

國際高空風能發展趨勢與初期導入作法研析

王衍襲^{1*}

摘要

隨著全球朝向淨零碳排和100%綠電目標，高空風能(Airborne Wind Energy, AWE)作為新興再生能源技術引發關注。臺灣政策鼓勵多元再生能源發展，然AWE技術於中文研究鮮有涉及；故本研究探討國際AWE的政策與產業趨勢及各國初期導入作法，並初步評估臺灣導入AWE之可行性及可能面臨的挑戰，以供我國能更瞭解該技術之最新資訊。

本研究發現，歐美多國已將AWE視為綠能技術並逐步推動發展，例如歐盟將其納入創新再生能源目標，並視為未來風能的重要技術之一；德國將其納入再生能源法；美國則提供政策和研發支持。另從國際AWE產業和應用發展發現，該技術目前多處於示範階段，地面發電的「捲繩牽引」技術最為成熟，並具高海拔風能資源利用、設備輕量化和環境友善等優勢，適合偏遠及離島地區。然AWE發展仍面臨如空域整合、技術成熟度、社會接受度等挑戰，特別是「空域」監管框架不完善，阻礙技術商業化應用；故各國正加強產官合作，制定明確政策監管框架，並加強大眾溝通，提高社會對此技術的認識並降低投資顧慮。

對於臺灣，本研究建議借鑒歐美經驗，先從可行性研究出發，逐步累積研究投入，提升開發商與投資者信心；同時參考國外定義並釐清適用現行法規，隨該產業發展成熟，再制定專屬規範，以確保技術安全營運。

關鍵詞：高空風能，創新能源，前瞻能源

1. 前言

世界各地的高空風能(Airborne Wind Energy, AWE)相關研究已二十多年，該技術多數雖仍處於試驗研發階段，然近年於全球邁向淨零碳排甚至於100%綠能發電目標之剛需驅動下，除了既有成熟綠能之推動外，政府與企業也更積極投入各類新興再生能源之開發。

如歐盟(European Union, EU) 2023年11月修訂生效的《再生能源指令》新增「2030創新型再生能源技術新增容量至少5%」；2024年4月德國公布其《再生能源法》(Renewable Energy Sources Act, EEG)已納入AWE，為其獨立一項補貼制度；美國2020年12月生效的《2020能源法案》重點關注有競爭力和創新的清潔能源解方¹，並指出應研究AWE在美國的潛力與技術可

¹工業技術研究院 綠能與環境研究所 副研究員
*通訊作者，電話：02-8772-9171#643，電郵：ian.wang@itri.org.tw

¹ <https://science.house.gov/2020/12/energy-act-of-2020>

收到日期: 2024年08月23日
修正日期: 2024年11月15日
接受日期: 2024年11月19日

行性；臺灣政府也鼓勵多元再生能源發展，並持續關注新能源科技，於2023年也有台電及智帆風能簽定高空風能系統試驗合作備忘錄之規劃²。

而目前主要發展AWE之國家與業者，依據歐盟高空風能協會定義，主要領先之技術規格有3個類型(如圖1)：1.地面發電-捲繩牽引發電(tether-gen)、2.空中發電-載體轉子發電(fly-gen)、3.地面發電-旋轉發電(rotor-gen)。根據德國EEG第3條21a項「陸域AWE」定義，則係指「使用透過電纜或線路連接到固定地面站的無人機載，並利用風能發電的任何陸域AWE。」

然這些技術多仍處於開發試驗階段，在技術與市場完全成熟前，仍普遍面臨如市場應用潛力，以及技術和法規可行性之議題，因此乘於鼓勵多元再生能源發展趨勢下，有必要於初期瞭解該技術目前於全球市場與政策發展(以下第2章)、應用情境與產業發展(以下第3章)、技術與法規發展(以下第4章)之狀況與挑戰；綜上明瞭該技術是否為綠能趨勢之一，及實際導入上之可行性，以利我國未來如欲設置引入之參考。

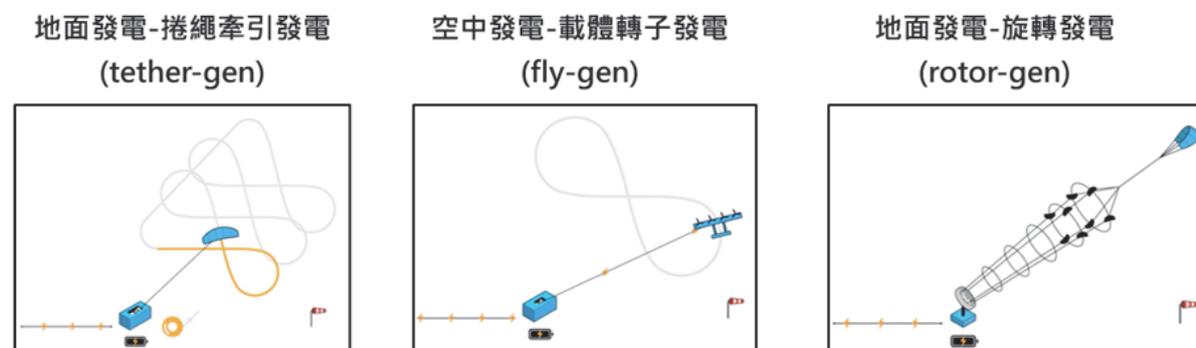
本研究資料來源主要包括近期歐美先進國家發布的官方法規政策與報告、歐洲高空風能

協會報告、各國專家研討會言論，以及數十家AWE產業領先者的進度分析。同時，也初步瞭解臺灣有關此技術布局現況追蹤，並瞭解近期相關主管機關與設置業者之挑戰與對於此技術之疑慮。

研究方法方面，通過PESTLE與SWOT分析框架，本研究從政治(P)、經濟(E)、社會(S)、技術(T)、法律(L)和環境(E)各層面進行全面性探討，從廣至深等綜合評估下，進行深入多層次分析與探討，以識別出AWE國際發展趨勢與挑戰，並給予建議。

2. 國際政策規範發展

目前歐洲國家對於AWE之引入主要政策架構依循於再生能源指令之創新設置指標，迄今以德國政策規範發展最為領先，已於2024年4月納入EEG法作為單獨一個補助能源之定義，主要源於歐洲高空風能協會於2023年10月的提案。此外，美國於《2020能源法案》通過後，加速推動AWE研發政策，能源部2021年發布《美國空中風能挑戰與機會》評估需進一步重大開發。以下主要就歐盟、德國與美國部分做進一步研析。



資料來源：歐洲高空風能協會，本研究整理，2024年7月。

圖1 高空風能系統主要技術類型

² <https://tpcjournals.taipower.com.tw/article/6595>

2.1. 歐盟主要政策與措施

歐盟的AWE業者早期主要申請之研發補助來源為「Horizon 2020」計畫，此係歐盟2014年至2020年的7年歐盟最大規模研究和創新資助計畫，預算近800億歐元³。現由「Horizon Europe」計畫接替，補助至2027年，共955億歐元，並新增支持能大規模商化擴散潛力之破壞式創新技術，主要資助對民間投資者具有高風險之中小企業研發創新案⁴。或一些業者申請如「歐洲永續能源獎」(EUSEW Awards)以實證其可行性。

此外，2023年10月出版《歐盟風力趨勢報告》指出，AWE主要處於技術成熟度(Technology Readiness Level, TRL) 3-5的技術發展驗證階段，但仍為未來可關注的風能技術之一。歐盟執委會並於2024年7月發布大型研究報告《研究清潔能源R&I機會，透過針對2030及以後各能源價值鏈的挑戰來確保歐洲能源安全》，評估當前和展望2050年共17種清潔能源技術價值鏈的能源安全挑戰，並將AWE納入未來風能重要發展科技之一。該報告針對AWE主要提出「AWE的材料使用量較低也提高了其經濟性。」，另指出與有關「永續性與環境影響方面，AWE可能較其他傳統風能具有優勢。」

然各國在於實際導入AWE時仍無主要針對AWE之相關政策補助或監管規範，歐盟高空風能協會即點出「目前歐洲國家政策和監管框架中幾乎沒有考慮AWE；AWE屬於兩個政策和監管領域—能源和航空，將兩者結合在一起頗具挑戰」。故該協會主張應將AWE單獨納入德國能源法及航空相關法規，以啟歐盟帶頭示範

作用，旋即於2023年10月向德國政府提案建議將AWE獨立納入EEG法(針對如AWE定義與補貼)，及針對空域和航空安全等相關規範，也可參考障礙物或無人機等既有規範管制。

2.2. 德國主要政策與措施

針對前開AWE納入德國EEG法提案，於2024年4月26日，隨「Solarpaket I」太陽能相關法案在德國議會的通過，也同步承認包括AWE(德語“Flugwindenergie”)作為單獨一項技術；目前已於同年5月8日公告修訂，5月16日生效正式納入EEG，使AWE營運商能夠參與聯邦網路局(Bundesnetzagentur)招標，並從上網電價補貼受益，主要參考原陸域小型風機之同等對待，為全球首例針對AWE特定補貼。

2024年公告之上網電價補貼以陸域小型風力換算最高為每度11.4分歐元，作競標最高上限，然仍低於該協會提案之每度20分歐元成本。歐洲高空風能協會秘書長Kristian Petrick針對此事指出⁵：

- 這項重大立法修正認可AWE技術的潛力，為銀行和投資者提供了更大的財務確定性。
- 將提高該技術在國家和歐盟層級研發資金中的知名度。
- AWE產業必須繼續尋求政策支持，作為進入常規市場的基本要求，特別是在授權、空域整合和融資方面。AWE能否成功納入再生能源領域，將取決於解決這些關鍵領域的問題。

2.3. 美國主要政策與措施

關於AWE幾篇重要研究可追溯至1980年代

³ <https://wayback.archive-it.org/12090/20220124080448/https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>

⁴ https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en

⁵ <https://greeningtheislands.org/the-inclusion-of-awe-within-the-german-renewable-energy-act-represents-an-outstanding-opportunity-for-islands/>

左右，早於1980年，美國能源部勞倫斯利弗莫爾國家實驗室(Lawrence Livermore National Laboratory)的研究員Miles Loyd已研究將風箏替代水平軸風力渦輪機之優勢，然當時感測與控制技術仍不足以實現商業開發。

而自2000年代初以來，全球倡導者、研究員和業界開始針對該領域加速發展。主要從2001年荷蘭物理學家兼歐洲太空人Wubbo Ockels於台夫特理工大學(Technische Universiteit Delft)發表相關高空風能論文，催生後續研究與產業發展。

2001年，Ockels在荷蘭台夫特理工大學發表一篇關於「Laddermill」的論文，指出此為一種地面發電概念，並指出高空有大量的風能資源可為其所用⁶。2005年，他在台夫特大學的研究小組提出一種更有效的設計「Pumping mill」，這即是許多現今地面發電概念的前身⁷。同時，Ockels的研究催生一些AWE公司，並逐漸形成由AWE研究人員、愛好者和企業家組成的全球網絡。

從2009年起，全球AWE界開始舉辦AWEC會議，共20多國參與，並在美國和歐洲之間輪流舉行，該會議每2年舉辦1次。並自2019年起，會議由歐洲風能研究院(European Wind Energy Association, EWEA)、歐洲高空風能協會和台夫特理工大學共同舉辦。2024年第10屆AWEC會議即於西班牙舉行。

2011年11月，美國聯邦航空管理局(Federal Aviation Administration, FAA)就《聯邦法規》(14 CFR)第14編第77部分「安全、高效使用和保護可航行空域」對高空風能系統(Airborne wind Energy Systems, AWES)的應用政策修訂徵求意見。此外，該通知還要求高空風能系統開發人員和公眾提供與這些系統相關的資訊，以

便聯邦航空局能夠全面分析AWES及其與國家空域系統(National Airspace System, NAS)的整合。

2020年12月美國通過《2020能源法案》優先考慮下一代技術的研究、開發和示範。故藉由此法源，2021年11月，能源部風能技術辦公室(Wind Energy Technologies Office, WETO)發布《美國空中風能挑戰與機會》報告，評估美國AWE的潛力和技術可行性。結論AWE潛力可能與傳統風能規模相似，然考慮目前成本和技術狀況，需進一步重大開發(即具規模商化案例)才能在國家層級進行有意義的部署。

於2022年12月6日，美國兩黨議員共同提案《空中風能研究和開發法案》將在能源部設立一個研究潛力、技術、環境影響之補助案，旨在提高對空中風能發電的效益、設計和影響的理解。從2023至2027年，每年補助5百萬至6百萬美元。

於同年，美國FAA為確定其關於聯邦法規第14編第77部法規關於安全、高效使用和保護所有AWES可航行空域的法規適用性的政策，故研究利害關係人意見與相關報告，並於2022年12月23日依據利害關係人意見與研究，發布《AWES政策聲明》。

根據針對該聲明收到的回饋，FAA得出結論，係「AWES可能會影響通航空域」；故自該政策聲明生效之日起，FAA將對通知中規定的政策進行修訂，並將考量所有AWES於原規範第77部分影響。提議建造超出第77.9節中參數的AWES的實體(如，在其現場地面高度(Above Ground Level, AGL)超過200英尺處建造的AWES)必須提前向FAA提交申請。

又美國能源部(Department of Energy, DOE)風能技術辦公室(WETO)於2023年7月11日，宣

⁶ <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369886901000027>

⁷ <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4f431d98247213072d849357696792a3bd4ce9d4>

布為15家致力於加速風能研究和開發的小型企業提供資金，主要來自兩黨基礎設施法(Bipartisan Infrastructure Law, BIL)的資金，作為能源部小型企業創新研究(Small Business Innovation Research, SBIR)和小型企業技術轉移(Small Business Technology Transfer, STTR)計畫資金來源。這些公司均被選中獲得約20萬美元的第一階段SBIR獎勵，針對如浮動式離岸風電技術、物種保護技術、環保材料技術、高效且經濟製造技術。總體而言，能源部向小型企業提供7,200萬美元，用於開展科學、清潔能源和氣候研究、開發和示範計畫⁸。

其中，美國能源部針對偏遠或複雜地形設置、高成本、製造速度、環境影響與國產化等所面臨之風力開發需求/痛點，補助前瞻創新技術包含：輕型兩葉式陸海用風機、浮動式離岸高空風能、野生動物追蹤系統、浮動式離岸風電張力腿機器人焊接系統。而「具經濟效益用於離岸高空風能的浮動平臺」一案，即補助Windlift公司，其需求及創新解方主張：因美國離岸風電設置目標預估難以達成(高成本、供應鏈瓶頸及缺乏專業基礎設施)。此高空風能技術能用較傳統風能更少材料及更低成本(無需依賴安裝傳統風機所需的客製化船舶和港口)方式利用風能資源。

綜上，美國於《2020能源法案》通過後，加速推動AWE研發政策，2021年發布《美國空中風能挑戰與機會》評估需進一步重大開發，並指出歐盟AWE發展較領先。美國本土迄今除了有航空領域法規解釋且提議建置需跟FAA通報，並也有SBIR補助前瞻離岸AWE應用，同時相關研發補助案正處於提案中。在政策、法規、技術、社會需求上皆持續發展。

3. 國際應用與產業發展

從歐美近期之政府與產業相關報告與專家指出，AWE作為一種新興的再生能源技術，較傳統風能或其他能源具備多項獨特的優勢，使其成為各國能源結構多元化的一個選擇。以下將從技術、經濟、環境和社會四個方面詳細探討AWE的優勢及其應用前景。

3.1. AWE發展優勢與應用情境

3.1.1. AWE科技優勢

技術方面，首先AWE能取得「高海拔地區未開發的風力資源」高空風速通常比地面風速更穩定且強勁，使AWE能夠更穩定地發電，提高能源供應可靠度；另利基於其「設備靈活性」，允許不斷調整採集高度以獲取最佳可用風力資源。增加與其他再生能源的「互補性」，並具「高容量因素」之潛力。

美國聯邦航空管理局(FAA)於2022年12月23日頒布之政策聲明於規定⁹即引用美國能源部2021年11月出版《美國AWE的挑戰與機遇》之研析，正式介紹「AWE是利用繫留飛行裝置將風能轉換為電能。AWE是一種臨時或永久結構，由拴在地面站上的自助機載系統組成，具有空中機載或地面安裝的傳動系統，用於將風中的動能轉換為用於發電的機械動力。AWE的繩索繫留方式，提供能在更高海拔地區收集更強、更穩定風力的機會。」能夠彌補傳統風能在低風速地區的發電不足。此外，《美國AWE的挑戰與機遇》指出「從不同的互補角度來看，傳統風能和AWE的供應鏈將在很大程度上是獨立的；故AWE技術的發展可助緩解清潔能

⁸ <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/weto-selects-15-small-businesses-bring-wind-energy-new-heights>

⁹ <https://www.federalregister.gov/documents/2022/12/23/2022-27993/airborne-wind-energy-systems-awes-policy-statement#footnote-5-p78850>

源快速部署情境中潛在的供應鏈限制。」

傳統風能和AWE之間的供應鏈大體上獨立，主因在於兩者的技術需求與設施設計大不相同。AWE使用高空飛行設備(如風箏或無人機)，這些設備的結構更輕便。這與傳統風能需要的固定式風力發電塔和重型設備截然不同，減少對鋼鐵、混凝土等傳統風能設施的需求。

AWE的獨特需求使得供應鏈體系較少重疊，在市場上，AWE可以發揮補充性，尤其在難以安裝傳統風機的偏遠地區或離岸場域，增加能源的多樣性和靈活性。換言之，AWE的發展並不會與傳統風能產業爭奪資源，反而有機會形成互利共生的關係。

另歐洲高空風能協會2022年9月的白皮書《美國AWE的挑戰與機遇》指出「AWE是風2.0——一種改變遊戲規則的解方，可在高於現有風能技術的高度上獲得大量未開發的風能資源潛力。它能夠以較低的碳強度並最終以較低的成本獲取更多的能源。」歐洲高空風能協會秘書長也提到，AWE場地利用上，目前商轉案例仍可於附近實施農作物，以土地複合式利用等方式設置。

3.1.2. AWE經濟優勢

經濟方面，首先係「建置成本較低」AWE系統不需要高大的塔架和大型基礎設施，降低了材料和施工成本；再者，其設備輕便，運輸和安裝過程相對簡單，材料使用量低、容量係數增加、更容易的物流和快速設置等因素，而導致資本成本(Capital expenditure, CAPEX)降低，從而可能進一步降低總體建設成本。另一方面因AWE系統的維護較簡單，且未來設備自動化的程度也會越來越高，減少人力資源依賴也可導致「營運成本較低」，例如無須傳統風機建置所需之昂貴起重機等建置設施。

歐洲高空風能協會秘書長Kristian Petrick

2023年10月27日於歐洲再生能源資源論壇即指出，首個商用AWE系統發電成本約20 €ct/kWh(約新臺幣7元)，已在取代柴油發電市場上具有競爭力。該協會並預計到2030年代中期，地面發電-捲繩牽引式的AWE，其能源均化成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)將低於傳統風電技術，將於2030年達到45 €/MWh至2040年達24 €/MWh。主要是可能有較低的材料、安裝和運輸和維運成本，以及更高的風能資源利用等因素，而推估其在整個生命週期的均化發電成本，有潛在更經濟化的優勢。

在潛在「市場需求」方面，AWE技術的靈活性和低建設成本，能於偏遠區域或較惡劣環境建置，能開發出更多的「新市場」。例如使其在發展中國家、離岸深海/浮動式、山區、偏遠地區，甚至颱風/颶風等區域，具有巨大的市場潛力(如圖2)，這些地區可能原本無法負擔傳統風能發電設施的高昂成本。

其次，歐盟的創新法案也支援多元創新能源，歐盟再生能源指令(EU/2023/2413) 2023年10月31日公布之新修正：「成員國應設定一個指示性目標，到2030年創新再生能源技術至少占新增再生能源裝置容量的5%。」其中即包含AWE為其中之一創新前瞻技術。

再者，全球指標性的德國EEG法正式將AWE納入補貼範疇，這項立法修正認可AWE技術的潛力，為銀行和投資者提供更高的財務確定性，並同時鼓舞相關產業開發業者。

3.1.3. AWE環境與社會優勢

在環境與社會接受度方面，AWE使用輕質繫繩取代風力渦輪機的塔架，顯著降低材料使用量，最多可減少90%的材料消耗，從而減少生命週期中碳足跡對環境的影響。這種「減少」原則符合循環經濟的理念，並代表風能技術的「創新改變和根本性重新設計」。此外，



資料來源：歐洲高空風能協會，本研究整理，2024年7月。

圖2 高空風能主要應用情境

2024年4月由荷蘭與德國大學共同發表全球首個針對AWE社區接受度研究《居民如何看待發電風箏？德國空氣風能系統和風電場的社區接受度比較》從視覺、聲音、安全、選址、環境和生態面，對AWE和附近風電場進行評分，發現AWE在「視覺」影響被評為更好，如相較傳統風電較沒有感覺到陰影，且受訪者將其與風箏聯想起來，具有俏皮、平靜和柔和感。

3.2. AWE產業發展狀況

AWE產業目前多處於示範發展階段，尚未有大規模商轉或在主要國家商轉的案例。目前以地面發電-捲繩牽引發電方式為主，主要推出100 kW以上的裝置，並有業者嘗試布局海域發電技術。

3.2.1. AWE地面發電類型

AWE產業主要以地面發電為主，又可分為「捲繩牽引發電」和「旋轉發電」兩種形式。捲繩牽引發電為高空風能最常見的類型，也是最多廠商開發的方向。大多數的單一設備以100 kW左右為主。該類技術主要係高空裝置被栓在地面上固定位置，藉由空氣中的動能來轉換為拉動繩索的力。拉力產生之動能帶動地面發電機的絞盤、馬達進而產生電能。高空裝置傾向於遵循螺旋形或平移的八字形路徑。此外，每

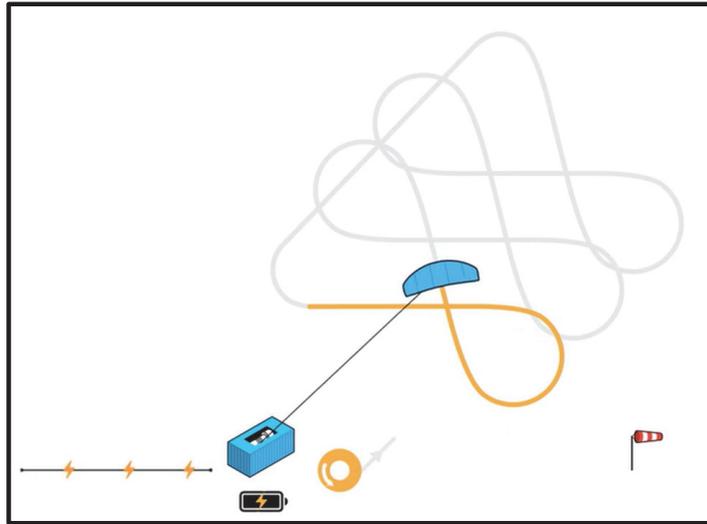
個地面站可能有多個空中設備。

正在開發地面發電系統，採用捲繩牽引發電裝置(如圖3)的公司包括SkySails、Kitepower、Kitenergy，以及裝在船上的Oceanergy等類似風箏的「軟翼」空中載體類型；此外，EnerKite、Kitemill、TwingTec則採用如無人機般的「硬翼」空中機載技術。其中SkySails已部署全球首個100 kW單風箏商業系統，並已建立小批量生產線，同時也於德國和其他國家開發200 kW示範。另Kitepower已在荷屬阿魯巴島部署一個100 kW設備，這是首座在歐洲以外地區進行的完整物流和運營測試。已獲得荷蘭人類環境和運輸監察局(Inspectie Leefomgeving en Transport, ILT)許可，可進行「超視距」(Beyond Visual Line of Sight, BVLOS)飛行。

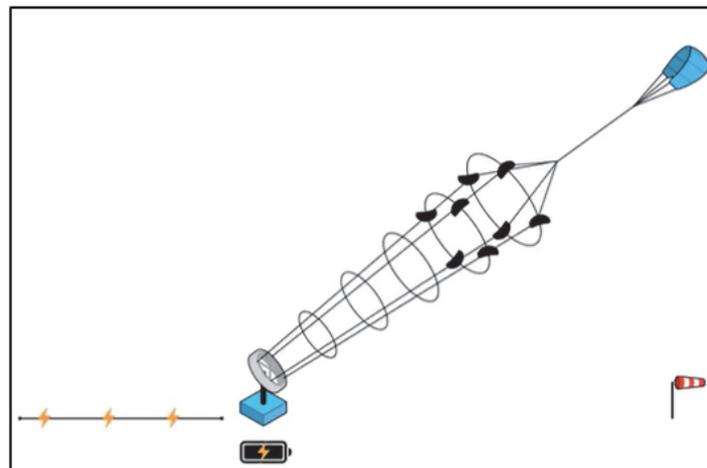
另一種地面發電的旋轉式發電(如圖4)，屬於相對較新的發電解方，由Windswept與Interesting共同開發，約10 kW。該設備固定在地面上，使用多個翼型及模組化的轉子，轉子用繩索連接在一起，以旋轉結構。通過保持繩索拉緊，該旋轉之力被傳遞到地面站發電機。

3.2.2. AWE空中發電類型

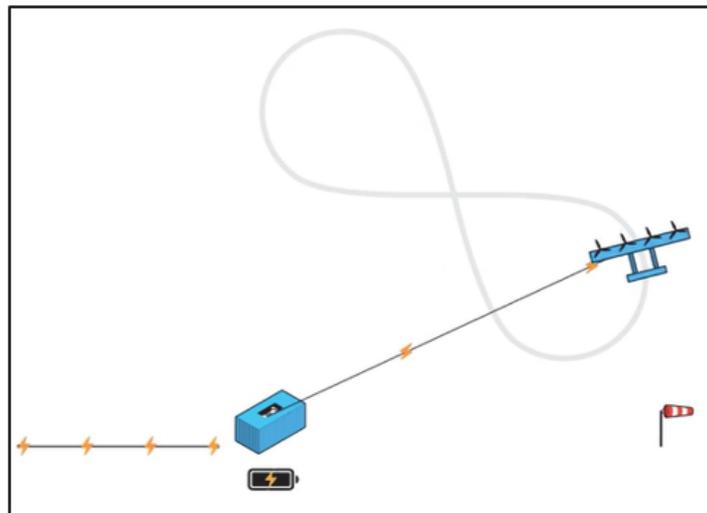
第三種為空中發電-載體轉子發電(如圖5)：空中發電(Fly-gen)設備被固定在地面的固



資料來源：歐洲高空風能協會，本研究整理，2024年7月。
圖3 地面發電-捲繩牽引發電(tether-gen)



資料來源：歐洲高空風能協會，本研究整理，2024年7月。
圖4 地面發電-旋轉發電(rotor-gen)



資料來源：歐洲高空風能協會，本研究整理，2024年7月。
圖5 空中發電-載體轉子發電(fly-gen)

定位置上。繩索的長度是固定的，電能轉換設備位於空中發電設備上，由一或多個轉子驅動發電機，再將電力透過繫繩傳回到地面基站。空中設備沿側風飛行，以圓形或八字形路徑移動。

然而此類技術研發上較為困難，如Altaeros和Makani等研究項目在研發過程中發現，功率性能低於預期，加上資金壓力，是促使其暫停的主要因素。此外，Google投資之Makani於2020年宣告終止開發，原因之一是當前此類技術仍無法穩定飛行，仍距離商業化營運目標遙遠。

但如德國Kitecraft與美國Windlift仍持續研發。Windlift受美國國防部1,100萬美元研發補助，用於國防和救災的行動電源解決方案；同時也獲得美國SBIR計畫支持，由能源部2023年7月補助風能相關研發資金20萬美元。主因Windlift公司主張，美國離岸風電設置目標預估難以達成(高成本、供應鏈瓶頸及缺乏專業基礎設施)。此高空風能技術能用較傳統風能更少材料及更低成本(無需依賴安裝傳統風機所需的客製化船舶和港口)方式利用風能資源。

4. AWE發展面臨之挑戰

從近期的產業發展狀況來看，AWE在科技、經濟、社會與環境影響等層面上相較於現有成熟能源，展現出其獨特性與潛在優勢。然而，過去政策上對此技術缺乏明確立法和補助，但近期德國已將AWE納入其EEG法規，美國也發布相關航空領域的規範說明。儘管如此，AWE在實際導入過程中仍面臨航空「法規」上的分類和一致性問題。

如歐洲高空風能協會針對德國將AWE納入EEG一事，認為雖該重大立法認可AWE技術潛力，並也提高其於投資與研發之吸引力與知

名度；然AWE產業仍必須繼續尋求「政策支持」，其中即直指在「空域整合」方面為其能否成功之關鍵因素。另一方面則是，雖然AWE的技術潛力有被認可，然要持續研發仍需要提高市場和公眾對AWE技術的「認知和接受度」，以獲得更多的關注與財務支持，推動其全商化進程。

4.1. AWE技術發展

本研究收集各業者近期技術發展資訊(如表1)，並參考《AWE系統之安全營運與空域整合》之研究發現，彙整如要設置AWE，可參考的國際主要技術演進、操作概念、監管分類的發展標準，讓相關投入者瞭解「AWE系統」具體要求。

AWE規格方面，現階段多數AWE翼展低於8公尺、質量低於25 kg的小型系統，多數公司認為50至100 kW裝置容量為其首個研發產品，目前初期商化裝置計畫在100至200 kW範圍內，長期目標擴增1至2 MW範圍內。

操作方面，預計早期商化階段AWE的自動化程度(Levels of Automation, LOA)為4級(高自動化)，呈超視距(Beyond Visual Line of Sight, BVLOS)操作；全商化規模階段，則系統將達到自動化程度5級。美國聯邦航空管理局(FAA)將超視距(BVLOS)定義為廣泛存在的和潛在的無人駕駛飛機系統(Unmanned aircraft system, UAS)操作，其唯一共同因素是無人駕駛飛機(Unmanned aircraft, UA)超出直接視線遠程飛行員的視線。在歐盟法規2019/947將BVLOS操作定義為「一種不在VLOS中進行的UAS操作」，VLOS (Visual Line of Sight)是指「一種遠端飛行員能夠保持連續無輔助目視操作的UAS操作」，允許遠端飛行員控制無人機，以避免碰撞其他飛機、人員和障礙物於其飛行路徑上。

表1 國際高空風能主要業者發展狀態

主要類型	起飛方式	國家	公司	容量 (kW)	進度	狀態
地面發電 (捲繩牽引發電)	軟翼	德國	SkySails	200	已商轉(單台)，實際成效待確認	推出世界首例商業AWE系統(100 kW)，在模里西斯共和國400公尺高空飛行。2024年2月於德國地點開發案，獲得德國聯邦排放控制法(BImSchG)審查給予環境影響正面之初步評估。
		荷蘭	Kitepower	30/100	測試中	正在愛爾蘭北海岸、荷蘭德克斯藍、荷屬阿魯巴島對試用版進行測試示範。已獲得荷人類環境和運輸監察局(ILT)許可，可進行「超視距」(BVLOS)飛行。
		義大利	Kitenerg	60/100	測試中	100 kW研發中。
		德國	Oceanergy	360	研發中	裝置在船上，預估2026至2028年商轉。
	水平起飛、降落	德國	EnerKite	30/100	測試中、商轉中	2024年與德國企業銷售簽約；正在德國、歐洲和世界各地開展另外9個試點計畫。
	垂直起飛、降落	挪威	Kitemill	150	測試中、商轉中	2019年Kitemill 啟動AWE項目，由歐盟委員會透過Horizon 2020 SME Instrument資助。預期推出首個商業規模系統100 kW KM2，計劃銷售中。
瑞士		TwingTec	N/A	測試中	2019年歐盟Horizon 2020資助研發；2023年入選日本東京都「SUITz Tokyo」海外新創加速器計劃。	
地面發電 (旋轉發電)	-	英國	Windswept & Interest-ing	10	研發中	與大學合作中。
空中發電 (載體轉子發電)	垂直起飛、降落	美國	Windlift	N/A	研發中	獲得美國海軍研究實驗室(US Marine Corps and US Naval Research Laboratory)和能源部之研究和開發項目補助。
		德國	Kitekraft	100	測試中	2023年10月25日首次於德國併網測試運行。

資料來源：各業者官方資料、各政府官方資料，本研究整理，2024年7月。

監管方面，迄今歐洲多數將AWE視為無人機系統，現階段屬於歐洲航空安全總署(European Union Aviation Safety Agency, EASA)

定義低風險「Open」類別¹⁰；隨著技術的商業化發展，尤其是大型AWE設備的引進，風險評估要求更加嚴格，必須遵守特定操作風險評估

¹⁰ <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/open-category-low-risk-civil-drones>

(Specific Operations Risk Assessment, SORA)。在邁向商業化階段，這些操作被視為中度風險「Specific」或高風險「Certified」，需要進行詳細的「特定保證和完整性等級」(Special Assurance and Integrity Level, SAIL)評估。

SORA評估通過量化地面和空中風險等級來確定SAIL值，設置者必須根據評估結果採取措施降低風險，確保無人機不會失控。EASA指出，如以「Specific」類別飛行，作為無人機操作員，在開始飛行之前，必須獲得註冊國家航空管理局(National Aviation Authority, NAA)的操作授權，即使在註冊國以外的區域進行操作，授權仍由註冊國的NAA頒發。對於最高風險「Certified」類別的飛行，無人機需經過認證，包括擁有型號證書和適航證書，運營商需獲得主管當局的航空營運商批准，遠端飛行員需持有飛行員執照。

目前，AWE技術主要集中在小型系統試驗(100至200 kW)，未來將朝向1 MW以上大型化發展，並如無人機技術一樣朝自動化和相關監管要求方向發展。

在空域管理方面，AWE設備需要整合到空域管理系統中，歐洲高空風能協會指出，「U-Space」計畫正好提供這樣的框架。AWE設備本質上屬於飛行器，因此需要與其他飛行器共用空域。U-Space計畫旨在建立一個數位化、自動化的空域管理系統，特別是針對無人機和其他新興航空器的飛行安全和效率。AWE設備可利用U-Space提供的數據和服務，例如空域資訊、飛行規劃、交通管理等，來實現安全、可靠、高效的運作。

歐洲高空風能協會指出「歐洲產業看到將AWE整合到U-Space中具有巨大的潛力，特別是在鄉村地區。如可確保地面風險，則應批准AWE裝置在無人居住的地區運作，在歐洲一些AWE系統已獲准在農民偶而會出現之地點使

用。」

4.2. AWE設置與營運監管規範

AWE作為一種新興再生能源技術，其設置與營運目前涉及複雜的空域和地面安全問題，需要明確的監管規範來確保其安全發展。目前，各國對於AWE的監管框架尚未成熟，主要存在兩種監管思路：將AWE視為無人機系統(UAS)或障礙物。

在歐盟地區，荷蘭、愛爾蘭、西班牙等多個國家以及歐洲航空安全總署(EASA)傾向於將AWE納入UAS的監管範圍。大多數硬翼AWE系統需要遵守歐盟關於無人機系統的授權法規(2019/945)和關於無人機操作規則和程式的法規(2019/947)。

具體來說，AWE被歸類為UAS的「特定類別」(specific category)。現階段，由於AWE系統規模相對較小，且多在安全地點運行，因此不需要完整的認證。但未來隨著AWE系統規模擴大，以及更靠近公路、鐵路或在其上方運行的可能性增加，將需要進行類型認證，例如特定保證和完整性等級(SAIL) V或VI級別。此外，所有AWE系統都需要進行SORA評估。根據歐盟法規(2019/947)，SORA提供了一種方法來幫助營運商和主管機關確定UAS操作是否可以安全進行。

與歐盟其他國家不同，德國目前將AWE視為障礙物，主要依據是國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)《國際民航公約》第14號附約(ICA0 Annex 14)中關於障礙物的通用規則。由於AWE的活動範圍受到繫繩的限制，類似於氣球、桅杆等障礙物，因此德國要求AWE必須讓其他空域使用者可見，例如透過照明和標記。且除了傳統的視覺手段外，德國也鼓勵使用詢答機(transponders)等技術來提高AWE的可見性和安

全性。

總之，明確且統一的監管框架對於AWE的安全、永續發展至關重要。AWE產業需要與各國政府、監管機構以及其他利益相關者積極合作，共同制定AWE發展的路線圖，促進AWE技術的進步和商業化應用。

4.3. AWE空域法規挑戰

故針對當前AWE於設置時所面臨之法規層面往下探討。首先從歐洲高空風能協會與IEA Wind Task 48於2023年9月發表之白皮書《AWE系統之安全營運與空域整合》指出，許多開發商在設置AWE與示範時，常面臨空域上的規範問題，因而該研究就AWE全球主要11個領先開發商，針對技術發展、營運發展及面臨問題作調查。本文整理其研究成果並綜合分析，共發現：

- 開發商在技術演進、操作概念和監管分類達成一致標準。
- AWE必須遵守能源和航空領域的標準，目前國際AWE技術導入即面臨飛航規範問題。
- 從空中風險減緩角度，AWE視為障礙物；地面風險則視為障礙物或無人機(UAS)。
- 歐盟相關無人機監管規範對AWE產業很有幫助，因適用於整個歐洲。
- 應用場域除可設置於偏遠無人居住地區，也可善用無人機場域。

歐洲高空風能協會總體給予AWE導入設置之建議，首先為將AWE融入空域：平等/優惠空域使用權、依國情與規格可被視為「障礙物或無人機」。針對減緩「空中風險」方面，指出：

- 應視為「障礙物」，應予以繞行、在航空圖有其特殊符號、裝置與地面站皆須有特殊標

示(障礙燈)。

- 可透過科技檢測，自動下降或落地，以避開其他飛行器。如德國的飛機偵測照明系統(Aircraft Detection Lighting Systems, ADLS)，其他飛行器如被偵測到，AWE將自動潛入150公尺以下。
- 應強制規定整個空域(或至少在AWE地點周圍)的所有空域使用者都必須使用「詢答器」之義務。
- 應在德國約10個測試和示範場地設立「限飛區」，以確保AWE系統全天運作的無障礙開發。對於商轉區，指定為危險區域即可。

前述詢答器技術是指，與其他空域使用者的協調需要詢答機。AWE業者指出，只有使用詢答機的飛機才能被偵測到。而沒有詢答機的空域使用者必須避開AWE，就像避開任何其他固定障礙物一樣。如ADS-B詢答機可能將成為強制性要求，允許詢答機之間進行通信(發送和接收有關位置、高度、行進速度方向等詳細數據，且包括有關飛機類型的資訊，如此為AWE並有一條繫繩)。

然而如僅於空中風險中視為障礙物的缺點為沒考量到可能風箏墜落之地面風險，故減緩「地面風險」方面：

- 可視為無人機或障礙物，取決於場地情況、AWE類型和當地管轄規範。部分已使用歐洲無人機法規來進行特定操作風險評估(SORA)並獲得營運許可證。
- 同時，如可確保地面風險安全，則應批准AWE裝置在無人居住地區運作，一些AWE已獲准在農民偶而出現的地區使用。

對於目前和早期的AWE，開發人員都需要遵從(EU) 2019/947的「Controlled ground areas」¹¹ 規範，以減緩地面風險。這樣可快速

¹¹ 「受控地面區域」是指無人機運作的地面區域，且無人機操作員可確保只有相關人員在場。

測試和部署AWE，而不會讓地面上的任何協力廠商面臨受到傷害之風險。為廣泛部署AWE，各公司目標是未來在「Non-controlled ground」進行操作。這將需要在未來幾年內開發適當的安全認證基礎和合規手段，例如需要解決在發生碰撞或失控時繫繩掃過地面的風險。

舉例而言，EASA已將Kitepower的AWE視為無人機，允許該公司作為其營運商，使用歐洲廣泛認可的管理框架來營運該設備。該設備被歸類為需要作SORA評估之「Specific」類別的無人機。為了獲准在此類別中營運，需要確定SAIL等級¹²。Kitepower系統被歸類為SAIL II，這使得它可在歐洲各地運作。但申請在其他歐洲國家運作時，需透過跨境表格聯繫相應國家的航空當局。儘管如此，由於SORA已經評估過且並受到EASA的監管，因此各歐洲國家都可接受，有利於Kitepower在歐洲廣泛部署¹³。

Kitepower已在荷蘭和愛爾蘭獲得許可營運，且能在「Non-controlled ground」的人煙稀少區域，在有可視距操作(VLOS)觀察員運作下營運，而於「Controlled ground areas」場域，也擁有無人機飛行員執照的超視距(BVLOS)操作飛行員控制。

4.4. AWE應用場地挑戰

最主要是應用方面，歐洲開發商覺得可應用在偏遠的無人居住地方，德國目前公布的聲明是AWE可以補助風光接觸不到的潛能地區或設置地點；另也提到可利用無人機已經劃分的場域，可能是未來潛能評估可以參考。

而歐洲航空安全總署(EASA)的U-Space計畫與AWE息息相關，U-Space是為支援無人機

的商業運營，特別是那些需要更高複雜性和自動化的商業運營。這是歐洲正在開發用於管理無人機交通的系統。(EU) 2021/664 U-Space監管框架第2條第1項與第2項：「U-Space空域」指由成員國指定的UAS地理區域，只有在U-Space服務的支援下才允許UAS運作¹⁴。

「U-Space服務」指依賴數位服務和功能自動化的服務，旨在支援大量無人機安全、可靠且有效率地進入U-Space空域。

建立U-Space的第一步是定義和指定U-Space空域。這些空域至少將提供強制性U-Space服務。U-Space空域指定程式由歐盟成員國完成。故歐洲AWE業者看到U-Space概念巨大潛力，如果將其擴展到鄉村地區可運行AWE。因此，U-Space應考慮AWE，目前在U-Space整合的第一階段(將持續幾年)，出於安全考慮，載人和無人交通應分開，即使最終的U-Space概念可能允許共用空域。U-Space計畫為AWE的空域整合提供技術框架和發展方向。AWE產業可參與到U-Space的建設和發展中，共同推動高空風能的商業化應用。

5. AWE發展綜合分析

再進一步將前述案例研究、文獻回顧與利益相關者訪談，有關政策、產業、技術、法規等之分析資訊整理，並利用PESTLE架構來分析國際AWE發展趨勢，並形成了對外部因素如潛在機會與風險的理解。再將PESTLE分析的結果融入SWOT分析中(如表2)，以更全面地評估內外部環境對AWE的可能影響因素，更清晰瞭解AWE的優勢、劣勢、機會與威脅。

¹² 此等級表示該設備暴露於其環境(包括鄰近的地面和空中環境)的風險，如何透過某些措施和策略來減輕。

¹³ <https://thekitepower.com/products/>

¹⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0664>

表2 國際高空風能主要業者發展狀態

因素	優勢 (Strengths)	劣勢 (Weaknesses)	機會 (Opportunities)	威脅 (Threats)
政治(P)	<ul style="list-style-type: none"> 全球各國政府積極支持再生能源技術，包含AWE，並提供政策和補貼等鼓勵措施。 歐盟再生能源指令(RED)新增2030年實現5%創新再生能源技術新增裝置容量目標、AWE納入「Horizon Europe」計畫、德國將AWE正式納入其再生能源法(EEG)。 美國發布《美國空中風能挑戰與機會》報告、航空領域法規解釋、SBIR補助AWE相關技術。 	<ul style="list-style-type: none"> 多國AWE的政策框架尚未完善，需要各國政府制定新的法規和標準，甚至一致性的明確規範指引。 AWE需要與現有的航空法規相結合，這對政策制定者來說是一個挑戰，因為需要協調能源和航空兩個領域的政策。 	<ul style="list-style-type: none"> 歐盟再生能源指令(RED)訂定創新再生能源技術目標，為AWE發展提供機會 歐盟的AWE產業可積極參與政策制定，推動有利於AWE發展的政策和法規。 AWE產業可以藉由國際合作，共同制定技術標準和規範，促進AWE技術的合作和推廣。 	<ul style="list-style-type: none"> 政策的不確定性或缺乏政策支持可能會阻礙AWE的發展。 現有航空法規的限制可能會阻礙AWE的部署，例如空域使用權的分配。
經濟(E)	<ul style="list-style-type: none"> AWE的建造成本和營運成本預計將低於傳統風電技術。AWE的首個商用系統發電成本約為每度電新臺幣7元，已具備與柴油發電市場競爭的能力。 AWE的材料成本較低，因為它使用輕型繫繩代替傳統風力發電機的塔架，材料消耗量最多可減少90%。 	<ul style="list-style-type: none"> AWE技術目前仍處於發展初期，需要持續的研發投入以提高其可靠度和降低成本。 AWE的融資管道尚未完善，需要吸引更多投資者關注。 	<ul style="list-style-type: none"> 歐洲高空風能協會估計AWE的市場潛力巨大，預計到2050年底，全球AWE市場規模將達到271GW。 AWE在偏遠地區和海上風電等特定市場具有優勢，並能與其他再生能源互補共生。 	<ul style="list-style-type: none"> 全球經濟衰退或其他能源價格下跌可能會降低投資者對AWE的投資意願。 若AWE技術發展速度不如預期，或未能有效降低成本，可能會影響AWE的市場競爭力。
社會(S)	<ul style="list-style-type: none"> AWE技術可以為偏遠和欠發達地區提供穩定的能源，促進社會發展和能源公平。 AWE在視覺影響方面優於傳統風電，社區接受度較高。 	<ul style="list-style-type: none"> 公眾對AWE的瞭解還不夠，可能會對其安全性產生疑慮。 	<ul style="list-style-type: none"> AWE產業可以加強與大眾的溝通，提高公眾對AWE的認識和接受度。 AWE技術可以為偏遠地區提供穩定能源，促進社會發展和能源公平。 	<ul style="list-style-type: none"> 社會對AWE的接受度不高可能會阻礙AWE的部署。

表2 國際高空風能主要業者發展狀態(續)

因素	優勢 (Strengths)	劣勢 (Weaknesses)	機會 (Opportunities)	威脅 (Threats)
技術(T)	<ul style="list-style-type: none"> ● AWE技術可利用高海拔地區更強勁、穩定的風能資源。 ● AWE系統可以使用現有的風力或無人機技術。 	<ul style="list-style-type: none"> ● AWE技術的可靠度和性能還需要進一步商轉案例驗證。 ● AWE系統的設計和製造需要克服一些技術挑戰，例如輕量化和抗風性。 	<ul style="list-style-type: none"> ● AWE產業可以通過技術創新，進一步提高AWE的發電效率、可靠度和安全性。 ● 無人機交通管理系統(U-Space)的發展為AWE技術的空域整合提供技術框架。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 技術進步緩慢或技術瓶頸可能會阻礙AWE的發展。 ● 其他可再生能源技術的快速發展可能會削弱AWE的競爭力。
法律(L)	<ul style="list-style-type: none"> ● 歐盟、EASA、國際民航組織ICAO已有一些無人機監管法規可供AWE參考。 ● 美國FAA有航空領域法規解釋。 	<ul style="list-style-type: none"> ● AWE技術的設置和運營涉及複雜的空域和地面安全問題，現行法律法規尚未完善。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 歐洲高空風能協會積極推動相關法規制定中。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 法規的不確定性或過於嚴格的監管可能會增加AWE的開發和部署成本，阻礙其發展。
環境(E)	<ul style="list-style-type: none"> ● AWE技術的環境影響較小，有助於減少碳排放和保護生態環境。 ● AWE的材料消耗量較傳統風能低，更具環保效益。 	<ul style="list-style-type: none"> ● AWE系統相較其他再生能源環境影響更低，但仍可能對鳥類和蝙蝠等野生動物造成潛在影響。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 社會對環保要求和標準提升，將推廣環境更為友善之AWE技術發展應用。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 其他更具環境友善之再生能源替代。

資料來源：本研究整理，2024年7月。

5.1. AWE發展趨勢

從政策、經濟、技術、社會環境等面向，可歸納出8個AWE國際上的發展趨勢：

1. 歐美政策支持力度加大，但仍需明確專屬規範：全球各國政府正積極支持再生能源技術，包含AWE，歐美國家並提供政策和補助等鼓勵措施。如，歐盟再生能源指令(Renewable Energy Directive, RED) 設定2030年實現5%創新再生能源技術新增裝置容量目標，且新的「Horizon Europe」補助計畫仍將AWE納入。德國更於2024年將AWE正式納入其EEG，成為全球首例。美國也發布《美國AWE挑戰與機會》報告，並提供航空領域法規解釋和SBIR補助；然AWE實際導入之政策框架與明確規範指引尚未到位，如空域整合，需要各國政府持續關注並制定更明確的政策。
2. 國際合作日益重要，有助於技術推廣和標準化：跨國合作促進技術轉移和標準化，將能加快AWE技術的推廣。由於AWE產業尚在發展初期，例如像是歐洲業者自行組織歐洲高空風能協會、舉辦AWEC國際會議、歐美各國也互相引用其研發調查期刊，並跨國調查各領頭業者動態。
3. AWE擁有市場潛力，特別是在偏遠場域：AWE以其獨特「科技、經濟、環境與社會」層面發展，相較其他能源有其發展潛力；

例如，能取得「高海拔地區未開發的風力資源」、「設備靈活性」、與其他再生能源的「互補性」等。歐洲高空風能協會預計到2050年底，AWE全球市場規模將達271 GW。其在偏遠地區、海上風能開發、與柴油發電競爭等特定場域具有相當優勢。目前，首個商用AWE系統發電成本約為每度電新臺幣7元，已具備與柴油發電市場競爭的能力。未來如成本低於「柴油甚至傳統風力」，將是該技術能否成功打入市場的關鍵因素之一。

4. 技術成熟度不斷提升，但無具規模之商轉案例：現階段AWE技術以小型系統試驗為主(100至200 kW)，未來將朝向1 MW以上大型化發展。且目前AWE技術的可靠度和性能還需要進一步大規模商轉案例驗證。唯有透過實際案例的累積，才能驗證AWE技術的可靠度，並進一步提升其性能。
5. 空域整合是AWE發展的關鍵挑戰：AWE技術的設置和營運涉及複雜的空域和地面安全問題，現行法規尚未完善。國際上，AWE產業需要與政府合作，持續制定更明確、針對AWE制定的政策支持和監管框架，如電價補貼、研發資金、安全規範和空域整合等。
6. 無人機技術發展為AWE提供借鑒與新機遇：AWE系統的自動化程度將越來越高，無人機技術的發展和相關監管經驗可以為AWE提供借鑒。此外，歐盟EASA的規範與U-Space計畫的發展為AWE技術的空域整合提供技術框架與場域機會。AWE設備可利用既有規範與U-Space提供的數據和服務，如空域資訊、飛行規劃、交通管理等，來實現安全、可靠、高效的運作。
7. 社會接受度是AWE推廣的必要條件：AWE技術相較傳統風能在視覺影響具有優勢，然公眾對AWE的瞭解還不夠，可能會對其安全

性產生疑慮。AWE產業需要加強與大眾的溝通，提高公眾對AWE的認識和接受度。

8. 環境友善是重要發展方向：AWE技術的環境影響較小，有助於減少碳排放和保護生態環境。相較於傳統風電，AWE的材料消耗量更低，其「Reduce」優勢更具環保效益。未來，AWE技術的發展將更重視環境友善，以符合全球環境保護目標。

5.2. 臺灣導入AWE初步評估

臺灣導入AWE的配套措施與挑戰，可以從國際趨勢與臺灣現況來分析。首先，目前國際AWE主要規格以100到200 kW的「地面發電-捲繩牽引-軟翼」為主，約在300到1,000公尺範圍內飛行。技術由兩大核心組成部分構成：空中飛行載具與地面設施。目前國際上法規對AWE的關注主要集中在空中飛行載具上，這是因為空中設備的運行可能會對航空交通或其他空域使用者造成潛在風險，故需專門的規範來確保其安全運行。

而國際法規方面，除參照風力或小型風力的規範納入外，目前主要爭議點係空域和地面安全問題，例如歐盟主要係以EASA與無人機或障礙物等法規作初步參照導入遵循用，目前國際上尚未有統一的AWE監管規範。

而在技術方面挑戰，AWE雖然利用高空風場的較高風速和穩定性來增加發電效率，但也可能受到其翼展大小限制，導致掃掠面積較小，而可能單位面積發電量會低於傳統風機。在可靠度方面，現有無人機技術尚未保證AWE系統長時間穩定運行，尤其在自動起降和惡劣氣候下的技術發展多數仍在研發測試階段。

AWE雖存在前述挑戰，但歐美國家已有相關政策認可AWE為其未來發展的再生能源技術之一，具有一定的環保效益和經濟潛力，例如歐盟將AWE納入未來風能重要多元綠能科

技之一。本研究初步評估，對於臺灣這樣的特殊地理與氣候條件，其靈活性、高空風速資源利用、環境友善性，以及應急供電的優勢，是有具備成為再生能源發展多元化選項之一的潛力。

首先，高空風速通常比地面穩定且強勁，使AWE系統能在相同時間內獲取更多動能。再者，臺灣地區受限於土地面積或運輸交通，傳統風電難以在某些偏遠或特殊場域（如山地或離島）設置，而AWE系統因輕量靈活的設計，或可被納入這些偏遠地區的設置考量之一，彌補交通與土地限制的不足。其三，雖然AWE單位發電量低於傳統風機，但其對環境的影響更小，且材料成本和建設資源需求較低。這與小水力的角色相似，雖發電量不大，但可作為環境友善的補充型能源。

最後，在臺灣颱風過後常面臨偏遠地區電力中斷的問題，AWE的便攜性和快速部署特性使其有機會於災後提供應急電力。這是其他傳統大型設施較難實現的優勢。AWE或可為偏鄉離島提供電力供應的選擇之一，且降低對環境的干擾，正如小水力發電作為輔助型綠能的重要角色，AWE可填補傳統風電的應用空隙，並為臺灣的能源結構增添更多彈性與永續性。

實際上，雖然AWE產業發展仍以歐洲國家最為盛行，然而臺灣目前台電與智帆風能(緯創子公司)已共同簽署「高空風能系統試驗合作備忘錄」，以台電彰濱光電場為試驗基地，進行為期2年測試。預期導入SkySails「地面發電-捲繩牽引-軟翼」設備，約200 kW¹⁵，未來視試驗成果，進一步規劃運用於離島地區。

對於我國導入AWE高空風能技術之相關法規修定方向與建議評估，首先需先確認將以國際主流的「地面發電-捲繩牽引-軟翼」的AWE

技術作導入探討，該技術利用高空(300-1,000公尺)的風力進行發電，會占用大片空域。基於此事實，AWE技術的法規討論可從「再生能源推動相關規範」與「民用航空法」角度進行分析。

5.2.1. 再生能源推動相關規範

再生能源推動相關規範部分。首先，參考德國納入做法，因AWE是利用高空風力進行發電，故其應可被包含在《再生能源發展條例》第3條與《再生能源發電設備設置管理辦法》第3條所定義之「風力發電」與「離岸風力發電」，因此在再生能源相關法規上，因AWE可以包含在條文的風力發電與離岸風力發電定義之下，從而對於AWE技術的引進，於再生能源相關基礎性規範，可能不會產生需有大規模修正之必要性。

惟目前定義再生能源設置屬定置型者才能申請再生能源發電設備之認定，雖其內涵無特定排除離岸風電或一些創新之固定設備；然仍需確認其定置型之定義或解釋，如空中載體發電類型，雖其發電裝置於高空上，但仍有繩索固定，故是否等同於浮動概念或認定為定置型，仍待確認。如有爭議，仍可按德國EEG做法，簡要納入AWE專屬定義。

若採取「離岸設置」時，AWE雖可包涵在「離岸風力發電」之概念下，但細部具體規範上就有修正之必要，因為依據《再生能源發展條例》第11條第3項所制定之《離岸風力發電示範獎勵辦法》以及《離岸風力發電規劃場址申請作業要點》於條文制定時，仍是以現行塔架、葉片、發電機所組成的風車式風力發電機，作為對於離岸風力發電的想像，以至於無法全面涵蓋到AWE。以《離岸風力發電示範

¹⁵ <https://tpcjournal.taipower.com.tw/article/6595>

獎勵辦法》而言，辦法第4條第1項對於所欲獎勵之示範機組與示範風場，其概念都是以風車式風力發電機做規範，而此部分就可能需要加入AWE之概念做修正；例如發電量、是否容許在礁島上設置地面發電設施，但空中的風箏運行於海上空域等(此部分涉及事實問題，需由AWE方面專家釐清定義)。此外，該辦法第5條第2項對於示範機組設置獎勵費用之定義(應該設備是以風車式風力發電機之設備去定義，因此在AWE地面設施與空中發電風箏與地面設施連結的電纜、於空中飛行的風扇設備可能就會無法被包含在內)。

再者，《離岸風力發電規劃場址申請作業要點》有同樣的問題，該要點第4條「單一申請案設置規劃不得小於十萬瓩，每平方公里不得小於五千瓩。」此規定對於單位面積應具備之發電量，顯然是以傳統塔架式風力發電作為規範方式，也需要配合AWE做相關修正。

此外，因AWE設備之形式，可以想像的其單一發電機所需要使用的空間(例如空域飛行面積可能達半徑800至1,000公尺)可能會大於風車式發電機，故在離岸風力發電規劃場址容量分配時，考量場址空間劃合理性，避免產生畸零地無法有效利用風力資源之情形，就此部分目前主管機關是依據《離岸風力發電規劃場址容量分配作業要點》進行處理，並據此提出《離岸風力發電區塊開發第一期容量分配方式說明》，因為AWE對空間安排之需求較現行風車式風力發電機可能較高(如空域的飛行面積)，則是否需要在容量分配作業要點中將空間分配之原則或標準明文，亦須為考量。

若採取「陸域設置」時，目前政策考量到臺灣地狹人稠，對於風力發電之推展逐漸朝向離岸風電發展，且「小型風力機發電系統示範獎勵辦法」、「風力發電示範系統設置補助辦法」等也逐步廢止，是若欲推展陸域AWE，可

能產生無參照之現行法狀態，如要推展，恐需再參照已廢止之法條，重新訂立相關規定。

5.2.2. 民用航空法

因AWE之風箏發電是於高空中運行，與風車式風力發電不同，其所使用的是立體的空域，因此此部分涉及到民用航空法之問題。如參照歐洲國家作法，對於AWE風場，應劃定禁航區，禁止其他航空器、無人機進入；或如歐洲高空風能協會所建議採用AWE專屬標示。而我國民航局也有相關禁航區地圖標示與規定，故未來或可參考。

另外，對於AWE空中風箏發電是否直接將其視為無人機，並以民用航空法關於無人機之法規範加以管制，此部分可能存有法律上概念之矛盾。因依據《民用航空法》第99條之13規定：「禁航區、限航區及航空站或飛行場四周之一定距離範圍內，禁止從事遙控無人機飛行活動」亦即無人機不得於禁航區中飛行，則如上段所述將AWE風場劃定為禁航區。而又將AWE風扇視為無人機，則在法規解釋上造成AWE風箏(無人機)不得在AWE風場(禁航區)運行之矛盾解釋。

此外，AWE為長期滯空(數天至數月)之設備，與通常遙控無人機滯空時間(數小時)有明顯差異，故對於AWE風箏設備之安全性管制，可能會與無人機管制要求有所不同，故雖可暫時適用無人機之規定，然從長遠之角度或許需考慮於民用航空法對於AWE此種長期滯空設備額外訂立，或如美國FAA作特別解釋。

6. 結論與建議

根據本研究綜合分析發現：

1. AWE國際政策與法規發展：

- 國際AWE政策發展已為多元創新綠能趨勢

之一。

- AWE現今導入法規上最主要在於空域上的規範，目前歐洲都是以在空域上視為障礙物，地面風險上視為無人機，來作規範。

2. AWE國際產業與技術發展：

- AWE技術依據發電方式可分為地面發電和空中發電兩種主要類型。地面發電又可分為「捲繩牽引發電」和「旋轉發電」兩種形式，空中發電則是以「載體轉子發電」為主。
- 主要發電容量在100-200 kW間，未來發展至1 MW；主要示範應用於離島、偏遠少人鄉區，並有部分業者嘗試布局海域發電技術。
- AWE產業主要由歐洲國家和企業主導，多數技術仍處開發試驗階段，以「地面發電-捲繩牽引-軟翼」技術發展最為成熟。
- AWE雖有首個於東非島國商轉案例，但仍未有於主流國家實際商轉實績。
- AWE優勢為高海拔風能資源開發、設備輕量化與靈活性、自動化與智能化，並主張「環境友善」，如小型風電或小水力；對於再生能源設置上屬於多元創新能源一環，雖一案設置容量無法與傳統風能相比，但因其環境友善與設置靈活性優勢，可視為與其他能源共生互補、或如地方社區不接受下之其他能源備選方案。

從歐美AWE歷史發展脈絡可見(如圖6)，產官學研界共同推動是AWE技術發展的關鍵。國際間首先從學研機構投入AWE研究開始，這些論文與期刊研究發表，催生企業或新創投入，從而逐漸形成產業並成立協會，例如歐洲高空風能協會(AWEurope)，並也舉辦例行的國際高空風能論壇(AWEC)，並也產生全球首個單點商轉案例；同時，也有如歐盟「Horizon 2020」等大規模創新研發補助計畫，提供可行

性的研究資金。

而當研究、產業與技術能量的累積，歐盟也於2023年設立「創新再生能源技術」新增設置裝置容量占整體5%的目標，並也包含AWE技術在內；此外，歐洲高空風能協會除呼籲政府重視，並提案希望將AWE單獨納入指標性的德國EEG法，並於2024年於德國世界首創納入。

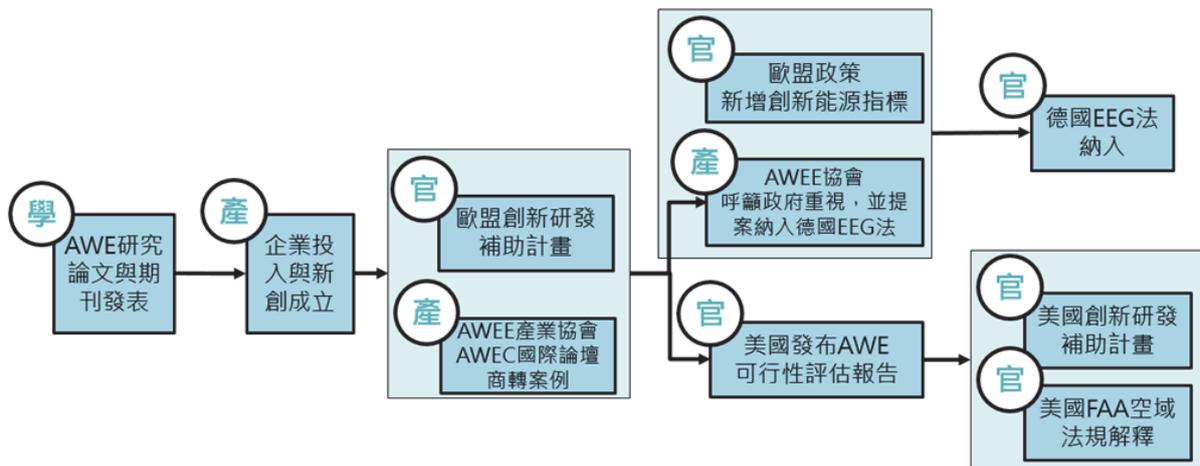
美國則於《2020能源法案》鼓勵創新與下一代技術中提及AWE，並發表《美國空中風能挑戰與機會》報告，評估美國AWE的潛力和技術可行性，並也於2022年其FAA發布有關AWE與空域規範之《AWES政策聲明》；2023年其SBIR計畫支持AWE離岸技術的可行性研究。

由此可見，產業和協會的積極參與推動政府政策的制定，例如德國將AWE納入EEG法，美國FAA頒布AWE航空政策說明。臺灣自2023年起也展開與德國SkySails的AWE示範合作項目，在我國鼓勵多元再生能源發展的政策環境下，產官學研界可參考歐美經驗(如圖6)，循序漸進建立AWE發展環境，並可先從「可行性研究」出發。

6.1. 以產業出發，加強國內AWE研究推廣

從市場與產業需求面來看，我國目前雖較少主力發展AWE之相關業者，然近年已有如智帆風能跟SkySails作合作示範案，但社會大眾對此技術認識仍有限，故於現今歐美已越發積極關注推動多元創新能源下，建議我國產官學研界可持續投入AWE相關可行性研究或研究歐美AWE產業發展，評估臺灣AWE技術的發展潛力和經濟效益。

此外，未來如示範案進行一定程度，也可進行市場調研，瞭解民間對AWE技術的接受度、需求和潛在應用領域，例如2024年國際期



資料來源：本研究整理。

圖6 歐美AWE發展脈絡圖

刊發表「既有居民如何看待AWE？德國高空風能系統和傳統風電場的社區接受度比較」，可作為參考案例，提高社會對AWE技術的認識和接受度。

6.2. 未來如導入商用AWE可思考我國現有法規之架構與可能限制：

現行我國需釐清AWE定義和適用現行法規，例如未來如欲導入，初步可能涉及「再生能源推動」與「空域」等法規層面，如《再生能源發展條例》、《再生能源發電設備設置管理辦法》、《離岸風力發電規劃場址申請作業要點》、《民用航空法》等。

另，由於我國現行主推離岸風電，考量AWE應用場景特性，未來除於離島偏鄉設置外，也可規劃往海上應用可行性作研究或示範。而於空域管制部分，因AWE的飛行設備可能涉及航空、軍事機密、禁限飛行和無線電頻率等法規。初期除參考國內規範外，也可參酌歐盟(EU)、歐洲航空安全總署(EASA)、國際民航組織(ICAO)、美國(FAA)等，其有關空域管制、無人機與障礙物之規範。逐步規範制定AWE專屬規範，確保AWE安全營運並與現有航空系統整合。

6.3. 善用現有相關補助，作可行性研究

從政策面來看，參考歐盟、德國和美國政策發展來看，皆有將AWE納入國家再生能源多元創新發展的政策之一，提供如研發補助、政策推廣、法規支持等激勵措施，鼓勵企業和研究機構參與AWE開發與應用。

而臺灣也有鼓勵創新多元能源政策，如《再生能源發展條例》第1條即指出，為推廣再生能源利用，增進能源多元化等，特制定本條例。另在實質補助上我國的SBIR及業界能專計畫皆有相關鼓勵各類前瞻創新能源之補助。

誌謝

本研究承蒙經濟部能源署113年度「再生能源發展政策研究與整合推廣計畫」支持，謹致謝忱。

參考文獻

臺灣電力公司，2023。台電電力工程月刊，第731期(2023/10/3)，<https://tpcjournals.com>。

- taipower.com.tw/article/6595.
- Airborne Wind Europe, 2023. Safe Operation and Airspace Integration of Airborne Wind Energy Systems, <https://airbornewindeurope.org/studies-papers/safe-operation-and-airspace-integration-of-airborne-wind-energy-systems/>
- BVG Associates, 2024. White Paper for the Air-borne Wind Energy Sector, <https://airbornewindeurope.org/studies-papers/white-paper-for-the-airborne-wind-energy-sector-by-bvg-associates-commissioned-by-airborne-wind-europe/>
- CE Delft, Directorate-General for Research and Innovation (European Commission), E3-Modelling, RAND Europe, 2024. Study on Clean Energy R&I Opportunities to Ensure European Energy Security, <https://airbornewindeurope.org/studies-papers/study-on-clean-energy-ri-opportunities-to-ensure-european-energy-security/>
- European Commission, 2022. Horizon 2020, <https://wayback.archive-it.org/12090/20220124080448/https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/what-horizon-2020>
- European Commission, 2022. Wind Energy in the European Union, <https://airbornewindeurope.org/studies-papers/europe-an-commission-2022-wind-energy-in-the-european-union/>
- European Commission, 2024. Horizon Europe, <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe-en>
- European Union, 2021. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/664 of 22 April 2021 on a regulatory framework for the U-Space, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0664>
- European Union Aviation Safety Agency, 2024. Open Category (Low Risk) Civil Drones, <https://www.easa.europa.eu/en/domains/drones-air-mobility/operating-drone/open-category-low-risk-civil-drones>
- Federal Aviation Administration, 2022. Airborne Wind Energy Systems (AWES) Policy Statement, <https://www.federalregister.gov/documents/2022/12/23/2022-27993/airborne-wind-energy-systems-awes-policy-statement#footnote-5-p78850>
- Helena Schmidt, Valentin Leschinger, Florian J.Y. Müller, Gerdien de Vries, Reint Jan Renes, Roland Schmehl, Gundula Hübner, 2024. How do residents perceive energy-producing kites? Comparing the community acceptance of an airborne wind energy system and a wind farm in Germany, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629624000380?via%3Dihub>
- Kitepower, 2024. Products page, <https://thekitepower.com/products/>
- Loyd, M.L., 1980. Crosswind Kite Power, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369886901000027>
- U.S. Department of Energy, 2021. Report to Congress: Challenges and Opportunities for Air-borne Wind Energy in the United States, <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-12/report-to-congress-challenges-opportunities-airborne-wind-energy-united-states.pdf>
- U.S. Department of Energy, 2024. WETO Selects

15 Small Businesses to Bring Wind Energy to New Heights, <https://www.energy.gov/eere/wind/articles/weto-selects-15-small-businesses-bring-wind-energy-new-heights>

U.S. House of Representatives, 2020. Energy Act of 2020, <https://science.house.gov/2020/12/energy-act-of-2020-opportunities-airborne-wind-energy-united-states.pdf>

Trends of International Airborne Wind Energy Developments and Challenges of Its Implementation in Taiwan

Yen-Hsi Wang^{1*}

ABSTRACT

As the world moves toward the goals of net-zero carbon emissions and 100% renewable energy, Airborne Wind Energy (AWE) has emerged as an innovative renewable energy technology attracting increasing attention. Taiwan's policies encourage the diversified development of renewable energy; however, research on AWE in Chinese literature remains limited. Therefore, this study explores international policies and industry trends related to AWE and examines the early-stage implementation approaches adopted by various countries. Additionally, it provides a preliminary assessment of the feasibility of implementing AWE in Taiwan and the potential challenges that may arise, offering insights into the latest developments of this technology.

The study finds that many countries in Europe and the United States have recognized AWE as a green energy technology and are gradually promoting its development. For instance, the European Union has included AWE in its innovation targets for renewable energy, considering it a key technology for the future of wind power. Germany has incorporated AWE into its Renewable Energy Sources Act, and the United States offers policy and R&D support. From the perspective of international AWE industry and application development, the technology is still largely in the demonstration phase, with the "tether-gen" method for ground-based generation technology being the most mature. AWE offers advantages such as utilizing high-altitude wind resources, lightweight equipment, and environmental friendliness, making it particularly suitable for remote and island regions. However, AWE development faces challenges related to airspace integration, technological maturity, and social acceptance. In particular, the lack of a comprehensive regulatory framework for airspace is a significant barrier to the commercialization of the technology. Consequently, many countries are strengthening public-private partnerships, developing clear policy and regulatory frameworks, and enhancing public communication to increase awareness of the technology and reduce investor concerns.

For Taiwan, this study suggests learning from the experiences of Europe and the United States by initiating feasibility studies, gradually increasing research investment, and building confidence among developers and investors. It is also recommended to refer to international definitions and clarify the application of current regulations. As the industry matures, Taiwan can then establish specific standards to ensure the safe operation of AWE technology.

Keywords: Airborne Wind Energy (AWE), innovative energy, prospective energy.

¹ Associate Researcher, Green Energy & Environment Research Laboratories (GEL) ITRI.

*Corresponding Author, Phone: +886-(0)2-8772-9197#643, E-mail: ian.wang@itri.org.tw

Received Date: August 23, 2024

Revised Date: November 15, 2024

Accepted Date: November 19, 2024