

出國報告（出國類別：研討）

赴日本參加第一屆 ICMST 研討會暨考察  
日本核能電廠隔減震建物實務

服務機關：原子能委員會

出國人 職 稱：科長 薦任技士  
姓 名：何恭旻 熊大綱

出國地區：日本東京、仙台、橫濱

出國期間：101 年 11 月 11 日至 101 年 11 月 17 日

報告日期：102 年 01 月 10 日

## 中文摘要

核能電廠之運轉安全繫於嚴謹之設計，健全的運轉維護計畫與制度，以及良好優質的人員素質與態度，而經驗交流與分享為促進更安全之運轉環境不可或缺之一環。同時，100年3月日本福島電廠事故發生後，全世界擁有核能電廠國家皆從各種面向重新檢視核能電廠之安全性。日本保全協會(Japan Society of Maintenance, 簡稱JSM)於11月12日至14日假東京大學舉辦第一屆維護科技國際研討會(1st International Conference on Maintenance Science and Technology, ICMST)，會議包括電廠安全、電廠設計、電廠技術以及成本與效益等四大主軸，討論議題涵蓋日本核能電廠福島事故經驗教訓與改善因應措施、嚴重事故管理、電廠安全、地震與海嘯之風險分析、老化管理與疲勞議題、材料設計、非破壞檢測、輻射對反應爐材料效應、核能電廠維護技術、管路薄化、進步型反應器經驗、混凝土結構與電纜完整性之研究等多項議題。本次公差主要目的除藉由參與本次國際研討會之機會，瞭解世界各主要核能發展國家如何從維護之觀點，強化核能電廠之安全。並獲得日本核能電廠對於發生福島電廠事故後之改善強化措施，以汲取相關經驗以為借鏡，作為改善或提升我國相關安全管制之參考。同時，本會並於本次研討會中，就核能二廠反應爐支撐裙板基座錨定螺栓劣化問題與本會管制作為，發表短篇論文。

此外，參照日本福島事故發生後緊急應變處置之經驗，具有隔減震功能之核能電廠緊急應變中心建築物已為國際原子能總署所認同，目前日本核能電廠正積極投入隔減震建物規劃與興建工作，因此，本次赴日本公差另一目的為考察日本東北電力公司女川核電廠隔減震建物設置實務以及地震海嘯受災與後續改善措施，包括實地觀察廠區抗海嘯淹水設施、現場廠房設施被淹水區域與改善措施、後備補水與電源設施之強化執行情形；同時，並特別安排拜會東京工業大學隔震專家 Kasai(笠井)教授就隔減震技術議題進行研討，並參訪該校隔減震建築物規劃與配置現況。藉以獲知隔減震建物理論技術與設置實務，並了解核能電廠對於抗海嘯防止淹水，以及後備補水與電力設備之強化措施與設置考量，以作為國內對於核能安全總體檢採行管制措施之參考。

# 目 次

	頁碼
壹、目的.....	01
貳、出國行程.....	02
參、過程紀要.....	03
肆、心得與建議 .....	15
伍、附件.....	17

# 壹、目的

核能電廠之運轉安全繫於嚴謹之設計，健全的運轉維護計畫與制度，以及良好優質的人員素質與態度，而經驗交流與分享為促進更安全之運轉環境不可或缺之一環。尤其 100 年 3 月日本福島電廠事故發生後，更引發全世界擁有核能電廠國家從各種面向重新檢視核能電廠之安全性。各國陸續舉辦國際研討會，藉由對各種議題之探討說明與面對面直接討論方式，能獲得更多一手之資訊。

第一屆維護科技國際研討會(1st International Conference on Maintenance Science and Technology, ICMST)，會議所發表之論文涵蓋日本核能電廠福島事故經驗教訓與改善因應措施、嚴重事故管理、電廠安全、地震與海嘯之風險分析、老化管理與金屬疲勞議題、材料設計、非破壞檢測、輻射對反應爐材料效應、核能電廠維護技術、管路薄化、進步型反應器經驗、混凝土結構與電纜完整性之研究等多項議題。本次公差主要目的除藉由參與本次國際研討會之機會，瞭解世界各主要核能發展國家如何從維護之觀點，強化核能電廠之安全。並獲得日本核能電廠對於發生福島電廠事故後之改善強化措施，以汲取相關經驗以為借鏡，作為改善或提升我國相關安全管制之參考。同時，本會並於本次研討會中，就核能二廠反應爐支撐裙板基座錨定螺栓劣化問題與本會管制作為，發表短篇論文。

此外，建造具有隔減震功能之核能電廠緊急應變中心建築物已為國際原子能總署所認同之緊急應變措施之一，同時國內完成之核電廠安全總體檢中，已要求核電廠對於防範地震與海嘯等天然災害採取多項強化措施，如增強廠房進出門與管件穿越口之水密性。目前日本核能電廠正積極投入隔減震建物規劃與興建工作，因此，本次赴日本公差另一目的為考察日本東北電力公司女川核電廠隔減震建物設置實務以及地震海嘯受災與後續改善措施，包括實地觀察廠區抗海嘯淹水設施、現場廠房設施被淹水區域與改善措施、後備補水與電源設施之強化執行情形；同時，並特別安排拜會東京工業大學隔震專家 Kasai(笠井)教授就隔減震技術議題進行研討，並參訪該校隔減震建築物規劃與配置現況。藉以獲知隔減震建物理論技術與設置實務，並了解核能電廠對於抗海嘯防止淹水，以及後備補水與電力設備之強化措施與設置考量，以作為國內對於核能安全總體檢採行管制措施之參考。

## 貳、出國行程

此次公差自 101 年 11 月 11 日起至 101 年 11 月 7 日止，共計 7 天，行程如下：

日期	行程	摘要
11/11	台北—東京	往程
11/12~11/14	東京	參加第一屆維護科技國際研討會 (ICMST)
11/15	仙台	參訪女川核能電廠
11/16	橫濱	拜會東京工業大學隔震專家 Kasai(笠井)教授
8/4-8/5	東京—台北	返程

## 參、過程紀要

本次公差行程主要包括參加第一屆維護科技國際研討會、參訪日本東北電力公司女川核電廠與東京工業大學等 3 項，各項行程內容分別說明於下。

### (一) 參加第一屆維護科技國際研討會

本次國際研討會係由日本保全協會(Japan Society of Maintenology, 簡稱 JSM)於 11 月 12 日至 14 日，假東京大學舉辦之第一屆維護科技國際研討會(1st International Conference on Maintenance Science and Technology, ICMST)，主辦單位在會議開始與研討會手冊中說明本次會議係以電廠安全、電廠設計、電廠技術以及成本與效益等四大層面組成，討論議題涵蓋日本核能電廠福島事故經驗教訓與改善因應措施、嚴重事故管理、電廠安全、地震與海嘯之風險分析、老化管理與疲勞議題、材料設計、非破壞檢測、輻射對反應爐材料效應、核能電廠維護技術、管路薄化、進步型反應器經驗、混凝土結構與電纜完整性之研究等項。本次研討會發表論文或演說包括 3 篇大會演講(plenary lecture)，1 篇由東京電力公司說明福島電廠事故之處理現況與除役規劃情形之 keynote lecture，1 次共同討論會議(panel discussion)，皆於會議大廳 Ichijo Hall 舉行，其他 10 篇邀請歐、美、韓、日等國與會人員之論文發表(invited lecture)以及其他 60 篇論文則分別於 Ichijo Hall 與 Seiholu gallery 兩個場地進行，議程詳參附件一。會議場地並提供日本日立-奇異、三菱重工、東芝及其他單位機構之展示攤位，提供與會人員參觀及諮詢，展示內容則包括用過燃料池溫度/水位監視儀器系統、大容量直流電池、移動式冷卻系統、Water Jet Peening 之殘餘應力釋放工法、反應爐內管路接口(Nozzle)檢測工具與技術等。

本次研討會所涵蓋的範圍非常廣泛，以下僅就核能電廠安全文化、福島事故後之經驗回饋與強化措施、海嘯與耐震評估之研究、嚴重核子事故處理與本會發表之論文等項作概要性介紹。

### 1.安全文化

會議中由 MPR Associates 之總裁 Douglas M. Chapin 先生以”assuring safety in operation of Japan Nuclear Power Plant”為題，闡述其認為安全運轉必須具備之要素與日本文化特性在安全文化上的缺點。為確保安全地運轉，必須(1)確保系統、結構與組件必須可靠且能夠符合設計與功能；(2)建立完善的改正行動方案(Corrective Action

Program)，以適時發現問題並有效地解決問題；(3)優良的人員績效，包括人員訓練使具備工作所需之專業知能，並營造具安全意識(Safety-Conscious)之工作環境，管理階層要以安全為優先，並鼓勵部屬主動報告安全上之問題而毋須害怕會被批評或處分。電廠必須明訂各階層人員的職責與角色，同時作業程序書內容亦須避免有模糊不清之規定，並訂定完整而正確的程序步驟。Chapin 先生也再次提到東方文化對於建立安全文化上需要突破的地方，尤其是日本文化上普遍不會挑戰上級長官或資深人員的看法，即使有不同看法也最好不要提出，亦即西方俗諺” The nail that sticks out gets hammered down”不要強出頭的心態，以及將認錯改過視為很沒面子的事，因此錯失主動通報問題，與及時追查與解決問題的契機，這些都是建立安全文化的障礙。(4)風險告知與以績效為基礎(Risk-informed and Performance Based)之方式，將資源與關注點著重在風險顯著性高的議題上，同時須視電廠之狀況與運轉歷史經驗，採取適當之檢測與維修作業，其認為不論風險顯著性高低而採取一致性之做法可能是不具效能的(ineffective)，而且會忽略必須考量各電廠之差異性採取不同之作業內容。他認為日本的維護策略過於專注在維持電廠設備本身狀況的細節上，如緊急柴油發電機 100%之成功起動率，卻忽略其他潛在的安全問題，如其它天然災害等外在因素對緊急柴油發電機之影響。

Chapin 先生亦提醒維持安全為電廠應主動負起的責任，而非靠管制單位的基本認知。另外，也點出目前發生的重大核能事故都是在美國、蘇聯與日本，這些國際間核能高度發展的國家，而發生問題的共通點是對欠缺安全意識與低估核能的風險。

## 2. 福島事故經驗回饋與各核能電廠之強化措施

本次會議中與此議題相關的有 5 項，分別是(1)東京電力公司就 100 年 3 月 11 日福島一、二廠遭受海嘯侵襲與設備受損情形、福島一廠目前處理現況以及後續除役處理面臨的挑戰；(2)關西電力公司說明其大飯(Oh)電廠強化措施執行情形；(3)女川電廠說明 311 海嘯受損情形與採取之強化安全措施；(4)中部電力公司說明濱岡(hamaoka)電廠之現況與安全強化措施；(5)北海道大學 Tadashi NARABATASHI 教授針對福島一廠事故過程各項參數變化、與嚴重核子事故 MAAP 程式分析結果比較以及經驗回饋做廣泛之介紹。在 5 篇演說與論文中，就可作為國內借鏡或管制參考之相關資訊整理如下。

### (1)在防止海嘯造成廠區淹水方面

各廠都採取一些措施，除將原防水(waterproof)門改為水密(watertight)門或於門外再增設擋牆 (reinforced door)，以強化廠房開口之水密性外，女川電廠將現有廠區海堤

(embankment)高度由現有 13.8 公尺(原高度為 14.8 公尺，311 地震後因板塊運動造成東日本地層下降 1 公尺)再加高 3 公尺。濱岡電廠模擬規模 9 地震造成之海嘯高度為約 10 米，其採取建造海拔 18 公尺(廠區地表 10~12 米高)，總長度約 1.6 公里之海牆，其基礎深入岩盤，設計上能承受海嘯之衝擊，預定於 2012 年年底可完工。大飯電廠部份，則已針對緊要海水廠房加裝防水檔牆，並增設海堤。各廠並將重要設備之廠房開口與穿越管全數改為具水密功能，以在超出設計之海嘯侵入廠區時，避免重要設備因淹水而無法運轉。至於因應福島一廠事故後增設之電力設施，如氣渦輪機或柴油發電機與電氣開關設備，都置於廠區高處。

#### (2)在強化耐震能力方面

女川電廠於 2005 年地震時，因部份區域震度超出設計基準值，故當時進行 1~3 號機共約 6600 個管路與支架之補強作業，同時建造免震之行政大樓於 2011 年 8 月完工，目前正進行耐震能力重評估作業與管路支撐結構之強化作業。濱岡電廠原對於 As(與反應爐停機、冷卻、控制放射性物質外釋有關之設施)耐震設計基準為 600 gal，於 2005 年於「較安政東海地震具有寬裕量的地動」計畫中，針對 3~5 號機管路與電纜支撐、排氣煙囪、燃料填換台車軌道、反應器廠房 5 樓架空吊車支撐結構、油槽、海水泵室旁邊地盤等，以岩盤約 1000gal 地震強度，進行強化改良措施，其中管路支撐結構強化共計約 6000 餘處。以上作業已於 2008 年 5 月完成，同時經評估確認反應爐與圍阻體。

#### (3)其他已採行強化措施

強化措施係包括預防淹水、耐震、電力與冷卻水源、圍阻體完整等要項，由於各廠之措施大同小異，這裡主要以濱岡電廠為例說明之。濱岡電廠之強化措施包括於反應器廠房頂部設置備用發電機，提供爐心隔離冷卻系統(RCIC)之直流電源系統之充電電源；於廠區後方山坡上設置氣冷之移動式水泵與水源，提供反應爐低壓注水之用；提供多種水源，如冷凝水儲存槽、額外水槽及河水；設置圍阻體排氣系統手動操作之氣源(氮氣瓶)與管路分配系統。大飯電廠則提到利用移動式柴油引擎驅動之氣冷式冷卻器作為熱沉。除以上硬體措施外，各廠為因應緊急操作所需人力，皆增加留守人力，如大飯電廠增加之留守人力約 30 餘人。

#### (4)後續強化措施

- a.在防止圍阻體過壓與氫氣控制方面，3 座核能電廠未來都計畫安裝圍阻體過濾排氣設施與被動式氫氣再結合器(PAR)，女川電廠除已於反應器廠房(二次圍阻體)頂板加裝開洞裝置(Boring device)，另已進行排氣口(venting hatch)安裝作業，並



- 計畫於高點設置氫氣偵測器(國內同類型之核一廠皆已安裝排氣與氫氣偵測器)。
- b. 女川與濱岡電廠皆已建造免震建築，並將緊急指揮中心設置於免震建築內，其中女川電廠之免震棟係與廠房高程相同，濱岡電廠則建於廠區後方海拔 25 公尺之高處。大飯電廠目前之指揮中心係設於控制室外，未來亦計劃興建免震建築。
  - c. 在最終熱沉部份，濱岡電廠考量為原提供反應器廠房冷卻海水之海水泵係在室外，可能因淹水而受損，故將於取水口旁邊之水密(watertight)廠房另安裝每部機兩台各為 100% 容量之緊要海水泵，作為替代熱沉，預定 2013 年年底正式啓用。
  - d. 濱岡電廠計畫將原為海水冷卻之高壓爐心噴灑系統泵馬達軸承，另增設氣冷裝置，冷凍機將裝設於反應器廠房屋頂。
  - e. 濱岡電廠將於免震建築設置 6 台 4000KVA 之氣渦輪機，並設置受電變壓器與移動式變壓器，預定 2013 年年底正式啓用。
  - f. 女川電廠將研擬乾井蓋氣密性之強化措施，此議題在北海道大學 Tadashi NARABATASHI 教授之報告中亦有提及。經請教 NARABATASHI 教授，其說明因馬克一、二型一次圍阻體容積較小，且為一次圍阻體邊界之乾井蓋上方為直接接觸大氣（馬克 3 型之乾井蓋上方平時為水淹蓋），於事故高溫高壓環境下，可能因法蘭接觸面氣密性不足而造成乾井內放射性氣體或氫氣直接洩漏至上方之反應器廠房區域，造成氫氣累積與區域背景增高之問題。NARABATASHI 教授並表示，日本新成立之原子能管制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)預定明年會將此議題正式列入管制法規要求。

### 3.海嘯與耐震評估之研究

本次研討會有 4 篇與海嘯及地震評估有關之論文，以下主要就其中 3 篇內容簡述於下。

第 1 篇”Standardized Procedure for Tsunami PRA by AESJ”；係由日本電力工業中央研究所（Central Research Institute of Electric Power Industry）、大阪大學與原子力安全基盤機構（JNES）為日本原子力學會(Atomic Energy Society of Japan，簡稱 AESJ)所建立之海嘯安全度評估程序，在論文中提及 AESJ 會採取 4 個步驟，以強化對廠外事件之風險評估，首先為考慮海嘯對電廠之影響，並考慮喪失廠外電源之情況，第 2 步為評估地震與海嘯之交互作用，第 3 步為將其它如火災、淹水等納入考慮，最後為評估所有廠外事件之綜合效應(synthetic effect)，此次發表的論文為第 1 步之結果。其要項包括(1) 蒐

集分析並現場巡查電廠廠址區域與電廠之特性資料；(2)確認事故情境：確認海嘯造成之事故情境，並建立與肇始事件及事故序列評估相關之廠房與組件之列表。(3)進行海嘯危害度評估(Tsunami Hazard Analysis, 簡稱 THA), 包括處理評估之不確定因素、建立海嘯產生區域模式 ( design Tsunami generating area model )、建立海嘯產生與傳遞(generating and propagation)模式、發展邏輯樹(logic trees)、海嘯評估、最後決定海嘯浪高變化量以作為下一階段易損性評估 ( fragility assessment ) 之參數；(4)廠房組件之易損性評估：此項包括確立評估之標的物與損壞(damage)模式、選擇評估技術、評估實際降伏強度 (realistic yield strength)與實際反應強度 (realistic response), 最後得到海嘯衝擊強度超過降伏強度時損害機率之易損性曲線；(5)事故序列評估，由前項所得廠房組件之危害度曲線，確立肇始事件，建立事故序列之模式，再建立系統之模式，最後進行事故序列之量化風險評估，得到海嘯之風險度評估結果。

第 2 篇” Failure Mechanism of Coastal Structures due to Tsunami Power”, 由日本 Port and Airport Research Institute 與 National Defense Academy 共同發表。主要說明進行海嘯衝擊水工實驗之結果，基本上先說明一般海浪與海嘯之差別，再來由實驗結果顯示海嘯底部之衝擊力最大，須 10 公分厚之混凝土牆於遭受 2.5 公尺高的海嘯衝擊時，牆面雖會龜裂，但仍可抵擋，惟另外海嘯之沖刷(scouring)效應會掏空基礎而造成倒塌問題。

第 3 篇” Seismic Safety Evaluation of Air-cooled Emergency Electric Power Supply Equipments”, 由日本原子力安全基盤機構 ( JNES ) 發表，主要因日本核電廠採用氣冷式柴油發電機與氣渦輪機作為福島事故後強化電力措施中之後備電源，但其耐震能力驗證尚未建立標準，因此 JNES 乃就建立耐震能力驗證標準進行一系列之測試與評估作業，本篇論文即說明其作業規劃內容與目前執行情形，其中於 2011 年主要為第一階段作業，包括蒐集過去之測試資料與相關技術，以及就目前應用或將使用於核電廠之設備規範調查結果建立測試方案，於 2012 至 2013 年則進行第二階段作業，包括由執行震動台測試結果評估故障模式與耐震能力、精進(refinement)測試結果之評估方法，以及建立耐震能力審查規範。本次發表論文主要為 2011 年第一階段之結果與 2012 年之執行情形，其中第一階段中說明其蒐集標的為大型氣冷式氣渦輪機與柴油發電機之氣冷式散熱鰭片(fin cooler), 並確認須進行測試之主動件與功能，選定執行振動台測試之設備包括單台大型氣冷式散熱鰭片(fin cooler)、雙台大型氣冷式散熱鰭片(fin cooler)與雙組氣渦輪機等，預定於 2013 年初進行測試。

#### 4. 嚴重核子事故處理

本項議題共有 4 篇論文發表，包括 2 篇與嚴重核子事故時圍阻體控制相關，另 2 篇各為碳化矽核燃料護套對事故之耐受性與日本對嚴重核子事故指引之改進作為等，由於第 4 篇為日本東京大學教授就其對日本於嚴重核子事故處理策略之應檢討改進之處提出其看法，由於相關內容主要係與國際間已採行或正進行之做法相似，而我國之作法本來即已採行國際間之相關導則執行，故以下僅就其他 3 篇論文內容簡述之。

第 1 篇” Merits of Filtered Containment Venting with High Filtration Efficiency during NPP Severe Accidents”，係由瑞士 Innovative Technology Development GbmH 與 IMI Nuclear(CCI AG)公司之代表，介紹其公司生產之圍阻體排氣過濾(filtered vent)系統之性能，並與一般文式管為基礎之濕式刮除器(Venturi based Wet scrubbers)與乾式過濾器(dry filters)對於事故初期排放與後續長期多次排放情況下，於所產生之氣態銫、有機/元素碘等放射性物質之除污因數(Decontamination Factor)做比較，依放射性物質型態與不同元素，其元素碘(elemental iodine)除污因數可達 10,000，一般法規要求為 100，懸浮狀態(aerosols)之碘與銫則宣稱除污因數可達 100,000/200,000，法規要求為 1000。此外，在論文中提到濕式過濾系統須注意幾個可能影響其濾除效果之因素，如因輻射或高溫而導致被留置之物質再揮發，這是採用圍阻體排氣過濾系統必須考慮的效應。

第 2 篇” Containment Systems Technologies for BWR and PWR to Mitigate Severe Accidents”，由位於德國之 AREVA NP GmbH 公司代表，說明該公司被動式氫氣再結合器(Passive Autocatalytic Recombiner，簡稱 PAR)、圍阻體排氣過濾系統(含輻射偵測系統)及圍阻體大氣偵測系統 HERMETIS 之性能與特性，以及為世界核能國家所採用之現況。其中提到 PAR 系統已經國際功能驗證，並有 100 組(每組包括 20~60 個 PARs) PARs 為西方與俄國電廠採用，其聲稱具有快速處理能力(high H<sub>2</sub> depletion rate)。HERMETIS 為提供事故後之圍阻體氫氣、一氧化碳、水蒸汽與氧氣之偵測與數據處理。在圍阻體排氣過濾系統部份，其為利用 Venturi Scrubber、金屬纖維(Metal Fiber)過濾器，並於下游設有吸收段(sorbents section)，以將未由前段濾除之放射性物質進一步吸收。簡報中除說明其濾除能力對於懸浮氣體與元素碘可達 99.99%與 99.8%之留置能力(retention efficiency)外，特別說明其係針對 1~10bar 與達攝氏 200 度，不同型態之碘，經國內與國際 ACE(Advanced Containment Experiments)測試驗證結果。同時在過濾系統下游設有輻射偵測器。此外，該公司代表亦強調所有裝置皆已考量耐震。

有關圍阻體排氣過濾系統設置與性能部份，研討會另篇由美國西屋公司人員以”

Design for Plant Maintenance/Modification in US to Address Post-Fukushima Lessons Learned”為題，所發表之內容中提及美國工業界認為圍阻體過濾系統並非安全議題，而是環境污染問題(land contamination issue)，且認為其效用不大。而美國核管會認為除污因素數值考量排放現象(phenomena)之不準度，目前除污因素限值可能不夠保守，此外並無足夠之測試數據以證實系統之除污因素（法國 AREVA 之說法為有經測試驗證），目前美國可能之作法為只限於馬克 1/II 型圍阻體須安裝，其採用 100~1000 除污因素，不考慮有機與元素碘，且不須建造另一廠房以容納新增之系統設備。其亦提到目前日本的做法要求除污因素須大於 10,000，且須考慮有機與元素碘。

第 3 篇” Silicon Carbide TRIPLEX Fuel Clad for Accident Resistance and Durability”，係由 Ceramic Tubular Products LLC 公司代表，就採用碳化矽作為核燃料護套之特性與在喪失冷卻水事故時相較於鋳合金護套之優點作一說明，主要是其良好的機械特性，與鋳合金護套於 500°C 以上金屬強度即降低相較，其可達 1400°C，另外其事故時產生氫氣量只有使用鋳合金護套之 1/400，也沒有如鋳水反應隨溫度上昇而急遽增加之情形。目前發展中之碳化矽護套係有 3 層結構，內層為 12mils 厚之高密度碳化矽層，具有防止分裂氣體外釋之功能；中間係稱為 robust compound 之碳化矽纖維與碳化矽組成之網狀結構，可抵抗事故時之外力，可保持護套之外觀形狀，厚度亦為 12mils；最外層為 4mils 後之防蝕層。其經美國麻省理工學院反應器之機械性能測試與 CTP Lynchburg facility 之模擬喪失冷卻水事故下之蒸汽測試。雖然如此，但此材質之護套應用仍有以下幾點待克服：(1)研發可靠的高強度端塞(end cap)；(2)建立 14 呎長護套管之新製程；(3)改進護套管之脆性；(4)減少正常運轉與暫態時因燃料丸溫度導致燃料丸與護套間隙變化之問題。

## 5. 本會發表之論文

本會於研討會中，特別就核二廠反應爐支撐裙板基座錨定螺栓斷裂事件，” Degradation and Failure of RPV Support Skirt Anchor Bolts at Taipower’s Kuosheng Nuclear Power Station”為題，由熊大綱技士就本案之肇因分析與本會安全管制作為作一簡報，簡報之內容如附件二。本篇論文被歸類於”Advanced NDT”中，於發表後，與會人員就執行非破壞之檢測(超音波)內容與範圍提問，熊技士已就非破壞檢測作業執行情形再詳細說明，兩部機組之螺栓皆執行超音波檢測。

## (二) 參訪女川核電廠(Onagawa NPP)

此次參訪係透過日本原子力技術協會(JANTI)的安排及山崎 達廣先生的陪同下，前往屬於日本東北電力公司(Tohoku Electric Power Company)，位在宮城縣女川灣畔的女川核電廠。由於路程較遠，經 JANTI 的安排，我們先於 11 月 14 日下午由東京搭乘東北新幹線，於晚上抵達仙台市。11 月 15 日上午 7 點半經 JANTI 安排，搭乘東北電力公司之小巴士前往女川核電廠，沿途經過 100 年 3 月 11 日東北地區大海嘯侵襲嚴重的石卷市，海嘯侵襲後之雜物已清除，有部分工廠恢復運作，亦看到部分重建之居民房舍，但大部分區域仍呈現雜物清除後之空曠狀態，途經內海旁之鐵道，亦因地震造成之陸沉效應而下降至接近海面或浸於海水中。另地處峽灣之女川町海港周邊，於海嘯中嚴重受損之政府與民眾房舍已不復見，僅餘高處之醫院以及於海港有簡單之工事進行。經約 3 小時車程，餘約 10 點多抵達女川核電廠。本次參訪由該廠技術部部長若林 利明(Toshiaki Wakabayashi)及副廠長 Isao Kato 等共 3 人接待。我們先聽取由若林部長所作的簡報，隨後至廠區內外參觀該廠針對福島核災事故防淹水及其對提高防範海嘯能力所作之改善，最後再參觀他們採基礎隔震(base isolation)的免震行政大樓，於下午接近 2 點時離開女川核電廠，參訪過程簡述於下。

女川核電廠共有 3 部機組，下表為該電廠各機組的數據，其中一號機與我們的核一廠同為沸水式反應器 4 型(BWR-4)與 Mark\_I 圍阻體，2、3 號機則為沸水式反應器 5 型(BWR-5)與 Mark\_II 圍阻體。

機組	反應器型式	發電量	商轉日期
1	BWR-4	524MWe	1984
2	BWR-5	825MWe	1995
3	BWR-5	825MWe	2002

若林部長所作的簡報主要有(1)100年3月11日東北地區大地震時，女川核電廠之機組與廠區狀況；(2)前項地震造成海嘯對女川核電廠的影響；以及(3)女川核電廠已採行與位來將採行之強化措施等項，內容如附件三。

女川核電廠為離 100 年 3 月 11 日東北地區大地震（以下簡稱 311 大地震）最近的核電廠(震央距離 123 公里)，之前女川電廠在 2005 年也曾受到地震侵襲而停機。311 大地震時在反應器廠房底部基礎上收錄到的最大地震加速度為 567.5gal(1 號機反應器廠房之地下 2 樓處)，各機組反應器廠房結構仍在其允許之設計剪力/剪應變的範圍內，反應爐也未受損，但聯外道路均因土石塌陷而中斷，1 號機反應器廠房天車(overhead crane)之行走輪軸軸承碎裂，1 只非安全的高壓電器開關箱(high voltage metal clad switchgear)也發生短路而爆炸起火；2 號機高壓汽機與低壓汽機 A 間混凝土基座受損龜裂，且螺栓有彎曲情形。至於海嘯部份，女川核電廠相較於福島第一核電廠，雖然約於地震發生後的 50 分鐘，海嘯的侵襲最大高度為 13.0m，小於廠區的高程(原來是 14.8m，地震過後下陷 1m，為海平面以上 13.8m)，但位於岸邊高程較低的一號機的一座燃油槽(fuel oil tank 傾倒而受損)，另海嘯來襲時，海水泵室潮位儀器開口被衝開，海水由該開口流至地下管線通道，再由未封填之廠房管路穿越口流至 2 號機輔助廠房地下室(B3)的緊急柴油發電機用的冷卻水系統房間(緊急柴油發電機位在地面樓層)，積水達 2.5 公尺左右，造成該冷卻水系統之冷卻水泵等電氣設備淹水故障，導致該部機組 B&H 兩部緊急柴油發電機因而無法運轉供電，但因該機組另一部 A 組緊急柴油發電機仍可用，故機組仍能安全達到冷停機。在廠外電源方面，女川核電廠共有 5 路外電，其中 4 路都跳脫，但有 1 路仍能正常供電。因此，女川核電廠的所有三部機組在地震後均能維持冷停機的狀態。女川核電廠在大地震後進一步完成了包括 alternate AC power, alternate seawater pumps, 加高海牆等應付海嘯及緊急電源措施，也另以福島氫氣爆炸經驗，於反應器廠房頂樓加裝排氣口(venting hatch)與一次圍阻體排氣閥的操作改善等，後續將於反應器廠房頂樓加裝氫氣偵測器與增設一次圍阻體耐高壓之排氣過濾系統。在簡報中，其說明當初 1 號機於 1970 年建廠時，由海嘯紀錄與文獻所得之海嘯高度為 3 米，後續 2、3 號機於 1987 年建廠時，就數值模擬與西元

869 年 JOGAN 海嘯之區域調查(Field study)結果,海嘯評估結果提昇為 9.1 公尺,而於 2002 年日本土木工程師協會(Japan Society of Civil Engineers)重新分析結果則為 13.6 公尺,與 311 於女川電廠之海嘯最高高度 13 公尺相近。至於 1970 年建廠時估計海嘯高度僅為 3 公尺,但為何決定將廠房基地提高為 14.8 公尺,經詢女川電廠若林利明先生,其表示係因為當時在女川縣附近海岸曾發生有 10 餘公尺高海嘯之紀錄,因此當初由專家與公司高層組成之小組乃作出此決定,事後證實此為非常明智之決定,否則可能會遭遇福島電廠相同之狀況。

另有鑒於 2007 年日本中越沖地震對柏崎刈羽核電廠的經驗,女川核電廠於 2009 年 7 月開始將舊有的行政大樓予以結構補強,並於 2010 年 3 月完工;並於 2009 年 12 月開始興建另棟免震的行政大樓,並於去年 10 月 11 日完成。我們一行人於聽完由若林部長所作的簡報,即至廠區內外參觀該廠就福島核災後對於耐震與防海嘯淹水所作之改善措施,包括參觀 2 號機控制室(與 3 號機同一區域)、於 311 海嘯時海水侵入之 2 號機輔助廠房地下室(B3)的緊急柴油發電機用的冷卻水系統房間與改善情形、現場管路與電纜托架支撐強化、廠房出入通道之大型水密門、設於廠區後方 52 公尺高處之新增小型氣冷式柴油發電機組、增高 3 公尺之海堤與邊坡強化措施、以及於海水泵室增設之防水擋牆等。現場參訪時,詢問其新增柴油發電機組之耐震設計,其表示基座部份已採耐震設計,但柴油發電機本體,因耐震測試平台尚未建立,故其耐震能力尚待驗證,此與 ICMST 研討會議中,JNES 專家表示震動台與測試標準尚在建置中的說法相符。另外,於海堤之廠區排水開口設有逆止裝置,若海嘯超過排水口時,逆止裝置將可阻擋海水經排水道倒灌入廠區。最後,參觀女川電廠為緊急應變設施的免震行政大樓的隔震層,實際現地觀看各種隔震器的佈置及安裝,其中結構物角落處的免震器已有應付上部結構(superstructure)於地震力下 overturning 所造成的張力而採用鹿島 (Kajima)建設的 winker 工法(wing plate anchor method)。此外,該大樓亦設有人員休息室,電力則由機組緊要電源提供,未來則計畫設置獨立之柴油發電機。在參觀過程中,我們注意到該大樓之玻璃窗並無輻射屏蔽

功能，可能影響對人員之輻射防護。隨後再回到簡報室，一面用便當，一面討論，於近下午 2 點左右結束女川核電廠之行。

### (三) 參訪東京工業大學笠井研究室與隔震建物

11 月 16 日與核研所周鼎副研究員等一行人前往東京工業大學在東京附近的橫濱校區，拜會笠井和彥(Kazuhiko KASAI)教授，就隔震結構進行廣泛討論。周鼎副研究員曾於亞東關係交流協會主辦的 2008 年台日核能安全高階交流會議期間來過此地，和當時尚未退休的和田 章教授討論日本核能耐震新規範及造成日本柏崎刈羽核電廠 7 部機組全部停擺的 2007 年 NCO 中越地區近海大地震(中越沖地震或 NCO 地震)，也參觀過該校的免震大樓。東京工業大學有一棟高樓是採基礎隔震，並裝有系統性的地震反應感應器，可進行隔震結構在實際地震下的表現及其與理論分析上差異的研究。311 大地震為大東京地區在關東大地震後所經歷之最大震度之地震，因此可藉此機會進一步了解。

首先我們在 KASAI 教授的笠井研究室，由 KASAI 教授簡報說明東京工業大學橫濱校區內之隔震建築(J2)在 311 大地震之地震反應(Responses of Base-Isolated Buildings in Tokyo during the 2011 Great East Japan Earthquake)，如附件四。此簡報並已在 101 年 9 月的第 15 屆世界地震工程會議(15<sup>th</sup> WCEE)上發表，此簡報內容對於此免震棟的結構參數、地震反應以及地震後的隔震效果、結構系統識別等等都有清楚的交代。該 J2 免震棟為地上 20 層地下 1 層的瘦高型結構。隔震層在地下 1 樓與地上 1 樓之間，裝有隔震用的兩種純橡膠與帶鋼阻尼裝置之橡膠支承隔震器(rubber bearing isolator)，阻尼器(damper)亦有鋼阻尼及油壓阻尼器兩型，至於樓體地震反應量測除了在隔震層的位移計外，另在底部的 2 樓、中間樓層的 7 樓 14 樓，以及頂端的 20 樓都裝置有強地動加速度計(accelerometer)。由於 311 地震的強度只有 0.05g 左右，加上此高樓仍嫌軟弱，所以沒有顯著的隔震效果；但經進一步的模擬，如果沒有此隔震裝置，高樓的晃動將增大許多。

簡報過後隨即由 KASAI 教授的副手松田和浩(Kazuhiro MATSUDA)助理教授帶我們實際走訪該 J2 免震建物，至在地下 1 樓與地上 1 樓間之隔震層觀看各型隔震器的現場安



裝狀況及其佈置。如同在女川核電廠免震棟一樣，在結構物角落處的免震器已有應付上部結構(superstructure)於地震力下 overturning 所造成的張力所採取之特別措施，但東京工業大學此棟免震建物係以清水建設的 conical spring 工法，有別於鹿島的 winker 工法。另外，周副研究員於 2008 年看到所用的管狀彎曲的鉛質阻尼器，因為在實際地震容易產生裂紋(crack)，因此已移除。

## 肆、心得與建議

此次參加日本保全協會舉辦之第一屆維護科技國際研討會，以及考察日本東北電力公司女川核電廠隔減震建物設置實務以及地震海嘯受災與後續改善措施，與拜會東京工業大學隔震專家笠井教授就隔減震技術議題研討，並參訪該校隔減震建築物規劃與配置現況等行程，心得與建議可歸納下列幾項：

1. 在維護科技國際研討會中，主辦單位安排多項與後福島事故後相關檢討與強化措施之相關議題，不論是從安全文化角度、福島事故後日本核電廠之強化措施、海嘯與耐震評估之研究，或是對嚴重核子事故之處理等，皆有廣泛而具體之討論，由參與此次會議之研討，可獲取不少有關於各國對於日本福島事故經驗學習的資訊，可作為國內未來管制參考，建議未來仍應持續參與。
2. 在前項研討會中，在安全文化部分，日本長久以來重視維護技術之精確與品質，固然建立其高品質之形象，但過於重視細節而未從整體角度衡量可能之弱點，忽略國際間對確保核能電廠安全之觀念與做法，尤其是對天然災害、風險與嚴重核子事故之處理等，輕忽應該重視與投入資源的要項，造成福島事故。雖然國內對於核能安全之營運與管制，長期以來皆非常重視國際間之經驗回饋，此經驗教訓仍值得國內核能從業人員，不論是管制機關、電力公司或相關學術研究單位，隨時警惕自己。
3. 對於後福島事故後之日本各核電廠之強化措施方面，不論是研討會期間之論文發表內容與實地至女川電廠參訪結果，固然可能因係為了重建政府與民眾對核能發電之信心，以早日獲准重新起動運轉，但日本各核能電廠確實已針對防海嘯與耐震方面積極迅速並務實地採取許多強化措施，其中除評估並提昇管路設備耐震能力外，並進行目前各核能電廠所採購作為備援電源之氣渦輪機或移動式柴油發電機之耐震

能力測試平台與規範之建置作業；在防海嘯方面，並以築海牆(濱岡電廠)或增高現有海堤(女川電廠)與同時全面強化廠房開口之水密性方式，防止海嘯侵入而造成系統設備受損之情形。這些措施，原能會大部分皆已要求台電公司之核電廠採行，建議可持續了解建造設置經驗，以作為國內執行之參考；針對備援電源部份之耐震能力測試平台與規範部分，亦建議持續了解後續辦理情形。此外，日本對於馬克 1 型圍阻體乾井蓋於嚴重核子事故時之氣密性評估與可能之管制要求，亦建議持續了解其進展與美國核管會之作法，以作為國內同型電廠管制之參考。

4. 針對圍阻體排氣過濾系統之性能部份，目前原能會已要求台電公司評估規劃設置圍阻體排氣過濾系統，而研討會中提及濕式過濾系統須注意可能影響其濾除效果之因素，如因輻射或高溫而導致被留置之物質再揮發。同時，對於除污因素大小，由研討會中西屋公司人員之發表內容提及日本採用之除污因素較國際一般標準為高，且事故排放現象之不確定性，可能影響除污因數之保守性，顯示須考量各國核電廠所在地之特性，如臨近區域人口、外釋對環境之衝擊，以及除污因數之保守性，訂定合理之數值。建議將前述圍阻體排氣過濾系統留置能力必須考慮的效應與除污因素之訂定等，請台電公司納入設置圍阻體排氣過濾系統之考量事項。
5. 日本核能電廠已經或未來將建造具免震功能之緊急應變設施，目前原能會亦已要求核電廠應強化目前緊急應變中心之耐震能力，並規劃比照日本建造具免震功能之緊急應變中心，此行由具地震與防震專業之核研所周鼎副研究員一道實際參觀並討論，參訪之經驗可作為未來國內建置免震緊急應變中心時，在管制方面之技術諮詢參考，並建議未來仍須持續注意國際間對免震建物規範之發展，以了解可能之技術演進與做法。

## 伍、附件

1. 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants (1st ICMST) Program。
2. 本會於 ICMST 發表之簡報資料。
3. 女川核電廠 11 月 14 日” Damage in Onagawa NPS in 3.11 Earthquake and Tsunami and Emergency Measures” 簡報。
4. 東京工業大學 11 月 15 日 ”Response of Base-Isolated Buildings in Tokyo during the 2011 Great East Japan Earthquake” 簡報。

註：附件 2~4 因涉及簡報單位之智財權或檔案較大，故僅供內部參考，不上網公布。