

出國報告(出國類別：實習)

進步型沸水式反應器電廠起動測試經驗 蒐集與研習

服務機關：台灣電力公司第四核能發電廠

姓名職稱：林盈吉 核能工程師

派赴國家：日本

出國期間：96年12月10~22日

報告日期：97年02月14日

出國報告審核表

出國報告名稱：進步型沸水式反應器電廠起動測試經驗蒐集與研習		
出國人姓名 (2人以上,以1人為代表)	職稱	服務單位
林盈吉	核能工程師	臺灣電力公司第四核能發電廠
出國期間：96年12月10日至96年12月22日		報告繳交日期：97年2月14日
出國計畫主辦機關審核意見	<input checked="" type="checkbox"/> 1. 依限繳交出國報告 <input checked="" type="checkbox"/> 2. 格式完整(本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」) <input checked="" type="checkbox"/> 3. 內容充實完備。 <input checked="" type="checkbox"/> 4. 建議具參考價值 <input checked="" type="checkbox"/> 5. 送本機關參考或研辦 <input type="checkbox"/> 6. 送上級機關參考 <input type="checkbox"/> 7. 退回補正,原因： <input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔 <input checked="" type="checkbox"/> 8. 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"/> 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同人進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> 9. 其他處理意見及方式：	
	<input type="checkbox"/> 1. 同意主辦機關審核意見 <input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____ (填寫審核意見編號) <input type="checkbox"/> 2. 退回補正,原因：_____ <input type="checkbox"/> 3. 其他處理意見：	
層轉機關審核意見		

說明：

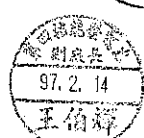
- 一、 出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、 各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、 審核作業應於報告提出後二個月內完成。

報告人：

單位：

主管處

總經理：



核副總經理
施副總經理
蕭專總



QP - 08 - 00 F06



行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：進步型沸水式反應器電廠起動測試經驗蒐集與研習

頁數 25 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話 /臺灣電力公司/陳德隆/23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

林盈吉/臺灣電力公司/第四核能發電廠/核能工程師/24905990 分機 4021

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：96/12/10 - 96/12/22

出國地區：日本

報告日期：97/02/14

分類號/目

關鍵詞：進步型沸水式反應器 (ABWR)、起動測試 (Startup Test)

內容摘要：(二百至三百字)

- 一、核四廠採用進步型沸水式反應器，但本公司並無此類型機組起動測試之經驗，鑑於起動測試為核四廠順利商轉之關鍵工作之一，為使機組起動測試工作得以順利推行，必需有最佳化之測試時程，故赴國外具進步型沸水式反應器電廠施工與測試經驗之相關廠家，獲取其起動測試經驗。
- 二、出國任務行程主要為赴日本兩家具進步型沸水式反應器 (ABWR) 電廠施工與測試經驗之主要核能電廠供應商：東芝公司與日立公司，蒐集起動測試相關資料，瞭解起動測試實績；並研習起動測試計畫、測試排程概念，並請教測試執行管控經驗，另並就核四廠目前進行測試時程規劃時所發現之問題向相關人員請益。
- 三、經參訪與研討後，獲取日本 ABWR 機組竣工經驗、竣工測試概念、測試工期、起動測試項目與階段、起動測試排程經驗、起動測試組織與執行等相關起動測試相關資訊，可供核四廠起動測試規劃與排程之參考。

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

目 錄

章節	頁次
一、 出國任務：	1
二、 行程紀要：	2
三、 研習心得	6
四、 建議事項	23

一、 出國任務：

(一)、 緣起：

1. 核四廠採用進步型沸水式反應器 (Advanced Boiler Water Reactor, ABWR)，機組起動測試由核四廠自行規劃與執行。由於本公司並無此類型機組起動測試之經驗，故核四廠除參考核一、二廠測試經驗，並以日本 (目前世界上僅有具備 ABWR 起動測試經驗的國家) ABWR 機組 (柏崎刈羽電廠六號機與七號機、濱岡電廠五號機與志賀電廠二號機) 為標竿，規劃於九個月完成起動測試。
2. 鑑於起動測試為核四廠順利商轉之關鍵工作之一，為使機組起動測試工作得以順利推行，必需有最佳化之測試時程，及有效整合與協調測試工作介面，且現階段正值審查起動測試測試程序書與規劃測試時程等前置工作，亟需參考國外廠家之規劃與測試經驗，實有必要赴國外具進步型沸水式反應器電廠施工與測試經驗之相關廠家，以獲取其起動測試經驗。

(二)、 目的：

前往具有進步型沸水式反應器電廠施工與測試經驗之相關廠家，蒐集與研習其起動測試經驗，瞭解其測試排程概念與測試執行管控經驗，以建立核四廠起動測試自行規劃與排程能力，確保起動測試順利完成。

(三)、 任務內容：

蒐集起動測試相關資料，瞭解起動測試實績，並研習起動測試計畫與測試排程概念，以及請教測試執行管控經驗。另並就核四廠目前進行測試時程規劃時所發現之問題向相關人員請益。

二、 行程紀要：

此次出國期間為 96 年 12 月 10 日至 12 月 22 日，共 13 日，任務行程主要為赴日本兩家具進步型沸水式反應器電廠施工與測試經驗之主要核能電廠供應商：東芝公司與日立公司。行程如下：

期間	地點	行程摘要
12 月 10 日		往程（台北→橫濱）
12 月 11 日～12 月 12 日	東芝公司 （橫濱）	1. 瞭解東芝公司核能技術發展現況 2. 瞭解核能電廠建廠設計概念 3. 瞭解核能電廠改善與維護技術之最新發展
12 月 13 日～12 月 14 日	日立公司 （東京）	1. 瞭解起動測試實績 2. 研習廢料系統起動測試經驗 3. 研習起動測試排程經驗
12 月 15 日～12 月 16 日		資料整理與往程
12 月 17 日～12 月 21 日	東芝公司 （橫濱）	1. 瞭解核能電廠竣工測試管理概念 2. 瞭解起動測試實績 3. 研習起動測試組織與計畫 4. 研習起動測試排程與測試結果 5. 順道參訪 IHI 公司
12 月 22 日		返程（橫濱→台北）

（一）、參訪東芝公司

1. 東芝公司之參訪行程，主要係由東芝公司核能業務部門 Hiroshi Yonekura 先生及 Fusao Goda 先生安排以及陪同，至位於橫濱之磯子核能工程中心（Isogo Nuclear Engineering Center, IEC）進行參訪與研習。
2. 於磯子核能工程中心參訪期間，會見管理階層與資深工程技術人員，包括磯子核能工程設計中心所長 Fuyuki Saito 先生、放射性

廢料暨水處理部門 Masaaki Ebata 先生、以及儀控測試部門之 Takeshi Hasegawa 先生、試運轉與起動測試部門 Satoshi Mizuno 先生、Tsuneo Kurosawa 先生等幾位有關負責測試之工程人員，經由簡報、討論、資料研閱等方式，藉以瞭解東芝公司之起動測試規劃經驗與測試實績，研習起動測試計畫與排程概念，並交換起動測試排程心得。

3. 參訪期間研討之議題如下：
 - (1) 東芝公司核能部門組織、發展現況及未來展望
 - (2) 東芝公司廢料處理技術之發展
 - (3) ABWR 建廠竣工測試概念
 - (4) 測試時程管控
 - (5) 測試介面管理
 - (6) 測試組織
 - (7) 系統移交經驗
 - (8) 儀控系統測試規劃經驗
 - (9) 起動測試時程規劃與管控
 - (10) 反應器內部組件維護與核燃料使用經驗
4. 研討之餘，東芝安排設計部門人員介紹該公司核能電廠 3 維電腦輔助設計工具 (3D-CAD) 的開發與應用實例，以及 NUPDM (NUclear Plant Data Management system) 核能電廠設計資料整合管理之概念與實施現況。另並安排參觀磯子核能工程中心之展覽館。
5. 核能電廠改善與維護技術為磯子中心重要研發技術之一，東芝亦安排至磯子中心研發實驗室參觀，由研發部門人員介紹反應器內部組件檢測與維護技術之最新發展。
6. 反應器壓力槽 (Reactor Pressure Vessel, RPV) 水壓試驗為核四廠竣工測試中之重要里程碑之一，為能增進對於 RPV 特性以及水壓試驗之瞭解，以提供測試規劃之參考，在東芝公司安排下，至鄰近磯子中心之核四廠二號機反應器壓力槽製造商 IHI 公司進行參訪。

7. 參訪 IHI 公司時，由業務部門 Toshihiro Yamakawa 先生、Shunji Miyajama 先生，與工程部門 Shigeki Kataoka 先生、Junichi Takano 先生等人說明該公司業務發展概況及核四廠反應器壓力槽製造過程，以及壓力槽製造工廠設備現況，並觀看與核四廠同為 ABWR 之柏崎刈羽核能電廠六號機反應爐壓力槽製造過程紀錄片。IHI 亦安排至工廠參觀，以對於反應器壓力槽之製造與工廠測試有更進一步的瞭解，並在工程人員帶領下，見識到該工廠所生產重達 2000 噸化工廠壓力槽之成品。之後並與工程人員討論核四廠反應器壓力槽之溫度壓力限制報告 (Pressure-Temperature Limits Report, PTLR)、反應器壓力槽內部組件安裝，以及水壓試驗等議題。

(二)、參訪日立公司

1. 參訪日立公司期間，經由龍門計畫經理 Hisashi Souma 先生的安排，會見日立公司原子力國際本部總計畫經理 Ryu Masuoka 先生，龍門計畫經理 Hiroo Igarashi 先生、廢料處理設計部門 Satoshi Hirayama 先生、大浦正人先生、技師 Tooru Kawasaki 先生、品質保證部門江幡久男先生、齋藤利浩先生、Yoshihiro Nishikino 先生、Hirotugu Miyagi 先生等廢料系統設計部門與測試部門人員。
2. 與日立公司人員研討之主題包括：
 - (1) ABWR 建廠時程管控經驗
 - (2) 測試介面管理
 - (3) 起動測試時程規劃與管控經驗
 - (4) 起動測試期間停機檢修項目
 - (5) 暫態測試經驗
 - (6) 起動中子源使用經驗
 - (7) 核四廠廢料系統測試過程
3. 由於日立公司為核四廠廢料處理系統與水處理系統供應商，此行亦與日立方面討論廢料系統試運轉測試有關儀控連鎖測試，以及起動測試程序書編寫與送審之議題。日立方面同意提供試運轉程

序書儀控連鎖測試範例，起動測試程序書則將依本公司之要求，於 97 年 3 月 31 日前依前版審查意見修編發行新版送本公司審查，並於本公司同意送審內容後提供可編輯之電子檔。

4. 日立公司另亦安排觀看廢料固化試驗之紀錄影片，並參觀廢料固化設備之測試設施。

三、 研習心得

(一)、 ABWR 竣工經驗

1. 日本為工業大國，但因能源自給率較低，為滿足其能源需求，大量採用核能發電（55 部機組運轉中，2 部機組興建中，佔全國發電比 30%），並積極參與核能工業之研究發展，同時也是全世界最早採用 ABWR 核能機組並加入商轉的國家。目前在日本已有東京電力公司柏崎刈羽核能電廠第六、七號機（K-6、K-7）、中部電力公司濱岡核能電廠五號機（H-5）及北陸電力公司志賀核能電廠二號機（S-2）等 4 部 ABWR 核能機組在商轉，且營運績效良好；另有中國電力公司的島根 3 號機在興建中。建廠實績如表一所示。
2. ABWR 為奇異公司首先發展之設計，日本為建立 ABWR 電廠之自主建廠能力，自柏崎刈羽電廠六、七號機計畫始，由東芝公司、日立公司與奇異公司共同合作投資承包該項計畫，負責主要設計，六號機核蒸汽供給系統（NSSS）由東芝公司提供設備，汽機發電機部分（BOP）則由奇異公司與日立公司合作提供設備；七號機則交換，日立公司負責提供核蒸汽供給系統設備，奇異公司與東芝公司合作提供汽機發電機相關設備。

表一 日本 ABWR 機組建廠工期

機組	額定功率 (MWe)	建廠工期 *1 (months)	商轉日期	設計建造主承包商	NSSS 設備供應商	BOP 設備供應商
K-6	1356	51	1996/11	Joint Venture (GE/ Toshiba/ Hitachi)	Toshiba	Hitachi /GE
K-7	1356	51.5	1997/07		Hitachi	Toshiba /GE
H-5	1380	56	2005/01	Toshiba	Toshiba	Hitachi
S-2	1358	56	2006/03	Hitachi	Hitachi	Hitachi

K: 柏崎刈羽電廠 H: 濱岡電廠 S: 志賀電廠 *1: 岩盤探勘至商業運轉

3. 奇異公司與日本兩大工業集團合作，藉由日方強大的重工業製造

能力以及多年來持續參與 BWR 建廠之經驗，將其得意之作 ABWR 設計順利成功商轉，得以向核能業界展示其寶刀未老，在第 3 代反應器爭奪戰中搶先一步取得商轉實績。日本方面則透過交互合作方式，成功獲得 ABWR 技術轉移，在之後的 AWBR 建廠計畫中，則已全權掌握設計之核心技術，濱岡核能電廠五號機由東芝公司得標，自力負責設計以及核島區設備，志賀核能電廠二號機則由日立公司得標，自力負責整廠之設計與建造。

4. 在功能強大的 3D-CAD 設計工具輔佐下所建立的完善設計，配合先進工法的採用，如開頂式 (Open Top) 施工、模組施工、全天候工法、大型吊車等，加上嚴謹的施工管控，使日本近年來新建之 4 座 ABWR 機組，自岩盤探勘至商業運轉，均得以在 56 個月以內的時間完工，扣除試運轉與起動試驗，實際施工期間（初次混凝土澆置至初次加壓）約僅需 39 個月。

(二)、竣工測試概念

1. 依據我國相關核能法規，並參照美國 RG 1.68 之概念，核四廠之初始測試 (Initial Test) 包括施工後測試 (Post Construction Test, PCT)，試運轉測試 (Preoperational Test) 與起動測試 (Startup Test) 三階段。設備組件施工完成後進行施工後測試，系統移交至測試單位後進行試運轉測試。燃料裝填之後開始進行起動測試。初始測試的目的在於：
 - (1) 確認施工已完成且可接受。
 - (2) 證明系統、結構與組件之能力符合要求。
 - (3) 安全且有效率的裝填核燃料。
 - (4) 驗證機組能耐預期暫態與事故。
 - (5) 驗證運轉員了解程序書與電廠設備，可安全地運轉電廠。
 - (6) 將機組帶到滿載並維持功率運轉。
2. 為確保機組運作正常可靠且安全無虞，日本核能機組在施工完成後至正式商轉之前有一連串的「試驗」與「檢查」之竣工測試過

程，類似於核四廠之「初始測試」(Initial Test)，概念相同，只是部分說法有些許出入。

3. 日方所謂「試驗」一般稱為「試運轉」，是指對組件設備於安裝、組立工程結束後的實際操作，試驗是否依設計運作，確認安全性與可靠性；而「檢查」是指政府主管機關所執行之「使用前檢查」，係在確認機組施工符合當初提送主管機關之計畫及安全功能等要求。
4. 「試運轉」包含「系統試驗」與「起動試驗」兩階段。「系統試驗」即所謂『Preoperational Test』，於加壓受電後開始進行直到燃料裝填前完成，對於各系統實際操作性能的確證。「起動試驗」即為『Startup Test』，為燃料裝填開始進行，以確認機組整體運轉特性與安全性。
5. 系統內各組件設備於施工安裝後，會分別進行安裝後的測試，項目大概有機械組件測試、電氣特性、信號查對、儀控迴路測試、儀器校正，以及水壓測試與管路沖洗等。
6. 「試運轉」開始的定義明確，以初次受電(275kV 加壓至廠內 6.9kV 匯流排)後即開始進行系統試驗，彼時主控制室以及數位儀控系統(DCIS)盤面均已安裝完工並近乎完成測試，以便於 6.9kV 匯流排受電後即可開始大量進行系統試驗。惟核四廠試運轉開始的條件除了初次受電(161kV 加壓)外，尚需 DCIS 可用(盤面完成 PCT 測試)，以及支援系統(海水、冷卻水、寒水、水處理、空氣等相關系統)必須已移交等，做為進行試運轉測試之先備條件。
7. 在「系統試驗」之前，亦有所謂系統移交(System Turnover 或 System Transfer)，但由於採用統包施工，此時的移交僅是由承包廠商內之「機械」與「儀電」等施工部門移交給「試運轉」部門，以確定施工完成，可進行試運轉工作，電力公司施工單位亦有對應的部門參與移交的程序，審查相關文件的完整性。以個別系統的觀點來看，施工完成與進行試運轉的分界點在於系統移交，用以區別施工部門和測試部門的權責。而直到整個竣工測試

完成後，機組才由施工單位（廠商）移交給運轉單位（電力公司），開始商業運轉。

（三）、測試工期

1. 依據 RG 1.68 之要求，為保留充足的時間以依序合理的完成所有測試，試運轉測試至少要排 9 個月的測試期，起動測試部分至少需 3 個月的測試期。
2. 日本 ABWR 機組之系統試驗與起動試驗之工期如表二所示，系統試驗（試運轉測試）約 10 至 13 個月，起動試驗約在 9 至 11 個月完成。相較於核四廠，試運轉測試的目標時程為 9 個月，較日本最佳紀錄為短，惟由於核四廠施工現況的複雜性，161kV 加壓後尚未達到可以開始進行試運轉的先備條件，為能依目標達成燃料裝填之里程碑，可供試運轉的時間緊迫，現階段實應加緊規劃推動相關準備工作。

表二 日本 ABWR 試運轉/起動測試工期

機組	系統試驗 (Preoperational Test)工期 *1 (月)	起動試驗 (Startup Test)			
		工期 *2 (月)	測試項數 (起動試驗+機能試驗)	非計畫性 停機次數	非計畫性 停機原因
K-6	10	11.5	87 (42+45)	2	1. Fuel leak 2. RIP Trip
K-7	12	9	84 (42+42)	1	低壓汽機異音
H-5	13	11	79 (40+39)	1	飼水控制問題, 反應器高水位
S-2	12	10.5	81 (39+42)	1	RCIC 蒸汽供給閥不開

*1: 初次受電至燃料裝填 *2: 燃料裝填至商業運轉

3. 核四廠起動測試的目標時程規劃為 9 個月，與日本起動測試工期之最短紀錄相同，但日方在規劃階段以約 240 天（k-6/7）為測試時程之目標，測試工期雖因非計畫性停機而超出預定工期，但在

嚴密的計畫、精準的管控及完備的技術支援下，仍能在合理的 11 個月完成起動測試。為能如期達成 9 個月完成起動測試的目標，核四廠於測試規劃階段應以 240 天以內測試排程目標，以保留測試時發生計畫外狀況時之因應時間。

(四)、起動測試項目

1. 起動測試係指從初始核子燃料裝填開始，至機組保證試驗完成為止的測試過程。起動測試目的包括：
 - (1) 確認設計基準；
 - (2) 儘可能證明機組的運轉與反應如設計上對預期暫態與假設事故的要求；
 - (3) 機組保證測試如合約與系統和設備規範的要求。
2. 日本 ABWR 之起動試驗（起動測試）約有 80 項，可分為「起動試驗」與「機組機能試驗」兩種。「起動試驗」是指以機組安全性確認為主軸的測試，爐內泵（RIP）跳脫測試、主蒸汽隔離閥（MSIV）全關試驗等；「機組機能試驗」是指設備單體性能、機能及設定值的確認為主軸的測試，如選擇控制棒插入（SCRR1）試驗、乾燥器/汽水分離器性能試驗。
3. 「起動試驗」與「機組機能試驗」的測試項目數如表二所示，一般來說，各機組「起動試驗」的項目類同，大致包括爐心特性、中子偵測儀器與控制棒系統性能、緊急冷卻系統性能、壓力/水位/流量等控制系統、機組暫態測試，以及汽機發電機性能等，有 39 大項，但因各廠家為了便於分別或執行之目的，對於部分測試項目再區分細項，故項目數略有差異。「機組機能試驗」項目各機組均類似，大多為電廠配套系統性能測試，如空調系統、冷凝器、汽水分離再熱器等，但執行的項目則視各廠商於合約中所要求驗證的機能而定，有些特性驗證僅需在同型機組執行過即可，如爐內流動振動測定（Flow Induce Vibration），從 K-6 以後的 ABWR 機組就不再執行了，另部分爐心臨界（Partial Core SDM），因在

K-6/7 起動測試後對於爐心特性已獲得充分的掌握，故後續 ABWR 機組亦無需執行。在合理的保守性下，減少不必要的測試，也是降低機組風險。

4. 核四廠起動測試項目共有 83 項，其中 NSSS 部分有 46 項，BOP 部分有 37 項，另依據 RG 1.68 中所述起動測試所必備之項目，篩選出屬安全有關的測試有 53 項，其測試結果須提送原子能委員會審查，這些項目除所有 NSSS 的測試項目外，尚包括液體廢料系統、廢氣系統測試。
5. 經比對後，核四廠起動測試項目與日本 ABWR 機組測試項目略有差異，但核四廠起動測試大致均涵蓋了日本之「起動試驗」項目，「機組機能試驗」項目則只有部分項目涵蓋，雙方明顯差異之處如下，至於差異處之合理性尚待深入確認：
 - (1) 日方並未將廢料相關系統之起動測試納入機組測試項目中。
 - (2) 爐心特性方面日方有所謂「冷溫臨界測定(局所臨界)」、「有 Xe 時臨界測定」、「溫度係數測定」等測試項目。
 - (3) 日方有爐心熱限值監測裝置(ATLM、MRBM)特性測試、RIP-ASD 切換試驗、選擇控制棒插入(SCRRI)、自然循環試驗、乾井(Dry Well)充氮氣試驗等測試項目。
 - (4) 我方有「Concrete Penetration Temperature Survey」及「Loose Parts Monitoring System Baseline Data」測試項目。

(五)、起動測試階段

1. 日本 ABWR 起動試驗階段區分為下列階段：
 - (1) 大氣壓：燃料裝填及反應器開蓋階段之測試。
 - (2) 核加熱：機組起動至額定壓力與溫度。
 - (3) 功率階段試驗：區分為 20%、50%、75%、100% 電氣出力(發電功率)之測試階段。
 - (4) 保證試驗：連續 100 小時全功率運轉。

2. 各測試階段之典型測試項目如下：
 - (1) 大氣壓：燃料裝填試驗、停機餘裕試驗、控制棒驅動系統試驗、主汽機保護裝置試驗、發電機測試
 - (2) 核加熱：溫度係數測定、控制棒驅動系統試驗、反應器隔離冷卻（RCIC）系統試驗
 - (3) 20%出力：APRM 校正、主汽機保護裝置試驗、發電機棄載試驗、外部電源喪失試驗及手動急停數據收集
 - (4) 50%出力：APRM 校正、汽機旁通閥容量測定、爐心流量校準、計畫性反應器急停測試及發電機棄載試驗
 - (5) 75%出力：APRM 校正、RIP 跳脫試驗、冷凝水泵跳脫測試、爐心流量校準、RIP-ASD 待機切換測試、汽機閥關閉測試、壓力調整器試驗、飼水控制試驗、發電機棄載試驗
 - (6) 100%出力：APRM 校正、爐心流量校準、RIP 跳脫試驗、壓力控制系統測試、飼水系統測試、發電機棄載試驗、再循環流量控制系統試驗、爐心穩定性試驗、RIP-ASD 待機切換試驗、汽機閥關閉試驗、主蒸汽隔離閥全閉試驗
 - (7) 保證試驗：連續 100 小時全功率運轉驗證
3. 在試驗排程中所區分的試驗階段是以電氣出力來區分，但以個別試驗項目所需之測試條件的觀點來看，功率階段試驗以爐心功率及流量的不同，區分為 6 個測試條件（Test Condition），各測試條件定義的概念如表三所示。
4. 核四廠之起動測試階段區分為如下所述：
 - (1) 開蓋測試（Open Vessel, OV）
 - (2) 加熱測試（爐心功率約 5%）（Heatup, HU）
 - (3) 爐心功率由約 5%至 100%之功率遞升，可再區分為低功率階段（Low Power, LP）、中功率階段（Mid Power, MP）與高功率階段（High Power, HP）
 - (4) 保證試驗（Warranty Run, WR）各階段之詳細定義如表四所示。

表三 日本 ABWR 機組起動試驗測試條件區分概念

測試條件	描述
大氣壓 (OV)	反應器開蓋
核加熱 (HU)	機組起動至額定壓力與溫度
TC1	低功率低流量：RIP 在最低轉速，爐心功率 25%
TC2	低功率低流量：75% 流量控制線 (FCL)，爐心功率 50%
TC3	低功率高流量：75% 流量控制線，爐心功率 75% (爐心流量 100%)
TC4	高功率低流量：100% 流量控制線，RIP 在最低轉速
TC5	高功率低流量：100% 流量控制線，爐心功率 65%
TC6	高功率高流量：100% 流量控制線，爐心功率 100% (爐心流量 100%)

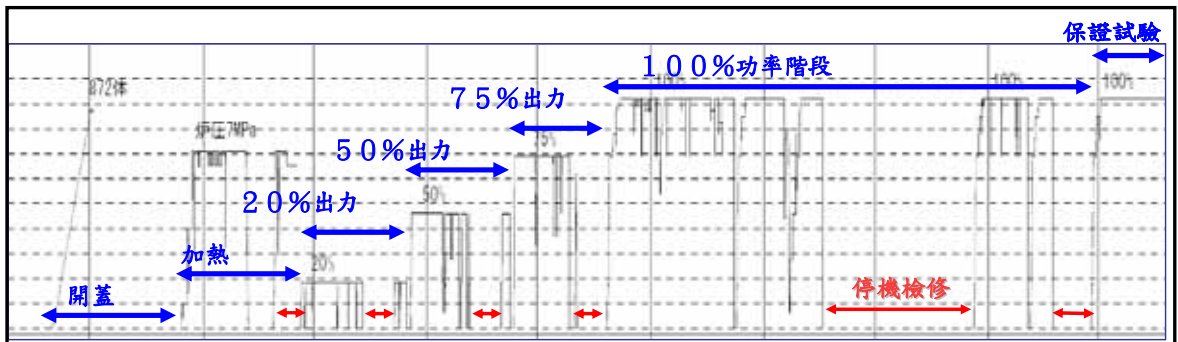
表四 核四廠起動測試階段

測試階段 (Plateau)	描述
開蓋測試 (OV)	爐蓋移除，將燃料開始裝填進入反應爐，直至燃料全裝填的冷爐狀態。
加熱階段 (HU)	核加熱，從大氣壓或 0kPa 至 RPV 達額定爐壓與溫度，但功率小於 5%。
低功率階段 (LP)	在 5%~25%額定功率間，RIP 轉速是在最低轉速 10%內。
中功率階段 (MP)	在 50%~75%棒負載線，RIP 的轉速是在最低與額定間。
高功率階段 (HP)	在執照分析範圍至 100%棒負載線下 5%，RIP 的轉速是在最低與額定間；在額定流量以上而低於最大流量時，在 100%負載下 0~5%間。
保證試驗	100 小時滿載運轉

5. 日本 ABWR 機組以爐心功率及流量控制線（即棒負載線）或流量將測試條件清楚界定在功率－流量圖（Power－Flow Map）上的某一點上，在測試的時機上較為明確，時程安排容易區分。而核四廠採用之測試階段係為奇異公司所提供之起動測試計畫所定義，其特點為低、中、高功率階段為功率－流量圖上之特定區域，故在測試的時機安排上具有彈性，但是在測試程序書中仍須清楚說明適合測試的功率與流量，以利於測試順序排定。

(六)、起動測試時程

1. 日方廠家建立起動試驗時程的順序是先確定測試項目與測試條件，並需考量管制單位使用前檢查之項目，再分別排定各測試階段之測試時程，另外再考量測試階段中計畫性停機檢修項目及所需時間，最後再組合成起動測試整體時程，如圖一所示，在規劃初期以 8 個月為工期目標，測試時程之排定會參照過去機組測試經驗而調整，但基本上各廠家應有一排程模版可供套用。



圖一 起動測試整體時程概念圖

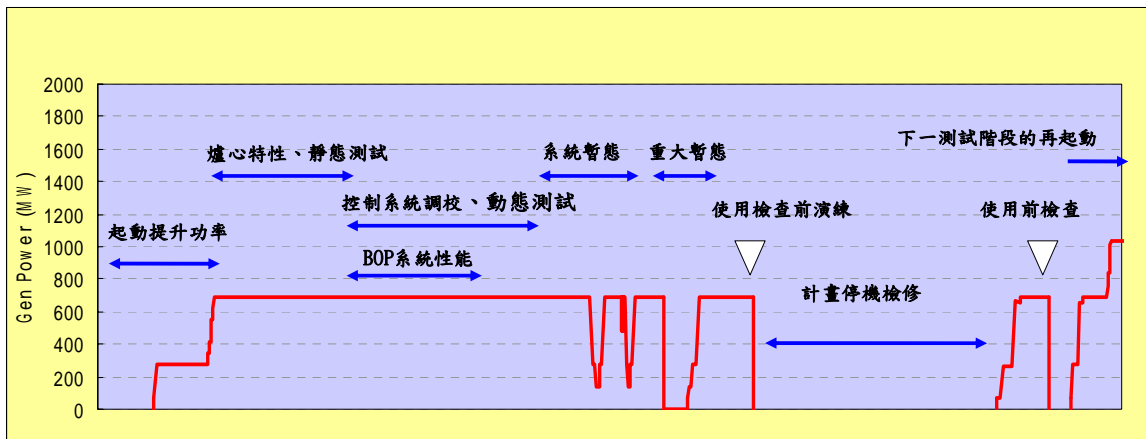
2. 各測試階段完成後之計畫性停機檢修項目，大致上為各項設備檢查與清理，以排除在測試中所發現的設備異常狀況，並確保機組在後續測試中正常運轉。階段後停機檢修之要徑工作概述如下：
- (1) 在大氣壓與核加熱階段之間為連續進行並無檢修。
 - (2) 核加熱與 20% 出力階段為冷凝器內部檢查與清理，以及儀器

之偵測試驗。

(3) 50% 與 75% 出力階段除前述項目外，尚有移除飼水泵與冷凝水泵臨時濾網。

(4) 100% 出力階段會安排兩次停機檢修，其中一次時間較長，因各設備從試運轉開始運轉至此時，應已接近維護保養之週期，檢修項目類似機組大修，有柴油發電機檢修、泵與熱交換器維護保養、冷凝器內部檢查與清理，以及儀器之偵測試驗等。另一次短期停機檢修主要工作為移除暫態測試記錄儀器等。

3. 起動測試執行的順序基本上由低功率測試依序進行至高功率測試。在各個測試階段中先進行靜態測試，如爐心性能分析、核儀校正、基礎數據測定；接著為動態測試，如控制系統調校；最後為暫態測試，先進行系統的小暫態測試，如 RIP 跳脫，然後才是機組重大暫態測試，如汽機跳脫測試。各起動測試階段中測試順序時程如圖二所示。



圖二 各階段起動測試時程概念圖

4. 日本 ABWR 機組起動測試時程各階段測試與停機時間之比較如表四所示。

表四 日本 ABWR 機組起動測試各階段時程比較表

測試階段		K6/7 (plan)	K-6(actual)	K-7(actual)	H-5 (plan)	H-5(actual)	S-2(actual)
OV	測試時間	28	23	28	35	39	34
	停機時間	0	0	0	0	0	0
	總共時間	28	23	28	35	39	34
HU	測試時間	22	29	19	27	26	24
	停機時間 1	6	6	18	6	6	8
	總共時間	28	35	37	33	32	32
20%	測試時間	21	26	19	23	24	26
	停機時間 2	15	6	14	7	5	8
	計畫外停機	--	17	0	--	0	0
	總共時間	36	49	33	30	29	34
50%	測試時間	19	18	17	21	26	23
	停機時間 3	6	6	6	7	5	8
	總共時間	25	24	23	28	31	31
75%	測試時間	17	16	17	18	20	21
	停機時間 4	0	0	10	7	5	8
	總共時間	17	40	27	25	25	29
100%	測試時間	52	42	57	62+24	59+31	43+11+16
	停機時間 5	24	27	30	38	36	39
	停機時間 6	5	7	4	8	11	3
	計畫外停機	--	0	8	--	0	0
	總共時間	81	76	99	132	137	112
WR	測試時間	17	82	19	46	42	35
	停機時間	0	0	0	0	0	0
	計畫外停機	--	39	0	--	0	0
	總共時間	17	121	19	46	42	35
合計	測試時間	176	236	176	256	267	233
	停機時間	56	52	82	73	68	74
	計畫外停機	--	56	8	--	0	
	總共時間	232	344	266	329	335	307

5. 日方在起動測試時程安排原則是每週工作六天，週日與年假為非工作日，每天工作 12 小時（08:00~20:00）進行規劃，但燃料裝填與加熱階段初期為每日 24 小時，且不論是否為例假日連續進行。核四廠起動測試規劃之工作時間為每週工作六天，每天工作 24 小時，燃料裝填與加熱階段初期則不論是否假日均為每日 24 小時連續進行。原則上重要的測試項目，如暫態測試，均在白天進行，若有電力調度上之需要，方考量安排於夜間執行。相信若無重大異常狀況，在 9 個月內完成起動測試應有相當餘裕。
6. 日本的起動試驗是以燃料裝填開始至保證試驗滿載運轉 720 小時完成後宣布商轉，而本公司係以燃料裝填開始至保證試驗滿載運轉 100 小時完成並取得電業執照後宣布商轉，但機組商轉後要累計滿載運轉達 720 小時，聯合試運轉小組的工作才結束。
7. 日方的起動測試時程中可見到在時程表上方有燃料裝填數目、反應器壓力及電氣出力，與下方的測試項目及時間長條圖並列顯示，方便測試人員明確判斷測試時機，及運轉人員掌握機組狀態，惟目前市面上商用排程軟體均無具備此功能，經詢問後，日方人員表示測試時程表係使用微軟 EXCEL 做成，著實不可思議。經觀察時程表之格線、測試項目、時間長條圖，甚至燃料裝填數目均應可用 EXCEL 做出，但反應器壓力及電氣出力其變化曲線相當細緻，推測應是用繪圖軟體繪出後再轉貼於 EXCEL 表格中即可。
8. 於討論測試排程經驗之過程中，我方亦展示核四廠起動測試時程現階段初稿供日方參考。核四廠採用微軟 PROJECT 進行時程規劃，日方人員對於以 PROJECT 規劃起動測試時程之詳細程度感到佩服。PROJECT 為專業排程軟體，除了工時、工期的排定與分析，尚可考量資源分配，在核一、二、三廠大修排程上有相當成功之應用。如何將反應器壓力及功率曲線並列於時程表中顯示是目前尚待克服的問題。
9. 在時程管控上，在燃料裝填開始前需建立起動試驗全體工程表（時程表），在各出力階段一個月前相關測試部門需開始進行測試時程

討論與調整，而在各出力階段開始前確定各出力階段別工程表，全體工程表與各出力階段工程表均以「日」為單位來排定。另外，依據定案之測試工程表，測試期間每週排定 3 週間工程表，依據上週測試實績，調整當週與下週的測試工程。並且再細分以「小時」為單位，每天排定 72 時間工程表，根據前一天測試狀況，調整當天與明天的測試工程。在計畫停機之前，亦會排定停止時工程表，以管控停機檢修工作時程。

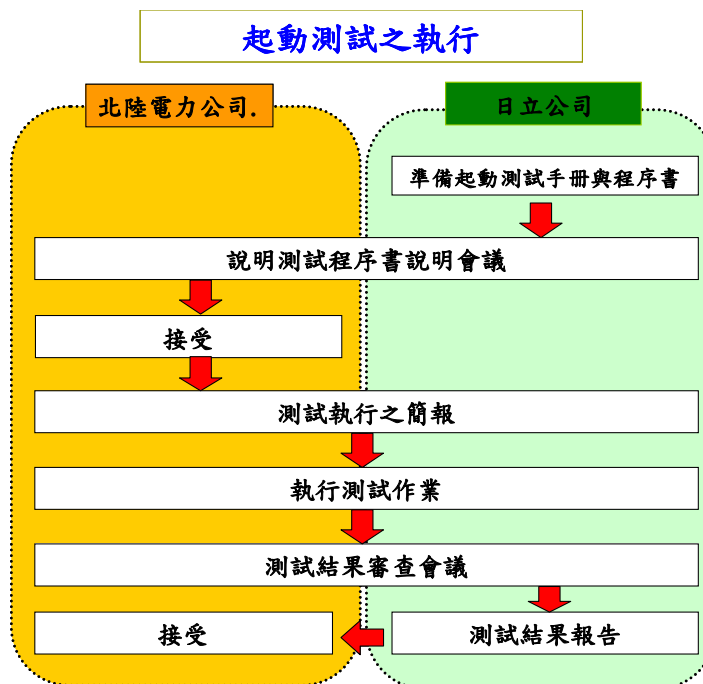
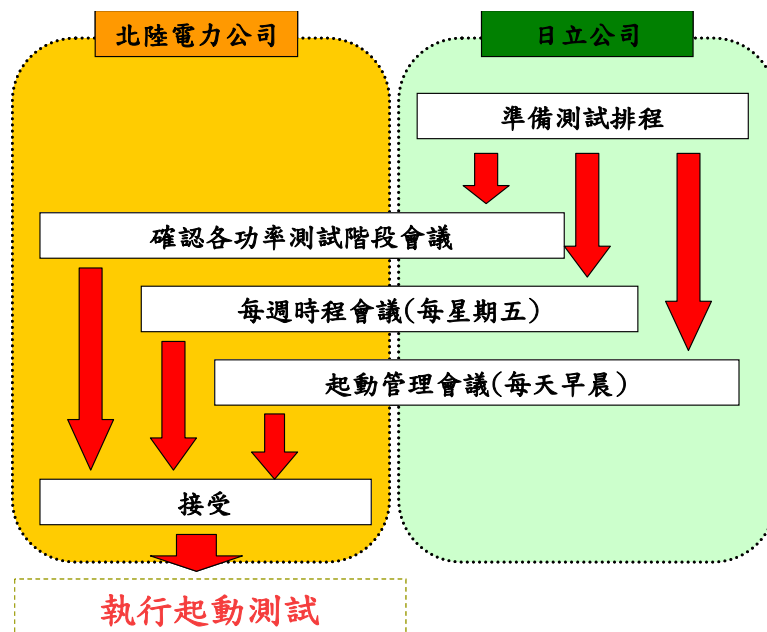
10. 起動測試期間所需製作的測試文件或報告，包括測試過程中會隨時記載測試狀況的登記簿 (Log Book)，每天會發佈「起動試驗日報」，每項試驗完成後會提出「起動試驗速報」，各出力階段完成後及最後所有試驗均完成後，會提出中間及最終「起動試驗報告書」。

(七)、 起動測試組織

1. 日本 ABWR 機組均採用統包 (Turn-Key) 模式，由承包商負責設計、施工及竣工測試 (試運轉)，機組竣工後由移交電力公司營運發電。故起動試驗是由承包商負責規劃與協助執行，此時機組雖未移交電力公司，但電力公司人員已進駐開始值班，開始負責機組操作，並控制機組狀態，配合進行測試，另亦需視電力需求配合調度發電。
2. 柏崎刈羽電廠六、七號機為東芝、日立與奇異合作投資成立之共同企業體承包。起動試驗為由共同企業體共同規劃執行。在建設所編制下，三家公司均有起動試驗負責人，依所負責範圍 (NSSS 或 BOP)，下轄爐心測試人員、汽機測試人員、發電機測試人員、化學測試人員等。以東芝公司來說，起動測試小組成員於系統試驗階段才編組成立，規劃階段於磯子中心負責擬定測試項目、規劃測試時程、編寫與發行測試程序書、安排測試工具等先備作業。起動試驗階段進駐現場，負責測試管理與測試時程管控等工作。
3. 電力公司方面，以柏崎刈羽電廠所屬之東京電力公司來說，建設

所編制下有發電準備業務部門，負責起動試驗，其下有起動試驗班，除負責起動試驗整體計畫與時程的管理與調整外，亦需審查所主管起動試驗項目之程序書，並且負責執行該項測試以及評估測試結果（配合廠家人員）。起動試驗項目除發電準備業務部門外，尚依據測試內容之特性，分配給建設所其他技術部門，如機械部門、電氣部門、環境化學部門等，這些部門也要對所主管之試驗項目，負責審查程序書、執行測試以及後續評估等。在柏崎刈羽電廠六、七號機起動試驗階段，發電準備業務部門人力最多達 120 多人，大多為負責系統試驗以及值班人員，起動試驗班最多也有 15 人。

4. 北陸電力公司之志賀電廠 2 號機由日立公司承包興建。與一般概念不同的是，日立公司是由品保部門負責規劃執行試運轉，全盛時期負責測試的技術人員有 200 多人。在起動測試時程規劃與測試執行上，廠家與電力公司之間合作體制如圖三所示。



圖三 起動測試的北陸電力公司與日立公司合作體制

(八)、 起動中子源議題

初始爐心核燃料裝填前，必須於爐心安裝中子源，在燃料裝填期間提供中子偵測儀器足夠讀數，以便驗證中子偵測儀器可用性，並可在反應器起動時，誘發連鎖反應而達到臨界。赴日本執行出國任務之際，正值奇異公司要求台電儘速決定起動中子源交貨日期，為確認中子源型式，以評估中子源可用的有效期，與日立人員討論燃料裝填程序書之際，向其詢問日本 ABWR 機組起動中子源使用之形式。Sb-Be 中子源為早期機組所使用，半衰期為 60 天，日本近年來之核能機組均使用 Cf-252 自發分裂中子源，半衰期為 2.65 年。使用 Cf-252 為核能界之趨勢，返國後經向奇異公司詢問，核四廠中子源型式確為 Cf-252。

(九)、 其他

1. IHI 公司為東芝公司之主要協力廠家，其歷史可說是日本重工業的發展史。IHI 在日本國內已有 20 座反應器壓力槽之製造經驗，亦已生產 4 座反應器壓力槽輸出至國外，其中包括核四廠二號機之反應器壓力槽，另核四廠反應器圍阻體襯板、人員通道氣鎖門 (Personal Airlock)、設備通道 (Equipment Hatch)、及安全級管路，亦是由該公司製造。核四廠二號機反應器壓力槽是 IHI 製造之第三座 ABWR 反應爐壓力槽，已於 95 年 10 月 5 日於龍門工地完成安裝。經由觀看反應器壓力槽製造過程之紀錄影片，工廠實地參觀，以及工程人員的說明，對於 ABWR 反應器壓力槽，從材料、加工成形、組裝銲接、熱處理、非破壞檢測，及水壓測試等各個重要製造與測試階段有全面性的瞭解。
2. 此外，關於核四廠兩部機組反應器壓力槽之溫度壓力限制曲線 (Pressure-Temperature Curve) 有明顯差異一事，IHI 技術人員表示基本上兩座反應器壓力槽均為相同設計，僅是不同的工廠所生產 (一號機為日立公司承製)，可能的差異來源在於材質規範所容許的誤差、熱處理溫度的誤差，以及機械性能測試的誤差，這些誤差會影響所得之溫度壓力限制曲線，但影響程度需進一步做

敏感性分析才能確認，這種情形在日本之前並沒有被注意到，不過只要溫度壓力限制曲線分析過程符合 ASME 規範，仍是可靠的。

四、 建議事項

(一)、 聘請具有 ABWR 起動測試經驗之專家，協助核四廠起動測試之規劃與技術支援。

1. 因應能源價格持續上漲趨勢，核四廠商轉發電已是必然之目標。近年來核四廠建廠進度明顯加速，161kV 加壓之里程碑已順利達成，並已開始進入管路沖洗階段，反應器水壓試驗亦積極準備執行，試運轉測試之展開指日可待。
2. 起動測試為驗證機組能否安全運轉之關鍵，核四廠起動測試順利進行將可早日達成發電商轉之目標。由於台電公司已多年未曾有核能機組竣工，且以往核一、二、三廠試運轉與起動測試均由國外顧問公司協助規劃，目前台電內部缺乏具有 ABWR 初始測試經驗之人員。而核四廠之起動測試，除部分測試程序書為廠家提供外，核四廠需自行編寫部分測試程序書，並負責規劃測試時程，以及測試之執行。
3. 核四廠採先進之分散式控制暨資訊系統 (DCIS)，為 ABWR 與傳統 BWR 機組主要差異之一，其特殊性與複雜性為影響起動測試順利與否之重要變數。
4. 核四廠起動測試規劃僅 9 個月之工期，相較於日本機組將近一年時間，實為非常不易之挑戰。在時間及人力資源有限之情況下，需有最佳化之測試排程，並需有效整合與協調測試工作介面，以期起動測試能順利如期完成。
5. 雖然經由此次出國任務，取得日本廠家寶貴之起動測試經驗，並習得起動測試排程概念，獲益良多，有助於加強核四廠自行規劃測試排程的信心。然核四廠之能否順利商轉為眾所矚目之事，起動測試期間實不允許發生任何失誤。藉由具有經驗之專家的指導，能確保起動測試作業的順利與品質，亦能對電廠安全奠定良好基礎。經由核四廠起動測試的成功經驗，可深化為電廠營運安全之核心技術，未來若有新建核能機組之計畫，必有能力自行規劃與執行。

6. 綜上所述，實有需要聘請具有 ABWR 起動測試經驗之專家，協助核四廠起動測試之規劃，以及測試執行時之技術支援。

(二)、 參考日本 ABWR 機組起動測試經驗，並融合台電本身核能電廠良好營運之技術，擬定核四廠適用之起動測試排程。

1. 為達到 9 個月內完成起動測試之目標，核四廠需有最佳化之測試排程，以及完善的測試管理。
2. 核四廠可參考日本經驗，以「小時」為單位規劃整體測試排程，測試期間排定 3 週測試時程表與 72 小時測試時程表，每日每週動態調整測試排程，做為測試追蹤管理之依據，並規劃以 24 小時進行測試作業。
3. 除妥善建立測試時程外，尚需嚴謹審查起動測試程序書，確保內容完整可行，並強化測試人員對於起動測試程序書深入瞭解。對於重要測試項目，如暫態或急停，在模擬器先行演練驗證測試可行性，並增進運轉人員對於機組特性的掌控能力。

(三)、 若未來台電公司有新建核能電廠之計畫，建議應採用統包方式，由具有成功建廠經驗之廠家負責統籌整廠之設計、建造與測試，以省卻分包後介面管理之複雜，並可完整取得技術轉移。統包有以下之優點：

1. 降低總成本，在設計規劃階段施工人員及已參與其中，使設計及施工之可行性獲得事前之查核，可節省因設計失誤造成之無謂之浪費外，並可因完善的規劃降低施工之阻礙，進而降低總體成本。
2. 變更設計易於執行：對於業主要求之變更設計，可於最短時間內一併調整設計與施工，使工期能充分掌握，避免因變更設計而停工之可能性。
3. 指揮系統單一：業主只發包一次，管理上只需管制總承包商，可降低業主管理上的負荷，節省管理人員的浪費，且規劃、設計、施工一併承攬，避免多標分包時，廠商互相推諉責任之情事。
4. 規劃與施工之協調，總承包統籌執行全案之規劃、設計、施工乃

至營建管理，可將設計及施工之介面降至最低，提高規劃效率及品質。

5. 節省工期，由於設計與施工部份重疊，可縮短整體之工期。