

出國報告（出國類別：考察）

大林模中超臨界燃煤機組發展運用 模擬器功能與人員訓練情形

服務機關：台灣電力股份有限公司

姓名職稱：洪貴忠/電機工程監、葉瑞峰/機械工程監

派赴國家：日本

出國期間：99年12月12日~99年12月18日

報告日期：100年1月25日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：大林模中超臨界燃煤機組發展運用模擬器功能與人員訓練情形

頁數 19 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話

台灣電力股份有限公司/陳德隆/(02)23667685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

洪貴忠/台灣電力公司/大林發電廠/電機工程監/(07)8711151-262

葉瑞峰/台灣電力公司/林口發電廠/機械工程監/(02)26062221-261

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他

出國期間：99/12/12~99/12/18

出國地區：日本

報告日期：100/01/25

分類號/目

關鍵詞：

內容摘要：(二百至三百字)

台電公司林口發電廠和大林發電廠機組皆已運轉超過 40 年，亟待更新改建高效率的超臨界現代化燃煤機組，本出國考察計劃，係前往日本三菱電機公司瞭解目前大型超臨界燃煤機組的技術發展概況及訓練模擬器相關功能。

本次出國考察的三菱電機公司，擁有良好的大型發電機組和模擬器製造經驗，考察項目主要為發電機轉子、定子製造維修、輔助設備製造維修、自動電壓調整器控制元件、DCS 控制系統及運轉訓練模擬器系統等。考察結果獲得許多最新技術發展資訊，相信能對進行中的林口及大林電廠更新機組提供參考助益。

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

目 錄

壹、考察目的	1
貳、考察過程	1
一、考察行程	1
二、三菱電機簡介	2
三、超臨界大型發電機組發展技術	3
四、訓練模擬器	14
參、心得及建議	19

壹、考察目的

台電公司林口發電廠和大林發電廠正值更新改建階段，計劃中的新機組將是發電量超過 800MW 的大型超臨界燃煤機組，由於台電公司現有火力發電廠中，並無相似的超臨界大型燃煤機組，因此對於相關技術發展、運轉維護、及模擬器訓練等並無相關經驗，亟待向機組製造廠家考察學習。

本次出國考察計劃，特別選擇擁有多年發電機及模擬器製造運轉經驗的三菱電機公司，考察項目主要為發電機維修、發電機轉子製造維修、發電機定子製造維修、相關發電機輔助設備製造維修、發電機自動電壓調整器控制元件、DCS 控制系統及運轉訓練模擬器系統等。本次考察期能有助於火力電廠現有三菱機組發電設備的維修提供較佳的技術資訊，並希望藉由三菱多年大型機組製造運轉經驗，瞭解超臨界燃煤大型機組最新技術發展概況，及考察其操作訓練模擬器功能，為進行中的林口及大林電廠更新機組提供相關參考資料。

貳、考察過程

一、考察行程

日期	城市及機構	工作內容
99/12/12	台北 - 日本神戶	去程
99/12/13~99/12/17	三菱電機株式會社 神戶製作所	考察超臨界燃煤機組發展 運用模擬器功能與人員訓練情形
99/12/18	日本神戶 - 台北	回程

二、三菱電機簡介

三菱電機株式會社是日本最大也是最重要的電機製造公司，創建於 1921 年，會社綜合總資產達 3200000 百萬日元，事業群員工總數約 11 萬人，主要事業內容如下：

重電系統部門	汽輪發電機、水電、核電設備、電動機、變壓器、電力電子、電路斷路器、氣體絕緣開關設備、控制開關設備、監控和自動梯、粒子束治療設備、電梯、電動汽車用品、大螢幕顯示系統、系統保護
產業機電整合部門	可程式設計序控制器、逆變器、伺服器、指示器、揚升機、電磁接觸器、斷路器、電力變壓器、電錶、不斷電供應系統、工業風扇、數控設備、電焊機、鐳射加工機、離合器
情報通信系統部門	有線通信設備、監控攝影系統、衛星通信設備、衛星、雷達設備、天線、火力控制系統、廣播設備、資料傳輸設備、網路安全系統、資訊系統設備、無線通訊設備
電子設備部門	電源模組、高頻設備、光學元件、液晶顯示器、微控制器、系統 LSI
家庭電器部門	液晶電視、投影電視，顯示監視程式投影儀，房間空氣調節器、空調機熱泵、熱水供暖系統、冰箱、風扇、排氣風扇、太陽能系統電熱水器、螢光燈照明裝置、壓縮機冷水機組、加濕除濕機、微波、空氣淨化機、DVD
其它部門	採購、物流、廣告、金融，和其他的房地產服務

本次考察的主要地點神戶製作所，位於日本關西地區，是重電系統部門下最重要的製造場所，分佈於世界各地的三菱發電機，皆是由本製作所完成後運出。

神戶製作所內主要生產發電機、勵磁機、勵磁系統、氫氣系統、封油系統及定子冷卻水等輔助設備，此外還有機組運轉監控設備、保護電驛設備等系統。

由於超臨界燃煤機組的發電量通常高達 600MW 以上，已相當於核一廠一部機組的發電量，因此其重要性不言可喻，而這樣大型的發電機組，對現有火力發電廠的運轉與維護人員而言，都是一項全新的挑戰，因此大型發電機組的製造及設計方式，及其最新技術的發展，對未來林口及大林電廠的機組更新改建，皆有重要的參考意義。

三、超臨界大型發電機組發展技術

1、大型發電機的製造經驗及技術發展

三菱已有 90 年的發電機製造經驗，產出約 1900 部發電機，三菱電機提供包括設計、製造、測試、安裝、及現場服務等工作。目前三菱可生產的最大輸出容量發電機為 1600MVA，也就是龍門電廠使用的四極式發電機組，在火力電廠的二極式發電機組部份，三菱可生產的最大輸出容量發電機為 1045MVA，和台電公司幾個火力電廠近年計劃安裝的 800MW 機組相去不遠，顯示台電公司計劃興建的已是最新型式的發電機組。

下列兩張圖表顯示三菱大型發電機組的發展過程及單機最大容量：

DEVELOPMENT OF MAXIMUM UNIT CAPACITY

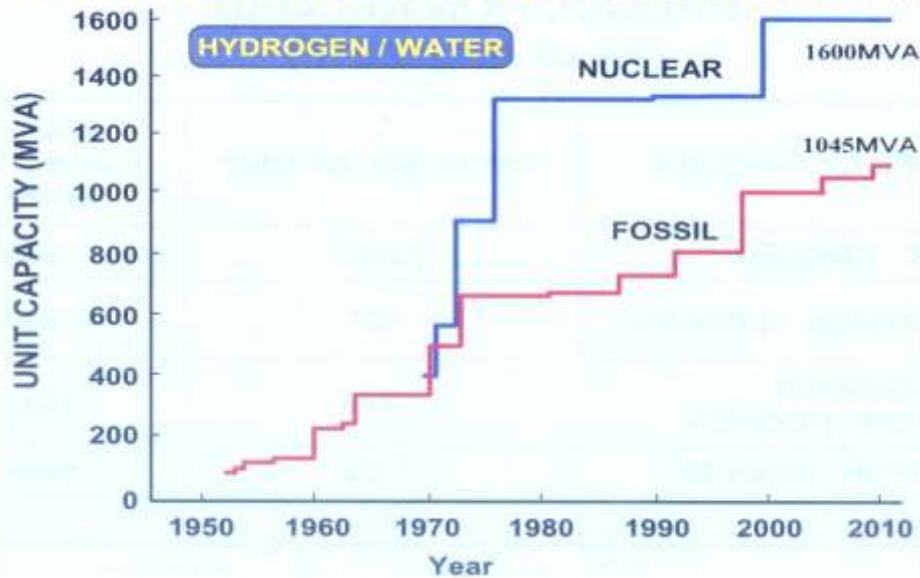


圖 1：三菱發電機組容量發展過程

MAXIMUM UNIT CAPACITY (AS OF Aug. 2010)

TYPE OF GENERATOR COOLING		SHIPPED MAXIMUM UNIT CAPACITY (MVA)	UNDER PLANNING (MVA)
AIR - COOLED		286	—
HYDROGEN - COOLED		530	560
HYDROGEN INNER - COOLED	2 POLE	868	—
	4 POLE	990	—
WATER - COOLED	2 POLE	1,045	1,250
	4 POLE	1,600	1,890

圖 2：三菱各種發電機組最大容量

由上表可知，當發電機組容量大於 1000MW 以上時，因為輸出電流較大，容易造成線圈熱量過高，因此須設計成水冷式定子線圈，才能將其熱量帶走，因此

未來林口及大林的新機組，應該都會採用此種設計，事實上台電公司現已有核三、台中、及大林六號機等機組採用定子冷卻水方式，因此對此方式並不陌生。

發電機的定子線圈冷卻方式可分為間接冷卻和直接冷卻，間接冷卻係以冷卻媒介對線圈做表面的冷卻，而直接冷卻則係讓冷卻媒介通過線圈內層的導孔，而冷卻的媒介物則有空氣、氫氣及純水等。一般而言，在 300MVA 以下大都採用空氣間接冷卻，550MVA 以下則可採用氫氣間接冷卻或直接冷卻，像目前台電公司的複循環機組大都採用此型，而發電容量大到 550MVA 以上，則一定要採用氫氣直接冷卻，例如協和及興達的機組皆屬此型。而當發電機組容量大於 1000MW 以上時，就非得採用純水冷卻才有辦法把線圈熱量降低了。

但此大型發電機組，僅其定子線圈用純水冷卻，其轉子及定子鐵心仍須靠氫氣做冷卻，故仍須保有氫氣及封油系統。也因此，氫氣封油系統，一直都是發電機最重要的輔助設備。

下表是空氣、氫氣及純水的冷卻特性比較：

FEATURES OF HYDROGEN (WATER) COOLING

Characteristics	Air	Hydrogen	Water
Density	1.0	0.07	860
Thermal Conductivity	1.0	7.0	23
Heat Transfer Coefficient from Surface	1.0	1.35	514
Specific Heat	1.0	0.98	3575
Support of Combustion	Yes	No	No
Oxidizing Agent	Yes	No	No

表 1：空氣、氫氣及純水的冷卻特性

由上表可知，由於氫氣的密度只有空氣的 7%，因此可減少發電機轉動時的風阻及流動損失。此外，氫氣的熱傳導率是空氣的 7 倍，因此比空氣更容易將線圈熱量帶走。一般空氣冷卻的機組皆是採用空氣對流式，容易將塵埃及濕氣帶進線圈內，而採用氫氣的機組皆是密封循環式，可避免塵埃及濕氣接觸線圈，因此線圈狀況可維持較好。但是因氫氣和空氣混合比 4~75%之間，容易因火花引燃氣爆，故有運轉安全上的考量。

純水的熱傳導率是空氣的 23 倍，其帶走線圈熱量的效果最好，也沒有氫氣爆燃的危險性，唯一的問題是，若不慎洩漏，則會導致線圈絕緣劣化，嚴重者甚至導致機組線圈必需重繞。

2、發電機額定規範差異

台電公司現有大林五號機、協和一&三號機及興達一&二號機，都是三菱公司早期設計製造的機組，和計劃中的林口及大林新機組規範比較起來，有明顯的不同，因為發電容量變大，使得電壓電流及氫氣壓力也跟著變大，發電機尺寸也變得更巨大，對日後的運轉及維護挑戰也更大。下表是三菱公司針對大林五號機和林口新機組的規範差異整理出的資料：

COMPARISON OF GENERATOR RATING FOR TALIN#5 AND LIN KOU

	Talin #5	Lin Kou
OUTPUT [MW]	501.5	883.15
CAPACITY [MVA]	590	1039
VOLTAGE [kV]	18	25
CURRENT [A]	18924	23995
POWER FACTOR [% lag]	85	85
H2 GAS PRESSURE [MPa-g]	0.40	0.50
FREQUENCY [Hz]	60	60
ROTATING SPEED [min ⁻¹]	3600	3600
COOLING SYSTEM		
STATOR COIL	HYDROGEN DIRECT COOLED	WATER COOLED
STATOR CORE	AXIAL VENTILATION	AXIAL VENTILATION
ROTOR COIL	HYDROGEN DIRECT COOLING	HYDROGEN DIRECT COOLING

表 2：大五機和林口新機組額定比較

COMPARISON OF GENERATOR OUTLINE FOR TALIN#5 AND LIN KOU

DIMENSIONS AND WEIGHTS	Talin #5	Lin Kou
L [mm]	16600	17140
G [mm]	10350	11950
E [mm]	5220	3890
D [mm]	3800	4300
W [mm]	4300	5040
H [mm]	5750	7140
STATOR WEIGHT [kg]	302,000	393,000
ROTOR WEIGHT [kg]	56,000	92,000
TOTAL WEIGHT [kg]	404,500	584,300

表 3：大五機和林口新機組外觀比較

3、發電機結構設計新技術

大型發電機組的結構設計，基本上和早期台電公司的機組並無太大差異，但三菱公司針對早期機組上的一些缺失，做了局部的改善，希望機組經過長年運轉後，鐵心及線圈仍能維持良好狀態，畢竟這每部機組可能都須運轉到 40 年以上。

發電機的基本構造圖如下所示：

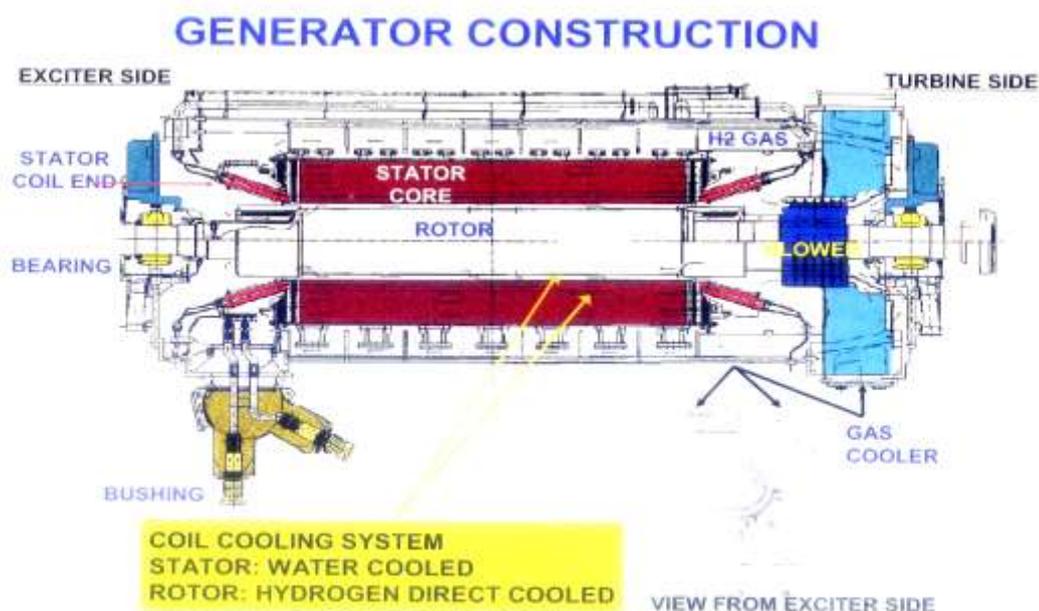


圖 3：發電機的基本構造圖

上圖中，發電機的外殼設計上可耐受的壓力為 1.05MPag，用以承受機內氫氣爆炸時高達 0.7MPag 的最大壓力。也因此發電機的定子重量才會大，這是不得不然的設計。

定子鐵心採用矽鋼片疊製，鐵心外側採用撓性鋼板吸收振動的設計和早期的設計並無不同，差異最大的當然是定子線圈留有導孔流通純水，採用定子冷卻水型式。

較值得一提的重大改變是，定子線圈端匝固定方式的技術改善，下圖 4 是早期三菱及西屋公司發電機定子線圈端匝的設計結構，由圖中可看出，發電機的端匝線圈是由安裝在鐵心末端的電木座(BRACKET)所支撐，再將端匝線圈綁紮固定在電木座上，上下層線圈間亦塞入電木塊綁紮固定，用以強化端匝的結構，避免運轉中的振動造成端匝鬆動摩擦。儘管如此，經由長年運轉後，台電公司的協一機和 3&4 機發電機線圈端匝還是發生了鬆動現象，最後都不得不進行線圈重繞的改善工作(下圖 5)，顯示端匝結構強化的重要性。

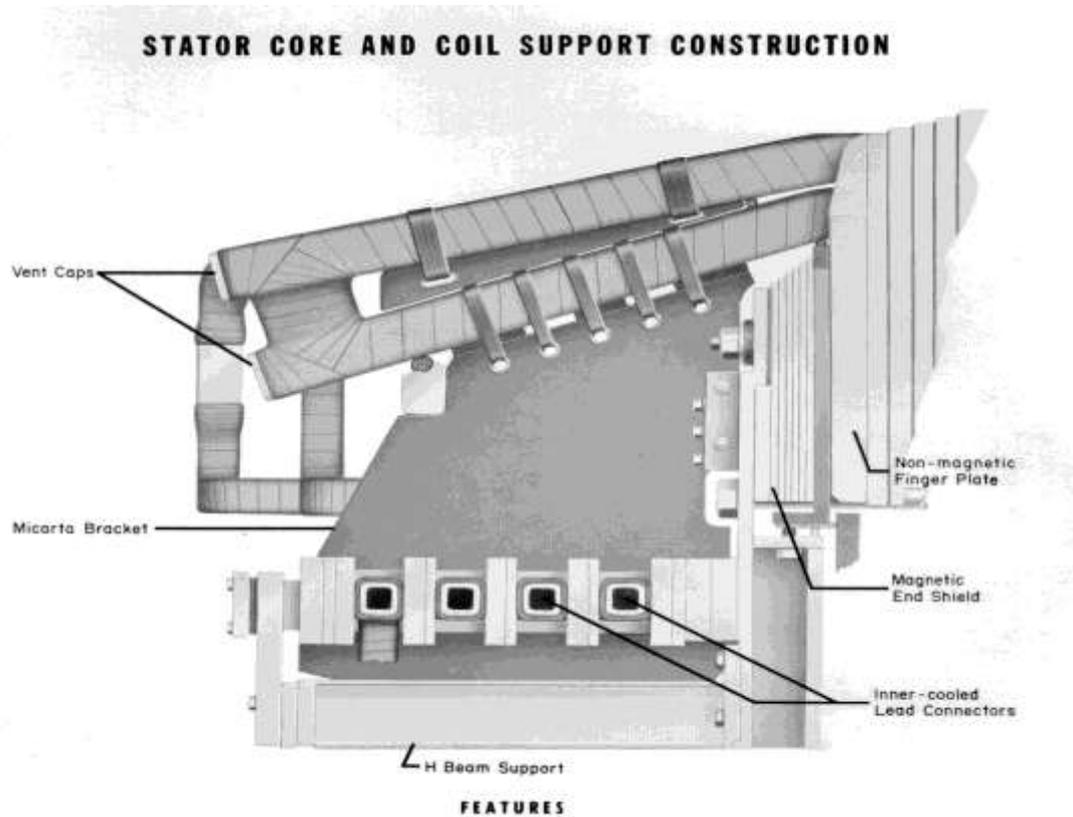


圖 4：早期三菱發電機定子線圈端匝的設計結構



圖 5：大林 3 號機線圈重繞改善工作

下圖 6 是三菱公司針對發電機端匝線圈結構改善後的示意圖，相較於圖 4 可看出，原來一座座獨立安裝的電木座，已被一整環的樹脂環(RESIN CORN，下圖 7)取代，而原來端匝線圈以紮帶綁紮的方式也不見了，另於導體上層設置 SEGMENT PLATE，再用貫穿的螺栓與下層樹脂環旋緊，如此上下將端匝線圈夾緊，使其運轉中不再鬆動。這是三菱公司針對端匝線圈結構的重大改變，和台電早期的三菱及西屋機組有顯著不同，顯示三菱公司意識到早期機組端匝鬆動造成的損害嚴重性。

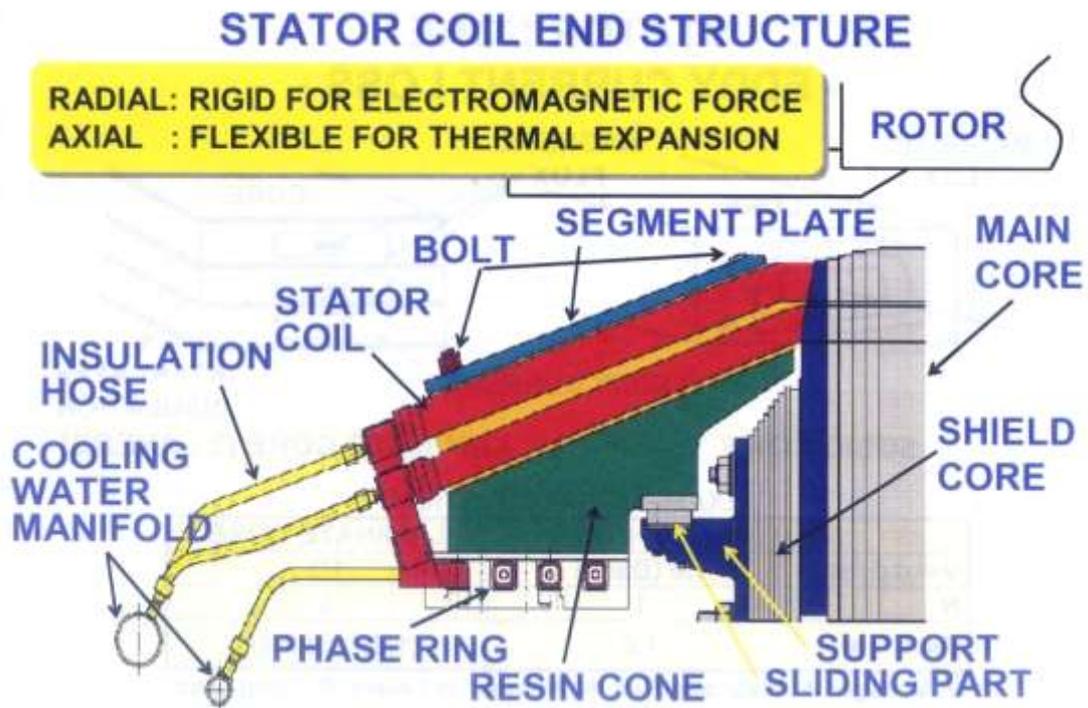


圖 6：三菱發電機端匝線圈結構改善後示意圖

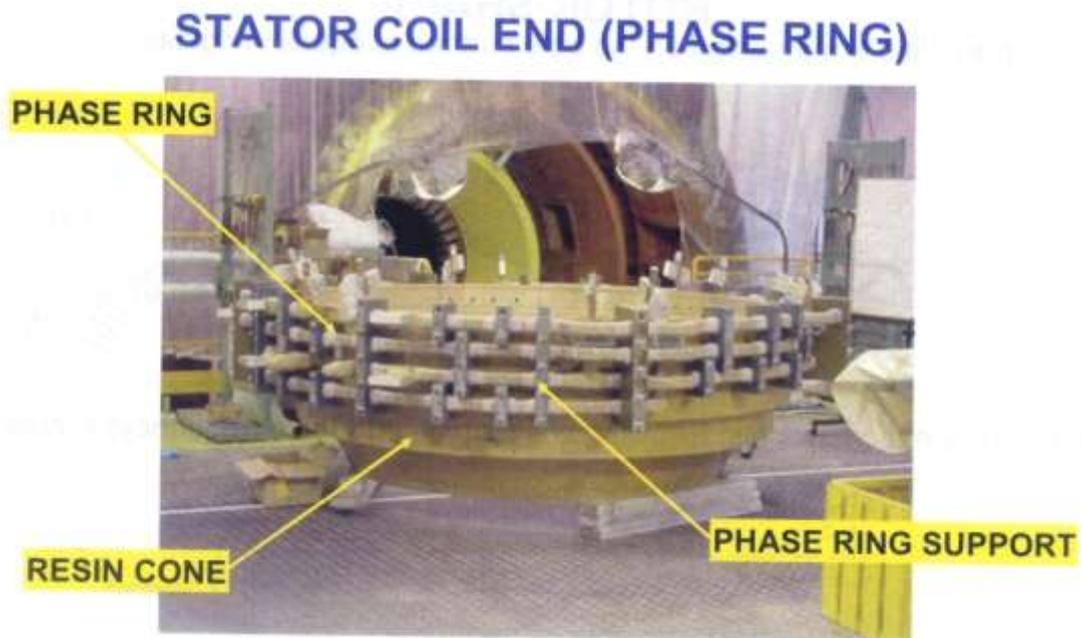


圖 7：樹脂環(RESIN CORN)

4、輔助設備技術改善

大型發電機組的輔助設備系統和早期並無不同，同樣需要氫氣及封油系統，但因發電容量比較大，故增加了定子冷卻水系統。定子冷卻水系統係使用高純度除礦水流經線圈導孔，將線圈熱量帶出，再經由熱交換器將熱量帶走，因此，水的純度變得很重要，以免線圈經由冷卻水系統接地，為確保冷卻水低導電度，通常會裝設還原樹脂槽，以控制導電度在安全範圍內。此外，若定子冷卻水中斷或壓力不足，可能會立即造成線圈過熱熔損，因此，須裝設壓力及溫度監控跳脫裝置，以確保發電機運轉安全。

三菱公司最新的定子冷卻水系統(圖 8)，除了和其它公司一樣有兩台水泵互為備用，在低水壓時會自動起動外，最大的不同是，三菱將定子冷卻水槽(WATER TANK)充灌氫氣加壓。依據三菱公司的研究，早期的定子冷卻水系統，機內氫氣會微量滲漏至定子冷卻水系統，因此水槽內會累積微量氫氣，和空氣混合後造成氣爆危險，現在將定子冷卻水槽充灌氫氣後，水槽內就不會再有氫氣和空氣混合的危險。

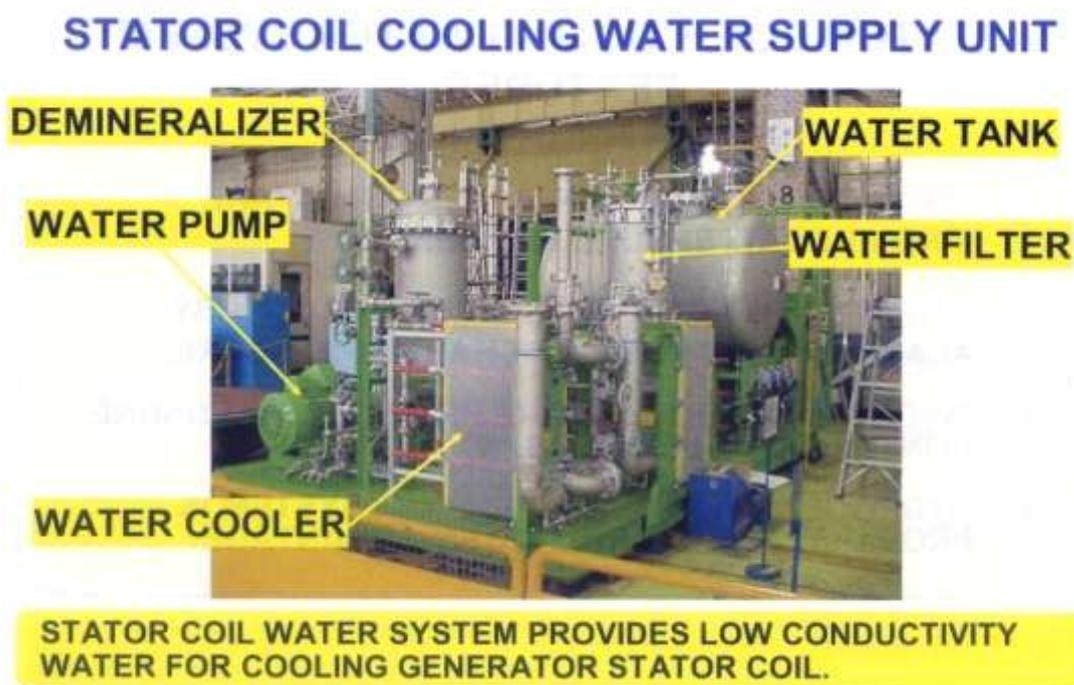


圖 8：三菱公司最新的定子冷卻水系統

定子冷卻水槽充罐灌氫氣加壓後，第二個優點是整個定子冷卻水系統和空氣隔離，如此一來，就不會發生氧化腐蝕的困擾了。氧化腐蝕一直是定子冷卻水系統最嚴重的問題，台電公司核三及興達的機組都曾因疑似線圈水管接頭焊接處氧化腐蝕，造成冷卻水外滲而最終不得不更換線圈(圖 9)。不過三菱公司強調，他們對於線圈水管接頭的焊接方式很有信心，認為其產品具有長期使用的可靠度，不會發生滲水的問題(圖 10)。



圖 9：定子冷卻水外滲而更換線圈

LONG-TERM RELIABILITY

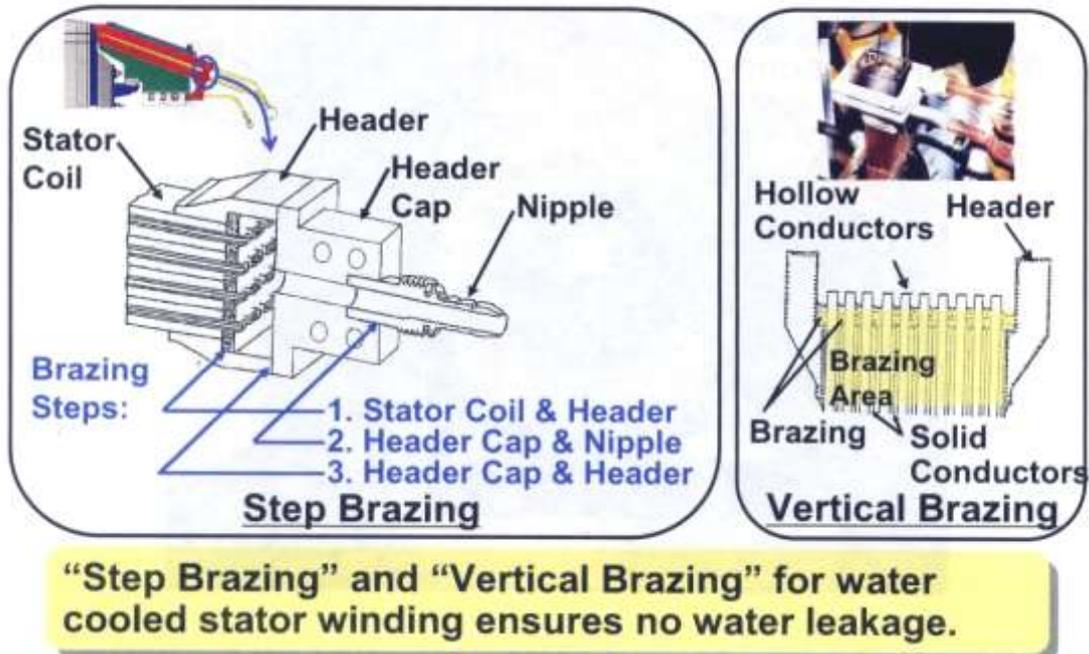


圖 10：三菱發電機線圈水管接頭焊接方式

定子冷卻水槽充灌氫氣加壓後，第三個優點是整個定子冷卻水系統和空氣隔離，就不會發生因為空氣中的二氧化碳導致冷卻水導電度上升的現象。

如此看來，定子冷卻水槽充灌氫氣加壓似乎是不錯的方式，但是否真有前述的三項效益，則可能有賴長時間運轉後的驗證了。但無論如何，這也是此行很重要的新技術觀念收獲了，對於往後新建機組的功能規範具有參考價值。

四、訓練模擬器

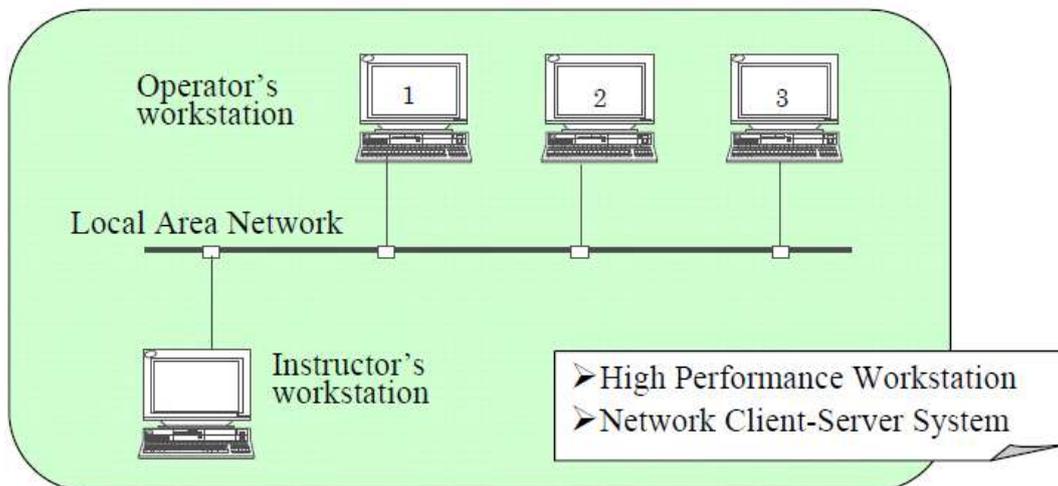
1、三菱訓練模擬器架構

本行的考察重點，除了瞭解超臨界機組技術發展外，還有一個重點是了解模擬器的相關資訊，雖然因為行程緊湊，無法很詳細的了解三菱公司的模擬器資訊，但我們仍帶回一些基本資料供參考。

誠如大家所知，火力電廠的運轉操作極其複雜困難，要培養優秀的值班主管更須經過千錘百煉。筆者身兼台電公司大林模擬訓練中心講師和口試委員，更瞭解模擬訓練對操作人員的重要性。

新進值班人員在現場跟隨資深主管或工程師的運轉操作，是最直接的訓練方式，也是最實戰的經驗，可是，現場實際遇到故障或緊急狀況的機會不多，因此學習變成可遇不可求。課堂上的理論學習，可讓操作人員了解機組設備的運轉原理和狀況，但永遠無法讓學習者身歷其境，無法確認其心智反應和危機處理能力，因此模擬器的設置是爲了讓學習者獲得良好的操作技能，和訓練其反應能力，經由刻意製造的事故狀況，讓操作者反復練習，以達到熟練的程度。三菱公司在模擬器的發展已有 30 年的經驗，其模擬器已累積許多火力電廠的訓練經驗。

下圖是三菱操作模擬器的架構圖，這個系統是由高效率的工作站和區域網路 (LAN) 所組成，訓練師可經由終端機設定模擬功能，要求受訓者應變處理。該系統相當簡單易於安裝，適用於教室或辦公室，對於有些電廠腹地不大來說更加方便。



Typical System Configuration of Compact Simulator

圖 11：三菱操作模擬器的架構圖

2、三菱訓練模擬器特點：

- A、有助於操作者熟練的有效工具。
- B、模擬實務操作環境的訓練。
- C、操作項目可重複演練。
- D、事故狀況可逆向操作演練。
- E、充足的訓練管理功能。

3、訓練師的訓練管理功能

- A、初始狀況設定功能。
- B、運轉/暫停功能。
- C、中途起始功能。
- D、回溯追蹤功能。
- E、故障設定功能。

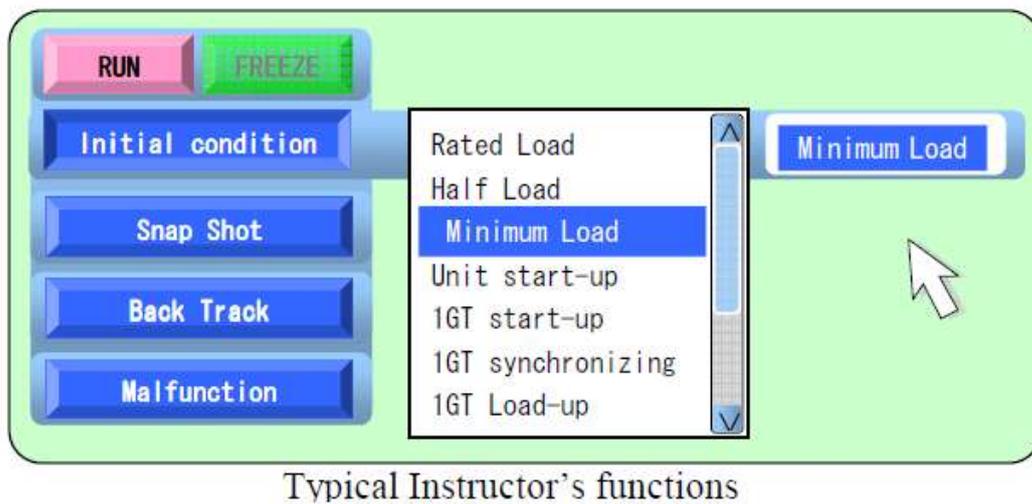


圖 12：典型的訓練管理功能畫面

4、受訓者功能

- A、螢幕操作控制介面。
- B、運轉狀態監視功能。

C、模擬實際運轉功能。

D、APS 控制監視功能。

5、三菱模擬器運轉經驗

從 1966 年至今，三菱公司已提供了世界各地超過 70 個訓練模擬器，這因此三菱公司有相當豐富的模擬器運轉經驗，對於台電公司來說，新建機組的模擬器若能與實際機組的監控系統，採用同一家公司產品，應該能讓操作者更快進入熟練階段。

A、各種火力電場廠的模擬器

不同的火力電廠，使用不同的燃料及不同的鍋爐，三菱公司針對各種火力電廠的需求，提供不同的模擬器內容，其運轉實績如下：

Fuel Type	Simulated Units
Oil	53
Coal	27
LNG	13

表 4：三菱模擬器運轉實績(依燃料型式)

Boiler Type	Simulated Units
Drum boiler	42
One through boiler	47
Combined cycle	3
Pressurized floating bed boiler	1

表 5：三菱模擬器運轉實績(依鍋爐型式)

B、三菱模擬器的種類

模擬器的型式依訓練的目的和範圍而有所不同，全功能的模擬器和機組的實際操作介面完全一樣，而另一種則是簡要桌上型的模擬器。這兩種型式的模擬器，三菱的運轉實績如下：

Simulator scale	Multi-units systems
Full scope simulator	35
Desktop simulator	10

表 6：三菱模擬器運轉實績(依模擬器型式)



A full-scope simulator over-view form Instructor's room.

圖 13：全功能模擬器實景

參、心得及建議

本次出國考察行程，係筆者從事發電機組運轉維護近 20 年來首次赴日本三菱電機公司參訪，三菱電機公司擁有良好的電機製造經驗和專門技術，台電公司水火力電廠中，亦有為數不少的三菱發電機組，長久來皆須委託三菱電機公司協助進行維修和改善，此次有機會進入三菱電機製造廠內，瞭解發電機組最新技術發展概況，認識三菱電機優良品質和企業文化的內含，深感獲益良多。也希望帶回的相關資料，能對公司內外從事三菱機組維護的技術人員有所助益，更希望能對大林口和大林電廠進行中的更新改建機組提供有用的資訊。

以下僅就本次赴日本三菱電機公司考察觀摩過程提出幾點建議：

一、本公司計劃中的超臨界燃煤機組發電量皆高達 800MW 以上，已相當於核能機組的容量，其對系統供電穩定度影響顯著重要，唯目前各火力電廠維護人員並無如此大型機組大修經驗，建議安排相關廠處維護人員赴國外觀摩超臨界大型燃煤機組大修工作，以供未來維護保養工作參考。

二、三菱電機公司針對發電機端匝線圈的強化改善，將原有的電木座改為樹脂環的作法，可提供給更新改建中的機組作為規範參考。

三、三菱電機公司針對發電機定子冷卻水系統的改善，將定子冷卻水槽灌充氫氣的作法，可提供給更新改建中的機組作為規範參考。