

出國報告（出國類別：實習）

通霄計畫發電機及勵磁設備之規劃
設計、製造、測試及運轉維護等實習
訓練

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：王熙堂 課長

派赴國家：日本

出國期間：104年8月17日至104年9月15日

報告日期：104年10月12日

摘要：

通霄更新計畫每一複循環機組容量達 892MW，並且擁有高發電效率，為了解大型複循環機組發電機及勵磁設備之規劃設計、安裝、運轉及測試相關知識，並熟悉廠家之設計理念，以作為後續機組規劃之參考。本次奉派到日本 MHPS(Misubish Hitachi Power System)及 MELCO (Mitsubishi Electric Corporation) 接受 4 周之發電機及勵磁設備之運轉、維護訓練，以期對三菱公司新型 J type 氣渦輪機組及汽輪機組之發電機、相關輔機及勵磁系統有完整之瞭解。此外針對激磁系統的各项設定如：MEL (Minimum Excitation Limit)、OEL (Over Excitation Limiter)、自動電壓調整器系統方塊圖等，藉由本次研習與 MELCO 公司之設計工程師有深入討論以瞭解各項設定之原由，並請廠家就其設計觀點、以往經驗，以及其他客戶意見提出說明。

一、國外公務之目的： -----	2
(一)、公務任務 -----	2
二、國外公務之內容與過程：	
(一)、通霄計畫發電機簡介-----	2
(二)、發電機輔機-----	13
(三)、激磁系統-----	17
(四)、最低激磁限制 MEL (Minimum Excitation Limit) 設定說明-----	25
(五)、最高激磁限制 (OEL Over Excitation Limiter)設定說明-----	31
(六)、進相運轉對發電機之影響及溫升評估-----	32
三、心得與建議 -----	33

一、國外公務之目的：

(一)、公務任務：

通霄計畫發電機及勵磁設備之規劃設計、製造、測試及運轉維護等實習訓練

二、國外公務之內容與過程：

本次訓練課程第一週安排在 **MHPS** 高砂廠進行複循環機組整廠概念說明，由熱平衡圖、整廠布置規劃、**P&ID**、氣渦輪機、氣輪機、到整廠燃氣、蒸氣、**HRSG** 爐水循環系統，做一概要說明。第二週起安排在三菱電機 (**MELCO**) 神戶製作所進行為期三週之訓練，主要內容包含發電機構造、發電機潤滑油及封油系統、氫氣系統、激磁系統及其設定，安裝、測試及維護等課程。因該所除發電機設計製造外，亦組裝 **AVR** 及發電機保護電驛盤，配合課程內容各訓練課程講師皆會視課程需要至各相關製程廠內實際了解相關設備製造及組裝情形，期間通霄新 1 機汽輪將電機轉子恰好正在廠內組裝完成，理論對照實物有助於加深對課堂所講述內容。

課程中安排二天前往位於同在兵庫縣之三菱電機工程參觀，8 月 26 日赴赤穗市 (**Ako**) 三菱電機輸電及配電系統中心赤穗工廠參觀，該廠主要生產外鐵型 (**shell type**) 大型變壓器、內鐵型 (**core type**) 中小型變壓器、乾式變壓器、鐵道運輸用變壓器、**MRI** 用超導體線圈、**OLTC** (**On Load Tape Changers**) 及 **OLTC** (**On Load Tape Changers**) 等，其中通霄新 1 機汽輪機組之乾式激磁變壓器於該廠組裝中，製程中正進行額定電流下之線圈阻抗試驗，因此也順道參觀此變壓器之試驗概況。8 月 28 日赴尼崎市 (**Amagasaki**) 三菱電機伊丹 (**Itami**) 工廠參觀，伊丹 (**Itami**) 廠主要生產發電機斷路器 (**GMCB Generator Main Circuit Breaker**)、隔離母相會流排 (**IPBD Isolated Phase Bus Duct**)、比壓器盤 (**VT**) 及避雷器盤 (**SA**) 等之設計製造，通霄計畫之比壓器盤 (**VT**) 及避雷器盤 (**SA**) 將在本工廠製造，參訪其間通霄機組之設備仍未排入製造流程，故僅就同等級設備製作概況進行參觀。

在本次任務中除在 **MHPS** 高砂製造所研習複循環機組整體概念外，配合訓練課程內容，前往發電機製造廠家 **MELCO** 進行發電機及勵磁系統之設計及製造之研習，並與相關設計人員就本發電計畫發電機及其輔機，激磁系統及設定等進行討論。以下將就本次任務過程做說明：

(一)、通霄計畫發電機簡介

通霄計畫之發電機均由 MELCO 公司製造，其中氣渦輪機發電機容量為 395MVA，20kV，額定電流 11,403A，具功因 0.85 落後及 0.95 越前運轉能力，採用氫氣冷卻。汽輪機發電機容量為 376MVA，20kV，額定電流 10,854A，具功因 0.85 落後及 0.95 越前運轉能力，採氫氣冷卻方式，簡要規格詳表(一)，因通霄計畫發電計畫之發電機目前僅進行至汽輪發電機轉子製造，定子組裝時程於稍後開始，因此提供典型之發電機外型如圖(一.a)。

	GENERATOR FOR GAS TURBINE	GENERATOR FOR STEAM TURBINE
RATED OUTPUT	395,000 kVA	376,000 kVA
RATED VOLTAGE	20 kV	20 kV
RATED CURRENT	11,403 A	10,854 A
POWER FACTOR	85%	85%
NO. OF PHASE	3	3
FREQUENCY	60 Hz	60 Hz
ROTATING SPEED	3600 min ⁻¹	3600 min ⁻¹
HYDROGEN GAS PRESSURE	0.35 MPag	0.35 MPag
SHORT CIRCUIT RATIO	0.5 at rated MVA	0.5 at rated MVA
EXCITATION VOLTAGE	390 V	390 V
INSULATION / TEMP. RISE	155(F) / 130(B)	155(F) / 130(B)
STANDARD	IEEE	IEEE

表(一)通霄計畫發電機主要規格



圖(一.a) 典型發電機外型圖

以下簡述發電機結構：

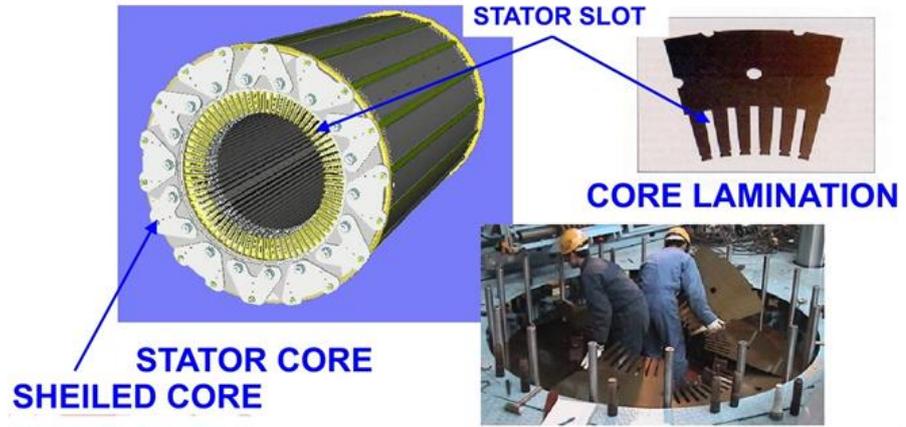
1. 定子結構：

發電機定子機殼是以鋼板滾壓後焊接而成氣密圓筒狀，內部並以徑向及軸向的支柱加強以提供堅固的結構，機殼主要作用是支持發電機之重量以及抑制靜態與短路兩者加諸定子鐵心之作用力，定子鐵心係由一連串高導磁係數、低損失之無方向性矽鋼片層層堆疊而成，鋼片兩面塗有絕緣漆，使片與片間彼此相互絕緣，以降低鐵心渦流損，定子鐵心構造詳如圖(一.b)。為了防止電磁作用力傳導至機殼和基礎產生之二倍頻振動，定子鐵心(又稱為 inner frame)與機殼(又稱為 outer frame)間採用葉狀彈簧支撐的可撓性裝置，此種結構具有足夠的剛性以支撐鐵心的重量及短路時的作用力，在發電機下方，左右兩側各設 4 只，共 8 只可撓性支撐架固定定子，支撐架構造詳如圖(一.c)。定子線圈導體係由方形銅排包覆玻璃帶所組成，這些銅排在線槽內以羅貝爾轉位法交叉變換每一銅排所佔之位置以降低渦流損失。為了抑制電暈作用，線圈置入線槽的直線部分表面在真空環境下，以環氧樹脂浸透再塗半導體材料。另一種半導體材料則使用在線圈端匣處，表面再塗以絕緣凡立水，以達成均一的電位梯度。定子線圈兩端分別以終端線圈支撐架(End Coil Support)及以樹脂為材質的環狀撐架支撐，再以玻璃纖維帶將所有終端線圈緊緊地與終端線圈支撐架及環狀撐架固定在一起，詳如圖(一.d)與圖(一.e)，使其具有足夠強度承受短路電流產生的應力。

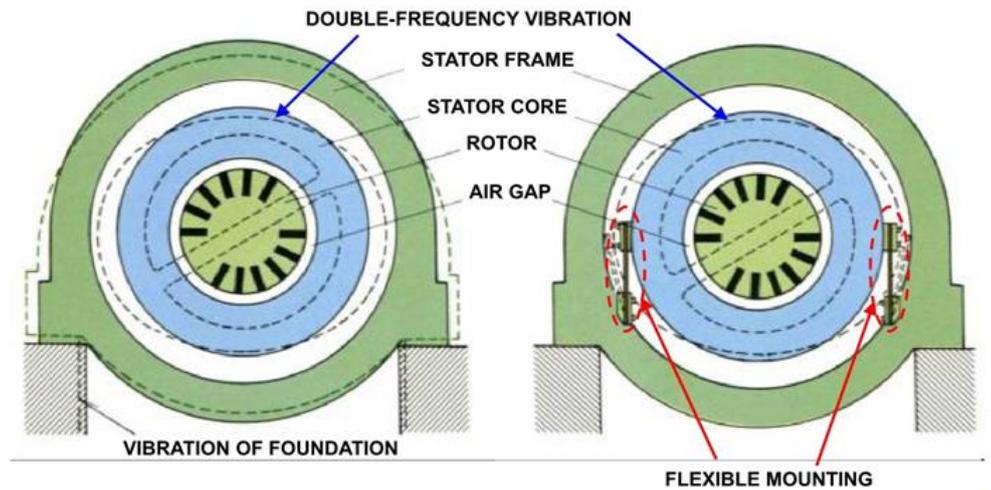
定子鐵心安裝線圈及完成末端處理後稱為內框架(Inner Frame)，與高剛性鋼板加工成數段圓筒狀，經焊接後成為外框架(Outer Frame)結合，完成發電機定子部分，請參見圖(一.f)發電機定子 Inner Frame 與 Outer Frame 組裝圖。

無論氣渦輪發電機或汽輪發電機，定子線圈絕緣材料均為 F 等級且其溫升均不超過 B 絕緣等級。進入定子線圈之冷卻水溫度為 45°C，定子線圈中選定溫度最高之線槽共 12 槽，分別埋入 RTD，計埋入 12 只 RTD，以埋入型 RTD 量測，允許之最高溫度為 102°C。轉子線圈則未裝設溫度偵測元件，故由量測激磁系統送到轉子線圈之電壓及電流，計算出轉子線圈電阻，由電阻法所算出之平均最高溫度為 120°C。在定子鐵心部分，分別在發電機兩端末端鐵心(end core)各埋入 6 只熱電耦合計 12 只，以量測末端鐵心溫度，允許之最高鐵心溫度為 100°C。

- High-grade silicone steel plates with lower iron loss
- Insulate core segments individually
- Form a solid stator by means of stacked core and through bolt



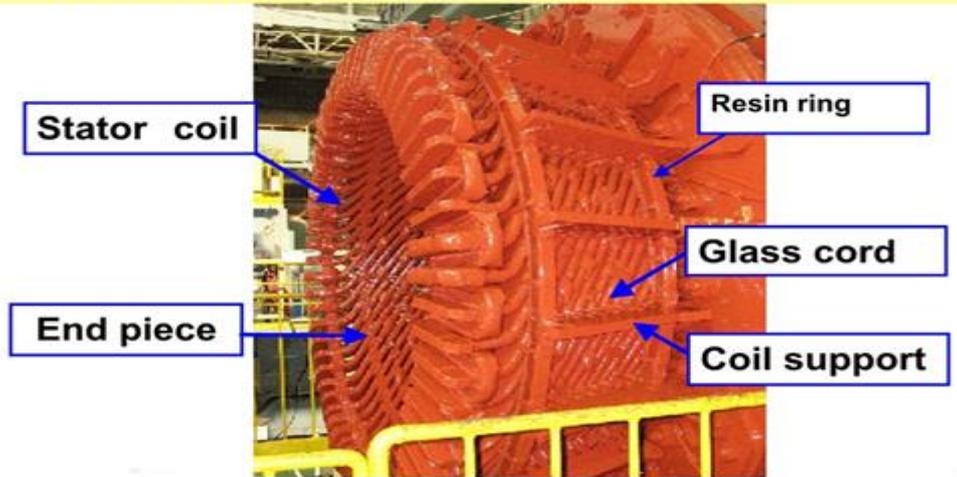
圖(一.b) 定子鐵心構造



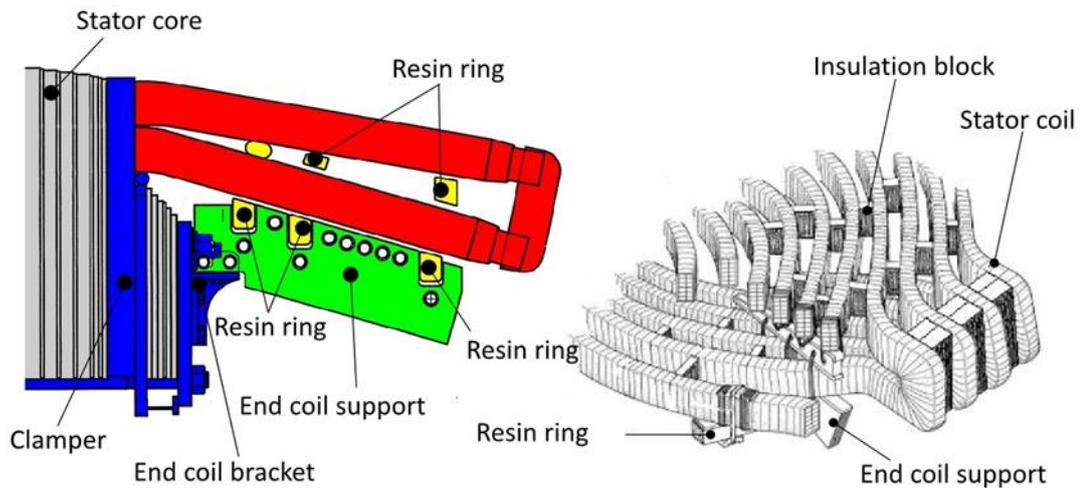
Preventing stator core vibration transmitting to frame / base

圖(一.c) 定子可撓性支撐架

- Firmly bound by means of insulation tape
- Supported with insulation block so as to with-stand the large force developed from a short circuit



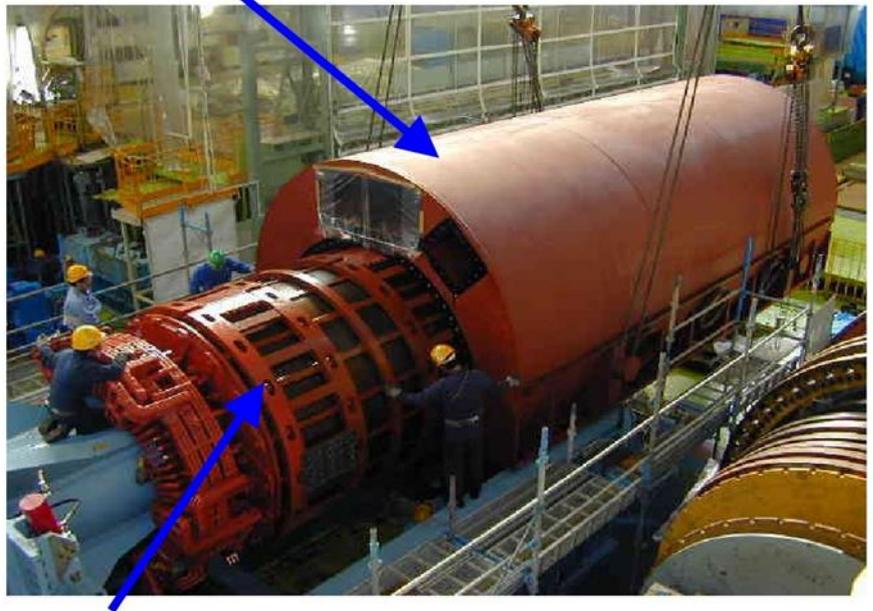
圖(一.d)定子線圈末端結構



- ENDWINDINGS ARE FIRMLY BOUND BY GLASS CORD
- WITHSTAND THE LARGE FORCE DEVELOPED FROM A SUDDEN SHORT CIRCUIT

圖(一.e)定子線圈末端結構說明

OUTER FRAME



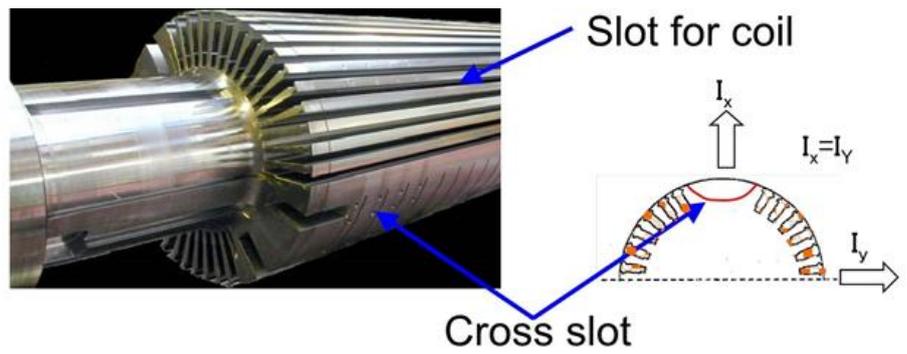
INNER FRAME

圖(一.f)發電機定子 Innerfram 與 Outerfram 組裝圖

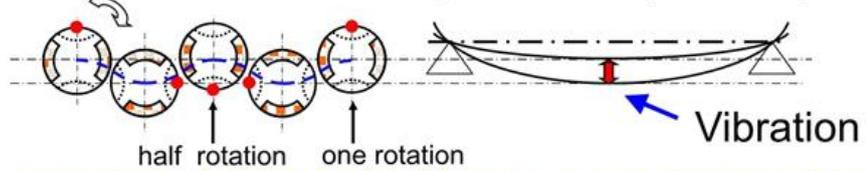
2.轉子結構：

發電機轉子鐵心主要部分是以整塊高強度合金鋼料鍛造而成，參見圖(二.a)轉子結構圖，轉子可承受高速迴轉所產生之機械應力，汽輪機與發電機之間的耦合裝置為收縮安裝型，轉子線圈兩端鐵心外之部分以高強度合金鋼(18Mn-18Cr)扣環(Retaining Ring)來承受高速迴轉產生的離心力，扣環先加熱至相當溫度，套進溫熱的轉子線圈端，冷卻後產生一強大的收縮力壓在線圈端上，整個轉子由兩端軸承支撐，軸承油封與轉子接觸部分全部予以絕緣，避免轉子鐵心感應之電壓經兩端任何部位構成回路。取下扣環後，轉子線圈終端參見圖(二.b)，本次參訪期間通霄新一機汽輪發電機轉子圖片參見圖(三)。

因本計劃發電機為2極式，N極與S極線圈分別放置於轉子圓周兩端，因結構上之非對稱，轉子旋轉時將因重量不平衡而產生振動，故在轉子表面加入 cross slot，如此可消除轉子旋轉時產生之二倍頻震動。

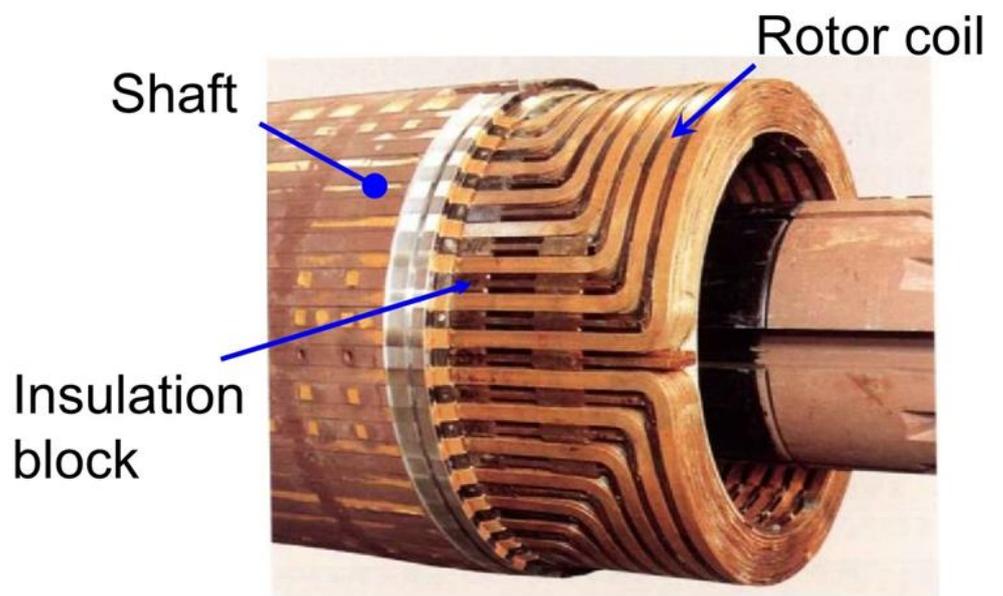


If there are not cross slots, following shaft vibration(double frequency) occurs



- ROTOR SHAFT MATERIAL IS SOLID FORGED Ni-Cr-Mo-V STEEL
- CROSS SLOTS FOR UNIFORM RIGIDITY

圖(二.a)轉子結構圖及 Cross Slot 說明



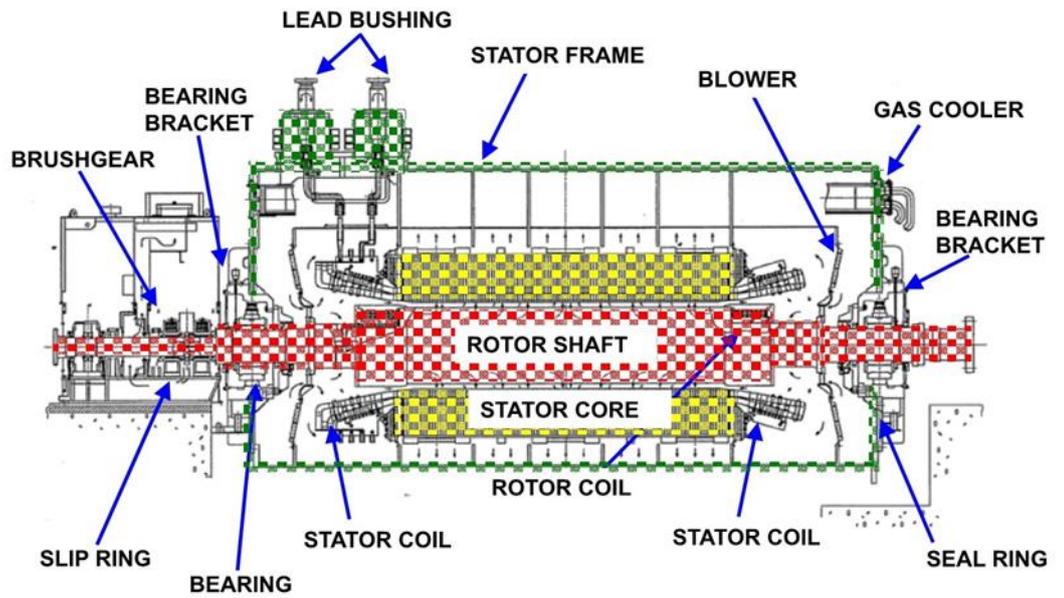
圖(二.b) 轉子末端線圈結構圖



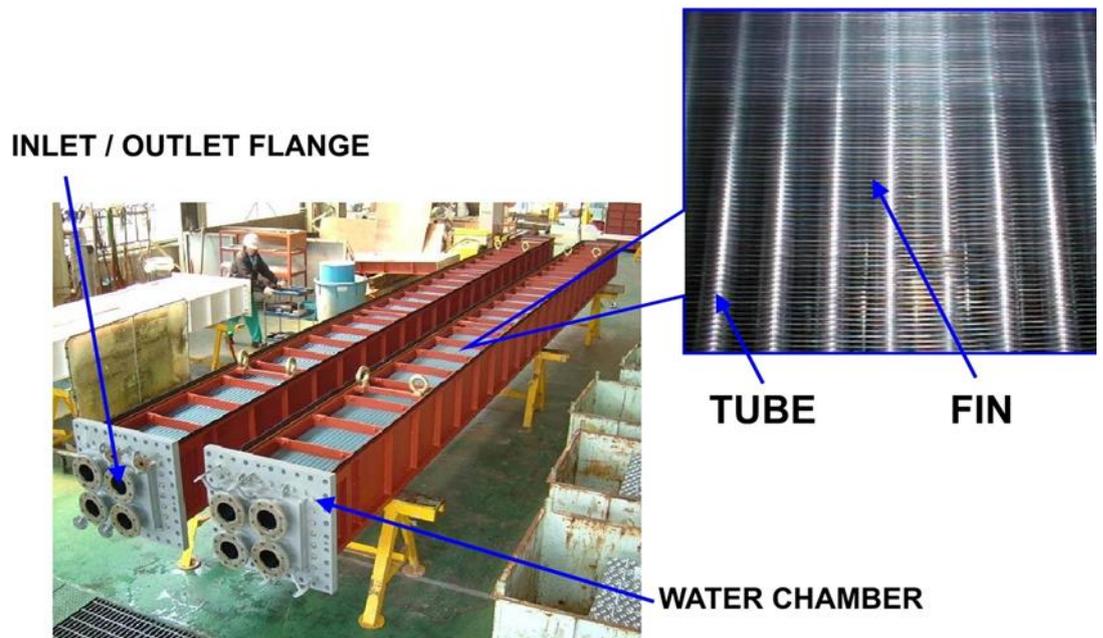
圖(三) 通霄新 1 機汽輪機發電機轉子於廠內組裝

3.冷卻方式：

發電機定子線圈採氫氣非直接冷卻方式，轉子線圈則為氫氣軸向流動直接冷卻方式(Radial Vent Direct Cooling)。在發電機轉子兩端各裝有一個風扇，將經氫氣冷卻器冷卻後之冷氫由轉子兩端，經氣隙吹向轉子中央，其中一部份冷氫則經扣環流入轉子線圈，經轉子線圈槽下之氫氣通道由軸向流動依序轉為徑向流動，穿過轉子線圈導體，經氣隙進入定子通風槽(Ventilation Slot)內之通風道(Slot Finger)，通過定子鐵心後稱為熱氫(Warm Gas)進入氫氣冷卻器，完成氫氣冷卻行程。相關說明參見圖(四.a)，圖(四.b)為氫氣冷卻器圖片。



圖(四.a) 氫氣冷卻發電機，氫氣流程圖

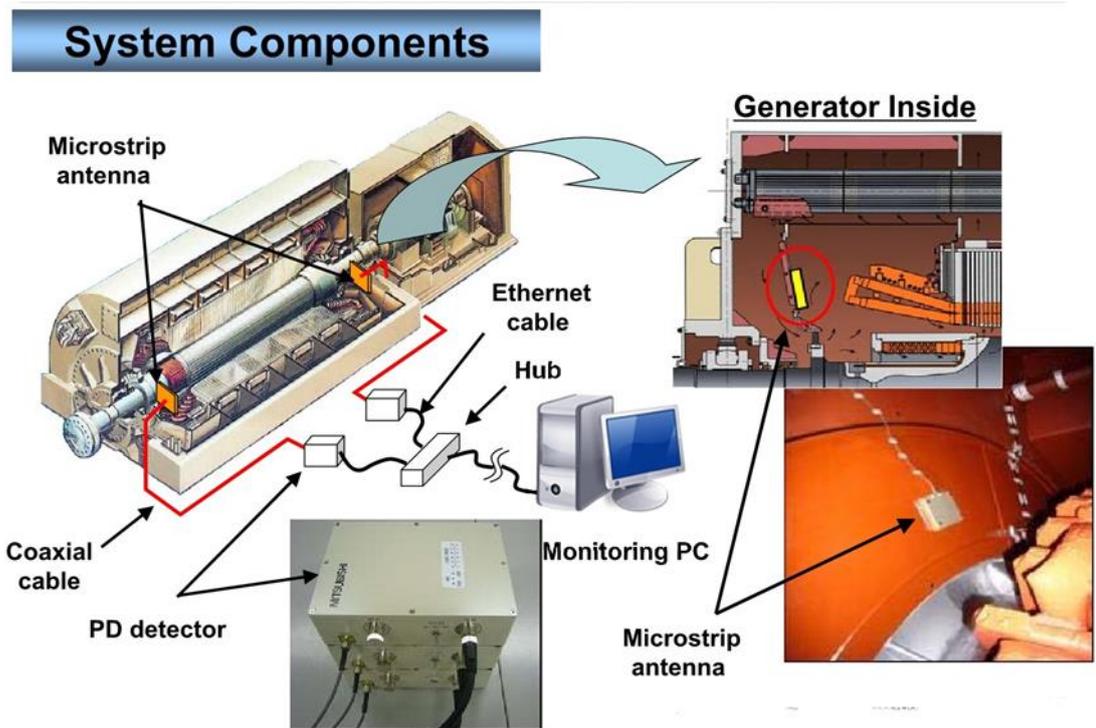


圖(四.b)發電機氫氣冷卻器

4.部分放電監測系統：

本計畫裝設部分放電監測系統參見圖(五)，在發電機運轉時可經由裝

設在發電機內之微型天線收集信號，在高壓旋轉電機產生部分放電之因素大約可分為以下四種類型：(1)內部放電，又包含絕緣材料內部空隙放電、內部絕緣層間之放電、及導體與絕緣層間之放電 (2)槽放電 (3)末端線圈表面放電 (4)相對相放電。依據三菱公司分析部分放電發生時之頻譜及背景雜訊，選擇 1.8GHz +/- 10MHz 做為監測標的，依此頻段波長設計接收天線，並將天線安裝於發電機兩端轉子冷卻風扇扇殼上，就近監測發電機定子線圈，由天線接收之信號，經類比訊號處理後，再經數位信號處理送至個人電腦，進行資料儲存。



圖(五) 部分放電監測系統圖

5. 發電機轉子線圈層間短路監測設備：

於研習期間三菱公司介紹發電機轉子線圈層間短路監測設備，其工作原理為在發電機定子線圈槽楔(wedge)上裝設磁通檢測器，當發電機轉子N極及P極線圈通過磁通檢測器時將分別感應磁通信號，藉由比較這兩者之磁通信號可得知在正常情況下兩者應一致，即兩者磁通量一致。當其中一個線圈發生層間短路，其呈現之感應磁通量將較低。經由量測、記錄前述磁通量，可瞭解轉子線圈之狀況，當發生層間短路但轉子線圈槽絕緣仍未被破壞，即轉子線圈發生接地事故前即可早期偵測到此一現象。本公司發電機目前仍未裝設本項偵測元件，於 MELCO 工廠參觀期間見到部分美國地區電力公司採購之發電機裝設本項元件。其裝設位置及工作原理參見圖(六.a)及圖(六.b)

Sample of Flux probe arrangement

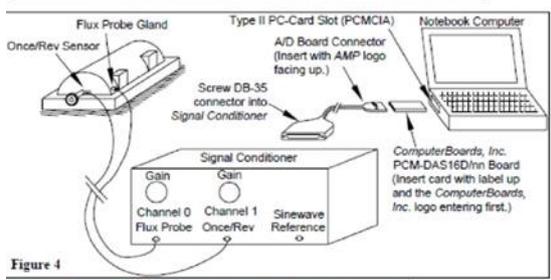
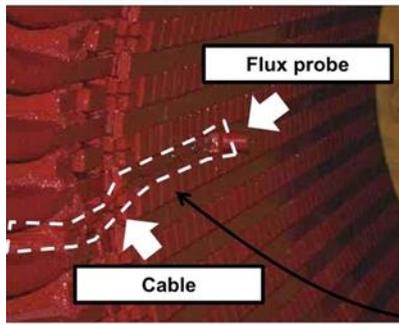
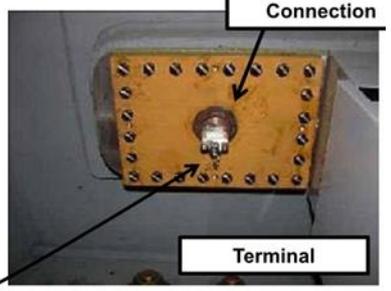
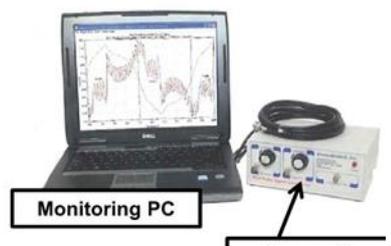


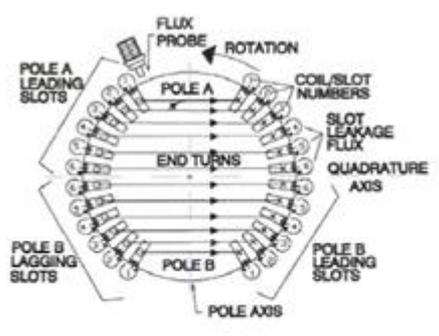
Figure 4



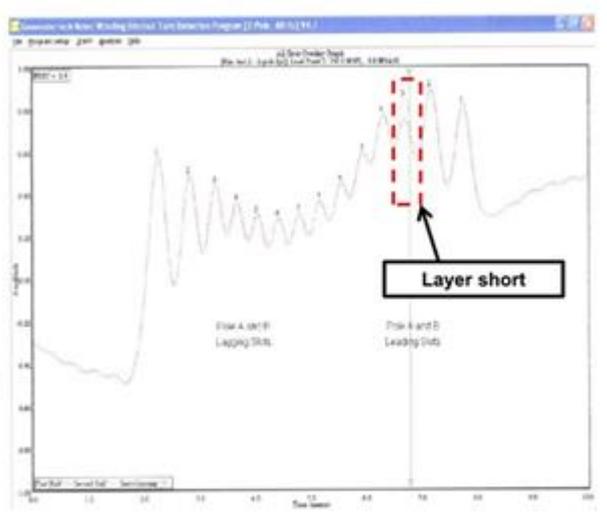
Flux probe is installed on the stator wedge, the cable should be fixed on the stator wedge and connecting with terminal.

圖(六.a) 發電機轉子線圈層間短路監測設備

Sample data of Flux probe



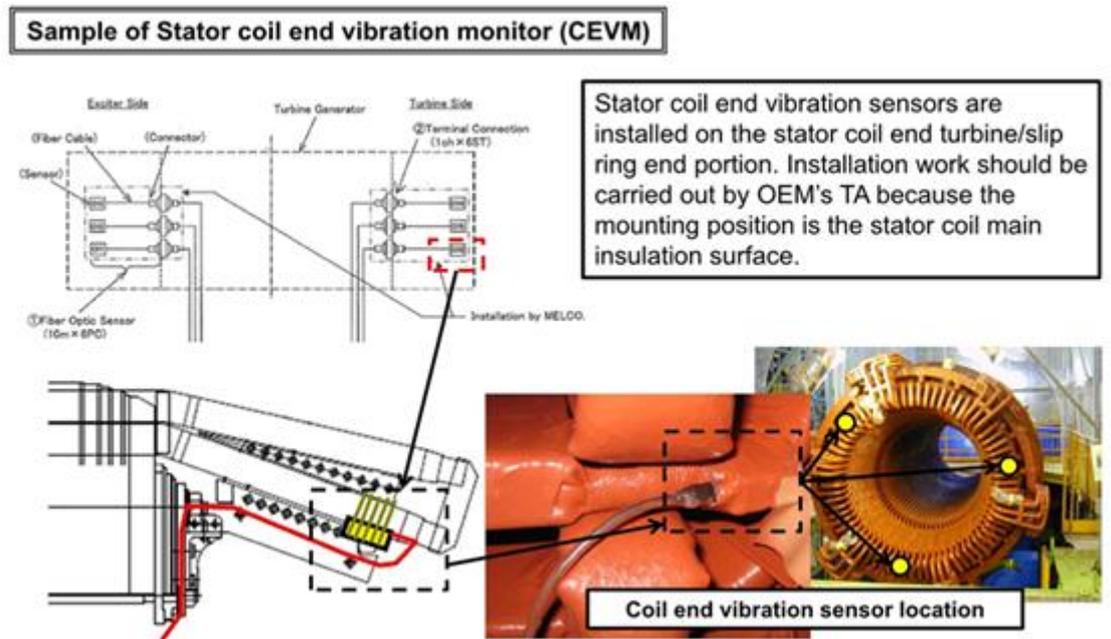
Layer short observation can be checked during the generator operation condition, then Owner can grasp the current rotor insulation condition and can plan the suitable maintenance menu earlier for next outage.



圖(六.b) 發電機轉子線圈層間短路監測設備工作原理

6. 定子線圈末端震動監測設備：

在發電機定子線圈末端裝設震動監測設備詳圖(七)，當固定末端線圈之 Glass Cord 磨損、Resin Ring 或 Coil Support 損壞，以致定子末端線圈未確實固定時，在發電機運轉時定子線圈將產生震動，線圈邊相互摩擦，經長時間運轉絕緣破壞，進而導致發電機相間短路事故。經由量測、記錄前述震動值，可瞭解定子線圈末端之狀況，並於異常狀況之初期即可掌握此一現象。本公司採購之發電機目前仍未裝設本項偵測元件。



圖(七) 定子線圈末端震動監測設備

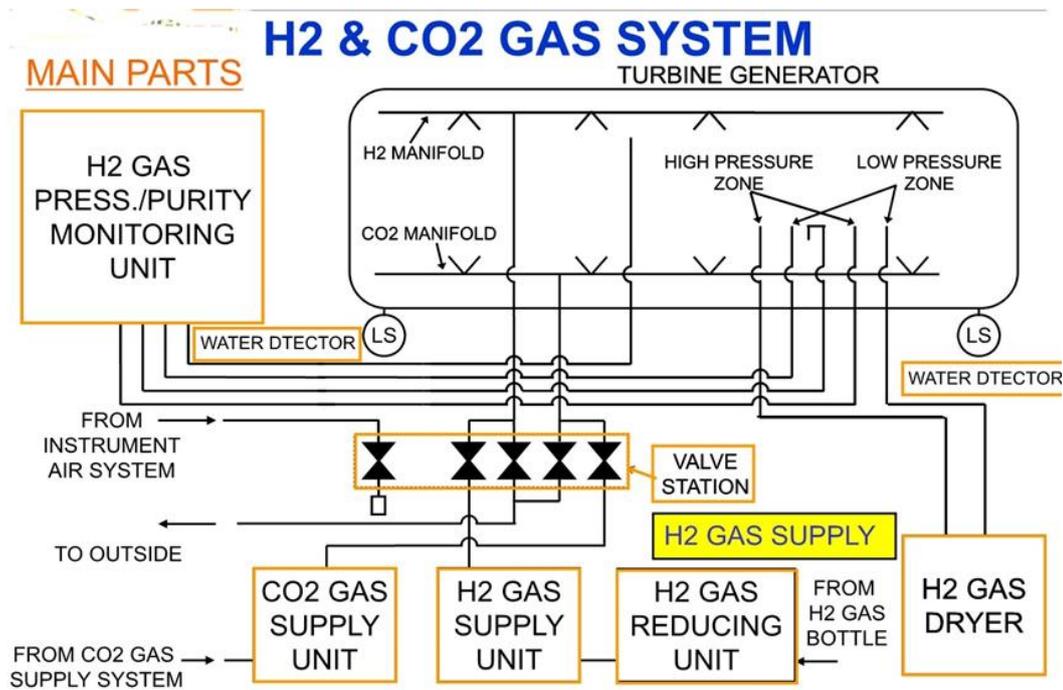
(二)、發電機輔機：

發電機輔機系統主要包含(1)發電機氫氣及二氧化碳系統(2)發電機封油系統，以下分別介紹：

1. 發電機氫氣及二氧化碳系統：

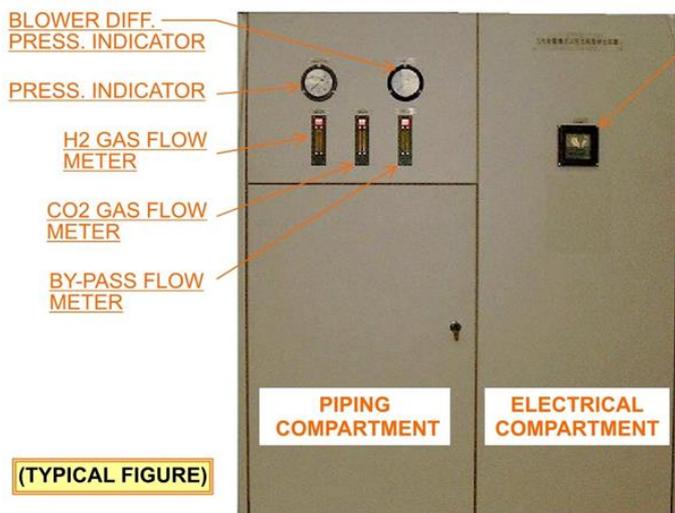
本系統主要目的為安全的將氫氣填充至發電機內，以及將氫氣移出發電機，在上述過程中使用二氧化碳做為交換介質。除此外，本系統具有維持發電機內氫氣壓力在 0.33-0.385MPag 之間，移走經由封油系統進入氫氣內之水氣，並監視氫氣之純度及壓力等功能。以功能區分氫氣系統主要包含：氫氣減壓系統、氫氣供應系統、二氧化碳供應系統、氫氣壓力及純度監視系統、氫氣乾燥系統、水氣偵測系統及閥體群(Valve Station)，這七大部分。詳如圖(八.a)發電機氫氣及二氧化碳系統方塊圖。在機組首次起動或發電機開蓋後重新起動，其氣體更換流程為，先由發電機下方導

入 CO₂ 以將空氣排出，接著由發電機上方填充氫氣，填充過程中，當氫氣濃度到達 95% 應先暫停，三小時後再檢查氫氣純度，確認符合運轉條件。反之在機組停機將氫氣排出過程為，先由發電機下方導入 CO₂ 將氫氣排出，接著由發電機上方導入儀用空氣將 CO₂ 排出。



圖(八.a)發電機氫氣及二氧化碳系統

H2 GAS PRESS./PURITY MONITORING UNIT



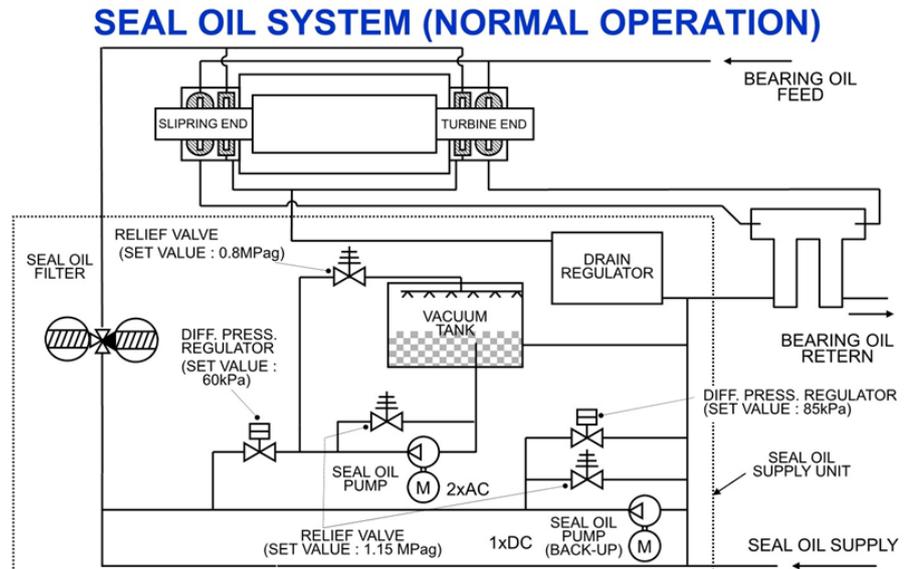
圖(八.b)發電機氫氣純度及壓力監視盤

(1) 氫氣減壓系統：位於氫氣鋼瓶區，主要功能為經壓力控制閥將氫氣

- 供應系統之氫氣壓力由15Mpa，減壓至0.8MPa，送到氣渦輪機區。
- (2)氫氣供應系統：位於氣渦輪機區，經控制閥將氫氣壓力由0.8MPa，減壓至0.35MPa，送到閥體群(Valve Station)，本盤面設有旁通針型閥(Needle Valve)，在控制閥故障時可以調整針型閥，以手動方式控制送到發電機的氫氣壓力。
- (3)閥體群(Valve Station):閥體群主要功能為控制各類氣體流向，在填充氫氣時，先將二氧化碳由發電機下半部主集管注入發電機，以將空氣排出，接著填充氫氣，將來自氫氣供應系統之氫氣送到氫氣壓力及純度監視系統進行流量量測，然後送到發電機上半部氫氣主氣管。在緊急狀況下，可將氫氣經由緊急洩放閥排至大氣。在長時間停機或發電機開蓋前，則進行氫氣排出之程序，先將二氧化碳由發電機下半部主集管注入發電機，以將氫氣排出，接著移去可移動式聯結管(Removable Link)，接上可撓式管路，將儀用空氣系統引入開始填充空氣。
- (4)二氧化碳供應系統: 位於二氧化碳鋼瓶區，主要功能為經壓力控制閥將二氧化碳供應系統之二氧化碳壓力由15Mpa，減壓至0.5MPa，送到氣渦輪機區。
- (5)氫氣乾燥系統：主要功能為移去氫氣中水氣，本計畫氫氣乾燥器為雙塔式具密閉再生型氫器乾燥器，當其中一台乾燥器運作時另一台將進入待機或再生模式。氫器乾燥器一端接至發電機底部氫氣集管高壓區，另一端為低壓區，以A塔進行氫氣乾燥，B塔進行再生為例，氫氣經四通閥進入A塔由Desiccant吸附氫氣中水氣，乾燥後氫氣流回發電機。此時B塔進行再生，經四通閥風扇將Desiccant中水氣加熱後帶出，至peltier element將水分離，進行再生程序。
- (6)水氣偵測系統：本系統主要偵測發電機中是否有任何液體存在，因此當氫氣冷卻器漏水或產生凝結水，以及油封系統故障封油流至發電機內部時，均可由液位偵測器得知相關訊息，人員可由現場視窗中觀測到液體並進行洩放。
- (7)氫氣壓力及純度監視盤：本盤面包含發電機冷卻風扇壓力差計、壓力計、氫氣流量計、二氧化碳流量計、旁通流量計等。在正常運轉時流經純度計之氫氣流量約為0.1-1.0L/min，本盤請參考圖(八.b)發電機氫氣純度及壓力監視盤。此外在發電機停機維修氫氣排放，即氫氣至二氧化碳過程中，量測氫氣排氣流量之流量計上並聯一回路量測氫氣純度，其中流經流量計之氫氣流量約為40L/min，流經純度計之氫氣流量約為0.1-1.0L/min。對流量及純度監測盤，在氫氣排放過程其取樣迴路先由發電機上方取樣，當顯示氫氣濃度為低時，切換為發電機下方取樣，直到偵測到CO₂時，改由CO₂流量計，量測CO₂排放流量，以確認是否可進導入儀用空氣，進行以空氣取代二氧化碳程序。

2.發電機封油系統：

封油系統主要目的為防止氫氣經由發電機轉子與發電機軸承間間隙逸散到外部，封油系統主要為將封油壓力提升至略高於發電機內氫氣壓力，封油系統單線圖詳圖(九.a)。在本次研習期間參訪三菱電機下包商時，正在進行通霄新一機汽輪機封油設備管路油洗，照片參閱圖(九.b)。



圖(九.a)發電機封油系統

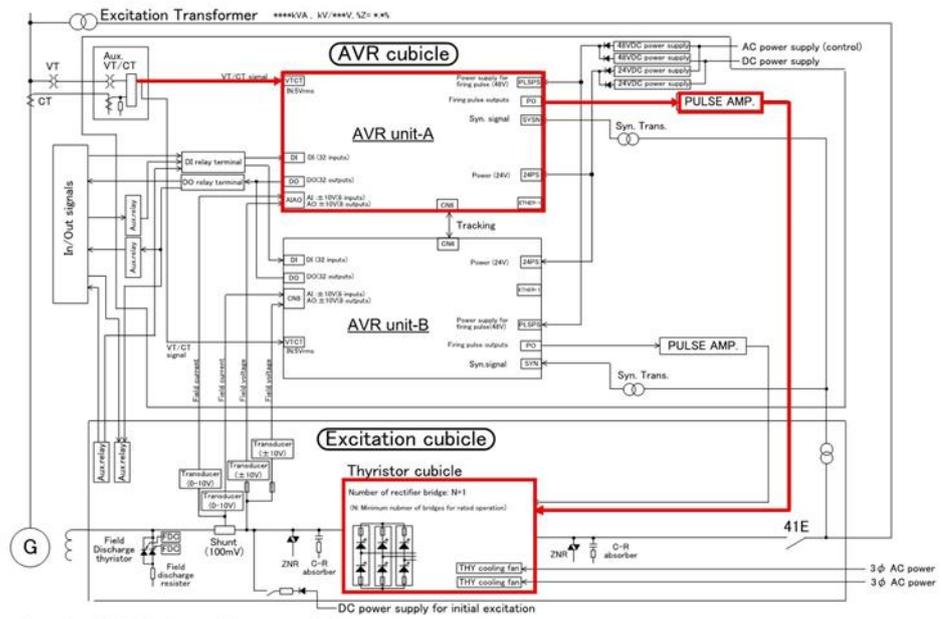


圖(九.b)通霄一號機汽機發電機封油系統進行管路油洗

封油系統與汽機發電機軸承潤滑系統之用油，均來自主潤滑油槽，本系統配置 2 台交流封油泵及 1 台直流緊急封油泵，進入封油系統之潤滑油先送到真空槽，經封油泵加壓後先由第一台釋放閥調整油壓為 1.15MPa，多餘的油經釋放閥送到封油泵入口端進行再循環。第二台釋放閥則調整油壓為 0.8MPa，多餘的油經第二台釋放閥送到真空槽噴灑系統，以除去潤滑油中之空氣及水氣。經第二台釋放閥調整後之封油壓力為 0.8MPa，經差壓調整閥後，封油壓力維持為發電機氫氣壓力+60kPa，送到封油環。封油環位於格蘭軸封器內，封油環氫氣側(內側)，設有迷宮封油環 (Labyrinth Seal Ring)，用以收集流至氫氣側之潤滑油，確保潤滑油不會流到發電機內部，氫氣側之潤滑油被收集至洩油調整槽，再送到軸承潤滑油回收槽。流到封油環空氣側(外側)之潤滑油，與發電機軸承潤滑油，同時流到軸承潤滑油回收槽，然後送至主潤滑油槽。當兩台交流封油泵 MCC 未動作且封油壓力下降到 0.35MPa，由直流電源供電之緊急封油泵啟動，經差壓調整閥後，封油壓力維持為發電機氫氣壓力+85kPa。此外本系統設置緊急氫氣系統，在緊急狀況下運轉人員可按下封油系統控制盤上之氫氣釋放按鈕，電磁閥動作後氫氣控制閥開啟，氫氣進入軸承進行緊急沖放以防止氫氣洩漏至外部。

(三)、激磁系統：

本計劃採用靜態激磁系統，由發電機端經激磁變壓、閘控整流器盤提供發電機所需之激磁電源。激磁系統盤面包含：磁場斷路器(FCB)盤、矽控整流器盤(Thyristor Panel)、SAB 盤及 MEC 7000 型自動電壓控制盤(AVR)。激磁系統結構圖參見圖(十)。以下將分別敘述各設備及其功能：



圖(十) 激磁系統結構圖

1.自動電壓調整器控制盤(AVR)

自動電壓控制盤(AVR)主要提供以下 4 種功能：(1)調整發電機端電壓：在無載狀況下調整電壓調整器 90R 即可改變發電機端電壓。(2)調整無效電力：當發電機連接到系統時，調整發電機電壓即可控制送到系統的無效電力。(3)增進電力系統穩定性：高反應比自動電壓調整器，在系統擾動時可快速增加或減少激磁，增進暫態穩定度(通常定義暫態區域為，由擾動開始 0-1 秒鐘內)。在事故發生時，磁場電壓快速增加以維持發電機端電壓保持定值，若激磁系統反應太慢，發電機將無法維持電壓，因此發電機將失去同步。電力系統穩定器 PSS(Power System Stability)，則在系統擾動後，適度增加阻尼，防止激磁系統過度反應，儘速回復至穩定狀態，因此 PSS 可增進動態穩定度(通常定義動態區域為，由擾動開始 1-10 秒鐘範圍內)。(4)在機組進行卸載時，因負載瞬間減少，故電樞反應變小，因此 AVR 需即時反應降低激磁電壓，以防止發電機端電壓瞬間增加。

發電機端電壓調整功能，EC 7000 型自動電壓調整器控制盤(AVR)，包含雙重備份之電源供應器及 AVR 模組、擴充控制器、脈波放大器及圖控介面(GOT Graphic Operation Terminal)大器。因本計劃之自動電壓控制盤(AVR)模組為雙重備分，故在同一時間僅有一組模板進行控制，另一組為 Hot Stand-by 狀態。當主控模板發生中度以上故障狀況時，且備援模組為正常或輕度故障時，系統將自動切換至備援模板，且不影響機組之運轉，在此同時送出信號通知值班人員主控制模板故障，其切換條件詳如圖(十一)。

Concept of changeover for duplex system

The channel, which is slighter for failure condition, will be selected automatically.

A channel	B channel	Selected channel
Normal	Normal	A (initial condition)
Light Fault	Normal	B
Light Fault	Light Fault	B (no changeover)
Light Fault	Middle Fault	A
Middle Fault	Middle Fault	A (no changeover)
Heavy Fault	Middle Fault	B
Heavy Fault	Heavy Fault	Trip of generator

Light Fault: AVR failed, but still can keep normal operation

Middle Fault: AVR failed and AVR changeover to manual mode. (cannot operated by auto mode)

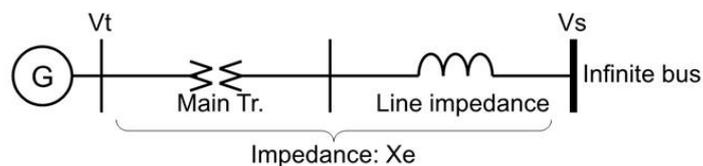
Heavy Fault: AVR failed and AVR trip (cannot keep operation)

圖(十一)雙重備份 AVR 模組切換條件

自動電壓調整器控制盤(AVR)主要的功能為：

- (1)調整發電機端電壓，控制發電機之無效功率，增加系統穩定性，在汽機發電機卸載時抑制發電機端電壓之突升等功能。其中電壓調整功能，主要由自動電壓調整器(90R)執行，發電機端電壓小於90R之設定值時，AVR送出之觸發信號，將減小閘流體觸發角，提升激磁電流。反之當發電機端電壓大於90R之設定值時，AVR送出之觸發信號，將增大閘流體觸發角，降低激磁電流。無效功率之調整，經由調整發電機端電壓可以控制發電機之無效功率，參見圖(十二)，由圖中得知當90R之設定值增加時，發電機端電壓增加，機組運轉在落後功因，即送出無效功率。當90R之設定值減少時，發電機端電壓降低，機組運轉在越前功因，即吸入無效功率。
- (2)自動電壓調整器可以增加系統之穩定，參見圖(十三)，在輸電線路故障時，由故障開始至清除約需4-5週期(約一秒鐘)，在故障清除後，若發電機組之動態穩定度不足則將影響有效功率之輸出，產生較長之震盪。更進一步若機組之暫態穩定度不佳，則機組無法送出有效功率，並導致機組解聯。高初始反應(High Initial Response)之激磁系統，可以在電力系統故障時，瞬間提升發電機電壓，使發電機維持在與系統同步。為提昇機組暫態穩定度，通霄機組即採用高初始反應(High Initial response)之靜態式勵磁系統。但採用高初始反應激磁系統之機組，在電力系統擺盪時，機組可能產生有效功率的擺盪現象，導致動態穩定度不佳，因此在激磁系統中加入電力系統穩定器(Power System Stabilizer)以消除此追逐效應。又PSS通常以軟體程式，來達成相關控制功能，且附屬於AVR功能中。

(2) Adjust MVars (reactive power)



$$\text{Reactive power: } Q = (V_t - V_s) \frac{|V_t - V_s|}{X_e}$$

MVar (Reactive power: Q) is regulated by generator terminal voltage. Therefore AVR can regulate MVars.

Vt is increased → MVars will be increase

Vt is decreased → MVars will be decrease



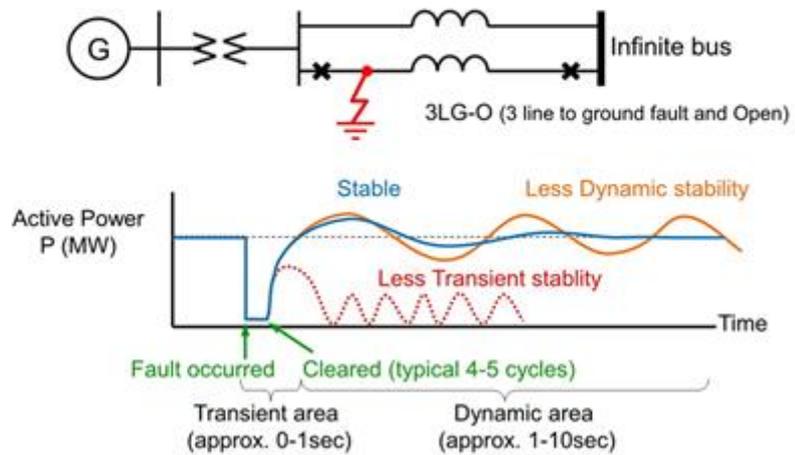
To increase MVars → 90R raise

To decrease MVars → 90R lower

圖(十二)無效功率之調整功能

(3) Improve power system stability

There are two type of Power system stability.

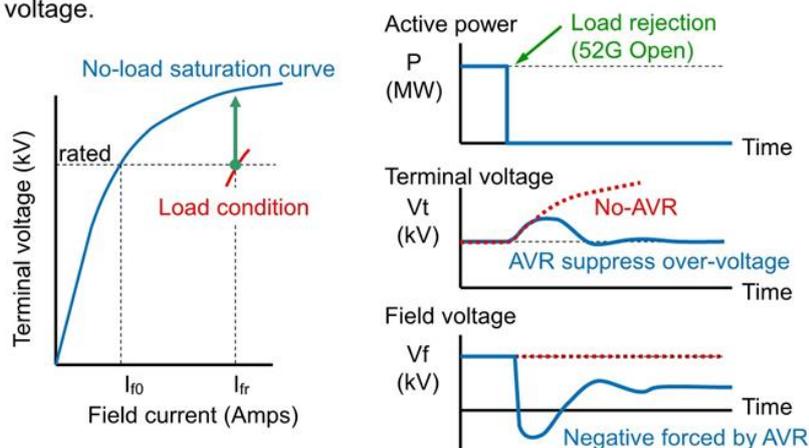


圖(十三)增進系統穩定度

- (3)在機組卸載時抑制過電壓現象，特別是在滿載情況下發電機斷路器或開關場之GIS突然打開，此時發電機瞬間失去負載，對發電機氣隙而言，瞬間電樞電流(即定子電流)降為零，故電樞反應亦降為零，但機組之轉軸因機械慣性之因素，在此瞬間仍維持近同步轉速，故發電機產生電壓突升現象。為維持發電機端電壓在定值避免過電壓情況發生，此時激磁系統瞬間將閘流體導通角延後至180度以後，對發電機磁場線圈而言，在此一瞬間外加之電壓為負值。因發電機磁場電路可等效為一階RL串聯電路。對L之儲能效應，可以一等效串聯電流源代替，故在激磁系統加入負電壓後，可以迅速移除電感L內儲能，降低磁場電流，減少氣隙磁通，使發電機端電壓迅速回到正常值，參見圖(十四)。

(4) Suppress the over-voltage on load rejection

When the load rejection, field current and field voltage should be reduced rapidly to keep terminal voltage constantly and prevent over-voltage.



圖(十四)在卸載時抑制過電壓現象

2. 閘控整流器盤：

靜態激磁盤則包含：磁場斷路器、橋式閘流體等。橋式閘流體採用 N+1 之設計觀念，共有三套橋式閘流體，其中兩套工作即可提供運轉所需激磁電力，運轉中可將其中一組橋式閘流體抽出進行檢修或更換，且不影响機組運轉。

3. 激磁系統控制功能：

激磁系統的控制模式可分為：

- (1) 電壓定值模式 (Voltage Constant Mode) 及磁場定值模式 (Field Constant Mode)。電壓定值模式 (Voltage Constant Mode) 又稱為自動模式，在本模式下發電機電壓為定值，AVR 將根據發電機端電壓值與 90R 設定值進行控制，操作人員可以由控制室調整電壓設定器 90R，將設定器之設定值提升或降低，比壓器量測發電機實際端電壓，由比較 90R 之設定值與發電機之實際值，控制 AVR 之輸出，調整激磁脈波，使發電機端電壓依 90R 之設定變動，手動設定器 70E 在此時僅追蹤實際之磁場電壓值。在機組起動階段，當設定為自動模式，在磁場斷路器 41E 投入後，發電機端電壓自動建立，若 30 秒內未到達額定電壓值，則激磁系統跳脫並發出初始激磁失敗信號。
- (2) 磁場定值模式 (Field Constant Mode) 又稱為手動模式，在本模式下發電機氣隙磁通為定值，即發電機磁場激磁電流維持一定。本模式係依回授之磁場電流信號調整激磁脈波，使發電機氣隙磁通維持定值，通常在比壓器 (PT) 和/或類比輸入故障或測試時使用。在比壓器 (PT) 和/或類比輸入故障時，自動電壓調整器將自動切換為手動模式，操作人員可以由控制室調整電壓設定器 70E，將設定器之設定

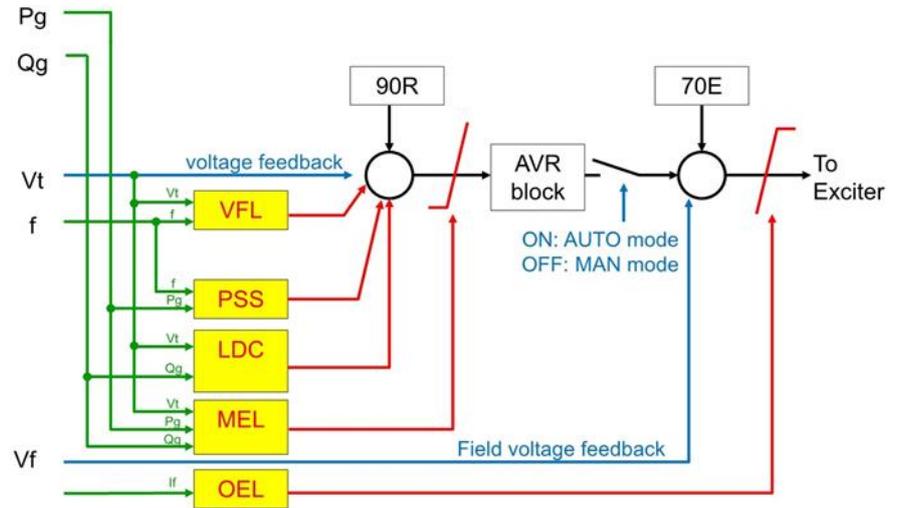
值提升或降低，自動設定器90R此時若功能還正常，亦僅能追蹤實際之磁場電壓值之變化。

(3)激磁系統的保護功能可分為：過激磁限制(OEL Over Excitation Limiter)、最低激磁限制(MEL Minimum Excitation Limiter)、電壓頻率比值限制(VFL Voltage Per Frequency Limiter)、電力系統穩定器(PSS Power System Stabilizer)、線路壓降補償(LDC Line Drop Compensator)。過激磁限制，主要為保護發電機磁場線圈過熱，當發電機運轉在落後功因時，將增加磁場電流，當發生過激磁時，過激磁限制功能將降低磁場電流，本項功能無論在自動模式或手動模式均能執行。最低激磁限制，主要要以保護發電機定子端鐵心，避免發電機在越前運轉時，端子鐵心過熱。電壓頻率比值限制，本功能主要為使電壓與頻率比值為一定，當頻率過低時，本功能將自動調整電壓值，以避免鐵心飽和而過熱。電力系統穩定器，在電力系統擺盪時，機組可能產生有效功率的擺盪現象，導致動態穩定度不佳，因此在激磁系統中加入電力系統穩定器(Power System Stabilizer)以消除此追逐效應。線路壓降補償，用以補償主變壓器與線路之壓降，使自動電壓調整器精準判定系統電壓及發電機電壓，以控制無效電力。

(4)整體AVR控制方塊圖詳如圖(十五)所示，由方塊圖中得知在自動模式(Auto Mode)下，操作人員設定90R之數值，系統將根據回授之發電機端電壓值與90R數值進行比較，再依據過激磁限制(OEL Over Excitation Limiter)、電壓頻率比值限制(VFL Voltage Per Frequency Limiter)、電力系統穩定器(PSS Power System Stabilizer)、線路壓降補償(LDC Line Drop Compensator)、最低激磁限制(MEL Minimum Excitation Limiter)，計算出激發閘流體之導通角控制送到激磁線圈之電壓值。在手動模式(Manual)時，所有與發電機電壓有關之參數均無法執行，故過激磁限制(OEL Over Excitation Limiter)、電壓頻率比值限制(VFL Voltage Per Frequency Limiter)、電力系統穩定器(PSS Power System Stabilizer)、線路壓降補償(LDC Line Drop Compensator)、最低激磁限制(MEL Minimum Excitation Limiter)均失去功能，由操作人員設定之70E與磁場電壓進行比較，再與OEL(OEL Over Excitation Limiter)，之設定值進行比較後，計算出激發閘流體之導通角控制送到激磁線圈之電壓值。

在上課期間通霄新一機氣渦輪發電機自動電壓調整器相關盤面正在 MELCO 廠內組裝，相關照片詳見圖(十六-a)、圖(十六-b)及圖(十六-c)，圖(十六-d)為激磁變壓器線圈於三菱電機 Ako 工廠內進行線圈阻抗試驗。

Function Block Diagram



圖(十五)自動電壓調整器系統方塊圖



圖(十六-a)通霄新一機氣渦輪發電機 AVR 相關盤面



圖(十六-b)通霄新一機氣渦輪發電機 AVR 閘流體托盤



圖(十六-c)通霄新一機氣渦輪發電機 AVR 模擬訓練盤測試



圖(十六-d)通霄新一機汽輪發電機激磁變壓器進行線圈阻抗量測

(四)、最低激磁限制(MEL Minimum Excitation Limiter)設定說明：

最低激磁限制，主要要以保護發電機定子端鐵心，避免發電機在越前運轉時，定子端鐵心過熱。當發電機越前運轉吸入之無效電力值超過 MEL 設定值時，MEL 將增加激磁電流，因 MEL 之執行係由發電機之有效功率(P)及無效功率(Q)值來進行判斷，而上述數值又與發電機端電壓有關，故 MEL 僅在 Auto Mode 下才能被執行，OEL 之功能方塊圖參見圖(十七)。

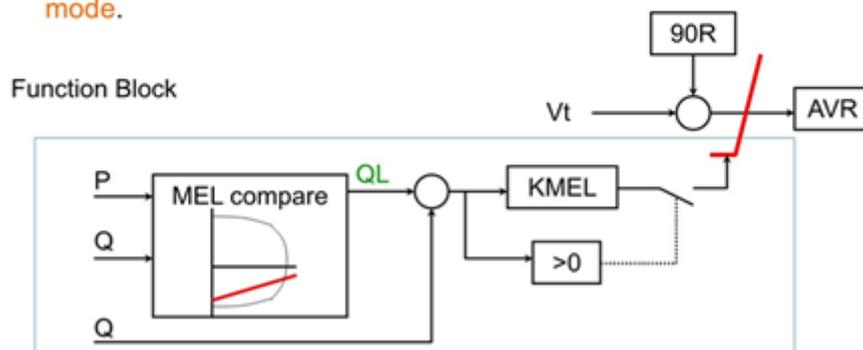
Minimum Excitation Limiter (MEL-1)

Purpose and feature of the function

MEL is provided to prevent over heating of Stator Core-end.

MEL increase excitation when the Var goes lead-side over setting value on the P-Q curve.

MEL operate due to P-Q value, therefore it is applicable **only AUTO mode**.



圖(十七) MEL 功能方塊圖

通霄氣渦輪發電機之容量曲線圖詳如圖(十八)，汽輪發電機之容量曲線圖詳如圖(十九)。發電機運轉所受之限制詳圖(二十)，曲線上方標示為 A 之區域，表發電機在落後功因下運轉時，其運轉能力主要受限於轉子線圈溫度。曲線右方標示為 B 之區域，表發電機在額定負載下之越前或落後運轉能力，主要受定子線圈溫度之影響。曲線下方標示為 C 之區域，表發電機在越前功因下運轉時，其運轉能力主要受限於發電機定子兩端鐵心之溫度。而最低激磁限制(MEL Minimum Excitation Limiter)，即為保護發電機定子兩端鐵心之溫度，但在設定最低激磁限制時除發電機容量曲線外，應考慮發電機穩態穩定曲線問題，參見圖(二十一)及圖(二十二)。

KC920680A

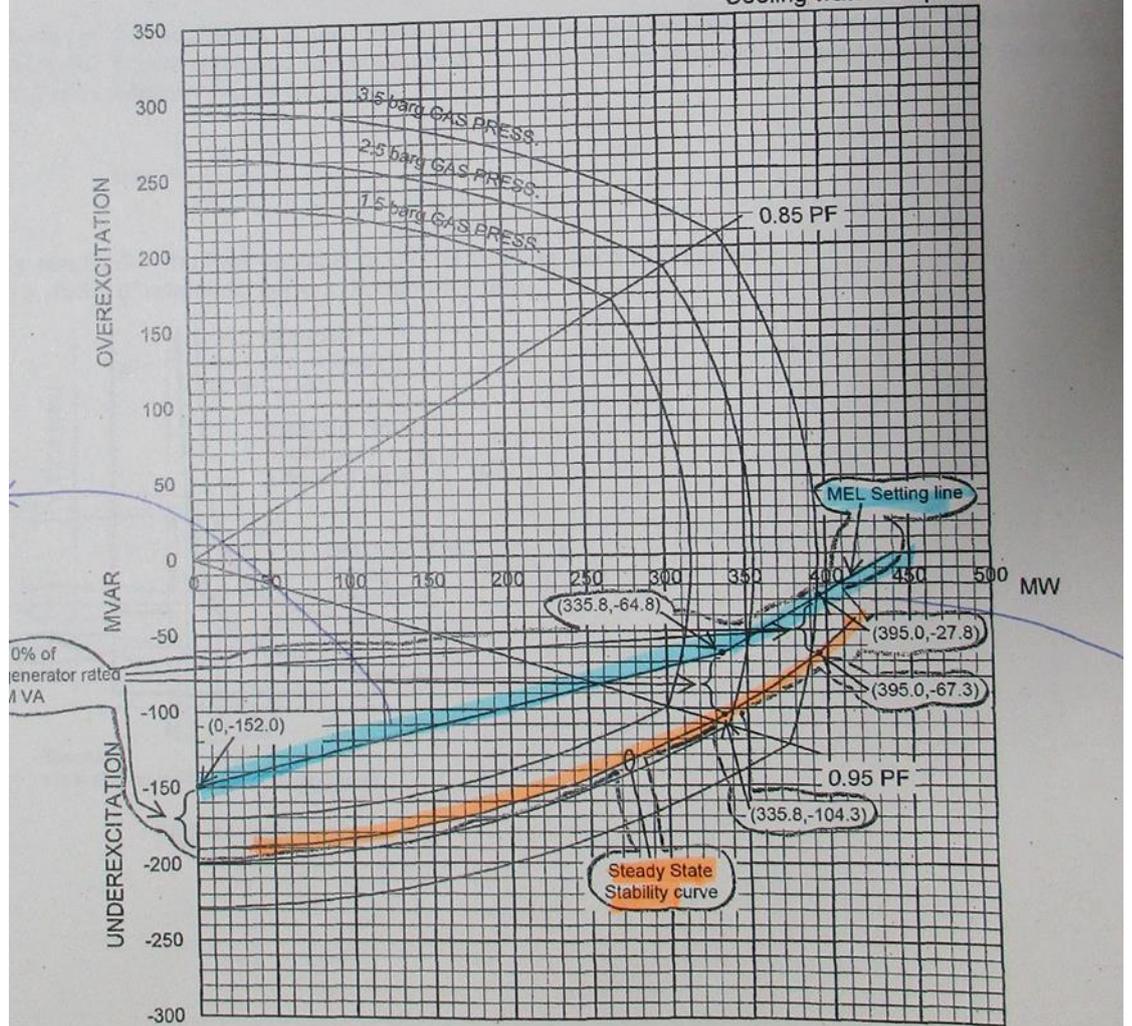
TAIWAN POWER COMPANY
TUNG HSIAO POWER PLANT RENEWAL PROJECT GTG



395000 KVA, 335750 kW, 85 %PF, 60 Hz, 3600 min-1,
20 kV, 11403 A, 3.5 barg, 390 VEXC

HYDROGEN INDIRECTLY COOLED GENERATOR
CAPABILITY CURVE

Cooling water temp. : 35°C



APPROVED	<i>[Signature]</i>
CHECKED	<i>G. Mahamud</i>
DESIGNED	2014-7/25 <i>Y. Raito</i>

Figure. 1-3

5/7

KC920680A

圖(十八) 氣渦輪發電機之容量曲線圖與 MEL 設定

TAIWAN POWER COMPANY
TUNG HSIAO POWER PLANT RENEWAL PROJECT STG



376000 kVA, 319600 kW, 85 %PF, 60 Hz, 3600 min-1,
20 kV, 10854 A, 3.5 barg, 390 VEXC

HYDROGEN INDIRECTLY COOLED GENERATOR
CAPABILITY CURVE

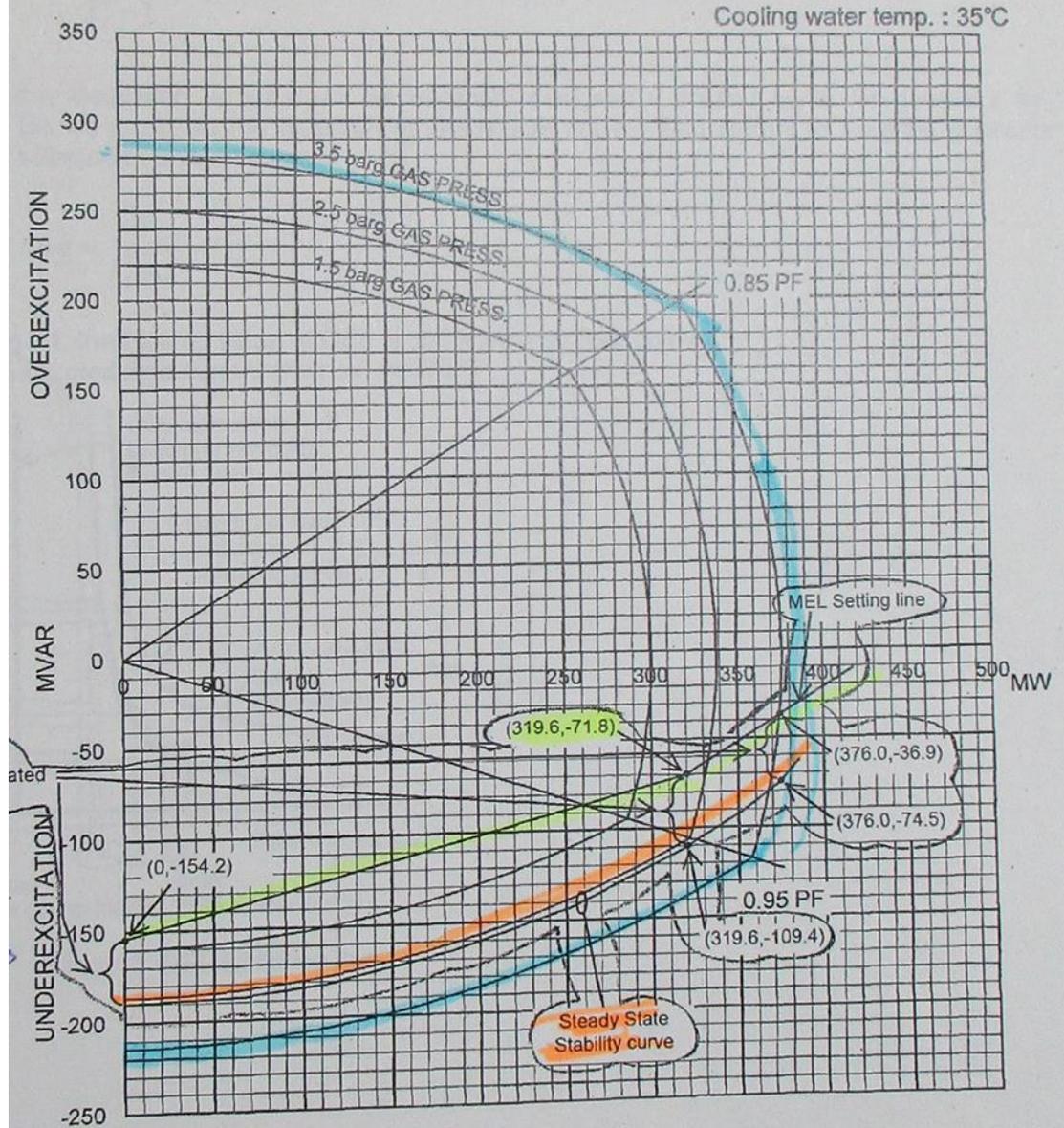


Figure. 1-3

APPROVED	<i>K. Tomoda</i>
CHECKED	<i>T. Mahamun</i>
SIGNED	2014-7/25 <i>Y. Saito</i>

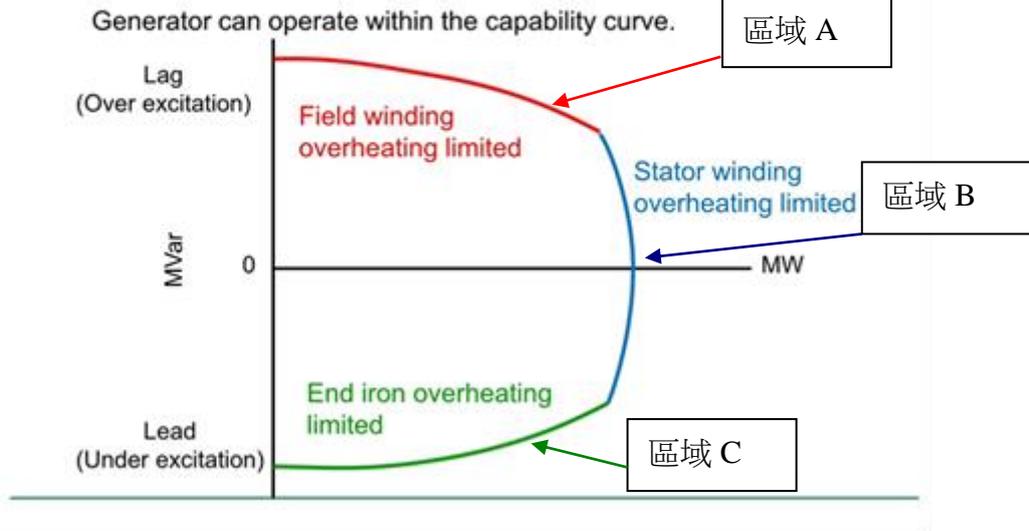
5/7

KC920683A

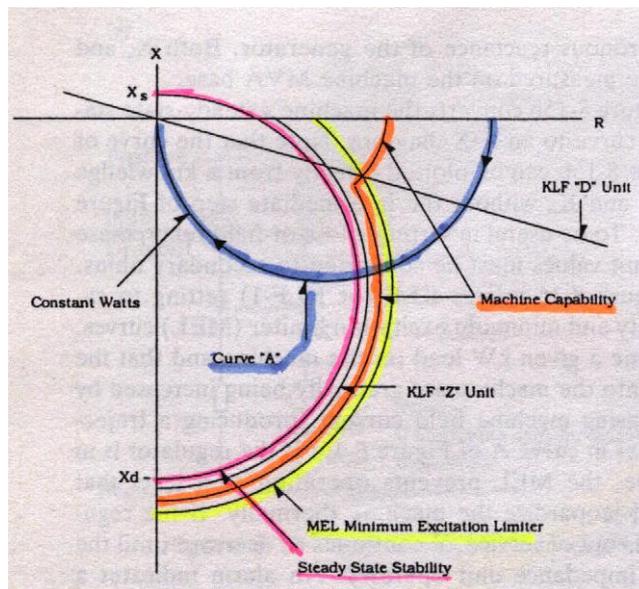
圖(十九) 汽輪發電機之容量曲線圖與 MEL 設定

Characteristics of Generator (2)

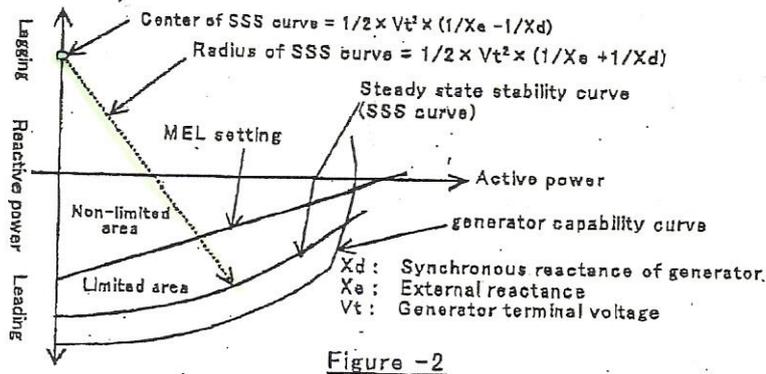
(2) Capability curve



圖(二十) 發電機運轉所受之限制圖



圖(二十一) 氣渦輪發電機 MEL 設定說明



- 1/4 -

圖（二十二）發電機容量曲線、穩態穩定度曲線與 MEL 設定之關係

穩態穩定曲線除考慮發電機之同步電抗外，需加入由發電機側所看到之系統阻抗值。為了使發電機與系統保持同步，發電機必須運轉在穩態穩定曲線以內，以物理意義觀點來看，穩態穩定曲線代表發電機所能送出的最大功率。

經簡化可得發電機端（發送端）穩態穩定曲線之圓心位置 C 為：

$$C = 1/2 \times V_1^2 \times (1/X_e - 1/X_d)$$

X_e ：主變壓器電抗與由通霄開關場端所看見之系統等效電抗值之和。

X_d ：發電機直軸電抗值

穩態穩定曲線之半徑 R 為：

$$R = 1/2 \times V_1^2 \times (1/X_e + 1/X_d)$$

令發電機端電壓 $V_1 = 1.0 \text{ pu}$

1. 氣渦輪發電機 MEL 設定：

由通霄氣渦輪發電機之參數 $X_d = 1.86 \text{ pu}$ ， $X_e = 0.3 \text{ pu}$ （以 395MVA 為基底值），計算得 $C = 1.26 \text{ pu}$ ， $R = 1.747 \text{ pu}$ 。

在課程期間，與 MELCO 發電機保護部門人員討論，得知有關 MEL 之設定值，依 MELCO 之經驗值，應與穩態穩定曲線保持 10% 之緩衝區。將相關數據帶入上述穩態穩定度公式，得：

$$C = 1/2 \times V_1^2 \times (1/X_e - 1/X_d) = 1/2 \times 0.95^2 \times (1/0.3 - 1/1.86) = 1.262$$

$$R = 1/2 \times V_1^2 \times (1/X_e + 1/X_d) = 1/2 \times 0.95^2 \times (1/0.3 + 1/1.86) = 1.747$$

以 $P=0$ 為例，由圓心 $C(0, 1.262)$ 減半徑 $R(0, 1.747)$ 得， Q （無效功率）點落在 $(0, -0.485)$ ，將之乘以基準值 395MVA 得 $-0.485 \times 395 = -191.58 \text{ MVar}$ ，依據 MELCO 之經驗與穩態穩定曲線保持 10%（在此指

基準值即發電機額定容量 395MVA 的 10%)，故可得 $-191.58+395\times 10\%$
 $=-152\text{MVar}$ ，此即圖(十八)中(0, -152)，依此類推分別計算額定 MW(即
335.8MW)，以及額定 MVA(即 395MW)時之值分別為(335.8, -64.8)，
(395.0, -27.8)，利用前述三點，帶入 $Y=aX+b$ ，可得 MEL 由兩條直線
 $Y=0.26X-152$ 及 $Y=0.625X-275$ 所構成。此與林口計畫之 MEL 計算方式不
一同，在林口計畫中係算出穩態穩定度 $P=0$ 時之 Q 值後，由原點算起減去
穩態穩定曲線值乘上 10%，做為 MEL 設定。

當考慮發電機電壓為 0.95pu 之最差狀況，在本案穩態穩定曲線，在
有效功率 $P=0$ 時，無效功率 $Q=-192\text{MVar}$ ，經計算本點之 MEL 值為
 -152MVar 。在有效功率 $P=335.8\text{MW}$ 時，穩態穩定曲線上無效功率
 $Q=-104.3\text{MVar}$ ，經計算本點之 MEL 值為 -64.8MVar 。當有效功率 $P=395.0\text{MW}$
時，穩態穩定曲線上無效功率 $Q=-67.3\text{MVar}$ ，經計算本點之 MEL 實設值為
 $Q=-27.8\text{Mvar}$ 。相關圖面請參照圖(十八)。

2. 汽輪發電機 MEL 設定：

由通霄汽輪發電機之參數 $X_d=1.77\text{pu}$ ， $X_e=0.3\text{pu}$ (以 376MVA 為基底
值)，計算得

$$C=1/2\times V_1^2\times (1/X_e-1/X_d)=1/2\times 0.95^2\times (1/0.3-1/1.77)=1.249 \text{ pu}$$

$$R=1/2\times V_1^2\times (1/X_e+1/X_d)=1/2\times 0.95^2\times (1/0.3+1/1.77)=1.759 \text{ pu}$$

在課程期間，與 MELCO 發電機保護部門人員討論，得知有關 MEL 之設
定值，依 MELCO 之經驗值，應與穩態穩定曲線保持 10%(在此指基準值即
發電機額定容量 376MVA 的 10%)之緩衝區，其計算方式與氣渦輪發電相
同，當考慮發電機電壓為 0.95pu 之最差狀況，在本案穩態穩定曲線，在
有效功率 $P=0$ 時，無效功率 $Q=-192\text{MVar}$ ，經計算本點之 MEL 值為
 -154.2MVar 。在有效功率 $P=319.6\text{MW}$ 時，穩態穩定曲線上無效功率
 $Q=-109.4\text{MVar}$ ，經計算本點之 MEL 值為 -71.8MVar 。當有效功率 $P=376.0\text{MW}$
時，穩態穩定曲線上無效功率 $Q=-74.5\text{MVar}$ ，經計算本點之 MEL 實設值為
 $Q=-36.9\text{Mvar}$ 。相關圖面請參照圖(十九)。

經與 MELCO 公司人員討論除目前之 MEL 設定外，亦可提供另一組設
定，但在該設定下雖可提升進相能力，但機組有效功率之輸出將受影響。
此外在特定客戶要求下，MELCO 亦可將 10%之 margin，縮減為 5%。但因
機組之運轉將極為接近穩態穩定曲線，故在系統暫態時有可能導致機組失
去同步。目前通霄電廠之 MEL 暫時以 MELCO 觀點規劃，是否以林口計畫
方式規劃待討論。

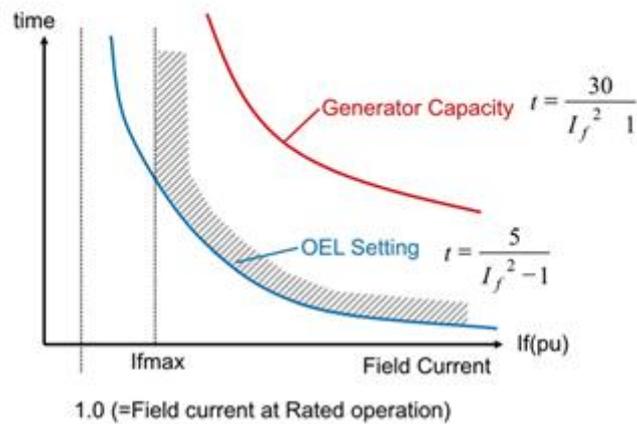
(五)、最高激磁限制(OEL Over Excitation Limiter)設定說明：

本設定為保護發電機轉子線圈避免過熱，OEL 係依據磁場電流信號，因此
在自動模式及手動模式，OEL 均可執行，OEL 動作具反時性其設定曲線詳

如圖(二十三)，其中發電機容量曲線為 $t=30/(I_f^2-1)$ ，OEL 設定值為 $t=5/(I_f^2-1)$ ，在 $I_f < 1.05$ pu 時動作時間為無窮大，即 OEL 未動作限制磁場電流，在 I_f 大於 1.05 後則依公式計算其延時值，OEL 動作時 AVR 將輸出信號降低磁場電流值至 1.0 pu 並發出警報信號，警報信號將持續到磁場電流降至 0.95pu 才會消失。在 OEL 公式中調整分子值即可使 OEL 接近發電機容量曲線，通常建議分子選 5。OEL 功能方塊圖參見圖(二十四)。

Over Excitation Limiter (OEL-2)

Detail operation



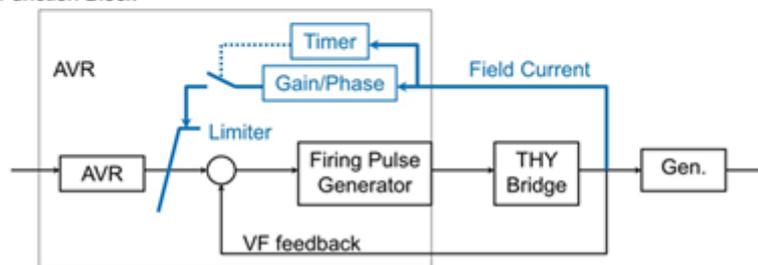
圖(二十三)OEL 設定曲線

Over Excitation Limiter (OEL-1)

Purpose and feature of the function

OEL is provided to prevent over heating of the field winding.
OEL reduce field current when the field current exceed setting value during the setting time (inverse time characteristic).
 OEL operate due to field current, therefore it is applicable **both AUTO and MAN mode**.

Function Block



圖(二十四)OEL 方塊圖

(六)、進相運轉對發電機之影響及溫升評估

在發電機進相運轉時因電樞反應為使氣隙磁通增加，在此情況下發電機定子鐵心兩端，將因磁通增加而產生飽和，進而引起鐵心過熱，惟依照 MELCO 目前設計，在定子鐵心端處增設遮蔽環，可引導磁通由此通過，降低定子鐵

心溫升。至於溫度偵測元件，分別在發電機兩端末端鐵心(end core)各埋入 6 只熱電耦，合計滑環端及汽機端共 12 只熱電耦量測鐵心溫升。末端鐵心處為埋入型熱電耦，因此故障時不可更型換。此外在本合約中要求裝設，GCM(Generator Condition Monitor)，可經由偵測氫氣中是否有異常粒子，判定在發電機定子線圈、轉子線圈、及鐵心中有異常過熱，而導致絕緣物破壞現象。

針對定子鐵心部分可由監測上述熱電偶以評估鐵心溫度，因此在進相運轉時運轉人員充分掌握相關資訊。鐵心設計允許之總溫度為 130°C，目前警報設定值為 100°C，可充分保護發電機。

三、心得與建議

感謝公司長官的厚愛提供海外研習的機會，使個人有機會至製造廠家更進一步精進專業知識及技能，在本次研習過程中，分在 **MHPS** 公司高砂製所及 **MELCO** 公司神戶工廠分別研習通霄複循環機組整廠設計觀念及發電機暨激磁系統之規劃、設計、運轉、維護訓練。在高砂製所研習期間，由整廠熱平衡圖開始說明複循電廠設計觀念並展開整體系統規劃，在決定各設備之工作溫度後，進行管材選擇及各類泵之選定、熱交換器之設計等。接著介紹氣渦輪機組、汽輪機組及熱回收鍋爐之工作流程，起動程序，系統的 **P&ID**，控制流程及全廠布置等。課程中與相關設計人員進行面對面討論，以進一步了解 **MHPS** 公司規劃之理念。第二週起到 **MELCO** 公司神戶工廠進行研習，課程主要內容為發電機的各项特性、製造程序、氫氣系統、封油系統、及激磁系統等，配合課程內容實際到廠內參觀發電機定子由矽鋼片堆疊，定子線圈製作，放入定子鐵心槽內，定子線圈終端連接，到完成內部主體，接著由發電機外殼之製作，到內部主體與外殼之結合。轉子則由鐵心鑄件進行車修，轉子槽楔加工，磁場線圈之加工，放置轉子磁場線圈，裝入扣環，到動平衡試驗，最後轉子與定子結合，裝入氫氣冷卻器，進行出廠試驗。經由一系列課程，讓我們更加瞭解發電機之製程及其設計理念。針對激磁系統與自動電壓調整器，由系統單線圖、各部分組件之功能、主要控制函數及其設定方式，除在課堂中與相關設計工程師進行討論與交流，更可至現場就相關盤體組裝、測試現況進行瞭解。

在本次研習過程中，個人深感受益匪淺，針對廠家送審圖面中相關規劃理念及系統架構有更進一步瞭解，尤其與各部門工程師面對面溝通中，更進一步瞭解廠家之理念及慣用規劃方式，此外就規範中相關規定進行說明，以使廠家之工程師明確瞭解工程單位及營運單位之需求。此外針對廠家新開發之檢測技術，建議增設之各類偵測元件，亦有初步瞭解，可做為未來新發電計畫規劃之參考。

建議將本次出國實習心得放置於本組技術平台，電機類相關內容

中，以作為同仁間技術交流。