

出國報告（出國類別：其他）

赴日本參加 ICMST 會議以及其他順道 參觀拜訪行程

服務機關：核能研究所

姓名職稱：周鼎 副研究員

派赴國家：日本

出國期間：101 年 11 月 11 日~101 年 11 月 17 日

報告日期：102 年 1 月 2 日

摘 要

本次出差前往日本之主要行程是參加在日本東京大學舉行的第一屆維護科技國際研討會（1st International Conference on Maintenance Science and Technology, ICMST）並發表論文，會議以電廠安全、電廠設計、電廠技術以及成本與效益為四大主軸，討論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、材料設計、非破壞檢測、放射性對於反應爐材料效應、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。本所參加的安全管制支援中心的審查召集人周鼎係配合原子能委員會核能管制處何恭旻及熊大綱等人的行程。周員等三人共同有一篇核二廠反應爐螺栓斷裂相關的論文發表。在參加 ICMST 會後，三人及後來加入行程的原子能委員會核能管制處張國榮等共四人並(1)前往位在宮城縣的女川核電廠考察，了解最接近去年 0311 日本東北大地震震央的此核電廠最新現況以及其採基礎隔震的新行政大樓，(2)前往東京工業大學橫濱校區，拜會笠井和彥教授，討論建築物隔震技術，以作為原能會擬於今後要求台電在核電廠興建隔震的緊急應變中心之參考。

目 次

摘 要.....	i
一、目的.....	1
二、過程.....	2
(一)參加 International Conference on Maintenance Science and Technology (ICMST-Tokyo) 第一屆國際會議.....	3
(二) 參訪女川核電廠(Onagawa NPP)	10
(三) 參訪東京工業大學笠井研究室	13
三、心得.....	15
四、建議事項.....	17

一、目的

去年 3 月 11 日日本東北外海發生規模 Mw 9.0 的大地震(Great East Japan Earthquake, GEJE) 並引起很大海嘯，造成 2 萬人的死亡，更造成福島第一核電廠多部機組的嚴重損害及爐心熔毀的最嚴重核子事故，舉世關注，並繼美國三哩島核電廠、俄國車若比核電廠核災後，再次質疑核能發電的安全。本次出差前往日本之主要目的在於交流核能地震安全相關之最新資訊。最新行程是參加在日本東京大學舉行的第一屆 ICMST 國際研討會議並發表論文，希望藉次會議了解到運轉中核電廠之安全最新議題及解決方法，本所參加的安全管制支援中心的審查召集人周鼎係配合原子能委員會核能管制處何恭旻及熊大綱等人共同與會。其中周員等三人並共同有一篇有關核二廠一號機反應爐於今年大修期間發現的底部支撐螺栓斷裂的論文。此論文主要敘述此一事件，並說明管制單位在此事件上確保安全的管制措施。在參加 ICMST 會後三人及後來加入行程的原子能委員會核能管制處張國榮等共四人並(1)前往位在宮城縣的女川核電廠考察，了解最接近去年 0311 日本東北大地震震央的此核電廠最新現況以及其採基礎隔震的新行政大樓，(2)前往東京工業大學橫濱校區拜會笠井和彥教授討論建築物隔震技術以作為原能會擬於今後要求台電在核電廠興建隔震的緊急應變中心之參考。

二、過程

本次公差自 101 年 11 月 11 日起至 17 日止共計 7 天，扣除飛機行程之來往，實際工作共 5 天，相關重點工作內容如下：

月/日(星期)	工作內容重點
11/11(日)	上午由松山機場飛東京羽田機場。 晚上至東京大學 ICMST 研討會會場報到註冊
11/12(一)	上午參加 ICMST 研討會並發表論文
11/13(二)	參加 ICMST 研討會
11/14(三)	前往宮城縣的女川核電廠，住宿仙台市
11/15(四)	參訪女川核電廠，返回東京
11/16(五)	前往橫濱市拜會參訪東京工業大學笠井和彥教授討論建築結構之隔震技術
11/17(六)	上午由東京羽田機場返國，飛抵松山機場。

(一)參加 International Conference on Maintenance Science and Technology (ICMST-Tokyo) 第一屆國際會議

本次國際研討會係由 Japan Society of Maintenology 主辦，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、老化管理語與疲勞、材料設計、非破壞檢測、放射性對於反應爐材料效應、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 兩個場地進行議題與議程詳參如附件一。會議場地並提供日本日立-奇異、三菱重工、東芝級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、移動式熱交換器車、機械應力釋放工法、反應爐內管路接口(Nozzle)檢測工具與技術等。此外並有參展廠商包括 Hitachi、Toshiba、GE、Mitsubishi 等共 3 家有攤位。此次公差參加的共有 3 人，包括有來自原能會的何恭旻科長、熊大綱及核研所核管技支中心的審查召集人周鼎。

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、被動式圍阻體排氣過濾系統之效能、海嘯研究與嚴重核子事故等項作概要性介紹。

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(CAP, 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，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，例如女川電廠將現有廠區海堤高度由現有 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、濱岡電廠則採取建

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 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，已進一步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 600gal，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 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。其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至於免震建築內，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，以下主要就第 1~3 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耐震度評估 (fragility assessment) 之參數；(4)廠房組件之耐震度評估：此項包括確立評估之標的物與損壞模式、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，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，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及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、雙台大型氣冷式散熱鰭片與雙組氣渦輪機等，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，其中第 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，由於相關看法主要係以國際間與國內已採行或正進行之做法，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 公司之代表，介紹其公司生產之圍阻體排氣過濾系統之性能，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，於所產生之氣態銻、有機/元素碘等放射性物質之除污因數 (Decontamination Factor) 做比較，其中值得注意的是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阻擋之物質再揮發，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 H₂ depletion rate)。HERMETIS 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，主要利用 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 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為耐震設計。

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鋁合金護套之優點作一說明，主要是其良好的機械特性，與鋁合金護套於 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知情形。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. 發表之論文

於此次研討會中，作者與原能會熊大綱等特別就核二廠反應爐支撐群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，由熊大綱先生從本案之肇因分析與原能會安全管制作為之角度作一簡報。於發表後，熊先生並就執行非破壞之檢測(超音波)內容與範圍再口頭詳細回覆提問人員。

(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)，位在宮城縣的女川核電廠。由於路程較遠，經 JANTI 的安排，我們先於 11/14 下午由東京搭乘東北新幹線特快車 Hayate33，經約 100 分鐘的車程，於晚上抵達仙台市。11/5 上午 7 點半由 JANTI 安排的小巴士載往位在宮城縣女川灣畔的女川核電廠，沿途特別經過 GEJE 海嘯侵襲嚴重的石捲市，看看尚在處理受海嘯侵襲後的住宅及受災復原情況，一年八個月後仍然有許多受災戶住在組合屋約 10 點抵達女川核電廠簡報室。

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福島核災之淹水及其電廠對提高對海嘯防範所作之改善，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，乘原車返回仙台市，搭傍晚的東北新幹線 Yamabiko 148，車程約 120 分鐘底達東京，結束此趟女川核電廠之參訪。

女川核電廠共有 3 部機組，下表為該電廠所提供有關女川核電廠各機組的數據，其中一號機與我們的核一廠同為 BWR-4 反應器 Mark_I 圍阻體。

Unit	Type	Capacity	Commercial
1	BWR-4	524MW	1984
2	BWR-5	825MW	1995
3	BWR-5	825MW	2002

若林部長所作的簡報主要有以下幾項：

1. 0311 GEJE 地震及女川核電廠大要，
2. GEJE 海嘯對女川核電廠的影響，

3. 今後女川核電廠對海嘯防範的措施

女川核電廠為離 GEJE 最近的核電廠(震央距離 123 公里)，之前在 2005 年也曾受到地震侵襲而停機。此次 GEJE 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(unit 1, B2F)，但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，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；至於海嘯，女川核電廠相較於福島第一核電廠的嚴重影響，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，為海平面上 13.8m)，但位於岸邊高程較低的一號機的燃油槽(fuel oil tank 傾倒而受損)，位在離海岸最近的二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的熱交換機(緊急柴油發電機在地面樓層)因經由取水渠道之穿越器被海嘯頂開而淹沒 2.5m，造成該部機組 B&H 兩部緊急柴油發電機不能用，還好該機組另一部 A 組緊急柴油發電機仍可用。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，好在還有 1 路能用。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 GEJE 後更進一步完成了包括 alternate AC power, alternate seawater pumps, 加高 sea wall 等應付海嘯及緊急電源措施，也另以福島氫氣爆炸經驗進行圍阻體的加裝 venting hatch, hydrogen detector, filtered venting system, 一次圍阻體排氣閥的操作改善等。

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 月完成該工程；但也於 2009 年 12 月開始興建一個免震的行政大樓並於去年 11 月完成。我們一行人於聽完由若林部長所作的簡報及至廠區內外參觀該廠福島核災之淹水及其電廠對提高對海嘯防範所作之改善後，最後再參觀他們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，尤其注意到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 winkler 工法(wing plate anchor method)(詳如下圖)，隨後再回到簡報室一面用便當，一面討論，於近下午 2 點結束女川核電廠之行。



(三) 參訪東京工業大學笠井研究室

11/16(星期五)

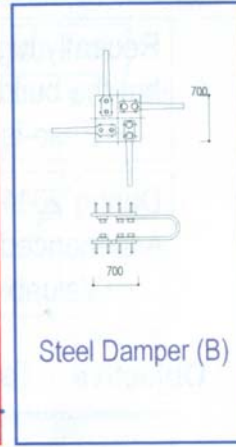
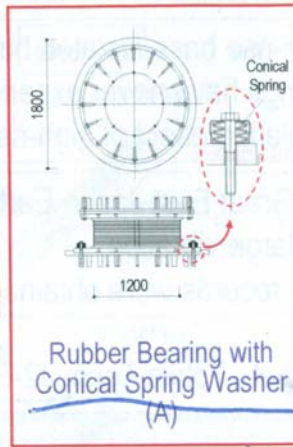
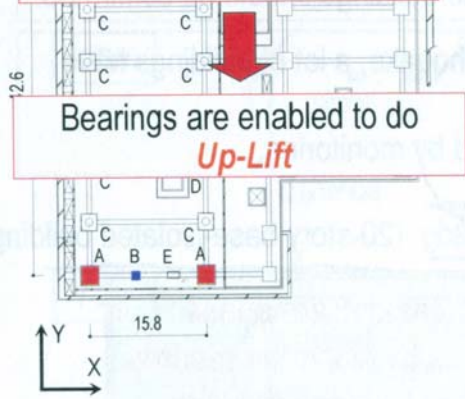
本日前往東京工業大學在東京附近的橫濱校區，拜會笠井和彥(Kazuhiko KASAI)教授，討論隔震結構。作者曾於亞東關係交流協會主辦的 2008 年台日核能安全高階交流會議期間來過此地，和當時尚未退休的和田 章教授討論日本核能耐震新規範及造成日本柏崎刈羽核電廠 7 部機組全部停擺的 2007 年 NCO 中越地區近海大地震(中越沖地震或 NCO 地震)，也參觀過該校的免震大樓。東工大有一棟高樓是採基礎隔震又裝有系統性的地震反應感應器，所以可以有效研究隔震結構在實際地震下的表現與其與理論分析上的差異。去年 0311 那麼大的 GEJE 地震是大東京地區在關東大地震後所經歷之最大震度之地震，因此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 教授以簡報說明東工大橫濱校區內的那棟 20 樓高隔震建築(J2)在去年 GEJE 大地震之地震反應: Responses of Base-Isolated Buildings in Tokyo during the 2011 Great East Japan Earthquake，此簡報並已在今年 9 月的第 15 屆世界地震工程會議(15th 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，裝有隔震用的橡膠支承隔震器(rubber bearing isolator)兩種(有純橡膠及帶鋼阻尼裝置的)，阻尼器(damper)也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，則在底部的 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)。由於此地震的強度只有 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，主要至隔震層看各型隔震器的現地安裝狀況及其佈置。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，但東工大的此免震建物係以清水建設的 conical spring 工法(有別於鹿島的 winkler 工法)。此 conical spring 在稍早笠井的簡報中也提及，詳如下圖。

Plan of Seismic Isolation Floor

Because this building is very **slender shape**, **tensile force** in the rubber bearing becomes a **critical design problem**.

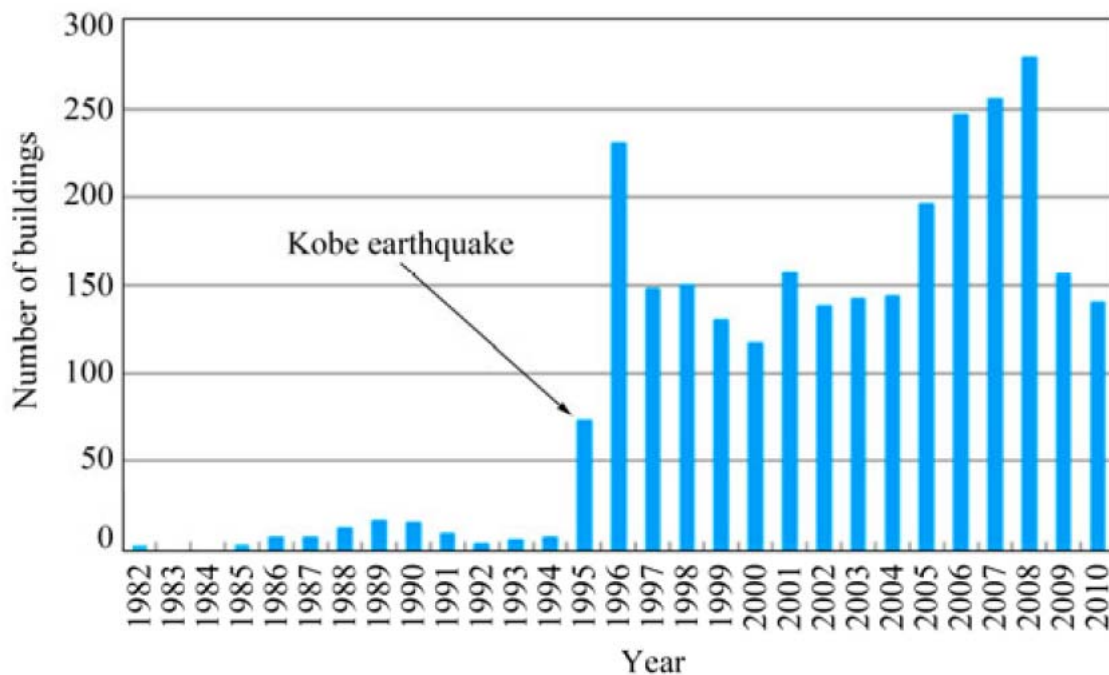


2cm ← 凍水凍反

另外值得一提的是筆者於 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)而已移除。

三、心得

(一)、在日本，採用免震器的免震棟在 1995 年阪神大地震(Kobe earthquake)後如雨後春筍(詳如下表)，但一直沒有經歷過較大地震的考驗。直到 2011 年 311 地震後，檢視離該巨大地震(GEJE)最近的東北地區(tohoku district)約 230 個免震建物之地震反應及 2007 年日本柏崎刈羽核電廠受到中越沖強烈地震後所在福島核電廠興建免震應急中心建物之地震反應，看出免震建築確實在地震下達到預期的良好減震效果，日本因此已開始要求在所有核電廠興建採用免震器的緊急反應建物(ERF, emergency response facility)，配套的 ERF 相關要求及技術規範也已在訂版階段。此日之前，筆者等已於 10/23 參加由行政院原子能委員會核管處邀請日本專家來講授的”核電廠免震建築與設備隔震研討會”，對於該技術及施行應用有了理論上的了解，此次在女川核電廠及東京工業大學更深一層的實際現地查訪該處的免震行政大樓/20 層高樓獲益很大，對於日後在要求台電公司在該方面的管制上有非常大的幫助。



(二)、女川電廠在 0311 福島核災後所採取並已完成之諸多改善及補救措施如 alternate AC power, alternate seawater pumps/motors, additional seawalls, 以及因應 mark I 圍阻體的安全改善想法(如加裝 torus 之排氣閥(已完成)，一次圍阻體的過濾排氣系統(filtered ventilation system)，二次側的氫氣偵測器及屋頂的排氣裝置(venting hatch)。

(三)、有鑒於 2007 年日本中越沖地震對柏崎刈羽核電廠的經驗，日本每個核電廠均開始

興建免震建物以作為第一線緊急應變的場所，目前已興建完成 8 個，其中女川的免震大樓算是較新完成的，因此前往實地查訪其所採用的隔震器及佈置，應有助於日後在核電廠地震安全管制上，要求台電公司在各核電廠比照/參考建造之用。

(四)、311 核災已快二年了，在由仙台前往女川核電廠考察的途中，海嘯肆虐過痕跡仍隨處清晰可見，許多受災戶仍住在組合屋，成堆待處理已生鏽的廢車還仍堆積著，大量工程車也還在忙著進行善後，可見當時地震/海嘯的破壞力量有多麼巨大，我們更應隨時保持危機意識，並提高對天然災害的防範能力。

四、建議事項

由本次公差心得體會有下列兩項建議:

由此次參加ICMST國際會議及實地至女川核電廠查訪311日本大地震後該廠的受損及善後措施以及至東京工業大學與笠井教授討論隔震系統等，感覺積極出席參加相關的國際會議是收集最新資訊、建立友好關係，及站上國際舞台最有效的手段之一，但也是他人藉此評估我們實力及形象/觀感的重要來源，而實地查訪與面對面的溝通/討論更能有效及正確的獲得想要的資訊。因此，建議應於事前有長程的準備與規劃，以達到最佳的效果，如果事先集合國內核能各界有效分工，參考前屆參加的心得，並以老雞帶小雞的方式培訓新人，相信會有很大的正面效果。

地震對核能發電的發展影響非常重要，已於之前2007年日本新潟地震(NCO地震)及311日本東北大地震(GEJE)所引發海嘯造成福島第一核電廠之嚴重核災可看出。同屬環太平洋強震帶的我國，對於核電地震安全也千萬不能掉以輕心或心存僥倖，應有及時的規劃與立即的作法。