

出國報告（出國類別：其他）

『赴日本京都大學及東京大學等參訪  
研討核電廠臨界及輻射相關安全議題』  
出國報告

服務機關：核能研究所

姓名職稱：葉昭廷 副研究員  
胡中興 副研究員

派赴國家：日本

出國期間：102年12月12日~102年12月18日

報告日期：103年1月17日



## 摘要

由於日本福島第一核電廠 2011 年因地震及海嘯引發核能事故，造成相關核安議題廣泛被國內社會大眾所關心。本次赴日本參訪日本京都大學原子爐實驗所、東京大學核子工程與管理學部、以及日本保全學會並進行研討會議，即針對以下議題：

- 一、日本福島第一核電廠 2011 年因地震及海嘯引發核能事故之成因、後續影響及防範措施。
- 二、日本東京電力公司已對福島第一核電廠第一到四號機組進行廢爐作業，並將四號機冷卻池的 1535 束燃料，移到一百公尺外的共同強化池儲存，其核臨界和輻射議題如何解決。
- 三、國內外核能界對於核電廠停機大修時，核燃料移出並貯放在用過燃料池，遇事故狀況下，發生喪失冷卻水或冷卻能力、水池升溫、中子吸收體劣化、水池再補水所產生的核臨界及輻射等之各種可能性安全議題及防範措施。

進行了深入討論，了解其處理情形，並蒐集有用資料提供國內面臨相同議題的參考，討論的主軸特別着重在事故發生後核燃料貯存池之臨界安全，以及輻射安全等。

此行除了深入了解福島事故的資訊討論外，尚參觀了京都大學研究用反應器，包括 KUR (Kyoto University Research Reactor)及 KUCA (Kyoto University Critical Assembly)，了解京都大學研究用反應器之現狀與應用情形。亦與東京大學關村直人教授及兩位東京電力公司專家在核工相關領域的研發現況做資訊的交流。

## 目 錄

摘 要 .....	i
一、目 的 .....	1
二、過 程 .....	2
三、心 得 .....	21
四、建議事項 .....	22
五、附 錄 .....	23

## 一、目的

由於日本福島第一核電廠 2011 年因地震及海嘯引發核能事故，造成相關核安議題廣泛被國內社會大眾所關心，國內外核能界對於核電廠停機大修時，核燃料移出並貯放在用過燃料池，遇事故狀況下，發生喪失冷卻水或冷卻能力、水池升溫、中子吸收體劣化、水池再補水所產生的核臨界及輻射等安全議題，仍持續進行各種可能性及防範措施之探討。

國內核能一廠有可能因為乾式貯存執照遲遲未能取得，造成冷卻池滿載，用過核燃料無法移出爐心，而面臨必須提前除役的問題，然除役也必須先移出用過核燃料至廠外，若因此用過核燃料進退兩難，在廠內放置的核臨界及輻射安全議題必須被關注。

日本東京電力公司已決定對福島第一核電廠第一到四號機組進行廢爐作業，如何將四號機冷卻池的 1535 束燃料，移到一百公尺外的共同強化池儲存，其核臨界和輻射議題如何解決？如何可以安全儲放並獲得管制單位和民眾的信心？是外界也同樣有興趣並關注的議題。

本次赴日本參訪並進行研討會議的目的即針對目前這些議題，與日本相關單位深入討論，了解其處理情形，並蒐集有用資料提供國內面臨相同議題的參考，討論的主軸特別着重在事故發生後核燃料貯存池（Spent Fuel Pool, SFP）之臨界安全，以及輻射安全等。參訪的機構包括：日本京都大學原子爐實驗所（Kyoto University Research Reactor Institute, KURRI）、東京大學核子工程與管理學部（The University of Tokyo, Department of Nuclear Engineering and Management）、以及日本保全學會（Japan Society of Maintenology, JSM）。

## 二、過 程

### (一) 行程

此次赴日公差行程，係自 102 年 12 月 12 日至 12 月 18 日計 7 日，詳細行程如下：

日期	到達地點	活動內容
12 月 12 日 (四)	桃園→京都	去程
12 月 13 日 (五)	京都	參訪京都大學並進行研討會議
12 月 14 日 (六)	京都	整理資料
12 月 15 日 (日)	京都→東京	行程
12 月 16 日 (一)	東京	參訪東京大學並進行研討會議
12 月 17 日 (二)	東京	參訪日本保全學會
12 月 18 日 (三)	東京→桃園	返程

## （二）參訪京都大學並進行研討會議

抵達京都大學原子爐實驗所由原子力基礎工學研究部門三澤毅（Tsuyoshi MISAWA）教授出面接待。



圖 2-1、訪問京都大學與三澤毅教授合影

由於事先已經與三澤毅教授取得聯絡，表達我們此行除了參訪京都大學研究用核反應爐等重要核設施外，希望也能對福島核電機組之現況有所了解。因此訪談過程分為兩部份進行，首先由三澤毅教授向我們講解福島核電廠事故詳細狀況並進行研討會議，接著再帶我們參觀兩座研究反應爐（KUR、KUCA）。

### 1. 福島核電廠事故資訊整理

圖 2-2 所示為全日本核電廠分佈圖，藍色顯示事故前已在運轉中，共 55 部機組，粉紅色為建造中，共 2 部機組，而黃色為計畫中準備建造，共 11 部機組，全總加起來共 68 部機組，總共可輸出 66697MW 電力。圖中紅色圈處為發生 311 嚴重事故之福島第一核電廠 6 部機組所在地。

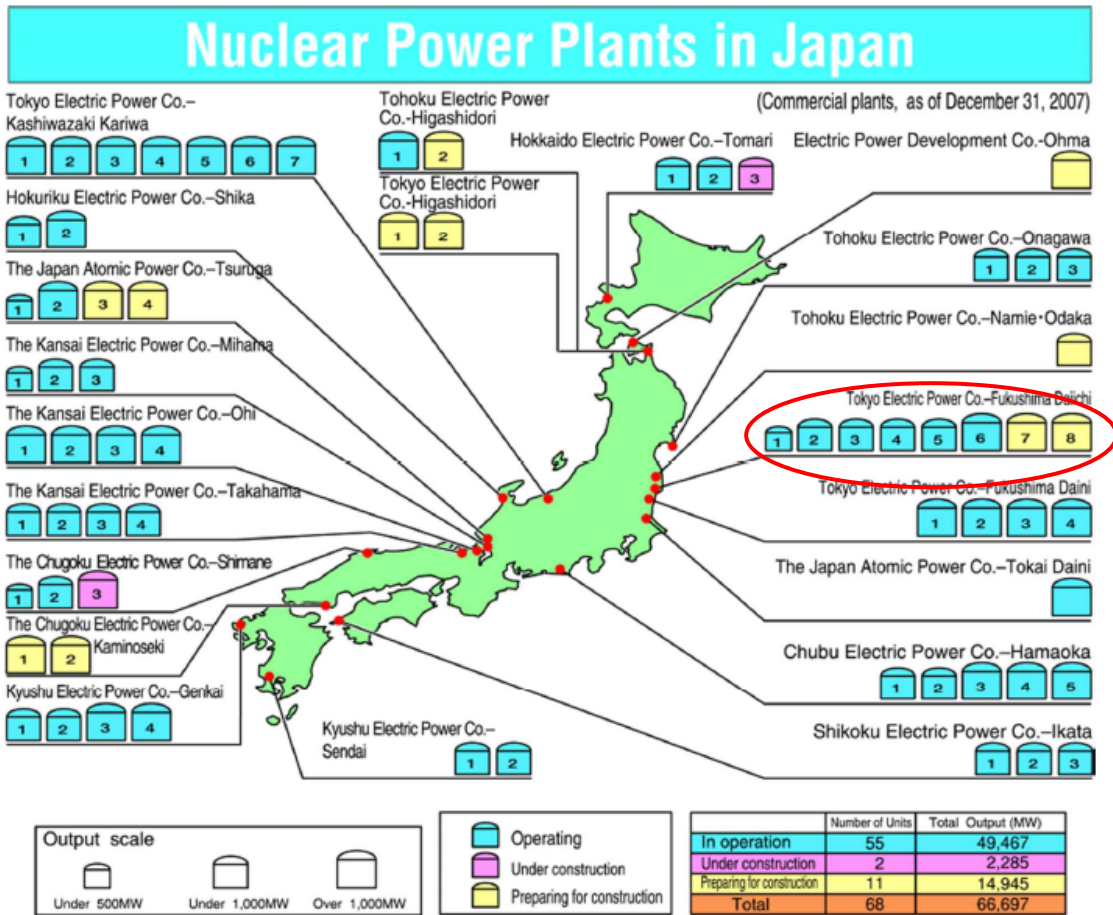


圖 2-2、日本境內核電廠機組分佈圖

圖 2-3 所示為事故前福島運轉中第一核電廠空照圖，各機組啟用時間及最大電力輸出如下表。

機組編號	開始啟用時間	機組型態	額定電功率	事故發生時之狀態
1	1971/3	BWR/3	460 MWe	額定功率運轉中
2	1974/7	BWR/4	784 MWe	額定功率運轉中
3	1976/3	BWR/4	784 MWe	額定功率運轉中
4	1978/10	BWR/4	784 MWe	大修停機
5	1978/4	BWR/4	784 MWe	大修停機
6	1979/10	BWR/5	1100 MWe	大修停機



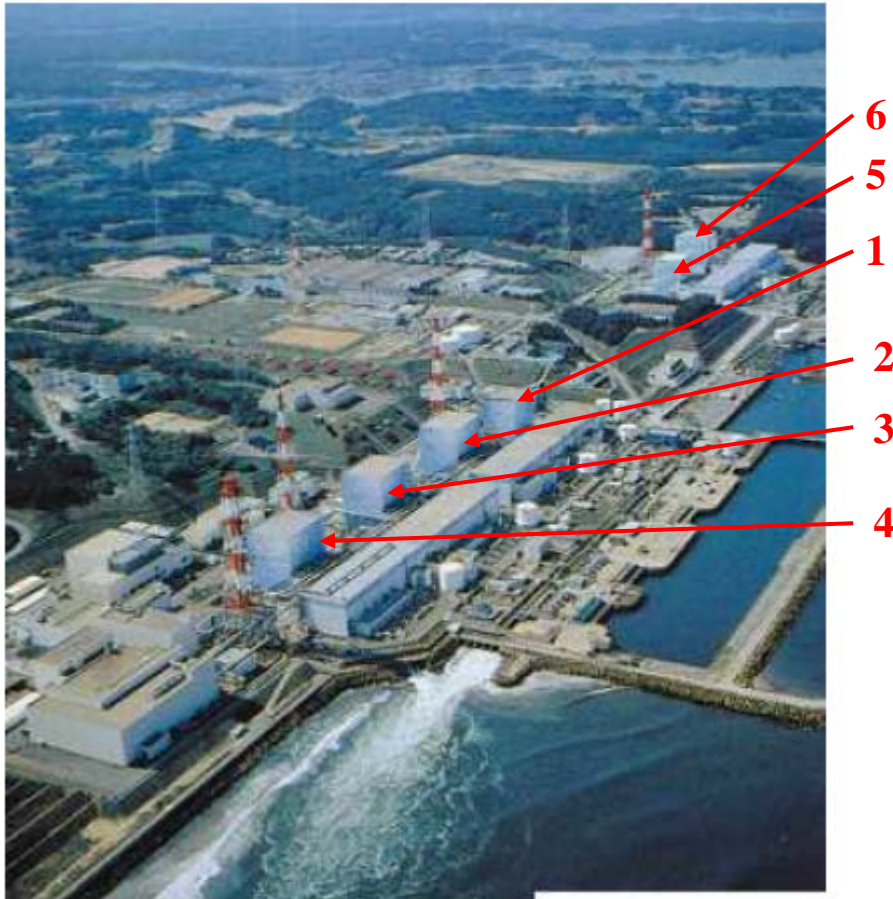


圖 2-3、事故前福島第一核電廠空照圖

福島第一核電廠 6 部機組型態全為沸水式反應器，沸水式反應器能量交換循環簡圖如圖 2-4 所示。

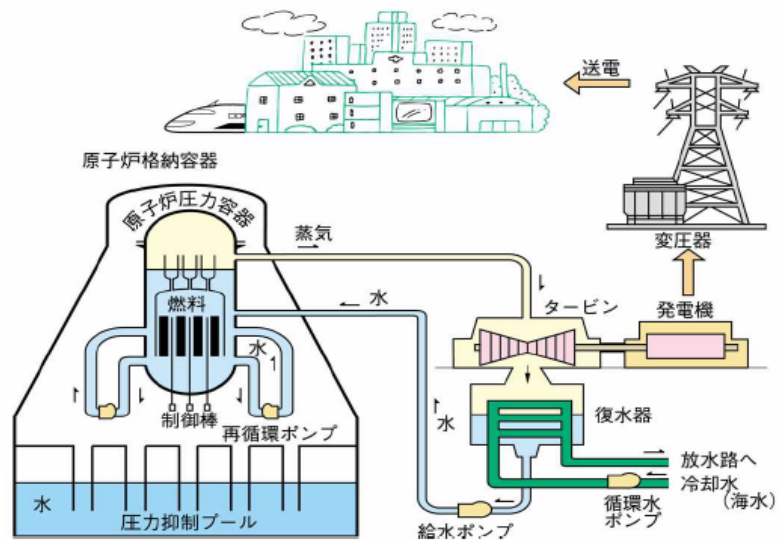


圖 2-4、沸水式反應器能量交換循環

2011 年 3 月 11 日福島東邊海域發生大地震，在福島第一核電廠測到的地震強度為 6 級（日本地震強度分級 0~7），隨後引發海嘯撲向日本陸地，地震發生 40 分鐘後，海嘯抵達福島第一核電廠，如圖 2-5 所示。由於海嘯高度達 13 公尺，遠高於設計基準值 6.1 公尺，結果海水淹沒高度在 10~13 公尺的大部分主廠房，如圖 2-6 所示，造成嚴重事故。

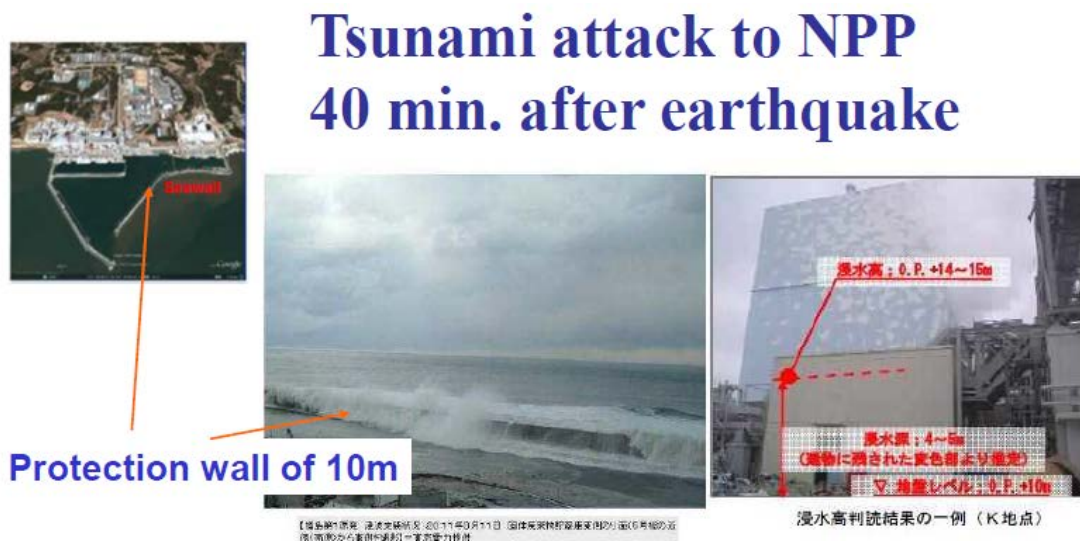


圖 2-5、海嘯抵達福島第一核電廠



圖 2-6、海水淹沒核電機組廠房及破壞情形

地震及海嘯破壞使得反應器廠房喪失外電，又廠內直流電池和柴油發電機都放在地下，海水淹進廠房後，這些供電系統全數無法使用，燃料衰變熱持續使得爐心溫度升高，水蒸乾後爐心開始熔融，甚至鉛-水反應產生氫氣，引起氫爆。以一號機為例，事故序列發生點描述如下：

- 3/11 14:46 地震發生，反應器自動急停
- 3/11 15:27 第一波海嘯抵達電廠
- 3/11 15:42 所有電力系統喪失
- 3/11 16:36 緊急爐心冷卻系統（ECCS）失效
- 3/12 01:20 包封容器內壓力升高
- 3/12 10:17 開始洩壓
- 3/12 15:36 氫爆發生
- 3/12 20:20 灌入海水

圖 2-7 所示為廠房內各主要系統於事故後損壞情形。

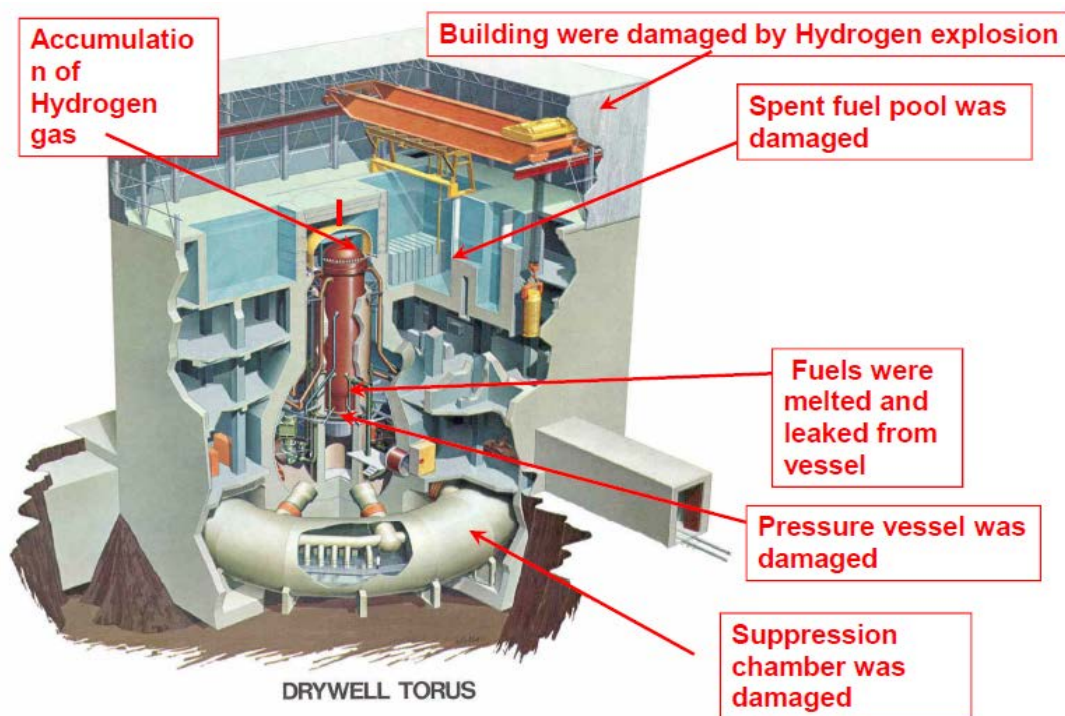


圖 2-7、廠房內各主要系統於事故後損壞情形



由於發生爐心熔融，且反應器廠房又遭破壞，遭成高輻射劑量之分裂產物釋放到大氣中，這些分裂產物中較重要的核種為 Cs-137、Sr-90、I-131 等。因此針對這些物質進行檢測及分佈計算至為重要，並劃定限制區域提供政府部門參考，圖 2-8 所示為輻射劑量與 Cs 污染分佈圖，圖 2-9 為現階段人員活動管制區劃分圖。

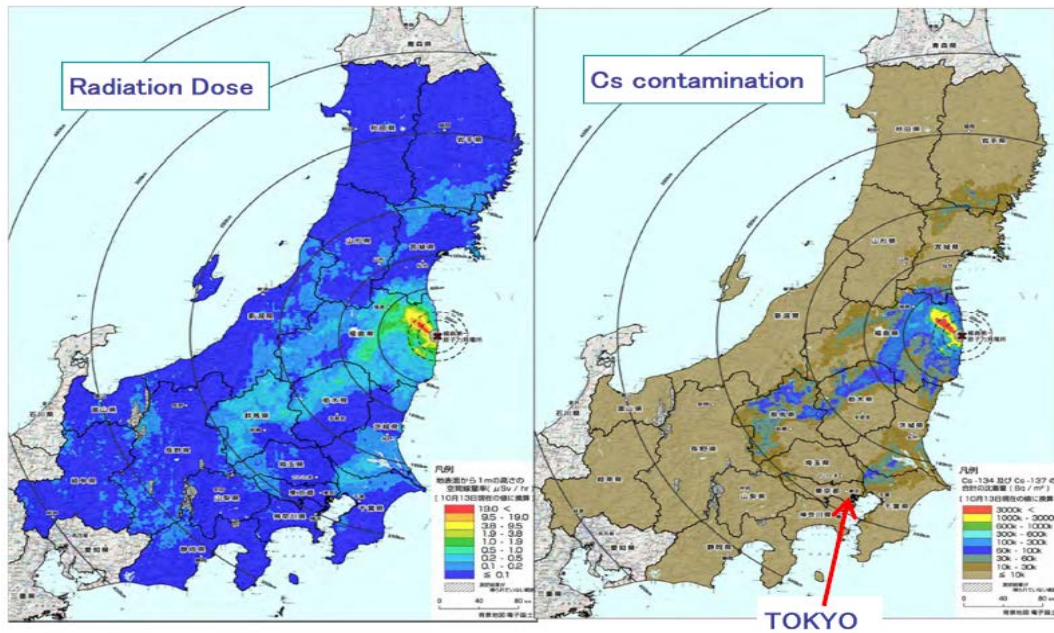


圖 2-8、輻射劑量與 Cs 污染分佈圖

## Restricted area in Fukushima

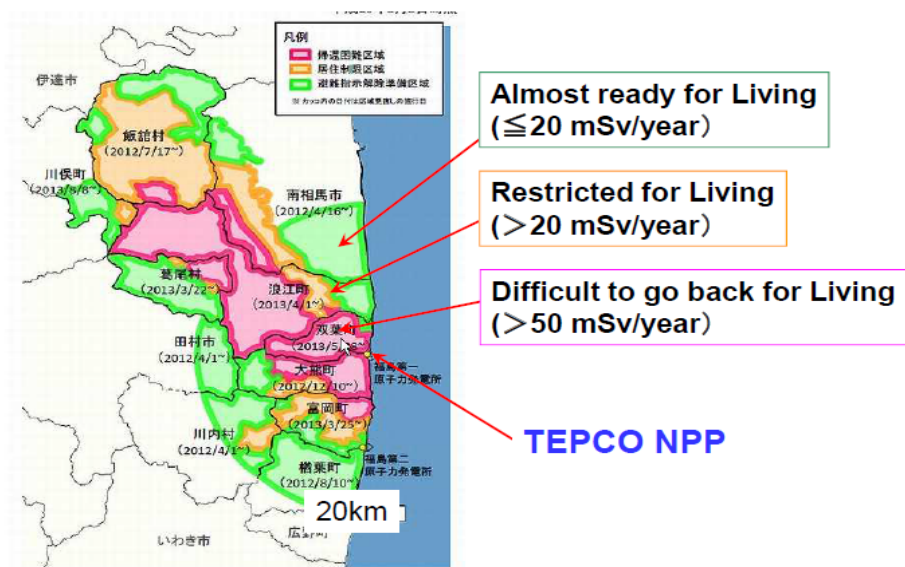


圖 2-9、人員活動管制區劃分圖

三澤毅教授最後針對此次事故，認為後續必須努力的要點為：

- (1) 福島事故持續追蹤處置，包括避免放射物質洩漏、除污與除役、檢討本次事故發生原因
- (2) 關於輻射劑量暴露議題包括：提供詳細輻射劑量分佈圖、盡可能降低輻射劑量
- (3) 對付類似核子事故之充分準備
- (4) 未來能源策略之討論
- (5) 民眾教育

三澤毅教授表示接下來福島第一核電廠的工作重點為除役、除污，特別是 1~3 號機有發生爐心熔融，燃料已經熔穿掉到反應器底部，將來的除污工作會有一些臨界安全疑慮，三澤毅教授準備與三菱重工洽談合作計畫，設定各種除污過程可能情境，進行臨界安全分析，協助除役工作順利進行。

## 2. 參觀京都大學研究反應爐（KUR 與 KUCA）

參觀研究用反應器之前三澤毅教授先簡單介紹目前日本境內研究用反應器概況，隸屬於日本原子能機構的有 10 個反應器，功能有材料試驗爐（50MW）、中子束爐（20MW）、高溫試驗爐（30MW）、以及脈衝中子爐等；大學院校中有 13 所開了核子工程課程，但只有 2 所大學擁有研究用反應器，分別為近畿大學（Kinki University）和京都大學（Kyoto University）。

京都大學下設研究用反應器試驗所（Kyoto University Research Reactor Institute, KURRI），負責維護運轉的核子設施包括京都大學研究用反應器（Kyoto University Research Reactor, KUR）（5MW）、京都大學臨界集合體（Kyoto University Critical Assembly, KUCA）（100W）、電子線性加速器（Electron Linear Accelerator, Linac）、鈷-60 Gamma-ray 照射設備、以及

熱室等。本次參觀的核設施主要為 KUR 和 KUCA，圖 2-10 所示為 KURRI 的鳥瞰圖。



圖 2-10、京都大學研究用反應器試驗所（KURRI）鳥瞰圖

(1) KUR 諸元

- 以輕水為緩和劑、蓄水式熱功率 5MW
- 板片狀高濃縮度燃料（20%）
- 熱中子通率達  $2 \times 10^{13}$  n/cm<sup>2</sup>/s
- 多用途中子束管
- 多樣照射設備（長照射氣管、低溫照射管、冷中子源等），如圖 2-11 所示



# Kyoto University Reactor (KUR)

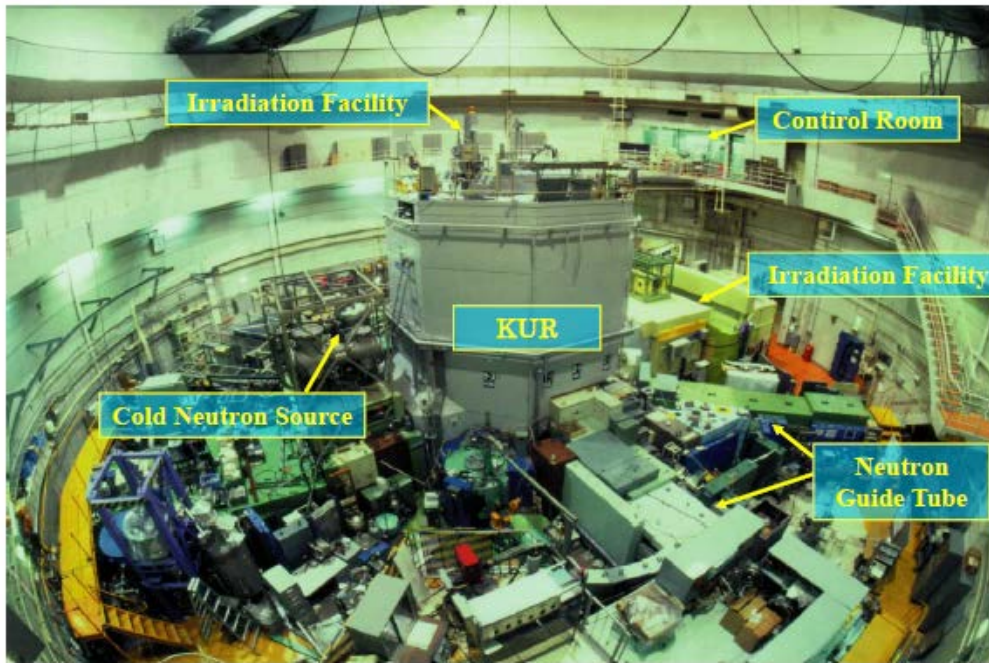
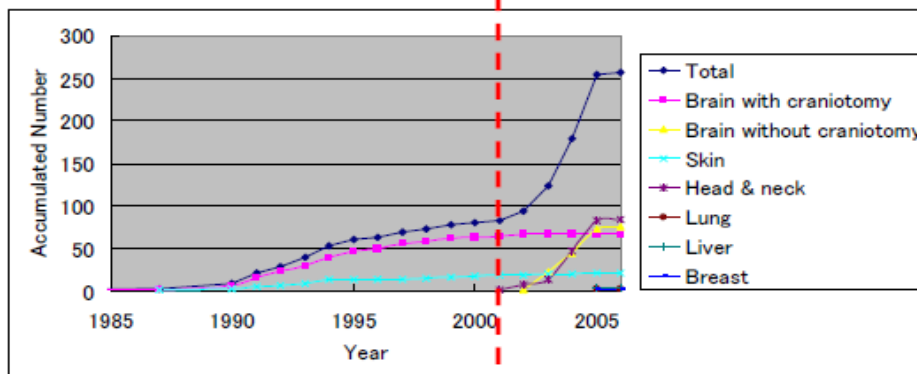


圖 2-11、KUR 照射設施配置情形

硼中子捕獲治療 (Boron Neutron Capture Treatment, BNCT) 是 KUR 重要的應用，至 2006 年 1 月已經累積了 257 病例照射，如圖 2-12 所示。

## Accumulated number of the BNCT clinical trials at the KUR



**Trial numbers as of Jan. 2006**

Brain tumors	142
Skin cancers	21
Head and neck cancers	84
Lung cancers	3
Liver cancers	4
Breast cancers	3
<b>Total</b>	<b>257</b>



Medical irradiation facility at the KUR

圖 2-12、KUR BNCT 照射累積病例統計

本次參訪 KUR 三澤毅教授特別請了一位來自大陸遼寧的工作人員趙女士幫忙以華語導覽解說，趙女士多年來在 KUR 負責運轉操作，實務經驗豐富，圖 2-13 為我們的合影。圖 2-14 為參觀 KUR 時拍照。



圖 2-13、參訪 KUR 與工作人員趙女士合影

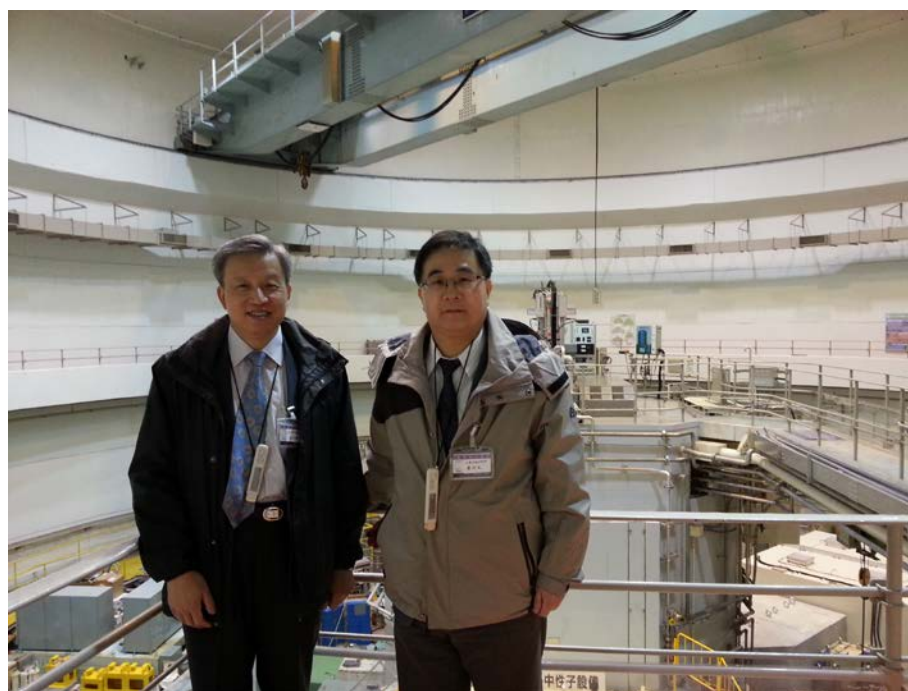


圖 2-14、參觀 KUR 時攝影



## (2) 參訪 KUCA

KUCA 在 1974 年第一次臨界，屬多爐心型態臨界集合體 (Assembly)，可以輕水或固態物質 (聚乙烯、石墨、鈹) 作為緩和劑，最大熱功率 100W，可搭配高達 14Mev 中子束或 150Mev 質子加速器混合實驗裝置。研究的主要課題為：鈾 (Thorium) 燃料反應器、高中子通率反應器、基礎反應器物理實驗、核臨界安全、中子偵檢器研究、加速器驅動反應器系統 (Accelerator Driven Reactor System, ADS)、以及大學學生反應器實驗課程等。

圖 2-15 為參訪 KUCA 時胡中興博士與三澤毅教授合影。



圖 2-15、參訪 KUCA 時胡中興博士與三澤毅教授合影

KUCA 反應器包含三個爐心集合體，分別為 A core、B core、C core。其中 A core 設計有一個加速器與之連結，用以進行一些高能實驗。圖 2-16 為 KUCA 截面圖。值得特別說明的是 A core 加速器實驗，目前藉由反應器與加速器結合實驗技術 (Accelerator-Driven Subcritical system, ADS)，發展用過核燃料高階廢料之轉換 (Transmutation) 技術，以及一些高能科學研究，圖 2-17 為其設計示範圖。圖 2-18 所示為具體實踐 ADS 實驗假想配置圖。

# Cross sectional view of KUCA building

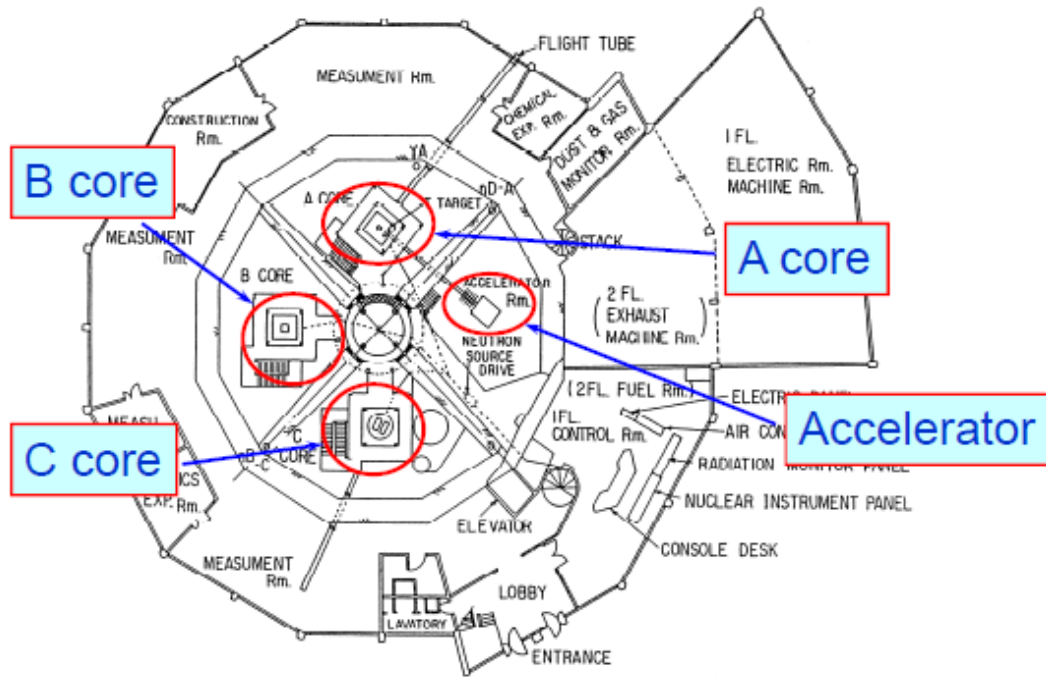


圖 2-16、KUCA 截面圖

## Accelerator-Driven Subcritical system (ADS)

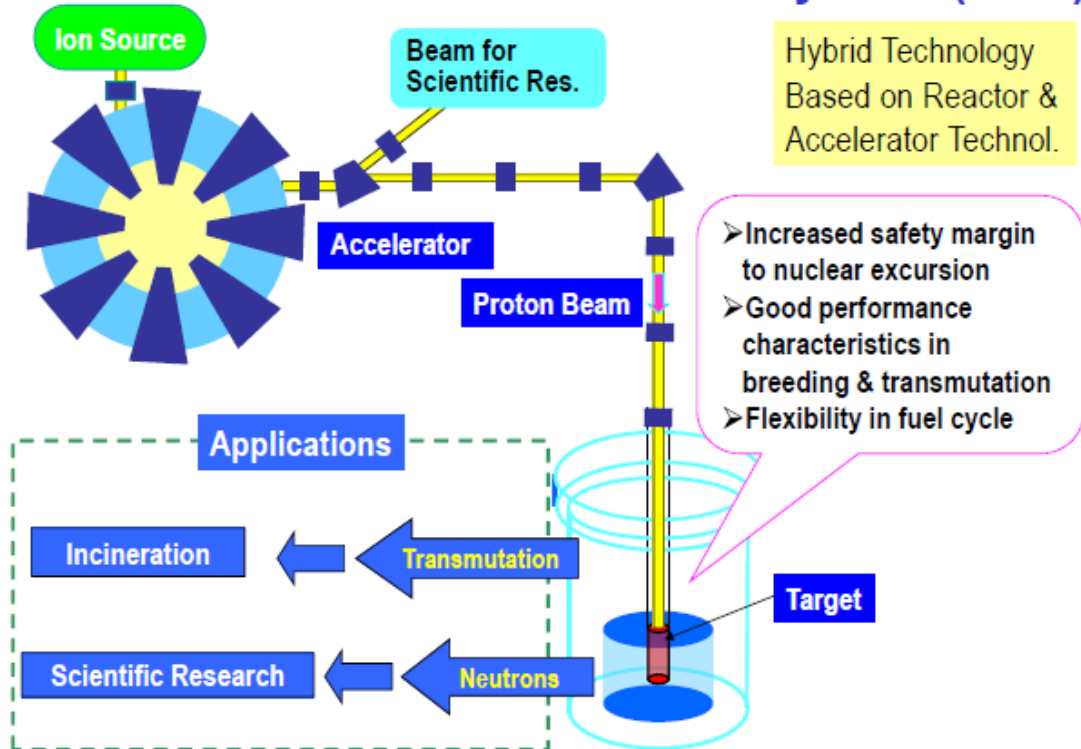


圖 2-17、反應器與加速器結合實驗技術設計示範圖

## Concept of FFAG-KUCA Experiment on ADS

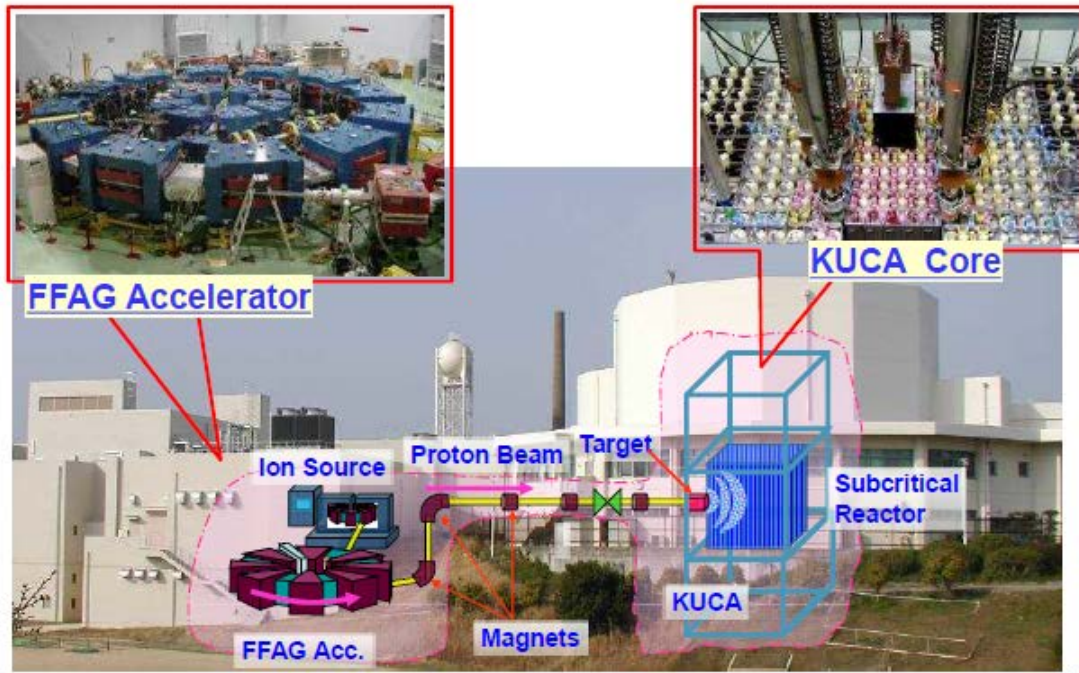


圖 2-18、ADS 實驗假想配置圖

### (三) 參訪東京大學並進行研討會議

出面接待我們的是東京大學關村直人教授，由於事先已經表達我們希望對於福島事故核燃料貯存池之安全議題有所討論，因此關村教授特別邀請了從該校畢業並在東京電力(東電)公司服務的兩位資深專家與談，一起進行研討會議，分別是東電公司原子力設備管理部核子反應器安全技術小組山中康慎(Yasunori Yamanaka)經理、核子安全及統括部核子安全小組宮田浩一(KOICHI MIYATA)經理。

與東電工程師討論的主軸仍以福島事故發生的成因及現況。檢討福島事故的成因，無庸置疑，福島事故是由東日本大地震與海嘯引發的，但是卻沒有證據說地震對安全設備造成結構性的傷害，主要的傷害還是來自於海嘯。回顧事件本身，最主要的問題仍是：

1. 對於海嘯的設計規範不足。對於海嘯規範，當初僅依據近百年的海嘯高度來做設計，顯然是不夠的，也顯示對於設計基準事故，不可僅用歷史數據來做評估，尚需核能安全與自然現象的專家互相合作。而除了海嘯，對於其他啟動事故，如火山爆發、廠區水災、廠區火災都仍需要做進一步的安全規範。
2. 對於事故中的情境，未有針對事故管理(Accident Management)實際處理演練。今後的演練應假想更多情境諸如氫爆、餘震、海嘯警報、輻射等等。電力公司與管制單位也應確保在各種現象或嚴重事故狀態下，事故管理的可靠性。
3. 對於超出事故基準事故的準備不足。福島事故揭露了，在目前電廠的安全設計下，在面對外部的極端自然災害，仍有許多弱點與不足的地方，電廠需要準備移動式設備以面對各種未預測到的事故狀況。

即使從事故後的觀點來看，加強對於外部天然災害，包括地震、海嘯等，的深度防禦，仍然是最能使人信服的改善措施。然而，對於天然災害的不確定性、對於瀕危效應(Cliff-edge Effect)的評估，以及利用 PRA 進行安全設備的有效性評估等等，都是尚需處理的問題。

接著轉向討論核燃料池 (Spent Fuel Pool, SFP) 安全議題。由於 4 號機大修全爐心燃料已經吊至 SFP 中，因此 4 號機 SFP 衰變熱相對於其他 SFP 大，甚至比共用池還大 (共用池雖然貯存高達 6375 根用過核燃料，但這些燃料已經過較長時間冷卻)，下表為福島第一核電廠各機組 SFP 貯存燃料情形。表中所示 4 號機 SFP 共放置 1331 根用過燃料及 204 根新燃料，總量為 1535 根，而其衰變熱為 2.26 MW，相對其他 SFP 高。

3 月 11 日地震發生後喪失外電，SFP 冷卻系統失效，此時緊急柴油發電機 (Emergency Diesel Generator, EDG) -B 自動動作 (EDG-A 維修中)。但海嘯到達後，所有 AC 和 DC 電力喪失，SFP 冷卻系統再度失效，衰變熱持續使得水溫開始升高，估計到 3 月後期燃料即可能無法被水覆蓋。3 月 14 日約 04:00 時，測得 SFP 水溫接近 84°C。



Unit	Spent fuel assembly (New fuel)	Decay heat (MW) (March 11)	Amount of water in the pool (m <sup>3</sup> )
Unit 1	292 (100)	0.18	990
Unit 2	587 (28)	0.62	1390
Unit 3	514 (52)	0.54	1390
Unit 4	1331 (204)	2.26	1390
Unit 5	946 (48)	1.01	1390
Unit 6	876 (64)	0.87	About 1450
Common Pool	6375 (—)	1.13	About 4000
Cask Storage Building	408 (—)	—	—

3月15日06:12 4號機包封廠房五樓發生氫爆，因為4號機所有燃料都在SFP內，由於無法確知SFP水位是否覆蓋燃料，東電工作人員擔心氫氣來自於SFP內燃料已經裸露乾燒並發生鋯-水反應，為了進一步確認，東電現場人員發現4號機廠房輻射劑量率(Dose Rate)並不高，研判燃料尚未破損。3月16日從直升機上可以看到SFP仍然有水，而且燃料並未裸露。

在排除氫氣來自4號機內部的諸多假設後，最後終於確認應該是來自3號機爐心熔毀之鋯-水反應，經由共用管路(Shared pipe)到4號機燃料裝填樓層(Refueling Floor)，其流經路徑如圖3-1所示。

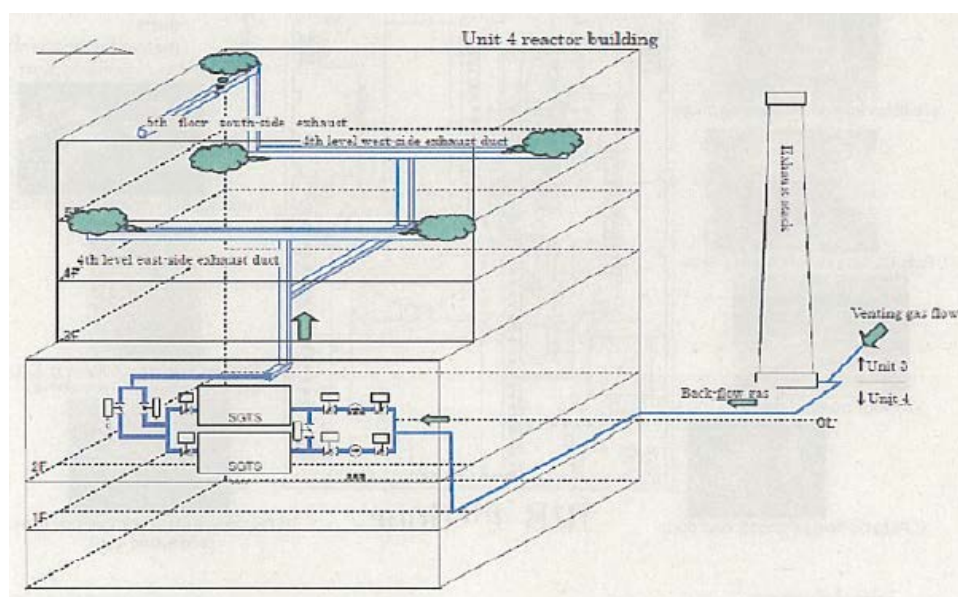


圖 3-1、氫氣從 3 號機流到 4 號機之路徑

既然在 3 月 16 日經由直升機證實 4 號機 SFP 燃料仍被水覆蓋，且 SFP 格架也保持完整，接下來的議題是如何注水進入 SFP 內以避免喪失電力下池水被衰變熱蒸發造成燃料裸露。3 月 16 日後東電人員一直努力使用水泡卡車(water cannon truck)和混凝土泵水車(concrete pump trucks)持續向 SFP 灌水，到了 4 月 12 日已經能夠測得水位高度。圖 3-2 所示為 4 號機 SFP 水位高度與水溫隨時間走勢評估圖，圖中顯示水位 0 公尺為燃料頂部，剛開始水位陡降乃由於地震晃盪所至，3 月 16 日前快速下降是由於蒸發和洩漏且無補水，16 日以後緩慢下降表示蒸發和洩漏速度比補水多，最低水位距離燃料頂部只有約 1.5 公尺，到了 4 月 22 日洩漏點關閉，4 月 27 日全功能水位復原系統修復可對 SFP 強力注水。

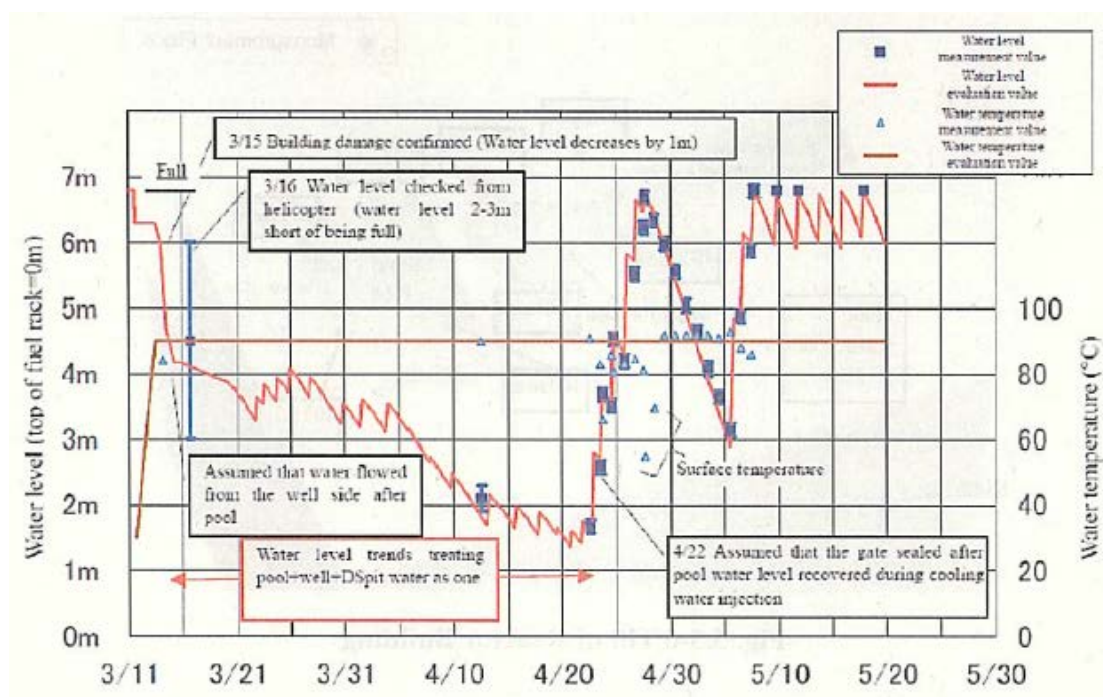


圖 3-2、4 號機 SFP 水位高度與水溫隨時間走勢評估圖

至於 1~3 號機 SFP 之處理方式與 4 號機類似，且相較於 4 號機這些機組 SFP 燃料有較低衰變熱，即使由於蒸發，池內仍保有足量冷卻水，最高水溫測得約為 70°C，此外即使 1~3 號機反應器廠房曾經發生爆炸，保持 SFP 水位系統功能仍然完整。5~6 號機 SFP 和共用池情形也類似，雖然水溫曾經來到 70°C。

東電 2 位經理也表示 4 號機 SFP 內燃料將逐漸運至約 100 公尺外之共用池，

原因是共用池具備全功能防護系統，且 1~4 號機已經決定除役，移出燃料為除役的一部分，選擇 4 號機 SFP 燃料先移出主要考量是因其無發生爐心熔毀，輻射污染相對較低，移出工作較容易進行。1~3 號機則因輻射污染問題和發生爐心熔毀造成核燃料不完整，狀況較複雜，相對地除役較為費時。

有關福島第一核電廠 4 號機 SFP 內燃料移出至 100 公尺外公用池之臨界安全議題，東電 2 位經理表示所有移出作業相關安全分析工作都在日本國內進行，並未假手國外廠商，安全分析報告亦被管制單位接受，因此移出作業已在進行中。

東京大學是日本國內首屈一指的高等學府，因此核能研究相關科系招生及人才培育工作並未受到福島事故影響(但其他學校則未必可知)，甚至因為日本核能電廠技術向國外輸出，東京大學也開設以英文授課的核能課程並招收國際學生。

#### (四) 參訪日本保全學會

12 月 17 日下午赴日本保全學會(Japan Society of Maintenology, JSM)訪問，接待我們的是宮健三會長，以及東北大學青木孝行教授。JSM 成立於 2003 年，現任會長為東京大學名譽教授宮健三教授，日語『保全』意謂保護設備周全之意，亦即維護。日本保全學會在 2011 年出版了輕水式原子力發電所的海嘯對策處理指引，以供日本各家電廠參考，而我國四座核能電廠也深受海嘯威脅，購買該本處理指引。

訪談中除了討論福島事故議題，宮健三會長對本所也很有興趣，宮健三會長表示希望邀請本所也能成為其協會會員，且有更進一步互動，對本所研究能量與方向甚感興趣。



圖 4-1、訪問 JSM 日本保全學會與宮健三會長(左二)、青木孝行教授(左一)  
合影



### 三、心得

- (一) 本次參訪日本京都大學才知目前日本境內有十幾座研究用反應器，有的甚至結合加速器進行一些高能撞擊實驗，原子能領域研究絲毫不受福島 311 事故影響，目前日本有些研究用反應器結合加速器之混合設計用以進行高能撞擊實驗，用過燃料中高毒性長半衰期鈾系核種轉換 (Transmutation) 撞擊實驗為其中研究項目，開啟高階核廢料處理解決先頁。
- (二) 日本福島核災是因大地震與海嘯，所引起的重大核能災害。未來核能復興的議題將不可避免地與核能安全掛勾在一起，核能電廠必須加強其防災措施，改善其安全文化，才能恢復民眾對核能的信心。
- (三) 近來北半球進入冬季，各地不斷傳出低溫履創紀錄，而南半球卻是炎熱難當，這種絕無僅有的極端氣候正是溫室效應惡化造成的。對於天然資源匱乏的國家例如日本和台灣，為確保國家競爭力，同時壓低碳排放以避免溫室效應惡化，核能發電仍是重要的選項。

#### 四、建議事項

- (一) 加強與日本學術或研究單位合作：雖然所內已無仍運轉之研究用反應器，無法進行用過核燃料轉換撞擊實驗，但密切注意國際上此一領域研究動態，甚至選擇與日本學術或研究單位合作，將來或可為用過核燃料處理找出一條解決之道。
- (二) 加強與國際核能組織之合作：安全文化的培養，沒有安全即沒有核能，核能安全是世界性問題，各國必須有如履薄冰的觀念，並落實核能資訊交流。建議本所仍須加強與國際間核能相關組織的合作，促進資訊交流與經驗回饋，並繼續精進核能安全相關技術。
- (三) 檢討對於超過基準事故之因應：天災強度充滿不確定性，核能電廠的安全防線不能僅依靠設計基準事故。福島核災之後，我國仍須徹底檢討核能電廠的弱點，並擬定及部署對抗超過設計基準事故的措施，才能確保核能安全。

## 五、參考資料

Report of “Seminars to Investigate the Accident at the Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station” What were wrong? What should be done from now on? Nuclear Safety Division, Atomic Energy Society Japan, March 2013.