

第六章 突破性新科技

本章小節

- 6.1 前言
- 6.2 直接空氣捕獲技術
- 6.3 生物及化學法二氧化碳利用技術
- 6.4 未來核技術
- 6.5 小結

6.1 前言

除了前述章節分別針對不同部門研析具有減排的潛力科技外，另外仍有一些具有前瞻性、突破性的科技發展方向，一旦發展成功可對減碳進展帶來突破性的影響，故須要同步關注，本章將加以探討。其中，根據其用來減少碳排對環境衝擊的時間點，可區分為後端處理與前端預防技術，後端處理技術以從大氣中減少二氧化碳(CO₂)含量為目的，而前端預防技術乃由源頭避免碳排的產生，如有關新能源或節能技術開發⁶⁴⁹。本章討論的突破性新科技包括屬於後端處理的直接空氣捕獲技術、生物法/化學法/電化學法二氧化碳利用技術，和屬於前端預防的未來核能技術發展。

二氧化碳捕獲的概念在多年前就被提出，主要是利用吸收/吸附劑將空氣(包括產業所排放的廢氣)中的二氧化碳捕獲。二氧化碳捕獲的關鍵在於(1)二氧化碳通過捕獲劑時的接觸面積、(2)捕獲劑對二氧化碳的捕獲能力、(3)捕獲流程的經濟效益。相較於液體，任何氣體本身在空間中是非常稀薄的，增加捕獲劑與二氧化碳接觸並捕獲的機會非常重要，只有開發出吸附效能高、具經濟效益的捕獲流程，才能成功的實現大規模直接空氣捕獲。直接空氣捕獲後的二氧化碳，後續可透過生物法、化學法與電化學法加以利用，轉化成各種化學原料，可進一步降低人類對石化原料的依賴。植物或微生物多數能夠以光合作用等方式轉化二氧化碳，不過也會行呼吸作用再排出部分的二氧化碳，如果將生物的固碳機制獨立出來直接加以運用，即是生物法的發展重點；化學法除了須要開發效率更高的反應外，一般化學法的反應過程須要添加還原劑，如氫氣，因此生產氫氣是否會排碳即是重要的考量；電化學法則用電催化還原二氧化碳來製造其他化學品，因此所用的電力若非源自綠電，會因傳統電力的使用造成碳排增加，失去固碳效益，因此綠電充足與否在電化學法的運用上扮演重要的角色。

此外，雖然國人多數對核能心存疑慮，但核能技術在歷經數十年的發展後，新技術的安全性已與我國目前運轉之核能電廠的核能技術大不相同。本章的關注

⁶⁴⁹ Sanz-Pérez, E.S., Murdock, C.R., Didas, S.A., & Jones, C.W. (2016) Direct Capture of CO₂ from Ambient Air. *Chem. Rev*, 116(19), 11840-11876. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.chemrev.6b00173>

重點為最新的核分裂技術—第四代反應爐的發展，另隨著核融合技術商轉機會的提高，本章也同樣觀察研析核融合技術的最新進展，並提出如何因應未來核融合技術商轉與國際產業鏈的政策建議。以下各小節將詳盡討論上述各項突破性新科技。

6.2 直接空氣捕獲技術(Direct Air Capture, DAC)

摘要

直接空氣捕獲技術為一種碳捕獲創新技術，直接從大氣中去除二氧化碳(CO₂)，故極具挑戰性，目前僅有少數試驗工廠在國外測試。此外，相關裝置系統的運作仍有一定能耗，除成本因素外，應該考量運作所需電力來源（綠能或化石燃料）之碳排，確保系統運作之碳捕獲量高於裝置能耗之碳排，使整體能夠達成淨零/淨負排放。直接空氣捕獲技術相較傳統的碳封存，可以建置於合適儲存的地點，無長途運送的成本，若能克服現有 DAC 成本以及能耗較高的挑戰，未來仍為具競爭力的負碳技術。綜合我國各種狀況，建議推動下列作為：

1. 透過國際合作與技術交流方式，推動直接空氣捕獲技術的發展，並投入研發可降低能耗與成本之技術。
2. 解決現有 DAC 成本以及能耗較高的問題後，啟動再利用途徑的研究或進行探勘尋找合適的地質儲存地點。

6.2.1 前言

直接空氣捕獲技術(Direct Air Capture, DAC)是直接從空氣中捕獲二氧化碳，後續再將高濃度的二氧化碳永久儲存在深層的地質結構中，也可應用於食品加工、與氫氣結合產生合成燃料等。一般而言，如果是工廠排放尾氣具有高濃度二氧化碳，例如天然氣加工製程，其碳捕獲成本較低(25 USD/ tCO₂eq)，但如果是低濃度二氧化碳的捕獲成本就較高，例如電力與水泥業碳捕獲成本在 50 USD/tCO₂eq 以上，而直接空氣捕獲成本則為 300 USD /tCO₂eq 以上⁶⁵⁰。根據國際能源總署(IEA)的研究報告，全球目前有 19 座直接空氣捕獲工廠，每年可以捕獲超過 0.1 Mt 的二氧化碳。依照 2050 年淨零排放的情境，2030 年透過 DAC 技術捕獲二氧

⁶⁵⁰ IEA (2021) Is carbon capture too expensive? <https://www.iea.org/commentaries/is-carbon-capture-too-expensive>

化碳將超過 90 Mt CO₂eq/年，到 2050 年捕獲量將達到 985 MtCO₂eq/年⁶⁵¹。因此，未來須要擴大基礎設施布建規模來精進技術發展與降低碳捕獲成本，才能成功大規模布建 DAC 設備，達成明確淨零/淨負排放的效果。

6.2.2 直接空氣捕獲之類型與案例

直接空氣捕獲技術可分為固體型與液體型，固體型為透過經化學處理的固體過濾器進行二氧化碳的吸附，後續經由加熱程序取得濃縮的二氧化碳，目前不同企業依照地區亦有不同發展進程，如瑞士 Climeworks AG 與冰島 Carbfix 創新案例顯示已達示範階段⁶⁵²；液體型為空氣通過化學溶液，如氫氧化物液體，透過施加高溫程序將化學物質進行重組，從而吸附二氧化碳，技術成熟度介於示範至商業化階段之間（圖 6.2.1）。

	原理	案例	技術現況與成熟度	成本、能耗
液體型	空氣通過化學溶液（如氫氧化鉀）而吸附二氧化碳 (>850 °C)	• 加拿大 Carbon Engineering	• 示範至商業化	• 再生電力 1,500 kWh/ton • 成本 100 美元/ton
固體型	以固體過濾器進行二氧化碳吸附，再經由加熱程序取得濃縮二氧化碳 (80~100 °C)	• 瑞士 Climeworks • 芬蘭 Soletair Power • 美國 Global Thermostat • 美國 Mechanical Tree	• 示範至商業化	• 電力 650 kWh 與熱能 2000 kWh/ton • 成本 100-200 美元/ton 或更高

圖 6.2.1 直接空氣捕獲技術的原理、案例、技術現況與成本能耗等^{653,654}

⁶⁵¹ IEA (2021) Net zero by 2050: a Roadmap for the global energy sector.

https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

⁶⁵² Climeworks (2020) The rapid construction of Climeworks' new direct air capture and storage plant Orca has started. <https://climeworks.com/news/climeworks-makes-large-scale-carbon-dioxide-removal-a-reality>

⁶⁵³ Viebahn, P., Scholz, A., & Zelt, O. (2019) The Potential Role of Direct Air Capture in the German Energy Research Program - Results of a Multi-Dimensional Analysis. *Energies*, 12(18), 3443. <https://doi.org/10.3390/en12183443>

⁶⁵⁴ Chalmin, A. (2021) Quarterly review #3: DAC & CCUS developments in 2021. geoengineeringmonitor.org/2021/12/quarterly-review-3-geoengineering-developments-in-2021/

1. 固體型

瑞士 Climeworks AG 與冰島 Carbfix 已於 2021 年 9 月在冰島完成建構全世界最大的捕獲與封存展示工廠 Orca，並透過自然礦化封存方式，安全儲存在玄武岩地層中，預計每年可封存 4,000 噸二氧化碳（圖 6.2.2）。直接空氣捕獲運作機制為透過風扇將空氣吸入收集區，二氧化碳會被吸附在多孔顆粒過濾器上，當過濾器表面吸附充滿二氧化碳後，便可關閉收集區並將溫度提升至攝氏 80~100 度，釋出並獲得高濃度的二氧化碳，後續除了直接封存於地下，亦可透過化學合成為燃料，如圖 6.2.3。相關動力（包含風扇運轉與約攝氏 100 度的熱源）來源主要來自冰島 Hellisheiði 地熱發電廠的再生能源（或是工廠廢熱）。捕獲 1 公噸的二氧化碳須要 600 kWh 電力與 1.8~2.5 kWh 的熱能，目前成本約 500~600 USD/tCO₂eq，2030 年希望降至 200~300 USD/tCO₂eq^{655,656,657,658}。美國哥倫比亞大學氣候學院 (Columbia Climate School) 轄下之拉蒙特—多爾蒂地球觀測所 (Lamont-Doherty Earth Observatory) 在 2021 年發表的研究成果，希望運用容易取得且低成本的礦物為來源，以被動方式在大氣自然條件下與二氧化碳進行反應，以直接由空氣捕獲二氧化碳，期能有機會降低現有直接空氣捕獲技術能耗及成本過高的問題。主要利用石灰石（碳酸鈣，CaCO₃）加熱後可得到氧化鈣 (CaO) 與二氧化碳之原理，將二氧化碳進行儲存或再利用，而氧化鈣可在大氣中重新吸收二氧化碳轉換為石灰石，透過循環利用氧化鈣將二氧化碳持續從大氣中移除。目前在實驗室的測試下，不到兩週的時間，便可將 75% 的氧化鈣轉化為石灰石。由於該過程非常簡單，有潛力以低成本方式移除二氧化碳⁶⁵⁹。而此技術目前也正由位於美國加州的

⁶⁵⁵ Chuang, D. (2021) 冰島世界最大 CCS 工廠將落成，每年把 4,000 噸二氧化碳「變石頭」。科技新報。 <https://technews.tw/2021/09/09/direct-air-capture/>

⁶⁵⁶ Reuters (2021) World's largest plant capturing carbon from air starts in Iceland. <https://www.reuters.com/business/environment/worlds-largest-plant-capturing-carbon-air-starts-iceland-2021-09-08/>

⁶⁵⁷ McQueen, N., Gomes, K. V., McCormick, C., Blumanthal, K., Pisciotto, M., & Wilcox, J. (2021) A review of direct air capture (DAC): scaling up commercial technologies and innovating for the future. *Prog. Energy*, 3, 032001. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/abf1ce/pdf>

⁶⁵⁸ Doyle A. (2021) Feature-Firms sucking carbon from air see boost from 'code red' climate crisis. Thomson Reuters Foundation. <https://www.reuters.com/article/climate-change-carboncapture-idUSL8N2QF2PA>

⁶⁵⁹ Aronsohn, M. D. (2022) Clearing the air: decarbonization technologies take a giant step forward. <https://news.climate.columbia.edu/2022/01/06/clearing-the-air-decarbonization-technologist-take-a-giant-step-forward/>

Heirloom Carbon Technologies 公司進行後續研發，希望透過氧化鈣和碳酸鈣的循環利用，到 2035 年從空氣中移除 10 億噸(1 Gt)二氧化碳⁶⁶⁰。

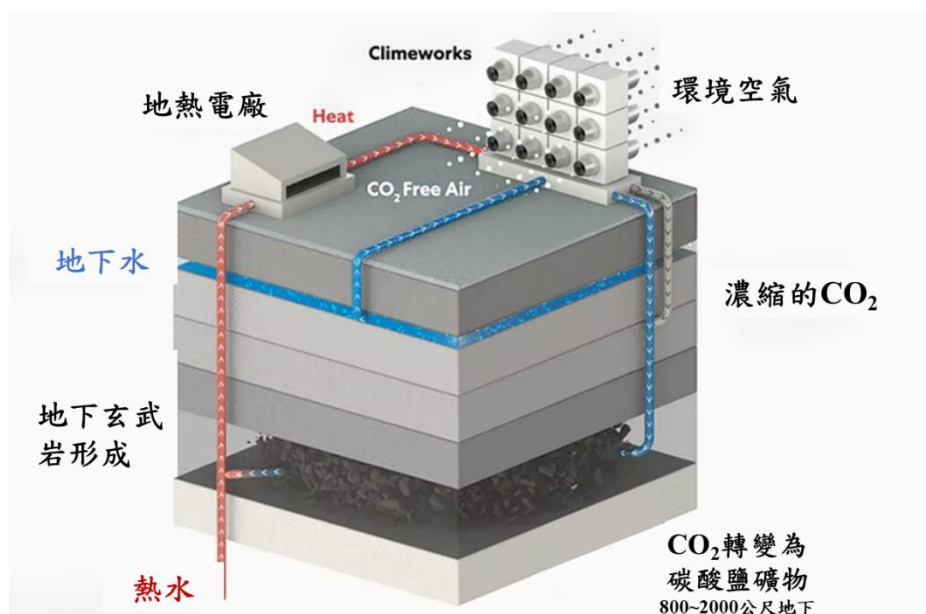


圖 6.2.2 瑞士 Climeworks AG 與冰島 Carbfix 合作的直接空氣捕獲與地下玄武岩礦化封存技術⁶⁶¹

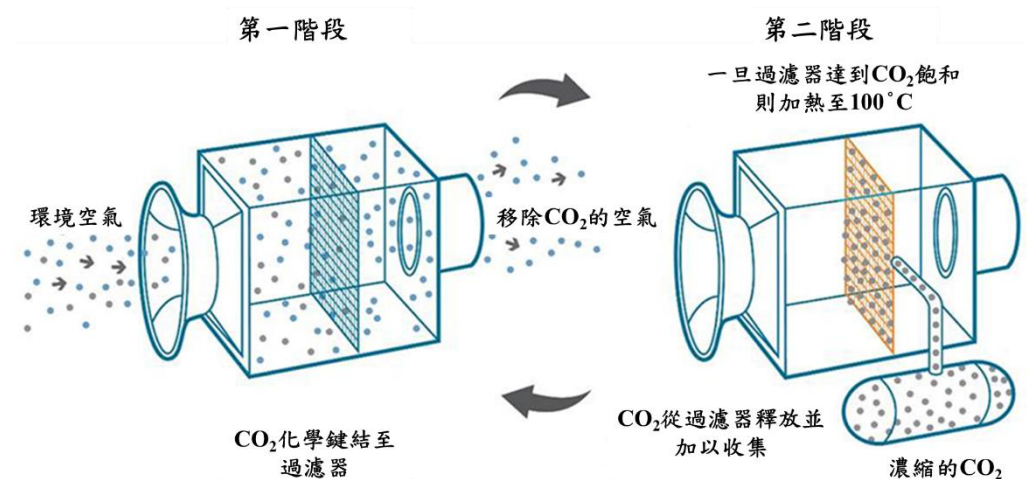


圖 6.2.3 瑞士 Climeworks AG 新創公司的 DAC 技術⁶⁶²

⁶⁶⁰ 同前揭註 659。

⁶⁶¹ Climeworks(2022) How Climeworks does CO₂ removal. <https://climeworks.com/company-gifts>

⁶⁶² Beuttler, C., Charles, L., & Wurzbacher, J. (2019). The role of direct air capture in mitigation of

芬蘭 Soletair Power 透過太陽能發電提供所需的電力，利用胺顆粒(solid amine sorbent)吸附空氣中的二氧化碳，經過攝氏 120 度的熱循環，將胺顆粒內的二氧化碳釋放出來後進行儲存，後續再透過電解水產製氫氣，並送入甲烷化反應器將氫氣與二氧化碳合成產生甲烷氣體，以及其他液體與固體碳氫化合物⁶⁶³。

美國 Global Thermostat 的直接空氣捕獲技術則是使用多孔材料固定胺類吸附劑，從空氣中移除二氧化碳，並將其儲存在地下，或是用於製造化學品、消費品或建築材料。因為相關製程可使用低溫蒸汽(100~130°C)進行脫附與收集，因此理想情況下有機會搭配附近工廠或電廠之運作，得到低溫或免費的餘熱或製程熱^{664,665}。例如，該公司在 2019 年開始與 ExxonMobil 公司簽署一項聯合開發協議，共同建構工業規模之廠房，以將該公司技術應用於捕獲和濃縮工業來源（包括發電廠和大氣）排放之二氧化碳；同時，也利用工廠的製程熱能，在捕獲程序後進行吸附劑之再生⁶⁶⁶。同時該技術設計上亦可以利用大規模太陽光電的「熱」副產品提供工廠能源，將光電農場轉變成碳匯，並搭配銷售二氧化碳來提高收益。如果透過商業模式的設計，可以達到在沒有政府補貼或碳稅收抵免下，仍可負擔甚至獲利^{667,668}。

愛爾蘭都柏林的碳收集公司(Carbon Collect Limited)（前身為矽王國控股公司，Silicon Kingdom Holdings, SKH）與美國利桑那州立大學(Arizona State University)合作共同研發可直接進行空氣捕獲的機械樹(mechanical tree)，捕獲的

anthropogenic greenhouse gas emissions. *Frontiers in Climate*, 1, 10.

<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fclim.2019.00010/full>

⁶⁶³ Vázquez, F. V., Koponen, J., Ruuskanen, V., Bajamundi, C., Kosonen, A., Simell, P., Ahola, J., Frilund, C., Elfving, J., Reinikainen, M., Heikkinen, N., Kauppinen, J., Piermartini, P. (2018) Power-to-X technology using renewable electricity and carbon dioxide from ambient air: SOLETAIR proof-of-concept and improved process concept. *Journal of CO₂ Utilization*, 28, 235-246. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212982018305213#fig0005>

⁶⁶⁴ Chichilnisky, G. (2019) Direct air capture: the key to reversing climate change. *The Digest*. <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2019/11/20/direct-air-capture-the-key-to-reversing-climate-change/>

⁶⁶⁵ 林海珍(2018) 能源趨勢觀測－減碳淨煤主軸簡報。建立及強化能源國家型科技計畫績效之管理機制及能源技術議題探索模式計畫成果（未出版）。

⁶⁶⁶ 同前揭註 657。

⁶⁶⁷ Global thermostat(2018) A unique capture process. <https://globalthermostat.com/a-unique-capture-process/>

⁶⁶⁸ 同前揭註 665。

二氧化碳氣體可直接進行儲存或是釋出再利用，例如可應用於合成燃料、提高石油采收率或食品、飲料和農業行業。與其他碳捕獲技術不同之處在於機械樹(mechanical tree)捕獲裝置像一棵樹，從大氣中去除二氧化碳，無須使用能源密集型設備將空氣吸入系統，係透過風從任何方向吹過系統時，該技術可以有效地捕獲碳，為一種被動式、成本相對較低且可大規模布建的解決方案。該技術經評估可以顯著降低地球大氣中二氧化碳含量，有助於對抗全球氣候變遷。目前碳收集公司已在加州建造 1,200 個機械樹，預計一年能捕獲 36,500 噸二氧化碳，當未來機械樹達商業化大規模部署時，預計成本將可低於 100 USD/tCO₂eq^{669,670}。

2. 液體型

加拿大 Carbon Engineering 開發空氣中碳捕獲技術分為兩部分：(一) 二氧化碳捕獲，自空氣接觸器將空氣吸入，並經過薄塑料表面使其接觸氫氧化鉀溶液。透過該溶液與空氣中二氧化碳分子發生化學反應形成碳酸鹽溶液，以達到自空氣捕獲之目的；(二) 二氧化碳再利用，透過碳酸鹽溶液中所含的二氧化碳進行一系列化學過程，以提高其濃度、對其進行淨化和壓縮，從而以氣態形式交付使用或儲存後再利用⁶⁷¹。

6.2.3 直接空氣捕獲技術搭配現地礦化封存之測試案例

總部位於阿曼的新創公司 44.01⁶⁷²於 2021 年 5 月開始與瑞士 DAC 公司 Climeworks 合作，以模擬橄欖岩(peridotite)在自然條件下可與二氧化碳和水反應形成碳酸鹽之原理⁶⁷³，在阿曼地區以 DAC 技術進行二氧化碳捕獲，捕獲之二氧

⁶⁶⁹ ASU News (2021) Carbon Collect's mechanical tree selected for US Department of Energy award. <https://news.asu.edu/20210702-carbon-collect-mechanicaltree-selected-us-department-energy-award>

⁶⁷⁰ ASU News (2019) Popular Science picks ASU professor's 'MechanicalTree' as a 2019 top technology. <https://news.asu.edu/20191205-popular-science-picks-lackner-mechanicaltree-2019-top-technology>

⁶⁷¹ Carbon Engineering (2021) Our technology. <https://carbonengineering.com/our-technology/>

⁶⁷² 以二氧化碳的分子量 44.01 作為公司名稱。

⁶⁷³ 此種碳酸鹽如方解石(calcite)，為一種碳酸鈣的穩定形態，為常見且無害的礦物。

化碳進一步與水蒸氣反應形成碳酸水後，透過鑽井輸送至地表下，與橄欖岩反應形成碳酸鹽在岩石內沉澱，過程中搭配工程技術改良以加速反應，希望達到從大氣中移除二氧化碳並以固體形式永久儲存之目的（圖 6.2.4）^{674,675}。

橄欖岩是一種富含橄欖石(olivine)以及輝石(pyroxene)的緻密火成岩，通常出現在地表 20 公里以下或更深之處，為地函(mantle)組成之岩石，但也可能存在於地球表面，像是阿拉伯半島的最東端，如阿曼北部海岸，便因為曾發生過板塊構造運動，讓數百平方英哩的橄欖岩裸露在地層表面上。約從 2006 年開始，前述提及美國哥倫比亞大學氣候學院轄下拉蒙特—多爾蒂地球觀測所(Lamont-Doherty Earth Observatory)的研究人員便利用裸露在地表的橄欖岩作為研究材料，測試運用阿曼地區橄欖岩進行礦化封存的潛力，發現透過人為策略改良可加速橄欖岩的二氧化碳礦化封存速度並降低整體的執行成本⁶⁷⁶。

在進行二氧化碳礦化封存之創新策略上，該公司採取的策略包括：提供比大氣中濃度更高的二氧化碳，這也是與瑞士 DAC 公司 Climeworks 合作之主要原因；此外，也透過工程鑽孔方式極大化岩石反應之表面積；第三則是利用當地生產的太陽能 and 生物燃料提供礦化封存技術操作動力，降低所使用的燃料成本。該公司希望在 2040 年達到礦化封存 10 億噸(1 Gt)二氧化碳的目標⁶⁷⁷。

⁶⁷⁴ Techcrunch (2021) 44.01 secures \$5M to turn billions of tons of carbon dioxide to stone.
<https://techcrunch.com/2021/08/10/44-01-secures-5m-to-turn-billions-of-tons-of-carbon-dioxide-to-stone/>

⁶⁷⁵ 同前揭註 659。

⁶⁷⁶ 趙紀東(2008) 研究發現橄欖岩的碳酸化作用可吸收二氧化碳。中國科學院國家科學圖書館。<http://www.llas.cas.cn/kxjckbzb/dqkxjzj/201412/P020141215634848928013.pdf>

⁶⁷⁷ 同前揭註 674。

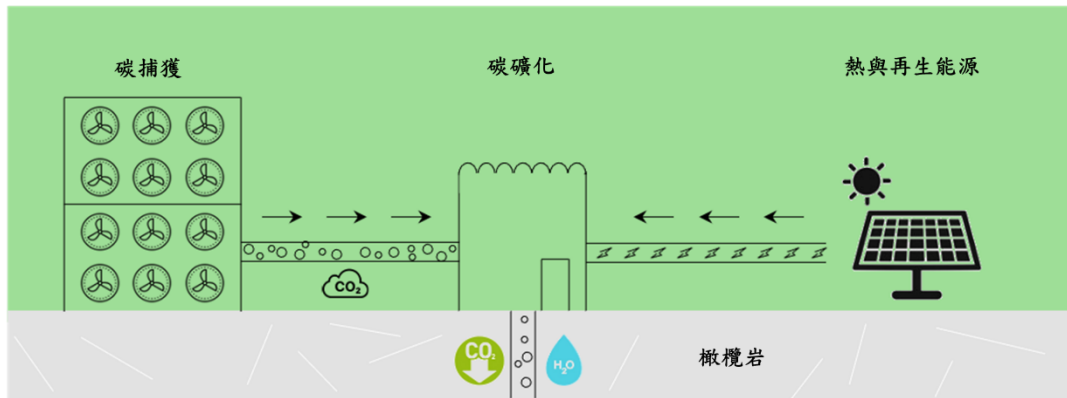


圖 6.2.4 新創公司 44.01 與 Climeworks 合作以直接空氣捕獲搭配礦化封存之技術⁶⁷⁸

6.2.4 政策建議

目前國際上部分直接空氣捕獲（化學法）已能透過搭配充足之零碳電力或低成本餘熱（如製程熱）達成二氧化碳之有效捕獲，且透過適當的商業模式設計與運作，展示出可在無政府補貼或無碳稅收抵免下，仍可負擔甚至獲利之潛能。相較傳統的 CCUS 技術，其不受限於排放源所在區位進行設置，廠址設置具有較大彈性，故有利於我國擴展碳捕獲實施之空間與範圍。建議適度獎助相關研究，以國際進展為標竿來推動空氣直接捕獲技術的發展，研發可降低能耗與成本之技術。

捕獲後的二氧化碳可以再利用或封存，再利用部分在本政策建議報告 3.3 及 6.3 節中已多所著墨，本節僅比較與傳統 CCUS 中封存技術（詳見第 3.3 節）的差別。傳統 CCUS 主要是從電廠/工廠煙道氣捕獲二氧化碳，雖然排放之二氧化碳濃度較高，捕獲成本較低，但若無法現地再利用，便須要透過管線等方式運送到封存場址進行儲存，故須選擇鄰近碳捕獲電廠/工廠之封存場址，以降低運輸成本。我國本島陸域可供封存利用之耗竭油氣儲集層位置固定，無法與我國高碳排放的產業區位完全匹配，若要配合產業區位尋覓濱海或近岸合適場址，將衍生相關海域調查需求，開發風險與探勘成本便會大幅提高。如前所述，直接空氣捕獲

⁶⁷⁸ 同前揭註 674。

技術 DAC 技術，較不受限排放源所在區位，故具備可直接設置在封存場址旁之彈性與優點，透過將直接空氣捕獲後之二氧化碳進行現地封存，大幅降低運輸管線設置所需面臨之社會溝通成本與運輸成本，並有潛力創造出如生質碳匯般可跨國合作之碳移除模式⁶⁷⁹。因此如果能夠克服現有 DAC 成本以及能耗較高的挑戰，又能找到合適的儲存或利用的方法，仍不失為一有效的減碳技術。

⁶⁷⁹ 同前揭註 674。

6.3 生物及化學法二氧化碳利用技術

摘要

無論以淨零排放甚至淨負排放為目標，從大氣中直接捕獲或由煙道氣中捕獲之二氧化碳(CO₂)，都須有適當的去處。除封存之外，二氧化碳再利用為一重要方向。再利用首先要將二氧化碳還原，其可用之方法，如生物法，化學法，或電(光)化學法等。二氧化碳還原之後再轉化成各種化學原料以取代部份化石原料，可進一步減少二氧化碳排放，同時合成高價值的化學品。綜合我國各種狀況，建議長期持續推動二氧化碳再利用技術的發展，包括生物法、化學法與電(光)化學法，以及結合不同方法生產高價化學品之轉化技術。

6.3.1 前言

現今社會經濟的進展對化石燃料產品有強烈依賴性，因此強烈阻礙節能減排的進程。2019 年我國溫室氣體總排放量為 287 Mt CO₂eq，其中二氧化碳占排放溫室氣體最大宗，達 95.28%⁶⁸⁰。而工業部門能源燃燒排放之二氧化碳(含分攤電力消費)占燃料燃燒總排放量接近五成(2020 年為 48.74%)。由於工業生產的產品絕大部份來自使用化石燃料，且部分製程須經耗能的合成程序，因此造成相當高的碳足跡。在歐洲，生產和使用 26 種化工原料即占化學工業總能源使用量的 75%，且其溫室氣體排放量也占整體歐洲化學工業的 90%以上(1.5 億公噸，150 Mt)。倘若依照此增長軌跡發展，到 2050 年，預計這些化合物將產生 2 億公噸(200 Mt)二氧化碳當量的排放量⁶⁸¹。

在 2017 年，化石燃料的開採和加工總共消耗能源 12 億噸(1,200 Mt)油當量(oil equivalent)，排放 15 億噸(1,500 Mt)二氧化碳^{682,683}。如要再利用二氧化碳首先

⁶⁸⁰ 行政院環境保護署(2021) 中華民國國家溫室氣體清冊報告(2021 年版)。

https://unfccc.saveoursky.org.tw/nir/tw_nir_2021.php

⁶⁸¹ Boulamanti, A., & Moya, J. A. (2017) Energy efficiency and ghg emissions: prospective scenarios for the chemical and petrochemical industry. EUR 28471 EN, doi:10.2760/20486

⁶⁸² IEA (2018) The future of petrochemicals: towards more sustainable plastics and fertilisers. <https://webstore.iea.org/the-future-of-petrochemicals>.

⁶⁸³ Luna, P. D., Hahn, C., Higgins, D., Jaffer, S. A., Jaramillo, T. F., & Sargent, E. H. (2019) What would

必須將其還原，而還原之方法，有生物法、化學法或電化學法等，這些方法都須要長期投入改善反應效率及能耗後，才能在未來成為有效的減碳工具。本節分別說明如後。

6.3.2 二氧化碳利用未來技術類型

1. 生物法二氧化碳利用技術

目前大氣中的二氧化碳主要是經由植物或微生物行光合作用，使之轉化為有機化合物，此過程是最有效的空氣中捕碳方式。光合作用的固碳過程，是透過植物或微生物吸收利用陽光的能量，再以固碳酵素（如主要為 Ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, RuBisCO）固定二氧化碳，使之轉化為有機碳儲存在植物體內。

生物法二氧化碳固碳技術的特點是溫和的反應條件、產品的專一性及多樣的長碳鏈產物。如再配合近年興起之代謝工程及合成生物學技術，可將二氧化碳轉化成多種代謝產物，這些代謝產物又可轉化成多種化學原料或塑膠單體。目前已成功的工業案例，包括乙醇、丁醇、異丁醇、乳酸、1,3-丙二醇(1,3 PDO)、1,4-丁二醇(1,4 BDO)與琥珀酸(Succinic Acid)等，其他實驗室及試驗工廠成功的案例不勝枚舉。根據理論，生物法應可將二氧化碳或生質原料轉化成多種化學品。

生物法二氧化碳利用技術目前的主要限制在於速率、效率及規模放大等方面。速率的限制主要來自生物生長的特性，但理論上微生物可以改質來增進速率，或在無細胞環境中以酵素線性放大來解決，然而其中仍有多項技術障礙尚待克服。效率的限制是因為主要的固碳酵素 RuBisCO 會受到環境中氧氣影響，產生光呼吸(photorespiration)作用，降低固碳效率。此外，植物與微生物只在白天經光合作用有明顯固碳效果，夜晚的呼吸作用又釋放二氧化碳，使得固碳效率受限⁶⁸⁴。為

it take for renewably powered electrosynthesis to displace petrochemical processes? Science 364, 350. doi: 10.1126/science.aav3506

⁶⁸⁴ 另可參見相關新聞說明：謝柏宏(2022) 中央研究院長廖俊智成功打造人工固碳循環技術，

了解決上述的限制，近年有兩個不同的人工固碳循環被創造並發表^{685, 686}。兩者都選用不受氧氣影響的固碳酵素，配合其他微生物的酵素共同組成，排除呼吸作用的干擾；再者，此途徑僅利用生物的酵素，而不使用整個微生物，故能不受植物細胞生長期限限制，打造高效的固碳效率。目前已發表的兩例人工固碳循環中，其一為我國中央研究院設計發表，此固碳循環超越植物進行光合作用的效率，且能將二氧化碳轉化為再利用的化學品，不但減少碳排，同時也可以增加碳匯。然目前使用人工固碳途徑的運作成本仍過高，須要降低酵素純化成本、增加酵素穩定度、拉長有效期間及改善輔酶再生循環，方能實現大規模應用的目的。

2. 化學法二氧化碳利用技術

化學法也可將二氧化碳還原，主要是利用氫把二氧化碳還原成甲烷、甲醇、甲酸或一氧化碳（圖 6.3.1）等單碳有機分子，再將之製成化學原料，其中最主要的限制為零碳氫的來源及化學轉化技術瓶頸。目前技術發展已可將一氧化碳及甲醇製成醋酸，惟我國目前醋酸的生產量是 0.75 百萬噸(Mt)，僅占二氧化碳排放量的一小部份。若將二氧化碳還原成甲烷，再以甲烷氧化耦合技術(Oxidative Coupling of Methane, OCM)製成乙烯（詳見 4.4 石化業），有望以二氧化碳提供大量的石化原料。然而，OCM 技術目前轉化率僅可達 20~40%，仍須投入研發以提升轉化率。此外，每摩爾(mole)二氧化碳需 4 摩爾的氫還原成甲烷。目前我國乙烯年產 4 百萬公噸(Mt)，至少需 2.28 百萬公噸(Mt)的氫製成，反推這些氫氣須投入 1,140 億度電來製造，故在我國綠電供給尚且不足的狀況下，以化學法還原二氧化碳仍有其困難度，若未來可進口低價綠氫，這個方法才有機會應用。

登國際期刊。經濟日報。

https://money.udn.com/money/story/5612/6146486?from=edn_next_story

⁶⁸⁵ Schwander, T., Schada von Borzyskowski, L., Burgener, S., Cortina, N.S., Erb, T. J. (2016) A synthetic pathway for the fixation of carbon dioxide in vitro. *Science*. 18; 354(6314): 900-904. doi: 10.1126/science.aah5237.

⁶⁸⁶ Luo, S., Lin, P. P., Nieh, L. Y., Liao, G. B., Tang, P. W., Chen, C. & Liao, J. C. (2022) A cell-free self-replenishing CO₂-fixing system. *Nature Catalysis* 5, 154–162.

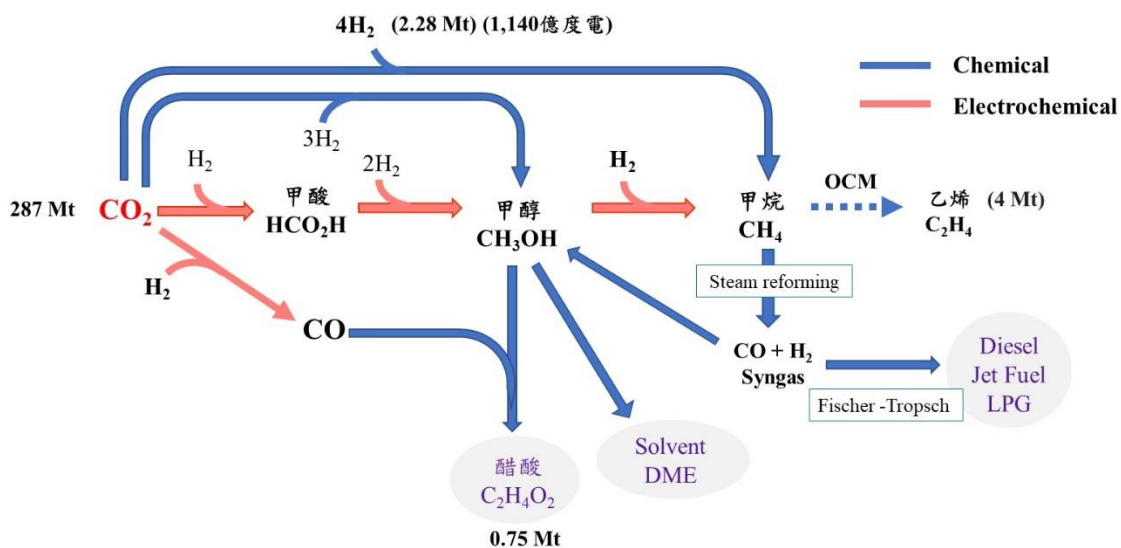


圖 6.3.1 化學法與電化學法再利用二氧化碳的可能途徑

化學法二氧化碳利用之創新案例，新近澳洲墨爾本皇家理工大學(RMIT University, Melbourne)研究團隊透過鎂銦液態金屬合金(EGaIn liquid metal)捕獲二氧化碳，並將其直接轉換為固態碳。該研究團隊利用合金的低熔點特性，使二氧化碳在低溫中進行還原反應，當氣體穿過液態金屬時，氣體分子會分裂形成固體碳薄片，如圖 6.3.2。在攝氏 200 度下，每小時可生成 $319 \mu\text{mol}$ 的碳，達到在室溫下無須另外使用補充性還原劑（如：氫），也可以進行二氧化碳的活化和碳的生成。透過這種新技術，可在二氧化碳產生時立即轉化並且永久形成固態碳，如此即成為高碳排放工業（如水泥業、石化業、鋼鐵業等）脫碳的新工具。目前該研究成果已與澳大利亞環境技術公司(ABR)簽署合作協議，將概念驗證擴展到可模組化原型，該技術商業化後可以協助水泥業與鋼鐵製造業進行脫碳，未來也將找尋固態碳的潛在應用，包含建築材料應用、水泥添加物等⁶⁸⁷。然此技術最大問題為能量消耗，及大量金屬氧化物的後續處理。

⁶⁸⁷ Zuraiqi, K., Zavabeti, A., Clarke-Hannaford, J., Murdoch, B. J., Shah, K., Spencer, M. J. S., McConville, C. F., Daeneke, T. & Chiang K. (2022) Direct conversion of CO_2 to solid carbon by Ga-based liquid metals. *Energy Environ. Sci.* 15, 595– 600. <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2022/ee/d1ee03283f>

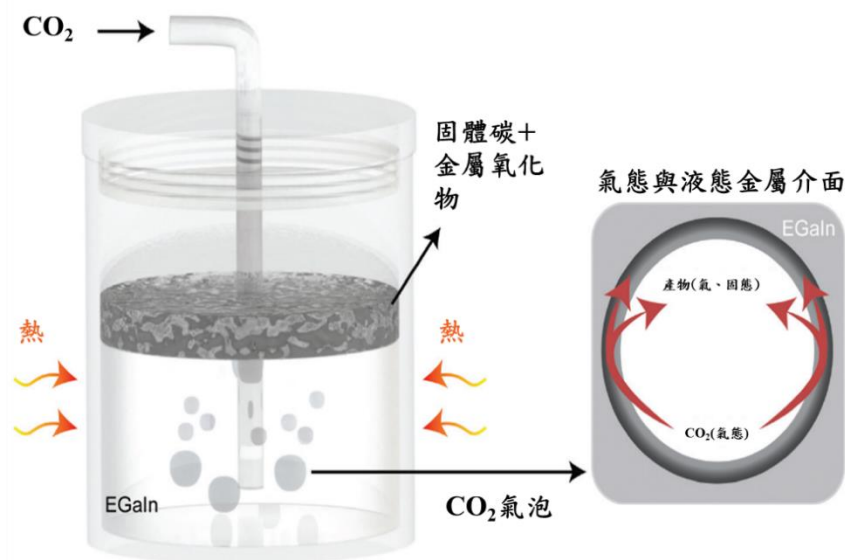


圖 6.3.2 鎔錒液態金屬與二氧化碳的反應過程⁶⁸⁸

3. 電化學法二氧化碳利用技術

相較傳統用於生產化學品前驅物（如乙烯、甲醇、乙醇、一氧化碳）的化學合成方法，利用電催化方式將二氧化碳進行轉化成上述化合物為近期最受矚目的新興技術。此方式直接用電將二氧化碳還原，不須經過產氫的程序，與傳統合成方法的最大差異在於，電催化二氧化碳轉化反應不須在高溫、高壓條件下進行⁶⁸⁹，因此可提供一個新的途徑來降低二氧化碳排放。運用電化學法轉化二氧化碳技術的最佳策略為：結合零碳能源（太陽能、風能、水力、地熱、潮汐發電）與電化學還原二氧化碳，把能源以化學鍵儲存並轉成化學前驅物，以取代石油產出的原料，而且電化學反應在常溫常壓下進行，設置規模及場域選擇較有彈性。

作為具前瞻性的新合成途徑，電催化二氧化碳轉化反應還有許多關鍵因素待克服，主要為所需能源過高，包含催化電壓需求高、催化反應的法拉第效率低⁶⁹⁰、催化反應的選擇性低、以及二氧化碳利用率低等。其中二氧化碳利用率低是由於

⁶⁸⁸ 同前揭註 687。

⁶⁸⁹ Dry, M. E. (2002) The Fischer-Tropsch process: 1950-2000. Catal. Today 71(3-4), 227-241. doi: 10.1016/S0920-5861(01)00453-9

⁶⁹⁰ 法拉第效率為實際生成物和理論生成物的百分比。

二氧化碳在水溶液中的溶解度低，這部份可透過工程方法解決，如利用氣體擴散電極，反應電流密度可增加到大於 100 mA/cm^2 ，達到初步實用階段⁶⁹¹。至於前三項關鍵因素決定於催化材料的特性，現今已知的電極材料包含銅、銀、金、錫、鉛、鈇和其合金或化合物，催化之過電壓絕大部份都高於 300 mV ，少部份法拉第效率可達或超過 90% ，但能源轉化效率一般都約 35% ^{692,693}。由於二氧化碳轉化反應發生時，亦可能伴隨產氫反應，造成反應競爭，而降低二氧化碳轉化率。電催化目前僅限於 C1（單碳）到 C3（三碳）化學品的生產，同時產物選擇性不佳。生成高價碳（ $> \text{C3}$ ）化學品牽涉到更多的質子耦合電子轉移，C-C 耦合較困難，反應途徑極為複雜，較不易達成，且隨著碳數的增加，每一次電子傳輸的能源效率就降低⁶⁹⁴。

當考慮電催化二氧化碳轉化技術是否有其競爭力時，會發現電價對生產成本影響最大，此外，催化的法拉第效率和能源效率也影響到技術的可行性。由於化學品的價格隨著地理區域和原料有很大的變化，若以工業應用成熟的聚合物電解質膜(Polymer Electrolyte Membrane, PEM)水電解槽規格做為假設，所得到的結論為，當電力成本達每度電低於美金 4 分（ 0.04 USD/kWh 或 40 USD/MWh ）且能效至少達 60% 時⁶⁹⁵，電催化產品才能與化石燃料產品的當前市場價格相競爭。雖然這是一個相當困難的目標，但並非不可能達成，特別是當考慮以二氧化碳為原料，對碳排放減量有正面的實質影響。以乙烯來說，相較於一氧化碳、乙醇和甲酸，其全球市場規模最大，達到 2,300 億美元，電催化製備乙烯方式可達每年減少 862 百萬噸(Mt)二氧化碳排放量⁶⁹⁶。在一氧化碳、乙醇和甲酸方面，相關的二

⁶⁹¹ Weekes, D. M., Salvatore, D. A., Reyes, A., Huang, A., & Berlinguette, C. P. (2018) Electrolytic CO_2 reduction in a flow cell. *Acc. Chem. Res.* 51(4), 910–918. doi: 10.1021/acs.accounts.8b00010

⁶⁹² De Luna, P., Quintero-Bermudez, R., Dinh, C. T., Ross, M. B., Bushuyev, O. S., Todorović, P., ... & Sargent, E. H. (2018) Catalyst electro-redeposition controls morphology and oxidation state for selective carbon dioxide reduction. *Nature Catalysis*, 1(2), 103–110.

⁶⁹³ Jhong, H.-R. M., Ma, S., Kenis, P. J. A. (2013) Electrochemical conversion of CO_2 to useful chemicals: Current status, remaining challenges, and future opportunities. *Curr. Opin. Chem. Eng.*, 2(2), 191–199. doi: 10.1016/j.coche.2013.03.005

⁶⁹⁴ Zhuang, T. T., Liang, Z. Q., Seifitokaldani, A., Li, Y., De Luna, P., Burdyny, T., ... & Sargent, E. H. (2018) Steering post-C–C coupling selectivity enables high efficiency electroreduction of carbon dioxide to multi-carbon alcohols. *Nature Catalysis*, 1(6), 421–428. doi: 10.1038/s41929-018-0084-7

⁶⁹⁵ 同前揭註 683。

⁶⁹⁶ 同前揭註 683。

氧化碳減排量可達 3.6、546 和 1 百萬噸(Mt)。以一座發電容量為 500 MW 的電廠考量，當電網碳排放強度為 0.11 kg CO₂/kWh，能量轉換效率達到 70%時，以電催化生產的產品都會達到淨零（乙烯）或淨負（乙醇、一氧化碳和甲酸）排放⁶⁹⁷。當以再生能源作為電力來源，在發電高峰期，電力過剩通常會導致市場電價為負值，這對以電化學合成化學品方法來說更有經濟上的優勢。

4. 光化學法二氧化碳利用技術

還原二氧化碳須要注入能量，其中化學法是以零碳氫為能源，電化學法則是以零碳電為能源。由於零碳氫及零碳電都可來自光能，故可直接以光能透過光觸媒還原二氧化碳，亦稱為人工光合作用。此途徑看似單純，但挑戰亦高，也受光照的場域及間歇性、光觸媒的設計及效率、產物的收集及純化的限制，未來可能在限制條件改善的狀況下，才會考量其應用性。

5. 結合化學法、電催化法與酵素或細菌等生物系統

以二氧化碳為碳源、以綠能為能量來源，理論上可生產所有的化學品取代石化工業的石油原料。然而因所需碳源及能源的數量級遠大於實驗室可行性分析所用的能源，未來也須要結合其他各種可能途徑，包括化學法、電催化法、酵素或生物系統，以克服多項上述之挑戰。

雖然現今電催化二氧化碳轉化技術只能產出 C1-C3 產物，但當它與酵素或細菌等生物系統作結合後，這些少碳小分子可再轉化升級為更複雜、更高價的化學品^{698,699,700}。特別是所產生的初級化學品如甲酸，可做為微生物或酵素所需的

⁶⁹⁷ 同前揭註 683。

⁶⁹⁸ Li, H., Opgenorth, P.H., Wernick, D.G., Rogers, S., Wu, T.Y., Higashide, W., Malati, P., Huo, Y.X., Cho, K.M., Liao, J.C. (2012) Integrated electromicrobial conversion of CO₂ to higher alcohols. *Science*. 30; 335(6076):1596. doi: 10.1126/science.1217643. PMID: 22461604. doi: 10.1126/science.1217643

⁶⁹⁹ Nangle, S. N., Sakimoto, K. K., Silver, P. A., & Nocera, D. G. (2017) Biological-inorganic hybrid systems as a generalized platform for chemical production. *Current opinion in chemical biology*, 41, 107-113. doi: 10.1016/j.cbpa.2017.10.023

⁷⁰⁰ Yishai, O., Lindner, S. N., Gonzalez de la Cruz, J., Tenenboim, H., & Bar-Even, A. (2016). The formate bio-economy. *Current Opinion in Chemical Biology*, 35, 1-9. doi:10.1016/j.cbpa.2016.07.005

唯一碳源，同時也為微生物或酵素固碳提供還原能力。除此之外，假如微生物透過改質方式^{701,702}，使各種產物分子具有更高容忍度，此工程改質微生物就可用於處理來自電催化二氧化碳轉化後的混合物，也可再將其混合原料升級為高價值化學品，此時電催化選擇性和分離過程將不再是一個限制。

為因應 2050 淨零排放，我國仍須發展二氧化碳轉化技術，以改善石化工業排碳之困境。一方面善用太陽能、風能及其他零碳能源提供的能量，另一方面搭配優化後的生物及化學催化程序，將可把傳統石化工業轉變為低碳或零碳工業，或合成高價值精密化學品的產業。

6.3.3 政策建議

無論以碳中和甚至負碳排為目標，從大氣中直接捕獲或由煙道氣中捕獲之二氧化碳，都須有適當的去處。除封存之外，二氧化碳再利用為一重要方向。生物法（植物、海藻）是目前空氣中捕碳最有效的方式，但技術上仍須突破速率、效率以及規模放大的問題。化學法也可透過氫的使用，把二氧化碳還原成甲烷、甲醇、甲酸或一氧化碳，但氫的生產須搭配充足的零碳電力供給，且須提升相關配套技術，如甲烷氧化耦合技術之轉化率等。利用電化學法轉化反應具有不須在高溫、高壓條件下進行反應之優勢，若與再生能源搭配，便可把能源以化學鍵儲存，並轉化二氧化碳為化學原料，但須解決目前催化電壓太高、催化反應的法拉第效率太低、催化反應的選擇性不夠高與二氧化碳利用率低等挑戰。此外，結合化學法、電催化法與酵素或細菌等生物系統，可將原本結構較為簡單的少碳小分子進一步轉化升級為更複雜、更高價的化學品。故建議我國應長期持續推動二氧化碳再利用技術的發展，包括生物法、化學法與電（光）化學法，以及結合不同方法生產更複雜、更高價化學品之轉化技術，以解決相關技術挑戰，並達到將二氧化

⁷⁰¹ Chen, X., Cao, Y., Li, F., Tian, Y., & Song, H. (2018) Enzyme-assisted microbial electrosynthesis of poly (3-hydroxybutyrate) via CO₂ bioreduction by engineered *Ralstonia eutropha*. ACS Catal. 8, 4429-4437. doi: 10.1021/acscatal.8b00226

⁷⁰² Qiao, K., Wasylenko, T. M., Zhou, K., Xu, P., & Stephanopoulos, G. (2017) Lipid production in *Yarrowia lipolytica* is maximized by engineering cytosolic redox metabolism. Nature biotechnology, 35(2), 173-177. doi: 10.1038/nbt.3763

碳的再利用價值提升之可能性，如此才能在成功捕獲二氧化碳之後，找到有效的辦法再將二氧化碳轉為其他可用材料。

6.4 未來核技術

摘要

核能技術從我國熟知的核一廠到核四廠設計建廠至今，過去的數十年中已有長足的進步。較新的第 3⁺、4 代核能技術安全係數高，已將發生核災的風險降低，第 4 代核能每單位發電所需的核燃料也減少許多。核能發電未來最大的阻力在於放射性廢棄物最終處置場所，不論從技術或住民觀感的角度，都還有很大挑戰。另一方面，新興的核融合技術一旦突破可行性驗證與能量產出/投入比的門檻，全體人類的能源供應可望不虞匱乏，英國已定下 2040 年先導核融合發電廠運行的目標。本建議書對核能發電技術應用的政策建議如下：

1. 對各種第 4 代核能技術審慎評估，如果新核能技術的應用在核能安全和廢料的產生和處置上有明確的改善，允宜考慮與民眾充分溝通後再研究如何導入。
2. 密切追蹤核融合商轉的發展，在適當的時間點啟動相關規範的建立，以期與全球同步引入核融合技術，協助達成 2050 淨零排放的目標。

6.4.1 前言

人類歷史上，曾發生過 1979 年三哩島事件、1986 年車諾比事件、2011 年福島核災等三次重大的核電廠事故，其中 2011 年 3 月 11 日東日本大地震導致的福島核電廠嚴重事故，造成全世界反核聲浪再起、人們對核能產生恐懼心理又一次高漲。隨著 2050 年實現淨零排放成為全球的共同目標，再生能源無法應付 2050 年國內乃至全球用電需求的隱憂漸漸浮現，這期間持續發展的核能發電技術，又重新回到淨零排放電力候選的可能項目之一。核燃料的能量密度比化石燃料高數百萬倍，發電效率高且可作為基載電力，我國核三廠一座機組一年所需的燃料，一架次的飛機就能完成運送，相較於須要每個月持續不斷進口的化石燃料，核燃料的供貨穩定性確實具備優勢。核能發電基本上不會產生二氧化碳，優於煤炭、天然氣等化石燃料；核能發電也不受氣候影響，優於風力、太陽能等綠能；如果

不考慮核廢料處理及其他社會成本，核能單位電力成本較其他發電方式相對便宜。

核能最大的缺點在於可能引致核災風險，一旦發生核災，將導致大範圍乃至全球性的輻射污染，造成人類與其他動植物的基因突變、後代發育畸形，污染的土地須經過很多世代才能復原。核電廠須要以大量水冷卻，使用海水雖成本低廉，但核電廠四周海水溫度上升，過去曾發生珊瑚白化等環境破壞。除了核災，核能發電另一個挑戰在於全世界對高放射性廢棄物如何有效處置尚無定論。放射性廢棄物分為高放射性與低放射性，高放射性廢棄物主要為原始的用過核燃料或經過再處理的萃取殘餘物，其放射性評估須達百萬年才會衰變至安全程度；低放射性廢棄物來自發電廠或醫療、研究、工業、農業各領域受輻射污染的器械、物品或廢料，放射性在數百年內會衰變到與自然背景輻射值相當。國內蘭嶼存放的僅是與放射性醫療廢棄物同等級的低放射性廢棄物，就已經招致批評與反彈。

國際核能界目前最被接受的高放射性廢棄物處置方法為深層地質處置(deep geological disposal)⁷⁰³，係將高放射性廢棄物埋存於地質穩定地區的深層地底。但地質處置有幾個未解難題，由於須與生物圈隔離數十萬年以上，必須考慮處置容器耐用性、工程與天然障壁穩固性、不可預期的地震或地層變動等因素造成之障壁劣化、處置地點民眾與地方政府接受度等問題。近年來核能發電技術已演進到第4代，中國2021年宣布山東榮成石島灣的超高溫氣冷式反應爐為全球首座併網發電的第4代反應爐。第4代核能的單位燃料產生電力更高，並已朝向小型模組化反應爐(Small Modular Reactor, SMRs)發展，因模組化使建造成本低、靈活性高、安全性較佳、可利用核廢料發電且其核廢料亦可回收再利用等優點，但產生的高放射性廢棄物可能還是無處可去。核融合技術雖然尚處於研發階段，仍被視為未來非常有潛力的淨零排放發電技術。核融合幾乎不產生高放射性廢棄物，作為燃料的氫同位素更是取之不盡，但核融合技術仍有技術瓶頸待突破，是否能成為具備成本效益的零碳發電技術仍是未知數。

⁷⁰³ Ramana, M. V. (2018) Technical and social problems of nuclear waste. Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment, 7(4), e289.
<https://wires.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/wene.289>

6.4.2 國際趨勢

表 6.4.1 為 2020 年核能裝置容量前 15 名國家與臺灣之比較，臺灣的核能裝置容量排在全球第 16 名。美國是全球核電廠最多的國家，在 2020 年底時有 56 座核電廠、96 座反應爐⁷⁰⁴，反應爐平均歲數是 39 歲，最新的 Watts Bar Unit 2 反應爐在 2016 年併網，新建的 Vogtle Units 3 和 4 會在近兩年陸續完工。美國核能裝置容量最高峰在 2012 年，有 104 座反應爐，裝置容量達到 102,000 MW；2020 年裝置容量為 98,152 MW，年發電量達 7.9 千億度，供美國全國約 20% 的電力。法國是世界裝置容量第二大的核能國，2020 年擁有 58 座反應爐，核能供電占比⁷⁰⁵高達全國的 70.6%，未來 10 年將新建 6 座反應爐。中國有 50 座反應爐，數量及裝置容量排名世界第三⁷⁰⁶，近期在設備的國產化方面已有相當多成功的經驗。

表 6.4.1 2020 年核能裝置容量前 15 名國家與臺灣之比較表⁷⁰⁷

國家	反應爐數	總裝置容量 (MW)	供電量 (百萬度)	核能占比 (%)
美國	96	98,152	789,918.61	19.7
法國	58	63,130	338,735.78	70.6
中國	50	47,528	344,747.50	4.9
日本	33	31,679	43,098.63	5.1
俄國	39	29,503	201,821.27	20.6
南韓	24	23,150	152,583.25	29.6
加拿大	19	13,624	92,166.11	14.6
烏克蘭	15	13,107	71,549.60	51.2
英國	15	8,923	45,668.04	14.5
國家	反應爐數	總裝置容量 (MW)	供電量 (百萬度)	核能占比 (%)
德國	6	8,113	60,918.11	11.3
瑞典	7	7,763	47,361.83	29.8

⁷⁰⁴ The U.S. Energy Information Administration (2021) What is the status of the U.S. nuclear industry? <https://www.eia.gov/energyexplained/nuclear/us-nuclear-industry.php>

⁷⁰⁵ 梅緣緣(2022) 馬克宏宣布「復興核電產業」將興建 14 座核反應爐，再度掀起能源自足爭論。 <https://www.thenewslens.com/article/162659>

⁷⁰⁶ 人民網(2021)《中國核能發展報告 2021》：我國在建機組裝機容量連續多年保持全球第一。 <http://finance.people.com.cn/BIG5/n1/2021/0418/c1004-32080738.html>

⁷⁰⁷ International Atomic Energy Agency (2022) Nuclear Share of Electricity Generation in 2021. <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx>

西班牙	7	7,121	55,825.26	22.2
印度	22	6,255	40,374.37	3.3
比利時	7	5,942	32,792.85	39.1
捷克	6	3,934	28,371.87	37.3
臺灣	4	3,844	30,341.92	12.7

核分裂反應爐依演進世代，可分為第 1、2、3、3⁺和 4 代反應爐（圖 6.4.1）。第 1 代為實驗型，商轉始於第 2 代，每噸燃料約可產生 7 億度電，歷年發生事故的車諾比、三哩島、福島等核電廠皆屬於這個世代，我國的核二、核三亦屬於此類。我國原規劃興建的核四屬於第 3 代，每噸燃料約可產生 14 億度電，相對於第 2 代，第 3 代核能將控制系統進行數位化，對反應爐結構與事故停機的因應機制已加以改良。相較於第 3 代，較新的 3⁺代具有免人為介入之被動式安全停機 (passive safety) 特性，發生事故機率比第 2 代小 2 個數量級，同時具有快速提升負載能力的新設計。第 4 代核能多在研發階段，主要有 6 種設計型式，依設計的不同，每噸燃料所能產生的電力為 9~120 億度不等，相對於第 3⁺代，設計上大幅提升每噸燃料所能產生的電力。有些第 4 代設計可對使用過的核燃料重複利用，為核廢料的處置減輕負擔；第 4 代設計的反應爐走向小型化、模組化，理想上可大幅縮減建廠與維修時間，亦可應用於偏遠地區、石油探勘及軍事基地等，並導入被動式安全機制，對免人為介入安全停機做進一步優化，且其不須建造大型混凝土結構屏蔽核燃料棒。另外，相較於核分裂技術，核融合技術預期不會產生高放射性廢棄物，不會發生不可收拾的鏈鎖反應，被視為更安全的核能。核融合以氫的同位素氘和氚為燃料，其中氘可由海水中提取，氚可由中子撞擊鋰-6 取得，來源無虞。

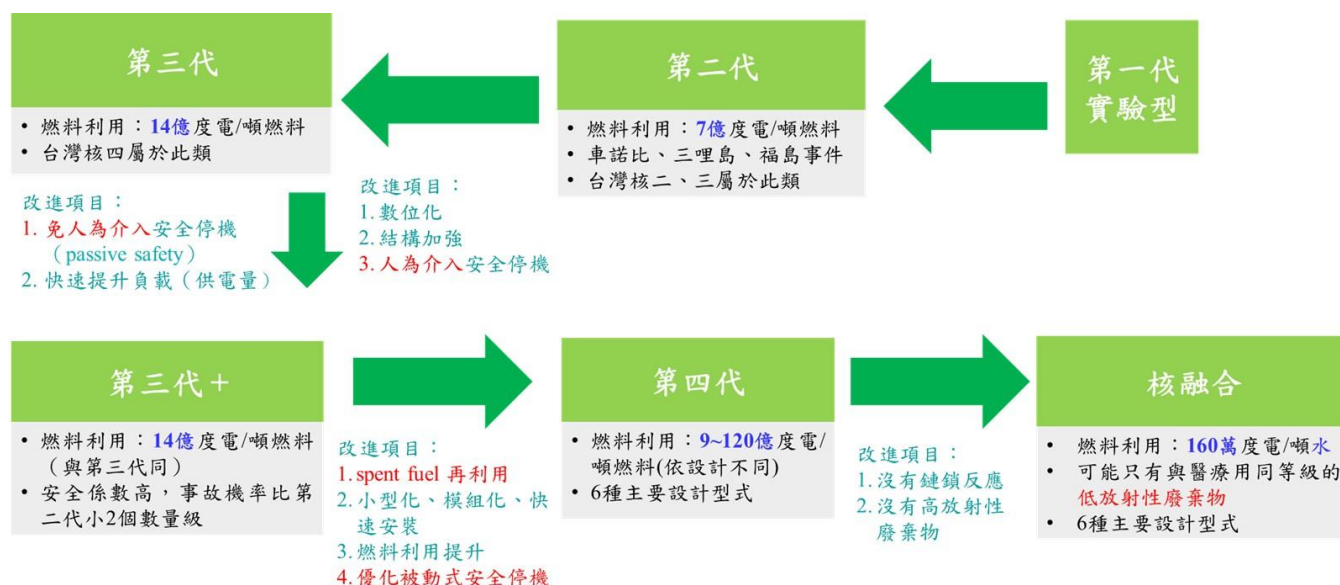


圖 6.4.1 核能技術演進

第4代核能主要有6種形式(表6.4.2):(一)超高溫氣冷式反應爐(very-high-temperature reactor, VHTR)、(二)鈉冷式快中子反應爐(sodium-cooled fast reactor)、(三)超臨界水冷式反應爐(supercritical water reactor)、(四)氣冷式快中子反應爐(gas-cooled fast reactor)、(五)鉛冷式快中子反應爐(lead-cooled fast reactor)、(六)熔鹽反應爐(molten salt reactor)。超高溫氣冷式反應爐以鈾化合物為燃料，每噸燃料理論上可產生約120億度電，是第4代反應爐中最高的，但其用過核燃料不再利用。華能核電開發有限公司在中國山東榮成石島灣的超高溫氣冷式反應爐在2021年12月20日併網，被認為是全球第一個商轉的第4代反應爐⁷⁰⁸。鈉冷式快中子反應爐以鈾/鈾碳化物為燃料，以液態金屬鈉做為冷卻劑，每噸燃料理論產生電力在12~48億度之間，其能夠將用過核燃料回收再利用，補充一次燃料可使用數十年，比爾蓋茲(Bill Gates)投資擬設置於懷俄明州的鈉冷式快中子反應爐 Natrium 預計2030年開始運轉⁷⁰⁹。超臨界水冷式反應爐依中子型式分為熱中子、快中子兩型，熱中子重水超臨界水冷式反應爐以鈾為燃料，快中子型以

⁷⁰⁸ 聯合新聞網(2021) 4代高溫氣冷堆核電廠併網發電。https://udn.com/news/story/7333/5976423

⁷⁰⁹ Chuang, D.(2021) 比爾蓋茲新一代鈉核電廠預計2030落成，首選懷俄明州凱默勒市。https://technews.tw/2021/11/17/terrapower-wyoming-kemmerer/

鈾鈾氧化物混合物為燃料，每噸燃料理論產生電力約 9 億度，依設計不同，用過核燃料再利用或未再利用的形式都有⁷¹⁰，目前國際原子能總署(International Atomic Energy Agency, IAEA)仍持續對超臨界水冷式反應爐的設計進行改良。氣冷式快中子反應爐以鈾與鈾系元素為燃料，每噸燃料理論產生電力約 12 億度，可對用過核燃料再利用。SpaceX 前工程師組成的新創公司 Radiant 正在開發氦氣冷卻式快中子反應爐，目標量產 1 MW 低價微型反應爐，其發電量約可供應 1,000 戶家庭使用⁷¹¹。鉛冷式快中子反應爐以鈾化合物為燃料，每噸燃料理論產生電力約 16 億度，可對用過核燃料再利用。義大利 Ansaldo Nucleare 與羅馬尼亞 Reinvent Energy 兩家公司近期投資實驗性的鉛冷式快中子反應爐，並獲得政府資金挹注⁷¹²。熔鹽反應爐又分為以鈾與鈾廢料及鈾鹽為燃料的熔鹽燃料型，與使用鈾與鈾廢料為燃料的固態燃料型，每噸燃料理論產生電力在 28~79 億度之間。美國 Southern 公司與美國能源部在 2021 年 11 月 18 日簽署合作協議，預計以 TerraPower 過去的原始設計為基礎，共同設計、建造並維運一座建於愛達荷州的實驗性熔鹽反應爐⁷¹³。

表 6.4.2 第 4 代核能 6 種形式比較

型式	特性	進展
超高溫氣冷式反應爐 (VHTR) 燃料：鈾化合物	- 燃料利用：120 億度電/噸燃料（第 4 代中最高） - 開放式（spent fuel 未再利用）	2021.12：中國山東石島灣球床式超高溫氣冷式反應爐成功運轉
鈉冷式快中子反應爐 (sodium-cooled fast reactor) 燃料：鈾鈾氧化物混合物	- 燃料利用：12~48 億度電/噸燃料 - 封閉式（spent fuel 有再利用）	2021.11：比爾蓋茲(Bill Gates)投資的懷俄明州凱默勒市鈉核電廠預計 2030 落成
超臨界水冷式反應爐 (supercritical water reactor)	燃料利用：9 億度電/噸燃料	2021.05：國際原子能總署(International Atomic

⁷¹⁰ GEN IV International Forum (2022) Supercritical-Water-Cooled Reactor (SCWR). https://www.gen-4.org/gif/jcms/c_42151/supercritical-water-cooled-reactor-scwr

⁷¹¹ Blain, L. (2021) Radiant aims to replace diesel generators with small nuclear reactors. <https://newatlas.com/energy/radiant-portable-advanced-nuclear/>

⁷¹² Todorović, I. (2022) US startup Last Energy plans to install small modular nuclear reactor in Romania. <https://balkangreenenergynews.com/us-startup-last-energy-plans-to-install-small-modular-nuclear-reactor-in-romania/>

⁷¹³ Nuclear Engineering International (2021) Southern Company, DOE to lead demonstration of molten-salt reactor. <https://www.neimagazine.com/news/newssouthern-company-doe-to-lead-demonstration-of-molten-salt-reactor-9267269>

型式	特性	進展
燃料：重水 SCWR 用鈾 燃料：快中子 SCWR 用鈾 銻氧化物混合物	• 開放式、封閉式都有	Energy Agency, IAEA)持 續設計 SCWR 原型機
氣冷式快中子反應爐 (gas-cooled fast reactor) 燃料：鈾與鈾系元素	• 燃料利用：12 億度電/噸 燃料 • 封閉式 (spent fuel 有再利 用)	2021.11：來自 SpaceX 的工程師組成的新創公 司 Radiant 正在開發氦冷 式快中子反應爐
鉛冷式快中子反應爐 (lead-cooled fast reactor) 燃料：鈾化合物	• 燃料利用：16 億度電/噸 燃料 • 封閉式 (spent fuel 有再利 用)	2021.11：義大利的 Ansaldo Nucleare 與羅 馬尼亞的 Reinvent Energy 投資的實驗性 LCFR，已獲得政府資金
熔鹽反應爐 (molten salt fast reactor) 熔鹽燃料型：鈾與銻廢料 及鈾鹽 固態燃料型：鈾與銻廢料	• 燃料利用：28~79 億度電 /噸燃料 • 快中子：封閉式 (spent fuel 有再利用) • 熱中子：開放式 (spent fuel 未再利用)	2021.11：Southern Co.將 在愛達荷州建立試驗性 molten chloride fast reactor

核融合技術目前尚未成熟達可實用的階段，判斷技術是否成熟可用的指標有二：(一) 在攝氏 1.5 億度的電漿中維持不間斷的核融合達 30 分鐘，或 (二) 能量「出/進」比 (Q 值) 大於 10 (例如以 50 MW 的熱能進行核融合而產生 500 MW 電力)。核融合的發生條件非常嚴苛，失控即會停止，所以沒有核分裂的危險性連鎖反應問題。核融合原理上不會產生高放射性核廢料⁷¹⁴，但目前最有希望成功商轉的核融合是氘—氚核融合，而氚是核分裂反應爐的副產物，所以核融合很可能還是會因為對氚的需求而間接產生高放射性核廢料。英國預計 2040 年後核融合技術會進入商轉階段，也已經陸續提出相關規範⁷¹⁵，我國亦可開始注意國際動向及相關規範之制定。

核融合技術主要有 6 種形式：(一) 托卡馬克(tokamak)、(二) 天星號環狀磁

⁷¹⁴ Carley Willis, Joanne Liou (2021) Safety in Fusion: An inherently safe process.
<https://www.iaea.org/bulletin/safety-in-fusion>

⁷¹⁵ Department for Business, Energy & Industrial Strategy, UK (2021) Towards Fusion Energy: The UK Government's Fusion Strategy.
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1022540/towards-fusion-energy-uk-government-fusion-strategy.pdf

場配置(stellarator)、(三) 反向場收縮(reversed field pinch)⁷¹⁶、(四) 慣性局限融合(inertial confinement fusion, ICF)⁷¹⁷、(五) 磁—慣性局限(magnetized target fusion)、(六) 核融合/核分裂共生(hybrid fusion)。

第一種托卡馬克反應器，利用巨大螺旋型磁場局限並加熱氘與氚電漿來產生氘—氚的核融合，發生核融合的電漿粒子密度為 10^{14} cm^{-3} ，電漿誘導電流可初步將電漿升溫至 $1 \times 10^7 \text{ K}$ 。採用托卡馬克裝置者包含歐洲聯合環狀反應爐(Joint European Torus, JET)和屬於國際熱核融合實驗反應爐(International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)成員的韓國 KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)反應爐。JET 在 2021 年 10 月時 Q 值達到 2/3 (16 MW/ 24 MW)，並維持了 0.1 秒；KSTAR 在 2021 年 11 月達成攝氏 1 億度維持 30 秒的里程碑，未來預計將產生約 500 MW 的功率。勞倫斯利佛莫爾實驗室國家點火設施(National Ignition Facility, NIF)與麻省理工學院共同支持的新創公司 Commonwealth Fusion Systems，在 2021 年 9 月 8 日宣布開發出世界最強磁力的高溫超導磁鐵⁷¹⁸，將應用於磁場局限核融合。

第二種天星號環狀磁場配置反應器，以形狀複雜的磁線圈模擬恆星，不會形成電漿誘導電流，電漿的穩定性高，且能連續性輸出能量。

第三種反向場收縮反應器，原理與托卡馬克相近，優點在於可微調磁場配置，可能不須使用超導磁鐵，並能直接利用阻擋中子用的銅殼做為磁場線圈。TAE Technologies 公司的設計就屬於反向場收縮的無中子產物(aneutronic)核融合，其原型機預計在 2030 年完成⁷¹⁹。

相對於上述技術以磁場將氘與氚電漿局限，第四種之慣性局限融合反應器係

⁷¹⁶ Sarff, J. (2020) Reversed Field Pinch Research in MST (Final Technical Report) . <https://www.osti.gov/biblio/1638828-reversed-field-pinch-research-mst-final-technical-report>

⁷¹⁷ Peeva, A. (2021) Exploring Alternatives to Magnetic Confinement: Laser fusion, linear devices and advanced fuels. <https://www.iaea.org/bulletin/exploring-alternatives-to-magnetic-confinement>

⁷¹⁸ Commonwealth Fusion Systems (2021) Commonwealth Fusion Systems creates viable path to commercial fusion power with world's strongest magnet. <https://cfs.energy/news-and-media/cfs-commercial-fusion-power-with-hts-magnet>

⁷¹⁹ Delbert, C. (2022) This Google-Backed Fusion Reactor Must Run 8 Times Hotter Than the World's Largest Tokamak. <https://31vid02ja3oz1qdp991dz7-wpengine.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/081122-PopMech.pdf>

利用雷射壓縮氫同位素之間的距離而最終導致核融合，使得核融合燃料可以在較長時間內以較可控之方式加熱。NIF 採用慣性局限核融合，2021 年 8 月時，輸出能量(1.3 MJ)達到輸入能量(1.9 MJ)的 70%。

第五種之磁—慣性局限反應器同時利用磁場與力學約束力控制氫同位素，操作參數範圍更大，比單純磁場局限所需要的時間更短、更穩定，又比單純慣性局限所需的電漿粒子密度小幾個數量級，需要的內爆速度(implosion velocity)較小，雷射等級/價格需求較低，設計較為簡單。英國原子能管理局(United Kingdom Atomic Energy Authority, UKAEA)和加拿大開發商 General Fusion 將建造磁—慣性局限反應器示範工廠，預計在 2025 年完工。

第六種之核融合/核分裂共生反應器是將核融合產生之中子用於核分裂反應，不需中子遮罩，發電所需融合量遠低於純粹的融合爐，更易實現。

除了上述 6 種形式，Alpha Ring 公司⁷²⁰開發另一種核融合技術，利用電子屏蔽(electron screening)效應，降低核融合的庫倫障壁，製造點火(ignition)條件⁷²¹。另外以氫硼融合達成無中子產物核融合，並產生淨輸出能量（以該裝置利用勞倫茲力驅動圓柱形艙體中的微弱電離氫氣達到高速旋轉，並產生強大的離心力與高密度氣體。增加反應物的密度能有效增加核融合反應速率）。

表 6.4.3 為第 4 代核能與核融合之間的優劣勢比較與待解決問題。第 4 代核能產生的用過核燃料，只有第三代的 1/10~1/2；因為模組化，含用過核燃料整組反應爐只有貨櫃大小，商業模式上可整組直接交回原廠處理，同時許多設計讓用過核燃料處理後可重新做為燃料。多數第 4 代核能尚停留在設計階段，其缺點在於儘管發電廠本身非常安全，還是有高放射性廢棄物無處可去的問題；另一方面，儘管某些技術下用過核燃料可重新製做為新燃料，但對於整個重製過程經濟效益與危害的估算，還沒有具信服力的數據。核融合技術的優勢在於幾乎不產生高放射性廢棄物，作為燃料的氫同位素幾乎是取之不盡；核融合技術的劣勢在

⁷²⁰ 林士蕙(2020) 放桌上就能發電！華人團隊 Alpha Ring 研發「人造太陽」，正打造下一個台積電？ <https://www.gvm.com.tw/article/74211>

⁷²¹ 美國專利 US10515726B2

於以目前的技術，燃料之一的「氚」可能須要由核分裂電廠量產，且我國國民多數不接受低放射性廢棄物貯放在國內（如蘭嶼）。目前核融合技術尚在實驗階段，是否真正能夠達到可接受的成本效益尚是未知數。

表 6.4.3 第 4 代核能與核融合技術之比較

項目	第 4 代	核融合
優勢	• 用過核燃料只有第三代的 1/10~1/2 • 含用過核燃料整組反應爐只有貨櫃大小，可整組直接交回原廠處理 • 用過核燃料處理後可重新作為燃料	• 幾乎沒有高放射性廢棄物，只有和醫療輻射廢棄物同等級的低放射性廢棄物 • 燃料（氫同位素）蘊藏量豐富
劣勢	• 還是有處置高放射性廢棄物的挑戰	• 燃料之一的「氚」可能須要由核分裂電廠量產 • 國人亦不接受低放射性廢棄物放在國內（蘭嶼）
待解決問題	• 用過核燃料再利用的經濟效益未確定 • 多數還在設計或試驗階段	• 尚處於設計或試驗階段，是否真正能夠達到可接受的成本效益尚是未知數

6.4.3 我國現況

我國 2020 年核能發電量占整體的 11.22%，核能發電量歷年占比如圖 6.4.2 所示。核一到核三廠分別啟用於 1978、1981、1984 年，核一廠已於 2019 年除役，核二、三廠分別將於 2023、2025 年除役。核一、二廠使用沸水式反應爐，核三廠使用壓水式反應爐，皆為第 2 代核能；封存的核四廠屬於第 3 代核能的進階沸水式反應爐。核四廠興建過程經歷 1986 年車諾比事件，時任總統蔣經國指示緩建，1992 年至 2006 年經歷多次停復工，2011 年發生日本福島核災，輿論傾向停建，2014 年行政院因而宣佈封存，陸續將已購入之燃料棒送回原廠。目前我國並無第 4 代核能或核融合應用研究之規劃。

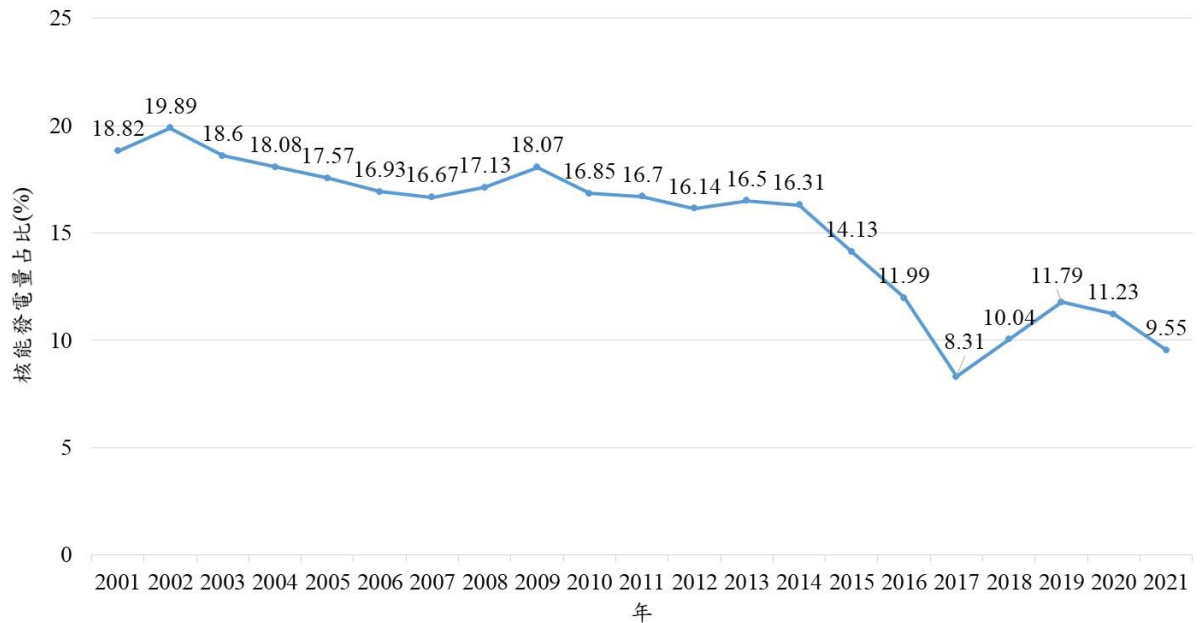


圖 6.4.2 我國核能發電量歷年占比⁷²²

我國過去也曾發生過核電廠的意外事件，最嚴重的發生在 2001 年 3 月 17 日，核三廠一號機因 345 仟伏超高壓線路故障停機，3 月 18 日 0 時 46 分，161 仟伏電源與 345 仟伏電源同時喪失，兩部緊急柴油發電機亦未順利併入電力系統，行政院原子能委員會接獲通知後，宣佈進入核子事故緊急應變計畫之 2A 類「緊急戒備」事故⁷²³，所幸最後事故解除圓滿落幕。除此之外，知情人士還揭露多起未上新聞版面的高風險事件⁷²⁴，包括防護不足、輻射水外洩等。我國低放射性廢棄物目前存放於蘭嶼、各核電廠內及核能研究所，依照台灣電力公司「低放射性廢棄物最終處置計畫」，低放射性廢棄物最終處置場應為坑道或海床下處置，須經過地區公民投票、場址細部設計與安全分析審查等嚴密的步驟方可建造，惟至今仍未完成選址⁷²⁵。依據台灣電力公司「用過核子燃料最終處置計畫⁷²⁶」，高

⁷²² 經濟部能源局(2022) 110 年能源統計手冊。

⁷²³ 行政院原子能委員會(2001) 核三廠一號機超高壓線路故障停機事件說明。
<https://www.aec.gov.tw/newsdetail/news/157.html>

⁷²⁴ 張靜文(2012) 揭開台灣核電廠不能說的 8 個祕密。

<https://www.businesstoday.com.tw/article/category/80392/post/201203220011/>

⁷²⁵ 台灣科技媒體中心(2021) 「核廢料處置」專家意見。<https://smctw.tw/11574/>

⁷²⁶ 台灣電力公司(2019) 用過核子燃料最終處置計畫書(2018 年修訂版)。
https://www.aec.gov.tw/share/file/fcma/629CrD95ZefdhJqIeU9qrQ_.pdf

放射性廢棄物處置過程須經歷 10 年濕貯冷卻、數十年的空氣對流冷卻乾式貯存、最後的深層地質處置等過程，然而我國濕貯、乾貯皆在電廠內就地進行，深層地質處置場址至今尚未確定。如果未來引入第 4 代核能，因其採用免人為介入之被動式安全停機，發生嚴重意外事件的機率大幅降低，但人員防護、輻射水的處理等還是須要謹慎以對。使用核能即會面臨核廢料最終處置的挑戰，目前使用核能的國家亦尚未找到大眾能接受的解決方案。

6.4.4 政策建議

過去重大核災事故在大眾心中已留下陰影，但事實上，我國已封存的核四屬於第 3 代核能，從核四廠的初始設計到今天，又過了數十年，核能技術已有重大進展。在用電吃緊與 2050 淨零排放目標的雙重催促下，政府可以讓民眾了解新核能技術帶來的利弊得失，並由國人為重啟核能或廢核做出對國家發展最適切的決定。第 4 代核能發電過程本身已非常安全，每單位發電所需核燃料大幅降低，不產生二氧化碳，容量因子遠大於太陽能或風能等綠能，發電穩定不受天候影響，燃料價格波動也低於天然氣等化石燃料；挑戰在於放射性廢棄物最終處置場所的安全性與人民接受度，這部分還須要仔細研究與溝通。核融合方面，我國雖無獨立發展核融合技術之經驗累積或經濟基礎，但核融合技術一旦有所突破，將為能源的使用帶來革命性的改變。以英國為例，英國政府已開始支持國內形成核融合產業的供應鏈，預計在 2040 年完成核融合先導發電廠建造，並由環境署 (Environment Agency) 與職業健康與安全管理局 (Health And Safety Executive) 著手擬定相關規範⁷²⁷。我國應儘早投入對國際核融合技術進展的掌握與接軌，了解如何參與相關供應鏈，並開始規劃將來核融合技術投入商轉所需配合的法制規範，才能即時取得相關技術並妥善地運用於紓緩我國電力供應瓶頸。本建議書政策建議如下：（一）對各種第 4 代核能技術審慎評估，如果新核能技術的應用在核能安全和廢料產生與處置上可明確的解決國人所關切的問題，再考慮與民眾充分溝

⁷²⁷ 同前揭註 715。

通後導入；(二) 密切追蹤核融合商轉的發展，在適當的時間點啟動相關規範的建立，以期與全球同步引入核融合技術，協助達成 2050 淨零排放的目標。

6.5 小結

本章討論（一）直接空氣捕獲、（二）生物法、化學法與電（光）化學法二氧化碳利用技術與（三）未來核技術等 3 類突破性新科技。

直接空氣捕獲為直接從大氣中去除二氧化碳(CO₂)，目前僅有少數試驗工廠在國外測試。傳統高濃度二氧化碳（如天然氣加工製程尾氣）捕獲成本約 25 USD/tCO₂eq，低濃度二氧化碳（如電力、水泥業尾氣）捕獲成本約 50 USD/tCO₂eq，然而目前直接空氣捕獲成本在 300 USD/tCO₂eq 以上。但上述捕獲劑的製造到直接空氣捕獲流程仍有能源消耗，固碳效果仍須要精算。

除封存之外，二氧化碳再利用為一重要方向，再利用首先要將其還原，生物法二氧化碳利用技術目前主要的限制在於速率、效率以及規模放大的問題，化學法、電化學法除了須要開發效率更高的反應外，反應過程若用電或製造氫氣參與反應，都會有額外二氧化碳的排放，因此綠電的使用在化學法與電化學法未來運用成效上扮演關鍵角色，在我國目前綠電供給尚且不足的狀況下，以化學法還原二氧化碳仍有其困難度，若未來有可能進口低價綠氫及使用剩餘綠電，這些方法才有機會實現。綜上，為因應 2050 淨零排放，我國仍須發展二氧化碳轉化技術，以改善化石工業排碳之困境，一方面善用太陽能、風能及其他零碳能源提供的能量，另一方面搭配優化後的生物及化學催化程序，將有機會把傳統石化工業轉變為低碳或零碳工業或合成高價值精細化學品的產業。

新核能方面，第 4 代核能發電過程安全性已有改善，每單位發電所需核燃料大幅降低，而且不產生二氧化碳，容量因子遠大於現有綠能（如太陽能或風能），不過核能的挑戰在於放射性廢棄物處置場所的安全疑慮與人民接受度。發展中的核融合技術方面，我國雖尚無獨立發展技術之能力，但須注意國際動向，將來如有科技突破讓核融合可以實用化，我國才能即時加入國際供應鏈，導入相關發電設施，以利達成我國淨零排放的目標。