商用車搭載燃料電池冷鏈系統運營效益與商業化路徑分析

產業發展處 莊閔任

全球商用車去碳化浪潮，冷鏈運輸成淨零碳排突破口

在全球 2050 淨零碳排與綠色供應鏈需求持續推進下，公路運輸部門的去碳化轉型已成為產官學界的關注焦點。其中，冷鏈物流車輛因需同時供應車輛行駛動力與冷凍機組維持低溫（如-12℃至-18℃）的雙重能量需求，其柴油消耗與碳排放顯著高於常溫物流車。傳統 3.5 噸柴油冷鏈車多透過主引擎帶動壓縮機（PTO 模式），或於每日出車前怠速發動引擎約 45 分鐘進行預冷，並於停等卸貨時持續怠速運轉冷凍機組，造成顯著的廢氣排放與高額燃油支出。

儘管純電動車（BEV）近年發展迅速，但應用於高耗能的冷鏈物流時，受限於大容量電池組的自重排擠載貨空間，以及長時間充電造成的停機時間，影響配送稼動率，至今仍難以全面取代傳統燃油車。相較之下，搭載燃料電池冷鏈系統的冷鏈物流車，可利用常溫常壓儲存的甲醇水溶液，於車載重組器內即時產氫發電，具備燃料補充迅速、系統輕量化與靜音預冷等優勢，為市區低溫宅配提供具潛力的脫碳解決方案。



圖 1、車輛中心之燃料電池電力冷凍系統

採用燃料電池冷鏈系統，是否能帶來實質的營運效益？

為精確評估 3.5 噸物流車改裝重組式甲醇燃料電池（RMFC）冷鏈系統的商業可行性，本研究整合國內 193 輛 ISUZU 3.5 噸柴油低溫貨車的實際營運數據（平均年里程 24,320 km、平均油耗 4.74 km/L），以及車輛研究測試中心於封閉場域取得的實測數據進行綜合比較。同時，傳統車輛總體擁有成本（TCO）評估模型，往往容易忽略出車前預冷所產生的燃油消耗及其實際營運成本。

此外，考量燃料電池系統改裝初期涉及一定的車輛改裝與設備購置成本，物流車隊在進行低碳轉型時必須有明確的財務投資回報依據。為填補此評估缺口，本研究構建年化淨效益模型（Annual Net Profit Model, ANPM）。ANPM 模型係以整體擁有成本與營運機會成本為基礎，將「燃料節省總收益」扣除「甲醇補充成本」與「車體空間/載重排擠損失」，其核心數學表達式為：

$$ANPM = \Delta C_{diesel} - C_{methand} - L_{cargo_volume} - L_{payload} - \Delta M$$

其中，年度柴油節省金額（ΔC_{diesel}）不僅包含車輛行駛與停等階段替代冷機的省油（$H_{operation} \times F_{operation_rate}$），更將每日出車前免怠速的預冷省油效益（$T_{precool_daily} \times F_{idle_rate} \times N_{date}$）納入精算。當$ANPM$大於零時，即代表該系統具備實質的年度正向財務投資效益。

在 ARTC 封閉場域之冷鏈運轉功耗方面，RMFC 系統於-12℃低溫環境下之冷凍機平均功耗為 1.4 kWh/h。系統設備總重約為 213.6 kg（包含電堆、BOP、電池與 15L 甲醇桶）。

經由 ANPM 模型精算，RMFC 燃料電池冷鏈系統能為車隊創造實質財務回報。首先在靜音預冷免怠速節能方面，柴油車每日出車前需怠速 45 分鐘進行貨艙預冷（耗費 1.5 L 柴油），而 RMFC 系統可直接啟動發電預冷，每年可額外省下 375 L 柴油（相當於 NT$10,688 元）。其次在營運階段，免除柴油引擎帶動冷機負載每小時可節省 1.0 L 柴油，全年行駛與停等階段可省下 2,000 L 柴油（相當於 NT$57,000 元）。兩者相加，每年共可節省 2,375 L 柴油，總省油收益高達 NT$67,688 元/年。

在扣除全年 2,800 L 的燃料電池燃料（甲醇）補充成本後，在外部掛載燃料電池之機構設計下，RMFC 系統於甲醇散裝零售價（NT$18/L）下之 ANPM 年化淨效益為 NT$ +17,288 元/年；於車隊大宗價（NT$ 12/L）下為 NT$ +34,088 元/年；於盤商批發價（NT$ 10/L）下更可高達 NT$ +39,688 元/年。這代表採用燃料電池冷鏈系統，每年可為每輛貨車創造約 1.7 萬至 3.9 萬元的淨現金流增益，並達成年減碳 4.6 噸之績效。

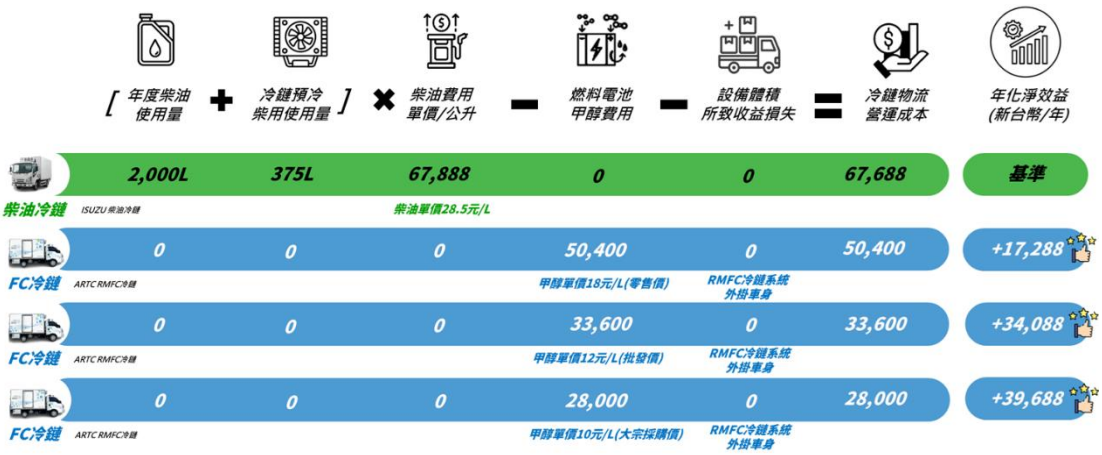


圖 2、燃料電池冷鏈商用車年化淨效益分析（系統外部掛載）

此外，若將系統受限於車體結構與車身設計，必須將燃料電池發電組部分設置於冷凍貨艙內部的情境，因其系統佔用貨物裝載空間，每年預估將造成 NT$ 25,585 元的空間機會成本損失，但燃料電池冷鏈物流系統仍能在甲醇每公升單價 12 元（批發價）之燃料成本下，具備年度營運效益空間。

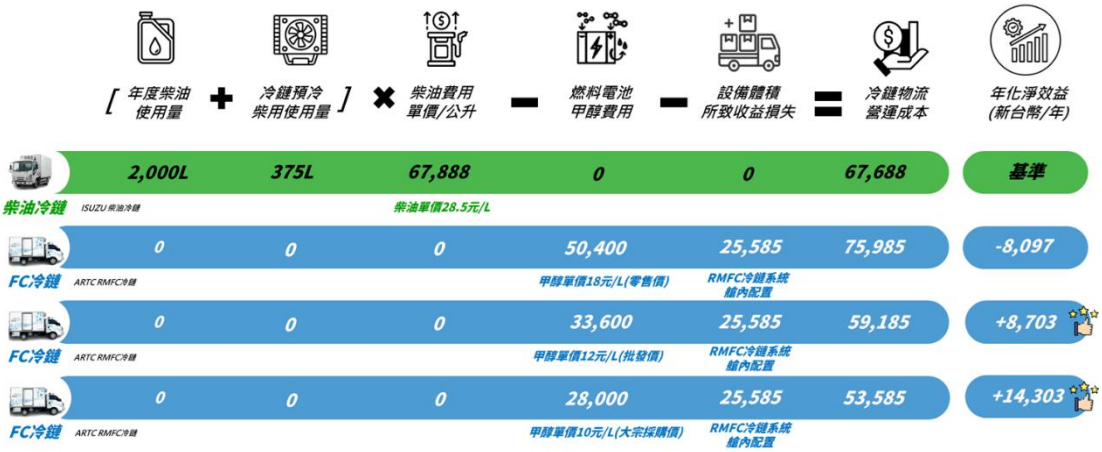


圖 3、燃料電池冷鏈商用車年化淨效益分析（系統配置艙內）

燃料電池冷鏈系統兼具經濟與減碳效益，加速冷鏈物流綠色轉型

綜合前述分析，重組式甲醇燃料電池（RMFC）應用於 3.5 噸柴油冷鏈物流車，可打破過往先進系統改裝必定增加營運成本的刻板印象。只要掌握「透過大宗採購降低甲醇燃料價格」及「系統設置」兩項核心策略，燃料電池冷鏈車不僅能在技術上滿足市區高強度低溫配送需求，更能在財務上為物流業者創造穩定的年度淨收益。

展望未來，建議車隊可評估優先採行底盤掛載燃料電池系統的設計，以極大化運載效益，並搭配政府研發與示範計畫投入實際運行，加速推動國內冷鏈商用車輛產業朝向 2050 淨零碳排的永續願景邁進。