

出國報告（出國類別：開會）

參加第 35 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：張志聲 副所長

曹昭陽 高壓研究室主任

黃筱雯 企劃控制專員

江文莊 電機研究專員

陳俊瑋 電機研究專員

李孟綸 規劃專員

派赴國家/地區：日本

出國期間：114 年 9 月 9 日至 114 年 9 月 12 日

報告日期：114 年 10 月 20 日

出國報告審核表

出國報告名稱：參加第 35 屆 CRIEPI／TPC 技術交流年會

出國人姓名 (2人以上,以1人為代表)		職稱	服務單位
張志聲		副所長	綜合研究所
出國類別		☐ 考察 ☐ 進修 ☐ 研究 ☐ 實習 ☒ 開會 ☐ 其他_____ (請依出國任務填列,例如業務接洽、海外承攬、駐外等)	
出國期間: 114年9月9日至114年9月12日		報告繳交日期: 114年10月20日	
出國人員 自我審核	計畫主辦 機關審核	審 核 項 目	
☒	☒	1.依限繳交出國報告	
☒	☒	2.格式完整(本文必須具備「目地」、「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:	
☐	☐	(1) 不符原核定出國計畫	
☐	☐	(2) 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容	
☐	☐	(3) 內容空洞簡略或未涵蓋規定要項	
☐	☐	(4) 抄襲相關資料之全部或部分內容	
☐	☐	(5) 引用相關資料未註明資料來源	
☐	☐	(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:	
☐	☐	(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。	
☐	☐	(2) 於本機關業務會報提出報告	
☐	☐	(3) 其他	
☐	☐	10.其他處理意見及方式:	

報告人：
(2人以上，
得以1人代表)

單位：
主管

主管處：
主 管

總經理：
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：

參加第 35 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會

頁數 77 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

張志聲/台灣電力公司/綜合研究所/副所長/(02)2360-1007

曹昭陽/台灣電力公司/綜合研究所/高壓研究室主任/(02)8078-2221

黃筱雯/台灣電力公司/綜合研究所/企劃控制專員/(02)2360-1176

江文莊/台灣電力公司/綜合研究所/電機研究專員/(02)8078-2265

陳俊瑋/台灣電力公司/綜合研究所/電機研究專員/(02)2360-1241

李孟綸/台灣電力公司/再生能源處/規劃專員/(02)2365-1336

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：114 年 9 月 9-12 日

派赴國家/地區：日本/我孫子市

報告日期：114 年 10 月 20 日

關鍵詞：潔淨能源策略、太陽能、氣候預測、電網韌性、地質分析

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 35 屆技術交流年會輪由日方主辦，討論議題為 R&D and Clean Energy Strategy、Accelerating Solar Adoption、Climate Forecast on Risk Reduction、Grid Resilience 以及 Geological Analysis for Earthquake。
3. 為能進一步瞭解電力技術之研發趨勢，本公司由綜研所張副所長率團參加本屆年會，加強與日本技術交流並瞭解電網韌性研究議題，對本公司電網韌性提升及相關計畫執行有相當助益。

目錄

一、出國任務與行程	1
二、會議內容	6
(一) R&D AND CLEAN ENERGY STRATEGY	6
(二) ACCELERATING SOLAR ADOPTION	16
(三) CLIMATE FOREST ON RISK REDUCTION	26
(四) GRID RESILIENCE	32
(五) GEOLOGICAL ANALYSIS FOR EARTHQUAKE	45
三、技術參訪	54
四、心得及建議	70

圖 表 目 錄

圖 1-1 CRIEPI 各研究據點分布圖-Abiko 為自然與環境科學研究核心據點 ...	1
圖 1-2 本次技術交流年會雙方參與人合影.....	3
圖 1-3 本公司參訪人員於我孫子所區合影.....	5
圖 2-1 日本核能相關政策演變.....	7
圖 2-2 研究結果-資訊提供前民眾對先進核能反應爐的接受度	8
圖 2-3 研究結果-資訊提供後民眾對先進核能反應爐的接受度	9
圖 2-4 研究結果-民眾對先進核能反應爐的主要關切與疑慮	10
圖 2-5 台電研發策略願景與三大轉型主軸.....	12
圖 2-6 台電透過環境掃描及早掌握潛在風險與機會	13
圖 2-7 台電運用可視化策略雷達工具進行發展機會評估	14
圖 2-8 台電於燃氣渦輪葉片再生領域之創新應用案例	15
圖 2-9 橋本篤博士.....	17
圖 2-10 透過單一向量法預測雲的移動模式.....	18
圖 2-11 透過向量分布法預測雲的移動模式.....	19
圖 2-12 單一向量法與向量分布法在壹岐島範圍的太陽輻射預測 RMSE	20
圖 2-13 壹岐島上的光電案場.....	21
圖 2-14 光電輸出曲線配合不同的 PCS 容量限制	21
圖 2-15 壹岐島光電預測 RMSE.....	22
圖 2-16 分散式能源系統衝擊分析.....	24
圖 2-17 系統衝擊分析及改善建議流程.....	24
圖 2-18 再生能源可併網容量圖資.....	25
圖 2-19 CRIEPI 開發的輸電鐵塔基本風速地圖實例.....	27
圖 2-20 綜研所高壓室曹主任昭陽進行簡報.....	29
圖 2-21 本公司「三值四級制預警機制」直覺化呈現危害風險等級的即時監 測資訊平台	30
圖 2-22 風險評估與管理系統簡報首頁.....	33
圖 2-23 停電期間與自然災害的轉變.....	33
圖 2-24 日本海平面溫度逐年上升.....	34
圖 2-25 日本近期發生的自然災害.....	35
圖 2-26 電網韌性的概念.....	35
圖 2-27 風險評估與管理系統.....	36
圖 2-28 風險評估與管理系統的運作流程.....	37
圖 2-29 RAMPT 的應用實例(2018 年第 21 號颱風).....	38
圖 2-30 2018 年第 21 號颱風的災害預測準確率分析	39
圖 2-31 風險評估與管理系統的效益.....	40
圖 2-32 RAMP 的實際使用情況	41

圖 2-33 再生能源占比逐漸提升，系統慣量逐漸下降	42
圖 2-34 輕載與重載下跳脫 1.6GW 的頻率響應.....	43
圖 2-35 台灣 2024 年農曆新年期間跳脫 1000MW 時的系統頻率變化.....	44
圖 2-36 影響系統最低頻率的因素.....	44
圖 2-37 2024 年能登半島規模 7.5 大地震.....	46
圖 2-38 2024 年能登地震斷層破裂反演.....	46
圖 2-39 能登半島東北部 Wakayama River 次生斷層壓縮摺皺谷地.....	47
圖 2-40 Wakayama River 谷底野外調查	47
圖 2-41 深層重力式邊坡變形 (DSGSD)	48
圖 2-42 能登半島北海岸海階研究.....	48
圖 2-43 台灣地熱資源及 10 大潛能區.....	49
圖 2-44 大屯山 AGS 國際合作探勘計畫	51
圖 2-45 磺嘴山-金山平原地熱探勘計畫	52
圖 2-46 仁澤地熱區熱源架構.....	53
圖 2-47 仁澤地熱電廠效率提升.....	53
圖 3-1 岩崎利泰博士.....	54
圖 3-2 突變基因在人體中的複製和消除.....	55
圖 3-3 流式細胞分選儀自動細胞分取解析裝置	56
圖 3-4 基因體分析儀.....	56
圖 3-5 實驗室自動化工作站.....	57
圖 3-6 遠心力載荷岩盤模型試驗裝置.....	58
圖 3-7 進水口泥沙流入的問題.....	59
圖 3-8 國外現有的技術.....	61
圖 3-9 不同導流板形狀的研究目的.....	62
圖 3-10 水力模型試驗的實驗方法.....	63
圖 3-11 q_i/q 的影響.....	65
圖 3-12 進水口寬度的影響.....	65
圖 3-13 結論與未來展望.....	66
圖 3-14 CRIEPI「空氣力荷載試驗裝置(風洞)」的研究設施以及解說人員 ..	68
表 1-1 出國行程簡述.....	2
表 1-2 第 35 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會議題交流情形	2

一、出國任務與行程

本公司與日本電力中央研究所（Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI）雙方基於技術合作合約，每年輪流舉辦技術交流年會，並視需要進行資料交換、人員互訪及邀請專家指導等合作活動，以持續獲取電力研發新知並提升本公司研發能力。

第 35 屆日本電力中央研究所技術交流年會(The 35th CRIEPI/TPC General Meeting)由 CRIEPI 主辦，於 114 年 9 月 9~12 日於千葉縣我孫子市我孫子所區 (Abiko Area)舉辦(如圖 1-1)。

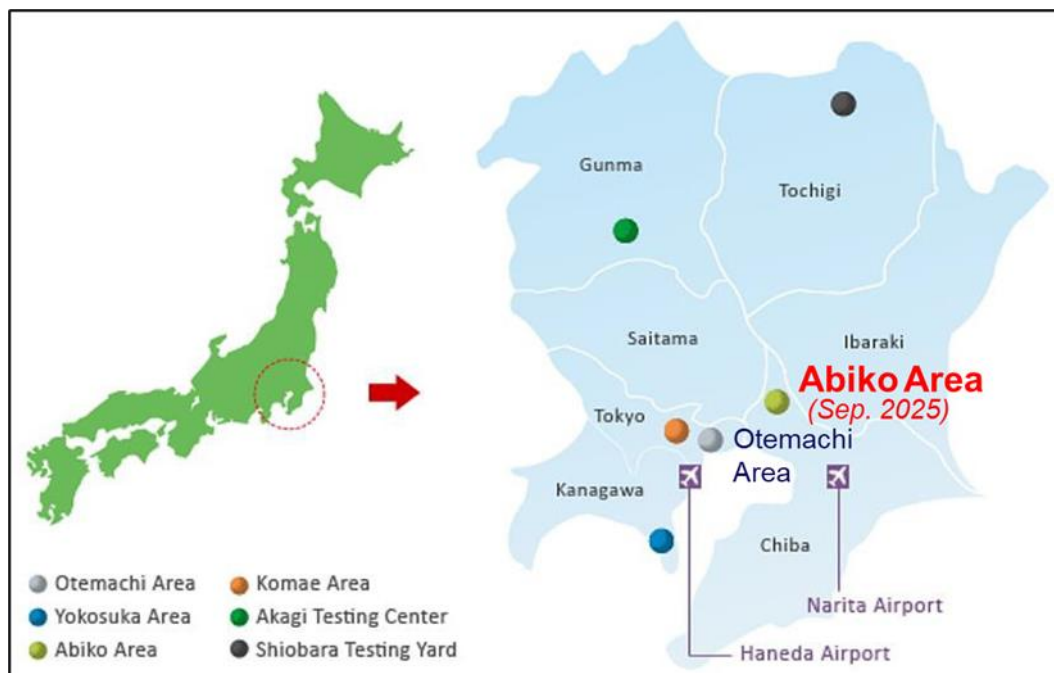


圖 1-1 CRIEPI 各研究據點分布圖-Abiko 為自然與環境科學研究核心據點

此次出國行程簡述如下(如表 1-1)：

表 1-1 出國行程簡述

日期	行程內容
9 月 09 日(二)	自台灣啟程前往日本
9 月 10 日(三)	出席第 35 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會並進行議題交流
9 月 11 日(四)	於我孫子所區進行技術參訪
9 月 12 日(五)	返抵台灣，結束出國任務

本次會議主題為「天然災害」，聚焦日本與台灣電力系統共同面臨之挑戰。

日本電力中央研究所由 Associate Vice President, Director of Planning Group Dr. Takashi NISHIHARA 率領相關研究人員出席；本公司則由綜研所張副所長志聲率領綜研所及再生處共 5 位同仁出席，會議包含五項重點議題，台日雙方均針對各主題派員簡報與交流，內容如下(如表 1-2)：

表 1-2 第 35 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會議題交流情形

交流議題	CRIEPI 發表議題與講者	TPC 發表議題與講者
Topic 1: R&D and Clean Energy Strategy 議題一：研發與潔淨能源策略	How does the public perceive innovative nuclear technologies? Dr. Kenta HORIO (Socio-Economic Research Center)	Innovation-powered R&D : Taipower's Strategies and Initiatives Ms. Hsiao-Wen HUANG (Planning Specialist, R&D Planning Office, TPRI)
Topic 2: Accelerating Solar Adoption 議題二：太陽能推廣加速	Development of Solar Radiation Forecasting and Analysis System (SoRaFAS) Dr. Atsushi HASHIMOTO (SSRL)	Impact Analysis of Solar Interconnection and GIS Application on Hosting Capacity Mr. Jun-Wei CHEN (Engineer, Load Management Research Lab, TPRI)
Topic 3: Climate Forecast on Risk Reduction 議題三：氣候預測與減災	Development of basic wind speed maps for wind resistant design of transmission towers in Japan and assessment of global warming impacts	Real-Time Monitoring and Risk Management of Transmission Tower Foundations Under Extreme Weather Conditions

交流議題	CRIEPI 發表議題與講者	TPC 發表議題與講者
	Dr. Yoshikazu KITANO (SSRL)	Dr. Chao-Yang TSAO (Director, High Voltage Research Lab, TPRI)
Topic 4: Grid Resilience 議題四：電網韌性	Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) Dr. Yoshiharu SHUMUTA (SSRL)	Estimation of system real-time frequency regulation ancillary service demand using wide area measurement system Dr. Wen-Zhuang JIANG (Electrical Engineer, Electric Power Research Lab, TPRI)
Topic 5: Geological Analysis for Earthquake 議題五：地震地質分析	Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes Dr. Keitaro KOMURA (SSRL)	Taipower's Geothermal Development Strategy Mr. Meng-Lun LI (Planning Specialist, Dept. of Renewable Energy, TPC)



圖 1-2 本次技術交流年會雙方參與人合影

除年會交流外，大會並安排參訪我孫子所區 (Abiko Area)，該所區為永續系統研究實驗室(Sustainable System Research Laboratory, SSRL) 之核心據點，聚焦領域如下：

- 電力設施韌性強化：防災、運維與風險管理。
- 環境影響與風險評估：支援電力設施之選址與運轉。
- 核能永續利用：放射性廢棄物處置與輻射安全研究。
- 再生能源技術開發：離岸風電、碳循環與資源循環，支援碳中和目標

參訪項目：

- 低劑量率輻射生物效應研究設施 (Low Dose-Rate Radiation Biological Effects Research Facility)
- 岩土力學離心試驗系統 (Geotechnical Centrifuge System)
- 水工模型試驗 (Hydraulic Model Experiments)
- 艾菲爾型風洞 (Eiffel-Type Wind Tunnel)



圖 1-3 本公司參訪人員於我孫子所區合影

透過現地觀摩與技術交流，本公司進一步了解 CRIEPI 在防災工程、環境永續與能源轉型領域的研究成果，上述成果將作為本公司後續防災技術研發、能源轉型與國際合作的重要參考依據。

二、會議內容

(一) R&D and Clean Energy Strategy

本場次先後由 CRIEPI Socio-Economic Research Center 的 Dr. Kenta HORIO 報告「How does the public perceive innovative nuclear technologies?」及本所研究發展企劃室的黃筱雯專員報告「Power Innovation R&D Strategy under Net-Zero Transformation」。以下就報告重點分別摘述：

1. How does the public perceive innovative nuclear technologies?

有關日方在本主題之簡報，由 CRIEPI 的社會經濟研究室 Dr. Kenta HORIO 分享日本大眾如何看待創新的核能技術。在能源政策背景方面，日本政府於 2014 年在福島第一核電廠事故後，透過第四次能源基本計畫提出「最小化對核能依賴」的方向。然而，隨著能源安全及減碳壓力日益升高，2025 內閣通過的第七次能源基本計畫已將政策轉為「最大限度利用再生能源、核能，以及其他兼具能源安全與高度減碳效果的電源」，如圖 2-1 所示。此外，岸田首相於 2022 年宣示推動具新安全機制的次世代先進核能反應爐，並於 2023 年納入 GX 基本政策，顯示日本已重新將核能視為能源轉型的重要選項。

Policy Developments

Nuclear Energy

- In 2014, Japanese government introduced a policy to "*minimize dependency on nuclear energy*" (4th Strategic Energy Plan), following the Fukushima Daiichi nuclear accident
- In February 2025, the Cabinet adopted the 7th Strategic Energy Plan, shifting policy to "*maximize use of renewable energy, nuclear energy, and other power sources that contribute to energy security and have high decarbonization effects*"

Advanced Reactors

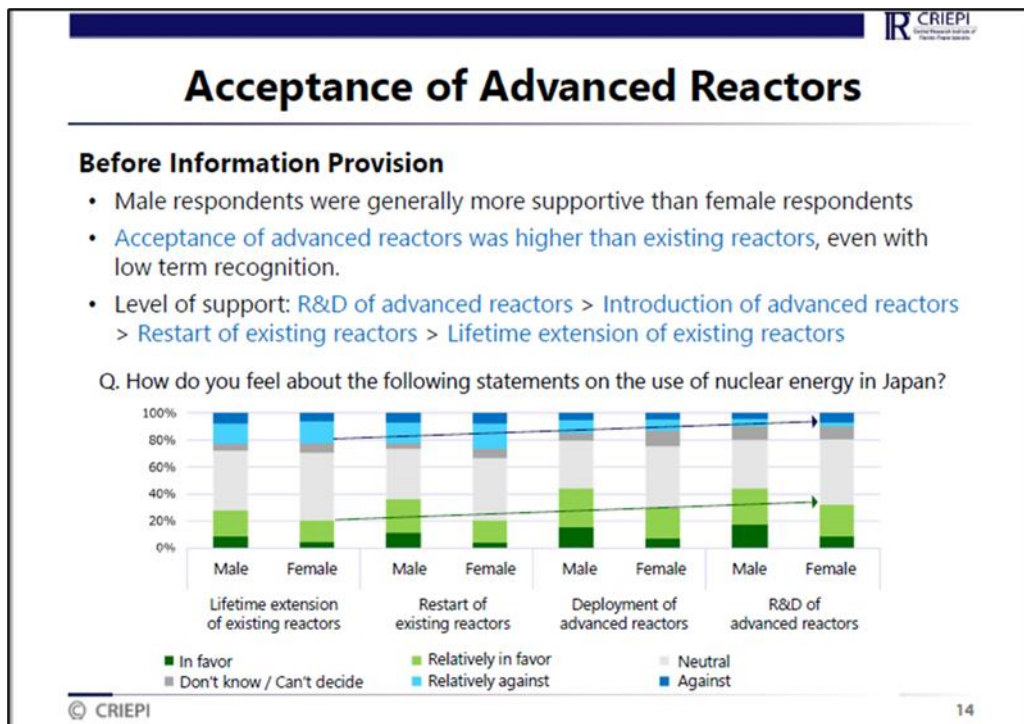
- On 24 August 2022, then Prime Minister Kishida announced the consideration of "*developing and constructing next-generation advanced reactors with new safety mechanisms*" at GX Implementation Council
- This direction was incorporated in the GX Basic Policy, adopted by the Cabinet in February 2023

資料來源：Kenta HORIO, "How does the public perceive innovative nuclear technologies?," 2025

圖 2-1 日本核能相關政策演變

在社會觀感方面，日本原子力關係機構(AERO) 2024 年調查顯示，約 40% 民眾支持「漸進式淘汰」核能，僅約 20% 主張維持或增加，整體上支持核能的比例雖逐步上升，但立即廢止的聲音仍存在。值得注意的是，NHK 於 2022 年的調查顯示，有 48% 民眾支持政府研議建設次世代先進核能反應爐，反對者則為 32%，顯示先進核能反應爐的社會接受度相較現有核能反應爐更高。

本次 CRIEPI 的研究以「如何理解大眾對先進核能技術的觀感」為核心，採用深度訪談與大規模問卷調查並行的方法，聚焦於次世代先進輕水爐與小型模組化反應爐(SMR)。研究顯示，多數民眾對相關專有名詞的認知不足(超過六成從未聽過)，僅有 16% 表示熟悉，但整體而言，對先進核能反應爐的接受度仍高於既有核能反應爐。支持度排序為：研發先進核能反應爐>導入先進核能反應爐>重啟既有核能反應爐>延役既有核能反應爐，其中男性支持度普遍高於女性，如圖 2-2 所示。



資料來源：Kenta HORIO, “How does the public perceive innovative nuclear technologies?,” 2025

圖 2-2 研究結果-資訊提供前民眾對先進核能反應爐的接受度

在資訊提供的影響上，問卷結果顯示，民眾在獲得更多資訊後，傾向轉為「難以判斷」，反映出對技術進一步認識後，會意識到議題的複雜性。然而，深度訪談則因受訪者理解了更多安全機制，部分轉向正面，顯示溝通方式對態度有關鍵影響，如圖 2-3 所示。

Acceptance of Advanced Reactors

After information provision

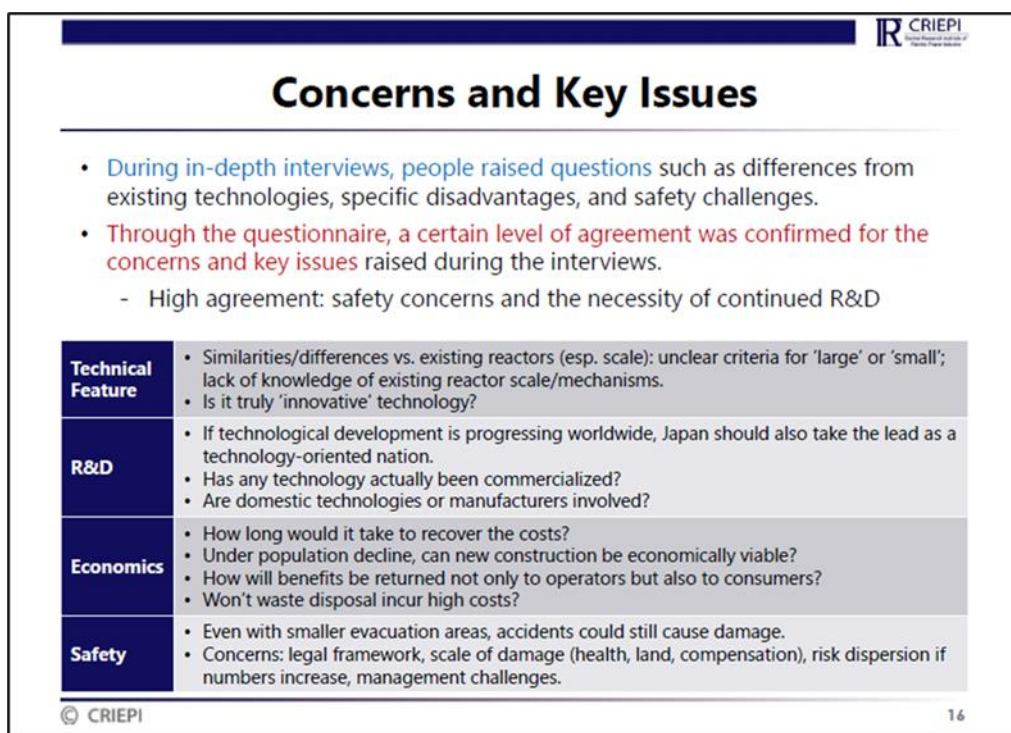
- "In favor" and "neutral" responses decreased, "Don't know / Can't decide" increased ("Upon reflection, it is difficult to judge")
- The questionnaire (quantitative survey) and interviews (qualitative survey) showed different tendencies
- During in-depth interview, positive responses increased due to better understanding of the technology, particularly its safety features

	Male			Female		
	Before	After	Change	Before	After	Change
In favor	16.1%	10.9%	-5.2%	7.5%	4.0%	-3.5%
Relatively in favor	28.0%	29.3%	1.3%	24.1%	20.4%	-3.8%
Neutral	35.8%	29.8%	-6.1%	46.0%	36.2%	-9.9%
Relatively against	9.7%	9.9%	0.3%	9.1%	11.4%	2.3%
Against	5.4%	5.6%	0.2%	4.1%	5.4%	1.3%
Don't know/ Can't decide	5.0%	14.5%	9.5%	9.2%	22.8	13.6%

資料來源：Kenta HORIO, "How does the public perceive innovative nuclear technologies?," 2025

圖 2-3 研究結果-資訊提供後民眾對先進核能反應爐的接受度

至於主要關切與疑慮，民眾聚焦在四個面向，如圖 2-4 所示：其一，技術層面，是否真具創新性、與現有反應爐有何差異；其二，研發層面，是否已有國際商業化案例，以及日本是否應積極投入；其三，經濟層面，建設與維運成本能否回收，並在少子化情境下是否具可行性；其四，安全層面，即使規模縮小，事故仍可能帶來損害，並涉及法制、補償與風險分散管理等問題。



資料來源：Kenta HORIO, “How does the public perceive innovative nuclear technologies?,” 2025

圖 2-4 研究結果-民眾對先進核能反應爐的主要關切與疑慮

綜合觀察，研究指出，先進核能反應爐的社會接受度雖高於既有核能反應爐，但其認知度不足，且態度呈現「複雜且細緻」的特徵：部分因安全機制理解而更支持，部分則因意識到不確定性而傾向保留。這反映出未來核能創新技術的推動，除了技術研發外，更需透過有效的資訊提供與社會對話，才能逐步提升社會共識與接受度。

2. Innovation-powered R&D：Taipower's Strategies and Initiatives

對全球氣候變遷與能源轉型挑戰，台灣已設定 2050 淨零排放目標。根據國家能源轉型路徑，屆時再生能源需大幅提升至 60-70%，同時逐步淘汰燃煤電廠，並發展氫能、地熱等新興能源技術。然而，伴隨 AI 應用、半導體產業與電動車的快速成長，電力需求仍持續攀升，為供需平衡帶來嚴峻挑戰。

國際能源總署(IEA)指出，實現淨零目標所需的關鍵技術中，約有 35%仍處於研發或試驗階段，顯示能源產業必須加速創新與技術突破。對台電而言，如何在確保電力穩定供應的同時，加速佈局與發展前瞻電力技術，已成為當前最迫切的課題。

本次在第 35 屆 CRIEPI/TPC 技術交流年會上，本公司綜合研究所研究發展企劃室黃筱雯專員即以「Innovation-powered R&D：Taipower's Strategies and Initiatives」為主題，正是針對上述課題提出回應。報告分享台電在研發策略與創新實踐上的具體作法，並透過案例展示如何將創新轉化為成果，協助公司在能源轉型中兼顧穩定供電與技術突破兩大目標。

台電考量全球淨零技術發展趨勢、公司未來經營策略與台灣在地化挑戰，研發策略聚焦於三大轉型支柱，作為支撐淨零與能源轉型的核心方向，如圖 2-5 所示：

- 淨零轉型 (Net-Zero Transition)：發展低碳及零碳能源技術，包括氫能、二氧化碳捕捉利用與封存(CCUS)、地熱等，推動能源結構調整並邁向淨零目標。
- 數位轉型 (Digitalization)：導入 AI、大數據、IoT 技術，強化營運效率與電力系統彈性。
- 韌性強化 (Resilience Enhancement)：因應極端氣候挑戰，提升防災能力、設備可靠度與系統恢復力。

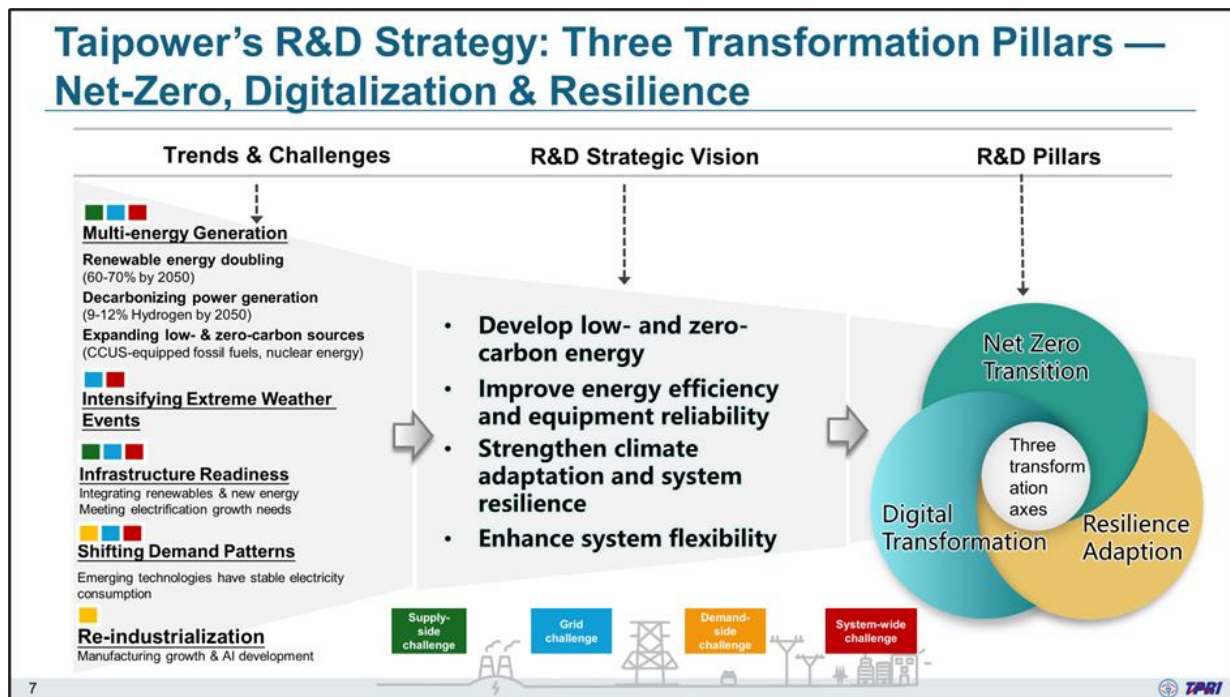


圖 2-5 台電研發策略願景與三大轉型主軸

在迎接未來挑戰的同時，我們觀察到淨零轉型正全面重塑電力價值鏈。由發電、輸配電到用戶服務，各類新技術快速湧現，特別是再生能源與數位化解決方案，不僅帶來新的挑戰，也創造嶄新價值。作為研發規劃單位，我們必須持續洞察趨勢，辨識潛在風險與機會，並將其轉化為公司創新作為的重要依據。

因此，台電公司透過環境掃描(Environmental Scanning，如圖 2-6)，持續關注技術、政策、市場與需求的變化，以便及早掌握潛在風險與機會。例如，定期追蹤專利動態、新創企業發展、能源法規演變，以及國際能源電力趨勢。環境掃描的價值，不僅在於捕捉早期訊號，更在於培養組織人員的前瞻思維，協助公司在快速變動的環境中做出更理性、平衡且具前瞻性的決策。

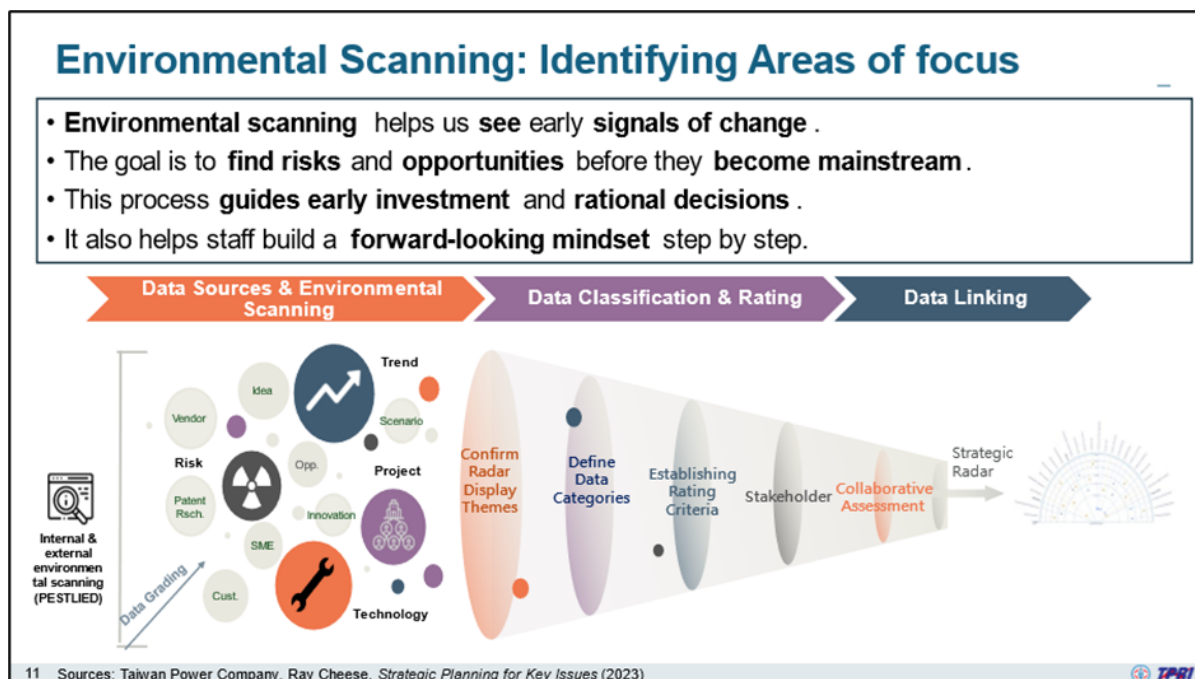


圖 2-6 台電透過環境掃描及早掌握潛在風險與機會

在完成環境掃描後，下一步是評估機會。台電運用策略雷達(Strategic Radar)工具，以核心業務及使命為出發點，整合技術、政策與市場訊號，並系統化檢視潛在機會。在技術評估準則上，我們可依需求採用不同的指標組合。例如，「應用範疇(Scope)」用以衡量技術應用的廣度；「技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL)」則區分從基礎研究、應用研究、產品概念，直到市場化準備的不同階段。

評估結果將透過策略雷達工具呈現，如圖 2-7 所示。此工具不僅能整合與可視化複雜資訊，更能作為公司內部持續對話的平台。藉此，團隊能辨識出與核心業務高度相關的重點領域，以及新興探索方向，並在全局視角下聚焦最優先議題。值得一提的是，評估過程並非由單一部門獨立完成，而是透過跨部門協作與討論，逐步凝聚共識，提升決策的完整性與全面性。

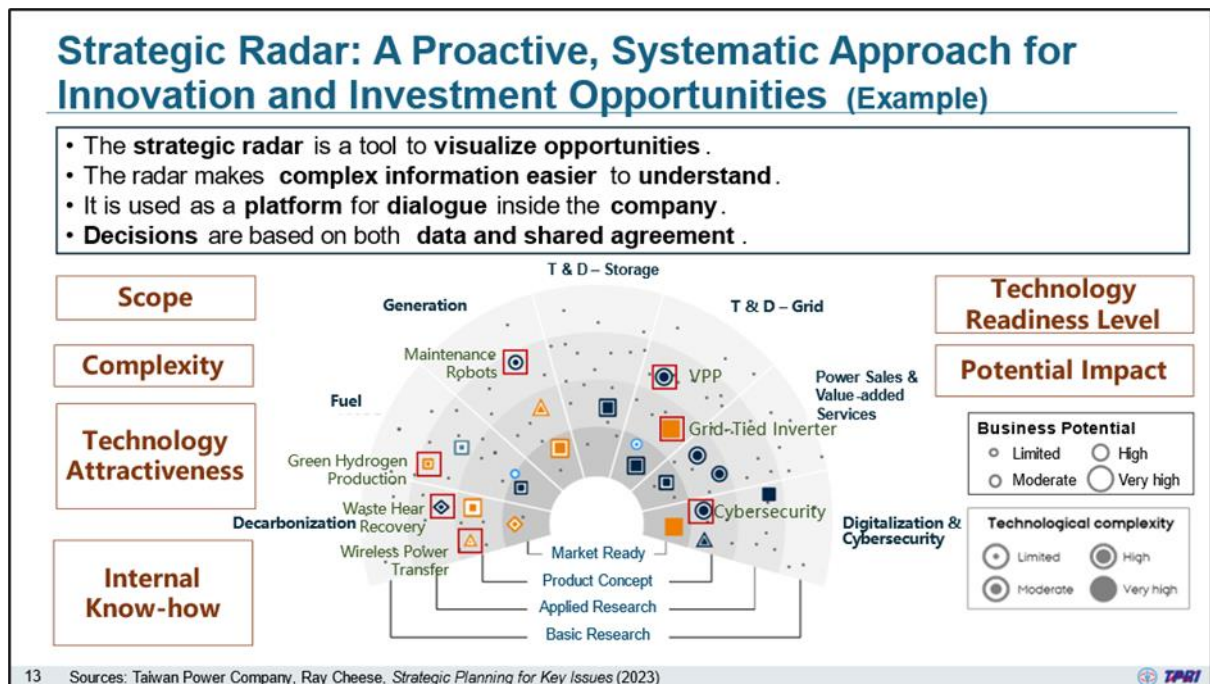


圖 2-7 台電運用可視化策略雷達工具進行發展機會評估

在確認機會後，下一步的關鍵在於付諸行動。台電採取開放式創新（Open Innovation）的模式，不僅運用內部研發能量，亦積極尋找具互補性之合作夥伴。同時，透過完善之利害關係人溝通與管理，確保獲得公司內外部的支持。此一作法使我們能夠加速將潛在機會轉化為實際價值，並在過程中有效降低風險。

以燃氣渦輪葉片再生技術（Gas Turbine Blade Regeneration Technology）之創新機會為例，如圖 2-8 所示，我們首先透過環境掃描，洞察到機組老化所帶來的維護需求增加，以及再生能源成長下火力機組需具備更高可靠性與彈性，進一步突顯了相關維護技術的重要性。接著，透過策略雷達工具，我們發現雖然預測性維護與 AIoT 監測技術在市場發展仍處於早期階段，但在降低成本、節省資源與支持循環經濟上的潛在效益已相當顯著。

由商業機會角度來看，東南亞國家相關發電機組維護服務供應商仍相當有限，而台電不僅具備豐富葉片修復知識與經驗，台灣在 AI 與 IoT 技術上亦有發

展優勢。最終，台電透過開放式創新，與新創公司 SmartTag 合作，導入智慧感測貼紙以蒐集機組運作過程中的震動、溫度等數據，並建置大數據資料庫，透過 AI 進行預測性維護。此案例展現了如何藉由小而前瞻的創新解決方案，創造高附加價值並帶來實質效益。

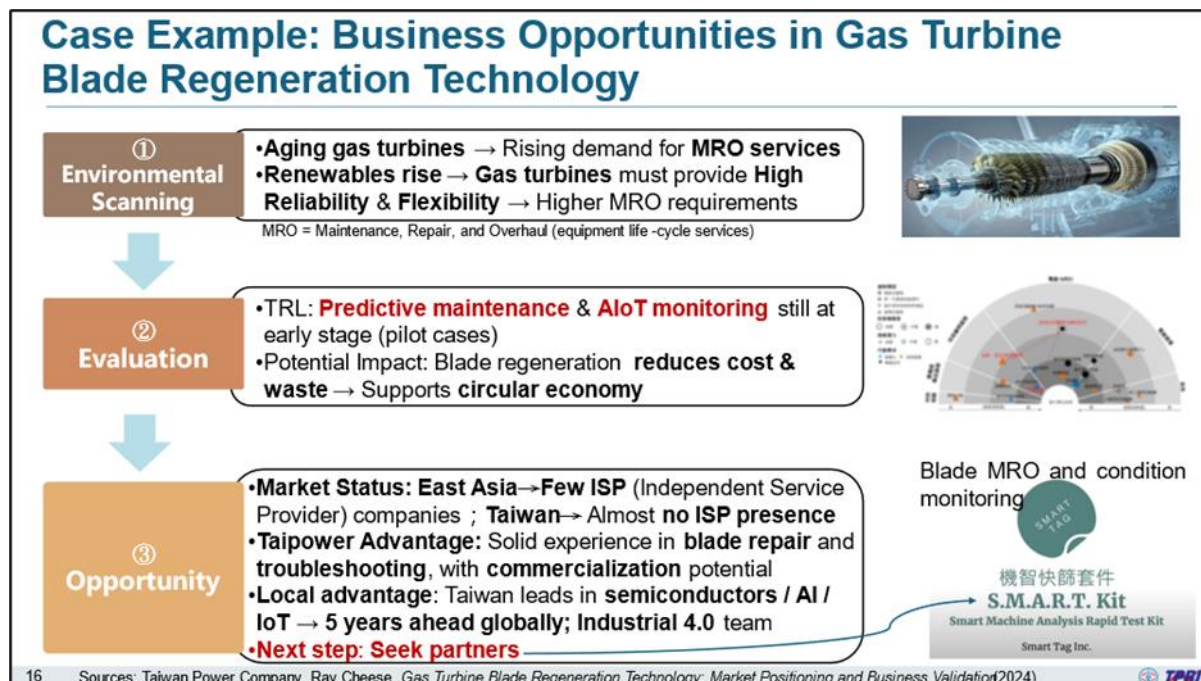


圖 2-8 台電於燃氣渦輪葉片再生領域之創新應用案例

本公司未來將持續透過系統性的環境掃描、策略雷達工具及開放式創新合作模式，積極尋找並掌握創新機會，以強研發能量與競爭優勢。如同英國管理思想大師 Charles Handy 與財星 500 大企業御用策略師 Steve Tighe 所強調，企業唯有透過持續創新，方能打造經營的第二曲線（Second Curve），以應對能源轉型與外部環境的嚴峻挑戰。

(二) Accelerating Solar Adoption

本場次先後由 CRIEPI 氣象及流體科學研究部（氣象、流体科学研究部門）橋本篤博士(Dr.Atushi Hashimoto)報告「Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System (SoRaFAS)」(太陽輻射預測與分析系統之開發)及本公司綜合研究所負載管理研究室陳俊瑋報告「Impact Analysis of Solar Interconnection and GIS Application on Hosting Capacity」(太陽光電系統衝擊分析與地理圖資系統在再生能源可併網容量之應用)。以下就報告重點分別摘述：

1. Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System (SoRaFAS)

CRIEPI 透過衛星雲圖影像建立了太陽輻射預測與分析系統 (Solar Radiation Forecasting and Analysis System, SoRaFAS)，可用以預測 6 小時後的太陽輻射分布情形，並以此為基礎，針對特定範圍內的光電案場進行發電預測。本議題由 CRIEPI 永續系統研究本部（サステナブルシステム研究本部）氣象及流體科學研究部的研究推動經理（研究推進マネージャー）橋本篤博士進行報告，如圖 2-9。



圖 2-9 橋本篤博士

SoRaFAS 使用的衛星雲圖是來自日本的氣象衛星向日葵 8 號和 9 號 (Himawari 8/9)，包含「可見光影像」(Visible Image)、「紅外線影像」(Infrared Image) 和「亮度溫度差」(Brightness Temperature Difference, BTDT)。SoRaFAS 透過轉換函式來計算地表太陽輻射量

$$S = S_0 \times \alpha \times \beta \times \gamma \times \left(\frac{1 - A}{1 - A_s} \right)$$

其中， S 是地表太陽輻射量 (solar radiation at ground)； S_0 是地球外太陽輻射 (extraterrestrial solar radiation)； α 是晴天下的修正係數 (correction coefficient for fine condition)； β 是陰天下的修正係數 (correction coefficient for cloud condition)； γ 是大氣質量修正係數 (correction coefficient for air-mass)； A 是可見

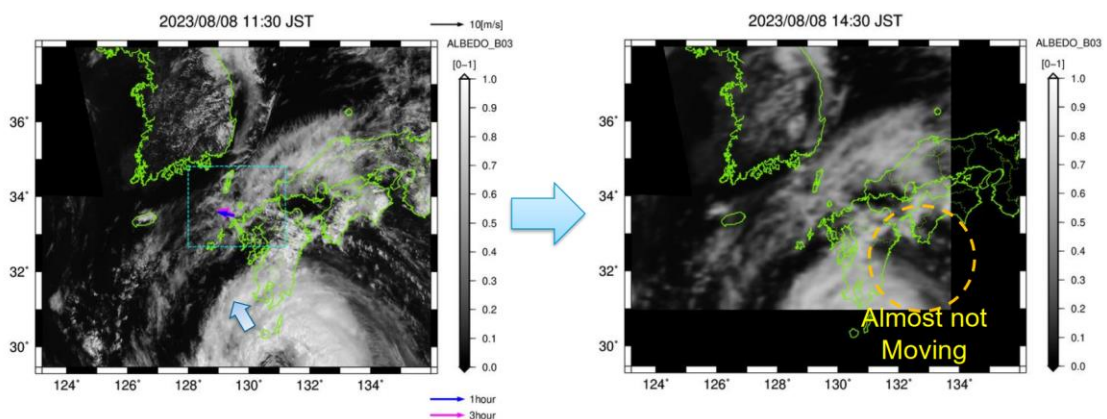
光影像反射率（reflection ratio of visible image）； A_s 是地表反照率（land surface albedo）。

前述轉換函式可在具備各項觀測數據的前提下計算地表太陽輻射量，而為了做到太陽輻射的預測，SoRaFAS 考慮了雲的移動模式（cloud motion），並比較單一向量法（Single Vector）與向量分布法（Vector Distribution）兩者之間的差異。

單一向量法是用來預測雲的移動模式的傳統方法，透過互相關聯（cross-correlation）的方式計算出雲移動速度向量（cloud motion velocity vectors），並透過不同範圍的當前及 10 分鐘前的資料集計算短期預測向量 uv_1 和中期預測向量 uv_2 ，再將兩者透過加權平均得出組合向量為

$$uv_{12}(t) = (1 - \alpha(t))uv_1 + \alpha(t)uv_2 + \frac{120}{180}(uv_2 - uv_1)$$

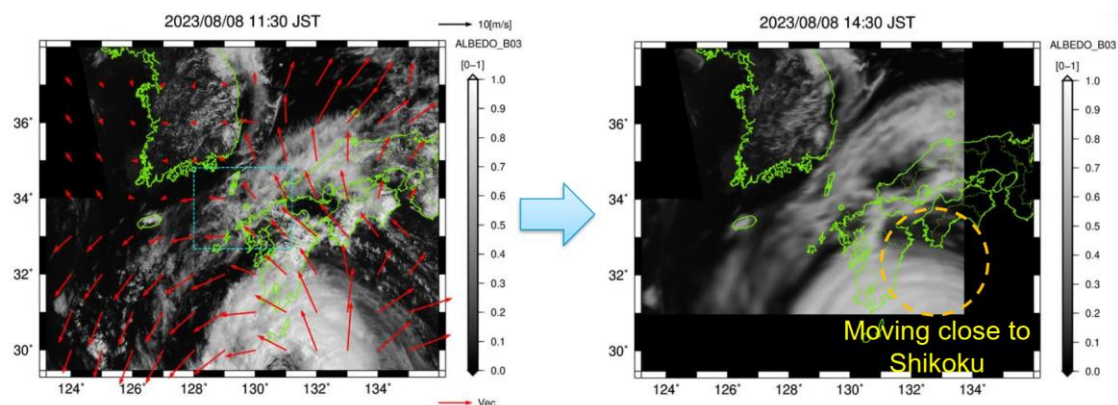
其中， $\alpha(t) = (t - 60)/120$ ，且 $t = 60 \sim 180$ 。透過調整 t 從 60 到 180，即可描繪出在當前的 60 分鐘到 180 分鐘之間，預期的雲移動模式，如圖 2-10。



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

圖 2-10 透過單一向量法預測雲的移動模式

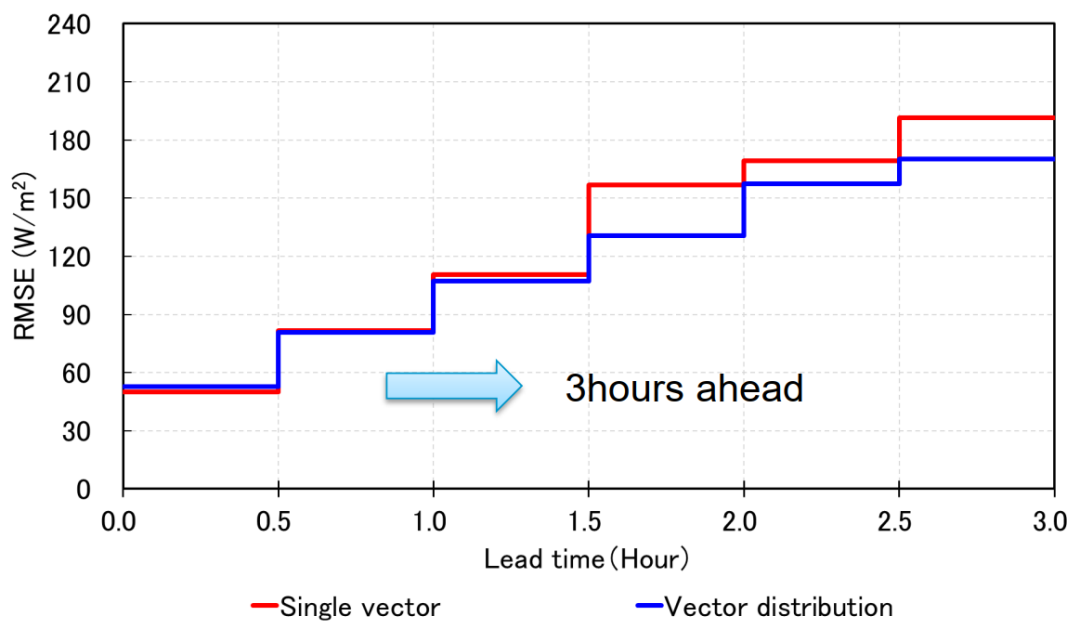
CRIEPI 優化單一向量法，提出向量分布法，不再僅以單一方向來預測雲的移動模式，而是針對分布在不同區域的氣流進行移動方向的預測，雲的移動模式可以從向量分布整合看出，如圖 2-11，這個方法可以在預測雲的移動模式時有效考慮到雲的旋轉（rotation）、輻合（convergence）及輻散（divergence）。



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

圖 2-11 透過向量分布法預測雲的移動模式

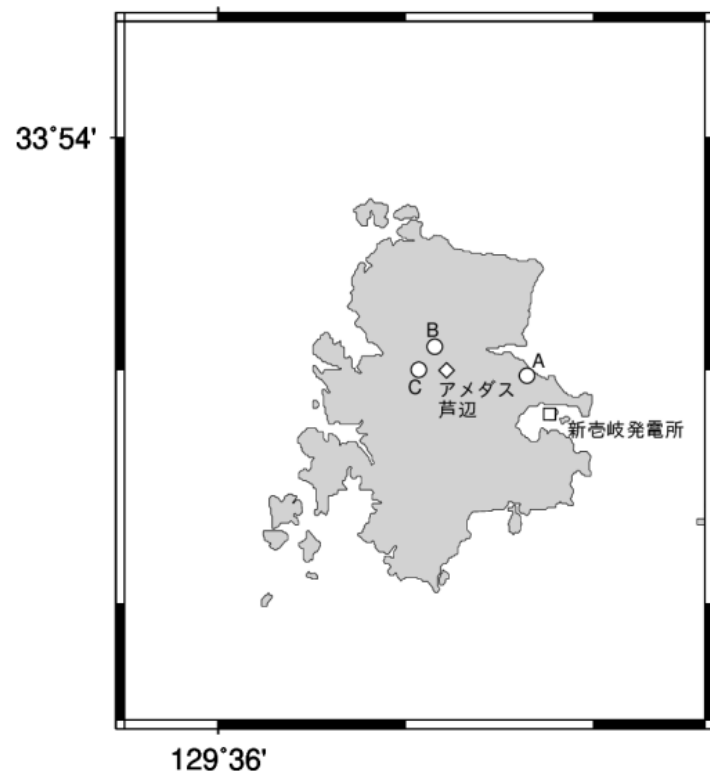
CRIEPI 透過單一向量法及向量分布法對位於九州西北方向、以壹岐島（壱岐島，Iki Island）為中心的範圍（以下稱壹岐島範圍）進行太陽輻射預測，並以均方根誤差（Root Mean Square Error，RMSE）探討兩種方法的準確度，向量分布法具有較小的 RMSE，如圖 2-12，也就是較佳的準確度。



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

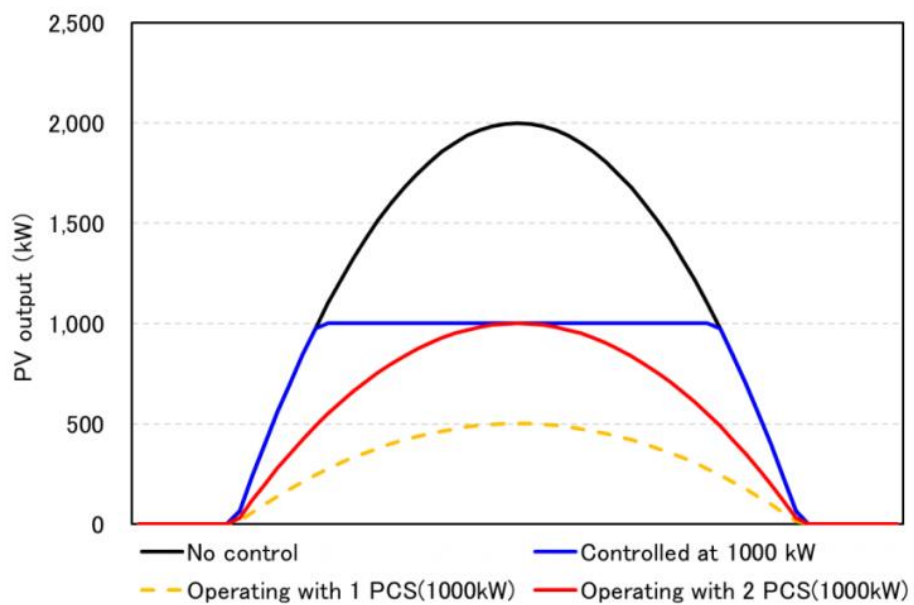
圖 2-12 單一向量法與向量分布法在壹岐島範圍的太陽輻射預測 RMSE

根據前述針對壹岐島範圍所得到的太陽輻射預測，CRIEPI 進一步針對壹岐島上的光電案場進行發電預測。壹岐島上有 3 個太陽光電案場，如圖 2-13。SoRaFAS 在針對壹岐島進行光電預測時，係以每個案場的輸出為預測主體，最終加總可得壹岐島整體的光電輸出。在針對每個案場進行光電預測時，SoRaFAS 會考量光電板本身的容量限制，包含 PCS 本身的容量限制以及在 PCS 啟動削減出力（curtailment）模式的情況下光電輸出的上限，因此，一個典型的光電輸出曲線配合不同的容量限制，會有不同的輸出曲線，如圖 2-14。



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

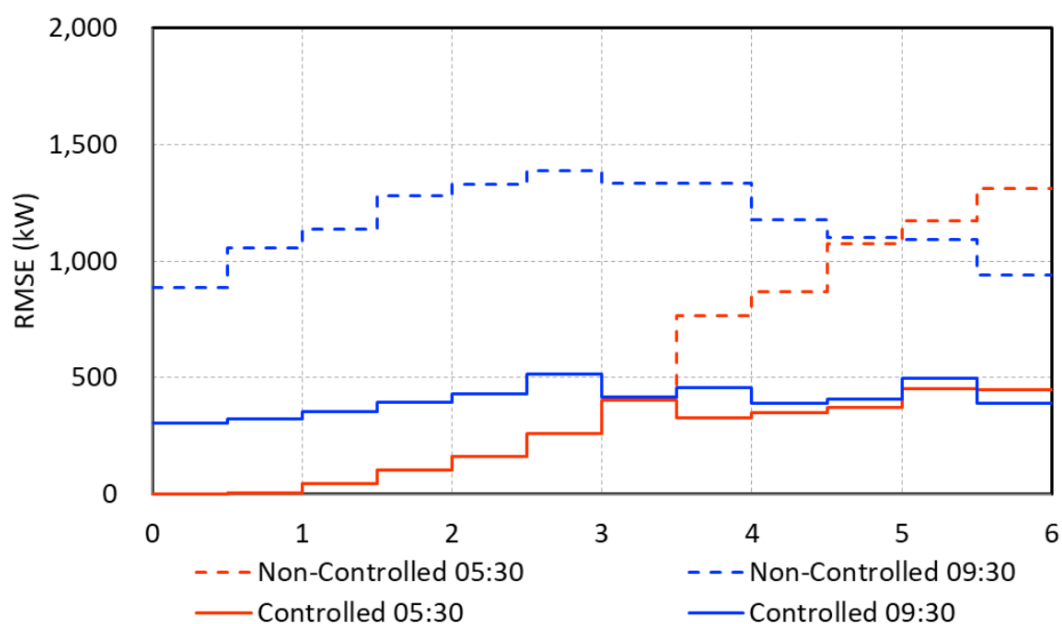
圖 2-13 壹岐島上的光電案場



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

圖 2-14 光電輸出曲線配合不同的 PCS 容量限制

SoRaFAS 針對光電案場的發電預測，以削減出力及非削減出力兩種模式來評估準確度，如圖 2-15 所示，其中包含不同時間點削減出力（標記為 controlled）及非削減出力（標記為 uncontrolled）模式下光電預測的 RMSE，在越短期的預測中，削減出力模式的 RMSE 是非削減出力模式的三分之一。在壹岐島的案例中，CRIEPI 透過向壹岐島上的光電案場介接取得現場即時量測數據，以評估各光電案場的預測準確度。



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

圖 2-15 壹岐島光電預測 RMSE

2. Impact Analysis of Solar Interconnection and GIS Application on Hosting Capacity

為了配合政府淨零轉型政策目標，本公司綜合研究所已建置新配電規劃資訊系統（New Distribution Planning System，NDPIS，或簡稱 DPIS）及饋線級再生能源可併網容量查詢系統（Feeder Hosting Capacity GIS，FGIS），前者提供配電處作為再生能源併網審查及相關規劃之輔助使用，後者對外公開，提供民間電業及民眾查詢適合併聯再生能源之區域。本議題由本公司綜合研究所負載管理研究室陳俊瑋進行報告。

台灣電力公司作為我國綜合電業，於再生能源等分散式能源併網時必須進行併網審查，以確認再生能源併網後，系統仍可維持穩定運轉。透過系統衝擊分析（Impact Analysis）所評估的電壓變動率（Voltage Variation）即是併網審查時重要的檢查項目，考量饋線於申請併聯之分散式能源併入電網後，以含分散式能源及不含分散式能源兩種情境，透過美國電力研究院(EPRI)公開的 OpenDSS 執行電力潮流分析，分別計算饋線中各節點的電壓，以計算電壓變動率為

$$\Delta V = \left| \frac{V_{DG} - V}{V} \right|$$

其中， ΔV 為電壓變動率， V_{DG} 為含分散式能源情境下的節點電壓， V 為不含分散式能源情境下的節點電壓，兩者皆以標么（per unit，p.u.）計，計算概念圖如圖 2-16。在饋線上所有節點的電壓變動率都不可超過 3%，以免電網過壓或低壓造成用戶設備異常。

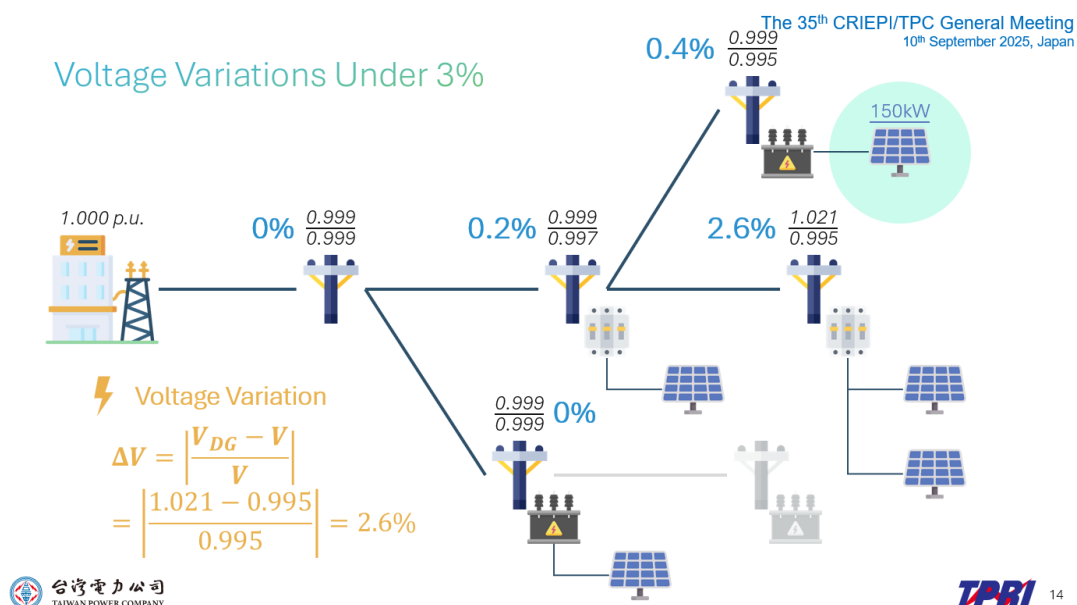


圖 2-16 分散式能源系統衝擊分析

當併聯審查人員在進行再生能源併網審查時，如遇到電壓變動率超過 3% 的情形，可透過 NDPIS 的改善建議功能進行弱點分析，透過調整變壓器容量、接法以及線徑等參數，嘗試降低電壓變動率，作為電壓變動率過高的緩解方法，以嘗試納入更多的再生能源進入電網，整體流程圖如圖 2-17 所示。

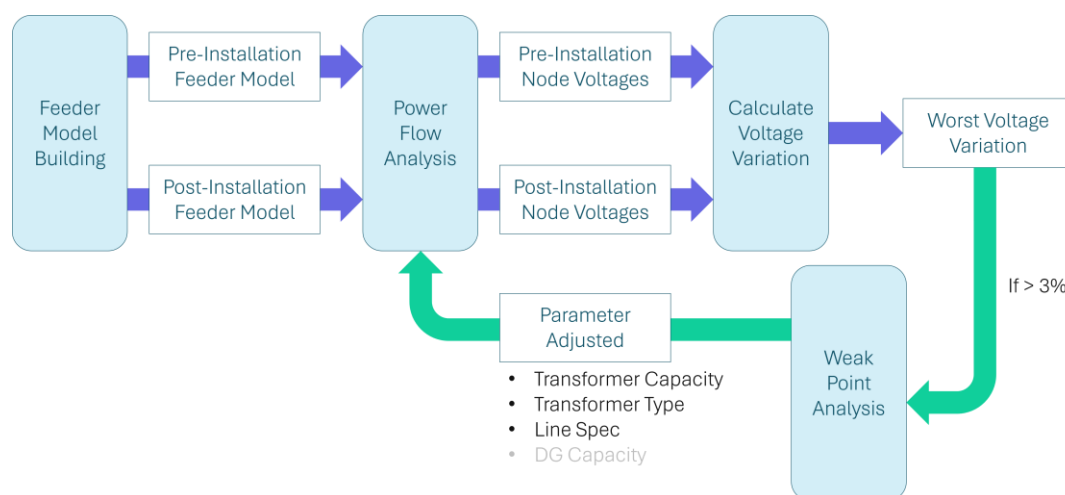


圖 2-17 系統衝擊分析及改善建議流程

針對光儲案場，DPIS 考量了發電情境（Light Load Scenario）與負載情境（Heavy Load Scenario），來評估儲能系統在充電及放電的情況下，對饋線電壓的影響。

FGIS 以系統衝擊分析為基礎，同樣使用 OpenDSS 作為電力潮流分析之核心，蒐集全台配電饋線拓樸、負載、既存分散式能源等資料，透過迭代的方式找出每條饋線在各節點電壓變動率都不超過 3% 的前提下，每個節點上分別可以併入多少容量的分散式能源，即視為該節點的可併網容量（Hosting Capacity）。每個節點可依其可併網容量高低進行分類，以顏色來區分，並透過圖資系統進行視覺化，配合其他輔助圖資，如閒置土地及野鳥保護區等，經綜合呈現可提供民間業者及民眾查詢適合及不適合建置再生能源的區域，如圖 2-18。

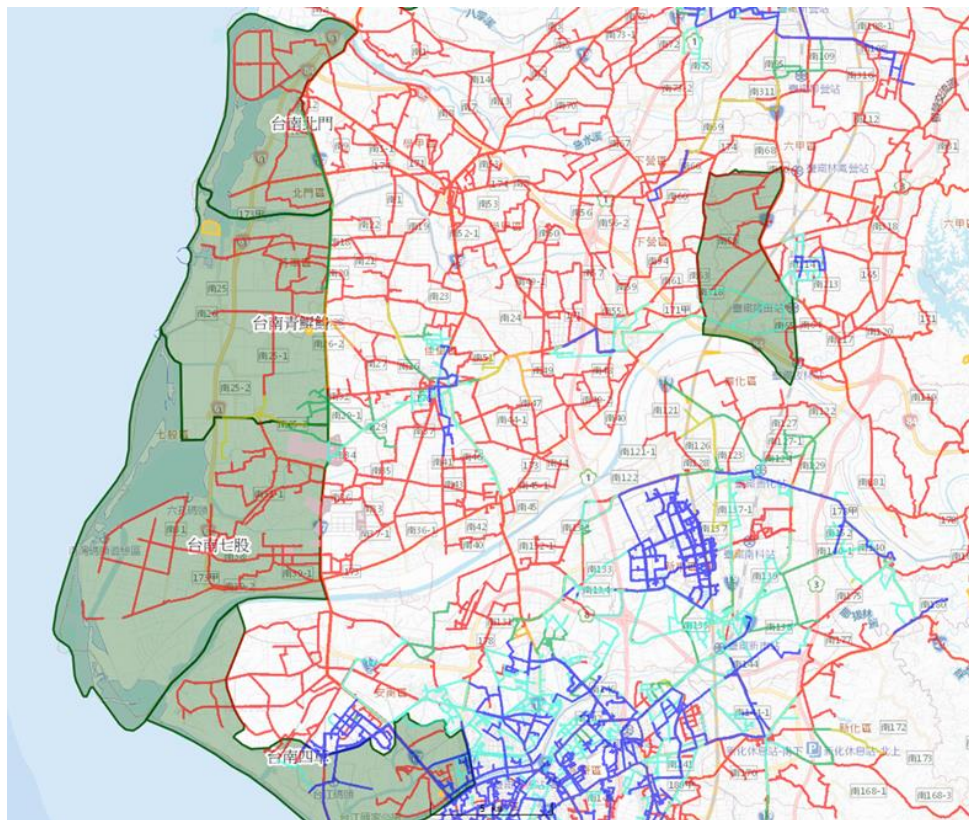


圖 2-18 再生能源可併網容量圖資

(三) Climate Forest on Risk Reduction

本場次先後由 CRIEPI 的 Dr. Yoshikazu Kitano 報告「Development of basic wind speed maps for wind-resistant design of transmission towers in Japan assessment of global warming impacts」及本公司綜合研究所高壓研究室的曹昭陽博士報告「Investigation of Environmental Monitoring and Management Method of Transmission Towers under Extreme Weather Conditions」。以下就報告重點分別摘述：

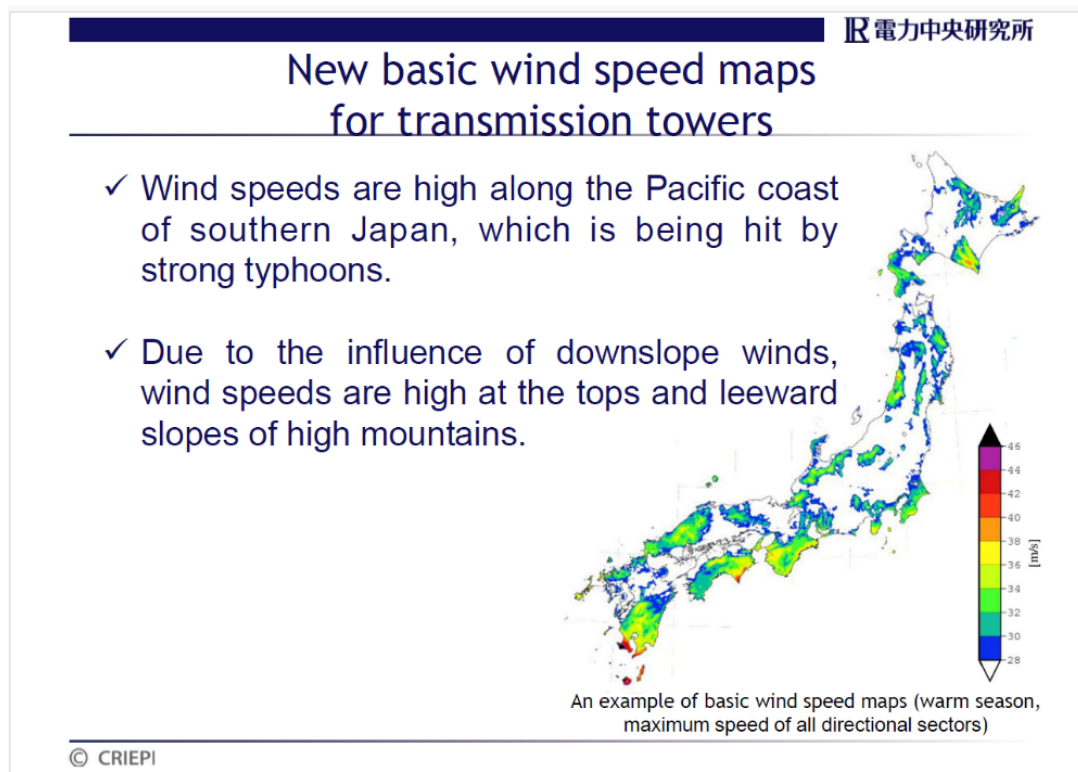
1. Development of basic wind speed maps for wind-resistant design of transmission towers in Japan assessment of global warming impacts

日方由北野慈和博士(Dr. Yoshikazu Kitano)進行簡報，題目是「用於輸電鐵塔抗風設計的風力地圖開發與全球暖化影響評估(Development of basic wind speed maps for wind-resistant design of transmission towers in Japan and assessment of global warming impacts)」內容，重點摘要如下：

- 日本輸電鐵塔抗風設計的關鍵在於評估強風風險，特別是颱風和冬季季風所引起的強風損害。由於日本地形有 70%以上為山坡地，既設鐵塔亦多數位於山區，然各山區之當地風速難以精確估計，尤其是山區背風面所形成的落山風，過往曾多次造成鐵塔倒塌。
- CRIEPI 開發了 CRIEPI-RCM-Era2 數值氣象模擬資料庫，其模擬精度具有 5 公里水平解析度，可用於推估無觀測資料地區的風速；對於具有落山風狀況下之複雜山區風場風速分析，該資料庫涵蓋有 1957 年至

2019 年的長期氣象數據。

利用模擬數據建立了具有風向差異的基本風速地圖，其顯示南日本沿太平洋海岸區域因颱風，及山頂與山脊等地形因素，造成背風面之落山風風速具有較大情形。深入了解風向及風速可使輸電鐵塔的設計更加合理，且可縮減鋼材用量和提升鐵塔安全性。圖 2-19 是 CRIEPI 開發的輸電鐵塔基本風速地圖在溫暖季節的實例。



資料來源：Atsushi Hashimoto, “Development of the Solar Radiation Forecasting and Analysis System”, 2025

圖 2-19 CRIEPI 開發的輸電鐵塔基本風速地圖實例

- 極值統計分析是計算風速重現期（如 50 年、100 年）的重要依據，長期數據對確保設計基準風速是具有一定的可靠性關鍵因素。

- 針對全球暖化影響，使用 d4PDF 大型氣候集合資料進行氣候變遷模擬，探討+2K 及+4K 升溫條件下風速變化。模擬結果顯示颱風風速在未來可能較現今風速增加最多 1.2 倍，但落山風在北日本地區則有減弱趨勢，推測與大氣分層變化及積雪融化後地面摩擦力增加有關。

- 國際上如澳洲和加拿大的設計標準已納入氣候變遷因子（如乘以 1.05）以調整放大設計風速，日本正評估如何導入類似調整係數以兼顧安全與經濟效益。

- 本研究對於未來輸電鐵塔風險管理及設計標準修訂提供科學依據，強調數值天氣模擬與氣候變遷資料的重要性，以期提升輸電系統於複雜地形與氣候變化背景下的韌性。

2. Investigation of Environmental Monitoring and Management Method of Transmission Towers under Extreme Weather Conditions

本公司綜合研究所高壓研究室曹昭陽主任進行簡報，題目是「極端天氣條件下輸電鐵塔的環境監測與管理方法研究 (Investigation of Environmental Monitoring and Management Method of Transmission Towers under Extreme Weather Conditions)」，分享本公司如何提升輸電鐵塔基礎的防災技術與維護管理效率，探究極端氣候下鐵塔所處環境風場變化、地震與降雨對塔基邊坡的影響，並精進現行的「塔基維護顏色管理模式」，如圖 2-20 所示。



圖 2-20 綜研所高壓室曹主任昭陽進行簡報

(1)研究方法與即時監測資訊平台

本研究結合了實體監測、數值模擬分析與管理模式精進三大面向。在第一階段，透過人工實地量測（如地中傾斜管）及建置即時監測系統以獲取現地環境參數。研究團隊開發了塔基即時監測資訊平台，該平台採用物聯網（IoT）架構，設計分為感測層、網路層和應用層。感測層儀器包括：地表傾斜計、雨量計、風速風向計、定置型傾斜計及電子式水壓計，用以量測水文、風場及大地邊坡的變化。這些設備多安裝於偏遠山區，因此採用太陽能供電系統，並透過 RF-Mesh 區域網路及 4G 電信網路或低軌衛星將數據即時回傳。

平台導入「三值四級制預警機制」，以「注意值」、「警戒值」及「行動值」搭配綠、黃、橙、紅四色燈號，直覺化呈現危害風險等級。為確保微氣象數據的真實性，研究比對鐵塔處的監測數據與鄰近交通部中央氣象署測站數據，發現同一區域的降雨量和風速風向受地形影響具有明顯的差異性，因此建議應在鐵塔處

建置微型氣象監測站，如圖 2-21 所示。



圖 2-21 本公司「三值四級制預警機制」直覺化呈現危害風險等級的即時監測資訊平台

(2)數值模擬與設計標準驗證

a.塔基邊坡穩定分析：研究遴選 9 座位於環境敏感區域的塔基進行邊坡穩定分析，採用極限平衡法計算安全係數。分析情境涵蓋常時水位、高水位及地震（相當於 6 弱等級地震）。分析結果顯示，所有塔基邊坡的安全係數均大於 1.0，表示邊坡現況為穩定狀態。人工量測（地中傾斜管）結果亦證實了邊坡在監測期間內並無剪動跡象。

b.鐵塔環境風場模擬分析：研究對 19 座鐵塔進行數值模擬，探討地形效應對風速變化的影響，以比對現行設計標準。透過計算風力安全係數（設計標準值除以模擬風速值），結果顯示所有鐵塔的安全係數均大於 1.0。這驗證了現行民國 69 年訂定的「輸電鐵塔新設計標準」仍屬保守且可符合設計需求。

(3) 塔基維護顏色管理模式精進

現行塔基維護顏色管理模式使用顏色矩陣分級，橫軸為環境因素，縱軸為鐵塔定期監測成果。研究審視其合理性，並提出精進建議，將經濟部地質調查及礦業管理中心公告的地質敏感區納入環境因素評估。

精進方案主要針對：

- 活動斷層地質敏感區：建議位於此區的塔基，其地質評分最高上限為 84 分。
- 山崩與地滑地質敏感區：建議位於此區的塔基，其邊坡評分最高上限為 74 分。

試算分析結果顯示，雖然此精進方案對大部分塔基的顏色分級影響甚微，但能使評估機制涵蓋更廣泛的潛在風險，進一步完善顏色管理機制。總體而言，本研究建立即時監測資訊平台，驗證了鐵塔結構的安全性，並為輸電鐵塔的運維管理提供了更精確且科學化的風險分級依據。本即時監測資訊平台逐步擴充，目前已涵蓋 103 座輸電鐵塔。

針對我方簡報，CRIEPI 對本公司在鐵塔現場實際安裝各種儀器即時監測，以回傳資訊供塔基維護顏色管理的作法表示讚賞，也對現場儀器後續維護議題提問。此外，CRIEPI 人員多從事基礎研究，因為不屬於電力公司，對於現場實務深感興趣，因此也詢問本公司有關輸電鐵塔巡視週期之規定，我方也說明本公司輸電線路維護準則規定，依巡視性質分為：普通巡視(為掌握線路全區間所有設備良莠情形之定期巡視，每 2 個月 1 次以上)、重點巡視(為及早發現異狀，防

範事故於未然，對於線下(旁)、鐵塔基地各項工程，進行特定區域內輸電線路之巡視，每月 1 次以上)、臨時巡視(颱風、豪雨、異常雨量、地震過後及覆冰期、融冰期，適時週期)、特別巡視(線路發生跳脫或故障時，必要時)。

(四) Grid Resilience

本次會議電網韌性的部分，分別由 CRIEPI Dr. Yoshiharu Shumuta 報告「Introduction of Risk Assessment and Management System for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT)-Cutting Edge for Electric Power Resilience」及本公司綜合研究所電力研究室江文莊博士報告「Estimation of System Real-Time Frequency Regulation Ancillary Service Demand Using Wide Area Measurement System」。以下就報告重點分別摘述：

1. Estimation of System Real-Time Frequency Regulation Ancillary Service Demand Using Wide Area Measurement System

CRIEPI 報告主要介紹該機構所開發的風險評估與管理系統(Risk Assessment & Management System for Power Lifeline, RAMP)，如圖 2-22 所示。自 1960 年代以來，隨著電力自動化、備援系統和維護技術的進步，日本電力系統的停電次數和停電時間已顯著減少。然而，這些電力設備在面對大型天然災害時，卻顯得脆弱無力。圖 2-23 顯示了停電的次數逐年下降，但 2010 年東日本大地震和 2018 年北海道地震與颱風等重大事件都會導致停電時間暴增，顯示了現有系統在應對極端事件時的不足。簡報引用日本氣象廳的數據，並指出日本沿海的海水表面

溫度逐年上升，如圖 2-24 所示。這不僅影響了颱風的強度，也改變了其路徑。

過去遵循常規路徑的颱風現在開始出現不規則的行進路線，侵襲那些以往不受影響、因此基礎設施較為脆弱的地區。此外，極端降雨事件的頻率也在增加。這意味著，過去僅憑經驗法則來應對災害的方式已經不再適用。

IR 電力中央研究所

Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) - Cutting edge for electric power resilience -

Topic 4: Grid Resilience

The 35th CRIEPI / TPC General Meeting

Yoshiharu Shumuta¹

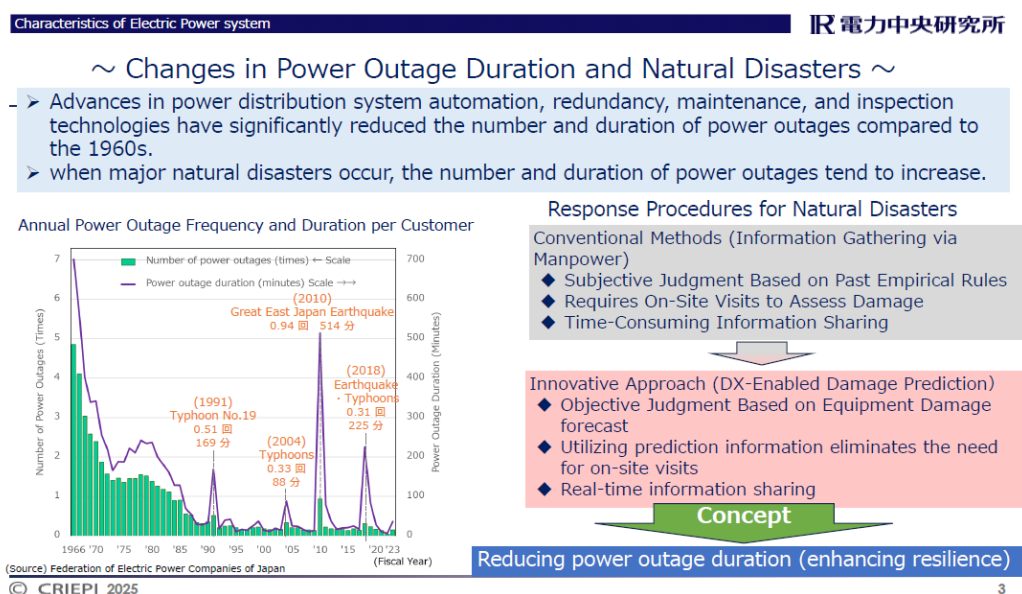
¹. Central Research Institute of Electric Power Industry, Chiba, Japan



© CRIEPI 2025

資料來源：Yoshiharu Shumuta, “Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience,” 2025

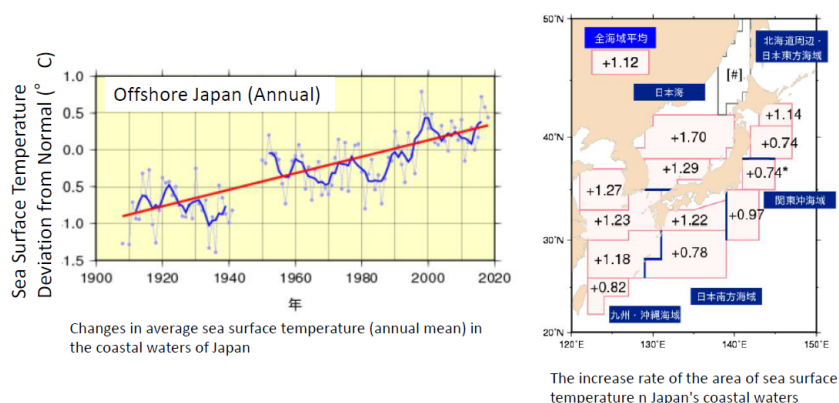
圖 2-22 風險評估與管理系統簡報首頁



資料來源：Yoshiharu Shumuta, “Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience,” 2025

圖 2-23 停電期間與自然災害的轉變

Changes in sea surface temperature over Japan



JMA: https://www.data.jma.go.jp/gmd/kaiyou/data/shindan/a_1/japan_warm/japan_warm.html

© CRIEPI 2025

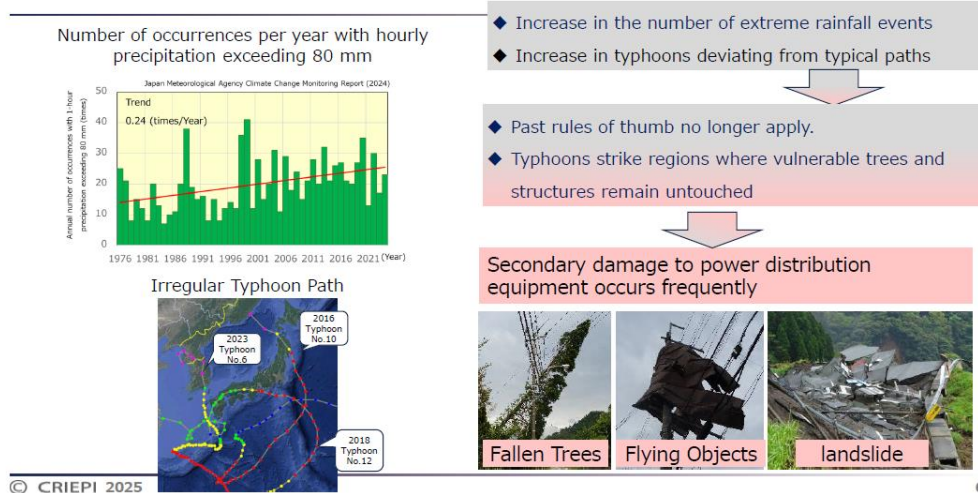
5

資料來源：Yoshiharu Shumuta, “Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience,” 2025

圖 2-24 日本海平面溫度逐年上升

隨著近幾年自然災害越來越頻繁，颱風的路徑變得不規則，而颱風對電力設備的破壞，並非主要來自風力本身，而是由二次性傷害所導致。例如，強風吹斷樹木、吹落物體，或因豪雨引發土石流，這些次生災害對配電設備如電線桿和電線造成了大量損害，這凸顯了從被動修復轉向主動預測的必要性，如圖 2-25 所示。簡報提出了「韌性三角」的概念，強調一個高韌性的系統不僅能夠有較小的災害損失，更能在災害發生後迅速恢復，減少停電時長，如圖 2-26 所示。

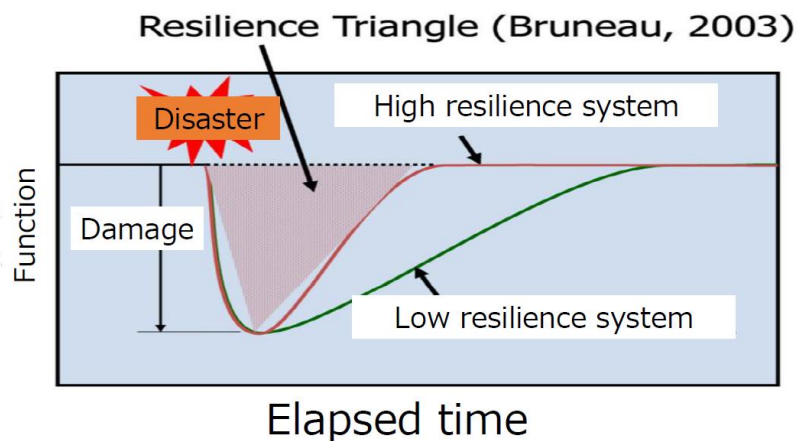
~ Recent natural disasters ~



資料來源：Yoshiharu Shumuta, "Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience," 2025

圖 2-25 日本近期發生的自然災害

Basic concept of resilience

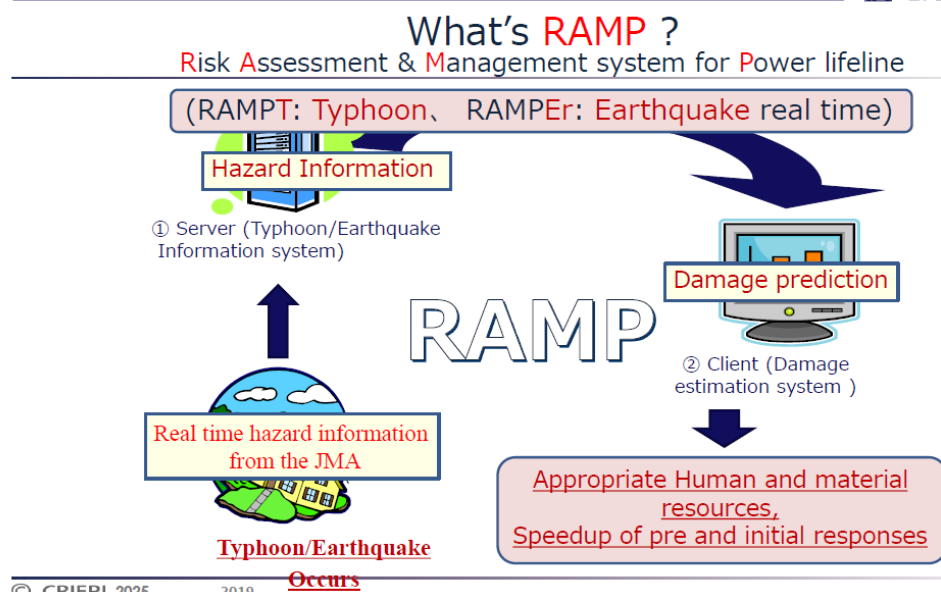


資料來源：Yoshiharu Shumuta, "Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience," 2025

圖 2-26 電網韌性的概念

為了應對上述挑戰，電力中央研究所開發了 RAMP(風險評估與管理系統)。

這是一套主要是用來應對颱風而設計的數位化決策支援工具，其核心思想是利用數據和預測模型，取代傳統的人力現場評估與經驗判斷，如圖 2-27 所示。



資料來源：Yoshiharu Shumuta, "Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience," 2025

圖 2-27 風險評估與管理系統

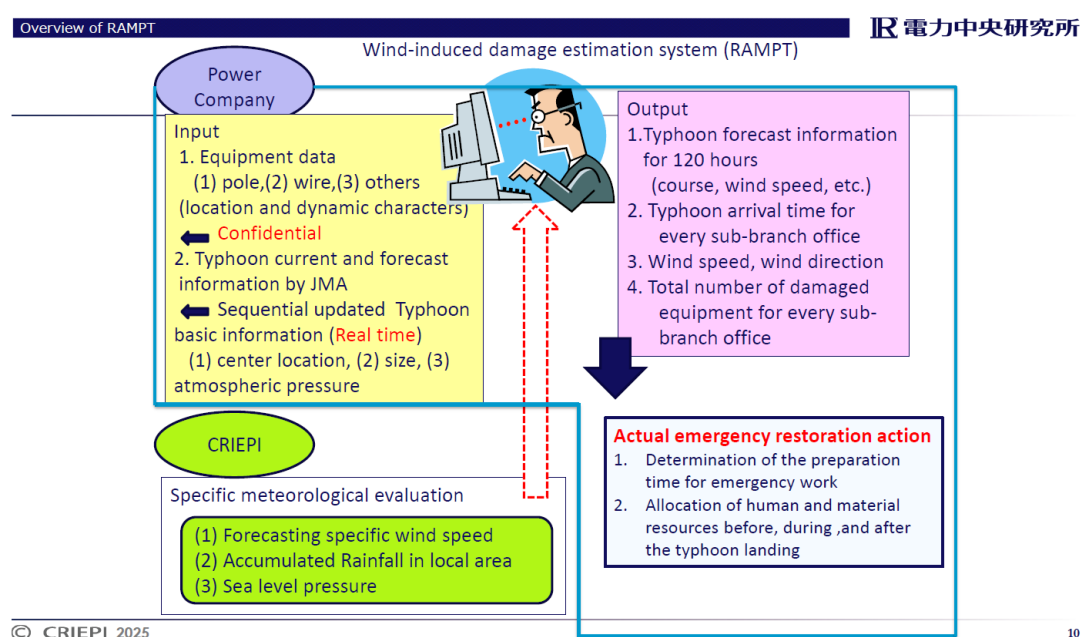
RAMPT 的運作流程可分為幾個關鍵步驟，如圖 2-28 所示：

1. **資料輸入：** 系統首先會匯入兩大類關鍵數據。第一類是電力公司的設備數據，包括每一根電線桿、電線和其他設備的位置和機械特性。第二類是來自日本氣象廳（JMA）的即時與預測颱風資訊，包括颱風中心位置、大氣壓力、大小和行進路徑。
2. **精準預測：** RAMPT 的核心是其預測模型。它利用從氣象廳獲取的資訊，透過一系列複雜的演算法，來估計颱風在不同地區造成的地面風速。這個模型甚至考慮了地形地貌的影響。在此基礎上，系統會結合其獨特的數據庫，這個數據庫詳細記錄了每根電線桿的機械性能以及其周圍環境，特別是與樹木的距離。透過這些數據的交叉比對，RAMPT 能夠精準預測出在颱風路徑上，每個分區辦公室可能損壞的電線桿和電線數量。
3. **資訊輸出與決策支援：** 系統將預測結果以視覺化地圖和數據清

單的形式呈現出來。這些輸出資訊包括：

- 颱風預測路徑和未來 120 小時的風速。
- 颱風抵達每個分區辦公室的具體時間。
- 預計受損設備的總數。

這些精準的數據讓電力公司能夠在災害來臨前約 5 天，就做出客觀且基於數據的判斷。它取代了傳統需要耗費大量時間進行現場勘查的方式。



資料來源：Yoshiharu Shumuta,“Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience,” 2025

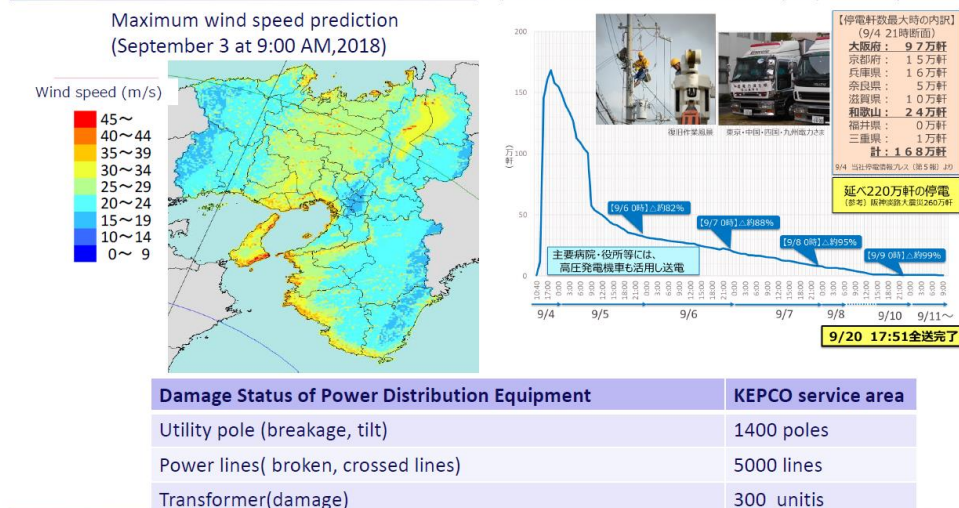
圖 2-28 風險評估與管理系統的運作流程

簡報以 2018 年的 21 號颱風為例，具體驗證了 RAMPT 系統的有效性，如圖 2-29 所示。這場颱風對日本關西電力公司（Kansai Electric Power Co., In., KEPCO）服務區域造成了重大破壞，導致超過 168 萬戶家庭停電，並造成了大量的電線桿和電線損壞。RAMPT 系統對這場颱風的預測結果，與實際災情進行了比對，展現了顯著的準確性。簡報指出，RAMPT 在某些地區的預測準確率

極高，尤其是在那些因強風導致的飛散物破壞較為普遍的城市住宅區。這顯示了系統在處理主要由颱風直接影響的災害情境時的卓越性能。

Application Example of RAMPT (Typhoon No.21, 2018)

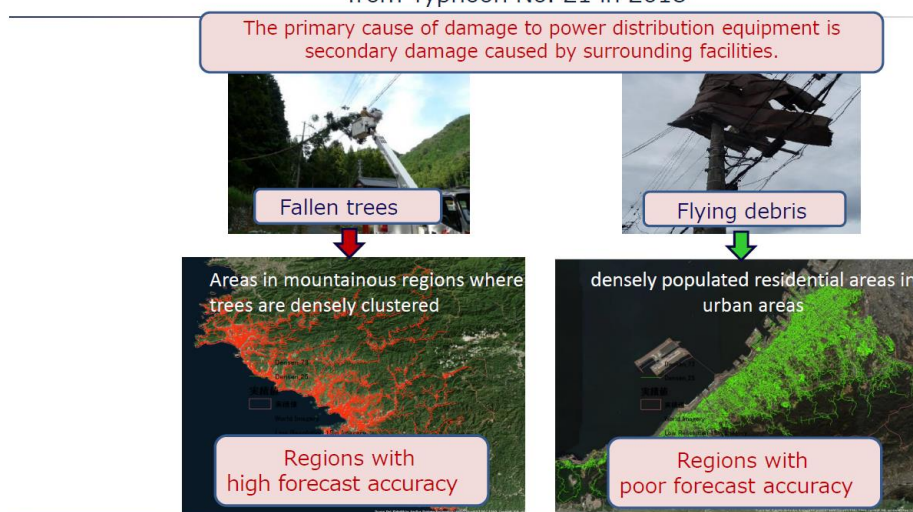
Up to 1.68 million households may experience power outages



資料來源：Yoshiharu Shumuta, “Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience,” 2025

圖 2-29 RAMPT 的應用實例(2018 年第 21 號颱風)

然而，簡報也指出了系統的不足之處，在山區樹木密集的地區，RAMPT 的預測準確率較低，如圖 2-30 所示。這可能是因為在這些地區，倒塌的樹木是造成電力設備損壞的主要原因，而這些傷害與單純的風速關聯度較低，更與樹木本身的脆弱性、土壤鬆軟度等因素有關。這也為未來的模型優化指明了方向。

Characteristics of Typhoon Damage
from Typhoon No. 21 in 2018

© CRIEPI 2025

2019

18

資料來源：Yoshiharu Shumuta, "Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience," 2025

圖 2-30 2018 年第 21 號颱風的災害預測準確率分析

RAMPT 系統的導入，不僅僅是技術層面的進步，更是一場管理與協作模式的革命。簡報強調了以下幾個方面的顯著效益：

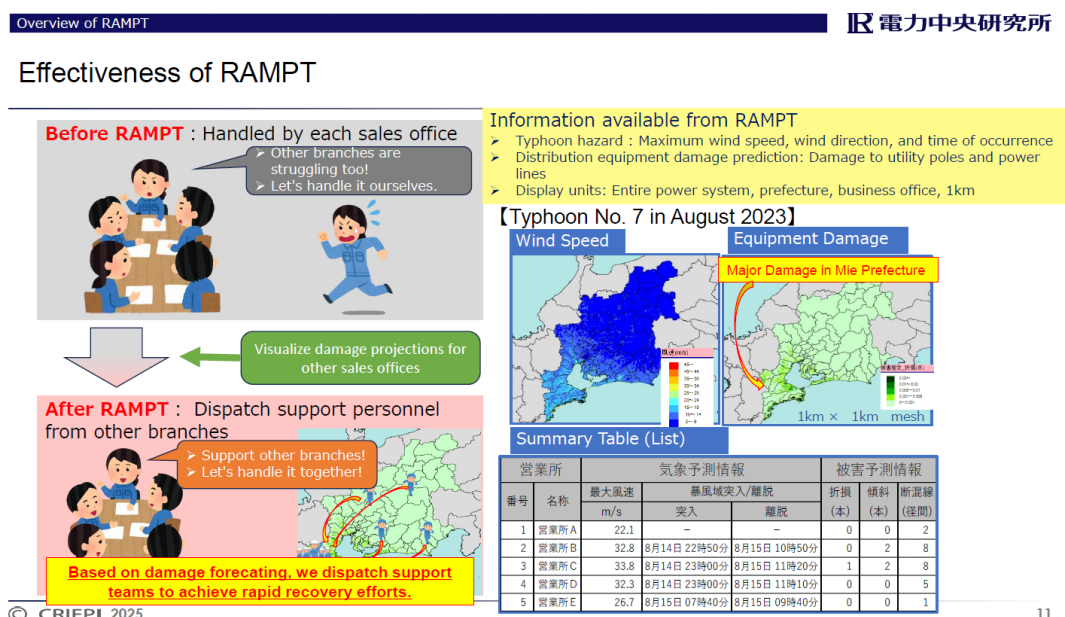
- **資源的合理調度：**在 RAMPT 系統導入前，電力公司每個地區的營業所各自應對，常常會出現「鄰近分所也自顧不暇」而無法互相支援的情況。RAMPT 能夠提供全公司範圍的損害預測，讓電力公司在颱風來襲前，就將支援人力與物資從受災較輕的地區調派至預計受災嚴重的地區。這種應變模式大大提升了救災效率，如圖 2-31 所示。

- **應變時間的縮短：**預先得知強風持續時間，能讓工作人員在心理和物理上做好準備，並能在正確的時間點展開搶修工作。

- **決策的客觀化：**RAMPT 將過去依賴個人經驗和主觀判斷的決策，轉

變為依據精準數據的客觀判斷。這不僅提升了決策的可靠性，也為災害應變的標準化提供了基礎。

• **多用途的應用：**除了應對颱風，RAMPT 的技術也已應用於地震災害的風險評估 (RAMPEr)，並在 2011 年東日本大地震和 2016 年熊本地震中發揮了作用。該系統目前已作為實用的決策支援工具，被日本 10 家電力公司採用，如圖 2-32 所示。



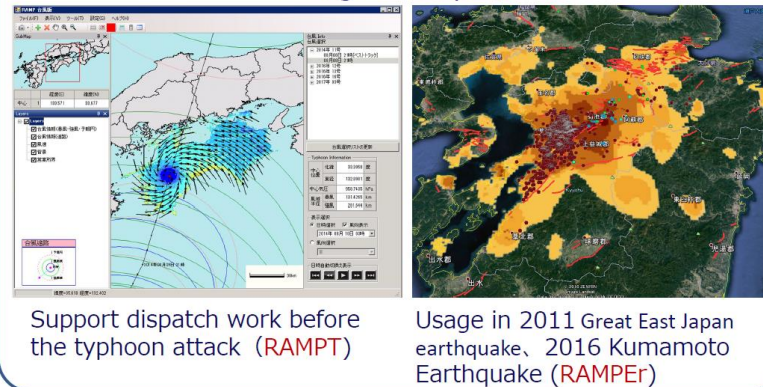
資料來源：Yoshiharu Shumuta, "Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience," 2025

圖 2-31 風險評估與管理系統的效益

The practical use situation of RAMP

RAMP are installed in 10 Power Companies as a Practical Decision Support Tool for emergency response

「Usage example」



© CRIEPI 2025

20

資料來源：Yoshiharu Shumuta, “Introduction of Risk Assessment and Management system for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT) – Cutting edge for electric power resilience,” 2025

圖 2-32 RAMP 的實際使用情況

2. Introduction of Risk Assessment and Management System for Power Lifeline against Typhoon (RAMPT)-Cutting Edge for Electric Power Resilience

本公司綜合研究所介紹了如何運用廣域量測系統 (WAMS) 來評估系統即時頻率調整備轉輔助服務 (AFC) 的需求，並展示了其在應對高再生能源滲透率挑戰方面的實際應用與成效。此簡報不僅是一份技術報告，更是一份具體展現台灣在面對能源轉型挑戰時，如何運用前瞻技術來確保電網穩定的策略藍圖。

同步機的轉子本身提供了物理慣性，能自然抵抗頻率的快速變化，但再生能源透過電力電子變流器 (Inverter) 併網，缺乏這種物理慣性，導致未來再生能源占比逐漸增加後，系統慣量隨之降低，如圖 2-33 所示。因此，當系統供需失衡，如大型機組跳脫時，頻率下降的速度 (RoCoF) 會顯著加快，最低頻率可能引發低頻卸載保護，導致停電。每個國家對 RoCoF (頻率變化率) 的定義和標準確實有所不同，這主要取決於其電網的特性、發電結構和相關法規。這些標準通常

被納入各國的電網規範（Grid Code）中，以確保電力系統的穩定與安全。目前有好幾種低碳的同步慣量來源，例如水力發電、同步調相機、儲能系統等。

The 35th CRIEPI/TPC General Meeting
10th September 2025, Japan

Introduction

- Due to the increase of distributed generations (DGs), such as PV sources, battery energy storage systems, and wind turbines, the **power-electronics inverters** are required to transfer the energy of DGs to the loads or electrical grids.

$$2H \frac{d(freq)}{dt} = P_m - P_e$$

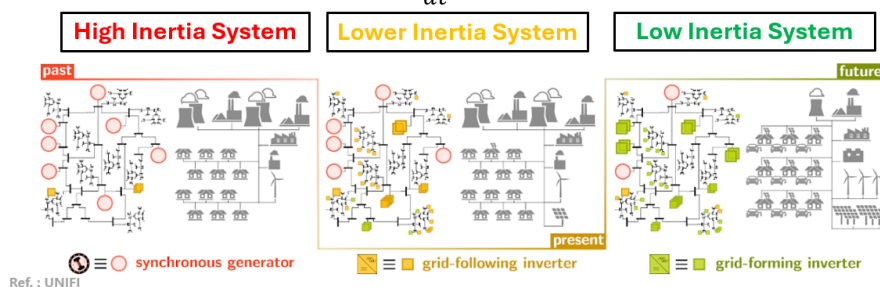


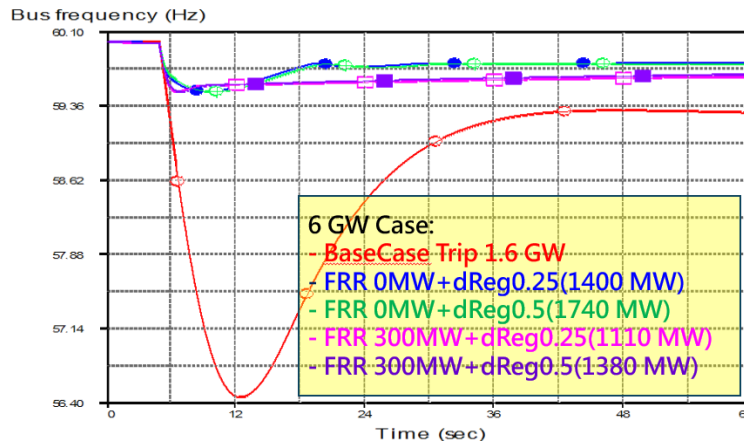
圖 2-33 再生能源占比逐漸提升，系統慣量逐漸下降

為了解決上述挑戰，本所運用了廣域量測系統（WAMS）。這套系統能夠以極高的取樣率即時監測全台電網的電壓、電流、相角和頻率等關鍵數據。透過 WAMS，台電可以獲得高解析度的頻率響應曲線，進而精確分析系統的慣量、負載響應等特性。在此基礎上，本研究進一步利用神經網路模型（Neural Network）來預測即時頻率調整備轉輔助服務（AFC）的需求。透過歷史數據訓練模型，使其能夠根據當前的發電組合、負載情況和再生能源滲透率等參數，即時預測出未來所需的 AFC 容量，從而實現精準調度。此外，本研究也提及了使用如 Powerflow & Short circuit Assessment Tool (PSAT)、Voltage Security Assessment Tool (VSAT) 和 Transient Security Assessment Tool (TSAT) 等動態安全評估工具進行模擬分析，確保模型的準確性與可靠性。

本研究透過不同負載情境（如輕載和重載）以及不同發電機組跳脫容量的模擬，顯現出 AFC 在維持系統頻率穩定方面的關鍵作用，如圖 2-34 所示。

System Light Load Scenario Analysis

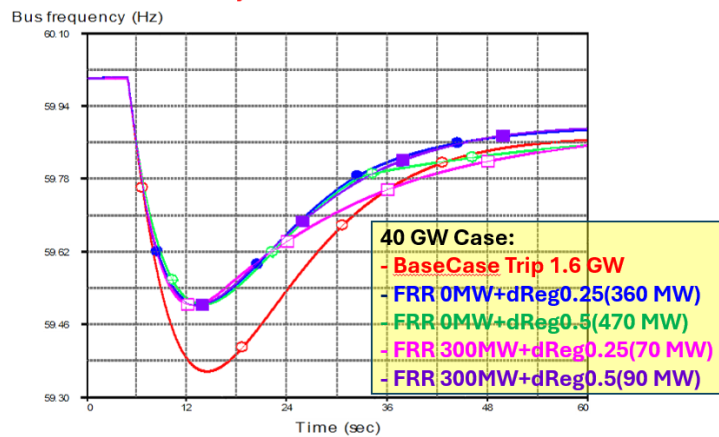
- The following figure shows the frequency response analysis of a **6 GW net system load** scenario with 1.6 GW of generator capacity disconnected.



(a)

System Heavy Load Scenario Analysis

- The following figure shows the frequency response analysis of 1.6 GW of generators disconnected under a **40 GW system net load** scenario.



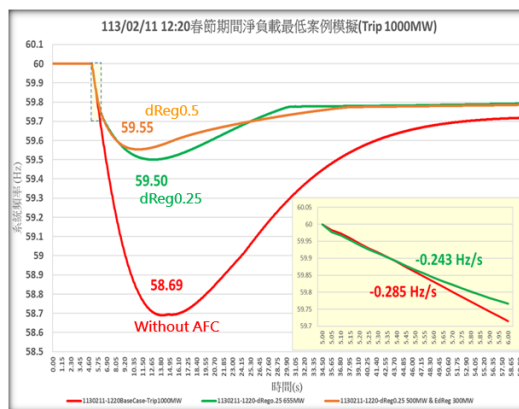
(b)

圖 2-34 輕載與重載下跳脫 1.6GW 的頻率響應

圖 2-35 為台灣 2024 年農曆新年期間跳脫 1000MW 時模擬的數據，在一個典型的大型機組跳脫情境下（如 1000MW 機組跳脫），若缺乏足夠的 AFC，系統最低頻率會顯著跌落至危險水平。然而，一旦有足夠的 AFC 資源（特別是反應速度快的 dReg0.25 和 dReg0.5），系統頻率便能在很短時間內得到有效支撐，

使最低頻率保持在 59.5 Hz 以上，從而避免觸發低頻卸載。如圖 2-36 所示，影響最低頻率的因素不僅包括慣量，還有負載模型、跳脫容量、再生能源滲透率等。這意味著單純的慣量補償並不足夠，必須綜合考慮多個變數，這也突顯了 WAMS 和神經網路模型在處理複雜系統動態方面的優勢。

Simulation Analysis of Minimum Net Load During the 2024 Lunar New Year



- During the 2024 lunar new year, the system's lowest net load reached 11,243 MW at 12:20 PM on February 11th. With **1,000 MW** tripped, the lowest frequency, without any ancillary services, was **58.69 Hz**.
- A **dReg0.25** of 655 MW was required to maintain the frequency above 59.5 Hz.
- Based on the AFC purchase volume from the power trading platform at the time (500 MW of **dReg0.5** and 300 MW of EdReg), the lowest system frequency would have been **59.55 Hz**.

圖 2-35 台灣 2024 年農曆新年期間跳脫 1000MW 時的系統頻率變化

Factors Affecting the System's Minimum Frequency

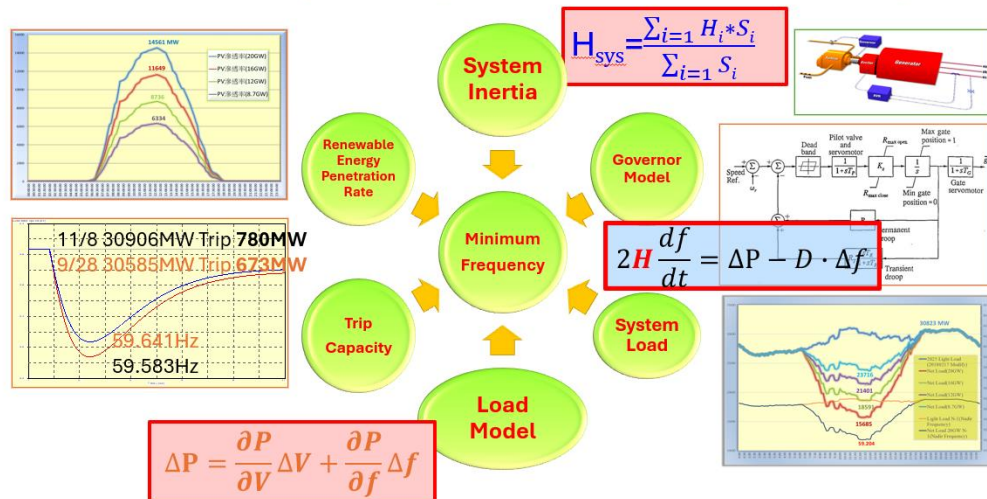


圖 2-36 影響系統最低頻率的因素

簡報的最後，介紹本所如何將這些研究成果轉化為實際應用。透過開發一套視覺化決策支援系統，調度人員能夠即時獲取 AFC 的需求預測，並以此為依據進行精準採購。這套系統的建立，代表著台灣電力調度可從過去的經驗式決策，

向智慧化調度邁出關鍵的一步。簡報也總結了未來的展望，包括持續優化 AFC 採購、完善需求響應措施等，展現了台電在電力系統轉型中的持續努力。

(五) Geological Analysis for Earthquake

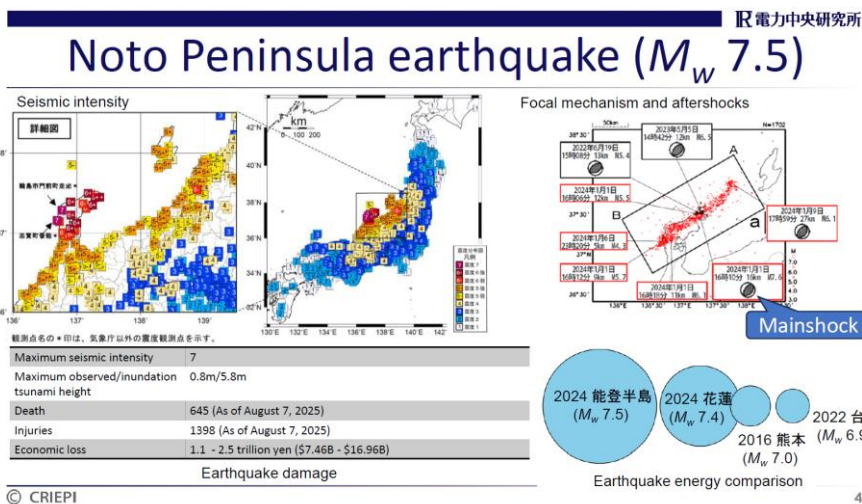
本次會議電網韌性的部分，分別由 CRIEPI Dr. Keitaro Komura 報告「Remote sensing and geological to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes」及本公司再生能源處李孟綸專員報告「Taipower's Geothermal Development Strategy」。以下就報告重點分別摘述：

1. Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes

本次 CREPI 的 Dr. Keitaro Komura 針對 2024 年能登半島地震（Mw 7.5 之地表破裂與次生斷層提供豐富且精彩的研究內容分享。

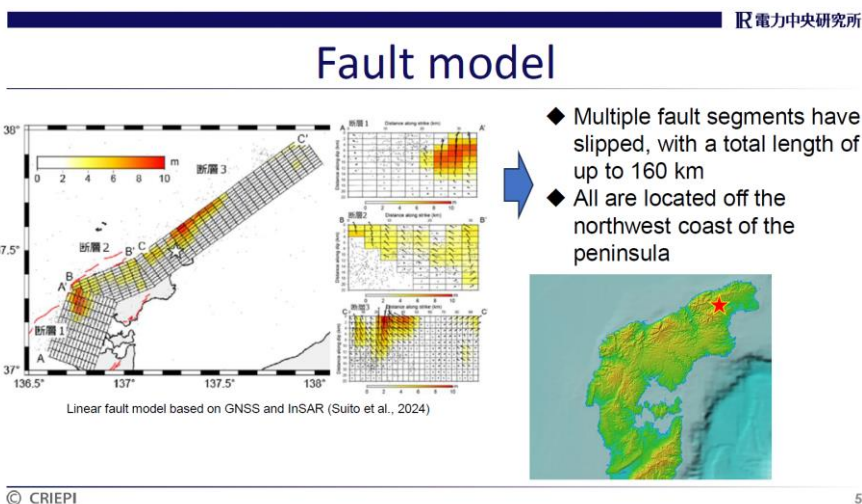
眾所周知，大地震時除了主要斷層破裂外，周邊常會出現許多次生斷層。然而，以往這些小型破裂較少受到重視。隨著近年遙測技術進步（如 InSAR、差分 LiDAR、DEM 以及光學相關法），我們現在能更詳細掌握它們的分布與特性。

2024 年 1 月 1 日，日本本州能登半島北岸發生規模 7.5 的地震，如圖 2-37，震源破裂涉及半島西北方多個斷層段，總長約 160 公里，如圖 2-38。目前尚未在陸地上發現明顯的「主要斷層」破裂，但震央附近已有數處零星的同震地表破裂（長達數公里）被記錄，引起學界關注。



資料來源：Keitaro Komura, “Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes,” 2025

圖 2-37 2024 年能登半島規模 7.5 大地震



資料來源：Keitaro Komura, “Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes,” 2025

圖 2-38 2024 能登地震斷層破裂反演

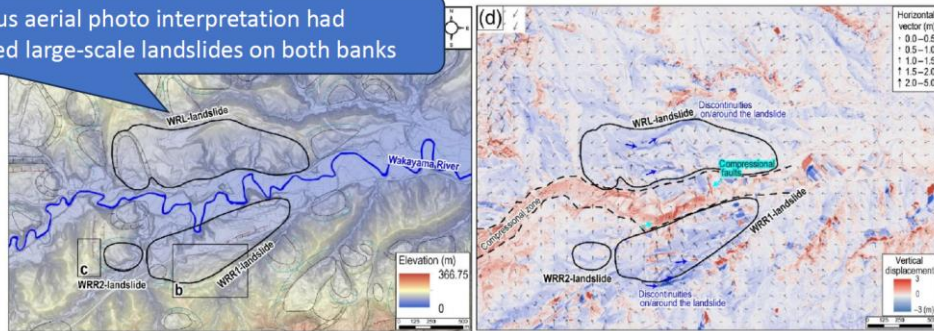
CREPI 團隊聚焦研究於半島東北部 Wakayama River 谷地一帶的地表破裂。

此處沿谷地出現了明顯的壓縮斷層崖，如圖 2-39。研究包含以下幾點：1.半島整體變形：透過 InSAR 分析呈現大範圍地殼形變特徵。2.局部破裂細部觀測：應用光學相關與差分 LiDAR-DEM，顯示谷地兩側山坡以塊體形式向谷地方向運動。3.野外調查：發現大量張裂縫，不僅出現在谷底，也分布於稜線，顯示可能發生了深層重力式邊坡變形（DSGSD），並間歇性觸發谷地壓縮斷層，如圖 2-40、2-

41。4.震前證據：DEM 也揭示震前已存在 DSGSD 特徵，如迎山崖與線狀凹地，顯示這些地貌是未來「斷層以外古地震研究」的重要目標。

Review of published papers; ③ Komura et al. (2025)

Previous aerial photo interpretation had revealed large-scale landslides on both banks



Geomorphic map around Naka area along Wakayama river and result of the differential analysis (Komura et al., 2025)

- Differential analysis of pre- and post-earthquake **LiDAR DEMs**
- Observation of unique geomorphic features based on pre-DEM data
- **Field survey** focusing on the slopes

資料來源：Keitaro Komura, “Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes,” 2025
圖 2-39 能登半島東北部 Wakayama River 次生斷層壓縮摺皺谷地

Review of published papers; ③ Komura et al. (2025)

Compressional faults along the river

Extensional scarps on the ridge top

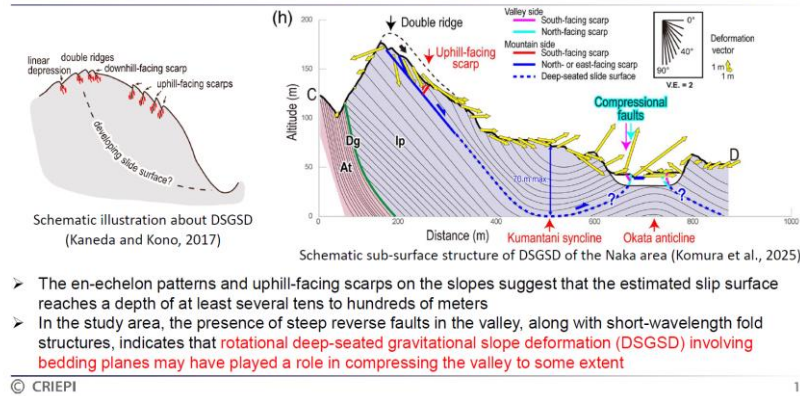


Field Photographs
(Komura et al., 2025)

Uphill-facing scarp on the slope

資料來源：Keitaro Komura, “Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes,” 2025
圖 2-40 Wakayama River 谷底野外調查

Review of published papers; ③ Komura et al. (2025)



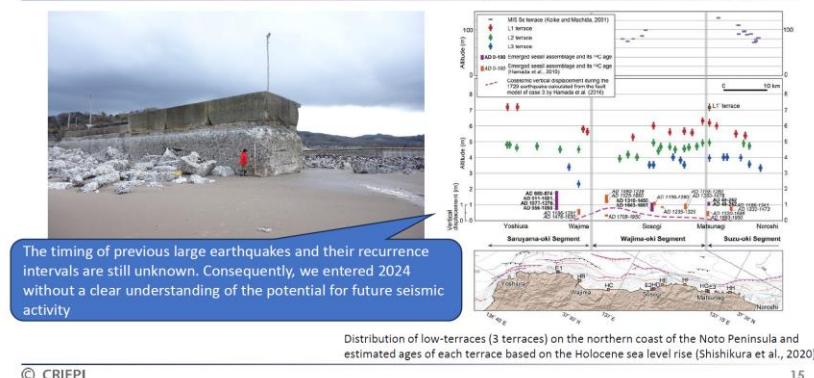
13

資料來源：Keitaro Komura, “Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes,” 2025

圖 2-41 深層重力式邊坡變形 (DSGSD)

能登半島過去大地震的歷史主要依靠北岸海階研究重建，但事件年代精度仍受限，原因是缺乏足夠的定年材料，如果 2024 年的次生斷層與過去事件同步，那麼這些破裂跡象將有助於重建半島的古地震史，如圖 2-42。對比 2020 年陳文山等人對於台灣花東海階地形構造斷層活動研究，藉由海階活動木質沉積物相關 C14 定年，可具體回推出大型地震發生距今約 700、1700、3400、4800、6300 及 8500 年，揭露區域大斷層活動及凸顯防災減災的重要性。

Contribution to off-fault paleoseismology



15

資料來源：Keitaro Komura, “Remote sensing and geological approach to recent coseismic surface ruptures: The case of the 2024 Noto Peninsula earthquakes,” 2025

圖 2-42 能登半島北海岸海階研究

2. Taipower's Geothermal Development Strategy

(1)前言

本公司致力於再生能源的發展，其中地熱能被視為極具潛力但尚待突破的領域。台灣地處環太平洋地震帶，位於歐亞板塊與菲律賓海板塊交界，地質條件孕育了多樣的地熱環境，地熱資源主要分布於四種地質環境，北部大屯火山群火成岩區、中央山脈變質岩區、前陸盆地沉積岩區及宜蘭張裂構造帶。為因應能源轉型與淨零排放目標，台電提出「地熱四支箭」策略，整合資源、引進國際技術、提升效率並培養本土產業鏈，逐步推進地熱產業規模化與永續發展。

根據 1994 年的全國調查，共辨識出 26 處溫泉區域。近年，地質調查及礦業管理中心進一步指出 10 處具備大規模開發潛能的區域，如圖 2-43。模型估算顯示，淺層（1–3 公里）地熱潛能約 1GW，深層（3–6 公里）則高達 40GW。相較之下，截至 2024 年，台灣裝置容量僅 7.49MW，另有 12.68MW 在建。這一落差凸顯出台灣地熱開發潛能巨大，並說明策略推動的急迫性。

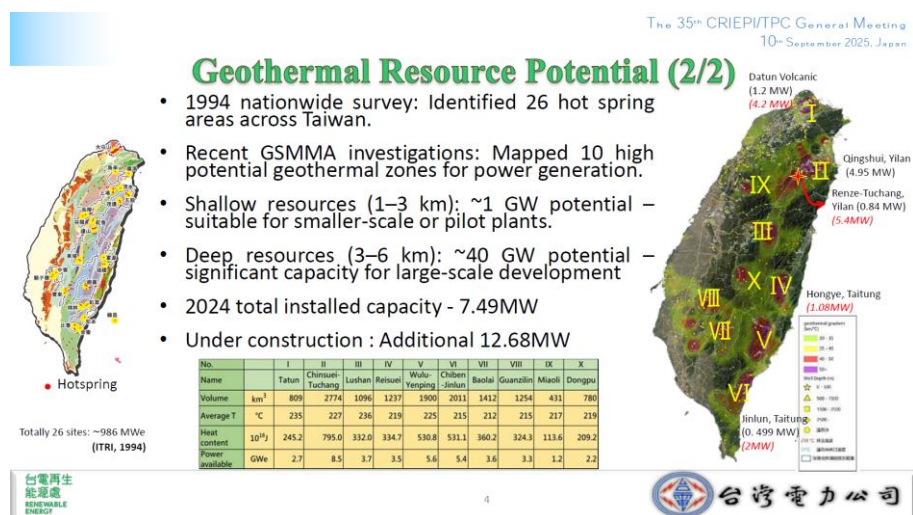


圖 2-43 台灣地熱資源及 10 大潛能區

(2) 地熱四支箭

(a) 資源整合

第一支箭著重於將零散潛能轉化為具投資價值的專案。台電將於 2025 年下半年啟動「地熱共同開發平台」，提供民間業者與台電合作的制度化管道。平台採取三階段機制，調查成果審查：申請者須提交地質、地球物理及測溫等調查資料，由台電專業團隊共同審查。探勘井分攤，若區位具潛能，台電與業者共同分攤試探井成本與風險。電廠投資與分潤，進入開發階段後，雙方共同投資電廠並分享收益。平台每年辦理兩輪申請，預期可降低業者初期風險，吸引更多投資者參與，促進潛能場址快速轉化為可營運專案。

(b) 國際鑽井能力

第二支箭確保能夠安全、精確地進入深部儲層。2024 年 10 月 1 日，台電與多家國際及本土企業簽署大屯山地熱開發合作備忘錄，成員包括 Baker Hughes、GreenFire Energy、Baseload Power、Taiteck。第一階段將導入國際探勘技術確認資源潛力，並評估在酸性火山地熱區導入 AGS (Advanced Geothermal System) 封閉迴路系統，以達到無抽取地下水的永續開發模式。

引入系統性探勘流程，首先檢視包含歷史地質調查、Tomography 研究，過往研究指出大屯火山群下方 8-20 公里處存在 P 波低速帶，可推測為直徑逾 10 公里的岩漿庫；再者，辦理調查 (3G Surveys)，如圖 2-44：地質與構造、氣體與同位素等地球化學分析、Magnetotelluric (MT) 與重力探測等地球物理探測；其

中 MT 由日本 GERD (Geothermal Energy Research & Development) 執行，突顯其在地熱研發領域的重要角色。第三，整合過往與新取得探勘資料，建置更新地熱概念模型，鎖定鑽井目標區域。最後採用定向鑽井技術，因部分潛能區域位於國家公園法規管制範圍，台電優先採用定向鑽井，自敏感區域外進入深層儲層，以減少地表擾動並符合《國家公園法》規範。

此外，在磺嘴山至金山平原區，台電與中央大學合作，完成 AMT (Audio-Magnetotelluric)、ERT (Electrical Resistivity Tomography) 及小口徑鑽井，確認地熱裂隙與地層不整合分布，下一步將動員國際定向鑽井團隊，於金山溫泉區鑽探三口深逾 3000 公尺之探勘井，不僅驗證資源，也培養國內鑽井技術與人力，如圖 2-45。

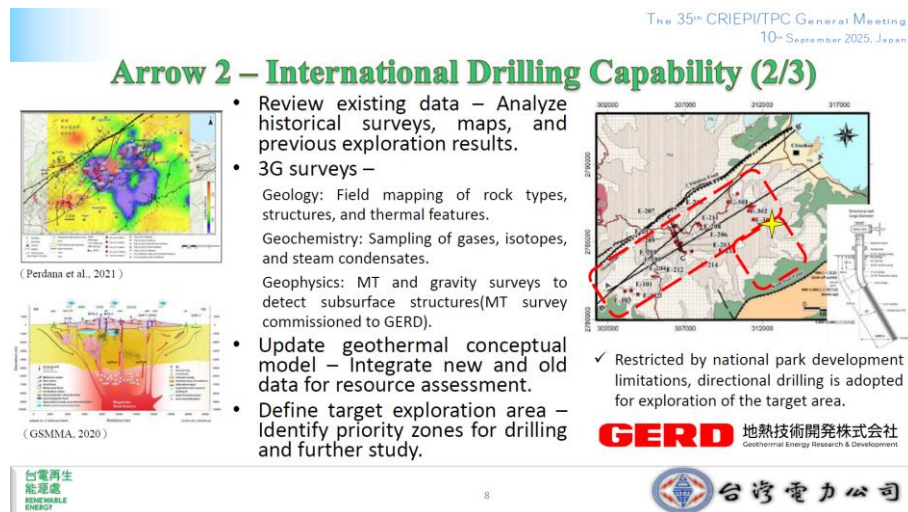


圖 2-44 大屯山 AGS 國際合作探勘計畫

Arrow 2 – International Drilling Capability (3/3)

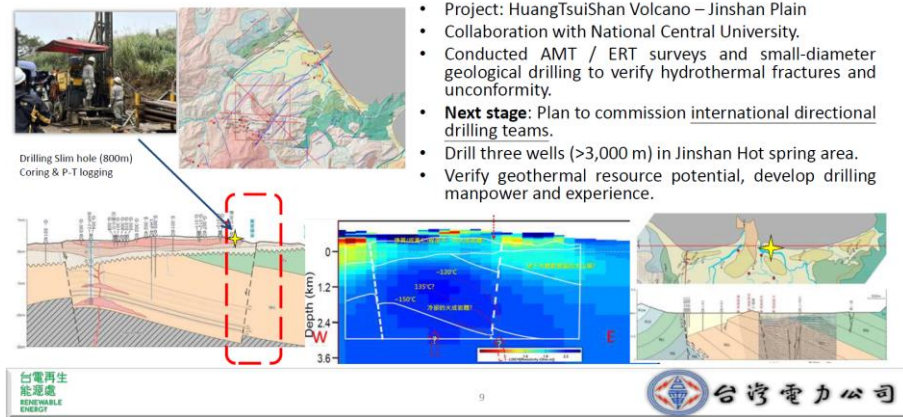


圖 2-45 磺嘴山-金山平原地熱探勘計畫

(3) 效率與穩定性

第三支箭旨在提升電廠效能與可靠性。在宜蘭仁澤地區，台電與中油於 2019 年完成 JT-3、JT-4 井，並於 2024 年 10 月啟用 840kW 雙循環發電示範電廠，展現穩定發電成果，如圖 2-46。

商轉後因流體富含礦物質，容易導致碳酸鈣結垢問題，加上井口壓力偏高，進一步加劇結垢。台電與工研院合作，導入專利塗層並聯手國內原廠設備製造商 HanPower 修改曝氣槽、加裝壓力容器（提升系統壓力約 3–4 bar），有效減緩結垢並降低回注功耗，提升整體發電輸出效率，如圖 2-47。後續更與太平山國家森林遊樂區合作，整修 1984 年鑽鑿的 JT-2 井，更換老舊故障之井口設備、進行井下機械刮除、聯合產能測試及井下流體採樣工作。另同步配合鑽鑿新淺層回注井，配置「三生產一回注」模式，預估可支撐 1–2MW 的新增發電規模，現場用地規劃設有擴廠區域，為下一座機組預留基礎設施與佈局，以降低施工對環境的衝擊。

Arrow 3 – Efficiency & Stability (1/3)

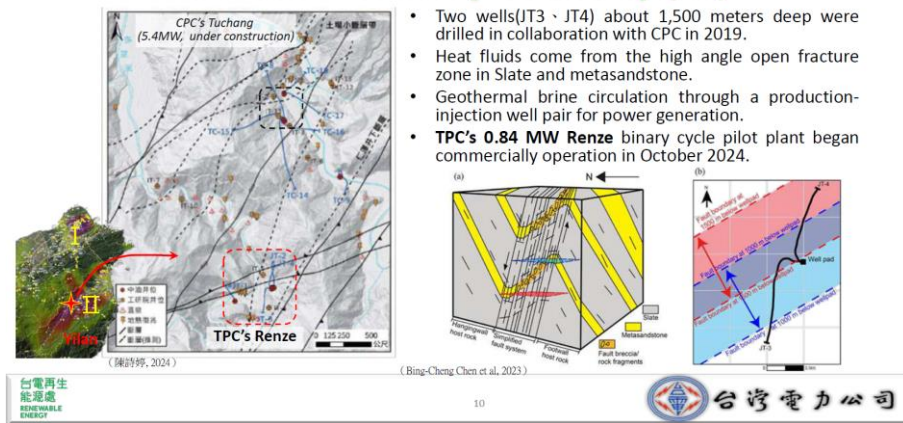


圖 2-46 仁澤地熱區熱源架構

Arrow 3 – Efficiency & Stability (2/3)

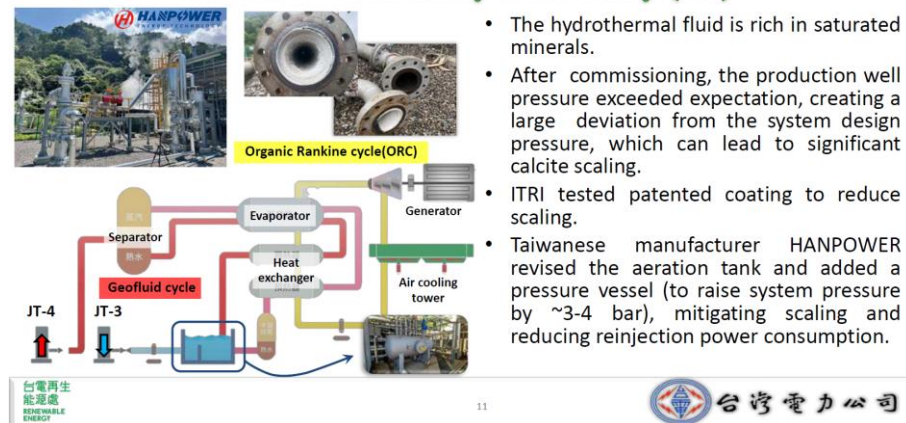


圖 2-47 仁澤地熱電廠效率提升

(4) 產業與人才發展

第四支箭聚焦於產業鏈與人力資源，透過設備國產化逐步推動國內製造地熱相關設備，建立自主供應鏈；2025 年將於宜蘭在地招募土木、機械及電機專業人員；提供獎學金制度，資助國內地質相關學程及研究生，於畢業後進入台電服務；長期規劃產學合作，深化與高中職及大專院校，建立長期技術人力培育機制。透過此三管齊下，台電正打造從硬體設備到人力資源的完整生態系，確保地熱產業能自立發展。

三、技術參訪

(一) Low Dose-Rate Radiation Biological Effects Research Facility

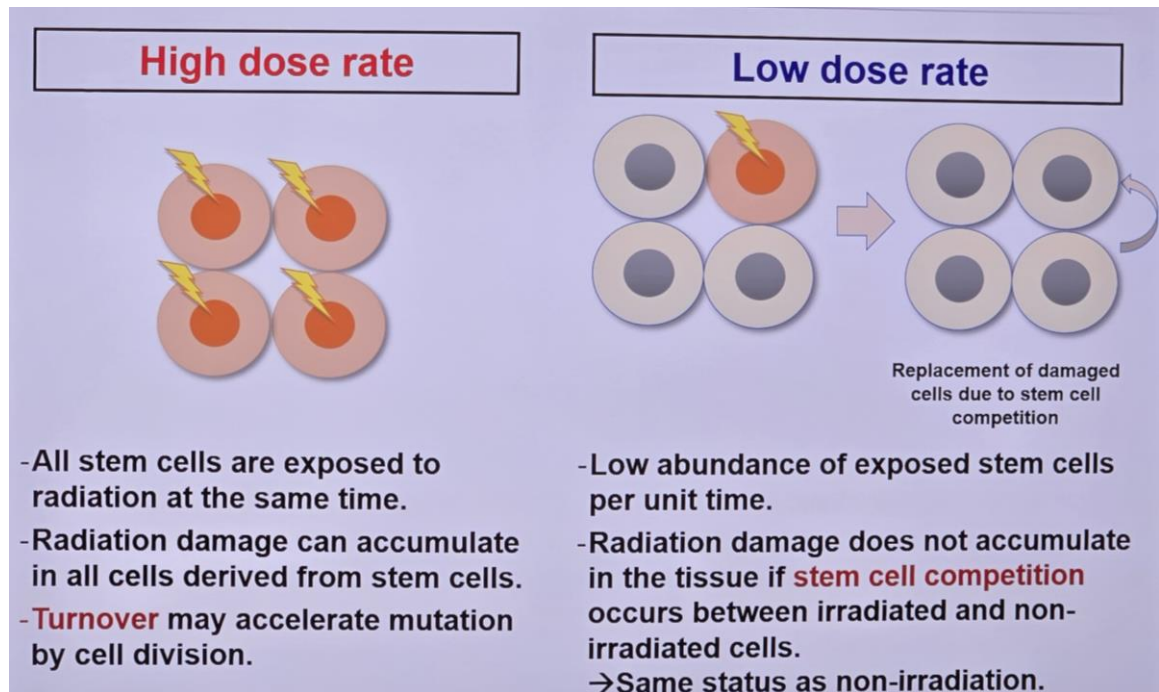
第一個參訪的實驗室為低計量輻射對人體影響實驗室（Low Dose-Rate Radiation Biological Effects Research Facility），由岩崎利泰博士（Dr.Toshiyasu Iwasaki）介紹實驗室在印度基拉拉邦（Kerala）的追蹤研究及問卷調查，如圖 3-1。基拉拉邦的沿海地區有著因含有大量獨居石（monazite）而聞名的黑沙灘，而獨居石富含鈷元素（thorium），是一種天然的放射性元素，這使得基拉拉邦具有較高的天然背景輻射（high natural background radiation）。



圖 3-1 岩崎利泰博士

當人體暴露在輻射環境中，輻射會隨機地使細胞發生突變，使得人體中部分細胞會具有突變的基因。在高劑量輻射下，人體中具有突變基因的細胞較多，透過細胞的分裂或增生（turnover），突變的基因會被複製，最終淹沒原本具備正常

基因的細胞；在低劑量輻射下，人體中具有突變基因的細胞較少，當少到一定程度時，細胞的分裂或增生就會使得具備正常基因的細胞可以取代具備突變基因的細胞，如圖 3-2。



資料來源：CRIEPI 低計量輻射對人體影響實驗室現場播放簡報

圖 3-2 突變基因在人體中的複製和消除

低劑量輻射對人體影響實驗室中，先對已有突變基因的實驗體進行細胞取樣，使用螢光劑作為標籤來進行細胞分類，再透過流式細胞分選儀自動細胞分取解析裝置，如圖 3-3，選出基因突變的細胞，以置入實驗器官中觀察突變的基因在器官中如何變化。為了確認突變基因在實驗器官中的變化情形，低劑量輻射對人體影響實驗室中會使用基因體分析儀進行次世代定序（Next-Generation Sequencing），如圖 3-4，同時也有效運用實驗室自動化工作站來程式化並自動化實驗流程，如圖 3-5，減少人工步驟，可大幅降低人為錯誤對實驗的影響。

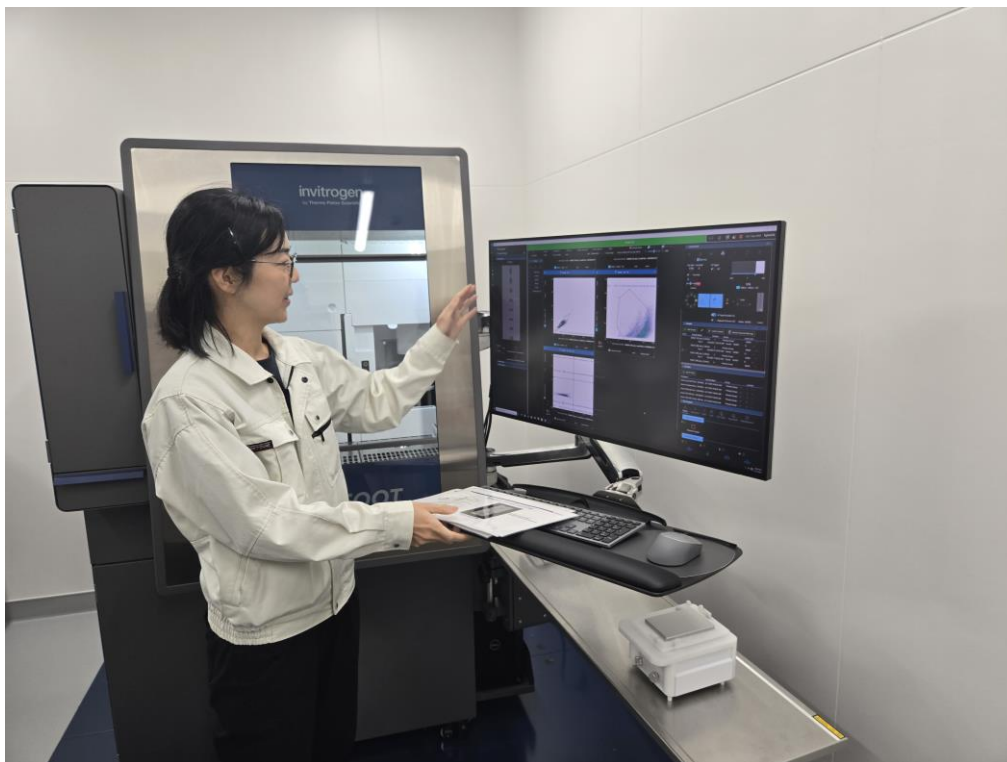


圖 3-3 流式細胞分選儀自動細胞分取解析裝置



圖 3-4 基因體分析儀

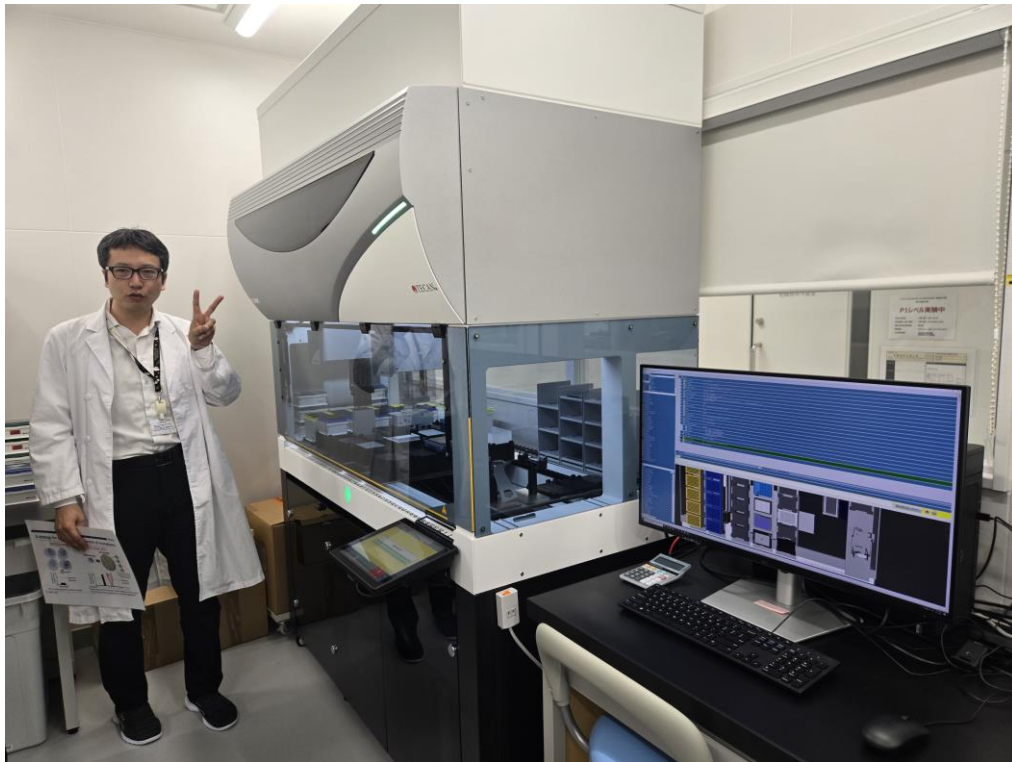


圖 3-5 實驗室自動化工作站

(二) Geotechnical Centrifuge System

在 CREPI 的 Abiko 研究所區第二站參訪的設施是 Geotechnical Centrifuge System 遠心力載荷岩盤模型試驗裝置，如圖 3-6，由 Dr. Makoto ISHIMARU 解說，該裝置透過對小型模型施加遠心力，依據「相似則」模擬實物受力狀態，用於評估岩盤或地層的真實物理行為，此設施現已修正更新成 mark2 版本，在選轉試驗平台上增設冷卻系統，以保持實驗條件之溫度穩定。

此設施總質量 80 公噸，最大有效回轉半徑 3.2 公尺，可連續 6 個月施加最高 100G 的離心力，架台最大載重 $150\text{G}\cdot\text{t}$ （相當於 100G 時可載 1.5 公噸模型），配備有小型振動台，能在 50G 離心場中模擬 $\pm 35\text{G}$ 的地震加速度（約 700Gal 相當）。

主要研究用途為 1.高放射性廢棄物地層處分設施的長期行為評估，利用時間

加速效果，模擬數十年至數百年的設施周邊地層長期變化，驗證影響評估與數值分析。2.地震時地盤與邊坡穩定性評估，在土槽內製作小型地盤或邊坡模型，施加地震動，觀測破壞與變形，並用於數值分析方法的開發與驗證。



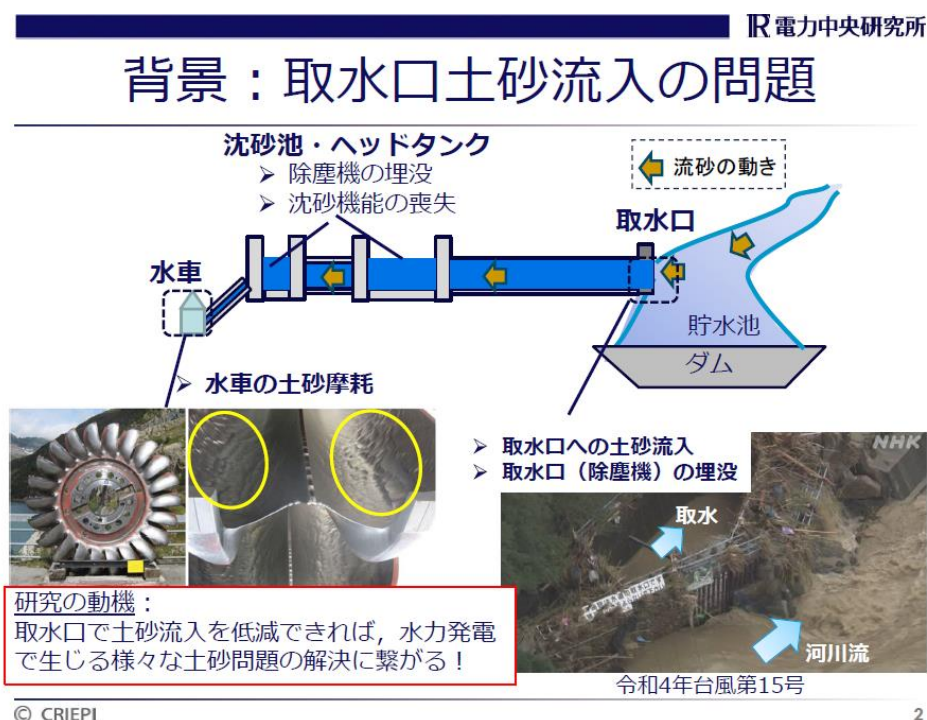
資料來源：<https://egsweb.denken.or.jp/facility/2002005/>

圖 3-6 遠心力載荷岩盤模型試驗裝置

(三) Hydraulic Model Experiments

第三項技術參訪為水力模型試驗(Hydraulic Model Experiments)，由 Daisuke Kobayashi 先生進行介紹。一開始提到，水力發電廠的進水口泥沙流入問題是一個長期困擾，如圖 3-7 所示。當河川流量大或發生洪水時，泥沙會隨水流進入進水口，導致：

- 沉砂池與前池功能喪失：泥沙淤積會使這些設施失去其應有的沉降功能。
- 除塵機掩埋：大量泥沙會掩埋除塵機，導致其無法正常運作。
- 渦輪機磨損：泥沙進入渦輪機會對其葉片造成嚴重磨損，影響發電效率和設備壽命。



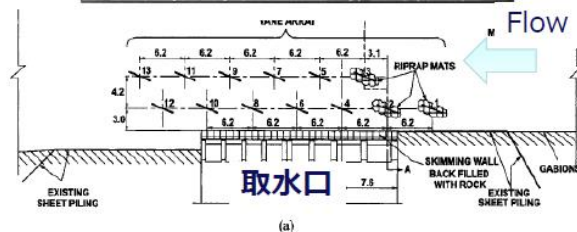
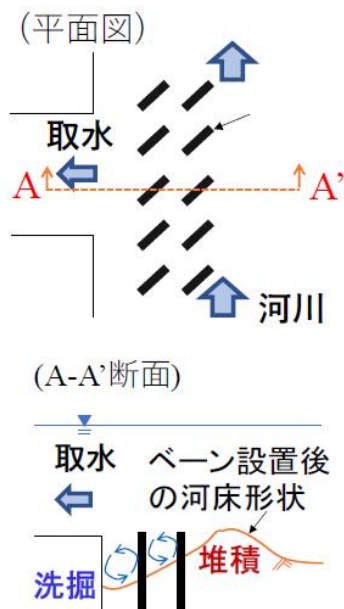
資料來源：太田一行，小林大祐，佐藤隆宏，“ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験，” 2024

圖 3-7 進水口泥沙流入的問題

研究動機は希望透過在進水口前端設置導流板來減少泥沙流入，從而從根本上解決這些問題。簡報提到既有技術與目前研究的差異，美國在火力發電廠和核電廠的進水口已經成功應用了水下導流板技術來減少泥沙流入，如圖 3-8 所示。這些導流板對於粒徑大於 0.15mm 的泥沙特別有效。美國的既有設計方法已經有一套水理設計規範，並能有效減輕泥沙淤積。

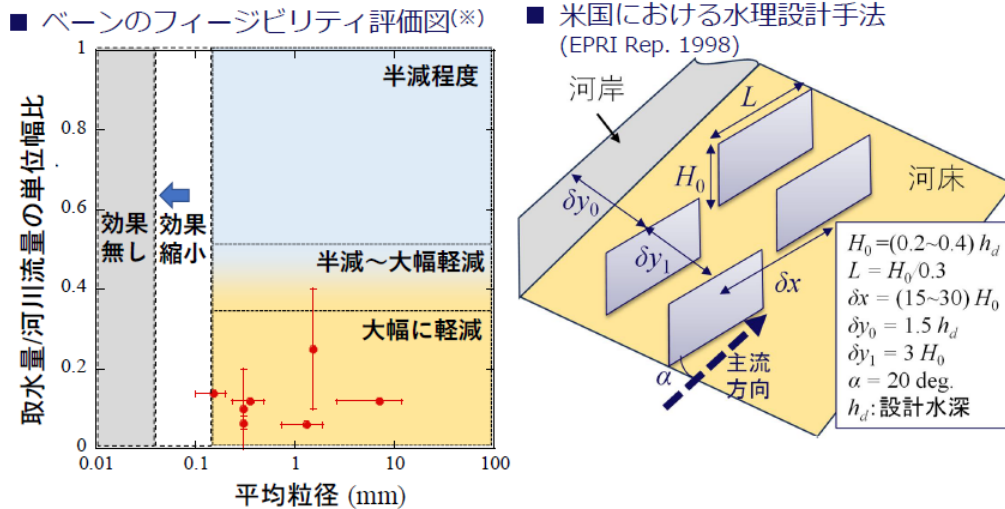
IR 電力中央研究所

背景：海外の既往技術



- 米国の火力・原子力地点（河川から冷却水を取水）では**没水ベーン工**による土砂流入軽減が実用されている。

背景：海外の既往技術



- 既往事例によれば、粒径0.15mm以上の土砂に対して効果的である(※)。
- 火力・原子力地点（河川取水）を想定した水理設計手法も確立されている。

© CRIEPI

(※)太田・佐藤(電中研報告, SS22006, 2022)

4

(b)

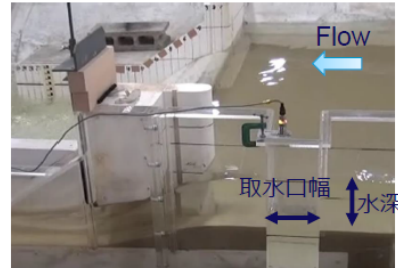
資料來源：太田一行，小林大祐，佐藤隆宏，“ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験,” 2024

圖 3-8 國外現有的技術

然而，研究者指出，與美國的火力/核電廠進水口相比，水力發電廠的進水口在水深與進水口寬度之比（ h/b ）上有顯著差異。水力發電廠的進水口寬度相對較小，這意味著既有的設計方法可能不適用。過往的研究也沒有專門探討在水力發電進水口使用導流板的適用性。因此，這項研究的目的是透過水理實驗來驗證導流板在水力發電進水口的適用性，並探討不同導流板形狀的影響，如圖 3-9 所示。

目的

- ◆ 取水口への土砂流入が懸念される流れ込み式水力の取水口は米国の火力・原子力用取水口に比べて、水深に対する取水口幅がかなり小さい傾向があり、ベーン工の適用性や水理設計法が異なってくると考えられる。
- ◆ これまで水力発電の取水口で流入土砂を制御するという発想自体が無く、水力発電へのベーンの適用性、効果的なベーン形状等を検討した例は見当たらない。



ダム排砂の移動床実験の例(Ota et al. 2017)

研究の目的

水理実験によりベーン工の水力用取水口への適用性を検証するとともに、ベーン形状の影響についても検討

© CRIEPI

5

資料來源：太田一行，小林大祐，佐藤隆宏，“ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験,” 2024

圖 3-9 不同導流板形狀的研究目的

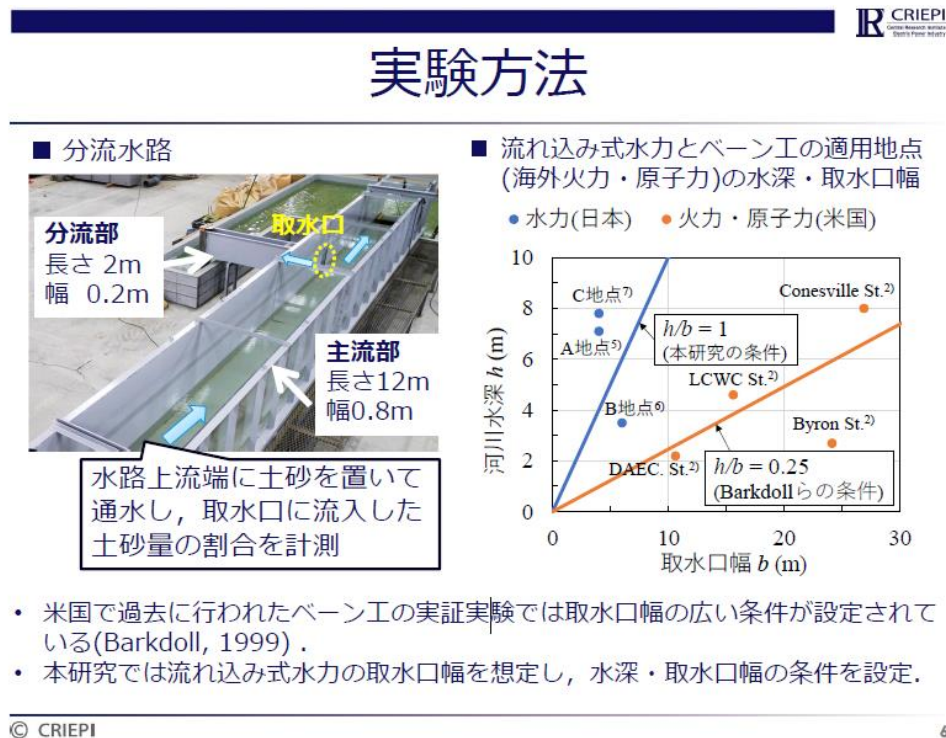
實驗方法與條件

為了模擬水力發電進水口的條件，研究者建立了一個實驗水槽，如圖 3-10 所示。

- 實驗裝置：實驗水槽由一個 12 公尺長、0.8 公尺寬的主流部分和一個 2 公尺長、0.2 公尺寬的分流部分（進水口）組成。實驗中，泥沙被放置在水槽上游，並測量流入進水口的泥沙量。

- 進水口條件：研究將水深(h)與進水口寬度(b)的比例設定為 $h/b=1$ ，這與美國既有研究中 $h/b=0.25$ 的條件明顯不同。這是因為水力發電進水口的水深與寬度相當。

- 導流板類型：實驗使用了兩種不同形狀的導流板：矩形導流板和翼型導流板。翼型導流板是參考 Ouyang 和 Lai (2013) 提出的形狀。
- 實驗變數：研究的主要變數是單位寬度取水量與河川流量之比(q_i/q)。這項實驗旨在探討不同流量條件下，導流板對泥沙流入的影響。



資料來源：太田一行，小林大祐，佐藤隆宏，“ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験，” 2024

圖 3-10 水力模型試驗的實驗方法

實驗結果與討論

實驗結果顯示，導流板在減少水力發電進水口泥沙流入方面非常有效，尤其是在洪水期等高流量條件下。

- 導流板效果與流量比的關係：導流板的效果隨著 q_i/q 的比值降低而顯著提高。在 $q_i/q < 0.5$ 的條件下，泥沙流入可以得到大幅度的減少，如圖

3-11 所示。

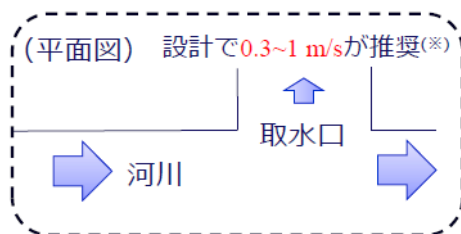
- 導流板形狀的影響：

1. 矩形導流板可減少約 80%的泥沙流入。
2. 翼型導流板效果更好，可減少高達 90-94%的泥沙流入。
3. 造成這種差異的原因是，矩形導流板上游端會產生水流剝離，導致部分泥沙繞過導流板進入進水口。而翼型導流板的流線型設計可以讓水流和泥沙沿著板身平順流動，進一步減少泥沙流入。

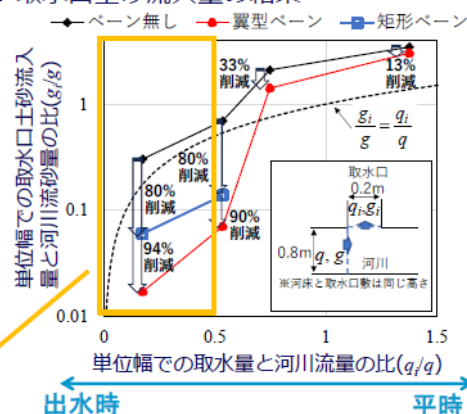
- 所需導流板數量：由於水力發電進水口的水深和寬度相當，一個導流板的影響範圍就能覆蓋整個進水口寬度。這意味著，與需要安裝 14 個導流板的美國既有實驗相比，水力發電廠可能只需要極少的導流板就能達到顯著效果。這將大大降低建設成本和複雜性。如圖 3-12 所示。

考察： q_i/q の影響

■ 水力発電の取水流速について



■ 取水口土砂流入量の結果



- 水力地点の取水流速は0.3 ~ 1 m/sにする設計が推奨されており(※), $q_i/q < 0.5$ は出水時に頻繁に発生し, ベーン工は出水時に有効に機能すると思われる。

© CRIEPI

(※) 千秋信一, 発電水力演習, p.247

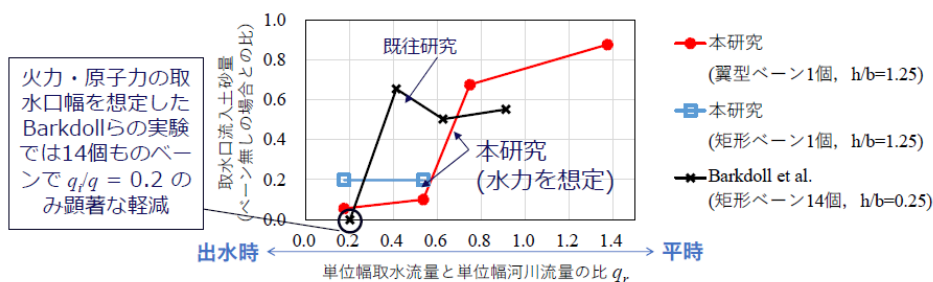
11

資料来源：太田一行, 小林大祐, 佐藤隆宏, “ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験,” 2024

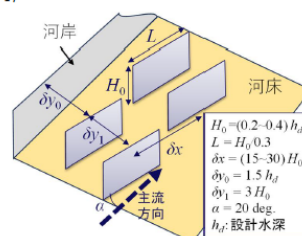
圖 3-11 q_i/q 的影響

考察：取水口幅の影響

■ 既往実験との比較



- 既往の設計法ではベーンの長さ L は設計水深と同等であるが, 水力用取水口では設計水深と取水口幅が同程度であることから, 一つのベーンの影響範囲が取水口全幅に渡ったと考えられる。
- 従って, 水力発電の場合は設置されるベーン個数よりも格段に少ないベーン個数で済むと示唆される。



© CRIEPI

12

資料来源：太田一行, 小林大祐, 佐藤隆宏, “ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験,” 2024

圖 3-12 進水口寬度的影響

結論與未來展望

這項研究成功證明了導流板技術在水力發電進水口的適用性，並得出以下結論，如圖 3-13 所示：

- 在洪水期 $q_i/q < 0.5$ 的水理條件下，導流板能有效減少 80-94% 的泥沙流入。
- 翼型導流板的效果優於矩形導流板。
- 水力發電廠所需的導流板數量遠少於火力或核電廠的既有案例。

這項技術的實踐仍有待解決一些挑戰，包括在實際的移動床條件下進一步驗證效果，並開發相應的數值分析評估技術。



まとめ

(得られた成果)

- 出水時に頻繁に発生すると考えられる水理条件 $q_i/q < 0.5$ において，取水口に流入する土砂は矩形ベーンでは 80% 軽減，翼型ベーンでは 90~94% 軽減し，それぞれ一つのベーンのみで高い効果が得られた。
- 単位幅での取水量と河川流量の比 (q_i/q) が大きいほど，取水口土砂流入の軽減効果は低下し， $q_i/q = 1.37$ の条件では翼型ベーンでも 13% の軽減効果に留まる。
- 流れ込み式水力発電における水深・取水口幅比を想定すると，必要となるベーンの個数は米国の火力・原子力発電所の既往事例で設置された個数から大幅に少なく済むと示唆される。

(社会実装に向けた今後の課題)

- 移動床条件下での効果確認
- 数値解析による評価技術の構築

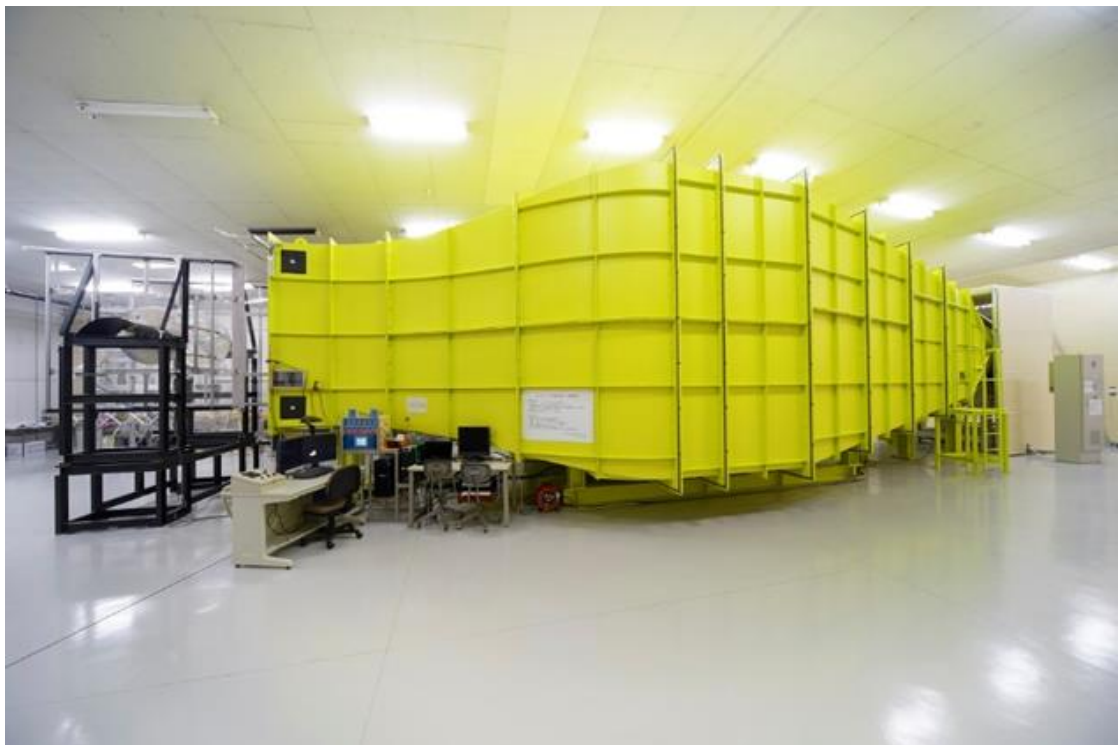


資料來源：太田一行，小林大祐，佐藤隆宏，“ベーン工による水力発電用取水口の土砂流入制御に関する実験，” 2024

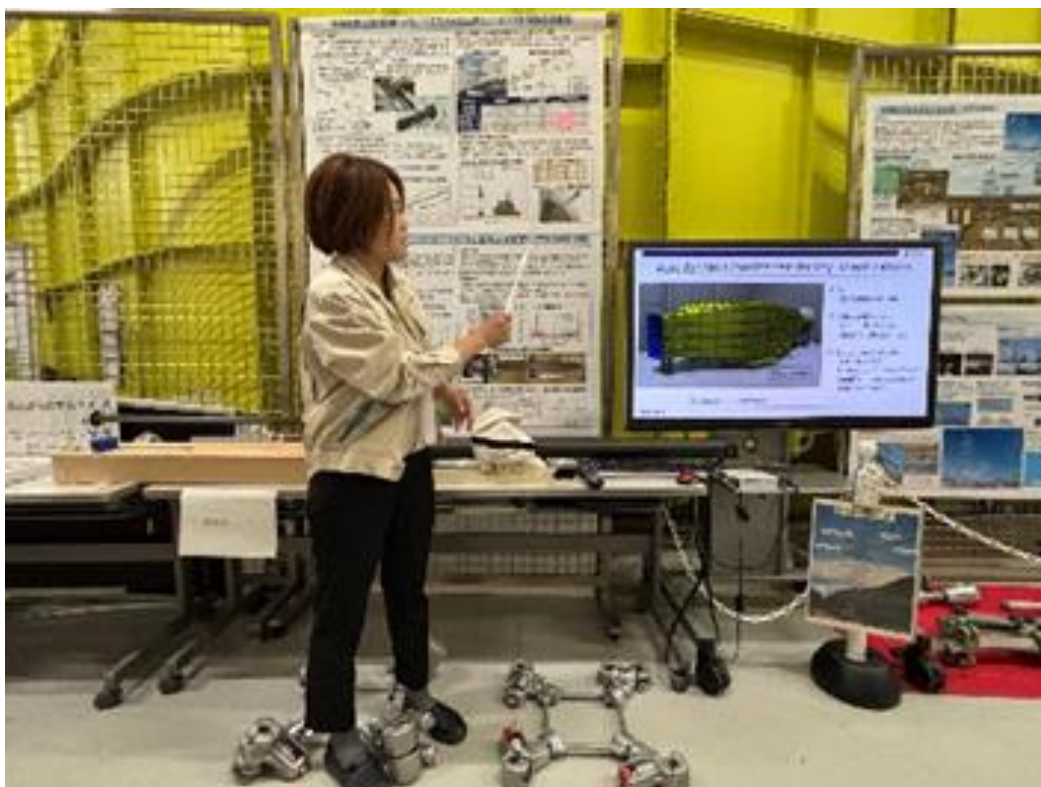
圖 3-13 結論與未來展望

(四) Eiffel-Type Model Tunnel

第四個參訪的實驗室為空氣力荷載試驗裝置。這是一個大型開放式的風洞實驗場域，最大風速可達約為每秒 17 米。該裝置的吹出口尺寸為高 2.5 米、寬 1.6 米，其主要特點是吹出口下游有足夠的空間來進行各種實驗。此裝置用於研究電力設備，例如模擬輸電線路上的風雨引起的振動現象（如舞動和雨振），以及評估抑制措施的效果。此外，它還可用於評估作用在太陽能板等物體上的風力荷載。該研究由 CRIEPI 的杉本聰一郎、岡崎友紀和垂石早紀等研究人員負責。這次參訪由垂石早紀負責現場簡報與解說，如圖 3-14 所示。



(a)



(b)

圖 3-14 CRIEPI「空氣力荷載試驗裝置(風洞)」的研究設施以及解說人員

這座大型風洞裝置，即「空氣力荷載試驗裝置」，主要針對電力設施進行了以下具體的風作用與荷載評估：

(一)風響應及振動現象的評估 (Evaluation of Wind Response/Vibration Phenomena)

該裝置的研究目的涵蓋了對電力設備的風響應評估。具體涉及以下幾種不穩定振動現象及其對策或影響的驗證：

1. 輸電線路的舞動 (Galloping)

- 該裝置能夠重現覆雪輸電線在強風下發生的「舞動 (Galloping)」現象。

- 舞動是一種具有大振幅且緩慢振動的現象。

- 實驗目的是用於驗證抑制舞動的對策法的效果。

2. 鐵塔構件受風雨引起的振動 (Rain-wind-induced vibration)

- 該裝置可用於針對鐵塔等構件進行疲勞評估的振動實驗。
- 具體涉及「風雨引起的振動 (Rain-wind-induced vibration)」現象。
- 這種現象是在鐵塔鋼管部材上，於降雨時且風速較高時，因雨水形成「水路」而引發的一種空氣動力上的不穩定振動。
- 由於風雨引起的振動被認為是導致構件疲勞損傷的一項原因，因此相關研究目標包括：

- 闡明鐵塔鋼管部材上風雨引起的振動特性。
- 利用風洞實驗（例如針對模擬水路的帶突起圓柱）測量其空氣力和表面壓力。
- 確認使用準定常空氣力進行的解析性評估的適用性。
- 分析發現，當升力（揚力）的激振效果超過阻力（抗力）和結構阻尼的阻尼效果時，振動即會發生。

(二) 風力荷載的評估 (Evaluation of Wind Load)

- 該裝置也可用於對物體上作用的風荷載進行評估。
- 具體應用包括評估作用於太陽能板等物體上的風荷載。

四、心得及建議

(一) R&D and Clean Energy Strategy

在本議題的交流中，台日雙方均強調「創新」與「溝通」在能源轉型過程中的關鍵角色。台電分享了邁向淨零的目標與具體措施，特別著重於如何透過持續且系統性的創新機制與行動，激發組織內部的創新能量。這對 CRIEPI 而言是一大啟發，因其研究人員同樣面臨繁重工作，如何在研究所管理中持續培養動力與創新，正是值得借鏡的重要課題。

另一方面，CRIEPI 的研究凸顯了資訊提供與溝通方式對民眾態度轉變的深遠影響。調查結果顯示，若僅依賴量化問卷，可能因「難以判斷」比例上升而低估創新技術支持度；但在深度訪談中，當民眾充分理解安全機制與創新設計後，往往更傾向於正面看待。這提醒台電，未來在推動能源政策與技術研發的同時，亦需加強社會溝通與資訊透明，以逐步凝聚社會共識並提升新技術的接受度。

展望未來，雙方將持續透過案例與經驗分享，深化交流與合作，共同推動創新發展，並攜手面對能源轉型與社會挑戰，助力台日電力產業實現永續發展與淨零目標。

(二) Accelerating Solar Adoption

在再生能源發電預測方面，CRIEPI 透過自身氣象領域的研究專業，建置太陽輻射預測模型，並用以預測太陽光電發電量，在交流過程中，雙方針對使用衛星雲圖或天空影像進行太陽光電發電預測進行了討論，可透過兩者互相配合的方式，讓預測的時間範圍更長。對於氣象資料取得的時間差議題，CRIEPI 建議可以結合數值氣象模型。另外，CRIEPI 在壱岐島的太陽光電預測是以每個案場為預測主體，可將 PCS 容量限制以及削減出力情境納入預測的考量範圍，不過為了評估準確度、提升預測效果，需要取得案場的詳細發電資料，CRIEPI 甚至

取得即時的光電設備運轉資料，來做滾動式的發電預測，這些做法或可作為本公司光電預測的參考。

(三) Climate Forecast on Risk Reduction

這份關於日本用於輸電鐵塔抗風設計的風力地圖開發與全球暖化影響評估的研究成果簡報對本公司鐵塔安全評估具有多項重要的參考價值：

- 山區複雜風場的評估方法：台灣同樣具有複雜多山地形，簡報中利用數值氣象模擬（如 CRIEPI-RCM-Era2 資料庫）來解析落山風等局部強風現象，提供了無觀測資料區域風速估算的有效方法，對台灣偏遠及山區鐵塔的風險評估極具借鏡意義。

- 風向影響及風向分區設計：簡報強調風向對鐵塔結構受力的顯著影響，並提出根據不同風向設計風速的策略，這和我方進行輸電鐵塔風力數值分析，在設計與安全評估中納入風向分佈的差異性，提升設計合理性的做法一致。

- 氣候變遷影響考量：簡報中對未來全球暖化情境下颱風風速變化及落山風強度變動的預測，提醒本公司在鐵塔安全評估中也應納入氣候變遷的影響，調整設計標準以因應極端氣象事件的可能增強。

- 長期極端風速統計：利用長時段氣象資料進行極端值統計分析，作為確定 50 年或 100 年重現期設計風速的重要依據，這種科學的統計方法能提高台灣鐵塔安全標準的科學性和準確性。然而，台灣輸電線路的設計風力重現期（一般線路 100 年，重要線路 200 年）與日本相比，也顯得

偏向保守，主要是考慮到台灣電網為獨立電網，抗風設計上必須更加嚴謹。

- 國際標準與調整因子參考：日本考慮引入類似澳洲、加拿大納入氣候變遷增強因子的設計標準，建議本公司在未來檢討與修訂鐵塔安全設計基準時，也可參考其作法——平衡安全性、經濟性與政策可行性。

總之，這份日本研究案例結合了數值模擬、長期統計分析與氣候變遷前瞻性評估的方法，提供本公司未來調整山區及氣候風險管理的鐵塔安全評估框架的參考，有助提升台灣電力系統在極端風災威脅下的韌性與可靠度。

CRIEPI 的研究比較聚焦在基礎力學研究，然而，本項技術參訪的研究內容與成果對於本公司在輸電鐵塔的設計與維護方面，具有重要的參考價值和應用潛力。研究價值主要集中在對風所引致之各類振動現象的深入理解、疲勞損傷風險的評估，以及設計分析工具的驗證等方面：

1.瞭解與應對輸電鐵塔的空氣動力不穩定現象

CRIEPI 的研究明確指出，電力設備可能遭受多種由風所引起的振動問題，這些問題可能導致金屬構材的疲勞或結構損傷。

(1)風雨引起的振動（Rain-wind-induced vibration）特性釐清：

- * 研究專注於鐵塔的鋼管構材，在降雨及高風速時，雨水形成水路可能引發的空氣動力上不穩定振動。此現象被認為是構材產生「疲勞損傷」的原因之一。
- * 透過風洞實驗和分析研究成果可了解鋼管構材發生振動的原因。當模擬水路於鋼管上形成時，將導致「升力係數急劇下降」，使得鋼管構材因空氣動

力不穩定而發生振動。

- * 這有助於工程師識別並理解在多雨環境下，鐵塔鋼管構材可能面臨的特定損壞機制。

(2)導線舞動（Galloping）的模擬與對策驗證：

- * 大型空氣動力試驗裝置（風洞）能夠再現覆雪輸電線在強風下發生的「導線舞動」（Galloping）現象。
- * 雖然台灣鮮少降雪，但此類大型風洞設備的應用價值在於「驗證抑制導線舞動的對策效果」。這對於設計和選擇合適的制振器或防振措施具有指導意義。

2. 提升疲勞損傷評估與維護預測能力

研究成果提供了一種分析方法，以評估可能發生在鐵塔構材上的振動振幅，這對鐵塔的維護和設計至關重要。

(1)疲勞損傷風險量化：

- * 為了確定哪些鐵塔構材的疲勞損傷風險較高，需要對各構材可能產生的振動振幅進行解析評估。
- * 研究驗證了使用「準定常空氣動力(Quasi-steady aerodynamic force)」進行解析評估的適用性，其解析結果與風洞實驗結果具有良好的一致性。
- * 建議本公司可以運用這種經過驗證的解析手法，對現有或新建鐵塔的鋼材進行疲勞壽命預測和風險評估。

(2)找出最大振幅發生的關鍵條件：

- * 分析結果顯示，當升力的激振效果超過阻力的減衰效果和結構阻尼時，振動就會發生。
- * 研究特別指出，當圓柱沿著偏向上風方向（斜向上）振動時，由於阻力導致的減衰效果最小。在這種條件下，即使在較低風速下也會發生振動，並且振幅達到最大。
- * 這些詳細的振動特性（如在何種鉸角下振幅最大）有助於本公司在設計時考慮如何優化鐵塔構材或接頭的配置，以避免關鍵的振動模式。

3. 支援設計和風力荷載評估

研究和實驗設備本身也為設計提供了基礎數據和測試平台。

(1) 實驗設施的應用：

- * 大型空氣動力荷載試驗裝置（風洞）可用於評估電力設施的風響應和風荷載。吹出口尺寸大（高 2.5m × 寬 1.6m），且下游空間寬廣，適合進行多樣化的實驗。
- * 除了鐵塔振動，該設施還可用於評估太陽能板等物體上作用的風荷載，這對於本公司在擴展再生能源設施時，亦具有應用價值。

4. 未來研究方向的指導：

研究計畫將進一步評估雨水形成的水路相對於風向有水平偏角時的情況，並對實際觀測到的鋼管構材由風雨引起的振動進行再現解析。這些後續工作將使解析模型更加貼近實際鐵塔結構，從而進一步提高鐵塔設計模型的準確性。雖然本公司輸電鐵塔主要使用角鋼結構，此主題後續研究成果仍值得持續關注。

(四) Grid Resilience

CRIEPI 此次的簡報呈現了一場由數據、預測模型和數位化技術所驅動的電力系統韌性革命。它清楚地傳達了幾個關鍵訊息：

- 首先，在氣候變遷日益加劇的今天，傳統的電力系統維護與應變模式已不足以應對極端災害。我們必須從被動的「災後修復」轉向主動的「災前預測與管理」。

- 其次，這份簡報是跨領域融合的典範。它結合了傳統的電力工程學、氣象學（颱風預測）和現代資訊科學（大數據分析、預測模型）。這種跨學科的合作，是解決當前複雜工程與環境挑戰的必經之路。

- 最後，這份報告也啟示我們，應對災害韌性的提升，不僅僅是技術問題，更是組織管理與協作模式的創新。RAMPT 系統的價值不僅在於它能預測損害，更在於它能打破部門和區域的界限，實現資源的合理調度，從而使整個系統的應變能力最大化。

- 總而言之，RAMPT 系統是日本電力產業在面對氣候變遷挑戰時，展現出的一種務實而高效的解決方案。它為全球各地的電力公司提供了寶貴的經驗，證明了透過數位化轉型，我們能夠建立更強韌、更智慧的電力基礎設施，以確保在未來的極端氣候下，仍能持續穩定地為社會提供電力。未來的挑戰在於進一步提升預測模型的準確性，並將更多複合型災害（如颱風與豪雨結合）的影響納入考量。

此次的 Hydraulic Model Experiments 實驗描述了一個極具實用價值的研究。它不僅參考了既有的導流板技術，更針對水力發電的特殊環境進行了創新性的實驗驗證。研究者明確指出了水力發電進水口與火力/核電廠進水口的本質差異（水深與寬度比），並以此作為實驗設計的基礎，展現了嚴謹的科學態度。實驗結果顯示，翼型導流板所展現出較佳的效果。這證明了流線型設計在流體力學中的優勢，並為未來的工程應用提供了明確的設計方向。同時，研究還指出，由於水力發電的特殊條件，所需的導流板數量將大幅減少，這不僅降低了成本，也提高了技術的可行性。這項研究成果為水力發電廠的泥沙問題提供了一個非常有前景的解決方案。泥沙淤積不僅影響發電效率，更會增加維護成本，甚至可能導致發電設施損壞。如果這項技術能夠成功應用，將能顯著提升水力發電廠的運營穩定性和經濟效益，並減少對環境的影響。未來的挑戰在於將實驗室成果應用到真實的河川環境中，這需要更全面的現場測試與數值模擬來建立可靠的設計標準。總體而言，這是一項兼具學術價值與工程應用潛力的優秀研究。

(五) Geological Analysis for Earthquake

CRIEPI 能登半島地震的研究成果，對台電而言不僅在地質科學上具有重要意義，也直接提醒電力系統在強震下的脆弱性。此次地震亦造成當地電力系統停電，大量電桿傾斜與斷裂配電線路受損等，顯示配電線路、電杆與次要設施雖然看似不起眼，卻可能成為大規模供電中斷的主要環節。因此，未來我們在電力防災規劃上，除了強化主力發電廠與輸電網的耐震設計，也需要加強對地形敏感區、斷層帶周邊配電網的韌性規劃。這些經驗與 CRIEPI 的研究成果相互呼應，將有

助於我們更精確地評估風險，並在前期防範上投入更有效的資源。希望能藉由這些交流，讓地震研究與能源基礎設施防災結合得更緊密，為提升能源安全與社會韌性共同努力。

台電的地熱發展策略以「四支箭」為核心，資源整合降低風險，加速專案轉換；國際鑽井導入先進技術，精準鑽入深層儲層；效率與穩定提升電廠可靠性，兼顧環境永續；產業與人才打造本土供應鏈與專業團隊。在推動過程中，台電亦嚴格遵守《國家公園法》與國家森林遊樂區合作，並在設計中納入擴廠規劃，確保發展與環境並行。

展望未來，台電將持續深化國際合作、推動設備國產化，並建立具韌性的產業鏈。透過這些努力，台灣有望將豐富的地熱資源轉化為可靠、具規模的綠能，為能源轉型與淨零排放願景做出具體貢獻。