

114-078-6225
MOTC-IOT-113-TCF004

鐵道系統強化調適能力之探討(1/3) -機制與方法



交通部運輸研究所

中華民國 114 年 10 月

114-078-6225
MOTC-IOT-113-TCF004

鐵道系統強化調適能力之探討(1/3) -機制與方法

著者：孫千山、鍾志成、魏健宏、林陳佑
張恩輔、邵國士、黃邵琪、陳怡蓁、施千華
賴宜弘、朱珮芸、鄔德傳、楊家銘

交通部運輸研究所

中華民國 114 年 10 月

國家圖書館出版品預行編目(CIP)資料

鐵道系統強化調適能力之探討(1/3)-機制與方法 /孫千山, 鍾志成, 魏健宏, 林陳佑, 張恩輔, 邵國士, 黃邵琪, 陳怡蓁, 施千華, 賴宜弘, 朱珮芸, 鄔德傳, 楊家銘著. -- 初版. -- 臺北市: 交通部運輸研究所, 民 114.10

面; 公分

ISBN 978-986-531-708-9 (平裝)

1. CST: 鐵路管理 2. CST: 運輸系統
3. CTS: 氣候變遷

557.23

114013266

鐵道系統強化調適能力之探討(1/3)-機制與方法

著者: 孫千山、鍾志成、魏健宏、林陳佑、張恩輔、邵國士、黃邵琪、陳怡蓁、施千華、賴宜弘、朱珮芸、鄔德傳、楊家銘

出版機關: 交通部運輸研究所

地址: 105004 臺北市松山區敦化北路 240 號

網址: www.iot.gov.tw (中文版>數位典藏>本所出版品)

電話: (02)2349-6789

出版年月: 中華民國 114 年 10 月

印刷者: 全凱數位資訊有限公司

版(刷)次冊數: 初版一刷 65 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定價: 470 元

展售處:

交通部運輸研究所運輸科技及資訊組 • 電話: (02)2349-6789

國家書店松江門市: 104472 臺北市中山區松江路 209 號 • 電話: (02)2518-0207

五南文化廣場: 400002 臺中市區中山路 6 號 • 電話: (04)2226-0330

GPN: 1011401029 ISBN: 978-986-531-708-9 (平裝)

著作財產權人: 中華民國 (代表機關: 交通部運輸研究所)

本著作保留所有權利, 欲利用本著作全部或部分內容者, 須徵求交通部運輸研究所書面授權。

交通部運輸研究所合作研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：鐵道系統強化調適能力之探討(1/3)-機制與方法			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN 978-986-531-708-9(平裝)	政府出版品統一編號 1011401029	運輸研究所出版品編號 114-078-6225	計畫編號 113-TCF004
本所主辦單位：運輸能源及環境組 主管：朱珮芸 計畫主持人：朱珮芸 研究人員：賴宜弘、鄔德傳、楊家銘 聯絡電話：02-2349-6872 傳真號碼：02-2712-0223	合作研究單位：財團法人中興工程顧問社 計畫主持人：孫千山 研究人員：鍾志成、魏健宏、林陳佑、張恩輔、邵國士、黃邵琪、陳怡蓁、施千華 地址：114065 臺北市內湖區新湖 2 路 280 號 聯絡電話：(02)8791-9198 傳真號碼：(02)8791-2198	研究期間 自 113 年 4 月 至 113 年 12 月	
關鍵詞：氣候變遷因應法、鐵道系統、氣候變遷、調適能力、機制方法			
<p>摘要：</p> <p>鐵道系統為我國重要資產之一，其特性為高沉沒成本、完工後不易大幅調整路線，需要以長期及永續角度進行整體性規劃與維運，在面對氣候變遷極端氣候的壓力下，鐵路系統的挑戰不僅是要在正常天候中維持正常營運，更要在面對極端氣候的條件下增加其韌性，使其在受異常天氣衝擊後，能儘速恢復並提供安全、可靠且有效率的服務。</p> <p>本計畫於 113 年度主要回顧國外針對鐵道系統之氣候變遷調適文獻，包含發展趨勢、強化調適能力方式、新科技應用與相關實務案例等，同時盤點我國鐵道系統目前因應氣候變遷的調適方式，進而深入探討氣候變遷衝擊影響鐵道系統韌性強度之因素，並研擬鐵道系統因應氣候變遷強化調適能力的機制與方法。</p>			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
114 年 10 月	388	470	凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

PUBLICATION ABSTRACTS OF RESEARCH PROJECTS
INSTITUTE OF TRANSPORTATION
MINISTRY OF TRANSPORTATION AND COMMUNICATIONS

TITLE: A Study of Enhancing the Adaptive Capacity of Railway Systems (1/3) - Mechanism and Method			
ISBN(OR ISSN) ISBN 978-986-531-708-9(pbk.)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER 1011401029	IOT SERIAL NUMBER 114-078-6225	PROJECT NUMBER 113-TCF004
DIVISION: Transportation Energy and Environment Division DIVISION DIRECTOR: Pei-Yun Chu PRINCIPAL INVESTIGATOR: Pei-Yun Chu PROJECT STAFF: I-Hung Lai, Deh-Juan Wu, Chia-Ming Yang PHONE: 886-2-23496872 FAX: 886-2-27120223			PROJECT PERIOD FROM April 2024 TO December 2024
RESEARCH AGENCY: Sinotech Engineering Consultants, Inc. PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chian-Shan Suen PROJECT STAFF: Jyh-Cherng Jong, Chien-Hung Wei, Chen-Yu Lin, En-Fu Chang, Kuo-Shih Shao, Shao-Chi Huang, Yi-Chen Chen, Chien-Hua Shih ADDRESS: No.280, Xinhu 2nd Rd., Neihu Dist., Taipei City 114, Taiwan (R.O.C.) PHONE: 886-2-87919198 FAX: 886-2-87912198			
KEY WORDS: Climate Change Response Act, Railway System, Climate Change, Adaptive Capacity, Mechanism and Method			
ABSTRACT:			
<p>The railway system is critical infrastructure in our country. It is characterized by high sunk costs and less flexibility in adjusting routes after completion. Thus, it requires comprehensive planning, operation, and maintenance from a long-term and sustainable perspective. Under the pressure of climate change, the challenges of the railway system are not only to maintain operations under normal conditions but also to increase its resilience in the face of extreme weather events, ensuring it can recover as quickly as possible to provide safe, reliable, and efficient services.</p> <p>This year's (2024) research mainly reviews the international literature on climate change and adaptation for railway systems, including development trends, approaches to enhance adaptation capabilities, new technology applications, and related practical cases. It also reviews the current adaptation measures through which the railway systems in our country respond to climate change and investigates the factors affecting the resilience of these systems in-depth. Finally, this research will propose mechanisms and methods to enhance the adaptation capabilities of railway systems in response to climate change.</p>			
DATE OF PUBLICATION October 2025	NUMBER OF PAGES 388	PRICE 470	
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目 錄

	<u>頁次</u>
目 錄.....	III
圖 目 錄.....	VII
表 目 錄.....	III
第一章 緒論.....	1-1
1.1 計畫緣起.....	1-1
1.2 全程計畫概要.....	1-3
1.3 計畫範圍與對象.....	1-4
1.4 計畫目標.....	1-5
1.5 計畫流程與步驟.....	1-6
1.6 氣候變遷調適相關名詞定義.....	1-8
第二章 氣候變遷的因應策略與鐵道系統調適現況.....	2-1
2.1 氣候變遷與調適策略概述.....	2-1
2.1.1 氣候變遷對鐵道系統的衝擊.....	2-4
2.1.2 氣候變遷風險組成因子.....	2-26
2.1.3 氣候變遷情境.....	2-30
2.1.4 韌性組成因子.....	2-33
2.2 我國鐵道系統調適現況作為.....	2-37
2.2.1 高鐵系統.....	2-37
2.2.2 臺灣鐵路.....	2-42
2.2.3 捷運/輕軌系統.....	2-44
2.2.4 小結.....	2-52
2.3 國外鐵道調適發展方向及趨勢.....	2-52
2.3.1 英國.....	2-52
2.3.2 美國.....	2-54
2.3.3 德國.....	2-56
2.3.4 法國.....	2-58
2.3.5 瑞典.....	2-60
2.3.6 紐西蘭.....	2-62
2.3.7 澳洲.....	2-63
2.3.8 日本.....	2-66

2.3.9	韓國	2-70
2.3.10	香港	2-71
2.3.11	新加坡	2-72
2.3.12	國際鐵路聯盟	2-73
2.3.13	小結	2-76
第三章	氣候變遷調適架構	3-1
3.1	通用型調適架構	3-1
3.1.1	ISO 14090 系列標準調適架構	3-1
3.1.2	氣候相關財務揭露 (TCFD) 國際倡議	3-8
3.1.3	TCCIP 國家氣候變遷調適架構	3-9
3.1.4	CCA6Steps 氣候調適 6 步驟	3-11
3.2	鐵道系統調適架構	3-12
3.2.1	鐵道系統的生命週期	3-13
3.2.2	國際鐵路聯盟建議的調適架構	3-15
3.2.3	天氣韌性與氣候變遷調適策略 (WRCCA)	3-17
3.3	公路系統調適架構	3-20
3.4	小結	3-22
第四章	鐵道系統調適方法	4-1
4.1	氣候變遷風險評估方法	4-1
4.1.1	英國-英國鐵路公司	4-1
4.1.2	英國-高速鐵路	4-13
4.1.3	英國-伯明翰大學	4-18
4.1.4	法國-國家鐵路公司	4-20
4.1.5	德國-德國聯邦環境署	4-21
4.1.6	美國-洛杉磯都會交通局	4-22
4.1.7	紐西蘭-國家氣候變遷風險評估	4-24
4.1.8	澳洲-METRONET	4-30
4.1.9	日本-國際協力機構	4-34
4.1.10	國際鐵路聯盟	4-38
4.1.11	其他相關方法論	4-40
4.2	調適選項案例及評估方法	4-44
4.2.1	調適選項案例	4-44
4.2.2	自然為本解決方案之相關研究	4-61
4.2.3	調適選項評估方法	4-72

4.3	新科技應用調適情形.....	4-77
4.3.1	新科技應用於基礎設施.....	4-77
4.3.2	新科技應用於車輛設備.....	4-78
4.3.3	新科技應用於環境監測.....	4-80
4.3.4	新科技應用於風險評估.....	4-91
4.4	小結.....	4-95
第五章	我國鐵道系統強化調適能力之機制.....	5-1
5.1	我國鐵道系統調適架構.....	5-1
5.2	氣候變遷調適融入既有評估流程.....	5-4
5.2.1	規劃設計階段.....	5-4
5.2.2	施工興建階段.....	5-7
5.2.3	營運維修階段.....	5-8
5.3	與安全管理及資產管理結合.....	5-9
5.3.1	氣候變遷調適融入安全管理.....	5-9
5.3.2	氣候變遷調適融入資產管理.....	5-11
5.4	鼓勵自主提報揭露適當調適資訊.....	5-13
第六章	我國鐵道系統強化調適能力之方法.....	6-1
6.1	氣候變遷風險評估.....	6-1
6.1.1	氣候變遷風險評估模型.....	6-1
6.1.2	危害界定方法.....	6-2
6.1.3	暴露度及脆弱度界定方法.....	6-3
6.1.4	氣候變遷情境設定.....	6-7
6.2	調適選項.....	6-8
6.3	調適案例.....	6-14
第七章	結論、成果與建議.....	7-1
7.1	結論.....	7-1
7.2	建議.....	7-3
	參考文獻.....	R-1
	附錄一 計畫摘要.....	附 1-1
	附錄二 審查意見辦理情形.....	附 2-1
	附錄三 成果海報.....	附 3-1
	附錄四 計畫簡報.....	附 4-1
	附錄五 縮寫對照表.....	附 5-1

圖 目 錄

	<u>頁 次</u>
圖 1.1-1	氣候變遷之風險管理流程圖..... 1-1
圖 1.1-2	鐵道系統氣候變遷調適概要示意圖..... 1-3
圖 1.2-1	全程計畫概要示意圖..... 1-4
圖 1.5-1	計畫流程圖..... 1-6
圖 2.1-1	氣候變遷成因與影響示意圖..... 2-1
圖 2.1-2	減緩策略意涵示意圖..... 2-3
圖 2.1-3	調適策略意涵示意圖..... 2-3
圖 2.1-4	英國 NR-氣候變遷與天氣事件之因果關係示意圖..... 2-9
圖 2.1-5	英國 HS2-氣候變遷風險示意圖..... 2-10
圖 2.1-6	瑞典-鐵路基礎設施故障數量季節趨勢圖..... 2-16
圖 2.1-7	COMET 會員受極端天氣影響因素及可控制程度示意圖 2-21
圖 2.1-8	IPCC-AR4 脆弱度定義示意圖..... 2-27
圖 2.1-9	IPCC-AR5 風險核心概念示意圖..... 2-28
圖 2.1-10	IPCC-AR6 WG3 風險核心概念示意圖..... 2-29
圖 2.1-11	AR4、AR5 及 AR6 風險核心概念比較示意圖..... 2-30
圖 2.1-12	IPCC-全球平均地表溫度推估變化趨勢圖..... 2-31
圖 2.1-13	IPCC-全球平均海平面上升推估變化趨勢圖..... 2-31
圖 2.1-14	IPCC-SSP 情境的減緩與調適挑戰示意圖..... 2-32
圖 2.1-15	IPCC-氣候變遷推估情境組合示意圖..... 2-32
圖 2.1-16	IPCC-全球暖化程度 GWL 情境示意圖..... 2-33
圖 2.1-17	英國-NIC 基礎設施韌性概念示意圖..... 2-35
圖 2.1-18	本計畫對鐵道系統韌性的定義..... 2-36
圖 2.2-1	台灣高鐵-DWS 系統示意圖..... 2-38
圖 2.2-2	台灣高鐵-邊坡自動化監測系統組成圖..... 2-39
圖 2.2-3	台灣高鐵-降雨警戒指標圖..... 2-40
圖 2.2-4	臺北捷運-防洪閘門照片..... 2-45
圖 2.2-5	臺北捷運-水密門照片..... 2-46
圖 2.2-6	臺北捷運-防洪隔艙照片..... 2-46
圖 2.2-7	臺北捷運-軌道溫度計照片..... 2-47
圖 2.2-8	臺北捷運-Metro PROMIS 系統截圖..... 2-48
圖 2.2-9	臺北捷運-Smart 巡檢系統照片..... 2-49

圖 2.3-1	英國-調適行動擬定流程圖	2-54
圖 2.3-2	德鐵 DB-Strong Rail 策略框架示意圖	2-58
圖 2.3-3	法國-PNACC 發展過程示意圖	2-58
圖 2.3-4	瑞典政府-調適專案評估決策示意圖	2-61
圖 2.3-5	紐西蘭-調適行動發展時間軸示意圖	2-62
圖 2.3-6	澳洲-國家氣候韌性與調適策略氣候危害示意圖	2-64
圖 2.3-7	澳洲-國家氣候韌性與調適策略領域分群示意圖	2-65
圖 2.3-8	日本-國立環境研究所推動氣候變遷調適示意圖	2-67
圖 2.3-9	UIC-四大調適專案時間軸示意圖	2-74
圖 2.3-10	UIC-ARISCC 調適行動發展流程圖	2-75
圖 2.3-11	UIC-RERA 專案架構示意圖	2-76
圖 3.1-1	ISO 14090 調適架構圖	3-1
圖 3.1-2	ISO 14091 風險組成要素示意圖	3-2
圖 3.1-3	ISO 14091 衝擊鏈示意圖(以農業為例)	3-2
圖 3.1-4	ISO 14093 LoCAL 架構圖	3-4
圖 3.1-5	ISO 14097 執行流程圖	3-5
圖 3.1-6	ISO Guide 84 國際標準制定流程圖	3-6
圖 3.1-7	系統思維法應用於氣候變遷調適行動示意圖	3-6
圖 3.1-8	生命週期法示意圖	3-7
圖 3.1-9	氣候相關財務資訊(TCFD)核心要素示意圖	3-8
圖 3.1-10	TCFD 定義之氣候相關風險及機會示意圖	3-9
圖 3.1-11	TCCIP 國家氣候變遷調適架構圖	3-11
圖 3.1-12	CCA6Steps 氣候調適 6 步驟示意圖	3-12
圖 3.2-1	鐵道系統生命週期示意圖	3-13
圖 3.2-2	生命週期降低風險作法示意圖	3-15
圖 3.2-3	UIC 鐵路調適架構圖	3-16
圖 3.2-4	NR-天氣與氣候變遷影響評估流程圖	3-19
圖 3.3-1	運輸系統調適策略架構圖	3-20
圖 3.3-2	公路系統規劃階段強化調適能力作業流程圖	3-21
圖 3.3-3	公路系統規劃階段氣候變遷調適指引流程圖	3-22
圖 4.1-1	英國-天氣影響公共績效指標 PPM 趨勢圖	4-2
圖 4.1-2	英國-故障事件與溫度關係示意圖	4-3
圖 4.1-3	英國-天氣危害對鐵路延誤量化成本圖	4-4
圖 4.1-4	英國-NR 氣候變遷利害關係分析圖	4-13

圖 4.1-5	英國-CRVA 氣候脆弱度評估流程圖	4-19
圖 4.1-6	英國-各區塊氣候脆弱度分數計算流程圖	4-20
圖 4.1-7	德國-聯邦環境署-氣候風險評估框架圖	4-21
圖 4.1-8	紐西蘭-調適行動方案滾動評估流程示意圖	4-24
圖 4.1-9	紐西蘭-氣候變遷風險評估架構示意圖	4-25
圖 4.1-10	紐西蘭-暴露度與脆弱度分級說明圖	4-28
圖 4.1-11	紐西蘭-暴露度與脆弱度分級說明圖	4-28
圖 4.1-12	澳洲-METRONET 風險辨識與調適評估示意圖	4-30
圖 4.1-13	澳洲-METRONET 風險評估流程圖	4-31
圖 4.1-14	澳洲-METRONET 氣候變遷韌性框架示意圖	4-31
圖 4.1-15	澳洲-METRONET 空間脆弱度流程示意圖	4-33
圖 4.1-16	日本-JICA 氣候風險評估框架概念圖	4-35
圖 4.1-17	日本-JICA 氣候風險評估和調適措施考量流程圖	4-35
圖 4.1-18	日本-JICA 風險矩陣建構步驟示意圖	4-36
圖 4.1-19	日本-JICA 氣候衝擊鏈示意圖	4-38
圖 4.1-20	氣候風險-模糊貝氏推論模型架構圖	4-41
圖 4.1-21	氣候風險-可靠度分析法流程圖	4-42
圖 4.1-22	RCP8.5 於 2071-2100 期間降雨&溫度預測圖	4-43
圖 4.2-1	日本-JR EAST 雷達與行車限制規則示意圖	4-56
圖 4.2-2	日本-JR EAST 車輛疏散判斷指標	4-57
圖 4.2-3	日本-JR WEST 車輛疏散策略與預警性停駛示意圖	4-59
圖 4.2-4	NbS 關鍵因子關係圖	4-62
圖 4.2-5	NbS 於交通建設與規劃效益示意圖	4-63
圖 4.2-6	英國-NR 六大土地利用策略示意圖	4-65
圖 4.2-7	英國-NR 鐵路沿線土地植被覆蓋圖	4-66
圖 4.2-8	英國-NR 多功能鐵路沿線土地利用策略範例圖	4-67
圖 4.2-9	英國-NR 植被覆蓋移出鐵道路權外前後比較圖	4-67
圖 4.2-10	天氣危害、鐵道設施及 NbS 方法對應示意圖	4-68
圖 4.2-11	NbS 於鐵路之障礙及解決方式示意圖	4-69
圖 4.2-12	NbS 融入鐵道氣候變遷調適框架流程圖	4-69
圖 4.2-13	鐵路從業人員 NbS 問卷調查結果示意圖	4-71
圖 4.2-14	澳洲-墨爾本鐵路氣候風險評估流程圖	4-73
圖 4.2-15	澳洲-墨爾本鐵路極端高溫風險評估流程圖	4-75
圖 4.2-16	時間-策略型調適路徑示意圖	4-76

圖 4.3-1	特殊耐高溫白色軌道塗層應用照片	4-77
圖 4.3-2	德鐵 ICE4-強化空調系統新型高速鐵路列車照片	4-79
圖 4.3-3	中國-抵禦極寒與沙塵暴環境高鐵列車照片	4-79
圖 4.3-4	有無剛玉塗裝之車廂內外溫度趨勢圖	4-80
圖 4.3-5	有無噴塗反射性隔熱塗層之車廂內外溫度比較圖	4-80
圖 4.3-6	光學雷達 (LiDAR) 邊坡偵測原理示意圖	4-81
圖 4.3-7	遠端狀況監測架構示意圖	4-82
圖 4.3-8	俄羅斯鐵路綜合資產管理系統架構圖	4-83
圖 4.3-9	Geoportal 工業系統畫面截圖	4-83
圖 4.3-10	英國-NR 太陽能氣象站照片	4-84
圖 4.3-11	英國-NR 太陽能氣象站監測畫面截圖	4-84
圖 4.3-12	入侵軌道之漂浮物照片	4-85
圖 4.3-13	InSAR 監測川藏鐵路鄰近邊坡活動性照片	4-87
圖 4.3-14	PSInSAR 監測鐵道穩定性照片	4-88
圖 4.3-15	PSInSAR 監測鐵路橋形變照片	4-89
圖 4.3-16	奧地利 ÖBB-導入無人機巡檢軌道照片	4-90
圖 4.3-17	美國 UNP-導入無人機巡檢橋梁照片	4-90
圖 4.3-18	AI 裂縫偵測成果與橋梁 3D 模型整合套疊圖	4-91
圖 4.3-19	瑞典-機器學習分析氣候變遷對道岔影響流程圖	4-92
圖 4.3-20	瑞典-時間因素對失效風險之潛在影響 SHAP 圖	4-93
圖 4.3-21	澳洲-METRONET 脆弱度評估示意圖	4-94
圖 5.1-1	我國鐵道系統調適架構圖	5-1
圖 5.1-2	鐵道系統保全對象架構圖	5-2
圖 5.1-3	氣候變遷風險評估類型判斷流程圖	5-3
圖 5.2-1	規劃設計階段風險管理示意圖	5-5
圖 5.2-2	捷運建設申請與審查作業擷錄流程圖	5-6
圖 5.2-3	鐵路平交道與環境改善建設審查-擷錄流程圖	5-7
圖 5.2-4	營造工程各階段施工風險評估流程圖	5-8
圖 5.3-1	我國鐵道安全管理系統架構圖	5-10
圖 5.3-2	台灣高鐵營運安全計畫 12 項安全管理要素圖	5-10
圖 5.3-3	我國鐵道資產管理範圍示意圖	5-11
圖 5.3-4	我國鐵道資產管理架構圖	5-12
圖 5.4-1	永續發展的核心目標方塊圖	5-14
圖 6.1-1	氣候變遷風險概念示意圖	6-1

圖 6.1-2	CID 類型及類別示意圖	6-2
圖 6.1-3	CID 類別界定決策樹圖	6-3
圖 6.1-4	國家氣候變遷調適應用情境設定示意圖	6-7
圖 6.3-1	調適案例-衝擊鏈示意圖	6-15
圖 6.3-2	調適案例-氣候實體風險模板示意圖	6-15
圖 6.3-3	水利署水利空間資訊平台-淹水潛勢圖	6-16
圖 6.3-4	研擬案例之「危害-脆弱度-暴露度」示意圖	6-17

表 目 錄

	頁 次
表 1.6-1	氣候變遷調適相關名詞定義彙整表..... 1-8
表 2.1-1	RSSB-極端氣候危害項目彙整表 2-5
表 2.1-2	TRaCCA-極端氣候危害項目彙整表 2-6
表 2.1-3	英國 NR-極端氣候危害項目彙整表..... 2-7
表 2.1-4	德國-各交通產業未進行氣候調適風險情境表 2-12
表 2.1-5	PNACC-極端氣候對鐵路設施潛在衝擊彙整表..... 2-14
表 2.1-6	瑞典-冬季氣候對鐵路基礎設施衝擊說明表 2-15
表 2.1-7	紐西蘭-氣候危害對鐵路資產衝擊彙整表 2-17
表 2.1-8	澳洲-氣候危害對鐵道系統衝擊彙整表 2-17
表 2.1-9	日本-氣候危害對鐵道系統衝擊彙整表 2-18
表 2.1-10	韓國-氣候危害對鐵道系統衝擊彙整表 2-19
表 2.1-11	UIC 極端氣候危害項目彙整表..... 2-19
表 2.1-12	我國鐵道系統之自然災害事件彙整表..... 2-21
表 2.1-13	各 CID 對鐵道系統之衝擊彙整表..... 2-23
表 2.1-14	IPCC-全球平均地表溫度及海平面上升推估變化表 2-30
表 2.2-1	台灣高鐵-土石運移風險分級矩陣圖表 2-41
表 2.2-2	捷運及輕軌系統-強風行車處理程序彙整表 2-50
表 2.2-3	捷運輕軌系統-調適主責單位與上位政策彙整表 2-51
表 2.3-1	PNACC-基礎設施和運輸系統行動彙整表..... 2-59
表 2.3-2	法鐵-D-Rail 專案發展動機彙整表 2-60
表 2.3-3	紐西蘭-氣候變遷因應法要求發布之報告彙整表 2-62
表 2.3-4	紐西蘭-國家調適計畫四大優先事項彙整表 2-63
表 2.3-5	紐西蘭-國家調適計畫四個調適選項彙整表 2-63
表 2.3-6	澳洲-國家氣候風險評估情境彙整表 2-66
表 2.3-7	日本-調適架構中各單位權責及其角色彙整表 2-68
表 2.3-8	日本-調適基本策略及方法彙整表 2-69
表 2.3-9	韓國-國家氣候變遷調適計畫彙整表 2-71
表 3.2-1	NR-鐵路資產因應氣候變遷調適範圍彙整表..... 3-18
表 3.4-1	調適架構比較分析表..... 3-23
表 4.1-1	英國-NR 對東南地區鐵路之脆弱度分析表..... 4-5
表 4.1-2	英國-NR 企業風險評估矩一覽表..... 4-7

表 4.1-3	英國-NR 氣候風險評估-嚴重度說明表	4-11
表 4.1-4	英國-NR 氣候風險評估-發生機率說明表	4-12
表 4.1-5	英國-NR 氣候風險評估矩陣表	4-12
表 4.1-6	英國-HS2 氣候風險評估-發生機率表	4-14
表 4.1-7	英國-HS2 氣候風險評估-嚴重度表	4-14
表 4.1-8	英國-HS2 氣候風險評估-風險矩陣表	4-15
表 4.1-9	英國-HS2 氣候變遷調適風險評估彙整表(摘錄)	4-16
表 4.1-10	美國-LA Metro-高溫風險評估範例表	4-23
表 4.1-11	美國-LA Metro-風險評分矩陣表	4-23
表 4.1-12	紐西蘭-建設環境領域嚴重度分級說明表	4-25
表 4.1-13	紐西蘭-暴露度與脆弱度分級標準	4-27
表 4.1-14	紐西蘭-氣候變遷風險分析結果說明表	4-29
表 4.1-15	紐西蘭-氣候變遷風險評估信心程度量表	4-30
表 4.1-16	澳洲-韌性調適框架研究建議彙整表	4-34
表 4.1-17	日本-JICA 氣候危害類型與指標彙整表	4-36
表 4.1-18	日本-JICA 危害發生頻率尺度彙整表	4-37
表 4.1-19	日本-JICA 影響程度評估尺度彙整表	4-37
表 4.1-20	鐵路氣候風險衝擊影響排名一覽表	4-41
表 4.2-1	日本-JICA 規劃設計階段調適選項彙整表	4-45
表 4.2-2	英國 NR-營運維護階段調適選項彙整表	4-47
表 4.2-3	美國 FTA-營運維護階段調適選項彙整表	4-49
表 4.2-4	德鐵 DB-營運維護階段調適選項彙整表	4-50
表 4.2-5	法鐵 SNCF-營運維護階段調適選項彙整表	4-51
表 4.2-6	瑞典鐵路系統-重大天氣事件彙整表	4-52
表 4.2-7	紐西蘭-KiwiRail 調適選項彙整表	4-53
表 4.2-8	澳洲-METRONET 調適選項彙整表	4-53
表 4.2-9	MOWE-IT 調適選項彙整表	4-54
表 4.2-10	日本-JICA 營運維護階段調適選項彙整表	4-55
表 4.2-11	日本-JR EAST 營運維護階段調適選項彙整表	4-56
表 4.2-12	日本-JR EAST 不同 RCP 情境之防洪措施效益表	4-58
表 4.2-13	韓國-鐵道公司營運維護階段調適選項彙整表	4-60
表 4.2-14	港鐵-營運維護階段調適暨成本彙整表	4-60
表 4.2-15	英國-21 世紀中氣候鐵路類比區域表	4-72
表 4.2-16	澳洲-墨爾本鐵路調適方案效益成本比較表	4-75

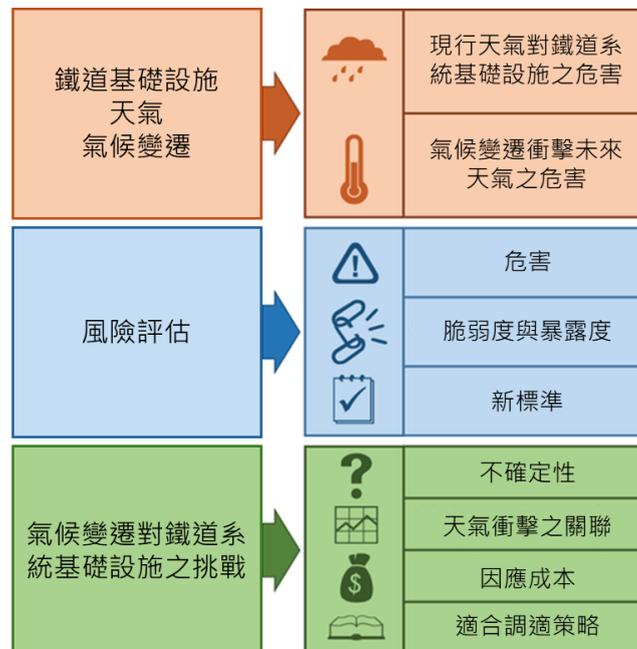
表 4.3-1	不同材質塗漆降溫實驗彙整表.....	4-78
表 6.1-1	日本-JICA 鐵路設施之暴露度、脆弱度及風險彙整表.....	6-5
表 6.1-2	鐵道系統生命週期-氣候變遷調適選項彙整表	6-10
表 6.3-1	北捷防洪標準及防洪實際高程彙整表.....	6-16

第一章 緒論

1.1 計畫緣起

鐵道系統與民眾日常生活息息相關，屬我國重要的維生基礎設施，且其系統具有高度沉沒成本、完工後不易大幅調整路線等特性，故須以長期及永續角度進行整體性之規劃與維運，尤其在面對氣候變遷(Climate Change)與極端天氣(Extreme Weather)的氣候壓力下，其面臨的挑戰不僅僅在平時天候中維持正常營運，更要在面臨極端氣候侵襲下展現其系統韌性，使其在遭受異常天氣衝擊後，能儘可能維持必要之營運，並且儘速提供安全、可靠且有效率的服務。

衡量國外先進之鐵道標竿國家已普遍採取系統性方法來強化面對氣候變遷風險之系統韌性，透過氣候風險評估找出極端氣候對鐵路系統的主要危害、潛在衝擊與因應對策，以 80/20 法則確認調適方案之優先順序，進而執行適宜之調適策略與行動方案來獲得良好的成效，如圖 1.1-1 所示。



資料來源：[43]及本計畫整理

圖 1.1-1 氣候變遷之風險管理流程圖

前揭鐵道標竿國家普遍參酌聯合國政府間氣候變遷專門委員會(Intergovernmental Panel on Climate Change, 以下簡稱 IPCC)之評估報告(Assessment Report, 以下簡稱 AR)與國際標準化組織(International Organization for Standardization, 以下簡稱 ISO)於 ISO 14091 氣候變遷調適—脆弱度、衝擊與風險評估等系列指引, 做為氣候變遷調適之依據。同時, 聯合國永續發展目標(Sustainable Development Goals, SDGs)於 2015 年通過 2030 永續發展議程, 其中「SDGs 目標 13-氣候行動」就是要加強所有國家對氣候變遷危害的復原力和調適能力。國際金融穩定委員會(Financial Stability Board, FSB)亦於 2017 年發布了「氣候相關財務揭露」(Task Force on Climate-related Financial Disclosures, 以下簡稱 TCFD), 目前已有許多鐵道系統參採以上規範進行氣候調適, 例如英國 Network Rail、台灣高鐵公司等。此外, 國際鐵路聯盟(International Union of Railways, 以下簡稱 UIC)也在 2017 年 11 月出版「鐵路調適(Rail Adapt)」指南, 期待透過導入鐵路調適架構, 協助鐵路營運機構靈活面對極端氣候所帶來之挑戰。

再者, 鐵道系統受氣候變遷與極端天氣之衝擊範圍包括基礎設施、車輛等, 故強化鐵道系統韌性之調適策略將會與資產管理及安全管理系統息息相關。參酌不同的國際文獻^[96, 100, 160]與實踐案例可知, 鐵道系統因應氣候變遷的調適作為中, 可透過風險導向的資產管理來充分掌握資產狀態, 實施以資產為本的風險管控以有效監控營運安全風險, 並建構整體的氣候變遷調適策略來提升系統韌性。

綜合上述, 鐵道系統調適的內容, 主要包括政策規劃、基礎設施韌性強化、營運機構內部作業程序標準化、跨系統介面整合, 以及技術升級等, 旨在應對氣候變遷所帶來的氣候衝擊, 達成保護資產、保障乘客及戶外工作者安全, 以及落實推動永續發展的目標。

再者, 有關鐵道系統調適的時間尺度規劃, 參酌資產之設計年限可涵蓋短期(2020-2040 年)、中期(2040-2060 年)及長期(世紀末), 並聚焦於易受強降雨、極端溫度、強風, 甚至鄰近海岸之暴潮、海平面上升等受氣候危害影響之高危險區域。實施過程需要整合政府部門、監理機關、營運機構、民間工程顧問公司、民間團體, 以及鄰近社區等利害關係者的參與, 透過辨識危害、進行風險評估、擬定調適策略及持續執行與回饋的方式, 有效減少氣候風險, 提升系統韌性, 如圖 1.1-2 所示。



圖 1.1-2 鐵道系統氣候變遷調適概要示意圖

氣候專家所言，即便此時已達到淨零排碳之目標，氣候暖化仍將逐年升高，故各地所面臨極端氣候的可能性也日益增加。故為及早強化國內鐵道系統之韌性與抗災能量，並協助國內鐵道系統之調適能力，本計畫參酌國際 ISO 14090 氣候變遷調適系列標準要求、IPCC 氣候風險模型、國際鐵路聯盟 UIC 之調適架構、國外營運機構調適機制方法，以及《氣候變遷風險評估作業準則》所揭櫫之氣候變遷風險評估之基本原則，以及研擬推動氣候變遷調適方案之程序，做為強化我國鐵道系統調適能力之主要參據，並提出相關推動機制與方法之建議。

1.2 全程計畫概要

本計畫就「鐵道系統強化調適能力之探討」為三年期之研究計畫，全程計畫概要詳圖 1.2-1 所示，全程計畫謹說明如下：

1. 第一年期(2024 年)主要回顧國外針對鐵道系統之氣候變遷調適文獻，包含發展趨勢、強化調適能力方式、新科技應用與相關實務案例等，同時盤點我國鐵道系統(包含一般鐵路系統、高速鐵路系統、捷運系統及輕軌系統)目前因應氣候變遷的調適方式，進而深入探討氣候變遷衝擊影響鐵道系統韌性強度之因素，並研擬鐵道系統因應氣候變遷強化調適能力的機制與方法。

2. 第二年期(2025 年)將以第一年回顧成果為基礎，研擬鐵道系統調適指引架構與內容(臺鐵與高鐵部分)，並先針對鐵路系統(臺鐵與高鐵部分)進一步研析包含強化調適能力作為、調適應用案例，以及針對跨系統介面衝擊影響提出溝通協調機制建議。
3. 第三年期(2026 年)則持續針對捷運與輕軌系統研析其強化調適能力之作為、進行案例解析及針對跨系統介面衝擊影響進行探討，並持續研擬鐵道系統調適指引內容，以完善整體鐵道系統調適指引。此外，該年度計畫亦將依據國外最新調適策略發展趨勢，滾動檢討我國整體運輸系統之調適策略。

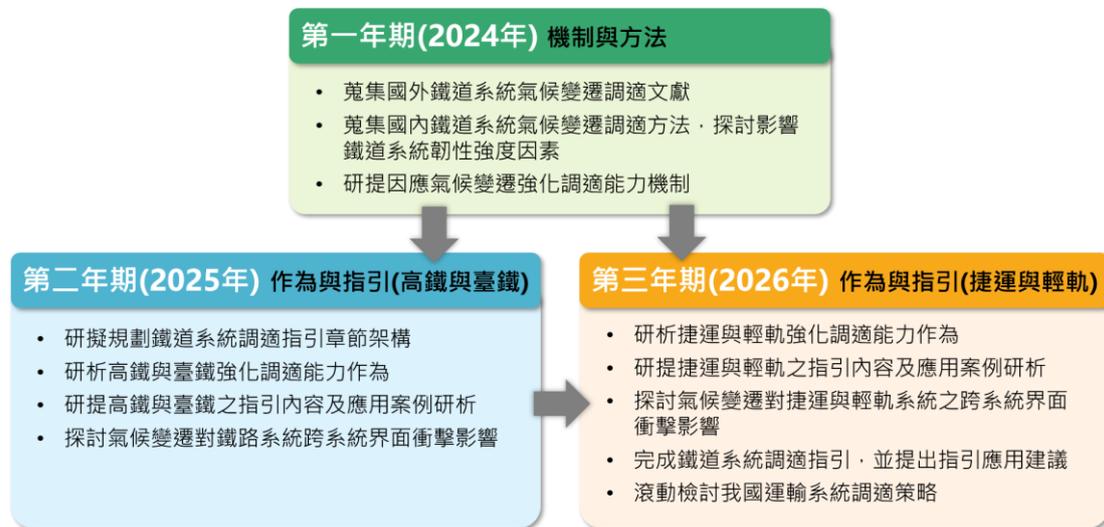


圖 1.2-1 全程計畫概要示意圖

1.3 計畫範圍與對象

依據前節所揭櫫之計畫概要，本計畫於第一年(2024 年)之探討範圍，主要係聚焦於研擬強化鐵道系統調適能力的機制與方法，探討對象則包括國內的鐵路系統、捷運及輕軌運輸系統。本計畫透過回顧文獻與國際標竿機構實踐案例，彙整適用我國鐵道系統之調適機制與方法，以強化我國鐵道系統之韌性，並提供鐵道相關單位發展其全生命週期各階段調適策略參考應用。

1.4 計畫目標

本計畫年度預期達成目標，謹說明如下：

1. 預期成果：

- (1) 完成鐵道系統(含高鐵、臺鐵、捷運、輕軌)因應氣候變遷強化調適能力之機制與方法之研析。
- (2) 完成 2023 年運輸系統因應氣候變遷調適成果彙整及檢討。

2. 預期效益：

- (1) 瞭解氣候變遷對國內鐵道系統之危害與衝擊，提供交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府捷運局、捷運公司參考及應用，俾利調整規劃設計營運之相關法規或規範。
- (2) 掌握國際運輸系統調適案例，提供交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府所屬捷運局、捷運公司參考應用，俾利其滾動檢討調適行動(執行)方案。

3. 預期應用、推動與執行：

- (1) 鐵道系統全生命週期強化調適能力之研析成果可提供交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府捷運局、捷運公司等設施權責機關做為檢視既有規劃、設計、營運等相關規範之參考。
- (2) 運輸系統氣候變遷調適資訊提供交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府捷運局、捷運公司等設施權責機關辦理調適相關業務之參考應用。

1.5 計畫流程與步驟

本計畫於第一前期(2024 年)之計畫流程規劃如圖 1.5-1 所示，主要工作項目說明如下：

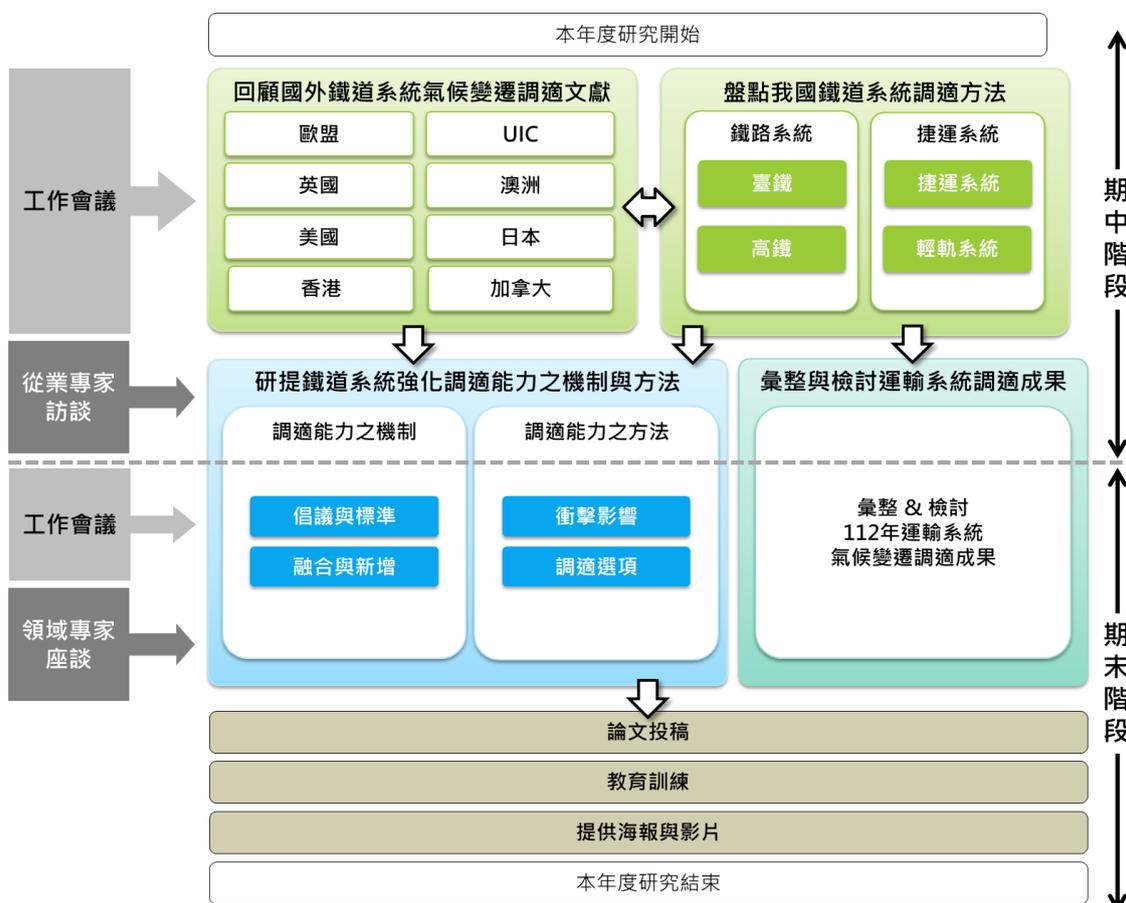


圖 1.5-1 計畫流程圖

1. 回顧國內外鐵道系統氣候變遷調適文獻

在氣候變遷領域方面，相關調適議題於歐美等先進國家已發展數十年，並取得相當成果，另配合 ISO 於 2019 年發表 ISO14090 等一系列之氣候變遷調適規範標準，提供企業機構以及公部門在推動調適策略上的參考框架。基此，本計畫於期中階段主要工作之一，係回顧國外鐵道調適發展方向及趨勢，蒐整國內外於運輸系統氣候變遷調適之相關文獻，提供後續研提鐵道系統強化氣候變遷調適能力於機制與方法之基礎。

2. 盤點我國鐵道系統調適方法

本計畫於期中階段之另一主要工作，係盤點我國鐵道系統調適方法之現況作為，進而研擬適用於我國鐵道系統強化調適能力之機制與方法。

3. 從業專家訪談

為利調適指引落地應用，本計畫透過向相關鐵道機構之從業專家進行請益，瞭解國內各機構因應氣候變遷採取之調適作為與努力，並反饋後續研擬強化鐵道調適機制及方法之參考。相關拜訪單位與時程包括有：國家災害防救科技中心(2024年6月13日、2024年9月19日)、各地方之捷運公司(2024年6月14日)、國營臺灣鐵路股份有限公司(以下簡稱臺鐵公司)(2024年6月18日)、鐵道規劃建設單位及工程顧問(2024年7月12日)、台灣高速鐵路股份有限公司(2024年7月23日)。

4. 研提鐵道系統強化調適能力之機制與方法

本計畫於期末階段，針對鐵道系統全生命週期之各階段作業，研析將氣候變遷調適包括衝擊影響評估作業以及調適策略選項等強化氣候變遷調適能力之機制與方法，適切融合既有的作業流程步驟當中，並鼓勵主辦機關或營運機構能自主提報揭露適當的調適資訊。

5. 領域專家座談

針對本計畫所研擬之鐵道系統強化調適能力之機制與方法，於2024年9月13日召開1場次專家學者座談會，會中說明鐵道系統因應氣候變遷，強化調適能力之機制與方法，徵詢專家對本計畫階段成果之回饋，以利凝聚鐵道系統強化調適能力之共識。

6. 其他工作項目

除研擬鐵道系統強化調適能力機制與方法之外，本計畫亦配合「國家氣候變遷調適行動計畫(112-115年)」，協助交通部彙整維生基礎設施領域氣候變遷調適行動方案之112年調適成果報告與能力建構成果摘要，並探討後續強化調適能力之方向和建議。

1.6 氣候變遷調適相關名詞定義

參酌我國《氣候變遷因應法》、《氣候變遷風險評估作業準則》、《氣候變遷專有名詞手冊》，以及聯合國 IPCC 評估報告、英國 NR WRCCA 等對於氣候變遷調適相關名詞之定義，綜整本計畫所採用氣候變遷調適相關名詞之定義彙整如表 1.6-1 所述：

表 1.6-1 氣候變遷調適相關名詞定義彙整表

中文名詞	英文名詞	定義
氣候變遷調適	Climate Change Adaptation	人類與自然系統為回應實際、預期氣候變遷風險或其影響之調整過程，透過建構氣候變遷調適能力並提升韌性，緩和因氣候變遷所造成之衝擊或損害，或利用其可能有利之情勢。
氣候變遷風險	Climate Change Risk	氣候變遷衝擊對自然生態及人類社會系統造成的可能損害程度。氣候變遷風險的組成因子為氣候變遷危害度、暴露度及脆弱度。
危害	Hazard	可能發生的自然或人為的危害事件或趨勢，其可能導致生命損失、傷害或其他人類健康影響，以及財產、基礎設施、生計、服務提供、生態系統和環境資源之毀壞和損失。
暴露度	Exposure	指存在於可能受不利影響的地方和環境中的人群、生計、物種或生態系統、環境功能、服務和資源、基礎設施，或經濟、社會或文化資產。
脆弱度	Vulnerability	指受到不利影響的傾向或導向。脆弱度包括各種概念和要素，包括對傷害的敏感性或易感性以及缺乏應對和應對的能力調適。

中文名詞	英文名詞	定義
敏感度	Sensitivity	指某個系統或物種受氣候變異或變化影響的容易程度，包含不利和有利的影響，影響可能是直接或間接的。
調適能力	Adaptive capacity	系統、機制、人類和其他生物調適以應對潛在損害、利用機會或應對後果的能力。
韌性	Resilience	系統面臨危害的衝擊下持續提供服務的能力，由抵禦能力、可靠度、備援能力、反應與恢復能力四要素組成。
抵禦能力	Resistance	透過提高系統的耐受度，防止系統損壞或服務中斷。
可靠度	Reliability	確保基礎設施在設計上能夠應對各種情況，以降低災害造成的損害或損失。
備援能力	Redundancy	透過備援設施或是備用的運輸容量，使其能夠持續提供服務。
反應與恢復能力	Response & Recovery	透過事先規劃、準備和演練，使其面對衝擊時，能夠做出快速有效的應對措施及恢復服務。

資料來源：[83,85,160]及本計畫整理

第二章 氣候變遷的因應策略與鐵道系統

調適現況

在研析適合我國鐵道系統機制與作法之前，先瞭解氣候變遷的危害以及對鐵道系統的衝擊，並回顧國內外鐵道系統的調適現況，有利本計畫擬定機制與方法之基礎。爰此，本章首先對氣候變遷的成因、危害、對鐵道系統的衝擊風險，以及可採取之因應策略進行概略性的說明，並勾勒出氣候變遷議題對於鐵道系統衝擊的大框架。

為界定本計畫之探討範疇以及敘明計畫賡續之研究內容，本章將敘明國外鐵道系統的調適發展趨勢與案例，並且闡述我國鐵道系統因應氣候變遷調適之現況作為。

2.1 氣候變遷與調適策略概述

氣候變遷係指溫室氣體所造成之氣候異常，尤其是燃燒化石燃料排放溫室氣體(特別是二氧化碳及甲烷)以及森林砍伐等行為，造成人為溫室氣體於地球低層大氣中，吸收更多的紅外線輻射能量，導致全球暖化(Global Warming)及極端天氣(Extreme Weather)的發生，其現象包括熱浪、乾旱、暴雨、洪水、雷擊之外，也會導致冰山融化、海平線上升、沙漠擴張、土石流、淹水、雪崩等地球環境之生物多樣性變化以及天然災害，如圖 2.1-1 所示。



圖 2.1-1 氣候變遷成因與影響示意圖

由於鐵道系統係屬關鍵基礎設施，倘若鐵道系統因氣候變遷而損毀或影響營運，將對人民生活、社會經濟造成重大傷害。例如 2024 年 6 月 21 日臺鐵 EMU3000 新自強號於花蓮路段撞上土石流導致人員受傷及營運中斷，對東部的經濟即造成重大衝擊。又如 2024 年 7 月 2 日臺北市午後暴雨，導致北捷文湖線出現異常，六張犁站到動物園站被迫暫時停止營運，除了對旅客不便之外，也會造成臺北捷運公司的營運損失。

因此，為降低氣候變遷之衝擊，世界各主要國家無不竭力採取各項措施來因應，甚至立法來執行。以我國為例，為因應世界潮流，於 2023 年 2 月 15 日公布施行《氣候變遷因應法》，以善盡共同保護地球環境之責任，並確保國家永續發展。該法之立法目的及因應策略大致可分為「減緩(Mitigation)」及「調適(Adaptation)」兩個面向，茲就內容說明如下：

1. 減緩：指減少溫室氣體排放或增加碳匯之行為，碳匯是將二氧化碳及其他溫室氣體自大氣中持續移除後，吸收或儲存至一個儲存空間(樹木、森林、土壤、海洋、地層、設施或場所)，若人為溫室氣體排放量與碳匯量達到平衡，即實現淨零碳排(Net Zero Emissions)之願景。常見減緩選項包含發展綠能、二氧化碳封存、徵收碳稅、鼓勵節約用電及研發碳匯技術等。
2. 調適：指人類與自然系統針對實際或預期的氣候衝擊或其影響，所進行的調整過程，以減輕危害或發展有利的機會。常見調適選項包含增加預警及備援機制及改善基礎設施(灰色)、透過自然生態方式改善(綠色)，以及擬定應變與回復計畫(管理)等，藉以強化運輸系統韌性的作法。

簡而言之，減緩是從根本上減少氣候變遷的驅動因素，調適則是為了讓人類環境或自然系統能更好地適應未來氣候變遷所帶來可能極端氣候的衝擊，如圖 2.1-2 及圖 2.1-3 所示，而本計畫的研究主題則是著重在後者有關風險評估與調適策略的探討。



圖 2.1-2 減緩策略意涵示意圖



圖 2.1-3 調適策略意涵示意圖

氣候變遷調適(Climate Change Adaptation，以下簡稱 CCA)與減災(Disaster Risk Reduction，以下簡稱 DRR)時常難以區分兩者差異，根據聯合國減少災害風險辦公室(United Nations Office for Disaster Risk Reduction，以下簡稱 UNDRR)2019 減少災害風險全球評估報告(Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2019，以下簡稱 GAR2019)^[120]，氣候變遷可視為災害風險的放大器，指因氣候變遷的衝擊下，導致災害生成頻率及強度增加，兩者差異說明如下：

1. 調適：調適著重未來中長期氣候的變化情況，透過科學推估資料分析未來氣候變遷風險，與減災不同的在於減災偏重自然災害本身分析之外，調適亦將未來氣候變遷以及對於社會經濟影響的複雜性納入考量。而後針對已辨識的氣候變遷風險，擬定相應之系統性策略，以因應未來面臨氣候變遷所帶來之挑戰。
2. 減災：減災則是聚焦於短期或突發性災害，透過現況和歷史災害資料進行分析，目標是避免增加或減少現有的災害風險，同時管理剩餘風險，以增強回復力並推動永續發展。

調適與減災兩者之間的差異，主要來自評估氣候危害風險依據資料與時間尺度上的不同，調適根據的是中長期的氣候預測模型，短期預測至少採 20 年、中長期則可看到世紀中或世紀末，而減災則是聚焦於歷史與現況的

災害資料，因此若有運用氣候指標或模式進行長期氣候風險與衝擊評估，發現其與依據歷史或現有資料所評估的風險存在落差，並在此基礎上進行調整以補足其缺口者，即可認定為調適。

2.1.1 氣候變遷對鐵道系統的衝擊

面對極端氣候的威脅，首要之先是須要能夠辨識氣候變遷的危害種類，瞭解其對於鐵道系統脆弱度與暴露度的衝擊方式與程度，進而評估其氣候風險，方能採取適當的調適方案。因此，本節將對氣候變遷的危害以及對鐵道系統的衝擊進行說明。

氣候變遷對鐵道系統帶來的衝擊包含基礎設施毀損、運輸安全性下降、運輸效率降低及環境衝擊增加等。茲將標竿國家或機構相關研析報告彙整摘錄如下：

一、英國

1. 傳統安全風險評估危害分類

- (1) 英國鐵路安全及標準委員會(Rail Safety and Standards Board，以下簡稱 RSSB)為協助鐵道業界能夠以有效率、一致、穩健的方式管理行車與非行車之營運安全、職業安全等課題，於 2023 年發布鐵道業通用危害分類^[183,184]，包含 18 類三個層級共計 500 多項危害項目，提供營運機構參考並據以發展適用於自身系統的危害登記冊。
- (2) 上述 RSSB 之 18 類鐵道系統的參考危害項目中，第 8 類即是與極端氣候相關之危害，可提供營運機構將其納入風險管理、研析降低極端氣候所造成之衝擊，有關極端氣候安全危害項目摘錄如表 2.1-1 所述。

表 2.1-1 RSSB-極端氣候危害項目彙整表

第一層分類	第二層分類	第三層分類	說明
極端環境/天氣事件或狀況 (RSSB 危害分類中之第 8 類)	極端溫度	高溫	-
		低溫	-
		極端溫度變化	-
	極端降雨	降雨	-
		降雪	-
		冰	-
		霰	-
		冰雹	-
		霧	-
	極端濕度	高濕度	-
		低濕度/乾旱	-
		極端濕度變化	-
	洪水	基礎設施損壞	包括道碴、路基、土方工程、建築物等影響
		號誌系統損壞	包括列車偵測、號誌設備、閉塞制度的影響
		電力系統損壞	包括電車線、接地設備、變電站等的影響
	極端風力	廢棄物等飛揚	-
		樹木倒下、植被受損	-
		基礎設施損壞	包括電車線、變電站、建築物等的影響
	雷擊	人員遭雷擊	-
		號誌系統損壞	包括列車偵測、號誌設備、閉塞制度的影響
		電力系統損壞	包括電車線、接地設備、變電站等的影響
	天然事件	氣候現象	-
		地震或引發之現象	-

第一層分類	第二層分類	第三層分類	說明
		火山現象	-
		氣候變遷（逐漸的或突然的）	-
		海岸侵蝕	-
		雪崩	-
		土石流（泥流）	-
		岩崩（落石、岩石滑動、岩體滑動）	-
		土壤蠕動（潛變）	-

資料來源：[183,184]與本計畫整理

2. 未來的鐵路與氣候變遷調適(TRaCCA)

英國 RSSB 在未來的鐵路與氣候變遷調適(Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation，以下簡稱 TRaCCA)中^[206]，依據四類極端氣候現象細分為主要與次要危害，有關各危害對鐵路基礎設施可能造成之衝擊彙整如表 2.1-2 所述。

表 2.1-2 TRaCCA-極端氣候危害項目彙整表

現象	主要危害	次要危害	對鐵路基礎設施可能造成之衝擊
溫度	高溫	熱浪、野火	鋼軌挫屈、結構的熱膨脹
	季節溫差大	永凍土融化	永凍土區道床融化沉陷
	低溫	雪、冰、霜、凍融	電車線及號誌設備損壞、落石、凝固點、隧道結冰、軌裂/斷軌
降雨	降雨過多	洪水(地表水/河川/地下水)、滲透、土石流	基礎設施邊坡破壞、橋梁沖刷、軌道/機廠/建物淹水、電子設備故障
	降雨不足	乾旱、土壤乾燥、收縮開裂、土石流	基礎設施邊坡破壞、軌道錯位、電車線支撐桿錯位
風	暴風雨/大風	樹倒、風吹物體	電車線掉落、樹倒/風吹物體造成結構損壞/軌道錯位

現象	主要危害	次要危害	對鐵路基礎設施可能造成之衝擊
海平面、風、氣壓	短/長期沿海水位極端變化	沿海洪水、波浪漫溢、河水潮汐氾濫	沖刷、結構損壞、隧道和軌道洪水

資料來源：[206]與本計畫整理

3. 英國鐵路公司(Network Rail，以下簡稱 NR)第四版調適報告

英國鐵路公司於 2024 年 12 月出版之第四版調適報告，主要探討英國鐵路基礎路網所受氣候變遷之衝擊，內容指出英國鐵路的資產、運營與服務都存在某種程度的天氣和未來氣候相關風險^[161]。在優先處理風險中，NR 選擇根據當前以及 2050 年的風險評級進行研析 NR 之關鍵風險。在關鍵風險的討論中，NR 將極端氣候變數歸納成「強降雨」、「海平面上升、海岸侵蝕和洪水」、「溫度」與「強風和風暴事件」等 4 個主要類別進行探討，並針對每個主要類別風險的極端氣候變數，列出該項風險對鐵路系統各個層面所造成之衝擊。如：強降雨類別中長期潮濕的日子和季節會對排水系統、地質和隧道造成不同程度之衝擊^[161]，如表 2.1-3 所述。

表 2.1-3 英國 NR-極端氣候危害項目彙整表

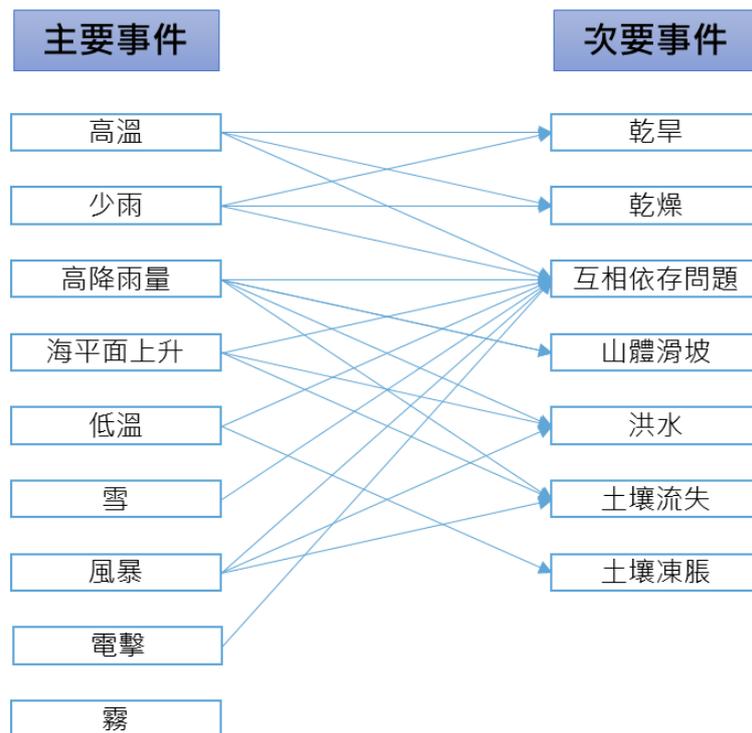
主要類別	極端氣候變數	對鐵道系統的衝擊
強降雨	長時間的降雨日子和季節	<ul style="list-style-type: none"> • 防洪設施受到挑戰且不堪負荷 • 土壤吸收過多水分使設施風險增加 • 水分滲入隧道結構，使其風險增加
	河流和地表洪水	<ul style="list-style-type: none"> • 防洪設施受到挑戰且不堪負荷 • 沖刷隧道及隧道淹水 • 月台及地下道淹水 • 電力系統供電中斷 • 沖刷結構物
	高低土壤濕度	<ul style="list-style-type: none"> • 鋼軌穩定性降低使列車降速或暫停營運 • 乾旱導致樹木死亡率增加，影響兩側邊坡穩定
	鐵軌黏附力	<ul style="list-style-type: none"> • 軌道表面受落葉、雨水等導致牽引力降低
	降雨量	<ul style="list-style-type: none"> • 超出排水系統設計容量或使抽水泵浦故障

主要類別	極端氣候變數	對鐵道系統的衝擊
		<ul style="list-style-type: none"> • 超出建物排水量 • 鋼軌受損 • 沖刷導致植物的穩定性降低 • 土壤吸收過多水分使設施風險增加
	雪和冰	<ul style="list-style-type: none"> • 隧道結冰導致列車營運中斷 • 員工與旅客滑倒風險增加 • 造成結構與材料風化 • 凍融及融雪引起降解
海平面上升、海岸侵蝕和洪水	海平面上升	<ul style="list-style-type: none"> • 超過排水系統上限及水流溢出護岸
	海岸侵蝕	<ul style="list-style-type: none"> • 結構受到沖刷及破壞 • 列車出軌 • 鋼軌穩定性降低使列車降速或暫停營運
	沿海洪水(風暴潮)	<ul style="list-style-type: none"> • 海岸侵蝕及水流溢出護岸
溫度	熱浪和極端高溫	<ul style="list-style-type: none"> • 鋼軌劣化、挫屈 • 戶外工作者身體不適 • 沿線植被乾燥，增加火災風險 • 號誌系統過熱故障 • 電車線下垂、斷線或掉落風險增加
	極端低溫	<ul style="list-style-type: none"> • 軌道表面結冰、道岔凍結、鋼軌斷裂 • 戶外工作者身體不適
	霧	<ul style="list-style-type: none"> • 能見度降低
	陽光眩目	<ul style="list-style-type: none"> • 難以目視號誌
	更高的平均溫度	<ul style="list-style-type: none"> • 鋼軌挫屈 • 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
強風和風暴事件	雷擊	<ul style="list-style-type: none"> • 擊毀電氣設備 • 被雷擊中的樹木可能倒落在軌道或脆弱的設備上
	強風和風暴	<ul style="list-style-type: none"> • 海岸侵蝕及水流溢出護岸

資料來源：[161]與本計畫整理

4. 英國鐵路公司(NR)天氣韌性與氣候變遷調適策略(Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan，以下簡稱 WRCCA)

英國 NR 在其氣候變遷資產管理報告中，將脆弱度定義為「天氣脆弱度(Weather Vulnerability)」，指受到氣候變遷影響後，對系統產生負面影響之天氣事件^[160]。報告中將氣候衝擊定義為主要事件，而天氣事件定義為次要事件，以釐清氣候與天氣事件之因果關係。例如海平面上升、強降雨、以及風暴可能導致之洪災，如圖 2.1-4 所示。



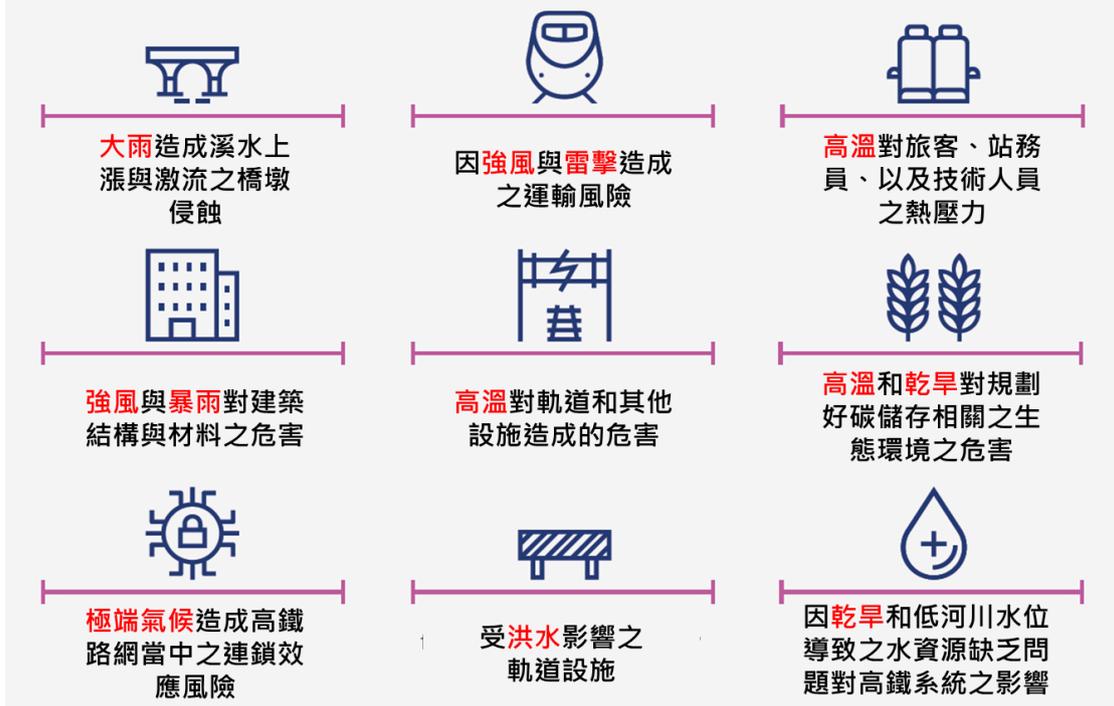
資料來源：[160]與本計畫整理

圖 2.1-4 英國 NR-氣候變遷與天氣事件之因果關係示意圖

5. 氣候變遷對英國高速鐵路系統之衝擊

英國高速鐵路(High Speed 2，以下簡稱 HS2)是目前英國正在建造之高速鐵路，通行於倫敦和伯明罕之間。HS2 為英國最近期之大型鐵路建設計畫之外，亦參酌 ISO 14090 應用危害風險評估方法，辨識未來可能之極端氣候風險，首次將氣候變遷調適融入規劃、設計及建造等不同生命週期階段，將不同子系統所造成之衝擊進行分析與評估，從而提出調適規劃^[76]，HS2 所辨識之極端氣候風險如圖 2.1-5 所示。

Potential climate change risks to HS2



資料來源：[76]與本計畫整理

圖 2.1-5 英國 HS2-氣候變遷風險示意圖

此外，該計畫之調適報告亦明揭機構之調適能力與韌性無法獨自實現，須與外部機構互聯互通及相互依存性方可達成。意味著，我們的服務可能受到我們與之互動或依賴的外部組織、資產和服務的影響。其意味系統所提供之服務，

氣候變遷透過對於外部機構之衝擊，進而對於高鐵資產與服務產生連鎖影響，爰該計畫明確要求設計師與施工承包商瞭解高鐵系統與外部機構之相互依賴關係以及可能面臨之風險，並納入氣候變遷韌性和相互依存關係評估 (CCRIA)，以確定相互依存的基礎設施。所涉及之外部關聯性，主要包含：

- (1) 電力系統：對於牽引動力、站體及沿線設備(包括信號、暖氣和照明)供電至關重要。
- (2) 資訊通信技術和電信：對於車站內的信號和服務至關重要，包括售票、照明、電梯和自動扶梯以及公共廣播通訊。
- (3) 天然氣：需要為車站和其他建築物提供供暖氣並維持其功能。

- (4) 其他運輸系統：與傳統鐵道路網的列車服務相互依存，包含對於乘客轉乘、工作人員進出，以及物資和設備的運送至關重要。
- (5) 液體/固體燃料：因應信號和加熱設備所需。
- (6) 水和廢水：可能導致路線、車站或建築物淹水之因應。

6. 氣候變遷對英國捷運系統之衝擊

有別於英國城際鐵路，英國大眾捷運系統(MRTS)的基礎設施幾乎完全位於城市區域內，因此捷運系統所受之氣候變遷的衝擊，須特別考量城市熱島效應(Urban Heat Island，以下簡稱 UHI)的影響，亦即高溫對乘客和基礎設施所構成的關鍵風險。此外，由於城市區域的空間有限，大眾捷運系統可能部分或全部位於地下，此亦存在顯著的洪水風險。

以下謹以倫敦地鐵為例，說明高溫與洪水對於英國大眾捷運系統可能造成之衝擊：

- (1) 極端高溫對於倫敦地鐵的乘客的熱舒適度與基礎設施構成了重大威脅。
- (2) 隧道內的熱環境因素複雜，隨著時間推移，隧道襯砌和周圍土壤的溫度顯著增加，而主要的熱量來源包括列車在隧道內運轉以及煞車產生的熱量和乘客的體熱。
- (3) 在地鐵列車延誤的情況下，高溫環境以及擁擠將進一步加劇乘客生理和心理上的不適。報告內容顯示，地面和地下的延誤次數都會隨著氣溫上升而增加，表示日均氣溫上升與設施相關延誤次數之間存在關聯。若氣候變遷情境為高碳排放，預計至 2050 年，倫敦地鐵部分深層隧道區域的乘客，將常態性的感受不舒適的狀態^[64]。
- (4) 大眾捷運系統路網在沿海或河口地區特別容易受到洪水的衝擊。倫敦雖受益於泰晤士防洪閘的保護，但洪水仍然對倫敦地鐵仍構成威脅，例如其建造之泰晤士隧道長期面臨泰晤士河的水淹風險，例如：1994 年 8 月的雷雨導致 28 個車站關閉，以及 2021 年 7 月造成 30 個車站關閉等，均屬顯著之案例^[64]。

二、德國

1. 2021 年德國氣候衝擊與風險評估^[66]

德國於 2021 年之氣候衝擊風險評估中，研析不同交通產業所遭遇到氣候挑戰及對應之衝擊，使用「暴露度」與「敏感度」兩指標評估在「未實行調適計畫」狀況下，依現階段、世紀中(2031-2060)及世紀末(2071-2100)三個時間軸，評估樂觀與悲觀情境各氣候危害所帶來的影響程度。

報告指出德國鐵路未來主要會受到洪水、風暴、土石流與極端高溫的影響，由於未來影響程度與範圍的預測變異性過大，因此係以高度不確定性來建置預測模型。有關德國各交通產業未進行氣候調適風險情境如表 2.1-4 所述，而各危害對德國鐵路之影響說明如下：

- (1) 洪水：在減碳成功的樂觀情況下，21 世紀中和世紀末沒有顯著變化；然在減碳失敗的悲觀情況下，則會頻繁發生洪水事件，並衍生更多地質破壞、導致更易引發土石流，且在此情境下，德國鐵路網到世紀末所受的影響程度與範圍將顯著增加。
- (2) 高溫：平均溫度上升和高溫天數增加，雖可減少極寒氣候如路線積雪或設備結霜等所帶來的危害，然卻會對號誌、供電與架空線造成一定程度的影響。
- (3) 強風：依科學研究預測顯示未來風場不會有明顯變化趨勢，因此不會造成嚴重影響。

表 2.1-4 德國-各交通產業未進行氣候調適風險情境表

氣候衝擊		現階段	世紀中		世紀末		調適時間
			樂觀	悲觀	樂觀	悲觀	
內陸水道適航性(低水位)	氣候風險	中	中	高	中	高	10-50 年
	準確性		中		低		
內陸水道適航性(洪水)	氣候風險	低	低	低	低	中	10-50 年
	準確性		中		低		

氣候衝擊		現階段	世紀中		世紀末		調適時間
			樂觀	悲觀	樂觀	悲觀	
海洋水道適航性	氣候風險	低	低	低	低	中	10-50 年
	準確性		中		低		
道路和鐵路的受損/阻礙(洪水)	氣候風險	低	低	中	低	中	10-50 年
	準確性		中		低		
道路和鐵路的受損/阻礙(重力導致的塊體運動)	氣候風險	低	低	中	低	中	10-50 年
	準確性		中		低		
交通管制系統、架空線路和供電系統受損	氣候風險	低	低	中	低	中	10-50 年
	準確性		中		低		
內陸和海洋在航路、港口、航運設施受損	氣候風險	低	低	低	低	中	10-50 年
	準確性		中		低		

資料來源：[66]與本計畫整理

2. 德鐵 DB-2023 年度綜合報告^[36]

德鐵 DB 委託德國波茨坦氣候影響研究所(The Potsdam Institute for Climate Impact Research, 以下簡稱 PIK), 研析德國到 2060 年的氣候變遷及其對德鐵軌道基礎設施的影響, 過程中採用 IPCC 的 RCP 2.6(符合 2°C 目標)和 RCP8.5(不實行任何減緩措施的結果)兩種氣候情景, 預測結果顯示, 炎熱的日子會逐漸增加、冬天則會逐漸減少, 同時暴雨等極端天氣條件將增加、風暴事件的強度也將繼續增加^[36]。

三、法國

1. 國家氣候變遷調適計畫(PNACC)^[18]

法國國家氣候變遷調適計畫(Plan for Adaptation to Climate Change，以下簡稱 PNACC)之基礎設施和運輸系統章節中，提及使用氣候預測資料，辨識基礎設施與運輸系統所遭受到的極端氣候類別，其中包括溫度、強降雨、強風、海平面上升與風浪等，並辨識極端氣候對各面向的潛在衝擊，如表 2.1-5 所述。

表 2.1-5 PNACC-極端氣候對鐵路設施潛在衝擊彙整表

危害		鋼軌	架空線	變電站
溫 度	平均溫度上升	—	—	—
	最高溫度上升	鐵軌應力增加：挫屈風險(熱浪)和斷裂風險(寒冷)	分隔裝置故障	熱浪使電纜過熱
	冰點以下的天數減少	—	—	—
	凍融循環	斷軌風險及轉轍器鎖死	導線磨損、絕緣失效	—
降 雨	降雪天數	斷軌風險及轉轍器鎖死	—	—
	極端降雨強度增加	<ul style="list-style-type: none"> • 山崩/洪水干擾電子設備和軌道電路運作 • 加速鋼軌鏽蝕 • 使軌道幾何不整 • 土石流使路線受阻 • 降雨或異常高水位造成分隔裝置故障 	洪水(降雨或異常高水位):分隔裝置故障	—
海平面上升和大浪增加		轉轍器上的潤滑劑被沖刷掉，影響其運作並縮短使用壽命	—	—
大氣系統改變		鹽霧：干擾軌道電路	怪風：架空線錯位影響集電弓運作	強風：室外電氣設備故障
乾旱		黏土收縮	—	—

危害	鋼軌	架空線	變電站
生物多樣性	—	—	—

資料來源：[18]與本計畫整理

2. 法國國家鐵路公司 2023 年度綜合報告^[199]

法國國家鐵路公司(Société Nationale des Chemins de fer Français，以下簡稱 SNCF)從 2003 年熱浪事件造成鐵路系統嚴重中斷，開始意識極端氣候對鐵路之衝擊，其後續針對高溫的議題進行研究中發現，在高溫的極端氣候下，易發生軌道挫屈、列車運行條件惡化，以及架空線垂落的問題。

四、瑞典

瑞典因位於高緯度地區，因此其氣候特徵為冬季寒冷而夏季舒適。依據 2011 年至 2015 年的統計資料顯示，瑞典鐵道基礎設施故障事件(Failures)呈現明顯的季節性特徵，冬季發生的故障事件比其他季節更為頻繁，這表明瑞典鐵路基礎設施故障與極寒氣候中的降雪和強風密切相關。

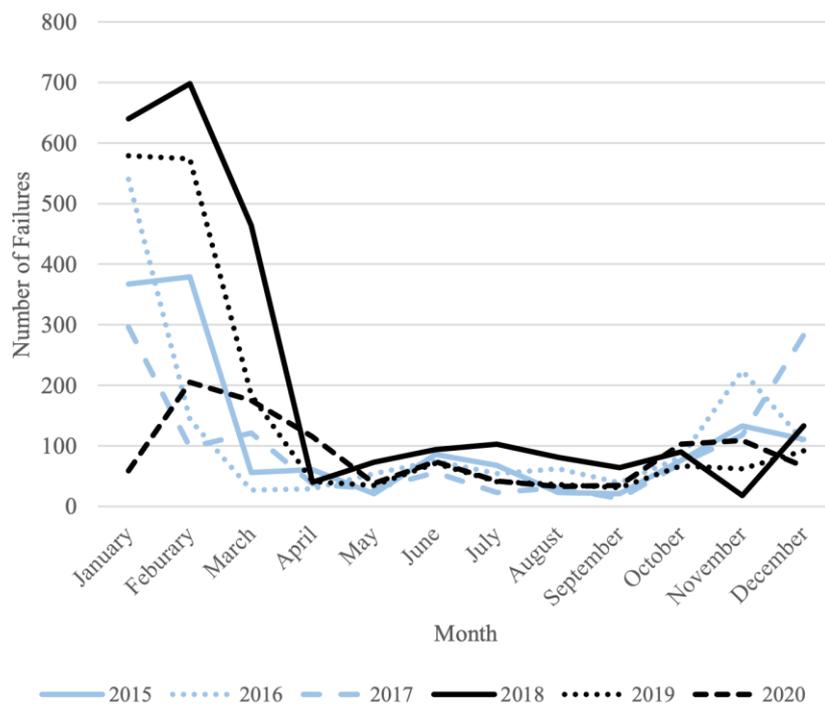
另一方面，由於全球暖化的影響，使得瑞典平均氣溫逐年上升，且冬季天數逐漸減少，由於瑞典位於高緯度地區，在氣溫在 0°C 上下變化的機會明顯增加，其導致瑞典政府正面臨更多因冰雪融化而引發的洪水事件。對此，瑞典目前積極應對氣溫在 0°C 上下變化所帶來的各種衝擊事件。相關冬季氣候對於瑞典鐵道系統基礎設施之衝擊如表 2.1-6 及圖 2.1-6 與所示^[174]。

表 2.1-6 瑞典-冬季氣候對鐵路基礎設施衝擊說明表

基礎設施	冬季氣候		
	雪	暴風雨	洪水(積雪融化)
道岔	冰雪堆積尖軌移動區域，導致不靈敏	樹木倒塌，破壞道岔部件	目前仍處於研究階段，相關洪水導致故障事件資料仍有待後續追蹤
架空線	冰雪覆著導致架空線下垂	樹木倒塌，架空線遭壓垮而停止供電	
軌道	冰雪覆著軌道易造成車輪打滑	樹木倒塌，軌道區有障礙物而中斷	

基礎設施	冬季氣候		
	雪	暴風雨	洪水(積雪融化)
車輛	出現車輪打滑或集電弓接觸不良	落葉被吹至軌道表面造成車輪打滑	
號誌系統	影響號誌傳遞，造成號誌中斷	樹木倒塌，相關實體線路遭受波及	

資料來源：[174]與本計畫整理



資料來源：[174]

圖 2.1-6 瑞典-鐵路基礎設施故障數量季節趨勢圖

五、紐西蘭

紐西蘭鐵道路網面臨極端高溫(如熱浪、炎熱天氣和乾旱)、風暴事件以及海平面上升(導致沿海洪水和侵蝕)的威脅^[127]，極端氣候對鐵路資產與營運造成衝擊彙整如表 2.1-7 所述。

其中，極端高溫對紐西蘭鐵路的衝擊尤為顯著，目前已經發生多起軌道和號誌設備故障的案例。根據 RCP4.5 和 RCP8.5 的排放情境預測，這些

極端氣候事件的發生頻率和鐵道路網的暴露風險在未來將顯著增加。例如，未來鐵道路網遭受內陸洪水衝擊的路段範圍可能達到 1,500 公里。

表 2.1-7 紐西蘭-氣候危害對鐵路資產衝擊彙整表

極端氣候分類	危害因子	對鐵道系統之衝擊
極端高溫	熱浪	<ul style="list-style-type: none"> • 軌道挫屈 • 號誌系統故障
	乾旱	<ul style="list-style-type: none"> • 導致地層下陷，影響鐵路基礎設施穩定性
風暴	內陸洪水	<ul style="list-style-type: none"> • 邊坡滑動事件增加，侵入鐵路路線 • 鐵路路基受洪水浸泡與沖刷造成損壞
海平面上升	沿海洪水	<ul style="list-style-type: none"> • 鐵路路基浸水、腐蝕和結構損壞

資料來源：[127]與本計畫整理

六、澳洲

在澳洲西部交通改善專案(METRONET)中，針對現況及未來交通專案可能面臨的極端天氣及其對資產的影響進行研究。依據該專案結果顯示，METRONET 未來將受到強降雨/洪水、叢林大火、乾旱與風暴等氣候危害因子的影響^[121]，其對鐵道系統可能之衝擊彙整如表 2.1-8 所述。

表 2.1-8 澳洲-氣候危害對鐵道系統衝擊彙整表

危害因子	對鐵道系統之衝擊
強降雨/洪水	<ul style="list-style-type: none"> • 超過排水系統的排水量，導致局部淹水，影響列車運行和營運安全 • 乾濕循環變化導致地層下陷、移動和龜裂，影響基礎設施穩定性 • 對基礎設施（軌道系統、號誌系統、車輛設備和電氣設備）造成損壞
叢林大火	<ul style="list-style-type: none"> • 車站和軌道設施毀損，導致服務中斷 • 居民或應變小組人員的安全事故風險增加
乾旱	<ul style="list-style-type: none"> • 嚴重乾旱使得景觀和植被受損 • 乾濕循環變化導致地層下陷、移動和龜裂，影響基礎設施穩定性

危害因子	對鐵道系統之衝擊
風暴	<ul style="list-style-type: none"> 雷擊導致架空線或電氣設備毀損或故障 風吹殘骸侵入靜態包絡線，導致服務中斷或資產損壞

資料來源：[121]與本計畫整理

七、日本

日本近年來飽受氣候變遷災害威脅，本計畫彙整氣候危害對於日本鐵道系統衝擊如表 2.1-9 所述。

表 2.1-9 日本-氣候危害對鐵道系統衝擊彙整表

危害因子	對鐵道系統之衝擊
高溫	<ul style="list-style-type: none"> 鋼軌挫屈
強降雨和洪水	<ul style="list-style-type: none"> 鐵道設備受損 橋梁被沖走、斷裂 橋墩（基）沖刷受損 邊坡坍塌 土砂侵入軌道 河川氾濫淹水 機廠淹水，導致機廠設備及車輛毀損 車站內淹水
強風	<ul style="list-style-type: none"> 列車脫軌翻覆
雪	<ul style="list-style-type: none"> 列車因軌道積雪被迫停駛

資料來源：[225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 234, 244, 245]與本計畫整理

八、韓國

韓國近年來受到極端氣候的影響包含降雨模式改變、極端高溫事件增加、颱風和洪水的強度與頻率上升、特定區域的降雪和雷暴發生頻率改變，使得列車延誤、軌道受損、系統營運不穩定等問題發生。其中，南部地區(如釜山和大邱)因靠近海岸，其颱風和洪水的風險較高，而內陸地區則是面臨極端高溫和降雨模式改變等衝擊。

氣候危害對韓國鐵道公社、釜山交通公社及大邱交通公社之衝擊彙整

如表 2.1-10 所示。

表 2.1-10 韓國-氣候危害對鐵道系統衝擊彙整表

危害	對鐵道系統之衝擊
強降雨和洪水	<ul style="list-style-type: none"> 沖刷鐵軌，造成鐵道基礎設施受損，尤其是沿海或低窪地區的鐵道系統 車站淹水 影響列車運轉
極端高溫	<ul style="list-style-type: none"> 軌道膨脹，使得軌道挫屈和列車脫軌的風險增加 乘客和員工的健康風險增加
颱風和強風	<ul style="list-style-type: none"> 影響鐵道電力系統，導致停電和系統中斷 導致鐵道周邊設施（如車站、橋梁等）毀損 影響列車運轉
雷暴	<ul style="list-style-type: none"> 影響電力和通信系統
雪	<ul style="list-style-type: none"> 影響列車運轉

資料來源：[110, 129, 249, 250, 251]與本計畫整理

九、國際鐵路聯盟(UIC)

國際鐵路聯盟(International union of railways，以下簡稱 UIC)針對鐵道基礎設施氣候變遷調適計畫^[1]中，將氣候變遷與極端天氣對鐵路可能造成的因素具體分為 5 類及共計 11 項之危害，有關各類危害趨勢、影響、以及對鐵道系統與資產可能造成之衝擊彙整如表 2.1-11 所述。

表 2.1-11 UIC 極端氣候危害項目彙整表

因素	趨勢	影響	對鐵路系統與資產衝擊
依現有之氣候模型分析，表中所列各因素/事件之頻率與衝擊均會增加			
1.溫度	分佈型態發生的變化、更高的溫度與均溫		
1.1 高溫與熱浪		過熱	基礎設施設備 機車車輛設備
1.2 溫度突然變化		張力	鋼軌挫屈

因素	趨勢	影響	對鐵路系統與資產衝擊
1.3 強烈陽光		過熱	鋼軌挫屈、邊坡火災、號誌異常
2.降雨	分佈型態發生變化、更多極端事件		
2.1 強降雨		水土流失、陸地兩側、洪水	路堤、土方工程毀損
2.2 降雨期延長		排水減慢、土壤侵蝕	其他基礎設施資產、營運
2.3 洪水：沿海、地表水、河流		山崩	排水系統、隧道、橋梁
2.4 乾旱		乾燥	土方工程乾燥
3.風	分佈型態發生變化、更多極端事件		
3.1 風暴/大風 (內陸)		風力更大	設施、電車線損壞
		連根拔起樹	列車運轉限制/中斷
3.2 沿海風暴及海平面上升			路堤、土方工程、營運
4.雷擊和雷爆		電壓過高	號誌系統、供電系統
5.植被	植物生長更快、新植物		植被管理

資料來源：[1]與本計畫整理

十、國際地鐵標竿聯盟(COMET)

國際地鐵標竿聯盟(Community of Metros Benchmarking Group，以下簡稱 COMET)調查指出，半數以上會員所維運之系統近年曾遭洪水(74%)、強風/強降雨(62%)、極端高溫(50%)等極端事件影響，茲將其會員營運單位針對易受極端天氣影響因素以及可控制程度，彙整如圖 2.1-7 所示。

自然		人文		
天氣與氣候	地質及地形	都市化	準備	基礎設施
最小/最高溫度變化	地下水位	地表物件	風險評估	暴露自然環境程度(開放、高架)
季風/雨季	海拔高度	綠設施缺乏	極端天氣應變計畫	設施年齡
鄰近海岸距離	地質組成(粉砂、沙、黏土等)	人口密度	預防性維護制度	冷/暖氣系統
濕度	鄰近鹹水/淡水距離	鄰近其他設施距離	資產狀況	材質(如木製枕木)

註：背景顏色越深表示營運單位可控制程度越高。

資料來源：[24] 與本計畫整理

圖 2.1-7 COMET 會員受極端天氣影響因素及可控制程度示意圖

十一、我國鐵道系統之自然災害事件

根據《國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適》^[308]，在氣候變遷的影響下，我國主要面臨高溫、降雨兩極化(含連續不降雨日數更長、極端暴雨常態化)、颱風數量減少但強颱出現頻率增加、海平面上升等危害，本計畫蒐整近年對我國鐵道系統造成衝擊之自然災害事件，彙整如表 2.1-12 所示。

表 2.1-12 我國鐵道系統之自然災害事件彙整表

危害因子	對鐵道系統之衝擊案例
高溫	<ul style="list-style-type: none"> 2016 年 6 月：臺鐵富里=東竹鋼軌挫屈，軌溫高達攝氏 63 °C，導致列車出軌 2024 年 7 月：臺鐵花蓮玉里段鋼軌輕微挫屈
強降雨和洪水	<ul style="list-style-type: none"> 2020 年 11 月底：受到連日豪雨影響，臺鐵瑞芳猴硎路段的邊坡滑動，造成宜蘭線東西正線暫停營運 2021 年 8 月：受到大雨影響，高鐵苗栗通霄路段發生邊坡坍塌，導致苗栗至臺中區間雙向暫停營運 2024 年 6 月：受到連日豪雨影響，落石入侵軌道，造成臺鐵行經崇德=和仁間 51K 西正線時，撞擊落石出軌。

危害因子	對鐵道系統之衝擊案例
	<ul style="list-style-type: none"> • 2024 年 9 月：受強降雨影響，造成臺鐵崇德=和仁被土石流覆蓋淹沒，造成路線中斷
颱風	<ul style="list-style-type: none"> • 2001 年 9 月：納莉颱風挾帶大量雨水，由於育成抽水站停擺，淡水河、基隆河倒灌，臺北捷運的臺北車站、中山站多處水淹高過防水高程，洪水從通風豎井、入口、地下連通道灌入，損失約 13 億元，歷時 3 個約月恢復 • 2009 年 8 月：阿里山林鐵受到莫拉克颱風影響，全線共計 421 處毀損，使得全線停駛 • 2015 年 8 月：臺鐵受到蘇迪勒颱風影響，造成漢本站貨車傾倒、電車線受損斷電、台北機廠停電 • 2015 年 9 月：阿里山林鐵受到杜鵑颱風影響，造成 58K 中斷 • 2016 年 7 月：臺鐵受到尼伯特颱風影響，臺車站前施工圍籬傾覆 200 公尺、大廳鐵門毀損、手扶梯淹水及貨車傾覆 • 2024 年 7 月：阿里山林鐵受到凱米颱風影響，導致邊坡崩塌及樹木倒落，本線因而暫停營運 • 2024 年 10 月：高雄輕軌受到山陀兒颱風影響，落葉堆積在鋼軌上，造成車輪打滑，影響列車運行 • 2024 年 11 月：受到康芮颱風影響，造成臺鐵北迴線和仁=崇德間被土石流覆蓋淹沒、景美=北埔間、南平=光復間、山里站等區間的電車線受損、號誌計軸器毀損、玉里=東里線槽被吹翻、電子聯鎖充電機故障、高型號誌機被吹倒、平交道遮斷桿斷裂、電纜短路等衝擊；高鐵、捷運及輕軌系統也調整其營運模式或發布停駛
雷擊	<ul style="list-style-type: none"> • 2024 年 7 月：臺北捷運文湖線受午後雷陣雨落雷影響，造成六張犁—動物園站號誌異常，因而暫停營運

資料來源：[259, 292, 296, 301, 307, 322, 347, 349, 354]與本計畫整理

十二、小結

依據前揭相關計畫專案結果可以發現，各專案對氣候危害、危害造成之影響的分類方式不盡相同，對此，本計畫參考 IPCC AR6 中氣候影響驅動

因子(Climatic Impact-Driver，以下簡稱 CID)^[84]進行分類，內容如表 2.1-13 所示。CID 係指直接影響社會或生態系統的自然氣候條件，包含平均值、事件及極值等，其中陸地相關的 CID 細分為冷與熱、濕與乾、風、雪與冰、沿海及其他，本計畫同時參考國際鐵道標竿機構與我國環境特性，另將植被與地震納入探討課題，說明如下：

1. 植被：回顧國外標竿案例及相關計畫，得知植被對鐵道系統之衝擊包含植被增生使視線受阻、樹木傾倒在軌道上，或樹葉黏附於軌道表面等。由於氣候變遷危害主要導因於氣候驅動因子，植被可能因氣候驅動因子而導致更脆弱，爰此，本計畫將植被視為 CID 事件或趨勢所造成的衝擊之一。
2. 地震：目前相關研究之共識傾向地震與氣候驅動較無明顯關聯，惟考量我國屬多山區域且位於環太平洋地震帶上，受到板塊擠壓導致地震發生頻繁，由於地震可能會破壞地質結構，倘若再發生強降雨時，易引發土石流、山崩等複合式災害。爰此，本計畫將地震列為風險評估情境之一，例如：因地震導致土石鬆動的邊坡，暴露在豪大雨及洪水下的風險。

表 2.1-13 各 CID 對鐵道系統之衝擊彙整表

CID 類型	CID 類別	說明	對鐵道系統之衝擊
冷與熱 (Heat and cold)	平均空氣溫度 (Mean air temperature)	地表平均氣溫及其晝夜與季節循環	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(Extreme heat)	地表空氣溫度間歇性升高事件，可能因濕度而加劇	鋼軌挫屈、基礎設施結構熱脹、機車車輛異常、號誌系統/電纜過熱、乘客舒適度降低、空調耗能增加、戶外工作者身體不適、電車線斷裂及掉落、列車運轉限制/中斷

CID 類型	CID 類別	說明	對鐵道系統之衝擊
	寒流(Cold spell)	地表空氣溫度間歇性降低事件，可能因風力而加劇	軌裂/斷軌、戶外工作者身體不適
	霜凍(Frost)	地表附近季節性的凍結和解凍事件	隧道結冰、軌裂/斷軌、電車線及號誌設備損壞
濕與乾 (Wet and dry)	豪大雨及洪水 (Heavy precipitation and pluvial flood)	高降水量及其導致的溪流和平地局部性間歇性的洪水	橋梁/隧道/植被被沖刷、軌道/機廠/建物/隧道淹水、號誌/電力/電子設備毀損故障、列車運轉限制/中斷、樹木傾倒、鋼軌鏽蝕、乾濕循環變化導致地層下陷，影響基礎設施穩定性
	土石流(Landslide)	地表和大氣條件導致地質質量移動的事件，包含山崩、土石流和落石	落石、邊坡破壞、號誌/電力/電子設備毀損故障、列車運轉限制/中斷、樹木傾倒
	氣象/氣候乾旱 (Aridity)	降水和蒸發散的平均量與大氣潛在狀態和地表水需求相比較下，地表水平均量、土壤濕度和/或相對濕度皆降低	邊坡破壞、軌道錯位、電車線支撐桿錯位、乾濕循環變化導致地層下陷，影響基礎設施穩定性
	農業和生態乾旱 (Agricultural and ecological drought)	土壤水分供應不足使得植物無法滿足其蒸散和生長所需之水分	鐵道沿線植被死亡率增加
	林火天氣(Fire weather)	有利於觸發和維持野火的天氣條件，通常基於一組指標及其組合，包含氣溫、	鐵道沿線/邊坡火災

CID 類型	CID 類別	說明	對鐵道系統之衝擊
		土壤濕度、濕度及風等條件	
風 (Wind)	強風暴(Severe wind storm)	間歇性強烈風暴，包括溫帶氣旋、雷暴、陣風、強對流風暴及龍捲風	列車運轉限制/中斷、樹木傾倒造成結構損壞/軌道錯位、人員遭雷擊、號誌/電力/電子設備毀損故障(如電車線掉落)、架空線錯位影響集電弓運作、風吹殘骸侵入靜態包絡線、列車脫軌翻覆
	熱帶氣旋(Tropical cyclone)	源自熱帶海洋的強烈旋轉風暴，伴隨強風、降雨和風暴潮	基礎設施毀損、列車運轉限制/中斷、樹木傾倒造成結構損壞/軌道錯位、號誌/電力/電子設備毀損故障(如電車線掉落)、架空線錯位影響集電弓運作、風吹殘骸侵入靜態包絡線、列車脫軌翻覆
雪與冰 (Snow and ice)	強降雪和冰暴 (Heavy snowfall and ice storm)	大量降雪和冰暴事件，包括凍雨和雨落在雪上 (Rain-on-Snow)	落石、列車運轉限制/中斷、號誌設備損壞、架空線下垂/毀損、集電弓接觸不良、軌道積雪、車輪打滑、隧道結冰、員工和旅客滑倒
	冰雹(Hail)	產生固體冰雹的暴風雨	列車運轉限制/中斷、電車線及號誌設備損壞
	雪崩(Snow avalanche)	冰凍圈崩壞運動及積雪崩塌的因素	落石、列車運轉限制/中斷、電車線及號誌設備損壞

CID 類型	CID 類別	說明	對鐵道系統之衝擊
沿海 (Coastal)	相對海平面 (Relative sea level)	相對於區域陸地表面的區域平均海平面高度	軌道/機廠/建物淹水、基礎設施毀損、結構惡化(如轉轍器上的潤滑劑被沖刷,影響其運作並縮短使用壽命)
	沿海洪水(Coastal flood)	由於相對海平面上升、潮汐、風暴潮和波浪的共同作用,沿海水位會出現間歇性高水位,引發洪水	軌道/機廠/建物淹水、基礎設施毀損(如腐蝕、結構毀損等)
	沿海侵蝕(Coastal erosion)	由於相對海平面上升、近岸海流、波浪和風暴潮所引起海岸線位置長期或間歇性的變化	基礎設施毀損(如橋梁腐蝕)、列車出軌、鋼軌穩定性降低使列車運轉限制/中斷

資料來源：[192]與本計畫整理

2.1.2 氣候變遷風險組成因子

人類因應氣候變遷所帶來之衝擊，首要工作必須要辨識危害並評估其風險。ISO 31000 之風險模型係採發生頻率與嚴重性之交集，惟在面對短期極端天氣與長期氣候變遷之影響下，無論是在頻率、強度、空間範圍、持續時間等都無法預期，並可能導致前所未有的極端災難。

由於需同時在高度不確定性的情況下做出決策，傳統模型在氣候變遷的背景下，可能較無法適當描述該複雜度與眾多交互作用的因素。爰此，國內外研究氣候變遷風險大多採用 IPCC 之定義，由危害(Hazard)、脆弱度(Vulnerability)與暴露度(Exposure)的函數來表達。

IPCC 為聯合國組織之一，負責研究與評估氣候變遷，其評估報告係由三個工作小組分別負責，包括有：

1. 第一工作小組(Working Group1，以下簡稱 WG1)：負責氣候變遷的自然科學基礎，以及氣候驅動因子 CID 的確認。
2. 第二工作小組(Working Group2，以下簡稱 WG2)：負責氣候變遷的衝擊、

調適及脆弱度。

3. 第三工作小組(Working Group3, 以下簡稱 WG3): 負責氣候變遷的減緩。

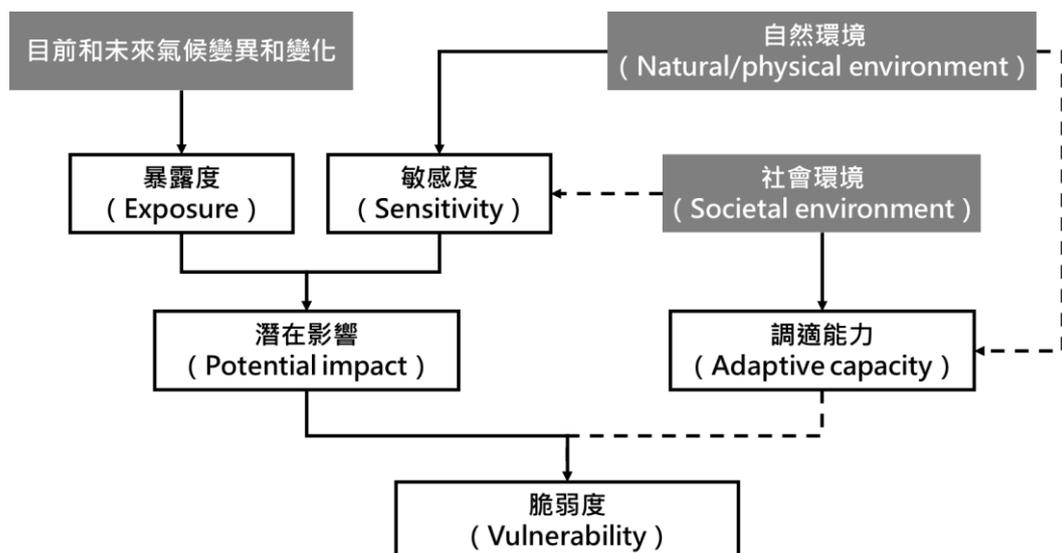
氣候變遷風險定義主要來自 WG2 的評估報告, WG2 自第五次評估報告(Fifth Assessment Report, 以下簡稱 AR5)^[83]引入風險概念, 相較於第四次評估報告(Fourth Assessment Report, 以下簡稱 AR4)^[82], AR5 將暴露度從脆弱度中分離出來, 並將氣候變遷風險(Risk)明確定義為「暴露度(Exposure)、脆弱度(Vulnerability)和危害(Hazard)」的函數, 其後第六次評估報告(Sixth Assessment Report, 以下簡稱 AR6)^[85], WG3 將人類對氣候變遷的應對措施(Response)也納入氣候變遷風險之概念中, 分述如下:

1. AR4 脆弱度定義: 指「系統易受或無法處理氣候變遷(包括氣候變異與極端氣候事件)負面效應影響的程度」, 模型為「暴露度(Exposure)、敏感度(Sensitivity)和調適能力(Adaptive Capacity)」的函數, 如式(2.1), 其中暴露度與敏感度又能以式(2.2)表示, 故式(2.1)可簡化為式(2.3), 如圖 2.1-8 所示。

$$\text{脆弱度} = f(\text{暴露度}, \text{敏感度}, \text{調適能力}) \quad (2.1)$$

$$\text{潛在衝擊} = f(\text{暴露度}, \text{敏感度}) \quad (2.2)$$

$$\text{脆弱度} = f(\text{潛在衝擊}, \text{調適能力}) \quad (2.3)$$



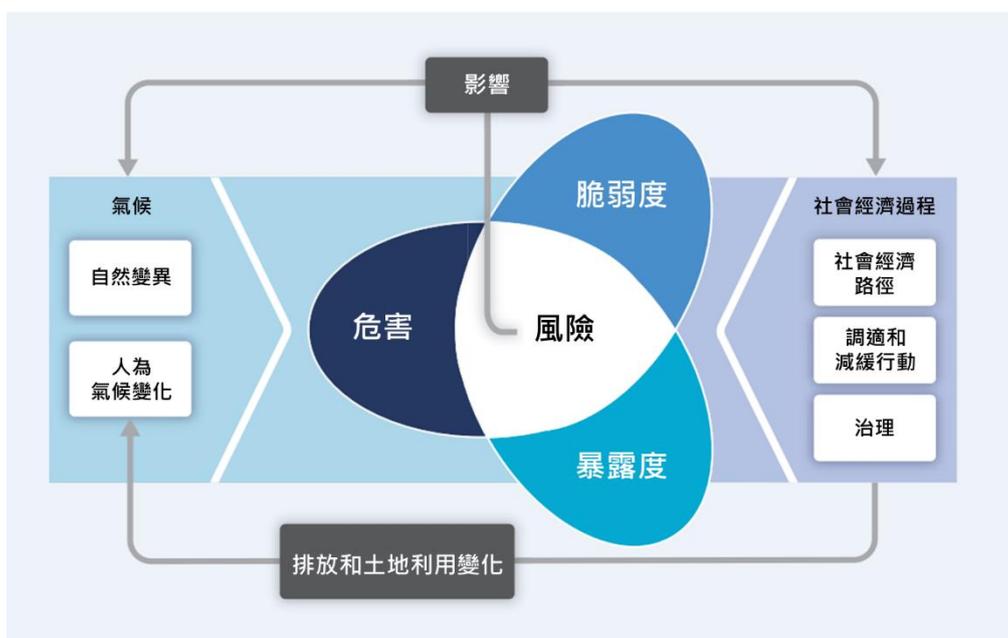
資料來源: [90]與本計畫整理

圖 2.1-8 IPCC-AR4 脆弱度定義示意圖

2. AR5 風險定義：WG2 在 AR5 引入風險概念，如圖 2.1-9 所示。在一般風險定義中，風險為發生機率(Probability)與後果(Consequence)之交集，而 AR5 則將風險定義為「氣候變遷風險來自氣候相關危害(包含危害性事件及趨勢)與人類和自然系統的暴露度和脆弱度之相互作用」，其模型為「暴露度(Exposure)、脆弱度(Vulnerability)和危害(Hazard)」的函數，其中脆弱度則由敏感度(Sensitivity)和調適能力(Adaptive Capacity)組成，分別如式(2.4)與式(2.5)所示。

$$\text{風險} = f(\text{暴露度}, \text{脆弱度}, \text{危害}) \quad (2.4)$$

$$\text{脆弱度} = f(\text{敏感度}, \text{調適能力}) \quad (2.5)$$

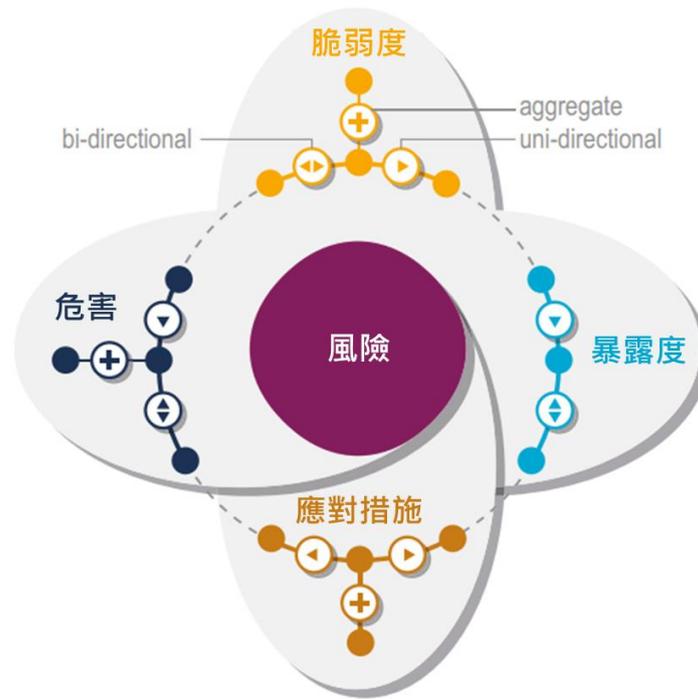


資料來源：[83]與本計畫整理

圖 2.1-9 IPCC-AR5 風險核心概念示意圖

3. AR6 風險定義：AR6 WG2 對氣候變遷風險定義與先前 AR5 相同，但因應各工作小組風險評估的需求，WG3 將應對措施(Response)納入風險考量，將風險定義為「氣候變遷的潛在影響(Impact)及人類對氣候變遷的應對措施(Response)之相互作用」，如圖 2.1-10 所示，相關說明臚列如下：

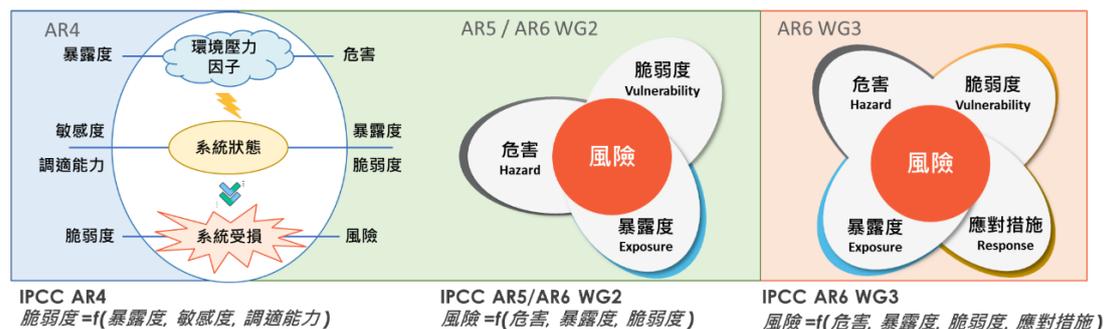
- (1) 氣候變遷的潛在影響：氣候相關危害(Hazard)與受影響之人類或生態系統對危害的暴露度(Exposure)與脆弱度(Vulnerability)之間的動態相互作用。
- (2) 人類對氣候變遷的應對措施：指應對措施為達到預期目標的可能性，或可源於其他社會目標(如 SDGs)的潛在權衡取捨或負面影響。



資料來源：[85]與本計畫整理

圖 2.1-10 IPCC-AR6 WG3 風險核心概念示意圖

比較 AR4、AR5 及 AR6 風險核心概念，AR4 著重脆弱度評估，由「暴露度、敏感度、調適能力」組成，而 AR5 引入風險概念，並將風險定義為「危害、暴露度、脆弱度」之函數，雖然兩者對組成因子的定義不同，但可互相對照^[27]。AR6 在 WG2 對風險之定義與 AR5 相同，而 AR6 在 WG3 則進一步考量應對措施對氣候變遷風險之影響，三者核心概念比較如圖 2.1-11 所示。



資料來源：[27]與本計畫整理

圖 2.1-11 AR4、AR5 及 AR6 風險核心概念比較示意圖

2.1.3 氣候變遷情境

在氣候變遷風險評估中，對於未來氣候變遷情境設定尤其關鍵，國內外研究常見之情境設定說明如下：

1. 代表性濃度路徑(RCP)

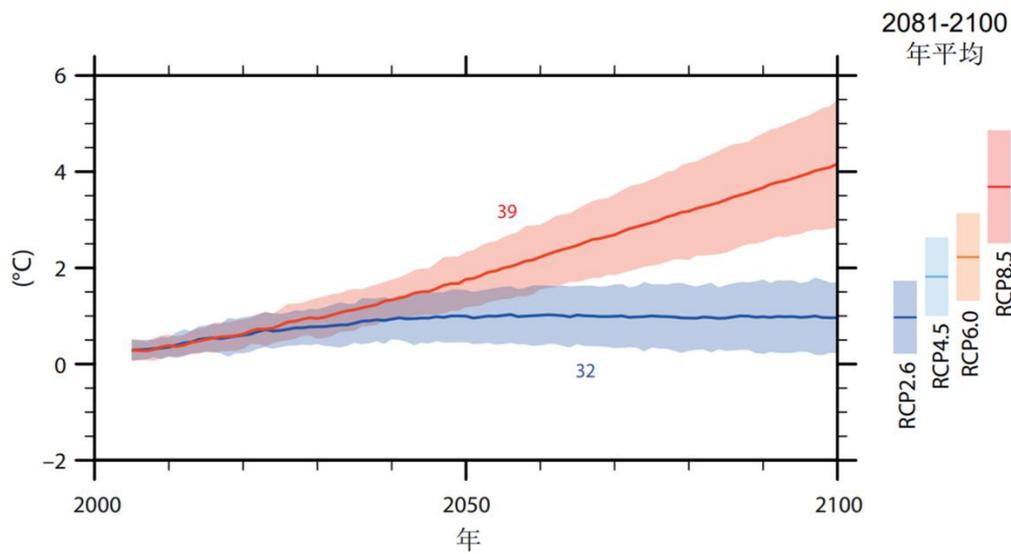
IPCC 在 AR5 發布代表性濃度路徑(Representative Concentration Pathway, 以下簡稱 RCP), 用四種不同路徑描述 21 世紀溫室氣體排放及其大氣濃度、空氣污染物排放及土地利用的情況^[87], 包含一個減緩情境(RCP2.6)、兩個中度排放情境(RCP4.5 和 RCP6.0)及一個高排放情境(RCP8.5), 其中, RCP2.6 為全球暖化幅度可能控制在不超過工業革命以前溫度 2°C 之情景, RCP8.5 則是代表各國政府無任何減緩作為, 各情境預估之全球平均地表溫度變化與全球平均海平面上升推估變化如表 2.1-14、圖 2.1-12, 以及圖 2.1-13 所示。

表 2.1-14 IPCC-全球平均地表溫度及海平面上升推估變化表

情境	全球平均地表溫度變化(°C)		全球平均海平面上升變化(m)	
	2046-2065 年	2081-2100 年	2046-2065 年	2081-2100 年
RCP2.6	1.0	1.0	0.24	0.40
RCP4.5	1.4	1.8	0.26	0.47
RCP6.0	1.3	2.2	0.25	0.48
RCP8.5	2.0	3.7	0.30	0.63

註：基準期為 1986-2005 年。

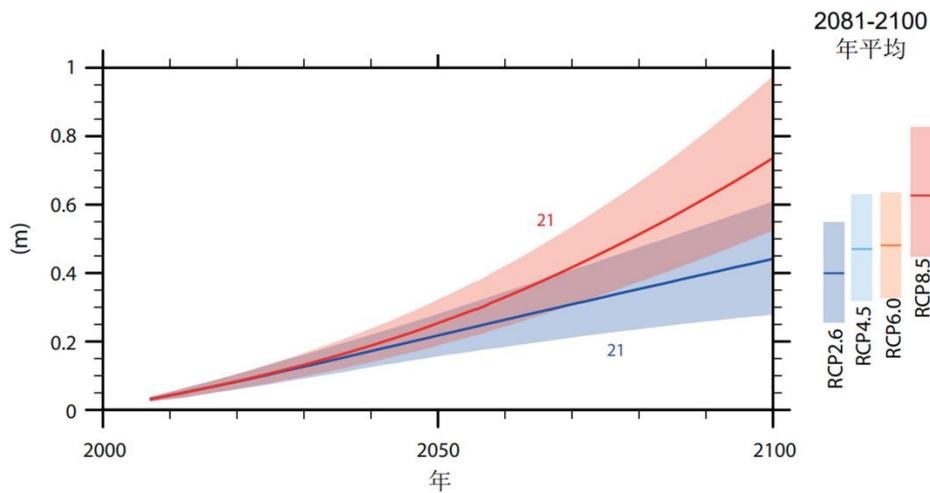
資料來源：[87]與本計畫整理



註：基準期為 1986-2005 年。

資料來源：[87]

圖 2.1-12 IPCC-全球平均地表溫度推估變化趨勢圖



註：基準期為 1986-2005 年。

資料來源：[87]

圖 2.1-13 IPCC-全球平均海平面上升推估變化趨勢圖

2. 共享社會經濟路徑(SSP)

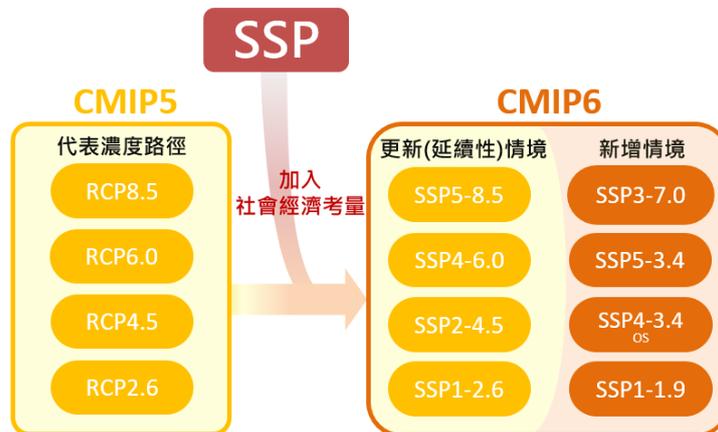
IPCC AR6 提出考量人口、經濟成長、教育及都市化的共享社會經濟路徑(Shared Socioeconomic Pathways, 以下簡稱 SSP), SSP 情境間差異主要來自不同的社會經濟假設, 共分為 5 種情境(SSP1-SSP5), 如圖 2.1-14 所示。

然而，耦合氣候模式對比計畫(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) 第 6 階段(CMIP6)將 SSP 與 RCP 互相搭配，推出 8 種情境組合，包含 4 個更新既有的第 5 階段(CMIP5)情境與 4 個新增的情境^[254]，如圖 2.1-15 所示。



資料來源：[254]

圖 2.1-14 IPCC-SSP 情境的減緩與調適挑戰示意圖



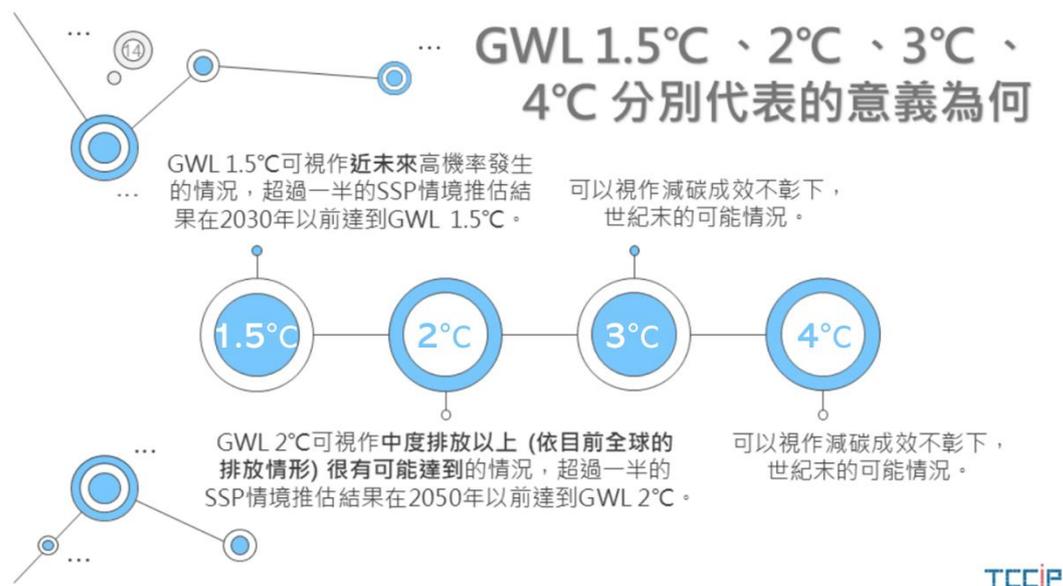
資料來源：[254]

圖 2.1-15 IPCC-氣候變遷推估情境組合示意圖

3. 全球暖化程度固定升溫情境(GWL)

配合 2015 年聯合國氣候峰會(COP 21)中通過之《巴黎協定》，IPCC 於

2018 年出版《全球暖化 1.5°C 特別報告 (Special Report on Global Warming of 1.5°C, 以下簡稱 SR15)^[88]》，該報告提出全球暖化程度/固定升溫情境(Global Warming Level, 以下簡稱 GWL), GWL 情境係以工業革命前(1850-1900 年)為基礎評估全球年均溫上升的程度，共分為 4 種情境，包含 GWL 1.5°C、GWL 2°C、GWL 3°C 及 GWL 4°C，舉例而言，GWL 1.5°C 表示相較於 18 世紀工業革命前，全球均溫上升 1.5°C 之情境，各情境說明如圖 2.1-16。



資料來源：[254]

圖 2.1-16 IPCC-全球暖化程度 GWL 情境示意圖

2.1.4 韌性組成因子

氣候變遷調適目的，主要係指人類與自然系統為回應實際、預期氣候變遷風險或其影響之調整適應過程，透過建構氣候變遷調適能力並提升韌性 (Resilience)，緩和因氣候變遷所造成之衝擊或損害，或利用其可能有利之情勢，我國《氣候變遷因應法》第 3 條第 2 款已有明揭。以下謹摘錄國外相關機構對於鐵道系統韌性之定義與策略，說明如下：

1. 聯合國政府間氣候變遷專門委員會 IPCC

IPCC 於第六次評估報告^[85](Sixth Assessment Report, AR6)指出，韌性為互相關聯的社會、經濟和生態系統應對危害事件、趨勢或干擾的能力，以保持其基本功能、定位和結構的方式進行應對或重組。當能夠保持調適、學習

和/或轉型的能力時，韌性是一種積極的特質。

2. 國際鐵路聯盟

國際鐵路聯盟 UIC 在《鐵路調適》(RAIL ADAPT)^[100]指南中將韌性定義為：面對氣候變遷時，能有效且持續提供服務之能力，由耐受能力、備援能力及恢復能力組成，分述如下：

- (1) 耐受能力(Robustness)：抵抗災害(Resist Disruption)的能力。
- (2) 備援能力(Redundancy)：在災害期間，能透過備援設施持續提供服務的能力。
- (3) 恢復能力(Recovery)：在災害發生後，能快速恢復服務的能力。

3. 英國鐵路網公司

英國鐵路網公司 NR 參考英國政府基礎設施部門(Cabinet Office Infrastructure)對韌性的定義，係由抵禦能力、可靠度、備援能力、反應與恢復能力組成^[160]，分述如下：

- (1) 抵禦能力(Resistance)：透過提高系統的耐受度，防止系統損壞或服務中斷。
- (2) 可靠度(Reliability)：確保基礎設施在設計上能夠應對各種情況，以降低災害造成的損害或損失。
- (3) 備援能力(Redundancy)：透過備援設施或是備用的運輸容量，使其能夠持續提供服務。
- (4) 反應與恢復能力(Response & Recovery)：透過事先規劃、準備和演練，使其面對衝擊時，能夠做出快速有效的應對措施及恢復服務。

4. 英國基礎設施委員會(National Infrastructure Commission，以下簡稱 NIC)

NIC 建議在因應氣候變遷影響和其他外部衝擊下，可採取如圖 2.1-17 所示之六種策略^[160]，摘述如下：

- (1) 預期(Anticipate)：提前做好應對準備。
- (2) 抵禦(Resist)：提前採取措施抵擋衝擊。
- (3) 吸收(Absorb)：在不可避免受到影響時減輕影響。
- (4) 恢復(Recovery)：迅速恢復正常服務水平。

- (5) 調適(Adapt)：調整系統以適應新環境。
- (6) 轉型(Transform)：重建和優化基礎設施系統。



資料來源：[160]與本計畫整理

圖 2.1-17 英國-NIC 基礎設施韌性概念示意圖

5. 美國運輸部(United States Department of Transportation, 以下簡稱 DOT)^[216]

DOT 將韌性定義為具備預測、準備、應對並從重大災害中恢復的能力，能夠最大限度減少對社會福祉、經濟和環境的損害。而對於專案韌性(Resilience with Respect to a Project)則是定義為某項專案能夠預測、準備或調適環境變化，或承受、應對與迅速從服務中斷中恢復的能力，其包括：

- (1) 抵抗危險或承受氣候事件和自然災害的影響，或減少極端氣候事件或自然災害對專案影響的程度或持續時間。
- (2) 具有吸收能力、調適能力和回復力，以減少專案對氣候事件或其他自然災害的脆弱度。

6. 美國聯邦運輸總署(U.S. Federal Transit Administration, 以下簡稱 FTA)

FTA 將韌性定義為具備預測、準備或適應環境，或承受、應對與迅速從中斷服務狀況恢復的能力^[60]，其包括：

- (1) 抵抗危害或承受天氣現象、自然災害的影響。
- (2) 減少極端氣候或自然災害對專案影響的程度或持續時間。

(3) 擁有吸收能力、調適力和恢復力，以降低項目對天氣事件或其他自然災害的脆弱度。

7. 美國聯邦公路總署(U.S. Federal Highway Administration, 以下簡稱 FHWA)

FHWA 將韌性定義為具備預測、準備或調適環境變化，以及能夠承受、應對或迅速從中恢復的能力^[217]，具體包括：

- (1) 抵抗危害或承受天氣事件和自然災害的影響。
- (2) 減少極端天氣事件或自然災害的影響程度或持續時間。
- (3) 擁有吸收能力、調適力和恢復力，以降低項目對天氣事件或其他自然災害的脆弱度。
- (4) 採用自然基礎設施(綠建築、透水路面)。

各機構對韌性之定義闡述雖略有不同，但其概念皆是指系統在面臨危害的衝擊下持續提供服務的能力，本計畫綜整考量鐵道系統全生命週期應有之韌性，採與英國 NR 相同之定義，即是由抵禦能力(Resistance)、可靠度(Reliability)、備援能力(Redundancy)、反應與恢復能力(Response & Recovery)四要素組成，如圖 2.1-18 所示。



資料來源：[160]本計畫繪製

圖 2.1-18 本計畫對鐵道系統韌性的定義

2.2 我國鐵道系統調適現況作為

為因應氣候變遷所帶來之挑戰，我國於 2015 年制定《溫室氣體減量及管理法》，於 2023 年修正為《氣候變遷因應法》，並配合國際趨勢新增調適專章，其中在該法第 3 條第 2 款條文中，明確將氣候變遷調適定義為「人類與自然系統為回應實際、預期氣候變遷風險或其影響之調整過程，透過建構氣候變遷調適能力並提升韌性，緩和因氣候變遷所造成之衝擊或損害，或利用其可能有利之情勢。」

基此，為掌握我國鐵道系統針對氣候危害之現況作為，本計畫除蒐整相關文獻外，亦邀集我國鐵道系統營運機構、規劃建設單位及監理機關進行專家訪談，本節將依序說明台灣高鐵、臺灣鐵路及捷運/輕軌系統之現況作為。

2.2.1 高鐵系統

為因應氣候變遷所帶來之衝擊，台灣高鐵股份有限公司(以下簡稱台灣高鐵公司)針對極端氣候之衝擊，盤檢防災相關應變機制，包含建構營運應變支援與決策輔助系統、邊坡安全管理與預警應變機制、發展行動化應變資訊平台、及檢視並落實基本 SOP 之安全作業。

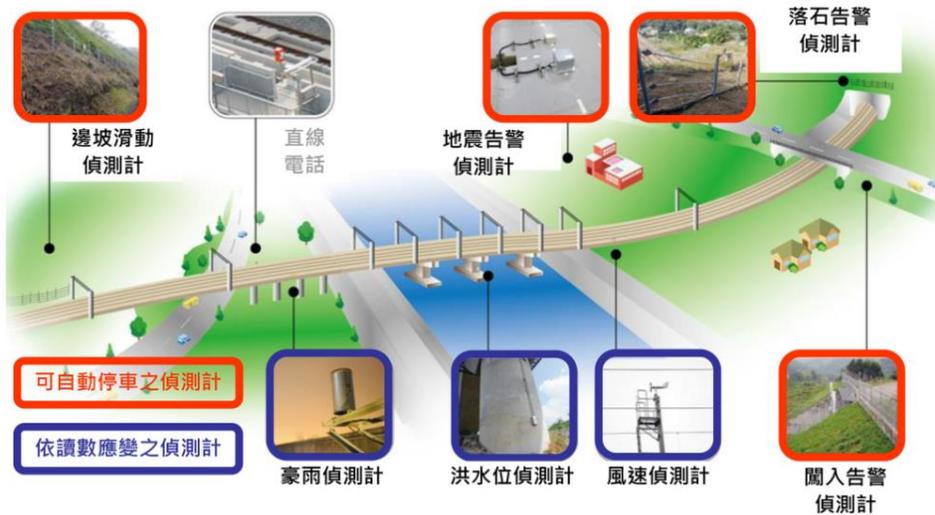
除上述應對措施外，亦導入新科技以強化災害耐受度與預警能力，包含強化既有設施結構物的韌性與耐候性、引進人工智慧與物聯網技術、以及透過遙測及無人載具提昇觀測效能。以下謹分別說明台灣高鐵公司對於邊坡、河川橋梁管理措施，及其氣候變遷領導權責單位與上位政策：

1. 邊坡管理

台灣高鐵公司於邊坡安全管理的體措施可分為三個層次，首先是結合專業巡檢、監測，以及預防性維護工程等方法避免災害發生；其次，結合高鐵天然災害告警系統(Disaster Warning System，以下簡稱 DWS)，在災害發生時啟動緊急停車，避免對營運安全造成影響。最後，建置管理與預警系統，即時掌握在強降雨的狀況下，邊坡發生坍塌的可能性，台灣高鐵針對邊坡相關作為彙整如下：

(1) 天然災害告警系統(DWS)

為便於駕駛及行控中心即時及精確掌握災害資訊，台灣高鐵公司所建置之 DWS 主要透過在沿線設置偵測器，將所偵測之異常情形傳送給駕駛及行控中心，若是與安全直接相關的危險訊號，將透過自動列車控制系統(Automatic Train Control System，以下簡稱 ATC)發布指令停駛列車^[260]，相關設計如圖 2.2-1 所示。



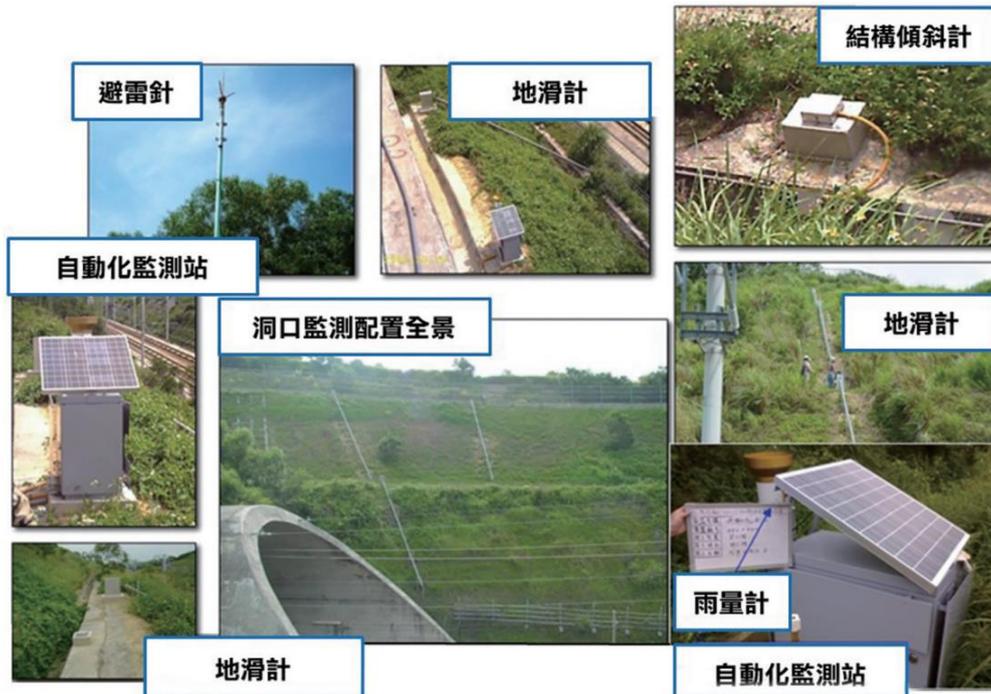
資料來源：[260]

圖 2.2-1 台灣高鐵-DWS 系統示意圖

(2) 自動化監測站

高鐵全線共有 389 單元邊坡，於 2015 年開始進行強化作業，並於 2022 年完成 389 處總體檢與改善工程^[256]，依據對於營運安全影響之嚴重程度，由高至低共分 A、B、B、D 四個風險分級。

台灣高鐵公司針對高風險邊坡設置「自動化監測系統」及人工監測量測，其預警管理值則綜合國內外工程實務，包含日本地滑對策技術協會、中華水土保持學會等建議所擬定。若邊坡監測值超過預警管理值，將由工程師判斷邊坡穩定性，並視需要進行現場檢查及評估維護或工程改善之必要性。另針對風險較低之邊坡，則派遣大地專業工程人員，以目視及步巡方式辦理邊坡檢查。相關設施如圖 2.2-2 所示。



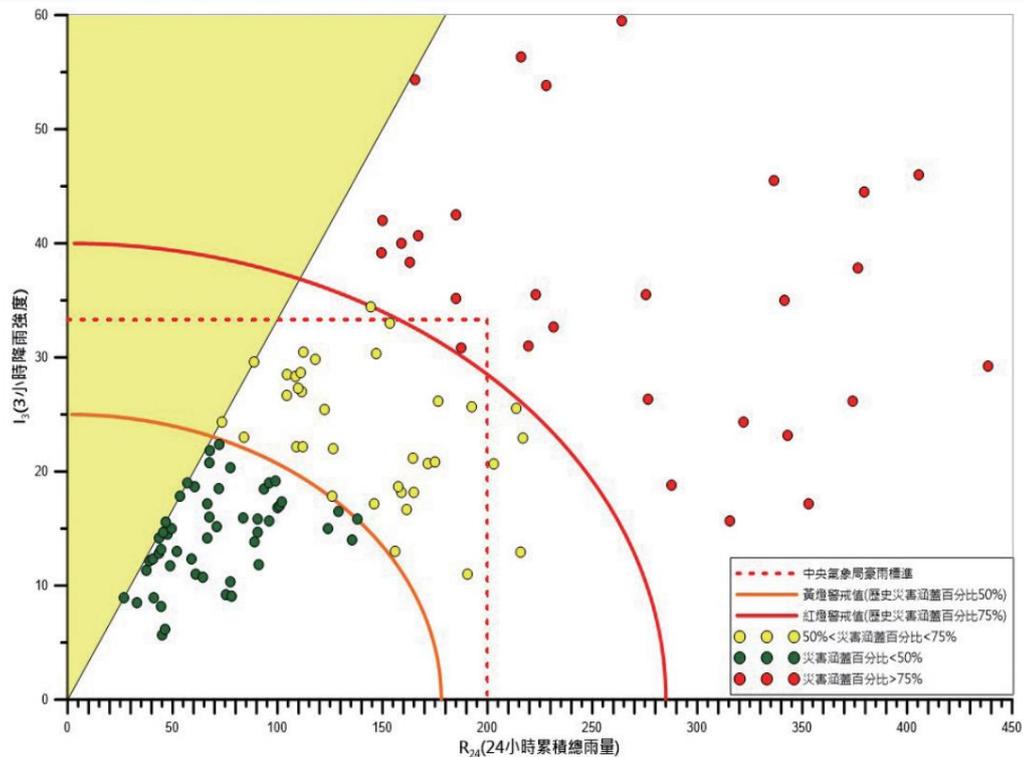
資料來源：[339]

圖 2.2-2 台灣高鐵-邊坡自動化監測系統組成圖

(3) 邊坡安全與暴雨預警系統

- 台灣高鐵公司於行政院核定「國家氣候變遷調適行動方案(107-111年)」^[290]中提報此建置計畫，其目的係在強降雨情境下，即時評估邊坡發生坍塌的可能性，以及發生坍塌時，藉由土石運移的範圍研判是否會入侵軌道，以減少極端氣候對高鐵安全造成的威脅。
- 台灣高鐵公司彙整過去暴雨導致之淺層坍塌事件與相關雨場分析，並參考沿線所經過地區的地質特性，以及周圍具代表性雨量站的數據，建置完成高鐵沿線邊坡暴雨預警系統，其預警機制可較 DWS 更早發出預警^[339]。

- 暴雨預警系統之降雨警戒指標，係採 I_3 -「3 小時降雨強度」做為短期降雨指標、 R_{24} -「24 小時累積雨量」做為長期降雨指標，彙整做為降雨警戒指標組合，如圖 2.2-3 所示。其降雨警戒值以歷史災害涵蓋百分比 50%做為黃色燈號警戒，歷史災害涵蓋百分比 75%做為紅色燈號警戒。當降雨量達到黃色燈號警戒值，表示降雨量增加已有一定趨勢，邊坡已接近不穩定狀態；當降雨量達到紅色燈號警戒值，表示降雨量持續增加，邊坡可能有崩滑之虞。



資料來源：[339]

圖 2.2-3 台灣高鐵-降雨警戒指標圖

(4) 高陡植生邊坡坍塌後土石運移風險評估

- 台灣高鐵公司於 2020 年起針對多處坡度較陡且風險較高之植生保護邊坡，辦理坍塌後土石運移分析與風險評估。運用顆粒流程序(Particle Flow Code，以下簡稱 PFC)，以個別元素法模擬分析材料運移軌跡及堆積之程式，可以將坡度、坡高、崩塌土石量及地層等因素納入分析，並據以評估淺層崩塌後土石運移範圍與高鐵軌道之相關性。

- 邊坡坍滑後土石是否入侵軌道區之評估，須綜合考慮安全係數與崩坍後土石運移範圍；安全係數範圍暫訂為暴雨狀況地層弱化時為 1.0-1.2，土石運移範圍用坡趾與軌道區欄杆做為分界標準。將安全係數、崩坍後土石運移範圍等因素列為矩陣，將營運安全以風險分級矩陣呈現，針對風險分級高的邊坡，優先考慮啟動預防性維護工程，如表 2.2-1 所示。

表 2.2-1 台灣高鐵-土石運移風險分級矩陣圖表

安全係數 土石運遺	I <1.05	II 1.05~1.1	III 1.1~1.2	IV >1.2
i 超越欄杆	高	高	中	低
ii 欄杆與坡趾間	高	中	中	低
iii 未達坡趾	中	中	低	低

資料來源：[339]及本計畫繪製

(5) 強化隧道洞口邊坡之防護工程

- 台灣高鐵公司將此工程計畫納入行政院核定「國家氣候變遷調適行動方案(107-111年)」之調適行動計畫，由台灣高鐵公司於2022年完成強化路段之邊坡檢查、安全監測等資料評估，辦理計新竹路段2處隧道洞口邊坡之預防性維護工程(寶山一甲隧道南、北洞口)，以減少受暴雨影響而發生邊坡坍滑觸動災害告警系統之情況，避免營運中斷。
- 台灣高鐵公司賡續於「國家氣候變遷調適行動計畫(112-115年)」^[352]提報以「強化沿線隧道洞口及高陡植生邊坡之防護工程」計畫，持續進行監測、專業邊坡巡檢等資料評估有風險需加固之邊坡路段，據以針對高風險之邊坡地段進行防護工程之施作。

2. 河川橋梁管理

高鐵河川橋於設計階段即已考慮極端洪水影響，其重現期遠高於特許期之重現期距，營運後則以「年度評估—年度防護」之機制辦理沖刷防護工

作，使河床之動態變化維持在原設計考量範圍內，並在資產重置階段持續進行。

台灣高鐵公司於 2022 年完成筏子溪橋、八掌溪橋、北港溪橋沖刷風險評估、防護建議與設計，透過預先識別並適時降低沖刷風險，確保高鐵設施及營運安全，以利維修單位辦理年度維護工作外，亦於「國家氣候變遷調適行動計畫(112-115 年)」^[352]中延續此計畫，其目的為面對極端氣候所帶來之暴雨、強雨、洪水與其他災害，持續每年於汛前進行高鐵河川橋沖刷風險評估，據以採行或研擬未來之相關因應作為。

3. 氣候變遷調適領導權責單位與上位政策

台灣高鐵公司參照「氣候相關財務揭露」(Task Force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD)要求，於 2022 年起在其官網自主揭露氣候變遷因應策略，透過借鏡國際鐵路同業的揭露實務及跨部門討論，以通盤考量氣候變遷對台灣高鐵的風險與機會，同時透過質化方法評估氣候變遷所造成的營運及財務損益。

台灣高鐵公司董事會設有「公司治理暨提名委員會」，經理部門設有總經理擔任主席之「公司治理推動委員會」，透過委員會持續推動相關議題並於每年向董事會報告推動執行情形及其成效。此外，台灣高鐵公司訂有「風險管理政策」，其涵蓋全公司的營運範疇，而風險管理推動與執行單位每年須向董事會進行報告，做為氣候變遷風險因應作法及成效檢討之參考^[257]。

2.2.2 臺灣鐵路

隨著氣候變遷所帶來的影響逐漸加劇，交通部鐵道局及國營臺灣鐵路股份有限公司(以下簡稱臺鐵公司)已逐步擬定相關應變措施，並委託國內研究單位進行氣候相關資料預測，以因應天然災變對臺鐵之衝擊。以下將分別就臺鐵之邊坡管理、鐵道橋梁工程、極端氣候應對措施、氣候變遷調適領導權責單位與上位政策等進行說明。

1. 邊坡管理

參酌行政院核定「國家氣候變遷調適行動計畫(102-106 年)」^[176]與「國家氣候變遷調適行動方案(107-111 年)」^[290]，有關交通部鐵道局及國營臺鐵

公司之邊坡管理作為，謹摘錄如下：

- (1) 2013 至 2017 年間，完成鐵路邊坡管理系統之建置，系統包括靜態之「基本資料庫」、動態之「監測資料庫」及「巡查與維護資料庫」等三大模組，並以電腦系統化管理，同時完成系統推廣與教育訓練。
- (2) 臺鐵公司後續至 2022 年完成執行的鐵路行車安全改善六年計畫中，針對邊坡規劃「鐵路邊坡全生命週期維護管理系統」，使用 WebGIS 圖台，記錄邊坡巡檢養護紀錄、CCTV、地滑儀與水量計等監控資料、可進行即時資訊的疊合，做為養護決策的依據，並於異常狀況時進行自動通報。

2. 鐵道橋梁工程

交通部鐵道局於 2018 至 2019 年間，完成萬里溪鐵路橋梁延長工程與枋野一號鐵道橋安全檢測、評估及補強工程，此二項工程皆針對既有之工程基礎設施進行補強或延長。

3. 極端氣候應對措施

為防範極端氣候所帶來的衝擊，臺鐵系統有連結交通部中央氣象署的劇烈天氣監測系統(QPESUMS)，每三個月對災害潛勢路段進行檢討，同時委託臺大研究團隊進行氣候相關資料預測。針對臺鐵系統應對各種極端氣候之應對措施分述如下：

(1) 高溫

- 交通部鐵道局於 2021 至 2022 年間，頒布「酷暑時期防範鋼軌挫屈須知與斷軌應變處置標準作業程序」，其目的為因應極端氣候帶來之酷暑與高溫，明訂在酷暑期間應避免擾動道床，並加強軌溫監測、紀錄及因應、對於相關特殊處所應特別檢視。
- 臺鐵公司於 2020 年訂定「斷軌應變處置標準作業程序」，明定鋼軌斷裂搶修使用斷軌處置器時，應視軌道條件限制列車慢行通過，並應於當晚辦理路線封鎖，進行抽換鋼軌及焊接作業。
- 臺鐵系統共設置 19 處電子溫度計測量鋼軌溫度，約每 15 分鐘取得鋼軌溫度資訊以供警戒分析，溫度計警介值與處理方式為：

攝氏 50°C(注意)、攝氏 55°C(派員現場巡查)、攝氏 60°C(降速至 30 km/h，或可能停駛)。

- 在列車自動保護系統(Automatic Train Protection，以下簡稱 ATP)的感應子上加蓋防曬避免高溫故障。

(2) 洪水

臺北車站與高雄車站在地下化路段設置有防水閘門，每月定期檢查以及每年定期演練，並於防汛期進行預防性檢查。

(3) 強風

南迴鐵路沿線 46 處設置風速計，目前係採預警式措施，當可能致災時，機務單位會預先將列車進行疏散。

4. 氣候變遷調適領導權責單位與上位政策

目前 ESG 相關議題處於內部討論階段，尚未對外公布相關報告，未來將朝永續經營及 TCFD 財務揭露之趨勢邁進，而氣候變遷相關議題已廣義納入該公司之安全憲章中。

2.2.3 捷運/輕軌系統

本節彙整我國捷運及輕軌系統於因應氣候危害現況之相關作為，對於同樣類型或性質之危害防治作為，透過可蒐集資料之系統進行案例說明。

1. 基礎設施工程

(1) 臺北捷運文湖線-鋼軌設計

臺北捷運文湖線軌道係屬中運量系統，其與臺北捷運系統其他高運量長焊鋼軌的設計不同，木柵段為混凝土的行駛路面，而內湖段鋼製行駛路面，臺北市政府捷運工程局於建置時已將溫差熱漲冷縮變化量納入設計考量，每段鋼軌接續位置在鋪設時預留伸縮縫，以確保行車安全。

(2) 臺北捷運、高雄捷運-出入口防洪設計高程

臺北捷運系統(以下簡稱北捷)與高雄捷運系統(以下簡稱高捷)車站之出入口防洪設計高程，皆以 200 年防洪水位做為設計基準。過去臺北捷運因遭遇納莉風災之慘痛經驗，爰在設計基準之上另加 110 公分，高

雄捷運則是在設計基準之上另加 80 公分高度，做為高程設計依據。後經交通部於 2021 年修正《捷運系統建設技術標準規範》，統一將高程設計再加高 110 公分方式處理。

(3) 臺北捷運-防洪閘門、水密門及防洪隔艙

臺北捷運各車站所屬地區因地勢特性不同，故捷運站體須採搭配防洪閘門、水密門及防水隔艙設計，做為防洪方式，相關設置方式，謹說明如下：

- 防洪閘門：設置於捷運站出入口，目前包含手動式擋板與自動擋板，做為捷運系統防洪第一關卡，如圖 2.2-4 所示。
- 水密門：設置於捷運車站之出入口和穿堂層連接處的適當地點，若洪水漫過閘門，亦可透過水密門防止洪水進入車站內，如圖 2.2-5 所示。
- 防洪隔艙(防水隔艙閘門)：設置在捷運重要車站、交會站、隧道或過河段，避免因捷運隧道經過斷層帶、過河段或出土段等可能湧水處，造成洪水侵入隧道並漫延至捷運沿線各車站，如圖 2.2-6 所示。



資料來源：[294]

圖 2.2-4 臺北捷運-防洪閘門照片



資料來源：[294]

圖 2.2-5 臺北捷運-水密門照片



資料來源：[294]

圖 2.2-6 臺北捷運-防洪隔艙照片

2. 環境設備監測

(1) 臺北捷運淡水信義線-軌道溫度計

- 臺北捷運路網大部分之高運量軌道鋪設於地下路段，較不易受到氣溫急遽變化之影響，僅淡水信義線屬於高架/平面段，較容

易受到氣候變遷之衝擊，故為避免軌道受氣溫變化影響，2000年起即於淡水信義線之鋼軌下方裝設軌道溫度計，於每天監測軌道溫度，確保行車安全^[344]，軌道溫度計如圖 2.2-7 所示。

- 北捷之鋼軌設計容許軌溫在攝氏 60°C，捷運公司進階參考亞洲地區及高鐵的軌溫標準，將軌溫監測標準訂在攝氏 50°C，目前更透過系統整合，使監控人員能遠端監控軌道溫度，若軌道溫度計監測到軌溫超過攝氏 50°C，則會自動通知監控端，整合至遠端電腦，並派遣軌道維修人員實地巡檢軌道狀況。



資料來源：[322]

圖 2.2-7 臺北捷運-軌道溫度計照片

(2) 臺北捷運-預測性軌道營運管理資訊系統

為提升維修管理與技術應用，臺北捷運公司建置預測性軌道營運管理資訊系統(Predictive Rail Operations Management Information System, Metro PROMIS)，運用 IoT 物聯網技術，建置蒐集車站、列車、道旁等 33 項重要營運設備資訊，透過雲端與數據庫整合各系統，打造大數據生態系統^[343]。相關內容如圖 2.2-8 及說明如下：



資料來源：[345]

圖 2.2-8 臺北捷運-Metro PROMIS 系統截圖

- 即時狀態監視儀表板，可協助行控中心與維修單位快速掌握數據資料庫狀態、即時監視及追蹤設備運轉警訊。
- 自 2020 年至 2022 年，系統建置已連接至資料點位數約 36 萬點、設備運轉分析模型 200 項，已解決潛在問題共計 272 件^[343]。
- 2022 年持續精進介面需求及功能，結合通訊軟體開發即時告警 Notify 功能，於設備故障前即時處理效能衰減初期異常徵狀設備，提高系統設備妥善率及營運可靠度。

(3) 新北安坑輕軌-邊坡穩定監測系統

- 安坑機廠位於安坑輕軌雙城站的山坡地帶，因此邊坡穩定性對其運營至關重要。為了防止邊坡滑動，安坑機廠於其周邊安裝特殊的監測儀器-土中傾度管^[340]。
- 土中傾度管是一種用於監測土壤變化的技術，通常被放置在土壤中的垂直鑽孔內。這些管道內部設有十字槽，可放置雙軸感應器，用來監測不同深度土層是否發生水平位移；若於管道連接處使用伸縮套筒或柔性套管，還可監測邊坡之坡面位移情況。
- 透過監控數據變化，使技術人員能夠迅速反應，採取必要的防護措施，使安坑機廠能有效維護邊坡穩定性，保障設施和人員的安全。

(4) 臺北捷運-台塑網 Smart 巡檢系統

- 臺北捷運運載量逐年增加，各車站、軌道及列車等不同控制區域的設備和資訊管理變得更加複雜，為能將繁複的巡站勤務資訊準時且準確的回報，臺北捷運公司於 2020 年引進台塑網 Smart 巡檢系統^[314]，巡檢過程如圖 2.2-9 所示。
- 該系統利用 RFID 技術，結合智慧行動裝置如手機和平板電腦，可確保巡檢人員能夠準時到位進行檢查，同時將原先的紙本記錄改為數位化，即時傳輸到系統資料庫中，除提升工作效率，亦推動臺北捷運公司數位轉型。



資料來源：[314]

圖 2.2-9 臺北捷運-Smart 巡檢系統照片

(5) 高雄捷運 - AI 智慧無人機巡檢應用

高雄捷運公司與民間公司合作，研發無人機技術以協助捷運巡檢員進行隧道與橋梁檢測。透過 AI 一鍵自動巡檢功能，無人機即可完成日常或災後的巡檢任務，提升巡檢效率，加強巡檢人員人身安全，也藉此減少原有高空作業車造成的空污排放問題，提升安全性的同時，亦可兼顧巡檢之永續性^[353]。

3. 運轉規章

(1) 依風力強度調整運轉方式

各捷運及輕軌系統均依據瞬間強風或者平均風速之強弱，採取適宜之運轉調度應變措施，相關應變措施彙整如表 2.2-2 所述。

表 2.2-2 捷運及輕軌系統-強風行車處理程序彙整表

捷運公司	門檻值		應變措施
臺北捷運	文湖線	瞬間風速達 8 級	減速行駛
		瞬間風速達 10 級或平均風速達 7 級	列車暫停行駛，並俟風力減弱再行駛至終端站疏散車內旅客
	淡水信義線、 松山新店線、 中和新蘆線及 板南線	瞬間風速達 8 級	高架平面區段之列車將採減速行駛
		瞬間風速達 10 級或平均風速達 7 級	高架及平面區段之列車暫停行駛，並俟風力減弱再行駛至終端站疏散車內旅客
新北捷運	淡海及 安坑輕軌	瞬間風速強度達 8 級	列車將降速為 30km/h
		瞬間風速達 9 級或平均風速達 6 級	列車暫停行駛
	環狀線	瞬間風速達 8 級	列車將降速為 30km/h
		瞬間風速達 10 級或平均風速達 7 級	第 1 次到站暫停 2 分鐘，若持續風力未減弱，將安排端點站清車疏散旅客並暫停營運
桃園捷運	平均風速達 8 級		<ul style="list-style-type: none"> ● 列車降速營運 ● 直達車變更為每站停靠，抵達終點後不再載客 ● 普通車仍維持 15 分鐘班距 ● 暫停收送預辦登機行李
	瞬間風速達 11 級或平均風速達 10 級		列車暫停行駛
臺中捷運	平均風速達 7 級		列車將降速為 40km/h
	瞬間風速達 10 級或平均風速達 8 級		列車暫停行駛
高雄捷運	平均風速達 8 級		高架段列車減速行駛，地下段列車照常營運
	平均風速達 10 級		高架段列車暫停行駛，地下段列車照常營運

資料來源：[293, 341, 342, 346, 355]與本計畫整理

(2) 高雄輕軌-依營運路段積水情形調整運轉方式

高雄輕軌平面路段若行經低窪地區有積水情形，會依積水高度不同，採取適宜之運轉調度應變措施^[291]。

- 當積水高度高過軌面 2.5 公分時，列車通過該區段時，速限 30km/h。
- 當積水高度高過軌面 3.5 公分時，列車通過該區段時，速限 15km/h。
- 當積水高度超過軌面 7.5 公分時，該區段停駛。

4. 氣候變遷調適領導權責單位與上位政策

本計畫透過專家訪談，各捷運公司請益有關氣候變遷調適的領導權責單位與上位政策。茲將重點摘錄如表 2.2-3 所述。

表 2.2-3 捷運輕軌系統-調適主責單位與上位政策彙整表

捷運公司	氣候變遷調適領導權責單位與上位政策
臺北捷運	2023 年董事會通過成立永續發展委員會，推動 ESG 相關作為，並參考 TCFD 揭露架構，辨識極端氣候事件及其潛在財務影響 ^[348] ，而防災部分係由機電和工安部門主導
新北捷運	ESG 目前仍在導入之中，針對新北市政府的市政白皮書在氣候變遷部分，係由工安處負責對接與指導
桃園捷運	近年導入 ESG 概念，由董事會推動創立永續發展委員會，以企劃處為統籌單位，防災部分係由工安處負責
臺中捷運	目前主要是針對短期的危害制定應變程序，透過安全管理系統因應氣候相關危害
高雄捷運	近年參考英國 BSI 在企業韌性及氣候調適制定的標準，由企劃處制定相關計畫並推動 ESG 概念，此外，工安處設有風險管理委員會，以因應氣候相關危害

資料來源：本計畫整理

2.2.4 小結

綜觀我國鐵道系統針對氣候危害之作為，多著重在洪災之應對措施，如環境監控，做為列車慢行或停駛依據，確保營運安全。但就目前所得到的資訊而言，我國鐵道系統現況作為偏向防減災風險評估，從 2.1 節氣候變遷調

適相關定義得知，氣候變遷風險與傳統災害風險最大差異為是否有使用科學推估資料進行評估，科學推估資料係指應用全球環流模式(Global Circulation Model，以下簡稱 GCM)或地球系統模式(Earth System Model，以下簡稱 ESM)模擬未來不同 RCP、SSP 情境設定，所推估之未來氣候資料。

由於氣候資料產置並非鐵道系統相關機關(構)之專業，再加上各鐵道系統所面臨氣候風險相似，各機關(構)對資料的需求可能有高度重疊。經與鐵道系統營運機構、規劃建設單位及監理機關訪談，各機關(構)一致反映調適所需之相關圖資及尺度資料，期待能由政府跨部門合作進行基礎科學研究，再提供給各機關(構)應用，藉此確保氣候危害資料一致及其分析結果可互相比較。

2.3 國外鐵道調適發展方向及趨勢

隨著氣候變遷加劇，標竿國家紛紛頒定氣候變遷相關法規，要求各領域提出因應氣候變遷下之應對措施，其中以英國為領頭羊，早於 2008 年便率先頒布《氣候變遷法》，做為英國國內執行氣候變遷調適之基礎。本節茲綜整國外鐵道系統標竿案例之調適發展方向及趨勢，提供我國鐵道系統權管機關(構)參採。其內容分述如下：

2.3.1 英國

相較於其他國家在氣候變遷法制發展及相關政策推動上，英國是起步最早且處於世界領先地位的國家，其相關調適政策及研究摘錄如下：

一、國家相關調適政策

1. 法規頒訂

《2008 年氣候變遷法案(Climate Change Act, 2008)》^[115]：該法於 2008 年頒訂，成為全球第一個以立法明揭減碳目標(Net Zero 2050)的國家，除了淨零碳排等相關減碳策略訂定之外，該法第四章-氣候變遷的影響與調適(Impact of and Adaptation to Climate Change)中，訂定氣候變遷調適相關的規範，同時要求政府需定期進行氣候變遷風險評估並制定國家調適計畫。

該法為英國的氣候調適制定一個具有強制力之法律框架，並以此為基礎發展相關延伸法規，提供政府部門與維生基礎設施等組織一個明確的調適指引。

2. 調適策略計畫

因應氣候變遷法之要求，英國政府擬定評估氣候變遷風險以及準備相應調適策略等法規與計畫，相關流程如圖 2.3-1 所示，主要採取之行動如下：

- (1) 氣候變遷風險評估(Climate Change Risk Assessment，以下簡稱 CCRA)：英國政府每五年會滾動評估氣候變遷對英國各個領域造成影響的科學評估和風險評估，做為國家調適計畫(NAP)擬定調適作為之基礎，其中，評估的領域包含鐵道等交通基礎設施^[28]。
- (2) 國家調適計畫(National Adaptation Programme，以下簡稱 NAP)：政府每五年會依據 CCRA 識別之風險採取相對應之行動，如：評估風險、確定優先事項、制定政策和措施、提供資金支持等^[28]。2024 年 NAP 重點項目包含保護自然環境、支持企業氣候變遷調適、基礎設施(如鐵道)氣候變遷調適、保護建築與周遭環境、保護公共衛生、減緩全球氣候變遷對英國之影響^[29]。
- (3) 調適報告能力書(Adaptation Reporting Power，以下簡稱 ARP)：氣候變遷法賦予政府要求「基礎設施提供者」與「公共性質」的機構(如：交通、能源、水利與公共衛生等產業)，編制其應對氣候變遷調適報告之權力，以評估其在應對氣候變遷方面的進展和成效^[28]。調適報告應包含企業評估未來氣候變遷將會對組織造成之衝擊，以及因應此衝擊所提案之調適方案。



資料來源：[28]與本計畫整理

圖 2.3-1 英國-調適行動擬定流程圖

二、國家鐵道調適研究

由英國 RSSB 出資，包含有營運機構、政府部門及氣象環境等單位組成科技策略領導團隊(Technology Strategy Leadership Group，以下簡稱 TSLG)，執行 TRaCCA^[206]鐵道氣候變遷調適研究計畫，重點摘錄如下：

1. 在進行鐵路投資計畫的經濟評估時，有必要將氣候變遷可能涉及之社會經濟效益納入考量。
2. 透過類比方法進行比較，發現 21 世紀末，英國的氣候預計將與歐洲西北部和西南部的某些地區的當前氣候相似；而歐洲西北部有部分地區的鐵道規模與英國的鐵道規模相當。
3. 英國鐵路在管理由氣候變遷引起的風險和了解我們資產的脆弱性方面，超前於歐洲和其他國家的鐵路。
4. TRaCCA 提出評估氣候變遷準備完整度之原型指標，可用於評估鐵路在更廣泛的運輸系統中的韌性與脆弱度。
5. 基礎設施系統相互依賴，需要跨機構合作與協調，進行氣候變遷調適。

2.3.2 美國

一、國家相關調適政策

1. 法規頒訂

美國於 2021 年 1 月頒布第 14008 號行政命令(Executive Order 14008)《應對美國境內外氣候危機(Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad)》^[49]，重點摘錄如下：

- (1) 旨在加強國內外應對氣候變遷的措施，提供全面的政策框架，將氣候變遷調適納入國家經濟、基礎建設、安全、外交及社會政策的核心。
- (2) 成立國家氣候工作小組，以及氣候政策中心辦公室，協調及推動美國氣候變遷調適相關政策。
- (3) 聯邦政府各部門每年須向國家氣候工作小組提交相關工作進度報告。

2. 調適策略計畫

- (1) 因應氣候變遷對美國交通系統影響的戰略計畫、第 14008 號行政命令及環境品質委員會(Council on Environmental Quality, 簡稱 CEQ)的要求，美國運輸部(DOT)於 2021 年制定氣候變遷調適計畫(Climate Adaptation Plan)^[53]，提出 5 個優先策略，包含：
 - 將韌性與調適作為納入運輸部經費補助計畫的評分項目。
 - 評估與修改現有的法規、指引，提升補助計畫在規劃設計及施工興建階段時之韌性。
 - 通過風險管理框架，優先實施關鍵設施的調適工作。
 - 指引並補助營運者實施氣候變遷調適策略。
 - 透過教育訓練加強 DOT 員工對氣候變遷及韌性的知識。
- (2) 基於 2021 年調適計畫的經驗和案例，DOT 於 2024 年發布 2024—2027 年氣候變遷調適計畫^[50]，針對氣候變遷所造成的風險與危害類別進行彙整，並提出政策、規劃與預算編列應納入氣候風險之建議，同時精進氣候變遷的調適策略及技術創新。
- (3) 聯邦運輸總署(FTA)在 2014 年發布《運輸與氣候變遷調適：受 FTA 資助的先導計畫之總結報告(Transit and Climate Change Adaptation: Synthesis of FTA - Funded Pilot Projects)》^[58]中，總合 FTA 所資助的 7 項先導計畫之成果，各計畫透過辨識目前和未來的氣候危害，評估運輸系統脆弱度，並根據地理位置和系統特點制定調適策略^[51,54,55,56,57,59]。

二、聯邦鐵路總署調適計畫

1. 聯邦鐵路總署(Federal Railroad Administration, 以下簡稱 FRA)於 2023 年提出 FRA 氣候與永續發展計畫(FRA's Climate and Sustainability Program)^[47]，其上位計畫為美國運輸部之 2022-2026 年戰略計畫(The Fiscal Year 2022-2026 Strategic Plan)，旨在減少鐵道系統碳排放與能源消耗、增強鐵道路網韌性與發展永續軌道建設，其主要工作項目包含擴展服務、資金支持、研究創新、數據整理、跨部門合作、內部協調及法規審查等。

2. FRA 於 2024 年 7 月發布鐵路韌性計畫(Climate and Sustainability : Rail Resiliency)^[48]，確保美國鐵路系統能夠因應氣候變遷的挑戰，並強化基礎設施的可靠度及安全性。

2.3.3 德國

一、國家相關調適政策

德國政府於調適相關政策之重要里程碑如下：

1. 氣候變遷調適策略

(1) 德國於 2008 年 12 月通過了「氣候變遷調適策略」(Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel，以下簡稱 DAS)，DAS 為國家級策略，旨在確定和應對德國面臨的氣候變遷影響，為各級政府制定具體行動計畫提供指導，以提高社會的調適能力。

(2) 該策略包括總體目標、原則和優先領域，領域涵蓋農業、健康、交通、能源、水資源管理等。但此策略並無強制法律約束力，僅鼓勵政府機關與業者自願性的進行氣候調適準備。

(3) 2015 年德國政府發布了 DAS 實施進度報告，許多聯邦州也跟進推出相關調適策略。

2. 調適行動計畫：2011 年在前述「氣候變遷調適策略」框架下，推出「調適行動計畫(Aktionsplan Anpassung，以下簡稱 APA)」，詳細列出各部門和領域具體的調適措施和行動方案，並確定實施時間和承辦部門。

3. 氣候變遷風險和影響分析報告：德國聯邦環境署(Umweltbundesamt，以下簡稱 UBA)在 2021 年發布「氣候變遷風險和影響分析報告」，說明氣候變遷已影響到社會各個層面，該報告每六年更新，以做為國家調適政策與產業氣候調適擬定參考。

4. 聯邦氣候調適法：德國《氣候調適法案》為德國所有行政層級的預防性氣候調適創建了第一個戰略框架，城市和市政當局負有責任要採取具體預防措施來應對氣候危機。該法已在 2023 年 12 月 22 日於聯邦公報公布，並於 2024 年 7 月 1 日生效^[15]。

- (1) 該法律要求各州確保在其行政層面制定系統性和全面性的氣候調適策略，並為各市和地區制定氣候調適概念。
- (2) 德國政府承諾在該法律下，未來將推行預防性氣候調適策略，並制定可衡量的目標^[21]。

二、德鐵相關調適政策

1. 德國政府為達成 2050 年淨零碳排的目標，擬定了 2030 與 2050 之國家行動計畫，階段性的訂定國家各層面減碳目標，其中交通產業之鐵路系統因電氣化與能源消耗效率高之表現，在交通部門降低碳排中扮演極重要的角色。
2. 德國鐵路股份公司(Deutsche Bahn，以下簡稱 DB)回應政府組織於交通與氣候政策目標，擬定有「Strong Rail」之策略，其框架圍繞在「更可靠-基礎設施與車輛」、「更強健-組織架構與程序」、「更現代-科技與智慧應用」三大主軸共 15 個行動方案，同時亦結合環境永續發展邁進，以滿足交通可持續性之目標，如圖 2.3-2 所示。



資料來源：[37]

圖 2.3-2 德鐵 DB-Strong Rail 策略框架示意圖

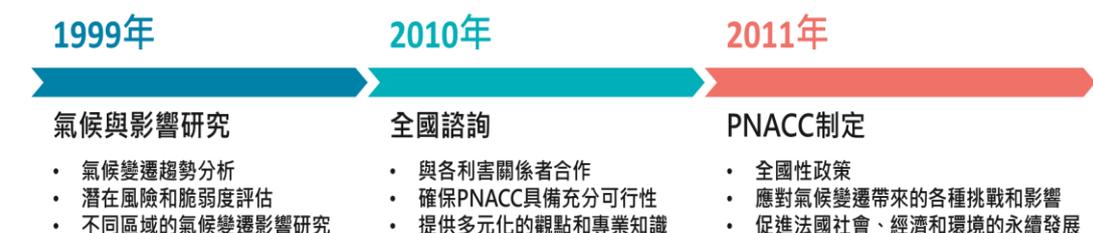
2.3.4 法國

一、國家相關調適政策

法國政府於 2011 年通過了第一個為期五年的「國家氣候變遷調適計畫 PNACC」，在該計畫制定前，法國政府開展了大量的研究和資料收集工作，

以了解氣候變遷對法國各個領域的可能影響，這些研究包括對氣候變遷趨勢的分析、對潛在風險和脆弱性的評估，以及對不同區域的氣候變遷影響的研究，如圖 2.3-3 所示。

法國政府與各利害關係者積極合作，包括行業代表、學術界專家、地方政府、非政府組織等，確保 PNACC 的代表性和可行性，並提供了多元化的觀點和專業知識^[128]。



資料來源：[128]與本計畫整理

圖 2.3-3 法國-PNACC 發展過程示意圖

PNACC 於基礎設施和運輸系統方面已確定一系列行動，使法國評估氣候變遷對基礎設施和交通系統的影響，並透過改善現有和未來基礎設施的抵抗能力和韌性，以建立安全可靠的未來交通網絡^[18]，實現氣候變遷調適目標，茲將行動彙整如表 2.3-1 所述。

表 2.3-1 PNACC-基礎設施和運輸系統行動彙整表

項目	行動說明
1	檢討並調整法國境內和海外領土運輸網絡的建設、維護和運營的技術標準，以確保其能夠應對氣候變遷帶來的挑戰。
2	研究氣候變遷對運輸需求的影響，並評估其對重新塑造運輸服務的後果，以便針對性地調整運輸策略。
3	制定一套統一的方法論，用於評估陸地、海上和空中運輸系統以及相關基礎設施的脆弱性，以提前應對可能出現的風險。
4	為法國境內和海外領土的陸地、海上和空中運輸網絡建立一份脆弱性報告，並制定適當和分階段的應對策略，以應對當地和全球氣候變遷挑戰，確保交通系統的永續運行。

資料來源：[18]與本計畫整理

二、法鐵相關調適政策

法國國家鐵路公司 SNCF 於 2011 年 10 月至 2012 年 5 月執行「D-RAIL」氣候變遷調適專案^[34]，該專案的動機來自於氣候科學結論、鐵路領域關注趨勢、國家政策與制度激勵、過去天氣事件、外部關注等多個面向，如表 2.3-2 所述。

表 2.3-2 法鐵-D-Rail 專案發展動機彙整表

面向	說明
氣候科學報告結論	2007 年第四次 IPCC 評估報告(AR4)以及其他科學研究的結果揭示了氣候變遷對環境的影響，例如衝擊法國的熱浪，進而影響了法鐵應對氣候之決策
鐵路領域關注趨勢	國際鐵路聯盟 UIC 於 2011 年啟動了「氣候變遷鐵路基礎設施調適(Adaptation Railway Infrastructure to Climate Change，以下簡稱 ARISCC ^[191])」專案，同時其他國家的鐵路公司如英國 NR 也進行了類似的計畫
國家政策與制度激勵	歐洲氣候調適策略及法國的首個 PNACC 亦提供制度上的支持和激勵
過去天氣事件	法國發生暴風雨、洪水以及歐洲熱浪等異常天氣，顯示氣候變遷已對社會和經濟造成嚴重影響，需要採取行動應對
外部關切回應	法鐵需回應外部社會和政府的關切，展示對氣候變遷挑戰的認識和解決方案，並展示能夠從過去經驗中學習並做出改變的能力

資料來源：[34]與本計畫整理

2.3.5 瑞典

瑞典政府致力於應對氣候變遷挑戰，藉由法律、條例和政策制定全面的調適方案，於各級政府與機構間建立協調合作之框架，以因應氣候變遷所帶來的衝擊^[202]。茲將重點摘錄如下：

一、國家相關調適政策

1. 法規頒訂

- (1) 《規劃和建築法》(The Swedish Planning and Building Act, PBL 2010:900)：該法於 2010 年頒訂，是規範瑞典氣候變遷調適工作的主要法規，要求地方政府考慮氣候風險並採取具體調適措施。
- (2) 《機構氣候變遷調適條例》(The Ordinance 2018:1428)：該條例於 2018 年頒布，規範了 32 個機構和 21 個縣行政部門的氣候變遷調適工作，

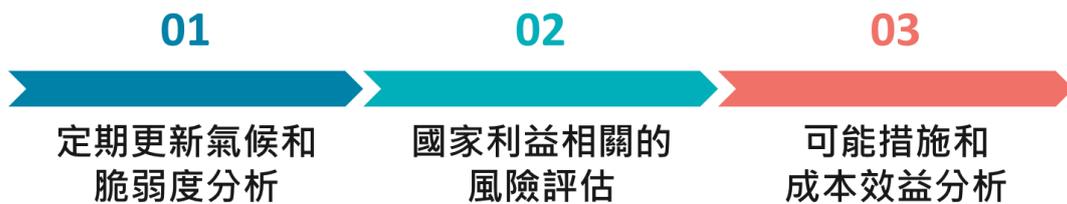
條例中要求所有相關機構每年向瑞典氣象和水文研究所(Swedish Meteorological and Hydrological Institute，以下簡稱 SMHI)報告其調適工作情形，SMHI 則每年分析這些報告並為政府彙整綜合報告。

2. 瑞典國家氣候調適專家委員會

- (1) 瑞典政府成立國家氣候調適專家委員會，隸屬於瑞典氣象和水文研究所 SMHI，負責向政府提供諮詢和建議。
- (2) 委員會每五年提交一次氣候變遷調適報告，內容涵蓋國家氣候變遷調適工作的方向建議，並基於風險及成本效益評估的調適措施優先順序、氣候變遷對社會影響的總結分析、及後續行動和建議。

3. 其他政府機構

- (1) 《機構氣候變遷調適條例》(2018:1428)列出了氣候變遷調適工作的機構在各自領域提供支援和協助，例如農業和林業由農業委員會和林業局負責支援氣候變遷調適。
- (2) 瑞典政府透過國家資金投資地方政府或相關產業進行調適行動，來分擔調適行動之資金壓力，同時為有效評估各項投資專案的適切與優先性，亦制定了投資專案之評估決策架構，對各^[109]，如圖 2.3-4 所示。



資料來源：[109]與本計畫整理

圖 2.3-4 瑞典政府-調適專案評估決策示意圖

二、瑞典鐵路調適現況

截至 2023 年，瑞典鐵道調適策略正處於發展階段，其焦點主要放在辨識氣候風險及降低風險，以確定交通基礎設施的調適需求並進行優先排序。同時在設計和興建交通基礎設施時，亦會將未來氣候變遷的趨勢納入考量，以確保交通基礎設施具有永續性，並能夠應對極端天氣^[109]。

2.3.6 紐西蘭

紐西蘭於 2002 年發布《氣候變遷因應法(Climate Change Response Act 2002)》，其關注溫室氣體排放減緩相關議題，並未擬定具體的調適目標與策略。2019 年紐西蘭政府修改該法，明確規範減緩與調適之目標與具體要求。此外，該法要求政府部門須定期發布調適策略報告^[123]，相關報告簡介彙整如表 2.3-3 所示，而其發展時間軸則如圖 2.3-5 所示。

表 2.3-3 紐西蘭-氣候變遷因應法要求發布之報告彙整表

項目名稱	簡介	更新頻率
國家氣候變遷風險評估報告	氣候變遷委員會針對國家各面向進行風險評估，透過氣候科學預測和質性分析方法，辨識國家十大關鍵風險與各項風險的優先順序	6 年 1 次
國家調適計畫	根據氣候變遷風險評估報告所辨識之風險擬定國家調適計畫，該計畫草案將依據與利害關係者訪談結果進行修訂並發布	6 年 1 次
進度報告	進度報告為氣候變遷委員會檢視調適計畫之執行成效，規定行政機關必須在六個月內回覆委員會的報告	2 年 1 次

資料來源：[123, 125]與本計畫整理



資料來源：[123]與本計畫整理

圖 2.3-5 紐西蘭-調適行動發展時間軸示意圖

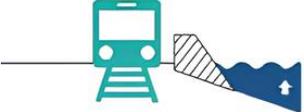
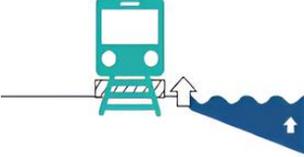
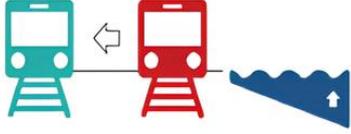
其中，國家氣候變遷風險評估報告為國家調適報告的發展基礎，調適報告依據各領域風險的排序，訂定四大調適優先事項和四個調適選項，如表 2.3-4 及表 2.3-5 所示，各基礎設施調適策略與措施均基於此進行發展^[124]。

表 2.3-4 紐西蘭-國家調適計畫四大優先事項彙整表

優先事項	說明
1	發展更好的風險決策資訊
2	確保專案和基礎設施投資決策在適合發展氣候韌性的地點推動
3	適應選項中涵蓋遷移與疏散策略
4	將氣候韌性概念嵌入基礎設施政策

資料來源：[124]與本計畫整理

表 2.3-5 紐西蘭-國家調適計畫四個調適選項彙整表

調適選項	示意圖	說明
避免 (Avoid)		防止在高風險區域進行新開發，並劃定未來禁建區
保護 (Protect)		透過工程改善，保護基礎設施免受自然災害影響。考量極端氣候發展趨勢，該選項不具經濟性且長期效果有限
容納 (Accommodate)		改造和調整資產，以增強其在多變環境下的韌性，確保長期穩定
遷移/疏散 (Retreat)		計畫性地撤離或搬遷高風險地區，減少對結構保護的依賴

資料來源：[124]與本計畫整理

2.3.7 澳洲

1. 法規頒訂

澳洲於 2022 年制定《氣候變遷法》(Climate Change Bill 2022)^[178]，該法規定了澳洲溫室氣體減量目標，並要求澳洲氣候變遷、能源、環境暨水資源部(Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water，以下簡稱 DCCEEW)部長每年提交氣候變遷聲明，其內容須包含溫室氣體減量

目標進展、國際應對氣候變遷發展趨勢、氣候變遷政策、聯邦政策對實現溫室氣體減量目標的效益、溫室氣體減量政策對偏遠和農村地區的影響，以及氣候變遷對澳洲可能造成之風險。

2. 調適策略計畫

(1) 2021-2025 國家氣候韌性與調適策略(National Climate Resilience and Adaptation Strategy 2021 – 2025)

2021 年由澳洲農業、水資源暨環境部(Department of Agriculture, Water and the Environment，簡稱 DAWE)¹公布，說明澳洲政府將採取哪些措施支持各級政府、企業及社區，以便更好地預測、管理及調適氣候變遷之衝擊。

該策略訂定氣候調適與提升韌性目標，並辨別包含氣溫上升、降雨模式改變及海平面上升等氣候危害因子，如圖 2.3-6 所示。該策略指出氣候變遷調適面臨跨領域的挑戰，需要在「自然」、「經濟」、「環境」與「建設」中進行協調，全面且系統性地辨識各領域的氣候風險並發展對應的調適策略外，還需考量領域間相互影響的問題^[30]，如圖 2.3-7 所示。



資料來源：[30]與本計畫整理

圖 2.3-6 澳洲-國家氣候韌性與調適策略氣候危害示意圖

¹ 2022 年農業和水資源部門變為農業、漁業暨林業部 (Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, DAFF)；環境部門則變為氣候變遷、能源、環境暨水資源部 (Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, DCCEEW)。



資料來源：[30]

圖 2.3-7 澳洲-國家氣候韌性與調適策略領域分群示意圖

(2) 國家氣候風險評估與國家調適計畫(National Climate Risk Assessment and National Adaptation Plan)

在 Powering Australia 計畫下，2023 年至 2024 年間資助 2,800 萬澳幣於制定國家調適計畫，以確立國家重大氣候風險並確定優先順序^[33]，包含「環境」、「農業」、「生物多樣性」、「健康」、「社會與文化生活方式」、「基礎設施」、「原住民價值及知識」及「經濟」領域^[31]，其氣候風險採用 IPCC AR6 定義，為「危害」、「暴露度」、「脆弱度」及「應對措施」之函數，在情境設定部分，共設定四個時間段，並以 GWL 情境進行評估^[32]，如表 2.3-6 所示。

表 2.3-6 澳洲-國家氣候風險評估情境彙整表

時期	時間點	時間區間	GWL 情境
基期	-	1850-1900	
現況	2020	2011-2030	
中期	2050	2041-2060	GWL1.5 (低排放) GWL2 (高排放)
長期	2090	2081-2100	GWL2 (低排放) GWL3 (高排放)

資料來源：[32]與本計畫整理

2.3.8 日本

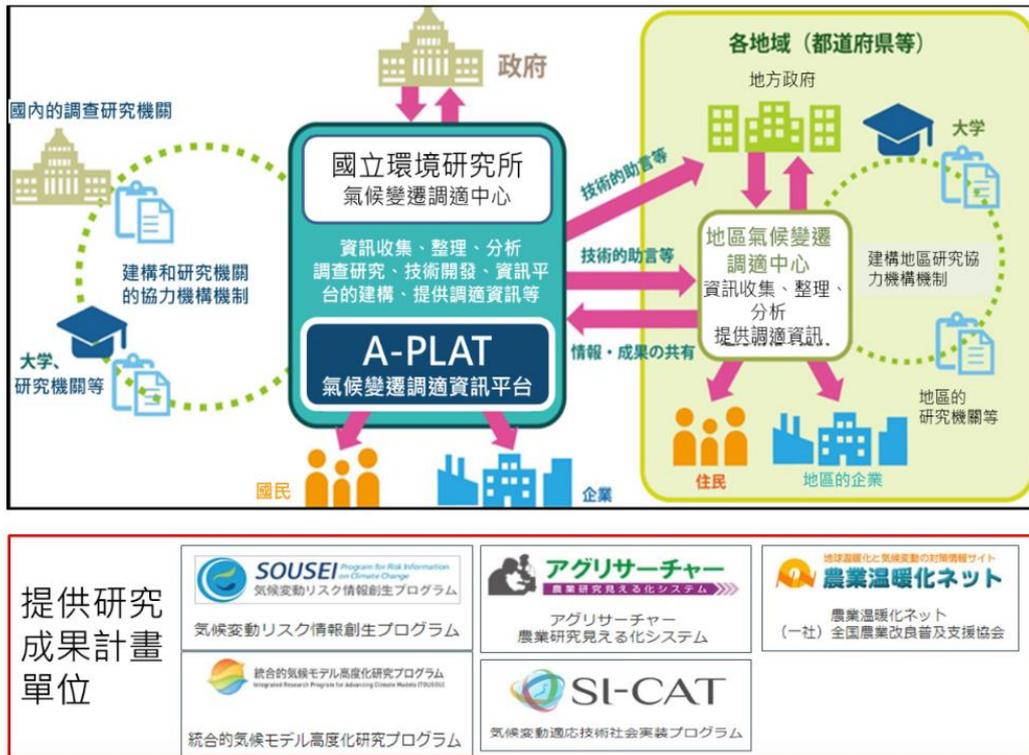
1. 法規頒訂

日本政府於 2018 年 6 月頒布《氣候變遷調適法》，並於同年 12 月 1 日生效^[248]。相關條文內容謹說明如下：

- (1) 該法第 7 條至第 10 條規定日本環境部每 5 年須參酌最新的氣候變遷科學研究結果，發布至少一次的全國性氣候變遷影響評估報告。而政府單位為了全面、有系統地推動氣候變遷調適政策，應制定氣候變遷調適計畫，並依影響評估報告調整或變更調適計畫內容。
- (2) 該法第 11 條至第 14 條規範環境部的研究法人「國立環境研究所 (National Institute for Environmental Studies，以下簡稱 NIES)」、地方政府單位及氣候變遷調適跨域協議委員會之調適責任，包含科研技術的提供、氣候變遷衝擊評估與協調等工作，說明如下：
 - 全國各都、道、府、縣與市政府等機關(構)，應以獨立或協作方式建立「地方(地區)氣候變遷調適中心」，提供該地區氣候變遷影響相關之科學資訊與技術建議。
 - 地方政府應依據中央所訂定之氣候變遷調適策略，並考量當地的自然環境、經濟與社會狀況，編寫適用於該地區的氣候變遷調適計畫。
 - 國立環境研究所應負責蒐集、整理、分析有關氣候變遷影響與氣候變遷調適之相關資訊，將其公開予地方政府、地方氣候變

遷調適中心、民眾、企業與研究機構，並對地方的氣候變遷研究以及調適計畫內容提供協助與建議，如圖 2.3-8 所示。

- 由地方政府、地方氣候變遷調適中心、企業及民間團體組成「氣候變遷調適跨域協議委員會」，以共同協商方式推動區域之調適相關工作。



資料來源：[237]與本計畫整理

圖 2.3-8 日本-國立環境研究所推動氣候變遷調適示意圖

- (3) 該法亦界定國家調適架構中，各單位權責及其所擔任之角色，說明如表 2.3-7 所示。

表 2.3-7 日本-調適架構中各單位權責及其角色彙整表

單位	權責及其所擔任之角色
中央政府	<ul style="list-style-type: none"> 每 5 年必須聽取中央環境審議會的建議，進行氣候變遷衝擊評估。 在氣候變遷調適計畫中推動七大領域的調適策略，將氣候變遷、衝擊的科學研究與相關調適策略進行結合，並有效應用。
地方政府	<ul style="list-style-type: none"> 依據當地自然與社會、經濟條件，擬訂並推動地方氣候變遷調適計畫、促進該地利害關係人（企業、國民）於氣候變遷下的調適與韌性。
國立環境研究所（含氣候變遷調適中心）	<ul style="list-style-type: none"> 彙整中央政府與氣候變遷相關的衝擊與調適資訊，提供予地方政府及地方調適中心，並提供技術協助。 將資訊公開於氣候變遷調適資訊平台（Climate Change Adaptation Information Platform，以下簡稱 A-PLAT）以促進國際合作，推動企業採取調適措施並推動調適相關事業。
地方氣候變遷調適中心	<ul style="list-style-type: none"> 負責與當地之研究機構、大學等重要科學研究單位合作，蒐集、整理與分析氣候變遷影響資料，協助地方政府制定氣候變遷調適計畫，並須將所蒐集與分析之地方氣候相關資料，與國立環境研究所進行交流共享。 地方氣候變遷調適中心可由當地之大學、地方環境研究所獨立或合作成立，且須於每期之調適計畫中明訂其職責。
氣候變遷調適跨域協議委員會	<ul style="list-style-type: none"> 由地方政府、地方氣候變遷調適中心、企業及民間團體組成，旨在共同協商和推動區域的調適工作。
企業	<ul style="list-style-type: none"> 根據組織本身之性質與特點推動企業氣候變遷調適，並利用氣候變遷帶來的機會以發展新的服務與產業。
國民	<ul style="list-style-type: none"> 理解氣候變遷與調適概念，配合中央與地方之調適行動計畫、協助調適策略的推動。

資料來源：[248]與本計畫整理

2. 調適策略計畫

(1) 2021 年日本環境部提出日本氣候變遷調適計畫(Japan Climate Change Adaptation Plan)^[134]，該計畫將調適分為七大領域並制定七大基本策略做為最高調適指導方針，而鐵道系統歸屬於「國民生活與都市生活」領域。

(2) 為在各領域與機構間推動七大策略，日本環境部提供可用於跨部門、且考慮地區特性之五大通用面向之調適基礎方法與實施績效指標，彙整如表 2.3-8 所述。

表 2.3-8 日本-調適基本策略及方法彙整表

策略及方法	說明
基本策略	<ol style="list-style-type: none"> 1. 將氣候變遷調適的概念納入所有相關的策略與措施中。 2. 加強利用氣候變遷之科學研究結果，以促進氣候變遷調適。 3. 建立氣候變遷資訊蒐集、組織、分析與提供之系統，健全日本研究機構的知識並建置公開資訊平台。 4. 推動因地制宜的地區性氣候變遷調適措施。 5. 深化企業與人民對氣候變遷調適的了解，以使氣候變遷調適更易推動。 6. 推動氣候變遷調適相關國際合作，提供技術增強發展中國家的調適能力。 7. 確保相關機構於氣候變遷調適時可保持密切合作。
調適基礎方法	<ol style="list-style-type: none"> 1. 加強利用氣候變遷科學研究結果之基礎方法。 2. 建構蒐集、整理、分析及提供氣候變遷資訊之系統的基礎方法。 3. 促進地方政府推動氣候變遷調適的基礎方法。 4. 促進企業實施氣候變遷調適措施的基礎方法。 5. 發展國際氣候變遷調適合作的基礎方法。

資料來源：[134]及本計畫整理

(3) 根據日本《氣候變遷調適法》第 4 條，地方政府應依據當地自然環境、經濟及社會情況推動調適規劃，並促進相關產業發展。第 12、13 條進一步規定各地方應獨立或合作推動「地方氣候變遷調適計畫」，並設立「地方氣候變遷調適中心」以提供氣候衝擊資訊及技術支援。為協助制定調適計畫，日本環境部編纂《日本地方氣候變遷調適計畫制定手冊^[247]》，制定了詳細的調適框架及步驟，包含事前準備、歷

史及未來氣候資料整理、氣候變遷衝擊評估、綜整既有應對措施及調適策略、擬定地方調適計畫、執行追蹤。

2.3.9 韓國

1. 法規頒定

- (1) 受到《巴黎協定》影響，韓國政府於 2010 年制定《低碳綠色成長基本法》^[131]，以推動國家低碳經濟的轉型及綠色成長，應對氣候變遷及環境的挑戰。
- (2) 韓國政府於 2021 年制定《碳中和與綠色成長基本法^[132]》，取代原先《低碳綠色成長基本法》，該法導入「氣候變遷影響評估」，旨在評估氣候變遷對國家重大計畫或大型開發專案之影響，並引導納入氣候變遷調適及減少溫室氣體排放。

2. 調適策略計畫

韓國乃為《聯合國氣候變遷框架公約》(United Nations Framework Convention on Climate Change，以下簡稱 UNFCCC)和《巴黎協定》的締約國，於 2010 年發布「國家氣候變遷調適計畫」(National Climate Change Adaptation Plan，以下簡稱 NCCAP)，旨在提升全國的調適能力，以幫助各行業、地方政府及社會各界有效應對氣候變遷的挑戰。

根據《低碳綠色成長基本法》第 48 條之規定^[131]，政府每 5 年應通盤檢討並調整調適計畫內容，自 2010 年迄今已發布三版調適計畫，相關內容摘錄如表 2.3-9 所述。其中，韓國環境部於擬定第三版計畫過程中，於 2019 年對國內氣候風險進行全面評估，並編製氣候風險清單，邀集專家學者及社會各界參與，確保納入不同利害關係者的意見，以更全面評估氣候變遷對社會、經濟和環境的影響^[113]。

表 2.3-9 韓國-國家氣候變遷調適計畫彙整表

計畫名稱	第一版國家氣候變遷調適計畫	第二版國家氣候變遷調適計畫	第三版國家氣候變遷調適計畫
發布時間	2010 年	2015 年	2020 年
計畫期程	2011–2015 年	2016–2020 年	2021–2025 年
重點摘要	<ul style="list-style-type: none"> • 著重減少公共健康、自然資源和生態系統領域的脆弱度。 • 訂定氣候變遷科學研究、風險評估、跨域合作等基本架構。 • 建立調適措施的評估與監測系統。 	<ul style="list-style-type: none"> • 反映內外部政策環境變化，加入第一版計畫未考慮的風險管理措施。 • 根據氣候變遷風險評估制定基礎設施的調適優先順序和策略。 • 探索氣候變遷減緩和調適的相容性。 • 制定短、中、長期調適願景的戰略框架。 • 擴大對氣候變遷調適技術的投資和國際合作。 	<ul style="list-style-type: none"> • 強調「科學依據」和「多元族群參與」。 • 建立系統性的政策與制度框架，並符合國際氣候變遷政策。 • 建立氣候脆弱度評估機制。 • 強化監測及預測，並將氣候變遷調適納入各部門的日常業務。 • 推動智慧水資源管理系統、永續農業，並制定公共健康調適計畫。

資料來源：[67, 111, 113, 114]與本計畫整理

2.3.10 香港

為減少碳排放、提升氣候韌性及推動社會和經濟的低碳轉型，香港政府分別於 2017 年及 2021 年制定公布《氣候行動藍圖 2030+》和《氣候行動藍圖 2050》。以下謹就重點摘錄如下：

1. 氣候行動藍圖 2030+[303]

- (1) 《氣候行動藍圖 2030+》於 2017 年公佈，該藍圖設定了 2030 年前的碳減排目標，相對 2005 年減少 65%至 70%。在調適方面，強調提升城市基礎設施的氣候韌性，特別是在防洪、供水、公共衛生和應急應

變等領域，其具體措施包括：加強防洪、防潮設施、提升供水系統應對極端氣候事件的韌性，以及改進建築設計和城市規劃。

- (2) 在鐵路方面，透過加強鐵路基礎建設的耐用性和調適性，以提升鐵路系統在極端天氣下的應對能力，其具體措施如改善鐵路網絡的排水設計和結構強度等。

2. 氣候行動藍圖 2050^[304]

- (1) 《氣候行動藍圖 2050》於 2021 年公布，其係基於《氣候行動藍圖 2030+》上提出，以 2050 年實現碳中和為目標，著重減少溫室氣體排放、促進能源轉型及提升整體社會的氣候調適能力。在調適部分，持續提出韌性城市的建設，包括更新建築物、道路和公共設施的設計標準。
- (2) 在鐵路方面，進一步強調鐵路系統的韌性提升，確保在極端氣候事件下仍可保持穩定和安全運營。此外，《氣候行動藍圖 2050》相較於《氣候行動藍圖 2030+》，導入更先進的技術應用，如透過智慧監測系統即時檢測和應對氣候帶來的潛在風險，以及推動鐵路運營與維護之低碳轉型。

2.3.11 新加坡

新加坡在 2016 年公布《氣候行動計畫：立即行動，創造永續未來》(Climate Action Plan : Take Action Today, for a Sustainable Future)，包含針對減緩的《立即行動，打造碳節能新加坡》(Take Action Today, for a Carbon-Efficient Singapore)，以及針對調適的《一個具有氣候韌性適的新加坡，創造永續未來》(A Climate-Resilient Singapore, for a Sustainable Future)^[140]。

1. 在調適部分，新加坡面對海平面上升、強降雨和高溫等氣候危害衝擊，其調適措施包含海岸防護、水資源管理及提升基礎設施韌性等^[139]，重點摘錄如下。
 - (1) 海岸防護：隨著海平面上升，新加坡政府開始建立更高、更強的海堤和水閘系統，防止洪水淹沒低窪地區，同時研究和實施自然為本的

解決方案(Nature-based Solutions, NbS)，如恢復紅樹林，以減少海岸侵蝕和增強海岸保護。

(2) 水資源管理：由於氣候變遷可能導致更頻繁以及更為嚴重的乾旱與洪水，新加坡政府透過增加水庫容量、推動節水措施、發展再生水以及海水淡化等技術的應用，藉以確保在極端氣候下，水資源得以供應穩定。

(3) 基礎設施韌性：由於新加坡係屬都會型的國家，因此新加坡政府致力於提升城市基礎設施韌性，特別是在交通、建築和公共服務等方面。例如強化城市排水系統升級、修訂因應未來極端氣候建築設計之相關標準等。

2. 新加坡以捷運系統為其公共運輸核心，為避免強降雨所造成之洪水災害，新加坡陸路交通管理局(Land Transport Authority，以下簡稱 LTA)針對低窪地區的地下捷運站體安裝防洪閘門，並規範未來的新車站也須滿足加強防洪之要求^[133]。

2.3.12 國際鐵路聯盟

極端氣候對國際鐵路聯盟 UIC 的成員國造成諸多衝擊，例如：2003 年歐洲熱浪事件，即造成歐洲數家鐵路公司中斷營運，UIC 基於科學趨勢及其會員需求，於 2006 年開始發布一系列的調適專案，綜合整理其成員國因氣候變遷所遭受的衝擊、及調適行動經驗分享，如圖 2.3-9 所示。UIC 發揮其組織功能，建立了知識共享平台與鐵道調適之通用性框架，藉此減少全球鐵路系統因氣候變遷所受的衝擊，進而提升鐵路的永續性。以下依時序回顧 UIC 迄今發展的重要調適專案^[97]：



資料來源：[97]與本計畫整理

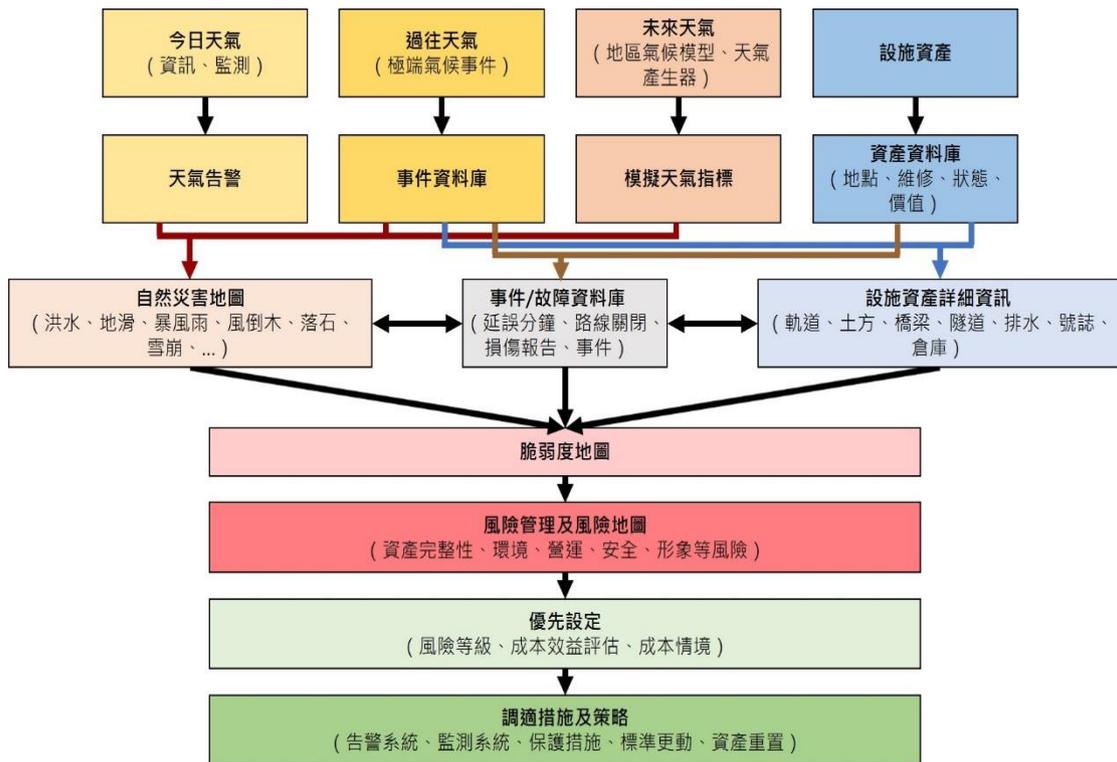
圖 2.3-9 UIC-四大調適專案時間軸示意圖

1. A Task for Examine the Consequences on Rail Infrastructure

- (1) 目標：該專案評估氣候變遷對鐵路基礎設施的影響，特別針對洪水、颶風、極高溫和低溫等極端天氣事件對鐵路路網的具體影響，並據此研擬未來的階段性調適任務。
- (2) 貢獻：該專案提供詳細的風險評估報告，協助各國鐵路公司預測和管理氣候變遷帶來的風險，制定更具韌性的應對策略。其工作聚焦於「為極端天氣事件做好準備」、「極端天氣事件發生時的穩健性」及「極端天氣發生後的復原力」。

2. Adaptation Railway Infrastructure to Climate Change, ARISCC^[191]

- (1) 目標：專注於對與天氣和氣候相關的自然災害進行綜合管理，以維持和改善鐵路基礎設施性能，並避免或儘量減少對鐵路基礎設施資產的損害。從天氣條件下的自然災害管理開始，制定解決方案和策略，為未來變化的天氣和氣候條件做好準備。
- (2) 貢獻：依面臨的衝擊事件與應對經驗，統整過去、現在與未來的資料，結合資產管理，並配合相應的數據推導出脆弱度地圖，從而發展調適方法與策略，如圖 2.3-10 所示。



資料來源：[191]與本計畫整理

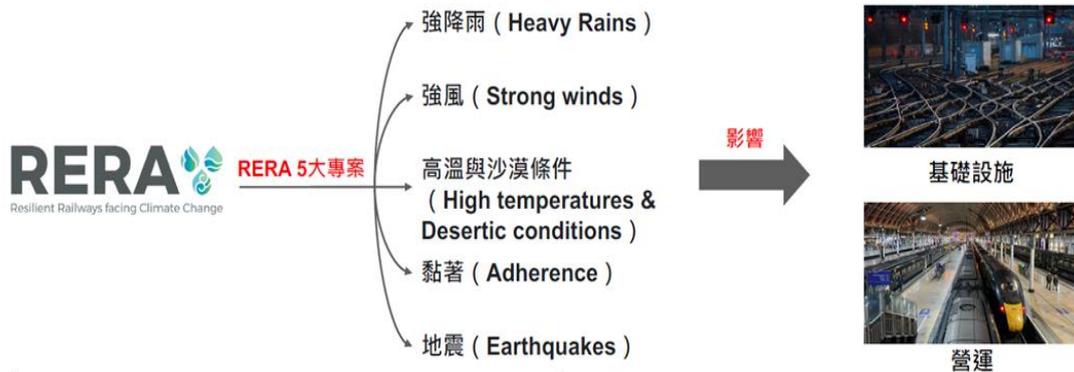
圖 2.3-10 UIC-ARISCC 調適行動發展流程圖

3. Rail Adapt Project^[100]

- (1) 目標：該專案制定全球鐵路氣候變遷調適的標準，促進跨國合作和和經驗案例與資訊共享。
- (2) 貢獻：統一調適相關名詞，例如：調適與韌性。基於前兩項研究，構建通用性調適框架，為成員提供指引以發展調適策略。

4. Resilient Railways Facing Climate Change, RERA^[97]

- (1) 目標：該專案以防災為出發點並結合鐵路永續性主題，圍繞五大鐵路危害因子，探討這些因子對營運與基礎設施的影響，發展鐵路系統的綜合韌性框架，包括預防、應對和恢復策略，如圖 2.3-11 所示。
- (2) 貢獻：制定全面的韌性策略，幫助鐵路公司應對氣候變遷引發的突發事件，並快速恢復運營，保證服務的連續性和安全性。



資料來源：[97]與本計畫整理

圖 2.3-11 UIC-RERA 專案架構示意圖

2.3.13 小結

綜觀鐵道標竿國家/機構於氣候調適發展方向及趨勢，多數都是採由上而下的方式進行，與國際鐵路聯盟 UIC 的調適架構方向一致，包括有：制定政策法規/指引、確認風險分析架構、蒐集氣候危害之研析報告、參考類似系統案例、邀集利害相關者參加工作坊或者專家座談取得共識、採量化或半定量方式進行風險評估、研擬鐵道調適方案、定期評估檢討成效。

為了確認氣候變遷之氣候驅動危害因子能被正確辨識出、擬定適宜的調適方法以及確認調適成效，氣候變遷相關之法規均會要求政府機構定期滾動檢討，包括：氣候變遷風險辨識、調適缺口確認、調適方法擬定、評估成效檢討；另受管轄之營運機構亦需定期將調適的作為與努力，透過調適成果報告方式提送給監理機構，同時並將財務相關揭露給投資者或利害關係者。

此外，考量氣候變遷相關數據需基於大氣科學等基礎科學研究，標竿國家多是由政府單位統籌資源與進行研析，並將成果提供給所需的機構繼續加值應用。

第三章 氣候變遷調適架構

本章回顧因應氣候變遷之調適架構，包括有通用型調適架構、鐵道系統調適架構，以及本所發展之公路系統調適指引架構，做為本計畫研提我國鐵道系統調適指引架構之參考。

3.1 通用型調適架構

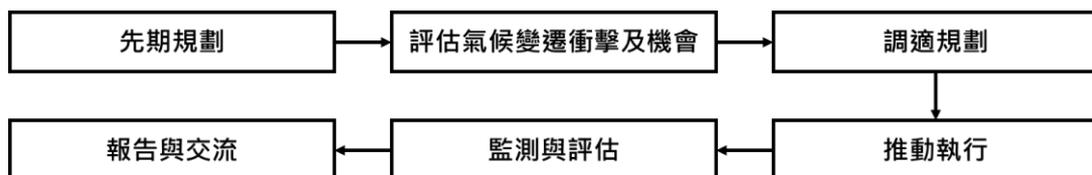
本節回顧可適用於各組織之通用型調適架構與國際倡議，包含國際標準化組織 ISO 標準、國際金融穩定委員會 TCFD 揭露架構，以及我國氣候變遷整合服務平台 TCCIP 提出之國家氣候變遷調適架構。

3.1.1 ISO 14090 系列標準調適架構

ISO 14090 提供了一個架構，用於制定和實施氣候變遷調適策略和行動計畫，以幫助組織適應氣候變遷帶來的風險和機會，其後，ISO 制定了 ISO 14091 脆弱度、影響和風險評估，ISO 14092 地方政府和社區調適規劃的要求和指南，ISO 14093 氣候變遷地方調適計畫融資機制，ISO 14097 溫室氣體管理與相關活動，茲將重點摘錄如下：

1. ISO 14090

ISO 14090 提出之調適架構包含先期規劃、評估氣候變遷衝擊與機會、調適規劃、推動執行、監測與評估、報告與交流，共 6 大構面，如圖 3.1-1 所示。其中，先期規劃意即界定範疇，包含評估組織是否有執行後續步驟之能力，以及確立與利害關係者間的互動關係。

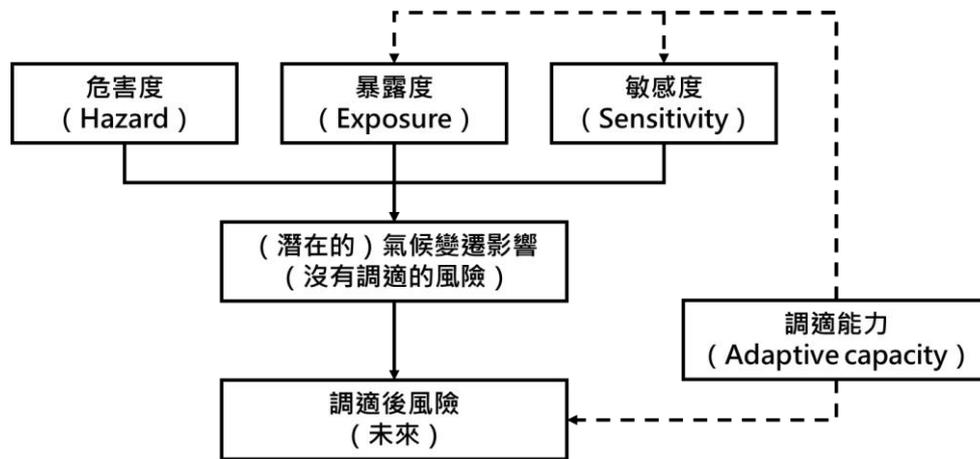


資料來源：[89]與本計畫整理

圖 3.1-1 ISO 14090 調適架構圖

2. ISO 14091

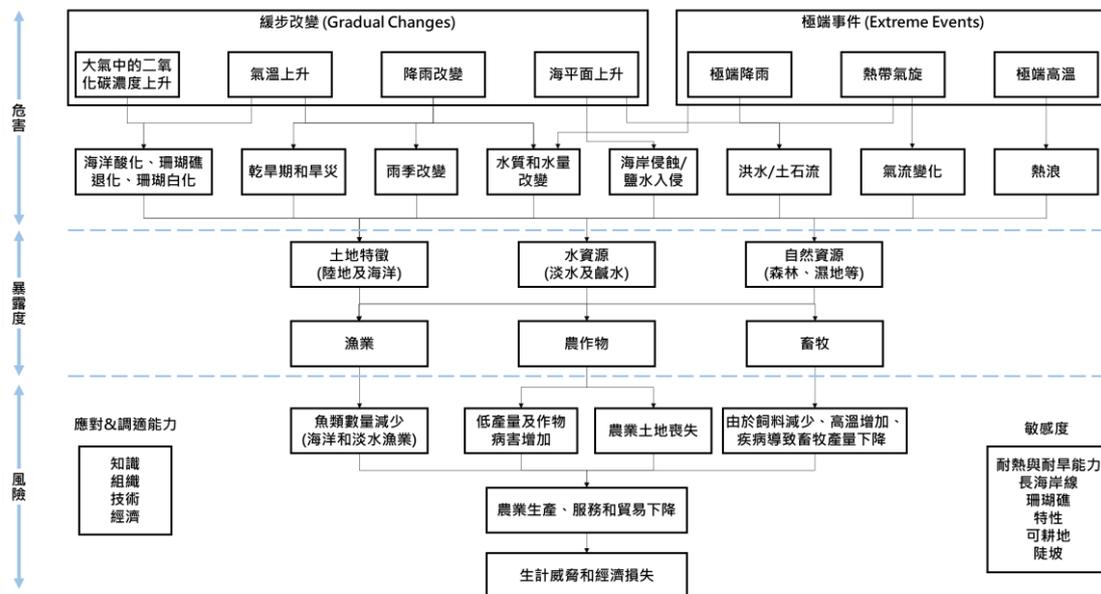
針對評估氣候變遷衝擊與機會，ISO 14091 提供氣候變遷風險之方法與工具，說明暴露在危害下之系統，其脆弱度來自其敏感度及調適能力，將風險組成要素間之關係定義如圖 3.1-2 所示；此外，亦提供衝擊鏈的方式表示氣候危害對系統造成之影響，來掌握其因果關係，如圖 3.1-3 所示。



註：虛線表示已實施調適行動

資料來源：[90]與本計畫整理

圖 3.1-2 ISO 14091 風險組成要素示意圖



資料來源：[90]與本計畫整理

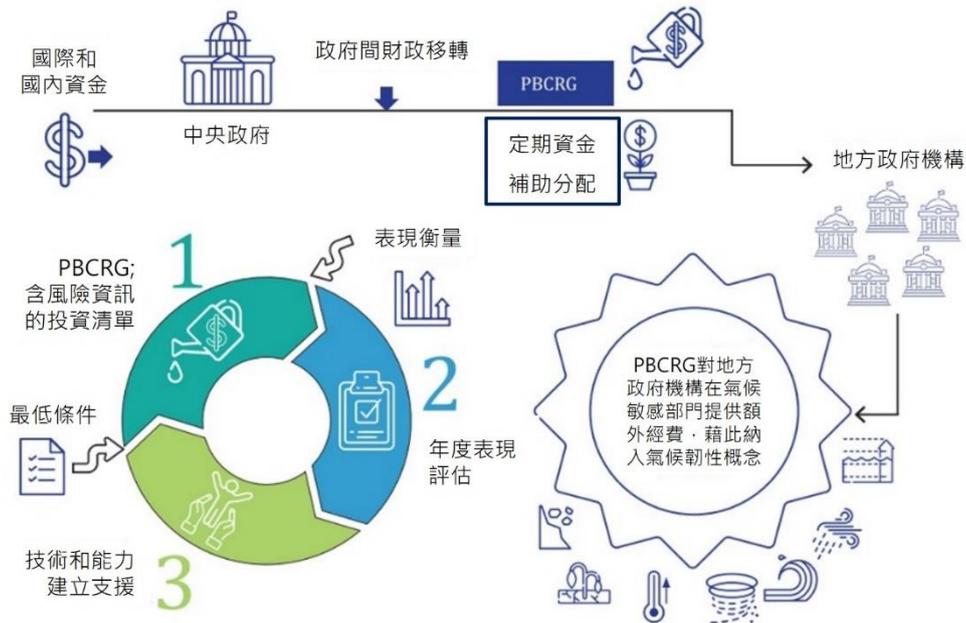
圖 3.1-3 ISO 14091 衝擊鏈示意圖(以農業為例)

3. ISO 14092

為協助地方政府和社區擬定調適計畫，以應對氣候變遷所帶來之挑戰，ISO 14092 說明如何建立一個適當、架構良好且具合作性的治理結構，以及調適計畫和實施過程的要素，包含建立協調小組、評估風險外，並擬定有效計畫、監測調適措施的實施狀況、評估調適措施實施成效。此外，ISO 14092 提供相關工具給地方政府擬定調適計畫時參考，例如：歐盟氣候調適 (Climate-ADAPT) 平台之調適支援工具 (Adaptation Support Tool)、歐盟氣候調適基礎設施和城市 (Climate Resilient Infrastructures and Cities, 簡稱 RESIN) 研究計畫之決策架構，以及英國氣候變遷衝擊計畫 (UK Climate Impacts Programme, 簡稱 UKCIP) 之調適嚮導及邏輯架構 (Logical Framework)。

4. ISO 14093

地方政府機構 (Subnational Authorities, 含州、地區當局或社群等單位) 理應提出最適合地方的氣候調適方案，惟常囿於資源的缺乏而無法執行計畫。因此，ISO 14093 基於聯合國資本發展基金 (United Nations Capital Development Fund, 簡稱 UNCDF) 的 LoCAL (Local Climate Adaptive Living) 機制，制定績效式氣候韌性補助金 (Performance-Based Climate Resilience Grant, PBCRG)，提供資金支持垂直整合制度，協助各國將國家層級氣候政策落實至地方層級，並且採用最低條件要求及監督機制，確保資金有效運用，如圖 3.1-4 所示。

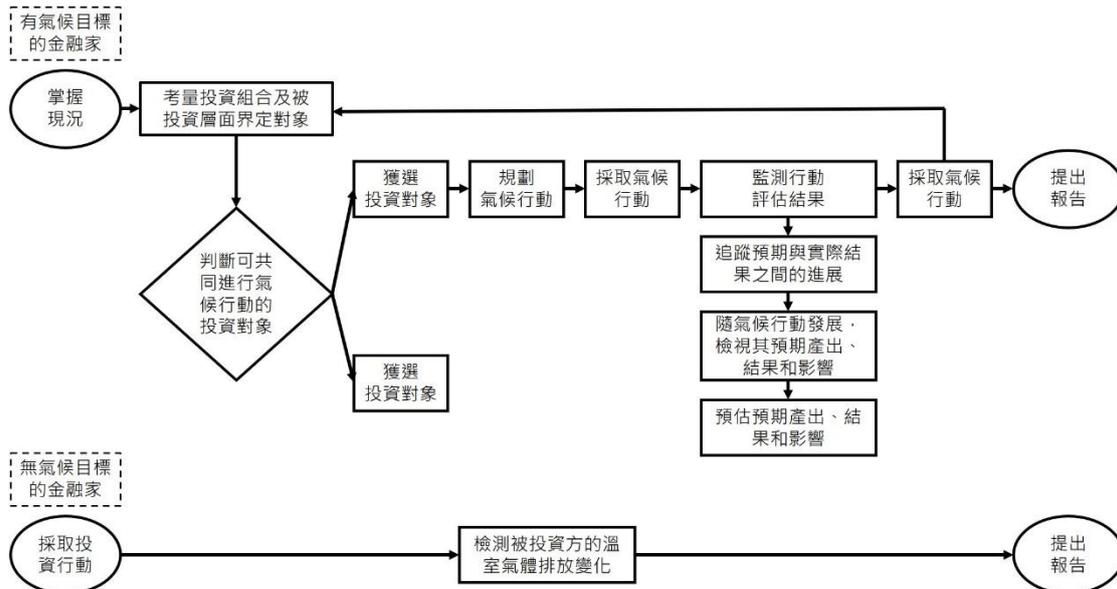


資料來源：[92]

圖 3.1-4 ISO 14093 LoCAL 架構圖

5. ISO 14097

ISO 14097 提供金融家(Financier, 指投資人或放款人, 且不限於金融機構)一套原則、要求和指南之框架, 藉此評估、監測和報告其所執行與氣候變遷有關的措施及貢獻。ISO 14097 也提出每項投資策略都會與氣候變遷產生雙向的正/負面影響, 即「雙重實質性」(Double materiality)。金融家首先須評估投資對象的氣候風險與機會, 接著確認達成巴黎協議目標的意願與能力。若有意願, 金融家須制定氣候政策、執行監控計畫並記錄成果。最終製作報告, 比較實際排放與科學緩解目標(Science-Based Mitigation Target)的差異, 並分析氣候行動的影響。若無意願, 金融家則須每年報告投資組合的溫室氣體變化情形, 分析重大變動原因, 並說明未來訂定氣候目標的規劃時程。執行流程如圖 3.1-5 所示。

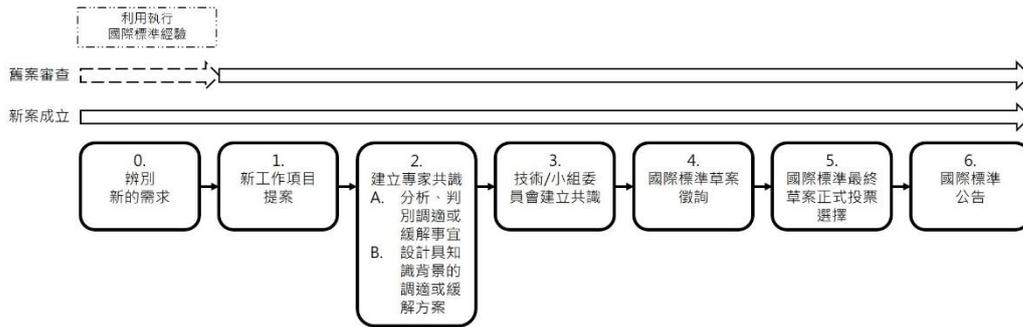


資料來源：[93]

圖 3.1-5 ISO 14097 執行流程圖

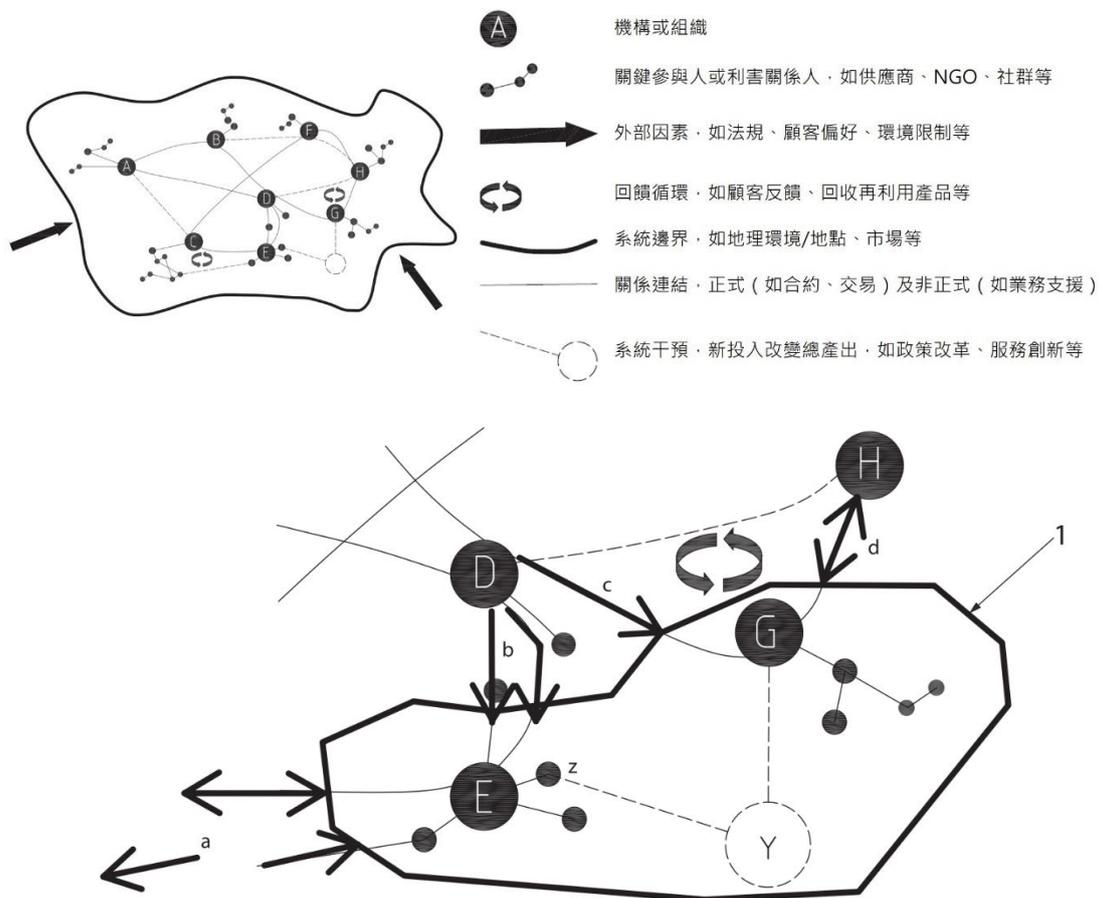
6. ISO Guide 84

Guide 84 提供一套系統性方法，確保 ISO 標準及相關事宜制定過程考量氣候變遷相關影響、風險與機會，標準制定流程如圖 3.1-6 所示。制定標準時，原則應考量交互性(Interactivity)、明確性(Clarity)、多元性(Involvement of Interested Parties)、透明性(Transparency)、公平性(Fairness and Equity)、績效性(Performance-Driven Approach)、未來性(Future Orientation)。擬定整體策略後，利用系統思維法(Systems Approach)、生命週期法(Life Cycle Approach)、風險基礎法(Risk-Based Approach)或預防措施法(Precautionary Approach)等應用於特定專案之中，如圖 3.1-7 及圖 3.1-8 所示。其中，生命週期法適用於標準化主題具多階段互動的氣候變遷調適或緩解措施，其強調利用生命週期的整體思維，而非使用正式的生命週期評估法(Life Cycle Assessment)進行氣候變遷調適措施的具體評估。



資料來源：[70]與本計畫整理

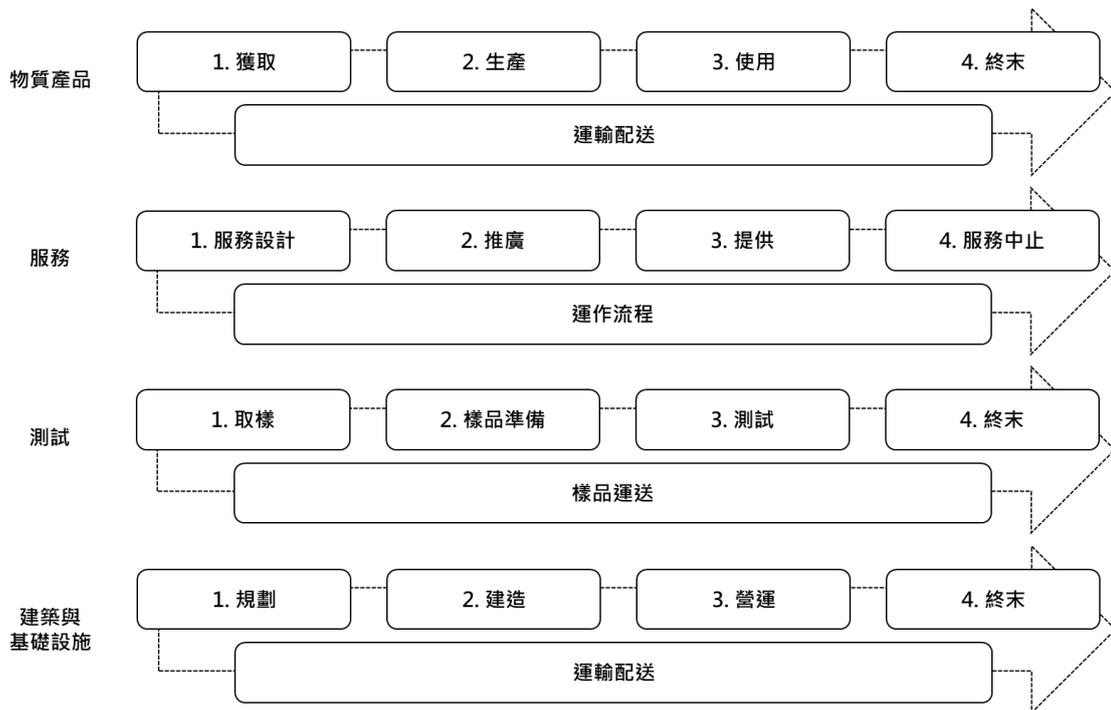
圖 3.1-6 ISO Guide 84 國際標準制定流程图



註：當調適措施 Y 直接或間接影響到 G 和 E 組織，進而邊界縮小，並且視範圍內的元素為一個子系統，以及仍有與外部其他組織的交互作用。

資料來源：[95]與本計畫整理

圖 3.1-7 系統思維法應用於氣候變遷調適行動示意圖



氣候驅動因子	次要效應/ 氣候相關因子	氣候變遷影響	考量目標	影響結果	生命週期			
					1	2	3	4
年度/季度/每月 · 平均氣溫 · 極端氣溫 (頻率/規模) · 平均降水量 · 極端降水量 (頻率/規模)	· 海平面上升 (含在地陸地變動) · 海/水溫 · 可用水源 · 暴風雨(路徑/強度)及風暴潮 · 洪水 · 海洋酸鹼度 · 塵暴	· 物理變化 · 失去資源 · 行為改變 · 健康影響 · 社會變化	物質/產品	價格和投入可用性	X	X		
			服務		X	X		
			測試		X			
風速 · 平均風速 · 最大風速	· 海岸侵蝕 · 土壤侵蝕 · 土壤鹽分 · 野火		建築和設施	原物料供應中斷	X	X	X	X
			物質/產品		X	X		
			服務		X	X		
濕度	· 空氣品質 · 地面不穩定/地滑/雪崩 · 城市熱島效應 · 生長季長度 · 冰冷條件/地面結霜 · 永凍土融化		測試	需求改變	X	X	X	X
			物質/產品		X	X	X	X
			服務		X	X		
太陽輻射			建築和設施	使用者要求改變	X	X		
			物質/產品		X	X	X	X
			服務		X	X	X	
			測試	對品質/性能影響			X	
			物質/產品		X	X	X	
			服務		X	X	X	

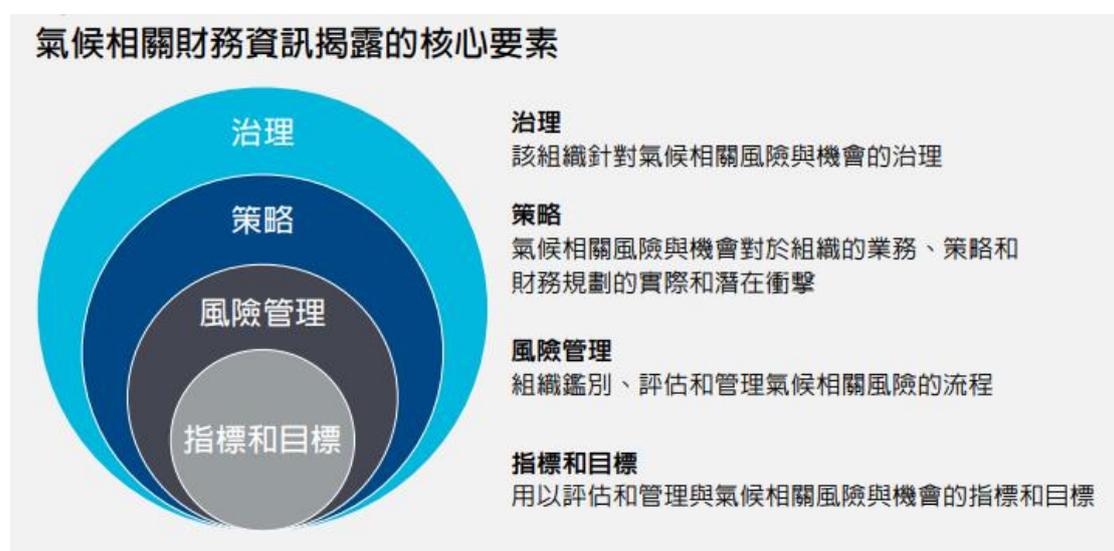
資料來源：[95]與本計畫整理

圖 3.1-8 生命週期法示意圖

3.1.2 氣候相關財務揭露 (TCFD) 國際倡議

國際標準化組織常參照「氣候相關財務揭露」(Task force on Climate-related Financial Disclosures, TCFD)國際倡議架構，茲將重點摘要如下。

1. 國際金融穩定委員會(Financial Stability Board, FSB)於 2015 年成立 TCFD 工作小組，其任務為擬定明確、可比較與一致性的氣候相關財務資訊揭露建議，協助企業鑑別氣候變遷之風險及機會。
2. TCFD 係由治理(Governance)、策略(Stratgy)、風險管理(Risk Management)、指標和目標(Metrics and Targets)共四大核心要素組成，如圖 3.1-9 所示。

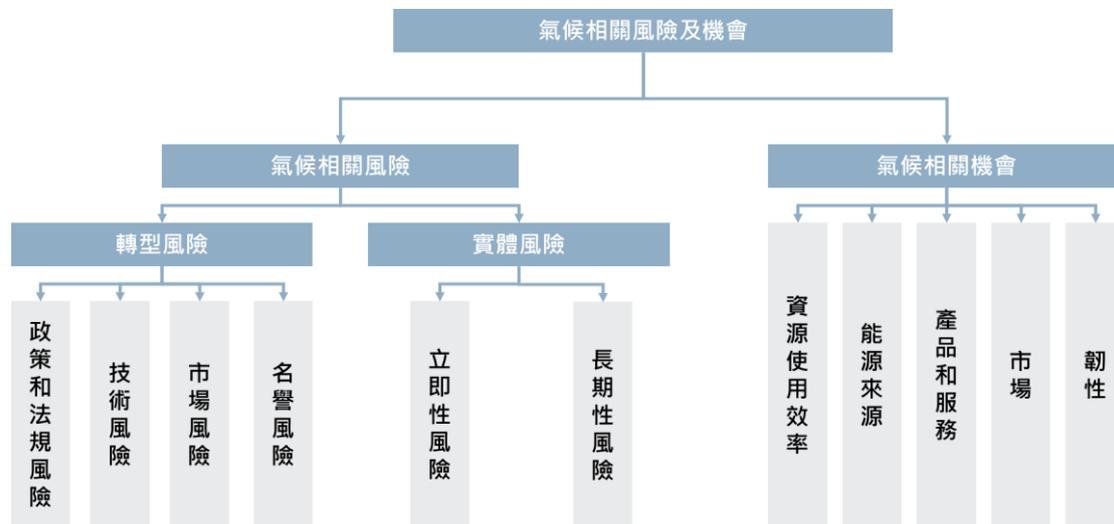


資料來源：[309]

圖 3.1-9 氣候相關財務資訊(TCFD)核心要素示意圖

3. TCFD 工作小組定義了「氣候相關風險」與「氣候相關機會」，如圖 3.1-10 所示，其中「氣候相關風險」可概分為「轉型風險」及「實體風險」兩類，內涵如下：
 - (1) 轉型風險：係指組織轉型為低碳經濟時，伴隨之不同程度的財務和名譽風險，可進一步細分為政策和法規風險、技術風險、市場風險及名譽風險。
 - (2) 實體風險：係指氣候變遷對組織造成的財務衝擊，如資產災損或服務中斷等，而依氣候模式特性可將實體風險細分為「立即性風險」與「長期性風險」：

- 立即性風險：係指日趨嚴重的單一極端天候事件，如颱風、強降雨等。
 - 長期性風險：係指氣候模式的長期變化，如連日高溫所造成的熱浪。
4. 有關「氣候相關機會」，則是指組織為了減緩與調適氣候變遷所採取的行動同時，這些行動也將替組織創造機會。
5. TCFD 工作小組將韌性視為氣候機會，由於組織為了因應轉型風險及實體風險之挑戰，從而改變其服務方法、提升效率或開發新產品等，使得組織獲得面對氣候變遷的調適能力。



資料來源：[309]與本計畫整理

圖 3.1-10 TCFD 定義之氣候相關風險及機會示意圖

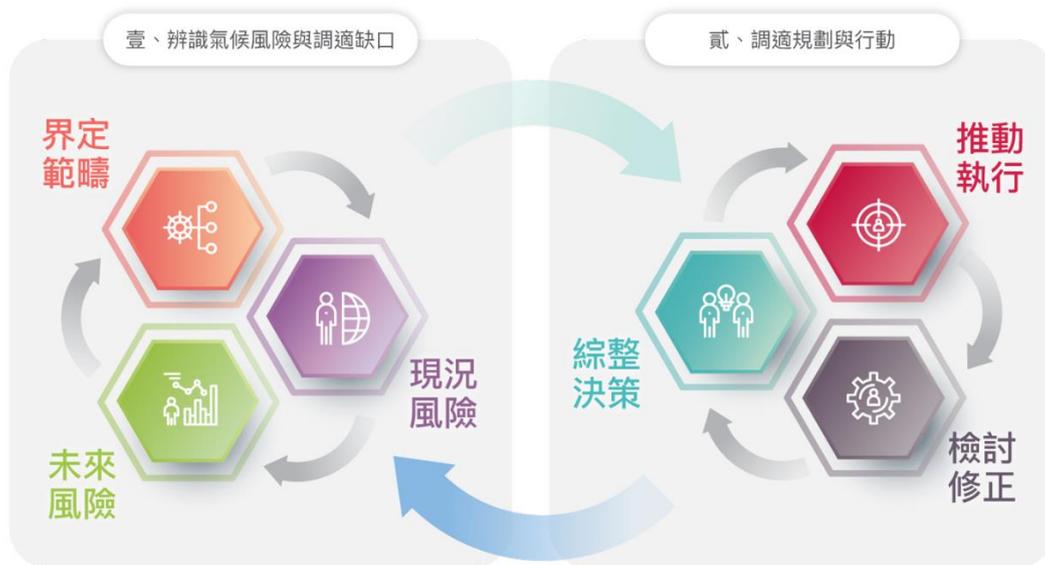
3.1.3 TCCIP 國家氣候變遷調適架構

面對全球氣候變遷對臺灣的衝擊，國家科學及技術委員會成立臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台(Taiwan Climate Change Projection and Information Platform，以下簡稱 TCCIP)，提供高解析度的氣候預測數據和相關資訊，協助公部門、學研單位、企業及社群機構評估氣候變遷帶來之衝擊。

TCCIP 將調適架構分為「辨識氣候風險與調適缺口」及「調適規劃與行動」兩階段及 6 構面，如圖 3.1-11 所示。操作過程除依序實施外，亦可

根據實際情況和可能遇到的障礙進行調整，例如：跳過某些構面或採不同順序推動，而後透過調適循環檢討方式彌補缺口，茲將各構面重點摘述如下。

1. 界定範疇：包含確立保全對象、辨識影響保全對象之氣候危害類型及其暴露之時空範圍，並邀集有關機關、學者及民間團體界定評估範疇，以掌握各利害關係者關注議題，取得共識，並有助於在實施調適策略時獲得更大的支持和合作。
2. 現況風險：包含檢視可掌握資源及現況氣候風險評估，其中，現況氣候風險評估係透過歷史氣候觀測相關資訊，針對現況衝擊與脆弱度進行量化或質化評估。
3. 未來風險：與現況風險相異之處，在於未來風險關注長時間氣候變遷因子所造成之風險，透過科學推估資料，設定未來氣候變遷情境，以評估未來氣候變遷下，於未來危害度與脆弱度雙重影響下，對於保全對象之衝擊與風險。
4. 綜整決策：進行辨識、評估及選擇調適選項，以應對現況及未來氣候變遷風險。
5. 推動執行：掌握調適執行進度的同時，藉由建立成效評估指標，或是透過訪談、焦點團體、專家諮詢等方式，幫助組織檢視調適選項之執行成效。
6. 修正檢討：藉由循環機制過程，評估調適策略及方案之適切性，同時也做為未來調適方案及改善方向之參考。



資料來源：[308]

圖 3.1-11 TCCIP 國家氣候變遷調適架構圖

3.1.4 CCA6Steps 氣候調適 6 步驟

氣候調適演算法(Climate Adaptation Algorithm)為 TCFD 知識庫(TCFD Knowledge Hub)認可之方法學之一，係從跨層級、跨領域因應氣候變遷的角度建立^[214]。該演算法是由氣候調適 6 步驟(Climate Adaptation 6 Steps，以下簡稱 CCA6Steps)組成，CCA6Steps 由氣候實體風險模板(Climate Risk Template)及氣候韌性調適路徑(Climate Resilient Adaption Pathway)組成，前者為風險定性分析工具，並便於治理組織劃分其權責；後者則做為實施調適選項之評估工具。各步驟重點摘錄如下：

1. 界定問題和目標：包括成立調適委員會、界定關鍵議題、進行跨領域分析以及設定目標。其中，調適委員會係由利害關係者組成，類似共同願景計畫(Shared Vision Planning，簡稱 SVP)概念，除能確保調適策略及方案的可行性外，也可提升其公信力。
2. 評估現況氣候風險：透過回顧相關研究及氣候事件資料，分析氣候風險的成因及熱點區域。
3. 評估未來氣候風險：納入未來氣候變遷和社會經濟情境進行分析，其情境可以透過選擇適當的全球環流模式(Global Circulation Models，簡稱

GCMs)及代表濃度路徑(RCPs)來決定。藉由比較現況和未來情境分析結果，即可評估未來氣候風險，做為後續制定調適策略時之參考。

4. 界定氣候調適選項：根據現況及未來氣候風險評估結果，辨識合適的調適選項，其中，調適選項應綜合考量當地條件及風險成因。
5. 規劃氣候調適路徑：根據所辨識之調適選項進行調適路徑規劃，調適路徑需綜合評估不同情境中的調適選項成本、效益及臨界點，以便應對變化多端的未來氣候。而執行計畫由調適委員會制定，委員會需先決定調適選項的優先順序，並制定路徑轉換的條件。
6. 監測與修正氣候調適路徑：根據調適路徑的規劃進行監測和滾動調整，其中，調適委員會應決定如何監測氣候風險的關鍵因素，及評估調適計畫的有效性。



資料來源：國家環境研究院氣候變遷研究中心

圖 3.1-12 CCA6Steps 氣候調適 6 步驟示意圖

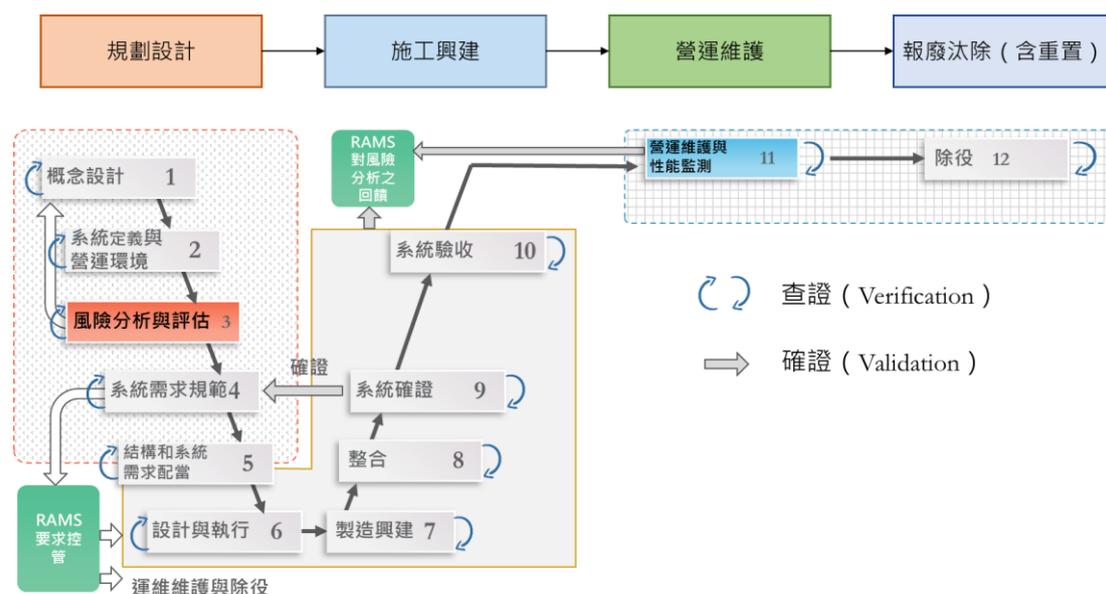
3.2 鐵道系統調適架構

本計畫係將鐵道系統全生命週期融入氣候變遷調適課題，使其全面防範氣候變遷所帶來之衝擊，故本節先說明鐵道系統的生命週期，而後回顧國際鐵路聯盟(UIC)及鐵道標準國家之調適架構。

3.2.1 鐵道系統的生命週期

依據 EN 50126 規範^[44]，鐵道系統的生命週期可簡單區分為規劃設計、施工興建、營運維護與報廢汰除(含重置)，如圖 3.2-1 所示。雖然 EN 50126 針對是鐵道核心機電系統，但其概念亦可擴充至包含土建設施的整體鐵道系統。從圖 3.2-1 可知，規劃設計階段必須進行風險分析，如果考慮到氣候變遷的衝擊，則風險分析與評估時必須將極端氣候的危害納入評估的範圍，並將風險配當到各個子系統，同時於施工興建時進行確證(Validation)，如此才能確保完工後的系統有足夠的抵禦能力(Resistance)、可靠度(Resistance)、備援能力(Redundancy)。

此外，於未來營運維護階段，必須要對系統進行監測，並採取必要的應變措施，系統才會有足夠的反應與恢復能力(Response & Recovery)，以提升鐵道系統之韌性，以下重點說明生命週期各階段調適之內涵。



資料來源：[44]及本計畫繪製

圖 3.2-1 鐵道系統生命週期示意圖

1. 規劃設計階段

- (1) 參考《大眾捷運系統建設及周邊土地開發計畫申請與審查作業要點》及《鐵路平交道與環境改善建設及周邊土地開發計畫審查作業要點》，鐵道系統在規劃設計階段包括有可行性研究與綜合規劃，於可行性研究階段評估認有其開發價值後，再廣續辦理綜合規劃。

- (2) 待前述規劃確認需求後，再依《政府公共工程計畫與經費審議作業要點》進行基本設計，使能銜接前階段需求，同時發揮規劃專業能力、律定下階段工程具體內容，而後會再將其各項需求轉為招標文件進行招商。
- (3) 爰此，全生命週期中之規劃設計階段若能納入氣候變遷的風險評估，並採取必要的設計方案，預期可大幅降低後續營運維修階段面對氣候風險的衝擊與成本，故此階段扮演著極為關鍵的樞紐角色。

2. 施工興建階段

- (1) 施工興建之承攬廠商作業包括有：採購、施工、製造、供應、安裝、測試並完成興建交付，此階段必須確證規劃設計階段的各項要求於施工興建階段都有被履行，且系統的性能吻合原先設定的需求。
- (2) 此階段應將氣候變遷之極端天氣影響納入風險管理，使各項工程進展降低受極端天氣之影響與衝擊。

3. 營運維修階段

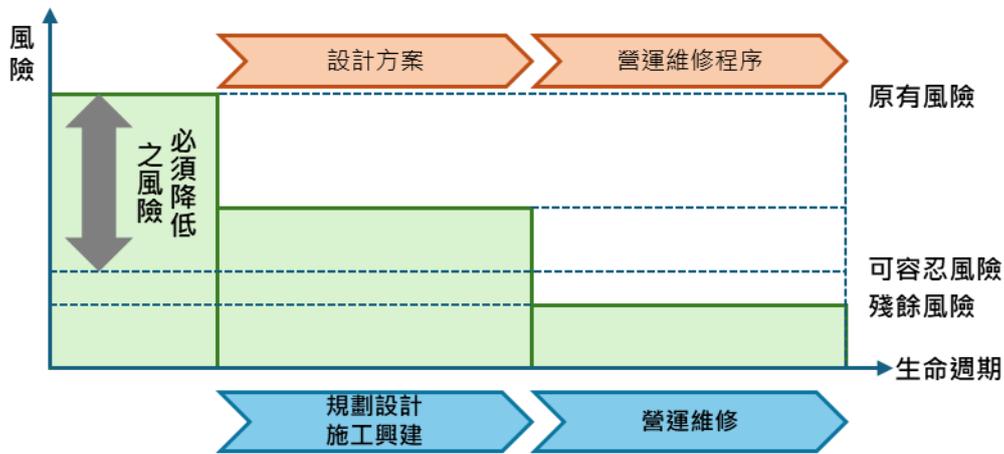
- (1) 鐵道系統是藉由營運人員依循一定的程序操控設施設備來達到營運的目的，若於先前規劃設計階段評估設施設備的成本過高、或是技術尚未能克服，則就必須在營運維修階段，藉由其他科技應用或是人員的標準操作程序(SOP)來進一步降低系統的氣候風險，如圖 3.2-2 所示。
- (2) 營運維修階段，鐵道系統的硬體設施條件都已經固定而成為限制條件，因此端賴營運機構的反應與應變能力來強化系統的韌性，此時可導入新科技的應用，以便能夠監測氣候與資產的狀態，提早預警，以快速反應氣候變遷的威脅。

4. 報廢汰除(含重置)階段

此階段屬於資產管理、循環經濟與減碳之範疇，透過資產管理之重置作業會銜接到前述規劃設計階段，另循環經濟與減碳則不在本計畫範圍內討論。

整體概念上，係於系統規劃設計階段即納入強固的設計方案以降低氣候風險的衝擊；在施工興建階段能有因應極端天氣的施工對策；另於營運

維修階段採用適當的調適策略與行動方案，使生命週期內殘餘的氣候風險位在可接受範圍內如圖 3.2-2 所示。



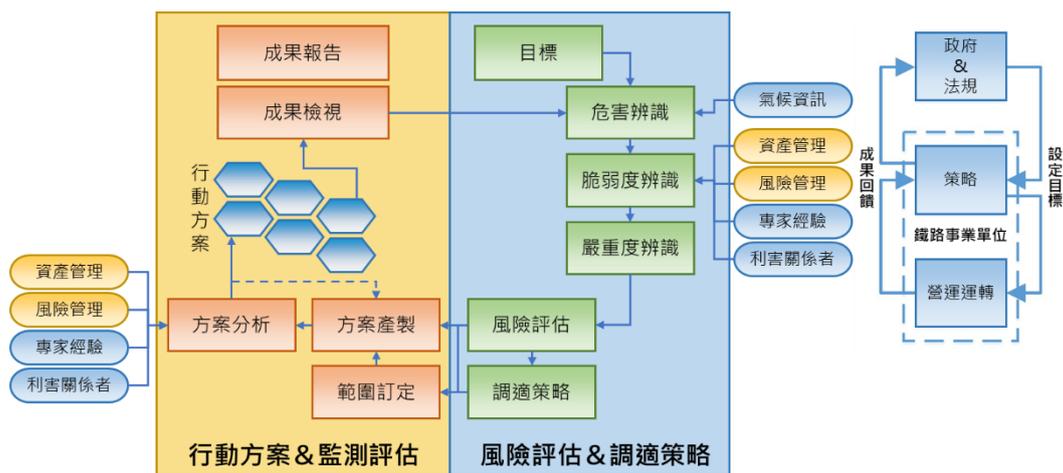
資料來源：本計畫整理

圖 3.2-2 生命週期降低風險作法示意圖

3.2.2 國際鐵路聯盟建議的調適架構

茲將國際鐵路聯盟(UIC)於《鐵路調適》(RAILADAPT)^[100]指南中之調適架構重點摘錄如下：

1. 鐵路調適即是增強鐵道系統韌性的手段之一，透過基礎設施改善、組織改革等方式，使鐵路服務可以更具彈性，能靈活應對各種不確定性與挑戰，並從中吸取經驗及教訓。值得注意的是，UIC 強調鐵路調適並非是一個特殊專案或是新業務，而是得將調適融入至日常業務當中。
2. 為達鐵路調適願景，UIC 參考瑞典交通署(Swedish Transport Administration, Trafikverket)、芬蘭交通局(Finnish Transport Agency，簡稱 FTA)及世界水運基礎設施協會(World Association for Waterborne Transport Infrastructure，以下簡稱 PIANC)的經驗，建立了鐵路調適架構，其內涵與資產管理國際標準 ISO 55000 及 PIANC 調適架構一致。
3. 在 UIC 鐵路調適架構中，可約略分為「風險評估&調適策略」及「行動方案&監測評估」兩部分，如圖 3.2-3 所示，說明如下：



資料來源：[100]及本計畫整理

圖 3.2-3 UIC 鐵路調適架構圖

(1) 風險評估&調適策略

考量未來可能出現之氣候變遷情況，以及對應之長時間氣候影響與短時間極端天氣，結合鐵路資產管理、不同鐵路路線之獨特性、風險管理、過往經驗等面向進行風險識別以及風險評估，並提出必要之調適策略，其中危害、脆弱度及嚴重度辨識說明如下。

- 危害：須從歷史經驗開始辨識危害，以指出重點關注之事件類型。然而，未來氣候存在高度不確定性，事件類型和頻率可能會隨著氣候變遷而改變，故探討其他潛在的未來危害至關重要，以制定相應之應對措施。
- 脆弱度：脆弱度分析涉及理解氣候和天氣危害對組織資產、運營、服務和乘客的影響。由於鐵路中斷可能由多種因素引起，故需考慮特定危害或組合事件的脆弱性。
- 嚴重度：在確定氣候危害和脆弱度後，需考慮系統中斷的潛在後果並予以量化，包含對組織內外部的影響。除財務損失外，對於難以用金錢量化之系統中斷對環境和社會之影響也應納入考量。

(2) 行動方案&監測評估

根據調適策略所訂定之具體調適方案，並同樣從鐵路資產管理、風險管理、過往經驗等面向進行評估，選出適當之調適方案後制定行動計畫，並追蹤調適後鐵路系統營運情況，以決定是否需要進一步調整。

(3) 鐵路調適架構特性

- 為一循環且具動態調整之氣候變遷調適架構。
- 鐵道調適過程中與資產管理及安全管理相互扣合。
- 強調由上而下的方式，即由政府建立制度，並由鐵路營運機構擬定執行策略方式來導入。

3.2.3 天氣韌性與氣候變遷調適策略(WRCCA)

英國政府在 2008 年頒布《氣候變遷法案》(Climate Change Act 2008)，要求每 5 年進行一次全面風險評估報告。英國政府根據這項法案於 2011 年首次發布「氣候變遷風險評估」(The First Climate Change Risk Assessment，簡稱 CCRA1)報告。此外，英國鐵路網公司 NR 為了回應前述法案之風險評估，於每 5 年制定「調適報告能力書」(Adaptation Reporting Power，以下簡稱 ARP)，說明面對未來氣候影響的相關計畫與行動，截至 2024 年底，NR 總計發布了 4 版的調適能力報告書。

此外，NR 鑑於氣候變遷對基礎設施的營運維護影響，為能有效對其鐵路資產執行調適作為，於 2011 年擬定了「天氣韌性與氣候變遷調適」(WRCCA)，協助機構管理與執行相關調適行動，重點摘要如下：

1. 資產類別與項目

NR 將其鐵路資產分為 5 類，包括：建築物與土建設施(Buildings and Civils)、軌道與道岔(Track and S&C)、控制設施與號誌(Control Command & Signaling)、系統工程(Systems Engineering)，以及機電設施(Mechanical and Electrical)等，並以此分類為基礎，分析天氣與氣候變遷對各類資產之可能影響。茲就各類資產涵蓋項目整理如表 3.2-1 所述。

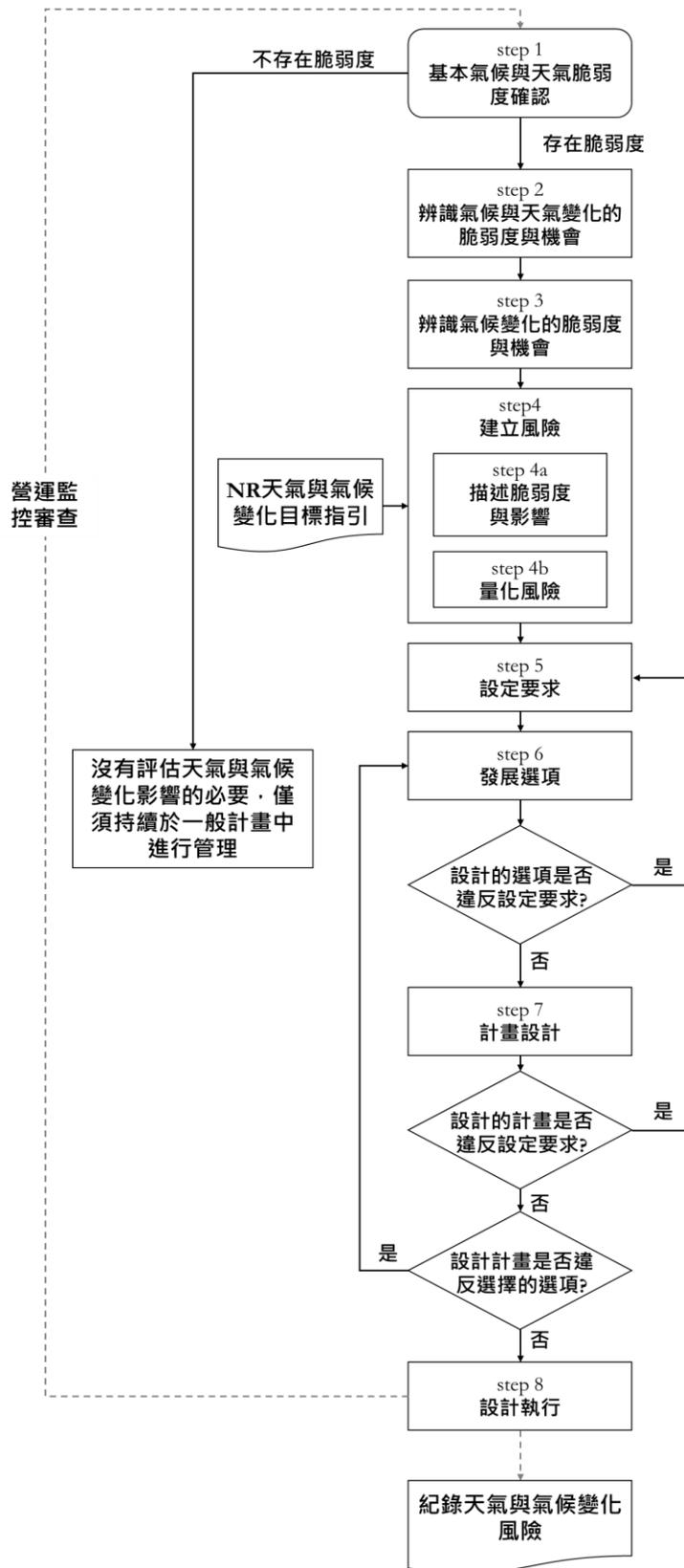
表 3.2-1 NR-鐵路資產因應氣候變遷調適範圍彙整表

鐵路資產類別	涵蓋資產項目
建築物與 土建設施	<ul style="list-style-type: none"> • 隧道(Mining and Tunnels) • 結構物(Structures)，例如橋梁、涵洞或高架路段 • 建築物與車站(Buildings & Stations) • 邊坡(Lineslide)，包含植被(Vegetation) • 排水系統(Drainage) • 大地工程(Geotechnics)，例如路堤
軌道與道岔	<ul style="list-style-type: none"> • 軌道(Track) • 道岔(Switch & Crossing)
控制設施 與號誌	<ul style="list-style-type: none"> • 平交道(Level Crossings) • 號誌(Signaling) • 通訊設施(Telecoms)
系統工程設施	<ul style="list-style-type: none"> • 機廠(Plant) • 牽引機車與車輛(Traction & Rolling Stock)
機電設施	<ul style="list-style-type: none"> • 電力設施(Power & Distribution) • 電車線(Contact Systems)

資料來源：[161]

2. 天氣與氣候變遷影響評估流程(資產設計、施工與維運計畫)

NR 在規劃設計、施工與維運階段皆須考量天氣與氣候變遷可能對其資產造成的影響，其在擬定專案或計畫前應評估哪些天氣與氣候變遷對鐵路資產造成影響與風險，圖 3.2-4 說明 NR 針對天氣與氣候變遷的評估流程，各步驟均設有一個關鍵問題來協助與引導人員判斷與評估。

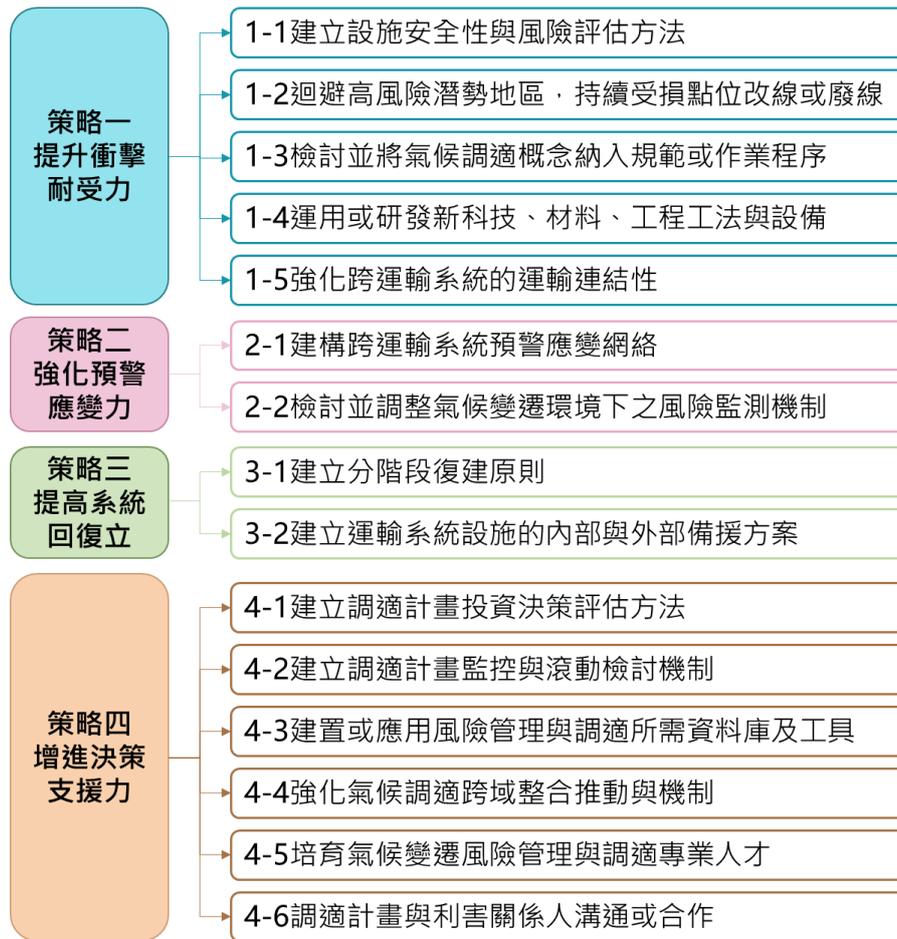


資料來源：[155]

圖 3.2-4 NR-天氣與氣候變遷影響評估流程圖

3.3 公路系統調適架構

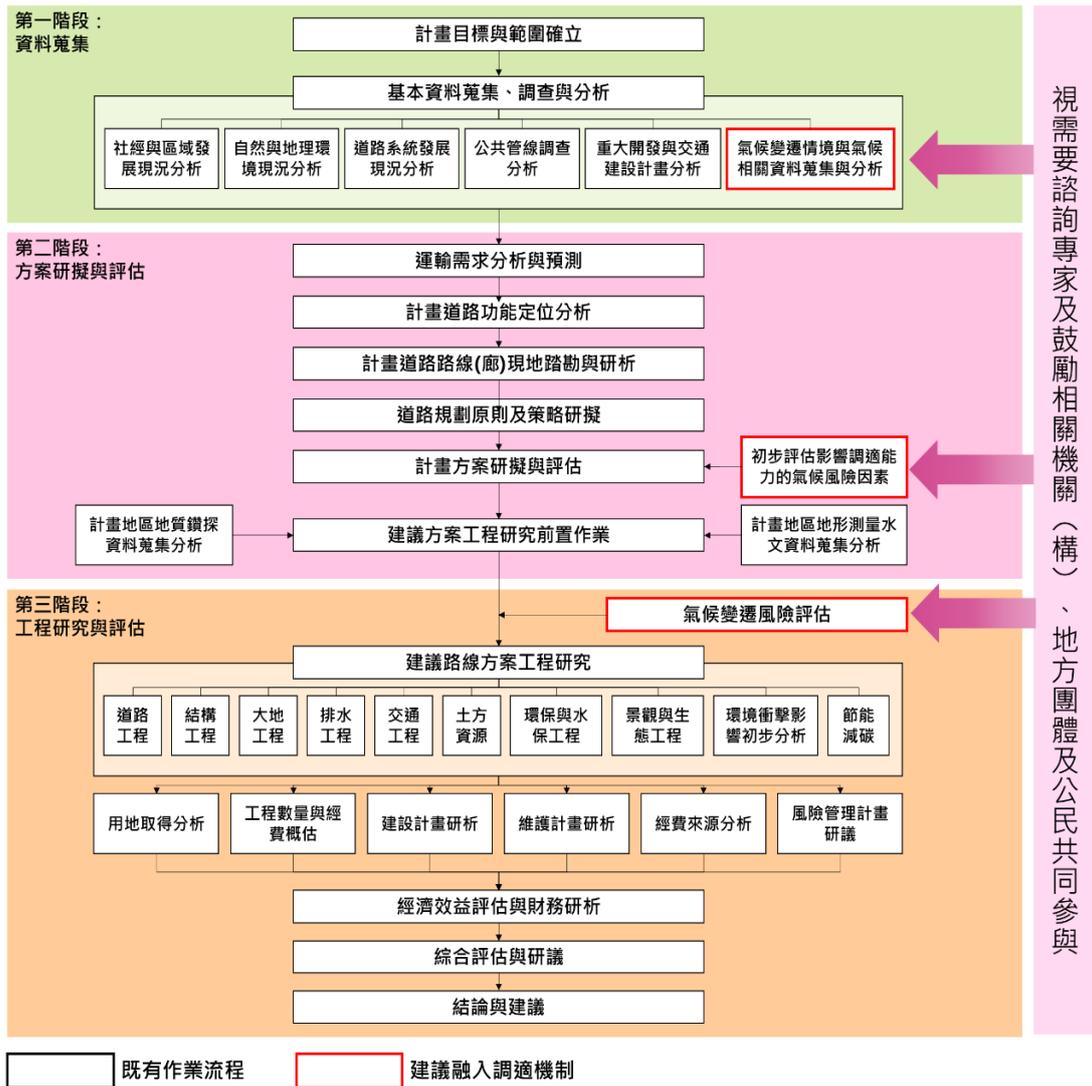
本所在推動運輸系統調適研究方面已有多項成果，包含於 2022 年發布我國整體運輸系統調適策略，共分為四大策略 15 項行動方案，如圖 3.3-1 所示。



資料來源：[272]

圖 3.3-1 運輸系統調適策略架構圖

而為提升公路系統衝擊耐受力，本所於 2021 年開始研析公路系統於規劃階段氣候變遷調適指引，期將調適的概念於「可行性研究」與「綜合規劃」階段時，即融入其作業流程，相關成果如圖 3.3-2 所示。



資料來源：[273]

圖 3.3-2 公路系統規劃階段強化調適能力作業流程圖

此外，為強化公路系統規劃階段調適指引之可操作性與易讀性，本所於 2023 年辦理「公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析」計畫案，除蒐整國外公路系統強化調適能力之實務案例，並進行案例特性分析，並參酌 ISO 14090 系列標準，提出可供國內公路系統權管機關參採之調適指引。該指引之作業流程如圖 3.3-3 所示。

該公路系統規劃階段調適指引於完成後，已由交通部高速公路局應用於「國 2 甲由台 15 線延伸至台 61 線新建工程」案實際應用，藉由該工程於未來情境下檢視相關設計標準，將有助於強化該工程因應未來極端氣候之韌性。

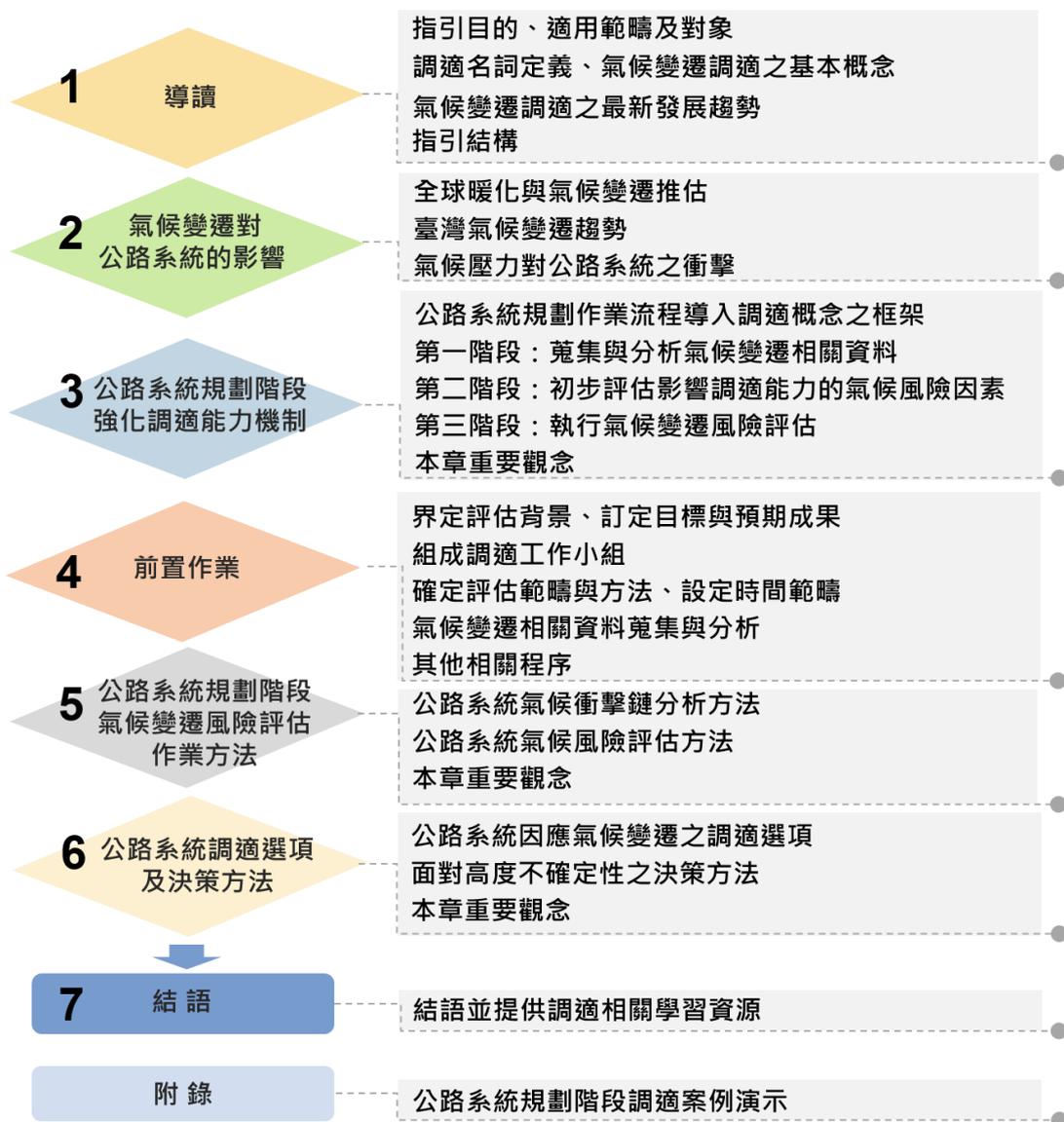


圖 3.3-3 公路系統規劃階段氣候變遷調適指引流程圖

3.4 小結

綜合上述各小節的內容，不論是適用於各組織的通用型調適架構、鐵道系統調適架構，其步驟大致可分為：界定範疇、風險評估、研擬及實施調適選項、追蹤調適執行成效、提出改善及修正調適策略，並回饋調適成果及發現，茲將通用型與鐵道系統調適架構彙整如表 3.4-1 所示。值得注意的是，CCA6Steps 的六步驟皆屬規劃階段(Plan)，未包含執行(Do)、檢查(Check)及改善(Action)之相關內容。

表 3.4-1 調適架構比較分析表

步驟	ISO 14090	TCFD	TCCIP 國家氣候變遷調適架構	CCA6Steps Tung et al., 2019	UIC Rail Adapt	NR WRCCA
界定範疇	先期規劃	治理策略	界定範疇	界定問題與目標	目標	界定範疇
風險評估	評估氣候變遷衝擊與機會	風險管理	現況風險 未來風險	評估現況氣候風險 評估未來氣候風險	辨識危害/脆弱度/嚴重度 風險評估	辨識脆弱度與機會 建立風險
研擬調適選項	調適規劃	指標和目標	綜整決策	界定氣候調適選項 規劃氣候調適路徑 監測與修正氣候調適路徑	調適策略 範圍訂定 方案產製 方案分析	設定要求 發展選項 計畫設計
實施調適選項	推動執行		推動執行	—	行動方案	設計執行
追蹤及回饋執行成效	監測與評估報告與交流		檢討修正	—	成果檢視 成果報告	營運監控審查

資料來源：本計畫彙

第四章 鐵道系統調適方法

根據第三章氣候變遷調適架構回顧可知，調適評估方法與調適措施擬定之流程，主要係由調適策略(界定範疇、風險評估)與執行計畫(研擬、實施、追蹤調適選項及回饋)兩階段形成循環回饋，其中調適策略聚焦於氣候變遷風險評估，依據風險評估結果擬定相應之調適策略，而後再於執行計畫階段，依據調適策略實施及監控相關調適措施。本章主要回顧調適能力方法，包含：風險評估方法、調適選項及新科技應用，相關成果可做為本計畫研擬鐵道系統調適方法之參考。

4.1 氣候變遷風險評估方法

本節回顧英國、法國、德國、美國、日本、UIC 等標竿機構於氣候變遷風險所應用之評估方法及相關研究。

4.1.1 英國-英國鐵路公司

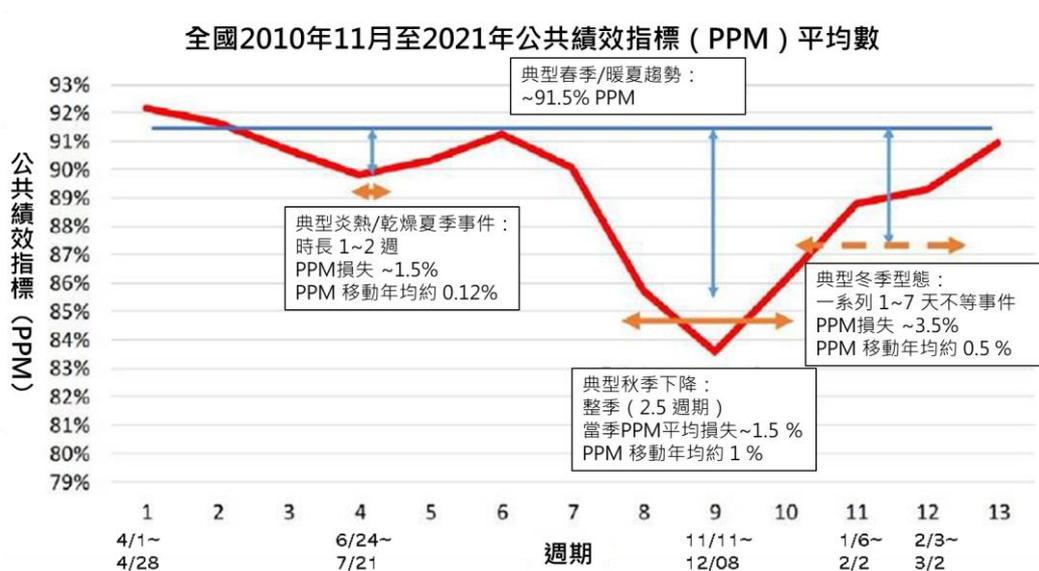
以下說明英國鐵路公司 NR 應用有關氣候預測、公共績效指標、天氣衝擊延誤量化分析、路線天氣韌性和氣候變遷調適計畫、企業與氣候風險評估矩陣、及利害關係者分析等，說明如下：

1. 英國氣候預測(UK Climate Projections, UKCP)

- (1) 英國氣候預測(UKCP)是由英國氣象局發布的一套氣候變遷預測工具，為英國提供最新的氣候變遷數據和情景，其預測包括未來氣溫、降水量、海平面上升等方面的變化，並根據不同的排放情境提供短期到長期的氣候變遷預測。
- (2) 英國 NR 於 2021 年發提出第三版調適報告書(Third Adaptation Report)^[161]，係依英國氣象局 2018 年氣候模型報告(UKCP18)之科學數據為基礎，評估鐵路系統當前與未來所面臨之風險，並制定對應的調適措施。

2. 公共績效指標^[160]

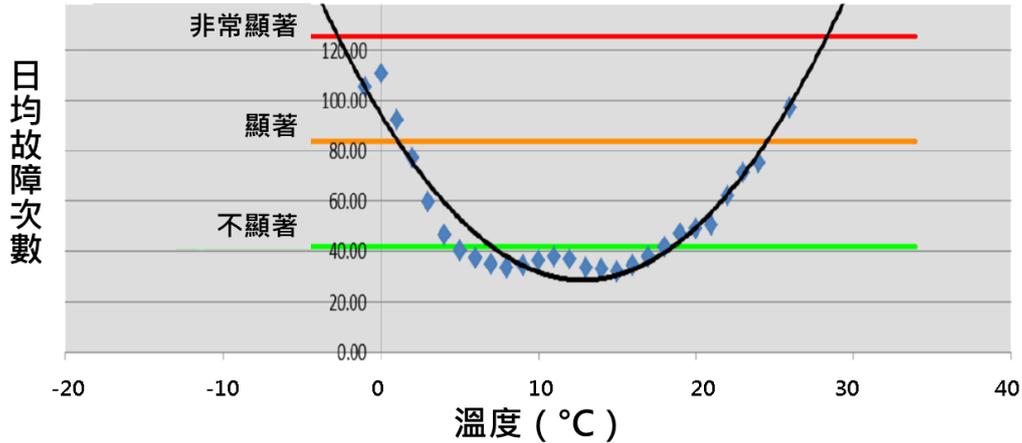
- (1) NR 將「準點性」和「可靠性」資料合併為單一績效衡量標準^[160]，將計劃的總列車數中按時抵達終點站的列車所占的百分比定義為「公共績效指標(Public Performance Measure，以下簡稱 PPM)」，做為評估鐵路運營的表現績效。
- (2) 圖 4.1-1 統計 2010/11-2021 期間天氣和氣候變遷對鐵路影響之 PPM，趨勢顯示英國在每年 11 月天氣普遍較差月份(陰冷/潮濕/霧霾)期間，其 PPM 表現受到較大影響。



資料來源：[160]與本計畫整理

圖 4.1-1 英國-天氣影響公共績效指標 PPM 趨勢圖

- (3) 類似方法還有使用故障事件發生頻率以及誤點時間評估系統脆弱度，即當鐵路系統受到天氣事件衝擊後，若故障事件發生頻率越多以及誤點越嚴重，表示系統越脆弱^[63]，如圖 4.1-2 所示。從圖中可以發現，溫度愈趨近極端高溫或低溫，系統故障發生頻率則會上升，顯示在不採取任何調適措施狀況下，極端高溫與極端低溫均會使得鐵路系統變得更加脆弱。



資料來源：[63]與本計畫整理

圖 4.1-2 英國-故障事件與溫度關係示意圖

3. 天氣衝擊對鐵路造成延誤量化分析^[160]

- (1) 英國政府意識到氣候變遷對國家之關鍵基礎設施(含鐵路)的威脅，提供 NR 資金執行「天氣韌性與氣候變遷調適策略(WRCCA)」，以提高鐵路基礎設施對極端天氣和氣候變遷的調適能力，並制定長期戰略計畫。
- (2) 圖 4.1-3 為 WRCCA 計畫中分析 2006 年 4 月至 2024 年 3 月期間，各種天氣危害對鐵路造成延誤程度及其貨幣化之成本比較。
- (3) 自 2021 年 NR 發布第 3 版報告以來，英國即不斷感受到各個季節極端天氣事件對於鐵道系統的影響，其中包括一些非常嚴重的風暴、破紀錄的高溫，以及自 2010 年以來最冷的冬天等。而在 2021 年至 2024 年期間，因天氣原因造成 930 萬分鐘的延誤，已造成 3.7 億英鎊的賠償。且依據該報告顯示，因極端氣候導致之補償費用隨著時間的推移而增加，且所造成的成本仍持續上升。
- (4) 依據該報告顯示，造成 NR 營運損失之天候因素，主要係肇因於洪水、強風、地基下陷等，其次包含高溫、暴雪、雷擊等，亦是造成 NR 營運延誤而產生災損的原因之一。

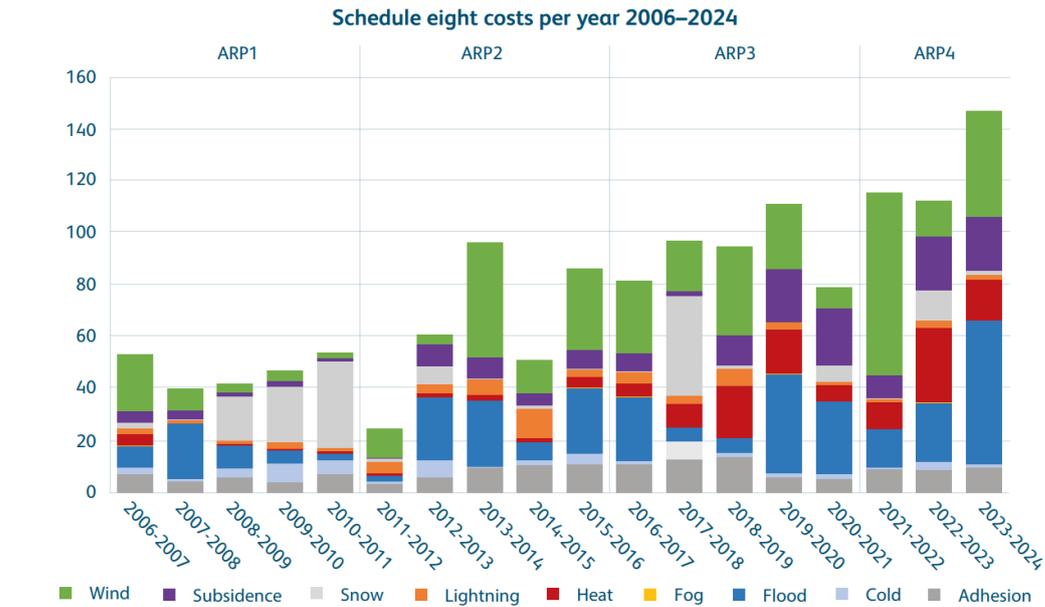


圖 4.1-3 英國-天氣危害對鐵路延誤量化成本圖

4. 路線天氣韌性和氣候變遷調適計畫^[164]

- (1) NR 除了在 WRCCA 對整體路網進行脆弱度評估外，也針對不同路線進行地區性脆弱度評估，其考量地區氣候、路線特性、以及營運特性差異。
- (2) 以英國東南地區(WRCCA for South East Region)為例，鐵路路線多建於建造年代十九世紀中期之地塹鬆軟黏土區域，由於鐵道土壤力學尚未發展完全、亦無新穎工法，因此英國東南地區鐵路特別容易受到洪水以及暴風雨威脅。該地區之氣候預測顯示氣候平均溫度會上升，同時也會面臨海平面上升之衝擊。
- (3) NR 對東南地區鐵路路線及特定地點進行脆弱度分析，包含：天氣事件種類、地點、行動方案、預估經費、預期效益、預計完成日期、以及韌性改善程度等資訊，摘錄如表 4.1-1 所述。

表 4.1-1 英國-NR 對東南地區鐵路之脆弱度分析表

脆弱度來源	地點	行動方案	行動成本	預期效益	預計完成日期	韌性改善程度	國家調適計畫
降雨	多樣	土方工程遠端監測	520 萬英鎊	減少和坍方相關的風險和誤點時間 (非量化)	2024/03/31	山體滑坡警告優化	NRNAP4
			20 萬英鎊	減少樹倒相關的風險和誤點時間 (無量化)	2021/03/31	樹木倒塌前，辨別其死亡、生病或垂死狀態	
風	路線	栽種植被	1,530 萬英鎊	增加對天氣事件的額外韌性	2024/03/31	永續管理	
		移除植被	部分土方工程 1 億 1,200 萬英鎊資金	減少因病、職災和非職災的缺勤	2020/03/31	從 139 處減少至 129 處	
降雨	路線	減少惡劣和極端天氣地點的數量					
員工	路線	改善員工面臨極端天氣事件的風險	-		2024/03/31		
脆弱度來源	地點	可能的行動方案	預計完成日期	預期效益	國家調適計畫		
洪水	Shalmsford Street (Chartham)	持續進行韌性排水工程	2019	減少停止營運和洪水導致的誤點			

資料來源：[164]與本計畫整理

5. 企業風險評估矩陣^[161]

- (1) NR 在氣候風險評估作業中，採用企業風險評估矩陣(Corporate Risk Assessment Matrix，以下簡稱 CRAM)為核心工具，系統性的評估和管理各種風險。其中，機率可能性之評估係基於歷史數據和現有控制措施，估算風險發生的頻率；衝擊影響評估則涵蓋有財務之營運損失、修復成本，以及非財務之名譽損失、服務績效低落等，如表 4.1-2 所示。
- (2) CRAM 為風險評估提供標準化的方法，使 NR 不同部門可以使用相同的標準來評估和比較風險，確保風險管理的一致性，進而根據其機率和衝擊影響評估優先排序，集中資源優先處理排序高之風險。

表 4.1-2 英國-NR 企業風險評估矩一覽表

衝擊範疇	次分類	1	2	3	4	5
安全、健康、環保	安全	可能導致少於20人受傷或單一特定傷害事件 (FWI 小於 0.1)	導致 1 至 5 人受特定重傷事件 (FWI 介於 0.1 至 0.5)	導致多於 5 人受特定重傷至 2 人死亡事件 (FWI 介於 0.5 至 2)	導致 2 至 10 人死亡事件 (FWI 介於 2 至 10)	導致 10 人以上死亡事件 (FWI 大於 10)
	健康	可能引起健康影響而需短期調適的事件，例如：工作相關壓力	可能引起健康影響而需長期調適的事件，例如：手臂振動症候群 (HAVS)	引起影響健康的事件，可能導致 1 至 2 人死亡，例如：矽塵和石棉，或導致永久工作能力喪失	引起影響健康的事件，可能導致 2 至 10 人死亡，例如：矽塵和石棉	引起影響健康的事件，可能導致超過 10 人死亡，例如：矽塵和石棉
	環境	暫時性且可逆的事件，對低環境價值的現場區域影響可忽略不計，可立即由內部控制程序管理	小規模短期可逆性事件 (<1 個月)，對現場中等環境價值區域有影響	中等規模中期的可逆性事件 (<6 個月)，對現場高環境價值區域有影響	重大，但可逆、需長期整治的事件 (>6 個月)，或對小群動物、小範圍棲地產生不可逆環境衝擊	重大、永久性且不可逆的環境破壞 (或長期 >5 年)，或重要國家或國際性場址及法規保護動物物種受衝擊
性能	能源 碳排	營運能無增加	輕微增加 (5-10%) 的營運能消耗和溫室氣體排放	中度增加 (10-20%) 的營運能消耗和溫室氣體排放	顯著增加 (20-30%) 的營運能消耗和溫室氣體排放	大幅增加 (超過 30%) 的營運能消耗和溫室氣體排放
	路網 中斷	某一路線上乘客或貨運的非計劃性中斷至多 1 天	某一路線上乘客或貨運的非計劃性中斷介於 1 至 3 天	某一路線上乘客或貨運的非計劃性中斷介於 3 天至 1 週或多條路線中斷至多 1 天	多條路線上乘客或貨運的非計劃性中斷超過 1 週及車站設施使用受限	所有乘客或貨運在主要路線上經歷長時間且非計劃性的中斷。主要車站設施的使用很可能受到嚴重限制。

衝擊範疇	次分類	1	2	3	4	5
	服務提供	非關鍵活動的表現不佳或未執行，對客戶的影響可忽略或非常輕微	非關鍵活動的表現不佳，導致對客戶的持續度影響，間歇性持續達1週	部分關鍵活動表現不佳或未執行，對1或多個客戶造成中度影響，持續長達1週	部分關鍵活動表現不佳或未執行，對1或多個客戶造成重大影響，衝擊關鍵服務提供，持續長達1週	許多關鍵活動表現不佳或未執行，導致多個客戶受長期衝擊服務提供，嚴重影響
	資產可靠性	資產可靠性CP6目標未達少於2% (包括綜合可靠性指數和影響服務的故障) 或比前一年表現下降少於2%	資產可靠性CP6目標未達3-5% (包括綜合可靠性指數和影響服務的故障) 或比前一年表現下降3%-5%	資產可靠性CP6目標未達5-10% (包括綜合可靠性指數和影響服務的故障) 或比前一年表現下降5%-10%	資產可靠性CP6目標未達10-15% (包括綜合可靠性指數和影響服務的故障) 或比前一年表現下降10%-15%	資產可靠性CP6目標未達標超過15% (包括綜合可靠性指數和影響服務的故障) 或比前一年表現下降超過15%
財務	英鎊(£)	0-2百萬英鎊	2百萬-1千萬英鎊	1千萬-5千萬英鎊	5千萬-2億5千萬英鎊	超過2億5千萬英鎊
	預算	少於3%分配預算	少於3-5%分配預算	少於5-10%分配預算	少於10-15%分配預算	超過15%分配預算
	效率	可實現100%效率目標	可實現超過90%效率目標	可實現80%-90%效率目標	可實現60%-80%效率目標	可實現不及60%效率目標
滿意度與聲望	資產永續性	延期更新少於2500萬英鎊	延期更新2500萬-1億英鎊	延期更新1億-5億英鎊	延期更新5億-15億英鎊	延期更新超過15億英鎊
	媒體與利害相關者	當地利害關係人的短期負面反應	一段時間內當地媒體負面報導及引起當地利害關係人關注	當地及區域重大報導，包括社交媒體；國家媒體引發公眾部門、分支機構和鐵路營運公司的全國性利害關係人全面聲明	廣泛、持續的全國性負面報導及公眾與主要利害關係人或分權治理機構的公開爭議	廣泛、持續的全國性負面報導及公眾與主要利害關係人、分權治理機構(包括政治和鐵路營運公司)的公開爭議，且無法避

衝擊範疇	次分類	1	2	3	4	5
	合法性	涉及輕微法律爭議、不符合規定或違反法規。庭外和解僅限於當事方，其預期結果已知。	有關單位違反法規，可能涉及調查或向當局報告，並可能受到起訴並面臨中等罰款，其結果不確定。	嚴重違反法規，可能引發重大訴訟/集體訴訟/刑事訴訟/禁令通知，其地區關注及結果不確定。	重大的起訴和罰款，包括嚴重的訴訟，如：集體訴訟，其引起全國性關注，對當前來業務運營產生影響。	免波及外部機構，於中長期內無法控制。可能涉及多個訴訟，高階主管可能面臨監禁、組織可能面臨高額罰款。引起全國性關注，對當前來業務運營產生重大影響。
	監管	無 ORR 行動 (鐵路公路管理局)	ORR 監管框架風險評分為 1-2	ORR 監管框架風險評分為 3	ORR 監管框架風險評分為 4	ORR 監管框架風險評分為 5
	政府			引起英國交通部/蘇格蘭交通部/威爾士交通部關注	引起英國交通部/蘇格蘭交通部/威爾士交通部介入	ORR 監管框架風險評分為 5
	內部	短期士氣低落，非關鍵活動表現不佳	參與度輕微下降，非關鍵服務失效導致效能與效率下降	參與度部分減少，導致部分關鍵服務效能與效率下降	全公司參與度大幅下降，導致部分關鍵服務失效	全公司參與度顯著下降，大部分服務嚴重失效，可能對國家鐵路網責任和結構引起重大變更
機率	-	風險發生的可能性非常低，小於 5%，風險發生頻率低於 25 年一次	風險發生的機率介於 5%~20%，風險發生頻率高於 25 年一次，至多 5 年一次	風險發生的機率中等，介於 21%~50%，風險發生頻介於 5 年一次至每年不及一次	風險發生的機率高，介於 51%~75%，風險發生頻率每年 1~5 次	風險發生的機率非常高，大於 75%，風險發生頻率每年大於 5 次

資料來源：[161]

6. 氣候風險評估矩陣

- (1) NR 為評估氣候變遷對資產的影響，亦建立氣候風險評估矩陣(Climate Risk Assessment Matrix)來評估目前及未來風險狀況，該矩陣係從與 NR 的 CRAM 中摘錄出鐵路適用之內容，其嚴重度、發生機率與風險矩陣表如表 4.1-3 至表 4.1-5 所述。
- (2) NR 在風險評估的方式係以現有控制與設計為基礎，假設在沒有採取任何新的調適措施下，評估目前鐵路的資產設計、標準和控制情境下之調適差距，此等差距則會受極端氣候衝擊導致資產故障並衍生安全事件，對整體路網造成重大危害。

表 4.1-3 英國-NR 氣候風險評估-嚴重度說明表

影響層面	1- Minimal	2- Minor	3- Moderate	4- Major	5- Catastrophic
安全與環境	輕微安全事件，可能導致最多 20 人輕傷或單一重傷，並且可使用現有的控制措施解決的環境事件	重大安全事件，具有可能在控制期內導致單一重傷到五起重傷，可使用現有控制措施防護的不良環境影響	重大安全事件，可能導致五起重傷到兩起死亡，並對環境有顯著影響，導致監管機構介入，現有的控制措施已無法解決或減緩	災難性安全事件，可能導致兩起到十起死亡，並對環境有重大影響，導致監管機構開立罰款，目前的控制措施不適用	災難性安全事件，可能導致超過 10 起死亡，伴隨著災難性的長期環境損害
績效	計畫性中斷，最多一天的單一路線	非計畫性中斷，最多一天的單一路線	單一路線或多條路線上非計畫性中斷(最多一周)	多條路線超過一周的非計畫性中斷	對關鍵路線的長時間非計畫性中斷，導致負面媒體關注和抗議，進而導致監理機關對路網營運許可條件進行審查
財務	每年解決問題的支出-高達 2 百萬英鎊	每年解決問題的支出-2 百萬英鎊至 2.5 千萬英鎊	每年解決問題的支出-2.5 千萬英鎊至 7.5 千萬英鎊	每年解決問題的支出-7.5 千萬英鎊至 2.5 億英鎊	每年解決問題的支出-超過 2.5 億英鎊

資料來源：[I60]

表 4.1-4 英國-NR 氣候風險評估-發生機率說明表

	1-Highly Unlikely	2-Unlikely	3-Possible	4-Likely	5-Almost Certain
發生機率標準 (Likelihood criteria)	無已知事件或已知的很少發生的	發生機率低，當前的防護措施能有效控制風險	發生機率中等，可使用當前的控制措施解決風險，進一步的改善正在進行中或積極制定中以提供防護	發生機率高，當前的控制措施無效，導致問題長時間未解決。目前尚未具備有效的防護措施來控制與管理已知弱點	發生機率極高，並且沒有有效的控制或防護措施來防止事件發生

資料來源：[160]

表 4.1-5 英國-NR 氣候風險評估矩陣表

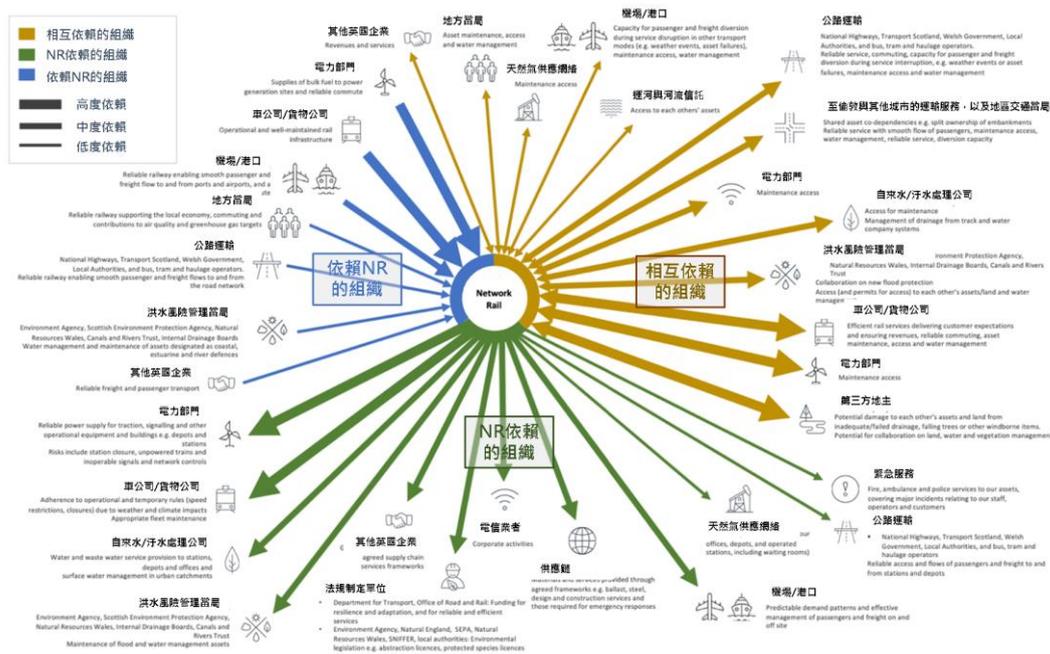
嚴重度 發生機率	1- Minimal	2- Minor	3- Moderate	4- Major	5- Catastrophic
5-Almost Certain	5/ Moderate	10/ Major	15/ Major	20/ Severe	25/ Severe
4-Likely	4/ Moderate	8/ Moderate	12/ Major	16/ Major	20/ Severe
3-Possible	3/ Minor	6/ Moderate	9/ Moderate	12/ Major	15/ Major
2-Unlikely	2/ Minor	4/ Moderate	6/ Moderate	8/ Moderate	10/ Major
1-Highly Unlikely	1/ Minor	2/ Minor	3/ Minor	4/ Moderate	5/ Moderate

註：時間範圍為 2050-2080。

資料來源：[160]

7. 組織彼此間利害關係分析^[161]

- (1) 在面對氣候變遷挑戰時，利害關係者間的參與、支持與合作對鐵路系統的韌性至關重要，例如：電力供應的韌性對鐵路系統的影響，或者往返港口鐵路路線韌性對貨物運輸之影響等。英國 NR 辨識利害關係者的方法為諮詢各業務部門，利用現有和過去與基礎設施部門的合作經驗列出潛在的利害關係，並研析如果服務減少或中斷可能對彼此構成的風險。
- (2) NR 將這些利害關係者分為「依賴 NR 的組織」、「NR 依賴的組織」、及「與 NR 有相互依賴關係的組織」三類，並根據天氣事件引起的服務減少或中斷對雙方的影響程度進行等級排序，如圖 4.1-4 中方向箭頭代表依賴的方式，線條粗細則代表依賴的程度多寡，同時也代表著服務減少或中斷後之風險高低。



資料來源：[161]

圖 4.1-4 英國-NR 氣候變遷利害關係分析圖

4.1.2 英國-高速鐵路

英國 2 號高速鐵路(High Speed 2, HS2)連接倫敦至伯明罕，為英國近期之鐵路建設計畫，其在規劃與設計之初即評估氣候變遷可能造成之風險^[76]。

HS2 與英國 NR 皆是採用半定量風險矩陣進行風險分析，惟高速鐵路與傳統鐵路的系統特性不同，故兩者對發生機率(Likelihood)、嚴重度(Consequence)以及風險(Risk)之定義不盡不同，如所示表 4.1-6 ~表 4.1-8 所述。

表 4.1-6 英國-HS2 氣候風險評估-發生機率表

發生機率	說明
非常低	此事件僅在特殊情況下發生，且預計不會在計畫 120 年的生命週期、鐵路系統 40 年的生命週期以及施工階段的 10 年內發生。
低	根據設計和工程標準以及營運和維護計劃，該事件在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內預計不會發生超過一次。
中間	該事件可能會在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內至少發生一次。
高	該事件可能會在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內發生幾次。
非常高	該事件可能會在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內多次發生。

資料來源：[76]與本計畫整理

表 4.1-7 英國-HS2 氣候風險評估-嚴重度表

嚴重度	安全	成本	旅行時間	大眾認知
輕度	輕微傷害或未遂事件	小於 5 百萬英鎊	輕微延誤	地方利害關係者會有短期負面反應
低度	損失工時傷害或需要接受醫治，對受影響者有短期影響	介於 5 百萬與 2 千 5 百萬英鎊之間	嚴重延誤	地方媒體持續的不利報導；地方利害關係者擔憂
中度	長期傷害或疾病，延長住院或無法工作	介於 2 千 5 百萬與 1 億英鎊之間	重大延誤或暫停服務時間小於 1 天	地方重要媒體或地區媒體及社交媒體報導；國家媒體關注使得大眾擔憂

嚴重度	安全	成本	旅行時間	大眾認知
高度	單人死亡/多人長期傷害	介於1億與2億5千萬英鎊之間	暫停服務時間介於1至14天	國家媒體持續廣泛的不利報導，主要利害關係者（如交通部、英國鐵路、倫敦交通局、鐵路公司、公營事業機構或其他政府機構）間出現爭議
重大	多人死亡	超過2億5千萬英鎊	暫停服務時間大於2週	國家媒體廣泛且持續的負面報導、主要利害關係者間出現爭議

資料來源：[76]與本計畫整理

表 4.1-8 英國-HS2 氣候風險評估-風險矩陣表

嚴重度/機率		發生機率				
		非常低	低	中間	高	非常高
嚴重度	重大	低	低	高	非常高	非常高
	高度	低	低	中	非常高	非常高
	中度	低	低	中	非常高	非常高
	低度	非常低	非常低	中	高	高
	輕度	非常低	非常低	低	高	高

資料來源：[76]與本計畫整理

HS2 進一步依不同生命週期階段(建造或營運)受影響之子系統(車輛、設施、人員等)，提出未來天氣趨勢、可能對子系統之衝擊、評估不同之風險等級並提出相對應之調適規劃，摘錄如表 4.1-9 所述。

表 4.1.1-9 英國-HS2 氣候變遷調適風險評估彙整表 (摘錄)

鐵路子系統在不同氣候變遷危害下半定量風險評估							半定量 風險 結果	額外 韌性 需求	氣候 風險 對應
序號	危害	未來趨勢	衝擊	對 HS2 影響	階段	調適規劃			
1	強降雨	預計日均降雨量會增加，尤其在冬季	河川、地表水和地下水源發生洪水的風險升高	軌道淹水，及/或排水設施不堪負荷	營運	<ul style="list-style-type: none"> 洪水風險標準規範在所有軌道設計中適當考量氣候因素，確保設施不受洪水侵擾，進而維持營運或能立即重啟服務 排水設施設計須能因應重現期 100 年以上的暴雨事件，並以重現期 1000 年以上的氣候變遷情境進行測試 營運期間將執行定期維護工作，以確保基礎設施持續正常運作 上述行動仍持續研發中 	低	無	In1 In2 In4
2	強降雨	預計日均降雨量會增加，尤其在冬季	河川、地表水和地下水源發生洪水的風險升高	HS2 聯外道路(供 HS2 工人及鄰近地主使用)	營運	<ul style="list-style-type: none"> 洪水風險標準規範在聯外/維修道路設計中適當考量氣候變遷 公路和通道的排水標準也考量氣候變遷 	低	無	In1 In2 In4

鐵路子系統在不同氣候變遷危害下半定量風險評估								氣候 風險 對應	
序號	危害	未來趨勢	衝擊	對 HS2 影響 及/或道路設 施淹水	階段	調適規劃	半定量 風險 結果	額外 韌性 需求	
3	強降雨	預計日均降雨量會增加，尤其在冬季	河川、地表水和地下水源發生洪水的風險升高	關鍵設施(含配電站點)浸水，導致訊號或其他電子設施故障或毀損	營運	<ul style="list-style-type: none"> 理論上，自動變壓饋電站 (ATFS) 和自動變壓站 (ATS) 會設置在環保局 (Environment Agency) 公告洪水區域之外 理論不可行時，規範 ATFS/ATS 所在的洪水水位須與設計洪水位有足夠的淨空高度 	低	無	In1 In2 In4
4	強降雨	預計日均降雨量會增加，尤其在冬季	河川、地表水和地下水源發生洪水的風險升高	隧道淹水	營運	<ul style="list-style-type: none"> 許多隧道相關規範皆納入韌性隧道考量，包含鐵路排水、土方工程、明挖回填隧道和隧道入口等，確保維持高度韌性 	低	無	In1 In2 In4

註：In1-相互依賴洪水和侵蝕對基礎設施服務的風險；In2-河流、地表水和地下水形成的洪水，對基礎設施服務的風險；

In3-沿海洪水和侵蝕對基礎設施服務的風險；In4-暴雨導致的下水道洪水風險。

資料來源：[76]與本計畫整理

4.1.3 英國-伯明翰大學

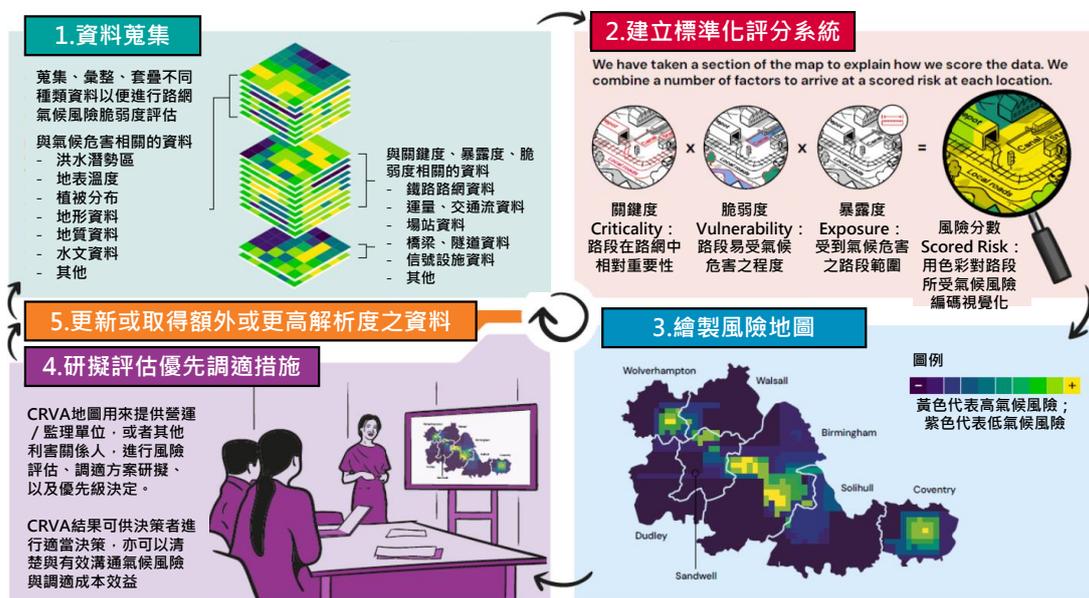
英國伯明翰大學協助英國中西部地區政府建立一包含鐵路網路在內之氣候變遷風險與脆弱度評估系統^[70,221]。該評估系統結合氣象資料、地形資料、社會經濟資料(如地方人口與產業)、交通運輸路網(含鐵路)資料，以地理資訊系統(Geographic Information System，以下簡稱 GIS)軟體，建立氣候風險與脆弱度評估工具(Climate Risk and Vulnerability Assessment，以下簡稱 CRVA)，說明如下：

1. CRVA 是一視覺化決策工具，透過不同基礎設施、氣候、與營運資料套疊，提供氣候變遷調適與監控之依據。同時，CRVA 為一風險與脆弱度評估工具，由於仰賴外部資料來評估氣候風險與脆弱度，故資料之蒐集、解析、與管理至關重要。
2. CRVA 評估流程如圖 4.1-5 所示，其透過循環程序建立一區域/路線之氣候風險並能夠滾動檢討，說明如下：
 - (1) 蒐集彙整氣候危害、關鍵度、暴露度、及脆弱度等相關資料並進行套疊，以便進行路網氣候風險脆弱度評估。其資料需要以圖層(Layer)方式匯入到 GIS 軟體(如 QGIS、ArcGIS)中，並且將圖層資料網格化(Raster)，分割成同等大小之區塊(Grid Cells)進行套疊分析。
 - (2) 資料套疊完成後，將不同圖層資料中之數值標準化，即建立等量分級。
 - 該研究根據資料解析度，以 5% 做為單位分級，意即以某一份資料中之最大值與最小值為範圍，其共分為二十等分。
 - 考量不同資料之單位差異，等量分級能夠結合不同單位資料之資訊，以視覺化方式呈現。
 - (3) 經過標準化等量分級轉換後之各圖層，可以顯示不同區域路段在不同氣候危害下受到之影響程度。每一層之最大值為 1，最小值為 0，每一層之等量分級可以用不同顏色表示。
 - (4) 根據決策分析需求，整合各資料圖層之標準化數值後，可得到代表路網中路段之氣候變遷風險/脆弱度。例如可以將不同氣候危害之關鍵

度、暴露度、脆弱度計算出來之風險值相加，得到該路段總和 CRVA 分數(CRVA Score)，如圖 4.1-6 所示。值得注意的是，納入分析的氣候危害種類須根據決策分析需求決定。

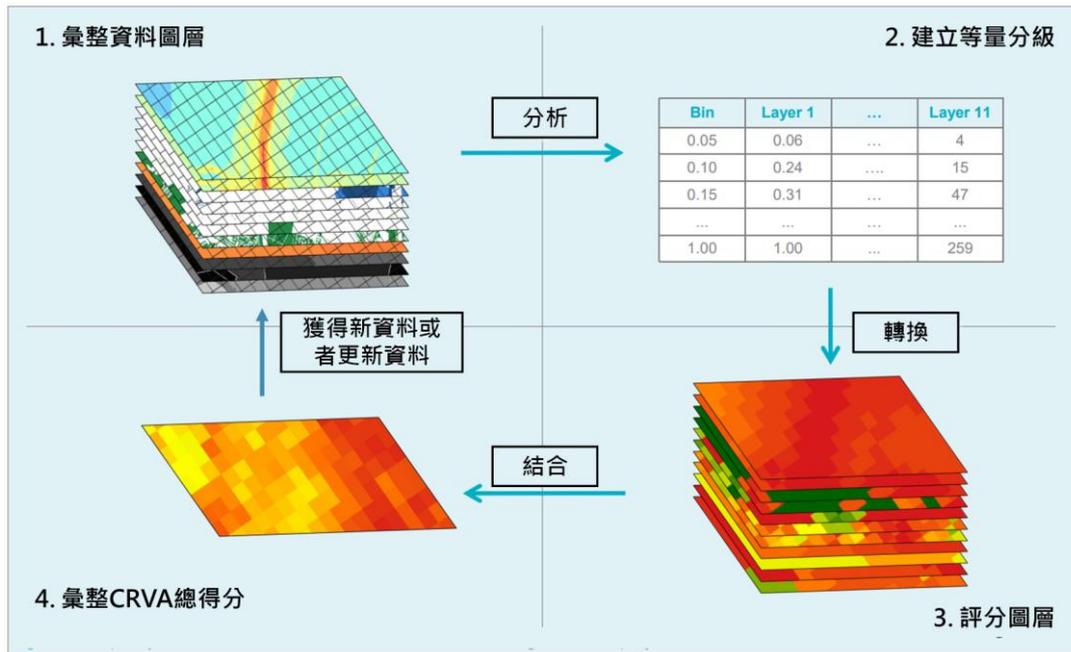
(5) CRVA 評估之網格尺度可視資料而定，該研究每一個網格為 100 公尺平方。值得注意的是，CRVA 分數為相對尺度，代表相對於分析區域內當中的所有網格，該網格之氣候風險脆弱度。

(6) CRVA 亦可針對每一個圖層(意即資料來源)所代表的權重進行調整，例如可將受強降雨影響之脆弱度圖層權重增加，其評估結果將更看重受到強降雨之影響。



資料來源：[70, 71]與本計畫整理

圖 4.1-5 英國-CRVA 氣候脆弱度評估流程圖



資料來源：[70, 71]與本計畫整理

圖 4.1-6 英國-各區塊氣候脆弱度分數計算流程圖

4.1.4 法國-國家鐵路公司

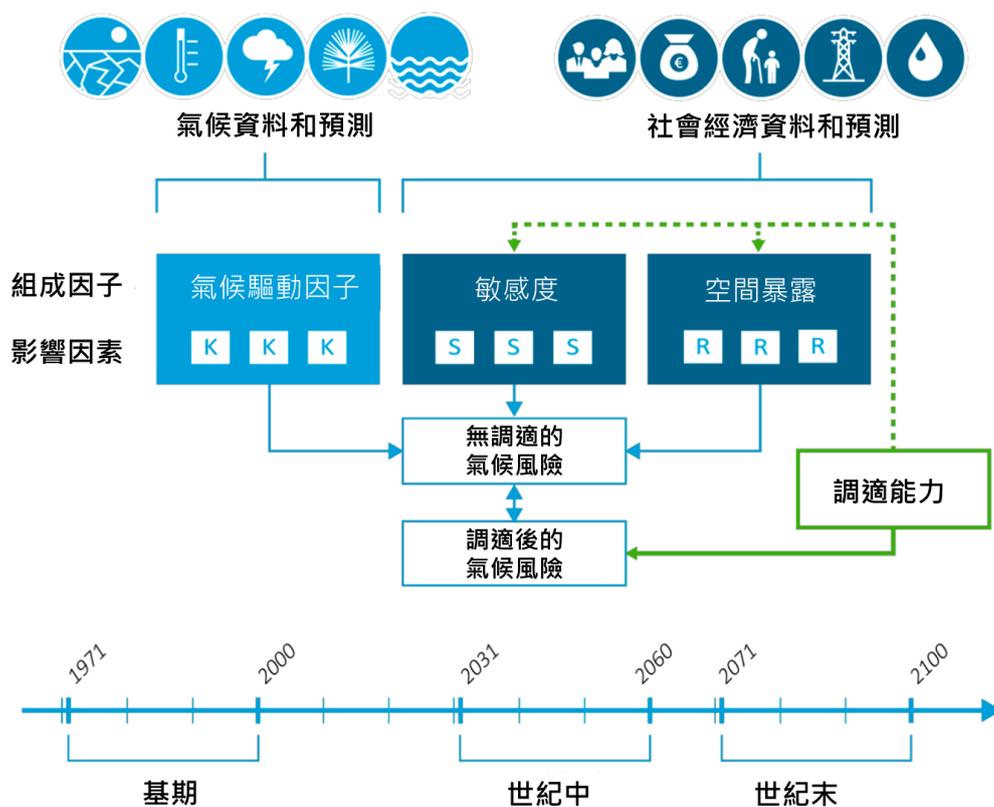
法國國家鐵路公司 SNCF 的風險評估方法涉及對各種氣候風險的全面分析，包括有衝擊影響和頻率分析，茲將重點摘錄如下：

1. 衝擊影響評估：涵蓋了財務、聲譽、職業健康與安全(Safety)、保安(Security)以及客戶和員工等多個層面，旨在全面了解各種風險對業務可能造成的潛在影響。
2. 發生頻率評估：主要基於 SNCF 過去的賠償紀錄與相關研究，研析不同風險發生的可能性。
3. SNCF 研析其面臨氣候風險較高者為：溫度變化、熱應力、溫度變異性、熱浪、洪水、颶風以及土壤收縮/膨脹。
4. SNCF 於 2022 依 IPCC 情境進行預測研究^[199]，透過天氣危害在長期和劇變性的暴露研析，了解氣候變遷對其業務的經濟影響，相關之風險評估可協助 SNCF 在制定氣候變遷的戰略和計畫時，提供重要的科學依據。

4.1.5 德國-德國聯邦環境署

德國聯邦環境署 UBA 在 2021 年氣候衝擊風險評估的報告^[66]中，採用氣候衝擊鏈(Climate impact chains)的概念建立其風險評估架構，該框架採天氣影響加上對系統衝擊的預測做為基礎，接著搭配對應的調適能力作風險評估依據，其架構如圖 4.1-7 所示，要素說明如下：

1. 氣候影響：描述氣候驅動因子對特定系統的觀察或潛在未來影響。氣候影響與特定時期有關，如：基線時期、世紀中、世紀末等。
2. 氣候驅動因子：係指氣候系統的變化方面，如：溫度、降雨等，其影響特定系統的程度取決於其強度。



資料來源：[66]與本計畫整理

圖 4.1-7 德國-聯邦環境署-氣候風險評估框架圖

1. 敏感度：描述特定系統對氣候變遷的影響程度，包括對氣候變遷的反應是不利還是有利的。例如，一些植物對高溫更加敏感，容易受到氣候變遷的影響。

2. 空間暴露：描述可能受到氣候影響的系統的存在位置和設定，例如：高度人口密集的地區可能更容易受到如洪水、暴風等氣候影響。
3. 調適能力：包括系統調整潛在損害的能力、利用機會或應對後果的能力。調適通常可降低系統的敏感性或減少氣候影響的空間範圍，像是透過改善防洪設施來提高強降雨事件的調適能力。
4. 氣候風險：表示對人類或生態系統可能產生不利後果的潛在性。在氣候變遷的背景下，風險可能來自氣候變遷的潛在影響或是人類對氣候變遷的反應。

4.1.6 美國-洛杉磯都會交通局

美國洛杉磯都會交通局(Los Angeles Metro Rail，以下簡稱 LA Metro)在 2019 年的調適策略報告^[112]中指出，增強系統對氣候變遷的調適能力，將使 LA Metro 避免或減少與氣候風險之影響，其首要任務即為評估氣候因子造成的潛在風險，重點摘錄如下：

1. LA Metro 對七種氣候危害進行風險評估，包括有：極端高溫、電力中斷、野火、強降雨、洪水、土石流、海平面上升和沿海洪水。
2. LA Metro 將風險定義為「脆弱度」和「關鍵度」兩個函數相乘，如表 4.1-10 所示。
3. 脆弱度：引用自 IPCC AR4 之定義，反映在暴露度、敏感度以及調適能力三個函數。
4. 關鍵度：根據加州交通局的定義區分為八個指標，各指標尺度為 1~5 級，這些指標的平均值則為其關鍵度分數。八個指標主要涉及其損失是否危及身生命安全或影響洛杉磯縣內居民的生活品質，包括：
 - (1) 搭乘(Ridership)。
 - (2) 是否服務搭乘依賴性較高的地區(Transit Dependency)。
 - (3) 連接性(Connectivity)。
 - (4) 系統或設施是否具有足夠的備用零件或機制(Lack of Redundancy)。
 - (5) 緊急情況中的角色(Role in Emergency Response)。

- (6) 是否鄰近聯合開發地點(Joint Development Site)。
 - (7) 服務就業機會(Job Served)。
 - (8) 是否鄰近主要經濟區(Priority Economic Zone)。
5. 風險值：係依據每個資產之脆弱度和關鍵度計算出，脆弱度尺度為 0~5、關鍵度尺度為 1~5，因此最大可能的風險值為 25，最後將依據不同分數將風險區分為 5 種等級，如表 4.1-11 所示。

表 4.1-10 美國-LA Metro-高溫風險評估範例表

指標	評估內容	分數
預期高溫增加之天數	32 more hot days by 2050	5
極端高溫之敏感度	High; may be severely damaged or subject to costly and extended repair	5
極端高溫之調適能力	Medium; Minor engineering modification to asset possible to avoid impact	3

指標	評估內容	分數
搭乘人數	5 million boarding	5
服務搭乘依賴性較高的地區	Yes	5
連接性	52 connections to other modes	5
系統或設施不可取代性	43 replacement assets	1
緊急情況中的角色	Yes	5
是否鄰近聯合開發地點	No	1
服務就業機會	1,000	5
是否鄰近主要經濟區	No	1

脆弱度
Vulnerability
Score 4.3

×

關鍵度
Criticality
Score 3.5

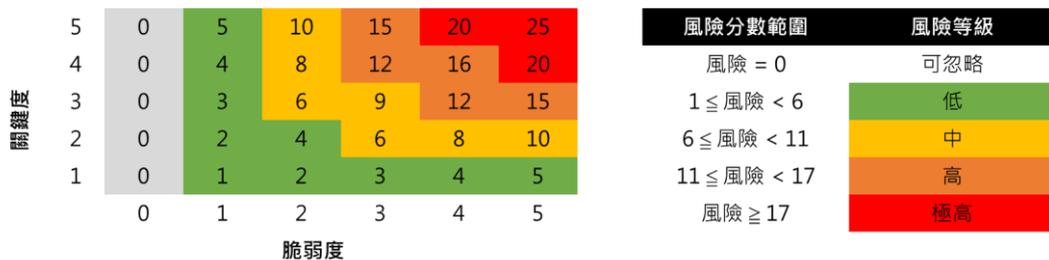
=

風險值
Risk Score
15.2 (High)

AR4定義
暴露度
敏感度
調適能力

資料來源：[112]及本計畫整理

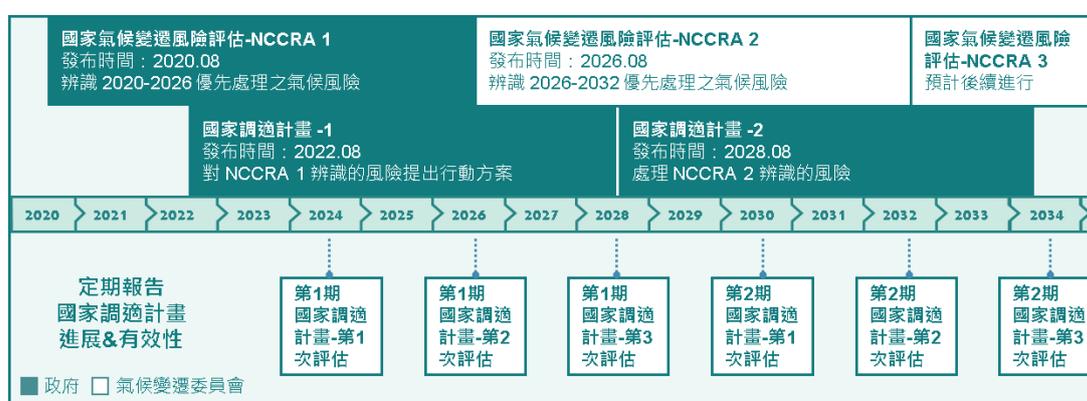
表 4.1-11 美國-LA Metro-風險評分矩陣表



資料來源：[112]與本計畫整理

4.1.7 紐西蘭-國家氣候變遷風險評估

紐西蘭現況採每 6 年發布/更新「國家氣候變遷風險評估」(National Climate Change Risk Assessment, 以下簡稱 NCCRA)報告,對「自然環境」、「居民」、「經濟」、「建設環境」、「治理」五種優先處理的氣候風險進行評估,後續亦透過每 6 年發布/更新「國家調適計畫(National Adaptation Plan)」報告,對前項報告中辨識出高風險項目者擬定適合調適行動方案,此外,為了確定擬定之調適計畫具進展與有效性,再每 2 年滾動對調適計畫進行成效評估,茲將其關係呈現如圖 4.1-8 所示。



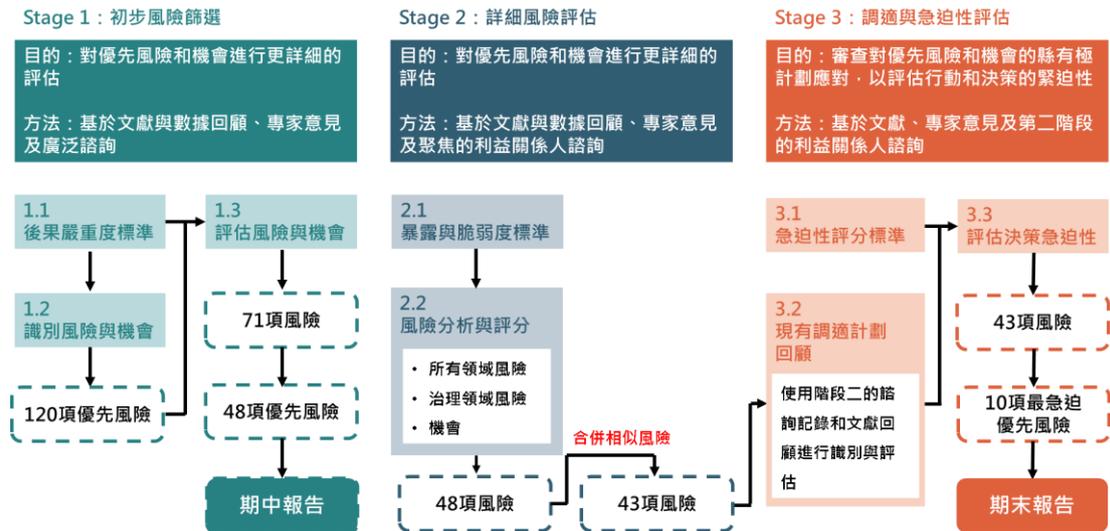
資料來源：[125]與本計畫整理

圖 4.1-8 紐西蘭-調適行動方案滾動評估流程示意圖

鐵道系統等交通基礎設施於五種優先處理氣候風險中歸屬「建設環境」領域,茲將其重點摘錄如下：

1. 風險評估架構

該架構分為三階段,透過氣候預測科學與質性分析、文獻回顧、利害關係者訪談,同時結合 RCP 8.5 及 RCP 4.5 排放情境的危害、暴露度、脆弱度等多重指標進行評估,逐步辨識優先處理氣候風險、進行全面性探討、納入相應之現有調適策略,同時評估潛在調適選項及對風險等級進行排序^[125],如圖 4.1-9 所示,說明如下：



資料來源：[125]與本計畫整理

圖 4.1-9 紐西蘭-氣候變遷風險評估架構示意圖

- (1) 第一階段：透過文獻回顧、工作坊與利害關係者訪談建立風險清單，考慮現階段、近期(2050年)及長期(2100年)RCP8.5排放情境下，五大領域中可能存在的氣候變遷風險^[126]。在第一階段的風險篩選過程中，各領域的評估團隊會先制定該領域的嚴重度分級標準，透過專家討論和與利害關係者訪談等方法，評估不同時間點下風險的相對後果，建設環境領域嚴重度分級，如表 4.1-12 所述。

表 4.1-12 紐西蘭-建設環境領域嚴重度分級說明表

嚴重度	說明	對建設環境之衝擊
輕度	全國性的影響沒有明顯變化—可透過日常營運方式處理；或僅產生局部或區域性影響，無須特殊管理措施	<ul style="list-style-type: none"> 在地方層級，對基礎建設造成輕微或不顯著的破壞 對建築物或毛利文化資產造成微不足道的破壞
低度	全國規模有些輕微影響，可透過當地管理機制和調適處理	<ul style="list-style-type: none"> 對基礎建設服務有短期且個案性的影響；或無永久破壞；或須輕微修復工作 基礎建設須提前更新 10 至 20%；或需要新的/修改輔助設施或設計標準

嚴重度	說明	對建設環境之衝擊
		<ul style="list-style-type: none"> • 增加建築物臨時或可恢復的破壞 • 須規劃未來搬遷事宜 • 對毛利文化資產造成輕微影響
中度	<p>全國規模有顯著影響，需國家機構關注調適措施。或是對一至二個地方氣候區域造成嚴重影響</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 對基礎建設服務有許多短期影響；這些影響能透過維護和輕微修理恢復 • 基礎建設須提前更新 21 至 50%；對 10 至 100 戶居民有中等程度破壞；部分居民須立即搬遷 • 5 至 20 棟商業公共建築須進行評估；部分設施須短暫搬遷 • 對毛利文化資產造成中等程度、可恢復的影響
重大	<p>全國規模有重大影響，須國家機構迅速進行調適措施。或是對一個地方氣候區域造成極嚴重影響</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 對基礎建設有短至中期的影響，為大規模損壞並須大型修復 • 基礎建設服務有重大損失 • 對 100 至 1000 戶居民有嚴重破壞，一定規模的住戶須立即搬遷 • 支出超過保險價值 • 20 至 100 棟商業公共建築須進行評估 • 對毛利文化資產造成嚴重且廣泛地影響
極端	<p>全國規模（或許多地方氣候區）有極嚴重影響，國家機構須迫切進行調適措施，也可能須與國際夥伴、金融或保險機構合作</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 服務長期中斷且影響範圍廣大；對基礎建設和其服務造成明顯的永久損傷，及/或完全失去功能 • 失去基礎建設支援，並且將服務移轉至他處 • 超過 1000 戶居民須評估立即搬遷方案 • 超過 100 棟商業建築及超過 100 棟政府和非商業建築須評估永久遷移方案 • 支出明顯超過保險價值 • 超過 75% 的毛利文化資產受到影響

資料來源：[126]與本計畫整理

(2) 第二階段：本階段在原先 RCP8.5 排放情境下，另加入了多項評估指標，如：潛在嚴重度納入 RCP4.5 排放情境^[126]。此外，亦訂立了「脆弱度」與「暴露度」的分級標準，採用質性分析方法，透過各領域的評估團隊經會議討論後給定風險等級，其分級說明如表 4.1-13 所述。

表 4.1-13 紐西蘭-暴露度與脆弱度分級標準

等級	暴露度說明	脆弱度說明
極端	超過 75% 的次分類或風險要素暴露於危害之中	極有可能受到不良影響，因為「次分類或風險要素」對特定危害高度敏感，並且調適能力不佳
高度	高比例(50-70%)的次分類或風險要素暴露於危害之中	非常可能受到不良影響，因為「次分類或風險要素」對特定危害高度敏感，並且調適能力不佳
中度	至多一半(25-50%)的次分類或風險要素暴露於危害之中	中度程度可能受到不良影響，因為「次分類或風險要素」對特定危害的敏感程度中等，並且調適能力較低或中等
低度	少部分(5-25%)的次分類或風險要素暴露於危害之中	受到不良影響的可能性較低，因為「次分類或風險要素」對特定危害的敏感性低，並且具較高的調適能力

資料來源：[126]與本計畫整理

(3) 第三階段：此階段著重確定優先風險的急迫性，藉由評估現有及計劃中的調適行動，判斷各風險和機會的急迫程度。

- 首先，蒐集自主調適和政策決策的相關資訊，確認是否已有針對優先風險和機會的計畫或行動。
- 再者，透過與專家及利害關係者的工作坊與討論會議，根據各風險的調適行動需求，如：持續關注、維持當前行動、優先研究或採取更多行動四個項目進行評分，如圖 4.1-10 所示。
- 最後，將質性分析所得之行動需求分數乘以相應的權重值，計算各領域風險的急迫性分數，做為風險排序依據^[126]。摘錄報告「建設環境」領域中，極端天氣造成風險排序第二高之 B2 建築風險為例，其探討因極端天氣事件、乾旱、火災和海平面持續

上升，對建築物造成風險，其評分內容與急迫性加權分數計算呈現如圖 4.1-11 所示。



資料來源：[126]與本計畫整理

圖 4.1-10 紐西蘭-暴露度與脆弱度分級說明圖

B2 風險-極端天氣對建築之風險：急迫性評估表						
急迫性類型	評分(0-100)		權重	行動說明		
More action needed 採取更多行動	60		最高 / 4	當前急迫風險，影響沿海和洪水易發地區的建築物，會隨時間推移而增加，需各級政府採緊急、聯合和有效的應對措施		
Research priority 優先研究	40		次高 / 3	需對危害有更多的了解，包括全國一致的洪水處理方法和相關的暴露度評估		
Sustain current action 維持當前行動	0		中等 / 2	目前行動足以應對未來五年的火災和極端天氣事件		
Watching brief 持續關注	0		最低 / 1	—		
調適急迫性(加權平均)	90		評估信心	高度一致性、中等信心		
結果	Now	重大	2050	極端	2100	極端

資料來源：[126]與本計畫整理

圖 4.1-11 紐西蘭-暴露度與脆弱度分級說明圖

2. 風險評估指標

在風險評估報告中，優先風險評估指標包含：急迫性類別(Urgency Category)、調適急迫性(Adaptation Urgency)、三個時間點(現在、2050年、2100年)的嚴重度，以及預測信心程度(Confidence)^[125,126]，以「建設環境」領域中鐵路路網風險為例，其風險分析結果如表 4.1-14 所述。

其中，信心程度是評估風險嚴重度之可信度，由證據(Evidence)和(Agreement)兩大因素構成。兩指標經過各自分級評估後，將結合構面表以確定該風險預測的信心程度^[125,126]，其量表如表 4.1-15 所述，說明如下。

- (1) 證據(Evidence)：衡量支持結論的證據數量、品質及來源多樣性。高品質證據來自於大量且多元的可靠數據，如多項研究、觀察結果或模型模擬。該指標不僅看證據的數量，更強調其穩健性與一致性。
- (2) 一致性(Agreement)：由於紐西蘭風險評估報告以質性分析為主，需評估不同來源、專家或模型之間對某一結論的共識程度。當多個來源的結論趨於一致且無明顯分歧時，一致性分數會較高。

表 4.1-14 紐西蘭-氣候變遷風險分析結果說明表

B6 鐵公路路網風險：急迫性簡介 (Risk to Linear Transport Networks: Urgency Profile)						
急迫性分類 (Urgency Category)		急迫性比例 (Proportion of Urgency)		行動說明 (Description of Actions)		
採取更多行動 (More action needed)		20		對於沿海淹水，還需要在鐵公路路網上採取更多行動。為了有效行動，需要考慮資金和立法上的限制，以減少當前和未來的風險		
優先研究 (Research priority)						
維持當前行動 (Sustain current action)		80		鐵公路路網風險多源自洪水，現有的了解及管理措施足以應對當前及近期的挑戰		
持續關注 (Watching brief)						
調適急迫性 (Adaptation Urgency)		60		信心程度 (Confidence)		高一致性 中等證據
嚴重度 (Consequence)	現在 (2022 年)	重大 (Major)	2050 年	重大 (Major)	2100 年	極端 (Extreme)

資料來源：[127]與本計畫整理

表 4.1-15 紐西蘭-氣候變遷風險評估信心程度量表

↑ 一致性	高一一致性 有限證據	高一一致性 中等證據	高一一致性 有力證據	信心 程度
	中一致性 有限證據	中一致性 中等證據	中一致性 有力證據	
	低一致性 有限證據	低一致性 中等證據	低一致性 有力證據	
	證據 (類型、數量、品質、合理) →			

資料來源：[126]與本計畫整理

4.1.8 澳洲-METRONET

METRONET 為西澳一項大型公共運輸計畫，包括改善既有交通與鐵路設施並新建 72 公里客運鐵路及增設 23 個車站，旨在改善 Perth 地區之公共運輸服務。為實踐永續發展策略，METRONET 於 2020 年展開氣候變遷路網脆弱性及風險架構及評估，對鐵路資產以及周遭社區面臨的氣候變遷風險分為短期衝擊(Shocks)與長期壓力(Stresses)。前者衝擊係指短暫且高影響的事件，如極端天氣帶來的災害；後者壓力則指由此衍生的長期問題，例如洪水導致的公衛問題^[122]，茲將其重點摘錄如下：

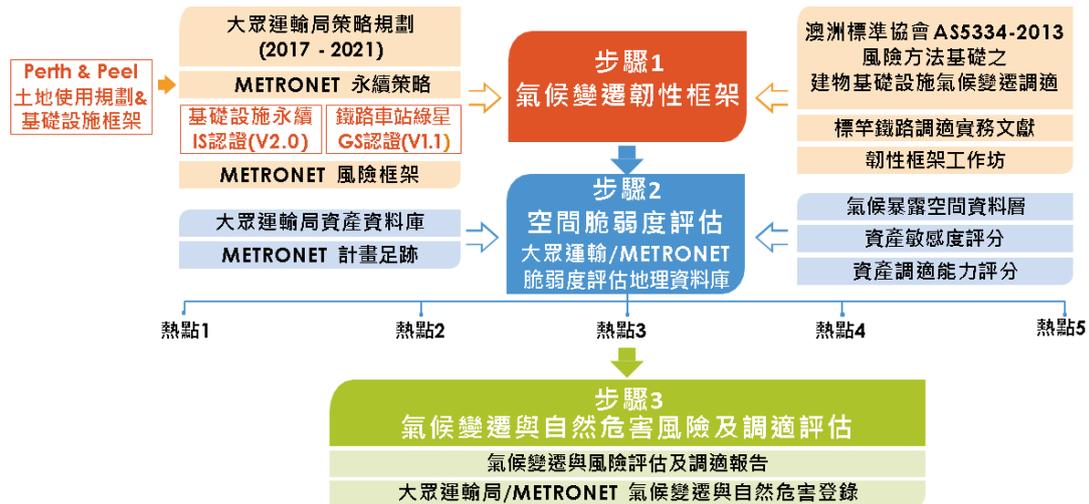
1. 該專案透過辨識各項衝擊與壓力，結合受影響資產、現有控制措施、發生頻率與嚴重度等指標，最終制定如改善基礎設施之物理實體調適措施與制定緊急應變計畫等社區管理調適措施進行應對，其調適評估過程如圖 4.1-12 所示。



資料來源：[122]與本計畫整理

圖 4.1-12 澳洲-METRONET 風險辨識與調適評估示意圖

2. 為因應氣候變遷所帶來之衝擊，METRONET 永續性策略列舉了韌性 (Resilience)與調適性(Adaptability)兩大關鍵主題，確保交通基礎設施於設計階段將氣候變遷與韌性風險納入考量。METRONET 基於歷史事件和最新的氣候變遷預測資料進行評估，採用「建構氣候變遷韌性框架」、「空間脆弱性評估」與「風險評估」三步驟建構鐵路路網的潛在脆弱性^[121]，如圖 4.1-13 所示。



資料來源：[121]與本計畫整理

圖 4.1-13 澳洲-METRONET 風險評估流程圖

(1) 步驟一：透過文獻回顧辨識氣候變遷風險並深入了解其背景，並建構氣候變遷韌性框架，而後依據該框架展開風險評估^[121]，其框架如圖 4.1-14 所示。

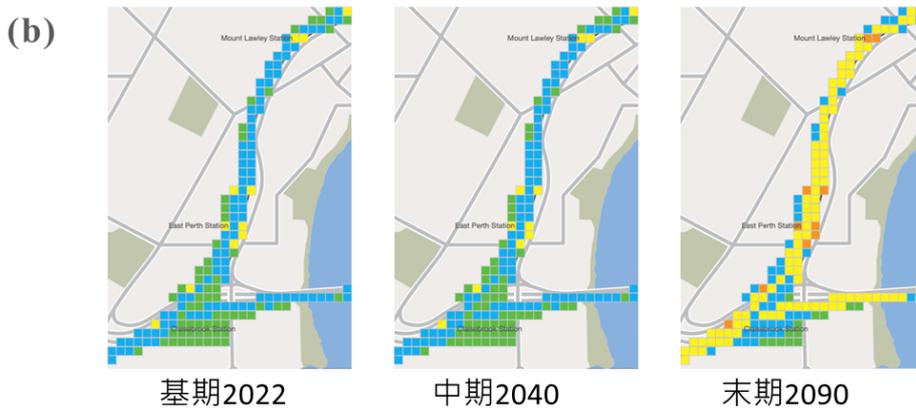
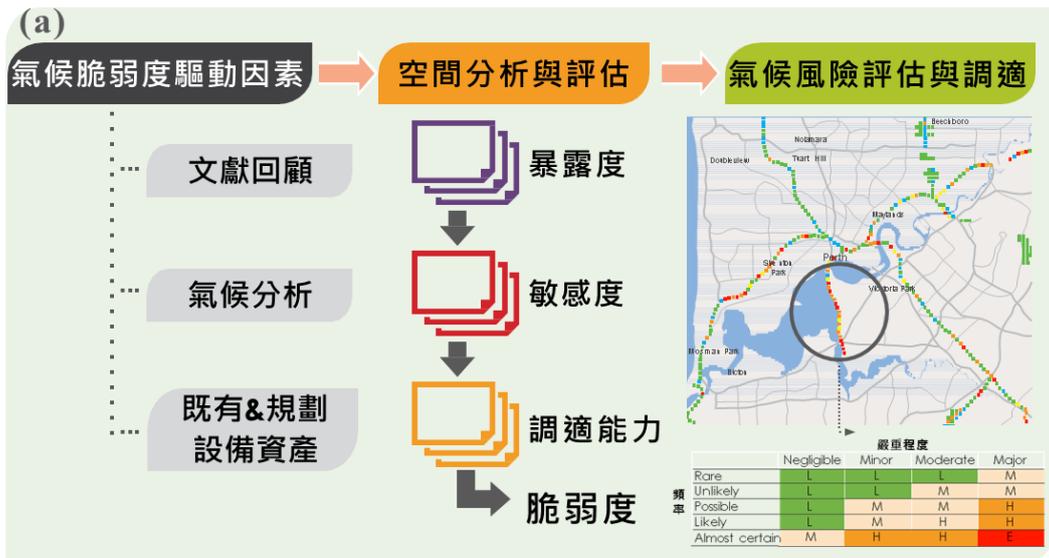


資料來源：[121]與本計畫整理

圖 4.1-14 澳洲-METRONET 氣候變遷韌性框架示意圖

(2) 步驟二：此階段用於辨識路網脆弱度及建立不同時間點(現在、2040年和 2090 年)的脆弱度地圖^[121]，說明如下：

- METRONET 將現有以及未來鐵路路網範圍結合 GIS 進行圖層開發，主要基於現有與計劃中的資產(如：號誌設備)，結合氣候變遷風險區域的空間數據(例如：政府的野火與洪水風險地圖、氣候變遷預測數據，以及來自氣象局和 IPCC 的歷史氣候數據)所生成。這些圖層透過鐵路資產與各種氣候變遷風險的組合，根據暴露度、脆弱度和調適能力等指標進行評估，最終生成脆弱度地圖，其流程如圖 4.1-15 (a)所示。
- 空間脆弱度標準係透過脆弱度評估引擎 (Vulnerability Assessment Engine) 進行分析，該工具生成鐵路路網中關鍵脆弱區域的空間圖層。藉由比對鐵路資產關鍵區域與氣候變遷高脆弱度區域，預測三個時間尺度(現在、2040 年與 2090 年)下的熱點區域(Hot Spots)，並依據生成結果發展各熱點區域的調適策略，結果如圖 4.1-15 (b)所示。



資料來源：[121]與本計畫整理

圖 4.1-15 澳洲-METRONET 空間脆弱度流程示意圖

- (3) 步驟三：對各熱點舉辦一系列的氣候變遷風險研討會，透過與會的專家與利害關係人根據步驟二的區域脆弱度分析結果與極端氣候預測趨勢，辨識其潛在調適措施。研討會之相關內容，包含過程與決議，將編製成報告書，並向 MERTONET 未來專案與上層主管機關-公共交通管理局(Public Transport Authority, PTA)提出建議^[121]，其建議彙整如表 4.1-16 所示。

表 4.1-16 澳洲-韌性調適框架研究建議彙整表

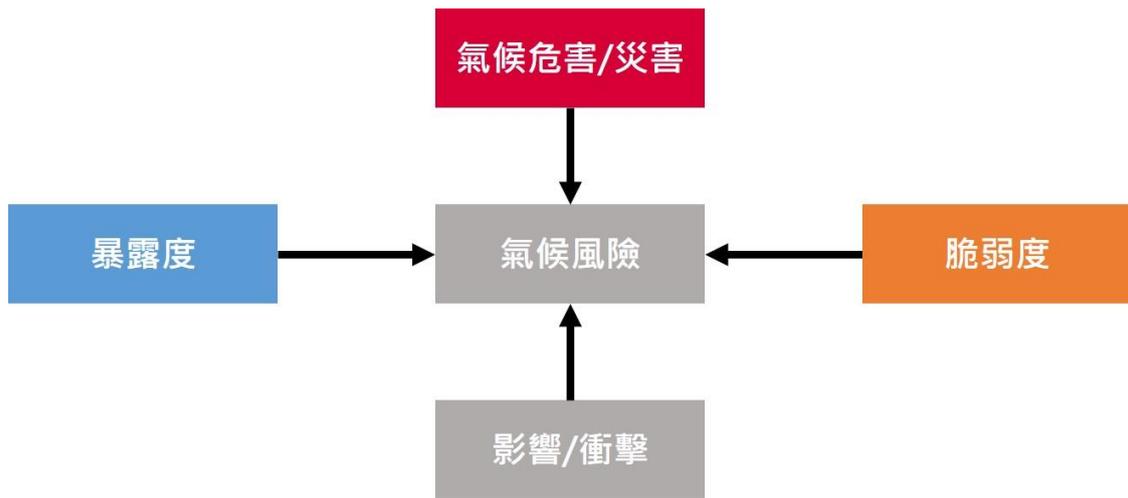
組織	建議項目
MERTONET 未來專案	<ul style="list-style-type: none"> • 所有專案合約要求需有相應的氣候變遷風險規劃 • 對高或極端的風險實施適當的調適措施 • 使用氣候變遷韌性框架提供逐步的風險評估過程和調適措施指導
公共交通管理局 (Public Transport Authority)	<ul style="list-style-type: none"> • 建立空間圖層及對未來的鐵路路網進行評估，提供鐵路營運時之參考 • 辨識優先調適之區域，增強其對氣候變遷的韌性 • 為新專案設計提供規範建議，以因應未來極端天氣事件

資料來源：[121]與本計畫整理

4.1.9 日本-國際協力機構

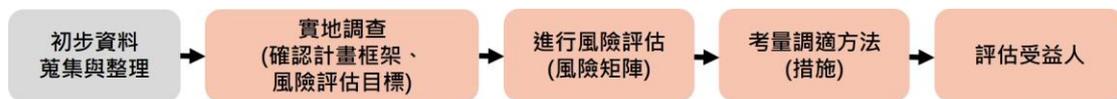
日本外務省獨立行政法人國際協力機構 (Japan International Cooperation Agency，以下簡稱 JICA) 之氣候風險調適工具 (JICA Climate-FIT) 「氣候風險評估與調適方法指引(第五版)」 (Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation measures consideration Version 5.0)^[104]，提供計畫在規劃設計階段過程，評估氣候風險並納入調適措施。此指引採用 IPCC AR5 氣候風險概念進行計畫氣候風險調查，評估框架如圖 4.1-16 所示。

指引的分析流程首先進行資料蒐集，接著透過實地訪查方式確認計畫框架和評估目標，然後評估氣候風險和提出調適措施，最後評估相關受益人，整體流程如圖 4.1-17 所示。



資料來源：[104]

圖 4.1-16 日本-JICA 氣候風險評估框架概念圖



資料來源：[104]

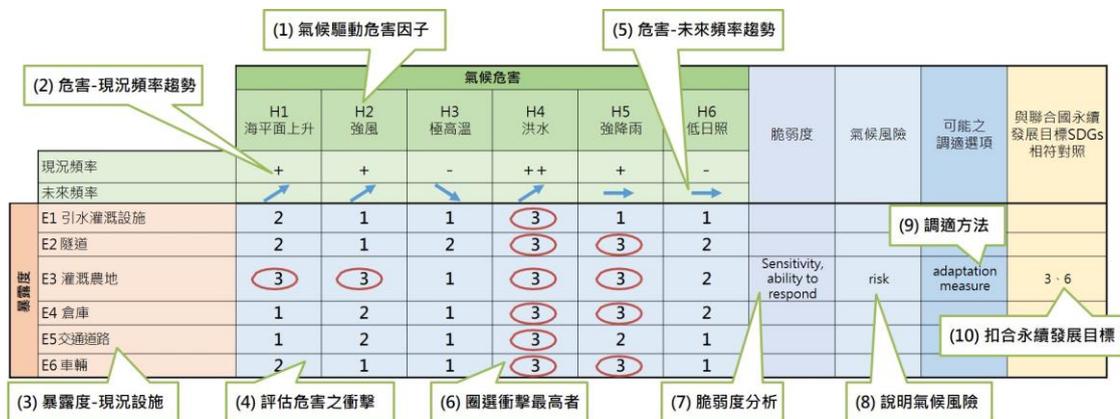
圖 4.1-17 日本-JICA 氣候風險評估和調適措施考量流程圖

在氣候風險評估部分，JICA 採用半定量方式建立氣候風險矩陣，彙整如圖 4.1-18 所示，茲將 JICA 風險矩陣各步驟說明如下：

1. 步驟 1：分析並識別氣候驅動危害因子，氣候危害類型與指標範例如表 4.1-17 所述。
2. 步驟 2：評估氣候危害現況的發生頻率，其尺度劃分標準如表 4.1-18 所述。
3. 步驟 3：填入可能受到氣候危害影響的暴露對象(即保全對象)，鑑於 JICA 主要在協助開發中國家進行氣候風險評估與調適，故此處多為既有系統或設施設備。
4. 步驟 4：評估氣候危害對暴露對象的影響程度，其評估尺度如表 4.1-19 所述。
5. 步驟 5：分析及預測危害之未來趨勢，並以箭頭表示。
6. 步驟 6：考量氣候危害的未來趨勢，決定保全對象受氣候驅動危害影響

下的優先調適組合。

7. 步驟 7：針對優先關注受保全對象，評估與脆弱度有關之敏感度與其調適能力。
8. 步驟 8：評估未來氣候風險，並建立氣候衝擊鏈，以檢視其因果關係是否合乎邏輯，如圖 4.1-19 所示。
9. 步驟 9：擬定調適選項並評估其急迫性、有效性、經濟績效和可行性，做為調適選項優先順序之依據。
10. 步驟 10：將調適選項對應至聯合國永續發展目標。



資料來源：[104]與本計畫整理

圖 4.1-18 日本-JICA 風險矩陣建構步驟示意圖

表 4.1-17 日本-JICA 氣候危害類型與指標彙整表

類型	該注意的現況與未來推估指標
熱浪、寒流	年平均溫度
	月平均溫度
	發生時間點/持續時間/規模
大豪雨	大豪雨發生頻率
颱風	颱風發生頻率
淹水	年降雨量
	月降雨量
	日降雨量
	時降雨量

類型	該注意的現況與未來推估指標
	河流洪峰流量
	年最大淹水洪峰
	淹水頻率（發生時間點/持續持間/規模）
乾旱、缺水	年平均溫度
	月平均溫度
	無降雨日數
	月雨量改變
	乾旱、缺水事件特性（發生時間點/持續持間/規模）
日照改變	太陽輻射改變
崩塌	月降雨量
	日降雨量
	時降雨量
	降雨累積量
	土砂災害警戒曲線
颱風暴潮、大浪	颱風暴潮、大浪事件（發生時間點/規模）
	海平面上升

資料來源：[104]與本計畫整理

表 4.1-18 日本-JICA 危害發生頻率尺度彙整表

頻率	定義與說明	具體標準
++	過去或目前頻繁發生	過去 20 年發生超過 10 次
+	過去或目前偶爾發生	過去 20 年發生超過 5 次
-	過去或目前幾乎從未發生	過去 20 年發生超過 1 次

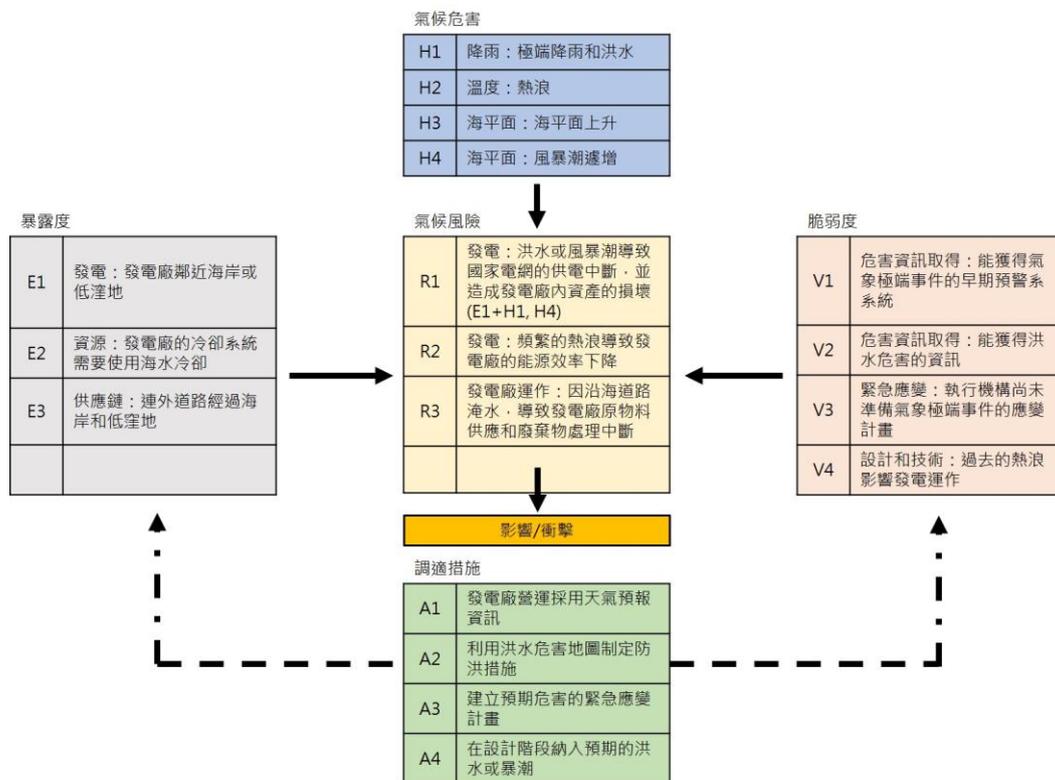
資料來源：[104]與本計畫整理

表 4.1-19 日本-JICA 影響程度評估尺度彙整表

影響程度	定義與說明	具體標準
3	迄今為止發生的事件和影響非常嚴重，難以應對和處理	該區域被淹沒，並且在恢復之前數月無法供水。
2	迄今為止發生的事件和影響屬於中等	該區域有部分淹水，設施暫時無法運作，但大約一週內就恢

影響程度	定義與說明	具體標準
		復正常，供水也得以重新啟動。
1	迄今為止發生的事件和影響不算太難處理，造成的影響較小，並且部分已被控制與管理。	該區域有部分淹水，設施暫時停運，但很快就恢復正常運作，供水也得以重新啟動。
0	迄今為止發生的事件與影響可以忽略不計。	該區域曾短暫局部淹水，但設施運作未受影響，水供應得以持續。

資料來源：[104]與本計畫整理



資料來源：[104]與本計畫整理

圖 4.1-19 日本-JICA 氣候衝擊鏈示意圖

4.1.10 國際鐵路聯盟

國際鐵路聯盟 UIC 於鐵路基礎設施氣候變遷調適^[2](Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change，以下簡稱 ARISCC)計畫中，統整其參與成員在氣候變遷和自然災害管理之實際案例，顯示運用風

險評估方法來提高決策的準確性和效率，用來應對不斷變化的風險和挑戰，茲將 ARISCC 計畫中之案例摘錄如下：

1. Impact of climate change on London's transport network

- (1) 此案例風險評估聚焦在研究氣候變遷對英國南部鐵路路網的影響，透過分析當前和未來的氣候情境，評估鐵路系統在高溫天氣下的強度、穩定性及量化損失。
- (2) 評估案例中包括有不同氣候情境可能的風險，如高溫對鐵路基礎設施的影響程度、可能導致的列車延誤和事故的潛在風險等。

2. CARAL 專案

- (1) CARAL 專案名為 Concerted Action Project on Forecasting, Prevention and Reduction of Landslide and Avalanche Risks，此專案風險評估中，主要為土石流和雪崩等天然災害的風險管理。
- (2) 透過分析地形、地質和氣候等因素，評估不同區域面臨的風險，並識別潛在的災害熱點。
- (3) 專案中亦評估現有風險管理措施的有效性，並提出改進建議。

3. MONITOR 專案

- (1) MONITOR 專案名為 Hazard Monitoring for Risk Assessment and Risk Communication，主要致力於改善防災預警和風險評估的監測方法，並結合空間規劃來提高決策效果。
- (2) 專案中透過發展決策支援系統和測試監測方法，有助於改善風險評估的準確性和效率，從而提高對自然災害的整體應對能力。

4. RIMADIMA 專案

- (1) RIMADIMA 名為 Risk Management, Disaster Management and prevention of natural hazards in mountainous and/or forested regions，專案旨在發展一個跨國的風險和災害管理系統，結合空間決策支援系統，以改善風險評估和管理。
- (2) 此專案涵蓋了多國山區和森林地區，致力於發展預防措施、緊急應對計畫以及對抗天然災害計畫。

- (3) 透過風險評估方法，專案中提供了改善風險管理策略的基礎，並促進了在災害風險管理方面的合作和知識交流。

4.1.11 其他相關方法論

1. 貝氏推論法^[208]

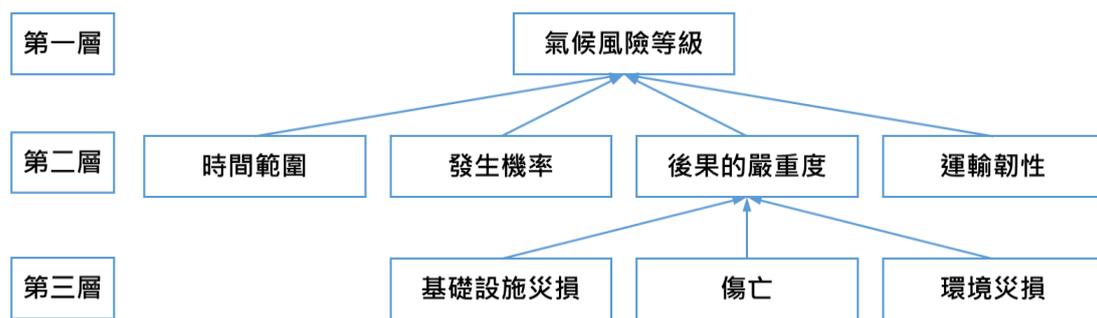
在氣候變遷影響的多樣性且氣候數據不精確的情況下，可透過模糊貝氏推論法(Fuzzy Bayesian Reasoning，以下簡稱 FBR)鑑別氣候風險事件對鐵道系統之威脅，重點摘錄如下：

- (1) 該研究盤點各項潛在氣候風險可能造成之威脅後，根據專家問卷結果計算各氣候衝擊事件之邊際機率，做為事件排名依據，該研究利用隸屬函數(Membership Function)將口語化(Linguistic)結果轉換為數值，再放入模型當中。

(2) FBR 三層模型(如圖 4.1-20 所示)

- 第一層為氣候風險等級(Climate Risk Level)；
- 第二層為影響氣候風險等級的四個參數，包含時間範圍(Timeframe)、發生機率(Likelihood)、後果的嚴重度(Severity of Consequences)及運輸韌性(Transport Resilience)；
- 第三層則是影響後果的嚴重度之三個參數，分別為基礎設施災損(Damage to Infrastructure)、傷亡(Injuries and/or Loss of Lives)及環境災損(Damage to Environment)。

- (3) 案例分析：研究中以英國鐵路為研析對象，得出首要調適之項目為：強降雨或洪水-造成橋梁受損倒塌導致之脫軌風險，相關成果如表 4.1-20 所述。



資料來源：[204]

圖 4.1-20 氣候風險-模糊貝氏推論模型架構圖

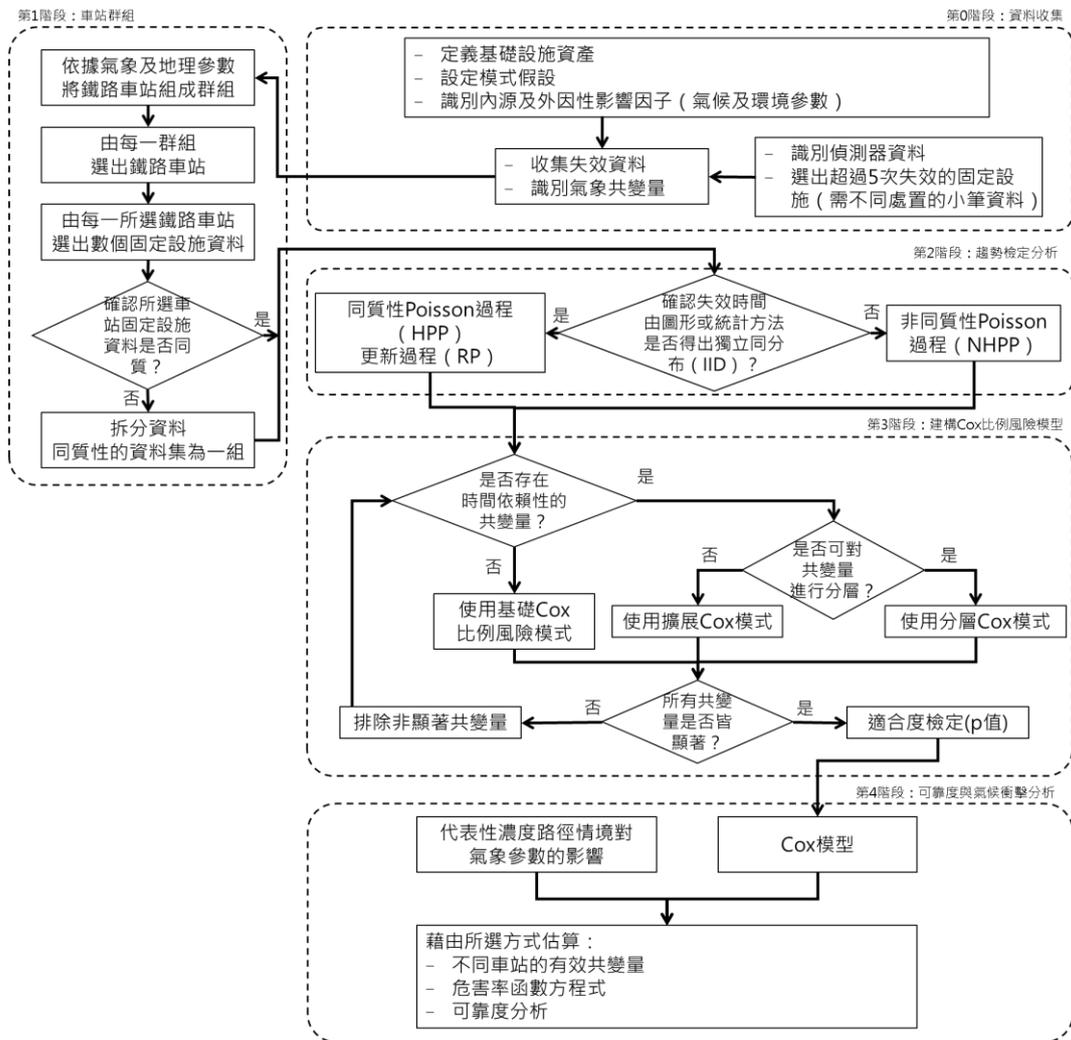
表 4.1-20 鐵路氣候風險衝擊影響排名一覽表

氣候危害	衝擊/影響	風險排序
高溫	軌道挫屈導致脫軌風險並影響軌道維護工作	6
	號誌及路側系統因高溫過熱和故障	6
強降雨或洪水	橋梁受損倒塌導致脫軌風險	1
	土石流導致脫軌風險	2
	大雨降低能見度，導致原定工作延期	8
	軌道被淹沒	3
暴雨頻繁或強度增加	樹木倒在軌道上	4
	大風降低能見度，導致原定工作延期	5
	架空電力線脫線	7
海平面上升	防波堤潰堤、洪水及脫軌風險	2
	影響橋梁及防波堤維護工作	7

資料來源：[204]

2. 可靠度分析法^[5]

可靠度之氣候影響評估方法，主要探討基礎設施資產管理者如何透過調整維護策略來應對氣候變遷，其評估方法有「巨觀」與「微觀」兩類，巨觀方法可有效評估特定氣候影響之鐵道路網脆弱度和風險，微觀方法則能全面了解氣候變遷對鐵路基礎設施資產的影響，評估流程如圖 4.1-21 所示，說明如下：



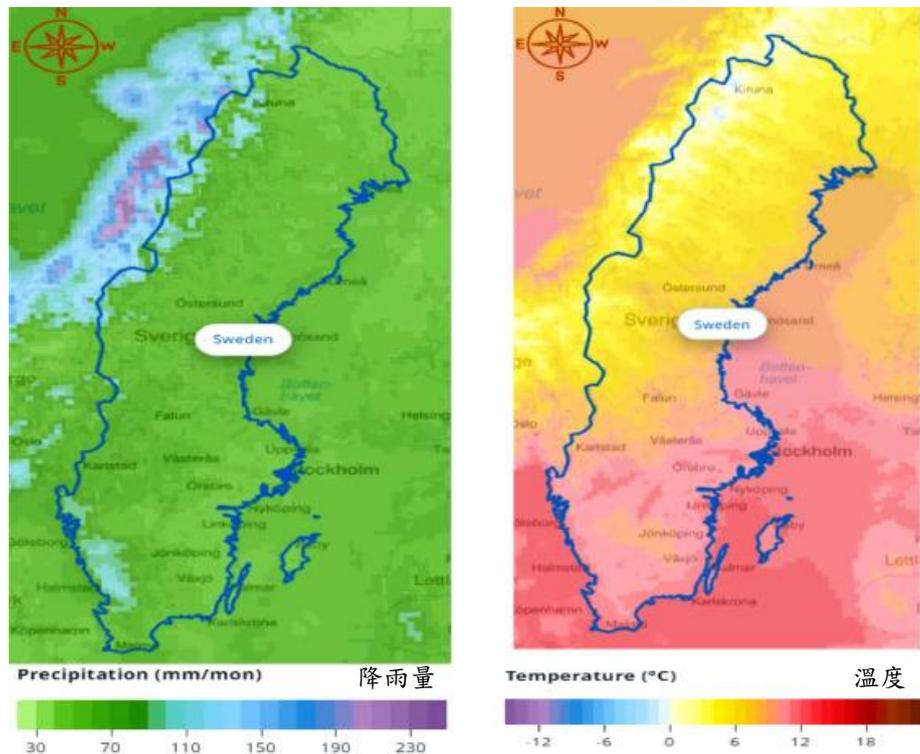
資料來源：[5]及本計畫整理

圖 4.1-21 氣候風險-可靠度分析法流程圖

(1) 巨觀評估方法

- 先選取一特定地理區域，挑選區域大小可以根據不同特徵來定義。
- 不考慮該地理區域個別實體資產及其相關故障行為，而是將該區域內所有故障模式整合一起分析。
- 氣候參數為整合各氣象站之彙整數據，例如使用平均溫度做為整個城市的指標。
- 以瑞典為例，其探討強降雨與高溫的未來潛在危害，以 17 種全球和區域氣候模型組合的平均值，依 RCP8.5 情境預測 2071 至 2100 年期間的降雨和溫度脆弱度地圖，鐵路營運業者可根據該

地圖有效識別鐵路路網中洪水與軌道挫屈的高風險區域，如圖 4.1-22 所示。



資料來源：[5]

圖 4.1-22 RCP8.5 於 2071-2100 期間降雨&溫度預測圖

(2) 微觀評估方法

- 氣候參數具高分辨率，並將同類型的資產組合進行評估。
- 微觀評估方法適用在研究對象存有異質性時，例如瑞典鐵路各個車站安裝了不同的基礎設施。
- 透過蒐集資產層面的所有特徵，包括故障原因、故障模式、地理位置和當地氣象參數，以進行氣候影響評估。
- 微觀評估方法會先識別資產受氣候之衝擊影響，包括：資產故障原因、故障模式和地理資訊等，之後再彙整當地的氣象數據，包括：溫度、降雨量等，進而研析氣候變遷對資產完善程度的影響。

- 微觀方法可發現不同地理位置與候條件下，資產可能面臨的風險程度，亦能識別氣候所造成的特定故障模式，可做為預防性維護和制定因應策略的科學依據。

4.2 調適選項案例及評估方法

本節將依鐵道生命週期彙整鐵道標竿機構之調適選項，其後回顧自然為本解決方案之相關研究及調適選項評估方法，以供參採。

4.2.1 調適選項案例

以下謹參照 3.2.1 節所述之鐵道系統生命週期，彙整鐵道標竿機構在規劃設計、施工興建及營運維護各階段所面臨之調適選項。

一、規劃設計階段

1. 英國-英國鐵路公司

英國鐵路公司 NR 因應氣候變遷之調適需求，調整更新其指導方針與標準^[161]，有關規劃設計標準內容摘錄如下：

(1) 環境和社會最低要求-設計和建設

NR 於 2019 年更新其設計與建設作業之環境和社會最低要求標準(NR/L2/ENV/015)^[148]，提供天氣韌性和氣候變遷影響評估指導與氣候預測指導，並規範各計畫必須進行「天氣韌性和氣候變遷風險評估」。

(2) 排水標準

NR 在 2018 年更新其排水設計標準(NR/L2/CIV/005/09 第 9 章-排水設計)^[147]，以符合英國環境食品與鄉村事務部(Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra)的建議，持續修訂排水和水管理策略，在排水設計中強化考量因應氣候變遷的增量和資產的脆弱性。

(3) 可靠性設計

NR 於產品設計可靠度標準(NR/L2/RSE/0005)^[149]中，規範鐵路產品需在環境運行時滿足性能、設計公差與可靠度要求。該標準於 2019 年

3 月改版，要求產品開發設計中須考慮氣候變遷，另 2020 年 3 月又再次修訂，說明對易受天氣影響(如：溫度、濕度或水分滲入)的產品制定環境要求，考慮產品運營壽命期間預期的氣候變遷。

2. 英國-大不列顛鐵路

大不列顛鐵路(Great British Railways，以下簡稱 GBR)過去引入多項措施^[175]來減緩氣候變遷之衝擊，例如：考量溫度、強風、洪水等極端氣候，來設計列車、軌道和各類基礎設施，提升軌道在炎熱和酷寒的變形耐受力，增加列車抵抗強風的設計，以及橋梁和涵洞的耐沖刷強度與排水系統需依 50 年內最強降雨事件來設計。

3. 日本-國際協力機構

日本國際協力機構 JICA 在「氣候風險評估與調適方法指引(第五版)」^[104]中，依據各領域特性列舉相關調適選項，鐵道系統規劃設計階段相關之調適選項彙整如表 4.2-1 所示。

表 4.2-1 日本-JICA 規劃設計階段調適選項彙整表

保全對象		調適選項案例
硬體設施	鐵軌系統(鐵軌、泊車位、車庫、車廂維修設施、安全運作器材、變電所電器管線、平交道等)	鐵路路線的重新規劃或改道(包括隧道路線)
		安裝、升級暖氣/冷氣設備
		安裝、升級廢水處理設施
		地鐵入口的防洪措施
		安裝和使用地下疏散引導系統
	車廂	安裝和強化空調設施
使用更堅固的車廂		
製造符合標準規格的車廂，提高車廂替換/更換的便利性		

資料來源：[104]與本計畫整理

4. 國際鐵路聯盟

(1) ARISCC^[1]專案：以英國西岸和萊茵河谷附近的鐵路進行案例研究，對未來降雨強度和持續時間會增加的情境，調整新建基礎設施的標

準，主要集中在排水系統尺寸、水壩和防洪堤高度、溫度標準提升和差異化，做為未來成員在制定鐵路指引時的參考。

(2) RERA-RAIN^[101]強降雨專案：綜整目前參與成員在強降雨或洪水之調適經驗，建議規劃階段採更強韌的軌道與號誌設計。

二、施工興建階段

鐵道施工興建階段之關注保全之對象為施工人員或者工程本體，屬於職業安全衛生對員工的環境改善或者工程風險課題，故較少於鐵路相關文獻中討論到其調適選項。

1. 英國 HS2 在其氣候變遷調適報告當中，提及強降雨、高溫等氣候危害會對施工人員造成健康衝擊^[76]，說明如下：

(1) 鐵道系統於建造過程中可能因為強降雨更加頻繁或嚴重，導致施工現場人員具更高的滑落與跌倒風險。對此，應加強未來高風險施工區域的監督與防護作業，以及增加相關工地教育訓練。

(2) 在高溫的衝擊下，可能導致現場人員身體不適或中暑等現象。對此，應提供(包含潛在受高溫衝擊區域)高溫防護設備、急救設備，飲水及遮陰設備，以及相關教育訓練。

2. 法國國鐵 SNCF 曾在其年度財務報告^[199]說明，為降低高溫造成員工不適、進而減少施工進度延誤，其施工興建階段調適選項係在工作場地設置遮蔽物，並施工休憩區域安裝空調設備。

三、營運維護階段

1. 英國-英國鐵路公司

英國 NR 在營運維護期間，持續進行關鍵氣候風險並預測其對鐵路系統各層面之衝擊辨識，之後採取一系列提升韌性的調適行動與措施，加強對現有基礎設施的保護，也對未來氣候挑戰做足充分準備，確保鐵路系統在極端天氣條件下的穩定運營^[161]，有關 NR 在氣候風險所採取之調適行動如表 4.2-2 所示。

表 4.2-2 英國 NR-營運維護階段調適選項彙整表

主要類別	改善層面	實際改善項目
強降雨	排水韌性	<ol style="list-style-type: none"> 1. 排水系統翻新 2. 排水資產數據收集 3. 針對洪水的計劃 4. 邊坡穩定工程 5. 相關議題之學術合作 6. 導入遠端狀態監測(Remote condition monitoring，以下簡稱 RCM)
	洪水與沖刷韌性	<ol style="list-style-type: none"> 1. 橋梁翻新工程 2. 特定區域之結構資產改造 3. 河流水位監測 4. 沖刷韌性增強計畫
	邊坡韌性	<ol style="list-style-type: none"> 1. 安裝邊坡移動監測設備 2. 地質技術更新和翻新計畫 3. 導入遠端狀態監測(RCM)有效即時監測邊坡狀況，減少鐵路事故風險
海平面上升、海岸侵蝕與沿岸洪水	海岸防護韌性	<ol style="list-style-type: none"> 1. 修建與重建海岸防護 2. 軌道調整、海堤加固、懸崖面穩定、海灘恢復和落石庇護 3. 監測和管理其河口和沿海資產的風險
溫度	炎熱、乾燥與熱浪	<ol style="list-style-type: none"> 1. 建立土壤乾燥化下的高風險路堤名單，並安裝設備進行監測 2. 移除高風險之黏土路上的高需水量樹木 3. 研究替代穩定技術 4. 改進乾旱地點管理流程
	極端高溫	<ol style="list-style-type: none"> 1. 於冬季進行例行檢查為夏季做準備 2. 軌道漆成白色減少熱量吸收與膨脹 3. 高風險路線改為混泥土道床 4. 安裝感測器測量軌道溫度 5. 架空線進行韌性提升

主要類別	改善層面	實際改善項目
	極端低溫	1. 安裝轉轍器加熱設備 2. 擬定冬季維護計畫（剷雪車隊） 3. 岩壁清理與防護網安裝
強風與風暴事件	雷擊韌性	1. 在建築物、信號與通訊設備中納入雷擊防護措施
	強風管理	1. 實施植被管理移除高風險植被 2. 實施輪班的植被檢查計畫 3. 使用光達（LiDAR）對其資產和鄰近土地的植被進行調查

資料來源：[161]與本計畫整理

2. 英國-大不列顛鐵路

大不列顛鐵路 GBR 在營運維護階段所導入氣候變遷調適之因應措施^[66]如下：

- (1) 極端天氣管理程序：為因應強降雪、洪水等突發天氣，所訂定之標準營運處理程序，包括積雪高度超過 8 英寸時，必須暫停列車營運，抑或是洪水溢淹水位達到軌頭底部和頂部之間時，調整為每小時 5 英里的行駛速率限制。
- (2) 工作人員管理程序：透過健康監控系統來管理室內/外之員工是否超過炎熱或寒冷天氣工作標準，並透過行車指南來規定因應的減緩措施。

3. 英國-高速鐵路(HS2)

英國 HS2 截至 2025 年雖然尚未開始營運，但在其氣候變遷調適報告當中，已經針對營運維護上可能遇到之極端氣候風險提出相對應調適措施^[76]。茲將重點摘錄如下。

- (1) 針對強降雨以及洪水建設排水設施。
- (2) 增加通往軌道區域進行維修保養之備用路線。
- (3) 於易淹水區之高地增設備用變電箱等電力設備。
- (4) 增強隧道內之排水系統使其能抵禦未來之洪水與強降雨。

- (5) 於未來易受強降雨衝擊區域種植能穩定土壤之植被。
- (6) 針對高溫區域增設防曬設施，並提供更明確之現場防高溫指引。
- (7) 提前監視與適時處理可能因高溫造成軌道挫屈之路段。
- (8) 電車線系統改良與維護保養以提升高/低溫韌性。
- (9) 於未來可能受到強風侵襲路段種植防風植被。
- (10) 加強未來可能受雷擊路段之防感電措施。

此外，本計畫於規劃設計階段之氣候變遷調適作為摘錄如下^[64]：

- (1) 英國 HS2 在建造初期，即要求對於氣候變遷進行調適評估，評估氣候危害及其對鐵路資產可能構成之風險，確認設計初期階段提出調適措施，以建立具韌性的高速鐵路。
- (2) 在洪水風險方面，其調適方案包括：千年一遇洪水所需防洪高程增加 1 公尺高度；在百年一遇洪水之排水容量則以增加 30% 方式進行設計。

4. 美國-聯邦運輸總署

美國聯邦運輸總署(FTA)所資助的 7 項先導計畫中，各計畫研擬之調適選項彙整如表 4.2-3 所述。

表 4.2-3 美國 FTA-營運維護階段調適選項彙整表

危害	調適選項
高溫	<ol style="list-style-type: none"> 1. 使用更耐熱的鋼軌材料 2. 在高溫期間，提高軌道維護作業頻率 3. 加強對車廂內空調系統的維護作業 4. 降低列車運行速度，避免列車脫軌 5. 安裝軌溫監測系統
強降雨及洪水	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提升排水系統，如提升排水泵的容量、擴建排水系統、在車站內設置臨時防洪設施 2. 設置防洪牆及屏障 3. 安裝監測系統
強風暴、颶風	定期修剪沿線樹木、清除枯木

危害	調適選項
海平面上升	1. 針對位於低窪地區的車站和路線，強化其防洪措施，包含防洪牆提高、架高關鍵設備、提升排水系統等 2. 針對海平面上升的高風險區，建立堤防及設置防洪屏障

資料來源：[51, 51, 54, 55, 56, 57, 59]與本計畫整理

5. 德國-德國鐵路

德國鐵路股份公司(Deutsche Bahn AG, 簡稱 DB)是歐盟區內最大的鐵路公司及鐵路基礎設施商。針對氣候變遷調適方面，於基礎設施管理部門成立自然災害管理團隊，專責應對極端天氣事件，因應氣候對基礎設施可能造成的負面影響。自然災害管理團隊的三個核心任務^[35]分別為冬季管理、防風暴植被管理和防暑措施，透過研擬適當且有效的調適行動，確保鐵路運營的穩定和安全，如表 4.2-4 所述。

表 4.2-4 德鐵 DB-營運維護階段調適選項彙整表

核心任務	調適選項
冬季管理	即時檢查 6,300 個加熱系統與 49,000 個轉轍器加熱裝置
防風暴 植被管理	在 2021 年至 2025 年期間，每年平均投入 1.5 億歐元，確保鐵路網絡在面對風暴和植被管理方面處於最佳狀態
防暑	1. 採購新式空調避免熱敏感控制系統受到損害 2. 在關鍵點安裝溫度感測器

資料來源：[35]與本計畫整理

6. 法國國鐵

法國國家鐵路公司(Société nationale des chemins de fer français, 簡稱 SNCF)，是歐盟區內僅次於德國鐵路的第二大鐵路公司。目前於氣候變遷調適之措施，主要係聚焦於因應高溫之相關作為。其調適行動^[199]可歸納為人員、車輛、基礎設施、監控與規範等五大面向，相關調適案例如表 4.2-5 所述。

表 4.2-5 法鐵 SNCF-營運維護階段調適選項彙整表

面向	調適選項
人員	<ol style="list-style-type: none"> 1. 工作時間表調整 2. 提升工作場域舒適度(休息區安裝空調、安裝工作場域的遮蔽) 3. 提供人員防高溫設備(提供冷卻器、保冰壺、工作服裝調整)
車輛	<ol style="list-style-type: none"> 1. 確認車輛設備的敏感元件 2. 採用防熱特殊塗層 3. 安裝抗紫外線材質窗戶 4. 空調系統使用更高效的冷媒
基礎設施	<ol style="list-style-type: none"> 1. 軌道塗上特殊防熱白漆 2. 於高風險區採用混泥土道床 3. 線路周圍種植樹木減少陽光曝曬
監控	<ol style="list-style-type: none"> 1. 制定高風險地圖 2. 對高風險區域實施密集監控
規範	更新技術標準加強鐵路韌性

資料來源：[199]與本計畫整理

7. 瑞典鐵路管理局

瑞典企業能源和通訊部 (Ministry of Enterprise, Energy and Communications) 在多個研究專案^[116]探討氣候對運輸系統和社會造成重大衝擊，其中瑞典鐵路管理局亦與顧問公司合作，評估「洪水」、「冬季暴風雪」和「颶風」對鐵路系統和社會的衝擊，並提出應對策略和建議，茲將其重點彙整如表 4.2-6 所示。

根據重大事件分析報告和既有鐵路故障事件分析，瑞典鐵路管理局提出積極發展「鐵路沿線無樹區」和「排水系統維護翻新」兩項調適行動，說明如下：

- (1) 鐵路沿線無樹區：將瑞典鐵路系統中優先等級較高的路段，移除鐵路線路周圍的樹木，確保鐵路在降雪或暴風雨天氣下，不致因樹木倒塌而中斷運行。
- (2) 排水系統維護翻新：改善故障排水系統，並翻新優先等級之鐵路排水涵洞，確保鐵路排水系統可有效抵禦強降雨的高水位情況。

表 4.2-6 瑞典鐵路系統-重大天氣事件彙整表

氣候危害	洪水	冬季暴風雪	Gudrun 颶風
時間	2000 年-2001 年	2000 年冬季	2005 年 1 月 8 日
地點	韋姆蘭與 諾爾蘭省	斯德哥爾摩地區	瑞典西南部
衝擊	舊有鐵路基礎設施受到嚴重損壞，如軌道淹水與地基破壞	強風使積雪堆積情況加劇，造成斯德哥爾摩地區疏運能力降低	鐵路沿線樹木遭颶風吹倒並侵入鐵路系統導致基礎設施受損
結論	新基礎設施所受之損壞遠小於舊有基礎設施，無需更改鐵路設計標準，但須加強舊有基礎設施之維護	需研擬短期與長期措施減少脆弱度	需識別鐵路沿線樹木倒塌風險並採取相關的應對措施

資料來源：[116]與本計畫整理

8. 紐西蘭

紐西蘭國有鐵路 KiwiRail 的氣候變遷調適策略著重於「基礎設施韌性」與「資產可靠度」，茲將調適選項彙整如表 4.2-7 所述。其中，面對極端高溫導致軌道挫屈風險的增加，KiwiRail 分別從營運管理和工程兩個層面進行調適^[107]，分述如下：

- (1) 營運管理：通過控制列車速度降低極端氣候對鐵路資產的衝擊。
- (2) 工程手段：KiwiRail 於 2023 年報告中指出，當氣溫達到 40°C 時，軌溫會超過平均溫度 20°C，使得軌道挫屈的風險增加。對此，KiwiRail 展開「Heat 40s」專案，透過在夏季來臨前，針對高曝曬和炎熱的路段進行鋼軌應力解除(Destressed)，以預留更多伸縮空間，從而降低軌道挫屈的發生機率。

表 4.2-7 紐西蘭-KiwiRail 調適選項彙整表

面向	調適選項
鋼軌	<ul style="list-style-type: none"> • 針對高溫路段進行鋼軌應力解除 • 更換成耐久度高的枕木 • 清洗與更換道碴
土木建設	<ul style="list-style-type: none"> • 邊坡穩定工程、降低邊坡斜率 • 涵洞及排水設施升級
電力系統	<ul style="list-style-type: none"> • 強化架空線張力 • 更換電桿與改善變電站
列車運轉	<ul style="list-style-type: none"> • 制定不同溫度下的運轉限制

資料來源：[108,107]與本計畫整理

9. 澳洲

METRONET 在氣候變遷調適研究中，辨識的氣候危害風險與對鐵路潛在之衝擊，並針對高溫、植被及洪水危害擬定相應之調適選項^[121]，茲將調適選項彙整如表 4.2-8 所示。

表 4.2-8 澳洲-METRONET 調適選項彙整表

危害	調適選項	說明
高溫	未來資產需達 70% 遮蔭率	訂定未來資產需達到 70% 的遮蔭率目標，同時辨識遮蔭率未達 70% 且易受高溫衝擊之資產
植被	增加路旁植被的監測和維護	於風暴事件過後安排人員進行檢查作業，同時辨識高風險植被並減少其侵入路線的風險
洪水	加強高風險橋梁監測和維護	針對混凝土易受腐蝕、沖刷和排水不足的橋梁進行密集監測與維護作業，提升高風險橋梁對極端氣候的抵禦能力

資料來源：[121]與本計畫整理

10. 國際鐵路聯盟

國際鐵路聯盟 UIC 於《鐵道調適》(RAIL ADAPT)^[100]指南中，摘錄 MOWE-IT 調適指南^[100,135]內容，將歐洲的極端氣候分為「極寒氣候」、「強風/風暴」和「強降雨」三種極端氣候類別進行探討，並列舉「事件發生前」與「長期準備」的調適選項，如表 4.2-9 所述。

表 4.2-9 MOWE-IT 調適選項彙整表

氣候危害	事件發生前	長期準備
極寒氣候	<ol style="list-style-type: none"> 1. 清理軌道障礙物 2. 增加除霜能力 3. 部署應變團隊及設備（如除雪機） 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 增加預防性維護（道岔、受電弓等） 2. 安裝防雪設施及道岔加熱器，建造雪障 3. 保持涵洞及排水系統暢通
強風/風暴	<ol style="list-style-type: none"> 1. 清理軌道附近植被及危險物品 2. 準備減少發車量及載客量策略 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 改善強風預測模型 2. 加固電纜桿提升軌道及車站建築物韌性 3. 制定風險基礎的限速及封閉線路策略
強降雨	<ol style="list-style-type: none"> 1. 提前發出洪水預警 2. 監控排水系統 3. 安裝防洪牆或可移動牆 4. 部署應變團隊及設備（如抽水機） 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 制定洪水應對計劃 2. 改善排水系統與評估增建地下排水系統 3. 考慮基礎設施的重新定位和搬遷

資料來源：[135]與本計畫整理

11. 日本-國際協力機構

獨立行政法人國際協力機構(Japan International Cooperation Agency, 簡稱 JICA)是隸屬日本外務省對外實施政府開發援助(ODA)的主要執行機構之一。該機構針對開發中國家鐵道系統所建議之調適作為，在營運維護階段除定期維護、翻新硬體設施外，環境監測、應變管理措施亦為關鍵，其相關之調適選項彙整如表 4.2-10 所述。

表 4.2-10 日本-JICA 營運維護階段調適選項彙整表

保全對象		調適選項案例
硬體設施	鐵軌系統(鐵軌、泊車位、車庫、車廂維修設施、安全運作器材、變電所電器管線、平交道等)	建設邊坡加固工程
		安裝和使用能夠檢測邊坡塌陷和土石流的設備，並導入訊號傳輸系統促發暫時停駛
修復鋼構橋梁		
	車廂	強化定期維護以保持設備品質
軟體設施	專案相關組織與人員	制定災害地圖並通知政府機構及鐵路營運機構
		引入並實施緊急因應指引，說明繞行路線和替代操作方式
		對基礎設施和鐵路軌道位置進行詳細的脆弱項目盤點/製圖
		強化對天氣狀況和基礎設備狀況的監測
		建立 GIS 極端天氣預警系統和天氣預報地圖
		與多家鐵路營運機構和多家運輸公司共同制定緊急天氣應變計畫

資料來源：[104]與本計畫整理

12. 日本-JR 東日本

JR 東日本著重防範洪水對鐵道系統造成之衝擊，其相關之氣候風險調適選項彙整如表 4.2-11 所述，說明如下：

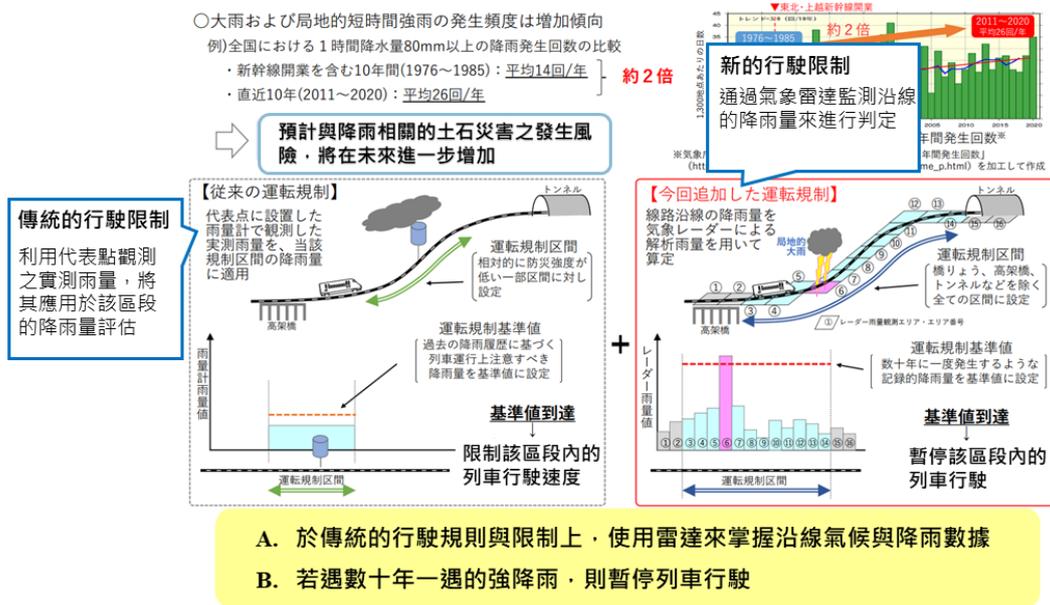
- (1) 過去 JR 東日本於在來線車站設置雨量計以進行降雨量測，並根據降雨量分級實施列車停駛或減速應變措施，但面對突發性局部強降雨越來越頻繁，新幹線已於 2021 年使用氣象雷達資料做為列車停駛評估依據，如圖 4.2-1 所示。另 JR 東日本亦於 2023 年 6 月，結合日本氣象廳及國土交通省之氣象雷達資料，綜合評估相關資訊來確保列車行駛安全。
- (2) JR 東日本開發「車輛疏散判斷支援系統」，透過蒐集河川水位、日本氣象廳公開數據及降雨量等資料，綜合評估在機廠和洪水高風險區

域之列車是否需要進行疏散，避免颱風河川水位暴漲造成列車受到災損，如圖 4.2-2 所示。

表 4.2-11 日本-JR EAST 營運維護階段調適選項彙整表

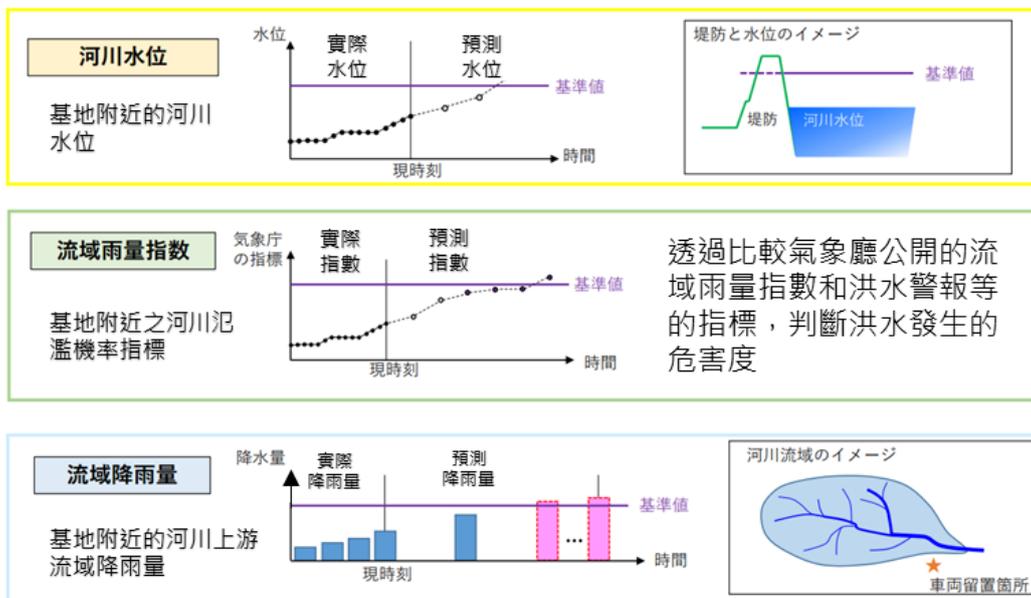
氣候危害	調適選項案例
強風	<ul style="list-style-type: none"> • 增設風速計 • 設置防風柵 • 透過氣象雷達及都卜勒雷達資料，評估陣風發生的可能性及其路徑
洪水	<ul style="list-style-type: none"> • 結合雨量及氣象雷達資料，做為發布列車停駛或慢行依據 • 開發車輛疏散判斷支援系統、制定車輛疏散計畫 • 電氣設備與電力設施架高 • 車輛停放處、維修庫等地之建築入口或開口處安裝防水板/門與擋水牆 • 確保備用系統或替代設備

資料來源：[238, 242]與本計畫整理



資料來源：[242]與本計畫整理

圖 4.2-1 日本-JR EAST 雷達與行車限制規則示意圖



資料來源：[242]與本計畫整理

圖 4.2-2 日本-JR EAST 車輛疏散判斷指標

(3) 為驗證實施調適方案效益，JR 東日本評估荒川、利根川、江戸川及多摩川在不同 RCP 情境下，有/無應對措施之差異，研析如表 4.2-12 所述，說明如下：

- 表中數字代表額外增加之損失金額，「0」則表示的增加之損失金額未超過 5 千萬日圓。
- 成果顯示無論是在 RCP 2.6 還是 RCP 8.5 情境中，現行 JR 東日本規劃的防洪措施皆能減少財務損失，以荒川為例，在 RCP 2.6 情境下，若有相關防洪應對措施，2021 年至 2050 年累計減少 199 億日圓之損失。

表 4.2-12 日本-JR EAST 不同 RCP 情境之防洪措施效益表

情境	防洪措施	荒川		利根川		江戶川		多摩川	
		2050	2021 - 2050	2050	2021 - 2050	2050	2021 - 2050	2050	2021 - 2050
RCP 2.6	無措施	23	338	2	31	4	61	3	51
	有措施	9	139	2	29	1	21	2	37
	效益	▲13	▲199	0	▲2	▲3	▲40	▲1	▲14
RCP 8.5	無措施	23	344	2	33	5	70	4	61
	有措施	10	148	2	31	2	24	3	44
	效益	▲13	▲195	0	▲2	▲3	▲46	▲1	▲17

註：單位為億日圓。

資料來源：[238]與本計畫整理

(4) 除依據各項氣候危害擬定相關應對措施外，JR 東日本推動「營運持續管理」(Business Continuity Management, BCM)，確保在遭逢天災或人禍等意外時，能不受重大資訊系統失效或災害影響，持續提供營運服務，其對策包含^[240]：

- 了解備援建設機具材料的狀態、類型及數量等。
- 掌握救災工程技術人員的技能水準、人員數量、配置情況等，並確保在緊急狀況下發布命令之方法與程序。
- 確認備援物資等之供給及配置，能在緊急狀況發生時能即時供應。
- 設置備援發電裝置、行動發電裝置等。
- 對欲前往或行經災害地區之列車，進行購票及行李限制，並提供替代路線、運具。
- 規劃商討在緊急狀況時，救援人員、修復材料運送等能優先在道路上通行。

13. 日本-JR 西日本

JR 西日本同樣著重防範洪水對鐵道系統造成之衝擊，其調適措施與 JR 東日本相似，包含淹水防治策略、車輛避難、及車輛疏散判斷支援工具^[232]，說明如下：

(1) 淹水防治策略

- 於場站、基地中設置擋/防水板、擋水牆、防洪(閘)門、沙袋等措施。
- 確保備援設備、備用系統與資源於多個地點可通用。
- 辨識洪災風險較高處，未來設計新建或升級電力或其他能源系統時，將其設置於風險較低處或海拔較高處。

(2) 車輛疏散策略與預警性停駛

由於車輛疏散需要較長時間將列車移置不會淹水的地方，因此，當決定實施車輛疏散策略時，會提早停駛且較晚恢復正常營運，如圖 4.2-3 所示。



資料來源：[232]與本計畫整理

圖 4.2-3 日本-JR WEST 車輛疏散策略與預警性停駛示意圖

(3) 車輛疏散判斷支援工具

JR 西日本透過與氣象公司合作，針對鐵路系統資產周邊之河川建立評估指標，以預測各地區是否會發生淹水災害，做為發布列車停駛及車輛疏散之參考。

14. 韓國-韓國鐵道公社、釜山交通公社、大邱交通公社

韓國鐵道公社、釜山交通公社、及大邱交通公社近年來飽受氣候變遷

威脅，包含強降雨及洪水、極端高溫、颱風及強風等，茲將其調適選項彙整如表 4.2-13 所示。

表 4.2-13 韓國-鐵道公司營運維護階段調適選項彙整表

氣候危害	調適選項案例
高溫	<ul style="list-style-type: none"> • 強化鐵道設計的耐熱標準 • 提升車輛空調系統，保障乘客舒適度 • 限制列車的運行速度 • 加強供電標準、建立電力設備監測系統 • 建立監測和自動灑水系統
海平面上升、強降雨及洪水	<ul style="list-style-type: none"> • 建置有效的排水系統並定期維護，特別是在雨季前增加檢查頻率 • 提升洪水防護能力 • 繪製氣候風險地區地圖 • 限制高風險地區發展
雪	<ul style="list-style-type: none"> • 安裝加熱系統以防止鋼軌結冰 • 加強絕緣，防止結凍和爆裂

資料來源：[110, 129, 249, 250, 251]與本計畫整理

15. 香港-香港鐵路公司

港鐵公司(MTR Corporation Limited)針對強降雨、颱風及高溫等氣候風險事件，擬定各項調適措施，以期降低氣候變遷所造成的營運中斷、資產災損等衝擊，茲將其調適選項與成本彙整如表 4.2-14 所述。

表 4.2-14 港鐵-營運維護階段調適暨成本彙整表

氣候危害	調適選項案例	調適選項成本
強降雨、颱風	<ul style="list-style-type: none"> • 將洪水處理及極端天氣處理流程納入一般操作手冊中 • 制定特大洪水的緊急應變流程，並定期進行演練 • 定期維護、檢討防洪措施 • 對地面車站和關鍵設備持續進行改善工程 	2021 年港鐵投入 108 億港幣，用於維護、升級或更換資產設備

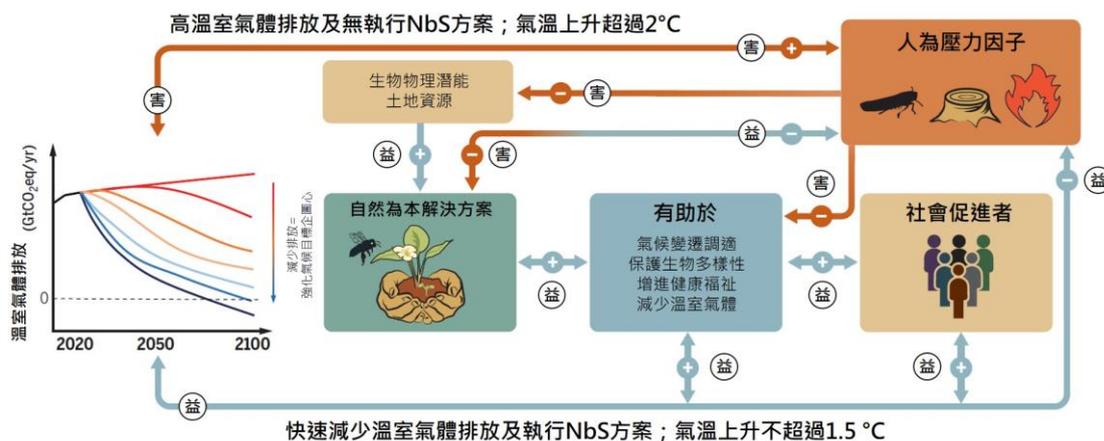
氣候危害	調適選項案例	調適選項成本
	<ul style="list-style-type: none"> 港鐵出入口防洪高程為地面高程+450 mm，並設置 1.2 m 高的防洪板 連接港鐵站及其他設施的地下出入口安裝防水門 鐵路隧道沉管路段安裝防洪閘門 	
高溫	<ul style="list-style-type: none"> 定期或依需求檢查機電設備，特別是暖通空調系統 分階段更換車站及機廠的冰水機 採用冬季自然冷卻模式，即開啟排氣扇並關閉冰水機和進氣扇 在地下車站設置月臺門，避免空調浪費 在可行的情況下，新港鐵車站採用高效率空調系統 監控高溫時的用電量並推動日常節能措施 	投入 11 億港幣分階段更換超過 150 台冰水機，截至 2022 年，第一期計畫已更換 133 台，第二期計畫於 2026 年完成再更換 31 台。

資料來源：[137, 305, 306]與本計畫整理

4.2.2 自然為本解決方案之相關研究

聯合國環境署(United Nations Environment Assembly, UNEA)於第五屆聯合國環境大會^[219]定義自然為本解決方案(Natural-based Solution, 以下簡稱 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」。

NbS 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，以及協助水質淨化與滯洪。然而，這種方法也存在一些限制，包括對改善氣候變遷的效果有限、容易受到當地氣候變遷的衝擊，以及實施成本較高，並且需要進行廣泛的規劃與管理。因此，將 NbS 跨領域與其他氣候策略整合，能促進全面性解決方案的發展^[196,205]，NbS 與其他關鍵因子的交互關係如圖 4.2-4 所示。以下分別回顧 NbS 在交通領域、英國 NR 之應用案例及其他相關學術研究。



註：箭頭為有害/益之影響方向；「+/-」代表透過增加或減少目標因素來達成影響。
資料來源：[196]與本計畫整理

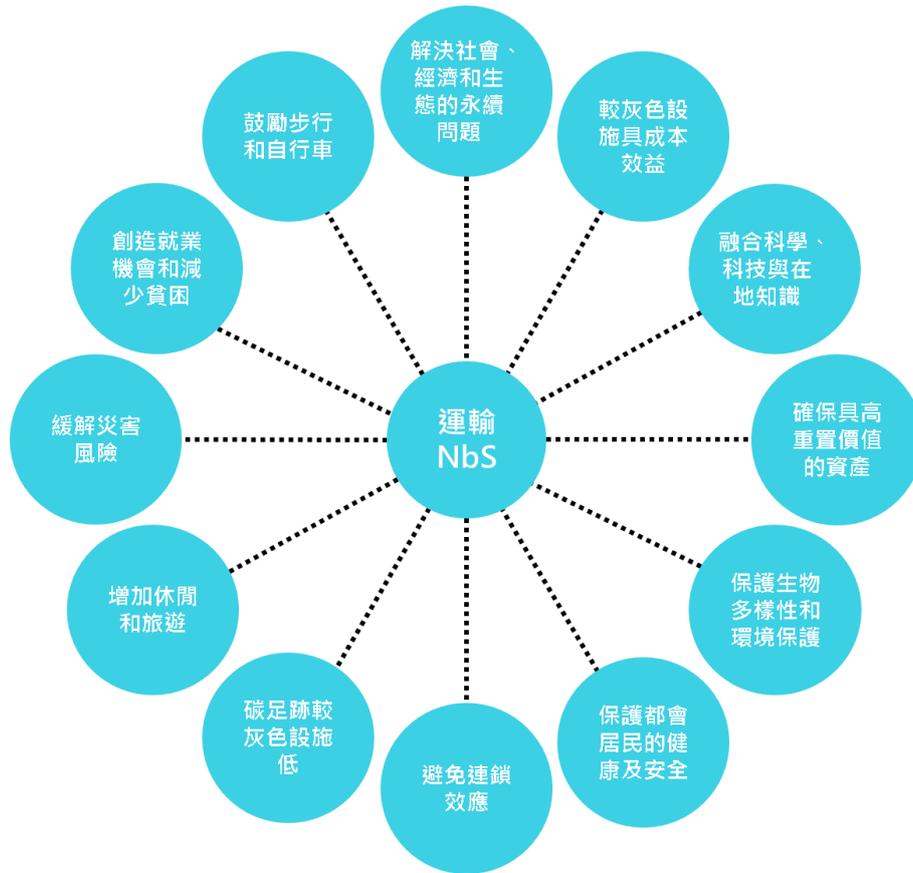
圖 4.2-4 NbS 關鍵因子關係圖

一、自然為本解決方案於運輸領域之應用

NbS 應用在交通上，係將自然環境地形與生態納入路廊路網之規劃與建造，從氣候變遷風險與調適的角度來看，此種方法可以減少溫室氣體排放，且 NbS 將自然地形、生態與人造運輸系統整合之綠灰混和設施^[8](Green-Grey Infrastructure)，相較於傳統運輸設施之灰色設施(Grey Infrastructure)，能更有效吸收抵禦氣候變遷所帶來之衝擊，進而提升運輸設施韌性，惟目前相關單位與業界對 NbS 概念與投入尚顯不足，因此實際應用案例較少。

長遠來看，融合 NbS 之交通運輸設施有多項優勢與助益^[8]，包括：單位資源投入能產生較多工作機會、促進較快之經濟成長、較容易實施與維護、及更為永續，如圖 4.2-5 所示，以下簡單彙整 NbS 於交通基礎設施與都市規劃之相關案例^[8]：

1. 海地：利用在沿著海岸線之邊坡、沙丘、沼澤種植植物，保護海岸線上之道路免於受到洪水、土石流、及大浪之衝擊與破壞。
2. 韓國：應用緊密城市(Compact City)概念，使用 NbS 方法整治首爾之清溪川與交通運輸設施，建造綠藍廊帶(Green-Blue Corridor)使大眾更有誘因步行、騎腳踏車、以及使用大眾運輸工具，減少私家車輛使用。此舉減緩都會碳排、改善空氣品質、降低都會區溫度、並提升氣候變遷調適能力。



資料來源：[8]與本計畫整理

圖 4.2-5 NbS 於交通建設與規劃效益示意圖

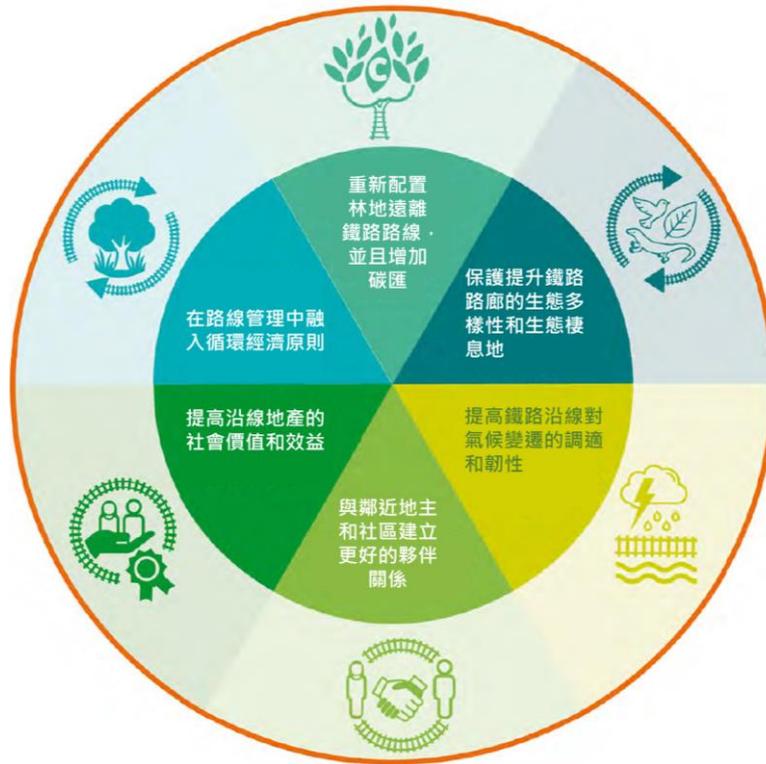
NbS 在鐵道運輸應用與推行亦屬初始階段，國際鐵路聯盟永續土地利用委員會(UIC Sustainable Land Use)在 2024 年推動「鐵路沿線設施結合生態系統服務與科學」(ECOSystem Valuation for Railways, ECOV4R)^[97]計畫，茲將其重點摘錄如下：

1. 計畫目的為透過生態系統服務(Ecosystem Services)概念與方法，在規劃鐵道系統土地時，考慮生態多樣性、水源、棲地等各種環境相關面向，納入管理與成本效益分析，做為一種基於 NbS 之鐵道運輸決策工具。
2. 生態系統服務與科學包含四大面向：供給(Provisioning)、支持(Supporting)、調節(Regulating)、文化(Cultural)。ECOV4R 計畫預期效益包括透過導入生態系統服務知識，讓鐵道運輸相關政府監理與營運單位得以更有效準確衡量 NbS 帶來之效益與相對應之成本，更有利於決策者從 NbS 角度進行鐵道運輸之規劃、建設、營運、與管理。

3. ECOV4R 包含五大工作項目(Work Packages，以下簡稱 WP)，包含：
- (1) WP1：定義 NbS 達成要件以及分析現行實務狀況與挑戰。
 - (2) WP2：定義鐵路生態系統服務框架與範疇、以及鐵路資產中典型與 NbS 相關之土地利用與棲息地種類。
 - (3) WP3：蒐集可供 NbS 方案決策分析之相關系統數據、參數、與現地資料。
 - (4) WP4：進行 NbS 方法分析與評估。
 - (5) WP5：提供能將 NbS 成本與效益財務化之評估框架。
4. ECOV4R 是國際鐵路聯盟正在建構的決策工具，其最主要目的之一為將 NbS 所能帶來的效益具體量化，使其能夠與傳統運輸設施規劃與建造方法之優劣進行比較，協助做出適當之運輸規劃與決策。
5. NbS 帶來的許多效益並非直接反映在財務收入與成本節省上，此特性與氣候變遷調適效益相似，因此需要較深入且多角度之分析並考慮設施生命週期與維護等因素，才能較準確地衡量 NbS 價值，其結果值得我國做為推行 NbS 於鐵道運輸等基礎設施參考。

二、英國鐵路網公司應用案例

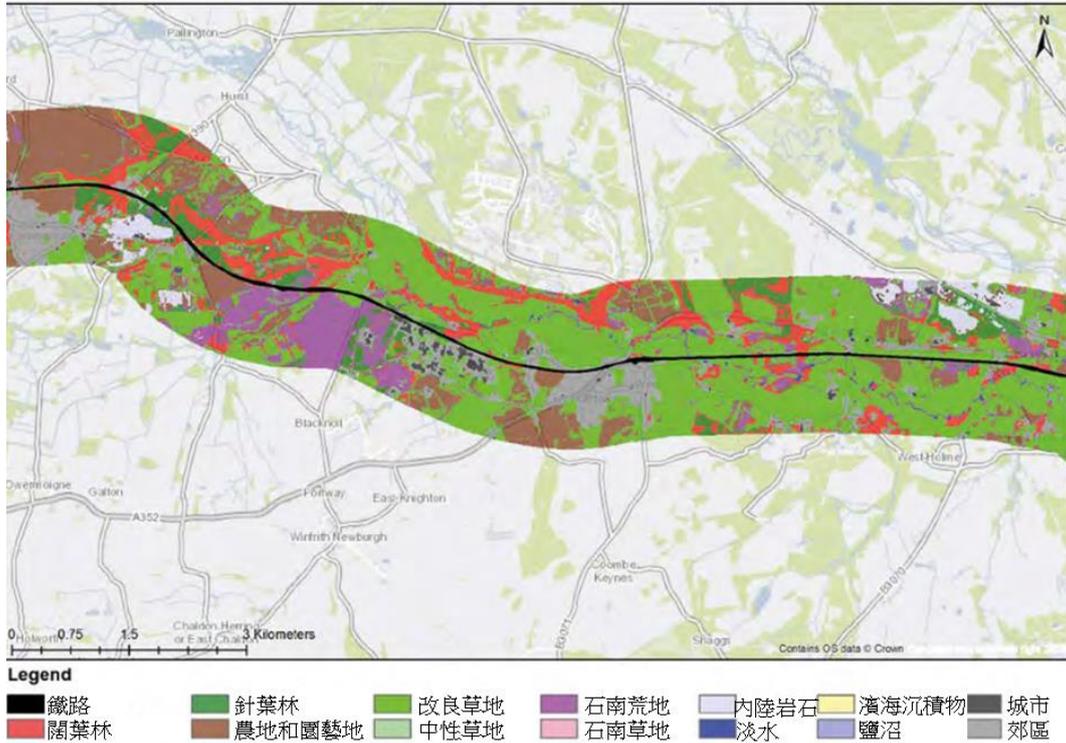
英國鐵路網公司 NR 相對積極應用 NbS，其在「國家自然路網：永續土地利用架構」^[141]報告中，提出鐵路沿線土地利用之六大策略，如圖 4.2-6 所示，茲將相關重點摘錄如下：



資料來源：[141]與本計畫整理

圖 4.2-6 英國-NR 六大土地利用策略示意圖

1. NR 與英國生態與水利中心(UK Centre for Ecology and Hydrology, UKCEH) 之合作，對其路網沿線周圍之土地類型進行調查，以英國棲地分類系統 (UK-Habitats Classification System, UKHab)歸納出 21 種土地使用以及植被覆蓋類別，如圖 4.2-7 所示。
2. 鐵路沿線土地條件與植被情況，可協助研擬具可行性且適合當地之 NbS 方案進行評估，透過視覺化、直觀、清楚的呈現土地使用與棲地分類，能協助跨部門之溝通與協調。



資料來源：[141]

圖 4.2-7 英國-NR 鐵路沿線土地植被覆蓋圖

3. 該架構於「多功能鐵路沿線」(Promoting a Multi-functional Lineside)土地利用策略中，說明 NbS 實踐方法聚焦項目包括：
 - (1) 整合排水系統以及地表逕流管理。
 - (2) 透過微氣候管理降低夏季極端高溫。
 - (3) 利用碳隔絕減緩溫室效應以及氣候變遷。
 - (4) 使用植被捕捉汙染粒子並改善空氣品質。
 - (5) 建立綠色路廊供遊憩、旅遊使用並改善公衛，如圖 4.2-8 所示。
4. 該計畫以英國 Freckland Wood, Nottinghamshire 地區之鐵路做為示範區域，其中一項具體規劃是將植被覆蓋區移出鐵道路權外，其行動方案為：
 - (1) 增加植被覆蓋區生物棲息地並使其種類多樣化。
 - (2) 維持公司土地範圍內之植被面積在 20% 以上，提升綠色形象。
 - (3) 與鐵路沿線居民協商與合作增加路權外植被覆蓋面積。

(4) 提高樹林棲地之間的連接性，形成整合生態路廊等措施，如圖 4.2-9 所示。



(a)

(b)

註：(a) 在鐵路沿線以植被建立自然排水溝渠；(b) 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。

資料來源：[141]

圖 4.2-8 英國-NR 多功能鐵路沿線土地利用策略範例圖



(a)

(b)

註：(a) 鐵路沿線有自行生長、低水土保持品質、且過於靠近鐵路之樹木，且沿線和附近植物種類單調、數量不足，無法形成多樣、連續之生態系；(b) 在鐵路兩旁一定距離外，種植連續且樹種多樣之樹籬以及植物，形成多樣生態系並以自然方式強化水土保持。

資料來源：[141]

圖 4.2-9 英國-NR 植被覆蓋移出鐵道路權外前後比較圖

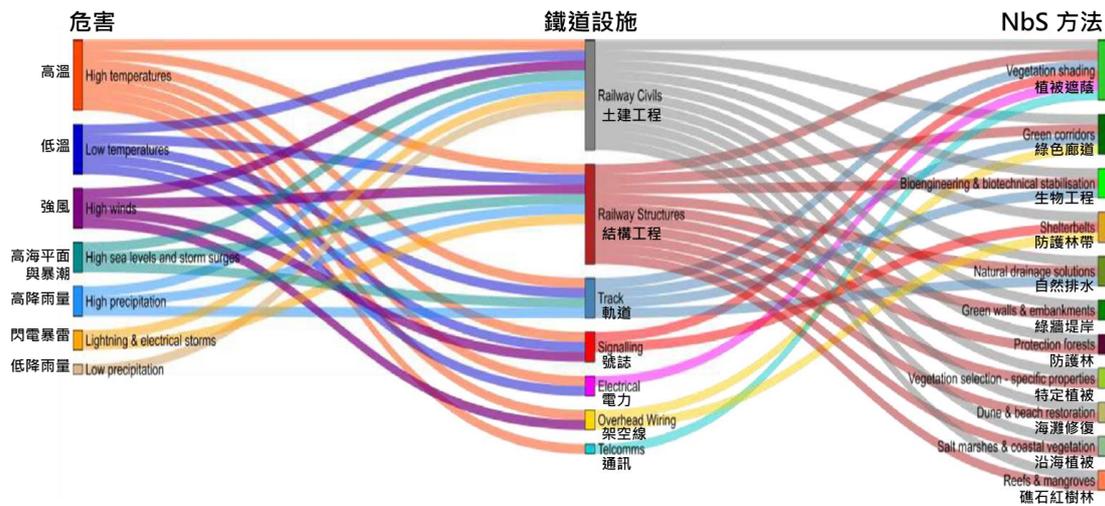
三、其他相關學術研究

NbS 目前在鐵路相關之學術研究相對較少，主要聚焦在數篇期刊論文 [10,9,11]，茲回顧如下：

1. NbS 於鐵路的相關研究^[10]依其實證應用程度可分為：概念性規劃、回顧

與比較、現地測試個別方案、案例分析與實證、與具體上線應用，重點摘錄如下。

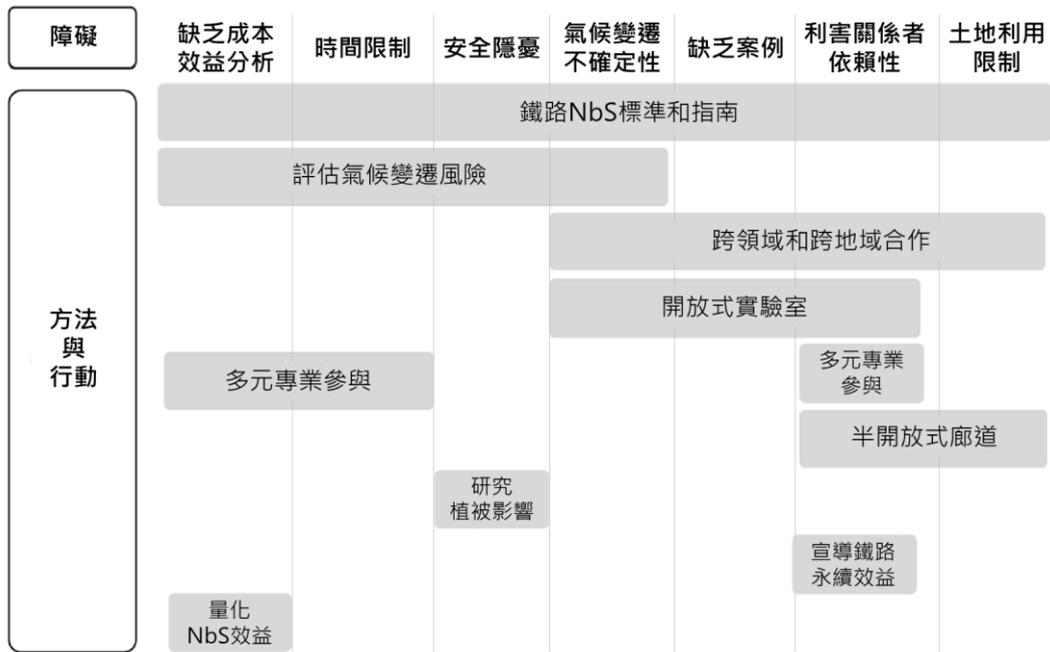
- (1) 研究發現鐵路上的 NbS 主要以針對強降雨造成之水土天災(Hydro-Meteorological Hazard)為主。
- (2) 研究中將 NbS 應用在鐵道之方法，對應到不同種類之天氣危害、及鐵道基礎設施，其彙整結果可供推行鐵道 NbS 時參採，如圖 4.2-10 所示。



資料來源：[10]與本計畫整理

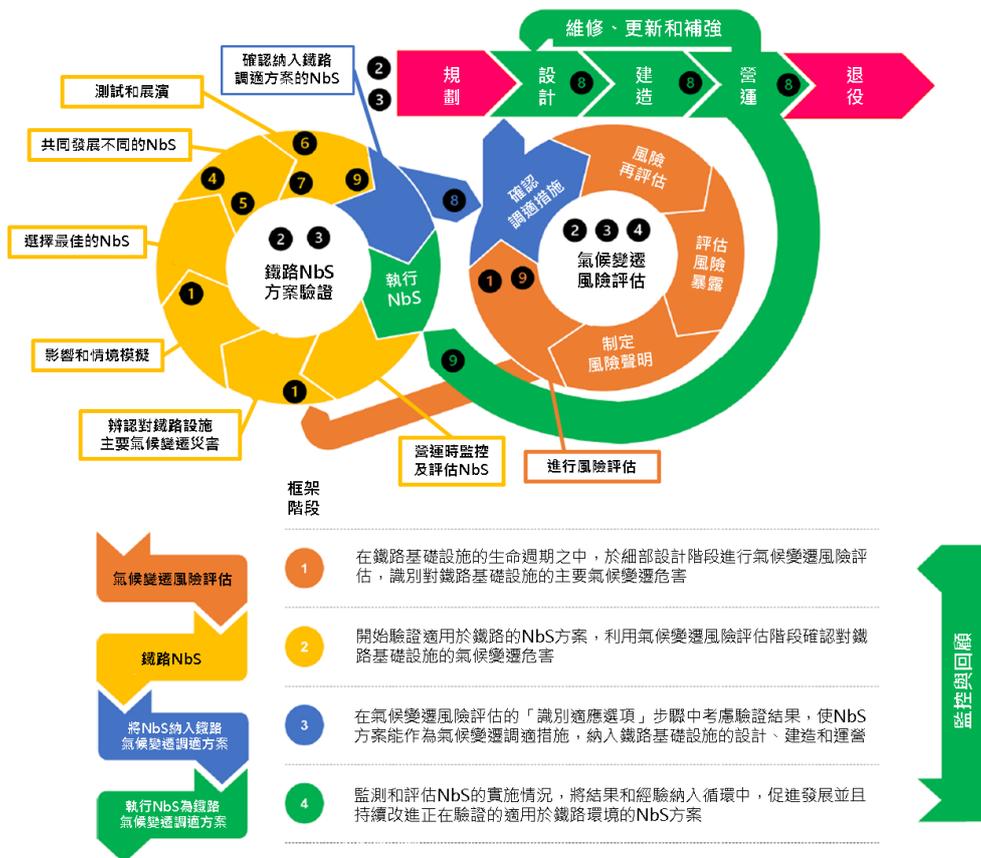
圖 4.2-10 天氣危害、鐵道設施及 NbS 方法對應示意圖

2. NbS 在鐵路應用遇到之阻礙^[9]包括：安全疑慮、缺乏實證、時間限制、缺乏效益分析、土地利用限制、氣候變遷不確定性、以及利害關係人依存性等幾個面向，圖 4.2-11 即針對每個面向提出可能之解決方案，圖 4.2-12 則是將 NbS 融入鐵路氣候變遷調適框架，重點摘錄如下：



資料來源：[9]

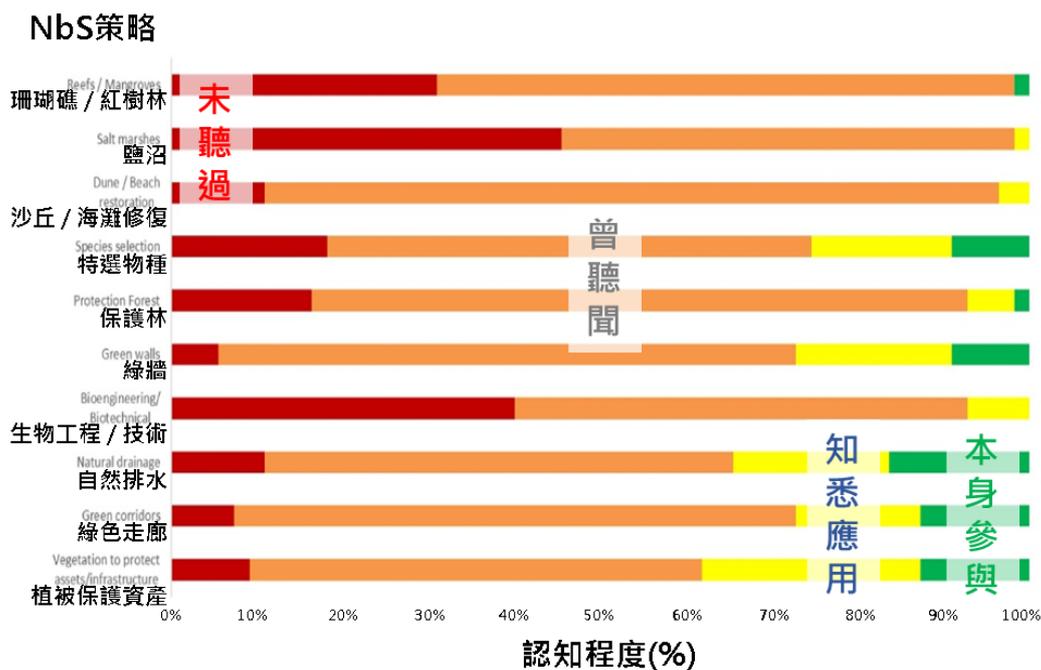
圖 4.2-11 NbS 於鐵路之障礙及解決方式示意圖



資料來源：[9]

圖 4.2-12 NbS 融入鐵道氣候變遷調適框架流程圖

- (1) 研究強調將 NbS 應用在鐵路系統的價值不應侷限在氣候變遷調適，氣候變遷調適僅是鐵路系統所面對的眾多議題中之一環，而氣候變遷風險也只是 NbS 能夠應用的其中一部分，NbS 對鐵道系統其他規劃、建造、與營運上也有不同的效益。
 - (2) NbS 以及氣候變遷調適之效果與效益皆應考慮鐵路系統中的各個層面以及系統生命週期，這將會需要更加細緻且複雜之分析與綜合考量，這也是目前在學術以及實務文獻上所缺乏的，應做為未來研究方向。
3. 研究曾在 2023 年對澳洲與英國鐵路從業人員進行氣候變遷採 NbS 調適之問卷調查^[11]，結果呈現如圖 4.2-13 所示，重點摘錄如下：
- (1) 研究結果發現，雖大部分鐵道從業人員有聽過氣候變遷 NbS 相關概念，但實務上採用情況很少。
 - (2) 研究中回顧 NbS 實務應用僅在英國與澳洲少數幾個地方，且多為示範/實驗案例，NbS 推展障礙包括有：觀念不普及、抗拒改變、未能接受新觀念、NbS 設施維護保養不易、缺乏成本效益分析、缺乏法規與可遵循指引等因素。
 - (3) 鐵道運輸應用 NbS 主要障礙是需額外維護成本，主要來自實務缺乏 NbS 經驗，因而導致較高之推行以及維護成本。
 - (4) 受訪者認為 NbS 能為鐵路運輸帶來之好處包含：生物多樣性、美觀、強化排水、社會效益以及減碳，同意應該嘗試整合 NbS 於鐵道運輸規劃設計與建造維運當中，惟必須要能夠有明確的規範與規定、清楚明瞭的成本效益分析、以及安全風險管理，才能夠提升推行與應用的可行性。



資料來源：[11]與本計畫整理

圖 4.2-13 鐵路從業人員 NbS 問卷調查結果示意圖

4. NbS 小結

- (1) 目前 NbS 在鐵路實務多應用於排水管理，特別是在有強降雨天氣型態的地區。
- (2) 推行 NbS 的重要關鍵中，建議由上而下從決策者開始推廣，制定相應政策、範疇、標準、規章，提供解決土地、時間、與經費等支援，再透過營運單位來落實執行，例如採小規模案例分析與示範計畫，將有助於 NbS 之具體成效。
- (3) 可參考國外採行之開放實驗室(Open Air Laboratories, OALs)，透過跨產業合作來取得執行 NbS 計畫所需之技術，以提供鐵路路廊及周遭完整的規畫，以有效展示 NbS。
- (4) 另一關鍵為若能將 NbS 效益量化，便能夠在成本效益分析中，準確評估 NbS 能為鐵道系統氣候變遷調適帶來之貢獻。
- (5) NbS 目前仍缺乏對社會及經濟效益的探討。未來執行時，應重視利害關係人的參與、確保效益分配的公平性，以及評估對當地在社會科學層面的影響。

4.2.3 調適選項評估方法

針對各式氣候危害之衝擊，國內外鐵道系統相關單位所採取之行動方案不盡相同，為在眾多案例中尋找合適之參考對象，ISO 14090 建議可採用之評估方法包含調適路徑(Adaptation Pathways)、成本效益分析(Cost-Benefit Analysis)、多準則評估(Multi-Criteria Analysis)、實物期權分析(Real Options Analysis)等，進行調適選項比較及排序，以下介紹類比分析及多準則評估兩種應用案例。

1. 類比分析

英國鐵路網公司 NR 與英國鐵路安全標準委員會(Rail Safety and Standards Board, RSSB)在 TRaCCA^[206]計畫進行模擬分析的實驗，希望從其他鐵路系統管理中尋求潛在的經驗教訓，在模擬分析中使用「氣候」與「鐵路」兩種類別來尋找合適的國家與鐵路網^[194]。

(1) 氣候：該研究透過全球氣候模型計算每日最低氣溫、每日最高氣溫、及每日總降雨量等三個氣候指標，並運用 Zech-Aslan 非相似性測度，將未來英國的氣候與全球其他地區現況進行比較。

(2) 鐵路：以路網每公里之延人公里數、路網每公里之延噸公里數、路網每公里之員工數、及客運營運效率等四項指標評比各國鐵路規模。

兩類別之分析皆須與英國條件足夠相似，才可為英國鐵路氣候變遷調適提供指引，如表 4.2-15 所示。

表 4.2-15 英國-21 世紀中氣候鐵路類比區域表

地區	最佳地點	備選地點
英格蘭南部	法國北部和西部	西班牙北部、法國南部、阿根廷和智利南部、澳洲墨爾本附近的海岸線、美國西部（舊金山與波特蘭之間）
英格蘭中部	英格蘭南部、法國北部、荷蘭和比利時	紐西蘭南島、阿根廷南部、智利南部

地區	最佳地點	備選地點
蘇格蘭和 英格蘭北部	英格蘭中部和南部、威爾斯、愛爾蘭、德國海岸線、丹麥	紐西蘭南島、阿根廷與智利最南端、美國西部（舊金山與波特蘭之間）
威爾斯	英格蘭南部和法國北部	荷蘭、比利時、西班牙北部、紐西蘭南島、阿根廷與智利南部、美國西部（舊金山與波特蘭之間）

資料來源：[194]與本計畫整理

2. 成本效益分析

AECOM^[3,4]以成本效益評估法為基礎，提出一套研究框架分析降低氣候變遷衝擊，如圖 4.2-14 所示。該研究分析墨爾本城市鐵路在面對高溫事件時，各項調適方法之成本和效益，找出最佳方案及其執行的最佳時機，摘錄重點如下：



資料來源：[4]與本計畫整理

圖 4.2-14 澳洲-墨爾本鐵路氣候風險評估流程圖

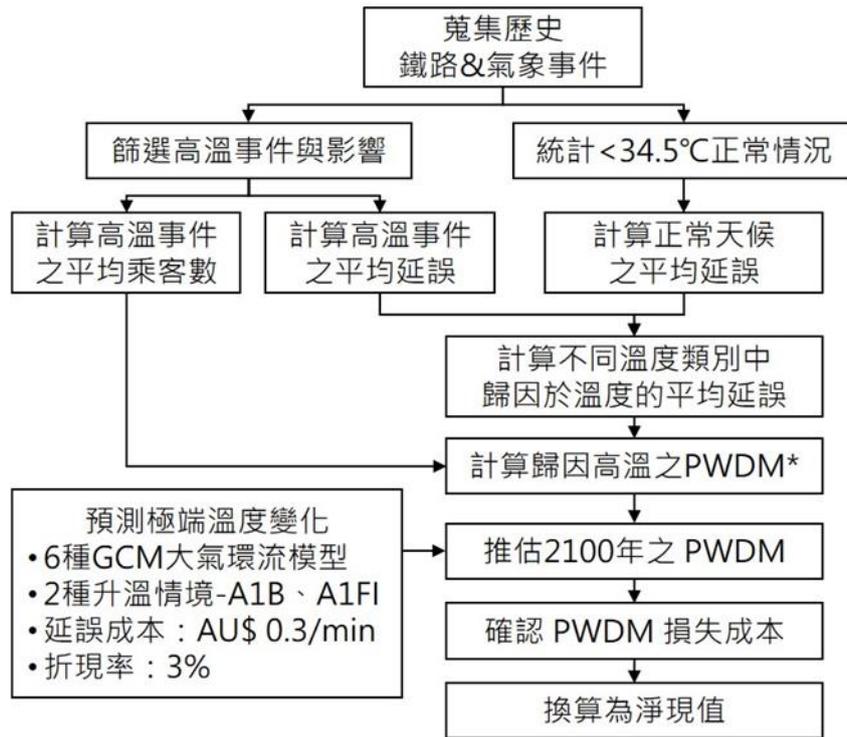
- (1) 該研究以「旅客加權延誤分鐘數(Passenger Weighted Delayed Minutes, 以下簡稱 PWDM)」做為評估指標，PWDM 為紀錄任何服務故障造成的延遲分鐘數，並依時段、行進方向及旅客數等進行加權，如圖 4.2-15 所示。

(2) AECOM 共評估六種調適策略在兩種溫室氣體排放情境下之成本與效益，在溫室氣體排放情境部分，採用 IPCC AR4 中 A1FI 情境與 A1B 情境，並且以適合研究框架與預測區域變化具準確性為原則挑選 IPCC 的 6 種 GCM。

- A1FI 情境：係未來溫室氣體排放最嚴重之情境，2100 年全球平均溫度相較 1990 年上升 5.5°C。
- A1B 情境：係未來溫室氣體排放相對較低之情境，2100 年全球平均溫度相較 1990 年上升 2°C。該研究在評估各調適方法效益時，主要以減少通勤延誤價值進行分析，但並未將舒適性、傷亡減少等效益納入考量，從表 4.2-16 中可以得知，調適措施 3-再生制軔及措施 4-更換電力線的淨現值與效益成本比優於其他調適措施。

(3) 研究最後透過敏感度分析發現設定不同延誤成本(每分鐘 0.23 澳幣和每分鐘 0.38 澳幣)、折現率(1.5%和 6.0%)，調適措施 3 皆有較優的淨現值與成本。其中，主要效益係來自再生制軔系統所節省的能源，而非來自減少通勤延誤時間。

(4) 敏感度分析也進一步分析 20 年、40 年及 60 年執行各項調適措施之淨現值與效益成本比，以了解調適措施最佳執行時機。研究結果顯示，越晚執行調適措施 3-再生制軔，其淨現值與效益成本比越差；而調適措施 4-更換電力線若於 40 年後執行，其淨現值與效益成本比較優，相關評估結果如表 4.2-16 所述。



資料來源：[3]與本計畫整理

圖 4.2-15 澳洲-墨爾本鐵路極端高溫風險評估流程圖

表 4.2-16 澳洲-墨爾本鐵路調適方案效益成本比較表

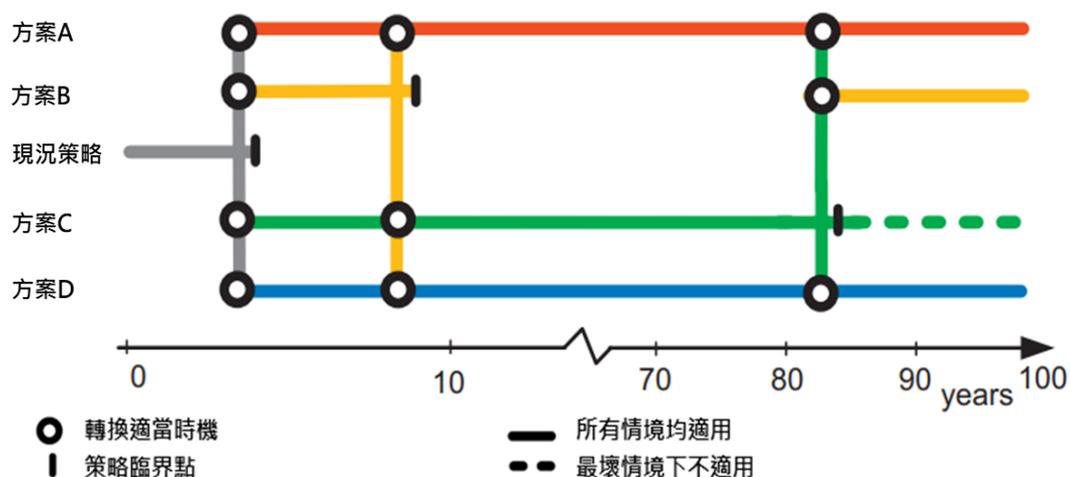
措施	調適措施	溫室氣體排放較低 情境 (A1B)		溫室氣體排放較高 情境 (A1FI)	
		淨現值 (百萬澳元)	效益 成本比	淨現值 (百萬澳元)	效益 成本比
1	更換為混凝土枕木	-120	0.09	-115	0.12
2	更換列車空調設備	-80	0.13	-75	0.18
3	安裝再生制軔	107	1.70	107	1.70
4	更換電力線中的電纜和 /或調整張力	1	1.27	4	1.78
5	更換號誌設備、其電子 設備安裝備援設施	-295	0.01	-242	0.01
6	行為改變	-29	0.04	-28	0.05

資料來源：[3]與本計畫整理

3. 氣候韌性調適路徑

由於未來氣候危害變化多端，難以準確預測，動態調適政策路徑(Dynamic Adaptive Policy Pathways，以下簡稱 DAPP)可幫助決策者在高度不確定下進行調適方案的決策^[77]。該方法結合調適性政策制定(Adaptive Policymaking)及調適路徑(Adaptation Pathways)，決策者可規劃多個調適方案選項，並在不同情境下，設定調適方案轉換之時機，若當某個調適選項之效益已達臨界點(Tipping Point)時，則需轉向其他調適路徑，如圖 4.2-16 所示。從該案例可以得知，現況策略預計在 4 年後達到臨界點，主事者共規劃 4 項方案可供選擇，各方案內容簡要說明如下：

- (1) 方案 A 和 D：在未來的 100 年內，不論面對任何氣候情境，皆可達到目標。
- (2) 方案 B：若在 4 年後選擇方案 B，該方案大約 5 年內會達到臨界點，此時需要轉向其他三個方案，才能繼續達成目標。
- (3) 方案 C：若選擇方案 C，約需至 80 年時即須評估轉向方案 A 或方案 D 才能達成目標；而其他情境下，方案 C 可在未來的 80 年內仍可達成調適目標。



資料來源：[77]與本計畫整理

圖 4.2-16 時間-策略型調適路徑示意圖

4.3 新科技應用調適情形

鐵道運輸領域已大量應用資通訊技術與人工智慧，本節回顧國內外鐵道系統將新科技應用於基礎設施、車輛、環境監測與風險評估之案例。

4.3.1 新科技應用於基礎設施

1. 開發特殊耐高溫白色軌道塗層

英國、德國、瑞士、西班牙、義大利及印度等國家開發了特殊耐高溫的白色材料，這種塗層可以降低軌道吸收熱能的速度並增強反射紫外線的能力，從而減少高溫對軌道的衝擊^[182]，如圖 4.3-1 所示。其中，多數國家會將白漆塗抹在軌腹、道渣、枕木上，而鋼軌踏面則因會與鋼輪摩擦後掉漆，效果有限。

在塗料選擇上，以無機塗料 Inorganic-3 的降溫效果最高，Inorganic 為無機化合物製成的塗料，通常具有較強的耐候性、耐高溫性和抗腐蝕性，因此常用於工業設施、橋梁和高溫環境等需要高度保護的結構表面。然經研究發現，倘若將鋼軌塗上錯誤的顏色(如灰色)，不但沒有達到降溫效果，還可能造成鋼軌升溫^[189]，塗料實驗結果如表 4.3-1 所述。



資料來源：[65, 117, 138, 144, 173, 188, 185, 203, 207]與本計畫整理

圖 4.3-1 特殊耐高溫白色軌道塗層應用照片

表 4.3-1 不同材質塗漆降溫實驗彙整表

塗漆種類	鋼軌降溫效果 (°C)
Inorganic-3	-10.7
Inorganic-2	-7.9
Inorganic-1	-5.5
Rooftop-2, 2 coats	-5.1
Rooftop-1	-4.1
Rooftop-2, 1 coat	-3.9
Exterior latex - tan	-3.3
Exterior latex - tan with double microballoons	-3.0
Exterior latex - tan with microballoons	-2.8
Bare Steel (control)	0.0
Rusty Steel	0.0
Exterior latex - gray with microballoons	0.1

資料來源：[189]

2. 抗寒技術

中國大陸包含東北及高原等區域經常面臨極端寒冷的情形，為確保其高鐵路行經路線之可靠度，遂於土木與電機工程投入新科技應用以抵禦寒地氣候對鐵路所造成的衝擊^[100]，說明如下：

- (1) 土木工程：為改善高鐵路行經凍融所造成不穩定的路基，爰開發凍融路堤的控制和監測技術系統，並引進填充層和新型橋梁承載灌漿材料，同時改進了隧道防凍技術。
- (2) 電機工程：將防冰和融雪技術應用於電車線和道岔，確保戶外電氣設備在嚴寒環境中的正常運行。

4.3.2 新科技應用於車輛設備

1. 採購新型城際電聯車並強化空調系統

為了抵禦高溫並確保旅客乘車的舒適度，德鐵投入數千萬歐元購買全新第四代高速鐵路列車(Intercity Express 4，以下簡稱 ICE4)，ICE4 的空調系統能夠因應室外高達 45°C 的極端高溫，為確保系統的穩定性，德鐵在列車營運期間每六個月至少進行一次系統測試^[35]，如圖 4.3-2 所示



資料來源：[85]

圖 4.3-2 德鐵 ICE4-強化空調系統新型高速鐵路列車照片

2. 研發抵禦極寒與沙塵暴環境的電聯車

中國大陸為了因應高鐵列車在極寒地區遭遇的問題，研發有土建凍融路堤、機械防冰與融冰、列車融冰設備，另也為了改善沙塵暴環境下的性能，精進其高鐵列車之側風穩定性、防沙、除沙以及空調舒適等性能，如圖 4.3-3 所示。

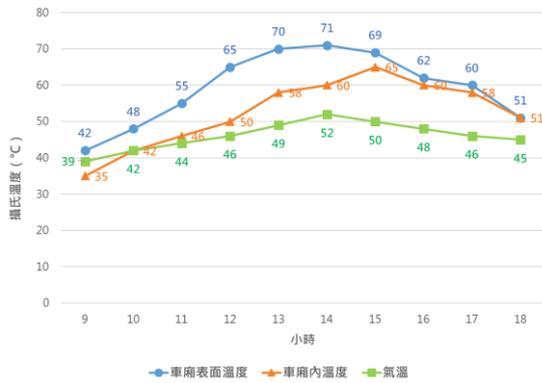


資料來源：[100]

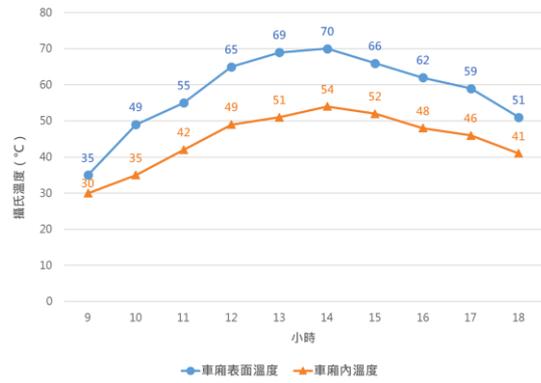
圖 4.3-3 中國-抵禦極寒與沙塵暴環境高鐵列車照片

3. 開發特殊車體塗層

針對高溫導致車廂內旅客舒適性降低之議題，多半以環控方式探討影響乘客舒適性因素，例如：加強空氣對流、調整相對濕度等。在車體塗層部分，有研究發現剛玉(Corundum)塗料雖然對降低車廂表面溫度的效果有限，但在最高溫時(14 時氣溫 52°C)，剛玉塗層有助於降低車內溫度 6°C ，如圖 4.3-4 所示。該研究指出車廂對太陽輻射的保護機制相當重要，可考量輕質金屬合金與高分子聚合物複合材料塗裝^[80]。



(a) 無剛玉塗裝

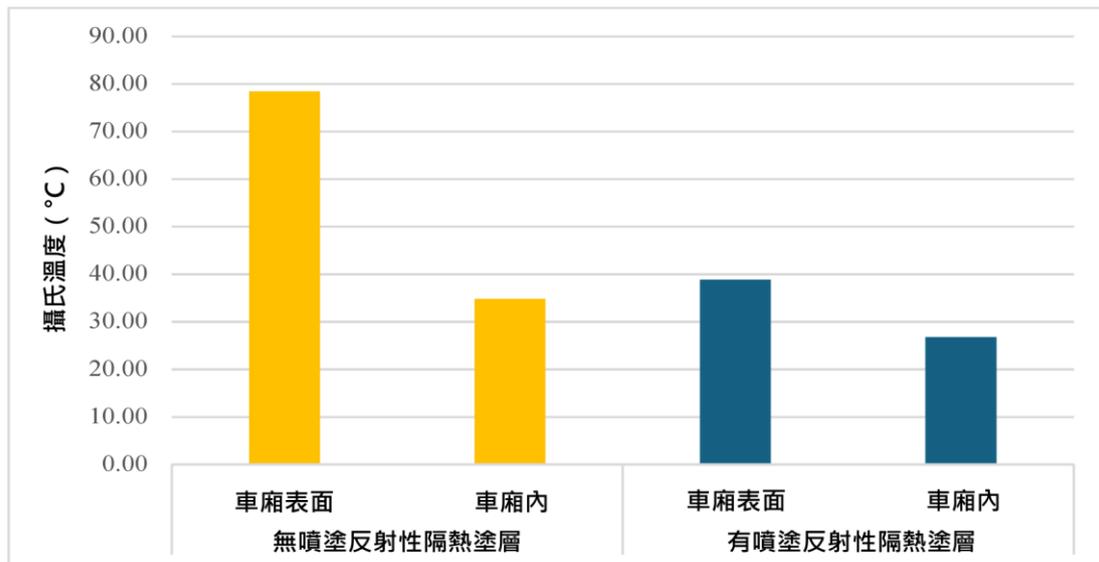


(b) 剛玉塗裝

資料來源：[80]與本計畫整理

圖 4.3-4 有無剛玉塗裝之車廂內外溫度趨勢圖

此外，若將車廂噴塗反射性隔熱塗層，經置於露天經陽光反覆曝曬 3 天發現，第 3 天實驗組的車內外溫差為 11.9°C ，較對照組 35.6°C 低 13.7°C ^[13]，如圖 4.3-5 所示。



資料來源：[13]與本計畫整理

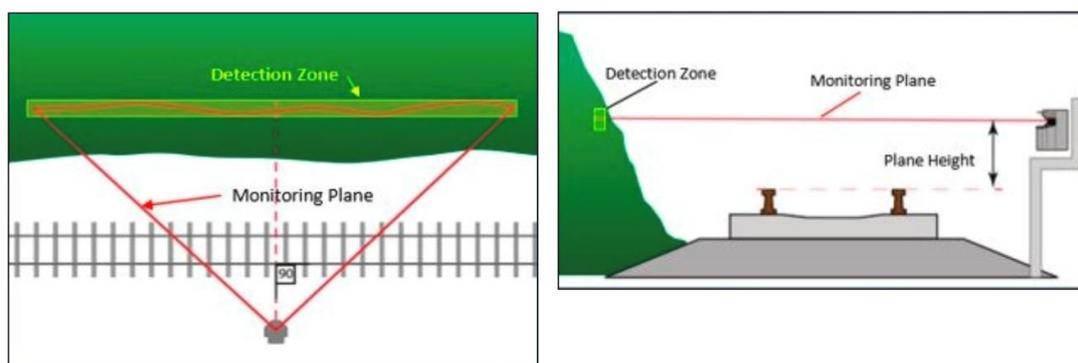
圖 4.3-5 有無噴塗反射性隔熱塗層之車廂內外溫度比較圖

4.3.3 新科技應用於環境監測

1. 光學雷達

光學雷達 LiDAR(Light Detection and Ranging)係透過雷射照射目標，再

以光學感測器捕獲反射光來測量距離。英國 NR 已廣泛應用 LiDAR 技術，例如威爾斯鐵路之 LiDAR 監測系統，能即時辨識並告警邊坡可能滑落的地点，如圖 4.3-6 所示。此外，LiDAR 技術也被 NR 應用於植被管理，主要透過持續測量分析，來消除植被可能產生的干擾，以準確監測邊坡輪廓，同時提高鐵路營運效能潛力^[142]。

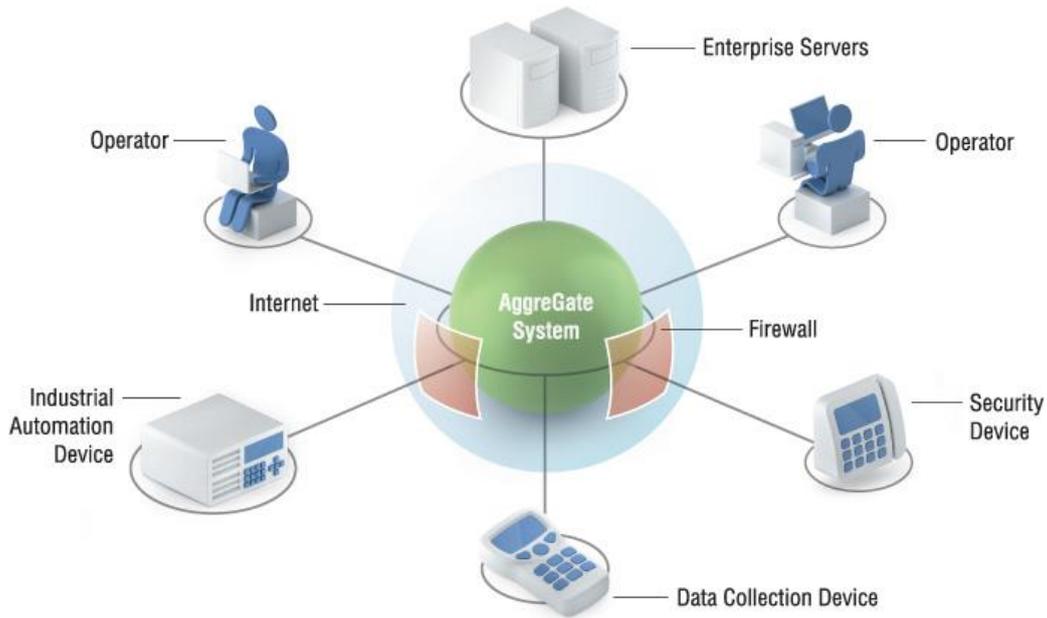


資料來源：[142]

圖 4.3-6 光學雷達 (LiDAR) 邊坡偵測原理示意圖

2. 遠端狀況監測(Remote condition monitoring, RCM)

遠端狀況監測主要用於提高基礎設施的效能和可用性，該技術透過自動測量和提出資產故障告警，提供預防性維護資訊，從而減少故障和提高生產力。其架構包括感測器收集原始數據，將數據傳輸到中心，再進一步分析確定資產健康狀況，如圖 4.3-7 所示。英國 NR 在調適行動中，主要應用於邊坡和排水系統，透過監測土地的穩定性和排水狀況，來提高鐵路的安全性和穩定性。



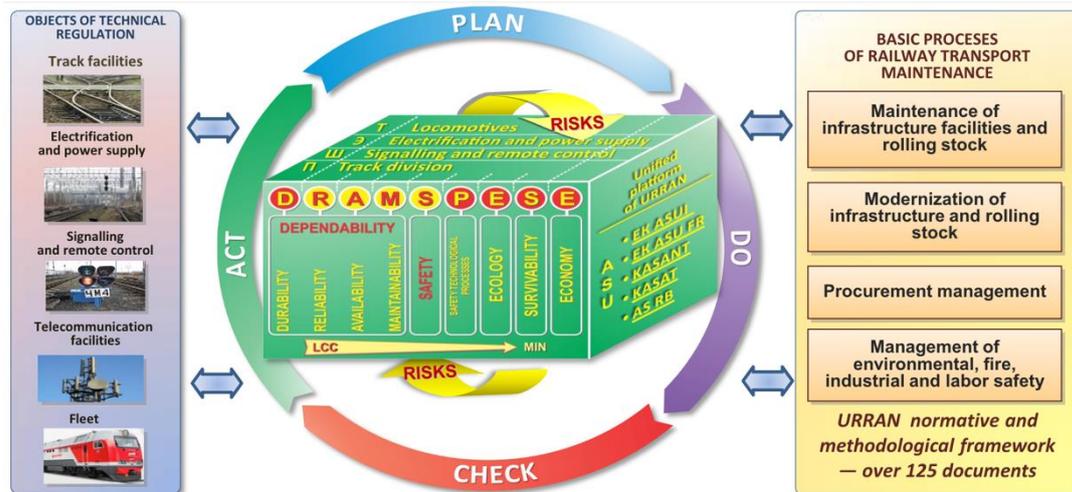
資料來源：[6]

圖 4.3-7 遠端狀況監測架構示意圖

3. 綜合資產管理系統

俄羅斯鐵路公司(Russian Railways，以下簡稱 RZD)管理超過 10 萬公里之鐵路路線，由於橫跨多個氣候和地理區域，面臨冰雪、洪水、倒樹和火災等危害威脅，因此控制的關鍵在於高效的資產管理和風險管理。RZD 自 2010 年起實施基於風險評估的綜合資產管理 URRAN 系統，如圖 4.3-8 所示，該系統特色為：

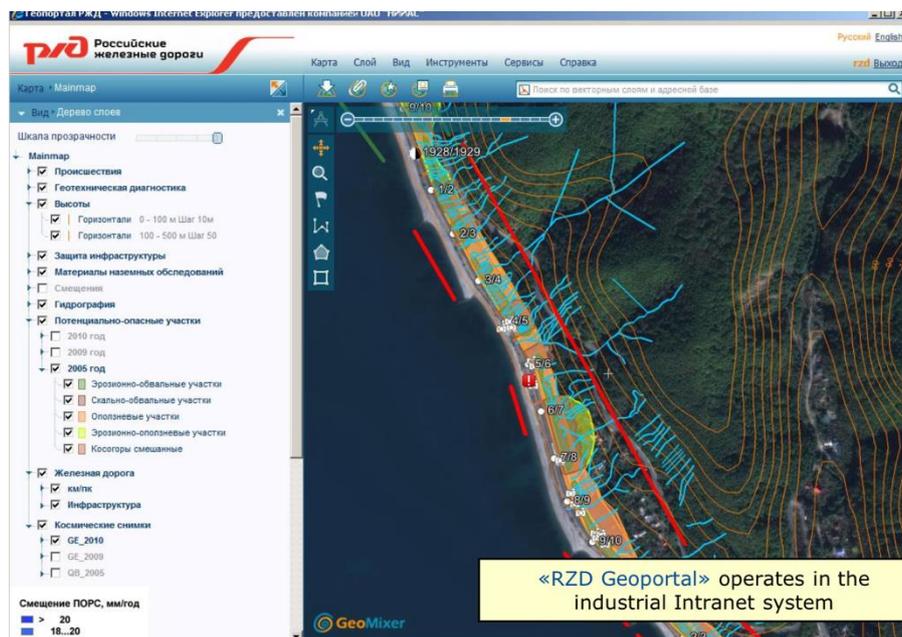
- (1) 符合 ISO 55000:2014 國際標準與方法，涵蓋營運資產的全面管理及技術安全監督和控制。
- (2) 採分散式工作站網路架構，自動收集資產狀況資訊。
- (3) 該鐵路管理決策支援系統，提供高風險資產或需要投資維修的線路建議，遵循風險降至合理可行的最低水平 ALARP 原則，避免將資源投入經濟不可行的調適措施。



資料來源：[100]

圖 4.3-8 俄羅斯鐵路綜合資產管理系統架構圖

此外，RZD 亦建置具視覺化之 Geoportal 地理空間資訊系統，主要應用於邊坡穩定措施監測和火災風險評估等^[193]，如圖 4.3-9 所示。



資料來源：[193]

圖 4.3-9 Geoportal 工業系統畫面截圖

4. 衛星影像技術

澳洲西部許多重要的公路和鐵路連接，面臨有極端高溫、洪水和叢林

火災在內的多種災害風險。爰此，澳洲利用衛星影像觀測森林大火和洪水的蔓延趨勢，做為擬定因應機制的決策依據^[100]。

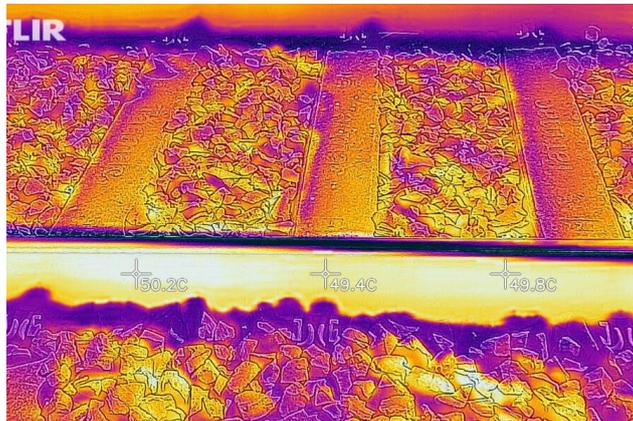
5. 太陽能氣象站

英國 NR 於 2021 安裝了由 60 個太陽能氣象站組成的即時監測極端天氣系統^[162]，如圖 4.3-10 與圖 4.3-11 所示，該系統能確認炎熱天氣影響的地點和時間，使 NR 能快速因應高溫事件、維持列車正常運轉、減少實施限速之頻率，未來更計劃納入其他氣候類別之測量。



資料來源：[162]

圖 4.3-10 英國-NR 太陽能氣象站照片



資料來源：[162]

圖 4.3-11 英國-NR 太陽能氣象站監測畫面截圖

6. 光學衛星影像

光學衛星影像的應用多著重在鐵道沿線的危險源預防性偵測，預先判別可能入侵鐵道範圍的異物來源位置及類別，相關研究應用分述如下：

(1) 人工構造物入侵

- 利用光學衛星影像偵測高速鐵路沿線之人工構造物人^[12]，如鐵皮屋、塑膠棚架、防塵網等，以分析這些不甚堅固之人工構造物對高速鐵路營運安全的影響。
- 利用光學衛星影像及人工智慧(Artificial Intelligence, AI)，大範圍偵測高速鐵路沿線之危險源^[177]，如易被強風吹起之老舊鐵皮屋、防塵網等，如圖 4.3-12 所示，以減少以往耗時費力的人工現場調查。
- 利用光學衛星影像及 AI 偵測高鐵沿線的漂浮物危險源人^[41]，如防塵網、農用塑膠網及鐵皮屋頂，整體精度可達 98.27%。



(a)防塵網



(b)鐵皮



(c)農用塑膠網

資料來源：[177]

圖 4.3-12 入侵軌道之漂浮物照片

(2) 崩塌地入侵

崩塌地亦為異物入侵鐵道的危險源之一，光學衛星影像亦可用於長期、大範圍的鐵道沿線崩塌地偵測，相關應用說明如下。

- 使用光學衛星影像、三維空載光達(LiDAR)數值地形模型及其衍生地形指標等，進行崩塌地自動分類^[338]。
- 應用光學衛星影像及物件式分類演算法進行崩塌地辨識^[324, 302]。
- 進一步利用光學衛星影像計算前後期 NDVI(Normalized Difference Vegetation Index，常態化差值植生指標)變化，並搭配 AI 進行崩塌地辨識^[313]。

(3) 樹木入侵

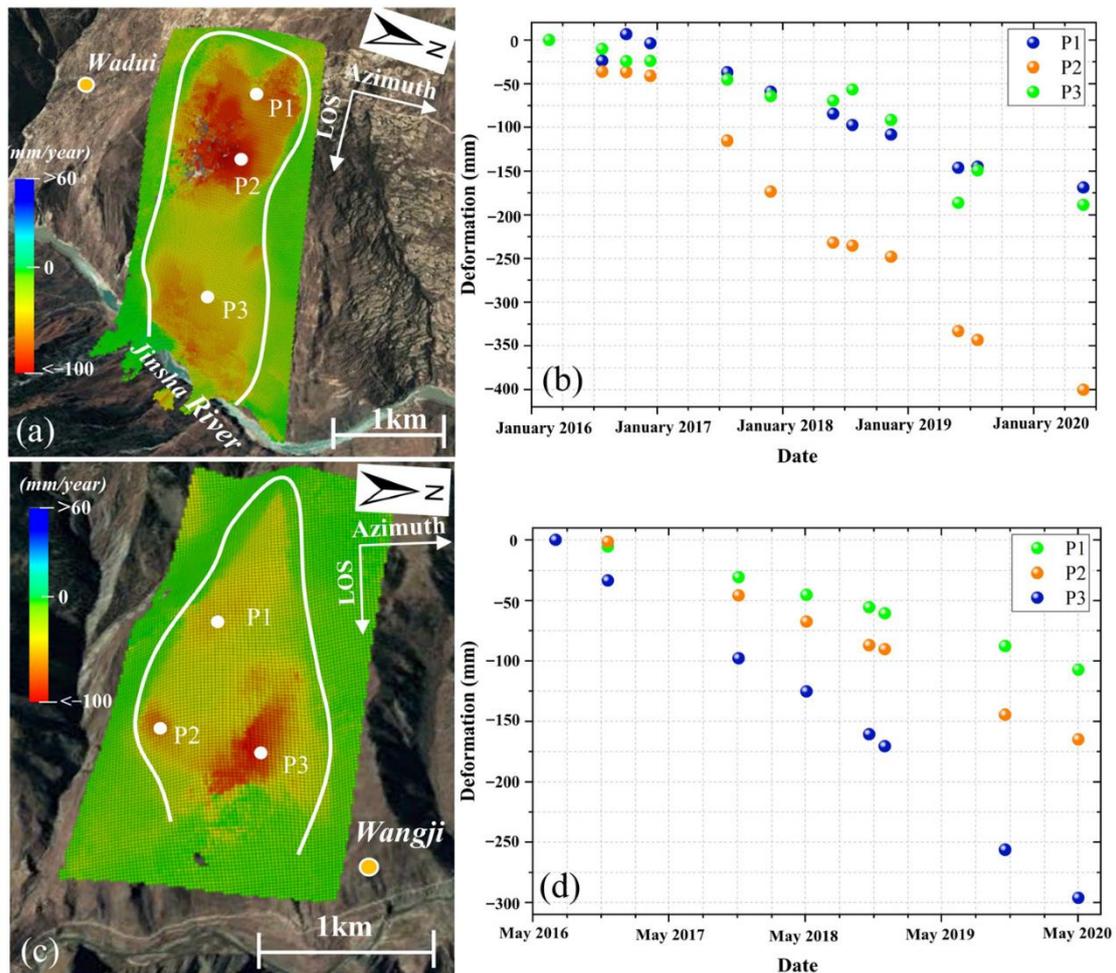
距離鐵道過近之樹木亦被視為另一危險源，因此軌道沿線植被管理有其必要性。

- 使用 Pleiades 光學衛星影像進行法國 55,000 公里的鐵路軌道沿線植被管理^[176]。
- 提供使用光學衛星影像進行植被管理的服務，例如 EUSI、AIDASH、UP42 等公司。

7. 合成孔徑雷達

合成孔徑雷達(Synthetic Aperture Radar，以下簡稱 SAR)是主動式微波觀測系統，感測器會主動發射訊號，並接收地表反射回波，具有穿透雲霧、日夜觀測等優勢^[26, 222]。

- (1) SAR 影像具有不同的偏極化(Polarization)與軌道方向，其接收的訊息包含相位(Phase)及振幅(Amplitude)，能用以瞭解地表覆蓋與粗糙度等資訊。
- (2) 目前已有許多 SAR 影像處理技術以因應不同應用場域，其中又以合成孔徑雷達干涉技術(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)最為常見。InSAR 技術是藉由不同拍攝位置或時間之兩張以上的 SAR 影像，透過計算相位差產生「干涉相位圖」，取得地表的三維資訊，以求得數值地形地表高程^[190]或求得變動區域與地表形變量^[223]。
- (3) 由於 SAR 影像具有不受天氣、日夜影響，能於任何時間進行地表觀測的優勢，且 InSAR 技術得以透過相位與干涉技術偵測較影像自身解析度更為小的地表形變量。因此，SAR 影像與 InSAR 技術已被廣泛用於多種天災監測、預警與災後評估。台灣鐵道系統受天災影響的常見致災因素有山崩、土石流、洪水，關於以上天災類型的防範與評估，目前已有許多以 SAR 影像為基礎的應用，例如透過 InSAR 技術監測鐵道沿線邊坡的穩定性與山崩、土石流預警^[75, 198, 224]，如圖 4.3-13 所示。



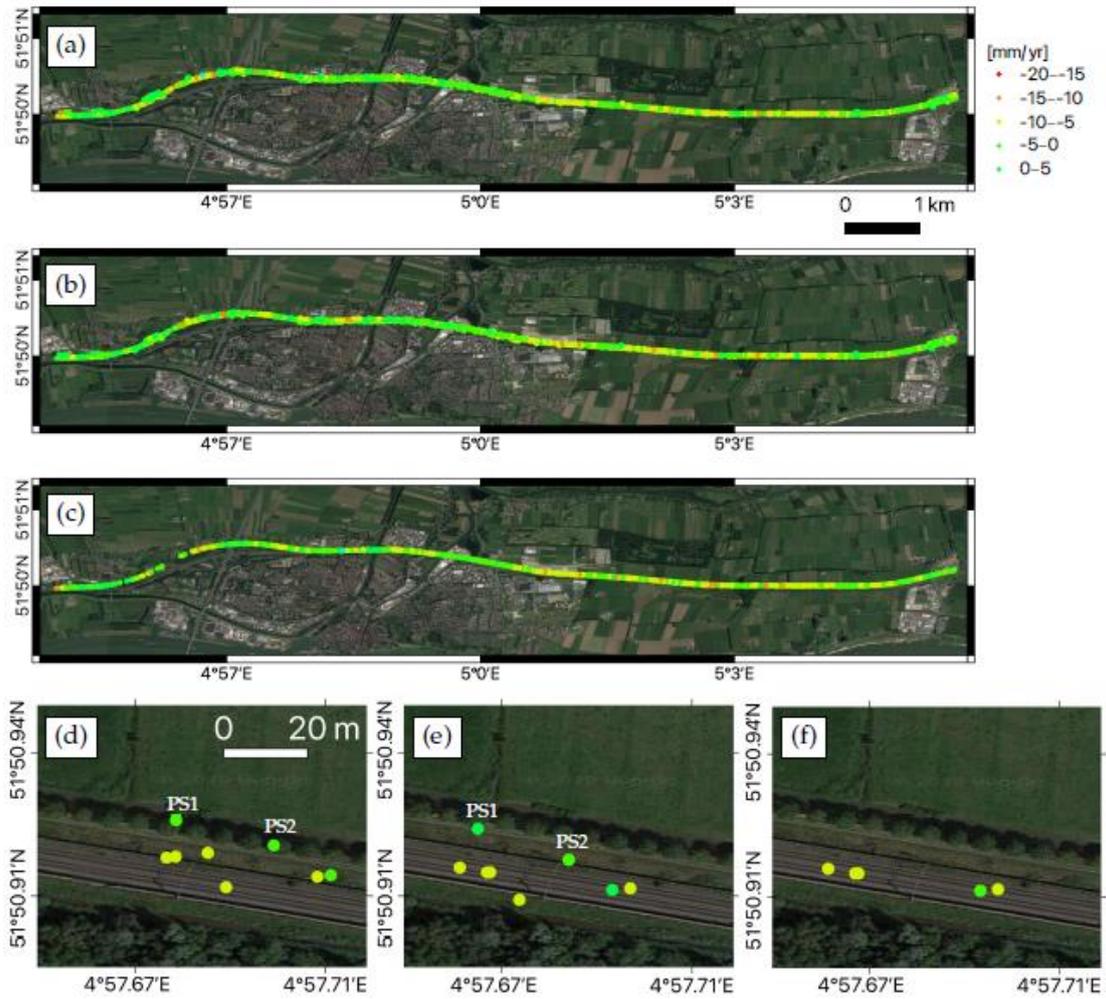
資料來源：[224]

圖 4.3-13 InSAR 監測川藏鐵路鄰近邊坡活動性照片

(4) 鐵道系統本身常見的災害包含沿線與基礎設施的損壞，碎石異物與水體侵入軌道，及鐵軌自身的形變與位移，這些鐵道本身的災害通常會先顯現一些難以注意到的徵兆，例如牆壁、地面的微小變形或滲水等，而 SAR 影像能監測結構物的健康度，相關應用說明如下：

- 透過軌道酬載雷達(Rail-borne SAR)進行交叉軌道的干涉與同調性變遷偵測^[16]，但過大的基線角度與相對掃描寬度(Swath Width)仍是挑戰。
- 利用 MT-InSAR 與 PSInSAR 監測鐵道的形變量與穩定性^[19,77]，如圖 4.3-14 所示。
- 藉由 InSAR 技術監測鐵道的沉陷狀況^[197]。

- 採用 PSInSAR 監測鐵路橋(Railway Bridge)的形變^[40]，如圖 4.3-15 所示。



資料來源：[19]

圖 4.3-14 PSInSAR 監測鐵道穩定性照片



資料來源：[40]

圖 4.3-15 PSInSAR 監測鐵路橋形變照片

8. 無人機

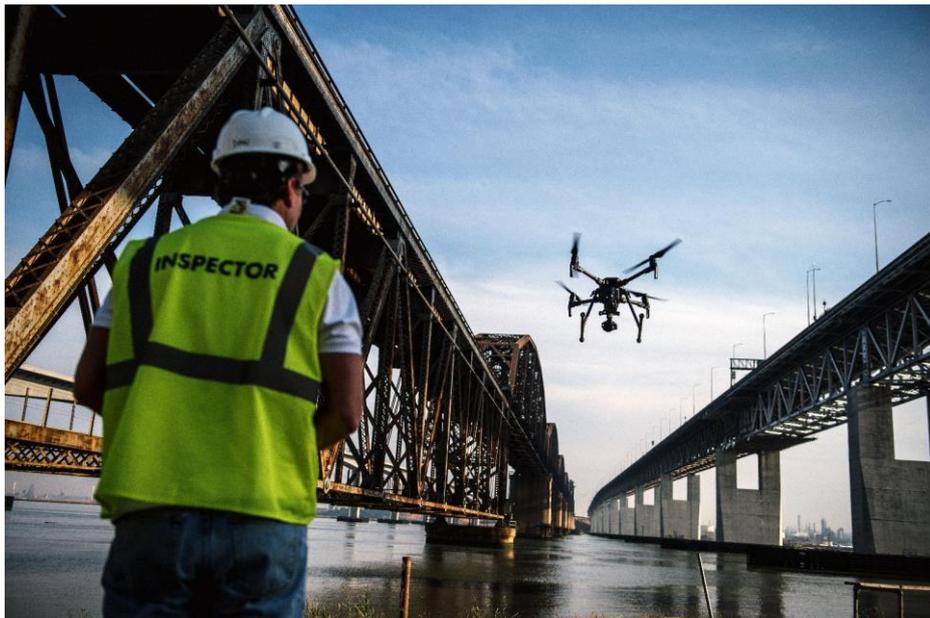
國際鐵路聯盟(UIC)成立 D4R-PT(Drone4Rail for Plain Track)專案，研析無人機應用鐵路設施檢核的技術可行性、法規以及成本效益問題，該專案認為無人機的優勢在於提高鐵路檢查期間的安全水準與巡檢任務效率。目前國外已有許多使用無人機來監測、因應氣候變遷中相關的危害因子，相關案例說明如下：

- (1) 奧地利 ÖBB^[186]導入無人機協助軌道巡檢，其優勢在於便於支援偏遠鐵路路段，亦能夠快速偵測落石或風暴後之現場情況，如圖 4.3-16 所示。
- (2) 美國聯合太平洋公司貨運公司(Union Pacific Corp, UNP)^[81]將無人機應用於觀測橋梁及基礎設施現況，如圖 4.3-17 所示。



資料來源：[186]

圖 4.3-16 奧地利 ÖBB-導入無人機巡檢軌道照片



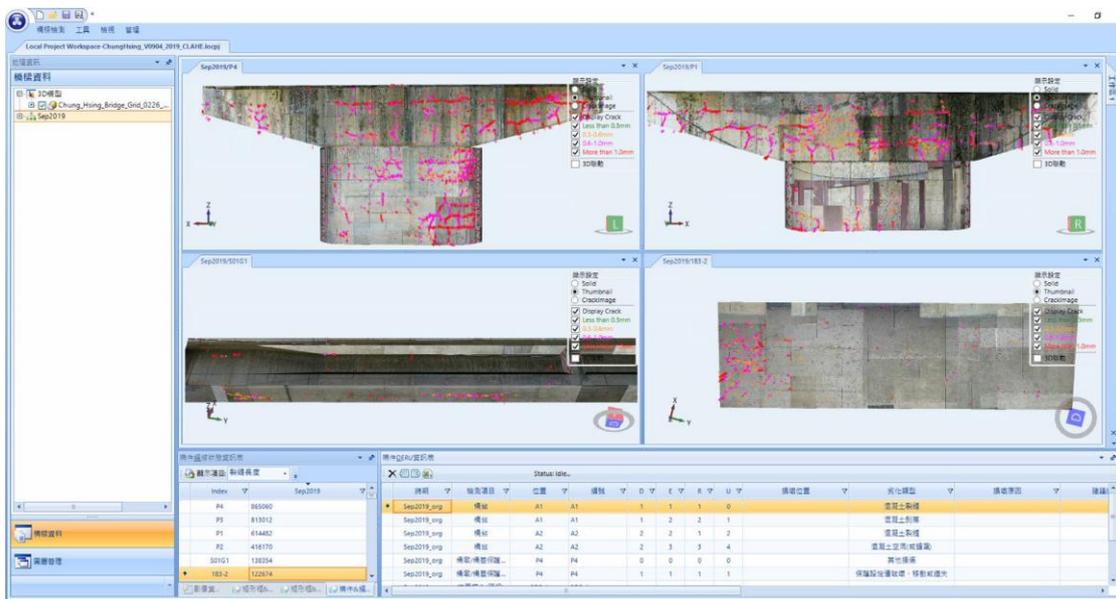
資料來源：[81]

圖 4.3-17 美國 UNP-導入無人機巡檢橋梁照片

- (3) 加拿大運輸部創新中心 (Innovation Centre)^[211] 的創新鐵路計畫 (Innovation Centre Rail Program)，已逐步推動運用創新科技技術來監測、因應氣候變遷中相關的危害因子，其應用包含：

- 土石流：使用無人機攝影來有效監測滑坡區域，有助於鐵路公司對大型緩慢移動邊坡例如河岸護堤、擋土牆或邊坡工程，進行即時監測與預警，並對防災措施進行及早準備。
- 洪水：同時透過衛星、無人機、儀器化車輛三種互補性方式來進行監控。其中無人機監測提供中等的可視範圍，但具更高的空間解析度。

(4) 為了提升檢測效率，結合 AI 影像辨識功能，可快速分析無人機於邊坡、隧道及橋梁拍攝影像的多種物件^[283]，圖 4.3-18 即為 AI 辨識偵測到劣化之橋梁構件與劣化區 3D 模型進行套合之分析過程。



資料來源：[283]

圖 4.3-18 AI 裂縫偵測成果與橋梁 3D 模型整合套疊圖

(5) 以無人機協助捷運進行隧道與橋梁檢測之「5G AI 智慧巡檢服務」^[268]，透過 AI 一鍵自動巡檢功能，無人機即可完成日常或災後的巡檢任務，提升巡檢效率，加強巡檢人員人身安全，也以此減少高空作業車造成的空污排放問題。

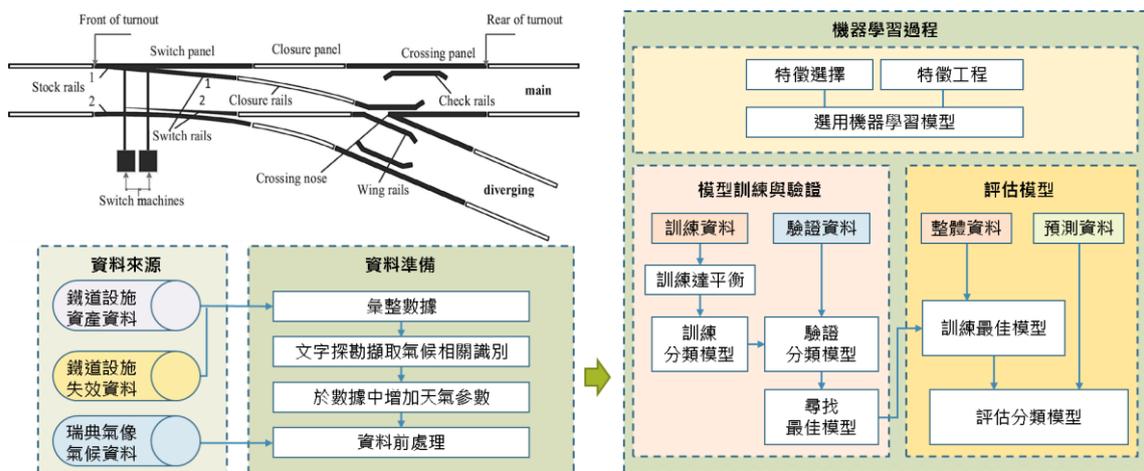
4.3.4 科技應用於風險評估

1. 機器學習

瑞典學者使用機器學習方法，分析因氣候變遷導致之極端氣候造成軌

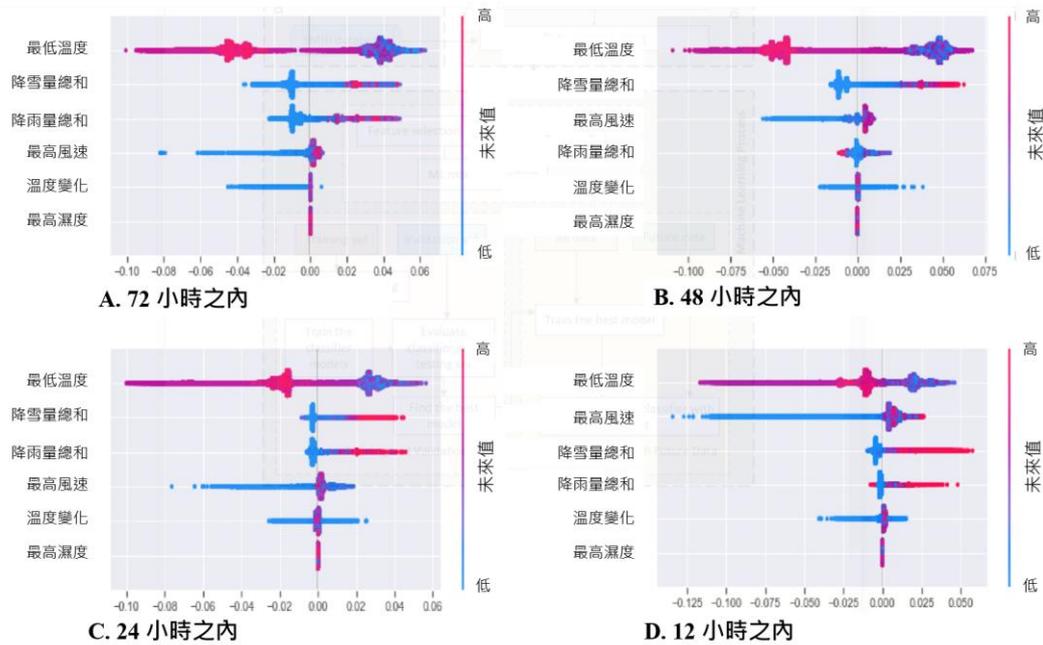
道設施失效事件的風險，並針對未來不同氣候變遷情境下軌道設施失效風險進行預測，說明如下：

- (1) 該研究結合瑞典氣象水利機構之國土氣象與水文資料(SMHI)、鐵道基礎設施資料庫(BIS)、以及鐵路路網失效資料庫(Ofelia)，以鐵道道岔與橫渡線設施(Switches and Crossings)為主題進行分析。
- (2) 透過機器學習當中的特徵選擇、特徵工程、和適當的機器學習方法，將資料分成訓練資料與測試資料進行模型建立與測試，最後選出最適配的模式，並以該模型做為未來預測之基礎，其分析流程如圖 4.3-19 所示。該研究使用包含隨機森林(Random Forest)、單純貝氏分類器 (Naive Bayes classifier)、XGBoost 在內等數種機器學習方法進行分析與預測，並分析在軌道設施失效前不同時間(12 小時、24 小時、48 小時、72 小時)之天氣條件，對於設施失效風險之影響，如圖 4.3-20 所示。



資料來源：[200]與本計畫整理

圖 4.3-19 瑞典-機器學習分析氣候變遷對道岔影響流程圖



資料來源：[200]

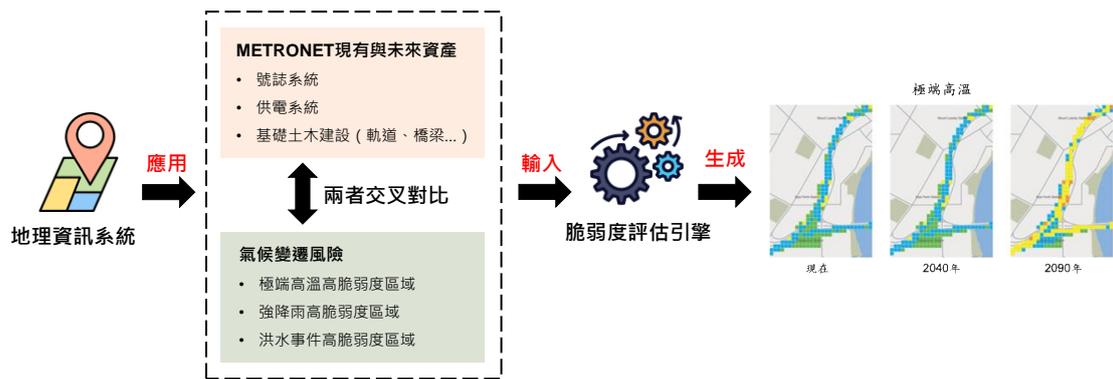
圖 4.3-20 瑞典-時間因素對失效風險之潛在影響 SHAP 圖

- (3) 在天氣條件部分，氣溫及雨量適合做為長時間週期下對失效風險進行預測之影響因子；最大風速則適合做為短時間週期下對失效風險進行預測之影響因子。其他天氣影響因子包括降雪量、溫差變化、以及溼度等。

2. GIS 與脆弱度引擎(Vulnerability Assessment Engine)開發

澳洲 METRONET 將現有鐵路網絡及未來專案範圍，透過 GIS 開發基於資產(如：號誌設備)與氣候風險區域的圖層。這些圖層結合了政府的野火與洪水風險地圖、氣候預測數據以及歷史氣候數據，並以暴露度、脆弱度和調適能力做為指標，進行空間脆弱度的評估，脆弱度評估如圖 4.3-21 所示。

而 METRONET 在辨識鐵路系統的脆弱區域時，透過脆弱度引擎生成空間圖層。該工具可比對鐵路資產關鍵區域與氣候變遷高脆弱度區域，並同時進行多時間尺度的預測(現在、2040 年與 2090 年)，以變針對所辨識出的熱點區域制定相應之調適策略^[121]。



資料來源：[121]與本計畫整理

圖 4.3-21 澳洲-METRONET 脆弱度評估示意圖

4.4 小結

本節主要回顧鐵道標竿國家在氣候變遷風險評估、調適策略選項及新科技應用案例等，茲彙整重點如下：

1. 在氣候變遷風險評估部分，鐵道標竿機構所採用之評估方法不盡相同，大致可分為兩類，其一是沿用傳統風險評估方式，透過危害發生機率與嚴重度評估風險優先等級，例如英國 NR 氣候風險評估矩陣；另一則以 IPCC 建議之風險評估模型進行分析，以 LA Metro 為例，其中脆弱度評估即是參照 IPCC AR4 之定義，由暴露度、敏感度與調適能力組成之函數。其中，英國 CRVA 為目前國內外氣候變遷風險評估工具中，能夠具體評估脆弱度的工具之一，其評估方法以及相對應之資料蒐集程序與需求，可供我國未來進行氣候變遷風險脆弱度評估工具開發，以及跨部門資料整合之參考。
2. 在調適選項部分，規劃設計階段著重在提升基礎設施及車輛系統之設計標準；施工興建階段關注施工人員的健康管理；營運維護階段之調適選項與防減災措施則互相有交集，常見因應措施包含環境監測、更新/換基礎設施及車輛設備、列車運轉規章及員工健康管理等。
3. 在 NbS 部分，目前在鐵路運輸領域仍屬於新興階段，政府部門以及營運業者皆在探索 NbS 之應用潛力。整體來說，NbS 普遍被接受做為潛在鐵路氣候變遷調適策略，在提供運輸服務同時也能夠同時提供生態系統服

務。

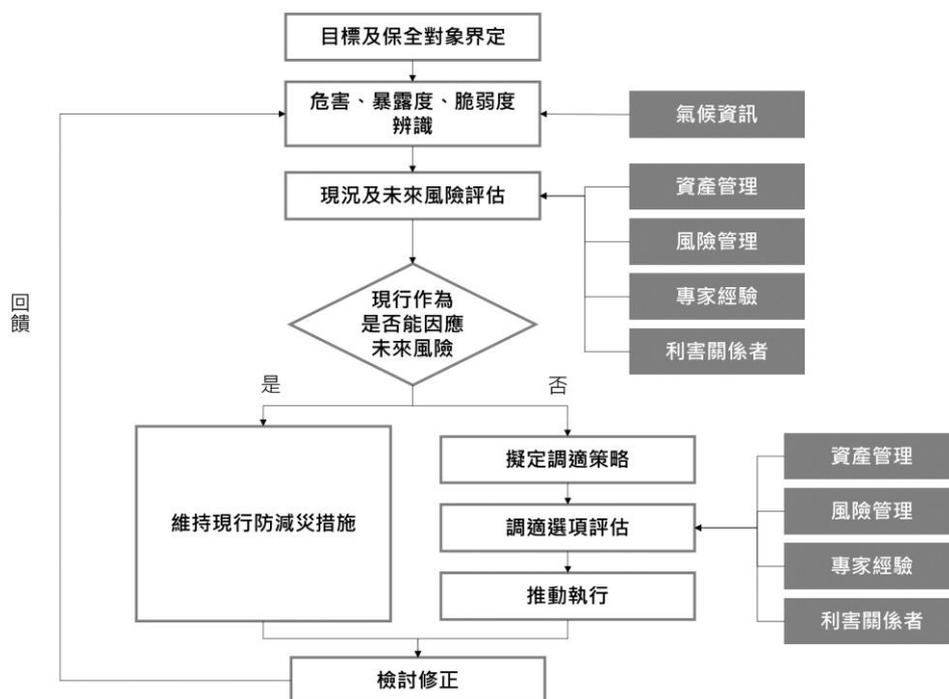
4. 在新科技應用部分，多數案例為環境監測應用，如長期、大範圍偵測軌道周圍/沿線危險源位置及類別的特性，預防性進行危險源的偵測與管理，同時降低現場巡查人力及死角，以更有效率的方式提升鐵路營運安全。此外，瑞典應用機器學習預測失效事件，藉此了解氣候持續時間對鐵道設施影響及其失效相關資訊，此分析方式可供我國進行氣候變遷風險分析之參考。

第五章 我國鐵道系統強化調適能力之機制

為強化我國鐵道系統全生命週期的調適能力，本計畫擬在既有評估流程中融入或新增氣候變遷調適議題，並與安全管理及資產管理系統結合，全面提升鐵道系統之韌性，此外，鐵道系統權管機關(構)若能主動揭露相關調適資訊，除有助於強化鐵道系統調適能力之外，亦有助於踐行資訊公開及公眾參與程序，本章謹就本計畫針對國內鐵道系統調適能力機制之規劃與建議進行相關研析與建議。

5.1 我國鐵道系統調適架構

參考第三章氣候變遷調適架構，本計畫規劃我國鐵道系統調適架構如圖 5.1-1 所示，其流程步驟包含界定範疇、現況與未來風險評估、研擬調適策略、調適選項評估、推動執行及檢討修正，說明如下：



資料來源：本計畫繪製

圖 5.1-1 我國鐵道系統調適架構圖

1. 界定範疇

此階段包含目標及保全對象界定，以及危害、暴露度與脆弱度辨識，在界定過程中，應邀集有關機關(構)、學者及民間團體等利害關係者，全盤考量彼此的關注議題。以臺鐵為例，其東部路線常受到挾帶土石之泥流影響，造成軌道被覆蓋進而影響行車安全，由於山坡地在臺鐵路權之外，若欲進行相關整治及維護作業，則需會同農業部林業及自然保育署、礦務局等相關單位，由利害關係者一起合作。

保全對象部分，可概分為基礎設施、車輛系統(即鐵路系統之工務、電務與機務；捷運系統之土建、機電與車輛)及人員(含受危害影響期間或空間分布可能之利害相關者)，其架構如圖 5.1-2 所示。

待確立保全對象之後，將進一步辨識影響保全對象之氣候危害類型、暴露範圍及其脆弱度。有關氣候危害，可從歷史經驗中決定驅動因子，例如從 2.1.1 節可知我國鐵道系統常受強降雨、洪水、颱風挾帶的大量雨水威脅，此外，亦可借鏡國外經驗，如極低溫、降雪等，雖此類危害短期對我國影響甚小，惟氣候變遷全球氣候異常下，可定期滾動檢視，若發現有前兆徵象時則可提前納入規劃。



資料來源：本計畫整理

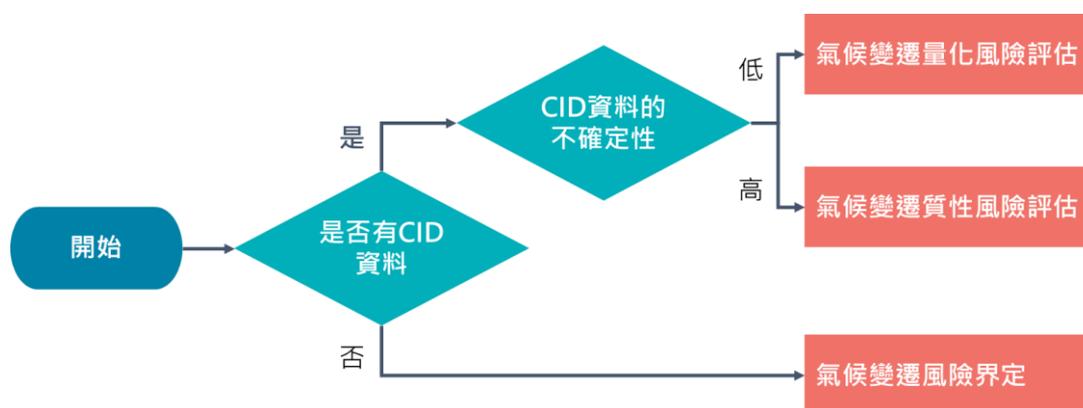
圖 5.1-2 鐵道系統保全對象架構圖

2. 現況及未來風險評估

在此階段須進行現況及未來風險評估，並評估現況作為是否能補足兩者間之缺口。為與國際趨勢及我國《氣候變遷因應法》一致，本計畫建議之風險評估模型為「危害、脆弱度及暴露度」之函數，其中，現況風險是基於歷史及現況資料進行評估，可視為傳統防減災風險評估。

未來風險則是推估未來情境下之氣候變遷風險，講求使用科學推估資料及未來情境設定。為能與我國其他領域之氣候變遷風險評估結果互相比較，未來情境設定參照環境部「國家調適應用情境」，建議至少評估 GWL 1.5°C 及 GWL 2°C 兩種情境下之氣候變遷風險。

由於目前未來情境下部分危害資料的不確定性較高(如風速)，在進行未來風險評估時，建議可依據「是否有氣候影響驅動因子 CID 資料」、「CID 資料的不確定」兩條件決定風險評估方法，若採質性風險評估，需邀集有關機關(構)、學者及利害關係者進行訪談，針對風險組成因子的等級劃分，取得共識，而評估類型判斷流程如圖 5.1-3 所示。另從國外鐵道標竿案例中可發現，氣候變遷風險與資產管理、安全管理環環相扣，故風險評估應與資產及安全管理結合，其說明詳 5.3 節。



資料來源：交通部運輸研究所，因應氣候變遷調適系列課程資料，2024 年。

圖 5.1-3 氣候變遷風險評估類型判斷流程圖

待完成現況及未來風險評估後，需進一步檢視現行防減災作為是否能因應未來氣候變遷所帶來之衝擊，若是，維持現行防減災措施並持續監測與檢討其成效即可；若否，即存在調適缺口，必須進一步規劃調適策略及其行動方案，以因應氣候危害之衝擊。

3. 研擬調適策略及調適選項評估

若現行防減災作為無法因應未來氣候變遷所帶來之衝擊，將對其缺口擬定相應之調適策略與調適選項，目標為降低暴露度及脆弱度，評估時亦須考慮經濟與財務的可行性。值得注意的是，降低危害度雖然同是降低氣候變遷風險的策略之一，由於得從氣候驅動因子層面著手，偏向減緩措施，故本計畫不將相關應對措施納入調適之研究範疇。

4. 推動執行及檢討修正

在推動執行調適選項的同時，可建立成效評估指標來檢視調適選項是否能達到調適目標，並透過循環機制過程，將其結果及相關資訊回饋至下一氣候變遷風險評估週期，做為未來調適策略精進改善方向之參考。

5.2 氣候變遷調適融入既有評估流程

依據 3.2.1 節歸納鐵道系統全生命週期，約略可分為規劃設計、施工興建、營運維護與報廢汰除(含重置)四個階段，又規劃設計階段可再細分為可行性研究、綜合規劃、基本設計、細部設計。爰此，鐵道系統因應氣候變遷之強化調適能力機制，必須在各階段作業中適度將氣候變遷調適評估作業融合於既有流程步驟中，謹說明如下：

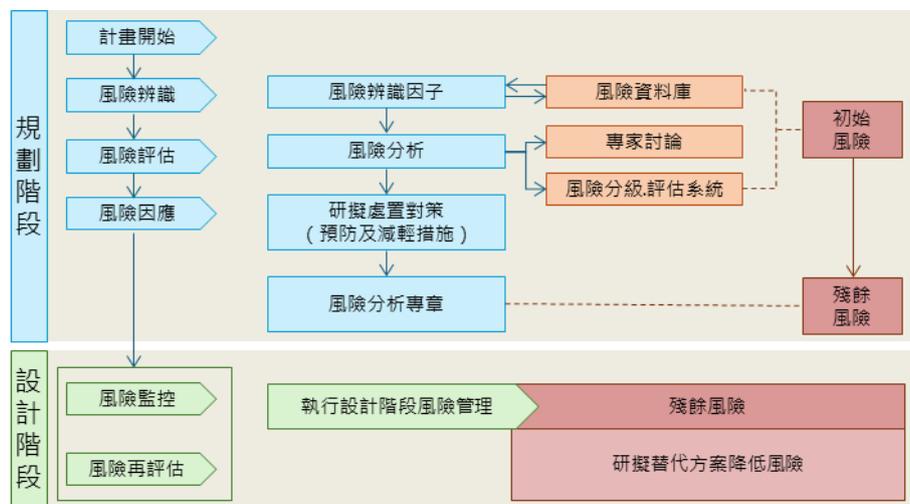
5.2.1 規劃設計階段

在規劃設計階段中，保全對象以鐵道基礎設施及車輛系統為核心，並依據氣候變遷風險評估結果，制定必要之設計方案，將風險控制在可容忍範圍內。不僅有助於提升系統的韌性，也大幅降低氣候危害在營運維護階段所造成之衝擊。

1. 捷運系統

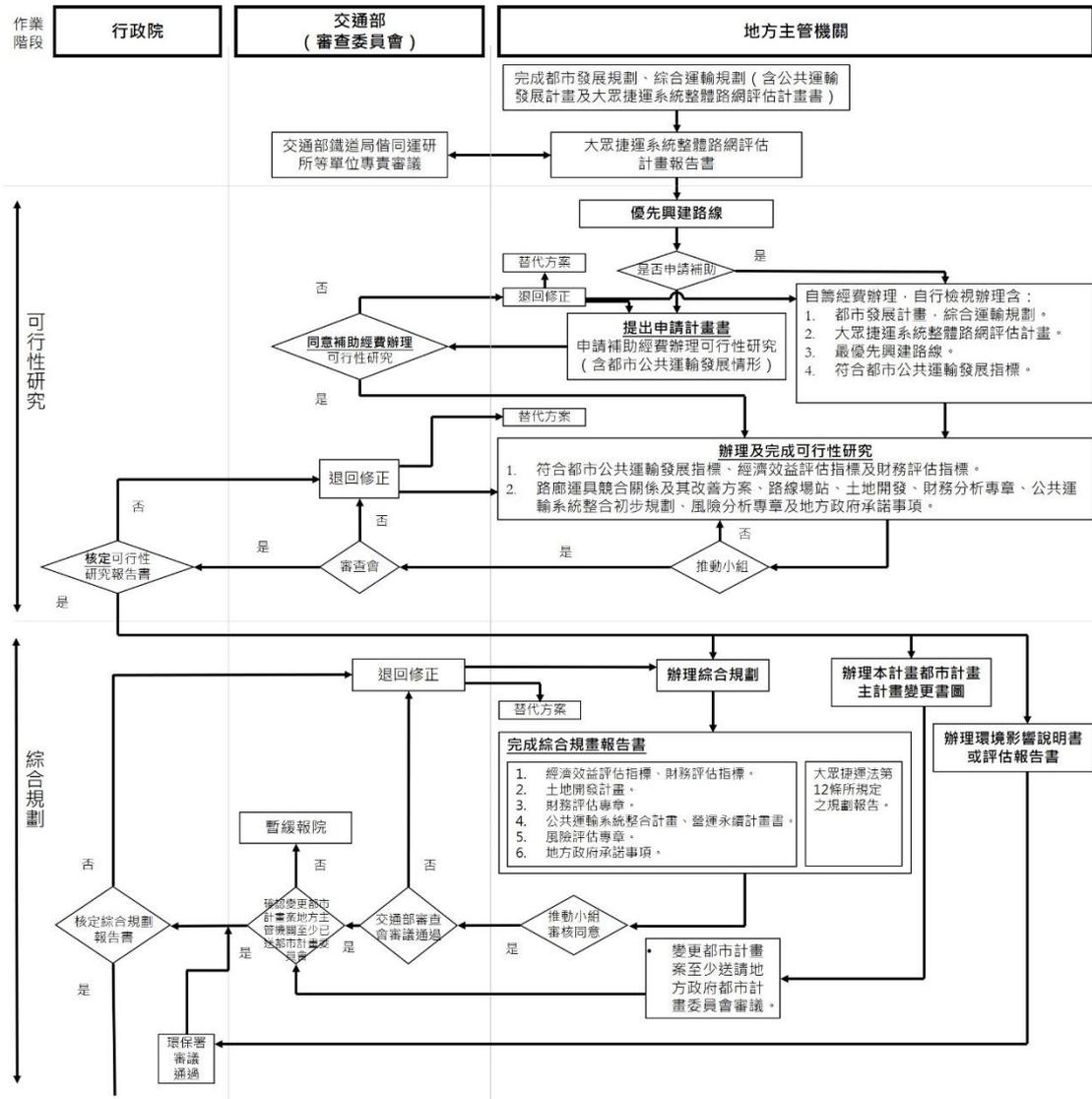
- (1) 實務風險評估作業流程可彙整如圖 5.2-1 所示，對照《大眾捷運系統建設及周邊土地開發計畫申請與審查作業要點》流程中，可與「可行性研究報告書」及「綜合規劃報告書」之風險評估專章要求相互扣合，如圖 5.2-2 所示。

- (2) 惟現階段規劃報告書之風險評估專章中，所關注的焦點多為綜合性之上位課題，例如：政府政策轉變、計畫延宕、經費分攤、預算未能通過、補助條件改變、用地費增加、土地開發效益未達預期、運量未達預期、機電系統相同性、民眾抗爭、文化遺址保留、圖面不符等，較少見到針對氣候變遷之課題提出研析。
- (3) 對此，本計畫建議可於風險專章中加入氣候變遷課題，檢視其基礎設施及車輛設計標準是否能因應未來風險，若否，則應規劃相應之調適策略或提高設計標準，以應對氣候變遷之衝擊。



資料來源：本計畫整理

圖 5.2-1 規劃設計階段風險管理示意圖

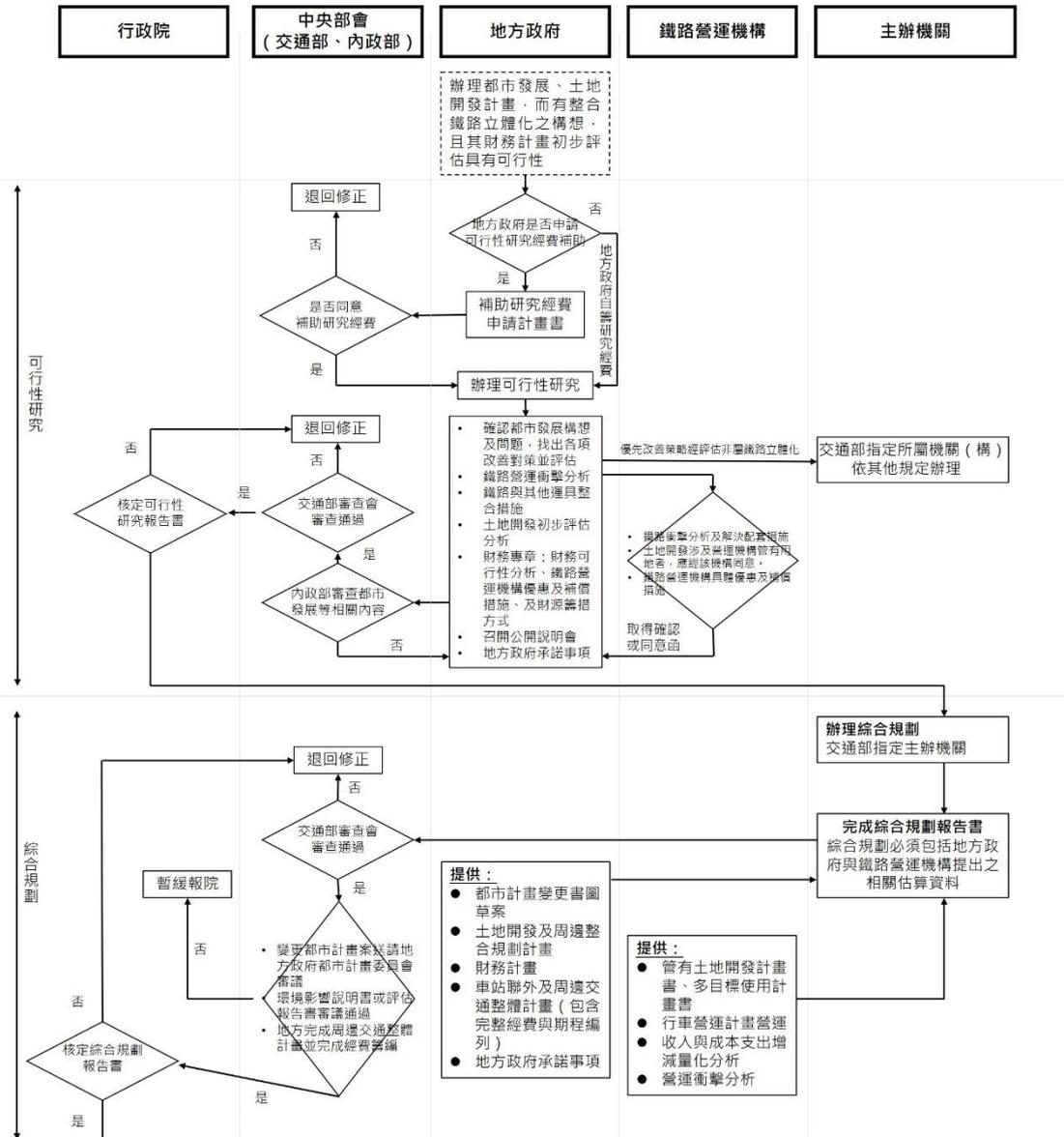


資料來源：[265]

圖 5.2-2 捷運建設申請與審查作業擷錄流程圖

2. 鐵道系統

參酌圖 5.2-3 有關《鐵路平交道與環境改善建設及周邊土地開發計畫審查作業要點》，可知既有程序中並未有風險專章之要求，因此建議可於「可行性研究報告書」及「綜合規劃報告書」中加入氣候變遷風險評估議題。



資料來源：[266]

圖 5.2-3 鐵路平交道與環境改善建設審查-擷錄流程圖

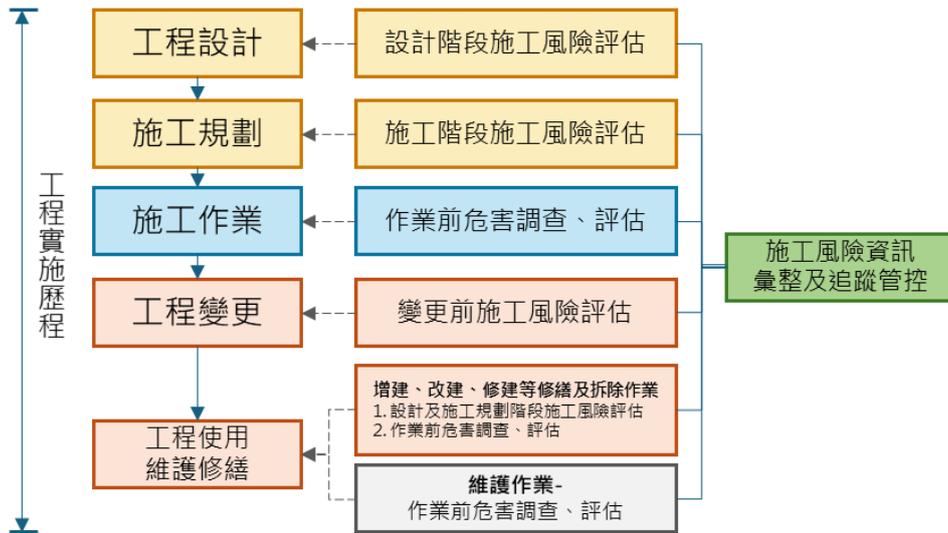
5.2.2 施工興建階段

1. 此階段主要是依據規劃設計階段之各項要求進行施工興建，保全對象聚焦於施工人員。依據《職業安全衛生法》第 5 條第 2 項「...工程之設計或施工者，應於設計或施工規劃階段實施風險評估...」，勞動部於《營造工程風險評估技術指引》中，亦說明興建工程各階段應進行之風險評估類型，如圖 5.2-4 所示。

2. 該指引亦指出施工興建風險通常來自於人員(Man)、機具(Machine)、材料

(Material)、工法(Method)、管理(Management)與環境(Environment)之 5M1E 等範疇，關注的焦點以職業安全風險為主，雖環境風險來源含有天候，惟並未明確指出是否有評估未來氣候變遷情境下的氣候風險。

3. 綜上說明，建議於風險評估中，除分析現況氣候風險外，將未來氣候風險一併納入評估範疇。



資料來源：[321]及本計畫繪製

圖 5.2-4 營造工程各階段施工風險評估流程圖

5.2.3 營運維修階段

此階段所考慮之保全對象較為廣泛，不僅包含基礎設施及車輛系統，員工、旅客等相關利害關係者皆屬之，其主要透過科技應用或是人員的操作程序(SOP)，進一步降低在規劃設計階段中之殘餘風險，若資產設備達需要重置之階段，則需再次檢視是否有規劃設計階段期間技術未達成者，以及是否有新科技可導入應用，其後將相關發現回饋給規劃建設單位，以強化軌道系統整體之韌性。

此外，在鐵路系統部分，我國《鐵路行車規則》^[265]已修法並要求鐵路營運機構實施安全管理系統，其定義之異常事件包含天然災變影響列車正常運轉之情事，詳如 5.3 節。

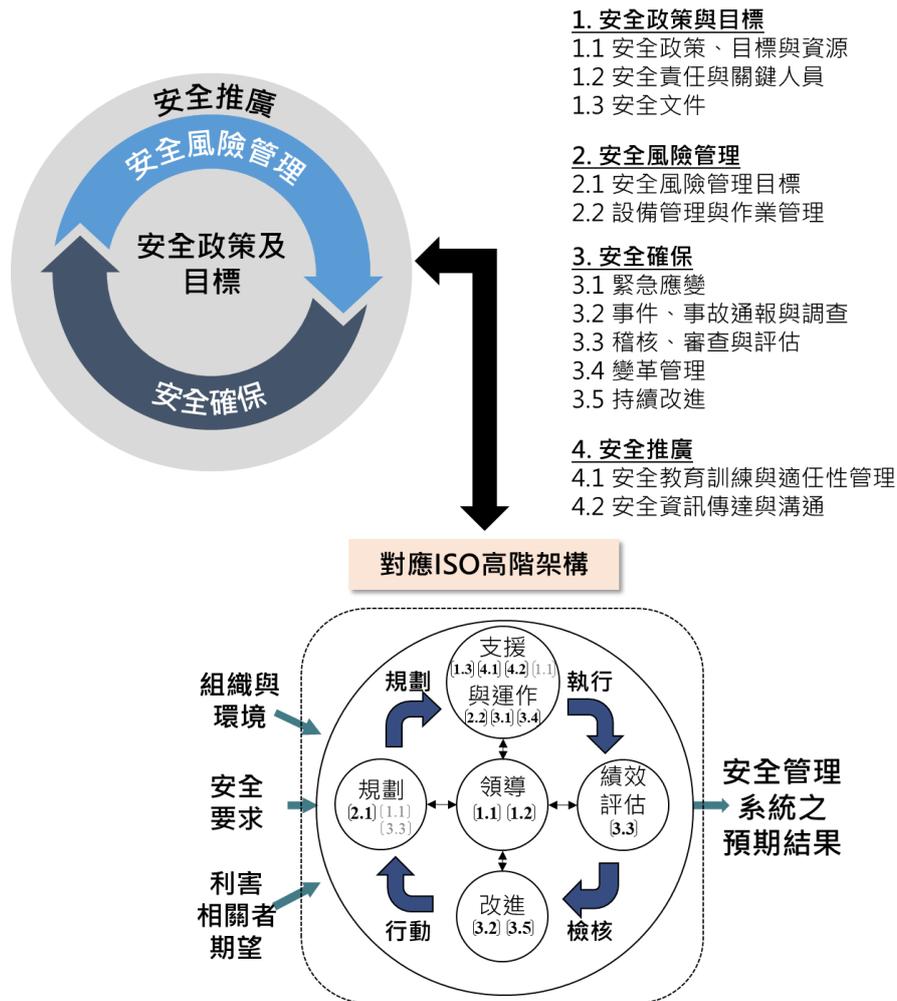
5.3 與安全管理及資產管理結合

氣候變遷導致極端天氣事件(如熱浪、乾旱、洪水、強風等)的頻率和強度上升，對基礎設施、機電設備、車輛等實體資產的維運與管理構成威脅，使得資產損壞、營運中斷等，進而導致營運維護成本增加及造成行車安全隱憂，爰此，本計畫建議可於安全管理及資產管理系統融入氣候變遷課題，規劃說明如下：

5.3.1 氣候變遷調適融入安全管理

安全管理系統(Safety Management System，以下簡稱 SMS)為國內近年運輸業界普遍導入來提升安全水準之工具，鐵道系統之相關規範、重點及融入氣候變遷課題之規劃說明如下：

1. 本所於 2018 年參考 ISO 高階架構，提出適用於我國鐵道系統之 SMS 通用架構^[270]，SMS 的發展目的係導入風險導向、以系統化的方式進行安全管理，如圖 5.3-1 所示。
2. 我國《鐵路行車規則》^[265]已修法要求鐵路營運機構依公告時程於 2024 年 1 月 1 日實施 SMS，所關注的範圍即是以「行車安全」為主，而天然災變對鐵路系統所造成之衝擊亦在其內。
3. 綜合上述，為降低氣候變遷對鐵路系統行車安全之影響，本計畫建議可於安全風險管理融入氣候變遷課題。以台灣高鐵為例，台高公司透過 PDCA 循環流程將安全政策之 12 項安全管理要素納入其中，如圖 5.3-2 所示。



資料來源：[270]

圖 5.3-1 我國鐵道安全管理系統架構圖



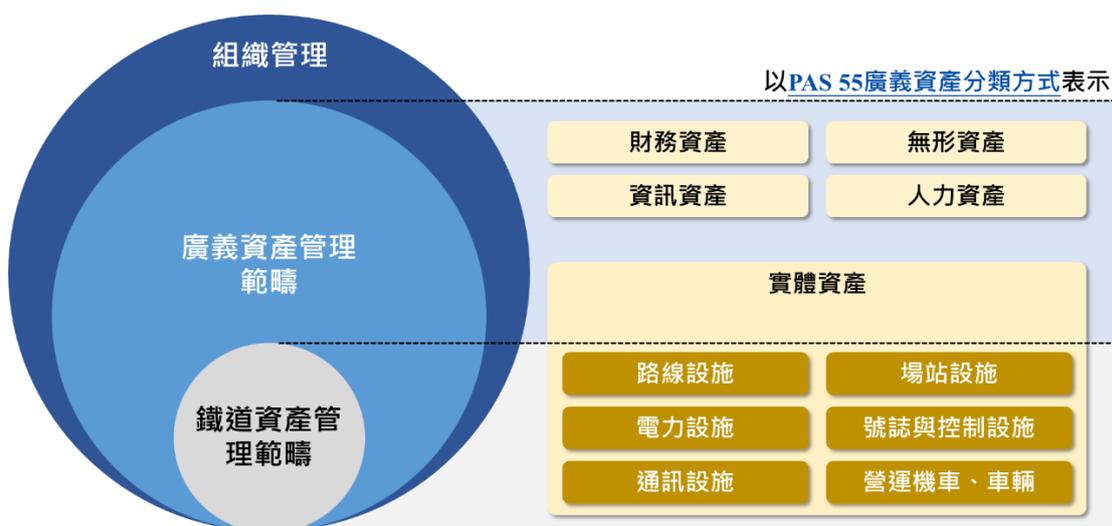
資料來源：[258]

圖 5.3-2 台灣高鐵營運安全計畫 12 項安全管理要素圖

5.3.2 氣候變遷調適融入資產管理

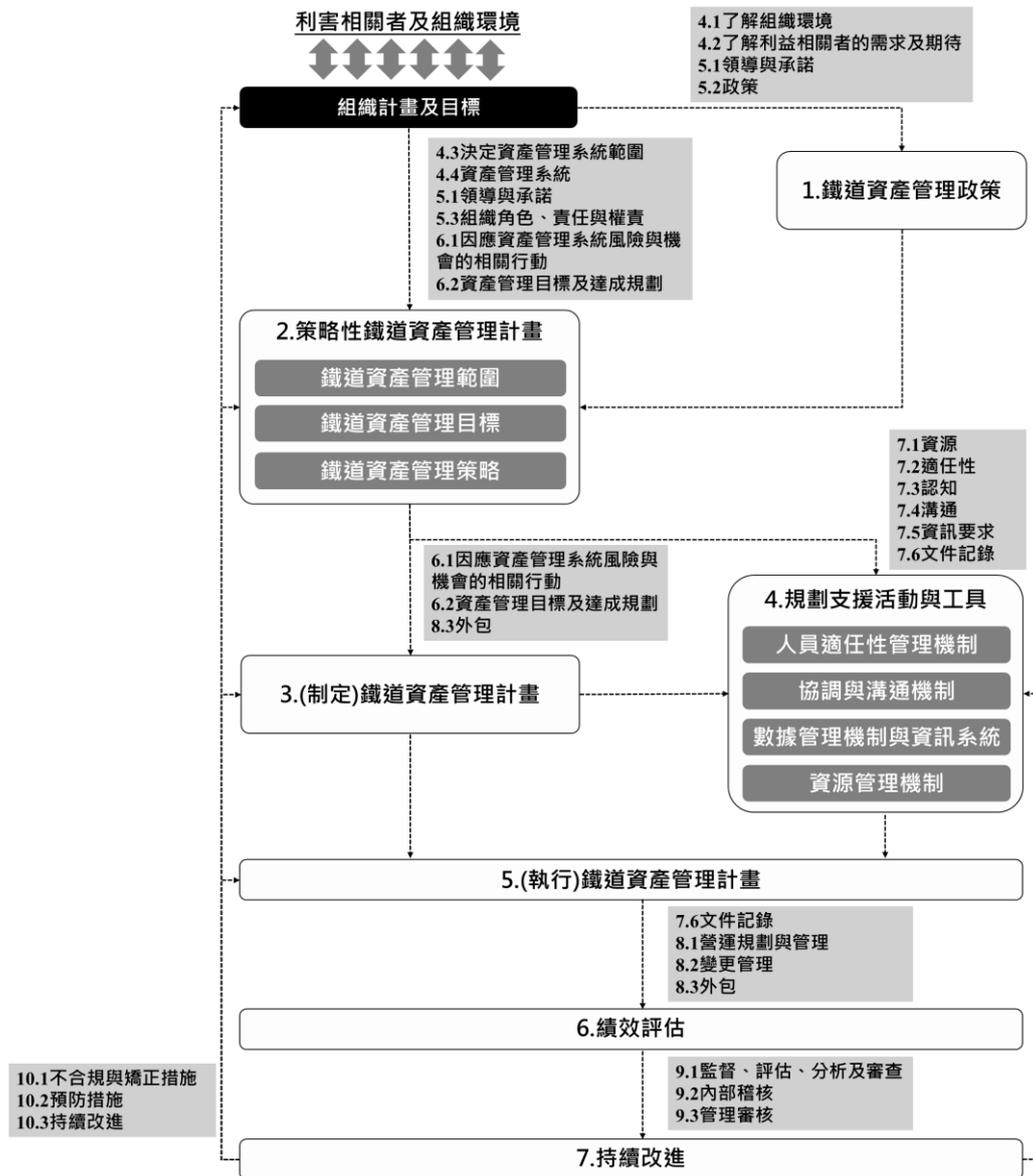
本所自 2023 年開始進行我國鐵道系統資產管理(Asset Management System, 以下簡稱 AMS)制度架構之建立, 相關重點及融入氣候變遷課題之規劃說明如下:

1. 該計畫以「營運鐵路系統之實體固定資產」做為我國鐵道資產制度架構之範疇, 包含有: 基礎設施(包含路線設施、場站設施、電力設施、號誌與控制設施、通訊設施)及車輛(包含營業機車、營業車輛), 所關注的範圍與氣候變遷風險影響之對象一致, 如圖 5.3-3 所示。
2. 鐵道系統資產管理之架構如圖 5.3-4 所示, 流程中「策略性鐵道資產管理計畫」(Strategy Asset Management Plan, 以下簡稱 SAMP)係從上位性、整體性之角度發展, 敘明組織對於鐵道資產管理的願景、整體目標以及為達成這些願景與目標的相關策略。
3. 綜上說明, 由於鐵道系統資產管理的範疇與氣候變遷風險影響與衝擊之範圍一致, 本計畫建議可於資產管理中納入氣候變遷調適策略, 使組織既有的業務流程及管理機制融合, 確保組織內各責任單位的執行方向能保持一致, 並充分理解其在鐵道資產管理的職責及面對氣候變遷應有的調適作為。



資料來源: [269]

圖 5.3-3 我國鐵道資產管理範圍示意圖



資料來源：[269]

圖 5.3-4 我國鐵道資產管理架構圖

依國外經驗^[6, 43]顯示，極端天氣對鐵道系統的直接影響時間範圍通常是相對短暫，但長期而言對鐵路系統的安全性能及資產價值有效利用則是至關重要。因此鐵道系統氣候變遷的調適，需與自身系統之資產管理機制及安全管理系統進行整合，方能發揮其最大效益。

5.4 鼓勵自主提報揭露適當調適資訊

除在既有評估流程中融入或新增氣候變遷風險課題，在不影響機敏與安全前提下，本計畫鼓勵主辦機關或營運機構能自主提報揭露適當的調適資訊，有助於與監理機關和大眾保持良好關係，從而實現長期穩定和永續發展，以下重點摘要常見之國際揭露架構及倡議標準之相關要求。

1. 氣候相關財務揭露(TCFD)

(1) 二十大工業國經濟合作論壇(Group of Twenty，以下簡稱 G20)旗下之國際金融穩定委員會(FSB)與在 2015 年 12 月成立氣候相關財務揭露工作小組，其任務係擬定自願性氣候相關財務資訊揭露建議，協助投資者與決策者瞭解組織重大風險，進而準確評估氣候相關之風險與機會。

(2) 該工作小組於 2017 年 6 月正式發佈 TCFD，要求企業藉由治理、策略、風險管理、指標和目標，有效管理氣候變遷之風險與機會。

2. 聯合國永續發展目標(SDGs)

(1) 聯合國於 2015 年通過 2030 永續發展議程，提出 17 項 SDGs，內容涵蓋有環境、經濟與社會等面向，展現了永續發展目標之規模與企圖心，各目標呈現如圖 5.4-1 所示。

(2) SDGs 之目標 13 就是要加強所有國家對氣候變遷危害的復原力和調適能力，例如：洪水、乾旱、熱浪、野火和其他自然災害等事件，目的是確保發展氣候變遷風險管理之技能，來預防或減少氣候變遷帶來的衝擊。

SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS



資料來源：[262]

圖 5.4-1 永續發展的核心目標方塊圖

3. ISO 14090 系列國際標準

國際標準化組織(ISO)在 2019 年時制定了與氣候變遷相關之 ISO 14090^[89]系列標準，包括有以下五個 ISO 規範與一個 Guide 指引，其中 2021 年發布的 ISO 14097 規範即是以 TCFD 框架為基礎，涵蓋了治理、策略、風險管理、指標和目標之核心要素，協助企業更有效地進行氣候相關財務揭露，具體向投資者報告氣候調適的韌性。

- (1) ISO 14090(2019)^[89]：氣候變遷調適-相關原則、需求與指引。
- (2) ISO 14091(2021)^[90]：氣候變遷調適-脆弱度、衝擊及風險評估指引。
- (3) ISO 14092(2020)^[91]：針對地方政府及社區的調適工作提出規範及指引。
- (4) ISO 14093(2022)^[92]：氣候變遷地方調適計畫融資機制-基於績效之氣候韌性補助-要求和指引。
- (5) ISO 14097(2021)^[93]：溫室氣體管理與相關活動-評估與報導氣候變遷相關投融資活動之原則及要求。
- (6) ISO Guide 84(2020)^[95]：於標準中納入氣候變遷考量指南。

由上說明可知，TCFD 建議的框架可幫助機構了解和管理極端氣候風險，從而做出更明智的投資決策；SDGs 目標 13 則是為機構提供明確的目標方向，幫助其應對氣候變遷；ISO 14097 則提供了比 TCFD 更詳細的指導氣候相關財務揭露。

為利本計畫後續之落地應用，以及瞭解我國鐵道系統相關機關(構)對氣候變遷調適的需求及見解，本計畫於辦理期間，多次拜會我國鐵道系統營運機構專家進行訪談，包含台灣高鐵公司、國營臺鐵公司、臺北捷運公司、新北捷運公司、桃園捷運公司、臺中捷運公司，以及高雄捷運公司等，目前台灣高鐵及臺北捷運已於永續報告書中參照 TCFD 揭露架構辨識氣候變遷實體風險，而其他鐵道系統營運機構亦表示願意自主揭露有關氣候變遷調適之相關作為。

第六章 我國鐵道系統強化調適能力之方法

強化氣候變遷調適能力之方法與步驟，首要係進行氣候變遷風險評估，就可能之調適差距擬定相應之調適策略，並就所擬之調適策略特性與資源，規劃可執行之期程。本章首先說明鐵道系統強化調適能力之方法，並輔以臺北捷運系統之演示案例，進行強化調適能力方法之說明。

6.1 氣候變遷風險評估

針對鐵道系統有關之氣候變遷風險評估模型，以及未來氣候變遷情境設定，謹臚列如下：

6.1.1 氣候變遷風險評估模型

本計畫在鐵道系統氣候變遷風險定義上，參考 IPCC AR6 WG2 及我國《氣候變遷因應法》第 3 條規定略以：「...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」，定義氣候變遷風險係由危害、暴露度及脆弱度之交集，其中脆弱度亦為敏感度與調適能力的函數，故整體呈現如圖 6.1-1、式(6.1)及式(6.2)所示。



資料來源：[83, 85]與本計畫整理

圖 6.1-1 氣候變遷風險概念示意圖

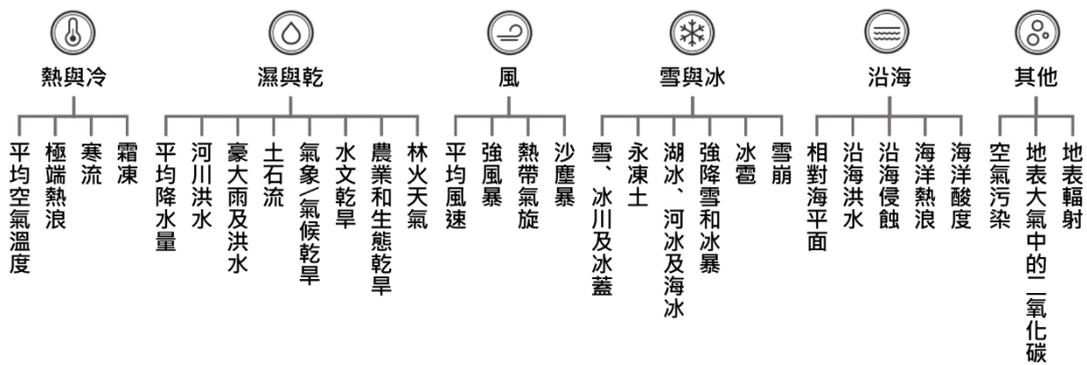
$$\text{風險} = f(\text{危害}, \text{暴露度}, \text{脆弱度}) \quad (6.1)$$

$$\text{脆弱度} = f(\text{敏感度}, \text{調適能力}) \quad (6.2)$$

其中，危害係指由氣候驅動因子造成天氣與氣候之有害事件，例如強降雨、熱浪、暴風...等；暴露度則為保全對象暴露於危害事件的數量或程度；而保全對象受危害影響之程度則取決於脆弱度。脆弱度包含自然環境條件及社會經濟條件，其與保全對象本身對危害的敏感度以及調適能力有關。

6.1.2 危害界定方法

如何辨別危害是否導因於氣候及其歸屬之氣候驅動因子(CID)類別係進行風險評估之首要課題，倘若危害非導因於氣候，則其所造成之衝擊不在氣候變遷風險評估範疇之中。根據 IPCC AR6，陸地相關 CID 可分為冷與熱(Heat and Cold)、濕與乾(Wet and Dry)、風(Wind)、雪與冰(Snow and Ice)、沿海(Coastal)和其他(Other)共六大類型^[84]，各類型所包含的 CID 類別如圖 6.1-2 所示。

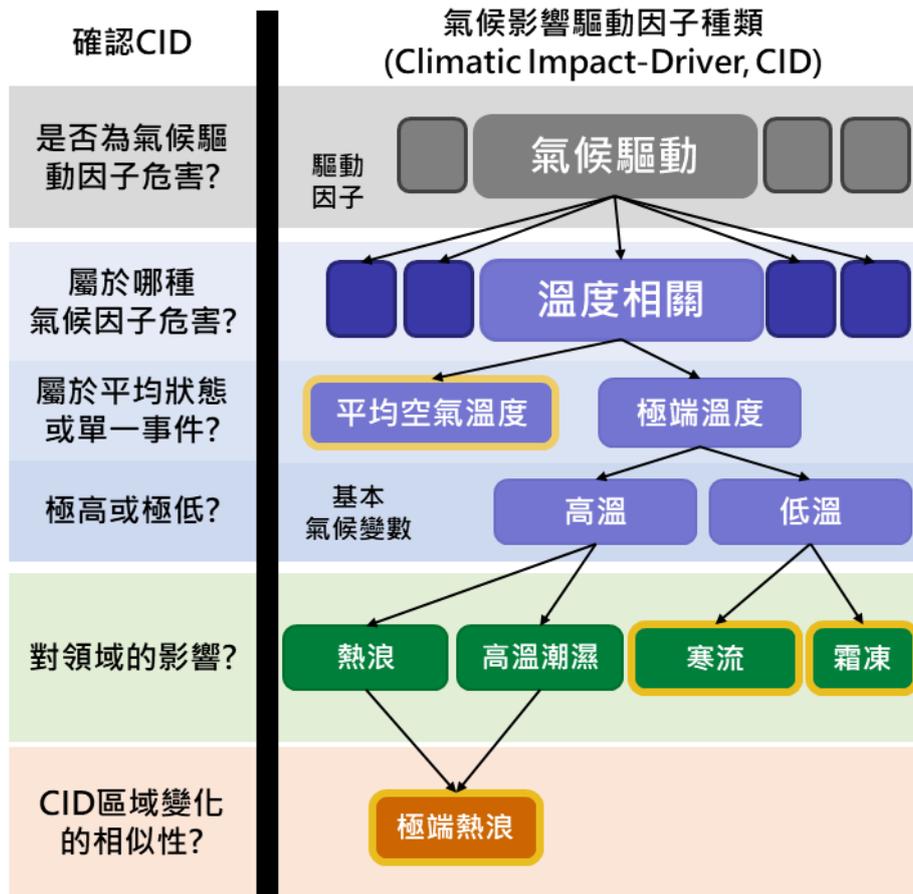


資料來源：[84]與本計畫整理

圖 6.1-2 CID 類型及類別示意圖

危害界定方式可參酌圖 6.1-3 之流程，其中，CID 可依據各領域受影響的情形進行區分，以溫度為例，高溫會影響某些作物的生長、高溫加上高濕度則可能造成人類體溫調節系統失常等。然而，若無限細分 CID 對領域之

影響，CID 類別恐過於複雜，導致氣候資訊評估變得更加困難，因此，可將基本氣候變數(Essential Climate Variable，以下簡稱 ECV)特徵和影響趨勢相似的 CID 合併，例如熱浪和高溫潮濕事件都與溫度這一基本氣候變量密切相關，且在多數地區，熱浪增加的同時，高溫潮濕的極端事件也在增加，故熱浪和高溫潮濕可合併為同一 CID 類別—極端熱浪^[192]。



註：黃框表示為 CID 類別

資料來源：[192]與本計畫整理

圖 6.1-3 CID 類別界定決策樹圖

6.1.3 暴露度及脆弱度界定方法

暴露度及脆弱度與保全對象特性相關，本計畫建議可邀集鐵道系統機關(構)、專家學者及相關利害關係者等進行討論，以便充分考慮可能影響保全對象之暴露度與脆弱度之因素。

1. 暴露度係指受氣候危害影響的對象及程度，需考量保全對象暴露情形之

時空分布。

2. 脆弱度係由敏感度及調適能力組成，說明如下。

(1) 敏感度指「哪些特徵會讓系統更容易受到特定氣候危害的負面影響」等涵蓋自然環境及社會經濟或文化等層面^[39]，例如：某鐵道路線是主要通勤路線，且缺乏替代交通工具，一旦發生事故時，難有其他替代方案，故該路線的敏感度較高。

(2) 調適能力指「系統中有哪些能力已經存在(或缺乏)，這些能力有助於降低現況或未來風險」，可從組織因應調適所具備之知識、技術、制度及經濟四個面向思考^[39]。

- 知識：目前有/缺乏哪些有助於調適作業之知識或專業技術？
- 技術：目前有/缺乏哪些有助於調適作業之技術工具？
- 制度：制度環境如何促進調適能力？
- 經濟：目前有/缺乏哪些經濟和財務資源，用於提升調適能力及實施調適選項？

針對暴露度及脆弱度的評估項目，日本 JICA 提出鐵道系統在氣候危害因子下，保全對象(硬體、軟體與人員)之暴露度、脆弱度及對應之風險，彙整如表 6.1-1 所述：

表 6.1-1 日本-JICA 鐵路設施之暴露度、脆弱度及風險彙整表

保全對象	暴露度	脆弱度	氣候風險
鐵軌系統（鐵軌、泊車位、車庫、車廂維修設施、安全運作器材、變電所電器管線、平交道等） 硬體設施	<ul style="list-style-type: none"> ● 設施的狀態（長度、數量、量能） ● 資產價值 	<ul style="list-style-type: none"> ● 設施地點、與海岸線與邊坡的距離 ● 設施抬升於地面距離 ● 土壤特性與邊坡坡度 ● 每種設施的氣候危害韌性程度 ● 廢水處理設備和空調系統的安裝狀態與量能 ● 各個設施是否已建立監測損害的系統 ● 在極端天氣下，系統是否具備持續運行的應急措施（例如緊急電力供應等） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 因淹水導致基礎設施和運具的損害增加 ● 鐵路軌道挫屈 ● 排水系統、隧道和橋梁的損壞 ● 指示標誌損壞，如電力線和交通信號燈 ● 樹木倒塌對車廂的架空電力線的損害
車廂	<ul style="list-style-type: none"> ● 數量、規格 ● 資產價值 	<ul style="list-style-type: none"> ● 車廂耐用度與使用年限 ● 暖氣/冷氣供應設備狀態 ● 極端天氣下的運作表現 ● 設備應對更高溫與降水模式變化的能力 	<ul style="list-style-type: none"> ● 車廂使用壽命縮短 ● 自然災害導致的車廂損壞

保全對象	暴露度	脆弱度	氣候風險
<p>軟體 設施</p> <p>專案相關組織 與人員</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 組織規模（包含人員結構、人數、角色等） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 災害應變計畫是否健全，如業務持續營運計畫等 ● 鐵路營運機構是否已購買極端天氣等災難保險 ● 於極端天氣中持續運營的知識與技術 ● 是否已建立氣象監測系統 ● 於極端天氣事件發生時的準備程度，如因應手冊有無等 ● 緊急情況下替代運輸選項的多樣性 	<ul style="list-style-type: none"> ● 班次延誤、停運 ● 由於車廂遭受淹水損壞和交通受限，乘客服務功能下降和貨物損失增加 ● 鐵路設施、車輛損壞，以及因停運造成的經濟損失 ● 極端天氣導致的損害和事故處理成本增加 ● 設備維護和人事成本增加 ● 極端天氣事件對工作人員/乘客產生的熱壓力 ● 鐵路運營中斷對周圍供應鏈網絡的損害
<p>周遭 人事物</p> <p>使用者（乘客、 貨物）</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● 乘客人數 ● 貨物數量 	<ul style="list-style-type: none"> ● 暖氣/冷氣供應設備狀態 ● 針對極端天氣的應變方案系統 	<ul style="list-style-type: none"> ● 極端天氣導致乘客/工作人員的壓力和生命風險 ● 貨物運輸停止

資料來源：[104]與本計畫整理

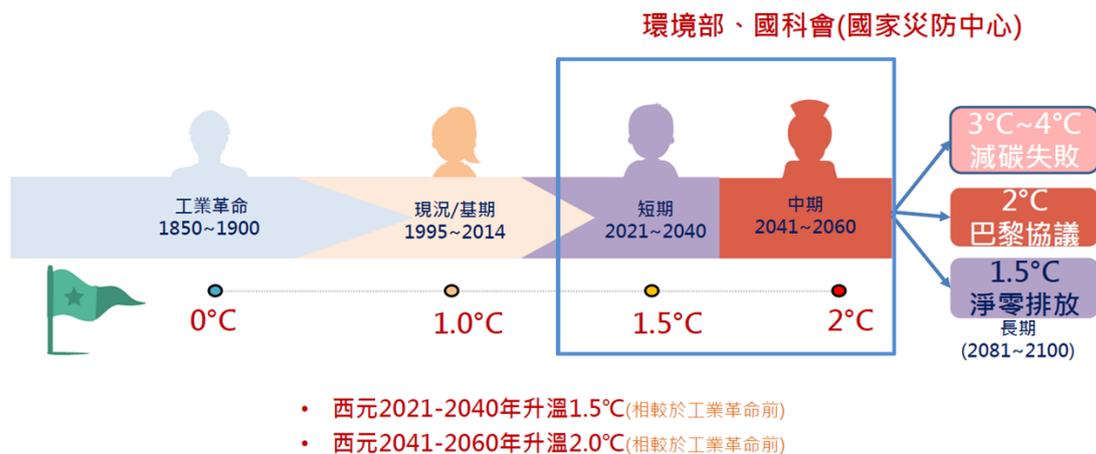
6.1.4 氣候變遷情境設定

氣候變遷風險之評估作業，關鍵係透過現況及未來風險比較找出是否存在調適缺口，若現有的防災措施無法因應未來的風險，即表示存在調適的缺口，必須採取適當的調適策略來降低極端氣候的衝擊。

有關未來風險之評估需使用科學推估資料，亦即是在不同氣候變遷情境下的氣候危害情形。根據行政院 2023 年 10 月 4 日核定之《國家氣候變遷調適行動計畫(112-115 年)》^[352]，我國「國家調適應用情境」採用全球暖化程度 GWL 固定增溫情境，GWL 情境為建立在共享社會經濟路徑 SSP 情境資料的推估結果，相較於 SSP 情境，GWL 情境較易於理解與表達，指當全球達成或未達成不同氣候目標時，暖化所造成的氣候變遷^[252]。

根據 IPCC WG1 的技術摘要報告，在未來的 20 年，不論全球減碳效果是否如預期中進行，全球均溫增加幅度將落在 1.5°C-2°C，爰此，國家調適應用情境優先採用「西元 2021-2040 年升溫 1.5°C」及「西元 2041-2060 年升溫 2°C」兩種情境。

為使我國鐵道系統之氣候變遷風險評估結果能與我國其他領域對接，本計畫建議各鐵道系統相關單位在進行未來風險評估時，至少需評估 GWL 1.5°C 和 GWL 2°C 兩種情境下之風險。倘需採用升溫超過 2°C 之高衝擊情境，建議可採用 3°C 或 4°C 之氣候推估情境，考量其發生機率，可優先參考 3°C 情境。相關情境設定如圖 6.1-4 所示。



資料來源：[252]

圖 6.1-4 國家氣候變遷調適應用情境設定示意圖

6.2 調適選項

從 4.2 節相關文獻回顧可以得知，調適選項會因氣候危害及所處的鐵道系統生命週期階段而異，爰此，本計畫根據氣候危害與鐵道系統生命週期將調適選項進行分類，俾利鐵道系統相關單位可根據其特性與需求查找相應之案例，做為擬訂適用自身機構的調適選項。

值得注意的是，施工興建階段著重在施工人員之職安風險，對於提升鐵道系統本身的韌性較無關聯，其調適選項多為改善員工的工作環境^[199]，降低極端氣候對施工人員造成的傷害與衝擊。有關極端高溫可能造成之影響，我國《職業安全衛生設施規則》第 324-6 條已有明揭，針對防範勞工在戶外作業時得到熱疾病，組織應視氣候狀況採取下列危害預防措施：

1. 降低作業場所之溫度。
2. 提供陰涼之休息場所。
3. 提供適當之飲料或食鹽水。
4. 調整作業時間。
5. 增加作業場所巡視之頻率。
6. 實施健康管理及適當安排工作。
7. 採取勞工熱適應相關措施。
8. 留意勞工作業前及作業中之健康狀況。
9. 實施勞工熱疾病預防相關教育宣導。
10. 建立緊急醫療、通報及應變處理機制。

相較於規劃設計及營運維修階段，施工興建階段對於不同氣候危害之調適選項差異較小，另報廢汰除(含重置)階段則透過系統重置進入到規劃設計階段形成一個 PDCA 循環，故本計畫主要彙整規劃設計階段及營運維修階段中，面對各氣候危害造成之影響所對應之調適選項，調適選項如表 6.1-2 所述。

實務上，每一種 CID 可能對鐵道系統造成不同的衝擊，而每一種對鐵

道系統的衝擊也可能來自於數個不同的 CID，為方便說明以及避免重複起見，表 6.1-2 係以對鐵道系統之衝擊內容來歸納可能的 CID 及對應的調適策略。

表 6.1-2 鐵道系統生命週期氣候變遷適選項彙整表

危害 (CID 類別)	生命週期		
	對鐵道系統之衝擊	規劃設計階段	
極端熱浪	對鐵道系統之衝擊 鋼軌挫屈	營運維修階段	
		<ul style="list-style-type: none"> ● 增加遮蔽以減少熱暴露 ● 夏季來臨前，針對高風險路段進行鋼軌應力解除，以預留更多伸縮空間 ● 更換軌道元件和鋼軌，使用更耐高溫的材料 ● 限制列車載荷以避免鋼軌挫屈 ● 提高維護作業頻率，如清洗與更換道碴 ● 開發或精進檢測鋼軌挫屈的方法 ● 將鋼軌塗成白色減少熱量吸收與膨脹 ● 設置軌道溫度計量測軌溫 ● 設置自動灑水系統 	
	基礎設施結構熱脹 電車線斷裂及掉落 號誌/電力/電子設備過熱故障 機車車輛異常	<ul style="list-style-type: none"> ● 使用更耐用材料建造橋面，包括鋼筋混凝土 	<ul style="list-style-type: none"> ● 提高巡檢和維護作業頻率 ● 更換橋梁伸縮縫 ● 建立監測和自動灑水系統
		<ul style="list-style-type: none"> ● 使用能依據溫度變化自動調整的張力的電車線設備 	<ul style="list-style-type: none"> ● 提高巡檢和維護作業頻率
		<ul style="list-style-type: none"> ● 提升變電站、號誌機房和電氣箱的通風和冷卻系統 ● 使用能承受更高溫度的電車線設備 	<ul style="list-style-type: none"> ● 更換為能承受更高溫度的設備 ● 提高巡檢和維護作業頻率 ● 建立監測系統
		<ul style="list-style-type: none"> ● 設計車輛時，採用符合極端溫度的設計規範 ● 採防熱特殊塗層 ● 強化車輛耐候設計 	<ul style="list-style-type: none"> ● 即時監測車輛重要設備狀態

生命週期		生命週期	
危害 (CID 類別)	對鐵道系統之 衝擊	規劃設計階段	營運維修階段
		<ul style="list-style-type: none"> 設計車輛和車站時採用耐高溫材料、抗紫外線材質窗戶、白色油漆屋頂等設計 升級車輛上的空調系統 車輛設計時將塗裝設計為淺色 	<ul style="list-style-type: none"> 最大程度地利用自然通風並改善列車和車站的冷卻系統 透過種植樹木或遮陽設施來增加陰影 提高車輛上空調系統的維護作業頻率 採購新式空調
寒流、霜凍	乘客舒適度降低	—	<ul style="list-style-type: none"> 制定列車降速及停駛規章 提供替代運具服務 (例如公車) 監測鋼軌應力
霜凍、強降雪和 冰暴、冰雹、雪 崩	空調耗能增加	—	<ul style="list-style-type: none"> 在列車上配備除霜集電弓 安裝防雪設施 安裝加熱裝置 加強絕緣，防止結凍和爆裂
強降雪和冰暴、 雪崩	列車運轉限制/中斷	—	<ul style="list-style-type: none"> 設置雪崩警報系統 岩壁清理與防護網安裝
強降雪和冰暴	軌裂/斷軌	調整容許軌溫之設計標準	<ul style="list-style-type: none"> 設置灑水系統、加熱墊、除雪機等進行除雪
強降雪和冰暴	電車線及號誌設備損壞	—	<ul style="list-style-type: none"> 制定強降雪列車降速及停駛規章 安裝道岔加熱器 提供替代運具服務 (例如公車) 進行植被管理，避免植被倒塌影響列車正常營運 (如運用 LiDAR 調查資產和鄰近土地的植被)
強降雪和冰暴	落石	—	<ul style="list-style-type: none"> 設置雪崩警報系統 岩壁清理與防護網安裝
強降雪和冰暴	車輪打滑	採用 T 型版式軌道，避免積雪	<ul style="list-style-type: none"> 設置灑水系統、加熱墊、除雪機等進行除雪
強降雪和冰暴、 冰雹、雪崩	列車運轉限制/中斷	—	<ul style="list-style-type: none"> 制定強降雪列車降速及停駛規章 安裝道岔加熱器 提供替代運具服務 (例如公車) 進行植被管理，避免植被倒塌影響列車正常營運 (如運用 LiDAR 調查資產和鄰近土地的植被)
土石流、氣象/氣候 乾旱	邊坡破壞	使用物理支撐結構 (例如擋土牆) 和植被加固來穩定邊坡	<ul style="list-style-type: none"> 增加對斜坡和排水系統的監測 邊坡穩定工程

危害 (CID 類別)	對鐵道系統之 衝擊	生命週期	
		規劃設計階段	營運維修階段
		<ul style="list-style-type: none"> 改善邊坡排水 選址時避開高風險地區 	<ul style="list-style-type: none"> 提高巡檢和維護作業頻率 將現有基礎設施遷離高風險地區 導入遠端狀態監測 (RCM)
	橋梁沖刷	<ul style="list-style-type: none"> 在上游建造攔水壩以減少洪水流量 加固橋墩和橋台並強化基礎 穩定河岸 (透過安裝護坡、石籠、塊石或增加植被) 以防止侵蝕 	<ul style="list-style-type: none"> 提高巡檢和維護作業頻率 進行沖刷風險評估 研發預報、監測系統 (如河川水位監測) 橋梁翻新工程
豪大雨及洪水	軌道/機廠/建物 淹水	<ul style="list-style-type: none"> 提高隧道及地下車站的排水設計標準 (如英國 HS2 的排水容量為 100 年洪水位, 再增加 30%) 提高車站出入口/連通地下道/通風豎井排風口/管線進出站體銜接處之防洪設計標準 (如英國 HS2 防洪高程為 1 千年洪水位 +1000mm) 使用綠色基礎設施來轉移徑流/增加滲透 	<ul style="list-style-type: none"> 使用移動屏障防止水進入隧道和地下車站 提高排水設施維護頻率、排水系統翻新工程 導入遠端狀態監測 (RCM) 開發車輛疏散判斷支援系統、制定車輛疏散計畫
	列車運轉限制/中斷	—	<ul style="list-style-type: none"> 提供替代運具服務 (例如公車) 開發天氣預警系統, 做為列車降速、停駛依據 制定緊急管理計畫, 包括地下系統的乘客疏散計畫
豪大雨及洪水、 土石流	號誌/電力/電子 設備毀損故障	<ul style="list-style-type: none"> 提高設備設計標準 提高設計高程 	<ul style="list-style-type: none"> 部署移動式電源供應備援設備 制定電力中斷的緊急應變計畫 在易淹水區的高地增設備援電子設備、電力/電子設備架高

生命週期		生命週期	
危害 (CID 類別)	對鐵道系統之 衝擊	規劃設計階段	營運維修階段
			—
強風暴、熱帶氣旋	樹木傾倒	—	<ul style="list-style-type: none"> 設置防風柵 種植防風植被
	列車脫軌翻覆	● 增加車輛抵抗強風之設計	<ul style="list-style-type: none"> 設置風速儀或開發暴風監測系統，做為列車降速、停駛依據 提供替代運具服務（例如公車）
	列車運轉限制/中斷	—	<ul style="list-style-type: none"> 部署移動式電源供應備援設備 制定電力中斷的緊急應變計畫 在設備中納入雷擊防護措施
	號誌/電力/電子設備毀損故障	● 提高設備設計標準	<ul style="list-style-type: none"> 建立緊急醫療、通報及應變處理機制 加強高風險區的防感電措施
強風暴	人員遭雷擊	● 確認安全程序與防感電設計	<ul style="list-style-type: none"> 使用防護塗層以減緩設備被腐蝕 增加或加強現有的海堤和堤防（如海堤加固） 恢復海岸線
	基礎設施毀損	<ul style="list-style-type: none"> 提升沿海防護設施設計標準（例如海堤、堤防） 選址時避免高風險區域 使用耐腐蝕材料 	<ul style="list-style-type: none"> 搬遷關鍵設備 增加或加強現有的海堤和堤防（如海堤加固） 開發或精進路基侵蝕檢測方法 恢復海岸線
	軌道/機廠/建物淹水	<ul style="list-style-type: none"> 提升沿海防護設施設計標準（例如海堤、堤防） 選址時避免高風險區域 在軌道附近建造綠色基礎設施以減少徑流 	

資料來源：本計畫整理

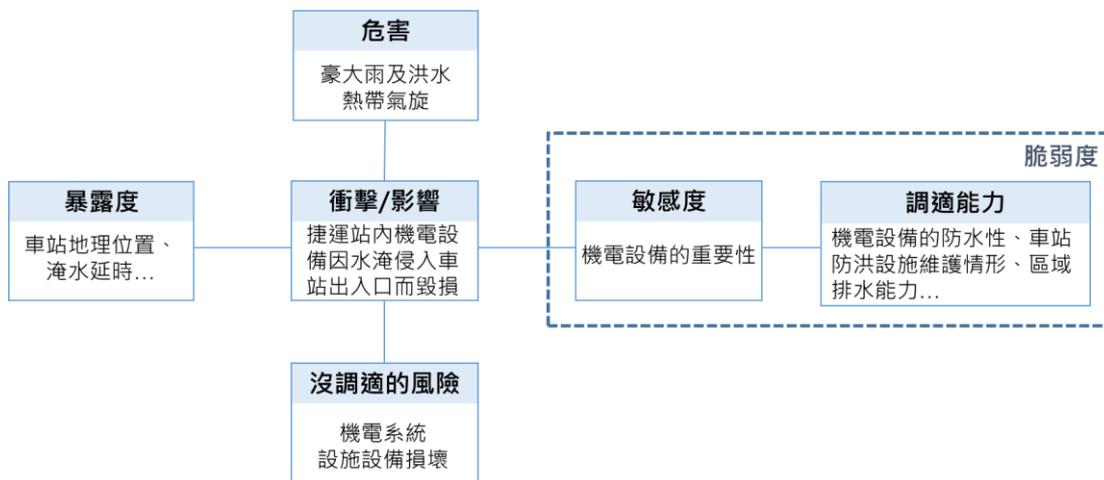
6.3 調適案例

為便於說明如何評估調適差距，並檢視現行作為是否能因應未來風險，本計畫以臺北捷運做為演示案例，並參照本計畫 5.1 節研擬之「我國鐵道系統調適架構」六步驟，包含：界定範疇、現況風險評估、未來風險評估、研擬調適選項、實施調適選項、追蹤及回饋執行成效，依序說明各步驟之操作範例。

1. 界定範疇

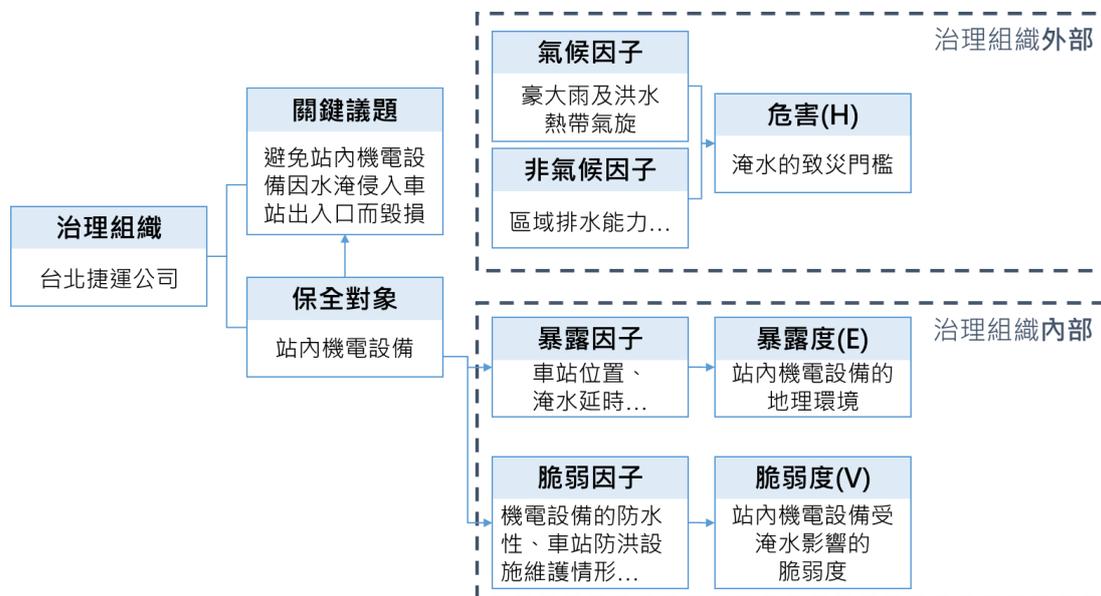
經回顧臺北捷運既有歷史氣候災害事件，以 2001 年 9 月納莉風災所造成之影響最為嚴峻，因納莉風災夾帶大量雨水，導致南港機廠、臺北車站遭洪水侵入，不但造成南港機廠、行控中心及部分車站淹水、及受影響路線停止運轉^[347]。考量前述水淹原因，可能來自於車站出入口、地下連通管道、通風豎井的排封口以及進出地下站纜線管槽，爰此，本計畫將案例設計為：因水淹侵入車站出入口，而造成站內機電設備毀損之風險，其保全對象為車站內的機電設備，而氣候危害因子(CID)可能包含豪大雨及洪水、熱帶氣旋。

本計畫建議鐵道系統相關機關(構)可依據自身系統特性與需求，採用 ISO14091 之衝擊鏈、或是氣候變遷調適科技整合研究計畫(TaiCCAT)中之氣候實體風險模板，來辨識危害、暴露度及脆弱度間之關係，藉此釐清各風險因子所需考量之指標，以便進行相關風險評估。值得注意的是，衝擊鏈和氣候實體風險模板對脆弱度之定義略有不同，衝擊鏈的脆弱度定義涵蓋自然環境及社會經濟脆弱度，如圖 6.3-1 所示；氣候實體風險模板則強調釐清各部會之權責，以鐵道系統而言，由於區域排水權責歸屬於地方政府而非鐵道系統機關(構)，故區域排水能力不足可歸類至危害中的非氣候因子而非脆弱度，如圖 6.3-2 所示。



資料來源：本計畫整理

圖 6.3-1 調適案例-衝擊鏈示意圖



資料來源：本計畫整理

圖 6.3-2 調適案例-氣候實體風險模板示意圖

2. 現況及未來風險評估

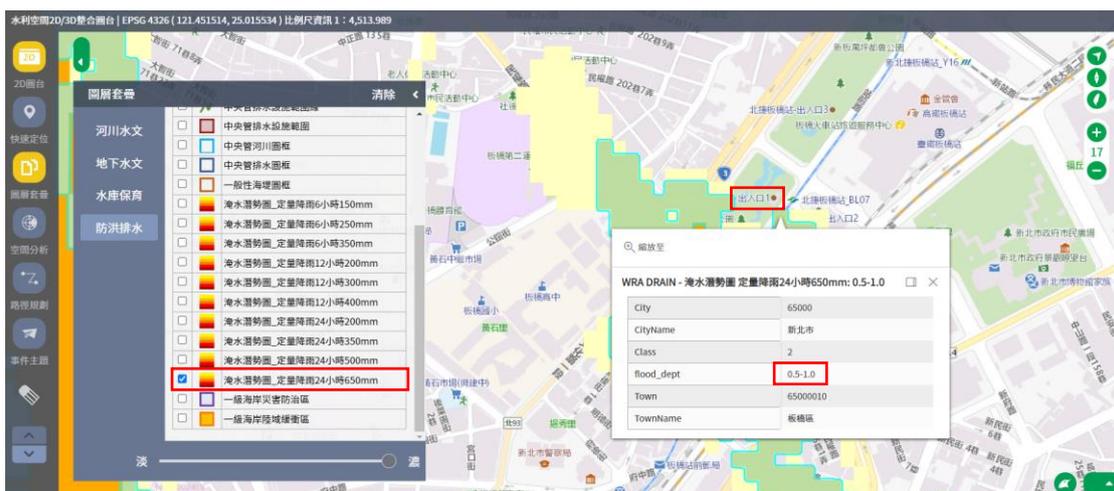
依據臺北市資料大平台之臺北捷運系統防洪設計標準資料，各站防洪保護標準及防洪實際高程彙整如表 6.3-1 所述，其高程係以基隆外海平均海平面為基準測得的高程加 100 公尺。至於捷運車站是否會遭洪水灌入，除考慮車站防洪高程外，區域的排水能力亦是其關鍵，區域排水能力可從水利署水利空間資訊平台查詢，該平台提供不同定量降雨標準下的淹水潛勢

圖，透過點擊地圖上之淹水網格，即可掌握其淹水深度，如圖 6.3-3 所示。值得注意的是，該圖台是基於設計降水條件及現況模擬淹水潛勢，未包含氣候變遷升溫情境下之淹水潛勢。

表 6.3-1 北捷防洪標準及防洪實際高程彙整表

路線	車站	防洪保護標準	防洪實際高程
淡水信義線	淡水-台大醫院	Max.{200 年洪水 位+500mm，地面 高程+600mm}	施工（含納莉風災 改善）完成之防洪 高程+捷運公司 增設之防洪擋板 高度
松山新店線	新店-小南門		
板南線	新埔-南港展覽館		
中和新蘆線	南勢角-頂溪		
文湖線	動物園-中山國中		
淡水信義線	東門-象山	Max.{200 年洪水 位+1100mm，地面 高程+600mm}	設計圖說標示的 防洪高程
松山新店線	西門-松山		
板南線	頂埔-板橋		
中和新蘆線	迴龍-台北橋、蘆洲-三 重國小、大橋頭-東門		
文湖線	松山機場-南港展覽館		
環狀線	大坪林-新北產業園區		

資料來源：臺北市資料大平臺與本計畫整理

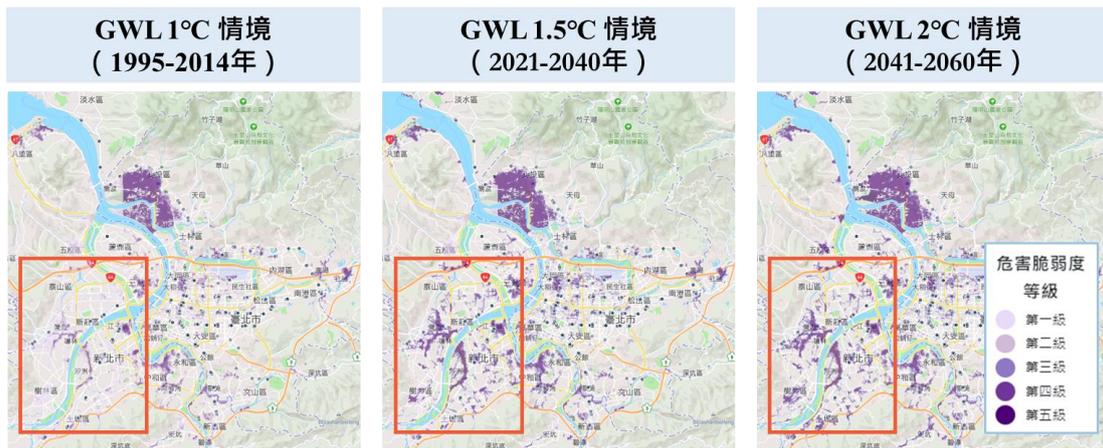


資料來源：水利署-水利空間資訊平台

圖 6.3-3 水利署水利空間資訊平台-淹水潛勢圖

為進一步了解氣候變遷升溫情況下，臺北捷運車站出入口暴露在水淹危害的風險程度，本計畫應用國家災害防救科技中心(NCDR)Dr.A「氣候變遷災害風險調適平台」之「危害-脆弱度」圖層，該平台之「危害」係指 24 小時降雨量超過 650mm 之機率、「脆弱度」則為水利署第三代淹水潛勢圖之淹水深度，「危害-脆弱度」則是將前兩者資料相乘後均分為五個等級來呈現。

本計畫依案例特性，將區域範圍設定為北北基、空間尺度採網格 40 公尺，另套疊臺北捷運各車站出入口地理標記資料(即暴露度)，來觀察不同 GWL 情境下風險等級變化，茲將 GWL 1°C、GWL 1.5°C 及 GWL 2°C 之「危害-脆弱度-暴露度」結果呈現如圖 6.3-4 所示，以圖中左下角框選大漢溪流域為例，可觀察到「危害-脆弱度-暴露度」隨升溫情境其風險影響逐漸加劇的變化過程。



資料來源：Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台與本計畫繪製

圖 6.3-4 研擬案例之「危害-脆弱度-暴露度」示意圖

待瞭解現況及未來情境下之風險差異後，即可進一步檢視現行作為是否能因應未來氣候風險，若現行防減災措施已可因應，則持續滾動檢討；反之，則代表存在調適缺口。以臺北捷運車站出入口處為例，現行防洪措施除了防洪高程設計外，另有防洪閘門設計，若評估現行防洪措施無法因應未來風險，則須進一步研擬及評估調適選項，以提升其韌性。

3. 研擬及執行調適選項

當評估現行防減災作為無法因應未來氣候變遷衝擊時，則須研擬相關

調適選項，本計畫已依不同氣候驅動之危害因子及鐵道生命週期，彙整鐵道標竿案例之調適選項於表 6.2-1 內供鐵道系統機關(構)參考。考量鐵道系統機關(構)之規模及預算差異會反映在調適選項之選擇，故本計畫建議可參酌 4.2.3 節中之評估方法來評估適用選項，常見方法包含氣候調適路徑、多準則評估、類比分析、成本效益評估等。完成調適選項評估後，即可執行相關措施，由於未來氣候難以準確預測，故氣候變遷調適必須持續滾動檢

第七章 結論與建議

本計畫之年度成果包括有回顧國內外鐵道系統氣候變遷調適文獻、盤點我國鐵道系統調適方法、研提鐵道系統強化調適能力之機制與方法、彙整與檢討運輸系統調適成果，以下說明本年度研究之整體結論、成果與後續建議。

7.1 結論

1. 鐵道標竿國家普遍發展氣候變遷調適機制與方法

- (1) 第二章、第三章及第四章回顧國外調適發展現況、趨勢、機制與方法，鐵道標竿國家普遍發布氣候變遷相關法規，並要求地方機關定期回報調適執行情形，做為調適計畫檢討精進之依據。在執行調適計畫過程中，強調調適計畫之定位與目標，組成工作小組進行跨部會合作並邀請利害關係者的參與，藉由中央政府或相關單位提供之最新科學研究資料，透過與專家學者及相關利害關係者的討論，以界定風險評估範圍、評估指標及風險等級分級標準，分析方法上，普遍採用質性方法評估未來氣候變遷下之風險。
- (2) 在眾多標竿案例中，以英國發展較為成熟，其中央政府於 2008 年頒布《氣候變遷法》並展開一系列調適策略相關研究，而英國相關機關(構)也積極發展調適機制與方法，如第二章介紹英國 NR 在 WRCCA 策略中擬定天氣與氣候變遷影響評估流程，將天氣與氣候影響納入規劃設計、施工與維運階段中考量；或是目前正興建中的英國 2 號高速鐵路 HS2 亦將氣候變遷影響於規劃階段即納入考量，並規劃未來營運時的應對措施；又或是第四章說明伯明罕大學協助研發之 CRVA 工具等，均可做為我國發展鐵道系統調適機制與方法的借鏡。
- (3) 鐵道標竿國家或機構之調適相關文獻中，多僅描述調適策略及其所採用之調適方案，並未明確說明 CID 評估過程、風險評估及調適方案評選之方式或評估指標細節，僅展示最終分析結果；惟仍可從部

分文獻中了解多數作業方式係採質性分析或半定量之評估方式，找出調適缺口並擬定適宜之調適方案。

- (4) 對於提升鐵道系統之調適能力，絕非單憑一己之力即可完成，需透過與其他涉及維護營運之外部組織共同參與才能達成。以英國 HS2 計畫為例，該計畫建立跨系統的聯繫機制，包含與能源、水、資通訊、廢棄物管理，以及與其他運輸系統間的資訊分享平台，於遭遇狀況時，可儘速進行協調與派遣，提升鐵道系統因應氣候變遷之反應能力。

2. 國內鐵道系統普遍聚焦於防減災，調適方面則處於剛起步階段

- (1) 氣候變遷調適與防減災之差異難以明確劃分，兩者主要差異在於：調適為透過科學推估資料，評估未來氣候變遷情境下之風險，並以其結果做為研擬調適選項之依據，評估期程短期至少往後預估 20 年，中長期則可檢視世紀中或世紀末可能之情境。
- (2) 目前我國鐵道系統多採用歷史及現況資料進行風險評估，做為擬定應對措施之參考，對於未來氣候風險評估則較少著墨。

3. 研擬我國鐵道系統強化調適能力之機制

- (1) 第五章依據我國「國家氣候變遷調適框架」、ISO 14090 系列標準及 UIC 調適架構，研擬我國鐵道系統調適架構，其步驟大致分為目標與保全對象界定、風險組成因子(危害、暴露度及脆弱度)辨識、現況風險評估、未來風險評估、研擬調適策略、調適選項評估、推動執行、檢討修正，本計畫研擬之調適架構可對應國家調適架構及相關法規。
- (2) 為協助我國鐵道系統相關權管機關(構)於規劃階段即納入氣候變遷調適工作，本計畫建議在不大幅修正既有作業體制之前提下，在現有鐵道計畫評估作業流程中，融入或新增氣候變遷風險評估，並將其與資產管理及安全管理系統結合，以發揮最大成效。此外，本計畫亦鼓勵鐵道系統主責機關(構)或營運單位，能自主提報揭露適當的調適資訊，讓相關利害關係者了解鐵道調適現況，經相關訪談會議討論，瞭解我國鐵道系統相關機關(構)有意願自主揭露針對氣候變遷的相關作為。

4. 研擬我國鐵道系統強化調適能力之方法

- (1) 本計畫第六章依據 IPCC AR5 與 AR6 WG2、我國《氣候變遷因應法》及「國家氣候變遷調適行動計畫」(112-115 年)^[352]，規劃鐵道系統氣候變遷風險模型及未來氣候變遷情境，其模型為「危害度、暴露度、脆弱度」之函數，情境設定則建議至少應評估 GWL 1.5°C 和 GWL 2°C 兩種情境下之風險變化，以便與我國其他領域互相比較。倘計畫需採用升溫超過 2°C 之高衝擊情境，建議可採用 3°C 或 4°C 之氣候推估情境，考量其發生機率，可優先參考 3°C 情境。
- (2) 在風險評估方法上，由於量化分析須具備足夠數據方能進行，包含不確定性的 CID 數據、保全對象的暴露度及脆弱度數據等。鑒於目前尚未有足夠的量化數據可進行量化風險評估與成本效益分析，本計畫透過專家學者討論等方式，應用質性分析方式(如風險矩陣)進行風險評估，以便鐵道機關(構)能在現況環境的限制下進行風險辨識及初步評估。
- (3) 在調適選項部分，本計畫彙整鐵道標竿機構之調適作法，依據 CID 及其對鐵道系統的衝擊影響、以及不同生命週期階段進行分類綜整，提供我國鐵道相關權責單位參採。
- (4) 為有效說明調適機制與方法應用，本計畫透過一調適案演示例，並參酌 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台提供之危害、自然脆弱度之圖層資料，與臺北捷運車站出入口點位套疊，即可辨識在未來升溫情境下，臺北捷運車站出入口暴露在淹水下之風險。

7.2 建議

1. 聚焦於高溫、強降雨等常見氣候風險做為調適指引之範例

我國鐵道系統常受強降雨及颱風挾帶的大雨影響，如臺鐵北迴線和仁至崇德段因地震後地質更加破碎，再加上強降雨的衝擊，導致落石、土石流等災情頻傳，惟目前坡地災害相關圖資資料，為經濟部地質調查及礦業管理中心 2014 年與 2016 年公告之岩屑崩滑、岩體滑動、落石與順向坡的地

質災害潛勢範圍資料，以及農業部林業及自然保育署 2018 年之福衛判釋崩塌地範圍資料，尚未考慮近期地震造成的崩塌影響及未納入未來升溫情境下之範圍變化。因此，本計畫建議在後續第二、三年期發展調適指引時，除以坡地風險做為示範案例外，亦可採用 CID 資料不確定性低、且與外部環境關聯性低之溫度資料，例如分析高溫下軌道挫屈風險，以利與鐵道相關機關(構)說明調適評估操作過程。

2. 持續推廣鐵道調適概念

考量鐵道調適於國內尚屬初期發展階段，部分相關機關(構)尚不熟悉氣候變遷調適與傳統防減災之差異，為使各單位對鐵道調適有更詳細的理解，除參閱 2.1 節的氣候變遷與調適策略概述外，建議後續可藉由教育訓練、研討會等方式，持續與相關機關(構)交流鐵道調適概念及作法，形成良性交流以利後續國家制度的推動。

3. 持續瞭解並彙整鐵道相關機關(構)導入鐵道調適面臨之課題

根據本年度實務訪談及相關會議瞭解營運機構、規劃建設單位及監理機關在導入鐵道調適的過程中，目前面臨到的困難與需求，包含：

- (1) 缺乏未來升溫等鐵道調適所需之相關風險評估圖資及尺度資料，以致在盤點現況與未來之調適差距時，較難有客觀且最新之科研數據進行評估。
- (2) 有關前揭之科研資料因涉及水利、氣象等不同領域之氣候變遷專業智能，期待鐵道系統權管機關(構)單獨蒐整及分析有其困難度，且若由各機關(構)獨自探索，亦有重複投入資源之疑慮。

基此，為利鐵道系統權管機關(構)順利辦理調適相關業務，除須持續瞭解並彙整鐵道系統機關(構)之需求與議題之外，對於最新科研數據之產出，建議由《氣候變遷因應法》之中央主管機關協助產製與彙整，透過平台方式分享相關使用單位。

4. 發展氣候變遷風險驅動因子評估原則規範、支援文件及工具

回顧國外鐵道標竿機構於調適選項案例，可發現與現行防減災作為相仿，誠如上述，兩者差異在於風險評估模型、未來情境等應用，其中風險評估所採用之驅動因子評估指標至關重要，但相關文獻及實際案例甚少。為

便於未來我國鐵道系統相關權責單位應用，本計畫建議後續可發展相關支援工具，包含氣候變遷風險驅動因子範本、驅動因子評估標準等。

參考文獻

[英文文獻]

1. Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change (ARISCC), Retrieved from: <https://www.ariscc.org/>
2. Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change (ARISCC), Good Practice Risk Management & Assessment, Retrieved from: <https://ariscc.org/index1398-2.html?id=87>
3. AECOM Australia, Adaptation of Melbourne's Metropolitan Rail Network in Response to Climate Change, 2011.
4. AECOM Australia, Economic framework for analysis of climate change adaptation options, 2012.
5. Ahmad Kasraei, Amir Garmabaki, Reliability Analysis of Railway Assets Considering the Impact of Geographical and Climatic Properties, International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, 2024.
6. ARC Advisory Group, Remote Condition Monitoring: A Boost for Rail Asset Management, 2017.
7. Baker, C., Chapman, L., Quinn, A., and Dobney, K., Climate Change and the Railway Industry: a Review. Journal of Mechanical Engineering Science. 224, 519-528, 2010.
8. Baskin, A., Nature Based Solutions (NBS) in the Transport Sector. Report for the Transformative Urban Mobility Initiative (TUMI), 2023.
9. Blackwood, L., and Renaud, F.G., Barriers and tools for implementing Nature-based solutions for rail climate change adaptation. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 113: 103529, 2022.
10. Blackwood, L., Renaud, F.G., and Gillespie, S., Nature-based Solutions as Climate Change Adaptation Measures for Rail Infrastructure. Nature-Based Solutions, Vol. 2, 100013, 2022.

11. Blackwood, L., Renaud, F.G., and Gillespie, S., Rail Industry Knowledge, Experience and Perceptions on the Use of Nature-Based Solutions as Climate Change Adaptation Measures in Australia and the United Kingdom. *Environmental Research Infrastructure and Sustainability*, Vol. 3, 045011. DOI: 10.1088/2634-4505/ad14ef, 2023.
12. Boqing Feng, et al, Detection of Man-Made Objects along the High-Speed Railway Based on High Resolution Remote Sensing Images. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 1486, 2019 4th International Seminar on Computer Technology, Mechanical and Electrical Engineering (ISCME 2019) 13-15 December 2019, Chengdu, China.
13. Brumercikova, E., Hofer, W., Brumercik, F., Bukova, B., & Zitricky, V., Research on the Use of Reflective Thermal Insulation Coating on Railway Tracks and Wagons in Slovak Republic. *Applied Sciences*, 14(15), 6569, 2024.
14. BSI Standards Publication, EN 50126-1, Railway Applications - The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS), 2017.
15. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMU), Das Klimaanpassungsgesetz (KAnG), Retrieved from: <https://www.bmu.de/themen/klimaanpassung/das-klimaanpassungsgesetz-kang>
16. Cantalloube, H. M., Nouvel, J. F., Azarian, S., Cheraly, A., Roques, S., and Oriot, H., Rail-borne SAR interferometry for Disaster Prevention. In *Proceedings of EUSAR 2016: 11th European Conference on Synthetic Aperture Radar* (pp. 1-5). VDE, 2016.
17. Carole Escolan (UIC), *Climate Change Adaptation for International Transport: Preparing for the Future*, 2019.
18. Cerema, *National Climate Change Adaptation Plan: Transportation Infrastructures and Systems, Action 1*, 2015.

19. Chang, L., Sakpal, N. P., Elberink, S. O., Wang, H., Railway Infrastructure Classification and Instability Identification Using Sentinel-1 SAR and Laser Scanning data. *Sensors*, 20(24), 7108, 2020.
20. Chen-Yu Lin, et al, International Benchmarking of Railroad Safety Data Systems and Performance—a Cross-Continental Case Study. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 26: 100384, 2023.
21. Climate Change Platform, Climate Adaptation Strategies in Germany, 2023.
22. Climate Risk and Resilience Portal (ClimRR), Retrieved from: <https://climrr.anl.gov/>
23. Climate Sense Ltd and Birmingham Centre for Railway Research & Education (BCRRE), University of Birmingham, Review of Network Rail’s Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plans, 2021.
24. Community of Metros Benchmarking Group, Research: Preparing for Extreme Weather and Climate Change, Retrieved from: <https://communityofmetros.org/research-preparing-for-extreme-weather-and-climate-change/>
25. Cousins, J. J., Justice in nature-based solutions: Research and pathways. *Ecological economics*, 180, 106874, 2021
26. Czuchlewski, K. R., Weissel, J. K., and Kim, Y., Polarimetric synthetic aperture radar study of the Tsaoling landslide generated by the 1999 Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 108(F1), 2003.
27. Das, S., Ghosh, A., Hazra, S., Ghosh, T., de Campos, R. S., and Samanta, S., Linking IPCC AR4 & AR5 Frameworks for Assessing Vulnerability and Risk to Climate Change in the Indian Bengal Delta, *Progress in Disaster Science*, 7, 100110, 2020.

28. Department for Environment, Food & Rural Affairs (Defra), UK Climate Change Risk Assessment: Government Report 2012 (PB13698), 2012.
29. Department for Environment, Food & Rural Affairs (Defra), Understanding Climate Adaptation and the Third National Adaptation Programme (NAP3), 2024.
30. Department of Agriculture, Water and the Environment (DAWE), National Climate Resilience and Adaptation Strategy 2021 – 2025, 2021.
31. Department of Climate Change, Energy, The Environment and Water (DCCEEW), Assessing and adapting to Australia’s climate risks, Retrieved from: <https://www.dcceew.gov.au/climate-change/policy/adaptation/ncra>
32. Department of Climate Change, Energy, The Environment and Water (DCCEEW), National Climate Risk Assessment First pass assessment report, 2024.
33. Department of Climate Change, Energy, The Environment and Water (DCCEEW), Powering Australia, Retrieved from: <https://www.dcceew.gov.au/energy/strategies-and-frameworks/powering-australia>
34. Dépoues, V., From Scientific Information on Climate Change to Economic Analysis for Adaptation of Infrastructure: The Case Study of SNCF, Doctoral Dissertation, Université Paris Saclay (COMUE), 2019.
35. Deutsche Bahn, Deutsche Bahn 2021 Integrated Report, 2021.
36. Deutsche Bahn, Deutsche Bahn 2023 Integrated Report, 2023.
37. Deutsche Bahn, Implementing Strong Rail, 2024.
38. Deutsche Bahn, Retrieved from: <https://www.bahn.de/>
39. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), Risk Supplement to the Vulnerability Sourcebook, 2017.

40. Di Martino, G., Esposito, M., Festa, B., Iodice, A., Mancini, L., Poreh, D., Riccio, D., and Ruello, G., Railway Bridge Monitoring with Sar: A Case Study. In IGARSS 2018-2018 IEEE International GEOSCIENCE and Remote Sensing Symposium (pp. 2952-2955). IEEE, 2018.
41. Dong, Q., Chen, X., Jiang, L., Wang, L., Chen, J., and Zhao, Y., Semantic Segmentation of Remote Sensing Images Depicting Environmental Hazards in High-Speed Rail Network Based on Large-Model Pre-Classification. *Sensors*, 24: 1876, 2024.
42. Doogie Black and Nick Pyatt of Climate Sense, *Adapting Urban Transport to Climate Change*, 2021.
43. Erika J. Palin, Irina Stipanovic Oslakovic, Kenneth Gavin, and Andrew Quinn, *Implications of Climate Change for Railway Infrastructure*, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Volume 12, Issue 5, 1-41, 2021.
44. European Committee for Electrotechnical Standardization, *Railway Applications – The Specification and Demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS) Part 1: Basic Requirements and Generic Process*, EN50126-1, 1999.
45. Fang-Chu Chen, *Wireless Slope Monitoring System*, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
46. Federal Highway Administration, *Vulnerability Assessment and Adaptation Framework Third Edition*, 2017.
47. Federal Railroad Administration (FRA), *FRA’s Climate and Sustainability Program*, Retrieved from: <https://railroads.dot.gov/rail-network-development/environment/fras-climate-and-sustainability-program>
48. Federal Railroad Administration (FRA), *FRA’s Climate and Sustainability: Rail Resiliency*, 2024.
49. Federal Register, *Executive Order 14008: Tackling the Climate Crisis at Home and Abroad*, 2021.

50. Federal Transit Administration (FTA), 2027 Climate Adaptation Plan, 2024.
51. Federal Transit Administration (FTA), A Vulnerability and Risk Assessment of Southeastern Pennsylvania Transportation Authority (SEPTA) Regional Rail, 2013.
52. Federal Transit Administration (FTA), An Integrated Approach to Climate Adaptation at the Chicago Transit Authority, 2013.
53. Federal Transit Administration (FTA), FTA's Climate Action Plan, 2021.
54. Federal Transit Administration (FTA), Gulf Coast Climate Change Adaptation Pilot Study, 2013.
55. Federal Transit Administration (FTA), Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority Climate Change Adaptation Pilot Project Report, 2013.
56. Federal Transit Administration (FTA), San Francisco Bay Area Rapid Transit District (BART) Climate Change Adaptation Assessment Pilot, 2013.
57. Federal Transit Administration (FTA), Sound Transit Climate Risk Reduction Project, 2013.
58. Federal Transit Administration (FTA), Transit and Climate Change Adaptation: Synthesis of FTA - Funded Pilot Projects, 2014.
59. Federal Transit Administration (FTA), Transit Climate Change Adaptation Assessment/Asset Management Pilot for the Metropolitan Atlanta Rapid Transit Authority, 2013.
60. Federal Transit Administration (FTA), Transit Resilience Guidebook, 2023.
61. Ferranti, E., Chapman, L., Lee, S., Jaroszweski, D., Lowe, C., McCulloch, S., and Quinn, A., The hottest July day on the railway network: insights and thoughts for the future. *Meteorol. Appl.* 25, 195-208, 2018.

62. Ferranti, E., Chapman, L., Lowe, C., McCulloch, S., Jaroszweski, D., and Quinn, A., Heat Related Failures On Southeast England's Railway Network: Insights and Implications for Heat Risk Management. *Weather Clim. Soc.* 8, 177-191, 2016.
63. Fisher, R., Quantifying the Vulnerability of GB Rail to Temperature and Precipitation in Order to Improve Resilience, Doctoral Dissertation for the University of Birmingham, Birmingham, United Kingdom, 2021.
64. Fisher, Rachel, et al, Climate Change Resilience Beyond The Mainline Railway: a Review, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering*, 2023.
65. Flickr, The White Rails of the Rhaetian Railway, Retrieved from: <https://www.flickr.com/photos/kecko/29844675158/in/photostream/>
66. German Environment Agency, Climate Impact and Risk Assessment 2021 for Germany, 2021.
67. Government of the Republic of Korea, Korea's Adaptation Strategy to Climate Change, 2011.
68. Greenham, S., Ferranti, E., Powell, R., Drayson, K., and Quinn, A., The impact of heat on London Underground Infrastructure in a Changing Climate. *Weather* 78, 170 175, 2023.
69. Greenham, S., Ferranti, E., Quinn, A., and Drayson, K., The Impact of High Temperatures and Extreme Heat to Delays on the London Underground Rail Network: An Empirical Study. *Meteorol. Appl.* 27, e1910, 2020.
70. Greenham, S., Jones, S., and Ferranti, E., Developing a Climate Risk and Vulnerability Assessment for Birmingham, 2023.
71. Greenham, S., Jones, S., Ferranti, E., Zhong, J., Acton, J., MacKenzie, R., and Grayson, N., Mapping Climate Risk and Vulnerability with Publicly Available Data, 2023.
72. Guillaume GACH, FRMCS and 5G for Rail Status and Challenges, *RailTech Europe 2022*, 2022.

73. Haasnoot, M., Kwakkel, J. H., Walker, W. E., and Ter Maat, J., Dynamic adaptive policy pathways: A method for crafting robust decisions for a deeply uncertain world. *Global environmental change*, 23(2), 485-498, 2013.
74. Hanson, H. I., Wickenberg, B., and Olsson, J. A., Working on the boundaries—How do science use and interpret the nature-based solution concept?. *Land use policy*, 90, 104302., 2020.
75. He, P., Guo, Z., Chen, H., Shi, P., Zhou, X., and Wang, G., Research and Application of Early Identification of Geological Hazards Technology in Railway Disaster Prevention and Control: A Case Study of Southeastern Gansu, China. *Sustainability*, 15(24), 16705, 2023.
76. High Speed Two (HS2) Limited, Climate Change Adaptation and Resilience Adaptation Reporting Power (ARP) Report, 2021.
77. Hu, F., Leijen, F. J. V., Chang, L., Wu, J., and Hanssen, R. F., Monitoring Deformation along Railway Systems Combining Multi-Temporal InSAR and LiDAR data. *Remote Sensing*, 11(19), 2298, 2019.
78. Hyun Ki Kim, Safety Management System using Measuring Data, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
79. Information and Communication Technologies for Enhanced Emergency Management, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management for Railway Systems, 2014.
80. Inoyatov, K., Abdullaev, B., and Rakhmatov, K., Impact of Solar Radiation on the Climate of a Passenger Car. In *E3S Web of Conferences*, Vol. 460, EDP Sciences, 2023.
81. Inside Track, How America's Top Railroad Learns to Fly, Retrieved from:
https://www.up.com/aboutup/community/inside_track/railroad-learns-to-fly.htm

82. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, 2007.
83. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability, 2014.
84. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2021: The Physical Science Basis, 2021.
85. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, 2022.
86. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2023 Synthesis Report, 2023.
87. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Climate Change 2013: The Physical Science Basis, 2013
88. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Global Warming of 1.5°C, 2018.
89. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14090:2019 - Adaptation to Climate Change- Principles, Requirements And Guidelines, 2019.
90. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14091:2021 - Adaptation to Climate Change- Guidelines on Vulnerability, Impacts and Risk Assessment, 2021.
91. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14092: 2020 -Adaptation to Climate Change- Requirements and Guidance on Adaptation Planning for Local Governments and Communities, 2020.
92. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14093: 2022 - Mechanism for financing local adaptation to climate change — Performance-based climate resilience grants — Requirements and guidelines, 2022.
93. International Organization for Standardization (ISO), ISO 14097: 2021 - Greenhouse Gas Management and Related Activities- Framework Including Principles and Requirements for Assessing

- and Reporting Investments and Financing Activities Related to Climate Change, 2021.
94. International Organization for Standardization (ISO), ISO 55001:2014 Asset Management Systems, 2014.
 95. International Organization for Standardization (ISO), ISO Guide 84:2020 - Guidelines for addressing climate change in standards, 2020.
 96. International Transportation Forum, Retrieved from: <https://www.itf-oecd.org/>
 97. International Union of Railways (UIC), Adapting to Climate Change, 2015, Retrieved from: <https://uic.org/sustainability/article/adapting-to-climate-changes>
 98. International Union of Railways (UIC), Ecosystem Valuation for Railways, 2024, Retrieved from: <https://uic.org/projects/article/ecov4r#Project-description>
 99. International Union of Railways (UIC), High Speed and Intercity Natural Risks, 2012
 100. International Union of Railways (UIC), RAIL ADAPT - Adapting the railway for the future, 2017.
 101. International Union of Railways (UIC), RERA-RAIN, Retrieved from: <https://uic.org/projects/article/rera-rain>
 102. James E. Neumann, et al. Climate effects on US infrastructure: the economics of adaptation for rail, roads, and coastal development. *Climatic change*, 167.3-4: 44, 2021.
 103. Jenkins, K., Gilbey, M., Hall, J., Glenis, V., and Kilsby, C., Implications of Climate Change for Thermal Discomfort on Underground Railways. *Transp. Res. Part Transp. Environ.* 30, 1-9, 2014.
 104. Japan International Cooperation Agency, JICA Climate-FIT Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation measures consideration Version 5.0, 2024.

105. Johnston, I., Murphy, W., and Holden, J., A review of Floodwater Impacts on the Stability of Transportation Embankments. *Earth-Science Reviews*, 215, 103553, 2021.
106. Karl Wang, Natural Disaster Management of Taiwan High Speed Rail Civil Infrastructure, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
107. KiwiRail, KiwiRail Integrated Report 2023, 2023.
108. KiwiRail, RAIL NETWORK INVESTMENT PROGRAMME, 2021.
109. Klimat-och näringslivsdepartementet, Nationell Strategi Och Regeringens Handlingsplan för Klimatanpassning (in Swedish), 2023.
110. Korea Environment Institute (KEI), Supportive Tools for Climate Change Adaptation Policies in Korea, 2019.
111. Kwon, Y. H., Climate Change Adaptation Policy and Future Direction in Korea, Korea Adaptation Center For Climate Change (KACCC) at Korea Environment Institute (KEI), 2013.
112. LA Metro, Metro Climate Action and Adaptation Plan 2019, 2019.
113. Lee, D., Shin, J., Song, Y., Chang, H., Cho, H., Park, J., and Hong, J., The development process and significance of the 3rd National Climate Change Adaptation Plan (2021–2025) of the Republic of Korea. *Science of the Total Environment*, 818, 151728, 2022.
114. Lee, M., Korea's Policies on Climate Change, Kyung Hee University, 2018.
115. Legislation.gov.uk, Climate Change Act 2008, Retrieved from: <https://www.legislation.gov.uk/ukpga/2008/27/contents>
116. Lindgren, J., Jonsson, D. K., and Carlsson-Kanyama, A., Climate Adaptation of Railways: Lessons from Sweden, *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 9(2), 2009.
117. Malaymail, Deutsche Bahn fights heatwaves with white rails, Retrieved from:

<https://www.malaymail.com/news/life/2019/09/26/deutsche-bahn-fights-heatwaves-with-white-rails/1794311>

118. Manabu Nishii, Natural Disaster Management by JR-West, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
119. Marcelo Blumenfeld, et al, Towards Measuring National Railways' Safety through a Benchmarking Framework of Transparency and Published Data. *Safety Science*, 164: 106188, 2023.
120. McGlade, J., et al. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2019, 2019.
121. METRONET, SUSTAINABILITY – Climate Change, 2024.
122. METRONET, SUSTAINABILITY – Transport Infrastructure and Station Precinct Resilience, 2024.
123. Ministry for the Environment, Adapt and thrive: Building a climate-resilient New Zealand – New Zealand's first national adaptation plan, 2022.
124. Ministry for the Environment, Adapt and thrive: Building a climate-resilient New Zealand, 2024.
125. Ministry for the Environment, National Climate Change Risk Assessment for New Zealand Main Report, 2022.
126. Ministry for the Environment, National Climate Change Risk Assessment for New Zealand Method Report, 2022.
127. Ministry for the Environment, National Climate Change Risk Assessment for New Zealand Technical Report, 2022.
128. Ministry of Ecological Transition and Territorial Coordination, France's Adaptation to Climate Change, 2018.
129. Ministry of Environment (South Korea), Korean Climate Change Assessment Report, 2020.

130. Ministry of Environment of the Slovak Republic, Adaptation Strategy of the Slovak Republic on Adverse Impacts of Climate Change, 2014.
131. Ministry of Government Legislation Korean Law Information Center, Enforcement Decree of the Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis, 2022, Retrieved from: <https://www.law.go.kr/LSW/eng/engLsSc.do?menuId=2§ion=lawNm&query=Climate&x=13&y=25#liBgcolor1>
132. Ministry of Government Legislation Korean Law Information Center, Framework Act on Carbon Neutrality and Green Growth for Coping with Climate Crisis, 2022, Retrieved from: <https://www.law.go.kr/LSW/eng/engLsSc.do?menuId=2§ion=lawNm&query=Climate&x=13&y=25#EJP1:0>
133. Ministry of the Environment and Water Resources (MEWR) and Ministry of National Development (MND), Singapore's Climate Action Plan: A Climate-Resilient Singapore, For a Sustainable Future, 2016.
134. Ministry of the Environment Government of Japan, Climate Change Adaptation Plan, 2021.
135. MOWE-IT., Guidelines and Recommendations for Reducing the Impact of Weather on Rail Operations, 2014.
136. Mr. IVANENKO Alexander, Modern Natural Disaster Emergency Response System of the JSC "Russian Railways" Infrastructure, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
137. MTR Corporation Limited, Climate Change 2022, 2022.
138. Murciatoday, Railway Ice Paint Against Extreme Heat Being Tested on a Line to Cartagena, Retrieved from: https://murciatoday.com/railway-ice-paint-against-extreme-heat-being-tested-on-a-line-to-cartagena_1613006-a.html

139. National Cancer Centre Singapore (NCCS), Adaptation Efforts, Retrieved from: <https://www.nccs.gov.sg/singapores-climate-action/overview/adaptation-overview/>
140. National Cancer Centre Singapore (NCCS), Climate Action Plan : Take Action Today, for a Sustainable Future, Retrieved from: <https://www.nccs.gov.sg/media/publications/climate-plan-take-action-today-for-a-sustainable-future/>
141. Network Rail, A National Nature Network - Sustainable Land Use Strategic Framework, 2022.
142. Network Rail, A Review of Earthworks Management, 2021.
143. Network Rail, Anglia Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2020.
144. Network Rail, Buckled Rail and Summer Heat, Retrieved from: <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/delays-explained/buckled-rail-and-summer-heat/>
145. Network Rail, Climate Change Adaptation Report (2024), 2024.
146. Network Rail, Environmental Sustainability Strategy, 2020.
147. Network Rail, Global Spec.-NR/L2/CIV/005, Drainage Systems Manual, 2018, Retrieved from: <https://standards.globalspec.com/std/10382679/nr-l2-civ-005>
148. Network Rail, Global Spec.-NR/L2/ENV/015, Environment and Social Minimum Requirements for Projects, 2019, Retrieved from: <https://standards.globalspec.com/std/13207548/nr-l2-env-015>
149. Network Rail, Global Spec.-NR/L2/RSE/0005, Product Design for Reliability, 2020, Retrieved from: <https://standards.globalspec.com/std/14343319/nr-l2-rse-0005>
150. Network Rail, Guidance Note-Environment-Aspects and Impacts, 2018.
151. Network Rail, Guidance Note-Environment-Being a Caring Neighbour, 2018.

152. Network Rail, Guidance Note-Environment-Climate Change Projections, 2018.
153. Network Rail, Guidance Note-Environment-Environment & Social Minimum Requirements - Deliverables, 2018.
154. Network Rail, Guidance Note-Environment-Planning and Managing Biodiversity, 2018.
155. Network Rail, Guidance Note-Weather Resilience and Climate Change Adaptation-Weather Resilience & Climate Change Impact Assessment, 2018.
156. Network Rail, Guidance Note-Weather Resilience and Climate Change Adaptation-Climate Change Projections, 2018.
157. Network Rail, Level 1 Contract Requirements Environment, 2017.
158. Network Rail, Level 2 Contract Requirements Environment, 2011.
159. Network Rail, London North East and East Midlands Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2020.
160. Network Rail, Network Rail Asset Management: Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan (WRCCA), 2021.
161. Network Rail, Network Rail Fourth Adaptation Report, 2024.
162. Network Rail, New Sustainable Weather Stations, 2022.
163. Network Rail, NW&C Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2019.
164. Network Rail, Route Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plans 2019 – 2024 (South East), 2020.
165. Network Rail, Scotland’s Railway Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2020.
166. Network Rail, South East Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2019.
167. Network Rail, The Fourth Adaptation, 2024.

168. Network Rail, Wales Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2019.
169. Network Rail, Weather Resilience and Climate Change Policy, 2017.
170. Network Rail, Wessex Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2020.
171. Network Rail, Western Route CP6 Weather Resilience and Climate Change Adaptation Plan, 2019.
172. Network Rail, WRCCA Decision Making Tool, 2018.
173. Newsweek, It's So Hot in Europe's Heat Wave, Countries are Painting Railroad Tracks White So They Don't Melt, Retrieved from: <https://www.newsweek.com/its-so-hot-europes-heat-wave-countries-are-painting-railroad-tracks-white-so-they-dont-melt-1451317>
174. Ochsner, M., Ivina, D., & Palmqvist, C. W., Weather-Related Railway Infrastructure Failures in Sweden: An Exploratory Study. In The 10th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis (ICROMA), 2023.
175. Olivier Marteaux, Knowledge Analysis Manager, RSSB, Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation: Executive Report, 2016.
176. Onody, A. S., Bah, F., Boum, M. A., Duval, G., Use of Satellite Imagery to Categorize Vegetation on the French Railway Network (SNCF Réseau). Transportation Research Procedia, Volume 72: 1451-1458, 2023.
177. Pan, X., Yang, L., Sun, X., Yao, J., and Guo, J., Research on the Extraction of Hazard Sources along High-Speed Railways from High-Resolution Remote Sensing Images Based on TE-ResUNet. Sensors, 22: 3784, 2022.
178. PARLIAMENT of AUSTRALIA, Climate Change Bill 2022 [and] Climate Change (Consequential Amendments) Bill 2022, Retrieved from:

https://www.aph.gov.au/Parliamentary_Business/Bills_Legislation/bd/bd2223a/Climate_Change_Bill_2022_and_Climate_Change_Consequential_Amendments_Bill_2022

179. Prospects and Challenges of Natural Disaster Management For High Speed Railways, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
180. Quinn, A.D., Ferranti, E.J.S., Hodgkinson, S.P., Jack, A.C.R., Beckford, J., and Dora, J.M., Adaptation Becoming Business as Usual: A Framework for Climate Change Ready Transport Infrastructure. Infrastructures 3, 10, 2018.
181. Rail Baltica, Design guidelines-Adaptation to Climate Change, 2019.
182. RailTech Digital Magazine, Climate Change Adaptation of Rail, 2022.
183. Railway Safety and Standards Board (RSSB), Common Hazards for the Management of Industry Safety, 2023.
184. Railway Safety and Standards Board (RSSB), Retrieved from: <https://www.rssb.co.uk/>
185. Railway Technology, Cool Runnings: Is White Paint the Perfect Solution to Overheated Tracks, Retrieved from: <https://www.railway-technology.com/features/solution-to-overheated-rail-tracks/>
186. Railway Technology, ÖBB to Use Drones to Check Track Safety, Retrieved from: <https://www.railway-technology.com/news/obb-to-use-drones-to-check-track-safety/>
187. Railway.Supply, Retrieved from: <https://www.railway.supply/>
188. Reddit, It's Rail Painting Season in Italy! Painting the Rails White Can Reduce Their Temperature Up to a FEW DEGREES CELSIUS, DECREASING the Effects of Thermal Expansion and Deformation on Long Sections, Retrieved from:

https://www.reddit.com/r/trains/comments/gk9q5r/its_rail_painting_season_in_italy_painting_the/?rdt=55639

189. Ritter and Al-Nazer, Coatings to Control Solar Heat Gain on Rails, AREMA 2014 Conference , 2014.
190. Rogers, A., and Ingalls, R., Venus: Mapping the surface reflectivity by radar interferometry. *Science*, 165(3895), 797-799, 1969.
191. Roland Nolte, IZT Berlin, ARISCC - Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change [Workshop], UIC Project ARISCC, Paris, 2010.
192. Ruane, A. C., Vautard, R., Ranasinghe, R., Sillmann, J., Coppola, E., Arnell, N., et al., The Climatic Impact-Driver Framework for Assessment of Risk-Relevant Climate Information. *Earth's Future*, 10(11), 2022.
193. Russian Railways, Asset Management and Climatic Risks, 2024.
194. Sanderson, M.G., Hanlon, H.M., Palin, E.J., Quinn, A.D., and Clark, R.T. Analogues for the railway network of Great Britain. *Meteorological Applications*, 23(4), 731-741, 2016.
195. Sarah Reeves, Mike Winter, Dominic Leal and Alison Hewitt (TRL), *An Industry Guide to Enhancing Resilience-Rail*, 2019.
196. Seddon, N., Harnessing the potential of nature-based solutions for mitigating and adapting to climate change. *Science*, 376(6600), 1410-1416., 2022.
197. Shi, M., Chen, B., Gong, H., Li, X., Chen, W., Gao, M., Zhou, C., and Lei, K., Monitoring Differential Subsidence along the Beijing–Tianjin Intercity Railway with Multiband SAR data. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(22), 4453, 2019.
198. Shi, X., Jiang, L., Jiang, H., Wang, X., and Xu, J., Geohazards Analysis of the Litang–Batang Section of Sichuan–Tibet Railway Using SAR Interferometry. *IEEE Journal of Selected Topics in*

- Applied Earth Observations and Remote Sensing, 14, 11998-12006, 2021.
199. SNCF, SNCF Group Annual Financial Report, 2023.
 200. Soleimani-Chamkhorami, K., Karbalaie, A., Kasraei, A., Haghghi, E., Famurewa, S. M., and Garmabaki, A. H. S., Identifying Climate-Related Failures in Railway Infrastructure Using Machine Learning, 2024.
 201. State Emergency Management Committee Western Australia, Emergency Preparedness Report 2012, 2012.
 202. Swedish Environmental Protection Agency, Nationally Important Adaptation Work, 2021.
 203. Swissinfo, Swiss Railway Tracks Buckle Under the Heat, Retrieved from:
https://www.swissinfo.ch/eng/society/track-record_swiss-railway-tracks-buckle-under-the-heat/45120350
 204. Takaaki FUKUHARA, Methods of Appropriately Installing Anemometers to Observe Strong Winds for Train Operation Control, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
 205. Tang, K. H. D., Urban Solutions to Climate Change: an Overview of the Latest Progress. Vol. 1, no. 2, Academia Environmental Sciences and Sustainability, 2024
 206. The European Climate Adaptation Platform (Climate-ADAPT), Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation (TRaCCA), 2010.
 207. Theautopian, How White Paint Is Saving Railways From Climate Change, Retrieved from:
<https://www.theautopian.com/how-painting-train-rails-helps-keep-them-straight/>

208. Tianni Wang et al, Impact Analysis of Climate Change on Rail Systems for Adaptation Planning: A UK case. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 83: 102324, 2020.
209. Tommy Jen, Information and Communication Technologies for Enhanced Emergency Management, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
210. Transport Canada, Enabling Adaptation and Resilience in the Rail Sector, 2022.
211. Transport Canada, Enabling Decarbonization, Adaptation, and Resilience in the Rail Sector, 2023.
212. Transport Canada, Enabling Decarbonization, Adaptation, and Resilience in the Rail Sector, 2023.
213. Tsuyoshi Takayanagi, Risk Assessment Method of Debris Flow Occurrence Utilizing Digital Terrain Model, 1st UIC Conference on Natural Disaster Management of Railway Systems, 2014.
214. Tung, C. P., Tsao, J. H., Tien, Y. C., Lin, C. Y., and Jhong, B. C., Development of a novel climate adaptation algorithm for climate risk assessment. *Water*, 11(3), 497, 2019.
215. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Nature-Based Solutions for Coastal Highway Resilience: An Implementation Guide, 2019.
216. U.S. Department of Transportation, Definitions, Retrieved from: <https://www.transportation.gov/priorities/climate-and-sustainability/definitions>
217. U.S. Federal Highway Administration, Definitions, Retrieved from: <https://highways.dot.gov/research/infrastructure/resilient-pavements/definitions>
218. UN Global Pulse Asia Pacific, Haze Gazer: A Crisis Analysis Tool, Retrieved from: <https://medium.com/pulse-lab-jakarta/haze-gazer-a-crisis-analysis-to-ol-23d7333c657a>

219. United Nation Environment Programme (UNEP), The Fifth Session of the United Nations Environment Assembly (resumed session) (UNEA-5.2), 2022, Retrieved from:
<https://www.unep.org/events/unep-event/unea-52>
220. United Nations Development Programme (UNDP), UNDP Guidance Notes on the Social and Environmental Standards, 2016.
221. University of Birmingham, Case study: West Midlands Transport Climate Risk and Vulnerability Assessment, 2024.
222. Wang, C., Mao, X., and Wang, Q., Landslide Displacement Monitoring by a Fully Polarimetric SAR Offset Tracking Method. Remote Sensing, 8(8), 624, 2016.
223. Wiczorek, G. F., and Snyder, J. B., Monitoring Slope Movements. Geol. Monit, 245-271, 2009.
224. Zhang, J., Zhu, W., Cheng, Y., and Li, Z., Landslide Detection in the Linzhi–Ya’an Section along the Sichuan–Tibet Railway Based on InSAR and Hot Spot Analysis Methods. Remote Sensing, 13(18), 3566, 2021.

[日本文献]

225. NHK，JR 鹿児島本線 温度上昇で線路にゆがみ 運転は再開
宇 城 ， 検 自 ：
<https://www3.nhk.or.jp/lnews/kumamoto/20240801/5000022895.html>。
226. リスク対策.com，羽越本線列車転覆事故 12月の気象災害，検自：
<https://www.risktaisaku.com/articles/-/86397>
227. 九州旅客鉄道株式会社，2017年豪雨等による災害，検自：
https://www.jrkyushu.co.jp/company/esg/safety/pdf/2018_anzen06.pdf
228. 内閣府，トピックス関西国際空港連絡橋へのタンカー衝突事故を踏まえた再発防止の取組，検自：
https://www8.cao.go.jp/koutu/taisaku/r01kou_haku/zenbun/genkyo/topics/topic_17.html

229. 日経クロステック，JR 九州が 345 カ所で被害、落橋のあった路線は復旧の見通し立たず，檢自：
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01360/00026/>
230. 古川敦，気象災害に備える鉄道技術，第 36 回 鉄道総研講演会，2023 年 10 月。
231. 西日本旅客鉄道株式会社，各地の被災直後の状況，檢自：
https://www.westjr.co.jp/info/gouu_2018/
232. 西日本旅客鉄道株式会社，鉄道施設の浸水対策，2020 年 8 月。
233. 地球環境部気候変動対策室(JICA)，気候リスク評価・適応策検討のガイダンス，2019 年。
234. 国土交通省，鉄道の防災・減災対策，2019 年 3 月。
235. 国土交通省大臣官房運輸安全監理官室，運輸防災マネジメント指針，2020 年 2 月。
236. 国土交通省鉄道局技術企画課施設課，新幹線における車両及び重要施設に関する浸水対策について，2019 年 12 月。
237. 国立環境研究所，組織紹介-気候変動適応センター，檢自：
<https://www.nies.go.jp/sosiki/tekiou.html#tab1>
238. 東日本旅客鉄道株式会社，JR 東日本グループレポート，2023 年 9 月。
239. 東日本旅客鉄道株式会社，在来線におけるレーダ雨量を活用した新たな運転規制の導入について，2023 年 6 月。
240. 東日本旅客鉄道株式会社，防災業務計画，2022 年 10 月。
241. 東日本旅客鉄道株式会社，異常気象に備えた新幹線に対する降雨防災の取り組みについて，2021 年 6 月。
242. 東日本旅客鉄道株式会社，鉄道施設等の浸水対策について，2020 年 5 月。
243. 東日本旅客鉄道株式会社，次世代車両制御システム (INTEROS) の開発，檢自：
<https://www.jreast.co.jp/development/theme/ict/ict01.html>

244. 朝日新聞，磐越西線が 8 カ月ぶりに全線再開 昨夏の豪雨で橋崩落，檢自：
<https://www.asahi.com/articles/ASR417JFFR41UGTB001.html?msoclkid=27c433a7cdf76c300cc82187cc636d14>
245. 朝日新聞，浸水した北陸新幹線、10 編成すべて廃車へ 台風 19 号，檢自：
<https://www.asahi.com/articles/ASMC654G8MC6UTIL034.html>
246. 環境省，民間企業の気候変動適応ガイド-気候リスクに備え、勝ち残るために，2022 年 3 月。
247. 環境省，地域気候変動適応計画策定マニュアル—手順編—，2023 年。
248. 環境省，気候変動適応法，檢自：
https://www.env.go.jp/earth/earth/tekiou/page_00608.html

[韓文文獻]

249. 부산교통공사, 기후위기 적응대책 요약 보고서 2023-2027, 2023.
250. 대구교통공사, 기후위기 적응대책 요약보고서 2024-2028, 2023.
251. 한국철도공사, 기후위기 적응대책 요약본, 2024.

[中文文獻]

252. Dr. A 氣候變遷災害風險調適平台，檢自：
<https://dra.ncdr.nat.gov.tw/>
253. ShareCourse 學聯網，什麼是物聯網，2017 年 12 月，
檢自：<https://medium.com/>
254. TCCIP 臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台，檢自：
<https://tccip.ncdr.nat.gov.tw/index.aspx>
255. 方仲欣，工程邊坡的健康管理，科學發展 571 期，2020 年。
256. 台灣高鐵，台灣高鐵永續報告書 2022，2022 年。
257. 台灣高鐵，台灣高鐵永續報告書 2023，2023 年。

258. 台灣高鐵，112 年度安全管理報告，2023 年 6 月。
259. 台灣高鐵，台灣高鐵苗栗-台中路段 8/20 起恢復雙線雙向運轉，新聞稿，2021 年 8 月 19 日。
260. 台灣高鐵，DWS 功能，檢自：
<https://www.thsrc.com.tw/ArticleContent/c690cfa7-597a-4f27-917e-00ca68de01e7>
261. 台北捷運，運用大數據技術增進台北捷運維修效能，大數據在軌道運輸系統之應用論壇，2018 年。
262. 永續發展平台，檢自：<https://globalgoals.tw/>
263. 交通部，111 年度能力建構成果摘要（初稿），2023 年 5 月。
264. 交通部，維生基礎設施領域 111 年度行動計畫成果報告(初稿)，2023 年 5 月。
265. 交通部，大眾捷運系統建設及周邊土地開發計畫申請與審查作業流程，修正日期：2018 年。
266. 交通部，鐵路平交道與環境改善建設及周邊土地開發計畫審查作業要點，修正日期：2018 年。
267. 交通部，鐵路行車規則，修正日期：2023 年。
268. 交通部，5G 智慧交通 AI 創新科技巡檢整合研發計畫，檢自：
<https://5gsmart-trans.org.tw/index.php/article/readfull/2/73>
269. 交通部運輸研究所，ISO55001 國際標準導入鐵道資產管理實務之研究(1/3)-制度架構建立（定稿報告），2023 年。
270. 交通部運輸研究所，鐵路運輸安全管理系統（SMS）制度化策略之研擬，2018 年
271. 交通部運輸研究所，公路系統因應氣候變遷強化調適能力案例研析，2023 年。
272. 交通部運輸研究所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討(1/2)，2022 年 3 月。
273. 交通部運輸研究所，公路系統規劃階段強化調適能力之探討(2/2)，2022 年 12 月。

274. 交通部運輸研究所，公路貨運服務碳足跡公用係數建置計畫(1/2)，2016年9月。
275. 交通部運輸研究所，公路貨運服務碳足跡公用係數建置計畫(2/2)，2017年7月。
276. 交通部運輸研究所，重大鐵公路系統氣候變遷調適策略與脆弱度評估指標之研究，2015年5月。
277. 交通部運輸研究所，重大鐵公路建設氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究(1/2)，2016年3月。
278. 交通部運輸研究所，重大鐵公路建設氣候變遷風險評估機制與調適資訊平台之研究(2/2)，2016年10月。
279. 交通部運輸研究所，氣候變遷運輸系統風險評估案例分析，2017年2月。
280. 交通部運輸研究所，氣候變遷運輸設施風險評估暨風險資訊進階服務計畫，2018年5月。
281. 交通部運輸研究所，運輸系統因應氣候變遷調適之研究，2021年7月。
282. 交通部運輸研究所，鐵公路氣候變遷調適行動方案之研究，2018年12月。
283. 交通部運輸研究所，無人機搭配 AI 影像辨識應用於橋梁檢測之研究(1/2)-橋梁劣化構件 AI 影像辨識之技術開發，2022年12月。
284. 交通部鐵道局，智慧鐵道發展架構及策略研訂，2020年2月。
285. 同舟共濟—臺灣氣候變遷調適平臺(Taiwan Adaptation Platform, TAP)，檢自：
<https://adapt.moenv.gov.tw/TCCIP-1-C/TCCIP-1-C-5-5.html>
286. 行政院農業部，農地資源空間風險評估架構與應用，2019年11月。
287. 行政院經濟建設委員會，國家氣候變遷調適政策綱領，2012年10月。
288. 行政院環境保護署，2022年國家氣候變遷調適行動方案年度成果報告摘要，2022年11月。

289. 行政院環境保護署，國家因應氣候變遷行動綱領，2017年2月。
290. 行政院環境保護署，國家氣候變遷調適行動方案(107-111年)，2019年8月。
291. 高雄市政府捷運工程局，中颱「杜蘇芮」進逼，高雄輕軌做好準備，提醒民眾注意安全，綜合規劃科新聞稿，2023年7月26日。
292. 高雄捷運股份有限公司，高雄輕軌營運狀況說明，新聞稿，2024年10月5日。
293. 高雄捷運股份有限公司，高雄捷運在颱風天時仍然有照常營運嗎旅客要如何得知相關颱風天之營運訊息，2024年10月22日，檢自：
https://www.krtc.com.tw/Service/faq_more?id=6df02bb1dafd461fa49a6d67eb787c23
294. 何玉華，捷運系統防洪3道關卡擋水患，自由時報新聞網，2021年7月22日。
295. 何錦亮，出國考察報告，第四屆兩岸四地智能軌道交通發展論壇。
296. 汪淑芬，台鐵瑞芳猴硐路段邊坡滑落不穩定度升至列最高級，中央通訊社新聞網，2020年12月4日。
297. 李仕勤、朱珮芸、曾佩如、任雅婷、戴子純、吳清如，鐵公路氣候變遷調適行動方案之研究，運輸計劃季刊第四十七卷第四期，2018年12月。
298. 阿里山林業鐵路及文化資產管理處，110年度安全管理報告，2021年5月。
299. 阿里山林業鐵路及文化資產管理處，111年度安全管理報告，2022年5月。
300. 阿里山林業鐵路及文化資產管理處，112年度安全管理報告，2023年8月。
301. 阿里山林業鐵路及文化資產管理處，歷史介紹，檢自：
<https://afrch.forest.gov.tw/0000052>

302. 林穎東、張國楨、楊啟見，利用物件式導向進行崩塌地種類判釋、復育追蹤-以高雄市寶來地區為例，中華水土保持學報，49(2)：98-109，2018。
303. 香港特別行政區政府，香港氣候行動藍圖 2030+，2017 年 1 月。
304. 香港特別行政區政府，香港氣候行動藍圖 2050，2021 年 10 月。
305. 香港鐵路有限公司，2022 年可持續發展報告，2022 年。
306. 香港鐵路有限公司，2023 年可持續發展報告，2023 年。
307. 張茗喧，颱風尼伯特發威 台東站 3 輛貨車被吹倒，中央通訊社新聞網，2016 年 7 月 8 日。
308. 許晃雄、王嘉琪、陳正達、李明旭、詹士樑，國家氣候變遷科學報告 2024：現象、衝擊與調適。國家科學及技術委員會與環境部聯合出版，2024 年。
309. 氣候相關財務揭露工作組織(TCFD)，氣候相關財務揭露建議，2017 年 6 月。
310. 氣候變遷教學資訊平台，檢自：<https://climatechange.tw/>
311. 財團法人全國認證基金會，溫室氣體確證與查證機構認證服務計畫，2015 年 5 月。
312. 陳佩茶、陳其華、張贊育，國際鐵道運輸發展議題與政策之探討—以數位轉型發展為例，運輸研究專輯，2022 年。
313. 陳映融、繆紹綱、徐于軒、林映丞，利用深度學習神經網路進行衛星影像的崩塌地辨識，中華水土保持學報，第 53 卷第 1 期，第 25-34 頁，2022 年。
314. 商業周刊廣編企劃，台塑網 Smart 巡檢系統智慧化行動整合平台，與臺北捷運一同守護行的安全，商業週刊，2022 年 3 月 28 日。
315. 國家發展委員會，地方氣候變遷調適計畫規劃作業指引，2018 年 4 月。
316. 國家發展委員會，國家氣候變遷調適行動計畫（102-106 年），2013 年。
317. 國家發展委員會、環境部(前行政院環境保護署)、經濟部、國家科學及技術委員會(前科技部)、交通部、內政部、農業部(前行政

- 院農業委員會)、金融監督管理委員會，臺灣 2050 淨零排放路徑及策略總說明，2022 年 3 月。
318. 國營臺灣鐵路股份有限公司(前交通部臺鐵局)，臺鐵智慧鐵道資訊整合平台委託規劃與監督審驗服務案，2022 年 1 月。
319. 教育部委辦-氣候變遷調適專業融入補充教材-維生基礎設施(交通系統)領域(2023 版)，2023 年 12 月。
320. 教育部委辦-氣候變遷調適專業融入實作教材-維生基礎設施(交通系統)領域(2023 版)，2023 年 12 月。
321. 勞動部，營造工程風險評估技術指引，修訂日期：2021 年。
322. 黃立翔，蘇迪勒過境 台鐵各路線傳零星災情，自由時報新聞網，2015 年 8 月 8 日。
323. 黃意涵，防軌道熱歪 捷運溫度計備戰，中國時報新聞網，2016 年 6 月 9 日。
324. 黃韋凱、林銘郎、陳良健、林彥享、蕭震洋，物件導向分析方法應用於遙測影像之分區及崩塌地與人工設施分類，航測及遙測學刊，第 15 卷，第 1 期，第 29-49 頁，2010。
325. 馮安華，尼伯特颱風離台 公路 5 路段仍無法通行 陸空交通大致恢復，風傳媒新聞網，2016 年 7 月 9 日。
326. 國家發展委員會，臺灣 2050 淨零轉型「公正轉型」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
327. 農業部，臺灣 2050 淨零轉型「自然碳匯」關鍵戰略行動計畫((核定本)，2023 年 4 月。
328. 經濟部，臺灣 2050 淨零轉型「前瞻能源」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
329. 經濟部，臺灣 2050 淨零轉型「風電/光電」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
330. 經濟部，臺灣 2050 淨零轉型「氫能」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
331. 環境部，臺灣 2050 淨零轉型「淨零綠生活」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。

332. 經濟部，臺灣 2050 淨零轉型「節能」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
333. 環境部，臺灣 2050 淨零轉型「資源循環零廢棄」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
334. 交通部，臺灣 2050 淨零轉型「運具電動化及無碳化」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
335. 經濟部，臺灣 2050 淨零轉型「電力系統與儲能」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
336. 國家科學及技術委員會、經濟部、環境部，臺灣 2050 淨零轉型「碳捕捉利用及封存」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
337. 金融監督管理委員會，臺灣 2050 淨零轉型「綠色金融」關鍵戰略行動計畫(核定本)，2023 年 4 月。
338. 楊孟學、林明璋、劉進金，結合衛星影像與地形指標於山崩自動分類之研究，航測及遙測學刊，第 14 卷，第 1 期，第 11-23 頁，2009 年。
339. 楊恒偉、吳思毅，高鐵邊坡安全管理、監測與告警系統，地質季刊，第 40 卷第 3-4 期，2021 年。
340. 新北市政府捷運工程局，邊坡穩定監測系統-土中傾度管，新北市政府捷運工程局官網，2024 年 3 月 25 日。
341. 新北大眾捷運股份有限公司，山陀兒颱風宣佈停班停課 新北捷運調整營運班距 宣佈停運標準，2024 年 10 月 1 日，檢自：<https://www.ntmetro.com.tw/basic/?mode=detail&node=741>
342. 桃園大眾捷運股份有限公司，山陀兒颱風逼近 桃園捷運公司備戰啟動防颱 SOP，2024 年 9 月 30 日，檢自：https://www.tymetro.com.tw/tymetro-new/tw/_pages/news/show-2028-1.html
343. 臺北大眾捷運股份有限公司，2022 年年報，臺北大眾捷運股份有限公司官網，2023 年。

344. 臺北大眾捷運股份有限公司，臺北捷運裝置「軌道溫度計」每日量「體溫」確保營運安全，臺北大眾捷運股份有限公司官網新聞，2023年7月7日。
345. 臺北大眾捷運股份有限公司，出席東日本鐵路公司多雲基礎建設與多雲環境應用國際交流會議提要表及簡報，臺北市資料大平台，2023年8月7日。
346. 臺北大眾捷運股份有限公司，颱風來襲時捷運系統之預防與應變措施，113年9月5日，檢自：
https://www.metro.taipei/News_Content.aspx?n=566DA580861CEE77&sms=87415A8B9CE81B16&s=5B788CE0DCBB4FF6
347. 臺北大眾捷運股份有限公司，大事紀，檢自：
<https://www.metro.taipei/cp.aspx?n=B27E7BC8CBBCDA61>
348. 臺北大眾捷運股份有限公司，2023年永續報告書，2024年。
349. 臺鐵公司，臺鐵公司完成康芮颱風災後復原全線通車 第10發，最新消息，2024年11月1日。
350. 農業部林業及自然保育署，前瞻基礎建設-軌道建設 阿里山林業鐵路設施設備安全提升計畫（108-113年），2022年2月。
351. 農業部林業及自然保育署，大阿里山軸帶百年躍升建設計畫，2023年9月。
352. 環境部，國家氣候變遷調適行動計畫（112-115年），2023年9月。
353. 蕭文康，緯創數技發展 5G AI 智慧巡檢服務 無人機檢測捷運隧道與橋樑，ETtoday 新聞雲，2024年3月18日。
354. 簡惠茹，八八風災重創 林鐵全線迄未通，自由時報新聞網，2019年7月28日。
355. 蘇木春，颱風山陀兒影響 中捷綠線調整班距為15分鐘，中央通訊社新聞網，2024年10月2日。

附錄一 計畫摘要

一、計畫緣起與目的

1. 計畫緣起

鐵道系統為我國的關鍵基礎設施之一，其特性為具高沉沒成本、完工後不易大幅調整路線，需要以長期及永續角度進行整體性規劃與維運，尤其在面對氣候變遷(Climate Change)與極端天氣(Extreme Weather)的壓力下，與民眾日常生活息息相關的鐵道系統，其面臨的挑戰不僅是要在正常天候中維持正常營運，更要在面對極端氣候的條件下強化其韌性，使其在受異常天氣衝擊後，能儘速恢復並提供安全、可靠且有效率的服務。

鐵道系統受氣候變遷與極端天氣之衝擊範圍包括基礎設施與車輛，故強化鐵道系統韌性之調適策略會與資產管理及安全管理系統息息相關。參酌國際文獻與實踐案例可知，鐵道系統因應氣候變遷的調適作為中，係透過風險導向的資產管理來充分掌握資產狀態，實施以資產為本的風險管控以有效監控營運安全風險，並建構整體的氣候變遷調適策略來提升系統韌性。

由於氣候暖化逐年升高，所面臨極端氣候的可能性也日益增加。為及早強化國內鐵道系統之韌性與抗災能量，並協助國內鐵道系統之調適能力，本計畫參酌國際 ISO 14090 氣候變遷調適系列標準要求、IPCC 氣候風險模型、國際鐵路聯盟 UIC 之調適架構、國外營運機構調適機制方法，以及我國「國家氣候變遷調適行動計畫(112-115 年)」中所揭櫫之二階段六構面，做為強化我國鐵道系統調適能力之主要參據，並提出相關推動機制與方法之建議。

2. 計畫目的

有關本計畫之主要目的，摘述如下：

- (1) 瞭解氣候變遷對國內鐵道系統之危害與衝擊，提供交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府捷運局、捷運公司參考及應用，俾利調整規劃設計營運之相關法規或規範。
- (2) 掌握國際運輸系統調適案例，提供交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府所屬捷運局、捷運公司參考應用，俾利其滾動檢討調適行動(執行)方案。

- (3) 透過鐵道系統全生命週期強化調適能力之研析成果，提供予交通部鐵道局、國營臺灣鐵路股份有限公司、台灣高速鐵路股份有限公司、地方政府捷運局、捷運公司等設施權責機關做為檢視既有規劃、設計、營運等相關規範之參考。

二、重要工作成果

1. 國外鐵道系統調適案例蒐集與研析

氣候變遷對於鐵道系統之衝擊，主要包含基礎設施毀損、運輸安全性下降、運輸效率降低及環境衝擊增加等。本計畫參考 IPCC AR6 中氣候影響驅動因子(Climatic Impact-Driver, CID)進行分類，CID 係指直接影響社會或生態系統的自然氣候條件，包含平均值、事件及極值等，其中陸地相關的 CID 細分為冷與熱、濕與乾、風、雪與冰、沿海及其他，本計畫同時參考國際鐵道標準機構與我國環境特性，另將植被與地震納入探討課題。

隨著氣候變遷加劇，標竿國家紛紛頒定氣候變遷相關法規，要求各領域提出因應氣候變遷下之應對措施。有關本計畫蒐整之主要國際鐵道標準機構鐵道調適研究，針對該等國家之調適計畫重點摘述如下：

(1) 英國

相較於其他國家在氣候變遷法制發展及相關政策推動上，英國是起步最早且處於世界領先地位的國家。有關英國國家鐵道調適研究(TRaCCA)係由英國 RSSB 出資，包含有營運機構、政府部門及氣象環境等單位組成科技策略領導團隊據以執行 TRaCCA。針對英國鐵路氣候變遷調適計畫(TRaCCA)之重點，摘錄如下：

- 在進行鐵路投資計畫的經濟評估時，有必要將氣候變遷可能涉及之社會經濟效益納入考量。
- TRaCCA 提出評估氣候變遷準備完整度之原型指標，可用於評估鐵路在更廣泛的運輸系統中的韌性與脆弱度。
- 基礎設施系統相互依賴，需要跨機構合作與協調，進行氣候變遷調適。

(2) 美國

美國聯邦鐵路總署(FRA)於 2023 年提出 FRA 氣候與永續發展計畫(FRA's Climate and Sustainability Program)，其上位計畫為美國運輸部之 2022-2026 年戰略計畫(The Fiscal Year 2022-2026 Strategic Plan)，旨在減少鐵道系統碳排放與能源消耗、增強鐵道路網韌性與發展永續軌道建設，其主要工作項目包含擴展服務、資金支持、研究創新、數據整理、跨部門合作、內部協調及法規審查等。

FRA 於 2024 年 7 月發布鐵路韌性計畫(Climate and Sustainability: Rail Resiliency)，確保美國鐵路系統能夠因應氣候變遷的挑戰，並強化基礎設施的可靠度及安全性。

(3) 德國

德國政府為達成 2050 年淨零碳排的目標，擬定了 2030 與 2050 之國家行動計畫，階段性的訂定國家各層面減碳目標，其中交通產業之鐵路系統因電氣化與能源消耗效率高之表現，在交通部門降低碳排中扮演極重要的角色。

德國鐵路股份公司(Deutsche Bahn，以下簡稱 DB)回應政府組織於交通與氣候政策目標，擬定有「Strong Rail」之策略，其框架圍繞在「更可靠-基礎設施與車輛」、「更強健-組織架構與程序」、「更現代-科技與智慧應用」三大主軸共 15 個行動方案，同時亦結合環境永續發展邁進，以滿足交通可持續性之目標。

(4) 法國

法國政府於 2011 年通過了第一個為期五年的「國家氣候變遷調適計畫 PNACC」，在該計畫制定前，法國政府開展了大量的研究和資料收集工作，以了解氣候變遷對法國各個領域的可能影響，這些研究包括對氣候變遷趨勢的分析、對潛在風險和脆弱性的評估，以及對不同區域的氣候變遷影響的研究。

PNACC 於基礎設施和運輸系統方面已確定一系列行動，使法國評估氣候變遷對基礎設施和交通系統的影響，並透過改善現有和未來基礎設施的抵抗能力和韌性，以建立安全可靠的未來交通網絡，其行動計畫彙整包含：

- 檢討並調整法國境內和海外領土運輸網絡的建設、維護和運營的技術標準，以確保其能夠應對氣候變遷帶來的挑戰。
- 研究氣候變遷對運輸需求的影響，並評估其對重新塑造運輸服務的後果，以便針對性地調整運輸策略。
- 制定一套統一的方法論，用於評估陸地、海上和空中運輸系統以及相關基礎設施的脆弱性，以提前應對可能出現的風險。
- 為法國境內和海外領土的陸地、海上和空中運輸網絡建立一份脆弱性報告，並制定適當和分階段的應對策略，以應對當地和全球氣候變遷挑戰，確保交通系統的永續運行。

(5) 日本

日本環境部於 2021 年提出日本氣候變遷調適計畫，該計畫將調適分為七大領域並制定七大基本策略作為最高調適指導方針，其中鐵道系統係歸屬於「國民生活與都市生活」領域。此外，日本環境部亦提供可用於跨部門、具地區特性之 5 項調適基礎方法，包含：

- 加強利用氣候變遷科學研究結果之基礎方法。
- 建構蒐集、整理、分析及提供氣候變遷資訊之系統的基礎方法。
- 促進地方政府推動氣候變遷調適的基礎方法。
- 促進企業實施氣候變遷調適措施的基礎方法。
- 發展國際氣候變遷調適合作的基礎方法。

此外，日本環境部編纂《日本地方氣候變遷調適計畫制定手冊》，擬定包含事前準備、歷史及未來氣候資料整理、氣候變遷衝擊評估、綜整既有應對措施及調適策略、擬定地方調適計畫、執行追蹤之框架與步驟，藉以協助地方政府擬定調適計畫。

(6) 韓國

韓國為《聯合國氣候變遷框架公約》和《巴黎協定》的締約國，為提升全國的調適能力，於 2010 年發布「國家氣候變遷調適計畫」，協助各行業、地方政府及社會各界有效應對氣候變遷的挑戰。

根據韓國《低碳綠色成長基本法》第 48 條之規定，政府每 5 年應通盤檢討並調整調適計畫內容，目前已發布第三版調適計畫(2020 年發布)。

韓國環境部於擬定第三版計畫過程中，於 2019 年對國內氣候風險進行全面評估，並編製氣候風險清單，邀集專家學者及社會各界參與，確保納入不同利害關係者的意見，以更全面評估氣候變遷對社會、經濟和環境的影響。

在韓國第三版國家氣候變遷調適計畫中，主要重點摘要如下：

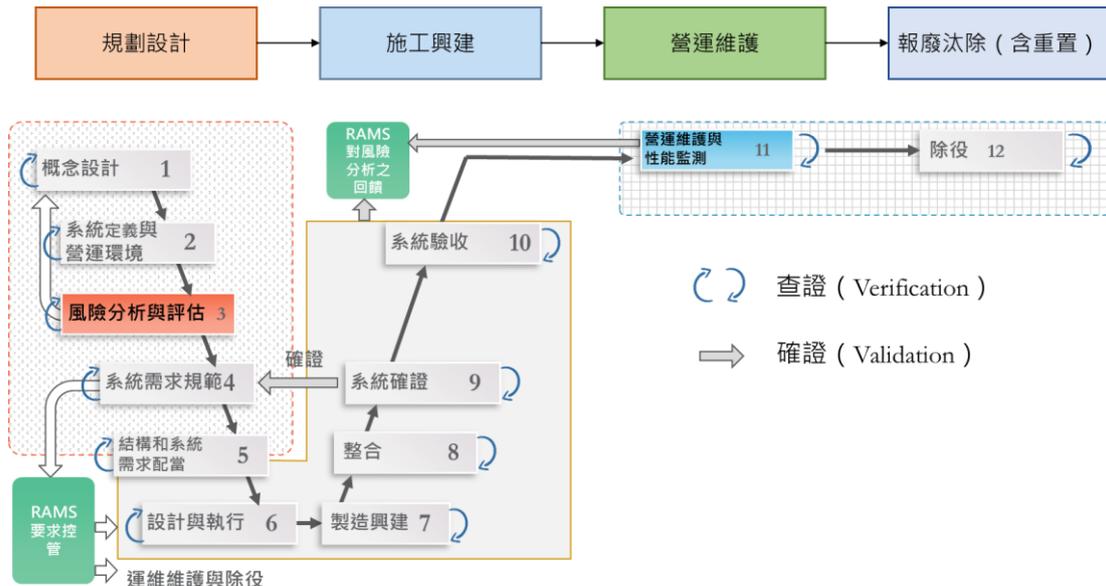
- 強調「科學依據」和「多元族群參與」。
- 建立系統性的政策與制度框架，並符合國際氣候變遷政策。
- 建立氣候脆弱度評估機制。
- 強化監測及預測，並將氣候變遷調適納入各部門的日常業務。
- 推動智慧水資源管理系統、永續農業，並制定公共健康調適計畫。

綜觀鐵道標竿國家/機構於氣候調適發展方向及趨勢，多數都是採由上而下的方式進行，包括有：制定政策法規/指引、確認風險分析架構、蒐集氣候危害之研析報告、參考類似系統案例、邀集利害相關者參加工作坊或者專家座談取得共識、採量化或半定量方式進行風險評估、研擬鐵道調適方案、定期評估檢討成效。

2. 鐵道系統調適架構

鐵道系統的生命週期可簡單區分為規劃設計、施工興建、營運維護與報廢汰除(含重置)，相關程序如附圖 1-1 所示。其中，規劃設計階段必須進行風險分析，如果考慮到氣候變遷的衝擊，則風險分析與評估時必須將極端氣候的危害納入評估的範圍，並將風險配當到各個子系統，同時於施工興建時進行確證(Validation)，如此才能確保完工後的系統有足夠的抵禦能力(Resistance)、可靠度(Reliability)、備援能力(Redundancy)。

此外，於未來營運維護階段，必須要對系統進行監測，並採取必要的應變措施，系統才會有足夠的反應與恢復能力(Response & Recovery)，以提升鐵道系統之韌性。以下重點說明生命週期各階段調適之內涵：



附圖 1-1 鐵道系統生命週期示意圖

(1) 規劃設計階段

參考《大眾捷運系統建設及周邊土地開發計畫申請與審查作業要點》及《鐵路平交道與環境改善建設及周邊土地開發計畫審查作業要點》，鐵道系統在規劃設計階段包括有可行性研究與綜合規劃，於可行性研究階段評估認有其開發價值後，再賡續辦理綜合規劃。

待前述規劃確認需求後，再依《政府公共工程計畫與經費審議作業要點》進行基本設計，使能銜接前階段需求，同時發揮規劃專業能力、律定下階段工程具體內容，而後會再將其各項需求轉為招標文件進行招商。

爰此，全生命週期中之規劃設計階段若能納入氣候變遷的風險評估，並採取必要的設計方案，預期可大幅降低後續營運維修階段面對氣候風險的衝擊與成本，故此階段扮演著極為關鍵的樞紐角色。

(2) 施工興建階段

施工興建之承攬廠商作業包括有：採購、施工、製造、供應、安裝、測試並完成興建交付，此階段必須確證規劃設計階段的各項要求於施工興建階段都有被履行，且系統的性能吻合原先設定的需求。

此階段應將氣候變遷之極端天氣影響納入風險管理，使各項工程進展降低受極端天氣之影響與衝擊。

(3) 營運維修階段

鐵道系統是藉由營運人員依循一定的程序操控設施設備來達到營運的目的，若於先前規劃設計階段評估設施設備的成本過高、或是技術尚未能克服，則就必須在營運維修階段，藉由其他科技應用或是人員的操作程序(SOP)來進一步降低系統的氣候風險。

營運維修階段，鐵道系統的硬體設施條件都已經固定而成為限制條件，因此端賴營運機構的反應與應變能力來強化系統的韌性，此時可導入新科技的應用，以便能夠監測氣候與資產的狀態，提早預警，以快速反應氣候變遷的威脅。

(4) 報廢汰除(含重置)階段

此階段屬於資產管理、循環經濟與減碳之範疇，透過資產管理之重置作業會銜接到前述規劃設計階段，另循環經濟與減碳則不在本研究範圍內討論。

整體概念上，係於系統規劃設計階段即納入強固的設計方案以降低氣候風險的衝擊；在施工興建階段能有因應極端天氣的施工對策；另於營運維修階段採用適當的調適策略與行動方案，使生命週期內殘餘的氣候風險位在可接受範圍內。

此外，在 UIC 鐵路調適架構中，可約略分為「風險評估&調適策略」及「行動方案&監測評估」兩部分，如附圖 1-2 所示，說明如下：

(1) 風險評估&調適策略

考量未來可能出現之氣候變遷情況，以及對應之長時間氣候影響與短時間極端天氣，結合鐵路資產管理、不同鐵路路線之獨特性、風險管理、過往經驗等面向進行風險識別以及風險評估，並提出必要之調適策略，其中危害、脆弱度及嚴重度辨識說明如下。

- 危害：須從歷史經驗開始辨識危害，以指出重點關注之事件類型。然而，未來氣候存在高度不確定性，事件類型和頻率可能會隨著氣候變遷而改變，故探討其他潛在的未來危害至關重要，以制定相應之應對措施。
- 脆弱度：脆弱度分析涉及理解氣候和天氣危害對組織資產、運營、服務和乘客的影響。由於鐵路中斷可能由多種因素引起，故需考慮特定危害或組合事件的脆弱性。

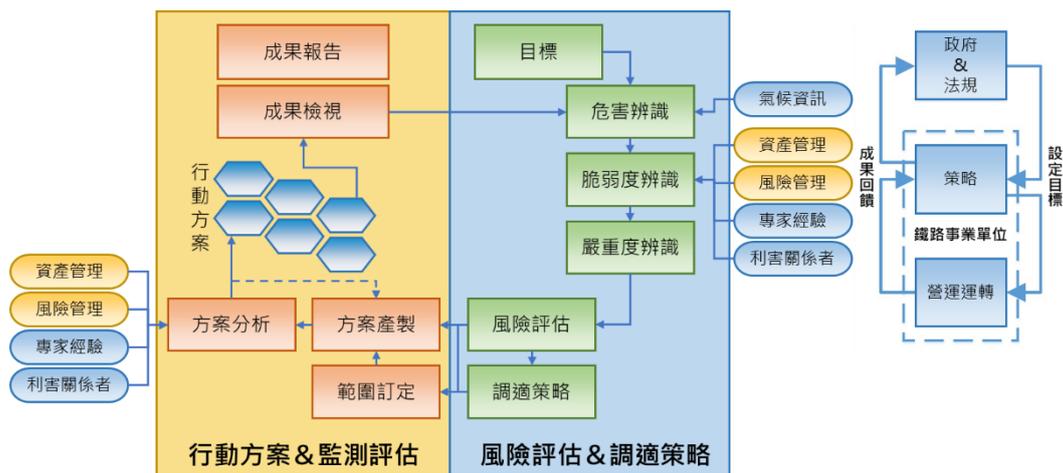
- 嚴重度：在確定氣候危害和脆弱度後，需考慮系統中斷的潛在後果並予以量化，包含對組織內外部的影響。除財務損失外，對於難以用金錢量化之系統中斷對環境和社會之影響也應納入考量。

(2) 行動方案&監測評估

根據調適策略所訂定之具體調適方案，並同樣從鐵路資產管理、風險管理、過往經驗等面向進行評估，選出適當之調適方案後制定行動計畫，並追蹤調適後鐵路系統營運情況，以決定是否需要進一步調整。

(3) 鐵路調適架構特性

- 為一循環且具動態調整之氣候變遷調適架構。
- 鐵道調適過程中與資產管理及安全管理相互扣合。
- 強調由上而下的方式，即由政府建立制度，並由鐵路營運機構擬定執行策略方式來導入。



附圖 1-2 UIC 鐵路調適架構圖

綜合各國組織的通用型調適架構、鐵道系統調適架構，其步驟大致可分為：界定範疇、風險評估、研擬及實施調適選項、追蹤調適執行成效、提出改善及修正調適策略，並回饋調適成果及發現，

3. 鐵道系統調適方法

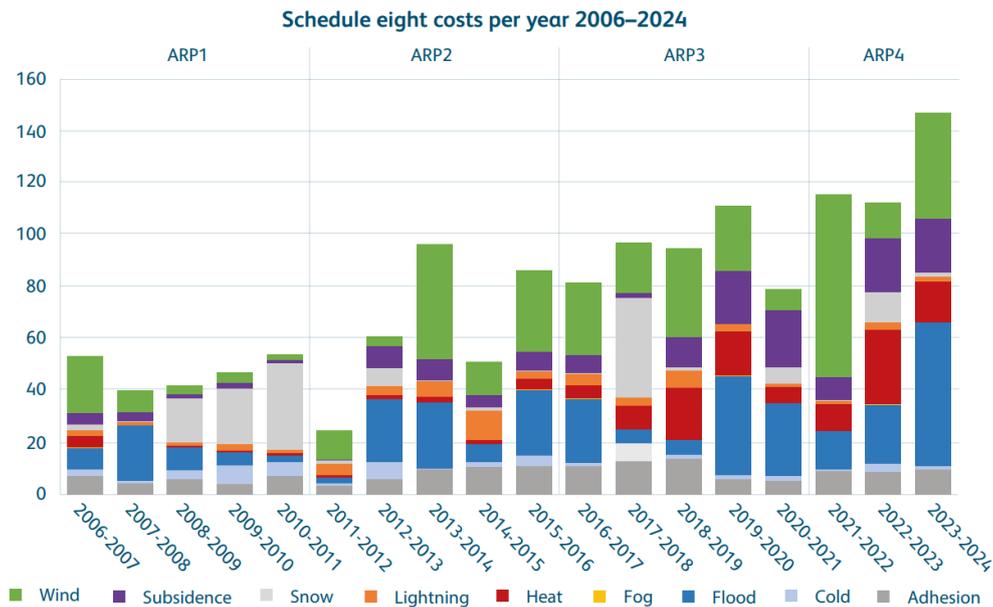
調適評估方法與調適措施擬定之流程，主要係由調適策略(界定範疇、風險評估)與執行計畫(研擬、實施、追蹤調適選項及回饋)兩階段形成循環回饋，其中調適策略聚焦於氣候變遷風險評估，依據風險評估結果擬定相應之調適策略，而後再於執行計畫階段，依據調適策略實施及監控相關調適措施。本

節謹摘錄國外相關案例所應用之評估方法及相關研究說明如下：

(1) 英國-英國鐵路公司(Network Rail, NR)

英國政府意識到氣候變遷對國家之關鍵基礎設施(含鐵路)的威脅，提供 NR 資金執行「天氣韌性與氣候變遷調適策略(WRCCA)」，以提高鐵路基礎設施對極端天氣和氣候變遷的調適能力，並制定長期戰略計畫。

自 2021 年 NR 發布第 3 版報告以來，英國即不斷感受到各個季節極端天氣事件對於鐵道系統的影響，其中包括一些非常嚴重的風暴、破紀錄的高溫，以及自 2010 年以來最冷的冬天等。而在 2021 年至 2024 年期間，因天氣原因造成 930 萬分鐘的延誤，已造成 3.7 億英鎊的賠償。且依據該報告顯示，因極端氣候導致之補償費用隨著時間的推移而增加，且所造成的成本仍持續上升，如附圖 1-2 所示。依據該報告顯示，造成 NR 營運損失之天候因素，主要係肇因於洪水、強風、地基下陷等，其次包含高溫、暴雪、雷擊等，亦是造成 NR 營運延誤而產生災損的原因之一。



附圖 1-3 英國-天氣危害對鐵路延誤量化成本圖

NR 在氣候風險評估作業中，採用企業風險評估矩陣(Corporate Risk Assessment Matrix，以下簡稱 CRAM)為核心工具，系統性的評估和管理各種風險。其中，機率可能性之評估係基於歷史數據和現有控制措施，估算風險發生的頻率；衝擊影響評估則涵蓋有財務之營運損失、修復成本，以及非財務之名譽損失、服務績效低落等。

此外，NR 為評估氣候變遷對資產的影響，亦建立氣候風險評估矩陣 (Climate Risk Assessment Matrix) 來評估目前及未來風險狀況，其評估之矩陣包含嚴重度(影響層面涵蓋安全與環境、績效、財務等)、發生機率，以及風險矩陣表等。

NR 在風險評估的方式係以現有控制與設計為基礎，假設在沒有採取任何新的調適措施下，評估目前鐵路的資產設計、標準和控制情境下之調適差距，此等差距則會受極端氣候衝擊導致資產故障並衍生安全事件，對整體路網造成重大危害。

(2) 英國-高速鐵路(High Speed 2, HS2)

英國 2 號高速鐵路(High Speed 2, HS2)連接倫敦至伯明罕，為英國近期之鐵路建設計畫，其在規劃與設計之初即評估氣候變遷可能造成之風險。

HS2 與英國 NR 雖然皆採用半定量風險矩陣進行風險分析，惟高速鐵路與傳統鐵路的系統特性不同，故兩者對發生機率(Likelihood)、嚴重度(Consequence)以及風險(Risk)之定義不盡不同。以發生機率與嚴重度為例，HS2 氣候風險評估之評級如附表 1-1 及附表 1-2 所述。

附表 1-1 英國-HS2 氣候風險評估-發生機率表

發生機率	說明
非常低	此事件僅在特殊情況下發生，且預計不會在計畫 120 年的生命週期、鐵路系統 40 年的生命週期以及施工階段的 10 年內發生。
低	根據設計和工程標準以及營運和維護計劃，該事件在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內預計不會發生超過一次。
中間	該事件可能會在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內至少發生一次。
高	該事件可能會在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內發生幾次。
非常高	該事件可能會在計畫 120 年的生命週期內、鐵路系統 40 年的生命週期內以及施工階段的 10 年內多次發生。

附表 1-2 英國-HS2 氣候風險評估-嚴重度表

嚴重度	安全	成本	旅行時間	大眾認知
輕度	輕微傷害或未遂事件	小於 5 百萬英鎊	輕微延誤	地方利害關係者會有短期負面反應
低度	損失工時傷害或需要接受醫治，對受影響者有短期影響	介於 5 百萬與 2 千 5 百萬英鎊之間	嚴重延誤	地方媒體持續的不利報導；地方利害關係者擔憂
中度	長期傷害或疾病，延長住院或無法工作	介於 2 千 5 百萬與 1 億英鎊之間	重大延誤或暫停服務時間小於 1 天	地方重要媒體或地區媒體及社交媒體報導；國家媒體關注使得大眾擔憂
高度	單人死亡/多人長期傷害	介於 1 億與 2 億 5 千萬英鎊之間	暫停服務時間介於 1 至 14 天	國家媒體持續廣泛的不利報導，主要利害關係者(如交通部、英國鐵路、倫敦交通局、鐵路公司、公營事業機構或其他政府機構)間出現爭議
重大	多人死亡	超過 2 億 5 千萬英鎊	暫停服務時間大於 2 週	國家媒體廣泛且持續的負面報導、主要利害關係者間出現爭議

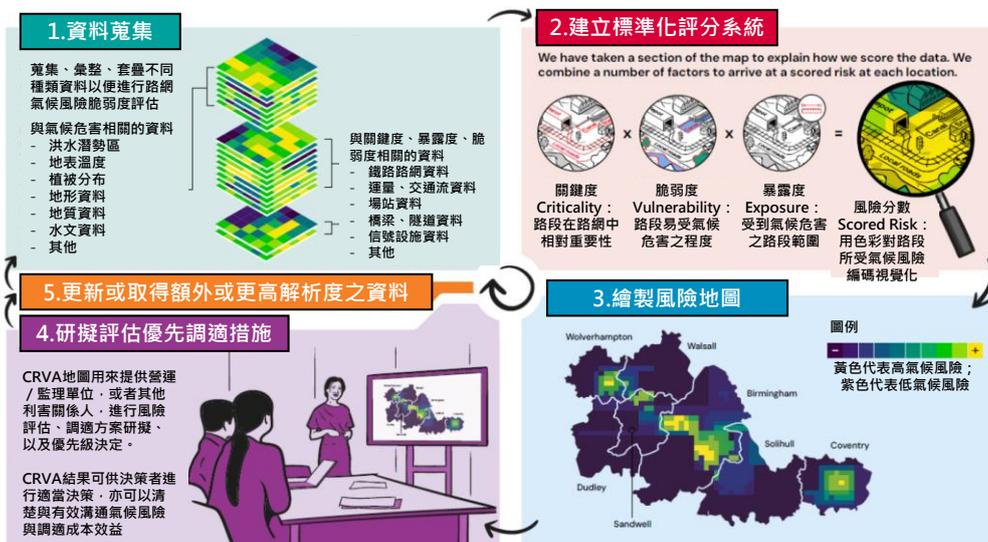
(3) 英國-伯明翰大學

英國伯明翰大學協助英國中西部地區政府建立一包含鐵路網路在內之氣候變遷風險與脆弱度評估系統。該評估系統結合氣象資料、地形資料、社會經濟資料(如地方人口與產業)、交通運輸路網(含鐵路)資料，以地理資訊系統軟體，建立氣候風險與脆弱度評估工具(Climate Risk and Vulnerability Assessment, CRVA)。CRVA 評估流程如附圖 1-4 所示，其透過循環程序建立一區域/路線之氣候風險並能夠滾動檢討，說明如下：

- 蒐集彙整氣候危害、關鍵度、暴露度、及脆弱度等相關資料並進行套疊，以便進行路網氣候風險脆弱度評估。其資料需要以圖層(Layer)方式匯入到 GIS 軟體(如 QGIS、ArcGIS)中，並且將圖層

資料網格化(Raster)，分割成同等大小之區塊(Grid Cells)進行套疊分析。

- 資料套疊完成後，將不同圖層資料中之數值標準化，即建立等量分級。例如該研究根據資料解析度，以 5%作為單位分級，意即以某一份資料中之最大值與最小值為範圍，其共分為二十等分；考量不同資料之單位差異，等量分級能夠結合不同單位資料之資訊，以視覺化方式呈現。
- 經過標準化等量分級轉換後之各圖層，可以顯示不同區域路段在不同氣候危害下受到之影響程度。每一層之最大值为 1，最小值为 0，每一層之等量分級可以用不同顏色表示。
- 根據決策分析需求，整合各資料圖層之標準化數值後，可得到代表路網中路段之氣候變遷風險/脆弱度。例如可以將不同氣候危害之關鍵度、暴露度、脆弱度計算出來之風險值相加，得到該路段總和 CRVA 分數(CRVA Score)。
- CRVA 評估之網格尺度可視資料而定，該研究每一個網格為 100 公尺平方。值得注意的是，CRVA 分數為相對尺度，代表相對於分析區域內當中的所有網格，該網格之氣候風險脆弱度。
- CRVA 亦可針對每一個圖層(意即資料來源)所代表的權重進行調整，例如可將受強降雨影響之脆弱度圖層權重增加，其評估結果將更看重受到強降雨之影響。



附圖 1-4 英國-CRVA 氣候脆弱度評估流程圖

4. 調適選項評估方法

針對各式氣候危害之衝擊，國內外鐵道系統相關單位所採取之行動方案不盡相同，為在眾多案例中尋找合適之參考對象，ISO 14090 建議可採用之評估方法包含調適路徑(Adaptation Pathways)、成本效益分析(Cost-Benefit Analysis)、多準則評估(Multi-Criteria Analysis)、實物期權分析(Real Options Analysis)等，進行調適選項比較及排序，以下介紹類比分析及多準則評估兩種應用案例：

(1) 類比分析

英國鐵路網公司 NR 與英國鐵路安全標準委員會(Rail Safety and Standards Board, RSSB)在 TRaCCA 計畫進行模擬分析的實驗，希望從其他鐵路系統管理中尋求潛在的經驗教訓，在模擬分析中使用「氣候」與「鐵路」兩種類別來尋找合適的國家與鐵路網，包含：

- 氣候：該研究透過全球氣候模型計算每日最低氣溫、每日最高氣溫、及每日總降雨量等三個氣候指標，並運用 Zech-Aslan 非相似性測度，將未來英國的氣候與全球其他地區現況進行比較。
- 鐵路：以路網每公里之延人公里數、路網每公里之延噸公里數、路網每公里之員工數、及客運營運效率等四項指標評比各國鐵路規模。

藉由參考兩類別之分析皆須與英國條件足夠相似，才可為英國鐵路氣候變遷調適提供指引，如附表 1-3 所示

附表 1-3 英國-21 世紀中氣候鐵路類比區域表

地區	最佳地點	備選地點
英格蘭南部	法國北部和西部	西班牙北部、法國南部、阿根廷和智利南部、澳洲墨爾本附近的海岸線、美國西部（舊金山與波特蘭之間）
英格蘭中部	英格蘭南部、法國北部、荷蘭和比利時	紐西蘭南島、阿根廷南部、智利南部
蘇格蘭和英格蘭北部	英格蘭中部和南部、威爾斯、愛爾蘭、德國海岸線、丹麥	紐西蘭南島、阿根廷與智利最南端、美國西部（舊金山與波特蘭之間）

地區	最佳地點	備選地點
威爾斯	英格蘭南部和法國北部	荷蘭、比利時、西班牙北部、紐西蘭南島、阿根廷與智利南部、美國西部（舊金山與波特蘭之間）

(2) 成本效益分析

澳洲墨爾本城市鐵道 AECOM 以成本效益評估法為基礎，提出一套研究框架分析降低氣候變遷衝擊，如附圖 1-5 所示。該研究分析墨爾本城市鐵路在面對高溫事件時，各項調適方法之成本和效益，找出最佳方案及其執行的最佳時機，摘錄重點如下：

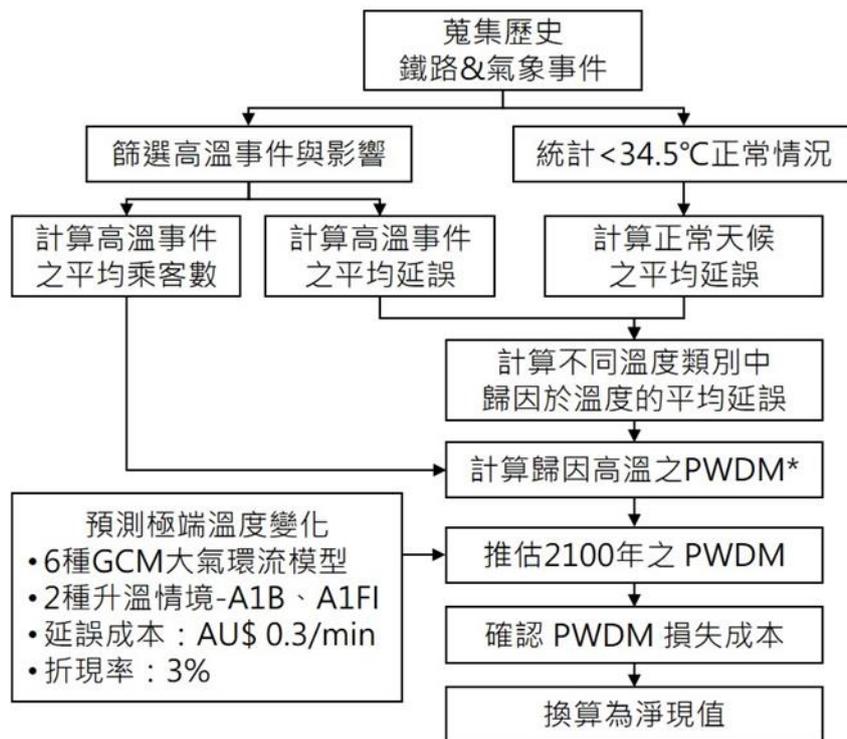


附圖 1-5 澳洲-墨爾本鐵路氣候風險評估流程圖

- 該研究以「旅客加權延誤分鐘數(Passenger Weighted Delayed Minutes，以下簡稱 PWDM)」作為評估指標，PWDM 為紀錄任何服務故障造成的延遲分鐘數，並依時段、行進方向及旅客數等進行加權，如附圖 1-6 所示。
- AECOM 共評估六種調適策略在兩種溫室氣體排放情境下之成本與效益，在溫室氣體排放情境部分，採用 IPCC AR4 中 A1FI 情境(未來溫室氣體排放最嚴重之情境，2100 年全球平均溫度相較 1990 年上升 5.5°C)與 A1B 情境(未來溫室氣體排放相對較低之情境，2100 年全球平均溫度相較 1990 年上升 2°C)，並且以適

合研究框架與預測區域變化具準確性為原則挑選 IPCC 的 6 種 GCM。

- 研究最後透過敏感度分析發現設定不同延誤成本(每分鐘 0.23 澳幣和每分鐘 0.38 澳幣)、折現率(1.5%和 6.0%)，調適措施 3 皆有較優的淨現值與成本。其中，主要效益係來自再生制軔系統所節省的能源，而非來自減少通勤延誤時間
- 敏感度分析也進一步分析 20 年、40 年及 60 年執行各項調適措施之淨現值與效益成本比，以了解調適措施最佳執行時機。研究結果顯示，越晚執行調適措施 3-再生制軔，其淨現值與效益成本比越差；而調適措施 4-更換電力線若於 40 年後執行，其淨現值與效益成本比較優，相關評估結果如附表 1-4 所述。



附圖 1-6 澳洲-墨爾本鐵路極端高溫風險評估流程圖

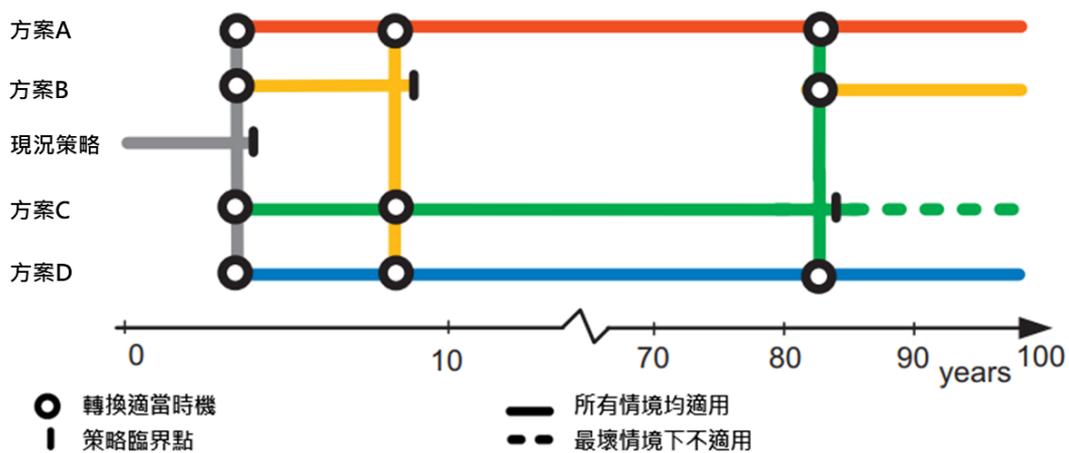
附表 1-4 澳洲-墨爾本鐵路調適方案效益成本比較表

措施	調適措施	溫室氣體排放較低 情境 (A1B)		溫室氣體排放較高 情境 (A1FI)	
		淨現值 (百萬澳元)	效益 成本 比	淨現值 (百萬澳元)	效益 成本 比
1	更換為混凝土枕木	-120	0.09	-115	0.12
2	更換列車空調設備	-80	0.13	-75	0.18
3	安裝再生制軔	107	1.70	107	1.70
4	更換電力線中的電纜和 /或調整張力	1	1.27	4	1.78
5	更換號誌設備、其電子 設備安裝備援設施	-295	0.01	-242	0.01
6	行為改變	-29	0.04	-28	0.05

(3) 氣候韌性調適路徑

由於未來氣候危害變化多端，難以準確預測，動態調適政策路徑 (Dynamic Adaptive Policy Pathways，以下簡稱 DAPP) 可幫助決策者在高度不確定下進行調適方案的決策。該方法結合調適性政策制定 (Adaptive Policymaking) 及調適路徑 (Adaptation Pathways)，決策者可規劃多個調適方案選項，並在不同情境下，設定調適方案轉換之時機，若當某個調適選項之效益已達臨界點 (Tipping Point) 時，則需轉向其他調適路徑，如附圖 1-7 所示。從該案例可以得知，現況策略預計在 4 年後達到臨界點，主事者共規劃 4 項方案可供選擇，各方案內容簡要說明如下：

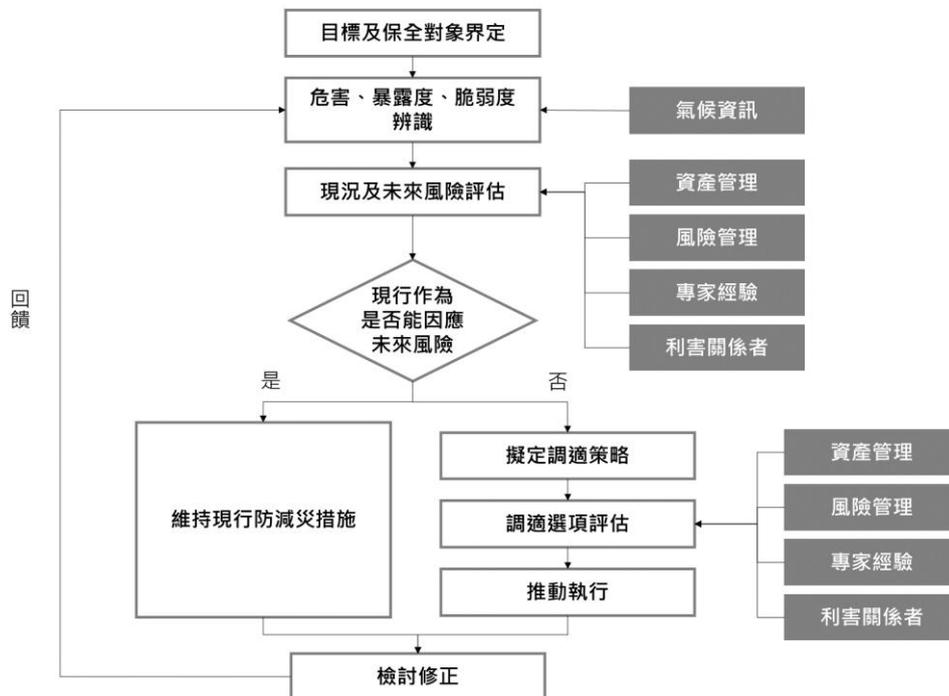
- 方案 A 和 D：在未來的 100 年內，不論面對任何氣候情境，皆可達到目標。
- 方案 B：若在 4 年後選擇方案 B，該方案大約 5 年內會達到臨界點，此時需要轉向其他三個方案，才能繼續達成目標。
- 方案 C：若選擇方案 C，約需至 80 年時即須評估轉向方案 A 或方案 D 才能達成目標；而其他情境下，方案 C 可在未來的 80 年內仍可達成調適目標。



附圖 1-7 時間-策略型調適路徑示意圖

5. 我國鐵道系統強化調適能力之機制

本計畫所規劃我國鐵道系統調適架構如附圖 1-8 所示，其流程步驟包含界定範疇、現況與未來風險評估、研擬調適策略、調適選項評估、推動執行及檢討修正，說明如下：



附圖 1-8 我國鐵道系統調適架構圖

(1) 界定範疇

此階段包含目標及保全對象界定，以及危害、暴露度與脆弱度辨識，在界定過程中，應邀集有關機關(構)、學者及民間團體等利害關係者，全盤考量彼此的關注議題。以臺鐵為例，其東部路線常受到挾帶土石的水泥流影響，造成軌道被覆蓋進而影響行車安全，由於山坡地在臺鐵路權之外，若欲進行相關整治及維護作業，則需會同農業部林業及自然保育署、礦務局等相關單位，由利害關係者一起合作。

保全對象部分，可概分為基礎設施、車輛系統(即鐵路系統之工務、電務與機務；捷運系統之土建、機電與車輛)及人員(含受危害影響期間或空間分布可能之利害相關者)，其架構如附圖 1-9 所示。

待確立保全對象之後，將進一步辨識影響保全對象之氣候危害類型、暴露範圍及其脆弱度。有關氣候危害，可從歷史經驗中決定驅動因子，例如我國鐵道系統常受強降雨、洪水、颱風挾帶的大量雨水威脅，此外，亦可借鏡國外經驗，如極低溫、降雪等，雖此類危害短期對我國影響甚小，惟氣候變遷全球氣候異常下，可定期滾動檢視，若發現有前兆徵象時則可提前納入規劃。



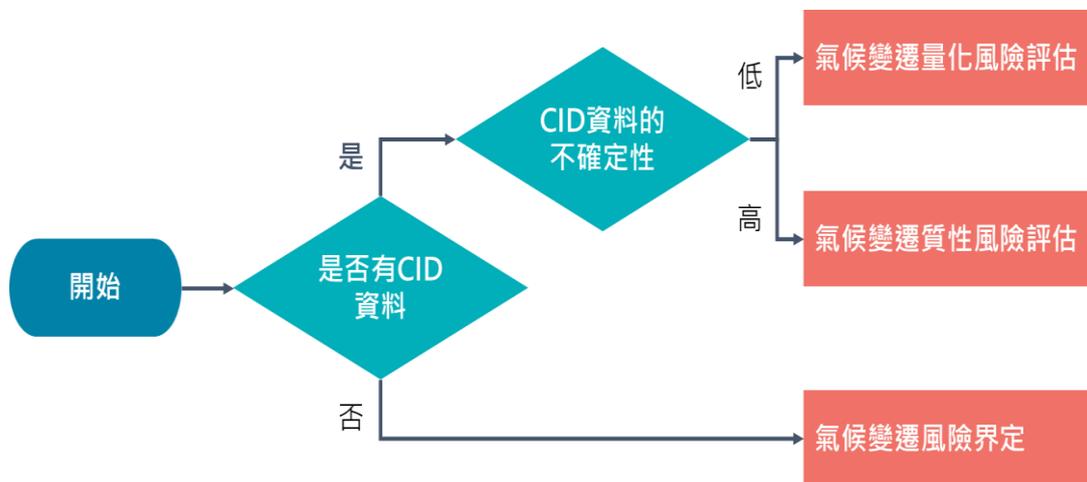
附圖 1-9 鐵道系統保全對象架構圖

(2) 現況及未來風險評估

在此階段須進行現況及未來風險評估，並評估現況作為是否能補足兩者間之缺口。為與國際趨勢及我國《氣候變遷因應法》一致，本計畫建議之風險評估模型為「危害、脆弱度及暴露度」之函數，其中，現況風險是基於歷史及現況資料進行評估，可視為傳統防減災風險評估。

未來風險則是推估未來情境下之氣候變遷風險，講求使用科學推估資料及未來情境設定。為能與我國其他領域之氣候變遷風險評估結果互相比較，未來情境設定參照環境部「國家調適應用情境」，建議至少評估GWL 1.5°C及GWL 2°C兩種情境下之氣候變遷風險。

由於目前未來情境下部分危害資料的不確定性較高(如風速)，在進行未來風險評估時，建議可依據「是否有氣候影響驅動因子 CID 資料」、「CID 資料的不確定」兩條件決定風險評估方法，若採質性風險評估，需邀集有關機關(構)、學者及利害關係者進行訪談，針對風險組成因子的等級劃分，取得共識，而評估類型判斷流程如附圖 1-10 所示。另從國外鐵道標竿案例中可發現，氣候變遷風險與資產管理、安全管理環環相扣，故風險評估應與資產及安全管理結合。



附圖 1-10 氣候變遷風險評估類型判斷流程圖

待完成現況及未來風險評估後，需進一步檢視現行防減災作為是否能因應未來氣候變遷所帶來之衝擊，若是，維持現行防減災措施並持續監測與檢討其成效即可；若否，即存在調適缺口，必須進一步規劃調適策略及其行動方案，以因應氣候危害之衝擊。

(3) 研擬調適策略及調適選項評估

若現行防減災作為無法因應未來氣候變遷所帶來之衝擊，將對其缺口擬定相應之調適策略與調適選項，目標為降低暴露度及脆弱度，評估時亦須考慮經濟與財務的可行性。值得注意的是，降低危害度雖然同是降低氣候變遷風險的策略之一，由於得從氣候驅動因子層面著手，偏向減緩措施，故本研究不將相關應對措施納入調適之研究範疇。

(4) 推動執行及檢討修正

在推動執行調適選項的同時，可建立成效評估指標來檢視調適選項是否能達到調適目標，並透過循環機制過程，將其結果及相關資訊回饋至下一氣候變遷風險評估週期，做為未來調適策略精進改善方向之參考。

6. 我國鐵道系統強化調適能力之方法

本計畫在鐵道系統氣候變遷風險定義上，參考 IPCC AR6 WG2，以及我國《氣候變遷因應法》第 3 條明揭「...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」之定義，採氣候變遷風險係由危害、暴露度及脆弱度之交集，其中脆弱度亦為敏感度與調適能力的函數，故整體呈現如附圖 1-11、式 1 及式 2 所示。



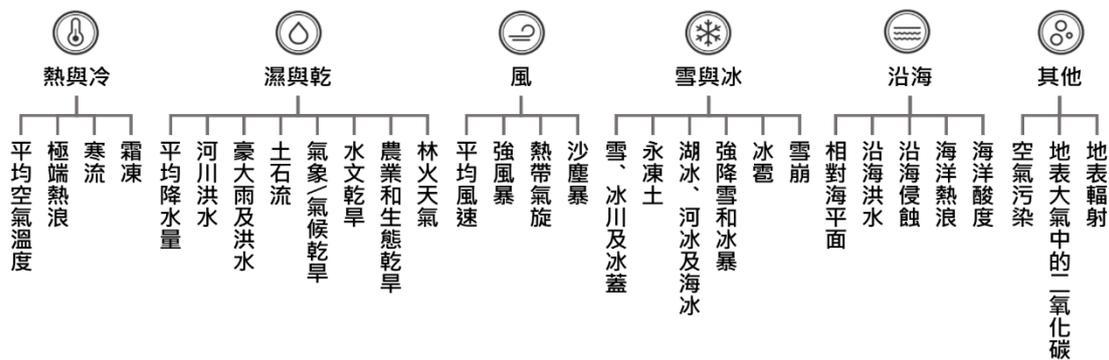
附圖 1-11 氣候變遷風險概念示意圖

$$\text{風險} = f(\text{危害}, \text{暴露度}, \text{脆弱度}) \quad (1)$$

$$\text{脆弱度} = f(\text{敏感度}, \text{調適能力}) \quad (2)$$

(1) 危害界定方法

如何辨別危害是否導因於氣候及其歸屬之氣候驅動因子(CID)類別係進行風險評估之首要課題，倘若危害非導因於氣候，則其所造成之衝擊不在氣候變遷風險評估範疇之中。根據 IPCC AR6，陸地相關 CID 可分為冷與熱(Heat and Cold)、濕與乾(Wet and Dry)、風(Wind)、雪與冰(Snow and Ice)、沿海(Coastal)和其他(Other)共六大類型，各類型所包含的 CID 類別如附圖 1-12 所示。



附圖 1-12 CID 類型及類別示意圖

(2) 暴露度及脆弱度界定方法

暴露度及脆弱度與保全對象特性相關，本計畫建議可邀集鐵道系統機關(構)、專家學者及相關利害關係者等進行討論，以便充分考慮可能影響保全對象之暴露度與脆弱度之因素，其包含：

- 暴露度係指受氣候危害影響的對象及程度，需考量保全對象暴露情形之時空分布
- 脆弱度係由敏感度以及調適能力所組成。其中，有關敏感度主要係指「哪些特徵會讓系統更容易受到特定氣候危害的負面影響」等涵蓋自然環境及社會經濟或文化等層面。例如：某鐵道路線是主要通勤路線，且缺乏替代交通工具，一旦發生事故時，難有其他替代方案，故該路線的敏感度較高；至於調適能力主要係指「系統中有哪些能力已經存在(或缺乏)，這些能力有助於降低現況或未來風險」，可從組織因應調適所具備之知識、技術、制度，以及經濟等四個面向予以思考。

(3) 氣候變遷情境設定

根據行政院 2023 年 10 月核定之「國家氣候變遷調適行動計畫」(112-115 年)，我國「國家調適應用情境」採用全球暖化程度 GWL 固定增溫情境，相較於 SSP 情境，GWL 情境較易於理解與表達，指當全球達成或未達成不同氣候目標時，暖化所造成的氣候變遷。此外，根據 IPCC WG1 的技術摘要報告，在未來的 20 年，不論全球減碳效果是否如預期中進行，全球均溫增加幅度將落在 1.5°C-2°C，爰此，國家調適應用情境優先採用「西元 2021-2040 年升溫 1.5°C」及「西元 2041-2060 年升溫 2°C」兩種情境。

為使我國鐵道系統之氣候變遷風險評估結果能與我國其他領域對接，本計畫建議各鐵道系統相關單位在進行未來風險評估時，至少需評估 GWL 1.5°C 和 GWL 2°C 兩種情境下之風險。倘需採用升溫超過 2°C 之高衝擊情境，建議可採用 3°C 或 4°C 之氣候推估情境，考量其發生機率，可優先參考 3°C 情境。

三、結論與建議

1. 結論

(1) 鐵道標竿國家普遍發展氣候變遷調適機制與方法

本計畫回顧國外調適發展現況、趨勢、機制與方法，鐵道標竿國家普遍發布氣候變遷相關法規，並要求地方機關定期回報調適執行情形，作為調適計畫檢討精進之依據。在執行調適計畫時，強調跨部會合作及利害關係者的參與，由中央政府提供之危害資料，透過與專家學者及相關利害關係者的討論，以界定風險評估範圍、評估指標及風險等級分級標準，分析方法上，普遍採用質性方法評估未來氣候變遷下之風險。

在眾多標竿案例中，以英國發展較為成熟，其中央政府於 2008 年頒布《氣候變遷法》並展開一系列調適策略相關研究，而英國相關機關(構)也積極發展調適機制與方法，如英國 NR 在 WRCCA 策略中擬定天氣與氣候變遷影響評估流程，將天氣與氣候影響納入規劃設計、施工與維運階段中考量；或是目前正興建中的英國 2 號高速鐵路 HS2 已將氣候變遷影響納入考量，並規劃未來營運時的應對措施；又或是伯明罕大學協助

研發之 CRVA 工具等，均可作為我國發展鐵道系統調適機制與方法的借鏡。

鐵道標竿國家或機構之調適相關文獻中，多僅描述調適策略及其所採用之調適方案，並未明確說明 CID 評估過程、風險評估及調適方案評選之方式或評估指標細節，僅展示最終分析結果；惟仍可從部分文獻中了解多數作業方式係採質性分析或半定量之評估方式，找出調適缺口並擬定適宜之調適方案。

(2) 國內鐵道系統普遍聚焦於防減災，調適方面則處於剛起步階段

氣候變遷調適與防減災之差異難以明確劃分，兩者主要差異在於：調適為透過科學推估資料，評估未來氣候變遷情境下之風險，並以其結果作為研擬調適選項之依據，評估期程短期至少往後預估 20 年，中長期則可檢視世紀中或世紀末可能之情境。

目前我國鐵道系統多採用歷史及現況資料進行風險評估，作為擬定應對措施之參考，對於未來氣候風險評估則較少著墨。

(3) 研擬我國鐵道系統強化調適能力之機制

本計畫依據我國「國家氣候變遷調適框架」、ISO 14090 系列標準及 UIC 調適架構，研擬我國鐵道系統調適架構，其步驟大致分為目標與保全對象界定、風險組成因子(危害、暴露度及脆弱度)辨識、現況風險評估、未來風險評估、研擬調適策略、調適選項評估、推動執行、檢討修正，本計畫研擬之調適架構可對應國家調適架構及相關法規。

為協助我國鐵道相關權責單位推動氣候變遷調適工作，本計畫建議在既有鐵道計畫評估作業流程中融入/新增氣候變遷風險評估，並將其與資產管理及安全管理系統結合，以發揮最大成效。此外，亦鼓勵主辦機關或營運單位能自主提報揭露適當的調適資訊，讓相關利害關係者了解鐵道調適現況，經相關訪談會議討論，了解我國鐵道系統相關機關(構)有意願自主揭露針對氣候變遷的相關作為。

(4) 研擬我國鐵道系統強化調適能力之方法

本計畫依據 IPCC AR5 與 AR6 WG2、我國《氣候變遷因應法》及「國家氣候變遷調適行動計畫」(112-115 年)，規劃鐵道系統氣候變遷風險模型及未來氣候變遷情境，其模型為「危害度、暴露度、脆弱度」之函數，

情境設定則建議至少應評估 GWL 1.5°C 和 GWL 2°C 兩種情境下之風險變化，以便與我國其他領域互相比較。倘計畫需採用升溫超過 2°C 之高衝擊情境，建議可採用 3°C 或 4°C 之氣候推估情境，考量其發生機率，可優先參考 3°C 情境。

在風險評估方法上，由於量化分析須具備足夠數據方能進行，包含不確定性的 CID 數據、保全對象的暴露度及脆弱度數據等。鑒於目前尚未有足夠的量化數據可進行量化風險評估與成本效益分析，本計畫透過專家學者討論等方式，應用質性分析方式(如風險矩陣)進行風險評估，以便鐵道機關(構)能在現況環境的限制下進行風險辨識及初步評估。

在調適選項部分，本計畫彙整鐵道標竿機構之調適作法，依據 CID 及其對鐵道系統的衝擊影響、以及不同生命週期階段進行分類綜整，提供我國鐵道相關權責單位參採。

2. 建議

(1) 聚焦於高溫、強降雨等常見氣候風險做為調適指引之範例

我國鐵道系統常受強降雨及颱風挾帶的大雨影響，如臺鐵北迴線和仁至崇德段因地震後地質更加破碎，再加上強降雨的衝擊，導致落石、土石流等災情頻傳，惟目前坡地災害相關圖資資料，為經濟部地質調查及礦業管理中心 2014 年與 2016 年公告之岩屑崩滑、岩體滑動、落石與順向坡的地質災害潛勢範圍資料，以及農業部林業及自然保育署 2018 年之福衛判釋崩塌地範圍資料，尚未考慮近期地震造成的崩塌影響及未納入未來升溫情境下之範圍變化。因此，本計畫於後續發展調適指引時，除以坡地風險作為示範案例外，亦可採用 CID 資料不確定性低、且與外部環境關聯性低之溫度資料，例如分析高溫下軌道挫屈風險，以利與鐵道相關機關(構)說明調適評估操作過程。

(2) 持續推廣鐵道調適概念

考量鐵道調適於國內尚屬初期發展階段，部分相關機關(構)尚不熟悉氣候變遷調適與傳統防減災之差異，為使各單位對鐵道調適有更詳細的理解，後續可藉由教育訓練、研討會等方式，持續與相關機關(構)交流鐵道調適概念及作法，形成良性交流以利後續國家制度的推動。

(3) 持續瞭解並彙整鐵道相關機關(構)導入鐵道調適面臨之課題

根據本年度實務訪談及相關會議瞭解營運機構、規劃建設單位及監理機關在導入鐵道調適的過程中，目前面臨到的困難與需求，包含：

- 缺乏未來升溫等鐵道調適所需之相關風險評估圖資及尺度資料，以致在盤點現況與未來之調適差距時，較難有客觀且最新之科研數據進行評估。
- 有關前揭之科研資料因涉及水利、氣象等不同領域之氣候變遷專業智能，期待鐵道系統權管機關(構)單獨蒐整及分析有其困難度，且若由各機關(構)獨自探索，亦有重複投入資源之疑慮。

基此，為利鐵道系統權管機關(構)順利辦理調適相關業務，除須持續瞭解並彙整鐵道系統機關(構)之需求與議題之外，對於最新科研數據之產出，建議由《氣候變遷因應法》之中央主管機關協助產製與彙整，透過平台方式分享相關使用單位。。

(4) 發展氣候變遷風險驅動因子評估原則規範、支援文件及工具

回顧國外鐵道標竿機構於調適選項案例，可發現與現行防減災作為相仿，誠如上述，兩者差異在於風險評估模型、未來情境等應用，其中風險評估所採用之驅動因子評估指標至關重要，但相關文獻及實際案例甚少。為便於未來我國鐵道系統相關權責單位應用，本計畫建議後續可發展相關支援工具，包含氣候變遷風險驅動因子範本、驅動因子評估標準等。

附錄二 審查意見辦理情形

交通部運輸研究所合作研究計畫

■期中□期末報告處理情形

計畫名稱：鐵道系統強化調適能力之探討(1/3)-機制與方法

執行廠商：財團法人中興工程顧問社

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
國立成功大學交通管理科學系暨電信管理研究所鄭永祥教授		
1. 有關於國外鐵道調適發展方向及趨勢，是否可有亞洲的案例可供參考如日本或是韓國，請補充。	目前研究團隊已著手蒐研日本、香港等亞洲國家案例，相關內容將納入期末報告，並在教育訓練進行交流及分享。	同意
2. 報告書 P. 2-17 所提及風險為暴露度、脆弱度以及危害度的函數，可否清楚說明其操作型意義？另外脆弱度由敏感度和調適能力所組成這部分的意義與操作分析也需要更詳細之說明。	<p>1. 危害、暴露度及脆弱度之操作型意義簡述如下：</p> <ul style="list-style-type: none"> ● 危害：指對保全對象造成損害或損失之氣候相關物理事件或趨勢的發生機率或程度。 ● 暴露度：指暴露於危害事件的數量或程度。 ● 脆弱度：保全對象暴露在危害之致災程度，其與保全對象之敏感度及調適能力有關。其中，敏感度為受氣候變異或變化影響的容易程度，若保全對象敏感度越高，其脆弱度越高；調適能力則指保全對象應對潛在損害等的的能力，若保全對象調適能力越高，其脆弱度越低。 <p>2. 在期末階段，本案將設計一調適案例輔助說明風險組成因子之操作過程，以便後續各鐵道相關機（構）實務操作參考。</p>	同意
3. 在回顧國外鐵道調適發展方向及趨勢後，建議研究單位應提出整理後可供我國研擬氣候變遷因應策略及鐵道系統調適發展	遵照辦理。	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
之重要參考方向。		
4.請說明其他國家以及其他鐵道系統在氣候變遷風險評估方法中所需要收集的數據資料類型？其取得方式（國家法規要求、自發性蒐集等）？評估指標及如何進行後續之分析之方法。	<p>在英國、法國和德國等國家，鐵道營運機構多是因應國家法規要求，蒐集調適報告所需數據資料，而這些數據通常涵蓋了基礎設施的健康狀況和受損程度等，與資產管理相互扣合。</p> <p>以英國 Network Rail 為例，其將準點性與可靠性合併為公共績效指標，並將該指標定義為計劃的總列車數中按時抵達終點站的列車所占的百分比，以此評估天氣和氣候變化對鐵路之影響。</p>	同意
5.請說明辦理專家學者座談會時，有關針對不同鐵道系統如何因應氣候變遷及強化調適能力方法的具體討論議題為何。	<p>本案今年度專家座談會討論議題包含本研究研擬之鐵道系統調適機制與方法的妥適性、鐵道調適案例設計、及 NbS 於國內鐵道之適用性。希冀藉由專家座談會與國內鐵道及調適領域專家請益，俾利本案研擬之鐵道系統調適機制與方法能臻於完善。</p>	同意
6.在英國 NR 案例中，其一為「準點性」和「可靠度」資料合併成「公共績效指標」，請說明是否會參酌這樣的作法進行風險評估。	<p>本計畫依《氣候變遷因應法》第三條，將氣候變遷風險定義為「危害、暴露度及脆弱度」之函數進行風險評估。</p>	同意
7.有關 LA Metro 案例，請說明其風險矩陣是否可對照「嚴重度」與「發生機率」之概念。	<p>LA Metro 的風險矩陣隱含了「嚴重度」及「發生機率」之概念，但因氣候變遷風險組成較為複雜，較難逐一對照傳統風險模型。</p>	同意
8.報告書 P.1-5~1-6 所提及「對應招標文件要求」等語意，似較偏向行政程序及計價審核，建議文字可略為調整。	<p>遵照辦理。</p>	同意
9.報告書 P.2-44~2-51、P.3-6~3-15 所提及國外鐵路調適發展及架	<p>目前研究團隊已著手回顧日本調適文獻，蒐研成果將納入本案期末報</p>	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
構僅蒐集英國、德國、法國、瑞典等國家資料，惟因日本的地形、環境與我國較接近，建議增列日本相關資料。	告，同時於今年度教育訓練進行分享與交流。	
10.本報告係藉由國外鐵道系統調適發展，經由辨識風險，提出適當的調適方案，提升鐵道系統韌性，係具有意義的研究。	謝謝委員的肯定。	同意
11.報告書第二章所提之氣候危害，建議釐清是否包含地震災害。目前天然災害多為複合型災害，例如地震造成地形地貌的改變，隨之而來的強降雨或地形雨將帶來災害。	回顧氣候變遷相關研究，目前普遍認為地震與氣候變遷的關聯性較低，多將其視為防減災課題。考量我國鐵道系統較易受地震影響，本研究會在考量天氣驅動因子之危害後，另將地震作為情境/背景之一，納入氣候變遷風險評估。	同意
12.新科技應用的案例中提及抵禦極寒、下雪狀況，與臺灣環境似有不同，建議可增列適合國內環境的新科技應用案例。	謝謝委員建議，研究團隊會於期末報告中，從我國適用角度說明相關新科技應用案例。	同意
13.目前建築物耐震設計的基本原則係「小震不壞、中震可修、大震不倒」，鐵路基礎設計面對天然災害可藉由工程或營運手段，將風險降低至可接受的程度。	本研究已將Haasnoot提出之氣候韌性調適路徑納入建議，亦即滾動調整調適選項，從而提升系統韌性以減少氣候變遷危害衝擊之風險。	同意
14.針對後續所提之調適方法，建議提出其優先順序，俾利考量入法可行性。	由於各鐵道系統的規模、財務及其受到異常天氣之衝擊不盡相同，爰此，本研究彙整國外鐵道標竿案例面對各種危害所採取之調適措施，提供鐵道相關機關（構）在執行氣候變遷調適時，可依據自身需求查找相關案例，作為後續研擬調適選項之參考。	同意
國家災害防救科技中心陳永明組長		
1.整體報告所蒐集的資料與重要文獻貼切氣候變遷調適議題。	謝謝委員的肯定。	同意
2.有關氣候變遷風險評估，建議在	研究團隊會持續嘗試與鐵道營運機	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
下半年進行訪談時，可與業務單位深入瞭解不同氣候危害因子的「量化」影響，例如多少雨量可能會對鐵道系統造成危害。	構交流，瞭解其調適作為以及標準作業程序，並將各營運機構的門檻值資訊融入未來調適指引當中。	
3.報告書中的「適應」建議修正為「調適」。	遵照辦理。	同意
4.鐵道系統的保全對象涵蓋較廣，由於各保全對象之風險評估目的不盡相同，為避免後續調適指引變得發散及不易執行，建議可先挑選相對明確、較容易產製量化資料之保全對象，優先發展其調適指引。	整體計畫為期三年，研究團隊會於第二與第三年的調適指引研究中，優先挑選相對明確、易產製量化資料之鐵道系統保全對象，進行調適指引研擬。	同意
5.有關調適選項的選擇，建議輔以量化數據，以便鐵道系統相關單位參採。	回顧標竿機構案例多為調適選項說明，較缺乏量化分析展示，研究團隊將持續蒐研量化相關案例，提供鐵道相關機關（構）參考。	同意，請研究團隊持續蒐整相關資料。
國立高雄科技大學土木工程系蘇助理教授育民		
1.報告書 P.2-29 所提及目前我國鐵道系統主要是防、減災為主，本研究報告中對於鐵道系統「應該」調適的作為或是「已經」調適的作為，以及各鐵道管理單位中目前相同、相異、以及未來可能應該強化調適能力的項目，建議在此階段的報告中能夠有所建議。	遵照辦理。	同意
2.報告書 P.5-4 所提及氣候調適融入規劃設計、施工興建、營運維修的部分似乎僅專注在工程類。鐵道四大部門「運工機電」尚有三個部分並未在文中探討到，建議分部門類別進行討論。	在鐵道系統生命週期中，規劃設計階段主要是透過工程手段提升鐵道系統之韌性，後續於營運維修階段則會透過科技應用或人員的操作程序(SOP)降低規劃設計階段中之殘餘風險，例如車輛調度、定期維護設備等。本研究之保全對象包括基礎設施、車輛系統及人員(圖 5.2)，	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
	另於報告中將標竿機構相關作為，彙整於生命週期調適選項彙整表，已將整體範圍包含在內。	
3.對於目前因為「可能」因為氣候變遷發生在鐵道系統上的案例以及調適手段，不論是否為防、減災，建議將案例彙整探討並詳細說明，可為未來擬定進一步強化調適策略之用。	研究過程中依氣候驅動之危害因子，回顧鐵道系統可能受到的衝擊/影響，並將不同生命階段可採行之調適選項進行彙整，可供鐵道機構進行參採。	同意
4.在臺灣地區氣候變遷可能造成的現象，極端溫度可能更高也可能更低、瞬時雨量可能更高可能延時更久、颱風風速可能更高延時更久、颱風造成海岸侵蝕與邊坡崩落等等可能的樣態，以及該樣態對於鐵道系統可能的影響，建議透過文獻整理、訪談記錄、以及案例探討來進行彙整，對於如何擬定此階段的成果應該有所幫助。	本研究會持續進行文獻彙整、嘗試與鐵道營運機構交流，蒐集各營運機構的門檻值資訊，作為研擬調適方法之參考。	同意
5.所有的強化調適能力均需要對於氣候變遷的長期監測，不論是擬定連結交通部氣象署的數據進行監測與預測，或是鐵道系統各單位自行進行監測與預測，因此，監測的必要性應該凸顯，否則永遠只能防減災，因為沒有監測很難預測氣候變遷可能帶來的問題。	鐵道系統於規劃設計階段會導入環境監測系統，另於營運階段亦會與氣象局、民間氣象預測公司合作，或者針對特定危害另設置監測系統，以降低異常天氣帶來的衝擊。此外，氣候變遷之長期模擬推估等基礎科學研究，主要由政府單位(水利署、國家防救災科技中心)統籌研析，再將資料分享給各機構應用，亦即透過機構現況的防減災作為、及長期的調適行動方案，來逐步強化機構本身的韌性。	同意
交通部綜合規劃司		
1.目前研究報告仍在蒐研階段，針對報告內容無相關意見。	謝謝委員的肯定。	同意
2.有關報告書 7.2 後續工作規劃，	遵照辦理，將對 112 年調適成果提	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
提及期末階段會針對「112 年度維生基礎設施領域調適成果」提出檢討與建議，請研究團隊協助檢視可精進之處，俾利各調適計畫改善精進。	出檢討與建議事項，相關內容將納入本案期末報告，提供鐵道相關機關（構）參考。	
3. 審計部查核意見係針對 112-115 年度之氣候變遷調適行動方案，由於各方案均為定案計畫，其彈性調整空間有限。因此，建議研究團隊可於 115 年度提出下一期調適方案之建議，俾利本領域調適方案臻於完善。	遵照辦理。	同意
4. 環境部氣候變遷署所擬之《氣候變遷風險評估作業準則》並不會訂定相關操作指引，需由各部會自行擬定。本案後續年度所發展之指引若有涵蓋運輸相關指引，將有助於補足其缺口。	本案將於明後年度發展鐵道系統（含高鐵、臺鐵、捷運、輕軌）調適指引，提供鐵道相關機關（構）參考。	同意
5. 隨著減碳及調適議題發酵，忽視相關措施而產生之損失逐步提升。因此，建議未來研究團隊在進行訪談時，能夠傳達調適方案的重要性，讓相關單位瞭解從長期的角度而言，採取調適措施可能更具經濟效益。	研究團隊會持續跟鐵道相關機關（構）交流，以建立雙方對氣候變遷調適之共識。	同意
6. 在國際文獻中，鮮少看到研究指出二氧化碳濃度與地震之關聯性，建議研究團隊可進一步研析或向氣象署請益。倘若兩者關聯性較低，建議可從複合型災害的角度，將地震影響納入評估範圍之中。	由於目前普遍認為地震與氣候變遷的關聯性較低，並多將其視為防減災課題，因此，本研究在考量天氣驅動的災害因子後，另將地震視為評估的情境/背景之一，以考量我國鐵道系統較易受地震影響之特性。	同意
交通部中央氣象署		
1. 報告書 P.2-1 中 Extreme Weather 建議翻譯為極端天氣較為妥適。	遵照辦理。	同意
2. 報告書 P.2-31 之圖 2.16，中央氣	謝謝委員提供資訊，圖 2.16 係台灣	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
象署豪雨標準現為雨量達 200 mm/24h 或 100 mm/3h 以上，提供參考。	高鐵於運轉作業中的監測門檻值。	
3.有關地震與氣候變遷之關聯，目前認為地震是無法預測的，氣候變遷則聚焦二氧化碳對於環境之改變，而文獻中較少提及兩者的關聯。後續將會請教地震中心對此之看法，若有相關資訊將再提供參考。	謝謝委員提供資訊。	同意
交通部鐵道局		
1.鐵道系統之調適能力，除營運期間的處理外，是否可增加規劃及設計期間的建議。	本計畫建議於規劃階段之「可行性研究報告書」及「綜合規劃報告書」中，融入/新增氣候變遷風險議題至風險評估專章，期待在規劃階段時能將未來氣候變遷風險納入考量，並在設計階段之「基本設計」及「細部設計」中滾動檢討與精進，建構更具韌性之鐵道建設，詳細調適機制與方法說明於報告 5.2 節及第六章。	同意，本計畫係以全生命週期研擬鐵道系統之調適指引。
2.英國高鐵 H2 工程之減碳管理導入 PAS2080，除減碳外，是否對調適也有所幫助，可否請研究團隊補充說明。	1.PAS2080 (Carbon Management in Infrastructure and Built Environment) 旨在透過管理和減少建築物和基礎設施的全生命週期碳排放，歸屬於減碳範疇。 2.本計畫以 ISO14090 相關規範為主，考量減緩 (mitigation) 和調適 (adaptation) 相輔相成，有關 PAS2080 對調適可能的間接幫助屬於較上位的程序，包括：風險評估範圍可括及到氣候風險評估、全生命週期內實施減碳作為提高對調適措施的關注、採用減碳材料與設計進	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
	階提升整體韌性、減碳蒐集之大數據可提供調適參考。	
國營臺灣鐵路股份有限公司		
報告書 P.6-5 有關表 6-1 鐵道系統生命週期-氣候變遷調適選項彙整表，極度高溫造成乘客舒適度降低，規劃設計階段，車輛可開啟窗戶一案須審慎評估可開窗戶裝設地點，若裝設客車車廂，列車若於高速行駛下，無法評估或控制旅客是否把手腳伸出窗外，或窗外有異物（如碎石、樹枝或樹葉）入侵造成旅客受傷。	本計畫會持續滾動檢討調適選項彙整表，刪除或備註說明有疑慮及不適用我國鐵道環境之調適選項。	同意
台灣糖業股份有限公司		
因糖鐵及林鐵屬觀光性質不在本研究案範疇，惟如後續氣候變遷之調適措施將納入鐵路相關法規，專用鐵路亦屬受規範之對象，本研究案未來是否確定不納入專用鐵路。	本計畫初步以一般通勤鐵道運輸服務為主，暫不將觀光屬性之專用鐵路納入。若未來氣候變遷調適入法時，研究團隊會通盤考量林鐵及糖鐵之特性。	同意
本所運輸安全組		
1. 研究團隊於報告中有強調防減災與調適之間的差異，但以簡報 P.20 的英國案例而言，許多措施仍偏向防減災範疇。請說明是否會切分兩者差異，提出更精進之調適措施，亦或是將防減災視為調適的一部分。	防減災與調適措施間具有交集，兩者主要差異在於調適措施係針對未來氣候變遷所額外規劃之措施，而防減災措施則是依據歷史或現況資料規劃之，本研究將會根據此準則辨別兩者差異。	同意
2. 鑑於臺鐵最近有被土石流淹沒之案例，植被不足可能會造成土石流災害，建議研究團隊可將植被納入危害範疇。	氣候變遷危害通常是指導因於氣候影響驅動因子（Climatic Impact-Driver, CID）之事件或趨勢，由於植被與 CID 較無明顯關聯，因此本研究將植被所造成之影響作為情境背景之一，納入風險評估。	同意
本所運輸經營及管理組		
針對調適策略大致上分為規劃或	1. 本計畫將於明後(114-115)年發	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
<p>興建階段之設計以及營運階段之應變兩個面向，針對兩者間之權衡，需透過更完整的風險與成本等量化資料來協助決策，爰期待本計畫未來能發展相關方法或工具，以協助鐵道單位進行規劃決策。另國內鐵道系統興建與營運階段多由不同單位負責，以捷運系統為例，規劃及興建階段係由地方政府(或捷運局)負責，而營運階段則為營運機構負責，針對上述 2 類調適策略，應於實務推動過程中建立相關溝通或參與機制，以達成共識。</p>	<p>展我國鐵道系統調適指引，提供鐵道系統各單位參採，並建議未來可另案辦理相關研究，發展氣候變遷風險評估相關支援工具，以供相關權責單位應用。</p> <p>2.鐵道系統的規劃建設及營運維護階段通常由不同單位負責，若在規劃建設階段，規劃建設單位能與營運維護單位建立溝通或參與機制，將有助於鐵道調適推進。因此，研究團隊希冀將研究過程中所蒐集之相關科研數據提供給規劃建設單位，作為鐵道調適作業之參考，即便營運維護單位未參與規劃建設，也能從中受益。</p>	
本所運輸能源及環境組		
<p>1.報告書 P.2-14 有關 UIC 將植被納入極端氣候危害項目，或相關文獻將植被列為推動 NbS 的障礙，主要係考量植被樹枝可能落在軌道上、擊中架空線設備、阻礙信號視野、阻礙平交道視線、阻礙工人避難所、擊中軌道車輛、阻礙檢查，或是落葉影響列車、阻塞排水等安全風險，亦或是植被可能遭受強風、高溫、增加叢林火災、蟲害等而變得脆弱等情事。建議團隊檢視前開情況是否可能發生於國內鐵道系統，再決定是否排除於本研究所定義之危害範疇。</p>	<p>本研究氣候變遷危害將參酌 IPCC AR6「氣候影響驅動因子(CID)」之界定方式，包含熱與冷、濕與乾、風、雪與冰等 CID 類型，並將植被作為情境/背景之一。例如在「強風暴導致植被倒落在軌道，所造成的鐵道營運安全風險」中，其危害之氣候影響驅動因子為強風暴，而植被倒落則可納入脆弱度中討論。</p>	同意
<p>2.報告書 P.5-2~5-8 有關我國鐵道系統調適架構圖示(圖 5.1)，請研究團隊就各生命週期階段須辦</p>	<p>1.鐵道系統各生命週期之調適流程大致相同，藉由現況及未來的風險評估結果，找到調適缺</p>	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
<p>理氣候變遷調適之事項，研議是否得整合於一個流程圖中之外，亦研議將環境部所擬《氣候變遷風險評估作業準則》(草案)納入整體調適架構之可行性，俾利提升後續研訂鐵道系統調適指引之可操作性。</p>	<p>口並擬定相應之調適選項，而各生命週期所適用之調適選項則有所差異。</p> <p>2.環境部所擬《氣候變遷風險評估作業準則》(草案)係基於我國國家氣候變遷調適架構，分為兩階段六構面，與本研究研擬之鐵道系統調適架構在基本原則和策略方向上可以相互對照。</p>	
<p>3.報告書 P.5-2 有關研究團隊所述之目標及保全對象部分，考量運輸系統的調適範疇，除包含系統本身之外，亦應涵蓋受危害影響時期或其空間分布可能的第三者(利害關係人)，建議研究團隊能於調適架構中研議納入之可能性。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>同意</p>
<p>4.報告書 P.5-3 有關危害、暴露度及脆弱度辨識之描述，雖摘錄《國家氣候變遷科學報告 2024: 現象、衝擊與調適》有關我國主要面臨之氣候壓力，惟建議研究團隊能再深入研析實際我國鐵道系統所遭遇之氣候壓力有哪些，以利後續盤點我國鐵道系統所面臨之調適缺口。</p>	<p>遵照辦理，本研究會考量我國鐵道系統曾遭遇之天氣及氣候危害的歷史事件，以便後續盤點重要危害議題及其調適缺口。</p>	<p>同意</p>
<p>5.報告書 P.5-4~5-5 研究團隊針對 5.2 氣候變遷調適融入既有評估流程中，建議於風險專章中納入氣候風險課題，檢視基礎設施及車輛設計標準是否能因應未來風險，另考量規劃設計階段財務計畫自足性亦為計畫通過與否關鍵，建議團隊可嘗試以臺鐵或高鐵為例，估算該等系統因氣候</p>	<p>1.氣候變遷預估的年期長(如：世紀中、世紀末)，實務上難將各種情境所面臨的成本與效益具體估量，因此關風險專章之作業方式，建議參採鐵道標竿機構作法，邀集利害相關者透過研討方式擬定方案並滾動檢討。</p> <p>2.欲蒐集氣候驅動之天氣危害造</p>	<p>同意</p>

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
<p>因素所造成的損失，以強化本計畫研究的正當性與必要性。</p>	<p>成的損失資料，需透過整體的機器設備與行政作業配合來達成，以英國 NR 為例，其在政府與鐵路安全及標準委員會（RSSB）協助，在 2019 年投入約 50 億臺幣來進行作業精進，以蒐集不同氣候危害所導致的延誤以及其損失的貨幣值。</p> <p>3.經與國內鐵道從業專家訪談，目前我國鐵道營運機構於延誤的統計上，多數是依票收損失或賠償金額來統計。</p>	
<p>6.報告書 P.5-14 有關 ISO 14090 系列標準敘述中，考量研究團隊已將 ISO 14092(2020) 氣候變遷調適-地方政府與組織的調適規劃要求和指導 (Adaptation to Climate Change - Requirements and Guidance on Adaptation Planning for Local Governments and Communities) 納入報告書中，為臻完整性，建議研究團隊亦將 ISO 14093(2022): 氣候變遷地方調適計畫融資機制-基於績效之氣候韌性補助-要求和指引 (Mechanism for financing local adaptation to climate change - Performance-based climate resilience grants - Requirements and guidelines) 納入。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>同意</p>
<p>7.報告書 P.6-1~6-3 研究團隊在 6.1 氣候變遷風險評估中，已敘明氣候變遷風險評估模型及氣候變遷情境設定，惟參酌 P.3-5~3-6 有關 TCCIP 之 2 階段調適架構，</p>	<p>本計畫規劃於期末階段，設計一國內鐵道系統調適案例，預計透過半定量的方式輔助說明風險評估及缺口辨識之作法。</p>	<p>同意</p>

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
似欠缺有關調適缺口之相關作法，建議研究團隊能再予補充，並以國內外案例方式輔助說明為妥。		
8.報告書 P.6-4 研究團隊於 6.2 調適選項中彙整規劃設計及營運維修階段調適選項，建議可評估各調適選項面對氣候衝擊效益及成本說明，以利後續各機關（構）實務操作參考。	回顧標竿機構案例多為調適選項說明，較缺乏量化效益及成本，研究團隊會持續蒐集相關資料，滾動更新調適選項彙整表之內容，以利鐵道相關機關（構）參採。	同意，請研究團隊持續蒐整國內外相關資料。
9.報告書 P.6-4~6-8 有關調適選項之闡述，宜與前節風險評估、調適缺口之步驟相扣合，如盤點在特定氣候壓力下對於特定之運輸系統產生衝擊而導致調適缺口，再針對其缺口研議及選擇後續之調適選項。建議研究團隊參酌 ISO 14090 系列標準進行鐵道系統之衝擊鏈分析，以利以系統性方式呈現本研究內容。	遵照辦理。	同意
10.目錄之少部分章節與頁次(例如目錄呈現 2.2.3 阿里山林業鐵路係在 P.2-34，惟本文實際內容卻無該章節)，以及部分文字有誤植(例如「橋梁」誤植為「橋樑」)，請研究團隊於期末報告時再予更正。	遵照辦理。	同意
主席結論		
1.地震及強降雨所引發之複合型災害備受關注，如果因地震的不可預測性而將其排除，外界恐難以接受，建議評估將地震作為情境之一納入考量。	遵照辦理。	同意
2.若可將氣候變遷調適效益量化，有助於規劃建設單位在計算經濟效益時，主動考量並評估採用	因現行氣候變遷風險量化評估較為困難，且鐵道建設之經濟效益評估係從社會整體福利觀點出發，不易	同意，請研究團隊持續蒐整

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
氣候變遷調適方案的效益。	將其納入目前經濟效益評估的架構之中。建議可在風險專章中討論氣候變遷議題，並於明後年的調適指引中說明氣候變遷對鐵道系統可能造成之損失，引導鐵道相關機關（構）針對各項氣候影響驅動因子進行評估，說明其風險評估結果及其採用的應對措施。	國內外之相應做法
3.有關本案研究成果，建議可投稿至運輸計劃季刊。	為確保本案在今年度能順利履約，研究團隊已將部分研究成果投稿至「2024年運輸年會暨學術論文國際研討會」。待後續研究完整性進一步提高後，再將研究成果投稿至《運輸計劃季刊》。	同意
4.請財團法人中興工程顧問社整理「審查意見處理情形表」，彙整審查會議各委員及與會單位研提之口頭及書面意見，並逐項說明回應辦理情形，並充分納入報告之修正。	遵照辦理。	同意
5.本計畫經徵詢審查委員意見，期中審查通過，請財團法人中興工程顧問社後續依本所出版品印製相關規定撰寫報告，並納入每月工作會議查核事項進行追蹤。	遵照辦理。	同意

交通部運輸研究所合作研究計畫

□期中■期末報告處理情形

計畫名稱：鐵道系統強化調適能力之探討(1/3)-機制與方法

執行廠商：財團法人中興工程顧問社

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
國立成功大學交通管理科學系暨電信管理研究所鄭永祥教授		
1.建議研究團隊在文獻蒐集時，考慮區分高鐵、臺鐵、捷運和輕軌等不同類型鐵路系統的特殊性及其各自的調適方向。	本案將於第二、三年分別發展城際鐵路與捷運輕軌之調適指引，研究團隊將持續蒐整相關文獻，研擬一套通案性的調適流程，同時考量各鐵路系統特殊性提出差異，以兼顧指引的通案性與各系統的差異性。	同意
2.就生命週期角度檢視，已在營運中的軌道系統與系統規劃設計初期的氣候風險不同，可考量怎樣提出建議會更有意義。	針對已營運的鐵路系統，由於路線通常不會大幅改線變動，故暴露度已既定，在面對氣候驅動的傷害下，需要透過提昇自身調適能力來降低系統之脆弱度。爰此，建議定期評估現況與未來風險的調適缺口，檢討現有防減災措施是否能因應未來氣候危害之衝擊，若可應繼續維持現況防減災措施，反之則需進一步擬定調適策略。	同意
3.建議研究團隊考慮將複合型災害（如豪大雨、土石流、強風等同時發生）納入風險評估和調適規劃中。	本計畫參考英國氣候風險與脆弱度評估工具（Climate Risk and Vulnerability Assessment, CRVA）之概念，將不同危害各視為一層因子，並對不同災害程度等量分配與標準化，最終將整體因子套疊整合成單一指標，以嘗試反映複合型災害的氣候風險評估。	同意
4.請說明調適架構之追蹤和回饋機制是如何運作，以及如何進行監測評估和修正。	為掌握調適選項之推動成效，建議可根據起初所設定之調適目標擬定相應評估指標，定期進行監測及評估，檢視調適行動是否達成原先設想之目標，同時將評估結果回饋至	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
	<p>下一個風險評估週期，作為調適計畫及行動方案修正之參考。由於未來氣候具高度不確定性，需藉由循環評估機制，滾動檢討調適計畫及行動方案之適切性，方能因應未來氣候變遷之衝擊。</p>	
<p>5.請說明風險評估架構選用 IPCC AR5/AR6 WG2、未採 WG3 之原因，以及危害暴露度和脆弱度的定義是否與國際接軌。</p>	<p>1.IPCC AR5/AR6 WG2 將氣候風險定義為「危害、暴露度、脆弱度」的函數，同時我國《氣候調適因應法》亦採相同之定義，實已與國際接軌。</p> <p>2.AR6 WG3 則是另將調適行動方案對風險降低的程度納入探討。</p>	<p>同意</p>
<p>6.簡報呈現之風險模板和衝擊鏈，請說明是否為同時進行，或為有順序性的關係。</p>	<p>氣候風險評估過程中，可能面臨數據資料不足情況，此時可擇一採用研究案例中提供之「TaiCCAT-風險模板」或「ISO14901-衝擊鏈」，透過腦力激盪方法的質性探討，研擬出適合之調適行動方案。</p>	<p>同意</p>
<p>7.關於成本效益分析，希望能嘗試了解其他國家是否也採用質性或半量化方式進行評估，以及其可靠性。</p>	<p>經回顧標竿機構文獻及協同列席環保署國家調適計畫推動會議，知悉欲對未來調適計畫進行成本效益評估非常困難，研究團隊知悉國際鐵路聯盟 UIC 在今 2024 年啟動 ECOV4R (Ecosystem Services Thinking and Science) 之三年期計畫，欲對自然為本解決方案 NbS 提出成本效益評估案例，將持續關注待其成果公佈後，本研究會納入回顧分享。</p>	<p>同意</p>
<p>8.建議研究團隊探討其他國家在推動氣候調適政策時，能嘗試了解其法規是否有要求提供科學研究資料。</p>	<p>綜觀鐵道標竿國家/機構於氣候調適發展方向及趨勢，有關氣候危害之相關科研資料，多由政府單位統籌資源與進行研析，並將成果提供給所需的機構繼續加值應用。</p>	<p>同意</p>

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
國立高雄科技大學土木工程系蘇育民助理教授		
1.此階段報告均有完成預期達成的研究目標，文獻回顧相當完整及清楚表達。	謝謝委員的肯定。	同意
2.高鐵、臺鐵、捷運、輕軌特性不一，同一鐵道系統內處理氣候變遷衝擊也會有「運/工/機/電」四個不同面向，未來可從上位通案性、並顧及「運/工/機/電」四個面向差異進行統整。	鐵道系統運作涵蓋運、工、機、電四個部門，面對氣候變遷的影響與應對方式會不同，研擬調適指引的原則會先採通案性的方向來發展，同時考量不同部門特性提出差異，來兼顧通案與差異，使機構可進行整體協調管理。	同意
交通部路政及道安司魏瑜專門委員		
1.近期鐵路北迴線和平至崇德段，逢颱風或豪大雨常有土石流情形，建議可納入下一期研究報告之調適案例。	研究團隊擬於本案第二年研擬城際鐵路調適指引過程中，嘗試以強降雨進行示範案例操作，以供相關機關（構）參考。	同意
2.鐵道系統增加韌性之機制與程序，會涉及設計標準、作業程序、相關法規，同時也會影響成本與預算，如何取得平衡為重要課題。	經回顧標竿機構文獻及協同列席環保署國家調適計畫推動會議，知悉調適相關成本效益評估不易執行。研究團隊知悉 UIC 將於今 2024 年欲對 NbS 提出成本效益評估案例，待其成果公布後，將納入本案回顧分享。	同意
3.報告書 P.5-2 之鐵道系統調適架構，其保全對象界定包含基礎設施、車輛系統及人員，其中人員部分包含過於廣泛，建議可聚焦於旅客及地區民眾。	考量鐵道系統受到氣候危害衝擊時，相關利害關係者皆可能受到波及，爰此，研究團隊與主辦組討論後，擬廣泛列舉可能受影響之利害關係者，提供鐵道系統相關機關（構）參考。	同意
4.報告書 P.5-3 於鐵道系統調適架構涉及到現況風險評估及未來風險評估，宜與調適架構能互相回饋分析調整。	遵照辦理。	同意
5.報告中圖 5-3 所提氣候影響驅動因子 CID 資料，請問是否已有資料庫。	報告中關於氣候驅動因子的風險評估類型判斷流程圖，該圖擬說明依資料的完整性，來選擇量化、半定	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
	量或者定性質化評估方式。	
6.報告書 P.5-4 之鐵道系統全生命週期，其中「報廢汰除」階段，請改採「重置」一詞來論述。	為兼顧忠實呈現文獻內容及我國慣用論述方式，本研究擬調整採「報廢汰除（含重置）」方式論述。	同意
臺中捷運股份有限公司朱來順總經理		
1.報告書 P.1-4 第一年期研擬組織之調適能力係以捷運系統為案例說明，後續可就軌道系統面臨之問題，如地震及豪雨造成崇德一和仁間產生的土石流課題來研議，亦符合第二階段重點。	本案第二年城際運輸調適指引研究中，研究團隊將嘗試以強降雨為例，進行示範案例操作，提供相關機關（構）參考。	同意
2.報告書 P.5-5 提及強化鐵道系統調適機制與全生命週期的構想，其中韌性愈強、成本就愈高，投入成本與效益面會有不同的考慮，是否有評估的準則能提供考慮。	回顧國外相關案例及協同列席環保署國家調適計畫推動會議，知悉各國案例多採定性、半定量的方式進行評估，成本效益評估實屬不易。研究團隊會持續關注 UIC 預計於今 2024 針對 NbS 所提出之成本效益評估案例，待其成果公布後，本研究將會納入回顧分享。	同意
3.本研究第 4 章回顧許多國家的調適案例，可否歸納出在我國訂定調適計畫時可能的方向或建議。	第 4 章著重回顧標竿案例的風險評估方法論及針對各氣候危害所採取之調適選項。為能掌握標竿國家發展趨勢，研究團隊於 2.3 節回顧鐵道標竿國家相關調適政策及研究之方向與趨勢，以供我國擬定調適計畫時參採。	同意
交通部中央氣象署		
1.報告書 P.2-1「氣候變遷係指地球氣候與溫度的長期變化，氣候變遷主要是人類燃燒化石燃料排放溫室氣體（特別是二氧化碳及甲烷）以及森林砍伐所造成。溫室氣體吸收地球因陽光變暖後輻射的部分熱量，大量的溫室氣體會在地球的低層大氣中捕獲更多的熱量(後略)」建議修改為	遵照辦理。	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
<p>「氣候變遷係指人類造成的氣候異常，尤其是燃燒化石燃料排放溫室氣體（特別是二氧化碳及甲烷）以及森林砍伐等行為。溫室氣體會吸收地球外逸至太空的紅外線輻射能量，大量的溫室氣體會在地球的低層大氣中捕獲更多的熱量(後略)」</p>		
<p>2.報告書 P.2-45 及 P.2-48 部分溫度沒加上單位，請再加上如攝氏 50°C 之單位。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>同意</p>
<p>交通部鐵道局</p>		
<p>1.期末報告將各國（特別是英國）相關法規及調適的機制與方法收集詳細完整，對本局業務有相當的幫助。</p>	<p>謝謝委員的肯定。</p>	<p>同意</p>
<p>2.本局 2022 年夏季派員前往倫敦研習，恰遇當地有史以來最高溫（40°C 以上），搭乘鐵路等各種軌道系統出現很多乘客不適狀況，車站除緊急提供免費杯水、瓶裝水等，也不斷廣播請乘客注意喝水，大車站如備戰狀況，乘客也不顧形象，穿著短少，很多千奇百怪情形因此上報，但普遍都肯定相關單位處理得宜，不知中興社有否收集到相關營運期間氣候調適之處理案件（含極大雨）。</p>	<p>謝謝委員提供資訊，本研究回顧各國相關調適文獻，彙整規劃設計階段及營運維修階段中，針對各氣候危害所採取之調適選項，如表 6-1 所示，以供相關機關（構）擬定調適行動時之參考。</p>	<p>同意</p>
<p>3.英國倫敦的軌道相關調適資料，於倫敦大學學院 UCL 有很多可以借鏡，建議第 2 階段時中興社可洽 UCL 土木部門 Taku 教授研商。</p>	<p>謝謝委員提供資訊。</p>	<p>同意</p>
<p>3.臺灣未來受到高溫、強降雨等影響將成為常態，且頻率應更高，</p>	<p>本計畫參考我國「國家調適應用情境」，建議應評估全球暖化程度</p>	<p>同意</p>

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
而臺灣平均溫度增加超過 2°C 的機率頗大，建議是否在下階段增加一章節來討論這種情境。	(Global Warming Level, GWL) 中 GWL 1.5°C 及 GWL 2°C 情境下之風險，並於報告書 6.3 節，透過 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台套疊 GWL 1.5°C 及 GWL 2°C 的「危害-脆弱度」圖層資料，分析不同升溫情境之淹水風險。	
國營臺灣鐵路股份有限公司		
臺鐵公司現況在土石流防治工作上較為棘手，建議後續能增加相關防治措施的研究與規劃。	研究團隊擬於第二年(114 年)調適指引中，以強降雨進行示範案例操作，提供相關機關(構)參考。	同意
國家災害防救科技中心		
1. 團隊蒐集及回顧相當豐富的國內外資料，並且有實用的整理與說明，可作為第二年度進一步規劃操作指引時的基礎。	謝謝委員的肯定。	同意
2. 建議報告書第二章適度補充日本 JICA(國際協力機構)氣候風險評估指引內容「Guidance on Climate Risk Assessment and Adaptation measures consideration(2024)」，該手冊範例皆以交通部門作為示範說明。	遵照辦理，研究團隊擬於報告書第四章補充 JICA 氣候風險評估指引中的風險評估方法及相關調適案例。	同意
3. 報告書 P.2-60 德國 2023 年通過「氣候調適法案」，請確認「聯邦氣候調適法」是否仍為草案階段(最新修改日期是否為 2023 年 11 月 10 日)。	遵照辦理。	同意
4. 報告書 P.2-70 中日本在調適治理上應是區分中央、地方及跨域治理 3 個面向，由「國家環境研究所」、「區域氣候變遷調適研究中心」及「氣候變遷調適跨域協議委員會」等，由上而下進行科研技術提供、氣候變遷衝擊評估與協調等事項。報告中對「氣候	遵照辦理。	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
變遷調適跨域協議委員會」的角色未提及，建議可補充說明。(此委員會是由地方政府、企業、民間團體等組成，目的為共同協商和推動區域的調適工作。)		
5.目前環境部正研擬「氣候變遷風險評估作業準則」，預計今(113)年底預告、明(114)年初公告，此研究計畫後續課題為研擬鐵道調適指引，建議可適度納入參考。	謝謝委員提供資訊，本研究於本案第二、三年研擬調適指引時，將會參酌「氣候變遷風險評估作業準則」，以利本研究研擬之鐵道系統調適指引能與我國各領域對接。	同意
6.報告書附錄 6 中，團隊針對 112 年維生基礎設施領域調適成果進行彙整，隨著氣候變遷風險評估與調適為長期且持續性工作，建議交通部後續可就上位的角度進行資源盤點，包括：瞭解既有風險議題、調適作業與處理風險情形、調適行動所需資源。	謝謝委員建議。 1.回顧標竿國家案例，英國及紐西蘭規劃每 5 與 6 年進行全國性之氣候風險評估，權責機關或營運機構亦須定期提送實施成果報告，確保行動方案成效，我國於調適行動計畫與成果彙整作法亦採相同機制辦理。 2.本計畫建議能由中央相關單位進行基礎科學研究並分享各類氣候風險資料，簡化營運機構取得資料的流程，協助營運機構能進行氣候風險評估作業。	同意
新北大眾捷運股份有限公司		
新北捷運今年受到地震影響衝擊甚大，建議研究團隊可參考日本等地震頻繁地區的做法，研究探討地震風險是否應該納入氣候風險評估體系中。	由於地震並非氣候驅動因子，本研究擬將地震作為脆弱度因子，納入氣候變遷風險評估中。	同意
臺中捷運股份有限公司		
1.國家氣候變遷調適行動計畫及災害防救基本計畫皆有指出臺灣氣候變遷的衝擊面向包含旱、澇、土、熱、疫（登革熱、新興傳染病），建議可將疫的部分於	「災害防救基本計畫」與「國家氣候變遷調適行動計畫」係從整體領域檢視調適作為，並由不同權責單位來協助彙整，例如疫情防治由衛福部統籌，鐵道系統等維生基礎設	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
報告內著墨。	施由交通部負責，本計畫於鐵道系統調適係採與鐵道資產管理一致之研析範圍，故未將疫情納入，請委員諒察。	
2.報告書 P.2-11 中「評估樂觀與悲觀情情境各氣候危害所帶來的影響程度。」多了一個「情」字，建議修正。	遵照辦理。	同意
3.報告書 P.2-19 之表 2-11 趨勢欄位未呈現資訊，建議修正。	依據原文獻內容，表 2-11 趨勢係指各氣候主因素（含溫度、降雨、風、植被）之變化趨勢，惟雷擊和雷爆之次因素與趨勢未有說明。該表為忠實呈現原作內容，故未調整內容，請委員諒察。	同意
4.報告書 P.2-20 之表 2-12「2024 年 6 月：受到連日豪雨影響，土石」說明不完整，建議修正。	遵照辦理。	同意
本所運輸能源及環境組		
1.報告書 P.1-8 研究團隊盤點我國鐵道系統調適方法現況做為，相關內容似彙整於 2.2 節，是否誤植彙整於 2.3 節再請確認。	遵照辦理。	同意
2.報告書第四章彙整英國鐵路、2 號高速鐵路(HS2)、香港鐵路公司及澳洲墨爾本鐵路極端氣候事件損失成本，建議研究團隊嘗試了解極端氣候事件的損失成本評估方法，以利後續各機關(構)實務操作參考，並估算因氣候變遷因素所造成損失。	回顧相關標竿文獻，其多展示最終結果，並未提供有損失成本評估方法及其操作過程，後續將持續蒐集可取得之公開文獻，納入本案回顧分享。	同意
3.第 5.1 節有關我國鐵道系統調適架構部分，研究團隊建議於既有風險管理之架構下，新增氣候變遷調適之風險評估，並於規劃設計、施工興建，以及營運階段進行相關調適評估作業。考量規劃	遵照辦理。	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
設計與營運階段之氣候變遷調適保全對象應有所不同，建議研究團隊於 5.2 節之各階段，能再補充各階段所需重視之保全對象。		
4.P.6-11 第 6.3 節調適案例中，臺北捷運系統防洪設計標準資料高程係以基隆外海平均海平面為基準測得高程加 100 公尺，是否應為高程加 100 公分再請確認。	海平面基準加上 100 公尺為工程設計中的約定，其目的是為了避免高程出現負值，並提供易於管理的高度基準系統。	同意
5.第 6.1 節有關氣候風險評估部分，團隊以 IPCC AR5 及 AR6 WG2 之氣候變遷風險評估模型做為風險之定義，其因子包含危害、暴露度及脆弱度，與我國「氣候變遷因應法」相符。研究團隊於 P.6-2 針對危害界定方法已有敘明，惟似遺漏對於暴露度及脆弱度之界定。針對我國鐵道系統有關「暴露度」及「脆弱度」常用之項目以及嚴重程度之界定，建議研究團隊能再予補充。	遵照辦理。	同意
6.第 7.3 節建議部分，研究團隊考量未來氣候情境相關圖資之可取得性，爰建議以高溫風險做為調適指引之範例。考量強降雨乃為國內運輸系統比較常見氣候因子，建議可部分採用現有圖資，進行示範案例操作，以利後續各機關(構)參考應用。	研究團隊規劃於本案第二年城際鐵路調適指引中，應用現有圖資及相關資料，以高溫及強降雨作為示範案例操作，以供我國鐵道相關機關(構)參考。	同意
7.行政院國家永續發展會及近期相關會議上，均要求各部會要全面檢討以自然為本之解決方案，並以科研報告做為後續風險評估之依據。針對前揭要求，請研	回顧相關文獻，知悉以自然為本之解決方案(NbS)在實務應用上仍面臨許多挑戰，包含額外維護成本增加、缺乏成本效益分析、土地利用限制等。研究團隊會持續關注 UIC	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
研究團隊於本計畫之相關機制及方法上，再予著墨。	預計於今 2024 針對 NbS 所提出之成本效益評估案例，待其成果公布後，納入本案回顧分享。	
本所林繼國所長		
研究團隊成員成大魏健宏教授提及臺鐵運、工、機、電等不同部門的整合議題，本所運安組過去曾就臺鐵不同單位間之安全管理系統(SMS)，研提包含規劃、執行、查核與行動(PDCA)等程序，並針對評估風險、檢測風險、執行等步驟，研擬一套通案性的作業流程，對於氣候變遷調適而言，應也是一樣的道理。針對本所前揭之相關研究成果，可提供研究團隊參考。	謝謝主席提供資訊。針對本案第二年期城際鐵路調適指引，研究團隊擬從通案性的方向來發展，同時考量各部門特性提出差異，以兼顧通案與差異。	同意
主席結論		
1.研究團隊於第 7.3 節係建議以高溫風險做為調適指引之範例，惟考量國內鐵道系統比較常見氣候因子係屬強降雨，請研究團隊可參酌現有圖資，後續以強降雨及高溫進行示範案例操作，以利各機關（構）參考應用	研究團隊規劃於本案第二年城際鐵路調適指引中，應用現有圖資及相關資料，以高溫及強降雨作為示範案例操作，以供我國鐵道相關機關（構）參考。	同意
2.研究團隊於第四章彙整英國鐵路、2 號高速鐵路(HS2)、香港鐵路公司及澳洲墨爾本鐵路極端氣候事件損失成本，請研究團隊研析極端氣候事件的損失成本評估方法，以利後續各鐵道系統機關（構）實務操作參考，並估算因氣候變遷因素所造成損失。	回顧相關標竿文獻，其多展示最終結果，並未提供有損失成本評估方法及其操作過程，後續將持續蒐集可取得之公開文獻，納入本案回顧分享。	同意
3.交通部魏瑜專門委員所提北迴線和平至崇德段之意見，目前該路段已面臨氣候災害，且發生頻率與嚴重性風險愈來愈高。短期	研究團隊彙整英國第二條高速鐵路（High Speed 2, HS2）調適案例，並應用 Dr.A 氣候變遷災害風險調適平台之坡地風險圖資進行套疊，以	同意

參與審查人員及其所提之意見	合作研究單位回覆及處理情形	主辦單位 審查意見
<p>雖可進行局部災害防治，但長期仍需進行改線的評估。因應北迴線和平至崇德段未來改線的需求，請研究團隊提早於今年研提規劃設計階段強化調適能力或類指引的改善建議，以提供鐵道局與臺鐵公司及早日因應與參考。</p>	<p>供臺鐵北迴線改線參考。相關資料已於 113 年 12 月 5 日請本案聯絡窗口協助轉寄給魏專門委員參考。</p>	
<p>4. 審查會議各委員及與會單位研提之口頭及書面意見，請財團法人中興工程顧問社整理「審查意見處理情形表」，且逐項說明回應辦理情形，並納入報告之修正。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>同意</p>
<p>5. 本計畫經徵詢審查委員意見，期末審查原則通過，請財團法人中興工程顧問社於 113 年 12 月 20 日（五）以前提送期末報告修正定稿。</p>	<p>遵照辦理。</p>	<p>同意</p>

附錄三 成果海報

鐵道系統強化調適能力之探討(1/3)－機制與方法

財團法人中興工程顧問社 交通部運輸研究所

緣起

鐵道系統為我國的關鍵基礎設施之一，其特性為具高沉沒成本、完工後不易大幅調整路線，需要以長期及永續角度進行整體性規劃與維護，在面對氣候變遷（Climate Change）與極端天氣（Extreme Weather）的壓力下，鐵道系統的挑戰不僅是在正常天候中維持正常營運，更要在面對極端氣候的條件下增加其韌性，使其在受異常天氣衝擊後，能迅速恢復並提供安全、可靠且有效率的服務。

鐵道標竿國家已普遍採系統性方法來強化其面對氣候變遷風險之系統韌性，透過氣候風險評估找出極端氣候對鐵道系統的主要危害、潛在衝擊與因應對策，以80/20法則確認調適方案的優先順序，進而執行適宜之調適策略與行動方案來獲得良好的成效。鑒於氣候變遷所造成之衝擊日益嚴峻，為協助提升國內鐵道系統之韌性，爰此辦理本研究。

氣候變遷與調適概述

減緩 Mitigation
旨在降低溫室氣體排放

調適 Adaptation
應用科學推估資料 評估未來風險

減災 Disaster Risk Reduction
基於歷史、現況資料 評估現況風險

氣候變遷對鐵道系統之衝擊

主分類	次分類	對鐵道系統的衝擊/影響
熱&冷	平均空氣溫度	導致產生使接線變型、溫度增加導致接觸網含水量增加、材料劣化
	極端熱浪	軌軌、排阻、基礎設施結構熱脹、機車車載異常、乘客舒適度降低、耗電增加、列車運轉限制/中斷、員工身體不適、野火、電車維修延誤及停滯
	寒流 霜凍	員工身體不適、結冰/斷軌 隧道結冰、軌裂/斷軌、電車輪及號誌設備損壞
濕&乾	豪大雨及洪水	燃氣/廢道/橋樑被沖刷、軌道/橋樑/建築物/隧道沖水、號誌/電力/電子設備設施故障、列車運轉限制/中斷、架木崩倒、雷擊斷軌
	土石流	土石流、邊坡崩落、號誌/電力/電子設備設施故障、列車運轉限制/中斷、架木崩倒
風	氣象/氣候乾旱	邊坡崩塌、軌道斷位、電車線支撐桿斷位
	強風颶風	列車運轉限制/中斷、架木崩倒/結構損壞/軌道斷位、人員傷亡、號誌/電力/電子設備設施故障、架空線網位影響集電弓運作、血吹強風侵入軌道包絡線、列車脫軌斷軌
	熱帶氣旋	基礎設施損壞、列車運轉限制/中斷、架木崩倒/結構損壞/軌道斷位、號誌/電力/電子設備設施故障、架空線網位影響集電弓運作、風吹強風侵入軌道包絡線、列車脫軌斷軌
	強降水和冰暴	土石流、列車運轉限制/中斷、號誌設備損壞、架空線下垂/斷損、集電弓接觸不良、軌道積雪、車輪打滑、隧道結冰、員工和旅客滑倒
雪&冰	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/橋樑/建築物淹水、基礎設施損壞、結構劣化
	沿海洪水	軌道/橋樑/建築物淹水、基礎設施損壞
	沿海侵蝕	基礎設施損壞、列車中斷、軌軌穩定性降低使列車運轉限制/中斷

氣候變遷風險成因因子&氣候變遷情境

▲ 源自IPCC AR5，我國《氣候變遷因應法》第3條也明確將氣候變遷風險由危害、暴露度及脆弱度組成

全球暖化程度固定升溫情境 Global Warming Level, GWL

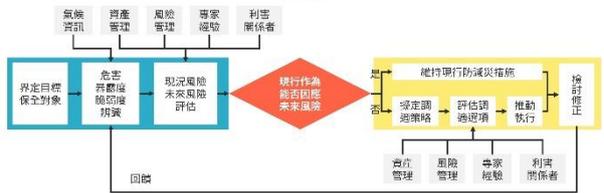
- 4°C：減碳成效不彰下，世紀末可能之情況
- 3°C
- 2°C：可能在2050年前達到
- 1.5°C：可能在2030年前達到
- 0°C：以工業革命前(1850-1900)為基準

國際氣候調適&鐵道標竿國家重要里程碑



鐵道系統強化調適能力機制與方法

機制



point! 01 將氣候變遷風險課題融入鐵道系統全生命週期

point! 02 融入鐵道資產管理、安全管理系統 全面提升鐵路系統調適能力

point! 03 鼓勵主辦機關或營運機構 自主提報揭露適當的調適資訊

方法

以臺北捷運為例

- 關鍵議題：車站內機電設備因車站出入口受水淹侵入車站而毀損之風險
- 保護對象：車站內機電設備
- 危害：豪大雨及洪水

Diagram illustrating the risk assessment for Taipei Metro stations, showing the flow from 'Hazard' (Heavy rain and flooding) through 'Exposure' and 'Vulnerability' to 'Risk' (Damage to station equipment due to water ingress at entrances).



▼ 本研究彙整這些標竿案例所規劃之具體事項，提供鐵道系統相關機關(構)擬定行動方案參考

危害	對鐵道系統之衝擊	生命週期	營運維修階段
豪大雨及洪水	軌道/機電/建築物淹水	提高隧道及地下車站的排水設計標準 提高車站出入口/隧道地下道/通風管井排風口/管線進出站管接頭接合之防滲設計標準 使用綠色基礎設施來轉移增加滲透	使用移動屏障防止水進入隧道和地下車站 提高排水設施的維護頻率、排水管的耐斷工程 納入運轉維護監測(RCM) 開發車輛調度判斷支援系統、制定車輛疏散計畫
豪大雨及洪水、土石流	號誌/電力/電子設備設施故障	提高設備設計標準 提高設計高程	部署移動式電源供應機提供備援 制定電力中斷的緊急應變計畫 在易淹水區外高地增設保護電子設備、電力/電子設備架高

結論與建議

- 結論**
- 鐵道標竿國家普遍發展氣候變遷調適機制與方法，多採質性分析或半定量評估方式，找出調適缺口、擬定適宜調適方案
 - 國內鐵道系統普遍聚焦於防減災，調適方面則處於剛起步階段
 - 研擬我國鐵道系統強化調適能力之機制與方法
 - 氣候風險模型採「危害、暴露度、脆弱度」之函數，應至少評估GWL1.5°C及2°C情境
 - 在既有鐵道系統全生命週期流程中，融入氣候變遷課題
 - 依據氣候危害及其對鐵道系統之衝擊類型，分類統整各國調適選項
 - 以捷運站出入口受到水淹侵入之風險，進行示範案例操作
- 建議**
- 翌年將以高溫、坡地風險作為調適指引之範例
 - 持續透過本計畫推廣調適概念
 - 繼續蒐集國際標竿案例並研擬鐵路系統調適指引
 - 待發展氣候變遷風險因子評估原則規範、支援文件及工具

附錄四 計畫簡報



交通部運輸研究所
Institute of Transportation, MOTC

鐵道系統 強化調適能力之探討(1/3)-機制與方法

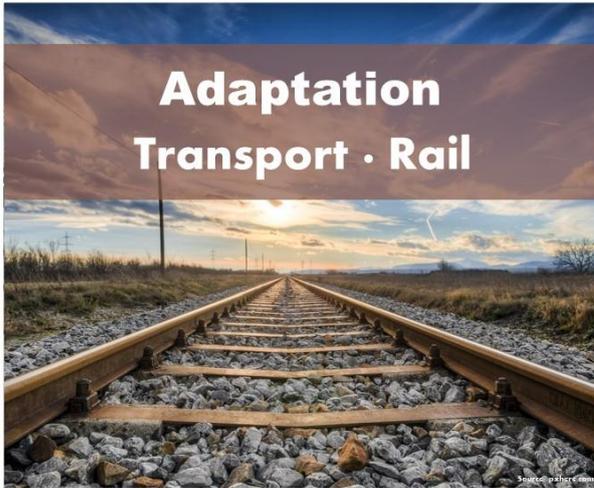


財團法人 中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

簡報大綱

- 壹 計畫背景&期中意見回應
- 貳 氣候危害因子與風險評估
- 參 鐵道系統調適架構與標竿案例
- 肆 鐵道系統調適機制與方法
- 伍 結論與建議





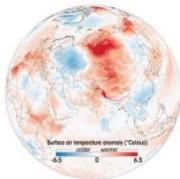
Adaptation Transport · Rail

Part 1 計畫背景

- 1-1 計畫背景概述
- 1-2 六何分析思維
- 1-3 全程計畫概要
- 1-4 當年研究流程

1-1 計畫背景概述 (報告 1.1 節)

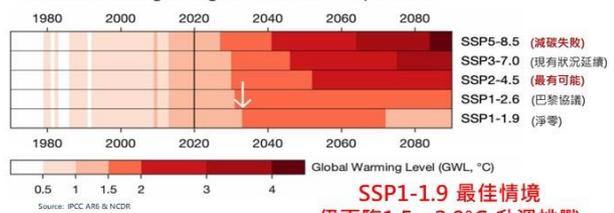
▼ 氣候變遷



氣候變遷對策因應



Assessed changes in global surface temperature

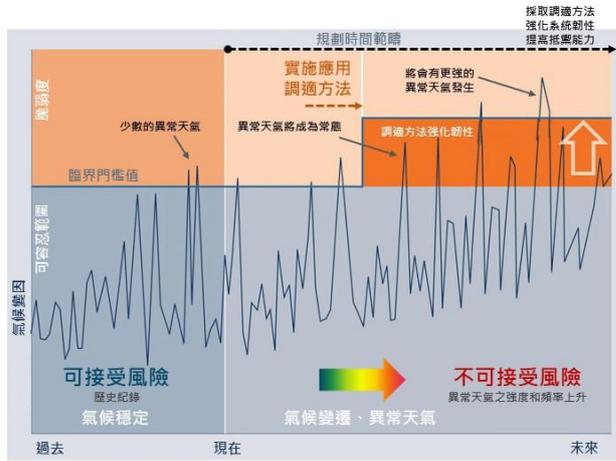


SSP1-1.9 最佳情境
仍面臨 1.5~2.0°C 升溫挑戰

▼ 鐵道系統衝擊案例



1-1 計畫背景概述 (報告 1.1 節)

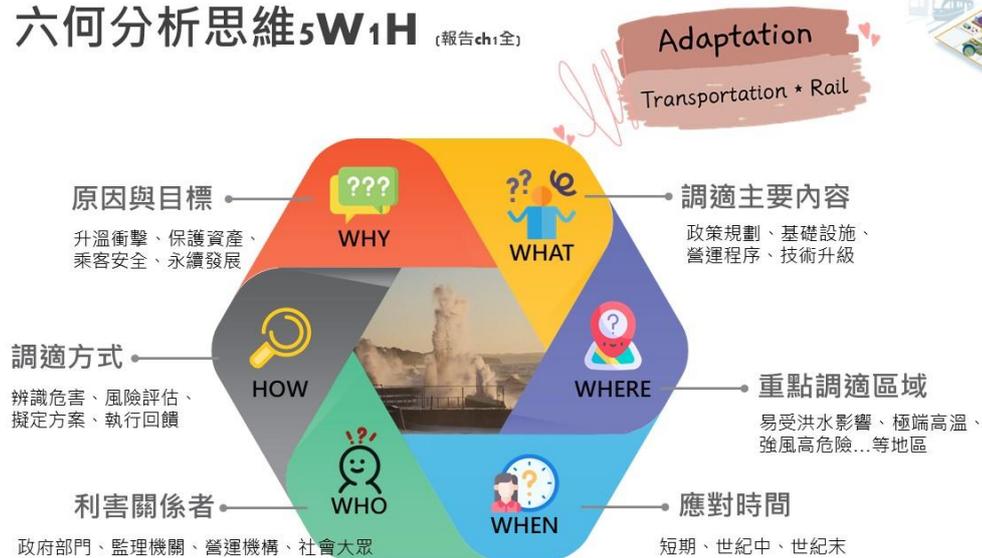


UK Climate Impact Programme (UKCIP), 2003 & Network Rail (NR), 2021



Palin et al., 2021

1-2 六何分析思維5W1H (報告 ch1 全)



1-3 全程計畫概要 (報告1.2節)



第一年期 (2024)



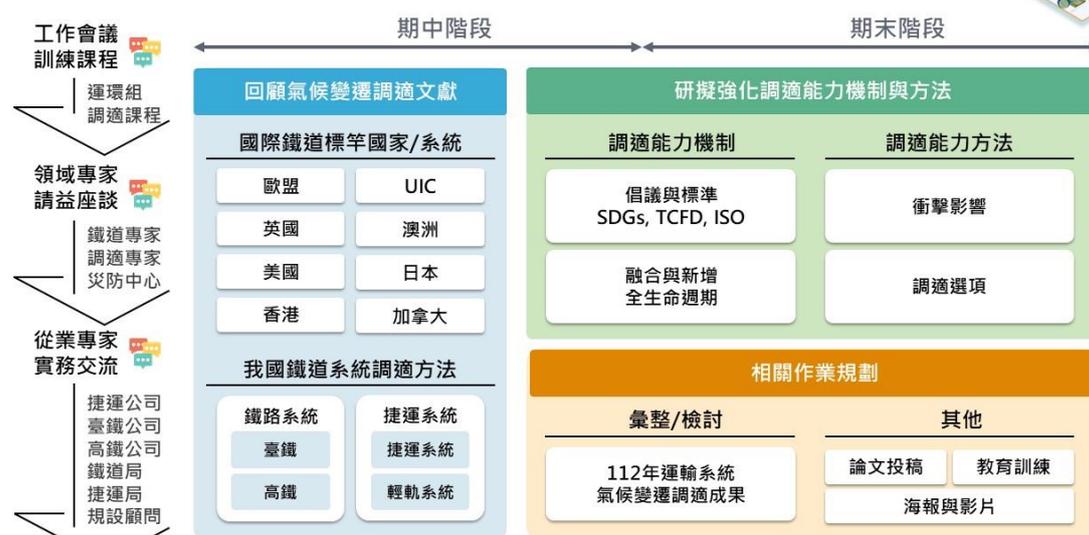
第二年期 (2025)

第三年期 (2026)

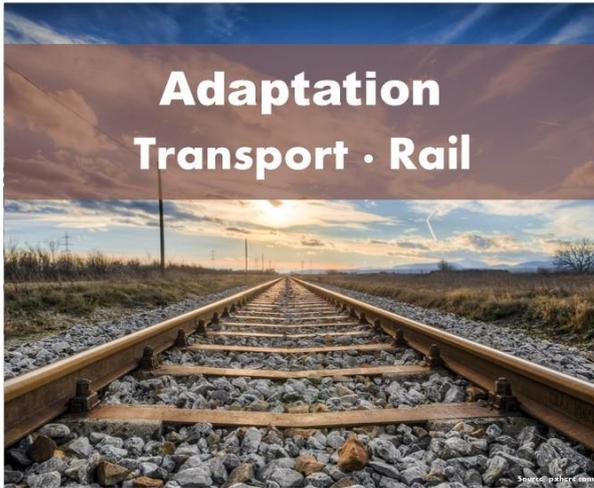


7

1-4 當年研究流程 (報告1.6節)



8



Part2 氣候危害因子與 風險模型

- 2-1 氣候變遷驅動因子
- 2-2 氣候變遷對鐵道系統的衝擊
- 2-3 氣候風險組成因子
- 2-4 氣候風險評估

2-1 氣候變遷驅動因子

(報告 2.1 節)



▼陸地相關的氣候影響驅動因子 (Climatic Impact-Drivers, CIDs)

主分類	次分類	主分類	次分類
熱&冷	平均空氣溫度	雪&冰	雪、冰川及冰蓋
	極端熱浪		多年凍土
	寒流		湖冰、河冰及海冰
	霜凍		強降雪和冰暴
濕&乾	平均降水量	冰雹	
	河川洪水	雪崩	
	豪大雨及洪水	相對海平面	
	土石流	沿海洪水	
	氣象/氣候乾旱	沿海侵蝕	
	水文乾旱	海洋熱浪	
	農業和生態乾旱	海洋酸度	
林火天氣	空氣汙染		
風	平均風速	其他	地表大氣二氧化碳
	強風暴		地表輻射
	熱帶氣旋		
	沙塵暴		

source: IPCC AR6 WG1

2-2 氣候變遷對鐵道系統的衝擊 (報告2.1.1節)



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
濕&乾 	豪大雨及洪水	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

11

2-2 氣候變遷對鐵道系統的衝擊 (報告2.1.1節)



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

考量台灣地理環境及鐵道系統特性- 將 **地震**、**植被** 作為**脆弱度**因子納入風險評估

12

2-3 氣候風險組成因子 (報告2.1.2節)



2-4 氣候風險評估 (報告2.1.2節)

■ 風險定義

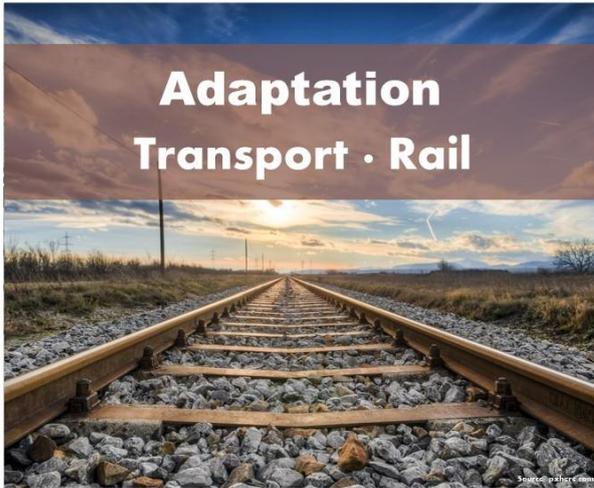
- 為了規劃及確定管理手段以降低風險至所設定的損傷目標或達到社會廣泛可接受的風險程度

■ 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**」

風險定義	內容說明
風險 = 概率 × 後果	風險是概率和後果的乘積，後果：潛在的財富損失
風險 = H × C × E	H：自然危害度，E：在風險中的要素，C：後果
$R_t = R_s \times E = (H \times V) \times E$ $R_t = H \times V$	R_s ：特定風險，H：危害度，V：脆弱度， R_t ：總風險，E：在風險中的要素
風險 = 危害度 × 脆弱度	風險是危害度和脆弱度的產物
$R(DI) = P(H) \times P(S H) \times P(T S) \times P(L T)$	(DI)：個人風險，P(H)：危害度，P(S H)：空間影響的概率，P(T S)：時間影響的概率，P(L T)：個人生活損失的概率
$R_t = \sum (R_s \times E) = \sum (H \times V \times E)$	R_t ：總風險， R_s ：具體風險，V：脆弱度，E：在風險中的要素
$Risk = E \times H \times V$	E：在危險中的元素；H：自然災害事件的危害，V：脆弱度
風險 = (危害度 × 脆弱度) / 災害管理	處於危害之中的要素與災害管理作用是相反
$R(PD) = P(H) \times P(S H) \times V(P S) \times E$	R(PD)：特定風險(財產)，P(H)：危害度，P(S H)：滑坡影響財產的概率，V(P S)：脆弱度，E：財產價值
$R_s = P(Hi) \times \sum (E \times V \times Ex)$	
$R_t = \sum R_s$ (Landslide events 1, ..., n)	R_s ：特定風險， R_t ：總風險，P(Hi)：特定滑坡程度的危害(Hi)，E：有風險元素的總價值，V：脆弱度，Ex：暴露度
$Risk = H \times E \times V$	
$Risk = H \times V \times \text{Amount}$	H：危害度，E：暴露度，V：脆弱度，Amount：在風險的要素
$Risk = (H \times V) / \text{Coping Capacity}$	H：危害度，V：脆弱度，Coping Capacity：減少災害風險的因應能力程度
$Risk = (H \times E \times V) / \text{Capacity}$	H：危害度，E：暴露度，V：脆弱度，Capacity：(軟+硬對策)/2
$Risk = (H \times E \times V)$	H：自然危害度，E：暴露度，V：脆弱度，(用於土石流)
$Risk = (H, E, V)$	H：自然危害度，E：暴露度，V：脆弱度
$Risk = (H, E, S)$	H：自然危害度，E：暴露度，S：敏感度

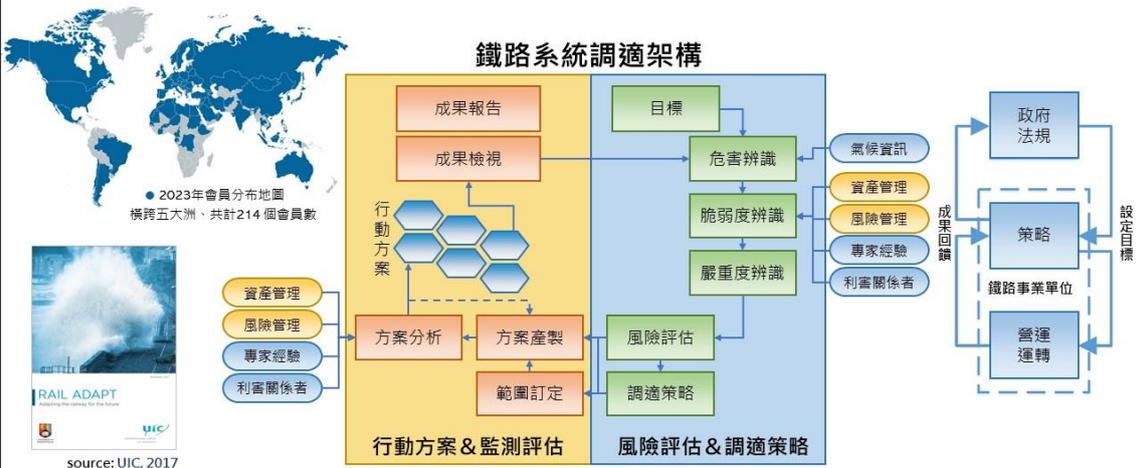
source: 減災與氣候變遷調適在區域治理上之融合研究—以坡地災害為例, 何謙余, 2020



Part3 鐵道系統調適架構 與標竿案例

- 3-1 鐵道系統調適架構研擬
- 3-2 鐵道標竿系統調適案例
- 3-3 自然為本解決方案Nbs
- 2-3 氣候風險組成因子
- 2-4 氣候風險評估

3-1 調適架構-UIC Rail Adapt (報告3.2節)



3-1 調適架構-ISO14090系列規範 (報告3.1節)



3-1 調適架構-彙整 (報告3.4節)



步驟	UIC Rail Adapt	ISO 14090	TCFD	TCCIP 國家氣候變遷調適架構	CCA6Steps Tung et al., 2019	NR WRCCA
界定範疇	目標	先期規劃	治理策略	界定範疇	界定問題與目標	界定範疇
風險評估	辨識危害/脆弱度/嚴重度 風險評估	評估氣候變遷衝擊與機會	風險管理	現況風險 未來風險	評估現況氣候風險 評估未來氣候風險	辨識脆弱度與機會 建立風險
研擬調適選項	調適策略 範圍訂定 方案產製 方案分析	調適規劃	指標和目標	綜整決策	界定氣候調適選項 規劃氣候調適路徑 監測修正氣候調適路徑	設定要求 發展選項 計畫設計
實施調適選項	行動方案	推動執行		推動執行	—	設計執行
追蹤及回饋執行成效	成果檢視 成果報告	監測與評估 報告與交流		檢討修正	—	營運監控審查

3-2 鐵道系統調適案例-紐西蘭 NCCRA (報告 4.1.7節)

■ 建設氣候風險

- 採半定量計算調適分數與風險排序

建設 Building		風險排序 高→低	
風險		評分	
Building 風險1 因降雨、溫度、乾旱、極端天氣事件和海平面持續上升的變化，造成飲用水供應風險	紧迫性	93	
	Now	重大	
	2050	極端	
	2100	極端	
Building 風險2 因極端天氣事件、乾旱、火災和海平面持續上升，對建築物造成風險	紧迫性	90	
	Now	重大	
	2050	極端	
	2100	極端	



▼ 氣候風險與調適計畫-PDCA滾動更新



優先處理氣候風險：「自然環境、居民、經濟、建設、治理」五大領域

▼ 探討暴露度、敏感度、調適能力

B2 風險-極端天氣對建築之風險：紧迫性評估表			
紧迫性類型	評分(0-100)	權重	行動說明
More action needed 採取更多行動	60	最高 / 4	當前紧迫風險，影響沿海和洪水易發地區的建築物，會隨時間推移而增加，需各級政府採取緊急、聯合和有效的應對措施
Research priority 優先研究	40	次高 / 3	需對危害有更多的了解，包括全國一致的洪水處理方法和相關的暴露度評估
Sustain current action 維持當前行動	0	中等 / 2	目前行動足以應對未來五年的火災和極端天氣事件
Watching brief 持續關注	0	最低 / 1	-
調適紧迫性(加權平均)	90		評估信心 高度一致性、中等信心
結果	Now 重大		2050 極端 2100 極端

Source: National Adaptation Plan, 2022

3-2 鐵道系統調適案例-澳洲 METRONET (報告 4.1.6節)

■ 氣候風險評估與調適

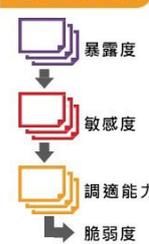
- 依「暴露度、敏感度、調適能力」進行半定量脆弱度評估

■ METRONET 應用氣候變遷網路脆弱度與風險框架



採AR4定義，由暴露度、敏感度、調適能力組成

空間分析與評估



嚴重程度	嚴重程度				
	Negligible	Minor	Moderate	Major	
Rare	L	L	M	M	
Unlikely	L	M	M	H	
Possible	L	M	H	H	
Likely	L	M	H	H	
Almost certain	M	H	H	E	

Source: Sustainability - Climate Change, 2017

3-2 鐵道系統調適案例-日本 JICA (附錄2 & 附錄7)



- 日本國際協力機構 Japan International Cooperation Agency, JICA
 - 依 IPCC-AR5 & AR6 採半定量氣候風險評估



source: JICA Climate-FIT (Adaptation), 2024

	氣候危害						脆弱度	氣候風險	可能之調適選項	與聯合國永續發展目標SDGs 相符對照
	H1 海平面上升	H2 強風	H3 極高溫	H4 洪水	H5 強降雨	H6 低日照				
Current frequency	+	+	-	++	+	-				
Future	↗	↗	↘	↗	↗	↗				
暴露度	E1 Irrigation intake facilities	2	1	1	3	1			(9) 調適方法	
	E2 Channel	2	1	2	3	3				
	E3 Irrigated farmland	3	3	1	3	3	Sensitivity, ability to respond	risk	adaptation measure	3 - 6
	E4 Storage warehouse	1	2	1	3	3				
	E5 Transportation Road	1	2	1	3	2				(10) 扣合永續發展目標
	E6 Vehicle	2	1	1	3	3				

(1) 氣候驅動危害因子 (2) 危害-現況頻率趨勢 (3) 暴露度-現況設施 (4) 評估危害之衝擊 (5) 危害-未來頻率趨勢 (6) 圈選衝擊最高者 (7) 脆弱度分析 (8) 說明氣候風險 (9) 調適方法 (10) 扣合永續發展目標

3-2 鐵道系統調適案例-美國 LA Metro (報告 4.1.6 節)



- 氣候風險-半定量評估
 - 採「脆弱度x關鍵度」進行半定量氣候風險評估

指標	評估內容	分數
預期高溫增加之天數	2050年會多出32個極高溫炎熱日	5
極端高溫之敏感度	高；可能受到嚴重損壞，或需進行高昂且耗時的修復	5
極端高溫之調適能力	中；可透過對資產進行小幅工程改造來避免影響	3

採AR4定義，由暴露度、敏感度、調適能力組成

脆弱度 Vulnerability Score
4.3

指標	評估內容	分數
搭乘人數	5 百萬搭乘人次	5
服務搭乘依賴性較高的地區	是	5
連接性	有 52 個點可與其他運輸方式連接	5
系統或設施不可取代性	有 43 個可取代資產設施	1
緊急情況中的角色	是	5
是否鄰近聯合開發地點	否	1
服務就業機會	1,000 個	5
是否鄰近主要經濟區	否	1

關鍵度 Criticality Score
3.5

風險值 Risk Score
15.2 (High)

source: Metro Climate Action and Adaptation Plan, 2019

M Metro ▼ 鐵道系統極端高溫風險最為嚴重

Asset	高溫	雷弱中斷	野火	強降雨	洪水	土石泥流	海平面上升
Bus Rapid Transit	12.4	7.7	4.4	3.4	6.1	5.1	5.1
Light Rail	14.4	10.1	5.1	3.4	6.8	4.9	0.5
Subway	16.1	11.4	8.2	3.8	7.4	5.6	0.6
Commuter and Circulator Buses	11.4	3.2	4.8	3.2	5.6	6.8	0.1
Limited Express Buses	12.0	8.3	5.5	3.3	8.1	8.4	2.7
Local Central Business District Buses	15.6	3.7	5.4	3.7	7.2	7.1	0.3
Local Non-Central Business District Buses	11.8	3.2	5.4	3.2	6.6	5.2	0.8
Rapid Buses	15.4	3.7	6.3	3.7	8.2	7.4	0.3
Highways	4.3	2.8	5.6	2.8	3.7	5.4	0.6
Bus-Share Stops	4.4	4.4	2.8	2.8	3.2	2.8	0.0
Metro Bike Hubs	9.1	10.8	2.5	2.5	4.1	2.5	0.0
Cal Trans Park & Ride Lots	9.1	2.1	2.7	2.1	2.6	2.2	0.1
Bus Divisions	9.5	11.2	4.4	2.4	5.6	2.6	0.4
Rail Divisions	10.0	11.8	3.8	2.7	5.1	3.7	1.5
Terminals	12.4	10.8	3.0	2.9	4.5	2.9	0.0
Radio Repeater Stations	3.4	6.9	4.9	2.3	2.3	4.9	0.0
Facilities - Other	9.4	11.2	3.7	2.4	3.1	2.6	0.0
Patrol Lots	6.5	2.8	2.8	2.8	4.1	2.8	0.5
Rail Stations	15.0	11.0	4.6	3.0	4.0	3.0	0.2
All Asset Types	10.3	5.7	4.9	3.2	6.8	5.1	0.4

3-2 鐵道系統調適案例-英國 Network Rail (報告4.1.1節)

- 天氣韌性與氣候變遷調適
 - 採半定量進行氣候風險評估

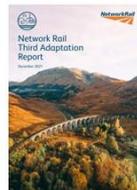


英國政府設施部門 基礎設施韌性



Network Rail 風險評估矩陣

嚴重程度 發生機率	1- Minimal	2- Minor	3- Moderate	4- Major	5- Catastrophic
5-Almost Certain	5	10	15	20	25
4-Likely	4	8	12	16	20
3-Possible	3	6	9	12	15
2-Unlikely	2	4	6	8	10
1-Highly Unlikely	1	2	3	4	5



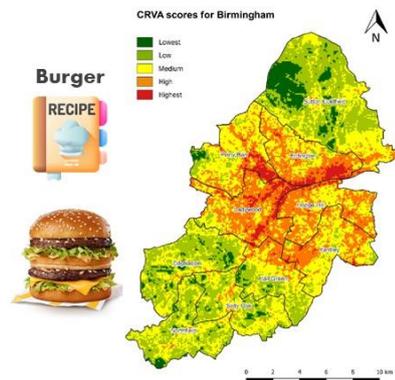
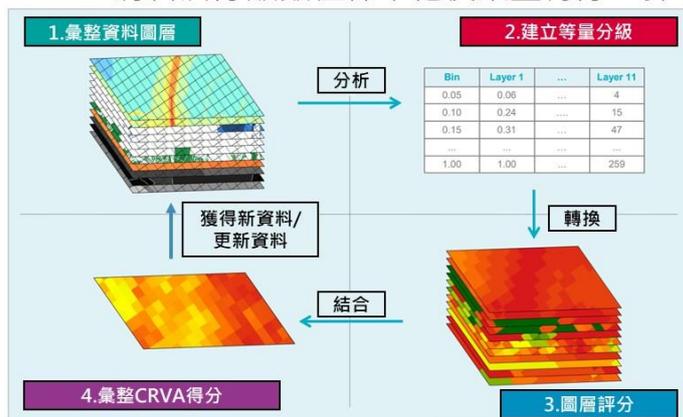
調適報告 能力書

- 已知悉氣候變遷對基礎設施的風險
- 氣候風險已納入戰略管理層面
- 在最易受影響路線上已實施調適措施
- 將持續滾動檢討將影響最小化

source: Network Rail (NR), 2021

3-2 鐵道系統調適案例-英國 CRVA (報告4.1.3節)

- 氣候風險與脆弱度評估工具 (Climate Risk and Vulnerability Assessment, CRVA)
 - 將各層分級數值標準化後彙整得分，採GIS套疊資料呈現氣候風險



source: West Midlands Transport Climate Risk and Vulnerability Assessment, 2024

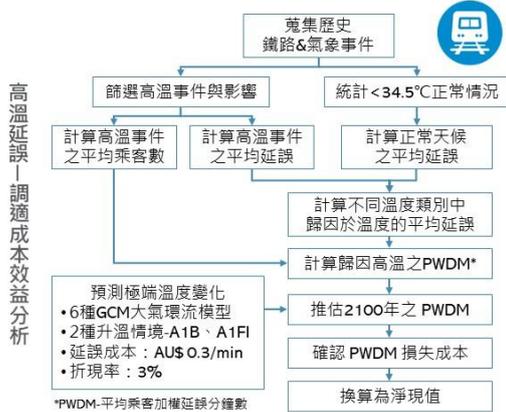
3-2 鐵道系統調適案例-澳洲 Melbourne Railway

(報告 4.2.3 節)



■ 澳洲墨爾本鐵路高溫延誤之調適選項

□ AECOM採量化方式進行成本效益分析



AECOM ▼ 成本-效益分析彙整表

措施	調適方案	溫室氣體排放 較低情境 (A1B-約升溫2°C)		溫室氣體排放 較高情境 (A1FI-約升溫5.5°C)	
		淨現值 (百萬澳)	效益 成本比	淨現值 (百萬澳)	效益 成本比
1	換為混凝土枕木	-120	0.09	-115	0.12
2	更換列車空調設備	-80	0.13	-75	0.18
3	安裝再生制動	107	1.70	107	1.70
4	更換電纜線調整張力	1	1.27	4	1.78
5	號誌備援系統	-295	0.01	-242	0.01
6	行為改變	-29	0.04	-28	0.05

source: AECOM, Adaptation of Melbourne's Metropolitan Rail Network in Response to Climate Change, 2011

25

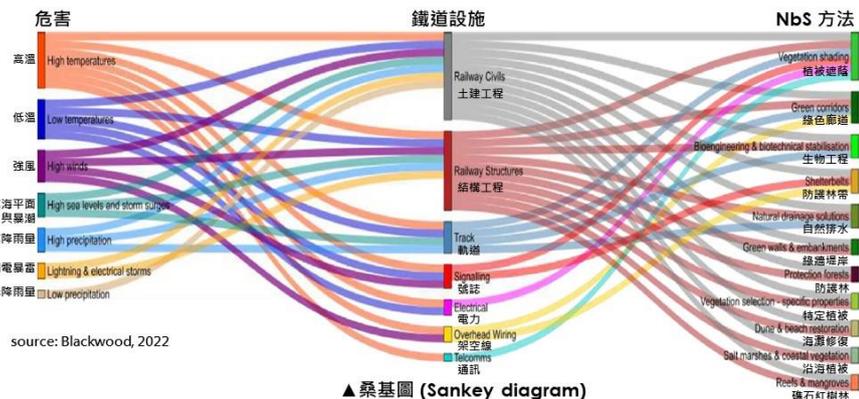
3-3 自然為本解決方案[Nbs] (報告 4.2.2 節)



實踐NbS之挑戰

- NbS 觀念不普及
- 額外維護成本增加
- 缺乏成本效益分析
- 土地利用限制
- 缺乏法規&可遵循指引

研究發現鐵路上的 NbS 以針對強降雨造成之水土天災 (Hydro-Meteorological Hazard) 為主

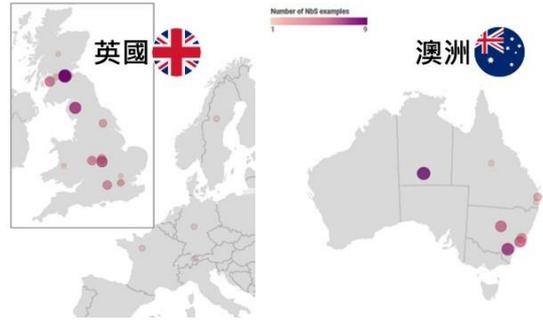
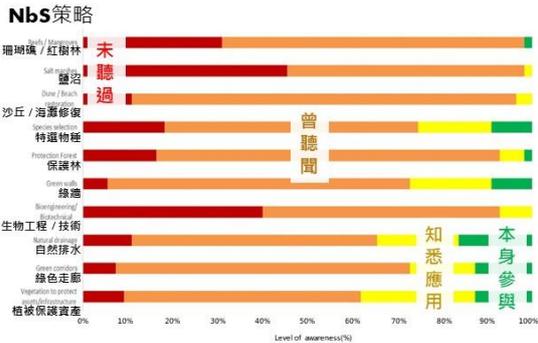


26

3-3 自然為本解決方案[Nbs] (報告4.2.2節)



- NbS在鐵道運輸應用上面仍屬初始階段
 - 2023年鐵路從業人員問卷調查：多數聽過 NbS，但實務應用很少
 - 目前鐵路NbS實際應用範例多位於英國與澳洲

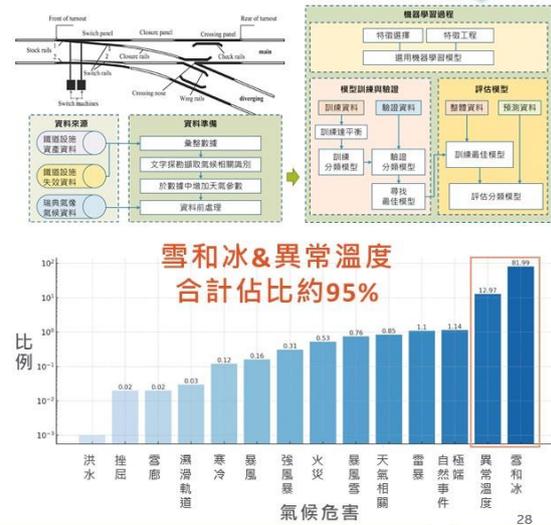


source: Blackwood, 2023

3-4 標竿機構科技應用 (報告4.3.4節)



- 瑞典鐵路-採機器學習辨識CID



source: Transportation Research Part D, 2024

3-4 標竿機構科技應用 (報告 4.3.1 節)



■ 鋼軌塗白漆降溫-實務應用

英國, NR 瑞士, SBB/CFF/FFS 德國, DB

比利時, Infrabel

西班牙, ADIF

義大利, RFI



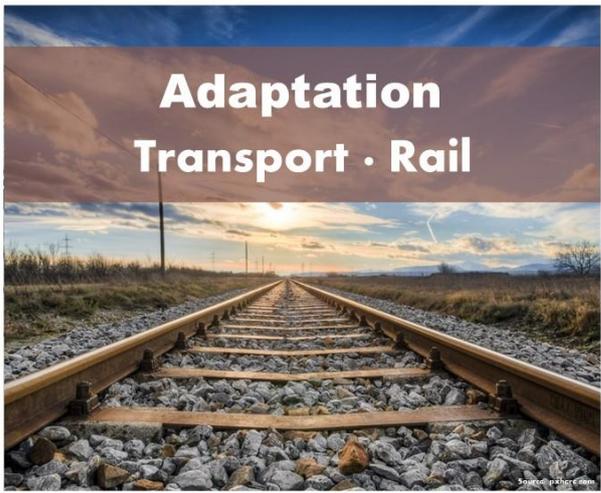
塗漆種類	鋼軌降溫效果(°C)
無機塗料-Inorganic-3	-10.7
無機塗料-Inorganic-2	-7.9
無機塗料-Inorganic-1	-5.5
屋頂防腐漆-Rooftop-2, 2 coats	-5.1
屋頂防腐漆-Rooftop-1	-4.1
屋頂防腐漆-Rooftop-2, 1 coat	-3.9
乳膠漆-棕褐色-Exterior latex - tan	-3.3
乳膠漆-棕褐色-含雙微粒-Exterior latex - tan with double microballoons	-3.0
乳膠漆-棕褐色-含微粒-Exterior latex - tan with microballoons	-2.8
裸鋼-Bare Steel (control)	0.0
鏽鋼-Rusty Steel (control)	0.0
乳膠漆-灰色-含微粒-Exterior latex - gray with microballoons	0.1

source: AREMA 2014 Conference, 2014



source: FRA, 2018

- 關注高反射率白色無機塗層
- 強調實際軌道測試之耐用性

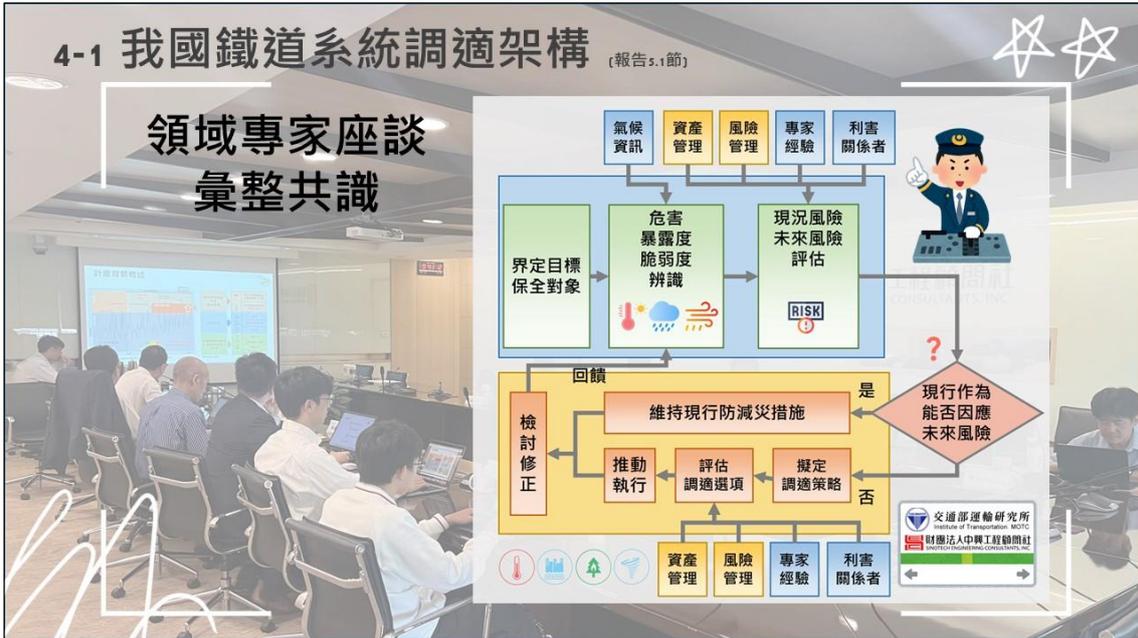


Part4 鐵道系統調適機制與方法

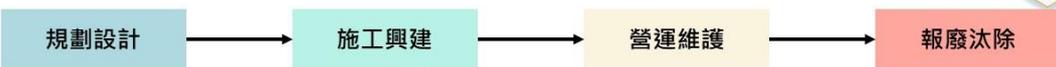
- 3-1 我國鐵道系統調適架構
- 3-2 強化鐵道系統調適機制方法
- 3-3 捷運氣候風險案例分析

4-1 我國鐵道系統調適架構 (報告 5.1 節)

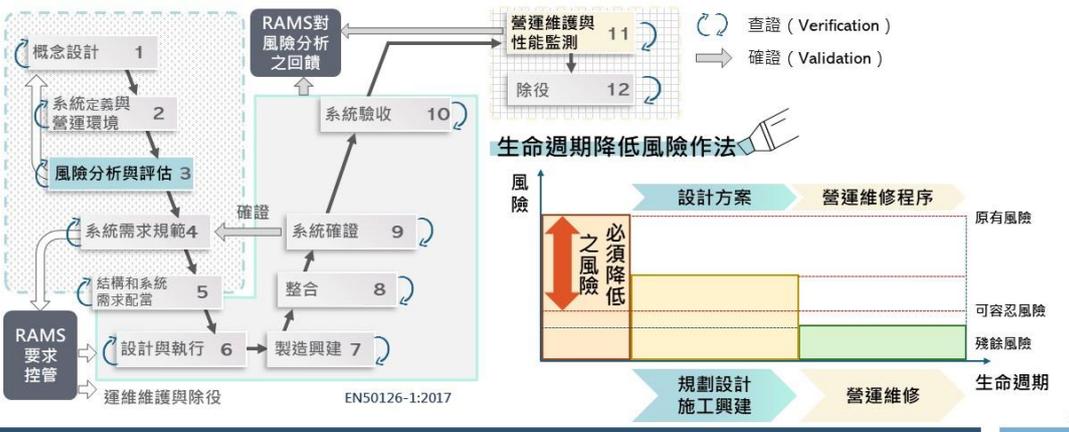
領域專家座談 彙整共識



4-2 強化鐵道系統調適-全生命週期 (報告 3.2.1 節)



EN50126 鐵道系統生命週期V模型



4-2 強化鐵道系統調適-機制 (報告 5.2 節)

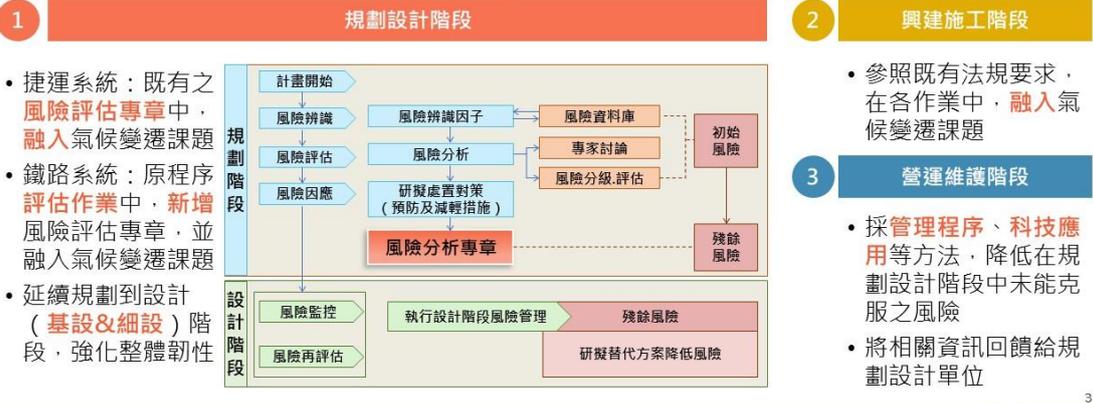


point/



將氣候變遷風險課題融入**鐵道系統全生命週期**

《大眾捷運系統建設及週邊土地開發計畫申請與審查作業要點》
 《鐵路平交道與環境改善建設及週邊土地開發計畫審查作業要點》
 《行政院所屬各機關中長程個案計畫編審要點》



33

4-2 強化鐵道系統調適-方法 (報告 6.1 節)



point/



以**熱&冷-極端熱浪**為例 (摘錄)

對鐵道系統的衝擊/影響	生命週期	
	規劃設計階段	營運維修階段
鋼軌挫屈	<ul style="list-style-type: none"> 在鋼軌安裝膨脹接頭 調整容許軌溫之設計標準 	<ul style="list-style-type: none"> 增加遮蔽以減少熱暴露 更換軌道元件和鋼軌，使用更耐高溫的材料 限制列車載荷與車速避免鋼軌挫屈 精進檢測鋼軌挫屈方法、提高維護作業頻率 將鋼軌塗成白色減少熱量吸收與膨脹 設置軌溫偵測、自動灑水系統
基礎設施結構熱脹	<ul style="list-style-type: none"> 使用更耐用材料建造橋面，包括鋼筋混凝土 	<ul style="list-style-type: none"> 提高巡檢和維護作業頻率 更換橋梁伸縮縫 建立監測和灑水系統
電車線斷裂及掉落	<ul style="list-style-type: none"> 使用能依據溫度自動調整張力的電車線設備 	<ul style="list-style-type: none"> 提高巡檢和維護作業頻率
號誌/電力/電子設備過熱故障	<ul style="list-style-type: none"> 提升變電站、號誌機房和電氣箱的通風和冷卻系統 使用能承受更高溫度的電車線設備 	<ul style="list-style-type: none"> 更換為能承受更高溫度的電氣設備 提高巡檢和維護作業頻率 建立監測系統
機車車輛異常	<ul style="list-style-type: none"> 設計車輛時，採用符合極端溫度的設計規範 採防熱特殊塗層、強化耐候設計 	<ul style="list-style-type: none"> 即時監測車輛重要設備狀態
:(略)	<ul style="list-style-type: none"> ... (略) 	<ul style="list-style-type: none"> ... (略)

34

4-3 捷運氣候風險案例分析 (報告 6.3節)

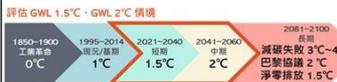


氣候變遷風險評估模型



AR5/AR6 WG2/氣候變遷因應法
 $風險 = f(危害, 暴露度, 脆弱度)$
 $脆弱度 = f(敏感度, 調適能力)$

評估情境



以台北捷運為例

- 關鍵議題：避免站內機電設備因車站入口受水淹侵入車站而毀損
- 保全對象：車站內機電設備
- 危害

CID 種類	濕&乾
平均或事件？	事件
極端高或極端低？	極端高
CID？	豪大雨及洪水
評估指標？	淹水深度 最大時雨量
門檻？	200年頻率洪水 水位加110公分

CID: Climatic Impact-Driver 氣候影響驅動因素

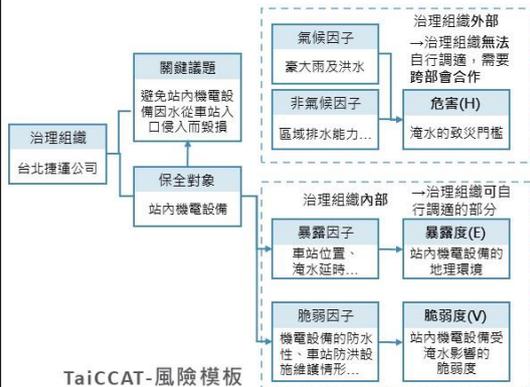


source: Ruane et al., 2022

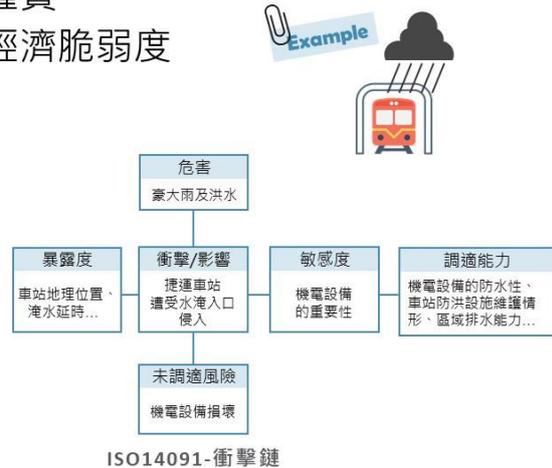
4-3 捷運氣候風險案例分析 (報告 6.3節)



- 風險模板-強調釐清各部會之權責
- 衝擊鏈-涵蓋自然環境及社會經濟脆弱度



TaiCCAT-風險模板



ISO14091-衝擊鏈

4-3 捷運氣候風險案例分析 (報告 6.3 節)



- 水利署-第三代水利空間資訊平台
 - 以現有地形與排水設施分析可能的淹水影響
 - 未考慮升溫或其他與氣候變遷相關的影響因素



4-3 捷運氣候風險案例分析 (報告 6.3 節)



- 災防中心 **NCDR**-氣候變遷災害風險圖臺
 - 危害-脆弱度(H-V) 氣候變遷**極端降雨**在可能淹水潛勢區之「危害-脆弱度」等級，共分為五個等級

現況&未來風險評估

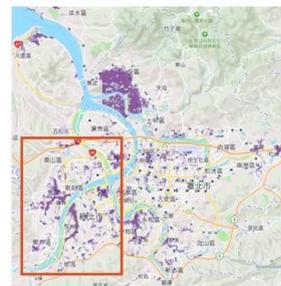
▼北捷出入口分布



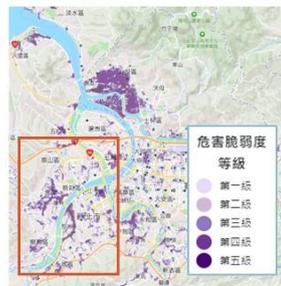
GWL 1°C 情境 (1995-2014年)



GWL 1.5°C 情境 (2021-2040年)



GWL 2°C 情境 (2041-2060年)

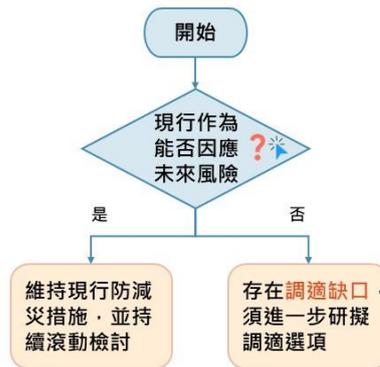


source: NCDR, Dr.A

4-3 捷運氣候風險案例分析 (報告 6.3 節)



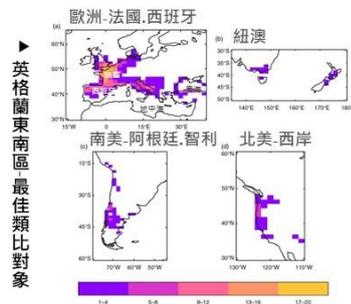
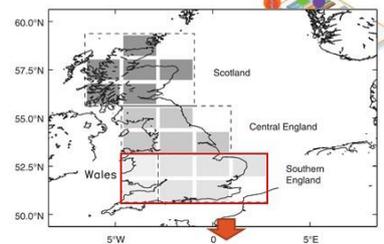
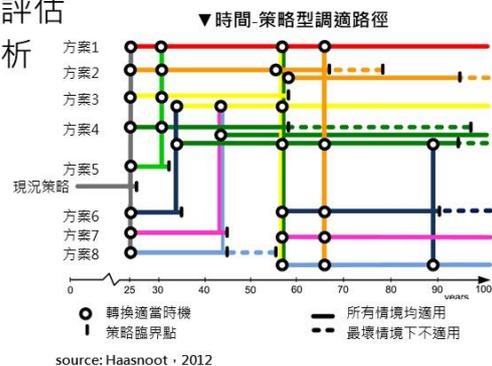
■ 確認調適缺口-評估現行作為是否能因應未來風險



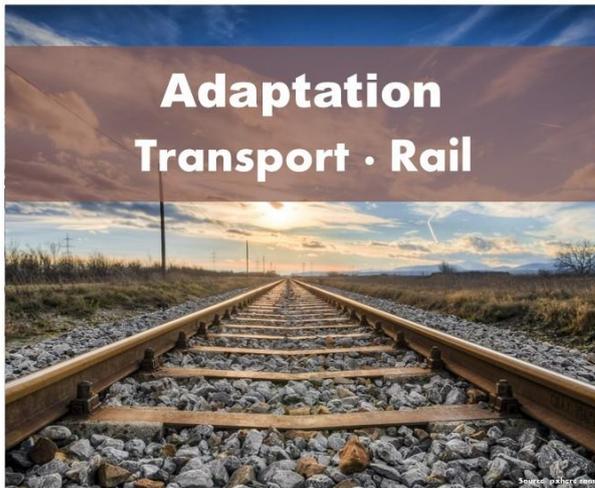
4-3 捷運氣候風險案例分析 (報告 6.3 節)

■ 研擬調適選項及執行監測效果

- 氣候調適路徑
- 成本效益分析
- 多準則評估
- 類比分析



source: Sanderson et al., Analogues for the railway network of Great Britain, 2016



Adaptation Transport · Rail

Parts 結論與建議

5-1 研究成果與結論

5-2 後續研究建議

41

5-1 研究成果與結論 (報告7.1節)



■ 鐵道標竿國家普遍發展氣候變遷調適機制與方法

- 英國發展較為成熟，HS2高速鐵路已將氣候變遷納入規設考量，可作為我國的借鏡
- 強調跨部會合作及利害關係者的參與，由政府提供科學研究與危害相關資料
- 多採質性分析或半定量評估方式，找出調適缺口、擬定適宜調適方案

■ 國內鐵道系統普遍聚焦於防減災，調適方面則處於剛起步階段

- 氣候變遷調適與防減災之差異難以明確劃分
- 目前多透過歷史及現況資料進行風險評估，鮮少評估未來氣候變遷情境下之風險

■ 研擬我國鐵道系統強化調適能力之機制與方法

- 氣候風險模型採「危害、暴露度、脆弱度」之函數，應至少評估GWL1.5 & 2°C 情境
- 在既有鐵道系統全生命週期流程中，融入氣候變遷課題
- 依據氣候危害及其對鐵道系統之衝擊類型，分類綜整各國調適選項
- 研擬一調適案例進行說明在未來升溫情境下，捷運站出入口受到水淹侵入的風險

42

5-2 後續研究建議 (報告7.2節)



- **建議以高溫、坡地風險作為調適指引之範例**
 - 建議後續發展調適指引時，除以坡地風險作為示範案例外，亦可採CID資料不確定性低、且與外部環境關聯性低之溫度資料，例如分析高溫下鋼軌挫屈風險
- **建議持續推廣鐵道調適概念**
 - 後續可藉由教育訓練、研討會等方式，持續推廣鐵道調適概念及作法，形成良性交流以利後續國家制度的推動
- **持續了解彙整鐵道相關機關（構）導入鐵道調適面臨之課題**
 - 鐵道調適所需之相關圖資及尺度資料
 - 能由政府跨部門合作進行基礎科學研究後，再提供給鐵道相關機關（構）應用
 - 未來制定鐵道調適法令或制度時，能考慮鐵道營運機構體制、資源與執行能力之特性
- **待發展氣候變遷風險驅動因子評估原則規範、支援文件及工具**

43



交通部運輸研究所
Institute of Transportation, MOTC

簡報結束 誠摯感謝

 財團法人 中興工程顧問社
SINOTECH ENGINEERING CONSULTANTS, INC.

[參考] 捷運作業要點



- 大眾捷運系統建設及周邊土地開發計畫申請與審查作業要點
 - 第5條-**可行性研究**內容...將下列事項納入報告書：
 - (十三) 全生命週期之**風險管理**，包含風險項目或情境分析、敏感度分析、風險分布、影響程度概估、風險處理構想、風險圖像矩陣及預估殘餘風險初步分析等。
 - 第6條-**綜合規劃**報告書內容應包含下列事項：
 - (十四) 全生命週期之**風險管理**，包含風險項目或情境評估、敏感度分析、風險分布、影響程度評估、風險處理計畫、風險圖像矩陣及預估殘餘風險說明等



45

[參考] 鐵路作業要點



- 鐵路平交道與環境改善建設及周邊土地開發計畫審查作業要點
 - 第5條-**可行性研究**內容... 將下列事項納入報告書...
 - (八) 財務專章
 - 3.財源籌措方式，包含基金或專戶之經費來源、運用方式及**風險評估**及因應對策等相關事項。
 - 第7條-**綜合規劃**...研提下列事項...
 - (一) 地方政府
 - 3.財務計畫：包含可行性研究階段財務專章各項目之具體評估，以及評估預期目標與實際執行具落差時之財源籌措因應對策。



46

[參考] 中央法規要點



■ 中長程個案計畫編審要點-個案計畫自評檢核表-附表一

檢視項目	內容重點 (內容是否依下列原則撰擬)	主辦機關		主管機關		備註
		是	否	是	否	
11、淨零轉型通案評估	(2)是否檢附相關協商文書資料					
	(1)是否以二氧化碳之減量為節能減碳指標，並設定減量目標					
	(2)是否規劃採用綠建築或其他節能減碳措施					
	(3)是否強化因應氣候變遷之 <u>調適能力</u> ，並納入淨零排放及永續發展概念，優先選列臺灣2050淨零排放路徑、淨零科技方案及淨零轉型十二項關鍵戰略、臺灣永續發展目標及節能相關指標					
	(4)是否屬臺灣2050淨零排放路徑、淨零科技方案及淨零轉型十二項關鍵戰略相關子計畫					
(5)屬臺灣2050淨零排放路徑、淨零科技方案及淨零轉型十二項關鍵戰略之相關子計畫者，是否載實填報附表三、中長程個案計畫淨零轉型通案自評檢核表，並檢附相關說明文件						



47

[參考] 防洪要求



■ 捷運系統建設技術標準規範

交通部運輸研究所
捷運系統建設技術標準規範



6.2 防洪要求

- 6.2.1 跨越主要河川的高架結構，應按 200 年重現期的洪水位標準進行設計。
- 6.2.2 隧道段有地下水或洪水瞬間大量侵入之虞處應設置防水設施，以阻隔外水漫延至其它區域。
- 6.2.3 捷運設施之出入口及捷運結構體開口防洪設施高度至少應高於 200 年重現期之洪水位加 1100mm 之淹水高程。
- 6.2.4 所有車站出入口之門檻及捷運設施地面開口，如有區域積水侵入之虞者，應設有防水設施至少高出突出地面結構體，必須符合比相鄰地面 人行道高程最少高出 500mm。
- 6.2.5 當管線穿過外牆且其位置在設計洪水位下時，該銜接點須有防水封之裝置，防水封在其位置上必須能抵抗周遭環境及壓力之破壞。
- 6.2.6 與車站連通之任何構造物，其連通處應具與捷運系統相同之防洪標準。

■ 台北捷運

- 200 年頻率淹水位加 110 公分
 - 鄰近路面加 60 公分
 - 納莉颱風淹水位加 20 公分
- 【以上取大值】



48

[參考] 防洪設計



■ 新北-汐東線招標案例

汐東捷運運輸系統計畫統包工程契約
業主需求書(一) 整體服務需求及規定

汐東捷運運輸系統計畫統包工程契約 業主需求書(一) 整體服務需求及規定

(1) - 淹水位評估報告

A. 廠商須調查機廠、車站(含各出入口)、路線、動力變電站及本計畫相關設施範圍週遭歷年淹水狀況，並參酌其它必要之資料後比較，完成本工程範圍附近地區淹水紀錄，廠商並須針對上述位置進行相關淹水數值模擬分析(車站出入口單位網格尺寸不得大於4m²)，以提送淹水位評估報告並決定選用之淹水位高程，經提送業主核定後，據以辦理本計畫廠站之防洪設計。

B. 淹水位評估報告內容，應包含機廠、車站(含各出入口)、路線、動力變電站及本計畫相關設施範圍週遭歷年淹水狀況紀錄之調查、淹水數值模擬分析及廠商所採用之各區域各週歸期淹水位(含廠商評估採用之理由及淹水位分析相關資料)。

■ 台中-烏日文新線設計案例

烏日文心北屯線建設計畫各站捷運設施
與土開大樓共構之捷運設施需求

1. 依據洪水位分析報告模擬所得資料，前述各車站遇 200 年頻率降雨洪水位之淹水深度約在 4~37 公分之間，永久防洪保護標準之 200 年洪水位加 0.80M 之保護高度則在 84~117 公分。
2. 本案因與捷運車站出入口銜接，防洪重點應考慮出入口地面層或位於地下層之車站轉乘空間等營運必要設施。依捷運設計規範規定，門樞高程需高於 100 年洪水位加 0.15m 且高於相鄰人行道或地面 60cm 以上，如有機電設施則需符合 200 年洪水位加 0.8m。
3. 依目前規劃，各土開大樓地面層只配置樓梯、電扶梯，穿堂層設備與機電設施均設置於高樓層。各車站地下及地面層雖無必要之營運設施，但考量本計畫僅設置單側出入口，為旅客進出之唯一選擇，考量在洪災解除後須立即營運，原則上出入口仍以 200 年洪水位加 0.8m 為防洪保護需求。
4. 係依據台北市捷運工程局提供之「台中都會區大眾捷運系統烏日文心北屯線建設計畫各站捷運設施與土開大樓共構之捷運設施需求」(北市捷土字 10034950100)，其內容將作為執行細部設計依據之一捷 G8a 車站建議設計高程(如下表)。

車站	100 年洪水位+0.15 (M)	200 年洪水位+0.80 (M)	鄰近人行道現況高程 (M)	出入口門樞設計高程 (M)	出入口防洪間門最小高度 (M)
G8a	91.20	91.90	91.00	91.90	0



49

附錄五 縮寫對照表

中英文縮寫	說明
AECOM	AECOM Australia，澳洲 AECOM 公司
AI	Artificial Intelligence，人工智慧
A-PLAT	Climate Change Adaptation Information Platform，日本氣候變遷調適資訊平台
AMS	Asset Management System，資產管理系統
APA	Aktionsplan Anpassung，德國調適行動計畫
AR4	Fourth Assessment Report，政府間氣候變遷專門委員會第四次評估報告
AR5	Fifth Assessment Report，政府間氣候變遷專門委員會第五次評估報告
AR6	Sixth Assessment Report，政府間氣候變遷專門委員會第六次評估報告
ARISCC	Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change，鐵路基礎設施氣候變遷調適計畫
ARP	Adaptation Reporting Power，英國調適報告能力書
ATC	Automatic Train Control System，自動列車控制系統
ATP	Automatic Train Protection，列車自動保護系統
BCM	Business Continuity Management，營運持續管理
CCA	Climate Change Adaptation，氣候變遷調適
CCA6Steps	Climate Adaptation 6 Steps，氣候調適 6 步驟
CCRA	Climate Change Risk Assessment，英國政府氣候變遷風險評估
CCVT	Closed-Circuit Television，閉路電視
CEQ	Council on Environmental Quality，美國環境品質委員會
CID	Climatic Impact-Driver，氣候影響驅動因子
CMIP	Coupled Model Intercomparison Project，耦合氣候模式對比計畫
CMRA	Climate Mapping for Resilience and Adaptation，美國聯邦政府氣候韌性與調適地圖
CP	Control Period，英國 Network Rail 控制週期
CRAM	Corporate Risk Assessment Matrix，企業風險評估矩陣

中英文縮寫	說明
CRVA	Climate Risk and Vulnerability Assessment, 英國氣候風險與脆弱度評估工具
CSR	Corporate Social Responsibility, 企業社會責任
DAFF	Department of Agriculture, Fisheries and Forestry, 澳洲農業、漁業和林業部
DAS	Deutsche Anpassungsstrategie an den Klimawandel, 德國氣候變遷調適策略
DAPP	Dynamic Adaptive Policy Pathways, 動態調適政策路徑
DAWE	Department of Agriculture, Water and the Environment, 澳洲農業、水資源暨環境部
DB	Deutsche Bahn, 德國鐵路股份公司
DCCEEW	Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water, 澳洲氣候變遷、能源、環境與水資源部
DOT	United States Department of Transportation, 美國運輸部
DRMS	Damage Report Management System, 土木結構檢查和損壞報告管理系統
DRR	Disaster Risk Reduction, 減少災害風險
DWS	Disaster Warning System, 天然災害告警系統
ECOV4R	ECOsysteM Valuation for Railways, 鐵路沿線設施結合生態系統服務與科學計畫
ECV	Essential Climate Variable, 基本氣候變數
EN 50126	歐盟鐵路設備可靠度、可用度、可維修度和安全性規範
ERM	Enterprise Risk Management, 企業風險管理
ESG	Environmental, Social, Governance, 環境保護、社會責任與公司治理
ESM	Earth System Model, 地球系統模式
FAR	First Assessment Report, 政府間氣候變遷專門委員會第一次評估報告
FBR	Fuzzy Bayesian Reasoning, 模糊貝氏推論法
FHWA	Federal Highway Administration, 美國聯邦公路總署
FRA	Federal Railroad Administration, 美國聯邦鐵路總署
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System, 未來鐵路移動通信系統

中英文縮寫	說明
FSB	Financial Stability Board，國際金融穩定委員會
FTA	Finnish Transport Agency，芬蘭交通局 Federal Transit Administration，美國聯邦運輸總署
G20	Group of Twenty，二十大工業國經濟合作論壇
GAR	Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction，減少災害風險全球評估報告
GBR	Great British Railways，大不列顛鐵路
GCMs	Global Circulation Models，全球環流模式
GIS	Geographic Information System，地理資訊系統
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway，鐵路通訊無線標準
GWL	Global Warming Level，全球暖化程度/固定增溫情境
HATTER	Harmonic Approach to Technological Transactions for Emergency Response，災害預防技術交易的諧波架構
HS2	High Speed 2，英國 2 號高速鐵路
ICE4	Intercity Express 4，德國高鐵第四代城際電聯車
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar，干涉合成孔徑雷達成像
INTEROS	Integrated Train Communication Networks for Evolvable Railway Operation System，次世代列車控制系統
IOT	Internet of Things，物聯網
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change，政府間氣候變遷專門委員會
ISO 14090	氣候變遷調適－相關原則、需求與指引
ISO 14091	氣候變遷調適－脆弱度、衝擊及風險評估指引
ISO 14092	針對地方政府及社區的調適工作提出規範及指引
ISO 14093	氣候變遷地方調適計畫融資機制-基於績效之氣候韌性補助-要求和指引
ISO 14097	溫室氣體管理與相關活動－評估與報導氣候變遷相關投融資活動之原則及要求
ISO 31000	風險管理－原理及指導綱要
ISO 31010	風險管理－風險評估技術標準條文
ISO 9001	品質管理系統－要求

中英文縮寫	說明
ISO 55000	資產管理－概述、原則和術語
ISO 55001	資產管理－管理系統－要求
ISO Guide 84	氣候變遷應對指引
JICA	Japan International Cooperation Agency，日本獨立行政法人國際協力機構
KRRI	Korea Railroad Research Institute，韓國鐵道研究院
LA Metro	Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority，洛杉磯都會交通局
LiDAR	Light Detection and Ranging，光學雷達
LTA	Land Transport Authority，新加坡陸路交通管理局
LTE-R	Long Term Evolution-Railway，鐵路寬頻移動通信系統
LUCRFR	London Underground Comprehensive Review of Flood Risk，倫敦地鐵洪水風險研究
Metro PROMIS	Predictive Rail Operations Management Information System，台北捷運預測性軌道營運管理資訊系統
MnDOT	Minnesota Department of Transportation，明尼蘇達州交通部
NAP	National Adaptation Programme，英國國家調適計畫
NbS	Nature-based Solutions，自然為本的解決方案
NCCAP	National Climate Change Adaptation Plan，韓國國家氣候變遷調適計畫
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index，常態化差值植生指標
NIC	National Infrastructure Commission，英國基礎設施委員會
NIES	National Institute for Environmental Studies，日本國立環境研究所
NR	Network Rail，英國鐵路公司
OALs	Open Air Laboratories，開放實驗室
ÖBB	Österreichischen Bundesbahnen，奧地利聯邦鐵路
PBCRG	Performance-Based Climate Resilience Grant，績效式氣候韌性補助金
PdM	Predictive Maintenance，預測檢修
PFC	Particle Flow Code，顆粒流程序

中英文縮寫	說明
PIANC	Permanent International Association of Navigation Congresses, 世界水運基礎設施協會
PIK	The Potsdam Institute for Climate Impact Research, 德國波茨坦氣候影響研究所
PNACC	Plan for Adaptation to Climate Change, 法國國家氣候變遷調適計畫
PPM	Public Performance Measure, 公共績效指標
PWDM	Passenger Weighted Delayed Minutes, 旅客加權延誤分鐘數
RAMS	Reliability, Availability, Maintainability and Safety, 可靠度、可用度、可維護度及安全性
RCM	Remote condition monitoring, 遠端狀態監測
RCP	Representative Concentration Pathway, 代表濃度路徑
RESIN	Climate Resilient Infrastructures and Cities, 歐盟氣候調適基礎設施和城市
RSSB	Railway Safety and Standards Board, 英國鐵路安全及標準委員會
RTRI	Railway Technical Research Institute, 日本鐵道綜合技術研究所
RZD	Russian Railways, 俄羅斯鐵路公司
SAMP	Strategy Asset Management Plan, 策略性資產管理計畫
SAR	Second Assessment Report, 政府間氣候變遷專門委員會第二次評估報告 Synthetic Aperture Radar, 合成孔徑雷達
SDG	Sustainable Development Goals, 聯合國永續發展目標
SMS	Safety Management System, 安全管理系統
SMHI	Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 瑞典氣象和水文研究所
SMIS	Safety Management Information System, 安全資訊管理系統
SNCF	Société Nationale des Chemins de fer Français, 法國國家鐵路公司
SOP	Standard Operation Procedure, 標準作業程序
SR15	Special Report on Global Warming of 1.5°C, 全球暖化 1.5°C 特別報告

中英文縮寫	說明
SSP	Shared Socioeconomic Pathway，共享社會經濟路徑
TaiCCAT	Taiwan integrated research program on Climate Change Adaptation Technology，臺灣氣候變遷調適科技整合研究計畫
TCCIP	Taiwan Climate Change Projection and Information Platform，臺灣氣候變遷推估資訊與調適知識平台
TAR	Third Assessment Report，政府間氣候變遷專門委員會第三次評估報告
TCFD	Task Force on Climate Related Financial Disclosures，氣候相關財務揭露
TRaCCA	Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation，英國鐵路氣候變遷調適計畫
TSIS	Train Supervision Information System，台北捷運列車監督資訊系統
TSLG	Technology Strategy Leadership Group，英國科技策略領導團隊
UAV	Unmanned Aerial Vehicle，無人飛行載具
UBA	Umweltbundesamt，德國聯邦環境署
UHI	Urban Heat Island，熱島效應
UIC	Union Internationale des Chemins de Fer，國際鐵路聯盟
UKCEH	UK Centre for Ecology and Hydrology，英國生態與水利中心
UKCP	UK Climate Projections，英國氣候預測
UKCIP	UK Climate Impacts Programme，英國氣候變遷衝擊計畫
UKHab	UK-Habitats Classification System，英國棲地分類系統
UNEA	United Nations Environment Assembly，聯合國環境署
UNCDF	United Nations Capital Development Fund，聯合國資本發展基金
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction，聯合國減少災害風險辦公室
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change，聯合國氣候變遷框架公約
UNP	Union Pacific Corp，美國聯合太平洋公司貨運公司

中英文縮寫	說明
WG	Working Group，工作小組
WP	Work Package，工作項目
WI-FI	Wireless Fidelity，無線相容認證
WRCCA	Weather Resilience and Climate Change Adaptation，英國 Network Rail 天氣韌性與氣候變遷調適策略
台灣高鐵	台灣高速鐵路股份有限公司
氣候法	氣候變遷因應法
高雄捷運	高雄捷運股份有限公司
桃園捷運	桃園大眾捷運股份有限公司
港鐵公司	香港鐵路有限公司
運研所	交通部運輸研究所
新北捷運	新北大眾捷運股份有限公司
臺北捷運	臺北大眾捷運股份有限公司
臺中捷運	臺中捷運股份有限公司
臺鐵公司	國營臺灣鐵路股份有限公司

ISBN 978-986-531-708-9
00470



9 789865 317089

GPN : 1011401029

定價 470 元