

出國報告（出國類別：開會）

參加 EPRI 於美國芝加哥市舉辦之  
「Program 36 - Underground  
Transmission Task Force Meeting」報告

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：

梁明福 副處長 新桃供電區營運處

余維文 組長 供電處

廖吉義 督導 高屏供電區營運處

趙志強 課長 輸變電工程處

派赴國家：美國

出國期間：103 年 9 月 27 日至 103 年 10 月 4 日

報告日期：103 年 11 月 20 日

## 出國報告審核表

出國報告名稱：參加 EPRI 於美國芝加哥市舉辦之「Program 36-Underground Transmission Task Force Meeting」報告

出國人姓名 (2人以上,以1人為代表)	職 稱	服 務 單 位
梁明福	副處長	新桃供電區營運處
出國類別	<input type="checkbox"/> 考察 <input type="checkbox"/> 進修 <input type="checkbox"/> 研究 <input type="checkbox"/> 實習 <input checked="" type="checkbox"/> 其他 <u>開會</u> (例如國際會議、國際比賽、業務接洽等)	

出國期間：103年9月27日 至 103年10月4日      報告繳交日期：103年11月20日

出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審 核 項 目
--------------	--------------	---------

<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/>	1.依限繳交出國報告 2.格式完整(本文必須具備「目的地」、「過程」、「心得及建議事項」) 3.無抄襲相關資料 4.內容充實完備. 5.建議具參考價值 6.送本機關參考或研辦 7.送上級機關參考 8.退回補正,原因: <input type="checkbox"/> (1) 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> (2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容 <input type="checkbox"/> (3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項 <input type="checkbox"/> (4) 抄襲相關資料之全部或部分內容 <input type="checkbox"/> (5) 引用相關資料未註明資料來源 <input type="checkbox"/> (6) 電子檔案未依格式辦理 9.本報告除上傳至出國報告資訊網外,將採行之公開發表: <input checked="" type="checkbox"/> (1) 辦理本機關出國報告座談會(說明會),與同仁進行知識分享。 <input type="checkbox"/> (2) 於本機關業務會報提出報告 <input type="checkbox"/> (3) 其他 _____ 10.其他處理意見及方式:
---	--	---

報告人：        單位：       主管處：       李專總：       副總經理： 

說明：  
 一、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。  
 二、審核作業應儘速完成，以不影響出國人員上傳出國報告至「公務出國報告資訊網」為原則。

# 行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

參加 EPRI 於美國芝加哥市舉辦之「Program 36-Underground Transmission Task Force Meeting」報告

頁數 62 含附件：是 否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：台灣電力公司/陳德隆/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

梁明福/台灣電力公司/新桃供電區營運處/副處長/(03)577-8020

余維文/台灣電力公司/供電處/組長/(02)2366-8419

廖吉義/台灣電力公司/高屏供電區營運處/營運督導/(07)321-4110#349

趙志強/台灣電力公司/輸變電工程處/課長/(02)2322-9779

出國類別：1 考察 2 進修 3 研究 4 實習 5 其他：開會

出國期間：103/9/27~103/10/4 出國地區：美國

報告日期：103/11/20

分類號/目

關鍵詞：

美國電力研究院：Electric Power Research Institute, EPRI

交連 PE 電纜：XLPE Cable

高溫超導技術：High Temperature Superconducting

地下傳輸系統：Underground Transmission System

內容摘要：(二百至三百字)

103年9月29日至10月1日期間，美國電力研究院(EPRI)邀請世界各國會員及美國境內機構於美國芝加哥(Chicago)舉辦「Program 36-Underground Transmission Task Force Meeting」就相關議題進行共同研討與交流。

EPRI 於會議中說明研究成果及未來研究方向，會議中亦邀請輸變電領域專家學者提出專題簡報進行交流；EPRI 於 10 月 1 日亦安排參觀設於位於美國伊利諾斯州波林布魯克(Bolingbrook, Illinois, USA) G&W 電氣公司，介紹該公司生產之電纜附屬器材產品，以現場組裝 138KV 預模型(Pre-moulded type)電纜接續匣及終端匣，可有效縮減施工時間，彰顯其施工之便利性，並針對相關議題進行交流。

本報告共有陸個章節：第壹章為出國目的與行程，簡要說明本次出國之緣由，以及行程安排；第貳章為地下輸電線工作成果會議蒐集資料與摘要記錄；第參、肆章分別為 G&W 針對電纜附屬器材簡報及參訪過程做敘述；第伍章為針對本公司所提的議題與 EPRI 及 BC Hydro 進行交流；第陸章為本次行程之心得與建議事項。

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

# 目 錄

	頁次
行政院及所屬各機關出國報告提要-----	II
目錄 -----	IV
圖目錄 -----	V
表目錄 -----	VII
壹、 出國目的與行程-----	1
貳、 地下輸電線工作成果會議蒐集資料與摘要紀錄-----	2
2.1 會議概要-----	2
2.2 工作成果會議資料摘述-----	5
2.2.1 2014 年發展總結及 2015 年各計畫範疇報告-----	5
2.2.2 地下輸電系統之設計、施工及運轉技術-----	6
2.2.3 XLPE 電纜之熱與機械行為研究-----	8
2.2.4 超導技術的近程發展-----	13
2.2.5 地下輸電系統及面臨的挑戰－Exelon 公用事業部-----	18
2.2.6 輸電電纜線性共振分析之評估(LIRA)-----	22
2.2.7 地下輸電交連 PE 電纜管路防蝕-----	23
2.2.8 地下輸電電纜系統診斷技術-----	24
2.2.9 電纜動態額定及增加電力潮流-----	26
參、 輸電電纜附屬器材基本介紹－G&W Electric -----	27
3.1 G&W 公司各年代產品介紹-----	27
3.2 G&W 附屬器材介紹-----	30
3.3 電應力分佈控制與施工-----	33
肆、 參訪芝加哥近郊 G&W 公司-----	35
4.1 G&W 公司簡介-----	35
4.2 G&W 參訪產品介紹-----	36
4.2.1 電纜接續匣(Cable Joint)介紹-----	37
4.2.2 電纜終端匣(Cable Termination 或 Sealing End)介紹-----	39
伍、 與 EPRI 及 BC HYDRO 公司交流研討議題-----	41
5.1 BC HYDRO 公司簡介-----	41
5.2 交流研討議題-----	41
陸、 心得與建議-----	56

# 圖 目 錄

	頁次
圖 1 電纜管道檢查使用機器人技術-----	6
圖 2 免開挖工法施工挖掘示意圖-----	7
圖 3 押出型電纜在管路中之熱與機械行為實驗示意圖-----	8
圖 4 熱與機械行為驗證流程示意圖-----	8
圖 5 EPRI 組織跨界團隊(包含顧問公司及電纜業界)任務分配圖-----	9
圖 6 有接頭及無接頭下之熱流情形比較圖-----	9
圖 7 大截面積導體之彎曲係數比較分析圖-----	10
圖 8 EPRI 電纜熱機械性(Thermo-mechanical)應力模型圖-----	12
圖 9 Korea Electric Power(KEPCO) Icheon, South Korea 超導計畫圖-----	13
圖 10 Sumitomo 66kV 超導電纜 at Asahi Substation, Yokohama-----	14
圖 11 Long Island 電力認證電纜 at Holbrook Substation -----	14
圖 12 Nexuans 製 HTS 高溫超導電纜-----	15
圖 13 HTS 故障電流限制器-----	16
圖 14 HTS 故障電流限制器裝設位置示意圖-----	17
圖 15 HTS 電纜裝設前後系統之示意圖-----	17
圖 16 HTS 電纜線路加入系統後之負載變化情形圖-----	18
圖 17 管路設計剖面示意圖-----	19
圖 18 芝加哥共同管溝方式布設示意圖-----	20
圖 19 電纜水樹及絕緣破壞檢測圖-----	23
圖 20 管路內固定電纜之鋁合金固定座及鋼材之腐蝕情形-----	24
圖 21 電纜之熱與機械應力的結果導致外皮的摩擦事故照片-----	25
圖 22 絕緣體上發現凹痕-----	25
圖 23 IEC60859—GIS 電纜終端濕式規範-----	31

圖 24	G&W 之 138kV 屋外型電纜終端匣產品-----	32
圖 25	接續匣電應力分佈情形圖-----	33
圖 26	G&W 公司外觀-----	35
圖 27	G&W 服務台之工安宣導-----	36
圖 28	G&W 公司終端及接續產品展示館-----	36
圖 29	G&W 預置式冷縮型橡膠絕緣體(採 Silicon Rubber)-----	37
圖 30	橡膠主體與電纜內外半導體層及絕緣層之位置-----	38
圖 31	接續匣施工之相關步驟及照片-----	39
圖 32	終端匣施工之相關照片-----	40
圖 33	世界各國地下電纜占所有線路的統計比例-----	43
圖 34	BCH 與 TPC 海底電纜構造剖面圖-----	51
圖 35	BCH 海纜偵測系統之電纜連接示意圖-----	52
圖 36	接地電纜之電流傳感器示意圖-----	52
圖 37	三相被覆電流及導體電流之偵測系統圖-----	53
圖 38	偵測系統在行動裝置顯示情形圖-----	53

# 表 目 錄

頁次

表 1	出國行程表-----	1
表 2	G&W「輸配電線路附屬器材之發展歷史表」-----	27
表 3	降低磁場的方式分類-----	42
表 4	台電公司地下電纜占所有輸電線路之比例-----	44
表 5	IEC 於竣工耐壓試驗中之施加電壓規範-----	45
表 6	10 家各國電力公司 SCFF 電纜之維護工作項目及頻率統計表-----	49
表 7	DGA 之分析結果乙炔(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> )量判斷電纜內部放電情形-----	50
表 8	不同型式的高壓陸纜事故率統計分析表-----	54



# 壹、出國目的與行程

美國電力研究院(EPRI)係一獨立、非營利組織，其致力於電力與能源領域相關之技術開發、研究整合與驗證推廣。該院於 103 年 9 月 29 日至 10 月 1 日期間，於美國芝加哥(Chicago)舉辦 2014 年「Program 36-Underground Transmission Task Force Meeting」(P36 地下輸電線工作成果會議)。

本公司為提升地下電纜輸電線路技術，與該院簽訂契約，加入該研究院之地下輸電線路技術研究專案，藉由本次該院舉辦之會議，瞭解各項下子計畫之研究近況與本年度主要技術之研究結果，並從中觀摩、學習各會員之實際處理經驗，以使本公司之輸電電網得以更加穩定、安全。

依據 2013 年 EPRI 2000197019764(Project ID No. 071730)契約書辦理，本次會議內容為美國電力研究院(EPRI)就其負責之 P36 地下輸電線工作研究案辦理成果邀請世界各會員就相關議題共同研討及交流。此次會議主要目的係有：

- (一)針對 EPRI P36 案中 36.001 ~ 36.006 等分項計畫(電纜設計與施工、電介質電纜系統、電纜動態額定值與提高功率、知識獲取與技術移轉)之 2014 年研究成果總結與 2015 年研究計畫範疇報告。
- (二)地下電纜線路五年研究行動計畫探討，包含超高壓技術、資產管理、事故案例、維護方式等議題。
- (三)地下電纜線路運行現況及未來挑戰之介紹與分享。
- (四)地下電纜電磁場屏蔽、土木工程灌漿程序、防蝕保護、系統保護等技術報告。
- (五)地下電纜線路附屬器材、接續匣與終端匣安裝技術介紹等。

本次出國行程說明，簡列如表 1。

表 1 出國行程表

日期	地點	內容
9 月 27 日 (六) ~ 9 月 28 日 (日)	台北→洛杉磯→芝加哥	往程 (台北—洛杉磯—芝加哥)
9 月 29 日 (一) ~ 10 月 1 日 (三)	芝加哥	參加 EPRI 於美國芝加哥舉辦之「Program 36-Underground Transmission Task Force Meeting」
10 月 2 日 (四)	芝加哥	與 EPRI、加拿大 BC Hydro 公司研討
10 月 3 日 (五) ~ 10 月 4 日 (六)	芝加哥→洛杉磯→台北	返程 (芝加哥—洛杉磯—台北)

## 貳、地下輸電線工作成果會議蒐集資料與摘要紀錄

### 2.1 會議概要

- 一、會議主題：PROGRAM 36: UNDERGROUND TRANSMISSION TASK FORCE
- 二、會議時間：2014年9月29日至10月1日
- 三、會議地點：Exelon Headquarters/Chase Tower(10 S Dearborn St, Chicago, IL 60603)
- 四、會議議程：

日期：2014年9月29日		
TIME (時間)	TOPIC (議題)	PRESENTER (報告人)
8:00 AM	Welcome & Introduction (歡迎及介紹)	Mark Smith, Task Force Chairperson, Southern Company
8:15 AM	Program Overview (議程內容概述)	Tom Zhao, EPRI Program Manager
8:30 AM	Summary of 2014 Deliverables and 2015 Project Scopes (2014年發展總結及2015年各計畫範疇報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● 36.001 Design and Construction of UT Systems (36.001 地下輸電系統之設計及施工)</li> <li>● 36.002 Extruded Dielectric Cable Systems (36.002 押出型絕緣電纜系統)</li> <li>● 36.003 Laminated Dielectric Cable Systems (36.003 纏繞型絕緣電纜系統)</li> <li>● 36.004 Cable Dynamic Rating and Increased Power Flow (36.004 電纜動態額定容量及可增加的電力潮流分析)</li> <li>● 36.006 Knowledge Capture and Tech Transfer (36.006 知識彙集及技術移轉)</li> </ul>	Tom Zhao, EPRI  Steve Eckroad, EPRI  Tom Zhao, EPRI  Paula Traynor, EPRI  David Kummer, EPRI
10:00 AM	Break (休息)	
10:15 AM	Technical Presentations (技術交流報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● XLPE Cable Thermo-mechanical Behavior R&amp;D Update (交連PE電纜之熱與機械行為研究發展結果更新)</li> </ul>	Steve Eckroad, EPRI
11:00 AM	Supplemental Project Update (補充計畫更新報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● Grouting Procedures (灌漿程序介紹)</li> <li>● Recent Developments in Superconductivity (超導技術的近程發展)</li> </ul>	Steve Eckroad, EPRI
11:45 AM	Lunch (午餐)	

12:30 PM	Member Inputs and Discussions on EPRI Underground Transmission 5-Year Action Plan (EPRI地下輸電5年行動計畫會員回饋意見及討論)	All
2:30 PM	Break (休息)	
2:45 PM	Member Inputs and Discussions on EPRI Underground Transmission 5-Year Action Plan (Continued) (EPRI地下輸電5年行動計畫會員回饋意見及討論-繼續)	All
4:30 PM	ADJOURN (休會)	

日期：2014年9月30日

TIME (時間)	TOPIC (議題)	PRESENTER (報告人)
8:00 AM	Member Presentations (會員報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● Exelon Underground Transmission Systems and Challenges (Exelon公司報告地下輸電系統及面臨的挑戰)</li> <li>● AEP underground transmission systems and challenges and Green Book updates (Chapter 12, Installation Design, and Chapter 13, Cable System Construction) (AEP公司報告地下輸電系統及面臨的挑戰與綠皮書內容更新)</li> </ul>	Frank Frentzas, Exelon  Rob Grawe, AEP
10:00 AM	Break (休息)	
10:15 AM	Member Presentations, Continued (會員報告-繼續) <ul style="list-style-type: none"> <li>● NYPA Underground Transmission Systems and Challenges (NYPA公司報告地下輸電系統及面臨的挑戰)</li> </ul>	Bob Schwabe, NYPA
11:15 AM	Technical Presentations (技術交流報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● EPRI Sensor Suite Development (EPRI各式感應裝置發展報告)</li> </ul>	David Kummer, EPRI
11:45 AM	Lunch (午餐)	
12:45 PM	Supplemental Project Update (補充計畫更新報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● Underground Vault Corrosion (地下防腐蝕處理)</li> </ul>	Tom Zhao, EPRI
1:15 PM	Technical Presentation (技術交流報告) <ul style="list-style-type: none"> <li>● Line Resonance Analysis (LIRA) for Assessing Transmission Cables (評估輸電電纜之線路共振分析(LIRA)技術)</li> </ul>	Jim Raines, Fauske
2:15 PM	Break (休息)	All
2:30 PM	Transmission Cable Accessory Fundamentals (輸電電纜附屬器材基本介紹)	G&W Electric
4:30 PM	ADJOURN (休會)	

日期：2014年10月1日		
TIME (時間)	TOPIC (議題)	PRESENTER (報告人)
8:00 AM	Travel to G&W Electric (至G&W Electric公司)	All
9:00 AM	Transmission Cable Accessory Installation and Workmanship (輸電電纜附屬器材安裝及施作) <ul style="list-style-type: none"> <li>● Termination (電纜終端匣)</li> <li>● Joint (電纜接續匣)</li> </ul>	G&W Electric & All
12:00 PM	Lunch (午餐)	
12:45 PM	G&W Plant Tour (G&W 工廠參觀)	All, Optional
2:45 PM	Wrap-up (總結會議)	
3:00 PM	UTTF Meeting ADJOURN (本次會議結束)	

## 五、2014 年P36 研究案內容概述

- (一)EPRI P36 案 36.001~36.006 分項計畫(電纜設計與施工、電介質電纜系統、電纜動態額定值與提高功率、知識獲取與技術轉移)之 2014 年研究成果與 2015 年研究計畫範疇報告。
- (二)EPRI 地下電纜線路五年研究行動計畫探討，包含超高壓技術、資產管理、事故案例、維護方式等議題。
- (三)Exelon、AEP、NYPA 等公司地下電纜線路運行現況及未來挑戰之介紹與分享。
- (四)地下電纜電磁場遮罩、土木工程灌漿程式、防蝕保護、系統保護等技術報告。
- (五)地下電纜線路附屬器材、接續匣與終端匣安裝技術介紹。

## 2.2 工作成果會議資料摘述

### 2.2.1 2014 年發展總結及 2015 年各計畫範疇報告

針對 EPRI P36 案中 36.001 ~ 36.006 各分項計畫(電纜設計與施工、電介質電纜系統、電纜動態額定值與提高功率、知識獲取與技術移轉)之 2014 年研究成果總結與 2015 年研究計畫範疇報告如下：

- 首先針對 2014 年各分項計畫的研究成果總結概述為

#### A.36.001(電纜設計與施工、運轉及維護)

1	使用機器人技術進行地下輸電系統之檢查工作	硬體部分
2	地下輸電系統保護	技術報告
3	輸電電纜附屬器材之可靠性評估	技術更新
4	地下傳輸系統之管理架構及生命週期成本分析	技術更新
5	地下輸電系統工作管理程式-第 7 版	軟體部分

#### B.36.002(押外型絕緣電纜系統)

1	押外型絕緣電纜系統之熱與機械應力設計	技術更新
2	押外型絕緣電纜系統之先進的感知器及檢查技術	硬體部分
3	地下輸電系統之磁場管理技術與實驗認證	技術更新

#### C.36.003(纏繞型絕緣電纜系統)

1	管型電纜系統中直埋式鋼管腐蝕狀況之檢查、評定和減輕技術	技術更新
2	管型電纜系統之有效的陰極保護技術其雜散電流定位和減輕分析	技術更新
3	纏繞型絕緣電纜系統條件評定用之線路共振分析	技術更新
4	高壓電纜及變壓器用之 EPRI 溶解氣體分析指南-2014 年更新版	技術更新

#### D.36.004(電纜動態額定容量及可增加的電力潮流分析)

1	電力潮流增加之參考手冊-2014 年	技術更新
2	傳輸額定計算工作管理程式-第 1 版	軟體部分
3	地下電纜周遭土壤及特殊回填物之熱阻係數評估	技術更新

#### E.36.006(知識彙集及技術移轉)

1	地下傳輸系統教育工作會議	工作會議
2	地下輸電電纜系統之診斷技術	技術更新
3	EPRI 地下傳輸系統參考書-綠皮書-2014 年更新版	技術報告

- 其次對於 2015 年各分項計畫除延續既有計畫內容外，部分新增計畫內容概述如下：

#### A.36.001(電纜設計與施工，運轉及維護)

針對其中「輸電電纜附屬器材之可靠性評估」將會有完成報告。

#### B.36.002(押外型絕緣電纜系統)

新增 220kV 至 500kV 之超高壓電纜將會有更新版的技術檢閱報告。

### C.36.003(纏繞型絕緣電纜系統)

針對纏繞型絕緣電纜之熱與機械應力行為會有其研讀報告。

### D.36.004(電纜動態額定容量及可增加的電力潮流分析)

針對押出型絕緣電纜之強制冷卻技術會有其技術報告。

### E.36.006(知識彙集及技術移轉)

針對地下輸電電纜及其附屬器材提出各式故障資料收集報告。

## 2.2.2 地下輸電系統之設計、施工及運轉技術

### (1) 地下輸電管道檢查使用機器人技術：

本簡報由 EPRI 計畫經理 Mr. Tom Zhao 提出，介紹地下電纜線路需要定期檢查和維修，以確保線路運轉的安全及可靠性。一般均由維護人員進入洞道或人孔內目視檢查或以攜帶式的儀器進行測量。

EPRI 已經開發出一種適用遠程遙控的機器人在軌道系統上行駛以做洞道內設備安全性的檢測。該方法的缺點是無法涵蓋整體的檢查範圍。本系統研發如達實用性時，於管道維護上將可節省龐大的巡檢人力及費用。本報告的研究項目包括於實驗室完成一個原型機器人及軌道系統以達驗證其可行性(詳圖 1)。

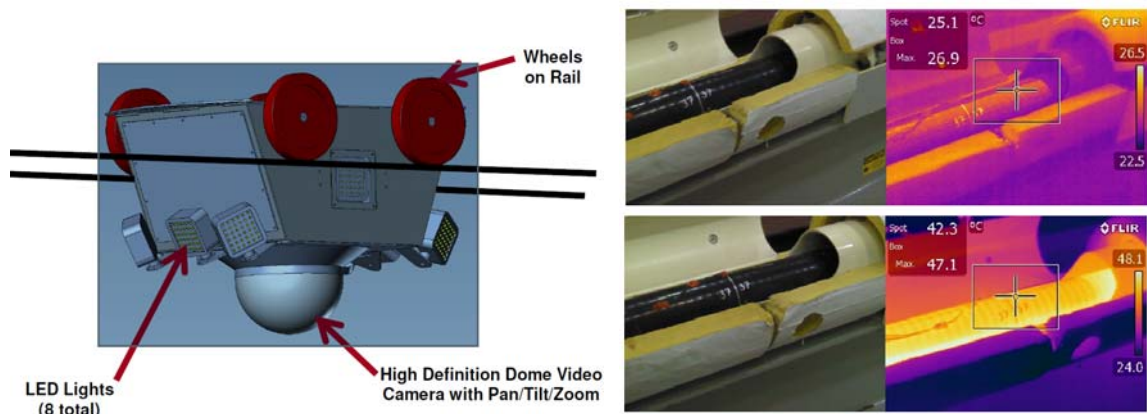


圖1 電纜管道檢查使用機器人技術

### (2) 免開挖工法施工指引書訂定

本簡報由 EPRI 助理研究員 Mr. Steve Eckroad 提出，介紹免開挖工法係指以免開挖或儘量減少開挖之方式，完成地下管線設置、修復或更新之技術。就地下電纜管線工程而言，一般係於一限定距離內，開設工作井，然後由兩工作井內完成管線修復工作，同時以最小挖掘面積完成地下管線施工作業的方法。其與傳統明挖工法之主要

差異如圖 2 所示。隨著科技日新月異，免開挖工法新技術不斷研發精進，各種工法各有所長，亦各有其限制，而各國免開發工程產業發展特性也不同，因此在工法研選上，目前尚無一套國際通用的準則可依循，故 EPRI 依委託而研究及建立管線免開發工法之作業指導書。

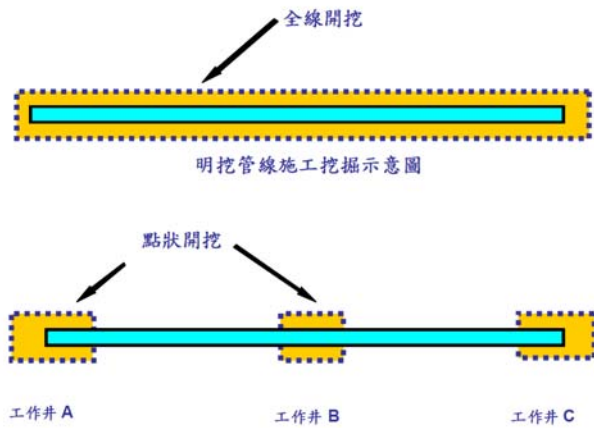


圖2 免開挖工法施工挖掘示意圖

## 2.2.3 XLPE 電纜之熱與機械行為研究

(1)本簡報由 EPRI 助理研究員 Mr. Steve Eckroad 提出，介紹電纜絕緣層高溫押出後會產生收縮，絕緣厚度會變薄，送電時的熱漲冷縮，電纜外徑則會微量增加。交連 PE 電纜的絕緣層的允許的工作溫度為 90°C，比基底溫度(30~40°C)高了 50~60°C，因此電纜產生了熱機械性(Thermo-mechanical)應力的變化，當電纜長度越長時，其伸長量越長。在不同的管路條件敷設方式下，交連電纜的熱機械性變化會有相當影響，說明如下：

A.首先可由圖示樣本了解在 230kV XLPE 管路中，保留了 25mm 之熱與機械間距。在本分項計畫中主要是針對押出型電纜(如交連 PE 電纜)在管路及鋼管中之熱與機械(TM)行為進行實驗認證。(如圖 3)

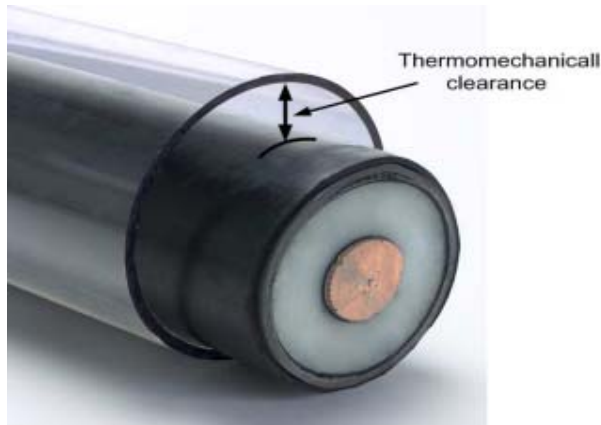


圖 3 押出型電纜在管路中之熱與機械行為實驗示意圖

B.在本議題之研究方向上基本是透過理論資料收集與模型建立後，藉由實驗室驗證後再進行工程施作實務等三階段方式為主。詳如圖 4。

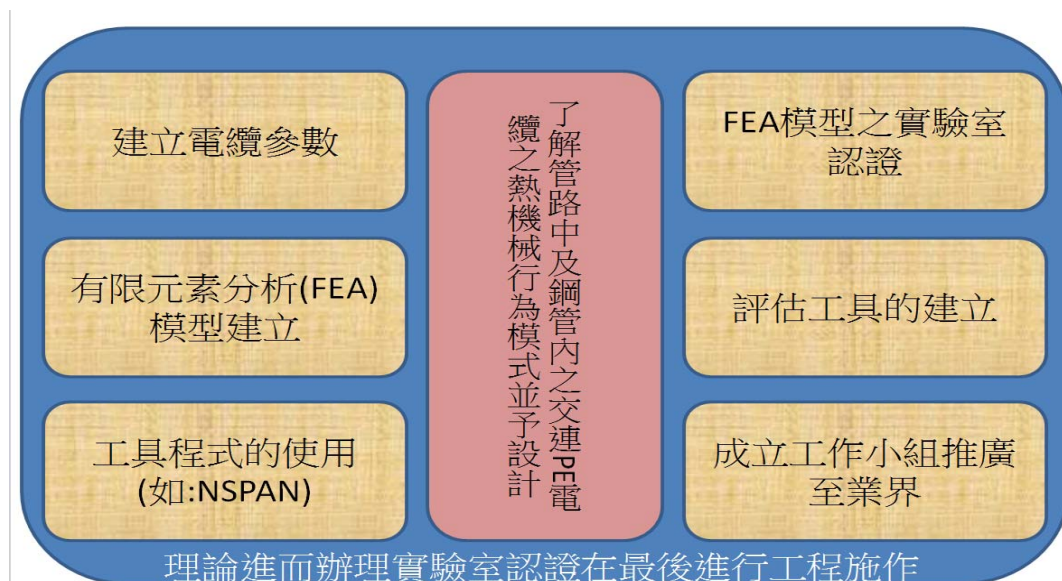


圖 4 熱與機械行為驗證流程示意圖



(2)EPRI 預計組成一個跨界團隊，包含顧問公司及電纜業界來展開理論的研究了解熱與機械行為模式之探討。詳如圖 5。

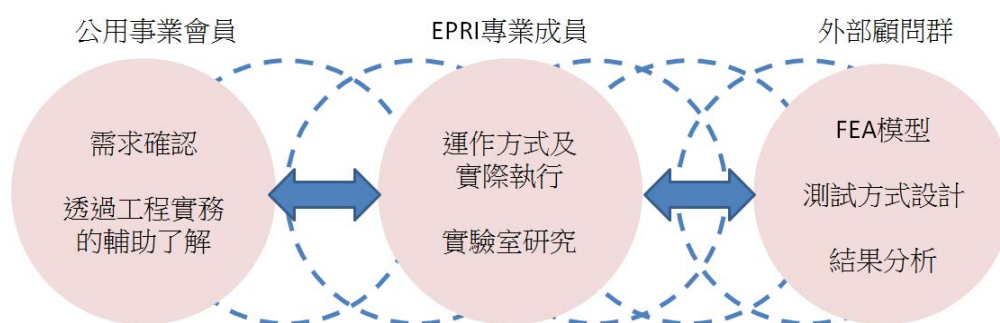


圖 5 EPRI 組織跨界團隊(包含顧問公司及電纜業界)任務分配圖

(3)有關熱與機械行為模式長時間試驗計畫略述如下：

#### A.目標

- (A)針對交連 PE 電纜首先完成具有統一性、全面性及業界可普遍接受的設計標準並進而建構一個包含管路及人孔的模擬系統。
- (B)提供工具程式及軟體供設計人員、製造商及施工者建置安全及可靠的交連 PE 電纜系統。
- (C)透過教育訓練，讓所有相關人員均能了解並適當地回饋包含管路及人孔的交連 PE 電纜系統之實際的機械應力狀況。

#### B.2014 年研究行動結果

- (A)針對測試電纜持續進行有限元素分析。
- (B)針對所有熱散逸路徑比對有限元素分析結果。
- (C)針對異常的溫度分布情形進行來源研究及探索。
- (D)持續建立第二條測試電纜進行結果查對

(4)試驗結果數據：

A.在有接頭及無接頭下之熱流情形比較，如圖 6。

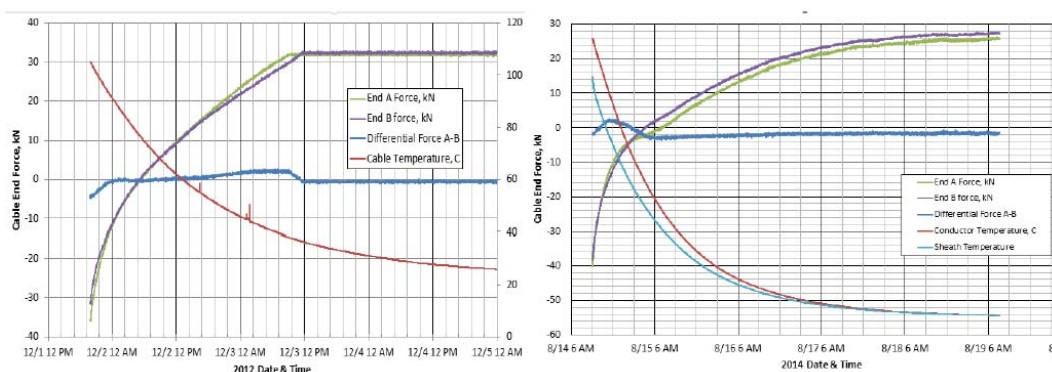


圖 6 有接頭及無接頭下之熱流情形比較圖

(A)有接頭時： $\Delta\text{Force}_{105c \rightarrow 25c} = 64 \text{ to } 68 \text{ kN}$

(B)無接頭時： $\Delta\text{Force}_{105c \rightarrow 25c} = 66 \text{ to } 68 \text{ kN}$

(C)比較結果：無明顯差異

B.大截面積導體之彎曲係數資料取得及其分析，如圖 7

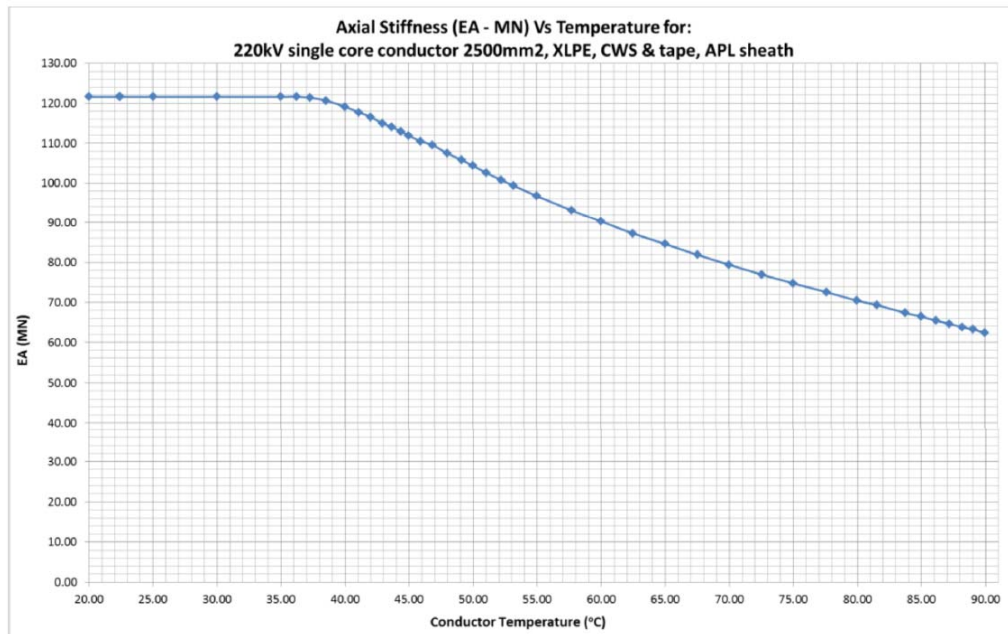


圖 7 大截面積導體之彎曲係數比較分析圖

(5)在不同的管路條件敷設方式下，交連電纜的熱機械性變化會有相當影響，說明如下：

A.直埋敷設時，電纜因受到周邊土壤的限制，整條電纜無法產生位移，於是線芯將在熱機械力的作用下在線路的兩個末端產生很大的推力，引起末端位移，因而造成對電纜接續或終端匣的安全有所影響。解決方式可在終端處做蛇型敷設以吸收應變力。

B.管路敷設時，人孔內之電纜因不受到橫向約束，在熱機械力的作用下電纜將產生彎曲變形；解決方法可將接續匣兩側至管路口間之電纜刻意以其至少 15 倍外徑之彎曲半徑彎成反曲。當電纜熱伸縮時由反曲彎曲半徑之變化來吸收。

C.河道敷設時，電纜一般均放在支架上，不作剛性固定，故電纜的熱伸縮較大，在斜面敷設時易出現滑落現象；在電纜的彎曲處易出現嚴重位移。解決方法對長距離推管、涵洞或河道內之電纜布設通常採用蛇形(Snaking)設計，即將電纜線路刻意分成很多小區間，然後將每個區間彎成蛇形，可將電纜全部之膨脹量均勻分散於每個蛇形段吸收。

D. 豎井敷設時，電纜的自重及熱機械力有可能使金屬層產生過分的應變，從而縮短電纜的使用壽命。解決方法為防止電纜下滑及提供熱伸縮之空間，如垂直距離較短時，採直線固定之布設方式，垂直距離較長時，除始末兩端皆須以彈簧式固定座固定外，均應採蛇行方式布設。

E. 橋架敷設時，若電纜敷設在橋架中，在熱機械力的作用下電纜還會受到橋樑伸縮、振動的影響，從而損壞電纜架等固定設施。解決方法在橋梁伸縮處及上下橋梁處採用可撓性設計方式以利吸收應變。

(6) 機械應力的變化是電纜設計時必須考慮到的重點，在一般電力開關操作下亦會引起溫度的增減，將導致電纜機械應力變化，影響絕緣層及 PVC 外被之壽命和性能。因此，EPRI 利用實際管路現場模擬方式(詳圖 8)及有限元素法 Finite Element Analysis (FEA) Model 模擬交連 PE 電纜於管路中送電時的熱機械性能，包含電纜及接續匣機械性能的影響測試，利用熱模型來進行測量電纜參數，並監測電纜絕緣變形。主試驗裝置是在全尺寸的管路下藉由電纜送電(以 TC 加熱)模擬，在常時送電容量下進行各種電纜機械應力的變化參數的量測。EPRI 將利用模型和計算方法證實理論，以利各電力業者日後電纜安裝設計時的重要參考依據。

除上述測試外，為蒐集更完整的電纜熱機械應變參數，LADWP 洛杉磯水電局 (Los Angeles Department of Water and Power)，將於 2015 年提供 138kV 1500MCM 鉛被覆充油電纜供 EPRI 做充油電纜熱機械應力變化的測試，使參數的資料更臻完整。

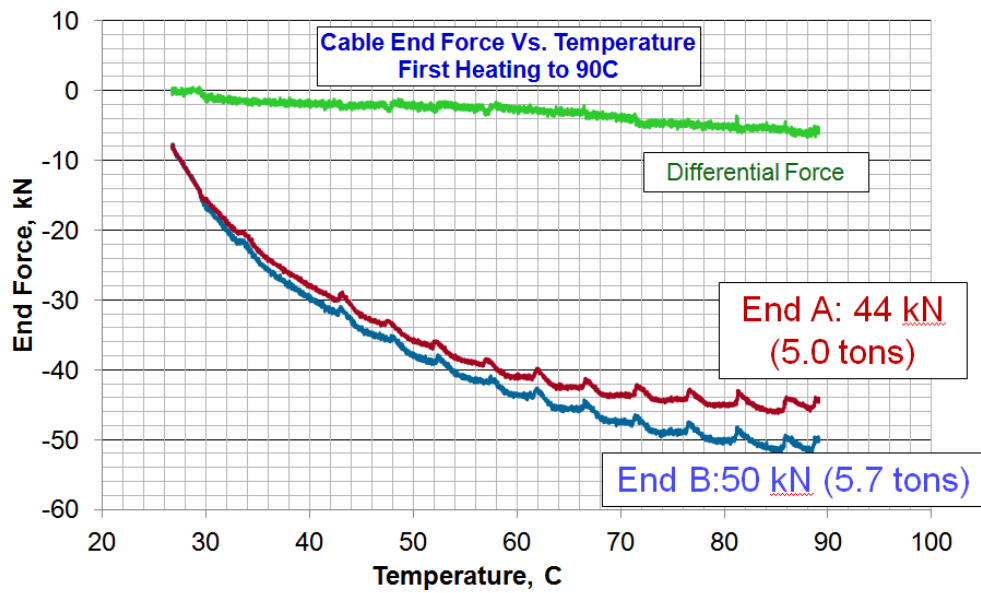


圖 8 EPRI 電纜熱機械性(Thermo-mechanical)應力模型圖

## 2.2.4 超導技術的近程發展

(1)有關於超導技術的計畫項下，在這次會議中提供最新的研究更新內容，並已收集全世界其他地區的安裝案例於會中報告。

(2)世界各地有關於高溫超導電纜(HTS)計畫資料收集—已安裝並加入運轉者。

- Essen, Germany: 1 km, 10 kV, 2300 A (40 MVA)
  - In urban distribution system – replaces HV transmission
- Icheon, South Korea: 410 m, 22.9 kV, 1260 A (50 MVA)
  - In urban distribution system
- Gochang, South Korea: 500 m, 154 kV, 3.75 kA (1 GVA)
  - In transmission grid
- Yokohama, Japan: 240 m, 66 kV, 5 kA (200 MVA)
  - In substation
- Long Island, USA: 610 m, 138 kV, 2400 A (575 MVA)
  - In transmission grid

其中：

### A. Korea Electric Power (KEPCO) Icheon, South Korea

(A)LS 電纜公司所製，其超導電纜部分為美國超導公司的第一代超導體。

(B)於 2011 年加入系統並持續運轉至今，額定為 22.9 kV, 1250 A (50 MVA)。

(C)變電所有其他 154kV 交流及 80kV 直流電纜運行中，如圖 9。



圖 9 Korea Electric Power (KEPCO) Icheon, South Korea 超導計畫圖



## B. Sumitomo 66kV HTS 電纜 at Asahi Substation, Yokohama, Japan

(A)使用 Sumitomo 公司所製電纜及超導電纜。

(B)TEPCO 公司於 2012 年 10 月加入系統，如圖 10。



圖 10 Sumitomo 66 kV 超導電纜 at Asahi Substation, Yokohama

## C. Long Island 電力認證電纜 at Holbrook Substation, USA

(A)額定 138 kV, 2400 A (575 MVA)，使用 Nexans 公司所製電纜及美國超導公司超導電纜。

(B)於 2008 年 4 月加入系統運轉，為世界電網中第一條且是目前最長的輸電電壓等級高溫超導電纜。

(C)僅利用約 4 呎寬的路權範圍即可輸送高達 575 MVA 電力傳輸，如圖 11。



圖 11 Long Island 電力認證電纜 at Holbrook Substation

(3)世界各地有關於高溫超導電纜(HTS)計畫資料收集－安裝於路面下部分：

- NYC, HYDRA Phase 2: 170 m, 13.8 kV, 4000 A (96 MVA)
  - Urban grid resiliency, fault current limiting AC cable
- St. Petersburg, Russia: 2.5 km, 20 kVdc, 2.5 kA (50 MW)
  - Urban grid resiliency, DC cable

(4)世界各地有關於高溫超導電纜(HTS)計畫資料收集－設計或計畫階段部分：

- Jeju Is., South Korea: 500 m, +/-80 kVdc, 750 A (60 MW)
  - Renewables integration, system stability
- Ishikari, Japan: 2 km, +/-10 kV, 2.5 kA
  - Renewables integration, system stability
- Chicago: HYDRA Phase 3: ~ 3.8 miles, 12 kV
  - Interconnecting 5 substations
  - Urban grid resiliency, fault current limiting AC cable

(5)安裝在 Essen, Germany 的 HTS 電纜及故障電流限制器

- 技術說明－HTS 電纜
  - 電纜為額定電壓 10kV,電流 2310A(40MVA)
  - 長度約 1 公里，設計公司為 Triaxial 公司，如圖 12
  - 採用冷絕緣方式

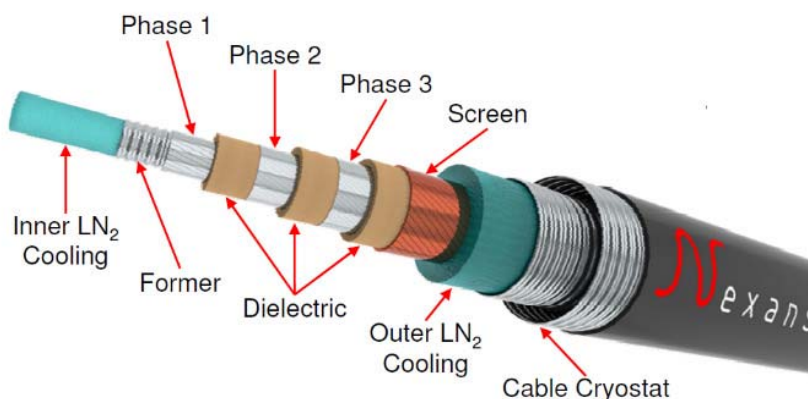


圖 12 Nexuans 製 HTS 高溫超導電纜

●技術說明－HTS 故障電流限制器

- 預期短路電流(峰值)為 50kA, (有效值)為 20kA
- 可限制短路電流(峰值)為<13kA, (有效值)為<5kA
- 可限制時間為 100msec
- 可耐受雷擊突波電壓為 75kV。交流耐電壓為 28kV



圖 13 HTS 故障電流限制器

●研究主題及應用方向

- 以市中心既有老化設備之處置作為而言，利用此技術已成功將一條 110kV 傳統線路取代為 10kV HTS 電纜。此外，藉由本方案的實施亦可推廣至市中心變電所和輸電線路的數量降低上。當我們減少這些充油式變壓器設備時，無形中亦可達成降低環境危害的目的。
- 經濟上針對 HTS 系統之評估分析如下
  - 和將 110kV 設備升級比較有 9.2%成本降低效果
  - 和將配電系統升級比較有 6.8%成本增加
  - 但是可以獲得的是損失的降低及都市內用地數量的減少



- 線路示意圖及裝設位置如圖 14

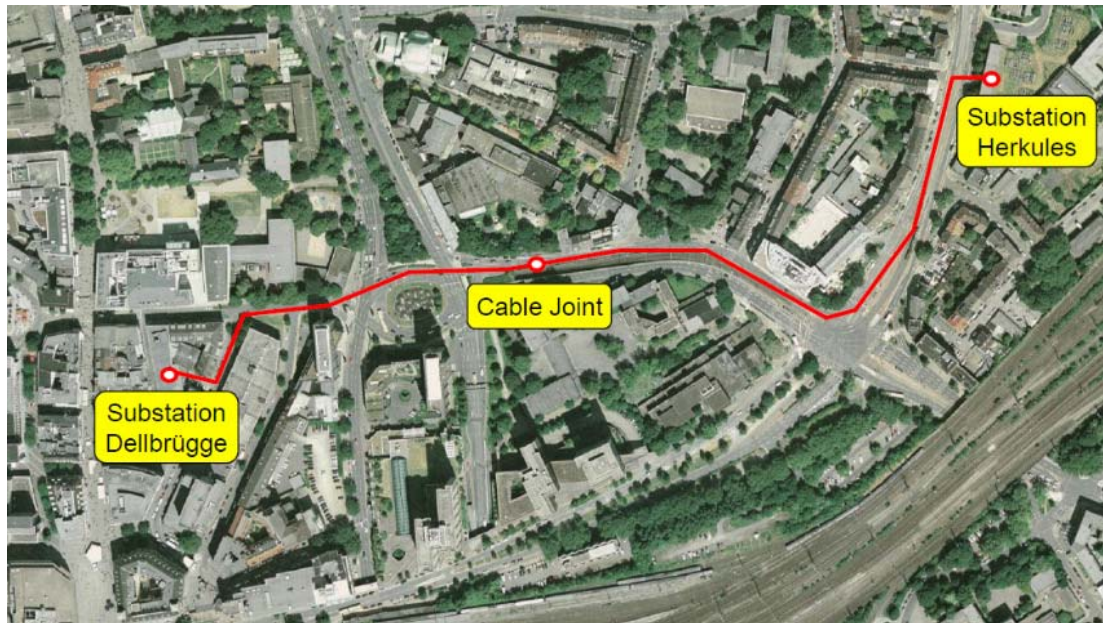


圖 14 HTS 故障電流限制器裝設位置示意圖

- 電纜裝設前後之系統比較如圖 15

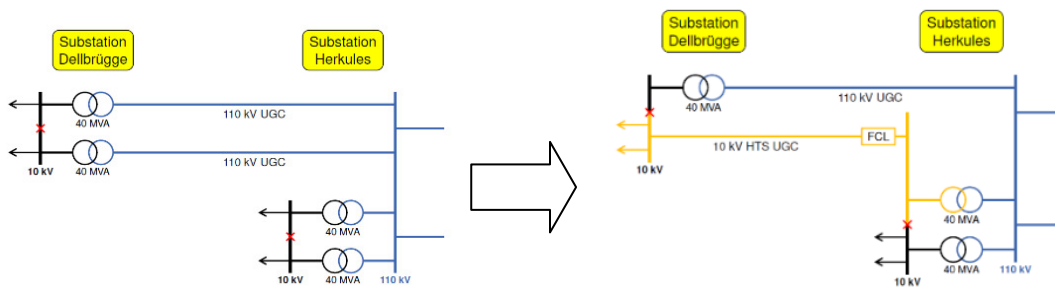


圖 15 HTS 電纜裝設前後系統之示意圖

- 可減少 1 台電力變壓器的使用並取代 1 條 110kV 輸電線路建置
- 研判過程約略先研究 HTS 電纜在配電網路的技術可行性程度，而後比較兩者投資成本的差異性，評估技術上運轉的優劣性，最後完成定案並推演其未來的發展方向。

- 線路加入系統後之負載變化情形如圖 16

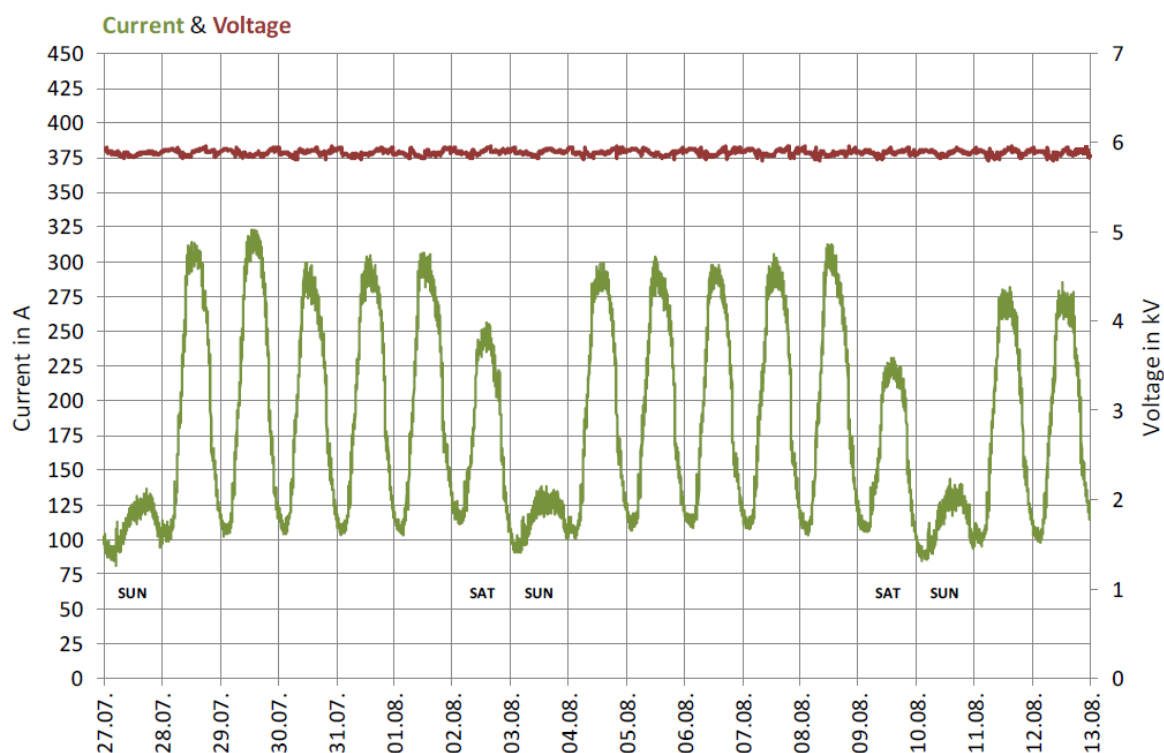


圖 16 HTS 電纜線路加入系統後之負載變化情形圖

## 2.2.5 地下輸電系統及面臨的挑戰－Exelon 公用事業部

(1)Exelon 公用事業部轄下計有 3 家公司，分別是 ComEd、BGE 和 PECO 等，總員工數約 12,000 人，用戶數約為 6 佰多萬戶，總尖峰用電量約為 40,000MW。

- 地下輸電電纜總回數哩數約為 410 回數哩，總線路數為 222 回線，變電所有 67 所及總人孔數為 1600 個。

- 供電系統電纜種類概分為

- High Pressure Fluid Filled(HPFF)Cable：225 回線哩

- 此類電纜系統從 69kV 到 345kV 都有，大部分是在 138kV 等級，總共有 87 回線，總長約為 225 回線哩，並包含 2.1 百萬加崙填充液與 63 個壓力站及 27 個強制冷卻與自動止油閥(ABVS)。

- Low Pressure Fluid Filled (LPFF)Cable：75 回線哩

- 此類電纜系統在 69kV 系統(含單心及三心)有 63 回線哩、138kV 系統有 11 回線哩，總共 40 回線。

- Paper Insulated Lead Covered (PILC) Cable : 無
- Crosslinked Polyethylene (XLPE) Cable : 110 回線哩

■此類電纜系統在 69kV 系統 24 回線哩、138kV 系統有 66 回線哩、345kV 系統有 20 回線哩，總共 39 回線。

(2)以目前而言，交連 PE 電纜已經是所有電壓等級的標準電纜，其附屬器材包括預模型接續匣及聚合型終端匣。所有的電纜均延放於 PVC 管路內，138kV 電纜大小計有 800mm<sup>2</sup>、1200mm<sup>2</sup> 及 1600mm<sup>2</sup>，345kV 電纜為 1600mm<sup>2</sup>，其絕緣體部分前者為 650 密爾及後者為 1050 密爾。

(3)有關管路及人孔設計部分資料如下：

管路型式採 3X3 型式的 6 吋 PVC 管，外覆混凝土，且至少埋深要有 42 吋，二回線的布設方式採如圖 17 所示般延放在對邊側方式。人孔型式為長 20 呎~28 呎、寬 8 呎及高 7 呎的空間，採預鑄式或場鑄都可以，原則上在道路施工以場鑄式較為方便。

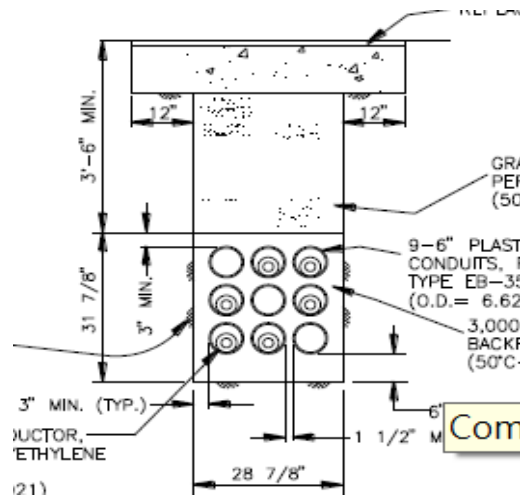


圖 17 管路設計剖面示意圖

(4)共同管溝方式布設部分資料如下—以芝加哥為例：

在我們不知道的芝加哥中央商業區路面下方，布設著約 66 英哩長的共同管道，其平均埋深約為路面下 40 到 60 呎，空間大小為寬 6 呎及高 7 呎左右。大家可曾知道這些管道早在 1903 年即開始興建，但一直到 1950 年代後期才開始使用。為了避免衝擊路面交通，只要是電纜路徑有經過，就可以使用該管道。該公司計有 15 回線 138kV 及 2 回線 345kV 布放於其中，大約有 16 回線哩長度，在單一管道中最多已布放了 4 回線路於其中，如圖 18。



圖 18 芝加哥共同管溝方式布設示意圖

(5)對於各類電纜之預防維護概要：

有關於電纜維護經驗方面之分享，該公司提到對於其維護內容及頻率部分約略如下：

- 點檢部分：針對人孔內設備進行包括人孔結構、電纜、接續匣、管路、交錯接地箱及接地線、支持物、夾具及其他鐵器，檢視頻率為 3 年 1 次。
- 針對線路內每一個電纜接續匣及電纜終端匣填充液體取樣，取樣頻率為 3 年 1 次。
- 針對取樣樣品進行分析及結果統計，以早期發現潛在弱點。

A. HPPF 電纜預防維護事項

(A)電纜、接續匣及終端匣部分

- 每 3 年一次針對填充液進行各項試驗，包括油中氣體分析、含水量分析、功率因數及介電強度等
- 每 3 年一次檢查人孔及終端匣
- 每 3~5 年一次進行鋼管腐蝕程度試驗

(B)填充液加壓廠及儲存槽壓力試驗

- 每 2 週一次進行目視檢查
- 每 2 週一次檢查及更換壓力紀錄紙
- 每 2 週一次進行油泵交替運轉並紀錄運轉時間
- 每年一次進行完整的電氣試驗檢查

(C)填充液或油循環單元

- 每半年一次進行油泵交替運轉

- 每半年一次進行目視檢查
- 每年一次進行完整的電氣及機械檢查與校正

(D)油預冷裝置(Air Cooled Oil Pre-cooler , ACOP)

- 每半年一次進行目視檢查
- 每年一次進行完整的電氣及機械檢查

(E)手動冷卻之油冷裝置(MROC)

- 每半年一次進行目視檢查
- 每半年一次進行功能性測試包含互鎖裝置
- 每年一次進行完整的電氣及機械檢查

B.XLPE 電纜預防維護事項

(A)電纜、接續匣及終端匣部分

- 每 3 年一次外被覆電氣整合性試驗
- 每 3 年一次檢查人孔及終端匣
- 使用 DTS 系統針對轄內 1 條 345kV 線及 1 條 138kV 線路進行連續性溫度紀錄
- 針對上述紀錄已有紀錄系統可用

(6)地下電纜面臨之挑戰：

A. 外界挖損－對所有類型電纜

- (A)較常見者為水力公司或下水道系統之緊急工程
- (B)未經過挖掘系統私自工作之承攬商

B. 腐蝕問題－對於 HPFF 電纜

- (A) 雜散電流
- (B)鋼管鍍膜
- (C)人孔

C. 材質問題\_對於 HPFF 電纜

- (A) 電纜及其附屬器材
- (B)鋼管

D. LPFF 電纜汰換

發展出一套適用各家公司之更換程序





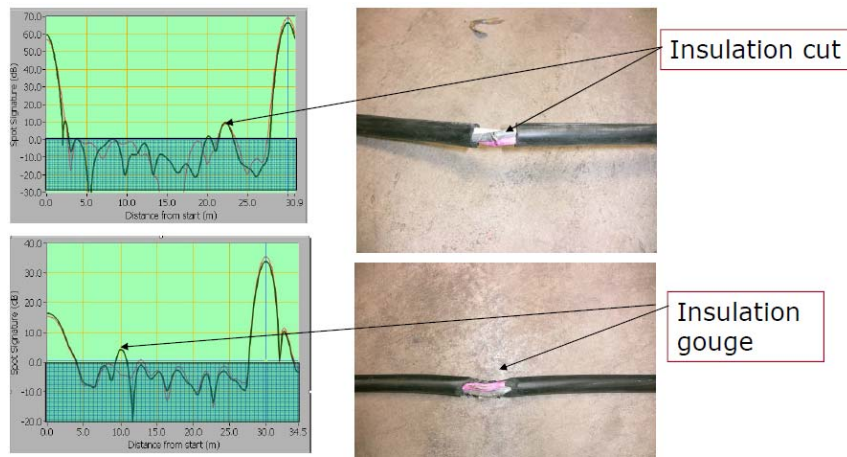


圖 19 電纜水樹及絕緣破壞檢測圖

## 2.2.7 地下輸電交連 PE 電纜管路防蝕(Underground Transmission XLPE Cable Vault Corrosion)

(1)本簡報由 EPRI 計畫經理 Mr. Tom Zhao 提出，介紹地下電纜管線由於管道內長期處於潮濕狀態及受交流感應電流影響，人孔內之鋁合金固定座、CCPU、鍍鋅角鋼、不鏽鋼管材、鋼筋混凝土內的鋼材等之腐蝕問題有愈來愈嚴重之趨勢(詳圖 20)。特別是新近埋設的管線，常在使用幾年之內，很快便發生腐蝕洩漏問題。究其原因，除了施工品質不良外，也因管線周圍土壤環境愈來愈複雜，以及防蝕觀念不正確所致。當腐蝕發生時，地下管線表面會產生不同的電位，這種管線的腐蝕行為稱為腐蝕電位元，可採下列方式降低管路的腐蝕：

- A.利用塗裝防蝕漆及包覆防蝕材料已達防蝕功效。
- B.防蝕(犧牲陽極)法：包括陽極形式、大小、回填料、間距，以及整流器、電源規範等。主要利用負電位金屬為陽極，與地下管線的介質（土壤、水等）聯結，形成電位。由於異類金屬相接觸時，較活潑之金屬（陽極）會在反應中被消耗，而鈍化的地下管線（陰極）會因此而被保護。其優點為投資及維護費用較低，但其缺點則為不適用於大裸露面積的保護。
- C.外加電流法：為目前廣為接受的腐蝕控制方法之一，可減低或去除地下管的腐蝕，主要係應用電化學電池原理，將管線表面塑造成陰極環境主要利用外部電源來提供陰極與陽極間的電位差。陽極必須接於電源正端，而地下管線則接於電源負端。電流從陽極經過介質（土壤、水等）到達地下管線表面，然後沿著地下管線經導線回

到電源處，使地下管線受到保護。其優點為可保護較大面積的地下管線，但其缺點為投資及維護費用較高。

D.其他包含消除管道幹擾之來源、增加管線與高壓輸電線路的間距、管道接地、置換管道附近的土壤等方式亦可達到改善。

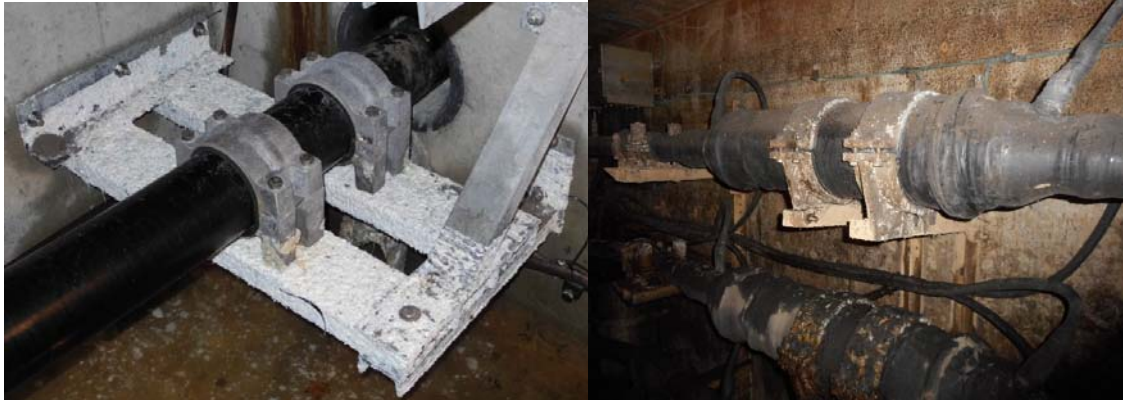


圖 20 管路內固定電纜之鋁合金固定座及鋼材之腐蝕情形

(2)地下管線防蝕系統的建立的確能使地下管線腐蝕率降低、延長地下管線的使用壽命，但最終成效仍繫於施工後的管理與維護，更是確保地下管線安全的關鍵。

## 2.2.8 地下輸電電纜系統診斷技術

(1)由紐約電力管理局(NYPA) Mr. Bob Schwabe 介紹該公司 345kV 管型充油電纜事故原因及獲得經驗。

(2)本案例為 345kV 2500MCM 鋼管型高壓充油電纜線路已運轉超過 22 年，從威徹斯特(Westchester)至拿薩(Nassau)全長約 18.5 英里(29.6 公里)，安裝於 8 5/8 吋的 PVC 管路，事故發生於線路中間，距事故兩側人孔各約 120 公尺處，發生事故之電纜並無非位於陡峭之區間或過於彎曲之管路，經分析結果乃是由於電纜之熱與機械應力的結果導致外皮的摩擦而出現事故，如圖 21 所示。

(3)將電纜故障點處之聚丙烯絕緣紙(Laminated Polypropylene Paper)實施介電常數測試，發現徑向功率因數過高及介質強度高於原 1991 年 3500 實測值，初步判斷係因事故當時所引起的汙染導致介電常數過高。惟其聚合度(Degree of polymerization)及內部含水量均在正常範圍。



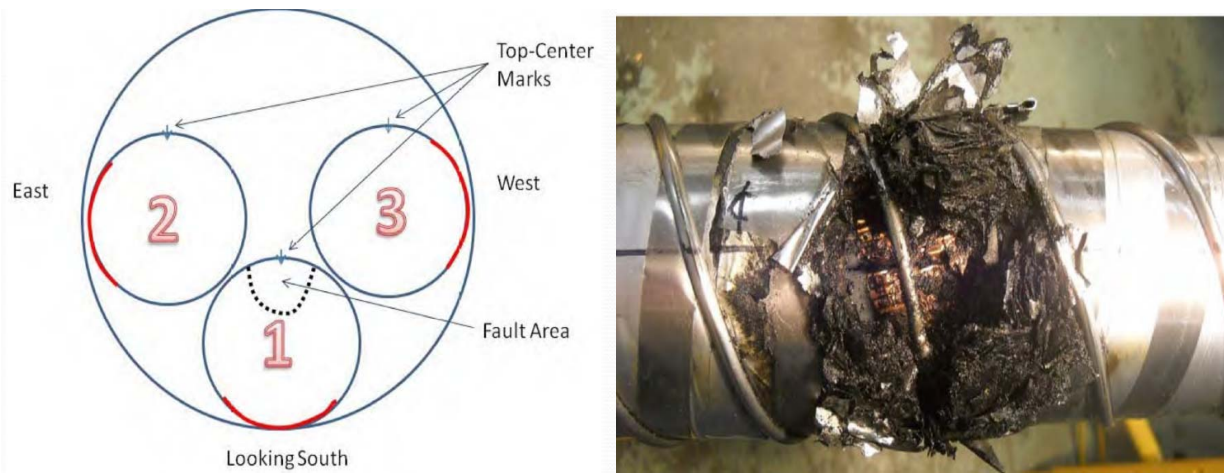


圖 21 電纜之熱與機械應力的結果導致外皮的摩擦事故照片

(4)針對本次事故所得的經驗如下：導致膠帶出現損壞之原因經查係由於管外側及其外側防滑線之摩擦所導致。另外分析其膠布重覆不一也會造成錯動，但大多數的膠布其絕緣特性都接近新品或預期值，表示絕緣膠布是沒有問題的。在絕緣體上發現凹痕，並由此觸發故障原因的找尋(如圖 22)，最後是能夠藉由比對發現管外側的位移現象。



圖 22 絕緣體上發現凹痕

## 2.2.9 電纜動態額定及增加電力潮流(Cable Dynamic Rating and Increased Power Flow)

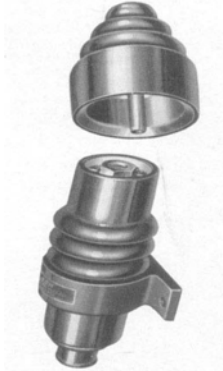
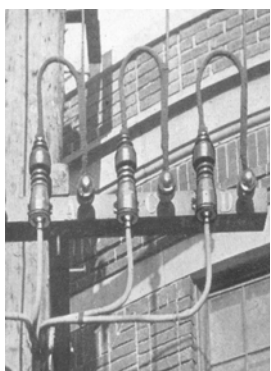
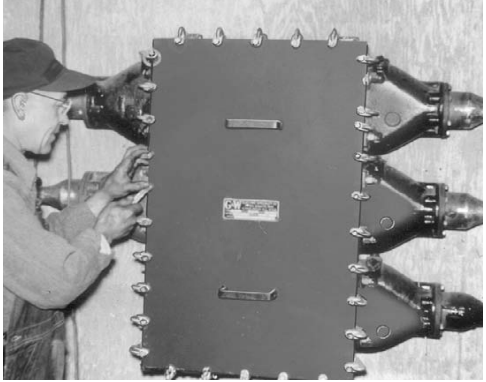
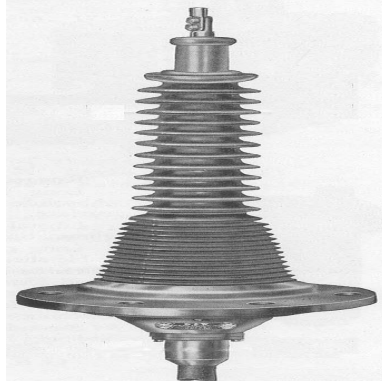
- (1)增加電力潮流指引(白金書)Increased Power Flow Guidebook (Platinum Book)，電力潮流是評估電力系統穩定度和故障分析的基礎。電力潮流計算是研究電力系統穩態運行情況的一種基本電氣計算，它的任務是根據給定的運行條件和網路結構確定整個系統的運行狀態，如匯流排電壓（幅值及相角）、網路中的功率分佈以及功率損耗等。
- (2)增加電力潮流指南係以現有技術克服電力系統問題及相關限制條件下提高現有輸電線路、電力變壓器和變電所設備的功率流能力又不損害其安全性和可靠性。例如採用超導體電纜提升電容量，由於傳統電纜所採用之金屬導體並非零阻抗，故當電力經由輸電網路、變電站及配電系統等設施供給至用戶端時，在電力輸送過程中或多或少皆會產生電力損失，致使供電成本因而增加。幸而隨著纜線製造技術之進步，部分國家已有高溫超導體電纜開發加入電網運轉，相較於傳統電纜，超導體電纜所具有之零電阻及較大傳輸容量等優點，則除可減少纜線布建空間，將電力輸送所產生之電磁干擾降低，同時更具有較低之輸電耗損，應有助於改善目前地下輸電工程之興建。
- (3)如何提高地下電纜送電容量與很多因素有關，除上述高溫超導體電纜的應用外，諸如電纜本身的構造、尺寸、材質、周圍環境、管路埋深、電纜線路排列方式等均影響線路的送電容量，其中探討如何有效降低地下電纜線路的散熱問題，即為目前國內外經常採用的強制冷卻系統技術，以循環冷卻水來對洞道做強制冷卻外，再利用冷卻機房的主機帶走循環水中的熱量，保持洞道溫度低於 40°C，以達到送電容量提升的目的。

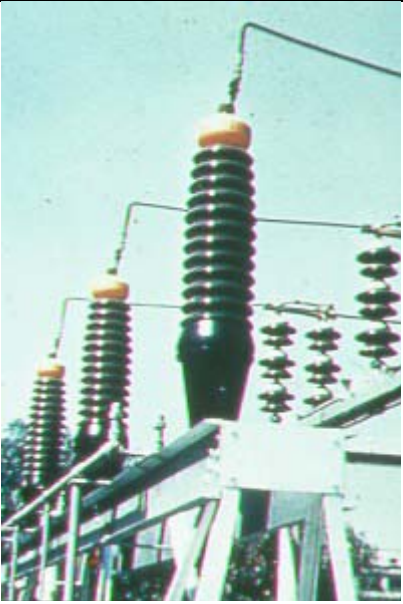
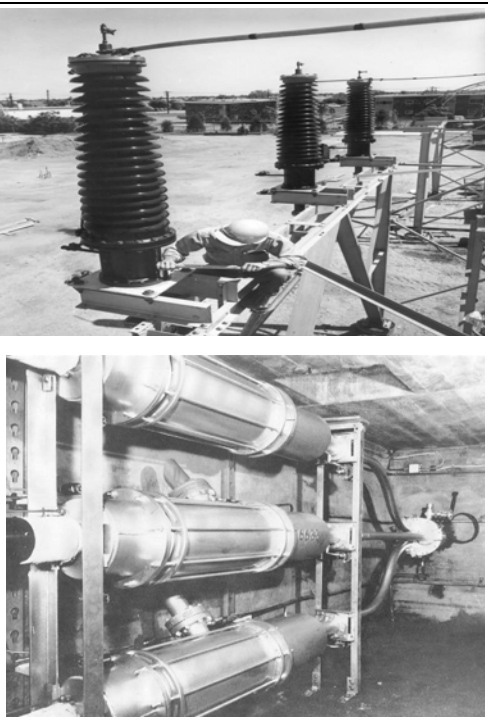
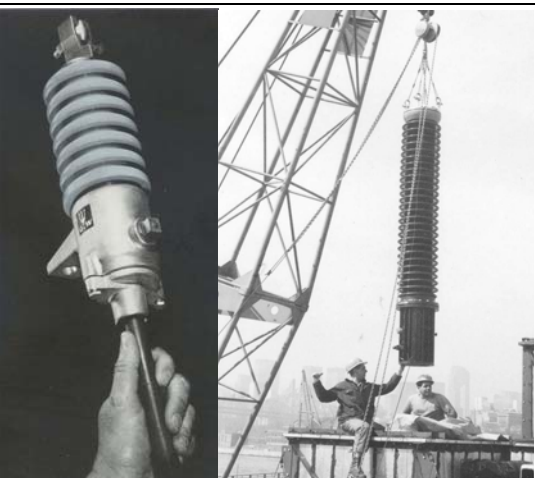
## 參、輸電電纜附屬器材基本介紹 — G&W Electric

### 3.1 G&W 公司各年代產品介紹



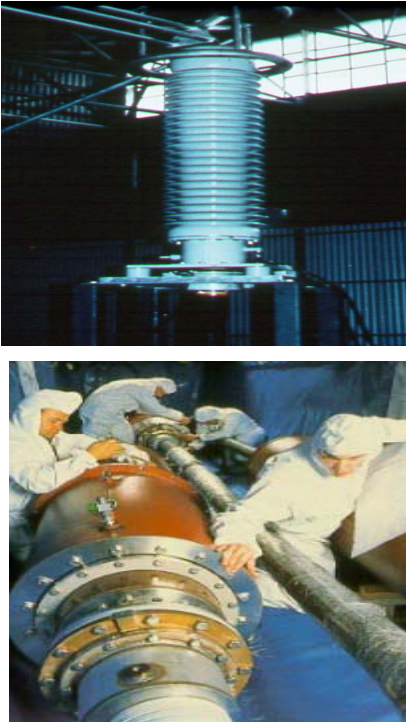
由G&W公司的廠長Mr. Ivan Jovanovic簡報，說明電力系統運作是一個複雜的過程，其背後涵蓋一連串的高深技術，包括發電、輸電與最後送達用戶端的配電等，G&W從「輸配電線路附屬器材之發展」緣起介紹，其依設計開發時間從1905起至今，附屬器材係依輸電線路需要而開發及設計而蓬勃發展至今規模，從該公司之開發沿革可窺知，詳表2。


表 2 G&W 「輸配電線路附屬器材之發展歷史表」

年代	產品介紹	圖 例
1905	第一套用於配電系統，連接架空線和地下配電線的可拆卸陶瓷連接器	 
1906 -1919	路燈用開關箱和纜線接線盒	
1920 -1929	75kV 電纜終端匣 Termination line expanded to 75kV	

<p>1952</p>	<p>138kV 高壓管型電纜終端匣 138 kV termination for high pressure pipe type cable</p>	
<p>1950-1959</p>	<p>230kV 紙型絕緣電纜終端匣及 69kV 電纜終端匣 Paper Termination line extended to 230 kV and Splice line extended to 69kV</p>	
<p>1960-1969</p>	<p>適用押出型電纜用之預裝滑式接 續匣和 500kV 紙型絕緣電纜終端 匣。 -Introduced first Slip-on preassembled termination for Extruded Cable (PAT Style) -Paper Termination line extends to 500 kV</p>	



<p>1980</p>	<p>600KV 直流/交流高油壓管型充油電纜用終端匣</p> <p>600kV dc/ac termination for high pressure, pipe type cables</p>	
<p>1985</p>	<p>1000KV 直流/交流高油壓管型充油電纜用終端匣</p> <p>1,000kV termination for high pressure, pipe type cables</p>	
<p>1990-1999</p>	<p>220kV 交連 PE 電纜用接續匣及接匣匣</p> <p>Cable accessory line expanded to 220kV terminations and joints for extruded dielectric cables</p>	

2005-2009	<p>230V 預模型矽橡膠接續匣及終端匣</p> <p>Introduced a line of mechanical shrink, premolded rubber terminations and joints for solid dielectric cable systems through 230kV</p>	
-----------	--	---

## 3.2 G&W 附屬器材介紹

(1)GIS終端和變壓器終端的基本結構與屋外終端相似。由於GIS是在全封閉環境下運行，可以免受大氣條件和汙染的環境影響，加上SF6氣體的良好絕緣特性，所以GIS終端的外絕緣採用環氧樹脂套管，其尺寸比屋外終端瓷礙管小得多。它的內絕緣用的應力錐和絕緣油與屋外終端相似。

(2)Mr. Ivan Jovanovic表示為了規範GIS電纜終端與GIS開關設備的具體配合尺寸，並明確界定電纜製造廠與開關製造廠的各自供貨的範圍，國際電子電機委員會制定了IEC859標準，因此，按照IEC859標準設計製造的GIS電纜終端都可以安裝在任何廠商製造的標準型GIS設備上。IEC859標準的最早版本是1986年頒布的，當時規定GIS電纜終端匣，不分濕式(Wet type)或乾式(Dry type)，在電纜倉內的高度L5是相同的。例如，138 kV GIS電纜終端的L5=757±1mm，之後該標準又幾經修改，1999年頒布的最新版本IEC60859—1999明確了GIS電纜終端分為濕式和乾式兩種類型，138kV濕式GIS電纜終端的L5仍為757±1mm，而138kV乾式GIS電纜終端的L5則為470±1mm(詳圖23)。



Polymer Insulating Materials)特性的改善，近幾年已大幅應用於各種電氣設備，如套管、支持礙子、懸垂礙子、避雷裝置等，以達增加絕緣耐力、增長洩漏距離、減輕重量或適用於室內高壓設備、超高壓變壓器套管、危險性液體、氣體管路或儲槽之場所及公共場所安全要求較高之場所。此型礙管內心(Inner Core)採用玻璃纖維強化塑膠圓筒(Fiberglass Reinforced Plastics, FRP)，以提供優越的機械強度，在 FRP 管外裝矽橡膠及雨帽，提供足夠沿面距離，使具備良好之耐候特性及電氣特性，除了重量較瓷礙管輕為其特色之一外，另一重要特點為：發生崩潰或接地事故時，瞬間短路電流造成之瞬間動力(Dynamic Force)將使瓷礙管破碎飛散四周，此尖銳飛散碎片具有極強大殺傷力，易造成人員或設備受損，因FRP 管本身具有良好的耐內壓強度(Internal Pressure Resistance Strength)，於介質擊穿接地故障期間，亦不會發生破片發散四周之情況。此種末端適用於 69 kV 級以上之電纜末端、特殊長套管之場所及設備。建議本公司日後採用屋外型電纜終端匣如安裝於人口或設備密集處亦可依維護需要或安全需求選擇考量採用。

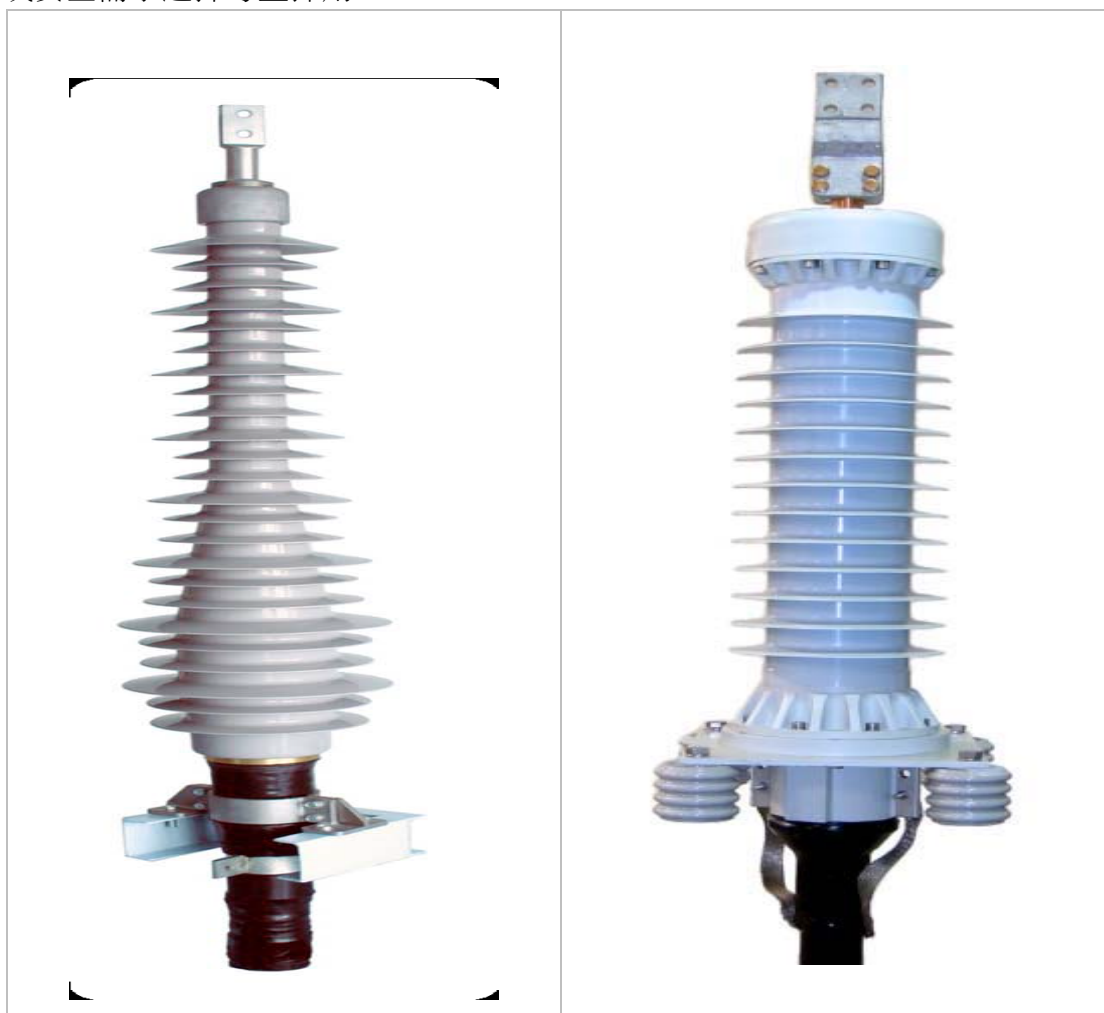


圖24 G&W之138kV屋外型電纜終端匣產品



### 3.3 電應力分佈控制與施工

(1)輸電電纜利用導體遮蔽層、絕緣體與絕緣體遮蔽層將傳導電流控制導體區域，使電位梯度均勻分佈及降低電場局部集中效應，當組立施工時，必須將高壓電纜之結構，包括導體、導體遮蔽層、絕緣體、絕緣體遮蔽層、金屬遮蔽層與被覆等剝削、截斷與重新處理外，此組立施工過程改變原電纜製造之結構與品質，為達到電纜承受高電壓能力及避免電應力局部集中現象，於中間接續及末端組立施工過程必需依據組立說明書進行組裝，以達電位(場)控制及長期穩定使用之目的(詳圖25)，但所有廠牌之中間接續及末端組立施工處理，無形中皆引藏些許風險，而非技師或技術人員所能完全了解，如不慎將產生電應力集中現象，其中最常見之問題最常見為施工環境潔淨度問題、中間及末端尺寸控制問題、及技師或技術人員專業知識與技術不足問題，為克服上述問題，首重提高中間接續及末端處理技術，其次針對施工環境潔淨度進行管控、接續尺寸誤差控制及提升監工、技師、技術人員專業知識及進行相關技術訓練等。電氣性能的好壞是評判電纜附件品質的首要原則。主要考慮電纜附件的電場分佈是否合理，改善電場分佈的措施是否恰當，材料的電氣強度、介質損耗和產品的絕緣裕度等。

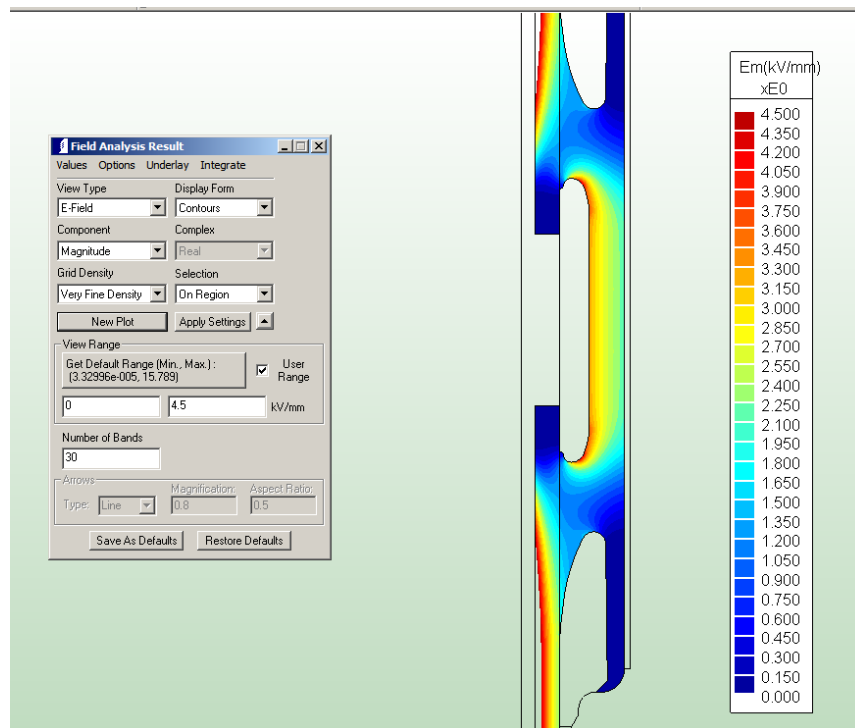


圖25 接續匣電應力分佈情形圖

(2)電纜附屬器材的品質管控因素應多方面考慮，例如在機械彎曲性能方面，接續匣及終端匣應該有足夠的抗彎、防震的能力、能承受一定的拉力和防止外力損傷的措施；在施工方面，安裝程序應盡量簡單且符合工期短，便於現場施工，避免過於複雜至稍有不慎致產生施工錯誤而無法立即察覺；在器材品質管控方面，附屬器材出廠前，應該嚴格對關鍵零組件，例如，橡膠應力錐、GIS的環氧樹脂套管、浸漬劑、中間接頭的組件等進行出廠試驗。仔細檢查試驗和測量設備是否可靠，試驗方法是否有效、試驗人員是否訓練有素和試驗記錄是否齊全等。

(3)鑒於本公司161KV大直~博愛電纜線路於施工時GIS型電纜終端匣採用洋華光電的濕式規格，於水平插入ABB製的GIS氣封開關時發現環氧樹脂套管內注入合成絕緣油無法適用，而緊急採用聯友製的乾式GIS型電纜終端匣，依據洋華公司說明日本技術合作廠商VISCAS擔心終端匣於水平安裝時其頂端之絕緣油無法不足而易產生絕緣破壞。故本公司詢問G&W有關該公司所產製之濕式GIS行電纜終端匣是否適用於水平式氣封開關設備，Mr. Ivan Jovanovic 答覆不論乾式或濕式GIS型電纜終端匣均應可用於垂直或水平之氣封開關設備，該公司所使用之濕式GIS型電纜終端匣有使用於水平式開關設備，但並無事故案例發生，因各附屬器材廠之設計技術不同，仍應以廠商之規定為主，建議可於電纜及附屬器材實施定型試驗或長期老化試驗時加做水平方向的氣封開關以達驗證其可行性。

## 肆、參訪芝加哥近郊 G&W 公司

### 4.1 G&W 公司簡介

(1)10月1日EPRI安排參觀設於位於美國伊利諾斯州波林布魯克(Bolingbrook, Illinois, USA) G&W 電氣公司，位於芝加哥西南方約50公里處，該公司成立於1905年，占地15,000平方公尺(詳圖 26)，集中了現代化的設計和生產技術，主要產品有輸配電系統使用的電纜終端匣、中間接續匣、SF6及乾式絕緣配電開關，SCADA系統產品和過流保護裝置等。

(2)G&W提供多種高壓地下電纜附屬器材，包含充油、氣體填充式、管式電纜及交聯PE電纜用之接續匣及終端匣。目前該公司屋外型、氣封型Cable terminations are available for outdoor applications through 345kV and gas insulated substation designs through 345kV.電纜終端及電纜接續匣已依IEC 62067試驗標準分別通過345KV與 230kV定型及老化試驗。



圖 26 G&W 公司外觀

## 4.2 G&W 參訪產品介紹

(1)在進入G&W公司前須於服務中心聽取約5分鐘的進廠前工安教育宣導，以確保參訪者進廠時避免碰觸危險物及竊取該公司機密資料，除該公司主管同意外，不得任意照相或錄影(詳圖27)。



圖 27 G&W 服務台之工安宣導

(2)本次負責接待之G&W公司人員為該公司電纜附屬器材廠之廠長(Managing Director) Ivan Jovanovic及產品研發工程師Dr. Kai Zhou 帶領本次參與EPRI年會之各國電力及研發業者代表赴該工廠參觀，並說明輸電地下電纜的發展必然帶動電纜附屬器材的發展，這是國際趨勢必然發展的結果，電纜附屬器材的種類相當多，有屋外(內)型終端匣、GIS型電纜終端匣、變壓器油浸型終端匣、普通接續匣、絕緣接續匣、電纜被覆保護裝置、接地箱等(詳圖28)。終端及接續攸關電力傳輸之介面技術，其製造及技術難度高，設計上比電纜本體要複雜得多，因為電纜整個運行系統中這一部分是個薄弱環節，對其設計製造時要極重視接頭部分的電場分佈、溫度分佈、壓力分佈，須絕對消除氣隙，模具設計極複雜，材料配方應用也有難度，雖然G&W僅生產電纜附屬器材，但該公司在國際上已具有領先地位，他們的產品僅單獨出售，不隨同交連PE電纜或充油電纜一起配套供應。



圖 28 G&W 公司終端及接續產品展示館

## 4.2.1 電纜接續匣(Cable Joint)介紹

- (1)電纜接續匣依其結構型式分為包帶式(Taped type)、預鑄型(Pre-fabricated type)及預模型(Pre-moulded type)三大類。近年來國、內外高壓電纜接續匣設計朝向單件式(One Piece)之預模型結構研發，此種新型「預置式冷縮型橡膠絕緣體(詳圖29)」利用高分子材料接合技術，將應力錐半導體層與絕緣層直接壓接模製於橡膠本體(Rubber unit)內，將橡膠本體機械擴張後內部置入螺旋載體或擴徑管。
- (2)橡膠本體材質可分為Silicon Rubber(矽橡膠)或EPDM(Ethylene Propylene Diene Molding 乙烯與丙烯共聚)等，G&W考量矽橡膠本身具有各種優異特性(如：熱穩定性、阻燃性、化學穩定性、抗藥品性、電氣特性、耐寒性、耐候性)，故以矽橡膠組合為橡膠本體，可大幅簡化傳統於現場二次施作工法，提高接續匣施作效率，已逐漸取代預鑄型接續匣，目前成為G&W接續匣生產之主要型式。本公司161kV系統於2008年起採用此款(SR及EPDM)新型單件式接續匣係符合世界潮流。

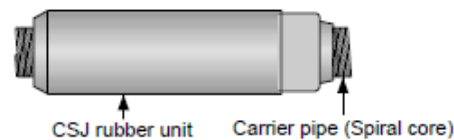


圖 29 G&W 預置式冷縮型橡膠絕緣體(採 Silicon Rubber)

- (3)G&W製之橡膠本體施工操作簡易，Mr. Ivan Jovanovic並請本次參觀人員現場將橡膠本體套入已經加熱整直及導體壓接處理過之138kV級交連電纜接續，其操作介面相當容易，首先使用塑膠手套將氟油薄薄地且均勻地塗於電纜絕緣層及半導體層表面，再將橡膠本體移到兩側電纜上的標記位置，慢慢地拉出載體，調適橡膠組件之前緣使位於標記位置，當橡膠組件收縮50~70 mm時，再次確認此橡膠組件之前緣位置，當確認並調整橡膠



組件之最後位置無誤後則可持續拉出載體，直到拉完為止，圖30顯示相關橡膠主體與電纜內外半導電層及絕緣層之位置。

(4)參訪者完成上述載體拉出定位後，接者由該公司產品研發工程師Dr. Kai Zhou處理後續之遮蔽處理，包含：

- 1)纏繞半導電膠帶於電纜半導電層及橡膠組件位置上。
- 2)纏繞遮蔽網編織帶於指定的半導電性布及半導電膠帶上，預留一些遮蔽網編織帶做為與電纜遮蔽鍍錫銅線聯結處理時所需。
- 3)纏繞絕緣膠帶以1/2 重疊方式纏繞6層於半層電層與IJ 側間。
- 4)將邊緣將電纜遮蔽銅線分成四束，並用鍍錫銅線捆綁且留部分餘長後切斷之，並使用適當的壓接工具將上述電纜遮蔽鍍錫銅線壓接於遮蔽網編織帶上。
- 5)後續處理電纜兩側保護銅管組合及將絕緣複合劑倒入保護銅管內。
- 6)防蝕層處理。

以上施工步驟係依Mr. Ivan Jovanovic及Dr. Kai Zhou現場說明，實際作業仍須以該公司施工說明書為主。施工之相關步驟及照片可參考圖31。

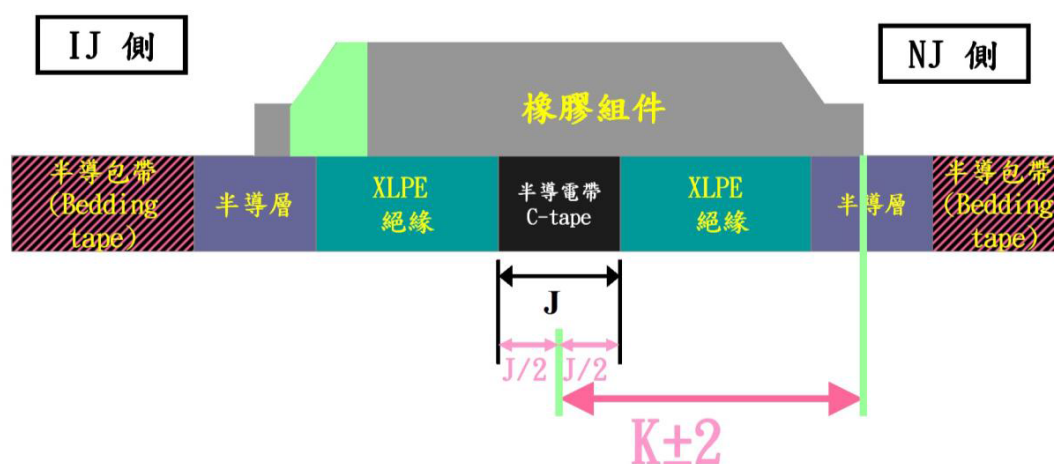


圖 30 橡膠主體與電纜內外半導電層及絕緣層之位置



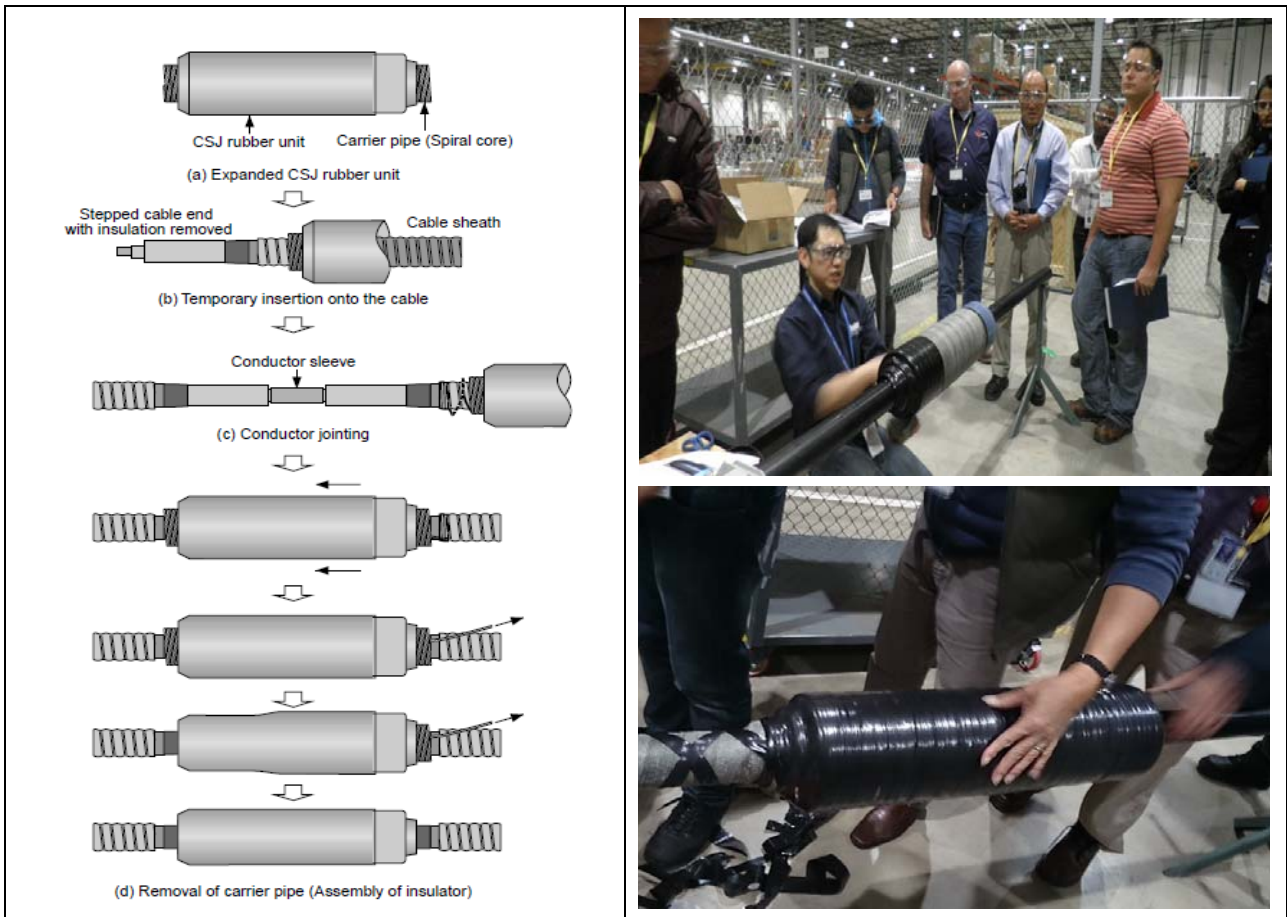


圖 31 接續匣施工之相關步驟及照片

#### 4.2.2 電纜終端匣(Cable Termination 或 Sealing End)介紹

電纜終端匣依內部絕緣材質型式分為注油式(Oil Impregnated Type)及乾式(Dry Type)，依用途分為浸油變壓器型(Oil Immersed Type)、氣體絕緣開關型(SF6 GIS Type)及屋外型(Outdoor Type)，而其內部絕緣結構型式可分為電力錐(Condenser)及電容電力錐(Capacitor Cone)兩類。在技術主要分成採用預模型、彈簧壓緊裝置及非橡膠應力錐等。主要三種基本結構說明如下：

- (1)預模型電纜終端匣係將應力錐半導電層與絕緣層直接壓接模製於橡膠本體(Rubber unit)內，將橡膠預製應力錐機械於擴張同時將螺旋載體或擴徑管置於橡膠本體內。其構造類似接續匣之單件式預模型，依靠橡膠本體自身的彈性保持應力錐與電纜絕緣之間介面上的應力和電氣強度。亦為G&W附屬器材生產之主要型式之一。它的外絕緣是瓷礙管(GIS終端一般用環氧樹脂套管)。內絕緣是一個合成橡膠(矽橡膠或乙丙橡膠)預模製應力錐，瓷礙管(或環氧樹脂套管)內注入合成絕緣油。G&W製之橡膠本體施工操作簡易，Mr. Ivan Jovanovic並請本次參觀人員現場將橡膠本體套入已經加熱整直及處理過之230kV級電纜端末，其橡膠本體套入操作方式與前述之電纜接續匣施工相同，不再贅述。(如圖32)



圖 32 終端匣施工之相關照片

這種結構簡單且施工容易，故於現場提出兩個技術問題詢問：

- 1)合成橡膠應力錐與浸漬油的相容性如何？
- 2)在高電場和熱場作用下，預模型的橡膠應力錐老化是否會引起介面壓的變化(鬆弛)，從而降低電氣強度？

Mr. Ivan Jovanovic答覆說以上兩個問題實際上就是一個材料問題，合適的材料既可以使合成橡膠與浸漬油相容，又可以確保良好的老化性能，G&W對自己的產品相當自信，上述G&W大量產品的長期安全運行經驗可以證明並無上述問題產生。

(2)採用彈簧壓緊裝置。這種結構的結構特點是在應力錐上增加一套機械彈簧裝置以保持應力錐與電纜之間介面上的應力恒定，輔以對付在高電場和熱場作用下，橡膠應力錐老化後可能會引起的介面壓力的變化(鬆弛)。這種結構還有一個很重要的特點，日本和韓國的電纜製造廠商大部分採用了這種結構。目前國內附屬器材廠聯友及洋華光電公司的產品也是這種採用日本的技術。

(3)採用電容式電纜終端，與乾式電纜終端不同，使用強化絕緣紙(reinforcing insulation paper)替代電力錐，現場施工時以絕緣紙捲繞經加熱整直之電纜絕緣體，套上鈴口絕緣套(Epoxy bell mouth)，並裝置於套管內，再注以絕緣油(degasified & refined synthetic oil)。採用一種非橡膠應力錐，在設計上它既能提供可靠的應力控制又能避開應力錐與電纜絕緣直接接觸。典型的結構是G&W公司設計的產品，它在工廠內已經把主要的零部件：瓷礙管、應力錐、頂蓋、底盤和油壓調整裝置等都裝配好。安裝時，當把電纜端部準備好後，把預製終端套入電纜即可。從使用角度來看，這種結構可以允許配套電纜有較大的直徑和偏心度的製造公差。上述三種結構各有所長，均達到了實用化水準，都已經有比較成熟的使用經驗。G&W公司在終端匣產製方面涵蓋了預模型及電容式應力錐兩種。

# 伍、與 EPRI 及 BC HYDRO 公司交流研討議題

## 5.1 BC HYDRO 公司簡介

英屬(不列顛)哥倫比亞省或稱卑詩省(下稱) (British Columbia, 簡稱: B.C.) 是加拿大的一級行政區, 位於加國最西部, 西面靠太平洋, 首府位於溫哥華島的維多利亞, 該省最大城市是溫哥華; 西鄰太平洋, 西北與美國阿拉斯加接壤, 北邊則是育空地區和西北地區, 東邊為亞伯達省, 南面為美國華盛頓州、愛達荷州和蒙大拿州; 該省面積944,735平方公里, 是加拿大面積第三大的省(大約是法國、德國和荷蘭的總和)。

加拿大 BC Hydro 電力公司之發電廠總裝置容量為12GW, 並擁有500kV之輸電網路, 服務BC省95%的用戶約400萬人、190萬戶, 其中90%為住宅用戶。加拿大電力公司輸電系統架構基本上是大陸互聯電網系統, 透過 500kV 之輸電線直接與亞博達(Alberta)省併聯, 不但與加拿大亞博達(Alberta)省電力系統互聯, 更與美國華盛頓電網融通, 其輸電容量可達1.2GW; 透過500kV及230kV之輸電線直接與美國華盛頓州併聯, 其輸電容量可達3.15GW。

## 5.2 交流研討議題

議題 1、地下電纜輸電線路埋設於既有道路與其他採用金屬管之公用管線(如油管、瓦斯管、水管)有無防蝕標準?(即不會造成本身及其他管線單位之金屬管腐蝕)

答覆 1:

- 採用可能的防蝕金屬構築管路:

鋁合金 (Aluminum alloy)、鋼 (Steel)、碳鋼(Carbon steel)、不銹鋼 (Stainless steel)、鍍鋅鋼 (Galvanized steel)、強化混凝土內之鋼 (Reinforcing steel in concrete)。


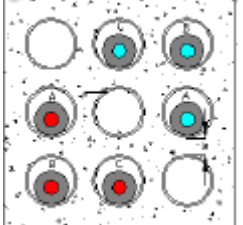
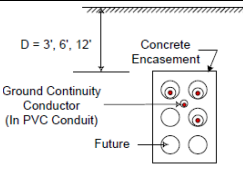
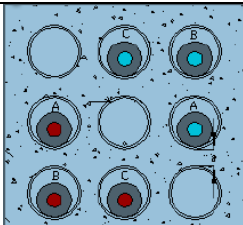
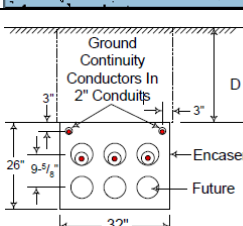

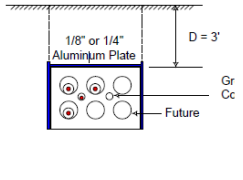
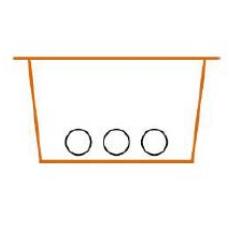
- 各種用電設備接地不當或損壞時將產生漏電, 在土壤當中會形成雜散電流的循環, 進而加速周圍土壤中埋設管路金屬構件的腐蝕(Stray current corrosion)。地下管路構件遭受到 AC 引發腐蝕問題的嚴重性, 傳統上及既有的陰極防蝕系統與標準可能會受到影響與誤判, 甚至失效而產生嚴重後果; 因此必須提升陰極防蝕標準且亦同時解決 AC 干擾所生感應電流問題, 才能有效地保障埋在地下管路鋼材構件的安全。

議題 2、地下電纜線路於管路內之相序排列配置(例如電纜相序 R1, S1, T1, R2, S2, T2...等), 於設計時有無考慮抵銷或降低磁場之措施? 貴公司能否提供寶貴建議?

答覆 2: 降低磁場的方式可分類如表 3:



表 3 降低磁場的方式分類

方法	圖例	優點	缺點	備註
減少相位間距		降低磁場	降低送電容量	1.採品字型排列 2.等邊三角形可 有效將低磁場
採用降低磁場之排列		降低磁場	無	對稱排列可 有效將低磁場
增加埋設深度		1.外部挖損機會減小 2.有效降低磁場值	1.降低送電容量 2.增加施工成本 3.無法降低水平方向磁場	
分相法 (Split-phase)		1.有效降低磁場值 2.增加系統可靠度	增加電纜及附屬器材成本	系統可靠度比 降磁場重要時 採用
接地補償迴路 (Passive Compensation Loops)		1.降低磁場 2.磁場將集中於某特定區域	1.降低送電容量 2.增加額外材料及施工成本	
水平屏蔽板敷設 (Horizontal Plate)		1.降低磁場 2.增加機械保護 3.增加施工便利性	1.直接屏蔽磁場 2.需有足夠之屏蔽板	
屏蔽板敷設 Channel		1.降低電磁場 2.增加遮蔽效率	1.大幅增加施工成本 2.垂直面材質需有連續性以達效遮蔽磁場	
封閉管溝 (Trough Enclosure)		1.將低磁場 2.增加遮蔽效率	1.維護電纜不易 2.回填困難 3.四周遮蔽之材質需連續性	

議題 3、輸電線路採用架空線或地下電纜設施的標準為何？

答覆 3：

- 可參考 CIGRE TB 110, 250, 338 (STATISTICS OF AC UNDERGROUND CABLES IN POWER NETWORKS)所述，統計世界各國 Australia、Austria、Belgium、Brazil、Canada、China、Croatia、Denmark、Finland、France、Germany、Ireland、Israel、Italy、Japan、Korea、Mexico、Netherlands、New Zealand、Poland、Portugal、Romania、Singapore、Spain、Sweden、Switzerland、United Kingdom 及 USA 等 29 個國家的地下電纜總和占所有線路總和統計比例，並區分五個電壓等級(50-109kV、110-219kV、220-314kV、315-500kV、501-764kV)，詳圖 33 所示。

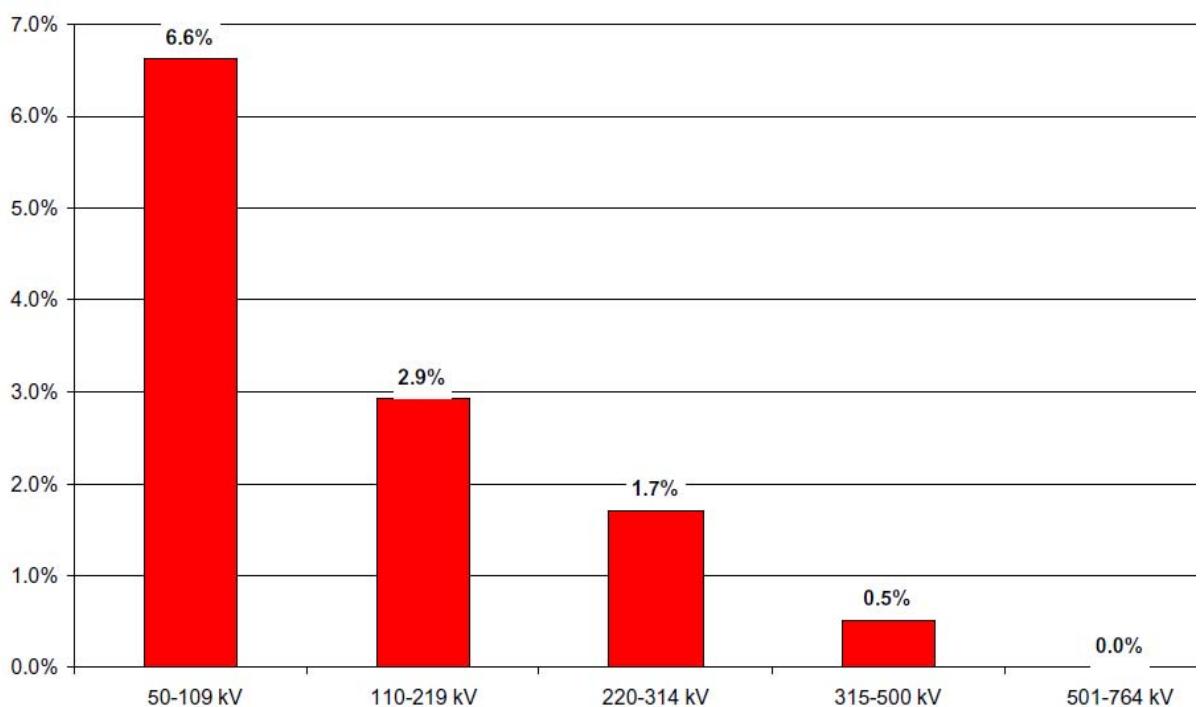


圖 33 世界各國地下電纜占所有線路的統計比例

- 本公司 69kV、161kV 及 345kV 輸電線路下地比例已達 22.4%(詳如表 4 所示)，統計本公司至 2013 年為止，69kV 線路下地占 24.45%(29 國 50~109kV 平均 6.6%)、161kV 線路下地占 33.01%(29 國 110~219kV 平均 2.9%)及 345kV 線路下地占 0.53%(29 國 315~500kV 平均 0.5%)。
- 由上述比較本公司輸電線路下地比例已大幅超越世界各先進國家，日後如有民眾抗爭或民代要求下地時，本公司可以此比較數據向民眾或民代說明將較有說服力。



表 4 台電公司地下電纜占所有輸電線路之比例

設備 年度	345kV(回線公里)			161kV(回線公里)			69kV(回線公里)			地下電纜線路總長度對全系統輸電線路長度之佔比
	地下電纜 長度(A)	輸電線路 總長度 (B)	地下電纜 佔比(A/B)	地下電纜 長度(A)	輸電線路 總長度(B)	地下電纜 佔比(A/B)	地下電纜 長度(A)	輸電線路 總長度 (B)	地下電纜 佔比(A/B)	
2006	11.810	3601.924	0.33%	1308.160	5909.363	22.14%	1060.011	6033.252	17.57%	15.31%
2007	18.725	3686.847	0.51%	1456.732	6035.157	24.14%	1125.554	6102.033	18.45%	16.44%
2008	18.725	3685.900	0.51%	1546.798	6203.361	24.93%	1213.657	6168.756	19.67%	17.31%
2009	18.725	3801.724	0.49%	1722.318	6409.893	26.87%	1252.569	6130.142	20.43%	18.32%
2010	18.725	3820.650	0.49%	1862.089	6595.473	28.23%	1290.793	6144.931	21.01%	19.15%
2011	20.525	3911.171	0.52%	2042.111	6760.066	30.21%	1422.843	6226.516	22.85%	20.63%
2012	20.525	3893.589	0.53%	2164.268	6835.368	31.66%	1476.390	6196.370	23.83%	21.63%
2013	20.654	3915.468	0.53%	2286.989	6928.184	33.01%	1518.544	6210.700	24.45%	22.44%

議題 4、地下電纜發生事故後，於修復後應實施那些測試以確保電纜品質？

答覆 4：

●交連 PE 電纜線路修復後之測試方式

1.同竣工試驗所測試內容，可參考 IEC60840 及 IEC62067 之竣工試驗 (Commissioning tests)，如表5所列。另參考 ICEA S-108-720 規範，電力電纜於安裝完成後，需進行耐壓試驗。此試驗需由買賣雙方訂約同意。以電壓頻率為 20~300Hz 之間，施加  $1.4U_0$  至  $1.7U_0$  的電壓(根據實際操作條件)，加壓 1 小時；或者，以系統電壓( $U_0$ )加壓 24 小時。但對修護後之電纜線路於加壓時建議予以適當折扣，需由電力公司與業者雙方協議訂定。

表 5 IEC 於竣工耐壓試驗中之施加電壓規範

Standard	Rated Voltage U(kV)	Voltage test after installation (kV)
IEC 60840 (2004)	60-69	72
	110-115	128
	150-161	150
IEC 62067 (2001)	220-230	180
	330-345	250
	500	320

2.目前本公司對於舊電纜維修或新舊電纜接續後之耐壓測試採  $1.25U_0$ ，符合與 EPRI 及 BC Hydro 之建議。

●充油電纜線路修復後之測試方式

- 1.氣體常數測試(K值須小於0.065)。
- 2.油流阻抗測試(flow resistance test)於接續完成後實施。
- 3.被覆直流耐壓測試以確定PE被覆之完整性。
- 4.電纜被覆保護裝置及油壓指示警報迴路測試。
- 5.直流耐壓試驗：採80%以下的額定DC電壓測試15分鐘。
- 6.本公司目前161kV充油電纜線路之耐壓採325kV持續15分鐘，對於修復後之電纜以70%額定DC電壓約228kV持續15分鐘，符合與EPRI及BC Hydro之建議採80%以下。

議題 5、台電目前新設立之輸電交連 PE 電纜線路於加入系統前，須實施 AC 耐壓試驗及商頻耐壓試驗(開關五次投切)，通過後加入系統運轉，請教 EPRI 及 BC Hydro 的看法。

投入次數 投入時間 啟開時間	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次
	投入 30 分鐘	投入 20 分鐘	投入 20 分鐘	投入 20 分鐘	投入
	啟開 10 分鐘	啟開 10 分鐘	啟開 10 分鐘	啟開 10 分鐘	

答覆 5：

- 對於台電目前新設立 XLPE 電纜線路於加入系統前，須實施 AC 耐壓試驗及商頻耐壓試驗(開關投切五次)，通過後才加入系統的做法，EPRI 表示 AC 耐壓試驗(1.7U<sub>o</sub> \* 30 分鐘, 60Hz)就是國際上普遍認為最好的做法，商頻耐壓試驗是台電獨有對於線路頻繁發生接續匣事故的對應試驗，沒有什麼問題，但須注意在 XLPE 電纜遮蔽銅線在充電後，CB 打開後 ES 投入時，遮蔽銅線線徑是否能承受放電電流，若線徑不足則會發生閃絡(Sparking)，導致熱溶損。
- 目前本公司交連 PE 電纜之遮蔽層截面積計算，係依據 IEC 60949 規定之短路容許電流如下公式計算，遮蔽銅線線徑能承受放電電流，其線徑已足夠，不會發生閃絡(Sparking)，導致熱溶損。
- 計算

$$I = K * \frac{S}{\sqrt{t}} * \sqrt{\ln\left(\frac{T_f + \beta}{T_i + \beta}\right)}$$

符號說明：

I：短路容許電流容量 (A)

S：導體截面積 (mm<sup>2</sup>)

t：短路持續時間 (Sec)

T<sub>f</sub>：短路時導體容許溫度 (°C)

T<sub>i</sub>：短路前導體溫度 (°C)

K：遮蔽層之材料常數 (銅：225.65、鋁：148)

β：遮蔽層之電阻溫度係數的倒數 (銅：234.45、鋁：228)

計算例：已知 161 kV 交連 PE 電纜遮蔽層之單相故障電流  $I = 50 \text{ kA}$ 、 $t = 0.4 \text{ Sec.}$ ，

引用前述公式，即

$$S = \frac{50 * 1000 * \sqrt{0.4}}{225.65 * \sqrt{\ln\left(\frac{200 + 234.45}{75 + 234.45}\right)}}$$
$$S = 240.593(\text{mm}^2)$$

故電纜之遮蔽銅線其素線直徑(d)大小為

$$\therefore S = N * \pi * d^2 / 4$$

161 kV XLPE 電纜遮蔽銅線之條數如設計  $N = 80$  條時

$$\therefore d = 1.957 \text{ (取 } 2 \text{ mm)}$$

161 kV  $\sim 2 \text{ mm } \phi \times 80$  條

同樣算法，可計算出 69 kV 及 345 kV 交連 PE 電纜遮蔽銅層之截面積為：

69 kV  $\sim 1.4 \text{ mm } \phi \times 65$  條

345 kV  $\sim 2.3 \text{ mm } \phi \times 80$  條

議題 6、海底電纜有關電纜監控項目有那些需設置、電纜故障位置如何定位，請說明。

答覆 6：

- 關於海底電纜監控方式，EPRI 表示可參考於 Marine Traffic 網站 (<http://www.marinetraffic.com/>) 所展示之監控各式商船、貨輪、郵輪、漁船等之海域航行即時狀況，可以即時監控來往海纜位置的船隻，以及查詢來往船隻歷史軌跡，若發生船錨損及海纜事故，不僅可以知道事故位置，也能找出肇事者。

議題 7、OF 電纜需定期實施油中氣體分析，EPRI 對此項措施的見解如何？請問此措施在實務上，有無防範事故之實績？

答覆 7：

- EPRI 表示新設 OF 電纜線路在加入系統後 6~12 個月的期間，即可做 DGA，原則上在一年內  $\text{C}_2\text{H}_2$  氣體的出現意味著線路可能有問題，若  $\text{C}_2\text{H}_2$  含量有自 0 開始增加的趨勢，即使含量小於 10ppm，也須視為事故的早期警示訊息，並從分析其他氣體含量( $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ ...等)得到更完整的狀態評估。以 BC Hydro 公司 230kV 屋外型終端匣為例，自 2005 年 6 月加入系統，於 2006 年 2 月發現  $\text{C}_2\text{H}_2$

氣體，並有持續增加的趨勢，所以在 2006 年 10 月更換新終端匣(re-termination)，即更換應力錐、絕緣油，但保留原瓷套管，原電纜不更換，同年同月針對更換後的終端匣再測量 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 氣體，三次採樣只有一次為 1ppm，其餘為 0，表示更換後有顯著之改善。

- 另一個實例也是 230kV 的 SCFF 電纜在 1974 年加入系統後，於 2009 年 10 月發現有幾個普通接續匣有大量的 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 氣體，含量濃度在 127~417ppm 有 6 個、含量濃度在 40-50 ppm 有 2 個、含量濃度在 10 ppm 左右的有 14 個，表示此現象並非個案。於 2009 年 12 月針對 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 含量濃度達 280 ppm 的普通接續匣做解剖，並在絕緣層的紙上發現許多黑點，又考慮線路已運轉近 40 年，不只是發現在單一接續匣上，因此評估可能是開關突波造成電纜內部放電而導致此現象，且產生 C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> 氣體。

議題 8、請問國外 OF 電纜維護工作有哪些？OF 電纜漏油時，有無快速查找漏油點的有效方式？

答覆 8：

- EPRI 答覆以香港電力公司為例，至 2014 年 3 月為止，各高電壓等級(77kV 以上)總計有 817 回線公里的 SCFF 的電纜線路，維護工作包含電纜線路、人孔巡視、油壓警報敏靈度測試(每半年)、給油裝置的油量與油壓檢查(每 3 個月)、被覆及 SVL 測試(新線路加入系統 1 年後測試，之後每 3~4 年測試)、DGA(新線路加入系統 1 個月及 1 年後測試，之後每 3~4 年測試)。統計 10 家各國電力公司 SCFF 電纜之維護工作項目及頻率統計詳細資料可參考研討會資料，如表 6 所示。



表 6 10 家各國電力公司 SCFF 電纜之維護工作項目及頻率統計表

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
Patrol of cable routes	Every 2 months	currently by special people		Check for civil work, cable markers are visible	Annually	Annually	6-monthly	Monthly for checking of environment activity (only for important circuits)		
Inspection of warning signs					Annually	Annually		Annually; knowledge of environment modification		Warning sign is not used
Administrative procedure, to provide information on cable routes to contractors					Yes, national	Yes, national				Yes

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
Pressure Monitoring, alarm	Yes	Yes					Yes	Yes	Yes	Yes
Pressure readings	Every 2 months	Monthly		Yes		Every 2 years	Monthly	Every 3 or 6 months	Every 2 months	50kV: every 6 month 132kV: every 3 months
Alarm gauge check SCFF + GC	Every 3 years	Every 3 months			Annually	Yearly		Every 1, 3, or 6 year	Annually	50kV: every 6 months 132kV: every 3 months
Inspection for corrosion	Every 3 years	Annually	Annually		Annually, only on gas pressure cables	Yearly on gas pressure cables on FF cables protection of tank is controlled	Every 6 months	Only on terminations every 3 or 6 month		
Sheath test (serving test)	Every 3 years	Annually	Annually	Yes		Annually in city, else every 2 years	Annually	Condition-based		
Check of thermocouple				Yes				Yes		
Visual inspections of terminations	Every 3 years			Check for external damage, dielectric fluid leakage, oil level and connections to overhead lines.		Annually		Every 3 or 6 months	Annually	50kV: every 6 months 132 kV every 3 months
Cleaning and treatment of outdoor termination				Yes						
Visual inspection of oil tank	Every 3 years							Every 3 or 6 months	Annually	
Analysis of cable oil	Every 3 years									
Test of earth resistance								Every 6 years		

	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10
Visual inspection of cross bonding system		Annually		Yes	Annually	Annually	Annually	Every 6 years		Every 5 years
Test of surge arrestors				Yes			Monthly			
Sheath current alarm										Yes, continually

議題 9、請問 DGA 之分析結果，如何據以判斷 OF 之絕緣狀況？以及後續之建議措施？

答覆 9：

- EPRI 答覆 DGA 之分析結果包含多種氣體，首先只看乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)量，鑒於台電公司是參考日本 ETRA 1999 年 Report 55-22 乙炔量和可燃性氣體的判斷標準，因此提供 ETRA 2014 年 Report 70-1 的新修正判斷標準給台電公司參考。再來則是其他氣體之間的比值，根據 IEC 60599 標準(Guide)，可表示電纜內部局部放電能量的等級。如表 7 所示。

表 7 DGA 之分析結果乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)量判斷電纜內部放電情形

TPC Criteria based on 1999 ETRA 55-2			Updated 2014 ETRA 70-1 Criteria		
評估等級 <sup>o</sup>	管理項目和基準值 <sup>o</sup>		A	50 ≤ C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	—
	乙炔量(C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> , ppm) <sup>o</sup>	可燃性氣體總量 (TCG, ppm) <sup>o</sup>			
A <sup>o</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ≥ 50 <sup>o</sup>	— <sup>o</sup>	B	10 ≤ C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> < 50	TCG < 2000
	50 > C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ≥ 10 <sup>o</sup>	TCG ≥ 2000 <sup>o</sup>		n < C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> < 10	150 ≤ TCG
B <sup>o</sup>	50 > C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ≥ 10 <sup>o</sup>	TCG < 2000 <sup>o</sup>	C	n	10000 ≤ TCG
	10 > C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> > ND <sup>o</sup>	TCG ≥ 10000 <sup>o</sup>		n < C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> < 10	25 ≤ TCG < 150
C <sup>o</sup>	10 > C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> > ND <sup>o</sup>	10000 > TCG ≥ 100 <sup>o</sup>	D	n	500 ≤ TCG < 10000
	ND <sup>o</sup>	10000 > TCG ≥ 1000 <sup>o</sup>		n < C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> < 10	TCG < 25
D <sup>o</sup>	10 > C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> > ND <sup>o</sup>	TCG < 100 <sup>o</sup>		n	TCG < 500
	ND <sup>o</sup>	TCG < 1000 <sup>o</sup>			

A: deterioration of contact, lots of combustible gas  
 B: discharge, carbon deposit  
 C: slight discharge  
 D: normal (continue to operate as normal)  
 n: not detected

- 因本公司未來有海纜的建設，藉由此次參加 EPRI P36 地下輸電線工作成果會議的機會，列出了海纜及其他電纜相關的議題，與 EPRI 的專家及其他會員交流，希望藉此得到建議，部分議題 EPRI 做了相關研究，並有相關報告；有些議題 EPRI 尚未做研究，但提供了相關書籍供本公司參考。

議題 10、該公司是否有針對海底電纜開發之故障及損壞偵測系統？

答覆 10：

有關本公司針對海底電纜之線上即時被覆電流偵測技術(經驗證亦可應用到一般地下電纜系統中)概述如下：

首先比較 BC HYDRO 與台電公司兩公司之海底電纜資料

(1)BCH 為 230KV SCFF 1600MM<sup>2</sup> 600MW 埋深 200 公尺 長度 24 公里

(2)TPC 為 161KV XLPE 630MM<sup>2</sup> 200MW 埋深 133 公尺 長度 58 公里

其海底電纜構造如圖 34 示：

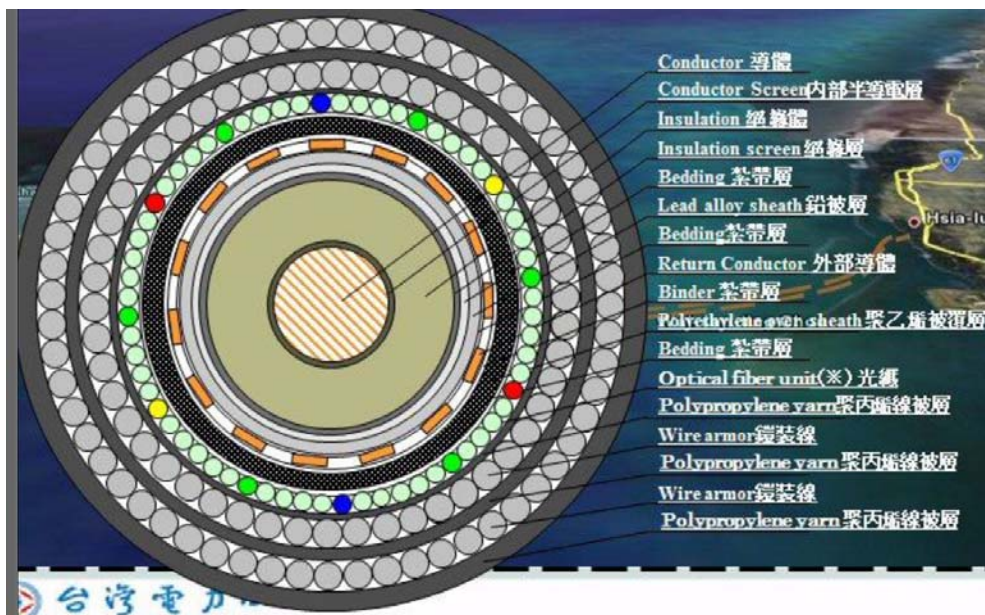
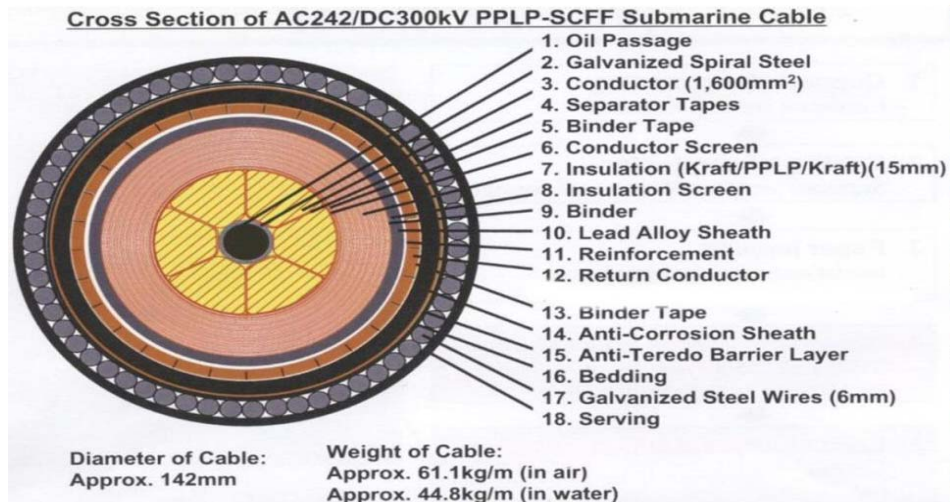


圖 34 BCH 與 TPC 海底電纜構造剖面圖

其中 BCH 電纜係安裝於 2008 年，以電纜之水中重量而言，BCH 電纜約為 44.8 公斤/公尺，而澎湖海纜約為 32.7 公斤/公尺，且本公司海纜其內部設置普通光纖 6 條偵溫光纖 2 條外部損壞位置偵測光纖 2 條及故障偵測光纖 2 條，因此可以用來偵測各種不同之故障類型。

接著指出 BCH 之海纜偵測系統之電纜連接示意如圖 35：



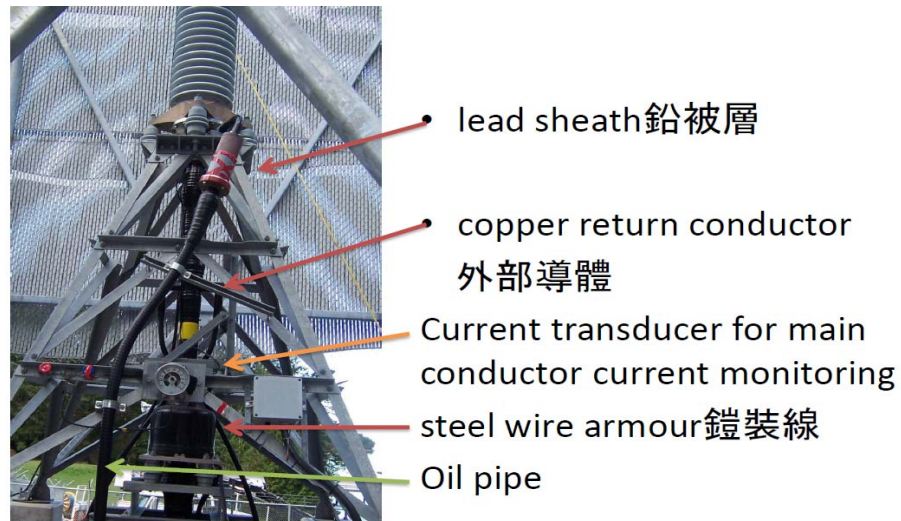


圖 35 BCH 海纜偵測系統之電纜連接示意圖

其中有一部分為導體電流偵測用之電流傳感器，本系統之運作原理主要係應用本傳感器做為重要之轉換設備。



圖 36 接地電纜之電流傳感器示意圖

其次可以看到的是接地電纜之電流傳感器示意圖，如圖 36。在上圖中共可看到有三個連接箱，電流傳感器約可傳送 4~16m 之信號到 PLC 控制器，而後傳送至 RTU，最後進到 SCADA 系統中，而架構成整個線上即時偵測系統。

其實際系統運作介面情形如下可見：

三相被覆電流及導體電流之偵測系統圖示內容共有

(1)在控制室顯示情形



圖 37 三相被覆電流及導體電流之偵測系統圖

(2)在行動裝置顯示情形

Station: <b>TBY</b>		Cathodic Protection:	
		Volts	11.0 V
		Current	122 A
Current Monitoring System:			
	A Phase GS1	B Phase GS2	C Phase GS3
Conductor Current	251 A	250 A	250 A
Metallic Sheath Current	65 A	41 A	47 A
Return Conductor Current	188 A	203 A	199 A
Wire Armour Current	7 A	7 A	4 A

圖 38 偵測系統在行動裝置顯示情形圖

最後是將本系統實際應用於高壓電纜及海底電纜系統之使用經驗分享(發表於 2009 年 CIGRE TB 379 針對 2001~2005 年)。

如表 8 所示，表中所示為不同型式的高壓陸纜之事故率統計分析

表 8 不同型式的高壓陸纜事故率統計分析表

		XLPE CABLES (AC)			SCOF CABLES (AC)		
<b>A. Failure Rate - Internal Origin Failures</b>		60-219kV	220-500kV	ALL VOLTAGES	60-219kV	220-500kV	ALL VOLTAGES
Cable	Failure rate [fail./yr 100cct.km]	0.027	0.067	0.030	0.014	0.107	0.041
Joint	Failure rate [fail./yr 100 comp.]	0.005	0.026	0.005	0.002	0.010	0.004
Termination	Failure rate [fail./yr 100 comp.]	0.006	0.032	0.007	0.005	0.015	0.009
<b>B. Failure Rate - External Origin Failures</b>		60-219kV	220-500kV	ALL VOLTAGES	60-219kV	220-500kV	ALL VOLTAGES
Cable	Failure rate [fail./yr 100cct.km]	0.057	0.067	0.058	0.095	0.141	0.108
Joint	Failure rate [fail./yr 100 comp.]	0.002	0.022	0.003	0.002	0.004	0.002
Termination	Failure rate [fail./yr 100 comp.]	0.005	0.018	0.006	0.009	0.013	0.010
<b>C. Failure Rate - All Failures</b>		60-219kV	220-500kV	ALL VOLTAGES	60-219kV	220-500kV	ALL VOLTAGES
Cable	Failure rate [fail./yr 100cct.km]	0.085	0.133	0.088	0.109	0.248	0.149
Joint	Failure rate [fail./yr 100 comp.]	0.007	0.048	0.008	0.004	0.014	0.006
Termination	Failure rate [fail./yr 100 comp.]	0.011	0.050	0.013	0.014	0.028	0.019

議題 11、針對充油式電纜(SCFF)之油中氣體分析是否可提供維護之相關經驗數據供參考？

答覆 11：

在過去 BC HYDRO 公司的 275KV 和 400KV 止油接續匣曾經遇到過極為嚴重的問題，而其主要是肇因於在切割銅導體時所造成的許多微細銅粒子。又因為在後來進行銅導體接續時，沒有充分的沖洗擦拭導致這些微細銅粒子留在止油接續匣之油通路中，這些油通路同時也承受著相當高的電應力。也因此在其中產生許多的放電現象和氣泡，而使得這個問題不斷的升高。我們要知道，當電纜絕緣油中充滿著這些氣體，當其達到飽和時就會使得氣泡因此而產生。

依據日本住友公司提供資料得知，電纜絕緣油中的最大可容許 SF6 氣體數量及在 SF6 開關之氣室內 SF6 氣體成份可概略得到如下：

1. 首先指出當 SF6 成份出現至何種程度時須進行維護

我們可以確認的是絕緣油之介電特性基本上是不會被溶出的 SF6 所影響，除非油中這些 SF6 氣體已然形成氣泡時就不一樣了。在絕緣油中溶出 SF6 成份的飽和值約是一大氣壓下 80 度 C 時達到 27%。而這個數值將會隨著溫度下降與壓力上升而增大。



所以在將來，不可避免的我們便必須考慮當絕緣油中溶出 SF6 成份已經來到差不多 27%時，便是需要進行電纜維護的時機點。

## 2. 針對可以接受的 SF6 洩漏的速率

假設該設備組裝後經過 40 年後其 SF6 成份到達 27%時，我們可以說其 SF6 成份的增加速率為

$$\frac{27\%}{40 \text{ 年}} = 0.78 \text{ ppm / 小時}$$

至此可以推論如果有這樣速率的洩漏出現在 EBA 中時，那當時的組立是有很大的問題的。我們也建議當加入系統後最好每隔半年到一年的期間就去比對一下溶出氣體中之 SF6 成份。同時也要通知實驗室及檢測單位務必知道在此取樣絕緣油樣品中是可能有 SF6 氣體存在的。

## 3. 絕緣油中的水份含量

和變壓器不同的是，充油電纜是運轉於一個密封系統中，如此一來那些外部的水氣或氧氣是無法跑到充油電纜系統中的。所以在電纜絕緣油中的水份含量則不允許超過 10ppm。

在早期 60 或 70 年代時，我們使用苯酚來當作阻隔被覆之接續絕緣物。這樣一種物質是會在日積月累中讓水份生成進而造成絕緣紙的損壞。

然而可以慶幸的是在台電的電纜系統中沒有這樣的問題存在。

## 陸、心得與建議

經由此次會議，不論是從EPRI的報告或是與會員間的交流，均得到不少收穫，

檢視供電單位目前之維護業務，心得與建議整理如下：

- 一、此次參加EPRI工作成果會議，除了在輸電線路之設計、運轉、維護議題上互相觀摩、學習與交流，也認識更多來自其他國家電力公司人員與電力領域之專家學者，對往後相關議題交流大有助益。針對EPRI擬於往後計畫中進行有關故障資料收集事宜，並針對所收集資料進行分類整理與故障原因分析後整理公布，對於不僅本公司、美國地區、更包括其他國家地區之電纜運轉狀態，相信會有實際性的幫助。
- 二、EPRI針對本公司所提海纜及其他電纜相關的議題，除雙方當面交流交換意見外，EPRI亦提供相關研究報告或書籍供參，對公司同仁在電纜設計及運轉維護上之助益甚多。
- 三、雖然EPRI研究計畫內容仍以填充液體絕緣方式之電力電纜為主，惟近來有電力公司簡報資料顯示，針對充油式電纜更換為交連PE電纜之替換介紹，可了解交連PE電纜亦已逐漸成為其採用的優先選擇。但不管是何種類，前者可以做為本公司維護之參考方向，而後者對於目前系統可能遭遇現象亦可做為參考對象。
- 四、針對EPRI提出利用機器人技術進行管道檢查事宜，希望藉由未來原型機的研發成熟，可以運用在本公司洞道內之電纜巡檢，真正達到節省巡檢人力及費用之目的。
- 五、利用本次會議才了解HTS(高溫超導技術)，目前在各國家的推動情形，會中也了解利用超導特性或許在建置成本上沒有太大幅度的縮減，但可以確定的是線路的損失將會降低且可以減少都市內使用土地興建變電所及變電設備的需要，未來可以持續關注本議題之發展情形。
- 六、參訪G&W公司並實際體驗其接續匣及終端匣的施工步驟及情形，明顯地可以了解其施工容易程度與結構的簡便性。對於電纜附屬器材方面更可以提供新的思維及未來設計方向的考量，更可以比較各種設計成果與現場施工之差異性比較。
- 七、芝加哥共同管道的設置經驗，對於長期須配合道路施工點檢的台電公司而言，真可說是同時具有便利及節省成本之雙重價值。雖然近半世紀的建設時間會使人覺得曠日廢時，但其對於管線單位而言，是較為可行且具經濟規模的選擇。也希望在現今台電公司為配合路平專案而無端耗費之大量經費得以節省，並在外界成本考量的聲浪下，將運維費用實際使用到設備的維護保養上。