

氫料源之儲運技術發展—以日澳「無碳排國際氫氣供應鏈計畫」為例

王健源 工研院綠能所研究員

摘要

日本政府於 2017 年底宣布「氫能基本戰略」，為實現氫能社會之願景提出十大推動要項，其中包括在 2030 年建構具商業規模的氫氣供應鏈。短期以每年進口約 25 億立方公尺 (約 22.5 萬噸) 的氫氣，達成提供氫氣終端使用者之售價從目前的 100 日元/Nm³ 降至 2030 年的 30 日元/Nm³ 為目標。長期藉由持續擴大國際供應源，設定 2050 年之目標價為 18 日元/Nm³，即與汽油和液化天然氣等傳統能源價格相當之水準。透過政府的資助，日本企業與澳大利亞合作，已展開氫氣生產、運輸與儲存之技術驗證計畫。儘管氫氣重量極輕，但體積卻非常大，故以氣態進行長程運輸效益偏低。本文說明以川崎重工為首之日澳跨國合作架構，採用超低溫 (-253°C) 技術液化氫氣使其體積縮減 800 倍，並結合絕熱儲槽技術提高運輸效益。

一、日澳國際氫能供應鏈之目的：

日本經產省於 2014 年首度公布「氫燃料電池戰略路線圖」，提出實現「氫能社會」，至 2050 年全國碳排量較 2013 年減少 80%。為此規劃分階段擴大氫能應用市場之時程：2025 年前加速技術驗證與應用推廣，提升氫能利用普及率；2030 年前建立大規模氫氣供應體系並實現氫燃料發電；2040 年前完成零碳氫燃料供給體系建設。澳大利亞之出口貿易額中能礦產品占比高，其中煤礦為全球第一大出口國。然而基於環保考量以及綠能技術之進步，煤炭發電占比持續降低，故澳大利亞積極開發新技術利用煤炭製造氫氣但無碳排放，期望能藉由產品之轉型維持能源產業發展，目標為 2030 年成為世界主要氫能出口國。爰此 2015 年雙方啟動「日澳無二氧化碳國際氫氣供應鏈計畫」，對日本而言，期望獲得長期穩定供應的無碳排放氫氣來源之目的，澳大利亞方面則藉由提高褐煤之供應量與附加價值，建立新的能源產品外銷之商業模式。

2016 年 2 月，由川崎重工 (Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)、岩谷產業 (Iwatani Corporation)、日本殼牌 (Shell Japan Limited) 和電力發展 (Electric Power Development Co., Ltd., J-POWER) 等四家公司成立“無 CO₂ 氫氣供應鏈技術研究協會” (CO₂-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association HySTRA)。其主要任務是執行由新能源產業技術綜合開發機構 (New Energy and Industrial Technology Development Organization, NEDO) 資助的示範驗證計畫，目標是於 2030 年實現氫供應之商業化，包括氫氣生產與儲運等環節。川崎重工不僅負責領導 HySTRA 的技術開發，還負責與澳大利亞政府的協調。圖 1 為合作計畫之整體運作流程與參與廠商負責項目之示意圖。

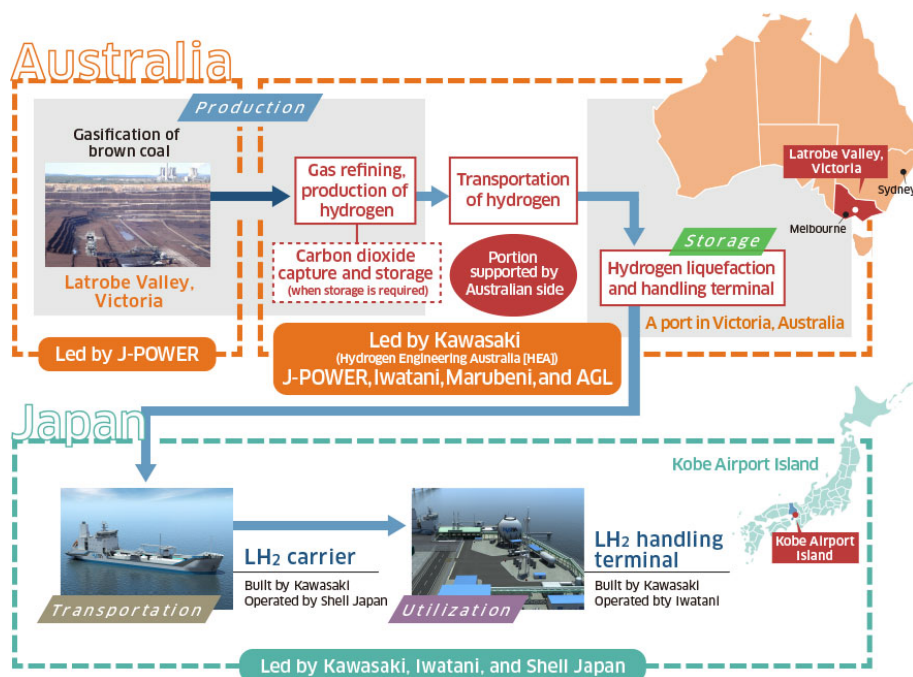


圖 1、日本與澳大利亞的無 CO₂ 氫供應鏈示範驗證計畫之架構

二、利用褐煤氣化結合碳捕捉技術製造“藍氫”：

褐煤 (brown coal, lignite) 因形成年代介於次煙煤和泥炭之間，屬於較新的煤層，是一種熱質較低的煤炭。位於澳大利亞墨爾本 (Melbourne) 以東 150 公里的拉特羅布山谷 (Latrobe Valley) 所蘊藏的褐煤綿延長達 14 公里。但因水分含量高 (50~60%) 影響運輸效益，即使乾燥後也可能因環境水氣的冷凝放熱而自燃，使其不利於長途運輸，多用於在地發電。川崎重工的子公司—澳大利亞氫能工程有限公司 (Hydrogen Engineering Australia Pty Ltd., HEA) 經過效益分析後認為利用褐煤作為氫料源可彌補此些缺點並創造較高附加價值。在 NEDO 資助計畫中，由 J-POWER 公司執行褐煤氣化 (gasification)，製造含有氫氣的混合氣體。除 NEDO 的示範計畫外，澳大利亞部分則由澳大利亞聯邦政府和維多利亞州政府補助，主要包括設置氣體精煉 (gas refining)、氫氣液化 (hydrogen liquefaction) 與儲存/裝卸等設施。參與計畫的公司還包括 J-POWER、川崎重工、岩谷產業、丸紅和 AGL，而 HEA 則是與澳大利亞政府簽約的主要承包商。HEA 還藉由澳大利亞政府推動的 CarbonNet 計畫，建立具商業規模的碳捕捉、利用與封存 (carbon capture, utilization and storage, CCS) 技術以處理製氫過程產生的 CO₂。雖使用含碳料源，但於氫氣的產製過程中無直接碳排或達到碳中和，此種氫氣稱為藍氫 (blue hydrogen)。液化氫的生產預計將於 2020 年秋季開始，然後裝載於船上進行運輸。

三、運用絕熱與渦輪機技術實現氫氣自身冷卻效果而產生液化氫：

川崎重工利用氣體於膨脹過程中會降溫的原理將氫氣冷卻至 -253°C 而發生液化，此稱為克勞德循環 (Claude cycle) 法。裝置如圖 2 所示，其中熱交換器和管路裝設於鋼筒中，採真空密封以隔絕外界的熱。所有組件還覆蓋用於衛星和太空服的同級性能之隔熱板。在液化的最後階段，預冷至 -196°C 的氫氣於通過膨脹渦輪機時可進一步降低溫度至 -253°C。此渦輪機的設計特點為不使用常規的油潤滑軸承而改

利用非接觸式的氫氣軸承並以超過 100,000 rpm 的超高速旋轉，因此無磨損與油類污染問題。

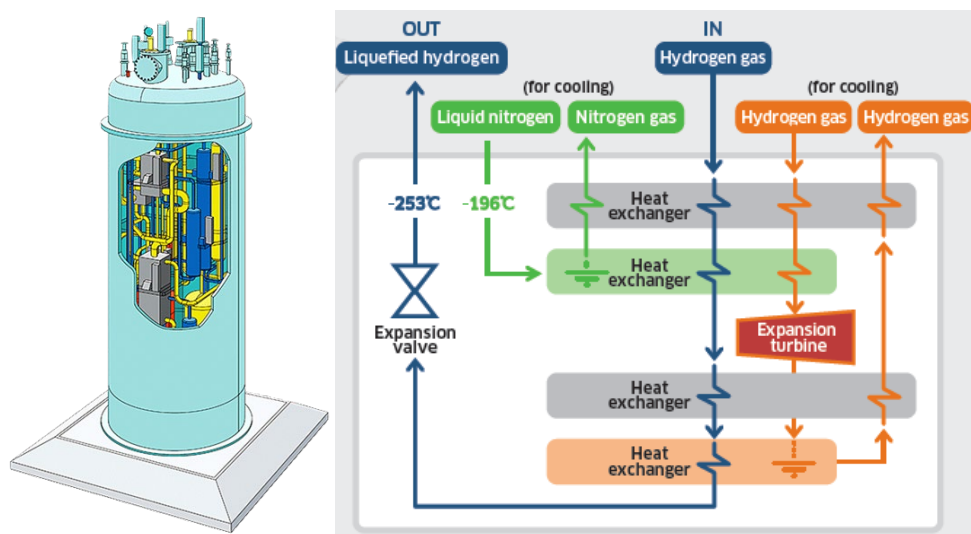


圖 2、採用克勞德循環進行氫氣自身冷卻之液化裝置(左)與運作流程(右)

四、基於液氫儲存技術建造長途運氫船以達成長距離運輸目的：

液氫比液化天然氣更易蒸發，且由於分子較小，更容易洩漏。川崎重工憑藉長期在種子島太空中心所累積的經驗，已開發出絕熱性能為液化天然氣儲槽的十倍之液氫儲槽，並納入緊急釋氫的安全機制於相關技術的開發範圍。液氫儲槽之容量為 1,250 立方公尺，它採用雙層外殼，類似熱水瓶的結構設計，承受壓力值約為五個大氣壓。2018 年下半年川崎重工開始建造世界上第一艘液氫運輸船。2019 年 12 月 11 日，在神戶舉行命名為 SUIISO FRONTIER 的全球首艘液化氫運輸船之下水儀式（圖 3）。負責營運的日本殼牌將於 2020 年底進行從日本到澳大利亞的首航。



圖 3、全球首艘液氫運輸船 SUIISO FRONTIER 號

因過去從未有大規模海上液氫之運輸，國際海事組織 (International Maritime Organization, IMO) 須制訂一套新規範以確保安全。在多次提案審議後，IMO 於 2016 年終於正式批准日本提出的安全規範。關於液氫的接收站，川崎重工正在神

戶港口島 (Port Island) 上建造一座工廠，由岩谷產業負責運營 (圖 4)。將液氫從運輸船上卸載到儲槽時，絕緣和密封對於確保安全至關重要。為此川崎重工開發雙壁柔性軟管，確保搖晃的液氫載具與岸上儲槽之間的連接。

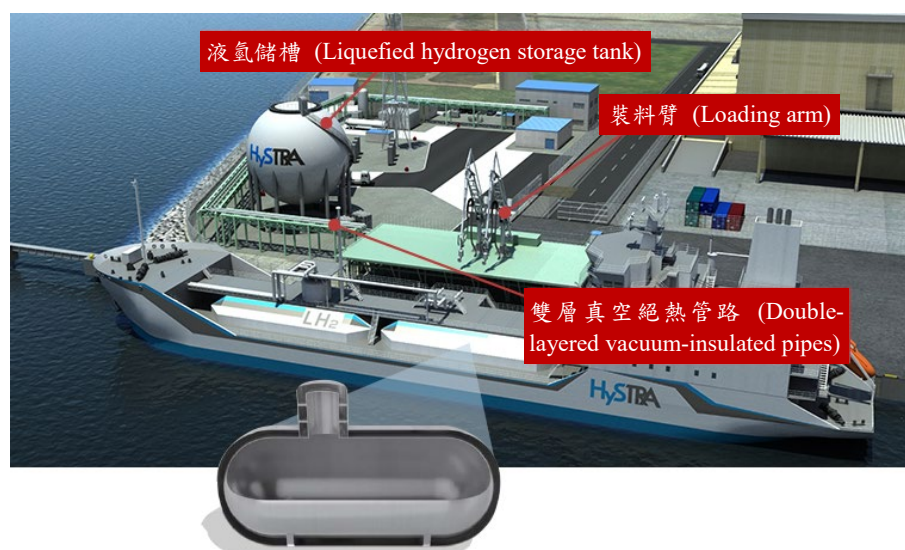


圖 4、停泊於神戶港口島碼頭旁之液氫運輸船以及接收站的液氫儲槽

五、結論：

日澳合作建立之國際氫能供應鏈模式，發展至今已於產氫、液化、儲存與運輸等重要環節完成概念驗證與小規模設備之設置與建造。2020 年起陸續進入試量產階段，期能於 2030 年實現大規模商業化之運用。目標達成前，包括如何持續降低氫氣成本、如何開拓其他氫氣供應源以分散風險以及如何降低氫能設備成本以提升運用效益等問題仍待驗證及評估。未來國內再生能源的發電量占比將持續提高，為維持電力供應安全與穩定性，氫能可作為能源調節之選項，而此合作案件可作為未來國內氫氣來源之參考。

參考資料：

- [1] 日本經產省水素燃料電池戰略路線圖，<https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001-2.pdf>
- [2] 無二氧化碳的氫氣普及情景研究成果報告書，https://www.iae.or.jp/download/ap_fy2019/?wpdmdl=14798&refresh=5ee0961b2163e1591776795
- [3] 褐煤的自燃，<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spontaneous-combustion>
- [4] 川崎重工公司網頁，<https://global.kawasaki.com/en/stories/hydrogen/index.html>
- [5] 無 CO₂ 氫氣供應鏈技術研究協會 (HySTRA) 網頁，<http://www.hystra.or.jp/>
- [6] 國際能源署網頁，清潔氫的未來已經開始，<https://www.iea.org/commentaries/the-clean-hydrogen-future-has-already-begun>
- [7] 日本經濟新聞中文版“世界首艘液態氫運輸船在日本下水”，<https://zh.cn.nikkei.com/industry/manufacturing/38560-2019-12-12-10-19-23.html>
- [8] NEDO 網頁“World's First Heat and Electricity Supplied in an Urban Area Using 100% Hydrogen”，https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100382.html