

電力研究簡訊

Power Research Newsletter

104年第1季 (104.1 No.95)

台電綜合研究所 **TPRI**

地址：(10091)台北市羅斯福路4段198號 電話：(02)2360-1084 傳真：(02)2364-9611

目錄

研究計畫成果

- 一、二氧化碳封存參數敏感度與不確定性分析技術研究.....1
- 二、綠能智慧屋實驗系統.....3
- 三、核一廠低壓汽機第9級動葉片力學分析.....5
- 四、地下電纜被覆循環電流異常分析與改善.....7

台灣電力公司
使命：滿足用戶多元化的電力需求、促進國家競爭力的提升、維護股東及員工的合理權益。
願景：成為具有卓越聲望的世界級電力事業集團。
經營理念：誠信、關懷、創新、服務。

研究計畫成果

一、二氧化碳封存參數敏感度與不確定性分析技術研究

(化學與環境研究室:彭桓沂、張玉金;能源研究室:陳景林)

(一) 研究背景、目的、方法：

地質碳封存 (Geological Carbon Sequestration, GCS) 為可積極有效減緩溫室效應的科技，然深層岩體與生俱來存在異質性，分析二氧化碳 (CO₂) 在岩層中移棲的不確定性則為重要的風險評估項目，故本研究的目的在發展高計算效率的 GCS 不確定性分析方法。因台中火力發電廠為本公司碳排放量最高的電廠，故本研究選擇位於台西盆地的彰濱試驗場址 (Changpin pilot test site, CPPS) 做為假想場址，利用實驗設計 (Design of Experiment, DoE) 中的二階 Plackett-Burman 設計 (PBD) 進行參數敏感性分析，找出影響 CO₂ 移棲特性的敏感因子；根據參數敏感性分析結果，利用 DoE 的中央複合設計 (Central Composite Design, CCD) 方法，找出不同反應的反應曲面多項式 (Response Surface Polynomial, RSP)，最後結合 RSP 及蒙地卡羅模擬，針對反應曲面中的敏感因子做全面性的抽樣，計算出所有系統反應的機率直方圖隨時間的變化，根據此統計特性則可探討與封存相關的不確定性問題。進行 PBD 及 CCD 分析所採用的抽樣調查結果，為在不同參數的組合情形下，利用 ECO2N 模擬程式所得的三維 CO₂ 移

棲數值模擬結果。根據台西盆地之地質特性，儲集層 (桂竹林層) 可視為砂頁岩互層之地層，且砂岩含量為控制異質性特性的重要參數。故本研究建立零異質性、中度異質性及高度異質性等 3 種不同異質性程度的概念模式 (分別以 ZHR、MHR 及 HHR 簡稱之)，並以壓力積聚比例 (RPB)、CO₂ 蓄積比 (SR)、殘餘 CO₂ 封存比例 (RRC) 及滲入蓋層之 CO₂ 比例 (RSC) 做為主要考量的系統反應。

(二) 成果及其應用：

本研究根據彰濱先導試驗場址 (CPPS) 的位置，選定模擬區域如圖 1 所示，東北側取桂竹林層 (KCL) 頂部等高線從 -3200 m 變化到 -3000 m 之南北向直線，沿著 -3200 m 等高線後，東南側邊界則取與彰化斷層走向線重疊的部分；西側取 KCL 頂部高程為 -1000 m 的位置；南北側邊界因無特殊的地質構造，故取距離 CPPS 南北向各 15 km 處為邊界。根據不同程度之異質性，本研究建立零異質性 (ZHR)、中度異質性 (MHR) 及高度異質性 (HHR) 三種地質概念模式，且均以 KCL 為主要異質性的目標岩層，而錦水頁岩 (CL) 及卓蘭層 (CS) 則均假設為均質岩層。ZHR 考慮三岩層均為均質岩層；

MHR 考慮 KCL 由上而下分別為魚藤坪砂岩、十六份頁岩及關刀山砂岩層所構成；HHR 則假設 KCL 中頁岩含量為異質性主要來源，且岩層中的孔隙率及絕對滲透係數為頁岩含量的函數。

本研究參考 Revil and Cathles (1999) 提出的模式 (簡稱 RC 模式)，視砂頁岩互層岩層中的頁岩含量為岩層滲透係數異質性的主要來源。若以 RC 模式的孔隙率與滲透係數的密次律函數關係，對台西盆地深部打鹿砂岩的孔隙率及滲透係數試驗結果進行資料套配，發現 RC 模式可合理解釋觀測數據。根據地質統計的循序高斯模擬法，則可建立 KCL 中異質性孔隙率及滲透係數的空間分佈。

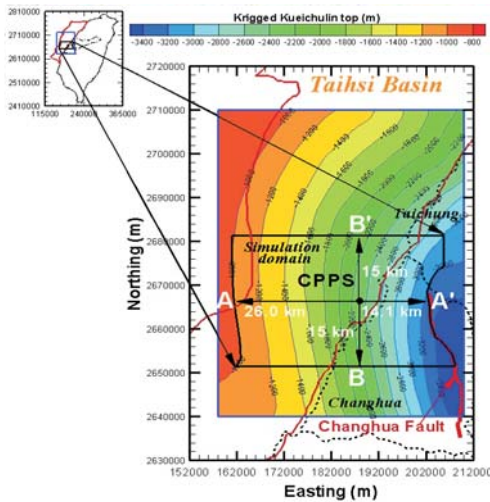


圖 1 研究區域及儲集層 (桂竹林層) 高程分佈

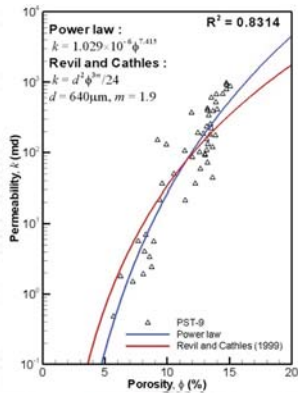


圖 2 以 RC 模式分析台西盆地白沙屯-9 試驗井的岩層滲透係數與孔隙率套配結果(資料來源:吳明賢,2010)

為分析注儲系統中不同的反應，本研究定義 4 種主要的系統反應：RPB、SR、RRC 及 RSC 表示之。針對上 4 種反應，本研究根據 DoE 的 PBD，可利用少數的抽樣調查結果進行不同系統反應的參數敏感度分析。表 1 列出 PBD 所考慮的分類因子 (Categorical factor) 及連續型因子 (Continuous factor)，其中的「-」及「+」則分別代表因子分佈的最小值及最大值。在不同地質概念模式中因考慮不同的異質性程度，故所考慮的因子數目則隨異質

性程度增高而增加，如表 2 所示。PBD 所採用的抽樣調查結果，為利用 ECO2N 數值模擬程式所得的三維 CO₂ 移棲數值模擬結果。例如，圖 3 顯示 ZHR 及 HHR 模式在圖 1 的 B-B' 剖面上氣相飽和度的模擬結果。PBD 分析結果指出，RPM 對大部分的反應而言均為敏感性因子，但大部分系統反應對 CPM 的敏感性均不高。其他的連續型因子對系統反應的敏感度，則隨不同地質概念模式及不同的時間 (如停止注入 CO₂ 前後) 而變化。

表 1 PBD 所考慮的因子

	因子	範圍		敘述
		-	+	
分類性因子				
1	RPM	Corey	vGM	絕對滲透係數模式
2	CPM	None	vGM	毛細壓力模式
連續型因子				
3	SGD	62.5 μm	2000 μm	砂岩粒徑直徑
4	SCE	1.5	2.0	砂岩膠結指數
5	CLS	1 km	10 km	頁岩含量相關尺度
6	PDR	247.5°	292.5°	頁岩含量主要相關方向
7	HVP	1	100	水平與垂直絕對滲透係數比值
8	SLR	0.1	0.25	液相殘餘飽和度
9	SGR	0.05	0.1	氣相殘餘飽和度

表 2 3 種地質概念模式中考慮的因子組合情形

因子	ZHR	MHR	HHR
1 RPM	☑	☑	☑
2 CPM	☑	☑	☑
3 SGD		☑	☑
4 SCE		☑	☑
5 CLS			☑
6 PDR			☑
7 HVP	☑	☑	☑
8 SLR	☑	☑	☑
9 SGR	☑	☑	☑

針對每一種系統反應，根據 PBD 分析所得的敏感因子，再次進行另一組三維 ECO2N 數值模擬抽樣結果，並以 DoE 的 CCD 方法，估計出每一種反應以敏感性因子所建立的 RSP (最高為三次多項式)。因三維 ECO2N 數值模擬所需之計算成本太高，故 RSP 可在蒙地卡羅模擬中取 ECO2N 數值模擬，以估計出該反應在不同時間的近似值。

根據不同反應所包含敏感性因子的數目，本研究取最多 10⁶ 組敏感因子隨機抽樣組合進行 CO₂ 注儲蒙地卡羅數值模擬，並根據模擬結果計算出每一種反應在不同時間的直方圖、極值包絡線 (Extreme value envelope) 及十分位數 (P10 及 P90) 包絡線 (Decile envelope)。例如，圖 4 為 SR 在 HHR 模式所得的機率直方圖。圖中顯示 SR 幾乎接近均勻分佈，且灌注停止時 (第 25 年) 的 SR 平均值均在 90% 以上，且此平均值均大於 ZHR 及 MHR 兩模式的平均值，說明異質性有助於地質封存。但相對的，異質性也可能造成進入蓋層的 CO₂ 質量 (RSC) 增加。利用類似圖 3 的直方圖，亦可估計不同反應在不同時間所發生的機率。以 SR 為例，研究結果指出，HHR 模式在注入停止之後，SR 大於 90% 的機率至

少在 80%以上，甚至可能高達 100%。但 ZHR 與 MHR 兩種模式，SR 大於 90%的機率則明顯偏低，甚至小於 50%。由以上分析結果可知，利用統計學的實驗設計方法，可分析出二氧化碳注儲系統的敏感參數，配合計算效率高的反應曲面多項式估計結果，可提供注儲數值模擬的替代計算方法，並可快速評估異質性對封存效率的影響。

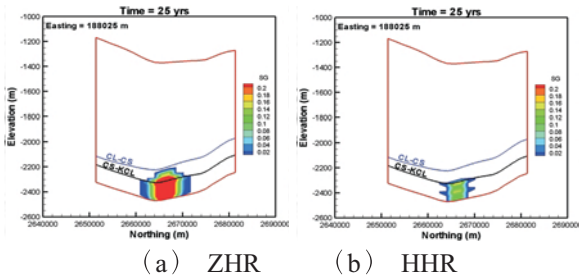


圖 3 氣相飽和度 (SG) 在 B-B 剖面上第 25 年的數值模擬結果

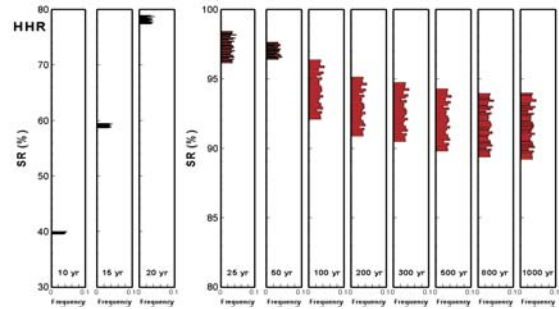


圖 4 HHR 模式中反應 SR 的不確定分析結果直方圖
參考文獻：

Revil, A., and L. M. Cathles III, 1999, Permeability of shaly sands, *Water Resources Research*, 35 (3), 651-662.

吳明賢，2010，台灣西北部苗栗鐵砧山氣田之油氣移棲研究，國立中央大學地球物理研究所博士論文。

二、綠能智慧屋實驗系統

(化學與環境研究室：吳成有)

(一) 簡介：

2012 年底台電綜合研究所自日本住友電工引進一套全釩氧化還原液流 (all Vanadium Redox Flow Battery; VRFB) 儲能系統，據以建置應用於家庭情境的複合型供電系統。為便於系統測試，本系統安裝於樹林所區之低碳發電研試中心頂樓，命名為綠能智慧屋實驗系統 (Green Energy Smart Home Experimental System; GESHER)。

GESHER 的電源供應為一再生能源併聯市電的複合型系統，本實驗系統乃由輔助電力固態氧化燃料電池 (Solid Oxide Fuel Cell; SOFC) 試驗區、儲能電池與電能管理試驗區、負載管理與需量反應試驗區，以及火力電廠副產物資源化利用示範區所組成，相關的配置區域如圖 1 所說明。

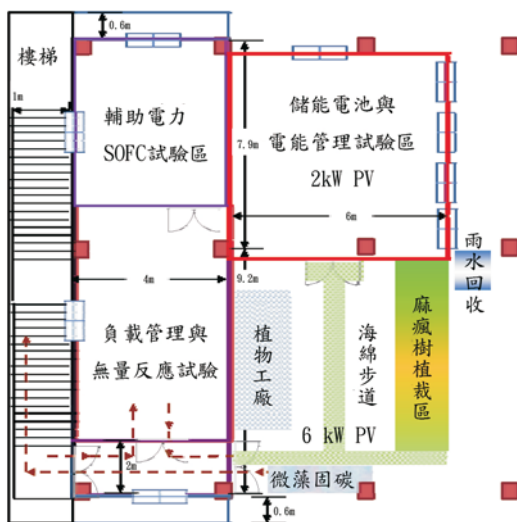


圖 1 綠能智慧屋實驗系統試驗區域配置圖

(二) 研究試驗內容：

GESHER 的電源供應來自於 6kWp-PV (BenQ, Taiwan)、1.5kW 風力發電機 (Hivawt, Taiwan) 以及市電電網。除此之外，1kW-SOFC 做為輔助電力的設施，該系統由 SOFC 電池堆本體 (Sunfire GmbH, Germany)、燃料前處理系統、操控界面、監控與資料擷取系統以及安全警示系統 (Hephas, Taiwan) 等子系統所組成。另有功率為 6kW 的能量轉換系統 (Schneider, France) 擔任交、直流電源轉換的重責大任。為了能提高再生能源對電網的滲透率，使再生能源的占比達到最大，乃加入了一組 4 kW/10 kWh 的 VRFB (Sumitomo electric industries, Japan) 儲能系統。為配合家庭用電情境，交流負載採用諸如冷氣機、電冰箱、飲水機、照明等家電用品以及小型 LED 植物工廠。整個電力系統圖佈置如圖 2 所說明。

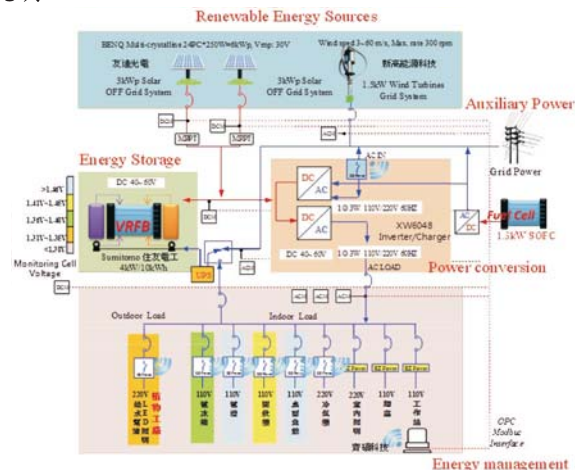


圖 2 綠能智慧屋實驗系統電力系統圖

(三) 研究進展：

1. SOFC 能量轉換效率

SOFC 經過 15 天期的驗證得知：以富氫燃氣 ($H_2 : N_2 = 2:3$) 為原料時，最大的直流輸出功率可以達到 1.2 kW，寄生設備的耗能在全載時約為 100 W。因此，本系統的電能效率約為 42% (LHV)。如果採用甲醇為燃料源，經轉換為富氫燃氣再以鈦膜管純化，做為燃氣時最大的直流輸出功率可以達到 1.1 kW，電能效率約為 36% (LHV)。

2. VRFB 特性

VRFB 主要是由兩項組件所構成，其一為電池堆做為化學能轉換為電能及逆反應進行的場所，另一項為做為儲存電能的電解液貯槽。在綠能智慧屋實驗系統中 VRFB 的儲電量為 10kWh，是由二個 20-cells 的電池堆以串聯方式所組成。在 2 個容量各 400 公升的 PVC 電解液貯槽中分別貯存了各 340 公升的正、負極電解液。電池組在充放電過程中以氮氣進行封存以避免活性物所受到空氣的氧化。VRFB 的循環試驗訂於 40~60V 的工作電壓範圍，先進行 35 安培的定電流充電，接著以 2kW 來進行定功率放電，試驗過程中維持循環泵流速於定值，其充放電曲線圖如圖 3 所示。圖 4 呈現出各循環次數下所得到的庫侖以及能量效率。從圖 3 得知 SEI-VRFB 的庫侖效率與能量效率分別是 95% 和 83%，顯示出此一儲能系統具備相當好的操作可靠性。

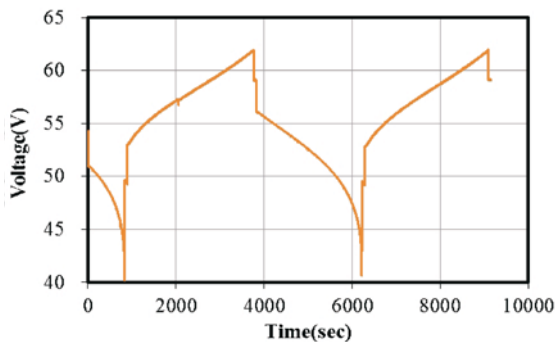


圖 3 SEI-VRFB 各循環次數下所得到的庫侖以及能量效率

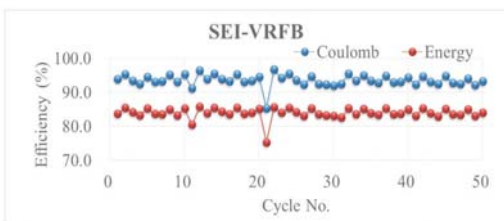


圖 4 SEI-VRFB 各循環次數下所得到的庫侖以及能量效率

3. VRFB 在綠能智慧屋實驗系統的特性

圖 5 顯示出綠能智慧屋實驗系統中太陽光電、市電以及電力負載的月平均電量值，圖中可清楚看出電量的分佈受到環境因素所影響。例如在 2014 年的 2 月份時，太陽能對市電的占比約為 1:1，而在八月份時則降到 1:2，可見太陽能供電存在著的不穩性。依據 2014 年 1 到 8 月份的累積資料計算，本系統的再生能源占系統用電量的配比達 36%。此外，VRFB 儲能電池及全系統的各月份的電量效率也呈現於圖 6。

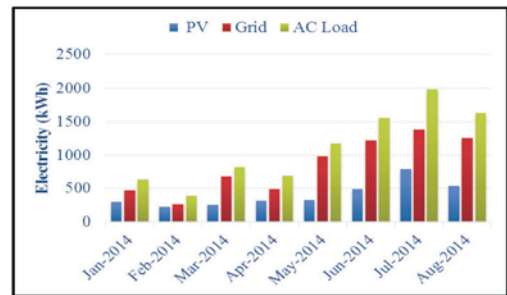


圖 5 綠能智慧屋實驗系統之太陽光電、市電以及電力負載的 2014 年 1~8 月平均電量值

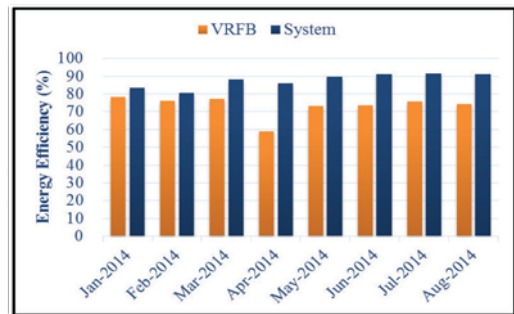


圖 6 綠能智慧屋實驗系統 VRFB 儲能電池及全系統 2014 年 1~8 月 VRFB 儲能電池及全系統的電量效率

圖 7 是綠能智慧屋實驗系統在典型的夏季 1 天的電功率分佈曲線，從曲線可以看出電池儲能系統扮演著將過剩的太陽能儲存並供應太陽能不足時的機制，市電則在日落及電池空乏時擔任支援的角色。

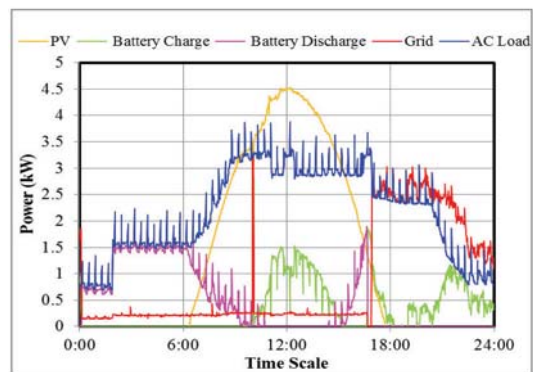


圖 7 綠能智慧屋實驗系統在典型的夏季 1 天之電功率分佈曲線

4. 綠能智慧屋實驗系統資源化利用示範區

在本示範區中呈現火力電廠副產物再利用於家庭之情境，內容包括有雨水過濾用於庭園澆水、土壤改良、海綿步道以及植栽介質等，如圖 8 所呈現。



圖 8 綠能智慧屋實驗系統資源化利用示範區

三、核一廠低壓汽機第 9 級動葉片力學分析

(能源研究室:陳瑞麒)

(一) 研究緣由：

核一廠於 99 年 4 月底大修時發現 1 號機低壓汽機轉子 LP-B GOV 端第 9 級 (L-2) 動葉片有兩支發生軸向偏移現象，偏移量約 8mm。經拆檢後發現編號#85 與#87 兩支葉片有相當長的裂縫，其破裂型態與走向非常相似，如圖 1 所示。在後續 LP-A 的內視鏡檢查中發現，同樣在 GOV 側第 9 級之#25 葉片也有偏移，拆檢後發現該葉片也發生裂縫。

核一廠兩部低壓汽機之轉子於民國 88 年完成更新，2 號機於 88 年中完成，1 號機於 88 年 11 月初完成，新轉子為 Alstom 公司產品 (原為 ABB 公司)，額定轉速 1800rpm，保固期 12 年，至民國一百零一年底保固到期。GOV 端第 9 級動葉片從啓用到 99 年大修發現破裂的期間約 10.5 年，此期間內 1 號機開機次數共 13 次，累計運轉時數 83,747 小時。依據核一廠提供之簡報資料，1 號機大修前振動監測結果，未發現主汽機振動有異常現象。

LP-B GOV 端第 9 級動葉片編號#85 的葉片由 Alstom 公司攜回分析，核一廠為獲得客觀的分析結果，也同時委託工研院進行#87 葉片之金相分析。由於雙方報告內容對葉片龜裂之肇因有所差異，雙方無法形成共識，核一廠因此委託綜研所進行葉片的力學分析，希望能有進一步的發現，以便能找出葉片龜裂的肇因。

(二) 研究方法與步驟：

為進行力學分析，本計畫針對核一廠低壓汽機整支轉子及 L-2 動葉片進行幾何尺寸量測及實體模型建立，然後進行 FEM 模態分析及應力分析，提出 L-2 動葉片發生龜裂的可能肇因，同時對 Alstom 公司的事故分析報告提出檢討，以供核一廠參考。

(三) 研究結果：

首先針對整圈 L-2 級動葉片進行模態分析，探討是否有可能產生共振，同時可藉以了解 L-2 級動葉片的振動特性。模態分析的結果如圖 2 所示，此模態分析已包含 1800 rpm 離心力的效應，第 1 群的模態是軸向彎曲模態，第 2 群的模態是切線向彎曲模態，每一群的模態又可依節線數分成 0、1、2... 等等，分析的結果並與 ALSTOM 公司分析的結果作一比較，兩者的吻合度還不錯。

由圖 2 可發現，AB1L0 模態的自然頻率為 150.56 Hz (ALSTOM 公司的分析值為 154.21 Hz)，如果考慮分析的誤差範圍，此頻率有可能靠近 5 倍運轉頻率，雖然 5 倍運轉頻率的激發力不大，但如果長期處在此接近共振狀態下，還是有可能發生高週期疲勞龜裂。AB1L0 模態的模態應力分佈，最大應力的位置是在葉片翼形部位的根部，其次是在葉片根部的轉角處，與此次葉片發生龜裂的起始位置相當靠近。在全部 125 片葉片中，每片葉片的自然頻率會有些微的差距，而自然頻率最靠近 5 倍運轉頻率的葉片就會先發生龜裂。由以上的推論，L-2 葉片接近共振有可能是造成葉片發生龜裂的肇因之一。



圖 1 1 號機 LP-B 第 9 級#85 葉片之破裂外觀

TPRI (Hz)	ALSTOM (Hz)	Remark	TPRI (Hz)	ALSTOM (Hz)	Remark
150.56	154.21	AB1L0	234.95	230.08	TB1L0
175.05		AB1L1	294.40		TB1L1
186.5	197.43	AB1L2	442.25	448.02	TB1L2
191.45		AB1L3	599.50		TB1L3
196.58	205.54	AB1L4	722.66	730.28	TB1L4
203.51		AB1L5	788.99		TB1L5
213.10	219.77	AB1L6	818.04	832.11	TB1L6
226.00		AB1L7	832.37		TB1L7
242.67	246.04	AB1L8	840.88	859.31	TB1L8
263.36		AB1L9	846.79		TB1L9
288.11	287.52	AB1L10	851.48	970.26	TB1L10

註：AB1：first axial bending mode，TB1：first tangential bending mode，Ln：n nodal lines。

圖 2 整圈 L-2 級動葉片之自然頻率

L-2 葉片在裝上汽機時會由於 pre-twist 而使葉片護環間緊密接觸在一起，這具有抑低振動的作用。如果在機組啓動過程中，由於某些因素使葉片

護環間的接觸力暫時變小或完全失去接觸力，則葉片的自然頻率將會發生改變，同時抑低振動的作用也將會降低或完全失去，造成葉片所受應力提高。因此，接著即針對最差的狀況，葉片護環間完全失去接觸力，進行模態分析。

模態分析的模型與前一節完全相同，只是將護環和護環間的 contact 邊界條件拿掉，分析的結果如圖 3 所示。葉片的模態還是分成一群一群的，而由於護環和護環間不再互相接觸，因此同一群內不同節線數的模態之自然頻率彼此非常靠近。值得注意的是，前一節中護環緊密接觸的 AB1L0 模態 150.56 Hz，將降為本節護環完全失去接觸力的 TB1L0 模態 113.16 Hz，如果護環和護環間的接觸力還不到完全失去的地步，則此自然頻率即有可能接近 4 倍運轉頻率 120 Hz，如此即有發生共振的危險。

接著進行 L-2 級動葉片的應力分析，以便找出應力最大的位置，同時探討與 ALSTOM 公司分析結果的差異。受離心力作用後，葉片往徑向變形，同時由於護環的質心位置偏離葉片的軸心線，因此產生彎矩作用，將葉片由吸力側彎向壓力側。護環往徑向的最大變形量為 2.333 mm，因此護環靠吸力側的邊緣較易與汽封片產生摩擦，顯見這種護環的偏心是一種不適當的設計。

葉片受離心力作用後的應力分佈，最大應力為 960.73 MPa，是由葉根與葉根槽間因受離心力作用而產生，屬於壓應力，不易產生疲勞龜裂。而 ALSTOM 公司的應力分析結果，其最大值為 3243 MPa，根據工研院的報告，L-2 動葉片的降伏強度為 756 MPa，抗拉強度為 923 MPa，因此 ALSTOM 公司所計算的最大應力值極不合理。而在 ALSTOM 公司的另一份報告中，以另一種程式進行應力計算，兩者有相當大的出入；再者，其使用截面中點的應力使用率來代表其安全程度也不合理，應該用該截面最大應力處的應力使用率來代表其安全程度才對。

由於此次葉片的龜裂是由疲勞而引起，因此應該看最大主應力的位置較為合理，如圖 4 所示，最大主應力的位置是在入流側葉根導圓角處，其值為 898.2 MPa，顯然已進入塑性變形範圍，顯示該葉片實在是不適當的設計。推究其因，一為護環的偏心設計，在離心力的作用下，因彎矩的作用而使葉根產生多餘的應力，二為護環為三角形的形狀，造成護環質量過大，在離心力的作用下，使葉根產生較大的應力。一般護環均設計成薄片型，以降低葉根的離心應力。

再者，如圖 4 所示，最大主應力的位置是在入流側葉根導圓角處，距壓力側約 12 mm，而工研院所分析的葉片之龜裂起始位置約距壓力側 23 mm，ALSTOM 公司所分析的葉片之龜裂起始位置約距

壓力側 14.5 mm。顯然葉片龜裂的起始位置與最大主應力的位置不吻合，而且兩片葉片龜裂的起始位置也不一致，這表示除了入流側葉根導圓角處應力較大外，還有其他因素的配合，才導致葉片的龜裂。

根據工研院的分析報告，L-2 葉片的根部凹槽有明顯的加工刀痕，顯微金相分析顯示該表面有微裂紋，如圖 5 所示，而 ALSTOM 公司的分析報告中也有金相分析，龜裂的起始位置就有一個小裂紋存在。這表示由於 L-2 葉片根部凹槽的加工粗糙度較大，在葉片龜裂的起始位置具有較大的微裂紋，由於應力集中的效應，造成材料抗疲勞強度下降，加上葉根導圓角區域的應力較大，經過長期運轉後終於因高週波疲勞而產生裂紋。

TPRI ₁ (Hz)	Remark ₁	TPRI ₁ (Hz)	Remark ₁
213.30	AB1L0	113.16	TB1L0
211.60	AB1L1	112.44	TB1L1
212.90	AB1L2	112.22	TB1L2
213.27	AB1L3	112.22	TB1L3
213.59	AB1L4	112.22	TB1L4
213.94	AB1L5	112.22	TB1L5
214.31	AB1L6	112.22	TB1L6
214.68	AB1L7	112.22	TB1L7
215.04	AB1L8	112.23	TB1L8
215.39	AB1L9	112.23	TB1L9
215.71	AB1L10	112.24	TB1L10

圖 3 護環間失去接觸力之自然頻率

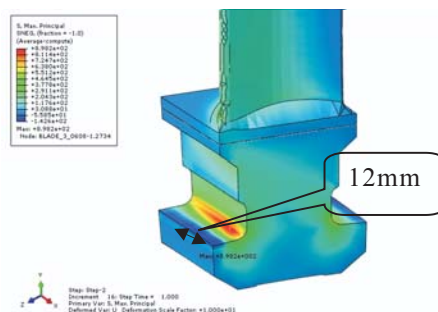


圖 4 葉片受離心力的最大主應力分佈

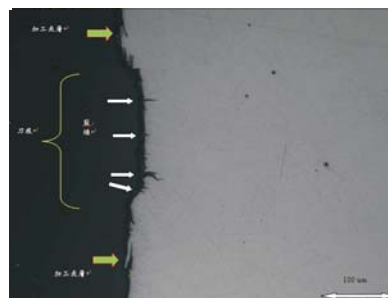


圖 5 #87 葉片的金相，溝槽加工面之刀痕小凹槽內有數條與主裂縫大致平行之微小裂縫。

雖然 ALSTOM 公司表示核一廠 L-2 葉片的粗糙度符合 N9 等級，但由 ALSTOM 公司對該支龜裂

葉片及另一支新葉片粗糙度的量測結果顯示，如圖 6 所示，龜裂葉片的粗糙度明顯比新葉片大，而且龜裂葉片的粗糙度並不符合 N9 等級。而從核一廠 3 支 L-2 備品葉片粗糙度的量測結果顯示，該 3 支 L-2 備品葉片大致符合 N9 等級。由以上的量測結果顯示，核一廠 L-2 葉片的粗糙度雖然大致符合 N9 等級，但明顯比新品粗糙，而龜裂葉片的粗糙度尤其最差。

再者，粗糙度等級是經過平均後的結果，不足以顯示局部惡劣的粗糙度。只要該材料表面有一點是粗糙度很差，即使其他位置的粗糙度都很好，還是會從粗糙度最差那一點開始裂起。從圖 6 中可知，龜裂葉片的 Rmax 為 70.2，是所有量測結果裡面最大值，而且是在 run 1 路徑上，也就是葉片根部的裂紋位置，因此其抗疲勞強度是最差的，所以最先產生龜裂。

綜合上述，歸結 L-2 葉片葉根產生龜裂的肇因如下：葉根應力過大，處於接近 5 倍頻運轉頻率的狀態，葉根加工過於粗糙導致產生微裂縫，處於腐蝕的環境中，經過 10 年多的運轉，終於將其疲勞壽命耗盡而導致產生龜裂。

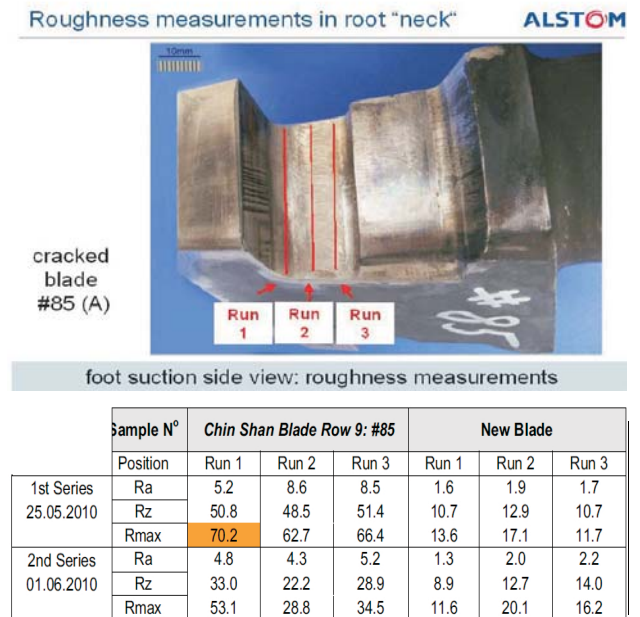


圖 6 ALSTOM 公司對 L-2 葉片粗糙

四、地下電纜被覆循環電流異常分析與改善

(高壓研究室：鄭強、林彥廷)

(一) 緣起：

1960 年代電纜系統以低介電損失、高介電強度之絕緣材料、改善電纜被覆接續結構及提昇送電效率為主要之產業發展重點。電纜系統應用範疇，亦提升至超高壓輸電級系統；因而衍伸出有關電纜被覆感應電壓、循環電流等運轉維護之新議題。

三相地下電纜系統，無論採取水平、垂直、正三角型等排列方式，其遮蔽銅線之阻抗與電纜沿線長度成正比關係，因而被覆導體之感應電壓亦隨電纜長度遞增。故三相電纜系統被覆導體多採特殊交錯接續設計，藉其自感與互感感應電壓之合成效應，可抑制並降低被覆感應電壓及循環電流值，藉以提升三相電纜系統之供電效率及運轉年限。若電纜被覆保護裝置 (Cable Covering Protection Unit; CCPU) 內之短路銅板交錯方向連接錯誤時，在交錯接續三區間中的被覆導體，則無法維繫電纜被覆三相感應電壓相量和趨近零的設計目的，可能導致電纜被覆導體上的感應電壓及循環電流均大幅升高，對電纜被覆絕緣、介質加速老化之影響甚大。

(二) 地下電纜溫升規格與結構：

138~345 kV 之 XLPE 電纜正常運轉溫度為 90 °C，緊急運轉溫度在 105 °C、短路時電纜的容許溫昇為 250 °C；中壓系統之 XLPE、EPR I、II 類型電纜正常運轉溫度為 90 °C，緊急運轉溫度在

105~130 °C、短路時電纜的容許溫昇為 250 °C 範圍中。

(三) 電纜被覆導體連接與接地方式：

電纜被覆採多點接地，為抑制被覆感應電壓有效方案之一。但電纜被覆由於多點接地形成迴路，將產生被覆循環電流，造成被覆回路損失及電纜額外溫升，進而限制電纜有效之載流容量。因此輸電級地下電纜系統，發展出特殊型式的被覆交錯連接與接地方式，藉以獲得最小的被覆循環電流值及損失值。依電纜系統被覆導體接地與連接方式，可劃分為：(1)單端接地，(2)雙端接地，(3)交錯接地等三種類型。

三相電纜被覆交錯連接 (cross bonding) 設計理念說明如下：

以電纜導體可提供的最大負載電流，計算單位長度之被覆感應電壓，依被覆感應電壓限制值，決定電纜的沿線長度。利用普通接續匣 (Normal Joint; NJ)、絕緣接續匣 (Insulation Joint; IJ) 及被覆保護裝置 (Cable Covering Protection Unit; CCPU) 組成交錯連接區段。電纜被覆導體藉 CCPU 箱交錯連接及被覆導體合成循環電流結構，如圖 1 所示。

實務上電纜線路每三區間中的長度不可能完全相等及電纜之排列亦不對稱，則三相電纜被覆導體

回路之感應電壓相量和不為零，而其殘餘電壓產生的循環電流，僅為額定電流 1~3%，因此電纜被覆導體採交錯連接型式者，其被覆回路電阻損失遠小於被覆導體多點接地者，此即為交錯接地最主要的優點。

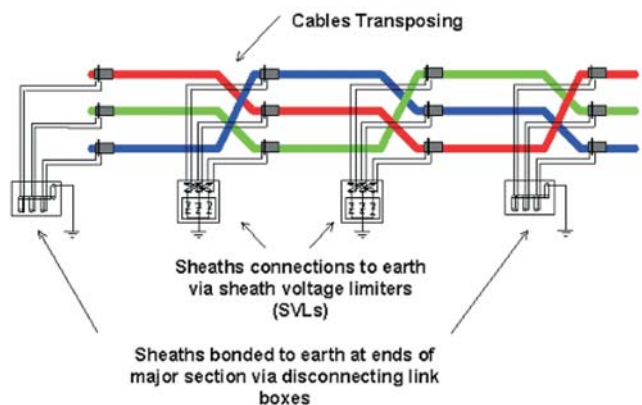
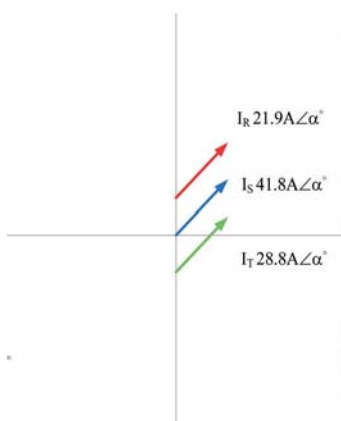


圖 1 電纜被覆交錯連接圖

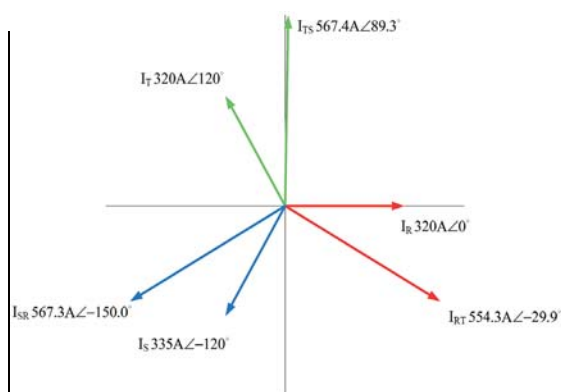
(四) 地下電纜溫升異常現象：

6 月 25 日 T 電廠電氣組執行機組主變壓器之 345 kV 地下電纜電檢維護作業，檢討紅外線檢測溫度及被覆循環電流量測結果，發現 345 kV 地下電纜 #6-#7-#8-IMB 區段中，#7-#8 CCPU 連接電纜末端溫升達 145°C，電纜被覆循環電流達 334 A。

電纜系統之異常現象，經電纜交錯接地之設計圖面及現場實際狀態，正常交錯接續被覆循環電流合成相量為 $I_a-I_b-I_c$ 、 $I_b-I_c-I_a$ 、 $I_c-I_a-I_b$ ；現場確認 #6-#7-#8-IMB 區段之交錯接續被覆循環電流合成相量為 $I_a-I_b-I_a$ 、 $I_b-I_c-I_b$ 、 $I_c-I_a-I_c$ ，屬交錯接續換位錯誤異常狀態。如圖 2 所示。



(a) 正常被覆循環電流相量圖



(b) 異常被覆循環電流相量圖

圖 2 電力電纜被覆循環電流相量圖

(五) 改善對策與成果：

1. 擬定#8 接續匣依下列步驟重組 CCPU 交錯接續順序：

- (1) 相同心電纜外芯，經短路銅板連接至 S 相同心電纜內心。
- (2) S 相同心電纜外芯，經短路銅板連接至 T 相同心電纜內心。
- (3) T 相同心電纜外芯，經短路銅板連接至 R 相同心電纜內心。

2. 改善成果：

(1) CCPU 短路銅板修正前，以 R 相為例：電纜被覆於 IMB-#8-#7-#6 交錯連接區段之循環電流值為 314A、546A、553A、334A，連接電纜末端溫度為 85°C、135°C、136°C、82°C。

(2) CCPU 短路銅板修正後，以 R 相為例：

IMB-#8-#7-#6 交錯接地區段之電纜被覆循環電流值為 39.8A、46.1A、47.6A、25.5A，連接電纜末端溫度為 51°C、32°C、31°C、31°C。

T 電廠依電纜被覆導體交錯接續與循環電流之電量、物理量正常與異常特徵及差異情況，交互靈活運用紅外線溫度檢測儀，以及被覆循環電流量測分析技術，跨越錯誤嘗試法門檻，依據量測資訊分析處理技術，建立診斷設備正常、老化、劣化之狀態維護技術與經驗，可供相關電廠應用卓參。