

國立政治大學 國際事務學院

日本研究學位學程 碩士學位論文

日本新能源政策探討—以氫能源為中心

A Study of New Energy Policy in Japan

—Focusing on Hydrogen Energy

指導教授：柯玉枝 博士

研究生：高育偉

中華民國 112 年 7 月

謝辭

回顧這兩年的研究所生涯，只能用「趕、趕、趕」來形容，兩天上課三天上班的行程填滿了日常生活，直到打上謝辭標題的這一刻，才意識到研究所生涯已然到了尾聲，因此挑揀一個深夜，泡好茶，對著電腦，路上無車無人，夜深無聲，回憶到這一路受到太多人的幫助，在此先向所有給予我支持的人表達誠摯的感謝。

首先要感謝我的父母，謝謝你們長久以來的辛勤付出與栽培，給予我良好的品德教育，理解並支持我做的任何決定，謹此將成果與你們分享。

衷心感謝我的指導教授柯玉枝老師，無論是課堂教學、研討會投稿、論文寫作甚或是生涯規劃，都給予我許多鼓勵以及寶貴的建議，並如同神醫一般，總能一針見血的點出問題癥結，使我可以踏破重重難關完成這本論文。

感謝口試委員金士懿老師和楊文琪老師，謝謝老師們在論文計劃書審查與學位論文口試上，以富有專業及實務的觀點給予我相當多精闢的建議，使研究能夠更臻完善，非常感謝老師們的建議與協助。

感謝在政大遇見的薛健吾老師、楊雯婷老師、李世暉老師、陳聖智老師與鄭子真老師，謝謝老師們的教書育人及提攜，給予我學術及人生價值上的啟發。

感謝資策會台日中心的陳龍主任和貝珊組長，給予我相當大的彈性來兼顧實習工作與學業，並且在業務過程中也得到許多產業知識來豐富研究。

感謝好友學昌、聖堯和惠馨，三年前鼓勵我重返校園讀書，讓身為大齡書僮的我，不致於錯過這一路上的美好風景；感謝研究所好友楚云、澤安、佩育和承宏，謝謝你們在研究所期間的相伴與幫助，讓鮮少到校的我也能夠找到歸屬感，祝大家未來的人生道路能夠徑情直遂。

感謝托特納姆熱刺隊，每周末的英超聯賽是我生活中的精神食糧，即使這幾年成績跌宕起伏，但比賽中總是展示出拚勁和不輕易言敗的精神，砥礪我在遍布荊棘的道路上前行，COYS！

最後想要特別感謝女友苡岑，無論是在大學或研究所期間，當我面對迷惘或困頓之際，總能給予我無條件的支持與幫助，用睿智慧黠的觀點提供建議，並且鼓勵我對更好的自己發起挑戰，一切盡在不言中，祝福妳在政大的研究生涯同樣精彩且順利；此外也非常感謝苡岑家人一直以來對於我的信任與幫助，謝謝妳們。

「人の一生は、重き荷を負うて遠き路を行くが如し。急ぐべからず」，即使未來人生道路中可能會遇到許多險阻，但我想提醒自己要適時佇足歇息，才不會錯過路途中片刻的美好。

育偉 2023年8月 於八芝蘭

摘要

18 世紀末工業革命以後，人類社會除了迎來生產方式的變革外，也開始使用煤炭及石油等化石燃料來提供生產工具動力，但化石燃料在歷經 200 餘年的大量損耗後，不僅面臨能源枯竭的問題，燃燒所產生的溫室氣體也造成全球暖化加劇；為了應對上述課題，國際社會擬定《巴黎氣候協定》及《格拉斯哥氣候公約》等減碳協議，希望藉此達成碳中和目標，並敦促各國推進新能源的發展。

與台灣同屬能源進口國的日本，在面對國際碳中和浪潮，以及地緣政治風險所導致的能源成本上漲等外部因素時，除了積極訂立如「綠色成長戰略」等碳中和相關規制外，也透過新能源政策的制定，摸索能夠共創碳中和目標以及經濟發展的能源解決方案；近年來，氫能源因為其燃燒後僅產生水和氧氣的特性，及未來在技術突破後，可以透過水電解方式大量產出，受到日本政府的青睞，在日本新能源政策的地位與日俱增，並規劃完整的氫能源政策體系，使得日本成為世界氫能源政策與產業發展的領頭羊。

本研究擬透過文獻分析法爬梳日本氫能源政策體系，盤點日本發展氫能源的經驗以及待解課題，並審視日本氫能源產業的發展現況，供台灣未來發展氫能源產業以及政府擬定氫能源政策時作為參考。

關鍵字：氫能源、碳中和、日本新能源政策

Abstract

The late 18th century's Industrial Revolution saw society not only embrace a shift in production methods but also start relying on fossil fuels, such as coal and oil, for energy. Over the course of more than two centuries, however, these fuels have been extensively depleted, leading not only to energy depletion problems but also to a worsening of global warming due to the greenhouse gases produced by combustion. To address these challenges, international agreements aimed at reducing carbon emissions, such as the Paris Agreement and the Glasgow Climate Pact, have been established to achieve carbon neutrality and encourage the development of new energy sources.

Japan, along with Taiwan, imports energy and faces the global trend towards carbon neutrality as well as rising energy costs caused by geopolitical risks. The Japanese government has shown a preference for hydrogen energy in recent years due to its environmentally friendly characteristics, producing only water and oxygen after combustion, and its potential for large-scale production through hydrolysis with technological advancements.

This study aims to conduct a literature review of Japan's hydrogen energy policy system, examine Japan's experience in developing hydrogen energy and the challenges that need to be overcome, and analyze the current state of Japan's hydrogen energy industry. The findings will serve as a reference for Taiwan's future hydrogen energy industry development and for the government in formulating hydrogen energy policies.

Keywords: Hydrogen Energy, Carbon Neutrality, Japan's New Energy Policy

目次

第一章 緒論.....	1
第一節 研究動機與目的.....	1
壹、研究動機.....	1
貳、研究目的.....	4
第二節 文獻回顧.....	6
壹、能源政策與產業政策工具.....	6
貳、國際碳中和規制發展.....	9
參、日本碳中和規制發展.....	18
肆、小結.....	20
第三節 研究範圍與概念澄清.....	21
壹、研究範圍.....	21
貳、概念澄清.....	21
第四節 研究方法與流程.....	23
壹、研究方法.....	23
貳、研究流程.....	24
參、章節安排.....	24
第二章 氫能源原理與供應鏈發展概況.....	26
第一節 氫能源的原理與供應鏈.....	26
壹、氫氣如何作為一種能源.....	26
貳、氫能源的優缺點.....	30
參、氫能源的供應鏈.....	33
第二節 國際氫能源供應鏈發展概況.....	40
壹、美洲地區.....	40
貳、歐洲地區.....	44
參、亞太地區.....	48
第三節 日本氫能源供應鏈發展概況.....	54

壹、日本製氫產業發展概況.....	54
貳、日本儲氫與運氫產業發展概況.....	57
參、日本氫能應用相關產業發展概況.....	59
第四節 小結.....	63
第三章 日本氫能源政策與立法.....	65
第一節 日本氫能源相關政策.....	65
壹、能源基本計畫.....	67
貳、氫能基本戰略.....	72
參、綠色成長戰略.....	76
第二節 日本氫能源相關法規.....	82
壹、製氫領域的法規整備.....	82
貳、儲氫領域的法規整備.....	84
參、運氫領域的法規整備.....	85
肆、氫氣應用領域的法規整備.....	90
第三節 小結.....	94
第四章 日本氫能源產學政策.....	96
第一節 日本氫能源研究支援體制.....	96
壹、文部科學省主導的研究支援體制.....	96
貳、JST 主導的研究支援體制.....	101
參、NEDO 主導的研究支援體制.....	110
第二節 日本氫能源產業政策.....	116
壹、擬定產業發展目標.....	116
貳、籌設產業組織.....	119
參、提供產業補助金.....	126
第三節 小結.....	132
第五章 結論.....	134
第一節 結論與研究發現.....	134

第二節 台灣發展氫能源的建議.....	136
壹、氫從哪來？台灣製氫領域的政策建議.....	136
貳、氫怎麼用？台灣氫能應用領域的政策建議.....	137
參考文獻.....	138



表次

表 1.1 產業政策常採用的政策工具.....	8
表 1.2 1900 年至 2021 年全球總碳排量.....	11
表 1.3 1900 年至 2022 年 各年溫度與 20 世紀平均溫度之差異.....	12
表 1.4 碳定價種類及其說明.....	15
表 1.5 碳盤查的範疇與涉及的排放類別.....	17
表 1.6 本研究之流程表.....	24
表 1.7 本研究之章節安排.....	25
表 2.1 不同顏色的氫氣種類.....	28
表 2.2 不同產業中會使用到氫氣の場合.....	29
表 2.3 氫能源的特性、優點及缺點.....	31
表 2.4 不同氫氣能源載體的特性.....	35
表 2.5 日本製氫相關企業與其關鍵技術.....	55
表 2.6 日本儲氫、運氫相關企業與其關鍵技術.....	58
表 2.7 日本氫氣應用相關企業與其關鍵技術.....	60
表 2.8 2010 至 2020 年間 各國在氫能源領域的 IPF 佔全球總數之比重.....	63
表 2.9 2001 至 2020 年間 各國申請氫能源領域專利的趨勢.....	64
表 3.1 2015 年與 2021 年 日本對於 2030 年發電結構之評估及比較.....	70
表 3.2 歷次能源基本計畫之能源結構願景與氫能源的角色.....	71
表 3.3 氫能基本戰略中的十項戰略方針與概要.....	73
表 3.4 綠色創新戰略的 14 個關鍵領域與發展課題.....	77
表 3.5 綠色創新基金採納的計畫.....	80
表 3.6 不同等級的碼頭之危險物品卸載容許量.....	87
表 3.7 《聯合工廠等保安規則》關於管線埋設深度的規定.....	89
表 3.9 加氫站各項設備須遵循的技術規範.....	91
表 3.8 不同地域別的氣體儲藏與供給設施規模.....	92
表 4.1 科研費的種類、申請條件與經費類型.....	97
表 4.2 1965-2023 年 以氫氣為主題進行研究的科研費研究案數量.....	99

表 4.3 日本有成立氫能源研究組織的大學列表.....	101
表 4.4 未來社會創造事業中有關氫能源的研究開發計畫.....	104
表 4.5 大學端新產業創出計畫中有關氫能源的計畫.....	105
表 4.6 CREST 中有關氫能源的研究開發計畫.....	106
表 4.7 さきがけ中有關氫能源的研究開發計畫.....	107
表 4.8 研究成果最適展開支援計畫中有關氫能源的計畫.....	108
表 4.9 先端低碳化技術開發中有關氫能源的研究開發計畫.....	109
表 4.10 氫能應用等先導研究開發事業之具體項目.....	112
表 4.11 氫能社會構築技術開發事業之具體項目.....	113
表 4.12 超高壓氫氣基礎設施正式普及技術研究開發事業之具體項目.....	114
表 4.13 產學官合作研發解決燃料電池大幅推廣後的共通課題之具體項目.....	115
表 4.14 建立有競爭力的氫能供應鏈技術開發事業之具體項目.....	115
表 4.15 2014 年與 2019 年氫能源與燃料電池路線圖比較.....	117
表 4.16 JH2A 成員列表.....	124
表 4.17 氫能源人才領域補助金列表.....	127
表 4.18 氫能源產創領域補助金列表.....	128
表 4.19 氫能源設備與製品領域補助金列表.....	129
表 4.20 氫能車領域補助金列表.....	129
表 4.21 加氫站領域補助金列表.....	130
表 4.22 氫能載具領域補助金列表.....	131

圖次

圖 2.1 氫能源的上下游供應鏈.....	39
圖 3.1 日本氫能源政策體系圖	94
圖 4.1 JST 六大核心事業.....	102
圖 4.2 NEDO 四大事業領域與其技術課題.....	111
圖 4.3 HySTRA 日澳液化氫供應鏈實證計畫	120
圖 4.4 AHEAD 日本汶萊 MCH 供應鏈實證計畫.....	121
圖 4.5 JHYM 在全國的加氫站整備計畫	123
圖 4.6 神戶關西圈氫能源供應鏈實證.....	125



第一章 緒論

第一節 研究動機與目的

壹、研究動機

18 世紀末開啟工業時代以後，隨著蒸汽機、內燃機以及電力的發明，部分產業的手工勞力被機器所取代，成本低廉且高效率的生產方式使得全球工業進一步發展，而為了供給機器電力所需，人類開始大量使用煤炭、石油等化石燃料，並在燃燒化石燃料時產生大量的溫室氣體，使得能源枯竭與全球暖化兩大課題接踵而至（徐作聖等，2010）。

而為了要解決能源枯竭與全球暖化兩大能源課題，國際社會陸續出台《巴黎氣候協定》以及《格拉斯哥氣候公約》等國際減碳協議，約束各國訂定碳中和目標¹，並且逐步推進碳定價機制，使得化石燃料的使用成本升高²，各國也因此轉而增加太陽能、生質能、海洋能、地熱能、氫能源以及風力等新能源技術開發的投入，並且為其擬定相應的能源相關政策。

以日本為例，因應碳中和的國際趨勢，2020 年 10 月 26 日時任日本首相的菅義偉宣布日本要在 2050 年達成全面碳中和，建成無碳社會³；並且在同年底推出「綠色成長戰略」，選定離岸風電、太陽能、地熱、氫能源、燃料氨、蓄電池等 14 個重點領域，制定完整的發展計畫與體制，希望能夠在推進溫室氣體減排

¹ Liffey, Kevin. 2021. "Explainer: From Paris to Glasgow: cutting through climate jargon," *Reuters*, <https://www.reuters.com/business/cop/paris-glasgow-cutting-through-climate-jargon-2021-10-27/>.

² 李介文，2022 年 5 月 20 日，「會計師看時事/制定內部碳定價 拚淨零排放」，*經濟日報*，<https://money.udn.com/money/story/122331/6326313>。

³ 要地正義、菰田馨，2020 年 10 月 26 日，「菅首相、2050 年カーボンニュートラル宣言の舞台裏」，*日經 BP*，<https://project.nikkeibp.co.jp/energy/atcl/19/feature/00001/00036/>。

的同時，也促進相關產業的發展⁴；2021年5月26日國會通過《地球暖化對策促進法》修正案，進一步將2050年碳中和的目標入法，排除產業和政策在法規面的限制⁵；綜上所述，可以見得日本政府對於再生能源的發展，不僅進行法規面的修訂，同時也透過能源政策的制定，描繪出完整的發展途徑。

台灣亦在2021年4月22日，由總統蔡英文宣示2050年淨零碳排(Net Zero Emission)將是台灣未來的目標⁶，並推動行政機關進行國內減碳法規之修法工作，將2050年淨零碳排的目標法制化⁷；2022年3月30日，國家發展委員會領銜經濟部、交通部、內政部、環保署等機關，提出台灣2050淨零排放路徑及策略⁸，並在同年底提出「台灣2050淨零碳排十二項關鍵戰略」，擬透過促進風電、光電、氫能源、前瞻能源、電力系統與儲能、碳捕捉利用與封存等產業之發展，達成2050年碳中和的目標⁹。

可以發現日本政府與台灣政府在面對國際碳中和趨勢時，除了針對國內法制進行適切的調整外，同時也將發展再生能源置於重要地位；進一步爬梳兩國因應碳中和的關鍵戰略—「綠色成長戰略」以及「台灣2050淨零碳排十二項關鍵戰

⁴ 經濟產業省，「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました」，經濟產業省，<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>。

⁵ 環境省，2021年3月2日，「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案の閣議決定について」，環境省，<https://www.env.go.jp/press/109218.html>。

⁶ 黃思敏，2021年04月22日，「蔡英文：2050淨零轉型也是台灣目標 立委籲盡快修定《氣候變遷行動法》」，環境資訊中心，<https://e-info.org.tw/node/230691>。

⁷ 阮怡婷，2023年1月10日，「氣候變遷因應法三讀，2050淨零目標入法，碳費2024年向287家碳排大戶開徵」，CSR@天下，<https://csr.cw.com.tw/article/42965>。

⁸ 胡華勝，2022年03月31日，「一次看懂2050淨零排放路徑及策略，影響台灣未來30年的關鍵戰略」，遠見雜誌，<https://www.gvm.com.tw/article/88501>。

⁹ 中華民國國家發展委員會，2022年12月28日，「公布十二項關鍵戰略行動計畫全面推動淨零轉型目標」，中華民國國家發展委員會，https://www.ndc.gov.tw/nc_27_36501。

略」，可以發現在能源產業方面，除了發展良久的太陽能及風力發電外，氫能源也佔據一席之地，因此本研究也將目光聚焦在此。

日本為世界氫能源先驅國，其認為氫能源將會是未來氣候問題的最佳解決方案之一，早在 1973 年便由學術界發起成立氫能源協會，整合氫能源相關技術的研發能量¹⁰；1990 年代由新能源產業技術綜合開發機構（後簡稱 NEDO）執行「We-Net 計畫」，針對製氫、儲氫、運氫等領域進行技術研發¹¹，並發展成為日本氫能源政策與技術開發不可或缺的一員。除此之外，氫能源在日本政府擬定的能源政策所佔之地位也逐漸提升，自 2014 年 4 月「第四次能源基本計畫」，氫能源首次被放入能源基本計畫的範疇¹²以後，日本政府於 2016 年及 2017 年出台了世界首份氫能源發展路線圖¹³以及氫能源發展指導方針「氫能基本戰略」¹⁴；2020 年經濟產業省與 NEDO 於福島縣浪江町成立的「福島氫能研究場域」（FH2R），亦是世界上首個氫能源技術的實證場域¹⁵；同年底的「綠色成長戰略」中，氫能源也位列 14 個重點領域其一，可以見得日本不僅是世界上最早制定氫能源相關政策的國家，同時也將氫能源視為達成 2050 年全面碳中和的要角。

¹⁰ 水素エネルギー協会，「水素エネルギー協会の歴史」，水素エネルギー協会，https://www.hess.jp/2_aboutus/history.html。

¹¹ 福田健三，2015 年 2 月 12 日，「WE-NET が目指した社会と今」，NEDO，https://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts4/kenzou_fukuda.pdf。

¹² 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 4 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf。

¹³ NEDO，「NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ」，NEDO，https://www.nedo.go.jp/library/battery_hydrogen.html。

¹⁴ 經濟產業省資源エネルギー庁，「水素社会実現に向けた取組」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/hydrogen_society/。

¹⁵ NEDO，2020 年 3 月 7 日，「再エネを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」が完成」，NEDO，https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html。

而本研究檢閱 2023 年以前之台灣碩博士論文，發現過往與氫能源相關之論文集中在氫能技術（包括製氫、儲氫、加氫、燃料電池以及氫能載具等）與氫能相關法規等面向，並未有系統性的針對各國氫能源政策進行研究；而與日本能源相關之論文則集中在日本整體能源政策、日本能源相關法規、日本能源外交及能源安全、日本能源與電力等之研究，其中有被提及的新能源別包括：太陽能、風力以及生質能等種類，過往並未有論文針對日本氫能源相關政策進行研究。

台灣與日本皆有九成以上的能源仰賴進口，且同處西太平洋第一島鏈，日益升高的地緣風險對於兩國的能源供給影響皆相當大；兩國也相繼提出要在 2050 年達成碳中和目標，揭櫫國家減碳的決心。因此在背景相似的情況之下，日本所擬定的能源政策對於後發的台灣具有相當大的參考價值，本研究希望透過爬梳日本在氫能源相關政策上的發展經驗，找出氫能源對於日本能源供給的重要性為何，以及政策推行迄今所遇到的待解課題，供台灣未來擬定氫能源相關政策時作為參考。

貳、研究目的

本研究擬透過爬梳日本氫能源相關政策的發展達成以下目的：

- 一、回顧日本面臨到何種內外部環境變化，導致能源轉型的需求恐急，因此政府除了擬定相應的政策外，新能源在國家能源政策的地位也逐漸上升。
- 二、理解氫能源的發電原理及其產業鏈，相較於其他新能源的優勢何在，並且釐清氫能源在國際與日本的發展現況為何。
- 三、將政策分為政府政策與立法（政府）、學術獎助機制（學研）以及產業政策（產業）等三大面向，藉此理解日本政府透過何種政策工具串聯起氫能源產

業鏈的產、官、學交流；並且進一步分析日本透過何種產業政策工具，來協助氫能源企業的發展。

四、盤點日本氫能源產業的發展經驗以及待解課題，供台灣未來發展氫能源產業以及政府擬定氫能源政策時作為參考。



第二節 文獻回顧

本節首先針對能源政策以及產業政策工具之文獻進行探討，並回顧全球碳排放量之趨勢；其後透過爬梳國際碳中和規制以及日本碳中和規制的沿革，理解國際減碳協議、日本減碳政策以及各式的碳定價機制，對於日本政府制定能源政策與產業政策的影響何在。

壹、能源政策與產業政策工具

一、能源政策

隨著人類社會的高速發展，能源供給、環境保護以及經濟發展間的矛盾也日漸加深，尹曉亮認為若政府無法針對能源供給和風險進行早期預判及處理，便會在未來影響國家的經濟發展；而一味的重視經濟發展的成本性及效率性，推行錯誤的能源供給策略也會帶給環境極大的衝擊，因此便有了能源政策的出現¹⁶。

Kohl 認為能源政策是經濟政策、外交政策以及國家安全政策的一個子集，並且會追求供應安全以及對環境的有限影響¹⁷；Tosun 等人亦認為能源政策時常要進行跨部門性的決策，因此會受到來自不同部門的決策所影響，並將能源政策區分為包括能源來源、能源效率、能源價格、能源基礎設施、能源法規以及能源生產、利用和運輸等面向¹⁸。可以見得政府詳細審視經濟及社會的發展、環境承

¹⁶ 尹曉亮，2011，戰後日本能源政策（北京：社會科學文獻出版社）。

¹⁷ Kohl, Wilfrid L. 2004. "National Security and Energy," *Encyclopedia of Energy*, vol. 4, pp. 193-206.

¹⁸ Tosun, Jale. et al. 2015. *Energy Policy Making in the EU* (London: Springer-Verlag).

載力以及地緣政治等條件，推算國家未來可能遭遇的能源課題，擬定能源政策並進行漸進式的動態調整已成為各國政府的常態。

關於新能源之於能源政策的研究，蔡岳勳認為目前國際能源政策主要聚焦在能源安全與氣候變遷兩大面向的課題，而這兩個課題皆可以透過使用及發展再生能源來解決部分疑慮，因此再生能源成為現今國際能源政策發展的核心之一¹⁹。

關於政府如何擬定良好的新能源政策俾產業發展，Allcott & Mullainathan 建議政府在擬定政策時，可以優先採取下列三個措施，首先是針對有高度開發潛力的能源投注資金，幫助其進行技術創新，其次是建立市場激勵機制，鼓勵消費者減少能源使用，最後是將能源的各式資訊（如：能源效率等）明確披露，使企業得以向消費者傳遞其價值²⁰。

關於日本能源政策體系的研究，尹曉亮將日本能源政策體系區分為三種類型：首先是根據能源別分類為煤炭政策、石油政策、核能政策與新能源政策等，其次是根據政策的性質分類為節能政策、石油替代政策與能源教育政策等，最後是根據政策的約束程度分類為能源展望、能源報告與能源法規等；並且因應不同階段的能源問題，日本政府皆會對政策制定者、政策目標以及手段進行調整，才能靈活面對各式挑戰²¹。

¹⁹ 蔡岳勳，2011，當代國際新能源政策與法制發展（新北：Airiti Press）。

²⁰ Allcott, Hunt & Mullainathan, Sendhil. 2010. "Behavior and Energy Policy," *Science*, vol. 327, issue 5970, pp. 1204~1205.

²¹ 尹曉亮，2011，戰後日本能源政策（北京：社會科學文獻出版社）。

二、產業政策工具

Tucker 將產業政策定義為透過改變投入成本、價格以及其他方式，促使資源從一個產業或部門移轉到另一個產業或部門²²；Siripurapu & Berman 則將其定義為政府為了促進對國家安全或經濟競爭力至關重要的特定產業，所擬定出的政策方針。簡而言之，產業政策便是政府有目的性的集中資源到特定產業所採取的手段²³。

Cherif 等人將產業政策所採用的工具，按照領域別分為產品市場、資本市場、勞工市場、土地市場以及科技技術五大類²⁴，並將細項臚列如表 1.1。

表 1.1 產業政策常採用的政策工具

市場別	政策工具	市場別	政策工具
A. 產品市場	貿易政策	C. 勞工市場	技術成長
	促進投資的稅制		勞工稅制
	國家作為生產者與消費者	D. 土地市場	廉價土地
	減少訊息摩擦的措施		經濟特區
B. 資本市場	指導與直接借貸	E. 科技	投資研發抵免稅制
	信用擔保		
	創業投資與企業孵化器		

資料來源：Cherif 等人；圖表為筆者自繪。

²² Tucker, Todd. 2019. *Industrial Policy and Planning: What It Is and How to Do It Better* (New York: Roosevelt Institute).

²³ Siripurapu, Anshu & Berman, Noah. 2022. "Is Industrial Policy Making a Comeback?" *Council on Foreign Relations*, <https://www.cfr.org/backgrounder/industrial-policy-making-comeback>.

²⁴ Cherif, Reda. et al. 2022. *Industrial Policy for Growth and Diversification: A Conceptual Framework* (Washington DC: IMF).

孫克難認為國家介入產業的政策工具可以分為五種：企業租稅減免、給予融資及低利貸款、直接提供企業補助金、簽署政府採購契約以及健全勞工、教育、環保、能源等一般性制度²⁵。

Rothwell & Zegveld 將政府政策工具分為三個層面：供給面、環境面及需求面，其中供給面政策工具包括成立公營事業、直接或間接鼓勵科學技術開發、建構教育訓練體系以及提供技術與市場交流的資訊服務；環境面政策工具包括給予貸款等財務金融支持、給予租稅減免優惠、規範專利及獨占等市場秩序、提供政策發展目標規畫及促成產業組織等政策性策略；需求面政策工具包括簽訂政府採購契約、提供公共服務、進行進出口貿易管制以及設立海外貿易組織等²⁶。

而能源作為一項產業，同樣也有相應的產業政策，以本研究所關注的新能源（再生能源）之產業政策為例，徐作聖等將再生能源產業政策的政策工具歸納為下列五點：建立技術創新機制、排除融資障礙、再生能源市場發展、再生能源管制制度以及再生能源權證交易制度，透過適當的能源產業政策之擬定，藉以達成政府擬定的發展目標²⁷。

貳、國際碳中和規制發展

碳中和（Carbon Neutrality）係指碳排放量與碳匯（Carbon Sink）取得平衡，所謂的碳匯即為碳吸收量高於碳排放量的系統，目前主要的碳匯來自土壤、森林以及海洋，每年能夠清除地球上 9.5 至 11 Gt 的二氧化碳；因此透過植樹造林等

²⁵ 孫克難，2000，政府協助產業科技發展措施的檢討與改進，產業金融季刊，第 106 期，頁 2-23。

²⁶ Rothwell, Roy, & Zegveld, Walter. 1984. "An assessment of government innovation policies," *Review of policy research*, vol. 3, no.3-4, pp.436-444.

²⁷ 徐作聖、王仁聖、彭志強，2011，新興能源產業及發展策略（台北：華泰）。

方式來增加碳匯，以及使用低碳或零碳能源等方式來降低碳排放量，便能使地球生態系統達成碳中和。

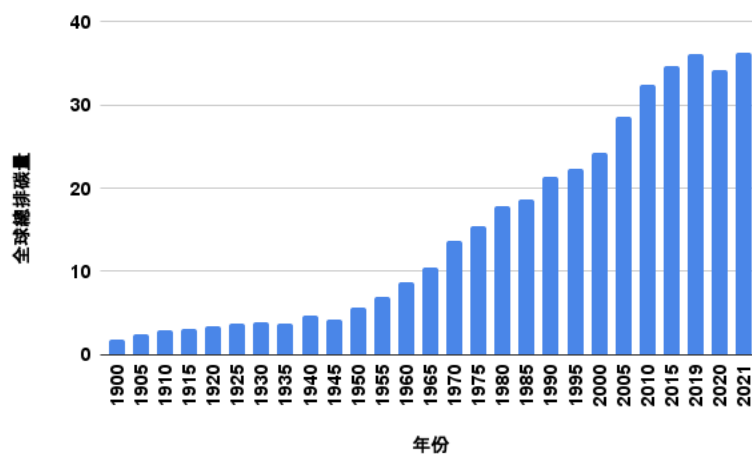
本節首先將爬梳全球碳排放趨勢的相關數據及理論，其後針對國際社會為達成碳中和而發展出的規制進行探討，並將規制分為兩大類，其一是各國所簽署的國際減碳協議，其二是碳定價機制（Carbon Pricing Mechanism）。

一、全球碳排放趨勢

自工業革命以來，人類社會對於化石燃料的需求急速攀升，化石燃料作為能源係經濟發展的基礎，對於維繫國民生計有著不可抹滅的貢獻，然燃燒化石燃料所產生的二氧化碳，亦造成地球環境相當大的破壞；詳見表 1.2，可以發現自 1900 年迄今，全球的總碳排放量從 1.8 Gt 上升至 36.3 Gt，儘管 2020 年因新冠肺炎疫情席捲全球，導致碳排放量較前年減少了 5.2%，但隨之而來的經濟復甦、全球極端氣候以及地緣政治衝突，即使該年的再生能源使用率迎來爆炸性增長，但成本較低的煤炭仍大量被使用，造成碳排放量再創新高²⁸。

²⁸ IEA. 2022. “CO2 emissions from energy combustion and industrial processes 1900-2021,” IEA, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2021>.

表 1.2 1900 年至 2021 年全球總碳排量

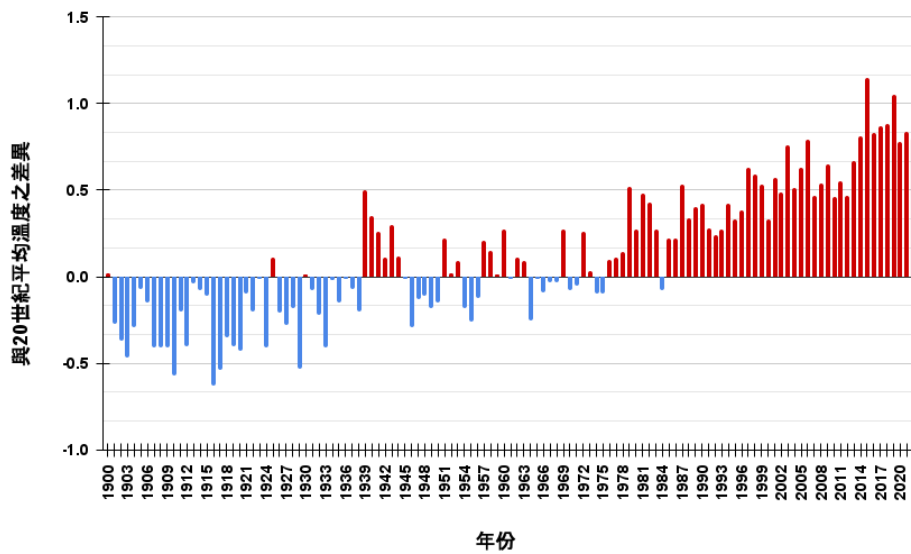


資料來源：IEA，總碳排量單位為 Gt；圖表為筆者自繪。

表 1.3 為 1900 年迄今的各年度溫度與 20 世紀平均溫度之差異，可以發現在 1970 年代以後，幾乎每年的溫度都較標準值高，近年來的差異甚至來到 1 度攝氏度；根據 NASA 的研究，當地球溫度升高 1.5 度攝氏度時，將會有 14% 的人口每五年遭遇一次極端熱浪，當溫度升高 2 度攝氏度時，此數值會提升至 37%，其他極端氣候（如乾旱、水災等）的發生機率也會隨著地球升溫而提高²⁹。

²⁹ Buis, Alan. 2019. "A Degree of Concern: Why Global Temperatures Matter," *NASA*, <https://climate.nasa.gov/news/2865/a-degree-of-concern-why-global-temperatures-matter/>.

表 1.3 1900 年至 2022 年 各年溫度與 20 世紀平均溫度之差異



資料來源：National Centers for Environmental information，

溫度單位為攝氏度；圖表為筆者自繪。

聯合國指出，煤炭、石油等化石燃料是目前地球升溫的最大推手，近九成的總碳排放量來源於此，且由於二氧化碳及其他溫室氣體壟罩地球，並吸收來自太陽的熱量，導致地球暖化的速度增快，破壞目前生態系的平衡³⁰，近年來各國頻傳的極端氣候便與碳排放量持續上升與地球升溫有著密切關聯，因此國際社會積極研擬相關協議與機制來避免情況惡化。

二、國際減碳協議

有鑑於全球碳排放量急遽上升，造成地球升溫及各式極端氣候頻傳，聯合國大會為了防止溫室氣體的濃度持續升高，使生態系統造成不可逆的傷害，「政府間

³⁰ UNFCCC. "Causes and Effects of Climate Change," UN, <https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.

氣候變化綱要公約談判委員會」在歷經多次的談判，於 1992 年正式通過「聯合國氣候變化綱要公約」(The United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC)，迄今已有 197 個國家與歐盟，共 198 個締約方，共同為了穩定大氣中的溫室氣體濃度在可控範圍，同時確保糧食生產與經濟的可持續性發展做努力³¹。

「聯合國氣候變化綱要公約」自 1995 年在德國柏林召開首次的締約方大會 (Conferences of the Parties, COP) 以降，便每年召集締約方開會以應對氣候變遷，包括 2022 年於埃及沙姆沙伊赫舉行的 COP27，迄今已召開 27 次的締約方大會；歷屆中對於氣候變遷做出代表性的決議，當屬於京都舉行的 COP3、於巴黎舉行的 COP21 以及於格拉斯哥舉行的 COP26；1997 年於京都舉行的 COP3，會中通過了《京都協議書》(Kyoto Protocol)，其規範已開發國家需要針對協議的六種溫室氣體 (二氧化碳、甲烷、氧化亞氮、氫氟碳化物、全氟碳化物及六氟化硫) 達成實質減量目標，惟排放大國美國與中國皆未受到《京都協議書》的規範，因此雖然《京都協議書》提出了史無前例的實質減量計畫，但其成效因參與國間的角度而大大減弱³²。

隨著溫室氣體的排放量不增反減，以及《京都協議書》延長效期將在 2020 年屆滿，各國意識到僅拘束部分締約方的協議無助於對抗氣候變遷，因此不斷協商要訂立一個全新且能夠拘束全體締約方的實質減量計畫，因此 2015 年在巴黎所舉行的 COP21 中，會中通過了《巴黎氣候協定》，除了協議要抑制直至本世紀末的升溫幅度在 2 度攝氏度 (並以不超過 1.5 度攝氏度為目標)，以及 2050 年達成

³¹ UNFCCC. “Conference of the Parties (COP)?” UN, <https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>.

³² UNFCCC. “What is the Kyoto Protocol?” UN, https://unfccc.int/kyoto_protocol.

零碳排，更重要的是要求締約方陸續提出國家自定貢獻，根據國情不同訂立減碳目標，並且每五年檢討及提出新目標³³。

簽署《巴黎氣候協定》後，地球升溫幅度未如預期的下降，世界各地仍然頻傳極端氣候帶來的損失，因此 2021 年 COP 26 所做成的《格拉斯哥氣候公約》中，各國首度針對化石燃料的使用做出行動，承諾要逐步取消對化石燃料的補貼，以及降低對於高碳排的燃煤發電之使用³⁴。

Wiersema 提到，COP 所達成的協議無法將其輕易歸類為硬法（Hard Law）或是軟法（Soft Law），儘管需要締約國簽署才對該國有約束力的條款，使其具備硬法的性質，基於共識型的決議機制，也使其具備軟法的性質，因此傾向將 COP 所達成的協議歸類為一種新型態、具適應性與靈活性的法律系統³⁵；Rajamani 在審視《巴黎氣候協定》的條文時，也認為其條文為硬性義務、軟性義務以及非義務的集合體，其中的界限相當模糊³⁶；Lawrence 認為《巴黎氣候協定》在許多關鍵條款（如：國家自定貢獻）採取軟性義務，將會使協議效果大打折扣。因此本研究認為除了國際減碳協議，仍有其他帶有硬性義務的碳中和機制在推進國際社會達成減碳目標，即為下個部分所探討的碳定價機制³⁷。

³³ UNFCCC. “The Paris Agreement” UN, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.

³⁴ UNFCCC. “The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26” UN, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>

³⁵ Wiersema, Annecoos. 2009. “The New International Law-Makers? Conferences of the Parties to Multilateral Environmental Agreements,” *Michigan Journal of International Law*, vol. 31, no. 1, pp. 231~287.

³⁶ Rajamani, Lavanya. 2016. “The 2015 Paris Agreement: Interplay Between Hard, Soft and Non-Obligations,” *Journal of Environmental Law*, vol. 28, pp. 337~358.

³⁷ Lawrence, Peter & Wong, Daryl. 2017. “Soft law in the Paris Climate Agreement: Strength or weakness?” *Review of European*, vol. 26, no. 3, pp. 276~286.

三、國際碳定價機制

根據 UNFCCC 的定義，碳定價機制是透過對排碳徵收費用，或者是訂立減少碳排放量的激勵措施來抑制全球暖化，透過經濟面的動機來促進減碳，並且將商品或服務的環境外部成本反應出來，達成環境正義；本研究整理目前國際社會主要採取的六種碳定價機制：碳稅（Carbon Tax）、碳費（Carbon Fee）、碳排放權交易（Emission Trading System, ETS）、碳信用（Carbon Credits）、企業內部碳定價（Internal Carbon Pricing, ICP）以及碳邊境調整機制（Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM），說明臚列如表 1.4。

表 1.4 碳定價種類及其說明

碳定價種類	說明
碳稅	針對碳排放量向商品或服務課徵的環境稅 ³⁸
碳費	針對管制對象的直接或間接排放量徵收，並且為特別公課，政府須設置基金對其進行專款專用 ³⁹
碳排放權交易	由政府規定一定時間內企業的碳排放量限額，未超過限額之企業，得將剩餘額度進行交易 ⁴⁰
碳信用	政府部門或企業透過提高能源使用效率等方式所減少的碳排放量，經過認證之後，可以進入碳交易市場交易 ⁴¹

³⁸ Parry, Ian. 2019. "What is Carbon Taxation?" *IMF*, <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2019/06/what-is-carbon-taxation-basics>.

³⁹ Parry, Ian. 2021. "Five things to know about carbon pricing," *IMF*, <https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2021/09/five-things-to-know-about-carbon-pricing-parry>.

⁴⁰ World Bank. "Pricing Carbon," *World Bank*, <https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>.

⁴¹ Thompson, Lucas & Miranda, Leticia. Oct 31, 2021. "What are carbon credits? How fighting climate change became a billion-dollar industry," *NBC news*,

企業內部碳定價	企業內部將高碳排放量的部門列為管制對象，針對其碳排放量課徵費用，並設置基金協助部門改善 ⁴²
碳邊境調整機制	目前已在歐盟施行，歐盟明定商品的碳排放量，若是出口制歐盟的商品之碳排放量超標，進口商需要購買碳憑證，或是在他國已收取碳費／碳稅使得抵免 ⁴³

資料來源：Parry、Thompson & Miranda、World Bank、C2ES、European Commission；圖表為筆者自繪。

關於碳定價機制的功能及預期成果，IEA 提到強有力的氣候政策工具可以促進短期經濟復甦，並幫助達成長期的能源轉型（Energy Transition）目標，並認為具備彈性和靈活性的碳定價機制便是能夠達成目標的工具之一⁴⁴。

ADB 認為碳排放權交易以及碳信用等性質的碳定價機制，不僅可以促進各國以低成本達成氣候承諾，也能激勵針對再生能源的投資，其認為碳定價機制與能源政策實有密不可分的關係⁴⁵；IMF 亦認為政府部門除了訂定碳定價機制外，同時也要對私營部門無法負擔的再生能源基礎設施進行投資，使得再生能源的使用率提升，進而達成碳定價機制的目的，也就是抑制全球暖化。

碳定價機制所牽涉到的碳排放量，與碳盤查（Carbon Offset Verification）的計算方式有關，目前碳盤查的指引方針為世界資源協會（World Resources Institute,

<https://www.nbcnews.com/business/business-news/are-carbon-credits-fighting-climate-change-became-billion-dollar-indus-rcna3228>.

⁴² C2ES, “Internal Carbon Pricing,” *C2ES*, <https://www.c2es.org/content/internal-carbon-pricing/>.

⁴³ European Commission. “Carbon Border Adjustment Mechanism,” *European Commission*, https://taxation-customs.ec.europa.eu/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en.

⁴⁴ IEA. 2020. “Carbon pricing can help put clean energy at the heart of stimulus packages,” *IEA*, <https://www.iea.org/commentaries/carbon-pricing-can-help-put-clean-energy-at-the-heart-of-stimulus-packages>.

⁴⁵ ADB. 2022. *Carbon Pricing for Energy Transition and Decarbonization* (Manila: ADB).

WRI) 及世界企業永續發展委員會 (World Business Council for Sustainable Development, WBCSD) 所出版的溫室氣體盤查議定書 (GHG Protocol), 其中將商品或服務的碳排量分為三個範疇, 詳如表 1.5, 而目前主要的碳排放量僅計算到範疇一與範疇二, 亦即直接排放與能源間接排放。

表 1.5 碳盤查的範疇與涉及的排放類別

範疇	涉及的排放類別
範疇一 (Scope 1)	直接溫室氣體排放與移除
範疇二 (Scope 2)	輸入能源之間接溫室氣體排放
範疇三 (Scope 3)	類別 4: 上游運輸和配送產生的排放 類別 6: 商務旅行產生的排放 類別 7: 員工通勤產生的排放 類別 9: 下游運輸和配送產生的排放
	類別 1: 購買商品或服務產生的排放 類別 2: 上游購買的資本財產產生的排放 類別 3: 與燃料和能源相關活動的排放 類別 5: 營運產生廢棄物的處置與處理的排放 類別 8: 上游租賃資產產生的排放
	類別 10: 銷售產品的加工產生的排放 類別 11: 使用銷售產品產生的排放 類別 12: 銷售產品廢棄處理產生的排放 類別 13: 下游租賃資產產生的排放 類別 14: 特許經營 類別 15: 投資產生的排放

資料來源: WRI & WBCSD; 圖表為筆者自繪。

綜上所述, 可以得知碳定價機制不僅可以在經濟面促進各部門降低碳排放量, 同時也能提升再生能源的投資額與使用率; 且在碳排放量計算時, 占比最大的即為能源排放, 因此碳定價機制將會進一步推升對再生能源的需求, 使各部門降低商品或服務的成本。

參、日本碳中和規制發展

本節將針對日本為達成碳中和而發展出的規制進行探討，並將規制分為兩大類，其一是日本國內相關的減碳政策，其二是日本所採取的碳定價機制。

一、日本國內減碳政策

為了因應 1997 年所通過的《京都協議書》，日本在 1998 年出台《地球溫暖化對策推進法》，針對溫室氣體的排放量與抑制手段進行規定，迄今進行過多次修法，最近一次是於 2021 年 5 月將菅內閣所承諾的 2050 年碳中和目標入法，並且規範地方自治體需要公開再生能源的導入目標，以及經評估後在各地設立再生能源促進區域，俾達成碳中和目標⁴⁶。此外，內閣府也於 2016 年 5 月提出「地球溫暖化對策計畫」，揭櫫各部門需要達成的減碳目標，以及應採取的對策，政府據此先行推動「政府實行計畫」，希望藉由政府的身體力行來促進私營部門參與並達成減碳目標⁴⁷。

在菅內閣揭櫫 2050 年碳中和目標後，日本經濟產業省於同年（2020）底推出「綠色成長戰略」，選定離岸風電、太陽能、地熱、氫能源、燃料氨、蓄電池等 14 個重點領域，制定完整的發展計畫與體制，編列 2 兆日圓的「綠色創新基金」（Green Innovation Fund），委託 NEDO 代為執行，希望能夠在推進溫室氣體減排的同時，也促進相關產業的發展。

⁴⁶ 環境省，2021 年 3 月 2 日，「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案の閣議決定について」，環境省，<https://www.env.go.jp/press/109218.html>。

⁴⁷ 環境省，「地球温暖化対策計画」，環境省，<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>。

2021 年日本政府提出第 6 次能源基本計畫，設定 2030 年的碳排放量要比 2013 年降低 46%，且為了達成 2050 年碳中和的目標，屆時再生能源的發電占比將達 50%，氫能源占比亦達 10%；並且持續維持「3E+S」的能源政策方針，在能源安全（Safety）的大前提下，同時達成能源自給（Energy Security）、經濟效率性（Economic Efficiency）以及環境適宜（Environment）的三個目標⁴⁸。

二、日本碳定價機制

日本目前所採取的碳定價機制為概念近似於碳稅的「地球溫暖化對策稅」，以及碳排放權交易；2012 年 10 月，日本政府為了要加強建構防止地球暖化的設施，如：引進再生能源以及節能基礎建設，因此分階段針對石油、天然氣及煤炭等化石燃料的使用，按照能源別對地球暖化的影響程度，向企業課徵地球溫暖化對策稅⁴⁹，也是亞洲第一個針對化石燃料徵稅的國家，惟稅率相較其他國家所開徵的碳稅來得低，OECD 亦認為日本所開徵的地球溫暖化對策稅屬於隱性的碳定價策略⁵⁰；因此 2021 年，日本政府進一步研擬要導入碳稅，依據商品或服務的供應鏈碳排放量課徵稅收，然預計在 2023 年徵收的碳稅，目前因為政府憂心加重日益攀升的家庭開銷，因此暫緩實施⁵¹。

⁴⁸ 經濟產業省資源エネルギー庁，「3E+S」，經濟產業省資源エネルギー庁，<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2020/005/>。

⁴⁹ 環境省，「地球温暖化対策のための税の導入」，環境省，<https://www.env.go.jp/policy/tax/about.html>。

⁵⁰ OECD. 2022. “Carbon pricing in Japan,” *OECD*, <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/carbon-pricing-japan.pdf>.

⁵¹ 林浩博，2022 年 11 月 8 日，「日本推遲碳稅改革，避免加重家庭生活成本」，CSRone，<https://csrone.com/news/7606>。

日本碳排放權交易可以伊始於 2005 年至 2012 年期間所運行的日本自願性排放交易機制（Japan Voluntary Emissions Trading Scheme, JVETS），政府補助吸引企業加入交易機制，並且也能在運行過程中學習到碳盤查與碳交易等的相關經驗；2010 年東京都構建世界上第一個以城市為單位的強制性碳排放交易機制—東京都排出量取引制度（Tokyo Cap-and-Trade Program, TCTP）⁵²，2011 年埼玉縣也根據 TCTP 設計出一套縣內的碳排放交易機制⁵³；然日本目前尚未有全國性的強制性碳排放交易機制在運行，因此目前日本交易所集團（Japan Exchange Group, JPX）、經濟產業省及其他相關部門亦針對全國性的強制性碳排放交易機制積極進行研商⁵⁴。

肆、小結

碳排放量急遽上升，導致地球升溫及極端氣候災情頻仍，國際社會透過《京都協議書》、《巴黎氣候協定》與《格拉斯哥氣候公約》等國際減碳協議，嘗試要解決問題，並且創建一套碳定價機制將經濟發展與環境保育串聯起來，提升減碳的誘因，促使各國積極朝碳中和目標邁進。

受到外部因素的影響，日本政府也開始研擬了碳中和相關法規、能源計畫、碳中和補助規制，甚或是發展碳定價機制，來幫助日本達成目標；而綜觀國際及日本的現行碳中和規制與碳定價機制，發現新能源能夠在其中扮演重要角色，其零排碳或低排碳的物理特性，可以使政府部門與企業在兼顧碳中和規制的同時，

⁵² 東京都環境局，「排出量取引」，東京都環境局，
https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/large_scale/trade/。

⁵³ 埼玉縣，「目標設定型排出量取引制度」，埼玉縣，
<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0502/torihikiseido.html>。

又維持經濟發展，惟目前各新能源仍處於發展階段，成本尚無法與化石燃料匹敵，因此需要政府提出相應的能源政策及產業政策，俾相關能源產業的健全發展。

第三節 研究範圍與概念澄清

壹、研究範圍

日本針對氫能源所擬定的能源政策與產業政策，可以用 2014 年做為分界點，彼時政府首次將氫能源列入能源基本計畫的範疇⁵⁵；2014 年前的氫能源相關政策較偏向前瞻技術發展，尚未針對氫能源訂立發展方針及政策，但隨著地球暖化愈趨嚴重，以及 2011 年東日本大地震引發的福島第一核電廠事故，促使日本政府調整其能源政策⁵⁶，因此 2014 年震災後擬定的第四次能源基本計畫中，大幅提昇包括氫能源在內的新能源之政策地位。因此本研究在第三、四章爬梳日本的氫能源政策發展時，會針對 2014 年氫能源列入能源基本計劃範疇後的一系列政策進行整理。

貳、概念澄清

國際社會上目前針對氫能源的分類尚無定論，國際能源署（International Energy Agency, IEA）⁵⁷以及國際可再生能源機構（International Renewable Energy

⁵⁵ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 4 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf。

⁵⁶ 經濟產業省資源エネルギー庁，「我が国のエネルギー政策の変遷と最近の取組」，經濟產業省資源エネルギー庁，<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014html/3-1.html>。

⁵⁷ IEA. 2019. *The Future of Hydrogen* (Paris: IEA).

Agency, IRENA)⁵⁸皆將其定義為再生能源 (Renewable Energy); 歐盟則是另外使用可再生氫能源 (Renewable hydrogen) 一詞, 藉此與源於化石燃料的氫能源做出區別⁵⁹。

根據聯合國對於再生能源的定義, 再生能源來源於補充速度高於消耗速度的自然資源, 例如: 太陽、風及水等, 與其相對的是煤炭、石油等不可再生能源; 而新能源 (New Energy) 則是相對於煤炭、石油等常規能源, 透過新技術及材料的開發而取得能源, 例如: 太陽能、風力、核能、海洋能及氫能等皆屬於此範疇 (王革華, 2008)。

然由於目前氫能源大多源於化石燃料重組後所得, 所產製的氫氣稱為灰氫 (Gray hydrogen); 而透過再生能源所得的電力進行水電解的製氫技術, 亦即所謂的綠氫 (Green hydrogen) 技術目前則尚待普及; 且日本資源能源廳以及 NEDO 在區分氫能源時, 皆將其歸納在新能源範疇中⁶⁰, 因此本研究不若國際將氫能源稱之為再生能源, 而是將其歸類為新能源。

⁵⁸ IRENA. 2019. *Hydrogen: A renewable energy perspective* (Abu Dhabi: IRENA).

⁵⁹ European Commission. "Hydrogen," *European Commission*, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en.

⁶⁰ 經濟產業省資源エネルギー庁, 「省エネルギー・新エネルギー」, 經濟產業省資源エネルギー庁, https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/。

第四節 研究方法與流程

壹、研究方法

為了描繪出日本氫能源政策體系的完整輪廓，本研究首先將針對國際及日本的碳中和規制（包含減碳協議與碳定價機制等）沿革，以及氫能源的發展概況及能源優勢進行整理，藉以理解為何日本將氫能源置於新能源政策中的重要地位；其後將日本氫能源政策分為政府面、學研面以及產業面三大領域，針對政府氫能源政策與立法、氫能源技術研發補助以及氫能源產業政策等進行爬梳，俾理解日本政府的完整氫能源政策體系，研析其政策脈絡與待解課題。

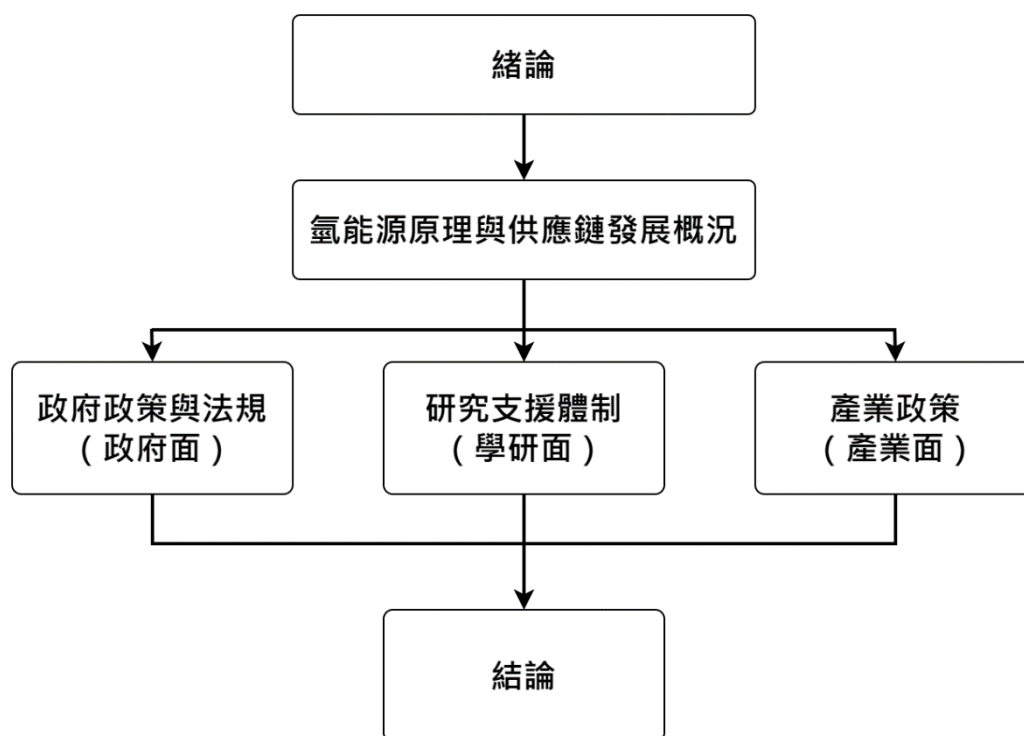
本研究之研究方法擬採取文獻分析法（Document Analysis），主要針對政府法規、政府公報、政府政策報告、政府及法人研究報告、產業報告、專書、期刊、論文及相關報導中，有關國際與日本碳中和規制、氫能源發展沿革以及日本氫能源政策發展的相關論著進行整理。

其中政策報告與研究報告的聚焦在制定日本氫能源政策的相關機關與法人，如：內閣府、經濟產業省、環境省、國土交通省、文部科學省以及 NEDO 等單位；而論及產業政策時，除了上述單位外，亦會針對日本氫能源相關企業，如：ENEOS、岩谷產業、川崎重工業、三菱重工、千代田化工建設、JERA、旭化成等，以及氫能源相關產業團體，如：零碳氫能供應鏈技術研究協會（HySTRA）、先進氫能源鏈技術開發協會（AHEAD）等所提出的產業報告進行整理，藉以理解各企業於日本氫能源政策體系中所扮演的角色。

為了完備資料蒐集的完整度，針對英文相關論著擬採用 SAGE Journals、JSTOR 以及 Science Direct 等電子資料庫，日文與中文相關論著則分別採用 Cinii 以及政治大學學術資源探索系統，並且透過網際網路搜尋與本研究相關之資料。

貳、研究流程

表 1.6 本研究之流程表



參、章節安排

本研究之章節安排臚列如表 1.7，第一章緒論旨在針對研究動機與目的、言就範圍與概念澄清、研究方法與架構進行說明，並對能源政策與產業政策工具相關文獻進行探討，以及爬梳國際及日本的碳中和規制發展，藉以理解日本對於新能源發展的急迫性與必要性；第二章擬針對氫能源的發電原理、供應鏈型態以及相較其他能源的發展優缺點進行探討，並整理國際與日本氫能源供應鏈發展的概況；第三、四章擬將日本氫能源政策分為政府面、學研面以及產業面進行研析；

第五章除針對日本氫能源政策的發展經驗做出結論外，並據此提出對台灣擬定氫能源相關政策以及產業發展方針的建議。

表 1.7 本研究之章節安排

章名	節次	標題
第一章 緒論	第一節	研究動機與目的
	第二節	文獻回顧
	第三節	研究範圍與概念澄清
	第四節	研究方法與流程
第二章 氫能源原理與 供應鏈發展概況	第一節	氫能源的原理與供應鏈
	第二節	國際氫能源供應鏈發展概況
	第三節	日本氫能源供應鏈發展概況
	第四節	小結
第三章 日本氫能源政策與法規	第一節	日本氫能源相關政策
	第二節	日本氫能源相關法規
	第三節	小結
第四章 日本氫能源產學政策	第一節	日本氫能源研究支援體制
	第二節	日本氫能源產業政策
	第三節	小結
第五章 結論	第一節	結論與研究發現
	第二節	台灣發展氫能源的建議

第二章 氫能源原理與供應鏈發展概況

第一節 氫能源的原理與供應鏈

壹、氫氣如何作為一種能源

氫的化學符號為 H，原子序為 1，不僅是宇宙中含量最為豐富的元素，同時也是最輕的元素；由於其作為單原子時會處於不穩定的狀態，因此在常溫常壓下，其通常以兩個氫原子所組成的雙原子分子 H₂（也被稱為氫氣）存在⁶¹；氫氣是一種無色、無毒且無味，並且具有高度易燃性的氣體，然而質量極小的氫氣難以被地球重力所束縛，大量外溢到大氣層外，因此在大氣中的氫氣含量相當低⁶²。

地球上的氫氣通常以化合物的形式存在，例如由兩個氫原子與一個氧原子所組成的 H₂O（也被稱為水），以及由一個碳原子與四個氫原子所組成的 CH₄（也被稱為甲烷，天然氣的主要成分）等化合物；而水亦是地球上最常見的氫氣存在形式，從不同語言對氫氣的命名方式，如：hydrogen（英）、hydrogène（法）、水素（日），即可得知氫與水之間密不可分的關係⁶³；但也因為氫氣多是以化合物的形式存在，使得其被定位為「二次能源」（secondary energy），即無法從空氣中捕獲，而是必須要透過加工及轉換後才能夠加以提取⁶⁴。

⁶¹ 岩谷産業，「水素とは」，岩谷産業，<https://www.iwatani.co.jp/jpn/consumer/hydrogen/about/>。

⁶² NEDO，「水素とは」，水素エネルギーナビ，<https://hydrogen-navi.jp/property/index.html>。

⁶³ 經濟產業省資源エネルギー庁，「次世代エネルギー「水素」、そもそもどうやってつくる？」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso_tukurikata.html。

⁶⁴ 石蕙菱，「全球氫氣生產方式的發展與趨勢」，經濟部技術處，https://www.moea.gov.tw/MNS/doit/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=364。

目前主流的氫氣提取方式可以分為「水蒸氣重組法」(steam reforming)與「電解法」(electrolysis)；水蒸氣重組法主要是透過高溫燃燒天然氣等化石燃料，使水蒸氣以及碳氫化合物重組後，再行精製並轉化為氫氣，目前約 95%的氫氣是透過此方式提取，為世界上較為成熟且成本最低的製氫方式⁶⁵，然由於燃燒天然氣的同時會產生大量二氧化碳，因此與目前碳中和的趨勢背道而馳；電解法主要是透過風力、太陽能等再生能源，為水電解槽提供電力，透過電解水來取得氫氣與氧氣，電解法的優點是由於電力來源於再生能源，因此沒有產生碳排的困擾，但由於技術仍未成熟，因此目前電解法的成本較高，且轉換效率相較水蒸氣重組法來得低。

雖然水蒸氣重組製氫為國際上主要的製氫方式，但為了因應碳中和的國際趨勢，包括前述的電解法，目前也開始出現許多在流程上使用零碳能源製氫，或將排碳進行碳捕捉與封存的方式來降低碳排的製氫方式，根據製氫流程以及所使用的一次能源之不同，可以將氫氣分為各種顏色，詳細臚列如表 2.1；而本研究因為著重在日本的氫能源政策，所以僅採用日本經產省資源能源廳所做的分類法，將氫氣分為「灰氫」、「藍氫」以及「綠氫」⁶⁶。

⁶⁵ 石蕙菱，「全球氫氣生產方式的發展與趨勢」，經濟部技術處，
https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=364。

⁶⁶ 經濟產業省資源エネルギー庁，「次世代エネルギー「水素」、そもそもどうやってつくる？」，經濟產業省資源エネルギー庁，
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso_tukurikata.html。

表 2.1 不同顏色的氫氣種類

顏色	氫氣種類	使用能源	製氫流程
	Gray Hydrogen 灰氫	天然氣	水蒸氣重組產出氫氣後，未將排碳進行碳捕捉與封存
	Blue Hydrogen 藍氫	天然氣	水蒸氣重組產出氫氣後，將排碳進行碳捕捉與封存
	Green Hydrogen 綠氫	再生能源	使用再生電力（太陽能、風力等）進行水電解製氫
	Turquoise Hydrogen 藍綠氫	天然氣	甲烷熱裂解後，產出氫氣與固態碳，並不再進行碳捕捉
	Pink Hydrogen 粉紅氫	核能	使用核能電力進行水電解製氫
	Brown Hydrogen 褐氫	煤炭	將煤炭氣化後產出氫氣
	Yellow Hydrogen 黃氫	太陽能	使用太陽能電力進行水電解製氫
	White Hydrogen 白氫	無	自然存在於地球上的氫，但目前尚未開發出提取方式

資料來源：Sustainable Northern Ireland⁶⁷；圖表為筆者自繪。

過去工業中使用到氫氣的場合相當廣泛，詳細臚列如表 2.2；在石化業中，提煉原油過程中需要吹入氫氣，與原油中的硫反應形成硫化氫並加以收集，來避

⁶⁷ Sustainable Northern Ireland. “The many colours of hydrogen,” *Sustainable Northern Ireland*, <https://www.sustainableni.org/blog/many-colours-hydrogen>.

免設備遭到硫腐蝕⁶⁸；在化工業中，氫氣為生產塑膠與其他樹脂的添加物；在鋼鐵業中，不鏽鋼等金屬材料在退火過程中，會混入純氫或氫氮混合氣體來防止高溫影響金屬材料表面，使其保持光亮⁶⁹；在半導體晶圓、太陽能矽晶圓以及各種電子相關原物料的製程中，氫氣也都在其中扮演重要角色；並且因為氫氣的單位重量能量密度相較液化天然氣（Liquefied Natural Gas, 後稱為 LNG）與柴油等化石燃料高出了三倍⁷⁰，因此更適合作為火箭燃料，所以一直以來在太空相關產業也受到廣泛的運用。

表 2.2 不同產業中會使用到氫氣的場合

產業	場合
電子零組件製造業	半導體、積體電路、電晶體、矽晶圓、太陽能矽晶圓、LED、陶瓷材料等
石油化學工業	油脂硬化、煉油、有機化合物、高純度氫氣、氮氣、甲醇、鹽酸等
玻璃製造業	退火玻璃、石英玻璃、光導纖維、燈泡、人工寶石等
金屬製造業	金屬熱處理、金屬鐵粉、非鐵金屬、焊接、退火等
太空產業	火箭燃料、人造衛星零組件等
其他產業	化學試驗、高空探測汽球、超電導等

⁶⁸ 台灣中油，「天涯河處覓油蹤—油氣是甚麼」，台灣中油，<https://www.cpc.com.tw/cp.aspx?n=1379>。

⁶⁹ 聯華林德，「熱處理」，聯華林德，<https://www.linde-lienhwa.com/tw/application/detail/%E7%86%B1%E8%99%95%E7%90%86>。

⁷⁰ 德瑞克說碳金融，「被喻為能源界的明日救星？「氫能源」到底是什麼？」，台灣氫能與燃料電池夥伴聯盟，<https://www.thfcp.org.tw/xcindustry/cont?xsmsid=0L265415022626956988&sid=0M203630443854474724>。

資料來源：岩谷產業⁷¹；圖表為筆者自繪。

除了上述的用途外，氫氣源於其「能量密度大」與「潔淨燃燒」的特性，被用以作為燃料電池（fuel cell）的燃料，其發電原理為氫氣與空氣中的氧氣在燃料電池中發生化學反應，產生電流以及副產物水；與鋰電池相比，燃料電池的能量密度較高，且可以排除鋰電池製程與回收的高污染，不用進行長時間的充電即能發電，並且在發電後僅會產出水，因此被視為清潔能源的一種。正是由於燃料電池的蓬勃發展，擴大了氫氣作為一項能源的潛力，人們開始意識到氫氣不只是工業製程中的必備原料而已，其或許會是建構碳中和社會時的最佳能源選項之一。

貳、氫能源的優缺點

不同的能源皆有其優缺點存在，如化石燃料雖然取得成本低且相關技術成熟，但是其會造成空氣、土壤、水資源的污染；太陽能雖然在發電時不會排放有害物質，且取之不盡用之不竭，但是仍有天候限制、建置成本高以及後續的太陽能板回收污染等問題⁷²；風力在發電時同樣也不會排放有害物質，亦同樣沒有蘊藏量限制，但是面臨著供電不穩定、地域性限制、噪音污染以及對當地生態的破壞等問題⁷³。綜上所述，可以知道能源是一體兩面的，氫能源同樣也有其優缺點存在，因此本段落將就氫能源的特性及其優缺點進行敘述，詳細臚列如表 2.3。

⁷¹ 岩谷產業, 「水素の用途」, 岩谷産業, <https://www.iwatani.co.jp/jpn/consumer/hydrogen/about/use/>。

⁷² Allen, Samantha. "Solar Energy Pros And Cons: What Are The Advantages And Disadvantages?" *Forbes*, <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/solar-energy-pros-and-cons/>.

⁷³ Energy Sage. "Wind energy pros and cons," *Energy Sage*, <https://www.energysage.com/about-clean-energy/wind/pros-cons-wind-energy/>.

表 2.3 氫能源的特性、優點及缺點

No.	特性	敘述
優點		
1	淨零碳排	和石油、天然氣、煤炭等化石燃料相比，氫氣在燃燒後只會產生副產品水，並不會產生碳排，因此對於環境的衝擊較低。
2	蘊藏量豐富	雖然大氣中的氫氣含量極低，但是在地球上許多化合物中都有氫的存在，只需要開發相應的提取技術，便能夠獲得足量的氫氣。
3	沒有毒性	化石燃料在燃燒時，除了會排放一氧化碳、硫氧化物、氮氧化物等溫室氣體外，同時也會產生鉛、硫、汞、砷及戴奧辛等有害物質，進而對土壤及地下水造成汙染 ⁷⁴ ；而氫氣在燃燒後僅產生水，不會留下任何有毒物質，因此對於環境的負面影響較少。
4	能源效率高	氫氣因為其能量密度大，相較於化石燃料的能源效率高了約 50%，意味著氫氣燃燒時，會比同單位的化石燃料得到更多的能量，進而降低燃料的消耗。
5	快速充電	相較鋰電池須要經過長時間的充電後才能使用，燃料電池只需要充填氫氣便能發電，與內燃機充填汽油的概念是相同的，能夠藉此來達成快速充電 ⁷⁵ 。

⁷⁴ 林玲珠，「石化能源污染知多少」，財團法人國家政策研究基金會
<https://www.npf.org.tw/3/12415>。

⁷⁵ 王縈緹，「未來汽車加氫或充電，你會怎麼選？」，旭時報，
<https://sunrisemedium.com/p/153/hydrogen-vehicle>。

6	擺脫能源限制	化石燃料為隨機分布在地球各處，並且集中在少數地區，因此大多數國家皆須要向蘊藏量高的能源擁有國進口；但若是製氫技術得到突破，許多能源進口國也能藉此受益，擺脫少數國家對能源的壟斷，藉此降低地緣政治衝突所引發的能源斷供，對於本國經濟安全的衝擊 ⁷⁶ 。
缺點		
1	存在安全疑慮	氫氣無色無味，若是遭遇洩漏事故，並無法透過視覺或嗅覺來察覺到，且氫氣具有高度可燃性，因此存在相當的危險性。
2	體積密度低	氫氣的體積密度相較於天然氣低了三倍左右，較石油甚至低了兩千七百倍 ⁷⁷ ，因此氫氣的儲存和運輸都面臨極大的挑戰。
3	能量損耗高	由於氫氣體積密度低，所以通常需要將氫氣進行壓縮、液化或轉化為其他的能源載體進行儲存及運輸，但在轉化的過程中會造成相當大的能量損耗。
4	依賴化石燃料	儘管氫氣號稱是清潔能源，但是理論上只有綠氫屬於此範疇，目前大多數產製出的氫氣仍是屬於灰氫；若是要全面成為清潔能源，仍然需要發展碳捕捉及封存技術，使碳排能夠被收集起來，更理想的狀態則

⁷⁶ Koons, Eric. "The Pros and Cons of Hydrogen Energy" *Energy Tracker Asia*, <https://energytracker.asia/pros-and-cons-of-hydrogen-energy/>.

⁷⁷ 石蕙菱，「全球氫氣生產方式的發展與趨勢」，經濟部技術處，https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=364。

		<p>是透過可再生能源來進行水電解製氫，以達成淨零碳排的目的⁷⁸。</p>
--	--	--

資料來源：圖表為筆者自繪。

然而儘管氫能源存在著上述的缺點，但是其淨零碳排以及蘊藏量豐富等優點仍然驅使著各國針對缺點進行改善，例如研發水電解以及碳捕捉與封存技術，幫助製氫擺脫化石燃料的桎梏；在儲藏和運輸過程中，針對更具安全性的儲藏材料，以及氫氣洩漏的感測器進行研發；並且尋求更優良的氫能源載體，進一步降低氫氣的能源損耗與成本。關於氫能源在不同階段的技術開發，會在下一部份進行詳述。

參、氫能源的供應鏈

氫能源的供應鏈大致上可以分為四個階段：「製氫」、「儲氫」、「運氫」以及「應用」，製氫主要包含氫氣的提取、精製以及轉化為其他能源載體等工序，儲氫、運氫則是需要因應不同的氫氣能源載體，使用相應的儲藏及運輸形式；應用面除了前述所提到的燃料電池外，活用燃料電池所製成的氫燃料電池車（Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV）及其他載具、家庭或工廠用的儲能裝置，或者是氫能煉鋼、氫能混燒或專燒發電等應用都包含在內；而本部分將會針對目前製氫、儲氫、運氫以及應用面的相關技術發展進行描述。

⁷⁸ Koons, Eric. "The Pros and Cons of Hydrogen Energy" *Energy Tracker Asia*, <https://energytracker.asia/pros-and-cons-of-hydrogen-energy/>.

一、製氫

目前主要的製氫方式主要分為兩大類：「水蒸氣重組法」與「電解法」，水蒸氣重組法主要是透過高溫燃燒天然氣等化石燃料，使水蒸氣以及碳氫化合物重組後，透過深冷分離法、膜分離法、吸收法或變壓吸附法（Pressure Swing Adsorption, PSA）等精製過程後轉化為氫氣，因為化石燃料燃燒時會產生碳排，因此生產出的氫氣為灰氫，若是在碳排過程中進行碳捕捉與封存，則能夠獲得藍氫；目前來源於水蒸氣重組法的氫氣產量佔了總產量的 95%，但是由於製程中仍會產生碳排，因此各國積極研發不會產生碳排的方式來獲得氫氣，其中便包括下述的電解法。

電解法主要是透過風力、太陽能等再生能源，為水電解槽提供電力，透過電解水來取得氫氣與氧氣，目前主要的水電解槽技術可以分為鹼性（Alkaline）、質子交換膜（Proton Exchange Membrane, PEM）、固態氧化物（Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC）以及陰離子交換膜（Anion Exchange Membrane, AEM）等四種，由於水電解所使用的電力源於再生能源，因此生產出的氫氣為綠氫，能夠幫助人類實現邁向碳中和的能源轉型⁷⁹。

然而由於產出後的氫氣體積密度低，儲藏與運輸相當不易且成本極高，因此會先將氫氣轉化為其他能源載體，以方便儲藏與運輸，目前的主要作法是將氫氣加壓後以氣態來進行運輸，但是壓縮氫的體積密度並未縮小太多，安全性隱患甚至比原本的氫氣還要高，因此未來將朝向「液化氫」、「氨」、「甲基環己烷（Methylcyclohexane，後稱為 MCH）」以及「甲烷」等其他氫氣能源載體選項來發展，詳述如表 2.4。

⁷⁹ 臼井建敏，「グリーン水素製造技術」，日本エネルギー学会機関誌，第 99 卷第 4 号，https://www.jstage.jst.go.jp/article/jiecnormix/99/4/99_338/_pdf。

表 2.4 不同氫氣能源載體的特性

氫氣載體	液化氫	氨	MCH	甲烷
與氫氣的體積比	1/800	1/1300	1/500	1/600
成為液態的條件	-253°C、常壓	-33°C、常壓	常溫、常壓	-162°C、常壓
有無毒性	無毒	有毒性及 腐蝕性	甲苯狀態下 有毒	無毒
直接使用	不可	可	不可	可
轉化時的能耗	目前 25-35% 未來 18%	氫化 7-18% 脫氫 20%	目前 35-40% 未來 25%	目前-32%

資料來源：經濟產業省資源エネルギー庁⁸⁰；圖表為筆者自繪。

二、儲氫

氫氣產出並轉化為不同能源載體後，必須要根據其化學特性的不同，使用相應的材料所製成的儲槽或儲罐進行儲存，以下分別針對壓縮氫、液化氫、氨、MCH 以及甲烷的儲藏方式進行敘述。

首先是壓縮氫，因為壓縮後的高壓氫氣會滲入普通鋼材所製成的儲罐，並且使鋼材變脆，因此目前儲藏壓縮氫，主要是選用特殊不銹鋼、鋁合金以及高分子複合材料所製成的儲罐⁸¹；其次是液化氫，當氫氣要以液態方式存在時，必須要

⁸⁰ 經濟產業省資源エネルギー庁，「水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性」，經濟產業省資源エネルギー庁，
https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/001_03_00.pdf。

⁸¹ 蘇順發，「減碳科技：儲氫材料」，科技大觀園，
<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000003/detail?ID=1eb80413-e83f-49af-aa75-5eba6eff3e1b>。

將其冷卻到-253°C以下，通常會選用一種雙層隔熱儲罐，在內層與外層的金屬之間設有一個真空區域，阻擋熱量從儲罐內部向外部傳遞，進而防止儲罐內的液化氫汽化⁸²。

氫只要在-33°C左右的溫度便能達成液化，與液化石油氣中的丙烷之液化溫度(-42°C)相近，因此可以通用液化石油氣的儲藏設備，僅需進行防腐蝕的相關處理即可；而將甲苯與氫氣反應後形成的 MCH，在常溫狀態下便是以液態方式存在，且不具備毒性及腐蝕性，因此能夠通用目前石油的儲藏設備；甲烷則是天然氣的主要成分，因此在儲藏上與天然氣無異。

除了上述的儲藏方式外，目前也開發出儲氫合金 (Hydrogen Storage Metal) 來儲藏氫氣，其原理是選用與氫原子親合的金屬或合金，使氫原子能夠在與合金接觸時嵌入其中形成金屬氫化物，需要取用氫氣時，僅需要對其進行加熱或降壓，便能夠提取出氫氣，目前研發中的有鈦系、鋅系、鐵系以及稀土系的儲氫合金⁸³，但因為其單位儲存量相較前述幾種能源載體來得低，且成本相當高，因此仍尚待進一步的開發與實證。

三、運氫

因應不同地點之間的運輸需求，運氫主要可以分為「海上運輸型」與「陸上運輸型」兩種模式，由於製氫的成本過高，因此部分國家考慮從國外進口氫氣，而海上運輸型的運氫方式主要是將製氫成本較低的國家所產製的氫氣，轉化為氨或 MCH 等可以適用現有運輸船舶的能源載體再行運輸到能源進口國，運載液化

⁸² 川崎重工業株式會社，「水素社会実現に向けた川崎重工業の取り組み」，仙台塩釜港 CNP 協議会，<https://www.pref.miyagi.jp/documents/39994/11.pdf>。

⁸³ 何鎮揚、葉名倉，「儲氫合金」，科學 online，<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3145>。

氫的運輸船目前也已開發及實測完畢，然海上運輸型的運氫方式受限於成本以及技術問題，目前仍尚待進一步的開發與普及。

陸上運輸型又可以細分為「車輛運輸」以及「管線運輸」兩種，車輛運輸主要是根據不同的氫氣能源載體，使用相應的車輛進行短途運輸，如壓縮氫可以將其充填至儲罐中再由拖車進行運輸，液化氫需要裝載在能夠保持低溫、防止汽化的油罐車儲槽中，而 MCH 與氫能夠透過現有的化學槽車進行運輸，甲烷也能夠由液化天然氣槽車運輸⁸⁴。管線運輸目前主要是將氫氣混入天然氣中，再由現有天然氣管線進行運輸，只要其中氫氣的含量不超過 10%便能保持安全性，另外使用特殊金屬材質製成的專用運氫管線目前也在研發中⁸⁵。

由於氫氣的化學物性會使得運輸車輛及管線等基礎設施產生「氫脆 (Hydrogen Embrittlement)」現象⁸⁶，無論是採用壓縮氫或液化氫的能源載體進行運輸，皆會大大提升運輸及後續檢修成本，而將氫氣轉化為化學物性較穩定且容易運輸的氫、MCH 或甲烷，則會因為轉化的過程中產生大量能源耗損，因此未來步入商業化時，仍需要比較何種能源載體較符合規模經濟及成本效益再行發展。

⁸⁴ 經濟產業省資源エネルギー庁，「水素の製造、輸送・貯蔵について」，經濟產業省資源エネルギー庁，
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/005_02_00.pdf。

⁸⁵ 日本ガス協会，「日本ガス協会における水素導管ネットワーク構築に向けた取り組み」，日本ガス協会，
https://f-suiso.jp/site1/bunkakai/H23bunkakai/2nd/2nd/H23_2_3.pdf。

⁸⁶ 江凱狄，「氫脆現象」，科技網，
https://www.digitimes.com.tw/tech/dt/n/shwnws.asp?id=0000437738_ZKT82H1H2WR5JP9JJOTVP。

四、應用

氫能源的實際應用主要可以分為四個面向：「運輸」、「儲能」、「發電」以及「工業」；運輸部分包含目前已有多家車廠開發的氫能車與氫能巴士，使用氫燃料電池的各種工業車輛及機械設備，如氫能堆高機(Hydrogen Fuel Cell Forklifts)、氫能貨櫃起重機(Hydrogen Fuel Cell Container Handler)⁸⁷等，以及正在開發中的氫能船舶、氫能列車、氫能飛機等載具；除了上述的載具外，加氫站等基礎設施也包含在運輸範疇中。儲能部分則包含活用燃料電池所製造的家用或產業用儲能設備，能夠將過剩的電力轉化為氫氣儲藏起來，可以作為備援電力提供家庭或產業需求來使用。

發電部分可以分為混燒及專燒兩種，混燒為將不同比例的氫氣或是氨氣混入化石燃料中進行火力發電，目前已有多個國家完成混燒的實證實驗，而專燒則是將 100%的氫氣或氨氣進行火力發電，但專燒相關技術仍然在研發中。工業部分則包括氫能煉鋼等面向。

⁸⁷ Lewis, Michelle. "Meet the world's first hydrogen fuel cell-powered container handler," *electrek*, <https://electrek.co/2022/10/12/meet-the-worlds-first-hydrogen-fuel-cell-powered-container-handler/>.

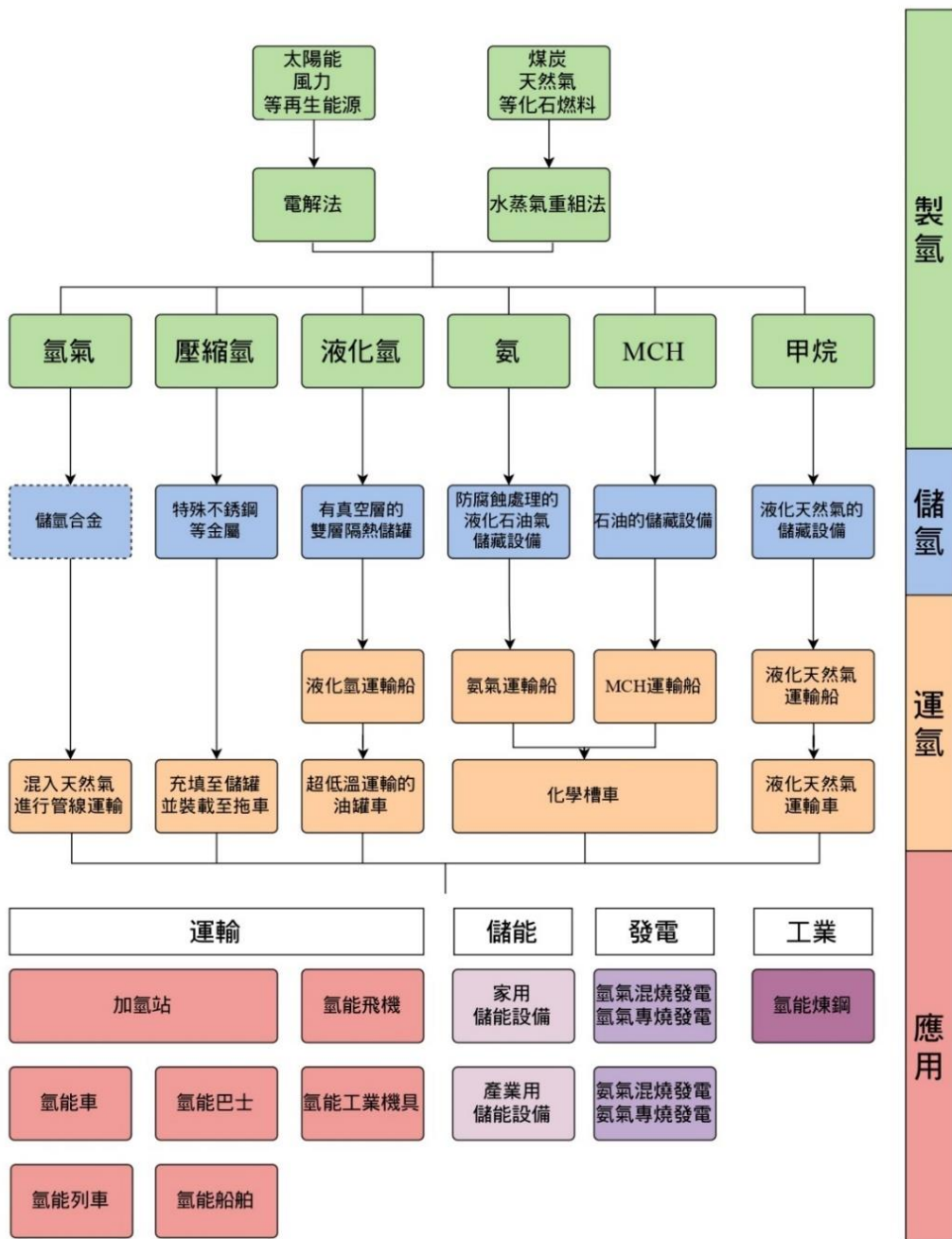


圖 2.1 氫能源的上下游供應鏈

資料來源：綜合前述整理；圖表為筆者自繪。

第二節 國際氫能源供應鏈發展概況

本節將針對美洲、歐洲以及亞太等三大區域，美國、加拿大、智利、英國、德國、法國、中國、韓國、澳洲、印度及台灣等十一個國家的政府之氫能源指導方針與政策，以及上下游供應鏈發展概況進行說明，藉以了解在碳中和的國際趨勢之下，各國政府將氫能源置於何種政策位階，以及未來供應鏈與產業主要發展的主軸為何。

壹、美洲地區

一、美國

美國在 2021 年 11 月公布「2050 淨零排放之路：美國長期策略」(The Long-Term Strategy of the United States: Pathways to Net-Zero Greenhouse Gas Emissions by 2050)，作為減排以及碳中和的上位政策，其中為了達成中期目標與長期戰略目標⁸⁸，希望可以透過發展氫能源，助力運輸物流以及其他相關產業達成碳中和。

除此之外，美國能源部在 2023 年 6 月公布「美國國家清潔氫氣⁸⁹戰略與路線圖」(National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap)，作為氫能源的政策指導方針，除了設定氫氣產量及成本的目標外，也提及要擴大美國本土的製氫能力，確保未來不需要進口氫氣來滿足國內產業需求，並規劃 2030 年以後能夠向海外出口過剩的氫氣。

⁸⁸ 美國碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 50-52%的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

⁸⁹ 根據美國能源部的定義，生產每公斤的氫氣不超過 2 公斤碳排，即可稱為清潔氫氣。

美國是世界上發展氫能源技術較早的國家，而近年來政府為了進一步鼓勵企業投入開發清潔氫氣的生產以及藍氫所需具備的碳捕捉與封存技術，在 2022 年 8 月出台的《2022 年降低通膨法案》（Inflation Reduction Act of 2022, 後稱為 IRA 法案）中，針對生產清潔氫氣的業者給予減稅優惠；2018 年出台的《45Q 碳稅收抵減條款》（Section 45Q Credit for Carbon Oxide Sequestration）中，亦針對進行碳捕捉與封存的業者給予減稅優惠；除此之外，能源部與綠色能源實證局也預計在 2023 年起投入 70-80 億美元，推行「區域清潔氫氣樞紐」（Regional Clean Hydrogen Hub, H2Hubs）計畫，希望在各州實證清潔氫氣的製造、儲藏以及運輸的供應鏈構築，並且藉以開創更多就業機會，解決勞工問題⁹⁰。

美國目前氫氣年產量約為 1000 萬噸，其中大多來自水蒸氣重組，並且經過碳捕捉及封存所獲得的藍氫，經由天然氣管線的輸送，最終約有 90% 的氫氣用於中南部各州（如：德克薩斯州、阿拉巴馬州與路易斯安那州）的煉油以及氨氣合成；目前除了在國內積極尋找能夠儲藏氫氣的天然鹽丘，並且興建多座液化氫工廠外，也在進一步發展使用再生能源、核能甚至是廢棄物焚化發電來進行製氫的技術；在氫能源的應用面，未來將從石化工業，積極向運輸物流（氫能卡車、列車、飛機等）、儲能以及發電領域的氫能源活用進行轉型⁹¹。

⁹⁰ 環境省，「米国の取り組み」，環境省，
https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_usa_202303.pdf。

⁹¹ 赤平大寿，「水素でも、自国中心のサプライチェーン構築を目指す米国」，JETRO，
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/656c671a3b492ede.html>。

二、加拿大

加拿大在 2016 年 11 月公布「加拿大 21 世紀中期溫室氣體減排發展戰略」(Canada's Mid-Century Long-Term Low-Greenhouse Gas Development Strategy)，作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成戰略中所規劃的中期與長期目標⁹²，希望可以透過推進重型車輛 (heavy-duty vehicle)、船舶以及航空等運輸工具使用氫能源，來促進交通領域的碳中和⁹³。

此外，加拿大自然資源部在 2020 年 12 月公布「加拿大氫能戰略」(Hydrogen Strategy for Canada)，作為氫能源的政策指導方針，主要目的是為了要活用加拿大豐富的天然資源，促進加拿大綠氫、藍氫以及核能電力製氫等低碳氫氣的生產，進一步帶動相關產業的發展，藉以解決就業問題，並且規劃未來將過剩的氫氣出口至日本、韓國、中國及歐盟等地⁹⁴。

而有鑑於美國提出 IRA 法案以及未來可預見的出口需求，加拿大財政部於 2022 年 12 月提出「清潔科技與氫氣稅收抵減政策」(Tax Credits for Clean Technology and Clean Hydrogen)，計畫在五年內投入 67 億加幣，給予清潔氫氣的生產與基礎設施提供者減稅優惠，希望促進更多企業投入相關領域，早期建構氫氣出口的供應鏈，提升未來加拿大氫氣出口的競爭力⁹⁵。

⁹² 加拿大碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 40-45%的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

⁹³ 環境省，「カナダの取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_canada_202303.pdf。

⁹⁴ 環境省，「カナダの取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_canada_202303.pdf。

⁹⁵ Department of Finance Canada. “Consultation on the Clean Hydrogen Investment Tax Credit,” *Government of Canada*, <https://www.canada.ca/en/department->

加拿大目前的氫氣年產量約為 300 萬噸⁹⁶，目前主要仍是透過水蒸氣重組獲得的灰氫或藍氫，但加拿大有著豐富的水力發電資源（佔全國發電量約六成），未來可望藉此生產綠氫，政府亦規劃透過核能發電來生產氫氣；除此之外，亞伯達省、薩斯喀徹溫省以及卑詩省等地擁有豐富的化石燃料儲備，未來待精進碳捕捉與封存技術後，能夠在這些地區發展藍氫生產。在氫能源的應用方面，加拿大計畫發展自家車、商用車、鐵道、船舶、飛機等交通工具的氫能源化，以及氫氣混燒及專燒發電，並且在高緯度地區使用氫氣來取代天然氣以供給暖氣。

三、智利

智利在 2021 年 10 月公布「智利長期氣候策略」（Chile's Long-Term Climate Strategy），作為減排以及碳中和的上位政策，並且也是南美洲最早響應《巴黎氣候協定》並提出碳中和策略的國家，為了達成規劃的中期與長期目標⁹⁷，智利希望透過發展交通運輸部門的氫能化來推進碳中和。

而智利能源部早在 2020 年 11 月，便在德國國際合作機構（Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, GIZ）的協助之下提出「國家綠氫戰略」（National Green Hydrogen Strategy），作為氫能源的政策指導方針⁹⁸；由於智利中北部沙漠地帶發展太陽能，以及南部鄰近南極地帶發展風力發電等再生能

[finance/programs/consultations/2022/consultation-on-the-investment-tax-credit-for-clean-hydrogen.html](https://www2.gov.bc.ca/gov2/finance/programs/consultations/2022/consultation-on-the-investment-tax-credit-for-clean-hydrogen.html).

⁹⁶ Beauchemin, Adam. "What can we expect from clean hydrogen in Canada?" *CBC*, <https://www.cbc.ca/news/science/clean-hydrogen-canada-1.6856584>.

⁹⁷ 智利碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 30% 的碳排放量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

⁹⁸ 環境省，「チリの取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_chile_202303.pdf。

源的成本相當低，因此希望透過此戰略結合再生能源，建構完善的綠氫供應鏈，進一步成為世界綠氫成本最低的國家，並規劃向歐洲、日本、中國、韓國及南美洲各國出口，除此之外也能帶動相關領域的研究開發與產業化。

目前智利主要仍是生產灰氫，希望透過上述的政策支援，以及智利產業開發機構（Corporación de Fomento de la Producción de Chile, CORFO）對於綠氫基礎設施的補貼措施來大力發展綠氫，未來所生產的綠氫主要將會用於採礦業的重型卡車以及長距離物流運輸卡車的替代能源（目前主要是使用柴油），以降低交通部門的排碳量，並且加緊建構港灣的氫氣出口設備，以利中長期對外出口氫氣的政策發展。

貳、歐洲地區

一、英國

英國在 2021 年 10 月提出「英國淨零策略」（UK Net Zero Strategy）作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標⁹⁹，英國希望透過氫能源在電力、建築、運輸物流及產業等部門的發展，來推進能源轉型。

英國商業及貿易部在 2021 年 8 月提出「英國氫能策略」（UK Hydrogen Strategy），作為氫能源的政策指導方針，希望藉由推動綠氫、藍氫以及氫氣專燒發電等專案項目，來推進低碳氫能源的產業發展，且由於英國在北海地區有著豐富的離岸風力發電資源以及碳封存潛在場址，因此離岸風電水電解製氫以及碳捕捉與封存都是未來發展的重點項目。英國商業及貿易部另在 2022 年 4 月公布「低

⁹⁹ 英國碳中和的中期目標為 2030 年需要較 1990 年基準值降低 68% 的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

碳氫氣標準」(Low Carbon Hydrogen Standard)，將低碳氫氣的標準訂為排碳量低於 20gCO₂e/MJLHV 以下，若企業要獲得政府的「淨零氫氣基金」(The Net Zero Hydrogen Fund)或是「氫氣企業模式」(Hydrogen Business Model)等補貼計畫，產製的氫氣必須要達到低碳氫氣的標準¹⁰⁰。

目前英國主要生產的是藍氫，在蘇格蘭以及英格蘭東北部地區進行水蒸氣重組製氫後，將捕捉的二氧化碳送至北海地區進行封存，而未來亦將活用北海地區的離岸風力發電潛力進行綠氫製造，除此之外在英格蘭東部地區也有在進行核能發電水電解製氫的示範計畫；英國目前主要的氫氣應用仍然是以石化與化工產業為主，未來將會朝向大型載具與建築機械的氫能化、取代天然氣供暖以及氫氣發電來發展¹⁰¹。

二、德國

德國在 2016 年 11 月公布「德國氣候變遷行動計畫 2050」(German Climate Action Plan 2050)，作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標¹⁰²，德國希望推進電力以及產業部門的氫能發展，加快相關產業的脫碳化進程。

¹⁰⁰ 環境省，「英国の取り組み」，環境省，
https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_uk_202303.pdf。

¹⁰¹ 菅野真，「エネルギー安全保障・ネットゼロに向け水素拡大（英国）」，JETRO，
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/3c74f4feb3e53b6.html>。

¹⁰² 德國碳中和的中期目標為 2030 年需要較 1990 年基準值降低 55%的碳排量，長期目標則是在 2045 年時達成全面碳中和。

德國經濟與能源部(經濟事務和氣候行動部的前身)在2020年6月公布「國家氫能戰略」(The National Hydrogen Strategy)，計畫投入90億歐元來推進氫氣的製造、應用、研究教育等領域之發展，並且將氫氣視為促進能源轉型的要角之一；德國教育與研究部也在2021年起投入7億歐元，針對H2Giga(水電解技術)、H2Mare(離岸風電與水電解製氫)、TransHyDE(運氫)等三項綠氫大型計畫給予補助，希望能夠藉此確立綠氫的技術與市場¹⁰³。

德國政府意識到未來的綠氫需求無法透過國內生產來滿足，因此計畫透過下列兩個方式，自外國購買綠氫來滿足國內需求，其一是經濟事務和氣候行動部於2022年12月啟動的H2Global計畫，透過與仲介公司Hint.co簽訂合約，從綠氫成本較低的國家購買氫氣，若歐盟其他國家有綠氫需求亦可進行轉賣¹⁰⁴；其次是響應歐盟的歐洲氫能骨幹倡議(European Hydrogen Backbone Initiative, EHB)，與周邊國家建構北海、北非、伊比利半島、北歐及東歐等地運往歐盟各國的氫能管線，確保未來氫氣供應無虞¹⁰⁵。德國未來將會在應用面推進氫能源在煉鋼、化工等產業的應用，並且透過H2 Mobility Germany等計畫對於加氫站的支援，建構完善的加氫站網路，促進商用車以及私家車的氫能化發展。

¹⁰³ 環境省，「ドイツの取り組み」，環境省，
https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_germany_202303.pdf。

¹⁰⁴ 環境省，「ドイツの取り組み」，環境省，
https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_germany_202303.pdf。

¹⁰⁵ 經濟部國際貿易局，「德國氫能政策發展現況」，中華民國對外貿易發展協會，
https://www.taitra.org.tw/News_Content.aspx?n=104&s=58035。

三、法國

法國在 2016 年 12 月公布「國家低碳策略」(National Low Carbon Strategy) 作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標¹⁰⁶，法國希望透過促進運輸部門的大型載具（如：卡車、鐵道、船舶、飛機等）之氫能化，以及檢討氫能煉鋼的可行性，來助力達成碳中和。

法國生態部及經濟財政部在 2020 年 9 月公布「國家脫碳化氫能源戰略」(Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France) 作為氫能源的政策指導方針，計畫在 10 年內投入 70 億歐元，透過扶植本國水電解裝置製造業、化學工業以及大型載具的氫能化，藉以促進相關產業的碳中和；除此之外，經濟財政部在 2020 年 6 月提出「航空產業再生計畫」(plan de relance du secteur aéronautique) 中，也提到未來政府將支援法國航空業者，針對氫能飛機的技術進行研究開發¹⁰⁷。

法國在石化以及化工領域的氫氣活用已經行之有年，國內的液化空氣集團 (Air Liquide) 也是目前世界上最大的工業氣體供應商，但主要生產的仍是以灰氫為主，未來將透過上述的政策支持，逐步向脫碳化氫氣轉型；其中法國有約七成的電力來自核能，在政策中核能電力用於水電解所產出的氫氣，亦被視為脫碳化氫氣，而馬克宏政權在 2021 年提出的「法國 2030」計畫中，核能發電廠與脫

¹⁰⁶ 法國碳中和的中期目標為 2030 年需要較 1990 年基準值降低 55% 的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

¹⁰⁷ 環境省，「フランスの取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_france_202303.pdf。

碳化氫氣都被列入其中¹⁰⁸，可以預期未來法國可能會以核能電力進行水電解作為主要的製氫方式，並且同時推進大型載具的氫能化。

參、亞太地區

一、中國

中國在 2021 年 10 月公布「中國 21 世紀中期溫室氣體減排發展戰略」(China's Mid-Century Long-Term Low Greenhouse Gas Emission Development Strategy)，作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標¹⁰⁹，希望透過發展電力、交通以及產業等部門的氫能化，來助力達成碳中和。

中國國家發改委以及國家能源局在 2022 年 3 月出台「氫能產業發展中長期規劃(2021—2035 年)」，作為氫能源的政策指導方針，針對再生能源電力製氫、儲氫、運氫、加氫等基礎設施的建置進行支援，並在交通、儲能、發電、工業等領域的氫能源應用進行相關的實證實驗，希望可以藉此初步確立綠氫的國內供應鏈¹¹⁰。除此之外，中國早在 2015 年 5 月提出的「中國製造 2025」以及 2016 年 10 月提出的「新能源及節能車的技術路線圖」中，便多次提及要強化氫燃料電池車的技術力，由此可見中國對於私家車的氫能化相當重視¹¹¹。

¹⁰⁸ KSM News and Research, 「水素エネルギーをめぐるフランスの事情」, KSM News and Research, <https://ksm.fr/archives/617810>。

¹⁰⁹ 中國碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 65% 的碳排量，長期目標則是在 2060 年時達成全面碳中和。

¹¹⁰ 中華人民共和國國家能源局，「氫能產業發展中長期規劃(2021—2035 年)」，中華人民共和國國家能源局，http://zfxxgk.nea.gov.cn/1310525630_16479984022991n.pdf。

¹¹¹ 環境省，「中国の取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_china_202303.pdf。

中國目前的氫氣年產量約為 3300 噸，是全世界最大的氫氣生產國，雖然目前生產以灰氫為主，但在西北地區積極開展的太陽能電力製氫計畫，以及東北地區的風力發電製氫計畫，使得綠氫產量亦在世界居冠，並且仍有大量的綠氫潛力尚待挖掘；中國目前製氫、運氫以及加氫等領域主要由國企、央企來負責，如中石油計畫鋪設內蒙古至北京的綠氫管道，中石化積極將全國各地的加油站朝向加油加氫複合站來轉型等，私營企業則是積極參與燃料電池以及工業相關的氫氣應用面；雖然目前中國的氫氣應用仍然集中在石化產業，但未來將會朝向氫氣發電、氫能煉鋼、氫燃料電池車等應用進行轉型¹¹²。

二、韓國

韓國在 2020 年 12 月公布「韓國 2050 碳中和推動戰略」(2050 Carbon Neutral Strategy of the Republic of Korea)，作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標¹¹³，希望透過發展電力、交通以及產業部門的氫能化，助力達成碳中和。

韓國產業通商資源部在 2019 年 1 月公布「氫氣經濟活性化路線圖」，確立韓國在 2040 年以前的氫氣產業發展途徑；2022 年 11 月韓國總理韓德洙在氫氣經濟委員會中，針對綠氫供應鏈的發展提出「3 UP 成長戰略」，分別是綠氫製造與應用面的規模擴大 (scale up)、綠氫供應鏈基礎設施的加強建設 (build up) 以及

¹¹² 神野可奈子，「水素産業サプライチェーンの構築に向けて進む（中国）」，JETRO，<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/71bcc4d75ae07843.html>。

¹¹³ 韓國碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2018 年基準值降低 40% 的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

關鍵技術的強化（level up），來幫助韓國建構世界領先的綠氫供應鏈，並且協助育成擁有關鍵氫能源技術的企業¹¹⁴。

韓國在 2018 年時選定氫能經濟，成為革新成長戰略投資的三大部門之一（另外兩個部門為 AI 以及資料科學），並且基於上述的政策支持，韓國的氫能供應鏈成長飛速；在製氫領域，除了擴大國內的綠氫生產量外，也規劃從澳洲、中東等地進口氨氣再行分解成氫氣¹¹⁵；在應用面，韓國 SK、現代汽車、浦項等多家財團於 2021 年 9 月領銜成立「韓國氫能商業峰會」（Korea H2 Business Summit），並在 2022 年設立了 5000 億韓元的氫能基金，引入政府的金融政策支援，跨部門的推動汽車、燃料電池、鋼鐵、水泥以及石化等部門的氫能化發展¹¹⁶；未來氫燃料電池車、氫能煉鋼以及燃料電池等產業將會是韓國氫能源應用的重點項目。

三、澳洲

澳洲在 2021 年 10 月公布「澳洲長期減排計畫」（Australia's Long-Term Emissions Reduction Plan），作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標¹¹⁷，計畫透過電力、農業、交通以及產業部門的氫能化，來助力達成碳中和。

¹¹⁴ 環境省，「韓國の取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_korea_202303.pdf。

¹¹⁵ 科技產業資訊室，「韓國組氫能供應鏈 到 2050 年潔淨氫氣本地供應比例 50%」，科技產業資訊室，<https://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=18372>。

¹¹⁶ アン・ジョン，「グローバルクリーン水素経済をリードするファースト・ムーバー(First-Mover)」，Invest KOREA，https://www.investkorea.org/ik-jp/bbs/i-685/detail.do?ntt_sn=491257。

¹¹⁷ 澳洲碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 43% 的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

澳洲政府委員會的能源評議會早在 2019 年 11 月便公布「澳洲國家氫能戰略」(Australia's National Hydrogen Strategy)，由科學與工業研究組織 (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, CSIRO) 以及再生能源署負責，計畫五年投入 6800 萬澳幣，針對綠氫供應鏈的構築進行實證，除了促進國內的氫能需求外，更重要的目的是建構出口導向型的供應鏈。此外，澳洲產業、科學、能源及資源部在 2020 年 9 月公布的「技術投資路線圖」(Technology Investment Roadmap) 中，也將綠氫製造、儲藏以及碳捕捉與封存技術列為優先發展對象¹¹⁸。

澳洲目前有 100 多項與氫氣有關的專案正在推行，並且包含了總量佔世界四成的綠氫專案，而其中更有兩項被認為是將來澳洲較具備競爭力的領域，分別為綠氫以及發電用綠氫之出口；未來澳洲在製氫領域，將會擴大本國來自風力或太陽能等再生能源發電的綠氫生產，並且整備氫氣出口基礎設施，向日本、韓國等海外國家出口過剩的氫氣；在應用面，則是會將重心放在氫能發電以及農業、大型車輛的氫能化¹¹⁹。

¹¹⁸ 環境省，「オーストラリアの取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_australia_202303.pdf。

¹¹⁹ JETRO，「オーストラリアにおける 水素産業に関する調査」，JETRO，https://www.jetro.go.jp/ext_images/_Reports/01/82b3276826014c69/20200042_02.pdf。

四、印度

印度在 2015 年 10 月提交了「印度國家自定貢獻」(India's Intended Nationally Determined Contribution)¹²⁰，提列出印度中期及長期的減碳目標¹²¹，但當時未針對氫氣在碳中和政策中所扮演的角色進行描述。

不過印度政府下轄的各部門，近年來提出許多關於氫能源的政策，包括電力部於 2022 年 2 月公布的「綠色氫能政策」(Green Hydrogen Policy)，以及再生能源部於 2023 年 1 月公布的「國家氫能任務」(National Hydrogen Mission)，透過給予能源業者財政補貼及優待，鼓勵業者在各地發展再生能源、水電解製氫以及儲、運氫的專案計畫；科技部的「氫能與燃料電池專案」(Hydrogen and Fuel Cell Program)，另外針對這些專案計畫給予補貼，希望推進印度氫能技術的普及化¹²²。

因應印度政府強力的補貼政策，信實工業、印度天然氣管理局、印度國家火力發電公司、印度石油公司以及拉森圖博公司 (Larsen & Toubro Ltd) 等能源業者，都開始投入氫能源的生產；在應用面，雖然印度有極高的氫能需求潛力，但尚未得到開發，政府目前僅將鋼鐵、長距離大型載具、船舶、儲能等產業氫能化列為首要試點的項目，但發展重點仍是放在綠氫製造之上¹²³。

¹²⁰ 邱虹儒，「印度取得全球環境基金 4.54 億美元挹注，於 2022 年前建構能源效率市場」，能源知識庫，https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=2459。

¹²¹ 印度碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 33-35% 的碳排量，長期目標則是在 2070 年時達成全面碳中和。

¹²² 環境省，「インドの取り組み」，環境省，https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_india_202303.pdf。

¹²³ 大瀧拓馬，「水素製造における高い潜在性を秘めるインド」，JETRO，<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/439dbf577fb34709.html>。

五、台灣

台灣在 2022 年 3 月公布「2050 淨零排放政策路徑藍圖」作為減排以及碳中和的上位政策，而為了達成規劃的中期與長期目標¹²⁴，台灣將氫能列在十二項關鍵戰略之中，希望透過發展氫能發電，來助力完成碳中和。

台灣政府目前尚未提出氫能源的政策指導方針，僅有工研院於 2022 年 6 月公布「台灣 2050 氫應用發展技術藍圖」，將「發電」、「載具」、「工業」列為未來台灣氫能源產業發展之主軸領域，希望透過發展氫能發電、氫能煉鋼以及大型車輛氫能化等，來協助台灣達成淨零碳排目標¹²⁵。

台灣目前產出的氫氣以灰氫為主，並且大多用於石化業以及半導體科技業，而在應用面，台灣過去雖已有在燃料電池領域發展多年的經驗，然而規模甚小，其餘氫能應用產業也因為缺乏政策支持，尚未有充足的發展，因此整體氫能源供應鏈，包含綠氫與藍氫的產製、儲藏、運輸等尚需要完善的規劃。

¹²⁴ 台灣碳中和的中期目標為 2030 年需要較 2005 年基準值降低 23-25%的碳排量，長期目標則是在 2050 年時達成全面碳中和。

¹²⁵ 陳怡如，「臺灣 2050 氫應用發展技術藍圖」，工業技術研究院，https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=18_content&SiteID=1&MmmID=1036452026061075714&MGID=1163474052341146132。

第三節 日本氫能源供應鏈發展概況

本部分主要將氫能源產業鏈分為製氫、儲運氫以及應用等三個領域，分別探討日本在各領域是由哪些企業領頭來引導關鍵技術的研發，藉以理解日本氫能源產業鏈現今的發展方向與全貌；關於日本透過何種政策來驅動氫能源產業鏈的前進，則會在第三章與第四章進行論述。

壹、日本製氫產業發展概況

日本製氫產業的發展最早可以追溯到 1950 年代，在 1950 年代以前，工業製程中會排放出副產品氫氣，除了部分氫氣被收集交予石化、金屬業者使用外，其餘的氫氣皆溢散到空氣中並未被活用；然而受益於美國的經濟援助，以及韓戰帶來的特需景氣，日本經濟在 1950 年代邁向復甦，被稱為「家電三神器」的電視、洗衣機、電冰箱開始日益普及，在民生物資有大量生產需求的背景之下，原先供給給石化、金屬業者的氫氣逐漸短缺，因此大阪曹達（現今的大阪ソーダ）、大阪水素工業（現今的岩谷瓦斯）等企業開設了專用的製氫工廠，透過水蒸氣重組的方式製氫，迄今此製氫方式仍是日本氫氣的主要來源¹²⁶。

但在碳中和的國際趨勢下，水蒸氣重組所產出的灰氫對於能源轉型無助益，因此綠氫成為日本製氫的主要發展方向，雖然日本是世界上綠氫製造技術發展最先趨的國家，然由於日本的再生能源發電成本在世界位居前列，製造綠氫時也面臨到成本過高的問題；因此日本除了在本土發展綠氫製造的技術外，也開始與再

¹²⁶ 岩谷産業，「イワタニの水素ロード」，岩谷産業，
<https://www.iwatani.co.jp/jpn/company/history/hydrogen/>。

生能源發電成本較低的汶萊、沙烏地阿拉伯等國家合作，透過該國的再生能源電力來製氫。詳細的日本製氫之相關企業與其技術臚列如表 2.5。

表 2.5 日本製氫相關企業與其關鍵技術

領域	次領域	企業	關鍵技術
製氫	液化氫	川崎重工業	開發首座商用的氫氣液化系統，日產五噸左右的氫氣。
		岩谷產業	開發世界最大的液化氫氣工廠 HydroEdge，共有兩道程序，首先從-162 度的 LNG 中提取出氫氣，再將其冷卻至-253 度進行液化，相較於原先僅透過電冷卻機的降溫模式，大大節省了成本。
	甲基環己烷 (MCH)	千代田化工建設	將 MCH 命名為「SPERA 水素」，與三菱商事、三井物產與日本郵船合作 AHEAD 計畫，千代田化工建設在汶萊建立 MCH 生產基地，並輸送回日本川崎臨海部。
		ENEOS	與千代田化工建設與昆士蘭科技大學合作 Direct MCH 計畫，透過澳洲的綠電製作 MCH，ENEOS 將水和甲苯直接電解產生 MCH，成本較過去的 OCH 法便宜近半。

燃料氨	三菱商事	與日揮控股、三菱重工業、宇部興產推進沙烏地阿拉伯的藍氨應用專案。
	三井物產	具有長年累積的天然氣與氨氣生產經驗，目前正在評估西澳 Waitsia 天然氣田旁的綠氨製造專案。
	日揮控股	與產總研合作內閣府 SIP「能源載體」計畫，水電解製氫後再合成燃料氨。
	千代田化工建設	在海外有 14 座製氨工廠，皆採用主流的哈伯法製氨，因此目前正在開發新的低溫低壓國內燃料氨製程，預計 2030 年能夠達到社會實裝階段。
	大阪瓦斯	投資美國 Starfire 公司，該公司具有利用再生能源、從空氣及水提取出燃料氨的技術。
水電解	旭化成	得到 NEDO 綠色創新基金補助，推進福島縣浪江町的福島氫能研究場域 (FH2R) 計畫，在其中建造全球最大規模、利用太陽能電力的鹼性水電解裝置。
	三菱化工機	與高砂熱學工業合作，進行一項透過秋田縣的風力發電進行水電解製氫，並合成為氫氣天然氣混合燃料的實證研究。

		日立造船	擁有大規模水電解產氫技術，開發出「HydroSpring」水電解裝置。
		神戶製鋼所	開發出質子交換膜（PEM）水電解超高純度製氫裝置「HHOG」。
	人工光合作用	三菱化學	與三菱瓦斯化學與 ARPCChem 合作，得到 NEDO 綠色創新基金補助，推動人工光合作用專案。

資料來源：圖表為筆者自行整理並繪製。

貳、日本儲氫與運氫產業發展概況

在氫氣的各種能源載體中，液化氫由於其需要保持在 -253°C 以防止汽化，因此對於其儲氫以及運氫的技術要求較高，而日本在 1960 年代便開始氫氣液化的研究，並且在 1970 年代起提供給宇宙航空研究開發機構（Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA）作為火箭的燃料¹²⁷，累積了長年的液化氫儲存經驗，促使日本能夠在海上液化氫運輸船的技术取得突破。

氨、MCH 等能源載體，其保存條件不若液化氫嚴苛，因此在陸上運輸的部分，可以共用其他能源的儲運方式；但由於日本有意在未來透過進口氫氣來滿足國內需求，近年來也開始針對不同的氫氣能源載體之海上運輸船之技術進行整備。詳細的日本儲氫、運氫之相關企業與其技術臚列如表 2.6。

¹²⁷ 小林弘明，「宇宙研と水素」，宇宙科学研究所，
<https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/190826.html>。

表 2.6 日本儲氫、運氫相關企業與其關鍵技術

領域	次領域	企業	關鍵技術
儲氫 運氫	液化氫	川崎重工業	儲氫方面，透過獨有的二重殼隔熱技術，保持儲氫槽的隔熱性與耐蒸發度；運氫方面，作為 HySTRA 的一員，負責液化氫的海上運輸與日本端的接收工作，並建造世界第一艘液化氫運輸船 <i>Suiso Frontier</i> ，且正在開發更為大型的運氫船。
		a-tech	岩谷產業的旗下企業，擁有製造超低溫儲槽的技術，並且將其應用至液化氫儲槽以及液化氫輸送拖車。
	甲基環己烷 (MCH)	千代田化工建設	將 MCH 命名為「SPERA 水素」，與三菱商事、三井物產與日本郵船合作 AHEAD 計畫，千代田化工建設在汶萊建立 MCH 生產基地，並利用化學品運輸船輸送回日本川崎臨海部。
		ENEOS	在京濱臨海部盤點既有的基礎設施及管線，進行改建和增設，在港口建構完整的接收鏈。
	氨	日本郵船	與 Japan Engine、IHI、Nihon Shipyard 合作，研究開發大型燃料氨專用運輸船，目前已取得日本海事協會的基本設計承認。

		商船三井	與三菱造船、名村造船所合作，開發 氨燃料動力的燃料氨專用運輸船。
		IHI	開發可以容納最大 10 萬噸，世界最 大的燃料氨儲存槽。

資料來源：圖表為筆者自行整理並繪製。

參、日本氫能應用相關產業發展概況

日本在 1980 年代起，便由通商產業省（現今的經濟產業省）領銜，鼓勵相關研究機構及企業，針對燃料電池技術進行開發¹²⁸，因而促進燃料電池在許多領域的活用，例如固定式燃料電池，或是日本政府大力支持的氫燃料電池車等；且為了因應氫燃料電池車的加氫需求，ENEOS、岩谷產業、出光興產等石油銷售業者，也紛紛在碳中和的趨勢之下，轉型投入加氫站的營運與技術開發。

除此之外，由於氫氣占了未來日本發電結構的一部分，因此在政府以及 NEDO 的補助之下，JERA、關西電力等電力業者，開始針對氫氣與氨氣的混燒發電進行技術開發與實證。詳細的日本氫氣應用之相關企業與其技術臚列如表 2.7。

¹²⁸ 岩井博行，「燃料電池の歴史をふり返る」，京都大学大学院経済学研究科，http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/wp-content/uploads/2016/02/%E3%80%90%E4%BF%9D%E8%AD%B7%E3%80%91160209HP%E6%8E%B2%E8%BC%89%E7%94%A8%E3%82%B9%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%89-1.pdf。

表 2.7 日本氫氣應用相關企業與其關鍵技術

領域	次領域	企業	關鍵技術
應用	加氫站	JHyM	為了普及氫能源車的使用，多家企業合資成立 JHyM，透過戰略性的加氫站整備以及營運效率化，協助各家業者間的情報共享，以達成「氫能、燃料電池戰略 roadmap」的目標。
		ENEOS	目前擁有日本最多的 47 座加氫站據點，主要集中在四大都市圈（首都、中京、關西、北九州）。
		岩谷產業	除了自有加氫站外，亦加入 JHyM（日本加氫站網絡合同會社）來推進全國加氫站的建設，並且與豐田通商及大陽日酸等企業合作建立 nimohyss 平台來推進移動式加氫站的發展。
		出光興產	在千葉縣佈建唯二的加氫站，營運電力皆來自自有的綠電計畫 Premium Zero Plan
		東京瓦斯	在關東地區佈建四座加氫站，並在其中一座（豐洲）導入最新的加氫機，提高加氫效率及穩定性，以供燃料電池公車使用。
		三井物產	投資美國加州最大的加氫站公司 First Element Fuel。

氫能混燒 火力發電	JERA	得到 NEDO 綠色創新基金補助，在 LNG 火力發電廠實證氫能混燒技術，希望在 2025 年能夠達成替代 30%LNG 的混燒目標。
	關西電力	得到 NEDO 綠色創新基金補助，活用既有的火力發電廠(姬路)，階段性的實現氫能混燒、甚或是專燒火力發電。
	三菱 Power	擁有世界領先的氫燃料渦輪發電機技術，並且與美國喬治亞電力公司和電力研究所合作，在喬治亞州的發電廠實證氫能混燒火力發電。
	川崎重工業	提供 DLE、擴散、MMX 三種不同型態的燃燒器，並且持續研發能夠供給 100%專燒火力發電的燃燒器。
氨能混燒 火力發電	JERA	與 IHI 合作得到 NEDO 補助，於碧南火力發電廠實證 20%氨能混燒火力發電技術，並且朝向 50%混燒率目標邁進；且兩家企業的子公司亦簽定備忘錄，在馬來西亞尋求擴大氨能應用面。
固定式 燃料電池	Panasonic	開發出 700W 以及 5kW 的氫燃料電池，其中 5kW 型氫燃料電池與太陽能

			發電及蓄電池，被應用於 Panasonic 自有 RE 100 實驗工廠 H2 Kibou Field。
		東芝	開發出結合太陽能發電、水電解、蓄電池以及燃料電池裝置的模組化獨立能源供應系統「H2One」。
		兄弟工業	開發出 700W 以及 4.4kW 的氫燃料電池。
	氫能煉鋼	日本製鐵	開發出 COURSE 50 以及 Super COURSE 50 兩種煉鋼高爐。
	氫能車 氫能卡車	豐田自動車	開發出全球首台氫燃料電池車「Mirai」，直到 2022 年以前皆是全球氫能車銷量最高的車種。
		本田技研工業	開發出氫燃料電池車 Clarity Fuel Cell，並規劃在 2024 年推出 FC-CRV。
		日產自動車	開發出氫燃料電池車 X-Trail FCV。
		五十鈴自動車	與本田技研工業合作積極研究氫燃料電池卡車，現已進行道路駕駛測驗中。
		日野自動車	與豐田自動車合作積極研究氫燃料電池卡車，現已進行道路駕駛測驗中。

資料來源：圖表為筆者自行整理並繪製。

第四節 小結

綜上所述，可以得知大多數國家對氫能源產業的投入，主要集中在碳中和國際趨勢席捲全球後，在 2020 年前後才出台氫能源的發展戰略，將氫能源作為再生能源的其一進行發展；相比之下，日本在氫能源產業以及技術的發展是處於先行者的位置，並且在製氫、儲氫、運氫以及相關應用的領域多有投入，由表 2.8 可以得知在 2010 年代，日本除了在儲氫與運氫領域的國際專利家族(International Patent Families, IPF) 數，略為落後於 2000 年代初期大幅投入的美國以外，在氫能源產業的其他領域中皆擁有領先世界的 IPF 數量，充分體現日本在氫能源產業的技術優勢。

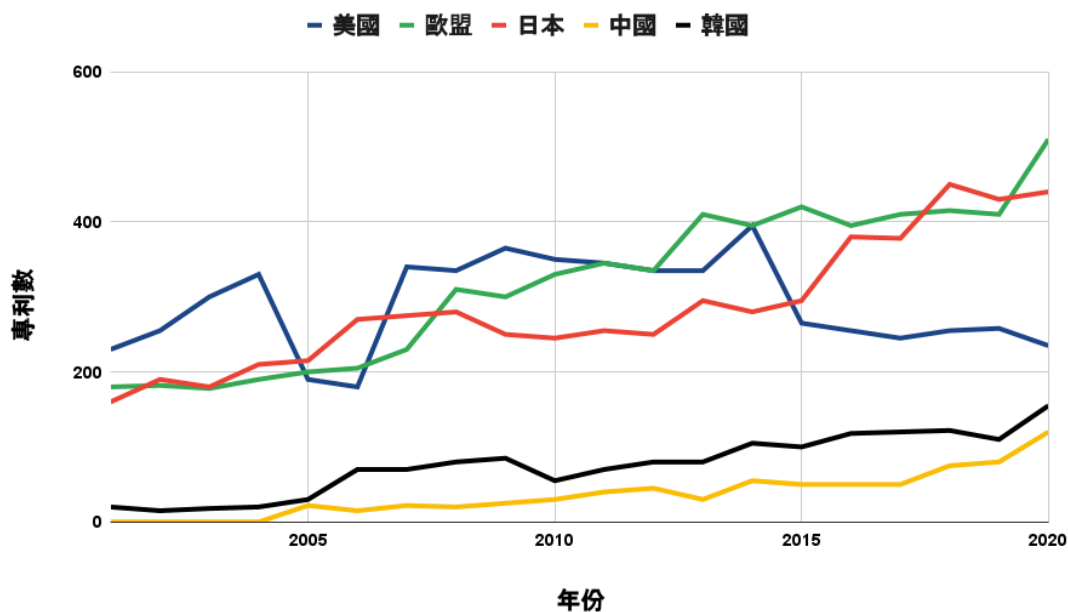
表 2.8 2010 至 2020 年間 各國在氫能源領域的 IPF 佔全球總數之比重

國家	製氫	儲運氫	應用	整體
日本	20%	22%	28%	24%
美國	19%	23%	19%	20%
德國	10%	14%	12%	11%
韓國	6%	5%	9%	7%
法國	7%	9%	4%	6%
中國	5%	3%	3%	4%
荷蘭	4%	2%	3%	3%
英國	3%	2%	2%	3%
瑞士	2%	1%	2%	2%
加拿大	2%	2%	1%	2%

資料來源：IEA¹²⁹；圖表為筆者自繪。

雖然日本目前看似在氫能源技術上領先世界，但是從表 2.9 可以發現，歐盟各國、中國以及韓國等國家也開始急起直追，挾地理、資源、人口、市場等優勢，並且積極訂立相關發展方針與政策，對日本現在保有的氫能源技術優勢產生威脅；然而日本身為世界上最早提出「氫能基本戰略」的國家，並且也已經發展出完整的氫能源政策體系，因此在第三章與第四章，會針對日本在政策面、學研面、產業面等不同面向的氫能源相關政策進行爬梳，藉以了解日本在各國競相爭奪氫能源市場的時刻，是如何動態調整其政策，使其依舊保持其技術領先優勢。

表 2.9 2001 至 2020 年間 各國申請氫能源領域專利的趨勢



資料來源：IEA¹³⁰；圖表為筆者自繪。

¹²⁹ IEA. 2023. “Hydrogen Patents for a Clean Energy Future,” IEA, <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future>.

¹³⁰ IEA. 2023. “Hydrogen Patents for a Clean Energy Future,” IEA, <https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future>.

第三章 日本氫能源政策與立法

第一節 日本氫能源相關政策

1970 年代，隨著化石燃料的過度開採及利用，國際社會開始預想半世紀後將會面臨到化石燃料枯竭的問題，且燃燒化石燃料也已造成地球的重大汙染，因此各國的科研人員開啟了探尋再生能源的研究，太陽能、風力、生質能等再生能源相關產業也開始蓬勃發展；其中，人口密度大且高度工業化的日本，也意識到未來需要透過再生能源來供給部分電力，因此針對再生能源的利用展開研究，除了太陽能、生質能以外，1973 年 7 月日本學界籌組了「日本氫能源協會」(Hydrogen Energy Systems Society of Japan, HESS)，正式開啟日本對氫能源的研究¹³¹。

在協會成立三個月後，爆發了第四次以阿戰爭，以沙烏地阿拉伯為首的產油國宣布向支持以色列的國家實施石油禁運，引發第一次石油危機，導致油價大幅飆升，其中日本也在禁運對象之中，因此造成國內人心惶惶；日本通商產業省旋即於 1974 年開啟「陽光計劃」(サンシャイン計画)，投入大量的科研經費給轄下的工業技術院(現今的產業技術綜合研究所)，目標是希望可以在 2000 年以前找到替代石油的新能源技術，除了太陽能、地熱發電技術以外，氫能源也被納入其中，成為日本政策性主導氫能源發展的伊始¹³²。

1978 年，通商產業省與工業技術院提出「月光計劃」(ムーンライト計画)，與開發新能源技術的陽光計劃不同，月光計劃主要是要開發節能技術，而氫燃料

¹³¹ 水素エネルギー協会，水素エネルギー協会の歴史，水素エネルギー協会，https://www.hess.jp/2_aboutus/history.html#。

¹³² 山崎邦彦，1994，「ニューサンシャイン計画の概要」，応用物理，第 63 卷第 8 号，頁 762-769。

電池的技術開發便是計劃中的重要項目；1992 年，陽光計劃與月光計劃被整併為「新陽光計劃」(ニューサンシャイン計画)¹³³，但氫能以及燃料電池的相關研究仍在其中扮演重要角色，主導計劃的通商產業省與工業技術院另外提供補助金給 NEDO，開展了「WE-NET (World Energy Network) 計劃」，其構想了一個活用世界各地的再生能源水電解製氫、運氫以及應用的場景，直到 2002 年計劃結束前，針對水電解製氫、超低溫儲氫、運氫、加氫、燃氫渦輪發電等領域進行前瞻技術的開發¹³⁴。

然而由於日本屬於能源進口國，仍需要以成本較低且無須過度仰賴外國的能源為主，加上對於溫室氣體減排的訴求，因此在 2000 年代，日本的能源大量依賴核能¹³⁵，並且也開始摸索以核能電力水電解製氫的技術；然而在 2011 年 3 月 11 日在日本東北地區外海的強烈地震，引發海嘯並且造成沿海的福島第一核電廠發生核事故，事故後日本暫停使用了國內所有核電廠的運作，在民眾對於核能發電信心喪失的情況下，政府開始思索能源發展的新方向¹³⁶。因此在 2014 年的「第四次能源基本計畫」，也就是福島核電廠事故後的首個能源基本計畫中，氫能源被首次列入範疇中，成為新能源的選項之一，並且期待未來能夠建成氫能社會¹³⁷，因此在此之後，關於氫能源的指導方針與支援政策陸續出台，引導氫能源的發展。

¹³³ 山崎邦彦，1994，「ニューサンシャイン計画の概要」，応用物理，第 63 卷第 8 号，頁 762-769。

¹³⁴ NEDO，WE-NET について，NEDO，https://www.ena.or.jp/WE-NET/contents_j.html。

¹³⁵ 經濟產業省資源エネルギー庁，「世界の原発利用の歴史と今」，經濟產業省資源エネルギー庁，<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/sekainonuclear.html>。

¹³⁶ 大島堅一，「福島原発事故 10 年：日本の原子力・エネルギー政策をどうするか」，自然エネルギー財団，https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210226_2.php。

¹³⁷ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 4 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf。

綜上所述，可以發現在 2014 年以前，日本針對氫能源的政策多聚集在氫能源相關的前瞻技術研究支持上，直到 2011 年福島核電廠事故後，日本開始思索未來能源結構時，才開始將氫能源等新能源納入能源基本計畫中；而在 2014 年以後，關於氫能源的政策大致可以分為三個方向，其一是「能源基本計畫」，目的是針對能源發展目標與大方向進行規劃；其二是「氫能基本戰略」，目的是想要透過由上而下（Top-Down）的方式，構築一個氫能社會，因此藉由氫能基本戰略來引導各面向的發展；其三是「綠色成長戰略」，則是因應碳中和的國際趨勢，把氫能源視為日本達成碳中和的重要角色，因此政策聚焦在脫碳化相關的氫能技術發展。

壹、能源基本計畫

在歷經石油危機以後，國際社會皆認知到未來不能夠再過度依賴石油等單一能源，因此日本在 1970 年代起便開展了一系列關於新能源與節能技術的探索，大幅降低日本的石油依存度；然而自然資源不豐富的日本，仍需要大量的仰賴進口能源，使得發電成本居高不下，在經濟活動趨向全球化的時代，發電的高成本相當程度地降低了日本產業競爭力，且在環境層面亦面臨到地球暖化的影響，在這樣的背景之下，亟需要系統性的重新規劃能源政策，因此日本在 2002 年 6 月出台《能源政策基本法》（エネルギー政策基本法），並以此法為基礎，要求經濟產業大臣必須遵循「確保安定供給」、「環境適宜」、「活用市場原理」等三大原則，至少每三年提出一次「能源基本計畫」（エネルギー基本計画），作為日本中長期能源政策的基本方針¹³⁸。

¹³⁸ e-Gov 法令檢索，「エネルギー政策基本法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=414AC1000000071>。

「第一次能源基本計畫」於 2003 年 10 月公布，在審度地球暖化以及發電成本等前提下，決議以核能發電作為基載電力(Baseload Power)，並且將核能安全、核燃料回收以及輕水反應爐等列為重點研發對象¹³⁹；「第二次能源基本計畫」於 2007 年 3 月公布，伴隨著「核能立國」(原子力立国)的口號，本次能源基本計畫的重心依然為核能發電的發展，而為了確保石油、煤炭等化石燃料的供應，提及要廣泛地開展資源外交，並且持續發展節能技術來因應地球暖化課題¹⁴⁰。

「第三次能源基本計畫」於 2010 年 6 月公布，由於地緣政治的情勢升高導致油價再次飆漲，促使政府開始思考能源安全保障的重要性，而減碳目標的提升，以及 2008 年的金融危機導致許多國家開始進行產業結構重組，其中包括大力投入能源產業，使得各國紛紛加入能源市場的爭奪戰；因此本次計畫確立了未來能源政策核心理念為 3E：能源自給 (Energy Security)、經濟效率性 (Economic Efficiency) 以及環境適宜 (Environment)，希望藉由政策資源的投入，使日本成為「環境及能源大國」。而本次能源基本計畫的重點則是放在核能與再生能源，透過增設核電廠基組以及充實再生能源基礎建設，將核能與再生能源的發電佔比從 34% 提升至 2030 年的 70%，藉以達成 3E 原則¹⁴¹。

「第四次能源基本計畫」於 2014 年 4 月公布，受到 2011 年福島核電廠事故所影響，原先的 3E 中加入了能源安全 (Safety)，成為「3E+S」原則，而原先擬定的中長期能源政策，也因為核能發電的安全神話在核事故後的崩塌，面臨巨大的轉向；伴隨著國內在電力系統及售賣的改革，以及國際能源結構的變化，因此

¹³⁹ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 1 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/0301007energy.pdf。

¹⁴⁰ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 2 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/keikaku.pdf。

¹⁴¹ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 3 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/100618honbun.pdf。

本次計畫提出要在 2018 年以後加大採購 LNG，以代替煤炭來進行火力發電¹⁴²，以最嚴格的標準來對應核能發電的重啟，並且將氫能源列入關鍵的二次能源之中，透過爬梳及解決氫能源在技術、成本、基礎建設以及制度等面向的課題，進一步實現「氫能社會」。

而在第四次能源基本計畫中，亦提到在要以「3E+S」為方針，針對「長期的能源供需前景」（長期エネルギー需給見通し）進行評估，因此在經濟產業省綜合資源能源調查會下設一個評估小委員會，並於 2015 年 7 月提出 2030 年的能源供需以及發電結構之預測，詳細數據臚列如表 3.1。

「第五次能源基本計畫」於 2018 年 7 月公布，因應《巴黎氣候協定》的簽署，日本政府提出 2030 年要比 2005 年減排 25.4% 的自定目標，且由於地緣政治情勢的升高，導致能源進口價格波動大，以及各國在脫碳相關技術上的競爭，因此本次計畫將再生能源列入中長期的發展主軸，並沿用 2015 年「長期的能源供需前景」的發電結構目標，希望在 2030 年時可以降低核能發電的比例，並且將再生能源發電比例提升至 22 至 24%；而日本政府於 2017 年 12 月出台「氫能基本戰略」，因此本次能源計畫中依舊是將氫能源視為重要的二次能源選項，並再次重申此戰略的重要性¹⁴³。

「第六次能源基本計畫」於 2021 年 10 月公布，由於時任日本首相菅義偉於 2020 年 10 月揭櫫日本 2050 年達成全面碳中和的目標，且極端氣候災害愈趨頻仍，加上數位化以及資通訊產業的蓬勃發展，使得用電需求大增，因此能源穩定

¹⁴² 石田雅也，第 4 次エネルギー基本計画、2020 年までを「集中改革実施期間」に，IT Media，<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1404/14/news014.html>。

¹⁴³ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 5 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf。

供給、減少碳排，以及壓低電價來提升產業國際競爭力成為重要課題¹⁴⁴；本次計畫便針對「長期的能源供需前景」進行修訂，降低煤炭、天然氣等化石燃料的發電結構所佔的比例，並且將其轉移到再生能源發電，其中氫能源亦是首次被列入發電結構的評估之中，詳細數據臚列如表 3.1%。

表 3.1 2015 年與 2021 年 日本對於 2030 年發電結構之評估及比較

能源別	2015 年	2021 年	差異
石油	3%	2%	下降 1%
煤炭	26%	19%	下降 7%
LNG	27%	20%	下降 7%
核能	20-22%	20-22%	持平
再生能源	22-24%	36-38%	上升 14%
太陽能	7%	14-16%	上升 7-9%
風力	1.7%	5%	上升 3.3%
地熱能	1-1.1%	1%	持平
水力	8.8-9.2%	11%	上升 2.2-2.6%
生質能	3.7-4.6%	5%	上升 0.4-1.3%
氫能	0%	1%	上升 1%

資料來源：經濟產業省^{145 146}；圖表為筆者自繪；

¹⁴⁴ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 6 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>。

¹⁴⁵ 經濟產業省資源エネルギー庁，「長期エネルギー需給見通し」，經濟產業省資源エネルギー庁，https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf。

¹⁴⁶ 經濟產業省資源エネルギー庁，「第 6 次エネルギー基本計画」，經濟產業省資源エネルギー庁，<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>。

其中再生能源包括太陽能、風力、地熱能、水力、生質能以及氫能。

綜上所述可以得知，「福島核電廠事故」以及「碳中和趨勢」兩者改變了氫能源在能源基本計畫中的所扮演的角色；發生福島核電廠事故以前，氫能源並未出現在日本中長期能源供需前景的視野中，直到日本政府決定要改變核能立國的思維後，氫能源等再生能源逐漸得到重視，且在碳中和的國際趨勢之下，以再生能源取代化石燃料的態勢高漲，並隨著氫能源的技術研發逐漸推進，氫能源甚至被納入 2030 年發電結構的一環，成為日本未來能源供需中不可忽視的存在。

表 3.2 歷次能源基本計畫之能源結構願景與氫能源的角色

能源基本計畫	時間	能源結構願景	氫能源的角色
第一次	2003 年 10 月	積極發展核能，以作為 國家基載電力	無明確說明
第二次	2007 年 3 月	以核能立國	無明確說明
第三次	2010 年 6 月	將核能與再生能源發電 比例大幅提高	無明確說明
第四次	2014 年 4 月	降低核能發電比例並轉 由其他能源發電	提出建成氫能社 會的發展願景
第五次	2018 年 7 月	提升再生能源發電比例	視為重要的二次 能源選項
第六次	2021 年 10 月	再度提高再生能源發電 比例	列入未來發電結 構的一環

資料來源：整理自歷次能源基本計畫；圖表為筆者自繪。

貳、氫能基本戰略

石油、天然氣與煤炭等化石燃料奠定了日本在戰後經濟快速成長的基礎，且確立日本的國際競爭力與地位，然而在石油危機中，曝露出日本能源極度仰賴進口的問題，因此供給容易受到地緣政治情勢的影響；正當日本轉向核能立國的能源政策時，突發的福島核電廠事故迫使政府重新思索能源結構問題，並恰逢國際碳中和趨勢興起，日本政府在確保「3E+S」的原則下，選擇大力發展再生能源。

在所有再生能源中，氫氣具備淨零碳排的特性，且在製氫與運氫技術發展得宜時，能夠活用海外的再生能源水電解製氫，轉換為不同的能源載體再運送回日本，這是其他再生能源所無法辦到的事；且日本在氫能源與燃料電池的技術具備領先優勢，若能夠建成第四次能源基本計畫中所提出的「氫能社會」目標，並在2020年在東京奧運展示給國際社會的話，不僅能夠廣泛推進各國發展氫能源，日本也能藉由氫能領域長年累積的技術力，引領世界氫能源產業的發展¹⁴⁷。

因此於2017年12月，內閣在「第二次再生能源與氫能閣僚會議」中，策定了「氫能基本戰略」(水素基本戰略)，也是世界上首個國家專門針對氫能提出能源政策，並且提出十項基本戰略方針，臚列如下表3.3，來推動氫能社會的建成；除此之外，氫能基本戰略也針對氫氣成本、氫燃料電池車數量、加氫站數量、家庭用燃料電池數量以及氫能發電規模，設定直至2030年與其後的發展目標¹⁴⁸。

¹⁴⁷ 內閣官房，「水素基本戰略」，內閣官房，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf。

¹⁴⁸ 內閣官房，「水素基本戰略」，內閣官房，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf。

表 3.3 氫能基本戰略中的十項戰略方針與概要

No.	基本戰略方針	概要
1	實現低成本的氫氣利用	透過建構國際大規模氫能供應鏈，及擴大國內產業需求等方式，來降低氫氣成本，使其與既有能源相比仍具競爭力。
2	開發國際氫能供應鏈	進行液化氫、MCH、氨、甲烷等氫能源載體的跨國運輸實證，並在國內檢證管道大規模運氫的可行性。
3	擴大導入國內的再生能源	提升日本的水電解技術程度，並且在地方積極開發再生能源電力用以製氫，以降低日本綠氫的成本。
4	電力領域的氫能利用	推動氫能及氨能的混燒發電技術開發，並針對相關法規制整備進行探討。
5	交通載具領域的氫能利用	透過普及氫燃料電池以及加氫站、擴大氫能巴士與氫能堆高機的使用範圍、開發氫能船舶以及氫能列車等，開創更多的氫能源需求。
6	工業製程與熱利用的氫能活用	尋找工業製程以及熱利用中，有哪些領域具備導入氫能源的潛力，並針對其進行技術開發。
7	燃料電池技術活用	提高燃料電池的發電效率，並降低碳排放係數，使燃料電池相對於其他家庭及工業用的發電設備更具競爭力。

8	前瞻氫能源技術開發	針對水電解技術、液氫儲藏材質、低成本且高效率的能源載體等技術進行創新研究開發。
9	氫能源的國際發展	參與氫能委員會等國際組織，以促進氫能市場的擴大，並積極向 ISO 提出氫氣有關的國際標準之建議，使未來國際採用日本所制定的基礎來進行標準化。
10	促進國民對氫能源的理解	偕同地方自治體及企業，在各地區積極召開公聽會及論壇，使國民更加理解氫能源的用途及安全性。

資料來源：內閣官房¹⁴⁹；圖表為筆者自繪。

然而於 2022 年 2 月俄羅斯入侵烏克蘭，爆發了全面戰爭，使得國際天然氣減產以及價格飆升，身為能源進口國的日本亦深受其害，因此內閣官房在 2022 年 12 月召開「第五次 GX (Green Transformation, 日本簡稱為 GX) 實行會議」，並在會中提出「實現 GX 的基本方針 (草案)」(GX 實現に向けた基本方針)，強調日本的脫碳化相關政策，需要建構在能源安全且穩定供應的前提之下，因此原有的氫能基本戰略也著手進行修訂¹⁵⁰。

2023 年 6 月，內閣召開「第四次再生能源與氫能閣僚會議」，會中提出「氫能基本戰略」的修正案；由於受到烏俄衝突的影響，發電成本攀升，因此許多國家開始大舉投入氫能源的研發，例如歐盟的「綠色政綱產業計畫」(Green Deal

¹⁴⁹ 內閣官房，「水素基本戰略」，內閣官房，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf。

¹⁵⁰ 內閣官房，「GX 實現に向けた基本方針 (案)」，內閣官房，
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai5/siryou1.pdf。

Industrial Plan)¹⁵¹及美國的 IRA 法案¹⁵²等政策，都針對氫能源產業擬定相關的補助措施，使日本引以為豪的技術優位遭到撼動；因此本次修正案希望藉由更具野心的氫氣與水電解裝置之導入目標設定¹⁵³、更大規模的供應鏈構築投入，以及提前在綠氫的世界基準制定上卡位，藉此確保日本在氫能源領域的技術優位；並且為了要積極擴展海外市場，以及整備國內氫能利用的環境，預計未來將會出台「氫能產業戰略」（水素產業戰略）以及「氫能保安戰略」（水素保安戰略），使氫能源的發展能夠「一石三鳥」的達成脫碳化、能源安全供給以及經濟成長等三項目標。¹⁵⁴

綜上所述可以發現，由於 2017 年所提出的「氫能基本戰略」中，僅針對氫能源的國內技術開發、需求拓展，以及由日本來領導氫能源的國際標準化進行討論；但是當世界各國因為地緣情勢風險升高，也開始大力發展氫能源時，市場規模與資金投入不如他國的日本萌生了危機感，雖然日本仍仰仗著先行者優勢，掌握眾多的氫能源技術與專利權，但是卻未將這些技術優勢向海外擴張，形同閉門造車；因此 2023 年「氫能基本戰略」的修正案，便是要針對此情形作出改善，其擬透過氫能產業戰略的規劃，將日本過去積累的技術優勢，向海內外的製氫、

¹⁵¹ European Commission. “A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age,” *European Commission*, https://commission.europa.eu/system/files/2023-02/COM_2023_62_2_EN_ACT_A%20Green%20Deal%20Industrial%20Plan%20for%20the%20Net-Zero%20Age.pdf.

¹⁵² Clifford, Catherine. “Inside the fierce debate over clean hydrogen, with \$100 billion in federal subsidies on the line,” *CNBC*, <https://www.cnbc.com/2023/03/03/clean-hydrogen-industry-future-depends-on-ira-tax-credit.html>.

¹⁵³ 氫能基本戰略的修正案中，將 2040 年的氫氣導入量提升至 1200 萬噸，為原先目標的六倍；且設定 2030 年水電解裝置的導入目標要達到 15 GW 的規模，佔全球約一成。

¹⁵⁴ 內閣官房，「水素基本戰略（案）」，內閣官房，https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/kaigi_dai4/siryou1-2.pdf。

國際氫氣供應鏈、脫碳化發電、氫能載具、燃料電池等領域進行擴張¹⁵⁵，扭轉日本在國際氫能源競爭上所面臨的頹勢。

參、綠色成長戰略

因應時任日本首相菅義偉於 2020 年 10 月，揭櫫日本要在 2050 年達成全面碳中和的目標，且國會在 2021 年 5 月 26 日通過《地球暖化對策促進法》修正案，正式將 2050 年碳中和的目標入法，宣示日本要力行碳中和的決心，因此有必要對此提出一個通盤檢討各產業減碳目標與相關技術研發的發展戰略。

經濟產業省於 2020 年 12 月，與內閣府、金融廳、總務省、外務省、文部科學省、農林水產省、國土交通省、環境省等與碳中和相關的省廳，策定了「實現 2050 年碳中和之綠色成長戰略」(2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戰略)，亦被稱為「綠色成長戰略」(グリーンイノベーション戰略)；而在 2021 年 6 月閣議通過的「經濟財政運營及改革之基本方針 2021」(骨太方針 2021) 中，將實現綠色社會與加速數位化、地方產業發展以及少子化對策列為日本未來發展的四大重點方向¹⁵⁶，因此經濟產業省也在同日提出修正版的綠色成長戰略，來強化整體戰略對於推進綠色社會的作用。

由於全球在 2020 年起陷入新冠肺炎疫情，經濟發展面臨停滯或衰退，以歐美為首的國家便主張在重建疫後經濟體系時，應該同時考量到碳中和課題，因此

¹⁵⁵ 內閣官房，「水素基本戰略（案）」，內閣官房，https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/kaigi_dai4/siryou1-2.pdf。

¹⁵⁶ 內閣府，「經濟財政運營と改革の基本方針 2021」，內閣府，<https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/honebuto/2021/decision0618.html>。

提出要以「綠色振興」(Green Recovery)作為未來的經濟發展主軸¹⁵⁷；而日本政府在訂定綠色成長戰略時亦考慮到這點，因此選定了 14 個關鍵領域，臚列如表 3.4，爬梳這些產業所面臨到的發展課題，為其尋找解決對策，並制定邁向碳中和的成長戰略，希望能夠把握此次全球能源及經濟轉型的變局，促成相關產業進行結構轉型，並且在政府的引導下，推進企業投資碳中和有關的創新事業，以加速達成碳中和的步伐¹⁵⁸。

表 3.4 綠色創新戰略的 14 個關鍵領域與發展課題

No.	領域	發展課題
1	離岸風電產業	創造離岸風電的國內市場
		建構國內離岸風機製造據點
		次世代的離岸風電技術開發
2	氫能與氨能產業	氫能渦輪發電的商用化
		定製型燃料電池的普及擴大
		氫燃料電池卡車的商用化
		氫能煉鋼的技術確立
		液化氫運輸船的技術開發
		保持在水電解裝置領域的技術領先
3	次世代熱能產業	熱能供給側的碳中和化
		熱能需求側的碳中和化
4	核能產業	快滋生反應爐的技術開發
		小型模組化反應爐的技術開發

¹⁵⁷ OECD. “Focus on green recovery,” *OECD*, <https://www.oecd.org/coronavirus/en/themes/green-recovery>.

¹⁵⁸ 經濟產業省, 「グリーン成長戦略 (概要)」, 經濟產業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_007_03_01.pdf.

		高溫氣冷堆的實證
		核融合的技術開發
5	汽車與蓄電池產業	擴大導入電動車
		汽車燃料的碳中和化
		擴大蓄電池的生產規模
6	半導體與資通訊產業	能源需求效率化與低碳化
		機器的節能與綠色化
7	船舶產業	朝向零碳替代燃料轉型
		LNG 燃料船的高效率化
		促進節能、低碳的船舶之普及
8	物流、人流與 土木基礎建設產業	構築碳中和港
		導入智慧交通
		推進物流與交通據點的低碳化
		都市空間與建設的淨零碳排
		實現碳中和的建設施工
9	食品與農林水產業	擴大農林水產業的碳排吸收源
		食品與農林水產業減排的技術開發
10	航空產業	飛機電動化的技術開發
		領先世界開展氫能飛機的技術開發
		航空替代燃油的安定供給與成本降低
11	碳循環與材料產業	降低負碳混凝土的成本
		水泥低碳化與回收的技術開發
		碳循環燃料的技術開發與成本降低
		碳循環化學品的技術開發

		二氧化碳分離與回收的技術開發
		輕量強韌的金屬素材開發
		鋼鐵精煉與軋製過程的低碳化
		產業資源的有效利用
		熱源的脫碳化
		石油化學工廠的脫碳化
12	住宅、建築物與 次世代電力管理產業	能源管理系統的社會實裝
		擴大高性能住宅與建築物的普及
		降低高性能建材的成本
		分散型能源的市場整備
		次世代電網的建構
		微電網產業的構築
13	資源循環相關產業	再生的低成本化、技術高度化
		回收與再利用的低成本化、技術高度化
14	Lifestyle 產業	住宅與移動的全面品質管理
		數位化與共享經濟的行為改變
		地域脫碳化的觀測技術開發

資料來源：經濟產業省¹⁵⁹；圖表為筆者自繪。

由表 3.4 可以發現，氫能源在綠色成長戰略中，被視為一種關鍵的碳中和技術，且不只是在發電、工業以及交通領域的活用，船舶、土木基礎建設、航空、碳循環與材料等產業的未來發展課題，都可以藉由氫能源技術來克服；由於日本在氫能源技術佔據先行者的地位，面對歐洲各國以及中國、韓國在氫能源產業的急

¹⁵⁹ 經濟產業省，「グリーン成長戦略（概要）」，經濟產業省，
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_007_03_01.pdf。

起直追，需要訂立更加有競爭力的發展策略，因此在綠色成長戰略中，直到 2050 年以前的氫能源各項關鍵技術之開發、實證、社會實裝以及導入支援，都有明確的時間表；除此之外，也訂定了氫氣導入量與氫能發電成本的目標，希望能在 2030 年引入 300 萬噸以上、2050 年引進 2000 萬噸以上的氫氣，並在 2050 年時將氫氣的成本壓低至比燃氣發電還低，藉以強化整體產業的競爭力¹⁶⁰。

而為了要解決上述領域發展所遇到的課題，2021 年 4 月經濟產業省的產業構造審議會綠色成長專案部會（産業構造審議会グリーンイノベーションプロジェクト部会）中，決議要自 2021 年起，編列 10 年共 2 兆日圓的「綠色創新基金」（グリーンイノベーション基金），委託 NEDO 代為執行，在經過研發難度、減排效果、市場成長性等綜合評估後，提列出 20 項重點計劃，臚列如表 3.5，開放給研究機構與企業進行公募與審查，並向通過審查者提供融資及支援機制¹⁶¹，希望藉由官民合作的方式來促進碳中和關鍵技術的突破。

表 3.5 綠色創新基金採納的計畫

領域別	綠色創新基金採納的計畫
WG1 綠電的普及促進	離岸風力發電的低成本化
	次世代太陽能電池的開發
	透過廢棄物與資源回收來實現碳中和
WG2 能源構造轉換	構築大規模氫能源供應鏈
	活用再生能源電力進行水電解製氫
	使用氫能來進行煉鋼製程

¹⁶⁰ 經濟產業省，「グリーン成長戦略（概要）」，經濟產業省，https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_007_03_01.pdf。

¹⁶¹ NEDO，「NEDO グリーンイノベーション基金」，NEDO，<https://green-innovation.nedo.go.jp/>。

	構築燃料氫供應鏈
	使用二氧化碳等來製造塑膠原料的技術開發
	使用二氧化碳等的燃料製造技術開發
	使用二氧化碳等的水泥製造技術開發
	開發二氧化碳的分離回收技術
WG3	開發次世代蓄電池與馬達
產業構造轉換	開發電動車的節能車載計算模擬技術
	構築智能移動載具社會
	構築次世代數位基礎建設
	開發次世代飛機
	開發次世代船舶
	開發食品與農林水產業的減碳與吸碳技術
	使用生質能製造業技術來推進碳回收
	製造業熱力過程的脫碳化

資料來源：NEDO¹⁶²；圖表為筆者自繪

由表 3.5 可以發現，在綠色創新基金所提列的 20 項重點計畫中，與氫能源相關的便佔據 6 項，其中包括大規模氫能源與氨能源供應鏈、水電解製氫、氫能煉鋼、氫能船舶與氫能飛機等課題；在前揭的 14 個重要領域中，氫能源除了獨立成單一領域外，在不同領域的發展課題中，也能看到氫能源技術的身影，可以見得氫能源產業對於日本能否達成碳中和具有非常重要的影響力，因此藉由綠色成長戰略來助力氫能源的關鍵技術之突破。

¹⁶² NEDO, 「NEDO グリーンイノベーション基金」, NEDO, <https://green-innovation.nedo.go.jp/>.

第二節 日本氫能源相關法規

由於氫氣屬於危險性較高的化學物質，因此在製造、儲存、運輸以及活用的時候，都需要有法源進行依循，以避免過程中意外事故的發生；本章節將分別針對日本在氫能源供應鏈中的製氫、儲氫、運氫以及氫氣應用等四個領域之中，各自在甚麼法規上進行整備，以利上述的能源基本計畫、氫能基本戰略與綠色成展戰略等政策，在推行氫能源領域相關發展時，能夠更加安全且順利。

壹、製氫領域的法規整備

一、高壓氣體保安法

《高壓氣體保安法》（高圧ガス保安法）為目前氫能源相關法規中的核心，本法規的制訂是為了要防止在各式高壓氣體在其生命週期，包括生產、進口、儲存、銷售、運輸、消費與終端處置等過程中發生意外。其中《高壓氣體保安法》第 2 條中針對高壓氣體進行定義，並且將其進一步分為兩類，第一類氣體（第一種ガス）為惰性氣體與空氣，包括氦氣、氖氣、氬氣、氪氣、氙氣、氡氣、氮氣、二氧化碳、碳氟化合物和空氣，而包括氫氣¹⁶³在內的其餘高壓氣體則被歸類為第二類氣體（第二種ガス）。

《高壓氣體保安法》第 9 條將高壓氣體的製造業者分為兩類，其中第一類業者與製造所需要接受政府方面的安全檢查、提出預防危險的規章、為員工提供完善的安全培訓、任命安全督導員，並且定期進行自主安全檢測，若未達成以上條件者則被歸類為第二類業者與製造所；《高壓氣體保安法》第 14 條提到，若是要

¹⁶³ 被歸類為高壓氣體的氫氣包括在 1 MPa 以上的壓縮氫氣，以及 0.2 MPa 以上的液化氫氣。

進行氫氣等高壓氣體的製造時，各業者受到的管制不盡相同，第一類業者與製造所在製造高壓氣體前，需要提出申請並得到都道府縣知事同意，才得進行生產；但第二類業者與製造所在製造高壓氣體前，僅需要向都道府縣知事彙報即可¹⁶⁴。

二、大氣污染防治法施行規則

《大氣污染防治法施行規則》（大氣汚染防止法施行規則）第 15 條認定，製氫以及燃料電池用改質器在製程中都會產生煙塵，因此需要定期測量煙塵與其中所含的氮氧化物，並且向都道府縣知事彙報。其中需要進行測量的製氫裝置為使用水蒸氣改質方式，在 0°C 且壓力為 1 標準大氣壓時，每小時氫氣生產能力低於 1000 立方公尺的裝置，不論其煙塵排放量有多少，皆需要每五年測量一次煙塵以及氮氧化物含量¹⁶⁵。

三、有關危險物品規制的政令

《有關危險物品規制的政令》（危険物の規制に関する政令）第 9 條規定，包含氫氣在內的各式具有致災性的高壓氣體製造所，於建設的時候需要保留 20 公尺以上的保安距離，但若有透過架設防火牆等方式來確保安全的話，可以在經過該地市町村長的允許，不用保留 20 公尺的保安距離¹⁶⁶。

¹⁶⁴ e-Gov 法令檢索，「高圧ガス保安法」，e-Gov 法令檢索，https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=346M50000500001_20221001_504M60001000004。

¹⁶⁵ e-Gov 法令檢索，「大氣汚染防止法施行規則」，e-Gov 法令檢索，https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=346M50000500001_20221001_504M60001000004。

¹⁶⁶ e-Gov 法令檢索，「危険物の規制に関する政令」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306>。

貳、儲氫領域的法規整備

一、一般高壓氣體保安規則

《一般高壓氣體保安規則》（一般高圧ガス保安規則）第 6 條中，針對氫氣等高壓氣體的儲放規則，若是儲存槽與用火裝置間距離不足 2 公尺的話，需要在兩者間設置障礙物，並且嚴禁用火以及放置具著火性與引火性的物品，來確保儲存槽的安全；包括氫氣在內的可燃性氣體、有毒氣體、惰性氣體以及氧氣，都必須要放置在單獨的儲存空間，在其中設置防止衝擊或毀損的設施，禁止攜帶燈火入內，來確保儲存空間的安全性；而針對壓縮氫氣的容器，也規定其必須常年處在 65°C 以下來保存¹⁶⁷。

二、勞動安全衛生規則

《勞動安全衛生規則》（労働安全衛生規則）第 261 條、第 275 條以及第 322 條規定，如果操作可能會引起爆炸或火災的易燃氣體（如氫氣等）或粉塵，操作者應該要不定時測量可燃氣體濃度，並且做好通風、換氣以及除塵等措施防止災害發生¹⁶⁸。

三、倉庫業法施行規則

¹⁶⁷ e-Gov 法令檢索，「一般高圧ガス保安規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=341M50000400053>。

¹⁶⁸ e-Gov 法令檢索，「労働安全衛生規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=347M50002000032>。

《倉庫業法施行規則》第 3 條中，將倉庫的種類分為十種類，其中氫氣等高壓氣體由於其存放具有一定的危險性，因此儲存氫氣的倉庫被歸類在第七類的危險物品倉庫¹⁶⁹；此類倉庫的設置標準需要符合《消防法施行規則》第 6 條的規定，在一定面積之中除了設置大型滅火裝置外，亦需要放置規定數量以上的水桶、水箱、滅火器、乾燥砂、膨脹蛭石、膨脹珍珠岩等滅火設備¹⁷⁰。

四、有關危險物品規制的政令

《有關危險物品規制的政令》第 11 條規定，包含氫氣在內的各式具有致災性的高壓氣體室外儲存槽，若是存放超過指定數量的話，需要將依照倍數在四周保留空地寬度，超過 500 倍以下至少需保留 3 公尺，超過 500 至 1000 倍至少需保留 5 公尺，超過 1000 至 2000 倍至少需保留 9 公尺，超過 2000 至 3000 倍至少需保留 12 公尺，超過 3000 至 4000 倍至少需保留 15 公尺，超過 4000 倍的話需要保留儲存槽的最大直徑長度，並不得低於 15 公尺¹⁷¹，以確保安全。

參、運氫領域的法規整備

一、道路法

¹⁶⁹ e-Gov 法令檢索，「倉庫業法施行規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=331M50000800059>。

¹⁷⁰ e-Gov 法令檢索，「消防法施行規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336M50000008006>。

¹⁷¹ e-Gov 法令檢索，「危險物の規制に関する政令」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306>。

《道路法》第 46 條規定，超過 5000 公尺以上的隧道以及水下隧道，為了確保隧道的結構以及交通安全，因此針對載運包括氫氣在內的危險物品之車輛進行限制，其道路管理者也有權力可以禁止車輛通行；而能夠通過上述隧道的運氫車，必須屬於普動自動車或四輪以上的小型自動車之種類，且不能載運超過 60 立方公尺容積的壓縮氫氣，或是超過 600 公斤的液化氫氣，其容器必須要符合《高壓氣體保安法》的規定，才得以通行長隧道及水下隧道；至於大型油罐車以及液化氣槽車等大型車輛，便被禁止利用上述隧道通行，只能夠繞路行駛¹⁷²。

《道路法》第 32 條規定，若是要在道路區域內進行高壓氣體管線埋設，或是工作物的放置的話，需要提前和道路主管機關申請道路占用許可，方能進行管線埋設等工作¹⁷³。

二、港則法

《港則法》第 20 條中規定，當載運如氫氣等爆炸品或危險品進入特定港口¹⁷⁴時，應該在抵達港口邊界時，接受港務長之引導；《港則法》第 21 條中規定，原則上載運爆炸品或危險品不得進入特定港口進行停泊，但若是港務長在評估後，認為這些貨品的類型、數量以及儲放方式在許可範圍內，便能夠允許該船舶進入

¹⁷² e-Gov 法令檢索，「道路法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=327AC1000000180>。

¹⁷³ e-Gov 法令檢索，「道路法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=327AC1000000180>。

¹⁷⁴ 根據《港則法》第三條，特定港口意旨能夠供吃水較深的船舶進出，以及外國籍船舶常時出入的港口，並且由政令指定之。

港口停泊；《港則法》第 22 條中規定，若是船舶要進入特定港口裝載或卸載爆炸品或危險品時，也應該獲得港務長的許可，並且在指定地點進行裝載或卸運¹⁷⁵。

而根據海上保安廳針對《港則法》所訂定出的「碼頭危險物品卸載容許量」（危險物接岸荷役許容量），可以得知不同等級的碼頭，能夠容許卸載的氫氣數量皆不同，詳細規定及標準臚列如表 3.6。

表 3.6 不同等級的碼頭之危險物品卸載容許量

碼頭區分	標準	卸載容許量
A	位於擁擠觀光區附近的泊位 位於行經船舶眾多航道附近的泊位 距離城市少於 100 公尺的泊位	1 公噸
B	距離城市高於 300 公尺的泊位	20 公噸
C1	距離城市高於 500 公尺的泊位 但不屬於貨櫃集裝箱專用	100 公噸
C2	貨櫃集裝箱專用	400 公噸

資料來源：海上保安廳交通部¹⁷⁶；圖表為筆者自繪。

¹⁷⁵ e-Gov 法令檢索，「港則法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=323AC0000000174>。

¹⁷⁶ 海上保安庁交通部，「危險物接岸荷役許容量」，海上保安庁交通部，<https://www.kaiho.mlit.go.jp/syoukai/soshiki/toudai/navigation-safety/pdf/kiken01.pdf>。

三、港灣法

《港灣法》（港灣法）第 37 條及第 52 條規定，若是港口碼頭的泊位需要增建裝卸臂來協助運氫船的卸載的話，需要事先向港灣管理員進行申請；並且在建設、維修以及更新裝卸臂時，要符合國土交通省針對裝卸臂所訂立的技術基準來進行施工¹⁷⁷，避免公共安全事故的發生。

四、瓦斯事業法實行規則

《瓦斯事業法實行規則》（ガス事業法施行規則）第 168 條規定，連續延伸超過 500 公尺、最大工作壓力高於 5000 kPa 的室外管線，或者是連續延伸超過 500 公尺、最大壓力低於 5000 kPa，但每日得輸送 10000 立方公尺以上氣體的室外管線，在建設時需要任命具有甲種或乙種瓦斯主任工程師（甲種／乙種ガス主任技術者）執照者，為室外管線設置時的瓦斯主任工程師，方能進行施作¹⁷⁸；因此在建設室外輸氫管線時，亦需要依循本法聘任擁有合格執照者來擔任瓦斯主任工程師。

五、一般高壓氣體保安規則

《一般高壓氣體保安規則》第 6 條第 1 項規定，運輸氫氣等高壓氣體的管線不得安裝在有滑坡、坍方、地面不均勻下降等地區，除此之外，經濟產業大臣所

¹⁷⁷ e-Gov 法令檢索，「港灣法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000218>。

¹⁷⁸ e-Gov 法令檢索，「ガス事業法施行規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=345M50000400097>。

公布之特定地點，以及建築物內與地基下方，亦不得安裝；而在安裝時則至少需要埋在距地表 0.6 公尺以下之處，方能確保高壓氣體輸送之安全性¹⁷⁹。

六、聯合工廠等保安規則

《聯合工廠等保安規則》（コンビナート等保安規則）第 9 條規定，運輸氫氣等高壓氣體的管線不得安裝在有滑坡、坍方、地面不均勻下降等地區，除此之外，經濟產業大臣所公布之特定地點，以及建築物內與地基下方，亦不得安裝¹⁸⁰；而管線與其他工作物的距離應不小於 3 公尺，埋設的深度則根據地點之不同有所差異，詳細臚列如表 3.7。

表 3.7 《聯合工廠等保安規則》關於管線埋設深度的規定

設置場所	與地表的距離	若安裝在防護結構中
山林原野	不小於 0.9 公尺	不小於 0.6 公尺
其他地區	不小於 1.2 公尺	不小於 0.6 公尺
市區道路之路面下	不小於 1.8 公尺	不小於 1.5 公尺
非市區道路之路面下	不小於 1.5 公尺	無相關規定

資料來源：整理自 e-Gov 法令檢索¹⁸¹；圖表為筆者自繪。

¹⁷⁹ e-Gov 法令檢索，「一般高圧ガス保安規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=341M50000400053>。

¹⁸⁰ e-Gov 法令檢索，「コンビナート等保安規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=361M50000400088>。

¹⁸¹ e-Gov 法令檢索，「コンビナート等保安規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=361M50000400088>。

七、海岸法與河川法

《海岸法》第 7 條、第 8 條以及第 13 條規定，若要在海岸保護區域進行清除土石、堆築路堤等管線埋設的施工行為的話，需要事先就施工設計圖與施工計畫與海岸管理者進行協商，並且向主管機關申請佔用許可，取得海岸管理者許可及佔用許可後方能進行施工¹⁸²。

《河川法》第 20 條、第 24 條以及第 26 條規定，若要在河川地進行改建、新建或是移除工程的話，需要事先向河川管理者申請工作物新築與河川地佔用許可，取得工作物新築與河川地佔用許可後方能進行施工¹⁸³；因此若是要在河川地進行管線埋設等施工行為的話，必須要依循本法來申請相關許可。

肆、氫氣應用領域的法規整備

一、有關危險物品規制的規則

《有關危險物品規制的規則》（危險物の規制に関する規則）第 27 條中，除了針對安全距離、障礙物與防火牆的設置、氣體洩漏的操作等安全措施進行規範外，同時也提出加氫站的各項設備需要遵循的技術規範¹⁸⁴，詳細臚列如表 3.9。

¹⁸² e-Gov 法令檢索，「海岸法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=331AC0000000101>。

¹⁸³ e-Gov 法令檢索，「河川法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=339AC0000000167>。

¹⁸⁴ e-Gov 法令檢索，「危險物の規制に関する規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334M50000002055>。

表 3.9 加氫站各項設備須遵循的技術規範

設備	技術規範
液化氫儲存槽、蓄壓器、升壓幫浦、液化氫接收設備等	在這些設備周遭需要加裝保護性欄杆，或者是將其安裝在車輛不容易進入的地方，以防止車輛進出造成碰撞，影響加氫站的安全。
加注管線	必須保證管線在沒有連結到車輛時不會供氣，以及採取措施來防止因巨大拉力而導致管線破裂，並且應檢討是否設置碰撞感測器等設施來檢測車輛碰撞。
液化氫的管線	為了防止車輛碰撞，管線應該安裝在頂棚或地下，抑或是用欄杆進行防護；除此之外，也應該在管線與加氫區、儲存槽之間設置防火牆，避免火災蔓延。
氫氣改質裝置	應安裝在不會與車輛產生碰撞的地方，且在氫氣洩漏的時候，應該要有緊急停止設施，來避免事故擴大。

資料來源：整理自消防庁¹⁸⁵；圖表為筆者自繪。

二、建築基準法

《建築基準法》第 27 條、第 28 條以及第 49 條規定，加氫站的設置以及儲藏量在不同地區皆有其規定，但是若是該地區主管機關在審核評估以後，認定在

¹⁸⁵ 消防庁，「圧縮水素充てん設備設置給油取扱所に係る基準」，消防庁，https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento111_10_sanko1_1.pdf。

該地建置加氫站並不會對周遭環境產生危害的話，亦能夠在建置高於規定儲藏量的加氫站¹⁸⁶，詳細條件臚列如表 3.8。

表 3.8 不同地域別的氣體儲藏與供給設施規模

地域別	液化氣體	可燃氣體	壓縮氣體
第 1 種低層住居專用地域	不可	不可	不可
第 2 種低層住居專用地域			
第 1 種中高層住居專用地域			
田園居住地域			
第 2 種中高層住居專用地域	3.5 公噸以下	35 m3 以下	350 m3 以下
第 1 種住居地域			
第 2 種住居地域			
準住居地域			
鄰近商業地域	7 公噸以下	70 m3 以下	700 m3 以下
商業地域			
準工業地域	35 公噸以下	350 m3 以下	3500 m3 以下
工業地域	無限制	無限制	無限制
工業專用地域			

資料來源：整理自 e-Gov 法令檢索¹⁸⁷；圖表為筆者自繪。

¹⁸⁶ e-Gov 法令檢索，「建築基準法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000201>。

¹⁸⁷ e-Gov 法令檢索，「建築基準法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000201>。

三、港灣法

《港灣法》第 38 條及第 40 條規定，若是要在臨港區域新建或擴建超過一定規模處理危險物的設施，例如加氫站等，必須要向港灣管理者進行通報並經同意，使得興建；然而，若是在《高壓氣體保安法》中所規定的高壓氣體則不需要通報，因為其安全已經受到這部法律的規範¹⁸⁸。

四、一般高壓氣體保安規則

《一般高壓氣體保安規則》第 60 條規定，消耗易燃氣體的裝置周遭 5 公尺範圍以內，禁止吸菸且不能夠設置用火裝置，亦不能用易燃或可燃材質來製造裝置¹⁸⁹，如家庭用或工業用的定製型氫能燃料電池組的設置，便需要遵循本法規，以防止事故的發生。

¹⁸⁸ e-Gov 法令檢索，「港灣法」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000218>。

¹⁸⁹ e-Gov 法令檢索，「一般高圧ガス保安規則」，e-Gov 法令檢索，<https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=341M50000400053>。

第三節 小結

綜上所述，可以發現日本氫能源的政策體系是如同積木一樣堆疊而成，最底端的是在 2014 年以前的陽光計畫、月光計畫、新陽光計畫以及 WE-NET 計畫等推進氫能源前瞻技術研發的計畫，其奠定了日後日本在氫能源領域的技術優勢。中間則是第四次及其後的能源基本計畫，因應能源轉型的需求迫切，因此逐步升高氫能源的政策地位，將其視為未來能源結構的重要組成者。最上層則可以分為兩部份，其一是因應碳中和趨勢所提出的綠色成長戰略，氫能源在此得以活用淨零碳排的特性，來助力碳中和達標；其二是因應建構氫能社會所提出的氫能基本戰略，日本想要將積累的氫能源技術優勢，轉化為產業與經濟層面的資本，並且在各國矚目的綠色振興局勢下，再度主導世界經濟的走向。



3.1 日本氫能源政策體系圖

資料來源：圖表為筆者自繪。

日本在法規整備層面，則較注重在氫能源供應鏈各層面的保安規制之上，因此在各法條之中，涉及製氫、儲氫、運氫與加氫過程中的安全性規範大致上皆已與現有的法規進行融合；然而在保安規制以外，如產業面以及學術研究面的推進事項，皆未被寫入法律中，而是透過各相關省廳自行編列政策來分頭並進。

與日本形成對照組的則是韓國，韓國於 2021 年提出了《氫經濟促進及氫安全管理法》，也是世界上第一部氫能源專法，其中不只針對氫能源供應鏈的部分保安規制進行修訂，並同時將人才培育、創投資金提供、基礎設施建設、國際合作與拓展海外市場等事項寫入法律中，以利整體戰略的推進¹⁹⁰。

兩相對照之下可以發現，韓國希望藉由專法來推進氫能源的發展，如此一來的好處是可以使整體產業發展時有所依歸，並且可以整合跨部會的資源來加速推進；但是其壞處是部分領域的權責有劃分不清的問題，且法律中較為針對氫能源產業發展政策進行描述，反而會忽略氫能源的保安規制，以及與碳中和之間的連動關係，這兩者亦是氫能源發展不可忽視的重點。

而日本則是在法規面較為注重氫能源的保安規制，且透過在綠色成長戰略維繫與碳中和之間的連動；但在產業發展方面，則是由於一開始在氫能基本戰略中，採取較為守勢的、注重發展國內需求的策略，導致在各國開始加大投入後，日本原先取得的大幅度技術優勢，逐漸被看到車尾燈；因此才會於 2023 年針對氫能基本戰略提出修正案，希望未來藉由較為攻勢、注重拓展海外市場的策略，來重新建立領先優勢，並且領導世界氫能源經濟的發展。

¹⁹⁰ 林淑媛、潘羿菁，「氫能新賽局 4 / 下一個半導體賽局？韓國如何光速打造氫能經濟王國」，中央社，<https://www.cna.com.tw/news/afe/202306250031.aspx>。

第四章 日本氫能源產學政策

第一節 日本氫能源研究支援體制

目前日本的氫能源研究支援體制，大致可以分為三個不同的組織來主導，其一是科技發展的主管機關文部科學省，其二是文部科學省轄下的國立研究開發法人科學技術振興機構，其三則是經濟產業省轄下的國立研究開發法人新能源產業技術綜合開發機構，三個組織各自所負責的研究支援體制與作用皆不盡相同，因此本節將對此進行探討與釐清。

壹、文部科學省主導的研究支援體制

文部科學省為日本教育、文化、體育、科技以及學術等領域的主管機關，其重要功能便是有效的推動所轄領域的相關事務發展，本研究所論及的氫能源技術研究及其支援機制，亦是由文部科學省所管轄；而爬梳文部科學省所主導的各項事業後，除了委由轄下法人 JST 所執行的各項計畫外，其在科學研究費助成事業以及大學端的氫能研究組織等，都給予了研究者充分的支援，因此本段落將分別論述之。

一、科學研究費助成事業

科學研究費（後簡稱科研費）是一項競爭型研究經費，其前身是 1918 年所創設的「科學研究獎勵金」，並且在 1965 年改革為現今的科研費制度；原先科研費的公募、審查以及交付業務，都是由文部科學省來負責的，但在 1999 年以後，科研費的相關業務已經全部委由日本學術振興會（Japan Society for the Promotion

of Science, JSPS) 來統籌辦理。而科研費的目的旨在透過同行評審 (peer review) 來進行研究評估，從基礎到應用、從人文社會科學到自然科學，所有領域的研究者都能夠申請科研費來幫助自身的學術研究發展¹⁹¹。

科研費的類型可以分為「補助金」與「基金」兩種，其中的差別在於，補助金即使研究期間跨越數年，但每年仍需要重新遞交申請書以及成果報告，且該年度未動支的科研費不得沿用；而基金只要在最初年度提交申請書即可，之後每年僅需要繳交一份進度報告，便可以領取科研費，且部分的科研費項目甚至能提報預支下個年度經費的申請，該年度未動支的科研費亦能在下個年度沿用，給予研究者較彈性的經費使用空間¹⁹²；詳細的科研費種類及申請條件臚列如表 4.1。

表 4.1 科研費的種類、申請條件與經費類型

科研費種類	科研費申請條件	經費類型
特別推進研究	一人或少人開闢出新的科學原創研究路徑 3-5 年間給予 2-5 億日幣	補助金
新學術領域研究	由研究團體提出的新學術領域研究 5 年間給予 1-3 億日幣	補助金
學術變革領域研究	由研究團體引導學術變革的研究 重大變革：5 年間給予 5000 萬-3 億日幣 創新研究：3 年間給予 5000 萬日幣以下	補助金
基礎研究 (S)	一人或少人的獨創先驅研究 原則上 5 年間給予 5000 萬-2 億日幣	補助金

¹⁹¹ 日本學術振興會，「科学研究費助成事業 (科研費) 研究種目・概要」，日本學術振興會，https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/01_seido/01_shumoku/index.html。

¹⁹² 日本學術振興會，「科学研究費助成事業 (科研費) 科研費の「基金化」」，日本學術振興會，https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/01_seido/06_kikinka/index.html。

基礎研究（A）	一人或數人的獨創先驅研究 3-5 年間給予 2000-5000 萬日幣	補助金
基礎研究（B）	一人或數人的獨創先驅研究 3-5 年間給予 500-2000 萬日幣	補助金
基礎研究（C）	一人或數人的獨創先驅研究 3-5 年間給予 500 萬日幣以下	基金
挑戰性的研究	一人或數人，對現今科學重大影響的研究 開拓：3-6 年間給予 500-2000 萬日幣 萌芽：2-3 年間給予 500 萬日幣以下	基金
青年學術研究	取得博士學位 8 年內的個人研究者 2-5 年間給予 500 萬日幣以下	基金
重啟研究活動的支援	重新聘任或育兒假回歸的個人研究者 1-2 年間每年給予 150 萬日幣以下	基金
獎勵研究	教育、研究機構、企業的個人研究者 1 年間每年給予 10-100 萬日幣	補助金

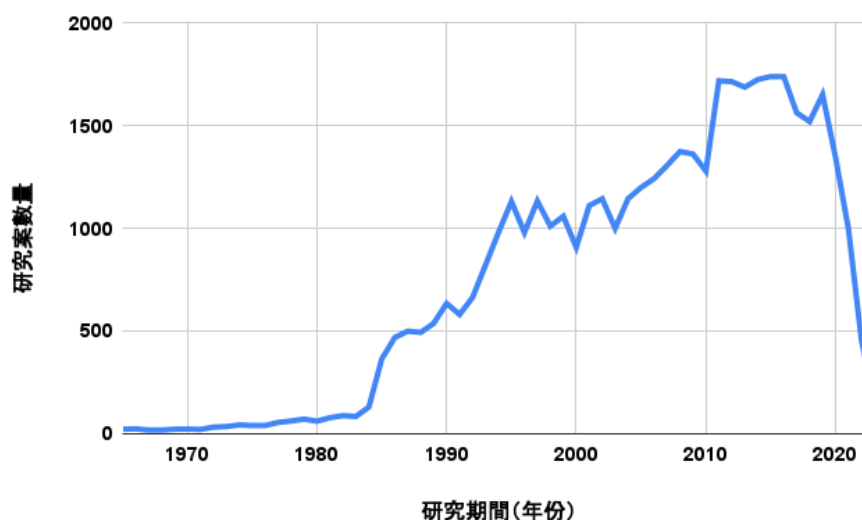
資料來源：日本學術振興會¹⁹³；圖表為筆者自繪。

而歷年來以氫氣為主題進行研究的科研費研究案數量統計如表 4.2，總數約有 43000 件，可以發現在 1980 年開始攀升之後，於 2010 年代到達頂峰，但是近年來以氫氣作為主題申請科研費的研究案數量又迅速滑落；其中科研費種類集中在基礎研究（C）、基礎研究（B）、青年學術研究等三類，而申請到的科研費總額集中在 100-500 萬日幣之區間（27000 件）；可以發現科研費領域的氫氣

¹⁹³ 日本學術振興會，「科学研究費助成事業（科研費）研究種目・概要」，日本學術振興會，https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/01_seido/01_shumoku/index.html。

研究通常規模較小，且近年來可能因為其他政策對於氫能源的關注，因此研究者捨科研費，轉而去申請其他政策提供的高額補助金。

表 4.2 1965-2023 年 以氫氣為主題進行研究的科研費研究案數量



資料來源：整理自 KAKEN¹⁹⁴；圖表為筆者自繪。

而在歷年來以氫氣為主題進行研究的科研費研究案之中，最為著名的便是由東北大學金屬材料研究所折茂慎一教授所領銜的「Hydrogenomics」（ハイドロジェノミクス）科研計畫，其研究團隊申請了 2018-2022 年新學術領域研究的科研費，主要針對氫的「高密度聚集」、「介面定位」、「高速移動」、「反應過程增強」以及「先端測量與模擬」等特性進行研究，藉由橫跨工程、物理、化學及生物領域的學者合作，開發出各種高階的氫氣功能，有效幫助未來的氫能源活用¹⁹⁵；而在科研費研究期間屆滿後，研究團隊與日本 MRS（材料科學相關的學會）執行

¹⁹⁴ KAKEN, 「科学研究費助成事業データベース」, KAKEN, <https://kaken.nii.ac.jp/ja/index/>.

¹⁹⁵ Hydrogenomics, 「領域概要」, Hydrogenomics, <https://www.hydrogenomics.jp/overview.html>.

委員會於 2022 年 2 月共同成立了「氫氣科學技術合作委員會」(水素科学技術連携研究会)，提供一個學術平台，供氫氣領域相關研究學者進行交流¹⁹⁶。

二、大學端的氫能源研究投入

2010 年所提出的文部科學省特別經費事業「透過產學官地域合作來推進氫能社會實證研究」(産学官地域連携による水素社会実証研究事業)中，九州大學與福岡縣、福岡縣氫能源戰略會議合作，在九州大學伊都校區(福岡縣福岡市西區)進行產學合作以及基礎建設的的示範研究，建立了當時世界第一個氫能源研究教育據點，並且在其後陸續成立了碳中和能源國際研究所、氫能材料先端科學研究中心、氫能源國際研究中心、次世代燃料電池產學合作中心、氫能源製品研究試驗中心等氫能源相關的研究機構，其中九州大學碳中和能源國際研究所更獲選文部科學省的世界頂尖研究據點計畫(World Premier International Research Center Initiative, WPI)，獲得文部科學省鉅額投入的九州大學，目前已是日本各大學中氫能源領域研究的佼佼者。除此之外，日本尚有其他大學成立氫能源的研究組織，共同推進氫能源技術的研究，詳細臚列如表 4.3。

¹⁹⁶ 水素科学技術連携研究会，「研究会趣旨」，水素科学技術連携研究会，<https://hydrogenomics-alliance.jp/overview01.html>。

表 4.3 日本有成立氫能源研究組織的大學列表

大學	研究組織	成立日期
山梨大學	綠色能源研究中心 ¹⁹⁷	2001 年 4 月
電氣通信大學	燃料電池與氫氣創新研究中心 ¹⁹⁸	2010 年 5 月
橫濱國立大學	綠氫研究實驗室 ¹⁹⁹	2011 年 4 月
九州大學	氫能源國際研究中心	2014 年 4 月
東京工業大學	國際氫能源研究組織 ²⁰⁰	2016 年 4 月
東京都市大學	氫能源社會構築推進研究中心 ²⁰¹	2016 年 4 月
兵庫縣立大學	氫能源共同研究中心 ²⁰²	2019 年 4 月

資料來源：圖表為筆者自繪。

貳、JST 主導的研究支援體制

日本科學技術振興機構（Japan Science and Technology Agency, JST）於 1996 年 10 月由文部科學省所設立，作為一個國立研究開發法人，在創新科學技術方

¹⁹⁷ 山梨大学, 「クリーンエネルギー研究センター概要」, 山梨大学, <http://www.clean.yamanashi.ac.jp/outline/index.html>。

¹⁹⁸ 電氣通信大学, 「燃料電池・水素イノベーション研究センター」, 電氣通信大学, <https://www.uec.ac.jp/facilities/research/hfc/>。

¹⁹⁹ 横浜国立大学, 「グリーン水素研究ラボ」, 横浜国立大学, https://acerc.ynu.ac.jp/_hyd/。

²⁰⁰ 東京工業大学, 「グローバル水素エネルギー研究ユニット」, 東京工業大学, <http://www.ghe.iir.titech.ac.jp/japanese/overview/index.html>。

²⁰¹ 東京都市大学, 「水素エネルギー社会構築推進研究センター」, 東京都市大学, <https://hydrogen.fpark.tmu.ac.jp/index.html>。

²⁰² 兵庫県立大学, 「水素エネルギー共同研究センター 設立趣旨」, 兵庫県立大学, https://www.u-hyogo.ac.jp/research/center/hydrogen_energy.html。

面扮演重要角色，其透過開展科學技術的基礎研究、新技術的商業化開發以及促進科技發展相關的基礎設施建構等工作，來促進科學技術的發展²⁰³。

為了達成上述目標，JST 建構了六大核心事業，分別是「制定有助於社會變革共創的研發戰略」、「推進有助於社會變革的新價值創造」、「推進新價值創造來源的研究開發」、「多樣人才支援與育成」、「強化科學技術創新的基礎」以及「構築世界級的研究基礎」，透過各事業下屬的計畫以及研究中心等，針對不同對象、目的、技術別的科學技術發展給予支援²⁰⁴，詳細臚列如圖 4.1。

而在爬梳 JST 的各項事業後，發現在「未來社會創造事業」、「大學端新產業創出計畫」、「CREST」、「さきがけ」、「研究成果最適展開支援計畫」以及「先端低碳化技術開發」等之中，都有支援氫能源技術發展的計畫，因此本段落將分別論述之。

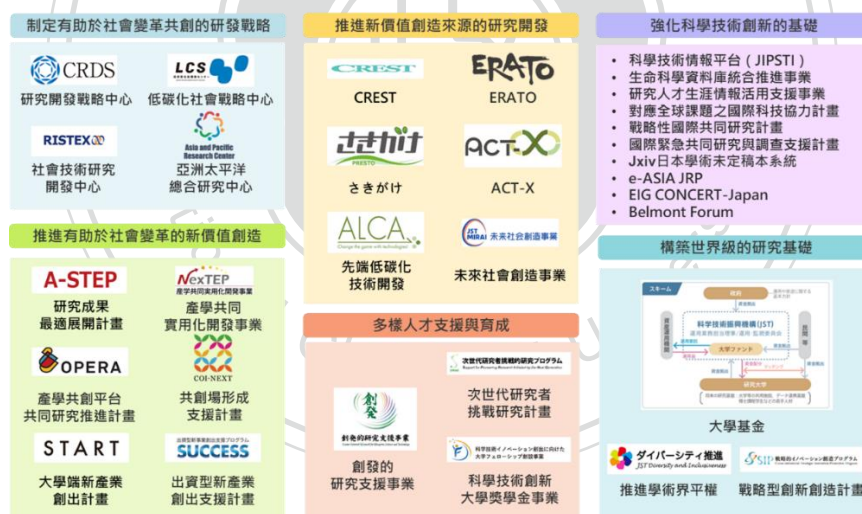


圖 4.1 JST 六大核心事業

資料來源：整理自 JST；圖表為筆者自繪。

²⁰³ JST, 「JST について」, JST, <https://www.jst.go.jp/all/about/outline.html>。

²⁰⁴ JST, 「事業紹介」, JST, <https://www.jst.go.jp/all/jigyou/>。

一、未來社會創造事業

「未來社會創造事業」(未来社会創造事業)在 JST 各項研究支援體制中，屬於推進新價值創造來源研究開發的其中一環，本事業會根據現今經濟面與社會面的潛在需求，來制定具有前瞻性及挑戰性的目標，並透過專案計畫以及科學研究補助金等方式，鼓勵研究者投入高風險、但對未來經濟面與社會面也具有高影響力的研究開發²⁰⁵。

事業主要由兩種研究途徑組成，其一是「探索加速型」，JST 會先透過徵求提案的方式，選定要優先進行公募的主題，其次會針對小規模的項目進行「探索研究」的補助，廣泛採納各式新穎的想法，並且在過程中研析這些想法付諸實現的可行性，最後再透過對於「本格研究」的補助，將想法推進到概念驗證 (Proof of Concept, POC) 的階段；其二則是「大規模專案型」，會針對已經進入概念驗證階段的想法，分析其是否能夠改變目前技術體系，成為影響未來社會的重要技術，並設定技術開發課題及展開公募，通過公募的計畫除了由 JST 進行補助開發外，也會引進部分民營企業的資金來加速其研究²⁰⁶。目前事業中有關氫能源的研究開發計畫臚列如表 4.4。

²⁰⁵ JST, 「未来社会創造事業とは」, JST, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/about/index.html>。

²⁰⁶ JST, 「未来社会創造事業とは」, JST, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/about/index.html>。

表 4.4 未來社會創造事業中有關氫能源的研究開發計畫

	計畫 1	計畫 2
研究項目	用於合成綠氨及尿素的 奇異電子系觸媒 ²⁰⁷	零碳社會所需的 發電廠隔熱金屬材料 ²⁰⁸
研究途徑	探索加速型	探索加速型
研究單位	東京工業大學	東京工業大學、島根大學
研究開發期間	2021-2025 年	2021-2025 年
研究開發費	最多 1 億 2300 萬日幣	最多 1 億 2300 萬日幣

資料來源：JST；圖表為筆者自繪。

二、大學端新產業創出計畫

「大學端新產業創出計畫」(大学発新産業創出プログラム，亦簡稱為 START) 在 JST 各項研究支援體制中，屬於推進有助於社會變革的新價值創造的其中一環，本計畫的主要目的是要將研究開發與商業開發結合再一起，引進公私部門的資金以及 Know-How，透過策定產業與智慧財產權戰略，將高風險但是具有高發展潛力的技術商業化，並且進一步發展為可持續性的機制，使學術部門的研究成果能夠回饋到社會²⁰⁹。

²⁰⁷ 日本の研究.com, 「グリーンアンモニアおよび尿素とその誘導体合成のための特異電子系触媒の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/1160143>。

²⁰⁸ 日本の研究.com, 「ゼロカーボン社会に向けた発電プラント用耐熱金属材料の基盤技術」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/1160136>。

²⁰⁹ JST, 「大学発新産業創出プログラム」, JST, <https://www.jst.go.jp/start/>。

START 主要由兩種研究途徑組成，其一是「專案推進型」，分別針對創業實證、創業啟動、商業模型檢證以及中小企業啟動先期研究（SBIR Phase 1）等四個階段進行研究支援；其二是「大學與商業生態系統推進型」，其中細分為大學推進型、據點都市環境整備型以及新創商業生態系統形成，並且對其提供研究支援²¹⁰；目前 START 中有關氫能源的計畫臚列如表 4.5。

表 4.5 大學端新產業創出計畫中有關氫能源的計畫

	計畫 1
研究項目	回收含高濃度二氧化碳之甲烷高分子吸附劑 ²¹¹
研究途徑	專案推進型 創業實證
研究單位	物質材料研究機構
研究開發期間	2022-2024 年
研究開發費	最多 8100 萬日幣

資料來源：JST；圖表為筆者自繪。

三、CREST

CREST 在 JST 各項研究支援體制中，屬於推進新價值創造來源的研究開發的其中一環，其目的是要促進有原創性，且符合國際高標準的基礎研究，來克服日本所面臨的挑戰，並且對於經濟面與社會面的變革做出重大貢獻；因此研究總括者會根據不同的研究領域及目標，建立數個研究團隊，由日本頂尖的研究人員

²¹⁰ JST, 「大学発新産業創出プログラム」, JST, <https://www.jst.go.jp/start/>.

²¹¹ 日本の研究.com, 「高分子吸着材による高濃度 CO2 を含むメタン/CO2 混合ガスからの CO2 回収事業」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/researchers/view/199966>.

推進各領域的研究，每個領域皆會有十餘位來自業界、學界與法界的顧問，給予研究發展的建議，並使成果最大化²¹²；CREST 中有關氫能源的計畫臚列如表 4.6。

表 4.6 CREST 中有關氫能源的研究開發計畫

研究項目	研究單位	研究開發期間
氨合成與分解的特殊反應場 ²¹³	名古屋大學	2013-2018 年
甲酸脫氫的高效率高壓氫生產技術 ²¹⁴	產業技術總合研究所	2013-2018 年
再生能源製氫與作為能源載體的 甲烷製造技術 ²¹⁵	宇宙航空研究開發機 構	2014-2019 年
運用鈮基合金膜的 創新氫氣分離與精製技術 ²¹⁶	物質材料研究機構	2014-2019 年
利用分子觸媒的革新製氨技術 ²¹⁷	東京大學	2015-2020 年

資料來源：JST；圖表為筆者自繪。

²¹² JST, 「CREST プログラムの概要」, JST, <https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/about/index.html>。

²¹³ 日本の研究.com, 「エネルギーキャリアとしてのアンモニアを合成・分解するための特殊反応場の構築に関する基盤技術の創成」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/123063>。

²¹⁴ 日本の研究.com, 「ギ酸の脱水素化反応による高圧水素の高効率製造技術の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/114127>。

²¹⁵ 日本の研究.com, 「再生可能エネルギー利用による水素製造とエネルギーキャリアとしてのメタン製造技術の研究」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/887999>。

²¹⁶ 日本の研究.com, 「バナジウム系合金膜による次世代エネルギーキャリアからの革新的水素分離・精製基盤技術の創出」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/888000>。

²¹⁷ 日本の研究.com, 「分子触媒を利用した革新的アンモニア合成及び関連反応の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920156>。

四、さきがけ (Sakigake)

「さきがけ」在 JST 各項研究支援體制中，屬於推進新價值創造來源的研究開發的其中一環，其目的是要促進有原創性，且符合國際高標準的基礎研究，來克服日本所面臨的挑戰，並且對於經濟面與社會面的變革做出重大貢獻；因此研究總括者會根據不同的研究領域及目標，挑選該領域中的年輕研究者，來進行有挑戰性的個人研究；且每個領域皆會有十餘位來自業界、學界與法界的顧問，給予研究發展的建議，並使成果最大化²¹⁸；さきがけ中有關氫能源的計畫臚列如表 4.7。

表 4.7 さきがけ中有關氫能源的研究開發計畫

	計畫 1	計畫 2	計畫 3	計畫 4
研究項目	不使用貴金屬的大規模製氫材料開發 ²¹⁹	改善氫與阻燃固態燃料混燒的點火特性 ²²⁰	一體化光觸媒與人工光合作用反應系統 ²²¹	多功能金屬觸媒推進甲酸高效製氫技術 ²²²
研究單位	筑波大學 伊藤良一	北海道大學 橋本望	東京大學 嶺岸耕	大阪大學 森浩亮
研究開發期間	2015-2018 年	2015-2018 年	2015-2018 年	2015-2018 年

²¹⁸ JST, 「さきがけ プログラムの概要」, JST, <https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/about/index.html>.

²¹⁹ 日本の研究.com, 「水素ステーション普及のための貴金属を使用しない大規模水素生産材料の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920198>.

²²⁰ 日本の研究.com, 「エネルギーキャリアとしてのアンモニア普及へ向けた難燃性固体燃料とアンモニアの混焼による着火特性改善効果の解明」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920199>.

²²¹ 日本の研究.com, 「メンブレン一体型光触媒シートの開発と人工光合成反応系の構築」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920201>.

²²² 日本の研究.com, 「ギ酸からの高効率水素発生を駆動する多機能集積型金属触媒の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920200>.

研究開發費	最多 4000 萬日幣	最多 4000 萬日幣	最多 4000 萬日幣	最多 4000 萬日幣
-------	----------------	----------------	----------------	----------------

資料來源：JST；圖表為筆者自繪。

五、研究成果最適展開支援計畫

「研究成果最適展開支援計畫」(研究成果最適展開支援プログラム，亦簡稱為 A-STEP)，在 JST 各項研究支援體制中，屬於推進有助於社會變革的新價值創造的其中一環；本計畫的主要目的是進行技術轉讓的支援，旨在將大學或研究機構所做出的研究開發成果，作為一項具有國家經濟意義的技術，透過產學合作的方式投入實際使用，以回饋到社會面及經濟面²²³。研究成果最適展開支援計畫中有關氫能源的計畫臚列如表 4.8。

表 4.8 研究成果最適展開支援計畫中有關氫能源的計畫

	計畫 1
研究項目	高速傳導氫離子的配位高分子物質 ²²⁴
研究單位	京都大學
研究開發期間	2015-2019 年
研究開發費	最多 4 億 1500 萬日幣

資料來源：JST；圖表為筆者自繪。

²²³ JST, 「A-STEP (研究成果最適展開支援プログラム) とは」, JST, <https://www.jst.go.jp/a-step/outline/index.html>。

²²⁴ 日本の研究.com, 「イオン伝導性配位高分子を電解質に用いた燃料電池の研究開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/957766>。

六、先端低碳化技術開發

「先端低碳化技術開發」(先端的低炭素化技術開發，亦簡稱為 ALCA)，在 JST 各項研究支援體制中，屬於推進新價值創造來源的研究開發的其中一環；本計畫的目的是開發減少溫室氣體排放的低碳技術，來建立一個低碳社會，ALCA 主要將目光投射到兩種減碳的策略上，其一是適應策略 (adaptation option)，藉由開發再生能源、儲能以及碳中和技術來減碳，其二是緩和策略 (mitigation option)，藉由節能技術等來減碳；因此再生能源、儲能、碳中和以及節能等都是本計畫著重支援的技術²²⁵。先端低碳化技術開發中有關氫能源的計畫臚列如表 4.9。

表 4.9 先端低碳化技術開發中有關氫能源的研究開發計畫

	計畫 1	計畫 2	計畫 3
研究項目	低成本高性能二硼化鎂超長線材 ²²⁶	高效率水蒸氣電解製氫、燃料電池可逆作動裝置 ²²⁷	氫氣、空氣蓄電池 ²²⁸
研究單位	九州大學、日立製作所、物質材料研究機構	山梨大學	同志社大學、FDK 株式會社
研究開發期間	2010-2019 年	2012-2019 年	2012-2019 年

²²⁵ JST, 「ALCA について」, JST, <https://www.jst.go.jp/a-step/outline/index.html>。

²²⁶ 日本の研究.com, 「未来の水素利用社会を支える低コスト高性能 MgB2 線材の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/110614>。

²²⁷ 日本の研究.com, 「高効率水素製造水蒸気電解/燃料電池可逆作動デバイスの開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/117523>。

²²⁸ 日本の研究.com, 「水素/空気二次電池の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/111277>。

研究開發費	最多 10 億日幣	最多 9 億日幣	最多 2.4 億日幣
-------	-----------	----------	------------

資料來源：JST；圖表為筆者自繪。

參、NEDO 主導的研究支援體制

新能源產業技術綜合開發機構（New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO）的前身是 1980 年因應石油替代能源開發及導入而創立的新能源綜合開發機構，後於 2003 年 10 月根據《獨立行政法人新能源產業技術綜合開發機構法》成立了獨立行政法人新能源產業技術綜合開發機構；2015 年又因組織法修訂為《國立研究開發法人新能源產業技術綜合開發機構法》，因此改稱為國立研究開發法人新能源產業技術綜合開發機構²²⁹。

NEDO 目前隸屬於經濟產業省之下，主要任務是促進民間的研發能量，針對非化石能源以及能源使用合理化的技術進行研究開發，並且藉以改進工業製程與促進其商業化，來確保能源的穩定供應；其最終目標有二，其一是藉由新能源與節能的技術研發，來解決日本面臨的能源供給課題以及地球環境課題，其二則是結合產官學的力量，來強化日本在新能源領域的產業技術力，搶佔未來新能源市場的先機²³⁰。

為了達成上述的目標，NEDO 建構了四大領域：「能源系統領域」、「節能與環境領域」、「產業技術領域」以及「新創產業創新領域」，各自對應到不同的技

²²⁹ NEDO, 「機構概要」, NEDO, <https://www.nedo.go.jp/introducing/kihon.html>。

²³⁰ NEDO, 「NEDO のご案内」, NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100906746.pdf>。

術開發與課題，透過國際計畫、課題型公募事業、特定公募型研究開發、國際實證事業及調查事業等方式，促進該領域技術的發展²³¹，詳細臚列如圖 4.2。

其中在能源系統領域中，為了要開展氫能源相關的技術開發，其透過「氫能應用等先導研究開發事業」、「氫能社會構築技術開發事業」、「超高壓氫氣基礎設施正式普及技術研究開發事業」以及「建立有競爭力的氫能供應鏈技術開發事業」等公募事業，而本段落將分別論述之。



圖 4.2 NEDO 四大事業領域與其技術課題

資料來源：NEDO²³²；圖表為筆者自繪。

²³¹ NEDO, 「NEDO のご案内」, NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100906746.pdf>.

²³² NEDO, 「NEDO のご案内」, NEDO, <https://www.nedo.go.jp/content/100906746.pdf>.

一、氫能應用等先導研究開發事業

「氫能應用等先導研究開發事業」（水素利用等先導研究開發事業）規劃自 2014 年度執行至 2022 年度結束；目的旨在確立氫能源在 2040 年以後作為無碳能源的地位，因此希望透過發展活用再生能源的高效低成本製氫技術、活用碳氫化合物（烴類）的無排碳製氫技術、燃燒氫和氧的超高效率燃氣渦輪發電技術、得以長距離輸送及儲存的氫氣能源載體技術、大規模的氫氣利用等技術開發，藉以達成目標²³³；本事業開放公募的詳細研究開發項目臚列如表 4.10。

表 4.10 氫能應用等先導研究開發事業之具體項目

項目	技術摘要
研究開發項目一	提升水電解製氫效率的基礎技術研發
研究開發項目二	大規模氫氣利用技術研發
研究開發項目三	超越過去發電效率的基礎技術研發
研究開發項目四	能源載體系統的調查與研究
研究開發項目五	利用碳氫化合物等不排碳的製氫技術

資料來源：NEDO；圖表為筆者自繪。

二、氫能社會構築技術開發事業

「氫能社會構築技術開發事業」（水素社会構築技術開發事業）規劃自 2014 年度執行至 2025 年度，其中 2023 年度所獲得的預算為 74 億日幣；目的旨在建構一個領先世界的穩定氫氣供應鏈，透過海外豐富且閒置的再生能源製氫，再行

²³³ NEDO, 「水素利用等先導研究開發事業」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100068.html.

運輸回日本進行應用；除此之外，還將開發應用氫能源的發電系統等，來提高氫氣的需求以及能源供應的靈活性，為日本的能源安全做出實質貢獻²³⁴；本事業開放公募的詳細研究開發項目臚列如表 4.11。

表 4.11 氫能社會構築技術開發事業之具體項目

項目	技術摘要
研究開發項目一	大規模氫能源利用技術開發
研究開發項目二	使用海外閒置再生能源製氫的供應鏈構築
	開發氫能源利用系統
研究開發項目三	地域氫能利用技術開發
研究開發項目四	製氫、儲氫、運氫、氫能應用的調查研究
	實現氫能社會的調查研究

資料來源：NEDO；圖表為筆者自繪。

三、超高壓氫氣基礎設施正式普及技術研究開發事業

「超高壓氫氣基礎設施正式普及技術研究開發事業」（超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業）規劃自 2018 年度執行至 2023 年度，其中 2023 年度所獲得的預算為 8000 萬日幣；為了要實現氫燃料電池汽車的普及，加氫站的整備是重中之重，因此本事業將針對加氫站的超高壓氫氣技術進行研發，希望藉此降低加氫站建設與營運的成本；除此之外，還將針對加氫站設施、車用高壓氫

²³⁴ NEDO, 「水素社会構築技術開発事業」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100096.html.

氣罐以及加氫品質管理方法等國際標準的統一進行技術開發，以確保日本於氫燃料電池車領域的國際競爭力²³⁵；本事業開放公募的詳細研究開發項目臚列如表 4.12。

表 4.12 超高壓氫氣基礎設施正式普及技術研究開發事業之具體項目

項目	技術摘要
研究開發項目一	提升水電解製氫效率的基礎技術研發
研究開發項目二	降低加氫站成本的技術開發
研究開發項目三	因應國際標準化的技術開發

資料來源：NEDO；圖表為筆者自繪。

四、產學官合作研發解決燃料電池大幅推廣後的共通課題

「產學官合作研發解決燃料電池大幅推廣後的共通課題」（燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業）規劃自 2020 年度執行至 2024 年度，其中 2023 年度所獲得的預算為 79 億日幣；本事業主要是根據「第六次能源基本計畫」的規劃，開發高效率、耐用且低成本的燃料電池系統（包括儲氫罐等）以及水電解系統，以及氫能源相關的先端技術及大規模製氫所需的生產與檢測技術，藉以推進日本達成 2030 年擴大普及與能源自立的目標²³⁶；本事業開放公募的詳細研究開發項目臚列如表 4.13。

²³⁵ NEDO, 「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100144.html。

²³⁶ NEDO, 「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100182.html。

表 4.13 產學官合作研發解決燃料電池大幅推廣後的共通課題之具體項目

項目	技術摘要
研究開發項目一	解決共通課題的技術開發
研究開發項目二	氫氣利用的先端技術開發
研究開發項目三	實現燃料電池多用途活用的技術開發

資料來源：NEDO；圖表為筆者自繪。

五、建立有競爭力的氫能供應鏈技術開發事業

「建立有競爭力的氫能供應鏈技術開發事業」（競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業）規劃自 2023 年度執行至 2027 年度，其中 2023 年度所獲得的預算為 66 億日幣；在建構氫能源供應鏈時，為了確保穩定且成本低廉的氫氣供應基礎，將針對製氫、儲氫、運氫以及各式活用氫氣的設施及系統（包括儲氫罐、加氫管線以及計量系統等）的相關技術進行升級，並且降低其成本與促進多樣化，藉以達成目標²³⁷；本事業開放公募的詳細研究開發項目臚列如表 4.14。

表 4.14 建立有競爭力的氫能供應鏈技術開發事業之具體項目

項目	技術摘要
研究開發項目一	構築大規模氫能源供應鏈的技術開發
研究開發項目二	構築氫能源需求地供應鏈的技術開發
研究開發項目三	加氫站效率高度化與降低成本的技術開發

²³⁷ NEDO, 「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100259.html.

研究開發項目四	整備共通技術基礎的技術開發
研究開發項目五	製氫、儲氫、運氫、氫能應用的調查研究
	實現氫能社會的調查研究

資料來源：NEDO；圖表為筆者自繪。

第二節 日本氫能源產業政策

目前日本的氫能源產業政策體系，大致可以分為三個方針，其一是「擬定產業發展目標」，透過政府提出氫能源的發展路線圖，來主導整體氫能源產業的發展方向；其二是「籌設產業組織」，由政府領銜或參與氫能源相關產業組織的籌設，透過官民合作的方式深化政策成效；其三是「提供補助金」，由中央政府或地方政府，針對特定氫能源產業領域給予補助金，強化誘因而吸引更多企業透入產業的發展；本節將對這三項方針進行探討。

壹、擬定產業發展目標

2014年6月，經濟產業省的氫能源與燃料電池戰略協議會（水素・燃料電池戰略協議會）提出「氫能源與燃料電池路線圖」（水素・燃料電池戰略ロードマップ），其明確訂立出氫能源產業在不同時間段應該要達成的目標，以及要藉由何種方式的產業改革或研究開發，才能夠達成目標²³⁸；但隨著日本在路線圖出

²³⁸ 水素・燃料電池戰略協議會，「水素・燃料電池戰略ロードマップ 水素社會の実現に向けた取組の加速」，經濟產業省，
https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/pdf/report01_03_00.pdf
。

台之後，又陸續提出「氫能基本戰略」、「第五次能源基本計畫」等政策，導致日本在氫能源供應鏈的發展路徑有較大的改變，因此在 2019 年 3 月，氫能源與燃料電池戰略協議會提出了修正版的氫能源與燃料電池路線圖，來確保產業發展與政策不會出現過大的落差²³⁹，兩份路線圖的比較臚列如表 4.15。

表 4.15 2014 年與 2019 年氫能源與燃料電池路線圖比較

領域	年份	目標	實現措施
氫氣製造	灰氫	2025 褐煤汽化後的製氫成本： 數百日幣/Nm ³ →12 日幣/Nm ³	褐煤汽化爐的大型化與 高效率化
		2025 液化氫氣槽的規模： 數千 m ³ →5 萬 m ³	液化氫氣槽的隔熱效果 加強與大型化
	綠氫	2030 氫氣液化效率： 13.6kWh/kg→6kWh/kg	在福島浪江町進行地域 實證
		2030 水電解裝置的成本： 20 萬日幣/kW→5 萬日幣/kW	水電解裝置的高效率化 與耐久性強化
氫能應用	氫燃料電池車	2025 FCV 與 HV 的價差： 300 萬日幣→70 萬日幣	與相關企業與研究機構 進行技術情報的共享
		2025 FCV 燃料電池成本： 2 萬日幣/kW→0.5 萬日幣/kW	開發得以減少使用貴金 屬的製程技術
		2025 FCV 儲氫成本： 70 萬日幣→30 萬日幣	開發得以減少使用碳纖 維的製程技術
	加	2025 加氫站整備費用：	

²³⁹ 水素・燃料電池戰略協議會，「水素・燃料電池戰略ロードマップ 水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン」，經濟産業省，
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/roadmap_hyoka_wg/pdf/002_s05_00.pdf。

		3.5 億日幣→2 億日幣	1.徹底進行加氫站營建 法規改革與技術開發
	2025	加氫站營運費用： 3400 萬日幣→1500 萬日幣	2.建構全國加氫站網絡
	2025	加氫站的壓縮機成本： 9000 萬日幣→5000 萬日幣	3.增加假日營業選項 4.與加油站合併設置
	2025	加氫站的蓄壓機成本： 5000 萬日幣→1000 萬日幣	5.與便利店合併設置
FC巴士	2025	FC 巴士販售價格： 10500 萬日幣→5250 萬日幣	1.提高耐久度技術開發 3.整備巴士專屬加氫站
堆高機	2030	FC 堆高機的銷量： 1 萬輛→銷售至海外市場	整備能夠簡單充填氫氣的基礎設施
發電	2020	氫能專燒發電效率： 26%→27%	開發高效率的燃燒器 臨界混燒率 FS ²⁴⁰ 調查
FC	2025	產業用燃料電池： 達成電網平價	消除電池堆退化的技術 開發

資料來源：水素・燃料電池戰略協議會；圖表為筆者自繪；

紅字為 2019 年修正後的目標。

²⁴⁰ Feasibility study，亦即可行性研究。

貳、籌設產業組織

日本政府在發展氫能源產業時，不管是中央或是地方政府，皆相當注重官民合作的重要性，透過與民間企業的合作，不僅能夠促進企業在氫能源領域的發展，同時也可以集結具有關鍵技術的企業，協助政府解決氫能源技術發展上的困難課題；因此本部分針對 HySTRA、AHEAD、JHyM、JH2A、神戶關西圈氫能源利用協議會以及中部圈氫能源利用協議會等六個產業組織，爬梳政府欲透過其達成的政策目標為何，以及產業組織發展迄今的成果。

一、HySTRA

2015 年，NEDO 在「氫能社會構築技術開發事業／大規模氫能源利用技術開發」領域之下，開展了「以閒置褐煤製氫並進行大規模海上輸送的供應鏈構築實證事業」（未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業），規劃自 2015 年 12 月執行至 2023 年 3 月，針對這項史無前例的氫能源跨國供應鏈實證進行研究開發²⁴¹。

對此，在 NEDO 的指導下，川崎重工業、岩谷產業、日本殼牌、電源開發、丸紅、ENEOS 與川崎汽船等企業進行合作，成立了「技術研究組合零碳氫能源供應鏈推進機構」（CO₂-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association, HySTRA）；計畫前期 HySTRA 主要是進行液化氫氣長距離大量輸送技術、液化氫氣裝卸技術以及褐煤汽化技術等的研究開發，並於 2020 年啟動實證計畫，在蘊藏大量褐煤的澳洲 Latrobe Valley 地區進行褐煤汽化與製氫之後，

²⁴¹ NEDO, 「液化水素サプライチェーンの商用化実証の出荷と受け入れ地について」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101612.html.

透過陸上運輸至澳洲 Hastings 港，再由川崎重工所製造的全球第一艘液化氫運輸船「Suiso Frontier」(すいそ ふろんていあ)運送回日本神戶港進行液化氫的卸運工作²⁴²；詳細的實證路徑圖臚列如圖 4.3。

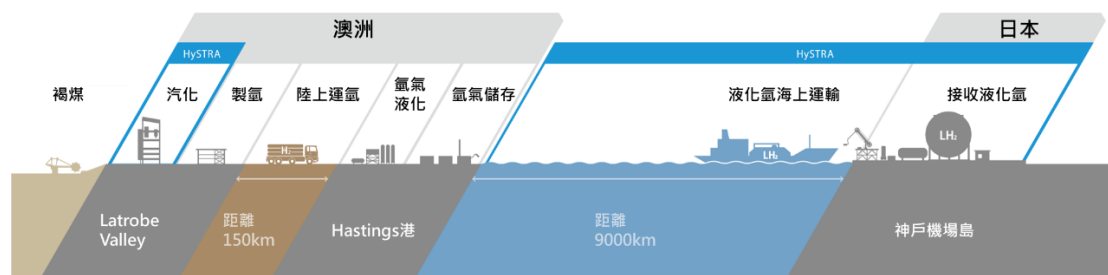


圖 4.3 HySTRA 日澳液化氫供應鏈實證計畫

資料來源：HySTRA；圖片為筆者經翻譯後重製。

二、AHEAD

除了 HySTRA 以外，NEDO 於 2015 年在「氫能社會構築技術開發事業／大規模氫能源利用技術開發」領域之下，開展了不同氫氣能源載體的跨國供應鏈實證計畫：「以有機化學氫化法進行再生能源製氫的供應鏈實證」(有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証)，規劃自 2015 年 7 月執行至 2021 年 3 月，針對在汶萊製氫並轉換為 MCH 運送回日本的供應鏈實證進行研究開發²⁴³。

²⁴² HySTRA, 「豪州と日本におけるパイロット水素サプライチェーン実証事業」, HySTRA, <https://www.hystra.or.jp/project/>.

²⁴³ NEDO, 「世界に先駆けて国際間水素サプライチェーン実証事業が本格始動」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100807.html.

對此，在 NEDO 的指導下，千代田化工建設、日本郵船、三井物產與三菱商事等企業進行合作，成立「次世代氫能源供應鏈技術研究組合」(Advanced Hydrogen Energy chain Association for technology Development, AHEAD)²⁴⁴；計畫前期 AHEAD 主要是進行供應鏈運作的基礎技術和零組件的研究開發，2018 年起開始建設汶萊的製氫工廠以及川崎的脫氫設備，2019 年完工後的隔年啟動實證計畫，在汶萊所產製的氫氣，透過千代田化工建設所持有的有機化學氫化法，轉換為 MCH (亦被千代田化工建設稱為 SPERA 水素) 後進行海上運輸回日本，並且在川崎臨海地區進行脫氫之後，再將副產物甲苯由同一艘船運輸回汶萊，以供下一次製氫使用；詳細的實證路徑圖臚列如圖 4.4。

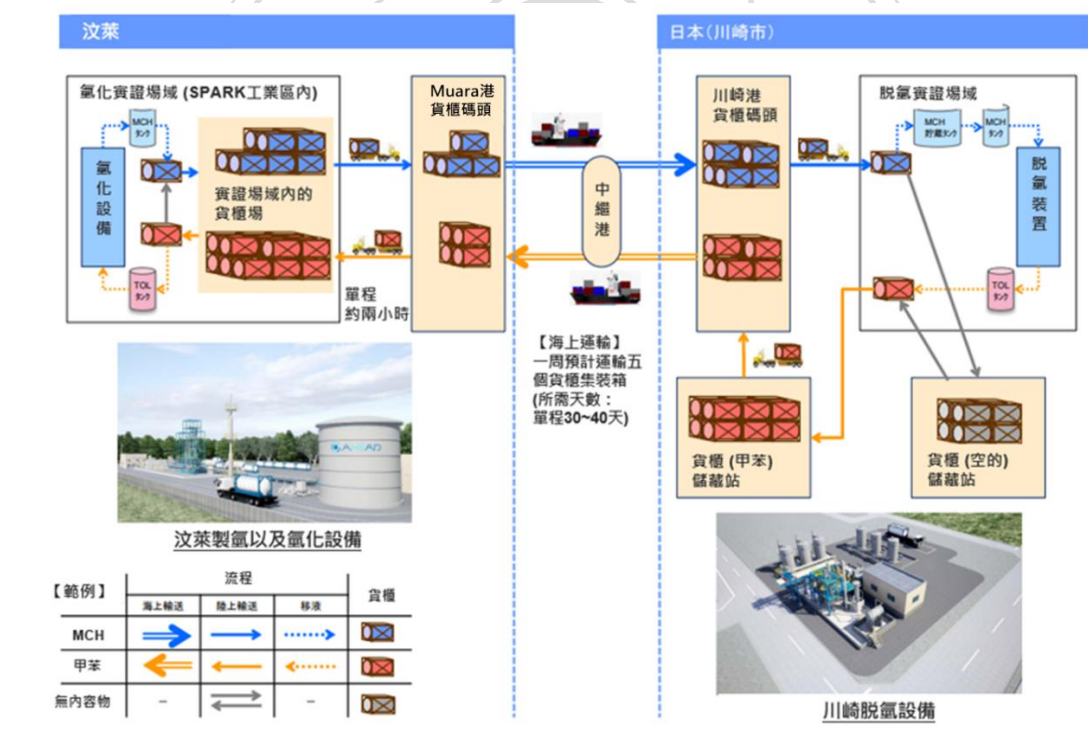


圖 4.4 AHEAD 日本汶萊 MCH 供應鏈實證計畫

資料來源：AHEAD；圖片為筆者經翻譯後重製。

²⁴⁴ AHEAD, 「組織概要」, AHEAD, <https://www.ahead.or.jp/jp/organization.html#01>.

三、JHyM

「日本氫能源網絡合作會社」(Japan H2 Mobility, JHyM) 於 2018 年 2 月所創立，其成立目的是要進行「戰略性的加氫站整備」以及協助加氫站效率化營運，希望透過業者間的情報共享，排除過去因為情報不流通導致設點後營運不佳的狀況，達成加氫站選址的適宜性，並提升經營利益²⁴⁵。

JHyM 預計分兩期、共十年進行運作後退場，第一期為 2018-2022 年，主要方針是要考量到自家車需求及氫氣供給，達成加氫站的最適化配置，規劃由四大都市圈向政令指定都市擴張及串聯，其餘地區則和地方自治體合作建設，但是在第一期結束後，雖然達成預設的加氫站數量目標，但是許多加氫站卻因為自家用的氫燃料電池車的數量太少，沒有來客而導致營收呈現赤字；因此 2023-2027 年間開展的第二期計畫，將原先面向自家車需求的方針調整為面向商用車，積極與計程車與物流業者合作，挖掘政府用車的需求，並且尋找車輛以外的氫氣需求藉以提升收益²⁴⁶。JHyM 在全國的加氫站整備計畫臚列如圖 4.5。

²⁴⁵ JHyM, 「JHyM について」, JHyM, <https://www.jhym.co.jp/nav-about/>。

²⁴⁶ JHyM, 「JHyM 第Ⅱ期に向けて」, 經濟産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/030_10_00.pdf。



圖 4.5 JHyM 在全國的加氫站整備計畫

資料來源：JHyM²⁴⁷；圖表為筆者自繪。

四、JH2A

「日本氫能價值鏈推進協議會」(Japan Hydrogen Association, JH2A) 於 2020 年 12 月所創立，其成立目的是要促成氫能相關企業交流，彙整產業情報，並且向政府提出建言與社會實踐計畫。過去日本官方及民間各自在推動氫能源產業的發展雖取得相當豐碩的成果，然目前還是面臨到基礎設施缺乏、氫氣價格較現有燃料昂貴許多等問題，顯示出日本氫能源市場尚未成熟²⁴⁸。

²⁴⁷ JHyM, 「JHyM 第II期に向けて」, 經濟產業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/030_10_00.pdf。

²⁴⁸ JH2A, 「CONCEPT」, JH2A, https://www.japanh2association.jp/pages/5769365/page_202202031627。

因此 JH2A 的成立是希望匯集氫能源產業中的各利益相關者，針對實現氫能社會集思廣益來擬定策略；所以 JH2A 的成員中不只包含民間企業，許多地方自治體以及大學等研究機構都以特別會員的身分參與其中，透過官民合作的方式一同推進氫能源產業的發展；詳細的會員名單臚列如表 4.16。

表 4.16 JH2A 成員列表

會員分類	參與者
理事會員 (共 25 名)	旭化成、岩谷產業、INPEX、ENEOS、大林組、川崎重工業、關西電力、Kubota、高壓氣體保安協會、神戶製鋼所、塩野義製藥、住友商事、千代田化工建設、電源開發、東芝、豐田自動車、日本液化空氣、Panasonic 控股、丸紅、三井住友海上火災保險、三井住友金融集團、三井物產、三菱化工機、三菱瓦斯化學、三菱 UFJ 金融集團
特別會員 (共 96 名)	愛知縣、大分縣、大阪市、川崎市、佐賀縣、鹿追町、周南市、敦賀市、富谷市、豐田市、浪江町、新潟縣、兵庫縣、神戶市、北九州市、福岡市、山梨縣...等自治體及團體
一般會員 (共 224 名)	IHI、AISIN、愛知製鋼、JOGMEC、出光興產、伊藤忠商事、岩谷瓦斯、AGC、荏原製作所、大阪瓦斯、小川電機、沖繩電力、奧村組、川崎汽船、九州電力、京瓷...等企業

資料來源：JH2A²⁴⁹；圖表為筆者自繪。

²⁴⁹ JH2A, 「MEMBER」, JH2A, https://www.japanh2association.jp/pages/5769365/page_202202031627.

五、神戶關西圈氫能源利用協議會

「神戶關西圈氫能源利用協議會」(神戶・關西圈水素利活用協議会)於 2020 年 9 月成立，其目的是要促進神戶與關西地區的氫能社會實裝，以及氫能源供應鏈的構築，希望號召關西地區的氫能源相關企業，將關西地區打造為推動日本氫能社會實踐的先鋒；目標是在 2025 年進行氫能發電與氫能供應鏈實證，2030 年在關西地區能夠達成商業化目標²⁵⁰，詳細的供應鏈路徑臚列如圖 4.6。

神戶關西圈氫能源利用協議會的成員包括：岩谷產業、大林組、川崎汽船、川崎重工業、關西電力、神戶製鋼所、日本殼牌、電源開發、Panasonic、丸紅、三菱電力、ENEOS、勤業眾信等 13 家企業；除此之外，經濟產業省、國土交通省、NEDO 以及神戶市役所都做為政府方的代表參與其中²⁵¹，希望透過官民合作的方式，不僅可以達成政府路線圖所訂定的目標，也能夠促進地方企業的氫能源領域發展。

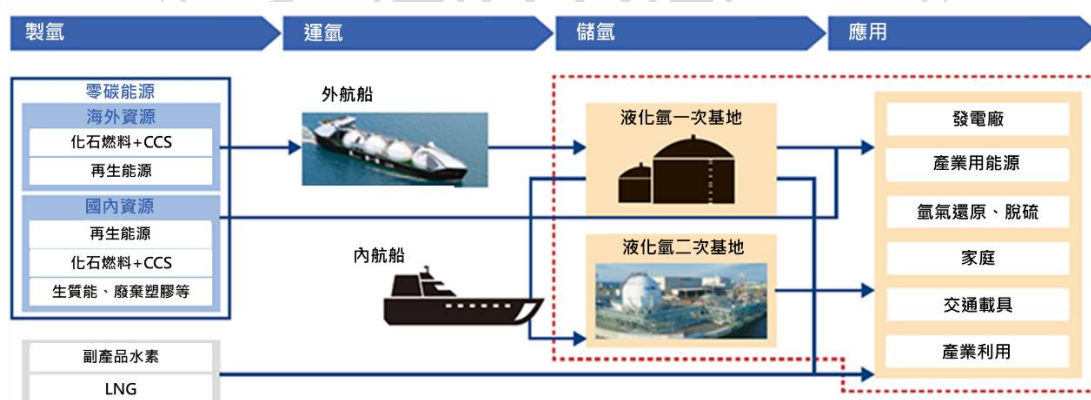


圖 4.6 神戶關西圈氫能源供應鏈實證

²⁵⁰ 溝口典仁，「次世代エネルギー水素 関西最前線【神戶・關西圈水素利活用協議会 | 三菱重工業 | 川崎重工業 | Atomis】」，關西電力，<https://www.kepco.co.jp/corporate/report/yous/5/active-kansai/article1.html>。

²⁵¹ 神戶市役所，「国内連携」，神戶市役所，<https://www.city.kobe.lg.jp/a36643/energy/kobekansai.html#koubekansaisaikennsuiso>。

資料來源：神戸市役所；圖片為筆者經翻譯後重製。

六、中部圈氫能源利用協議會

「中部圈氫能源利用協議會」（中部圈水素利用協議会）於 2020 年 3 月成立，其成立目的是要透過在中部圈創造大規模的氫氣需求量以及供給量，並領先世界其他地區實現大規模的社會實；由於中部圈同時也是日本製造業的聚集地，擁有大量的工廠及發電廠等碳排源，因此希望在發展氫能源產業的同時，也能夠帶領中部圈的企業完成能源轉型，助力中部圈達成碳中和目標²⁵²。

中部圈氫能源利用協議會的成員包括出光興產、岩谷產業、ENEOS、川崎重工、COSMO 石油、三得利控股、日鋼鶴見造船廠、住友商事、中部電力、千代田化工建設、東邦瓦斯、豐田自動車、豐田通商、日本製鐵、日本綜合研究所、日本液化空氣、三井住友銀行、三菱化學、中部國際機場、日本政策投資銀行等 20 家企業；而愛知縣的經濟產業局亦會參與其中²⁵³，透過官民合作的方式，定期與企業間召開會議，來理解政策推進狀況並進行修正。

參、提供產業補助金

為了加速實現氫能社會的達成，日本中央及地方自治體針對氫能源各領域的產業提供補助金，透過經濟上的誘因，或者是創造更大的需求，以鼓勵更多企業

²⁵² 愛知縣，「中部圈水素・アンモニアサプライチェーンビジョンを策定しました」，愛知縣，<https://www.pref.aichi.jp/press-release/suiso-fcv/chubu-vision.html>。

²⁵³ 愛知縣，「中部圈水素・アンモニアサプライチェーンビジョンを策定しました」，愛知縣，<https://www.pref.aichi.jp/press-release/suiso-fcv/chubu-vision.html>。

投入氫能源產業的發展；根據本研究統計，2020 年迄今，中央政府與地方自治體合計提供了 51 筆補助金，分別提供給「人才」、「產創」、「設備與製品」、「氫能車」、「加氫站」以及「氫能載具」等六個不同領域的氫能源產業別，本段落將分別論述之。

一、人才領域補助金

2020 年迄今，各自治體針對氫能源人才所提供的補助金共計有 3 項，其中兩項由兵庫縣神戶市所提供，另一項則是由福島縣所提出，詳細臚列如表 4.17。

表 4.17 氫能源人才領域補助金列表

年份	自治體	補助金名稱	最高補助金額
2020	神戶市	氫能產業人才培育補助	30 萬日幣
2021	神戶市	氫能產業人才培育補助	20 萬日幣
2023	福島縣	氫能相關產業人才育成支援事業費補助	50 萬日幣

資料來源：補助金ポータル；圖表為筆者自繪。

二、產創領域補助金

2020 年迄今，各自治體針對氫能源產創領域所提供的補助金共計有 16 項，其中三項由中央政府所提供，愛媛縣以及大阪府亦各自提供三項補助金，詳細臚列如表 4.18。

表 4.18 氫能源產創領域補助金列表

年份	自治體	補助金名稱	最高補助金額
2020	愛媛縣	再生能源與氫能源導入可能性調查	200 萬日幣
2020	山梨縣	製造業產業聚集促進補助	7.5 億日幣
2020	大阪府	新能源產業創出事業補助	750 萬日幣
2020	大分縣	環保能源挑戰支援事業補助	2900 萬日幣
2020	神戶市	神戶挑戰企業支援補助	600 萬日幣
2021	愛媛縣	再生能源與氫能源導入可能性調查	600 萬日幣
2021	大阪府	新能源產業創出事業補助	500 萬日幣
2021	東京都	活用氫能的智慧能源區域形成推進事業	3.3 億日幣
2021	山口縣	醫療及環境領域產業創新促進補助	1500 萬日幣
2021	神戶市	神戶挑戰企業支援補助	600 萬日幣
2022	愛媛縣	再生能源與氫能源導入可能性調查	200 萬日幣
2022	全國	抑制碳排放對策事業費補助	2 億日幣
2022	全國	海事領域的碳中和支援事業	10 億日幣
2022	全國	與第三國合作進行製氫與氫氣利活用	4 億日幣
2023	大阪府	能源產業新創促進事業補助	750 萬日幣
2023	姫路市	半導體與氫能等新產業新創支援補助	900 萬日幣

資料來源：補助金ポータル；圖表為筆者自繪。

三、設備與製品領域補助金

2020 年迄今，各自治體針對氫能源設備與製品領域所提供的補助金共計有 6 項，其中四項由神戶市所提供，北海道以及山口縣亦各自提供一項補助金，詳細臚列如表 4.19。

表 4.19 氫能源設備與製品領域補助金列表

年份	自治體	補助金名稱	最高補助金額
2020	神戶市	氫能源製品的研究開發實證補助	950 萬日幣
2021	神戶市	氫能源製品的研究開發實證補助	950 萬日幣
2022	神戶市	氫能源製品的研究開發實證補助	1500 萬日幣
2023	神戶市	氫能源製品的研究開發實證補助	1500 萬日幣
2023	北海道	活用氫能自立型/分散型能源系統導入補助	2 億日幣
2023	山口縣	氫能源製品的零組件開發推進補助	500 萬日幣

資料來源：補助金ポータル；圖表為筆者自繪。

四、氫能車領域補助

2020 年迄今，各自治體針對氫能車領域所提供的補助金共計有 10 項，其中全國性的補助金最高可以拿到 255 萬日幣，而在自治體之中，德島縣所提供的補助金是相對較高的，最高可以拿到 100 萬日幣，詳細臚列如表 4.20。

表 4.20 氫能車領域補助金列表

年份	自治體	補助金名稱	最高補助金額/台
2020	富山縣	燃料電池自動車普及促進事業補助	50 萬日幣
2020	鹿兒島市	次世代自動車補助	30 萬日幣
2021	東京都	燃料電池自動車導入促進事業補助	40 萬日幣
2021	德島縣	燃料電池自動車導入促進事業補助	100 萬日幣
2022	德島縣	燃料電池自動車導入促進事業補助	100 萬日幣
2022	富山市	燃料電池自動車導入推進事業費補助	50 萬日幣

2022	いわき市	次世代電動車導入補助	20 萬日幣
2022	福島市	氫燃料電池車導入補助	20 萬日幣
2022	全國	燃料電池車補助	255 萬日幣
2023	いわき市	次世代電動車導入補助	20 萬日幣

資料來源：補助金ポータル；圖表為筆者自繪。

五、加氫站領域補助

2020 年迄今，各自治體針對加氫站領域所提供的補助金共計有 11 項，其中三項由東京都所提供，且補助金額相對其他自治體來得高很多，詳細臚列如表 4.21。

表 4.21 加氫站領域補助金列表

年份	自治體	補助金名稱	最高補助金額
2021	東京都	加氫站整備與營運費用補助	7.8 億日幣
2021	愛媛縣	加氫站整備促進事業費補助	5000 萬日幣
2022	東京都	燃料電池自動車供給氫氣設備營運費補助	4000 萬日幣
2022	岩手縣	加氫站整備事業補助	2500 萬日幣
2022	愛知縣	加氫站整備費補助	1.75 億日幣
2022	東京都	燃料電池自動車用供給氫氣設備整備事業	10 億日幣
2022	福島縣	移動式加氫站普及擴大事業補助	1000 萬日幣
2023	愛媛縣	加氫站整備促進事業費補助	5000 萬日幣
2023	神奈川縣	加氫站整備費補助	3500 萬日幣
2023	福島縣	氫氣供給設備導入支援補助	1.5 億日幣

2023	茨城縣	氫氣供給設備活動事業費補助	100 萬日幣
------	-----	---------------	---------

資料來源：補助金ポータル；圖表為筆者自繪。

六、氫能載具領域補助

2020 年迄今，各自治體針對氫能載具領域所提供的補助金共計有 3 項，其中神奈川縣連續兩年針對氫能堆高機的導入給予補助，而全國性的補助金則提供給氫能卡車等重型車輛申請，詳細臚列如表 4.22。

表 4.22 氫能載具領域補助金列表

年份	自治體	補助金名稱	最高補助金額
2022	全國	使用氫氣內燃機的重型車輛實證事業	3.5 億日幣
2022	神奈川縣	氫能堆高機導入費補助	500 萬日幣
2023	神奈川縣	氫能堆高機導入費補助	500 萬日幣

資料來源：補助金ポータル；圖表為筆者自繪。

第三節 小結

綜上所述，可以發現日本關於氫能源的研究支援體制之重心，似乎也隨著氫能源在政策上的地位移轉而有所變動；在 2014 年以前，氫能源被定位為新能源的一種，透過陽光計畫、月光計畫、新陽光計畫以及 WE-NET 計畫等前瞻技術研發相關的政策推進其發展，而此時氫能源的研究支援體制亦是以文部科學省的科研費補助，進行主題較為發散的前瞻技術研發為主。

隨著氫能社會的概念，在 2014 年「第四次能源基本計畫」中被提出，並且於 2017 年藉由「氫能基本戰略」強化以後，氫能源的研究支援體制便開始轉由 NEDO 主導，此時進行的是較為收斂且具有目的性的氫能源相關研究，研究經費較過去科研費時期充足，由 NEDO 設定製氫、運氫、氫能應用以及國際供應鏈等研究事業題目並公募，目標便是要如同拼圖一般，盤點出氫能社會缺少的技術，找到合適的研究者，進行研究開發後將其補上，藉以協助氫能社會的建構；而此時氫能源領域關於前瞻技術的研究，除了部分仍透過科研費體制在補助外，也有一部分轉移到 JST 的各項研究開發計畫底下，並且透過 JST 較為靈活的產學合作體制，將研究開發成果回饋到社會面與經濟面。

而在氫能源的產業政策層面，氫能源的發展路線圖將供應鏈的各個環節設定發展目標，並且隨著氫能源政策的變遷，進行動態調整，使產業在發展時有所依循；而由於氫能源產業的上游與中游，也就是製氫、儲氫、運氫等領域，前期在建設相關的基礎設施時屬於重資產（Heavy Asset）投入，以及土地、交通甚或是外交等各個領域的公部門協力，才有辦法建設完竣，資本回收的期限遙遙無期，且民間並沒有辦法跨部門整合這些資源，因此在氫能源產業的上游與中游，主要是由政府來領導成立產業組織，並依照領域的不同，號召擁有該領域關鍵技術或 Know-How 的企業參與，其中引進日本政策投資銀行等具有官方背景的金融機構，

來保障產業組織的財政狀況無虞，如日本與澳洲、汶萊合作的跨國氫能源供應鏈計劃，或者是加氫站、地域整體發展戰略等，皆是透過產業組織來運作及推進。

至於氫能源下游的部分，日本是以「需求創造」以及「促進參與」的理念來推進產業政策，從路線圖中即可得知，日本政府的目標是想要使氫燃料電池車的價錢降低，促使更多人有誘因買氫能車，有了氫能車便會創造出對氫氣的需求，需求提升的話，伴隨著加氫站等營運成本降低，有利可圖的情況一下便能夠促進更多業者投入；補助金的作用也在此體現，可以發現補助金大多集中在下游的氫能源應用領域進行補助，中央政府與地方自治體透過提供補助金，來促進欲發展的氫能源領域，無論是產創、人才、設備與製品等促進參與的補貼，或是加氫站、氫能車、氫能載具等需求創造的環節，其最終目標都是將氫能源產業市場做大，才能使產業發展得到最大利益。



第五章 結論

第一節 結論與研究發現

在碳中和的國際趨勢中，氫能源由於其淨零碳排以及蘊藏量豐富等特性，在各國新能源政策中的地位與日俱增，並且紛紛出台氫能源的相關發展戰略；其中日本更是領先其他國家，最早提出完整氫能源政策體系的國家，因此在我國目前也欲極力發展氫能源產業的時刻，爬梳日本的氫能源政策體系有其重要性。

日本的氫能源政策主要是由「能源基本計畫」、「氫能基本戰略」以及「綠色成長戰略」做為基底，能源基本計畫的主要功能是將氫能源進行定位，釐清其在國家整體能源方針中所扮演的角色，並確保國家能源供給無虞；氫能基本戰略的主要功能是針對氫能源產業的整體發展進行中長期規劃，以期帶動產業發展並早日建構氫能社會；而綠色成長戰略的主要功能則是藉由投入氫能源等碳中和相關技術的發展，來助力日本達成碳中和目標；可以見得，作為能源進口大國，且經濟成長不振的日本，希望能夠透過發展氫能源產業，一石三鳥的解決「能源安全供給」、「氫能經濟建構」以及「碳中和」課題。

而要想在各國的氫能源競爭中搶得先機，確保研發能量是不可忽視的重點，因此日本在學研面透過文部科學省、JST 以及 NEDO 的研究支援體制，強化其在氫能源領域的研發能量；在 2014 年以前主要是透過文部科學省的科研費體制來補助氫能源之前瞻技術發展，2014 年氫能源政策地位提升後，與政策相關聯的核心技術研發主要透過 NEDO 的各項研究事業之公募來補助，較為發散的前瞻技術研究則由原先的科研費、大學端的氫能源研究以及 JST 的研究支援體制來推進。

而氫能源產業面，日本政府透過制訂氫能源產業發展路線圖，來確立產業的發展方針與目標，其次拉攏具有關鍵技術的企業成立產業組織，協助建構跨國供應鏈、加氫站等需要重資產投入的領域，並且再藉由產業補助金來吸引企業投入下游的氫能源應用面，並且帶動整體氫能源需求，創造能夠使企業獲利的環境，才得以讓產業持續發展下去。

除此之外，也能夠發現日本政府的氫能政策於 2023 年 6 月的氫能基本戰略修正案後出現一次重大的轉軌，在此之前日本氫能政策方針主要是以促進國內技術開發以及提升國內氫氣需求為主軸，並未真正將目光放到國際氫能源市場上；然而伴隨地緣政治風險提升，以及碳中和的日益迫切，各國開始加大投入在氫能源產業，使日本備感威脅，因此在提出氫能基本戰略修正案時，便規畫要將日本目前尚具有些許優勢的氫能源技術向海外進行擴張，由守轉攻，希望能夠擴張日本氫能源產業在國際市場的影響力。

然而透過日本的政策以及產業發展歷程可以得知，氫能源產業鏈的發展，首先需要釐清「氫氣成本」與「氫氣需求」的互動關係，若是氫氣成本低，才會促使更多產業轉而使用氫氣，進而創造氫氣需求，然而若是氫氣需求低，製氫產業因為無法達成規模經濟，成本亦無法下降；因此日本政府首先訂立出中長期的氫氣成本目標，透過建立跨國供應鏈、促進製氫、儲氫及運氫技術開發等方式來降低氫氣成本，並且提供氫能應用面的補助金，以及補助學研組織開發及強化氫能應用技術，使得氫能應用面變得更廣泛，進而提升氫氣需求。由此可見，發展氫能源時需要同時注重成本與需求間的平衡並齊頭並進，才得以避免天平失衡。

第二節 台灣發展氫能源的建議

我國與日本同屬於能源進口國，在碳中和的國際趨勢下，對於再生能源的需求孔急，而我國在 2022 年底將氫能源的發展列入未來「台灣 2050 淨零碳排十二項關鍵戰略」之中，可以見得氫能源已成為再生能源的選項之一，但目前除了這份關於碳中和的指導方針外，並沒有另外針對氫能源的政策出台，而考量到未來台灣的氫氣需求，政府應當進行氫能源政策的指導方針、發展路線圖以及安全相關法規的整備，以供產業發展有所依循；因此以下僅就台灣發展氫能源過程中，較為關鍵的製氫及應用等面向提出政策方向的建議。

壹、氫從哪來？台灣製氫領域的政策建議

由於國際水電解製氫的技術仍未普及，且成本仍居高不下，因此未在水電解領域投入過多的台灣，本研究認為目前應還是選擇以水蒸氣重組法的方式製造氫氣為佳，而為了要使產製出的氫氣達成零碳，需要另行發展碳捕捉、封存及再利用的技術，將水蒸氣重組時的排碳進行收集及封存，方能收獲在理論上沒有排碳的藍氫。

而考慮到將來的國際趨勢是以產製綠氫為主，因此對於再生能源電力有極大的需求，台灣應在目前的基礎上，持續發展太陽能與風力發電等再生能源，並且鼓勵相關技術的研發，來降低再生能源發電之成本，得以使未來產製綠氫的成本下降。

貳、氫怎麼用？台灣氫能應用領域的政策建議

本研究認為台灣在氫能應用的發展未來可以著重在「燃料電池儲能系統」、「氫能發電」、「氫能商用車」等三大領域；由於台灣具有長年研發燃料電池的經驗，因此在產業發展初期便能夠量產，而台灣目前主流的再生能源電力為太陽能以及風力發電，其都具有間歇性能源（intermittent energy）的特色，亦即供應具有尖峰與離峰，離峰時段必須要仰賴較為穩定的火力或核能發電來彌補缺口，未來若將燃料電池儲能系統與再生能源發電結合，便能夠把太陽能或風力在尖峰時的發電轉化為氫氣儲存，再於離峰時期透過氫氣進行燃料電池供電，即可以降低再生能源尖峰與離峰間的發電落差，強化供電韌性。

其次是氫能發電，由於台灣未來將以天然氣發電作為主要的發電選項，因此可以逐步引進氫能混燒或專燒發電技術，不僅可以提升發電效率，也能夠降低天然氣的用量，適時降低發電的成本。

其三是氫能商用車，考察到日本的發展經驗，日本車廠在發展初期便大量投入氫能私家車的研發，然而由於車價極高，且加氫站尚未普及，即使有政府的大量補貼，仍然無法大幅提升氫能私家車的銷量，因此才在 2023 年氫能基本戰略修正案中，將氫能車的發展方針從私家車移往商用車；而商用車的發展優勢是原先的燃油商用車排碳量極高，在商用車領域進行能源轉型的效果相當顯著，且商用車的行進路線大多是有跡可循，因此可以按照商用車的行進習慣，沿線設置加氫站，便能夠避免加氫站無人使用導致赤字經營的窘境；以台灣為例，應當在各商港、大型工業區、物流園區以及高速公路休息區等商用車經常途經的地點設置加氫站，並且與物流業者合作，將部分車輛汰換為氫能商用車，不僅能夠創造氫能需求，同時也能提升碳中和的成果。

參考文獻

壹、中文部分

一、專書

尹曉亮，2011，戰後日本能源政策（北京：社會科學文獻出版社）。

王革華，2008，新能源概論（台北：五南）。

王海運、許勤華，2012。能源外交概論（北京：社會科學文獻出版社）。

林全能，2017，全球能源轉型下之再生能源發展探討與借鏡（台北：孫運璿基金會）。

范枚芳 等，2014，公民能不能？能源科技、政策與民主（新竹：交大出版社）。

徐作聖、王仁聖、彭志強，2011，新興能源產業及發展策略（台北：華泰）。

劉璋、萬燕鳴、張岩（譯），Marco Alvera（原作），2022。氫能革命：清潔能源的未來藍圖（北京：機械工業出版社）。

蔡岳勳，2011，當代國際新能源政策與法制發展（新北：Airiti Press）。

二、期刊論文

孫克難，2000，政府協助產業科技發展措施的檢討與改進，產業金融季刊，第 106 期，頁 2-23。

三、網路資源

中華人民共和國國家能源局，「氫能產業發展中長期規劃（2021—2035 年）」，

中華人民共和國國家能源局，

http://zfxgk.nea.gov.cn/1310525630_16479984022991n.pdf。

中華民國外交部，2014 年 3 月 17 日，「關於 UNFCCC」，中華民國外交部，

<https://subsite.mofa.gov.tw/igo/cp.aspx?n=9157634B03B0E393>。

中華民國國家發展委員會，2022 年 12 月 28 日，「公布十二項關鍵戰略行動計

畫全面推動淨零轉型目標」，中華民國國家發展委員會，

https://www.ndc.gov.tw/nc_27_36501。

王縈緹，「未來汽車加氫或充電，你會怎麼選？」，旭時報，

<https://sunrisemedium.com/p/153/hydrogen-vehicle>。

台灣中油，「天涯河處覓油蹤—油氣是甚麼」，台灣中油，

<https://www.cpc.com.tw/cp.aspx?n=1379>。

石蕙菱，「全球氫氣生產方式的發展與趨勢」，經濟部技術處，

https://www.moea.gov.tw/MNS/doi/industrytech/IndustryTech.aspx?menu_id=13545&it_id=364。

江凱狄，「氫脆現象」，科技網，

https://www.digitimes.com.tw/tech/dt/n/shwnws.asp?id=0000437738_ZKT82H1H2WR5JP9JJOTVP。

何鎮揚、葉名倉，「儲氫合金」，科學 online，

<https://highscope.ch.ntu.edu.tw/wordpress/?p=3145>。

李介文，2022 年 5 月 20 日，「會計師看時事/制定內部碳定價 拚淨零排放」，經濟日報，<https://money.udn.com/money/story/122331/6326313>。

阮怡婷，2023 年 1 月 10 日，「氣候變遷因應法三讀，2050 淨零目標入法，碳費 2024 年向 287 家碳排大戶開徵」，CSR@天下，
<https://csr.cw.com.tw/article/42965>。

林玲珠，「石化能源污染知多少」，財團法人國家政策研究基金會
<https://www.npf.org.tw/3/12415>。

林浩博，2022 年 11 月 8 日，「日本推遲碳稅改革，避免加重家庭生活成本」，CSRone，<https://csrone.com/news/7606>。

林淑媛、潘羿菁，「氫能新賽局 4 / 下一個半導體賽局？韓國如何光速打造氫能經濟王國」，中央社，<https://www.cna.com.tw/news/afe/202306250031.aspx>。

邱虹儒，「印度取得全球環境基金 4.54 億美元挹注，於 2022 年前建構能源效率市場」，能源知識庫，https://km.twenergy.org.tw/Data/db_more?id=2459。

科技產業資訊室，「韓國組氫能供應鏈 到 2050 年潔淨氫氣本地供應比例 50%」，科技產業資訊室，
<https://iknow.stpi.narl.org.tw/Post/Read.aspx?PostID=18372>。

胡華勝，2022 年 3 月 31 日，「一次看懂 2050 淨零排放路徑及策略，影響台灣未來 30 年的關鍵戰略」，遠見雜誌，
<https://www.gvm.com.tw/article/88501>。

陳怡如，「臺灣 2050 氫應用發展技術藍圖」，工業技術研究院，
https://www.itri.org.tw/ListStyle.aspx?DisplayStyle=18_content&SiteID=1&Mm mID=1036452026061075714&MGID=1163474052341146132。

黃思敏，2021 年 4 月 22 日，「蔡英文：2050 淨零轉型也是台灣目標 立委籲盡快修定《氣候變遷行動法》」，環境資訊中心，<https://e-info.org.tw/node/230691>。

經濟部國際貿易局，「德國氫能政策發展現況」，中華民國對外貿易發展協會，https://www.taitra.org.tw/News_Content.aspx?n=104&s=58035。

德瑞克說碳金融，「被喻為能源界的明日救星？「氫能源」到底是什麼？」，台灣氫能與燃料電池夥伴聯盟，<https://www.thfcp.org.tw/xcindustry/cont?xsmsid=0L265415022626956988&sid=0M203630443854474724>。

聯華林德，「熱處理」，聯華林德，<https://www.linde-lienhwa.com/tw/application/detail/%E7%86%B1%E8%99%95%E7%90%86>。

蘇順發，「減碳科技：儲氫材料」，科技大觀園，<https://scitechvista.nat.gov.tw/Article/c000003/detail?ID=1eb80413-e83f-49af-aa75-5eba6eff3e1b>。

貳、日文部分

一、專書

NEDO，2014，NEDO 水素エネルギー白書（東京：日刊工業新聞）。

經濟產業省近畿經濟產業局，2022，KANSAI 水素の入門書（大阪：經濟產業省近畿經濟產業局）。

經濟產業省資源エネルギー庁，2022，エネルギー白書 2022（東京：經濟產業省資源エネルギー庁）。

二、期刊論文

臼井建敏, 「グリーン水素製造技術」, 日本エネルギー学会機関誌, 第 99 巻第 4 号, https://www.jstage.jst.go.jp/article/jieenermix/99/4/99_338/_pdf。

山崎邦彦, 1994, 「ニューサンシャイン計画の概要」, 応用物理, 第 63 巻第 8 号, 頁 762-769。

三、網路資源

AHEAD, 「次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合」, AHEAD, <https://www.ahead.or.jp/jp/>。

AHEAD, 「組織概要」, AHEAD, <https://www.ahead.or.jp/jp/organization.html#01>。

e-Gov 法令検索, 「エネルギー政策基本法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=414AC1000000071>。

e-Gov 法令検索, 「ガス事業法施行規則」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=345M50000400097>。

e-Gov 法令検索, 「コンビナート等保安規則」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=361M50000400088>。

e-Gov 法令検索, 「一般高圧ガス保安規則」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=341M50000400053>。

e-Gov 法令検索, 「大気汚染防止法施行規則」, e-Gov 法令検索, https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=346M50000500001_20221001_504M60001000004

。

e-Gov 法令検索, 「危険物の規制に関する政令」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=334CO0000000306>。

e-Gov 法令検索, 「労働安全衛生規則」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=347M50002000032>。

e-Gov 法令検索, 「河川法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=339AC0000000167>。

e-Gov 法令検索, 「建築基準法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000201>。

e-Gov 法令検索, 「倉庫業法施行規則」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=331M50000800059>。

e-Gov 法令検索, 「海岸法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=331AC0000000101>。

e-Gov 法令検索, 「消防法施行規則」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336M50000008006>。

e-Gov 法令検索, 「高圧ガス保安法」, e-Gov 法令検索, https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=346M50000500001_20221001_504M60001000004

。

e-Gov 法令検索, 「港則法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=323AC0000000174>。

e-Gov 法令検索, 「港湾法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=325AC0000000218>。

e-Gov 法令検索, 「道路法」, e-Gov 法令検索, <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=327AC1000000180>。

Hydrogenomics, 「領域概要」, Hydrogenomics, <https://www.hydrogenomics.jp/overview.html>。

HySTRA, 「技術研究組合 CO2 フリー水素サプライチェーン推進機構」, HySTRA, <https://www.hystra.or.jp/>。

HySTRA, 「豪州と日本におけるパイロット水素サプライチェーン実証事業」, HySTRA, <https://www.hystra.or.jp/project/>。

JETRO, 「オーストラリアにおける水素産業に関する調査」, JETRO, https://www.jetro.go.jp/ext_images/Reports/01/82b3276826014c69/20200042_02.pdf。

JH2A, 「CONCEPT」, JH2A, https://www.japanh2association.jp/pages/5769365/page_202202031627。

JH2A, 「MEMBER」, JH2A, https://www.japanh2association.jp/pages/5769365/page_202202031627。

JHyM, 「JHyM について」, JHyM, <https://www.jhym.co.jp/nav-about/>。

JHyM, 「JHyM 第II期に向けて」, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/030_10_00.pdf。

JQA, 「自主参加型国内排出量取引制度 (JVETS)」, JQA,
https://www.jqa.jp/service_list/environment/service/asset/jvets/。

JST, 「ALCA について」, JST, <https://www.jst.go.jp/a-step/outline/index.html>。

JST, 「A-STEP (研究成果最適展開支援プログラム) とは」, JST,
<https://www.jst.go.jp/a-step/outline/index.html>。

JST, 「CREST プログラムの概要」, JST,
<https://www.jst.go.jp/kisoken/crest/about/index.html>。

JST, 「JST について」, JST, <https://www.jst.go.jp/all/about/outline.html>。

JST, 「さきがけ プログラムの概要」, JST,
<https://www.jst.go.jp/kisoken/presto/about/index.html>。

JST, 「大学発新産業創出プログラム」, JST, <https://www.jst.go.jp/start/>。

JST, 「未来社会創造事業とは」, JST,
<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/about/index.html>。

JST, 「事業紹介」, JST, <https://www.jst.go.jp/all/jigyoku/>。

KAKEN, 「科学研究費助成事業データベース」, KAKEN,
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/index/>。

KSM News and Research, 「水素エネルギーをめぐるフランスの事情」, KSM
News and Research, <https://ksm.fr/archives/617810>。

NEDO, 「NEDO グリーンイノベーション基金」, NEDO, <https://green-innovation.nedo.go.jp/>。

NEDO, 「NEDOのご案内」, NEDO,

<https://www.nedo.go.jp/content/100906746.pdf>。

NEDO, 「NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ」, NEDO,

https://www.nedo.go.jp/library/battery_hydrogen.html。

NEDO, 「水素とは」, 水素エネルギーナビ, <https://hydrogen-navi.jp/>。

NEDO, 「水素利用等先導研究開発事業」, NEDO,

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100068.html。

NEDO, 「水素社会構築技術開発事業」, NEDO,

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100096.html。

NEDO, 「世界に先駆けて国際間水素サプライチェーン実証事業が本格始
動」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100807.html。

NEDO, 「液化水素サプライチェーンの商用化実証の出荷と受け入れ地につい
て」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101612.html。

NEDO, 「超高压水素インフラ本格普及技術研究開発事業」, NEDO,

https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100144.html。

NEDO, 「機構概要」, NEDO, <https://www.nedo.go.jp/introducing/kihon.html>。

NEDO, 「燃料電池・水素」, NEDO,

https://www.nedo.go.jp/activities/introduction8_01_05.html。

NEDO, 「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研
究開発事業」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100182.html。

NEDO, 「競争的な水素サプライチェーン構築に向けた技術開発事業」,

NEDO, https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100259.html。

NEDO, 2020年3月7日, 「再エネを利用した世界最大級の水素製造施設
「FH2R」が完成」, NEDO,

https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html。

NEDO, 2021年, 「グリーンイノベーション基金事業 公募等情報」, NEDO,

<https://green-innovation.nedo.go.jp/about/public-contribution/>。

NEDO, WE-NETについて, NEDO, [https://www.ena.or.jp/WE-](https://www.ena.or.jp/WE-NET/contents_j.html)

[NET/contents_j.html](https://www.ena.or.jp/WE-NET/contents_j.html)。

PwC Japan, 2022年7月1日, 「産業政策と政府の投資」, PwC Japan,

<https://www.pwc.com/jp/ja/knowledge/column/industrial-policy/vol01.html>。

アン・ジョン, 「グローバルクリーン水素経済をリードするファースト・ムー
バー(First-Mover)」, Invest KOREA, [https://www.investkorea.org/ik-jp/bbs/i-
685/detail.do?ntt_sn=491257](https://www.investkorea.org/ik-jp/bbs/i-685/detail.do?ntt_sn=491257)。

大島堅一, 「福島原発事故10年: 日本の原子力・エネルギー政策をどうする
か」, 自然エネルギー財団, [https://www.renewable-
ei.org/activities/column/REupdate/20210226_2.php](https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210226_2.php)。

大瀧拓馬, 「水素製造における高い潜在性を秘めるインド」, JETRO,

[https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/439dbf577fb34709.ht
ml](https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/439dbf577fb34709.html)。

小林弘明, 「宇宙研と水素」, 宇宙科学研究所,

<https://www.isas.jaxa.jp/feature/forefront/190826.html>。

山梨大学, 「クリーンエネルギー研究センター概要」, 山梨大学,

<http://www.clean.yamanashi.ac.jp/outline/index.html>。

川崎重工業株式会社, 「水素社会実現に向けた川崎重工業の取り組み」, 仙台
塩釜港 CNP 協議会, <https://www.pref.miyagi.jp/documents/39994/11.pdf>。

内閣官房, 「GX 実現に向けた基本方針 (案)」, 内閣官房,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/dai5/siryou1.pdf。

内閣官房, 「水素基本戦略 (案)」, 内閣官房,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/kaigi_dai4/siryou1-2.pdf。

内閣官房, 「水素基本戦略」, 内閣官房,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf
。

内閣府, 「経済財政運営と改革の基本方針 2021」, 内閣府,
[https://www5.cao.go.jp/keizai-
shimon/kaigi/cabinet/honebuto/2021/decision0618.html](https://www5.cao.go.jp/keizai-shimon/kaigi/cabinet/honebuto/2021/decision0618.html)。

日本ガス協会, 「日本ガス協会における水素導管ネットワーク構築に向けた取
り組み」, 日本ガス協会, [https://f-
suiso.jp/site1/bunkakai/H23bunkakai/2nd/2nd/H23_2_3.pdf](https://f-suiso.jp/site1/bunkakai/H23bunkakai/2nd/2nd/H23_2_3.pdf)。

日本の研究.com, 「イオン伝導性配位高分子を電解質に用いた燃料電池の研究
開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/957766>。

日本の研究.com, 「エネルギーキャリアとしてのアンモニアを合成・分解する
ための特殊反応場の構築に関する基盤技術の創成」, 日本の研究.com,
<https://research-er.jp/projects/view/123063>。

日本の研究.com, 「エネルギーキャリアとしてのアンモニア普及へ向けた難燃性固体燃料とアンモニアの混焼による着火特性改善効果の解明」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920199>。

日本の研究.com, 「ギ酸からの高効率水素発生を駆動する多機能集積型金属触媒の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920200>。

日本の研究.com, 「ギ酸の脱水素化反応による高圧水素の高効率製造技術の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/114127>。

日本の研究.com, 「グリーンアンモニアおよび尿素とその誘導体合成のための特異電子系触媒の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/1160143>。

日本の研究.com, 「ゼロカーボン社会に向けた発電プラント用耐熱金属材料の基盤技術」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/1160136>。

日本の研究.com, 「バナジウム系合金膜による次世代エネルギーキャリアからの革新的水素分離・精製基盤技術の創出」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/888000>。

日本の研究.com, 「メンブレン一体型光触媒シートの開発と人工光合成反応系の構築」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920201>。

日本の研究.com, 「分子触媒を利用した革新的アンモニア合成及び関連反応の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920156>。

日本の研究.com, 「水素/空気二次電池の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/111277>。

日本の研究.com, 「水素ステーション普及のための貴金属を使用しない大規模水素生産材料の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/920198>。

日本の研究.com, 「未来の水素利用社会を支える低コスト高性能 MgB2 線材の開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/110614>。

日本の研究.com, 「再生可能エネルギー利用による水素製造とエネルギーキャリアとしてのメタン製造技術の研究」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/887999>。

日本の研究.com, 「高分子吸着材による高濃度 CO₂ を含むメタン/CO₂ 混合ガスからの CO₂ 回収事業」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/researchers/view/199966>。

日本の研究.com, 「高効率水素製造水蒸気電解/燃料電池可逆作動デバイスの開発」, 日本の研究.com, <https://research-er.jp/projects/view/117523>。

日本学術振興会, 「科学研究費助成事業（科研費）研究種目・概要」, 日本学術振興会, https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/01_seido/01_shumoku/index.html。

日本学術振興会, 「科学研究費助成事業（科研費）科研費の「基金化」」, 日本学術振興会, https://www.jsps.go.jp/j-grantsinaid/01_seido/06_kikinka/index.html。

水素・燃料電池戦略協議会, 「水素・燃料電池戦略ロードマップ 水素社会の実現に向けた取組の加速」, 経済産業省, https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/pdf/report01_03_00.pdf。

水素・燃料電池戦略協議会, 「水素・燃料電池戦略ロードマップ 水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン」, 経済産業省,
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/roadmap_hyoka_wg/pdf/002_s05_00.pdf。

水素エネルギー協会, 「水素エネルギー協会の歴史」, 水素エネルギー協会,
https://www.hess.jp/2_aboutus/history.html。

水素エネルギー協会, 「水素エネルギー協会の歴史」, 水素エネルギー協会,
https://www.hess.jp/2_aboutus/history.html#。

水素科学技術連携研究会, 「研究会趣旨」, 水素科学技術連携研究会,
<https://hydrogenomics-alliance.jp/overview01.html>。

石田雅也, 第4次エネルギー基本計画、2020年までを「集中改革実施期間」に, IT Media,
<https://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1404/14/news014.html>。

兵庫県立大学, 「水素エネルギー共同研究センター 設立趣旨」, 兵庫県立大学, https://www.u-hyogo.ac.jp/research/center/hydrogen_energy.html。

赤平大寿, 「水素でも、自国中心のサプライチェーン構築を目指す米国」, JETRO,
<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/656c671a3b492ede.html>。

岩井博行, 「燃料電池の歴史を振り返る」, 京都大学大学院経済学研究科,
http://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/wp-content/uploads/2016/02/%E3%80%90%E4%BF%9D%E8%AD%B7%E3%80

%91160209HP%E6%8E%B2%E8%BC%89%E7%94%A8%E3%82%B9%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%89-1.pdf。

岩谷産業, 「イワタニの水素ロード」, 岩谷産業,

<https://www.iwatani.co.jp/jpn/company/history/hydrogen/>。

岩谷産業, 「水素とは」, 岩谷産業,

<https://www.iwatani.co.jp/jpn/consumer/hydrogen/about/>。

岩谷産業, 「水素の用途」, 岩谷産業,

<https://www.iwatani.co.jp/jpn/consumer/hydrogen/about/use/>。

東京工業大学, 「グローバル水素エネルギー研究ユニット」, 東京工業大学,

<http://www.ghe.iir.titech.ac.jp/japanese/overview/index.html>。

東京都市大学, 「水素エネルギー社会構築推進研究センター」, 東京都市大学, <https://hydrogen.fpark.tmu.ac.jp/index.html>。

東京都環境局, 「排出量取引」, 東京都環境局,

https://www.kankyo.metro.tokyo.lg.jp/climate/large_scale/trade/。

要地正義、菰田馨, 2020年10月26日, 「菅首相、2050年カーボンニュートラル宣言の舞台裏」, 日経BP,

<https://project.nikkeibp.co.jp/energy/atcl/19/feature/00001/00036/>。

海上保安庁交通部, 「危険物接岸荷役許容量」, 海上保安庁交通部,

<https://www.kaiho.mlit.go.jp/syukai/soshiki/toudai/navigation-safety/pdf/kiken01.pdf>。

消防庁, 「圧縮水素充てん設備設置給油取扱所に係る基準」, 消防庁,

https://www.fdma.go.jp/singi_kento/kento/items/kento111_10_sanko1_1.pdf。

神戸市役所, 「国内連携」, 神戸市役所,

<https://www.city.kobe.lg.jp/a36643/energy/kobekannsai.html#koubekannsai kenn suiso>。

神野可奈子, 「水素産業サプライチェーンの構築に向けて進む (中国)」,

JETRO,

<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/71bcc4d75ae07843.html>。

埼玉県, 「目標設定型排出量取引制度」, 埼玉県,

<https://www.pref.saitama.lg.jp/a0502/torihikiseido.html>。

経済産業省, 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略を策定しました」, 経済産業省,

<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005.html>。

経済産業省, 「グリーン成長戦略 (概要)」, 経済産業省,

https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/pdf/gi_07_03_01.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁, 「3E+S」, 経済産業省資源エネルギー庁,

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/pamphlet/energy2020/005/>。

経済産業省資源エネルギー庁, 「エネルギー政策 (全般)」, 経済産業省資源エネルギー庁, <https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/index.html>。

経済産業省資源エネルギー庁, 「水素・アンモニアを取り巻く現状と今後の検討の方向性」, 経済産業省資源エネルギー庁,

https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/001_03_00.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁、「水素の製造、輸送・貯蔵について」、経済産業省資源エネルギー庁、

https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/005_02_00.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁、「水素社会実現に向けた取組」、経済産業省資源エネルギー庁、

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/hydrogen_society/。

経済産業省資源エネルギー庁、「世界の原発利用の歴史と今」、経済産業省資源エネルギー庁、

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/sekainonuclear.html>。

経済産業省資源エネルギー庁、「次世代エネルギー「水素」、そもそもどうやってつくる?」、経済産業省資源エネルギー庁、

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/suiso_tukurikata.html。

経済産業省資源エネルギー庁、「我が国のエネルギー政策の変遷と最近の取組」、経済産業省資源エネルギー庁、

<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2014html/3-1.html>。

経済産業省資源エネルギー庁、「長期エネルギー需給見通し」、経済産業省資源エネルギー庁、

https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/mitoshi/pdf/report_01.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁, 「省エネルギー・新エネルギー」, 経済産業省
資源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第1次エネルギー基本計画」, 経済産業省資
源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/0301007energy.pdf
f。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第2次エネルギー基本計画」, 経済産業省資
源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/keikaku.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第3次エネルギー基本計画」, 経済産業省資
源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/100618honbun.pdf
f。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第4次エネルギー基本計画」, 経済産業省資
源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第4次エネルギー基本計画」, 経済産業省資
源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/140411.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第5次エネルギー基本計画」, 経済産業省資
源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf。

経済産業省資源エネルギー庁, 「第6次エネルギー基本計画」, 経済産業省資源エネルギー庁,

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>.

経済産業省資源エネルギー庁, 「第6次エネルギー基本計画」, 経済産業省資源エネルギー庁,

<https://www.meti.go.jp/press/2021/10/20211022005/20211022005-1.pdf>.

経済産業省資源エネルギー庁, 「新エネルギーシステム政策について (水素を含む)」, 経済産業省資源エネルギー庁,

https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/index.html.

菅野真, 「エネルギー安全保障・ネットゼロに向け水素拡大 (英国)」,

JETRO,

<https://www.jetro.go.jp/biz/areareports/special/2023/0503/3c74f4febcfe53b6.html>.

愛知県, 「中部圏水素・アンモニアサプライチェーンビジョンを策定しました」, 愛知県, <https://www.pref.aichi.jp/press-release/suiso-fcv/chubu-vision.html>.

溝口典仁, 「次世代エネルギー水素 関西最前線【神戸・関西圏水素利活用協議会 | 三菱重工業 | 川崎重工業 | Atomis】」, 関西電力,

<https://www.kepco.co.jp/corporate/report/yous/5/active-kansai/article1.html>.

補助金ポータル, 「補助金ポータル」, 補助金ポータル, <https://hojyokin-portal.jp/>.

電気通信大学, 「燃料電池・水素イノベーション研究センター」, 電気通信大学, <https://www.uec.ac.jp/facilities/research/hfc/>。

福田健三, 2015年2月12日, 「WE-NETが目指した社会と今」, NEDO, https://www.nedo.go.jp/nedoforum2015/program/pdf/ts4/kenzou_fukuda.pdf。

横浜国立大学, 「グリーン水素研究ラボ」, 横浜国立大学, https://acerc.ynu.ac.jp/_hyd/。

環境省, 「インドの取り組み」, 環境省, https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_india_202303.pdf。

環境省, 「オーストラリアの取り組み」, 環境省, https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_australia_202303.pdf。

環境省, 「カーボンニュートラルとは」, 環境省, https://ondankataisaku.env.go.jp/carbon_neutral/about/。

環境省, 「カナダの取り組み」, 環境省, https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_canada_202303.pdf。

環境省, 「チリの取り組み」, 環境省, https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_chile_202303.pdf。

環境省、「ドイツの取り組み」、環境省、

https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_germany_202303.pdf。

環境省、「フランスの取り組み」、環境省、

https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_france_202303.pdf。

環境省、「中国の取り組み」、環境省、

https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_china_202303.pdf。

環境省、「地球温暖化対策のための税の導入」、環境省、

<https://www.env.go.jp/policy/tax/about.html>。

環境省、「地球温暖化対策計画」、環境省、

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/keikaku/211022.html>。

環境省、「米国の取り組み」、環境省、

https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_usa_202303.pdf。

環境省、「国内排出量取引制度」、環境省、

<https://www.env.go.jp/earth/ondanka/det/index.html>。

環境省、「英国の取り組み」、環境省、

https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_uk_202303.pdf。

環境省, 「韓国の取り組み」, 環境省,

https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/PDF/overseas-trend_korea_202303.pdf。

環境省, 2021年3月2日, 「地球温暖化対策の推進に関する法律の一部を改正する法律案の閣議決定について」, 環境省,

<https://www.env.go.jp/press/109218.html>。

参、英文部分

一、専書

ADB. 2022. *Carbon Pricing for Energy Transition and Decarbonization* (Manila: ADB).

Cherif, Reda. et al. 2022. *Industrial Policy for Growth and Diversification: A Conceptual Framework* (Washington DC: IMF).

Hydrogen Council. 2022. *Hydrogen Insights 2022* (Brussels: Hydrogen Council).

IEA. 2019. *The Future of Hydrogen* (Paris: IEA).

IEA. 2022. *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021* (Paris: IEA).

IEA. 2022. *Global Hydrogen Review 2022* (Paris: IEA).

IRENA. 2019. *Hydrogen: A renewable energy perspective* (Abu Dhabi: IRENA).

IRENA. 2021. *Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs* (Abu Dhabi: IRENA).

IRENA. 2022. *Green hydrogen for industry: A guide to policy making* (Abu Dhabi: IRENA).

Tosun, Jale. et al. 2015. *Energy Policy Making in the EU* (London: Springer-Verlag).

Tucker, Todd. 2019. *Industrial Policy and Planning: What It Is and How to Do It Better* (New York: Roosevelt Institute).

WRI & WBCSD. 2004. *The Greenhouse Gas Protocol* (Washington DC: WRI & WBCSD).

二、期刊論文

Allcott, Hunt & Mullainathan, Sendhil. 2010. “Behavior and Energy Policy,” *Science*, vol. 327, issue 5970, pp. 1204~1205.

Kohl, Wilfrid L. 2004. “National Security and Energy,” *Encyclopedia of Energy*, vol. 4, pp. 193~206.

Lawrence, Peter & Wong, Daryl. 2017. “Soft law in the Paris Climate Agreement: Strength or weakness?” *Review of European*, vol. 26, no. 3, pp. 276~286.

Ohta, Hiroshi. 2021. “Japan’s Policy on Net Carbon Neutrality by 2050,” *East Asian Policy*, vol. 13, no. 1, pp. 19~32.

Rajamani, Lavanya. 2016. “The 2015 Paris Agreement: Interplay Between Hard, Soft and Non-Obligations,” *Journal of Environmental Law*, vol. 28, pp. 337~358.

Rothwell, Roy, & Zegveld, Walter. 1984. “An assessment of government innovation policies,” *Review of policy research*, vol. 3, no.3-4, pp.436-444.

Wiersema, Annecoos. 2009. "The New International Law-Makers? Conferences of the Parties to Multilateral Environmental Agreements," *Michigan Journal of International Law*, vol. 31, no. 1, pp. 231~287.

三、網路資源

Allen, Samantha. "Solar Energy Pros And Cons: What Are The Advantages And Disadvantages?" *Forbes*, <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/solar-energy-pros-and-cons/>.

Beauchemin, Adam. "What can we expect from clean hydrogen in Canada?" *CBC*, <https://www.cbc.ca/news/science/clean-hydrogen-canada-1.6856584>.

Buis, Alan. 2019. "A Degree of Concern: Why Global Temperatures Matter," *NASA*, <https://climate.nasa.gov/news/2865/a-degree-of-concern-why-global-temperatures-matter/>.

C2ES, "Internal Carbon Pricing," *C2ES*, <https://www.c2es.org/content/internal-carbon-pricing/>.

Clifford, Catherine. "Inside the fierce debate over clean hydrogen, with \$100 billion in federal subsidies on the line," *CNBC*, <https://www.cnbc.com/2023/03/03/clean-hydrogen-industry-future-depends-on-ira-tax-credit.html>.

Department of Finance Canada. "Consultation on the Clean Hydrogen Investment Tax Credit," *Government of Canada*, <https://www.canada.ca/en/department->

finance/programs/consultations/2022/consultation-on-the-investment-tax-credit-for-clean-hydrogen.html.

Energy Sage. “Wind energy pros and cons,” *Energy Sage*,
<https://www.energysage.com/about-clean-energy/wind/pros-cons-wind-energy/>.

European Commission. “A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age,”
European Commission, https://commission.europa.eu/system/files/2023-02/COM_2023_62_2_EN_ACT_A%20Green%20Deal%20Industrial%20Plan%20for%20the%20Net-Zero%20Age.pdf.

European Commission. “Carbon Border Adjustment Mechanism,” *European Commission*, https://taxation-customs.ec.europa.eu/green-taxation-0/carbon-border-adjustment-mechanism_en.

European Commission. “Hydrogen,” *European Commission*,
https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en.

European Parliament. 2019. “What is carbon neutrality and how can it be achieved by 2050?” *European Parliament*,
<https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050>.

IEA. 2020. “Carbon pricing can help put clean energy at the heart of stimulus packages,” *IEA*, <https://www.iea.org/commentaries/carbon-pricing-can-help-put-clean-energy-at-the-heart-of-stimulus-packages>.

IEA. 2022. “CO₂ emissions from energy combustion and industrial processes 1900-2021,” *IEA*, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/co2-emissions-from-energy-combustion-and-industrial-processes-1900-2021>.

- IEA. 2023. “Hydrogen Patents for a Clean Energy Future,” *IEA*,
<https://www.iea.org/reports/hydrogen-patents-for-a-clean-energy-future>.
- Koons, Eric. ”The Pros and Cons of Hydrogen Energy” *Energy Tracker Asia*,
<https://energytracker.asia/pros-and-cons-of-hydrogen-energy/>.
- Lewis, Michelle. “Meet the world’s first hydrogen fuel cell-powered container handler,” *electrek*, <https://electrek.co/2022/10/12/meet-the-worlds-first-hydrogen-fuel-cell-powered-container-handler/>.
- Liffey, Kevin. 2021. “Explainer: From Paris to Glasgow: cutting through climate jargon,” *Reuters*, <https://www.reuters.com/business/cop/paris-glasgow-cutting-through-climate-jargon-2021-10-27/>.
- Lindsey, Rebecca & Dahlman, Luann. 2023 “Climate Change: Global Temperature,” *Climate.gov*, <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.
- National Centers for Environmental information. 2023. “Global Time Series,” *National Centers for Environmental information*,
https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/climate-at-a-glance/global/time-series/globe/land_ocean/1/12/1900-2022.
- OECD. “Focus on green recovery,” *OECD*,
<https://www.oecd.org/coronavirus/en/themes/green-recovery>.
- OECD. 2022. “Carbon pricing in Japan,” *OECD*, <https://www.oecd.org/tax/tax-policy/carbon-pricing-japan.pdf>.

- Parry, Ian. 2019. "What is Carbon Taxation?" *IMF*,
<https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2019/06/what-is-carbon-taxation-basics>.
- Parry, Ian. 2021. "Five things to know about carbon pricing," *IMF*,
<https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2021/09/five-things-to-know-about-carbon-pricing-parry>.
- Siripurapu, Anshu & Berman, Noah. 2022. "Is Industrial Policy Making a Comeback?" *Council on Foreign Relations*,
<https://www.cfr.org/background/industrial-policy-making-comeback>.
- Sustainable Northern Ireland. "The many colours of hydrogen," *Sustainable Northern Ireland*, <https://www.sustainableni.org/blog/many-colours-hydrogen>.
- Thompson, Lucas & Miranda, Leticia. Oct 31, 2021. "What are carbon credits? How fighting climate change became a billion-dollar industry," *NBC news*,
<https://www.nbcnews.com/business/business-news/are-carbon-credits-fighting-climate-change-became-billion-dollar-indus-rcna3228>.
- UN. "What is renewable energy?" *UN*, <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>.
- UNFCCC. "About Carbon Pricing," *UN*, [https://unfccc.int/about-us/regional-collaboration-centres/the-ciaca/about-carbon-pricing#What-is-Carbon-Pricing?-](https://unfccc.int/about-us/regional-collaboration-centres/the-ciaca/about-carbon-pricing#What-is-Carbon-Pricing?-.).
- UNFCCC. "Causes and Effects of Climate Change," *UN*,
<https://www.un.org/en/climatechange/science/causes-effects-climate-change>.

UNFCCC. “Conference of the Parties (COP)?” *UN*,
<https://unfccc.int/process/bodies/supreme-bodies/conference-of-the-parties-cop>.

UNFCCC. “The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26” *UN*,
<https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-glasgow-climate-pact-key-outcomes-from-cop26>.

UNFCCC. “The Paris Agreement” *UN*, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.

UNFCCC. “What is the Kyoto Protocol?” *UN*, https://unfccc.int/kyoto_protocol.

World Bank. “Pricing Carbon,” *World Bank*,
<https://www.worldbank.org/en/programs/pricing-carbon>.

