

電力研究簡訊

Power Research Newsletter

115 年第 2 季 (115.04 No.140)

台電綜合研究所 **TPRI**

地址：(100046) 台北市中正區羅斯福路 4 段 198 號 電話：(02)2360-1084 傳真：(02)2365-8477

目錄

研究計畫成果

- 一、2035 台灣電力前瞻情境規劃研究 1
 - 二、既有廢水處理程序回收改善 3
 - 三、利用電力系統強健度指標評估區域再生能源穩定性 4
 - 四、以爐管外壁溫度及應變量計算內壁蒸汽壓力之研究 5
- #### 研發試驗活動
- 單相變壓器短路試驗原理與試驗實務 7

台灣電力公司

使命：以合理成本及友善環境的方式，提供社會多元發展所需的穩定電力。

願景：成為卓越且值得信賴的世界級電力事業集團。

經營理念：誠信、關懷、服務、成長。

研究計畫成果

一、2035 台灣電力前瞻情境規劃研究

(研究發展企劃室：陳曉薇、林文文、黃鐘、陳好涵、陳培琳、黃雅琪、尤水輝、吳秉洲、姚雨欣)

(一) 研究緣由：

在全球淨零碳排趨勢下，本公司作為台灣唯一綜合電業，必須在確保穩定供電之前提下，面對電力需求成長、設備電氣化及地緣政治風險等挑戰，同時達成能源轉型目標。

在此背景下，前瞻性的策略規劃對本公司未來發展至關重要，有助於提前辨識潛在風險、掌握發展機會，並確保資源投入的有效性。然而，傳統策略規劃方式難以充分因應外部環境之高度不確定性，亦無法有效整合多元觀點。為提前因應未來挑戰、制定可行策略，並確保技術投資與策略規劃能有效支撐淨零目標，本公司決定推行本研究，透過系統性方法描繪 2035 年電力發展願景，作為後續策略規劃之基礎工作。

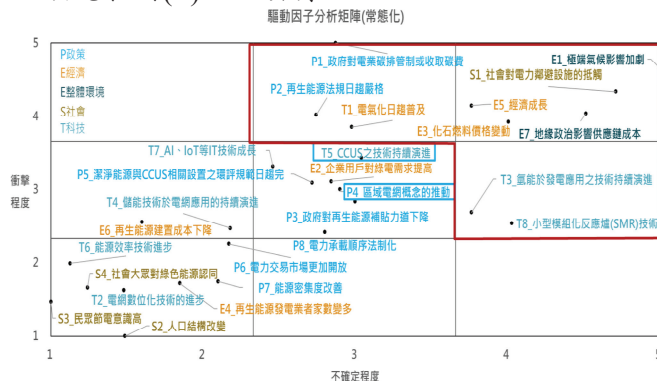
本研究採用「情境基礎策略藍圖」(SBSR)方法，整合情境分析與策略研擬。首先設定決策焦點為「2035 年將每度電排碳係數降至 0.3 kg CO₂e」，並收集國際趨勢與報告，以 PEEST 架構整理 27 項驅動因素。透過專家問卷評估其「不確定程度」與「衝擊程度」，篩選十大關鍵因素，建構「最有利」、「最可能」、「最不利」三種情境。

在策略研擬上，從情境分析機會與威脅，推導

8 項重要議題，經高階主管會議擇定 3 項關鍵議題深入研究。透過專家工作坊形塑策略空間，運用策略評估矩陣進行優先排序，最終產出具時間軸的策略執行路徑，並呈現台電 2035 年減碳策略藍圖。

(二) 研究成果：

1. 在情境建構階段，研究團隊以來自產學研共 162 份專家問卷，從 27 項驅動因素中篩選出高不確定程度及高衝擊程度之 10 項關鍵驅動因素(如圖 1)，涵蓋政策(P)、經濟(E)、環境(E)、社會(S)及發電技術(T)五大類別。



資料來源：本研究

圖 1 衝擊程度-不確定程度分析矩陣

2. 基於這些關鍵驅動因素，本研究建構出三種情境(如表 1)，並從三種情境中識別出機會與威脅。

表 1 三種減碳情境下基礎假設

情境驅動軸	最有利情境	最可能情境	最不利情境
政策	嚴格	嚴格	嚴格
P1. 電業碳排總量管制與碳費	碳費徵收 1,800 元/tCO ₂ e	碳費徵收 1,800 元/tCO ₂ e	碳費徵收 1,800 元/tCO ₂ e
P2. 再生能源法規	用電大戶綠能裝置義務 15%	用電大戶綠能裝置義務 15%	用電大戶綠能裝置義務 15%
環境	嚴酷	嚴酷	嚴酷
E1. 極端氣候影響	超過 35°C 天數為 76 天	超過 35°C 天數為 76 天	超過 35°C 天數為 76 天
E7. 地緣政治影響供應鏈成本	地緣政治風險指數(GPR)129	地緣政治風險指數(GPR)129	地緣政治風險指數(GPR)129
經濟	趨緩	成長	成長
E5. 經濟成長+T1. 電氣化日趨普及	電力消費年均成長 1.86%	電力消費年均成長 2.8%	電力消費年均成長 3.0%
E3. 化石燃料價格	燃氣 LCOE 3.36 元/kWh	燃氣 LCOE 2.83 元/kWh	燃氣 LCOE 2.28 元/kWh
社會	理想	現實	現實
S1. 社會對電力鄰避設施的抵觸	28% 民眾反對鄰避設施	61% 民眾反對鄰避設施	61% 民眾反對鄰避設施
發電技術	突破	突破	緩慢
T3. 氫能發展-混氫火力發電	混氫比例達 20%	氫比例達 20%	混氫比例達 5%
T8. 小型模組化反應爐(SMR)	國際商業化	國際商業化	未商業化

資料來源：本研究

3. 在策略研擬階段，基於機會與威脅分析，以及公司內部組織需求，研究推導出 8 項重要減碳議題(如表 2)，並透過高階主管會議擇定 3 項關鍵議題進行深入研究，分別為「提高氫氫混燒比例」、「增加碳捕集與封存(CCS)設置與應用」，及「擴大再生能源發電占比」。

表 2 八項減碳議題

序	議題	影響碳排	技術成熟度(IEA 清潔能源技術指南)	台電淨零策略架構
1	提高氫氫混燒比例	直接	TRL5(混氫)、TRL9(混氫)	供給面
2	增加 CCS 設置與應用	直接	TRL8~9	供給面
3	擴大再生能源發電占比	直接	TRL9~10	供給面
4	評估 SMR 導入機會	直接	TRL6~7	供給面
5	推動 Energy Hub 發展	間接	依導入技術組合而有差異(e.g. 離岸風電生產綠氫 TRL6)	●供給面 ●電網面 ●需求面
6	擴大需量反應/時間(即時)電價參與	間接	TRL10(自動化需量反應 TRL7)	需求面
7	創新商業模式	間接	非技術項目	需求面
8	強化電網智慧化	間接	TRL7~10	電網面

資料來源：本研究

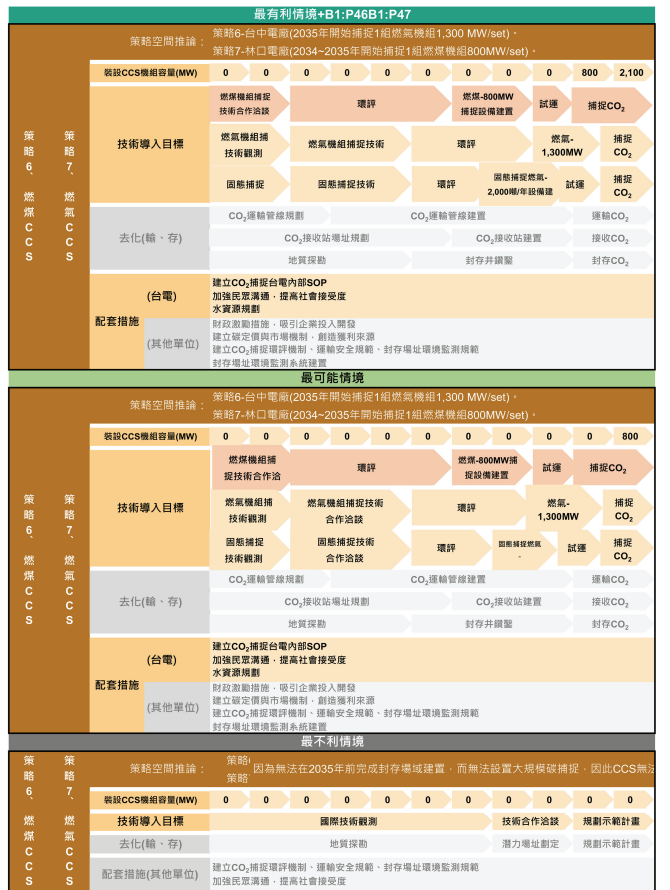
4. 針對 3 項關鍵議題，研究建構出 7 項具體策略。(1)在擴大再生能源發電占比議題下：發展海上太陽光電、更新陸域風電、購買競標離岸風電以及發展深層地熱等四項策略。

(2)在提高氫氫混燒比例議題下：發展出燃氣混氫發電策略。

(3)在增加 CCS 設置與應用議題下：發展燃氣 CCS 與燃煤 CCS 兩項策略。

每項策略都針對三種情境設定不同的發展假設與目標，並評估其對 2035 年減碳目標的貢獻。

5. 研究進一步整合法規政策、技術支援、財務資源、宣導溝通等配套構面，為每項策略繪製具時間軸的策略藍圖。以燃氣 CCS 與燃煤 CCS 策略為例(如圖 2)，策略藍圖涵蓋捕捉技術選項、封存場域選址與評估、社會接受度以及法規與監測機制等四大配套構面。



資料來源：本研究

圖 2 燃氣 CCS 與燃煤 CCS 策略之情境策略藍圖

6. 根據研究推算(如表 3)，在最有利情境下，七項策略整合後可使 2035 年碳排係數降至 0.2537 kg CO₂e/kWh，達成台電 0.3 kg CO₂e/kWh 的減碳目標。在最可能情境下，碳排係數可降至 0.2937 kg CO₂e/kWh，同樣達成減碳目標。然而在最不利情境下，碳排係數僅能降至 0.3265 kg CO₂e/kWh，未能達成減碳目標。

表 3 2035 年台電減碳目標之達成狀況

策略	2035 年 (單位: kg CO ₂ e / kWh)		
	最有利情境	最可能情境	最不利情境
情境別之原始碳排係數	0.3043	0.3200	0.3294
S1: 發展海上 PV	-0.0036	-0.0017	-0.0006
S2: 更新陸域風電	-0.0014	-0.0006	-0.0002
S3: 購買競標離岸風電	-0.0142	-0.0068	-0.0015
S4: 發展深層地熱	-0.0101	-0.0010	-0.0001
S5: 燃氣混氫發電	-0.0054	-0.0022	-0.0005
S6: 燃氣 CCS	-0.0104	-0.0092	---
S7: 燃煤 CCS	-0.0055	-0.0048	---
最終之碳排係數	0.2537	0.2937	0.3265

資料來源：本研究

7. 綜上，本研究透過情境基礎策略藍圖方法，為台電 2035 年減碳策略提供系統性決策架構。此架構可協助台電在面對政策變動、技術演進或市場變化時，快速評估各種情境並調整資源配置，使台電在高度不確定的環境中保持策略彈性，為台灣電力淨零轉型之路奠定重要基礎。

二、既有廢水處理程序回收改善

(化學與環境研究室：傅弼豐、曹志明、吳俊賢、張茱琪)

(一) 研究背景、目的、方法：

脫硫廢水中的硼濃度深受煤質與沖放量影響有很大的波動，加上除硼劑的除硼效率隨著添加量增加而減少，因此，除了要對原水進行水質監控，也必須對加藥條件做進一步的測試，找出最適當的加藥方式與加藥劑量，才能確保後段程序的穩定。

環保意識升高加上降雨分佈不均，不僅使得放流水標準越來越嚴格，也讓社會對水資源循環再利用的要求越來越高，廢水零排放剛好同時滿足前述需求，所以本研究也將評估脫硫廢水零排放的可行性與所需程序。

本計畫確認以綜合廢水回收水取代生水對 FGD 吸收塔沖放頻率和氯離子平衡濃度之影響，並完成 FGD 廢水零排放程序試驗，可作為未來電廠改善整體廢水回收應用之參考。

(二) 成果及其應用：

本計畫找出脫硫廢水程序中螯合劑除硼的最適效率，其中混凝沉澱的效果與水中的離子濃度有

關，首先測試不同硼濃度條件下螯合劑的除硼率。從實驗結果可以看到，在 FGD 廢水常見的硼濃度範圍中，螯合劑的除硼率相當一致並且遠高於常見的鎂鹽(20~30%)、鈣鹽(40~60%)和鋇鹽(60~80%)；而且在 pH 8.5 以上即可發揮效果，這除了能夠減少液鹼用量，也可大幅減輕後處理單元(除硼樹脂)與污泥處理單元(沉澱與脫水)的負荷，增加系統穩定性。

有關綜合廢水的回收途徑，本計畫利用薄膜系統串接進行測試，確認操作參數與產水效率，可直接製成生水進行回用。另一方面，考量綜合廢水水質特性，除特殊情況時，也可直接導入 FGD 吸收塔內做為補充水進行回用，經 1 號機組實際測試，發現對塔內氯離子濃縮並無太大影響，因此也可作為一可行回收方案。

本計畫同步驗證 FGD 廢水零排放的可行性與處理程序。本處理程序得到的結晶鹽以氯化鈉為主，純度有 80% 以上，剩餘成分為硝酸鈉、硼酸鈉和少量硫酸鹽，可作為電廠未來改善之參考。



資料來源：本研究拍攝

圖 1 加藥測試



資料來源：本研究拍攝

圖 2 蒸發測試

三、利用電力系統強健度指標評估區域再生能源穩定性

(電力研究室：王永富、吳承翰、賴凱右、廖清榮)

(一) 研究背景：

為達到淨零排放目標，需要整合大量再生能源，並且取代傳統發電機組，而傳統發電機減少，同時也會減少電網的短路電流以及系統慣量，對於系統來說會形成弱電網的情況(Weak Grid)，而如何識別弱電網，以及事故擾動後變流器可能會有不穩定的情況，需要事先進行探討以及因應。

(二) 研究內容及成果：

電網強度可以定義為電力系統無論在穩態或干擾後，維持與控制任一點電壓穩定的能力，與系統上節點所連結的設備構成的電氣強度有關。一般而言，強度越高的電力系統，更能夠忍受故障造成的擾動，並恢復正常運轉；強度越低則相反。電網強度主要由同步發電機提供，然再生能源的增加，導致機組的淨發電量下降，進而降低系統的強度。由於再生能源變流器不像同步發電機由磁場驅動，而是依靠內部鎖相迴路(Phase Lock Loop, PLL)來偵測並適當響應電網上的任何波動。若電網強度低，可能無法以穩定的方式回應，對電力系統帶來挑戰，如穩定度、保護電驛以及供電可靠度等。

電網強度的評估可分為區域性以及系統性。區域性的評估會以短路比為主，阻抗比為輔進行識別。系統性的評估則以頻率變化率以及慣量為指標，適用於獨立且再生能源發電比例較高的系統。本研究以區域性的強度評估進行探討。目前尚未有明確的短路容量以及數值來識別弱電網的狀態，因此有多種的方式來計算短路容量比，如短路比(Short Circuit Ratio, SCR)、加權短路比、複合式短路比以及等校短路比等。

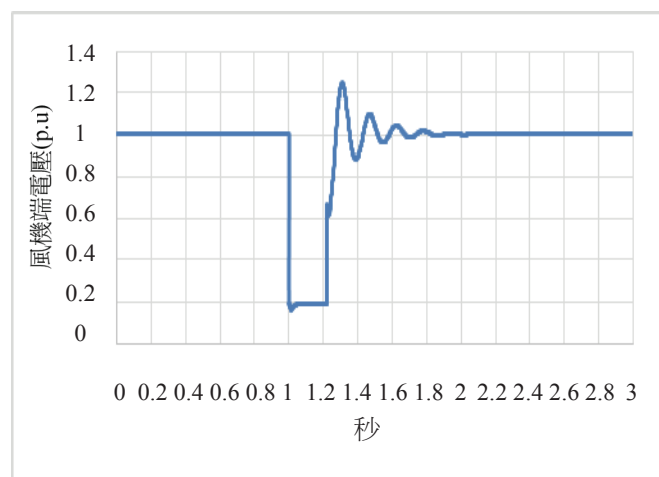
為降低 IBR 滲透率的增加所帶來的不穩定影響，各國電業規範會要求 IBR 具備高/低電壓過渡能力，以及高/低頻率過渡能力，確保在系統異常情況下能仍穩定運作。若 IBR 併網位置於末端且輸電線路少，併接點的短路比下降，會形成弱電網情況，而在事故後，可能會引發震盪的情況。

早期為了滿足對風力發電機通用動態模型的需求，美國西部電力協調委員會(WECC)開發了適用於電網規劃研究的通用正序風力發電機動態通用模型，本研究針對不同電網情況下，利用通用的 IBR 模型以及 RMS 分析軟體，來評估事故後穩定情況。

1. 弱電網情境

以本公司 122 年輕載，中部地區風力發電量較高之情境為案例，先計算較低短路比之併接點，篩選短路容量較小之地區，再計算出不同短路比。經計算後，以 Bus 5832 之短路比約 2.8，利用 REGC_C 之模型進行分析，觀察低短路比情況下，再生能源在事故後穩定情況。

本研究首先將併接點 Bus 5832 之風力發電機，利用 REGC_C 以及 REEC_A 等兩種模型進行分析，參數皆以典型值替代，當併接點發生 3 相短路接地事故，於事故後 13 週波清除故障，並跳脫一迴線，其結果如圖 1，清除故障後，風機端電壓呈現振盪，於 2 秒後穩定。



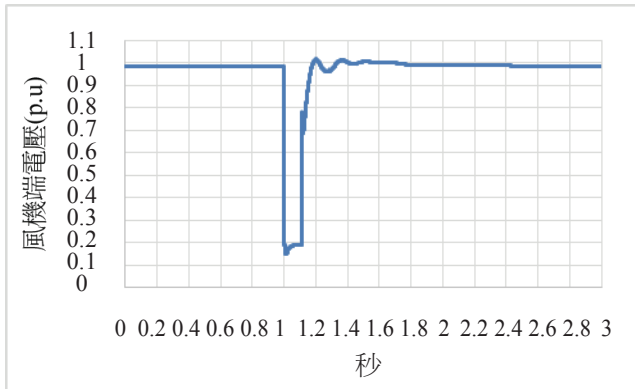
資料來源：本研究繪製

圖 1 弱電網-事故後 13 週波隔離故障之風機端電壓

2. 強電網

強電網情境仍以本公司 122 年輕載，中部地區風力發電量較高之情境為案例，先計算較高短路比之併接點，經計算後 Bus 590 短路比大於 3，再利用上述案例 REGC_A 以及 REGC_C 之模型參數，觀察高短路比情況下，再生能源在事故後穩定情況。

將併接點 Bus 590 之風力發電機以 REGC_C 以及 REEC_A 兩種模型進行分析，當併接點發生 3 相短路接地事故，於事故後 7 週波清除故障，並跳脫一迴線，其結果如圖 2，清除故障後，風機端電壓穩定。



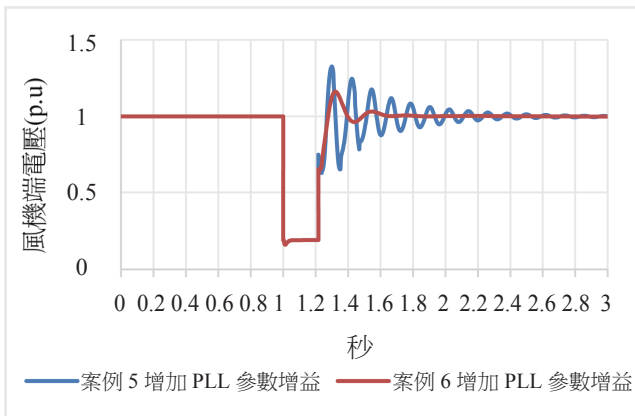
資料來源：本研究繪製

圖 2 強電網-事故後 7 周波隔離故障之風機端電壓

3. 不同 PLL 參數影響

如本研究所提，REGC_C 模型在事故清除後震盪現象，可以調整 PLL 參數以及內部電流控制迴路參數來改善，因此本節將調整 PLL 參數觀察事故後響應。

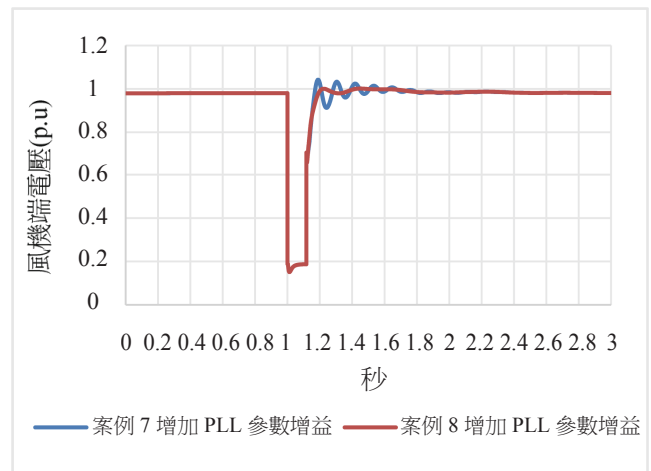
圖 3 是在弱電網情境中，分別增加/降低 PLL 參數增益，可看出在弱電網情境中降低 PLL 增益可使事故後電壓呈現較穩定狀態，相反地增加 PLL 增益會使電壓呈現不穩定震盪。



資料來源：本研究繪製

圖 3 弱電網情境不同 PLL 參數增益響應

圖 4 是以強電網情境，分別增加以及降低 PLL 參數增益，結果如所示，可看出降低 PLL 參數可使事故後電壓呈現較穩定狀態。



資料來源：本研究繪製

圖 4 強電網情境不同 PLL 參數增益響應

(三) 結論：

再生能源取代傳統機組導致電網強度與慣量下降，使依 PLL 的設備在弱電網中易發生電壓震盪甚至跳脫。為解決此區域性穩定度挑戰，除了參考國際規範建立電網強度評估機制外，實務上可透過增設同步調相機等硬體，並結合動態模擬軟體優化設備的控制參數來改善。最後，須同步升級技術規範、系統規劃與保護策略，才能確保邁向淨零目標下的電網穩定性。

四、以爐管外壁溫度及應變量計算內壁蒸汽壓力之研究

(能源研究室：曾千洧、高全盛、蘇奎元、楊學文)

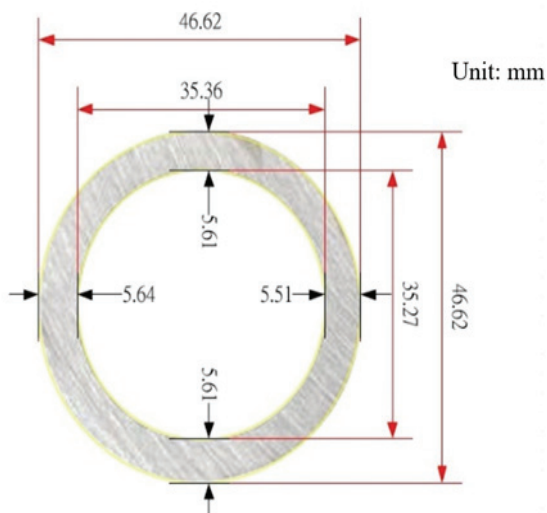
(一) 研究背景：

發電鍋爐在運轉當下，爐膛溫度高達攝氏 1100 度以上，一般計器無法承受如此高溫環境，僅能安裝於爐膛外部之集管段，導致維護人員不易立即觀察機組的健康狀況或做適當的診斷。本研究的目的為利用爐管表面溫度及應變量製作不同的蒸汽壓力圖表，維護人員可使用查表的方式獲得爐膛中熱交換管內部蒸汽壓力值，進一步研判爐管是否發生異常腫脹或破管造成蒸汽洩漏。

(二) 研究內容：

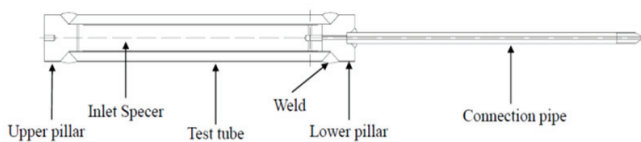
本研究取樣低合金鋼材質之熱交換管，內徑 35.3mm、外徑 46.6mm 與軸向長度 330mm，爐管截面尺寸如圖 1 所示。

試驗爐管組成包含連接管、下柱、上柱、中子、爐管本體及銲道，如圖 2 所示。上柱與下柱為不銹鋼材質之凸型結構。爐管取樣長度大於 150mm+2D₀，使用機械方法切取後對其表面進行非破壞檢測，符合標準即可進行後續加工作業，D₀: 爐管外徑。



資料來源：本研究繪製

圖 1 爐管本體截面尺寸



資料來源：本研究繪製

圖 2 爐管試樣示意圖

爐管試樣的中子材料選用不銹鋼材質，中子與爐管內壁間距 0.5mm。連接管使用不銹鋼材質之高壓管。試驗爐管坡口加工按照 AWS D1.1/ D1.1M^[1] 銲接規範進行，使用鎢極氬弧銲完成上柱、下柱及連接管的銲接程序，銲接作業完成後，銲道必須通過射線檢測。

兩端封閉的爐管試樣內部採用去離子水作加壓介質，加壓至規定的蒸汽壓力並保持恆定。加壓設備之迴路搭載卸壓閥和加壓閥，經由連接管均勻地向爐管試樣持續施加並調整所需的壓力。試驗壓力在 5%~100% 使用範圍內，壓力值相對誤差小於 1.0%，試驗過程中，蒸汽壓力低於設定壓力值 1.0% 時應立即加壓並維持恆壓，蒸汽壓力降低 1.0% 的時間需小於一分鐘。

高溫爐設置三區域獨立控溫，溫度偏差小於 $\pm 3^\circ\text{C}$ 。加熱爐管外壁，模擬實際運轉狀況，升溫速率每分鐘 4°C ，均溫區長度大於試驗爐管長度的 1.2 倍。加熱器之控溫熱電偶使用 R-Type，爐管測溫熱電偶使用 K-Type，溫度控制器精度為 0.1°C ，溫度補償精度在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 內。

試驗前執行 1.2 倍試驗壓力之水壓測試，保持壓力 10min 無壓降，即開始加溫，試驗工作環境溫

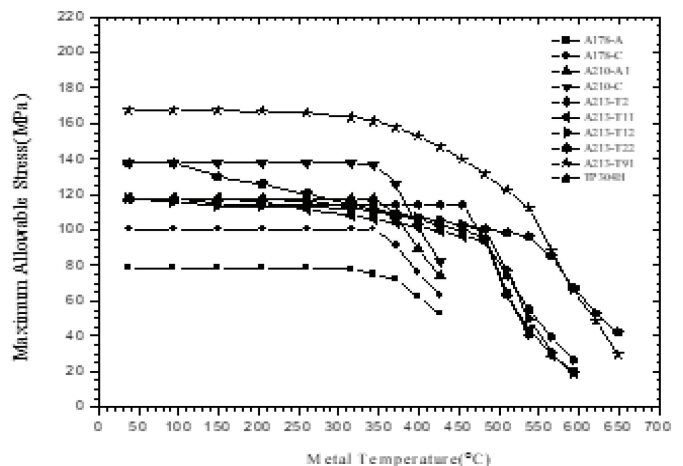
度保持在 $10^\circ\text{C}\sim 30^\circ\text{C}$ 。爐管上、中及下三區域安裝熱電偶與周向應變感測器，如圖 3 所示。



資料來源：本研究繪製

圖 3 爐管試樣安裝熱電偶及應變感測裝置

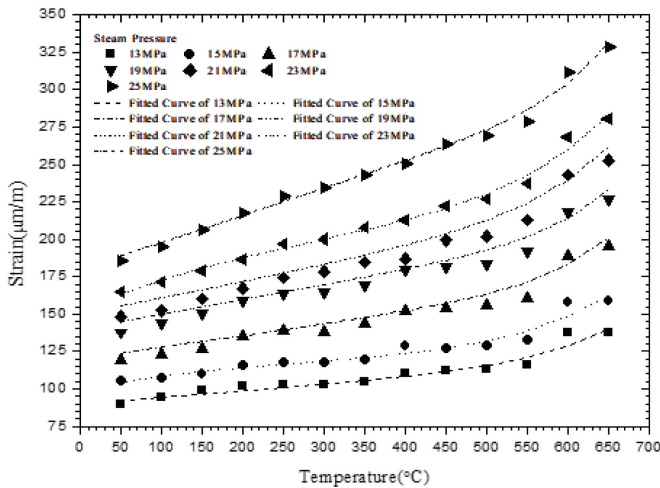
碳鋼、低合金鋼及不銹鋼等爐管材料在高溫時的最大容許應力表現皆有所不同^[2]，使用合金元素含量更高的爐管材料，可增加其抗潛變能力，降低熱交換管件失效的機率^[3]。合金含量的多寡影響最大容許應力發生陡降的溫度值是否延後發生，如圖 4 所示。除了爐管外徑與壁厚的因素，金屬材料在高溫容許應力的表現將決定爐管在高溫高壓下運轉的變形量。



資料來源：本研究繪製

圖 4 不同材料隨溫度增加之最大容許應力值

固定溫度，隨著蒸汽壓力遞增，應變量呈現規律性成長，每增加 1MPa，爐管外壁應變值增加 $5\sim 10\ \mu\text{m}/\text{m}$ 。持續加溫，不同蒸汽壓力下，爐管材料有相同的應變趨勢。以蒸汽壓力圖表觀察，應變量在 550°C 後開始明顯增加是由於晶界析出二次相所致，如圖 5 所示。正常運轉條件下，應變量存在合理的變化，若爐管在異常之蒸汽壓力、長期過熱或短期過熱的情況下運轉，應變量的陡升或陡降會立即發生，由潛變速率的增加幅度也可預測其破管事故即將發生的時間。



資料來源：本研究繪製

圖 5 爐管內壁蒸汽壓力表

透過曲線擬合的方法可獲得蒸汽壓力圖表實驗數據之經驗公式：

$$\varepsilon = A \times e^{-T/B} + C \times e^{-T/D} + E \quad (1)$$

以蒸汽壓力 17MPa 為例， $A=0.0085$ ， $B=-79.46$ ， $C=-4.74 \times 10^6$ ， $D=6.16 \times 10^7$ ， $E=4.74 \times 10^6$ ， ε 為爐管外壁材料應變量， T 為鍋爐爐管外壁攝氏溫度，不同之蒸汽壓力隨著運轉溫度所造成的金屬

研發試驗活動

單相變壓器短路試驗原理與試驗實務

(高壓試驗組：張聖典、溫建樹、江榮城)

(一) 研究背景：

電力系統中，變壓器的耐受短路電流能力是確保供電可靠性的核心指標。當電力系統發生故障短路時，變壓器金屬導體所受的力與短路電流的關係為 $F = B \times I \times L \times \sin\theta$ ，電流磁場磁力的關係為 $B = (\mu_0 \times I) \div (2\pi r)$ ，因此金屬導體短路時所受的力約與短路電流平方成正比。為了驗證設備的強韌性，必須進行「瞬時短路試驗」。

目前台電之單相變壓器驗收時，包括「亭置式變壓器 C001₍₁₀₄₋₀₇₎」與「改良型變壓器 Y065₍₁₀₁₋₀₆₎」，均在綜研所內進行短路試驗。根據 IEEE 規範，試驗時產生的峰值電流 (Peak Current) 與 RMS 值(均方根值電流)，皆須達到計算值的 95% 以上，方屬合格。

變壓器執行短路試驗時，變壓器高壓測與試驗迴路連接，低壓測以銅牌連接短路，整個試驗迴路圖如圖 1 所示， R_{t0} 與 X_{t0} 即下文的 r 與 x 。

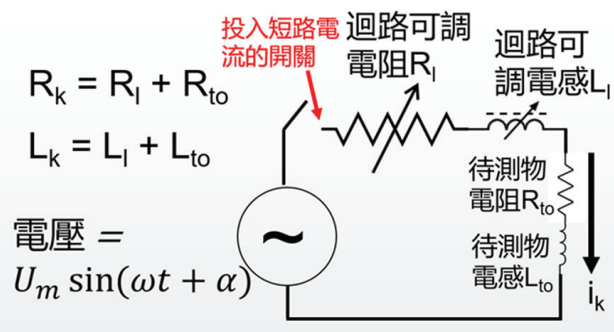
材料變形皆以指數的數學型式呈現。

(三) 研究結論

實驗結果發現利用爐管表面溫度與材料應變兩個物理量製作蒸汽壓力圖表，透過查表或經驗公式獲得爐管內部蒸汽壓力為可行的方法。若爐管在異常之工作條件下運行，會立即發生應變量的陡升或陡降現象，由潛變速率的增加幅度也可預測其破管事故即將發生的時間。

(四) 參考文獻

- [1] *Structural Welding Code—Steel*, AWS D1.1/D1.1M, 2008.
- [2] *Power Piping*, ASME B31.1, 2007, pp. 102–159.
- [3] B. Haghghat-Shishavan, H. Firouzi-Nerbin, M. Nazarian-Samani, P. Ashtari, and F. Nasirpour, "Failure analysis of a superheater tube ruptured in a power plant boiler: Main causes and preventive strategies," *Eng. Fail. Anal.*, pp. 131–140, Oct. 2019.



資料來源：本研究

圖 1 試驗迴路圖

(二) 瞬時短路試驗的 K 值與 RMS 計算方式：

以下以 C001₍₁₀₄₋₀₇₎50kVA 亭置式變壓器為例，在正式施打短路電流前，必須量測其基本特性，如表 1 所示。

表 1 IEC、IEEE、CNS 標準對於變壓器短路試驗 RMS 電流倍數與試驗時間規定(以單相 50kVA 變壓器為例)

	IEC 60076-5(2016)	IEEE C57.12.90(2021)	CNS 598(2017)
峰值電流	95%~105%規定值	> 95%規定值	95%~105%規定值
RMS 電流	規定值 = 額定電流÷(阻抗電壓%) 試驗電流介於 90%~110%的規定值	規定值 = 35 倍額定電流 或 額定電流÷(阻抗電壓%) 兩者中較小的試驗電流大於 95%的規定值	規定值 = 額定電流÷(阻抗電壓%) 試驗電流介於 90%~110%的規定值
試驗時間、方式以及次數	0.5s±10% 最高電壓、額定電壓、最低電壓各 3 次, 共 9 次	額定電壓下試驗 0.25s 5 次 試驗時間 = (1250 ÷ 352)秒 1 次 6 次試驗中 2 次須達到 95%峰值規定值	0.5s±10% 最高電壓、額定電壓、最低電壓各 3 次, 共 9 次

資料來源：本研究

再依據 IEEE C57.12.00(2015)公式,可計算得出 K 值。負載損量測方式為：高壓側施加額定電流,低壓側短路,此時高壓測量測到的電壓為阻抗電壓(換算百分比 = 161.9V ÷ 6930V = 2.336%)。

依 IEEE C57.12.00(2015) 7.1.5.2, K 值的公式為：

$$K = \left\{ 1 + \left[e^{-\left(\phi + \frac{\pi}{2}\right) \frac{r}{x}} \right] \sin \phi \right\} \sqrt{2}$$

其中 r 與 x 為變壓器的電阻與電抗,依表 2 計算 K 值如下：

$$\text{阻抗 } Z = 169.1 \div 7.21 = 22.44\Omega$$

$$\text{電阻 } r = \sqrt{(345W \div 7.21A)} = 6.63\Omega$$

$$\text{電抗 } x = \sqrt{(Z^2 - R^2)} = 21.44\Omega$$

$$\Phi = \tan^{-1}(X \div R) = 1.27$$

$$K = 1.997$$

表 2

油溫	高壓測額 定電流	阻抗電壓 V	阻抗電壓 %	負載損
13.6°C	7.21A	161.9V	2.336%	345W

資料來源：本研究

一般變壓器製造商習慣阻抗電壓將阻抗電壓換算至 75°C 或 85°C,如將阻抗電壓換算至 75°C 或

85°C,因高溫電阻變大,導致 K 值變小;較小的 K 值無法反映變壓器在低溫或低負載短路故障的峰值電流,因此以上計算採用室溫量到的參數計算 K 值。

1. RMS 值依據台電材規 C001₍₁₀₄₋₀₇₎所規定的容量與倍數決定,如下表 3,我們可計算出 RMS = 35 倍額定電流 = 35×7.21A = 252.35A。

表 3

變壓器容量 (kVA)		短路電流大小(A)、時間(s)
單相變壓器	三相變壓器	
25	75	40 倍額定電流、t
50、100	150、300	35 倍額定電流、t
167	500	25 倍額定電流、t

資料來源：台電材規 C001₍₁₀₄₋₀₇₎

2. 峰值電流須達到 478.75A(1.997×252.35A 的 95%)以上以及 RMS 值須達到 239.73A(252.35A 的 95%)以上,才可符合試驗規定。

3. 若使用 IEC/CNS 標準執行上述變壓器的短路試驗,由 IEC/CNS 標準計算得到的 K 值與由 IEEE 標準計算得到的 K 值相同,依照表 1 公式,IEC/CNS 標準的短路電流與峰值電流分別為 308.6 A 與 616.3 A,變壓器導體受力約為依 IEEE 標準執行短路試驗的 1.5 倍,試驗當下變壓器可能毀損。依 IEC/CNS 標準計算短路電流與峰值電流及倍數如下：

$$\text{短路電流} = 7.21 \div 2.336\% = 308.6 \text{ A}$$

$$\text{峰值電流} = 308.6 \times 1.997 = 616.3 \text{ A}$$

$$\text{受力倍數} = (308.6 \div 252.35)^2 = 1.5 \text{ 倍}$$

(三) 短路試驗實務：

根據經驗法則,首先以低於額定短路電流值的 70% 進行多次「試打」,以減少對變壓器本身的破壞,最後才進行額定短路電流值 100%試驗。

1. 利用試打產出之波形,進行角度的調整:觀察電流波形的 K 值,反覆調整控制器的投入角度。一般而言,每次調整±5 度,直到 K 值符合 1.997±5%,即完成試打。

2. 進行額定短路電流值 100%試驗:考量電壓降後,最終產出的波形須滿足台電規範,即 RMS 值與峰值電流均須在計算值的 95% 以上;除此之外,若短路試驗後變壓器特性滿足:激磁電流變化率 < 25% 及阻抗電壓變化率 < (22.5-500×阻抗電壓%) = (22.5-500×2.336%) = 10.82%,就表示短路試驗合格。