

出國報告（出國類別：實習）

輸電線路鐵塔基礎異常氣候下設計之強化

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：蕭宇能 供電處 主管土木

陳懷宇 花東供電區營運處 施工課長

派赴國家：美國

出國期間：113年6月22日至113年6月29日

報告日期：113年8月14日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：「輸電線路鐵塔基礎異常氣候下設計之強化研習」出國報告

頁數 50 含附件 是 否

出國計畫主辦機關／聯絡人／電話：台灣電力公司／翁玉靜／

02-23667685

出國人員姓名／服務機關／單位／職稱／電話：蕭宇能/台灣電力股份有

限公司/供電處/主管土木/02-23668610

出國人員姓名／服務機關／單位／職稱／電話：陳懷宇/台灣電力股份有

限公司/花東供電區營運處/施工課長/03-8230023 轉 225

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 其他

出國期間：113 年 6 月 22 日至 113 年 6 月 29 日

出國地區：美國

報告日期：113 年 8 月 29 日

分類號／目：交通建設/其他

關鍵詞：極端氣候、EPRI、颱風、強降雨

內容摘要：近年來，因溫室效應、氣候變遷造成的極端氣候現象益趨頻繁，在全世界造成各種異常的氣候現象，包含熱浪、強降雨、乾旱、颶風等，對電力事業來說是一項嚴苛的挑戰，台灣位處於西太平洋，平均每年都有三至四個颱風，所帶來的強風與豪雨對電力系統是一大威脅，同時因地處板塊交界處，地震頻繁，如 921 大地震及近期的 0403 花蓮地震，皆造成停電的事故及災害，因此本

次實習擬藉由參訪美國 EPRI 的機會，進行議題討論及參觀實驗室，期能利用這次機會作為後續工作設計維護上的借鏡，了解在氣候變遷下，如何有效因應，減緩極端氣候風險對供電系統的損害並進一步設計強化。

目錄

一、出國目的.....	1
二、出國行程.....	2
三、實習內容.....	3
壹、實習單位簡介.....	3
貳、議題交流.....	5
參、會議議程.....	7
一、議題 1&2 極端氣候 Climate READi(REsilience and ADaptation initiative).....	8
二、議題 3 坡地災害.....	10
三、議題 4 地震之考量.....	12
四、議題 4-1 線路抗風設計.....	13
五、議題 5 監測儀器的佈置.....	14
六、議題 6 基礎腐蝕防治.....	16
七、議題 6-1 混凝土基礎的劣化機制.....	19
八、議題 6-2 混凝土基礎的修復方式.....	20
九、議題 7、10~14 無人機技術討論.....	21
十、議題 8 OPGW 的應用技術.....	23
肆、變電所研究項目介紹 (Program 37).....	25
一、局部放電檢測和油中氣體監測.....	26
二、變壓器液體冷卻裝置測試.....	27
三、變電所極端氣候運轉測試.....	28
四、無人機飛行器系統及無人機反制測試.....	29
五、氣體絕緣開關設備 SF ₆ 替代氣體研究.....	30
六、氣體絕緣斷路器 SF ₆ 替代氣體研究.....	32
七、變電設備耐蝕、耐雷、耐電壓研究.....	33
伍、地下電纜研究項目介紹 (Program 36).....	35
一、地下電纜創新技術研究.....	36
二、2025 主要研究議題 I.....	37
三、2025 主要研究議題 II.....	38

四、2025 主要研究議題 III.....	39
五、2025 主要研究議題 VI.....	40
六、地下電纜的壽命 (ELS) 評估.....	41
七、輸電地下電纜與配電管路交叉的降額定計算.....	42
八、地下輸電電纜系統的磁場與設計管理.....	43
四、心得與建議.....	44
五、延伸討論.....	46

一、出國目的

隨著全球氣候變遷引發極端氣候，災害發生頻率及規模預期將伴隨增加，台灣位處颱風及地震頻繁地區，鐵塔受天然災害損壞之風險不斷提高，為確保輸電線路基礎安全，應於源頭端思考因應對策。

本次行程藉由參訪美國 EPRI 在電網強化之研究，了解其在氣候變遷下，學習整合及監控各氣象資料，以評估各極端事件對於塔基之風險機率，不僅可於災害發生前預防，亦可於事後針對損害進行評估並進一步設計補強。

二、出國行程

時間	地點	工作概要
113.06.22-113.06.23	台北→舊金山→夏洛特→諾克斯維爾	往程
113.06.24-113.06.25	諾克斯維爾 EPRI	實習氣候變遷影響輸電鐵塔相關議題及參觀實驗室
113.06.26	諾克斯維爾→夏洛特	轉程
113.06.27	夏洛特 EPRI	實習輸電鐵塔基礎抗風耐震等相關議題
113.06.28-113.06.29	夏洛特→舊金山→台北	返程

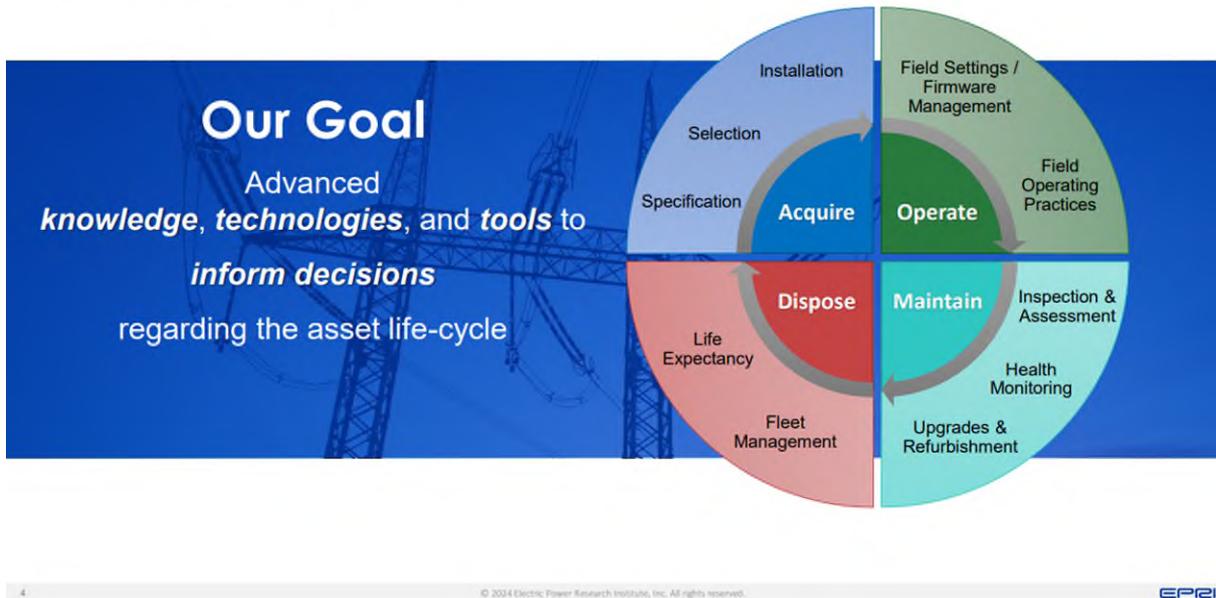
三、實習內容

壹、實習單位簡介

EPRI 為美國的一個獨立的非營利性組織研究機構，從事與電力事業發電，輸電和運轉維護相關的研究和開發，以幫助解決全世界能源行業的挑戰，包括可靠性，效率，可負擔性，健康，安全性和環境。EPRI 的主要辦公室和實驗室位於加利福尼亞的帕洛阿爾托；北卡羅來納州夏洛特；田納西州諾克斯維爾；華盛頓特區；和馬薩諸塞州的萊諾克斯 (Lenox)，本次參訪的實驗室為夏洛特及諾克斯維爾。因 EPRI 的研究主題涉獵甚多，本次主要的參訪主題著重在氣候變遷議題(諾克斯維爾)及輸電設備管理(夏洛特)。

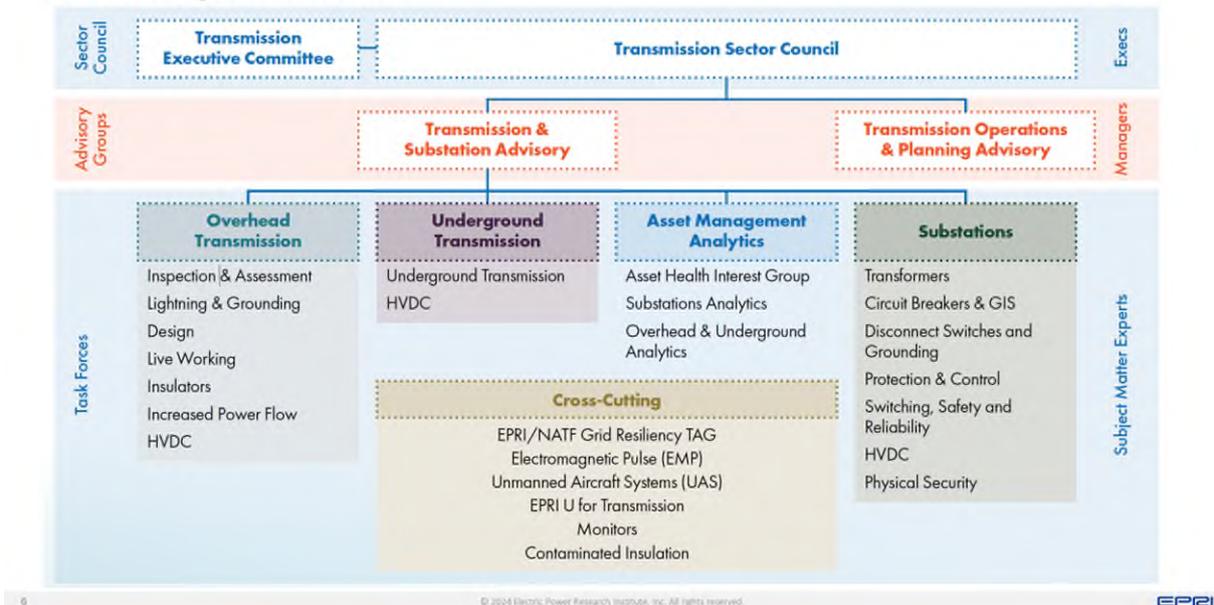
於夏洛特辦公室時之討論內容聚焦於 1.P35 架空線路傳輸 (Overhead Transmission) 2.P36 地下電纜傳輸 (Underground Transmission) 3.P37 變電所 (Substations)，簡介時從輸電事業的生命週期出發，包含 1.運轉、2.維護、3.處置及 4.發展等各階段，於議程中分別進行深入探討。

T&D Asset R&D at EPRI



EPRI 輸電事業生命週期架構

Advisory Structure



EPRI 輸電部分諮商團隊架構

目前 EPRI 架空線路(Overhead Transmission)團隊有 16 項專案分別分屬七大工作類別，包含為 1. 檢視評估及管理項目 2. 線路設計項目 3. 雷擊及接地項目 4. 活線作業項目 5. 絕緣礙子項目 6. 增大傳輸容量項目 7. 高壓直流輸電項目。

貳、議題交流

由於本次參訪夏洛特輸電團隊的研究議題相當廣泛，於參訪前即彙總相關討論議題，包含 1. 極端氣候 READi、2. 架空線路 P35、3. 地下電纜 P36 及 4. 無人機技術等面向，研討議題如下

#	Topics	Contents	Remarks
1	READi	In past two year,our power supply sector start to build micro-weather station(include anemometer、thermometer、hygrometer、rain gauge and ground clinometer) on specific towers which are susceptible to weather.According to the reasearch of Readi, what we can do to benefit our management or improve our resilience by using these weather datas we collected?	
2	READi	In our tower safety assessment, we classify the towers into four type:red、orange、yellow and green.(showing on the right side)Green is the safer tower and red is the risky one. The tower was classified by two variables: the deformation of structure and the environmental change. Considering climate change, does Climate READi provide new approaches to assess risks and do some prevention to avoid the risk?	
3	P35	Since a lot of towers are located in the mountainous area, they are frequently	

		damaged according to the rock flow or landslide. Could you demo some cases of preventing landslide disasters on geologically sensitive areas ?	
4	P35	Could you elaborate the way of designing the model of transmission tower considering seismic and wind force?	
5	P35	We had installed some monitoring instruments under towers in some difficult area. The transportation is by helicopter and the signals were sending by satellite. It is a tough job and hard to maintain. Under this situation, how do EPRI deploy Monitoring and Warning System in difficult area?	
6	P35	How does EPRI distinguish the concrete degradation and corrosion of the transmission line foundations? How does EPRI reinforce or repair the foundation once it got damaged?	
7	P35	Could you introduce any innovative research of using UAV or robot technologies (such as Transmission Line Inspection or field survey)?	
8	P35	Could you provide a few case about the Optical Fiber Sensing Technology ? Few years ago, We had installed some monitoring instruments under towers with joint boxes and the signals were sending by OPGW. So it is not easy to imagine detection without any instruments.	
9	P36	Updates of P36 recent research.	
10	DRONE	Can you provide detailed information on drone based inspections, especially application cases for radiography, resistance measurement and corrosion detection?	
11	DRONE	Should the drone based inspection be used in live line operation? Is it easy be interfered in electromagnetic field?	
12	DRONE	Does drone based inspections performed manually? all situation is detected	

		automatically and instantly? Or waiting for engineer determined	
13	DRONE	How long does it take to inspect one section?	
14	DRONE	Will drone based inspections be introduced in Taiwan in future? Is this technology possibility be transferred in Taiwan?	

參、會議議程

AGENDA **EPRRI**

Taiwan Power Site Visit

📅 June 24th - 25th, 2024
📍 **EPRRI Knoxville Office**
942 Corridor Park Blvd.
Knoxville, TN 37932

JUNE 24 TH , 2024		
TIME	TOPIC	PRESENTER
9:00 AM	ISSP	Nidhi Santen, Parag Mitra
10:30 AM	Break	
10:45 AM	TCP Discussion on Power System Resilience Assessment Process	TCP
12:00 PM	Lunch	
1:00 PM	READI WS1 Overview	Laura Fischer
2:00 PM	READI WS 2 Overview	Jeff Thomas, Doug Dorr
3:00 PM	Break	
3:30 PM	READI RISC Tool Discussion	Ek Nath Vittal
4:30 PM	Adjourn	

JUNE 25 TH , 2024		
TIME	TOPIC	PRESENTER
9:00 AM	Lab Tour	Jonathan Morrell
10:30 AM	Break	
10:45 AM	READI WS3 Overview	Ek Nath Vittal
12:00 PM	Lunch	
1:00 PM	Overview of Transmission Planning Topics	Deepak Ramasubramanian, Parag Mitra, Alberto Del Rosso
2:30 PM	iCCS Area Introduction	Brian Seal
3:15 PM	Follow-Up	Parag and others
3:45 PM	Adjourn	

🐦 in f
www.eprri.com
© 2022 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

圖 3.1 EPRI Knoxville 會議議程

EPRI Transmission Asset R&D

June 27, 2024

Charlotte Campus
Building 2

JUNE 27, 2024		
TIME	TOPIC	PRESENTER
8:30 a.m.	Welcome and Introductions	<i>Drew McGuire</i>
8:45 p.m.	Overhead Transmission R&D	<i>Rachel Moore</i> <i>Neal Murray</i> <i>Dexter Lewis</i>
	• Overhead Structures	
	• Corrosion	
9:45 p.m.	• Drones	
	Break	
10:00 p.m.	Substations R&D	<i>Erika Willis</i>
10:30 a.m.	SF ₆ - Free Breakers and SF ₆ Replacement R&D	<i>Luke van der Zel</i>
10:30 a.m.	Underground Transmission R&D	<i>Tom Zhao</i>
11:00 p.m.	Lab Tour	<i>Drew McGuire</i>
12:00 p.m.	Lunch – Discuss next steps	<i>All</i>
1:00 p.m.	Adjourn	

圖 3.2 EPRI Charlotte 會議議程

一、議題 1&2 極端氣候 Climate READi (REsilience and ADaptation initiative)

Climate READi 為 EPRI 發展出針對極端氣候所擬定之風險評估及應對計畫，此系統分為三大部分 1. 氣候資料蒐集及導引 2. 能源系統及資產之弱點評估 3. 韌性/適應性計畫，目前第一部份所研究的氣候參數包含：氣溫、降雨、太陽輻射、風力、颶風等，其依照觀察資料的延時長短 (Length)、空間及時間上的覆蓋率 (Coverage)、精確度 (Accuracy) 評估出資料品質 (Quality)。並利用氣候預測工具了解未來的變化，藉由評估出之資料品質 (Quality)、氣候模擬模式的能力 (Ability)、全球暖化下氣候變數變化的物理驅動因素 (Physical Drivers) 以決定預測未來氣候

變化的可靠度(Confidence)，由於氣候變因的不確定性相對高，比較不同的預測模式如可以得到相似的預測值，亦可提升預測結果的可靠度。目前本公司利用即時監測在部分塔基處設有風速、溫度及雨量觀測站，後續若累積到一定之觀測紀錄值後，亦可將仿照其資料數值評估後進行氣候預測模式的建立。

Climate Variable	Length	Coverage	Accuracy	Quality of Observations
Air Temperature	High	High	High	High
Precipitation	High	High	High	High
Wind	Medium	Medium	High	Medium
Solar	Medium	Medium	High	Medium
Drought (meteorological)	High	High	High	High
Wildfires	Medium	High	Medium	Medium
Severe & Convective Storms	Medium	Low	Low	Low
Hurricanes	High	Medium	Medium	Medium
Inland Flooding	Low	Low	Medium	Low

圖 3.3 Climate READi 氣候變數品質評估

Climate Variable	Quality of Observational Record	Ability of Models to Simulate	Understanding of Physical Drivers of Changes	Confidence in Projected Changes
Air Temperature	High	High	High	High
Precipitation	High	Medium	Medium	Medium
Wind	Medium	Medium	Low	Medium
Solar	Medium	Medium	Medium	Medium
Drought (meteorological)	High	Medium	Medium	Medium
Wildfires	Medium	Low	Medium	Medium
Severe & Convective Storms	Low	Low	Low	Low
Hurricanes	Medium	Medium	Medium	Medium
Inland Flooding	Low	Low	Medium	Medium

圖 3.4 Climate READi 氣候變化預測可靠度評估

二、議題 3 坡地災害

本次討論議題 3 特別針對山區環境鐵塔，受到坡地災害如落石，坍方等影響之處置情形及塔基受地震力及風力之影響分別討論，過程中，EPRI 顧問 Jean-Pierre Marais 先生以美加較為常見之雪崩進行分享，其以 BC Hydro 在 Lu & Chakrabart 發生的雪崩案件為例，該座 287kV 線路建造於 1960s 期間，分別於 1977、1989、2007 及 2018 遭受到雪崩的侵害，其在後續設計並未考慮加高基礎或於坡面設置保護工程方式防治，而是採用塔身結構設計時考慮受雪崩滑移之側向力考慮，同時須考慮雪崩時不同之滑移模式，由上到下包含 1. Powder Cloud 粉霧層 2. Saltation Layer 躍移層 3. Dense Flow 壓密層，其中 Dense Flow 壓密層的側壓最大，而 Powder Cloud 粉霧層側壓最小，但因 Powder Cloud 粉霧層影響範圍較大，設計線下高度需考慮 Powder Cloud 粉霧層影響範圍避免影響送電，同時依照鐵塔所在坡度位置分為 1. 啟動區(坡度 $>45^{\circ}$) 2. 滑動區(20° - 50°) 3. 終止區($<10^{\circ}$)。而另一項設計思維則採用避免於雪崩高風險區設置支持物，如同 Marais 先生所說：「如果你無法擊敗某些東西，你只能去避免(avoid)它」，防治雪崩的設計即是以懸吊索取代支持物，以懸吊索附掛礙子送電，並加大跨距到 1200m，於對地面高度達到 150m 上施作以避免雪崩時雲霧層影響，上方並設計走道以方便後續維護保養，其工程的創新思維值得我們借鏡。

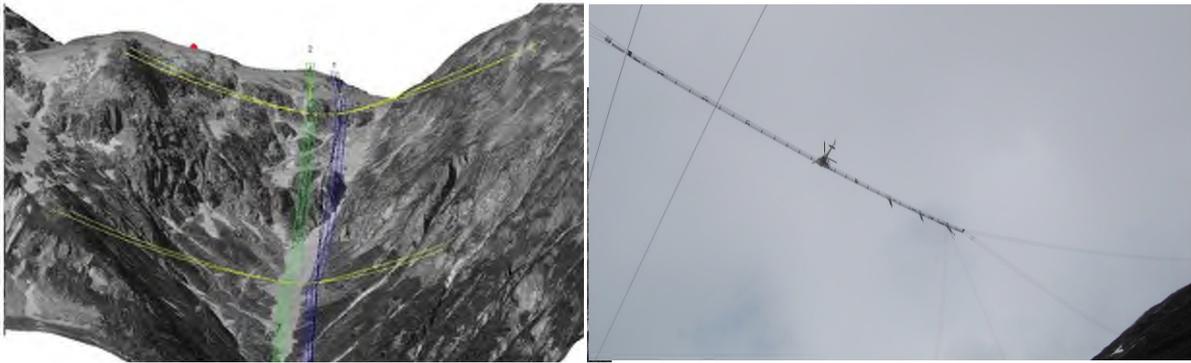


圖 3.5 EPRI 懸吊索設計



圖 3.6 EPRI 懸吊索設計

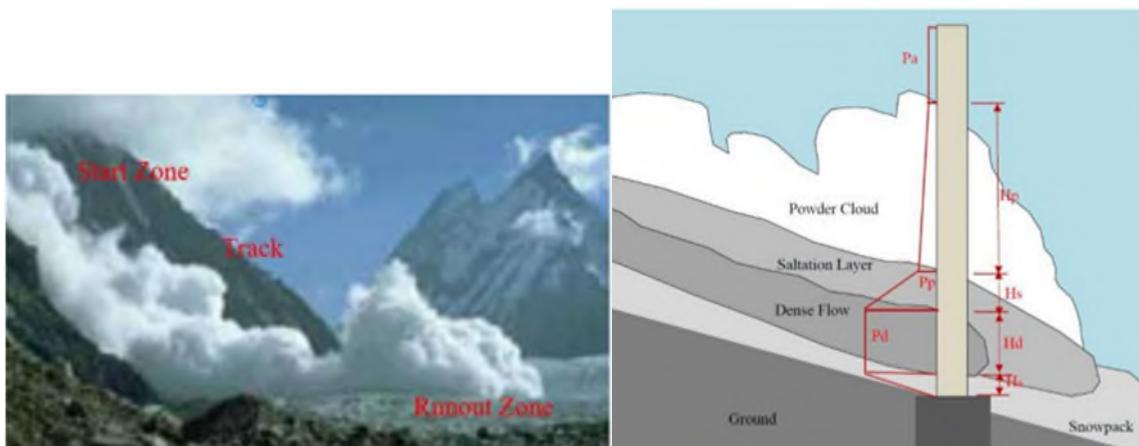


圖 3.7 EPRI 雪崩側向力分析

三、議題 4 地震之考量

輸電鐵塔在實務上較不易受地震之直接破壞，由於一般地震之自然振動頻率約為 0.8~3.9Hz，而一般輸電結構物的自然振動頻率為 3~40Hz，即便是以支線補強的結構會降低其自然振動頻率，惟其抗動態載重能力增加，對地震預防的能力反而會提高。雖地震不至造成直接影響，但實務上較需注意地震所引發的二次災害，包含 1. 土壤液化、2. 邊坡穩定及 3. 落石問題。針對其各災害處理的解決方案，EPRI 有出版一本報告 Practical Overhead Line Hardening Guide 做深入討論，但由於本報告要價 15,000USD，會議過程中並無法提供給我們再深入了解，實屬可惜。

Transmission Lines and Seismic Events

- Transmission towers are resistant to lateral seismic ground accelerations
 - Natural frequency of earthquakes ranges from 0.8-3.9Hz
 - Natural frequency of transmission structures typically higher (3-40Hz)
- Guyed transmission structures have lower natural frequency but are more resistant to dynamic loading
- No seismic loading recommended for Tx lines in ASCE MOP 74
- Towers and foundations are prone to secondary seismic hazards: (See Cigre TB 516)
 - Liquefaction
 - Slope stability
 - Rockfalls
- See [EPRI LINE HARDENING GUIDE](#)



圖 3.8 EPRI 地震災害研究

四、議題 4-1 線路抗風設計

有關導線的抗風設計，EPRI 研究比較不同導線，包含傳統圓形素線與平面素線對風力係數之影響，依照本公司輸電工程作業手冊內容可知導線所受之風壓與電線最外層素線直徑相關，基本上相同導線線徑下，最外層素線直徑越大，所受之風壓越大，由 EPRI 研究可知圓形素線導線在設計風壓上取 1.0 可符合大部分的需求，除非素線之直徑較小，其結果與本公司作業手冊相符，而採用平面素線(FLAT STRAND)之設計變異性較大(0.65~1.25)，但在大斷面導線可有效降低風力係數，但在小斷面時卻有上升之趨勢，此現象可供我們在後續設計線路時之評估條件。

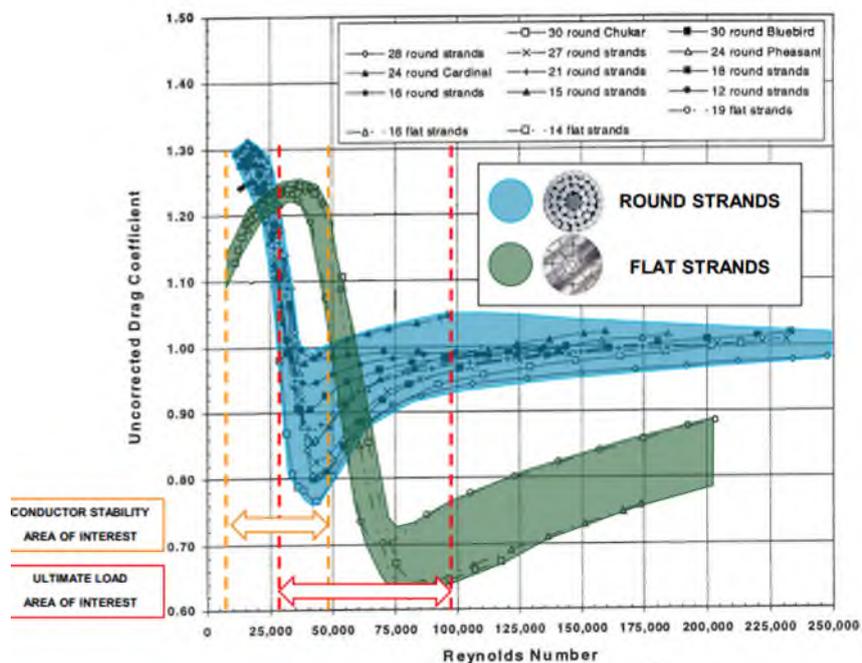
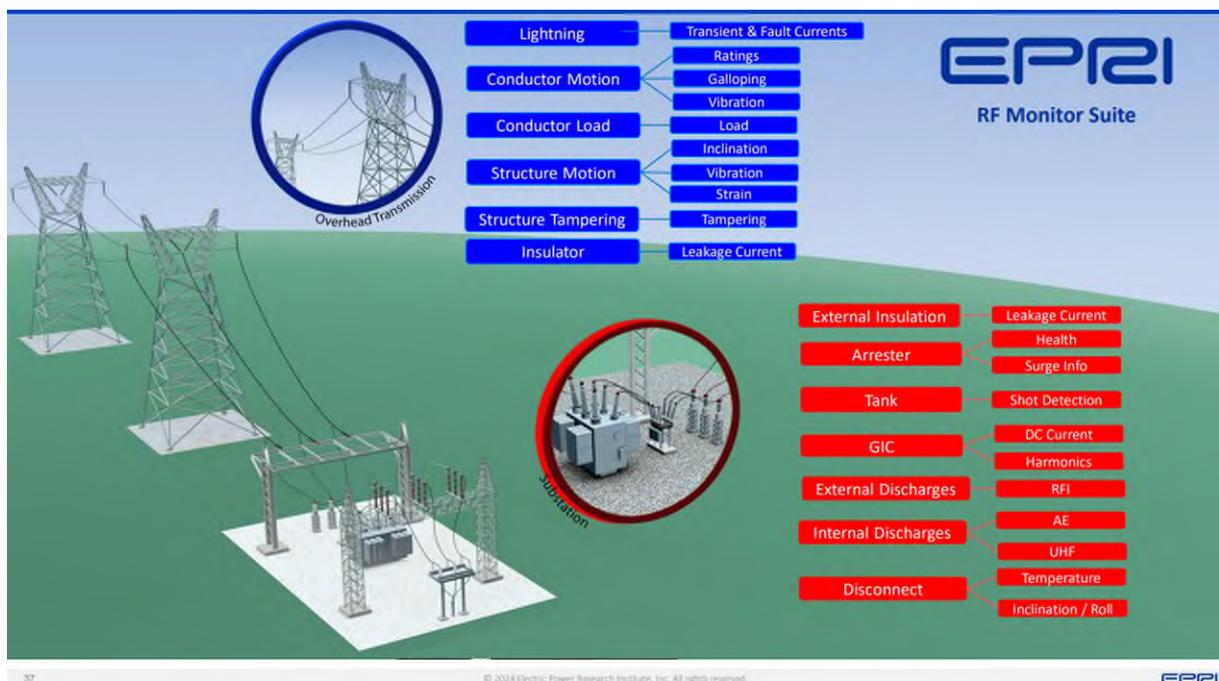


圖 3.9 EPRI 抗風設計研究

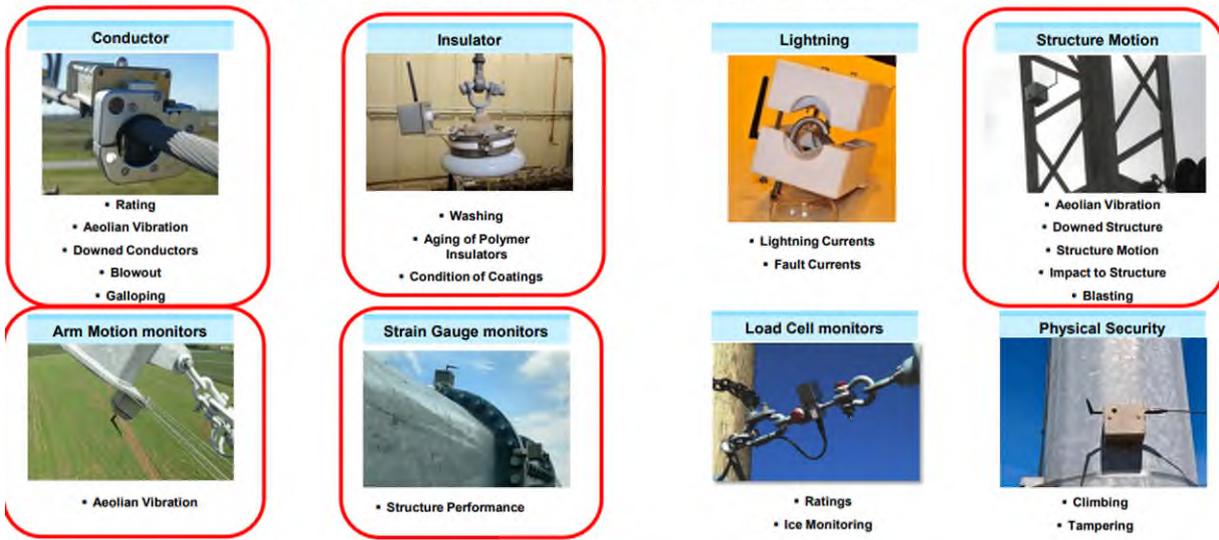
五、議題 5 監測儀器的佈置

有關輸電線路監測儀器的佈置，分為架空線路部分和變電設備部分，本次介紹主要為架空線路部分，分為 1. 導體 2. 絕緣體 2. 結構運動監控 3. 橫擔變化監控 4. 應變計監控儀器等，其於架空線路各位置設置無線儀器後，傳輸至地面基地台，大多數儀器都依賴 ZigBee 網路來布置區域中所處的位置來與地面基地台進行傳輸，後續透過無線網路或 ZigBee 網路進行連接至後端，做圖形化的輸出或是警報的功能。



EPRI 監控分為輸電及變電系統

RF monitors for Overhead Transmission Lines



38

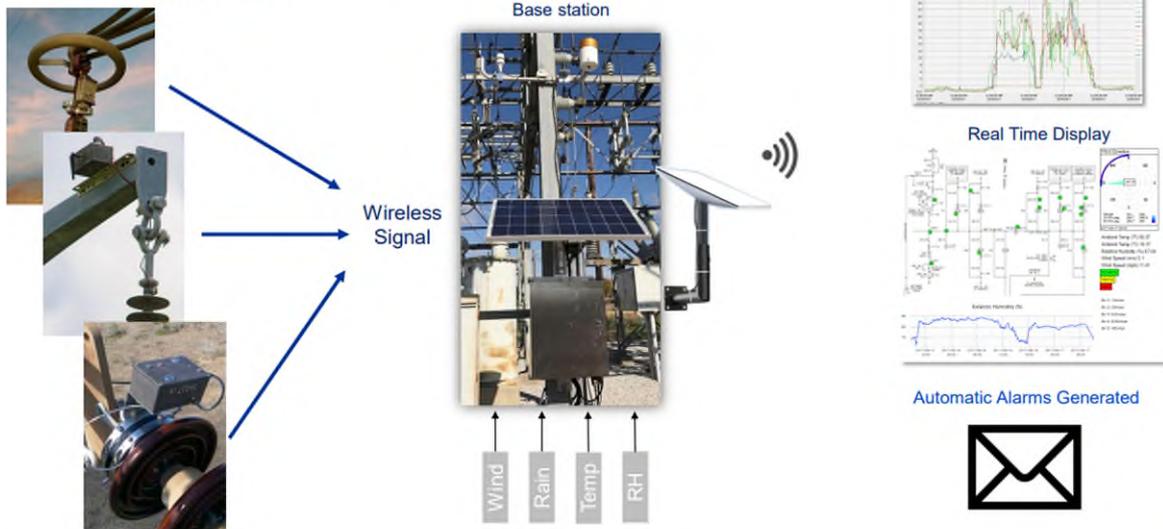
© 2008 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

EPRI

圖 3.10 EPRI 輸電監控儀器布置

RF Monitor System

EPRI's Wireless monitors



39

© 2004 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved.

EPRI

圖 3.11 EPRI 儀器訊號傳輸及警報系統

六、議題 6 基礎腐蝕防治

在 P35 計畫項下有關防腐的項目有 002 Conductor, Shield Wire and Hardware Corrosion Management(導線, 屏蔽線及鐵件腐蝕管理)、003 Structure and Foundation Corrosion Management(結構及基礎腐蝕管理)、104 Substation Corrosion Management(變電所腐蝕管理), 本次詢問的議題主要為 P35.003 結構及基礎腐蝕管理, 由 Neal Murray 先生負責, 由於美國幅員廣闊及塔基大部分為土壤或普通基礎, 關於結構的腐蝕管理尤其重要, 首先 Neal 先生為我們介紹腐蝕的原因, 分為地上及地下的環境因素, 地面上的腐蝕原因包含 1. 濕度 2. 溫度 3. 汙染 4. 金屬種類, 而地面下的腐蝕原因包含 1. 溫度 2. 濕度 3. 導電度 4. PH 值 5. 電位 6. 金屬種類 7. 雜散電流。

Understanding Degradation of a Structure

What governs the severity of Atmospheric corrosion?

- Time of wetness
- Temperature
- Contaminants
- Type of Metal

What governs the severity of Below Grade corrosion?

- Temperature
- Moisture
- Conductivity
- pH
- Potential
- Type of Metal
- Stray Currents

Corrosion Category	Corrosion Types	Sources
Electrolytic	Stray Current	Pipeline, Electrified Railroad, Mining Operations, Smelting Plant, Weld Shops
	Circulating Current	Unbalanced Distribution Transformers, Broken Insulators on Overhead Transmission Lines, Damaged Link Box
Electro-chemical	General, Localized, Concentration Cell, Crevice, Fretting, Galvanic, Microbiologically Induced, Stress Induced	Soil Exposure, Microbes, Stresses due to assembly, settling or movement, Material Selection

Types of Corrosion Found on Transmission Line Structures

© 2024 Electric Power Research Institute, Inc. All rights reserved. EPRI

圖 3.12 EPRI 結構及基礎腐蝕分類

目前 EPRI 有針對美國部分區域包含中部及東岸區域的土壤腐蝕率做了進一步的調查，並將腐蝕程度做了程度的分級，共分為 R1(無須處置)、R2(觀察)、R3(減緩)、R4&RX(減緩及修復)，依照 EPRI 的研究結果，其研究區域內 R1 約佔 48.3%、R2 約佔 24.9%、R3 約佔 19.3%、R4&RX 約佔 7.5%，而由於全球暖化的影響，溫度每上升 1.5° C，腐蝕率大約增加 30%，腐蝕元素的活性與濕度呈正相關，同時近年由於風速和風力延時的增強，腐蝕程度也有從沿海區往內陸移動的傾向，根據研究顯示，在 2023 年，R1 及 R2 共約佔 75% ，R3 及 R4 約佔 25%，預測到了 2035 至 2050 期間，R1 及 R2 變為佔 36% ，R3 及 R4 增加到佔 64%，可見腐蝕程度變化的劇烈性。

而針對地面上的腐蝕程度，EPRI 亦有建置相關的圖資，並區分為 C1~CX 共六個分級並建置腐蝕率與導線使用年限的關係式，其腐蝕率為

$$CR_y = Ay^B$$

Locating and Quantifying Soil Corrosion Severity

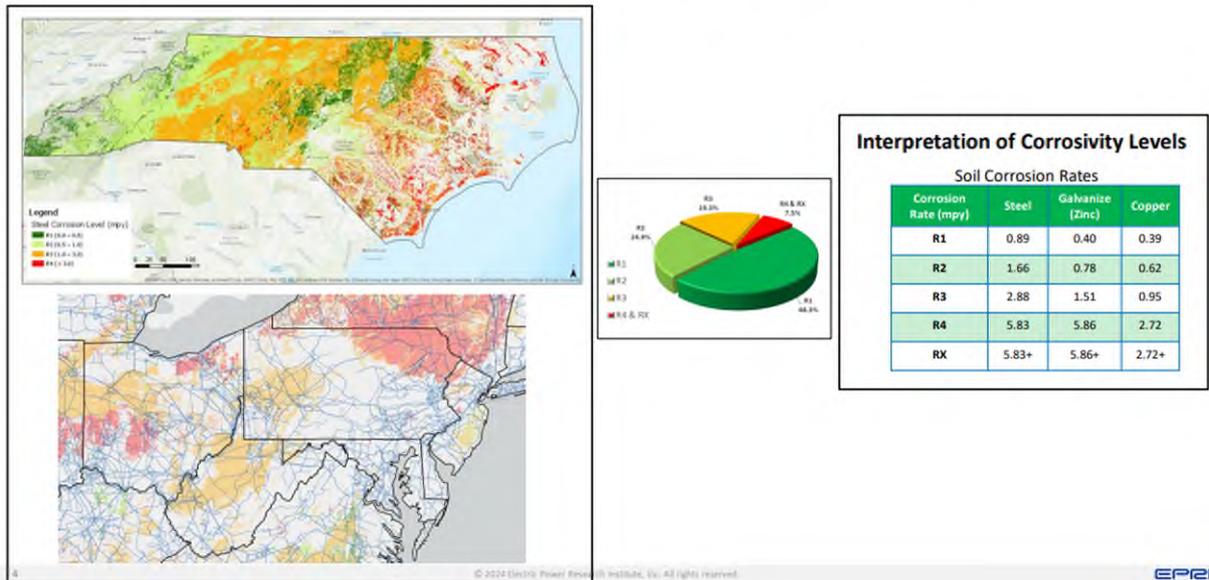


圖 3.13 EPRI 土壤劣化嚴重度 GIS 地圖

ISO Std 9224 determines the corrosion rate at that GIS based map location.

$$CR_Y = A \cdot Y^B$$

Where:

- CR_Y is the yearly corrosion rate after Y years of exposure (mpy)
- A and B are constants for bare or coated steel core strands

Corrosion Categories	Galvanizing coating		Bare steel	
	A	B	A	B
C1	0.004	-0.192	0.049	-0.437
C2	0.028	-0.162	0.984	-0.479
C3	0.083	-0.188	1.973	-0.472
C4	0.0165	-0.190	3.152	-0.473
C5	0.332	-0.189	7.895	-0.480
Cx	0.984	-0.193	27.555	-0.477

- Based upon 80% rated breaking strength, this conductor will be a reject in 76 years.
- The orange zone is time to budget and prepare for reconductoring operations.

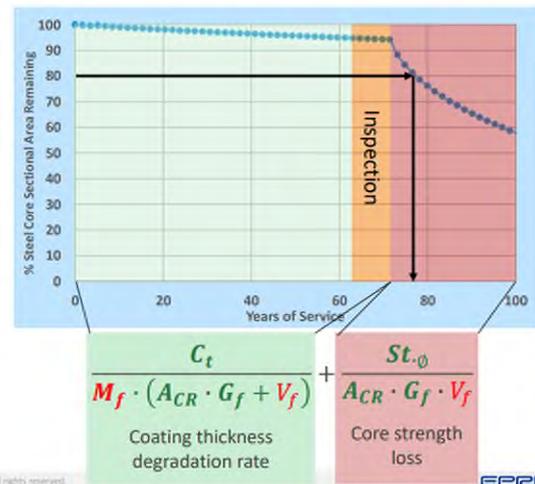


圖 3.14 EPRI 土壤劣化嚴重度預測

七、議題 6-1 混凝土基礎的劣化機制

混凝土為鐵塔基礎普遍採用的材料，其負責提供抗壓強度，並搭配鋼筋提供抗拉及抗剪強度，一般混凝土劣化及強度的喪失可歸類於以下原因：1. 混凝土中性化 2. 鹼骨材反應 3. 氯化物或硫酸鹽侵入 4. 鋼筋生鏽的內應力 5. 配比設計不良，而鋼筋的鏽蝕可歸納為 1. 較低之 PH 值 2. 拌合水的影響 3. 裂縫形式，而有關基礎劣化目視評估可分為 1. 環境評估：包含土壤種類，水文形式、汙染形式 2. 基礎評估：包含裂縫種類、表面孔洞及剝落、表面孔洞及蜂窩、周遭植生情形、不適當的排水及積水及各鐵配件的鏽蝕情況，其針對裂縫的寬度區分為 1. 輕微(1mm 寬*15mm 深) 2. 中等(2mm 寬*50mm 深) 3. 嚴重(>2mm 寬)。

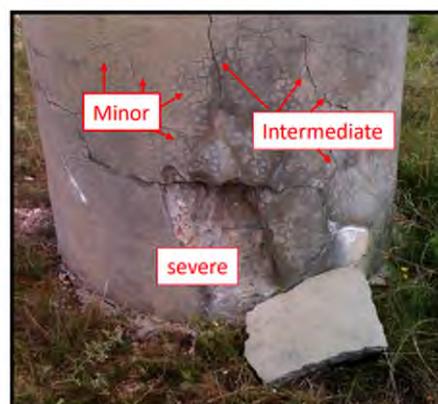
Visual Inspection of Concrete Foundations

Environmental Assessment

Soil Type	Hydrology	Contaminants
Clay, Silt, or Sand?	Does water build up around the base?	Atmospheric or Soil

Foundation Assessment

- Cracking (varies widely in nature and style)
- Surface pitting and spalling
- Surface staining
- Differential movements or displacements
- Surface voids
- Honeycombing
- Vegetation growth near foundation
- Improper drainage/water retention
- Rusting of steel components (anchor bolts/nuts, stub angles, etc.)



Severity	Crack Width x Depth
Minor	1 mm x 15 mm
Intermediate	2 mm x 50 mm
Severe	> 2 mm width

圖 3.15 EPRI 混凝土基礎劣化判釋

針對混凝土基礎的強度評估亦可採用 1. 槌試法 2. PH 值檢測 3. 表面

Repair Method for Concrete Foundations

1. Chip off all cracked concrete until the reinforcing steel is exposed.
2. Evaluate rebar integrity, epoxy and tie in new rebar in locations where required.
3. Solvent degrease the affected area (SSPC SP-1: Solvent Cleaning).
4. Surface preparation of rebar (SSPC SP-2: Hand Tool Cleaning).
5. Wipe the surface to remove dust and soil.
6. Apply zinc-rich cold galvanizing paint to exposed rebar.
7. Apply a chemical bonding agent to the concrete surface.
8. Apply forms to the damaged area and re-cast the concrete foundation.



Coatings, Inhibitors and Cathodic Protection may be Applied to Foundations with Less Damage

圖 3.17 EPRI 混凝土基礎劣化清理及修復法

九、議題 7、10~14 無人機技術討論

本次針對 EPRI 有關無人機技術的應用上，包含搭載放射攝影、電阻量測、目視檢查、紅外線熱影像、腐蝕檢測等多項應用研究，而目前以實際於電力事業中載用的項目包含電阻讀數、感測器及驅鳥器的安裝，而於活線作業中執行無人機飛行作業可能遭遇磁場干擾數位羅盤導致航向精度下降、無線通信因高頻諧波、局部放電、電暈或其他射頻電磁雜訊而退化、GPS 精度下降，飛行過程中在量測作業連接過程中電位變化可能會破壞電路板載系統、在飛機懸停時的陣風可能造成意外，甚至碰撞螺旋槳損壞，理想的預防方式是做好飛行前管理，包含 1. 確定作業的安全距離。2. 考慮無人機的尺寸、材料和位置。3. 考慮電磁場的穩態和瞬態條件。4. 在電磁干擾的時候，確定無人機懸停和導體的位置。



圖 3.18 EPRI 無人機 DRONE 議題討論



圖 3.19 EPRI 無人機 DRONE 議題討論

Drone Based Inspections

- Infrared Thermography
- Visual Inspections
- Radiography
- Resistance Measurements
- Corrosion Detection, C-Corr

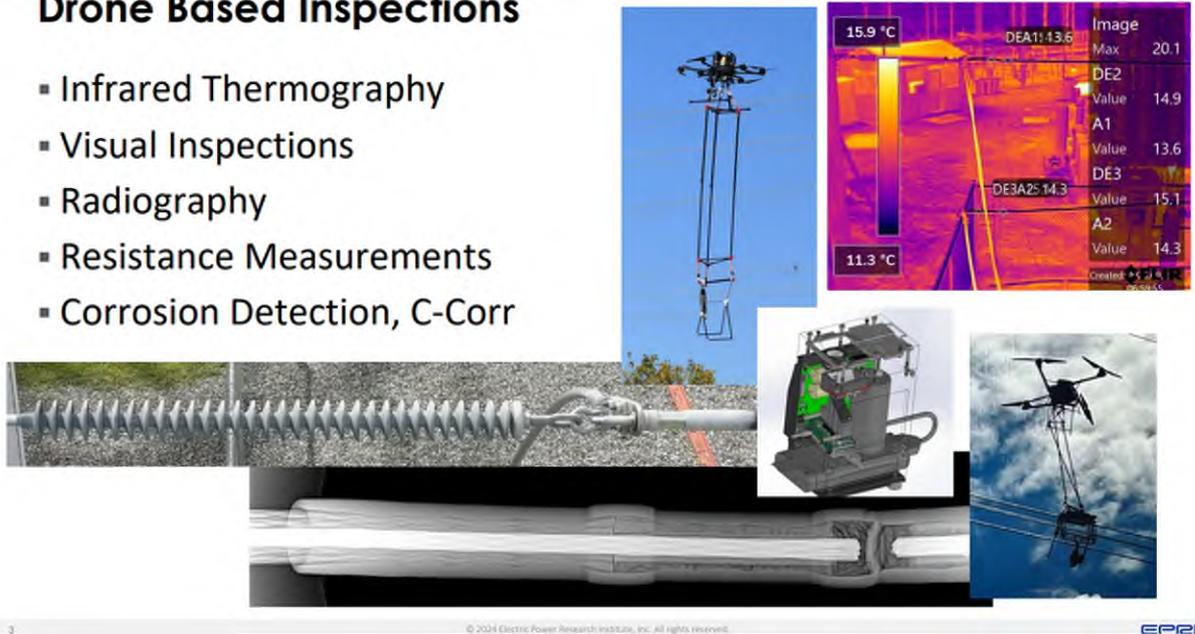


圖 3.20 EPRI 無人機 DRONE 議題討論

十、議題 8 OPGW 的應用技術

在 P35.001 項目下，正研究利用 OPGW 技術檢視及偵測鐵塔的各项環境變因，包含 1.雷擊 2.保全 3.強風 4. 動態線路額定值(DLR)5. 森林火災 6.冰凍 7.閃絡 8.電暈放電 9.線下竹木，本研究計畫預計利用萊諾克斯實驗室架設線路設備進行實驗，研究成果預計藉由檢測環境條件的信號可以作為早期警報，並向線路部門發出警告，尤其是在偏遠地區，同時各電力公司可以利用這項技術來監控即時了解其架空輸電線路資產，並幫助公司製定計劃並優化架空線路維護程序。

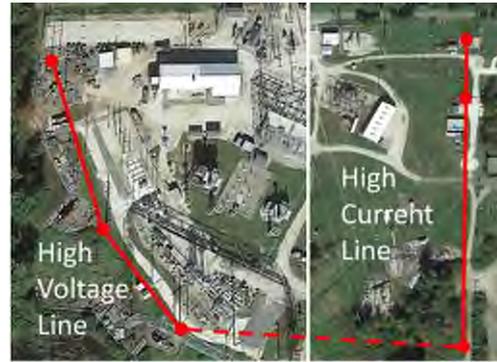
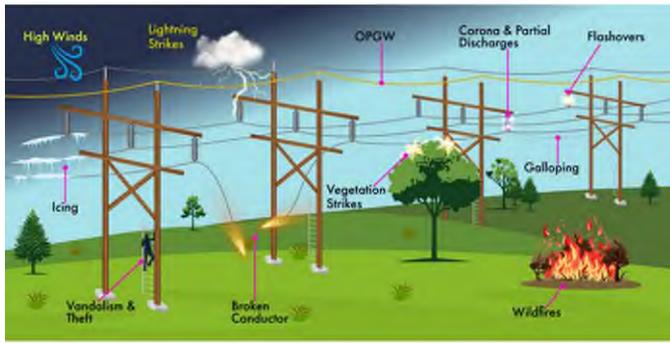


圖 3.21 EPRI OPGW 應用技術計畫

肆、變電所研究項目介紹 (Program 37)

EPRI 變電技術研究部門擁有龐大的研究團隊，藉由研究各種變壓器、斷路器等變電設備，從初始性能調整安裝，到現地測試運轉作業，直到設備生命週期結束，透過與世界各國電力公司協作及全球電力研究機構的成員參與各種實驗項目，開發新技術變電設備產品，以下介紹位於 EPRI 夏洛特的實驗室中，研究有關變電所相關技術的各種面向。



圖 4.1 變電所研究面向(EPRI 夏洛特研究中心)

一、局部放電檢測和油中氣體監測

藉由 110kV 變電設備進行局部放電在線監控，與油中氣體監測的研究，對不同的監測數據進行巨量資料研究及處理，並進行第三方公正單位的測試。

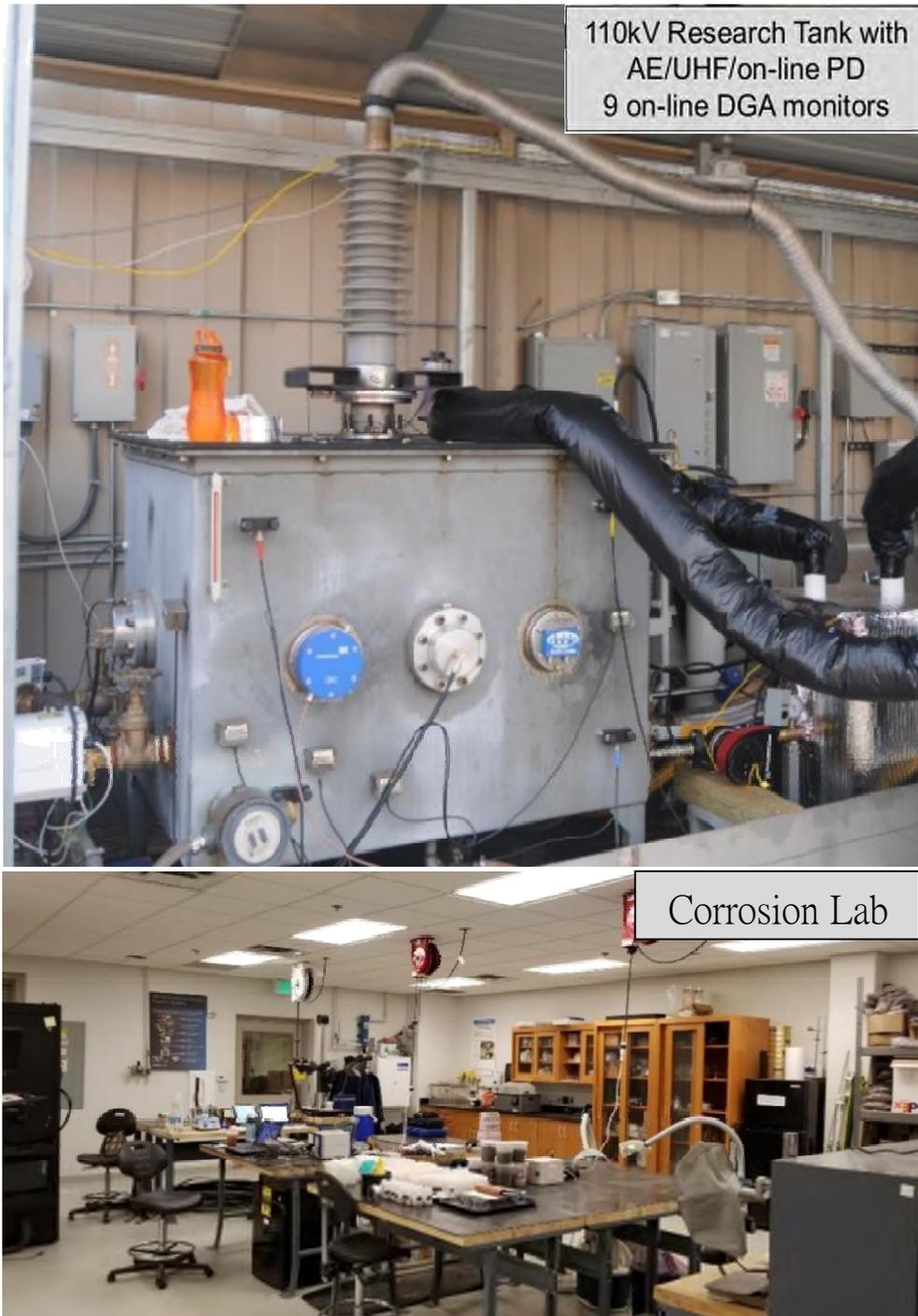


圖 4.2 變電設備 PD 及 DGA 檢測(EPRI 夏洛特研究中心)

二、變壓器液体冷卻裝置測試

外部實驗場設置常規尺寸變壓器附帶冷卻裝置，進行個別運轉之散熱降溫測試。



圖 4.3 變電器 LTC 散熱檢測(EPRI 夏洛特研究中心)

三、變電所極端氣候運轉測試

為再現極端寒冷環境，EPRI 於麻州萊諾克設置 138 kV 研究用模擬大型的變電站，現場放置各式的監視儀器蒐集數據，因應極端氣候影響或人因造成變電故障時，模擬各式情境便於觀察變電設備老化損耗情況。



圖 4.4 MA.Lenox,138 kV 變電站極寒試驗場(EPRI 夏洛特研究中心)

四、無人機飛行器系統及無人機反制測試

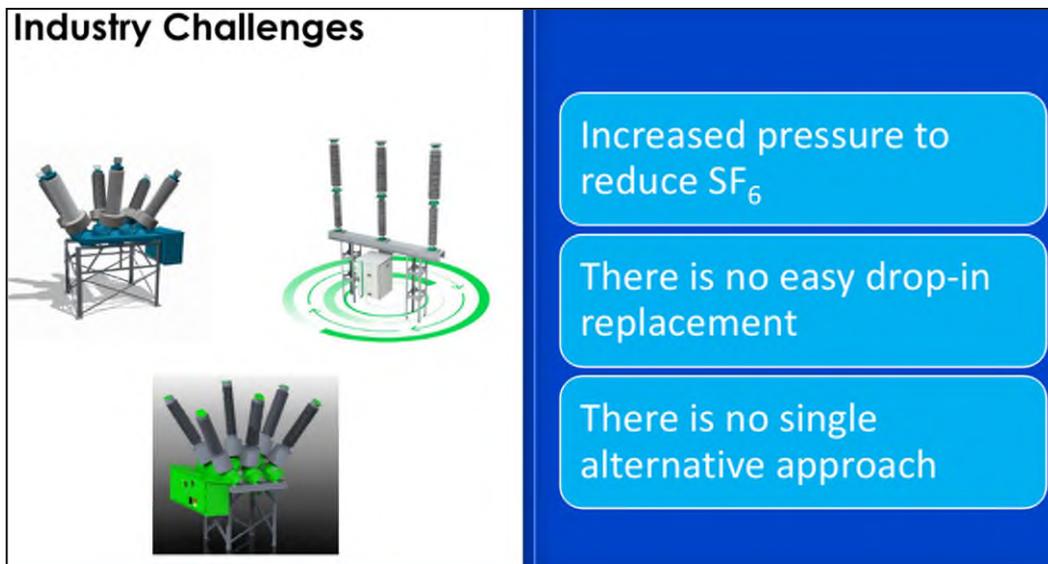
UAV 結合感測器、GPS 接收機、接收處理器及伺服處理器等構成即時多工自主飛行，俗稱無人機 Drone。透過測試無人機飛行模式及攝影檢測，以了解在高電磁場環境各方面的表現。近年在安全領域所受到之關注，美國制定《反制小型無人機系統戰略》包括在關鍵基礎設施的保護等層面上，目前偵測各種 UAV 的技術包括：(一) 光電、紅外線或聲音感測器；(二) 雷達偵測；(三) 偵測控制 UAV 之無線電訊號；由於其隱蔽性，偵測及預警需綜合運用。目前用以反制 UAV 的手段則有干擾無線電頻率、衛星導航系統等方式，甚至可透過類似電磁手段俘獲無人機。



圖 4.5 無人機測試及反制無人機試驗場(EPRI 夏洛特研究中心)

五、氣體絕緣開關設備 SF₆ 替代氣體研究

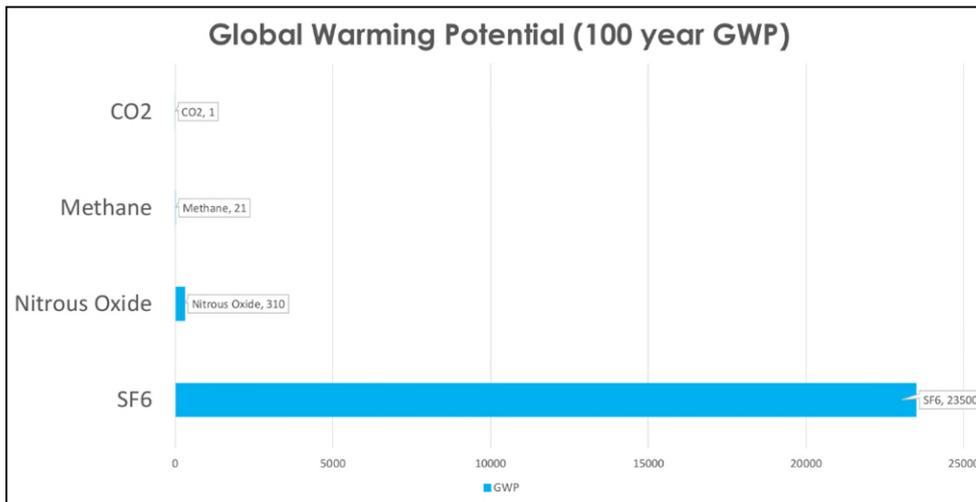
氣體絕緣開關設備(GIS,GAS Insulated Switchgear)已是現代電力系統常見的設施，因為體積小且安全性高。通常會以六氟化硫(SF₆)氣體作為絕緣介質，SF₆氣體具有良好的電氣絕緣性能和消弧性能，一般狀態之下無色無味對人體無害，卻屬溫室氣體不能隨意排放至大氣中恐會加劇溫室效應。EPRI 正在研究 SF₆ 新氣體替換技術，目前在夏洛特開發研究替換新的氣體混合物，因為若是使用回收不當，SF₆氣體極可能在高溫電弧作用下產生有毒物質，不但使電氣設備無法正常運作，同時也會危害到人體健康，SF₆氣體洩漏是電力業者必須嚴加注意的面向，不僅關係到電力系統的穩定，更是企業應盡到環境與健康的責任。



Industry Challenges

- Increased pressure to reduce SF₆
- There is no easy drop-in replacement
- There is no single alternative approach

The slide features three 3D renderings of GIS equipment: a blue and grey unit on the left, a unit with green accents in the center, and a green and grey unit at the bottom. The text is presented in three light blue rounded rectangular boxes on a dark blue background.



Two GIS separated for SF₆ Alternatives research



圖 4.6 GIS 之 SF₆ 氣體替換研究(EPRI 夏洛特研究中心)

圖



4.7 SF₆ 替代氣體分析與儲存(EPRI 夏洛特研究中心)

六、氣體絕緣斷路器 SF₆ 替代氣體研究

六氟化硫 GCB 斷路器 (Gas Circuit Breaker) 使用 SF₆ 作為斷路器的介質，可以在高壓電力系統中進行斷路操作，SF₆ 氣體優良的絕緣和滅弧性能，使 SF₆ 斷路器具有開斷能力強，適用於頻繁操作，無火災危險，機電磨損小之優異性能。為維護地球永續環保，EPRI 研究多種新的氣體混合物，並嘗試替代原有氣體。

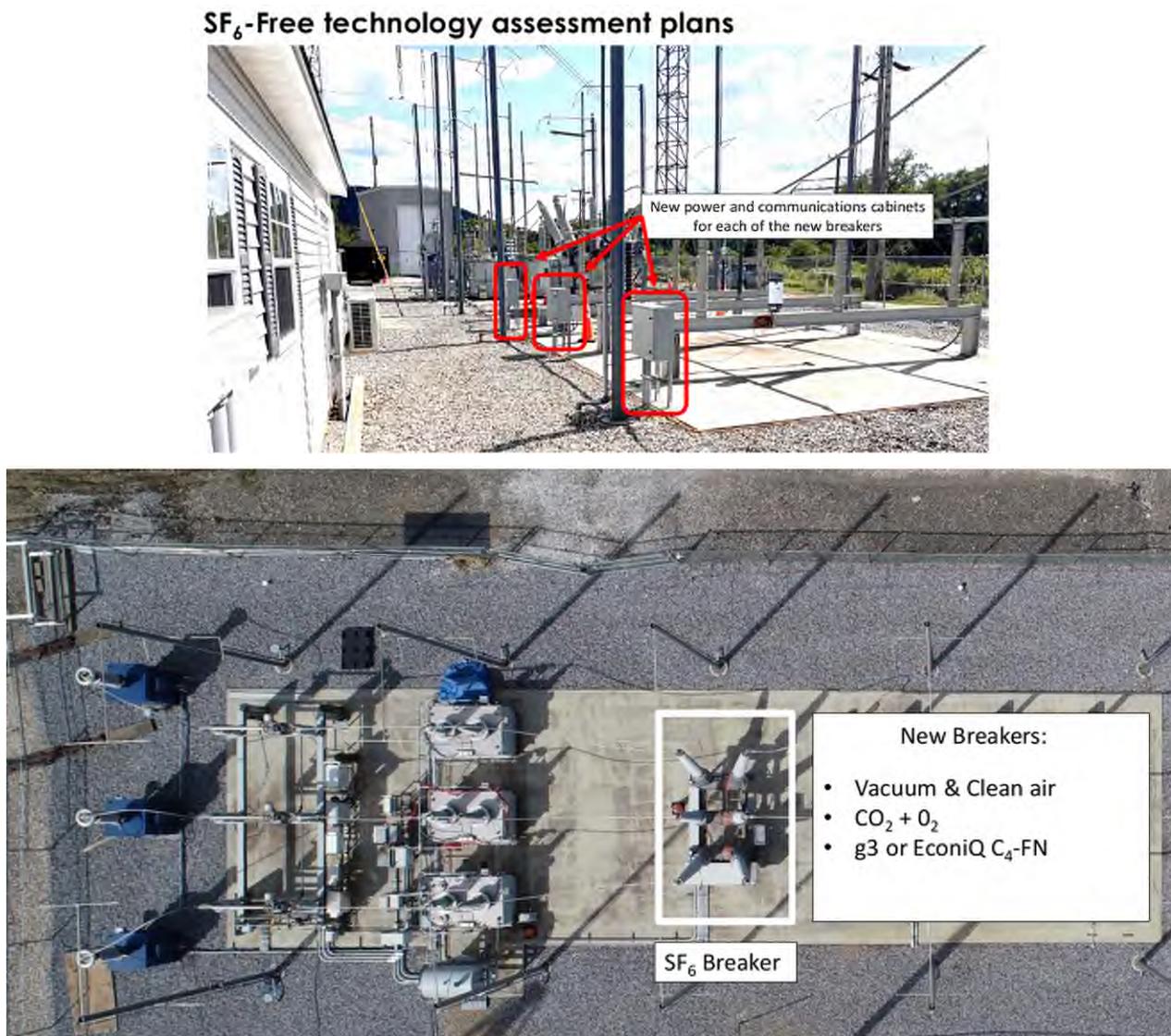


圖 4.8 SF₆ 替代氣體分析與儲存(EPRI 夏洛特研究中心)

七、變電設備耐蝕、耐雷、耐電壓研究

因應氣候極熱極冷變化，在實驗場採用每隔 5 分鐘噴灑雨水模擬變電所鏽蝕環境，也測試讓其承受強大電壓脈衝及提高交流過電壓到達 110% 耐受度持續 12 個月，EPRI 將通過所有這些加速老化測試，以了解變電設備之整體生命週期呈現。

Full lifetime of mechanism operations: 2,000 operations



Rain Spray



圖 4.9 變電設備雨霧鏽蝕實驗場(EPRI 夏洛特研究中心)

Lightning impulses



圖 4.10 變電設備雷擊脈衝實驗場(EPRI 夏洛特研究中心)

AC Overvoltages: 110% for 6 weeks in the 12 month period



圖 4.11 變電設備過電壓實驗場(EPRI 夏洛特研究中心)

伍、地下電纜研究項目介紹 (Program 36)

EPRI 地下電纜研究團隊藉由降低運維成本、增加輸電可靠度、研發新應用技術、增加送電容量等方式來提高可靠度及安全性，透過應用新的檢查方法和監控技術，維護人員可以更有效地瞭解電纜在什麼環境下容易受到損壞，並進行選擇性升級和改造，以利有效維護延長壽命。以下介紹位於 EPRI 夏洛特的實驗室中，研究有關對於交連 XLPE 電纜、Laminar dielectric cable(例如充油 OF 電纜)、直交流海底電纜相關技術的各種面向。

Drivers				
Reduced Costs	Improved Reliability	New Technologies	Increased Capacity	
Research Portfolio				
001: Design, Construction, Rating, & O&M	002: Extruded Dielectric Cable Systems	003: Laminar Dielectric Cable Systems	006: Principles and Practices	008: HVDC/AC Submarine Cable Systems
				

EPRI Laboratory Facilities – Underground Transmission

Test Facility	Location
Extruded Cable Thermo-mechanical	Charlotte
Extruded Cable Mechanical Parameter	Lenox
Cable Mechanical Bending	Charlotte
Extruded Cable Termination Aging	Lenox
Vault Component Corrosion	Charlotte
Buried Pipe Corrosion	Charlotte
Full-scale Test for Paper Cable	Lenox
Monitoring Research	Charlotte
Manhole Robotic Inspection	Charlotte
Cable Joint and Clamp Mechanical	Charlotte
Cable Failure Root Cause Study	Charlotte



圖 5.1 地下電纜研究面向(EPRI 夏洛特研究中心)

一、地下電纜創新技術研究

EPRI 已有部分技術獲得美國專利：(1)地下人孔之 XLPE 電纜陰極保護(Cathodic Protection)，以外加電壓方式將電極腐蝕電位轉移至較不易氧化性之區域，以降低腐蝕的技術。(2)鋼管內電纜之鋼管破裂及更換新管技術。(3)地下人孔之機器人檢視技術，無需人員進出感電和缺氧密閉空間，包含機器人軌道系統、無人機系統(UAS)、無人水下航行器(UUV)、360°相機攝影技術；另有部分技術進入原型開發階段：(4)局部鋼管電纜腐蝕監測，即使鋼管表面塗層和陰極保護仍會受到腐蝕，針對腐蝕保護、塗層完整性和陰極保護效果的檢查監測。(5)充油電纜油中溶解氣體分析(Dissolved Gas Analysis，簡稱 DGA)，是絕緣狀態監測最常使用的作法，然而所有這些技術均需仰賴複雜的數學運算與經驗判讀。



圖 5.2 地下電纜創新技術(EPRI 夏洛特研究中心)

二、2025 主要研究議題 I

EPRI 輸電項目 P36.001 最新議題介紹：(1) 電纜材料性能可靠度。(2) 地下電纜設計工作站 (Underground Transmission Workstation) 軟體開發。(3) 充油電纜接續 XLPE 異種轉換研究。(4) 電纜工程施工和安裝程序。(5) 機器人人孔檢查技術。(6) 地下電纜的性能和故障模式研究。



圖 5.3 P36.001 地下電纜 2025 技術(EPRI 夏洛特研究中心)

三、2025 主要研究議題 II

EPRI 輸電項目 P36.002 最新議題介紹：(1) 電纜材料溫度耐受特性設計。(2) 進階地下電纜監控和檢查技術。(3) XLPE 電纜材質老化特性研究。(4) 地下人孔腐蝕檢查評估和修復技術。(5) XLPE 電纜、電纜終端、電纜接頭設備資產管理。

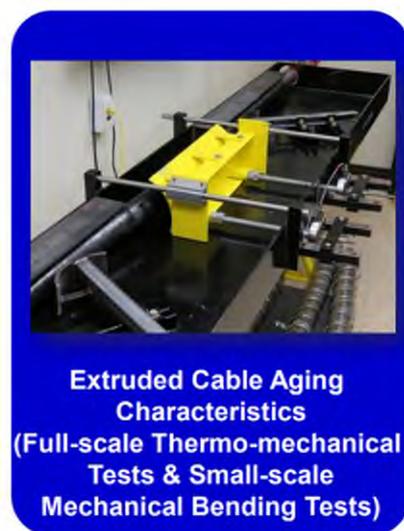
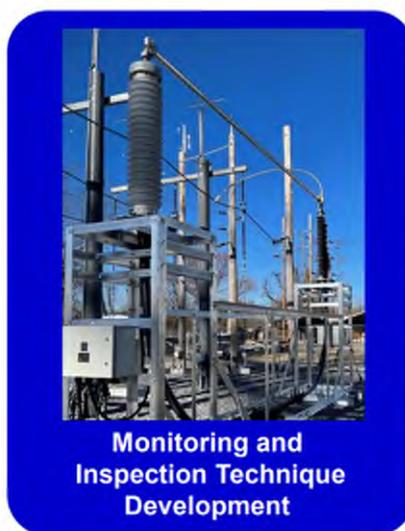


圖 5.4 P36.002 地下電纜 2025 技術(EPRI 夏洛特研究中心)

四、2025 主要研究議題 III

EPRI 輸電項目 P36.002 最新議題介紹：(1)檢查、評估和減緩地下鋼管腐蝕技術。(2)充油電纜油中氣體 DGA 線上及離線狀態評估。(3)充油電纜監控和檢查技術。(4)電纜絕緣油絕緣層特性研究。(5)充油電纜油中氣體 DGA 分析技術。(6)舊充油電纜替換資材之性能研究。(7)充油電纜絕緣失效根本原因研究。

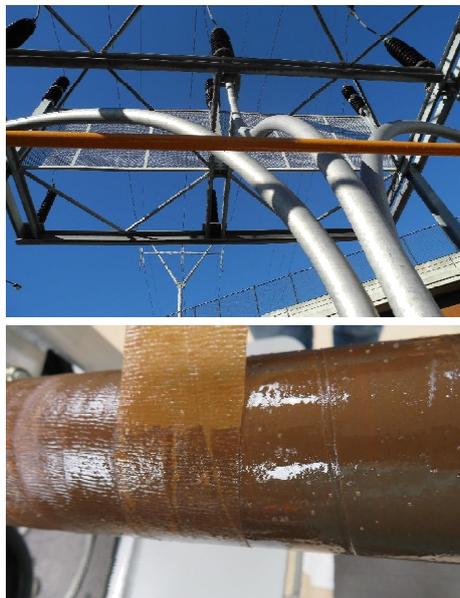


圖 5.5 P36.003 地下電纜 2025 技術(EPRI 夏洛特研究中心)

五、2025 主要研究議題 VI

EPRI 輸電項目 P36.008 最新議題介紹：(1)高壓直流電 (HVDC) 傳輸技術。(2)地下電纜設計軟體 (UTW) 高壓直流電額定電流評估。(3) AC 及 DC 地下電纜離線故障定位系統。(4)海上風力發電之海底電纜傳輸技術及海底電纜 HVAC、HVDC 腐蝕研究。

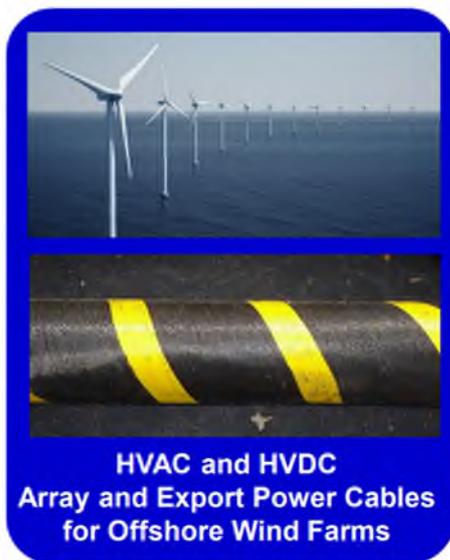


圖 5.6 P36.008 地下電纜 2025 技術(EPRI 夏洛特研究中心)

六、地下電纜的壽命 (ELS) 評估

EPRI 藉由蒐集評估各國用戶的經驗及研究數據，歸納計算溫度造成絕緣老化的關鍵參數，以做出保守壽命估計(Expected Service Life): (1) 高壓充液電纜(High-pressure Liquid-filled Cables)，計算電纜溫度造成絕緣老化程度。如電纜管路沒有液體洩漏，腐蝕塗層和陰極保護系統正常，電纜接頭、電纜終端沒有腐蝕現象，則建議增加 20 年延壽。(2) 低壓充液電纜(Low-pressure Liquid-filled Cables)，如負載低於設計額定電流值，且液體洩漏導致電纜加壓困難，需長期監測液體洩漏情形和充液儲存設備的狀況，EPRI 建議開始設計更換 XLPE 電纜於 10 年內更換完成。



圖 5.7 地下電纜 (ELS) 評估技術(EPRI 夏洛特研究中心)

七、輸電地下電纜與配電管路交叉的降額定計算

因應地下輸配電線路交叉影響，EPRI 電纜設計軟體 (UTW) 可提供降額定計算 (de-rating) 以延長電纜的壽命，運作在小於額定電流或是小於額定電壓方式，藉由降額效應運算提供多種線路配置的結果，以利設計人員更好理解降額效應影響，提供最佳地下電纜配置及性能。

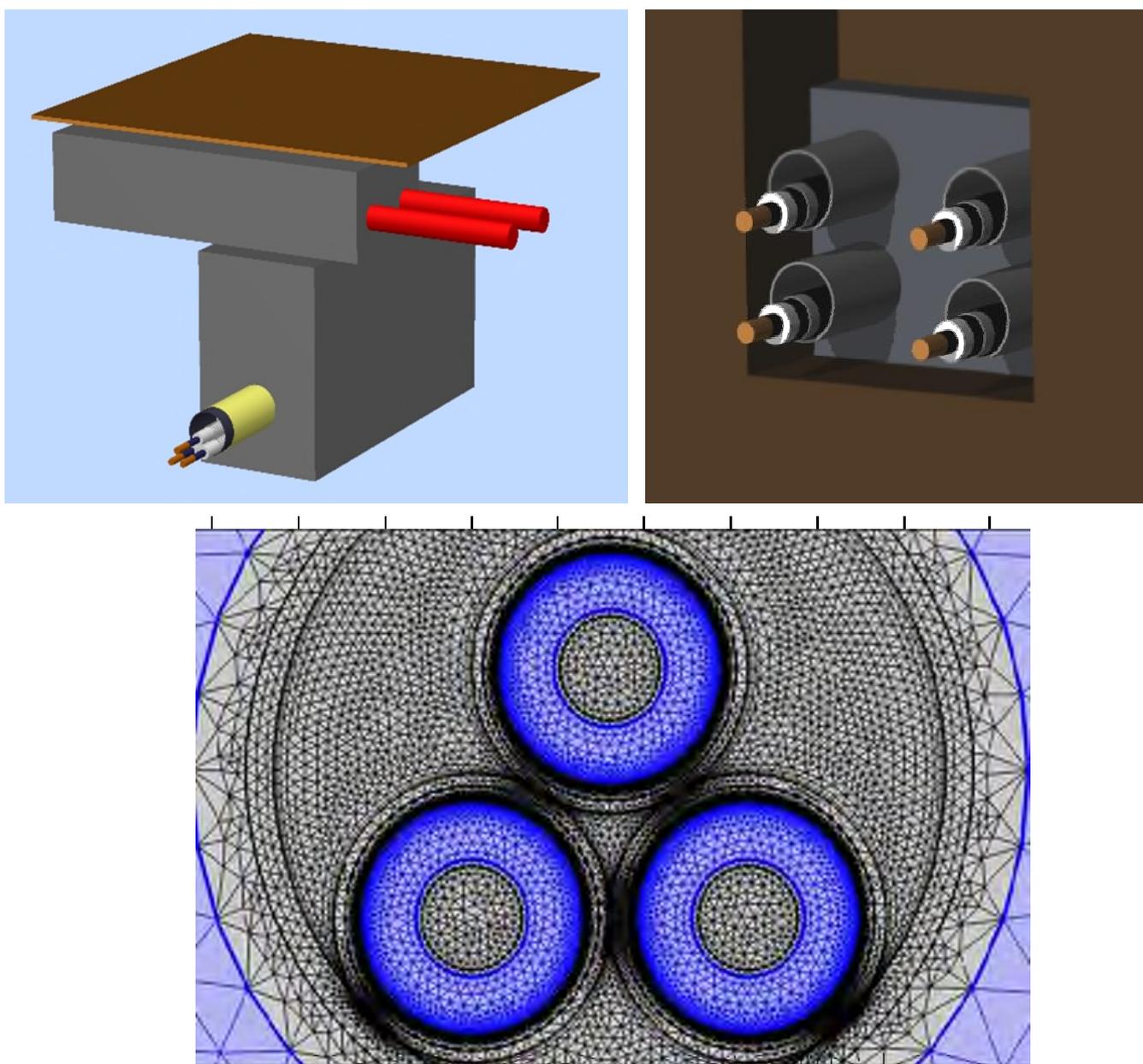


圖 5.8 電纜設計軟體 (UTW) 降額定計算評估 (EPRI 夏洛特研究中心)

八、地下輸電電纜系統的磁場與設計管理

為更清楚瞭解地下電纜配置的磁場影響，EPRI 電纜設計軟體 (UTW) 可提供電磁效應設計多種電纜配置，因應都市用地取得困難，在多迴線電纜需配置於鄰近區間時，透過 RST 三相配置改善原有設計，提高整體系統輸電效率並降低長期維護成本。

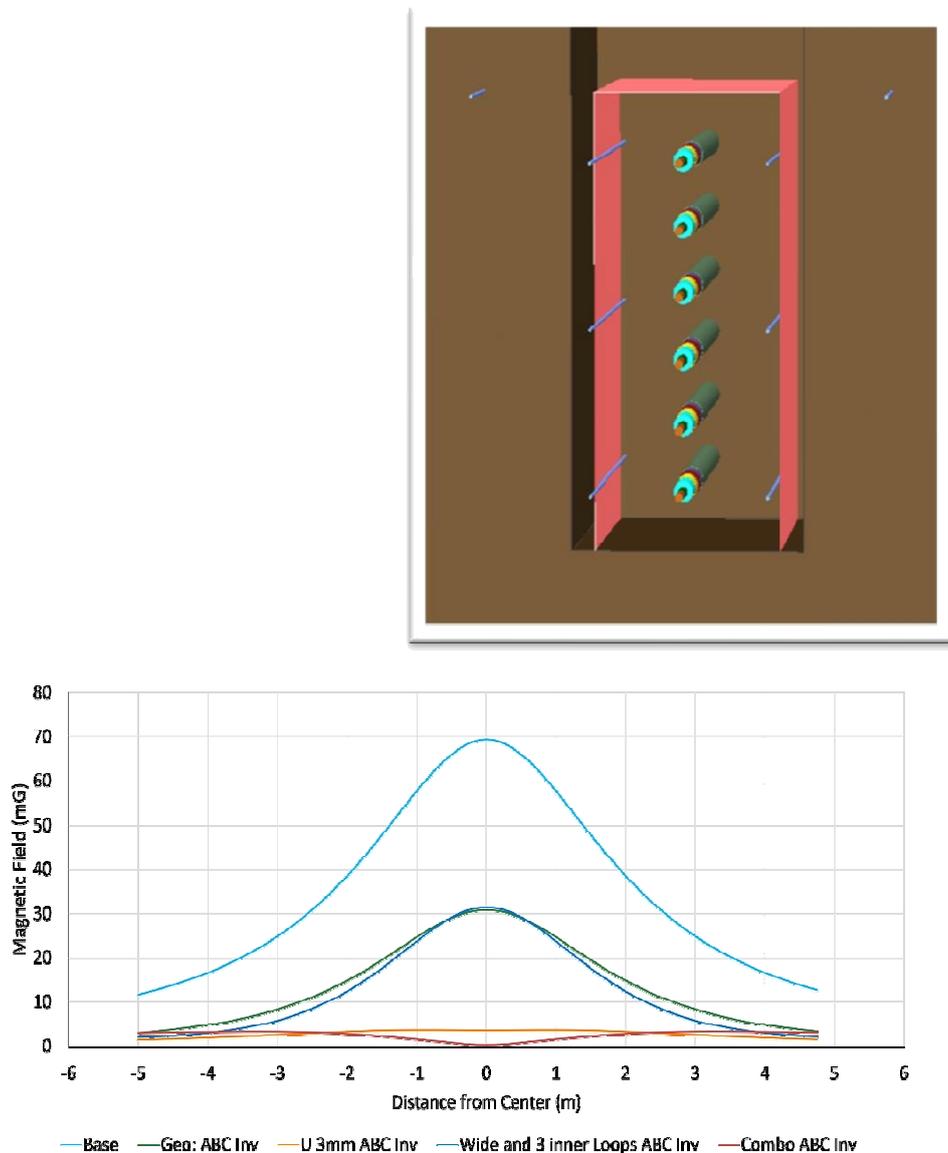


圖 5.9 電纜設計軟體 (UTW) 電磁效應評估 (EPRI 夏洛特研究中心)

四、心得與建議

1. EPRI 研究內容相當廣泛，本次實習過程除了針對各項議題進行討論外，亦有參觀諾克斯維爾及夏洛特的電力實驗室，其中除了各項傳統電力設備的實驗，包含導體材料、絕緣礙子材料、焊接機械性質及 GIS 氣體等測試，尚包含智慧家電、電動車輛、無人機及機器人的應用，都讓我們大開眼界，也了解未來前瞻科技的應用發展。
2. 極端氣候的影響是關乎全球的議題，EPRI Climate READi(Resilience and Adaptation initiative)致力於發展一整合且永續的方法，從氣候資料的蒐集及指引、能源系統資產的脆弱性評估到韌性/適應性的計畫決策等各階段，以求能減緩氣候變遷的衝擊，因氣候變遷為一全球性的議題，後續本公司亦可參與 EPRI Climate READi 研究計畫，以求能在極端氣候下達到電網韌性最佳化。
3. 在坡地災害如落石，土石流處置影響上，本次 EPRI 參訪是以雪崩案件為類比，其處置是採用塔身結構設計時考慮受雪崩滑移之側向力考慮，與過往落石，土石崩塌時以加高塔基露見段設計思維不同，亦或許是雪崩滑移不似落石有較大的衝擊力可能造成撞擊破壞，方可以塔身結構作抵抗。另懸吊索取代支持物的設計亦為一項打破傳統思維的設計模式，其思維值得我們借鏡。
4. SF₆ 氣體絕緣開關設備及 SF₆GCB 斷路器，以六氟化硫為絕緣介質，屬溫室氣體排放會加劇溫室效應。夏洛特中心正在研究替換 SF₆ 之新的氣體

混合物技術，EPRI 變電部門技術人員亦希望能與本公司展開後續合作，以維護地球永續環保及企業責任。

5. 本公司已有建置台澎海底電纜目前已營運送電中，惟海底電纜相關維護及運營無過往經驗參考，夏洛特中心已有針對海上風力發電之海底電纜傳輸技術及腐蝕研究的研究經驗，如有後續維護相關困難亦可接洽合作機會。

五、延伸討論

1. 參考 EPRI Climate READi(Resilience and Adaptation initiative)

針對極端氣候所擬定之氣候資料蒐集及導引，結合中央氣象局氣候的預測模式提升可靠度，本處將提送「應用人工智慧評估輸電鐵塔基礎健全度以輔助防災決策之研究」，導入各類地質危害風險圖資及監測數據與環境氣候等資料，建構輔助防災機制以期能快速聚焦於具高風險性塔基，使得有限之人力及物力能發揮最大效益。輸電鐵塔基礎現行採用顏色分級之維護管理模式，雖現已將轄管近 2 萬座鐵塔給予顏色分級管理，並將風險等級(紅、橙色)較高之鐵塔持續安裝塔基邊坡安全監測設備，然考量人力及物力有限情況下，且為達成災害預防及提前示警目的，將引入人工智慧分析模式用以評估建構適切之輸電鐵塔基礎健全度與決策輔助機制，以提供後續改善治理優先順序。

2. 深入瞭解 EPRI 監測傳輸方式與供電處雷同，本處輸電塔基安全監測的

佈置，以雙軸自動傾斜儀、雨量計及溫濕度計為必要安裝之標準配備，風速風向計則視甲方需求選擇安裝，於指定之塔基及其鄰近邊坡安裝監測設備，並將各監測設備所測得之數據匯集後，採 4G 傳輸模式直接傳送至甲方指定之伺服器資料庫內。若監測塔所在位置無 4G 訊號或不佳時，亦可採用等無線傳輸方式增設中繼站；監測塔監測資料經由無線傳輸模組(Lora、ZigBee)發送至轉站或中繼站，再由其透過 4G 回傳至甲方指定之資料庫。

3. 洽詢 EPRI 對於無 4G 訊號時之傳輸建議，過往亦嘗試以衛星傳輸訊號係可行方案，惟費用過高無法廣為布設。而供電處已提送「衛星鏈傳輸應用之可行性研究」，為因應極端氣候異常危及供電穩定及輸電鐵塔安全，擬於人員不易到達之新東西線選取數座現地無通訊訊號之場所安裝環境安全監測設備，並應用衛星鏈傳輸技術做為監測資料傳輸方式之可行性。克服偏遠山區人員不易到達及無通訊訊號之場域，導入應用衛星鏈傳輸技術，並結合環境監測儀器量測結果，建立長時監測數據並結合輸電線路歷史資料，以建構大數據之預警模式。今已於 345kV 大觀、明潭～鳳林線 166、#171 完成衛星傳輸安全監測實地安裝測試。
4. EPRI 有關無人機技術的應用上，包含搭載紅外線熱影像應用研究，供電處目前參採可行技術並洽詢國內廠商自主研發無人機熱影像應用，利用無人機搭配雙光鏡頭載具(可見光+熱影像儀功能)，拍攝礙子及導線接點處溫度，洩漏電流對絕緣影響因子，拍攝方式運用雙光鏡頭，可以針對溫度可疑點，切換可見光功能細部拍攝檢查，以精進線路巡檢新技術。



雙光鏡頭同時實際拍攝畫面(中寮-瀾力線 電塔)2024/06/18

5. 有關坡地災害防治上，EPRI 以美加常見的雪崩案為案例做延伸討論，當然如果可以在選址上就避免於雪崩潛勢區設置線路支持物，即可避免後續維護上之困難，其參考 CAA(Canadian Avalanche Association) 分類建議，將雪崩分類為 5 類：

Table 1. Categorization of snow avalanches (CAA 2002).

Size	Description	M (t)	I (kPa)	L (m)
1	Relatively harmless to people.	<10	1	10
2	Could burry, injure or kill a person.	10 ²	10	100
3	Could bury a car, destroy a small building, or break a few trees.	10 ³	100	1000
4	Could destroy a railway car, large truck, several buildings or forest with an area up to 4 ha.	10 ⁴	500	2000
5	Could destroy a village or forest up to 40ha.	10 ⁵	1000	3000

Note: M is the typical snow mass; I is the impact pressure defined as the product of the avalanche density and the avalanche velocity squared. L is the typical path length.

其中第 1、2 類因規模及危害較低，線路支持物可直接設置較不受影響，而分類 3、4 則須進一步於設計時考慮雪崩之危害及後續維護之成本，而分類 5 則不建議設置支持物。現階段本公司選址皆會套匯地質敏感區及土石流潛勢區域，儘量避免於高坡地災害區域內設置鐵塔基礎，避免後續維護困難。但若遭遇無法避免之情形，或在選址考量上可比照其做法，建立土石流危害程度分類(潛勢因子)與鐵塔基礎設置之關係，作為後續設計之依據。

6. 在地震及抗風設計上，目前本公司在輸電線路塔基設計模組(found2.0)中皆已依國內規範考量地震力及受風力的設計載重，同時在即時監測儀器的布設上亦設置風速計作進一步的現地觀測，其在地震及風力危害上，應可滿足塔基強度需求，而有關導線素線斷面形狀耐風設計，應尚於 EPRI 研究階段，目前還未實際於輸電線路應用。

7. 在腐蝕防治上，因本公司山區塔基部分屬土壤基礎，其巡視上需注意基礎角鐵的腐蝕程度，現階段維護上皆採用根卷保護方式，延長其使用年限。而在輸電導線腐蝕防治上可參考圖 3.14 採用 ISO Std9224 之評估公式，於 0 至 76 年屬塗層厚度之劣化，而 76 年以上屬核心強度之損失，EPRI 建議於導線送電服務滿 60 年至 76 年時即須進一步的評估劣化情形，而本公司自行訂定點檢汰換年限依維護等級 A~E 級對應為 40~10 年，則更為嚴謹。
8. 在混凝土基礎劣化補強方面，現階段於線路巡視時如發現基礎有裂縫情形時，皆會回報土木部門作進一步之檢查，因目前國內混凝土澆置時，皆會管控其氯離子標準，除非已發生鋼筋腐蝕將混凝土保護層膨脹開裂之情形，一般皆未針對混凝土基礎作 PH 值檢測。在混凝土強度非破壞檢視上，建議可採用槌試法進行強度檢測，同時混凝土裂縫勘查上一併針對塔基環境所受到之外力或變形進行檢視，針對現場環境、邊坡及水文因子評估，除對塔基裂縫進行補強之外，尚須針對源頭發生原因進行處置。
9. EPRI 研究利用 OPGW 技術檢視及偵測環境變因，利用萊諾克斯實驗室架設線路設備進行實驗，檢測環境條件的信號作為早期警報，經與 EPRI 輸電計畫經理 Ms. Rachel Moore 聯繫建議參加 P35.001，內容有歷年研究包括 Drone 遙控檢查及監測架空輸電線路的成果及運維指引 (Yellow Book) 等實用報告，也建議編列 1~3 年預算，以利獲得每年更

新的內容，參考信件如述:I think encouraging them to join 35.001 is a good idea. 35.001 focuses on the inspection and assessment of the entire overhead transmission system. Yearly deliverables include The Yellow Book as well as field guides that are updated regularly. Additionally, multi-year participation ensures that they will be able to collaboratively guide the research into the areas that they deem most needed.