

出國報告(出國類別：開會)

參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵及蒸汽 產生器維護技術交流會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：陳信宇 核三廠機械組工程師

張志宇 核三廠機械組工程師

派赴國家：德國、比利時、法國

出國期間：112年12月9日至112年12月17日

報告日期：113年1月8日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵及蒸汽產生器維護技術交流會議

頁數 20 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/黃惠淪/02-23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

陳信宇/台灣電力公司/第三核能發電廠/機械組工程師/08-8893470-2412

張志宇/台灣電力公司/第三核能發電廠/機械組工程師/08-8893470-2412

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 開會 6 其他

出國期間：112年12月9日至112年12月17日

派赴國家/地區：德國/埃朗根、比利時/芒斯、法國/熱蒙

報告日期：113年1月8日

關鍵詞：反應爐冷卻水泵(Reactor Coolant Pump, RCP)、蒸汽產生器(Steam Generator, SG)

內容摘要：（二百至三百字）

蒸汽產生器和反應爐冷卻水泵均為壓水式核電廠最重要的設備之一。業界對於反應爐冷卻水泵之運轉維護議題(包含振動抑低、軸封洩漏量等)均有豐富的實務經驗；另有關蒸汽產生器的運轉維護，由於其二次側污泥淤積是造成管束老化的重要因素，核三廠近年來投入大量資源從事二次側管底板物理清洗及異物搜尋等工作，確保蒸汽產生器的運轉壽命與安全。因此派員前往法國Framatome公司開會交流蒸汽產生器及反應爐冷卻水泵維護技術。

Framatome公司今年舉辦反應爐冷卻水泵研討會(Workshop)，會中討論近年該泵在維護及運轉上之各種重要項目，包含泵內部組件、泵軸封及馬達等議題，並與專家討論關於電廠長期保存方案，其所提出之運轉維護經驗可供核三廠參考。

針對此次研討會內容，本報告篩選出對核三廠較具參考價值之電廠設備保存方案，此二項設計皆可強化福島事件後電廠對意外事故之應變能力。

本文電子檔已傳至公務出國報告資訊網 (<https://report.nat.gov.tw/reportwork>)

目 次

一、 目的：	1
二、 過程：	1
三、 心得及建議：	2

一、目的：

- (一) 反應爐、反應爐冷卻水泵及蒸汽產生器係壓水式核電廠三大關鍵設備，其中反應爐冷卻水泵(Reactor Coolant Pump, RCP)一旦故障，可能使電廠降載，該泵之軸封為控制洩漏之設計，若軸封發生損壞，將使電廠必須停機檢修。因此熟悉 RCP 馬達、泵及軸封之設計原理及運維技術，使其維持正常功能是確保 RCP 運轉安全的不二法門。
- (二) 蒸汽產生器是壓水式核能電廠一次側系統重要組件，以熱交換管束做為傳遞爐心一次側熱量，用於產生二次側蒸汽以推動汽機帶動發電機發電。蒸汽產生器屬超大型熱交換器，若未適當維護而造成組件不堪使用必須更換時，費用將達數百億台幣，以今日國家政策及環保意識抬頭的情況下，無疑將面臨關廠的命運。也由於蒸汽產生器的熱交換管束為反應爐的壓力邊界，管束完整性對於蒸汽產生器的可靠度至關重要。業界十分重視蒸汽產生器的營運維護，對於一、二次側、管底板、管束、汽鼓區的維護均研發各式各樣的專用設備。本公司亦投入大量資源投入蒸汽產生器的維護，因此透過與 Framatome 公司的技術交流會議，進行各項維護技術的標竿比對，以確保蒸汽產生器的運轉壽命與安全。
- (三) Framatome 公司今年舉辦反應爐冷卻水泵研討會 (Workshop)，會中討論近年該泵在維護及運轉上之各種重要項目，包含泵內部組件、泵軸封及馬達等議題，並與專家討論關於電廠長期保存方案，其所提出之運轉維護經驗可供核三廠參考。

二、過程：

112 年 12 月 09 日~12 月 10 日 往程 (台北—德國法蘭克福)

12 月 11 日~12 月 12 日 赴德國埃朗根參加蒸汽產生器維護技術交流會

議

12 月 13 日~12 月 13 日 赴法國熱蒙反應爐冷卻水泵製造工廠討論業界最新技術

12 月 14 日~12 月 15 日 赴比利時蒙斯參加反應爐冷卻水泵研討會議

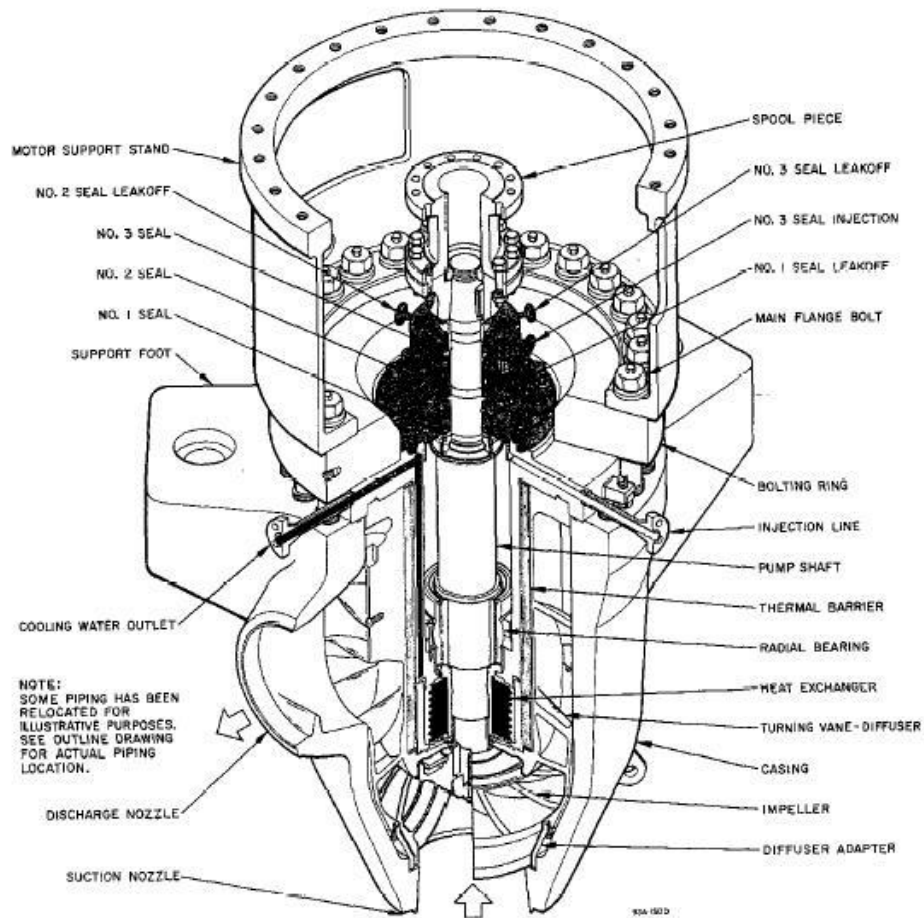
12 月 16 日~12 月 17 日 返程（比利時布魯塞爾－荷蘭阿姆斯特丹－台北）

三、心得及建議：

（一）核三廠反應爐冷卻水泵設備簡介：

不同於核一、二廠，位於我國國境之南的核三廠是目前國內唯一一座壓水式核能發電廠（Pressurized Water Reactor, PWR），其正常運轉中之反應爐冷卻水系統(Reactor Coolant System, RCS)壓力維持在 157 kg/c m^2 (2235psig)、溫度則維持在 292 至 308°C (557°F~586°F) 之區間內，使反應爐冷卻水保持在過壓狀態不致沸騰（純水在飽和壓力 157 kg/c m^2 時，飽和溫度約為 344°C）。反應爐冷卻水流經反應爐爐心，將核燃料核分裂反應所產生之大量熱能帶走，流經熱端管路(Hot Leg)到蒸汽產生器(Steam Generator, SG)管側，以加熱殼側飼水成為蒸汽（約 70 kg/c m^2 、1000psig）後用於推動汽機發電。反應爐冷卻水經過 SG 後，溫度降低，由 RCP 經冷端管路(Cold Leg)送回反應爐爐心重複循環。

RCP 主要功用為：(a)強迫冷卻水循環流經爐心和蒸汽產生器，及時移走爐心產生之熱量提高爐心之功率密度，防止燃料熔化。(b)提供一穩定之速度水頭，作為調壓槽噴水系統之驅動力。(c)反應爐冷卻水系統的硼液濃度改變時，藉水泵之良好混流作用，使系統各部份的硼液濃度分佈均勻。



圖一、RCP 泵浦組件說明圖

本次 RCP 工廠技術交流與研討會議僅有三天，主要著重於各電廠及 Framatome 公司的電廠除役後之 RCP 保存，以及各電廠維護 RCP 與運轉經驗，以下就此二項內容做簡要說明。

1. 電廠除役後之 RCP 及其附屬設備保存

核三廠一號機將於明年(113 年)7 月運轉屆滿 40 年，二號機亦將於後年(114 年)使用執照到期須除役，但部分設備仍有持續運轉或保有未來運轉需求之可用性，故台電公司派員與 Framatome 公司資深設備與維護工程師，針對 RCP 泵浦、馬達及其附屬管路與設備之保養、保存進行討論：

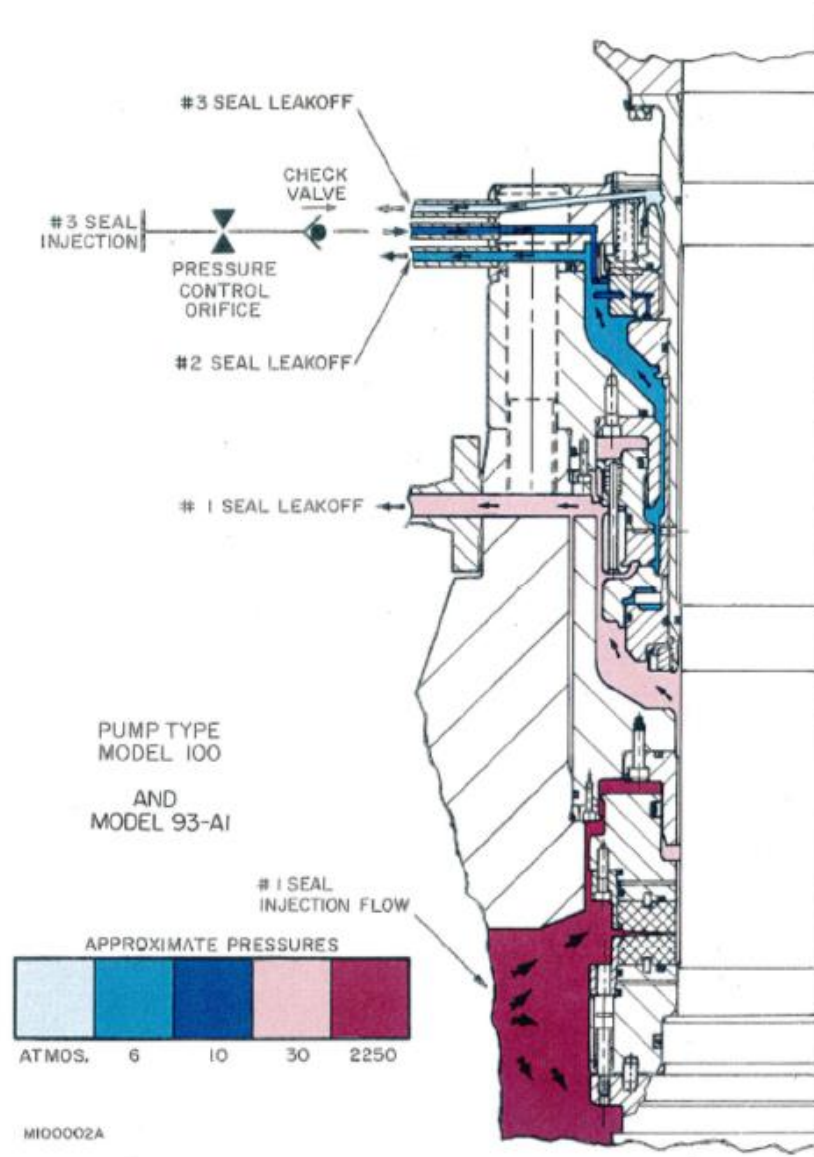
(1) 水位控管：

RCP 軸封是泵浦最重要的組件之一，共有三級軸封：分成一號軸封、二號軸封及三號軸封，後兩個軸封組合又可稱為彈筒狀軸封。RCP 軸封屬於水潤滑靜態軸封，本身可藉由運轉中之浮力、壓力及重力達成平衡，控制每級軸封在特定壓力下之洩漏流量，軸封流量在不同運轉壓力下有不同的運轉限值，若超出或過低則必須採取相對應的行動以恢復至正常範圍，更甚者會導致機組停機。

在核能機組使用執照到期後，目前台電公司規劃兩部機所有置放於爐心之用過核燃料將會全部退出到位於燃料廠房之用過燃料池內，爐心將處於無核子燃料的狀態。此時若是將 RCS 水位補至高於 RCP 軸封表面，因此時三台離心式充水泵(Centrifugal Charging Pump, CCP)已停止使用，不會提供如正常運轉時持續性的一號軸封注水水流，RCP 內的 RCS 爐水會長期處於靜止或不易擾動的狀態之下，水中所含有的鐵氧化物離子可能會隨時間吸附或逐漸沉積於一號軸封表面上，對未來泵浦若有需求而重新運轉時的洩漏量管理會產生不利影響。故 Framatome 公司資深設備與維護工程師建議兩種方式保存：降低水位或不改變水位，但須於泵浦重新運轉前更換新品軸封。

前者是將 RCS 水位維持在一號軸封表面高度(約為 119'11.9")以下，降低 RCS 水中沉積物對於 RCP 一號軸封表面的影響，減少泵浦運轉時的不確定性。後者則是維持水位高於一號軸封表面，但一號軸封及彈筒狀軸封(即二、三號軸封之總成)皆須更換，以降低運轉時一號軸封洩漏

量異常之發生機率。



圖二、RCP 軸封注水及洩水流徑

(2) 一號軸封注水及洩水管路保存

RCP 一號軸封注水在系統正常運轉時或一號軸封被水覆蓋時，須保持常時運轉，以提供一穩定注水以維持一號軸封表面清潔，減少水中物質沉積。RCP 一號軸封注水由上游三台不同迴路之 CCP 提供，經由軸封注水過濾器後注入到 RCP 一號軸封。

在電廠停止運轉階段，CCP 會停止提供軸封注水，若軸封注水處於滿水狀態下，因 RCS 爐水長期處於靜止或不易擾動的狀態，軸封管路可能會有水中懸浮微粒沉積，造成管路有阻塞情形。Framatome 公司資深設備與維護工程師建議可在軸封注水及軸封洩水管路間安裝一外環臨時管路，並使用其他系統泵浦或外接泵浦，使水流定期循環，以減少一號軸封注水及洩水管路因雜質阻塞之機會，為未來可能的泵浦再啟動提供一穩定且安全的運轉環境。

(3) 馬達保存

RCP 泵浦本身缺乏動力，故仍須有馬達推動運轉。本廠 RCP 馬達係直立式、六極、防滴型、空氣冷卻。鼠籠式感應馬達，主軸上裝有上、下徑向軸承，兩琴式(Kinsbury)推力軸承、飛輪、推力軸承油壓頂起系統，和一離合法蘭，馬達亦裝有軸承和繞線溫度感測器，軸承油冷卻器，油位極限開關及反逆轉機構。

RCP 馬達在長期存放時，因空氣中含有水分子，濕氣會影響馬達內部組件，故建議開啟內部加熱器，以祛除水分保持內部組件乾燥防止生鏽及電器迴路短路。且為防止馬達軸彎曲及潤滑油油路阻塞，應定期每 2 週啟動頂舉油泵，並以手動方式旋轉馬達軸。且因 RCS 內部未滿水，故應先將馬達與泵浦解聯，不得保持聯軸器為耦合狀態，以避免 RCS 壓力低於 25 kg/c m²時，RCP 泵浦軸封表面未開啟而造成軸封表面靜環與動環對磨，使軸封面損壞，進而影響未來正常運轉時的洩漏量控制。

綜合以上 Framatome 公司資深設備與維護工程師之意見，建議本公司核三廠可採取下列方式保存 RCP 泵浦與馬達：

a. 水位控管：

RCS 水位維持高於 RCP 一號軸封表面，但在 RCP 重新運轉前必須更換一號軸封及彈筒狀軸封，以維持軸封運轉穩定。

b. 一號軸封注水及洩水管路保持：

在軸封注水及軸封洩水管路間安裝一外環臨時管路，並使用其他系統泵浦或外接泵浦，使水流定期循環或沖放。

c. 馬達保存

RCP 馬達與泵浦聯軸器解聯，保持定期每 2 週啟動頂舉油泵，並以手動方式旋轉馬達軸。

2. 各電廠維護 RCP 與運轉經驗

在會議期間，共有法國、瑞典、芬蘭、中國大陸與南非等數家電廠及 Framatome 公司分享其運轉及維護 RCP 經驗，以下擷取具參考價值之主題以資借鑑：

(1) RCP 內部組件運轉與維護：

RCP 內部組件的檢修維護週期是依每家電廠的運轉經驗以及維護條件而訂定。法國電力公司(Électricité de France, EDF)的 RCP 型號是 100D 型為主，EDF 是以線上監測工具「Stimu-GMPP」來監控泵浦葉輪運轉情形，並未訂定固定周期之檢修計畫；中國中廣核集團(China General

Nuclear, CGN)大亞灣核電廠則是以固定每 20 燃料週期替換檢修修復品的方式更換內部組件。核三廠目前則是固定每 12 燃料週期進行內部組件檢查，並替換為修復品。

在零組件檢查方面，與會專家提出許多關於 RCP 內部組件分解與檢查之案例與方法。其中，EDF 分享了數起案例，該公司轄下電廠在執行內部組件拆檢後的非破壞檢查時，發現該型號(主要是 93D 或 100D)熱屏蔽與泵軸接觸的泵軸肩部具有細小裂紋。雖泵浦形式有所不同，但同為西屋公司製造之衍伸型號，且維護方式及零組件設計皆同小異，故仍具一定參考價值。核三廠應可針對熱屏蔽(Thermal barrier)、葉輪(Impellar)及熱軸套(thermal sleeve)進行非破壞檢測，例如液滲檢查(Penetration Test, PT)、磁力檢測(Magnetic Test, MT)或超音波檢測(Ultrasonic Test, UT)，尤其是加強上述組件之應力集中處，泵軸肩部或漸縮處等，並在平時運轉時加強振動監測。

(2) RCP 軸封運轉與維護：

RCP 一號軸封目前最常遇見的問題是一號軸封洩漏率異常，EDF 提出與 EPRI Reactor Coolant Pump Seal High Leakoff Mitigation 報告相同的控制方式：降低軸封注水溫度，以核三廠的相關設備來說即為容積控制槽(Volume Control Tank, VCT)溫度，降低電泳現象產生之鐵氧化物沉積。再搭配定期更換軸封新品或對軸封表面進行化學清洗，可有效緩解一號軸封洩漏率異常發生機率。

(3) RCP 軸封材料更換供應商：

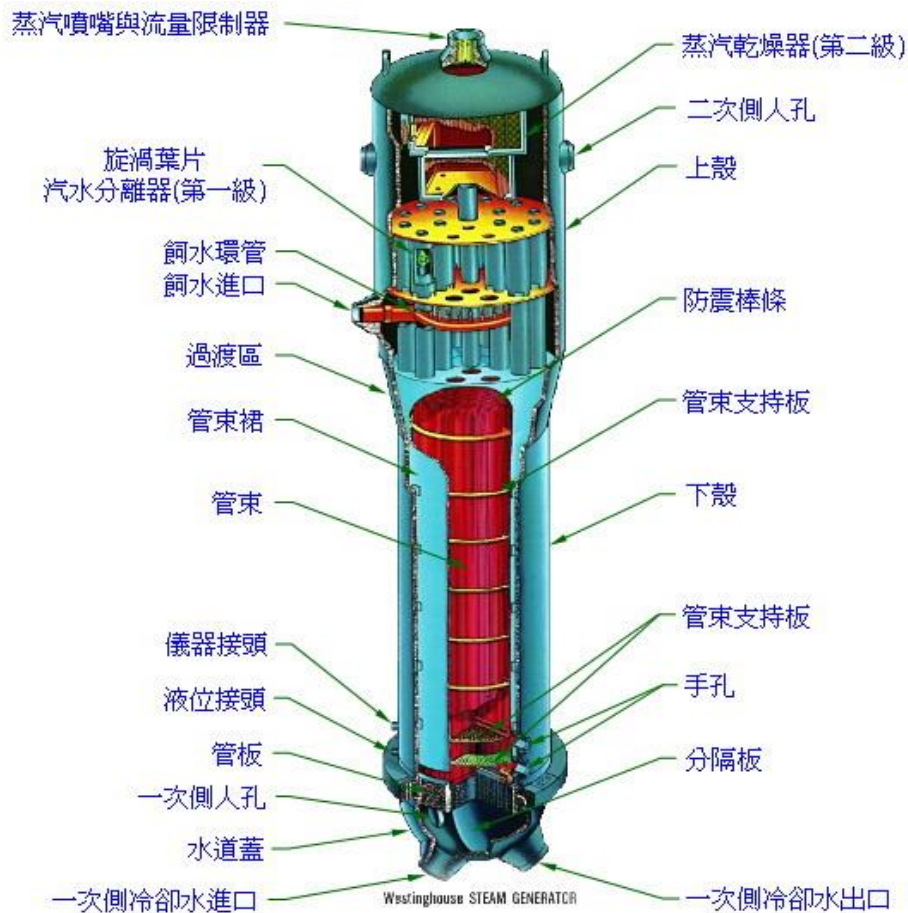
RCP 一號軸封表面是由氮化矽(Silicon nitride)所製成，具有良好之抗酸鹼及耐高溫特性，核三廠所使用之一號軸封多是由 Framatome 公司及 Westinghouse 公司所製造。其中，Framatome 公司上游製程廠商原有美國企業參與，但近年 Framatome 公司為排除美國影響、降低對單一廠商的依賴性及降低製造、運輸成本，已與歐洲廠商 Kersit N 公司重新測試新種類的氮化矽表面層，未來測試合格後即可量產。另外，二號、三號軸封表面鍍層，動環為碳化鉻(chromium carbide)；靜環則為石墨(carbon graphite)，二號、三號軸封表面製程同樣將轉移回歐洲公司，碳化鉻材料改由義大利公司 Lincotek 的 TAFE 負責；石墨材料改由德國 Schunk 公司承接。核三廠未來若有機會採購到該新品軸封時，應再注意該新軸封對運轉與維護方面之影響。

(二) 核三廠蒸汽產生器設備簡介：

核三廠每部機各有 3 台 MODEL F 型蒸汽產生器(Steam Generator, SG)。每只蒸汽產生器各有 5624 根直立式 INCONEL 600 U 型管，於管板處以液壓擴管並焊接以防止洩漏，U 型管束將爐心流經管束內側的爐心高溫水熱量，傳至二次側將飼水加熱為蒸汽。管束由七片支撐板(Tube Support Plate, TSP)所支持。管束與支撐板上之穿越孔為四葉形流孔(Quatrefoil)，以提供管束的支撐及飼水流路，避免流量不均導致化學物聚集而產生局部腐蝕現象。

由於蒸汽產生器結構上必須承受一、二次側的高壓力，在設計結構

上的穿越孔如人孔或手孔蓋就會儘量減少，以便於維持結構的完整性，然而相對的就會造成在執行組件內部維護的不便。



圖三、核三廠蒸汽產生器

蒸汽產生器(SG)二次側的飼水攜帶二次側管路沖蝕或腐蝕下來的鐵離子或氧化鐵，在 SG 沸騰成蒸汽後，這些物質被留在管底板或管支撐板上，累積成為污泥聚積於管底板處，SG 雖在管底板上有沖放管路的設計，但實際上仍無法有效的將沉積的污泥沖放掉，污泥經年累月積壓硬化，可能造成管束擴管變形漸進區的應力腐蝕龜裂或孔蝕，另在管束表面亦會形成管垢，影響管束的熱交換功能，導致 SG 的劣化。因此，如何利用有限的穿越手孔，將 SG 累積於管底板、管束表面及飼水或蒸汽流徑上的積垢或污泥清除，是 SG 維護工作的最大挑戰。

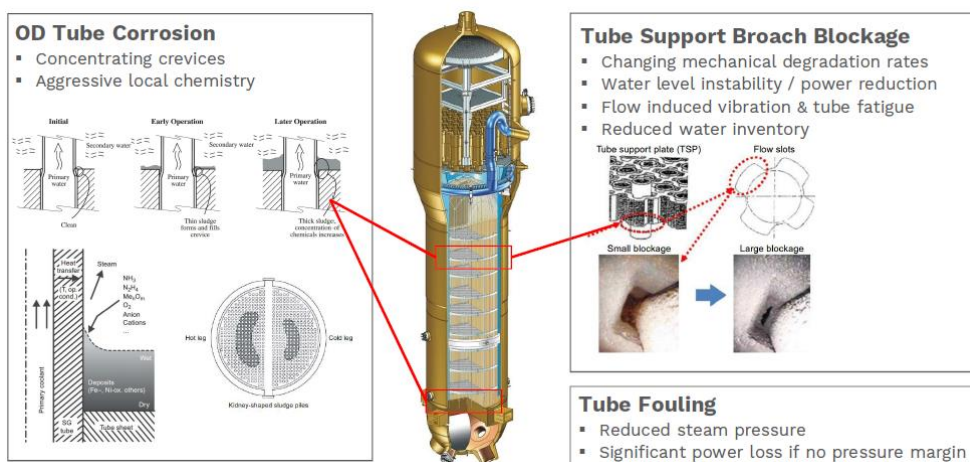
核三廠自 2004 起開發蒸汽產生器化學清洗技術，有效解決四葉孔

汙泥堆積，並確實解決水位震盪現象，恢復機組全功率運轉。探討造成支撐板管束四葉形流孔阻塞的機制及其改善方法除了是業界普遍關注的議題，亦為核三廠持續努力的方向。

除了針對全管束與支撐板、四葉孔等組件進行化學清洗，業界仍持續努力解決管底板的汙泥堆積。核三廠於 EOC-27 大修採用物理清洗方式以清除管底板的汙泥，由管束渦電流檢測結果可發現有具體成效。業界對此開發不少技術，值得核三廠學習。

(三) Framatome 公司分析蒸汽產生器營運維護所面臨的挑戰：

1. 熱交換管束外部腐蝕，來自於組件縫隙中的局部區域水化學所造成。
2. 管支撐板(Tube Support Plate, TSP)旁之四葉孔(Quatrefoil)汙泥阻塞，汙泥產生屬運轉自然現象，而汙泥阻塞除了造成組件加速劣化，四葉孔因阻塞將造成二次側運轉水位不穩定晃動，為避免達到二次側高水位跳機警報，機組需降低功率運轉，同時產生的不穩定將帶來水流所產生的振動(Flow Induced Vibration)，使抗振棒(Anti-vibration Bar)等組件加速磨損。
3. 熱交換管束的結垢(Fouling)，將導致熱交換管傳熱效率不佳，產生之蒸汽壓力隨之降低，造成發電損失。



圖四、蒸汽產生器維護挑戰

4. 蒸汽產生器劣化的主因係由於運轉生成腐蝕產物或雜質等傳送與堆積，進而改變堆積處周邊局部的環境，此環境使蒸汽產生器更易發生應力腐蝕(Stress Corrosion Crack, SCC)。Framatome 針對不同 pH 值下鐵離子溶解度進行分析，鹼性水化學能將腐蝕降至最低，在較低 pH 值環境中，水中金屬離子會顯著釋出，pH 值並非恆定，將會視所添加的胺類其揮發程度所變化。腐蝕產物將會堆積在蒸汽產生器水流轉向或水汽相變轉換區域(稱之為 Flow Dead Zone)，在該區域造成局部高酸性之易發生腐蝕環境，即使熱交換管束以抗腐蝕材料製造，仍容易發生腐蝕。

(四) 核三廠與 Framatome 公司在蒸汽產生器營運及維護措施比對如下：

1. 水化學控制：

- (1) 腐蝕產物抑制，Framatome 公司與核三廠都按照業界的壓水式核電廠水化學營運導則執行，致力於腐蝕抑制及腐蝕環境的生成，如防止硫化物、氯化物、腐蝕產物自冷凝器管路洩漏至飼水管路等。

- (2) 核三廠遵循美國電力研究院(Electric Power Research Institute, EPRI)發行的一、二次側水化學導則(Pressurized Water Reactor Primary Water Chemistry Guidelines & Pressurized Water Reactor Secondary Water Chemistry Guidelines)執行，符合營運水質標準及規範。

2. 維護及檢查工作：

- (1) 組件目視檢測：

Framatome 公司與核三廠均執行蒸汽產生器一、二次側組件的目視檢測，包含一次側水室(Channel Head)、二次側管底

板(Tube Sheet)、汽水分離器及蒸汽乾燥器(Moisture Separator & Dryer)、人孔蓋板螺栓非破壞檢測等，確保蒸汽產生器的組件完整性。

(2) 熱交換管束渦電流檢測：

Framatome 公司與核三廠均於電廠大修期間對蒸汽產生器熱交換管束進行一定比例的渦電流檢測，依照壁厚標準以決定是否進行塞管。也藉由渦電流檢測，找出潛在劣化因子，如有發現 SCC 等劣化，能盡早做出適當處置及追蹤。

(3) 二次側清洗：

Framatome 公司與核三廠均於電廠大修期間對蒸汽產生器二次側進行清洗，Framatome 公司所使用的是(Deposit Minimisation Treatment, DMT)清洗技術，對於蒸汽產生器二次側全管束進行化學清洗，能有效緩解四葉孔阻塞情形。DMT 對於碳鋼的腐蝕程度較低，且不含 EDTA，因此產生之廢水較容易處理。核三廠是使用含 EDTA 的清洗藥劑，對組件碳鋼材料的腐蝕極輕微，對於每次汙泥清洗量均會事先進行計算，清洗過程隨時監測各濃度參數，在達成化學反應點時即進行洩水和潤洗，以避免管束及組件腐蝕。

對於管底板的清洗，Framatome 公司與核三廠均開發機械式的清洗設備，由手孔進入無管通道(No Tube Lane, NTL)，以高壓水柱沖洗手孔高度以下至管底板間的汙泥。因核三廠蒸汽產生器的設計與 Framatome 公司的設計略微不同，U 型管束頂端至汽鼓區無任何維修孔或通道，因此自手孔高度以上的區域只能使用化學清洗的方式進行維護，與 Framatome 設計可由

汽鼓區中層板區(Mid-Deck Plate)內的維修孔安裝設備進入一次側 U 型管的頂部進行維護不同。

(4) 二次側管束積垢厚度量測與污泥積垢分布：

Framatome 公司與核三廠均於電廠大修期間蒸汽產生器渦電流檢測時，一併進行管束外的污泥厚度估算，隨後以軟體繪製出平面的污泥高度分布圖。美國電力研究院(EPRI)研究報告指出，分布的形狀似腎形(Kidney-shaped)，核三廠再依據此分布圖，決定清洗的程度並擬訂計畫，在有限的排程將維護工作做到極致。

(5) 熱交換能力計算：

蒸汽產生器由於水質、運轉歷史、維護品質等因素，均會影響熱交換管的健康度。對於蒸汽產生器而言，熱傳係數、塞管率、水流溫度壓力等參數均對熱交換能力有一定程度的影響。因此結垢因數(Fouling Factor)的計算就成為分析蒸汽產生器的整體性能的重要指標之一。核三廠與 Framatome 公司對於 Fouling Factor 均有進行分析，核三廠共 6 台蒸汽產生器，商轉迄今已接近 40 年，目前塞管率最高的蒸汽產生器仍不到 3%，績效非常優良。

(五) 本次另一項收穫是 Framatome 公司展示的最新水下工作設備 SUSI，Framatome 工廠內有反應爐槽、蒸汽產生器、冷卻水泵及連接管道的實體模擬設備，用於現場實作測試。Framatome 現場展示如何使用 SUSI 進行水下異物搜尋及取出，SUSI 的設計構想來自於潛水艇及機械手臂，搭載抗輻射的攝影系統，使操作人員可自由於反應爐內進行異物搜尋，或是水下組件的目視檢測工作。特別的是，Framatome 也提到如果要直接

檢查反應爐冷卻水泵的水下組件，自蒸汽產生器一次側水室內放入 SUSI，即可遙控下潛行至冷卻水泵進行檢查。此設備除了應用於反應爐冷卻水系統，也可以應用於電廠的海水管路，在不需洩水的情況即可完成檢查，對於維修工期減少有相當助益，核三廠相關部門可考慮購置。另該公司對於人員訓練所建置的實體模擬器亦值得核三廠參考學習效仿。

(六) 赴國外開會可增廣見聞，加強自身對專業技術涉入的深度及廣度，不但對個人職場生涯增添一番歷練，藉著出國前後行程規劃及食宿的安排，加上開會時與國外人士的互動，可讓開會人員在公務上及待人接物方面都成長不少。本次感謝各級長官給我們機會出國參加壓水式核電廠反應爐冷卻水泵及蒸汽產生器維護技術交流會議，承蒙公司內人資處、核發處及國外機構協助配合，在出國這段期間一切平安順利。本次所獲得之相關資料及經驗，將有助於電廠持續提升反應爐冷卻水泵及蒸汽產生器維護技術，使發電績效更加優良。