

出國報告（出國類別：研究）

# 福島核子事故放射性廢棄物 之管理研究

服務機關：行政院原子能委員會  
放射性物料管理局

姓名職稱：張明倉薦任技正

派赴國家：日本

報告日期：102年12月06日

出國時間：102年6月20日至102年9月17日

## 摘要

本次出國研究是經由行政院人事總處 102 年度選送公務人員出國專題研究計畫，派赴日本進行「福島核子事故放射性廢棄物之管理研究」，研究機構為位於日本千葉縣的電力中央研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)。

日本 2011 年 3 月 11 日發生了福島核電廠核子事故，產生了大量的放射性廢棄物，雖然處理的難度高，但經由不斷的檢討及改善，目前已逐步建立相關的處理管理機制，可供參考。本次赴日本進行核災事故放射性廢棄物之專題研究有二項主題，分別為：

- 1.核災後福島核電廠區外之放射性廢棄物管理: 探討數量龐大的廠外放射性廢棄物分類方法、偵測儀器、判定標準，放射性廢棄物量估算方法，災區放射性廢棄物處理體制，放射性廢棄物協同處理模式，廢棄物再利用可行性評估，及放射性廢棄物處理之管理模式等。
- 2.核災後福島核電廠內之放射性廢水處理研究: 探討核電廠對於核災事故後核電廠內放射性污染廢水量評估、放射性廢水處理流程及考量因素、廢水處理設備功能要件、放射性廢水處理模擬技術、放射性廢水處理管理模式等相關雛型。

藉由學習日本福島經驗探討我國核災事故復原階段放射性廢棄物處理技術及管理哲學，面對未來的可能風險、預為構建前瞻的因應之道，以提高緊急應變效率。

## 目録

一、	目的.....	3
二、	過程.....	5
	(一) 行程概要.....	6
	(二) 研究與參訪概要.....	7
三、	心得.....	21
四、	建議事項.....	52
五、	附件	
	(一) 我國「核子事故復原階段放射性污染廢棄物清理原則」	
	(二) 平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法（簡稱特別措置法）	
	(三) 福島第一核電廠汽機廠房放射性廢水核種分析	

## 一、目的

2011 年 3 月 11 日本福島核電廠，受到規模 9 級的東日本大地震及超過 15 公尺的海嘯襲擊，福島第一核電廠發生核災事故而外釋大量的放射性物質，事故造成的輻射污染嚴重衝擊超過方圓數百公里的廣大地區，在核電廠內及核電廠外都產生數量龐大、劑量不一的放射性廢棄物。由於放射性廢棄物具有輻射特性不同於一般垃圾，其後續妥善處理及管制工作都需另有技術層面及輻射防護考量，也對核災事故後之復原階段工作造成相當的難度。

本次專題研究係經行政院核准錄取「102 年度選送公務人員出國專題研究計畫」正取人員並奉行政院人事總處核准出國專題研究計畫執行書，派赴日本進行「福島核子事故放射性廢棄物之管理研究」，研究執行所在機構係位於日本千葉縣之電力中央研究所(Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI)。專題研究共進行二項主題研究，分別為 1. 福島核災後核電廠區外之放射性廢棄物管理研究，2. 核災後福島核電廠內之放射性廢水處理研究，各主題相關研究項目如下：

### (一)、福島核災後核電廠區外之放射性廢棄物管理研究

1. 放射性廢棄物處理之管理模式
2. 災區放射性廢棄物處理體系
3. 廠外放射性污染之鑑別、廢棄物之分類方法、使用之偵測儀器與污染及處理之判定標準
4. 廠外放射性廢棄物量估算

5. 地方自治體自行處理之規劃與執行
6. 尋求其他自治團體協同處理模式
7. 廢棄物再利用可行性評估

## (二) 核災後福島核電廠內之放射性廢水處理研究

1. 放射性污染廢水量的預估及先期處理規劃
2. 廠內原有放射性廢水處理系統之使用檢討
3. 新增廢水處理系統之規劃與建置
4. 整體廢水處理系統之整合、建制與規劃
5. 實際運作之檢視與檢討
6. 日本原子力保安院與東京電力公司之管制管理機制

他山之石、可以攻錯，藉由此次專題研究學習日本福島事故的放射性廢棄物處理技術及管理方式，汲取寶貴的實際經驗與最新技術，探討核子事故放射性廢棄物管理制度及處理技術，對於未來的可能風險，先期建立正確的方法，以避免資源浪費並提高緊急應變效率。

## 二、過程

(一) 行程概要

(二) 研究與參訪概要

## (一) 行程概要

本次赴日本電力中央研究所進行「福島核子事故放射性廢棄物之管理研究」專題研究行程如下所示:

日期	地點	活動內容
6月20日(四)	台灣飛抵日本	抵達東京、赴電力中央研究所拜會所長等主管、展開專題研究啟始會議
6月21日(五)	千葉縣	電力中央研究所簡介並參觀核燃料循環後端研究中心研究設備及儀器
6月22日(六)至7月31日(三)	千葉縣	福島核災後核電廠區外之放射性廢棄物管理研究
8月1日(四)	青森縣	參訪日本原燃株式會社(Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)六ヶ所村核燃料循環設施
8月2日(五)至8月25日(日)	千葉縣	核災後福島核電廠內之放射性廢水處理研究
8月26日(一)	靜岡縣	參訪中部電力公司浜岡核電廠
8月27日(二)至8月29日(四)	千葉縣	福島核災後核電廠區外之放射性廢棄物管理研究

8月30日(五)	神奈川縣	參訪電力中央研究所橫須賀深層地質 處置技術驗證場
8月31日(六) 至9月12日(三)	千葉縣	核災後福島核電廠內之放射性廢水處 理研究
9月13日(五)	東京都	拜會日本原子力發電環境整備機構 (Nuclear Waste Management Organization, NUMO)
9月14日(六) 至9月16日(一)	千葉縣	整理研究資料
9月17日(二)	日本飛返台灣	電力中央研究所辭行、返還台北

## (二) 研究與參訪概要

六月二十日

飛抵日本後，隨即前往此次研究所在機構 – 千葉縣電力中央研究所 (CRIEPI)，首先拜會地球工學研究所所長金谷守(Mamoru Kanatani)博士、環境科學研究所所長水鳥雅文(Masafumi Miautori)博士、核燃料循環後端研究中心主任伊藤千浩(Chihiro Itoh)博士、核燃料循環後端研究中心副主任宮川公雄(Kimio Miyakawa)博士、核燃料循環後端研究中心前主任河西基(Motoi Kawanishi)博士(現為電力中央研究所顧問、東京電力公司福島核電廠廢水處理委員會委員；亦為日方安排專案研究之重要負責人)、核燃料循環後端研究中心上席研究員新孝一(Koichi Shin)博士，並自我介紹與此行目的。

拜會相關人員之後，隨即與 Motoi Kawanishi 博士、Chihiro Itoh 博士、Koichi Shin 博士在所區內，就本研究專題「福島核子事故放射性廢棄物之管理研究」展開啟始會議，首先由我報告此次專題研究之二項研究主題：「福島核災後核電廠區外之放射性廢棄物管理研究」及「核災後福島核電廠內之放射性廢水處理研究」研究內容及研究項目大意，並與所方人員討論整體研究架構、研究進行方式與後續作業模式。

六月二十一日

由 Motoi Kawanishi 博士介紹電力中央研究所歷史緣由、組織架構及院區，並帶領認識電力中央研究所園區環境及主要相關研究室。該研究所係於 1951 年由日本九家主要電力公司：北海道電力公司、東北電力公司、東京電力公司、中部電力公司、北陸電力公司、關西電力公司、中国電力公司、四国電力公司、九州電力公司等共同出資設立，其設立目的係為深化電力科技知識，並對公共電力

所需的電力技術和經濟知識進行研究與測試，促進電力事業發展。

電力中央研究所共有四個院區、七個研究所、三個研究中心及三個技術試驗場，其院區分別位於東京都千代田區、東京都狛江市、千葉縣我孫子市及神奈川縣橫須賀市，七個研究所分別為系統技術研究所、原子力技術研究所、地球工學研究所、環境科學研究所、電力技術研究所、能源技術研究所、材料科學研究所等分布於四個院區內，三個研究中心則為輻射安全研究中心、人因工程研究中心及核燃料循環後端研究中心，另外三個技術試驗場為大電力試驗場、塩原實驗場及赤城試驗中心。

簡介完後，Motoi Kawanishi 博士並引導參觀核燃料循環後端研究中心的相關實驗室及研究設備，包括地下水同位素定年實驗室、膨潤土研究實驗室、混凝土實驗室、地工實驗室、岩石力學實驗室、化學分析實驗室、地震模擬設備等，其中地下水同位素定年技術及設備為電力中央研究所自行研發完成，利用同位素氯-36 半化期長達 31 萬年的特點，分析深層地質地下水中同位素氯-36 的含量及年代，做為探討深層地質處置場址穩定性的定年評估工具之一。

### 參訪日本原燃株式會社(Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)六ヶ所村核燃料循環設施

8 月 1 日上午由 Motoi Kawanishi 博士陪同，由青森縣三澤市前往小川原地區六ヶ所村（車程約 1 小時），參訪日本原燃株式會社(JNFL)設置於六ヶ所村的核燃料循環設施廠區及拜會廠區內設施人員，參訪設施包括有低放射性廢棄物處置場、玻璃化高放射性廢棄物貯存場、用過核燃料再處理廠(尚未正式商轉營運)、用過核燃料接收及貯存廠、MOX 核燃料製造廠(尚未正式商轉營運)、放射性廢棄物次地表處置研究實驗場等設施，相關設施配置圖如圖 1 所示。



圖 1 六ヶ所村的核燃料循環設施配置圖

1960 年代日本政府原將青森縣小川原地區規劃為石化工業區，設置戰備石油槽，容量可供全日本 7 日之用，但 1972 年後由於石油危機造成石化工業萎縮，業界無擴展意願，因而造成該工業區廣大面積閒置。不過由於小川原地區岩盤穩固、地質良好，加上鄰近具備港口可以提供方便的海上運輸，在當地居民同意下，該區 1984 年規劃作為核燃料循環設施用地，1985 年核准作為低放射性廢棄物最終處置場及鈾濃縮廠，1992 年鈾濃縮廠及低放射性廢棄物處置場開始運轉，並陸續興建用過核燃料再處理廠、玻璃固化高放射性廢棄物貯存中心及用過核燃料接收貯存設施，2007 年開始興建 MOX 燃料製造廠。

抵達參訪廠區時，首先拜會低放射性廢棄物處置場設施人員，包括埋設事業部長小栗第一郎(Daiichirou Oguri)、埋設計画部長加藤和之(Kazuyuki Katou)博士、埋設計画原価契約部長柿花英章(Hideaki Kakihana)、埋設計画部副長竹越恒則、開發設計部副部長高橋美昭(Yoshiaki Takahashi)、開發設計部進士喜英(Yoshihide Shinshi)博士等人，再由埋設計画部長 Kazuyuki Katou 博士陪同一行人

參訪核燃料循環設施。

日本核電廠運轉及維護所產生之放射性廢棄物一般分為三類，第一類為污染之工作服、手套、去污之紙布等歸類為可燃廢棄物，經焚化處理後將焚化灰渣予以固化裝桶；第二類為檢修後更換下之管路、泵等不可燃廢棄物，經壓縮、切割或熔融後予以裝桶；第三類為核電廠水質處理後產生之放射性液體廢棄物，經濃縮處理程序後，將淨水回收最為循環冷卻用水或經偵測無污染之虞後排放，濃縮廢液則以水泥或聚合物固化後裝桶，各電廠所產生之低放射性廢棄物皆暫存於廠區之貯存設施內。

六ヶ所村低放射性廢棄物處置場採分階段、分期施工原則，最大設計容量為 60 萬立方公尺，約可處置 300 萬桶低放射性放射性廢棄物。目前已完成 1 號處置場及 2 號處置場建置(如圖 2)，以地下壕溝方式將低放射性廢棄物貯存桶堆置後，再澆灌混凝土或泥漿混合物等填充材成為類塊狀立方體露天堆置，填充材可以包封固定貯存桶並提供輻射屏蔽作用，場區內有地面水及地下水監測站，周界也有環境輻射監測站。1 號處置場於 1990 年開始興建、1992 年開始接收廢棄物，主要接收各核電廠運轉產生之放射性廢液或殘渣，截至 2013 年 6 月已處置 14 萬 7 千餘桶低放射性放射性廢棄物；2 號處置場 1998 年開始施工、2000 年開始接收廢棄物，至 2013 年 6 月已處置約 10 萬 9 千餘桶低放射性放射性廢棄物。

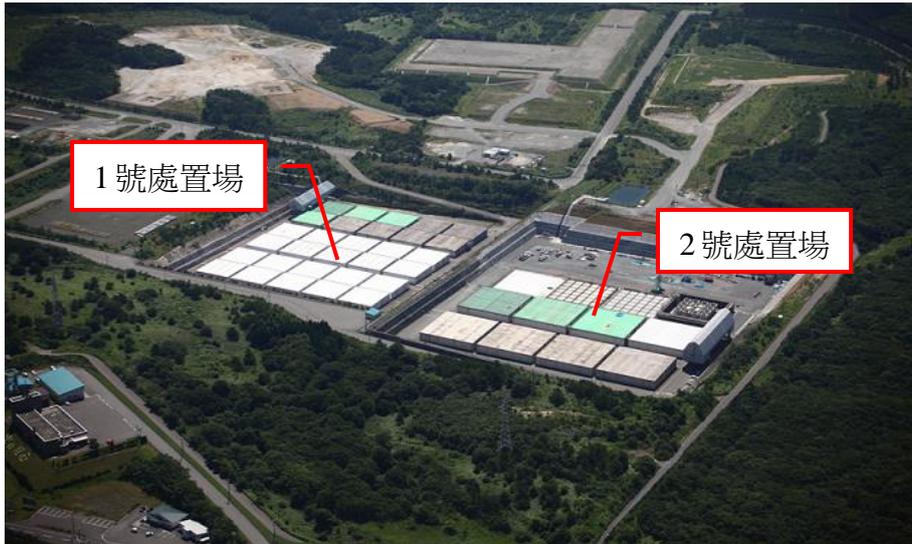


圖 2 六ヶ所村低放射性廢棄物處置場

六ヶ所村低放射性廢棄物處置場係採分階段管理的安全防護概念，第一階段為處置場運轉期間的安全防護，主要以工程障壁及人員監督為防護主體，時程約 25 至 35 年；第二階段為處置場封閉期間的安全防護，主要以工程障壁、人員監督及天然障壁為防護主體，時程約 30 年；第三階段為處置場監管期間的安全防護，主要以天然障壁為防護主體，時程為處置場封閉後 300 年，這段期間僅限制處置區的開挖行為。

JNFL 鈾濃縮廠於 1992 年開始運轉，每年處理量約為 700 ton-SWU，可提供日本核電廠約 7%~8%核燃料。天然鈾中含有 U-238 及 U-235，中子撞擊 U-235 後會產生核分裂反應釋出能量，U-238 則不會，但天然鈾中 U-235 僅佔 0.711%，必須加以濃縮達到適當濃度才能加以利用，鈾濃縮廠即為將 U-235 予以濃縮之設施。日本採用高速離心濃縮方法，依據 U-238 及 U-235 質量不同的性質，在高速旋轉下較重的 U-238 會偏於離心機外緣處，較輕的 U-235 則會偏於離心機的內緣，利用這種高速離心的方式，再將濃度尚不足的 U-235 引進下一台離心機，如此週而復始直至 U-235 濃縮達到預定濃度值為止。

核電廠反應器內之核燃料主要由 U-238 (約佔 95~97%) 及少量 U-235 (約佔 3~5%) 所組成, U-235 經由發生核分裂反應產生能量, 核燃料在使用 2~3 年後, 因無法持續產生核分裂反應, 需進行核燃料更換並退出反應器而成為用過核燃料; 由於用過核燃料中仍含有未燃耗之 U-235、U-238 及由 U-238 轉化而成之 Pu-239, 此些用過核燃料若經再處理程序可製成混合氧化燃料 (MOX fuel), 達到核燃料循環再利用及減少核廢料體積的目標。

用過核燃料再處理廠於 1993 年開始興建, 用過核燃料先送至再處理廠水池中貯存, 待處理時將用過核燃料從池中吊出, 切成細塊置入硝酸中, 因為核燃料中之鈾及鈾會溶解於硝酸, 利用此特性將鈾及鈾與其他不溶解於硝酸之分裂產物分開, 同時以化學萃取法將鈾及鈾析出, 再以化學處理使鈾及鈾分離, 並去除殘餘之分裂產物, 最後製成二氧化鈾及鈾鈾混合氧化燃料, 殘餘之萃取液則以玻璃固化為高放射性廢棄物後暫存, 待最終處置設施完工後再進行最終處置。此次 8 月參訪再處理廠時, 玻璃固化關鍵技術尚處於試運轉最後驗證階段, 雖然該廠稍後於今年 9 月完成玻璃固化技術驗證, 但由於日本原子力規制委員會尚在研擬及檢討用過核燃料再處理設施的安全新規制基準及相關規則, 必須符合新規制基準等規定才會允許再處理設施的運作, 故正式營運商轉日期仍為未定之數。

六ヶ所村的玻璃固化高放射性廢棄物貯存中心於 1989 年申請許可, 1992 年動工興建, 1995 年完工並開始正式營運, 設計貯存容量為 2,880 罐。該玻璃固化高放射性廢棄物貯存中心之設置, 係因再處理廠未正式營運商轉前, 日本部分用過核燃料被送往法國及英國進行再處理, 並將再處理後產生之廢液及殘渣, 經玻璃固化處理後運回日本, 因玻璃固化體內含長半衰期之核分裂產物, 須先予以妥善貯存, 待高放射性廢棄物處置設施興建完成後, 再送往處置。同時, 六ヶ所村的用過核燃料再處理廠正式商轉後產生的廢液及殘渣等高放射性廢棄物, 也須經

玻璃固化後，將玻璃固化體運送至玻璃固化高放射性廢棄物貯存中心暫存區暫存。

JNFL 於 1998 年引進國內及國際相關之研發技術，著手規劃 MOX 燃料製造廠，2005 年獲得經濟產業省核發興建許可，2010 年開始施工興建，2011 年受日本 311 震災福島核事故影響全面暫停建造，直至 2012 年中才再度恢復興建工程，目前預計 2016 完成整廠工程興建。MOX 燃料製造廠製程首要事項為安全，所以製程之臨界控制非常重要，從 MOX 粉末至完成燃料束之所有過程皆保持乾燥，鈾及鈾之重量、燃料丸之形狀及大小控制於特定範圍內，並以硼吸收所放射的中子等，因製程原料含有毒性非常強之鈾元素，為保護工作人員，其操作過程皆須於密閉且具有負壓之設備中運作，有別於一般核燃料製造廠；生產之 MOX 燃料可供沸水式及壓水式反應器使用，現有核電廠僅需調整其運轉模式皆可採用，最大之製造容量為 130t-HM/年（HM 表示鈾鈾之重量）。

日本核燃料循環系統將於用過核燃料再處理廠及 MOX 燃料製造廠建置完成後，實際具備完整的用過核燃料循環設施，將鈾燃料經由濃縮、再轉換、成型加工、用過核燃料再處理、MOX 燃料製備等程序，提供日本核電廠用過核燃料處理處置適當去處及發電用核燃料，對該國的核能產業發展有相當大的助益。但日本經過福島核災事故之後，國內開始有反對用過核燃料再循環處理方式的聲音出現，主張直接將用過核燃料直接進行最終處置。

雖然日本核燃料循環處理再製整體系統目前遭受社會質疑，但是六所村低放射性廢棄物處置場自 1992 年營運以來，一直維持良好的安全營運紀錄，處置場周邊的環境輻射監測站所測得之劑量率，也都可以經由網路快速獲知相關資料，讓民眾可以放心、安心地了解低放射性廢棄物處置場之運作狀況，持續地與當地民眾、社區人員溝通及揭露營運相關訊息，並建立六所村核燃料循環民眾展覽館

及支持地方公共建設實質回饋地方，讓地方及全國民眾都能領會六所村低放射性廢棄物處置場不僅可以安全營運，更可以提昇公共建設、增加就業機會、促進地方繁榮等益處，這點是值得我們學習的地方。

### 參訪中部電力公司浜岡核電廠

8月26日由 Koichi Shin 博士陪同，前往靜岡縣御前崎市浜岡核電廠參訪，浜岡核電廠佔地約 1.6 平方公里，共有 4 部 BWR 機組及 1 部 ABWR 機組服役中，隸屬於中部電力公司。但因 311 大地震後，配合日本政府安全新基準等加強抵抗海嘯及耐震設施的要求，浜岡核電廠目前 5 部機組已停止營運商轉，將待通過再啟動審查後，才將符合新基準的反應器機組重新運轉發電。

本次參訪浜岡核電廠，由 5 號機組運轉部門退休之原英明先生及中部電力公司總公司大津正士課長引領至各設施現場解說，並進入緊急應變中心免震棟地下室觀察建物免震設備與管線配置。日本長期觀察認為該區海底斷層有可造成日本南部的大地震，因此浜岡核電廠目前建造各項防海嘯堤防、防水閘門、管線防震支撐及各項事故防範措施(如圖 3 ~圖 5)，以符合新安全基準的要求，部分改善工程包括 22 公尺高的防海嘯牆及緊急氣渦輪發電機仍在施工，大部分改善工程已經完成建置。

●津波対策の実施イメージ(浜岡原子力発電所ジオラマ模型)

主な対策を、浸水防止対策1は●、浸水防止対策2は●、緊急時対策の強化は●で表示しています。



図 3 浜岡核電廠改善示意图

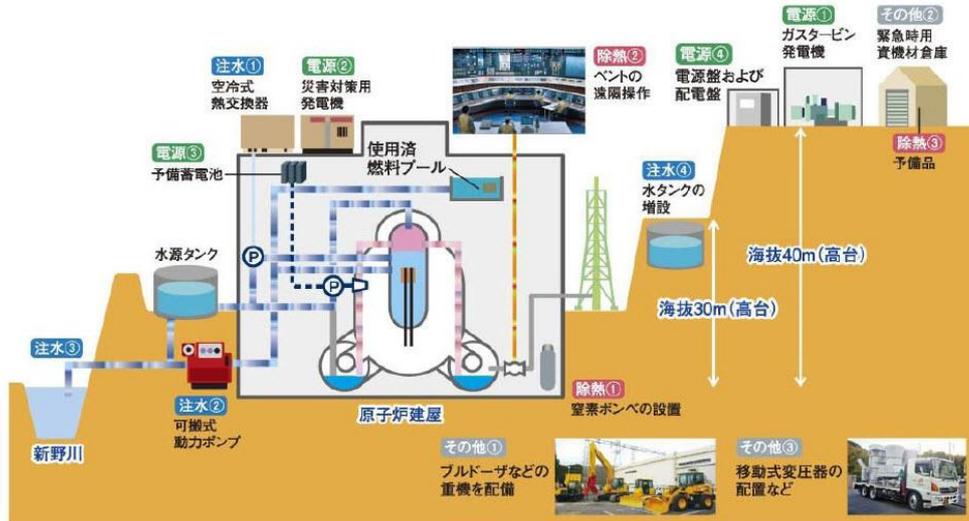


図 4 防止電源喪失策略

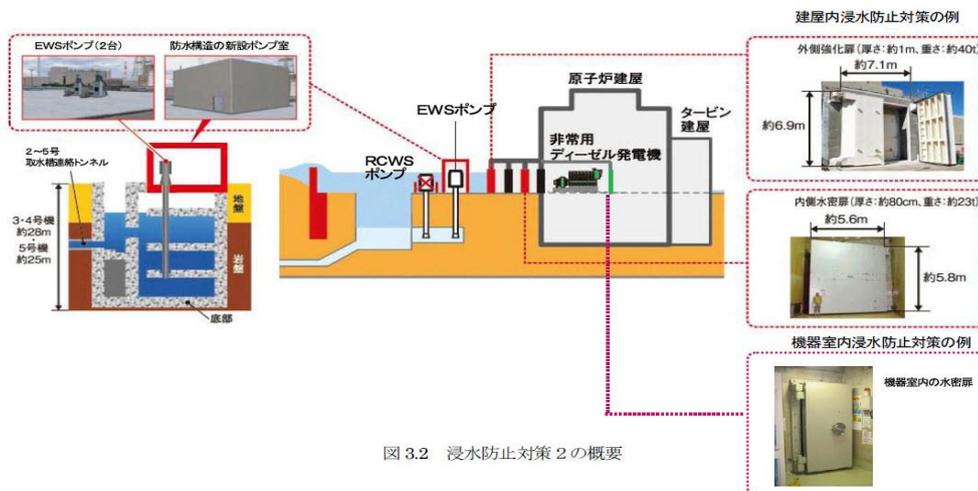


図 3.2 浸水防止対策 2 の概要

図 5 防水侵入措施

此行並參觀了浜岡核電廠之歷史失誤學習中心，因為每年有許多新進員工進入浜岡核電廠服務，該學習中心不僅以正面教材作為訓練內容，並以實際歷史失誤教訓作為訓練案例教材，傳承經驗。例如浜岡核電廠曾發生反應器管路因為產生氫爆而爆裂，所以將此爆裂管保留在訓練中心，以實際案例納入新進員工教材，避免重蹈覆轍，獲益良多。

### **參訪電力中央研究所橫須賀深層地質處置鑽探技術驗證場**

8 月 30 日由電力中央研究所核燃料循環後端研究中心山本武志(Takeshi Yamamoto)博士陪同，前往位於神奈川縣橫須賀市屬於電力中央研究所院區之深層地質處置鑽探技術驗證場參訪，現場並有計畫主持人近藤浩文(Hirofumi Kondo)博士陪同說明。該驗證場係以橫須賀院區海濱泥岩(mudstone)及沙岩(sandstone)地質特性，驗證目前已發展之深層地質鑽探技術，分析不同鑽探技術之可行性、可靠性、適用條件、使用限制等，並比對地質鑽探土壤樣本，以作為未來放射性廢棄物地質處置工程技術之用。

該驗證場以 7 年計畫期程，規劃鑽掘 3 口地下深度 500 公尺以上深層井以驗證深層地質處置所使用之調查及鑽探技術，第一口深層井鑽探深度達地下 350 公尺時，因地底土質鬆軟造成下探井身崩壞，無法達成預計深度，目前已將井口封井填平。第二口深層井則成功鑽探至地下 500 公尺深，驗證深層鑽探技術及地質物理特性，並持續監測地下水水質及水位變化與環境、氣候、海洋等對應關係。目前現地正在進行第三口深層井鑽探作業(圖 6)，以持續進行地下水文結構及地下水地球化學技術的驗證。

日本放射性廢棄物深層地質處置技術經過幾十年的研究，基本上已建立自主建置的技術與能力，即使深層地質處置場址的選定仍遙遙無期，但仍對相關處置

技術一再進行測試及驗證，俾在實務面確認自主工程技術之可行性，並可以在測試過程發現缺點以精進關鍵技術。我國規劃 2055 年完成放射性廢棄物深層地質處置場的建置，目前同樣與日本都尚未選定處置場址，但在建置深層地質處置的技術與能力上，還可以再加把力，俾使處置場址正式選定時，可以順利完成相關工程技術面的建置。



圖 6 深層鑽探作業

拜會日本原子力發電環境整備機構（**Nuclear Waste Management Organization, NUMO**）

9 月 13 日由 Takeshi Yamamoto 博士陪同前往東京都拜會日本原子力發電環境整備機構（**Nuclear Waste Management Organization, NUMO**），由出口朗(Akira Deguchi)部長及鈴木覺(Satoru Suzuki)課長接待，並就該機構現況及業務推展情形說明及交流意見。

NUMO 係日本經濟產業省(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) 依據「特定放射性廢物最終處置法」之授權，於 2000 年設立專責建置高放射性廢棄物及超鈾廢棄物深層地質最終處置設施之機構，其任務在確保日本核燃料循環中產生之長半化期放射性廢物的安全管理。NUMO 與其他相關機關(構)關係架構及主要工作項目如圖 7 所示。

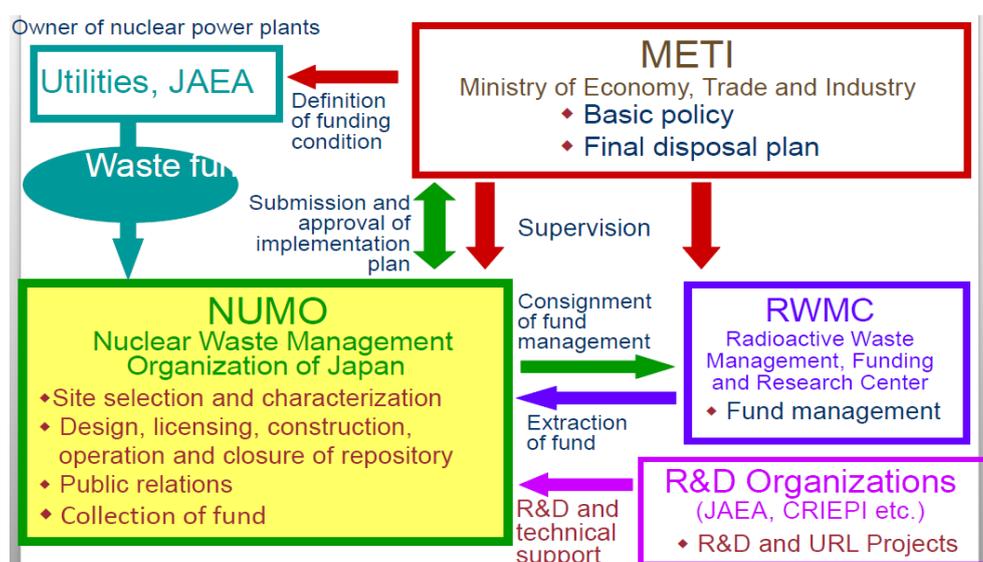


圖 7 NUMO 與其他機關(構)關係架構

NUMO 的工作包括最終處置設施場址特性鑑定及場址選定、處置設施設計、許可申請、建造施工、處置設施營運及封閉、民眾溝通，目前進行最終處置設施場址特性鑑定及場址選定作業，預計 2010 年代完成場址先期調查(PIAs)、2030 年完成最終處置設施場址選定、2030 年代末期展開最終處置設施營運。

NUMO 的場址選定程序包括三個作業階段，分別為文獻回顧、先期區域調查、詳細區域調查。首先由中央政府提案或地方政府提送意願書，再就潛在場址先進行文獻回顧，文獻回顧結果獲得地方政府首長的同意後，再對候選場址進行地球物理調查及地質鑽探等先期區域調查工作，調查結果符合相關調查要件的場址，再進行詳細區域調查的現地隧道試掘及調查。

NUMO 自 2002 年 12 月公開徵求有意願參與場址可行性調查之地方政府至今，仍無成功案例。對於高放射性廢棄物最終處置設施每年均進行 2 次的問卷調查，調查結果顯示高達七成受訪民眾認為有必要設置高放射性廢棄物最終處置設施，但只有約一成六的受訪民眾願意接受最終處置設施場址設置在自己家鄉的決定。所以日本目前最終處置設施場址作業尚停留在公開徵求意願書階段，且經過福島核事故之後，全國人民普遍對於核設施增加不安全感，建造最終處置設施的就更加困難。

NUMO 表示經過長年的研究，日本已經具備建造高放射性廢棄物最終處置設施的技術，但為使民眾更能接受最終處置設施的設置，將持續提昇最終處置設施的安全功能技術，以獲得民眾對最終處置設施的接受。從此可知，擁有完整核燃料循環產業鏈及低放射性廢棄物處置場的日本，本身就具備了建造高放射性廢棄物最終處置設施的技術，但從高放射性廢棄物處置場選址作業階段，仍遭遇很大的阻力，顯示處置的困難點除技術外，民眾接受度佔極重要的部份。負責的專責機構仍亟思解決之道，希望以能讓民眾安心的最終處置技術，獲得民眾的認同。

### 三、心得

本次赴日本電力中央研究所進行專題研究，主要為了解有關日本在東北大地震福島核事故後，日本政府及核能電力業者管制及管理核事故造成的放射性廢棄物及放射性廢水所採行的相關措施。日本 311 福島核事故迄今已歷時二年半，從福島第一核電廠發生氫爆使得放射性物質外洩，造成廠區外廣大地域的輻射污染，也產生了數量龐大、輻射劑量不一之放射性廢棄物；同時，為了要冷卻核反應器中仍持續散發高熱的核燃料，控制並避免災害擴大，持續注入了大量的海水與淡水至核反應內核燃料，也產生了大量的放射性廢水，這些放射性廢水的洩漏，已對福島核電廠附近的地下水及鄰近的海域造成污染。

日本政府為了妥善清理福島核事故放射性廢棄物，數月內完成「特別措置法」的制定，明確規定中央政府、地方政府、關係核能業者之責任、義務及應採取的措施，並對放射性廢棄物分類、處理、貯存、處置方式訂定相關規範，對於執行「特別措置法」所須費用負擔，也釐清責任歸屬。

福島核事故放射性廢棄物管理上，先將廢棄物依輻射劑量高低進行分類，分 3 類進行處理、貯存及處置作業，此種分類精神已納入與環保署協商之射災害廢棄物清理事宜。我國能原會近期所擬訂「核子事故復原階段放射性污染廢棄物清理原則」(附件一)，廢棄物亦規劃依輻射劑量分為 3 類，俾進行核子事故復原階段清理工作，已實際運用此次赴日本專題研究成果於我國相關管制措施。

日本在福島核事故發生後，藉由空中輻射偵測方式，判定遭受放射性物質污染的地區，據此規劃復原作業，以執行放射性廢棄物清理及除污計畫。參考福島經驗，此種偵測方式可以迅速地量測大範圍污染面積，可以檢視我國空中輻射偵測能力及設備建置，有利於核事故發生時，作為緊急應變之參考依據。

日本依據不同土地使用分區及特定的除污對象，推算土地使用類別之放射性廢棄物產生因子，可推估不同輻射污染程度地區的放射性廢棄物量。惟各國核事故放射性廢棄物的產生因子不盡相同，所以須發展符合自己國家狀況之放射性廢棄物產生因子，才能在核事故發生初期推估放射性廢棄物可能產生數量，我國也可以參考日本此種推估放射性廢棄物量方式，提供做為復原階段相關規劃與設計重要參考。

福島核事故核電廠產生之放射性廢水，核種複雜且數量數百倍於核電廠平日產生量，非原有放射性廢水處理系統所能應付，須重新規劃、設計與建造一套全新的廢水處理系統，方能因應此種災變危害。可以考量參考目前已建置之核事故放射性廢水處理系統，探討系統中各廢水處理單元功能及污染去除效率，建立處理規劃及因應之道。

核事故發生時，核電廠無法處理的大量放射性廢水已經污染了核電廠周遭地下水及海水，並擴及鄰近海洋生態，處理或防止此類地下水放射性污染，須掌握核電廠周遭水文地質環境，將放射性廢水處理技術結合現地的水文地質條件，方能達到效果。可以參考福島現在所面臨的處境及經驗，詳細調查核電廠周遭詳細水文地質環境及條

件，建立核電廠周邊水文地質完整資料庫，先就技術面預為探討相關因應作業，以掌握緊急應變及預防放射性廢水污染契機。

日本政府藉由 311 福島核事故，將核能管制工作由原來經產省、文科省及原子力委員會多頭馬車分別管制的架構，改為由原子力規制委員會(NRA)統一管制，確保核能管制獨立性及組織一元化，事權統一、提升管制效能，以回應民眾的期盼，並健全核能管理制度及法令。我國核能管制制度上，由原能會統一督導管制國內核能機構營運及業務運作，也含括對學術單位及學術機構的管制，具備組織一元化及事權統一優點，可以藉此做一比對。相關專題研究成果心得，彙整如下：

### **(一)核災後福島核電廠區外之放射性廢棄物管理**

日本有關管制放射性廢棄物的相關法律，大致可以 2011 年福島 311 核事故以前及以後作為分界，概述如下：

#### **福島 311 核事故以前之相關法律**

2011 年 3 月福島核事故發生前的日本放射性廢棄物管理相關活動，主要在「原子力基本法」下，受到「原子炉等規制法」與「放射線障害防止法」的體系規範。放射性同位素等醫療領域上的使用，則受到醫療法的規範。其中在「原子炉等規制法」中，對於放射性物質於環境中的釋出、處理、貯存管理到處置相關作業進行規範，關於各核能業者的事業活動所產生的廢棄物，必須採取安全保障的必要措施。放射性廢棄物的管理責任，包含處置費用的確保責任，原則上是由放射性廢棄物產生者來負責。此外，日本政府也完成了放射性廢棄物處置政策，建置最終處置財務架構、最終處置執行機構主體、指定專款管理方針等，使得最終處置相關措施及架構制度化，並制定了放射性廢棄物最終處置的相關法律。

「放射線障害防止法」，則是從確保公共安全角度著眼，目的是為避免特定職場發生放射線傷害，在法律對於放射線同位素的使用進行規範。另訂定有「電離放射線障害防止規則」，是以勞動安全為立法基準，保護勞動者不受放射線傷害的法律。

關於放射性廢棄物以外的廢棄物處理，則主要是依據「環境基本法」之下的「廢棄物處理法」制定之相關規範，廢棄物大致可以區分為從家庭產生的一般廢棄物，事業活動所排出的產業廢棄物以及事業系一般廢棄物。

### **福島 311 核事故之後的特別措置法**

2011 年 8 月日本政府公布「平成二十三年三月十一日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴う原子力発電所の事故により放出された放射性物質による環境の汚染への対処に関する特別措置法」(簡稱特別措置法，如附件二)，期盼以此特別法妥善處理福島核事故所釋出放射性物質與放射性廢棄物。

2012 年 1 月日本內閣會議擬定了「原子力組織制度改革法案」，並且也修訂了「環境省設置法」及「原子力基本法」，為環境省(類似我國環保署)在其組織架構中，另外設置外部獨立原子力管制機構奠定了法源基礎；此外，為了統一修訂原子力安全的規制法與制度，也對「原子炉等規制法」及「原子力災害對策特別措置法」進行了法規修訂。2012 年 6 月通過了大幅度修訂原子力安全規範制度的「原子力規制委員會設置法」，這個新的法律不僅明定了「原子力規制委員會」以及其直隸行政事務單位「原子力規制廳」的功能以及權限，也幾乎把所有與原子能相關的法律，諸如「原子力基本法」、「原子炉等規制法」、「放射線障害防止法」及「電氣事業法」等需要修訂的相關法規授權，均包含在這項新頒法規之中。

此外，依據「原子力規制委員會設置法」的附屬規則，以往將放射性污染

相關管制作為排除的「環境基本法」，也在這次的修訂中進行了調整，將環境法體系對於放射性物質所造成的污染環境給予了明確的定義，而放射性污染相關的環境法案的修訂也在持續地進行中。

### 放射性廢棄物處理之管理模式

「特別措置法」是針對 2011 年 311 福島核電廠事故造成的放射性污染所制定的特別法，其目的係在針對福島核事故放射性物質外釋所造成的環境污染，明確規定中央政府、地方政府、相關核能業者所需負擔的責任與義務及應採取的對應措施及相關事項，以儘速降低放射性污染對人體健康以及生活環境的影響，亦即為福島放射性廢棄物處理之管理模式。

「特別措置法」所制定的體系內，要求環境省大臣對福島核事故所造成的環境輻射污染，擬定對應的基本方針計畫並經由內閣會議的同意，同時制定放射性污染廢棄物及土壤等處理相關基準；另外，亦要求為了掌握環境污染的狀況，應儘速完成完備的環境輻射監測及測定體系並加以執行。

「特別措置法」中規定，屬於「特定廢棄物」的放射性廢棄物由中央政府負責處理，在此範圍之外屬低輻射劑量的放射性廢棄物，則由市町村等地方政府及事業者負責處理。此外，因福島核事故造成輻射污染的地區，其除污作業也規劃依據地區及劑量的不同，分別由中央政府及地方政府負責相關作業。對於核能電廠內產生的廢棄物、土壤及飛散原子爐設施周邊污染廢棄物的處理，則明定由核能電廠業者負責執行。

「特別措置法」對於執行相關措施之必要費用負擔規定如下：(1)中央政府對於推動污染對處應相關施行對策上所需要的費用，提出財政上的措施。(2)特別措置法的措施，適用於原子力損害賠償法中規定的損害事項，由相關的核能業者負擔。(3)中央政府在考量社會責任，為了使關係核能業者足以支付地方政府

依據特別措置法執行的對處措施所生的費用，可以採取必要的措施。

特別措置法的概要如圖 8 所示。

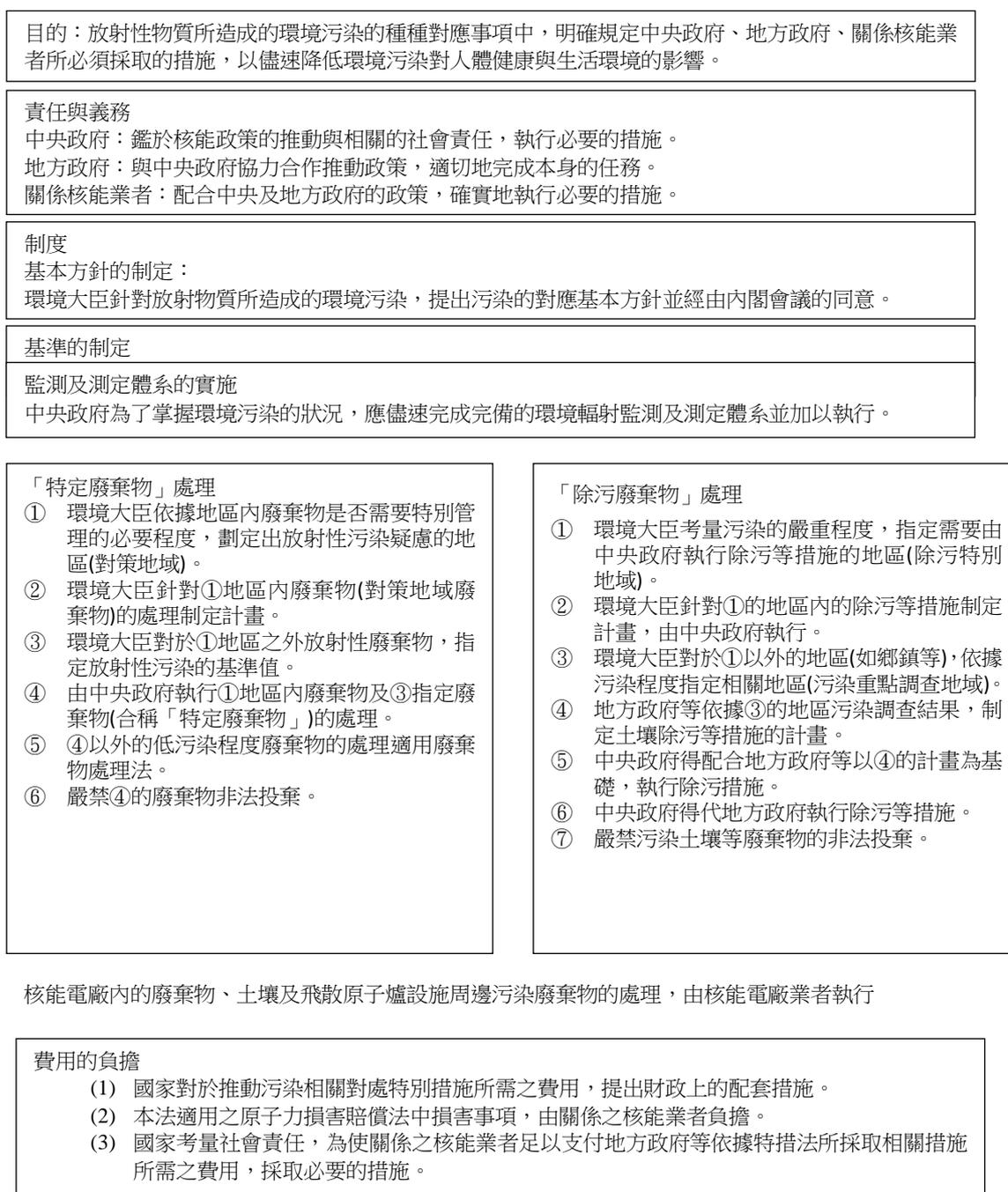


圖 8 特別措置法概要

## 災區放射性廢棄物處理體系

災區放射性廢棄物分為「特定廢棄物」及「除污廢棄物」二類，「特定廢棄物」又分為「對策地域內廢棄物」及「指定廢棄物」。「特定廢棄物」處理上係以 8,000 Bq/kg 為判定基準，「對策地域內廢棄物」劑量小於 8,000 Bq/kg，可以參照一般廢棄物處理方式進行處理；「對策地域內廢棄物」大於 8,000 Bq/kg 則比照「指定廢棄物」之處理方式進行後續處理。「指定廢棄物」處理上先依據「可燃物」與「不可燃物」分類，可燃物一律以焚化減容方式處理，焚化處理後產生之焚化飛灰及底灰則併同不可燃物以處置方式處理。

處置方式基本上分為「管理型處置場」及「遮斷型處置場」，基本上以 100,000 Bq/kg 作為處置方式判定基準，放射性廢棄物劑量小於 100,000 Bq/kg 以「管理型處置場」進行最終處置；放射性廢棄物劑量大於 100,000 Bq/kg 則先以「中期貯存設施」貯存，待最終處置場建置完成後，再將「中期貯存設施」內之放射性廢棄物移至最終處置場妥善處置。

「除污廢棄物」比照「指定廢棄物」分類方式，先將廢棄物分為「可燃物」與「不可燃物」二類，除污土壤等不可燃廢棄物先暫存於「放射性廢棄物暫存場」，再送至「中期貯存設施」貯存；可燃物一律以焚化減容方式處理，焚化處理後產生之焚化飛灰及底灰輻射劑量小於 100,000 Bq/kg 以「管理型處置場」進行最終處置，大於 100,000 Bq/kg 者亦先再送至「中期貯存設施」貯存，待最終處置場建置完成後，再將放射性廢棄物一起移送至最終處置場。

原則上，「指定廢棄物」、「除污特別地域」除污廢棄物、輻射劑量大於 8,000 Bq/kg 「對策地域內廢棄物」、「中期貯存設施」、災區放射性廢棄物最終處置場等處理、貯存、處置設施，由中央政府負責規劃、執行及建置。

## 廠外放射性污染之鑑別、廢棄物之分類方法、使用之偵測儀器與污染及處理之判定標準

廠外放射性污染廢棄物之鑑別及使用之偵測儀器，分為「公共設施」與「個人及事業設施」二類鑑別程序，廢棄物分類方法及處理判定標準，則仍依據「特別措置法」規定進行分類及判別。

### 1.公共設施

在對策區域外，針對環境省指定的調查地區，包括岩手縣、宮城縣、山形縣、福島縣、茨城縣、栃木縣、群馬縣、埼玉縣、千葉縣、東京都、神奈川縣、新潟縣等地，調查指定公共設施類別如水道設施、公共下水道、流域下水道、工業用水道設施、焚化設施及聚落排水等設施，由這些設施的管理者對設施產生之廢棄物，如脫水污泥、乾燥污泥、焚化飛灰、底灰及殘渣等進行輻射劑量調查，並量測指定廢棄物的輻射劑量，據以作為後續處理處置的基準。

符合特定要件的水道設施、公共下水道、流域下水道、工業用水道設施、一般廢棄物焚化設施、廢棄物焚化設施以及聚落排水設施的管理者，針對上開設設施產生的污泥、焚化灰燼等廢棄物進行放射性污染狀況調查，其廢棄物輻射劑量調查結果若超過 8,000Bq/kg，則向地方環保機關報告並經審查認定為指定廢棄物，由國家處理指定廢棄物。相關調查及報告流程如圖 9 所示。

廢棄物偵測樣品的採取，必須考量採樣目的、試體狀態與試體代表性，採樣方法原則如下所示：

- 使用採樣鏟(increment shovel，如圖 10)，從廢棄物堆中採樣。
- 廢棄物堆中採樣時，為了確保代表性，須於相離的 4 個點以上採樣(圖 11)；若須於輸送帶上採取廢棄物樣品時，須一定間隔時間內進行 4 次以上的取樣。

- 所採取的樣品，如有需要，得將樣品粉碎後，將各樣品以同重量的比例於容器中(例如樣品收集用夾鏈袋)充分混合。
- 所採集樣品偵測重量，合計須達 500 公克至 1 公斤的程度。

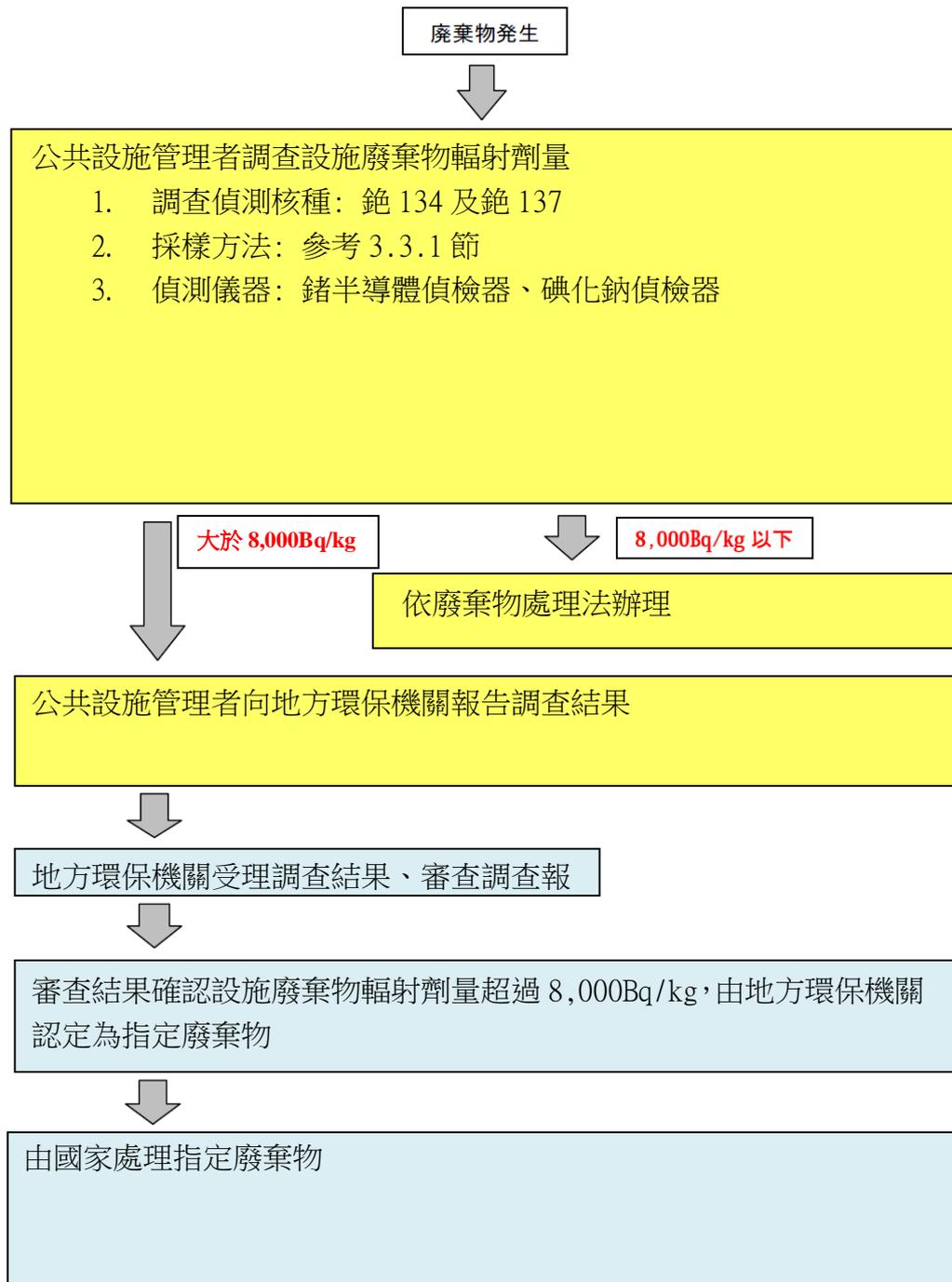


圖 9 地區公共設施放射性廢棄物調查及報告流程

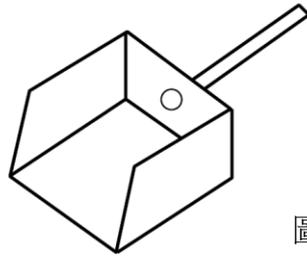


圖 10 取樣用取樣鏟

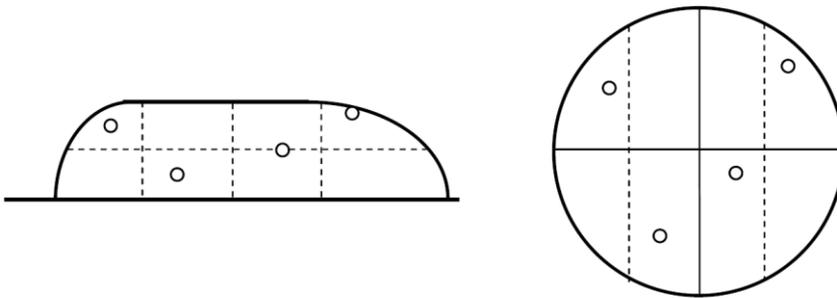


圖 11 樣品堆取樣方法

輻射偵測儀器以鍺半導體偵檢器(Germanium semiconductor detector, 圖 12)或碘化鈉閃爍偵檢器(NaI scintillation spectrometer, 圖 13)為主, 測定銻 134 與銻 137 的濃度, 並以標準方法進行校正。



圖 12 鍺半導體偵檢器



圖 13 碘化鈉閃爍偵檢器

## (2)個人及事業設施

在環境省所公告對策區域外及指定公共設施外之事業或個人，如果有因為福島核事故所造成或產生之放射性廢棄物，不限制廢棄物種類，可經由自行偵測這些廢棄物，其廢棄物輻射劑量調查結果若超過 8000Bq/kg，則向地方環保機關報告並經審查認定為指定廢棄物，由國家處理指定廢棄物。相關調查及報告流程如圖 14 所示。

廢棄物偵測樣品的採取，必須考量採樣目的、試體狀態與試體代表性，採樣方法原則如下所示：

- 使用採樣鏟，從廢棄物堆中採樣。
- 廢棄物堆中採樣時，為了確保代表性，須於相離的 10 個點以上採樣；若須於輸送帶上採取廢棄物樣品時，須一定間隔時間內進行 10 次以上的取樣。若同一事業或個人的廢棄物以盛裝容器貯存時，為確保樣品之代表性，選擇 10 個容器並自各容器中採取 1 個以上的樣品。
- 所採取的樣品，如有需要，得將樣品粉碎後，將各樣品以同重量的比例於容器中(例如樣品收集用夾鏈袋)充分混合。
- 所偵測樣品的重量，合計須達 500 公克至 1 公斤的程度。

輻射偵測儀器也是以鍺半導體偵檢器(Germanium semiconductor detector)或碘化鈉閃爍偵檢器(NaI scintillation spectrometer)為主，測定銫 134 與銫 137 的濃度，並以標準方法進行校正。

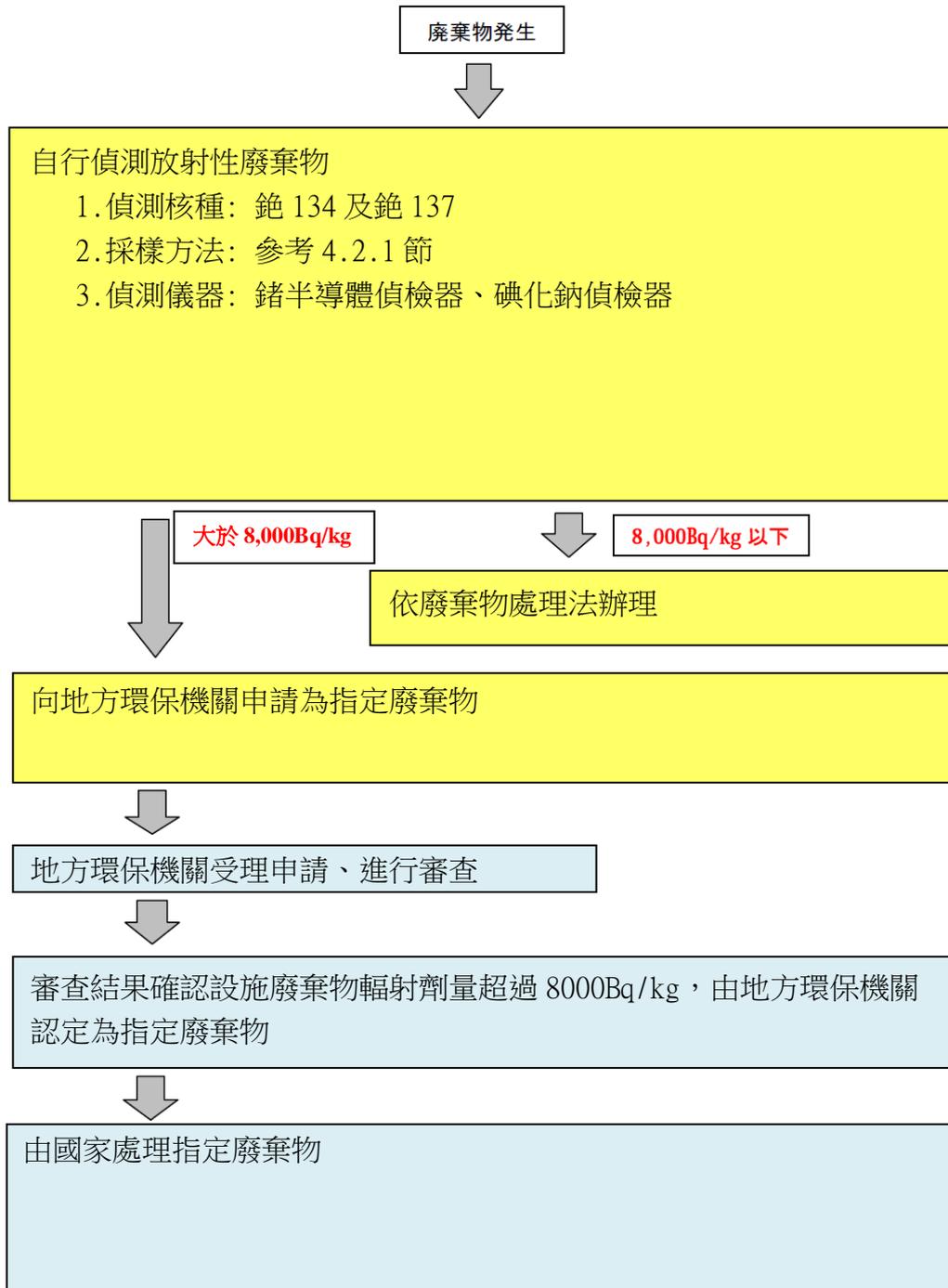


圖 14 個人或事業放射性廢棄物調查及報告流程

## 廠外放射性廢棄物量估算

### 1.廢棄物量估算原則

#### (1)除污特別地區(中央政府除污責任範圍)

- 依據住宅區、學校區、公園區、農地區等土地使用分類別及特定的除污對象，規劃除污方法及擬定除污計畫。
- 依據不同土地使用類別之試行除污的實際作業結果，推算出各類土地使用類別之單位除污放射性廢棄物的產生量，包括土壤、不燃物及可燃物等除污放射性廢棄物，此單位廢棄物產生量稱為產生因子。
- 依據執行潛在污染區域全面性空中偵測的地面環境輻射劑量結果，統計不同輻射劑量區間的污染面積。
- 將不同輻射劑量區間的污染面積，乘以不同土地使用類別之單位除污放射性廢棄物的產生因子，推估未來執行除污計畫可能產生之潛在除污放射性廢棄物產生量。

#### (2)除污實施區域(地方政府除污責任範圍)

- 依據市町村等地方政府的除污實施狀況報告，依土地使用類別統計推估住宅、公共設施、農地等分類之除污土壤等廢棄物之單位產生量。
- 計算預計實施除污措施區域之不同土地類別面積及相關設施數量。
- 依據(1)之單位產生量及(2)之除污規劃資料，推估除污實施區域之除污土壤等廢棄物量。

(3)原則上，可燃廢棄物全部焚化處理進行減容，並假設焚化後殘留廢棄物20%體積。

參考福島核事故推估放射性廢棄物數量方法，可以依據住宅區、學校區、公園區、農地區等不同土地使用分區及特定的除污對象(如屋頂、水溝、庭園、

田地等)，先推算出各土地使用類別之放射性廢棄物產生因子，才方便推估不同輻射污染程度地區的放射性廢棄物量，據以規劃放射性廢棄物後續的妥善貯存、處理、處置設施容量與規格。惟各國核事故放射性廢棄物的產生因子，會因為各國土地使用分區之利用方式與廢棄物態樣的不同而不盡相同，所以須發展符合自己國家狀況之放射性廢棄物產生因子，才能在萬一核事故發生時適用於自己的國家。我國宜參考日本此次福島核事故放射性廢棄物數量的推估作法，預先建立我國核事故放射性廢棄物數量推估模式與產生因子機制，可以在萬一核事故發生之後，在事故初期先行推估放射性廢棄物可能產生數量，以提供復原階段妥善貯存、處理、處置相關設施規劃與設計之重要參數。

## 地方自治體自行處理之規劃與執行

### 1.放射性廢棄物之破碎處理

大型放射性廢棄物處理之前，須先進行破碎處理至適當尺寸，以便於廢棄物後續的篩選、分類、焚化、貯存、回收再利用等用途。放射性廢棄物進行破碎處理時，為避免破碎所產生的放射性粉塵上造成環境輻射污染，必須採取防止粉塵飛散的措施，相關考量包括：

- (1)破碎設備設置於室內建物
- (2)破碎設備本身須為密閉設計構造
- (3)若須設置於開放空間等有產生粉塵疑慮的場所，視必要性設置灑水設備，以防止粉塵飛散，但必須儘可能抑低放射性廢水的產生量。
- (4)建物內設置破碎設備時，必須加裝氣體過濾器，以避免粉塵於建物內部飛散。
- (5)破碎設備產生的破碎殘留物，例如瓦礫類破碎處理中產生再生碎石外的細

微粒子，必須確認其輻射劑量並加以妥善收集貯存。

## 2.放射性廢棄物焚化處理設施

放射性廢棄物焚化設施需備有高性能的廢氣處理設施，係指具高效率收集放射性焚化飛灰之袋式集塵器(如圖 15)，或配備活性炭吸附裝置、活性炭吸著塔、消石灰吹入裝置或濕式氣體洗淨裝置之靜電集塵器(如圖 16)。

為了避免過濾布上飛灰堆積造成壓力損失，或負荷過重造成過濾布的脫落，可以脈衝噴射法(Pulse Jet)法將表面堆積層以反向清洗的方式移除，在濾布表面之飛灰堆積層移除時，過濾器的效果會下降，然而由於過濾布表面附著物移除後，過濾器效果可以持續，對於整體過濾器效果而言，並無不當。

焚化超過 100,000Bq/kg 的放射性廢棄物時，必須預先充份檢討焚化處理過程中，防止放射性廢棄物及焚化殘渣飛散的措施，確保廢氣的適當處理並防止作業員受到不必要的輻射暴露風險，以維持焚化作業的順利運轉。

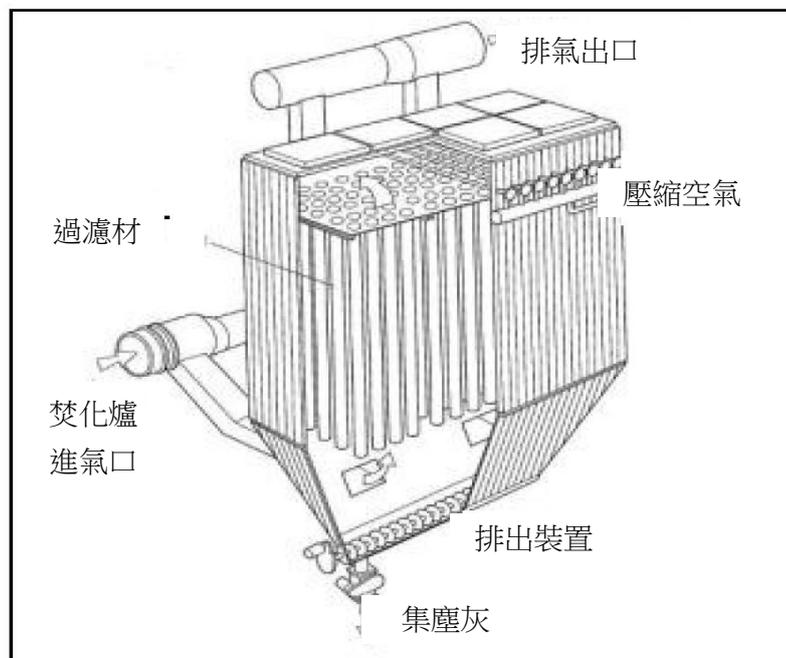


圖 15 袋式集塵器

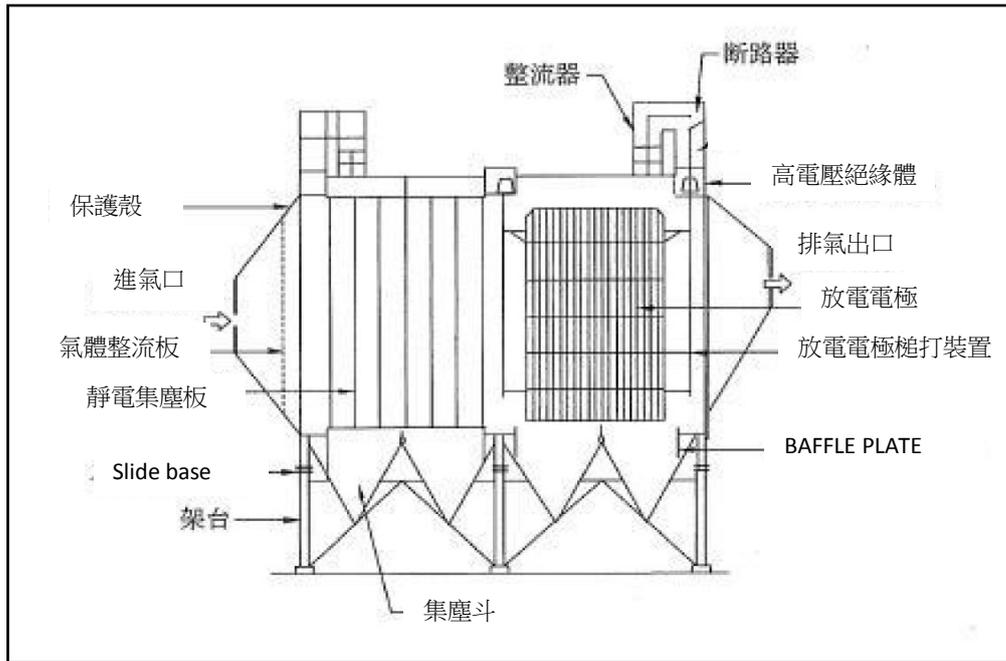


圖 16 靜電集塵器

### 尋求其他自治團體協同處理模式

福島核事故發生後，各災區都產生了大量的廢棄物，必須予以妥善的處理。但由於受災區原有的廢棄物處理設施容量，不足以應付突如其來龐大的災害廢棄物，例如岩手縣廢棄物年產生量原為 45 萬噸，核事故後廢棄物增至 380 萬噸，約為原來年產生量的 8 倍；宮城縣廢棄物年產生量原為 82 萬噸，核事故後廢棄物增至 1090 萬噸，約為原來年產生量的 13 倍。所以若要早日清除數量龐大的廢棄物，恢復災區原有的生活環境，須藉助災區外尚有廢棄物處理容量餘裕的地方政府，經由協同處理模式，加速災害廢棄物的清理，此模式又稱為廣域處理模式。

以岩手縣上閉伊郡大槌町為例，約 200 噸的災害廢棄物(圖 17)，經由靜岡縣靜岡市、浜松市、新潟縣柏崎市、三條市、福井縣敦賀市、高浜町等地方政府的協同處理，約以二個月的時間清理完畢，恢復核事故前存在的吉里吉里海岸公園(圖 18)。



圖 17 岩手県上閉伊郡大槌町協同處理前 圖 18 岩手県上閉伊郡大槌町協同處理後

又以宮城県松島町為例，藉由山形縣酒田市及酒田地區協同處理的方式，約以四個月的時間清理完畢約 300 噸的災害廢棄物(圖 19)，讓居民得以重返家園(圖 20)。



圖 19 宮城県松島町協同處理前

圖 20 宮城県松島町協同處理後

### 廢棄物再利用可行性評估

2011 年 5 月日本環境省頒布「東日本大震災災害廢棄物處理指針」，指示對福島核事故產生的災害廢棄物，盡力考量採取再生利用的可能。在同年 12 月環境省發表「混凝土等災害廢棄物之有條件再生利用」報告，考量在確保安全之管制條件下，對混凝土等災害廢棄物進行再利用，並探討以放射性廢棄物，實際模擬並評估作為道路基材之可行性。

模擬評估結果顯示，在路面下 30 公分處回填輻射劑量 3,000 Bq/kg 之放射性廢棄物，道路周便居住者增加之外部暴露劑量約在每年 10  $\mu$ Sv 以下；若在路面下 40 公分處回填放射性廢棄物，則回填之廢棄物輻射劑量可達 10,000 Bq/kg，道路周便居住者增加之外部暴露劑量才會達每年 10  $\mu$ Sv。該模擬並評估以放射性廢棄物作為道路基材，放射性銫對經由地下水循環路徑及食物鏈攝取，對於畜產物之影響，結果顯示輻射劑量達 10,000 Bq/kg 放射性廢棄物，增加暴露劑量每年在 10  $\mu$ Sv 以下。

該報告顯示放射性廢棄物在有條件的控制之下，並不需要達到豁免或外釋基準，可以經由適當的管理措施進行回收再利用，不會對環境造成輻射污染。但是該報告也提醒，公共工程在回收再利用放射性廢棄物後，須持續對該工程進行追蹤管理及記錄，維持公共設施完整以達到良好的輻射屏蔽效果，並防止該設施遭受破壞。

圖 21 為日本原子力研究開發機構(JAEA)對於放射性廢棄物再利用之情境評估，核事故放射性廢棄物經適當篩選、破碎、分類後，金屬廢棄物可經由熔煉後，重新使用或成為一次加工品的材料；可燃物焚化灰燼或融渣固化物，可以回填充當基材，適當管理之處置場所可以做為公園之用。

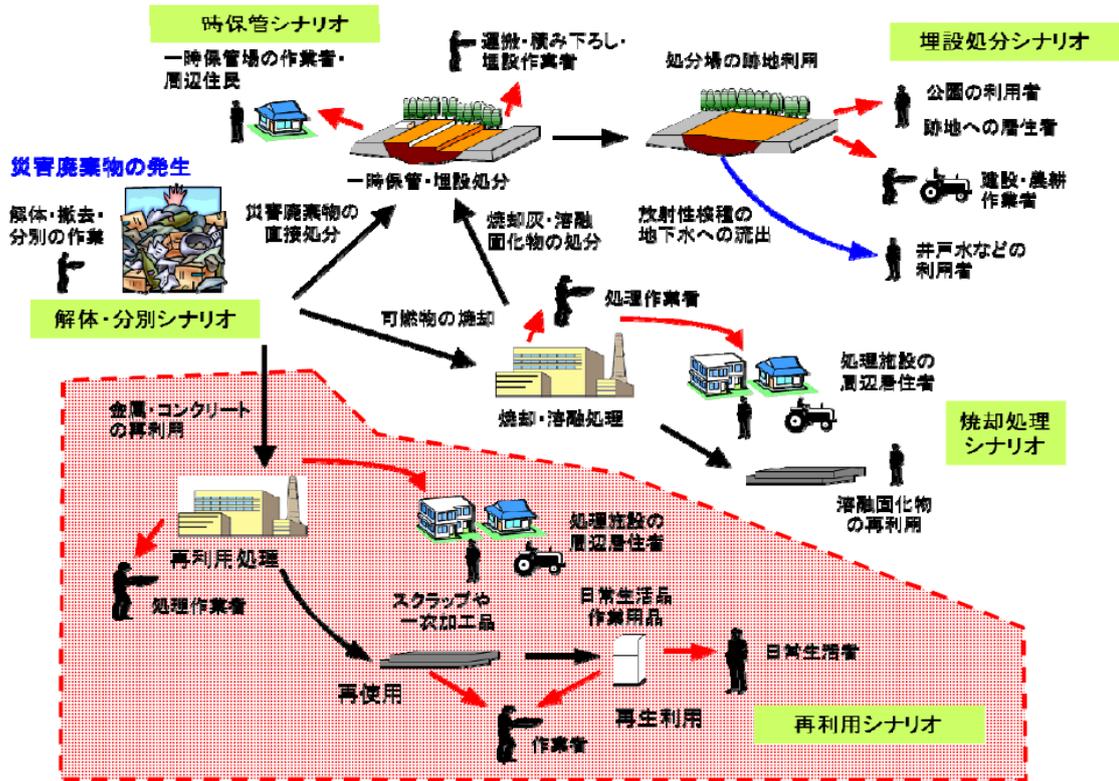


圖 21 放射性廃棄物再利用情境評価

## (二) 核災後福島核電廠內之放射性廢水處理研究

福島第一核電廠發生核事故後，每日約產生 700~800 噸的放射性廢水，其中 400 噸廢水經由廢水處理系統淨化後，循環回流至核電廠內提供冷卻水補給，其餘 300~400 噸的放射性廢水目前存放；另外估計約有 300 噸放射性廢水流入地下水或海水中，影響核電廠周遭的海洋生態。由於目前福島核電廠的放射性廢水問題，已非東京電力公司獨力可以解決的事情，所以日本首相安倍晉三已經指示經濟產業省，積極協助東京電力公司妥善處理廢水問題，並防止污染擴大。

### 放射性污染廢水量的預估及先期處理規劃

福島第一核電廠內廢水來源，主要來自核電廠對核反應器內核燃料之冷卻廢水及地下水流入之污染廢水，1 號機至 4 號機的放射性廢水經收集後，送至廢水處理系統處理，目前每日約收集及處理 700~800 噸的放射性廢水。

由於 1 號機至 3 號機在 311 核事故發生時，核反應器內仍留有核燃料未取出，為避免反應器內溫度過高導致核燃料熔融狀況發生，須持續補充注入冷卻水，以維持反應器內適當溫度。目前東京電力公司每日約補充注入 300~400 噸冷卻用水，但是每日卻可以收集到 700~800 噸的放射性廢水必須處理，所以每日約有 400 噸地下水流入核電廠內，增加放射性廢水產生量。

另外東京電力公司依據水文地質模式，估算流經福島第一核電廠周遭的地下水總量每日約有 1,000 噸，其中約 400 噸地下水流入核電廠內，另外 600 噸地下水中，約有 300 噸遭受放射性污染。

福島第一核電廠放射性廢水在先期處理規劃上，是以去除廢水中放射性銫為優先考量，共有二套系統。第一套廢水處理系統簡稱為 KURION，係先將廢水中放射性銫經吸附去除後，再經加壓浮除混凝沉澱除污程序；第二套廢水處理

系統簡稱為 SARRY，裝置有放射性銫吸附去除單元。依據廢水水質經過 KURION 或 SARRY 系統，去除水中的放射性銫後，再經 RO 逆滲透及蒸發濃縮之淡水化裝置，將淡水化後的放射性廢水循環補充流入反應器機組，提供反應器內核燃料足夠的冷卻能力，並將處理產生廢水及濃縮廢水至於廢水貯存槽暫存。相關放射性廢水量及廢水處理規劃如圖 22 所示。

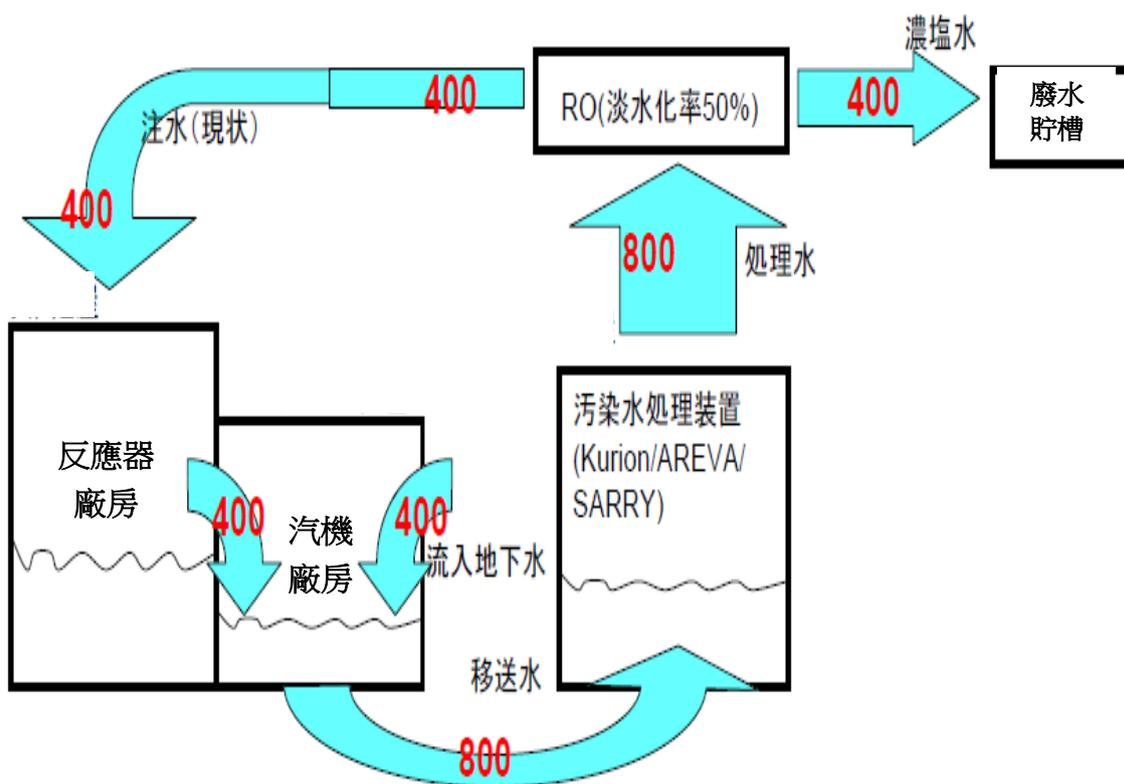
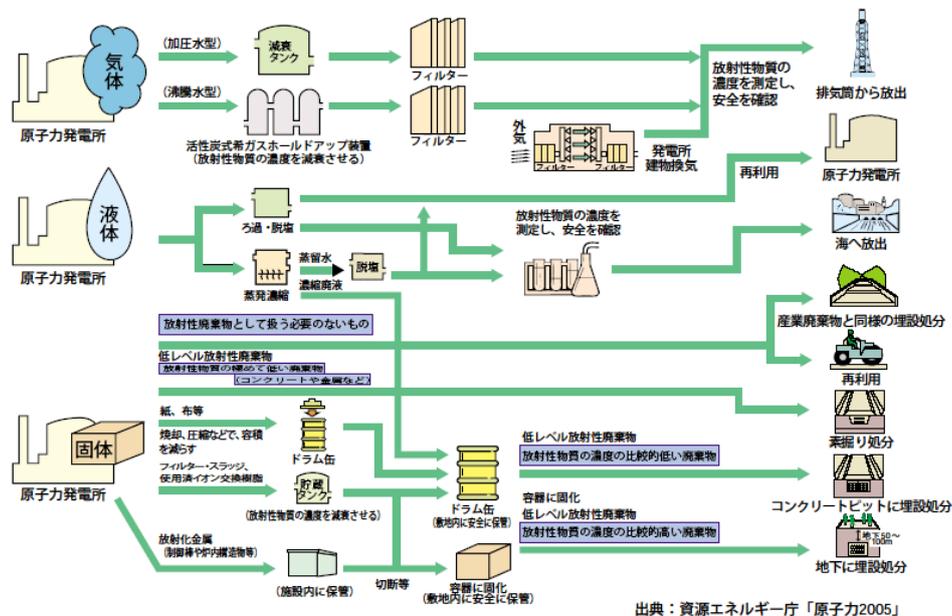


圖 22 放射性廢水量及廢水處理先期規劃示意圖

## 廠內原有放射性廢水處理系統之使用檢討

福島第一核電廠 1 號機至 4 號機均為沸水式反應器(BWR)，由於東京電力公司並未將福島第一核電廠原有放射性廢水處理系統詳細資料公開，故無法直接探討該廠原有廢水處理系統功能。

依據日本原子力文化振興財團資料(圖 23)顯示，核電廠通常經由過濾、除礦及蒸發濃縮單元處理放射性廢水，過濾及除礦後的水部份循環回收電廠再利用，部分則經偵測檢驗後，排放至大海等水體，蒸發濃縮後產生之濃縮廢液，則固化裝桶後貯存處置。



### 原子力発電所の廃棄物処理方法

【出典】(財)日本原子力文化振興財団:「原子力・エネルギー」図面集 2007、8-3(2007年2月)、p.179、  
電氣事業連合会: <http://www.fepc-atomic.jp/library/zumen/pdf-data/all08.pdf>, 3/17

圖 23 核電廠放射性廢水處理示意圖

該廠廢水處理系統經過 311 核事故後，均已損毀無法操作運轉，由於處理容量太小，處理能力不足以應付核事故後每日大量產生的放射性廢水，且因為核事故後核電廠內輻射劑量相當高，東京電力公司評估後認為在安全考量及使用效率上，原有廢水處理系統無再使用價值，故未加以修復，改為直接新設每日處理容量可達 800 噸的廢水處理系統替代。

## 新增廢水處理系統之規劃與建置

福島第一核電廠在 311 核事故後設置之放射性廢水處理系統，係以去除大量廢水中之放射性銫為優先考量，再搭配淡水化裝置循環回收冷卻用水為原則。

由於福島廢水中含有相當多項核種，在事故發生初期日本原子力開發機構 (JAEA) 對汽機廠房廢水進行核種分析(附件三)，發現廢水中含有  $\beta$  核種、I-131、Cs-134 及 Cs-137、Sr-89 及 Sr-90、B-140 及 La-140。東京電力公司分析核反應器內核燃料在水中產生的核種及核設施機械腐蝕在水中產生的核種，發現在福島廢水中總共有 62 種  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  核種(如附表所示)必須去除，已非 KURION 系統或 SARRY 系統所能妥善處理，勢必另行新增別的廢水處理系統，才能解決問題。

基於上述因素，東京電力公司新增一套可以去除廢水中 62 項核種、且可以處理高濃度廢液的放射性廢水處理系統，簡稱 ALPS (Advanced Liquid Processing System，如圖 24 所示)。ALPS 廢水處理系統主要由 3 個處理單元組成，包括鐵共沉處理設備、碳酸鹽沉澱處理設備及多核種除去裝置。鐵共沉處理設備主要是藉由與水中核種生成次氯酸鹽錯化體及  $\alpha$  核種氫氧化鐵等化合物共同沉澱，去除  $\alpha$  核種、Mn-54、Co-60 等核種；碳酸鹽沉澱處理設備則藉由加入次氯酸鈉、氯化鐵、調整 pH 值並加入凝集劑，生成氫氧化鐵沉澱去除妨礙吸附去除作用之 Ca、Mg 離子等；多核種除去裝置則運用 14 個相連的吸附塔，內部填充活性碳、鈦酸鹽、鐵氰化合物等吸附材，再連接 2 個填充離子交換樹脂之處理塔，去除廢水中數十種放射性核種。值得注意的是，雖然 ALPS 廢水處理系統幾乎可以去除大多數的放射性核種，但目前仍無法去除放射性氚核種，也使得整體廢水處理效果尚有一絲隱憂。

表 福島廃水去除核種一覽表

No.	放射性物質の種類	線種	No.	放射性物質の種類	線種
1	Rb-86	$\beta \gamma$	32	Ba-140	$\beta \gamma$
2	Sr-89	$\beta$	33	Ce-141	$\beta \gamma$
3	Sr-90	$\beta$	34	Ce-144	$\beta \gamma$
4	Y-90	$\beta$	35	Pr-144	$\beta \gamma$
5	Y-91	$\beta \gamma$	36	Pr-144m	$\gamma$
6	Nb-95	$\beta \gamma$	37	Pm-146	$\beta \gamma$
7	Tc-99	$\beta$	38	Pm-147	$\beta \gamma$
8	Ru-103	$\beta \gamma$	39	Pm-148	$\beta \gamma$
9	Ru-106	$\beta$	40	Pm-148m	$\beta \gamma$
10	Rh-103m	$\beta \gamma$	41	Sm-151	$\beta \gamma$
11	Rh-106	$\gamma$	42	Eu-152	$\beta \gamma$
12	Ag-110m	$\beta \gamma$	43	Eu-154	$\beta \gamma$
13	Cd-113m	$\gamma$	44	Eu-155	$\beta \gamma$
14	Cd-115m	$\beta \gamma$	45	Gd-153	$\gamma$
15	Sn-119m	$\gamma$	46	Tb-160	$\beta \gamma$
16	Sn-123	$\beta \gamma$	47	Pu-238	$\alpha$
17	Sn-126	$\beta \gamma$	48	Pu-239	$\alpha$
18	Sb-124	$\beta \gamma$	49	Pu-240	$\alpha$
19	Sb-125	$\beta \gamma$	50	Pu-241	$\beta$
20	Te-123m	$\gamma$	51	Am-241	$\alpha$
21	Te-125m	$\gamma$	52	Am-242m	$\alpha$
22	Te-127	$\beta \gamma$	53	Am-243	$\alpha$
23	Te-127m	$\beta \gamma$	54	Cm-242	$\alpha$
24	Te-129	$\beta \gamma$	55	Cm-243	$\alpha$
25	Te-129m	$\beta \gamma$	56	Cm-244	$\alpha$
26	I-129	$\beta \gamma$	57	Mn-54	$\gamma$
27	Cs-134	$\beta \gamma$	58	Fe-59	$\gamma$
28	Cs-135	$\beta$	59	Co-58	$\gamma$
29	Cs-136	$\beta \gamma$	60	Co-60	$\beta \gamma$
30	Cs-137	$\beta \gamma$	61	Ni-63	$\beta$
31	Ba-137m	$\gamma$	62	Zn-65	$\beta \gamma$

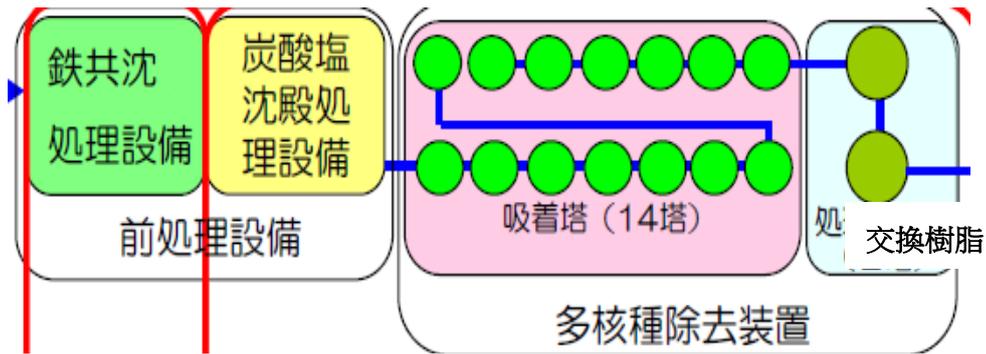


圖 24 ALPS 廢水處理系統

### 整體廢水處理系統之整合、建置與規劃

福島第一核電廠放射性廢水處理系統，經由先期規劃、工程建置、逐步改善及系統整合，目前廢水處理系統已建立整體的架構，相關處理流程如圖 25 所示。核電廠放射性廢水依據水質特性，經過 KURION 或 SARRY 系統除去水中的放射性銫，由於目前核電廠廢水產生量大於循環冷卻水補注量，所以一部分銫去除水流至淡水化裝置，淡化後的水循環注入反應器內，以提供核燃料足夠的冷卻能力，另一部分的銫去除水則流到 APLS 多核種去除處理系統，去除其他核種後暫存於貯水槽。

淡水化裝置 RO 逆滲透程序後產生的濃鹽水，若無需進一步經蒸發濃縮程序製造淡水回收再利用，可排至 APLS 處理系統去除其餘放射性核種後，暫存於貯水槽。淡水貯存槽中的淡水，若不需繼續留置於槽中備用，也可以送至 APLS 處理系統去除其餘放射性核種後，暫存於貯水槽。APLS 多核種去除處理系統截至今(2013)年 9 月底止，尚未順利完成完整的功能測試，若能早日成功正式運轉，將有助於解決部分棘手廢水問題

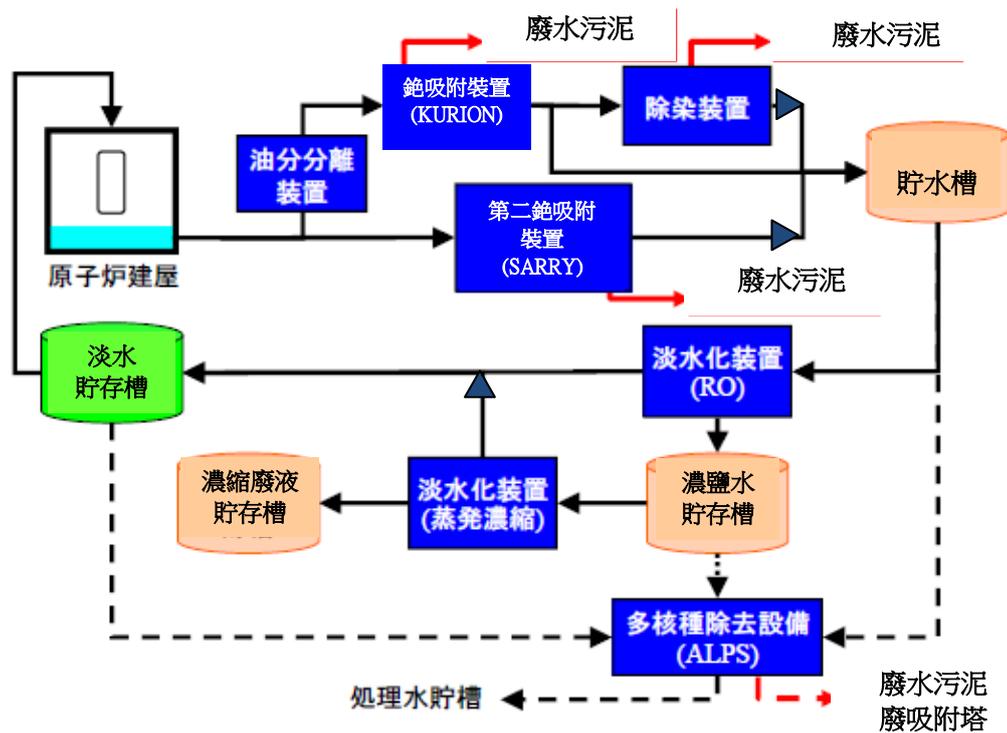


圖 25 福島核電廠放射性廢水處理整合系統

### 實際運作之檢視與檢討

福島第一核電廠地面上放射性廢水已逐步獲得控制，但地下水放射性污染問題是另一項挑戰。福島第一核電廠週遭每日有 1,000 噸地下水流向核電廠(圖 26)，其中 400 噸流入核電廠內，另外 600 噸地下水中有 300 噸遭受輻射污染流向海域。福島核電廠地下水污染問題已受到全世界關注，日本首相安倍晉三更向全世界承諾 2020 年東京奧運時，不會有福島廢水污染問題，更指示經產省積極協助東京電力公司妥善解決福島廢水處理問題。

目前日本經產省及東電公司已研擬 5 項技術方案合併執行，希望能解決地下水污染問題。第一項方案至第三項方案的技術概念，係以多重方法為避免廠周外地地下水接觸廠址地下放射性污染及減少污染水量，並避免污染廢水流到海裡，相關工程施作位置如圖 27 所示。

首先，第一項技術方案係將鋼板樁以連續壁方式，在福島第一核電廠海濱建造一道深度達海床不透水層的擋水牆(圖 28)，鋼板樁之間連接處澆灌混凝土固定，這項工程已於 2012 年 5 月動工，預計 2014 年 9 月完工，希望擋水牆能擋住污染水流入海洋。

第二項技術方案採用凍土工法，在 1 號機至 4 號機四周將冷凍管深埋入地下不透水層(圖 29)，試圖以低溫將冷凍管周圍之地下污染水凍住，讓核電廠污染水不外洩，也讓外界地下水不滲入。這項技術在歐美雖有成功案例，但該案例場址位於淡水岸邊，福島核電廠則位於海濱及沙岩與泥岩互層地質，凍土工法是否適用於互層地質狀態，尚有待事實證明。

第三項技術方案採用測溝(Sub-drain)抽水法，在 1 號機至 4 號機廠房周圍建構深達地下不透水層的側溝(圖 30)，再將側溝中的地下水抽出，以避免地下水流入廠房增加廢水量。

第四項技術方案採取地下水繞流(groundwater bypass)法，此法是在核電廠地下水上游處，設置一系列的抽水井(圖 31)，在地下水流到核電廠前，先經由這些抽水井抽起並經排水管路運到水槽暫存(圖 32)；由於地下水經由排水管路繞過發電機組，形同繞流(bypass)現象，故稱為地下水繞流(groundwater bypass)。

第五項技術方案則採用水玻璃止水工法，在反應器機組進水口之間地面下灌注水玻璃(圖 33)，以減少地下水的滲透；目前 1 號機進水口與 2 號機進水口之間已經完成水玻璃止水工程施作，3 號機進水口與 4 號機進水口之間正展開此項作業(圖 34)。

從測溝抽水工法及地下水繞流工法的圖面，可以看出本項工程使用多個地下水井抽取地下水，多口的地下水井操作，應謹慎評估模擬各抽水井馬力及揚程、水量大小，維持多口地下水井間之水體平衡，避免造成本來無污染的水井因

抽水作用抽來污染的地下水，造成污染擴散；鄰近海濱的地區，因抽水作用將海水抽進地下土壤，造成地下土壤鹽份升高、水份結凍不易，影響凍土工法的品質及結果。因為在一定區域之下，同時施用多種工法，必須考慮工法彼此間差異性及協調性，避免彼此干擾甚至形成反效果，是必須注意的要項。

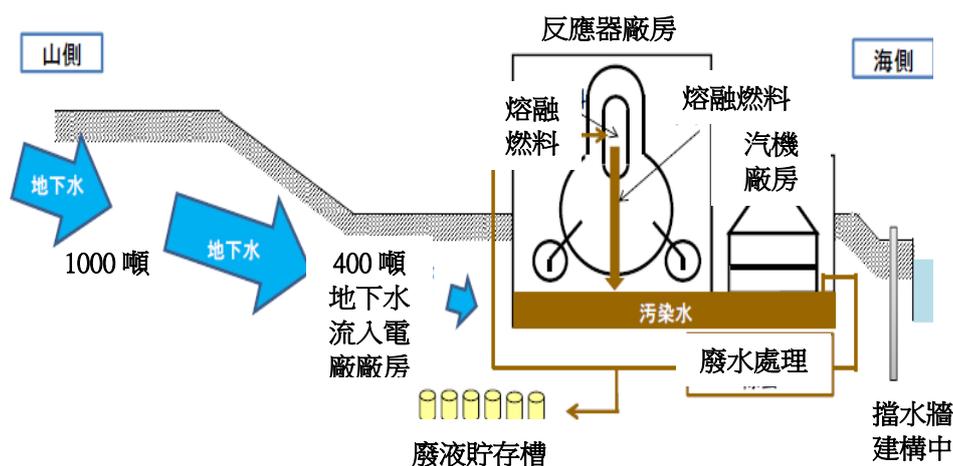


圖 26 福島第一核電廠地下水流向

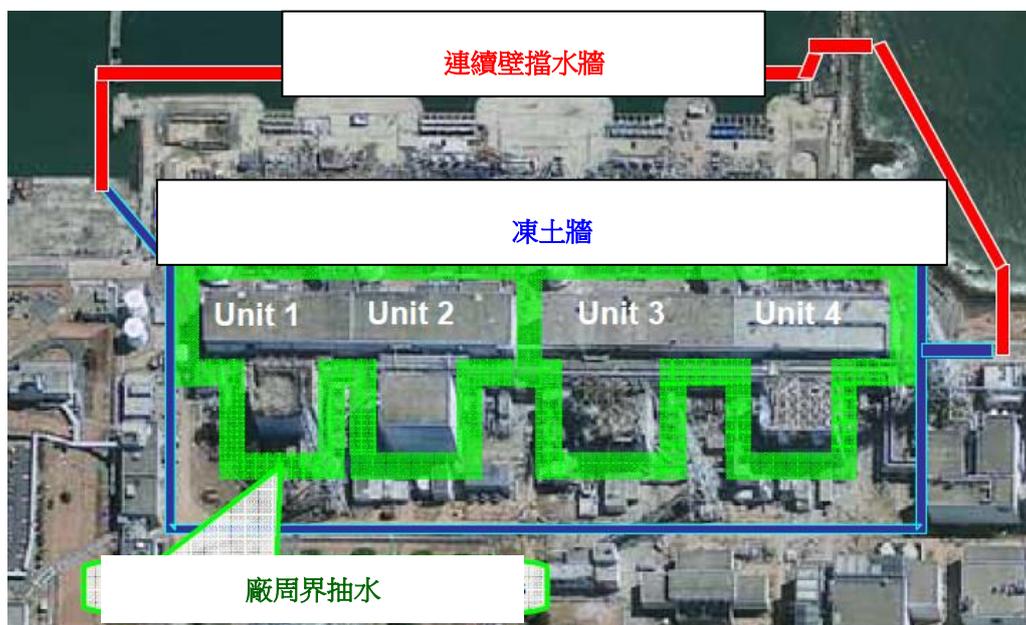


圖 27 連續壁擋水牆、凍土牆、測溝抽水工程施作位置

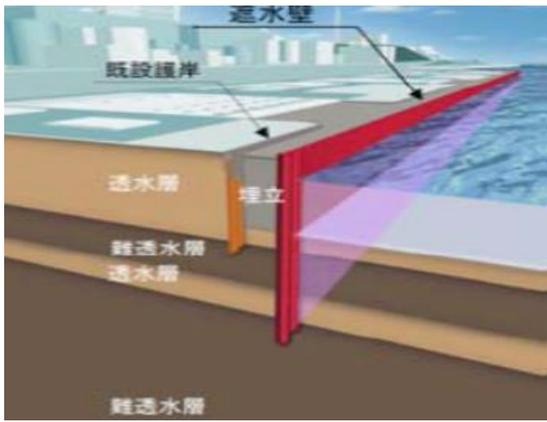


圖 28 連續壁擋水牆工法

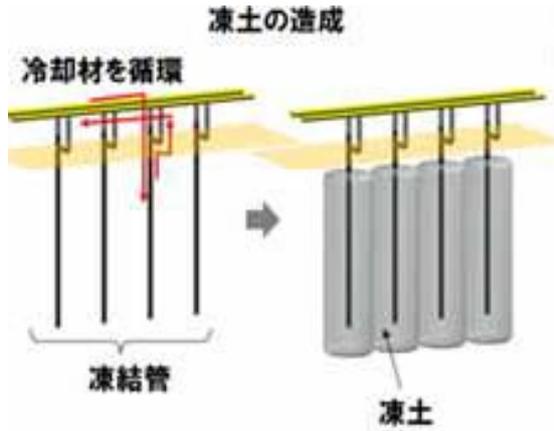


圖 29 凍土牆工法

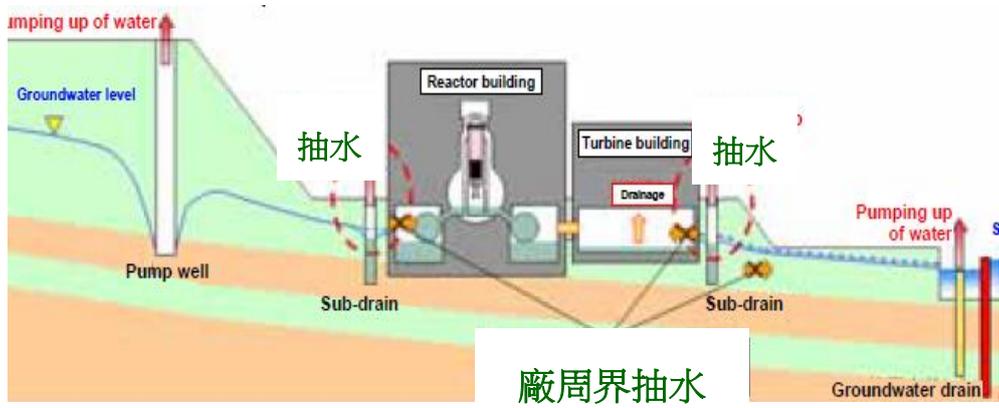


圖 30 測溝抽水工法



圖 31 地下水繞流工程



圖 32 繞流排水管及貯槽

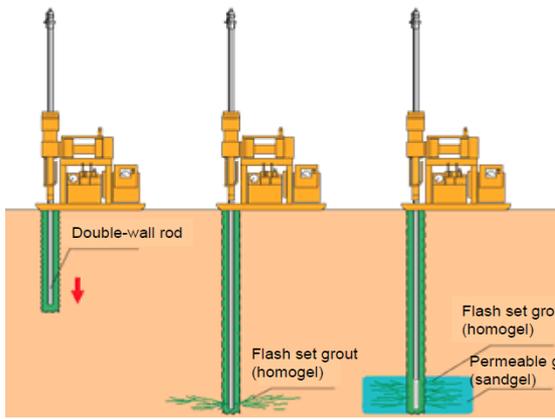


圖 33 水玻璃止水工法

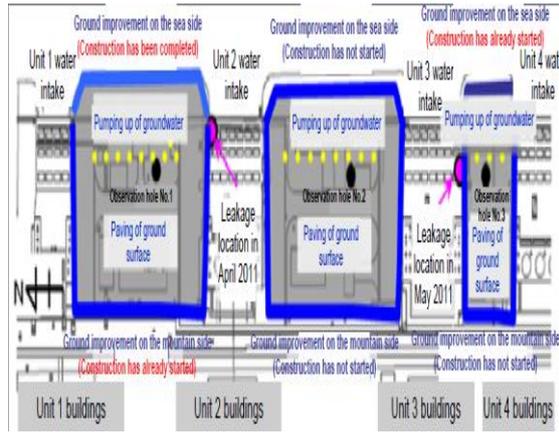


圖 34 水玻璃止水牆位置

### 日本原子力保安院與東京電力公司之管制管理機制

日本發生福島 311 核事故後，2012 年 6 月發布「原子力規制委員会設置法」之後，核能管制工作由原來經產省、文科省及原子力委員會多頭馬車分別管制的架構，改為由原子力規制委員會(NRA)統一管制，以確保管制獨立性及組織一元化，管制機構組織變動情形參考圖 35。

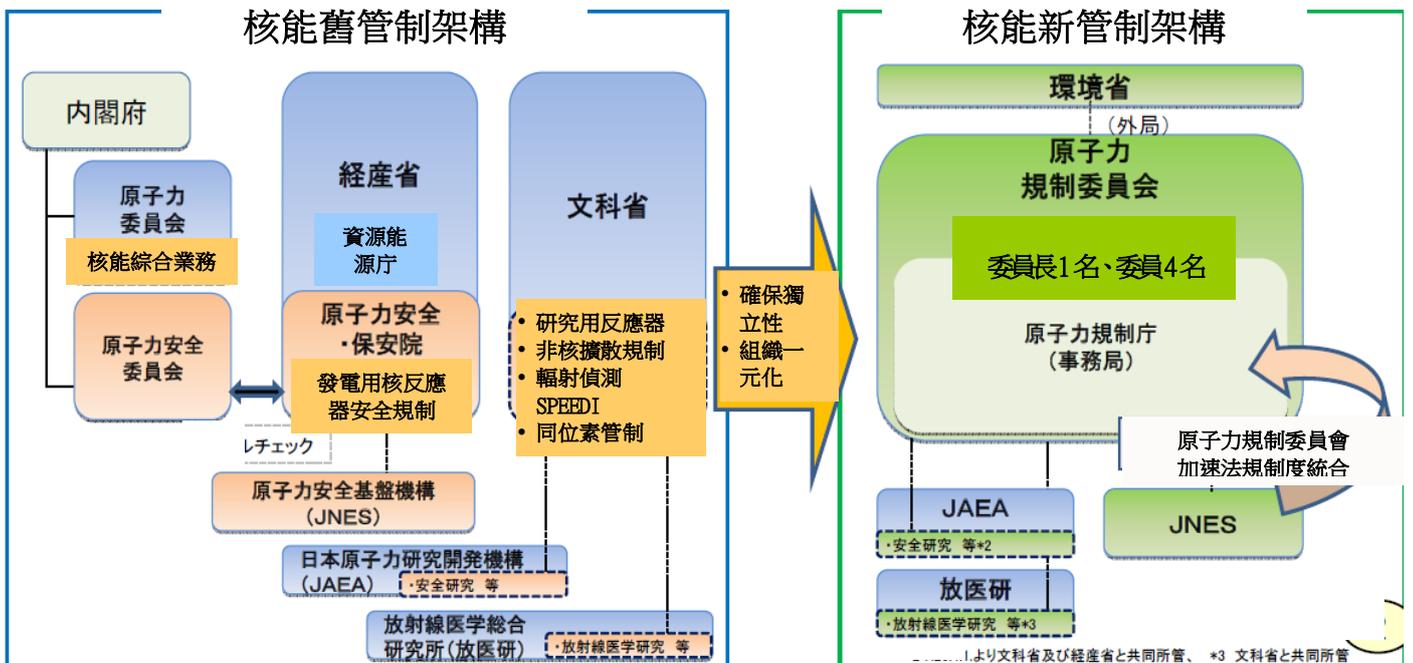


圖 35 日本核能管制機關變動圖

依據圖 35 所示，2011 年 3 月 11 日發生福島核事故之時，因為原子力規制委員會尚未成立，在核電廠放射性廢水處理議題上，東京電力公司直接受到經產省的協助、督導及管制，在制度上有球員兼裁判之虞；對東京電力公司福島放射性廢水處理之管制管理，也是由經產省原子力保安院執行，也引起民眾詬病。2012 年 6 月原子力規制委員會依法成立後，東京電力公司在放射性廢水處理及除役作業上，就改接受原子力規制委員會管制。

由於福島核事出突然，日本並沒有對福島如此大型核災變的放射性廢水處理預為制定相關規範，所以災變後一開始是由經產省原子力保安院指示東京電力公司提送放射性廢水處理相關文件及報告，如原子力保安院 2011 年 6 月以「東京電力株式会社福島第一原子力発電所における高濃度の放射性物質を含むたまり水の処理設備及び貯蔵施設の設置に係る報告書への評価と指示」公文，要求東京電力公司提送「福島第一核電廠高放射性廢水處理設備及貯存設施建置評估報告」，以作為東京電力公司處理貯存高放射性廢水之基礎。東京電力公司就依據這份的指示，定期向原子力保安院提送「福島第一原子力発電所高放射性廢水貯蔵及処理状況」報告，第一期報告已於 2011 年 6 月提送原子力保安院；2012 年 6 月原子力規制委員會成立後，東京電力公司改向規制委員會提送本類報告。

#### 四、建議事項

- (一)、日本處理福島核事故放射性廢棄物，先將廢棄物依輻射劑量高低進行分類，共分 3 類進行處理、貯存及處置作業。參考日本作法，我國原能會所擬「核子事故復原階段放射性污染廢棄物清理原則」(如附件一)，廢棄物亦依輻射劑量分為 3 類，以進行核子事故復原階段清理工作，分類方式與日本雷同。
- (二)、從福島經驗看來，大範圍面積的輻射污染偵測必須借重空中輻射偵測設備，才能迅速地量測、推算界定污染範圍以利規劃復原作業。我國宜引進及發展有效空中輻射偵測技術及能力，與國際同步建立相當偵測能力。
- (三)、參考福島核事故推估放射性廢棄物數量方法，依據不同土地使用分區及特定的除污對象，推算土地使用類別之放射性廢棄物產生因子，可推估不同輻射污染程度地區的放射性廢棄物量。惟各國核事故放射性廢棄物的產生因子不盡相同，所以須發展符合自己國家狀況之放射性廢棄物產生因子，才能在核事故發生初期推估放射性廢棄物可能產生數量，以提供復原階段妥善貯存、處理、處置相關設施規劃與設計之重要參數。
- (四)、日本規劃以 3 年時間建置福島災區高污染放射性廢棄物中期貯存設施並存放 30 年，我國宜檢視現有條件，逐步建立相關軟硬體條件、技術及處理能力，確保緊急應變能力。

(五)、福島核事故發生後，福島核電廠內原有之放射性廢水處理系統，在處理容量或處理功能上，均無法妥善處理事故後福島核電廠數百倍於平日數量且核種複雜之放射性廢水，須重新規劃、設計與建造另一套新的放射性廢水處理系統，方能因應此種災變危害。但由於災害發生事出突然，即使日本國內擁有核工業，對於這樣的輻射危害處理仍面臨困難，無法妥善完成核事故放射性廢水處理。宜借鏡日本福島經驗，對於數量龐大且核種複雜之災害放射性廢水，分析其廢水特性，參考目前已建置之核事故放射性廢水處理系統，探討系統中各廢水處理單元功能及污染去除效率，建立處理規劃及因應之道。

(六)、福島核電廠產生的大量放射性廢水目前已經污染了核電廠周遭地下水及海水，並擴及鄰近海洋生態，處理或防止此類地下水放射性污染，須掌握核電廠周遭水文地質環境，將放射性廢水處理技術結合現地的水文地質條件，方能達到效果。借鏡福島核災經驗，宜請核電廠調查掌握核電廠周遭詳細水文地質環境及條件，先就技術面預為探討相關因應作業，建立完整核電廠周邊水文地質資料庫。

(七)、放射性物質隨大氣及下雨產生沉降，但有的放射性物質會隨著時間與水流、空氣遷移(再浮游)，使得污染範圍及程度改變，須調查掌握放射性物質分布狀況並預測變化傾向，才能正面回應社會期待及掌握重要核種情形。建議參考福島經驗，培養並與國際同步建立環境放射性物質遷移整體調查技術及能量。