

行政院及所屬各機關出國報告  
(出國類別：專題研究 )

(裝釘線)

( 日 本 核 能 電 廠 除 役 技 術 研 究 )

服務機關：台電核二廠  
出 國 人 職 稱：化學工程師  
姓 名：吳樹實  
出國地區：日本  
出國期間：90年12月20日到91年3月17日  
報告日期：91年4月15日

G3/CO9007578

## 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：日本核能電廠除役研究

頁數 27 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

吳樹實/台灣電力公司/第二核能發電廠/化學工程師/24985990--2671

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：90.12.20~91.03.17 出國地區：日本

報告日期：91.04.15

分類號/目

關鍵詞：核能電廠除役研究

內容摘要：(二百至三百字)

在走向多元化的台灣社會裡,在大環境的影響之下,國內核能研究單位人力經費的日益萎縮,核能支援工商業的凋零,電廠新生代人力補充的嚴重不足,在在形成了一股拮制核能發電永續經營的氣氛。做為核能電廠的擁有者及管理單位的台電,始終負有對核能電廠的未來善加處理的義務。即使台灣的三個輕水式核能電廠,屬於核能發電機組的主流,號稱有四十年的使用壽命。但是在目前的國內外政經局勢之下,雖然最老的核能一廠也才運轉二十餘年。然而在未來,甚至是不久的未來,要如何安全有效的進行除役工作,已然成為台電日趨重要的課題。本次研究目的為本公司目前核能電廠逐漸老化的問題,尋求日本的經驗供國內參考,並針對日本核能電廠目前正在進行除役的東海電廠一號機的處理過程及經驗進行瞭解,以提供在未來國內核能電廠除役時的參考。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

目錄.....	P0
壹. 前言: .....	P1
貳. 目的: .....	P1
參. 行程及提要: .....	P1
肆. 研習內容: .....	P1~P20
一. 日本核能電廠除役的現況介紹: .....	P1~P10
二. 有關除役的各項技術內容.....	P10~P20
伍. 結論及心得: .....	P20~P25
陸. 感想及建議: .....	P25~P26
柒. 備註及專有名詞/縮寫說明網路連結索引.....	P26~P27

## 壹. 前言:

在台灣的核能工業，經過了約五十年的研究發展及應用的歷程之後，整個世界的大環境持續在變，國內的政經生態也處在昨是今非的劇烈變化之中。在走向多元化的台灣社會裡，核能已漸漸被擠到國家發展方向的核心之外，甚至有許多人欲去之而後快，不時鼓吹非核家園的理想。在政府政策及社會環境的影響之下，國內核能研究單位人力經費的日益萎縮，核能支援工商業的凋零，電廠新生代人力補充的嚴重不足，在在形成了一股柑制核能發電永續經營的氣氛。在拋開政府的政策方向的是非對錯不談，做為核能電廠的擁有者及管理單位的台電，始終負有對核能電廠的未來善加處理的義務。即使台灣的三個輕水式核能電廠，屬於核能發電機組的主流，號稱有四十年的使用壽命。但是在目前的國內外政經局勢之下，雖然最老的核能一廠也才運轉二十餘年。然而在未來，甚至是不久的未來，要如何安全有效的進行除役工作，已然成為台電日趨重要的課題。本次的除役研究計劃，便在這樣的背景下應運而生。

## 貳. 目的:

本次出國的任務是從事日本之核能電廠除役問題研究，為本公司目前核能電廠逐漸老化的問題，尋求日本的經驗供國內參考。並針對日本核能電廠目前正在進行除役的東海電廠一號機的處理過程，進行瞭解以期能針對未來國內核能電廠如果要進行除役時，可能遭遇的問題，先行提出解決的對策。

## 參. 行程及提要:

1. 90年12月20日~90年12月20日  
往程:自基隆⇒桃園⇒中正國際機場⇒東京羽田機場⇒橫濱市東芝公司。
2. 90年12月21日~91年01月21日  
研究日本核能電廠除役有關法規問題及現況。
3. 91年01月22日~91年01月25日  
參加 WANO 所舉辦的 Work Shop 瞭解及討論除役相關問題。
4. 91年01月26日~91年03月16日  
研究日本核能電廠除役相關技術問題及除役經驗。
5. 91年03月17日返回桃園中正機場搭車返抵基隆。

## 肆. 研習內容:

- 一. 日本核能電廠除役的現況介紹:

(一).電廠統計

在日本的發電用(註1)核子反應爐總數，截至91年三月底為止共有54部在運轉中(見附表一)，三部正在建造當中，其中運轉中的輕水式反應爐共有52部，含PWR23部及BWR29部，其他重水式反應爐原型機組1部，快滋生反應爐原型機組1部，總計運轉中的核能電廠提供全日本用電量約百分之三十四至三十五左右(參考網址：<http://www.fepec.or.jp/jijyou/index.html>)。正在執行除役工作的第一個發電用核子反應爐。東海電廠一號機，是使用石墨做為中子的緩衝劑，以二氧化碳作為冷卻劑的氣冷式反應爐，發電量只有166MWe。自1966年開始商業運轉，到1998年三月停止運轉，2001年開始進行除役的工作。東海電廠一號機的資料詳見附表二。日本各電力公司及相關的核能機組資料請參考以下的網址：

[http://keepower.webhostme.com/new\\_page\\_22.htm#jp](http://keepower.webhostme.com/new_page_22.htm#jp)。

附表一.建造/運轉/除役中的日本核能電廠資料

電廠名稱	型式	開始運轉時間	備註
1 Tokai	GCR	7/1966	除役中
2 Tsuruga-1	BWR	3/1970	357MWe
3 Mihama-1	PWR	11/1970	340 MWe
4 Fukushima #1-1	BWR	3/1971	460 MWe
5 Mihama-2	PWR	7/1972	500 MWe
6 Shimane-1	BWR	3/1974	460 MWe
7 Fukushima#1-2	BWR	7/1974	784 MWe
8 Takahama-1	PWR	11/1974	826MWe
9 Genkai-1	PWR	10/1975	559MWe
10 Takahama-2	PWR	11/1975	826MWe
11 Fukushima#1-3	BWR	3/1976	784MWe
12 Hamaoka-1	BWR	3/1976	540MWe
13 Mihama-3	PWR	12/1976	826MWe
14 Itaka-1	PWR	9/1977	566MWe
15 Fukushima#1-5	BWR	4/1978	784MWe
16 Fukushima#1-4	BWR	10/1978	784 MWe
17 Hamaoka-2	BWR	11/1978	840MWe
18 Tokai-2	BWR	11/1978	1100MWe
19 Fugen-1	ATR	3/1979	165 MWe
20 Ohi-1	PWR	3/1979	1175 MWe
21 Fukushima #1-6	BWR	10/1979	1100 MWe

附表一. 建造/運轉/除役中的日本核能電廠資料(續)

22	Ohi-2	PWR	12/1979	1175 MWe
23	Genkai-2	PWR	3/1981	559 MWe
24	Ikata-2	PWR	3/1982	566 MWe
25	Fukushima #2-1	BWR	4/1982	1100 MWe
26	Fukushima #2-2	BWR	2/1984	1100 MWe
27	Onagawa-1	BWR	6/1984	524 MWe
28	Sendai-1	PWR	7/1984	890 MWe
29	Takahama-3	PWR	1/1985	870 MWe
30	Fukushima#2-3	BWR	6/1985	1100 MWe
31	Takahama-4	PWR	6/1985	870 MWe
32	Kashiwazaki-Kariha-1	BWR	9/1985	1100 MWe
33	Sendai-2	PWR	11/1985	890 MWe
34	Tsuruga-2	PWR	2/1987	1160 MWe
35	Fukushima #2-4	BWR	8/1987	1100 MWe
36	Hamaoka-3	BWR	8/1987	1100 MWe
37	Shimane-2	BWR	2/1989	820 MWe
38	Tomari-1	PWR	6/1989	579 MWe
39	Kashiwazaki-Kariha-5	BWR	4/1990	1100 MWe
40	Kashiwazaki-Kariha-2	BWR	9/1990	1100 MWe
41	Tomari-2	PWR	4/1991	579 MWe
42	Ohi-3	PWR	12/1991	1180 MWe
43	Ohi-4	PWR	2/1993	1180 MWe
44	Shika-1	BWR	7/1993	540 MWe
45	Kashiwazaki-Kariha-3	BWR	8/1993	1100 MWe
46	Hamaoka-4	BWR	9/1993	1137 MWe
47	Genkai-3	PWR	3/1994	1180 MWe
48	Kashiwazaki-Kariha-4	BWR	8/1994	1100 MWe
49	Ikata-3	PWR	12/1994	890 MWe
50	Onagawa-2	BWR	7/1995	825 MWe
51	Monju-1	FBR	2/1996	280MWe
52	Kashiwazaki-Kariha-6	ABWR	11/1996	1356 MWe
53	Kashiwazaki-Kariha-7	ABWR	7/1997	1356 MWe
54	Genkai-4	PWR	7/1997	1180 MWe
55	Onagawa-3	BWR	1/2002	825 MWe
56	Hamaoka-5(3/1999 起建)	ABWR	1/2005	1380MWe
57	Higashitori-1(12/1998 起建)	BWR	7/2005	1100MWe
58	Shika-2(8/1999 起建)	ABWR	3/2006	1358MWe

附表二·東海電廠#1 機有關資料

項目	內容
反應爐型式	二氧化碳氣冷式(GCR)反應爐
發電量	166MWe
平均可用因素	77.5%
平均容量因素	62.9%
開始施工日期	1960 年 1 月
開始商轉時間	1966 年 7 月
最後停機時間	1998 年 3 月
除役計劃送審時間	2001 年 10 月
開始拆除時間	2001 年 12 月
預計完成除役時間	2018 年
累計發電量	29 兆瓦小時/290 億 KWH
燃料型式	天然鈾
反應爐隸屬單位	JAPC 日本原子力公司
除役原因	發電量小，維護成本昂貴

註 1.:由於普賢#1 號機及文殊#1 號機屬於原型機組，並且是由日本政府資助的核能研究機構擁有，發電量較小，通常在日本歸類商業用反應爐時可能會不予計算，本研究內容則以用途區分，只要是發電用的核能機組均計算在內。

(二).日本政府及國內除役研究的歷程

1. 日本國內對電廠除役技術較正式有系統的研究，始於研究用的核子反應爐 JPDR(Japan Power Demonstration Reactor)於 1981 年由政府科學技術廳(STA; Science and Technology Agency)委託日本原子力研究所(JAERI)進行除役，同時進行除役技術研究。在經過五年的各項有關技術的研發後，於 1986 年起正式開始拆除作業。在邊除役邊執行各項除役技術的測試後，在 1996 年完成所有的測試及拆除工作，並將原址地貌恢復成為綠地。有關 JPDR 的有關資料請參考附表三。

附表三·JPDR 反應爐有關資料

項目	內容
反應爐型式	研究用 BWR
熱功率	90MWt(初期 45MWt)
發電量	12.5MWe
開始施工日期	1960 年 9 月
首次臨界	1963 年 8 月

首次併聯(日本首次核能發電)	1963年10月
達到滿載運轉	1963年12月
自然循環運轉模式中止	1969年9月
增加功率設計修改	1969年10月到1971年12月
功率修改完成後首次臨界	1972年2月
功率修改後首次併聯	1972年5月
最後停機時間	1976年3月
除役計劃送審時間	1982年12月
開始進行拆除時間	1986年12月
原址恢復成綠地時間	1996年
累計發電量	1.4億KWH
燃料型式	2.6%濃縮鈾(UO <sub>2</sub> )
總運轉時數	17,000小時
反應爐隸屬單位	日本國家科學技術廳
除役原因	經濟效益考量、進行除役研究

2. 自 1982 年起，日本開始對除役法規進行廣泛的討論，最後日本原子能委員會(JAEC;Japan Atomic Energy Commission)在”調查会原子力部会”綜合調查会原子力部会報告書 昭和 60 年 7 月 15 日(1985 年)中訂定了除役的三項基本原則:

- (1)除役的電廠應該與當地社區居民充分合作，在絕對安全的情況下，依 1982 年 JAEC 出版的”核能發展及使用長期計劃”繼續將原址土地，供做其他核能設施有效的利用。
- (2)基本上，停止運轉的核能電廠必須永久拆除。在拆除過程中可回收使用的材料或設備，應該儘量回收使用，並須發展出有效率的拆除作業的技術。廢料應當合理的處置，使整個除役作業在最佳及最有效的情況下進行。
- (3)標準的作業程序及除役方法，在上述的必備條件下，必須先建立妥當，相關其他工作譬如資金的準備，及廢料的處理等，也應當完成充分的研究。

經過了十餘年後，依據 2000 年的 11 月 24 日，JAEC 發表的”核能之長期研發使用計劃”當中對於日本核能電廠的除役訂定了以下三項基本政策:

- (1).營運核能電廠者，對電廠的除役負有責任。
- (2).電廠除役工作，應在確保安全的原則之下，取得當地社區居民的諒解及合作。
- (3).由於土地的取得不易，電廠除役後的原址，應繼續作為核能營運之用途。

在綜合現今日本國內各單位對核能電廠除役的研究，可以得到以下對除役問題的六點重要原則：

- (1).核能設施負責人，必須對該設施的除役工作負責。
- (2).除役工作的執行，必須在確保安全問題無虞的前提之下，與除役設施附近社區居民的合作，進行除役工作。
- (3).在核子反應爐停止運轉後，應該在可能的最早階段進行移除。



- (4).在除役工作完成後的綠地，仍應繼續作為管制的核能區域。
- (5).日本政府將支持除役研究及發展的活動。現行的研發活動係基於研究用反應爐 JPDR 與 JRTF 除役所得到的經驗，商用核能電廠的除役研究，目前仍在國家研發計畫的支持下繼續進行。
- (6).核設施負責人必須對除役所產生的放射性廢料，建立適當的處理或處置計劃以示負責，並應負擔所需的費用。
3. 對於漸漸老化的電廠運轉安全問題，日本政府的通商產業省經過研究後在 1996 年的 4 月完成了一份報告，名為“核能電廠老化的基本概念”，報告中主要的結論為：在國家安全法規的管制，以及電廠運轉單位對於確保安全，所採取的方法運作之下，足以確保漸漸老化的反應爐的安全性及可靠性。
4. 日本政府對核能電廠的除役時機，並沒有運轉的年限時間限制，只有對運轉中的電廠，核能法規(LRNL)要求主管機關每年應定期檢查之外，核能電廠亦必須滿足所有與安全有關的各項要求，以確保電廠的安全運轉。任何一個發現的缺失，在沒有獲得解決改善之前，反應爐必須停止運轉，待符合安全規定後方可繼續運轉。因此電廠的運轉年限端賴於電廠負責人，針對符合安全標準而必須花費的維護成本及發電效益，進行除役時機的考量。東海電廠一號機在運轉三十二年進行除役的主要原因，即在於境內沒有其他同型機組，發電量較小造成維護成本不符經濟效益的基礎下，乃決定進行除役。即將於 2003 年停止運轉及進行除役準備的普賢電廠一號機也是如此。有關普賢電廠的相關資料請參考附表四。

附表四·Fugen(普賢)電廠#1 機有關資料

項目	內容
反應爐型式	重水做減速劑,輕水冷卻的進步型熱中子反應爐 ATR(Advanced Thermal Reactor)
熱功率	557MWt
發電量	165MWe
開始建造施工日期	1970 年 12 月
開始商轉時間	1979 年 3 月
預計最後停機時間	2003 年 9 月
累計發電量到 2001,03,31	207 億 KWH
燃料型式	MOX 混合鈾及鈾氧化物
反應爐隸屬單位	JNC(見柒.專有名詞說明)

5. 在 1985 年 7 月日本調查會原子力部會報告書中，建立了除役的標準程序，其中對於適合日本的除役方法有下列的幾項考量重點：職業曝露劑量、除役費用、廢料量的預估、原址的再利用、在運轉終止後取得大眾的接受該區域作為核能設施的繼續使用等等。在此之後日本政府制訂了除役基金的提撥制度，並主導了包括各項除役技術的開發工作，在民間企業的配合之下，陸續完成了除役的準備工作，並成功的將研究用的反應爐

- JPDR 拆除，原址恢復成為綠地。
6. 日本輕水式反應爐除役的基本標準程序分為五個階段：A.燃料移除 B.系統除污 C.安全儲存五至十年 D.進行拆除工作 E.廢料處置處理及土地的再利用。

(三). 日本的除役法規及檢查規定

1. 日本現行與核能電廠除役有關的法規主要列在有關核能物質,核燃料及核反應爐總法(LRNR)以及國家電氣事業法(EUIL)之中。規範核能設施負責人,應對電力供應計劃的變更,向主管機關提出申請。在除役前的最後一個燃料週期結束的三年前,應提出最後的運轉計畫送交主管機關。以及在供電計劃變更的兩年前應將變更內容提送主管機關。要進行除役的一個月以前,將除役計劃提送主管機關(METI)進行審核,文件的內容應包含所有有關安全問題的評估及除役計劃的工作內容。在主管機關核准以前不得運行除役工作。若主管機關認為除役計劃內容有不詳盡之處,得要求電廠對除役計劃進行解釋及資料補充。在除役前有關安全的維護機制必須建立,當執行過程中,這個安全維護機制發生改變時,設施負責人必須向主管機關提出通知,並在主管機關完成檢查同意後方得繼續進行除役工作。所有在運轉階段使用的設備或元件或系統,如果在除役階段仍舊需要用到者,都必須向主管機申報並取得同意。在所有除役工作或程序完成之後的三十天內,設施負責人應將相關文件資料向主管機關提出通知。在提出通知之前,設施負責人必須完成包括燃料運送,放射性污染物質的移除及處置的所有工作,並向主管機關提出報告。設施負責人對該項除役工作的責任,要到主管機關同意其所提出之文件後方才終止。
2. 從運轉階段到除役準備及執行過程的法規適用情形如附表五。

附表五·日本核能機組運轉到除役的法規對照

除役工作內容	引用法規項目
運轉中的除役準備階段	LRNR-30/37 條及 EUIL-29 條
停止運轉提出除役計劃	LRNR-38 條,EUIL-9 條
除役過程/計劃的內容更動	LRNR-17 條,EUIL-9 條
除役計劃的結束	LRNR-65 條

3. 在 JPDR 的除役過程中主管機關的 STA 執行了 108 項的除役過程之檢查工作,其中較重要者有:
  - (1)除役前的狀態檢查
  - (2)除役及拆除方法的檢查

(3)除役後的狀態檢查

(4)輻射管理及放射性廢棄物的管理

除了固定的檢查項目外，設施負責人尚需固定提出季報及年報，通知主管機關除役的進度及狀況。

(四).除役產生的廢棄物及輻射問題

3. 核能電廠除役將產生的廢棄物，根據日本過去的研究，一個商業用核能電廠所產生的廢棄物量推估約有 97%到 98%是不需要當作放射性處理的廢棄物，另外的 2%至 3%則屬於低階的放射性廢棄物。以一個發電量為 1100MWe 的輕水式核能電廠為例，除役時將產生的廢棄物量約 50 萬噸到 55 萬噸左右，其中約一萬噸是屬於低放射性的廢棄物。另外依 JAPC 最近發表的估算數據顯示，一個裝置容量 1100MWt 的 BWR 除役時將產生的廢料量約在 54 萬噸左右，其中屬於放射性的廢料僅佔 1%，非放射性的廢料佔 99%。而同樣裝置容量的 PWR 其除役將產生的廢料約在 50 萬噸左右，非放射性的廢料所佔的比例亦是 99%。在研究用的 JPDR 實際拆除時所產生的廢料量總數為 24,440 噸，其中的 20,670 噸是非放射性的廢料。在整個拆除作業過程中，工作人員所接受到的總輻射劑量為 0.3 人西弗。
4. 雖然說目前一般研究的認知，對於將近 99%的除役廢料可當作非放射性廢料處理，然而直到目前為止，日本政府對於所謂的無放射性的基準值(Clearance Level)尚未制定最適當的標準，目前仍在努力之中，而此標準值的高低，對於大量的廢料處理成本而言，尚存在著一定的變數。
5. 低放射性廢料的分類方法，日本是依個別核種  $\beta$   $\gamma$  放射性及總  $\alpha$  活度的高低，分成較高強度的低放射性廢料 L1(總  $\alpha$  活度大於  $1.11\text{E}+9\text{Bq/t}$ )，較低強度的低放射性廢料 L2(總  $\alpha$  活度介於  $1.11\text{E}+9\text{Bq/t}$  與  $1.7\text{E}+7\text{Bq/t}$  之間)，及極低強度的低放射性廢料 L3(總  $\alpha$  活度介於  $0.2\text{Bq/g}$  與  $1.7\text{E}+7\text{Bq/t}$  之間)。至於個別核種放射性活度低到何種程度可視為清潔垃圾處理，目前日本政府則尚未定出統一標準。
6. L1 的低放射性廢料的處置方式，日本是採取 50 公尺到 100 公尺的地底掩埋，L2 的低放射性廢料則是在較淺層地底，以混凝土結構做成的坑洞儲存，L3 的廢料則是在地表面以混凝土溝做成人工屏蔽障後直接掩埋。
7. 有關電廠除役產生廢料的處置問題，日本在研究初期就瞭解到，廢料處理及處置的方式是影響除役成本很大的變數，因此在過去一直在努力研究有關處置場的籌設，廢料減量，用過燃料的再處理及用過控制棒切割技術有關的問題。儘管如此，日本國內並沒有政府設置的中期或是最終處置場所。屬於民營的日本核燃料有限公司(JNFL)，在日本青森縣已於 1993 年開始施工的用過燃料再處理廠，預計到 2005 年完工後，每年可以回收 800 噸的鈾料。至於高放射性的儲存設施也位於同一地點，1992 年

開始施工，1995 年開始使用，可儲存 1440 桶的高放射性廢料，未來並可擴充至 2880 桶。目前則僅存放了 824 桶。在同樣地點的低放射性廢料儲藏所在 1990 年開始施工，1992 年完工，目前被核准可存放的廢料桶數為 100 萬桶，未來並可擴充至 300 萬桶，目前則僅存放了 135,331 桶。此外該址並有一 1992 年開始運轉的鈾濃縮工廠，在未來最終的處理容量可達到每年 1500 噸 SWU(Separated Working Unit)。

8. 有關放射性廢料的最終處置的問題，日本政府曾於 1994 年 6 月公布將於公元 2000 以前成立一個組織運作最終的處置場，並於 2030 年，最遲在 2040 開始的十年中建造處置場，並表示將會由民營公司進行管理。目前有關政府部門正在朝這方向努力中。

#### (五).有關核能電廠的除役成本及所需時間

1. 除役的成本依選擇不同的除役方案而有不同的結果，一般而言除役分成三大處理方式：A.安全儲存(SAFSTOR)；將核能設施維持在安全的狀態下很長的時間，直到輻射污染的程度降到可以被允許做為非限制區。B.就地封埋(ENTOMB)；將部份地上結構物拆除之後，主體部份就地以混凝土進行封埋。C.除污(DECON)；拆除前將輻射污染的部份先行除污，使完成拆除後的原址，輻射污染的程度能低於做為非限制區的標準。在日本目前的選擇方式，主要為 A 及 C 的結合作法。
2. 有關除役所需費用的問題，依據 NUREG/CR-0672Vol-1 的報告，主要成本包括了 1.放射性廢料的處理成本。2.職工人力的成本。3.消耗能源的成本。4.特殊工具設備的成本。5.各項支援物質所須成本。6.特定合約商的成本。7.核能保險費用。8.執照相關費用。9.其他可能的支出等等的費用。
3. 在 1984 年依據日本官方所訂出的除役標準程序,包括五個階段：A.燃料移除 B.系統除污 C.安全儲存五至十年 D.進行拆除工作 E.廢料處置處理及土地的再利用。在當時的評估，一個約 1100MWe 級的核能電廠除役成本約為 300 億日圓。
4. 依據日本原子力公司 JAPC 最新發表(2002 年 1 月)的成本預估，東海電廠#1 號機除役的費用大約是 927 億日圓，其中的 580 億是廢料處理費，由於該機組為 GCR，使用大量的石墨做為中子減速劑，而高達 1600 噸的石墨放射性廢料含有放射性元素碳-14，無法以焚化方式減容，因此在掩埋成本上佔了總成本相當大的比例，此外該反應爐本體相對其功率而言大了許多，因此造成廢料處理的費用較高，剩餘的 347 億日圓則是拆除的費用。而對仍在運轉中的東海電廠二號機(發電量約 1100MWe 的 BWR),除役時所需的成本預估約為 545 億日圓，其中的廢料處理費用為 157 億日圓，拆除電廠的費用則為 388 億日圓。對 Tsuruga 二號機(發電量 1160MWe 的 PWR)除役費用的預估則為 587 億日圓，其中 410 億為拆除費用，177 億為廢料處理費用。為了除役工作的預算準備，在 1989 年當時的

日本通產省制定了除役基金提撥制度的行政命令(通產省令第30號)，核能電廠應提撥部份盈餘做為除役基金之準備。並於1990年公布租稅特別措置法，規定來自盈餘提撥作為除役基金的拆除費用的85%得以享有免納稅賦的優惠。

5. 在一個核能機組從停止運轉開始，包括系統除污及全部移除燃料及運輸到處理機構，約花一到兩年的時間，等待較高放射性的廠房進行輻射衰減，同時拆除非放射性部份建築約花5到10年的時間，拆除核心主體廠房約花6到7年的時間。整個除役的工程依不同的電廠、不同的輻射情況而會有不同的差異。以JPDR研究用的核反應爐為例，全部的工程從1982年提出除役計劃到1986年開始進行拆除，到1996年恢復成綠地總共經過十四年的時間。而東海電廠一號機的除役計劃從2001年預計到2018年約需17年的時間。

## 二. 有關除役的各項技術內容

### (一) 有關研究單位

自從第一個研究用的核反應爐 JPDR 開始進行除役以來，自從日本政府下到民營公司，一直在合作開發新的除役技術，在政府的資助之下，日本的核能工程公司(NUPEC)從1982年起陸續進行的商業用電廠除役技術測試驗證，在1994年完了三項成果。(1)310mm厚的反應爐內部組件使用一氧化碳氣體雷射切割技術。(2)420mm厚的碳鋼及不銹鋼襯板的反應爐的水底切割技術。(3)使用直徑50mm強化鋼筋的生物屏蔽牆表面層的拆除技術。直到現在，為了廢料減量的目的，NUPEC仍舊在針對除污技術，廢料處理技術，除役有關的輻射偵測技術繼續與民營公司合作進行研發當中。相對於NUPEC，由政府資助的日本原子能研究所(JAERI)，則是針對反應爐內部組件的遙控拆除技術，以及拆除的系統工程，一直不遺餘力的進行研究當中，並在JPDR的除役過程中應用及測試，此外並與核能除役研究組織RANDEC (Research Association for Nuclear Decommissioning)合作繼續對除污、遙控拆除及金屬廢棄物回收使用的課題，持續努力研究之中。

### (二) JAERI 的研發成就

在JAERI的長期努力之下，完成了許多項核能電廠除役需要用的相關技術，說明如下：

1. 除役的系統工程分析(System Engineering for Reactor Decommissioning): 為求有效及安全的進行除役工作，必須先分析需要執行那些工作，並選擇最適當的方式及程序，因此必須評估以下各項相關資料：工作人員的輻射曝露，放射性廢棄物的形式及產量，人工勞力成本，儀器材料等等。JAERI已發展出了一套電腦模擬程式，進行這些資料的分析推估並應用在JPDR的除役工作上。
2. 非破壞式管內核種活度測量(Nonintrusive Measurements of

Radioactivity inside Pipe):為了有效及安全的進行切管工作，事前對管內的輻射情況作定性及定量的分析是有必要的，JAERI 因此發展出了非破壞式的管內核種度量系統。

3. 輻射強度的預估(Radioactive Inventory Estimation): 正確的對除役電廠在反應爐停止運轉時的輻射情況進行預測，是準備除役計劃的基本及必要的第一步，各項對核種分布及定性定量的分析方法被廣泛的應用在 JPDR 核設施中，這些測量及計算的結果並提供給 JPDR，擬定合理的除役計劃。
4. 拆解技術及系統(Dismantling Techniques and Systems): JAERI 發展出了有效並安全可適用於拆解具有來自活化或污染，或者兩者都有的輻射污染的鋼鐵及混凝土結構。以下是應用在 JPDR 的例子。

不銹鋼拆解技術	混凝土拆解技術
Plasma Arc Cutting System	Diamond Sawing and Coring System
Arc Saw Cutting System	Abrasive Water Jet Cutting System
Rotary Disk Knife Cutting Sy.	Controlled Blasting
Shaped Explosive Cutting Sy.	

5. 除役的廢料處理儲存及處置(Decommissioning Waste Treatment, Storage and Disposal):針對除役時可能發生的大體積的廢料處理儲存及處置，JAERI 完成了以下的各項努力。A.特殊的裝運容器,B.減容及廢料的分類,C.混凝土碎片的水泥固化處理,D.拆解元件表面污染的擴散防範等。
6. 反應爐的除役前除污(Decontamination for Reactor Decommissioning):為了減低工作人員的輻射曝露及減少放射性廢料的產量，JAERI 發展了以下的除污方法。A.拆解前的系統除污,B.拆解後元件的除污,C.混凝土表面的除污。
7. 輻射管制(Radiation Control):JAERI 發展出各種的輻射管制技術及儀器以減低工作人員的輻射曝露，同時增加拆解反應爐的工作效率。A.污染檢查監測器。B.遙控高劑量率偵測儀器。C.可換氣式粉塵偵檢器。D.極低強度廢料加馬射線掃描器。E.輻射外釋的環境影響評估。
8. 遙控操作技術(Remote Operation Techniques):在高輻射強度的環境裡，要降低工作人員的輻射曝露，遙控操作的技術是必備的，JAERI 目前正對以下的項目進行研發的工作。A.遙控操作技術。B.用在遙控操作的可抗輻射自動偵測元件。C.機器人操控系統的測試及製造。

### (三) 新開發的工業界的除役有關技術

#### 1. 控制棒的雷射切割技術

- (1).切割速度較高是電漿切割的 1.5 倍。
- (2).切割缺口較窄可產生較少的二次廢料量，約是電漿切割

方法的七分之一。

- (3).由於二次廢料產量少可減少清潔水的使用量。
- (4).切割時反作用力低固定容易，且儀器本體可安裝在 100 公尺遠的距離避免污染。

## 2. 臭氧化學除污技術

- (1).除污後的廢料產量較 CORD/UV 還低。
- (2).除污因素與 CORD/UV 接近。
- (3).對材料的腐蝕影響，SUS630(H750)略高於 CORD，其他對敏化的 SUS304，未敏化的 SUS304 及 D308L(SR)等的腐蝕情況則均較 CORD 為輕微。

## 3. 大體積型廢料輻射偵測器

依據除役時勢必產生的大量廢料，雖然大部份屬於非放射性廢料，但是輻射或污染的偵測篩選卻是更重要的工作，因此目前在東芝公司已經建立了一套大區域的污染自動偵測工具以及廢料污染程度的自動偵測系統，做為管制輻射擴散的重要工具。

## 4. 新開發的工業界除役有關技術 4--雷射應用廠房內管路立體圖繪製，通常在最初建造的核能機組的廠房設備等文件資料較為老舊，甚至不齊全，而現在許多的技術應用及除役有關數據的評估都已進入電腦化的時代。因此為了重建廠房及設備管路的圖面資料，日本已引進了使用雷射配合 3D 繪圖軟體自動重繪現場實際的三度空間的圖面資料。

### (四) 除役系統工程介紹

在除役工作開始之前必須先完成整個系統工程的規劃，規劃的內容主要包含四個部份：

#### **I. 除役計劃的規劃**

#### **II. 廢料量的評估**

#### **III. 成本的評估**

#### **IV. 資金的籌措**

針對未來對國內核能電廠除役的需要，以下將這四項工作的內容做較詳細的提綱介紹

### **I. 除役計劃的規劃**

#### **1. 工程計劃的概要描述**

##### **1.1. 除役概述**

- 1.1.1 除役的可行方案比較及參考作法包括 SAFSTOR、ENTOMB、DECON 的作法比較。並考量對人員健康、環境衝擊、成本考量及其他因素的結果決定除役的最佳方案。
- 1.1.2 除役的目標要達成 A.最適當的風險管理包括輻射劑量、毒性物質、拆除過程操作風險等。B.達成最低的廢料產量包括除污方法的使用、嚴謹的回收再

利用機制、最簡單及最佳的處理方法。C.控制最低的除役成本。

## 1.2. 計劃概述

在計劃概述中針對除役階段的風險管理，可將除役工作分成四個部份來進行：評估階段、開發階段、執行階段、結案階案。

### 1.2.1 評估階段

#### 1.2.1.1 電廠特性評估

- A. 相關對應法規項目評估。
- B. 未來土地使用考量。
- C. 財務資金調度考量。
- D. 廢料處理可行方案考量。
- E. 民眾參與程度考量。
- F. 除役技術發展情況。
- G. 風險評估。

#### 1.2.1.2 除役方法考量

根據不同的可能方法，核能設施負責人自行決定其對應的評估項目及所設權重。

- A. 保護大眾安全的有效程度。
- B. 保護環境的有效程度。
- C. 執行能力。
- D. 廢料最低量化(Wastes Minimization)。
- E. 成本與效益的比例。
- F. 公眾的接受度。
- G. 合理要求的可行性或相對性。
- H. ALARA 原則的考量。
- I. 未來土地的使用。
- J. 對社會經濟的衝擊，如雇工及交通等。
- K. 對文化及歷史或其他美學考古學的衝擊。

### 1.2.2. 開發階段

根據法規指引對除役細節的工程，進行檢視以完成除役計劃並對主管機關進行說明並獲得同意。

#### A. 除役工程

- a. 工程細節
- b. 成本預估
- c. 訂定工作計劃期程

#### B. 除役工作的準備

- a. 統合協調
- b. 文件製備
- c. 建立與民眾的溝通及良好的關係
- d. 建立安全及保安系統

#### C. 管理系統建立

- a. 保護員工、民眾及環境部門



- b.適當的管理、技術及行政部門的人力
- c.製做除役指引供完成除役手冊及程序書及招標規範等。
- d.訓練

#### D.除役計劃準備

- a.根據除役各項討論完成的工程細節做成正式的除役計劃
- b.計劃應涵蓋所有的技術細節，成本及期程，組織結構及其他順利進行除役工作必備的行政支援項目。

#### 1.2.3.執行階段

執行程序依計劃進行並進行確認

##### A.輻射污染物質的處理

輻射污染部份的移除、除污及以上二者的結合。

##### B.需要經過處理部份污染物質的廠內暫存問題

儲存區域規劃，搬運方法

##### C.需要經過處理部份污染物質的包裝運送

包裝，外部污染偵測，過磅，文件管理，裝運地點

#### 1.2.4.結案階段

本階段主要工作是驗證除役設施的最後狀態，符合計劃所訂的結案標準。

##### A. 輻射偵測:最後的原址輻射背景值，將受到法規的檢視及民眾的挑戰，因此最後的輻射偵測必須以高標準來進行。此項偵測計劃的指引可參考 NUREG/CR-2082, -5849。

##### B. 驗證的公正性:要達到本項偵測的公正性，偵測的工作應該由與核設施負責人無關的第三者獨立進行。

##### C. 文件的歸檔:包括最後核設施本身偵測及公正的第三者偵測的結果及其他相關的計算及資料均應完成歸檔。

## 2.除役計劃內容

除役計劃內容是法規要求的文件，本章節根據以下三份文件頡取之重點提供除役計劃準備的指引。

##### A. DOE Order 5820.2A, Chapter V

##### B. Regulatory Guide 3.65(NRC1989)

##### C. Regulatory Guide DG-1005

本章的內容包括

#### 2.1.介紹

#### 2.2.核設施歷史介紹，特性，狀態

#### 2.3.除役方法的選擇

- 2.4.除役的工作內容
- 2.5.計劃的管理
- 2.6.員工及環境的保護
- 2.7.廢料的管理
- 2.8.最後的偵測計劃

## 2.1 介紹

本章應包含確認核設施的特性，及重點描述除役的計劃內容。

## 2.2 核設施歷史介紹，特性，狀態

### 2.2.1 核設施歷史調查

說明核設施過去曾經執行過的一些放射性物質的操作，有關的放射性物質資料，工作內容的描述，工作過程中主要的輻射背景值情況及污染情況。

### 2.2.2 輻射及污染情況資料庫建立

所有被污染的系統，建築結構，機件均應建立資料庫，包含偵測或是計算的方法。

### 2.2.3 現場實際情況的調查

依核設施現場的資訊，使用繪圖照相以及其他記錄方式反應目前的狀況及或修改後的狀況。

## 2.3. 除役方法的選擇

本章節說明包含最適當的除役方法，以及其他除役方法的選擇過程之評估摘要。

## 2.4. 除役的工作內容

本章應對於除役的各階段目的，達成的方法詳細說明，包含所選定方法的原因說明。

## 2.5 計劃的管理

詳細的行政管理計劃，成本，期程及資訊的管理。

### 2.5.1 組織

應詳細描述除役的組織架構，對應工作負責人員等。同時應包含訓練，品質保證，技術規範，硬體保安，程序書，及合約商的所扮演的角色等相關文件。

### 2.5.2 成本

計劃內容應針對除役細節的內容提出成本預估，屬於 NRC 管轄的設施負責人應說明資金如何規劃以完成除役的工作。

### 2.5.3 期程

在有關適當的地點，各階段相關的工作期程應清楚的張貼及描述。

## 2.6 員工及環境的保護

說明用什麼樣的方法，如何確保人員及環境不受除役過程中可能發生的化學及輻射危險

### 2.6.1 保健物理計劃

在除役過程中的保健物理計劃應詳細描述，所使用法規標準及選擇輻射偵測或是污染偵測儀器及人員偵測的門框偵檢器等的選擇說明必須完整。

### 2.6.2 ALARA 原則的應用

有關使用的方法應說明如何對應於工作人員輻射的 ALARA 合理抑低原則。

### 2.7. 廢料的管理

用來處理,儲存,處置放射性廢料的程序書，處理方法及處理系統應詳細說明。處置地點的法規要求及放射性廢料的特性，容積，核種濃度，廢料形式，分類方式等相關資訊均應說明。

### 2.8 最後的偵測計劃

除役完成後的輻射偵測應提供確認該設施所在地，及緊鄰的環境符合改成非限制區域的輻射標準。

## II. 廢料量的評估

有關廢料量的評估方式因核設施所在國家而會較大的差異，本章係依據日本官方發布的研究報告為基礎，原始文件內容分成三個部份。由於其中的輻射強度分類標準架構並不適用於我們，此處僅對以下二者進行介紹：

1. 評估範圍包含之目標物
2. 評估廢料量的分析方法

### 1. 評估範圍包含之目標物

由標的物範圍的確定，建立一個評估資料庫作為除役計劃廢料量以及成本估計的計算基礎。

- 1.1. 放射性設備
- 1.2. 放射性設備所在的廠房
- 1.3. 室外的放射性設備

### 2. 廢料量評估的分析方法

分析的流程可參考如下：

- A. 調查儀器設備及建物結構的廢料量後繼續進行 B 項。
- B. 確認放射性活度的分類標準後繼續 C 項。
- C. 廢料處理方式的再檢查後繼續 D 以及 H 項。
- D. 除役廢料評估的拆除產生的廢料輻射量評估及分類。
- E. 各設備輻射強度的評估後繼續 B 項評估。
- F. 系統除污的範圍確立後繼續 B 項評估。
- G. 拆除工作所需的工時評估後繼續 H 項評估。

H. 二次廢料產生率的評估後繼續 I 項的評估。

I. 二次廢料產生量的評估。

### 2.1 廢料量的調查方法

調查項目的區分原則

- A. 主要原則來自廠房設計圖計算建築物的廢料量
- B. 進行建物內部系統，材料，管理區域的分類及計算。
- C. 將設備主體部份與電動馬達進行區隔。
- D. HVAC 系統區隔為加壓系統及排氣系統。
- E. 燃料棒，控制棒，中子射源，離子交換樹脂，活性碳等，屬於運轉中的廢料評估項目，不在除役評估方法之列。
- F. 共用的設備應被共用的機組分攤廢料量的計算。  
主要的設備如下所列
  - a. 一般設備(熱交換器，泵浦，儲槽，空調系統等)
  - b. 反應爐及內部組件
  - c. 一次圍阻體(包封容器)
  - d. 生物屏蔽牆(BSW)
  - e. 汽機發電機冷凝器
  - f. 過濾除礦器
  - g. 活性碳吸附床
  - h. 燃料池
  - i. 管路，閥體，支撐架
  - j. 空調管路，撐架
  - k. 纜線，纜線穿越器，支撐架
  - l. 儀器操作盤，電源控制盤
  - m. 其他電氣盤，儀器盤，支撐架

### 2.2. 決定放射性活度值

#### A. 金屬

- a. 依據 2.1 所調查的結果定出每單位放射性活度值。
- b. 依據被活化造成的放射性分布定出活化的放射性程度
- c. 針對每個系統定出污染的放射性程度。

#### B. 混凝土

- a. 依據結構被活化的放射性分布結果，定出不同活度的放射性廢料量。
- b. 依據結構表面被污染的程度及滲透的深度，計算出被污染的廢料量及其放射性活度值。

### 2.3 處理方法的檢驗

#### A. 固體廢料處理

- a. 拆除後的廢料，除污以及瀝青填充固化等等。

- b. 伴隨產生的廢料焚化，壓縮，瀝青填充固化等。
- B. 液體廢料
  - 包括系統本身的餘水，切割產生的廢液，除污產生的廢液及洗衣服產生的廢液等。以水泥固化或塑膠固化及瀝青填充固化等。
- 日本一般的拆除產生的廢料處理流程如下：
  - A. 拆除的廢料產生後可能繼續步驟 B 或 C 或 D。
  - B. 瀝青填充固化後繼續 E 或是 F
  - C. 拆除後進行除污依活度再進行 B 或是 G
  - D. 判定符合清潔垃圾的標準則進入 H
  - E. 以 L1 的廢料處理方式裝桶
  - F. 以 L2 的廢料處理方式裝桶
  - G. 以 L3 的廢料處理方式裝桶
  - H. 丟棄或是回收使用
- 日本一般除役過程產生的二次廢料處理流程如下：
  - A. 廢液進行濃縮後進行塑膠固化再進行步驟 G
  - B. 廢棄樹脂進行塑膠固化
  - C. 焚化後的灰屑以水泥固化
  - D. 濃縮後的濃漿以水泥固化
  - E. 不可燃的廢料以瀝青固化
  - F. 過濾器壓縮後以瀝青固化
  - G. 以 L-2 的廢料處理方式裝桶

### III. 成本的評估

基本上成本預估的方式與國家不同而會有不同的考量依據日本目前的文件可分為以下兩種方式

- 1 美國式的成本預估, 參考文件如 DOE/EM-1042P
2. 在日本所使用的成本評估方法, 依據文件為能源諮詢委員會核能分會所公布的報告 A. 1985 年 7 月 15 日版及 B. 1999 年 5 月 18 的期中報告

以下各別作細部的說明

1. 美國式的成本預估
  - 1.1 總計劃成本
    - A. 主要成本: 直接及間接施工費用
    - B. 週邊費用: 設計, 工程, 法規, 介面及監督(oversight) 費用等
    - C. 廢料處理費用: 包括現場處理及廠外處置費用
  - 1.2 成本預估流程
    - A. 工作範圍審視
      - a. 必須執行的主要工作(主要成本)
      - b. 必須的支援工作及時間限制(週邊費用)
      - c. 已知的污染廢料(廢料流程成本)

- B. 取得建物結構資料以決定各細節成本之估算數字
  - C. 依時間先後訂妥工作順序
  - D. 計算所有成本之加總包括主要工作成本，週邊成本，廢料處理成本並反應處理的時間成本，突發狀況，管理費用等
- 1.3. 主要成本
- 勞力，消耗材，儀器設備，下包合約及其他包括能源以及管理費用等。
- 1.4 週邊成本
- 執行輻射偵測，計算來自活化輻射及污染總量情況，執行工程內容研究，籌備除役計劃等。
- 1.5 廢料產生的成本
- 處理，除污，減容，裝運包封，分類，依法規要求運輸，掩埋以及其他附加費用。
- 1.6 其他費用
- 突發狀況，醫護材料及零星雜費，財產保險及稅賦。
- 1.7 成本計算項目的變數
- D. 工作困難度因素(人員保護護具，高點接近困難度，現場勞工貢獻程度)
  - E. 不同區域勞工的所得差異
  - F. 材料設備成本變數
  - G. 管理費用的變數，醫護費用及零星雜物價值的變數
  - H. 能源成本的變數
2. 在日本所使用的成本評估方法
- 2.1 評估範圍及評估方法
- A. 評估方法
- 依各個標準程序所預訂的單價，加總計算所需總成本。
- B. 評估範圍
- 訂定標準程序的範圍但不包含設施負責人的成本，設施本身的成本，財產保險費，稅賦，突發狀況等費用。
- 2.2 評估成本的方法
- A. 勞力成本；計算每項工作包括拆除，處理，運輸所需人力及天數後乘以人力成本的單價計算而得。
  - B. 儀器設備成本；訂出該設施執行拆除，處理，測量等等的設備規範後計算設備的成本。
  - C. 施工管理成本：從電廠管理系統訂出管理成本及安全防護成本，輻射管理成本。
  - D. 其他各式各樣的成本費用；依據各相關工作成本單價乘以人數及工作天後的固定比例做為獎

- 金及一般性管理費用及加計人員住宿費等。
- E. 廠外運輸及處置費用;通常廠外運輸及處置的業務係以電腦模擬，由此計算每單位除役廢料的處理單價並統計總額。

### 2.3 成本費用的評估項目

- A. 調查計劃費用  
工程費用，取樣費用，輻射來源及總量評估，拆除報告支援費用
- B. 安全儲存階段準備費用  
該核能設施初期的恢復作業費用等等
- C. 拆除前的除污費用  
勞力成本，儀器費用
- D. 安全儲存管理成本  
看管成本，維護成本，設施使用前檢查成本
- E. 拆除儀器及建物成本及勞力成本包括使用之設備成本及設置臨時性建物的成本。
- F. 建築物殘餘輻射度量成本包括人力及儀器等
- G. 處理費用成本；包括勞力及儀器費用
- H. 檢查費用成本；包括勞力及儀器費用
- I. 廢料裝桶費用；包括容器成本及裝桶成本
- J. 廠內運輸成本；包括人力及設備成本
- K. 廠外運輸及處置成本；每立方米廢料單價成本
- L. 各式各樣其他成本；電廠管理成本；保安成本及輻射管制成本
- M. 其他成本；包括一般行政費用、保險費用、住宿費、設備維護費用及使用費用等。

## IV. 資金的籌措

1. 有關電廠除役的經費籌措規定，係依據 1989 年日本通商產業省所頒布的命令(通商產業省令第 30 號)，核能設施必須事先提撥除役所需的成本，做為除役時的準備金，並反應在電價費率之中。
2. 1990 年政府公布的租稅特別措置法的部份修正指出，在除役時所預估拆除成本的 85%在提撥盈餘做為準備金的時候可以免稅。
3. 依據成本評估的程序及核能機組的大小，得到所需的除役成本後，計算開始提撥的年度到除役的年度平均分配，得到每年應保留的盈餘做為除役之用。

## 伍. 結論及心得:

- (一) 面對核能科技在和平的用途上，日本政府在角色扮演上同

時扮演輔導機關(STA)，及審查機關(原子力保安院)。有一定程度的政府預算進行輔導及監督。如此使民間的核能相關企業在一些新科技的研發上沒有後顧之憂。反觀在國內的環境則並沒有民間的企業能在沒有政府的支援之下，不顧公司生存問題的挑戰，協助核能電廠解決許多運轉過程中所發生的問題。當日本的電廠運轉發生問題時，電廠馬上可以將問題交由支援維護及諮詢的民間企業進行問題研究及謀思解決之道。而在國內的核能電廠發生問題時，通常只是造成一群忙壞了的現場員工及總公司的稽察人員，最後仍並不一定能得到正確的答案。在我們拿日本電廠所使用管理人力數與國內核能電廠員工數進行比較時，這是一個極不公平的基準。在此次除役研究的過程中，從目前所獲致的資訊看來，從日本政府到所屬研究機構以至於民營工程設計製造公司等對核能問題的人力財力物力的投資，令人印象深刻。即使是對核能電廠除役前最後一個燃料週期結束時，將在廠房內的建築本體產生多少的活化放射性活度資料，都在民營公司進行研究的範疇之中，並應用電腦程式進行推估供作除役的參考。更別論除役時所需要的拆除技術，切割技術等的研究。在我們國內如果從現在起，要開始進行有關除役方面技術的研發，恐怕要找到足以勝任的民間企業人力及學術研究機構支持都有困難。更遑論要得到可以應用的研發成果。

- (二) 相對於日本的國家能源政策，我們國內的天然資源並不會比日本豐富，有史以來對核能所受到過的傷害也不像日本前有原子彈的重創，在 1999 年又發生了核燃料製造工廠，鈾料臨界造成兩人死亡，居民疏散的前後兩次嚴重事件。然而日本的政府即使經過了政權的更替，也不得不向經濟民生的現實低頭，繼續以解決問題的態度支持核能工業的良性發展。台灣在自產能源缺乏的情況之下，核能是不得已的選擇，但是未來如果核能工業繼續在目前的政經情勢發展下去的話，國內的核能科技人才將迅速凋零，國內核能電廠的許多技術諮詢及工程維護方面的問題，包括未來如何安全有效的除役問題等，都勢必需要與國外的核能工業界有充分的交流及支援管道，以日本為例將是一個很好的選擇。困難的是語言及國情文化的不同，包括政府核廢料政策的差異，管制法規的不同等。許多工作的執行很容易產生認知上的偏差，如何在未來的合作中讓雙方有充分的溝通管道可以化異求同，將是一個很關鍵的重點。如何在有利於雙方的前提之下儘早開始有關的合作計劃，似乎是台電極待努力的方向。
- (三) 在本次研習期間，參加 WANO 所舉辦的除役討論會時，經過與 JAPC 公司在東海電廠的管理階層討論，以及實際參觀東海電廠一號機後得到以下資訊，可供國內除役時的參考：
1. 正在除役的東海電廠一號機，在除役前大約有 100 位左右的員工，在目前的階段則大約僅剩 20 位的員工繼續在工作



崗位上進行除役的配合工作，大約減少了 80 位的員工則是大部份調至別的單位。由於 JAPC 是有不少核能單位的大公司，在人力的調度上，並沒有發生裁員的情況。但是在台電內部，目前的趨勢，各單位已經是在人員縮編及合併的潮流之下，未來如何吸納除役後多出來的人力，減少人力後對社會將產生的影響，在進行除役計劃評估時，應當重視此問題對國家社會經濟整體的影響。

2. 在除役過程的安全儲存階段所需的時間，一般而言會因廠而異，東海電廠預計安全儲存十年，計算基準是以開始拆除時間做橫坐標，以工作人員預估將接受的劑量作縱座標繪圖後與運轉中的劑量接受限值取得交點而決定之。在目前台電的除役政策之中，安全儲存的時間僅有 3 年，如此是否符合 ALARA 的原則，以及在國內實際從事核能工作的有限人力是否可行似乎有待進一步的評估，比對計算的基準。
3. 由於東海電廠一號機旁尚有正在運轉中的二號機，因此在安全評估的過程中，尚需考量除役工作對運轉中機組可能造成的影響，包括大批包商進出電廠造成交通的影響以及拆除過程可能造成的振動及微塵等。
4. 在除役準備階段的安全儲存過程中 JAPC 利用機會對許多運轉了三十餘年的設備如泵浦等振動機械等的基礎固定螺栓以及水泥塊進行取樣研究分析，以期得到更多資訊，提供未來的核能工業做參考。類似作法應可在國內執行除役工作時，對相關項目的研究是一個不錯的機會。
5. 預備拆除的一號機原址，雖然是以恢復綠地為原則，然而不論是 JAPC 公司或是政府都不排除在原址重蓋新核能機組的可能性，尤其是在日本國內核能設施土地的取得是非常的不容易而且非常昂貴。此點極類似國內的情況，值得我們參考。

(四) 本次研習過程當中，透過東芝公司的安排，特別訪問了日本東京大學量子工程學系的寺井隆幸教授。除了獲得了他站在學者角度對核能發展的寶貴意見之外，寺井教授更是說明了在東京大學工學院的核能研究機會。在日本政府教育部的全額補助(包括機票及生活費)之下，東京大學每年提供五個名額給亞洲地區的大學畢業生，攻讀核能工程有關的碩士及博士學位。在國內研究環境已經日趨勢微的情況下，台電應可考慮在未來與東京大學合作培養新生代，為核能電廠的未來注入新血。以下是訪談的記錄，雖然是寺井教授的個人意見，但我想亦具有很高的參考價值。

1. 問: 在過去三十年來，一般日本民眾對核能電廠的印象是如何?

答: 日本民眾了解核能是滿足能源需求(Energy Security)必要的一部份，即使是必須審慎的使用。最近 NIMBY(別

在我家後院)的風氣同樣的在日本有形成一股潮流的趨勢，一般而言，年輕人則對於滿足能源需求的重要性並不特別重視。

2.問:日本政府在國內興建核能電廠與否的角色上是否站有非常的重地位

答:是，雖然幾乎所有的電力公司都是民營的，但是所有的核能電廠都是在政府的政策指引下，進行興建核能電廠的決定。

3.問:一般民眾是否相信政府所言，核能是安全的說法？

答:在某些大眾傳播媒體的帶領之下，有些民眾會有存疑的想法。

4.問:核能電廠附近的居民或是其他團體，抗議電力公司興建核能電廠的問題在日本是否是嚴重的問題？

答:最近有漸漸變得比較嚴重，尤其是公民投票的想法有漸漸增加影響力的趨勢，雖然政策上尚未制定。

5.問:日本經過了第二次世界大戰之後，尤其是對那些原子彈的嚴重受害者，日本政府如何說服民眾在日本國內蓋核能電廠是安全的？

答:日本政府堅持強調核能電廠跟原子彈基本上是不同的，透過適當的控制管理，安全可以確保無疑。

6.問:過去三十年以來，日本政府是否有經歷過政黨輪替的經驗？是否有在野反對核能的政黨在執政後改變了對核能的立場？

答:日本有過一次類似的經驗，當時的聯合政權首相 Murayama(社會黨的主席)在執政後指稱雖然核能是有些問題尚待解決，但是核能對日本而言是需要的。

7.問:經過 1999 年的 JCO 燃料製造工廠發生的臨界意外，似乎有兩個興建核能電廠的計劃被取消了，這樣的決定是在政府的決定或是電力公司自己決定的？

答:是電力公司自行決定的，由於電力公司考量當地居民兩次投票的結果，雖然這個投票沒有法治的約束力。但是在日本，大多數的人視和諧的相處是重要的先決條件。日本政府只對申請核准進行把關，同意後就是電力公司自己決定的事了。

8.問:日本跟台灣一樣缺乏自產能源，日本政府是否有對核能應佔多少比例有預設立場呢？

答:目前核能發電的比例大約是 35%，日本政府堅持從滿足能源需求的考量下，能源的多樣性是很重要的，從這個觀點看來，日本政府並不堅持核能佔的比例要超過百分之 40 或是至 50 的水準。

9.問:日本是否有曾發生過因為電力短缺，造成電力公司分區限電或是暫停供電給工廠的現象？

答:不曾發生過，日本只有曾在 70 年代石油危機時，政府

提出節約能源的政策及對民眾呼籲節約能源。

10.問:從學者的角度來看,您覺得核能的未來前景如何?在未來的100年內會被其他的能源取代或是相反的扮演著主要的角色?

答:我個人認為在未來三十年內,由於在抑減二氧化碳的政策下,核能在日本仍將佔有重要的地位,在三十年以後使用鈾做為燃料,以及快滋生反應爐的發展使用情況,會因為鈾 235 的有限,而決定核能的未來。自然能源的角色,包括風力太陽能等等會較今日更為重要。但是在三十年內最多也只能提供 10%的能源需求而已。依不同的地區及不同的電力需求等因素,核能與其他自然能源同時存在是很重要的,前者需要資金雄厚的組織系統,而後者則甚至個人都可能擁有。

- (五) 目前有關除役所產生的廢料,在日本大部份的認知均是僅將全部廢料量的 1%到 3%,當作低放射性廢料處理。但是日本政府對於清潔廢料的放射性基準值尚未定出。尤其是在針對大批的拆除廢料的放射性偵測技術,即使是目前在日本的偵測方式,為了要兼顧測量時間的考量以及測量的準確度。事實上仍會有些許測量上的盲點。同樣的問題未來在我們國內有關政府機關的要求及我們應如何對應,因國情的不同及處理設施的差異而勢必有所不同,有關此類問題,政府的立場非常重要,台電公司內的相關溝通及配合工作,似乎亦應及早進行。尤其是目前對固體廢料的偵測技術研究,在國內恐怕台電必須自食其力,儘早獲得正確及有效的量測系統。
- (六) 在目前世界上任何一個國家的居民,似乎都漸漸產生了所謂的 NIMBY(Not In My Back Yard)的想法。因此在未來,要興建核能電廠的土地取得問題會日益嚴重,即使在日本目前亦未排除在核能電廠除役後原址,重建核能機組的可能性。在地狹人稠的台灣,在未來如果沒有其他的可替代能源,能滿足島內電力需求的繼續成長,或是在石油危機再度發生時,核能發電的角色勢必有再重登舞台的機會,因此保留除役機組原址,做為未來重建的可能地點,似乎仍有其必要性。
- (七) 在除役的成本計算模式上,依據日本 JAPC 的計算結果,一個類似東海電廠二號機 1100MWe 的 BWR 除役約需 545 億日圓。然而依據本公司曾經參考 US NRC 使用的評估程式估算的結果,核二廠的 985MWe 的除役成本不含低放射性廢料的最終處理費用,一部機卻要 32.2 億台幣匯率如以 1 比 25 計算相當於 805 億日幣,站在擲節國家預算的角度來看,未來除役的方式有必要同時考慮日本的作法,經過比較之後再進行後續的工作。
- (八) 在日本規劃核能電廠除役的同時,仍舊繼續有新核能電廠在進行建造及計畫之中,為的是滿足工業及民生用電的成長。此外並需考慮火力電廠二氧化碳排放的問題。倘若我們國內

核能電廠除役之後，電力的大量需求及二氧化碳排放控制的問題如何同時解決，將是所有國人及政府應當事先及早規劃的問題。

#### 陸. 感想及建議：

1. 在承受了史上最嚴重的核子災難的日本，由於國內天然資源及自產能源的有限，為了國家工商業及民生發展的需求，仍舊不得已的持續在核能的和平用途上，從政府，學術機構以至於民間企業繼續以合作的模式培育需要的人才及發展進步的科技。即使政府在經過政黨的輪替之後，在野時反對核能發電的政黨勢力，一旦主掌國政亦不得不在照顧全國國民的前提之下，繼續對核能發電站在輔導的立場，支持並推動良性發展的政策，讓全國的人民從來不用擔心有分區限電的恐懼。反觀國內的政治情勢，主政者似乎在重要的決策上，始終存在著讓所有人民，包括熟悉，了解與不了解的人民做決定，遺憾的是專家的人數永遠是佔少數，要讓全民都瞭解專家的論點，往往要耗費大量的社會成本。尤其是在此種決策氣氛之下，有能力的核能專業人才或是有潛力成為未來核能專業人才的年輕學子，早就在不愿意成為任人宰割的對象而早早離去，留下來在核能工業貢獻己力的精英，也在未來沒有接棒人手的不確定因素之下，紛紛求去。在一向把核能安全視為最高方針的核能電廠員工，在此種充滿危機意識的工作環境中，更是要在擔心飯碗隨時可能不保的不穩定狀態中，影響工作品質。不論國家的領導團隊最後對核能的判決是生是死，在這樣的發展過程中，實際上已經扼殺了核能發電在台灣的未來。尤其是面對核能電廠未來的除役問題，也無法在國內獲得政府及工商業的支持，使得台電必須仰賴於國外的技術。
2. 不論未來的核能前途為何，站在台電人的立場，在未來的十年至二十年中，勢必要對核能電廠除役的問題，展開積極的佈署及尋求解決之道。尤其是對將產生的大量廢料如何處理，應及早在全國居民被”不要在我家後院(NIMBY)”的理論掩蓋理性之前得到解決辦法，愈晚處理的成本愈高而且愈不容易處理。同時類似的問題在處理技巧上，必須仰賴一定程度的政府公權力協助，與政府機關的充分溝通必須及早進行。
3. 與除役有關的許多技術及工作，在日本花了相當多的時間及人力物力的投資。才總算得到今日的發展成果，雖然我們可以藉由研究及觀摩的機會學習瞭解其成就，以發包給國際間有能力執行除役計劃的公司為我們執行除役工作。然而最後負有除役責任的台電公司卻也難以在不瞭解除役細節工程的情況下，輕易決定最適合國內除役執行方式及執行過程。如果台灣的核能電廠真的在未來的十年內要進行除役工作時，除役所需的相關專責單位組織應及早成立。相關執行方式的研究計劃應及早進

行，電廠與除役有關的技術資料應及早準備，除役過程中的管理制度及執行方法的訓練應及早進行，以免在除役過程中產生不當的處理方式，反而挑戰到台電向來最為重視的核能安全。

4. 此次的核能電廠除役研究原本是要在日本進行三個月，美國進行三個月，然而由於 2001 年 911 的賓拉登事件造成本人申請美國簽證的延誤而最後不得不取消美國的行程，殊為可惜。然而依據此次日本研究的經驗瞭解到，其實不管研究的所在地為何，該國家內的研發成果只能供作我們參考，及提供台電未來的服務工作。許多的關鍵科技是屬於各公司的 Knowhow，我們無法在不勞而獲的情況之下，建立起自己的除役團隊或是相關科技。但是在多方比較之後，我們仍可發現在東西方的除役計劃存在著不小的差異，包括成本的計算差異，放射性廢料的處理方式等。仍有待我們作進一步的深入探討，以決定適合我們的最佳技術。

#### 柒. 備註及專有名詞/縮寫說明網路連結索引

1. **ATR: Advanced Thermal Reactor**，進步型熱中子反應爐，以普賢電廠為例，使用鈾及用過燃料所提鍊出的鈾，製做成的燃料稱為MOX燃料)。
2. **LRNR:**日本有關核能物質,核燃料及核反應爐總法(The law for the Regulation of Nuclear Source Materials, Nuclear Fuel Material and Reactors )which is referred to as the Law of the Regulation of Nuclear Reactors.一般日文簡稱爐規法，網址如下:  
[http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxrefer.cgi?H\\_FILE=%8f%ba%8e%4f%93%fl%96%40%88%ea%98%5a%98%5a&REF\\_NAME=%8a%6a%8c%b4%97%bf%95%a8%8e%bf%81%41%8a%6a%94%52%97%bf%95%a8%8e%bf%8b%79%82%d1%8c%b4%8e%71%98%46%82%cc%8b%4b%90%a7%82%c9%8a%d6%82%b7%82%e9%96%40%97%a5&ANCHO](http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxrefer.cgi?H_FILE=%8f%ba%8e%4f%93%fl%96%40%88%ea%98%5a%98%5a&REF_NAME=%8a%6a%8c%b4%97%bf%95%a8%8e%bf%81%41%8a%6a%94%52%97%bf%95%a8%8e%bf%8b%79%82%d1%8c%b4%8e%71%98%46%82%cc%8b%4b%90%a7%82%c9%8a%d6%82%b7%82%e9%96%40%97%a5&ANCHO)
3. **EUIL:The Electric Utility Industry Law** 日本簡稱電氣事業法, 規範電力事業供電計劃相關事宜，網址如下:  
[http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxselect.cgi?IDX\\_OPT=1&H\\_NAME=%93%64%8b%43%8e%96%8b%c6%96%40&H\\_NAME\\_YOMI=%82%a0&H\\_NO\\_GENGO=H&H\\_NO\\_YEAR=&H\\_NO\\_TYPE=2&H\\_NO\\_NO=&H\\_FILE\\_RECNO=4386](http://law.e-gov.go.jp/cgi-bin/idxselect.cgi?IDX_OPT=1&H_NAME=%93%64%8b%43%8e%96%8b%c6%96%40&H_NAME_YOMI=%82%a0&H_NO_GENGO=H&H_NO_YEAR=&H_NO_TYPE=2&H_NO_NO=&H_FILE_RECNO=4386)
4. **MITI:**日本政府的通商產業省(Ministry of International Trade and Industry)是 METI 的前身於 2000 年改制為 METI 經濟產業省
5. **METI:** 日本國家經濟產業省,是現行負責商業用核能電廠除役時主要的主管政府機關 **Ministry of Economy, Trade and Industry.** 網址如下: <http://www.meti.go.jp/>

6. NISA:日本原子力安全・保安院 Nuclear and Industrial Safety Agency 網址如下：<http://www.nisa.meti.go.jp/>
7. JAPC:日本原子力公司, Japan Atomic Power Company 網址如下：<http://www.japc.co.jp/>
8. JNC: Japan Nuclear Cycle Development Institute 日本政府資助的核能研究機構, 網址如下：  
<http://www.jnc.go.jp/jncweb/index.htm>
9. JAERI:日本原子力研究所, 由政府(STA)資助的研究機構網址如下：<http://www.jaeri.go.jp/english/index.cgi>
10. STA: Science and Technology Agency 日本國家科學技術廳, 現已合併改組為文部科學省, 是研究用核反應爐的主管機關(MEXT; Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology)請參考網址如下：<http://www.sta.go.jp/>
11. NUPEC: Nuclear Power Engineering Corporation, 財團法人原子力發電技術機構, 網址如下：<http://www.nupec.or.jp/>
12. RANDEC: Radioactive Waste Management and Nuclear Facility Decommissioning Technology Center, 日本放射性廢料及核設施除役技術中心, 網址如下：<http://www.randec.or.jp/>