



鐵道系統的調適策略

報告人：鍾志成

民國114年12月8日

簡報大綱

壹、氣候變遷對鐵道系統的衝擊

貳、氣候變遷的成因及風險

參、氣候變遷之調適架構與策略

肆、鐵道系統調適策略的挑戰

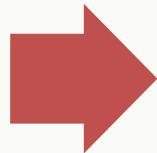




壹、氣候變遷對鐵道系統的衝擊

極端氣候會對鐵道系統造成重大衝擊

極端氣候
(天然災害)



對鐵道系統的衝擊
(路線、車站、車輛、人員...)



水淹



暴潮



滑坡



挫屈

國內即曾發生過多起天然災害的案例



納莉風災 (2001年)



Source: 自由時報

臺鐵富源 - 光復出軌 (2016年)



Source: 自由時報

臺鐵侯硐落石 (2020年)



Source: 工商時報

臺鐵和仁 - 崇德土石流 (2024年)

國外的災情同樣屢見不鮮



Source: 聯合報

北陸新幹線淹水 (2019年)



Source: 聯合報

鄭州地鐵淹水 (2021年)



Source: TCCIP

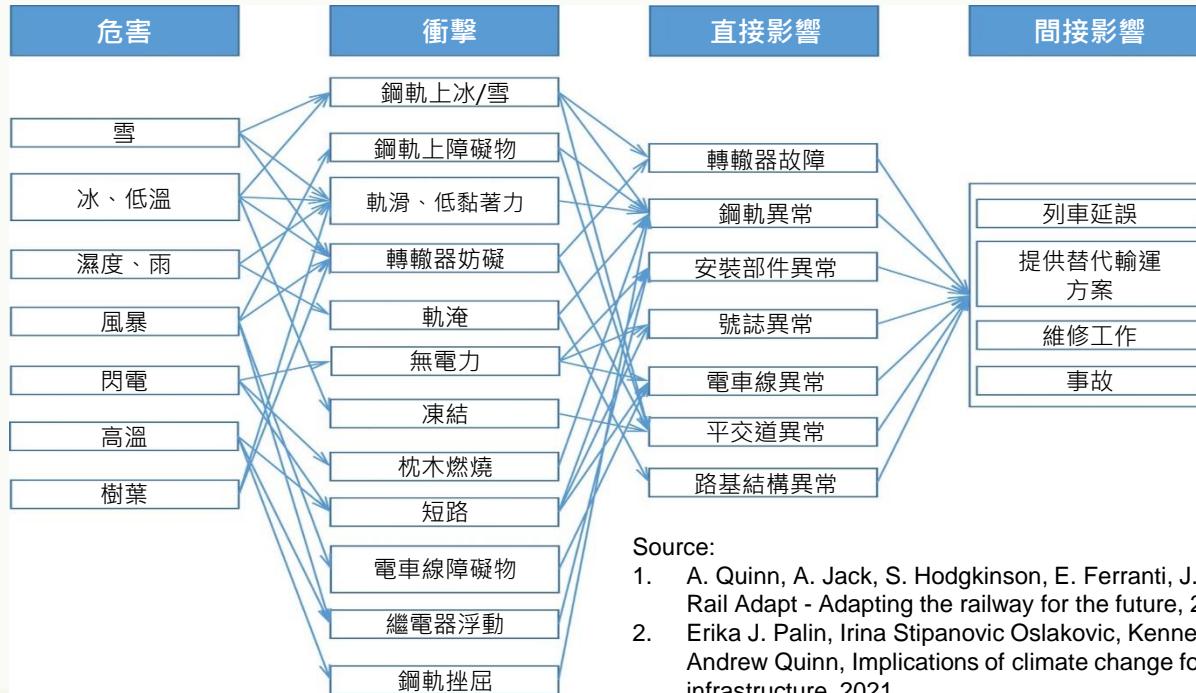
奧地利鐵路停駛1,900次 (2023年)



Source: Trafikverket · 2022

瑞典軌道挫曲 (2020年)

極端氣候對鐵道系統會有複合性的衝擊



氣候變遷的危害、對鐵道系統的複合衝擊，以及直接與間接影響

一旦發生重大災害，損失無法估計

- 納莉風災臺北捷運歷時三個月才全面修復
- 凱米颱風於113年7月24日侵台，造成小清水溪橋沖毀，直到12月21日才修復通車



那麼，我們該如何因應極端氣候的衝擊？



首先，我們必須先了解氣候變遷的成因及風險



貳、氣候變遷的成因及風險

何謂氣候變遷？如何造成的？

- 是指地球氣候的長期變化，主要是因為人類**排放溫室氣體（Greenhouse Gas）**以及**森林砍伐（Deforestation）**所造成全球暖化（Global warming）及極端氣候（Extreme weather）



Source: Tatiana Grozetskaya / Shutterstock.com



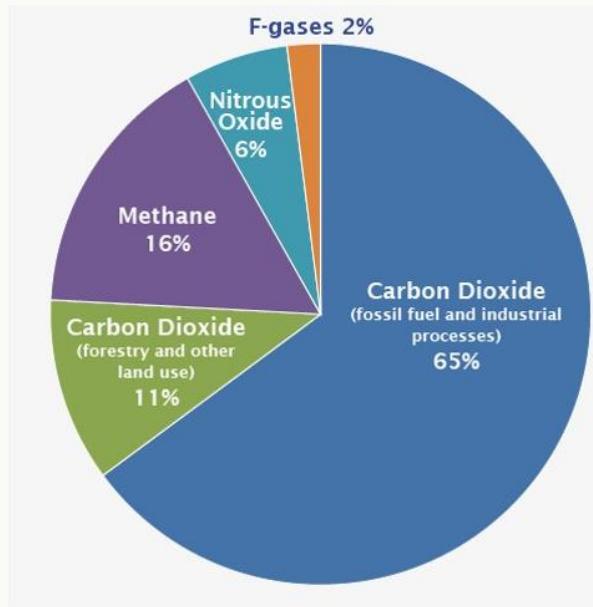
Source: National Geographic

甚麼是溫室氣體？

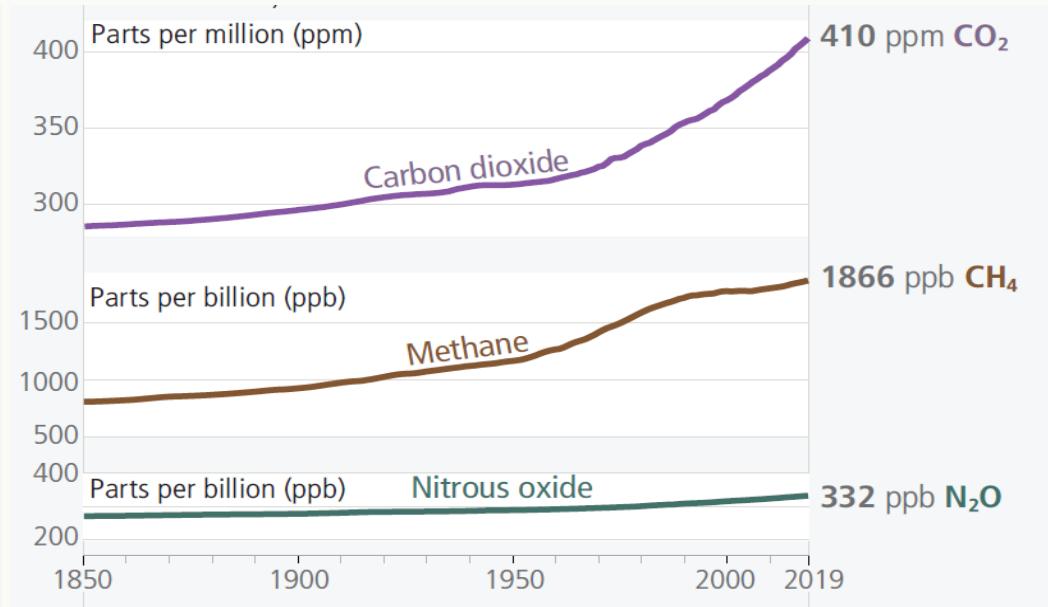


《氣候變遷因應法》第三條第一款定義之溫室氣體

溫室氣體的排放逐年增加



溫室氣體的比例



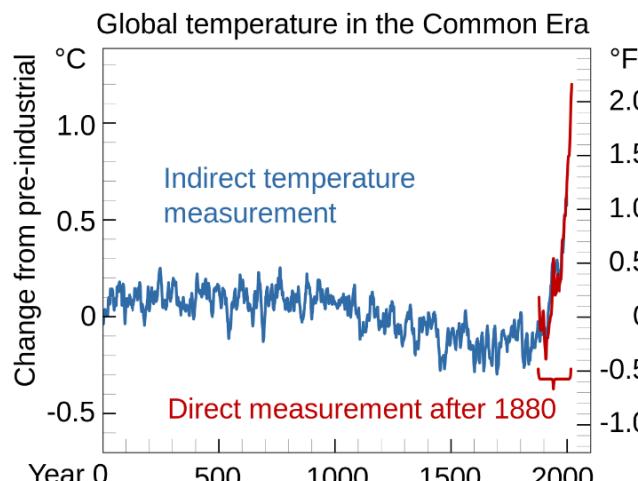
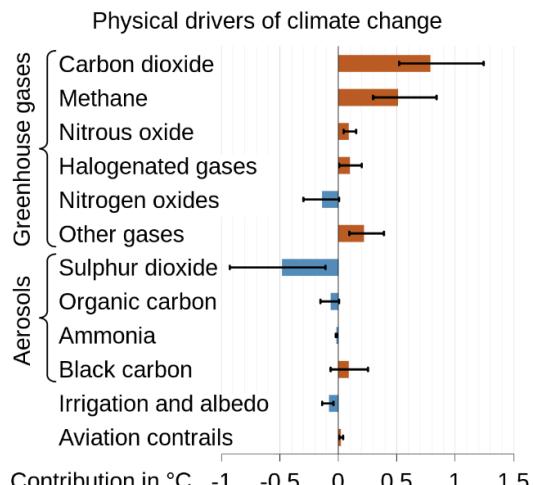
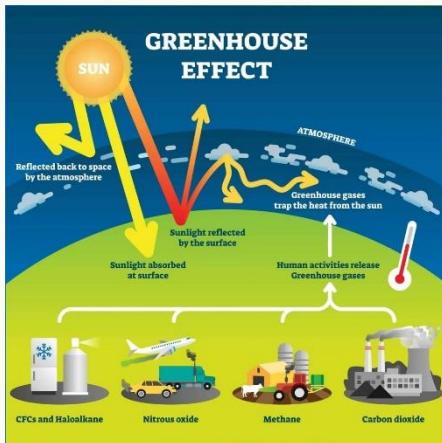
1850年來主要溫室氣體的增加趨勢

Source: [US EPA](#)

Source: IPCC, AR6

溫室氣體導致地球溫度不斷上升

- 溫室氣體吸收地球因陽光變暖後輻射的部分熱量，大量的這些氣體會在地球的低層大氣中捕獲更多的熱量，導致全球暖化



溫室氣體效應

Source: <https://avaada.com/greenhouse-gases/>

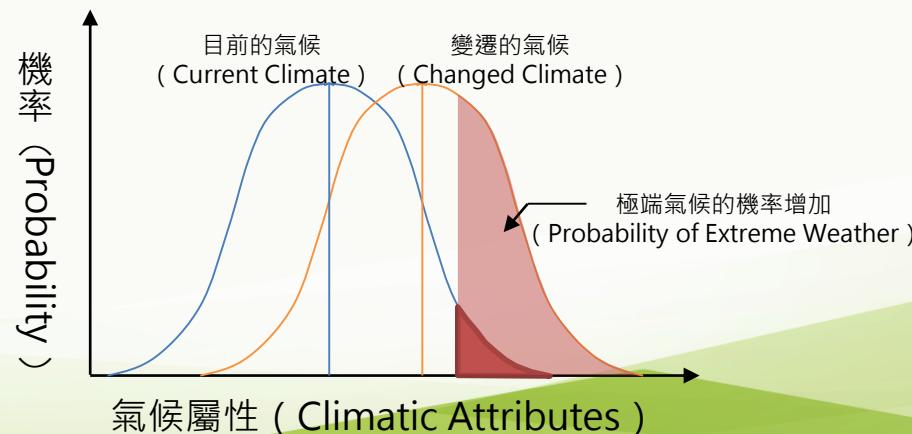
各種溫室氣體對地球升溫的影響

Source: Wikipedia, Greenhouse gas

地球氣溫的變化趨勢

地球升溫導致天然災害的風險增加

- 地球升溫會導致極端氣候，造成天然災害發生的頻率與嚴重度增加



氣候變遷的影響驅動因子分為六大類

- 導致天然災害的氣候因子稱為氣候影響驅動因子 (Climatic Impact-Driver, CID)
- 政府間氣候變化專門委員會 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 第六次評估報告 (Sixth Assessment Report, AR6) 將CID分成六大類
- 地震算是氣候影響驅動因子嗎？

冷與熱

濕與乾

風

雪與冰

沿海

其他

IPCC與陸地有關的氣候影響驅動因子分類

CID會導致天然災害



| 主分類 | 次分類 |
|-----|----------|
| 熱&冷 | 平均空氣溫度 |
| | 極端熱浪 |
| | 寒流 |
| | 霜凍 |
| 濕&乾 | 平均降水量 |
| | 河川洪水 |
| | 豪大雨及洪水 |
| | 土石流 |
| | 氣象/氣候乾旱 |
| | 水文乾旱 |
| | 農業和生態乾旱 |
| | 林火天氣 |
| | 空氣汙染 |
| 其他 | 地表大氣二氧化碳 |
| | 地表輻射 |



| 主分類 | 次分類 |
|-----|----------|
| 雪&冰 | 雪、冰川及冰蓋 |
| | 多年凍土 |
| | 湖冰、河冰及海冰 |
| | 強降雪和冰暴 |
| | 冰雹 |
| | 雪崩 |
| 沿海 | 相對海平面 |
| | 沿海洪水 |
| | 沿海侵蝕 |
| | 海洋熱浪 |
| 風 | 海洋酸度 |
| | 平均風速 |
| | 強風暴 |
| | 熱帶氣旋 |
| | 沙塵暴 |

氣候影響驅動因子的大分類與次分類

並進一步對鐵道系統造成衝擊

各種CID對鐵道系統衝擊彙整表

| 主分類 | 次分類 | 對鐵道系統的衝擊/影響 |
|--|--------|--|
| 熱&冷  | 平均空氣溫度 | 植被增生使視線受阻、濕度增加導致襯砌含水量增加、材料劣化 |
| | 極端熱浪 | 鋼軌挫屈、基礎設施結構熱脹、機車車輛異常、乘客舒適度降低、耗能增加、列車運轉限制/中斷、員工身體不適、野火、電車線斷裂及掉落 |
| | 寒流 | 員工身體不適、軌裂/斷軌 |
| | 霜凍 | 隧道結冰、軌裂/斷軌、電車線及號誌設備損壞 |

Source:交通部運研所, 鐵道系統強化調適能力之探討, 2024

並進一步對鐵道系統造成衝擊

各種CID對鐵道系統衝擊彙整表

| 主分類 | 次分類 | 對鐵道系統的衝擊/影響 |
|--|---------|---|
|  濕&乾 | 豪大雨及洪水 | 落石、邊坡破壞、橋樑沖刷、軌道/機廠/建物淹水、號誌/電力/電子設備毀損故障、列車運轉限制/中斷、樹木傾倒 |
| | 土石流 | 落石、邊坡破壞、號誌/電力/電子設備毀損故障 |
| | 氣象/氣候乾旱 | 邊坡破壞 |
|  風 | 強風暴 | 列車運轉限制/中斷、樹木傾倒、人員遭雷擊、號誌/電力/電子設備毀損故障 |
| | 熱帶氣旋 | 基礎設施毀損、列車運轉限制/中斷、樹木傾倒 |

Source:交通部運研所, 鐵道系統強化調適能力之探討, 2024

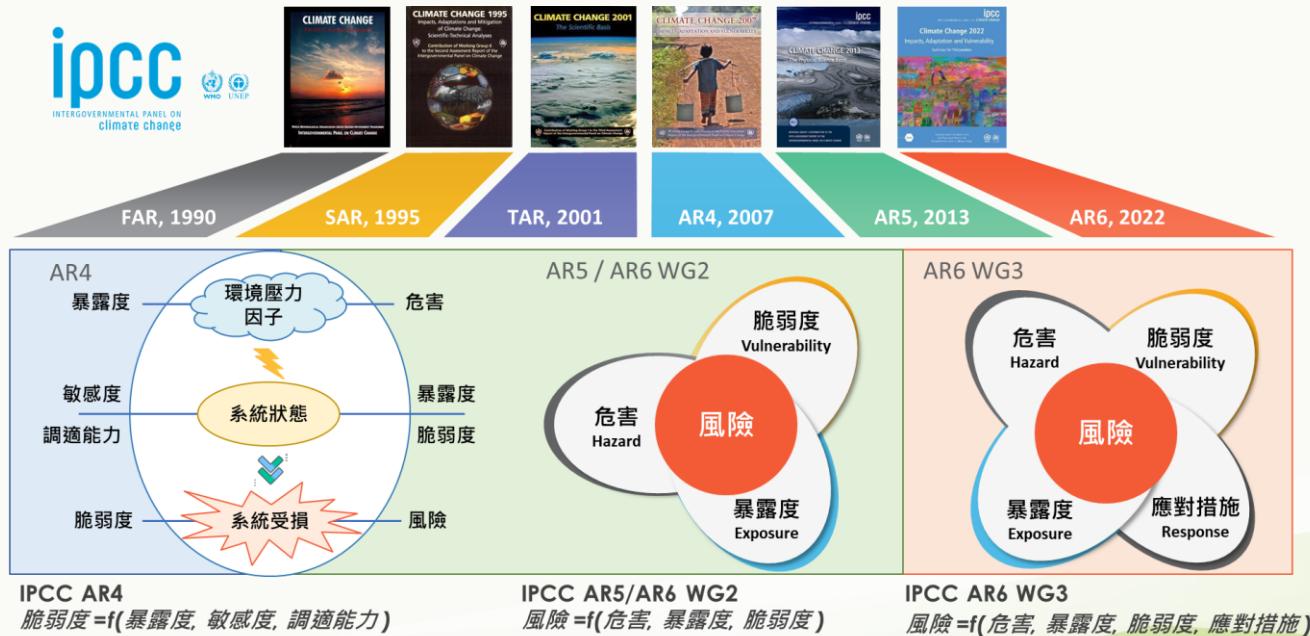
並進一步對鐵道系統造成衝擊

各種CID對鐵道系統衝擊彙整表

| 主分類 | 次分類 | 對鐵道系統的衝擊/影響 |
|--|--------|-------------------------------|
| 雪&冰  | 強降雪和冰暴 | 落石、列車運轉限制/中斷、電車線及號誌設備損壞 |
| | 冰雹 | 列車運轉限制/中斷、電車線及號誌設備損壞 |
| | 雪崩 | 落石、列車運轉限制/中斷、電車線及號誌設備損壞 |
| 沿海  | 相對海平面 | 軌道/機廠/建物淹水、基礎設施毀損 |
| | 沿海洪水 | 軌道/機廠/建物淹水、基礎設施毀損 |
| | 沿海侵蝕 | 基礎設施毀損、列車出軌、鋼軌穩定性降低使列車運轉限制/中斷 |

Source:交通部運研所, 鐵道系統強化調適能力之探討, 2024

如何評估氣候變遷的風險？



IPCC AR4、AR5、AR6風險核心概念示意圖

Source:交通部運研所，鐵道系統強化調適能力之探討，2024

如何評估氣候變遷的風險？

- 《氣候變遷因應法》-第3條
 - 「.....氣候變遷風險的組成因子為氣候變遷**危害**、**暴露度**及**脆弱度**」



$$\text{風險} = f(\text{危害}, \text{暴露度}, \text{脆弱度})$$

《氣候變遷因應法》對於風險的組成因子與IPCC AR5相同

氣候風險評估有關的重要名詞定義

氣候風險評估的重要名詞定義

| 名詞 | 定義 |
|------------------------|--|
| 危害 (Hazard) | 氣候影響驅動因子發生的機率，例如豪大雨發生的機率 |
| 暴露度 (Exposure) | 保全對象暴露於危害因素的程度，保全對象可能包括人文社會、物種或生態 |
| 脆弱度 (Vulnerability) | 指某個系統受氣候變遷負面影響及無法因應的程度。脆弱度會受到敏感度及調適能力的影響，亦即系統暴露在氣候變遷及其變化的特性、強度、頻率以及受關注者面對衝擊之敏感度及調適能力 |
| 敏感度 (Sensitivity) | 系統對於氣候變遷衝擊的容易程度，包含不利及有利的影響，可能是直接或間接的 |
| 反應力 (Response) | 系統對氣候變遷的應變能力 |

我們該如何處理氣候變遷的風險呢？

- 淨零 vs. 調適

淨零

- 淨零是降低溫室氣體的排放，以減緩全球暖化與極端氣候的情形；淨零是屬於風險處理中的減緩措施（**Mitigation Measures**）

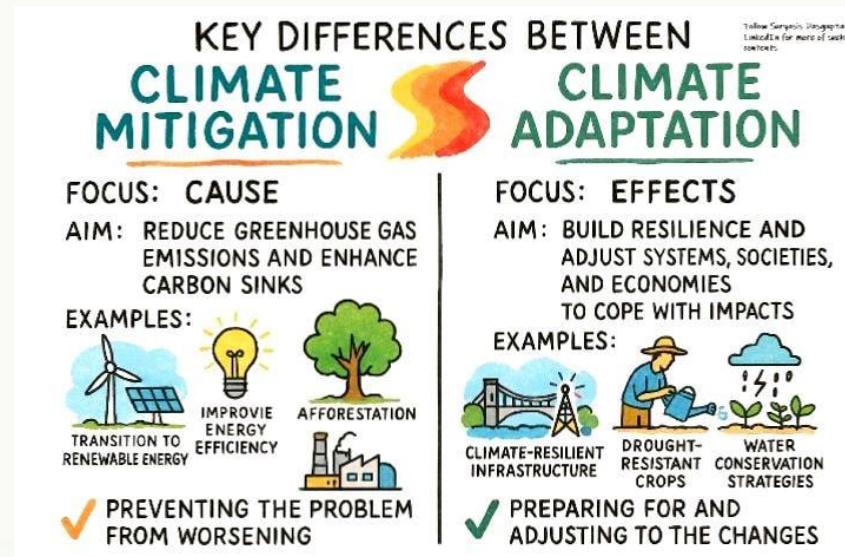
調適

- 調適（**Adaptation**）是面對氣候變遷的風險，採取一些措施，以降低或緩和極端氣候的衝擊



我們該如何處理氣候變遷的風險呢？

淨零緩不濟急，調適勢在必行！



Source: Facebook, Rise for Climate

我們平常做的防災就是調適嗎？

防災

- 防災根據歷史的氣候條件以及災害資料所採取對抗天然災害的手段

調適

- 調適是根據未來地球升溫情境下所導致的極端氣候情況下所採取因應天然災後的措施，例如提高防洪標準
- 若過去的防減災措施足以因應未來氣候變遷的風險，可以繼續執行防減災的措施，倘若不足以因應未來的風險，就代表存在**調適缺口**

鐵路產業如何因應氣候變遷的衝擊？

- 國際鐵路聯盟 (UIC)



UIC因應氣候變遷的重要里程碑

Source:交通部運研所, 鐵道系統強化調適能力之探討, 2024

鐵道的調適策略就是提高鐵道的韌性

韌性

- 系統面臨危害衝擊下，持續提供服務的能力
- 鐵道系統的調適策略就是要提高鐵道系統的韌性



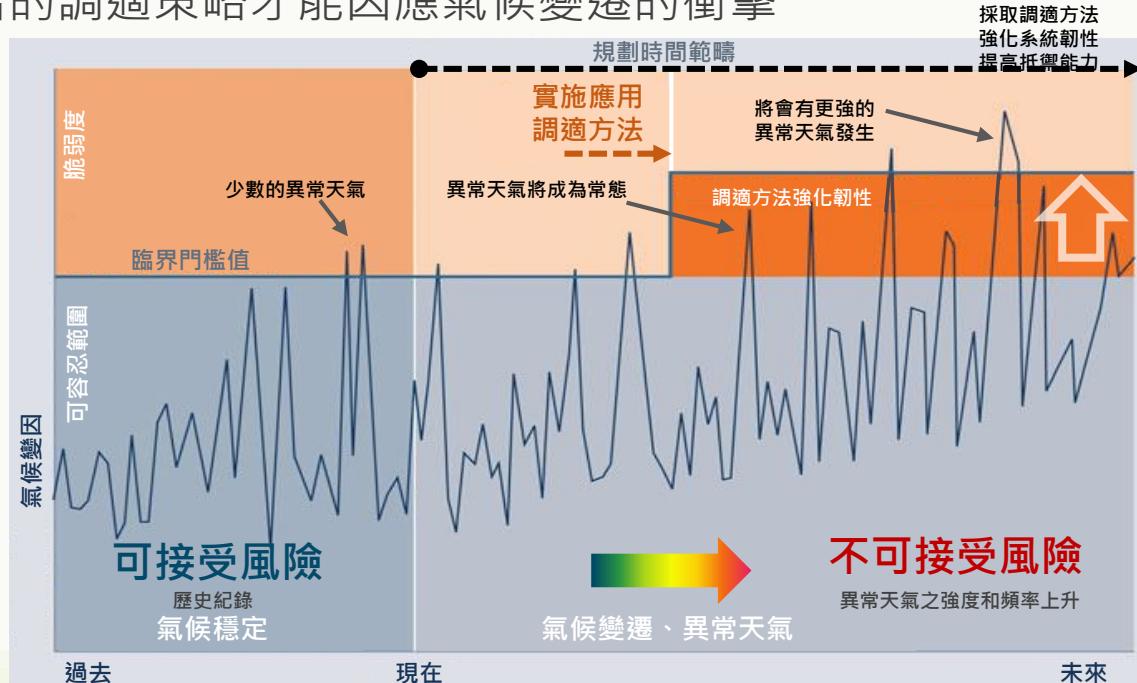
UIC對於鐵路系統韌性定義



英國Network Rail對鐵路韌性的定義

提高韌性才能因應氣候變遷的衝擊

- 採取適當的調適策略才能因應氣候變遷的衝擊



採取調適策略以提高鐵道系統的韌性

Source: UK Climate Impact Programme (UKCIP), 2003 & Network Rail (NR), 2021



參、氣候變遷之調適架構與策略

TCCIP建議兩階段六構面的通用型調適架構



臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台兩階段六步驟調適架構

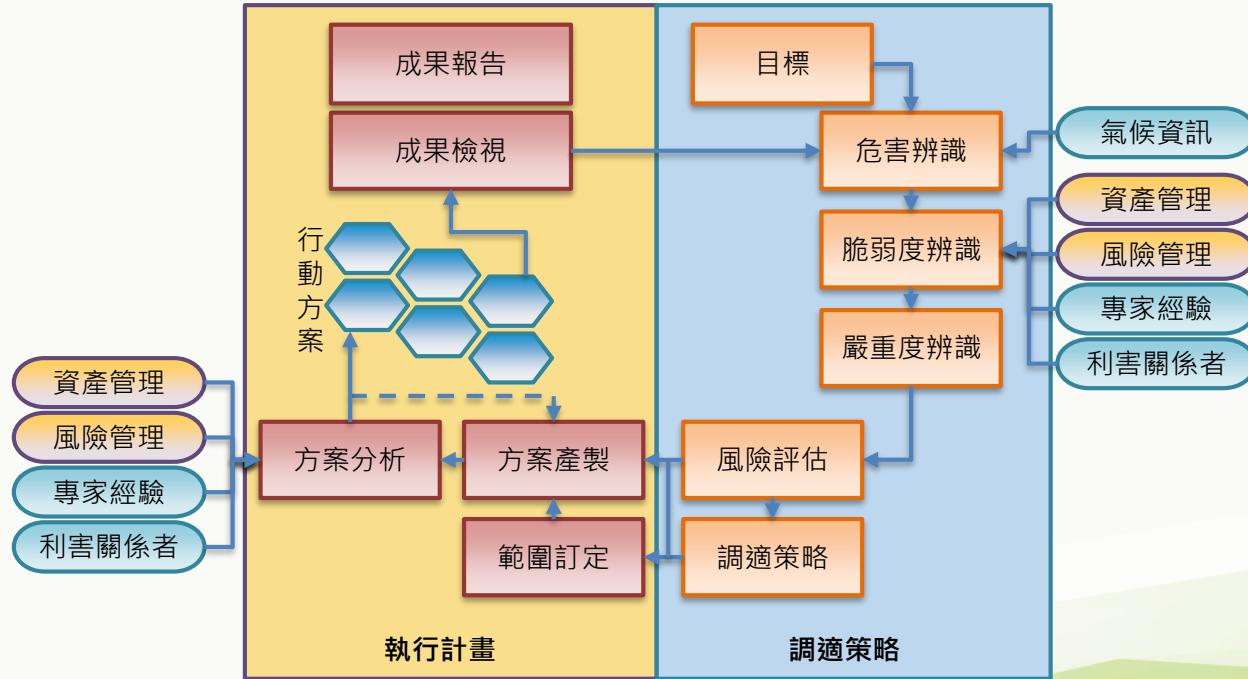
Source: Taiwan Climate Change Projection and Information Platform, TCCIP

《氣候變遷風險評估作業準則》建議的步驟



Source: 環境部，氣候變遷風險評估作業準則

國際鐵道聯盟UIC也有建議的調適架構



Source: International Union of Railways (UIC), RAIL ADAPT – Adapting the railway for the future, 2017

運研所也已經發展出鐵道調適策略指引



鐵道系統調適指引架構

壹、導讀

貳、氣候變遷對鐵道系統的衝擊

參、鐵道系統全生命週期強化調適能力機制

肆、鐵道系統氣候變遷風險評估

伍、鐵道系統調適選項研擬與推動

陸、結語

附錄A、鐵道系統調適案例演練

附錄B、氣候變遷風險評估指標彙整表

附錄C、氣候變遷調適選項彙整表

《氣候變遷風險評估作業準則》 6構面

1. 界定範疇

2. 檢視資源及氣候衝擊現況

3. 評估未來氣候變遷風險

4. 調適選項規劃與綜整決策

5. 推動或執行調適選項

6. 檢討或修正調適選項

執行要素

1-1 調適評估範疇準備

1-2 調適評估範疇界定

1-3 氣候變遷調適工作小組

2-1 評估指標界定

2-2 現況資源盤點

2-3 衝擊評估方法規劃

2-4 現況風險評估

3-1 未來風險評估

3-2 調適差距評估

4-1 調適選項規劃

4-2 優先執行調適選項及推動期程

5-1 調適執行成效及推動期程規劃

5-2 調適執行成效及推動期程評估

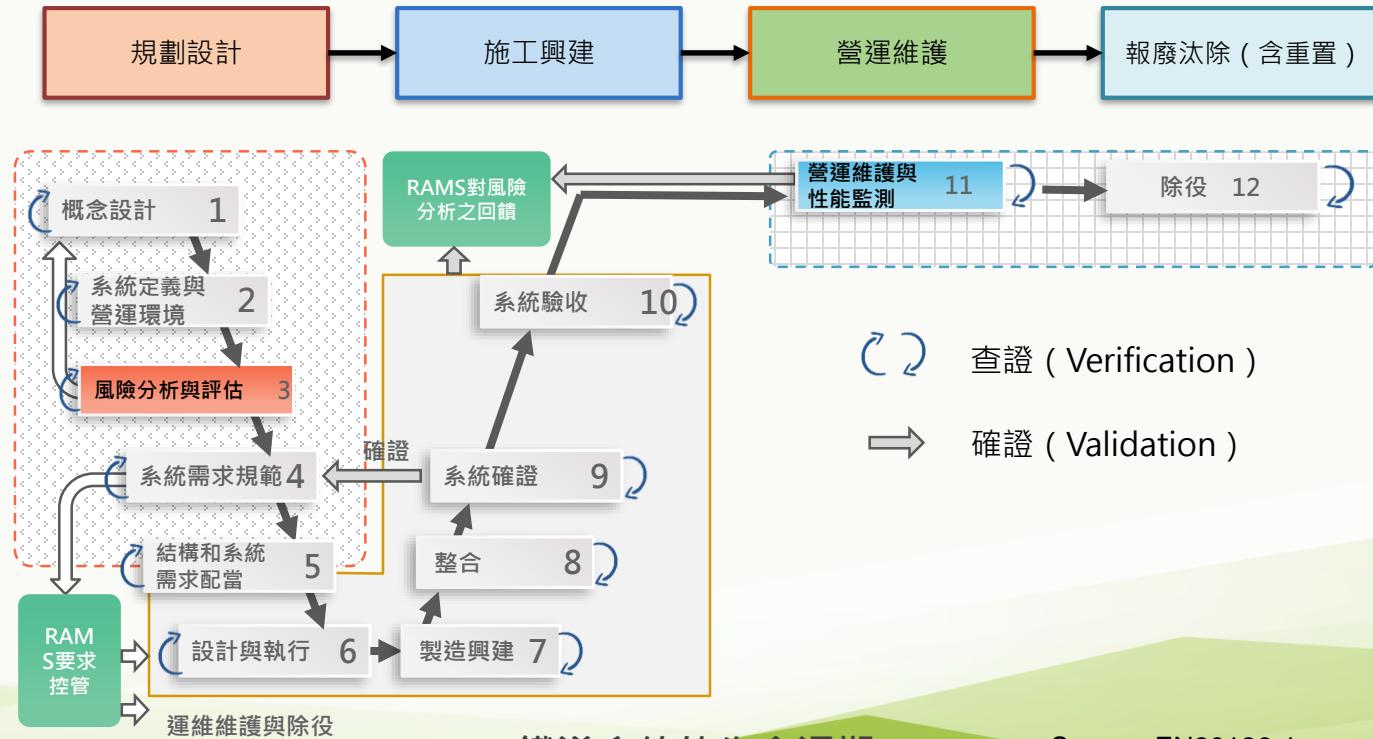
6-1 調適選項執行結果檢討

6-2 風險評估及調適選項修正

每一個執行要素都有詳細的說明

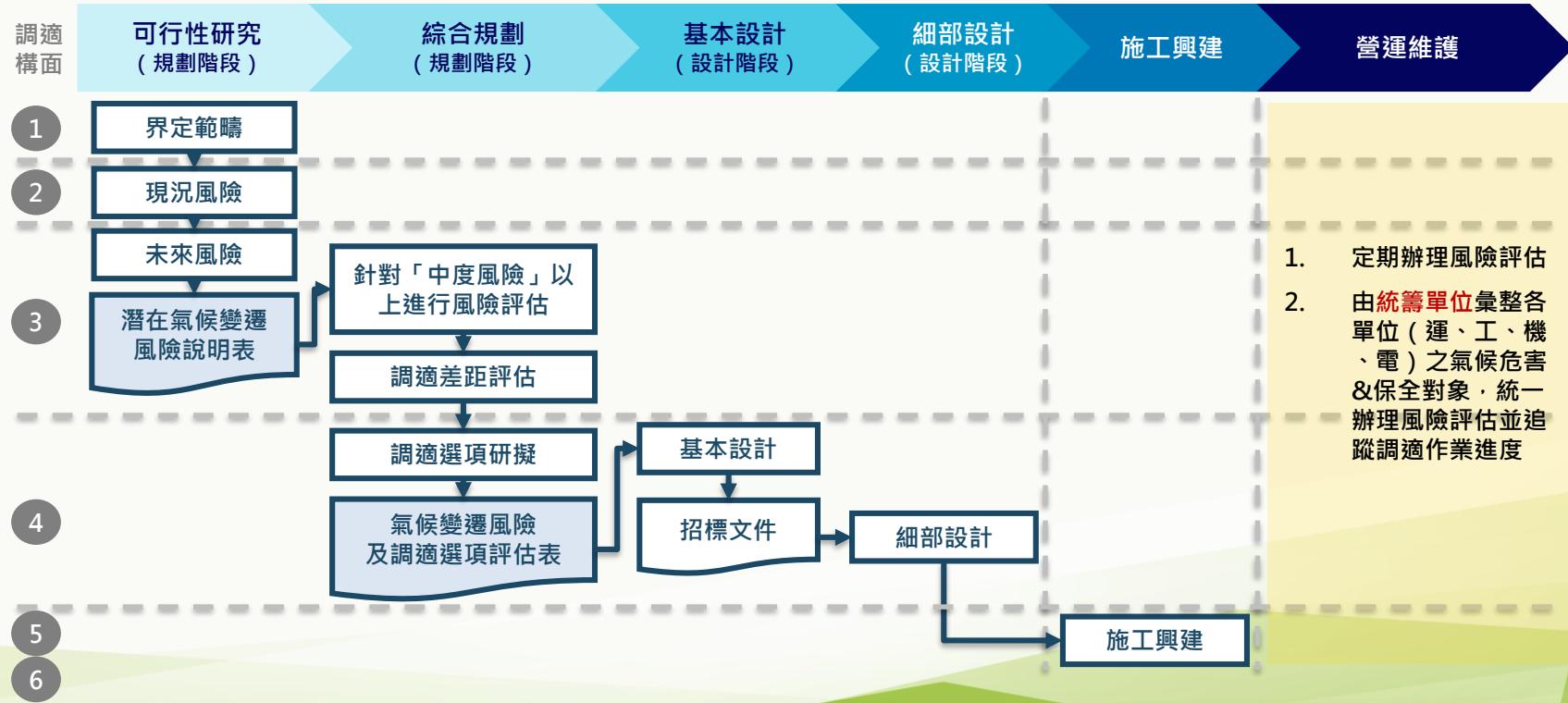


調適策略要從鐵道系統全生命週期著手



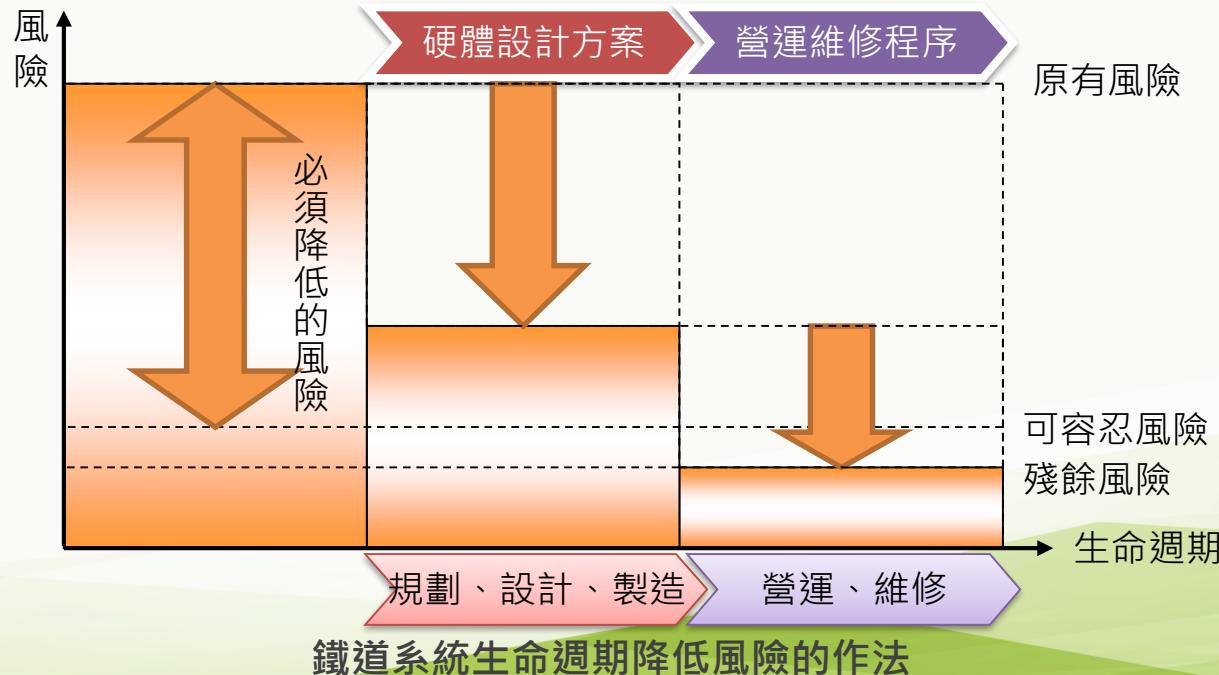
Source: EN20126-1

並於審議流程納入風險評估與調適選項



先用硬體手段，再用程序彌補不足

- 硬體規劃設計要提高耐受力、備援力及可靠度，於營運維修階段要提高回復力及應變力



各階段採取的調適手段與訴求皆不相同

規劃設計階段

- 辨識氣候變遷的危害 (CID)，並依據未來情境評估其風險
- 考慮氣候變遷與極端氣候的風險提高設計標準，以提高提高基礎設施的耐受力 (Robustness)、備援力 (Redundancy) 及可靠度 (Reliability)

施工興建階段

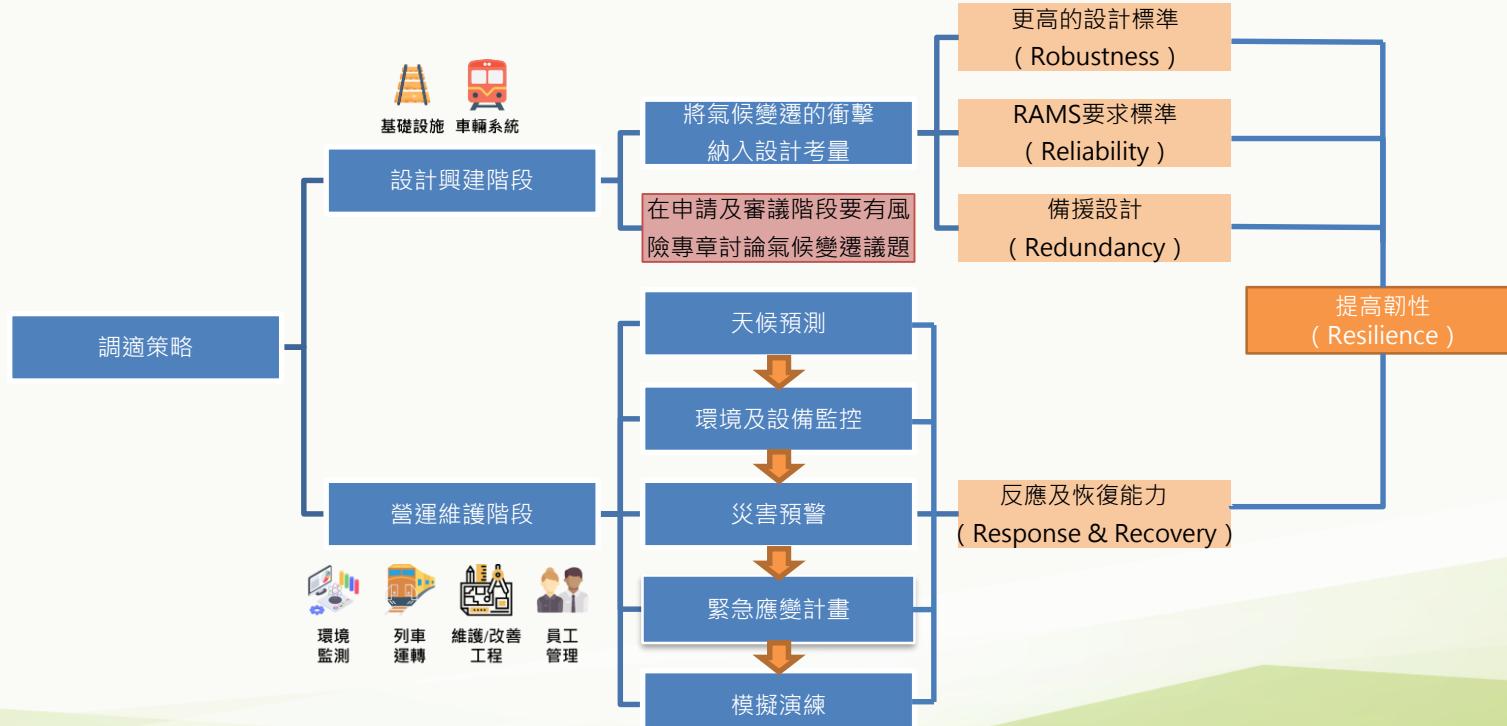
- 施工興建階段的保全對象主要屬於職業安全衛生對員工工作環境的風險與改善

營運維護階段

- 營運維護階段著重在天氣與系統的監測，透過較好的維護方式與應變措施，提高系統的反應及恢復能力 (Response & Recovery) 來降低極端氣候的衝擊

備註：對鐵道系統本身的韌性而言，調適策略主要在「規劃設計」以及「營運維修」階段

最終是要提高鐵道系統的韌性



以自然為本的解決方案逐漸受到重視

甚麼是NbS (Natural-based Solution) ?

- 聯合國環境署 (United Nations Environment Assembly, UNEA) 於第五屆聯合國環境大會定義 NbS為：「以對自然或改良的陸地、淡水、沿海和海洋生態系統有保護、維護、恢復、永續利用之管理與行動，提供增進人類福祉、生態系統韌性以及和生物多樣性之效果，同時有效地適應社會、經濟和環境之挑戰」

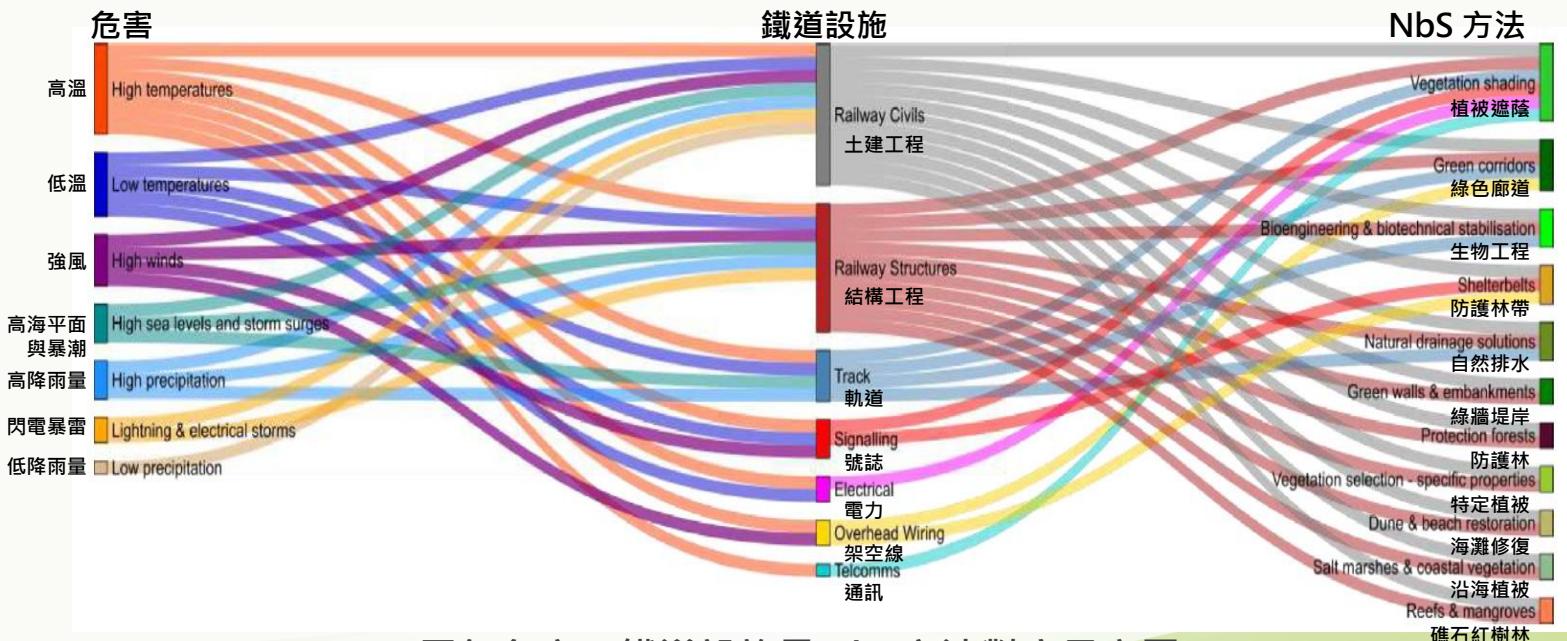
如何實施NbS ?

- NbS是透過綠化來增加碳匯，提供在地氣候調節功能，同時創造休閒設施、改善空氣品質，以及協助水資源鏡或與滯洪，以及協助水質淨化與滯洪

NbS的效果好嗎？

- NbS的改善效果有限、容易受到當地氣候變遷的影響，以及實施成本較高
- 可將NbS與其他氣候調適策略整合應用

以自然為本的解決方案的可能方法



天氣危害、鐵道設施及NbS方法對應示意圖

以自然為本的解決方案之案例



在鐵路沿線以植被建立自然排水溝渠



在鐵路兩旁建立連續而不影響列車行駛之植被保護水土狀態

英國Network Rail採用NbS的範例

Source: Network Rail

新科技在調適策略上也有廣泛的應用

新科技於鐵道調適策略之應用

| 應用場域 | 應用科技 | 應用內容 |
|------|--------------|----------------------------|
| 基礎設施 | 耐高溫特殊塗料 | 將塗料塗抹於鋼軌上以降低軌溫 |
| | 抗凍技術 | 應用於土木工程與機電工程，以抵禦寒地氣候 |
| | 無人機 | 軌道、橋梁等基礎設施的監測與巡檢 |
| 車輛系統 | 新式空調系統 | 因應室外高達45°C的極高氣溫 |
| | 反射隔熱塗料 | 塗抹於車廂，提高車廂的隔熱與反射熱量的能力 |
| | 融冰技術、防砂、除沙技術 | 抵禦列車行駛過程外部極寒、沙塵暴、側風壓力等惡劣環境 |
| 路線環境 | 光學雷達技術 | 辨識並告警邊坡可能滑動的地點 |
| | 遠端監控技術 | 監控路線邊坡及排水系統，提高路線的安全性 |
| | 衛星影像技術 | 監視路線邊坡位移狀況，提早發出預警 |
| | 太陽能氣象站 | 監視天氣狀況，及早發出預警 |
| | 光學影像技術 | 監視異物入侵，提早應變以避免列車撞擊異物 |
| | 合成孔徑雷達 | 監視路線兩側邊坡的穩定性 |



肆、鐵道系統調適策略的挑戰

肆、鐵道系統調適策略的挑戰

- 氣候變遷的風險評估大家都在摸索，特別是危害度及脆弱度的評估
- 興建階段如果考慮調適策略，興建成本會遽增，經濟效益評估不見得可行！
- 興建階段若不考慮調適策略，經濟效益評估或許比較容易通過，但日後營運機構需要很多的應變及復原，會疲於奔命！
- 無論如何，仍須預做準備

主要參考文獻

- A. Quinn, A. Jack, S. Hodgkinson, E. Ferranti, J. Beckford and J. Dora, *Rail Adapt - Adapting the railway for the future*, University of Birmingham, 2017.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2023: Synthesis Report, the 6th Assessment Report, 2023.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2013: The Physical Science Basis, 2013.
- Network Rail, *Network Rail Asset Management - Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan*, 2021.
- High Speed Two (HS2) Limited, *Climate Change Adaptation and Resilience Adaptation Reporting Power Report*, 2021
- International Unions of Railways (UIC), *Rail Adapt – Adapting the Railway for the Future*, UIC, 2017.
- Lorraine Blackwood, Fabrice G. Renaud, Barriers and Tools for Implementing Nature-based Solutions for Rail Climate Change Adaptation, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 113, 2022.
- Wikipedia, *Climate Change*.
- Wikipedia, *Global Warming*.
- TCCIP臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台
- 交通部運輸研究所，*鐵道系統調適能力之探討*，2024, 2025。

簡報結束

Thank You For Your Attention