

# 能源科技發展趨勢觀察

撰稿：古慧雯

2025/06/12

## 一、前言

根據國際能源總署(International Energy Agency, IEA)於 2024 年「世界能源展望」(World Energy Outlook 2024)中的分析，全球對電力的需求持續攀升，2035 年預估用電量較 2023 年預測值增加 6%，相當於新增約 2,200 太瓦時 (TWh)<sup>1</sup>，這一增幅主要受惠於電動化與數位化趨勢所驅動，但也對再生能源佔比提升與碳排放削減目標形成更大挑戰。同時，俄烏戰爭、以巴衝突以及中美關係的變化，使全球地緣政治風險升高，衝擊能源市場穩定，並使能源自主與技術主權成為各國能源政策的重要戰略。

在此背景下，重塑全球能源科技供應鏈與強化戰略部署已成為國際趨勢。美國與歐盟積極推動關鍵礦物與能源技術的在地生產，分散供應風險，同時深化與盟國之間的能源外交與綠色技術合作。新興經濟體亦投入於能源科技轉型，強化本土製造能力與技術轉移機制，以確保經濟發展與能源安全並進。潔淨能源供應鏈過度集中於少數地區的現象亦備受關注，特別是在電動車與儲能需求快速成長的推動下，全球對鋰、鈷、鎳與稀土等關鍵礦物的依賴日益擴大。然而，這些礦物資源主要掌握在少數國家與企業手中（如全球七成以上鈷來自剛果、稀土主要由中國供應），引發地緣政治、勞動權益與環境永續等多重風險。為降低此類風險並保障能源轉型的穩定性，各國政府與企業加速推動技術創新，涵蓋替代材料研發、循環回收技術、利用人工智慧加速地質勘探與供應鏈數位透明化等面向，藉此提升關鍵礦物的可持續性與供應韌性。

另一方面，人工智慧(AI)技術的迅速發展亦成為能源科技轉型的關鍵推力。AI 已廣泛應用於電網調度、風光發電預測、儲能管理與電池健康監測等領域，不僅提升再生能源整合效率，也有效降低系統營運成本。例如，AI 驅動的智慧電網可即時調整負載與儲能配置，支撐高度間歇性的風能與太陽能發電。同時，AI 也促進能源材料與設備元件的模擬與快速研發，大幅縮短創新週期。不過，AI 深度介入能源基礎設施後，也引發資安、演算法偏誤與決策透明度等治理議題，成為政策制定的重要挑戰。2024 年，各國已積極行動。例如英國在 3 月宣布投入 173 萬英鎊用於 AI 驅動的綠色轉型項目，以加速淨零碳排放目標的實現；美國能源部則於 4 月發布「AI 與能源：建構現代電網與清潔能源經濟的機會」(AI and Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy)，強調以

<sup>1</sup> IEA (2024). World Energy Outlook 2024.

<https://outlook.stpi.narl.org.tw/index/tdop/4b11410092766a36019293dbc2ab4667>

AI 提升能源安全並應對氣候危機；而在 6 月舉行的第 28 屆聯合國氣候變遷大會（COP28）中，大會主席也呼籲全球攜手推動 AI 於能源轉型的應用，以加速全球氣候行動。

經觀察，自 2024 年起，全球能源科技的發展受到人工智慧的廣泛應用、永續價值觀的強化，以及地緣政治帶來的供應鏈壓力的影響，促進全球能源技術重塑創新路徑，也使各國政策架構與國際合作模式持續調整與演進。而 2025 年 IEA 發布「能源創新現狀」（The State of Energy Innovation）報告，指出加速淨零轉型的關鍵領域，包含電池與關鍵礦物供應的多樣化、人工智慧於能源領域的深度應用，以及碳移除技術（Carbon Dioxide Removal, CDR）的發展與落地。這三大方向也預期將成為 G7、G20 及「使命創新」（Mission Innovation）等 2025 年多邊高層論壇的主要議題。

## 二、能源科技政策動態

各國政策在電力、交通、建築與工業部門的能源轉型中發揮了主導作用。以下簡述各國近兩年的主要政策動態。

### （一）美國

2024 年，美國太陽能與風電首次超越燃煤，合計占全國發電 18%；受 AI 資料中心與半導體產業帶動，全國用電量也出現近 20 年來首次顯著成長（+2%）。美國電池儲能市場快速擴張，2030 年新增容量可望突破 70 GW。2024 年 4 月美國能源部發布了「AI and Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy」，利用人工智慧強化美國能源和國家安全，並協助應對氣候危機。此外，確定了人工智慧在電網管理的四個關鍵領域（電網規劃、核可和選址、營運、調度韌性），以及交通、建築、工業和農業的解決方案。

然而，2024 年底川普總統重新執政後，美國能源政策出現重大轉向。根據 Frost & Sullivan 報告<sup>2</sup>，政府於 2025 年初宣布「國家能源緊急狀態」，加速石油與天然氣開發，並終止多項再生能源補貼與審查，強調「能源主權」與去全球化，力求減少對外依賴。儘管川普政府重新審視「降低通膨法案」（IRA）中的稅務補助機制，但市場與地方政府仍持續推動多項能源創新技術穩健發展。

例如，許多州政府，尤其是加州、德州與紐約，仍積極透過地方性激勵措施與社區能源專案推動太陽能裝置的普及。同時，企業投資亦未減速，2024 年全國新增太陽能容量達歷史新高的 49 GW。美國能源部（DOE）於 2024 年啟

<sup>2</sup> Frost & Sullivan (2025.05.28), Impact of President Trump's Administration on the Energy Industry, United States, 2024–2030.

動多項支持先進電池研發的計畫，包括對固態電池與高密度儲能材料的創新投入，同時強化回收體系與供應鏈在地化。此外，美國中西部與墨西哥灣沿岸地區已逐步建立二氧化碳輸送與封存基礎設施，形成新興的「碳管理樞紐」，並持續透過碳管理辦公室（Carbon Management Office）推動示範專案與長期技術研發。

## (二) 歐盟

歐盟發布的「電池與廢電池法規」(Regulation (EU) 2023/1542) 自 2024 年 2 月起開始生效。法規旨在統一歐盟成員國對電池全生命週期的管理，涵蓋設計、生產、使用、回收與再利用等各個階段，強化電池產業的永續性與供應鏈責任。例如要求電池商披露碳足跡資訊跟達成再生材料最低含量、識別供應鏈風險、自 2026 年起需具備數位電池護照、2027 年起電池需易拆卸和更換設計、設定明確回收目標、生產者延伸責任。同時，這也為全球電池產業樹立了新的標準，預計將引領其他地區制定類似的法規，以推動全球電池市場的持續發展。

此外，歐盟為擴大發展產業碳管理技術，於 2024 年提出「產業碳管理策略」(Industrial Carbon Management Strategy)，制定一個共通且全面的政策與投資框架。策略包含碳捕獲與封存(Carbon Capture and Storage, CCS)、碳移除(Carbon Dioxide Removal, CDR)、碳捕獲與利用(Carbon Capture and Utilization, CCU)三大技術路徑，以及碳運輸相關基礎設施，並擬定 2030 年、2040 年及 2040 年以後的三個階段目標，制定共通的政策及監管框架，以激勵碳捕獲、封存、利用和碳移除技術方面的投資。另一方面，加強投資人才培訓與研發創新、引入可降低風險的金融工具，並建立知識共享平台，分享捕獲技術、運輸和儲存基礎設施、儲存地點、監管及標準要求、財政優惠措施等資訊，以促進利害關係人共同努力實現 2040 年及 2050 年氣候目標。

歐盟於 2025 年 2 月推出「潔淨工業協議 (Clean Industrial Deal)」<sup>3</sup>，作為回應能源價格上升與氣候危機的整體行動計畫。協議旨在協助歐洲工業加速脫碳、降低成本，並提升在全球潔淨技術領域的競爭力。該協議聚焦七大方向：降低能源費用、推動潔淨產品採購、投入超過 1,000 億歐元支持潔淨製造、強化關鍵原料取得與循環利用、建立國際潔淨貿易夥伴關係、培育綠色轉型人才，以及簡化法規並加強政策協調。協議強化對潔淨產品的市場需求，鼓勵公共與私人採購納入「永續性」、「歐洲製造」與「供應韌性」等標準。整體而言，此協議標誌歐盟將能源轉型與產業政策整合為一體，推動潔淨工業成為歐洲經濟未來的核心驅動力。

<sup>3</sup> 科技發展觀測平台(2025.03.17)，潔淨工業協議：歐盟競爭力與脫碳計畫，<https://outlook.stpi.niar.org.tw/index/news/4b1141009536e1df0195650b508408f0>

### (三) 日本

面對國際能源安全與地緣政治風險升高、國際綠色產業競爭與碳關稅制度（如 CBAM）的壓力，以及國內產業結構轉型的需求，日本能源政策出現顯著轉變。日本預估至 2040 年，隨著半導體工廠與數據中心等高耗能產業的快速發展，國內電力需求將較目前增加 1.2 倍。因此，日本於 2025 年 2 月正式通過「第七次能源基本計畫」與「GX 2040 願景」<sup>4</sup>，大幅調整能源政策方向，以因應對電力需求增加、能源安全挑戰及國際減碳承諾，推動能源結構轉型與產業升級。

「第七次能源基本計畫」<sup>5</sup>是日本能源政策的中長期方針，計畫明定擴大應用再生能源與核能等零碳電力，目標至 2040 年再生能源佔比達 40%至 50%，將能源自給率提升至 30%至 40%。日本將積極推動鈣鈦礦太陽能電池的商業化、制定氫能與 CCUS 技術的中長期策略，並導入數位技術開發創新的節能方案，以應對可再生能源比例上升所帶來的間歇性挑戰。

「GX 2040 願景」是日本考量在數位發展下電力需求的持續增加，提出未來脫碳和產業政策方向的長期願景。內容涵蓋能源供應多元化、零碳電力投資、氫氣供應保障、輸電網強化、碳定價機制建立等措施，旨在推動產業結構轉型，提升供應鏈韌性，並創造高品質就業機會。策略支持以去碳化能源與數位轉型（DX）為基礎的新興產業聚落，特別是半導體與電池等領域，透過稅收優惠與電價補貼等措施，促進企業進駐於近海風電場或核電廠等低碳能源樞紐附近，實現能源效率與產業競爭力的結合。

### 三、關鍵科技主題與趨勢

在全球邁向淨零碳排的戰略目標下，能源科技的發展正處於全面重組階段。從 2024 至 2025 年間的創新技術觀察中可以清楚看出，太陽能、鋰離子電池與碳捕獲、利用與封存（Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS）三大領域，已成為能源轉型的核心支柱。

以下將簡述三大關鍵科技主題在 2024 年至 2025 年間的創新案例，透過具體創新案例分析全球能源技術的發展趨勢。

<sup>4</sup> 日本經濟產業省(2025.02.18)，GX 2040 願景，  
<https://www.meti.go.jp/press/2024/02/20250218004/20250218004-1.pdf>

<sup>5</sup> 日本經濟產業省(2025.02.18)，第七次能源基本計畫，  
[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20250218\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20250218_01.pdf)

## (一) 太陽能

### 1. 技術趨勢：

太陽能為再生能源發展的核心技術之一，亦是全球實現淨零目標的關鍵。根據「IEA PVPS Country Updates 2024」<sup>6</sup>分析顯示，各國正在更新其太陽能政策(如表一)，加速太陽能部署。為因應國際地緣政治風險，各國除強化國內供應鏈，亦積極推動PV價值鏈的研發和示範活動，從基礎材料(如鈣鈦礦、碲化鎘電池)到系統整合、數位化解決方案(運維、電網管理)、循環經濟(回收)以及新應用。

此外，太陽能應用亦面臨電網擁塞、社會接受度、環評趨嚴等挑戰，因此，逐漸朝向浮動式太陽能發電或是具備雙重用途的領域發展。例如，義大利、法國、韓國透過立法及招標條件來規範光電農業用地的取得，以避免農業太陽能光電系統(Agrivoltaics)對農業用地的競爭，日本與德國也都訂定農用光電的規範。而臨海國家如荷蘭、日本、中國等，則是在水域架設浮動式太陽能(Floating Photovoltaics, FPV)，避開土地競爭議題。建築整合太陽能(Building-Integrated Photovoltaics, BIPV)受惠於去碳壓力及鈣鈦礦新興技術的興起，在土地受限區域蓬勃發展。

表一、主要國家 2024 年至 2025 年太陽能發展動態

國家	主要太陽能政策	研發示範現況
中國	<ul style="list-style-type: none"> <li>通過《中華人民共和國能源法》，強化再生能源開發利用的優先地位。</li> <li>推出《2024-2025年節能減碳行動計畫》，加速建設大型太陽能基地與推動分散式能源發展。</li> <li>發布《光伏製造業規範(2024)》，規範生產佈局、資源利用、智慧製造與環保要求等。</li> <li>2027年初步建立碳足跡管理體系，目標2030年建構完善管理體系。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>在穿隧型異質接面TOPCon、背接觸和串聯太陽能的電池效率方面都創下了新紀錄，其中鈣鈦礦串聯式電池效率達34.6%。</li> <li>首座1MW鈣鈦礦示範電廠於2023年底投入營運。</li> <li>展開首座海上抗浪浮動式太陽能平台海洋環境測試。</li> </ul>
歐盟	<ul style="list-style-type: none"> <li>修訂《可再生能源指令》(EU/2023/2413)，簡化許可流程，要求成員國劃定再生能源快速發展區域。</li> <li>《建築能源效率指令》修訂版開始生效，要求新建建築安裝太陽能。</li> <li>《歐洲太陽能憲章》及《淨零產業法》(NZIA)推動太陽能供應鏈本地製造，目標2030年前境內產能達到需求的40%。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Horizon Europe 計畫投入5,700萬歐元，推動製造設備創新、低功率應用、車載太陽能應用、社區整合太陽能系統及優化環境足跡等。</li> <li>建立產官學研夥伴關係，整合資源共同規劃太陽能發展策略。</li> </ul>
日本	<ul style="list-style-type: none"> <li>通過《第七次能源基本計畫》與《GX 2040願景》，目標2040年再生能源占比達40%至50%，其中太陽能占23%至29%。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>由NEDO主導多項次世代太陽能開發計畫，如超輕量薄膜太陽能、壁掛式太陽能系統、移動式應用及多結太陽能技術。</li> <li>積極開展零耗能建築、農電共生、浮動式太陽能等應用示範。</li> </ul>
南韓	<ul style="list-style-type: none"> <li>公布《第11次電力供需基本計畫》，目標到2030年累計裝機達55.7 GW。</li> <li>強化國內再生能源產業，支持國產太陽能零組件</li> <li>加強地方政府參與，以促進太陽能多元應用模式(如農業光電、浮動式和建築整合系統)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全球首個自主開發的大面積串聯太陽能轉換效率達28.6%，並獲得第三方認證。</li> <li>成立先進太陽能技術中心(CAST)，以協助產業預生產技術驗證，並研發次世代串聯電池、組件和測量技術。</li> <li>研究聚焦於超高效率太陽能電池的開發、太陽能光電系統的多元應用以及回收再利用技術。</li> </ul>

<sup>6</sup> IEA PVPS, Country updates 2024. <https://iea-pvps.org/annual-reports/annual-report-2024-country-updates/>

資料來源：IEA PVPS，科技發展觀測平台整理

## 2. 創新案例：

### (1) 整合人工智慧的端到端自動化建置技術

開發單位/廠商：美國 Terabase Energy

為解決大型太陽能電廠普遍面臨的勞動力短缺、施工進度緩慢與人工安裝誤差等問題，美國 Terabase Energy 結合自動化、人工智慧（AI）與數位孿生（Digital Twin）技術，開發從場址規劃、工廠預製模組、AI 控制安裝到遠端管理平台的端對端自動化系統，降低成本與大規模部署速度。該公司研發的 Terafab 模組化太陽能建置系統，能在類似工廠的可控環境中，透過機械臂、傳送系統與自動吊掛裝置，迅速完成太陽能模組與追日系統的組裝，大幅提升施工效率與精準度。其數位孿生（Digital Twin）技術能虛擬化整體建設流程，提供即時監控、預測分析與遠端調控功能；AI 演算法則應用於場址設計、能源產能預估與供應鏈最佳化，進一步強化整體系統效能。此技術特別適合用於 GW 規模的大型太陽能案場，具高度擴展性與成本效益，有效降低施工成本、勞動力支出和材料浪費。

然而，該技術仍面臨初期資本成本高、難以應用於小型分散式太陽能系統、高度仰賴自動化設備與 AI 硬體設備，以及傳統產業對技術轉型的抗拒等挑戰。目前，Terabase 已成功部署於 40MW 太陽能案場驗證其技術效能，並計畫未來擴大 Terafab 系統的製造規模與技術升級，以因應資料中心快速成長及新興儲能市場的需求。

### (2) 智慧型動態追日系統

開發單位/廠商：法國 Engie

為解決太陽能間歇性發電、大量土地需求、發電效率不佳、電網整合等問題，法國能源公司 Engie 結合人工智慧（AI）與物聯網（IoT）技術，開發高效率的太陽能追日系統。該系統可採用單軸或雙軸追日結構，並導入人工智慧演算法與智慧逆變器模組，能即時調整太陽能板角度以追蹤太陽軌跡。系統亦整合 IoT 感測與氣候預測功能，可依據氣候條件動態優化營運策略，提升能源穩定性與併網效率。相較於傳統固定傾斜系統，最高可以提升 20% 至 40% 的發電效益。此外，該系統具備耐候設計，能承受每小時 150 公里的風速，並在極端氣候下自動收起面板，有效降低設備損壞風險。目前 Engie 已實現此技術的大規模商業化應用，例如智利一座 100MW 太陽能案場即導入該系統，每年可供電達 2.5 億度，顯示其經濟與環境效益。

然而，此技術仍面臨初期建置成本較高、維護需求提升，以及在低日照或多雲地區效益受限等挑戰。此外，隨著雙面模組與新型太陽能材料的快速發

展，未來仍需持續技術創新與成本優化，以維持市場競爭力。Engie 預計在 2030 年前擴大再生能源部署，並結合浮動式太陽能與智慧電網應用，加速實現能源轉型與碳中和目標。

### (3) 360 度波束控制的太空太陽能傳輸技術

開發單位/廠商：英國 SpaceSolar

為解決傳統再生能源易受間歇性氣候影響與土地資源限制等問題，英國新創公司 SpaceSolar 推動太空太陽能發電（Space-Based Solar Power, SBSP）技術，可直接從太空收集太陽能並以無線方式傳輸到地球，提供持續且穩定的電力來源。其核心技術為 CASSIOPEIA（Constant Aperture, Solid-State, Integrated, Orbital Phased Array）系統，結合高效率太陽能電池與微波傳輸技術，在太空中持續收集太陽能，並透過相位陣列天線（Phased array antenna）將能量以微波形式無線傳送至地球的地面接收站，再轉為電力輸入電網。該系統採用模組化固態結構設計，無需傳統複雜的機械旋轉零組件，可降低維修成本並提高效率。並具備創新的 360 度波束控制（beam-steering）功能，可支援不同軌道部署與多點傳輸需求，提升系統靈活性與全球佈建彈性。此技術具有未來作為穩定基載電力的潛力，尤其適用於偏遠地區與碳中和工業應用。

目前該技術已完成小型原型機測試，但整體技術仍處於開發初期階段，面臨高昂建置成本、太空發射與維運風險，以及微波傳輸的安全性與國際法規限制等挑戰。未來將進一步擴大商業規模，目標於 2030 年前建構首座 30MW 的太空發電站，實現軌道部署與地面輸電。<sup>7</sup>

### (4) 以奈米碳管提升鈣鈦礦太陽能電池性能

開發單位/廠商：日本 名古屋大學（Nagoya University）

鈣鈦礦太陽能電池（Perovskite Solar Cell, PSC）雖具有高轉換效率與低製造成本等優勢，但性能容易受濕氣、氧氣、紫外線輻射和高溫影響而下降。因此，日本名古屋大學開發創新的電極整合製程，將單壁奈米碳管（Single-Walled Carbon Nanotube, SWCNT）導入鈣鈦礦太陽能電池中作為導電材料，以提升 PSC 的穩定性與效率。研究顯示，即使在 80°C 高溫與高濕環境中運作 500 小時，仍能保有超過 80% 的效率，而最高功率轉換效率可達 25%。SWCNT 具備高導電性、高透光率與優異的機械韌性，能有效降低界面阻抗，強化電子傳輸效率，可擴展至柔性應用，如穿戴式裝置。

然而，該技術目前仍處於實驗室階段，雖已展現出穩定性與效率兼具的潛力，但鈣鈦礦材料中所含的鉛具有潛在環境風險，可能導致封裝與回收成本的

<sup>7</sup> SpaceSolar 官網。From: <https://www.spacesolar.co.uk/space-solar-study-advances-commercial-space-based-solar-power/>.

增加。未來，除了需進一步擴大試點示範外，也有賴與商業化策略夥伴建立合作關係，以加速技術成熟與推廣。同時，開發無鉛替代材料亦將是降低環境衝擊、實現永續應用的關鍵方向。

### (5) 低碳可回收的碲化鎘薄膜技術

開發單位/廠商：美國 First Solar

美國太陽能製造商 First Solar 開發和應用碲化鎘（Cadmium Telluride, CdTe）薄膜太陽能電池材料。較傳統矽晶太陽能，CdTe 具有更高的光吸收效率、製程能耗更低與環境適應力強等優勢，能在高溫與低照度環境下維持穩定發電。其模組效率已達 18.2%，目標於 2025 年提升至 25%，至 2030 年達 28%。此外，CdTe 碳足跡僅 15.83 gCO<sub>2</sub>eq/kWh，水資源消耗為 800 L/MWh，碳足跡及水足跡皆遠低於矽晶太陽能約 4 倍<sup>8</sup>，且材料回收率超過 90%，有效降低資源浪費與廢棄物產生。該技術已廣泛應用於公用規模太陽能案場與偏遠地區的能源基礎建設，具備大規模部署能力，全球累積裝置容量超過 177 GW，為極端氣候區域與新興市場提供穩定電力來源。模組製造成本已降至 0.40 美元/W 以下，預計於 2025 年降至 0.30 美元，進一步提升市場競爭力。

然而，CdTe 技術仍仰賴鎘與碲等稀有材料，面臨原料供應與地緣政治風險；同時，在矽晶與鈣鈦礦等新興太陽能技術的快速發展下，也對其市場占有率構成挑戰。未來，First Solar 將進一步聚焦於效率提升、材料回收技術創新與拓展分散式應用場域。

### (6) 熱機濕法三合一太陽能板回收技術

開發單位/廠商：義大利 9Tech

全球光電模組逐漸進入退役高峰，傳統掩埋或低效率的回收方式，不僅造成資源浪費，也可能長期影響環境。義大利新創公司 9Tech 開發出一項結合熱處理、機械分離與濕法冶金的創新三階段回收技術（thermo-mechanical-hydrometallurgical process）。該技術能有效回收退役光電板中的高價值材料，如矽、銀與銅，且過程中不產生有害物質，具備高度環保與經濟效益。該流程首先透過高溫熱處理分解聚合物封裝材料和背板，再以機械方式分離玻璃與導線，最後進行濕法冶金以提取金屬。相較於傳統僅能回收鋁框與玻璃的方式，9Tech 的技術擴大了材料回收的種類與價值，提升整體資源再利用率與回收純度。

目前，該公司已申請 7 項國際專利，並規劃於義大利建置首座日處理 700 片模組的產線，作為擴大全球市場的試點。然而，這項技術仍面臨如熱處理過程中的能源消耗、回收材料價格波動導致經濟效益不穩，以及材料污染與降解

<sup>8</sup> First Solar 官網。From: <https://www.firstsolar.com/en/Technology/CadTel>.

所帶來的處理挑戰。未來，9Tech 將持續優化技術流程，並積極布局歐洲與其他新興市場。

### (7) 荷蘭農業太陽能示範計畫

開發單位/廠商：荷蘭 Symbizon

荷蘭 Symbizon 能源生產和永續農業計畫採用單軸追日系統（single-axis trackers）與雙面發電的太陽能模組（bifacial PV），提高發電效率。垂直的太陽能板的土地遮蔽率僅 10%，可降低對農作物的影響。此外，該計畫透過輪種馬鈴薯、甜菜、燕麥、芹菜等作物，並採用 9 公尺與 15 公尺兩種行間距，測試不同作物對部分遮蔽環境的適應性與評估不同間距對農業與能源生產的影響。該計畫的發電系統於 2024 年併入電網，並監測土壤與氣溫變化對農作物生長的影響，及優化太陽能板排列方式。整個研究過程採用有機農業模式，不使用任何化學農藥或肥料，並在太陽能板下方種植生物多樣性綠帶（biodiversity strips），以探討糧食生產、能源生產和生物多樣性之間的共生關係<sup>9</sup>。

### (8) 浮動式混合再生能源

開發單位/廠商：挪威 Ocean Sun

挪威新創公司 Ocean Sun 開發創新的浮動式太陽能技術，突破傳統浮筒支撐架構，採用彈性薄膜作為漂浮平台，讓太陽能模組可直接鋪設於水面薄膜上，降低結構材料使用與安裝成本。此設計透過水體自然冷卻模組，能有效降低運作溫度，提升發電效率最高可達 10%。系統採中央浮體支撐與周邊繫繩固定的方式，整體輕量且環境干擾小，具備良好的視覺整合性與生態友善性，特別適用於內陸湖泊、水庫與沿海等水域。技術優勢包含模組散熱佳、安裝簡便、成本競爭力高，並已於中國山東建置 0.5MW 實證案場，顯示具備跨國市場應用潛力。然而，該技術仍面臨若干挑戰，包括浮體材料的耐候性與抗紫外線能力尚須長期驗證，在極端氣候下的結構穩定性仍需強化，且大規模應用下模組維護與替換機制仍有待優化。同時，不同國家的水權、環評與併網規範也將影響部署進度。未來，Ocean Sun 將持續投入材料研發與系統優化，拓展亞洲、歐洲等沿海與內水市場，為浮動式太陽能提供更具彈性與永續的發展解方。

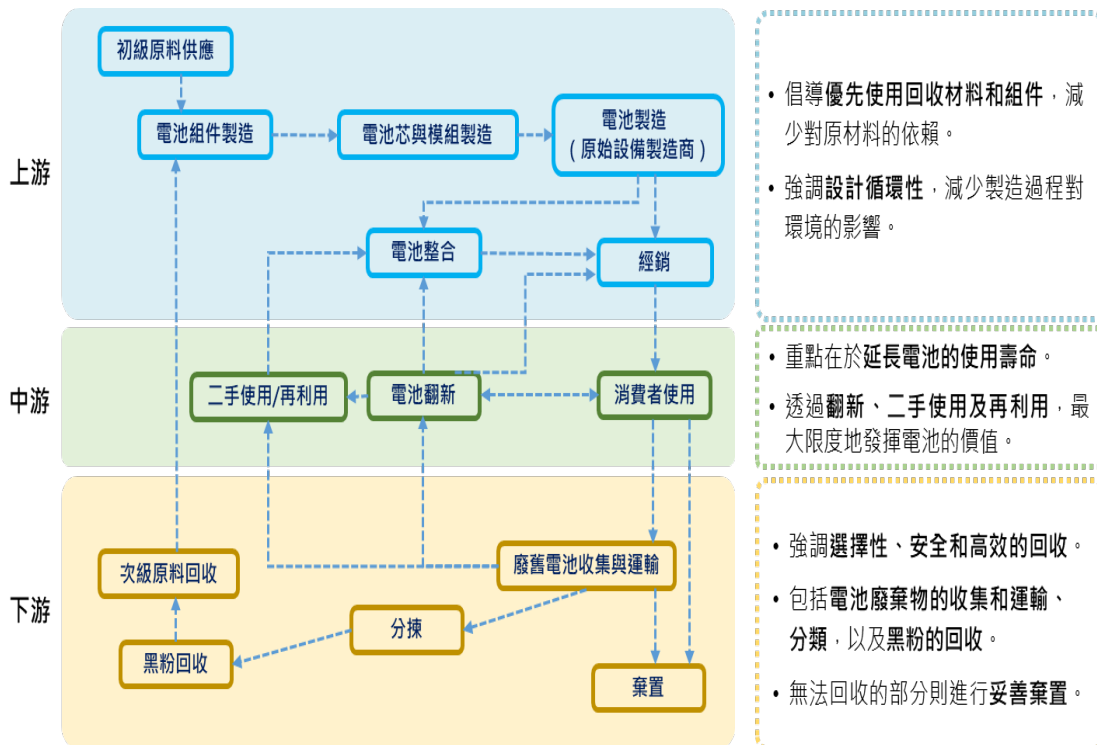
<sup>9</sup> HEMUS. From: <https://hemus.nu/project/symbizon/>

## (二) 鋰離子電池

### 1. 技術趨勢：

隨著全球能源轉型加速，鋰離子電池在電動車、儲能系統等領域的需求快速成長，世界經濟論壇 World Economic Forum (WEF)指出電池關鍵的原料-鋰、鎳與鈷礦的年需求量，在 2035 年預計分別達 90.9 萬噸、259 萬噸和 24.7 萬噸，但根據現有及已規劃開採的數量，在淨零情境下，僅可滿足 2035 年需求量的 39%、69 %及 62 %。除了天然礦產開採的限制以外，未來倍增的報廢電池也將嚴重影響環境。IEA 預測 2030 年 EVB 報廢量將達到 1,85 萬噸，2040 年將增至 20,50 萬噸。根據 McKinsey & Company 的數據，2040 年報廢電池中，94% 將來自產品壽命結束(End-of-life, EOL)，而非生產廢料。如圖一所示，電池價值鏈包含多項具潛力的循環經濟機會，未來，電池的循環利用將成為最佳解決方案之一。

然而，大量的鋰離子電池也帶來安全風險增加與廢棄電池衍生的環境與資源挑戰。為提升鋰電池的安全性與永續性，全球各國研發單位與新創企業積極投入材料創新與回收技術開發，針對電池熱失控、易燃風險、回收效率低落與製程高耗能等問題，提出多元解決方案。



圖一、電池價值鏈的循環經濟機會

資料來源：Frost & Sullivan，科技發展觀測平台整理

## 2. 創新案例：

### (1) 導入物聯網監控與模組化設計的鋰電池系統

開發單位/廠商：加拿大 UgoWork

為解決傳統鉛酸電池的效率較低的問題，加拿大能源服務公司 UgoWork 整合物聯網 (IoT) 監控、模組化設計及可回收功能，開發創新鋰離子電池系統。該技術可在 30 分鐘內充電至 80%，大幅縮短停機時間，提升整體營運效率，同時具備高度可回收性。UgoWork 採用能源即服務 (Energy-as-a-Service) 的經營模式，並導入即時車隊監控功能，協助企業優化能源管理與營運效率。該公司預計於 2026 年前結合先進的 AI 及 IoT 技術，聚焦於車隊電氣化和能源效率提升。然而，鋰電池仍面臨如熱失控 (thermal runaway)、火災風險及原料開採對環境的潛在衝擊等挑戰，需透過設計與管理機制持續加以改善。

### (2) 以液化氣電解質降低易燃風險與提升低溫性能

開發單位/廠商：美國 South 8 Technologies

美國 South 8 Technologies 開發出液化氣電解質 (LiGas®) 技術，有效解決鋰離子電池熱失控風險、低溫效能不佳及高成本問題。該技術能讓電池在  $-60^{\circ}\text{C}$  至  $+60^{\circ}\text{C}$  的溫度範圍內安全運行，並在低溫下維持電池性能 ( $-20^{\circ}\text{C}$  下保有 96% 能量， $-40^{\circ}\text{C}$  下保有 87% 能量)。當電池破損時，電解質以氣態形式安全釋放，降低易燃風險。此外，液化氣電解質也相容於無鈷的陰極材料，降低成本與環境爭議，並可沿用現有電池製程，具備商業化潛力。截至 2025 年，South 8 Technologies 已申請 36 項專利。然而，該技術之電解質需加壓保持液態，對製造與封裝有較高要求，仍需進一步優化技術與擴大量產規模加速商業化發展。

### (3) 採用矽基固態電解質強化電池熱穩定性與能量密度

開發單位/廠商：美國 Blue Current Inc.

為解決傳統鋰離子電池液態電解質的熱失控風險及能量密度限制等問題，美國 Blue Current Inc. 開發出創新的矽基固態電池技術。其電池採用高矽陽極與複合式固態電解質，不含液態成分，可在低壓 (約 1 MPa) 下運作，通過釘刺與過充測試，具極高安全性與熱穩定性，能量密度目標可達 900 Wh/L。該設計同時相容於現有鋰離子電池生產線，具擴產與成本優勢。該公司已取得 78 項專利，包含複合式固態電解質、矽陽極和低壓製程。然而，儘管該技術具發展潛力，仍面臨固態電池在低溫下性能下降、固態電解質脆性高、表面阻抗及成本過高等挑戰，需進一步擴大試驗與示範應用規模。

### (4) 應用低排放濕法冶金技術提升回收效率

開發單位/廠商：巴西 維索薩聯邦大學 (Universidade Federal de Viçosa, UFV)

隨著電動車與儲能市場快速成長，廢棄鋰離子電池數量激增，若未妥善處理，將造成有害物質外洩與資源浪費。巴西維索薩聯邦大學 (UFV) 開發出一種低排放濕法冶金 (hydrometallurgical) 技術，可有效回收鋰離子電池中的有價金屬和材料。該回收流程包含預處理 (機械分離)、金屬萃取 (濕法浸出與選擇性沉澱)、純化和精煉 (電化學回收與熱處理)，最後將回收材料再利用於新電池生產。創新技術的材料回收率超過 90%，並可較傳統火法冶金

(Pyrometallurgy) 的回收技術降低 40% 能耗、減少 80% 溫室氣體排放。然而，該技術尚處於實驗室試驗階段，仍須進一步大規模示範與驗證其經濟可行性。

### (5) 利用超音波乳化技術分離與回收高純度材料

開發單位/廠商：英國 萊斯特大學 (University of Leicester)

傳統鋰電池回收方法 (如火法冶金和濕法冶金) 需消耗大量能源，產生高碳排放，且常用強酸等有害化學品，會破壞電池中有價值的金屬氧化物結構，降低回收材料的再利用價值。英國萊斯特大學開發出創新的鋰電池回收技術，透過油包水超音波奈米乳化技術 (ultrasonic oil-in-water nano-emulsion technique) 實現高效、低能耗的電池材料分離與回收。利用超音波產生奈米級油滴吸附石墨，同時分離鋰金屬氧化物，無需使用強酸或高溫，僅以簡單過濾方式完成高純度回收。與傳統回收方法相比，該技術能耗僅約 1%，對環境影響極小，並能達成高達 96.6% 的陰極材料純度。然而，該技術目前仍處實驗室階段，需仰賴專用超音波設備與特定乳化液，有待進一步擴大規模驗證與整合現有回收流程。

### (6) 以直接前驅物合成技術簡化製程與降低成本

開發單位/廠商：美國 Ascend Elements

鈷、鎳、鋰等電池材料受礦產開採限制與地緣政治影響，價格波動劇烈。為降低供應鏈風險與環境衝擊，美國工程材料公司 Ascend Elements 開發出名為 Hydro-to-Cathode® 的直接前驅物合成的製程技術 (direct precursor synthesis process technology)，將廢電池粉碎後經濕法萃取金屬，直接透過前驅物合成技術轉化為陰極材料，跳過傳統金屬純化步驟。該技術能高效回收鋰離子電池中的關鍵金屬，回收率高達 98%，且相較傳統火法與濕法的冶金技術，製程簡化、碳排放量降低 90%、成本可節省達 50%。可依需求調整前驅體成分，生產 NMC 532、622、811、NMCA 等不同型號的陰極材料，直接供應電池製造商。該公司已與波蘭 Elemental Strategic Metals 公司共同成立 AE Elemental，預計 2026 年啟用波蘭工廠，年處理 1.2 萬噸廢電池。

### (三) 碳捕獲、利用與封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)

#### 1. 技術趨勢：

為了因應氣候變化，加速難以減排產業對碳再利用技術的部署。自 2020 年以來，全球碳捕獲量年均成長 58%。大規模的碳封存計畫依賴儲存地點的地理位置，增加了運輸成本。因此，透過碳捕獲再利用 (Carbon capture and utilization, CCU) 技術可實現分散式的碳管理，同時可生成多種高價值應用的二次原材料，進而衍生負碳效益，是達成長期減排目標的關鍵。

許多國家也紛紛提出低排放燃料和材料的政策措施，支持碳捕獲再利用 (Carbon capture and utilization, CCU) 技術的發展。例如 2023 年歐盟在 ReFuelEU Aviation 提案中，提高永續航空燃料(Sustainable Aviation Fuel, SAF)與煤油的混合比例；美國的降低通膨法案(Inflation Reduction Act, IRA)提供稅收抵免，提高每噸二氧化碳的獎勵額度，並提出 Clean Fuels & Products Shot 計畫，促進關鍵燃料及碳基產品的原料和轉化技術發展。

CCU 技術涵蓋了多種技術途徑，其技術類型、優勢與效益如表二。而捕獲的碳，根據國際能源署(International Energy Agency, IEA)<sup>10</sup> 2024 年統計，目前每年約使用 230 Mt 的二氧化碳，其中 130 Mt 的二氧化碳主要用來生產化肥產業的尿素，80 Mt 的二氧化碳用以提高石油採收率(Enhanced Oil Recovery, EOR)。然而，近幾年其他高市場潛力的創新應用也正在蓬勃發展，如基於二氧化碳的合成燃料、化學品和建築材料等創新用途，預計至 2030 年每年捕獲的碳將有近 15 Mt 投入這些創新應用。

值得注意的是，生物技術 (Biotechnology) 成為推動產業永續的關鍵技術之一。根據世界經濟論壇 (World Economic Forum, WEF) 報導<sup>11</sup>，生物技術正透過可再生資源、低碳製造、生物基產品與環保材料等技術，推動全球向永續經濟 (Sustainable Economy) 轉型。目前，全球多家企業與研究機構正積極利用生物技術 (Biotechnology) 開發替代燃料、生物基塑膠、永續化學品，不僅能夠減少對石化資源的依賴，還能利用農業廢棄物、生質材料等可再生資源，提升資源循環效率。

<sup>10</sup> IEA, CO2 Capture and Utilisation. <https://www.iea.org/energy-system/carbon-capture-utilisation-and-storage/co2-capture-and-utilisation>

<sup>11</sup> World Economic Forum, 2023.09.14. Biotechnology: From transforming healthcare to transforming our planet. <https://www.weforum.org/stories/2023/09/biotechnology-sustainable-development-goals/>

表二、碳捕獲再利用技術的效益分析

再利用技術類型	技術特色	環境永續優勢	每年減碳潛力	減碳成本 (美元/每噸二氧化碳)
碳礦化技術 Carbon Mineralization	模擬自然界岩石的風化過程，將碳與礦物進行反應	由工程用碳酸鹽材料製成每立方米的混凝土，需捕獲784公斤~1176公斤的二氧化碳	每年可利用7億噸捕獲的二氧化碳	60~80
碳氫化技術 Carbon Hydrogenation	碳和氫透過鎳、銻、鈷、鉑、鈮和鈳等催化劑作用，生成高附加值的燃料和化學品	生產每噸燃料(如甲醇)，需捕獲1.5~2噸二氧化碳	每年可利用7億~10億噸捕獲的二氧化碳	500~670
碳甲烷化技術 Carbon Methanation	碳與氫透過鐵、鎳、鈷、鈳和銻等催化劑作用，在高溫(約300°C~400°C)下合成甲烷	每生產一噸的甲烷，需捕獲一噸的二氧化碳，可產生500kW ~10MW規模的潔淨電力	每年可利用5億噸捕獲的二氧化碳	100~320
碳聚合化技術 Carbon Polymerization	碳與環氧化物(包括氧化環己烯(CHO)和環氧丙烷(PO))或糖苷(glycoside)分子在鋅基催化劑下，轉化為可用於製造生活塑膠製品的脂肪族(aliphatic)聚合物	可降低多元醇(Polyols)製程中的化石燃料用量，使每捕獲一噸的二氧化碳，避免約2噸的排碳量。	每年可利用3億~5億噸捕獲的二氧化碳	50~220

資料來源：Frost & Sullivan，科技發展觀測平台整理

## 2. 創新案例：

### (1) 去碳同時產生水的高效直接捕碳技術

開發單位/廠商：美國 Avnos

工業製程是排碳的主要來源之一，且需消耗大量的能源和水資源。因此，美國新創公司 Avnos 開發了一種名為「混合直接空氣捕獲技術」(Hybrid Direct Air Capture, HDAC) 的創新技術，可有效去除大氣中的二氧化碳並同時產生水。傳統碳捕獲技術採用液體或固體吸附劑，去除二氧化碳時需消耗大量能源及水資源。該技術採用濕度吸附(moisture swing adsorption, MSA)技術，將捕獲的空氣經過除濕後捕獲二氧化碳，再利用除濕收集到的水釋放二氧化碳，預計捕獲每噸碳可產生 5 噸水。系統採用模組化設計，可根據需求靈活增加單元數量，適應不同規模和應用場景。然而，該技術尚處於開發初期，仍需進一步大規模示範來驗證其效益與穩定性。

### (2) 分散式離網生產碳中性電子燃料

開發單位/廠商：美國 Aircela

燃燒化石燃料造成二氧化碳不斷增加，致使極端氣候、海洋酸化、生物多樣性喪失及對人類健康的嚴重影響。為此，美國新創公司 Aircela 正在開發第一台冰箱大小的小型分散式設備，能夠捕獲空氣中的二氧化碳並將其轉化為碳中和的電子燃料(e-fuels)，用於多種應用。該技術將捕獲的空氣經由氫氧化鉀

(potassium hydroxide) 過濾器吸收二氧化碳，再利用回收水與可再生電力（如太陽能 and 風能）用於生產氫氣。同時，將捕獲的二氧化碳與氫氣結合並生成電子燃料，如電子甲醇（e-methanol）。其模組化設計，可使該產品可在離網裝置中生產電子燃料，擴大其應用領域。該技術已在合成燃料生產系統及相關技術領域申請 2 項專利。然而，該技術尚處於開發初期，仍需進一步大規模示範來驗證其成本效益和競爭力。

### (3) 結合乾濕方法的捕獲技術

開發單位/廠商：烏克蘭 Carbominer Ukraine

新創公司 Carbominer Ukraine 開發一種創新且具經濟效益的直接空氣捕獲技術(Direct Air Capture, DAC)。該技術結合乾式(以固體材料吸附二氧化碳)和濕式(將二氧化碳溶於液體中)方法，採用離子交換吸附劑捕獲空氣中的二氧化碳，並使用電化學原理進行原位酸鹼震盪 (Electrochemical pH Swing)，透過調整溶液的酸鹼度來分離出高純度的二氧化碳（純度可達 99.75%）。靈活的模組化設計，可部署在使用二氧化碳的現場，例如農業溫室、工業製程或其他需求場景，降低二氧化碳運輸成本及相關排放。然而，該技術尚處於試驗與小規模應用階段（2023 年於維也納成功完成每年 1 噸的小型 DAC 系統測試），仍需要進一步大規模示範與驗證其成本效益和競爭力。

### (4) 以微藻培養技術捕碳並轉化為生物基產品

開發單位/廠商：西班牙 AlgaEnergy

西班牙生物精煉公司 AlgaEnergy 創新將培養微藻（microalgae）的光合生物反應器(photobioreactor)，用於捕獲二氧化碳並轉化為生物基產品（bio-based products），包括生物刺激素（bio-stimulants）、生物燃料（biofuels）及生物塑料（bioplastics），在最佳條件下碳捕獲率可達 90%。該項技術已在微藻培養及生物精煉領域獲得 30 多項專利。然而，微藻培養需要精確的光照與溫度控制，對能源的需求較高，且系統若未能充分消毒或是維持封閉環境，容易受到微生物污染風險，影響藻類的生長。

### (5) 以微生物捕碳同時促進農作物生長

開發單位/廠商：美國 Andes Ag

為能長期去除空氣中的二氧化碳，同時擴展二氧化碳的效益。新創公司 Andes Ag 透過有益微生物與玉米和小麥等農作物種子結合，進入土壤後與植物根系反應，加速將捕獲的二氧化碳轉化為土壤中的礦物質，並透過雨水將礦物質轉移到地底封存。同時，土壤中的礦物質還可提供植物養分，增加土壤中有機質的穩定與改善排水性能。該項技術已在種子處理領域申請 27 項專利。然

而，在大規模的應用中，微生物的培養與管理可能是該技術目前面臨的重大挑戰。

#### (6) 利用微生物捕碳並轉化為乙醇

開發單位/廠商：美國 LanzaTech Global

LanzaTech Global 是美國第一家碳捕獲和再利用的上市公司。該公司利用微生物發酵的專利技術，從工業廢氣中捕獲二氧化碳或一氧化碳，並將其轉化為永續燃料、化學品、材料和蛋白質等。例如：該公司與服裝品牌公司(如 Zara、H&M Move、Adidas 等)合作將捕獲的碳轉化為聚酯原料；與香水、美容護膚品牌公司合作(如 Coty、Gucci)將捕獲的碳轉化為高純度乙醇等；與盧森堡的鋼鐵公司 ArcelorMittal 合作大規模捕獲鋼鐵製程中排放的碳，並轉化為燃料級乙醇，進行直接出售或進一步純化。該公司也與法國能源解決方案供應商 Technip Energies 獲得美國能源部(DOE) 2 億美元的投資，用於將二氧化碳生產永續乙烯技術商業化 (SECURE 計畫)。

#### (7) 海藻基的無塑料永續包裝材料

開發單位/廠商：美國 Sway

傳統塑膠包材的主要材料源自於石油，廢棄後難以分解，整體生命週期皆造成海洋和土壤污染。美國潔淨技術新創公司 Sway 開發了一種基於海藻

(Seaweed) 的生物聚合物樹脂 (Biopolymer Resin) TPSea®，可用來製造可生物降解的包裝材料，不會造成長期污染。傳統生物基塑膠通常使用玉米和甘蔗做為原料，需要大量土地、水和能源消耗，且易與糧食生產競爭。該產品以海藻為原料，能快速生長、來源豐富、環境影響低，且生長不需要農地、淡水或農藥，不會與糧食生產競爭。且海藻與陸地植物一樣，可光合作用，將吸收二氧化碳轉成碳水化合物。該公司於 2023 年榮獲 TOM FORD 塑膠創新獎

(Plastic Innovation Prize)。然而，萃取海藻多醣體 (polysaccharides) 的加工成本較高，且海藻培育易受天氣、海洋污染和病害影響，目前仍需進一步優化生產流程以降低成本，並確保其供應鏈的穩定性。

#### (8) 精準發酵技術生產永續棕櫚油

開發單位/廠商：英國 Sun Bear Biofuture

棕櫚油因飽和脂肪含量高、成本低而被廣泛應用於食品、飲料、化妝品、藥品及各種產業，但種植棕櫚樹導致熱帶雨林砍伐與生態破壞。英國新創 Sun Bear Biofuture 公司開發了一種透過酵母發酵生產的棕櫚油替代品，以減少對環境的影響。該技術使用特定酵母菌株 (基因優化後的菌種) 發酵馬鈴薯皮、麵包廢料等食品廢棄物，生成類似精煉棕櫚油的脂肪酸。發酵產生的脂質無需再加工亦無需砍伐熱帶雨林，符合歐盟 2025 年起禁用非永續棕櫚油的新規定，

可直接取代食品、化妝品產品中的棕櫚油。然而，該技術處於起步階段，仍須進一步擴大製程規模以驗證其成本效益。

#### 四、結論與建議

2024 至 2025 年間，全球能源技術正邁入深度轉型階段，面對氣候變遷的壓力、供應鏈風險與能源安全挑戰，各國與企業已不再僅聚焦於效率提升與成本降低，而是推動系統性的創新與永續整合。根據近兩年間能源科技創新案例的觀察與分析，太陽能、鋰離子電池與碳捕獲利用封存（CCUS）三大領域，正展現出三項關鍵發展路徑：生物科技融合、關鍵原料的低依賴策略，以及人工智慧驅動的智慧化轉型。

##### （一）生物科技帶動碳循環與產業創新

在 CCUS 領域，微藻、微生物與農業廢棄物等生物資源被廣泛應用於碳捕獲與再利用，顯示能源技術已不僅是排放治理工具，更具備創造經濟附加價值的潛能。例如，微藻透過光合作用不僅能高效捕碳，亦可生產生質燃料、生物基塑膠與有機農業投入品，推動碳資源轉化為再生產品，形構以「捕碳－轉化－循環」為核心的綠色經濟模型。此外，生技應用亦可延伸至棕櫚油、生質燃料等高環境衝擊原料的替代，展現生物科技在能源材料永續化方面的潛力。

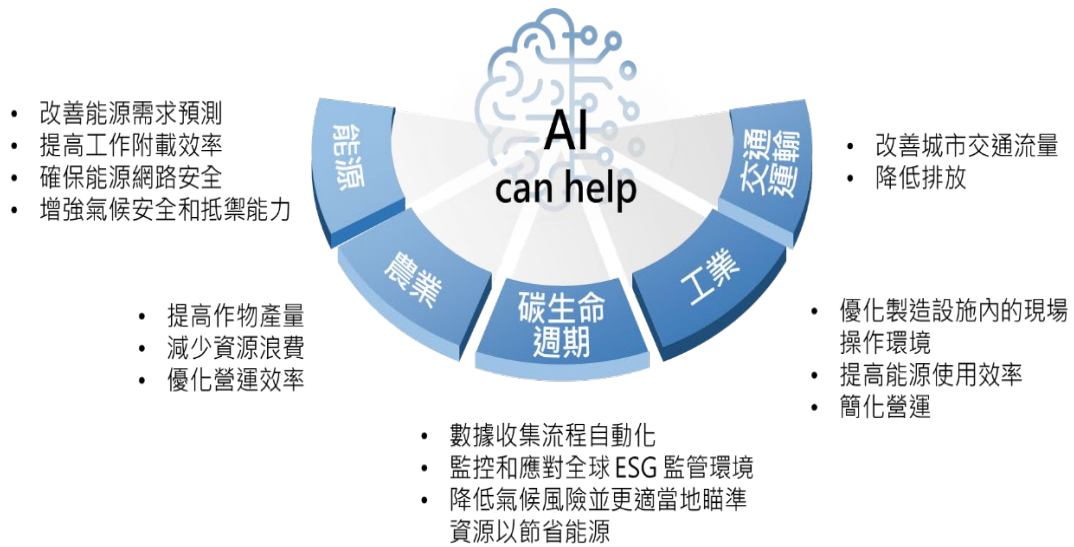
##### （二）去依賴化成為能源材料研發與供應鏈重組的重要策略

鋰、鈷、鎳等礦物資源的供需失衡與地緣集中，已使能源科技面臨供應不穩與成本波動的雙重風險。因此，太陽能與儲能系統正積極導入替代材料與回收再製機制。例如，碲化鎘薄膜模組以其高吸收效率與高回收率，提供矽晶技術以外的穩定選項；鋰電池方面，無鈷陰極、固態電解質與濕法回收等技術快速進展，不僅提高材料利用效率，亦大幅減少製程碳排與污染風險。這些轉向顯示，未來能源材料供應體系將從依賴原生開採，轉變為高回收率及低衝擊製程的韌性新結構。

##### （三）人工智慧成為強化能源系統韌性的關鍵

AI 技術的演進可處理龐大數據、加速運算並支持精準決策，進一步促進綠色科技的發展，如圖二顯示 AI 在能源轉型中的應用潛力。面對再生能源間歇性高與系統協調複雜度提升的挑戰，AI 技術被廣泛應用於太陽能建置、儲能管理、電力調度與 CCUS 流程中。從大型太陽能案場的 AI 自動化建置，到電池模組的即時監控與效能優化，再到分散式碳捕獲設備的模組調控與預測分析，人工智慧不僅強化系統反應能力，也降低了人力與時間成本。此外，AI 所支持的智慧平台與能源即服務（Energy-as-a-Service）模式，正在促成能源從靜態基礎設施走向動態調度與彈性部署，為再生能源成為穩定電力來源奠定技術與制

度基礎。



圖二、AI 在各領域能源轉型的創新應用

資料來源： Information Technology Industry Council (ITI)，U.S. DOE，科技發展觀測平台整理

## 參考資料

1. BATT4EU (2024), Strategic Research and Innovation Agenda.
2. Clean Energy Ministerial (2025), Global Developments with Carbon Capture, Use and Storage Deployment Programmes.
3. Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI (2024), Benchmarking International Battery Policies.
4. Frost & Sullivan (2024), Top 50 Emerging Technologies: 2024 Edition.
5. Frost & Sullivan (2024), Innovations in Carbon Capture Utilization (CCU) Strategies: Sustainable Approaches and Value Creation.
6. Frost & Sullivan (2024), Innovations in Battery Recycling, Soil Amendments & Crop Nutrition Enhancers, Renewable Fuels, Direct Air Carbon Capture, and Waste Valorization.
7. Frost & Sullivan (2024), Innovations in Carbon Capture and Utilization, Bio-based Succinic Acid Production, Advanced Fermentation Technology and Enzymatic Biorecycling.
8. Frost & Sullivan (2024), Innovations in Wastewater Treatment, Renewable Fuels, Direct Air Carbon Capture, and Waste Valorization.
9. Frost & Sullivan (2024), Alternative Fuels Market, Global, 2024–2030.
10. Frost & Sullivan (2025), Top 10 Growth Opportunities for Alternative Fuels, 2025.
11. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Materials for Petrochemicals Replacement, Sustainable Agriculture, Advanced Manufacturing, and Other Industrial Applications.
12. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Advanced Fermentation, Biofuel Production, Waste Valorization, Hydrogen Production, & Waste Heat Recovery Systems.
13. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Lithium-ion Batteries, Solar Irradiance Forecasting, Solar Panel Recycling, Alkaline Electrolyzers, and Membraneless Electrolysis.
14. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Carbon Capture, Renewable Chemicals Production, Precision Fermentation, Biofuel Production, and Battery Recycling.

15. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Cellulosic Ethanol Synthesis, Insect Farming, Biomimetic Membranes, Battery Recycling, and Waste Gasification.
16. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Solar Axis Tracker Systems, Wind Turbines, Electrolysis for Hydrogen Production, Sodium Ion Batteries, and Small Modular Reactors.
17. Frost & Sullivan (2025), Innovations in Next Generation Lithium-ion Batteries, Offshore Wind Turbines, Next Generation Solar Panels, Fuel Cell Catalysts, & AI-driven X-ray Microstructure Analysis.
18. Information Technology Industry Council (ITI) (2024), ITI's Sustainable Technology Policy Guide: Understanding AI's Role in the Energy Transition.
19. International Energy Agency (2024), Advancing Clean Technology Manufacturing.
20. International Energy Agency (2024), Advancing Clean Energy Demonstration Projects.
21. International Energy Agency (2024), World Energy Outlook 2024.
22. International Energy Agency (2025), The State of Energy Innovation.
23. IEA PVPS (2024), Trends in Photovoltaic Applications 2024.
24. Oil and Gas Climate Initiative (2024), Carbon capture and utilization as a decarbonization lever.
25. U.S. Department of Energy (2024), AI and Energy: Opportunities for a Modern Grid and Clean Energy Economy.
26. SolarPower Europe (2024), Agrisolar Handbook.
27. World Economic Forum (2025), Powering the Future: Overcoming Battery Supply-Chain Challenges with Circularity.