

高密度聚乙烯聚合礙子破損分析

李文台*¹、鄭錦榮¹、廖財昌²、陳健賢²

HDPE Polymer Insulator Fracture Failure Analysis

W. T. Lee*¹, J. R. Cheng¹, C. C. Liao², J. S. Chen²

摘要

台灣屬海島型氣候區，沿海電力設備盜質絕緣礙子受海風、鹽塵害及工業廢氣污染因子等嚴重影響，導致絕緣礙子表面閃絡，輸配電系統無預告的瞬間斷電，構成工商業重大損失，其中以半導體業、石化及鋼鐵工業危害最大。為了防止因礙子污損洩漏電流增加或產生閃絡等現象而造成電力系統損壞，分別使用不同材料及電壓等級之聚合礙子，以防止礙子表面水膜的生成，目前鹽塵害地區使用聚合礙子之趨勢日益增加，本文分別從 11.4 KV 配電線路燒損跳脫的事故現場，收集事故及鄰近地區高密度聚乙烯聚合礙子。從電氣特性試驗、材質機械及化學性質，材質缺陷結構分析等分析結果進行探討絕緣老化破壞程度及電蝕性能測試。從外觀判斷事故樣品已高溫燒熔，其他樣品底部均有明顯電蝕現象，礙子表面污損物為現場環境之鹽塵害；事故樣品之傅立葉紅外線光譜 (FTIR) 及熱分析 (TGA/DSC) 分析結果，與新品比較明顯變質，而其他樣品表面之分析結果，與新品無明顯差異；從電氣模擬試驗之紫外光放電影像檢測，發現礙子底部螺栓部份明顯閃絡現象，判斷原因應是鹽塵害之堆積，造成局部電弧，致使材料遭電蝕及穿孔破壞，並產生高溫使樣品燒損，進而造成事故發生。

關鍵詞：高密度聚乙烯聚合礙子；電蝕；葉紅外線光譜；熱分析；紫外光放電影像檢測。

ABSTRACT

Taiwan islands locate in sub-tropic area. In this climate condition, the insulators on transmission and distribution lines along the seashore suffer from the impact of sea-wind, salt-fog and industrial pollutants respectively. Comparing to other climates, the severe weather parameters are significantly influence in insulator performance. Contamination flashovers have become the greatest concern to power lines during the past decades. A number of power failures are recorded

1 台灣電力公司綜合研究所化學與環境研究室
Chemistry & Environment Research Lab., Taiwan Power Research Institute, TPC.

2 台灣電力公司綜合研究所高壓研究室
High Power Lab., Taiwan Power Research Institute, TPC.

* 連絡作者(u629790@taipower.com.tw)

on electric networks. To solve this problem, so far various efforts, gradually replacement of conventional insulators by polymer insulators for specific area have been made. In other words, polymer insulators serve as a countermeasure against contamination problems. This project is initiated in distribution lines aiming to investigate HDPE polymer insulators failure events and establish the fracture analysis techniques, in the consequence of improving power quality in distribution lines. The main results in this project are acquiring polymer insulators application information both in domestic and overseas, establishing analysis techniques both in materials (FTIR/TGA/DSC/SEM) and electricity (UV Corona Image Monitoring) and referring maintenance criteria on polymer insulators service. The failure occurred in the vicinity of the bottom of insulators with accumulated contaminants which caused tracking and erosion phenomena and induced high-temperature damage.

Keywords: HDPE polymer insulators; Tracking and erosion; FTIR; TGA/DSC; UV corona image monitoring.

1. 前言

1.1 緣起

台灣屬海島型氣候區，沿海電力設備瓷質絕緣礙子受海風、鹽塵害及工業廢氣污染因子等嚴重影響，導致絕緣礙子表面閃絡，輸配電系統無預告的瞬間斷電，構成工商業重大損失，其中以半導體業、石化及鋼鐵工業危害最大。為了防止因礙子污損洩漏電流增加或產生閃絡等現象而造成電力系統損壞，分別使用不同材料及電壓等級之聚合礙子，以防止礙子表面水膜的生成，目前鹽塵害地區使用聚合礙子之趨勢日益增加，本文係 11.4 KV 配電系統某沿海線路之夾線及繫線裝腳聚合礙子，其材質為高密度聚乙烯，於 92 年底連續發生聚合礙子燒損造成配電線路跳脫的事故，因此進行聚合礙子事故損壞原因分析，擬從材質機械性質分析、材質化學特性及結構分析、表面污損物分析、表面撥水性分析及電氣特性試驗五種方式進行探討分析。

1.2 高密度聚乙烯聚合礙子特性

1.2.1 高密度聚乙烯特性

高密度聚乙烯^[1]係 1935 利用微量氧氣為催化劑，在高溫高壓條件下將乙烯聚合，該產品約有 50% 結晶度，具有甲基、乙基、丁基等分枝，進一

步利用 Ziegler 觸媒 (三烷基鋁與四氯化鈦) 在低溫、低壓聚合乙烯，為完全線性聚乙烯，結晶度達到 90%。這兩類產品分別以低、高密度聚乙烯區分。所謂低、中密度聚乙烯其聚合物密度分別介於 0.91 - 0.925 g/cm³ 與 0.926 - 0.940 g/cm³，主要其聚合物含較短的烷基分枝，並未到達結晶區域，導致結晶度降低，高密度聚乙烯其聚合物密度介於 0.941 - 0.965 g/cm³ 具有較高結晶度及剛性，高軟化點溫度、低氣體滲透。

由基本性質^[2]可以了解高密度聚乙烯晶體及無定型的結構，高密度聚乙烯在機械特性及熱性質均較低、中密度聚乙烯為優異，且高密度聚乙烯同樣具有較佳的物理特性，及較佳的耐酸鹼特性，但耐碳氫化合物溶劑較差。

1.2.2 聚合礙子材質成份

對聚合物技術而言，橡膠的合成是一門學問，即如何將聚合物及添加劑適當合成，而得到最佳的物理及化學特性，聚合物的合成配方包含 10 個以上的成份，每一種成份均有其特定功能，並決定聚合物特性及製程難易，聚合物主要合成成份^[2]包括：聚合體 (Elastomers)、硫化劑 (Vulcanizing Agents)、粘著劑 (Coagents)、抗劣化劑 (Antidegradants)、製程輔助劑 (Processing Aids)、填充劑 (Fillers)、偶和劑 (Coupling Agents)、塑料劑及軟化劑 (Plasticizers and Softeners)、特殊用途材料

(Special Purpose Materials)。

2. 試驗分析項目及方法

2.1 現場環境及樣品資料收集

現場提供 4 個已燒損聚合礙子樣品，包括夾線型及繫線型裝腳礙子，因其已嚴重損壞，無法直接分析事故原因，因此赴各事故現場，瞭解現場氣象及地形等環境，發現事故現場均距離海邊僅 400 ~ 500 公尺，並得知 92 年底該地區數月未下雨，同時在勘查時發現正發生另一事故現場及燒損之橫樑木，如圖1所示。為使事故分析能更為周全，請現場再提供事故現場附近地區及距海邊較遠地區拆換之樣品，以供比對分析之用，因此所取得樣品四組線路(距海邊距離：A 組/ B 組：400 公尺，C 組 500 公尺，D 組：1 公里) 及新品 (E/F 組)，其中樣品之分類包括：

- (1) 事故樣品：A-1、B-1、C-1及C-2，樣品分別如圖 2 ~ 圖 5。
- (2) 現場附近地區樣品：A-2、B-2 及 C-3，屬與事故同一電桿或鄰近電桿之樣品，如圖 6 ~ 圖 8。
- (3) 距海邊較遠地區樣品：D-1，如圖 9。
- (4) 新品：繫線及夾線裝腳聚合礙子新品各一個，E-1 及 F-1。

2.2 材質機械性質分析

依據 ASTM 2240A 規範以 Teclock GS-709N Shore D 檢測表面硬度計量測礙子葉片表面硬度分佈，並依據 DIN 47721 規範以 Hommel T500 手提式表面粗糙度儀分別量測礙子葉片表面及底部粗糙度分佈，以瞭解聚合礙子材質的耐候性及閃絡電壓、高溫所構成材質表面劣化等分析。

2.3 材質化學特性及結構分析

分別利用 Bio-Rad SPC-3200 霍氏轉換紅外線光

譜儀 (FTIR) 以 ZnSe 晶体作全反射 (ATR) 鑑定，儀器使用之條件：解析度：4cm⁻¹、掃瞄次數：16 次、掃瞄範圍：650 - 4000cm⁻¹，直接對閃絡劣化損傷樣品進行化學鍵圖譜分析，判斷碳氫鍵、矽氧鍵在分子鏈中是否有明顯的變化。

利用 NETZSCH Instruments STA 409 熱分析儀 (TG/DSC) 進行聚合物之熱性質分析，本分析方法主要藉著控制溫升的速率 (20°C/min；室溫 ~ 650°C) 來比較樣品的能量變化情形，可以從相同溫度轉折點中分別判斷玻璃轉折溫度 (T_g)、結晶溫度 (T_c)、熔點 (T_m)、蒸汽分解溫度 (T_d) 及吸熱與放熱效應等基本資料。

利用 JEOL JSM-5410 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察新品表面的材質結構，以超音震盪清洗聚合礙子表面，再利用電子顯微鏡觀察表面粗糙度及是否有孔隙，以瞭解樣品製造加工時材質之均勻狀況。

2.4 表面污損物分析

利用等效鹽分附著量 (ESDD) 量測及離子耦合電漿光譜儀 (ICP) 分析礙子表面污損物成份，以瞭解現場環境造成礙子事故之因素。

2.5 表面撥水性分析

利用瑞典 STRI [guide-1-92-1 (Hydrophobicity Classification Guide)]^[1] 所訂聚合礙子撥水性 (後退角 (r) 的評估標準等級分類，以 HC=1 為全部形成獨立水滴，大部份水滴 $\theta_r \geq 80^\circ$ ，HC=7 為全部測試區域均為連續水膜，由其分類等級判斷各層葉片的撥水性，探討聚合礙子撥水性的差異及回復。

2.6 電氣特性試驗

2.6.1 絕緣電阻試驗

使用 AVO MEGGER BM11D 絕緣電阻計對試樣兩端加以 1000 VDC 電壓，並量測 1 分鐘時之絕緣電阻值。

2.6.2 交流洩漏電流試驗

試樣在乾燥狀態下，使用 200 KV 交流耐壓測試系統，將試樣加以 11.4 KV 系統最大對地電壓值 6.9 KV，再利用 YEW-7552 數位電表量測其穩定後之洩漏電流值。

2.6.3 衝擊閃絡電壓試驗

在乾燥狀態下，使用 200 KV 交流耐壓測試系統，依據 ANSI C29.1-1988 For electrical power insulators-test methods 4.2 low frequency dry flashover voltage test 之試驗方法，對各試樣加以交流電壓，直至發生閃絡時紀錄其電壓值，並求取三次之平均值，試驗時電壓上升率為 3 KV/Sec，大氣狀態為 20.5°C，1027 mbar，68.6% R.H。

2.6.4 放電影像觀測

利用觀測儀器進行礙子表面放電樣貌之觀測，對於探討礙子放電時其電場係集中於何處，以及放電時其電弧發生部位之調查加以紀錄，包括紫外光放電影像觀測及等效鹽霧試驗之放電影像觀測等兩項觀測試驗。

紫外光放電影像觀測係對試樣兩端加以 10、20、30、40、50 KV 之較高電壓，再以紫外光放電影像儀觀測礙子表面之放電部位，所加電壓較運轉電壓較高之理由在於使礙子在乾燥情況下發生放電現象，以顯示其電場集中之部位。

等效鹽霧試驗之放電影像觀測係以「JEC-201 交流電壓絕緣試驗」中之等效鹽霧試驗法，對礙子表面使用噴霧器噴以相當於 ESDD 為 0.06 mg/cm²，0.12 mg/cm²，0.35 mg/cm² 之污損液，於噴塗後 3 分鐘之內，對試樣兩端加以電壓上升率 3 KV/Sec 之交流電壓，觀察放電進展過程之情況。

3. 分析結果與討論

3.1 現場環境及樣品資料收集

從收集事故及鄰近地區高密度聚乙烯聚合礙子外觀判斷，A-1 及 B-1 事故樣品已完全高溫燒熔，

如圖 2 及圖 3 所示，C-1 及 C-2 事故樣品底部嚴重電蝕，甚至造成穿孔，且表面有明顯污損物，如圖 4 及圖 5 所示，而螺拴鐵配件亦明顯腐蝕，其腐蝕生成物對電蝕現象可能造成加成作用，因此金屬配件之防蝕對策亦相當重要；而其他比對樣品底部均有程度不一之電蝕現象，如圖 6 ~ 圖 9 所示，所有樣品現場裝掛起訖時間不等，約 1 ~ 3 年，距海邊距離 400 公尺 ~ 1 公里不等，屬沿海鹽霧地區。

3.2 材質機械性質分析

量測聚合礙子表面硬度及粗糙度，以瞭解聚合礙子材質的耐候性及閃絡電壓、高溫所構成材質表面劣化等分析。

3.2.1 聚合礙子硬度分析

依據 ASTM 2240A 規範以 Shore D 硬度計檢測表面硬度，除 A-1 及 B-1 燒損嚴重樣品外，量測所有礙子樣品葉片表面硬度分佈，詳如表 1 所列，所有礙子樣品五次平均硬度量測值皆在 60 ± 2 之間，新品與舊品比較結果，並沒明顯之硬度變化現象，表示樣品使用年限不長 (1 ~ 3 年)，表面無明顯劣化現象。

3.2.2 聚合礙子粗糙度分析

依據 DIN 47721 規範以 Hommel T500 手提式表面粗糙度儀檢測粗糙度，除 A-1、B-1、C-1 及 C-2 燒損樣品外，量測葉片表面及有電蝕痕跡底面粗糙度，詳如附表 2 所列，其中表面粗糙度，新品為 0.25 ± 0.05 μm，舊品介於 0.3 ~ 1.7 μm 之間，因不同地區、使用時間及線路，各組礙子粗糙度值有所不同，表示材質的耐候性及劣化程度不同；而底面粗糙度因明顯電蝕之故，其粗糙度值均大於表面粗糙度值，新品為 0.9 μm，舊品介於 1.7 ~ 7.9 μm 之間；又新品底面粗糙度 (0.9) 明顯大於其表面粗糙度 (0.3 ~ 0.4 μm) 之原因，可能製造加工處理時品管控制之問題，因此底部較易附著污損物。依據文獻指出，聚合礙子抗電蝕性之降低與抗電蝕無機填加物 (filler) 關係甚深，包括填加物之含量是否足夠、與

聚合物混合均勻度是否完全等因素。

3.3 材質化學性質分析

3.3.1 霍氏轉換紅外線光譜儀 (FTIR) 分析

分別利用霍氏轉換紅外線光譜儀 (FTIR) 全反射偵測，直接對閃絡劣化損傷樣品進行化學鍵圖譜分析，HDPE 紅外線光譜中分別在 $650-750\text{ cm}^{-1}$ 出現 $-\text{CH}=\text{CH}-$ ， $1405-1465\text{ cm}^{-1}$ 出現 CH_2 中 CH 的彎曲振動，在 2853 ± 10 及 $2926\pm 10\text{ cm}^{-1}$ 出現 CH_2 中 CH 的伸直振動光譜，除了高密度聚乙烯基本圖譜外，若聚合礙子含有 ATH 填充物外露，則在 1020 cm^{-1} 出現明顯波峰，若含有水中的 OH ，則會在 1640 cm^{-1} 出現一波峰。

新品之基本圖譜如圖 10 所示，各組取事故樣品及代表性樣品 (A-1 及 A-2) 作 FTIR 圖譜分析，其中圖 11 為線路燒損礙子 A-1 及鄰近礙子 A-2 樣品之圖譜，其中燒損樣品 I.A-1 已變質且大部份非原基本圖譜，而樣品 II.A-2 主要吸收波長與原基本圖譜相似，表示葉片表面無明顯劣化情況，而有電蝕底部因幾何形狀無法製作成 FTIR 所需試樣；其它樣品結果與上述相同。

3.3.2 熱分析儀 (TG/DSC) 分析

經由 TG 溫度對重量變化圖，可獲得初始材質的熱穩定性及組成資料，同樣經由加熱反應過程中可獲得中間體的熱穩定性及組成資料，在加熱反應過程中會釋出經由化學或物理作用的各種揮發性產物。樣品熱分析之 TG 及 DSC 曲線，其失重百分比表示高分子材質遇熱分解的比例，因此可代表高分子材料的含量，而殘餘的固形物百分比可表為未劣化高分子材料添加物的濃度。至於波峰溫度代表高分子分解反應時，吸熱或放熱效應。

圖 12 為 HDPE 礙子新品 TG-DSC 分析圖，反應起始溫度為 292°C ，反應最後溫度為 500°C ，在 TGA 曲線方面可得到以下之訊息：試樣 HDPE 經劣化反應後，高分子含量最後溫度 500°C 之殘餘量為 7.54% 。在 DSC 曲線方面可得到以下之訊息：HDPE 在 137°C 為有放熱反應， 419°C 為吸熱反

應。

圖13為燒損礙子 A-1 及鄰近礙子 A-2 樣品之分析圖，其中 I.A-1 之 TG 殘餘量為 98.04% ，表示其高分子大部份已被燒盡，且 DSC 分析圖已完全非 HDPE 之特性；II.A-2 之 TG 殘餘量為 7.21% ，與新品接近，而 DSC 分析圖與新品相比變化不大，表示葉片表面無明顯劣化情況；其它樣品結果大部份與上述相同，僅 C-1 事故樣品 TG 殘餘量為 51.91% ，表示其並未完全燒損。

3.3.3 電子顯微鏡 (SEM) 分析

利用 JEOL JSM-5410 掃描式電子顯微鏡 (SEM) 觀察新品表面的材質結構，在圖 14 HDPE 的新品 SEM 圖中，只有少量填充料，並沒明顯缺陷及孔隙。

3.4 表面污損物分析

為瞭解現場環境，現場提供 $92.7 \sim 92.12$ 期間所量測平均等效鹽分附著量 ESDD 值，A 樣品地區為 0.130 mg/cm^2 ，C 樣品地區為 0.184 mg/cm^2 ，由此值可知本地區屬重度鹽害地區；針對各線路代表性樣品 A-2、B-2、C-3 及 D-1 之 ESDD 值約介於 $0.01 \sim 0.04\text{ mg/cm}^2$ 之間，詳如表 3 所示，其值比前述值較低之原因為樣品已被雨水清洗之故。

取回樣品中僅 C-1 及 C-3 礙子表面存有明顯污損物，可供 ICP 及 SEM 分析，ICP 分析結果如表 4 所示，主要成份為 SiO_2 、 Na_2O 、 Al_2O_3 等，顯示為泥土成份，即表示若久未下雨時，該地區有一定程度之塵害。

3.5 表面撥水性分析

依據瑞典 STRI [guide-1-92-1 (Hydrophobicity Classification Guide)] 所訂聚合礙子撥水性 (後退角) 的評估標準等級分類如圖 15 及表 5 所示；各樣品經試驗結果如表六所示，得知各樣品葉片表面的撥水性等級介於 $4 \sim 6$ 之間，其中夾線聚合礙子 A、B、D 及 F 組撥水性等級介於 $5 \sim 6$ 之間，而繫線聚合礙

子 C 及 E 組撥水性等級介於 4 ~ 5 之間，新品與舊品之間差別不大，表示並無明顯失去礙子之撥水性。

3.6 電氣特性試驗

試驗係針對表 6 中所列試樣及項目進行，現場拆下試樣並未清除表面附著之污損物，各項目進行之程序分述如下，其測試結果則如表 7 示。

3.6.1 絕緣電阻試驗

O MEGGER BM11D 絕緣電阻計對試樣兩端加以 1000 VDC 電壓，並量測 1 分鐘時之絕緣電阻值，由測試結果顯示，新品試樣之絕緣電阻極高，無論紮線型或夾線型均 $>100\text{G}\Omega$ ，現場拆試之樣品則因受到污損而大多降至 $3\text{G}\Omega$ 左右。

3.6.2 交流洩漏電流試驗

乾燥狀態下，使用 200 KV 交流耐壓測試系統，將試樣加以 11.4 KV 系統最大對地電壓值 6.9 KV，再利用 YEW-7552 數位電表量測其穩定後之洩漏電流值，由測試結果顯示，新品試樣之交流洩漏電流極低，紮線型或夾線型新品之洩漏電流值僅為 $16.67\ \mu\text{A}$ 及 $14.67\ \mu\text{A}$ ，現場拆試之樣品則因受到污損而分布於 $20\sim 36\ \mu\text{A}$ 之間，與絕緣電阻測值趨勢吻合。

3.6.3 交流乾燥閃絡電壓試驗

乾燥狀態下，使用 200 KV 交流耐壓測試系統，依據 ANSI C29.1-1988 For electrical power insulators-test methods 4.2 low frequency dry flashover voltage test 之試驗方法，對各試樣加以交流電壓，直至發生閃絡時紀錄其電壓值，並求取三次之平均值，試驗時電壓上升率為 3KV/Sec ，大氣狀態為 20.5°C ， 1027mbar ， $68.6\%\text{R.H.}$ 。結果顯示在乾燥情況下，不論紮線型或夾線型新品交流乾燥閃絡電壓均合於規範值，現場拆試之樣品則因受到污損而稍有降低。經由觀察，各試樣均由礙子表面發生閃絡放電，表示均未經由絕緣介質材料發生內部擊穿之

絕緣破壞，此亦顯示現場拆試之樣品，即使其 PIN 周圍之聚合物已發生侵蝕或局部閃痕通道碳化，但在乾燥下仍具有相當之耐電壓能力，但推斷其鹽霧耐電壓之能力應會降低，因本所並無標準之鹽霧耐壓試驗設備，並無法進行是項試驗。

3.6.4 放電影像觀測

利用觀測儀器進行礙子表面放電樣貌之觀測，對於探討礙子放電時其電場係集中於何處，以及放電時其電弧發生部位之調查加以紀錄，此項試驗並無法達成定量之量測，但可作為放電趨勢之定性觀察。觀察可分成兩部分，惟試驗程序並無相關標準可尋，結果僅能做為參考之用，茲分述如下。

3.6.4.1 紫外光放電影像觀測

主要係針對上述試樣，在去除污損物後，對試樣兩端加以 10、20、30、40、50 KV 之較高電壓，觀測礙子表面之放電部位，交流耐壓試驗設備及被試物配置如圖 16，所加電壓較運轉電壓較高之理由在於使礙子在乾燥情況下發生放電現象，以顯示其電場集中之部位，最低電壓取運轉線電壓 (11.4 KV) 附近之 10 KV，最高電壓取交流乾燥閃絡電壓 (約 90 KV) 之 60% 左右之 50 KV，所使用加壓導線為無包覆鋁線。以加壓 40 KV 為例，觀察不同樣品，如 B-2 試樣如圖 17 所示，為比較增益 (G) 為 100 及 30 時之放電影像。

由放電影像位置顯示，不論紮線或夾線型，電場均集中於 PIN 周圍及接線端，該部位之放電較為劇烈，其中 B-2 夾線試樣之葉片表面放電較為激烈，係污損物含量較高，洩漏電流較大所致，由於所加電壓較運轉電壓高出甚多，因此本實驗僅能做為觀察電場集中部位之參考。

3.6.4.2 等效鹽霧試驗之放電影像觀測

以「JEC-201 交流電壓絕緣試驗」中之等效鹽霧試驗法，對礙子表面使用噴霧器噴以相當於 ESDD 為 0.06mg/cm^2 ， 0.12mg/cm^2 ， 0.35mg/cm^2 之污損液，於噴塗後 3 分鐘之內，對試樣兩端加以電壓上升率 3KV/Sec 之交流電壓，觀察放電進展過程之情況。本項試驗僅取編號 F(新夾線)、編號 F-3

(底部有侵蝕夾線)、編號 B-2(底部有碳化夾線) 三只代表性之試樣進行，由於聚合礙子具潑水性，污損液無法均勻分布水膜於礙子表面，如圖 18 所示，因此此項試驗僅能做為參考之用。

結果顯示在噴以乾淨之蒸餾水使之潮濕時，加以較高之電壓，礙子表面方開始產生火花放電，放電火花極為細微呈青白色，且放電路徑均勻分布於葉片各處。

ESDD 為 0.06 mg/cm^2 時，較低之電壓即開始火花放電，放電火花呈紅色，為較粗之電弧，但大致上放電路徑亦均勻分布於葉片各處。

ESDD 為 0.12 mg/cm^2 時，更低之電壓即開始火花放電，多由底部 PIN 周圍開始形成電弧，次由接線端之部位發生電弧，放電電弧呈紅色，為較粗之電弧，再連通成全面性閃絡電弧。

ESDD 為 0.35 mg/cm^2 時，尚未達到運轉電壓值即開始發生電弧放電，且電弧放電集中於底部 PIN 周圍，電弧產生之溫度促進乾燥帶之形成，因此電弧由下部葉片往上延伸達到接線端而形成全面閃絡，A-2 樣品觀察結果如圖 19 所示。

由以上放電過程及現象，必須探討此種礙子若使用於嚴重鹽害地區時，是否可能由於 PIN 周圍產生之局部電弧高溫，使高分子發生劣化現象。

4. 結論

1. 從收集事故及鄰近地區高密度聚乙烯聚合礙子外觀檢視結果，其底面均有程度不一之電蝕現象，且愈接近海邊者愈嚴重。
2. 量測聚合礙子葉片表面硬度及粗糙度，並沒明顯硬度及粗糙度變化，即表示樣品使用年限不長(1~3年)，表面無明顯劣化現象，但底面粗糙度因明顯電蝕之故，其粗糙度值均大於表面粗糙度值。
3. 由 FTIR 全反射偵測紅外線光譜中偵測 $-\text{CH}=\text{CH}-$ 、 CH_2 吸收峰的特性光譜，判斷聚合物為 HDPE 高密度聚乙烯塑膠材質；燒損樣品已變質且大部份非原基本圖譜。
4. 在熱分析中，HDPE 反應起始溫度為 292°C ，反應最後溫度為 500°C ，HDPE 經反應最後溫度 500°C 後殘餘量為 7.54%。
5. 由現場調查及表面污損物之 ESDD 等效鹽分附著量與 ICP 污損物等分析，得知現場屬重度鹽害地區，且若久未下雨清洗礙子表面污損物時，則易發生鹽塵害事故。
6. 表面潑水性分析，各樣品葉片表面的潑水性等級介於 HC 分類 4~6 之間，此屬 HDPE 潑水性範圍，一般而言，較不適用於沿海地區，可能需定期清洗礙子才能維護供電品質。
7. 電氣特性試驗中，現場折試之樣品則因受到污損絕緣電阻降低，交流洩漏電流值增加，而不論紮線型或夾線型新品交流乾燥閃絡電壓均合於規範值。
8. 由電氣模擬試驗之紫外光放電影像觀測試驗中，觀察出電場均集中於底部 PIN 週圍及接線端，由等效鹽霧試驗之放電影像觀測中，觀察出嚴重鹽附著時，電弧放電均由底部 PIN 週圍開始發展，最後達到全面性之閃絡。
9. 聚合礙子樣品底部均有明顯電蝕現象，依據上述各項結果判斷原因應是鹽塵害之堆積，造成局部電弧，此部份開始劣化，累積一段時日後，致使材料遭電蝕及穿孔破壞，並產生高溫使樣品燒損，進而造成事故發生。
10. 為確定高密度聚乙烯聚合礙子之適用地區，建議現場使用高密度聚乙烯聚合礙子事故案例回饋系統，可依此探討各地區氣象、地形及污染源等環境因素，作深入長期追蹤，再配合各地區等效鹽分附著量相關資訊，以訂定適當礙子分區使用及維護準則。
11. 若要使用於較高鹽塵害地區時，需加強高密度聚乙烯聚合礙子之設計及製造加工品管控制，如增加洩漏距離、製造加工時材料之混合均勻度、適量之抗蝕及耐候等填加物等，同時需實施清洗礙子之維護作業。

參考文獻

1. 鄭錦榮、李文台、楊豐澤，「聚合材料應用於配電器材之研究」，台電公司研究專題，2002。
2. B. Bahder, T. Garrity, M Sosnowski, R. Eaton, and C. Katz, "Physical model of electric ageing and breakdown of extruded polymeric insulated power cables", IEEE trans. Power Apparatus Syst., PAS-101 (1982) pp.1379 ~ 1390.
3. Basic Compounding and Processing of Rubber, pp.
4. STRI Guide 92/1 "Hydrophobicity Classification Guide".
6. Rubber Division, American Chemical Society, Inc., The University of Akron, Akron, OH 44325 (1985).

收到日期：2004年7月31日

修訂日期：2005年2月4日

接受日期：2005年2月15日

表1. HDPE 聚合礙子硬度檢測。

Table 1 Hardness test of HDPE polymer insulators.

編號	硬度					平均
	1	2	3	4	5	
A-1	44	46	43	42	44	43.8
A-2	59	61	61	59	60	60
B-1	59	59	58	60	59	59
C-1	59	58	57	58	57	57.8
C-2	57	57	58	57	58	57.4
C-3	59	57	57	58	57	57.6
D-1	59	61	59	60	60	59.8
E-1	59	59	59	60	59	59.2
F-1	59	61	61	59	60	60.0

高密度聚乙烯聚合礙子破損分析

表2. HDPE 聚合礙子粗糙度檢測。

Table 2 Roughness test of HDPE polymer insulators.

編號	表面粗糙度(μm)				底面粗糙度(μm)			
	1	2	3	平均	1	2	3	平均
A-1	--	--	--	--	--	--	--	--
A-2	0.8	0.4	1.2	0.8	3.0	2.6	3.5	3.0
B-1	--	--	--	--	--	--	--	--
B-2	0.8	1.2	1.1	1.0	1.8	2.2	2.9	2.3
C-1	--	--	--	--	--	--	--	--
C-2	--	--	--	--	--	--	--	--
C-3	0.3	0.5	0.3	0.3	2.6	3.2	3.8	3.2
D-1	0.7	0.5	1.1	0.7	1.7	2.8	4.9	3.1
E-1	0.3	0.2	0.4	0.3	1.0	0.7	1.0	0.9
F-1	0.2	0.2	0.3	0.2	0.6	1.1	1.2	0.9

表3. HDPE 聚合礙子樣品 ESDD 值。

Table 3 ESDD figures of HDPE polymer insulators.

樣品	測試液溫 θ (°C)	測試液導電度 σ _θ (mS/cm)	換算導電度 σ ₂₀ (mS/cm)	鹽度 Sa (kg/m ³)	等效鹽分附著量 ESDD (mg/cm ²)
A-2	20.7	0.131	0.1290	0.0680	0.0406
B-2	20.4	0.094	0.0932	0.0487	0.0290
C-3	20.5	0.026	0.0260	0.0131	0.0078
D-1	20.4	0.096	0.0953	0.0498	0.0297

表4. 表面污損物 ICP 分析。

Table 4 ICP analysis of superficial contaminants.

分析項目	樣品重 (g)	MgO	Na ₂ O	ZnO	SiO ₂	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	Al ₂ O ₃
C1	0.0504	1.41	4.75	0.07	35.73	2.11	2.77	2.68	6.26
C3	0.0142	0.91	3.55	0.21	36.35	4.12	2.93	2.11	6.59

表5. 聚合物礙子撥水性分類(HC)標準。

Table 5 Hydrophobicity classification in STRI.

HC	說明
1	全部形成獨立水滴,大部份水滴 $\theta_r \geq 80^\circ$
2	全部形成獨立水滴,大部份水滴 $50^\circ < \theta_r < 80^\circ$
3	全部形成獨立水滴,大部份水滴 $20^\circ < \theta_r < 50^\circ$, 通常它們不是圓形
4	包括獨立水滴及細長濕潤水痕 ($\theta_r = 0^\circ$), 完全濕潤面積 $< 2 \text{ cm}^2$, 其總濕潤面積 $< 90\%$
5	有些完全濕潤面積 $> 2 \text{ cm}^2$, 其總濕潤面積 $< 90\%$
6	總濕潤面積 $> 90\%$, 仍可觀察到小區域未濕潤區域
7	全部測試區域均為連續水膜

註: θ_r 為後退角(Receding Contact Angle)

表6. 聚合礙子樣品撥水性試驗。

Table 6 Hydrophobicity classification of polymer insulator.

編號	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	C-3	D-1	E-1	F-1
HC	---	6	---	6	---	4	4	6	4	5

表7. 聚合礙子高壓試驗結果。

Table 7 Results of polymer insulators power test.

編號	型式	絕緣電阻	洩漏電流	閃絡電壓	備註
A-2	夾線	1000 VDC 1 min 3.8 GΩ	6.9 KV A.C 24.12 μA	3 KV/sec A.C 3 次平均值 93.1 KV	20.5°C 68.6% R.H
B-2	夾線	1000 VDC 1 min 3.18 GΩ	6.9 KV A.C 35.96 μA	3 KV/sec A.C 3 次平均值 91.0 KV	20.5°C 68.6% R.H
C-3	紮線	1000 VDC 1 min 69.0 GΩ	6.9 KV A.C 20.67 μA	3 KV/sec A.C 3 次平均值 79.9 KV	20.5°C 68.6% R.H
D-1	夾線	1000 VDC 1 min 3.04 GΩ	6.9 KV A.C 22.70 μA	3 KV/sec A.C 3 次平均值 82.8 KV	20.5°C 68.6% R.H
E-1	紮線	1000 VDC 1 min >101 GΩ	6.9 KV A.C 16.67 μA	3 KV/sec A.C 3 次平均值 85.4 KV	20.5°C 68.6% R.H
F-1	夾線	1000 VDC 1 min >101 GΩ	6.9 KV A.C 14.67 μA	3 KV/sec A.C 3 次平均值 95.3 KV	20.5°C 68.6% R.H



圖1 現場勘查。
Figure 1 Field investigation.



圖2 A-1 樣品。
Figure 2 Sample A-1.



圖3 B-1 樣品。
Figure 3 Sample B-1.



圖4 C-1 樣品。
Figure 4 Sample C-1.

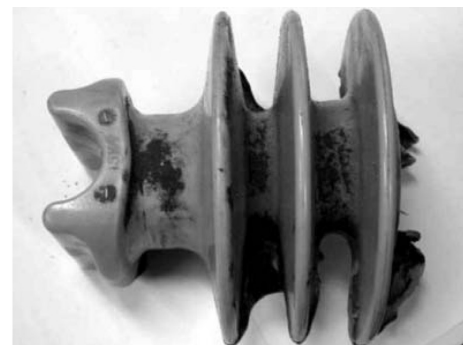




圖5 C-2 樣品。
Figure 5 Sample C-2.

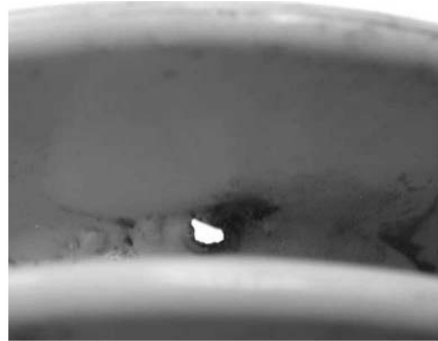


圖6 A-2 樣品。
Figure 6 Sample A-2.



圖7 C-2 樣品。
Figure 7 Sample B-2.



圖8 C-3 樣品。
Figure 8 Sample C-3.



圖9 D-2 樣品。
Figure 9 Sample D-2.

高密度聚乙烯聚合癡子破損分析

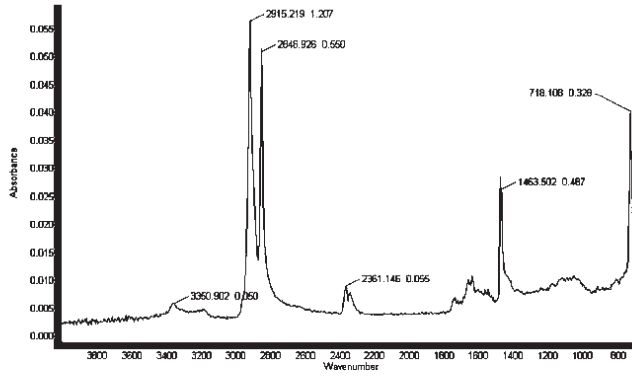


圖10 新品 FTIR 圖譜。
Figure 10 FTIR spectrum of new sample.

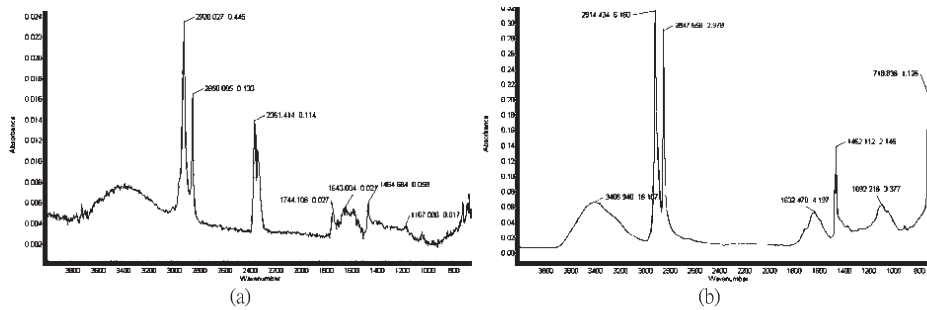


圖11 (a) I : A-1 樣品 , (b) II : A-2 樣品 FTIR 圖譜。
Figure 11 FTIR spectrum of (a) I : A-1, (b) II : A-2.

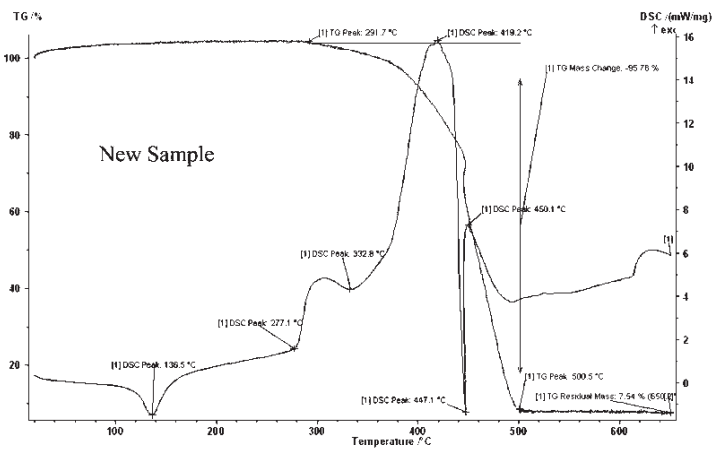


圖12 新品 TG-DSC 分析圖。
Figure 12 TG-DSC figure of new sample.

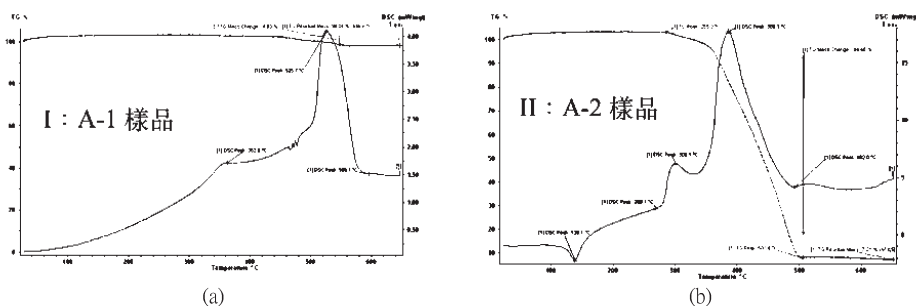


圖13 (a) I : A-1 樣品 , (b) II : A-2 樣品 TG-DSC 分析圖。

Figure 13 TG-DSC figure of (a) I : A-1, (b) II : A-2.

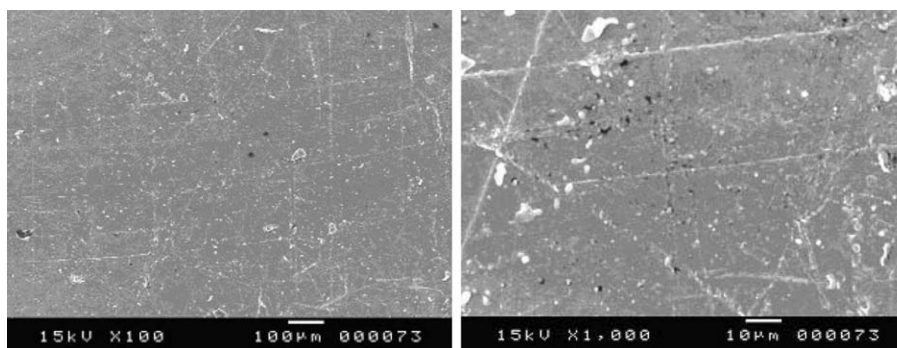


圖14 新品表面 SEM 組織圖。

Figure 14 SEM morphology of new sample.

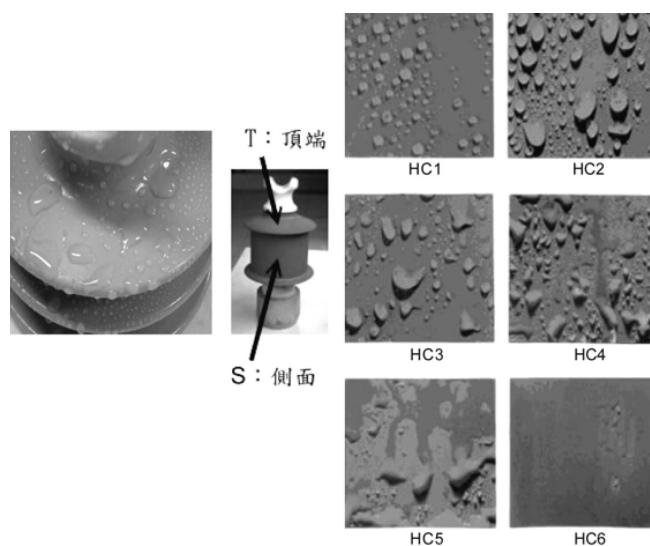


圖15 STRI 撥水性評估標準。

Figure 15 Hydrophobicity classification in STRI.

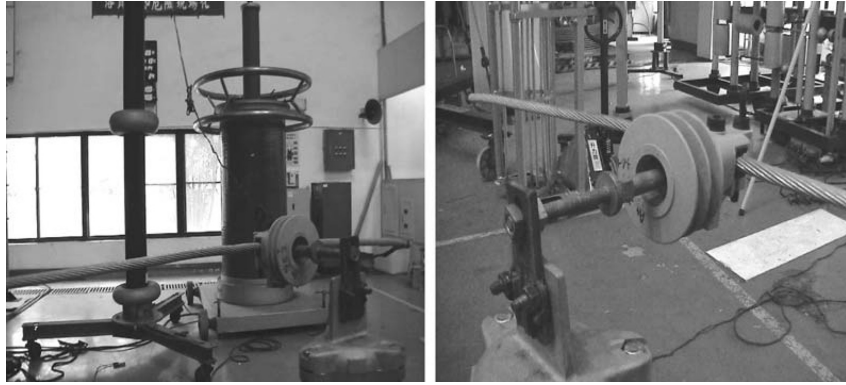


圖16 交流耐壓試驗設備及被試物配置。
Figure 16 Power test facilities and layout.

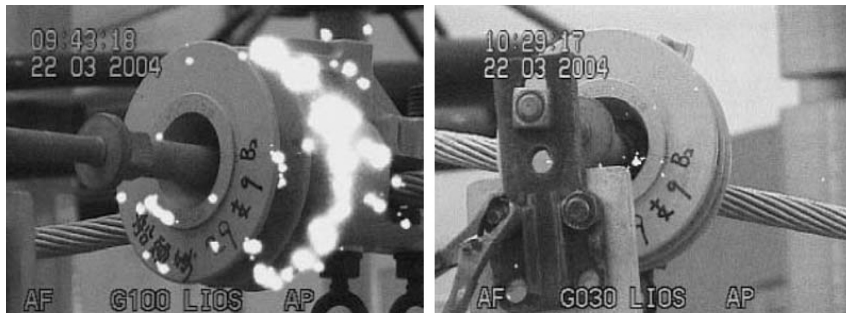


圖17 樣品 B-2 紫外光放電影像檢測。
Figure 17 UV corona image monitoring of B-2.



圖18 放電影像觀測污損液附著情形。
Figure 18 Artificial contaminants figure in UV corona image monitoring.



圖19 樣品 A-2 ESDD 等效鹽霧試驗放電影像觀測(0.35 mg/cm²)。

Figure 19 Artificial contaminants figure in UV corona image monitoring of Sample A-2.