

出國報告（出國類別：開會）

參加 OECD/NEA 之
BWR 管制工作組第 2 次會議

服務機關：行政院原子能委員會

姓名職稱：陳彥甫技正

派赴國家/地區：法國巴黎

出國期間：107 年 9 月 24 日至 107 年 9 月 27 日

報告日期：107 年 11 月 23 日

摘要

本次公差目的為赴法國巴黎參加 OECD/NEA 之 BWR 管制工作組第 2 次會議。BWR 管制工作組是 OECD/NEA 核能管制委員會新成立之專案小組，專門處理 BWR 管制相關議題，有美國、日本、瑞典、芬蘭、英國、德國、西班牙、瑞士與我國等之核能安全管制機關參與。此次會議先由各國介紹近期 BWR 管制現況與技術議題專案報告，再延續前次會議討論 BWR 管制重要議題，逐項由提案國家說明議題背景，各國代表發表對該議題之看法並評價議題重要性，經討論彙整後，已評選出 3 項重要性最高的管制議題，(1)反應爐水位計之多樣性設計(2)嚴重事故指引(3)因應燃料型式改變之管制作為，作為 BWR 管制工作組之工作計畫。BWR 管制工作組將就前述 3 項重要管制議題研擬計畫目的、執行方法、預期成果等，再透過問卷調查方式，綜整各國實務經驗提出這 3 項議題之管制評估報告。本次會議過程與各國管制機關代表討論核能電廠管制實務，並進行技術交流，對於我國核能電廠安全管制工作之推展與提昇有實質效益，也擴大我國與各國相關專業人士之交流管道，有助未來技術交流業務之推展。

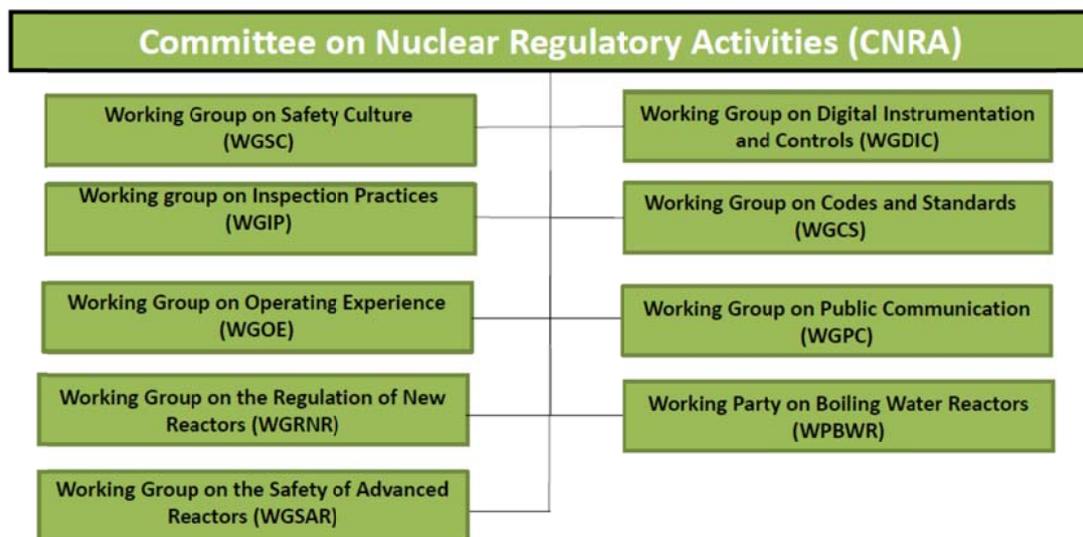
目 次

	頁碼
壹、目的	1
貳、出國行程.....	3
參、過程紀要.....	4
肆、心得與建議	11

壹、目的

經濟合作暨發展組織核能署(OECD/NEA)核能管制委員會(Committee on Nuclear Regulatory Activities, CNRA)因接獲跨國設計評估計畫(Multinational Design Evaluation Programme)進步型沸水式反應器(ABWR)工作組參與國家之建議，應增設專門處理沸水式反應器(BWR)與 ABWRs 相關管制議題之工作組。CNRA 於 2017 年 12 月開會討論後，即核准成立 BWR 管制工作組(Working Party on BWRs)。

核能管制委員會主要是負責處理核設施安全管制、執照核發、視察等相關安全議題，提供各國管制機關一個資訊與經驗交流的平台，審視安全管制作法與運轉經驗，協同合作確保各國均符合高安全標準及強化管制效能。CNRA 是由各國管制機關高階官員所組成，目前下設 9 個專案工作組，處理特定技術議題。BWR 管制工作組是專責處理 BWR 管制相關議題，BWR 型式亦包含 ABWRs 與經濟簡化沸水式反應器(Economic Simplified Boiling Water Reactors, ESBWRs)。



圖一、核能管制委員會下設之 9 個專案工作組

BWR 管制工作組任務是要提供各國管制機關一個國際合作平台，可就 BWR 管制經驗與技術資訊進行交流，包含核電廠從設計、建廠、運轉、除役等各方面，並藉由各國分享其觀點，以聚焦 BWR 所面臨之安全議題與挑戰，進而予以強化。為達成此目標，BWR 管制工作組已邀請各國安全管制機關之專家參加，將利用協同合作方式找出關鍵的管制議題，

並提出一致性的觀點、計畫或建議，經由 CNRA 核准或認同後，即可公開評估報告或提出具體之研發計畫建議。

BWR 管制工作組第 1 次會議已於今年 3 月在瑞典召開，討論此工作組之任務與 BWR 管制關切議題。因我國核能一、二廠與龍門電廠均屬 BWR 類型反應器，BWR 管制工作組成員亦提議邀請我國參加，並列入第 1 次會議之行動事項。我方於接獲邀請後，安排陳秘書彥甫代表原能會參加此次 BWR 管制工作組第 2 次會議，期望與各國交流 BWR 管制經驗，並拓展國際交流管道，以提升我國核能安全管制效能。

貳、出國行程

此次公差自 107 年 9 月 24 日起至 107 年 9 月 27 日止，共計 4 天，行程如下：

日期	行程	摘要
107 年 9 月 24 日	奧地利維也納→法國巴黎	去程
107 年 9 月 25-26 日	法國巴黎	參加OECD/NEA之BWR管制工作組第 2 次會議
107 年 9 月 27 日	法國巴黎→奧地利維也納	返程

參、過程紀要

BWR 管制工作組第 2 次會議於 9 月 25-26 日假經濟合作暨發展組織核能署位於法國巴黎之總部召開，此次會議先由各國說明 BWR 管制現況與技術議題專案報告，再討論決定 BWR 管制工作組之工作計畫，以及未來會議時間與地點等。BWR 管制工作組共有 9 個國家之核能安全管理機關參與，

- 美國核能管制委員會(United States Nuclear Regulatory Commission, USNRC)
- 瑞典輻射安全局(Swedish Radiation Safety Authority, SSM)
- 芬蘭輻射暨核能安全管制局(Radiation and Nuclear Safety Authority, STUK)
- 德國核子反應器安全研究所(Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit , GRS)
- 西班牙核能安全委員會(Spanish Nuclear Safety Council , CSN)
- 瑞士聯邦核能安全督察委員會(Swiss Federal Nuclear Safety Inspectorate, ENSI)
- 英國核能管制辦公室(Office for Nuclear Regulation, ONR)
- 日本原子力規制委員會(Nuclear Regulation Authority, NRA)
- 我國原子能委員會

BWR 管制工作組主席為瑞典 SSM 的資深分析師 Mr. Lennart Bons，副主席則是美國 NRC 的資深反應器系統工程師 Mr. Eric Thomas，此次會議瑞典、日本及英國各有 2 位代表出席，其餘各國則有 1 位代表出席。NEA 秘書 Ms. Aurélie Lorin 先向與會代表說明 BWR 管制工作組之任務職掌(Mandate)說明文件，包含工作範圍、工作方法與預期工作成果等，該文件已於 2018 年 6 月 4 日經 CNRA 核准，並公告於 NEA 網站。

BWR 管制工作組已彙整各國運轉中與興建中 BWR 機組之反應爐型式、圍阻體型式、電廠位址、發電容量、再循環泵型式、執照核發時間、執照有效期限、是否考慮執照更新、預期機組停止運轉時間等資訊，供工作組成員內部討論參考。此份統計資料共列出 81 部 BWR 機組，除墨西哥與印度外，所列各國均已加入 BWR 管制工作組。未來每次 BWR 管制工作組召開會議前，與會代表均需再檢視 BWR 機組資訊，視需要予以更新，作為會議討論之參考文件。

(1) 各國 BWR 管制現況與技術議題專案報告

● 瑞典

瑞典運轉中 BWR 機組有 5 座，Forsmark 核電廠 1~3 號機、Oskarshamn 核電廠 3 號機、Ringhals 核電廠 1 號機，其中 Ringhals 核電廠 1 號機預計運轉至 2020 年，其餘機組則規劃運轉 60 年，至約 2040 年。目前各機組正在進行組件現代化更新與安全強化改善。瑞典於福島事件後執行壓力測試，評估結果指出電廠需強化爐心冷卻能力，增設一組獨立系統。2014 年 SSM 發布命令要求經營者安裝獨立爐心冷卻系統，並於 2020 年底前完成，這套獨立爐心冷卻系統之水源、電源、儀器、隔離閥等需實體獨立，且能因應長時間喪失交流電與最終熱沉之事件，持續移除爐心餘熱，維持機組於冷停機狀態且圍阻體保持完整。Forsmark 核電廠經營者已提出獨立爐心冷卻系統之規畫方案，將採用「注水並洩壓」(Feed and Bleed) 的策略，15 分鐘內可手動開啟注水系統，再手動控制反應爐水位與釋放壓力，蒸汽會經由圍阻體排氣過濾系統之煙囪排放至大氣環境，維持機組於冷停機狀態至 72 小時，72 小時後機組人員即可採取其他方式來維持反應爐於冷停機狀態。

● 美國

美國 Oyster Creek 核能電廠已於今年永久停止運轉。近期 NRC 關切之 BWR 管制議題為機組停機期間之運轉規範修改，業者希望可提供更多彈性給運轉員與維護人員安排大修作業，故向 NRC 提出運轉規範修改，擬用反應爐洩水時間(Reactor Vessel Drain Time)進行安全管制。因原運轉規範非常保守，需維持兩個注入水源、二次圍阻體完整、控制室通風、備用氣體處理系統等，這些限制影響機組大修維護作業期程。運轉規範修改將放寬 BWR 在停機期間且燃料還在爐心內所需之安全系統串，行動基準依據反應爐洩水時間至有效燃料區頂部(Top of Active Fuel, TAF)所需時間，當反應爐洩水時間大於 36 小時，僅需確保有 1 串水源可補水，隨著洩水時間愈低，才需要進一步確保備用氣體處理系統可用，以及隔離二次圍阻體及建立另 1 串補水系統。

美國代表另報告反應爐壓力安全釋壓閥設定點飄移議題，此問題是發生於 Target Rock 公司製造的安全釋壓閥，這些安全釋壓閥分別安裝於 13 座 BWR 機組，

在機組運轉過程中，安全釋壓閥內部之嚮導閥(Pilot valve)會因腐蝕而影響其壓力設定點，但安全釋壓閥之設定點測試僅能在機組大修期間執行，所以目前關切之管制重點是如何判定安全釋壓閥何時需列為不可用，NRC 正考量要求電廠提出改善方案。

- 西班牙

西班牙 Cofrentes 核電廠有一部 GE BWR-6 機組，Mark III 型式圍阻體。西班牙代表於會議中說明電廠為改善控制棒驅動機構 O 形環密封效果，更換 O 形環材質案例之經驗回饋。

- 德國

目前德國運轉中之核電廠，僅 Gundremmingen 核電廠機組 C 是 BWR，本次會議沒有報告新的管制資訊。

- 台灣

我國核一、二廠與龍門電廠皆為 BWR 機組。此次會議介紹我國 BWR 機組基本資料與目前運轉狀態，並向各國代表簡要說明核一廠燃料束水棒連接桿斷開處理、核一廠區域性大雨導致輸電電塔倒塌、核二廠振盪功率偵測系統動作導致機組急停等管制經驗。

- 瑞士

瑞士 Mühleberg 核電廠 GE-BWR4 機組，Mark I 型式圍阻體，自 1972 年 11 月開始商業運轉，此機組之反應器廠房屬於瑞士特有設計，有一環形水池可提供冷卻，福島事件後，電廠也增設氣冷式柴油發電機與強化用過燃料池冷卻系統。但經營者 BKW 公司已決定將 Mühleberg 核電廠於 2019 年 12 月永久停止運轉，該廠之除役計畫已經過瑞士聯邦能源辦公室(Swiss Federal Office of Energy, SFOE)與 ENSI 審查，並於 2018 年 6 月取得聯邦環境、運輸、能源和通信部核發之除役許可。

Leibstadt 核電廠 GE-BWR6 機組，Mark III 型式圍阻體，該機組正在執行安全相關儀控現代化計畫，預計於 2019~2020 年更換反應爐再循環系統組件，主冷卻水流量將改由電子頻率轉換器來控制泵速。福島事件後，主要在嚴重事故管理方面進行強化。2014 年 Leibstadt 核電廠發現 SVEA-96 Optima2 燃料有破損，根據燃料廠家瑞典西屋公司(WSE)之肇因分析結果，認為最有可能的原因是發生燒乾(dryout)。因燒乾發生在徑向功率最高處，為預防此事件再次發生，2015 年所提出之改善措施為降低尖峰因子、增加流量、增加額外的臨界熱功率比餘裕。但在 2016 年大修期間，再檢查超過 200 束燃料，仍發現 47 束燃料在臨近燃料束角落的燃料棒有出現異常指示，與預期不同，經進一步評估認為爐心流量增加反而導致徑向尖峰因子變大，所以後續運轉措施要求為限制單根燃料束輸出功率需低於 7.2 MW 與爐心流量需低於 95%。2017 年檢查 22 束使用經過 1 周期之燃料束，則未再發現燃料棒表面有異常指示，證實預防措施是有效，後續仍將持續採用，並定期檢查燃料束。目前電廠已知燃料棒表面異常指示與燃料支撐組件之限流孔位置、臨近燃料束角落之燃料棒有關。經營者正與燃料供應商積極合作研究此議題，期望提出解決方案，並解除單根燃料束輸出功率與爐心流量之管制限制。

- 英國

英國 Horizon 公司規劃在 Wylfa Newydd 興建兩部 UK ABWR 機組，發電功率為 1350 MWe，用過核燃料與中階核廢料皆會貯存於廠內。因該廠址特性未完全被 UK ABWR 通用設計審查(GDA)評估內容所包絡，因此 Horizon 正在修改兩部機組之設計與廠區佈置，且建廠前安全評估報告也會根據設計修改進行更新，目前預計於 2020 年中完成。此外，本案之開發許可令申請已於 2018 年 6 月提出，審查期程預計約需 18 個月。

英國 ONR 報告 UK ABWR 已完成 GDA 審核程序，但審查過程發現加氫水化學有很多挑戰，水在爐心內接受到放射線照射分解為氫氣與氧氣，然後隨蒸氣到冷凝器中，再被移除，所以若要採用加氫水化學，廢氣系統會受到影響，必需進行功能驗證。多數美國核電廠都採用加氫水化學與添加惰性金屬，歐洲與日本沸水式反應器也都有採用加氫水化學，但運轉中之 ABWR 都沒有使用加氫水化學，僅曾有短時間測試過，故全世界無 ABWR 實際長時間運轉加氫水化學之經驗可供參考，ONR

已提出一系列問題要求經營者需評估 ABWR 採用加氫水化學對機組相關系統之影響。

- 芬蘭

芬蘭 Olkiluoto 核電廠有兩座 860 MWe 的 BWR，自 1979 年與 1982 年開始商業運轉，STUK 剛核可其執照更新申請，兩部機將可運轉至 2038 年。電廠為強化機組運轉安全，有增設蒸汽驅動輔助飼水、消防水低壓注入反應爐、水源注入用過燃料池等救援系統，並持續根據安全度評估結果，改善反應爐保護系統儀控組件之多樣性。此外，緊急柴油發電機目前僅可透過海水冷卻，電廠正在進行改善，未來也可經由空氣進行冷卻，預計於 2022 年完成。

芬蘭 Olkiluoto 核電廠於 2016 年發生燃料破損事件，查證發現與控制棒抽出有關連，因此判定是燃料丸與護套交互作用所造成。雖然電廠原先所採用之控制抽棒速度規範已符合廠家要求，但 STUK 已要求電廠採用更嚴格的抽棒速度要求，防止燃料丸與護套交互作用造成燃料破損。

- 日本

日本新規制基準於 2013 年 7 月生效，目前總共有 16 座 PWR 機組、11 座 BWR 機組向 NRA 提出新規制基準審查之申請。目前 BWR 審查進度最快的是柏崎刈羽核能發電廠 6/7 號機與東海第二核電廠 BWR-5 機組，其中柏崎刈羽核能發電廠 6/7 號機 ABWR 機組之基準設計審查已完成，相關設計細節與運轉安全計畫需依據基準設計審查結果進行修訂，至於東海第二核電廠 BWR-5 機組，基準設計審查正在進行公眾閱覽程序，目前 NRA 正在整理公眾意見與更新審查報告，細部設計也在審查中。

日本代表於此次會議也介紹柏崎刈羽核能發電廠 6/7 號機與東海第二核電廠，改善反應爐外管理(Ex-Vessel Core Management)之實際案例，經營者將於乾井內的基座上增加爐心熔融物屏蔽(Corium Shield)，材質為鋳合金，將可避免熔融物侵蝕乾井基座或是集水池(Sump)，發生「熔解爐心混凝土交互作用」(Molten-Core Concrete Interaction, MCCI) 反應，以減緩嚴重核子事故發展。

(2) 討論 BWR 管制工作組之工作計畫

有關 BWR 管制工作組工作計畫之候選議題，此次彙整約 20 餘項 BWR 管制議題，部份項目為前次會議所討論之項目，其餘則是由美國、瑞典、英國於此次會議前增列之管制關切議題。此項議程之進行方式是逐項由提案國家說明議題背景，各國代表發表對該議題之看法，若經確認該議題應列入考量，就會請各國評價議題之重要性為高、中或低，下列是有進入評選之議題項目，

- 反應爐水位計之多樣性設計
- 嚴重事故管理指引
- 因應燃料型式改變之管制作為
- 停機與起動期間圍阻體內氧濃度
- 停機與燃料更換期間之安全分析，是否有特定之緊急操作程序
- 機組停機期間反應爐洩水相關運轉規範修改
- 再循環泵速控制系統失效（電子式頻率控制）
- 福島核電廠事故後經驗傳承，比較各國就 BWR 之因應改善措施
- 設備環境驗證
- 反應爐水化學改變
- 爐心功率振盪
- 安全釋壓閥設定點飄移
- 圍阻體過濾裝置堵塞

最後評選結果，已挑選出三項重要性最高的管制議題為 (1)反應爐水位計之多樣性設計。(2)嚴重事故管理指引。(3) 因應燃料型式改變之管制作為。其中反應爐水位計之多樣性設計議題，主要是因為目前 BWR 反應爐水位量測是採用參考水柱量測方式，有些國家如芬蘭為了增加水位量測方式之多樣性，曾考量過幾種設計方式，但在實際執行時，面臨很多困難，所以期望透過此工作計畫收集各國曾考慮增加反應爐水位量測多樣性的設計方案，集思廣意，共同發展一套可行方案，以符合水位量測方式多樣性之管制要求；至於嚴重事故管理指引議題，目的是要調查各國核電廠所採用之嚴重事故管理指引，例如假想處理之嚴重事故情境類別、管制要求、運轉員訓練、作業指引更新程序等，期望藉由各國分享嚴重事故管理指引相關資訊，強化嚴重事故管理能力；因應燃料型式改變之管制作為，

各國 BWR 機組爐心會裝載混合不同廠家或型式之燃料束，近期有燃料廠家擬推出新型的燃料束設計，可提升燃料對事故之耐受能力(Active Tolerance Fuel)，增加安全餘裕，此計畫期望透過問卷調查了解各國管制機關在核電廠導入新型燃料束，爐心有混合燃料型式之安全管制作為。

目前 BWR 管制工作組 3 個工作計畫分組為(1)反應爐水位計之多樣性設計。(2)嚴重事故管理指引。(3) 因應燃料型式改變之管制作為，組長分別為芬蘭代表、瑞典代表與美國代表。各工作計畫分組將會研擬計畫目的、執行方式、預期成果等，預計於第 3 次會議前 1 個月，各工作分組會內部討論提供問卷初稿，並於第 3 次會議期間由各國代表確認問卷型式與問題描述後，再於會議後送交各國答覆相關技術問題，以便綜整各國經驗提出管制評估報告。

(3) 明年會議時間與地點

BWR 管制工作組每半年需召開乙次會議，瑞士 ENSI 代表主動邀請各國代表赴瑞士參訪，所以第 3 次會議規劃 2019 年 3 月於瑞士 Mühleberg 核電廠舉辦，至於第 4 次會議則安排 2019 年 9 月於法國巴黎舉辦。

肆、心得與建議

此次參與 BWR 管制工作組會議之心得與建議，可歸納下列幾項：

1. 參與 BWR 管制工作組會議之各國代表均有豐富的 BWR 管制實務經驗，藉由實際參與會議，與各國官員互相討論技術細節，可深入了解各國核能管制最新現況，對我國而言，BWR 管制工作組也提供我國與各國核能管制機關官員橫向交流的平台，在會議期間，我方也可伺機就近期關切之核能安全管制議題進行技術交流，以作為我國核能安全管制之參考。
2. BWR管制工作組成員需共同合作，針對特定管制議題提出管制評估報告，建議我國應積極參與BWR管制工作組，透過實際與各國代表協同合作，培養我國核能管制官員具有跨國合作之專業能力，同時強化國際交流管道。