

## 2.6 去碳燃氫

### 摘要

去碳燃氫，即是以無氧裂解技術(pyrolysis)技術，將天然氣在無氧條件下，分解產生氫氣和固體碳（純碳），並以氫氣直接發電。以此法產生之氫，亦被稱為青綠氫(Turquoise H<sub>2</sub>)，因反應不產生二氧化碳(CO<sub>2</sub>)，而把碳在燃燒前以固體碳形式分離，因此無二氧化碳排放問題。歐盟甫通過 2035 年之前低碳排天然氣發電(<270 g/kWh)可納入永續能源投資選項，去碳燃氫技術若能持續降低碳排，甚可能成為「準綠電」來源，有助解決目前綠電嚴重不足之問題。所產生之固態碳亦可在緊急時做為備用能源，紓緩我國儲備能源不足之窘境。雖然代價為依賴進口天然氣，且僅利用天然氣熱值的 55%，仍為極具開發價值之選項。須研發的技術項目包括天然氣無氧裂解、混氫發電技術、全氫發電技術，並同時發展固態碳利用技術。此項技術將能突破傳統先燃燒再捕二氧化碳的思維，開發更適合臺灣的零碳電力技術。

此技術十分有研發空間與減碳潛力，但尚未達成商業化階段，仍須完善技術細節，進行技術經濟評估(technoeconomic analysis)。故綜合我國各種狀況，建議推動下列作為：

1. 研發各式天然氣無氧裂解技術，將甲烷分解成氫和固態碳，並對各種應用模式進行技術經濟評估。
2. 研發混氫或燃氫發電設備，包括燃料電池。
3. 研發純碳之利用途徑，如各式材料應用、填海造陸、封存，或備用燃料以應緊急狀況。
4. 2035 年前研發天然氣無氧裂解技術(去碳產氫)替代天然氣發電量(2020 年)之 2~5%，進行混燒發電，並導入燃燒系統之重新設計以發展全氫燃燒發電，2050 年前全數轉型完成。

## 2.6.1 前言

天然氣無氧裂解技術在本建議書中稱為去碳燃氫技術，是本院及國際上正在研發的創新科技，可讓天然氣在無氧條件下，分離產生氫氣和固體碳（純碳），亦即雖然以天然氣為來源，但因反應後係產生固體碳而非氣態二氧化碳，故無二氧化碳排放問題，而且所製氫氣可直接混入或最終取代天然氣用以發電，目前實驗室規模的轉化率達到 95% 以上<sup>1</sup>，甚至更高。裂解過程可產生非常純的碳副產品，可應用作為工業原料，例如碳黑、碳纖、耐高溫材料、彈性體、和電極等，並可開發製成大規模建材。另亦可加工成不同碳結構，如石墨、石墨烯、奈米碳管、鑽石等高級材料。大量產生之碳，可以填海造陸，或封存並做為緊急時期燃料。天然氣無氧裂解方式所生產的氫，也可以直接與天然氣混合，在現有的燃氣渦輪機中進行混燒（20%以下）<sup>2</sup>，協助提升電力生產過程之燃燒效率並降低碳排放（圖 2.6.1）。本技術雖尚未達成商業化，但商業化進展快速，十分有研發空間。例如 Pöyry Management Consulting (UK) (2019) 的研究便認為天然氣無氧裂解產氫技術，在未來極具成本效益並且容易進行規模擴大，並推估 2050 年歐盟所需氫能約 3,969 TWh（含電力、製程/非製程熱與運輸），其供應來源會以天然氣無氧裂解產氫為主，高達 55% (2,197 TWh)，傳統天然氣重組產氫與加上碳捕存技術占 30% (1,163 TWh)，而水電解產氫僅占 15% (609 TWh)。主要因為該研究認為，僅有在歐盟再生能源成本極低的區域像是伊比利半島或北歐，電解水產氫才會相較其他兩技術具有成本競爭力<sup>3</sup>。

---

<sup>1</sup> 美國 UCSB 2017 年刊登在科學期刊(Science)的研究，利用催化性熔融金屬(catalytic molten metals)可以直接將甲烷轉化為氫與碳，運用 27% Ni~73% Bi 合金在 1,065°C 下可以達成 95% 之甲烷轉化率。請參見 Gao, Y., Wang, X., Corolla, N., Eldred, T., Bose, A., Gao, W. & Li, F. (2022) Alkali metal halide-coated perovskite redox catalysts for anaerobic oxidative dehydrogenation of n-butane, Science Advances, 8, 30. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aao5023>

<sup>2</sup> Mitsubishi Power (2018) The hydrogen gas turbine, successfully fired with a 30% fuel mix, is a major step towards a carbon-free society. [https://power.mhi.com/special/hydrogen/article\\_1](https://power.mhi.com/special/hydrogen/article_1)

<sup>3</sup> Pöyry Management Consulting (UK) (2019) Hydrogen from natural gas: The key to deep decarbonization. [https://agnatural.pt/folder/documento/ficheiro/565\\_zukunft\\_erdgas\\_key\\_to\\_deep\\_decarbonisation.pdf](https://agnatural.pt/folder/documento/ficheiro/565_zukunft_erdgas_key_to_deep_decarbonisation.pdf)



圖 2.6.1 天然氣無氧裂解產氫與碳，以及混燒應用

根據 Weger 等人(2017)建置之天然氣(甲烷)無氧裂解對氫經濟影響模型，當天然氣洩漏率低時，利用天然氣無氧裂解產氫並應用燃料電池(直接燃燒亦可)，全球二氧化碳排放量可減少至多 27%<sup>4</sup>。另根據 Sánchez-Bastardo 等人於 2021 年發表的文獻，目前配合實施 CCS 系統時，天然氣蒸汽重組、天然氣無氧裂解兩種技術已經可以達到轉換效率相近(60% vs. 58%) (表 2.6.1)<sup>5</sup>。然近期天然氣無氧裂進展快速。此外，CCS 在臺灣佈建亦有尚待克服之技術、經濟、及社會面向之困難。

<sup>4</sup> Weger, L., Abánades, A. & Butler, T. (2017) Methane cracking as a bridge technology to the hydrogen economy, *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(1), 720-731. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319916333213>

<sup>5</sup> Sánchez-Bastardo N., Schlögl, R. & Ruland, H. (2021) Methane pyrolysis for zero-emission hydrogen production: A potential bridge technology from fossil fuels to a renewable and sustainable hydrogen economy. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 60 (32), 11855-11881. DOI10.1021/acs.iecr.1c01679

表 2.6.1 天然氣無氧裂解與其他產氫技術之能源效率比較（右欄搭配 CCS）<sup>6</sup>

| technology                     | energy efficiency in transformation (%) | energy efficiency with CCS (%) |
|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|
| coal gasification              | 60                                      | 43                             |
| steam methane reforming        | 75                                      | 60                             |
| biomass gasification           | 35~50                                   |                                |
| thermochemical water splitting | 20~45                                   |                                |
| water electrolysis             | 50~70                                   |                                |
| methane pyrolysis              | 58                                      | 58                             |

而若就產氫成本與產氫的生命週期碳足跡<sup>7</sup>進行比較（利用現有電網電力），天然氣無氧裂解單位產氫成本高於天然氣重組產氫，但是低於水電解產氫；而就產氫的碳足跡而言，天然氣無氧裂解則比天然氣重組產氫與水電解產氫為低（圖 2.6.2）。必須注意的是，天然氣成分中 90% 為甲烷(CH<sub>4</sub>)，此為短周期，但暖化潛能高的溫室氣體，近年國際間對於甲烷排放量也越趨重視<sup>8</sup>，尤其是天然氣生產鏈中上游及中游的逸散洩漏問題。因去碳燃氫仍仰賴天然氣作為原料，因此，未來須確保改善逸散洩漏問題，去碳燃氫技術之碳足跡方可能降低(Box 2.6.1)。此外，天然氣重組技術已臻成熟，電解水產氫亦已開發多時，而天然氣無氧裂解技術仍在發展階段，不過前途大有可為。若天然氣無氧裂解產生之氫發電可歸為綠電，則此途徑為產生綠電最佳模式。詳見 Box 2.6.2、Box 2.6.3 與 Box 2.6.4。

#### Box 2.6.1 國際間管控甲烷逸散洩漏排放之現況與趨勢

全球甲烷排放量主要排放源為天然溼地、人為農業等，能源相關甲烷排放約占 23%<sup>9</sup>。因天然氣在許多國家能源轉型中扮演過渡能源的角色，能源部門甲烷排放量預期將隨之成長，天然氣生命週期中的甲烷排放主要發生在上游開採與處理階段(44%)，尤其是製程中的高壓排放(vented)需求，中游運輸則占 35%，下游的再氣化及輸送為 21%<sup>10</sup>。惟過去對天然氣生產鏈中的甲烷排放及洩漏缺乏有效監測與管控機制，使能源部門的甲烷排放有被低估現象<sup>11</sup>。也因如此，國際間也逐漸重視，2021 年 11 月 COP26 大會中，逾百國（含前 30 大

甲烷排放國之半數、巴西等)響應美國與歐盟發起之「全球甲烷承諾」(Global Methane Pledge)倡議<sup>12</sup>，共同推動減少天然氣開採、加工、儲存生產、製程及配送等造成甲烷逸散排放，部分推動做法如下：

- 2015 年美國環保署即制定甲烷排放標準，提供 3,000 萬美元用於開發低成本高靈敏度技術，檢測油氣系統中的甲烷排放，並要求企業調查儲罐、管道和開採井之甲烷洩漏，規範每月需在大型設施上執行<sup>13</sup>。
- 歐盟成立歐洲氫能運作者網路(European Network of Network Operators for Hydrogen)，2050 年起將不再提供長期契約給未減碳的天然氣業者<sup>14</sup>。
- IEA 及美國國家環境保護局(Environmental Protection Agency, EPA)等機構建議需發展洩漏檢測與修復(Leak Detection and Repair, LDAR)系統，建立天然氣管線設備的檢測與修復程序，並規範檢測頻率、範圍等；或訂定技術標準，規範天然氣業者設備技術的甲烷排放標準<sup>15</sup>。

---

<sup>6</sup> 同前揭註 5。

<sup>7</sup> 碳足跡為一項活動或是產品整體生命週期產生的溫室氣體排放量，亦即涵蓋從原物料開採、製造、配送銷售、使用到廢棄或回收各階段。產品碳足跡資訊網（2022）碳足跡介紹－何謂碳足跡。<https://cfp-calculate.tw/cfpc/Carbon/WebPage/FLFootIntroduction.aspx>

<sup>8</sup> Tollefson, J. (2022) Scientists raise alarm over ‘dangerously fast’ growth in atmospheric methane. Nature. [https://www.nature.com/articles/d41586-022-00312-2?utm\\_source=Nature+Briefing&utm\\_campaign=d6c58c6a9d-briefing-dy-20220208&utm\\_medium=email&utm\\_term=0\\_c9dfd39373-d6c58c6a9d-44990377](https://www.nature.com/articles/d41586-022-00312-2?utm_source=Nature+Briefing&utm_campaign=d6c58c6a9d-briefing-dy-20220208&utm_medium=email&utm_term=0_c9dfd39373-d6c58c6a9d-44990377)

<sup>9</sup> IEA (2020) Methane Tracker 2020, <https://www.iea.org/reports/methane-tracker-2020>

<sup>10</sup> IEA (2021) Driving Down Methane Leaks from the Oil and Gas Industry. IEA, Paris.

<sup>11</sup> A.R. Brandt et al., (2014) Methane Leaks from North American Natural Gas Systems. Science 343:6172.

<sup>12</sup> Global Methane Pledge. <https://www.globalmethanepledge.org/>

<sup>13</sup> 美國白宮 (2015) FACT SHEET: Administration Takes Steps Forward on Climate Action Plan by Announcing Actions to Cut Methane Emissions, <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/01/14/fact-sheet-Administration-takes-steps-forward-climate-action-plan-anno-1>

<sup>14</sup> The EU Hydrogen and Decarbonised Gas Market Package: Revising the governance and creating a hydrogen framework. <https://fsr.eui.eu/the-eu-hydrogen-and-decarbonised-gas-package-revising-the-governance-and-creating-a-hydrogen-framework/>

<sup>15</sup> EPA (2007) Leak Detection and Repair: A Best Practices Guides.

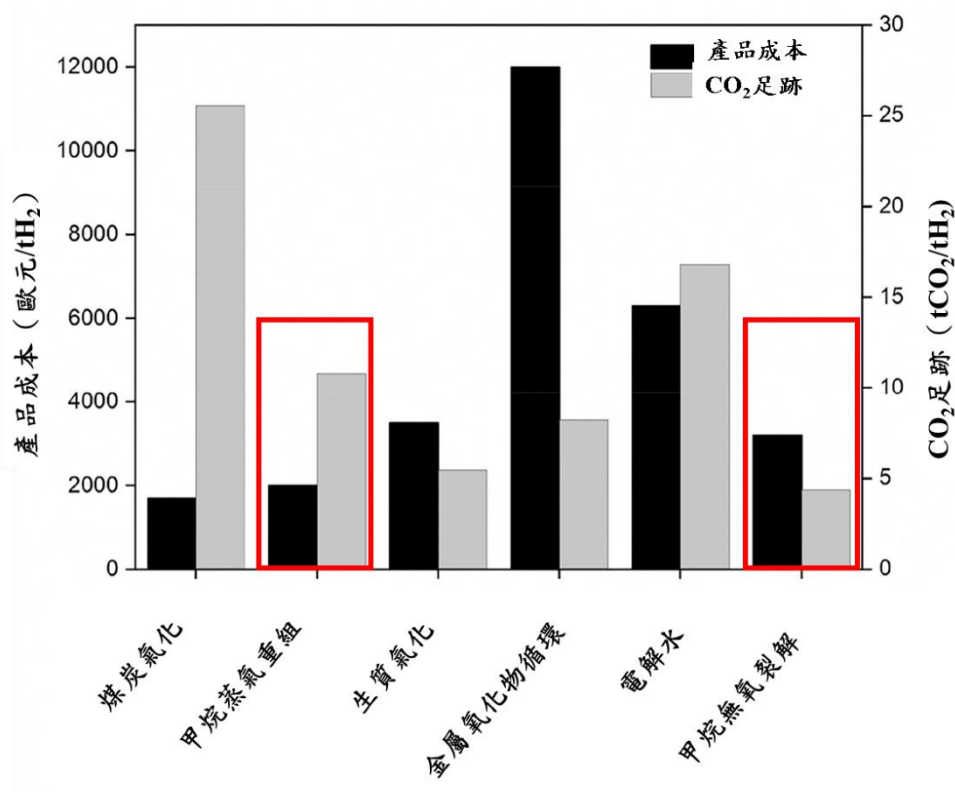


圖 2.6.2 天然氣無氧裂解與其他產氫技術之產氫成本與生命週期碳足跡比較<sup>16,17</sup>

#### Box 2.6.2 一度綠電，如何使用最好？

若有一度(kWh)綠電，可以下列數種方式使用。(1)直接使用，取代排碳電力。(2)若無法馬上使用，以電池或其他儲能裝置儲能，再放電使用。(3)電解水產氫，再以氫發電。(4)電解水產氫，再以氫發熱。(5)無氧裂解天然氣成氫和固態碳，再以氫發電。(6)抽蓄水力儲能再發電。

若直接使用，取代燃氣或燃煤等排碳電力，相較燃氣或燃煤則可省 0.45 kg 與 0.9 kg 的二氧化碳<sup>18</sup>。若無法馬上使用，以電池儲能，再放電使用。電池充放電效率約 90%，故一度電降為 0.9 度，相較燃氣或燃煤則可省 0.41 kg 及 0.81 kg 的二氧化碳。但電池儲能須考慮成本，且長期儲能不易。

若以一度綠電電解水產氫，以最高效率(80%)<sup>19</sup>計算，可產 0.02 kg 的氫。再以氫發電，若最高效率為 60%，則可產生 0.48 度電，相較燃氣或燃煤則可省 0.21 kg 與 0.43 kg 的二氧化碳。故產氫能效低，且須考量儲氫運氫的問題。其好處為可長期儲能。若電解水產氫，再以氫燃燒發熱以取代天然氣發熱，則可省之二氧化碳僅為 0.16 kg<sup>20</sup>。此乃以天然氣和氫燃燒發熱效率相同計算。

若以一度綠電裂解天然氣成氫和固態碳，則可將 0.6 kg (37.9 mole)的天然

氣分解成 0.151 kg (75.8 mole) 的氫和 0.455 kg (37.9 mole) 的固態碳。再以氫發電，以最高效率 60% 計，則可產出 3.6 度的零碳電力。若此零碳電力獲國際認證為綠電，則產生複利循環。所產生之固態碳則可為工業材料、建材或填海造陸，亦可做備用能源，解決天然氣儲量不足的問題。

若以一度綠電提供抽蓄水力儲能，作為後續發電使用，因抽蓄水力約須耗 1.25 度電抽水才能發 1 度電<sup>21</sup>，故若投入 1 度綠電，對應可以得到 0.8 度綠電，若以此發電取代燃氣或燃煤等排碳電力，相較燃氣或燃煤則可省 0.36 kg 與 0.72 kg 的二氧化碳。

### Box 2.6.3 如何產生綠電「複利」循環的效果？

以我國目前狀況，綠電從風、光發電而來，目前已有供不應求的狀況。若以一度綠電來裂解天然氣（主成份為甲烷， $\text{CH}_4$ ），理論上可把 47.3 摩爾(mole) 的甲烷分解成固態碳和氫。若以 80% 效率推估，則可分解 37.9 mole 的甲烷成 37.9 摩爾(mole) 的固態碳和 75.8 摩爾(mole) 氫。若以後者發電，效率可達 40~60%（渦輪機或燃料電池），而產生 2.4~3.6 度(kWh) 的電。由於以氫發電不排二氧化碳，此途徑產生之電可視為綠電。此可為綠電「增生」之有效途徑，而解決綠電不足之問題。代價為依賴進口天然氣，且僅利用天然氣熱值的 55%，勢必增加發電成本約二倍。但若考慮碳價則差異將減少。

<sup>16</sup> 同前揭註 5。

<sup>17</sup> 水電解與金屬氧化物循環產氫之生命週期碳足跡主要來自既有電網電力生產的排碳；天然氣無氧裂解的排碳除了來自電網電力生產之排碳外，尚包括天然氣開採與運輸的排碳。雖然天然氣之甲烷洩漏，容易使天然氣無氧裂解在整個生命週期產生較高的碳足跡，但此種洩漏可透過完備基礎設施和有效的洩漏檢測和修復加以避免，故我國未來在天然氣採購上，可透過要求天然氣生產國證明並無甲烷逸散來避免相關碳足跡產生。

<sup>18</sup> 燃煤與燃氣一度電的排碳量係參考表 2.1.2 台灣電力公司火力機組之溫室氣體排放係數（2016 年資料），燃煤以 0.9 kg  $\text{CO}_2$ /度電計算，燃氣的碳排則設定為燃煤的一半，以 0.45 kg  $\text{CO}_2$ /度電計算。但隨技術演進排放係數將可進一步下降，如目前台灣電力公司於 2020 年購入的新型燃氣複循環發電機組發電效率已達 64%，將來技術創新後效率仍可望進一步提升，此外目前大林電廠採用的超超臨界燃煤機組的發電效率亦達 44.93%。

<sup>19</sup> 同前揭註錯誤！尚未定義書籤。

<sup>20</sup> 1 度(kWh)綠電電解水產氫，以最高效率(80%)計算，可產 0.02 kg 的氫，氫熱值（高）為 142 MJ/kg，故理論可產生之熱量為 2.84 MJ。另我國天然氣（進口）排放係數依照經濟部能源局 109 年度我國燃料燃燒二氧化碳排放統計與分析報告顯示為 56,100 kg  $\text{CO}_2$ /TJ（等同 0.056 kg  $\text{CO}_2$ /MJ，100%燃燒下），若假設天然氣和氫燃燒發熱效率相同皆為 A，氫實際燃燒可發熱熱量為  $(2.84 \times A)$  MJ，天然氣燃燒發熱實際碳排需轉化為  $(0.056 \div A)$  kg  $\text{CO}_2$ /MJ。故氫實際燃燒發熱熱量  $(2.84 \times A)$  MJ 可以節省的碳排為  $(2.84 \times A) \times (0.056 \div A)$  kg  $\text{CO}_2$  = 0.16 kg  $\text{CO}_2$ 。

<sup>21</sup> 抽蓄水力約需耗 1.25 度的電抽水才能發 1 度電。請參見孫文臨(2021) 尖峰用電備援再添生力軍，德基水庫化身大型「儲能電池」，拚 2034 年啟用。<https://e-info.org.tw/node/231418>

#### Box 2.6.4 電解水，甲烷裂解（去碳燃氫），和甲烷蒸汽重組之比較

電解水產氫所得到氫的燃燒熱( $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ )理論上等於電解水所需之能量。即使原料成本為零且製程毫無損失也是無法加值。實際上電轉氫再轉電效率只有 50%.以下，好處是可以長期儲能。為一儲能途徑。但儲氫問題須解決。

甲烷裂解僅須水電解能量的 7.5 分之一，但須投入甲烷為原料，然其產生之氫所含之能量遠大於裂解甲烷所需投入之能量，故有淨增之可用零碳能源。此外，所生成之固態碳亦可作工業原料或儲備緊急用能源。惟仍依賴進口天然氣，且發電量較低。若天然氣成本比產出電能的價值低，則有淨利。此外、所產之電為綠電。若綠電價格為一般電價兩倍以上、則合成本考量。若天然氣價格飆高、綠電價格大幅下降、則甲烷裂解產氫再發電將無競爭力。

另一產氫方式為甲烷蒸汽重組，其能耗及能量淨增量約與甲烷裂解相似，但卻產生大量二氧化碳，若要淨零，仍須仰賴二氧化碳捕捉與封存。

|           | 電（裂）解水                                                               | 裂解甲烷、去碳燃氫                                                              | 甲烷蒸汽重組                                                                                                         |
|-----------|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 原料        | $\text{H}_2\text{O}$                                                 | $\text{CH}_4$                                                          | $\text{CH}_4, \text{H}_2\text{O}$                                                                              |
| 需投入之能量*   | $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 2\text{H}_2$<br>572 kJ | $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}_{(\text{s})} + 2\text{H}_2$<br>76 kJ | $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$<br>126 kJ (per 2 mole $\text{H}_2$ ) |
| 氫燃燒產生之能量* | $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$<br>572 kJ | $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$<br>572 kJ   | $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$<br>572 kJ                                           |
| 能量淨利      | $572-572=0$ kJ                                                       | $572-76=496$ kJ                                                        | $572-126=446$ kJ                                                                                               |
| 副產物       | —                                                                    | 固態碳                                                                    | 二氧化碳                                                                                                           |
| 好處        | 產氫，長期儲能                                                              | 產綠電，基載                                                                 | 產氫，技術成熟                                                                                                        |
| 缺點        | 無綠電淨利<br>須解決儲氫問題                                                     | 依賴進口天然氣<br>技術待精進                                                       | 依賴進口天然氣<br>仍須二氧化碳捕捉                                                                                            |

\*註：為理論值，以 2 mole  $\text{H}_2$  為基準



## 2.6.2 國際發展現況

### 1. 天然氣無氧裂解技術途徑、案例、發展現況及挑戰

在去碳燃氫技術發展趨勢上，目前主要有三大途徑，包括熱能分解、電漿分解與催化劑分解技術（圖 2.6.3）。熱能分解案例主要是德國的 BASF 與 KIT/IASS 發展的技術，反應溫度大於攝氏 1,000 度；挪威 Kvaerner 與美國 Monolith materials 發展的電漿分解技術，通常溫度須要高於攝氏 2,000 度；美國佛羅里達太陽能中心與 Hazer Group 則是開發催化分解技術，可以透過催化劑的協助，將反應溫度降至攝氏 1,000 度以下。而在技術成熟度上，以電漿分解技術及熱能分解成熟度較高，約在先導工廠與生產工廠階段，催化劑分解技術則在比較上游，約為實驗室到先導工廠階段<sup>22</sup>。

| 原理                                                                                                                                                             | 案例                                                                                                           | 發展現況 (TRL)                                                                  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
|  <ul style="list-style-type: none"> <li>反應器壁熱量分解 (&gt;1000 °C)</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>BASF</li> <li>德國KIT/IASS</li> </ul>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>實驗室規模工廠/研發計畫擴大規模 (TRL3-4)</li> </ul> |
|  <ul style="list-style-type: none"> <li>電漿炬產生局部能量密度和 2,000 °C 高溫</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>挪威Kvaerner</li> <li>美國Monolith materials</li> </ul>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>先導工廠/生產工廠 (TRL6-8)</li> </ul>        |
|  <ul style="list-style-type: none"> <li>透過催化劑於遠低於1,000 °C 溫度下反應</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>UOP, HYPRO process</li> <li>佛羅里達太陽能中心</li> <li>Hazer group</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>實驗室/先導工廠 (TRL3-4)</li> </ul>         |

圖 2.6.3 去碳燃氫技術發展現況<sup>23</sup>

### 2. 天然氣無氧裂解之能耗

去碳燃氫技術發展的挑戰，主要在於能源消耗。甲烷的燃燒熱為 889 kJ/mole，

<sup>22</sup> Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F. & Kolb, T. (2020) State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. ChemBioEng Reviews, 7: 150-158.  
<https://doi.org/10.1002/cben.202000014>

<sup>23</sup> 同前揭註 22。

但理論上僅需 76 kJ 的熱能即可把一摩爾(16 g)的甲烷分解成二摩爾氫和一摩爾碳，其中二摩爾氫的燃燒熱為 572 kJ。故理論上天然氣無氧裂解發電之能效最高可達天然氣發電之 59%<sup>24</sup>，但產出之電力為零碳電力。若可利用發電廠之熱整合，則能效可再提高。若以電漿裂解，則須提高電漿控制系統能效。實際上目前天然氣無氧裂解技術之能耗仍高於理論值，但有望在近年有重大進展。

天然氣無氧裂解技術，要以天然氣燃燒發電再捕碳做比較。倘若直接以天然氣發電（假設以發電效率約 45%左右計算），每度約產 0.44 kg 左右二氧化碳<sup>25</sup>，再用傳統碳捕捉技術把碳捕捉，其耗能也相當可觀。以鈣迴路進行二氧化碳捕獲為例，一摩爾碳酸鈣(CaCO<sub>3</sub>)分解出二氧化碳需 180 kJ，須回收熱能以提高效率。回收熱能雖可行、但設計複雜且增加設備投資成本，捕獲之二氧化碳須加壓至超臨界狀態才可儲存於地層，加壓亦消耗相當能量，且在臺灣並無足夠現成儲存場域。未儲存之二氧化碳雖可製成醋酸等化學品，但量不足以消耗臺灣所有產出之二氧化碳，其餘目前少有利用價值。

綜上，從能耗、儲存、再利用各角度而言，天然氣無氧裂解去碳，將比天然氣燃燒後再捕獲封存或利用二氧化碳有效率。惟天然氣無氧裂解去碳技術仍屬於發展早期，反應能效仍須提高。此外，要為產生的碳尋找合適的應用或去處。

### 3. 天然氣無氧裂解產碳之應用

天然氣無氧裂解產出之碳可直接儲存，是為重要優點，而不若一般 CCUS 捕捉下來之碳為氣態二氧化碳須加高壓至臨界狀態才能注入地層。對於天然氣無氧裂解產碳的可能應用，美國能源部能源先進研究計畫署(ARPA-E)研究不同類型碳應用之市場大小與價值性。其研析可應用於包括較高價的材料，如石墨烯(graphene)、鑽石(diamond)、碳奈米管(carbon nanotubes)以及碳纖維(carbon fiber)等，亦可以應用於價格較低但應用量較大的水泥業(cement)、鋼鐵業(steel)、鋁業

---

<sup>24</sup> Energy efficiency =  $572 \div (889+76) = 59.2\%$

<sup>25</sup> 我國天然氣（進口）排放係數為 56,100 kg CO<sub>2</sub>/TJ，1 TJ 相當於 277,778 kWh，故排放係數換算後為 0.2 kg CO<sub>2</sub>/kWh（100%燃燒下），若發電效率為 45%，則每 kWh 之 CO<sub>2</sub> 排放為  $0.2 \div 0.45 = 0.44$  kg。

(aluminum)、塑膠(plastic)、冶金焦(met coke)、碳黑(carbon black)、石墨(graphite)以及碳化矽(silicon carbide)等。以石墨烯(graphene)而言，每噸的價值很高，甚可達 1 億美元，但是全球市場不到 0.01 Mt。應用於鋼鐵業與塑膠的用量較大，全球約在 100~1,000 Mt 的範圍，價格約每噸 1,000 美元左右<sup>26</sup>。用於水泥原料雖然每公噸價格僅在 100 美元左右，但量級會更高。目前像是 Monolith materials 公司在美國內布拉斯加州 Olive Creek 計畫，便規劃將天然氣無氧裂解獲得之碳，製作為碳黑，以使用於輪胎、工業橡膠或特用化學品中<sup>27</sup>。美國 C-Zero 公司則是投入研發將天然氣無氧裂解產碳取代建築結構之技術，詳見後述創新案例 5(1)。德國石化大廠 BASF 則是嘗試將碳使用於製鋼與製鋁並已獲得正向測試結果<sup>28</sup>。

然而，天然氣無氧裂解產出大量的碳每年可達百萬公噸級以上，不可能完全被利用。將碳儲存或封存的方法可以包括填海造陸或是作為土壤改良/環境修復劑等。由於純碳相對穩定，填海造陸為一可能選項。我國已有多次填海造陸經驗，應可規劃評估。碳的密度約為水的兩倍，亦可沈於海底以為永久封存，惟對生態的影響亦須進一步評估。而向土壤添加碳質產品可以改善種子發芽、植物生長和作物產量，因此若天然氣無氧裂解獲得的碳也可利用於土壤改良，則對植物生長產生正面影響，但亦須要透過進一步的研究驗證其對土壤改良和環境淨化的適用性，並確保不會對既有土地與環境生態等產生負面影響<sup>29</sup>。

此外，產出之碳亦可做為儲備能源，萬一遇有緊急狀況，可以燃碳發電。此技術層面問題應可參考燃煤發電。若要長期使用，則須以 CCUS 技術來搭配。綜上所述，有別於目前氣體二氧化碳轉為儲存的方法都有額外能耗，固態碳的利用或儲存確有市場價值，不失為正向的碳儲存方式。

---

<sup>26</sup> ARPA-E (2021) Methane pyrolysis for hydrogen: Opportunities and challenges.

<https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-09/h2-shot-summit-panel2-methane-pyrolysis.pdf>

<sup>27</sup> 同前揭註 26。

<sup>28</sup> ARPA-E (2021) Methane Pyrolysis – a potential new process for hydrogen production without CO<sub>2</sub> emission, BASF. ARPA-E Methane Pyrolysis Annual Program Review Virtual Meeting. <https://arpa-e.energy.gov/sites/default/files/2021-01/16%20OK%20-%20ARPA-E%20Meeting%20Bode%20Flick%20Methane%20Pyrolysis%20web.pdf>

<sup>29</sup> 同前揭註 5。

#### 4. 實施天然氣無氧裂解技術的問題與挑戰

綜上所述，從能耗、儲存、再利用各角度而言，以天然氣無氧裂解去碳，將比天然氣燃燒後再捕獲封存或利用二氧化碳有效率，但天然氣無氧裂解技術的實施，仍須透過更詳細之評估研究，以確認該技術在政治、社會、經濟、技術與環境等面向之可行性。例如，天然氣無氧裂解技術雖不排碳，但仍須要使用天然氣作為原料，以相同發電度數，天然氣無氧裂解所需天然氣量較天然氣直接發電為高。以 2020 年天然氣發電燃料投入約為 1,426 萬公噸<sup>30</sup>，燃氣發電度數為 998 億度<sup>31</sup>，相當於每億度電須投入 1.43 萬公噸天然氣；而依照附錄 2H 以未來 2050 年淨零排放之長期觀點估算天然氣無氧裂解產氫發電潛力，若投入天然氣 3,888 萬公噸，燃氫發電度數約在 1,456~1,685 億度，相當於每億度電須投入 2.31~2.67 萬公噸天然氣，為傳統天然氣發電之 1.6~1.9 倍。因此，利用天然氣無氧裂解技術進行發電，可能增加我國對天然氣進口的依賴，較不利於達成能源消費結構多樣化等能源安全目的。此外，因產出相同發電量，天然氣無氧裂解技術所需天然氣投入量為傳統天然氣發電所需之 1.6~1.9 倍，代表原料成本（未計入副產品碳應用之收益以及實施天然氣無氧裂解所需新增之固定資產設備成本等）將同步增加，電價因此須要隨之調升。但未來若能搭配適當的碳定價與開發多元化之碳應用增加收益，天然氣無氧裂解技術仍有機會相較傳統天然氣發電具有競爭力。而在技術面上，因天然氣無氧裂解技術，大多須要透過攝氏 1,000 度以上的高溫操作溫度，故在裂解爐之設計與使用上，須注意高溫反應下對反應爐可能產生的腐蝕作用，並透過開發合適之材料以達成反應之安全性。而在環境可行性則如前述產碳之應用討論，開放式之碳儲存或封存應用須要完善生態環境影響之相關評估研究。

#### 5. 天然氣無氧裂解之創新案例

##### (1) 美國 UCSB 催化性熔融金屬之天然氣無氧裂解技術

美國加州大學聖塔芭芭拉分校(UCSB)開發前述第三類的催化性熔融金屬之

<sup>30</sup> 經濟部能源局能源統計專區(2022) 發電燃料投入。 <https://www.esist.org.tw/Database/Search?PageId=5>

<sup>31</sup> 經濟部能源局能源統計專區(2022) 發電量。 <https://www.esist.org.tw/Database/Search?PageId=3>

天然氣無氧裂解技術，主要利用催化性熔融金屬(catalytic molten metals)（27% Ni~73% Bi 合金）在 1,065°C 下可以達成 95%之甲烷轉化率。該校新創公司 C-Zero 在 2021 年得到 Breakthrough Energy Ventures 等投資 1,150 萬美元<sup>32</sup>。此外，美國 ARPA-E 資助了天然氣無氧裂解搭配碳再利用計畫，前述的 C-Zero 與 MIT、Stanford 等大學共同參與，並展示將裂解產碳（以多種形式）取代建築結構與熱電系統中的礦物與金屬，希望開發的碳屋可利用天然氣無氧裂解生產的奈米碳管(CNT)、線(threads)和片材(sheets)<sup>33,34</sup>。

## **(2) BASF 天然氣無氧裂解產氫/碳**

德國巴斯夫(BASF)天然氣無氧裂解產氫/碳則是利用前述第一類熱能分解技術，BASF 與合作夥伴參與德國聯邦教育和研究部(BMBF)的資助計畫，開發天然氣無氧裂解技術測試反應爐，並已在路德維希港建造與啟動<sup>35,36</sup>。在進程規劃上，預計 2025 年啟動先導工廠，2030 年開始以大規模工廠量產。

## **(3) 美國 Monolith Material 電漿炬天然氣無氧裂解技術**

美國 Monolith Material 電漿炬天然氣無氧裂解技術則是利用前述第二類電漿分解技術，使用 100%再生能源，運用電漿炬天然氣無氧裂解技術，將再生天然氣(RNG)或是生物沼氣(renewable biogas)轉換為碳跟氫，可達成淨負排放，預計 2024 年上線成為全球最大規模天然氣無氧裂解工廠<sup>37</sup>。

---

<sup>32</sup> C-Zero (2021) Greentech Media: C-Zero Raises \$11.5M to Scale Up ‘Turquoise Hydrogen’. <https://www.czero.energy/post/greentech-media-c-zero-raises-11-5m-to-scale-up-turquoise-hydrogen>

<sup>33</sup> ARPA-E (2020) Massachusetts Institute of Technology (MIT)- CarbonHouse. <https://arpa-e.energy.gov/technologies/projects/carbonhouse>

<sup>34</sup> 同前揭註 26。

<sup>35</sup> BASF (2020) Climate protection with carbon management. <https://report.basf.com/2020/en/managements-report/responsibility-along-the-value-chain/environmental-protection-health-and-safety/carbon-management.html>

<sup>36</sup> BASF (2021) New technologies. <https://www.basf.com/hk/en/who-we-are/sustainability/we-produce-safely-and-efficiently/energy-and-climate-protection/carbon-management/innovations-for-a-climate-friendly-chemical-production.html>

<sup>37</sup> 同前揭註 26。

#### (4) 中央研究院天然氣無氧裂解產氫/碳

我國為減少燃煤發電產生的污染，天然氣發電比重已達 40%，惟天然氣燃燒 ( $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ ) 仍釋放出二氧化碳溫室氣體，故中央研究院啟動的 Alpha 去碳計畫，即希望在燃燒前先將天然氣（甲烷）中的碳去除 ( $\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$ )，剩下潔淨的氫氣發電，達到淨零排放的目標。依前述去碳燃氫的技術途徑可分：熱能分解、電漿分解與催化劑分解技術三大類，各有優劣點與待克服的瓶頸問題。過去國外為製造高純度的氫氣，研究以上無氧裂解天然氣的方法已經有多年的歷史，也建立了一些基礎，惟尚未能達到真正大規模去碳的商業運轉。因此，Alpha 去碳計畫重點為發展最佳的去碳技術，過去一年多來已經測試了以上三類無氧裂解去碳技術，實際將天然氣無氧裂解出固態碳和氫氣，並累積了足夠的實驗數據（圖 2.6.4），已經進展到 TRL 3（實驗室的 R&D 研究計畫）的階段，下一步將進入 TRL 4 階段，亦即試行實驗室環境的原型測試與驗證。中央研究院在此項研究雖僅有一年多的歷史，但研究水準已經達到國際上的平均水準，並期待在與業界合作下，測試導入天然氣發電機組之最佳條件，盼能早日達到去碳燃氫（天然氣無氧裂解去碳技術）的商業運轉，協助國家在 2050 年達到淨零排放的目標。



圖 2.6.4 中央研究院以天然氣無氧裂解產碳成果<sup>38</sup>

<sup>38</sup> 中央研究院 Alpha 去碳計畫研究團隊提供。

### 2.6.3 政策建議

#### 1. 研發各式天然氣無氧裂解(pyrolysis)技術，將甲烷分解成氫和固態碳，並對各種應用模式進行技術經濟評估

因為天然氣無氧裂解技術途徑可分熱能分解、電漿分解與催化劑分解技術三大類，各有其優劣點與待克服的瓶頸，但無論以何類無氧裂解技術產氫，副產物皆僅有非常純的粉狀碳副產品，不會形成碳排，故應及早投入研發使技術能夠加速達到商業化。產氫可混入或最終取代天然氣用以發電，粉狀碳副產品則可做材料應用或封存。然而天然氣無氧裂解產氫與碳，須要能源的投入，才能再衍生後續多元應用途徑，故在相關的技術投資決策上，仍須先完善該等技術應用相關之技術經濟評估，包括能耗、減碳效益、各類應用之技術與經濟可行性等來選擇最適合我國天然氣無氧裂解技術發展的應用場域。

#### 2. 引進或研發混氫或燃氫發電設備

因天然氣無氧裂解所生產的氫，可以直接與天然氣混合，在現有的燃氣渦輪機中進行混燒（<20~60%氫），短期內便可協助提升電力生產過程之燃燒效率並降低碳排，國際預估可供純氫燃燒的燃氫渦輪機將在 2030 年左右達到成熟，屆時將可利用純氫燃燒發電逐步取代傳統化石燃料發電大幅降低發電碳排，故投入研發各式天然氣無氧裂解技術時，須同步引進或研發混氫或純氫發電設備，以利於天然氣無氧裂解技術產氫後，可以充分利用來燃燒提供無碳電力。

此外，由於歐盟近期通過 2035 年前低碳排天然氣發電(< 270 g/kWh)可納入永續能源投資選項，去碳燃氫技術若能持續降低碳排，甚可能成為「準綠電」來源，有助解決目前綠電嚴重不足之問題。

#### 3. 研發純碳之利用途徑，如各式材料應用、填海造陸、封存，或備用燃料以應緊急狀況

無氧裂解產出之粉狀碳副產品可直接儲存或應用，是為其主要優點，不若一般 CCUS 捕捉下來之碳為氣態二氧化碳須加高壓至臨界狀態才能注入地層。但

因無氧裂解產出之碳量每年可達百萬公噸級以上，因此規劃與研發純碳之利用途徑以順利進行轉化是一重要議題。由於純碳相對穩定，少則可做一般材料應用，如作為工業原料、高級材料與建材等，多則可考慮填海造陸、海底永久封存或是作為備用燃料。惟填海造陸、海底永久封存對生態的影響亦須評估。

#### **4. 2030 年前研發天然氣無氧裂解技術（去碳產氫）替代部份天然氣發電量，進行混燒發電，並導入燃燒系統之重新設計以發展全氫燃燒發電，2050 年前全數轉型完成**

因國際預估全氫燃燒的氫渦輪機預計在 2030 年左右達到成熟，為能促進 2050 淨零排放目標的達成，並考量創新科技去碳燃氫技術之成熟時程，因此建議在 2035 年前研發去碳燃氫技術替代 2%~5%天然氣發電量（2020 年為基準），以與天然氣進行混燒發電；待去碳燃氫技術更為成熟且成本大規模下降，並搭配發電裝置逐步替換為全氫燃燒之氫渦輪機下，則可逐步推動實現 2050 年全氫燃燒發電。

至於天然氣無氧裂解產氫發電潛力，因天然氣為此技術之原料，故本政策建議書以天然氣量來估算此技術發電潛能。2021 年天然氣進口 1,944 萬噸，初步假設在 2050 年使用 2021 年進口天然氣量之 2 倍在去碳燃氫發電上，則可供無氧裂解產氫的天然氣量為 3,888 萬噸。無氧裂解效率達 80%的情形下，3,888 萬噸天然氣可以得到得淨電力為 1,685 億度，若無氧裂解效率僅達 60%，3,888 萬噸天然氣可以得到得淨電力為 1,456 億度，估計 2050 年全氫發電可達 1,456~1,685 億度，再以發電廠容量因數(capacity factor)設定為 0.8 回推所需裝置容量，裝置容量約為 20.8~24.0 GW（詳見附錄 2H）。