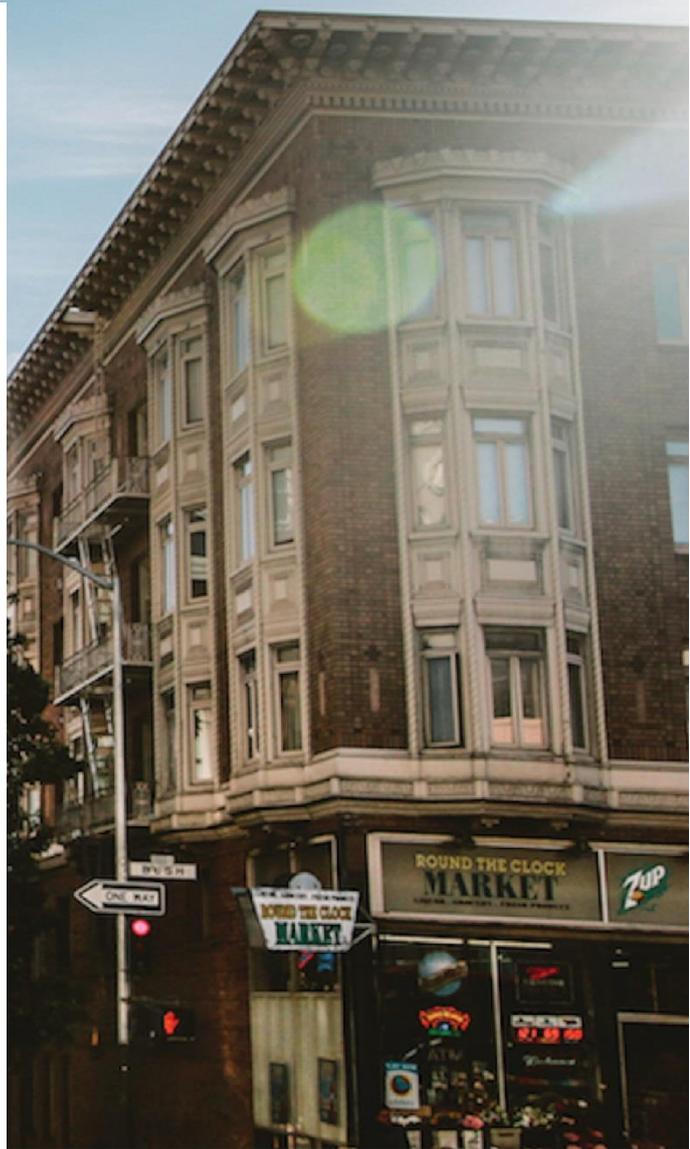


氨燃料特性、製程 與成本趨勢探討

財團法人驗船中心
(2024年2月)



目錄

名詞對照	1
一、前言	3
二、氨的特性	4
三、減碳關鍵—氫的來源	7
四、氨各種製程及成本	9
五、航運燃料全生命週期與氨的成本	14
六、氨燃料後續展望	19
參考文獻	23

名詞對照

英文簡稱/符號	英文全稱	中文
AEA	Ammonia Energy Association	氨能協會
ATR	Auto-Thermal Reforming	自發性熱重組
CAPEX	Capital Expenditure	資本支出
CAS	Chemical Abstracts Service	美國化學文摘服務社
CII	Carbon Intensity Indicator	碳強度指標
CLP	Classification, Labeling and Packaging	歐盟化學物質及混合物之分類、標示及包裝法規
CO _{2e}	Carbon Dioxide Equivalent	二氧化碳當量
DAP	Diammonium Phosphate	磷酸二銨
DRM	Dry Reforming of Methane	甲烷乾重整
EDF	Environmental Defense Fund	環境保衛基金
EMSA	European Maritime Safety Agency	歐洲海事安全署
eSMR	Electrified Steam Methane Reforming	電氣化蒸汽甲烷重整
EU ETS	European Union Emissions Trading System	歐盟碳排放交易系統
FEUM	FuelEU Maritime	歐盟海事燃料法規
GHG	Green House Gas	溫室氣體
IEA	International Energy Agency	國際能源總署
IMO	International Maritime Organization	國際海事組織
IRENA	International Renewable Energy Agency	國際再生能源總署
LCA	Life Cycle Assessment	全生命週期評估
LNG	Liquefied Natural Gas	液化天然氣
MAP	Monoammonium Phosphate	磷酸一銨
MEPC	Marine Environment Protection Committee	海洋環境保護委員會
NFPA	National Fire Protection Association	美國消防協會
NH ₃	Ammonia	氨
OPEX	Operational Expenditure	營運支出
POX	Partial Oxidation	部分氧化
SMR	Steam Methane Reforming	蒸汽甲烷重整

TtW	Tank to Wake	油艙到艙流
UAN	Urea Ammonium Nitrate	尿素硝酸銨
UN	United Nations	聯合國
WtT	Well to Tank	油井到油艙
WtW	Well to Wake	油井到艙流
單位		
°C	degree Celsius	攝氏度
% w/w	mass fraction	重量百分濃度
atm	standard atmosphere	標準大氣壓
EJ	exajoule	10 ¹⁸ 焦耳
GJ	gigajoule	10 ⁹ 焦耳
MJ/kg	megajoule per kilogram	每公斤10 ⁶ 焦耳
MJ/L	megajoule per liter	每公升10 ⁶ 焦耳
Mt	megatonne	10 ⁶ 噸
ppm	parts per million	百萬分之一

一、前言

1. 國際海事組織的戰略目標¹

全世界正為巴黎協定(Paris Agreement)的目標而找尋節能減碳的方法，國際海事組織(IMO)於2023年的海洋環境保護委員會(MEPC)第80次會議，調整「IMO降低船舶溫室氣體排放戰略」，戰略目標包含以下五點，分別是：

- 持續提高新造船能效以降低船舶碳強度、
- 降低國際航運碳強度，每年船舶碳強度指標(CII)逐年降低、
- 增加採用零或接近零溫室氣體排放技術的燃料或能源、
- 國際航運溫室氣體排放量達成淨零排放、
- 設置國際航運達成溫室氣體淨零排放的中間查核點等。

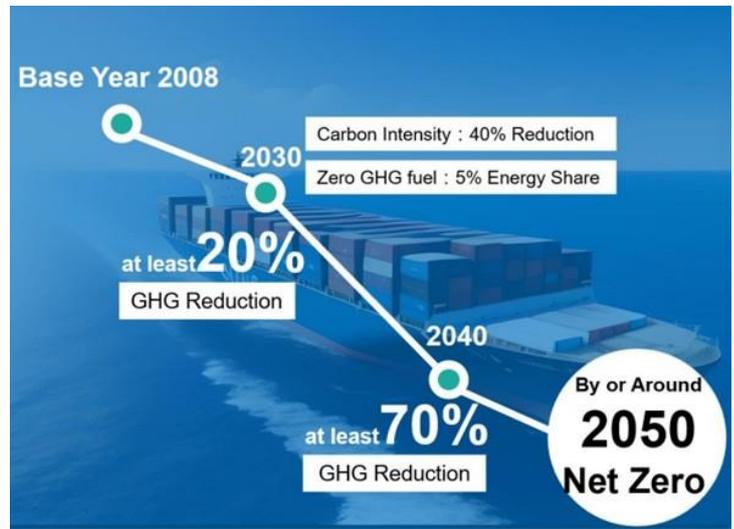


圖 1-1: IMO 降低溫室氣體戰略目標，預計 2050 年左右達到淨零排放
(圖片來源: 驗船中心(CR))

此戰略路線圖如圖 1-1 所示，於 2030 年時，整體的碳強度要降低 40%、溫室氣體排放要降 20%，而且最少要使用 5% 的替代燃料，直到 2040 年溫室氣體的減排達到 70%，以期待 2050 年可以達到淨零的目標²。

2. 氨的角色

航運界找尋的各種替代傳統燃油方案中，包含發展相對較成熟的 LNG 燃料，以及近期熱門的甲醇、氨與氫等，其中氨(NH₃)因為化學式不含碳原子而受到重視，是目前熱門候選燃料之一³。雖然氨的產製與運用在陸上工業已成熟，但在航運燃料產業尚在開展和推動階段，全球氨燃料供應鏈及適合船舶使用的主機目前仍在積極發展。船舶為因應後續的法規，將可能需要使用更多清潔環保的燃料以滿足規定，此新興燃料極有可能為航運界帶來重大的轉變。

本文先介紹氨的特性，接著針對氨製程中的減碳關鍵—氫元素的來源做說明，並摘要國際再生能源總署(IRENA)對於氨製程的成本比較，再進一步分析燃料全生命週期概念與未來船舶使用氨燃料的可能影響，最後總結氨燃料未來展望。

¹ IMO, “MEPC.377(80) 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships”

² CR, 「第 129 期技術通報」

³ EMSA, “Potential of Ammonia as Fuel in Shipping”, Chapter 1.1

二、氨的特性⁴

1. 氨的物理性質

氨(Ammonia)在標準溫度及壓力下是透明無色的氣體。氣態氨比空氣輕，當以空氣比重為1時，氨比重為0.588，因此釋放到環境中時會上升，並具有明顯的刺激性味道而容易被檢測，其氣味檢測閾值為5 ppm。氨在1 atm、-33°C下或約10 atm、25°C下時會凝結為液體。液態氨比水輕，當以水的比重為1時，液態氨比重為0.619。液態氨從液態變成氣態時，體積將膨脹766倍。

2. 氨的化學性質

氨由1個氮原子和3個氫原子組成，如圖2-1所示，化學式為NH₃，分子量為17.03 g/mol，屬於鹼性物質，極易溶於水，由於氣態氨分子的特性，其20°C時的平衡溶解度為34% w/w，氨的溶解度會隨著溫度升高而降低，氨遇水溶解時會釋放出大量的熱能，並導致氨水沸騰。

氨在潮濕的情況下，會與銅、鋅及其合金發生反應並腐蝕。因此多選用鋼、鐵、鋁、複合材料或特定對氨具有耐腐蝕性的材料作為儲氨的容器。

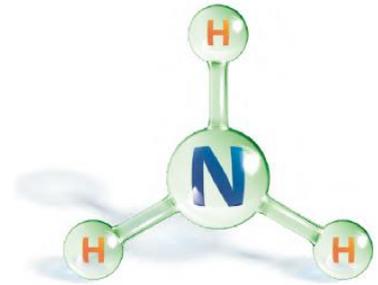


圖2-1: 氨分子示意圖

(圖片來源: Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel")

3. 氨的危險分類與其他特性

依據聯合國危險貨物運輸建議⁵，氨被分類為第2.3類的有毒氣體，UN代碼為1005。參考歐盟CLP法規⁶及美國NFPA的分類⁷，氨的健康危害等級為3級，即對人體影響很大；火災危險為1級，如圖2-2所示。

雖氨易溶於水，但當大量的氨洩漏到水中時，可溶解的氨量卻取決於水與氨的各種物理現象而定，例如氨溶解於水產生的熱量、水因氨沸騰氣化而迅速失去熱量而形成冰、氨在該溫度條件下的溶解度、氨與水中雜質的反應等，依據過去的氨洩漏案例，約只有5至10%的氨溶解在水中。

GHS/CLP Hazard Classification				NFPA Rating	
GHS06	GHS05	GHS04	GHS09		
Signal word: Danger					
Hazard statements					
H221 Flammable gas				Health 3 Can cause serious/permanent injury	
H280 Contains gas under pressure; may explode if heated				Flammability 1 Must be preheated before ignition can occur	
H314 Causes severe skin burns and eye damage				Instability 0 Normally stable, even under fire conditions	
H331 Toxic if inhaled					
H400 Very toxic to aquatic life with long-lasting effects				Special - -	

圖2-2: 氨的危害等級

(圖片來源: Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel")

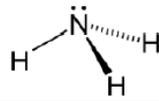
⁴ Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel", Chapter 1

⁵ UN, "Recommendations on the Transport of Dangerous Goods Model Regulations"

⁶ EU, "Regulation (EC) No. 1272/2008 on Classification, Labelling and Packaging of Chemical Substances and Mixtures"

⁷ NFPA, "704 Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response"

4. 氨的物質特性表⁸

物質	氨 Ammonia Anhydrous, Liquid Ammonia		
物理狀態	無色物質，伴隨著難聞之氣味		
相關危險	比空氣輕、易出事故、具有毒性		
化學式	NH ₃	結構式	
分子量	17.03 g/mol		
密度	1 atm, 0°C 時為0.77 g/L	水溶性	0°C 時為895 g/L
沸點	1 atm時為-33°C	閃點	132°C
熔點	-77°C	相對蒸氣密度	當空氣為1時為0.6
自燃溫度	630°C	爆炸極限	15~33.6 % (vol%)
CAS 編號	7664-41-7	UN 編號	1005

5. 氨的商業應用⁹

氨對地球上的生物相當重要，是所有食物和肥料的重要成分。氨也是很多藥物和商業清潔用品直接或間接的組成部分。由於氨有廣泛的用途，使之成為世界上產量最多的無機化合物之一，約70%的氨用於製作化學肥料，其餘的30%則應用於一系列的工業應用，例如氨是硝酸的主要成分，硝酸用於製造不同等級的硝酸銨，其為工業炸藥的主要成分；尿素、丙烯腈是氨的直接衍生物，可做為其他化工產品的原料等。參考圖2-3為氨在肥料供應鏈所扮演的角色，透過化石原料製氨，並且在與二氧化碳加工合成尿素，或再製成磷酸一銨(MAP)、磷酸二銨(DAP)、尿素硝酸銨(UAN)等，目前肥料產業也須遵守巴黎協定，減少碳排放量。

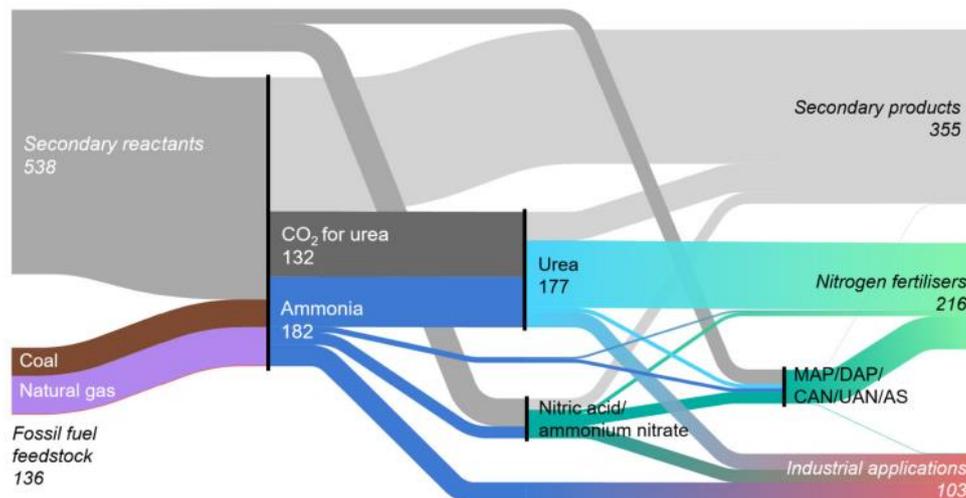


圖2-3: 氨的製程及產品的流向，大部分進一步製作成肥料及其他化工產品
(圖片來源: IEA, “Ammonia Technology Roadmap”)

⁸ IMO, “CCC 9/3/2 Study on Safety Assessment of Ammonia Toxicity”

⁹ IEA, “Ammonia Technology Roadmap”, Chapter 1

氨的生產屬於能源和排放密集型的產業，2020年全球氨的產製消耗能源約為8.6 EJ，約占最終能源消耗總量的2%，而二氧化碳排放量約為5億噸，相當於總排放量的1.3%。目前氨的產製主要為化石原料來源，透過天然氣蒸氣重整、採用煤氣化方式產生。如圖2-4，於2019年度統計，中國是最大的氨生產國，占總產量30%，而俄羅斯、中東、美國、歐盟和印度各占8至10%。其在全球出口量約占總產量的10%。

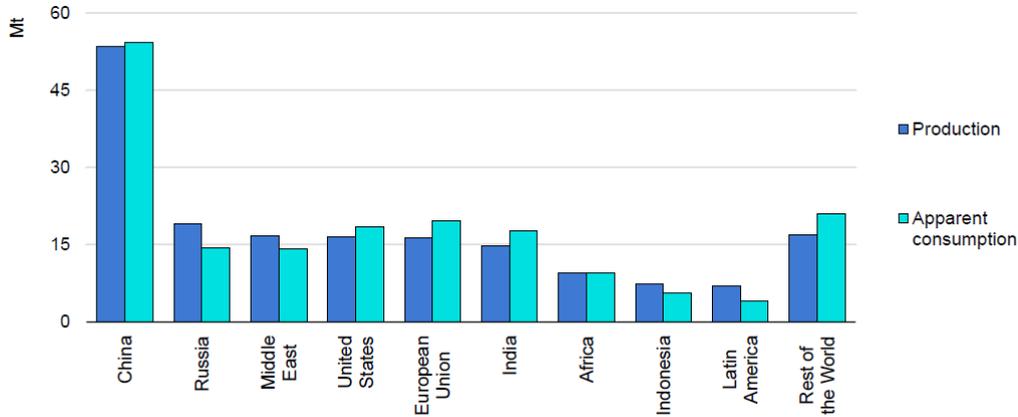


圖2-4: 2019年度全球氨市場的產製及消費概況
(圖片來源: IEA, "Ammonia Technology Roadmap")

三、減碳關鍵—氫的來源¹⁰

1. 氫的組成為氮及氫，而空氣中的氮充足，一般可透過氣體分離技術提取，因此各種製程的減碳差異在於氫的取得，氫的不同取得方式會直接影響工廠生產氫的成本，而氫製程對於環境的友善程度，未來也影響航運界使用替代燃料的合規程度。

現階段氫的產製大部分採用化石原料，約有72%來自天然氣、22%來自煤炭、4%來自重油、1%來自石腦油，其他原料僅占1%。另一個特殊的數據顯示，製氫每年排放約5億噸二氧化碳，占全球二氧化碳排放量的1.3%，使得氫的產製成為化工業中很大的二氧化碳排放源，約35%。除了製程的二氧化碳，當今氫的產製約占全球能源消耗總量的2%，其中約有40%的能源用於原料的取得，其他的部分則為製程的能耗。

如果製氫工業視作為一個國家，將是世界上第16大的排放體¹¹。另以目前的產業軌跡下並評估經濟和人口的成長後，氫的產量在2050年預估成長40%，有關二氧化碳的排放量在2030年會達到3%。氫為重大的化工原料，少部分用於燃料，更多的產品用於肥料，因此改善氫的製程方式及能源的使用，為迫在眉睫的議題。

2. 為實現氫產製到利用的生命週期之間其碳排控制，關鍵因素的氫取得如圖3-1所示，大致上可分為：

- 以屬於化石來源的煤、天然氣所製得的灰氫。
- 以化石原料再配合碳捕捉系統或天然氣透過甲烷熱解(Methane Pyrolysis)、乙烷裂解(Ethane Crackers)，或電氣化蒸汽甲烷重整(Electrified Steam Methane Reforming, eSMR)所製得的藍氫。
- 以核電電力電解水所製得的粉紅氫¹²。
- 如採用再生電力電解或透過生質所製得的綠氫。

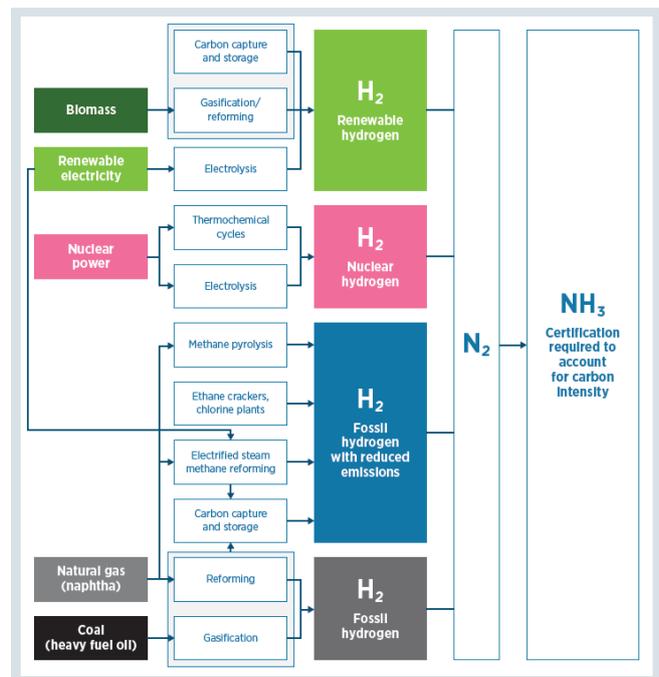


圖3-1: 氫產製的碳足跡流程，依據氫的來源分類
(圖片來源: IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia")

¹⁰ IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia", Chapter 2

¹¹ IEA, "Ammonia Technology Roadmap"

¹² 核電雖然零碳排，但有核廢料等議題因而較具爭議。

3. 即便氨於後段油艙到艙流(TtW)為零碳排燃料，但產製過程產生大量的二氧化碳，亦會視為不環保的原料來源。因此氨的產製也可以依據前述氨的來源與碳排的程度做分類。如圖3-2分為4種類別¹³，原則上顏色僅示意而非絕對，依據不同的機構或政府，仍可有其他分類，說明如下：

- 以化石來源的天然氣、煤、重油製得棕氨(Brown Ammonia)。
- 以化石原料製氨再配合碳捕捉製成的低碳氨係為藍氨(Blue Ammonia)。
- 以甲烷裂解產生氫而製成的藍綠氨(Turquoise Ammonia)
- 以再生電力等所製成的綠氨(Green Ammonia)^{14 15}。

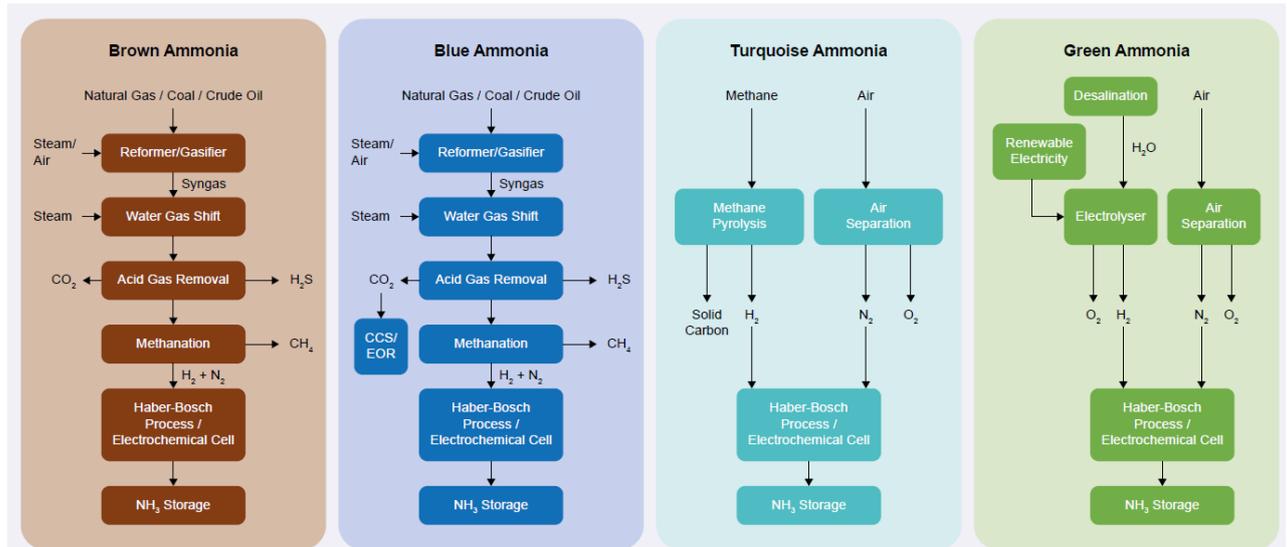


圖3-2: 各種製程的氨分類

(圖片來源: Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel")

¹³ Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel", Chapter 2

¹⁴ 財團法人台灣綜合研究院, "電子燃料發展概況分析", 摘要其電子燃料的介紹: 電子燃料(Electrofuel; e-Fuel)是一種合成燃料(Synthetic Fuel), 廣義上泛指所有利用電能製造的可燃燃料, 包含利用再生能源電解水製造的綠氨, 以及利用綠氨製作的衍生燃料, 如氨等, 因應淨零排放趨勢, 由於目前航空與海運等替代能源較少或仍需時間發展, 使得電子燃料在前述交通領域的應用有不錯發展潛力。

¹⁵ Ricardo, "Study on the Readiness and Availability of Low-and Zero-Carbon Ship Technology and Marine Fuels", 摘要其e-fuels的定義為: **E-fuels or electrofuels are based on hydrogen produced by electrolysis primarily using renewable and nuclear electricity. These are sometimes referred to as renewable fuels of non-biological origin (RFNBO), green, or synthetic fuels.**

四、氨各種製程及成本¹⁶

氨為重要的化工產品，為肥料主要成分，現階段哈伯法是業界大規模製氨的主流，原理是將氮與氫置於高壓約200 atm和高溫350至500°C的條件下，與鐵催化劑進行反應生成氨，後續再經過冷凝、提取和純化，以獲得所需純度的氨後儲存。以下將介紹目前氨製程的各種方式：

1. 煤基製氨(Coal-Based Ammonia Production)

(1) 技術及生產流程

- 步驟1-煤氣化：煤透過煤氣化的過程轉化為合成氣(Syngas)，並去除雜質和毒物。合成氣為一氧化碳、二氧化碳、氫等成分的混合物。該技術經過160多年的發展，適用於多種工業化爐型。
- 步驟2-水煤氣化：合成氣中的一氧化碳再與水蒸氣反應，產生更多的氫和二氧化碳。
- 步驟3-氫提取：從混合物中移除二氧化碳，僅留下氫。
- 步驟4-氮提取與哈伯法製氨：通過氣體分離技術，從空氣中提取氮。最後以哈伯法將氮和氫合成為氨。

(2) 成本

煤基製氨的成本主要取決於煤炭原料成本，每噸氨為225至315美元，但透過煤基製氨，平均每噸將產生4噸的二氧化碳，以碳額75美元估算¹⁷，則氨每噸的二氧化碳排放成本為300美元，成本提高為525至615美元。

(3) 目前裝置容量及未來趨勢

目前全球以煤為原料製氨的產能估計每年約53 Mt，主要位於煤炭儲量豐富的中國，但工廠通常規模相對較小、能源效率低。儘管目前煤基製氨的生產成本較低，以目前趨勢，整體的氨製程亦須考慮碳排的限制，預估此類的製氨廠將逐漸被淘汰。

2. 天然氣基製氨(Natural Gas-Based Ammonia Production)

(1) 技術及生產流程

- 步驟1-天然氣可透過多種製程轉化為合成氣，包括蒸汽甲烷重組(SMR)、部分氧化(POX)、自發性熱重組(ATR)、甲烷乾重整(DRM)或多種的組合，舉SMR為例，需有加氫脫碳、一段轉化、空氣分離、二段轉化、高/低溫變換、脫出二氧化碳、甲烷化和氨合成，該技術目前是美國、加拿大等天然氣豐富國家採用的製氨方式，但會消耗大量化石燃料，產生大量的二氧化碳。
- 步驟2-水煤氣化：合成氣中的一氧化碳再與水蒸氣反應，產生更多的氫和二氧化碳。
- 步驟3-氫提取：從混合物中移除二氧化碳，僅留下氫。

¹⁶ IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia", Chapter 2

¹⁷ 此處排放每噸二氧化碳額外課徵 75 美元，是指 IRENA 假想未來全球氨的生產者都可能都因各區域(如歐盟)的碳交易制度而隨著受到影響，並演變為普遍皆在生產成本內將碳價納入。

- 步驟4-氮提取與哈伯法製氨：通過氣體分離技術，從空氣中提取氮。最後以哈伯法將氫和氮合成為氨。

(2) 成本

以天然氣為原料製氨的成本主要取決於天然氣價格，每噸氨為110至340美元。天然氣製氨每噸會產生約1.6至1.8噸二氧化碳，另考量開採和運送的上游排放，則每噸氨製成會產生約2.2噸二氧化碳。估算製程中的二氧化碳排放成本，則每噸氨的成本增加165美元。成本提高為275至505美元。

(3) 目前裝置容量及未來趨勢

全球以天然氣製氨的產能估計約為每年132 Mt。大多數新建製氨廠位於天然氣成本低的地區，如北非、奈及利亞、北美、中東和前蘇聯國家。新建工廠通常規模非常大，以利從量產受益。

3. 低碳化石原料製氨(Lower-Carbon Fossil-Based Ammonia Production)

(1) 技術及生產流程

如同前兩項，指同樣以化石原料產製，但在生產流程中加入碳捕捉、利用和儲存或其他提高效率的技術，以減少碳排放，例如：

- 自發性熱重組(ATR)：將氨生產和加熱合併在一個反應器中，形成一個集中的二氧化碳流，這降低二氧化碳捕捉的成本，同時提高有效的捕捉率達到98%。
- 電氣化蒸汽甲烷重組(eSMR)：利用再生能源的電力作為重組器的能量輸入，相對蒸汽甲烷重組裝置而言可減少碳排。

(2) 成本

如同前述，煤基製氨的成本為每噸氨225至315美元，再加上碳捕捉設備的成本後，成本為每噸氨360至450美元。相較前述1.(2)內容，未有減碳裝置但考量二氧化碳排放成本為每噸氨525至615美元，低碳化石原料製氨的成本較低，其具體差距仍取決於碳捕捉技術、實施效率和碳排放成本等變數。

而蒸汽甲烷重組製氨的碳捕捉成本估計為每噸氨100至150美元，若加入碳捕捉時，氨生產成本為每噸235至465美元。自發性熱重組製氨的碳捕捉成本約為每噸氨40至80美元，將使ATR氨生產成本為每噸170至400美元而具有競爭力。

(3) 目前裝置容量

過去幾年中，已宣布多個低碳化石原料製氨計畫，包括改裝和新建包含碳捕捉系統的工廠、改進製氨製程等，其中一些已經實現，使得生產低碳足跡氨已可以達成。現有的低碳化石原料製氨廠的產能約為每年2.6 Mt；而後續規劃中的產能預計為每年17.4 Mt。

4. 生質能製氫(再生氫)(Renewable Ammonia Production from Biomass)

(1) 技術及生產流程

- 步驟1-生物質可透過多種製程轉化為合成氣，包括透過固體生物質(如木材、農業殘渣、固體廢棄物等)的空氣氣化反應、將生物質氣化和甲烷化以形成生物甲烷或沼氣，或者透過生物質的厭氧消化以形成生物甲烷，再以甲烷重整等方式轉化為合成氣。
- 步驟2-水煤氣化：合成氣中的一氧化碳再與水蒸氣反應，產生更多的氫和二氧化碳。
- 步驟3-氫提取：從混合物中移除二氧化碳，僅留下氫。
- 步驟4-氮提取與哈伯法製氫：通過氣體分離技術，從空氣中提取氮。最後以哈伯法將氫和氮合成為氨。

目前生質氫尚未商業化生產，但生質製氫的所有步驟均已有進行商業化證明。

(2) 成本

生質作物的能量密度相較於太陽能低兩個數量級，即單位土地所呈現的資本密集度及規模經濟效應導致大規模的生質能製氫很難實現；以生質能製氫每噸的成本估計為455至2000美元，具體取決於生物質來源和工廠規模，這遠高於典型市場價格。除此之外，生質能也可以引入現有的化石燃料製氫工廠，使其原料脫碳10至15%。

(3) 目前裝置容量

全球尚無商業規模的生質能製氫廠在運作。過去曾有多個生質能製氫廠計畫但都未能實現，僅在具備特定條件與環境的情況下應用。

5. 再生電力製氫(再生氫)(Renewable Ammonia Production from Renewable Electricity)

(1) 技術及生產流程

再生電力製氫的流程示意如圖4-1，主要包含下列步驟：

- 步驟1-電力生產：利用再生能源，如水力、風力或太陽能發電，產生電力。
- 步驟2-電解水製氫：使用所產生的電力進行水電解，將水分解成氫和氧。
- 步驟3-氫提取：移除氧氣和剩餘水蒸氣，僅留下氫。
- 步驟4-氮提取與哈伯法製氫：通過氣體分離技術，從空氣中提取氮。最後以哈伯法將氫和氮合成為氨。

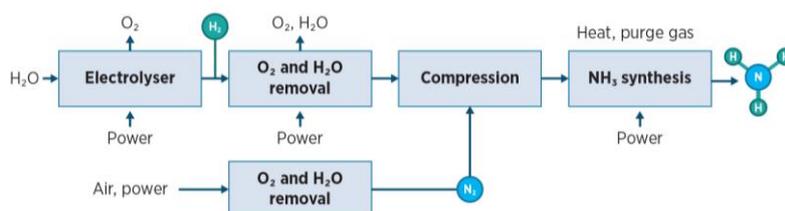


圖4-1: 再生電力生產再生氫流程示意圖

(圖片來源: IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia")

(2) 成本

電解水需要大量電力和水的供應。使用不同電解技術所需電力不同，大略來說，要生產每噸氮需要36 GJ，相當於10,000度電，其中，氮生產消耗90%的能量。而水需要大約1.6噸，並需要額外的水來冷卻氮合成工廠與相關系統。因此對於再生電力製氮廠而言，電力和水是大規模生產氮的重點要素，大部分成本投資於上游的再生能源開發。建置成本除了氮生產和氮合成裝置，更多的是再生電力生產、水質淡化和淨化設備、電解水製氮設備等，故目前再生能源製氮廠成本與再生能源成本下降有密切相關。

如今，新廠的再生氮生產成本估計在每噸720至1,400美元之間；到2030年，在適合開發再生能源的地點，每噸氮的成本最低約為475美元，可與低碳化石原料氮成本相當；到2050年將降至每噸310至610美元，如圖4-2所示預期於2050年再生氮的價格可貼近低碳化石原料氮。

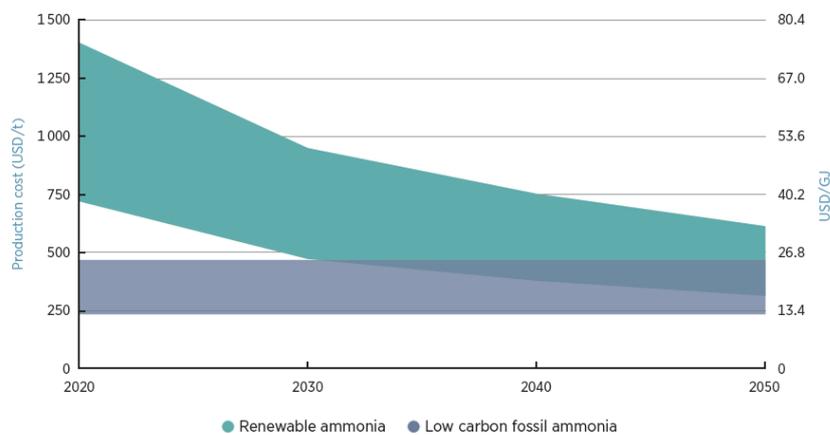


圖4-2: 2020至2050年再生氮和低碳化石原料氮生產成本比較
(圖片來源: IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia")

(3) 目前裝置容量

於1920年就已有利用水力發電生產再生氮，後來因天然氣充足且成本較低而逐漸減少水力發電製氮。於2019年起，已有許多改裝或新建以風能和太陽能發電的製再生氮工廠的規劃，其中，透過現有製氮廠轉型稱為棕地(Brownfield)廠，主要供應當前市場和能源市場；而新建之再生能源製氮廠稱為綠地(Greenfield)廠，主要供應能源市場。目前全球再生能源製氮廠建置可參考圖4-3，全球各地均有發展以再生能源製氮的規劃，包含採用太陽能、風能、水利等再生能源。綜觀相關設廠的位置都與該地開發之再生能源有關，例如位於沙烏地阿拉伯、埃及、茅利塔尼亞就充分利用其地理特性發展之太陽能及風能建置相關製氮廠。

Press Release	Country	Plant Location	Main Developers	Annual Capacity (tonnes)	Energy Source
2019	Chile	Mejillones	ENAE, ENGIE	18,000	Solar
2020	New Zealand	Kapuni	Ballance-Agri, Nutrients, Hiringa Energy	5,000	Wind
2020	Saudi Arabia	Red Sea Coast	Air Products, ACWA Power, NEOM	1,200,000	Solar, wind
2020	Scotland	Orkney	Eneus Energy	4,015	Wind
2020	Denmark	Western Jutland	Haldor Topsoe, Vestas	5,000	Solar, wind
2020	Norway	Porsgrunn	Yara, NEL Hydrogen	500,000	Hydro
2020	Australia	Tasmania Bell Bay	Origin Energy	420,000	Hydro
2021	Australia	Pilbara	Yara, ENGIE	850,000	Solar
2021	Morocco	Rabat	Fusion Fuel, Consolidated Contractors Group S.A.L.	183,000	Solar
2021	United Arab Emirates	Abu Dhabi	Abu Dhabi Ports, Helios Industry	200,000	Solar
2021	Bolivia	Oruro	H2 Bolivia S.A., the Government of Oruro	500,000	Solar
2021	Mauritania	In the north	CWP Global	10,000,000	Solar, wind
2021	Chile	Magallanes	Total Eren	4,400,000	Wind
2022	Malaysia	Bintulu	Samsung Engineering, Lotte Chemical, POSCO, Sarawak Economic Development Corporation	630,000	Renewable energy
2022	Spain	Aragon	Copenhagen Infrastructure Partners, Fertiberia, Vestas, Enagás, Naturgy	200,000	Solar, wind
2022	Norway	Southwestern coast	Hy2gen, Trafigura and Copenhagen Infrastructure Partners	219,000	Hydro
2022	Oman	Duqm	Scatec, ACME Group	1,200,000	Solar
2022	Egypt	Ain Sokhna	Scatec, Egyptian government entities	3,000,000	Solar, wind
2022	Canada	Quebec	Trammo, Teal Corporation	800,000	Hydro

圖4-3: 全球再生能源製氨的發展資訊
 (圖片來源: Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel")

五、航運燃料全生命週期與氮的成本

1. 海運燃料全生命週期的概念¹⁸

- (1) IMO於MEPC 80次會議上通過非強制之「海運燃料全生命週期溫室氣體強度準則」(LCA準則)¹⁹，律定船舶使用能源的溫室氣體範疇涵蓋至燃料自開採/產製到最終使用(Well to Wake, WtW)，其類似搖籃到墳墓的概念，如圖5-1所示，分為兩個部分處理，即第一部分燃料產製與第二部分船端使用，目前IMO僅強制要求船端使用的部分，透過船舶碳強度指標(CII)來達到監管之目的。該準則除了計算二氧化碳排放量外，其他溫室氣體如甲烷與一氧化二氮，亦依全球100年暖化潛勢換算成二氧化碳當量(CO₂e)並納入計算。

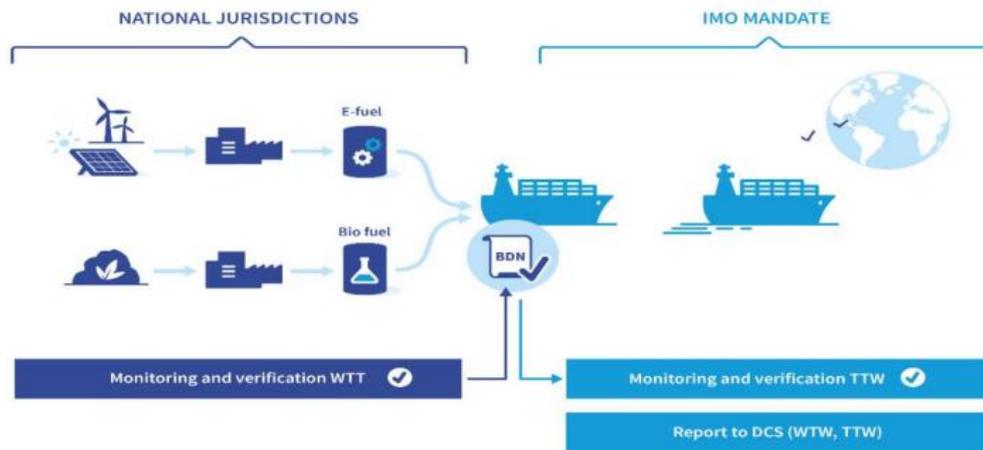


圖5-1: 海運燃料全生命週期溫室氣體示意圖

(圖片來源: 驗船中心(CR))

- (2) 海運燃料全生命週期溫室氣體(WtW)之計算方式將拆分為：「油井到油艙(Well to Tank, WtT)」及「油艙到艙流(Tank to Wake, TtW)」兩者的加總，即 $WtW = WtT + TtW$ ，各自計算方式如下：
1. WtT：指從提取原料、生產和運輸燃料到使用端，包含加油所產生的GHG排放。目前該準則僅提供化石燃料之之預設值可直接做計算，但氮燃料尚未定案。
 2. TtW：指與船上燃料使用所產生的GHG排放，包括燃料艙到能源轉換器之間的燃料洩漏(Fugitive)和在能源轉換器內未燃燒完全的逃逸(Slip)。
- (3) 現況摘要
- 目前IMO尚未將海運燃料全生命週期之規定強制化，目前處於研議配套規定中，但為符合節能減碳的要求，採用全生命週期考量將是趨勢。

¹⁸ CR，「第129期技術通報」

¹⁹ IMO, "MEPC.376(80) Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines)"

- 歐盟已於2024年起將海運碳排納入EU ETS，僅納入船端之排放，即TtW，故就本規定而言不同製程方式原則上並不影響其結果，惟自2026年起，除二氧化碳外，亦將納入船端之甲烷與一氧化二氮排放。
- 另一方面，歐盟亦將於2025年開始實施歐盟海事燃料法規(FuelEU Maritime, FEUM)，鼓勵船舶使用替代燃料，此法案採用全生命週期去限制船用燃料的溫室氣體排放上限，最終達到促使船舶減少使用化石燃料。如圖5-2中，FEUM法規訂定船用燃料允許之全生命週期溫室氣體排放，並且逐漸遞減，舉例來說，2045年以後使用化石燃料幾乎無法符合要求，在這樣的架構下，綠氫的優勢將逐漸凸顯出來²⁰。

Well-to-Wake carbon intensity of marine fuels - $GWP_{CH_4}=29.8$ (100-year)

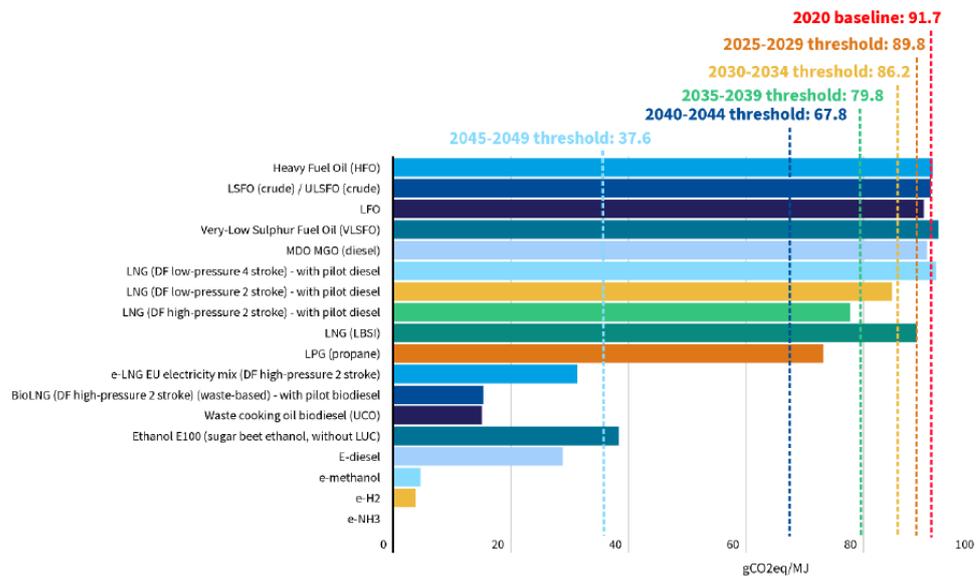


圖5-2: 各種燃料全生命週期GHG強度比較

(圖片來源: Transport & Environment, “FuelEU Maritime: T&E analysis and recommendations. How to drive the uptake of sustainable fuels in shipping”)

2. 氫的產製成本分析

目前氫大部分應用於農業與化工業，氫產業亦有對應減排的目標，同步隨著全球產業朝著淨零碳排邁進，可預期未來綠氫的產量將會逐漸增多以符合日漸增加的需求。有關於氫燃料的成本取決於全球氫工業的供給與需求。氫的價格將取決於目前氫產製的方式，將考量：

- 資本支出，即建廠的設備投資，以藍氫廠而言，初期須投入碳捕捉設備，惟採用碳捕捉也跟其技術有關，例如，碳捕捉率為70%和98%所得的藍氫，碳排放強度就有不同，而建構碳捕捉系統的成本，也會反應到市場的售價上。綠氫廠需建置電解槽產氫，有關電解槽的規模、效率也會反應於整體的資本支出；
- 營運支出，即運作時耗材及維護費，約為資本支出的5至10%；

²⁰ Transport & Environment, “FuelEU Maritime: T&E analysis and recommendations. How to drive the uptake of sustainable fuels in shipping”

- 原料、電力價格，棕氨及藍氨會透過天然氣、煤取得氫，故原料價格會隨著天氣、煤的價格波動，綠氨的電力成本也依市場價格決定；
- 碳排放費用，未來將考慮燃料生命週期的碳排，規劃將透過政策的制定，確保藍氨、綠氨可以得到公平的稅收和長期的價格保證，亦避免不環保的棕氨持續使用，如歐盟FEUM法規，而增加棕氨碳稅成本，使其無法以低價取得市場優勢。參考圖5-3，經IRENA統計，以煤為原料製氫，其平均產生的碳排高出船舶重油許多，顯示棕氨整體生命週期而言為不環保的物質。

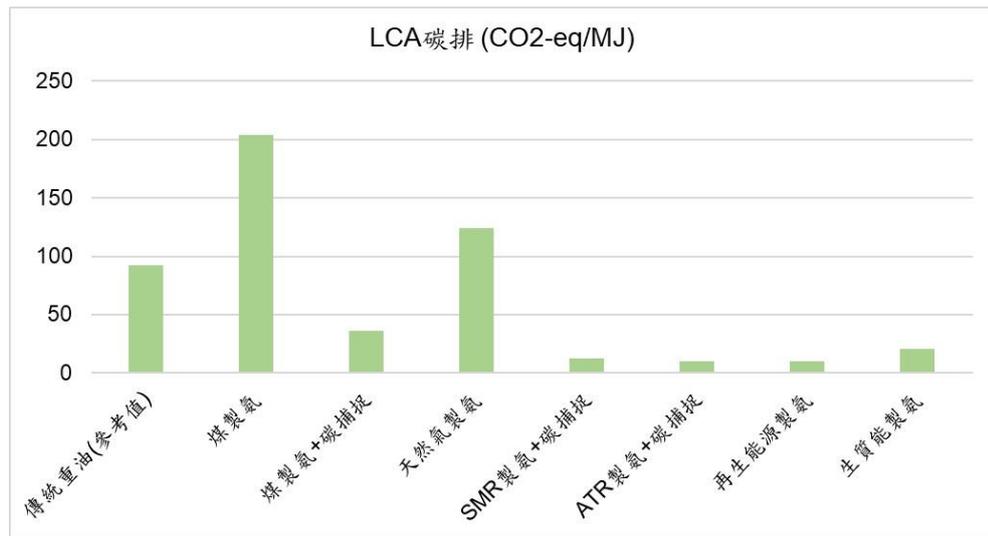


圖5-3: 各種製程所生產的氨之全生命週期碳排放量評估

(圖片來源: 驗船中心(CR)依據IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia"之數據製作)

- 其他因素，尚須考慮運輸成本，目前全球的氨約有10%的產量透過運輸完成貿易。

	CAPEX	OPEX	原料、電力成本	產量規模	碳排放費用 (若有)	市場價格
棕氨	低	低	市場價格	高	高	普通
藍氨	次高	次高	市場價格	低	次高	普通
綠氨	高	高	市場價格	低	低	高

彙整前述以各種方式製氫的成本資料進行分析，由圖5-4可見考量CAPEX、OPEX、原料、電力、碳排放費用時，當以煤為原料製氫，每噸的成本為525至615美元、以天然氣製氫，每噸的成本為275至505美元、以煤製氫配合碳捕捉時，納入建置碳捕捉設備的成本，每噸的成本為360至450美元、以SMR製氫配合碳捕捉每噸的成本為235至465美元、以生質能製氫每噸的成本為455至2000美元、以再生能源製氫每噸的成本為720至1,400美元。

生產綠氨，除了建廠及維護費用高昂外，也會依據生產的量能決定建置的成本²¹，例如電解槽的大小，另外再生能源的電網成本或生物質來源也是重要因素之一，目前全球

²¹ EMSA, "Potential of Ammonia as Fuel in Shipping", Chapter 2.5.2

綠氫生產的量占比少於1%，價格仍非常高昂，後續將有賴政策、製程技術、電力成本的支撐，有效的將價格降至與其他替代燃料相同，以利航商選擇及使用。由圖5-3及5-4的統計，棕氫的全生命週期碳排放量遠高於藍氫與綠氫，因此若考量一定程度的碳排放成本，低碳化石原料製氫已有機會與傳統化石燃料競爭，且氫與其他先進零碳燃料相比成本相對低，若未來透過生產規模擴大、製程技術改善、再生能源成本降低等條件，將可使再生氫的生產成本大幅降低，將有機會與傳統化石燃料加計碳排費用的條件下競爭。

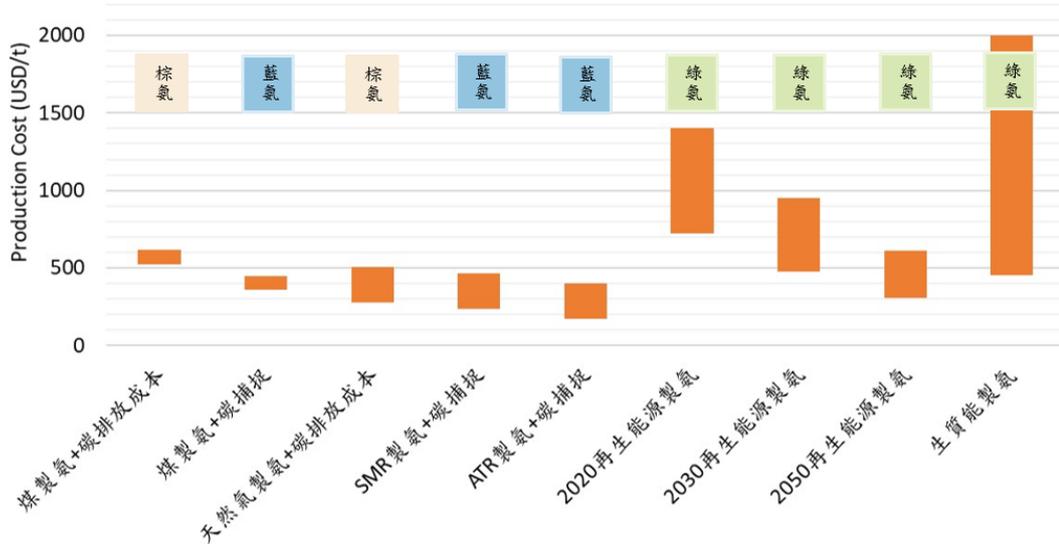


圖5-4: 各種製程所生產的氫之價格比較

(圖片來源: 驗船中心(CR)依據IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia"之數據製作)

3. 氫與其他燃料的比較

- (1) 目前海運燃料係以化石燃料為主，包含重油、天然氣等，未來的候選替代燃料可能有甲醇、氨及氫，可先初步分類為有無碳燃料(Carbon Free)、海運燃料(Marine Fuel)包含重油/低硫燃油/柴油、低碳燃料(Low Carbon)包含LNG/LPG/甲醇/乙醇/二甲醚及生質燃料(Biogenic)等，請參考圖5-5。
- (2) 氨屬於無碳燃料，其燃燒後不產生二氧化碳、硫化物、顆粒物質、一氧化碳等污染物²²，而且原料來源可透過化石原料、電解水取得氫、透過空氣分離氮，原料獲得來源廣及充足。
- (3) 氨的單位質量熱值為18.9 MJ/kg，約是重油的48%左右。由於各種燃料的密度不同，氨的單位容積能量密度為12.7 MJ/L，約為重油的33%左右，因此與重油相比，產生等量熱值時，氨燃料的所需儲存空間約為3倍，若應用於船舶，將調整船舶艙櫃布置或調整營運操作，如增加燃料儲存櫃的容積或增加加注氨的次數。
- (4) 氨若作為燃料，將以液氨的形式儲存，通常於常壓下，溫度須控制在-33°C。以此觀點而言，對比於重油、低硫燃油、生質燃油甚至甲醇，確實較為弱勢，因上

²² EMSA, "Potential of Ammonia as Fuel in Shipping", Chapter 2.2.2

述的物質可於常溫常壓下儲存，但若是與儲存氫的-253°C或LNG的-162°C的情況相比，氫所需維持的能源及方式較為容易達成。

Types	Fuel / Alternative Fuel	Properties		Energy Content		Combustion Emissions					Feedstock	Feedstock Availability	Storage	
		Chemical Structure	Physical State	Specific Energy MJ/kg	Energy Density MJ/L	CO ₂	SO _x	NO _x	PM	CO			Storage Condition	Net Storage Volume ¹ m ³
Carbon Free	Ammonia (liquid -33°C)	NH ₃	Saturated liquid	18.9	12.7	×	×	●	×	×	Fossil, water, air	High	-33°C at 1 atm. pressure, 25°C at 10 bar absolute pressure	3,070
	Hydrogen (liquid -253°C)	H ₂	Boiling liquid	120	8.5	×	×	●	×	×	Fossil, water, biomass	High	-253°C at 1 atm. pressure, 25°C at 350 to 700 bar	4,590
Marine Fuel	HFO RMG380	~ C ₂₀ to ≥ C ₃₀	Liquid	39.5	39	●	●	●	●	●	Crude oil	High	Atmospheric	1,000
	LSFO	~ C ₂₀ to ≥ C ₃₀	Liquid	39.5	39	●	○	●	●	●	Crude oil	High	Atmospheric	1,000
	MDO	~ C ₉ to C ₂₁	Liquid	42.6	36.0	●	○	●	●	●	Crude oil	High	Atmospheric	1,080
Low Carbon	LNG at -162°C	CH ₄	Boiling liquid	48.6	20.8	○	○	○	○	○	Natural gas	High	-162°C	1,875
	LPG (propane and butane)	C ₃ H ₈ , C ₄ H ₁₀	Saturated liquid	46.6	23.6	○	○	●	○	○	Natural gas	High	5 to 15 bar	1,650
	Methanol	CH ₃ OH	Liquid	20.0	16.2	○	○	○	○	○	Natural gas, biomass	High	Atmospheric	2,410
	Ethanol	CH ₃ CH ₂ OH	Liquid	27.0	21.2	○	○	○	○	○	Biomass	Low	Atmospheric	1,835
	DME (dimethyl ether)	CH ₃ OCH ₃	Saturated liquid	28.9	19.2	○	○	●	○	○	Fossil, biomass	Low	5 to 15 bar	2,030
	FAME	C ₁₄ to C ₂₄ fatty acids esters	Liquid	36 to 38	32 to 34	○	○	●	○	○	biomass	High	Atmospheric	1,180
Biogenic	HVO/HRD	~ C ₉ to C ₂₁	Liquid	43 to 44	32 to 34	○	○	○	○	○	biomass	High	Atmospheric	1,180

● Similar to baseline (Heavy Fuel Oil – RMG 380) ○ Lower than baseline
○ Negligible or below detection limit × Absolute zero emission

圖5-5: 各種船用燃料特性比較

(資料來源: Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel")

(5) 相關燃料成本預估

依據IRENA的預估，以再生氫或低碳氫作為未來氫燃料可能的發展，分別與石油、甲醇、LNG進行比較，如圖5-6所示。圖中左起為化石燃料，每GJ約為15至18美元，若加上碳排放費用，約於22至28美元之間；生質甲醇每GJ約為18至55美元，費用高且產量少；低碳氫每GJ約為15至28美元，可與化石燃料併碳排放費用後的價格競爭；而再生氫於2020年的成本仍高且量少，因此無法與化石燃料競爭，預期到2050年時，可拉近與化石燃料的差異，再生氫的價格將與石油加上碳排放成本之費用相近，其價格亦可能比甲醇有優勢。

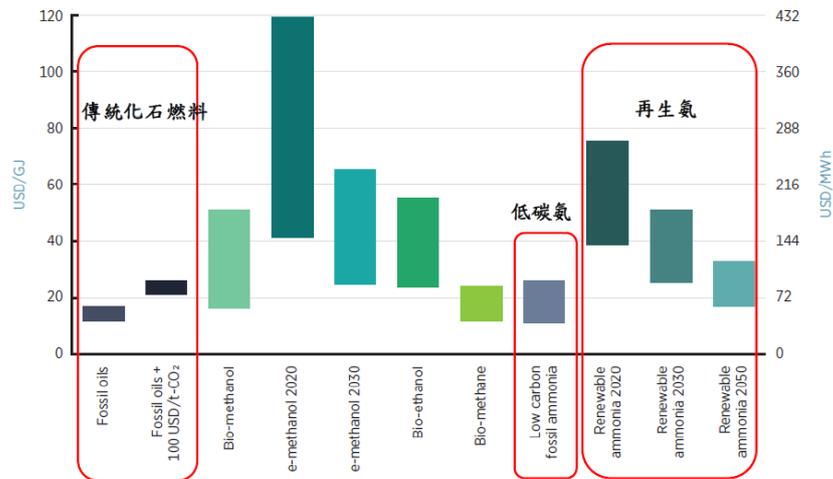


圖5-6: 低碳化石原料氫、再生氫與其他燃料價格比較

(圖片來源: IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia")

六、氨燃料後續展望

1. 氨應用之現況

- (1) 目前氨的產製還是以棕氨為主，但已有不少新建和改裝低碳或零碳製氨工廠的計畫正在進行中。氨的產製、儲存和運送的成本依據生產的途徑、地點而有所不同，以澳洲棕氨廠為例，其平均生產成本略估為每噸340美元，若加上從澳洲運到新加坡的成本為每噸60美元，其棕氨的市場價格約為每噸400美元。

氨生產成本主要組成爲資本投資及營運成本。若爲棕氨製造廠，除了製氨和氨的設備、氨的合成及儲存設備的資本投資外，主要成本爲營運期間原料購買的成本。若爲綠氨製造廠，主要成本尚包含再生電力來源及產氨電解槽的資本投資，預估占資本投資約50%至66%，因此降低再生電力及電解槽的投資成本將會使綠氨更具有競爭力。若後續生產更具規模、技術更進步，使得生產更有經濟效益，則預估綠氨的降格可以大幅下降²³。

- (2) 目前的技術開發，氨可以直接用於內燃機，但仍處於試驗階段。此外，氨很容易裂解成氮及氫，因此氨亦可做爲氫的載體，是氫以外唯一的油艙到艙流(TtW)零碳燃料。與碳基燃料相比，製氨原料的氮及氫是取之不盡，只要有空氣跟水就可以進一步處理，且從空氣中捕獲氮比捕獲碳更容易、有效率、更經濟。同樣都是替代候選燃料，以氨及甲醇為例，氨製成需要氮，甲醇製成需要二氧化碳，空氣中有79%爲氮，氮由空氣中取得的成本約爲每噸42.4美元，而直接從空氣中捕捉碳(Direct Carbon Dioxide Capture)之費用爲每噸200至500美元²⁴。
- (3) 氨的貿易供應鏈較爲完善，液態氨目前占液化氣體市場海運貿易的第三位，僅次於液化天然氣和石油氣。經統計至2020年全球約有170座氨碼頭，然而其中可發展作爲氨燃料加注港的僅有4座，於亞洲的新加坡、歐洲的鹿特丹、中美洲的巴拿馬、中東半島的富查伊拉(Fujairah)等處具有供應氨燃料的潛力，如圖6-1。



圖6-1: 2020年全球含氨交易之港口的分布
(圖片來源: Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel")

²³ Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel", Chapter 2.1.4

²⁴ Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel", Chapter 1.1.6

2. 氨燃料的挑戰

(1) 安全和環境挑戰

由於氨具有毒性，若氨燃料在船舶加注或使用中發生洩漏，可能對船員和乘客造成健康威脅，尤其是在密閉空間中，毒性更易擴散和累積。因此需要建立船舶使用氨燃料的安全要求及標準作業程序，更需要加強對船舶人員的培訓，確保他們能夠正確應對氨燃料的安全使用和應急處理²⁵。

除了有毒性之外，氨也是強鹼性化合物，氨的洩漏可能引起水體污染，對海洋生態系統造成負面影響，也影響海洋生物的生長、生存和繁殖。此外，氨雖作為零碳燃料，但仍為含氮燃料，使用氨燃料時，屬於溫室氣體的一氧化二氮的排放量也會增加。因此船舶使用氨燃料對海洋和大氣的評估研究還須持續進行²⁶。

(2) 技術和基礎設施挑戰

採用氨燃料的船舶內燃機或燃燒裝置尚未發展成熟，尚要克服氨的可燃性低、點火能量(Ignition Energy)較高^{27 28 29}等挑戰，且機器必須符合嚴格的安全標準，結構和控制系統的設計需要能夠有效地防止氨的洩漏和意外點火。此外，船上氨燃料的儲存和管路系統亦需要注意氨的揮發性和腐蝕性，以確保其安全和穩定性³⁰。驗船中心(CR)考量上述船舶之安全性能要求，已於2023年發布「船舶使用氨燃料準則」(Guidelines for Ships Using Ammonia as Fuel 2023)，供各界參考使用。

目前的氨碼頭多用於氨作為貨物的裝卸，氨燃料的基礎加注設施不足。如果沒有一定數量的加注港口，氨燃料的可取得性不佳，航商可能不會規劃建造和營運氨燃料船舶。然而加注設施的建設同樣需要大量的資金和技術支持，包括港口基礎設施的改建或新建，以及相關安全和環境監管措施的建立，使得建設成本相對較高，也需要政府和相關機構通過政策和經濟激勵來推動。

(3) 市場和成本挑戰

目前氨應用於農業與化工業，且為因應全球溫室氣體減排趨勢，欲供應未來船舶氨燃料的需求，必須要新建大量低碳或零碳的製氨工廠，但現階段氨的產製還是以化石燃料氨為主，低碳氨和再生氨的製程開發中且生產成本較高。欲改裝或新建包含碳捕捉系統的低碳氨工廠必須投入一定的資本成本，而再生氨仍處於起步階段，若無法降低再生能源價格，過高的生產成本會使再生氨的價格在市場上不具競爭力，但興建大規模的再生氨生產設施需要高昂的資本支出，必須解決先有蛋還是先有雞的問題，還需透過相關政策才能推動。

²⁵ EMSA, "Potential of Ammonia as Fuel in Shipping", Chapter 2.2.3

²⁶ EDF (Europe), "Ammonia at Sea: Studying the Potential Impact of Ammonia as Shipping Fuel on Marine Ecosystems"

²⁷ Yunliang Qi, Wei Liu, Shang Liu, Wei Wang, Yue Peng, Zhi Wang, "A Review on Ammonia-Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines", eTransportation, Volume 18, October 2023, 100288

²⁸ EMSA, "Potential of Ammonia as Fuel in Shipping", Table 1

²⁹ Nanyang Technological University, "Ammonia as a Marine Fuel", Chapter 1.1.4, 1.1.5, 1.2.1

³⁰ Ricardo, "Technological, Operational and Energy Pathways of Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050", Chapter 4.1.3

(4) 政策和認證挑戰

根據估計目前的製氨廠需要每噸60至90美元的碳排放成本，才能過渡到低碳氨³¹；而再生氨亦需要更高的碳排放成本才足以平衡投資再生氨生產設施高昂的成本，因此尚未健全的碳排放監管框架，阻礙了低碳氨和再生氨市場的發展。而且目前碳排放監管和收取排放成本仍屬於區域規定，且預估碳排放費用若低於60美元，難以激勵化石燃料製氨廠投入低碳氨的生產或興建再生氨生產設施。

此外，藍氨及綠氨的認證機制尚未建立。在缺乏認證的情況下，企業可能缺乏足夠的動力來開展相應的技術創新，而消費者可能會對其生產過程的環境友善程度和可持續性表示懷疑，亦會影響需要支付的碳排放成本，從而影響了氨燃料的市場推廣和接受程度，進而限制了藍氨及綠氨的發展。

3. 氨燃料的展望

圖6-2和圖6-3分別為IRENA假設2050年溫度上升不超過1.5°C的劇本，預測現今至2050年氨的使用情況及產製方式。

從圖6-2可以看到未來氨的市場仍持續成長，預估2050年時氨的需求量會是現今的3倍以上，除了現行的肥料工業和化工市場將成長1.8倍外，值得注意的是預估於2030年技術成熟後，會增加大量用於船舶燃料、發電及作為氨的載體等的應用，在2050年時將會占全球氨使用市場約50%的使用量。

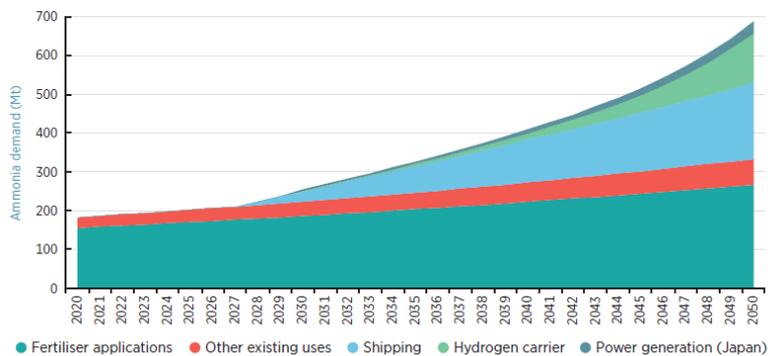


圖6-2: IRENA預測現今至2050年氨的用途種類
(圖片來源: IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia")

而未來氨的使用，無論是用於肥料、化工製品或燃料，都將考慮全生命週期的概念，不僅是使用端要注意碳排放，連同原料取得、製程的過程都需要考慮碳或是溫室氣體的排放，因此，若能透過改善製程技術及採用碳捕捉，或引入再生能源製氨，有望減少碳排放。從圖6-3可以看到低碳化石原料氨和再生氨預估會在2025年後逐漸成長，在2050年氨的產製將以再生氨為主，占比達80%。這部分也回歸到政策面，例如透過各方合作共同開發新的能源，並且有資金的挹注確保研發可以順利進行，另外透過限制使用化石燃料之各種政策，使得各燃料的價格可以有競爭性等。

³¹ IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia", Chapter 2.3

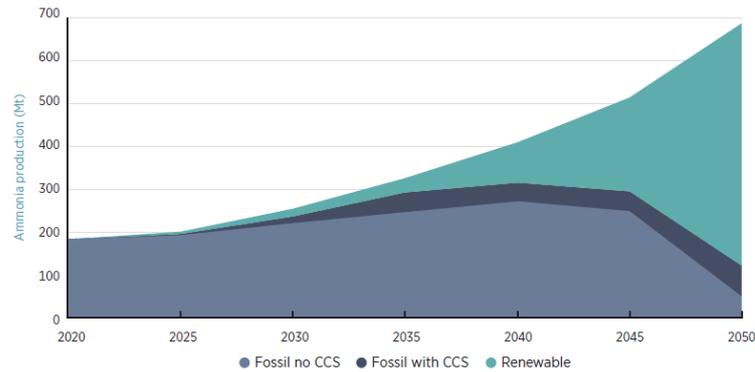


圖6-3: IRENA預測現今至2050年氨的產製方式
(圖片來源: IRENA and AEA, "Innovation Outlook: Renewable Ammonia")

4. 氨燃料發展之短期及長期目標：

- 短期目標：氨用於船舶燃料，目前仍須克服動力層面、安全層面、排放物處理技術的發展等議題，主要是開發氨燃料之內燃機之應用技術，包含船上儲存及輸送要求、氨燃料的加注基礎建設，包含是否有足夠的加注點及供應量、氨產製程序的改善，包含綠氨或藍氨的生產效能、處理氨洩漏或氮氧化物之排放，包含毒性及燃燒後的一氧化二氮³²之處理等。
- 長期目標：透過國家能源政策的支持，例如日本推動氨能源的利用，或是透過國與國的合作，例如日本與澳洲的航運綠色走廊合作，透過國家政策的力量，推動新穎能源的研究開發與應用。並且更進一步，持續降低再生能源的成本，開展和精進利用再生能源製氫及氨，並建立適當的認證制度亦為重點目標之一。此外，全球金融環境對於低碳轉型及氨燃料生產和使用技術研發的補貼、船舶氨動力技術成熟與廣泛運用，皆是未來努力的目標。

³² EMSA, "Potential of Ammonia as Fuel in Shipping", Chapter 2.2.1

參考文獻

- CR, 「第129期技術通報」
- DTU (Denmark) and BIMCO, “Life Cycle Assessment of Ammonia as an Alternative Marine Fuel”
- EDF (Europe), “Ammonia at Sea: Studying the Potential Impact of Ammonia as Shipping Fuel on Marine Ecosystems”
- EMSA, “Potential of Ammonia as Fuel in Shipping”
- EPA (Australia), “Ammonia Expansion Project”
- EU, “Regulation (EC) No. 1272/2008 on Classification, Labelling and Packaging of Chemical Substances and Mixtures”
- IEA, “Ammonia Technology Roadmap”
- IEA, “Net Zero Roadmap – A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach”
- IMO, “CCC 9/3/2 Study on Safety Assessment of Ammonia Toxicity”
- IMO, “MEPC.328(76) 2021 Revised MARPOL Annex VI”
- IMO, “MEPC.376(80) Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels (LCA Guidelines)”
- IMO, “MEPC.377(80) IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships”
- IRENA and AEA, “Innovation Outlook: Renewable Ammonia”
- IRENA, “Global Renewable Outlook”
- IRENA, “International Trade and Green Hydrogen”
- MAN Energy Solutions, “Engineering the Future Two-Stroke Green-Ammonia Engine”
- Nanyang Technological University, “Ammonia as a Marine Fuel”
- NFPA, “704 Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency Response”
- Nordic Innovation, “NoGAPS: Nordic Green Ammonia Powered Ship”
- Ricardo, “Study on the Readiness and Availability of Low-and Zero-Carbon Ship Technology and Marine Fuels”
- Ricardo, “Technological, Operational and Energy Pathways of Maritime Transport to Reduce Emissions Towards 2050”
- Transport & Environment, “FuelEU Maritime: T&E Analysis and Recommendations. How to Drive the Uptake of Sustainable Fuels in Shipping”
- UN, “Recommendations on the Transport of Dangerous Goods Model Regulations”
- YARA and ENGIE, “ENGIE and YARA Renewable Hydrogen and Ammonia Deployment in Pilbara”
- Yunliang Qi, Wei Liu, Shang Liu, Wei Wang, Yue Peng, Zhi Wang, “A Review on Ammonia-Hydrogen Fueled Internal Combustion Engines”, eTransportation, Volume 18, October 2023, 100288
- 財團法人台灣綜合研究院, 「電子燃料發展概況分析」