

出國報告（出國類別：開會）

參加第 33 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會

服務機關：台灣電力公司綜合研究所

姓名職稱：鍾年勉 所長

陳曉薇 研究發展企劃室主任

高全盛 機械資深研究專員

張書維 資深化學研究專員

張翔琳 企劃控制專員

吳承翰 電機研究專員

吳浩平 機械助理研究專員

羅尹孜 電機工程專員

楊宗霖 企劃控制專員

派赴國家/地區：日本

出國期間：112 年 9 月 5 日至 112 年 9 月 8 日

報告日期：112 年 11 月 16 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：

參加第 33 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會

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/人力資源處/翁玉靜/(02)2366-7685

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話

鍾年勉/台灣電力公司/綜合研究所/所長/ (02)2360-1001

陳曉薇/台灣電力公司/綜合研究所/研究發展企劃室主任/ (02)2360-1170

高全盛/台灣電力公司/綜合研究所/機械資深研究專員/ (02)8078-2208

張書維/台灣電力公司/綜合研究所/資深化學研究專員/ (02)8078-2252

張翔琳/台灣電力公司/綜合研究所/企劃控制專員/ (02)2360-1183

吳承翰/台灣電力公司/綜合研究所/電機研究專員/ (02)8078-2269

吳浩平/台灣電力公司/綜合研究所/機械助理研究專員/ (02)8078-2295

羅尹孜/台灣電力公司/綜合研究所/電機工程專員/ (02)2360-1218

楊宗霖/台灣電力公司/綜合研究所/企劃控制專員/ (02)2360-1252

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會 6 其他

出國期間：112 年 9 月 5-8 日

派赴國家/地區：日本/鎌倉市、橫須賀市

報告日期：112 年 11 月 16 日

關鍵詞：淨零轉型、研發創新策略、技術預測、電力系統、微電網、儲能系統

內容摘要：(二百至三百字)

1. 本公司與日本電力中央研究所 (CRIEPI) 長期以來依據雙方簽訂之技術合作合約，每年輪流舉辦技術交流年會，並視需要進行資料交換、人員互訪和邀請專家指導等相關研發活動。
2. 今年第 33 屆技術交流年會輪由日方主辦，討論議題為 R&D Innovation Strategy、Power Cables、Power Analysis Simulations、Secondary Battery、Sector Coupling、Gas Turbine、Boiler Maintenance。
3. 為能進一步瞭解電力技術之研發趨勢，本公司由綜研所所長率團參加本

屆年會，加強與日本技術交流並瞭解電力技術之研發趨勢，對本公司研發工作與計畫執行成效有相當助益。

目錄

一、出國任務與行程	1
二、會議內容	2
(一) R&D INNOVATION STRATEGY	2
(二) POWER CABLES	9
(三) POWER ANALYSIS SIMULATIONS ..	15
(四) SECONDARY BATTERY	23
(五) SECTOR COUPLING	26
(六) GAS TURBINE	33
(七) BOILER MAINTENANCE	38
三、技術參訪	43
四、心得及建議	47

一、出國任務與行程

本公司與日本電力中央研究所(CRIEPI)長期以來依據雙方簽訂之技術合作合約，每年輪流舉辦技術交流年會，並視需要進行資料交換、人員互訪和邀請專家指導等相關研發活動，有助持續獲取電業研發新知和提升研發水平。

第 33 屆日本電力中央研究所技術交流年會(The 33rd CRIEPI/TPC General Meeting)由 CRIEPI 於 112 年 9 月 5~8 日在日本鎌倉及橫須賀舉辦。本公司由綜研所鍾所長率領 8 位人員出席，討論議題共有七項：R&D Innovation Strategy、Power Cables、Power Analysis Simulations、Secondary Battery、Sector Coupling、Gas Turbine、Boiler Maintenance，台日雙方均針對各主題指派人員進行簡報與交流。透過本次電力研究發展相關議題之經驗交流與分享，本公司成功加強與日本技術交流並瞭解電力技術之研發趨勢，相關成果可作為研發策略規劃及技術發展之參考，以提升本公司研發能力。

除議題討論外，主辦單位另外安排至 CRIEPI 橫須賀所區進行技術參訪，參訪項目包括：XLPE 長電纜劣化試驗 (Long Length XLPE Cable Deterioration Test)、先進配電系統試驗(Advanced Distribution Grid Test)、鋰二次電池性能評估測試(Lithium Secondary Battery Performance Evaluation Testing Equipment)及真實結構樣本的彎曲和內壓 (Bending & Internal Pressure on Real Structural Samples)等設備。

二、會議內容

(一)R&D Innovation Strategy

在碳排放淨零的趨勢下，創新成為推動改變的重要工具。這也是本公司與CRIEPI 經歷多年交流，雙方首次針對研發創新策略進行交流。本公司由綜研所研發室陳曉薇主任負責本議題之交流，其簡報題目為「R&D Innovation Strategy of TPC」。

在企業管理的價值鏈中，研發發揮了至關重要的作用，尤其是研發策略和創新育成，可以有效提升公司競爭力。明確的研發策略有助於更精確地分配資源，以應對未來的競爭挑戰。此外，在創新育成方面本公司採用開放創新概念，加速內部技術商業化，將研發成果轉化為新的業務並增加收入，以適應市場需求的不斷變化(如圖 1)。

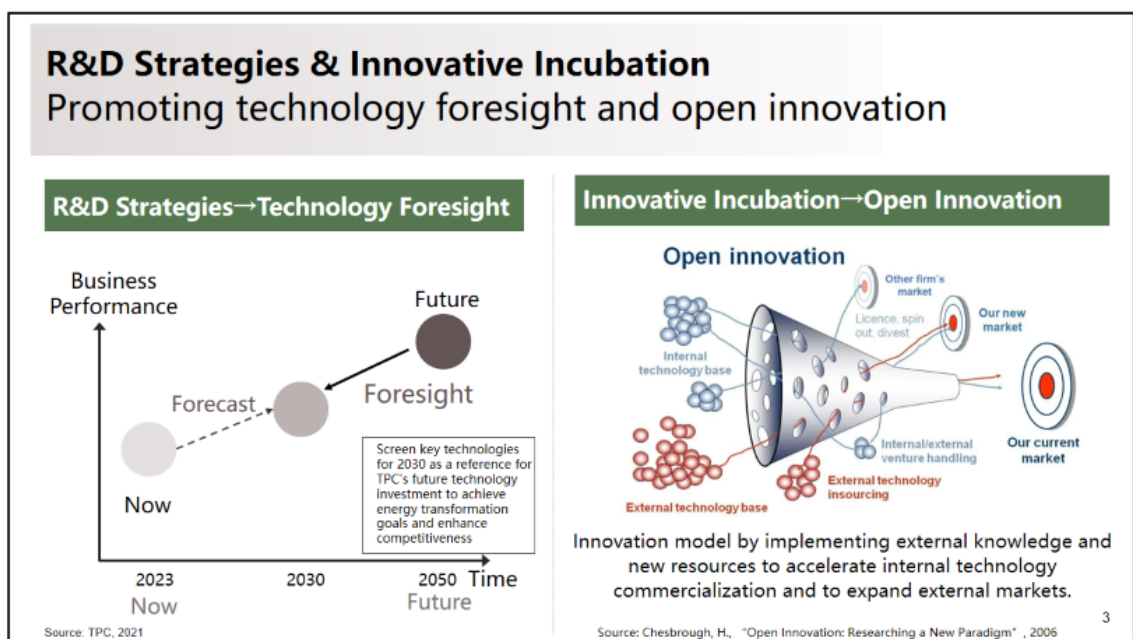


圖 1 本公司兩大創新主軸-研發策略及創新育成

面對 2050 淨零挑戰，還有許多未知的技術尚未發展，而如何早期識別這些技術非常重要，故本公司於研發策略上，推動技術趨勢預測，蒐集了國際 13 大指標電力公司以及 9 家科研機構前瞻技術發展項目作為參考，針對台灣與國外電力環境及趨勢進行現況分析，以掌握國內外電力市場趨勢及發展，並了解目前電力技術應用情形，及未來前瞻電力技術發展趨勢。接著，本公司利用科技管理的方法學，分別採用德菲法問卷、層級分析法（AHP）問卷結合國際能源署（IEA）推薦的能源技術路徑圖進行繪製。其規劃核心在：(1) 提高內部人員參與度；(2) 引導企業將有限資源集中使用，以利形成組織共識與成果被落實。來聚焦 Top-down 及 bottom-up 的共識，為未來所需之前瞻電力技術進行篩選及排序，並擬定其策略佈局與技術藍圖(如圖 2 研究流程)。

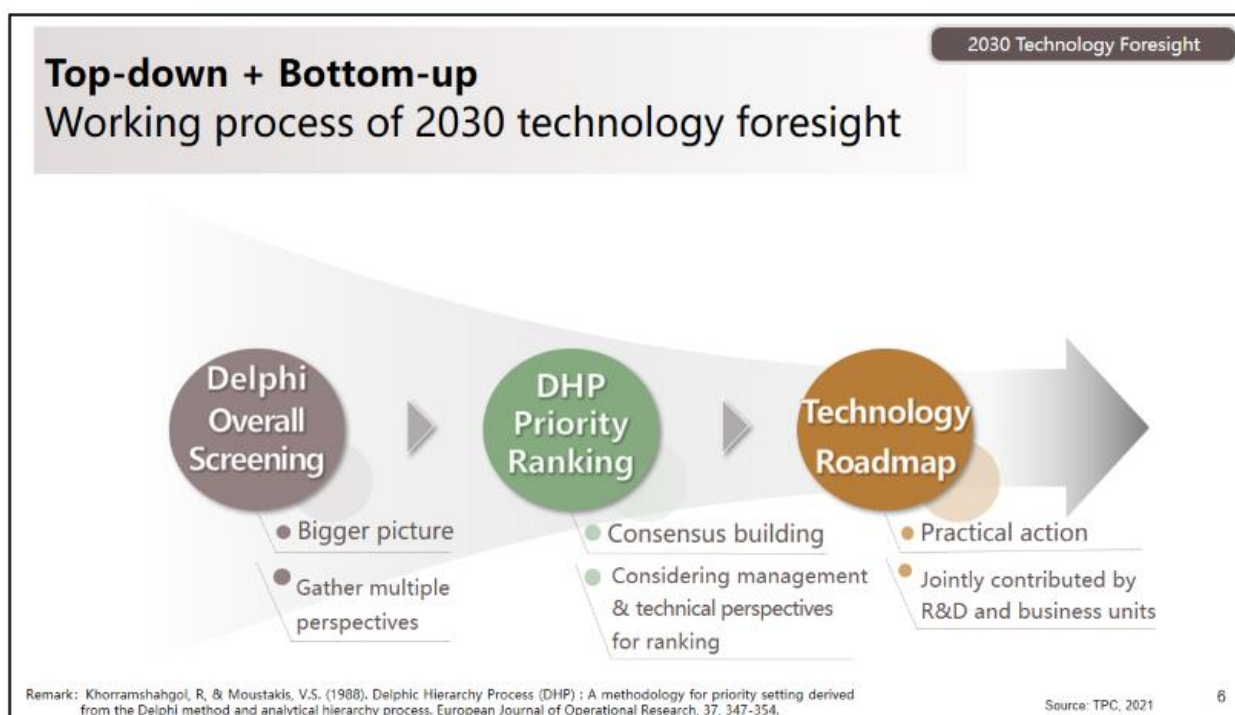


圖 2 台電公司 2030 前瞻電力技術預測研究流程

最後透過情境設定，由研發端及業務端共同研擬技術路徑圖，以確保此研究務實可行，並將結果分類成發電端、電網側、用戶端及綜合應用呈現 2030 年應具備之 11 項電力技術，作為公司未來達成能源轉型目標未來電力技術投入參考依據，如圖 3 研究結果。

Results of TPC in 2030 Technology Foresight -Selecting the top 11 technologies that should be prioritized for layout in 2030												
Ranking internal and external experts with Delphi (questionnaire analysis results)				Internal experts DHP score (with DHP quantization result)								
Technology	Technology Item	Application grouping	Total	Sort	Generation side (26.7)	Score	Power grid (24.6)	Score	User side(26.4)	Score	Comprehensive application (22.8)	Score
1	Smart Generation and Dispatch	Generation Side	475									
2	Advanced Grid Management	Power Grid	442	1	Smart generation and dispatch	6.9	Advanced grid management	8.2	Demand-side management	10.4	Big data applications	5.5
3	Energy Storage Devices	Power Grid	435									
4	Smart Transmission Dispatch	Power Grid	431									
5	Big Data Applications	Comprehensive Application	427	2	Distributed renewable generation	5.3	Smart transmission dispatch	7.8	Power purchase agreement	6.5	Artificial intelligence	4.0
6	Distributed Renewable Generation	Generation Side	393									
7	Demand-Side Management	User Side	382	3	Offshore wind energy	4.5	Grid and home cybersecurity	4.8	Trading and marketing technology	6.0	Internet of things, iot	3.9
8	Grid and Home Cybersecurity	Power Grid	336									
9	Artificial Intelligence	Comprehensive Application	256	4	Advanced PV	4.1	Energy storage devices	3.7	EV composite application mode	3.5	Virtual power plant	3.8
10	Offshore Wind Energy	Generation Side	247									
11	EV Composite Application Mode	User Side	232	5	Green hydrogen and hydrogen storage	3.2					Wireless sensors	2.9
12	Internet of Things, IoT	Comprehensive Application	230									
13	Advanced PV	Generation Side	226	6	Carbon capture, utilization & storage	2.7					Blockchain	2.2
14	Virtual Power Plant	Comprehensive Application	216									
15	Blockchain	Comprehensive Application	203									
16	Green Hydrogen and Hydrogen Storage	Generation Side	185									
17	Carbon Capture, Utilization & Storage	Generation Side	144									
18	Trading and marketing technology	User Side	143									
19	Power Purchase Agreement	User Side	123									
20	Wireless Sensors	Comprehensive Application	114									

Technology roadmap workshop (Confirm the top 11 technologies)			
Generation side	Grid side	User side	Comprehensive application
Smart generation and dispatch	Advanced grid management	Demand-side management	Big data applications & AI
Distributed renewable generation	Smart transmission dispatch	Power purchase agreement	DERMS
	Energy storage devices	Trading and marketing technology	Home cybersecurity
*11 technologies are determined by experts in the workshop			
			8

圖 3 台電公司 2030 前瞻電力技術預測研究結果

有關本公司創新育成推動部分，目前主要以內部創新推動為主，包括：提案構想、加速驗證、商業驗證、創業審核，並應用開放式創新概念導入外部資源，開發出一套完整的流程，用於評估公司內部研發成果之創新成熟度，包含評估技術面、市場面、組織面之完備程度，共分為 9 個等級，以加速驗證商業模式及市場。

本所目前共有兩個創新創業案例，第一個案例為加速商業驗證，協助研發成果創新成熟度由 Level 3 提升到 level 5，如圖 4。此案例背景為本公司研發出將電廠發電廢棄物(底灰)經由高壓製成磚塊之技術，並希望將這項技術多元應用。其推動方法主要是由本所研發室及提案

團隊共同組成「虛擬團隊」，加上外部教練團的協助，以有效推進創新成熟度。本案分為各面向去檢視此項技術之成熟度提升情形，包含技術面應達到第一版實驗室產線規劃與產品規格，市場面為檢視商業計劃書之痛點確認、可行性、成本收益分析，組織面則是進行團隊人員績效檢核及診斷。

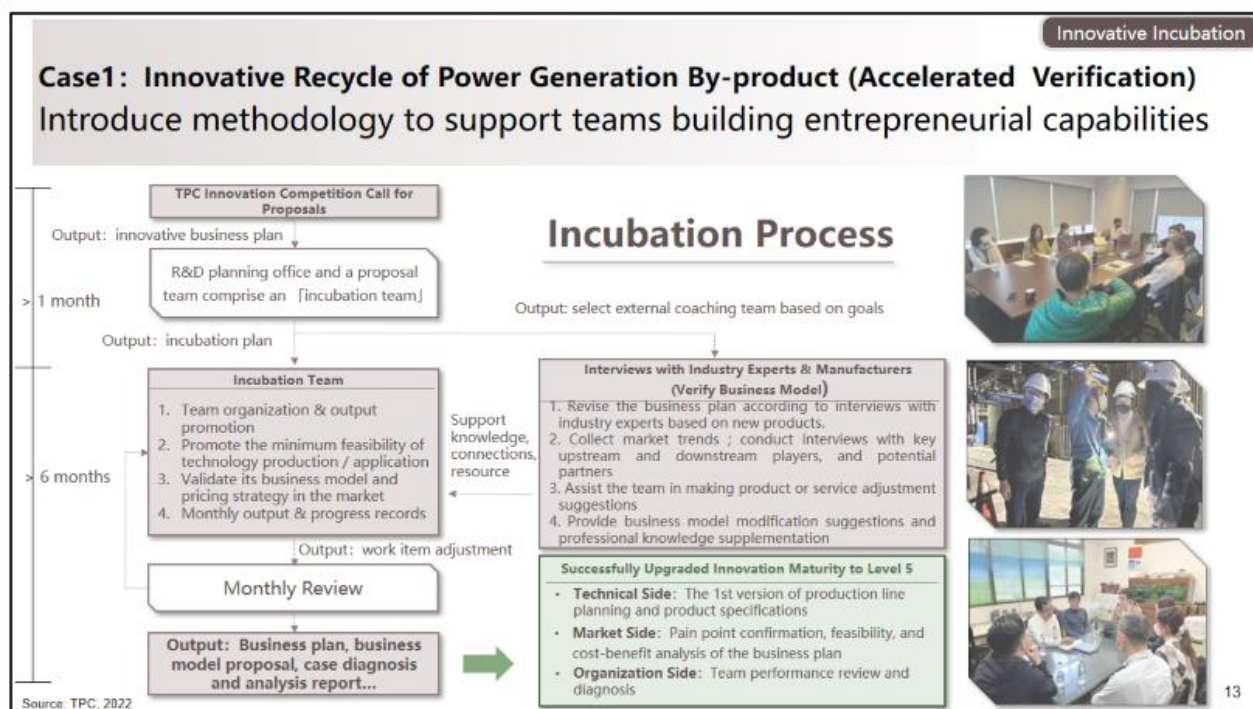


圖 4 創新案例一:加速商業驗證流程

第二個案例為協助本公司已成熟技術，思考成果技術多元應用之可行性與驗證新的商業模式及市場定位，如圖 5。此案例背景為本所葉片再生技術具商業化潛力，已為本公司創造多年亮眼成績，因應能源轉型影響產業變革速度加快，須加緊把握市場先機，規劃並確立葉片再生技術商業化路徑，繼而作為未來葉片再生多角化經營之規劃參考。為了朝此目標前進，本所研發室、研究室同仁共組虛擬團隊，透過新創加速器偵蒐工具，研析市場環境與技術應用趨勢，同時納入利害關係人見解，進行商業驗證，協助擬定本技術之最佳市場定位。

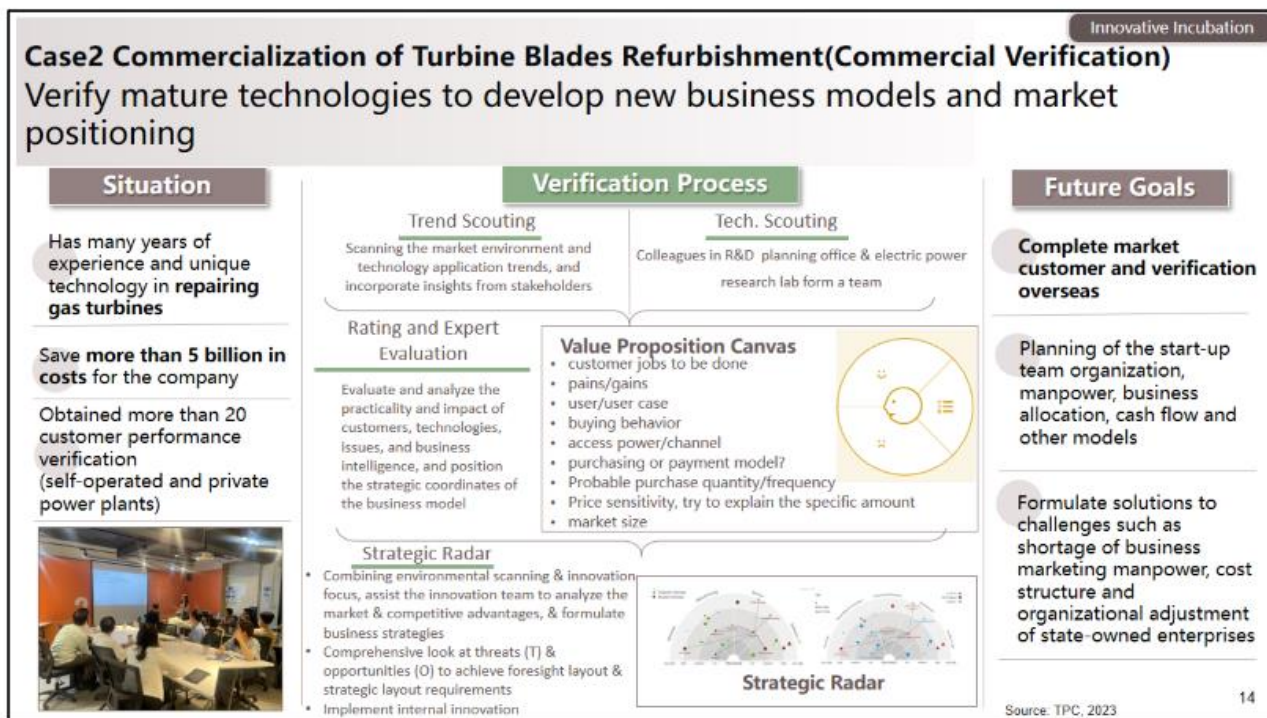


圖 5 創新案例二:驗證新商業模式

本公司未來希望持續透過研發策略及創新育成之布局，提升組織未來的競爭力。如同英國管理思想大師 Charles Handy 及財星 500 大企業御用策略師 Steve Tighe 提出之洞見，企業應積極透過創新作為來提升競爭力，創造企業經營之第二曲線，以適應外部環境的挑戰。

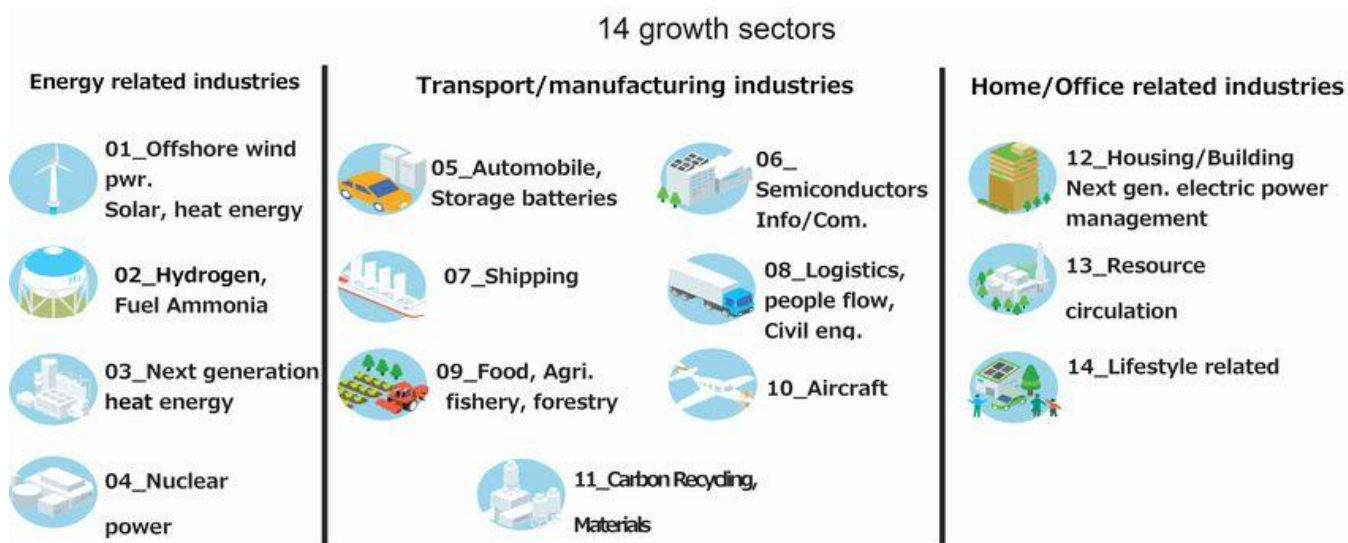
有關日方在本主題之簡報，由 CRIEPI 的社會經濟研究室 Dr. Hisanori Goto 分享日本電力產業在外部環境變化的背景下所面臨的挑戰和應對策略。其中包括電力系統的脫碳和分散化、電力市場改革、數位化以及人口減少等方面的挑戰。為了解決這些挑戰，報告提出了一系列解決方案：

電力供應的碳減排問題是一項關鍵挑戰，解決之道之一是開發新型發電技術，包括再生能源。日本電力公司積極引入這些新技術，以降低碳排放。電力輸配電系統的改進至關重要，特別是在廣泛引入再生能源的情況下，需要對其進行升級和改善。此外，電力需求端的變化也帶

來一系列挑戰，包括電氣化、分散式電力系統、虛擬電廠以及能源需求管理，這些都需要借助數位技術以滿足不斷變化的需求。

為了應對這些挑戰，日本電力公司也採取了創新策略。他們不僅依賴內部研發，還積極尋求外部創新，包括與初創企業的合作和投資。

2020 年 10 月，日本宣布將在 2050 年實現碳中和目標。為實現這一目標，必須大力加速在能源和工業領域的結構性變革，並進行大膽的創新投資。在此背景下，日本經濟產業省與其他部門合作，制定了旨在創造「經濟與環境良性循環」的產業政策—「綠色成長戰略（Green Growth Strategy）」，用以為企業營造有利的轉型與創新環境，引導民眾改變生活習慣，將減碳挑戰轉化為驅動整體經濟轉型成長的綠色成長契機，其戰略明定了 14 個優先發展戰略產業(如圖 6)，並提供了從工業和能源政策角度的行動計畫。



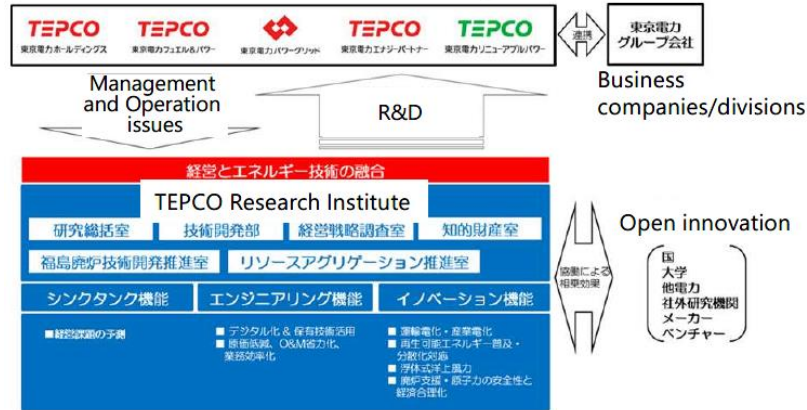
資料來源：Hisanori Goto, “R&D and Innovation Strategies of Japanese Electric Utilities”, 2023

圖 6 2050 年實現碳中和的綠色成長策略-14 項優先發展戰略產業

有關日本電力產業的現狀，CRIEPI 表示自 2011 年的東日本大地震和福島核事故以來，電力產業經歷了改革，但公司的盈利能力下降，成長策略面臨挑戰。不過，日本政府正在積極推動創新政策，包括支持大

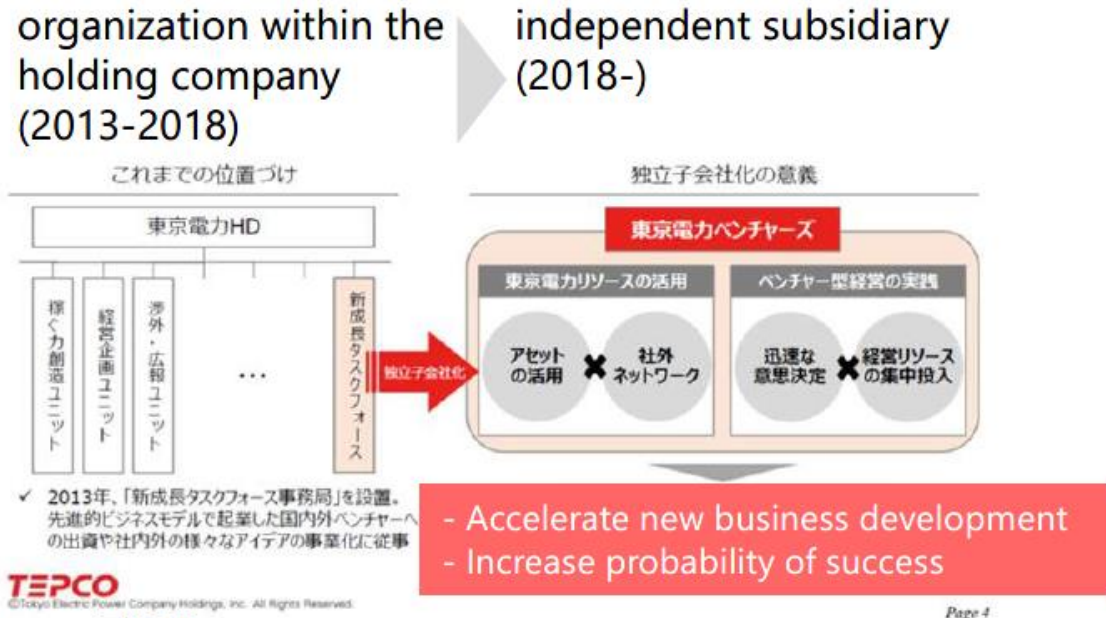
學創辦企業，以推動產業的創新。

日本東京電力公司(TEPCO)在應對電業挑戰時，透過研發和創新策略(如圖 7)，採用新技術和開發新業務(如圖 8)，來改善電力系統的永續性和碳排放情形，這對於日本實現綠色成長和碳中和目標至關重要。



資料來源：Hisanori Goto, “R&D and Innovation Strategies of Japanese Electric Utilities”, 2023

圖 7 TEPCO 東京電力研發和創新策略



資料來源：Hisanori Goto, “R&D and Innovation Strategies of Japanese Electric Utilities”, 2023

圖 8 TEPCO 新業務領域開發

CRIEPI 表示日本電力公司已經在其管理政策中明確了成長策略，並承擔推動創新的任務，包括改革其電力業務並創造新的業務領域。

自 2000 年以來，電力公用事業公司的研發費用雖有下降的趨勢，但在有限的管理資源下，他們正努力設立研發領域以回應成長策略。此外，除了傳統研發之外，日本電力公司還採納了新的創新方法，如與新創公司合作和投資、採用開放創新方式投資新技術之開發，以及開展新業務領域等。

總結本議題交流情形，台日雙方都強調了創新策略是電力產業轉型的核心工具。本公司專注於研發策略和開放式創新，以適應電業發展趨勢，並運用開放式創新概念，將內部技術商業化，加速研發成果轉化為新業務，以滿足市場需求的不斷變化。而 CRIEPI 則強調了電力產業面臨的外部環境挑戰，包括碳排放問題、電力系統脫碳和分散化、電力產業的管制和數位化等問題。為了因應這些挑戰，他們提出了各種創新解決方案，包括引進新發電技術、改善電力輸配電系統，以應對電力需求端的變化。他們也十分重視與外部新創公司的合作，以加速創新和技術應用。

未來，雙方將持續進行案例及經驗分享等交流，以共同推動電力產業的創新和永續發展，期許台日雙方能共同應對挑戰、提高企業競爭力以協助電力事業達成淨零轉型目標。

(二) POWER CABLES

本場次先後由本所資通室羅尹孜報告「Real-time Optical Sensing Technologies in Power Cables」及 CRIEPI 高橋俊裕博士 (Dr. Toshihiro Takahashi) 報告「Investigation on Degradation Characteristics of Aged XLPE Cables」。下就報告重點分別摘述：

1. Real-time Optical Sensing Technologies in Power Cables

現代社會中，電力供應是關鍵的基礎設施之一。然而，隨著電力需求的不斷增加，電力系統變得越來越複雜。為了確保可持續的能源供應，本公司需要不斷改進和優化電力傳輸和分配系統。近年台灣民生用電及工業用電需求急速成長且負載集中，面臨瓶頸線路輸電容量不足之問題，於既有輸電線路之供電條件下，可運用動態熱容量技術以增加輸電容量。在這方面，光學感測技術為監測和管理電力電纜的性能提供了重要的工具(如圖 9)。

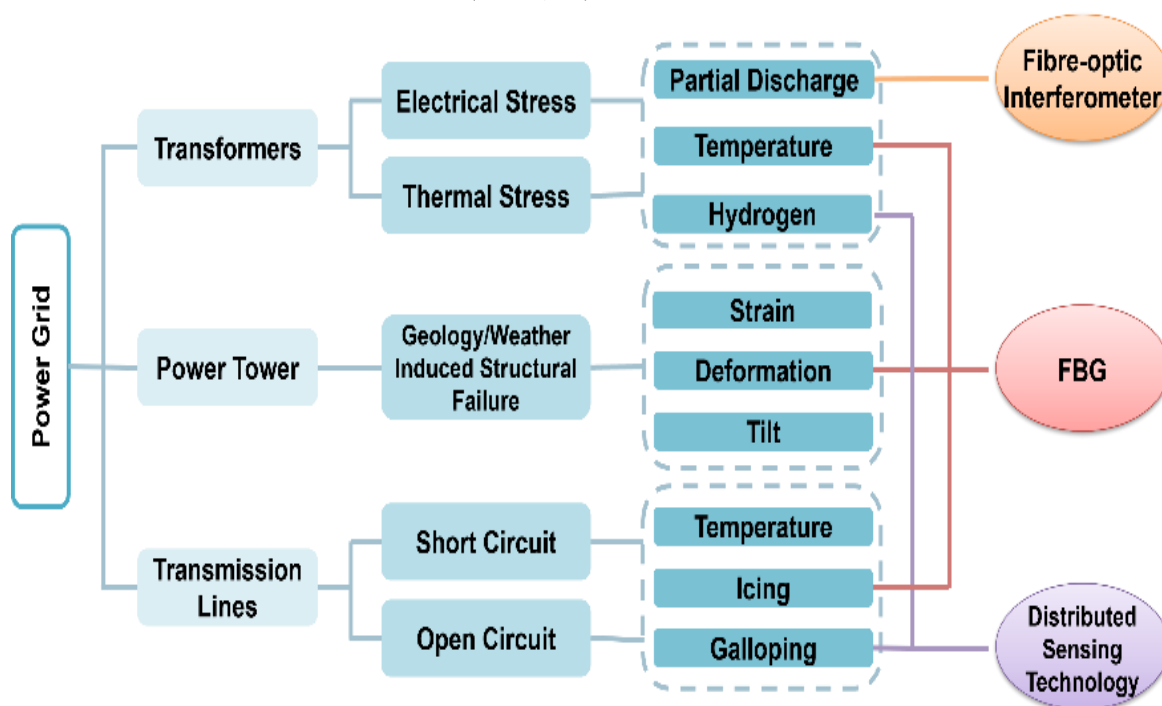


圖 9 光纖感測技術於電網之應用

目前現有輸電線路係將光纖內置於架空地線中(複合光纖架空地線 OPGW)，構成依託輸電線路的之光纖通信網，以承載著傳輸、保護和調度電話等重要通信業務。鑒於輸電導線之容量設計皆依循導體溫度為計算指標，因此建置光纖內置於架空輸電導體內，除保有通信功能，亦可針對輸電導體進行溫度等相關物理特性進行監測，即時

透過數據回推輸電線路動態最高送電容量並計算導線弛度變化，提供調度人員參考，以提升現有輸電電網效能及可靠度(如圖 10)。

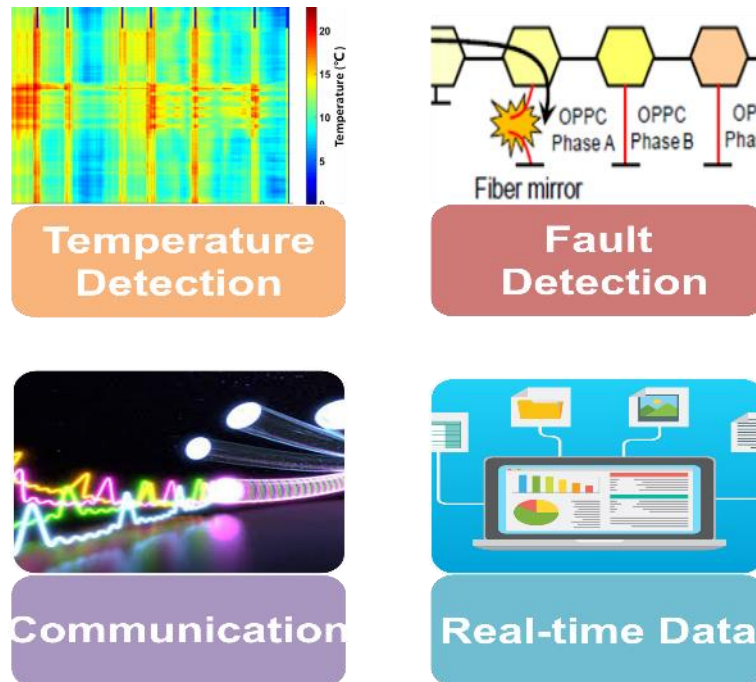
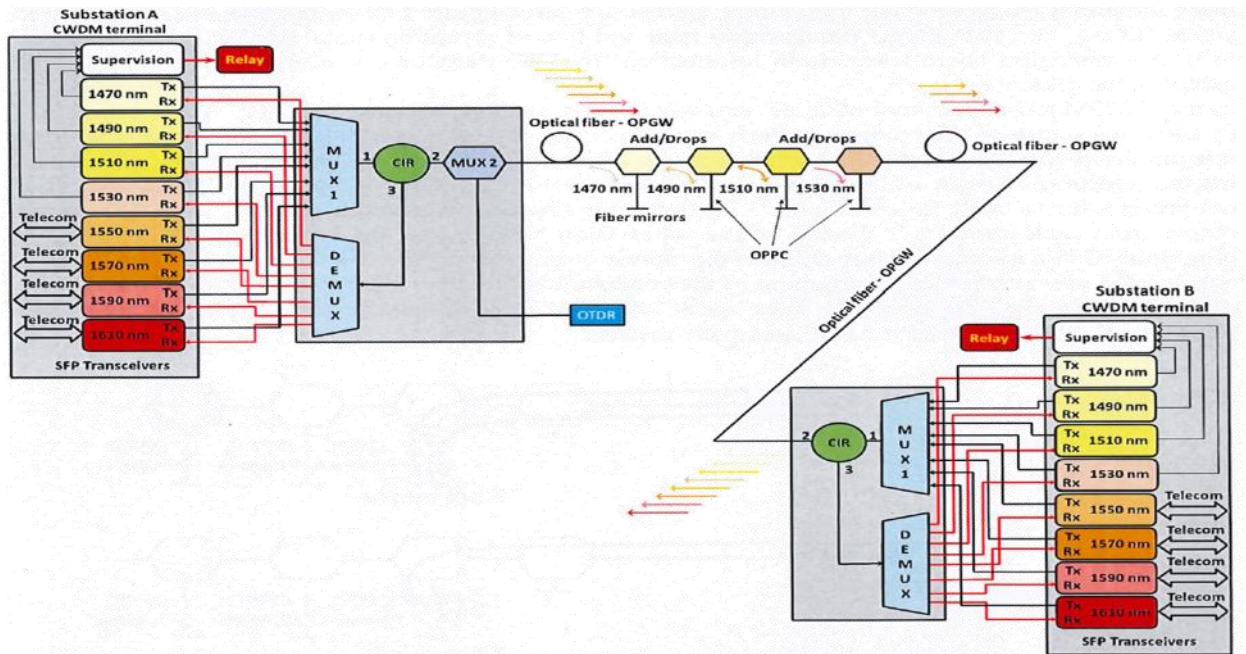


圖 10 輸電線路內置光纖功能

然而，由於光纖內頻寬資源有限，為提高光纖使用效率，需結合分波多工之(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技術，在同一條光纖中將不同波長分為不同傳輸頻道，分別進行不同應用。以稀疏分波多工(CWDM)為例，可將光纖分為 8 個不同頻道，其中 4 個通道用於光纖感測，其餘 4 個通道則進行通訊資料傳輸，如此一來可同時進行資料傳輸以及電纜之溫度/故障偵測。



資料來源：J.B. Rosolem, “Optical system for broadband data transmission concomitant to monitoring the physical integrity of conductors in overhead transmission lines”, 2018

圖 11 CWDM 結合光纖感測

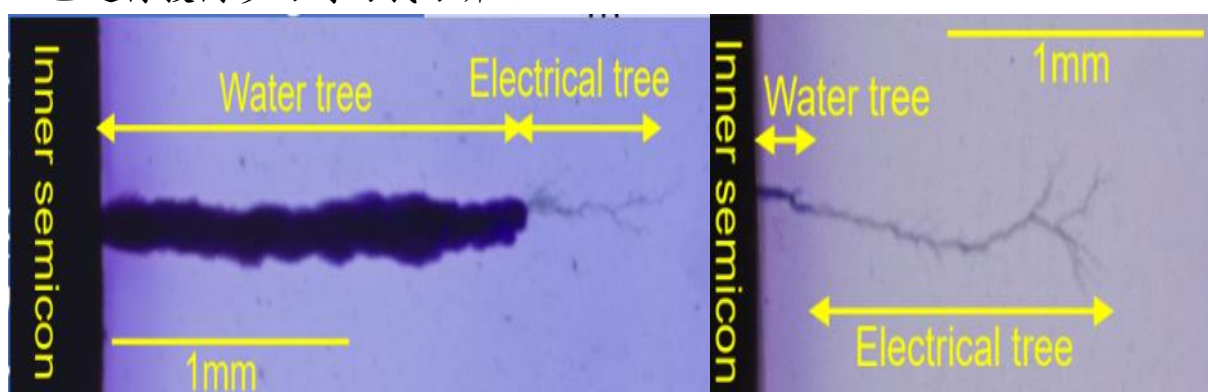
在問答環節中，討論了材料對拉曼散射和光纖布拉格光柵 (FBG) 的影響。這些技術在光學感測中起著重要作用，並且可以用來檢測輸電線路的性能和狀態。光纖感測技術為電力行業帶來了一個重要的創新，可提高電力傳輸的效率和可靠性。通過監測電力電纜的溫度分佈，有助於調度管理電力系統，確保擁有穩定、高效且可持續的電力供應。

2. Investigation on Degradation Characteristics of Aged XLPE Cables

老化的 XLPE 電纜可能是許多電力公司和設施運營商面臨的一個關鍵問題。這些電纜的長期使用可能會導致電氣特性下降，增加了事故風險。然而，更換這些電纜是一項昂貴且耗時的工作，需要仔細的

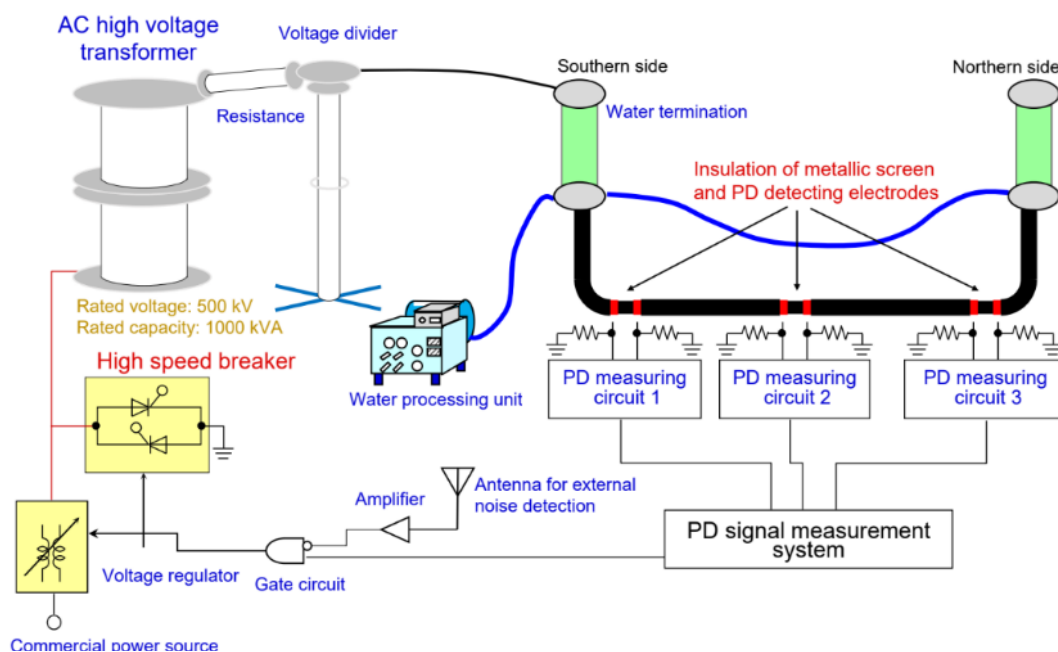
規劃和預算。一些 XLPE 電纜的運行壽命已經超過了其預定壽命，這表明它們的品質和性能在一些情況下可能仍然穩定。

CRIEPI 一直在對退役的 XLPE 電纜進行「預擊穿放電偵測測試 (The Pre-breakdown Discharge Detection Test)」，由高壓交流電供電施加 5 kV / 5 分鐘之電壓至 XLPE 電纜樣本，並偵測部分放電 (Partial Discharge, PD) 避免擊穿電纜，最後觀測電纜樣本中之水樹 (Water Tree) 作為電纜老化判斷依據 (如圖 12)，藉以瞭解其電氣承受能力和劣化原因。這對於確定是否需要更換電纜以及計劃替換工作非常重要。其實驗架構如下圖 13 所示，並於 CRIEPI 橫須賀所區進行技術參訪時向我方介紹。



資料來源：Toshihiro Takahashi, “Investigation on Degradation Characteristics of Aged XLPE Cables”, 2023

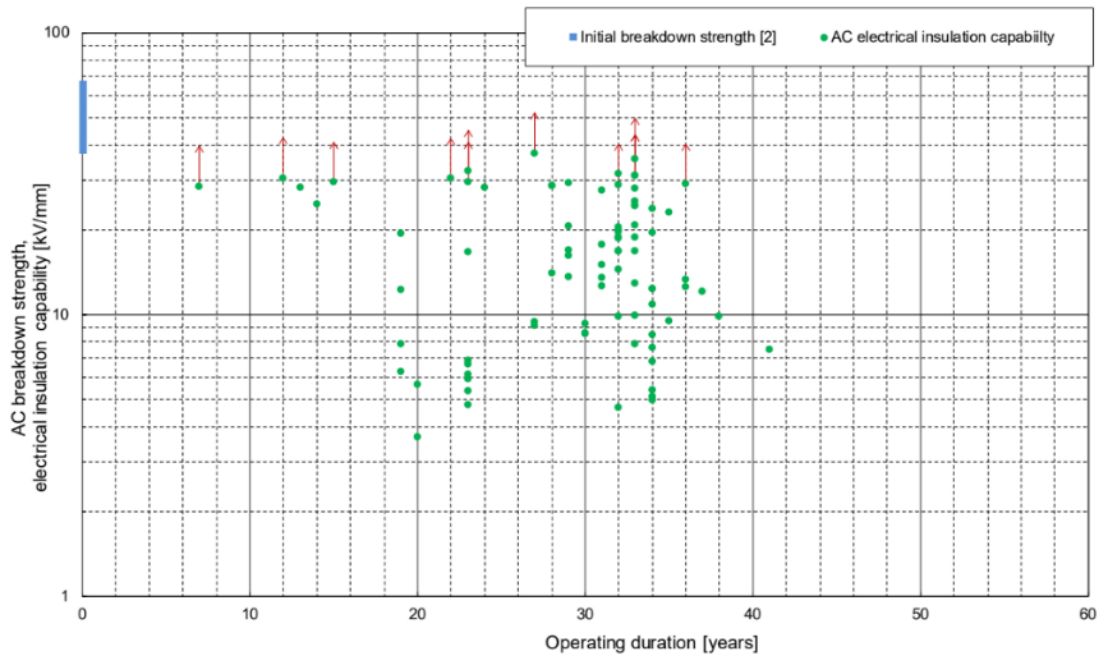
圖 12 電纜內半導體層之水樹情形



資料來源：Toshihiro Takahashi, “Investigation on Degradation Characteristics of Aged XLPE Cables”, 2023

圖 13 預擊穿放電偵測測試實驗架構圖

利用前述實驗結果，可建立老舊 XLPE 電纜絕緣特性劣化之特徵圖(如下圖 14 所示)，作為電力公司進行電纜線資產管理之重要資訊，比對電纜使用年限及老化特徵圖判斷是否需進行更換，可更精準判斷更換電纜之時機，避免突發之電纜事故發生的同時，亦可減少不必要成本支出。最後討論提及未來可結合 AI 進行電纜老化特徵診斷，有助於提前發現問題並採取預防措施。XLPE 電纜的老化和絕緣劣化是一個重要的問題，需要仔細的監控和管理。CRIEPI 的研究和討論增加對電纜老化特性之瞭解，有助於電力行業更好地處理這個問題，確保供電系統的穩定運行。



資料來源：Toshihiro Takahashi, “Investigation on Degradation Characteristics of Aged XLPE Cables”, 2023

圖 14 老舊 XLPE 電纜絕緣特性劣化之特徵圖

(三) POWER ANALYSIS SIMULATIONS

本次會議電力系統分析與模擬部分，分別由本所報告「Micro Grid and Islanding Operation Strategy in Shulin Campus」，以及 CRIEPI 報告「An Introduction to the Simulation Program XTAP for the Analysis of Electromagnetic Transients in Power Systems」。

本所報告主要針對樹林所區微電網過去建置與未來展望進行說明。過去樹林所區微電網主要針對所內 VCB 7 轄下範圍，作為推動與示範場域，主要展示儲能系統達成不停電孤島轉換，以及不停電併回電網之功能，為微電網於電網異常時提升供電穩定度與韌性之重要能力。於下個階段，樹林微電網範圍將擴展至整個所區，並依據 IEEE 2030.7 The Specification of Microgrid Controllers，打造完整功能之微電網

及其控制器。

微電網控制器為穩定運轉之核心，需要監測微電網內各種電力狀態，及時作出反應以維持微電網穩定，並符合控制目標。依 IEEE 2030.7，微電網控制器需具備相關邏輯，以應付不同情境包含穩態併網(Steady state connected)、穩態孤島(Steady state islanded)、預期性孤島轉換(Planned islanding)、非預期性孤島轉換(Unplanned islanding)、全黑啟動(Black start)與重新併網(Reconnect)。由於兩個穩態為微電網最常運轉之情境，故僅針對此兩情境細部說明本所執行規劃。

於穩態併網情境，運轉功能包含用電最佳化以及電網輔助功能，控制架構示意圖如圖 15。用電最佳化應屬微電網於穩態併網情境之基本功能，藉由負載與再生能源發電預測，結合時間電價或需量反應方案，並調度內部可控分散式能源或負載，以降低樹林所區電費。而電網輔助功能，則使微電網進一步參與電力系統的運轉。例如，可接收上層調度系統，如分散式能源管理系統(Distributed Energy Resource Management System, DERMS)調度指令，執行微電網併網點(Point of interconnection, POI)實功或虛功響應，以提升配電系統穩定度。另外，亦可將微電網作為可控資源，參加電力交易平台，提供電網輔助服務。透過上述功能與交易行為的模擬與試行，可預先推導相關機制，並建立相關準則，作為後續大量微電網參與電力系統運轉之參考。

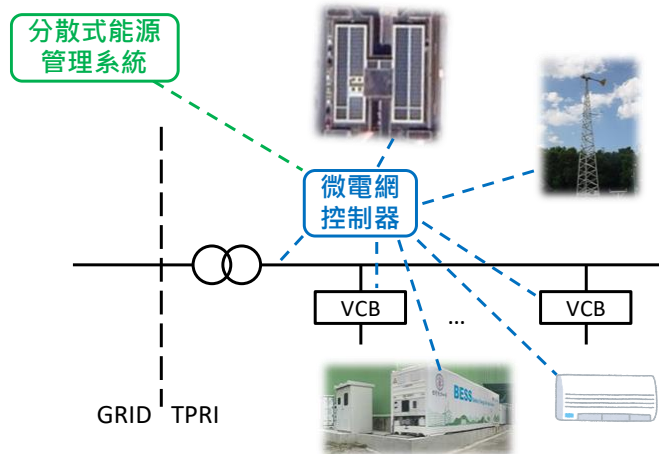


圖 15 樹林所區微電網控制架構示意圖

於穩態孤島情境，首先需調查樹林所區的發電設備、儲能系統與負載之組成及特性，以達到供給端與需求端的平衡。發電設備包含太陽光電與小型風力機組，裝置容量近 900 kW，而各研究大樓之緊急供電柴油機不屬併網型設備，故忽略不計。儲能系統部分，雖所區內有多套儲能系統，但大小與功能不一，故主要利用鋰電池儲能系統兩套與鈎液流電池儲能系統一套，裝置容量共約 1375 kW / 2650 kWh。而負載部分，則利用 AMI 資料取得全年所區的需量曲線，並分類為 5 大類如圖 16。

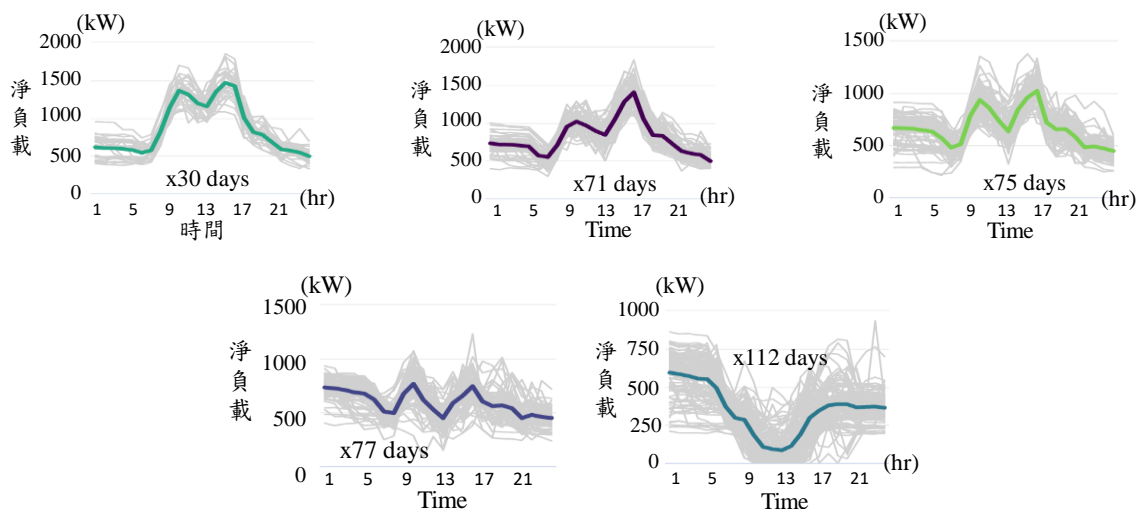


圖 16 樹林所區負載型態

以負載較輕，通常為假日之負載型態為例，全年中共占 112 天，如圖 2 右下。由平均負載曲線可見，即使再生能源裝置容量近 900 kW，白天中午時仍需由電網供應電力。故此，於孤島狀態時缺乏外部電力供應，須要卸除部分用電設備。

未來，樹林所區將再逐步建置並試行零碳與低碳發電設備，例如甲醇燃料電池、固態氧化物燃料電池與整合於建物上之太陽能等，共約 250 kW 之總裝置容量。預期於完成建置後，假日負載型態之平均淨負載可由藍線降至黃線，如圖 17，於中午時段最大有約 130 kW 超額發電可對儲能系統充電，此期間約可儲存 440 度電。

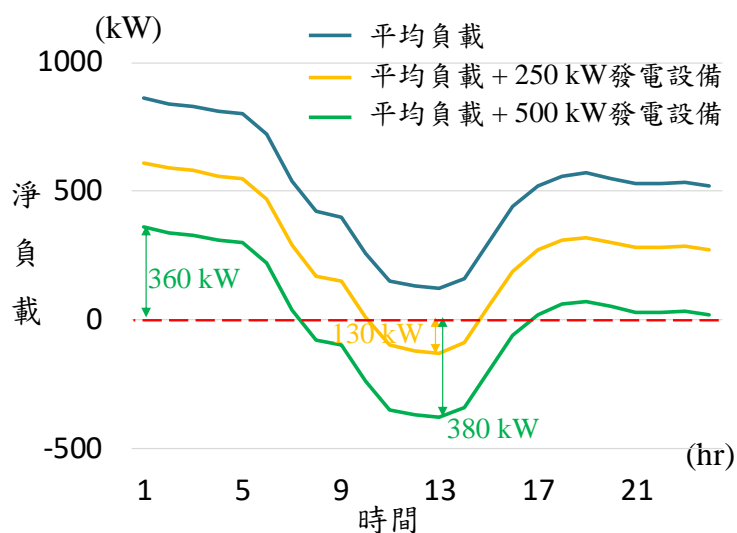


圖 17 假日負載型態穩態孤島運轉策略

若再納入技術驗證場域將新建之柴油發電機，並以 250 kW 發電，則假日負載型態之平均淨負載可再由黃線降至綠線，於中午時段最大有約 380 kW 超額發電可對儲能系統充電，此期間約可儲存 2120 度電，足以提供凌晨與夜間時段用電需求。故此，藉由上述新增發電設備，樹林所區微電網於穩態孤島運轉時，大部分情境可獨立運轉，且不需卸除用電設備。

除了穩態併網與穩態孤島等兩執行規劃，於報告時亦說明微電網技術驗證場域之建置目的與作法。由於微電網建置數量將明顯提升，不論於離島、配電饋線或校園，均有相關推動計畫。為了確保相關微電網設備(如微電網控制器或儲能系統等)功能的完整性與協調性，本所將建立驗證場域與測試程序，依據 IEEE 2030.8 規範，針對微電網設備進行測試與驗證。

微電網技術驗證場域架構如圖 18，由本所樹林所區內變電站 SS 8 延伸出 1 迴路，經過隔離開關與斷路器後，再分為兩迴路，一迴送至左側匯流排，另一迴則送至電網模擬器與轄下匯流排。右側匯流排主要進行微電網設備驗證，廠商可送最多兩套儲能系統與微電網控制器至此，本所將利用電網模擬器、負載器、柴油機與儲能系統，依 IEEE 2030.8 規範製造一系列的系統初始情境與擾動，以驗證微電網控制器邏輯是否完整，足以應付不同擾動，以及對其儲能系統之控制效能是否符合需求。左側匯流排常時併入 SS 8 進入電網，主要進行新型設備之測試，觀察相關設備之運轉特性，以及與電網之輔助能力。藉由 tie 斷路器的投入，左右兩匯流排亦可合聯運轉，進行整合性的測試。例如，以電網模擬器產生較嚴峻之系統電壓或頻率擾動，觀察左側匯流排設備之響應；亦或是結合不同設備，進行不停電孤島測試等。

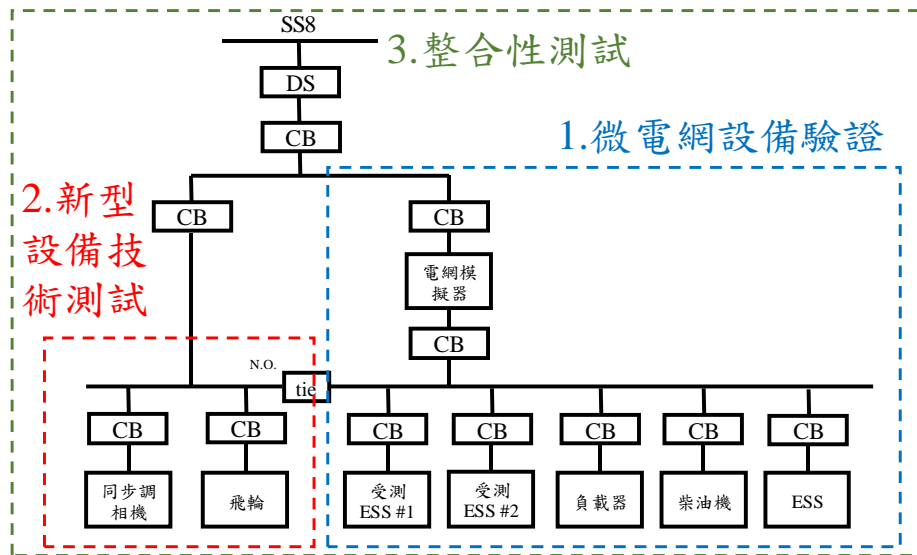
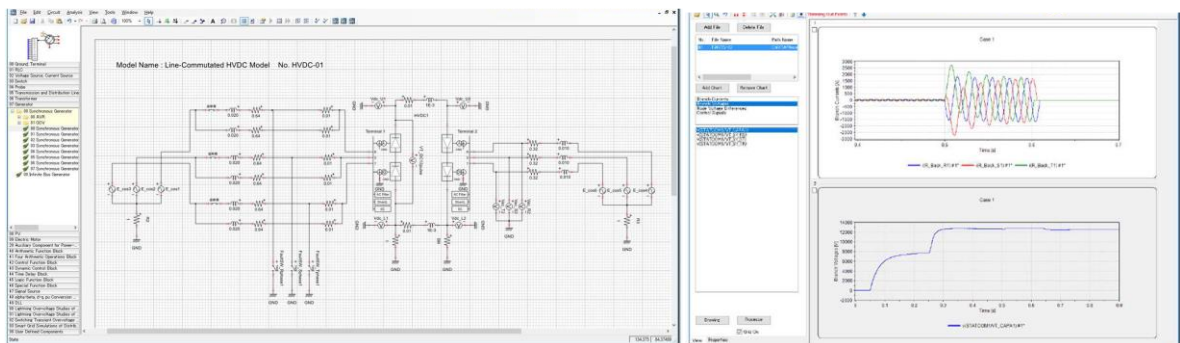


圖 18 微電網技術驗證場域架構

CRIEPI 報告主要介紹該機構所開發之電磁暫態模擬軟體 XTAP。與 PSS/E 等穩態模擬軟體不同，電磁暫態模擬軟體主要針對短時間之暫態現象，例如開關突波、雷擊或鐵磁共振等，且所觀察之結果為電壓與電流波形，而非 RMS 值或頻率值。

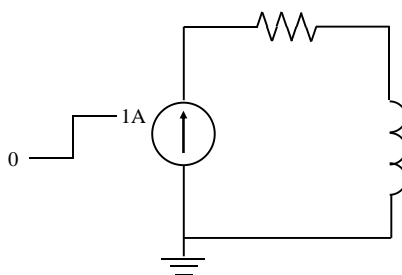
XTAP 與過去常用之 EMTP-ATPDraw 相似，均以圖形介面進行操作，將所需元件如電源、阻抗、線路與負載等拖曳至工作區，完成元件間的連結，並設定設備細部參數與擾動後，即可模擬並觀看結果，如圖 19。



資料來源: Taku Noda, “An Introduction to the Simulation Program XTAP for the Analysis of Electromagnetic Transients in Power Systems”, 2023

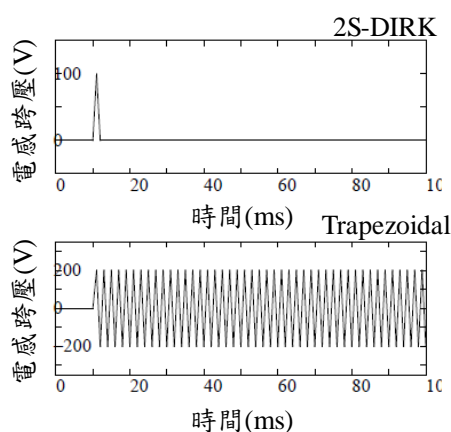
圖 19 XTAP 操作介面

依 CRIEPI 說明，XTAP 與其他電磁暫態模擬軟體之主要差異在於數學積分 (Numerical integration) 方式，採用 2S-DIRK(2-Stage Diagonally Implicit Runge-Kutta)法。與梯形法(Trapezoidal)相比，2S-DIRK 於擾動後的收斂性更佳。以一簡單的 RL 電路為例如圖 20，將電流源由 0 以步階型式提升至 1 A 後，觀察模擬結果如圖 21。由此可見，2S-DIRK 法不會因為電感上電流的瞬間變化，亦或是電容上電壓的瞬間變化，而造成數學計算上虛擬的震盪結果，對於模擬結果的正確性有舉足輕重的影響。



資料來源: Taku Noda, “An Introduction to the Simulation Program XTAP for the Analysis of Electromagnetic Transients in Power Systems”, 2023

圖 20 測試 RL 電路



資料來源: Taku Noda, “An Introduction to the Simulation Program XTAP for the Analysis of Electromagnetic Transients in Power Systems”, 2023

圖 21 2S-DIRK 與 Trapezoidal 法模擬結果比較

XTAP 中可用的元件除了基本的電源、阻抗、負載與控制外，亦包含發電機、馬達、輸電線路、變壓器、電力電子變流器與再生能源等大項，並再依元件特性細分為眾多小項。以變壓器為例，可再分為兩繞阻與三繞阻以及不同接法等。XTAP 也提供使用者自建模型，或製作加密 DLL 檔。而 XTAP 另一優點在於，常用電力設備模擬模型的標準化。由於 XTAP 為日本電力公司通用之電磁暫態模擬軟體，故常用之電力設備及其參數均已內建於軟體內，且參數為經過多方討論並訂定之通用參數，故使用者使用不須再額外設定該元件參數，降低模擬與參數取得的困難度。

於報告中，CRIEPI 共舉了 6 個 XTAP 模擬案例，包含：

1. 德島縣與和歌山縣間之跨海 HVDC，模擬事件為電力輸送方向的反轉，模擬結果包含 DC 側直流電壓與電流波形，並可呈現控制指令，與電氣波形互相對照。
2. 地下電纜零序循環電流，模擬模型包含多電壓層級，以及多迴地下線路實際配置的模擬。藉由細部的建模，模擬出正確的零序循環電流結果，解決了電纜故障誤偵測的問題。
3. 頻率轉換站，模擬關東與關西 60 Hz 與 50 Hz 系統之頻率轉換站，以 HVDC 背對背方式達成，以了解頻率轉換站擴建後之系統狀況。
4. 北海道與青森縣之跨海 HVDC，由於此 HVDC 線路正建設中，利用 XTAP 中 MMC(Modular Multi-level Converter)模型模擬系統 AC 側故障時，對於 DC 側電壓電流與兩端 AC 側電壓之影響。
5. 配電系統之雷擊保護，由於過去通訊線常不包含於雷擊保護之模擬中，但實際上，通訊線可能影響雷擊電流的分流結果，進而影響過電壓現象，故此案例說明如何將通訊線納入模擬中，以取得更準確

並貼近實際之結果。

6. SVR(Step Voltage Regulator)與 PV 發電系統之響應，利用 XTAP 模擬配電線路上之電壓調控設備與再生能源之互動結果，於實際建置前，設計更佳之 SVR 控制策略。

目前 XTAP 於日本不僅為電力公司之通用電磁暫態模擬軟體，相關設備之主要製造商、電機工程公司、大學與研究機構亦共同組成使用社群，截至 2021 年 9 月，共有超過 3,300 名使用者。

為了讓使用者了解如何應用 XTAP，CRIEPI 也建置了專屬網站 www.xtap.org，提供軟體下載、教學、使用者手冊與案例分享等功能與資訊。另外，於日本提供 5 日的教育訓練課程。未來，XTAP 將開放網路版使用功能，不須在電腦上安裝 XTAP，可遠端連線進入系統並進行操作，免去安裝、升級與電腦效能不佳的困擾，更方便使用者操作。

經詢問，XTAP 功能仍不斷擴充中，依據使用者的回饋或電力公司模擬需求，CRIEPI 會再修正或新增相關模擬功能，但較新穎的功能或由電力公司提供經費開發的功能，僅開放付費版 XTAP 中使用。例如，若用 HVDC 電纜 DC 側所儲存之能量，額外提供實功至 AC 系統作為虛擬慣量，此現象即可利用付費版 XTAP 模擬，觀察 AC 側實功輸出與 DC 側電壓降低之響應。除較特殊之功能外，基本功能均可於免費版中使用。部分付費版功能則會再視已開發時間或需求性，逐步移至免費版中。

(四)SECONDARY BATTERY

有關「SECONDARY BATTERY」這個主題，本公司由綜研所化環室張書維研究專員負責簡報，題目為「Function demonstration of battery

energy storage system in a Microgrid」，簡報內容為綜合研究所對於電池儲能系統於微電網試驗場域的規畫、建置與功能說明，包括如何以電池儲能系統達成電網追蹤(Grid Following)、電網形成(Grid Forming)及自動調頻等功能，此外，如何透過系統設計與電池儲能系統達成微電網與主電網的無縫切換、全黑啟動、離網後同步等微電網的系統轉態功能測試，另透過國際資通訊標準的導入，使本所樹林微電網試驗場成為台灣首座符合 IEC 61850-7-420 資料通訊格式的分散式能源實證示範場域。未來規劃透過示範場域，對內發展微電網控制技術以提昇微電網效益，避免重要負載停電損失、減少電費與碳排，對外協助區域電網快速復電、維持區域電壓品質，減少區域停電風險及增加電網彈性與韌性。簡報後，雙方就微電網功能在實際應用的情形與電池儲能系統在台灣如何進行第三方測試驗證其功能等議題進行交流與討論，我方簡報說明情形如圖 22，交流討論情形如圖 23 所示。



圖 22 SECONDARY BATTERY 本公司簡報情形



圖 23 SECONDARY BATTERY 我方簡報與日方交流情形

針對相同主題，日方 CRIEPI 隸屬於能源化學部門-能源轉化研究研究室(Energy Transformation Research Laboratory)的三田裕一(Yuchi Mita)資深研究員負責簡報，題目為「Current Status of Battery Energy Storage System Interconnected to the Power Grid in Japan and CRIEPI's Activities about Battery Performance Evaluation」，簡報內容說明可充電式二次電池技術廣泛應用於便攜型設備、電動車 (EV) 和定置型儲能系統 (BESS) 等。BESS 預期可用於調頻、能量調峰、再生能源整合以及全黑啟動支援等應用領域。在日本，隨著再生能源電力的增加，以維持穩定電力供應為目的大型 BESS 數量不斷增加，簡報說明 BESS 在日本的建置的情形。截至目前為止，在大型 BESS 裝置中，鋰離子電池的使用頻率高於鉛酸電池、氧化還原液流電池、鈉硫電池和其他類型的電池，根據三田研究員表示，預計 2024 年，日本本島將會有 48MW/113MWh 的大型鋰離子電池 BESS 案場規劃，有別於日本本島，由於北海道的再生能源占比更高，對於電池儲能系統

的需求與實績也更多，預計民國 2023 年將會有規模達 100MW/180MWh 的大型鋰離子電池 BESS 案場，全鈦氧化液流電池案場規模也達 17MW/51MWh，顯示電池儲能系統在日本的蓬勃發展，與電池相關的電力交易市場規則自 2021 年開始即陸續在日本展開，而三田研究員也表示為了確保 BESS 穩定運作 10 年或更長時間，了解蓄電池的剩餘效能評估也很重要，他介紹了 CRIEPI 在這方面的研發現況，包括鋰電池充放電測試系統、鋰電池加速劣化測試系統、電池分解技術、電池材料分析技術與電池劣化評估技術等。簡報後，雙方就電池儲能在日本的應用現況、電池技術的選擇、電池劣化評估技術與分解技術的安全性議題等，進行交流與討論。

(五)SECTOR COUPLING

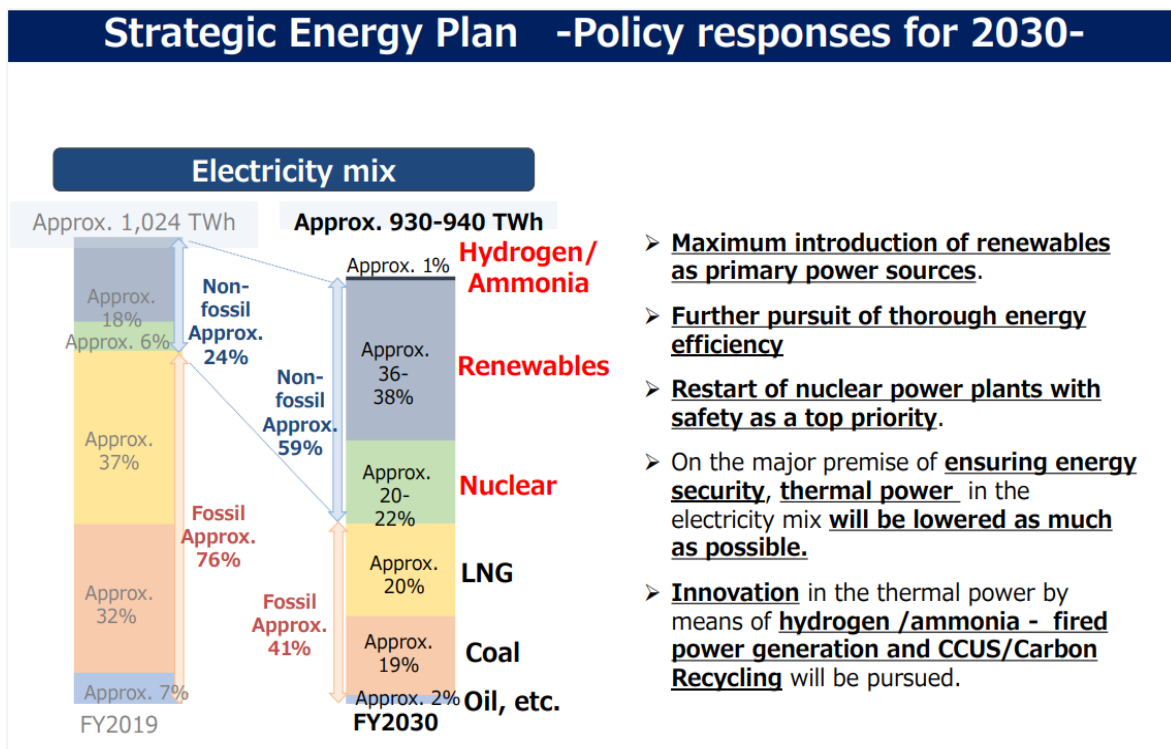
本議題主要與電網創新研究室 (Grid Innovation Research Laboratory, GdRL)的高橋雅仁(Masahito Takahashi)博士交流討論跨部門耦合(Sector Coupling)議題。

1. 背景說明

在日本 2050 年碳中和目標下，相較於民國 102 年的溫室氣體排放水準，日本政府設定於 2030 年減少 46% 溫室氣體排放量 (National GHG emissions)。同時，在 2030 年國家能源規畫中，預期再生能源發電占比為 36-38%，其中太陽光電總裝置容量為 103.5-117.6 GW(目前約 66 GW)。

值得注意的，根據日本經濟產業省 (Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) 公布之第六版能源策略規劃，設定 2030

年的電力配比目標為：氫氨能 1%、再生能源 36-38%、核能 20-22%、天然氣 20%、燃煤 19%、燃油與其他 2%，如下圖 24 所示。

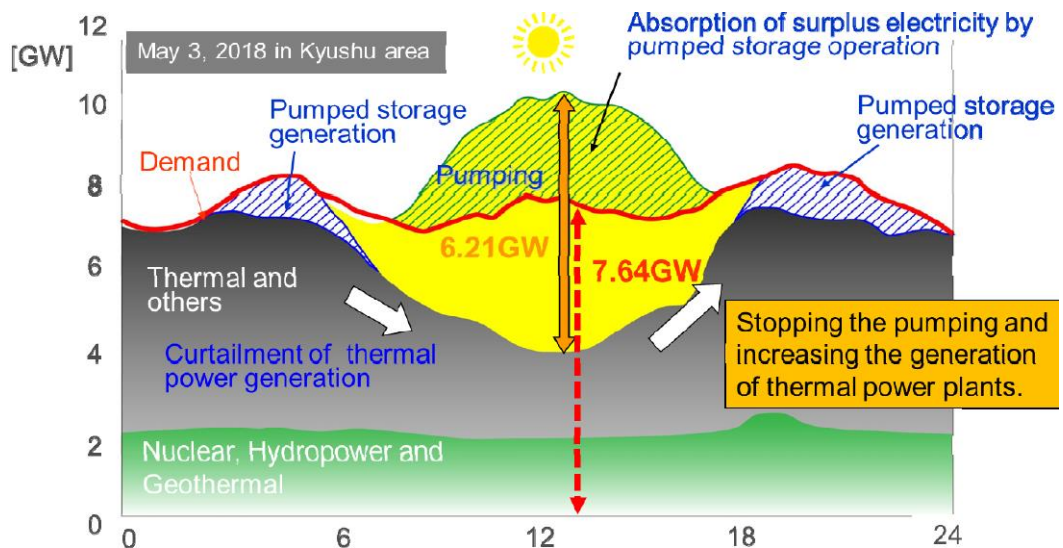


資料來源：日本經產省第六版能源策略規劃

圖 24 2030 年日本電力配比目標

隨著再生能源滲透率逐年提升，某些區域(如九州、中國、四國等)低負載日的特定時段，太陽能發電量已超過區域負載的 100%。電網相關議題備受重視，例如：電力過剩、電力平衡容量不足、輸電容量不足等。

例如民國 2019 年 5 月 3 日的九州某區域，中午 12 時太陽光電最大出力達 6.21 GW，需求負載量為 7.64 GW，可藉由抽蓄水力儲存多餘電力；隨著傍晚太陽下山出力減少，增加火力發電因應鴨子曲線 (Duck Curve)，並從晚上 18 點起，抽蓄水力改以放水發電模式滿足夜尖峰負載需求。如下圖 25 所示。



資料來源: Masahito Takahashi , “CRIEPI’ s R&D activities in end-use electrification and sector coupling: Heat pump, Plant factory and Electric vehicle” , 2023

圖 25 九州低負載日電力供需狀況

2. CRIEPI 在終端電氣化與跨部門耦合的研發案例

跨部門耦合(Sector Coupling)係指在終端能源消費部門(如交通運輸、產業、住宅供暖空調等)以再生能源取代化石燃料，包括透過跨部門能源供需管理，極大化利用再生能源。而終端電氣化(End-use electrification)是第一個且主要的方法。

此外，跨部門耦合的好處包含：減少溫室氣體排放、提升能源效率、極大化利用再生能源、提升電網穩定度、抑低電價上漲幅度、提升電力系統韌性等。

終端電氣化作為一項重要的脫碳技術，日本國家能源策略規劃分別對產業、民生住宅、交通運輸部門，提出達成電氣化所需克服的議題，如下圖 26 所示。而 CRIEPI 也在此政策架構下執行熱泵、工廠及電動車之研發案例，分述如下：

部門	技術	克服すべき主要課題 (目標達成に向けた技術的イノベーションが必要なもの)	コストバリエーション
電力部門	再エネ	導入拡大に向け、系統制約の克服、コスト削減、周辺環境との調和が課題	
	原子力	安全確保の再確認、安全性等に優れた炉の進出、経理した設備の維持が課題	
	火力+CCUS/カーボキャプチャー	CO2回収技術の確立、回収CO2の用途拡大、CCSの進捗開発、コスト削減が課題	
	水素発電	水素専焼火力の技術開発、水素インフラの整備が課題	水素価格 約13円/Nm3
産業部門	アンモニア発電	アンモニア発電率の向上、アンモニア専焼火力の技術開発が課題	
	電化	産業用ヒートポンプ等電化設備のコスト削減、技術開発の確保、より広い温度帯への対応が課題	
	水素化 (メタネーション)	水素の安定供給確保、水素インフラの普及拡大に向け、設備のコスト削減、技術開発の確保、水素インフラの整備が課題	水素価格 約40円/Nm3
	アンモニア化	メタネーション設備の大型化のための技術開発が課題	
民生部門	熱・燃料	火災リスクの低減化のためのアンモニアバーナー等の技術開発が課題	
	水素化	水素による暖房を実現するために、水素による取捨反応の克服、安定・大規模の水素供給が課題	水素価格 約8円/Nm3
	電化	エコキュート、IHコンロやオール電化住宅、ZEH、ZEB等を更に普及させるため、設備コスト削減が課題	
	メタネーション	メタネーション設備の大型化のための技術開発が課題	
運輸部門	EV	導入拡大に向け、車種の拡充、設備コストの削減、充電インフラの整備、充電時間の削減、次世代蓄電池の技術確立が課題	電力価格 約30円/kWh 水素価格 約90円/Nm3
	FCV	導入拡大に向け、車種の拡充、設備コストの削減、水素インフラの整備が課題	
	合成燃料 (e-fuel)	大規模生産、コスト削減を実現する燃料製造方法等の技術開発が課題	

Industrial sector:
Heat pump and other types of electric heating

Building sector:
"Ecocute", IH cooker, All-electrified house, ZEH, ZEB

Transport sector:
Electric passenger car, Electric bus, Electric freight truck

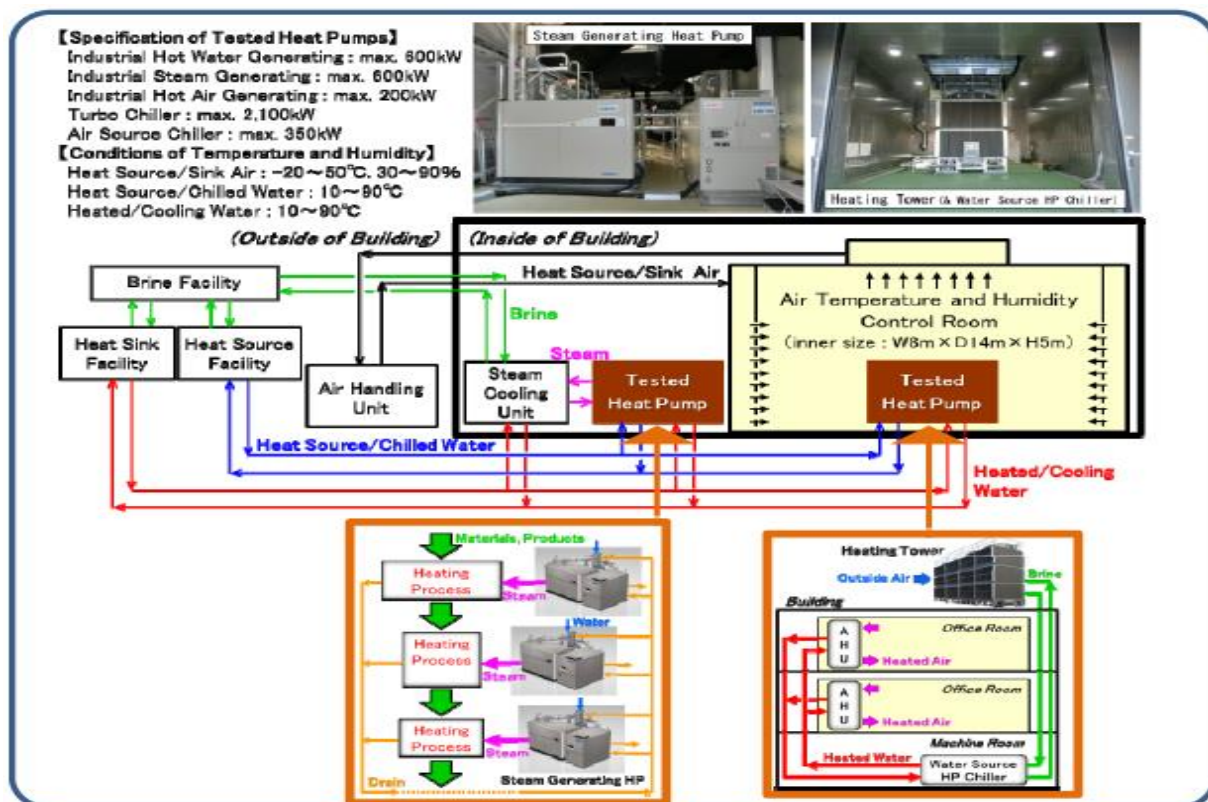
資料來源: Masahito Takahashi, "CRIEPI's R&D activities in end-use electrification and sector coupling: Heat pump, Plant factory and Electric vehicle", 2023

圖 26 日本終端電氣化之關鍵議題

(1) 熱泵計畫

本計畫主要進行熱泵技術的基礎研究，評估熱泵熱水器產品(如 ECOCUTE)的效能表現，協助制訂高度可靠的國家標準。然而，不同部門對熱泵技術的應用也有所差異，例如：住宅及商業部門使用熱泵熱水器；工業部門使用蒸氣式熱泵；交通運輸部門，電動車採用無霜熱泵空調系統等。目前 CRIEPI 主要研究發展相關量測設備，用於評估工業及商用熱泵系統，例如：空氣溫度(-20-50°C)與

濕度(30-90%)可涵蓋全日本區域的氣候條件;大容量的儲水設備;
 模擬大範圍 10~90°C 溫度區間內之溫排水。



資料來源: Masahito Takahashi , “CRIEPI’ s R&D activities in end-use electrification and sector coupling: Heat pump, Plant factory and Electric vehicle” , 2023

圖 27 CRIEPI 熱泵系統測試設備及流程

(2) 植物工廠智慧照明計畫

本計畫目標在於為植物工廠智慧照明 (Plant Factory with Artificial Lighting, PFAL)發展能源管理系統，並調查環境變化對植物栽培的影響。本計畫地點位在台灣與沖繩中間的宮古島 (Miyakojima island)，自 2021-2022 年由日本政府資金支持。由

於當地電網規模小，再生能源併網後即面臨電網不穩定(Grid instability)問題，因此亟需發展能源管理系統，控制植物工廠智慧照明的電力需求，具備需量反應資源回饋區域電網之能力。植物工廠能源管理系統可有效控制太陽光電、電池儲能、LED、空調及風扇等設備，滿足區域電網操作者的要求，同時符合植物栽培的條件。

(3) 電動車計畫

根據統計日本目前電動車數量，計有純電動車(Battery Electric Vehicle, BEV)16萬台、插電式混合車(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)17萬台、油電混合車(Hybrid Electric Vehicle, HEV)則高達6,200萬台。充電基礎設施方面，共有9,000個快速充電站、2萬個一般充電站。預估若所有燃油汽車轉換為純電動車，則全國電力需求(kWh)將增加5-10%。此外，電動車的優勢在於能夠降低運具的碳排放量，當自然災害發生時，電動車作為虛擬電廠資源，可解決電力短缺問題。

為了估計區域充電負載曲線，並分析快速充電站的最適數量與設置地點，CRIEPI開發電動車交通模型EV-OLYENTOR，可在特定區域模擬未來電動車的狀況與充電行為。



資料來源: Masahito Takahashi , “CRIEPI’ s R&D activities in end-use electrification and sector coupling: Heat pump, Plant factory and Electric vehicle” , 2023

圖 28 EV-OLYENTOR 模擬示意

為了大幅降低日本全國能源系統的溫室氣體排放量，終端電氣化與跨部門耦合是高再生能源占比下的關鍵技術與未來趨勢。為了達成終端電氣化與跨部門耦合，CRIEPI 將持續致力於長期跨部門的研究發展活動，包含技術發展、示範計畫、政策分析與社會實踐等研究領域，朝向日本 2050 年碳中和目標邁進。

同樣地，根據國家發展委員會公布之「臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明」，確立非電力部門(包含建築、運輸、工業等)及電力部門於 2050 年達成淨零排放之終極目標。其中，電力部門達到淨零目標的重點在於減碳路徑以及低碳技術之發展，具體而言，中期需評估 2030 年前現有技術限制下之減碳路徑，長期則需考量 2030 至 2050 年低碳能源發展期程與技術組合。

藉由本次交流機會，介紹本公司建置的我國電力部門 2020-2050 年小時別資源整合模型 Taiwan-REGEN，模擬最適電力供需策略，並評估未來儲能建置需求量，供我國電業決策者了解各項技術之投資優先順序。未來也將參考 CRIEPI 的跨部門耦合(Sector Coupling)研究經驗，在 Taiwan-REGEN 的基礎上建置非電力部門(包含建築、運輸、工業等)之需求面模型(End-use model)，力求精確刻劃能源終端用戶的電力負載需求，俾有助於提升我國 2050 淨零排放路徑規劃之參考價值。



圖 29 我國電力部門淨零路徑評估簡報

(六)GAS TURBINE

在氣渦輪機部分，本次報告以氣渦輪機的第一級動靜葉片之流體力學分析為主軸，流體力學分析又可以分成兩個部分，其一為計算流體分析(Computational Fluid Dynamics, CFD)及共軛熱傳分析(Conjugate Heat Transfer, CHT)。報告內容首先由參數的計算出發，從氣渦輪機環境的溫度和壓力，經過公式的演算後可以先得到氣渦輪機壓縮段的出口壓力，溫度的部分則需要用疊代的方式找到最近似的溫度作為條件的輸入，公式的部分則會用到空壓段的效率、空壓機入口的焓值與絕熱壓縮的焓值等參數作為中間計算的值，來猜空壓機出口

的溫度值，並藉由循環疊代可以得到計算的空壓機出口溫度，兩相比較之下持續修正空壓機出口溫度的猜測值，一直到疊代計算得到的空壓機出口溫度能盡可能接近猜測的出口溫度值後，這個值就是作為壓縮段輸入條件的值，計算後空壓機出口壓力約為 20Bar，而出口溫度為 755 °C，疊代的誤差大約是在 10 的負六次方數量級。

經過前段的計算後，接著就是要進行 CFD 的分析，會先將渦輪段的第一級模型建立，然而因氣渦輪機第一級是屬於高溫高壓的環境，因此除了在材料的選用有比較嚴格的要求之外，在葉型的部分也有相當多的結構，避免燃氣直接對葉片造成影響而使得材料失效；然而在 CFD 分析上會追求將不必要的結構簡化以節省計算資源，因此在 CFD 計算的部分，會先將冷卻空氣的流量扣掉後，剩餘的空氣視為完全與燃料作用進行計算。在入口條件的部分，根據文獻可以發現到入口的壓力是一個拋物線形式的分布，而溫度的部分，也是根據文獻的資料來做近似值，設定以得到合理的溫度趨勢分布，再輸入分析軟體進行計算；出口條件的部分則是根據不同的葉形反動度進行設定，不同的反動度出口條件會有不同，因此出口條件的選擇就決定了反動度的大小，再根據計算的結果去判斷，在各個反動度之下，氣渦輪機的流場分布情況是否符合一般葉型的設計，分析結果發現在葉形反動度大約在 0.3 到 0.4 左右，是比較符合氣渦輪機設計理念的，因此在這個區間內可以找到一個較符合氣渦輪機運轉條件的值，作為後續計算的參考。

在 CFD 分析之後，除了在 CFD 分析已經置入的冷卻孔條件之外，會將葉片材料相關的資訊一起放進來，也就是除了會用到的流道模型之外，還會再加入葉片實體的模型及葉片上下的整體冷卻結構。在邊界

條件的部分，會使用與 CFD 分析相同的邊界條件進行分析，由於在 CFD 分析的部分已經確定了邊界條件的狀況，因此在 CHT 分析中，可以直接拿來應用並檢視 CHT 分析出來的結果，對於葉片材料及整體流場造成哪些影響。此外，由於氣渦輪機葉片通常會在高溫高壓的環境下運轉，因此氣渦輪機葉片外層，通常會包覆塗層以避免熱氣直接接觸到葉片造成葉片的損傷。在分析中塗層的條件有稍微簡化，由於進行流場分析對於塗層不會做太深入的設定，因此在這邊塗層的參數部分，就是給定熱傳導係數、塗層厚度與塗層熱阻值。這個主題在日方簡報中，將會對氣渦輪機的塗層進行更詳細且深入的研究。

在葉片內部冷卻孔的設計，可以看到在內膽的部分有三塊結構，每塊結構上都有許多冷卻孔，讓整個葉片能夠有足夠的散熱能力，避免葉片有過熱的情況。然而實際分析的結果卻發現，葉面的散熱有不太合理的狀況，葉面上的燃氣和冷卻空氣的分布不平均，原因是冷卻孔內的壓力和外側燃氣的壓力分佈不合理所導致，因此在檢視葉片內膽冷卻孔的合理性之後，針對冷卻孔的部分進行結構的修正。修正以後可以發現，冷卻氣流和燃氣的分布相對合理許多，因此冷卻空氣對葉片的冷卻比較有效，避免一開始分析時，氣流分布比較不合理的狀況。除了冷卻氣流和燃氣的分布之外，對於氣渦輪機而言，另一個較重要的就是，需要了解機組的金屬溫度分布，在這邊也是透過 CHT 的分析來確認金屬溫度分布的合理性，由計算的結果可以發現，從金屬溫度的分布來看，在葉片上會有一個個的熱點，這些熱點對於葉片可能會造成熱應力分布不均的狀況，因此對於分析的結果，可以回頭檢視葉片在熱點的位置，是否有足夠的耐受性可以讓整個機組穩定運轉，最直接的就是，確認葉

片的塗層相關參數或組成，是否有符合葉片保護的需求，以避免葉片在運轉中或是在長期運轉後發生問題。

日方在氣渦輪機的主題部分，是由 CRIEPI 的北澤留彌博士進行有關氣渦輪機塗層的微觀組織與裂紋成長研究報告。在簡報中首先針對塗層的組成進行介紹，在每個塗層都有各自的功能，包括阻絕高溫的燃氣及避免葉片組織的氧化等。然而重要的一點是，要瞭解塗層的破壞及塗層的脫層，這兩個現象會讓塗層嚴重失去其該有的作用，而造成內部的葉片的破壞，進一步降低機組熱元件運轉的壽命，因此在北澤博士的簡報中針對了塗層的特性，進行有限元素法的分析，及模擬塗層實際的運轉狀況的實驗，並針對實驗的結果進行探討。

簡報一開始，先針對有限元素分析進行探討，和熱流分析相類似的，就是在有限元素分析也要先進行建模，只是和熱流分析不同的地方在於，在塗層有限元素分析的部分模型的尺度，通常都非常小，在這麼小的尺度下需要加入熱生成的氧化層(Thermally Grown Oxidation, TGO)，根據過去的文獻及北澤博士團隊的研究，TGO 的型態通常類似餘弦函數的分布，因此在邊界條件的設定上就會把 TGO 近似成餘弦函數放入模型中進行分析；另外溫度分布的部份為了達到具有熱應力的條件，初始的溫度大約會在 1000K 以上，隨後降溫至略高於室溫的溫度，並以彈性條件進行分析。分析的結果可以得到幾個結論，首先就是 TGO 的厚度會影響到整個應力的分布，因此在分析中應用了 4 組不同的 TGO 厚度及振幅的組合去計算以探討對整個應力條件的影響，結果可以看到在 σ_{11} 和 σ_{22} 的方向，會有不同的塗層應力分布，除此之外，靠近邊

界與塗層在不同的組成也會對應力有相當的影響。

在實驗的部分團隊則建立了一套實驗裝置，以探討循環熱應力隊塗層的影響。實驗裝置分兩個部分，試片的部分根據塗層不同層的組成分成頂層、連結層與基底，每層都有不同的厚度和直徑，以模擬實際塗層的狀態，同時每層的組成也會根據每層不同的結構和功能，有不同的元素組成，另外在基底的部分，會預留幾個孔洞以量測溫度的分布狀況。另一個是加熱裝置的部分，由於塗層接觸到的溫度相當高，因此在加熱裝置使用電漿加熱槍，針對試片進行加熱。同時為了模擬冷卻的狀況，這個裝置除了在塗層試片的冷卻位置，應用水冷的方式進行冷卻之外，也在整個裝置需要冷卻的位置，應用水冷的方式進行冷卻。

實驗結果的部分可以從兩個面向來探討，一個是應用電子顯微鏡來觀察顯微組織變化的狀況，同時從 TGO 厚度改變的公式來進行探討，公式的部分從 Okada 本人在 CRIEPI 的 2009 內部報告中，可以得知 TGO 隨著輸入熱量、溫度及操作時間的關係中，在不同的熱源條件及溫度下，TGO 厚度隨著時間的變化，從公式中可以預期，生成不同的 TGO 厚度大約需要多久的操作時間，應用在氣渦輪機運轉上，即可以預測塗層大約可以耐受多久時間的操作條件，而不會使得熱燃氣直接影響到氣渦輪機的設備。

除了理論的應用之外，實驗的部分從電子顯微鏡的微觀組織中，可以看到在垂直及側向的裂紋，研究團隊應用了 4 種不同的熱處理及熱浸條件，來確認在這幾種不同的條件下裂紋的成長狀況。從裂紋產生的

情形可以發現，垂直裂紋和熱處理的條件沒有太大的關聯性，但是在側向裂紋則和熱處理的條件有相當的趨勢，因此在簡報的結論方面，除了 FEM 的分析結果外，熱處理的條件對於裂紋成長的影響，以及北澤博士的團隊對於不同的熱處理，對於 TGO 的狀態也有操作條件上的建議，這些對於未來應用到實際氣渦輪機的運轉維護上，具有相當的參考性。

(七) BOILER MAINTENANCE

發電鍋爐之大型蒸汽輸送管線經過運轉多年，材料將逐漸潛變老化，需要高精確的壽命評估技術，進行評估其殘餘壽命。而主要會影響大型蒸汽管線之壽命長短，是以潛變破壞機制為主要因素，其中潛變破壞與運轉時間長短、溫度與壓力高低有很大的相關。在許多數值模擬分析中，都在探討其殘餘壽命評估，評估結果多以銲件中之熱影響區為高風險區。故若能從現場運轉中管件取實際熱影響區樣品，進行潛變試驗，可從既有之材料潛變曲線推斷其殘餘壽命。

傳統之材料潛變試驗，其試片最厚處可能為直徑 20mm，但對現場管件而言，管件之厚度減少對於安全與壽命有很大的疑慮，尤其當管件厚度減少達 20mm 之多。故 CRIEPI 專家規劃從現場大型蒸汽輸送管件取樣較小樣品尺寸，來進行潛變實驗研究，目前是針對 600°C 火力電廠運轉的 Grade 91 材質之鋼管為目標。

因無法從電廠運轉中管件大量取得母材與銲件進行 UMC(Ultra-miniature creep)潛變實驗，故採用先從實驗室標準尺寸之母材潛變實驗

中，獲得與標準尺寸鉚件潛變實驗得到其關聯性，是較可行的。

從下圖 30 中，為 650°C 標準尺寸之母材與鉚件潛變試驗數據，鉚件之破斷壽命是明顯短於母材破斷壽命，CRIEPI 專家歸納母材與鉚件相關聯潛變壽命，如圖 31 所示，顯示有一關聯性，所以若可獲得母材潛變特性，就可估算鉚件的潛變特性。

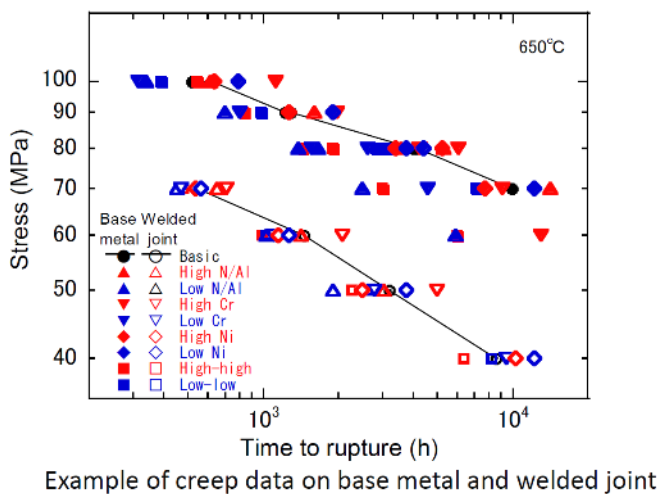


圖 30 母材與鉚件的潛變試驗

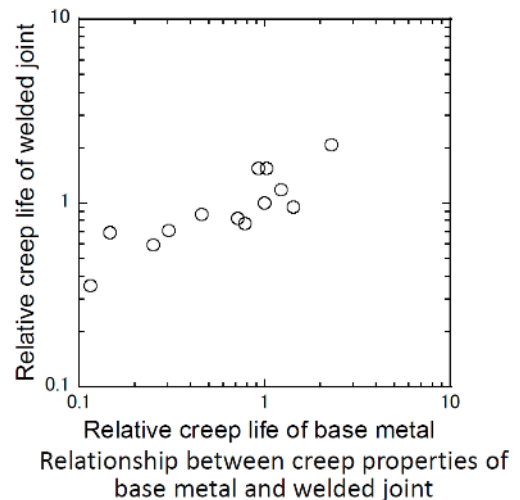


圖 31 母材與鉚件的潛變關聯

CRIEPI 專家開發之 UMC 潛變試片尺寸為長度 10mm、寬度 5mm、厚度 0.5mm 之規格，經過多次 UMC 母材潛變試驗，其試驗結果如圖 32 所示，說明 UMC 母材潛變試片結果與標準尺寸母材潛變試片結果具有一致性，故可從現場大型蒸汽輸送管取樣 UMC 尺寸母材樣品進行潛變試驗，推算標準尺寸之母材潛變結果，進而透過母材與鉚件潛變關聯性，得到大型蒸汽輸送管之鉚件之潛變壽命。

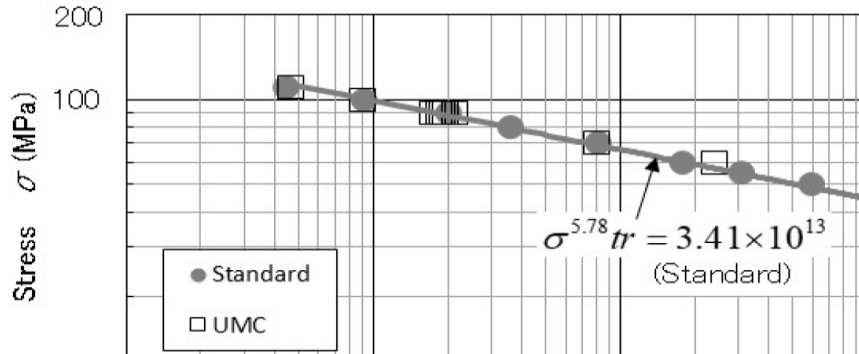


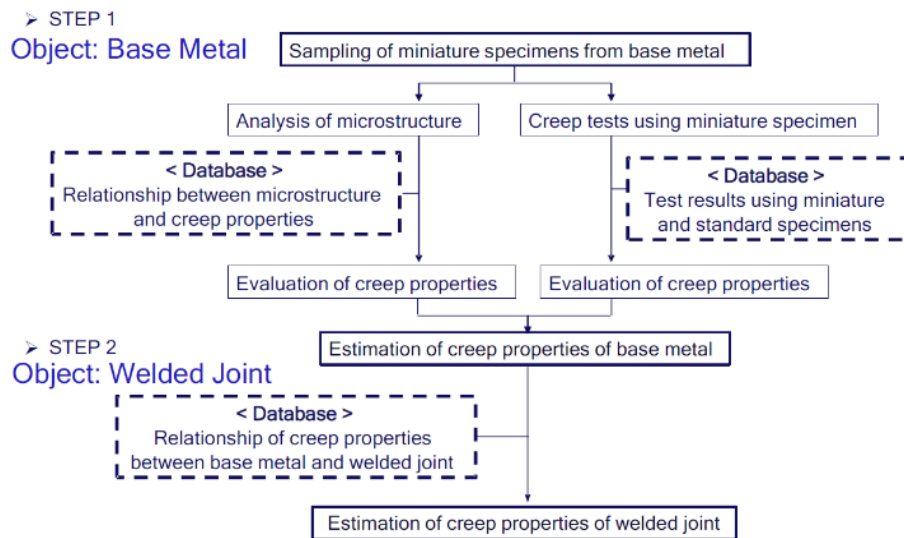
圖 32 標準試片與 UMC 試片潛變試驗比較(Grade91，650°C)
Time to rupture t_r (h)

然而因管材厚度減少，對於管材壽命是否有影響，CRIEPI 專家進行內壓潛變試驗分析，在 5%厚度減少情形下，管材之潛變壽命是沒有影響的；但在 7.5%厚度減少情形下，其管材之潛變壽命是僅餘 85%壽命；在 10%厚度減少情形下，其管材之潛變壽命僅餘 65-80%壽命，故需控制在取樣管材厚度減少在 5%以內的，才能對管材壽命不造成影響。

在不同破壞機制中，管材之外層、中間層或內層破壞優先次序位置可能是不同的，CRIEPI 專家在進行外層、中間層或內層不同位置之潛變試驗後，確認潛變試驗結果是不受取樣外層、中間層、內層位置影響，其潛變破斷時間是一致的。故在大型蒸汽輸送管進行表面處取樣 UMC 試片，是具有代表性的潛變壽命結果。

進行鍋爐現場大型蒸汽輸送管銲件之壽命評估流程如圖 33 所示，從母材處取樣 UMC 尺寸試片，進行 UMC 試片之潛變試驗，其潛變實驗結果與標準尺寸母材試片比對，並分析其顯微組織變化，可估算 UMC 母材試片潛變壽命，再參考之前建立的母材與銲件潛變試驗結果，即可評估出取樣之大型蒸汽輸送管銲件潛變性質。

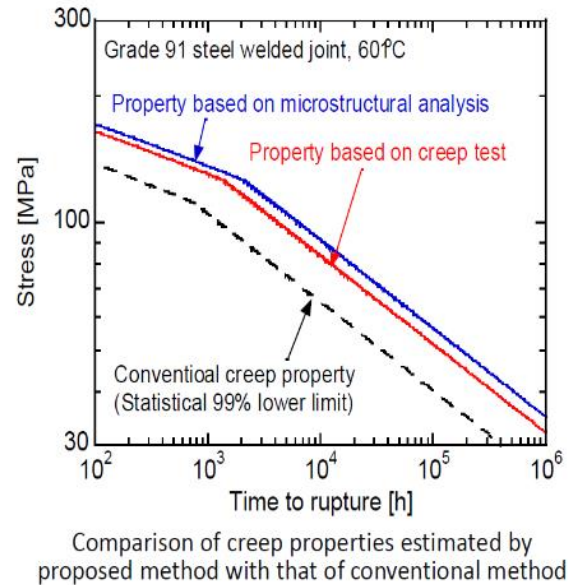
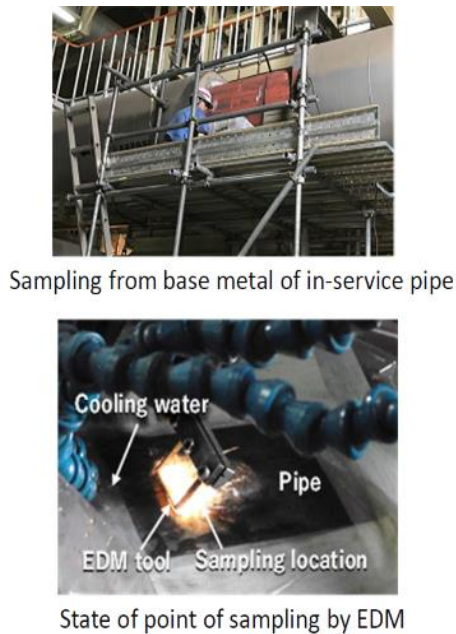
Flow of life assessment



資料來源：Masatsugu Yaguchi, “Creep Lifetime Assessment Using Small Samples for 600°C-Class Boiler Piping in Japan”, 2023

圖 33 UMC 尺寸試片壽命評估流程

CRIEPI 專家說明進行鍋爐現場大型蒸汽輸送管之 UMC 試片尺寸的放電加工過程，如圖 34 所示，可達到取樣大型蒸汽輸送管之 UMC 母材後，進行潛變實驗，推估大型蒸汽輸送管之銲件潛變壽命之目的，CRIEPI 專家將後續推動至 USC 鍋爐進行。



資料來源：Masatsugu Yaguchi, “Creep Lifetime Assessment Using Small Samples for 600°C-Class Boiler Piping in Japan”, 2023

圖 34 實際管件取樣試驗之應用

本所也正在規劃類似微小試片試驗，將購置類似 CRIEPI 的 EDM 加工機，同樣可進行大型蒸汽輸送集管放電加工，取樣表面母材，並可後續進行常溫之微小試片之拉伸試驗，待微小試片之拉伸試驗技術熟練，逐步購置微小試片潛變試驗機台，評估國內電廠大型蒸汽輸送管材料壽命，後續與 CRIEPI 專家持續交流。

本所發表電廠水牆管破損分析與無人機目視檢測，與會之 CRIEPI 鍋爐維護專家對於無人機在鍋爐爐膛巡檢技術相當感興趣，本所亦詳盡說明無人機特性，與如何飛行並進行檢查水牆管缺陷，後續開發人工智慧辨識缺陷模型。本所擁有之無人機為室內型無人機，無 GPS 裝置，依賴操作人員手動控制，貼近爐壁逐步紀錄水牆管表面特徵，畫面中可顯示高清晰之影像與光線，空氣中灰塵不會影響影像畫面，目前無裝設其他感測器，如超音波測厚器，飛行時間約 10 分鐘。

三、技術參訪

本次技術參訪參觀了 CRIEPI 橫須賀所區兩個重要研究室，包含能源轉型研究室(Energy Transformation Research Laboratory, EXRL)，其主要從事前瞻技術的研發與創新，例如能源的轉換與儲存、核能電廠的長期使用、未來世代核反應爐的發展、實現火力發電機組之淨零排放等，以及電網創新研究室(Grid Innovation Research Laboratory, GdRL)，其致力於建構新型態的廣域電力系統與區域能源供需基礎設施，促進產業、交通及住宅部門電氣化，以提升再生能源併網量，同時確保供電穩定。

首先參訪的是 GdRL 研究室電力設備技術部門(Electric Facility Technology Division)內的長型 XLPE 電纜劣化試驗大樓(Long length XLPE cable deterioration test building)，有鑑於 XLPE 電纜自 1980 年代起大量使用於輸配電系統，迄今已使用超過 40 年，為了提升系統韌性，針對老舊設備進行最適運轉維護，並制定策略性汰換計畫，研究與調查 XLPE 電纜絕緣材質的劣化情形是一項極具挑戰且重要的工作。

高橋俊裕(Toshihiro Takahashi)博士介紹劣化前的放電檢測技術(Pre-breakdown discharge detection technique)，採用 500KV AC 變壓器(如下圖 35、36 所示)，針對已汰換的 200 公尺等級 XLPE 電纜進行高壓測試，有助於了解電力絕緣材質劣化的因素。



圖 35 XLPE 電纜劣化試驗簡介



圖 36 500KV AC 變壓器

接下來參觀的是先進配電試驗大樓(Advance distribution grid test building)之電網通訊技術部門(Grid and communication technology division)，由CRIEPI 福島健太郎(Kentaro Fukushima)博士介紹先進配電網試驗設備，其研究主題包含透過用戶端設備(如功率調節器、電動車)的虛功率調節用戶電壓、配電自動化系統的先進通訊網路應用、電力線路的安全度評價等。

隨著配電系統技術進步，電力需求面也產生不同以往的變革，例如：大量躉購(Feed-In Tariff, FIT) 的太陽光電併入電網，導致用戶電壓等級超過最大限制；電業自由化持續向前推進；智慧電網、智慧社區等新型態配電系統的出現。為了適應上述變革、解決相關問題，先進配電系統必須持續進步，達成電力供給面與需求面雙向同步互動，而本大樓的試驗設備即在評估測試先進配電系統。

緊接著參觀的是 EXRL 研究室之鋰二次電池效能評估試驗設備

(Lithium secondary battery performance evaluation testing equipment)，由 CRIEPI 能源化學部門(Energy chemistry division)的三田裕一(Yuichi Mita)上席研究員介紹鋰二次電池效能的試驗設備。三田研究員表示為了保持鋰離子電池的長期性能，材料劣化分析對於闡明電池性能退化過程至關重要，在該設施中，可以通過拆解從小型電池到用於電網應用的大型電池的所有材料來快速分析材料，並且可以單獨掌握正極和負極電極材料的劣化狀態，這是由於許多電池材料會與水分發生反應和劣化，因此該設施配備了將水分含量降至最低的乾燥室和充滿惰性氣體(Ar)的手套箱，以防止電池損壞，在保持性能的同時可以進行材料劣化分析。此外，CRIEPI 為因應日新月異的電池材料研究需求，該實驗室也配置了電池電極合成、塗層和原型電池生產的整合設備，用於未來電池的性能改進研究，使用的材料分析儀器包括 XRD、SEM/EDX 以及 ICP-OES 等，並於說明過程表示如何透過材料分析發現電池正極材料的非均相反應為造成電池容量下降的原因案例。相關設備的規格如下：

- 乾燥室：面積 100m²，出口露點-70°C（水分 3ppm）以下。
- 真空置換手套箱：直接連接到乾燥室，露點-100°C（水分 0.01ppm）以下。
- 超乾式發電機：局部露點-90°C（0.1ppm）以下。
- 電池材料合成設備：電爐溫度 1000°C 以上，可通入多種氣體（O₂、Ar、N₂）。

最後參觀的是 EXRL 研究室的實體結構樣本的彎曲與 BIP 壓力測試設備(Bending & internal pressure on real structure samples)，由 CRIEPI 材料科學部門(Materials science division)的 Satoshi Nishinoiri 博士說明電廠管路彎曲與內部壓力測試之方式。Nishinoiri 博士說明在高溫條件下，同時使用蒸汽內部壓力和四個彎曲負荷點，測量大型管路樣本變形及損傷的演變過程，直到管路破裂，測試後的樣本可參考下圖 37。此一測試設備可用於驗證電廠管路的剩餘壽命評估、發展非破壞性的檢測技術、管道損壞監測系統等，此種測試方法有助於評估電力資產壽命評估及管理，對電廠的運作安全和可靠有非常大的幫助。



圖 37 BIP 壓力測試樣本

本次的參訪針對日本電力最新技術之發展有更深入的了解，也期許本公司持續與日本保持交流，關注新能源技術、電纜和電池材料的劣化測試、電網管理技術之發展，持續學習其最新研究成果並進行經驗交流，以共同應對國際電業市場不斷的變化，達到電力供應永續發展之目標(團員合照如圖 38)。



圖 38 技術參訪團員合照

四、心得及建議

在與 CRIEPI 研究人員進行技術交流會議，以及參訪橫須賀所區的過程中，可以發覺 CRIEPI 自 1951 年成立以來，在電力與能源領域，累積相當深厚的基礎研究能力，針對一項個別研究主題(如電纜劣化、配電系統、電廠管路等)進行高資本密集的實驗設備投資，儘管研究範疇相對小，研究質量卻十分精密，其成果反應在 2022 年共發表 417 篇學術審查論文並申請 49 項專利。

然而，CRIEPI 的研究經費主要來自日本電力公司收入移撥及政府研究經費，自 2016 年日本政府全面實施電力零售自由化以來，大量電力零售業者進入市場競爭，已影響傳統大型電業的營業收入，導致 CRIEPI 的研究預算逐年減少。同時，日本各家電力公司為了提升競爭力，也紛紛自行成立研究部門，投入新能源技術的研發與應用，試圖發展出新興商業模式，提升電力的附加價值。因此，CRIEPI 也開始逐步調整研究方向，在過往學

術研究的基礎上，提升電力技術的商業應用價值，促使研究領域符合當前的電業發展趨勢。

隨著日本政府宣示 2050 年碳中和目標，對日本電力與能源產業而言無疑是一項前所未有的挑戰，CRIEPI 作為日本電業的中央學術研究機構，意識到能源系統轉型是達成碳中和的必經之路。因此，建構「永續且社會可接受的新能源系統(Sustainable and social acceptable energy system)」是未來電力與能源產業發展的重要課題，其中包含七大目標：電氣化、區域能源供需平衡、電網創新、以再生能源為主的電力供應、零碳火力發電、核能安全與成本降低、能源系統韌性等。

為了在 2050 年實現上述七大目標，CRIEPI 據此規劃相關研究發展方向，包含：推廣零碳能源與電氣化社會、建構可承受災害風險與再生能源大量併網的電力系統、社會與經濟分析、核能風險、能源轉型與電網創新等領域。

其中，令人印象深刻的莫過於，CRIEPI 以「SEEDS」作為中心思想，開展出能源轉型(Energy Transformation)相關研究。SEEDS 除了字面上「種子」的意義外，係指藉由永續能源生態系統實現社會脫碳化(Sustainable Energy Ecosystem makes Decarbonized Society, SEEDS)，具體包含三個關鍵研究主題：

- (一)建構並維持最佳能源配比(Build and maintain the best energy mix)，
避免地緣政治風險，提高能源自主性，以確保能源安全。
- (二)電力部門脫碳化(Decarbonized the power sector)，持續發展再生能源、核能發電、零碳火力 CCUS。

(三)建構先進能源網路(Form an advanced energy network)，整合氫與合成氣體的生產、運輸及儲存，以提升電力系統的彈性和韌性。

另外，CRIEPI 在氣渦輪機材料方面的深入研究，尤其是在塗層領域，為本公司的葉片鉚修技術提供了寶貴的參考。藉由日方在材料方面的主題中分享，發現 CRIEPI 在實際應用上投入了相當大的心力，從最初的模擬分析一直到後期實際試片的進行實測。值得注意的是，日方在評估塗層的方法上運用了多種驗證模式，以確保他們的研究結果的可信度。這種系統性的驗證方法是本公司可以借鏡學習的方面。在熱流領域，與材料領域相比，實驗較不直觀，且設備取得相對困難。因此，精準設置熱流領域的評估模型變得至關重要，以避免模擬出許多專案卻缺乏系統性驗證的情況。特別是對於關鍵設備，例如氣渦輪機的內流場，模擬結果是否能真實呈現實際運轉情況，以確保實際機組的穩定運轉，這些不確定性更為顯著。因此，除了這次的交流外，也期待未來也能夠有更多機會與其他類似領域的能源機構交流，以提升本公司的研究價值。

在儲能系統方面，日本正持續擴大電池儲能系統 (BESS) 之應用，尤其在島嶼和區域微電網中。CRIEPI 針對鋰離子電池進行測試，以了解其退化特性，並提出最佳運行方法，並進行電池材料的基礎研究。電池的電極合成、塗層和原型電池生產等方面的研究對電力事業具有重要性。除了鋰離子電池，還存在其他儲能技術，如鈉硫電池和液流電池。

在 XLPE 電纜劣化試驗方面，CRIEPI 提出並建立測試方法與環境，評估老舊電纜的狀態，有助於制定最佳的維護和替換策略，以確保能源供應的可靠性和安全性。在燃煤鍋爐維護技術領域，建置出 UMC 與 BIP 壓力測試技術與設備，有助於進行電力資產壽命評估。CRIEPI 的研究發展不僅以

實地應用為導向，還進行基礎研究和前瞻性研究。這些都值得持續關注其發展並進行合作。

藉由本次參與第 33 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會，雙方均獲得豐碩交流成果，不僅有助於深化雙方技術發展的理解，也為應對淨零碳排的挑戰提供了重要的協作機會。而明年交流年會將輪由本公司綜合研究所於 9 月份在臺北舉行，本次 CRIEPI 的精心規劃與安排，可以作為我方舉辦下一屆年會的重要參考。本所將縝密規劃研發策略及技術交流之議題規劃，以成功舉辦下(34)屆 CRIEPI/技術交流年會，以維持台日友好交流關係。



圖 39 本屆會議與會人員合照