

出國報告(出國類別：實習)

東亞地區低放射性廢棄物處理、用過核燃料乾式貯存及最終處置現況與相關技術
研習報告

服務機關：台灣電力公司第二核能發電廠

職稱：分類十等主辦固體廢料處理專員

姓名：林竝修

派赴國家：日本

出國期間：97年10月19日至10月28日

報告日期：97年12月1日

摘 要

放射性廢棄物管理東亞論壇會議(EAFORM) 成立於 2006 年，是一個結合亞洲地區的放射性廢棄物處理及處置技術的 R&D 共同合作、資訊交流與經驗分享之平台，主要宗旨係提昇亞洲地區核能技術與安全。其主要成員來自日本、南韓及台灣的核能研究機構，以及美國的桑迪亞國家實驗室。EAFORM 年會定期在這 4 個成員所在地區舉行大會，每年均由會員地區學術、研究及發電機構派員參加這個盛會，本屆會議尚邀請德國、瑞典、澳洲及中國大陸等相關學術研究單位共同參與。

我國今年由行政院原子能委員會物管局黃局長慶村帶領原子能委員會及台電公司同仁共 11 人前往日本東京與會。會議中所研討範疇除包括參與成員地區放射性廢棄物管理工作現況報告及交流外，另就核反應器設施除役及高/低放射性廢棄物處理、最終處置等技術之研究成果進行分享。在技術參訪行程方面，赴日本岐阜縣東濃地下科學中心位於瑞浪市的超深層地層研究所，實地深入地下 200 公尺的研究坑道，研習日本高放射性廢棄物最終處置的前置研究現況；以及前往日本青森縣六個所村低放射性廢棄物最終處置中心，實地瞭解其低放射性廢棄物最終處置流程與現況，及處置中心南側台地調查坑道內工作情形。

另在日本原子力產業協會的協助安排下，由其國際部部長小林雅治先生及前島徹士先生陪同參訪位於宮城縣女川原子力發電所，實地瞭解#3 機廢棄物處理廠房及低放射性廢棄物貯存設施內之運作現況；以及前往位於茨城縣東海發電所，實地參觀其 1 號反應器發電機組除役工作現況與除役廢棄物外釋作業流程，另外參觀#2 機用過核燃料乾式貯存設施實際運作狀況及管理模式。

目 次

壹、出國目的與行程	
一、出國目的	1
二、行程	1
貳、放射性廢棄物管理東亞論壇（EAFORM）第2屆年會情況報告	
一、日本放射性廢棄物管理現況	3
二、韓國放射性廢棄物管理現況	7
參、參訪活動	
一、東濃地下科學中心	10
二、六個所村低放射性廢棄物最終處置場	13
三、女川原子力發電所	17
四、東海發電所	21
肆、心得與建議	26

壹、出國目的與行程

一、出國目的

台電公司正積極規劃興建用過核燃料乾式貯存場及低放射性廢棄物最終處置場，希望藉由參加日本東京舉辦之第 2 屆放射性廢棄物管理東亞放射性廢棄物管理論壇會議（2nd EAFORM），透過東亞鄰近國家的經驗交流，汲取相關的技術與資訊。另透過同為沸水式反應器機組(BWR)核能電廠的參訪活動，研習低放射性廢棄物處理及最終處置之技術設備，擷取新知未雨綢繆，有助於本公司放射性廢棄物營運預做安排準備，以配合未來此二項作業之順利執行。本次出國實習的目的如下：

- (一)赴日參加東亞論壇會議第 2 屆年會，瞭解東亞地區放射性廢棄物的管理現況。
- (二)參訪日本原子力開發研究機構 (Japan Atomic Energy Agency, JAEA)位於岐阜縣東濃地下科學中心，研習日本進行高放射性廢棄物最終處置場設置前的研究工作情形。
- (三)參訪日本核燃料公司(日本原燃株式会社, Japan Nuclear Fuel Limited, JNFL)位於青森縣六個所村低放射性廢棄物最終處置場，研習其最終處置設施設置與運轉作業情形。
- (四)參訪東北電力發電公司(Tohoku Electric Power Company, TEPC)位於宮城縣的女川原子力發電所，研習乾性廢棄物處理現況。
- (五)參訪日本原子力發電公司(Japan Atomic Power Company, JAPC)位於茨城縣東海發電所，研習其 1 號機除役廢棄物外釋作業及 2 號機用過核燃料乾式貯存設施運作現況。

二、行程

- 97 年 10 月 19 日（星期日）台北啓程→抵達東京
- 97 年 10 月 20 日（星期一）參加 EAFORM 2nd 年會
- 97 年 10 月 21 日（星期二）參加 EAFORM 2nd 年會
- 97 年 10 月 22 日（星期三）參訪東濃地下科學中心
- 97 年 10 月 23 日（星期四）參訪六個所村低放射性廢棄物最終處置場
- 97 年 10 月 24 日（星期五）參訪女川原子力發電所
- 97 年 10 月 27 日（星期一）參訪東海發電所
- 97 年 10 月 28 日（星期二）東京回程→返抵台北

貳、放射性廢棄物管理東亞論壇 (EAFORM) 第 2 屆年會情況報告

在放射性廢棄物管理工作上，運用安全、確定及永續的解決方案對於核能電廠持續成長與其他和平的應用是具關鍵性的影響。因此，在亞洲地區的 R&D 共同合作、資訊交流、經驗分享是非常的重要，也有助於彼此的成長。在這樣的前提下，促成了放射性廢棄物管理東亞論壇(The East Asia Forum on Radwaste Management, EAFORM)的誕生，其主要成員係來自日本、南韓及台灣的核能研究機構，以及美國的桑迪亞國家實驗室(Sandia National Laboratory, SNL)，主要目的爲了提昇亞洲地區核能技術與安全。

首屆的會議由台灣地區主辦，於 2006 年桃園龍潭核能研究所 (INER) 召開，今年則輪值由日本原子力發電環境整備機構主辦(RWMC)，於東京虎之門飯店盛大舉行。本屆會議參與人員不僅由上述地區派員共同與會外，另外，澳洲、德國、瑞典及中國大陸等相關研究機構，亦派員共同參與盛會，進行技術交流與經驗分享。與會議題主要就廢棄物除污、處理與最終處置技術、核能設施除役技術、廢棄物最終處置場址評估方法與經驗，以及用過核燃料最終處置技術等進行交流與討論，議程如表 1。以下就本次會議日本與南韓兩國成員報告低放射性廢棄物處理與處置現況進行摘要報告。

表 1、EAFORM 2nd 年會議程

10 月 20 日 (一)	9:00~09:50	報到註冊		
	10:00~10:20	開幕式 主辦單位致詞：日本原子力發電環境整備機構		
	10:20~12:00	議題：東亞地區放射性廢棄物管理現況		
	12:00~12:50	議題：東亞以外地區放射性廢棄物管理現況		
	12:00~14:00	休息		
	14:00~18:00	廢棄物處置技術	廢棄物處理、除 役與除污技術	廢棄物處置場 址描述及評估
10 月 21 日 (二)	09:00~10:40	廢棄物處置技術		
	10:40~10:50	休息		
	10:50~12:55	廢棄物處置技術	用過核燃料管理	
	12:55~14:00	休息		
	14:00~16:05	廢棄物處置技術	社交溝通技術與策略	
	16:05~16:20	休息		
	16:20~16:50	閉幕式		

一、日本放射性廢棄物管理現況

日本現有運轉機組共有 55 部，總裝置容量為 49,580MW；建造中機組共有 2 部，裝置容量為 2,285MW；計劃建造機組共有 11 部，裝置容量為 14,945MW，其機組詳細分佈情況如圖 2.1-1。對於核燃料自鈾礦開採提煉、核電廠發電、用過核燃料再處理、MOX 燃料製造與高低放射性最終廢棄物處置等，日本已建構出完整的循環架構(如圖 2.1-2)，並自 1985 年開始規劃青森縣六個所村成爲核燃料循環設施，於 1992 年起，陸續建置完成及運轉相關設施，且持續地進行高放射性廢棄物最終處置設施建置的相關研究工作。

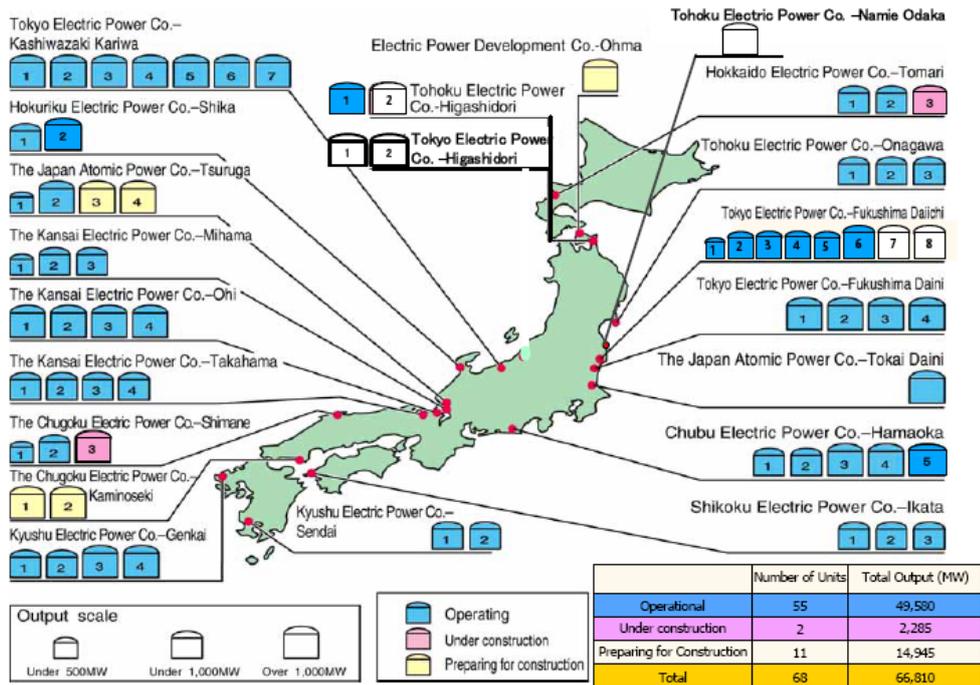


圖 2.1-1：日本核能機組分佈現況

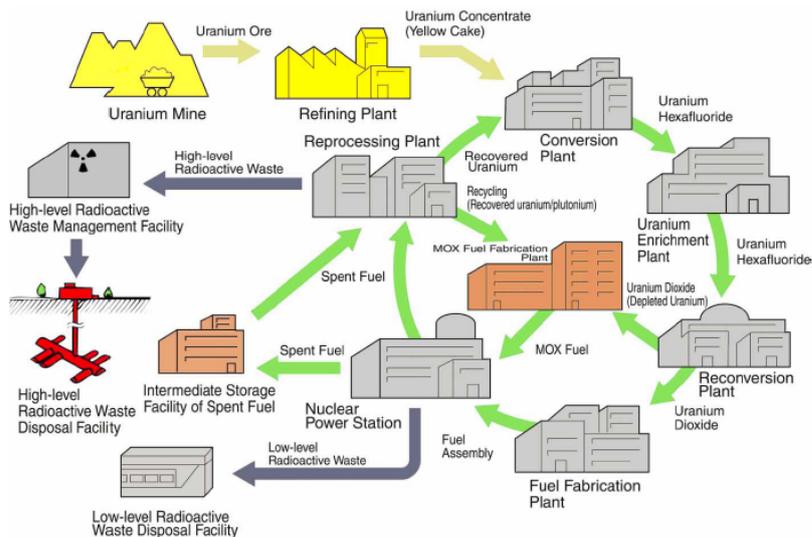


圖 2.1-2：日本核燃料循環架構圖

日本放射性廢棄物係以 α 、 β - γ 核種濃度大小進行分類(如圖 2.1-3)，其來源與處置方式說明如下：

- 1、低於清潔標準(Below Clearance Level)：該類廢棄物經量測低於清潔標準，即可外釋於核能設施以外環境再利用。
- 2、非常低階(Very-Low Level)：該類廢棄物來自於核能設施運轉維護及除役過程所產的廢棄物，以無工程屏障之近地表處置(Near surface Disposal)方式進行最終處置。
- 3、低階(Low-Level)：該類廢棄物來自於核能設施運轉維護及除役過程所產的廢棄物，以工程屏障之近地表處置方式進行最終處置。
- 4、相對高活度(Comparative High Radioactivity)：該類廢棄物來自於核反應器之除役工作，以次地表處置方式(Sub-surface Disposal)進行最終處置，處置深度約在底表下 50~100 公尺。
- 5、含 TRU 核種：該類廢棄物來自於用過核燃料再處理及 MOX 燃料製造工廠，以近地表、次地表與地質處置方式(Geological Disposal)進行最終處置。
- 6、高階(High-Level)：該類廢棄物來自於用過核燃料再處理工廠，以地質處置方式進行最終處置。

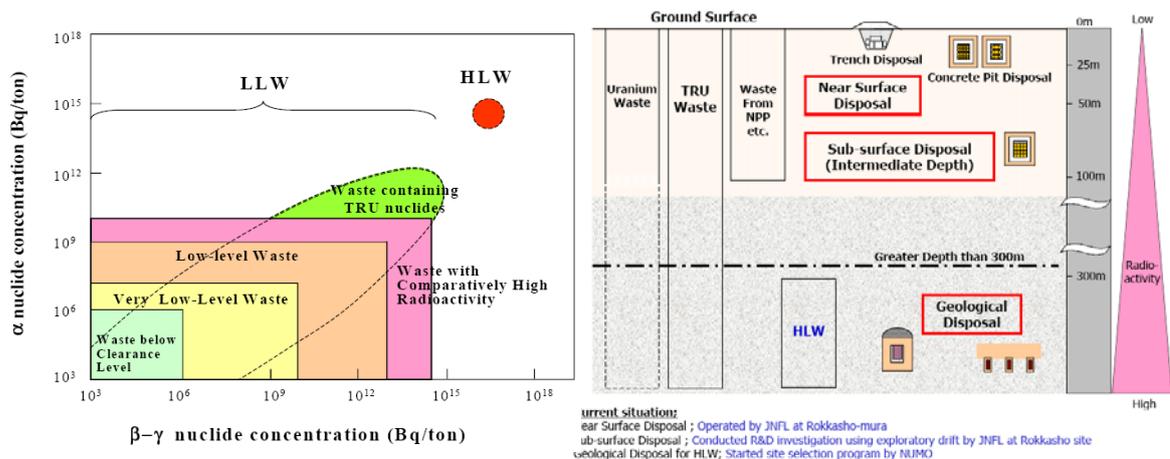


圖 2.1-3：日本放射性廢棄物之分類及其最終處置概念

如前所述，日本對於低階放射性廢棄物係以近地表(Concrete pit)方式進行最終處置，由 JNFL 位於青森縣六個所村興建最終處置場，1992 年開始啓用運轉第一期最終處置設施，主要處置濃縮廢液均勻固化廢棄物。2000 年開始啓用運轉第二期最終處置設施，主要處置乾性廢棄物。2002 年 11 月，開始於最終處置中心南側台地開挖調查坑道，進行次地表處置之研究工作，以做為將來高 β - γ 核種濃度廢棄物最終處置之用。該類廢棄物，如 Channel Box、可燃有毒物、控制棒、反應爐爐心構造及用過離子交換樹脂等，被置入不銹鋼材質的高完整性容器(High Integrity Container，如圖 2.1-4)內，密封後置入深達 50~100 公尺的處置坑進行掩埋與灌漿(如圖 2.1-5)。

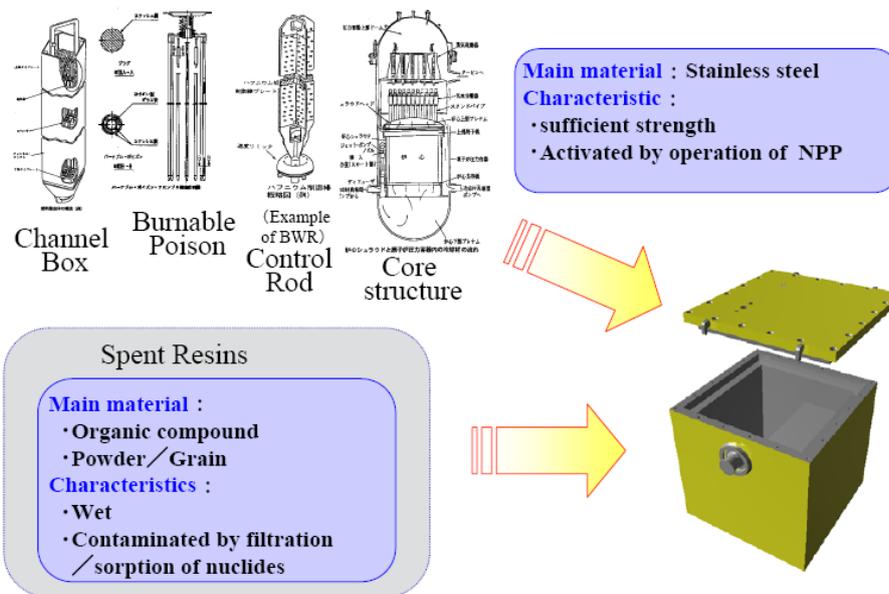


圖 2.1-4：次地表最終處置廢棄物標的與容器

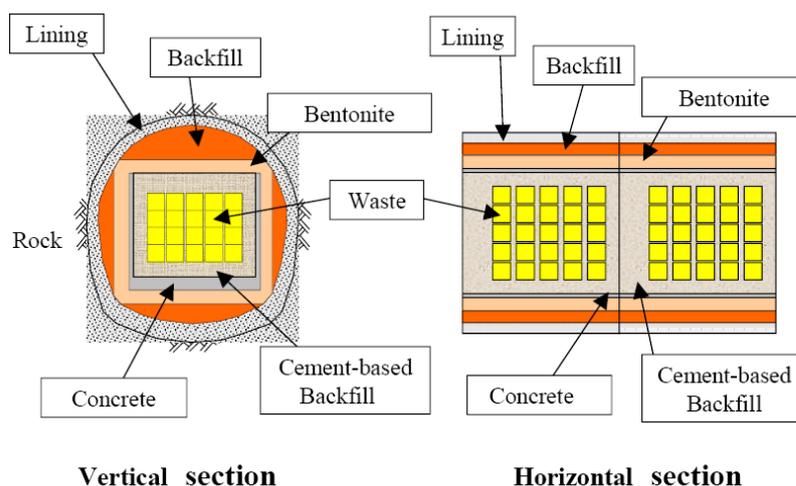


圖 2.1-5：次地表最終處置概念設計

日本對於高階放射性廢棄物的地質最終處置工作，已規劃出一個建置流程與時程。自 2002 年起，公開甄選自願候選場址，再進行這些區域與環境的調查工作，所採用的方法為文獻研究，選出預備性調查區域 (Preliminary Investigation Areas, PIAs)。接下來再針對這些區域進行地表基礎資料的調查 (surface-based investigation)，所採用的方法為鑿孔研究，預計於 2013 年篩選出詳細的調查區域 (Detailed Investigation Areas, DIAs)。針對這些 DIAs 的地下調查設施中，進行詳細的地表探勘、測量與試驗，預計於 2028 年篩選出最終處置場址 (Repository Site, RS)。接下來進行後續的申請建造與興建設施的工作，預定於 2030 年啓用運轉 HLW 最終處置設施。

爲了要執行這計畫，日本成立最終處置法 (The Final Disposal Law) 來推動各項工作，由經濟、貿易與工業部門 (Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) 負責建立基本政策及一個十年期及每五年更新之最終處置計畫。在 2000 年 12 月，由日本核能電廠共同出資成立核能廢棄

物管理組織(Nuclear Waste Management Organization, NUMO)，負責場址的選定、設施的建造與運轉，由放射性廢棄物管理基金與研究中心(Radioactive Waste Management Funding and Reserch Center, RWMC)受 NUMO 委託管理所籌措之處置基金，其執行組織架構圖如 2.1-6。

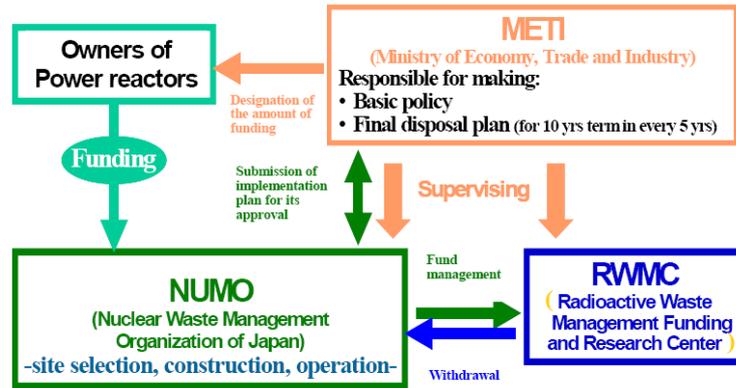


圖 2.1-6：日本 HLW 地質處置執行組織架構圖

對於 HLW 最終處置的相關研究工作方面，JAEA 負責基礎科學技術方面的 R&D 工作，分別在岐阜縣瑞浪市及北海道幌延町興建深地層研究所，其研究的母岩則分別為花崗岩及沉積岩(如圖 2.1-7)。而在工程基礎技術方面的 R&D 工作，則由 RWMC、CRIEPI(Central Research Institute of Electric Power Industry)、ASIT 及 NIRS 等機構負責，經費則由 METI 資助。對於執行 HLW 處置計畫的 R&D 工作則由 NUMO 負責。

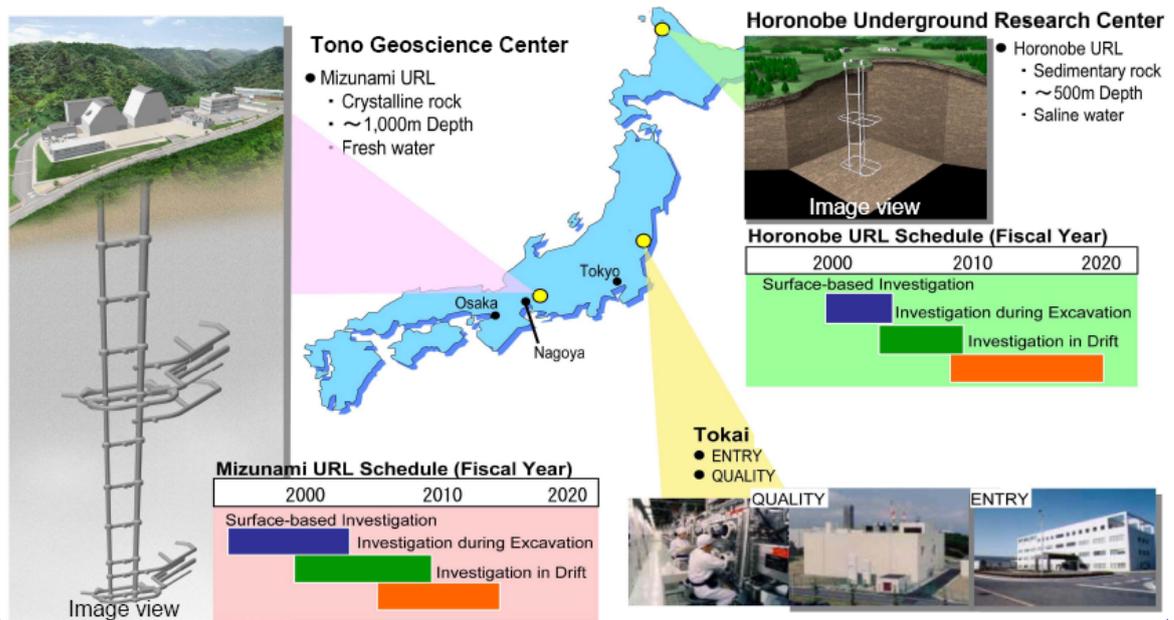


圖 2.1-7：JAEA 在 HLW 最終處置方面的 R&D 設施

在 HLW 最終處置技術方面，則規劃以固化或玻璃化的穩定形式貯存 30~50 年，然後在超過地表下幾百公尺深度下，以多重屏障系統為基礎的處置場進行處置，其被處置之總數預估至 2020 年為 40,000 組玻璃化 HLW 金屬罐(canister)，如圖 2.1-8 所示。

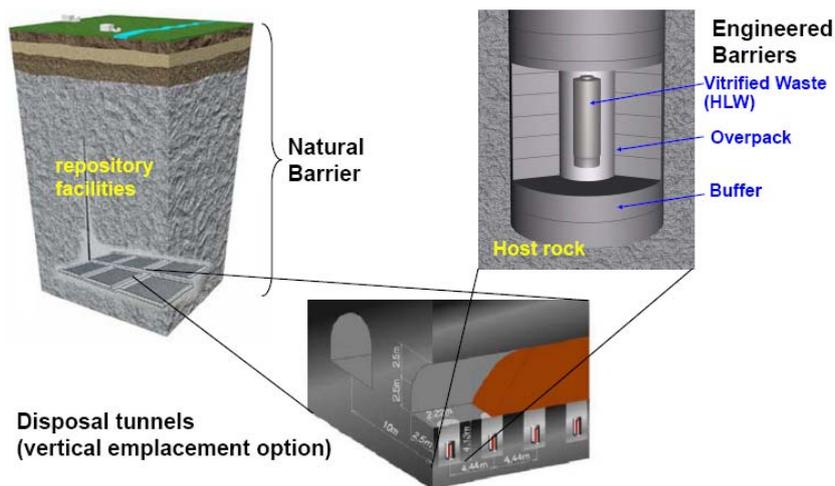


圖 2.1-8：HLW 最終處置的處置場設計概念

二、南韓放射性廢棄物管理現況

南韓現有運轉機組共有 20 部，總裝置容量為 17,716MW；建造中機組共有 6 部，裝置容量為 6,800MW；計劃建造機組共有 2 部，裝置容量為 2,680MW，其機組詳細分佈情況如圖 2.2-1。



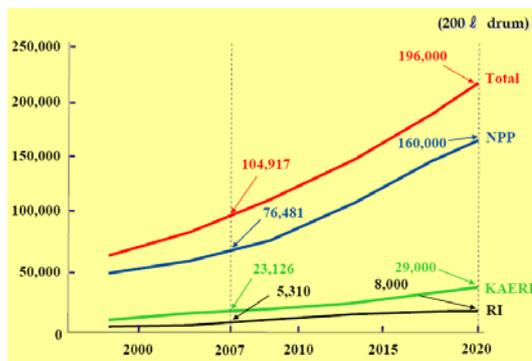
圖 2.2-1：南韓核能機組分佈現況

1988 年南韓原子能源法案通過「污染者付費」條款，由科技部負責徵收韓國水力與核電公司（KHNP）和韓國核燃料公司發電稅，款項納入國家放射性廢棄物基金。修訂版的放射性廢棄物方案則由核能環境科技研究所（Nuclear Environment Technology Institute, NETEC）起草，並且在 1998 年獲原子能委員會（Atomic Energy Commission）核准通過。韓國水力與核電公司則自行負責管理其產生的放射性廢棄物。在南韓 1998 年所提出的放射性廢棄物管理政策揭櫫其管理方針：直接由政府控制、安全為首要目標、致力抑減廢棄物產量、遵循污染者付費原則及選址過程透明化等。

在 2004 年 12 月，南韓原子能委員會第 253 次會議做出南韓放射性廢棄物的政策規劃方向：

- (一) 低階與中低階廢棄物(LILW) 最終處置設施將優先建置，且與用過核燃料中期貯存設施分開，預計將於 2009 年興建完成。
- (二) 用過核燃料管理政策(包括中期貯存設施)方面，需在國家政策與技術發展考量下，經由公聽會取得共識後進行，預計將於 2016 年興建完成。

南韓 LILW 主要來自各核能電廠、核能研究所(KAERI)及 KHNP-NETEC (RI waste)，至 2007 年累計已產生 104,917 桶，預估至 2020 年將達 196,000 桶，其中，各核能電廠產量佔全國 72.9%(如圖 2.2-2)。由圖 2.2-3 資料顯示，4 座核能電廠 LILW 累積設計貯存容量為 99,900 桶，至 2007 年已累積產生 76,481 桶，僅剩 23.4%的貯存餘裕，其中 Ulchin 及 Wolsong 兩座電廠即將於 2008 年與 2009 年達到貯存飽和的狀態，顯然南韓政府若未興建 LILW 最終處置設施供處置，即可能影響核能電廠的正常運轉。



Site	Capacity	Cumulative Amount	Saturation Year
Kori	50,200	37,977	2014
Yonggwang	23,300	18,246	2012
Ulchin	17,400	13,506	2008
Wolsong	9,000	6,752	2009
TOTAL	99,900	76,481	-

圖 2.2-2：南韓 LILW 產量統計

圖 2.2-3：南韓各核能電 LILW 貯存狀況

因此，南韓政府早已於 1988 年開始著手 LILW 最終處置設施的選址作業，一直到 2004 年為止，經過 9 次的嚐試努力皆宣告失敗，主要是民眾對安全缺乏信心、充滿焦慮，在選址過程缺乏透明化、公開討論與民眾參予，且民眾對於由政府出資興建充滿疑慮等。故在 2005 年 5 月透過制定特別法案，採取區域公民投票、3 億美金的財政來源、與用過核燃料相關設施分開興建、組織一個選址的特別小組與宣告選址的標準等措施，終於在 2005 年 11 月選出慶州市做為 LILW 最終處置設施場址(現已正式更名爲「月城 (Wolsong) 中低放射性廢棄物最終處置中心」，其選址過程如圖 2.2-4 所示。

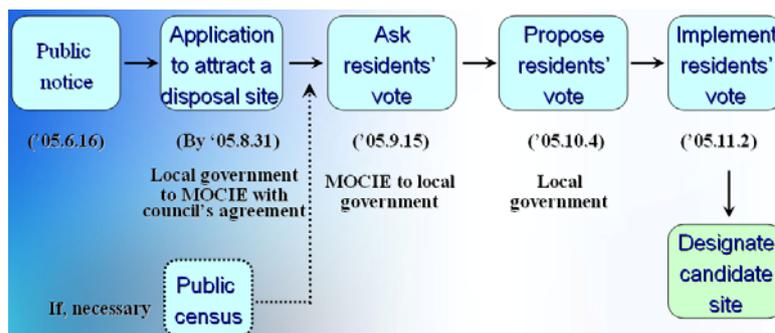


圖 2.2-4：南韓 LILW 最終處置設施的選址過程

月城中低放射性廢棄物最終處置中心佔地 2,096,838 m² (建物規劃如圖 2.2-5)，採用岩層洞穴 (rock cavern) 處置型式 (如圖 2.2-6)，總設計最終處置容量為 800,000 桶，處置場將包括 42 個筒倉及 5 個岩穴，2006 年 6 月規劃第一期最終處置區處置容量為 100,000 桶，2008 年 7 月取得建造許可與運轉執照，預計 2010 年 6 月興建完成。該最終處置坑係嵌入岩石深層並襯以鋼筋混凝土的 6 個混凝土筒倉 (SILO) 內，每一混凝土筒倉位於海平面以下 80 - 130 公尺深的花崗岩床處，直徑 25 公尺，高 50 公尺，貯存容量為 16,670 桶廢棄物，在廢棄物桶置入筒倉內後，任何剩餘空間將以岩屑回填。



圖 2.2-5：LILW 最終處置場建物規劃及工程輪廓圖

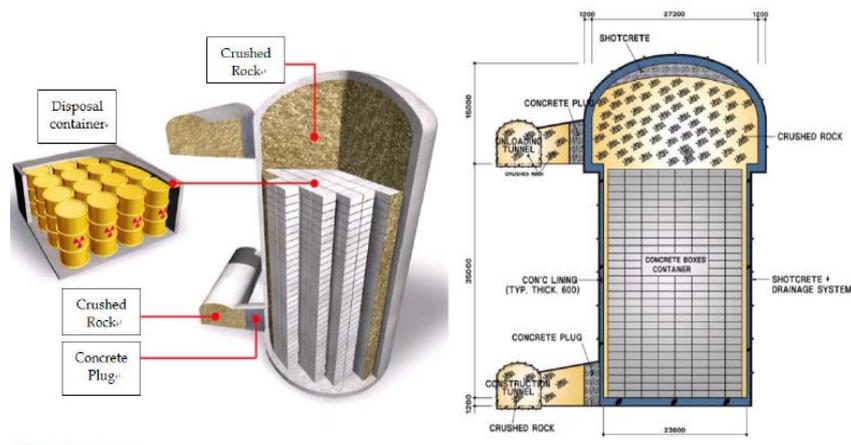


圖 2.2-6：rock cavern 設計概念

南韓 HLW 主要來自各核能電廠，其用過核燃料的型式有壓水式 (PWR) 及加拿大重水式 (CANDU) 兩種，至 2007 年累計已產生 9,420 噸，預估至 2020 年將達 20,000 噸 (如圖 2.2-7)。由圖 2.2-8 資料顯示，4 座核能電廠 HLW 原累積設計貯存容量為 12,561 噸，其中 Ulchin 及 Wolsong 兩座電廠因即將於 2008 年與 2009 年達到貯存飽和的狀態，故已進行用過核燃料格架擴充工程，使其增加 3,860 噸的貯存容量，將飽和年限延長至 2018 年。同樣在 2004 年 12 月，南韓原子能委員會第 253 次會議對用過核燃料處置做出管理政策規劃方向，在 2016 年以前，透過公民投票的方式決定中期貯存 (AR/AFR) 方法及最終處置選項。

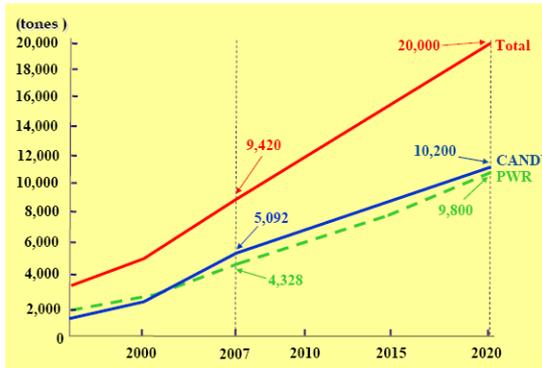


圖 2.2-7：南韓 HLW 產量統計

Site	Capacity	Cumulative Amount	Year of Saturation	Expansion of Storage
Kori	2,253	1,623	2016	2016
Yonggwang	2,686	1,491	2016	2021
Ulchin	1,642 (2,327) ¹⁾	1,214	2008	2018
Wolsong	5,980 (9,155) ¹⁾	5,092	2009	2017

1)() storage capacity after expansion

- PWR : storage high-density storage rack

- CANDU : 300 silos & high-density storage system(KN-400)

圖 2.2-8：南韓各核能電 HLW 貯存狀況

南韓政府對於用過核燃料採取永久處置或再循環使用並未建立一個長期明確的管理政策，但多方面的研究工作也一直在進行。在 KIEP-21(Korean, Innovative, Environmentally Friendly, and Proliferation Resistant System for the 21st C)的主要R&D計畫(如圖2.2-9)，除對於永久處置仍朝地質處置方式研究外，另一方面則研究以Pyroprocess，開發進步型燃料再循環技術，建立測試型快滋生反應器。目標要達到節省處置空間及縮短管理時間幾百年。

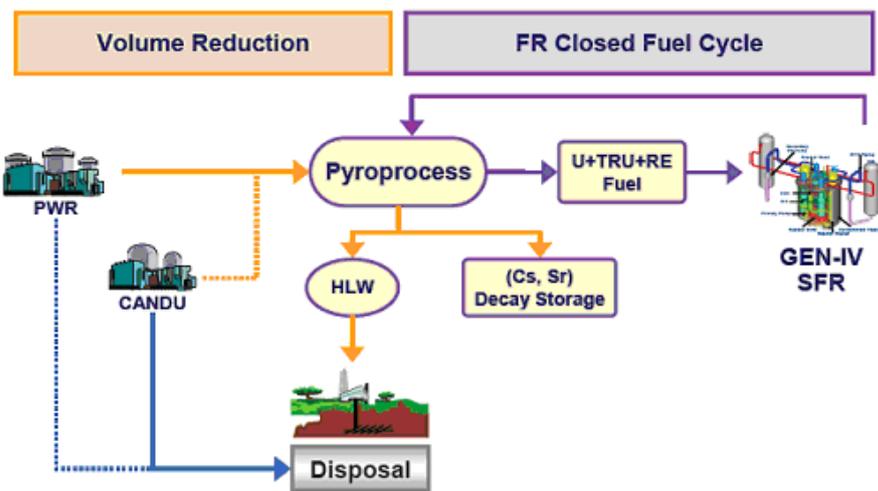


圖 2.2-9：KIEP-21 主要 R&D 計畫

參、參訪活動

一、東濃地下科學中心

日本為了示範高放射性廢棄物最終處置技術可靠性與安全性，日本原子力開發研究機構將計畫分成三個領域，分別為地質環境評估、最終處置場設計與工程技術及功能評估。在地質環境評估方面，除進行全國地質文獻調查外，亦在東濃與釜石礦場進行區域與現場地球科學研究，同時亦進行地下研究設施規劃。故在岐阜縣瑞浪市興建超深層地層研究所及北海道幌延町興建深地層研究所，瑞浪超深層地層研究所(Mizunami Underground Research Laboratory, MIU)之母岩為花崗岩，幌延深地層研究所(Horonobe Underground Research Laboratory, HOU)

之母岩為沉積岩。設置上述研究所主要是研究地質與地質構造、水文學特性、地球化學特性、核種遷移特性及岩石力學特性。

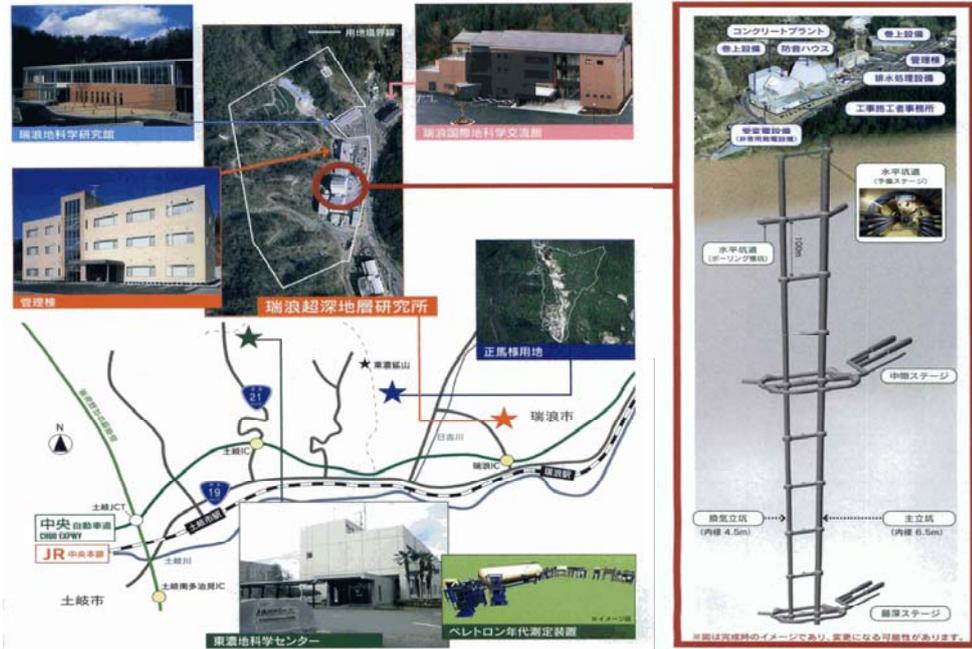


圖 3.1-1：瑞浪超深地層研究所地理位置及設計佈置圖

瑞浪超深地層研究所屬於東濃地下科學中心，但因該地下實驗室場址之行政區位於瑞浪市(地理位置如圖 3.1-1 所示)，故實驗室之名稱爲瑞浪而不稱東濃，其設計規格以二條豎坑作爲通道，豎坑之間間距 40 m，最大深度地面下 1,025 m，圓形直徑爲 6.5 m，通風豎井直徑爲 4.5 m。中期階段(middle stage)爲地面下 500 m，主要階段(main stage)爲地面下 1,000 m，每個次階段(sub stage)爲 100 m(如圖 3.1-2 所示)。

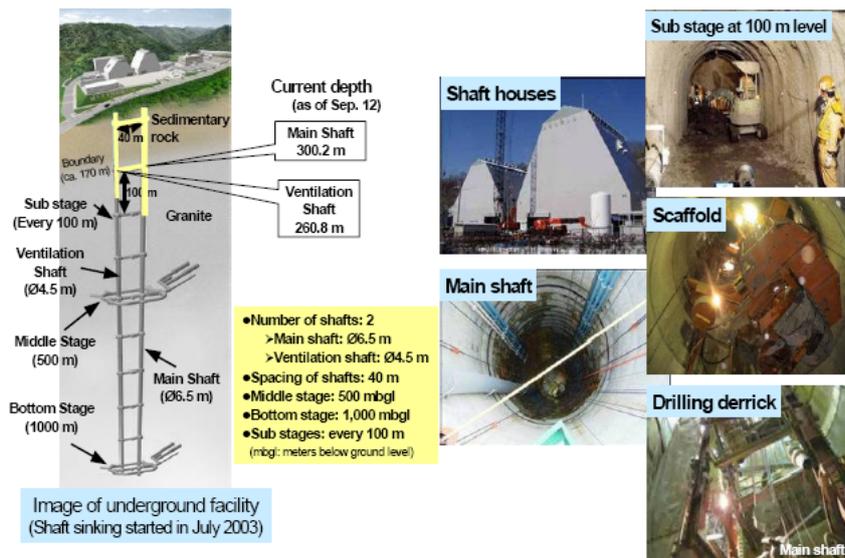


圖 3.1-2：瑞浪超深地層研究所設計佈置圖

MIU 計畫主要區分爲三個時程，分別爲地表基礎調查、建造與運轉。在地表基礎調查工作時程主要是進行地理、水文地理、水文化學及岩層

力學等調查工作(如圖 3.1-3 所示)。MIU 計畫第二個工作時程預計分別於地下 500 公尺及 1,000 公尺處建立實驗設施，其建造過程分為四個階段，分別為透過已經存在的淺層鑽井或新鑽井進行探勘、進行深井之鑽探，進行深井之間之相關試驗、建造實驗用坑道(橫向)、進行斷面水力特性之試驗及建構豎井與通道，目前正進行豎井與通道的開挖與相關試驗量測。其中鑽探深井則已達 1,000 公尺處，鑽探特別選擇以穿越斷層帶的方式進行，並採取傾斜水平面 $5\sim 7^\circ$ 的角度進行鑽挖，同時於特定深度後，鑽頭更能於特定位置轉變其方向，此機具之研發成果類似電力中央研究所之鑽探設備，顯示日本對於深井鑽探之技術有其獨到之處。

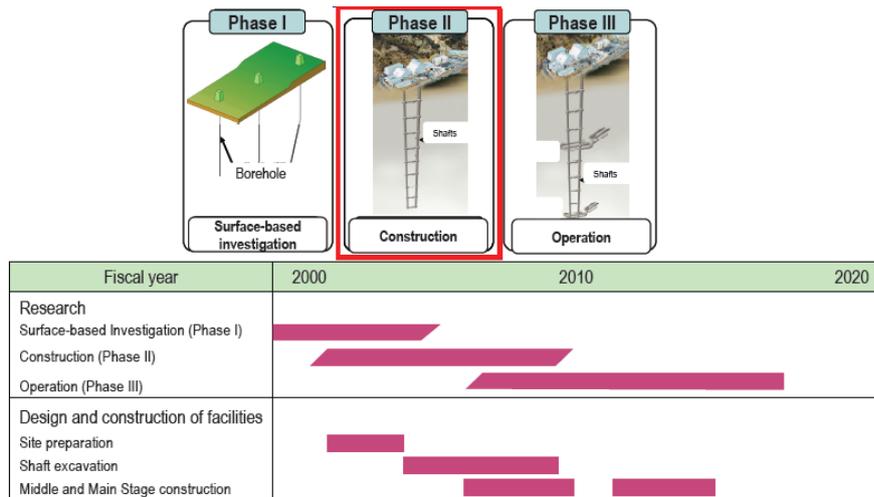


圖 3.1-3：MIU 計畫時程計劃表

MIU 現階段工作主坑與換氣坑已於平成 19 年(2007)分別開挖至地面下 231.2m 與 202.6m，200m 的水平坑道。豎井直徑 6.5 公尺，通氣井直徑 4.5 公尺，平均進深約每 0.5 公尺/日。預計之研究內容則包含解決第一個工作時程待確認的議題及確認其預測的地質模型，並將開挖過程之相關資料，回饋於模型之建立，並持續推估與確認地質綜合流程 (geosynthesis work flow)。本次參訪由設施人員分組搭乘電梯下達深度 200 公尺處(如圖 3.1-4 所示)，實地參觀坑道內佈置(如圖 3.1-5 所示)、坑道及地層露出實景(如圖 3.1-6 所示)及地下水監測(如圖 3.1-7 所示)。參觀後發現，日本對於高放射性棄物最終處置場設置前的準備工作，不僅只參考歐美先進國家作法，其國內最終處置場址適用性的研究工作亦做得非常詳盡與確實。



圖 3.1-4：人員搭乘電梯



圖 3.1-5：坑道內佈置圖



圖 3.1-6：坑道內實景

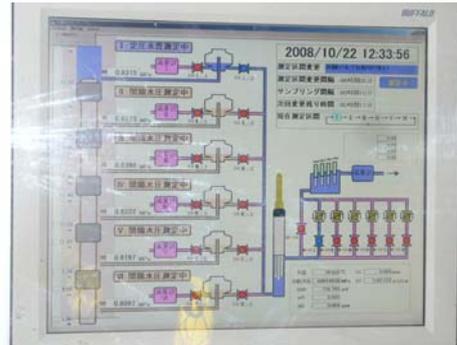


圖 3.1-7：坑道內地下水監測儀器與內容

二、六個所村(Rokkasho-mura)低放射性廢棄物最終處置場

JNFL 於 1980 年 3 月 1 日成立，主要由東北電力、東京電力、中部電力、北陸電力、關西電力、中國電力、九州電力、四國電力、北海道電力等 9 家核能電力公司組成，資本額 2 千 5 百億日圓，現有員工 2 千餘人。六個所村位於日本本州青森縣，由於規劃得宜加上持續的努力，六個所村由戰備石油區成功的轉型為日本核燃料循環的重鎮。JNEL 自 1985 年開始規劃六個所村成為核燃料循環設施，經多年之建設，鈾濃縮廠及低放射性廢棄物最終處置場於 1992 年開始運轉，而玻璃固化廢棄物貯存中心及用過核子燃料接收貯存設施則陸續於 1995 年與 1999 年運轉，目前用過核子燃料再處理廠正進行最後測試，預計於 2008 年 11 月運轉，2001 年 MOX 燃料製造廠則已獲得當地政府同意，正在申請建造許可，另東京電力公司為因應再處理廠處理容量之不足，亦於此地規劃一用過核子燃料之乾式貯存場，以供未來全國核能電廠所產生之用過核子燃料集中貯存之用，六個所村的地理位置及主要設施如圖 3.2-1、3.2-2 所示。

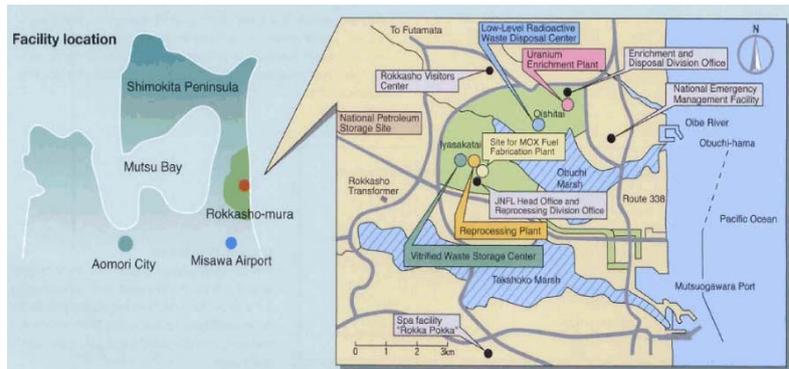


圖 3.2-1：六個所村地理位置



圖 3.2-2：六個所村各項處理設施實景圖

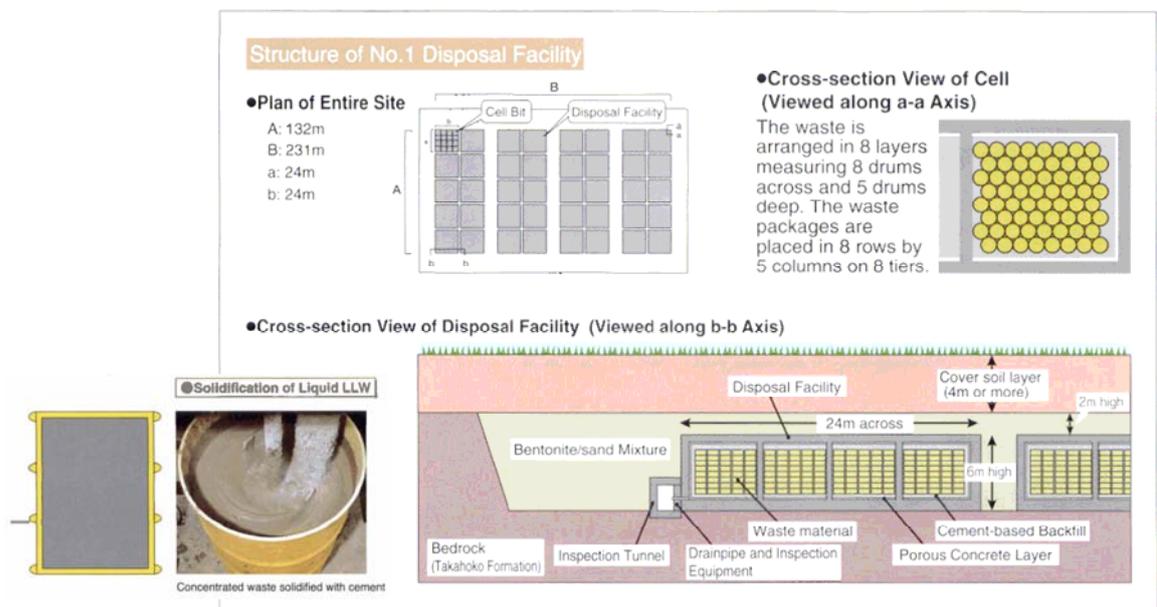


圖 3.2-2：均勻固化桶最終處置區廢棄物桶配置圖

低放射性廢棄物最終處置中心規劃處置容積為 $600,000 \text{ m}^3$ ，設計容量 300 萬桶，已核准之處置容積為 $80,000 \text{ m}^3$ （約 40 萬桶），於 1992 年 12 月開始運轉，第一期工程為均勻固化桶處置區(如圖 3.2-2)，共有 30 個處置單元，每一單元長、寬各 24 公尺，高 6 公尺，可處置 5,120 桶廢棄物，總處置量為 153,600 桶，截至 2008 年 9 月 30 日已處置 138,939 桶；第二期工程為非均勻固化桶處置區(如圖 3.2-3)，共有 16 個處置單元，每一單元長 36 公尺，寬 37 公尺，高 6 公尺，可處置 12,960 桶廢棄物，總處置量為 207,360 桶，截至 2008 年 9 月 30 日止，共已處置 62,064 桶。六個所村低放射性廢棄物最終處置場其廢棄物桶處置流程(如圖 3.2-4)說明如下所述：

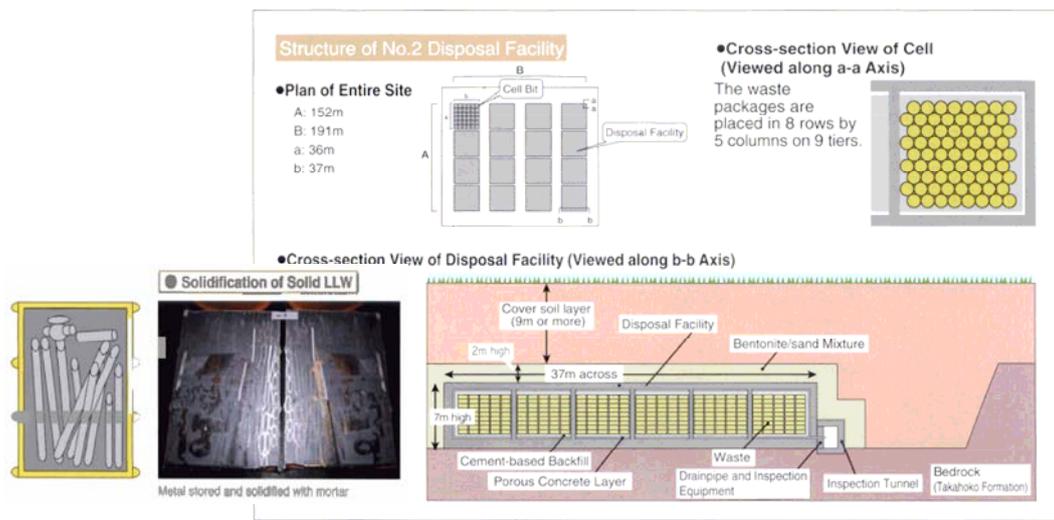


圖 3.2-3：非均勻固化桶最終處置區廢棄物桶配置圖

專用船至各核能電廠收集廢棄物桶，再以海運送至小川原港卸下。



將廢棄物桶自運送貨櫃取出逐一檢查後，再載送至最終處置場。



將廢棄物桶自運送車以每 8 桶一組取出後，再置入處置窖中。



將砂漿灌入處置窖縫隙



將強化混凝土蓋置入處置窖的頂部，組成一個磐石的岩層。



處置窖頂部覆蓋一層不透水土壤及火山灰黏土，再植上草皮。

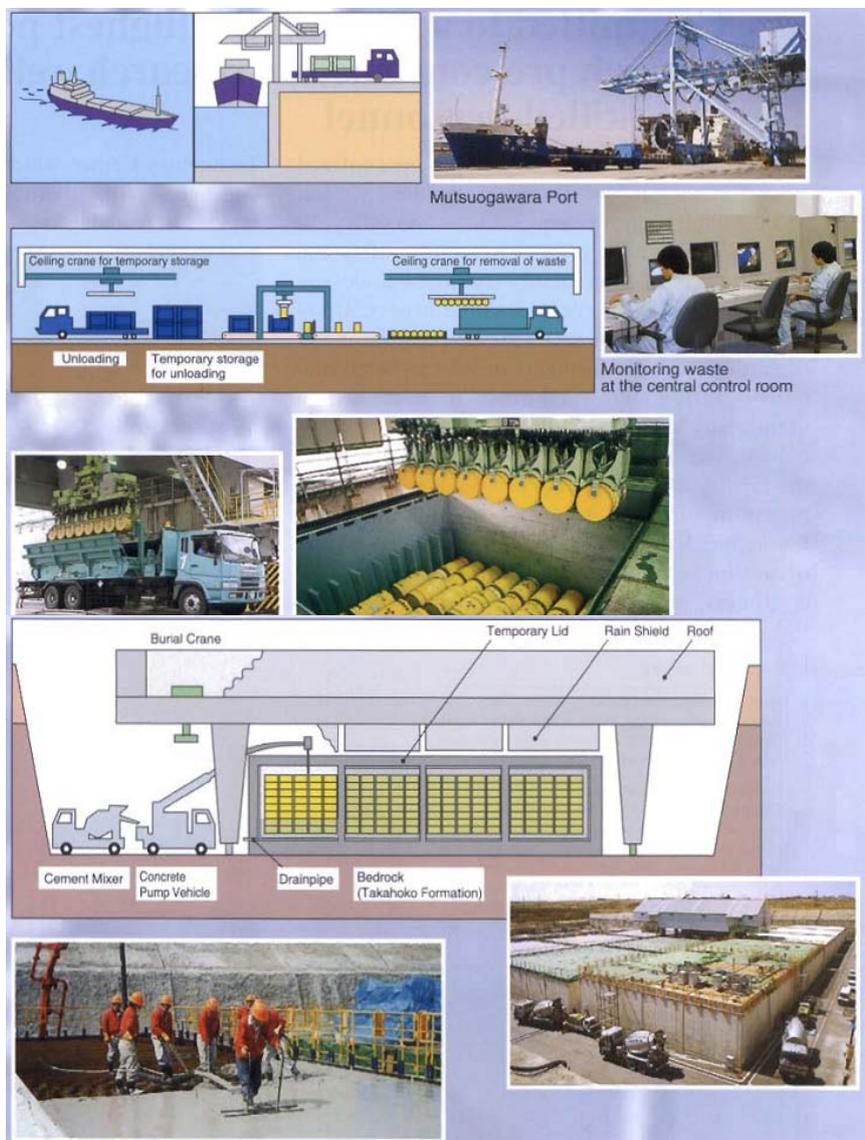


圖 3.2-4：低放射性廢棄物桶最終處置流程

此最終處置中心之第三期工程，預定處置核能電廠所產生之廢棄控制棒及燃料格架，在日本該類廢棄物屬中低放射性廢棄物，除掩埋之深度（50-100 公尺）與前二期之低放射性廢棄物不同（8-9 公尺），處置方式為坑道式，與之前的淺地層掩埋亦有所區別，為確認地質、地下水及岩盤之條件能符合處置之規定，2002 年 11 月日本核燃料公司於處置中心南側台地開挖調查坑道，分三方面進行調查：

(一)設施預定地附近地質、地下水及岩盤之狀況

主要調查項目為地質觀察、物理試驗、三維抗壓試驗、透水試驗、流速測定及地下水壓測定，這些項目皆於調查坑內進行。

(二)設施安定性

主要調查項目為地質觀察、岩盤變位測定及支撐工程應力測定，這些項目皆於試驗空洞進行。

(三)南側台地、尾鮫沼澤之地質及地下水狀況

主要調查項目為鑽探調查、物理試驗、三維抗壓試驗、透水試驗、地下水壓測定、水質試驗及音波探測，這些項目皆以鑽探方式為之。

調查報告於 2006 年 3 月完成，目前於調查坑內仍繼續進行更進一步之計測工作。調查工作之相關位置如圖 3.2-5 所示，調查坑之示意圖如圖 3.2-6。

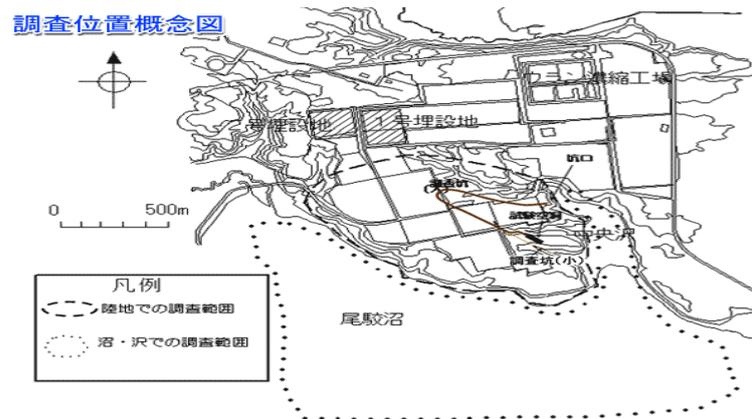


圖 3.2-5：調查工作之相關位置圖

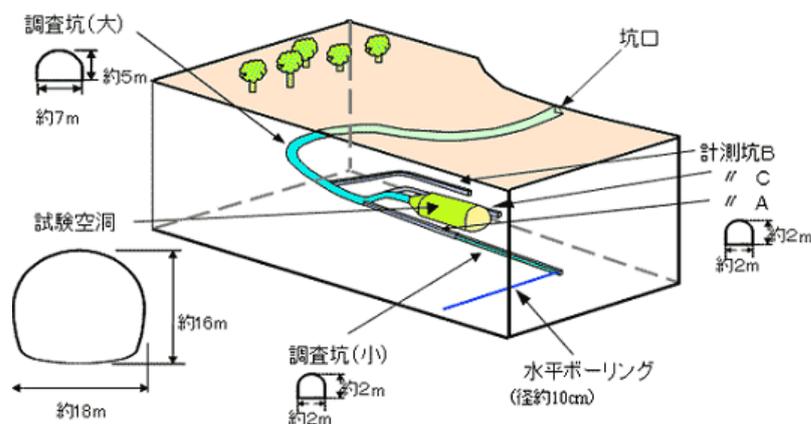


圖 3.2-6：調查坑示意圖

JNFL 與民眾溝通所採取之基本原則為取得共識及合作，而採行的溝通方式有三：

(一) 資訊透明化

為了讓當地民眾了解核能並取得其信任，除法規或安全協定上要求公開之資訊外，其規劃或進行之一些活動主動張貼於網站供民眾隨時參閱，以資訊透明化向民眾展示公開及合作的態度，使民眾感受該公司之誠意、不欺瞞及值得信任。定期舉辦研討會（1 年 6 次），邀集地方意見領袖討論並交換意見。舉辦民眾講座與地方百姓面對面溝通。於電視或報紙刊登宣導廣告，加深民眾印象。宣導資料、公開資訊及 Q&A 置於網站上，便於民眾取得。主動以電子郵件詢問民眾意見。

(二) 參與地方活動及建設地方

要求每一員工參與地方活動，讓民眾感受該公司屬於該地區。贊助該地區之相關活動並適時參與。結合地方特色建造溫泉餐廳，交由地方業者經營，提供工作機會以及休憩活動。建造技術訓練中心，協助地方培育技術人才。

(三) 提供當地民眾就業機會

JNFL 在當地共有 2,088 個員工，977 人來自青森縣，除造就當地居民就業機會外，並提供另一項資訊透明化之管道。

三、女川(Onagawa)原子力發電所

女川原子力發電所位於宮城縣牡鹿郡女川町(地理位置如圖 3.3-1)，占地約 173 萬 m²。隸屬於東北電力(Tohoku Electric Power)公司，共設有三部機組，皆為沸水式輕水反應器，裝置容量共為 217.4 萬千瓦。

	Unit No.1	Unit No.2	Unit No.3
Electric output (MW)	524	825	825
Reactor	Boiling-light-water reactor (BWR)		
Thermal output (MW)	1,593	2,436	2,436
Fuel type	Slightly enriched uranium dioxide (UO ₂)		
Number of Fuel assemblies	368	560	560
Start of Commercial operation	June 1, 1984	July 28, 1995	January 30, 2002

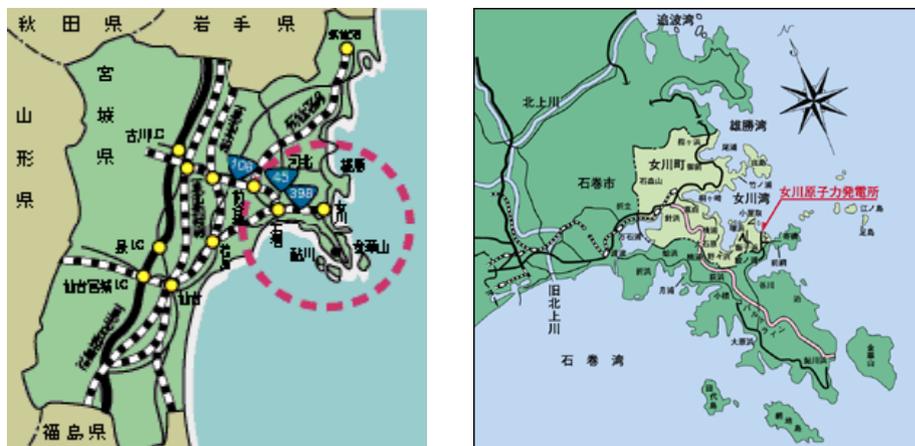


圖 3.3-1：地理位置圖

女川原子力發電所乾性廢棄物主要區分為可燃及不可燃兩類，可燃廢棄物與洗衣污泥以焚化爐進行焚化處理，而不可燃廢棄物則進行水泥灌漿固封處理，大型廢棄物經切割處理後，置於 1m³ 金屬貯存箱中暫存。機組運轉過程所產生的濃縮廢漿與廢樹脂，則以水泥均勻混合固化處理，處理流程如圖 3.3-2、3.3-3 所示，2003 年～2007 年平均每年產生約 3,100 桶固體廢棄物(如表 3.3-1)。

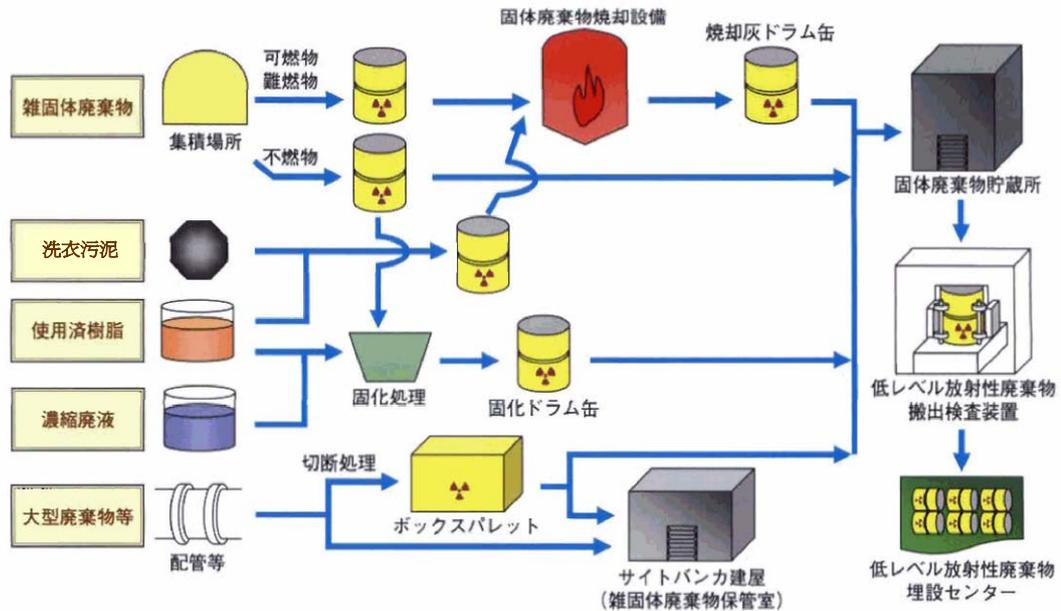


圖 3.3-2：固體廢棄物處理流程

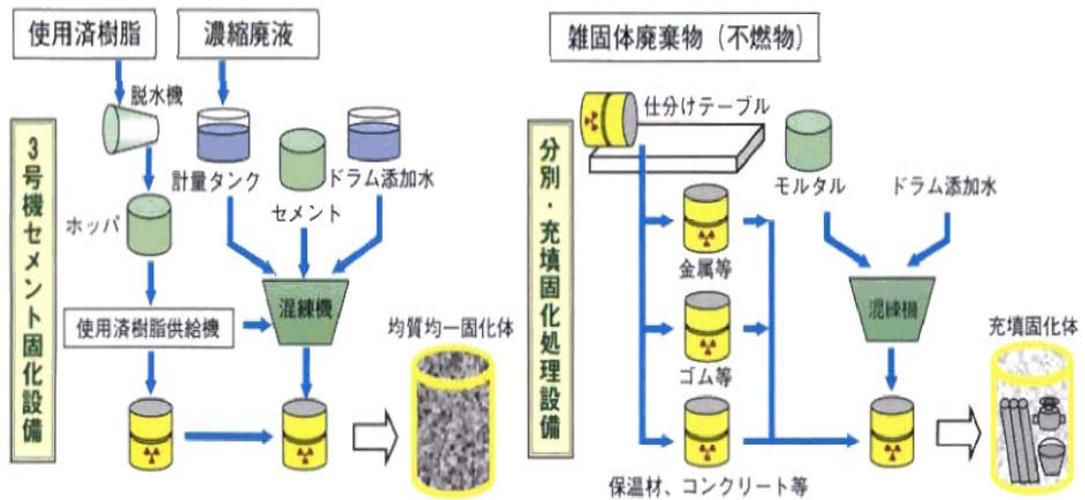


圖 3.3-3：廢棄物固化處理流程

表 3.3-1：固體廢棄物產量統計表

廢棄物類別		處理方式	產量(桶/年)
雜項固體廢棄物	可燃	焚化	2,200
	不可燃	貯存	800
洗衣污泥		焚化	10
水泥固化廢棄物(均勻)		固化	100
大型廢棄物(管路、泵等)		貯存	10(m ³ /年)
總計			3,100

本次參訪係在日本原子力産業協會(Japan Atomic Industrial Forum, JAIF)的安排下，由其國際部前島徹士先生陪同前往。當抵達女川發電所後，所長佐久間洋先生親自接見，副所長加藤功先生進行簡短的簡報，並由放射線管理課課長清野和夫先生與工程師鈴木幸宏先生做完詳細解說後，陪同前往參觀 3 號機廢棄物處理廠房及倉貯設施。在進入管制區前，需換穿發電所制式的衣服、手套、鞋子、襪子及護具(如圖 3.3-4)，身上並噴灑防靜電霧劑。由於 3 號機係為運轉僅 7 年餘的新機組，管制站空間規劃較為寬敞(如圖 3.3-5)，所使用的輻射偵檢儀器亦較先進(如圖 3.3-6)，而在廢棄物接收廠房所看到的乾性廢棄物分類皆很確實，且來源大部分為輻防衣物，輻射劑量率皆很低(如圖 3.3-7)。



圖 3.3-4：管制區著裝情形



圖 3.3-5：管制區實景



身份辨認儀器



輻射劑量偵檢器



全身偵檢器

圖 3.3-6：管制區輻射偵檢儀器



圖 3.3-7：乾性廢棄物收集情形

女川原子力發電所低放射性廢棄物貯存設施共有等 3 個貯藏區，A 區 15,000 桶、B 區 5,000 桶、C 區 10,000 桶，至 2008 年 6 月底，累計貯存量為 26,008 桶，大型固體廢棄物貯存室(如圖 3.3-8)貯存空間約為 500m³。



圖 3.3-8：Onagawa NPS 低放射性廢棄物貯存設施實景

由於日本已於青森縣六個所村設置低放射性廢棄物最終處置設施，故核能電廠會陸續將所產生的廢棄物桶送往該處進行處置，女川原子力發電所迄今已累積達 5,240 桶。再送往六個所村之前，核電廠必須依據下列流程(如圖 3.3-9)將廢棄物桶進行檢查，其說明如下：

1. 將廢棄物桶自貯存區移出。
2. 將廢棄物桶移入檢查站。
3. 進行廢棄物桶表面污染偵測。
4. 利用超音波進行固化桶抗壓強度量測。
5. 使用 Ge-NaI 偵測器量測核種活度及測量廢棄物桶重。
6. 使用 GM 偵測器量測廢棄物桶表面輻射劑量率以確保符合法規要求，並以攝影機進行外觀檢察。
7. 將檢查結果列印於標籤張貼於廢棄物桶之桶身，並以色帶標示表面劑量率在桶身指定的位置。
8. 將廢棄物桶移入運送容器中。



圖 3.3-9：低放射性廢棄物桶外運前檢查流程

該發電所人員指出，廢棄物貯存設施於 2007 年日本柏崎刈羽大地震期間並無發生任何廢棄物桶移位或傾倒的情況，顯示其管理措施做得相當的完善。由於日本核電廠低放射性廢棄物可送六個所村進行最終處置，並無長期貯存的問題，故 55 加侖廢棄物鋼桶未進行鍍鋅處理，每桶購價僅約 10,000 日圓，約為本公司購價的 1/3。另外，據陪同人員告知，該廠所產生之廢棄物桶輻射劑量率皆相當地低，大部份位於 0.1~0.01mSv/h，以及從發電所提供的資料顯示，該所對於工作人員集體劑量管制績效方面表現相當地優異(如表 3.3-2)，在全世界 47 座 BWR 反應器機組中，2005 年~2007 年平均名列第三位。

表 3.3-2：Onagawa NPS 近三年輻射集體劑量統計表

項目	西元年	2006	2007	2008 (As of Jun)
工作人數		2,852	3,564	2,129
Total dose equivalent (person-Sv)		0.92	3.08	0.42
Average dose equivalent (mSv)*		0.3	0.9	0.2
Maximum dose equivalent (mSv)		10.4	17.9	8.8

*Average of all the Japanese nuclear power plants in 2007:1.1mSv

四、東海(Tokai)發電所

東海發電所隸屬於日本原子力發電株式會社(Japan Atomic Power Company, JAPC)，位於日本茨城縣東海村內(地理位置如圖 3.4-1)，共設有 Tokai-1 及 Toaki-2 二座核能發電機組，員工總人數為 357 人，其中技術部門為 290 人，事務性工作人員為 67 人。Tokai-1 發電機組(如圖 3.4-2)是從英國引進的，為氣冷式墨棒控制反應器，1966 年開始運轉，為日本第一個商業運轉核能電廠，因為運轉及維修成本增高不符合經濟效益，於 1998 年 3 月停止運轉，目前正進行除役工作中，也是日本第一部除役的機組。Tokai-2 發電機組(如圖 3.4-3)為沸水式反應器，發電量為 1,100MWe，為日本第一部單一反應器發電量最多的發電機組。

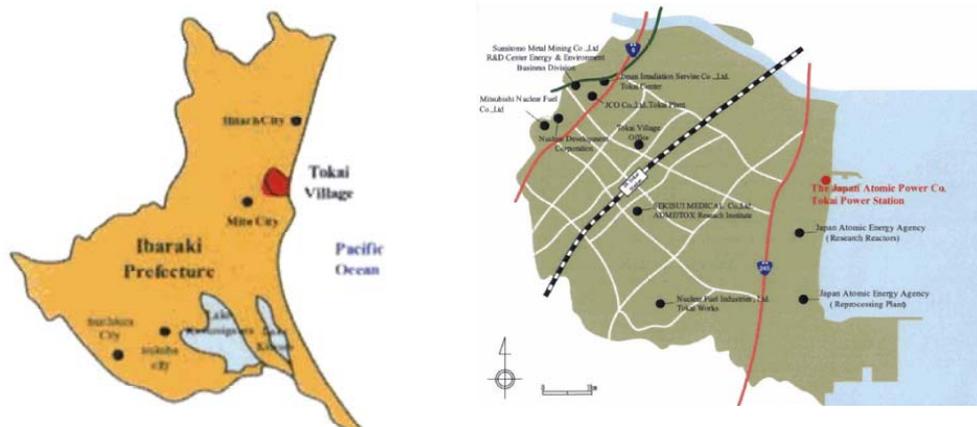
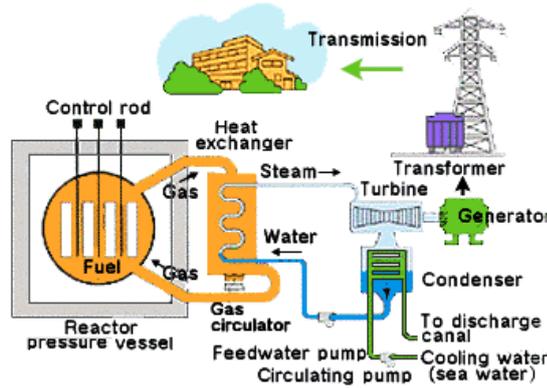


圖 3.4-1：東海電廠地理位置

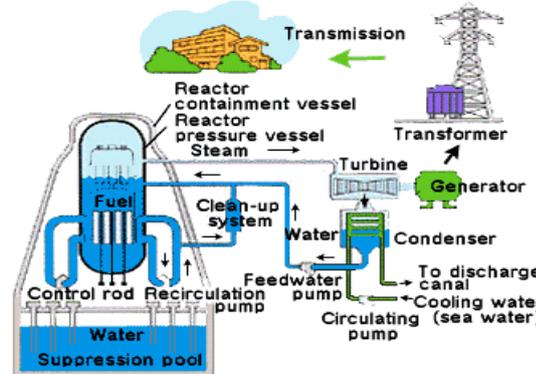
Tokai Power Station (GCR)



- Tokai-1 is the first commercial NPS in Japan
- <Specifications>
- Electrical output : 166 MWe
 - Reactor type : Gas Cooled Reactor (U.K. Calder Hall)
 - Fuel : Metal Natural Uranium with Magnox Cladding
 - Moderator : Graphite
 - Coolant : Carbon Dioxide Gas
 - Reactor vessel : Spherical Shape, 18m Diameter
 - Steam Raising Unit : 4 Units
 - Turbine Generator : 83 MWe × 2 Units
 - Operation term : 1966~1998(for 32 years)
 - Defueling and shipment : 28 May 1998~21 June 2001
 - Start of Decommissioning : 4 December 2001~

圖 3.4-2：Tokai-1 發電機組概要

Tokai-II Power Station (BWR)



- <Specifications>
- Reactor type : Boiling Water Reactor (General Electric)
 - Electrical output : 1,100MWe, 50Hz Frequency
 - Fuel : Low Enriched 3.7% Uranium Dioxide (approx.132tons/core)
 - Start of commercial operation: 28 November 1978
 - Power supplied to : Tokyo Electric Power Co.Inc, Tohoku Electric Power Co.Inc

圖 3.4-3：Tokai-2 發電機組概要

本次參訪同樣在 JAIF 的安排下，由其國際部部長小林雅治先生及前島徹士先生陪同前往。當抵達東海發電所後，由廢止措置室副室長小松崎德隆先生進行簡報，並在安全管理部次長青田尚士一起陪同下，前往參觀 Tokai-1 發電機組除役現況、Toaki-2 用過核燃料乾式貯存設施及低放射性廢棄物倉貯設施。

Tokai-1 發電機組自 2001 年開始進行除役，反應器及其結構先進行為期 10 年的安全貯存，直至 2011 年再開始進行切割與移除工作，移除後的土地預計做為核能發電廠將來的場址。2001 年~2005 年進行非放射性設備的拆除工作，如飼水泵浦、汽機發電機及冷卻池等，2006 年迄今則進行蒸汽上昇單元、輔助鍋爐及燃料填換設備等，其各階段設備移除時程如圖 3.4-4，汽機廠房及其設備實際拆除的情況如圖 3.4-5。由於 Tokai-1 發電機組為氣冷式反應器，污染的範圍大部份集中在反應器週邊設備，因此除役過程所拆除的設備大部份屬於非放射性(65.4%)或清潔標準(20.4%)的廢棄物(除役廢棄物分類如圖 3.4-6)。而清潔標準的廢棄物經過量測低於外釋標準(0.1Bq/g)時，則外釋進行回收再製工作(如圖 3.4-7)，如加速器研究設備屏蔽(79 噸)、結合磚(600 噸)、長凳(40 噸)及桌子(10 噸)等。

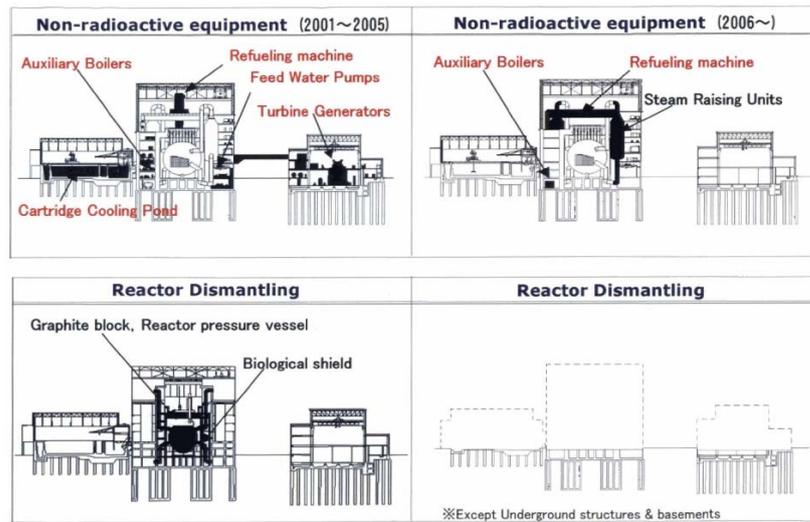


圖 3.4-4：Tokai-1 發電機組各階段設備移除時程

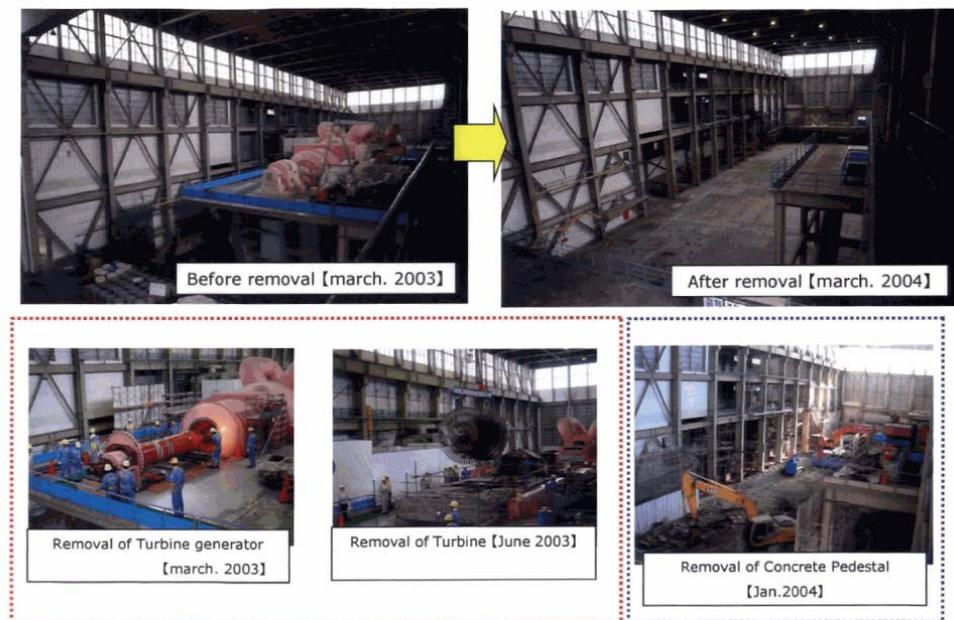


圖 3.4-5：Tokai-1 發電機組汽機廠房及其設備拆除實景

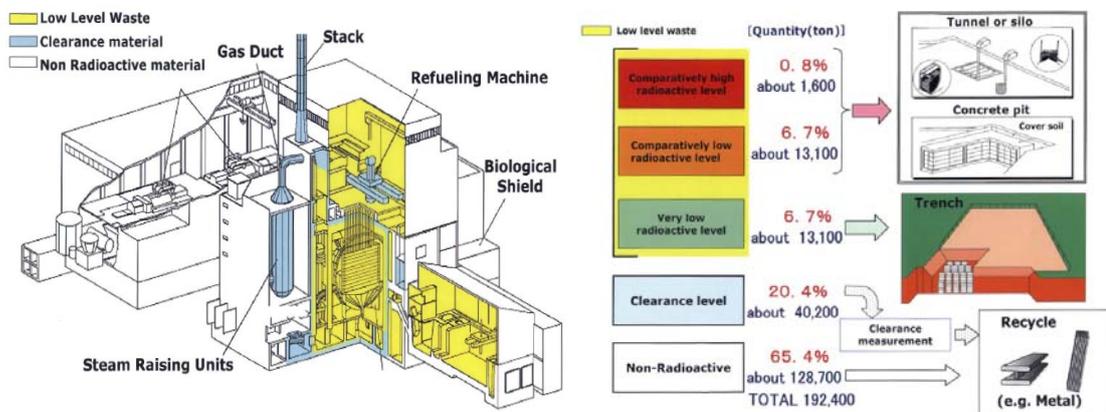


圖 3.4-6：Tokai-1 發電機組除役廢棄物分類情形



圖 3.4-7：Tokai-1 發電機組除役廢棄物再製品實景

符合清潔標準廢棄物的量測流程說明如下：首先要將廢棄物進行切割，使其得以置入量測容器內。接下來進行分類及除污，東海發電所係使用噴砂的方式進行除污，以不銹鋼砂做為介質，除污後表面皆相當光亮。除污後廢棄物置於量測容器後，開始進行表面輻射強度的偵測及核種活度的度量，完成後即集中貯存，其處理流程如圖 3.4-8 所示。

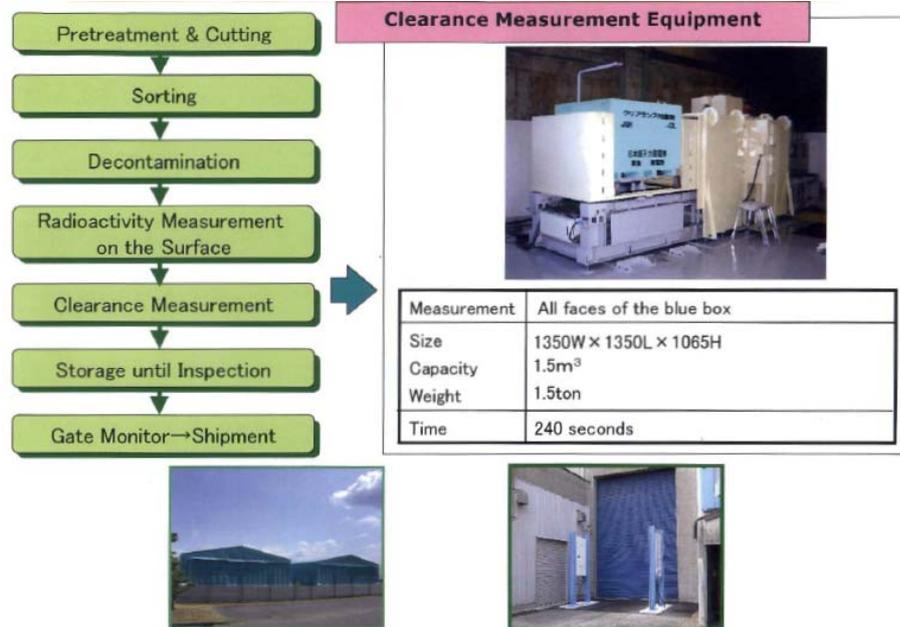


圖 3.4-8：符合清潔標準廢棄物之量測流程

東海發電所對於用過核燃料中期貯存所採用乾式貯存的方式，而乾式貯存設施為一個室內的貯存場所，利用自然的空氣對流方式進行貯存場所的冷卻，該空間總共可以貯存 24 個 Dry Cask(如圖 3.4-9)，目前已存放 13 個 Dry Cask。每個 Dry Cask 重達 260 噸，可貯存 61 束用過核燃料組，Dry Cask 內部有差壓及溫度的監測，當這兩項監測項目達

到設定值時，廠房內控制盤的警報視窗會出現警報，同時亦會連線至 Tokai-2 控制室，控制室運轉人員先會透過監視器瞭解廠房內的狀況，再派員前往查看。在現場 Dry Cask 旁邊實際觸摸其表面溫度約為 50℃，室內的溫度約為 20℃，空間輻射劑量率為 0.004853mSv/h，其作業流程詳如圖 3.4-10。



圖 3.4-9：用過核燃料 Dry Cask 概要

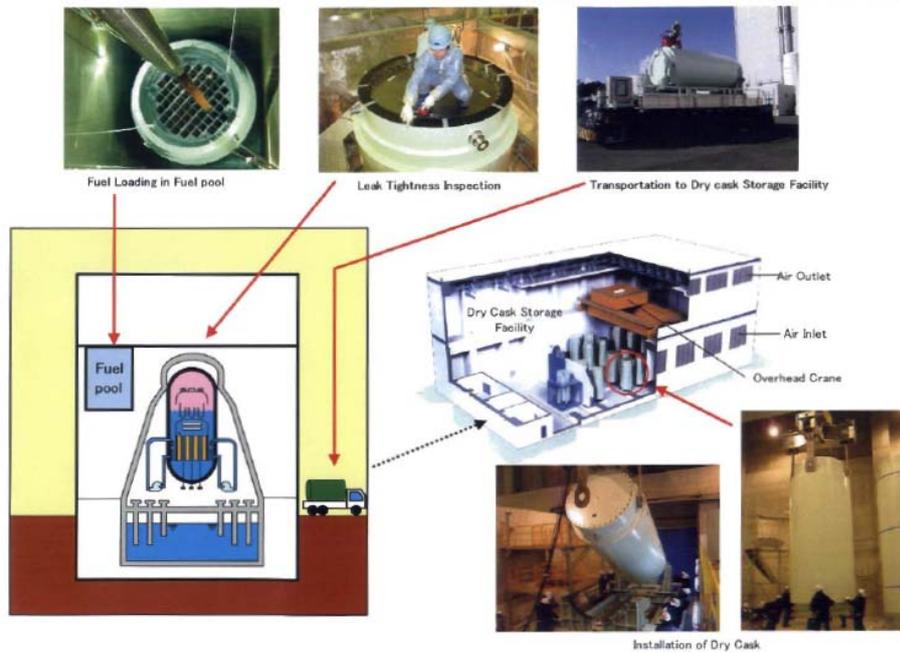


圖 3.4-10：用過核燃料乾式貯存作業流程

東海發電所低放射性廢棄物貯存設施共有 A、B 兩棟建築物(如圖 3.4-11)，總設計貯存容量為 73,000 桶。A 棟有兩層樓，貯存容量為 25,000 桶，現已貯存 22,400 桶；B 棟有三層樓，貯存容量為 48,000 桶，現已貯存 30,400 桶。由於該發電所產生的低放射性廢棄物可送往六個所村處置，因此上述貯存設施僅做貯存及外運前檢查裝櫃之用，平日並無特定的工作人員常駐監管，迄今累積已 5,192 桶。

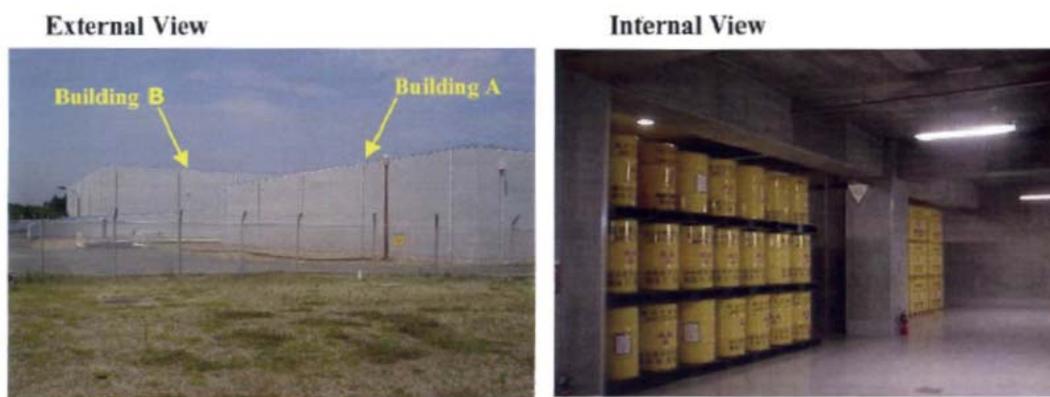


圖 3.4-11：東海發電所低放射性廢棄物桶貯存設施實景

肆、心得與建議：

- 一、透過 EAFORM 2nd 年會的技术研討，可以瞭解到東亞地區放射性廢棄物處理及最終處置技術的發展現況，尤其是鄰近的日本與韓國對於低放射性廢棄物最終處置場的建置規劃起步都相當早，日本六個所村更是被規劃成一個完整的廢棄物處理及最終處置的地區，低放最終處置場自 1992 年營運迄今亦已 16 年，而南韓月城中低放最終處置中心亦已開始興建，預計 2010 年開始運轉啓用。而國內三個低放最終處置場的潛在場址甫於今年 8 月 29 日公告，起步似乎來得較晚，由於日韓兩國皆有成功的範例足供師法，國內應引以為鑑、截長補短，以避免重蹈南韓 9 次失敗的覆轍。
- 二、日本對於高放射性廢棄物最終處置場的設置規劃，係透過立法、成立相關組織、訂定建置時程、透過國際合作及進行相關的研發計畫，按部就班的推動，也陸續顯現實施的成果。本次參訪瑞浪超深層地層研究所及六個所村低放最終處置場南側台地開挖調查坑道兩地，實際體驗到日本對於高放地質最終處置場及中低放射性廢棄物次地表最終處置場設置前的研究工作做得相當的徹底，將實際的研究成果顯現在其國人面前後，對於要在當地興建前述設施時，面對民眾會有相當的說服力，阻力較小、推動也較易成功，這也是國內推動類似工作可以參考效法的模式。
- 三、日本核能電廠的保安管制工作實施得相當嚴謹，從參訪行程安排期間對身分及參訪目的事前瞭解確認外，當抵達電廠時，對人員身分的再確認及車輛的安全檢查亦相當的謹慎確實。另進入乾式貯存設施前，除需透過保安攝影機確認身分外，每次僅可以一人進入的門鎖管制設計，顯示電廠對用過核燃料的保存安全相當的重視。而本公司核一、

二廠擬建置的乾式貯存設施為露天型式，在保安管制設計上，更應特別審慎規劃。

- 四、由於近幾年國際原物料價格飛漲，核能設施所使用的 55 加侖鍍鋅採購金額更是扶搖直上，此次參訪女川電廠發現，其使用的鋼桶價格僅約台灣的三分之一。由於日本已設置六個所村低放射性廢棄物最終處置場，核電廠產生的低放射性廢棄物沒有長期貯存的需求，故廢棄物鋼桶並無進行鍍鋅處理，是其價格能較國內低的原因之一。但反觀國內三座核電廠近期新建的廢棄物貯存設施，皆已實施溫溼度空調控制，有極佳的貯存環境，是否還需以這種特殊規格的鋼桶盛裝廢棄物貯存，應可以與主管機關進行討論。另也因為製作條件特殊，目前國內製作廠商數量有限而造成賣方市場，採購價格不易控制，如果國內能引進日本 55 加侖鋼桶規範加以使用，開放國外廠商競標採購，擴大競爭市場，應可紓解目前採購成本居高不下的問題。
- 五、在參訪的兩座核電廠後，發現有一個共同的特點，就是低放射性廢棄物的表面輻射劑量率都相當低，皆位於 0.1~0.01mSv/h，也從人員進出管制的實際狀況與所提供的資料顯示，電廠對於集體劑量的管控與抑減成效做得相當的成功，尤其是女川原子力發電所該方面的績效更是名列 WANO 評比之 BWR 電廠第三名，本廠對於集體劑量績效正積極朝進入 WANO 評比電廠前 1/4 的目標努力，該廠的輻防相關管制措施應有許多值得本廠學習的地方，建議可再次派員參訪瞭解其管理及硬體措施，將有助於提昇本廠集體劑量績效。
- 六、民眾的認知與支持是日本各項核設施順利建造和經營運作的重要因素，南韓經過 9 次選址失敗經驗，亦體驗到民眾的參與及資訊透明化是成功與否的重要成因。在本次 EAFORM 2nd 年會議題探討上，發現核能安全相關公司組織管理和人文議題已漸漸受到重視，亦是未來的趨勢重點。不管在將來核能機組延壽、增建核能機組或是設置高低放射性廢棄物最終處置場等相關推動工作上，如何與社會公眾溝通，以取得社會對核能發電與其廢棄物處理最終處置之安全與管制的肯定和信賴，相信是我國現階段必須重視的問題。因此如何將科技與人文結合，讓一般民眾可以很正確地瞭解核能，資訊透明化和公開化更是當前取得民眾信賴的首要步驟，必須持續加強。
- 七、日本東海發電所#1 機除役所產生的廢棄物，由於事前分類

的工作規劃做得相當得宜，致使僅產生約 14%的放射性廢棄物，且約 20%符合清潔標準的廢棄物經由量測符合外釋標準後，釋出電廠進行回收再利用再製的成功經驗，非常值得做為國內核能電廠未來執行一定活度或比活度以下放射性廢棄物外釋工作參考。

- 八、EAFORM 3rd年會預計 2010 年於南韓慶州市舉行，屆時月城中低放射性廢棄物處置中心應已啓用運轉，建議本公司應由核能後端處、核發處及電廠派員共同組團與會，各單位成員除可以藉由會議進行技術交流與經驗分享外，也可以實地瞭解該處置中心的運作現況，以做為國內相關工作推動的參考依據。