

出國報告(出國類別：其他)

赴法國亞維儂(Avignon)參加  
第5屆國際除役研討會議

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：朱亦丹 技士

派赴國家：法國 亞維儂(Avignon)

出國期間：102年04月06日至102年04月12日

報告日期：102年06月12日

## 摘要

國際除役研討會議係由法國核能協會(French Nuclear Energy Society)舉辦，ANS(美國核能學會)、ENS(歐洲核能學會)、IAEA(國際原子能總署)與OECD NEA(歐洲經濟合作組織核能署)等核能相關國際機構協辦，此國際會議為每五年舉行一次，參與人士以歐洲國家為主，已是歐盟關鍵性的國際除役文化交流活動，可藉此會議瞭解歐洲除役相關組織的發展及關注議題和趨勢。

本次公差行程於4/06~4/12赴法國亞維儂(Avignon)參加2013年國際除役研討會議-除役之展望，主要目的是了解法國與其他國家的政府及民間團體之間的除役安全管制作為，交換管理實務經驗，以收他山之石之效，強化我國之除役的輻防管制水準。經由參與國際性之研討會議，可了解先進國家的中央主管機關在特定議題之管制方式與民間除役相關組織 / 公司所關切之事項，此會議討論的除役管理內容相當廣泛，且均為主管機關與業者實際面臨的議題，並可藉由積極參與國際技術交流活動，建立資訊交流管道，可有效提昇我國除役安全管制作業。而會中呈現出世界各國的最新動態和未來發展趨勢，可作為國內除役管制的發展規劃及研究依據。

# 目次

(頁碼)

## 摘要

一、目的	-----	1
二、過程	-----	2
三、心得	-----	3
四、建議事項	-----	54
五、附件	-----	54

# 一、目的

我國能源政策於民國100年定調為「穩健減核，邁向非核家園」，能源發展願景為：「確保核安、穩健減核、打造綠能低碳環境、逐步邁向非核家園」，宣布核一、核二與核三廠將不再延役，興建中的核四廠則必須在「確保安全」的基礎下才會進行商轉。為因應核一廠、核二廠及核三廠即將到來的除役時程，以及確保除役作業對於工作人員、民眾、環境的輻射防護安全方面有良好規範架構，有必要派員赴國外了解目前核能先進國家對於除役方面的安全管理與法規架構，蒐集最新核能電廠除役新知；本次行程安排赴歐洲核能大國-法國所舉辦之除役研討會議，取得法國與其他國家的除役安全管理資訊，俾供後續本會規劃除役作業之輻射防護要求及重要決策的參考。

## 二、過程

(一)本次公差行程(102年4月06日至4月12日，共計6日)

日期	天數	地點	工作內容
102.4.06(六)~ 102.4.07(日)	2	台北 → 新加坡(轉機) → 法國巴黎 → Avignon	路程(台北→ Avignon) 會議報到
102.4.08(一)~ 102.4.10(三)	3	Avignon 教皇宮會議中心 (the Pope's Palace )	參加2013年國際除役研 討會議
102.4.11(四)~ 102.4.12(五)	2	Avignon → 法國巴黎 → 新加坡(轉機) → 台北	路程(Avignon →台北)
合計	7		



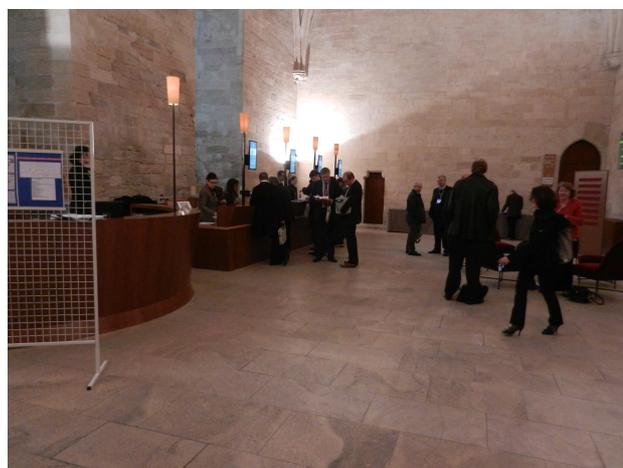
圖a：教皇宮(Palais des Papes)



圖b：開幕會場



圖c：會場歡迎海報



圖d：報到處

# 三、心得

## 1. 會議議程

會議共計三天，以專題演講 / 簡報與論文壁報展示方式進行，論文發表分成16個主題，會議議程簡表如下。

MONDAY April 8, 2013		TUESDAY April 9, 2013		WEDNESDAY April 10, 2013		
[08:00 - 09:15] <b>OPENING SESSION</b>		[08:30 - 10:30]		[08:30 - 10:30]		
[09:15 - 10:35] <b>1.01-I</b>		<b>3.01-I</b>	<b>3.02-I</b>	<b>7.01-I</b>	<b>7.04</b>	<b>4.01-I</b>
Safety, Strategy and Programme Development		Project Feedback Experience: Reactor	Project Feedback Experience: Cycle	Techniques and Process Improvements: Radiological Characterisation	Techniques and Process Improvements: Waste Treatment	Material Management, Recycling, Reuse
Coffee Break		Coffee Break		Coffee Break		
[11:00 - 12:20] <b>1.01-II</b>		<b>3.01-II</b>	<b>3.02-II</b>	<b>7.01-II</b>	<b>7.02</b>	<b>4.01-II</b>
Safety, Strategy and Programme Development		Project Feedback Experience: Reactor	Project Feedback Experience: Cycle	Techniques and Process Improvements: Radiological Characterisation	Techniques and Process Improvements: Decontamination	Costing, Economics and Financial Aspects
Lunch Period		Lunch Period		Lunch Period		
[13:45 - 15:05] <b>1.01-III</b>		<b>3.01-III</b>	<b>3.03</b>	<b>7.03</b>	<b>5.01</b>	<b>4.01-III</b>
Safety, Strategy and Programme Development		Project Feedback Experience: Reactor	Project Feedback Experience: Waste	Techniques and Process Improvements: Cutting, Remote Handling, Simulation...	Site and Building Rehabilitation	Material Management, Recycling, Reuse
Coffee Break		Coffee Break		Coffee Break		
[15:30 - 17:15] <b>2.01</b>		<b>3.04</b>	<b>9.01</b>	<b>Round-Table</b>		
Regulation Evolution		Project Feedback Experience: Site	OECD/NEA: An Overview of DD&R Activities	Decommissioning Pitfalls: How to mitigate it?		
[17:30 - 19:30] <b>11.01</b>		[18:30 - 19:30] <b>10.01</b>				
Posters Session		Education & Resources, Profession & Training				



## 2. 選擇性主題重點說明

分爲(1)安全、策略與方案發展(Safety, Strategy and Programme Development)、(2)法規沿革(Regulation Evolution)、(3)方案經驗回饋 – 反應器(Project Feedback Experience: Reactor)、(4)方案經驗回饋 – 燃料循環(Project Feedback Experience: Cycle)、(5)方案經驗回饋 – 廢棄物(Project Feedback Experience: Waste)、(6)方案經驗回饋 – 廠址(Project Feedback Experience: Site)、(7)OECD/NEA DD&R活動的介紹(OECD/NEA: Overview of DD&R Activities)、(8)教育與資源、專業與訓練(Education & Resources, Profession & Training)、(9)技術與程序精進 – 輻射特性調查(Techniques and Process Improvements: Radiological Characterisation)、(10)技術與程序精進 – 廢棄物處理(Techniques and Process Improvements: Waste Treatment)、(11)技術與程序精進 – 除役(Techniques and Process Improvements: Decontamination)、(12)技術與程序精進 – 切割、遠程控制、模擬(Techniques and Process Improvements: Cutting, Remote Handling, Simulation..)、(13)物質管理、再循環利用、再利用(Material Management, Recycling, Reuse)、(14)廠址與建物復原(Site and Building Rehabilitation)、(15)IAEA-鈉處理與鈉設施除役(IAEA-Sodium Treatment and Decommissioning of Sodium Facilities)、(16)成本、經濟議題與財務方面(Costing, Technico-Economical Issues & Financial Aspects)等十六個主題，茲就其中重要之主題內容分別說明如下：

### 2.1 法國在除役方面的法規與管制架構及執行方法

法國的核能是在1950至1980年代發展的，所大量建造安裝的核設施已漸面臨停機與除役。僅在2011年，法國就有約30座各類型的核設施(發電用或研究用反應器、實驗室、燃料處理廠、放射性廢棄物處理設施等等)停機或除役。確保這些設施於除役運作中的安全與輻射防護是ASN(Autorit de Sret Nuclaire[法文]，法國核能安全署)的主要職責。

#### 當前除役策略

法國於1990年代，核設施除役的管制觀念有相當進步的改變。在2006年於環境法典的第 I 至 IV 冊有核能領域透明化和安全性法案(Act on Transparency and Nuclear Safety, 簡稱TSN法案)的澄清與補充。2007年11月2日關於基礎核設施(basic nuclear

installation, BNI)與放射性物質運送涉及核能安全監督的行政命令，設定了四個新的架構涵蓋完整核設施生命週期，由設計、核發運轉執照、最終停機與拆除、與廢止核設施運轉執照。並於2012年2月7日發佈核能設施通則(包括持照者的組織、核能安全證明、不當行為的管理及對環境與健康方面的影響、廢棄物管理、緊急應變程序)。至今ASN仍持續發展此管制架構，在核設施除役運作上已有一個明確和透明的管制架構。

除役方案的規劃與執行，在 2006年6月28日第2006-739號規劃法案-在放射性物質和廢棄物持續管理，訂有確保資金於需要時可運用的程序。核設施持照者必須對於其核設施之除役經費與用過核燃料及放射性廢棄物的管理進行審慎的評估。核設施除役的問題與放射性廢棄物管理有密切關聯。核設施除役意味著除役運作產生的所有廢棄物將實施最終處置或至少有暫時貯存的途徑。

除役期間多數產生的是極低活度(VLL)、低活度(LL)、中活度(IL)廢棄物類別，這些類型的廢棄物在法國已有最終處置場。至於除役所產生的部份長半衰期低活度廢棄物與長半衰期高活度(HL)廢棄物，2006年6月28日的法案對上述兩類廢棄物的處置，設定了一個法規與管制架構。因此未來，法國所有放射性廢棄物的管理皆有解決之道。在受放射性物質污染的廠址(包括核設施廠址)管理方面，ASN近期制定了基本原則，必須要考量到除役作業時游離輻射對個體的曝露，在目前技術、經濟與社會因素下必須儘可能合理抑低來達成。這也是為何除役的主要目標之一是儘可能移除大部份放射性污染。因此ASN相信讓放射性廢棄物留在廠址內的方案只是過渡解決方法。此外，由ASN、環境部與IRSN公佈了“可能受放射性污染的廠址之管理方法論指引”，以取代了2000年8月公佈之“可能受放射性污染的工業廠址之管理方法論指引”。

### **法規與管制要求**

法規要求營運者要儘早在提交其核設施建造授權申請時，就提供其除役計畫。此計畫必須特別敘明下列內容：

- 在設計階段爲了協助拆除所採取的措施，包括保存設施的歷史與可取得之相關數據，並維持設施的專業技能和知識的措施
- 運轉時程與拆除步驟

- 為拆除的必要設備
- 廢棄物管理體系
- 拆除後最終狀態，以預估廠址之後的使用與監測的模式

對一個正在運轉的現有設施，則要求當設施於週期性審查時應能夠提供除役計畫。一旦持照者決定將其設施停機與除役，依據TSN法案條款，核設施最終停機與除役是由ASN依新法令核准。除役計畫必須根據法規進行更新，特別是在公布最終停機的決定(在實際提交申請的前三年)與提交最終停機和申請除役執照時。在預定最終停機時程前一年，持照者提出申請，並將所需要的文件送到ASN審查。

為了保持除役方案的整體性，除役申請所提交的相關檔案必須明確的敘明由最終停機至最後狀態所有規劃的工作，且每一步驟必須說明設施所造成的風險的性質和規模，以及管理這些風險的手段。最終停機與除役階段必須在運轉的最終停機準備階段就要先預備，包括為收集除役所需的資料(如運轉歷史)、場所準備、作業區準備、工作人員訓練、卸載與撤出核燃料、排除液體或任何除污與清潔行動等，準備階段允許移除部份或全部的射源項，接著就可執行輻射地圖製作。這類作業也要與建造許可的法令一致，不可與授權條件不一致，並需完全符合安全報告與一般運轉規範，除非有些必要的特殊變更。在其他案例中，這些作業受最終停機與除役許可的法令所管制。TSN法案要求在除役階段的設施安全性一般需每10年重新審查一次，確保設施安全性可接受，直到解除管制(delicensed)；所採行措施應與除役期間的設施風險成比例。

在除役之後，持照者就可申請核設施解除管制，須提供一個確實可以達成之預期最終狀態的證明，並描述除役後的廠址狀態(土壤、建築或設備復原等的狀態分析)。根據所要達到的最終狀態，可能要執行公眾防護限制，這與隨後的廠址或建築利用有關，可能包括某些土地使用限制(例如只能作為工業用途)或監測措施(在挖掘作業時執行輻射量測等等)，ASN依據其解除管制的最終狀態決定要執行哪些限制。ASN與西歐核能安全管制者協會(WENRA)一起將TSN法案與2007年11月2日法令的管制變更，納入與整合於一份2010年6月出版的指引 - ASN第6號指引。此指引係提供給核設施持照者，說明TSN法案下之法令所訂定的管制程序，解說ASN認為停機與除役申請資料中

某些項目的內容為何，特別是除役計畫，以及解釋除役的各種時期的技術與管制觀念。

## **除役設施的廢棄物管理**

ASN相信除役作業的廢棄物管理是除役方案運作的關鍵點，這涉及到可用的處置途徑、廢棄物流程管理等。這方面以系統性評估廢棄物管理的程序，作為整體檢討所採用之除役策略。拆除作業過程，放射性廢棄物區清理乾淨後，可轉分類為一般廢棄物區。環境法典第L.542-1-2條要求業者的天然放射性物質生產與廢棄物管理計畫(PNGMDR)須每三年更新一次，其目的在審查目前之放射性物質與廢棄物管理程序，預估廢棄物貯存與處置的未來需求、確認這些設施的容量與貯存期間。對於放射性廢物，考量除役之廢棄物的回收利用可能性，ASN以往認為受污染廢棄物或在核能產業已被污染的廢棄物不能在核能產業外再利用。然而，現在ASN開始支持除役之廢棄物的回收使用，例如核能產業的金屬廢棄物與混凝土瓦礫堆，其建議列於國家放射性物質與廢棄物管理計畫裡。

## **除役的資金**

2006年6月28日的規劃法案第20條對放射性物質與廢棄物管理(在環境法典第I至V冊)建構了一個對於核設施與放射性廢棄物營運管理的核能經費保證體系。法規體系遵循污染者付費原則，要求核能持照者負擔除役經費，通過設立專門的資產組合以滿足預期成本，確保除役的資金無虞。持照者必須保守評估其核設施的除役、停止營運、維護與監管經費。持照者也必須評估其用過核燃料與放射性廢棄物的管理經費，並每三年提送報告以及每年提送更新備忘錄。ASN將審查持照者的措施是否能符合管制要求。核能持照者有責任保留長期充足的除役資金，並評估除役與廢棄物處理作業之不確定性對經費的衝擊。

## **公眾資訊**

2006年6月13日的TSN法案對核能領域資訊透明度及權利有新的規範：“一套規範核能領域的透明度，要能確保公眾在核能安全上可獲得公開可靠的資訊”(環境法典的第L 125-12條，之前為TSN法案的第一條)。TSN法案(第22條)並建立了CLI (Local Commission for Information，地方資訊委員會)的法源依據。CLI是地方人士與核能營

運業者之間的溝通橋樑，由地方政府、環保團體、貿易組織、商業與健康專業人士等代表所構成的獨立體。CLI可請業者提供必要的任何文件，或請獨立實驗室進行環境與健康方面調查。CLI的經費來自地方政府與ASN。此外，TSN法案及其實施法令2007-2557號法令，制定了有關核設施公開資訊和參與的相關程序。現在公眾可查詢核設施的法令依據、最終關廠、與除役許可資料。

## **2.2 OECD核能署在除役方面的工作**

核能署(NEA)是經濟合作與發展組織(OECD)內的一個專門機構。它的使命是“幫助其會員國，通過國際合作，以安全、環保、和平的利用核能；並提供權威性評估及建立共識，使經濟合作與發展組織在能源上有更廣泛與持續的發展”。為了實現這一目標，NEA作為一個共享資訊與經驗及促進國際合作的媒介，幫助成員國們累積其技術專長；成為促進政策分析和技術共識發展載體。除役是一個跨領域的問題，在NEA的7個委員會中有5個與除役有關。然而大部分的工作，是由放射性廢物管理委員會下的退役和拆除工作小組(Working Party on Decommissioning and Dismantling, WPDD)與除役項目共同合作專案(Co-operative Programme on Decommissioning Projects, CPD)負責。WPDD是一個由來自NEA會員國、歐盟與IAEA之管制機關、研究與發展機構、除役工業等公私領域的資深除役專家組成的小組。工作小組任務是確認、分析與記錄除役的主要問題，觀察全球的除役議題的技術與管理發展狀況，並促進WPDD會員們之間的多邊溝通與資訊交流。CPD則是集合一些特別除役專案的重要方案，目前包含有來自23個組織與13個國家共59項專案，分享實際的資訊與經驗。CPD內的資訊交流僅限於方案參與者。但是CPD也有公開一些議題的技術報告。

## **2.3 IAEA(國際原子能總署)在除役方面的作為**

國際原子能總署旨在促進會員國政府間核能科技之和平應用與交流合作，除役是總署對放射性廢棄物安全管理工作的部份。就IAEA組織架構來看，這些作為主要由廢棄物技術科(Waste Technology Section, WTS)與廢棄物與環境安全科(Waste and

Environmental Safety Section, WES)負責，WTS隸屬核能處(Department of Nuclear Energy)，WES隸屬核能安全與保安處(Department of Nuclear Safety and Security)。核能安全標準的發展是後者的關鍵職責，核能處主要關注在技術相關的議題。通常由技術合作處(Technical Cooperation Department)管理並協助會員國，例如培訓活動和提供除役有關的服務及設備的工作。總署利用許多不同的機制來促進除役的科學與技術資訊交流，例如建立除役方案的全球狀態資訊資料庫。過去20年來，已出版各種除役與整治之技術方面的報告。這些報告旨在記錄良好的國際實踐作法，並補充安全標準和相關的指導性文件。IAEA的安全標準係針對核能安全、輻射安全、廢棄物安全和運送安全。這些標準係透過國際共識所建立的安全標準，以保護公眾和環境避免游離輻射傷害，並定期修訂以納入新的知識、經驗和良好做法。

安全標準的組織階層包含在“核能基本安全原則(Fundamental Safety Principles, SF-1)”，其下分為十個基本安全原則。再下一階則是“一般”與“特定”安全規定，最下層則是安全指引，用於協助如何達成安全規定。除役的安全規定目前納入WS-R-5 “*使用放射性物質之設施的除役(Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material)*”裡，目前在修訂中。還有相關的安全指引分別規範核能與研究用反應器、核燃料循環設施及醫療、工業和研究設施的除役，這些指引也正在修訂中。在2013年1月31日前會提供WS-R-5的修訂初稿以進行一般性審查。預計在2013年出版“*一般安全規定第6部份-設施的除役(General Safety Requirements Part 6 – Decommissioning of Facilities)*”。另將在2013年提供“*核設施的除役，不含使用NORM、醫療、工業、研究、處置設施(Decommissioning of Nuclear Facilities, except Facilities using NORM and Medical, Industrial, Research and Disposal Facilities)*”安全指引的初稿以進行一般性審查。這份文件未來將會取代目前的WS-G-2.1 “*核電廠與研究用反應器之除役(Decommissioning of Nuclear Power Plants and Research Reactors)*”與WS-G-2.4 “*核燃料循環設施之除役(Decommissioning of Nuclear Fuel Cycle facilities)*”。

在2008年，IAEA開始一個設施除役規劃與實施之安全評估的國際方案(“FaSa”)，該報告目前已完成並準備出版。這項工作的主要產出包括在除役規劃和實施之除役安

全評估的應用上的建議，強調以分階段方式發展安全評估。IAEA在除役方面已有六十幾份出版品(NE系列報告、技術系列報告、安全標準、安全報告、TECDOC等)，已涵蓋相當廣泛的安全與技術議題，包括除役的安全實施、廠址及物質外釋之管控、放射性量測技術、電廠與結構物除污與拆除、還有非技術性的觀念如規劃、經費預估與專案管理等等的指引文件。近兩年(2011/2012)出版的技術方面出版品如下：

- 除役實績指標的選擇和利用(Selection and Use of Performance Indicators in Decommissioning)，核能系列NW-T-2.1，2011
- 核設施和核能廠址的重新開發和再利用：以往案例和已汲取的經驗教訓(Redevelopment and Reuse of Nuclear Facilities and Sites - Case Histories and Lessons Learned)，核能系列NW-T-2.2，2011
- 小型醫療、工業和研究設施的除役：一項簡化的逐步方案(Decommissioning of Small Medical, Industrial and Research Facilities: A Simplified Stepwise Approach)，核能系列NW-T-2.2，2011
- 核設施除役所汲取的設計課程(Design Lessons Drawn from the Decommissioning of Nuclear Facilities)，IAEA-TECDOC-1657，2011
- 核設施和放射性設施除役政策和策略(Policies and Strategies for the Decommissioning of Nuclear and Radiological Facilities)，核能系列NW-G-2.1，2012
- 核設施除役經費預估的國際性結構(ISDC)(International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations)，由NEA與歐盟合作撰寫，巴黎NEA出版，2012

最近涉及除役的安全相關報告有：

- 符合豁免與清潔解除管制標準的管控監測(Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels)，安全報告系列第67號，2012
- 符合廠址整治準則的管控監測(Monitoring for Compliance with Remediation Criteria for Sites)，安全報告系列第72號，2012
- 除役之安全評估-國際計畫在使用放射性物質之設施除役的安全論證與評估的結果(DeSa)( Safety Assessment for Decommissioning - Outcomes of the International Project

on Evaluation and Demonstration of Safety for Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material (DeSa))-出版中

爲因應2011年3月在日本福島核電廠的核能意外事故，IAEA理事會提出一個重要的工作方案-核能安全行動方案(Nuclear Safety Action Plan)。根據該方案，國際原子能總署秘書處組織了一個核子事故後之除役和復原的國際專家會議(International Experts' Meeting, IEM)。本次會議的結果撰擬一份國際社會對核事故後除役和整治之經驗的簡要報告，這報告將在2013年出版。其他一系列有關除役和環境整治領域的工作仍在進行中，包括重大事故後除役所需的方法、技術、工具和設備等經驗的收集。

## **2.4 西班牙對核能與放射性設施的除役管制體系案例 - 實驗用核能研究中心(CIEMAT)的拆除**

核設施在運轉前須經過主管機關事先許可，在運轉期著受到管制與監督。若設施因技術或經濟因素或被迫而停止運轉，只要主管機關認爲殘留的放射性可能對個人造成不可接受的環境風險，仍必須接受監督。西班牙核設施除役的法規架構是建立在皇家律令(Royal Decree) 1836/1999，規範了核能與放射性設施除役申請的行政程序，特別是設施的持照者必須提交的文件。核能與放射性設施法規的第VI章明訂對這類設施除役與拆除的完整行政許可要求事項。法規律令(Legislative Decree) 1302/1986、皇家律令1131/1988、法規律令1302/1986則有環境影響評估的相關規範。永久停機可能是原先規劃或不可預見之因素而造成，有些先期作業必須在獲得拆除許可或持照者申請前進行，例如將反應器與用過燃料池的核燃料卸載及處理運轉期間所產生廢棄物。法規也考量到核電廠拆除時用過核燃料仍放置在燃料池的可能性，但前提是持照者有提交用過核燃料的管理計畫，並先經能源部批准。

除役方案的授權程序是由能源部依據CSN(西班牙核安委員會)對持照者提出之拆除計畫的審查同意報告、環境部的環境影響評估來授予拆除許可，允許持照者實施該計畫與啓動除役及設備拆解、結構破壞及物質運送等相關作業，最後允許在執照終止

後的廠址能全部或限制性使用。核設施除役的許可要求與其運轉許可所需要提交的文件類似，包括以下文件：

1. 安全性研究：提出設施初始狀態的描述與摘述此方案期間的主要作業、安全分析與環境輻射影響評估。
2. 作業規範，並說明組織、功能與人員職責。
3. 技術規範：應用在拆除作業期間的作業設備與系統上。
4. 品質保證手冊：拆除過程的品管方案範圍。
5. 輻射防護手冊：拆除作業進行時遵守的輻射標準與防護規範。
6. 廠址應變計畫：當用過核燃料在核能電廠內部時，因應於拆除過程可能發生的臨界意外，以及火災、爆炸等事故伴隨輻射影響發生的機率。
7. 放射性廢棄物管理計畫：應對過程中所產生的所有廢棄物材料的管理設置基本規範，不論是放射性廢棄物或解除管制的物質。
8. 解除管制材料控制方案：包括用於驗證符合解除管制殘留物質之輻射規範的設備與程序之描述。
9. 廠址復原計畫：除役後應有廠址外釋的最終放射性分析計畫。
10. 財務調查：拆除計畫的財務預測。

若設施的除役計畫是分多個階段執行，則授權許可可限定只對該階段有效，執行下一階段則須新的授權許可。設施拆除工作結束後須提出“除役聲明”，將持照者的責任卸下，除役後廠址若在未來土地利用上有限制，受任命的管理組織有責任維護與確保其符合規定。一旦西班牙核安委員會確認拆除後能符合廢棄物管理與廠址復原計畫，就由能源部在完成拆除作業後頒佈除役聲明。除役的安全、環境與公眾政策議題與運轉期間有很大不同，且通常公眾關注度相當高。居住在核設施周圍的群體可能對正常運轉習以為常，但一個新的活動如除役，包括產生的安全、環境、組織、人因與社會因素和公眾議題，需要建立一個可行的用過燃料管理策略，以及符合廠址復原規範的放射性廢棄物管理或解除管制程序及監測。

設施拆除過程所產生的放射性廢棄物，與運轉中的放射性廢棄物不同。廢棄物處

理、貯存、處置必須妥適管理，例如對非常低階放射活性廢棄物的管理，這類廢棄物可能可以解除管制，並納入一般廢棄物的管制層面。以管制的角度來看解除管制，必須具備良好的決策過程與品質管理程序。管制的目的在於確保物質不會被稀釋，以符合解除管制標準，並在其外釋到環境或一般市面上之前要有足夠的監測體系。法規明定放射性物質或任何來自核能設施而帶有放射性的物料若要處置、循環使用或再使用，應經過能源部許可，這類物質或物料的處置、循環使用或再使用在符合某些條件下可豁免管制，表示這類含有放射性物質或受放射性污染的物料之活度或核種濃度低於能源部訂定的放射性廢棄物定義。截至目前，能源部尚未實施任何剩餘物料的解除管制標準或以任何土地或廠址的通案清潔規範。但已有部會首長授權對特定除役項目的某些設施發佈剩餘物料解除管制標準和廠址外釋的放射性規範，但這只對該除役項目有效。剩餘物料的解除管制經考量為：絕對解除管制標準(N1)、一般條件解除管制標準(N2)、以及特定條件解除管制標準(N3)。

- 第一類絕對解除管制標準N1，係以非限制性外釋之物料的總活度濃度與表面污染的方式制定。

總β/γ	0.2 Bq/g (貝克/公克)
總 α	0.1 Bq/g (貝克/公克)
表面污染 總β/γ	0.4 Bq/cm <sup>2</sup> (貝克/平方公分)
表面污染 總 α	0.1 Bq/cm <sup>2</sup> (貝克/平方公分)
表面污染 低能量β/γ	4 Bq/cm <sup>2</sup> (貝克/平方公分)

- 第二類放射性核種特定解除管制標準來自IAEA TECDOC – 855 “固體放射性廢棄物解除管制標準-豁免原則的應用(*Clearance levels for radionuclides in solid materials – application of exemption principles*)”，或許可用在固體廢棄物的絕對解除管制上。若符合這些解除管制值，就可確保在這些物料外釋後，對民眾的個人劑量不超過每年10 μSv。
- 申請人也可以提出其他解除管制的方式，核安全委員會可經審核後發佈特定條件解除管制值N3。

目前除役的許可標準是可接受一般條件解除管制值(N2)，係源自歐洲原子能共同體條約第31條設置的專家小組所訂定。金屬材質、建築物與建物碎片解除管制之可接受的輻射準則是假設任何人一年內遭受到這類物質曝露的有效劑量低於10  $\mu\text{Sv}$ ，一年內的集體約定劑量不超過1人-西弗。對於不可預見的未來，以在最嚴重的情況下受到劑量為1毫西弗來保守推算。除了有效劑量的標準，也引入皮膚等價劑量50 mSv/年的限制，以避免確定性效應發生的可能性。

材料解除管制後就被視為無輻射狀態，意味只要依材料屬性進行一般的管理。所有可能再利用的金屬物件必須符合嚴格的解除管制標準。對於廢金屬回收使用與設備組件工具直接再利用的一般條件解除管制標準(N2)係參考歐盟1998年的文件RP 89 “核設施拆除的金屬回收使用之輻射防護參考準則(*Recommended radiological protection criteria for the recycling of metals from the dismantling of nuclear installations*)”。對於建物再利用或建物拆除之一般條件解除管制標準(N2)係參考歐盟2000年的文件RP 113 “核設施拆除的建物碎片之輻射防護參考準則(*Recommended radiological protection criteria for the clearance of building rubble from the dismantling of nuclear installations*)” *European Commission*”，其中：

- (1) 建物作為任意用途(再利用或未來被拆除)之解除管制：解除管制規定與結構物中每單位表面積的活度與總活度(將表面固著與非固著活度之總和加上滲入內部的活度相加)有關。解除管制後，建物可用於非核能用途或拆除。
- (2) 建物拆除之解除管制：核設施廠址的建物通常會被拆除，所形成瓦礫堆可再回收使用或當作一般廢棄物處置。被拆除的建物獨立結構可以表面污染解除管制值，拆除的建物瓦礫堆可用質量比活度解除管制值。拆除作業中應記錄以證實有將高活度污染的物質分離出來。

一旦建立了解除管制標準後，管制機關的另一個重要責任就是確保解除管制能適當地實施。任何剩餘物質於外釋之前需要非常嚴謹的程序來驗證符合要求。可能解除管制物質的初期特性分析須注意：(1)放射性核種能譜與關鍵核種；(2)用於決定非常難測放射性核種的活度之比例因子(scale factor)；(3)活度分布與潛在“熱點”的位置。解

除管制的量測儀器必須操作在非常低的可偵測極限，故需要特別審查量測儀器的使用、校正程序與受背景輻射的影響。以管制角度而言，有良好品管方案與決定過程文件化是非常重要的。物料物質不能被故意稀釋以符合解除管制規範，爲了確保解除管制物質的正確管理，也可對合約承攬者有所規範。解除管制程序需要證明能分析出物料活度是否低於CSN授權的解除管制標準，且有95%可信賴水準。此外，必須確保整個管制過程足以追溯確認可能的誤差與不合格。解除管制過程中，監管的目標是專注在最關鍵處進行視察與稽核，以保證整體解除管制過程的安全，確保其可靠度。

廠址復原規畫方面，整治的目的係以劑量約束爲基礎，一般以年劑量參考標準代表整治準則或廠址外釋準則。整治過程的初期階段包括廠址定義、歷史資料評估、整治說明與廠址外釋準則、及量測範圍。整治活動需要一個輔助監測方案來追蹤整治過程，輔助監測也能有助於最終整治監測方案的效用。例如，在回填之前證明被挖掘的地方低於已建立的安全準則。爲了有效性與符合性，整治所使用的儀器與技術必須完全符合的整治準則規範需求。

在運轉期間確保安全的管制方式仍可沿用到除役上，但除役也有某些不同於運轉時期的議題。管制方案與管制監督方法應根據實際的除役現況來建立，重要的是在一開始即確立該廠址未來的最終使用目的，以評估放射性和經濟後果。若用途越廣泛，則復原的經費越高，該廠址所能允許的殘留活度濃度標準越低，因此需要更多的復原能量投入。除役項目中有相當數量的拆除任務都是由專業承包商或其他類型的非核能人員執行，應確保在這些情況下有一個清晰和明確的安全責任分配。監管機構也應促進安全文化，以鼓勵質疑和學習的態度來保護和安全。目前CIEMAT已訂定各除役廠址的不同放射性核種活度濃度之外釋標準，並選擇美國多部會輻射偵檢與場址調查手冊(Multi-Agency Radiation. Survey and Site Investigation Manual, MARSSIM)所述方法作爲確認是否符合這些標準的方法。

## 2.5 法國原子能委員會之除役方案與經驗回饋

法國原子能委員會(CEA)創始於1945年，任務是進行核能應用的研究，設置與營

運各種核能設施，例如研究或原型反應器、處理研究與試驗實驗室、試驗裝置、加速器、核能電廠與處理設施。在1960至1970年代，CEA透過拆除各類核設施取得了經驗與知識，已運用到現在的拆除技術上。CEA核能處的核設施目前有17座反應器與36座其他相關設施，特別是實驗室、燃料處理單位與廢棄物管理設施。這些設施有些已拆除或必須被拆除，讓核能處能建造未來核能工業所需之新的設備與研發用設施。CEA於數十年前開始第一個核設施拆除作業，之後執行了各種不同類型設施除役，包括自1960至1970年代即運轉的設施。

1963年的63-1228號法令是最早核設施的土木建築拆除規範，在1990年由90-78號法令補充。2003年藉由SD3-DEM-01備忘錄，安全管制當局修訂了應用該法令的做法。接著2006與2007年，2006-686號核物質的安全與透明度法以及2007-1557號法令是應用在核設施的法令，建構了關於核設施許可拆除與除役的管制架構，另於2010年提出兩份指引：(1)核設施後期營運與DD&R(除污、除役與復原)營運的方法指引(Guide n° 6 Methodology for nuclear facilities post operation and DD&R operations)、(2)清理方法指引(Guide 14 Methodology for total clean up)。設施停機後的開始作業稱為最終停機的準備期。以過渡階段，許可的作業內容為所有射源項移除 - 反應器內的燃料清空或實驗室的處理管路淨空，還有拆除作業的準備階段 - 安全參考文件中預計要移除的設備、放射性清單的建立、廠址準備、訓練團隊等等。實際拆除階段在準備階段之後，這個拆除在於設施內營運用的設備與結構物將被拆除或移離，包括作為放射性圍阻屏障的部份。這階段至少在計畫性停機之前一年，由營運者提送拆除授權許可申請給負責安全的部會。申請時應附下列檔案：

- 除役規劃的各階段、順序、一般營運規則與相關的安全報告
- 設施與廠址於拆除後的狀態
- 拆除作業的風險與影響研究，特別是規劃移除來自拆除之廢棄物的方法
- 預期廠址之後的用途
- 更新尚有設施存在之廠址的內部應變計畫
- 拆除後的任何監測與維持措施要求

經過安全署審查營運者提出之最終狀態、拆除時程表、以及對主管機關要求之承諾，並接受各種公共諮詢和公眾查詢，包含地權設定、使用限制或預防措施、輻射監測等。對於廠址完全或有條件外釋，則是根據2006年對核設施土木建築工程結構物之完全清理要求的指引辦理。解除管制與拆除作業係透過抑低整體劑量來達到工作人員防護，而環境的防護則致力在減低放射性廢棄物與排放物之量與輻射強度。

評估計算工具ETE-EVAL第五版主要用於估算設施拆除案的經費與財務風險。ETE-EVAL V5將核設施解除管制/拆除作業所產生排放物/廢棄物的量、劑量與經費、時間的評估模組化。一個核設施解除管制/拆除的整體經費決定於估算的基本量(人力、廢棄物、排放物)與相關服務(洗衣，包括廢棄物與耗材等)的額外人力和一般項目(作業經費、安排等)。ETE-EVAL V5有28種標準情境與不同種類的作業方式參數可用。

CEA身為研究用核設施的營運者，亦肩負起除役計畫規劃與作業方案整合、安全文件製作、工作人員輻射防護作業的專案管理。一旦除役工作進行到某階段且風險降低(核物料移除、系統解除管制)，設施作業即可委外。除了某些特作業需要CEA專業知識，多數解除管制與除役作業可委外給原先營運期間的的承包商。但仍有必要實質監督，使專案風險在可控制範圍內。除了某些傳統作業服務，如土木工程的最後破壞或專案管理支援，承包商必須是經過CEA放射性解除管制公司認可委員會(CAEAR)所認證的公司。CAEAR對於涉及放射性解除管制作業的公司有一套驗收與監管程序，由CEA認可的視察員來執行。

CEA的拆除作業特點來自要被拆除設施的多樣性，主要是研究設施，而有大量的經驗回饋。20多年來透過拆除研究用反應器、加速器、實驗室或處理廠，CEA獲得經驗與關鍵知識運用到現有的拆除技術，並持續精進以降低作業成本。CEA總結除役的成功要件有：(1)設施輻射地圖的知識掌握、(2)工作與任務組織安排、(3)符合ALARA抑低的良好技術。另經驗回饋顯示在設施開始營運至除役之間的各階段有必要定期清潔，特別是熱點污染，以減低除役時的除污工時經費。

## 2.6 降低電廠除役成本的拆除廢棄物管理策略

於福島意外事故後，西歐有的核能電廠(NPP)開始規劃除役。有些國家對於核電廠逐步淘汰做出政策性的決定，由於除役的需求增加，可能會導致有能力與經驗的工作人員、技術與設施短缺。除役程序要進一步發展以降低設施經營者與社會的經濟負擔。核能除役聯盟(ndcon)由執行數十年的D&D(除役與拆除)方案中學到下列經驗：

- 除役規劃要早點開始 - 電廠相關知識會隨時間而逝去。
- 以廢棄物管理為主的除役：廢棄物管理約佔總經費的1/3。
- 根據除役目標記述其特性：在D&D方案一開始必須清楚知道方案執行所需的特性資訊以及解除管制和外釋要求。
- 良好的結構性分類是解除管制分級法的基礎：可能受污染但似可解除管制的龐大數量廢棄物，需在除役方案裡說明處理策略。
- 受污染廢棄物之廠外廢棄物處理的拆除-包裝-運送觀念可減少方案時程。
  - 方案時程對於除役方案的總經費有重大影響。方案時間的減少有助於總經費的降低。
  - 專用廢棄物處理設施對於廢棄物處理，有適當的技術、設備、及有能力和經驗管理的人力可用。
  - 若有廠區外處理設施存在，可不需建立新的廠內廢棄物管理設施。廠區外處理設施可減少廠址內除役的工作，且不至於對除役方案造成重擔。

初期工作是建立規劃的基礎，瑞典的D&D方案之架構類似國際除役時程的架構(IAEA, OECD/NEA, EC等)。

一個可信的放射性存量清單與特性調查對於預測物質、體積、時程表與所需資源等參數至為重要。初期工作包括：(1)基於特性調查的結果，進行劑量估算；(2)確認歷史活動、設計變更、未知的放射性意外事件、不明確的排放流程；(3)客觀的資料解析；(4)樣品管理與結果收集 - 資料庫結構是否符合除役各階段所需、樣品的檔案管理、品保與記錄保存；(5)知識管理。

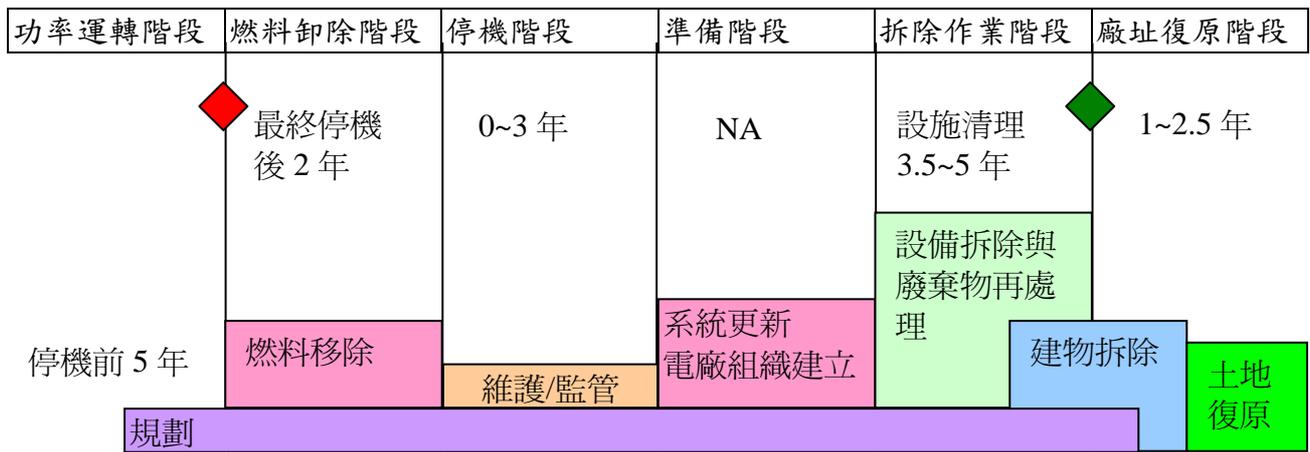


圖 1：典型的 D&D 方案時間表

設施清理的一項主要工作就是除污，可減低對工作人員之劑量，進一步廢棄物處理與符合解除管制 / 外釋規範。可應用的除污型式有：(1)為了劑量減低的全系統除污；(2)局部工區除污；(3)建物除污/油漆表面的擦洗或混凝土刨削；(4)運至廠區外放射性廢棄物處理廠除污，核種成份會影響廢棄物處理過程。廢棄物經處理後應符合解除管制或處置條件，拆除工作與廢棄物清運作業需一起考量，拆了就清運是個省時間方法，可立即轉移至廠外進一步廢棄物處理，減低廠區內暫時貯存的需求。廠區外廢棄物處理有幾種廢棄流程類別，如：(1)融熔合金屬的大型組件；(2)焚化乾式放射性廢棄物(DAW)；(3)熱處理濕式廢棄物(油、離子交換樹脂、除污液體等)；(4)非金屬無機碎片。一旦建築物被清理過，並經主管機關核准，可以採取傳統的建築物拆毀方法。廢棄物的清運方面，有兩種運送類型較為常用：(1)ISO貨運容器(主要為箱型)、(2)大型組件(包覆或與組件本身封裝)；另有關運送方式則分為海運、貨車運送與火車運送，可考量後勤、環境、成本參數等廠址特性來搭配選擇。

## 2.7 法國的放射性物質與廢棄物存量清單

自2004年起，法國放射性廢棄物管理局(ANDRA)每三年會出版與更新放射性物質與廢棄物的法國存量清單。此存量清單說明物質與廢棄物現有與未來的數量，係依據現有與就目前核能設施運轉剩餘壽命預估未來活動造成的量，作為規劃目前及未來廢棄物管理解決方案。最新版的國家存量清單是2012年版，國家存量清單將放射性廢棄

物的來源分爲五項經濟區塊：

1. 核能發電：包括核能發電廠、核燃料製造與處理廠(鈾礦萃取與處理、鈾濃縮的化學轉化、燃料豐化與製作、用過燃料處理與再循環)。
2. 國防用途：主要活動與核能威懾有關，包括某些船艦與潛艦的推進系統及相關的研發活動。
3. 研究用途：民生核能領域、醫療研究實驗、粒子物理、農業、化學等的研究
4. 工業用途(非屬核能電廠者)：主要是稀土元素的萃取及密封射源的製造，還有各種的應用如焊接檢驗、醫療器械的消毒、殺菌和食品保鮮等。
5. 醫療用途：包括治療與診斷。

國家存量清單這是由放射性物物質與廢棄物生產者與持有者申報的資料所建立起來的，這些申報給ANDRA的內容是透過網路傳送。申報資料經嚴謹分析與合併而成爲四份報告出版。不同種類的放射性廢棄物其物理與化學性質、放射活度種類與程度皆爲不同的特性。爲了管理各種類廢棄物，分爲五種廢棄物類別：

- 高階廢棄物(KLW)：主要來自處理後的用過核燃料。這種廢棄物的放射活性程度每公克達十億貝克。
- 中階長半衰期廢棄物(ILW-LL)：主要也是來自處理後的用過核燃料。這種廢棄物的放射活性程度每公克達幾百萬至十億貝克。
- 低階長半衰期廢棄物(LLW-LL)：主要來自第一代天然鈾石墨氣冷式反應器(GCR)的石墨廢棄物與含鏷廢棄物。石墨廢棄物的放射活性在幾千至十幾萬貝克範圍。含鏷廢棄物的放射活性在幾十至幾百貝克範圍。
- 低階與中階長衰期廢棄物(LILW-SL)：主要來至核能電廠、燃料循環設施、研究中心運轉、維修、拆除，以及小量的生醫研究活動所產生。這類廢棄物的放射活性在幾百至一百萬貝克範圍。
- 非常低階廢棄物(VLLW)：主要來至核能電廠、燃料循環設施、研究中心運轉、維修、拆除所產生。這類廢棄物的放射活性低於一百貝克。

拆除作業會產生兩類廢棄物：放射性廢棄物、一般廢棄物，這係核能設施根據其設施歷史與過去的活動而劃分。

- 一般廢棄物區域的廢棄物沒有放射活性，不需要特別的核能管理。
- 放射性廢棄物區域的廢棄物原則上皆先視為有放射活性，即使偵測不到放射活性。

拆除作業產生的放射性廢棄物多數組成爲：

- 拆除下來的材料(混凝土、瓦礫、廢金屬、手套箱壁、管路等)
- 除污用設備(例如金屬部份)
- 工具與防護衣物(手套、工作服等)
- 沖洗設備的廢水

管理拆除作業需要對廢棄物的數量和類型有極其精確的估計，所採用的處理和準備方法亦應能配合。首先要製作設施清理的精確清單，包括所包含的所有設備及其殘留污染程度。營運者設施根據過去設施運轉的完整知識、同類型設施拆除作業的經驗回饋來評估產生廢棄物的量。

## **2.8 法國的國家放射性物質與廢棄物管理規劃**

法國的國家放射性物質與廢棄物管理規劃(PNGMDR)的目的是定期評估放射性物質的管理政策、預估新的需求與決定未來要達成的目標。PNGMDR涵蓋了最終廢棄物和可再使用(reusable)的放射性物質現有的管理規劃，與界定高階放射性廢棄物和低階放射性廢棄物、核能工業或研究部門或醫療產生的廢棄物。PNGMDR係因應1991年對放射性廢棄物管理透明化的法案要求，並於2006年6月13日的核能安全與透明化法案中確立。PNGMDR的細節仰賴一個多元化的工作小組，匯集了約30個利益相關者：環保協會、民選官員代表、以及專家、傳統的放射性廢物的生產者和管理者之控制和評估機構，由法國核能安全署和環境部共同主持這個工作小組。工作小組會議(每年3~5次)可以由技術性議題，特別是法令要求的調查與研究，使成員與工作小組間討論交流。

放射性物質與廢棄物管理架構明確訂於2006年6月28日第2006-739號有關放射性物質與廢棄物之永續管理法案。此法案明定放射性物質與廢棄物管理政策、除役和放

射性廢物的長遠資金管理。它禁止來自國外的廢棄物(又稱孤兒廢棄物)在法國處置管理。該法案規定這些放射性物質與廢棄物管理必須滿足三個基本原則：保護人類健康和安全的環境、預防或限制子孫後代負擔過重的義務、生產者即付款人的原則，這與環境法的污染者即付款人原則類似。PNGMDR依據法律定義的方向安排放射性物質與廢棄物管理的研究與調查之實施。

事實上，放射性物質，某些是可重複使用的物料，其他就是廢棄物。以核能發電過程為例，用過燃料即包括可再使用的這類物質。放射性廢棄物相當多樣，這與其成份、危險性等因素有關。危險因素不只是放射性的特質，還有化學毒性。在法國對於放射性廢棄物的分類有兩個參數：

1. 活度：即放射性的程度，這與廢棄物中所含放射性有關，非常低階、低階、中階、高階放射性。
2. 壽命，與廢棄物中所含核種的半衰期有關。經過10個半衰期後，放射性約降了1000倍，一般來說，10個半衰期的時間長度視為放射性元素的“壽命”。大多數廢棄物含有短半衰期(< 31年)與長半衰期(> 31年)的放射性元素，若廢棄物內含元素大多數為短半衰期者，則稱為短半衰期廢棄物。

廢棄物類別搭配管理方式的分類表如下，每個類別設置特定的管理方法。

	非常短半衰期(半衰期 < 100 天)	短半衰期(半衰期 < 31 年)	長半衰期(半衰期 > 31 年)
非常低階(VLL)	在產生廠址依放射性衰變來管理，然後以一般廢棄管理方式來除去	地表處置 Aube 處置場(VLL 廢棄物) 循環利用管理途徑	
低階(LL)		地表處置 Aube 處置場 (LL/IL-SL 廢棄物)	淺層處置 研究中
中階(IL)			深層處置場 規劃中
高階(HL)	不適用		

廢棄物的類別與管理途徑之間的對應關係並非完全準確。事實上，廢棄物管理途徑並

非完全取決於活度與壽命。還有其他考量，如物理和化學穩定度或所含化學元素。PNGMDR爲了最適化現有的廢棄物管理途徑，決定執行一些行動。至2012年底的現有管理途徑有：(1)核設施中部份放射性廢棄物的再利用；(2)有些廢棄物採焚化處理；(3)設置短壽命放射性廢棄物(非常低階、低階、中階)長遠廢棄物管理專用的處置場；(4)其他現有的放射性廢棄物管理方法，特別是傳統處置場處置或廢棄礦場原處處置。

密封放射性射源數量多，但體積小(佔放射性廢棄物體積不到1%)，一旦許可使用期限到了(在法國爲10年，除非有特別情況)，密封放射性射源必須退回供應商，再退回製造廠家或送至授權設施廢棄。具體地說，有三種可能性：(1)射源退回供應商，再出口至國外供應商或製造廠家；(2)退回供應商，再退回法國本地的製造廠家；(3)若沒有明確的供應商，必須建立射源處理體系。幾乎所有的廢棄物於現今都有現有的或規劃長遠的管理途徑。然而仍有極小比例的廢棄物無長遠的管理途徑，主因是其化學成份。例如無法焚化的油或液體、有些石棉廢棄物會釋出纖維、有些廢棄物含汞的成份、還有鳳凰與超級鳳凰快滋生式反應器的鈉、及加速器活化的部件。PNGMDR 2013-2015版要求對這五類進一步研究以訂出能實施的管理行動。

## 2.9 核設施除役之輻射特性調查的策略

輻射特性調查在核設施除役中扮演重要的角色，它是規劃、確認污染物特性與範圍、潛在風險影響評估、經費預估、除役架構的實施、輻射防護、環境保護、以及除役產生的物質管理之基礎，以供作爲建物與廠址的外釋決策參考。在所以除役方案或專案裡，適當的輻射調查至爲重要。一般來說，“輻射特性調查”係指核設施中放射性核種的濃度、位置、與特質的測定，是建立除役專案的基礎。輻射特性調查是一個持續不斷的過程，直到最終偵測執行與執照終止後才結束。它並不只取樣與量測，還有自各種來源取得的相關文件、運轉歷史、計算所得資訊的評估。當核設施永久停機後，應儘快建立輻射特性調查方案。應先測定所有相關結構或工具上殘留活度必要的方法與步驟，提供一個對於放射性核種含量與類型、物理與化學狀態且可信賴的資訊資料庫。輻射特性調查有下列幾個目標：

- 測定在結構、系統、組件與環境中污染的範圍、種類與同位素混合物。
- 活化分析與量化難測核種。
- 提供劑量建模以建立物質、建物與廠址的外釋規範。
- 評估除污技術與決定包裝、運送、處置的廢棄物分類。
- 決定必要的整治行動，包括需要除污的範圍。
- 提供除役實施期間工作人員的劑量評估。確認安全的類型與工作人員、民眾、環境防護之輻防要求。
- 提供除役經費評估與驗證設施最終能否符合外釋規範。

核設施的生命週期可分為不同階段，由規劃與興建至運轉、過渡與除役，乃至除役與最終偵測以免除法規管制。輻射特性調查在各階段有不同的目標，例如：

- 作為基準量測以確定於選址階段的背景輻射標準，並在建造階段獲取資訊以提供作為未來放射活度增建與放射活度分布的計算。
- 於運轉期間常規的量測與偵測，若有涉及廠房污染的意外事件，則需要額外的偵測與調查。
- 在過渡期間需要詳細的輻射偵測以提供發展最終除役計畫。
- 在除役階段，輻射特性調查與所有劑量評估議題、放射性廢棄物管理與解除管制議題一起配合。
- 執照終止階段的廠址與任何還在的結構物，需要最終偵測以作為廠址免除法規管制的依據。

要完成輻射特性調查需要大量的技術程序，特別是利用機械工具由表面取樣，可以是擷取樣品、可以是大塊物體中鑽孔核心取樣，還有許多對物質不同深度的取樣技術以供分析(金屬、建物表面、瓦礫堆、土壤等)。樣品分析方法有實驗室以加馬能譜或放射化學方法分離後的 $\alpha/\beta$ 能譜以及總阿伐/總貝它量測。除了取樣，劑量率、總貝它、貝它與加馬污染可在現場量測得到。加馬發射之放射性核種可現場以加馬能譜分析來量測。

樣品的量測與直接測量所得資料隨收集的目的不同而有各自的意義，這意味資料

的量與品質需要符合其目的。定義清楚目的的方式應有結構化序列。一種循序漸進的程序，如資料品質目標(Data Quality Objectives = DQO)能改進偵測效益與效率，乃至決策的可防禦性。它也可以通過消除不必要的、重複的或過於精確的數據，大幅減少相關資料收集的開支。利用循序漸進的程序可保證決策所用環境資料的種類、品質、數量是適當的。輻射特性調查在核設施除役的資金需求預估方面也是個重要參數，它有助於除役與放射性物質管理的大量參數之確認與評估。這些參數(例如需要除污的量、無法解除管制之放射性廢棄物與物質的量、是否應用花費高的遙控或人工拆除技術之決定等等)皆涉及龐大的經費，透過輻射特性調查能變得清晰，形成除役規劃的堅實基礎，促使成本估算更為精確。在核設施生命週期裡有些關鍵活動會涉及輻射特性調查，於下說明：

1. 初期步驟：在輻射特性調查開始之前，供以規劃活動所需資料的要求與意圖須先定義好。初期步驟包括特性調查專案的目的初期確認。專案的目的應訂在工作範圍裡，提供了一個初步的定義是什麼樣的設備、材料等需要哪種形式的特性調查，並解釋為何必須進行這項工作。
2. 規劃步驟：特性調查專案有不同的方式來規劃。一個方式也是最常見的-依循序漸進程序的原則，例如資料品質目標(DQO)。規劃特性調查的程序係美國環保署為污染土地所發展的，但其原則可作為任何特性調查專案的結構性規劃。DQO程序並非線性的，而是反覆式；因此或許需要回到前一步驟。實施系統性規劃可利用DAO作為特性調查的合理架構。在規劃階段投入的時間和精力，可確保最終產物滿足所有的專案目標，並能提供對資料收集、分析和解釋有明確的正當理由。一項重要的工作是準備歷史資料文件，即有關廠址、面積、或設施的現有(歷史)資訊經過調查來收集並適當評估。將現有的分析和歷史資訊的使用最大化，減少新的取樣和分析的需要。編制歷史文件的目的是對現有資訊收集、評估和評註。這文件應呈現資訊的關鍵評估，其品質與數量視所用目的而定。這反映這資訊使用上的可信度程度。通過把重點放在利用現有資訊，使專案能確保特性調查可提供足夠且在合理不確定度內的資料來做出明智的決策，並只收集所需要的資料量。取樣與量測的策略需要確保

收集足夠與適當的資料能符合所定的目標，應透過DQO程序來導出要求，考慮其他不可忽略的因素。一個確認取樣及量測策略是否適合專案的關鍵動作，是需要在取樣作業執行之前審視想藉由取樣活動達成的目標。取樣設計與分析方式與評價目標是緊密相連的。從這個角度來看，建立一個適當的評價方法是最重要的。取樣方式的最簡化呈現就是判斷或統計。主觀判斷的方式可降低經費而集中取樣範圍，但這仰賴對之前的知識且結果的有效性與採用的判斷品質有關。對於錯誤案例、熱點與邊界的發現相較於估算平均或假說檢定來說是不錯的方式。統計性(系統性)方式對於之前的知識依賴較低且不易出問題。藉由假設統計性分布理論(這仍需要一些歷史資訊)，運用數學結構由樣品推論整個全體。在某些複雜情況下，必須混合運用這兩種方式。

3. 實施步驟：實施階段包括量測、樣品收集、樣品分析，依取樣規劃執行。取樣作業包括代表性樣品的收集或適度呈現非破壞性量測資料的收集，接著是資料評估與做決策。應注意的是並非一定要經過所有程序步驟，某些程序步驟的手續取決於專案的複雜性與取樣者的經驗。防範採樣期間的典型錯誤有：採樣工具的選擇和使用不當、不當或逾期校正、增量的數目不足、不正確的樣品質量、交叉污染、錯誤的採樣地點。當帶回實驗室分析時，應符合某些要求以保證資料的可靠性。理想的情況下，應有相應品質標準的認證。另要注意的是非輻射方面的特性調查(如有害廢棄物)的必要性，許多輻射特性調查所取樣品也可用於其他化學成份的分析上。
4. 資料的評估(assessment)與評價(evaluation)步驟：資料的評估包括審視與評估分析或量測所產生的資料，以決定專案目標。分析資料應及時進行初期評估，最好是儘快從實驗室接收資料後或資料被轉錄至任何資料評估工具前。這增加實驗室保留足夠材料的可能性，可再進行任何必要分析。初期分析是檢驗完整性和可用性，執行這樣的評估來確保未來下決策時有適度的資料組可用。這可降低專案後期階段重新重新分析或再取樣的可能性降低，避免專案的成本超支和延誤。如果資料初步評估後被認為是完整可用的，接著會被轉至一個合適的資料評估工具或形成適當的資料報告。統計技術可應用在資料評估上，且應用在特性調查專案也適當。不同的統計方

式應視資料收集的目的作適當選擇。操作人員應經過培訓和對數據分析有能力評估。

5. 最終確定步驟：特性調查專案的產出應納入最終報告，以將資料評估轉成對使用者或客戶而言有意義的語言，及提供利益相關者檢驗的透明度。這裡應評估特性調查目標的資料與初期問題陳述。由成果的意見和判斷，可以提供除役策略的發展，條件被充分說明以評價除役規劃、解除管制與廢棄物途徑的可接收度。其產出應清楚連結到最初目標，讓未來使用者了解其限制。

### 管理觀念與策略選擇

將代表一個核設施輻射狀態知識之大量資料進行編撰與評估是一項龐大工作。此外，輻射特性調查需要有對電廠歷史、放射化學方面、資料管理、量測、關聯電廠設計與運轉歷史的量測資料收集與詮釋相關經驗的足夠數量員工來負責此任務。在大型設施裡，輻射特性調查應視為獨立的專案或作為一項明確的任務，且應有輻射專家參與任何特性調查活動的規劃。

在量測與取樣方面，每個設施應單獨評估是否採用現場量測或取樣後於實驗室分析。污染的種類與量測取樣做法息息相關，若以 $\alpha$ 與 $\beta$ 核種為主，而無或僅有低能量加馬輻射的核種，則採用取樣後於實驗室分析，必要時還要放射化學分析。異質性污染也需要額外取樣分析或驗證核種成份。若污染滲入到物體內部，例如混凝土表面污染沒有防污塗層的保護，也需要取樣(特別是取芯樣品)以測定其深度剖面圖及滲透深度。由物體內取樣以驗證活化計算，這也是輻射特性調查的一部份。對於污染的其他類型，例如金屬表面或建物表面之純表面污染且沒有或淺的滲透深度，若周圍輻射標準不會干擾測量時，可用現場測量技術來量測。輻射特性調查過程中的應用的測量技術類型應儘早決定，目前對應各式污染與活化類型有許多測量技術可用。所有技術皆有優缺點，通常會在測量時間與靈敏度之間取一平衡。這有幾個技術可用，如ICP-MS(感應耦合電漿質譜分析)是可行的快速測量方法，對於重的元素如鈾(U)與超鈾(TRU)能在短時間達到足夠的偵測低限。

決定採用一組特定技術需要仔細權衡，通過使用新的技術可更快和更有效地執行測量或為了達到穩定可用以致拉長測量時間而增加成本。輻射特性調查所執行的測量

與解除管制程序的測量不相同。因此並未涵蓋金屬材質或建物結構體整個表面，且偵測下限也無須達到非常低來驗證高於解除管制標準之污染的有無。以有效的方式結合包括統計方法的不同技術也是個選項。一個系統、建物表面或土地區域的平均污染標準須測定其不確定度，並決定除污的必要性。這方式可能大幅降低整體除污經費。輻射特性調查完成的核種向量推導可評估有關污染的均質性。輻射特性調查期間，以一組樣品中所有相關放射性核種之平均活度百分比為基礎，統計方式也能應用在測定核種成份上。目前已有許多資料管理工具可應用於所有測量與取樣資料的儲存與輸入，包括輻射特性調查、資料品保、放射性核種衰變修正、代表運轉歷史與污染的背景之資料、有關特性特質的資料組統計評估、核種分布的製作、資料歸檔與文件製作等等。有些結合資料庫與資料分析功能的工具有能力實現設施廠址、系統、房間的2D或3D資料模型，方便評比設施輻射特性。適當的資料管理工具是不可缺少的，資料的保存必須持續幾年或甚至數十年，QA過程必須透明與可追溯。

在規劃系統與金屬結構物的輻射特性調查時，某些做法能沿用到後續建物表面特性調查資訊的特性調查上。系統與金屬結構物的外表面之核種與所在房間裡的牆面可能是相同的，因為污染機制可能相同，可一起進行取樣與測量。輻射特性調查的結果輸入到資料庫，並讓數據以適當呈現，可立即獲得相同房間的系統和結構物、以及建物表面的污染概觀。

3. 組織方面：輻射特性調查是無法與每日常規工作並行的任務，需要專門的專案結構與人力，才有足夠時間與資源完成任務。根據電廠營運者的人力資源與背景，輻射特性調查可委外給承攬商或由員工自行完成。然而之後，還是要執行額外的取樣與測量以擴充資料庫，明智的做法是讓現有員工得到充分的訓練，能夠執行這些任務。其他還有運用外部實驗室取代或加上營運者自己的實驗室設備。使用自己的實驗室需要投資必要的設備和有能力的員工；在外部實驗室分析樣品的成本則隨著測量數量成比例增加。這些選項的抉擇可利用成本-效益分析來協助。

### **表面下污染的策略**

金屬表面上的污染可滲透至材料裡至多幾釐米的裂縫，建物表面的污染則可達數

公分至數十公分，因此在輻射特性調查期間容易偵測到，這情形基本上與土壤污染的類型不同。來自地下洩漏管路、溢流或污染材料的污染會可能滲透到地下，導致地下污染較難被偵測到，其污染規模需要詳細的取樣與測量。因此對於地下污染所用調查方式，不同於金屬結構物、建物、其他材料與近表面土壤的調查，需要進行較深的取樣與量測，若有殘留較高的污染，可能會長期影響環境，例如地下水。考慮這些情況，可由下列幾個方面的分析來建立地下污染的解決策略：

1. 審視場址歷史資料與運轉記錄以確認溢流、事故、以及可能流至地下的排放事件。
2. 審視與評估環境監測資料以確認地下土壤、地下水、沉積物和地表水對於地面下的潛在影響。
3. 地面下污染的可能範圍與種類、濃度或放射性核種標準的評估。
4. 地面下資料的收集，若可能的話，對估測的地下污染邊界建立合理的可信度。

對於地面下污染的輻射特性調查任務有：

1. 考量到除役執行的期間與採用可信的曝露情節，對環境的潛在風險與對民眾的劑量評估。
2. 地面下污染的潛在風險/劑量與除役完成後廠址外釋的法規要求之劑量/風險規範相比較。
3. 若有必要，則對可能採取的整治行動進行評估，並利用成本-風險分析來評估經費，另以最適化的合理抑低原則以減低對環境與公眾的潛在影響。

假設地面下污染的風險/劑量相較於外釋規範無法忽略，則可能需要3D取樣與建模以評估污染團與潛在遷移，接著整治主要集中在高活度區域。研擬評估劑量影響的假想曝露情節必須根據地面下污染源來評估潛在影響，這種案例要取樣/測量來證明其有無污染。

### **經驗/教訓**

來自許多除役專案的經驗顯示，輻射特性調查會有許多當初規劃未能預料的狀況發生，造成時程延後或增加工作量，最常見的就是所含放射性核種的特性調查。例如有一核電廠因為初期取樣結果只有低的 $\alpha$ 含量，核種分布調查認定 $\alpha$ 污染核種可予忽

略。但若事後證明有需要分辨各種 $\alpha$ 核種(Am-241、某些U、Pu與Cm的同位素)，則需要重複取樣與評估，增加經費負擔。若在一開始評估就有完整的核種分布，例如藉由用過核燃料燃耗計算的幫助，則可避免這問題。

核能電廠的系統裡之核種分布在過濾器或相態轉變處(例如蒸汽-水、水-蒸汽)常會發生變化，輻射特性調查應考慮到這狀況，要有足夠的取樣與測量數量。否則可能有必要重複部份取樣程序，以達到足夠多的樣本數。有些除污技術會造成核種分布改變，這可能在輻射特性調查過程沒被考慮到。特別是化學除污方法可能會選擇性地減低某些元素(例如金屬)的量，而對某類元素沒有或只有輕微影響，例如鈷系元素。在進行除污之前的任何特性調查皆無法評估其影響，這就是為何在許多除役專案中會應用機械除污技術的理由之一，這種技術對所有核種分布的影響相等。

對於運轉階段的輻射防護來說，在金屬與建物表面使用防護塗料避免污染是個有效的去污方式。但實際上常見塗料會在原有的一層上再塗上一層翻新，而原有層並沒完全除污，以輻防觀點來看是可被接受的。然而多層的狀況會讓一般測量無用化，因為污染測量只偵測到上層，而無法偵測到較深處的活度。若事後才發現這種情形，則需要重新調查或取樣；對於建物表面的滲透深度測定錯誤也會有類似考量。建物或廠址土壤表面下的污染存在之可能性應儘早確認清楚，以對廠址或建物制定適當的取樣與測量計畫。如果在正常的表面輻射特性調查完成後才發現表面下污染，則需在更深之處執行再取樣。小心規劃以及與類似的除役專案進行資訊交流有助於除役作業的遂行。

## **2.10 ANDRA對污染廠址復原的方法**

根據法國2006年6月28日的放射性廢棄物和物質管理法案，ANDRA主管放射性污染廠址清理，有部份放射性污染來自早期的鐳工業，在1930年代認為鐳是有益健康的，這些受污染廠址是當時製造鐳或由鈾礦中萃取出鐳的地方。但現在這些廠址可能已是住宅區、辦公區、商業或工業區。某些情況下，有些廠址已成為學校或幼稚園用地。ANDRA負責清理其他放射性核種污染的遺留廠址，特別是以前作為稀土族(鈾)萃取工

廠或製造放射性示蹤劑(氙或碳14)之處，後者同時有放射性污染與化學污染。若廠址位在一個人口密集的城市環境或在私人土地上，這些地方的居民必須於整治工程期間遷出。溝通議題非常重要，當然首先是受污染廠址的所有權人在發現其居住地有污染時可以合法地表達關切，其他當地居民與民意代表也會要求對實際風險作說明及整治策略的選擇。ANDRA的這項任務係由國家補助提供資金，整治策略與補助金額由ANDRA的首長主持的國家委員會討論。包括主管這些議題的部會、管制機構、技術支援專家組織、市長、環保協會。ANDRA已經在法國辦理了約三十處受污染廠址的整治工作，介入的時間由幾天至幾年，經費由幾百至幾百萬歐元。廢棄物法案賦予一個實施架構，以推動放射性污染廠址整治的積極政策，ANDRA已經建立一個作業組織來完成該項政策。

## 2.11 受污染土壤與廠址之復原

巴黎地區受放射性污染之廠址眾多，有些甚至已被遺忘，需要安全主管機關ANDRA由歷史研究與現場調查來找出。歸納有三種污染類型：

1. 歷史性廠址：20世紀初期受到居里夫婦研究的影響，對於鐳(從瀝青鈾礦中提煉的放射性礦產，成本遠高於黃金)的研究有熱烈的進展。這些廠址的放射性污染主要來自鐳-226，也有發現其他放射性核種如鈾或鈾(這些廠址有原本礦石)及放射性元素的鉛、鉍等，亦即氦-222(放射性氣體)。
2. 民生核能應用的廠址：放射性特性的發現造成在許多不同領域的應用，如手錶製造與飛航(發光)、製藥(鐳針)等等。這些廠址的污染主要來自鐳與其子核或氙(利用其發光性質)。
3. 其他如研究相關(民生、軍事、或私人)的廠址亦有之。這類的污染中放射性元素在同一廠址種類多樣且有不同類型(C-14、Cs-137、H-3、Am-241等)。

受污染廠址的除役專案採用的工作方式分為以下主要階段：

1. 進行輻射調查以確認待處理區域、污染深度、污染特性(所含放射性元素)。
2. 決定輻射方面的目標，這與專案業主設想的復原方案有關。

3. 界定介入的方式、廢棄物管理、輻射方面的後續規劃等等。
4. 廠址工作的合作與協調，包括輻射防護與廢棄物管理。
5. 工作尾聲時的輻射特性調查，以確認有達成原定輻射的要求。

專案的實施會受到政府嚴密監督，特別在輻射防護方面。爲了獲得除役作業許可，必須定位與量化輻射污染物質的體積，這仰賴對廠址歷史活動的了解，實務上常常無人能提供足夠信賴的資料，必須自行根據廠址歷史知識來建立一個或多個可能情節以作爲評估，並利用各種技術完成調查(輻射與技術性調查)以儘可能證實符合所假設的情節。輻射防護偵測設備須經驗證有極佳靈敏度以量測出非常接近天然背景雜訊(70~120 nSv/h)的訊號。污染的處理上所遭受到的困難很多，首先面對的是原屬業主對於他們擁有的廠址風險特性缺乏足夠的警覺，調查時可能發現污染區域在物理邊界之外或深入地面而先前卻未知。爲了儘可能精確量化要處理的污染範圍，需要進行地圖製作、核心鑽孔、量測等等調查，這都非常花錢，專案業主常想要削減這方面預算，但範圍的準確評估卻是專案成功的重要關鍵。第二個困難是心理和媒體相關方面，由於這類遺留廠址直到現在才被發現放射性污染，但先前無人知曉，該處居住或工作的民眾顯然會焦慮或反感，甚至會成立協會以捍衛自己的權利。有時這會影響除役工作進行，有必要向民眾解釋作業過程與安撫民心。

## **2.12 對於廠址整治準則的豁免與解除管制標準符合監測之國際建議**

在核設施與其他使用放射性物質之設施，其營運期間與之後除役會產生的不同放射活性之物質。特別是在除役過程，會產生大量的物質，有相當的部份所含放射活度低於法規管制的限值，因此可外釋當作非放射性廢棄物來處置。對於天然放射性物質與人造且低於管制的活度濃度值的物質，在國際共識認爲這不用被法規監管。放射性物質管制的排除管制、豁免管制、解除管制觀念被定義與闡釋於“防護游離輻射與放射性射源安全：國際基本安全標準(International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources)”。這些觀念的應用可參考IAEA安全標準叢書RS-G-1.7“排除管制、豁免管制、解除管制觀念的應用

(Application of the Concepts of Exclusion, Exemption and Clearance)”。活度濃度標準值的推導技術基礎，包括詳盡的情節描述模式化所用的參數，是採用IAEA安全報告“對於排除管制、豁免管制、解除管制之活度濃度值推導(Derivation of Activity Concentration Values for Exclusion, Exemption and Clearance)” (SRS 44)所闡釋的。最近IAEA出版了安全報告“對符合豁免管制和解除管制標準值的監測(Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels)” (SRS 67)，協助營運者執行與評估外釋管制之物質的監測結果，以驗證是否符合建立的標準值。

除役期間產生的東西有相當數量會被清理，建物結構與廠址地區也是外釋的標的，其相關議題可參見在IAEA安全導則WS-G-5.1“廠址因終止業務而解除法規管制安全指引(Release of Sites from Regulatory Control on Termination of Practices)”中。為了提供額外的詳細導則與實務建議，IAEA出版一份安全報告“符合廠址整治準則的監測(Monitoring for Compliance with Remediation Criteria for Sites)” (SRS 72)。這裡介紹兩份IAEA安全報告的概要內容(SRS 67與SRS 72)。

### **豁免管制與解除管制符合度的監測**

SRS 67的目的是提供有關豁免管制與解除管制應用、符合管制值活度要求證明的實務資訊。安全報告中一般提到的標準限值是RS-G-1.7中建立的值，報告是針對是否符合來自許可輻射作業(包括各種種類核能或輻射設施的營運與除役活動)且含有低活度濃度放射性核種物質，其豁免與解除管制的監測策略發展與實施。報告透過一系列實務範例說明來提供監測設備與技術的選擇建議。RS-G-1.7是以是否低於活度濃度限值作為管制的手段。有些會員國選擇以表面污染值當作豁免管制與解除管制的參照值。SRS 67未納入干預情境，除了廠址整治的土地管制以外，SRS 67可應用在外釋物質的監測。至於對於土地的監測可參考安全報告叢書72號(SRS 72)。對於食物、飲水、飼料的活度濃度要求則參考WHO(世界衛生組織)提出的“飲用水品質指引，第1冊：建議(Guidelines for Drinking-Water Quality, Volume 1: Recommendations)”與FAO(聯合國農糧組織)的“國際食品法典，第1冊，第6.1節(Codex Alimentarius, Vol. 1, Section 6.1)”規範。空氣中氬氣的行動標準則列於安全標準叢書“防護游離輻射與放射性射源安

全：國際基本安全標準“GSR Part 3。放射性物質運送則依據IAEA安全標準叢書TS-R-1。另外SRS 67不考慮放射性核種之子核種，例如Cs-137衰變中的Ba-137m。

SRS 67第一節說明這份報告的背景、目的、範圍與結構。對於符合性之監測的最適化策略選擇，則在第二節探討其一般方式與必要步驟，包括探討須被監測之物質的界定與要執行的監測任務，探討通用與廠址特定活度濃度值、分級方法的應用、大體積與表面污染值、平均化的程序、被監測物質的歷史資訊、管理方式、最適監測方式的決定以及提及有關各方的參與。第三節則是可應用在特定情形之儀器與監測技術的選擇之細節，闡述了包括如何處理混合放射性核種問題、如何根據任務選擇合適的儀器、如何執行物質的物理管制。第四節探討符合性監測的挑戰，包括不確定度的詳盡建議、背景活度的處理、偵測靈敏度、 $\alpha$ 及 $\beta$ 和低能 $\gamma$ 發射體的量測、粗糙不規則或其他表面難以量測類型的監測、非均質議題、有危險性與放射性的物質、校正之挑戰和採樣過程。第五節介紹了數據評估的活動和監測結果可信度之建立、不確定度的處理、結果的代表性和解除管制決策的有效性。第六節則是品質管理方案。符合性的監測策略與以及在實際情形下執行的實務範例則列於安全報告的附錄。

### **豁免管制與解除管制符合性證明的監測程序**

豁免管制與解除管制符合性的監測程序是複雜的且相較於運轉中設施例行輻射監測相較為耗時的程序。例如解除管制標準值趨近儀器的偵測能力限值，且要量測的物質數量很多。程序一開始是由物質的特性考量外釋，由監測結果採行的行動為結束。符合性的監測主要步驟如圖2。

爲了預測污染的可能種類與程度，對於豁免管制與解除管制必須選擇最適當的監測策略，這需要正確資訊如下：

- a. 來源：設施類型與設施內的所在處，例如核反應器一次側系統、核燃料製造廠、生產放射性同位素的熱室，以及是在營運期間或除役拆除期間所產生的。
- b. 材質種類：物質的物理形式(如混凝土、不銹鋼、塑膠)。
- c. 拆除與廢棄物數量：以體積、質量、範圍評估每年的量。
- d. 放射性核種。確認放射性核種呈現的特徵，特別是單一放射性核種或混合放射性核

種(核種能譜、化學組成)、輻射種類( $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ )、特定放射性核種污染的辨識。

- e. 污染類型：污染的物理特性，例如表面污染(固著或非固著)、大塊污染、活化或複合性。

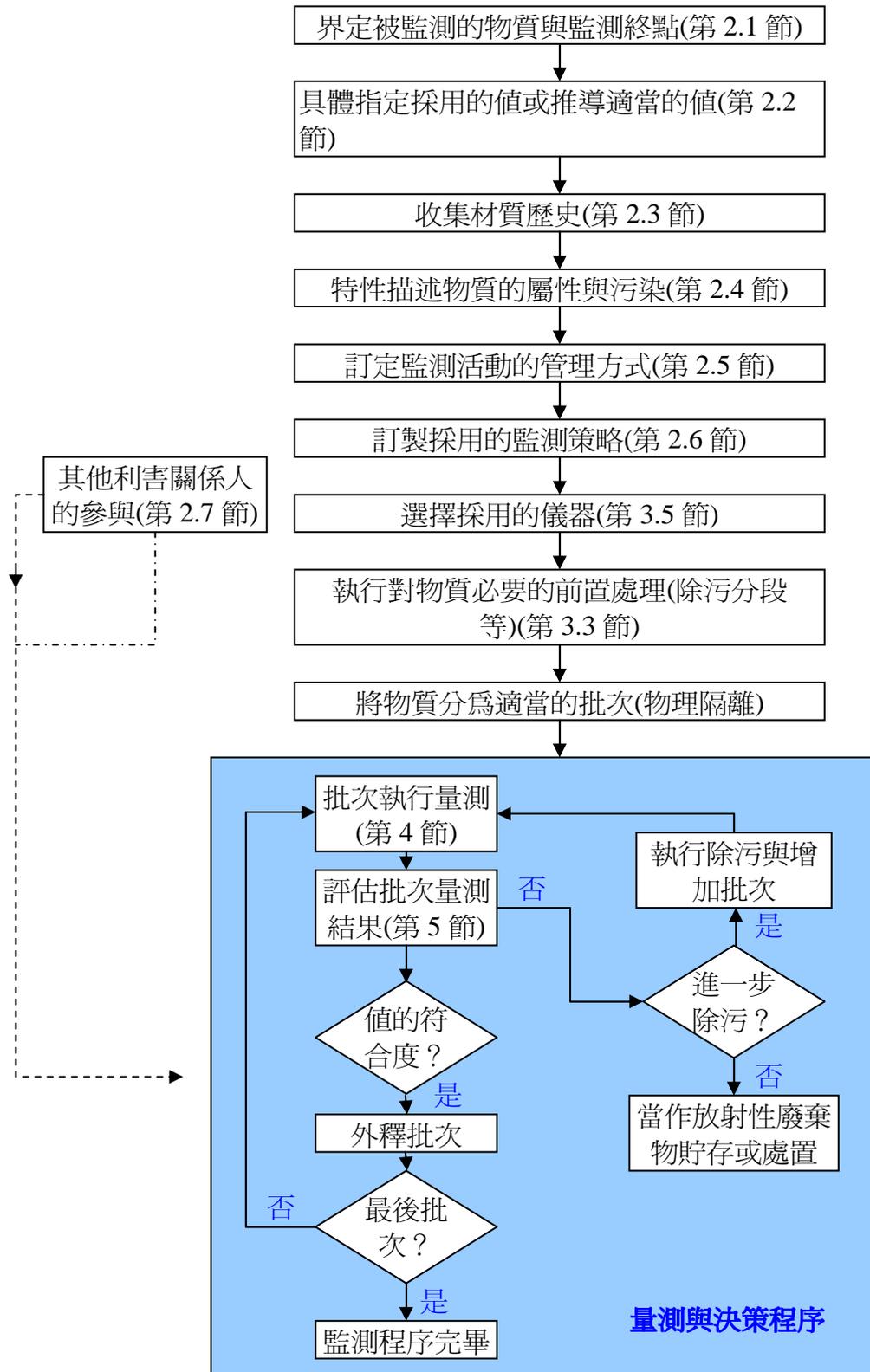


圖2：豁免管制與解除管制標準值符合性監測的主要步驟

f. 污染的均勻性：確認熱點是在表面或在內部。

g. 時間表：污染發生到被量測之間的時間間距，對於短半衰期放射性核種與衰變鏈中的放射性核種至為重要。

執行下列活動以協助外釋標準值符合度的決策程序：

- ✓ 偵測儀器的界限規範與分類。
- ✓ 偵測儀器的殘留活度與外釋標準值比較。
- ✓ 放射性核種混合的處理方法以及如何建立修正因數(鑑別特徵)。
- ✓ 不確定度差異之處理策略。
- ✓ 類型I決策錯誤(沒污染誤以為有污染)與類型II決策錯誤(有污染誤以為沒污染)的定義，分配這些錯誤發生的機率限制。

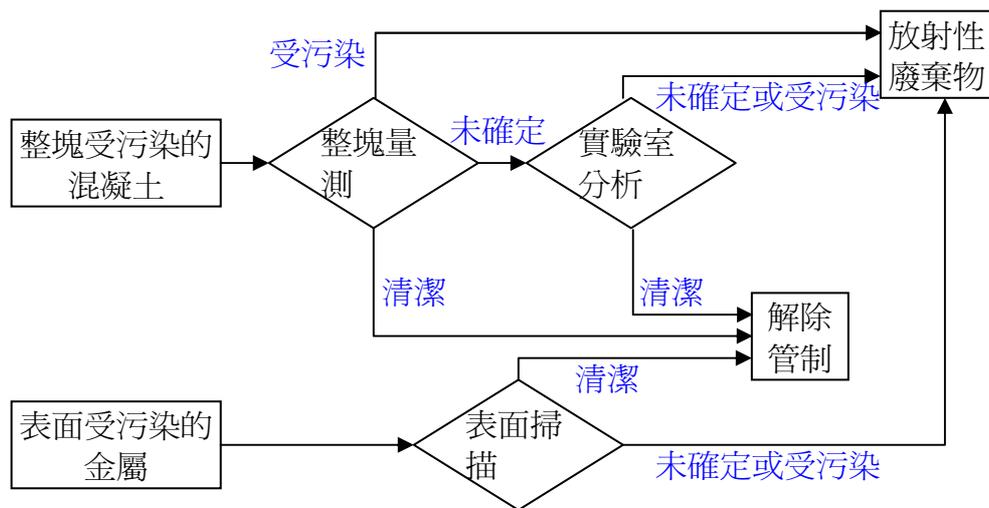


圖3：一般監測策略的流程

解除管制或豁免管制符合度的監測活度的量測，這涉及對輻射或放射性物質潛在曝露的控制或評估，以及結果的詮釋。監測策略可以物質流程圖來描述，被監測物質當作輸入，監測技術與物質處理過程作為流程的一部份，最終物質清除當作輸出(圖3)。輸入的是各種不同被監測物質，可能再分為“預期”或“潛在”污染分類(例如“預期清潔”或“可能受污染”)，或污染種類(例如表面-整塊、 $\alpha$ 或 $\gamma$ 輻射)。流程的輸出是物質解除管制、在規定設施裡進一步處理或處置。

監測技術是監測策略中使用的一項工具，以決定是否符合建立的標準值，它結合了儀器的選用及如何用在直接與間接監測上。對於直接方式，使用儀器直接量測被監測的物質；對於間接方式，污染經二次媒介或取樣(濾紙等)，再監測樣品或媒介。監測策略與技術之間的聯繫如圖2。整塊受污染的混凝土及表面受污染的金屬(如鐵)需要以兩個可行的經濟管理方式來監測：解除管制或視為放射性廢棄物處置。

### 廠址整治準則符合度的監測

SRS 72的目的是在完成整治行動後，對廠址整治準則符合度的監測策略執行與發展提供實務的建議，並與整治、除役與廠址外釋管制所得的現在輻射防護原則及經驗一致。SRS 72並提供如何證實整治或土地(主要是土壤，與其他相關介質)外釋準則符合度的實務資訊，這影響到廠址外釋的管制決策。SRS 72適用範圍涵蓋因事故或過去活動被污染的區域。提供給整治完成後負責外釋準則符合度之監測活動的發展、執行與審視。文中的名詞“營運者(operator)”係指對於廠址一般性安全及規劃和執行監測負有責任的組織。SRS 72亦有協助管制機關或其他獨立組織審查與驗證下列項目的目的：(1)選擇與應用適當的整治策略；(2)由營運者獲得之分析與結果來判斷，以及整治規劃內容中建立的整治準則和外釋準則符合度提供足夠的可信度水準。

SRS 72提到整治程序最後階段之整治符合度的監測係針對現存曝露情節，亦即包含因事故或過去活動被污染的區域。然而在安全報告中應用的方法也能用於執照終止過程對廠址外釋相關規範的考量上。安全報告中考量的廠址包括：(1)受輻射事故影響的地區；(2)輻射性物質不當管理或過去放射性廢棄物管理作為不當的地區；(3)曾用於生產、存放、處理天然或人造放射性核種的地區(如醫療、核醫藥物、研究、教育、處置等等)；(4)曾未經管制機關許可營運的設施。SRS 72可應用於廠址的監測包括對土地、建物與地上或地下結構體。其他可能會造成潛在的曝露途徑的媒介也有考量，包括深層土壤、地表與地下水、殘留在廠址的地下結構物或物體、在受污染地區的植物群和動物群，以及廠址周圍可受影響的地區。

SRS 72並未提及大塊物質(bulk material)、廢棄物處置廠址、礦場與礦處理廠的監測，這些撰寫在其他出版品中。SRS 72亦未直接涵蓋特性調查及整治行動執行期間的

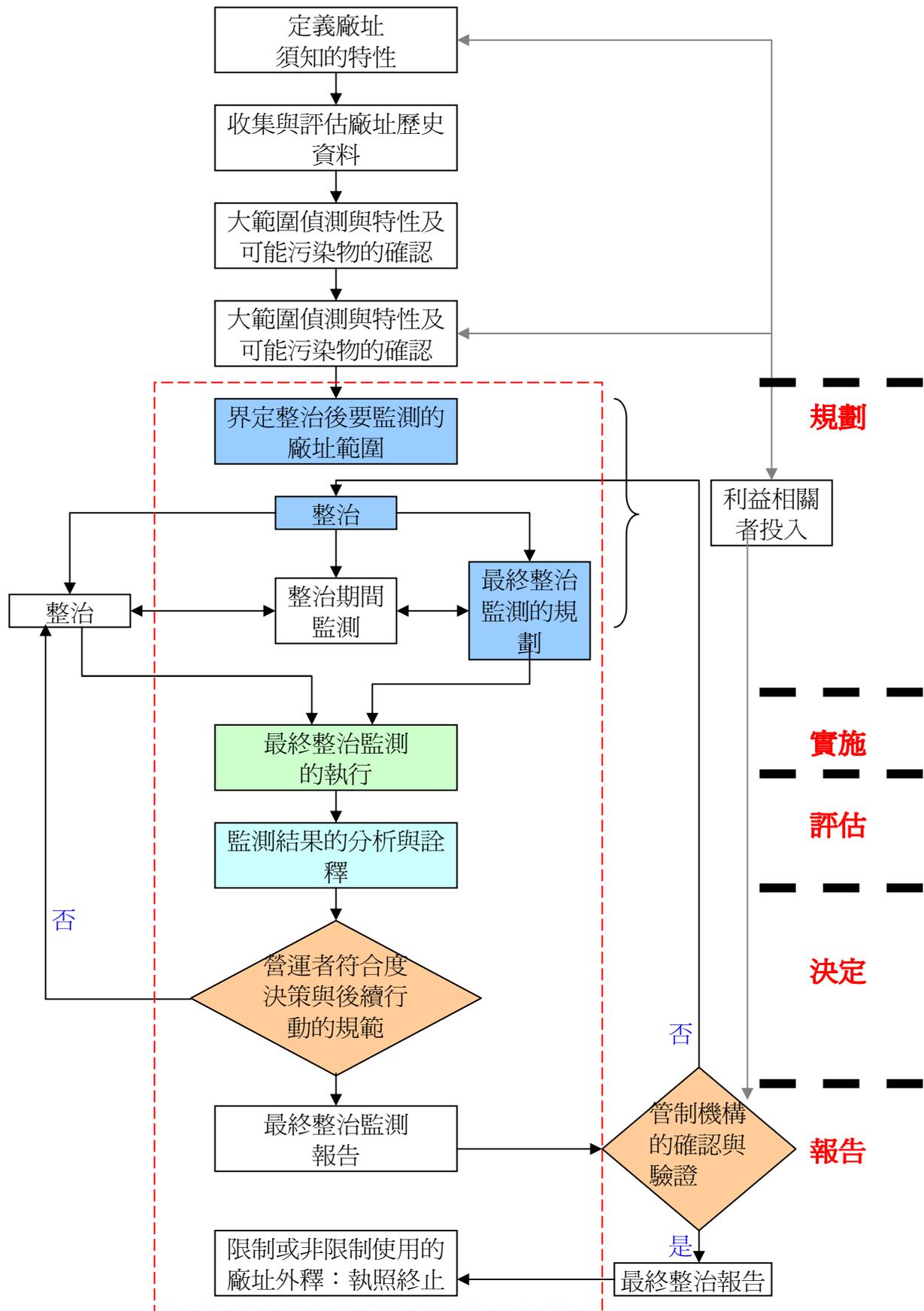
監測(見圖3)。然而，這裡的監測原則卻可適用於各階段。事實上，在整治作業期間的監測有助於促進最終整治監測的效用。最終監測階段的規劃必須整合，若可能的話，整治之前或期間的監測一起規劃(圖4)。SRS 72著重下列關鍵因素：(1)監測策略的規劃與整合(例如監測設備與技術)；(2)監測行動的執行以取得有代表性的結果及證明符合外釋準則所要求的可信賴水準；(3)結果的評估；(4)廠址限制或非限制使用之建立準則符合性的決策程序；(5)正式的結果報告。

有些廠址可能同時有輻射及化學污染，廠址的外釋可能性必須視這兩類殘留污染的程度而定。儘管安全報告並含非屬輻射污染的整治監測內容，但實務上在最終整治監測的規劃與實施必須將輻射危險與非輻射危險一起考慮。SRS 72在第1節是簡介，第2節說明最終整治監測策略的發展概觀。監測策略的規劃、事前準備與選擇列於第3節，提供確認應用的輻射準則、污染物辨識、有關放射性核種的決策、平均面積與偵測單位、監測技術的選擇、儀表議題、不確定度與可信度水準、假設檢定、品質管理程序、所需資源、記錄保存要求、進行監測期間的非輻射危險、考量廠址物理特性的監測最適策略選擇、廠址進出管制、非均質議題與分級方式的應用。

### **整治後的最終監測程序**

在整體整治程序的內容必須有最終整治監測策略的發展。監測策略的發展與實施重要步驟如圖4。依序為規劃、實施、結果評估、符合性決定、正式的結果報告。提出正式的結果報告包括營運者對於廠址解除法規管制後的建議，管制機關必須決定廠址是否符合相關的安全要求與準則。選擇有：(1)非限制使用；(2)限制使用，包括限制的條件；或(3)需要進一步整治。一旦整治完成並符合管制機關要求，營運者就可完成最終整治報告。

圖4說明了整治過程不同階段的監測期間要注重的部份。最終整治監測策略與整治的目標(最終狀態)有關。有些模式已用於規劃廠址對相關放射性核種的特定外釋規範，以界定在最終整治監測所採用設備的偵測能力要求，達成監測目的。



最終整治監測程序係為證明符合整治或廠址外釋準則，為較耗時的程序，因為低程度放射性活度要準確量測以及需要大量的資料以供作為符合準則的基礎。整治準則的最終效益取決於：(1)對該廠址的認知；(2)期望的最終狀態與輻射準則的知識；(3)最終狀態的新動向(非限制或限制使用)；(4)了解證明符合度之決策所關連的不確定度；(5)適當監測技術與設備的選擇；(6)最終整治監測期間產生的資訊之定期檢討；(7)因應非預期監測值升高或儀器問題的措施；(8)有效的品質管理系統；(9)監測方式與結果文件化以供強化調查與總結的可信度。

### 2.13 除役之安全評估-國際方式

全球各地使用放射性物質的設施除役方案數量增加，有些是達到其壽命尾聲，或已經依規劃或在預期壽命到達之前(例如意外事故、政治、社會等其他因素)就永久停機。這些設施規模有大有小，如研究實驗室、研究用反應器、再處理設施、燃料製造設施、核能電廠、採礦與礦物處理設施。最近資料顯示約100個採礦場、140個核能電廠、45座原型反應器、超過250座研究用反應器與許多燃料循環設施已經退休，有些會被完全拆除。為了協助IAEA會員國確保除役期間的安全與協助涉及除役行動的規劃、辦理、管制、終止的營運者、管制者及其他專家，IAEA於2004年11月啟動一個國際專案，稱為“核設施除役期間安全評估與證明(Safety Assessment for the Decommissioning of Facilities Using Radioactive Material)” (DeSa專案)。有來自30個會員國超過50位專家支持和積極參與在：

- 除役之安全評估方法的協調
- 安全評估方法應用至3種設施(一座核能電廠、一座研究用反應器與一間核能實驗室)的論證
- 除役安全評估發展中的分級方法應用之建議
- 除役安全評估的管制審查之建議

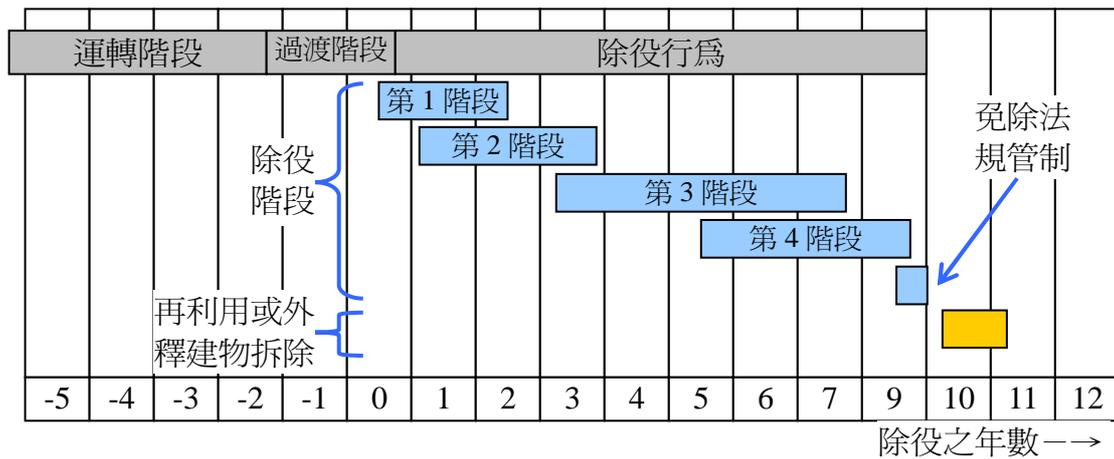
三年期的DeSa專案(2004 - 2007)的成果納入IAEA安全指引WS-G-5.2 “使用放射性物質之設施的除役安全評估(Evaluation and Demonstration of Safety during

Decommissioning of Nuclear Facilities)”，詳細內容則寫在近期出版的安全報告叢書“除役安全評估-核設施除役期間安全評估與證明(DeSa)的國際專案成果”。

DeSa專案於2007年最後一次聯合會議期間，參與夥伴認為並建議需要進一步國際合作與分工在解釋除役規劃與安全評估之間的結構、內容與界面、在規劃與除役辦理時安全評估結果的應用與使用、延後拆除的安全評估以及設施生命週期中安全評估的演進。根據這建議，IAEA於2008年啟動一個新的國際專案-使用放射性物質的設施之除役規劃與實施中安全評估結果的運用(FaSa專案)。FaSa專案的關鍵觀念包括安全評估的運用以及在下列階段的審查：(1)除役規劃；(2)除役辦理；(3)除役終止；(4)安全評估結果、控制與改變管理的實施；(5)安全評估結果、控制與改變管理的實施審查。三年期FaSa專案說明的標準安全評估方法論，是在DeSa專案時所發展的，證實可應用在除役中一般發現的不利情形。其成果發表於IAEA新的安全報告叢書-使用放射性物質的設施之除役規劃與實施中安全評估結果的運用(FaSa專案)。該報告即說明這兩個專案所發展出的除役安全評估之國際方式的部份觀念概要。在第2節則簡短探討除役安全評估與除役規劃之間關係概要。第3節則是DePa專案提出的通用多步驟安全評估方法論，第4節解釋了多階段除役專案的除役安全評估進展。

### **安全評估與除役規劃概要**

依IAEA要求與WS-G-5.2及WS-R-5指引，除役安全評估應能支持最終除役計畫，因此需要納入最終除役計畫或成爲一系列安全支持文件的一部份。對於大、複雜與長期專案常常採用多階段方式(參考圖5)。經驗回饋顯示多階段方式能應用在任何除役策略，不論核設施種類、許可程序及專案時程表。每一階段反映出除役行動的不同範疇。多階段方式的好處是第1階段能撰寫詳細，以取得許可或讓管制機關批准，而接下來各階段的細節仍在撰寫中。如此，初期除役行動得以在取得許可/批准後即可立即開始，營運者可繼續並行下一階段工作的細部規劃。此外，多階段方式在規劃上較有彈性且可因應新的情況(新資訊、技術發展、由之前實施階段獲得的最新經驗)。在許可/批准下一階段前易於變更計畫。



過渡期	除役的準備活動，包括 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 用過燃料移出</li> <li>• 系統除污</li> <li>• 運轉期間產生的放射性介質移除與處置</li> </ul>
第 1 階段	污染組件首次拆除以取得後續拆除活動的運用空間，包括 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 設備氣閘與空氣-再循環系統(裝修/替換)</li> <li>• 洩水槽</li> <li>• 控制棒導管與驅動裝置的外部成份</li> <li>• 蓄壓器</li> </ul> 同時進行：位後續拆除活動設置需要的基礎設施
第 2 階段	大量組件拆除，包括 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 一次側冷卻迴路管路及主冷凝泵</li> <li>• 蒸汽產生器</li> </ul>
第 3 階段	活化系統與組件拆除，包括 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 反應壓力容器內部組件</li> <li>• 反應壓力容器</li> <li>• 生物屏蔽牆</li> <li>• 混凝土橫樑</li> <li>• 用過燃料池的格架</li> </ul>
第 4 階段	剩下的系統與組件拆除 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 吊車</li> <li>• 燃料填換平台</li> <li>• 通風系統</li> <li>• 水處理廠</li> </ul>
免除法規管制	建物與廠址解除管制
事後	再利用或外釋建物拆除

圖5：NPP的多階段除役專案範例

對於多階段專案，安全的評估是依循各階段規劃的除役行動程序。實務上顯示需要實施兩種安全評估以證實安全性：

1. 總體安全評估(OSA)：OSA是除役專案所有階段安全性的證明，不涉及各單獨階段，

確保整體專案的安全性。因此OSA無須如各階段安全評估一般的詳細。

2. 最終安全評估(FSA)：對每一階段，該階段除役行動的開端之前必須執行足夠詳盡的最終安全評估以證實安全性得以確保。

上述兩種安全評估皆需要有系統地、合於邏輯且透明的方法論，尤其必須考量到每一階段的開始與結束點。

### 除役安全評估的通用方法論

基於IAEA會員國的實務經驗，使用放射性物質之設施的除役安全評估方法論於DeSa專案期間發展出來。安全評估的主要目的是識別在正常除役營運期間與可能發生潛在事故狀態期間的危險，確認預防、排除、減緩危險及其後果的工程與行政管制措施，根據安全規範減低危險風險及確認有適當地合理抑低(ALARA)作為。儘管發展時專注於核能及輻射危險及它們對民眾與工作人員的影響，此方法論亦能用於考量傳統危險，特別是除役專案的過程中對於工作人員有比核能及輻射危險還高者。圖6呈現除役安全評估反覆式方法論的主要步驟：

1. 安全評估架構的確認

安全評估程序的初始步驟當作條件確認，設置安全評估進行的外框。因此步驟裡在除役期間所有管制條件、安全要求與規範都要考慮到，並確認與說明。在後面的評估步驟，進行安全評估結果對應這些安全要求及規範的符合度。因此由於需求考量，提供正確與完整的要求與規範摘要。在此步驟中，主要除役行動與對應的專案各階段，將受安全評估的限制，同要摘要出來，包括別階段的完結點與整體除役專案的最終結束狀態。此步驟也需要描述應用的安全評估方法論及解說安全評估產生的輸出訊息。

2. 設施與除役行動的描述

此步驟是設施與準備之除役行動的描述。設施的描述需要涵蓋設施的那些方面，包括執行安全評估時需要的輸入廠址資訊。因此需要提供氣候、廠址水文或周圍人口群體的資訊，設施的設計方面亦同，包括安全相關的系統、結構和組件以及設施的放射性存量清單。描述可包含相關資料的摘要，並有連結到現有文件的詳

細資訊。關於除役的行動，在一個給定的專案階段裡所有規劃的行動若要受評估，需要加以說明。描述應盡可能詳細，以符合安全評估需求。說明亦可為規劃除役行動行動的摘要，有額外連結到相關的文件，文件對已規劃之除役行動有更詳細的說明。

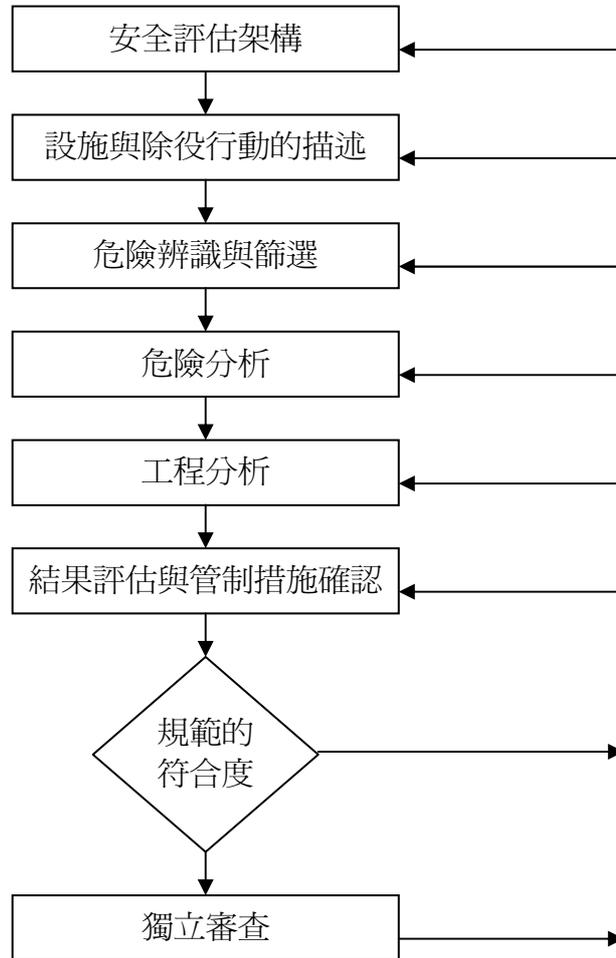


圖6：除役安全評估的方法論之主要步驟

### 3. 危險辨識與篩選

此步驟裡，確認在除役行動期間與發生事故狀態下可能影響工作人員、公眾、環境的現有與未來的危險(含輻射與非輻射)。所有合理而可預見的始發事件和事故情節下可能造成的危險，需要確定以進行評估。在確認危險後，始發事件和事故情節，應執行第一次危險與情節篩選評估，以確認那些危險與情節對安全性有明顯威脅，以至它們需要進行安全評估下一步驟-更詳細的評估。依據設施複雜度與關聯的危險，篩選結果可為危險或情節的大清單或有限清單，以對已規劃除役活動的安全

性進行保守評估。

#### 4. 危險評估

基於之前步驟的成果，再執行相關危險與情節的詳細分析。對於每個危險與其情節而言，是關於已規劃除役活動的安全性影響，但對於任何失效與事故情節也要分析。正常(已規劃)行動與事故的分析係針對工作人員、公眾與環境的後果。因此要知道放射性排放對工作人員與公眾造成的劑量。需要必要的安全功能以確保分析期間的安全性。根據正常與異常/事故情節的後果分析，安全功能得要求要具體且工程及行政安全措施要初步確定以提供必要的安全功能。安全措施의詳細確認是在安全分析程序的下面步驟執行。這分析通常根據確定性方法論，但隨特定除役專案的複雜度而定，或應用機率性方法論也屬適當。

#### 5. 工程分析

在此步驟裡，之前確認的工程安全措施依技術設計與性質來分析。安全相關系統、結構、組件(SSCs)與適當工程規範與標準的符合度，以及安全功能重要性的相稱度(若失效時未減緩的後果)要評估。現有SSCs是否適當與足以提供危險分析時所假設的安全功能也要分析，它們是否能達到要求劑量與風險降低至適當的信賴水準。

#### 6. 結果評估與管制措施確認

安全評估作為證明管制要求的符合度與確認那些必要的管制措施，以確保風險適度地降低，使除役可安全地完成。因此安全評估的結果一般會依照所應用的安全措施來調整，直到管制規範與需求能符合風險的合理抑低。在此步驟裡，管制措施的角色已經被確立並初步具體化。此時又利用敏感度分析來確定與評估那些會高度影響評估結果的參數及數值。若輸出結果對於所假設的輸入參數特別敏感，需要降低不確定性，重作一部份安全評估。這步驟的輸出結果是所有安全分析結果的集合，反映管制規範與需求、相關風險與情節及關聯的安全措施的整體呈現。

#### 7. 安全評估結果與管制要求及規範的符合度

若安全評估的結果無法證明管制要求與規範的符合度，則評估應根據圖6的架構來修訂。結果應能用在對現有除役策略、規劃或行動提出修正，工程策略與防護安

全策略亦同，確認額外的安全措施能符合安全要求與規範。不確定度應加以降低。若除役計畫被修訂，則安全評估亦應隨之審閱或視需要來修訂更新。

#### 8. 營運者辦理的獨立審查

在完成安全評估之前或提報給管制機構審查之前，應由營運者或其代表人辦理獨立審查。營運者辦理的獨立審查應確保輸入資料與採用的假設是有效的，能準確地評估反映設施真實狀態與將執行的除役行動，且由安全評估導出的安全措施適合其除役計畫。一般獨立審查不能被管制機構的審查所取代，管制機構的審查係為驗證安全評估符合管制要求，以及確認安全評估提供足夠資訊以支持除役準備的要求。管制機構審查的審查結果會形成管制程序的一部份。

根據安全評估程序中個別步驟的輸出結果，有回到前一步驟的必要，以調整假設或計算方法或甚至是再重新開始將進行的除役行動規劃修正。因此這裡描述的方法論提供反覆式系統，通常要進行數次直到符合所有規範，並經獨立審查確信為正當且高品質的結果。方法論提供一個通用系統性安全評估框架，方法論中個別步驟可有較寬廣的特定方式、計算與評估方法選擇。例如，安全評估的確定性方式常能適當地呈現危險與相關的輻射性後果，以確認作為深度防禦防護層的安全策略；然而，機率性方式或也能輔助確認。

最好的做法是調整安全評估的詳細程度，以保持在正常和事故情節下的危險與對應之已規劃除役行動相稱。這個概念在國際上稱為分級方法，並可以很容易地應用到安全評估方法論的每一步驟。過程中每一步驟皆可被分級。例如國家法規可能要求排放必須符合法規表列放射活度排放限值(貝克/年)表或對民眾為1 毫西弗/年 的劑量限值；第二項規範需要較為費力以證明一個不算複雜的核設施能符合，而依據分級方式觀念，排放限值表的應用較可能且適合。除役安全評估的分級方式應用說明與細節可參考“除役安全評估-核設施除役期間安全評估與證明(DeSa)的國際專案成果”。

#### 除役執行期間安全評估之演變

前面提到對一個除役專案而言，需要總體安全評估(OSA)與最終安全評估(FSA)。OSA專注在證實整體除役專案能安全地執行。接著，每一階段的最終(即詳細)安全評

估發展的總目標是確認哪些相關的安全措施是必要的。OSA與除役專案相關的最終除役計畫預期能提供下列重要資訊：除役策略與最終狀態、主要階段與對應的安全議題、相關的時程表、廢棄物管理計畫。經驗顯示支持最終除役計畫的OSA之內容與內文專注在除役方案的主要安全議題判定與確認。特別是其目的係提供技術資訊給管制機構發給除役許可，這是必要的，如除役策略判別、主要階段的確認、對應的規劃、主要安全議題及除役目的和相關的規範。除役方案的每一階段主要安全議題的確認有助於管制機關管理許可程序，依里程碑發給單一階段許可，也許可以特別許可或多階段許可。它將協助管制機關建立許可條件，營運者必須完全遵守。OSA是FSA編寫的起始依據，以連貫每一階段，提供關於個別階段之最終安全分析的參考。這種做法被普遍認可，以掌握除役專案的最新動態。每一階段完成後或對安全性影響有不一致之處就加以更新。對營運者而言，較好的做法就是持續更新OSA。

如之前提到，多階段方式有益於FSA的發展。這可讓營運者納入新的資料，例如更新的技術、由之前階段學到的教訓，以發展更為實際的安全評估。這方是說明於圖7，總結之前發展的主要觀念，並在提出分階段方式時提供實施整個除役方案的路線範例。安全文件性的發展(左邊)與分階段方式(右邊)之間有連結。另提供應該採取什麼樣的發展、演進和更新的安全文件之示意圖(圖7)。基於總體安全評估的輸出結果，要涵蓋專案所有階段，營運者必須對每一階段發展詳細的安全評估：

- 管理除役專案的演進及涉及每一階段的特定議題細節
- 保持完整除役專案的最新安全評估，以反映除役過程中作的修訂

多階段FSA的範疇與細節做法如圖7之發展程序。安全評估的撰寫必須漸進地執行，考量到所有安全性、輻射防護與廢棄物管理議題，以及除役的編制方面(設施整修、人員訓練、員工管理等)。因此逐步成形的安全評估有助於最適化工作方式，視危險與對該階段後果的複雜度而定。這些技術研究的主要目的是確認所選擇技術的可行性並加以強化。圖8說明不同階段、不同時刻開始的最終安全評估演進示意圖。這顯示由經驗回饋、事件與/或事故、拆除作業中的過程所收集而成之新資料，或可對設施的輻射存量清單有更佳的知識。這些新資料可能涉及下一階段相關的安全評估發展。

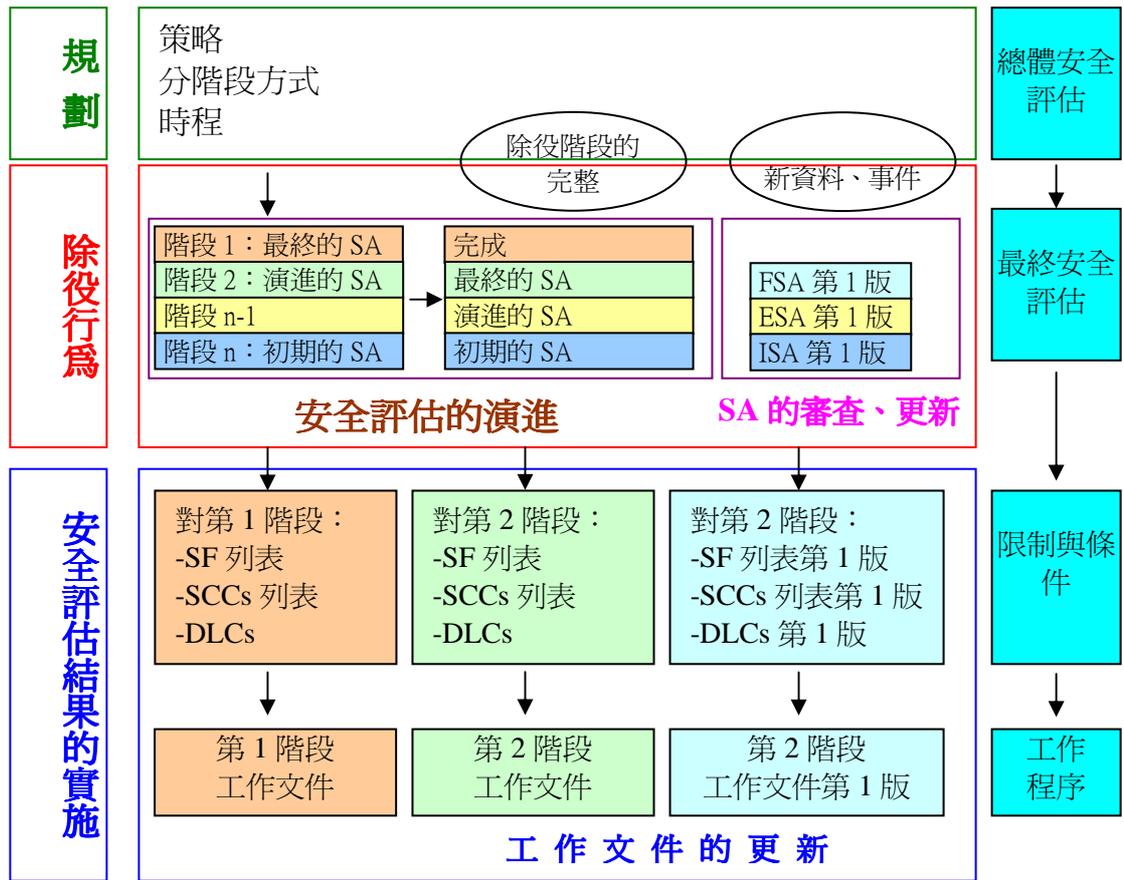


圖7：多階段除役專案中安全評估的應用

圖8已經說明在第1階段除役工作開始前，第1階段的FSA通常必須可用，此時第2階段的FSA還在編撰中，成為演進中的第2階段安全評估。在第1階段進行時，演進中的第2階段安全評估會進展到變成第2階段安全評估，並在第2階段除役工作開始前可供採用。根據國家管制體系，第1階段的OSA與FSA可在營運終了以及設施過渡期(亦即在除役許可批准之前)時編撰。圖8顯示永久停機至除役行動開始之間有一過渡期。一般在過渡期，管制機構會審查最終除役計畫。不論如何，除役的準備工作可在過渡期進行，且實務上可在於運轉許可的條件下執行。另可觀察到：

- 分階段方式的實施也能應用不同階段平行進行
- 不論一分階段方式的規劃與時程，每一階段的最後狀態要定義清楚以將一階段的決策程序移到到另一階段

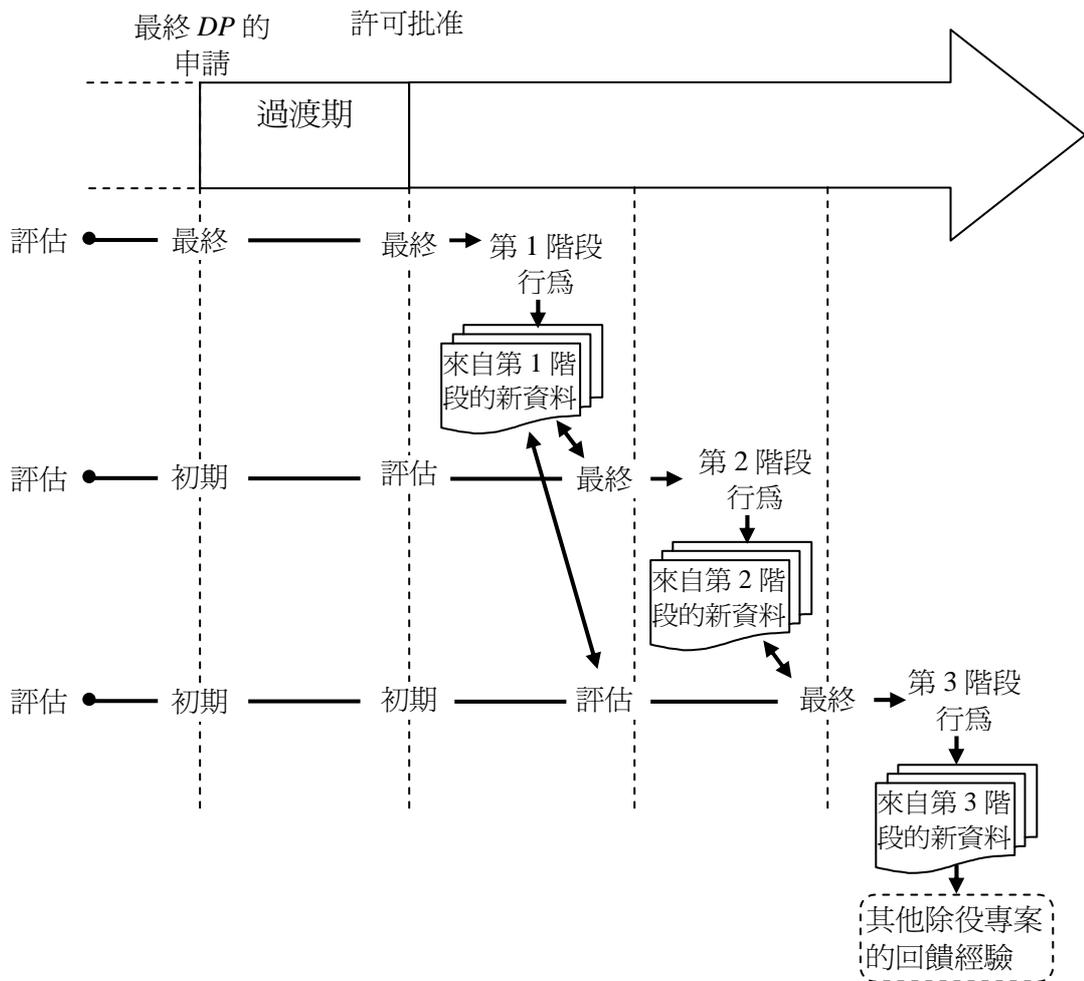


圖8：一個3階段除役專案的安全評估演進說明(DP-除役計畫，SA-安全評估)

在使用放射性物質的設施之除役安全評估方面，IAEA藉由這兩個國際專案DeSa (2004 - 2007)與FaSa(2008 - 2011)形成國際能接受的方法論。而IAEA安全指引WS-G-5.2總結了DeSa專案發展的方法論 - 如何執行除役的安全評估與如何審查其結果。FaSa專案在設施壽命期間安全評估的演進以及安全評估結果實施方面提供更為詳盡的細節。除役的安全評估核心是基於：

- 評估架構的說明
- 首度篩選除役專案的危險與情節
- 安全功能的確認與相關工程及行政安全措施の確認
- 規範符合性檢查，以驗證管制規範和要求得以滿足
- 辦理獨立審查，作為營運者執行過程中的一部分

評估與證實安全性的方法論受分階段方式的限制，但對個別除役專案的危險及安全性

威脅能適當地評估。多階段除役專案的案例中，安全評估方法論可應用在不同的專案階段與不同的詳細程度。在大而複雜之除役專案，其安全評估演進過程能提供彈性，這是採多階段方式的主要理由之一。

## 2.14 以無人直升機進行輻射地圖繪製

福島意外事故顯示大區域輻射地圖繪製的必要性，包括人員難以到達地區，如荒野、高樓林立的城市。法國Onet Tech.公司利用現有與已經驗證的陸地自動地圖繪製技術發展飛行監測。2003年Onet Tech.公司已發展全表面輻射地圖繪製(CRTT)，利用很高解析度的加馬偵檢儀(塑膠閃爍體)架在地面載具上，搭配GPS(全球定位)裝置，一旦開始掃描地面，就能自動化地繪製輻射地圖，避免繪製錯誤。這種技術的偵測下限很低，約500 Bq/m<sup>2</sup>或對一熱點為800 Bq。此技術已成功應用在巴黎近郊CEA負責的廠址，以及作為EdF之NPP廠址的年度管制手段。

藉由CRTT的經驗，利用搭配小型偵檢器(NaI閃爍體，3" x3")的無人直升機，將輻射資料與定位資料結合原理導入。偵檢器提供能譜量測以供分辨人造核種(Cs-134、Cs-137)與背景(宇宙射線、天然放射性核種)。直升機穩定性對於地圖繪製解析度有很大影響，若需要高解析度(標準為10 m，或可更低)，直升機要飛得更低。高解析度需要穩定的飛行，低飛時首先要避免墜機，因此選擇Survey Copter公司提供的自動駕駛直升機，其飛行能力在風速15 m/s時的穩定性高於1 m。機上自動駕駛可由遙控者領航，只需經一週的訓練即可操作。透過搖桿進行基本地操控如向左、向右、向上、向下，遠端遙控直升機。若採自動飛行理論上可行，可對一界定好範圍的區域進行徹底掃描。裝有攝影機的無人駕駛直升機，遙控者無須親自看到現場而能遠端領航。該公司曾在法國Pierrelatte航站以密封的Cs-137射源進行真實狀況測試。

城市的輻射地圖繪製也應有需求性，但飛行監測儀的設計受限於幾何複雜度而有些困難。由於量測訊號與背景干擾訊號的來源(放射性核種)可能相同，只靠能譜分析是很難將要量測訊號由背景中分離出來，必須藉助厚重屏蔽。另外監測有時必須垂直

掃描(建物牆面)，有時須標準掃描(街道、建物屋頂)，直升機的穩定性相當重要，以能很接近量測表面(最多相距3~5 m)。

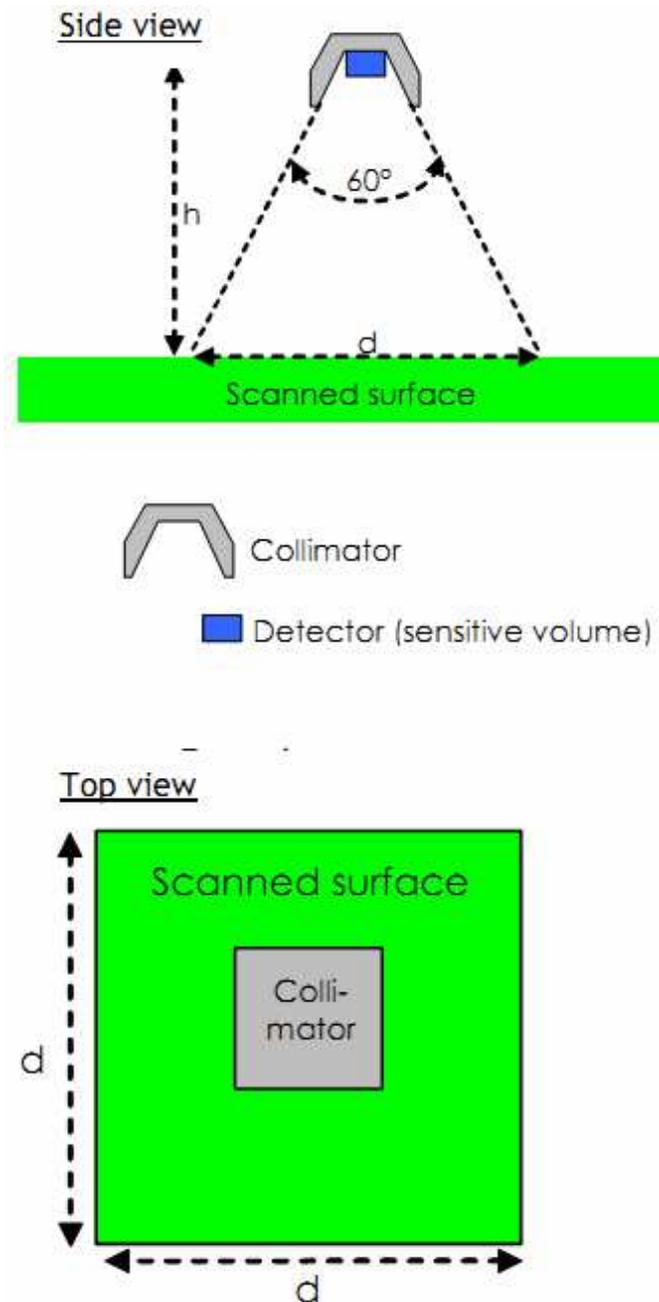


圖 9：空間解析度等於飛行高度



圖 10：在風速 15 m/s 時的飛行監測



圖 11：輻射製圖的即時成果

表 性能與飛行高度

飛行高度 (m)	空間解析度 (m)	偵測極限 (Bq/cm <sup>2</sup> , <sup>137</sup> Cs)	掃描率 (km <sup>2</sup> /h)
3	3x3	2.5	0.0052
10	10x10	2.6	0.058
30	30x30	2.8	0.52

以無人直升機進行輻射地圖繪製證明是可行的，能以高掃描率、低偵測下限與高解析度繪製廣大的表面範圍。相較於有人駕駛直升機，可避免墜機風險與燃油消耗，並能在較低的飛行高度執行。城市的輻射地圖繪製較不易做到，但仍有可能達成。

## 2.15 IAEA在事故後的除役及環境整治議題方面的近期作為

嚴重核子事故後的除役與環境整治若由許多面向(例如技術、安全、管制、財務、社會、經濟等)來看，是個非常複雜的議題。除役與環境整治方案的重要觀念需要重新評估方能考慮周全。包括除役與環境整治的替代策略評估、標準與新技術的部署、輻射及一般安全要求的增加、複雜的方案管理、充足資金的確保、龐大數量的放射性廢棄物管理。IAEA協助會員國在核子事故領域的除役與整治，例如提供相關出版品、技術合作方案的實施、核能安全行動計畫下的組織活動。IAEA將過去反應器事故的經驗寫在技術報告叢書(TRS)裡，有些建議可能過時了，如事故後狀態的描述最近因福島事故而對過去文件提及的採取步驟與策略討論有個重要的開始。相關的IAEA技術出版品如下：

- 核子事故造成大範圍污染的清理(Clean-up of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident) (TRS No. 300, 1989)
- 嚴重受損核子燃料與相關廢棄物的管理(Management of Severely Damaged Nuclear Fuel and Related Waste) (TRS No. 321, 1991)
- 核子事故造成大範圍污染的清理規劃(Planning for Clean-up of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident) (TRS No. 327,1991)
- 核子事故造成大範圍污染的清理所產生的廢棄物處置(Disposal of Waste from the Clean-up of Large Areas Contaminated as a Result of a Nuclear Accident) (TRS No. 330, 1992)
- 嚴重事故後核反應器之除役與清理(Clean-up and Decommissioning of a Nuclear Reactor after a Severe Accident) (TRS No. 346, 1992)
- 核設施除役的遠端操作處理設備之應用(Application of remotely operated handling equipment in the decommissioning of nuclear facilities) (TRS No. 348, 1993)

這些報告之中有些已經更新，有些則配合未來有其他因福島事故而準備的出版品來補充，許多準備中的報告內容會更新來納入嚴重核子事故後除役的相關方面資訊。另IAEA有關整治與除役的安全標準如下：

- 輻射源的輻射防護與安全：國際基本安全標準-過渡版，一般安全要求第3部份，簡稱為BSS。
- 使用放射性物質之設施的除役，IAEA安全標準叢書，S-R-5 (2006)。

整治的安全要求涵蓋了BBS第5節的即存曝露情節。根據BBS第5節延伸了各式安全指引，其一為IAEA安全標準叢書WS-G-3.1(2006)受過去活動或意外事故影響的地區之整治程序。Ws-R-5的安全要求正在改版，儘管有些是為正常除役情況所發展的，但能調整適用到事故情況。

意外事故發生後，環境整治活動的範圍主要取決於事故的類型，事故可能會，也可能不會導致意外的放射性廢水排放到環境。以幾個嚴重的核事故(例如三哩島)為例，只有核設施的內部區域被污染時，環境整治活動可能限制在設施的邊界內。但建議加強周邊地區的輻射監測，以確認環境不受影響，而不需要額外的整治措施。事故發生後，若有放射性污水排放至周邊地區的環境整治，會是一個嚴肅的技術、社會和經濟問題。它不僅會影響事故發生的國家，也可能透過意外排放而影響到鄰近國家。最嚴重核事故(車諾比爾和日本福島縣)的環境整治需要長期的努力，並規劃最適方式來實施。其意外後復原策略的一部分，還包括環境整治活動所產生大量廢棄物的管理。

## 四、建議

本次公差建議事項條列如下：

- 1、廠址輻射特性調查係除役之關鍵步驟，並非只是單純偵測與取樣，還包括廠址過去的歷史調查、污染程度與範圍之評估，以供後續除役作業方式、防護與安全評估、經費等等的決策之用。雖廠址輻射特性調查因各核設施特性不同而有很大差異，但本會仍可參考本次出國所得資料，作為未來訂定除役計畫有關廠址輻射特性調查章節的內容說明，以及審查的原則性規定。
- 2、IAEA對除役計畫之安全評估指引可提供各國執行除役計畫功能評估的參考，協助各國採取有效的措施以達到高標準的除役安全，故國內亦可參考該文件，考量本國國情，研訂本會對於除役之輻射安全方面的要求項目及評估規範，並可參考他國的除役經驗，以及安全評估之方法，要求業者採取最適化的除役管理。
- 3、依國外除役經驗顯示，除役計畫於執行時可能需要根據實際情形而調整，這也是部份國家採除役多階段方式審查與許可的原因之一，我國法規上採一次性審查許可，建議在審查除役計畫時，考量保有除役計畫修訂的彈性。

## 五、附件

會議出席證

