

出國報告（出國類別：開會）

2014 西屋公司核能技術會議

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：奚瑞駿 核能發電處核能工程師

派赴國家：美國

出國期間：103 年 8 月 23 日至 8 月 31 日

報告日期：103 年 9 月 30 日

103-5107-6

出國報告審核表

出國報告名稱：2014 西屋公司核能技術會議		
出國人姓名 <small>(2人以上，以1人為代表)</small>	職稱	服務單位
奚瑞駿	六等核能工程師	台灣電力公司核能發電處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <u>開會</u> (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	
出國期間：103年8月23日至103年8月31日		報告繳交日期：103年9月30日
出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審核項目
<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	1. 依限繳交出國報告 2. 格式完整 (本文必須具備「目地」、「過程」、「心得及建議事項」) 3. 無抄襲相關資料 4. 內容充實完備。 5. 建議具參考價值 6. 送本機關參考或研辦 7. 送上級機關參考 8. 退回補正，原因： <input type="checkbox"/> (1) 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> (3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> (4) 抄襲相關資料之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> (5) 引用相關資料未註明資料來源 <input type="checkbox"/> (6) 電子檔案未依格式辦理 9. 本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input checked="" type="checkbox"/> (1) 辦理本機關出國報告座談會 (說明會)，與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> (2) 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> (3) 其他 _____ 10. 其他處理意見及方式：

報告人 奚瑞駿 103.9.30	單位 主管 薛進益 103.10.6	主管處 主管 簡福添 103.10.7	總經理 副總經理 林專德 103.10.9	專業總工程師 林德福 103.10.14	副總經理 陳布燦 103.10.14
------------------------	-----------------------------	------------------------------	--------------------------------	----------------------------	--------------------------

說明：
 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存
 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

2014 西屋公司核能技術會議

頁數 24 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

奚瑞駿/台灣電力公司/核能發電處/六等核能工程師/02-23667090

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他（開會）

出國期間：2014/8/23~2014/8/31 出國地區：美國賓系佛尼亞州

報告日期：2014/9/30

分類號/目

關鍵詞：第三核能發電廠、Westinghouse 公司

內容摘要：(二百至三百字)

本次任務主要為參加由 Westinghouse 公司，於 Pennsylvania Pittsburgh 舉辦之 2014 核能技術會議。

此會議為 Westinghouse 公司召集全球各該公司反應爐使用客戶及核燃料使用客戶進行技術研討及了解各用戶之使用現況與技術需求，會議中提供目前西屋公司核能部門發展之最新狀況、核能技術之研發現況(包含已商業化之核能技術更新和未來將商業化之技術研發現況)、全球核能產業狀況並提供如何提高營運績效及技術支援管道。

針對我國的目前核能營運現況，整理資訊如下七點：1.如何有效解決及預防軸向功率偏移現象發生 2.如何有效使壓水式反應器燃料達到更高之燃耗值 3.壓水式反應器功率提升之現況 4.壓水式反應器延長運轉周期至 24 個月之可行性 5.壓水式反應器爐心線上監測軟體之發展現況 6.國際核能電廠興建現況 7.核能發電新型燃料護套之研發現況。

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://open.nat.gov.tw/reportwork>)

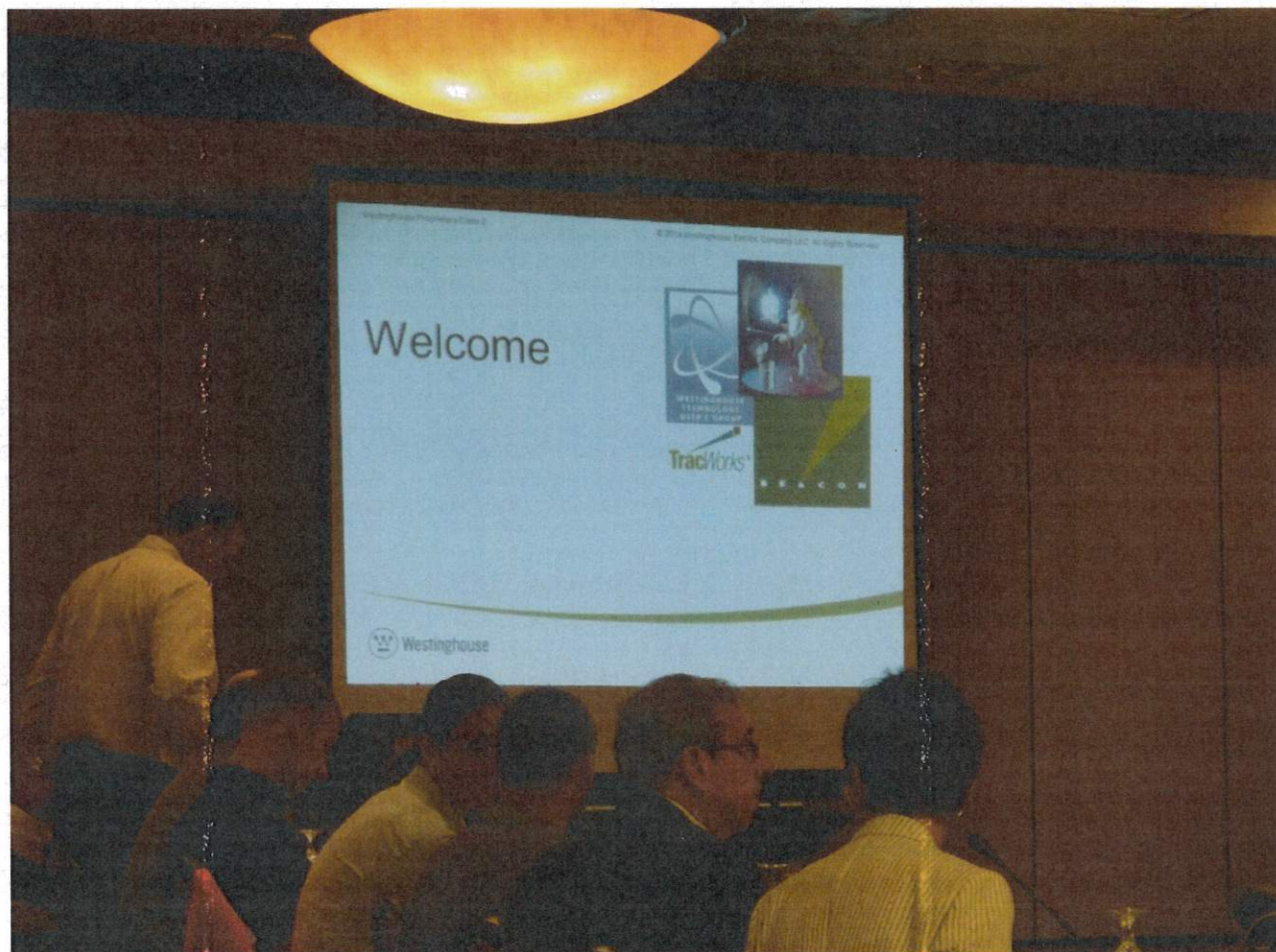
目 錄

內 容	頁次
壹、出國目的	1
貳、出國行程	3
參、任務過程	4
肆、結論、心得與建議事項	20
伍、參考資料	22

壹、出國目的

本次出國行程含往返路程共計 9 日，出國任務為參加由西屋公司舉辦之「2014 年核能技術會議」。

西屋公司舉辦之核能技術會議與會人員為全世界各國核能發電廠使用西屋公司之燃料廠家及西屋公司之反應器使用廠家。西屋公司定期舉辦此會議，目的在召集全世界使用該公司核能技術之同業人員，分享目前西屋公司核能部門發展之最新狀況、核能技術之研發現況、全球核能產業狀況、如何提高營運績效及提供技術支援與提供供應商和使用者間之直接對談管道，並使所有與會人員交換運轉意見，由西屋公司之該電廠業務負責人員直接與客戶對話以聆聽客戶之需求。



西屋公司舉辦核能技術會議之會議現場

本次西屋公司分享之資訊主要如下：

1. 再填換燃料執照分析計算方法之更新
2. 壓水式反應器之爐心監測與分析
3. 中幅度功率提升及大幅度功率提升之因應策略
4. 延長運轉週期長度至 24 個月之可行性與因應策略
5. 國際核能發展現況
6. 最新護套材質研發狀況
7. 防範燃料護套洩漏策略
8. 爐心水化學精進

藉由參加本次會議可了解國際上各核能發電廠核子反應爐監測軟體、再填換燃料執照分析計算方法發展現況及使用狀況，除了解反應器監測軟體之運作原理和線上監測系統如何監測反應爐運轉之安全，亦可透過監測系統降低核燃料護套洩漏率、提升營運效率，以確保反應器安全，並了解原廠家再填換燃料執照分析計算方法，使未來執行燃料稽查工作更為順利；另可直接獲取原廠家之第一手技術資料，並交換國際上之運轉經驗以提高本公司之運轉績效、提昇核能運轉之技術能力、降低核能發電燃料成本、確保爐心運轉安全。

貳、出國行程

103 年 8 月 23 日至 103 年 8 月 31 日含往返程共計 9 日，於美國賓夕法尼亞州匹茲堡市(Pittsburgh, PA) Westinghouse 公司會議現場執行本項任務。詳細行程如下：

日期	行程	摘要
8/23-8/24	台北→舊金山	往程
8/24	舊金山→匹茲堡	往程
8/25	Westinghouse 公司會議現場	參加 BEACON User Group 會議
8/26	Westinghouse 公司會議現場	1.參加 BEACON User Group 會議 2.參加 Joint Session 會議 3.參加 Thermal Analysis Group 會議
8/27	Westinghouse 公司會議現場	1.參加 Reactor Engineers' Seminar 會議 2.參加 Technology Users Group 會議 3.參加 APA Working Group 會議
8/28	Westinghouse 公司會議現場	1.參加 TracWorks Advisory Council 會議 2.參加 Steering Committee Meeting 會議
8/29~8/30	匹茲堡→舊金山	返程
8/30~8/31	舊金山→台北	返程

參、任務過程

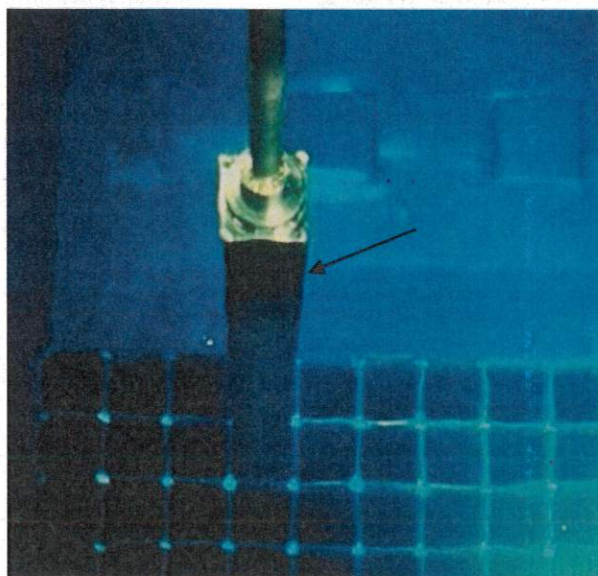
本次出國任務為參加 2014 西屋公司核能技術會議，會議日期為 8/25 至 8/28，會議內容整理如下七項：

- 1.如何有效解決及預防軸向功率偏移現象發生
- 2.如何有效使壓水式反應器燃料達到更高之燃耗值
- 3.壓水式反應器功率提升之現況
- 4.壓水式反應器延長運轉周期至 24 個月之可行性
- 5.壓水式反應器爐心線上監測軟體之發展現況
- 6.國際核能電廠興建現況
- 7.核能發電新型燃料護套之研發現況

1. 如何有效解決及預防軸向功率偏移現象發生：高 IFBA 之運轉策略期望能有效降低 AOA

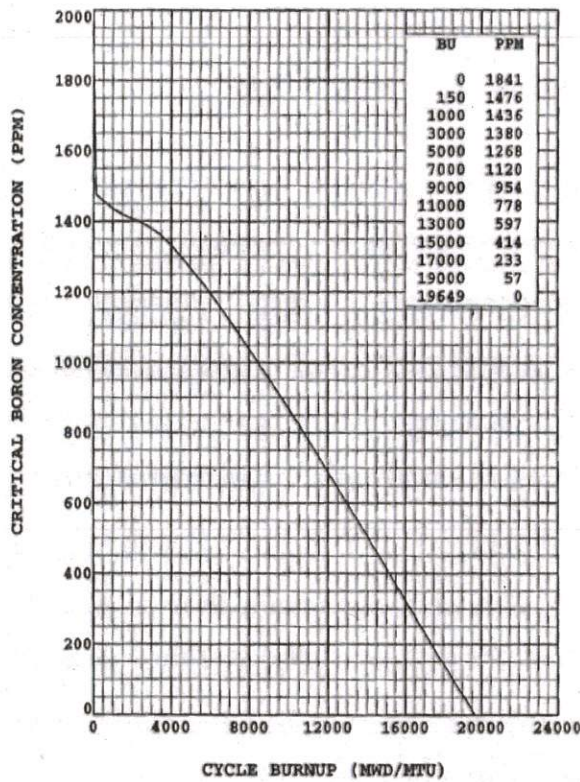
西屋公司針對所有燃料使用者逐漸採用越來越多的噴鍍式可燃毒物燃料棒(IFBA Integral Fuel Burnable Absorber)運轉策略。以核三廠為例，當噴鍍式可燃毒物燃料棒引進初期(MS1 Cycle14 2000 年)，噴鍍式可燃毒物燃料棒全爐心之使用量為 4160 根，而到目前(MS2 Cycle22 2014 年) 噴鍍式可燃毒物燃料棒全爐心之使用量已達到 7964 根。而國外之壓水式電廠於此次會議中，亦有增加噴鍍式可燃毒物燃料棒進行運轉之趨勢。

大量採用噴鍍式可燃毒物燃料棒進行運轉，好處在於壓水式反應器採用控制棒及硼酸同步進行反應度控制，於運轉周期初，壓水式反應器的硼酸濃度大約會達到近 2000PPM 的濃度，而運轉到週期中，硼酸濃度也大約會達到 1000PPM 左右，雖壓水式反應器之反應爐無沸騰現象產生，但因燃料棒加熱作用，沸水式反應器燃料上半部在運轉一個週期後即可明顯看到積垢的現象，此類積垢大部分為金屬離子與硼酸結晶，因硼酸為中子毒素對熱中子有很大的吸收截面(部分金屬離子亦對熱種子有極大之吸收結面)，而當運轉到週期的越末段時，燃料棒表面的積垢會逐漸增厚，導致功率越來越往下半部挪移，此現象稱爐心軸向功率偏差，當狀況過於嚴重則將造成軸向功率異常(AOA axial offset anomaly)。若積垢過厚，則反應爐受到震動或某些因素造成積垢脫落時，原先包覆積垢之燃料將因中子通量大增而導致功率瞬間增加，可能造成燃料丸因熱膨脹而擠壓燃料護套，或者因上半部燃料過熱，造成偏離核沸騰(DNB departure from nucleate boiling)現象之發生。

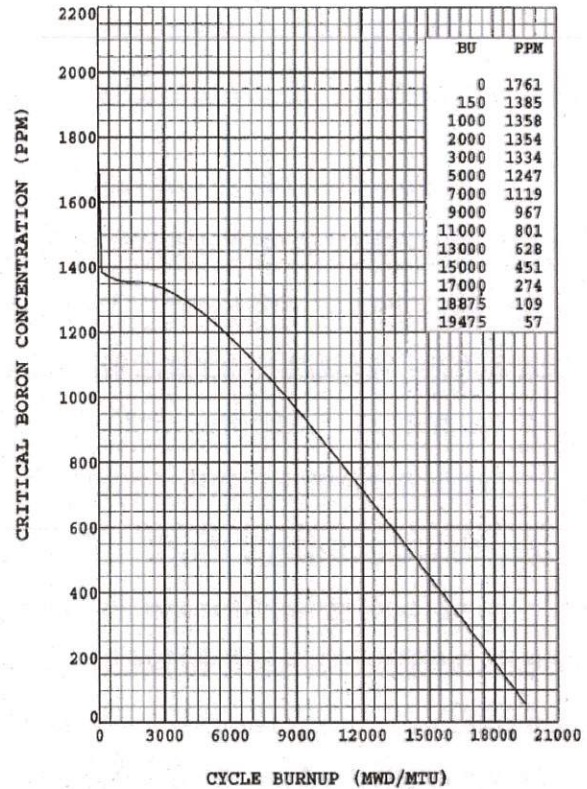


燃料上部積垢現象

以相似的兩個運轉周期(MS1 Cycle14 2000 年及 MS2 Cycle21 2012)做比較,如下圖所示,兩個周期之週期末燃耗皆大約為 19500MWD/MTU,但可發現 MS1 Cycle14 使用較少量的噴鍍式可燃毒物燃料棒,而 MS2 Cycle21 整個週期到週期中以前的硼酸濃度皆較 MS1 Cycle14 少了大概 100PPM,且從週期初起爐開始,MS2 Cycle21 的爐心硼酸濃度即很快的降到 1400PPM 以下,故可知道大量地使用噴鍍式可燃毒物燃料棒可有效減少壓水式反應器一次側硼酸濃度。



MS1 Cycle14 燃耗及硼酸濃度



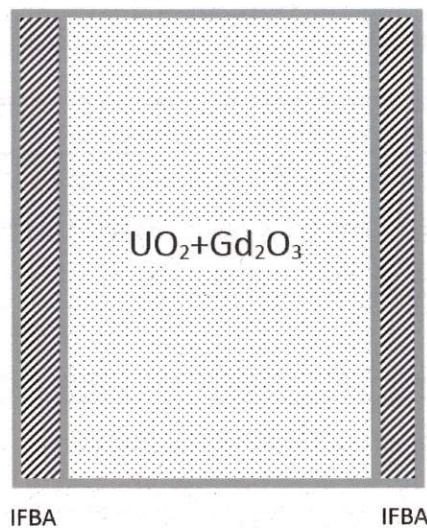
MS2 Cycle21 燃耗及硼酸濃度

減少硼酸濃度與維持爐水品質除了可有效減低 AOA 防止因燃料積垢脫落造成之燃料擠壓護套外,減少硼酸濃度使積垢量減低亦可使燃料表面保持清潔以維持良好的熱傳效果。另外壓水式反應器起動時,因一次側爐水會因升溫膨脹而排離反應器,因硼酸可增加反應爐之負反應度,當升溫時爐水體積不變但密度變小總量減少,即爐心內減少可增加負反應度的物質,而硼酸濃度過高即升溫會造成過多的正反應度加入,將導致反應器再啟動階段有溫度的正回饋機制,此亦為爐新設計時之限制值,故若需要更多燃料填入爐心但僅用控制棒和硼酸進行反應度的壓制,將使週期長度或功率提升有所限制。

2. 如何有效使壓水式反應器燃料達到更高之燃耗值：同步使用有 IFBA 及 Gd 之新型燃料效降低 AOA 並確保燃料內壓之限制

除了增加噴鍍式可燃毒物燃料棒之使用量外，若燃料之可燃毒物採用更新之設計 IFBA+Gd(釷)，則更有可能大幅度增加燃料之使用時間。目前 Westinghouse 採用之燃料皆為於燃料丸表面噴鍍鋁化硼，此類燃料之噴鍍薄膜非常薄，僅需很短的時間即可消耗完畢，好處在於運轉周期前半部可壓制反應度避免燃料過熱，而運轉週期末噴鍍式可燃毒物幾乎消耗殆盡，故可保持爐心週期末較強之出力。

但因噴鍍式可燃毒物燃料棒消耗過快，且僅噴鍍於燃料丸表面，若考量於燃料棒中增加更多燃料總重，則於噴鍍式可燃毒物完全消耗殆盡後，可能燃料棒仍有過剩的反應度，此將造成噴鍍式可燃毒物消耗殆盡後之運轉困難，故目前 Westinghouse 考量除噴鍍式可燃毒物外，另考量於燃料丸中加入 Gd 氧化物之粉末，以提升可燃性毒物之壓制效果。



IFBA+Gd 燃料丸分布方式

於燃料丸中加入 Gd 氧化物之粉末做法，已於沸水式反應器之營運中有很好的使用經驗，而我國第一及第二核能發電廠皆已採用此種方式處理之燃料。另外，噴鍍式可燃毒物之材質為鋁化硼，硼吸收中子後會在燃料棒內產生氣體，影響燃料棒之內壓，若僅考量大量使用噴鍍式可燃毒物壓制反應度，則可能影響燃料棒之機械壽命。而 Gd 之中子捕獲反應則較無氣體壓力之疑慮，且 Gd 之中子捕獲後，可產生多個世代之高中子截面核種，故 Gd 用於壓制反應度，將有非常長之效期。

3. 壓水式反應器功率提升之現況：期望能達成中幅度、大幅度功率提升之目標

目前本公司第三核能發電廠一二號機皆功率提升為 1.67%(由原先 2775MWt 提升至 2822MWt)，未來若欲再提升第三核能發電廠之功率以因應用電吃緊、減低碳排放之問題，則可考量實施中幅度或大幅度功率提升。

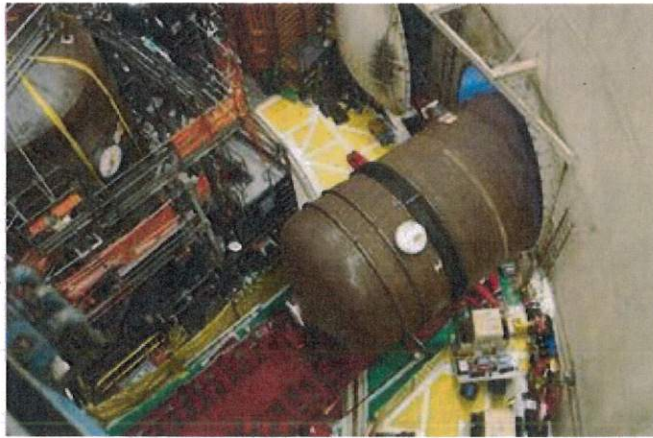
以目前國際上壓水式反應器 Westinghouse 公司統計之功率提升案，功率提升最高約可達到 3000MWt 之熱功率，可行性評估報告約需歷時 4 到 6 個月，另外執照申請部分(包含安全分析、燃料變更分析.....等)另需約一年半左右，而另外亦須考量硬體部分之改善。

(1) 燃料設計之更新：目前由 Westinghouse 公司提供全球核能發電廠之燃料，皆逐漸採用小棒設計，包含 Combustion Engineering 之壓水式反應器(CE PWR)亦逐漸採由原先燃料棒改為變為細棒設計，故目前全球 Westinghouse 提供燃料之壓水式反應器皆逐漸汰換掉原先之設計，以統一其生產過程，進而減少生產成本以壓低營運成本。但若需執行中幅度或大幅度功率提升，則必須考量採用大棒設計，其優點在於可獲得更多的燃料填充量，以減少每次大修之燃料更換數量，可有效降低後端營運成本。並另可因外表面積增加，獲取額外約 8%之熱傳面積，且因表面積增加單位面積之發熱量減低，亦可使積垢現象降低，減少軸向功率異常 AOA 之現象。

(2) 更新蒸汽產生器：本公司第三核能發電廠一、二號機之蒸汽產生器營運至今皆已有效率降低之現象，故更新蒸汽產生器除可增加運轉效率外，另因功率提升能量須經由蒸汽產生器交換之量更為大增，故更新蒸汽產生器亦可見其重要性，但另需考量更換爭產生器之問題。

位於美國馬里蘭的 Calvert Cliff 壓水式電廠於更換蒸汽產生器後，經過兩個週期的營運後發生兩根燃料護套洩漏的現象。經過調查其燃料護套洩漏原因為積垢導致腐蝕現象(Crud Induced Localized Corrosion)。其成因為蒸汽產生器生產時為未完全氧化之金屬，當電廠更換蒸汽產生器後其一次側內部之熱交換管氧化膜逐漸建立，但同時亦釋出金屬離子，並因燃料加熱而堆積於表面導致腐蝕。

故更換蒸汽產生器後，除須考量新的蒸汽產生器之運作狀況(如熱交換管震動疑慮等)，亦另需增加監測一次側水質及考量是否增加過濾濾材之汰換頻率，以確保新蒸汽產生器逐漸建立氧化膜的過程中對水質不會產生負面之影響。



圍阻體內蒸汽產生器之吊運

- (3) 二次側泵浦之更新：因爐心之熱功率提升，二次測知流量亦相對有明顯幅度之提升，為考量其可靠度及穩定度，亦可同步考量更新二次側之 feed water pump 及 condensate water pump 之容量。
- (4) 飼水再熱系統之更新：飼水再熱系統之更新可分為效率提升及流量提升，若一次側反應器之功率提升，則二次側流量必定有所提升，故同步提升飼水再熱系統之流量，可減低因流量增加造成機械問題之疑慮。另亦須考量飼水再熱系統之更新可提高其效率，其發電效率將會有顯著之改善。
- (5) 執照之更新：目前本公司第三核能發電廠燃料合約已接近期限，若需實施中幅度或大幅度之功率提升，則執照更新之申請將由燃料提供廠商進行實施，但若因燃料合約到期恐有更換燃料廠家之疑慮，故未來之功率提升案建議先考量燃料供應商之合約期限。

4. 壓水式反應器延長運轉周期至 24 個月之可行性：延長運轉週期可有效減少大修次數，有效抑低營運成本

目前如本公司核三廠相同設計之 Westinghouse 三個二次側迴路(三個蒸汽產生器)之壓水式反應器考量延長至 24 個月週期，預估約每三到四個週期及可節省一次大修，本公司核一廠 BWR4 及核二廠 BWR6 對於延長週期長度至 24 個月皆已有相對應之策略，但三迴路之壓水式反應器因壓力槽燃料填裝空間限制，目前每個周期之爐心僅可填裝約 66.5 公噸之鈾重(相似電功率輸出之 BWR6 機組每次填裝約 110 公噸之鈾重)。

若採用目前 VANTAGE+ 之細棒設計，則欲延長每次週期長度至 24 個月，勢必造成每次

大修需更換之燃料數目過多，以目前爐心滿載熱功率 2822MWt、相同之燃料濃縮度及硼酸濃度狀態為例，若延長週期至 24 個月，則每次需更換之燃料總量將達到全爐心的 1/2 以上，即全爐 157 束燃料每次於大修時將更換 79 束以上之燃料棒。如此之更換燃料數量除造成填換燃料工期、工作量延長，亦大幅增加後端營運成本，且每次更換全爐心 1/2 以上之燃料，即表示許多燃料必須於僅使用一次之狀態就退出爐心，如此之燃料成本將暴增。

為解決此問題，目前 Westinghouse 公司提出數個解決方案：

(1) 更改棒徑設計：目前國際上常使用之壓水式電廠燃料棒徑有所不同，第三核能發電廠採用之 VANTAGE+燃料為細棒設計，若未來更改使用粗棒設計可獲得更多燃料填充量，並可得到更多熱交換面積以減低單位面積之發熱量，以減少軸向功率異常之問題。故未來若需增加運轉週期且欲壓低後端及燃料成本，必須更改為粗棒設計之燃料。

(2) 爐水品質之提升：目前核三廠每個週期啟動之酸濃度約設定於 1800PPM，未來若爐心填充更多燃料，則若採用提高硼酸濃度進行壓制多餘的反應度屬不可能之選項，因目前營運狀態中，軸向功率偏差已是營運須考量的問題，故若提升硼酸濃度，恐將導致軸向功率偏差之問題更加嚴重，甚至導致軸向功率異常產生。

硼酸之週期初濃度應繼續保持約 1800PPM 不宜增加，此外燃料表面之積垢亦須加以考量，因目前週期長度僅 18 個月，若增加週期長度至 24 個月，即燃料表面之堆積時間立即增長 1/3，若爐水品質不佳將導致嚴重的積垢現象，嚴重時將導致熱傳不良，故爐水品質之提升為延長週期長度必要之對策。

(3) 燃料棒內可燃性毒物設計之變更：目前燃料棒內可燃毒物為採用噴鍍式可燃毒物 IFBA 設計，當燃料週期延長，僅使用增加噴鍍式可燃毒物進行壓制將造成噴鍍式可燃毒物燃料棒數目過多，或者噴鍍式可燃毒物濃度過高。濃度過高將導致燃料棒護套內產生之氣體量大幅提高，燃料棒內壓之上升問題需額外考量。若可燃毒物燃料棒數目較少，則因爐心分析程式針對爐心外圍輸出共率較低，故計算功率時此外圍之區域可忽略不計，但若使用大量可燃毒物燃料棒，則外圍功率將提升至不可忽略不計之量級，故須修改分析程式之設計。

另考量上述問題，噴鍍式可燃毒物之使用外亦可採用 IFBA+Gd 之設計，即同步採噴鍍式可燃毒物噴塗於燃料丸表面，並於燃料丸粉末中加入 Gd 之氧化物再進料丸之製造，即可使燃料由外到內皆分部有可燃毒物進行壓制，且燃料外圍之噴鍍式可燃毒物將於週期初燒完，而內部混合之 Gd 將可撐到週期末甚至下個週期使用，故若需提高週期長度至 24 個月，則引進 IFBA+Gd 之燃料設計為達成此目標之重要選項。

5. 壓水式反應器爐心線上監測軟體之發展現況：BEACON 爐心監測軟體協助電廠運轉及升降載

BEACON (Best Estimate Analysis of Core Operations – Nuclear) 爐心監測系統用於商業運轉的壓水式反應器，它最早是在 1989 年初次使用在西屋壓水式反應器的爐心線上監測軟體。此套軟體用於線上監測壓水式反應器爐心熱功率分布及熱限值監測，並已於 1994 年獲得美國核管會 USNRC(United States Nuclear Regulatory Commission)認證。

壓水式反應器的設計與沸水式反應器最大的不同在於沸水式反應器因爐內已設置固定式中子偵測儀器，故沸水式反應器無論在平日運轉或者停機狀態，皆可使用中子偵測儀器線上監測反應器爐心狀態，於控制室之盤面即可隨時發現反應器是否正常。

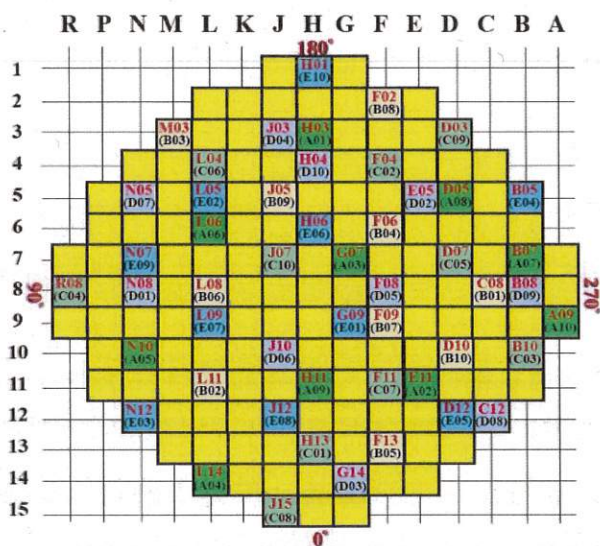
沸水式反應器之所以設置爐內中子監測系統是因為沸水式反應器爐心狀態同時存在液體水及氣體水，且其控制棒可依運轉員需求進行單根控制，因其較為複雜的爐心狀態，當初反應器設計時即於爐心內設置中子監測儀器，除線上隨時可監測爐心狀態外，因爐心內屬於高中子通量環境，因爐內中子監測儀器長期受中子照射而老化，沸水式反應器定期(約每個月一次)以 TIP 系統(Traversing Incore Probe)系統進行爐內中子監測儀器之校正，以確保爐內中子監測儀器之準確性。

壓水式反應器因反應爐無蒸氣產生，爐心狀態較沸水式反應器單純，且其控制棒運作模式為採用棒組控制模式，當運轉員操作控制棒時，控制棒為以組為單位進行操控，且控制棒組於爐心內之設置皆為對稱排列，故控制棒之移動將使爐內中子通量之改變仍保持其對稱性。壓水式反應器爐內未設置爐內中子監測系統，反應器於啟動階段時採用設置於反應爐爐外兩個方向(0° , 180° 方位)之爐外中子監測儀器進行監測。而平日遇運轉時僅使用於爐外的四個方向(45° , 135° , 225° , 315° 方位)設置爐外中子監測儀器，此四個監測儀器分為上下兩部分，即爐心狀態的監測於壓水式反應器而言，大約僅分為八個區塊(四個象限及上下兩部分)，此八塊即用於監測爐心的上下半部是否有功率分布偏差之問題，或者四個象限功率分布不均勻之問題。

另壓水式反應器每個月亦會以 MIC(moveable in-core sensor)系統進行爐內狀態之確認及爐外核儀之校正，此 MIC 系統與沸水式反應器之 TIP 系統作用類似，但因為壓水式反應器之爐內中子監測儀器僅有此 MIC 系統可供使用，故為防止儀器老化，且此類監測儀器於使用過後皆屬於高放射性廢棄物，更換及維修皆有一定之困難度，故此監測器不會長時間留

在爐內供平日運轉監測使用。

壓水式反應器僅靠爐外監測系統進行監測之設計於平日正常狀態運轉時雖已足夠，但遇到爐水水質不佳、事故或者特殊狀況.....等，壓水式反應器難以知道爐心內真實的中子通量其分布之詳細狀況，故為了補足這方面的不足，西屋公司設計 BEACON 線上監測軟體進行爐心狀態之監測，希望能更準確的分析爐心狀態。

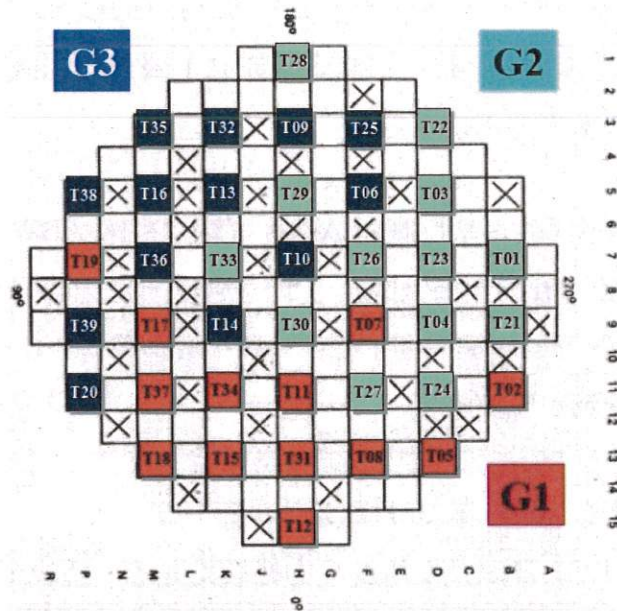


moveable in-core sensor 掃描之位置

BEACON 爐心監測系統主要採用上述之爐外中子偵測儀器、MIC 爐內中子監測儀器(定期校準)及 39 組燃料元件出口熱電偶進行反應爐狀態監測，其中 39 組燃料元件出口熱電偶之分布如壓水式反應器 39 組溫度監測元件分布情況圖所示。BEACON 於運作時，會先以 MIC 爐內中子監測儀器進行校準爐外中子監測儀器及讀取爐內中子分布狀態，讀取完畢後為避免偵檢頭老化，MIC 爐內中子監測儀器將會退出爐心，平時運轉時僅靠爐外中子偵測儀器以及 39 組燃料元件出口熱電偶之信號輸入伺服器後進行爐內狀態之計算。但由於 39 組燃料元件出口熱電偶輸入 BEACON 系統之信號為溫度之訊號，故系統計算出之爐內中子狀態屬於長期追蹤燃料出口溫度之推估值，爐內發生之暫態若無法使燃料出口水溫有所改變，則 BEACON 系統將不會記載到此一變化，故 BEACON 之系統雖稱為線上爐心監測系統，但並非如沸水式反應器之線上監測系統一樣的準確。

BEACON 爐心監測系統需要定期以 MIC 爐內中子監測系統進行校正，MIC 爐內中子監測系統因中子照射會造成老化，且有更換及維修專問題，但若電廠加裝 BEACON 爐心即時監測系統，則因為爐心狀態經長期之熱電偶訊號及爐外監測系統同時進行監控及相互校準，故加裝 BEACON 爐心即時監測系統之額外好處為 MIC 爐內中子監測儀器可減少校準使用

之次數，因 BEACON 爐心即時監測系統已提供熱電偶累積推估之爐內中子狀態，若與爐外中子監測儀器之讀值相比沒有太大差異時，即可確認爐外中子監測儀器並未因中子照射老化而影響準度，因更換及維修 MIC 爐內中子監測儀器之劑量較高，故能減少使用 MIC 爐內中子監測儀器進而使更換及維修 MIC 爐內中子監測儀器之次數減低，可有效減低電廠營運之成本。



壓水式反應器 39 組溫度監測元件分布情況

自 1989 年 BEACON 爐心即時監測系統正式使用在商業化之核能電廠至今，已使用約 20 年。目前最新版本已更新至第 7 版，而 BEACON 軟體之運作環境，須採用運行 SUSE Linux 之伺服器，第 7 版則僅可運行於 SLES 系統。因 BEACON 爐心即時監測系統需隨時蒐集 39 根爐心熱電偶之溫度訊號及爐外中子監測儀器之訊號，並將這些訊號加以計算以轉換為線上之反應器狀態，故此套系統所需運行之平台皆十分要求可靠度及穩定度，而 linux 伺服器之操作介面與操作習慣與平常使用電腦之經驗有很大的差異性，故若欲引進此套心即時監測系統，需思考是否需另找熟悉 SUSE Linux 伺服器操作介面之養護人負責養護工作。

BEACON 爐心即時監測系統亦可用於追蹤氫毒的狀態，反應器因故停機、反應器因故降載，氫毒之分布為再次啟動或升載策略之最大的考量。沸水式反應器之反應器各區塊狀態可經由爐內中子偵測儀器進行確，避免違反運轉之各項限值。壓水式反應器無爐內中子偵測儀器可供監測，故短時間停機啟動時若尚未到達零氫毒之狀態，則啟動時爐心內之氫毒狀態將成為運轉最大之挑戰，BEACON 軟體雖為採用偵測燃料出口溫度及爐外中子偵測儀器進行預測爐心狀態，但目前之版本據悉針對氫毒之預測於以安裝電廠測試準確性已達標準，可協助運轉人員更了解爐心內之狀態。

6. 國際核能電廠興建現況：世界第一部進步型壓水式反應器反應器 將於一年內於中國三門核電廠商轉

世界第一座商轉的 AP1000 核電廠--位於中國浙江省三門縣的三門核電廠(Sanmen Nuclear Power Station)--將於一年內商轉。此電廠為中國核工業集團公司(China National Nuclear Corporation-CNNC)所擁有，於 2005 年成立子公司三門核電有限公司，並將三門核電廠交其子公司施工及未來完工後之運轉。

三門核電廠採用第三代改良型反應器 AP1000(龍門電廠 ABWR 亦屬於第三代改良型反應器)，目前此廠規畫於 2020 年前完成共三期的建設，第一期同步與西屋公司完成技術轉移，共興建兩部機組。而第二與第三期工程完畢後，廠區將有六部 AP-1000 機組進行運轉。每部機組之總發電容量為 125 萬千瓦。

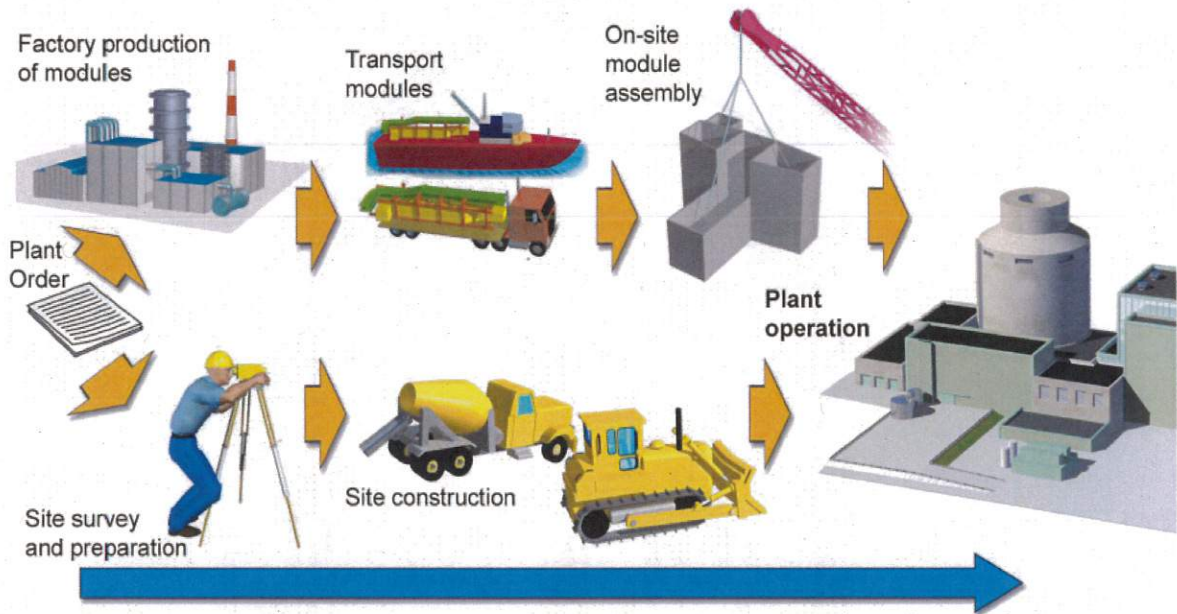
三門核電廠一號機於 2008 年 3 月開始，進行核島區動工。工程中因為反應爐冷卻泵(reactor cooling pump—RCP)測試及反應爐壓力槽製造延宕，造成至 2011 年達 20%之工程進度落後。此次會議中所提，目前三門電廠已趨完工，且預計將於一年內(2015 年中)成為世界第一部進行商轉的 AP-1000 機組。

目前三門核電廠廠區員工已近千人，廠內有宿舍、超市、游泳池、籃球場、高爾夫球場.....等，宛如一座生活機能健全之小城市，並設有飯店供來訪之親友住宿，其員工及員工家屬皆可遷入居住，雖該廠於市區亦另有宿舍供員工認購，但可供多數員工居住於廠內之設計，可使附近居民知道電廠員工對電廠的安全有信心，故願意遷居於此，如此可非常有效地減低反核聲浪。

AP-1000 的施工工法與傳統核電廠之施工方式有極大的不同，其採模組化施工方式，一般之核電廠將施工機具搬運至施工現場，即在現場進行整地施工，依各廠不同之地形地貌施工條件進行核電廠之興建。模組化之施工方式則將大部分可於異地施作之項目於異地先製作完成，再將組件搬運至廠址所在地進行組裝，如此可極度有效減少廠址施工機具之數量，使廠址有更大更寬闊之施工空間，而廠址僅負責組組裝工作，故於廠址遇到待解決之工程問題大多為組裝及測試所遇到之問題，而施工(如模組灌漿)所遇到之問題則大多於異地產生，故當異地遇到問題時，解決問題的同時，施工廠址無須停工等待問題解決，可繼續施作其他部分，待生產組件的問題解決後再運輸至現場組裝。

Modular Construction:

Allows More To Be Done in Parallel
Resulting in Shorter Construction Schedule



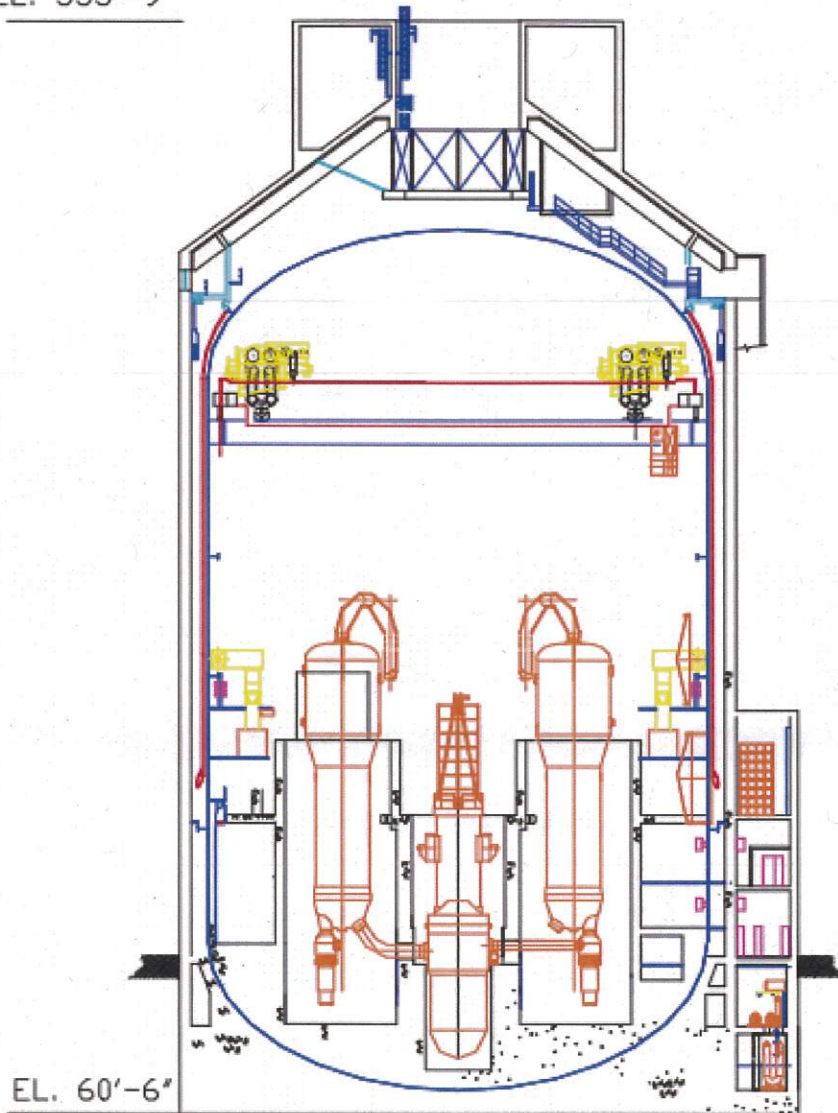
AP1000 採模組化施工方式

因模組化生產之規格標準化，故除該機型首幾次之組裝工作會遇到較大之組裝問題外，經數次組裝經驗後，未來各機組之組裝原廠家將更有組裝經驗，幾乎將很少再發生重大之組裝問題，且一有廠址之組裝問題，可透過攝影、拍照……等優先以線上會議方式進行解決，無須所有問題皆須等待原廠家工程師到場會勘後才能繼續施工，所節省下之施工時間、施工金額皆十分可觀。



三門核電廠圍阻體底部模組吊運

EL. 333'-9"



AP1000

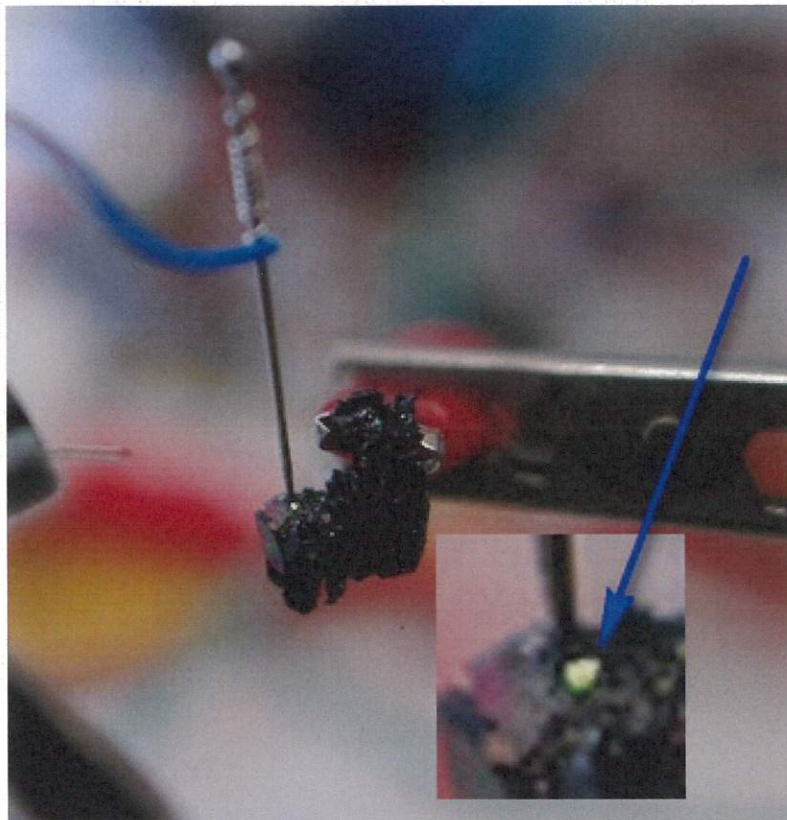
AP1000 圍阻體配置圖

以往核能電廠之圍阻體為核能機組土木施工最具挑戰性的部分，須全程於廠址施工、澆漿。AP1000 之圍阻體亦採部分模組化設計，於廠址僅需澆灌部分組件，其餘非必要於廠址澆灌組件則於異地生產後再運至廠址組裝。但因圍阻體組件之密度(金屬或鋼筋混凝土)即高，且因強度關係組件之體積十分巨大，因此模組化後之圍阻體組裝將動用到極大型之機具進行搬運。吊掛作業及運輸作業在一般建設工地皆屬較具危險性及挑戰性之工程，而模組化後之核能機組之吊掛作業及運輸作業則更具挑戰性並將更頻繁地執行。

7. 核能發電新型燃料護套之研發現況：碳化矽護套(SiC)目前西屋公司正積極研發之最新型護套

目前碳化矽在工業上的應用為亟需抗磨損及抗高溫之環境，例如高速軸承、剎車來令片、離合器……等，目前工業中對碳化矽的使用經驗，已對其耐受性及化學性質有極高的評價，而核子燃料所需承受之環境即為需抗高溫及抗磨損之環境。

1893 年法國化學家亨利·莫瓦桑 Henri Moissan 在研究取自亞利桑那州的隕石樣品時發現了罕見在自然條件下存在的碳化矽礦石。1907 年一個偶然的情況下，英國 Marconi 通訊公司的職員將莫桑石通以電壓，竟發現莫桑石樣本通電後發出綠黃及橙光，這是世界上最早的發光二極體。



碳化矽礦石通電後之發光狀況

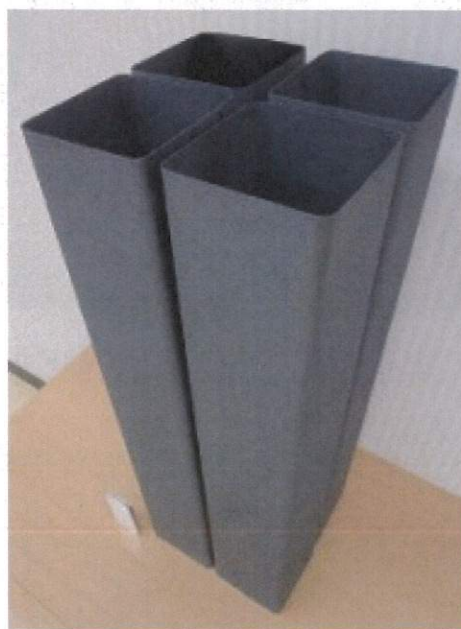
自然界中存在少量的碳化矽，人類由隕石中將碳化矽提煉出來稱莫桑石，其特點為：

- (1) 極高的硬度
- (2) 極高的耐熱性。

極高的硬度：目前爐心內燃料護套洩漏大部分肇因皆為爐屑磨損，若採用硬度如此高的護套，則目前已打撈起的爐屑中，幾乎不可能找到有可以對碳化矽護套造成磨損的材質，因此採用碳化矽做為未來核子燃料的護套，將可大大降低燃料護套洩漏的機率，碳化矽的摩氏硬度達到 9.5，玻璃僅約 6.5，而鑽石為 10，目前已知的材質除鑽石以外，幾乎很少硬度比碳化矽高的了。

極高的耐熱性：碳化矽的導熱係數 $2.3-4.9 \text{ watt/K-cm}$ ，雖較鋁合金低，但比較所有非金屬材質的熱導係數來說，碳化矽的導熱能力已經屬於非常高的了。而目前的核子燃料護套材質為鋁合金，其熱導係數會因為氧化而改變，但碳化矽護套的化性極為穩定，在碳化矽加溫觀察氧化狀態的厚度實驗中發現，碳化矽在空氣的環境中約 800°C 開始緩慢氧化， $1000^\circ\text{C}-1300^\circ\text{C}$ 與空氣接觸的表面生成二氧化矽的保護層，此保護層隨著加溫時間及加溫溫度緩慢的逐漸增厚，約 1500°C 時氧化膜厚度到達固定的厚度，並轉變為石英保護層，石英保護層的高溫化性更佳，當產生完整的石英保護層後只要溫度不再上升，護套表面即幾乎不再產生氧化反應，而實驗中石英的熔點約在 1650°C ，故當碳化矽做為核子燃料護套時，只要表面溫度不超過石英的熔點，被石英保護住的碳化矽護套即不會再繼續產生氧化，故此種護套可以承受極高的溫度，並安全限制放射性物質不致外釋。

若燃料表面溫度不幸超過 1650°C ，則表面披覆的矽元素保護層會逐漸溶解，接著內部碳化矽會裸露出來，裸露的碳化矽因高溫且與氧氣接觸將緩慢的氧化為二氧化矽，之後再漸漸還原為矽，此反應過程緩慢，僅隨溫度上升而反應速率有所增加。若未來將碳化矽應用於核燃料護套材質，將可有效解決於高溫時產生鋁水和反應之機會。



碳化矽已製成沸水式燃料匣並置入研究用反應器進行測試

碳化矽材質之護套特性類似陶瓷之特性，雖耐磨損、導熱佳，但因其延展性不如金屬好，故其遭受衝擊後恐有碎裂疑慮之特性則較需克服。但實際於工業上之使用經驗，碳化矽雖較脆，但不像陶瓷或玻璃般容易碎裂，其已應用在高性能跑車剎車系統上之高震動、高衝擊環境有非常好的機械性質，故應用於新型燃料護套時，除了可以幾乎完全免除爐削磨損之疑慮外，另因碳化矽化性極為優良，故僅需考慮燃料表面之熱沉積效應(水中雜質沉積於燃料表面造成導熱不佳或軸向功率偏移)，其餘如水質不佳易造成燃料腐蝕或新燃料之燃料護套表面氧化模建立等水化學疑慮，則在更換碳化矽陶瓷護套後幾乎無須擔心，故在碳化矽護套可在水化學之養護及護套離子沉積於管路造成人員劑量...等方面，得到許多好處。

另外，由於碳化矽容忍高溫的能力較鋁合金好上許多，且偏離核沸騰發生時，護套表面會較平常運轉衝高許多，但其溫度和碳化矽的實驗室測試出之耐受溫度相比(約 1650°C)，尚有十分大的保守度。因其與現今使用之鋁合金相比多了極大的保守度，故使用碳化矽護套於燃料設計、爐心設計、安全分析等模擬計算時，因大幅放寬之限制值，將可容許模擬計算之精確度無須到現在如此精確之等級，可節省需多模擬計算之時間，即可大幅節省燃料設計時之成本。

肆、結論、心得與建議事項

1. 我國第三核能發電廠從 2000 年初次引進噴鍍式可燃毒物燃料棒(IFBA)，運轉至今已將近 14 年，如國際上之運轉狀況，目前已較初期引進時逐步調整為高 IFBA 之運轉策略，近幾年第三核能發電廠針對軸向功率偏移現象皆有不錯之運轉狀況，故推論廠家針對此一技術應已掌握得十分良好，建議往後週期繼續依燃料供應廠家之運轉策略執行。
2. 如何有效使壓水式反應器燃料達到更高之燃耗值為提升壓水式核能電廠效率之重要目標，目前 IFBA 在壓水式電廠及 Gd 在沸水式電廠皆已有很好之運轉經驗，而 IFBA+Gd 之運轉則應為提升更高之燃耗值之有效方式，建議應持續追蹤國際上發展此燃料及國際上實際運用此燃料之經驗。
3. 壓水式反應器因爐心總體積較相同熱功率之沸水式反應器小很多，故在功率提升之改善方案上有雖較多之技術性限制，但國際上針對沸水式反應器之功率提升案已有成熟之對應技術。
本公司若需更有效率的使用核電資源及有效減少碳排放之問題，則除新建低碳排放及高效率之電廠外，功率提升亦屬於優先選項之一，因目前新建電廠之電源開發方式阻力甚大，故在已有之設備上實施改善案獲取更好之營運及經濟效率為極可行之方案。
4. 壓水式反應器延長運轉週期至 24 個月可有效提升運轉效率，目前美國已有非常多的核能機組採用週期長度為 24 個月之運轉方案，根據其運轉經驗之回饋，提高週期長度除能減少大修次數節省經費及提高有效發電時數外，目前已實施該方案之各機組運轉狀況皆十分良好，故建議本公司應持續追蹤並考量是否實施延長各核能機組之運轉週期。
5. 壓水式反應器爐心線上監測軟體(BEACON)實際運用在商用壓水式反應器已有 20 多年之使用經驗，此反應器爐心線上監測軟體發展至今已屬成熟之技術，安裝此監測軟體可幫助運轉人員更準確的了解爐心之各項狀況，但因其爐心中子分布狀況為採用水溫進行推估，且此次會議該軟體仍存在修正性之更新，故針對我國第三核能發電廠是否安裝此監測軟體則應再持續觀察。

6. 目前最受全球矚目之核能電廠興建現況為中國三門核電廠之 AP-1000 興建案，此電廠將為福島核子事故後第一個興建完成之新核能機組，機組之建設採模組化施工可有效減少建廠時間及經濟成本，目前中國大陸正蓬勃發展核能技術，除 AP1000 之機組建設外目前中國亦已同步執行該類型機組之技術轉移案，建議我國未來建廠時亦可考量是否同步執行技術轉移，以更了解核能電廠各項設計細節，期能使完工後之運轉更為有效率。
7. 目前世界各國核能發電廠正積極研發新材質燃料護套，期能較鋁合金護套運用於核能產業上有更好的表現。因碳化矽於機械發展之運用上已有十分良好之表現，且其生產技術亦逐漸成熟，故目前已有許多廠家投入碳化矽核燃料護套之研發，相信不久的將來即可使用在商業用反應器中。

碳化矽護套除了有優良的抗腐蝕、耐高溫極耐磨損外，其極高之耐受性將可使運轉餘裕增加許多，故未來若可採用碳化矽材質之護套，將幾乎可完全擺脫護套洩漏之問題，另節省之電腦分析時數將可在燃料成本上有顯著的節約。

伍、參考資料

1. 燃料上部積垢現象
第三核能發電廠 PWRT 練教材
2. MS1 Cycle14、MS2 Cycle21 燃耗及硼酸濃度
Westinghouse NDR reort
3. 圍阻體內蒸汽產生器之吊運
<http://www.power-eng.com/articles/slideshow/2013/july/2009-projects-of-the-year-award-winners/pg007.html>
4. moveable in-core sensor 掃描之位置
第三核能發電廠 PWRT 練教材
5. 壓水式反應器 39 組溫度監測元件分布情況
第三核能發電廠 PWRT 練教材
6. AP1000 採模組化施工方式
<http://www.dailytech.com/article.aspx?newsid=23588>
7. 三門核電廠圍阻體底部模組吊運
<http://atominfo.ru/newse/l0151.htm>
8. AP1000 圍阻體配置圖
<http://www.power-technology.com/projects/westinghouseap100/>
9. 碳化矽礦石通電後之發光狀況
<http://bio-tec.ch/de/article/history>
10. 碳化矽已製成沸水式燃料匣並置入研究用反應器進行測試
http://www.shimbun.denki.or.jp/news/industry/20140704_01.html

