

105-097-6185
MOTC-IOT-104-TAA007

氫燃料電池車輛之能耗與碳排 生命週期分析

著者：張瓊文、朱珮芸、蕭為元、陳國岳

交通部運輸研究所

中華民國 105 年 10 月

氫燃料電池車輛之能耗與碳排生命週期分析

著 者：張瓊文、朱珮芸、蕭為元、陳國岳

出版機關：交通部運輸研究所

地 址：10548 臺北市敦化北路 240 號

網 址：www.iot.gov.tw (中文版>圖書服務>本所出版品)

電 話：(02)23496789

出版年月：中華民國 105 年 10 月

印 刷 者：九易數碼科技印刷有限公司

版(刷)次冊數：初版一刷 10 冊

本書同時登載於交通部運輸研究所網站

定 價：非賣品

展 售 處：

交通部運輸研究所運輸資訊組・電話：(02)23496880

國家書店松江門市：10485 臺北市中山區松江路 209 號・電話：(02)25180207

五南文化廣場：40042 臺中市中山路 6 號・電話：(04)22260330

著作財產權人：中華民國（代表機關：交通部運輸研究所）

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

交通部運輸研究所自行研究計畫出版品摘要表

出版品名稱：氫燃料電池車輛之能耗與碳排生命週期分析			
國際標準書號（或叢刊號） ISBN (平裝)	政府出版品統一編號	運輸研究所出版品編號 105-097-6185	計畫編號 MOTC-IOT-104-TAA007
主辦單位：綜合技術組 主管：張瓊文 計畫主持人：張瓊文 研究人員：陳國岳、朱珮芸、蕭為元 聯絡電話：(02)23496869 傳真號碼：(02)27120223			研究期間 自 104 年 1 月 至 104 年 12 月
關鍵詞：燃料電池車、生命週期、GREET			
摘要： 由於環保意識的抬頭，促使替代能源車輛的技術逐漸發展，以期達到更為節能減碳的未來。為探討新運具引入之能耗與CO₂排放效果，利用生命週期觀點進行分析確有其必要性。 本研究介紹世界各國氫燃料電池車發展現況及政府政策，並分析國外燃料電池在原料生產、製造與運輸、使用與維護、棄置與回收等技術議題。為進一步分析生命週期各階段中，所涉及能源消耗與溫室氣體排放之相關範疇採用美國GREET (The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model)車輛生命週期評估模式，並將模式中部分參數調整為國內本土化數值後進行分析，以釐清氫燃料電池車在生命週期各階段及全生命週期的總能耗與溫室氣體排放量，以及節能減碳之效率，研究結果亦可做為未來推動氫燃料電池車之參據。 結果顯示，若從生命週期觀點分析，燃料電池車在全生命週期每公里行駛的能耗及二氧化碳排放仍低於汽油車，燃料電池車在車輛使用階段並不會直接排放二氧化碳，能耗較汽油車低，但在其餘階段(含氫氣生產配送過程)的能耗及二氧化碳排放量則較汽油者高。本研究並針對分析結果進行相關課題探討及提出推動建議，以期在考量生命週期觀點下，燃料電池車可朝更節能減碳方向推展，研究成果可作為國內未來推廣燃料電池車之參據。			
出版日期	頁數	定價	本出版品取得方式
105 年 10 月	123		凡屬機密性出版品均不對外公開。普通性出版品，公營、公益機關團體及學校可函洽本所免費贈閱；私人及私營機關團體可按定價價購。
機密等級： ☐ 密 ☐ 機密 ☐ 極機密 ☐ 絕對機密 （解密條件： ☐ 年 月 日解密， ☐ 公布後解密， ☐ 附件抽存後解密， ☐ 工作完成或會議終了時解密， ☐ 另行檢討後辦理解密） ☒ 普通			
備註：本研究之結論與建議不代表交通部之意見。			

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

TITLE: A life cycle analysis of fuel cell vehicles for energy consumption and CO ₂ emissions			
ISBN(OR ISSN) ISBN (pbk.)	GOVERNMENT PUBLICATIONS NUMBER	IOT SERIAL NUMBER 105-097-6185	PROJECT NUMBER MOTC-IOT-104-TAA007
DIVISION: Interdisciplinary Research Division DIVISION DIRECTOR: Chiung-Wen Chang PRINCIPAL INVESTIGATOR: Chiung-Wen Chang PROJECT STAFF: Kuo-Yueh Chen , Pei-Yun Chu, Wei-Yuan Hsiao PHONE: (02)2349-6869 FAX: (02)2712-0223			PROJECT PERIOD FROM 2015/01 TO 2015/12
KEY WORDS: fuel cell vehicle ,life-cycle, GREET(The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model)			
ABSTRACT: The alternative fuel vehicles technology has been developed substantially to accommodate the raising environmental awareness for the purpose of providing the general public a future with less energy consumption and CO₂ emissions. Thus, to investigate the energy consumption and CO₂ emissions of new modes with the perspective of life cycle is indeed inevitable. This study introduced the technical issue of fuel cell electric vehicles (FCEV), including the raw materials and production, manufacture and transportation, use and maintenance, discard and recycling, etc.The study showed you the status of development and government policies in the world. In addition to the technical presentation, also included the analysis of relevant category of energy consumption and CO₂ at various stages of the life cycle. To clarify the total energy consumption in full life cycle and each stages, CO₂ and the efficiency of Energy Conservation and Carbon Reduction, we used the United States vehicle life cycle assessment model- GREET (The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model), then adjust the part data to the local values to study and analyze. The result may be used as parameter for promoting fuel cell electric vehicles (FCEV) in the future. The results indicated that, In addition, from the life-cycle perspective, the energy consumption and CO₂ emissions per kilometer of the fuel cell electric vehicles are still less than those of the gasoline vehicles. Fuel cell electric vehicles do not emit CO₂ during the operation stage, and their energy consumption is less than that of the gasoline vehicles. The energy consumption and CO₂ emissions during the other cycle stages (include Hydrogen generation/distribution process) are relatively high compared with those process of gasoline. This study also drew up recommendations based upon the findings with the life-cycle perspective. We hope that the results could also be served as reference for the promotion of fuel cell vehicles in the future with less energy consumption and CO₂ emissions.			
DATE OF PUBLICATION October 2016	NUMBER OF PAGES 123	PRICE	CLASSIFICATION ☐ RESTRICTED ☐ CONFIDENTIAL ☐ SECRET ☐ TOP SECRET ☒ UNCLASSIFIED
The views expressed in this publication are not necessarily those of the Ministry of Transportation and Communications.			

目錄

第一章 緒論	1-1
1.1 計畫背景	1-1
1.2 研究目的	1-2
1.3 研究範圍	1-2
1.4 研究內容	1-2
第二章 氫能源的發展	2-1
2.1 前言	2-1
2.2 氫能源應用範圍	2-2
2.3 國際氫燃料電池車輛發展狀況	2-5
2.3.1 日本	2-5
2.3.2 美國	2-13
2.3.3 歐洲	2-23
2.3.4 中國大陸	2-26
2.4 小結	2-27
第三章 氫氣製造與燃料電池原理	3-1
3.1 氫的來源	3-1
3.2 傳統化石燃料製氫技術	3-3
3.3 水解製氫	3-5
3.4 再生能源製氫	3-6
3.5 製氫成本比較	3-9
3.6 燃料電池種類與基本原理介紹	3-10
3.7 燃料電池車輛原理介紹	3-16
3.8 燃料電池車與電動車之比較	3-18
3.9 小結	3-22
第四章 氫的儲存與運輸	4-1
4.1 前言	4-1
4.2 技術發展	4-2
4.3 高壓儲氫	4-4
4.4 液態儲氫	4-8
4.5 儲氫合金	4-10

4.6	氫的運送	4-18
4.7	加氫站技術	4-20
4.8	車上重組的研究	4-23
4.9	小結	4-23
第五章	燃料電池小客車生命週期能源消耗與溫室氣體排放試算與評估	5-1
5.1	我國私人小客車生命週期盤查	5-1
5.1.1	評估工具選擇	5-1
5.1.2	國內汽油車及燃料電池車相關參數資料蒐集	5-1
5.1.3	REET 1 2015 模式參數本土化	5-2
5.1.4	REET 2 2015 模式參數本土化	5-6
5.2	我國私人小客車生命週期能源消耗與溫室氣體排放試算與評析	5-10
5.2.1	REET 1 2015 模式試算結果	5-10
5.2.2	REET 2 2015 模式試算結果	5-14
5.3	小結	5-20
第六章	結論與建議	6-1
6.1	結論	6-1
6.2	建議	6-3
參考文獻	參-1	
附錄	計畫摘要	附錄 1-1

表目錄

表 3-1	燃料電池工作溫度與效率.....	3-13
表 4-1	美國能源部儲氫研究各式儲氫系統技術現況	4-2
表 4-2	美國能源部運輸車用儲氫系統目標值與溫度範圍	4-4
表 4-3	MOF 材料氫氣吸附性能比較.....	4-16
表 5-1	國內油料運輸途徑本土化調整列表	5-5
表 5-2	國內油料熱值本土化調整列表	5-6
表 5-3	我國自用小客車各主要用途別比例及年平均行駛里程	5-7
表 5-4	流體的替換次數.....	5-8
表 5-5	流體更換廢液占比.....	5-9
表 5-6	流體在汽車中所占的重量.....	5-9
表 5-7	不同類型燃料 WTP 階段之能耗與二氧化碳排放試算表	5-11
表 5-8	汽油車燃料週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表	5-12
表 5-9	燃料電池車燃料週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表	5-12
表 5-10	汽油車與燃料電池車燃料週期各階段能耗與二氧化碳排放試 算表	5-13
表 5-11	汽油車與燃料電池車車輛週期 (不含車輛使用階段)各階段能 耗與二氧化碳排放試算表	5-16
表 5-12	汽油車全生命週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表	5-17
表 5-13	燃料電池車全生命週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表 ...	5-17
表 5-14	汽油車與燃料電池車全生命週期各階段能耗與二氧化碳排放 試算表	5-18

圖目錄

圖 2-1	燃料電池來源與應用.....	2-3
圖 2-2	燃料電池應用範圍分析.....	2-5
圖 2-3	未來燃料電池應用範圍預測.....	2-6
圖 2-4	未來燃料電池市場規模預測.....	2-7
圖 2-5	燃料電池效率分析.....	2-7
圖 2-6	各種能源技術車輛排碳分析.....	2-8
圖 2-7	燃料電池專利分析.....	2-9
圖 2-8	日本燃料電池發展規劃.....	2-10
圖 2-9	燃料電池相關法規.....	2-11
圖 2-10	TOYOTA MIRAI 驅動原理.....	2-12
圖 2-11	TOYOTA MIRAI 系統配置.....	2-13
圖 2-12	Freedom CAR Fuel Partnership 組織.....	2-14
圖 2-13	美國氫能發展計畫重點.....	2-16
圖 2-14	美國氫能發展計畫.....	2-17
圖 2-15	CaFCP 燃料電池車數量預測.....	2-18
圖 2-16	CaFCP 加氫站數量預測.....	2-19
圖 2-17	燃料電池發電成本.....	2-20
圖 2-18	燃料電池與燃油車輛每英哩成本比較.....	2-21
圖 2-19	美國氫能相關法令制定狀況.....	2-22
圖 2-20	HyChain Minitrans 計畫.....	2-24
圖 2-21	德國 NIP 計畫.....	2-25
圖 3-1	氫氣的來源.....	3-2
圖 3-2	蒸汽重組法示意圖.....	3-4
圖 3-3	電漿重組法示意圖.....	3-5
圖 3-4	再生能源製氫.....	3-7
圖 3-5	太陽光電化學法.....	3-8
圖 3-6	太陽熱搭配熱化學技術.....	3-9
圖 3-7	不同製氫原料與技術成本分析.....	3-10
圖 3-8	各種燃料電池工作溫度.....	3-12
圖 3-9	PEMFC 基本結構圖.....	3-14

圖 3-10	PEMFC 工作原理	3-16
圖 3-11	燃料電池電動車的動力系統.....	3-17
圖 3-12	燃料電池電動車的熱管理系統	3-18
圖 3-13	燃料電池與電動車電池的能量密度比較	3-20
圖 3-14	燃料電池與電動車電池所需空間比較	3-21
圖 3-15	燃料電池與電動車燃料週期排碳分析	3-22
圖 4-1	各式儲氫系統.....	4-1
圖 4-2	美國能源部儲氫系統單位重量與單位體積之儲氫目標值	4-3
圖 4-3	高壓氫氣儲存儲氫體積密度.....	4-5
圖 4-4	35 MPa 高壓儲氫容器	4-6
圖 4-5	70MPa 高壓儲氫容器	4-6
圖 4-6	壓縮儲氫系統效率比較.....	4-7
圖 4-7	壓縮儲氫系統重量組成.....	4-8
圖 4-8	液態氫氣儲存容器.....	4-9
圖 4-9	放熱型金屬 A 與吸熱型金屬 B 於週期表位置.....	4-11
圖 4-10	化學儲氫.....	4-12
圖 4-11	金屬材料儲氫過程以及 PCT（壓力－成分－溫度）關係示意圖	4-13
圖 4-12	MOF 合成反應示意圖	4-15
圖 4-13	典型的 MOF 配位基結構.....	4-15
圖 4-14	各式吸附型儲氫系統.....	4-17
圖 4-15	有機液態儲氫的儲運模式.....	4-19
圖 4-16	氫溢出現象(Hydrogen Spillover)	4-20
圖 4-17	加氫站種類與技術.....	4-21
圖 4-18	車輛氫氣補充技術.....	4-22
圖 4-19	加氫站安全管理.....	4-22
圖 5-1	美國原油開採到煉油廠的運輸途徑	5-4
圖 5-2	天然氣儲存場到加氣站之運輸途徑	5-5
圖 5-3	GREET 模式之生命週期流程.....	5-10

第一章 緒論

1.1 計畫背景

臺灣自然資源匱乏，能源嚴重依賴進口，目前還要面臨減碳的壓力，因此對於潔淨之替代能源的發展，格外積極。相較於其他新能源項目，氫能與燃料電池產業仍屬萌芽階段，然而以其潔淨、高效率、來源廣泛的特性已吸引了全球關注，並投入大量的人力、財力、物力進行開發。我國經過十多年氫能與燃料電池技術的發展，涵蓋上、中、下游的產業鏈已初具規模，其中不乏國際知名廠商，已成為氫能與燃料電池技術研發最為活躍地區之一。

美、日、歐為代表的科技先進國家都已經將氫能與燃料電池提升到國家能源戰略層面加以規劃，從 2003 年起，國家級或跨國級的氫能計畫陸續啟動，2003 年美國發表了氫燃料倡議(Hydrogen Fuel Initial)，並啟動「自由車與燃料夥伴計畫(FreedomCAR and Fuel Partnership)」與「氫燃料電池與基礎設施技術計畫(Hydrogen, Fuel Cell & Infrastructure Technologies Program, HFCIT)」等兩項國家級氫能計畫，日本則在 2002 年起推動氫與燃料電池示範運行計畫(Japan Hydrogen and Fuel Cell Demonstration Project, JHFC)，歐盟在第 7 期框架計畫 (7th Framework Program) 中則將氫與燃料電池列為能源研究領域之優先推動項目，我國經濟部能源局也將「氫能與燃料電池產業」列為配合行政院「綠色能源產業旭升方案」之重要項目之一，目前氫燃料電池已是能源研究領域之優先推動項目。

本研究介紹世界各國氫燃料電池車發展現況及政府政策，並探討氫燃料電池小汽車在原料生產、製造與運送、使用與維護、棄置與回收等技術議題，除各項技術介紹之外，分析生命週期各階段中，所涉及能源消耗與溫室氣體排放之相關範疇採用美國 GREET(The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model) 車輛生命週期評估模式，並將模式中部分參數調整為國內本土化數值後，進行生命週期中各階段之能耗及溫室氣體排放及分析，以釐清氫燃料電池車在生命週期各階段及全生命週期的總能耗與溫室氣體排放，以及節能減碳之效率，研究結果可作為未來推動氫燃料電池車之參據。

1.2 研究目的

本研究主要目的如下：

1. 介紹燃料電池技術發展，分析氫能由製造、運送、儲存、應用等技術發展與面對問題，同時與傳統石化能源進行比較，提供交通部門研擬推動策略之參據。
2. 以全生命週期觀點，利用 GREET 模型分析氫燃料電池車燃料週期與車輛週期與傳統車輛之耗能，有助於了解其生命週期各階段 CO₂ 排放情形。

1.3 研究範圍

本研究以氫燃料電池車在原料組成、製造與運銷、使用與維護、棄置與回收等生命週期各階段中，各項技術議題初步研析，所涉及能源消耗與溫室氣體排放之相關範疇為主要研究範圍，利用 GREET 模型進行氫燃料電池小汽車之燃料與車輛週期溫室氣體排放初步分析。

1.4 研究內容

1. 技術介紹與範疇界定

本研究探討主題為國內氫燃料電池車在生命週期中的能源消耗與溫室氣體排放之比較，因此首先需了解生命週期的理論及評估方法，並界定所欲分析之車輛，進行氫燃料電池車輛燃料週期與車輛週期介紹，包括氫燃料之生產、運送、儲存及使用，以及氫燃料電池小汽車技術初步探討。之後進行車輛在生命週期各階段的能耗及溫室氣體排放之資料蒐集分析並與傳統能源車輛進行比較，以及進行相關課題探討，以了解未來在相關氫燃料電池車輛推動上之因應對策。

2. 國內外氫燃料電池車輛發展趨勢探討

本研究探討日本、美國、歐洲與中國大陸氫燃料電池車輛發展現況，分析各國發展目標、系統建立、研發方向、示範系統及政府與民間合作概況，比較各國對氫燃料電池車輛推動政策，藉以探討如何解決氫燃料電池車輛所面對的問題，提供未來發展參考。

3. 利用生命週期評估模式進行替代能源車輛能源消耗與溫室氣體排放分析

蒐集彙整國內外有關車輛之全生命週期之研究資料，並了解車輛生命週期各階段之定義，另針對本研究所使用的 GREET 車輛生命週期評估模式內容及修訂部分進行說明，最後，利用參數本土化之 GREET 生命週期評估模式進行汽油車與氫燃料電池車輛生命週期各階段之能源消耗與溫室氣體中二氧化碳排放量之分析與比較。

4. 生命週期各階段能源消耗與溫室氣體排放課題探討

將氫燃料電池車輛之生命週期模式評估結果，進行生命週期各階段能源消耗與溫室氣體中二氧化碳排放量之研究分析，並比較氫燃料電池車輛之全生命週期排放之結果，以進行相關課題之研究探討。

第二章 氫能源的發展

2.1 前言

我國由於自產能源有限，隨著能源需求的增加，我國對進口能源之依賴度日益加深。此種對進口能源的高度依賴，已經威脅到國家能源供應的安全，使未來整體經濟發展受其影響的風險日益增高。化石能源有關的活動也是造成空氣污染與溫室氣體排放的主要來源，且自從 2005 年 2 月 16 日京都議定書正式生效成為國際公約後，溫室氣體減量已是目前的國際共識，未來對淨潔能源及提升能源效率的需求將更緊迫。98 年全國能源會議總結報告，篩選國家能源科技重點研發領域，考量經濟、能源及環境，行政院「能源國家型科技計畫」中「新能源產業旗艦計畫」選定氫能系統發展儲氫技術、產氫技術、運送技術及氫能載具以及燃料電池與氫內燃機之研發、應用與推廣 [7][8]。

氫能可自再生能源轉製，其能源使用後產物主要是水，具有低污染、環保的優點，被各國視為最具提昇國家能源安全、減少溫室效應氣體排放、減少空氣污染及提昇能源使用效率潛力之二次能源。發展氫能經濟是很多國家的長期目標，氫做為燃料能源，有其優越之勢。根據分析，氫的燃燒熱值高，每 1,000 克氫燃燒後的熱量約為汽油的 3 倍，酒精的 3.9 倍，焦炭的 4.5 倍，在提供能量方面，顯然比目前使用的石化燃料更具效率。且氫可以由水來製取，而水則是地球上豐富的資源。氫燃燒後的產物只有水，對環境不會造成污染。氫做為燃料能源不會像燃燒石油和煤炭一樣產生任何足以導致溫室效應的化學物質，也不會引起酸雨和煙霧。產生高能量與零污染的特性，使得氫能源的研究成為當前各國致力發展的方向，期望能以氫能源作為未來的替代能源^{[6][7]}。

雖然氫能乃二次能源，但大自然界含量豐富並不斷循環，只要克服生產、儲存、輸送及應用技術障礙，便能發展出更具效率與多元的永續能源供需體系與產業，其效應相當於電能的發現與利用。

2.2 氫能源應用範圍

在眾多的綠色能源如太陽能、風力、氫能、水力等當中，氫能源為其中一極具發展潛力的對象，其具備以下優點：1.氫能源不具毒性，對環境安全性高，其能量密度較傳統汽油高，根據美國能源部資料顯示，9.5 公斤氫氣所含的能量約與 25 公斤汽油相等。2.氫氣可在管線中進行運輸；3.在一般的情況下，氫氣燃燒後所產生的氣體相當乾淨，副產品是水。4.氫氣可以透過非常多的方式取得，且產生的氫氣與燃料電池進行搭配後，可以應用在不同領域，包括車用、家用進行發電，目前氫氣被認為是最有可能取代石油的能源。

然而氫在自然界並不以原子或是氫氣分子 (H_2) 的形式存在，而是以和其他元素結合的方式存在在地球上，其中最大宗的存在形式就是水與有機化合物；日本人又稱氫為「水素」，就是取其大量存在於水中之意。整個宇宙甚至約有 75%是由氫構成，因此氫氣的來源可以說是取之不盡。

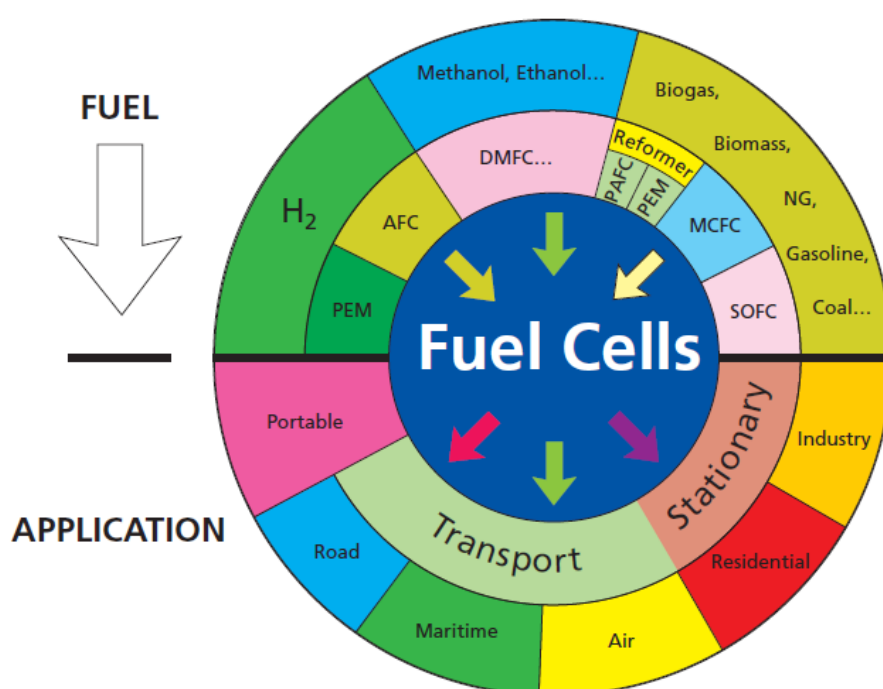
氫氣車分為兩種，氫內燃車 (hydrogen engine vehicles, HICEV)是以內燃機燃燒氫氣（通常透過分解甲烷、電解水或液態氫取得）及空氣中的氧產生動力，推動的汽車。而氫燃料電池車(Fuel cell electric vehicle, FCEV)是使氫或含氫物質及空氣中的氧通過燃料電池以產生電力，再以電力推動電動機，由電動機推動車輛。這類車輛的發電廠把氫的化學能轉換為機械能，或者是通過燃燒的內燃機中的氫，或通過在燃料電池中的氧與氫反應來運行電動機。使用氫為能源的最大好處是它能跟空氣中的氧，產生水蒸氣排出，有效減少了其他燃油汽車造成的空氣污染問題。

由於從工業革命開始藉由燃燒石化燃料產生熱能，進而產生動力或電力，過程中產生大量的碳排放且效率低，於是開始思考去碳化(de-carbonization)尋找新替代能源，以達到追求乾淨能源的目標。將碳氫化合物去掉碳—使用氫氣為燃料自然是追求乾淨能源的終極目標，而燃料電池係將燃料中的化學能直接轉換成為電力，屬於直接能源轉換裝置 (Direct Energy Conversion Device)，使用過程並不排碳且效率較高。

事實上燃料電池的原理早在 1839 年便由德國的化學家尚班 (Christian Friedrich Schönbein) 所發現並公布於世，隔年英國的物理學家威廉·葛洛夫(William Robert Grove)以尚班的理論，製作出全世界第一個燃料電池。但

首次成功應用系 1960 年代，美國太空總署將燃料電池應用於太空船上，可惜由於成本因素，氫能始終未能成為主流能源。直至二十一世紀的現在，氫能才再度受到世人注目。其最大原因有二，其一是能源問題，2008 年原油價格飆漲，其二是環境問題，使用石化燃料所排放的二氧化碳助長了地球暖化現象。

燃料電池因燃料來源不同、技術不同，可應用於許多不同的產品(如圖 2-1 所示)，依據其應用性質，約略分為 3 大類，可攜式燃料電池、運輸型燃料電池、定置型燃料電池^[43]。



資料來源：Hydrogen and Fuel Cells Technologies
(https://www.researchgate.net/figure/271225756_fig2_Fig-2-Fuels-and-applications-of-fuel-cell-technology-27-PEM-14-Proton-Exchange)

圖 2-1 燃料電池來源與應用

根據 FUEL CELL TODAY 預測，燃料電池未來主要發電規格將在 500 watt~2kilowatt 之間，首先最有機會替代做為輔助電源裝置(auxiliary powerunits)應用之汽柴油發電機。而 100~500watt 的產品則會是未來市場需求量第二大，主要應用在於緊急系統電池充電、動力工具等^[3]。

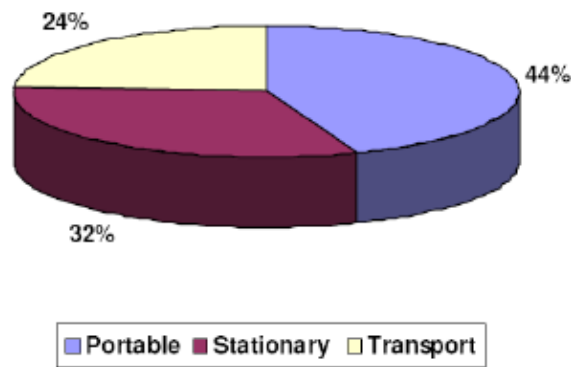
可攜式電子產品應用將在接下來的幾年內繼續成為燃料電池市場的推動力，此種燃料電池技術可作為傳統電池替代品，或為可攜式應用產品的

小型發電機。市場上的主力燃料電池產品。可攜式電子產品應用目前多數應用於軍事用途，在民生用途上目前多為 1KW 以下，現階段主要作為休閒娛樂用之小型發電機或是供作遊艇之輔助電源。至於應用在筆電、手機的消費性電子應用，屬於 50W 以下的所謂微型燃料電池，雖然全世界約有 60 多家廠商與研究機構進行開發，但目前多處於模型的階段，不具實用價值。

燃料電池第 2 大的市場則為定置型市場，所謂定置型可以應用在一般住宅、工廠、學校等，未來可以結合智慧電網，補充尖峰用電需求，提供夜間熱能，達到節能效果，亦或是單獨發電，提供斷電時或偏遠地區、緊急狀況時的供電。功率需求，發電規格將至少在 1KW 以上。定置型燃料電池發電系統依發電量有大型發電廠、家用型燃料電池發電機和攜帶型備用電源等。目前以家用型燃料電池發電機成長速度較快，家用型燃料電池係可直接供應一般家庭的電力使用，而燃料電池亦可和不斷電系統電源供應器做結合，即可具備不間斷發電系統的功能，又可發揮燃料電池高效率的供電能力，目前以北美和日本為主要應用地區。

燃料電池第 3 大市場則為運輸型，所謂運輸類是以各類型車用動力為對象，從大型公車到一般燃料電池汽車與機車。目前歐、美、日、韓重要車廠，均已推出或著手於燃料電池汽車之產品，部分已經參與公開的道路示範實證計畫。發電規格需求視應用而定，約在百瓦至 2KW 左右。相對於目前運輸工具使用的石化燃料便利與成熟，燃料電池用於運輸工具目前仍有技術問題待克服且成本過高，因此 FUEL CELL TODAY 預測運輸型燃料電池發展性不如可攜式與定置型燃料電池^{[3][7][8]}。

目前國際汽車大廠均有投入運輸型燃料電池開發，根據 FUEL CELL TODAY 統計，2014 年民間投入燃料電池領域之總研發經費中，約有 80% 即來自汽車業者，顯示車廠對未來燃料電池產業之重視。主要汽車大廠對於燃料電池汽車之經營策略多為進行產業水平或垂直策略聯盟，以降低研發風險，並且掌握大部分燃料電池汽車產業價值鏈。目前汽車大廠積極投入之研發項目包括上游產氫、儲氫、燃料重組技術，中游之燃料電池組、系統零組件、電力驅動系統，以及下游燃料電池整車系統^[3]。



資料來源：The Fuel Cell Industry Review 2013

圖 2-2 燃料電池應用範圍分析

依據 FUEL CELL TODAY 統計，2013 年運輸型燃料電池占全世界燃料電池市占率大約 24%，目前仍以可攜式燃料電池占比最高。

2.3 國際氫燃料電池車輛發展狀況

2.3.1 日本

日本在 2014 年 4 月的內閣會議中制定了新的「能源基本計畫」，並將氫能視為今後二次能源的核心。由於氫能的應用在技術面、成本面、制度面及硬體設備面仍存有課題待克服，是否能被大眾接受，還有待今後努力。能源基本計畫中提到，包括燃料電池本身的耐久性及品質可靠度、超過市場可接受的成本、將氫能作為日常生活/產業活動的能源所需的制度整頓和加氫站的普及問題等。這些課題該如何獲得全面性的解決，將成為氫能發展與否的關鍵。有鑒於此，由跨產官學單位所組成的「氫能/燃料電池戰略協議會」，在 2015 年 6 月提出「氫能/燃料電池戰略 Road Map」，考量克服技術性課題及確保經濟性所需時間，以三階段方式帶領日本步入氫能社會。日本認為氫能技術可應用的範圍極廣，除了已達實用階段的燃料電池車、家用燃料電池系統之外，未來在船舶及鐵路等運輸應用、氫能發電等領域皆具備潛在性，如圖 2-3 所示。而在氫能本身的製造上，將利用國內外的可再生及尚未充分利用的能源，或是從他國調度便宜的一次能源。如此一來，將有助於進軍國際、開拓國際市場，對經濟成長有所貢獻^{[4][5][6]}。

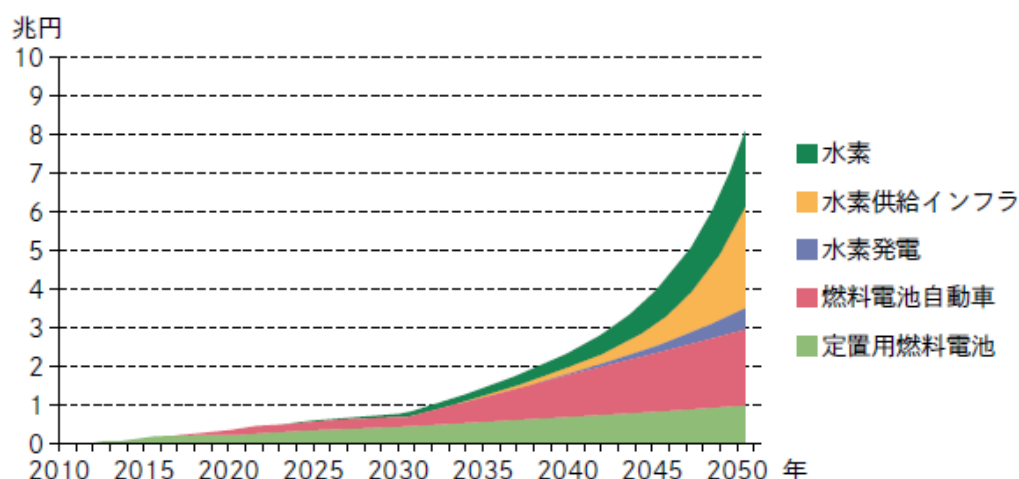


資料來源：氫能/燃料電池戰略 Road Map (<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>)

圖 2-3 未來燃料電池應用範圍預測

缺乏天然能源的日本，在經歷過 1970 年代的石油危機後，於 1980 年代正式投入氫能的相關研發。為了開發省能技術及新能源，陸續提出「Sun Shine 計畫」及「Moon Light 計畫」等國家級計畫。目前燃料電池的研發及實用化整合，係由經濟產業省及旗下的日本新能源產業技術總合開發機構(New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO)為中心推動，視之為革命性的能源高度利用技術之一，經歷福島地震之後，氫能源已列為重點投入研發的政策性資源。

日本的新能源產業技術總合開發機構預測未來日本氫能源與燃料電池相關市場規模，預計 2030 年可達 1 兆日圓，2050 年可望擴大至 8 兆日圓，是今後 10~35 年間有機會大幅成長的領域，如圖 2-4 所示，和 FUEL CELL TODAY 不同的是，新能源產業技術總合開發機構預測未來燃料電池最大的應用領域是在燃料電池車輛^{[4][5]}。



資料來源：2014 NEDO 氫能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 2-4 未來燃料電池市場規模預測

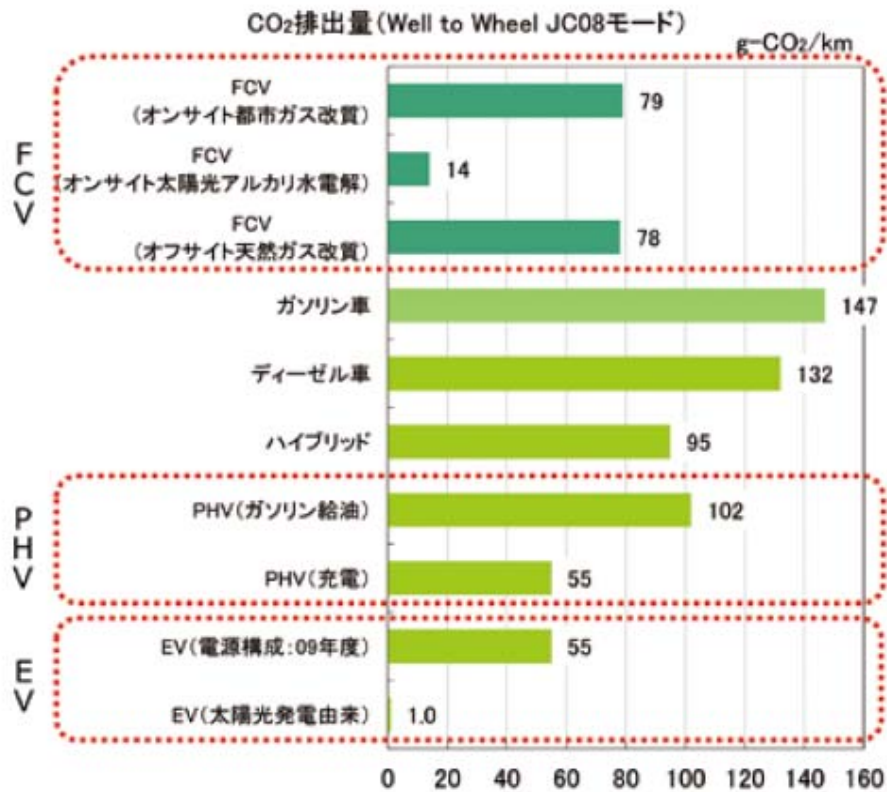
新能源產業技術總合開發機構認為燃料電池係由氫與空氣中的氧進行化學反應後，直接取出的能源，因此發電效率相當不錯(如圖 2-5 所示)，並可生成電能與熱能兩種能量，除電能外，熱能可再擴展應用，將有助於大幅節省能源，較現行發電系統提升 1 倍以上之效率，為燃料電池最具節能效益應用領域^{[4][5]}。



資料來源：2014 NEDO 氫能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 2-5 燃料電池效率分析

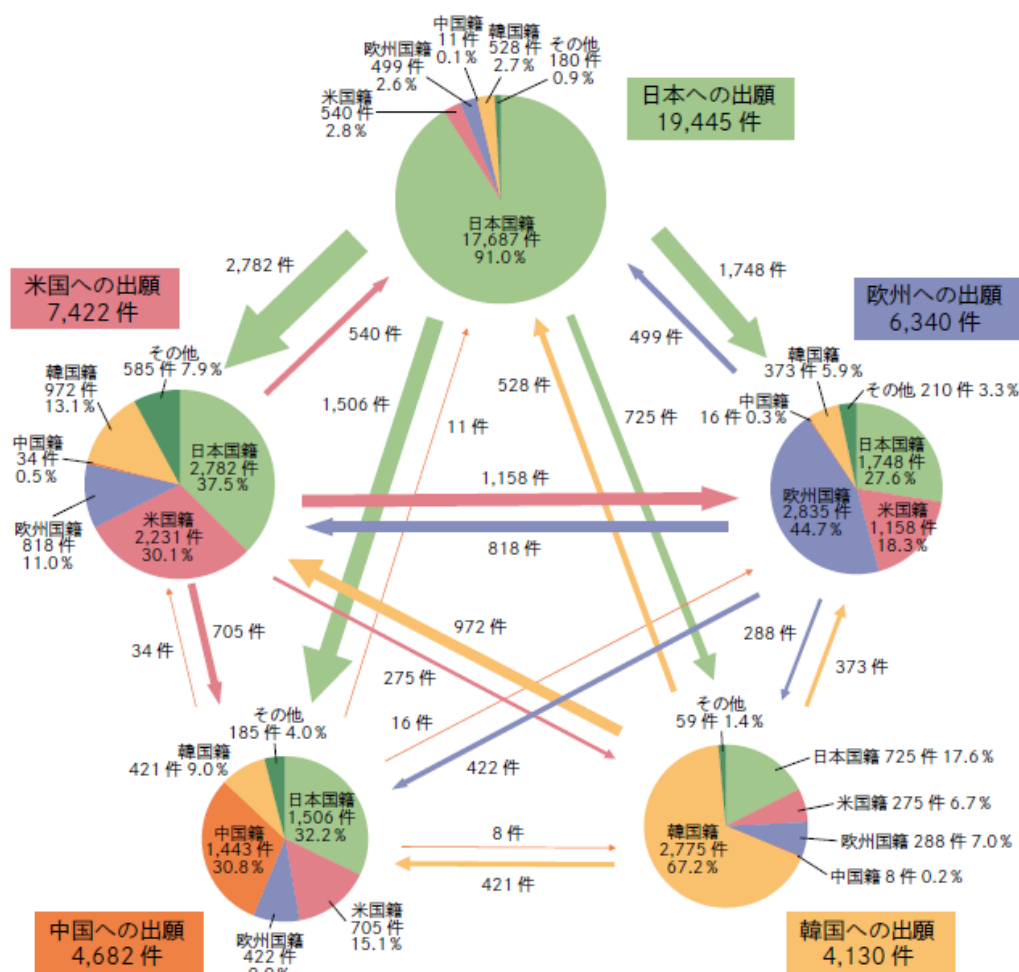
另一個氫能源優勢領域，係車輛應用，採用氫能之燃料電池車的二氧化碳排放量與既有汽油車相比，約只有一半左右，若採用太陽能並電解水作為氫的製造能源，更可減碳達 90% 以上(如圖 2-6 所示)。



資料來源：2014 NEDO 氫能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 2-6 各種能源技術車輛排碳分析

根據新能源產業技術總合開發機構引用日本專利部門的報告指出，日本在燃料電池領域的專利申請件數目前為全球第一，與排名在後的歐、美、韓國、中國大陸相比，件數差距高達 2 倍以上(如圖 2-7 所示)。因此，新能源產業技術總合開發機構認為在氫能源產業上日本可說具備極高的競爭力 [4][5]。



資料來源：2014 NEDO 氢能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 2-7 燃料電池專利分析

為了加速氫能的普及，日本政府於 2014 年 4 月制定了新的能源基本計畫，其中提出了「3E+S」作為能源政策的基本概念。所謂「3E+S」，就是以安全性(Safety)為前提，以能源的安全供給為優先，實現提升經濟效率的低成本能源供應，同時追求對於環境的友善性，未來達成建構日本多層化、多樣化、有彈性的能源供需構造。期推動策略將分 3 階段^[4]：

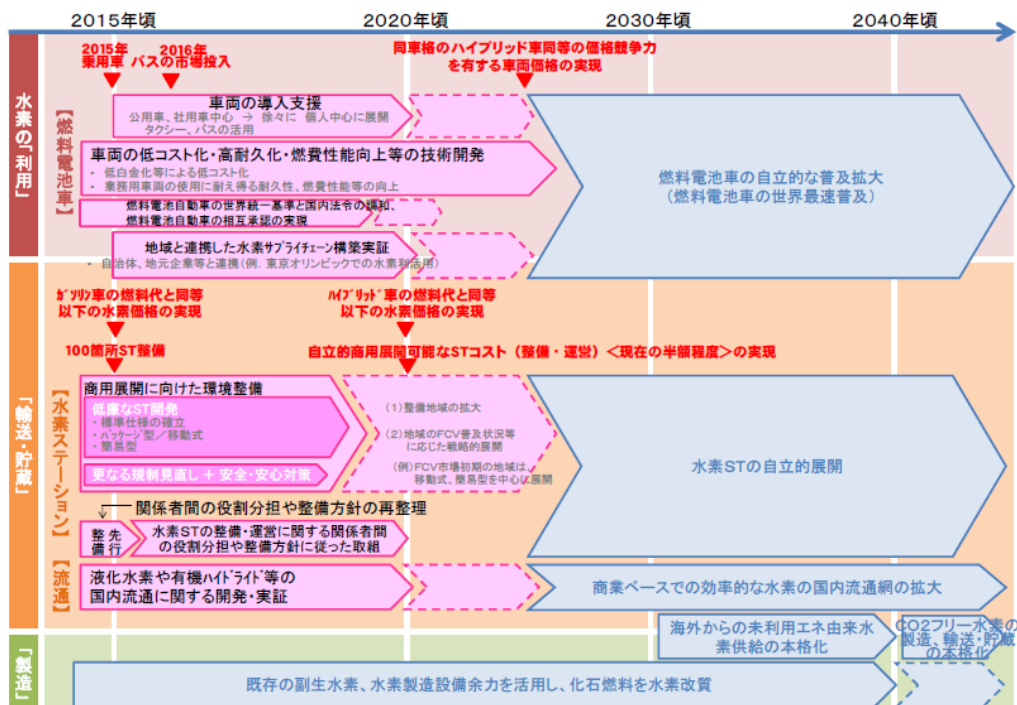
1. 第一階段(現在)：在政府與民間合作下，氫能應用呈現跳躍性擴大。日本 2015 年開始擴大目前已經步入實用化的定點燃料電池及燃料電池車之應用，在氫能燃料電池領域中搶得先機，獲得全球市場。
2. 第二階段（正式採用氫能發電/確立大規模的氫能供應系統）：預計 2020 年後期達成。在政府與民間持續推動下，新能源產業技術總合開發機構預測氫能需求將持續擴大，氫能來源並可以擴大至未善加

利用之能源，確立起既有的「電能/熱能」加上「氫能」的新二次能源構造。

3. 第三階段（確立無二氧化碳排放的氫能供應系統）：2040 年達成氫能製造與碳捕獲與儲存(Carbon Capture and Storage，簡稱 CCS)組合，活用生質性氫能，確立總和上無二氧化碳排放的氫能供應系統。

而針對燃料電池車輛推廣方面，小客車用的燃料電池已在 2015 年如日本政府規劃上市，燃料電池公車也將隨後投入市場，燃料電池並計畫延伸至堆高機、船舶等領域。從 2015 年至 2020 年中期，燃料電池車的發展方針有三，如圖 2-8 所示^[5]。

1. 輔導國民採用燃料電池車：起先以公務車、公司用車為主，逐漸擴散至個人用戶，應用於計程車、公車等。
2. 研發燃料電池車低成本、高耐久、提升效能的技術：譬如減少白金使用量以實現低成本化，並提升車輛的耐久性及耗能，使燃料電池車可做為日常使用。
3. 整合日本國內法令，符合燃料電池車的世界統一標準達到全球規格互通。



資料來源：氫能/燃料電池戰略 Road Map (<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>)

圖 2-8 日本燃料電池發展規劃

所謂法規上的障礙，係指有關應用氫氣之產品在製造、運輸、分送、儲存和使用上的安全問題，是否有適當的法規(Codes)與標準(Standards)加以規範，讓工程師、製造商、消費者及政府主管機關有所遵循(如圖 2-9 所示)。由於法規與標準，在推動氫能科技或燃料電池相關產品的商業化時，會有以下的效益，並克服一些非技術性的障礙，所以受到美、日等國家高度之重視。而日本政府提出制定法規目的如下^[5]：

1. 節省開發之人力、時間和金錢，確保技術之效益，以促進產品製造和服務等相關產業建立。
2. 防止不安全產品進入市場，保護人員的安全。
3. 使一致性的產品測試與驗證，實現多邊認可和促進國際貿易。



資料來源：氫能/燃料電池戰略 Road Map (<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>)

圖 2-9 燃料電池相關法規

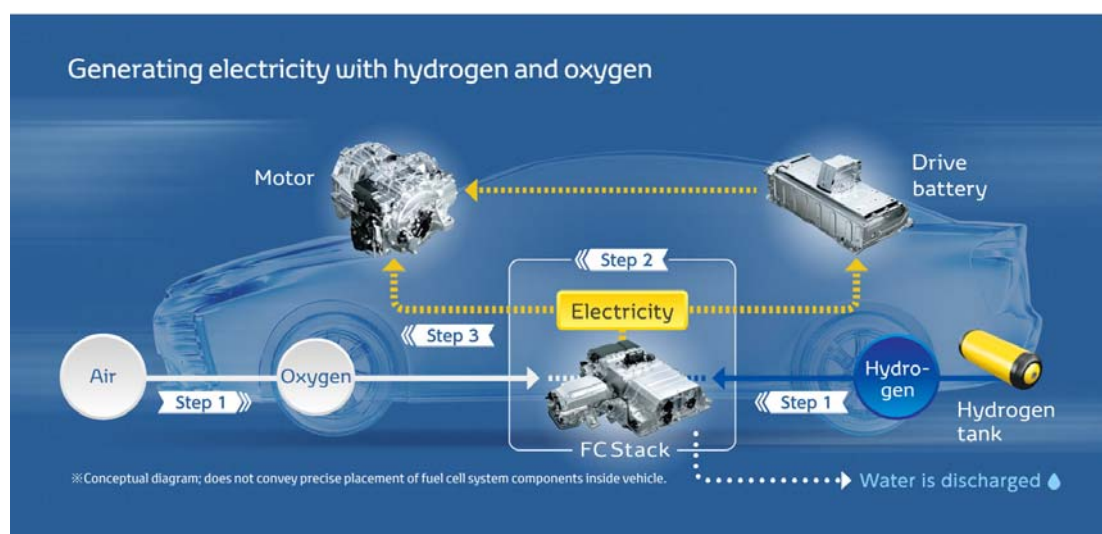
統計日本投資在氫能與燃料電池的研發經費，多年來大致都維持 300 億日圓以上，經費比重與美國能源部投資約略相當。不過美日等國的民間投資，尤其是汽車廠的研發投資也相當龐大，更勝於政府的研發投資。

豐田汽車於 2014 年底推出名為「MIRAI」的燃料電池車，其在日本 2015 年的目標銷售量設定為 400 輛。2015 年初豐田汽車為了吸引參與，宣布將無償提供 5,680 件燃料電池相關專利，藉以加速燃料電池車的普及。豐田汽車

無償提供的專利包括燃料電池組 3,350 件、高壓氫氣槽 290 件以及加氫站 70 件，豐田汽車宣稱此項措施將持續執行至 2020^{[13][14]}。

「MIRAI」行駛時不會排放二氧化碳，利用氫氣與氧反應產生電力 以作為驅動車量的力，故僅會排放水(如圖 2-10 所示)，豐田汽車宣稱「MIRAI」為終極的環保車。

「MIRAI」使用 2 個儲氫槽，常態操作壓力 70MPa，因此每次充填氫氣僅需 3 分鐘，與燃油車之加油時間相當，1 次充填可行駛 650 公里，豐田汽車宣稱最大車速達 175 公里/小時，車身尺寸長 4,890 公釐、寬 1,815 公釐、高 1,530 公釐，車體重量 1,850 公斤，可乘坐 4 人，在日本的含稅售價約 723.6 萬日圓，而在日本政府補貼下，用戶所負擔費用約為 520 萬日圓。「MIRAI」最大的特點 為將燃油引擎置換成電動馬達，汽車的油箱亦置換儲氫槽，改變了汽車的組成與零組件^[14]。



資料來源：<http://www.toyotasingapore.com.sg/technology/environmental-technology/fuelcell-vehicle/#nogo>

圖 2-10 TOYOTA MIRAI 驅動原理

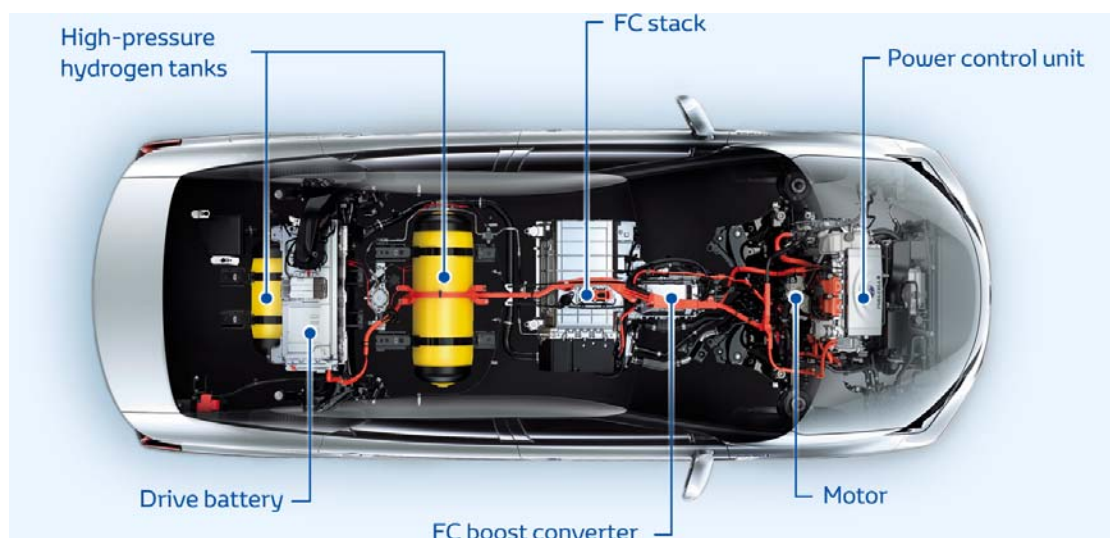
為避免車輛遭受衝撞時體變形導致燃料電池組與高壓氫氣槽毀損，「MIRAI」採取了下列 3 項安全措施^[14]。

1. 防漏氣措施為高壓氫氣槽由 3 層結構組成，表層為玻璃纖維強化塑膠、中層為碳纖維強化塑膠、內層為塑膠襯，具有優異強度與耐久性。
2. 安全措施為每輛「MIRAI」配備氫氣檢測器，一旦到外漏或車輛遭

受衝撞時，「MIRAI」將立即切斷氫氣供應，氫氣不足時亦會發出警訊。

3. 「MIRAI」使用易排氣結構：「MIRAI」將氫氣相關組件設置在車體外，整體設計為氫氣易排放於車外的結構(如圖 2-11 所示)。

「MIRAI」係使用碳纖維材料以實現燃料罐輕量化的需求。而在燃料電池車上路後，豐田汽車宣稱其可能帶動加氫站和儲氫設施進一步建設，而豐田汽車也計畫將氫氣燃料小客車附屬設施與巴士和推高機的共用。



資料格式：<http://www.toyotasingapore.com.sg/technology/environmental-technology/fuelcell-vehicle/#nogo>

圖 2-11 TOYOTA MIRAI 系統配置

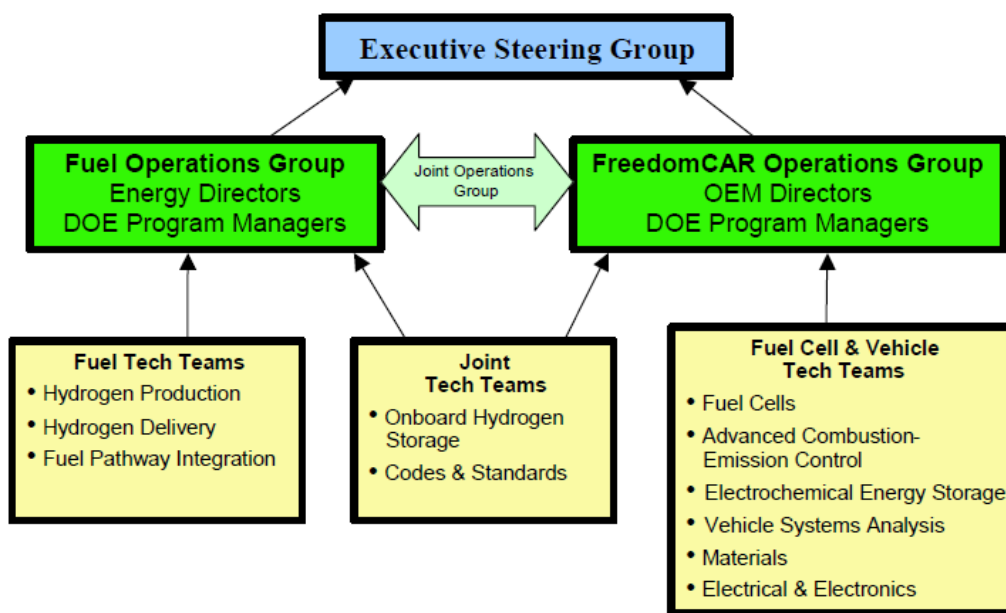
在日本，燃料電池車受到政府的大力支持，日本政府將 2030 年定為燃料電池車普及年。希望能提高燃料電池汽車的普及率到 20% 以上。為了實現此一目標，除了大力支持燃料電池汽車的各項配套設施，也希望到 2020 年能在全日本建造 350 座加氫站，遠程目標到 2030 年增至 8,500 座。

並不是每一家國際大廠都對燃料電池前景表示樂觀，舉例來說首先通用汽車此次並未參加，該車廠率先發展 70Mpa 高壓儲氫技術，所屬的 HydroGen3 FCV 首先從 2003 年與 FedEx 開始在京都進行一年的包裹快遞服務，為日本第 1 個商用燃料電池示範車隊，而德國福斯汽車更認為燃料電池車輛 10 年內無法推廣至日本以外。

2.3.2 美國

美國氫能的發展主要由能源部所主導，布希總統在 2000 年時，政府執

行 FCFP(Freedom car and Fuel partnership)計畫推動燃料電池車的汽車實用化。在 2005 年通過能源法案 (EPA 2005)，預計到 2020 年時投入超過 37 億美元在研發、測試。能源部同時也在 2007 年到 2009 年間，投入 1,120 萬美元資助 13 項的氫能技術研究計畫，並由美國三大車廠及聯邦單位組成「Freedom CAR Fuel Partnership」，如圖 2-12 所示。Freedom CAR 計畫是由美國能源部與美國汽車研究理事會 (USCAR) 提出的一項合作開發經濟上的氫氣燃料電池汽車技術及相關氫氣供應基礎設施技術的合作研發項目，可以說是美國新一代汽車夥伴計畫(Partnership for a New Generation of Vehicle, PNGV)的更新版，推動以氫為燃料的燃料電池車之開發為目的的計畫；該計畫除了提高轎車、卡車效率、降低運輸成本及降低廢氣污染外，更期望能藉此降低對海外石油的進口比例，以提高美國在能源安全上的保障。因此，在開發燃料電池的同時，美國政府也將全力扶持該國對於可再生能源中提取氫的相關研究，該計畫原定於 2010 年將燃料電池成本降低至每度 30 美元/KWh，惟受技術發展不如預期，延遲此項目標^[13]。



資料來源：https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/fc_fuel_partnership_plan.pdf

圖 2-12 Freedom CAR Fuel Partnership 組織

美國燃料電池車主要發展地點在加州，加州提出零排放量汽車(zero emission vehicles, ZEV)。加州政府報告顯示在美國加州中，可以依附現有加油站的硬體設施，進行氫燃料的儲存和加氫服務，進而實現更廣泛、更便捷

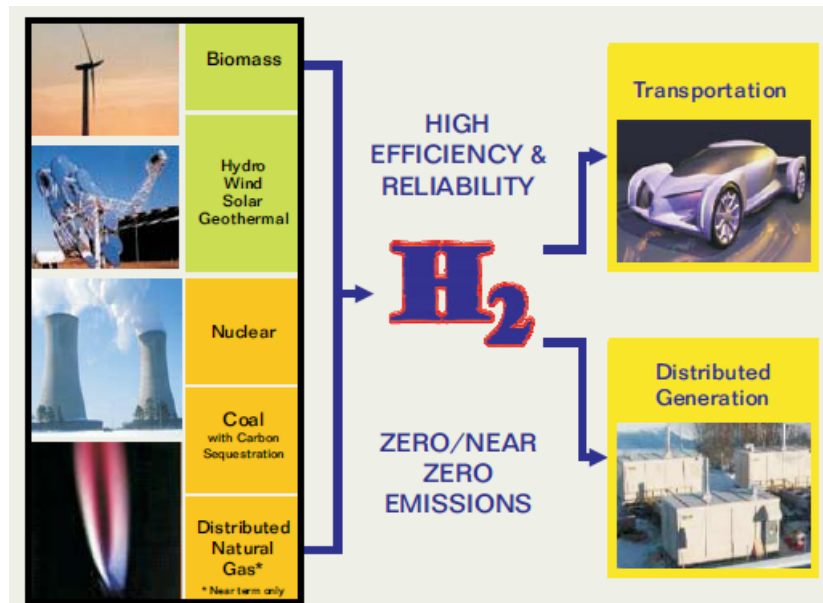
的加氫站的設置。這份報告研究了加州目前的 70 個商業加油站，確認在國家消防協會(NFPA) 2011 年所制定的氫能技術規範(NFPA 2, Hydrogen technology code)指導下，加油站整合加氫站的可能性。

國家消防協會在報告中，評估 70 家加油站中有 14 家可以順利實現加氫站的整合，17 家在硬體設施擴建後能夠進行加氫站的整合。在科學、風險資訊的分析將有助於加氫站與現有商業化加油站的整合，正是科學、風險告知的分析才促成了 NFPA 2-2011 的制定，目前也認為相比其他常規工業易燃氣體，氫氣的安全係數更高一些，風險較低。而氫能的需求也使加州政府預計在 2016 年投入一億美金來建造加氫站。預計在 2016 年秋天建立 25 個全新的氫能源補充站點，屆時將有能力滿足 4,000 輛燃料電池車的使用需求。而加州政府為提升燃料電池車使用意願，考慮提供的補貼是電動汽車的兩倍。加州空氣資源委員會曾在 2012 年預計，未來道路上的氫燃料汽車數量最終將超越電動汽車，但到目前仍未有實現的跡象^{[16][17]}。

在氫經濟方面，2002 年，美國能源部建立氫、燃料電池和基礎設施技術規劃辦公室，提出「向氫經濟過渡的 2030 年遠景展望報告」(A National Vision of America's Transition to a Hydrogen Economy—To 2030 and Beyond)。其目的是為了降低氫能源的成本，研究有效的氫存儲以及氫燃料的供給。2003 年 1 月，美國布希總統宣佈啟動總額超過 12 億美元氫燃料計畫，該計畫的核心目的在於降低美國對國外石油的依賴性，促進美國國內能源資源可持續的多樣化應用，降低能源生產和 CO₂ 的排放，增加發電的可靠性與效率。該計畫所涉及的研究領域包括氫氣的製造、運輸、儲存、氫燃料電池、技術認證、教育、標準法規、安全、系統集成與分析等領域，並且針對上述研究領域分別提出研究的具體目標，主要研究目的在於降低製氫、儲氫和運輸成本，降低車載質子交換膜燃料電池的成本，完善製氫系統的技術認證，完成氫燃料電池車的技術標準制定，出版有關安全規程的手冊，確立有關氫經濟與燃料電池技術的教育普及運動^[19]。

在美國的大力推動下，2003 年，由美國、澳洲、巴西、加拿大、中國大陸、義大利、英國、冰島、挪威、德國、法國、俄羅斯、日本、韓國、印度、歐盟委員會等國在華盛頓成立「氫經濟國際夥伴計畫」(Hydrogen and Fuel Cells in the Economy, IPHE)，顯示國際社會在發展氫經濟上已初步達成共識，也為美國發展氫經濟提供國際合作的基礎。

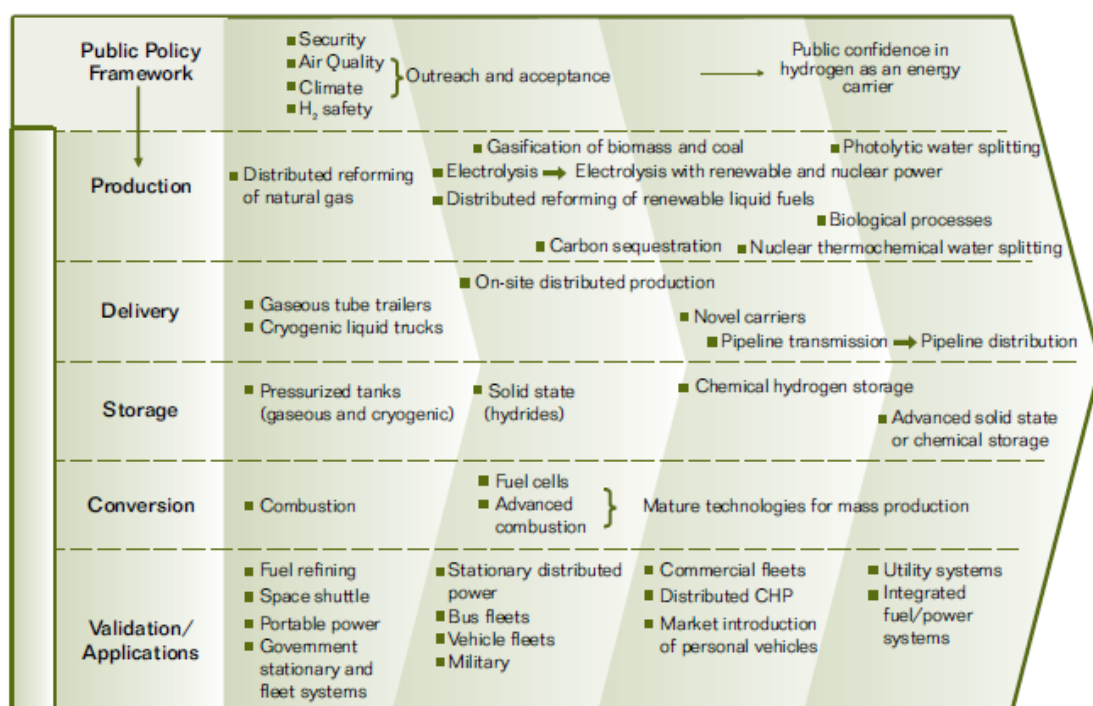
2005 年美國能源部公佈了「氫能發展計畫-技術研究、開發與示範行動」(Hydrogen Posture Plan-An Integrated Research, Development, And Demonstration Plan)。該計畫制定了發展“氫經濟”的步驟和向“氫經濟”過渡的時間表，確定了在發展氫經濟初始階段的技術研究、開發與示範的具體內容和目標(如圖 2-13 所示)，以及相關後續行動等。該計畫宣示美國發展“氫經濟”已從政策評估、制定階段進入到了系統化實施階段^[16]。



資料來源：“Hydrogen Posture Plan-An Integrated Research, Development, And Demonstration Plan,” U.S.DOE,(<http://www.chinaev.org/html/qnjs/html/bzfg/20050112ycgh.pdf>)

圖 2-13 美國氫能發展計畫重點

氫能發展計畫-技術研究、開發與示範行動內容十分廣泛，由燃料電池研發、氫氣燃料研發、製造技術研發、系統分析、技術實證(安全、準則、標準測試)、開創市場與推廣，同時並支援能源部國家再生能源研究所其他的實證計畫(如圖 2-14 所示)^[16]。



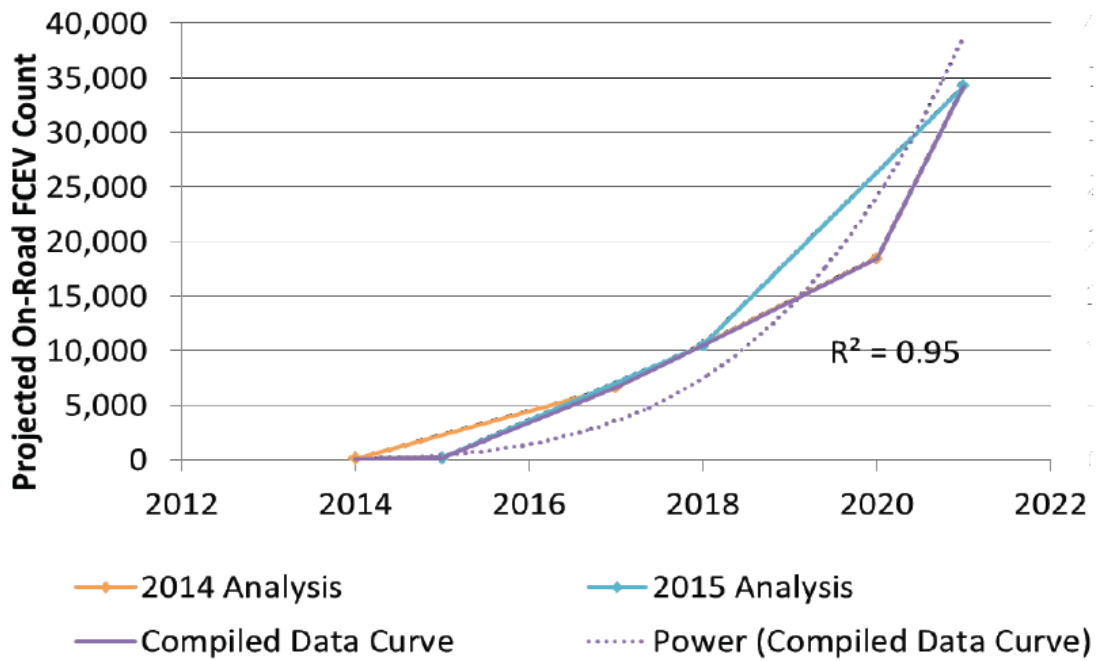
資料來源：“Hydrogen Posture Plan-An Integrated Research, Development, And Demonstration Plan,” U.S.DOE,(<http://www.chinaev.org/html/qnjs/html/bzfg/20050112ycgh.pdf>)

圖 2-14 美國氫能發展計畫

然而，隨著美國特斯拉電動車與通用汽車增程式電動車發展的成功，美國歐巴馬總統一度宣布大幅削減用於燃料電池車輛研究的聯邦預算，取消前任總統布希 12 億美元的氫能汽車項目提議，並將投資於燃料電池和氫能技術的預算削減 50% 以上，但美國國會隨即否決歐巴馬總統有關削減氫能經費案，確定美國政府持續發展燃料電池車輛。

目前美國只有加州訂定了明確的燃料電池車普及以及氫氣站環境建構計畫，加州已導入零排放汽車(Zero Emissions Vehicle, ZEV)規範，大力推動燃料電池車。此外，由加州能源委員會(California Energy Commission, CEC)經費支援的官方與民間合作組織-加州燃料電池夥伴(California Fuel Cell Partnership, CaFCP)，以改善空氣品質為目標，結合加州大氣資源局(Air Resources Board, ARB)，共同推動氫能基礎設施的設置^[15]。

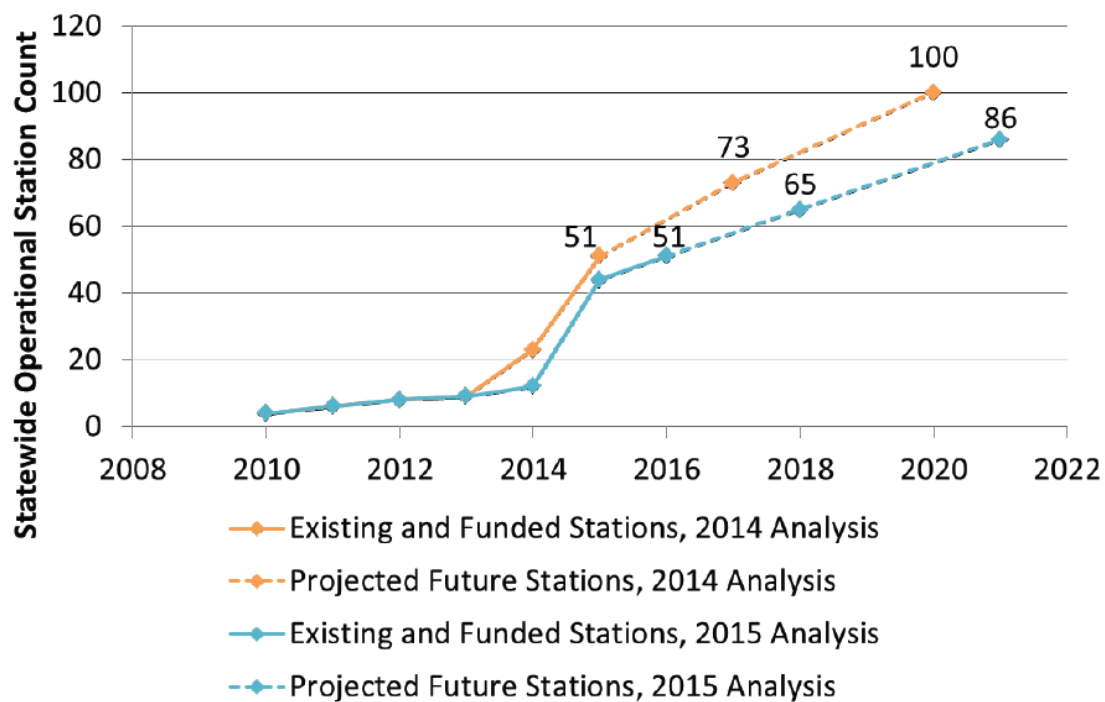
CaFCP 根據對加州車商進行問卷調查，2014 年推估至 2017 年時加州將導入約 5,300 輛的燃料電池車(如圖 2-15 所示)。隨著目前發展不如預期，2015 年重新修正預測^[15]。



資料來源：http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2015.pdf

圖 2-15 CaFCP 燃料電池車數量預測

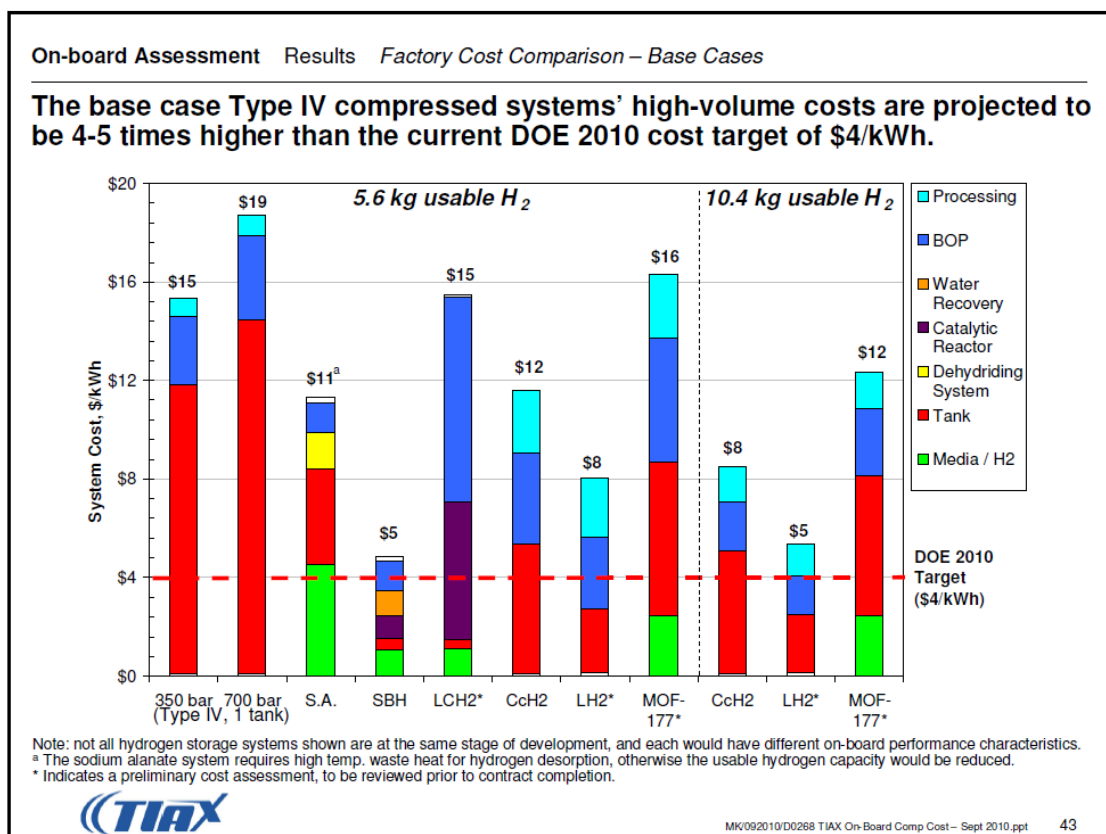
根據此項預測，CaFCP 於 2015 年發表的「加州發展藍圖」中指出：至 2016 年，加州需設置 68 處氫氣站，隨著燃料電池車的普及，2017~2018 年時需有 100 處氫氣站。加州每年將編列 2,000 萬美金的預算設置加氫站，直至境內加氫站數量達到 100 處。同樣隨著目前發展不如預期，2015 年重新修正預測至 86 處(如圖 2-16 所示)^[15]。



資料來源：http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2015.pdf

圖 2-16 CaFCP 加氫站數量預測

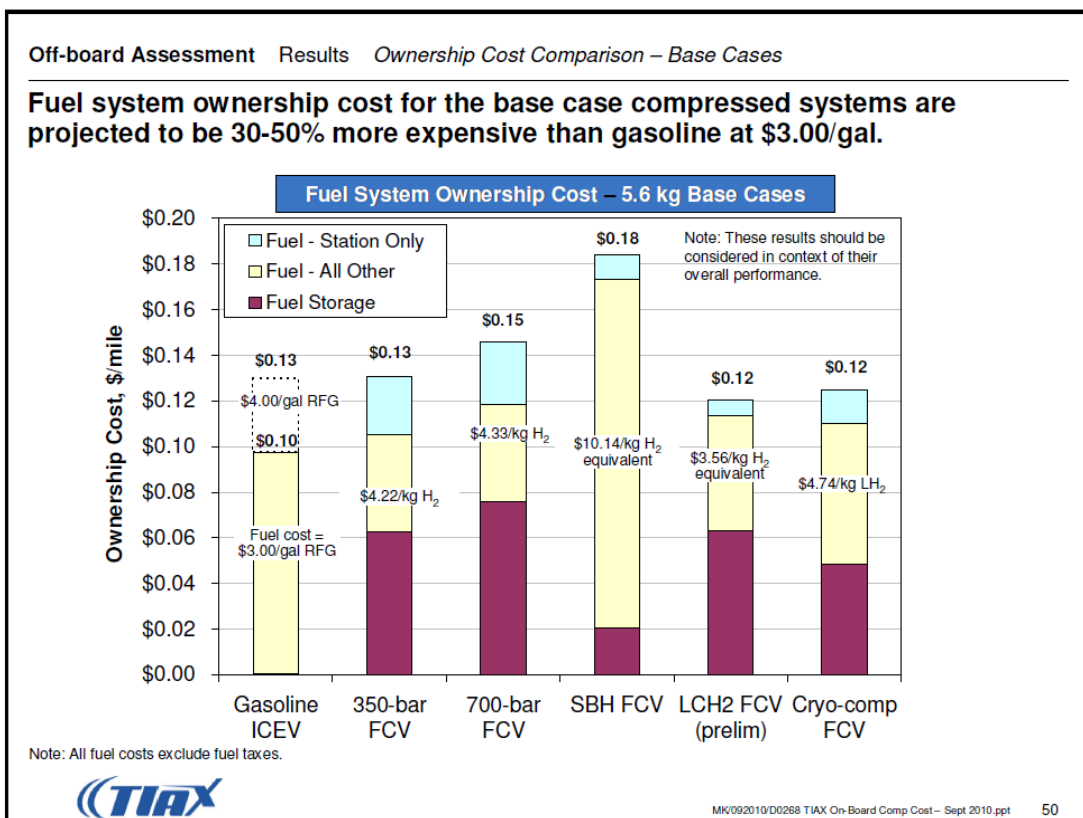
美國能源部依據實際燃料電池發展狀況，於 2014 年檢視 2007 年相關預測，原本預期到 2010 年，燃料電池車輛上每度電(KWH)成本將降至 4 美元，但到了 2013 年，除了固態儲存技術，包括高壓、液態、金屬吸附及化學儲氫等方式成本均超過預期 2 到 3 倍(如圖 2-17 所示)，而固態儲存技術必須在高溫下執行，目前尚無法應用於車輛^[15]。



資料來源：http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2015.pdf

圖 2-17 燃料電池發電成本

另外，以行駛效益而言，不同技術的燃料電池車輛每行駛 1 英里成本較所設定之 2010 年目標成本仍高出 30%~50%(如圖 2-18 所示)，甚至比傳統燃油車輛於油價每加侖 3 美元時成本要高，更何況在 2015 年，美國油價每加侖已逼近 1 美元^[15]，因此在目前技術條件限制下，燃料電池車輛行駛成本仍遠高於傳統燃油車輛。



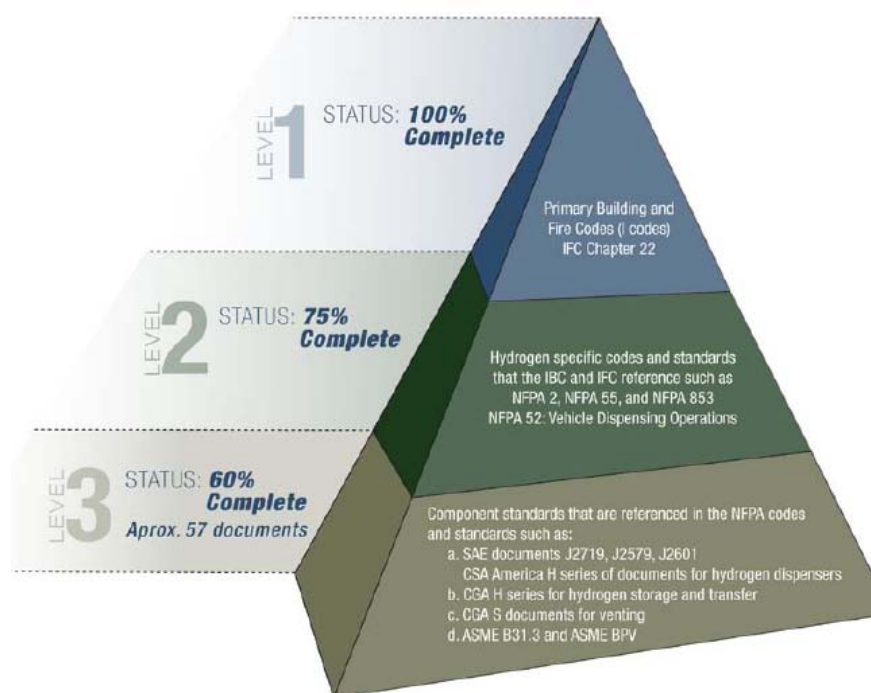
資料來源：Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications, Argonne National Laboratory

圖 2-18 燃料電池與燃油車輛每英哩成本比較

氫能發展雖然不如預期，美國地方州政府仍積極投入，2013 年加州與其他 7 個州簽署合作備忘錄，計畫至 2025 年導入 330 萬輛零排放車輛。零排放車輛包含燃料電池車、電動車、插入式油電混合車。特別是以紐約州為首的東北部各州，積極導入燃料電池車，以沿岸的大都市為中心，進行了基礎設施的環境建構計畫。此外，在夏威夷州，GM 與美國能源省、國防部合作，除了將燃料電池應用於軍事用途外，並同步進行應用再生能源(風力、地熱等)生產氫氣的計畫^[16]。

美日早在十幾年前就開始合作於國際上制定燃料電池的標準及各種安全法規，目前標準法規的制定，主要分成燃料電池技術與氫氣技術兩大部分，分別由國際電工委員會 (International Electrotechnical Commission, IEC) 之技術委員會 TC105 和國際標準組織 (International Organization for Standards, ISO) 之技術委員會 TC197 負責，對於燃料電池術語、模組、定置型系統、輔助動力裝置、可攜式系統等，與氫氣規格、偵測器、系統安全、製造、儲存等標準加以制定。此外，有關燃料電池車輛的安全測試標準，則以美國汽

車工程師學會（Society of Automotive Engineers, SAE）為主，成立燃料電池標準委員會制訂相關標準，以回應生產者、使用者、消費者和管理者在燃料電池運輸上之安全要求，並且建立燃料電池動力車輛的標準和測試程序，涵蓋車輛用燃料電池系統的安全、性能、可靠度和回收性(Recyclability)，並強調效率和環境的衝擊。這些標準也將建立測試程序，使車輛、系統、零件之性能測試結果有一致的比較基礎，並定義系統間的介面需求。目前仍有約 57 項標準文件在進行討論，尋求共識(如圖 2-19 所示)^[17]。



資料來源：Evaluation Protocol for Stationary Fuel Cell Power Plants, National Evaluation Service, Inc.,2014

圖 2-19 美國氫能相關法令制定狀況

另外一方面，新的公私部門合作為 H2USA 計畫，集合美國能源部與日本三大車廠、通用汽車、Daimler、韓國現代參與此計畫。主要聚焦於四大方面在加氫站設置，氫經濟發展，氫經濟工作小組，氫能區域發展藍圖。另外有鑑於多餘的頁岩油氣有可能可以降低氫氣製造的成本，美國能源部、通用汽車、麻省理工等 20 個官方與民間組織均投入汽油重組器的研究，解決氫氣製造、運輸、儲存的問題，使得氫能社會有機會在美國站一席之地。

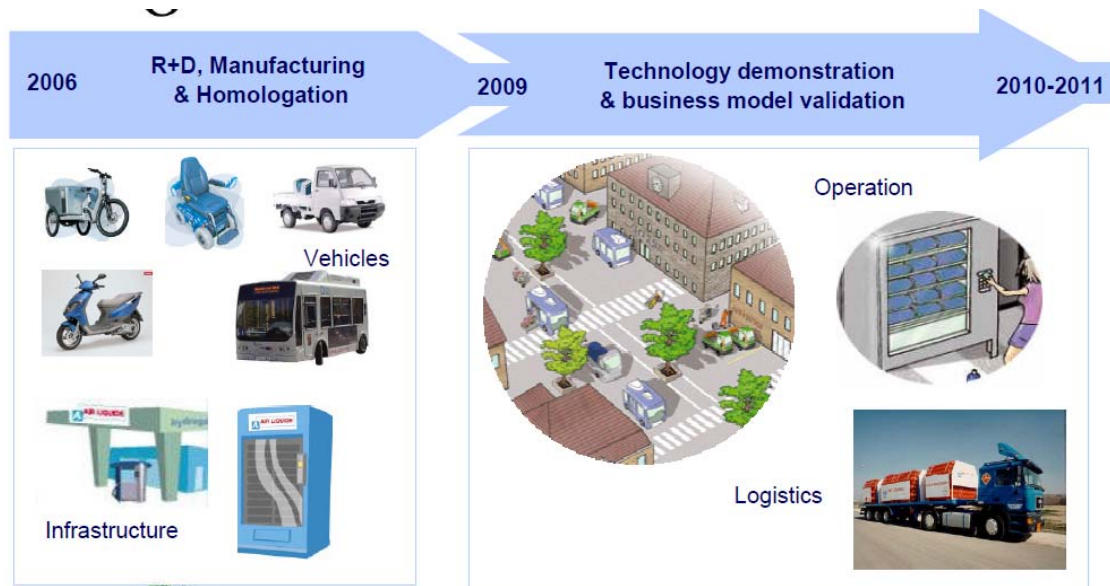
2.3.3 歐洲

歐盟在 2008 年啟動公私部門合作的氫能/燃料電池計畫「燃料電池暨氫能共同執行機構(FCH JU-Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking)」，至 2013 年已導入 49 輛燃料電池公車以及 37 輛燃料電池汽車，並設置 13 處加氫站。2014~2020 年進行第二階段的 FCH JU-「FCH2 JU」。2013 年啟動隸屬歐洲交通網環境建構計畫(TEN-T：Trans-Europe Transport Network)的「交通通用氫能基礎建設計畫(HIT-Hydrogen Infrastructure for Transport)」。2015 年完成 FCEV 與加氫站技術改良與驗證。

在示範研究方面，歐盟推動 FP6(6th Research And Development Framework Programme of the EU)及 FP7(7th Research And Development Framework Programme of the EU)計畫執行氫燃料示範驗證及大規模氫能示範計畫。FP 系列計畫投入超過 20 億歐元，延伸超過 15 項子計畫執行，希望 2017 年建置 30 座示範氫氣站及 3,000 燃料電池車，希望 2020 年成員國燃料電池車占新車總量 5%。

參考歐盟各國的計畫，於丹麥、荷蘭設置加氫站。2013 年同時啟動的「交通清潔能源組合(CPTP-CleanPower for Transport Package)」，整合目前已有加氫站的國家，預計在 2020 年時將氫能基礎建設拓展至全歐。

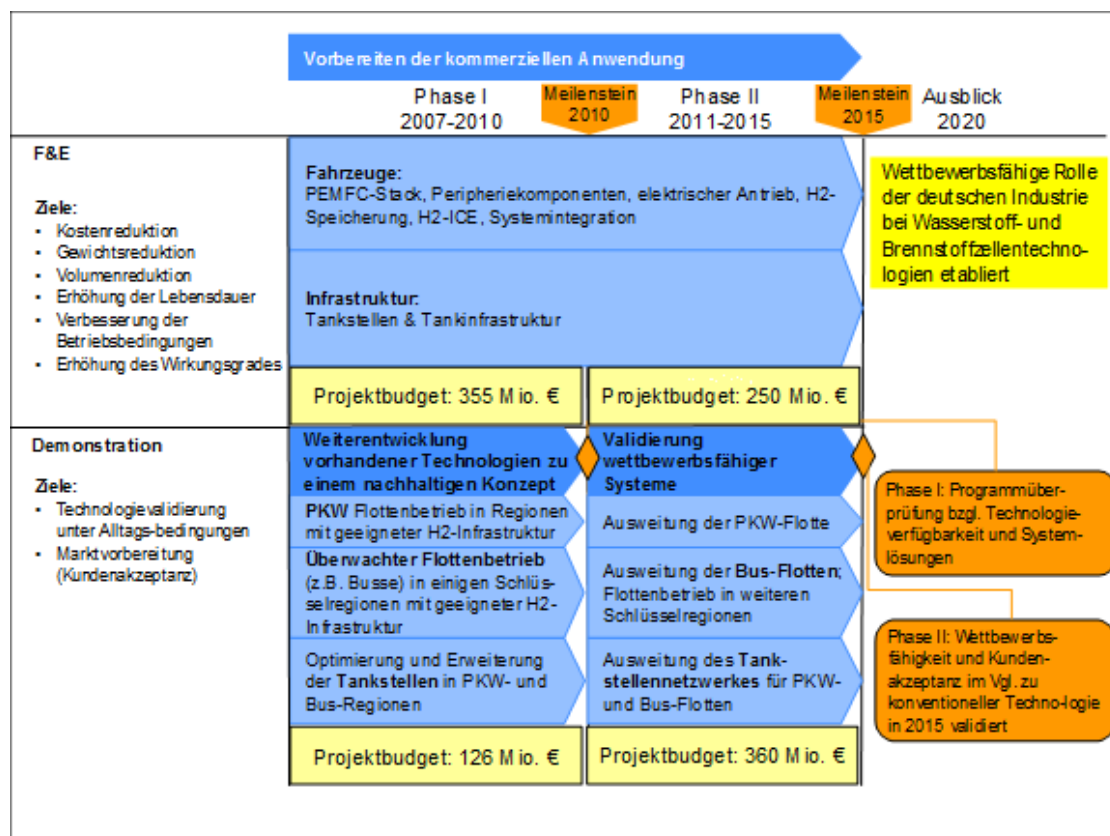
歐盟另於 2006-2011 年間執行 HyChain Minitrans 計畫(如圖 2-20 所示)，共有 24 個企業參與，HyChain Minitrans 計畫第 1 階段係研發氫能車輛，第 2 階段於德國、法國、西班牙及義大利發展氫能交通系統，HyChain Minitrans 計畫共有 158 輛小型燃料電池運輸車輛加入試運行，在法國、西班牙、德國及義大利 4 個地區運行，專門給巡邏、郵政、清潔市容、養老院等政府機關使用。當地政府也積極建立氫氣基礎設施，使用的加氫方式是以販賣機的方式進行氫氣罐的交換，這個計畫也培訓了不少燃料電池車駕駛員與技術人員。歐盟方面認為這種輕型燃料電池車搭配氫氣交換罐的方式，將比汽車系統更快商業化。



資料來源：https://www.iit.upcomillas.es/cessa/presentaciones/Juan_deBlas.pdf

圖 2-20 HyChain Minitrans 計畫

德國以聯邦交通、建築暨都市事務部(BMVBS)與聯邦經濟技術部(BMWi)為中心，推動氫氣、燃料電池技術革新計畫(Nationales Innovations programm Wasserstoff und Brennstoffzellen technologie,NIP)。根據 NIP 計畫，2007~2016 年的 10 年間將投入 14 億歐元(官民各出資一半)於氫能、燃料電池技術的開發(如圖 2-21 所示)。該計畫預計在 2007-16 十年間投入 14 億歐元進行市場準備、研發與示範，其中 54%的經費將用 在交通應用（包括氫氣生產與加氫站建造）上^[18]。



資料來源：https://www.iit.upcomillas.es/cessa/presentaciones/Juan_deBlas.pdf

圖 2-21 德國 NIP 計畫

而由創新計畫支持成立的潔淨能源企業聯盟（Clean Energy Partnership, CEP）於 2002 年開始行動，主要目標是要透過驗證，讓氫氣作為交通運輸燃料可以真正商業化。參加車廠包含 BMW、福斯、福特、通用、豐田等。到 2010 年為止已經在柏林實施至第二階段。（第一階段：2003 至 2007 年，包含 25 輛車、2 座加氫站與一座分散式產氫站之設立。第二階段：2008 年至 2010 年止，專注於各種使用狀況下的技術驗證，車隊車輛增加到 40 輛（包含巴士），在柏林與漢堡地區共新增 3 座加氫站。第三階段於 2011-16 年進行，為量產商業化作準備。2009 年 9 月，多家廠商在德國宣示要在 2015 年讓氫能燃料電池車正式量產上路。雖然幾乎所有的汽車公司都發展燃料電池電動車，但以發展內燃機著名的 BMW，卻不發展燃料電池車，而是發展讓內燃機燃燒氫氣（車內裝填液態氫）的 BMW Hydrogen 7，這種氫氣車早在 2006 年就已經開始在慕尼黑機場附近進行示範運行^[44]。

在 Clean Urban Transport for Europe(CUTE, 2001~2006)專案成功研發出氫燃料電池公車後，目前有 200 輛氫燃料電池公車在歐洲試行，歐盟希望透

過 HyFleet CUTE 的計畫，使歐洲成為全球最大的氫燃料電池公車使用區域。

另一個歐盟跨國計畫為 Daimler 之 GR/V (Group Research and Advanced Engineering Vehicle and Powertrain) FCEV，該燃料電池車隊示範計畫重點為安全、促進燃料電池技術、研究氫能基礎設施，並將提供學術單位能量分析（歐盟合作研究機構進行 Well to Wheel 分析等）^[8]。

在歐洲除燃料電池小客車外，是最早有跨國大規模的燃料電池巴士示範運行，從 2003 年開始，30 輛的燃料電池巴士在歐洲 10 座城市中示範運行。歐盟投入 2,100 萬歐元在該計畫，包括歐聯 9 座城市的歐洲潔淨都市運輸計畫(Clean Urban Transport for Europe , CUTE)，和在冰島的生態城市運輸系統計畫(Ecological City Transport System , ECTOS)，以瞭解燃料電池巴士在不同氣候條件下的運轉狀況；同時也設立 10 座加氫站，分別採用電解水製氫、液態氫、高壓氫氣和重組天然氣等不同方式，提供燃料電池巴士所需的氫氣^[6]。

歐盟對氫氣儲存和運輸偏向以化學方式，目前主要研究方向係使用甲醇，因此甲醇重組研究為目前德國、法國及英國等之國家重點項目。

2.3.4 中國大陸

中國大陸也在大力推進定置型與氫燃料電池車輛的產業化和商轉，並於大連能源科技中心項目正式啟動。2012 年大陸國務院在發佈節能與新能源汽車產業發展規劃(2012-2020 年)時提出包括 FCV、車用氫能源產業與國際同步發展的政策指導。

中國大陸由上汽、一汽、奇瑞、長安等國產車廠主導產學研聯合，形成了具有自主知識產權的燃料電池乘用車和商用車動力系統技術平臺，分別開發出相應的 FCV 產品投入實際示範運行測試。

中國大陸燃料電池乘用車其目標為 2016 年，FCV 平均燃料損耗為 6.9 升/百公里，節能型車為 5.9 升/百公里；2030 年，FCV 平均燃料損耗為 5 升/百公里，節能型車為 4.5 升/百公里。

根據上海汽車發佈的 FCV 規劃，到 2016 年將實現 FCV 產業化，在北京、上海、大連等試點城市上市銷售，計畫生產數量為 1,000 輛。屆時，整車成本將降到 50 萬元人民幣以內。

中國大陸認為氫燃料電池在中小功率領域的應用更具備快速商業化的潛能，市場容量有望達到千億美元。但其發展似乎還是較先進國家為慢。

2.4 小結

目前對燃料電池國外發展狀況，以日本最為積極，日本政府與民間合作，建立各種示範系統，並積極建立國際合作，其第 1 個商轉系統如時程規劃於 2015 年推動上市，日本政府並提供高額購車補助。其次是美國最早投入燃料電池研究，美國能源部就氫能生產、運送、儲存與應用進行完整規劃與研究，能源部並與各相關單位、協會針對對氫能應用建立相當完整的法令規範，並與各車廠進行示範系統合作，在燃料電池車輛推動與補助，其地方政府比中央政府更為投入，提供的補助是電動車的 2 倍。歐盟相對於美國與日本，氫能發展之時程較落後且規模較小，且以定置型應用為優先。歐盟在車輛方面氫能應用，不同於美國和日本優先以小客車為主，歐盟目前其跨國示範系統係以大客車應用為主。

氫能源目前仍需面對氫生產成本過高及過程中使用能源過多而無法達成減碳目的。對此，美國與日本均有以再生能源製氫的相關研究與示範。而在氫氣儲存與運輸不符成本效益問題，世界各國目前均採用高壓儲氫技術，美國未來將發展合金與化學儲氫，日本仍以高壓並結合液化儲氫技術，歐盟重點係以甲醇之化學儲氫技術為主。顯見燃料電池車輛的前景並未在世界上取得共識。

在推動從化石燃料至燃料電池技術之過程中，需要政府來扮演關鍵的角色。這是因為研發的投資是很龐大的，因此早期之世界各先進國家均由政府率先投資，滿足燃料電池技術成本、性能和可靠度的要求，由政府解決許多重要的基礎問題，提供未來目標和分擔風險，是建立燃料電池應用所必須的手段。能源系統之經濟可行性，並將環境等衝擊面亦納入分析。國際間對氫能經濟研究範圍相當廣泛，首先是氫能生產、運輸、儲存、轉換應用，主要的研究議題包括技術成本分析及供給鏈路徑分析，此部分以美國為主，另一個為能源、經濟、環境整合規劃：涵蓋國家層次的能源有效配置規劃，主要的研究議題包括資源配置對氫能供給路徑經濟性影響、不同部門燃料轉換情景模擬分析等，此部分係以日本為主。

第三章 氫氣製造與燃料電池原理

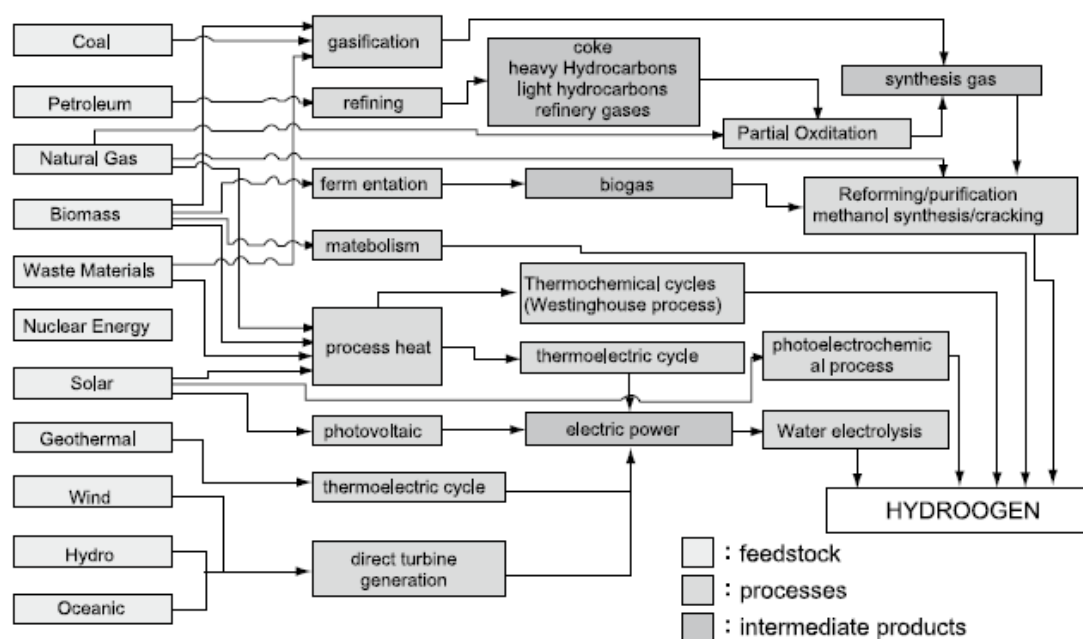
工業革命後的快速發展帶動了經濟繁榮，現在交通工具主要使用內燃引擎，其他機械的運轉和家用能源則非電力莫屬。不管是引擎或電力，最重要的能源是各式各樣碳水化合物燃料，亦即燃油、燃煤或天然氣也就是化石能源，在使用的同時亦產生了空氣污染、酸雨與溫室效應等問題。自從聯合國世界氣候會議發表了京都協議書後，二氧化碳與其他諸如甲烷、氮氧化物等污染氣體的排放量須逐年削減。因此開發新能源產業亦是一項刻不容緩的課題，其中氫能源技術開發與應用將是國際上新興能源產業中最重要發展項目之一，因為氫氣經氧化反應的主產物是水，具有低污染的優點，且氫能屬於二次能源可重複再生利用，自然環境中含量豐富且再生週期短，可不斷循環。

氫原子是自然界裡最小最輕最簡單的原子，宇宙中約 90% 的原子是氫原子，地球上它以水和其他碳水化合物的形式存在。以往氫氣除了用在學理的探討和化學合成外，並沒有太大用途，隨著科技之發展，很多科學家相信 21 世紀的經濟將由目前的碳經濟或石化經濟轉型為氫經濟。

氫氣能源的好處是只要成功的找到從水提出氫氣的方法，它使用之不竭，且燃燒或使用過程時只會排放水氣，不會污染空氣或傷害大氣而造成地球暖化現象。可惜地球上並沒有儲存大量現成的氫氣，它必須用其他能源來製造，以目前主要生產方式仍會排碳，也就是說氫氣能源的使用必須有生產其他再生能源的配套。

3.1 氫的來源

氫能源的特點之一就是氫氣的來源相當多元化，參考圖 3-1，從各種初級能源透過不同的途徑來得到氫氣。



資料來源：A HYDROGEN FUTURE? An Economic and Environmental Assessment of Hydrogen Production Pathways

圖 3-1 氫氣的來源

以原料的來源來區別，氫氣的生產方法可以分為兩大類，一類是由化石原料製氫，另一類則為非化石原料製氫法。目前氫能源製程以蒸汽重組製程最為重要，佔目前氫能製造 96% 以上，所用的原料以天然氣及甲醇為主。這是目前氫氣產製程中耗能最低，最可靠而成本最低的製程。由於前述 2 種原料都屬於化石原料，天然氣本身其蘊藏量比石油來得豐富且低廉。如果把甲烷的水合物算進去，則其蘊藏量更為充足。甲醇的來源除了天然氣之外，可由有機生質或煤炭的氣化生產^[19]。

另以發展時程上來說，氫氣生產技術的研究策略，短期內係以技術成熟的石化燃料作為原料，以重組反應產製氫氣，當前研究目標在達到高重組轉化率、高能源使用效率及可現場(On-site)產氫等方面，譬如薄膜助效重組反應及常壓電漿重組反應。長期研究策略，則是希望以水為進料，搭配再生能源產製氫氣，譬如再生能源發電搭配電解水技術、太陽光電化學法(Photoelectrochemical Method)，及太陽熱搭配熱化學技術。

3.2 傳統化石燃料製氫技術

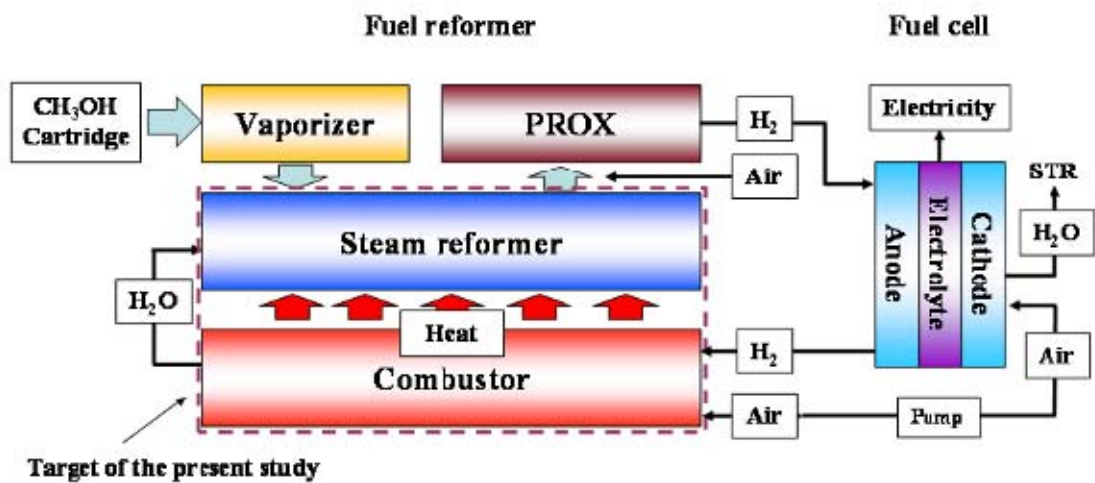
目前所有商業化製氫均採用化石燃料，包括甲醇、天然氣(甲烷,CH₄)為主，占總量 96%以上，主要製程為下列 3 種：

1. 蒸汽重組法：此為製氫技術中最常被使用的製造方法，國內外石化大廠如美國 Air Product、德國 Carbotech 及我國之中國石油、台塑石化等，皆採用此種方式，使用蒸氣與低碳之化石原料（大部分以甲烷為主，即天然氣）反應產生氫氣，提供石油裂解中的加氫脫硫製程之用，產生含有氫氣、一氧化碳及二氧化碳的重組氣。
2. 部分氧化法：不同於蒸汽重組法須由外界供應熱量，部分氧化法可藉由自身氧化反應熱供應重組產氫反應所需的熱量。早期採用固體燃料通入氧氣的方式進行部份氧化，後來改用液體燃料，但因此技術須使用觸媒，缺點為燃料的選擇被限制在一狹窄範圍內；後期開發出不需觸媒的高壓製程，可使用氣體或液體燃料，亦可使用固體燃料，自天然氣、液化石油氣、煤焦、甚至瀝青均可使用。目前此種製程大多為美孚、Texaco Process、及 Shell Process 等國際石油大廠使用。
3. 水煤氣法：先經氣化程序將煤炭轉為以氫氣與一氧化碳為主的合成氣(Syngas)，再利用水移反應(Water-Gas Shift, WGS)，將 CO 與 H₂O 轉為 CO₂ 與 H₂ 產生更多的氫氣。

前述 3 種方式均屬於集中式產氫(Centralization)技術，主要應用於大量生產純氫，經過容器儲存後，可快速補充氫引擎車輛或燃料電池車輛所需之氫燃料，因產出的氫能並非立即使用，因此又稱為離線式(Off-site)產氫；線上產氫(Onboard, On-site)技術則偏向線上直接生產、流量需求較低、氫氣可被立即使用的富氫氣體生產技術。

目前較備普遍採用之重組器製氫為薄膜分離反應器(如圖 3-2 所示)，因為燃料電池使用的鎳觸媒會遭到硫份的毒化，故天然氣在進入重組器之前要先進入脫硫器脫硫，才能開始在重組反應中移除氫氣，氫氣經由選擇性薄膜滲透而分離，使重組反應持續朝向生成物方向前進，此為吸熱反應，須在 650~850°C 的高溫下搭配觸媒才能得到 70~80%的氫氣轉化率。薄膜分離反應器同時具有分離與反應的特點，其優點為突破熱力學上的限制，增加轉化率及改進選擇率另外提高系統總效率，降低操作溫度及減少能源耗損並增加

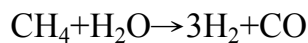
整體經濟效益^[20]。



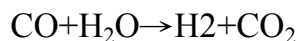
資料來源：http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/hv_report_12-17.pdf

圖 3-2 蒸汽重組法示意圖

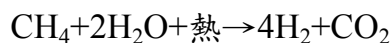
若輸入氣體是天然氣，而重組器的合成氣（Synthesis gas generation）生成反應如下所示



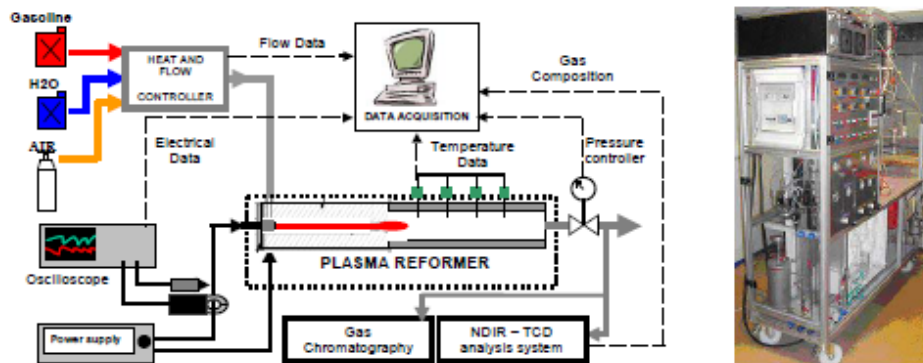
水-氣轉化反應：



總反應：



重組器另外一個發展方向是電漿(Plasma)(如圖 3-3 所示)，而利用電漿做為能量來源則是完全不一樣的概念。電漿是一種富含離子自由基與電子的高溫氣氛。在常壓下，將碳氫化合物之氣體燃料、液態燃料（如汽油、柴油、生質汽柴油和廢油等）與空氣、水蒸氣混合後，通入電漿反應槽內。高溫和高電解離度能破壞碳氫燃料原有的鍵結，形成單原子或自由基等高能離子態，加速有利的化學反應，再重新結合產生氫氣和一氧化碳等主要氣體。未來希望配合高溫電漿火炬(Plasma Torch)，可以裂解固體燃料如生質、農作廢棄物達成重組產氫的效果，可替代石化燃料。



資料來源：Plasma assisted fuel reforming for on-board hydrogen rich gas production, 2010 Adeline Darmon

圖 3-3 電漿重組法示意圖

電漿重組反應的特點在於電漿反應器反應速率快，啟動等待時間極短，因此可以處理多樣的燃料。電漿重組反應器結構簡單且設備成本低廉，並且在過程中不需要重組觸媒，因為電漿是一種充滿活性的離子氣形態，以高溫（攝氏數千度）和高度電解離，在有豐富的自由基幫助下，不需要使用觸媒即可加速重組反應過程，使觸媒毒化的問題得以排除，大幅降低處理觸媒失效所帶來的替換、再生程序與成本的增加^[21]。

但是使用電漿進行重組反應最為人疑慮的就是和傳統薄膜分離反應器需要耗費大量電能，產生的氫氣卻無法補償所耗費的能量。依現有技術，產生常壓電漿不外乎透過 RF 高週波、微波以及大電流直流放電的方式來產生。由於常壓氣體分子數多，因此常壓電漿多是呈現熱電漿(Thermal Plasma)的狀態為主。

3.3 水解製氫

前述產氫方式原料主要來源仍為石化燃料，為徹底擺脫對石化燃料依賴，包括美國、日本、歐洲均發展另一類非化石原料製氫法，以水為來源包括：水電解法（Water Splitting by Electrolysis）、水光電解法（Photo-electrochemical Water Splitting）。

水電解製造氫氣是一種傳統的，而且成熟的製造氫氣的方法，製造設備很簡單，只要將兩個電極，浸泡在電解液中，中間插入隔離氫、氧氣體的隔膜就完成了電解池了。然後當直流電通過兩個電極，電解液中的水就會分解

成氫氣和氧氣。

傳統的水電解法是使用鹼性溶液作為電解液，石棉作為隔離膜，以雙極板的設計方式來電解水，陰極使用鐵板，陽極使用鎳板，因為有過電位的關係，操作電壓為 1.9~2.4V，效率為 47%~64%，若改用多孔性鎳電極以增加反應表面積時，則操作電壓可降為 1.65V，效率 75%。

目前工業上的水電解法係採用固態高分子電解質 (Solid Polymer Electrolyte, SPE) 的電解槽設計，以氟化與磺酸化之強離子交換膜為電解質，類似燃料電池的逆反應，使用白金為電極，操作溫度為 150 °C，電壓 1.6 V，電流密度 100 A/cm²，此種製程的效率約 80% 左右，整個生產流程很乾淨，無污染，而且轉換效率很高，一般都在百分之 75 到 85 左右；但是電量消耗很大，每生產一立方公尺的氫氣，必須消耗電力達 4.5~5.5kW/h 左右，電費支出佔整個生產費用比重達到 80% 以上。如果拿來和從石化燃料提煉氫氣的方法來比較，並不具有經濟上的競爭力，所以水電解製氫佔全球氫氣生產比重，不到 5%。不過，水電解製氫還是有其獨特優點，例如生產出來的氫氣純度高，還有生產規模可大可小，投資規模可依照需要來規劃。此外，對於水力、風力、太陽能資源豐富的地區，或者是城市用電尖離峰落差很大的電網，水電解制氫就是很好的選擇。水電解製氫可以將多餘沒有用到的電能，轉換成氫能的型式儲存，留到需要用的時候再使用。

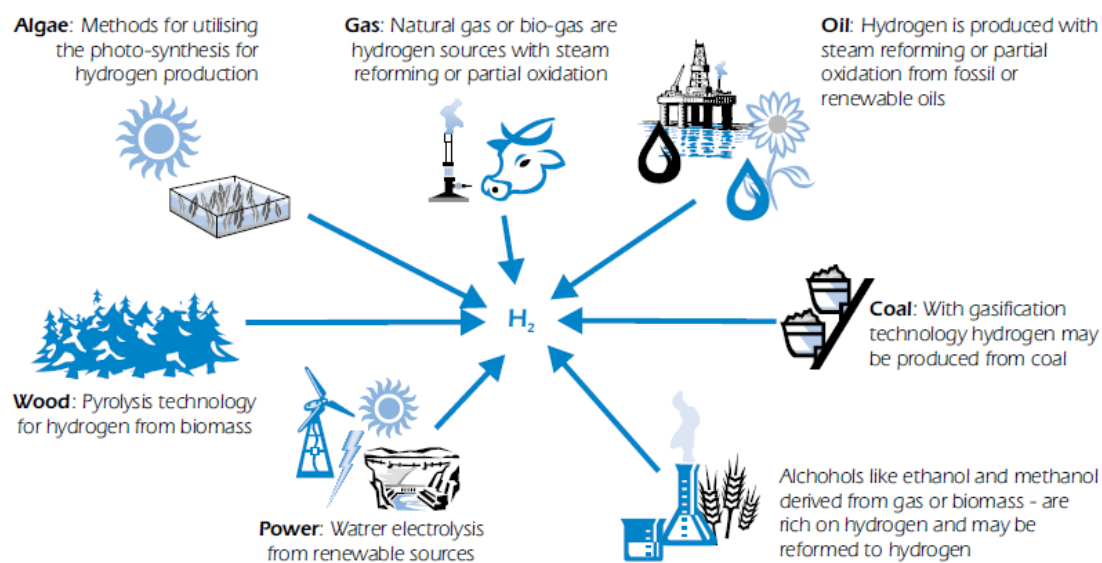
此外，使用煤水電解製氫，也是另一種選擇，這種製程使用加了煤粉或其他含碳物質的煤水漿作為電解液，可以有效的節省電解耗能達到百分之 50 以上。煤水電解製氫缺點主要是除了氫氣之外，還會產出大量的二氧化碳，而不是氧氣，對於環保有相當的壓力。

3.4 再生能源製氫

在氫能與再生能源結合方面，高溫熱解水製氫和熱化學製氫則是目前深受期望的水解產氫製程；有關高溫熱解水製氫，其核心理論簡單來說，就是將水直接加熱到超過攝氏 3,000 度以上，部分水蒸氣就會分解成氫和氧；他的困難度在於操作的溫度太高，熱能來源是重要的大問題，其中太陽能熱系統，則是被期待的可能解決方案。

由於再生能源有供需不穩定的缺點，可將氫氣作為能源載體，將再生能

源轉換為氫氣，再送到需要使用能源的地方，以直接燃燒或是利用燃料電池來發電。在製氫可以利用之再生能源包括水力、風能、太陽光電、太陽熱的方式來提供能量(如圖 3-4 所示)，在國際上目前多數研究以太陽能為主，包括太陽光電搭配電解水技術、太陽光電化學法(Photoelectrochemical Method)，及太陽熱搭配熱化學技術^[22]。



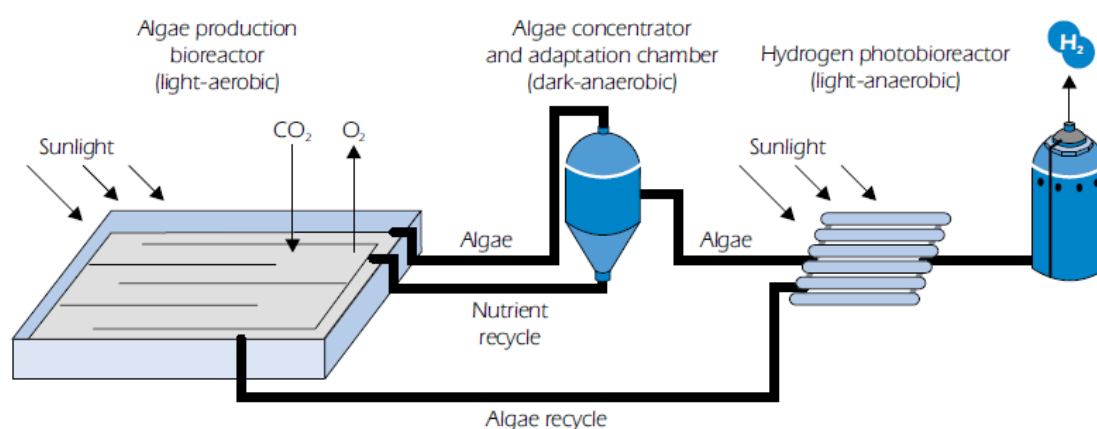
資料來源：HYDROGEN PRODUCTION R&D:PRIORITIES AND GAPS, Trygve Riis

圖 3-4 再生能源製氫

水電解法是靠外加電場將水分解，由於水本身屬熱力學穩定化合物，外加能量來源是必須的，此熱源可來自於核能發電、石化燃料發電或再生能源發電之廢熱，藉由配合電解法，負極產生氫氣，正極產生氧氣。太陽光電搭配電解水技術利用太陽光發電去電解水以產生氫氣，是最容易理解的產氫技術，也是相對成熟的技術。目前國內商業化矽基太陽光電效率可達宣稱可達 25% 以上，而利用半導體多重介面製作的矽基板更可達 32%。搭配使用多孔鎳電極效率可進一步提升。依此估計，現行商業水準的太陽光電搭配電解水技術可達到效率為 10% 左右。

另外一種受注目的技術係太陽光電化學法(如圖 3-5 所示)，其反應式與電解水相同，利用半導體觸媒的能階差，必須跟入射光子的能量相符合以吸收光能，以產生電子電洞對，而價帶和導帶也必須與水的氧化還原電位相

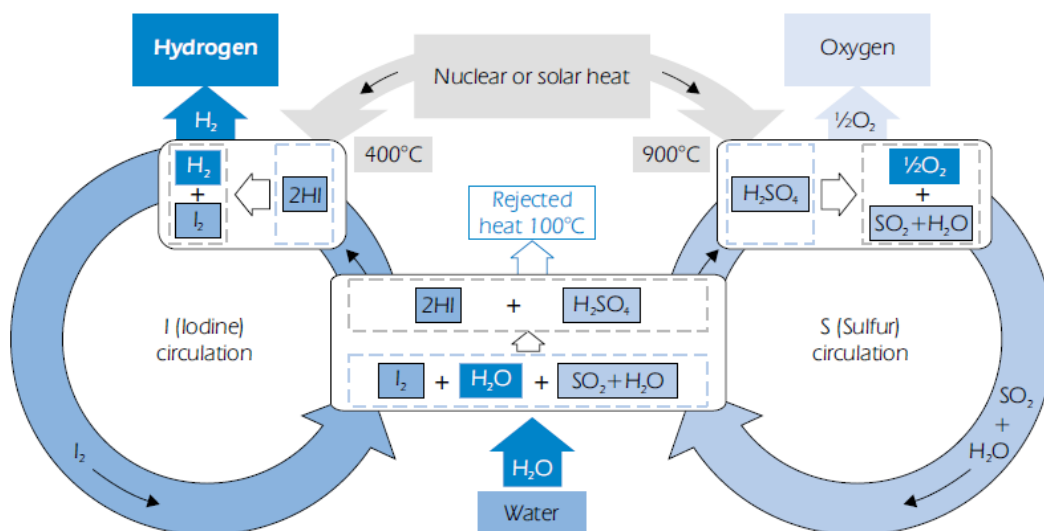
符，才能進行水的分解，如導帶之電子位階不足，無法促使還原反應發生，整個水分解反應就無法發生。因此適當的半導體觸媒必須具備足夠的能階差距(1.6~2.2 eV)與高穩定性；同時其能階與水的氧化還原電位匹配，使得符合要求的半導體觸媒並不多見。目前國際上取得重大突破者為美國國家再生能源實驗室(National Renewable Energy Lab.)，其觸媒採用磷化銦鎵/砷化銦鎵/銻(p-GaInP₂/n-GaAs/p-GaAs)，轉化效率高達 15% 左右，但其成本仍過高，每公斤氫生產成本超過 15 美元，是化石能源製氫 3 倍以上^[22]。



資料來源：HYDROGEN PRODUCTION R&D: PRIORITIES AND GAPS, Trygve Riis

圖 3-5 太陽光電化學法

另外一種發展中的技術係太陽熱搭配熱化學技術，其原理為水加熱到 3,000°C 以上的高溫，部分水會直接分解成氫氣和氧氣，但是直接以化石燃料燃燒產生高溫去分解水，非常不經濟，且高達 3,000°C 的溫度下，反應器與製程設計皆很困難。目前的發展方向是以聚光型太陽熱能或結合核電廠的核能廢熱(如圖 3-6 所示)。提供 800~1,000°C 的溫度，搭配適當之觸媒進行一系列不同但是相互關聯的化學反應，最終將水分解為氫氣與氧氣。使用的觸媒包含金屬氧化物如 Mn、Fe、Co 等金屬氧化物，其效率可達 20% 以上；金屬鹵化物如溴化鈣，此種方式又稱 UT-3 循環，效率可達 35~40%^[22]。



資料來源：HYDROGEN PRODUCTION R&D:PRIORITIES AND GAPS, Trygve Riis

圖 3-6 太陽熱搭配熱化學技術

3.5 製氫成本比較

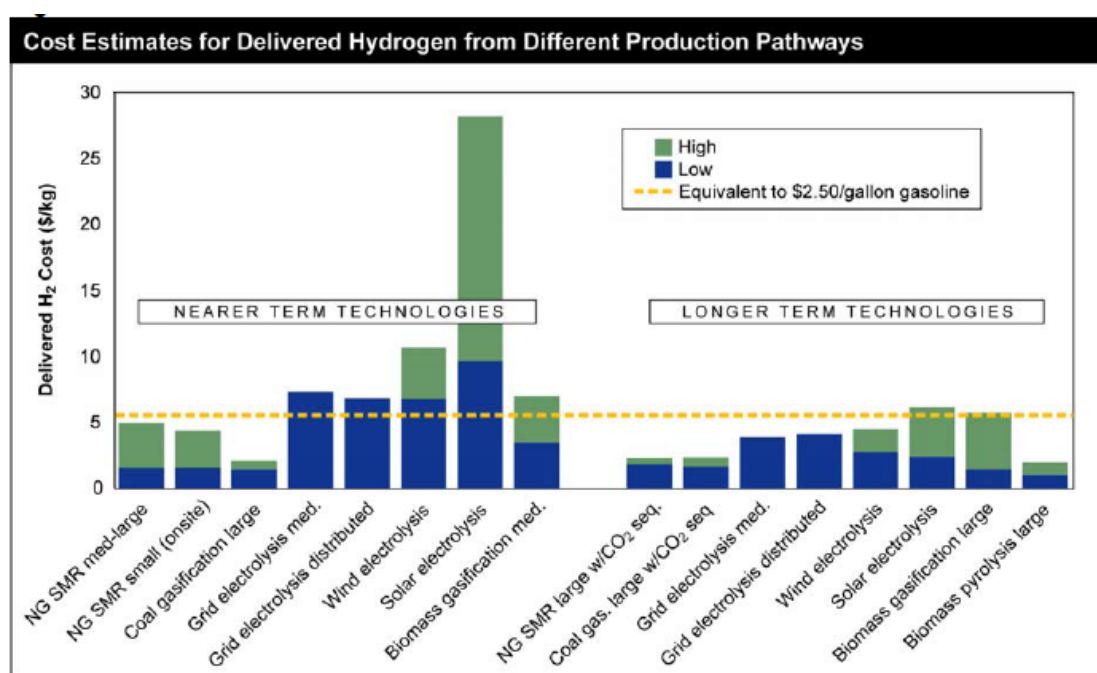
氫氣的工業生產製程中，以天然氣與甲醇的蒸汽重組製程最為重要，從天然氣與甲醇原料供應的難易與成本的差異，不同生產規模與投資額大小的影響，比較兩種製程在生產效率與經濟效益的差異。六成的甲醇是由天然氣特製而成，因此甲醇比天然氣貴，但考慮運輸與儲存費用上的差異，兩者的價位差直接受供應方式而異，接受天然氣管線供應的地區，則甲醇的價位約為天然氣的 2 倍。從熱力學的理论計算，生產 1 立方公尺的氫氣，天然氣的能源需求，約為甲醇的 1.7 倍，但實際操作上需求則大於 2 倍。

氫氣的生產都導源於水的分解，但因水的能源階層很低，直接分解頗為耗能，必須在很高的溫度才能獲得氫氣。工業上，水電解生產 1 立方公尺氫氣的電能為 5--7kWH，這是甲醇製程的 5~8 倍，或天然氣製程的 2.7~3.9 倍，以甲醇或天然氣生產的氫氣有一半是間接來自於水的催化分解，因此甲醇或天然氣扮演的是能量的供應以減少水本身分解所要的能量，代價是產生一些二氧化碳^[19]。

水的電解雖不產生二氧化碳，但 3~8 倍的能源需求，以目前的電力供應方式，所產生的二氧化碳更多。

各種生產方法成本不同(如圖 3-7 所示)，一般可由氫能來源來分類，煤

炭可經由氣化產生氫氣，而天然氣等碳氫化合物也可經過高溫重組產生氫氣，生質物則是可經過熱裂解產氫，或是與廢水一樣，可經由微生物發酵程序來產生氫氣。而高溫裂解水分子產氫，熱源可來自於石化燃料、太陽熱能與核能廢熱等。另外因此目前所使用的電力來源，如火力發電、水力發電、核能發電與風力發電，甚至於太陽能發電，都能透過電解水的程序，轉換成氫能。依照美國能源部研究，太陽能製氫雖然零排碳，但受限於相關設備耐用性不高，成本極為昂貴，未來希望透過基板技術、複晶技術改良提高其耐用度，達成每公斤氫氣 5 美元之目標^[23]。



資料來源：U.S. Department of Energy (Hydrogen Program), “Record 5031: World Nuclear Association,”

(http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html.)

圖 3-7 不同製氫原料與技術成本分析

3.6 燃料電池種類與基本原理介紹

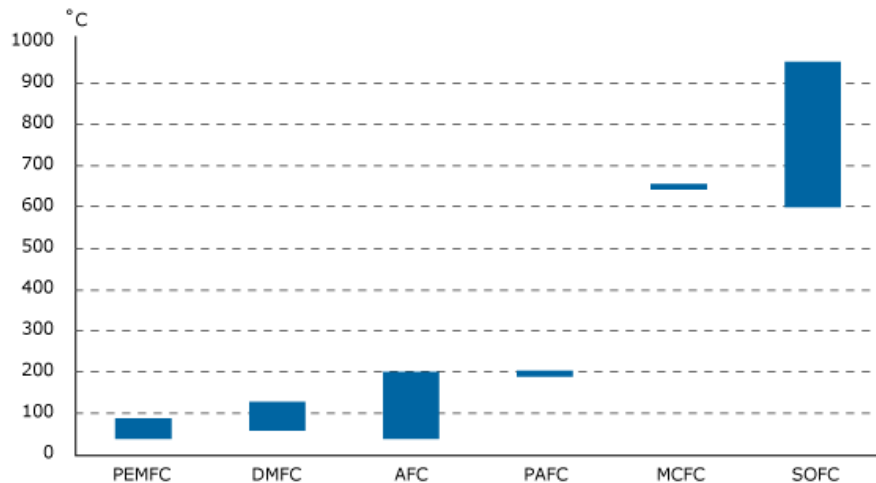
燃料電池與其他電池一樣，都是將物質所具有的化學能經電化學反應轉換成電能。它與電池不同之處是電池的電極經放電之後會消耗殆盡，而燃料電池的電極係當作觸媒使用，催化燃料的氧化還原反應，本身並不會因放電而消耗，只要燃料源源不絕，燃料電池就可以持續放電。它本身的功用如同

發電機。一般的發電機，如火力發電、核能發電，是將物質所具有的化學能或是輻射能先轉換成熱能（例如，將水加熱成過熱的水蒸氣 Superheated Steam）之後，以水蒸氣推動渦輪將熱能轉換成動能，渦輪推動發電機產生電力。這樣的發電過程經過多考重能量轉換，過程複雜且效率低。而燃料電池係直接將燃料的化學能經電化學反應轉換成電能，過程簡單且效率較高。

燃料電池有多種形式，除了早期的鹼性燃料電池(Alkaline Fuel Cell, AFC)，尚有已在測試中的磷酸燃料電池(Phosphoric Acid Fuel Cell, PAFC)、正在發展中的質子交換膜燃料電池(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)、熔融碳酸鹽燃料電池(Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)、固態氧化物燃料電池(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)，以及近來倍受矚目的直接進料甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)等。這些燃料電池的基本操作雷同，是以所使用的電解液來分類。如 AFC 的電解液是 KOH，PEMFC 的電解液是高分子質子交換膜，PAFC 的電解液是磷酸，MCFC 的電解液是碳酸鹽類，SOFC 的電解液是固體氧化物等。

AFC、PEMFC 及 PAFC 所用的電解質具有良好的導電度，所用材料祇能操作在 200°C 以下。MCFC 與 SOFC 所用的電解質必須分別操作在 500°C 與 700°C 以上才具有良好的導電度。

各種燃料電池的操作溫度如圖 3-8 和表 3-1 所示。因其操作溫度的不同，這些燃料電池的用途也不盡相同。在低溫操作(40-200°C)的燃料電池有 AFC、PEMFC、PAFC 及 DMFC。由於低溫操作的啟動速率比較快，這些燃料電池的發展目標多鎖定在中小型(1W - 100KW)開關較為頻繁的發電用途，如電動交通工具巴士、轎車、供 3C 產品用的攜帶電源、公司醫院備用電源、軍用遙控設備或隨軍獨立電源等等。在高溫操作的燃料電池有 MCFC 與 SOFC，因高溫啟動較慢，這些燃料電池的發展鎖定在大型(100KW - 10 MW)固定式的發電用途，如分散式社區發電廠等。



資料來源：U.S. Department of Energy (Hydrogen Program), “Module 1: Permitting Stationary Fuel Cell Installations” (http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html.)

圖 3-8 各種燃料電池工作溫度

燃料電池因操作溫度的不同，各元件所用的材質也不盡相同，相關特性如表 3-1 所示。在低溫下的電化學反應速率較慢。貴重金屬如鉑等常作為 PEMFC、PAFC 及 DMFC 電池的陰極觸媒。在高溫下的電化學反應速率很快，鎳等金屬便可以作為 MCFC、SOFC 電極的觸媒；然而在高溫下的腐蝕性較強，這些電池必須採用高溫抗腐蝕的陶瓷材料。各元件的熱膨脹係數以及各元件之間的密封與接合，也成了高溫燃料電池材料選取的考慮因素。高溫燃料電池所使用的燃料範圍較廣，碳氫化合物如甲醇、甲烷、天然氣等都可以使用。低溫燃料電池對於 CO 的容忍程度很低，除了 DMFC 之外，AFC、PEMFC、PAFC 都需用純度很高的氫氣作燃料；或者是經過燃料重組器將燃料分解成含氫的氣體^[24]。

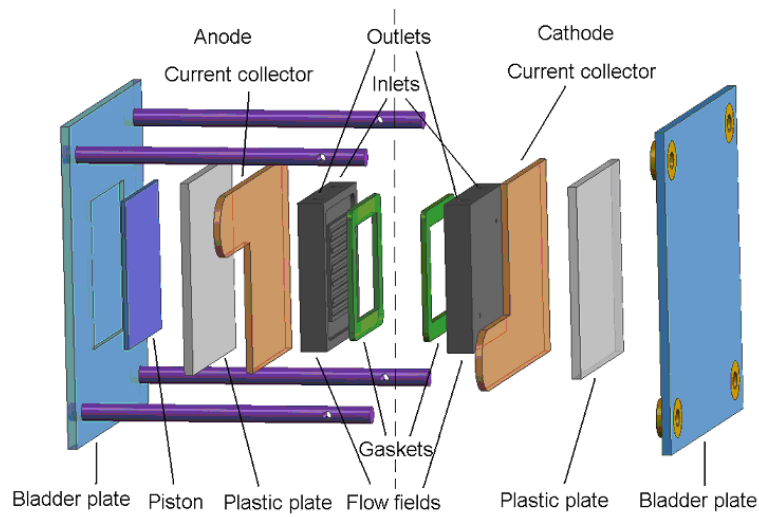
表 3-1 燃料電池工作溫度與效率

Fuel Cell Type	Common Electrolyte	Operating Temperature	Typical Stack Size	Efficiency	Applications	Advantages	Challenges
Polymer Electrolyte Membrane (PEM)*	Perfluoro sulfonic acid	50-100°C 122-212°F	1 kW-250 kW	60% transportation 35% stationary	- Backup power - Portable power - Distributed generation - Transportation - Specialty vehicles	- Solid electrolyte reduces corrosion & electrolyte management problems - Low temperature - Quick start-up	- Expensive catalysts - Sensitive to fuel impurities
Alkaline (AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90-100°C 19-212°F	10-100 kW	60%	- Military - Space	- Cathode reaction faster in alkaline electrolyte, leads to high performance - Low cost components	- Sensitive to CO₂ in fuel and air - Electrolyte management
Phosphoric Acid (PAFC)	Phosphoric acid soaked in a matrix	150-200°C 302-392°F	400 kW 100 kW module	40%	Distributed generation	- Higher temperature enables CHP - Increased tolerance to fuel impurities	- Pt catalyst - Long start up time - S sensitivity
Molten Carbonate (MCFC)	Solution of lithium, sodium, and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	600-700°C 1112-1292°F	300 kW-3 MW 300 kW module	50-60%	- Electric utility - Distributed generation	- High efficiency - Fuel flexibility - Can use a variety of catalysts - Suitable for CHP	- High temperature corrosion and breakdown of cell components - Long start up time - Low power density
Solid Oxide (SOFC)	Yttria stabilized zirconia	600-1000°C 1112-1832°F	1 kW-2 MW	50-60%	- Auxiliary power - Electric utility - Distributed generation	- High efficiency - Fuel flexibility - Can use a variety of catalysts - Solid electrolyte - Suitable for CHP & CHHP - Hybrid/GT cycle	- High temperature corrosion and breakdown of cell components - HT operation requires long start up time and limits shutdowns

資料來源：U.S. Department of Energy (Hydrogen Program), “Module 1: Permitting Stationary Fuel Cell Installations” (http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html.)

PEMFC 算是目前發展最快而最普遍的系統，由於內部電解質的設計是採用高分子膜，且操作的溫度也相對地較低，觸媒的反應效率也大幅提升，所以輸出功率密度也相對地提高，在加上體積比其他類型的都還小，可因本身的需要來量身訂做，從小瓦數的電池到大瓦數的電池都囊括其中，目前應用最普遍的應該是在車輛的動力系統上，也算是在這眾多類型的燃料電池中最具有發展潛力的。

PEMFC 要基本元件包含端板、雙極板、電解質（如圖 3-9 所示），由二片薄多孔電極構成陽極與陰極，兩極間以固態聚合物隔膜電解質隔離，每片電極一面鍍有觸媒（鉑）。



資料來源：D. Greene et al., "Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure,"
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fcev_status_prospects_july2013.pdf

圖 3-9 PEMFC 基本結構圖

燃料電池的工作核心包括陰極、陽極與隔離電極的電解質層。電解質層傳導離子而不導電子，可避免電極短路並且傳導電極所需的離子。這三者（陰極、陽極與電解質層）的組合在 PEMFC 中就是所謂的膜電極組(Membrane Electrode Assembly; MEA)，藉由電化學方式產生電力，電化學電位以還原反應為標準。陽極所釋放出的電子流經外部負載到陰極。所產生的質子由陽極經質子傳導膜傳導到陰極。在陰極內，氧氣與傳導到陰極的電子與質子結合並還原成水^[30]。

質子交換膜燃料電池組為發電系統的核心組件，其原理為利用氫氣與氧氣（空氣）的電化學反應產生電力，其中氫氣來自燃料系統，而氧氣則直接取自空氣。此種電池組的組裝係由大量單電池堆疊串接而成，每個單電池包括一片含有觸媒的 MEA 與兩片碳質氣體擴散層。在堆疊過程中，必須導引氫氣與空氣均勻流過電池的反應面、防止反應氣體的穿透與混合，以及傳導每個單電池的反應電流。

燃料氧化、氧分子還原、質子及電子傳輸等發電關鍵步驟皆在 MEA 中進行。由於在低溫操作(80°C 以下)，燃料及氧分子的反應速率皆相對緩慢，導致發電效果不彰，為目前燃料電池落實之主要障礙。提升燃料及氧分子反應速率必須在陰極中添加觸媒，藉由觸媒之催化作用來加速燃料氧化及氧分

子還原兩個半反應，以達到大幅提升發電效率的效果。

陰極觸媒除了必須具備良好的氧分子還原催化活性外，還必須兼具良好的耐酸性（酸性質子交換膜）、質子及電子傳導性，才能有效的完成陰極反應。此外，觸媒同時亦需具有良好的穩定性（壽命至少應維持約 5,000 小時）才能滿足車輛之基本要求。目前用於 PEMFC 最佳之陰極觸媒以鉑(pt,又稱白金)為主要活性成份，要得到所需的電能，觸媒必須使用極高的鉑含量(>30wt%)才能達到所需之催化效果。由於鉑價格昂貴，觸媒成本為影響燃料電池生產成本最主要之因素，提升觸媒效率及降低鉑使用量為落實 PEMFC 商業化之主要關鍵^[31]。

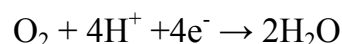
由於燃料電池使用白金系列的觸媒，因此氫氣中若含有過高的 CO 濃度，會使觸媒損壞。質子交換膜的氫離子傳導作用必須在充分濕潤的情況下才能發揮效率，但是燃料電池的反應溫度容易造成水分的蒸發，使質子交換膜發生失水，導致電壓下降現象，甚至氣體穿透薄膜直接燃燒的危險情況，因此必須在空氣氣流中予以加濕。

基本的運作原理大致可整理成以下程序^[42]：

1. 燃料進入電池—氫氣體分子型態由陽極進入，氧化劑之氧氣由陰極進入。
2. 陽極反應—燃料從儲存系統傳送至陽極觸媒活性中心，燃料吸附在觸媒表面並進行電催化氧化反應，經過電化學反應後，分解成 2 個氫離子和 2 個電子。

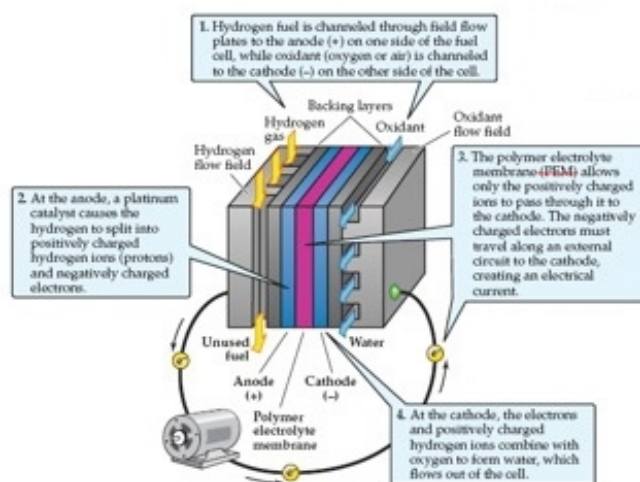


3. 負載供電—電子由陽極端經外部迴路傳至陰極，同時提供能量給負載（如電動馬達或二次鋰離子電池組）使用；其次，質子則通過隔膜抵達陰極。
4. 陰極反應—氧化劑氧氣經由陰極進入，與穿過電解膜之氫原子、與由陽極經外部迴路至陰極的電子進行會合，質子、電子與氧分子在陰極進行催化反應成水，並同時產生電能，最後反應產生的副產品即為水及熱。



單一燃料電池（Cell）其理論輸出電壓值約為 1 伏特，故通常可藉由雙

極板或連接器將組件予以串、並聯，便可製作出不同功率規格電池組。



資料來源：D. Greene et al., “Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure,”
(http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fcev_status_prospects_july2013.pdf)

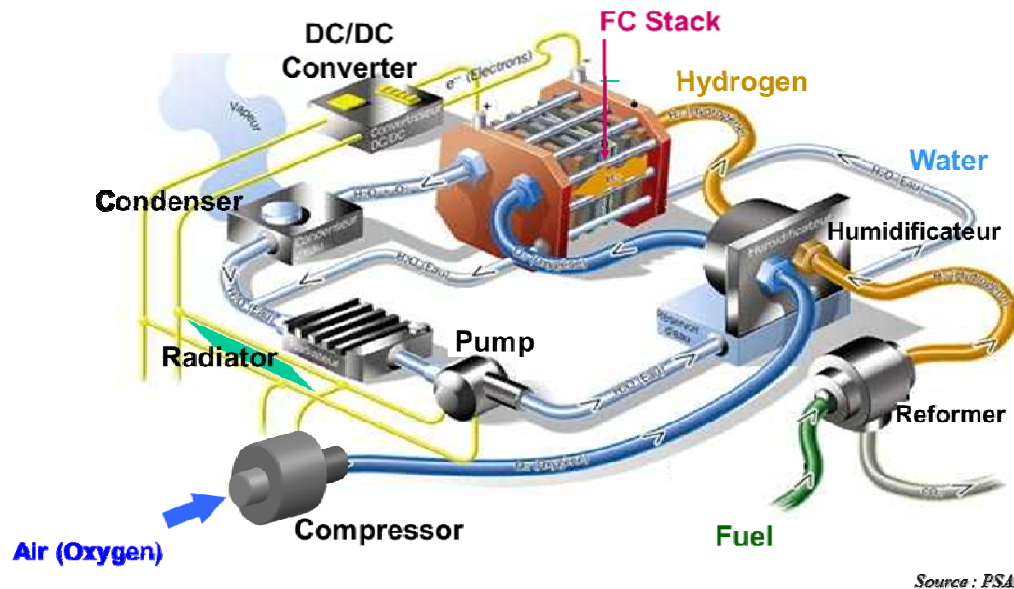
圖 3-10 PEMFC 工作原理

另外一種用於車輛係 DMFC，其最主要優點可以甲醇或汽油為燃料，在車上進行重組，和直接以氫為燃料的 PEMFC 相比，可免去氫燃料運送的困擾，並降低裝置成本，缺點主要為啟動時間太長，必須加熱，才可達到操作溫度與提供反應熱量，因此需要加裝一些電池作為補助啟動的動力，同時甲醇內可能含有各種無機與有機雜質都可能使其燃料電池觸媒因汙染而損壞。

3.7 燃料電池車輛原理介紹

燃料電池汽車、大客車或是貨車，本質上都是由類似電瓶的裝置所驅動的電動車。不過燃料電池並不像電瓶般儲存能量，而是運用電化學反應發電，而且只要通入氫燃料及氧氣，即可持續運轉。

燃料電池電動車的動力系統，除燃料電池組與燃料處理系統之外，需要有一個 DC/DC 變壓器，以調整電池組的輸出電壓(如圖 3-11 所示)。



資料來源：D. Greene et al., “Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure,”
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fcev_status_prospects_july2013.pdf

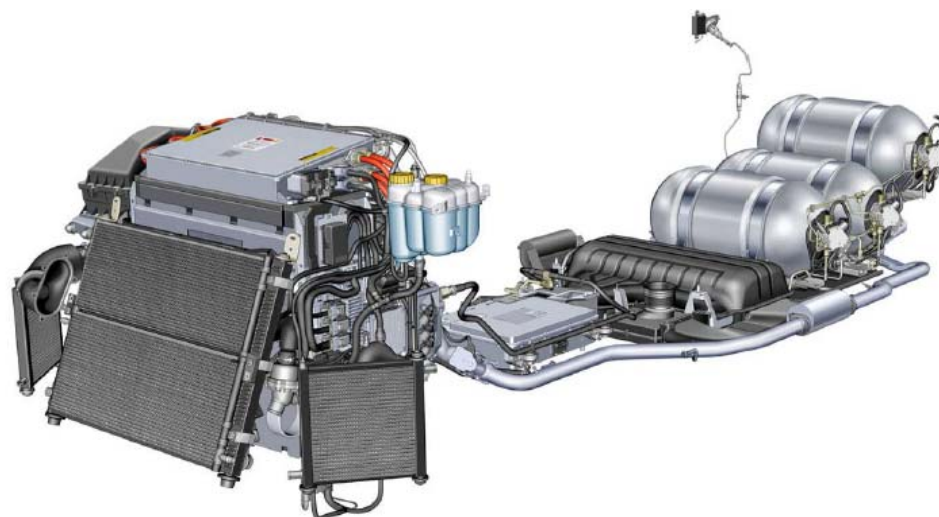
圖 3-11 燃料電池電動車的動力系統

燃料電池車輛必須配置 DC/AC 轉換器，以帶動三相交流感應馬達與傳動系統，提供車輛動力。燃料電池組在停止運轉時並無電力儲存功能，如果要啟動系統，則必須要利用備用鉛酸或鎳氫電池與控制器^[42]。

燃料電池電動車正式啟動系統前，因為安全需要，控制器的程式會先檢查所有感測器、與冷卻水存量與系統功能是否在正常狀態，否則會發出警報訊號而無法啟動。之後利用備用電池的電力啟動鼓風機，將空氣流入與電池組的陰極空氣管路。燃料電池組在開始發電後，因為屬於放熱反應，所以溫度將會迅速上升，在達到 80°C 後，電池組需要冷卻。啟動冷卻水泵與散熱器的冷卻空氣風扇，使冷卻水系統開始運轉。控制器檢查所有訊號與功能，如果都呈現正常時，即完成整個系統的啟動程序^[25]。

燃料電池的發電作用必須控制在 80°C 以下，但是反應時會放出大量的熱量，因此溫度控制就成為電池組設計的又一項重點。燃料電池系統並不像汽油引擎，可以由廢氣排出大量的廢熱，因此需要在電池組中安裝大量的冷卻板，才能達到有效冷卻的效果。通常冷卻板與單電池的比例為 1:1。冷卻水的循環系統係由水箱開始，利用低壓水泵流經電池組吸熱後，再進入散熱器，以冷卻風扇移除熱量。燃料電池系統冷卻水的熱負載約較傳統引擎高

50%，而且冷卻水的溫度只有 80°C，而非引擎系統的 120°C，因此散熱器所需的熱交換器面積增加 100%以上(如圖 3-12 所示)。其實在燃料電池系統，馬達與控制器也需要冷卻，因此還須另一個散熱器，同時，燃料處理系統可能也需要冷卻時，這些冷卻需求形成整體系統設計時很大的挑戰^[22]。



資料來源：P. J. Berlowitz and C. P. Darmell, Fuel Choices for Fuel Cell Powered Vehicles, SAE Paper

圖 3-12 燃料電池電動車的熱管理系統

在燃料電池動力系統啟動後，各種運轉情況的控制與保護程序更為複雜。首先經由油門(加速)感測器的位移訊號，需要調整燃料與空氣的流量；其次，對於煞車感測器的訊號須有更快速的處理程序。

在電池組與燃料處理系統的保護方面，更要隨時偵測壓力、溫度、一氧化碳(CO)濃度、電流與電壓等訊號，在發現異常時，立即分析狀況執行應變程序。

目前燃料電池組主要的問題為製造成本，而成本又與製程、材料、產量、良率等相關，而且附屬組件與系統方面的技術改良也須繼續進行。

3.8 燃料電池車與電動車之比較

在近年因節能政策被列為發展重點的電動車，在近幾年來的發展並不如預期，兩者之優缺點可進行比較，分析兩者之未來發展。

首先為環保性方面，電動車行駛並無任何副產品，而燃料電池車行駛中

產生副產品只有水和熱，均優於目前傳統燃油車輛排出大量溫室氣體、各種懸浮污染物。

在噪音管制方面，電動車和燃料電池車行駛中噪音均較傳統燃油車輛安靜許多。

在能源補充便利性方面，電動車可在專屬充電站、家中或公共場所提供電源地方進行充電，且目前充電設計方面，電動車充電介面可有交流、直流、高壓、低壓等不同形式。而燃料電池車輛只能在加氫站利用專屬設備補充燃料。

而在能源補充效率方面，燃料電池車輛補充能源時間僅需 3 分鐘，與傳統燃油車輛相近。若補充 10KWH 電量到電動車，速度最快的 200KW 直流快充需要約 30 分鐘，若在家中使用 110V 交流電源則需 10 小時，無法和燃料電池車相比。

在燃料價格方面，燃料電池車輛補充的氫能源價格較一般電動車補充的電力價格高出許多。

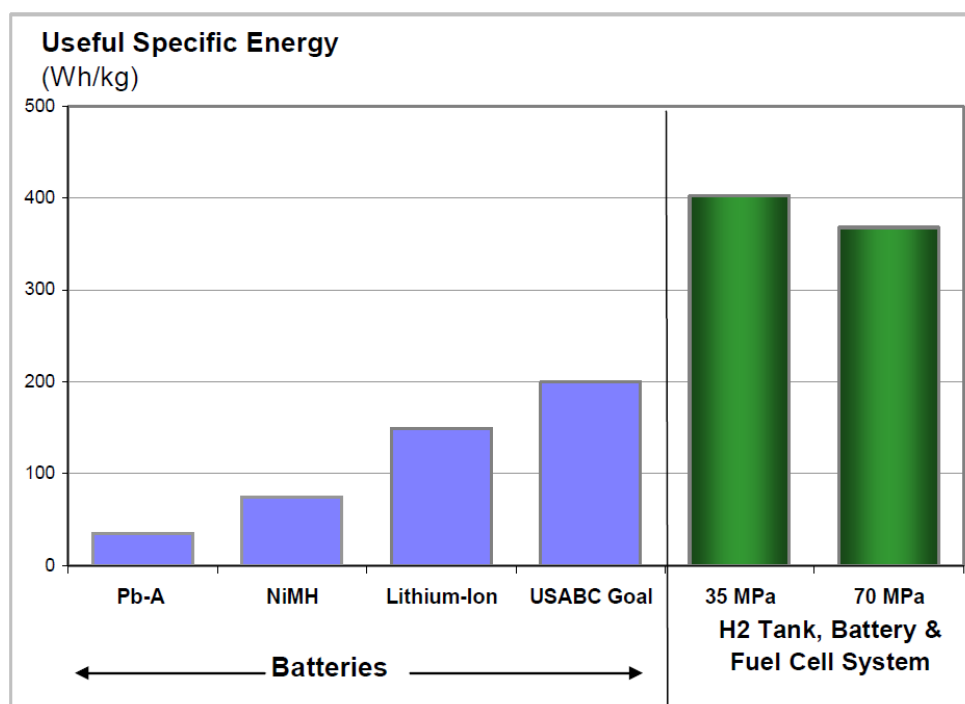
在續航力方面，燃料電池車輛續航力大多在 400~500 公里之間，超越一般純電動車(約 200 公里)，和增程式電動車(Extended Range Electric Vehicle,EREV)相近。

在售價方面，以目前販售之 Toyota Mirai 為例，車商與政府若完全無補貼措施，其在美國售價將接近 69,000 美元，超過乘坐品質、性能接近、更具節能效益與使用更加方便的增程式電動車 Chevrolet Volt(42,000 美元)，甚至可購買搭配鋰鐵電池油電混合的賓士 CLS400(65,000 美元)。

前述售價係採相對性比較，若採絕對性比較，則更加明顯，以 Audi 原本要在美國上市的燃料電池車輛 A7 Sportback h-tron quattro 為例，以氫氣燃料電池為動力售價超過 14 萬美元，而同車型電動版本 A7 Sportback e-tron quattro 售價約 8 萬美元，反之燃油車輛 A7 Sportback quattro 只需 5 萬美元。

燃料電池車輛售價居高不下一個主因是電極所採用的鉑，佔總成本近 50%，2006 年效能 150KW(接近 2,000CC 燃油引擎輸出)約需要 100 公克鉑，2013 年美國通用汽車通過製程改良與離子佈植技術，宣稱將燃料電池車輛所需的鉑減少至 50 公克，但鉑的價格卻由每盎司 800 美元漲到 2,200 美元，因此相關成本反而增加^[28]。

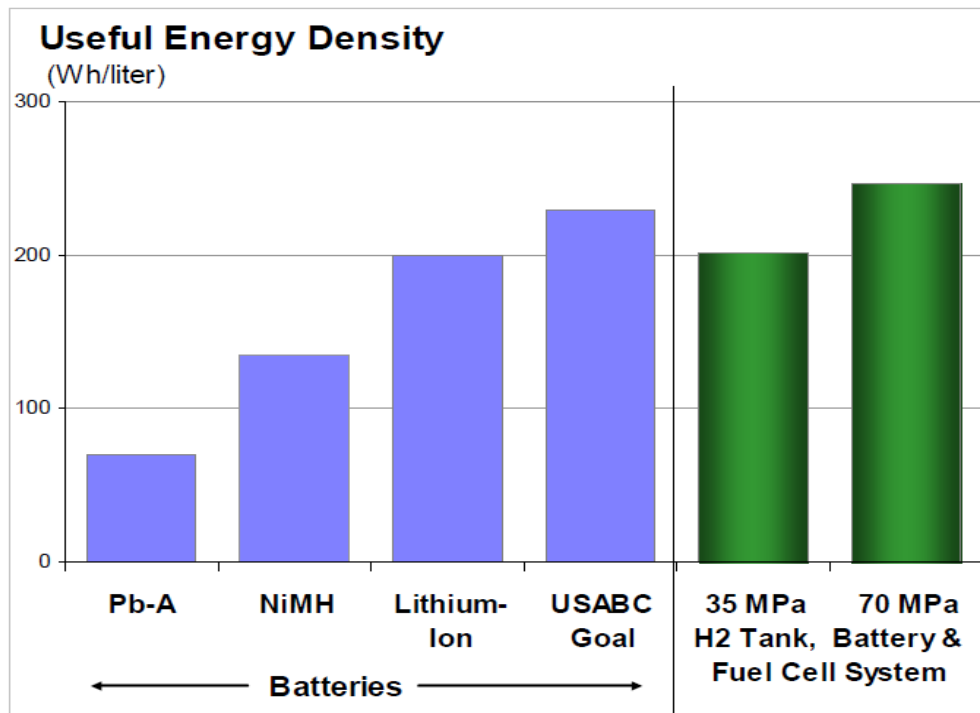
另一個電動車和燃料電池車比較重點為能量密度，電動車發展一向受制於電池能量密度不如傳統燃油車輛，若以相同重量的高壓氫氣(含相關儲氫容器)與電池進行比較，由圖 3-13 可知，燃料電池能量密度優於電池 2 倍以上。



資料來源： Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared By C. E. (Sandy) Thomas

圖 3-13 燃料電池與電動車電池的能量密度比較

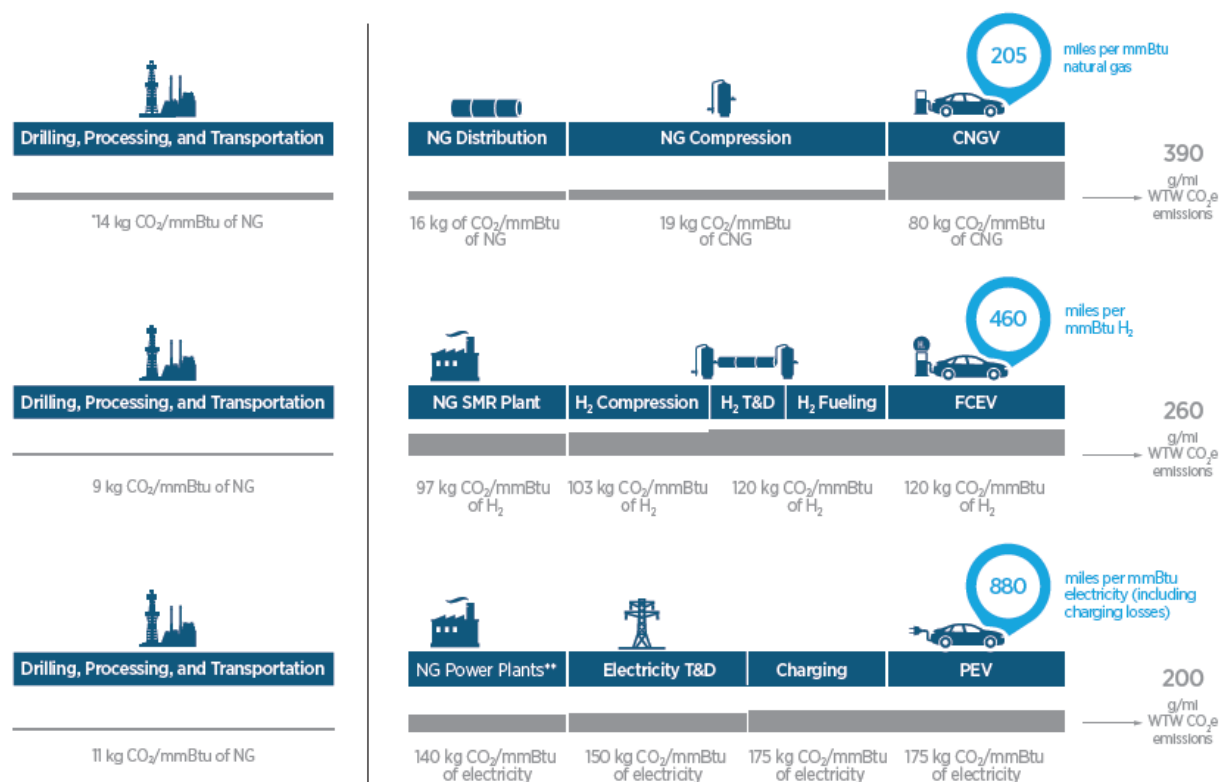
另一項能量密度比較則是以空間計算為基礎，氫氣雖然能量密度甚高，但其物理特性卻使其所相同能量所需空間和電動車電池差不多(如圖 3-14 所示)^[26]。



資料來源： Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared By C. E. (Sandy) Thomas

圖 3-14 燃料電池與電動車電池所需空間比較

最後是兩者全生命週期中的燃料週期分析，在電動車所使用的電由天然氣電廠供應，燃料電池車輛氫燃料同樣由天然氣提煉，和使用天然氣的內燃機引擎車輛相比較如圖 3-15，可以發現燃料電池車輛因為製造和運送過程消耗太多能源，其排碳數字是不如電動車^{[26][27]}。



資料來源： Using Natural Gas for Vehicles: Comparing Three Technologies ,The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE)

圖 3-15 燃料電池與電動車燃料週期排碳分析

3.9 小結

目前絕大多數的氫氣都來自於化石燃料的分解，不管是利用傳統的蒸氣重組法、部分氧化法、煤炭氣化或是先進的薄膜分離助效反應、電漿重組，基本上都是將碳氫化合物進行分解，生產過程必定產生氫氣和二氧化碳。因此開發此類型技術，必伴隨著二氧化碳零排放技術的發展，才能有多樣化的燃料選擇。燃料電池更大的挑戰在於尋找一種便宜、有效、且非以石化燃料為原料的產氫方法，目前以電解水為較成熟的技術，而其電力來源必須從無碳再生能源出發，譬如太陽光電熱能、水力、風力、地熱、潮汐能、洋流、生質能等。如何提高再生能源的汲取效率其實是一項更為廣泛的課題，而水的電解槽除了研發效率更高的固態電解質高溫水蒸氣電解槽之外，利用光電化學反應直接合併光與化學反應將可有效提升其產氫效率，目前距離實際使用還有一段很長的路要走。

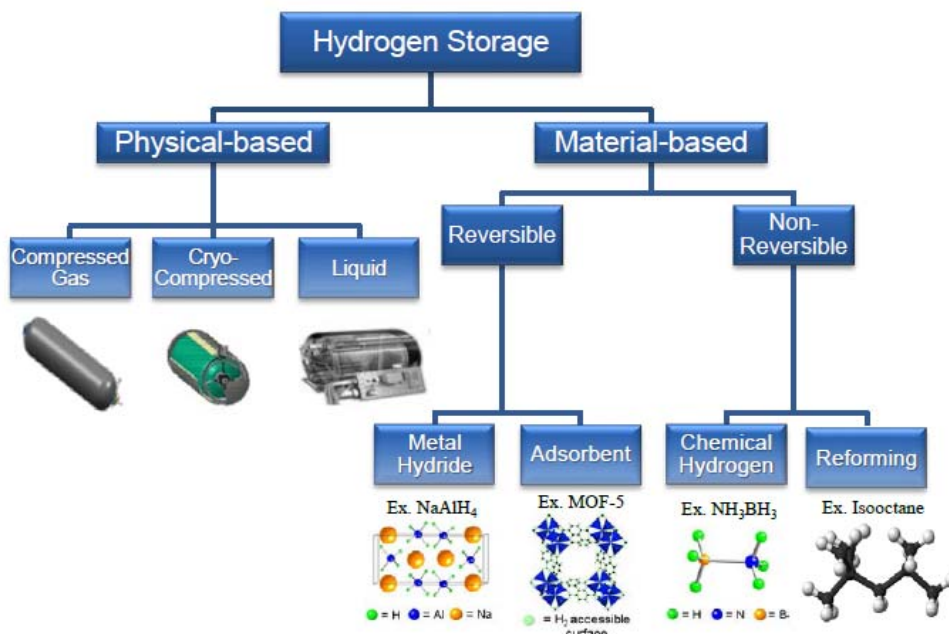
燃料電池電動汽車想要開啟市場大門的關鍵，除性能、壽命、價格都要

符合消費者的需求與期待之外，必須解決燃料周邊系統的普遍性、方便性與安全性等問題，因此需要持續的技術研發與教育推廣。目前各國政府採行的政策支持、法規配合與獎勵補助，將可加速商業化的進展。

第四章 氫的儲存與運輸

4.1 前言

氫在常溫常壓下以氣態形式存在，且易燃、易爆、易擴散，在實際應用中需優先考慮氫儲存和運輸中的安全。將氫作為一種燃料使用，必須解決儲存和運輸問題。現在實際應用在生活當中易物理特性大致有4種儲存方式：室溫高壓、低溫液化、物理吸附、金屬氫化物，而另1種分類方式則是儲存在容器內或是儲存在材料裡。儲存在容器內則以高壓將氫氣壓入容器內儲存，或是將氫氣液化後儲存在容器內。如圖 4-1 所示，針對氫的特性，可將氫氣高壓或液化儲存於容器或藉由材料與氫氣的鍵結將氫封存在材料中，高壓或液化的儲氫方式有氣體壓縮耗能、安全，以及液氫無法長期保存的問題。將氫氣儲存於材料中被視為安全且極具高密度儲存的潛力。儲氫材料一般可分為金屬氫化物(Metal Hydride)、化學儲氫材料(Cheical Hydride)及吸附型儲氫材料(Sorbents)。從重量儲氫密度來講以液態儲氫為最高，但從體積儲氫密度、儲氫耗能、安全性等因素綜合考慮，目前美國能源部認為物理吸附、金屬氫化物儲氫是目前最好的儲氫方法^{[35][36]}。



資料來源：Hydrogen Storage Technical Team Roadmap 2013 Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability US DOE

圖 4-1 各式儲氫系統

針對各種儲氫技術驗證所得的結果顯示，目前只有低溫壓縮的方式才能達到美國能源部(U.S. Department of Energy)所設定的目標(如表 4-1 所示)，以目前儲氫材料分析，以鎳系合金製作的儲氫合金罐已是成熟的商品，市場上已可購得，但是系統儲氫量僅約 1wt%左右，以美國能源部所設定的 2010 年儲氫系統主要目標(系統單位重量儲氫量 6wt%)來看，研發上必須朝向更高儲氫量的儲氫材料。

表 4-1 美國能源部儲氫研究各式儲氫系統技術現況

Hydrogen Storage System	Gravimetric (kWh/kg sys)	Volumetric (kWh/L sys)	Cost (\$/kWh; projected to 500,000 units/yr)
700 bar compressed (Type IV) ^b	1.7	0.9	19
350 bar compressed (Type IV) ^b	1.8	0.6	16
Cryo-compressed (276 bar) ^b	1.9	1.4	12
Metal hydride (NaAlH ₄) ^c	0.4	0.4	TBD
Sorbent (AX-21 carbon, 200 bar) ^c	1.3	0.8	TBD
Chemical hydrogen storage (AB-liquid) ^c	1.3	1.1	TBD
2017 Target Values	1.8	1.3	12
Ultimate Target Values	2.5	2.3	8

資料來源：Hydrogen Storage Technical Team Roadmap 2013 Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability US DOE

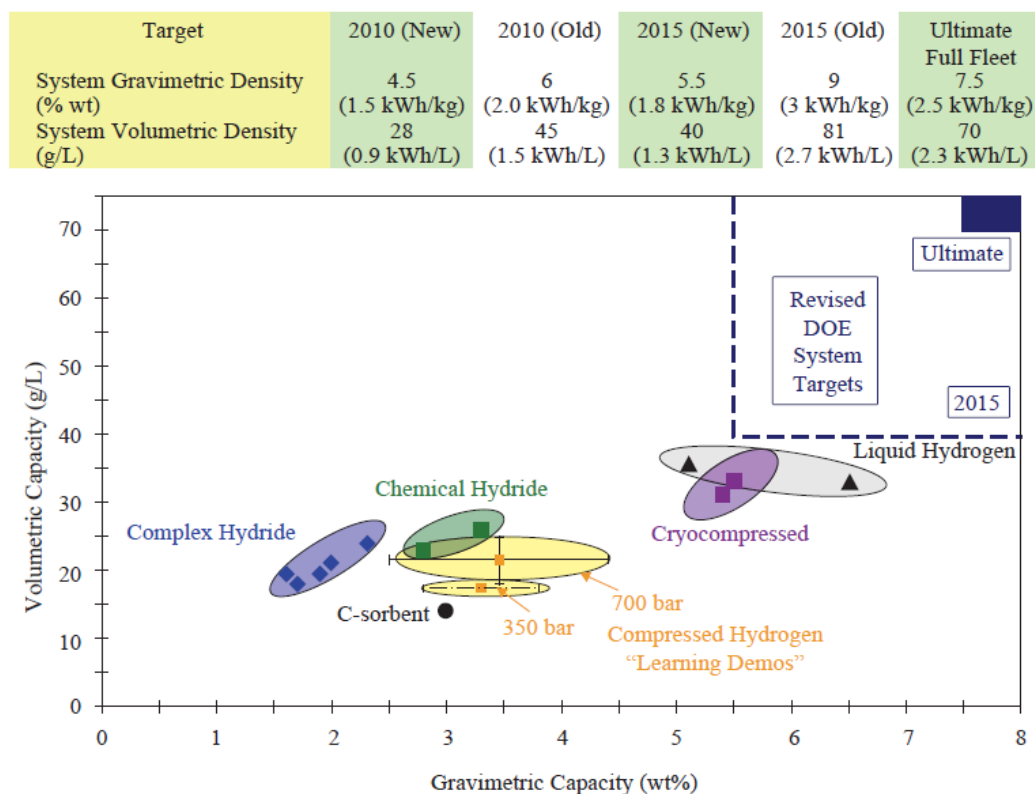
4.2 技術發展

氫能源目前最大的挑戰在於如何較有效率地儲存和運輸此一高可燃性的氣體，美國能源部認為儲氫材料儲存氫氣是最安全及有效率的儲存方式。美國能源部對應用運輸之可攜式儲氫裝置設定了系統儲氫量之目標值，然而目前並無任何材料能達到美國能源部所規劃之目標值，所以美國能源部就儲氫技術設下了針對近期及長期雙管齊下的策略：近期以高壓氫氣的系統研究聚焦於降低成本、精進設計及製作改善；長期策略則為儲氫材料及低溫壓縮技術，研究聚焦於先進材料開發、精進設計和性能分析。兩者主要涵蓋的方向內容則為降低壓力容器（碳纖維）的成本、改善複合材料的特性及降低成本，低溫壓縮系統的絕熱及系統工程設計，儲氫材料的開發、特性研究和搭配材料的儲氫系統設計開發及製造。

而評估儲氫能力通常使用質量百分濃度又稱重量百分濃度（Mass

fraction 或 percentage by mass，縮寫 wt.%），是一種表示混合物中特定物質濃度的方法，是特定物質的質量相對於所有物質總質量的比例^[36]。

2010 年美國能源部下修材料應用在儲氫系統之目標 2010 年為 4.5 wt.%，2015 年為 5.5 wt.%，如圖 4-2 所示。



資料來源：Hydrogen Storage Technical Team Roadmap 2013 Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability US DOE

圖 4-2 美國能源部儲氫系統單位重量與單位體積之儲氫目標值

美國能源部預計之 2017 年運輸車用系統的重量及體積儲氫密度分別為 1.8 kWh/kg 及 1.3 kWh/L，操作溫度及充放氫速率亦詳加規定（如表 4-2 所示）。為了達到美國能源部所訂定的目標，國際上各個研究單位均投入大量的人力、物力及資源，致力於儲氫技術能力之提升與開發，期望能達到所規定之目標值^[36]。

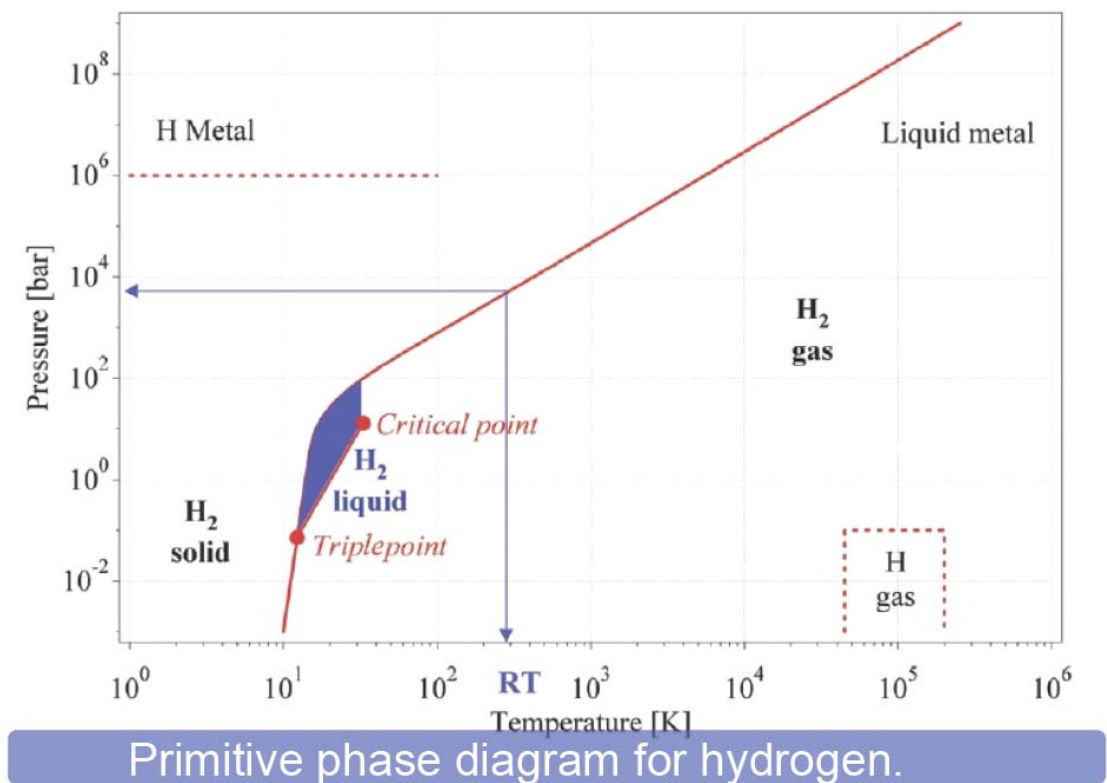
表 4-2 美國能源部運輸車用儲氫系統目標值與溫度範圍

Storage Parameter	Units	2010	2017	Ultimate
System Gravimetric Capacity: Usable, specific-energy from H ₂ (net useful energy/max system mass)	kWh/kg (kg H ₂ /kg system)	1.5 (0.045)	1.8 (0.055)	2.5 (0.075)
System Volumetric Capacity: Usable energy density from H ₂ (net useful energy/max system volume)	kWh/L (kg H ₂ /L system)	0.9 (0.028)	1.3 (0.040)	2.3 (0.070)
Storage System Cost: • Fuel cost	\$/kWh net (\$/kg H ₂) \$/gge at pump	TBD (TBD) 3~7	TBD (TBD) 2~4	TBD (TBD) 2~4
Durability/Operability: • Operating ambient temperature • Min/max delivery temperature • Operational cycle life (1/4 tank to full) • Min delivery pressure from storage system; FC = fuel cell, ICE = internal combustion engine • Max delivery pressure from storage system • Onboard Efficiency • “Well” to Powerplant Efficiency	°C °C Cycles bar (abs) bar (abs) %	-30/50 (sun) -40/85 1,000 5 FC/35 ICE 12 FC/100 ICE 90 60	-40/60 (sun) -40/85 1,500 5 FC/35 ICE 12 FC/100 ICE 90 60	-40/60 (sun) -40/85 1,500 5 FC/35 ICE 12 FC/100 ICE 90 60
Charging/Discharging Rates: • System fill time (5 kg) • Minimum full flow rate • Start time to full flow (20°C) • Start time to full flow (-20°C) • Transient response 10~90% and 90~0%	min (kg H ₂ /min) (g/s)kW s s s	4.2 (1.2) 0.02 5 15 0.75	3.3 (1.5) 0.02 5 15 0.75	2.5 (2.0) 0.02 5 15 0.75
Fuel Purity (H ₂ from storage):	% H ₂	SAE J2719 and ISO/PDTS 14687-2 (99.97% dry basis)		
Environmental Health & Safety: • Permeation & leakage • Toxicity • Safety • Loss of usable H ₂	Scc/h — — (g/h)kg H ₂ stored	Meets or Exceeds Applicable Standards		
		0.1	0.05	0.05

資料來源：Hydrogen Storage Technical Team Roadmap 2013 Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability US DOE

4.3 高壓儲氫

所謂高壓儲氫係藉由高壓將氣態氫壓縮，以達到儲存氫氣的目的。但實際上由於儲存桶材料的限制以及安全性的考量，一般所施加的壓力範圍大約在 20~80MPa，所能達到的儲氫體積密度大約是 36kg.m³(80MPa,如圖 4-3 所示)。目前幾乎所有燃料電池車輛均採用高壓儲氫方式，由於較低的體積儲存密度以及高危險性，限制了高壓儲氫的發展性^[35]。



資料來源：Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications, Argonne National Laboratory

圖 4-3 高壓氫氣儲存儲氫體積密度

高壓氫氣儲存目前在車用市場分為兩個等級：5,000 psi(約 350 bar or 35 MPa) 等級和 10,000 psi (約 700 bar or 70 MPa) 等級，均已有汽車廠安裝於相關示範概念車上。5,000 psi 等級的高壓儲氫容器結構係以無縫鋁合金為主體，可防止氫氣滲透和抗氫脆化；外部纏繞碳纖維以提高鋁合金主體的強度、增加循環壽命和提升對化學物質的抵抗能力。目前 5,000psi 等級的儲氫密度為 2.8~3.8wt.% 和 0.017~0.018 kg/L。

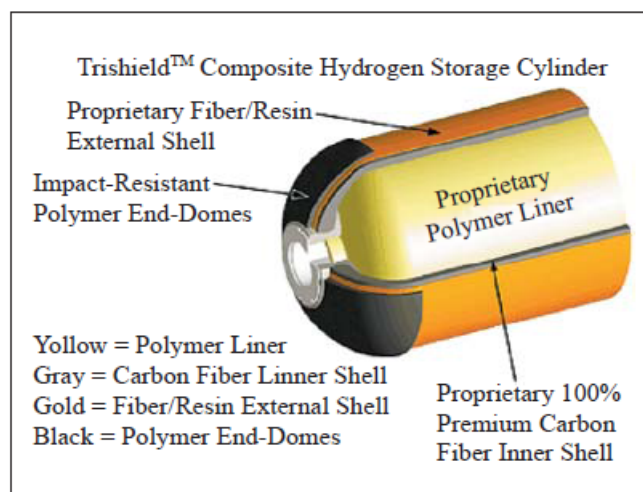
35 MPa High-pressure Hydrogen Tank



資料來源：Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications ,Argonne National Laboratory

圖 4-4 35 MPa 高壓儲氫容器

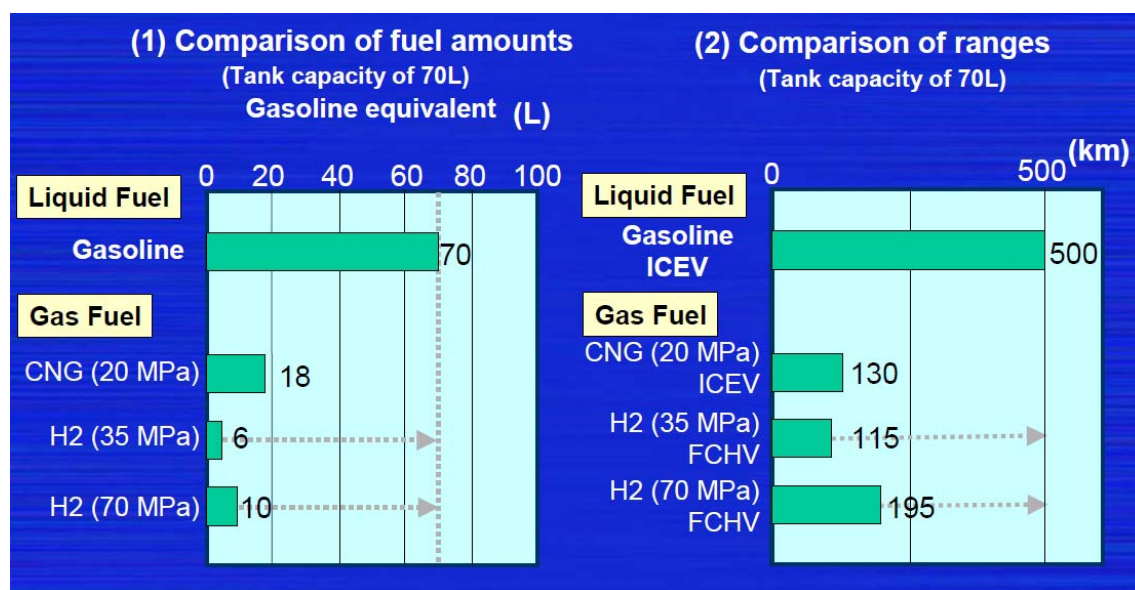
10,000 psi 等級的高壓儲氫容器，係由美國通用汽車於 2005 年發明，目前幾乎所有車廠推出燃料電池概念車、示範車均採用此項技術，以圖 4-5 的儲氫容器為例，容器內襯為高分子聚合物作為阻擋氫氣滲透層，接下來以碳纖維強化環氧樹脂(CarbonFiber-epoxy Resin Composite)為主體，承受高壓氫氣的壓力，再接下來最外層也利用高分子材料，用以防止衝擊造成的傷害。此種氫氣儲存方式的容器材質為高分子，且氫氣壓力較高，所以氫氣儲存密度大。目前 10,000 psi 等級的儲氫密度為 2.5~4.4wt.% 和 18~25g/L。高壓氫氣儲存最大的問題在於成本，目前估計 5,000 psi 成本 17 美元/kWh；10,000 psi 成本 27 美元/kWh^[35]。



資料來源：Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications ,Argonne National Laboratory

圖 4-5 70MPa 高壓儲氫容器

以目前中大型轎車配備之 70 公升油箱為例，在相同空間下，以 5,000 psi 只能裝入 6 公升的氫氣，10,000 psi 只能裝入 10 公升的氫氣(如圖 4-6 所示)，常規只配備 1 個燃料箱的氫燃料電池車都無法行駛超過 200 公里，反之以相同儲能空間，汽油車輛卻可行駛 500 公里以上，這也說明氫氣儲存面臨的問題^{[30][36]}。

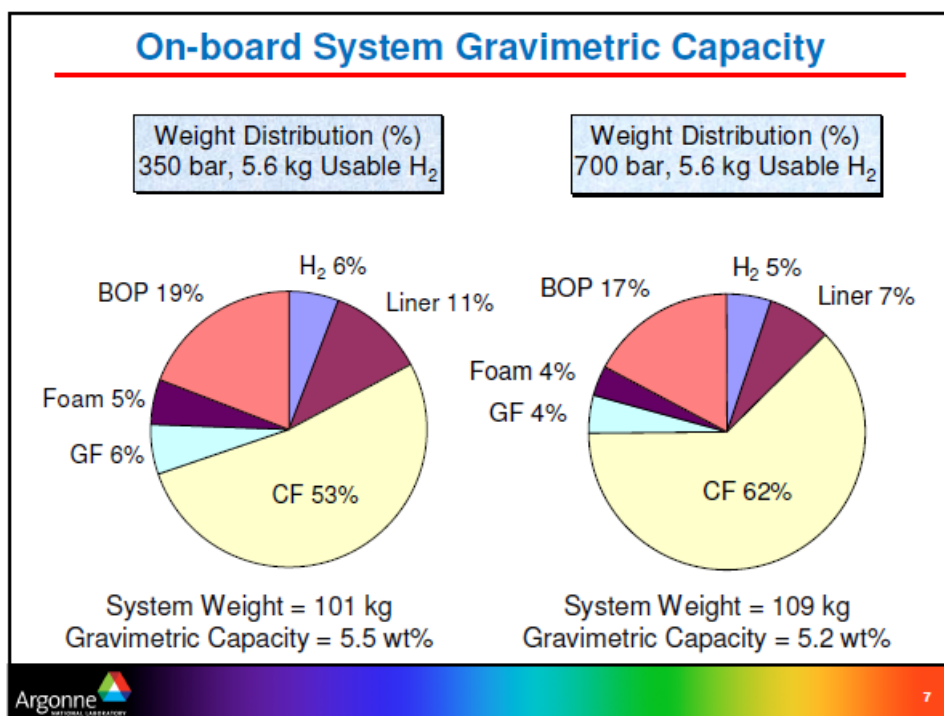


資料來源：Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications, Argonne National Laboratory

圖 4-6 壓縮儲氫系統效率比較

高壓儲氫另一個缺點係儲存桶重量太重，美國阿岡國家實驗室（Argonne National Laboratory, ANL）以儲存 5.6 公斤氫氣為例，5,000 psi 壓力需要 101 公斤儲存桶、10,000 psi 則需要 109 公斤儲存桶，效率在 6% 以下，與目前傳統化石燃料 70% 以上相去甚遠(如圖 4-7 所示)^[36]。

高壓方式儲存氫氣，需要耐高壓之儲存容器，依其材質不同，系統可儲存 1~7wt.% 之氫氣；若將具高表面積之多孔性碳材放入高壓容器內，可稍為增加其儲氫量。以高壓壓縮氫氣，估計需消耗壓縮氫氣所含能量之 20%^[34]。



資料來源：DOE Materials-Based Hydrogen Storage Summit Defining Pathways for Onboard Automotive Applications

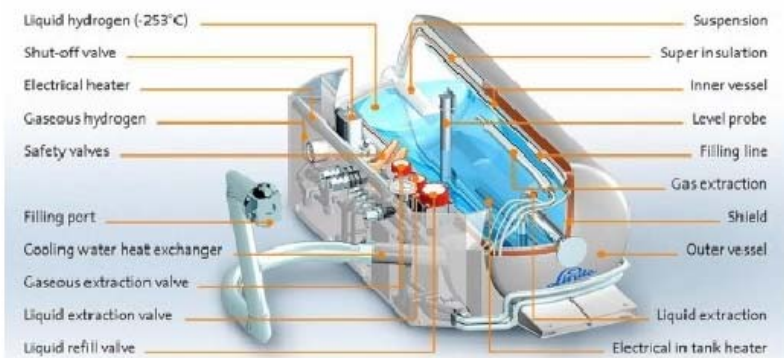
圖 4-7 壓縮儲氫系統重量組成

4.4 液態儲氫

液態氫氣儲存可提高儲氫系統單位重量的儲氫量，工業上製作及應用技術成熟，但缺點為液態氫氣需要極低溫來儲存。以圖 4-8 為例，主要有一個超級絕熱層(Superinsulation)，容器設計複雜。

Tank-System for liquid hydrogen (LH₂)

- ✓ Operating temperature of in-between 20 and 30 K and 0.5 to max 1 MPa pressure.
- ✓ Problem: Unavoidable heat flow through:
 - Thermal conduction.
 - Convection.
 - Thermal radiation.
- ✓ A efficient multi-layer vacuum super insulation is necessary (approximately 40 layers of metal foil).
- ✓ Boil-off losses after several days.
- ✓ Energy to liquefy hydrogen consumes 30% of the stored chemical energy.



Source: Helmolt/Eberle 2007, 838

資料來源：DOE Materials-Based Hydrogen Storage Summit Defining Pathways for Onboard Automotive Applications

圖 4-8 液態氫氣儲存容器

液態氫氣儲存有 4 個課題需要克服：第 1 是由於氫的沸點低，因此液態氫氣容易沸騰逸散，若此問題未獲解決，則儲存液態氫的車停在密閉空間是很危險的。第 2 為液態氫儲存所耗費的能量太大以及成本的問題，通常將氫氣製作成液態所耗費的能量約相當於本身氫氣能量值大約 30~40%，第 3 則為設備成本問題，導致液態氫之製作成本高。第 4 為液態氫比氣態氫的密度高，但是氫氣的液化溫度是攝氏零下 239.7 度，即使目前所普遍採用超級絕熱容器，依照美國能源部之研究，液態氫每天因蒸發造成的損失也約 1%^[34]。

目前液態氫氣儲存單位體積的儲氫密度為 35~40g/L；單位重量儲氫密度約為 5~6.5wt.%。德國 BMW 公司提出另一種極低溫氫氣儲存的方法，即利用 Cryo-compressed 的概念，氫氣在極低溫的狀況以適當的壓力可以儲存大量的氫氣，且因為壓力低，所以容器的設計可比高壓儲氫容器較輕；同時溫度比液態儲存高，所需儲氫的能量較少，以上為其優點，具有車用儲氫的潛力。單位體積的儲氫密度為 30~35g/L；單位重量儲氫密度約為 4.5~5.7wt.%。液態氫也適用氫氣的運輸，因為液態氫氣儲存的單位重量儲

氫量最大，適用於承載大量氫氣。

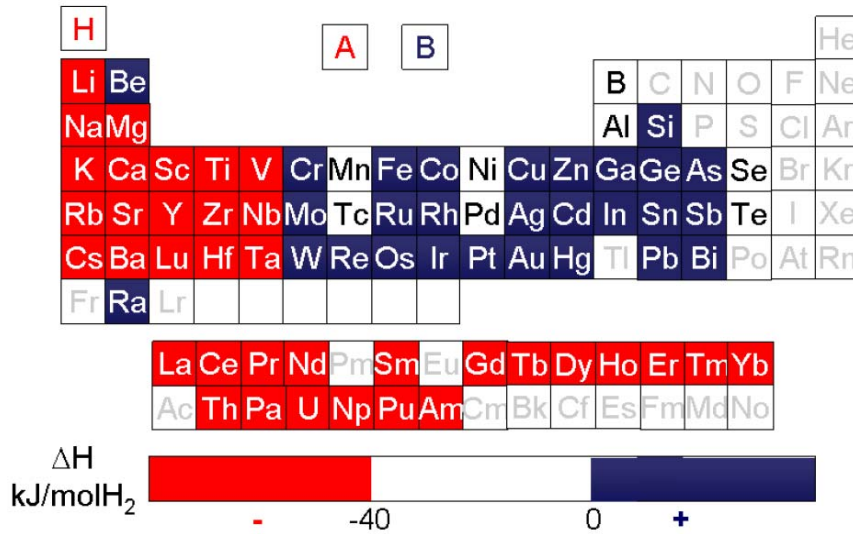
液化氫具有高重量能量密度，以常壓低溫儲存液化氫，包含貯存槽及絕熱裝置，系統儲氫量可較高壓氣體儲氫高。但將氫氣液化，依前述說明需消耗液化氫氣所含能量之 40%，因此必須搭配低碳能源才有減碳效益。因此，大量生產液化氫氣極度耗能並加重能源負擔是其主要缺點，另一需要改善是氫氣之揮發損耗，若以高壓低溫方式儲存液化氫，可阻遏氫氣之揮發損耗，但會增加儲存設備之重量及尺寸^{[32][33][35]}。

4.5 儲氫合金

為改善高壓儲氫與液態儲氫的安全顧慮，儲氫金屬（合金）被提出應用，儲氫金屬之儲氫密度可達 $1500\text{cm}^3\text{-H}_2/\text{cm}^3$ ，遠高於液態氫的 $784\text{cm}^3/\text{cm}^3$ （在 -273°C ）及高壓儲氫在氫氣壓力瓶在 200 大氣壓所能儲存的 $200\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 。若利用儲氫合金來儲運高純度(99.9999%)氫氣，除了沒有爆炸的危險，並具貯存時間長且無損耗等優點，是一個既安全又有效的方法。其缺點則是儲氫合金較低之儲氫重量密度。實用儲氫合金應該具備的特性包含儲氫量大、容易活化、吸放氫反應之溫度壓力適中、吸釋氫反應之速率快、使用壽命長、成本低廉等^{[28][34]}。

周期表中所有的金屬元素都可以和氫反應形成氫化物，反應的性質可由元素週期表約略分為兩種。第一種金屬容易和氫反應形成穩定的氫化物，並且反應過程中會放出熱量，稱放熱型金屬 A，如 Ti、Zr、Mg、V、稀土元素等。另一種金屬與氫的親和力較小，不容易生成氫化物，和氫反應的過程中需要吸收熱量，稱吸熱型金屬 B（如圖 4-9 所示），如 Fe、Co、Ni、Cr 等^{[28][34]}。

A: hydride forming element; **B**: non hydride forming element



資料來源：DOE Materials-Based Hydrogen Storage Summit Defining Pathways for Onboard Automotive Applications

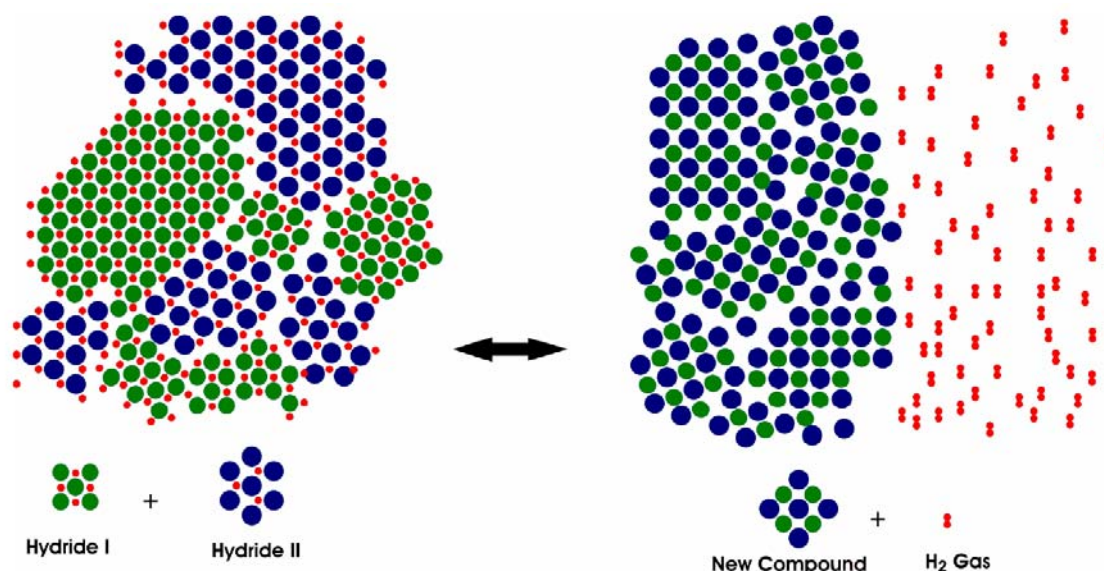
圖 4-9 放熱型金屬 A 與吸熱型金屬 B 於週期表位置

放熱型金屬(A)與氫具有強的親和力，吸氫量較高，也不易釋出氫氣；吸熱型金屬(B)則具有相反的性質。一般儲氫合金都是利用這兩種不同特性的金屬組合而成，分子式以 A_mB_n 表示（例如 AB、A₂B、AB₂、AB₅、AB₃、AB₇ 等），這種類型的儲氫合金主要由 A 元素控制儲氫量，而 B 元素控制吸放氫的可逆性，以改善合金吸放氫的熱力學和動力學性質，調整適當的 m 和 n 比例，可製備出特性優良的儲氫合金及可調整吸釋氫之熱力及動力性質。另因元素因不同之原子半徑、陰電性及晶體結構，在形成儲氫合金時會有不同的化學計量組成(Stoichiometric Composition)及結晶構造。一般常見的儲氫合金包括稀土系、鈦系、鐵系、鎂系等合金所構成。前三種合金貯氫密度通常不超過 2wt.%，而鎂系合金可高達 6 wt.% 以上 [28]。

合金儲氫的方式可分為物理儲氫和化學儲氫。物理儲氫是以物理吸附的多孔儲氫材料，使氣體分子積累在材料的表面上，但不和材料發生化學反應。化學儲氫則是儲氫合金在一定的溫度和壓力下，和氫氣進行可逆反應生成金屬固溶體和金屬氫化物。這可逆反應進行吸氫反應時會放熱，吸收熱量時則放出氫氣 [28][34]。

在化學儲氫的過程中，氫分子先在材料表面裂解成氫原子，然後和材

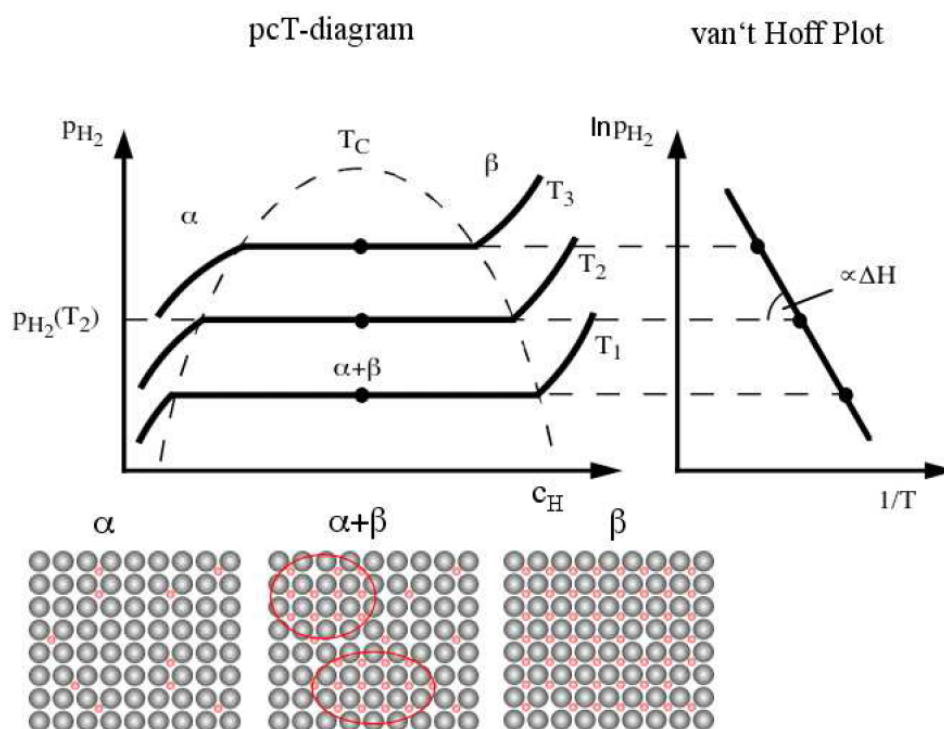
料反應(如圖 4-10 所示)。反應剛開始時，氫原子在材料上占據一些隨機的位置形成氫的固溶體。吸附的氫原子向金屬內擴散，最終和金屬原子形成金屬鍵、共價鍵或離子鍵，而成為一個氫化物。氫通過氫化物層進一步擴散和內層金屬反應，形成的金屬化合物中氫原子的位置是有規律的。



資料來源：http://thesis.library.caltech.edu/7198/5/Stadie_N_2013_Chapter3.pdf

圖 4-10 化學儲氫

P-C-T 曲線是衡量儲氫材料熱儲氫性能的重要特性曲線，由這曲線可以了解金屬氫化物中能含多少氫(%)，和任一溫度下的分解壓力值。P-C-T 曲線的平台壓力、平台寬度和傾斜度、平台起始濃度和滯後效應，既是常規鑑定儲氫合金吸放氫性能的主要指標，也是探索新儲氫合金的依據。一般來說，金屬材料儲氫過程如圖 4-11 所示，是由 α Phase (金屬、M) 變成 β Phase (氫化物、 MH_x) 的過程，從 α Phase 到 β Phase 的過渡區間則為 $\alpha + \beta$ Phase，為平台狀的壓力區，即為有效可逆的儲氫區域。金屬儲氫具有平台壓力區可由 van't Hoff 相定律得出，於平台狀壓力區的自由度 $F = 1$ ，即表示一般狀態下，溫度為恆定^[33]。



資料來源：Thermodynamics of Metal Hydrides: Tailoring Reaction Enthalpies of Hydrogen Storage Materials, 2012 DOE

圖 4-11 金屬材料儲氫過程以及 PCT（壓力 - 成分 - 溫度）關係示意圖

依照美國能源部分析指出，鎂及鎂合金儲氫能力超過所有可逆 (Reversible) 金屬氫化物 (Metal Hydride)，其儲氫能力理論上可達 7.6 wt% (MgH_2)，符合未來運輸相關應用之期望。但實際上，純鎂金屬表面很容易覆蓋一層氧化物，這會嚴重影響氫分子的吸附，並造成活化處理困難，即使在極高溫下 ($400^\circ C$ 以上) 其儲氫能力通常不超過 5 wt.%。若溫度在 $350^\circ C$ 以下， MgH_2 之吸氫與釋氫反應很慢，需長時間來達成。日本豐田汽車在鎂金屬中添加鎳，可大大提升其活化性與吸氫速率，但其儲氫量降低。舉鎂鎳合金 Mg_2Ni 及鎳與鎂形成之共晶 (Eutectic) 合金而言，前者之理論貯氫密度為 3.7 wt.% 而後者可達 6 wt.% 以上；但其吸釋氫反應通常亦需在 $300^\circ C$ 以上才會發生，此特性仍限制其在運輸系統之應用^{[35][36]}。

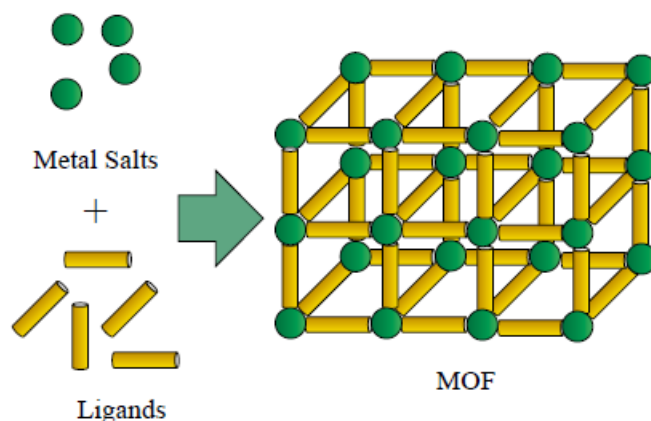
鎂系儲氫合金雖有重量輕、貯氫量大、價格低廉等優點，但是由於其放氫溫度高、活化處理困難等缺點，以致嚴重限制了它的廣泛應用。若放氫溫度能降到 $200^\circ C$ 以下，則其實用價值將可得到大幅提昇。

依照美國與日本分析一致指出，實用儲氫合金應具備的特性包含儲

氫量大、容易活化、吸釋放氫之溫度與壓力適當、吸放氫反應速率快、使用壽命長、成本低廉等。未來儲氫合金的開發主要分兩個方向：第 1 是以現有之合金為基礎，利用各種微量元素的添加或結構的改變（包含奈米化）以改進合金特性，開發嶄新的系統，第 2 就是從根本上探討新的合金主要組成要素與改變合金配比著手，必須不斷改進，才能擴大應用範圍，達到普及化之目標。

吸附型儲氫是利用高比表面積的材料進行氫的儲存，主要是利用氣體分子與固體表面進行凡得瓦爾力交互作用來達成，主要係因為材料本身結構存在著許多微細的顆粒以及相當緻密的多孔結構以及在碳原子與被吸附的氣體之間存在著相互吸引的作用力。由於具有材料輕、成本低、低壓吸附氫、常溫放氫容易的特性，所以美國能源部以高額補助吸引多方相繼投入研發。目前技術上普遍使用金屬有機骨架材料 (Metal-Organic Frameworks, MOF)、奈米碳管、碳纖維、石墨奈米纖維以及活性碳材等具高度多孔性材料進行儲氫探討，在低溫(77K)經由物理吸附具有一定的儲氫量。室溫條件下這些多孔性材料在沒有金屬團簇 (Metal Clusters) 存在的情形之下，對氫氣的吸/脫附不超過 1 wt.%，所以材料的研究重點在 MOF 及使用過渡金屬摻雜 (Doping) 的碳系材料，增加氫分子的束縛而得到常溫可逆的高吸氫量。

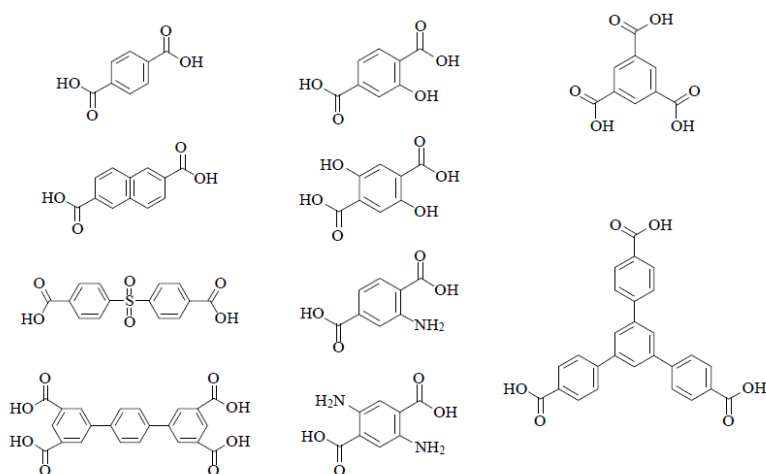
MOF 屬於配位高分子 (Coordination Polymers) 的一種，由金屬離子與配位基自組裝而成，應用在氫氣儲存則開始於 1999 年，利用鋅離子與苯二羧酸 (benzenedicarboxylic Acid, H₂BDC) 合成相當穩定的多孔 MOF-5 材料。MOF 材料是結合配位化學 (Coordination Chemistry) 與超分子 (Supramolecules) 的產物。基本上是由金屬中心與配位基形成的一種多孔結晶性配位高分子，圖 4-12 為 MOF 合成反應的示意圖^{[31][32]}。



資料來源：STATUS AND PROSPECTS OF THE GLOBAL AUTOMOTIVE FUEL CELL INDUSTRY AND PLANS FOR DEPLOYMENT OFFUEL CELL VEHICLES AND HYDROGEN REFUELING INFRASTRUCTURE,David L. Greene Oak Ridge National Laboratory

圖 4-12 MOF 合成反應示意圖

金屬中心為一帶正電之點電荷，配位基為一帶負電之點電荷，金屬中心與配位基之間的鍵結只考慮正負靜電之離子鍵結，金屬中心常用材料包括鋁、鹼土族及鋅、銅、鐵、鈷、鎳等過渡金屬元素。常用的配位基包括兩價以上的芳香族羧酸或其他陰離子基，典型的 MOF 配位基種類如圖 4-13 所示。不同金屬中心的配位數及配位基的價數與結構的組合，可形成不同的網狀結構，亦即不同的晶相^{[31][32]}。



資料來源：Thermodynamics of Metal Hydrides:Tailoring Reaction Enthalpies of Hydrogen Storage Materials,2012 DOE

圖 4-13 典型的 MOF 配位基結構

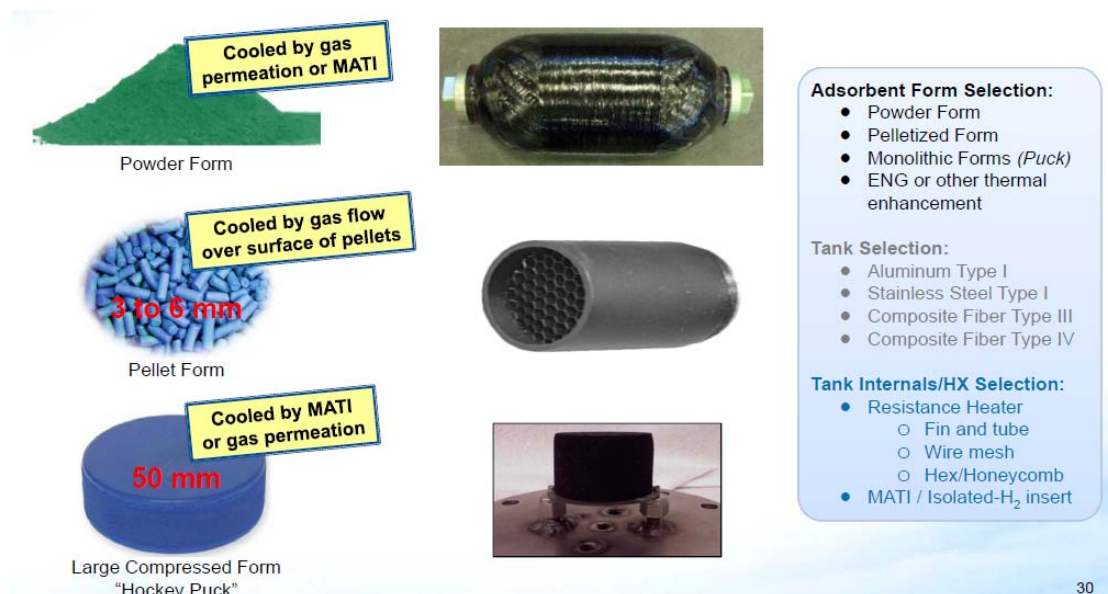
MOF 材料最大的特色是孔洞比表面積遠超過傳統多孔材料且具有高孔隙度(Porosity)。於1999年發表第一個穩定的高孔隙MOF材料MOF-5，表面積(Brunauer-Emmett-Teller; BET)高達 2,320 m²/g，遠超過一般的沸石與活性碳。在美國能源部補助之下，許多研究開始改變配位基的長度或晶體結構，以增加 MOF 表面積或孔隙度。2010 年發表的 MOF-200 與 MOF-210，使用更長的配位基 BBC(benzene- triyl-tris(tribenzoate)) 以及 BTE(benzene-triyl-tris(tribenzoate))及 BPDC (Bipheny-dicarboxylate)，表面積分別達到 4,530m²/g 及 6,240m²/g，而孔隙度較 MOF-5 分別提高到 90%及 189%。目前表面積最高的MOF材料為NU-110。其組成包括銅與配位基 BHEHPI，孔洞表面積為 7,140m²/g（如表 4-3 所示）^{[11][31][32]}。

表 4-3 MOF 材料氫氣吸附性能比較

MOF	Metal	Ligands	Void Volume (%)	Crystal Density (g/cm ³)	ABET (cm ² /g)	Alan (cm ² /g)
MOF-5	Zn	BDC	79	0.59	3,800	4,400
MOF-177	Zn	BTB	83	0.43	3,780	5,340
MOF-180	Zn	BTE	89	0.25	ND	ND
MOF-200	Zn	BBC	90	0.22	4,530	10,400
MOF-205	Zn	BTB, NDC	85	0.38	4,460	6,170
MOF-210	Zn	BTE, BPDC	89	0.25	6,240	10,400
UMCM-2	Zn	BTB, T2DC	83	0.4	5,200	6,060
NU-110	Cu	BHEHPI	-	-	7,140	-

資料來源：Hydrogen Storage Technical Team Roadmap 2013 Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability US DOE

美國能源部同時計畫在吸附型的儲氫系統開發上，以未經金屬摻雜的 MOF-5 於低溫之特性下，另外針對吸附材料的構形、儲氫容器材質輕量和容器內部結構及熱交換進行研究，設法達成儲氫需求目標以及未來車輛應用之可行性。吸附劑的結構形式包含粉末狀、成型造粒或壓成單片狀再層層疊放（如圖 4-14 所示）3 種，其目的不外乎期望在最大的吸附劑容量下，實現最佳化的熱交換設計又顧及氫氣的擴散速率。



資料來源：Thermodynamics of Metal Hydrides: Tailoring Reaction Enthalpies of Hydrogen Storage Materials, 2012 DOE

圖 4-14 各式吸附型儲氫系統

MOF 的超高表面積可以像海綿一樣吸收大量的氣體，要增加氣體儲存量，除了提高表面積之外，也可以增加氣體與 MOF 的作用力。因此，儲存氣體的 MOF 結構設計需要高比例之表面積，同時孔洞大小需有利於氣體與 MOF 的作用力。由理論計算可輕易得知儲存氫氣的最佳孔洞尺寸為 0.7 nm，而甲烷為 1.2 nm。在溫度影響方面，材料在 -40~120°C 之儲氫溫度條件下，其吸氫目標值須達到 5.5~6.0 wt.%，才能符合美國能源部之需求目標。目前尚未有任何材料之儲氫溫度在此範圍內達成目標值。另一項挑戰係美國能源部認為構成 MOF 的化學鍵相當強，因此熱穩定性佳，通常可耐 200°C~500°C 的高溫。但是化學穩定性必須改良，由於 MOF 配位基有置換反應，在溶劑中或酸鹼環境下容易崩解，不利於車載應用^{[24][28]}。

美國能源部自 2014 年起投入碳基儲氫材料研究，氫在碳質材料上吸附儲存，主要分為在活性碳上的吸附和在碳奈米材料上的吸附儲存。活性碳由於吸附能力大、表面活性高、重複使用壽命長、可工業化大量生產等優點，而成為一種獨特的多功能吸附劑。高比表面積活性碳儲氫是利用它巨大的表面積和氫分子之間的凡德瓦爾力，是典型的超臨界氣體吸附材料。氫氣的吸附量和碳材料的表面積成正比，而且氫氣的吸附量

隨著溫度的升高呈指數規律降低。活性碳吸氫性能與溫度和壓力密切相關，溫度越低，壓力越大，儲氫量就越大。

另一種碳基儲氫材料稱為奈米碳管儲氫，直徑大於 100 奈米時，稱為奈米纖維；小於 100 奈米時，稱為奈米碳管。從微觀結構來看，奈米碳管是由一層或多層同軸中空管狀石墨烯構成，可以簡單地分為單壁奈米碳管、多壁奈米碳管和由單壁奈米碳管束形成的複合管。氫氣在奈米碳管中，根據吸附過程中吸附質和吸附劑分子之間相互作用的區別，以及吸附質狀態的變化，可分為物理吸附和化學吸附。氫在奈米碳管中的吸附是單分子層吸附，飽和吸附量隨溫度升高而降低。

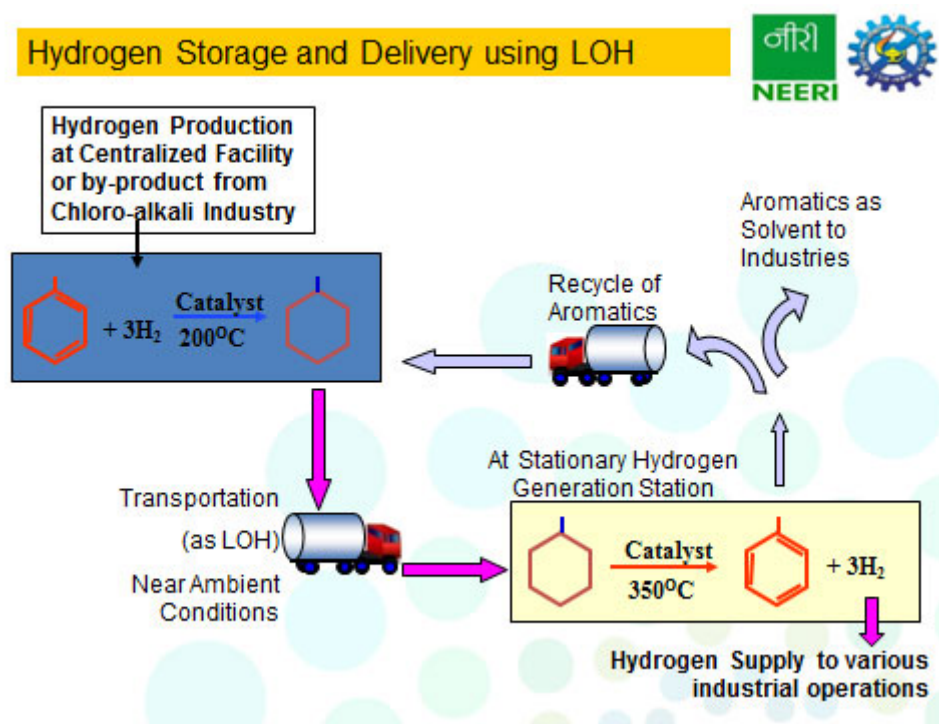
目前碳基儲氫材料多搭配高壓儲氫技術，通用公司宣稱採用物理吸附奈米碳管配合高壓儲氫系統，可使氫氣搭載量增加 30% 以上。

根據美國能源部的研究，一輛使用質子交換膜燃料電池的車輛，行駛 480 公里需 3.58 公斤的氫氣。據此，美國能源部對於電動車的研究發展訂定以下目標：至 2010 年時，使用固態儲氫燃料的能量密度應以達到 6wt%（即每公斤儲氫材料可以儲存 60 克氫氣）為標準；2015 年時，使用固態儲氫燃料的能量密度應達到 9wt% 的標準，但這些目標都未實現。

4.6 氫的運送

由於吸附型儲氫材料受限材料密度小的缺點，因此在相同容積下可容納的吸附劑量相較於金屬儲氫材料就少了許多。因此將吸附材料壓錠成型是儲氫系統開發中一項重要的研究，其中壓縮的緻密程度、所用的結合劑及相對於容器尺寸的幾何設計，都會影響材料充填量及氫氣充放操作時氫氣擴散的速率及容量。因此美國能源部同時計畫結合高壓與儲氫材料的系統，研發目標可以在 35MPa 的壓力下儲存高於 75MPa 壓縮氫氣的量，這也是針對車載應用之研究的重點，結合有機液態儲氫(Liquid Organic Hydride, LOH)，藉由不飽和的液態有機氫化物可逆的加氫脫氫反應作為儲氫載運，加上可循環使用之特性。從儲氫過程的能耗、儲氫量及氫載體的物性等方面考量，美國能源部計畫結合有機液態氫化物為苯或甲苯。以甲苯為例，甲基環己烷(Methylcyclohexane-Toluene- Hydrogen, MTH)，在氫氣的產生端以甲苯加氫反應進行氫氣的儲存成為甲基環己烷，甲基環己烷被載運至使

用端，透過脫氫反應將氫氣取出成為甲苯（如圖 4-15 所示）。



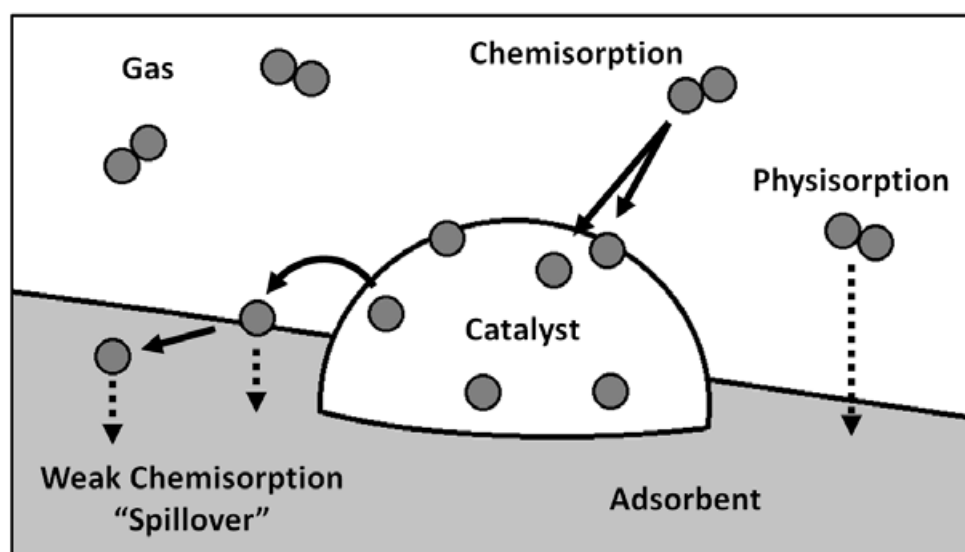
資料來源：http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/tech_status.html

圖 4-15 有機液態儲氫的儲運模式

美國能源部之研究顯示，甲苯屬於十分理想的有機液態儲氫劑，理論儲氫量分別為 7.19 wt.% 和 6.18wt.%，由於常溫常壓下為液態，相較於高壓氣體及現有的金屬儲氫量高許多，可以使氫之儲運體積大幅減少，且容器不需如高壓鋼瓶厚重，所以在安全上及運送成本上有明顯的優勢，儲氫劑成本低且可多次循環使用，對長距離及大量的氫能運輸深具意義，液態儲氫之形式與目前使用汽油的能源基礎設施相近，這對未來替代能源車輛之應用可行性可大幅提高。

另外研究方向係利用所謂氫溢出現象(Hydrogen Spillover)，根據實驗結果，揭露在室溫環境下氫氣並無法被還原釋放之(Al₂O₃)化合物，卻能在添加鉑之 Pt-Al₂O₃ 存在的條件下輕易地進行還原，且 Spillover 現象並不侷限於鄰近的表面，它能延伸至其他與接受體表面接觸的地方，如圖 4-16 所示。雙原子分子(Diatomic Molecule)首先吸附在金屬表面，被激發之物質 Spillover 在載體(白色)上，這些被激發（解離）之物質可以擴散至另一相接

觸之表面(灰色)。



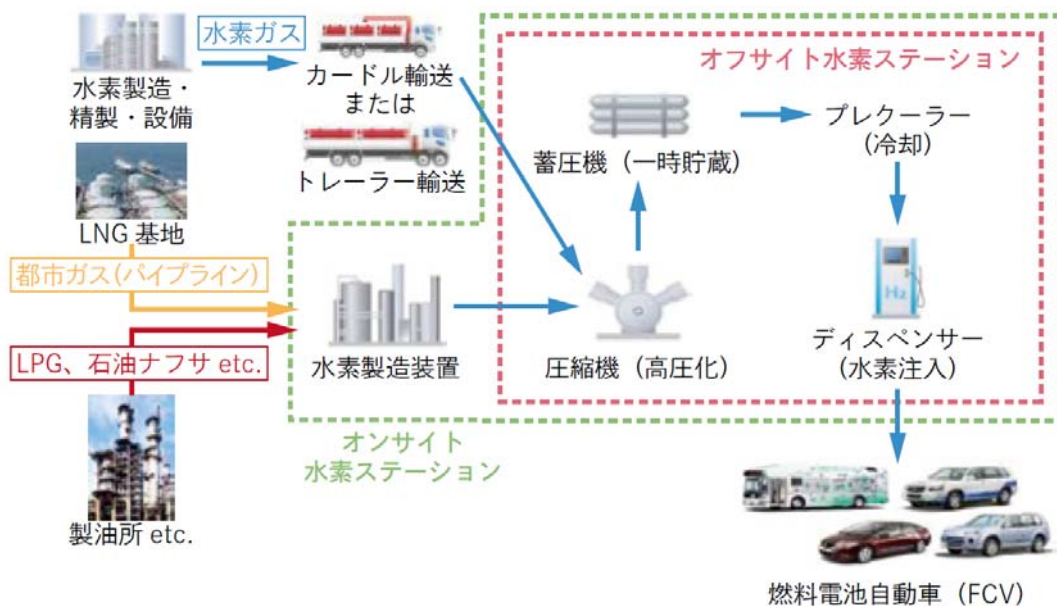
資料來源：Thermodynamics of Metal Hydrides: Tailoring Reaction Enthalpies of Hydrogen Storage Materials, 2012 DOE

圖 4-16 氫溢出現象(Hydrogen Spillover)

氫溢出過程於室溫下發生時，氫分子先經金屬觸媒解離產生氫原子後，藉由表面擴散(Surface Diffusion)將氫原子轉移至碳材(Support or Receptor)上，最後吸附於碳材。經由溢出機制所產生之可逆室溫儲氫量，氫氣在摻雜少量白金多孔性碳材上之溢出現象在 6.9 MPa 壓力下，其室溫儲氫量可由 0.6 wt.% 提升至 1.2 wt.%，提升車載運送應用之可行性^{[28][32]}。

4.7 加氫站技術

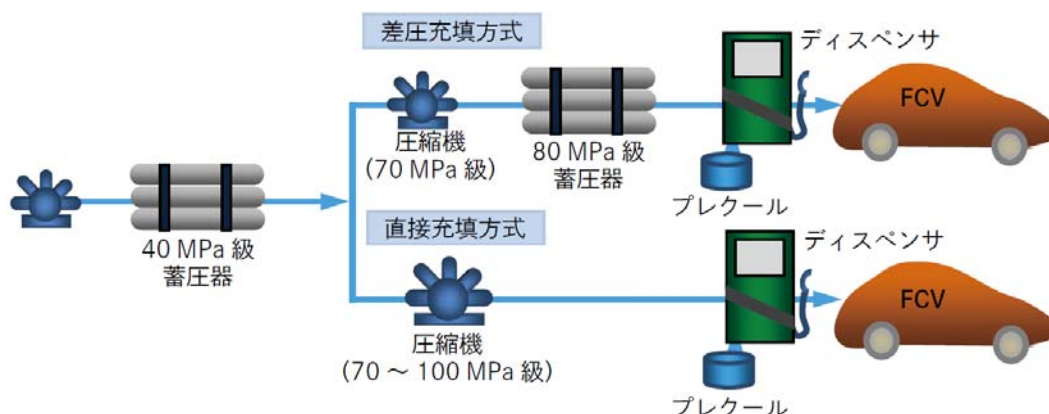
加氫站是氫能利用的必要基礎設施，其型式主要區分為：氫氣製造與加氫站分處兩地，藉由氫氣車等輸送的異地型(off-site)與以瓦斯或液化石油氣為原料，直接在加氫站製造氫氣的現地型(On-site)兩種(圖 4-17 所示)，圖中紅色虛線代表異地型加氫站，而綠色虛線代表現地型加氫站。兩者的差別僅在於對加氫站供應氫氣的型式不同，但對於燃料電池車有加氫充填則相同。



資料來源：2014 NEDO 氢能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 4-17 加氫站種類與技術

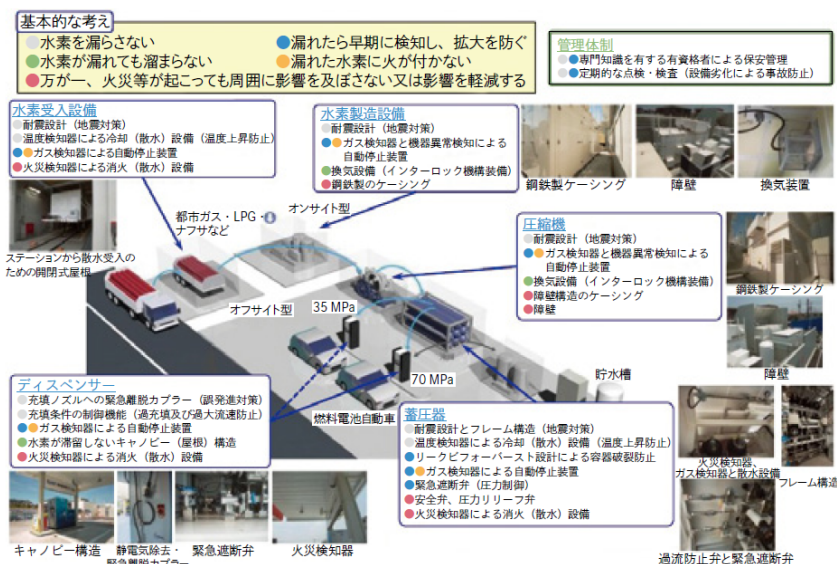
加氫站對燃料電池車的充填技術有兩種：第1種是壓差充填方式，利用加氫站儲壓機與燃料電池車氫氣儲槽的壓力差進行充填；第2種是利用壓縮機加壓使氫氣不停留於氫氣儲壓機、直接注入於燃料電池車之氫氣儲槽的直接充填方式(如圖4-18所示)；目前亦有部分業者提出併用兩種充填方式的提案。直接充填方式無需高壓儲壓器(80MPa)，成本較低，但是加氫站必需配置2部壓縮機才能達成大容量的高壓充填，其技術開發還有發展空間。氫氣充填過程中，最高充填壓力高達87.5MPa，充填時間約需3分鐘，與一般燃油車的加油時間相當。由於充填時燃料電池車的氫氣儲槽溫度會上升，為了不超過最高容許溫度(85℃)，須以預冷器將氫氣溫度降至-40℃。充填過程中，加氫站與燃料電池車之間須利用紅外線進行通訊連結，除了確認燃料電池車的氫氣儲槽狀態外，同時可控制氫氣的流量與壓力^{[4][5][6]}。



資料來源：2014 NEDO 氫能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 4-18 車輛氫氣補充技術

而加氫站安全、耐用度更需特別注意，主要是氫脆（hydrogen embrittlement）現象。金屬材料由於吸氫或氫滲而造成機械性能嚴重退化，發生脆斷的現象。不僅在普通的鋼材中發現氫脆現象，在不鏽鋼、鋁合金、鈦合金、鎳基合金和鋁合金中也都有此現象，因此加氫站的相關建材、使用年限必須加以研究。另外由於氫燃點低、活性強，因此必須特別嚴格規範包括靜電、洩漏、耐震、溫度之控制(如圖 4-19 所示)^{[4][5]}。



資料來源：2014 NEDO 氫能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)

圖 4-19 加氫站安全管理

4.8 車上重組的研究

燃料電池電動汽車商業化的最大瓶頸在於燃料的選擇與運送，也就是牽涉到燃料周邊系統的建立問題。為解決氫氣運送產生相關問題，若選擇其他易於運送之燃料，在車上進行重組產生氫氣，作為燃料電池電動汽車的燃料為目前美國和歐洲思考的方向。美國由於頁岩油的成功，研究主要方向是汽油，而歐洲方面偏向採用甲醇。

現有氫氣、甲醇與汽油三種，這些燃料分別具有不同的特性、優勢與問題。就燃料電池車輛的技術層面而言，以氫氣系統最為容易，也最為成熟，且已在長期試運轉獲得驗證。其次是甲醇系統，所需使用的燃料重組系統較為簡單；最後為汽油系統，因為高溫重組需要付出加裝高溫與低溫一氧化碳轉化反應器，造成系統複雜度升高的難題。就環保層面而言，也有相同的結果，氫氣車種的排氣為零污染；甲醇與汽油車種的污染則依序提升，但較傳統燃油車輛減少 1 半以上。

如果改採建立燃料補充系統困難度的觀點，則結果恰好相反。加氫站對社會大眾而言，完全屬於一個嶄新的觀念，即使已有安全良好的法規與裝備，也需要相當時間的教育與推廣，才能去除民眾的疑慮。此外，一座合格的加氫站成本係現有加油站 5 倍以上，要在全國各地普遍設立，並不是一件容易的事。

使用甲醇則會較氫氣為容易，只須就現有加油站的設施進行改裝，因此投資金額較少。但是甲醇作為燃料也有其他的疑慮，因甲醇具有毒性，操作必須完全隔離，而且發生洩漏時，可能會引發環境危機；同時，甲醇缺乏明顯的味道，管制不易。

至於汽油系統，則可利用現成的加油站，也就是沒有燃料補充的問題。然而燃料電池系統所使用的汽油，需要極低的硫含量，並不能直接使用目前市售的商用汽油，以免損害燃料電池的電極^{[3][7][9]}。

4.8 小結

氫能儲存技術最具障礙，但經過多年的研發投入，在儲氫技術本身和應用模式及需求上均已逐漸可行。在系統研究方面，高壓儲氫可供給近程

市場，而壓力影響碳纖維的需求為系統成本的最大考量，降低壓力是降低系統成本的關鍵，目前的方向朝著低溫或是以儲氫材料搭配來降低壓力。總結來說，目前高壓儲氫可以供給近程的市場使用，加強其成本降低。以長程目標來看，美國能源部認為儲氫材料才能帶來重大突破。

另外一個是考慮車上重組的可行性，若使用車上重組，即可使用甲醇和汽油，這項技術的優點是可搭配目前使用中的燃料儲存、輸送系統，大幅降低氫氣儲存與運送成本，但排碳量會上升，同時車輛本身必須配置燃料重組器，成本會增加。

第五章 燃料電池小客車生命週期能源消耗 與溫室氣體排放試算與評估

5.1 我國私人小客車生命週期盤查

5.1.1 評估工具選擇

本研究採用美國阿岡國家實驗室(Argonne National Laboratory)所開發之 GREET(Greenhouse gases Regulated Emissions, and Energy use in Transportation) 模式，針對整個車輛與燃料生命週期之能源消耗與污染排放進行分析，模式中 包含各種能源使用車輛參數，其中也包含了本研究的研究對象—汽油車與燃料 電池車。GREET 模式除了對車輛的生命週期進行分析外，也同時針對燃料的 生命週期進行分析，使得整體生命週期的評估架構較為完整。由於本模式為公 開使用版本，且有完善的說明指南，因此對於模式相關參數均有詳細說明，操 作上也較為方便。綜上所述，本研究以 GREET 模式作為分析小客車生命週期 能耗與二氧化碳排放的評估工具。其中，車輛週期係透過 GREET2 2015(2015 年版)模式分析，燃料週期則透過 GREET1 2015(2015 年版)模式分析。

GREET 模式是美國 Argonne 國家實驗室根據所蒐集到的美國地區相關燃 料提煉及各式汽車及電動車的資料建立而成，主要分析美國各式的車種，然而 我國在車輛組成過程、車輛使用及油料生產提煉過程與美國有所差異，因此在 GREET 模式中部分參數需要進行本土化的修正，以符合現今國內使用的特性。

5.1.2 國內汽油車及燃料電池車相關參數資料蒐集

本研究以 TOYOTA 2014 Altis 1.8L CVT7 汽油車及燃料電池車作為研究對 象，在燃料使用設定上，汽油車之燃料為汽油。

選擇之燃料電池車為 TOYOTA MIRAI，該車已於美國及日本進行試運 行，燃料電池車之燃料為氫，並依照我國國情，目前國內氫氣 90%以上由天然 氣所提煉，該車之乘坐空間與 TOYOTA 2014 Altis 相當接近。

有關汽油車在車輛平均耗能 (km/L) 之數據部分，可從車輛耗能研究網站 中查詢得知。而從測試值可看出，其油耗皆符合國內耗油標準之規定，本研究

以車輛的油耗測試值作為平均油耗，即 19.1km/L。經由單位換算，1 英哩/加侖(mile per gallon, MPG) = 0.425143707 km/L，因此可得平均油耗為 44.93 MPG。

而在燃料電池車車輛平均耗能之數據部分，可從美國 TOYOTA 官網中查詢得知，其燃料效率為 66 MPG (每加侖氫氣行駛 66 英哩)。

在車輛二氧化碳排放參數方面，利用車輛平均油耗乘以每公升汽（柴）油排放的二氧化碳當量，即可得到。根據能源局公告「油料燃燒及電力使用之二氧化碳排放係數」，使用汽油每公升排放二氧化碳約 2.26 公斤，將二氧化碳排放係數除以表 5-1 的平均油耗，可得到車輛行駛每公里排放的二氧化碳公斤數，即 $2.26(\text{kg/L}) / 19.1(\text{km/L}) = 0.118 (\text{kg/km})$ 。經由單位換算 $1 \text{ kg/km} = 1,610 \text{ 公克/英哩}(\text{gram/mile})$ ，因此可換算為，車輛行駛每英哩排放的二氧化碳克數為 190.5 g/mile。

5.1.3 GREET 1 2015 模式參數本土化

本研究在車輛能源使用上，比較汽油車與燃料電池車的燃料週期能耗與溫室氣體排放的差異，並以 GREET1 2015 模式進行分析。

有關模式參數本土化說明如下：

1. 在模擬年份上，設定為 2015 年。
2. 比較的車種設定為汽油小客車與燃料電池小客車。在模式中，燃料途徑選擇石油與天然氣，其中石油部分選擇汽油。
3. 模式中有關汽油種類分為兩種，分別為傳統汽油(conventional gasoline)與新配方汽油(Reformulated gasoline, RFG)，其中新配方汽油根據美國環保署的定義，是經過特殊調配的汽油，使其較傳統汽油燃燒得更徹底，減少在空氣中的廢煙與毒物的產生。由於在我國並無特別針對汽油進行相關的分類，因此這部分即先依模式預設的參數值設定。
4. 在汽油含氧量級含硫量部分，根據行政院環境保護署「車用汽柴油成分管制標準」，自 101 年 1 月 1 日起施行之汽油成分標準，硫含量最多不能高於 10 mg/kg，氧含量最多不得高於 2.7 %。因此在 GREET 模式本土化參數修正上，即以上述數值輸入於新配方汽油及傳統汽油參數中，如圖 5-1

所示。

5. 有關汽油的增氧劑(Oxygenate)，目前國內無鉛汽油主要是使用「甲基第三丁基醚(methyl tert-butyl ether；MTBE)」，其可提高汽油的辛烷值，並可促進汽油的完全燃燒(中油網站)，減少車輛使用過程中揮發性有機化合物的排放，進而達到整體空氣品質改善之目標(袁菁，1999)。因此在增氧劑本土化參數上，即選擇 MTBE。
6. 在車輛動力部分，本研究對象之 TOYOTA 2014 Altis 使用的引擎為渦輪增壓汽油引擎，然模式中針對一般汽油車所使用的引擎技術僅區分火花點火引擎(Spark Ignition Engine, SI engine)及火花點燃直噴引擎(Spark Ignition Direct Injection, SIDI)，其與渦輪增壓汽油引擎是不同技術。為利模式計算，渦輪增壓汽油引擎及火花點燃直噴引擎均屬較先進技術，因此本模式計算中，以火花點燃直引擎(SIDI)作為本報告之模式假設參數。另燃料電池車搭配燃料電池堆疊依其官網公布最大可輸出 114 千瓦（153 馬力），搭配 1.6KWH 之鎳氫電池。
7. 在天然氣部分，有關燃料提煉及組成成份之相關數值，考量我國並無生產均向國外購買進口，故採模式原始設定值。
8. 油料運送途徑

在汽油部分，模式中之油料運輸途徑參數輸入，包括原油開採到煉油廠的運輸途徑(如圖 5-1 所示)及煉油廠到加油站之途徑，相關參數主要參考本所 101 年度「從生命週期觀點探討國內替代能源車輛之能源消耗與溫室氣體排放之研究」之結果進行本土化修正，如表 5-2 所示。

在天然氣部分，本研究假設從天然氣儲存場以管線方式(如圖 5-2 所示)，配送至各個加氣站供車輛使用，依據天然氣加壓站規格與效率，一般可搭配之管線運送平均長度為 50 公里。

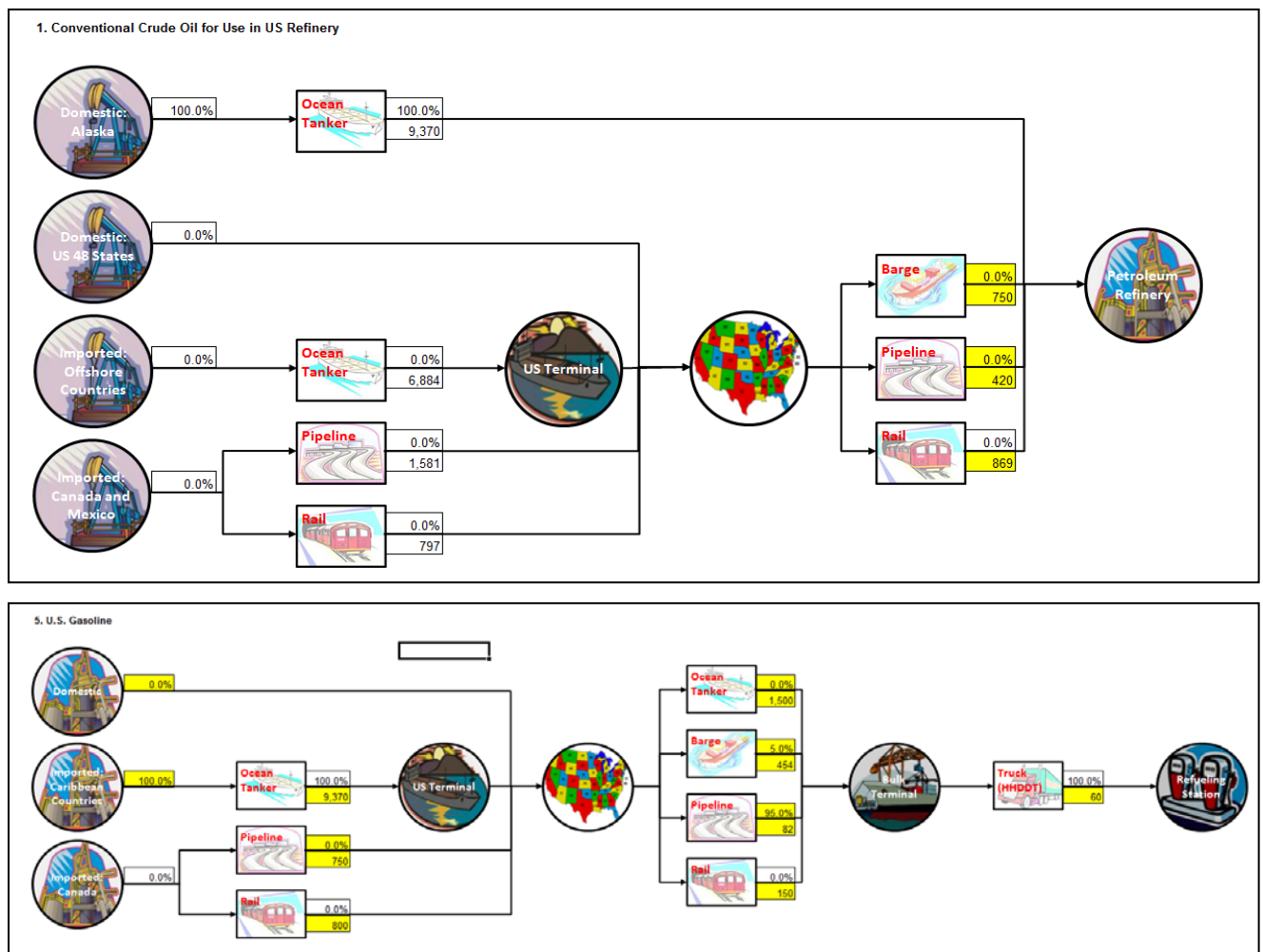
9. 我國油輪噸位

主要參考本所 101 年度「從生命週期觀點探討國內替代能源車輛之能源消耗與溫室氣體排放之研究」之本土化結果，中油在遠洋油輪部分，已建立相當具規模的自有油輪船隊，包括 26 萬噸級油輪 1 艘、15 萬噸級 3 艘、10 萬噸級油輪 1 艘、4 萬噸級油輪 2 艘，平均約為 12.7 萬噸級。在環臺油輪部分，假

設以 2010 年中油與臺船購買的 2 艘 4 萬噸級油輪為主，則平均噸位約為 4 萬噸級。

10. 電力排放係數

GREET 預設之每度電(Kwh)排碳 723 公克，本研究依據經濟部能源局公布之 103 年我國電力排放係數資料，調整為每度電(Kwh)排碳 521 公克。



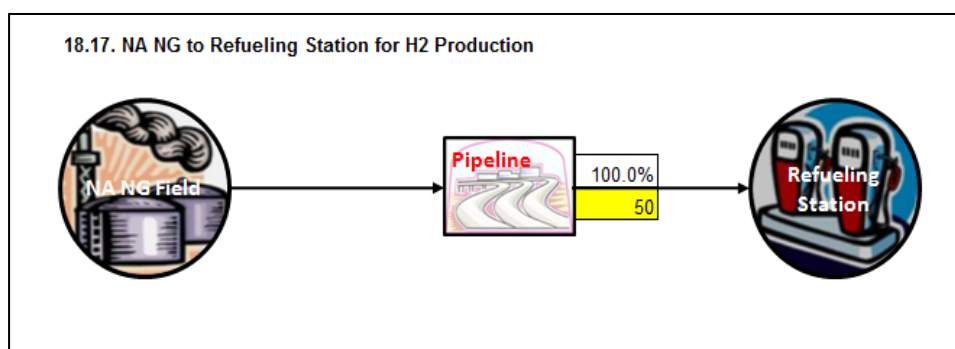
資料來源：本研究整理

圖 5-1 美國原油開採到煉油廠的運輸途徑

表 5-1 國內油料運輸途徑本土化調整列表

作業項目	進口	儲存		配送
運輸途徑	國外至臺灣端	煉油廠至供油中心（油庫）		供油中心（油庫）至加油站
方式	遠洋油輪	油管（西部）	油輪（東部）	油罐車
比例	100%	95%	5%	100%
距離	9,370 公里	82 公里	454 公里	60 公里

資料來源：交通部運輸研究所 101 年度「從生命週期觀點探討國內替代能源車輛之能源消耗與溫室氣體排放之研究」



資料來源：本研究整理

圖 5-2 天然氣儲存場到加氣站之運輸途徑

11. 油料的熱值

熱值是指 1 單位數量的油料完全燃燒時產生的熱量，由於我國與美國對油料的燃燒效率並不同，因此在熱值上也需進行調整。由於在火力發電火使用到燃煤、燃氣及燃油，在汽油燃料提煉過程使用到原油，在一些生產過程中，亦會使用到一些燃料，因此在本模式中，主要進行發電業用燃料煤、原油、車用汽油、柴油及天然氣的熱值進行本土化的調整。根據能源局 104 年 5 月公布的能源產品單位熱值表資料，我國發電業用燃料煤、原油、車用汽油、柴油及天然氣的熱值別為 5,700 kcal/kg、9,000 kcal/l、7,800 kcal/l、8,400 kcal 及 8,000 kcal/m³，如表 5-3 所示。

表 5-2 國內油料熱值本土化調整列表

	熱值	單位轉換	預設值
發電業用燃料煤	5,700 kcal/kg	20,571,818 Btu/ton	19,474,196 Btu/ton
原油	9,000 kcal/l	135,341 Btu/gal	129,670 Btu/gal
車用汽油	7,800 kcal/l	117,295 Btu/gal	116,090 Btu/gal
柴油	8,400 kcal/l	126,318 Btu/gal	128,450 Btu/gal
天然氣	8,000 kcal/m ³	900 Btu/ft ³	983 Btu/ft ³

資料來源：經濟部能源局公布之能源產品單位熱值表，105 年

5.1.4 GREET 2 2015 模式參數本土化

在車輛週期模式方面，主要採用本所 101 年度「從生命週期觀點探討國內替代能源車輛之能源消耗與溫室氣體排放之研究」報告之本土化參數。

本研究以 2015 年版 GREET2 2015 模式進行車輛週期評估。本研究對象之車型為汽油車及燃料電池車，進行相關參數本土化調整。

由於我國政府法令規定及汽車使用者對於汽車使用的習慣不同，因此在模式中部分與汽車使用行為相關的參數需要進行本土化調整，調整的項目包括車輛總行駛里程、車輛使用的流體更換次數、車輛使用的流體產生廢液的比例、車輛使用的流體重、輪胎及車用電池的更換次數等；至於有關車輛原件的組成占比，車輛原料生產過程中所產生的能耗與溫室氣體排放參數，以及車輛組裝、廢棄與回收所產生的能耗與溫室氣體排放參數則假設與預設值設定相同，不進行修正。相關參數本土化調整說明如下：

1. 一般國內汽車使用年限

參考本所 101 年度「從生命週期觀點探討國內替代能源車輛之能源消耗與溫室氣體排放之研究」，本研究假設以 8 成民眾汽車使用 15 年就會淘汰，並設定我國汽車使用年限為 15 年。

2. 一般國內使用車輛生命週期總行駛里程

依據交通部「103 年自用小客車使用狀況調查報告」，針對我國自用小客車各主要用途別比例及年平均行駛里程進行統計，透過這 2 項資料，可得到我國平均自用小客車年行駛里程。

本研究綜整我國自用小客車各主要用途別比例及年平均行駛里程統計資料，如表 5-4 所示。我國自用小客車主要用途別大致可區分為通勤(學)、探親或接送親人小孩、休閒、洽公或業務使用、購物及其他等 6 種，各用途使用占使用百分比，通勤(學)使用比例最高，達 43.9%，其次為探親或接送親人、小孩，達 21.0%，接下來依序為休閒、洽公或業務使用、購物及其他，使用百分比分別為 18.9%、11.4%、4.2%及 0.7%。

在平均每車全年行駛里程(公里)部分，其中洽公或業務使用的年行駛里程最多，達 19,710 公里，其次為通勤(學)，年行駛里程達 12,842 公里，接下來依序為探親或接送親人小孩、其他、休閒及購物，平均每車全年行駛里程(公里)分別為 10,221 公里、9,043 公里、8,210 公里及 3,868 公里。透過各用途別使用百分比及平均每車全年行駛里程進行相乘計算，可得我國自用小客車全年平均行駛里程約 11,394 公里。

表 5-3 我國自用小客車各主要用途別比例及年平均行駛里程

	通勤(學)	探親或接送親人、小孩	休閒	洽公或業務使用	購物	其他
用途別使用百分比	43.90%	21.00%	18.90%	11.40%	4.20%	0.70%
平均每車全年行駛里程(公里)	13,211	8,911	6,571	19,710	3,857	10,260
加權(公里)	5799.629	1871.31	1241.919	2246.94	161.994	71.82

資料來源：交通部「103 年自用小客車使用狀況調查報告」

將我國自用小客車全年平均使用里程 11,394 公里乘上我國小客車假設平均使用期限 15 年，則可得到我國小客車在生命週期中可行駛的里程數為 170,910 公里(106,000 英哩)。

3. 若以一般國內使用車輛生命週期總行駛里程可達 170,910 公里，每年可行駛 11,394 萬公里計算，及小客車平均使用年限約 15 年，則車輛在此使用年限內所用到相關流體的替換次數，參酌原廠保養手冊建議，本土化修正說明(表 5-4)如后：

- ① 引擎機油 (Engine Oil) 部分，平均每行駛 5,000 公里更換 1 次，共約需更換 35 次，而燃料電池車並無此需求。

- ② 動力方向機油（Power Steering Fluid）部分，平均每行駛 100,000 公里更換 1 次，共約需更換 2 次，而燃料電池車並無此需求。
- ③ 煞車油（Brake Fluid）部分，平均每 1.5 年更換 1 次，共約需更換 10 次。
- ④ 自動變速箱油（Transmission Fluid）部分，平均每 2 年換 1 次，共約需更換 8 次，而燃料電池車並無此需求。
- ⑤ 動力系統冷卻液（Powertrain Coolant）部分，平均每 2 年換 1 次，共約需更換 8 次。
- ⑥ 擋風玻璃水（Windshield Fluid）部分，主要是依當地氣候而定，假設在臺灣平均每行駛 10,000 公里更換 1 次，共約需更換 18 次。
- ⑦ 接著劑（Adhesives）使用部分，因接著劑主要用於車輛製程，使用過程中並不會用到，故設定為 0 次。

表 5-4 流體的替換次數

	引擎機油	動力方向 機油	煞車油	自動變速 箱油	動力系統 冷卻液	擋風玻璃 水	接著劑
設定值	39	0	3	1	3	19	0
本土化調整	35	2	10	8	8	18	0

資料來源：本研究整理

4. 有關各種流體廢液更換比例部分，由於引擎機油因在更換時會洩漏掉大部分的廢液，參酌原廠保養手冊及國內維修保養經驗，假定殘留量為 10%，即總更換引擎機油廢液量比為 90%；其他如動力方向機油、煞車油、動力系統冷卻液及接著劑，一般更換廢液比約為 66.7%（約占 2/3），至於自動變速箱油更換廢液比則假設約為 60%，詳表 5-5 所示。

表 5-5 流體更換廢液占比

	引擎機油	動力方向機油	煞車油	自動變速箱油	動力系統冷卻液	擋風玻璃水	接著劑
設定值	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	66.7%	0.0%	66.7%
本土化調整	90.0%	66.7%	66.7%	60.0%	66.7%	0.0%	66.7%

資料來源：本研究整理

5. 有關各種流體在汽車中所占的重量部分，其中動力方向機油、剎車油及接著劑以模式中原設定值為準，在汽油車方面，引擎機油調整為 11 磅，自動變速箱油及動力系統冷卻液調整為 17.6 磅，擋風玻璃水調整為 4.4 磅，燃料電池車輛方面，並無引擎機油與自動變速箱油，冷卻液則依其官網公布調整為 30 磅。詳表 5-6 所示。

表 5-6 流體在汽車中所占的重量

單位：磅

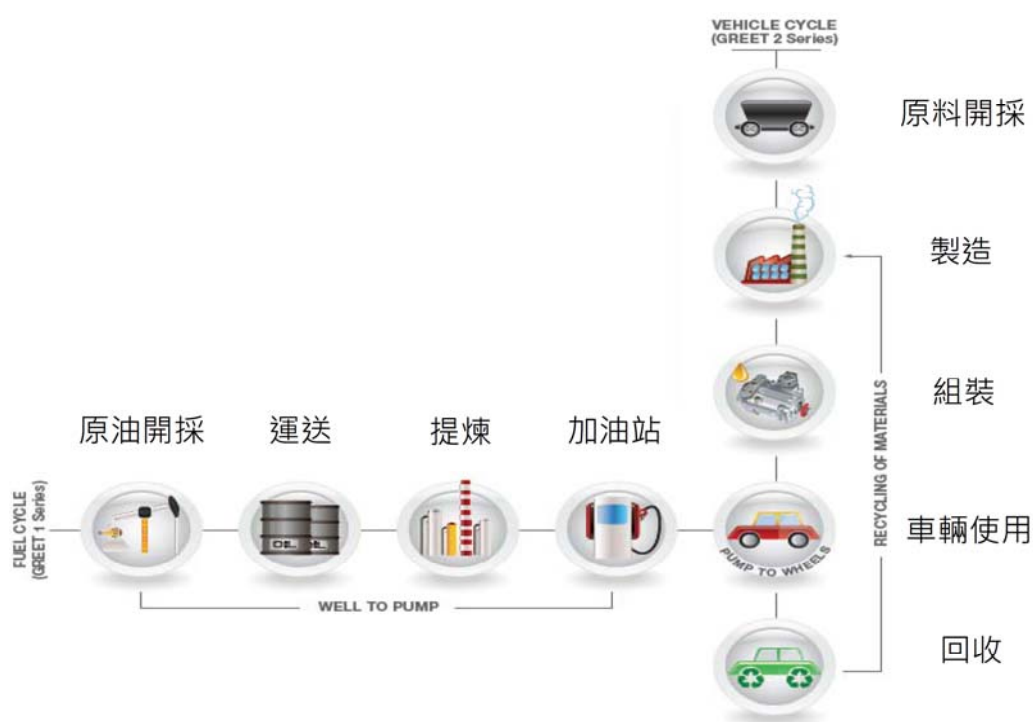
		引擎機油	動力方向機油	煞車油	自動變速箱油	動力系統冷卻液	擋風玻璃水	接著劑
汽油車	設定值	8.5	0.0	2.0	24.0	23.0	6.0	30.0
	本土化調整	11.0	0.0	2.0	17.6	17.6	4.4	30.0
燃料電池車	設定值	0.0	0.0	2.0	1.8	15.8	6.0	30.0
	本土化調整	0.0	0.0	2.0	0	30.0	4.4	30.0

資料來源：本研究整理

6. 有關車輛生命週期中輪胎及鉛酸電池更換次數部分，若以每行駛 5 萬公里更換 1 次，試算車輛輪胎及鉛酸電池更換次數皆為 4 次。
7. 車重：TOYOTA 2014 Altis 汽油車與 Mirai 燃料電池車車重部分，依據車輛耗能研究網站的資料，TOYOTA 2014 Altis 汽油車車重約 1,000 公斤(2,205 磅)；燃料電池車車重部分，本研究假設車重依其官網公布為 1,900 公斤(4,190 磅)。
8. 燃料電池車之燃料電池堆假設為 114kW(153hp)。
9. 燃料電池車另配置 1.6Kwh 之鎳氫電池。

5.2 我國私人小客車生命週期能源消耗與溫室氣體排放試算與評析

本研究將 GREET 模式內的參數進行本土化調整後，可得到汽油小客車與電動小客車在生命週期過程中的能耗與溫室氣體排放(包含二氧化碳排放)之評估結果。GREET 模式除可分析車輛全生命週期外，另可分析油井到加油站 (well-to-pump, WTP) 階段、車輛週期(不含車輛使用階段)及車輛使用階段等 3 階段。以下針對 GREET1 2015(燃料週期模式)及 GREET2 2015(車輛週期模式)之試算結果進行評析。GREET 生命週期流程圖如圖 5-3 所示。



資料來源：Argonne National Laboratory

圖 5-3 GREET 模式之生命週期流程

5.2.1 GREET 1 2015 模式試算結果

從 GREET1 2012 模式之分析可得到車輛所使用的燃料之油井至輪胎 (well-to-wheel, WTW) 燃料生命週期結果，其包含了從原油開採、提煉、運送到加油站之 WTP 階段的能耗及溫室氣體排放，及從加油站至輪胎階段 (pump-to-wheel, PTW) (即汽車使用階段) 的能耗及溫室氣體排放。在本模式中

的主要成果呈現有兩種：①不同燃料之原料開採、提煉至運送到加油站階段（WTP）所需的總能耗及溫室氣體排放量；②以燃料週期觀點，分析不同能源使用車輛在每公里行駛下，其原料開採（Feedstock）階段、油料提煉至運送到加油站階段及車輛使用（vehicle operation）階段的能耗與溫室氣體的排放量，其單位分別為熱量/公里（Btu/km）及公克/公里（g/km）。

不同類型燃料在 WTP 階段(即油井至加油站階段)之能耗與二氧化碳排放試算部分，本研究透過 GREET 模式中部分參數本土化調整，得到汽油與氫氣在 WTP 階段的能耗與二氧化碳排放量，詳見表 5-7。其中能量單位 Btu(British thermal unit)為英制熱量單位，1Btu 等於使 1 磅的水升高華氏 1 度所需要的熱量，而 mmBtu 為百萬英制熱量單位。根據模式分析結果，在汽油的 WTP 階段，每生產 1 mmBtu 需要 276,415 Btu 的能耗，並會產生 14,985 公克的二氧化碳排放。在氫氣的 WTP 階段每生產 1 mmBtu 需要 779,481 Btu 的能耗，並會產生 117,480 公克的二氧化碳排放。從結果可看出，氫氣生產在 WTP 階段每 mmBtu 生產，其能耗及二氧化碳排放量明顯高於汽油。

表 5-7 不同類型燃料 WTP 階段之能耗與二氧化碳排放試算表

燃料類型	燃料之原料開採、提煉及運送階段（WTP） （每 mmBtu 燃料生產）	
	能耗（Btu）	二氧化碳排放（公克）
汽油	276,415	14,985
氫氣	779,481	117,480

資料來源：本研究整理

GREET1 2015 以燃料週期觀點，分析不同能源使用車輛在每公里行駛下，其原料開採（Feedstock）階段、燃料提煉至運送到加油站階段及車輛使用（vehicle operation）階段的能耗與溫室氣體的排放量。表 5-8 及表 5-9 分別為汽油車及燃料電池車的試算結果，本研究並針對燃料週期各階段能耗及二氧化碳排放進行整理及分析，如表 5-10 所示。

1. 有關汽油車與燃料電池車在燃料週期各階段的能耗比較說明如下：

(1) 在汽油車與電動車的能耗分析部分，若僅考慮車輛使用階段，汽油

車每公里行駛的能耗較燃料電池車能耗高，汽油車的能耗為 1,567 Btu/km，而燃料電池車的能耗僅為 587 Btu/km。但若考慮整個燃料週期，包括原料開採（Feedstock）階段、燃料提煉至運送到加油站階段及車輛使用階段，則汽油車每公里行駛的總能耗為 2,000 Btu/km，而燃料電池車的總能耗為 1,043 Btu/km，燃料電池車每公里行駛的總能耗低於汽油車總能耗。然而在燃料提煉至運送階段，車輛每公里行駛的能耗燃料電池車高於汽油車，燃料電池車在此階段的能耗為 409 Btu/km，汽油車的能耗為 337 Btu/km；在原料開採階段，汽油車每公里行駛的能耗高於燃料電池車，汽油車的能耗為 95 Btu/km，而燃料電池車的能耗為 47 Btu/km。

表 5-8 汽油車燃料週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表

	每公里能耗（Btu）；每公里二氧化碳排放（公克）				占比（%）		
	原料開採	燃料提煉及運送	車輛使用	合計	原料開採	燃料提煉及運送	車輛使用
Total Energy	95	337	1,567	2,000	4.8%	16.9%	78.3%
Fossil Fuels	93	321	1,464	1,877	4.9%	17.1%	78.0%
Coal	9	21	0	29	29.8%	70.2%	0.0%
Natural Gas	56	191	0	247	22.6%	77.4%	0.0%
Petroleum	28	109	1,464	1,600	1.7%	6.8%	91.5%
CO ₂ (w/ C in VOC & CO)	0.024	24	119	143	0.0%	16.5%	83.5%
CH ₄	0.083	0.054	0.006	0.143	58.3%	37.8%	3.9%
N ₂ O	0	0.004	0.005	0.009	0.0%	46.7%	53.3%
GHGs	2	27	121	149	1.7%	17.9%	80.8%

資料來源：本研究整理

表 5-9 燃料電池車燃料週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表

	每公里能耗 (Btu)；每公里二氧化碳排放 (公克)				占比 (%)		
	原料開採	燃料提煉及運送	車輛使用	合計	原料開採	燃料提煉及運送	車輛使用
Total Energy	47	409	587	1,043	4.5%	39.2%	56.3%
Fossil Fuels	47	380	587	1,013	4.6%	37.5%	57.9%
Coal	1	95	0	96	0.6%	99.4%	0.0%
Natural Gas	44	281	587	911	4.8%	30.8%	64.4%
Petroleum	2	4	0	6	40.0%	70.0%	0.0%
CO ₂ (w/ C in VOC & CO)	3	66	0	69	4.5%	95.5%	0.0%
CH ₄	0.157	0.079	0	0.236	66.5%	33.5%	0.0%
N ₂ O	0	0	0	0	0.0%	0.0%	0.0%
GHGs	8	68	0	76	10.5%	91.5%	0.0%

資料來源：本研究整理

表 5-10 汽油車與燃料電池車燃料週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表

車種	燃料類型		每公里能耗 (Btu)；每公里二氧化碳排放 (公克)				占比 (%)		
			原料開採	燃料提煉及運送	車輛使用	合計	原料開採	燃料提煉及運送	車輛使用
汽油車	汽油	能耗	95	337	1,567	2,000	4.8%	16.9%	78.3%
		二氧化碳排放	0.024	24	119	143	0.0%	16.5%	83.5%
燃料電池車	氫氣	能耗	47	409	587	1,043	4.5%	39.2%	56.3%
		二氧化碳排放	3	66	0	69	4.5%	95.5%	0.0%

資料來源：本研究整理

(2) 針對車輛本身在燃料週期各階段的能耗比較，汽油車部分，車輛使用階段能耗最高，能耗為 1,567 Btu/km，占總燃料週期的 78.3%；燃料提煉及運送階段次之，能耗為 337 Btu/km，占總燃料週期的 16.9%；在原料開採階段能耗最低，為 95 Btu/km，占總燃料週期的 4.8%。燃料電池車部分，在車輛使用階段能耗最高，能耗為 587 Btu/km，占總燃料週期的 56.3%，在燃料提煉及運送階段次之，能

耗為 409 Btu/km，占總燃料週期的 39.2%，原料開採階段能耗最低，為 47 Btu/km，占總燃料週期的 4.5%。

2. 有關汽油車與燃料電池車在燃料週期各階段的二氧化碳比較說明如下：

- (1) 在汽油車與燃料電池車的二氧化碳排放分析部分，若僅考慮車輛使用階段，汽油車的每公里行駛的二氧化碳排放量較燃料電池車高，汽油車的二氧化碳排放量為 119 g/km，然而燃料電池車在行駛時並不會直接排放二氧化碳，屬間接排放，因此這階段的二氧化碳排放量為 0 g/km。但若考慮整個燃料週期，包括原料開採（Feedstock）階段、燃料提煉至運送到加油站階段及車輛使用階段，則汽油車每公里行駛的總二氧化碳排放量為 143 g/km，而燃料電池車的總二氧化碳排放量為 69 g/km，燃料電池車每公里行駛的總二氧化碳排放量明顯較汽油車低。車輛每公里行駛在原料開採階段的二氧化碳排放量上，燃料電池車在此階段的排放量為 3 g/km，汽油車的排放量為 0.024 g/km，燃料電池車排放量高於汽油車；若比較燃料提煉至運送階段，燃料電池車在此階段每公里行駛的二氧化碳排放量亦高於汽油車，燃料電池車的排放量為 66 g/km，汽油車則為 24 g/km。
- (2) 針對車輛本身在燃料週期各階段的二氧化碳排放比較，汽油車部分，車輛使用階段二氧化碳排放量最高，排放量為 119 g/km，占總燃料週期的 83.5%；在燃料提煉及運送階段次之，二氧化碳排放量為 24 g/km，占總燃料週期的 16.5%；原料開採階段二氧化碳排放量最低，為 0.024 g/km，占總燃料週期的 0%。燃料電池車部分，在燃料提煉及運送階段二氧化碳排放量最高，排放量為 66 g/km，占總燃料週期的 95.5%，在原料開採階段次之，二氧化碳排放量為 3 g/km，占總燃料週期的 4.5%；在燃料電池車行駛過程中無二氧化碳排放，因此在車輛使用階段的排放量最低，為 0 g/km，占總燃料週期的 0%。

5.2.2 GREET 2 2015 模式試算結果

GREET2 2015 模式經由參數本土化調整後，可分析我國汽油車及燃料電池車在每公里行駛下之車輛週期(不含使用階段)及全生命週期的能耗與二氧化碳排放。本研究在汽油車與燃料電池車 GREET2 2015 模式參數中，車重、車輛使用年限、使用習慣、行駛里程及電池效能...等，皆是本土化參數調整的項目。以車重為例，汽油車與燃料電池車間的引擎、動力系統有很大的不同，再加上相關搭配的不同配件，造成汽油車及燃料電池車的車重差異，因為燃料電池車配置 2 個 70Mpa 的高壓儲氫桶，再加上電池與控制模組，使車重大幅上升。而車重間接代表著車輛組成的差異，使得其是影響車輛週期能耗及溫室氣體排放的參數之一。

在 GREET2 2015 模式中，車輛週期(不含使用階段)部分包含了車輛元件製造、汽車組裝/廢棄/回收、電池使用(包含電池組裝及使用)及流體使用(包含車用相關液體之製造、使用、廢棄)，本研究分析結果如表 5-11 所示。本研究假設國內各種車輛在電池使用及流體使用的狀況相同，在組裝/廢棄/回收階段則依模式的預設值，主要差異之處在修正汽車重量之參數。從結果可看出，其組裝/廢棄/回收階段在車輛全生命週期的能耗與二氧化碳排放量皆相同；在電池使用部分，燃料電池車在車輛全生命週期的能耗與二氧化碳排放量較汽油車高。流體使用部分，汽油車在車輛全生命週期下的能耗及二氧化碳排放均高於燃料電池車；車輛元件製造部分，燃料電池車在車輛全生命週期的能耗及二氧化碳排放均高於汽油車。

從 GREET2 2015 模式分析車輛週期(不含使用階段)結果顯示，汽油車全生命週期的車輛週期能耗為若針對車輛本身進行車輛週期各階段的能耗及二氧化碳排放比較分析，車輛全生命週期下，在汽油車部分以車輛元件製造階段的能耗及二氧化碳排放量最多，分別占車輛週期的 61.8%及 61.9%，其次分別為流體使用(能耗及二氧化碳排放分別占車輛週期的 19.9%及 20.8%)及組裝/廢棄/回收階段(能耗及二氧化碳排放分別占車輛週期的 16.7%及 16.3%)，最少的則是電池使用(能耗及二氧化碳排放分別占車輛週期的 1.6%及 1.1%)。在燃料電池車部分亦以車輛元件製造階段的能耗及二氧化碳排放量最多，分別占車輛週期的 89.9%及 90.1%，其次依序為組裝/

廢棄/回收階段(能耗及二氧化碳排放分別占車輛週期的 6.5%及 6.5%)及電池使用 (能耗及二氧化碳排放分別占車輛週期的 2.0%及 1.7%)，最少的則是流體使用(能耗及二氧化碳排放分別占車輛週期的 1.6%及 1.7%)。

表 5-11 汽油車與燃料電池車車輛週期 (不含車輛使用階段)各階段能耗與二氧化碳排放試算表

車種	燃料類型		車輛週期能耗（Btu）； 車輛週期二氧化碳排放（公克）					占比（%）			
			車輛元件製造	組裝/ 廢棄/ 回收	電池使用	流體使用	總計	車輛元件製造	組裝/ 廢棄/ 回收	電池使用	流體使用
汽油車	汽油	能耗	51.759	13.982	1.325	16.619	83.685	61.8%	16.7%	1.6%	19.9%
		二氧化碳排放	3,658,459	961,572	63,047	1,228,207	5,911,285	61.9%	16.3%	1.1%	20.8%
燃料電池車	氫氣	能耗	193.460	13.982	4.227	3.452	215.121	89.9%	6.5%	2.0%	1.6%
		二氧化碳排放	13,349,984	961,572	253,993	257,384	14,822,933	90.1%	6.5%	1.7%	1.7%

資料來源：本研究整理

REET2 2015 模式亦可呈現全生命週期的分析，其主要包含 3 個階段，分別為 WTP 階段、車輛週期 (vehicle cycle) 階段(不含車輛使用階段)及車輛使用 (vehicle operation) 階段，本部分的 WTP 階段是從原油的原料開採、提煉、運送，一直到送到各加油站端的整個過程(即燃料週期中原料開採階段加上燃料提煉及運送至加油站階段)；車輛週期階段則是從車輛製造過程中的原料開採、提煉、車輛組裝，及最終的廢棄回收等過程，不含車輛使用階段；而車輛使用階段，則是指車輛供駕駛者使用階段。其中 WTP 階段的能耗與二氧化碳排放即是 REET1 2015 模式中的原料開採階段至燃料提煉及運送階段的分析數據總和。表 5-12 及表 5-13 分別為汽油車及燃料電池車的試算結果，本研究針對車輛每公里行駛下之全生命週期能耗及二

氧化碳排放進行分析比較，如表 5-14 所示。其能耗與二氧化碳排放量的單位分別為熱量/公里 (Btu/km) 與克/公里 (g/km)，另外也分析各階段能耗與二氧化碳排放的占比。

表 5-12 汽油車全生命週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表

	每公里能耗 (Btu) ； 每公里二氧化碳排放 (公克)				占比 (%)		
	WTP 階段	車輛週期 (不含車輛 使用階段)	車輛使用	合計	WTP 階段	車輛週期 (不含車輛 使用階段)	車輛使用
Total Energy	433	305	1,567	2,305	18.8%	13.2%	68.0%
Fossil Fuels	413	284	1,464	2,162	19.1%	13.2%	67.7%
Coal	29	102	0	131	22.3%	77.7%	0.0%
Natural Gas	247	116	0	363	68.1%	31.9%	0.0%
Petroleum	137	67	1,464	1,667	8.2%	4.0%	87.8%
CO ₂ (w/ C in VOC & CO)	24	22	119	164	14.3%	13.1%	72.6%
CH ₄	0.137	0.044	0.006	0.187	73.5%	23.6%	2.9%
N ₂ O	0.004	0.001	0.005	0.010	47.1%	4.6%	48.3%
GHGs	29	23	121	172	16.7%	13.4%	69.9%

資料來源：本研究整理

表 5-13 燃料電池車全生命週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表

	每公里能耗 (Btu) ； 每公里二氧化碳排放 (公克)				占比 (%)		
	WTP 階段	車輛週期 (不含車輛 使用階段)	車輛使用	合計	WTP 階段	車輛週期 (不含車輛 使用階段)	車輛使用
Total Energy	456	782	587	1,825	25.0%	42.9%	32.1%
Fossil Fuels	426	720	587	1,733	24.6%	41.5%	33.9%
Coal	96	228	0	324	29.6%	70.4%	0.0%
Natural Gas	324	411	587	1,322	24.5%	31.1%	44.4%
Petroleum	6	81	0	87	7.3%	92.7%	0.0%
CO ₂ (w/ C in VOC & CO)	69	54	0	123	56.1%	43.9%	0.0%
CH ₄	0.236	0.121	0	0.357	66.0%	34.0%	0.0%
N ₂ O	0.0003	0.0012	0	0.0015	20.0%	80.0%	0.0%
GHGs	76	58	0	134	56.6%	43.4%	0.0%

資料來源：本研究整理

表 5-14 汽油車與燃料電池車全生命週期各階段能耗與二氧化碳排放試算表

車種	燃料 類型		每公里能耗 (Btu) ; 每公里二氧化碳排 放 (公克)				占比 (%)		
			WTP 階段	車輛週期 (不含車輛 使用階段)	車輛使 用	合計	WTP 階段	車輛週期 (不含車輛 使用階段)	車輛使 用
汽油 車	汽 油	能耗	433	305	1,567	2,305	18.8%	13.2%	68.0%
		二氧化 碳排放	24	22	119	164	14.3%	13.1%	72.6%
燃料 電池 車	氫 氣	能耗	456	782	587	1,825	25.0%	42.9%	32.1%
		二氧化 碳排放	69	54	0	123	56.1%	43.9%	0.0%

資料來源：本研究整理

1. 有關汽油車與燃料電池車全生命週期各階段的能耗比較說明如下：

- (1) 汽油車與燃料電池車在每公里行駛下的能耗分析結果，若僅考慮車輛使用階段，汽油車每公里行駛的能耗較燃料電池車能耗高，汽油車的能耗為 1,567 Btu/km，而燃料電池車的能耗僅為 587 Btu/km。但若考慮全生命週期，包括 WTP 階段、車輛週期及車輛使用階段，則汽油車每公里行駛的總能耗為 2,305 Btu/km，而燃料電池車的總能耗為 1,825 Btu/km，燃料電池車每公里行駛的總能耗略低於汽油車。車輛全生命週期能耗中，車輛每公里行駛在 WTP 階段的能耗燃料電池車高於汽油車，燃料電池車在此階段的能耗為 456 Btu/km，汽油車的能耗為 433 Btu/km；若比較車輛週期(不含車輛使用階段)，燃料電池車在此階段每公里行駛的能耗仍明顯高於汽油車，燃料電池車的能耗為 782 Btu/km，而汽油車的能耗為 305 Btu/km。
- (2) 針對車輛本身在全生命週期各階段的能耗比較，汽油車部分，車輛使用階段能耗最高，能耗為 1,567 Btu/km，占全生命週期的 68%；在 WTP 階段次之，能耗為 433 Btu/km，占全生命週期的 18.8%；車輛週期(不含車輛使用階段)能耗最低，為 305 Btu/km，占全生命週期的 13.2%。燃料電池車部分，在車輛週期(不含車輛使用階段)

階段能耗最高，能耗為 782 Btu/km，占全生命週期的 42.9%；車輛使用階段次之，能耗為 587 Btu/km，占全生命週期的 32.1%；在 WTP 階段能耗最低，為 456 Btu/km，占全生命週期的 25%。

2. 有關汽油車與燃料電池車全生命週期各階段的二氧化碳排放比較說明如下：

- (1) 汽油車與燃料電池車在每公里行駛下的二氧化碳排放分析結果，若僅考慮車輛使用階段，汽油車的每公里行駛的二氧化碳排放量較燃料電池車能耗高，汽油車的二氧化碳排放量為 119 g/km，而燃料電池車在行駛時並不會直接排放二氧化碳，屬間接排放，因此這階段的二氧化碳排放量為 0 g/km。但若考慮全生命週期(納入車輛製造及原料取得)，包括 WTP 階段、車輛週期及車輛使用階段，則汽油車每公里行駛的總二氧化碳排放量為 164 g/km，而燃料電池車的總排放量約為 123 g/km，燃料電池車每公里行駛的總二氧化碳排放量低於汽油車。車輛全生命週期的總二氧化碳排放中，車輛每公里行駛在 WTP 階段的二氧化碳排放量燃料電池車高於汽油車，燃料電池車在此階段的排放量為 69 g/km，汽油車則為 24 g/km；在車輛週期(不含車輛使用階段)階段，燃料電池車的二氧化碳排放亦高於汽油車，燃料電池車在此階段的排放量約為 54 g/km，汽油車則為 22 g/km。
- (2) 針對車輛本身在全生命週期各階段的二氧化碳排放比較，汽油車部分，車輛使用階段的二氧化碳排放量最高，排放量為 119 g/km，占全生命週期的 72.6%；WTP 階段次之，二氧化碳排放量為 24 g/km，占全生命週期的 14.3%；在車輛週期(不含車輛使用階段)能耗最低，為 22 g/km，占全生命週期的 13.1%。燃料電池車部分，在 WTP 階段二氧化碳排放量最高，排放量為 69 g/km，占全生命週期的 56.1%，車輛週期(不含車輛使用階段)階段次之，二氧化碳排放量為 54 g/km，占全生命週期的 43.9%，在車輛使用能耗最低，因燃料電池車在行駛時並不會排放二氧化碳，故這階段的二氧化碳排放量為 0 g/km，占全生命週期的 0%。

5.3 小結

為進行我國汽油車及燃料電池車生命週期能源消耗與二氧化碳排放試算與評估，本研究以美國 Argonne 國家實驗室所建立的 GREET 模式作為試算之工具，並分別以 GREET1 2015 模式分析燃料週期，以 GREET2 2015 模式分析車輛週期(不含使用階段)及全生命週期(包括 WTP 階段、車輛週期及車輛使用階段)。由於原本的模式以美國地區所蒐集到的資料建立而成，因此該模式只適用於美國，若要適用於我國，則模式中部分的參數需要進行本土化的調整。本研究分析車輛為燃料電池車，並以 TOYOTA 2014 Altis 1.8L CVT7 汽油車作為對照組。

1. 在 GREET 模式參數調整方面：

在 GREET2 2015 模式中，本土化調整的參數包括車輛總行駛里程、車輛使用的流體更換次數、車輛使用的流體更換廢液的比例、車輛使用的流體重、輪胎及車用電池的更換次數...等；而 GREET1 2015 模式則針對原油運輸途徑、車輛使用過程的溫室氣體排放量與油耗量、油輪之噸位及各種油料的熱值等資料進行本土化的調整。

因車輛使用能源方式不同，因此在車輛規格上有較大差異。透過將上述所蒐集到的汽油車與燃料電池車本土化參數資料帶入模式中進行試算，可得到不同車種間的能耗與二氧化碳排放量結果。

2. GREET1 2015 模式分析結果：

(1) 氫氣在 WTP 階段每 mmBtu (million British thermal units) 生產之能耗及二氧化碳排放量明顯高於汽油。

(2) 若僅考慮車輛使用階段，汽油車每公里行駛的能耗及二氧化碳排放分別為 1,567 Btu/km 及 119 g/km，而燃料電池車每公里行駛的能耗為 587 Btu/km，但燃料電池車在行駛時並不會直接排放二氧化碳，屬間接排放，因此這階段的二氧化碳排放量為 0 g/km。結果顯示，在車輛使用階段，汽油車的能耗及二氧化碳排放量均較燃料電池車高。

(3) 若考慮整個燃料週期，包括原料開採 (Feedstock) 階段、燃料提煉至運送到加油站階段(含電力生產階段)及車輛使用階段。在能耗部分，汽油

車每公里行駛的總能耗為 2,000 Btu/km，而燃料電池車的總能耗為 1,043 Btu/km，在二氧化碳排放部分，汽油車每公里行駛的總二氧化碳排放量為 143 g/km，而燃料電池車的總二氧化碳排放量為 69 g/km，結果顯示若考量整個燃料週期，汽油車及燃料電池車的能耗及二氧化碳排放量均增加，且汽油車在總燃料週期的能耗及二氧化碳排放均較燃料電池車高。

(4) 在燃料週期的能耗中，汽油車在原料開採階段每公里行駛的能耗高於燃料電池車；若比較燃料提煉至運送階段，則燃料電池車在此階段每公里行駛的能耗高於汽油車。

(5) 針對車輛本身在燃料週期各階段的能耗及二氧化碳排放比較：

① 汽油車部分，車輛使用階段每公里行駛能耗及二氧化碳排放量均最高，燃料提煉及運送階段均為次之，原料開採階段能耗及二氧化碳排放量均為最低。

② 在燃料電池車部分，在車輛使用階段每公里行駛的能耗最高，在燃料提煉及運送階段的能耗次之，原料開採階段能耗最低，但二氧化碳排放部分，在燃料提煉及運送階段的排放量最高，原料開採階段的排放量次之，車輛行駛時的車輛使用階段則最低，為 0 g/km。

3. GREET2 2015 模式可分析我國汽油車及燃料電池車在每公里行駛下之車輛週期(不含使用階段)及全生命週期的能耗與二氧化碳排放。GREET2 2015 模式分析結果如下：

(1) 若僅考慮車輛使用階段，汽油車每公里行駛的能耗及二氧化碳排放分別為 1,567 Btu/km 及 119 g/km，而燃料電池車每公里行駛的能耗為 587 Btu/km，但燃料電池車在行駛時並不會直接排放二氧化碳，屬間接排放，因此這階段的二氧化碳排放量為 0 g/km。

(2) 若考慮全生命週期，包括 WTP 階段、車輛週期(不含車輛使用階段)及車輛使用階段，在能耗部分，汽油車每公里行駛的總能耗為 2,305 Btu/km，而燃料電池車的總能耗為 1,825 Btu/km；在二氧化碳排放部分，汽油車每公里行駛的總二氧化碳排放量為 164 g/km，而燃料電池車的總二氧化碳排放量為 123 g/km，結果顯示若考量整個生命週期，汽油車及燃料電

池車的能耗及二氧化碳排放量均增加，且汽油車在全生命週期的能耗及二氧化碳排放均較燃料電池車高。

(3) 在全生命週期分析中 WTP 階段及車輛週期(不含車輛使用階段)階段，燃料電池車每公里行駛的能耗及二氧化碳排放量均高於汽油車。

(4) 針對車輛本身在全生命週期各階段的能耗及二氧化碳排放比較：

① 汽油車部分，車輛使用階段能耗最高，WTP 階段能耗次之，車輛週期階段(不含車輛使用階段)能耗為最低，但在二氧化碳排放上，車輛使用階段的排放量最高，其次為 WTP 階段，車輛週期(不含車輛使用階段)的排放量最低。

② 在燃料電池車部分，車輛週期階段(不含車輛使用階段)能耗最高，車輛使用階段能耗次之，WTP 階段能耗為最低，但在二氧化碳排放上，WTP 階段的排放量最高，其次為車輛週期(不含車輛使用階段)階段，車輛使用階段的排放量最低。

4. 雖然車輛每英里行駛在 GRRET 全生命週期分析中，若將車輛週期分為車輛元件製造、汽車組裝/廢棄/回收、電池使用(包含電池組裝及使用)及流體使用(包含車用相關液體之製造、使用、廢棄)等 4 部分，可以發現因車輛組成不同，使得這些部分的能耗及二氧化碳排放量有些許差異。

(1) 在汽油車部分以車輛元件製造階段的能耗及二氧化碳排放量最多，其次分別為流體使用及組裝/廢棄/回收階段，最少的則是電池使用。

(2) 燃料電池車在能耗部分，以車輛元件製造階段能耗最多，其次依序為組裝/廢棄/回收階段及電池使用，最少的則是流體使用。在二氧化碳排放量部分，以車輛元件製造階段排放量最多，其次依序為組裝/廢棄/回收階段及流體使用，最少的則是電池使用。

5. 從結果顯示，燃料電池車使用階段能耗及二氧化碳排放明顯較汽油車少了很多，若從生命週期觀點來看，其在 WTP 階段之能耗及二氧化碳排放較卻明顯較一般汽油生產高出很多。雖然全生命週期分析顯示燃料電池車的能耗及二氧化碳的排放是較汽油車少的，但以我國天然氣來源取得及提煉環境，若要使用燃料電池車確實達到節能減碳，我國在這部分的相關發展仍有很大改進空間。

第六章 結論與建議

本研究主要介紹世界各國氫燃料電池車發展現況及政府政策，並分析燃料電池在原料生產、製造與運送、使用與維護、棄置與回收等技術議題。為進一步分析生命週期各階段中，所涉及能源消耗與溫室氣體排放，本研究採用美國 GREET(The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model) 車輛生命週期評估模式，並將模式中部分參數調整為國內本土化數值後進行分析，以釐清氫燃料電池車在生命週期各階段及全生命週期的總能耗與溫室氣體排放量，以及節能減碳之效率。主要結論與建議如下。

6.1 結論

1. 目前對燃料電池國外發展狀況，以日本最為積極，日本政府與民間合作，建立各種示範系統，並積極建立國際合作，其第 1 個商轉系統如時程規劃於 2015 年推動上市，日本政府並提供高額購車補助。其次是美國最早投入燃料電池研究，美國能源部就氫能生產、運送、儲存與應用進行完整規劃與研究，能源部並與各相關單位、協會針對對氫能應用建立相當完整的法令規範，並與各車廠進行示範系統合作，在燃料電池車輛推動與補助，提供的補助是電動車的 2 倍。歐盟相對於美國與日本，氫能發展之時程較落後且規模較小，且以定置型應用為優先。歐盟在車輛方面氫能應用，不同於美國和日本優先以小客車為主，歐盟目前其跨國示範系統係以大客車應用為主。
2. 燃料電池的發展必須與國際接軌：一致的標準為建構燃料電池車安全性能基礎環境不可或缺的一環，除本研究介紹之美國和日本外，聯合國經濟委員會日前亦開啟了訂定氫能與燃料電池車技術規則的倡議，由於燃料電池是不同於化石燃料的系統，勢必要與國際接軌交流才能掌握趨勢、兼顧安全與節能。
3. 相關法令修正：由於利用氫氣作為機具和運輸上的燃料，目前仍有許多技術與法規上的障礙需加以克服。所謂法規上的障礙，係指有關應用氫

氣之產品在製造、運輸、分送、儲存和使用上的安全問題，是否有適當的法規(Codes)與標準(Standards)加以規範，讓工程師、製造商、消費者及政府主管機關有所遵循。由於法規與標準，在推動氢能科技或燃料電池相關產品的發展時，會有節省開發之人力、時間和金錢，確保技術的效益，並促進產品製造和服務等相關產業建立、促使一致性的產品測試與驗證，防止不安全產品進入市場，保護消費者與用路人的健康、安全與福祉。

4. 在燃料電池車推廣上，其中交通部門可著力的部分包括：(1)交通相關法規之鬆綁或訂定相關條文。(2) 交通獎勵措施或稅費減免之檢討。(3)智慧型運輸系統的應用，除一般道路服務外，亦可與加氫站進行資訊結合，提供離行駛電動車最近的加氫站位置、最近加氫站之行駛路線規劃，以便於燃料電池車之補充燃料。
5. 氢能儲存技術最具障礙，但經過多年的研發投入，在儲氫技術本身和應用模式及需求上均已逐漸可行。在系統研究方面，近程高壓儲氫技術可供市場使用，惟因需儲存 70MPa 以上壓力，導致儲氫系統必須使用特殊碳纖維，亦是目前儲氫系統成本的無法下降原因，因此降低儲氫系統所需壓力是降低系統成本的關鍵，目前朝著低溫或是以儲氫材料搭配來降低儲氫系統壓力的方向努力。
6. 根據本研究分析，雖然燃料電池車在車輛使用時的能耗及二氧化碳排放均較汽油車低，且燃料電池車在行駛過程中並不會直接產生二氧化碳的排放。但若從生命週期觀點，涵括氫氣製造過程的 WTP 階段及汽車製造到廢棄回收的車輛週期(不含車輛使用階段)，其將造成車輛在使用過程中的間接能耗及二氧化碳排放。因此未來在燃料電池車減碳策略研擬上，WTP 階段(從氫氣製造生產過程的原料取得到氫氣配送至加氫站之階段)是主要探討的核心，亦為燃料電池車減碳工作的核心重點，未來除了可透過太陽能製氫減少能耗及二氧化碳排放外，原料上以電解水取代化石燃料，都能使燃料電池車達到更節能減碳之效益。
7. 燃料電池更大的挑戰在於尋找一種便宜、有效、且非以石化燃料為原料的製造氫方法，取代使用中重組製程。目前以電解水為較成熟的技術，而其電力來源必須從無碳再生能源出發，譬如太陽光電熱能、水力、風力、地熱、潮汐能、洋流、生質能等，因此如何提高再生能源的汲取效

率其實是一個更為廣泛的課題。

8. 燃料電池電動汽車想要開啟市場大門的關鍵，除性能、壽命、價格都要符合消費者的需求與期待之外，必須解決燃料周邊系統的普遍性、方便性與安全性等問題，因此需要持續的技術研發與教育推廣。
9. 從本研究試算結果顯示，燃料電池車使用階段能耗及二氧化碳排放明顯較汽油車少了很多，若從生命週期觀點來看，其在 WTP 階段之能耗及二氧化碳排放較卻明顯較一般汽油生產高出很多。雖然全生命週期分析顯示燃料電池車的能耗及二氧化碳的排放較汽油車少，但以我國現階段天然氣取得及提煉環境成本仍高，若要使用天然氣製造氫氣提供燃料電池車使用，仍有很大努力空間方可達真正減碳。

6.2 建議

1. 建議未來推動應與再生能源綜合考量，以利排碳實質減量：目前氫的來源大多數仍來自化石燃料，進行重組製造時仍需耗用大量的電力，這也是燃料電池車輛行駛過程雖然不排碳，計入燃料生產週期後，每公里平均排碳量雖較燃油車輛低，但仍比電動車略高。未來只有選擇非化石燃料來源製氫，同時結合太陽光、半導體等先進製程，才能大幅節能減碳，以日本研究為例，若是氫氣製造時使用綠色能源，其排碳將可減半。
2. 建議政府推動前，應提升社會大眾對燃料電池車的認識與了解：調查顯示即使在美日等燃料電池車輛技術領先國家，一般民眾對於燃料電池車的認識相對較低，對於燃料電池車的基本組成以及性能亦缺乏了解。欲將此新產品擴大推廣至日常生活中使用，需先提升民眾對於燃料電池車的認識與了解。各項科普教育與推廣活動為必要的手段。以日本為例，政府利用 2020 年東京奧運推廣其燃料電池車，在提高消費者對燃料電池車的認識、了解，以提升接受度的宣導規劃中，以安全、對環境友善為訴求，吸引經濟條件較佳且具環保概念的消費者。
3. 在 GREET 模式分析過程中，雖然本研究進行部分參數如電力排碳係數、油料熱值、車種形式、車輛油耗等參數本土化，但對於 GREET 模式所需參數如車輛週期中製程、原料組成或燃料週期中燃料生產、運送等資料蒐集不足或取得困難，建議未來能進一步探討。

參 考 文 獻

1. F. Gallucci and A. Basile, “A simulation study of the steam reforming of methane in a dense tubular membrane reactor”, International Journal of Hydrogen Energy 2012, 29, 611。
2. European Commission , Hydrogen and Fuel Cells Technologies 2014.9(http://europa.eu.int/comm/research/energy/index_en.html)。
3. Fuel Cell Today, The Fuel Cell Industry Review 2014。
4. 日本新能源與產業技術綜合研發機構，氫能/燃料電池戰略 Road Map (<http://www.meti.go.jp/press/2014/06/20140624004/20140624004.html>), 2014。
5. 日本新能源與產業技術綜合研發機構，2014 NEDO 氫能白皮書 (http://www.nedo.go.jp/library/suiso_ne_hakusyo.html)。
6. 經濟部能源局，經濟部能源科技研究發展計畫-氫能技術研究發展與示範計畫，民國 103 年 12 月。。
7. 經濟部能源局，高效率氫能與燃料電池技術研究計畫(度政府部門科技計畫期末報告)，民國 103 年 10 月。
8. 經濟部能源局，經濟部能源科技研究發展白皮書第 3 篇第 2 章。
9. United States Department of Energy, Overview of Storage Development DOE Hydrogen Program, Sandia National Laboratories , 2012.
10. United States Department of Energy, DOE Targets for Onboard Hydrogen Storage Systems for Light-Duty Vehicles , 2014.
(http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/targets_onboard_hydro_storage.pdf)
11. United States Department of Energy, U.S. Department of Energy Hydrogen and Fuel Cells Program 2015 Annual Merit Review and Peer Evaluation Report June 8–12, 2015 Arlington, Virginia, 2015.
12. United States Department of Energy, A NATIONAL VISION OF AMERICA'S TRANSITION TO A HYDROGEN ECONOMY — TO 2030 AND BEYOND(Based on the results of the National Hydrogen Vision

- Meeting), 2011.
13. The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Water Consumption for Light-Duty Vehicles' Transportation Fuels Originator: EERE Offices of Fuel Cell and Vehicle Technologies Jeni Keisman (AAAS), Dave Andress (DAA)
https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/fc_fuel_partnership_plan.pdf °
 14. Toyota,<http://www.toyotasingapore.com.sg/technology/environmental-technology/fuelcell-vehicle/#nogo>, 2016.
 15. California Air Resources Board, 2015 Annual Evaluation of Fuel Cell Electric Vehicle Deployment and Hydrogen Fuel Station Network Development ,2015.(http://www.arb.ca.gov/msprog/zevprog/ab8/ab8_report_2015.pdf) °
 16. United States Department of Energy, Hydrogen Posture Plan-An Integrated Research, Development, And Demonstration Plan,” ,2005.
U.S.DOE,(<http://www.chinaev.org/html/qnjs/html/bzfg/20050112ycgh.pdf>) °
 17. United States Department of Energy, Evaluation Protocol for Stationary Fuel Cell Power Plants, National Evaluation Service, Inc.,2014 °
 18. Comillas Pontifical University,
https://www.iit.upcomillas.es/cessa/presentaciones/Juan_deBlas.pdf °
 19. Marika Tatsutani, A HYDROGEN FUTURE? An Economic and Environmental Assessmentof Hydrogen Productio Pathways,2012.
 20. The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, FY 2015 Annual Progress Report,2015
http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/hv_report_12-17.pdf.
 21. Adeline Darmon , Plasma assisted fuel reforming for on-board hydrogen rich gas production °
 22. Trygve Riis ,HYDROGEN PRODUCTION R&D:PRIORITIES AND GAPS ,2014 °
 23. U.S. Department of Energy (Hydrogen Program), “Record 5031: World Nuclear Association,”

- (http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html).
24. U.S. Department of Energy (Hydrogen Program), “Module 1: Permitting Stationary Fuel Cell Installations”
(http://www.hydrogen.energy.gov/program_records.html).
 25. P. J. Berlowitz and C. P. Darmell, Fuel Choices for Fuel Cell Powered Vehicles, SAE Paper, 2014.
 26. C. E. (Sandy) Thomas, Fuel Cell and Battery Electric Vehicles Compared, 2015.
 27. The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Using Natural Gas for Vehicles: Comparing Three Technologies, 2015.
 28. U.S. Department of Energy (Hydrogen Program), Thermodynamics of Metal Hydrides: Tailoring Reaction Enthalpies of Hydrogen Storage Materials, 2012.
 29. 奈米技術於氫氣儲存輸送之特性探討 勞動部勞動及職業安全衛生研究所 吳鴻鈞、鍾財王、陳邦旭 民國 104 年 4 月
 30. The Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), 2016 SUSTAINABLE TRANSPORTATION SUMMIT, 2016.
http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/storage/tech_status.html.
 31. Greene Oak Ridge National Laboratory, STATUS AND PROSPECTS OF THE GLOBAL AUTOMOTIVE FUEL CELL INDUSTRY AND PLANS FOR DEPLOYMENT OFFUEL CELL VEHICLES AND HYDROGEN REFUELING INFRASTRUCTURE, 2013.
 32. United States Department of Energy, DOE 2015 Annual Progress Report, 2015. (https://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress15.html)
 33. http://thesis.library.caltech.edu/7198/5/Stadie_N_2013_Chapter3.pdf.
 34. United States Department of Energy, DOE Materials-Based Hydrogen Storage Summit Defining Pathways for Onboard Automotive Applications, 2011.
 35. Argonne National Laboratory Technical Assessment of Compressed Hydrogen Storage Tank Systems for Automotive Applications, 2012.

36. United States Department of Energy, Hydrogen Storage Technical Team Roadmap 2013 Driving Research and Innovation for Vehicle efficiency and Energy sustainability,2010.
37. United States Department of Energy, GREET Model Development and Life Cycle Analysis Applications Michael Wang, Amgad Elgowainy, Jeongwoo Han Argonne National Laboratory The 2014 DOE Fuel Cell Technologies Program and Vehicle Technologies Program Annual Merit Review and Peer Evaluation Meeting,2014.
38. Argonne National Laboratory ,Well-to-Wheels Analysis of Hydrogen Fuel Cell Vehicles, International Hydrogen Fuel Cell Technology and Vehicle Development Forum,2014.
39. Argonne National Laboratory ,GREET – Estimating Total Energy Cycle Reductions of Greenhouse Gas Emissions via Transport Technology Options. Example: Ethanol,2011.
40. Argonne National Laboratory ,Well-to-wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context WELL-to-WHEELS Report Version 3c, July 2011.
41. Argonne National Laboratory ,Well-to-Wheels Analysis of Advanced SUV Fuel Cell Vehicles A. Rousseau, R. Ahluwalia, B. Deville, Q. Zhang Argonne National Laboratory,2015.
42. “Status and Prospects of the Global Automotive Fuel Cell Industry and Plans for Deployment of Fuel Cell Vehicles and Hydrogen Refueling Infrastructure,” D. Greene et al.,2015.
(http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/fcev_status_prospe cts_july2013.pdf)
43. European Commission , Hydrogen and Fuel Cells Technologies ,
(https://www.researchgate.net/figure/271225756_fig2_Fig-2-Fuels-and-appli cations-of-fuel-cell-technology-27-PEM-14-Proton-Exchange)
44. <http://www.hydrogencarsnow.com/index.php/bmw-hydrogen-7/>

附錄

計畫摘要

氫燃料電池車輛之能耗與碳排生命週期分析

計畫摘要

一、研究緣起與目的

臺灣自然資源匱乏，能源嚴重依賴進口，目前還要面臨減碳的壓力，因此對於潔淨之替代能源的發展，格外積極。相較於其他新能源項目，氫能與燃料電池產業仍屬萌芽階段，然而以其潔淨、高效率、來源廣泛的特性已吸引了全球關注，並投入大量的人力、財力、物力進行開發。我國經過十多年氫能與燃料電池技術的發展，涵蓋上、中、下游的產業鏈已初具規模，其中不乏國際知名廠商，已成為氫能與燃料電池技術研發最為活躍地區之一。

目前對燃料電池國外發展狀況，以日本最為積極，日本政府與民間合作，建立各種示範系統，並積極建立國際合作，其第 1 個商轉系統如時程規劃於 2015 年推動上市，日本政府並提供高額購車補助。其次是美國最早投入燃料電池研究，美國能源部就氫能生產、運送、儲存與應用進行完整規劃與研究，能源部並與各相關單位、協會針對對氫能應用建立相當完整的法令規範，並與各車廠進行示範系統合作，在燃料電池車輛推動與補助，其地方政府比中央政府更為投入，提供的補助是電動車的 2 倍。歐盟相對於美國與日本，氫能發展之時程較落後且規模較小，且以定置型應用為優先。歐盟在車輛方面氫能應用，不同於美國和日本優先以小客車為主，歐盟目前其跨國示範系統係以大客車應用為主。

本研究介紹世界各國氫燃料電池車發展現況及政府政策，並探討氫燃料電池小汽車在原料生產、製造與運送、使用與維護、棄置與回收等技術議題，除各項技術介紹之外，分析生命週期各階段中，所涉及能源消耗與溫室氣體排放之相關範疇採用美國 GREET(The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model) 車輛生命週期評估模式，並將模式中部分參數調整為國內本土化數值後，進行生命週期中各階段之能耗及溫室氣體排放及分析，以釐清氫燃料電池車在生命週期各階段及全生命週期的總能耗與溫室氣體排放，以及節能減碳之效率，研究結果可作為

未來推動氫燃料電池車之參據。

二、研究範圍與內容

本研究以氫燃料電池車在原料組成、製造與運銷、使用與維護、棄置與回收等生命週期各階段中，各項技術議題初步研析，所涉及能源消耗與溫室氣體排放之相關範疇為主要研究範圍，利用 GREET 模型進行氫燃料電池小汽車之燃料與車輛週期溫室氣體排放初步分析。

三、研究成果

本年度主要工作項目與執行成果包括：

1. 技術介紹與範疇之界定

本研究探討主題為國內氫燃料電池車在生命週期中的能源消耗與溫室氣體排放之比較，因此首先需了解生命週期的理論及評估方法，並界定所欲分析之車輛，進行氫燃料電池車輛燃料週期與車輛週期介紹，包括氫燃料之生產、運送、儲存及使用，以及氫燃料電池小汽車技術初步探討。之後進行車輛在生命週期各階段的能耗及溫室氣體排放之資料蒐集分析並與傳統能源車輛進行比較，以及進行相關課題探討，以了解未來在相關氫燃料電池車輛推動上之因應對策。

2. 國內外氫燃料電池車輛發展趨勢探討

本研究探討日本、美國、歐洲與中國大陸氫燃料電池車輛發展現況，分析各國發展目標、系統建立、研發方向、示範系統及政府與民間合作概況，比較各國對氫燃料電池車輛推動政策，藉以探討如何解決氫燃料電池車輛所面對的問題，提供未來發展參考。

3. 利用生命週期評估模式進行替代能源車輛能源消耗與溫室氣體排放分析

蒐集彙整國內外有關車輛之全生命週期之研究資料，並了解車輛生命週期各階段之定義，之後進行替代能源車輛技術及發展現況介紹，並針對我國目前氫燃料電池車輛的推行概況進行說明。另針對本研究所使用的 GREET 車輛生命週期評估模式內容及修訂部分進行說明，最後利用參數本土化之 GREET 生命週期評估模式進行汽油車與氫燃料電池車輛生命週期各階段之

能源消耗與溫室氣體中二氧化碳排放量之分析與比較。

4. 生命週期各階段能源消耗與溫室氣體排放之課題探討

將氫燃料電池車輛之生命週期模式評估結果，進行生命週期各階段能源消耗與溫室氣體中二氧化碳排放量之研究分析，並比較氫燃料電池車輛之全生命週期排放之結果，以進行相關課題之研究探討。

四、結論

1. 目前對燃料電池國外發展狀況，以日本最為積極，日本政府與民間合作，建立各種示範系統，並積極建立國際合作，其第 1 個商轉系統如時程規劃於 2015 年推動上市，日本政府並提供高額購車補助。其次是美國最早投入燃料電池研究，美國能源部就氫能生產、運送、儲存與應用進行完整規畫與研究，能源部並與各相關單位、協會針對對氫能應用建立相當完整的法令規範，並與各車廠進行示範系統合作，在燃料電池車輛推動與補助，提供 2 倍於電動車的購車補助。歐盟相對於美國與日本，氫能發展之時程較落後且規模較小，且以定置型應用為優先。歐盟在車輛方面氫能應用，不同於美國和日本優先以小客車為主，歐盟目前其跨國示範系統係以大客車應用為主。
2. 燃料電池的發展必須與國際接軌：一致的標準為建構燃料電池車安全性能基礎環境不可或缺的一環，除本研究介紹之美國和日本外，聯合國經濟委員會日前亦開啟了訂定氫能與燃料電池車技術規則的倡議，由於燃料電池是不同於化石燃料的系統，勢必要與國際接軌交流才能掌握趨勢、兼顧安全與節能。
3. 相關法令修正：由於利用氫氣作為機具和運輸上的燃料，目前仍有許多技術與法規上的障礙需加以克服。所謂法規上的障礙，係指有關應用氫氣之產品在製造、運輸、分送、儲存和使用上的安全問題，是否有適當的法規(Codes)與標準(Standards)加以規範，讓工程師、製造商、消費者及政府主管機關有所遵循。由於法規與標準，在推動氫能科技或燃料電池相關產品的發展時，會有節省開發之人力、時間和金錢，確保技術的效益，並促進產品製造和服務等相關產業建立、促使一致性的產品測試與驗證，防止不安全產品進入市場，保護消費者與用路人的健康、安全與福祉。
4. 在燃料電池車推廣上，其中交通部門可著力的部分包括：(1)交通相關法規

- 之鬆綁或訂定相關條文。(2) 交通獎勵措施或稅費減免之檢討。(3)智慧型運輸系統的應用，除一般道路服務外，亦可與加氫站進行資訊結合，提供離行駛電動車最近的加氫站位置、最近加氫站之行駛路線規劃，以便於燃料電池車之補充燃料。
5. 氫能儲存技術最具障礙，但經過多年的研發投入，在儲氫技術本身和應用模式及需求上均已逐漸可行。在系統研究方面，高壓儲氫可供給近程市場，而壓力影響碳纖維的需求並為系統成本的最大考量，降低壓力是降低系統成本的關鍵，目前的方向朝著低溫或是以儲氫材料搭配來降低壓力。
 6. 根據本研究分析，雖然燃料電池車在車輛使用時的能耗及二氧化碳排放均較汽油車低，且燃料電池車在行駛過程中並不會直接產生二氧化碳的排放。但若從生命週期觀點，含括氫氣製造過程的 WTP 階段及汽車製造到廢棄回收的車輛週期(不含車輛使用階段)，其將造成車輛在使用過程中的間接能耗及二氧化碳排放。因此未來在燃料電池車減碳策略研擬上，WTP 階段(從氫氣製造生產過程的原料取得到氫氣配送至加氫站之階段)是主要探討的核心，亦為燃料電池車減碳工作的核心重點，未來除了可透過太陽能製氫減少能耗及二氧化碳排放外，原料上以電解水取代化石燃料，都能使燃料電池車達到更節能減碳之效益。
 7. 燃料電池更大的挑戰在於尋找一種便宜、有效、且非以石化燃料為原料的製造氫方法，取代使用中重組製程。目前以電解水為較成熟的技術，而其電力來源必須從無碳再生能源出發，譬如太陽光電熱能、水力、風力、地熱、潮汐能、洋流、生質能等，因此如何提高再生能源的汲取效率其實是一個更為廣泛的課題。
 8. 燃料電池電動汽車想要開啟市場大門的關鍵，除性能、壽命、價格都要符合消費者的需求與期待之外，必須解決燃料周邊系統的普遍性、方便性與安全性等問題，因此需要持續的技術研發與教育推廣。
 9. 從本研究試算結果顯示，燃料電池車使用階段能耗及二氧化碳排放明顯較汽油車少了很多，若從生命週期觀點來看，其在 WTP 階段之能耗及二氧化碳排放較卻明顯較一般汽油生產高出很多。雖然全生命週期分析顯示燃料電池車的能耗及二氧化碳的排放是較汽油車少的，但以我國天然氣來源取得及提煉環境，若要使用燃料電池車確實達到節能減碳，我國在這部分的相關發展仍有很大努力空間。

五、建議

1. 建議未來推動應與再生能源綜合考量，以利排碳實質減量：目前氫的來源大多數仍來自化石燃料，進行重組製造時仍需耗用大量的電力，這也是燃料電池車輛行駛過程雖然不排碳，計入燃料生產週期後，每公里平均排碳量雖較燃油車輛低，但仍比電動車略高。未來只有選擇非化石燃料來源製氫，同時結合太陽光、半導體等先進製程，才能大幅節能減碳，以日本研究為例，若是氫氣製造時使用綠色能源，其排碳將可減半。
2. 建議政府推動前，應提升社會大眾對燃料電池車的認識與了解：調查顯示即使在美日等燃料電池車輛技術領先國家，一般民眾對於燃料電池車的認識相對較低，對於燃料電池車的基本組成以及性能亦缺乏了解。欲將此新產品擴大推廣至日常生活中使用，需先提升民眾對於燃料電池車的認識與了解。各項科普教育與推廣活動為必要的手段。以日本為例，政府利用 2020 年東京奧運推廣其燃料電池車，在提高消費者對燃料電池車的認識、了解，以提升接受度的宣導規劃中，以安全、對環境友善為訴求，吸引經濟條件較佳且具環保概念的消費者。
3. 在 GREET 模式分析過程中，雖然本研究進行部分參數如電力排碳係數、油料熱值、車種形式、車輛油耗等參數進行本土化，但對於 GREET 模式所需參數例如車輛週期中包括車輛製程、原料組成或燃料週期中燃料提煉生產、運送路徑等本土化參數資料蒐集不足或取得困難而使用系統預設參數，建議未來能進一步探討。