電磁砲的百年軌跡：技術、競賽與應用

詹祥威

網路安全與決策推演研究所

壹、前言

「電磁砲（Electromagnetic Railgun）」嚴格而言，並非「電磁頻譜作戰」中一環，其原理乃藉電流與磁場產生「物理推力」，進而在不依靠火藥前提下將彈藥以高速擊向目標，如雷射、微波一般，軍事領域將之歸納為「定向能武器（Directed Energy Weapons）」；然而，由於其在運作時會產生瞬間高頻雜訊與「脈衝電磁干擾（Impulse Electromagnetic Interference, IEI）」，這些訊號可能分佈在射頻（Radio Frequency, RF）範圍，也可能延伸至微波波段，在實際作戰環境中，電磁砲因其為發射源 (emitter) 特性，須視為電磁頻譜作戰環境（electromagnetic spectrum operation environment, EMOE）的一部分進行管制，才能確保其他依賴射頻運作的系統不受其運作干擾。謂此，美國與北約軍事概念定義中，電磁頻譜作戰（Electromagnetic Spectrum Operations, EMSO）不僅包含干擾、網電作戰，電磁砲之類的定向能武器亦涵蓋在其定義之內。[1]

「電磁砲」並非一新興概念，其技術與構想可追溯至 20 世紀初，其以電磁力加速金屬彈體，具備超高速、無火藥、貫穿力強等特性；隨電源儲能與材料科技進步，美國等國自 2000 年起積極投入實驗與研發，以期打造射程更遠、精度更高、作戰成本更低的次世代武器系統。然，儘管具一定技術潛力，但同時也面臨諸多挑戰，

[1] "Electromagnetic Spectrum Operations," *Air Force Doctrine Publication* 3-85, December 14, 2023, https://shorturl.at/F4Rh6, pp. 1-6.

包含能源需求大、砲管磨耗快、作戰平台整合困難等，導致多國研發計畫進展遲緩或暫緩。本文針對電磁砲的發展與近況進行綜整，探討其在電磁頻譜作戰中的持續影響力。

貳、歷史發展與原理

法國發明家安德烈・福雄—維爾普萊（André Louis Octave Fauchon-Villepleé）被認為是該概念的提出者，其在一戰期間提出「電砲（electric cannon）」的概念，希望可以將火炮的距離在電磁協助下，延伸射程使其超越德軍的「威廉皇帝砲（Kaiser-Wilhelm-Geschütz）」；1917 年其在「都鐸蓄電池公司（Société anonyme des accumulateurs Tudor）」協助下，創造了一小型工作模型並於 1922 年獲得美國專利號。[2] 根據其申請的專利圖可理解，該模型係以電流通過兩條平行匯流排，在磁場中產生推力從而將具備翼片的彈丸沿匯流排射出。

法國軍備部研發總監為此於 1918 年 7 月 25 日委託維爾普萊開發一款 30 毫米至 50 毫米的電磁砲，然而該發明因第一次世界大戰中止而提前告終，最終此概念並未被落實。[3]這種武器概念十分單純，加上射擊距離長、超音速，以及高精準度等特性，使得其具備成為正式武器的潛力，雖概念簡單但由於技術、材料的高度限制，使得此概念長期未能被具體實踐化。

[2] A. L. O. Fauchon-Villepleé, “Electric Gun or Apparatus For Propelling Projectiles,” *US Patent*, Patented March 1, 1921, https://shorturl.at/tXpRW.
[3] Peter Suciu, “Railguns: The Game Changer Weapon America’s Military Can’t Build,” *The National Interest*, June 1, 2024, https://shorturl.at/huusq.

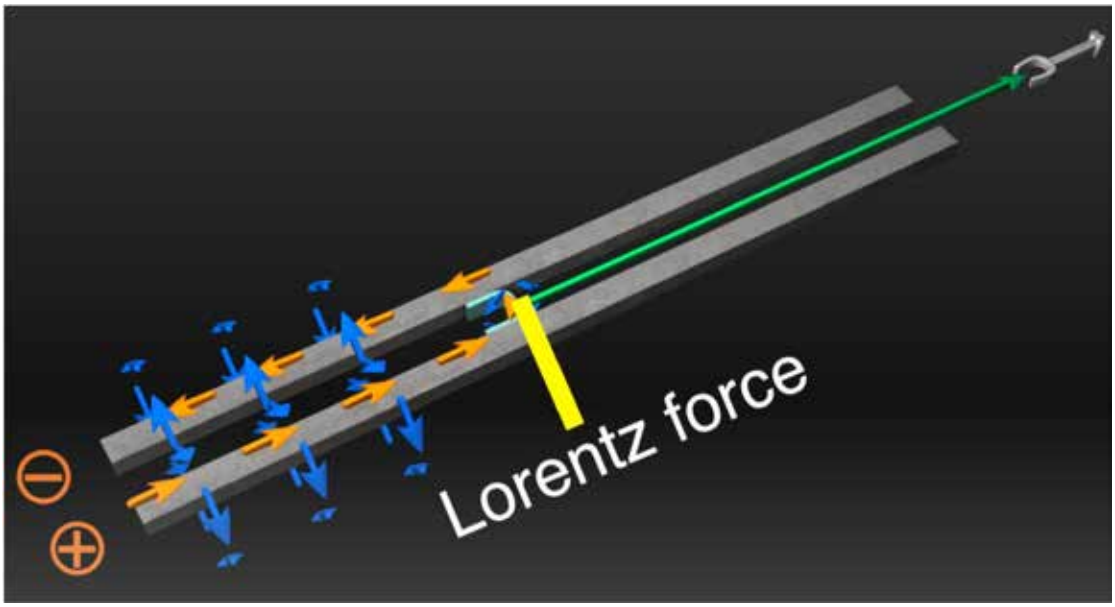

圖 7-1、電磁砲運作原理

圖片來源：截自 News Direct, “US Navy Railgun: How It Works,” *YouTube*, https://www.youtube.com/watch?v=PQNHsS-BNs4。

電磁砲的基本運作與運用，被稱為電磁推進（electromagnetic propulsion），其牽涉到「電子加速（Electron Acceleration）」、「電子聚焦（Electron Focusing）」，以及「電子偏轉（Electron Deflection）」三個原理。「電子加速」指在設備中施加高電壓，使電子從陰極被加速射出，此電壓所產生的電場對電子施加作用力而使其加速移動；而「聚焦」則指藉由線圈或其他導電元件產生的磁場可聚焦電子束，使電子會聚成一條細長的光束；在過程中移動電子會產生彎曲，導引至光束中心。「電子偏轉」，則是指磁場偏轉電子束，電子移動過程中所受的勞侖茲力，可改變其運動方向，將其導向不同目標點。當中運動牽涉到「勞侖茲力（Lorentz Force）」和「安培定律（Ampere’s Law）」，簡言之就是一條為正極、一條為負極的兩條平行導電軌道，藉巨大電流從一條軌道流向電樞，再沿另一條軌道返回時，會在軌道之間產生一個強大的磁場，其方向

垂直於電流流動方向，而這種電流與磁場的相互作用產生勞侖茲力，從而以極高的速度推動電樞和彈丸沿軌道加速。[4]

與傳統火砲相比，電磁軌道砲確實具有多項顯著優勢，包含：

- 超高初速：在各項試驗中的電磁軌道砲，砲口初速可達 2,000 至 3,500 公尺／秒（即 5 馬赫至 7.5 馬赫以上），遠超傳統火藥推進火砲的約 1,219 公尺／秒的限制，這種超高初速可轉化為超高動能。
- 延伸射程：超高初速使得砲彈射程大幅增加，理論上潛在射程可達 200-250 海里（約 360-450 公里），超過現有海軍艦艇的艦砲，並且速度亦有相當水準；例如，200 海里的射程僅需約 6 分鐘即可覆蓋，而戰斧巡弋飛彈約需 8 分鐘。
- 純動能彈藥：巨大的撞擊動能意味彈丸無需裝載炸藥彈頭，簡化設計並降低操作人員的安全風險，理論上這種「撞擊殺傷（hit-to-kill）」能力足以摧毀大多數目標。
- 降低單發成本：無需推進燃料與複雜的爆炸彈頭，電磁軌道砲彈丸的成本顯著降低，估計每發僅需 1,000 至 10,000 美元，遠低於一枚數百萬美元的飛彈，例如一枚戰斧飛彈造價約 200 萬美元。[5]
- 增加彈藥儲備：由於無需前述的燃料與爆炸彈頭，整體砲彈體積縮小，在相同艦載空間內，可儲存的軌道砲彈丸數量可達傳統火砲的兩到三倍。

---

[4] Peter Graneau, “Application of Ampere’s Force Law to Railgun Accelerators,” *AIP Publishing LLC*, June 22, 1982, https://shorturl.at/97VDv.

[5] Roman Pryhodko, “United States Has Agreed to Sell the Latest Version of Tomahawk Missiles to the Netherlands,” *Militarnyi*, April 26, 2025, https://shorturl.at/lBQ8e.

- 提高安全性：缺乏揮發性推進劑和爆炸彈頭，消除傳統彈藥處理和運輸相關的重大安全風險，即便彈藥電動搬運系統失效，人員搬運彈藥困難與危險性亦大幅降低。
- 難以攔截：一旦發射，電磁軌道砲彈丸的極高速度使其幾乎不可能被現有防禦系統摧毀或攔截。

然，要能順利以電磁進行砲彈的發射，其主要技術限制在於高耗能、熱管理以及耐久性等。當前研究普遍認為，要將數公斤重的彈丸加速到數倍音速，瞬間所需的電力會達到數十萬到數百萬焦耳，峰值功率可能高達數十兆瓦（megawatts）甚至百兆瓦，亦即數毫秒間的每一個發射動作，將「一次性釋放」一般家庭數日乃至數月的總用電量。而如前所述，在瞬間產生巨大電流的同時，除需要強大電力支持外，勢必面臨高衝擊 IEI、高熱，以及砲身、砲管所需承受的耐久性等問題；因此，「高耗能」、「超高溫」，以及「耐用性」一直是電磁軌道砲發展的三大技術阻礙。

參、各國發展現況與特徵

一、美國

1995 年在美國德州奧斯丁大學提出了當代先進電磁砲研究，並成功驗證電磁砲技術在軍事層次的應用可行性，在發射效率、結構設計與系統整合方面取得突破性進展。[6]該研究以 82%石墨纖維與 18%玻璃纖維組成「纖維複合纏繞外殼」，以及「AD-96 氧化鋁陶瓷」，嘗試克服「超高溫」及「耐用性」的問題，而使外殼足以提供軸向剛性並承受預載應力，既有強度又有必要之韌性，同時確保

[6] Yun, H.D., Price, J.H., "Electromagnetic and Structural Analyses of Electric Gun and Integrated Launch Package Systems," *Center for Electromechanics,* The University of Texas at Austin, January 1995, https://shorturl.at/2PFLW.

「陶瓷側壁」在放電過程中保持壓縮狀態，避免過多的瞬間位移影響發射的穩定。

在此研究下，基本達成了 0.2 秒快速發射率、每秒 1,850 公尺的射擊初速，以及「理論上」以 185 克彈藥在 1,500 公尺擊穿 73 毫米裝甲，以及 3,000 公尺擊穿 37 毫米裝甲的打擊效能。儘管此研究提供具體且看似可被解答的分析與解決方案，但實際測試電磁砲發射瞬間溫度可達數千度、殘留熱應力會衝擊金屬軌道，影響持續運作效力，同時其冷卻系統體積過度龐大，影響平台與系統的整合及有效運用。

根據後續美軍持續研究與測試，前述各種挑戰使電磁砲在平均使用 12 至 24 次發射後，就必須強迫更換砲管，而相對傳統火炮的數值為 600 次；[7]因此雖每次發射的成本遠低於傳統火炮，但在前述數值難達有效率的軍事作戰部署要求，且前述的各項管理問題無解下，美國在 2021 年最終取消了該研發的進行。總計美國在此 15 年的專案研發中，投入至少 11 億美元。[8]然，雖計畫以停止研發告終，但仍留下 2,500 m/s 初速的成績，以及可反覆充、放電的模組化電源與能量管理的「能量儲存與脈衝電源模組（Pulse Power Module, PPM）」技術。

二、英國

英國投入「電磁砲」的研發時間約在冷戰期間，英國皇家軍備研究與開發局（Royal Armament Research and Development

[7] Bryan Lynn, “US Navy Cancels Development of High-Tech Railgun Weapon,” *VOA*, July 7, 2021, https://shorturl.at/Bf32V.
[8] “Navy Lasers, Railgun, and Gun-Launched Guided Projectile: Background and Issues for Congress,” *Congressional Research Service*, April 1, 2022, https://shorturl.at/aHOQN.

Establishment, RARDE）在蘇格蘭柯庫布里／鄧德倫南靶場建立「電磁發射設施（Electromagnetic Launch Facility）」以藉由大型實體發射器驗證高初速彈體的可行性。[9]當時的整體運作模式，係由RARDE主導基礎科學技術與原理研究，國內產業進行後續可行性分析與子系統研製。

該設計原理，是將需要快速切換高電流脈衝電路的「高電流脈衝的主開關」與「砲膛尾端（breech）」設計成一個平行軌式的「開關軌道』，在充電時由開關軌短路主軌；發射瞬間，開關軌上的滑動電樞跨越絕緣缺口，在開關軌上拉弧並抬升弧電壓，把電流快速「換流」進入主發射軌與砲彈電樞，達成極快速的大電流注入。[10]在該研究計畫最終達成的結果，是該方案可提供 12 百萬焦耳

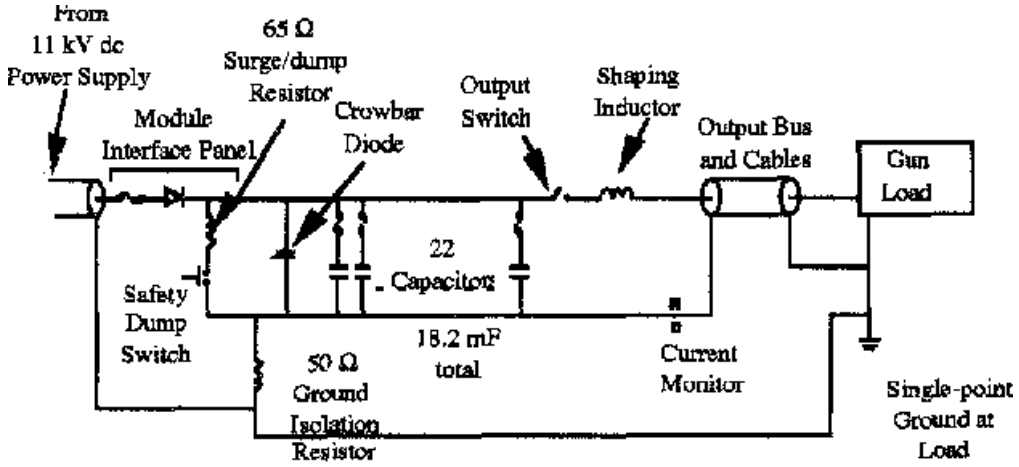

Figure 4. Simplified pulsed power circuit.

圖 7-2、英國 RARDE 設計之電磁砲運作原理

圖片來源：H. G. Hammon et al., "The Kirkcudbright Electromagnetic Launch Facility," in *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 1, January 1993, pp. 975-979,

[9] H. G. Hammon et al., "The Kirkcudbright Electromagnetic Launch Facility," in *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 29, No. 1, pp. 975-979, Jan. 1993.

10 David W. Scherbarth, et. Al., "Rotary Switch For Multiple Shot Electromagnetic Launchers," *United States Patent* No. 4,841,833, June 27, 1989, https://shorturl.at/kau1E.

（MJ）的槍口能量；射擊速度在 2.0 至 3.5 每秒／公里間；重複射擊率高達「每日 10 發」，兩次射擊之間的間隔不超過 30 分鐘。

實際上，後續英國 RARDE 停止該系統的持續研發，而美英聯合軍火商 BAE 則將此系統於 2006 年投入美國海軍水面作戰中心合約中，甚至成功開發出 32 兆焦耳的原型機並於 2012 年交付海軍，當時美國海軍實驗室公開測試該系統的影片仍留存在網路；[11]而前述美國海軍所進行的研發雛形，便是 BAE 交付、由英國 RARDE 啟動研發產生的該方案。同時期美國海軍除採用 BAE 系統外，另有通用原子（General Atomics）與雷神公司（Raytheon Co.），最終英美分別因技術與能源問題難以克服而停止該研發計畫。

三、中國

中國始終是開發電磁砲最活躍的國家之一，冷戰後 2010 至 2011 年就已首次公開其電磁砲研發，而藉由美國的研發經驗，中國從研發初期就聚焦於電力系統的開發。中國工程院院士、海軍工程大學教授馬偉明在 2007 年由國家支持下建立「艦艇綜合電力技術國防科技重點實驗室」，[12]專門解決船艦電力系統問題，以克服普遍電磁砲的船艦電力瓶頸；亦即馬偉明領導的團隊不僅從電磁砲技術開發本身著手，更同時嘗試克服加大與穩定船艦供電系統的挑戰。

也因為此種雙管齊下的研發路徑，使得中國相較其他國家更早將電磁砲安裝於艦上測試；2018 年在社交平台 X（推特，twitter）就揭露了 072II 型登陸艦 936 海洋山安裝了電磁軌道砲，然實際卻從未有射擊畫面揭露；而從露出的照片比例判斷，滿載 4,000 餘噸，長

[11] Airboyd, “Office of Naval Research Electromagnetic Railgun Program Commissioning Test of BAE Built Railgun at NSWC Dahlgren,” *YouTube*, October 31, 2012, https://bit.ly/45IFJ9e.

[12] 〈中國建立艦艇綜合電力技術國防科技重點實驗室〉，新浪軍事，2007 年 4 月 29 日，https://shorturl.at/XXvsV。

120 公尺、寬 15.3 公尺的 072II 艦，電磁砲砲身就可能長達 10 餘公尺，以比例而言其體積超過其他國家之測試品，更甚者相較於日美 40mm 砲彈，中國砲彈僅 25mm 而砲身卻更大，且疑似另外搭載貨櫃提供必要動力或發電裝置。[13]

為克服前述三大技術門檻中的「高耗能」，馬偉明的中國團隊從船艦發電系統著手，推出了有別於歐美使用數百年的「中壓交流（MVAC）」系統，而採用「中壓直流綜合電力系統（Medium Voltage DC Distribution Systems, MVDC）」，差異在於 MVDC 可提供更高的能源效率，且電力損耗通常較低，較能完整、有效的運用轉換船艦產生的有限電力，以及更好的整合船艦各種電力負載。而中國高效的「軍民融合體制」也為其有效推進軍事技術研發提供良

圖 7-3、中國艦載電磁砲

圖片來源：Dafeng Cao, on *X.com*, January 31, 2018, https://tinyurl.com/23uje7us。

[13] Jeffrey Lin, P.W. Singer, “Looks Like China Just Installed a Railgun on a Warship, Beating the U.S. Navy To The Punch,” *Popular Science*, July 6, 2021, https://shorturl.at/Xu0hw.

好前提，「十五」、「十一五」的電力系統的基礎理論體系，為其船艦發電提供一定的研發基礎。[14]

除電力系統外，中國嘗試在克服三大門檻中的「超高溫」及「耐用性」的問題，使用液態金屬塗層減低砲管磨損，並開發「磁化電漿砲（Magnetized Plasma Cannon）」以「磁化電漿」技術改進發射機制，使其更適合移動平台應用；「磁化電漿砲」主要運用在電磁軌道砲的「砲管內壁」和「發射系統」，砲管內壁塗裝毫米厚的「磁化電漿保護層」覆蓋，保護層可減少彈丸與砲管間的摩擦和徑向力，並有效提供熱絕緣以解決傳統電磁軌道砲的軌道燒蝕問題。

當前中國藉新興科技協助，在測試裝置上大規模安裝人工智慧 AI 感測器，藉此蒐集大量數據以期改善既有裝置的不足；2024 年中國官媒「南華早報」公開揭露「電磁砲以 5 馬赫速度將砲彈發射至 15,000 公尺之平流層」，但由於上升過程旋轉太快而出現明顯偏航；[15]此外，該報稍早更強調在「實際測試」下，該系統可「快速發射大量子彈而不受損」，暗示著該系統已克服三大門檻中的「耐用性」。[16]雖始終沒有任何公開測試影片釋出，若根據事後的揭露資訊為真，即便 5 馬赫的出速低於美國的 7 馬赫，但能克服快速、大量、且無損害的發射仍是相當的重要進展。

可以肯定的是，在研發電磁砲同時啟動的電力系統研發，確實

---

[14] 馬偉明，〈中國實現中壓直流綜合電力系統 世界首家〉，《人民網》，2014 年 11 月 14 日，https://shorturl.at/zMBxO。

[15] Stephen Chen, “China’s Rail Gun Sends Smart Bomb into Stratosphere at Hypersonic Speed, then Something Goes Wrong,” *SCMP*, May 14, 2024, https://shorturl.at/Mty4G.

[16] Stephen Chen, “2 Years After US Killed the Rail Gun, China Brings Weapon Back to Life with Technological Leap,” *SCMP*, December 9, 2023, https://shorturl.at/UETyw.

使得中國在電磁系統運用上取得相當進展，最終該技術也據傳被運用在最新「福建號」航空母艦的電磁彈射系統中。[17]

四、日本

相較於美國初期發展的定位乃是「進攻型」，日本自始便將電磁軌道砲發展定位在「防衛用途」；為有效因應西部方面的超音速導彈威脅，在 1990 年就由防衛裝備廳啟動小型電磁砲的基礎研究；2016 年正式啟動的研發汲取美國研發的教訓，在初期研發階段的經費投入，在 2016 年至 2019 年 3 年間的研發總投入約為 3 億美元，相較美國初期投入資金為 5 億美元相比，日本的經費要顯得更為謹慎。[18]

由防衛省防衛裝備廳（ATLA, Acquisition, Technology & Logistics Agency）陸上系統研究中心（GSRC, Ground Systems Research Center）主責的研發，在 2021 年成功試作 40mm 中型電磁軌道砲原型機，目標設定為將 320 克的彈丸以 2,297 公尺/秒（約 6.6 馬赫）的初速發射，雖該原型設計僅能進行單發射擊，但其目標是建立高出速與飛行過程中「彈丸穩定」的基礎關鍵技術，而此二者對後續的延續性開發與實質作戰至關重要。[19]

相較於中國的原型測試機長 10 餘公尺，日本的防衛裝備廳原型測試機口徑 40mm，全長約 6 公尺、總重約 8 噸，另外搭載三個外掛集成電源提供與管理。從 2016 年啟動的計畫，到 2022 年為止的 7 年間，日本投入總共約 650 萬美元，達成了「彈丸出速每秒 2,000 公尺

[17] 馮小川、陳志輝，〈中國第三航母福建艦下水　新電磁彈射技術挑戰美國〉，《亞洲周刊》，2022 年第 26 期，2022 年 6 月 27 日，https://shorturl.at/UE9Jz。

[18] “Japan’s New Railgun Naval Weapon,” *Australian Naval Institute*, July 6, 2025, https://shorturl.at/58DxI.

[19] 内田泰,〈電磁砲で世界初の洋上射撃、防空網突破の極超音速兵器迎撃狙う〉,《日経クロステック》，2023 年 11 月 2 日，https://shorturl.at/7tyNy。

以上、砲身壽命 120 發以上」的單發型測試。

此原型機測試主要目的，在於先以小口徑原型機蒐集大量數據，藉此構想與驗證中口徑技術可行性並將成本效率化，同時藉此基礎技術透過國際技術交流與共同研究以期降低風險。2024 年度至 2028 年度，防衛裝備廳預計持續以原型機進行內部測試，主要著重在三大目標：最佳化放電模式和電路設計以達到技術節能與能源部件小型化、開發電磁砲彈專用裝填技術與確立射擊程序實現高速射擊目標，以及克服發射造成的熱力效應與砲彈彈體的改進達成高超音速飛行的穩定性和末端速度確保。[20]

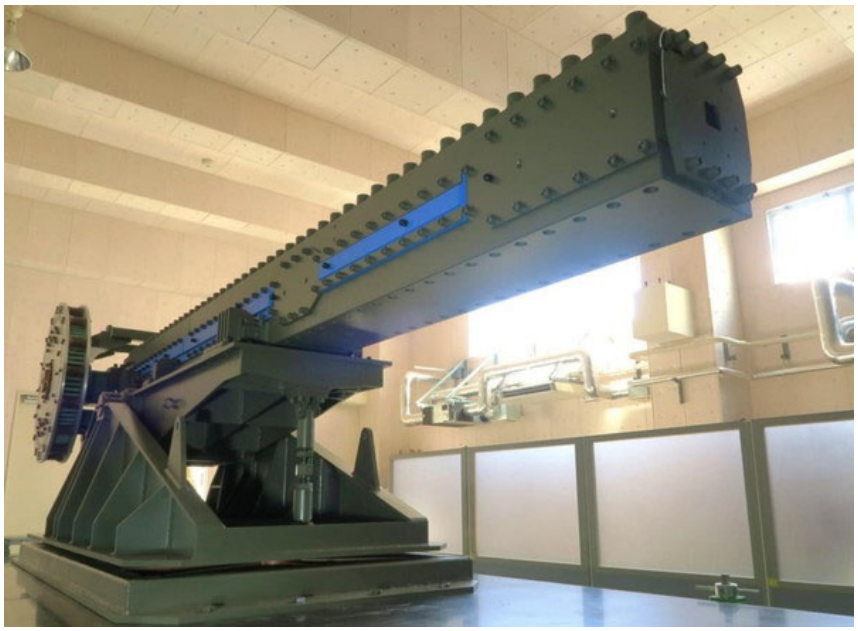

圖 7-4、防衛裝備廳於 2021 年成功試作的 40mm 中型電磁軌道砲原型機

圖片來源：内田 泰,〈電磁砲で世界初の洋上射撃、防空網突破の極超音速兵器迎撃狙う〉，《日经クロステック》，2023 年 11 月 02 日，https://shorturl.at/7tyNy。

值得注意的是日本汲取他國開發的教訓，在研究開發的同時與

[20] 防衛装備庁技術戦略部技術計画官，〈将来レールガンの研究 〉，《令和３年度 政策評価書（事前の事業評価）》，2021 年 8 月，https://shorturl.at/qwKFO。

各國簽訂合作協議，交換各國研發的專長項目以減少誤區。2023 年防衛裝備廳派遣研究員與工程師赴美國海軍研究機構，以實質技術交流吸取美國既有研發經驗與教訓；2024 年，日本與法國、德國簽署《電磁砲技術合作實施指南》，建立三邊技術交流與專家互訪、定期召開技術會議，以及在研發、測試與評估領域展開協同合作的跨國合作機制。[21]

日本在其精密製造和材料科學等領域具有深厚基礎與獨特優勢，此點在開發電磁砲過程佔有相當決定性影響；如前述當前電磁砲三大門檻，日本產業技術綜合研究所就成功開展關於「化學沉積表面塗層」技術的研發；該技術主要是將「固態粒子」噴附薄膜上使其固化，藉此減少高溫加工可能造成的耗能與材料異劣，藉由將塗層材料如陶瓷研磨，或以其他工法製成微米乃至奈米級粉末，再以氣溶膠技術高速加熱噴附於欲加工之表面，形成極致薄膜陶瓷塗層。[22]前述砲彈發射過程會產生高熱，並對砲身金屬形成熱應力累積，藉此陶瓷或其他材料的薄膜塗層技術，將可有效阻絕與避免此現象。

2023 年，日本產業技術綜合研究所成功進行首次海上試射，[23] 2025 年，ATLA 將電磁砲安裝於海上自衛隊測試艦飛鳥號（ASE-6102），雖為文時尚未進行擊發測試，但整體預計針對艦載化與航行間穩定性等項目蒐集數據作為後續研發的基礎。日本多次明確表示，電磁砲的運用在於綜合防空與超高音速飛彈攔截，以及作為海

[21] Inder Singh Bisht, “Japan Signs Railgun Cooperation Agreement with France, Germany,” *The Defense Post*, June 4, 2024, https://shorturl.at/6VsIB.

[22] 山田貴壽 等，〈二次元ナノデバイス材料研究チーム〉，《ナノカーボンデバイス研究センター》，https://shorturl.at/VF818。

[23] “ATLA has Accomplished Ship-Board Firing Test of Railgun First Time in the World with the Cooperation of the JMSDF,” *X*, October 17, 2023, https://tinyurl.com/2f7ytdmp.

基、陸基反艦的制海打擊，並且尋求進一步將電磁砲與「13DDX」次世代驅逐艦進行整合，因此 2025 年的上艦測試可解讀為日本當前正逐步實踐其計畫的預期目標。

對於電磁砲的三大阻礙，「高耗能」、「超高溫」，以及「耐用性」的致命傷，日本藉由其深厚基礎研究顯然逐步克服，不僅實際部署在艦上進行進一步海上測試，更在實驗室達成連續 120 發而砲身為有明顯損害的階段性目標。下一步重點將是如何克服在艦載電力系統管理以及電磁砲的高耗能最佳化間取得平衡，乃至於最終如何將其與艦載作戰系統、指揮鏈路系統進一步整合。

肆、優劣與戰場態勢分析

除前述電磁砲開發的技術門檻與各國進展外，電磁砲此概念自身若能成功部署，其整體優劣勢為何，何以各國相繼投入資源進行開發？

前述提及，電磁砲的原理乃藉電磁驅動不帶火藥的砲彈進行高速動能打擊，由於砲彈不含任何火藥或引爆裝置，其破壞力來自發射時所賦予的「巨大動能」，其效果可想像等同一節火車以 160 公里時速穿過一面牆，憑藉彈體自身與 6 馬赫以上的動能，砲彈能輕易穿透既有金屬材料的船隻或建築物進而對目標物造成毀滅性打擊。即便缺乏傳統飛彈的後續爆炸破壞，但藉由動能打擊所造成的刺穿亦能使載具永久失效而失去作戰能力。

此種「動能殺傷」的作戰模式為既有戰場帶來兩大核心優勢，第一是「作戰安全」，由於艦艇不再需要儲存大量易燃易爆的彈藥，極大地降低了因戰損乃至於搬運意外而造成的各種風險，從而提高艦船與人員的安全與生存機率；其次也由於彈丸的體積相較傳

統彈藥更小、更輕，因此將對後勤需求大幅簡化。固態金屬彈丸不僅生產與運輸成本低廉且易於儲存，此將極大簡化後勤供應鏈乃至船艦儲存空間，進而使多餘空間可做更多彈性配置。也由於固態金屬彈丸的生產，無論體積或價格相較於既有飛彈都更低，因此可預期船艦可以裝載更多的彈藥儲備，面對潛在的敵方「飽和攻擊」便有更多的攔截成本，改變整體船艦防空作戰的態勢。

而在整體海戰方面，過去藉由昂貴的戰斧等飛彈方能達成的「短時超距」打擊型態，如今在 6 馬赫動能的電磁砲中，以相對極低成本即可完成；此外，由於彈丸體積小且相較飛彈沒有明顯熱源特徵，難以被攔截雷達探測並反制，搭配著高速特性極高的提升了有效打擊機率。而在防守端方面，由於直線高速與動能等特性，可搭配既有飛彈防禦、方陣快砲等形成了船艦的三層防空交錯網絡，依據戰場發展態勢與敵方來襲的種類進行最適防守選項。近年，隨高超音速武器崛起與定向能武器加速發展，電磁砲的角色逐漸轉變，從獨立武器系統轉為技術平台與模組應用的研發介面，未來亦可能與電磁脈衝武器、反飛彈系統等整合，持續在電磁頻譜作戰中發揮影響力。

此外，由於前述各國針對電磁砲各有其專長，美國、日本、法國、德國的合作亦形成了戰略武器為核心的合作模式，恰好再次強化了「印太民主國家」與「專制威權國家」為核心的地緣戰略對抗態勢，亦由於電磁砲的研發耗時冗長且需長期資金投入，因此中國的威權主義與軍民融合體制為其提供相當優勢，但前述民主國家的合作亦可平衡此種優劣對比。

伍、代結語

電磁砲的發展歷程，從一個世紀前的概念萌芽，到如今成為一種先進的武器系統，充滿了技術挑戰與戰略權衡。其核心優勢在於超高初速、遠程動能打擊、低單發成本和高安全性，此種優勢使其在理論上具備顛覆既有海戰的潛力。然而，其發展始終受到三大核心工程阻礙：巨大瞬間耗能、砲管在極端高溫和機械應力下的快速磨損與耐用，及將龐大系統整合到有限平台上的複雜性。

這些挑戰形塑了各國不同的發展路徑。美國在投入巨額資金並取得顯著技術成就後，因持續的技術障礙、財政限制及戰略重心轉向高超音速飛彈和定向能武器的研發而暫停其計畫。意味即便技術領先的國家，也必須在研發投入與實際部署可行性之間做出務實選擇。相對，日本與中國則持續推動各自計畫；日本採取小心務實的策略，以其深厚的金屬加工與材料研發功力，專注於高耗能與耐用性等關鍵問題，並已成功在 120 發連續射擊後，砲管耐用性上取得重大突破，後續更將此計畫作為高超音速飛彈威脅的防禦手段。

而相對中國則以大膽、炫目的技術引人注意，包括聲稱以先進人工技術 AI 輔助進行砲管管理，乃至於以「液態金屬」與其他冷卻技術解決熱應力等門檻，而儘管其測試彈丸口徑較小，實際擊發的測試也未可見，因此能否成功將研發轉至作戰部署仍待長期觀察。

而按電磁砲的運作原理，涉及「電子加速」、「電子聚焦」，以及「電子偏轉」三個原理，實際投入作戰時是否在擊發、運作同時產生大電流脈衝乃至強烈電弧，而對於既有設備造成「物理損傷」、「電磁設備干擾」，乃至於瞬間超高電流與高壓對周邊人員、設備可能造成的安全風險等，都是進一步投入戰鬥部署前，除了砲身自身技術外必須研究與克服的基礎課題。

電磁砲並非簡單的技術競賽，而是對基礎科學、加工技術乃至

工程整合的極限性挑戰。儘管其作為一低成本、高射速的動能武器，在防空、反艦乃至對地支援等具有獨特優勢，但其廣泛部署仍有賴於前述科學與技術的根本性突破。若能克服這些障礙，電磁砲將有望成為未來多層次防禦體系中的重要組成部分，與高超音速飛彈和定向能量武器形成互補。即便最終電磁砲以失敗告終，研發過程中的前述基礎科學、加工技術乃至工程整合得到的成果，亦可作為整體人類器物文明進展的新基礎。

本文作者詹祥威為淡江大學國際事務與戰略研究所博士，現為財團法人國防安全研究院網路安全與決策推演所助理研究員，主要研究領域為海洋安全、地緣戰略、電子戰與兵棋推演。

The Centenary Trajectory of Electromagnetic Railguns: Technology, Competition, and Applications

Siông-Ui, Tsiam

Division of Cybersecurity & Wargaming Simulation

Abstract

Electromagnetic railgun technology represents a significant military shift, using the Lorentz force to launch projectiles at hypersonic velocities exceeding Mach 5. This approach eliminates the need for explosives, leading to cheaper ammunition and deeper magazines, which overcome the imbalanced 'cost exchange ratio' of modern naval defence. However, the technology is plagued by immense power demands, rapid barrel wear, and guidance issues for projectiles at extreme speeds.

Once a pioneer, the United States discontinued its large-scale programme in 2021 after failing to resolve issues with barrel durability and power supply integration. In contrast, Japan has become a frontrunner, with its Agency overcoming the critical barrel wear problem with a new material, achieving a barrel life from its prototype. This success underpins Japan’s strategic focus on using railguns for hypersonic defence. Concurrently, China is aggressively pursuing its path, leveraging its expertise in integrated shipboard power systems.

While the technology is still nascent, these diverging international efforts highlight its disruptive potential. The ability to field a high-volume, low-cost kinetic weapon is poised to fundamentally reshape naval strategy and combat economics.

Keywords: Electronic Spectrum Operations, Direct Energy Weapons, Railgun