

鋰電池之海事溫濕度環境試驗分析

黃雍哲* 余金庭* 蘇俊連*¹ 胡卓瀚* 劉家毓** 黃姿妤** 李穎承** 林琬玲**

*國立高雄科技大學 電機工程系

**海軍造船發展中心

關鍵詞：船艦、海事環境、鋰電池、認證標準、溫濕度試驗

摘要

新一代船艦動力系統需要大型鋰電池儲能裝置，對這類電池的放電倍率、使用壽命、能量密度、及檢修維護等要求甚高，對安全性更是有嚴苛的鋰電池海事環境效能標準與商用產品認證要求，惟國內目前針對於船艦用之海事鋰電池組的環境型式認證測試標準及程序的研究較少。本文參考鋰電池國際海事環境認證標準，建立適用於船艦動力用之鋰電池海事環境之溫濕度試驗程序及試驗平台。研究成果期望有助於國內相關產業，於規畫及設計新一代船艦動力系統時，可以決定符合國際海事環境標準之國內電池適當商用產品，確保船艦作業安全的同時，將可加速國內廠商投入船艦電池研發速度，並協助達成政府國艦國造經濟政策。

前言

近年來，鋰電池相關研究已顯示全球能源系統正處於急遽的變革。電力電子技術的革命性發展、高效能儲能裝置的崛起、及再生能源的持續匯網被視為該變革的主要驅動因素。消費性電子的大量增加也是造成此改變的主要原因之一。在此情況下，新一代電池(如鋰電池)儲能系統技術已經被重新討論及在研發與船艦動力系統應用領域上的實際成功案例已逐漸增加，最具代表性的為全電力船舶(All-Electric Ship, AES)[1]。這類的船艦以電氣控制設備取代船上傳統的機械設備，包括船上主機及輔機、甲板機械、及特殊作業或任務需求負載設備等。AES 最重要的特性之一為整合式電力系統(Integrated Power System, IPS)概念，藉由智慧型多重路徑方法及動態發電容量配對，在符合負載需求下，可減少船上發電機裝置容量。廣義的來說，船艦 IPS 可被視為一個具有特定要求的大型且建置於船上的微電網。

在新一代船艦電力系統應用上，推進、配電、緊急供電系統及脈衝高功率電力負載，為整合船艦電力網重要挑戰。相關研究建議儲能系統(energy storage system, ESS)或電池儲能系統(Battery Energy Storage System, BESS)可隨著複雜性、建造、及成本而改變與系統整合及管理，以克服這類負載操作需求[2]。近幾年來，ESS 或 BESS 在船艦微電網的重要性逐漸增加，這主要是因為這類能源系統可以提供許多可能的系統運轉效益，如可靠度、安全性、穩定度、及電力品質，特別是潛艦電力系統。

在先進潛艦電力系統應用上，艦上設置的 ESS 或 BESS 已被視為新一代船艦整合式電力系統最主要的關鍵設備之一，其主要理由有增強存活力(survivability)及增加導入高能量脈衝負載。若船艦無將所裝設的 ESS 或 BESS 整合並有效管理，艦上電源容量必須要很大，才足以支援具有高能量且脈衝特性的電氣化武器系統運轉。目前海事應用上，儲能系統有二次電池、電子雙層電容(Electrical Double-Layer Capacitors, EDLCs)、飛輪(flywheel)，船艦動力系統應用上以二次電池為主。

海事用大型鋰電池的環境認證主要標準有 DNVGL-CG-0339[3]、MIL-STD-810[4] 以及 MIL-STD-901[5]。DNV-GL 驗船協會於 2015 年發布有關鋰電池相關型式驗證標準 DNVGL-CP-0418[6]，其中包括了電芯試驗、電池系統試驗以及電池環境試驗，其中電池環境試驗引用 DNVGL-CG-0339 標準，包括振動(Vibration)、乾熱試驗(Dry Heat)、濕熱(Damp Heat)、冷態(Cold)、鹽霧(Salt mist)、阻燃(Flame Retardant)及電磁兼容性(Electromagnetic Compatibility)等試驗項目標準。其中乾熱試驗用於檢驗待測物，在乾燥且高溫的環境下，待測物能否維持正常運作，性能能否保持正常，冷態試驗則與乾熱試驗相反，用於檢驗待測物，在寒冷環境下的性能狀況；濕熱試驗則是檢驗待測物，在潮濕且濕度較高的環境下之性能；本文研究目標為建立適用於船艦動力用之鋰電池海事環境之溫濕度試驗程序及試驗平台，為此本文將參考 DNV-GL 有關溫濕度試驗之標準進行研究目標之建立。

¹聯絡作者 蘇俊連 (cls@nkust.edu.tw)

試驗分析方法

1. 鋰電池環境試驗標準

本文參考 DNVGL-CG-0339 其中根據溫度及濕度試驗規範，根據鋰電池組放置於船艙不同位置，區分不同的試驗等級，如表1所示。

表1：試驗等級及位置對照表[3]

試驗項目	主要區域內的位置	船上主要區域				
		機艙	控制室、住艙	駕駛台	泵浦間、貨艙、無熱艙間	開放甲板
溫度試驗	溫升 5°C 或以上的隔間、辦公桌、控制台等內部	B	B	B	D	D
	其他地點	A	A	A	C	D
濕度試驗	採取特殊預防措施以避免冷凝的位置	A	A	A	A	A
	其他地點	B	B	B	B	B

2. 溫度環境試驗方法

根據 DNV-GL 溫度環境分為 Class A~Class D 四種不同等級，乾熱試驗及冷態試驗為高溫及低溫測試，其測試等級應為相互對照，一個等級應為一組溫度試驗條件，試驗應兩種試驗皆通過，才能判定符合溫度環境試驗標準。

2.1. 乾熱環境試驗方法

乾熱試驗旨在證明乾燥熱情況下，對鋰電池不會造成損壞，也不會發生暫時性或永久性故障，在乾熱測試之前，應對鋰電池進行目視、電氣和機械檢查，並按照鋰電池預期置放位置根據相對應等級進行試驗，如表2所示，試驗時間為時 16 小時，相對濕度(RH)最大 50%，實驗溫度公差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，相對濕度公差 $\pm 10\%$ 。

表2：乾熱試驗溫度表[3]

Class	Test temperature	Test duration
A	55°C	16 hours
B	70°C	16 hours
C	55°C	16 hours
D	70°C	16 hours

測試前應先進行逃生路線規劃，進行待測物基本電能量測以及外觀拍照記錄，並根據鋰電池置放

位置判別試驗溫度級別，在依照以下步驟進行試驗：

- 步驟一：試驗時間為時 16 小時，濕度最大 50%，溫度公差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，濕度公差 $\pm 10\%$ 。
- 步驟二：性能試驗分為兩次，第一次依據乾熱試驗溫度曲線上的最高測試溫度，在維持此溫度的最後兩小時執行充放電試驗，第二次在電池恢復正常環境溫度後兩小時再進行一次充放電試驗
- 步驟三：將實驗數據對照原廠出廠報告，檢測各參數有無產生過大變化使受測鋰電池組損壞，檢驗參數包含電池充放電能力、電池容量及內阻等。

2.2. 冷態環境試驗方法

冷態試驗旨在證明在寒冷影響下，對鋰電池不會造成損壞，也不會發生暫時性或永久性故障，在冷態測試之前，應對鋰電池進行目視、電氣和機械檢查，並按照鋰電池預期置放位置根據相對應等級進行試驗，如表3所示，測鋰電池組應與其周圍環境保持熱平衡，如果在此期間不需要進行性能試驗，在不超過 5 分鐘的時間內，溫度的最大變化率為每分鐘平均 1°C 試驗時間為時 2 小時，實驗公差為溫度 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

表3：冷態試驗溫度表[3]

Class	Test temperature	Test duration
A	+5°C	2 hours
B	+5°C	2 hours
C	-25°C	2 hours
D	-25°C	2 hours

測試前應先進行逃生路線規劃，進行待測物基本電能量測以及外觀拍照記錄，並根據鋰電池置放位置判別試驗溫度級別，在依照以下步驟進行試驗：

- 步驟一：試驗時間為時 2 小時，溫度公差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。
- 步驟二：性能試驗分為兩次，第一次依據乾熱試驗溫度曲線上的最高測試溫度，在維持此溫度的最後一小時執行充放電試驗，第二次在電池恢復正常環境溫度後兩小時再進行一次充放電試驗
- 步驟三：將實驗數據對照原廠出廠報告，檢測各參數有無產生過大變化使受測鋰電池組損壞，檢驗參數包含電池充放電能力、電池容量及內阻等。

3. 濕熱試驗等級

濕熱試驗旨在證明在潮濕熱環境下，鋰電池不受損害，且不會發生永久或暫時的故障。根據實際相關位置等級，分為無冷凝及具冷凝測試。

- 等級 A—靜態試驗(無冷凝)：試驗平台內的溫度和相對濕度應保持在 40°C 和 93%為期 4 天(96 小時)。在試驗結束時，受測鋰電池組應處於正常的環境條件下恢復正常條件，恢復時間需大於 1 小時且小於 2 小時。
- 等級 B—循環試驗(具冷凝)：濕熱試驗溫度循環圖如圖1所示，受測鋰電池組需在試驗平台處於室溫下放入，並且在整個試驗週期中都應連接外部負載。

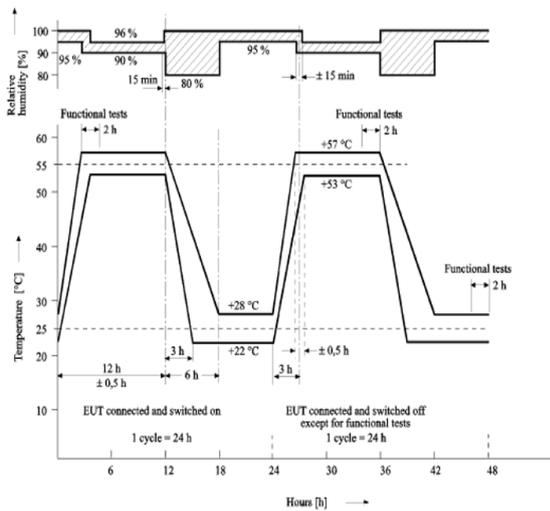


圖1：濕熱試驗溫度循環圖[3]

測試前應先進行逃生路線規劃，進行待測物基本電能量測以及外觀拍照記錄，並根據鋰電池置放位置判別試驗溫度級別，在依照以下步驟進行試驗：

- 步驟一：設定試驗時間，等級 A 為 96 小時，等級 B 為時 48 小時，溫度公差 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，濕度公差 $-3\% \sim +2\%$ 。
- 步驟二：濕度試驗分為無冷凝及具冷凝，無冷凝相對濕度應保持在 40°C 和 93%為期 4 天(96 小時)。在試驗結束時，受測鋰電池組應處於正常的環境條件下恢復正常條件後進行充放電試驗，恢復時間需大於 1 小時且小於 2 小時。具冷凝應根據圖1循環圖設定環境，並且於循環期間應連接外部負載，於第一個試驗週期 3 小時進行充放電試驗，第二個試驗週期最後 5 小時進行充放電試驗第二次

步驟三：具冷凝試驗於第二試驗週期內，應在 3 小時 ± 30 分鐘內將溫度從正常環境升高到設備上限溫度，升溫間隔期間的溫度變化率應使鋰電池表面發生冷凝。

步驟四：將實驗數據對照原廠出廠報告，檢測各參數有無產生過大變化使受測鋰電池組損壞，檢驗參數包含電池充放電能力、電池容量及內阻等。

4. 測試對象鋰電池組

本文以一國外生產 12V 105Ah 鋰電池做為測試對象，該電池組額定容量為 105 Ah、額定電壓為 12.8 V、尺寸為 437 x 90 x 175 mm 以及重量為 10 公斤，測試目標規格表，如表4所示。該電池組建議連續放電流為 105 A，放電脈衝電流為 315 A，該電池除了適合做為啟動設備用之電池，亦可提供電源至用電需求較大之動力設備。該電池通過 DNV-GL 海事環境認證項目，溫度為 Class B 低溫為 5°C 高溫為 70°C，濕度為 Class B 循環試驗濕度為 80%~96%，如表5所示。

表4：國外鋰電池規格表

額定容量	105Ah
額定電壓	12.8 V
開路電壓	13.2 V
充電電壓	14.3 V~14.5 V
最大充電電流	105 A
放電終止電壓	10 V
連續放電電流	105A
放電脈衝電流	315A
尺寸	437 x 90 x 175 mm
重量	10 kg

表5：測試對象通過試驗之項目

溫度試驗	Class B
濕度試驗	Class B
振動試驗	Class A
電磁相容試驗	Class A
防水試驗	IP66

試驗結果與討論

1. 溫度環境試驗結果

溫度環境試驗，高溫為乾熱試驗，低溫為冷態試驗，此處溫度為一組試驗流程，透過試驗鋰電池認證項目得知溫級別為 Class B，於冷態試驗等級應為 5°C，乾熱試驗應為 70°C，該試驗於溫度須通過

乾熱試驗以及冷態試驗，才可判定為符合海事認證鋰電池，若只通過乾熱試驗或冷態試驗任何一項，則不可判定該溫度為通過海事認證鋰電池。

1.1. 乾熱試驗結果

測試對象進行 1C (105A)之定電壓充電測試，數據取樣時間為 1 秒，測試對象之電壓由 10.881V 開始定電流充電，充電電流為 105A，約在 59.1 分鐘後電池電壓到達至 14.4V，之後轉為定電壓充電，直到充電完成；鋰電池充電測試曲線，如圖2所示，鋰電池電量由 0% 充至 98.7%。

接著進行測試對象 1C(105A)之定電流放電測試，數據取樣時間為 1 秒，測試對象開始放電後，電壓 13.9V 降至 10V，放電電流約為 105A，直至開始放電後約 58.9 分鐘，電壓到達鋰電池放電終止電壓 10 V，並停止放電；測試對象放電測試圖，如圖3所示，測試對象電量由 98.7% 降至 0%。



圖2：乾熱試驗下充電測試曲線

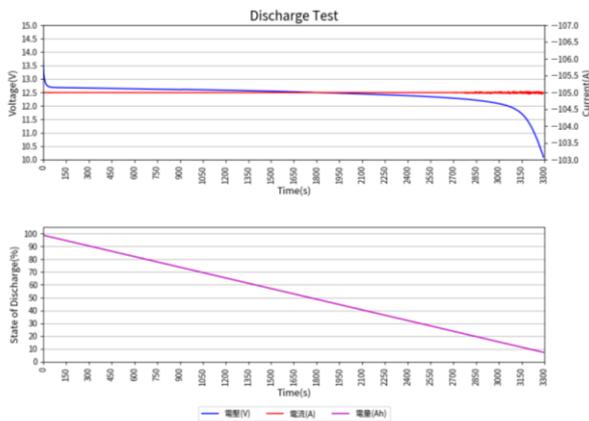


圖3：乾熱試驗下放電測試曲線

1.2. 冷態試驗結果

國外 12V 105Ah 鋰電池進行 1C (105A)之定電流充電測試及定電壓充電測試，數據取樣時間為 1 秒，測試對象電壓由 12.4V 開始定電流充電，充電電流為 105A，約在 54.8 分鐘後電池電壓到達至 14.4V，之後轉為定電壓充電，直到充電完成；鋰電池充電測試曲線，如圖4所示，測試對象電量由 0.2% 充至 97.6%。

接著進行測試對象 1C(105A)之定電流放電測試，數據取樣時間為 1 秒，測試對象開始放電後，電壓由 13.8V 降至 10V，放電電流約為 105A，直至開始放電後約 54.9 分鐘，電壓到達鋰電池放電終止電壓 10V，並停止放電；測試對象放電測試曲線，如圖5所示，鋰電池電量由 97.6% 降至 6.3%。

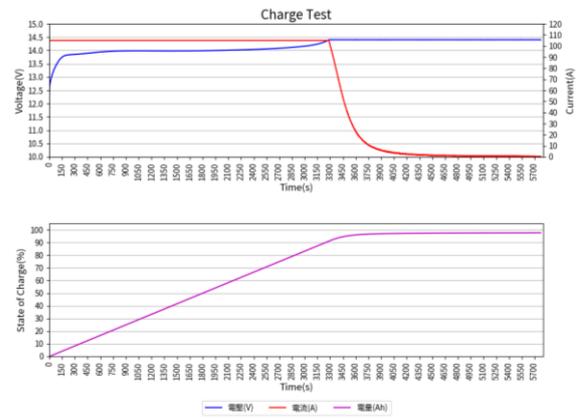


圖4：冷態試驗下充電測試曲線

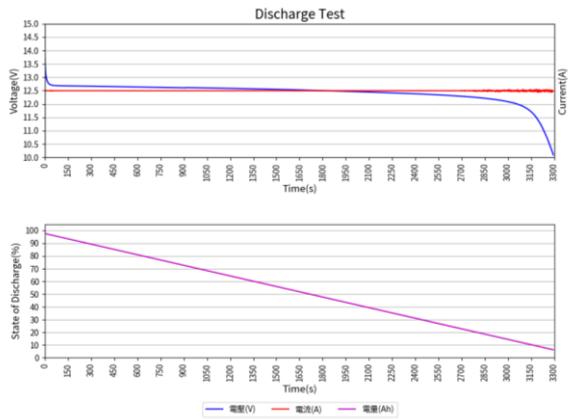


圖5：冷態試驗下放電測試曲線

2. 濕度環境試驗結果

根據 DNV-GL 規定濕度分為無冷凝及具冷凝測試，無冷凝需將測試鋰電池置放於規定溫度及濕度內 96 小時，完成後檢查鋰電池外觀及性能測試；具冷凝為循環測試，需將鋰電池置放在指定溫度及濕

度內循環兩次，於第一次及第二次循環內進行各一次性能測試。

2.1 濕熱試驗結果

等級 B 無冷凝，須於 3 小時內恆定斜率，如式 (1) 所示，以每分鐘 0.167°C 斜率從常溫上升至 55°C，本實驗透過恆溫恆濕機設定 48 小時循環，由實際曲線變化觀察得知，T₁ 溫度為 25°C，T₂ 溫度為 55°C，測試開始時間為 09 時 05 分 35 秒，溫度提升至 55°C 時為 12 時 05 分 35 秒，溫度爬升時長為 180 分鐘，每分鐘 0.167°C 斜率上升，因而證實本實驗依據 DNV-GL 之標準執行。

$$m = \frac{T_1 - T_2}{Time} \quad (1)$$

1) 濕熱環境循環下第一次性能測試：

第一次循環下測試，溫度從 25°C 上升至 55°C 後進行第一次充電與放電性能測試，對鋰電池進行 1C (105A) 之定電流充電測試及定電壓充電測試，數據取樣時間為 1 秒，鋰電池電壓 10.9V 開始定電流充電，充電電流為 105 A，約在 57.9 分鐘後電池電壓到達至 14.4 V，之後轉為定電壓充電，直到充電完成；鋰電池充電測試曲線，如圖6所示，鋰電池電量由 0% 充至 98.9%。

接著進行鋰電池 1C(105A) 之定電流放電測試，數據取樣時間為 1 秒，電壓由 13.69 V 降至 10V，放電電流約為 105A，直至開始放電後約 59.2 分鐘，電壓到達鋰電池放電終止電壓 10V，並停止放電；鋰電池放電測試曲線如圖7所示，鋰電池電量由 98.9% 降至 0.6%。

2) 濕熱環境循環下第二次性能測試：

第二次循環測試中溫度從 55°C 下降至 25°C 前進行第二次充電與放電性能測試，對鋰電池進行 1C (105A) 之定電流充電測試及定電壓充電測試，數據取樣時間為 1 秒，鋰電池電壓 10.9V 開始定電流充電，充電電流為 105A，約在 57.9 分鐘後電池電壓到達至 14.4V，之後轉為定電壓充電，直到充電完成；鋰電池充電測試曲線，如圖8所示，鋰電池電量由 0% 充至 99%。

接著進行鋰電池 1C(105A) 之定電流放電測試，數據取樣時間為 1 秒，鋰電池開始放電後，電壓由 13.71V 降至 10.09V，放電電流約為 105A，直至開始放電後約 59.13 鐘，電壓到達鋰電池放電終止電壓 10V，並停止放電；鋰電池放電測試曲線如圖9所示，鋰電池電量由 98.99% 降至 0.8%。

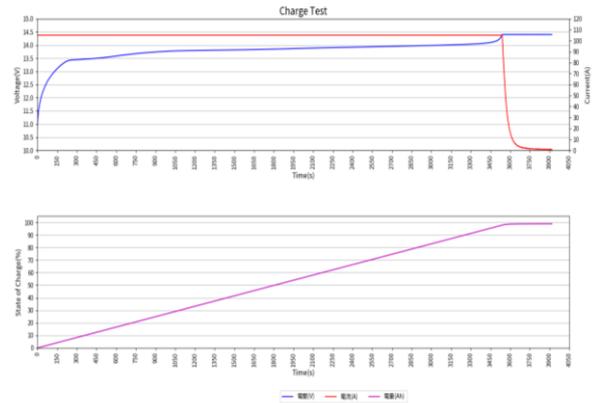


圖6：濕熱循環第一次下充電測試曲線

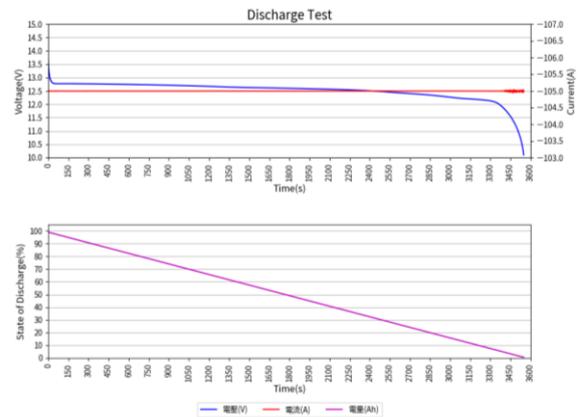


圖7：濕熱循環第一次下放電測試曲線



圖8：濕熱循環第二次下充電測試曲線

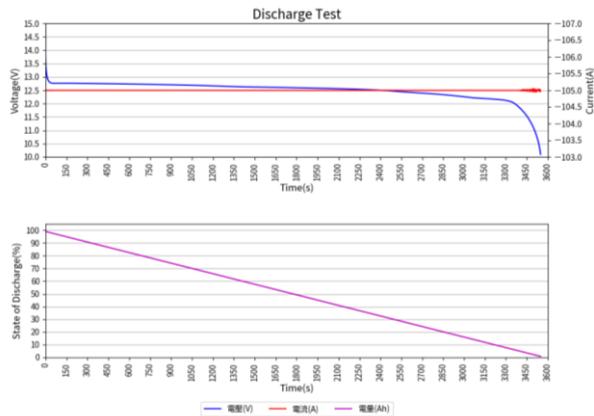


圖9：濕熱循環第二次下放電測試曲線

結論

本文根據 DNVGL-CG-0339 參考其中溫度以及濕度測試程序及測試等級標準，建立針對海事型式認證鋰電池測試程序，並且參照其試驗平台規格建置實驗平台，用以幫助國內電池廠家透過該標準進行鋰電池模組的海事環境試驗認證，並應用於全電力船舶或複合動力船舶上，進行充分測試驗證，確保安全可靠應用和經濟性。

參考文獻

1. All-electric ship operations and management: Overview and future research directions, July 2023.[Online].Available: <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2023.100251>.
2. J. Herbst, J. Beno, A. Ouroua, S. Pish, J. Hahne and R. Hebner, "High slew rate power supplies for support of large pulsed loads," *2015 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS)*, Old Town Alexandria, VA, USA, 2015, pp. 446-452, doi: 10.1109/ESTS.2015.7157894.
3. DNV-GL, "DNVGL-CP-0339 Environmental test specification for electrical, electronic and programmable equipment and systems," Nov. 2015.
4. United States Department of Defense, "Mil-Std-810G Environmental Engineering Considerations And Laboratory Tests," Oct. 2008.
5. United States Department of Defense, "Mil-S-901D Shock Tests. H.I. (High-Impact) Shipboard
6. DNV-GL, "DNVGL-CP-0418 Lithium batteries," Dec. 2015.

ANALYSIS OF TEMPERATURE AND HUMIDITY ENVIRONMENTAL TESTS FOR MARITIME LITHIUM BATTERIES

*Y. Z. Huang** *J. T. Yu** *J. L. Su*¹* *C. H. Hu*** *C. Y. Liu*** *Z. Y. Huang*** *W. L. Lin***

*Department of Electrical Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology

** Naval Shipbuilding Development Center

Keywords: Ship, Maritime Environment, Lithium Battery, Certification Standards, Temperature and Humidity Testing.

ABSTRACT

The next generation of ship propulsion systems requires large lithium battery energy storage devices. There are stringent requirements for the discharge rate, lifespan, energy density, maintenance, and other aspects of such batteries. Safety standards and commercial product certifications for lithium batteries in maritime environments are particularly demanding. However, there is currently limited research on environmental certification testing standards and procedures for maritime lithium battery systems used in ships domestically. This paper refers to international maritime environmental certification standards for lithium batteries and establishes temperature and humidity test procedures and platforms applicable to maritime environments for ship propulsion lithium batteries. The research results are expected to assist domestic industries in planning and designing the next generation of ship propulsion systems. This will enable them to choose domestically available battery products that meet international maritime environmental standards, ensuring the safety of ship operations. At the same time, it is anticipated to accelerate the pace of domestic companies in developing ship batteries, contributing to the government's policy of promoting a self-sufficient national defense industry.