四個都不滿足，就是負面反應。

核安全和安保委員會注意事項 2016-15(Nuclear Safety and Security Commission Notice)，說明了反應器設施安全等級及其標準的規定。該規定將 SSC 分為安全等級 1，安全等級 2，安全等級 3 和非安全等級。安全等級 3 的安全功能包括：放射線屏蔽，用以保護主控制室和廠外人員；濕式存儲用過燃料的冷卻功能；以及安全等級 1、2 或 3 的支持系統。根據韓國國內法，有處於燃料卸載狀態的安全等級 3 的 SSC 的相關規定。如果採用韓國國內法對 SSC 的安全等級進行分類，則是相同的 SSC 分類。定義為在燃料卸載下使用韓國國內法的安全功能與分類，與在 ITDC 的 SSC 的安全功能定義相似。

在正常運轉期間，SSC 被指定為安全相關和非安全相關。在燃料卸載狀態下，某些 SSC(例如反應器冷卻水系統和相關系統)並不運轉，並且 SSC 的功能已更改。因此，對於燃料卸載狀態，

SSC 可以分類為與安全相關或為 ITDC、運轉相關、以及運轉不運轉，如圖 5 所示。某些 SSC 並沒有運轉，則判定為運轉不相關。對於燃料卸載狀態，正在運轉的 SSC 被分類為與安全相關或與運轉相關。

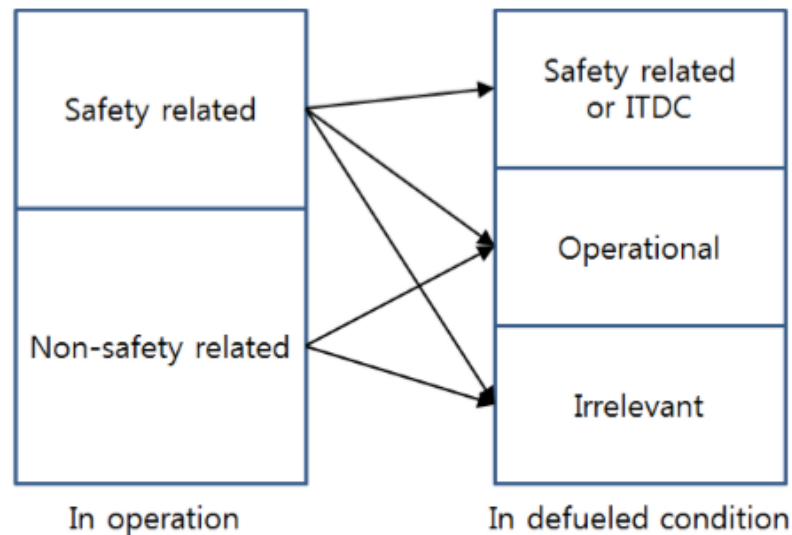


圖 5 在燃料卸載條件下 SSC 的再分類⁽²⁰⁾

為了確定 SSC 的安全等級，第一步是確定在燃料卸載狀態下的安全目標。可能的安全目標是反應度的控制 (reactivity control)、燃料組件的冷卻、放射性物質的和輻射暴露是否被限制。

第二步是確定與安全目標相關的修訂後的事務分析，例如地震的代表性事件，包括續發性失效 (consequential failure)、廠外電源中斷 (> 10 小時)、用過燃料池冷卻失效，用過燃料池池水喪失、燃料操作事故、反應器廠房內部淹水、內部火災 以及在卸載狀態下的外部事件 (飛機墜毀、爆炸……)。

滿足安全目標的安全功能，藉由安全系統來達成。包含了安全系統以及履行安全功能的 SSC 被指定為安全相關或為 ITDC。表一說明了 SSC 重新分類的案例。

表 1 重新分類案例⁽²⁰⁾

	safety-related	non-safety-related
safety-related or ITDC	the spent fuel pool cooling system	
operational	emergency core cooling system	demineralized water supply system
Irrelevant	steam generator feed water system	generator

修訂後的事故分析的結果與時間有關，因為燃料卸載的狀態（如衰變熱和事件清單）與時間有關。因此，SSC 的分類可能與卸載狀態的時間而定義不同。

針對用過燃料池冷卻和清潔系統的支撐系統可以具有多功能，例如，組件冷卻水系統（CCW）不僅支持用過燃料池冷卻和清潔系統，而且還支持其他組件，例如反應器冷卻泵密封冷卻和其他熱交換器。因此，CCW 的某些 SSC 被歸類為與安全相關或 ITDC，而另一些則被歸類為與運轉無關。

需要在運轉狀態下運轉的許多系統，在燃料卸載狀態下將不再運轉，並且系統功能將從運轉狀態變更為燃料卸載狀態。在燃料卸載狀態下的核電廠需要工作許可(conduct licensing)，電廠要完成系統降級和 SSC 等級重新分類，以優化電廠的設計基礎，方

進行所需工程。 本文說明了對燃料卸載狀態下安全等級進行重新分類的方法。正常運行期間 SSC 的安全等級，經過審查後在燃料卸載狀態下重新分類裝 SSC 安全等級的案例。

二、管路設備(明管/埋管)之老劣化(維護管理)評估研究報告彙整

管路系統的結構完整性對核電廠的安全性和可操作性很重要，基於此認知，管路與系統組件與設備劣化與失效的資料需要由管治單位、國際組織、工業界組織來蒐集。這些資訊經常回饋給反應器法規與研發方案，並配合無損檢測(NDE)技術、在役檢測(ISI)方案、洩漏前評估、風險告知 ISI 和機率安全評估(PSA)。

幾個 NEA 成員國已同意建立組件運轉經驗、退化和老化計劃(Component Operational Experience, Degradation and Aging Program, CODAP)⁽¹⁹⁾，以鼓勵多邊合作收集和分析商業核電廠中被動金屬部件退化和故障的數據 CODAP 是 2002-2011 年的延續 NEA 管路故障數據交換項目(OPDE)和 2006-2010 NEA 應力腐蝕開裂和電纜老化項目(SCAP)。2014 年 12 月，11 個國家(加拿大，捷克共和國，法國，德國，日本，韓國，斯洛伐克共和國，西班牙，瑞士，美國和台灣)同意就 CODAP 第二階段(2015-2017)達成協議。

自 2002 年成立以來，地下管路的運轉經驗一直是技術範圍內所關切的項目。CODAP 事件數據庫項目，具體而言 CODAP 收集地下管路故障的數據，包括運轉影響和潛在的安全影響。

“地下管路”類別包括：1) 與土壤接觸的埋地管路；2) 埋設管路包埋在混凝土中；和 3) 地下管路，低於一定高度者，但包含在隧道或拱頂內，使其與空氣接觸，並位於檢查通道受限的地方。地下三種類型管路暴露在不同的環境中，它們受到不同

機制的腐蝕，並且它們受到不同的腐蝕保護。重要的是要認知到並非所有地下管路故障都要考慮。通常，只有對安全有影響的故障事件才會報告給管制單位。關於美國事件的資訊，根據運轉經驗審查，地下水服務系統管路產生了最大的事件比例，包括幾個具有重大運轉影響的重大事件，該系統組包括非安全相關和安全相關的冷卻水。

地下管路系統的數量和類型在核電廠之間差別很大，隨著核電站的老化，它們的地下管路系統往往會腐蝕，並且由於這些系統基本上無法接近，因此確定其結構完整性可能具有挑戰性。報告包括 CODAP 成員國對地下管路系統的調查結果，並注意到這些類型系統在使用和安全相關性方面的一些國家特定差異。關於持續的數據庫開發和維護(即數據提交和驗證)，建議 CODAP-PRG 內存在正在進行的活動數據提交活動中考慮以下項目：

- (一) 在CODAP會議期間分享金屬被動組件操作經驗的詳細資訊，並討論與核安全群體共享CODAP數據分析見解是有效方法。
- (二) 擴大CODAP會議中運轉經驗數據的共享，介紹最近運轉事件的國家概況，包括根本原因分析的結果：即導致材料退化和失效的技術和組織因素。
- (三) 在CODAP會議上分享老化管理計劃審查的見解，重點關注地下管路，包括相關的NDE經驗。
- (四) CODAP事件數據庫的基礎，考慮到對地下管路系統進行風險分類的方法，取決於不同的老化敏感性和不同的可靠性

和完整性管理（RIM）策略。搭配未來除役作業可能未預期事件(unexpected events in decommissioning)，蒐集國外電廠在運轉中及停機中之管路老化研究案例。

CODAP 是一個使用管路老化經驗數據庫，來量化管路可靠性參數的國際基準方式，可輸入標準問題應用（例如，風險知情可操作性確定）獲得所需的資訊，但第一步可能是積極尋求制定地下管路故障風險特徵的建議導則。

三、搭配未來除役作業可能未預期事件 (unexpected events in decommissioning)，蒐集國外電廠在運轉中及停機中之管路老化研究案例

(一) 除役作業美國過渡階段作業的典型清單

以下是美國典型的過渡階段活動清單：

- 成本估算
- 準備/提交監管文件
- 系統，結構和組件（SSC）Rr分類
- 修訂的技術規範
- 冷和黑程序（重新啟動某些系統）
- 項目管理模式
- 重新設計工作控制流程
- 制定溝通計劃
- 同時包括內部與外部
- 人力資源
- 保留關鍵員工
- 勞工協議的影響
- 搬遷其他工作人員
- 執行歷史站點
- 評估和初始場地特徵
- 處置業務（遺留）廢物
- 燃料建築改造以與其他工廠系統隔離
- 認證燃料處理程序
- 將乏燃料轉移到乾式貯存罐

- ✓乾式燃料儲存系統的設計
- ✓建築和系統修改，以支持乾燃料存儲系統
- ✓乾式燃料儲存罐，蓄電池和其他相關設備的製造
- ✓設計和建造 ISFSI
- 拆除非核設施
- 升級工廠/基礎設施（例如鐵路）以便於清除廢物
- 全系統化學品去污
- 熱點減少
- 石棉和易燃材料的清除
- 準備過渡後退役活動
 - ✓主要部件清除計劃
 - ✓反應器容器和內部分段計劃
 - ✓電廠拆除的平衡

過渡階段活動的知情規劃將為降低成本和縮短過渡階段的持續時間以及整個工廠退役期間的長期效益提供直接效益。

(二) 老化管理⁽²⁰⁾

針對除役，NRC 提出了解決老化管理的兩個選擇，並徵求過對這些選擇的回饋意見。具體而言，NRC 提出以下兩種選擇方案：1.不採取行動，或 2.制定管制導則並確保檢測方案的充分性。

NEI 同意 NRC 官員的意見，「已經存在足夠的管制基礎，以合理保證持照者能充分的保護核燃料，並擴大到其他相關的結構、系統和組件以履行該義務」，因此不需要訂定新的法規。NEI 將制定導則（備選方案 2），以確保從過渡期到除役過程中

的法規的確定性。例如：以中子吸收材料為例，正確的方法是針對通用信函 2016-01「用過燃料池中吸收材料的監測」(ADAMS 登記號 ML16097A169) 中提出問題的解決方案，可以適用到所有 Part50 持照者將用過燃料儲存在現場的用過燃料池中。一旦得到 NRC 的批准，NEI 16-03「用過燃料池中固定中子吸收劑的監測導則」(ADAMS 登記號 ML16147A078) 將是一種可接受的導則，可以被永久停機的持照者採用。

對於其他被動的，長壽命的結構和受關注的組件（例如，用過燃料池襯裡、用過核燃料池冷卻系統），為了證明管理老化效應所提建議，所開發的任何導則，必須與通用老化經驗回饋（Generic Aging Lessons Learned，GALL）報告、老化管理方案（Aging Management Program，AMP）所建議的方法一致。針對持照者，要確保已實施 AMP（作為第 50 部分電廠延役的一部分）的連續性。持照者可選擇維持現有已實施的 AMP，以某種格式呈現，而不是為了除役全然換成新的 AMP。對持照者而言，對於在其最初的 40 年運營執照，到期之前進入除役時，可能沒有實施任何的 AMP，藉著保持與 GALL、AMP 一致的導則，可以允許持照者利用在電廠延役間實施的運營經驗（Operating Experience，OE）。僅用於除役所發展新的 AMP，若與 GALL 報告不一致，因此不允許持照者從 OE 中抽取和使用。

四、除役期間對於可能之封閉管路積水可能造成腐蝕洩漏，或除役中該管路液體積存含放射性污染物之案例研究-防止除役中地下管路洩漏，在永久停機過渡階段間的注意事項

針對除役期間地下管路老化破裂，管路洩漏，避免造成地下水污染，考慮在電廠永久停機過渡階段注意事項之摘要說明。

(一) 以前未被評估過的區域

土壤取樣以及增加監測井的安裝：

1. 污染事件已對土壤造成衝擊，但以前並未評估過；
2. 土壤有被污染的可能性，但以前並未評估過；
3. 已知地下水污染的區域逐漸改變，但以前並未評估過

(二) 已知地下水污染區域

基於電廠運轉期間，在監測井中檢測到的污染程度，可能需要收集額外的數據以允許更完整的污染群定義，其可能涉及使用傳輸模型，包含：

1. 增加的監測井要選好位置，以追蹤污染群
2. 從現有的或者是增加的監測井蒐集更多的數據資料
3. 利用打地下水測試，已決定飲用水區域半徑的計算

(三) 多種放射性核種取樣

運轉電廠和除役電廠的經驗顯示，最常存在且以最高濃度檢測的放射性核素是氚(H3)，這是合乎邏輯的，因為H-3以與水相同的方式穿過土壤和岩層，通常會相對快速地遠離洩漏或溢出位置。還有其他放射性核素的移動性低於H-3，但在電廠除役期間可能很重要。這方面的一個例子是Strontium 90 (Sr-90)，如上所述，它被證明對 Connecticut

Yankee 核電廠的除役非常重要。根據洩漏位置存在的土壤類型，Sr-90 可能需要很長時間才能遷移到地下水，然後前往監測井位。考慮到這些因素，在核電廠永久停機後應考慮以下措施：

1. 比較在電廠運轉期間採樣的核種套件與在除役期間重要的核種套件。這種比較可能產生土壤和地下水樣品在未來所需的分析中添加額外的放射性核種。
2. 在場址釋放可用地下水濃度要求非常低，例如，A.2.2 節中討論的一些州和 NRC / EPA 諒解備忘錄的限制，定義地下水中的 Sr-90 濃度不高於 0.3 Bq / L (8 pCi / L)，方可允許場址釋放出來。應審查每種核種樣品分析靈敏度要求，以確保分析樣品的檢測下限不能超過釋放場址最大限值的 50%。
3. 與 Connecticut Yankee 電廠除役期間的情況一樣，為了降低 EPA MCL 的地下水污染程度，需要將土壤修復至相對較低的濃度，如第 A.2.2.1 節所述。可能需要額外的建模，其包括場地土壤對所關注污染物的實際親和力（分配係數或 K_d ）以確定補救濃度目標。

(四) 主動系統流體洩漏的監測

過渡階段間電廠中某些配置，在設計此期間就要考慮到地下水監測，具體如下：

1. 通常，在過渡階段作業中的一部分，許多流體系統作為被排放掉。在拆除或安全儲存間，這些措施應可污染土壤和地下水的整體驅動力和風險。

2. 在電廠最終停機後，所有的用過燃料冷卻到可以移到乾式貯存前，通常可能需要至少 4 或 5 年。在此期間，受污染的流體系統和用過燃料池本身代表了需要監測的環境洩漏的潛在來源。也可能存在用於支持拆除活動的流體系統，例如反應器內部構件分割。需要監控這些類型系統洩漏的可能性。
3. 可能增加污染物擴散到土壤和地下水的可能性的因素是電廠系統的退化。這個因素對於位於地下水位下或受到濕氣通過滲流區的埋管尤其重要。如果這些類型的系統劣化使得它們被破壞，則污染物可能被釋放到環境中。

考慮到在過渡階段間繼續存在含放射性流體的系統，安裝的監測井網路應能夠：

1. 從已知的或者是潛在的源區域，可偵測到新的地下水衝擊。
2. 可以對新的地下水聚落、存在地下水聚落的行動途徑進行偵測。
3. 在電廠輻射控制區域的監測井網路中，在任一個顯著的斷層中擔任起哨兵的任務。

(五) 由過渡階段到安全貯存間的地下水監測方案

準備安全儲存的核電廠情況，與將立即拆除的核電廠非常相似，如下所示：

1. 由於安全操作問題等因素，所有受污染的區域可能尚未被識別和限制。
2. 已知地下水污染的源可能不會被找到。

3. 在這段時間，電廠系統中污染流體不停地出現，表示在土壤與地下水污染中一定有新的射源出現。

因此，在安全儲存期間，電廠有一些額外的措施，應考慮如下：

1. 被污染的系統管路和組件即使在排放水後也可能是土壤/地下水影響的可能來源。應評估在早期安全儲存期間用水泥漿或其他環保材料去除或填充這些系統。
2. 對於土壤污染和確定為地下水污染源區域的區域，應對潛在的長期對地下水的影響進行評估。該評估可以確定在早期安全儲存期間的補救是合理的，以避免稍後更大的補救追蹤和/或更高的地下水監測成本，方能通過安全儲存期的剩餘時間的考量。

肆、參考文獻

1. 原子能委員會核能電廠除役管制，107 年 12 月 3 日，
https://www.aec.gov.tw/webpage/control/waste/files/index_30_1_1.pdf
2. IAEA Safety Reports Series No. 50, Decommissioning Strategies for Facilities using Radioactive Material, (2007)
3. 107 年 12 月 5 日原能會網站，
<https://www.aec.gov.tw/newsdetail/headline/4687.html>
4. <https://www.nrc.gov/reactors/operating/ops-experience/grndwtr-contam-tritium.html>
5. NEI 07-07, Industry Ground Water Protection Initiative-Final Guidance Document, Accession Number ML072600290, (2007).
6. David Smith, Overview of the NSIAC Initiative in the US for Buried and Underground Piping & Tanks, IAEA Technical Meeting on Ageing Management of Buried and Underground Piping and Tanks for NPPs, October 13, 2014, Charlotte, NC.
7. NEI 09-14(Rev 1). Nuclear Energy Institute. Guideline for the Management of. Underground Piping and. Tank Integrity. December 2010
8. TI 2515-182, “Review of Implementation of the Industry Initiative to Control Degradation of Underground Piping and Tanks”, February 10 – 12, (2014)
9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Decommissioning of Underground Structures, Systems and Components, Technical Reports Series No. 439, IAEA, Vienna (2006).
10. Pilgrim Nuclear Power Station, Post-Shutdown Decommissioning Activities Report, November 2018.
11. <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/buried-pipes-fs.html>
12. <https://www.nrc.gov/docs/ML1703/ML17030A025.pdf>
13. Vermont Yankee Nuclear Power Station, Radiological Historic Site Assessment, Entergy Nuclear Operations, Inc., Vermont Yankee Nuclear Power station, Radiation Safety & Control Services (RSCS), September (2014).
14. Environmental Toxicology Program, Memorandum Subject: Pilgrim Nuclear Power Station Tritium in Groundwater Investigation Update, Bureau of Environmental Health, Department of Public Health, Executive Office of Health and Human Services, The Commonwealth of Massachusetts, May 8, (2017).

15. NRC Docket ID: NRC-2015-0070, RIN Number:3150-AJ59, Regulatory Improvements for Power Reactors Transitioning to Decommissioning, November 20, 2017.
- 16.EPRI Report #1023025, Decommissioning Experiences and Lessons Learned: Decommissioning Costs, (2011).
- 17.NUREG/CR-6876, Risk-Informed Assessment of Degraded Buried Piping Systems in Nuclear Power Plants, June (2005).
- 18.Nuclear Energy Agency, Committee of the Safety of Nuclear Installations, Operating Experience Insights into Below Ground Piping, A Topical Report by NEA Component Operational Experience, Degradation and Ageing Programme, 24 May (2018).
- 19.Comments on the NRC Draft Regulatory Basis Document Regulatory Improvements for Power Reactors Transitioning to Decommissioning; Docket ID: NRC2015-0070, Project Number 689, June 13, (2017).
- 20.Dong-Hak Kim and Dang-Hee Jeon, Method to classify the safety class of Structure, System and Components in a Defueled Condition of Nuclear Power Plant Method to classify the safety class of Structure, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting Gyeongju, Korea, October 27-28, 2016
- 21.U.S. Nuclear Regulatory Commission, Title 10, Code of Federal Regulations Part 50 Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities.
- 22.U.S. Nuclear Regulatory Commission, Title 10, Code of Federal Regulations Part 100 Reactor Site Criteria.
- 23.Notice of Nuclear Safety and Security Commission No. 2016-15, Regulation on Safety Classification and Applicable Codes and Standards for Nuclear Reactor Facilities.
- 24.Zion Station Defueled Safety Analysis Report, 1998.
- 25.IAEA Nuclear Energy Series, No. NP-T-3.24, Handbook on Ageing Management for Nuclear Power Plants, 2017.