

行政院原子能委員會
委託研究計畫研究報告

液流電池系統產品化標準測試與驗證研究

**The Research of Standardization of Products Test for Flow Battery
System**

受委託機關(構)：財團法人金屬工業研究發展中心

計畫主持人：王耀明

聯絡電話：0926174605

E-mail address：yawang@mail.mirdc.org.tw

研究期程：中華民國 110 年 4 月至 110 年 11 月

研究經費：新臺幣 88 萬元

核研所聯絡人員：古鴻賢

報告日期： 110 年 11 月 08 日

目 錄

壹、摘要	2
一、中文摘要	2
二、英文摘要	3
貳、前言	4
一、綠電與再生能源的發展	4
二、儲能系統發展契機	6
三、液流電池儲能系統相關法規	7
參、研究方法.....	9
一、液流電池簡介	9
二、研究規劃	10
肆、結果與討論.....	14
一、液流電池系統產品化性能標準與驗證	14
二、液流電池安全標準測試與驗證研究	26
三、液流電池系統效能測試程序書	31
伍、結論	45
一、結論說明	45
二、查核點確認	45
陸、參考文獻.....	48

圖目錄

圖 1. 臺灣產業超前部署關聯圖	5
圖 2. 全球鈮液流電池市場預測	7
圖 3. 液流電池結構與發電原理示意圖	10
圖 4. 本計畫之執行方法及相關法規	13

壹、摘要

一、中文摘要

本次計畫已完成液流電池系統性能標準測試與驗證研究以及液流電池系統安全標準測試與驗證研究的部分內容，包含法規對 IEC 62933-2-1，「電能儲能(EES)系統的規範要求：針對單元參數與測試方法的規範」、IEC 62932-2-1，「液流電池於定置型應用：性能通用要求和測試方法」、IEC 62933-5-1，「電能儲能(EES)系統的規範要求：集成電網的電能儲能系統的安全注意事項-通用規範」、IEC 62932-2-2，「液流電池於定置型應用之安全要求」以及 UL 1973，「用於輕軌與定置型系統之電池標準」等法規進行研析。

已比對 IEC 62933-2-1 以及 IEC 62932-2-1，規劃液流電池性能檢測之方式，並比對 IEC 62933-5-1 以及 IEC 62932-2-2，規劃液流電池安全檢測之方式及內容。如此完成「液流電池安全標準測試與驗證研究研報告」1 篇、其中包含液流電池系統效能測試程序書，並共同投稿 1 篇論文至國內外期刊及研討會上述進度已達整體計畫之 100%，達成本次計畫需完成整體計畫 100%之需求。

關鍵字：液流電池、性能要求、安全要求、測試方法

二、英文摘要

This project has completed part of the flow battery system performance standard test and study, part of the flow battery system safety standard test and study. Including research and analysis of IEC 62933-2-1, "Electrical energy storage (EES) systems –Part 2-1: Unit parameters and testing methods – General specification ", IEC 62932-2-1, "Flow battery energy systems for stationary applications – Part 2-1: Performance general requirements and test methods ", IEC 62933-5-1, "Electrical energy storage (EES) systems – Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems – General specification ", IEC 62932-2-2, "Flow battery energy systems for stationary applications –Part 2-2: Safety requirements " and UL 1973, "Batteries for use in stationary, vehicle auxiliary power and light electric rail (LER) applications". It's been planned several testing program with performance and safety, to finished the final report and the test procedure. And co-submit paper to journals and seminars.

The above progress has reached 100% of the overall plan, it's completed the requirements of this report (100%).

Keyword: Flow battery, Performance general requirements, Safety requirements, Test methods

貳、前言

全球環保意識已逐漸抬頭，各國近年來致力於再生能源之研究、開發與使用，我國更將綠電與再生能源列為「六大核心戰略產業」之一。然而綠電與再生能源有間歇性與不穩定性的特點，在使用上須搭配儲能系統進行輔助，而在各種儲能系統中，又以電化學儲能系統因可快速反應、無須受限於地形以及環境等優勢，而具有極大之發展潛力。其中又以液流電池極合適大規模儲能之電化學儲能系統，但因我國液流電池的商業化較晚，對於液流電池未有完善之標準制定，亦缺乏液流電池標準檢測驗證環境。因此本計畫預期建立液流電池相關驗證規劃，以確保液流電池之安全，同時也將助於國內液流電池產業鏈完整建構，提升台灣於儲能產業之競爭力。

一、綠電與再生能源的發展

為因應美中貿易戰及武漢肺炎疫情下，所導致的全球經濟劇烈變動與供應鏈加速重組，蔡總統在 2020 年就職典禮上宣示，將在五十二產業創新的既有基礎上，打造「六大核心戰略產業」，並透過建立臺灣品牌、提供靈活多元的金融支援、打造安全的產業發展環境、匯聚及培養數位和雙語人才等，讓臺灣成為未來全球經濟的關鍵力量。我國政府產業發展超前部署與通盤規劃，調整金融、人才等相關措施，優化產業發展環境，並透過五十二產業創新，以及 AI、5G 等行動計畫，建構產業轉型升級基礎，再推動產業拔尖、強化科技創新，以及擴大國際合作等推動策略，促進臺灣產業再進化，打造「六大核心戰略產業」。如圖 1 所示為

臺灣產業超前部署關聯圖[1]。



圖 1. 臺灣產業超前部署關聯圖[1]

其中六大核心戰略產業包含對資訊及數位相關、資安卓越、臺灣精準健康戰略、國防及戰略、綠電及再生能源、民生及戰備等六大核心戰略產業。其中綠電及再生能源產業部分，政府致力建構綠能產業聚落、發展多元綠能應用、引領綠能人才升級、健全參與綠電制度，及透過融資與保證等，協助國家隊進軍亞洲綠電市場，打造臺灣成為亞太綠能應用典範，以達成我國 2025 年能源轉型目標，並促使風電產業輸出國際。

為求在兼顧能源安全、環境永續及綠色經濟下進行能源轉型工程，政府以太陽光電及離岸風電做為主力，其中離岸風電規劃於 2025 年累計設置 5.7 GW、太陽光電累計設置 20GW，以風光並進方式促進能源多元化及自主供應，建構再生能源發電

友善發展環境，帶動內需與就業，展現我國積極推動綠能發展之決心[2]。而發展綠電以及再生能源的同時，對於儲能系統將有所需求，方可進行電力調度與平滑輸出，有效利用綠電與再生能源。

二、儲能系統發展契機

隨工業化與經濟成長，全球碳排放量亦逐年增長的大環境下，全球環保意識已逐漸抬頭，各國近年來已不斷致力於再生能源之研究、開發與使用[3~5]。但在使用再生能源的過程中，再生能源的間歇性與不穩定性導致若要大規模使用再生能源發電，必須搭配儲能系統進行電力調度 [6]。若是將再生能源作為重要電力來源時，再生能源的不穩定性需要搭配儲能系統進行電力調度與穩定；因此使得在發展再生能源的同時，對於儲能系統之需求亦有明顯增加。

近年來各種儲能電池系統開始大量發展，主要可分為物理儲能、化學儲能、電化學儲能以及蓄熱儲能...等 4 種技術路線。其中又以電化學儲能因可快速反應、無須受限於地形以及環境等優勢，而具有極大之發展潛力。基於儲能電池系統的安全性考量、使用壽命等因素，在各種電化學儲能技術中，液流電池系統近期受到國內外學者之關注並投入研究，並已有廠商開始推出液流電池之電池堆與電池系統等產品，且已有不少示範案場投入運作[7]。液流電池之靈活性、長電池壽命與其高安全性使其具有高度的發展優勢，根據 ADROIT 市調報告表示，液流電池市場將以 59.7 % 的複合年增長率增長，如圖 2 所示，預測液流電池在 2025 年時將有顯著成長，並達 11.1 億美元的市場規模[8]。

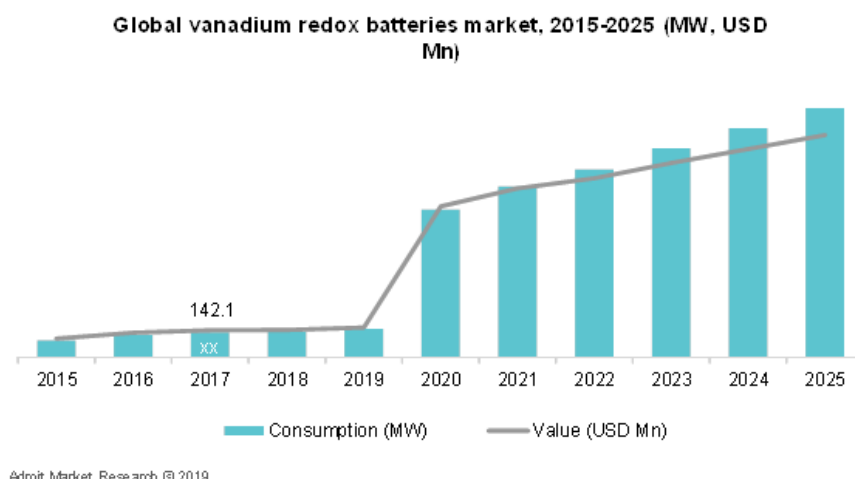


圖 2. 全球鈮液流電池市場預測[8]

近年來國內已有液流電池之示範場域，並有廠商開始關注液流電池產業，然而國內對於液流電池未有完善之標準制定，亦缺乏液流電池標準檢測驗證環境。依據我國能源發展綱領，我國規劃於 2025 年達成非核家園之目標，現正於能源轉型趨勢加速之際，儲能大規模應用需求因應而生，建立相關驗證技術確保安全為重要的工作，同時也將助於國內液流電池產業鏈完整建構，提升台灣於儲能產業之競爭力。

三、液流電池儲能系統相關法規

對於儲能系統產品之相關法規，國際間近年已逐步建立，且我國也針對儲能系統進行相關規範，於 109 度修正「用戶用電設備裝置規則」，於 110 年 2 月 11 日正式生效，對儲能系統進行一般要求、電路電源、電化學系統等規範[9]。但對於液流電池而言，國際間之相關標準尚在發展階段，相關法規、標準及規範之制定相對其他儲能系統而言起步較晚，較無完整且全面之規範與測試方式。目前國際間唯一針對液流電池訂定之標準，為 2020 年 2 月

公布之 IEC 62932 系列標準[10~12]。針對液流電池之相關術語、性能通用要求和測試方法以及安全要求進行規範。

我國規劃於 2025 年達成非核家園之目標，建立液流電池系統產品化之標準測試以及驗證方式為當務之急[13-14]，且也有助於國內液流電池產業鏈完整建構與發展，提升我國於儲能產業之競爭力。因此本計畫蒐集並分析國際間相關儲能系統[15-20]及液流電池法規及標準，進行法規、技術、環境及安全面之評估分析，分析液流電池系統產品化標準之測試項目與驗證方法，並評估目前國際間液流電池主要發展國家與廠商之發展近況，參考標竿廠商之依循標準，以利液流電池系統產品化標準建立。

參、研究方法

我國正於能源轉型之際，儲能系統的發展為當務之急。又因我國液流電池的商業化較晚，對於液流電池未有完善之標準制定。因此本計畫預計參考國際間儲能電池系統相關法規以及液流電池系統相關法規，並對性能及安全部份進行研究，盤點相關產品化所需之標準測試與驗證。

一、液流電池簡介

液流電池為一種電化學裝置，包含各種電解液搭配的形式，其中全釩液流電池（VRFB），為最常見之系統，為現今各液流電池廠商主要產品，因此本文主要針對全釩液流電池進行研究。全釩液流電池分別採用 $\text{VO}^{2+}/\text{VO}_2^+$ 和 $\text{V}^{2+}/\text{V}^{3+}$ 氧化還原對硫酸溶液作為正極及負極端的反應電解液，並用幫浦將電解液打入反應區中，利用釩離子價數的轉換，如式(1)至(3)所呈述之其正負極與全反應之充放電反應，將產生的能量儲存在電解液中。液流電池示意如圖 3 所示，運作原理為輸送不同價數之離子電解液，使電解液透過氧化還原反應進行充放電[21]。

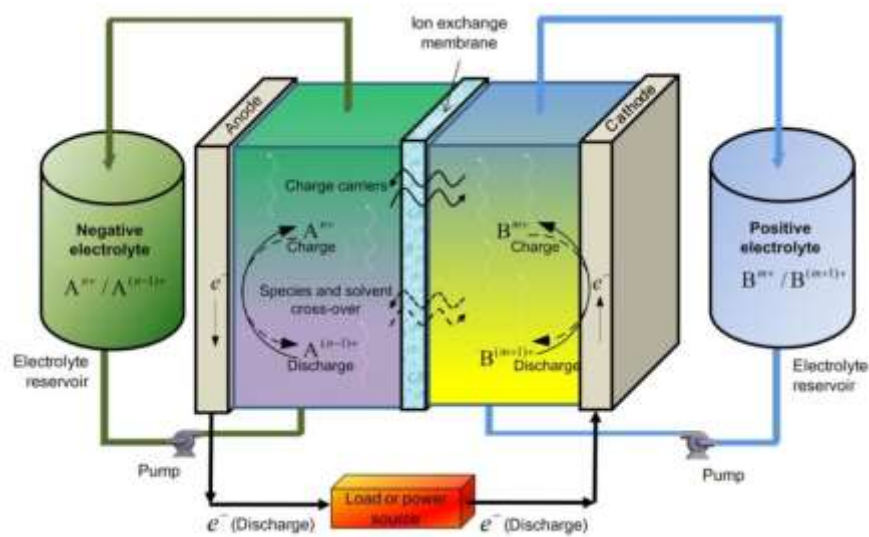
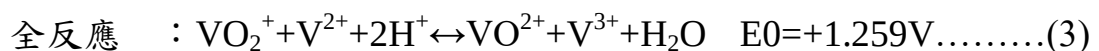
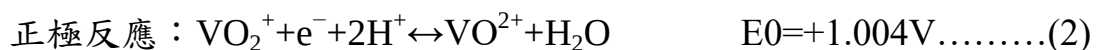


圖 3. 液流電池結構與發電原理示意圖[21]



由上述介紹中可了解到，液流電池的工作原理與一般的電池系統有所差異。因此在液流電池的運作過程中，除了應注意一般儲能系統對於電性的相關測試與安全要求外，還牽扯到了酸性或鹼性的電解液輸送系統，且不同電解液間若有所接觸，將有氧化還原反應發生之可能；使其在零組件、電池堆、電池系統的安全要求上，與現今常見之鋰離子電池、鉛酸電池等儲能系統有明顯之差異。因此在使用液流電池的儲能系統中，也需針對液流電池之特性進行檢測項目之規劃。

二、研究規劃

現階段國際間液流電池的相關標準尚在發展階段，對於液流

電池之規範相對較少且可能有所不足之處。因此本計畫預計參考國際間儲能系統相關法規，了解國際間對於儲能系統之一般規範以及要求，再以液流電池相關法規進行輔助，以求完整規劃液流電池系統產品畫之標準測試及驗證研究。初步盤點國際間相關儲能系統以及液流電池的相關法規後，本計畫預計參考之國際法規及其內容整理於表 1，並在儲能系統的法規研析加入我國「用戶用電設備裝置規則」中第七節之相關內容。

表 1. 本計畫預計參考法規及其內容

分類	編號/名稱	參考內容
建置場域	IFC 2018 ^[15]	儲能系統消防要求
儲能系統	IEC 62933-2-1 ^[16]	儲能系統特性與測試
	IEC 62933-5-1 ^[17]	儲能系統之安全考量
	UL 9540 ^[18]	儲能系統與設備標準
	UL 9540A ^[19]	儲能系統熱失控測試
	用戶用電設備裝置規則	儲能系統之安裝、存放與保護
液流電池	IEC 62932-1	液流電池術語
	IEC 62932-2-1	液流電池性能要求與測試
	IEC 62932-2-2	液流電池安全要求
	UL 1973 ^[20]	流體電池系統測試與要求

IEC 62933-2-1 為電能儲能系統特性與測試，對儲能系統的測試環境、測試項目、測試位置、測試方式等內容進行規範，以提供一標準對儲能系統的容量與規格進行測試。而 IEC 62933-5-1 則為電能儲能系統之安全考量，對於各種類之儲能系統的安全與注意事項進行規範，以促進使用者之安全。其主要內容為儲能系統風險之描述與判別(第五章)，再進行風險之評估(第六章)，最終進

行風險之排除(第七章)。

為針對液流電池系統完善規範與要求，本計畫盤點國際間液流電池相關法規，並分析量測方式以及相關要求。目前已有國際標準組織以及第三方認證單位對於液流電池進行相關規範，國際標準組織之法規參考國際電工委員會發布之標準(International Electrotechnical Commission, IEC)所訂定之 IEC 63932 系列，其中對於液流電池之規範範圍涵蓋液流電池能量系統(FBES)，包含電池管理系統(BMS)、電池支援系統(BSS)、液流電池系統與電源轉換系統(PCS)等部分，且其內容包含術語定義、一般要求、測試對象、測試方法與程序、分險分析、安全要求與防護、標示等。

而在第三方認證機構相關標準中，本計畫主要參考美國保險商試驗所（Underwriter Laboratories Inc.）之 UL 1973：用於輕軌與定置型系統之電池標準，其中在於附件部份針對流體電池系統之使用情境進行規範，包含電氣、物理、溫度、電池堆、電池系統與洩漏遏制系統等檢測細節，規範液流電池之零組件、電池堆、電池系統之檢測標準，且較為詳細的訂定了測試方式以及評估標準。

本計畫將針對上述儲能系統之量測規範、儲能系統之風險評估、液流電池之性能要求以及安全要求，進行評估與盤點，預期對液流電池系統產品的效率、輸出輸入功率等性能量測進行研究，並對短路、熱衝擊、洩漏、排氣等產品安全要求之測試方式進行盤點，以提供液流電池系統產品檢測驗證依據，並提供人員以及環境避免電擊、中毒、火災、化學品洩漏等危害之方法。

因此對於液流電池系統產品化之測試，應以性能與安全兩方

面作為主要考量與論述。本計畫以上述法規作為依據，分別對液流電池系統之性能標準與安全標準的測試與驗證進行研究，執行方法如圖 4 所示，性能部份以 IEC 62933-2-1 為核心，參考其對電化學儲能系統之測試，並輔助參考 IEC 62932-2-1 以及 UL 1973 之內容，針對液流電池系統之性能評估測試與驗證項目。對於安全部份則以 IEC 62933-5-1 為出發，搭配 UL 9540、UL 9540A、IEC 2018 參考其中對電化學儲能系統之安全考量，並以 IEC 62932-2-2 輔助建立液流電池系統之安全測試與驗證項目。

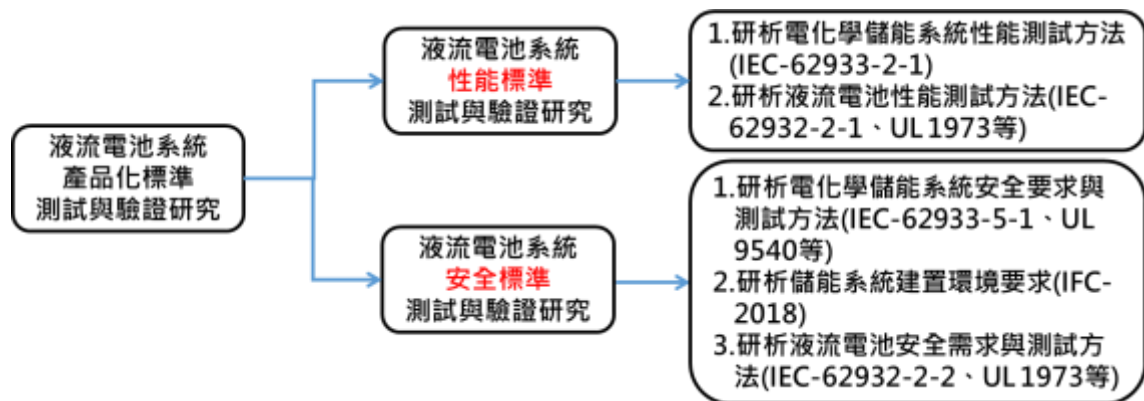


圖 4. 本計畫之執行方法及相關法規

肆、結果與討論

依照本計畫規畫之工作項目，本研究報告完成工作項目 1：「液流電池性能標準測試與驗證研究」，並完工作項目 2：「液流電池安全標準測試與驗證研究」之內容部分。並盤點出液流電池之相關規範與測試方法。最終藉由所盤點之相關內容，挑選其中與液流電池本身效能相關之內容，完成液流電池系統效能測試程序書，期使液流電池系統效能測試獲得適切控管，以確保測試數值的正確性以及統一性。

一、液流電池系統產品化性能標準與驗證

本研究對 IEC 62933-2-1，「電能儲能(EES)系統的規範要求：針對單元參數與測試方法的規範」、IEC 62932-2-1，「液流電池於定置型應用：性能通用要求和測試方法」以及 UL 1973，「用於輕軌與定置型系統之電池標準」三則標準進行整理，規劃液流電池性能檢測之方式。

液流電池系統產品化性能標準與驗證應包含：

(一). 量測環境

量測環境應主要參考 IEC 62932-2-1 之內容，並加入 IEC 62933-2-1 在海拔與濕度之要求，方能較完整的對量測環境與機台的精度進行統一之規範，因此建議量測環境之要求應如本節所彙整之內容進行。

電壓量測-所使用的儀器的精度等級應等於或大於 1 %。所使用的電壓表的內部電阻應至少為 $1\text{k}\Omega/\text{V}$ 。

電流量測-所使用的儀器的精度等級應等於或大於 1 %。且直流和交流電流測量設備的精度，不因能量和效率因素產生對於精度產生負面影響。

電能測量-所使用的儀器的精度等級應等於或大於 1 %。且直流和交流功率及能量測量設備的精度，不因能量和效率因素產生對於精度產生負面影響。

溫度測量-所用儀器的解析度應為 0.5 K，儀器的誤差值為 $\pm 1\text{ K}$ 或更好。

外部環境-建議標準之測試環境為：環境溫度為 25°C 、海拔需 $\leq 1000\text{ m}$ 、濕度需 $\leq 95\%$ 且無凝結之情況發生，除非測試條款另有規定或製造商和用戶同意。且應測量並報告環境溫度。測量儀器或探頭應屏蔽通風和輻射熱。

對於任何測試，均應記錄並報告平均環境溫度和進入液流電池或電池組的流體溫度。應該描述流體溫度探頭的位置。

(二). 能量容量

因 IEC62932-2-1 為針對液流電池進行之規範，因此在連接點(POC)處之考量更符合液流電池之系統設計，因此在能量容量之考量主要參考 IEC62932-2-1 的內容。

此測試為恆功率下之能量測定，該測試用於通過測量 FBES 或 FBS 的總放電能量輸出以及輔助設備（例如 BMS，BSS 和泵）消耗的輔助能量來確定 FBES 或 FBS 在恆定功

率模式下的放電能量。在測量前應處於穩定的溫度條件下，且進入電池或電池堆的電解液的溫度和濃度應予以記錄和報告。測試應依照以下程序與內容：

- a). 測試單元應連接至負載電路，該負載電路可根據需要對測試單元進行充電或放電。
- b). 測試單元應符合可製造商聲明之操作。
- c). 測試單元應以恆定功率放電，直到達到放電終止。該功率應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。
- d). 應測量並記錄測試裝置的總能量消耗與輔助設備之能耗。
- e). 測試單元的充電狀態或健康狀態的任何變化，輔助設備的功耗的變化或使用不同的放電功率，環境/電解質溫度或放電終止參數都會導致不同的結果能量值。因此，測試結果都必須附有測試過程之相關條件。
- f). 為了驗證製造商聲明的能量值，應在額定功率下進行三次連續且相同的能量測試。
- g). 為了確認符合製造商聲明的額定能量值，三個連續循環的實驗確定的平均能量應等於或大於額定值。

(三). 輸出功率/輸入功率

因 IEC62932-2-1 為針對液流電池進行之規範，因此在 POC 處之考量更符合液流電池之系統設計，且對於輸出/輸入功率考量實際測試之需求，針對供應商設宣稱之最大輸出與輸入功率進行量測與確認，因此在輸出功率/輸入功率之考量主要參考 IEC62932-2-1 的內容。

最大輸出功率確認：液流電池操作所需的最大放電輸出

功率受放電時間、充電狀態、環境溫度和輔助功率的影響。因此，本測試所確定的任何最大可輸出輸出功率值，僅代表或僅適用於液流電池的測試之工作條件。測試應依照以下程序與內容：

- a). 放電持續時間 t_d 應在試驗前確定。建議將定義的 $1/50$ 額定能量持續到額定功率的持續時間。或者，製造商應聲明使用的持續時間。
- b). 應按照製造商聲明的方法將測試單元充電至所需的充電狀態。
- c). 測試單元應以選定的恆定功率放電，直到放電終止，並記錄放電持續時間。功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。應當注意，所選的放電功率水平不會對設備造成不可逆轉的損壞。
- d). 如果放電持續時間 t 高於定義的持續時間值 t_d ，以增加的功率水平重複量測，直到達到確定的放電持續時間 t_d 。所有其他條件應保持恆定。
- e). 如果放電持續時間 t 小於定義的持續時間 t_d ，以降低的功率水平重複量測，直到達到定義的放電持續時間 t_d 。所有其他條件應保持恆定。
- f). 應記錄最大可輸出輸出功率值和相應的輔助功率。最大可輸出輸出功率值應伴有放電持續時間 t_d ，充電狀態和環境溫度。
- g). 為了驗證製造商聲明的最大輸出功率值，應選擇程序 c). 中的最大功率輸出測試。且測得的放電持續時間不得少於

製造商規定的時間。

最大輸入功率確認：液流電池操作所需的充電輸入功率受充電時間、充電狀態、環境溫度和輔助功率的影響。因此，本測試所確定的任何最大可輸入輸入功率值，僅代表或僅適用於液流電池的測試之工作條件。測試應依照以下程序與內容：

- a). 充電時間 t_c 應在測試前確定。建議將定義的 $1/50$ 額定能量持續到額定功率的持續時間。或者，製造商應聲明持續時間和所使用的最大輸入功率。
- b). 應按照製造商聲明的方法將測試單元放電至所需的充電狀態。
- c). 測試單元應以恆定的選定功率水平充電，直到達到充電終止。應當記錄充電的持續時間。功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。應當注意，所選的充電功率水平不會對設備造成不可逆轉的損壞。
- d). 如果充電持續時間 t 高於定義的持續時間值 t_c ，則以增加的功率水平重複量測，直到達到確定的充電持續時間值 t_c 。所有其他條件應保持恆定。
- e). 如果充電持續時間 t 小於計算的持續時間 t_c ，請以降低的功率水平重複量測，直到獲得計算的充電持續時間 t_c 。所有其他條件應保持恆定。
- f). 應記錄可接收的最大輸入功率水平值和相應的輔助功率。可接收的最大輸入功率值應伴有充電時間 t_c ，充電狀態和環境溫度。

- g). 為了驗證製造商聲明的最大輸入功率值，應選擇程序 c). 中的最大功率輸出測試。測得的充電持續時間不得少於製造商規定的持續時間。

(四). 往返效率

因 IEC62932-2-1 為針對液流電池進行之規範，因此在 POC 處之考量更符合液流電池之系統設計，其中之能效測試即為液流電池系統之往返效率標準，因此在往返效率測試之考量主要參考 IEC62932-2-1 的內容。

在液流電池操作的充電和放電過程中，能量效率受功率水平和輔助能量消耗的影響。因此，任何能效測試結果都僅適用於指定功率水平下的液流電池。液流電池在測量之前應處於穩定的溫度條件下。進入電池或電池堆的電解液其溫度和濃度應予以記錄和報告。測試應依照以下程序與內容：

- a). 測試單元應連接至負載電路，該負載電路可根據需要對單元進行充電或放電。在充放電期間，應有足夠的設備來確定測試單元中輔助設備的能量消耗。
- b). 測試單元應以恆定功率放電，直到達到放電終止。
- c). 然後應以恆定功率對測試單元進行充電，直到達到充電結束，且功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。
- d). 然後應以與充電期間相同的恆定功率對測試單元進行放電，直到達到放電終止，且放電功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。

e). 在 c). 中充入測試單元的能量應記為 E_c ，在 d). 中充入測試單元的能量應記為 E_d 。

f). 能量效率 η 定義為 d). 中釋放的能量與能量之比值：

$$\eta = \frac{E_d}{E_c} \times 100\%$$

其中：

η 是液流電池在充放電循環中的能量效率；

E_d 是在放電期間從液流電池釋放的測得能量（Wh）；

E_c 是充電期間（Wh）充入液流電池的測得能量。

g). 測試單元的荷電狀態或健康狀態的任何變化，使用不同放電功率，環境/電解質溫度或截止標準參數的變化將導致不同的能源效率值。因此，測試結果都必須附有測試過程之相關條件。

h). 為了驗證製造商聲明的額定能效值，應進行三次連續且相同的能效測試。

i). 為了表明符合製造商聲明的額定能效值，實驗確定的三個連續循環的平均能效應等於或大於額定值。

(五). 使用壽命

現階段研析之三項法規，對於液流電池的使用壽命，並無標準化檢測方式。本計畫為完善液流電池的性能測試方式，找尋國際間相關法規，找尋到 GB/T 33339，「全釩液流電池系統測試方法」中有相關測試。GB/T 33339 有一測試為容量保持能力測試，其針對液流電池之容量保持能力進行

測試，確認液流電池應有一定之使用壽命，相關測試步驟如下：

- a). 將電池系統充電至 100% SOC；
- b). 以額定功率對電池系統放電至截止條件；
- c). 以額定功率對電池系統充電至截止條件；
- d). 以額定功率對電池系統放電至截止條件；
- e). 充放電時紀錄系統的 SOC；
- f). 連續重複 3~5 步驟 99 次；
- g). 依式計算電池系統的容量衰減率。

$$R=(1-E_d/E_r)*100\%$$

式中：

R 為電池系統容量衰減率，%；

E_d 為電池系統淨放電瓦時容量，瓦時(Wh)；

E_r 為電池系統額定瓦時容量，瓦時(Wh)。

(六). 電池響應

因 IEC62933-2-1 中並為要求測試電池之響應速率，因此在此電池響應測試之考量參考 IEC62933-2-1 的內容。

規範響應測試、階躍響應時間與斜率，電能儲能系統的響應時間應符合下述程序測試，且 POC 上的數據採集應以合適之時間間格分辨紀錄：

- a). 電能儲能系統應充電或放電至可用能量的 50% 狀態。
- b). 設定點應為 0。在輸出達額定輸入功率的 $(0\pm 2)\%$ 內，設定

點的值應都維持不變。

- c). 設定點應更改為額定輸入功率。設定點值應保持不變，直到 POC 上的有功功率達到額定輸入功率範圍的 2% 內。步驟 c) 的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT1 以及 RR1。
- d). 設定點應更改為 0。在輸出達額定輸入功率的 $(0 \pm 2)\%$ 內，設定點的值應都維持不變。步驟 d) 的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT2 以及 RR2。
- e). 電能儲能系統應在規格的 50% 容量下進行充放電。
- f). 設定點應更改為額定輸出功率。設定點值應保持不變，直到 POC 上的有功功率達到額定輸入功率範圍的 2% 內。步驟 f) 的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT3 以及 RR3。
- g). 設定點應更改為 0。在輸出達額定輸入功率的 $(0 \pm 2)\%$ 內，設定點的值應都維持不變。步驟 g) 的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT4 以及 RR4。

(七). 自放電

因 IEC62933-2-1 中並為要求測試電池之響應速率，因此在此自放電測試之考量參考 IEC62933-2-1 的內容，按照下列程序進行測試：

- a). 電能儲能系統應充至規格能量容量的 100%。
- b). 在電能儲能系統的自放電量測時間內，應關閉電能儲能系統中的功率轉換系統並保持在停止狀態。電能儲能系統的自放電時間應為 1 小時、1 天或 1 週中選定一種。

- c). 在電能儲能系統的自放電量測時間之後，應將 ESS 系統充電至初始能量水平，並於 POC 上量測輸入能量。此 POC 上的輸入能量即為自放電能耗。
- d). 如果電能儲能系統有可監控能量之裝置，則步驟 b) 前後之能量數值差即為自放電能耗，不用進行步驟 c)。
- e). 電能儲能系統的自放電率應以 c) 或 d) 所得之能耗除以自放電時間作為評估。

(八). 工作電壓/工作頻率

因 IEC62933-2-1 中並為要求測試電池之響應速率，因此在工作電壓/工作頻率測試之考量參考 IEC62933-2-1 的內容，按照下列程序進行測試，且所有輸入與輸出功率公差應在額定功率的 $\pm 2\%$ 內。且應紀錄 POC 上之評率、電壓以及有功功率：

- a). 測試情況 1： $U=U_{min}$ ， $f=f_{min}$ 在恆額定有功功率輸出的條件下
 - 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
 - 2). POC 的電壓設定應設置為 U_{min} ，POC 的頻率設定應設為 f_{min}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在 POC 處，輸出 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率
- b). 測試情況 2： $U=U_{max}$ ， $f=f_{max}$ 在恆額定有功功率輸出的條件下
 - 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%

- 2). POC 的電壓設定應設置為 U_{max} ，POC 的頻率設定應設為 f_{max}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在 POC 處，輸出 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率
- c). 測試情況 3： $U=U_{min}$ ， $f=f_{min}$ 在恆額定有功功率輸入的條件下
- 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
 - 2). POC 的電壓設定應設置為 U_{min} ，POC 的頻率設定應設為 f_{min}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在 POC 處，輸入 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率
- d). 測試情況 4： $U=U_{max}$ ， $f=f_{max}$ 在恆額定有功功率輸入的條件下
- 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
 - 2). POC 的電壓設定應設置為 U_{max} ，POC 的頻率設定應設為 f_{max}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在 POC 處，輸入 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率

(九). 過充測試

參考 UL 1973 中對於電池之過充電測試，評估電池系統承受過充電狀況的能力，不因過度的充電而有火災、洩漏、有毒氣體釋放等危害。

測試時應完全放電並使用製造商所規定的最大充電功率進行充電。應充電至最大允許電壓之 110%，且測試結束

後電池不應有不符合規定之危害發生。

(十). 過放電保護測試

參考 UL 1973 中對於電池之過放電保護測試。本測試應在充滿電的樣品上進行，以確定承受過放電條件的能力，防止不可修復的電池損壞。測試液流電池可承受應承受恆定的放電電流/功率。並測試持續到激活保護設備，或在達到其指定的正常放電極限後再放電 30 分鐘。且測試結束後電池不應有不符合規定之危害發生。

(十一). 高溫測試

參考 UL 1973 中對於電池之高溫測試。電池堆之工作環境需承受一定高溫，因此進行電池堆的高溫測試：應選擇電池組的最高額定溫度或 $70\pm 2^{\circ}\text{C}$ 中較大者為依據測試，於循環溫室中測試 7 小時。高溫測試結束時，應冷卻至室溫，然後應通過洩漏測試檢查其是否洩漏，以確認電池堆具有承受目標溫度之性能。

(十二). 周邊零組件測試

參考 UL 1973 中對於電池之周邊零組件測試，包含環境溫度與反應性部分的測試。電解液的周邊零件應能抵抗其環境溫度以及所含酸性流體的變質，應按照 ASTM D638，周邊零件在測試環境，在 50°C (122°F) 溫度下於全氣流循環烘箱中分別置放 7 天，30 天和 60 天，最終的被測材料的抗拉強度應不低於原樣材料抗拉強度的 80%。

電解液接觸的墊圈和密封件應按照 UL 157 的規定在浸入電解液 70 小時後進行體積變化和抽出，拉伸強度和伸長率的測試。拉伸強度和伸長率至少應為標準值的 60%，體積變化值應為標準值的- 1 到+ 25%，且重量變化不得大於 10%。

如此可經由此一測試確認電池堆之零組件具有承受溫度與電解液之性能。

本計畫已完成液流電池性能部分之法規研析與統整，液流電池之性能測試主要為電池系統之各種效能測試，以及其可工作環境的確認，與一般電池系統的考量並無太多差異。

二、液流電池安全標準測試與驗證研究

本研究分別對 IEC 62933-5-1，「電能儲能(EES)系統的規範要求：集成電網的電能儲能系統的安全注意事項-通用規範」、IEC 62932-2-2，「液流電池於定置型應用之安全要求」進行整理，規劃液流電池安全檢測之內容。

由 IEC 62933-5-1 中可知，電池儲能系統主要有電路隱患、機械隱患、火災隱患、高溫隱患、化學危害等需考量之部分。而在 IEC 62932-2-2 中對於上述危害多有規範，可做為液流電池安全要求之標準。整理相關內容如下：

(一)、漏電流測試

IEC 62932-2-2 中提供有漏電流測試。液流電池系統的

電路應與其他本地導電部件適當絕緣。電池電路與其他局部導電部件之間的最小絕緣電阻應符合 IEC 62485-2：2010，6.4 的要求，其間的最小絕緣電阻應大於 100Ω 。

(二)、過/欠電壓與過流/欠流

IEC 62932-2-2 中未明確提及對應之測試方式，且過電壓、過故此處參考 UL 1973 中對於電池之過充電測試，評估電池系統承受過充電狀況的能力，不因過度的充電而有火災、洩漏、有毒氣體釋放等危害。

測試時應完全放電並使用製造商所規定的最大充電功率進行充電。應充電至最大允許電壓之 110%，且測試結束後電池不應有不符合規定之危害發生。

另外我國用戶用電設備裝置規則中則針對儲能系統電路之保護裝置進行要求，要求過電流保護裝置之額定應依規定及儲能系統之額定決定，且不得低於最大電流之一·二五倍。

(三)、溫度過高/過低

IEC 62932-2-2 中提供有熱衝擊測試。當流體開始循環時，電堆應可承受由熱引起的機械應力。測試應依照以下程序與內容：

- a). 將樣品暴露於 T_{max} 流體或 T_{max} 環境中較高的溫度下，
- b). 以製造商指定的最大入口壓力，使液流電池系統中使用的流體以 T_{min} 流體或樣品的 T_{min} 環境溫度的

較低溫度循環 1 小時，

- c). 將樣品連續暴露於 T_{min} 流體或 T_{min} 環境中較低的溫度下，
- d). 以製造商指定的最大入口壓力，以最高溫度（最高溫度）或最高溫度（最高溫度）在樣品中循環流體 1 小時，
- e). 重複從 1 到 4 的程序 9 次。共進行 10 次熱衝擊測試。

(六)、靜電

IEC 62932-2-2 中提供有短路測試。明確規範使用電阻不大於 $20\text{ m}\Omega$ 的電阻負載連接被測物的正負極，直到下述情況發生：(1).電池完全放電，(2).集成保護裝置起作用或(3).電池結構具有失敗，以先發生者為準。該測試可能具有危險性，應在合格人員的監督下，在適當的測試設備中進行。

(五)、防爆以及防止火災隱患

IEC 62932-2-2 於氣體危害中有所提及，但未有明確之測試方式以進行防爆與防止火災隱患。且我國用戶用電設備裝置規則中也要求，儲能系統應有通風設備，以防止儲能裝置所生爆炸性混合物之累積，套件型或整套型之儲能系統通風措施得依製造廠家建議辦理。因此本研究參考 UL 9540A 中對於液流電池熱失控測試之相關內容，其中包含電解液之易燃性測試以及電池廢氣組成。

電解液之易燃性測試

由電解液之黏性與閃火點並依據 ASTM E502 判斷所液

流電池電解液測試標準。ASTM E502(密閉杯化學品閃火點測定用 ASTM 標準選擇)中提供了選擇測試方式之指導：其中指示高閃火點與高黏性($9.5 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)之電解液應參考 ASTM D3828 或 ASTM D93 之測試方式。測試儀器中的所有零件材料需與電解液不產生化學反應。測試須持續至 200 度或可判斷易燃性或達測試極限，並記錄電解液閃火點。

若有電池系統中有兩種電解液，液體之易燃性應參考個別電解液之測試結果。若電解液閃火點被定義，則電解液熱失控應閃火點溫度進行比較。

由於存在兩種電解液之液流電池故障時，可能導致溫度之上升。因此應將電池充至 SOC 100%進行測試，且於 1 分鐘內直接混合兩種電解液，並封於密閉容器，並量測其溫度，且測試最少進行 1 小時。所量測之最大溫度與閃火點應因進行比較。

電池廢氣組成

電池排氣組成應由 GC 或同功能之分析技術進行氣體組成之定量分析，主要鑑定烴氣組成，因燃燒與爆炸風險。且氫氣也應被量測，氫氣感測器應具有量測超過 30%之容量能力。廢氣之最低可燃極限應由 ASTM E918 中所述之方式定義，製作混合氣體並於 5 公升的不鏽鋼容器中進行 LFL 之測試測試之。在一密閉容器中捕獲所生成之廢氣。且須收集通風口處之排氣並進行分析，且周圍測試溫度與最高溫度均應量測。易燃氣體容量測應參考最大之儲能情況，或系統於故障時可能產生之最大易燃氣體量，且紀錄於報告中。

如下述熱失效測試達成，則液流電池無須再進行其他熱相關測試：

- a). 電解液測試符合電解液易燃性測試之測試而無燃燒、
- b). 所量測之閃火點溫度，至少須高於所量測過充、短路溫度 5°C、
- c). 所量測之閃火點溫度，至少須高於所量測之電解液混合溫度之最高溫 5°C。

又由 IFC 2018 中又有進行相關規範，以防止火災與爆炸發生。其中規範通風設備應可將 LFL 限制於 25%之下，而對於氫氣，應限制在儲存空間之 1%之下。或使用持續通風之方式，而通風速率不應小於 $0.00508 \text{ m}^3/\text{s}\cdot\text{m}^2$ 。

(六)、防止化學作用與防止有害排放物和洩漏

IEC 62932-2-2 於氣體危害以及液體危害中有提及防止化學作用與防止有害排放物和洩漏，但未有明確之測試方式，因此參考 UL 1973 中的洩漏遏制元件測試，為避免液流電池系統漏液所造成之為害，應依據 UL 1973 之要求，使用洩漏遏制系統（例如密閉容器、吸收枕）來對液流電池系統進行密封、吸收或中和從流動的電解液電池中溢出的電解液時，洩漏遏制系統的材料和部件應接受 UL 2436 的適用測試。但如果涉及暴露於或使用硫酸以外的電解液的測試，則應再根據電池系統中使用電解液組成從 UL 2436 的測試中進行修改。

本計畫已完成液流電池安全部分之法規研析與統整，液流電池之安全測試與要求在電性部分與一般電池系統的考量並無太多差異。但在防火、防爆、防化學作用與防止有害排放物部分則因液流電池之特性而有所不同。須留意電解液之反應以及流動性化學品所造成的影響。

三、液流電池系統效能測試程序書

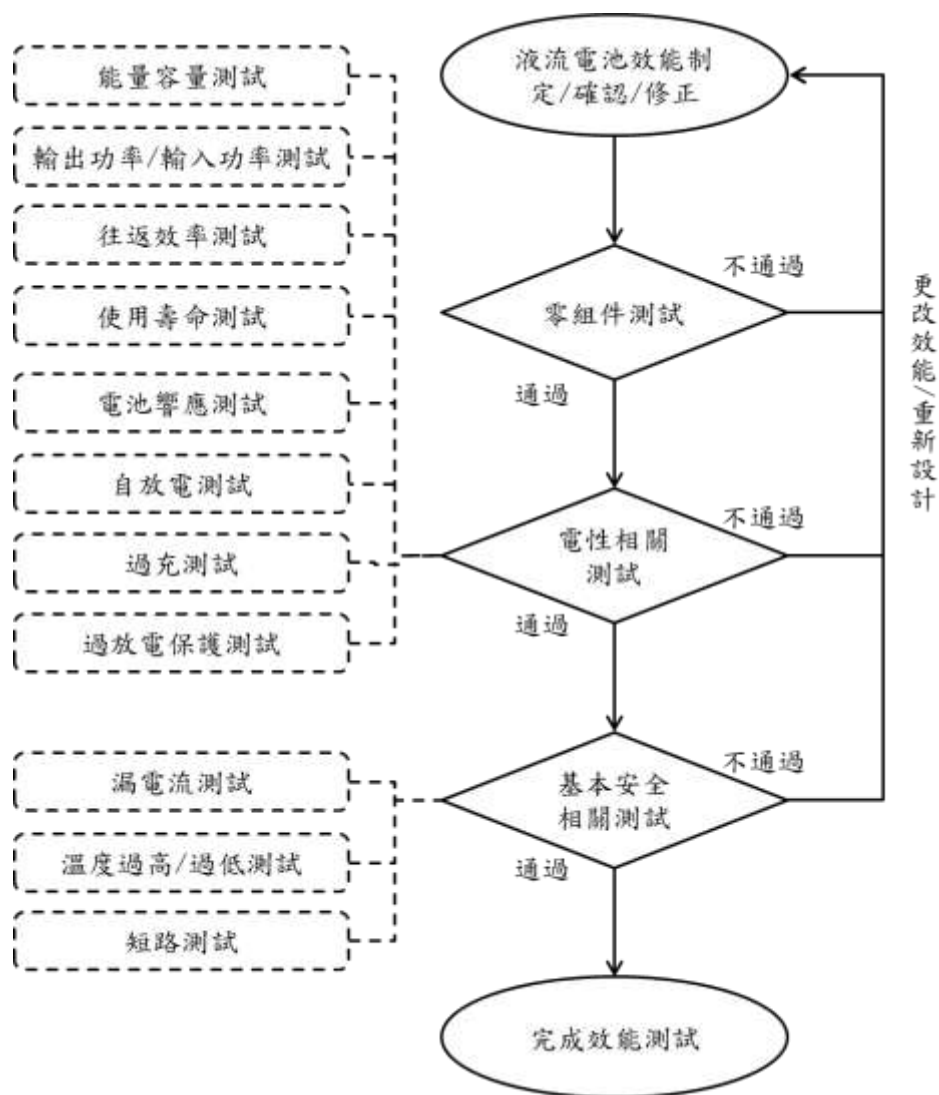
1. 目的

建立液流電池系統效能測試管理規範，期使液流電池系統效能測試獲得適切控管，以確保測試數值的正確性以及統一性。

2. 測試程序

液流電池系統效能測試程序應如下圖所示，先參考待測電池的說明書/設計規格，確認測試條件，再進行零組件測試、電性相關測試以及基本安全相關測試。其中零組件測試包含環境溫度與反應性部分的測試，而電性相關測試則包含能量容量測試、輸出功率/輸入功率測試、往返效率測試、使用壽命測試、電池響應測試、自放電測試、過充測試以及過放電保護測試。最後對電池系統進行基本安全的相關測試，以確認液流電池系統具有設計或製造商所宣稱的效能。其中包含漏電流測試、溫度過高/過低測試以

及短路測試。若測試不通過時，則需更改說明書或規格，或是重新設計開發以達到預期之效能。



3. 設備要求與測試環境

- a). 電壓量測-所使用的儀器的精度等級應等於或大於 1%。所使用的電壓表的內部電阻應至少為 $1\text{k}\Omega/\text{V}$ 。
- b). 電流量測-所使用的儀器的精度等級應等於或大於 1%。且直流和交流電流測量設備的精度，不因能量和效率因素產

生對於精度產生負面影響。

- c). 電能測量-所使用的儀器的精度等級應等於或大於 1%。且直流和交流功率及能量測量設備的精度，不因能量和效率因素產生對於精度產生負面影響。
- d). 溫度測量-所用儀器的解析度應為 0.5 K，儀器的誤差值為 ± 1 K 或更好。
- e). 外部環境-建議標準之測試環境為：環境溫度為 25°C、海拔需 ≤ 1000 m、濕度需 $\leq 95\%$ 且無凝結之情況發生，除非測試條款另有規定或製造商和用戶同意。且應測量並報告環境溫度。測量儀器或探頭應屏蔽通風和輻射熱。
- f). 對於任何測試，均應記錄並報告平均環境溫度和進入液流電池或電池組的流體溫度。應該描述流體溫度探頭的位臵。

4. 測試方式

4.1 零組件測試

對於電池之周邊零組件測試，應包含環境溫度與反應性的測試。電解液的周邊零件應能抵抗其環境溫度以及所含酸性流體的變質，周邊零件在測試環境，在 50°C (122°F) 溫度下於全氣流循環烘箱中分別置放 7 天，30 天和 60 天，最終的被測材料的抗拉強度應不低於原樣材料抗拉強度的 80%。

且電解液接觸的墊圈和密封件應在浸入電解液 70 小時後進行體積變化和抽出，拉伸強度和伸長率的測試。拉伸

強度和伸長率至少應為標準值的 60%，體積變化值應為標準值的- 1 到+ 25%，且重量變化不得大於 10% 。

4.2 電性相關測試

4.2.1 能量容量測試

此測試為恆功率下之能量測定，該測試用於通過測量液流電池儲能系統或液流電池系統的總放電能量輸出以及輔助設備（例如 BMS，BSS 和泵）消耗的輔助能量來確定液流電池儲能系統或液流電池系統在恆定功率模式下的放電能量。在測量前應處於穩定的溫度條件下，且進入電池或電池堆的電解液的溫度和濃度應予以記錄和報告。測試應依照以下程序與內容：

- a). 測試單元應連接至負載電路，該負載電路可根據需要對測試單元進行充電或放電。
- b). 測試單元應符合可製造商聲明之操作。
- c). 測試單元應以恆定功率放電，直到達到放電終止。該功率應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。
- d). 應測量並記錄測試裝置的總能量消耗與輔助設備之能耗。
- e). 測試單元的充電狀態或健康狀態的任何變化，輔助設備的功耗的變化或使用不同的放電功率，環境/電解質溫度或放電終止參數都會導致不同的結果能量值。因此，測試結果都必須附有測試過程之相關條件。
- f). 為了驗證製造商聲明的能量值，應在額定功率下進行三次連續且相同的能量測試。

- g). 為了確認符合製造商聲明的額定能量值，三個連續循環的實驗確定的平均能量應等於或大於額定值。

4.2.2 輸出功率/輸入功率

最大輸出功率確認-液流電池操作所需的最大放電輸出功率受放電時間、充電狀態、環境溫度和輔助功率的影響。因此，本測試所確定的任何最大可輸出輸出功率值，僅代表或僅適用於液流電池的測試之工作條件。測試應依照以下程序與內容：

- a). 放電持續時間 t_d 應在試驗前確定。建議將定義的 $1/50$ 額定能量持續到額定功率的持續時間。或者，製造商應聲明使用的持續時間。
- b). 應按照製造商聲明的方法將測試單元充電至所需的充電狀態。
- c). 測試單元應以選定的恆定功率放電，直到放電終止，並記錄放電持續時間。功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。應當注意，所選的放電功率水平不會對設備造成不可逆轉的損壞。
- d). 如果放電持續時間 t 高於定義的持續時間值 t_d ，以增加的功率水平重複量測，直到達到確定的放電持續時間 t_d 。所有其他條件應保持恆定。
- e). 如果放電持續時間 t 小於定義的持續時間 t_d ，以降低的功率水平重複量測，直到達到定義的放電持續時間 t_d 。所有其他條件應保持恆定。
- f). 應記錄最大可輸出輸出功率值和相應的輔助功率。最大可

輸出輸出功率值應伴有放電持續時間 t_d ，充電狀態和環境溫度。

- g). 為了驗證製造商聲明的最大輸出功率值，應選擇程序 c). 中的最大功率輸出測試。且測得的放電持續時間不得少於製造商規定的時間。

最大輸入功率確認-液流電池操作所需的充電輸入功率受充電時間、充電狀態、環境溫度和輔助功率的影響。因此，本測試所確定的任何最大可輸入輸入功率值，僅代表或僅適用於液流電池的測試之工作條件。測試應依照以下程序與內容：

- a). 充電時間 t_c 應在測試前確定。建議將定義的 $1/50$ 額定能量持續到額定功率的持續時間。或者，製造商應聲明持續時間和所使用的最大輸入功率。
- b). 應按照製造商聲明的方法將測試單元放電至所需的充電狀態。
- c). 測試單元應以恆定的選定功率水平充電，直到達到充電終止。應當記錄充電的持續時間。功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。應當注意，所選的充電功率水平不會對設備造成不可逆轉的損壞。
- d). 如果充電持續時間 t 高於定義的持續時間值 t_c ，則以增加的功率水平重複量測，直到達到確定的充電持續時間值 t_c 。所有其他條件應保持恆定。
- e). 如果充電持續時間 t 小於計算的持續時間 t_c ，請以降低的功率水平重複量測，直到獲得計算的充電持續時間 t_c 。所

有其他條件應保持恆定。

- f). 應記錄可接收的最大輸入功率水平值和相應的輔助功率。可接收的最大輸入功率值應伴有充電時間 t_c ，充電狀態和環境溫度。
- g). 為了驗證製造商聲明的最大輸入功率值，應選擇程序 c). 中的最大功率輸出測試。測得的充電持續時間不得少於製造商規定的持續時間。

4.2.3 往返效率測試

在液流電池操作的充電和放電過程中，能量效率受功率水平和輔助能量消耗的影響。因此，任何能效測試結果都僅適用於指定功率水平下的液流電池。液流電池在測量之前應處於穩定的溫度條件下。進入電池或電池堆的電解液其溫度和濃度應予以記錄和報告。測試應依照以下程序與內容：

- a). 測試單元應連接至負載電路，該負載電路可根據需要對單元進行充電或放電。在充放電期間，應有足夠的設備來確定測試單元中輔助設備的能量消耗。
- b). 測試單元應以恆定功率放電，直到達到放電終止。
- c). 然後應以恆定功率對測試單元進行充電，直到達到充電結束，且功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。
- d). 然後應以與充電期間相同的恆定功率對測試單元進行放電，直到達到放電終止，且放電功率水平應保持恆定在 $\pm 2\%$ 以內。
- e). 在 c). 中充入測試單元的能量應記為 E_c ，在 d). 中充入測試單元的能量應記為 E_d 。

f). 能量效率 η 定義為 d). 中釋放的能量與能量之比值：

$$\eta = \frac{E_d}{E_c} \times 100\%$$

其中：

η 是液流電池在充放電循環中的能量效率；

E_d 是在放電期間從液流電池釋放的測得能量 (Wh)；

E_c 是充電期間 (Wh) 充入液流電池的測得能量。

g). 測試單元的荷電狀態或健康狀態的任何變化，使用不同放電功率，環境/電解質溫度或截止標準參數的變化將導致不同的能源效率值。因此，測試結果都必須附有測試過程之相關條件。

h). 為了驗證製造商聲明的額定能效值，應進行三次連續且相同的能效測試。

i). 為了表明符合製造商聲明的額定能效值，實驗確定的三個連續循環的平均能效應等於或大於額定值。

4.2.4 使用壽命測試

針對液流電池之容量保持能力進行測試，確認液流電池應有一定之使用壽命，相關測試步驟如下：

- a). 將電池系統充電至 100% SOC；
- b). 以額定功率對電池系統放電至截止條件；
- c). 以額定功率對電池系統充電至截止條件；
- d). 以額定功率對電池系統放電至截止條件；

- e). 充放電時紀錄系統的 SOC；
- f). 連續重複 3~5 步驟 99 次；
- g). 依式計算電池系統的容量衰減率。

$$R=(1-E_d/E_r)*100\%$$

式中：

R 為電池系統容量衰減率，%；

E_d 為電池系統淨放電瓦時容量，瓦時(Wh)；

E_r 為電池系統額定瓦時容量，瓦時(Wh)。

4.2.5 電池響應測試

規範響應測試、階躍響應時間與斜率，電能儲能系統的響應時間應符合下述程序測試，且連接點上的數據採集應以合適之時間間格分辨紀錄：

- a). 電能儲能系統應充電或放電至可用能量的 50%狀態。
- b). 設定點應為 0。在輸出達額定輸入功率的(0±2)%內，設定點的值應都維持不變。
- c). 設定點應更改為額定輸入功率。設定點值應保持不變，直到連接點上的有功功率達到額定輸入功率範圍的 2%內。步驟 c)的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT1 以及 RR1。
- d). 設定點應更改為 0。在輸出達額定輸入功率的(0±2)%內，設定點的值應都維持不變。步驟 d)的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT2 以及 RR2。
- e). 電能儲能系統應在規格的 50%容量下進行充放電。

- f). 設定點應更改為額定輸出功率。設定點值應保持不變，直到連接點上的有功功率達到額定輸入功率範圍的 2% 內。步驟 f) 的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT3 以及 RR3。
- g). 設定點應更改為 0。在輸出達額定輸入功率的 $(0 \pm 2)\%$ 內，設定點的值應都維持不變。步驟 g) 的躍階響應時間與斜率應分別記錄為 SRT4 以及 RR4。

4.2.6 自放電測試

液流電池的自放電測試按照下列程序進行測試：

- a). 電能儲能系統應充至規格能量容量的 100%。
- b). 在電能儲能系統的自放電量測時間內，應關閉電能儲能系統中的功率轉換系統並保持在停止狀態。電能儲能系統的自放電時間應為 1 小時、1 天或 1 週中選定一種。
- c). 在電能儲能系統的自放電量測時間之後，應將 ESS 系統充電至初始能量水平，並於連接點上量測輸入能量。此連接點上的輸入能量即為自放電能耗。
- d). 如果電能儲能系統有可監控能量之裝置，則步驟 b) 前後之能量數值差即為自放電能耗，不用進行步驟 c)。
- e). 電能儲能系統的自放電率應以 c) 或 d) 所得之能耗除以自放電時間作為評估。

4.2.7 工作電壓/工作頻率測試

工作電壓/工作頻率測試應按照下列程序進行測試，且所有輸入與輸出功率公差應在額定功率的 $\pm 2\%$ 內。且應紀錄

量測點上之評率、電壓以及有功功率：

- a). 測試情況 1： $U=U_{min}$ ， $f=f_{min}$ 在恆額定有功功率輸出的條件下
- 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
 - 2). 量測點的電壓設定應設置為 U_{min} ，量測點的頻率設定應設置為 f_{min}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在量測點處，輸出 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率
- b). 測試情況 2： $U=U_{max}$ ， $f=f_{max}$ 在恆額定有功功率輸出的條件下
- 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
 - 2). 量測點的電壓設定應設置為 U_{max} ，量測點的頻率設定應設置為 f_{max}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在量測點處，輸出 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率
- c). 測試情況 3： $U=U_{min}$ ， $f=f_{min}$ 在恆額定有功功率輸入的條件下
- 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
 - 2). 量測點的電壓設定應設置為 U_{min} ，量測點的頻率設定應設置為 f_{min}
 - 3). 應確認電能儲能系統可在量測點處，輸入 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率
- d). 測試情況 4： $U=U_{max}$ ， $f=f_{max}$ 在恆額定有功功率輸入的條件下

- 1). 電能儲能系統應充電或放電至規格能量容量的 50%
- 2). 量測點的電壓設定應設置為 U_{max} ，量測點的頻率設定應設置為 f_{max}
- 3). 應確認電能儲能系統可在量測點處，輸入 5 分鐘(或規格中的持續時間)的額定有功功率

4.2.8 過充測試

電池需經過充電測試，以評估電池系統承受過充電狀況的能力，不因過度的充電而有火災、洩漏、有毒氣體釋放等危害。

測試時應完全放電並使用製造商所規定的最大充電功率進行充電。應充電至最大允許電壓之 110%，且測試結束後電池不應有不符合規定之危害發生。

4.2.9 過放電保護測試

參考 UL 1973 中對於電池之過放電保護測試。本測試應在充滿電的樣品上進行，以確定承受過放電條件的能力，防止不可修復的電池損壞。測試液流電池可承受應承受恆定的放電電流/功率。並測試持續到激活保護設備，或在達到其指定的正常放電極限後再放電 30 分鐘。且測試結束後電池不應有不符合規定之危害發生。

4.3 基本安全相關測試

4.3.1 漏電流測試

液流電池系統的電路應與其他本地導電部件適當絕緣。電池電路與其他局部導電部件之間的最小絕緣電阻應大於 100Ω 。

4.3.2 溫度過高/過低測試

當流體開始循環時，電堆應可承受由熱引起的機械應力。測試應依照以下程序與內容：

- a). 將樣品暴露於 T_{max} 流體或 T_{max} 環境中較高的溫度下，
- b). 以製造商指定的最大入口壓力，使液流電池系統中使用的流體以 T_{min} 流體或樣品的 T_{min} 環境溫度的較低溫度循環 1 小時，
- c). 將樣品連續暴露於 T_{min} 流體或 T_{min} 環境中較低的溫度下，
- d). 以製造商指定的最大入口壓力，以最高溫度（最高溫度）或最高溫度（最高溫度）在樣品中循環流體 1 小時，
- e). 重複從 1 到 4 的程序 9 次。共進行 10 次熱衝擊測試。

4.3.3 短路測試

應使用電阻不大於 $20\text{ m}\Omega$ 的電阻負載連接被測物的正負極，直到下述情況發生：(1).電池完全放電，(2).集成保護裝置起作用或(3).電池結構具有失敗，以先發生者為準。該測試可能具有危險性，應在適當的環境與測試設備中進行。

5. 參考標準

用戶用電設備裝置規則

IEC 62932-1. Flow battery energy systems for stationary applications - Part 1: Terminology and general aspects.

IEC 62932-2-1. Flow battery energy systems for stationary applications - Part 2-1: Performance general requirements and test methods.

IEC 62932-2-2. Flow battery energy systems for stationary applications - Part 2-2: Safety requirements.

IFC-2018. International Fire Code.

IEC 62933-2-1. Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification

IEC 62933-5-1. Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems - General specification

UL 9540. Standard for Energy Storage Systems and Equipment.

UL 9540A. Standard for Safety: Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems.

UL 1973. Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications.

GB/T 33339. 全釩液流電池系統測試方法

伍、結論

一、結論說明

本次計畫已完成液流電池系統性能標準測試與驗證研究以及液流電池系統安全標準測試與驗證研究的內容，包含法規對 IEC 62933-2-1、IEC 62932-2-1、IEC 62933-5-1、IEC 62932-2-2 以及 UL 1973 等法規進行研析。並比對 IEC 62933-2-1、IEC 62932-2-1 以及 UL 1973，規劃液流電池性能檢測之方式，包含能量容量之測量、輸入輸出功率測試、往返效率測試、系統響應測試、自放電測試以及工作電壓與頻率範圍測試...等各項性能測試。又比對 IEC 62933-5-1 以及 IEC 62932-2-2 之內容，規劃液流電池安全檢測之方式。

研析與整理的過程中發現性能與安全部分法規亦有不足處，如對液流電池循環壽命的檢測方式、因應危害氣體的通風要求...等未提供有足夠且清楚的測試方式。因此找尋國際間相關液流電池法規，或積極發展液流電池的國家中，是否有相關法規對這些部分進行規範。如此方能完善本計畫之檢測驗證內容。

二、查核點確認

本計畫的工作規劃如表 2 所示，預期依照進度完成各工作項，並於 110 年 11 月 08 日前完成執行進度達 100%且繳交研究報告，內容包含「液流電池性能標準測試與驗證研究」、「液流電池安全標準測試與驗證研究」以及「液流電池系統效能測試程序書」部分。

本次報告已完成工作項目 1：「液流電池性能標準測試與驗證

研究」、工作項目 2：「液流電池安全標準測試與驗證研究」兩工作項，工作項目 1 已完成 IEC 62933-2-1 以及 IEC 62932-2-1 兩項法規之研析以及比較，並參考 UL 1973 等規範進行補充。工作項目 2 已對 IEC 62933-5-1 以及 IEC 62932-2-2 進行比較，並整理工作項目 1、2 之內容，挑選其中液流電池系統效能相關測試，完成「液流電池系統效能測試程序書」。且完成共同投稿至少 1 篇論文至國內外期刊及研討會，執行進度達總計畫之 100%，如表 2 所示。

表 2. 本計畫之甘特圖。

年月 工作項目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1. 液流電池性能標準測試與驗證研究						※		※				
2. 液流電池安全標準測試與驗證研究								※			※	
3. 完成研究報告 1 篇											※	
4. 共同投稿至少 1 篇論文至國內外期刊及研討會											※	
工作進度估計百分比 (累 積 數)			7 %	14 %	28 %	42 %	58 %	74 %	85 %	96 %	100 %	
預 定 查 核 點	期初：執行進度達 30%研究報告 期中：包含「液流電池性能標準測試與驗證研究」與「液流電池安全標準測試與驗證研究」內容之期中報告。 期末：完成「液流電池安全標準測試與驗證研究研究報告」1 篇、其中包含液流電池系統效能測試程序書、共同投稿 1 篇論文至國內外期刊及研討會											

陸、參考文獻

1. 國發會產業發展處(109 年度)，“推動六大核心戰略產業，獲取全球關鍵力量”，台灣經濟論衡，第 18 卷，第四期，第 4 頁-9 頁
2. 國發會產業發展處(109 年度)，“2025 打造臺灣成為亞太綠能發展典範”，台灣經濟論衡，第 18 卷，第四期，第 29 頁-32 頁
3. Twumasi, Y. A. (2017). “Relationship between CO₂ Emissions and Renewable Energy Production in the United States of America,” *ACRI*, Vol. 7, No. 1, pp 1-12.
4. Kandpal, T. C., and Broman, L. (2014). “Renewable energy education : A global status review,” *Renew. Sust. Energ. Rev.*, Vol 34, pp. 300-324.
5. Carrasco, J. M., Bialasiewicz, J. T., Guisado, R. C. P., and León, J. I.. (2006). “Power-Electronic Systems for the Grid Integration of Renewable Energy Sources: A Survey,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 53, No. 4, pp. 1002-1016.
6. HELISCSP, Concentrated Solar Power plants provided 3,093 MWh on May 16 in California, Retrieved from <http://helioscsp.com/> (May 31, 2017)
7. You, D., Zhang, H., and Chen., J. (2009). “A simple model for the vanadium redox battery,” *Electrochim. Acta*, Vol 54, pp. 6827-6836.
8. ADROIT Market Research, Vanadium Redox Flow Battery Market Will Grow at 59.7% CAGR to Hit \$1.11 Billion by 2025: Adroit Market Research, Retrieved from <https://www.globenewswire.com> (Apr, 09, 2019)
9. 用戶用電設備裝置規則，民國 109 年 04 月 15 日
10. IEC 62932-1, (2020). Flow battery energy systems for stationary applications - Part 1: Terminology and general aspects.
11. IEC 62932-2-1, (2020). Flow battery energy systems for stationary applications - Part 2-1: Performance general requirements and test methods.
12. IEC 62932-2-2, (2020). Flow battery energy systems for stationary applications - Part 2-2: Safety requirements.
13. 立法院(106 年度)，能源政策專案報告，第 9 屆第 5 會期，1-3 頁

14. 盧恆究、陳竑廷、黃永福(106 年度)，“我國高占比再生能源併網之因應參考策略：以日本大型改善設備系統技術分析為例”，臺灣能源期刊，第四卷，第四期，第 445 頁-463 頁
15. IFC-2018, (2018). International Fire Code.
16. IEC 62933-2-1, (2017). Electrical energy storage (EES) systems - Part 2-1: Unit parameters and testing methods - General specification
17. IEC 62933-5-1, (2017). Electrical energy storage (EES) systems - Part 5-1: Safety considerations for grid-integrated EES systems - General specification
18. UL 9540, (2020). Standard for Energy Storage Systems and Equipment.
19. UL 9540A, (2020). Standard for Safety: Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems.
20. UL 1973, (2018). Batteries for Use in Stationary, Vehicle Auxiliary Power and Light Electric Rail (LER) Applications.
21. Perry, M. L., Adam Z. W. (2016), “Advanced Redox-Flow Batteries: A Perspective.” Journal of The Electrochemical Society , Vol 163.1 , pp. A5064 - A5067.
22. GB/T 33339, (2016). “全釩液流電池系統測試方法”