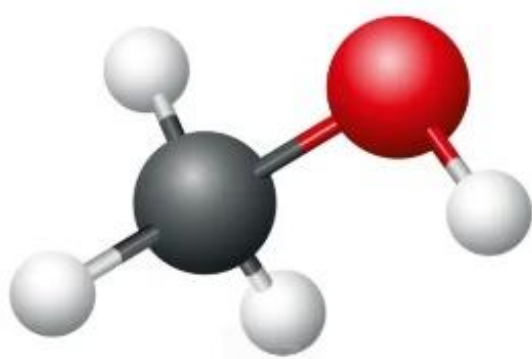


甲醇燃料特性、製程 與成本趨勢探討



CH₃OH

財團法人驗船中心
(2024年5月)



目錄

名詞對照	1
一、前言	3
二、甲醇的特性	5
三、減碳關鍵—氫及二氧化碳的來源	9
四、再生甲醇各種製程.....	12
五、海運燃料全生命週期與再生甲醇的成本.....	21
六、再生甲醇燃料後續展望	29
參考文獻	36

名詞對照

英文簡稱/符號	英文全稱	中文
AGR	Acid gas removal	酸氣移除
BECCS	Bio-energy with carbon capture and storage	生物能源與碳捕捉和儲存
BECCU	Bio-energy with carbon capture and utilization	生物能源與碳捕捉和利用
CAPEX	Capital expenditure	資本支出
CH ₃ OH	Methanol, MeOH	甲醇
CII	Carbon Intensity Indicator	碳強度指標
CO ₂ e	Carbon dioxide equivalent	二氧化碳當量
COS	Carbonyl sulfide	羰基硫
CR	CR Classification Society	財團法人驗船中心
DAC	Direct air capture	直接空氣捕捉
DME	Dimethyl ether	二甲醚
DMFC	Direct methanol fuel cell	直接甲醇燃料電池
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
GENA	GENA Solutions Oy	GENA解決方案有限公司
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
LCM	Low carbon methanol	低碳甲醇
LNG	Liquefied natural gas	液化天然氣
LPG	Liquefied petroleum gas	液化石油氣
MDI	Methylene diphenyl diisocyanate	二苯基甲烷二異氰酸酯
MEPC	Marine Environment Protection Committee	海洋環境保護委員會
MI	Methanol Institute	全球甲醇行業協會
MMSA	Methanol Market Services Asia	亞洲甲醇市場服務公司

MTBE	Methyl tert-butyl ether	甲基第三丁基醚
MTO	Methanol-to-olefins	甲醇制烯烴
MSW	Municipal solid waste	城市固體廢棄物
OPEX	Operational expenditure	營運支出
TRL	Technology readiness level	技術成熟度
TtW	Tank to wake	油艙到艚流
WtT	Well to tank	油井到油艙
WGS	Water gas shift	水氣轉換
WtW	Well to wake	油井到艚流
單位		
°C	Degree (Celsius)	攝氏度
EJ	Exajoule	10 ¹⁸ 焦耳、艾焦耳
GJ	Gigajoule	10 ⁹ 焦耳、吉焦耳
kW	Kilowatt	千瓦
kWh	Kilowatt hour	千瓦小時
MJ	Megajoule	10 ⁶ 焦耳、兆焦耳
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，百萬噸
ppm	Parts per million	百萬分之一

一、前言

1. 國際海事組織(IMO)的戰略目標¹

為了達成巴黎協定(Paris Agreement)的目標，尋求節能減碳的方案，IMO於2023年的海洋環境保護委員會(MEPC)第80次會議，調整降低船舶溫室氣體排放戰略(2023 Strategy on reduction of GHG emissions from ships)，戰略目標包含以下五點，分別是：

- 持續提高新造船舶能效以降低船舶碳強度；
- 降低國際航運碳強度，逐年降低船舶碳強度指標(Carbon Intensity Indicator, CII)；
- 增加採用零或接近零溫室氣體排放技術的燃料或能源；
- 目標於2050年前後，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。

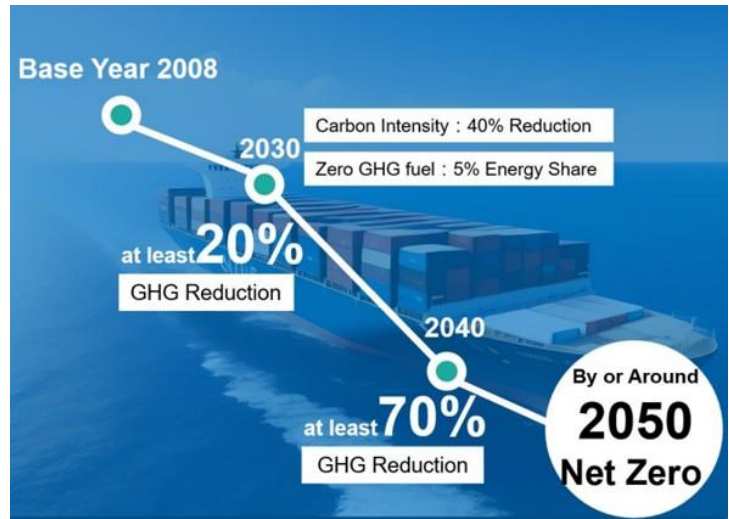


圖1-1: IMO降低溫室氣體戰略目標，預計2050年左右達到淨零排放
(資料來源: 驗船中心(CR))

此戰略路線圖如圖1-1所示，規劃於2030年整體的國際航運碳強度要降低40%，溫室氣體排放降低20%，且至少要使用5%的替代燃料，並於2040年達到溫室氣體減排70%，以期在2050年可以達成淨零之目標²。

2. 替代燃料—甲醇

航運界找尋的各種替代傳統燃油方案，包含發展相對成熟的液化天然氣(LNG)燃料，及近期較熱門的甲醇和氨等替代燃料，其中甲醇常溫下為液態，是目前熱門候選燃料之一³。雖然甲醇的產製與運用在陸上工業已成熟，但在航運燃料方面目前處於開展和推動階段。

甲醇作為船舶燃料的議題，可以追溯至約20年前，當時船舶燃燒重油，產生大量硫化物及顆粒物質，導致污染嚴重的區域之肺癌發生率高。歐盟於2006年起著手進行甲醇作為船舶燃料的研究計畫，如圖1-2所示。除引擎技術方面外，亦就相關法規進行探討及修正，有這些基礎後，使得甲醇用於船舶的技術及規定得以更加完善。

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

² CR 第 129 期技術通報

³ EMSA, “Study on the Use of Ethyl and Methyl Alcohol as Alternative Fuels in Shipping”, Chapter 1.1

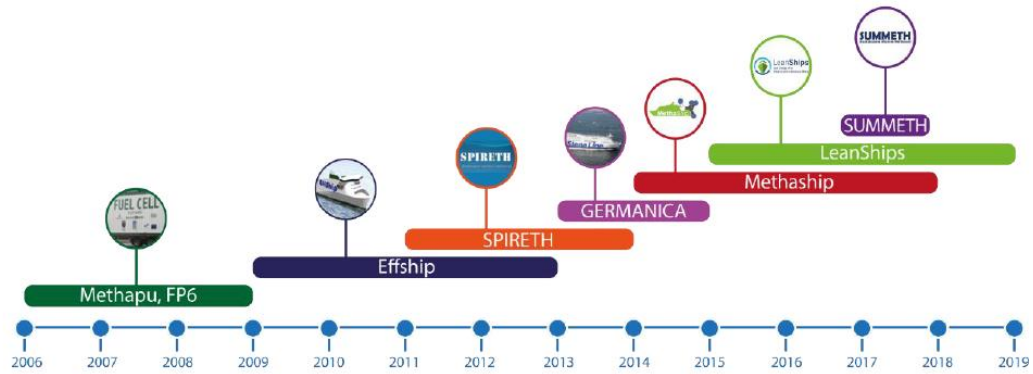


圖1-2: 歐盟於2006年之後展開的甲醇燃料發展計畫總覽

資料來源:EMSA, "Study on the Use of Ethyl and Methyl alcohol as alternative fuels in shipping"

全球甲醇燃料供應鏈及甲醇主機開發商目前已開始布局，並已經有船舶以甲醇為燃料開始運行之實例⁴。為因應後續相關法規，船舶將可能需要使用更多清潔環保的永續燃料以滿足規定，各類新興燃料極有可能為航運界帶來重大的轉變。

本文先介紹甲醇的特性，並針對甲醇製程中的減碳關鍵—氫及二氧化碳之來源進行說明，另摘要國際再生能源總署(IRENA)所列的各種再生甲醇製程，進一步分析海運燃料全生命週期的概念以及再生甲醇之成本發展，最後總結再生甲醇燃料後續展望。

⁴ MAERSK, "Maersk to deploy first large methanol-enabled vessel on Asia - Europe trade lane"

二、甲醇的特性⁵

1. 甲醇(Methyl Alcohol)又稱為木醇、木石腦油或木精，同義之英文名稱有Wood Spirit, Wood Alcohol, Carbinol, Methylol, Methyl Hydrate, Methyl Hydroxide等，甲醇的化學式為 CH_3OH ，縮寫為 MeOH ，是最簡單的醇，在環境溫度下為無色且易燃液體。它有許多用途，可以做為燃料、燃料添加劑、化學原料、溶劑、製冷劑以及許多消費品中的成分或中間介質。雖然如此，甲醇也屬於危險化學品，具有極強的毒性、易燃性和活性，若處理不當則會對人體健康和環境造成有害影響。甲醇的自然來源包含火山氣體、植被、微生物、昆蟲，也可使用各種無機和有機原料製成。大部分的甲醇都在大型綜合化工廠透過天然氣製成，而其位置多位於蘊藏大量碳氫化合物原料的地區，例如波斯灣、加勒比海、南美、非洲和俄羅斯。此外亦可透過煤炭產製，如圖2-1所示，在中國⁶許多化工產品如甲醇、氨等，大部分透過煤炭生產而來。

Key process routes of the coal conversion sector in China

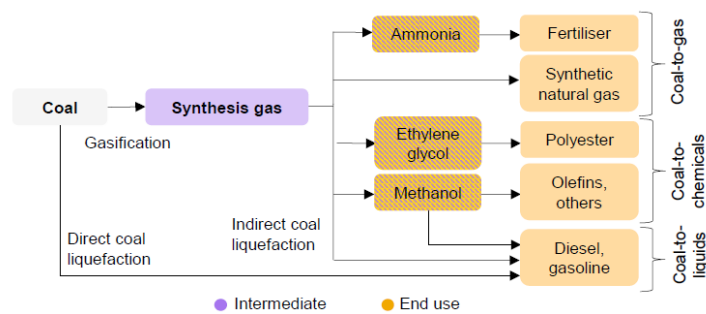


圖2-1: 中國透過煤炭生產各種化工產品

資料來源:IEA, "Coal 2023- Analysis and forecast to 2026"

2. 甲醇消費端遍佈全球，大部分集中於工業高度發展的區域，如北歐、北美、日本、中國、台灣及韓國等。製造端及消費端的地理位置不同，約有80%的甲醇透過海運運輸，甲醇在海上轉運站被接收及存放後，進一步透過卡車、鐵路及駁船等轉運到化工廠等，其中圖2-2為目前全球有甲醇儲運或加注之港口分布圖。

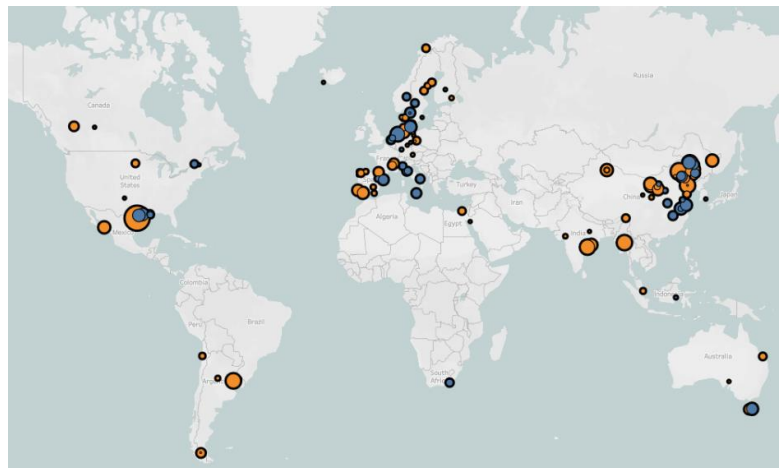


圖 2-2: 全球甲醇儲運及加注之港口

資料來源: MI, "https://www.methanol.org/renewable/"

⁵ MI, "Methanol Safe Handling Manual"

⁶ IMO, "Methanol as Marine Fuel: Environmental Benefits, Technology Readiness, and Economic Feasibility", Chapter 2.1.

3. 甲醇的組成中只有一個碳原子，是由普通飽和烴-甲烷衍生而來的最簡單的醇⁷。醇的化學名稱與其相應的烴組呼應，通常命名規則是去掉結尾的“-e”，並加上“-ol”，如甲烷為Methane，甲醇為Methanol。常見的醇為甲醇、乙醇、丙醇，其具有相似的物理和化學特性，但是其毒性危害程度卻大不相同。隨著醇分子中的碳原子數增加，直碳鏈的長度會增加，醇分子的分子量增加後，凝固點溫度會降低，沸點溫度會升高。醇的結構與特性與水類似，都屬於極性分子，可相容許多物質。甲醇具有毒性，應謹慎處理，否則會對人體造成危害，因此處理甲醇有以下五個重要事項，分別是：

- (1) 甲醇屬於易燃、可輕易點燃的液體，會在空氣中燃燒並且可能會爆炸；
- (2) 甲醇蒸氣的重量稍微大於空氣的重量，若有洩漏時，其液體會匯聚，蒸氣可能會擴散到地表附近並聚集在受限空間和低窪地區。接近於中性浮力的甲醇蒸氣易在通風良好的地點消散，但如果在密閉空間中點燃，可能會逆燃到源頭。
- (3) 在某些特定環境下，甲醇蒸氣在點燃時可能會爆炸而不是燃燒：甲醇受到外部加熱時，容易發生沸騰，使液體轉換成蒸氣膨脹而導致爆炸。
- (4) 甲醇有毒，小量即可導致永久性失明，攝入少量會導致死亡。應避免吞食甲醇液體、吸入甲醇蒸氣、或在匯聚甲醇液體之處所中走動，勿讓甲醇蒸氣或液體接觸皮膚，因為甲醇可以透過皮膚或其他組織直接吸收到血液中。
- (5) 甲醇可以與水完全混溶並依然保持其可燃性。由75%的水和25%的甲醇混合而成的溶液即可視為易燃液體，其混合比例對於消防評估非常重要。甲醇是一種化學溶劑，因此選擇儲存及運送甲醇容器的材料也很重要。

4. 甲醇的物理性質⁸

甲醇為無色之化學物質，稍微帶有芳香的刺鼻氣味，其嗅覺閾值在空氣中範圍廣，介於10~20000 ppm；於一大氣壓下，溫度介於-98°C至65°C時為液態，小於-98°C時為固體；液體在25°C相對於水的比重為0.7866、黏性為0.544 mPa·s；熱體積膨脹係數在20°C時為0.00149/°C；飽和濃度為166 g/m³；

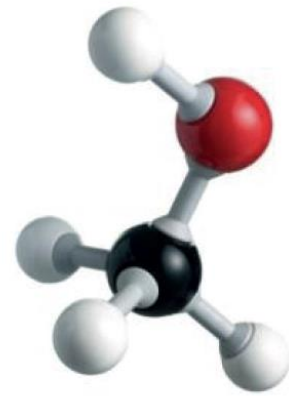


圖2-3: 甲醇分子示意圖

(資料來源: IMO, "Methanol as a Marine Fuel")

5. 甲醇的化學性質⁹

甲醇的化學品族為脂肪族醇(Aliphatic Alcohol)，分子量為32.04克/莫耳，如圖2-3所示，由氧(50.0 wt%) / 碳(37.5 wt%) / 氫(12.5 wt%)等元素組成。甲醇在水中可以100%的溶解，pH值為7.2，生物耗氧量為5天內0.6~1.12 lbs/lb。甲醇的特性表可參考圖2-4，其為全球甲醇行業協會(MI)製作的甲醇物質特性表。

⁷ IMO, "CCC 3/INF.23 Information on a German project called MethaShip"

⁸ MI, "Methanol Safe Handling Manual", Appendix B – B.1

⁹ MI, "Methanol Safe Handling Manual", Appendix B – B.2

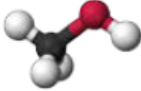
METHANOL TECHNICAL DATA SHEET		METHANOL INSTITUTE	
FOR PRODUCED METHANOL			
CHEMICAL FORMULA:	CH ₃ OH		
CAS No:	67-56-1		
SYNONYMS:	METHYL ALCOHOL, WOOD ALCOHOL		
DESCRIPTION:	METHANOL IS A CLEAR, COLORLESS LIQUID THAT IS SOLUABLE IN WATER AND IS BIODEGRADABLE.		
APPLICATIONS:	<ul style="list-style-type: none"> *CHEMICAL FEEDSTOCK - FORMALDEHYDE, ACETIC ACID, MTBE, DME, BIODIESEL, OLEFINS. *FUEL & FUEL ADDITIVE - VEHICLES, SHIPS, COOKING, HEATING *HYDROGEN CARRIER FOR METHANOL FUEL CELLS *WINDSHIELD WASHER FLUID *WASTEWATER DENITRIFICATION 		
			
TYPICAL PROPERTIES:			
Molecular Weight:	32.04 g/mol	Specific Gravity (20/20°C)	0.7910 - 0.7930
Purity:	99.85 %wt min	Freezing Point:	-97.8°C / -144°F
Water (impurity)	0.100 %wt max	Boiling Point:	64.6°C / 148°F
Acetone (impurity)	30mg/kg max	Flash Point (closed cup, 1 atm):	12°C / 54°F
Ethanol (impurity)	50 mg/kg max	Explosive limits in air	6% - 36%
Chloride (impurity) as Cl	0.5 mg/kg max	Solubility: Methanol in Water/ Water in Methanol	100% / 100%

圖2-4: 甲醇的物質特性表

資料來源: MI, "Methanol Technical Data Sheet"

6. 甲醇的燃燒特性¹⁰

甲醇於1大氣壓下的閃點溫度為12°C，自燃溫度為385°C；在空氣中的爆炸極限為6~36 vol%，爆炸範圍為30 vol%，燃燒時為不發光的藍色火焰，濃度於25 vol % (21 wt%)時的甲醇為易燃物質，其化學計量的空氣/燃料重量比為6.45。

7. 甲醇對金屬、合金、塑膠的腐蝕性¹¹

- (1) 無水甲醇對於鉛、鋁合金具有少量的腐蝕性，對於鎂、鈾的腐蝕性更強，若採用上述合金時，建議定期進行檢查及非破壞性檢測。甲醇對於鋁合金的侵蝕速率通常比較慢，會產生凹坑式的腐蝕。
- (2) 甲醇水溶液對於部分有色合金亦具有腐蝕性，若用於銅合金、鍍鋅鋼、鈦合金、鋁合金以及某些塑膠及其合成物製成的設備都要特別注意。銅、銅合金、鋅、鍍鋅鋼、鋁等塗層，因使用狀況及環境，致使其腐蝕速率不等，因此與甲醇直接接觸的熱交換器、泵組件及閥件等要特別留意。
- (3) 如果儲運甲醇的系統沒有濕氣或含水情況，可採用低碳鋼，但若有含水的情況，則考慮採用316L不鏽鋼或含鈦、鈾的316L穩定不鏽鋼材質。此外，濕氣、無機鹽也會使銲接熱影響區出現腐蝕的現象，進而導致銲接完整性的問題。
- (4) 使用含鈾之低碳鋼，其價格較高，但可防止整體的甲醇腐蝕、凹坑腐蝕、應力腐蝕、氫引裂和產品污染等。
- (5) 樹脂、尼龍、橡膠、乙烯丙烯及氟化材料如鐵氟隆等皆可提供良好的材料性能運用於儲運甲醇的系統上。

¹⁰ MI, "Methanol Safe Handling Manual", Appendix B – B.5

¹¹ MI, "Methanol Safe Handling Manual", Appendix B – B.3

8. 甲醇的消防安全¹²

甲醇具有易燃性，其閃點約為12°C，如圖2-5所示。甲醇與目前船舶常用的燃料不同，在火災撲滅方面有很大的挑戰，因此控制甲醇引發的火災也是重要議題。

甲醇所引起火災有四個主要因素，分別是點火源如高溫、火花；燃料，如甲醇；氧氣，空氣即是氧的來源；以及化學連鎖反應，為持續保持火焰而提供能量的燃燒。

(1) 火災的探測與保護

甲醇引起的火災，在剛發生的時候影響較小，隨後火勢逐漸增大則可能導致嚴重的後果，因此防止火災的目標需於早期火勢較小時進行抑制、控制和撲滅。

需透過前期探測、立即處理及適當的措施進行滅火。大多數的火災會釋放熱量、火焰及煙霧，但甲醇比較特別，其燃燒溫度低，產生的熱量少，而且其為易燃物質，可能在意外的情況下點燃，又其溶於水，很難用水為介質撲滅甲醇所引起的火災。

對於使用甲醇火災事故的探測器，可採用蒸氣探測，由於甲醇的燃燒特性，不會產生明顯的火焰，故無法在視覺上進行探測，但產生大量甲醇蒸氣時，幾乎會發生火災，故蒸氣點燃前先行偵測是否有甲醇蒸氣為優先選項。IMO的MSC.1/Circ 1621¹³通函指出，對於船載甲醇燃料之火災探測器，需要依據燃料的特性評估選擇，除煙霧偵測器外，也要與可以更有效探測甲醇火災的探測器配合使用。此外，甲醇的燃燒溫度低、且為不發光的火焰，其輻射熱通量低，而低燃燒溫度與低熱通量的特性，相對於汽柴油火災，可以更接近火焰滅火。

(2) 滅火劑的選擇

甲醇可完全混溶於水，若25%甲醇及75%水的混合物，已是易燃液體，因此不可使用以水為介質作為甲醇等混合燃料的火災滅火劑，應使用高溫醇類相容的泡沫滅火劑，如成膜氟蛋白泡沫，特別是抗溶水成膜泡沫。此外還應與火源保持適當的距離，並於火災看似撲滅後持續長時間施放泡沫，依過往經驗，甲醇的火災可能會復燃。

滅火劑應為與醇類相容的泡沫，否則甲醇的溶劑特性會腐蝕和消除泡沫，導致滅火失敗。此外甲醇是一種不得吸入或與皮膚接觸的有毒物質，甲醇通常會透過皮膚吸收，因此滅火時應特別注意。

依據IMO的MSC.1/Circ 1621通函指出，採用甲醇作為燃料時，機艙和燃料間的滅火設備應安裝認可的固定式滅火系統保護，所採用的滅火劑應適用可撲滅甲醇之火災，而A類機艙還須設有認可的泡沫型滅火系統。

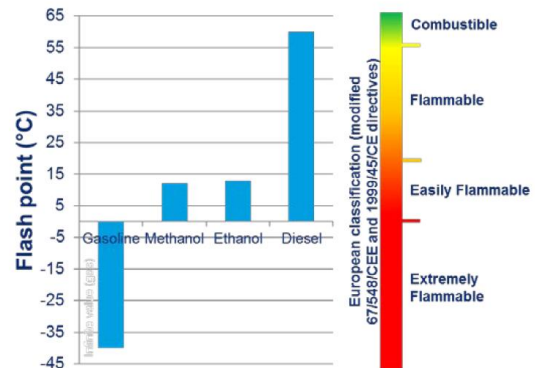


圖2-5: 甲醇的火災危險性

資料來源:IMO, "CCC 5/INF.9 – Study on Methanol Vapour Toxicity"

¹² MI, "Methanol Safe Handling Manual", Chapter 6

¹³ IMO, "MSC.1/Circ 1621 - Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Methyl/Ethyl Alcohol as Fuel"

三、減碳關鍵—氫及二氧化碳的來源

1. 甲醇的應用

- (1) 甲醇主要做為化工原料使用¹⁴，其天然存在於水果、蔬菜、發酵食物、大氣中，過去甲醇通常被稱為木醇，因為最初是作為木炭生產中的副產品，透過木材蒸餾產生，每噸木材約可生產10~20升的甲醇。隨著工業演進，透過煤、天然氣等提高甲醇的生產量。統計至2019年，每年約生產1億噸甲醇，超過60%透過甲醇產製烯烴(Methanol-to-olefins, MTO)的途徑合成甲醛、乙酸、甲基丙烯酸甲酯、乙烯和丙烯等化學物品，透過這些基礎化學品進一步生產數百種與生活息息相關的產品，包含油漆、塑料、建築材料、汽車零件等。甲醇後製的化學品，以甲醛占比最大，主要用於製作苯酚、尿素、三聚氰胺甲醛和聚縮醛樹脂、丁二醇、二苯基甲烷二異氰酸酯(Methylene diphenyl diisocyanate, MDI)等。其中MDI用於冰箱、門、汽車儀錶板作為隔熱材料。甲醛樹脂用途廣泛，可用於膠合板和其他木板製造等木材工業中的黏合劑。甲醇透過MTO的製程，可提高聚乙烯、聚丙烯的產量。
- (2) 甲醇亦可做為燃料使用¹⁵，自2000年左右，甲醇本身或與汽油混合作為燃料、用於生質柴油生產、作為甲基第三丁基醚(Methyl tert-butyl ether, MTBE)和二甲醚(Dimethyl ether, DME)的使用形式也大幅增長，共占甲醇消耗量的31%。自1980年左右，MTBE就已經作為汽油中的燃料抗爆添加劑，此外也可透過甲醇跟油脂的化合產製生質柴油，不過使用甲醇作為燃料是最直接的方式。甲醇做為燃料從2000年開始的1%占比，約過20年後已達14%以上，由於具備高辛烷值，甲醇可做為內燃機中的汽油添加劑或替代品，亦可用於改裝後的柴油發動機或混合動力和燃料電池車輛。由於甲醇的體積能量密度約為汽油和柴油的一半左右，如果使用甲醇為燃料，要達到相同的航行里程勢必要調整燃料艙尺寸，其容積與其他燃料艙之比例如圖3-1所示。

採用甲醇作為燃料時，不會產生煙灰、煙霧或異味，因此也廣泛用於瓦斯爐，光是在中國，其2018年時就消耗500萬噸。甲醇的衍生物DME是通過脫水程序而產生，在中等壓力下即可液化，與液化石油氣(Liquefied petroleum gas, LPG)的性質相似，而DME於業界也有被當作柴油替代品使用，也可以用於加熱和烹飪等應用中代替LPG，無須對現有的設備進行改裝、或在有限的改裝下就可以將20%的DME與LPG混合使用。

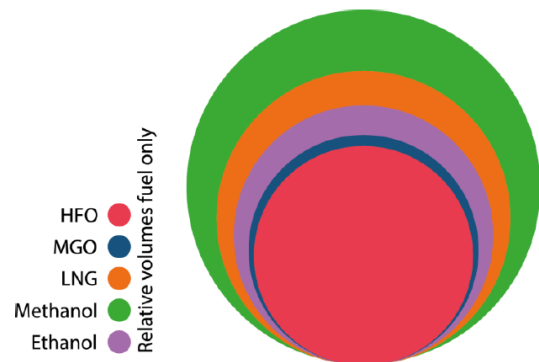


Figure 5: Relative volumes of fuels based on energy density only

圖3-1: 比較傳統燃油、甲醇、乙醇所需的燃料容積
資料來源: EMSA, "Study on the Use of Ethyl and Methyl alcohol as alternative fuels in shipping"

¹⁴ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 1.1

¹⁵ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 1.2

2. 甲醇的關鍵元素

甲醇的化學式為 CH_3OH ，其由一個碳原子、三個氫原子及一組羥基組成，成份很單純，為氫氣及二氧化碳之組成，依據IRENA的報告¹⁶，甲醇的各種生產來源可參考圖3-2進行分類：

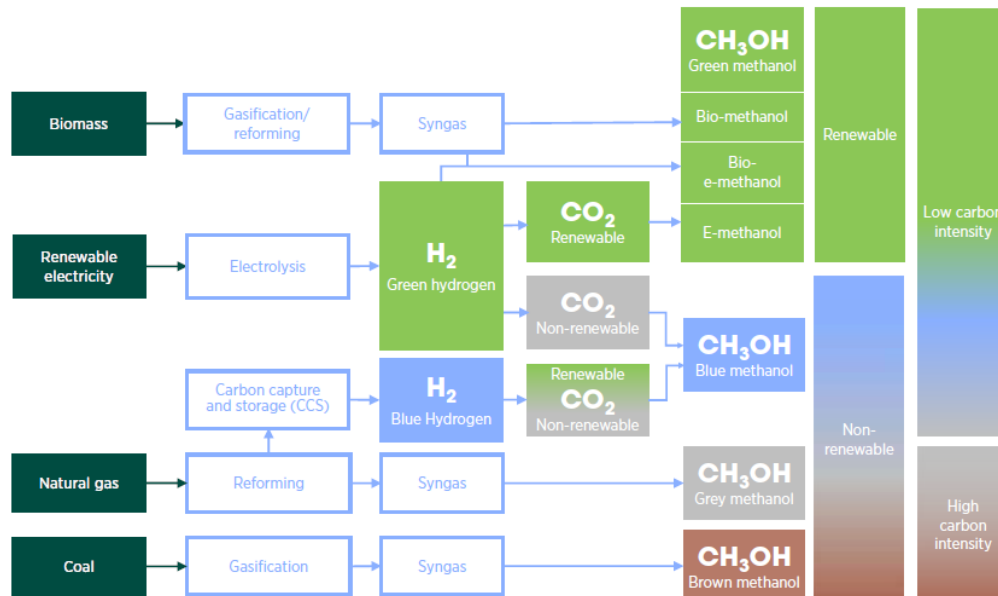


圖3-2: 對於各種原料生產的甲醇進行的分類建議
資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

- (1) 甲醇可先區分為低碳強度 (Low carbon intensity)、高碳強度 (High carbon intensity)、再生 (Renewable) 及非再生 (Non-renewable) 等類型，依據氫氣及二氧化碳的來源所屬的製程及取得方式進行排列組合。
- (2) 再生甲醇是指合成甲醇的氫氣是透過再生能源電解或生物質氣化產生而來的氫；二氧化碳則是透過碳捕捉或由再生資源取得，此類的甲醇亦稱為綠色甲醇，包含生質甲醇 (Bio-methanol)、E-生質甲醇 (Bio-e-methanol)、E-甲醇 (E-methanol) 等，詳細內容將於第四章說明。為符合再生能源標準，用於生產甲醇的所有原料必須是再生物質及再生能源，如生物質、太陽能、風能、水力、地熱能等。
- (3) 非再生甲醇是指其組成的氫氣或二氧化碳，部分或全部來自化石原料：
 - 直接由煤為原料產製而成，稱為棕色甲醇，其碳足跡很高。
 - 直接由天然氣為原料產製而成，稱為灰色甲醇，其碳足跡也很高。
 - 由煤或天然氣產生的氫氣，經過碳捕捉處理，降低生產中的碳排放量，再與任何型態的二氧化碳組合，稱為藍色甲醇。
 - 由綠氫與不環保的二氧化碳來源結合而成的甲醇，也是藍色甲醇，雖然為低碳甲醇，但不為再生甲醇。
- (4) 上述之棕色及灰色甲醇產製的過程中，有關的二氧化碳直接排到大氣，屬於高碳強度甲醇，而綠色及藍色甲醇於產製的過程有碳排的控管，因此稱為低碳強度甲

¹⁶ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Fig.19

醇或低碳甲醇(Low carbon methanol, LCM)¹⁷。低碳甲醇主要於產製時，透過各種方式降低二氧化碳的排放，其方法分別有：

- 透過其他工業捕捉的二氧化碳進行甲醇合成。
- 採用天然氣產製時，前期高溫重整脫碳，但很耗能。
- 利用再生能源生成的電力進行天然氣重整。
- 於甲醇合成的迴路中所產生的二氧化碳與再生能源電解水所產生的氫結合。

以上方法是利用灰色、棕色、藍色、綠色甲醇之各種生產組合的混合方案，可以逐步推動甲醇減碳的製程，有效且循序漸進達成甲醇生產的減排。

- (5) 雖然低碳甲醇有很多種類，例如生質甲醇、E-甲醇、E-生質甲醇、藍色甲醇等，但其減碳的程度，將依據採用再生電力的比例、碳捕捉的效能、生物質的轉化效率等而有所不同，未來仍待後續碳足跡的認證，確認其減碳的多寡。氫氣及二氧化碳取得的方式，將影響工廠生產甲醇的成本，而甲醇製程對於環境的友善程度，未來也影響甲醇燃料的合規程度，因此甲醇產製流程及成本的關鍵元素為氫氣及二氧化碳。

¹⁷ IRENA and MI, “*Innovation Outlook: Renewable Methanol*”, Chapter 2.1

四、再生甲醇各種製程¹⁸

人類活動所引起的溫室氣體排放造成環境及氣候的改變，影響生活環境甚巨，因此各國政府、各行各業及專家學者等積極尋找適當的方式及措施，以降低溫室氣體的排放。而低碳及再生甲醇透過全部或部分採用永續的來源進行生產，使得甲醇可實現化工及運輸業達到脫碳的目標。本章主要摘要為達脫碳目標的再生甲醇製程，分別有由林業、農業廢棄物及其衍生物、沼氣、污水、城市固體廢棄物(Municipal solid waste, MSW)、製漿造紙業的黑液(Black liquor)等生物質原料生產的再生甲醇通稱為生質甲醇；而透過再生能源電力生產的綠氫及再生二氧化碳所合成的再生甲醇通常稱為 E-甲醇。

透過再生資源所產製的生質甲醇或 E-甲醇的化學性質與化石原料產製的甲醇相同，但可以顯著降低整體物質生命週期內溫室氣體的排放。此外，使用再生甲醇可以減少對化石能源進口的依賴，並有效刺激區域性經濟。目前已有許多公司開始布局生產再生甲醇並建置相關示範裝置，對再生甲醇的產製積極的開發。

1. 甲醇合成的程序

(1) 原料預處理(Feedstock pretreatment)

若原料本質上多為固體時，如煤、MSW等，送入氣化爐(Gasifier)之前，需要透過適當步驟將物質均化。進料器系統通常會透過惰性氣體的協助，以均勻流速推動固體，讓預處理更為安全及有效率運作。

(2) 氣化(Gasification)

氣化裝置的關鍵是氣化爐，氣化爐是原料轉換至合成氣的高溫轉換器，其中反應所需的熱能，一部分是由純氧提供，另外還可通過某些熱交換間接提供。

氣化爐大致上分為兩類，即非熔渣(Non-slagging)和熔渣(Slagging)：

- 非熔渣氣化爐：用於處理生物質原料，非熔渣之氣化爐不允許熔煉過程中存在惰性元素，以避免堵塞容器。最高溫度約為800~900°C，且爐中的熱區不能有熱點，否則會導致局部熔化，因此設計上沒有火焰，這也致使某些氣化反應不如熔渣氣化爐有效，過程中也會產生甲烷和焦油(Tars)，後續需要進一步處理。
- 熔渣氣化爐：用於化石原料的製作過程，處理時以高於爐渣熔點的溫度運作。氣化爐溫度高於1000°C，原料會通過灼熱的火焰進行氣化，過程中比較不會產生甲烷和焦油。

(3) 氣體調節和清潔(Gas conditioning and cleaning)，包含水氣轉換(Water gas shift, WGS)

相關的後處理取決於氣化爐的類型、原料成分等。由於生物質材料來源很多，且組成較為複雜多元，需要進行後處理，常見的後處理方式包含透過顆粒過濾器除去顆粒、透過重整焦油/甲烷的程序除去焦油和甲烷、將羰基硫(Carbonyl sulfide, COS)水解轉換成硫化氫以除去COS、採用化工方式去除含氮與氟的成分及透過酸氣移除(Acid gas removal, AGR)的程序除去硫化物和二氧化碳等。

¹⁸ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 2.2

從技術角度而言，商業化的成功關鍵是將原料轉化為滿足甲醇合成裝置技術供應商所要求品質的合成氣(Syngas)。無論上游採用哪一種合成技術，合成氣的品質要求都類似，因此甲醇的生產工廠仍可採用類似汽油、柴油各種烴類燃料生產的Fischer-Tropsch(F-T)技術進行處理，以利產出品質較好的合成氣。

此外氣化爐的技術可依據採用的設計原理加以分類，參考表4-1，依加熱原理分為兩種，一為通過使用氧氣部分燃燒直接加熱的DO₂方式，二為採用間接加熱的IH方式。氣化爐的類型分為採用鼓泡床原理的BB型式、採用上升氣流、氧氣與蒸氣一起注入的UO₂型式、採用燃料與氧氣一起注入燃燒器的EF型式以及採用上升氣流和間接加熱的U-IH型式。

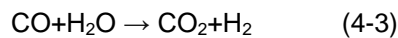
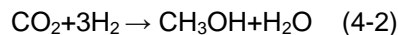
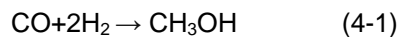
表4-1: 氣化爐設計原理

加熱原理	
DO ₂	Directly(D) heated via partial combustion with oxygen(O ₂) 通過氧氣燃燒直接加熱
IH	Indirectly heated(IH) 間接加熱
氣化爐類型	
BB	Bubbling bed(BB) principle 鼓泡床原理
UO ₂	Updraft(U), oxygen(O ₂) injected together with steam 上升氣流、氧氣與蒸氣一起注入
EF	Entrained flow(EF)(fuel and O ₂ injected together in a burner device) 夾帶流(EF)(燃料和氧氣一起注入燃燒器裝置)
U-IH	Updraft(U), indirectly heated(IH) 上升氣流，間接加熱

氣化爐裝置通常由兩個或以上並聯操作，其優點分別為模組化可提高產量、若有一氣化爐停爐或維修時，仍可持續生產。

(4) 甲醇合成及純化¹⁹(Methanol synthesis and purification)

甲醇是極為重要的有機化工和清潔液體原料，是合成氣轉化合成的基礎化學品。合成氣合成甲醇的主要反應如公式4-1所示，由氫氣及一氧化碳合成；同時合成氣中少量的二氧化碳也會與氫反應生成甲醇如公式4-2所示；反應的同時還可能發生WGS反應，即一氧化碳與水反應成二氧化碳及氫氣，如公式4-3所示。



上述合成甲醇主要為放熱反應，因此於低溫下有利於反應進行；同時甲醇合成又是分子數減少的反應，增加壓力有利於甲醇合成；在熱力學的原理上，一氧化碳與氫氣的組合效能較二氧化碳與氫氣的組合更適當。

合成甲醇使用的催化劑，於工業上多採鋅-鉻基催化劑和銅基催化劑。鋅-鉻基催化劑(ZnO/Cr₂O₃)於1923年即開始運用，其活性溫度較高，為320~400°C，為獲取較高的合成氣轉化率，操作壓力通常為25~35 MPa。優點是具有較好的耐熱性、抗毒性、機械強度、使用壽命，缺點是活性溫度與操作壓力高，致使動力消耗大，設備複雜，產品品質差。

銅基催化劑於1966年成功應用於工業低壓合成甲醇過程，其低溫活性高，適宜操作溫度介於230~310°C，壓力介於5~15 MPa。主要成分為CuO/ZnO/Al₂O₃或

¹⁹ 葛庆杰. 第六章 合成气化学. 工业催化, 2016,24(3): 82-104.

CuO/ZnO/Cr₂O₃，其中CuO/ZnO為活性部分，Al₂O₃或Cr₂O₃可提高催化劑使用壽命，採用此種催化劑為現行工業界的主流。

- (5) 甲醇產製的流程，參考圖4-1以生物質為例，原料進到工廠後，先進行原料預處理，使得有較好的狀態進入氣化爐進行氣化；接下來調節合成氣的狀態，並除去相關的雜質，包含硫化物、二氧化碳等；最後透過催化劑在適當的溫度及壓力下，合成甲醇。

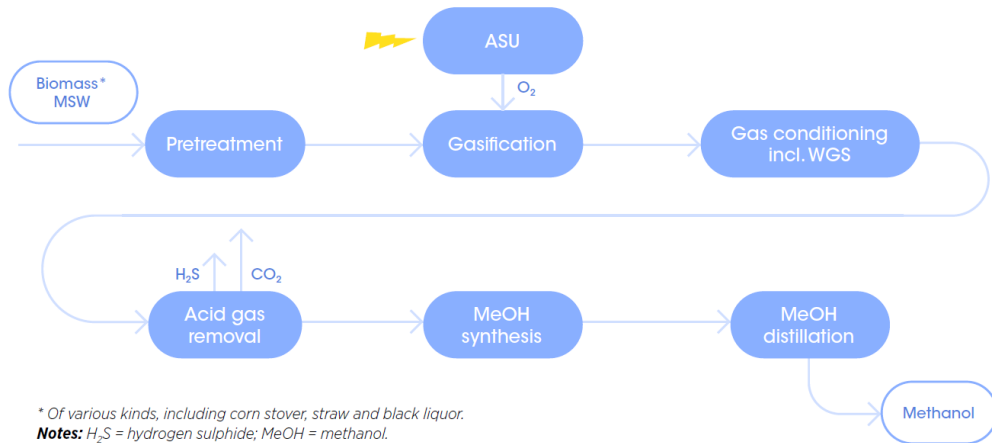


圖4-1: 採用生物質之甲醇製程的流程圖

資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

2. 採用化石原料生產的甲醇之要點

(1) 採用天然氣

採用天然氣轉換為合成氣，即一氧化碳、氫氣及二氧化碳的混合物。其合成氣有多種方式，包含蒸氣轉化法、部分氧化乾燥轉化法、自熱轉化法或幾種方式的組合。以上方式皆為溫度超過800°C的高溫製程方式。於理想狀況，調節後的合成氣，其氫與一氧化碳的比例約為2:1，此為合成甲醇最佳的比例。接下來催化劑將合成氣轉化為甲醇，再以蒸餾的方式以除去甲醇合成時產生的水及副產物。

使用天然氣為原料的優點為雜質較少、容易分離，且氫碳比(H/C)較煤炭佳，二氧化碳排放也較採用煤炭少，生產每公斤的甲醇約會產生0.5公斤的二氧化碳當量。

(2) 採用煤炭

採用煤炭轉換為合成氣，即一氧化碳、氫氣及二氧化碳的混合物，並通過部分氧化和高溫下蒸氣處理結合及氣化之製程方式產出，其溫度約為800~1800°C。透過煤炭獲得的合成氣需要更多程序進行預處理、調節和調整以除去雜質及污染物，如焦油、灰塵、無機物質等，並優化合成氣的組成，以利合成甲醇。調節後的合成氣，氫與一氧化碳的比例約為2:1，之後採用催化劑將合成氣轉化為甲醇，並蒸餾除去合成時產生的水及副產物。

由於煤炭的氫碳比(H/C)較低，其合成氣富含碳氧化物，且氫氣的量不足，其合成氣須進WGS，透過一氧化碳及水的反應，產生二氧化碳及氫氣，以提高氫氣所占的比例。但二氧化碳也會被分離並排到大氣，以煤炭產製的甲醇約每公斤約產生2.6~3.8公斤的二氧化碳當量。

3. 生物質和MSW生產的生質甲醇

採用生物質和MSW為原料產製的技術與採用化石原料產製的技術相同，其差異為處理氣化程序的不同。原料在氣化爐中氣化成合成氣，主要成分是一氧化碳和氫，以及二氧化碳和水的混合物，比例主要取決於氣化爐的類型，合成氣還包含低含量的碳氫化合物、以及源自原料或在氣化過程中形成的殘留物。

氣化時為避免產生惰性氣體，使用純氧作為氧化劑。惰性氣體會影響甲醇合成的效率和產量，增大整個合成氣處理規模，進而增加工廠成本。原料和氧氣之間的比例考量有多種因素，包含原料的反應、氣化爐溫度、原料殘渣和合成氣成分。原則是使用最少量的氧氣以降低成本，並最大化合成氣產量。因此需考量氧氣純度、工廠成本、產量規模和電費。

氣化後之粗合成氣需進行清潔和調節以達到合成甲醇的最佳比例。根據原料和氣化爐的類型，處理的程序也會不同。合成氣還需去除焦油、灰塵和其他殘留物等，並使用脫除裝置去除二氧化碳和硫化物等酸性氣體。氣體調節是要將氫氣及一氧化碳的比例(H₂/CO)調節至2:1以進行最佳的甲醇合成狀態。此外盡可能最大程度提高合成氣產量以及避免甲烷被當作廢氣排除而造成能量損失。

4. 沼氣生產的生質甲醇

沼氣生產在全球極為普遍，經淨化處理後，可以將生質甲烷注入天然氣網路，也可以直接燃燒作為供熱或發電。某些地方既有的甲醇生產設施使用生質甲烷與天然氣共同供料，與傳統甲醇生產相比，GHG排放減少約50%。圖4-2為採用沼氣製程的生質甲醇，其流程與現成製程方式一致，沼氣原料包含糞便或水處理污泥等各類原料，送到沼氣廠後進行原料預處理，包含分離含硫物質、二氧化碳等，接下來進入氣化階段，沼氣多採用甲烷重整產生合成氣，進一步產製甲醇。

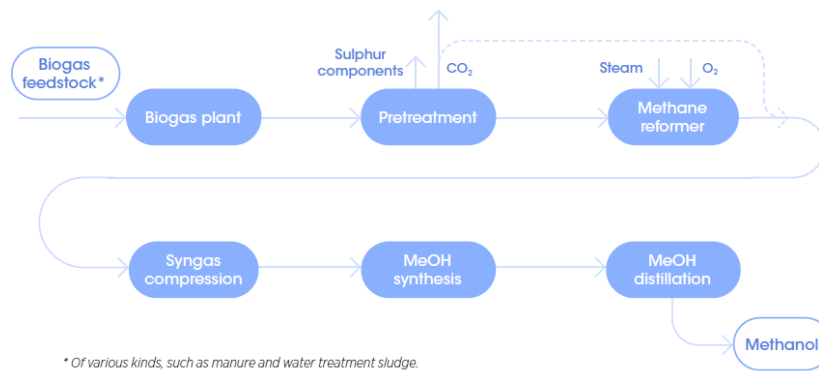


圖4-2: 採用沼氣之甲醇製程的流程圖

資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

5. 從紙漿廠製漿循環生產生質甲醇

當木漿轉化為紙漿以進一步加工為產品時，過程中的木屑會與蒸煮化學品(主要是氫氧化鈉和硫化鈉)發生反應形成粗甲醇。其副產品含有各種雜質，所以大部分作為內部燃料，包含供熱和發電使用。若進一步處理可升級為化學級生質甲醇。

6. 使用二氧化碳及綠氫產製的E-甲醇(E-methanol)

國際再生能源總署(IEA)表示E-燃料(E-Fuel)²⁰是利用電解水後產生的氫氣作為原料所獲得或合成的燃料。因此E-燃料的主要成分氫氣是透過低碳或零碳的電網獲得，以及所需的其他元素為有效處理或處理過，以達到降低溫室氣體排放為目的所產製的燃料，包含E-氫、E-甲醇、E-氨、E-柴油等，見圖4-3，E-燃料產製方式及範圍。

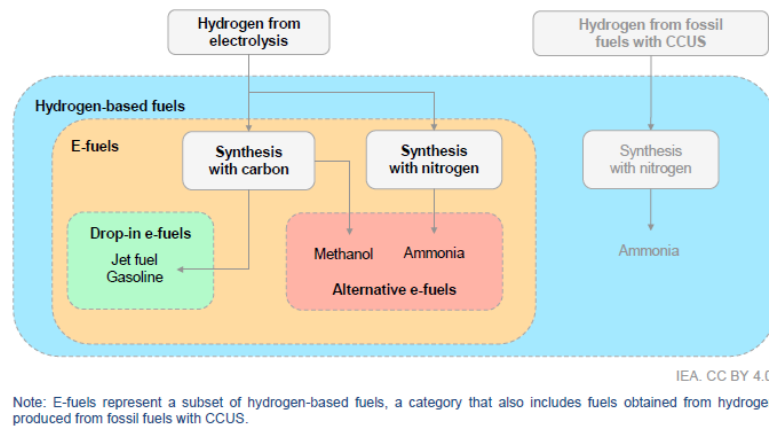
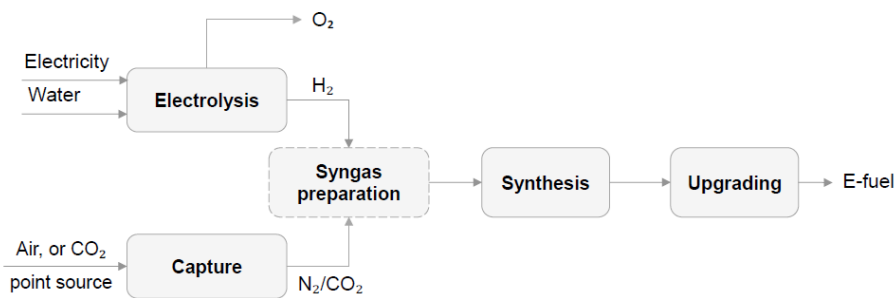


圖4-3: E-燃料產製方式及範圍

資料來源: IEA, "The Role of E-fuels in Decarbonising Transport"

參考圖4-4，E-燃料最重要的組成來源為電解水所產生的氫氣，原則是透過再生能源電網所產製而來，此外透過各種合規方式取得的二氧化碳或氮氣等物質可接續合成E-甲醇及E-氨提供給各界使用。



IEA. CC BY 4.0.

Note: A dedicated syngas preparation step (indicated with a dashed line) is required for Fischer-Tropsch, but not for the methanol or the ammonia process. TRL refers to the IEA extended Technology Readiness Level scale.

圖4-4: E-燃料產製流程示意圖

資料來源: IEA, "The Role of E-fuels in Decarbonising Transport"

²⁰ IEA, "The Role of E-fuels in Decarbonising Transport"

透過上述方式生產的甲醇被視為一種E-燃料，即E-甲醇。綠氫和其他類型氫氣之間的區別，如圖4-5所示，IRENA依據產製氫氣的技術及方式劃分氫的類型。通過再生能源所產生的電網而取得的氫氣稱為綠氫，其屬於低碳氫，且是唯一的再生氫；採用化石原料，但有降低溫室氣體排放措施的氫，如採用碳捕捉設備，可歸類為藍氫，雖然是屬於低碳氫，但由於來源非再生物質，故其分類為非再生氫；透過化石原料且沒有其他的減排措施，則為棕氫、灰氫，且為高碳氫及非再生氫。

當前大多數氫氣仍來自化石燃料(棕氫及灰氫)。採用天然氣、石油和煤炭為來源的占比分別為48%、30%和18%，僅4%的氫氣(綠氫)透過電網電力或再生能源發電通過電解而成。

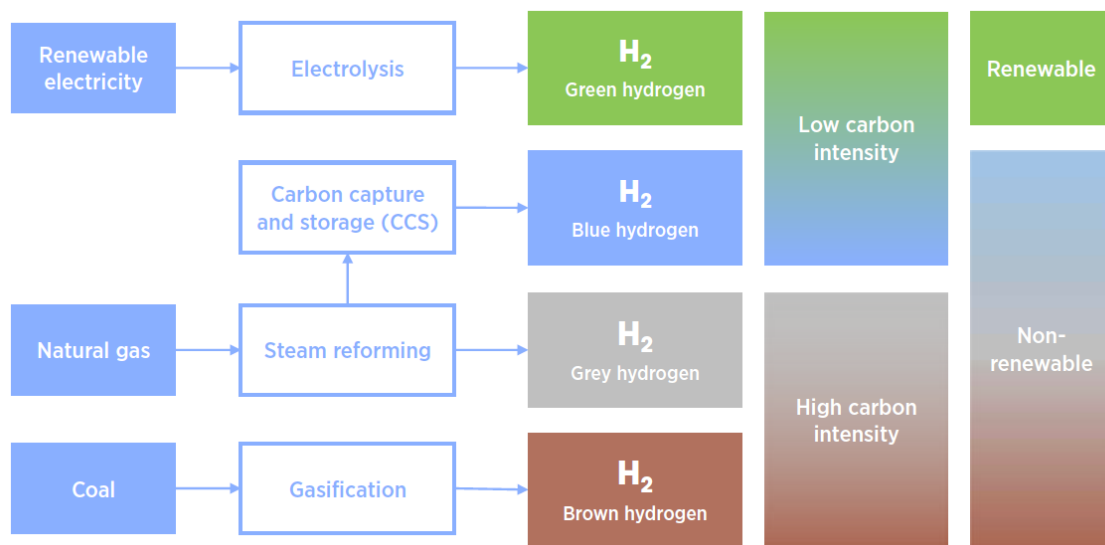


圖4-5: 依據產製氫氣的技術及方式劃分氫的類型

資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

氫氣目前應用層面廣，如化學(甲醇、氨和聚合物)、精煉(加氫裂化和加氫處理)、金屬加工、航空航太、玻璃和食品等行業等，因此將綠氫作為再生燃料的應用近期也成為熱門議題。

利用電化學產製的綠色甲醇有多種方法，目前較為成熟的方法是使用再生電力通過電解水後產製氫氣，再與二氧化碳反應合成綠色甲醇，如圖4-6所示。

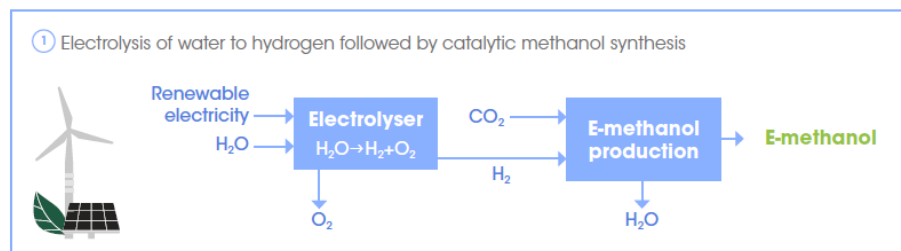


圖4-6: 通過電解和電化學技術生產的E-甲醇方法之其一

資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

其他電化學方式，有些實驗室研究高轉換率的電解方式，其通過電解生產合成氣，包含氫氣和一氧化碳，進一步直接合成甲醇。目前技術尚未成熟，僅在實驗室進行，且電解容量小，如圖4-7所示。

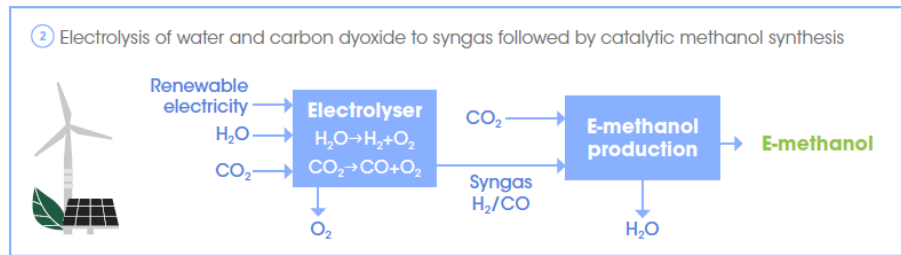


圖4-7: 通過電解和電化學技術生產的E-甲醇方法之其二
資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

另外還有尚在研究中的案例，如通過電化學，將二氧化碳和水直接轉化為甲醇的方法，但到目前為止，實驗室規模的效率和產量有限，如圖4-8所示。

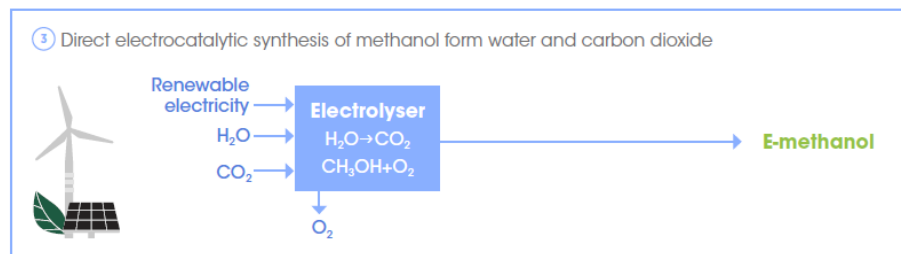


圖4-8: 通過電解和電化學技術生產的E-甲醇方法之其三
資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

綜上所述，利用二氧化碳與電解水產生的氫氣反應是目前生產E-甲醇的實用方法。IRENA指出²¹，E-甲醇產製時，每個二氧化碳分子盡可能轉換為甲醇分子的形式。但是，每個二氧化碳分子需要3個氫分子才能產生1個甲醇分子及水分子。因此每生產1噸甲醇需要約1.373噸的二氧化碳和0.188噸的氫氣，而為了產生上述的氫氣，需約1.7噸的水來電解。

每生產1噸E-甲醇大約需要10-11 MWh電力，在已有二氧化碳的前提下，絕大部分用於電解水。使用100 MW電解槽生產E-甲醇的產能約為每天225噸。每天產能1000噸的大型E-甲醇工廠至少需要420 MW的電解槽。若要替換產能為每天2,500噸的傳統大型甲醇工廠，則需要1個GW級的電解槽，但大型電解槽仍需進一步發展。

E-甲醇合成的技術與化石燃料生產甲醇的技術非常相近，現已成熟，技術成熟度 (Technology readiness level, TRL) 約為8-9。傳統的銅基催化劑僅需稍加調整即可應用於甲醇合成。

(1) 二氧化碳之原料考量，依據來源可大致分為兩類，如圖4-9所示：

- 來自發電廠、鋼鐵和水泥廠等各種工業來源的二氧化碳，其二氧化碳來自化石燃料的燃燒，即使採用碳捕捉並利用，其仍為基於化石燃料之非再生的二氧化碳，且整個製程中二氧化碳淨排放仍然為正。但考慮到不處理的二氧化

²¹ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 2.2

碳排放到大氣進而造成污染，還不如將二氧化碳捕捉後再利用與綠氫共同合成低碳甲醇。

- 通過直接空氣捕捉(Direct air capture, DAC)或生物質來源所獲得的二氧化碳，其目的為實現再生、永續及零碳排。透過生物質來源的二氧化碳約有蒸餾廠、發酵裝置、MSW、沼氣以及其他裝置來源，如燃燒生物質發電的發電廠等方式。上述製程中的二氧化碳通常視為廢氣排放到大氣中，若透過碳捕捉裝置捕捉、存儲與利用，此種方式稱為生物能源與碳捕捉和儲存(Bio-energy with carbon capture and storage, BECCS)或生物能源與碳捕捉和利用(Bio-energy with carbon capture and utilization, BECCU)。未來透過BECCS、BECCU和DAC可在E-甲醇生產中實現碳中和或淨零排放的循環。

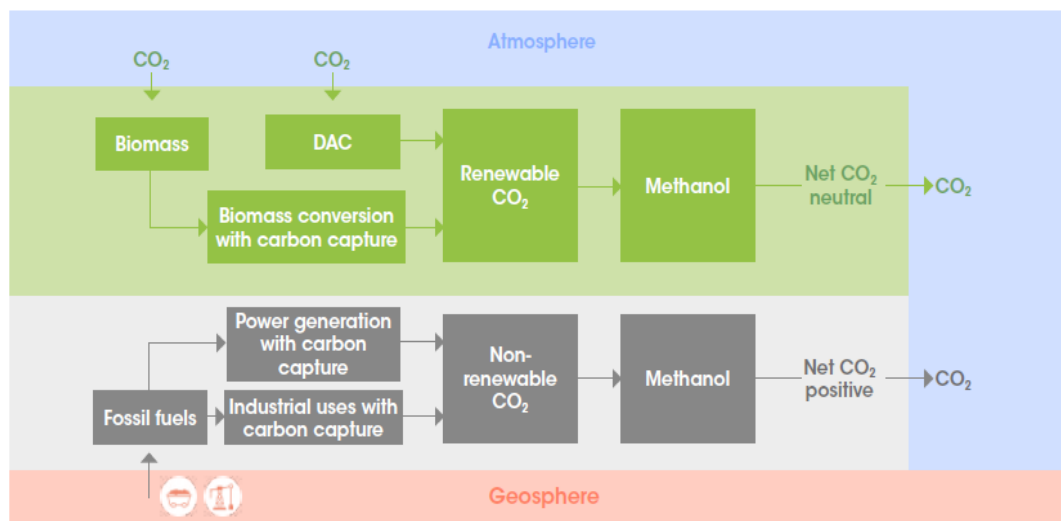


圖4-9: 產製E-甲醇的二氧化碳來源

資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

- (2) 氫氣之來源，採用電解水產製氫氣的規模已由kW級增至GW級，但還需進一步改善電解技術並降低成本，才能實現具有成本競爭力的大規模綠氫生產。相關製程所需的電能可透過任何形式的能源產生，但要實現永續發展，則必須來自再生能源。風能和太陽能發電對於大規模部署永續電解製程而言具備潛力，並為世界上增長最快的能源，可提供清潔和實惠的電力。

7. E-生質甲醇(Bio-e-methanol)的產製

在製造生質甲醇時，其合成氣中的氫氣與一氧化碳之比例(H₂/CO)較低，但其最佳比值約為2，因此一氧化碳會在進行WGS程序與水反應轉化為氫氣，同時產生過量的二氧化碳並直接排至大氣。生物質產製之甲醇過程會產生大量二氧化碳，導致生物質產製之甲醇的轉化率降低。即便採用生物質，只有約50%的碳最終轉化為甲醇，剩餘部分則以二氧化碳形式排出。為提升碳的利用率，將上述剩餘的二氧化碳與外來的氫氣發生反應，可以產生更多的甲醇，因此結合生質甲醇和E-甲醇之產製程序的產物，稱為E-生質甲醇。

原則上採用生物質原料合成甲醇，其氫氣含量不夠，因此透過綠氫的挹注，可以增加低碳甲醇、再生甲醇的產量。如圖4-10，期望生物質中的碳可以100%轉換成甲醇時，綠氫可於合成甲醇前的階段時注入，使得氫氣及一氧化碳的比值(H₂/CO)接近2，進而

免除進行WGS程序²²。另一節點為當反應後仍有殘留二氧化碳時，注入綠氫進行後續反應合成甲醇。

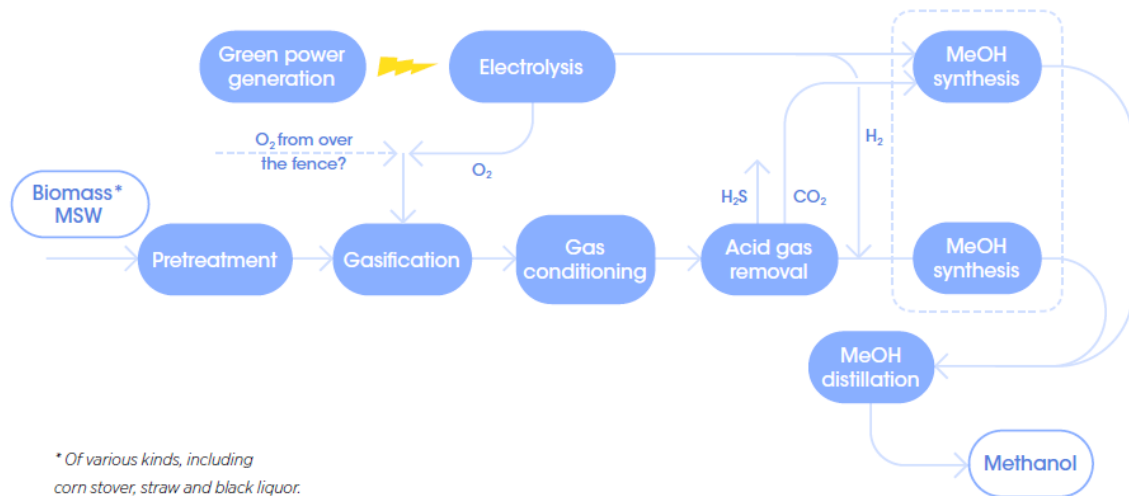


圖4-10: 生質甲醇和E-甲醇聯產流程圖

資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

原則上結合生質甲醇和E-甲醇之產製程序的方式，除免除使用WGS的優點外，對於整體的影響是：

- 補足原始合成氣中的氫氣，此外電解所產生的純氧亦可代替空氣分離裝置中的氧氣，可不需要空氣分離裝置。
- 採用生物質原料，所有二氧化碳將易於追蹤，且為再生資源來源。
- 產製過程中多餘的二氧化碳還可以與額外注入的氫氣合成甲醇。

以上都可降低甲醇生產的成本及充分利用再生資源，結合生質甲醇和E-甲醇之產製程序，將有效利用生物質中的所有碳，進而提高生物質的生產潛力。

²² 無 WGS 的優點為：免除裝置投資、無 WGS 反應中將高壓蒸氣注入合成氣、無 WGS 之鍋爐供水、無 WGS 轉化時的碳損失、無 WGS 放熱反應的能量損失等。此外由於二氧化碳負荷降低，氣體淨化裝置的運營成本相應降低。

五、海運燃料全生命週期與再生甲醇的成本

燃料的永續性，對於海運的減排措施影響非常重要，未來海運燃料將採用全生命週期來評估碳排放，甚至包含相關的溫室氣體。甲醇是有機化合物，含有碳原子，於船舶使用後會排放二氧化碳，但以航運燃料全生命週期而言，再生甲醇，如生質甲醇、E-甲醇、E-生質甲醇等，將會是永續燃料之一。以下先摘要 IMO 的海運燃料全生命週期的要點，並進一步說明使用甲醇對於 CII 的影響，及透過全生命週期檢視使用再生甲醇的可能性，最後就再生甲醇的成本進行分析。

1. 海運燃料全生命週期的概念²³

- (1) IMO於MPEC 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」(Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels, LCA Guidelines)、並於MPEC 81次會議上通過「2024年海運燃料全生命週期溫室氣體強度準則」(2024 LCA Guidelines)，律定船舶使用能源的溫室氣體範疇，涵蓋燃料從開採/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，分為兩個部份處理：第一部分為燃料產製、第二部分為船端使用；目前IMO僅強制要求船端使用的部分，透過CII來達到監管之目的。該準則除計算二氧化碳排放量外，其他溫室氣體如甲烷，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。

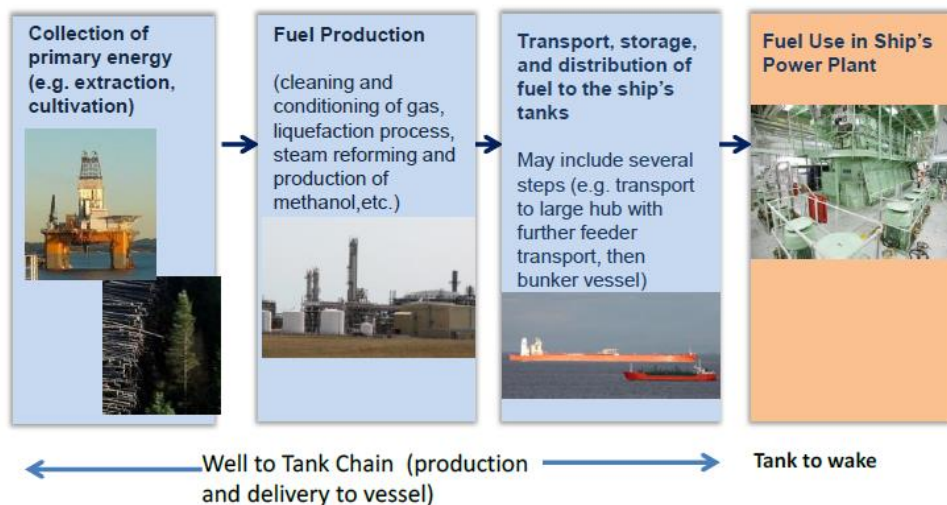


圖5-1: 海運燃料全生命週期溫室氣體示意圖

資料來源:EMSA, "Study on the Use of Ethyl and Methyl alcohol as alternative fuels in shipping"

- (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：
- 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。目前該僅提供化石燃料之預設值，LCA準則及2024 LCA準則之Appendix 2-Initial Default Emission Factors Per Fuel Pathway Code尚未對甲醇燃料給予數值。

²³ CR 第 129 期技術通報

- TtW：指於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)。

2. 船端使用現況

- (1) 依據2021年經修訂的防污公約(MARPOL)附錄VI，其為防止船舶造成空氣污染規則。該規則的第4章為國際航運碳強度規則，所律定之CII，即為上一段所述之油艙到艙流(TtW)的溫室氣體之一的二氧化碳控管。現行符合該規則之船舶，使用甲醇燃料時，仍需符合相關的規定。
- (2) 依據IMO決議案MEPC.364(79)²⁴，考慮各種燃料TtW的狀況下，參考表5-1，顯示每單位質量的燃料轉換到二氧化碳質量的係數，其中甲醇的C_f值為1.375 (t-CO₂/t-Fuel)，而傳統燃油如重油(HFO)的C_f值為3.114 (t-CO₂/t-Fuel)；此外甲醇的最低熱值為19900 (kJ/kg)、重油(HFO)為40200 (kJ/kg)，因此，若欲達與傳統燃油到相似的航行里程，主機/其他燃油設備使用甲醇所需的熱值需與傳統燃油相當，則甲醇的使用量約為重油的2倍，計算兩種燃料每單位熱值(kJ)的碳排後，甲醇相較於重油在TtW的狀況下約可減少11%的碳排放量。

表 5-1: 各燃料的熱值、碳含量及 C_f 值

Type of fuel	Lower calorific value (kJ/kg)	Carbon content	C _f (t-CO ₂ /t-Fuel)
Diesel/Gas Oil (ISO 8217 Grades DMX through DMB)	42,700	0.8744	3.206
Light Fuel Oil (LFO) (ISO 8217 Grades RMA through RMD)	41,200	0.8594	3.151
Heavy Fuel Oil (HFO) (ISO 8217 Grades RME through RMK)	40,200	0.8493	3.114
Methanol	19,900	0.3750	1.375

- (3) CII值的計算如公式5-1所示，評估採用甲醇作為燃料時，假設分母的航程與運力維持不變，影響CII表現的參數分別有燃料消耗及C_f值，另參考主機廠MAN提供的甲醇主機資料，目前開發之甲醇/傳統燃油雙燃料主機，燃燒甲醇時需使用先驅燃料(pilot fuel)，使用比例約為甲醇95%，柴油5%，暫以該比例納入以下計算，後續依此比例稱甲醇模式。

$$CII = \frac{\sum \left(\text{燃料消耗}_{\text{年度}} \times \text{燃料的CO}_2\text{排放係數} C_f \right)}{\text{航行距離}_{\text{年度}} \times \text{船舶載運能力(DWT or GT)}} \quad (5-1)$$

以下為船舶採用傳統燃料及甲醇時的範例及CII的相關變動：範例甲船2023年的燃油消耗數據回報資料，在有關條件不改變的情況以及採用燃油之設備皆可使用甲醇等條件下，分析使用傳統燃油與甲醇的結果如圖5-2所示，綠/黃/橘/紅等四條曲線為CII五種評級A/B/C/D/E的交界，原則上船舶應維持在C級以上，因此推估使用傳統燃油2030、2031年為C級；使用甲醇時的CII約為9.74，於2034年仍在合規範

²⁴ IMO, "MEPC.364(79) 2022 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships"

圍內。目前IMO的CII計算方式為營運操作方面的指標，且架構僅考量TtW的碳排，採用較低 C_f 值的燃料如甲醇時，尚須考量因單位熱值與傳統燃油不同而增加的燃料總量，即甲醇的熱值較低，需2倍以上的同等燃油的質量才能達到跟傳統一樣的效果，總體燃料使用量以及碳排數值也因此受到影響。在TtW架構之下，CII非設計性能方面的指標，除燃料種類的選用，其他如船舶的維護保養狀況、航線規劃、到離港與靠泊時間之掌握等營運管理措施也會影響CII的表現。

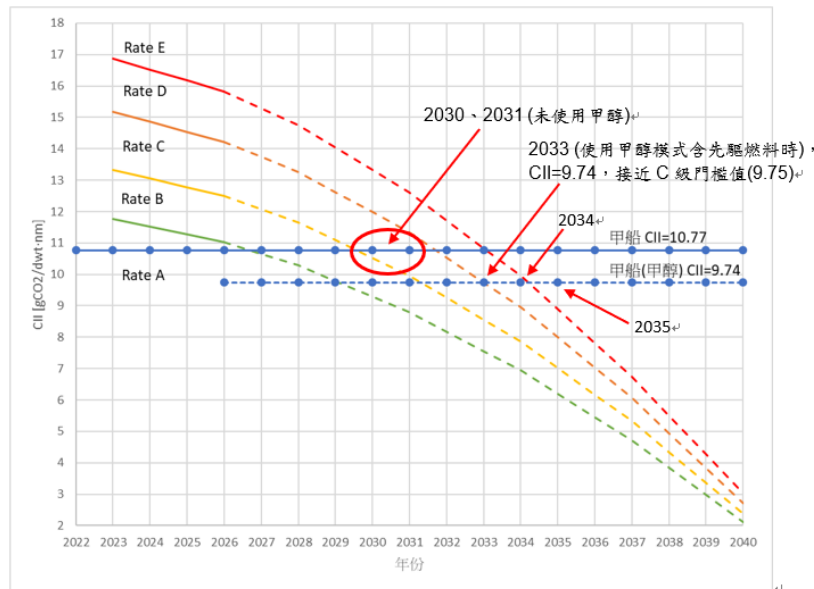


圖5-2: 船舶使用傳統燃油與甲醇的CII比較

資料來源: 驗船中心(CR)

3. 考量全生命週期中WtW之再生甲醇的狀況

- (1) 歐盟已於2024年起將海運碳排納入歐盟碳排放交易系統(European Union emissions trading system, EU ETS)，僅納入船端之排放，即TtW。故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。
- (2) 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，以達到促使船舶減少使用化石燃料。如圖5-3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，未來使用化石燃料幾乎無法符合歐盟要求，在這樣的架構下，E-甲醇的優勢將逐漸凸顯出來²⁵。
- (3) 參考國際綠氫組織於2023年12月出版的綠氫和綠氫產品的全球標準²⁶，其提供綠氫及相關產品的認證服務，特別是透過再生能源產製的產品，認證其相關的碳排放量。其中一項為綠色甲醇的認證，最重要的是要證明綠氫是由再生能源生產，且接近零排放的能源，需考量其製程、運輸及分配等階段，其綠色甲醇必須為使

²⁵ Transport & Environment, "FuelEU Maritime: T&E analysis and recommendations. How to drive the uptake of sustainable fuels in shipping"

²⁶ Green Hydrogen Organisation, "Green Hydrogen Standard 2.0- The Global Standard for Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivatives, GHS 2.0"

用綠氫及合格的二氧化碳來源，其中合格的二氧化碳來源包含生物質、生物廢料、DAC、不可避免的工業排放、已透過認證的碳排放等。但也要注意這些物質或能量的使用不得由生物多樣性高的土地取得。

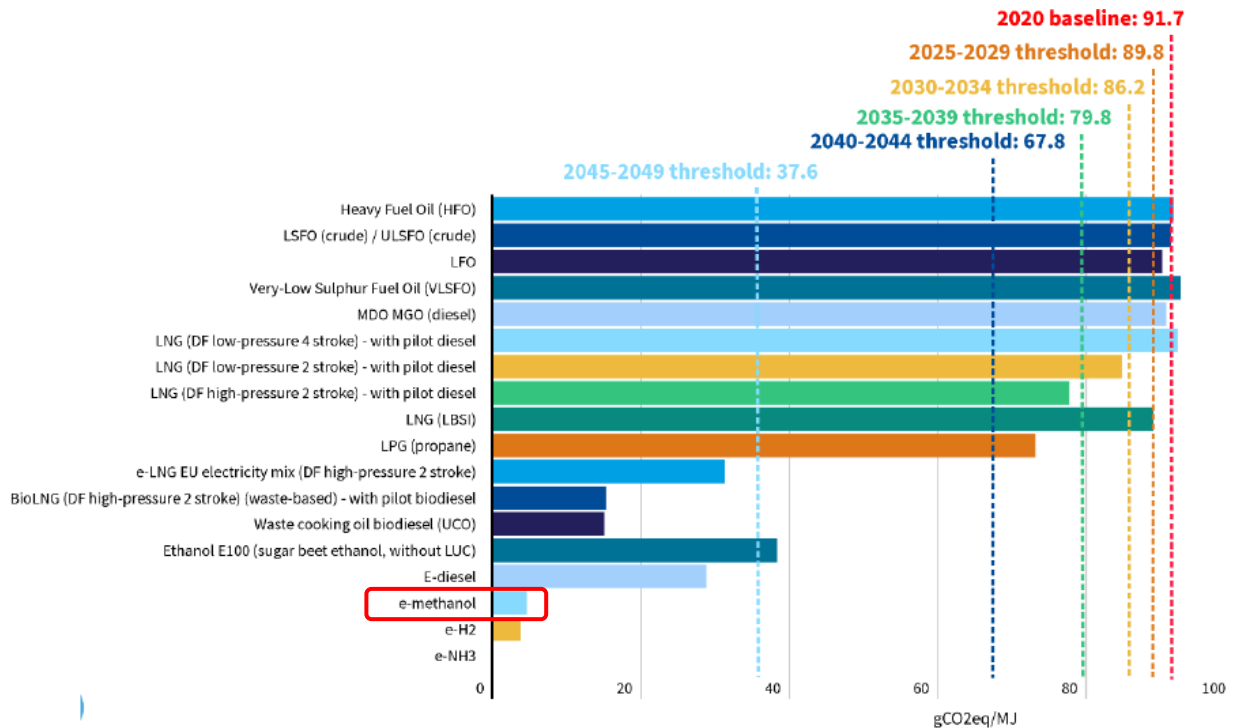


圖5-3: 各種燃料全生命週期GHG強度比較

資料來源: Transport & Environment, "FuelEU Maritime: T&E analysis and recommendations. How to drive the uptake of sustainable fuels in shipping"

4. 再生甲醇產製成本分析²⁷

由再生資源生產的生質甲醇及E-甲醇的成本，主要取決於原料、技術選擇、能源需求、生產能力、營運條件、產品的純度和稅收優惠等。生產成本估計的方式為每年的資本回收費用、營運支出(Operating expenditure, OPEX)和原料採購成本之和，除以生產產量。由於甲醇工廠所生產之甲醇，可為化工原料或燃料，關於價格的呈現，依參考文獻有採用噸或GJ為基準，在此依據IMO MEPC.364(79)²⁸所給定的甲醇熱值為19.9 MJ/kg，提供表5-2為每噸甲醇及每GJ甲醇的價格轉換係數。

表5-2: 甲醇每噸及每GJ之價格轉換係數

美元/噸	美元/GJ
1	0.05025
19.9	1

²⁷ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 4.1

²⁸ IMO, "MEPC.364(79) 2022 Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships"

此外，以下就甲醇的成本構成之資本支出(Capital expenditure, CAPEX)、OPEX、原料成本等三個面向進行解析。

(1) 甲醇的成本構成

• CAPEX：

為建廠所需的成本。原則上設廠選定一種來源物質後，就不容易轉換成另一種原料產製，例如生質甲醇工廠採用MSW進行製程，其相關設備及設計就無法處理以紙漿為原料的製程，其將影響設備的採購成本。例如來自生物質的工廠特定投資為1560~2220 美元/噸/天，計算出其甲醇產品中的資本成本為206~293美元/噸，若為MSW的工廠，其特定投資為2000~2780 美元/噸/天，計算出其甲醇產品中的資本成本為264~367美元/噸。

• OPEX：

估算OPEX不計原料，又涉及各公司的營運機密，通常以CAPEX的占比表示，包括工廠供料、人工、處理原料相關成本、維護保養及副產品或衍伸物的處置成本。最低約在CAPEX的5~6%，而最大的有到9~10%，差距將近兩倍，如圖5-4，為生物質及MSW做為原料，營運支出的高低所反應出的成本。

			Biomass as feedstock		MSW as feedstock	
			Low	High	Low	High
	CAPEX, USD/t MeOH/y		1560	2 220	2 000	2 780
OPEX Low	5%	USD/t MeOH	78	111	100	139
OPEX High	10%	USD/t MeOH	156	222	200	278

圖5-4: 生產成本中的OPEX成本要素

資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

• 原料成本：

原料成本依據生產工廠的位置及原料的類性，存在很大的差異，如圖5-5表示。原料的供應成本受運輸成本影響，研究報告指出，若在工廠所屬的國內取得原料則成本相對低；又依據生物質的來源，例如加工殘渣較能源作物的成本相對較低。

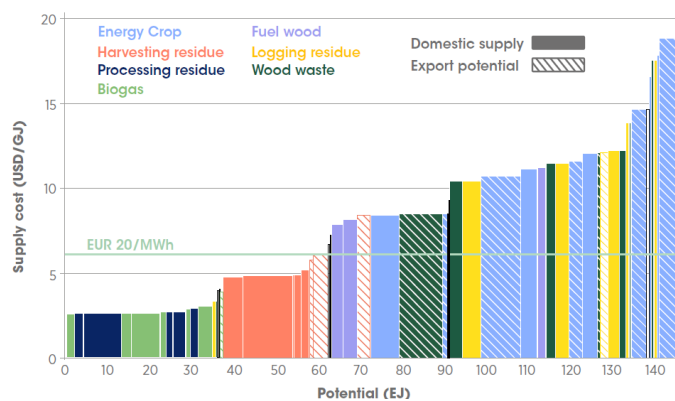


圖5-5: 2030年預估全球初級生物質供應曲線

資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

原料成本同時也要考量生物質到甲醇的能量轉換效率等因素，如圖5-6表示，原料成本由每GJ約1.5到15美元，生物質轉換到甲醇的轉化效率由50~70%，其生產成本就有很大的差異，由每噸約43到597美元，更高的成本主要是採用能源作物和林業產品。

Feedstock cost USD/GJ feedstock	Conversion efficiency, feedstock to methanol, %					
	50		60		70	
	USD/GJ MeOH	USD/t MeOH	USD/GJ MeOH	USD/t MeOH	USD/GJ MeOH	USD/t MeOH
15	30.0	597	25.0	498	21.4	426
10	20.0	398	16.7	332	14.3	284
6	12.0	239	10.0	199	8.6	171
3	6.0	119	5.0	100	4.3	85
1.5	3.0	60	2.5	50	2.1	43

圖5-6: 生產總成本之原料成本及轉化效率的關係
資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

(2) 生質甲醇的成本分析

生質甲醇的生產，受到原料及轉化效率影響較大，其建廠投資成本又與原料有關，如圖5-7，顯示出不同原料的價格、整理轉化的效率、高低營運支出的影響、另考量不同未來可能額外收取不同的碳費或碳稅。目前價格落於每噸約327到1013美元之間。

		Biomass as feedstock				MSW as feedstock			
		Low		High		Low		High	
CAPEX/y, USD/t MeOH		206		293		264		367	
Overall conversion efficiency, %		60	70	60	70	50	60	50	60
Feedstock cost element for methanol at various level, USD/t MeOH	At USD 15/GJ	498	426	498	426	-	-	-	-
	At USD 10/GJ	332	284	332	284	-	-	-	-
	At USD 6/GJ	199	171	199	171	-	-	-	-
	At USD 3/GJ	100	85	100	85	119	100	119	100
	At USD 1.5/GJ	50	43	50	43	60	50	60	50
	At USD 0/GJ ^(a)	-	-	-	-	0	0	0	0
OPEX at 5%, USD/t MeOH		78		111		100		139	
OPEX at 10%, USD/t MeOH		156		222		200		278	
Cost of methanol (USD/t MeOH)	Feedstock cost below USD 6/GJ	327-561		447-714		414-583		556-764	
	Feedstock cost at USD 6-15/GJ	455-860		575-1013		-		-	
Carbon credit (USD/t MeOH)	At USD 50/t CO ₂ ^(b)	-82		-82		-82		-82	
	At USD 100/t CO ₂ ^(b)	-164		-164		-164		-164	

圖5-7: 生質甲醇的總生產成本
資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

(3) E-甲醇的成本分析²⁹

目前生質甲醇是取得再生甲醇最為經濟的方式，而且有大量的生物質可使用，即便如此，未來可能無法滿足全球能源需求。因此直接利用二氧化碳及氫氣所產製的E-甲醇有很大的潛力，二氧化碳生產的甲醇不會受到生物質等原料的限制。

透過永續的方式電解水產生氫氣，並由工業或空氣中捕捉二氧化碳，相互結合催化為甲醇。此途徑的生產成本最主要來自原料成本：即氫氣與二氧化碳；而其又與所需的電力息息相關。生產1噸的E-甲醇約需10-11 MWh的電力，其中大部分用於電解氫，約為9-10 MWh。

與其他化工產品類似，可以通過一定規模的經濟效應降低大型工廠生產的成本。原則上再生甲醇工廠應可達到傳統工廠的規模，因其原料的來源及相關製程的技術都相同。如同採用化石燃料甲醇設施的大型熱催化技術，甲醇合成裝置和蒸餾裝置可以有效利用規模經濟效應降低相關的生產成本。電解水的電化學技術還可以受益於規模增大帶來的成本降低優勢。

天然氣產製之甲醇的生產成本約為每噸100美元，尤其在中東、北美地區，天然氣是製作甲醇最便宜的原料。而在歐洲，天然氣產製之甲醇每噸約300美元。而煤製甲醇的生產成本每噸約於150~250美元之間，工廠幾乎都位於中國。

依據IRENA的報告指出，利用煙道或大氣中捕捉的二氧化碳產製的甲醇之生產成本約為每噸570~1000美元。

規模為每年4000噸到180萬噸不等的工廠生產E-甲醇之成本約為每噸300美元到1000美元。差距大的其中一項因素是區域性較低的電力生產成本，另一因素為電解過程中產生的氧氣可以當作產品銷售，以補貼甲醇的價格。氧氣的售價約為每噸45~180美金，每生產1噸甲醇，其電解水的產物可產生約1.5噸的氧。

因此E-甲醇的生產成本可通過氫和二氧化碳的成本來估算，而上述兩項成本代表絕大部分的大型E-甲醇工廠之生產成本，一旦提供足夠的二氧化碳和綠氫，後續甲醇生產及其蒸餾的程序就非常簡單及成熟，生產1噸的甲醇需要0.188噸的氫及1.373噸的二氧化碳。

- 氫氣成本：

IRENA指出，電解水是能源密集型的產製方法，以100%的理論效率生產1噸氫，需消耗39.4 MWh電力，經統計實際上的消耗電量接近50 MWh，因此氫的成本與其所需的電力成本密切相關。若再生電力如風力、水力、太陽能未來可降到0.4美元/kWh的電力價格時，通過電解產生的氫氣成本約每公斤2.5~3美元，則生產1噸的甲醇需要560美元的氫氣，依據能源願景的預測，如圖5-8，綠氫至2030年時的成本約為每公斤1.8~5美元，至2050年時的成本約為每公斤0.9~3.3美元，若以每公斤1美元的綠氫價格計算，則生產1噸的甲醇僅需190美元的綠氫。因此再生能源電力的價格是決定綠氫成本的關鍵因素。

²⁹ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 4.2

	Historical progress	Where we are heading		Where we should be	
	2015-2018	2030	2050	2030	2050
Cost (USD/kg H ₂)	4-8	2.5-5.0	1.6-3.3	1.8-3.2	0.9-2.0

圖5-8: 綠氫現在和未來的成本

資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

- 二氧化碳成本

二氧化碳的成本最主要取決於其來源及其純化的狀況。可從已經產生二氧化碳濃縮和回收的設施，例如天然氣淨化、化肥和生物乙醇工廠等，以最低成本約每噸20~30美元得到二氧化碳，但這些來源產量較小。若為發電廠、鋼鐵廠、水泥廠透過碳捕捉設施獲取的二氧化碳，其成本約每噸50~100美元，需視其技術和地理位置而定。當前的二氧化碳來源仍來自化石燃料，被歸類為「非再生的二氧化碳」。

採用生物質可透過BECCS及BECCU技術提供部分所需的二氧化碳，其成本取決於碳捕捉技術、原料性質、工廠規模等，其變數大而導致成本差異大，二氧化碳的價格約在每噸20~400美元。造紙廠的生物乙醇生產、生物質氣化和紙漿工廠之黑液氣化提供廉價的二氧化碳，價格約為每噸20~100美元，透過生物質，即再生物質取得的二氧化碳稱為「再生二氧化碳」。

二氧化碳另外一個來源是透過DAC，但該技術成本高，約每噸300~600美元。

六、再生甲醇燃料後續展望

甲醇作為現有化工原料及新興燃料，對比現行有關產業的現況，本章先列出產製、化學應用、儲運、一般燃料、船用燃料、污染物排放、對健康和環境等影響的優缺點，最後總結目前甲醇及再生甲醇所面臨的挑戰及未來的展望與願景。

1. 甲醇和再生甲醇的優缺點³⁰

甲醇的生產和化學應用(為主要化工原料)	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 通常採用各種含碳原料來進行工業生產，如天然氣、煤炭等，具有高產量和高效率的特點。 ➢ 為主要化工原料，已用於生產數百種日常工業化學品和消費品。 ➢ 可用於生產芳香族化合物以及目前從石油獲得的其他化學品。 ➢ 擴大甲醇生產規模以滿足運輸或化學工業的需求，無額外的技術挑戰。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 通過煤炭進行生產的甲醇，其碳足跡很高。 ❑ 再生甲醇的生產成本仍高於化石基甲醇。 ❑ 再生甲醇的生產需要擴大規模，才能達到需求。 ❑ 其再生原料(如生物質)、再生能源(如太陽能、風電等)，會與其他再生替代方案相互競爭。

甲醇的性能、運輸和儲存	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 甲醇常溫下是液體，可直接透過船舶、管道、卡車、鐵路進行儲存、運輸和分配。 ➢ 甲醇的儲存和運輸要求與汽油、乙醇等其他易燃液體相近。 ➢ 作為汽車燃料使用的甲醇可以在常規加油站加注，僅需要進行低成本的小規模調整。 ➢ 船用甲醇的加注與HFO相似，可透過現有的基礎設施進行調整。 ➢ 甲醇在適當的儲存條件下表現穩定，其保質期(Shelf life)沒有限期。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 甲醇可能對於部分金屬具有腐蝕性，如鋁、銅、鋅、鈦及其某些合金；甲醇也會侵蝕某些塑料、樹脂和橡膠，必須選擇兼容的金屬、塑料的材料。 ❑ 甲醇會吸收空氣中的水分，建議將甲醇儲存在密封容器中。 ❑ 儲存甲醇之容器應留有容納熱膨脹餘裕的設計，如較大的艙櫃、浮頂櫃(Floating roof tank)、洩壓閥等。甲醇吸收的水分可以完全混溶，並仍保持單一均勻的反應物，不會影響燃燒。然而，汽油和甲醇混合物吸收的水分會形成不混溶的多相反應物，將會對燃燒產生干擾。

³⁰ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Annex 1.

作為全球各種燃料使用	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 甲醇作為燃料使用的市場不斷擴大，至2022年之統計，約佔甲醇需求的31%。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 與現有燃料，如柴油、汽油，以及與氫、生質燃料、LPG等替代品相互競爭。 ❑ 甲醇的體積能量密度 (Volumetric energy density) 相對較低，約為柴油和汽油的一半。

作為汽油添加劑和替代品	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 甲醇辛烷值高、抗爆震性能強，允許發動機在高壓縮比下運行，以提高效率。 ➢ 可與汽油按3%至純甲醇的不同比例混合，如M3、M15、M85、M100。濃度達15%之M15的汽油可用於普通汽油車。 ➢ 高含氧量，應避免於富燃料燃燒區 (Fuel-rich combustion zones) 使用、蒸發熱量高、貧燃極限低 (Low lean flammability limit)、揮發性強、可兼容於混合動力系統的車輛。 ➢ 甲醇製汽油 (Methanol-to-gasoline, MTG) 提供另一條衍生途徑，可用於現有發動機。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 甲醇在低溫下蒸氣壓較低，可能需要冷啟動系統 (Cold start system) 或更高蒸氣壓力的添加劑。 ❑ 甲醇潤滑性能差。 ❑ 在較高濃度的甲醇下實現最佳效率，需要對發動機進行改造。

作為柴油的替代品	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 甲醇可用於燃燒點火之柴油發動機。 ➢ 甲醇中提取的DME是柴油的替代品，DME的十六烷值比較高。甲醇也是生物柴油的主要成分，生物柴油主要由植物油和動物脂肪與酒精進行酯化反應而得，因此從甲醇中提取的氧化亞甲基醚 (Oxymethylene Ethers, OME) 也正作為柴油替代品接受測試。 ➢ 以甲醇和DME為燃料的改裝發動機，使用在卡車上已有實例 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 甲醇並不是很好的柴油替代品，其十六烷值非常低，若要在柴油發動機使用純甲醇，則需要點火塞、添加劑或同時注入少量柴油 (約5%)，而且在壓縮後才能點燃。

作為船用燃料	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 甲醇作為船用燃料使用，符合IMO制定的2020年生效的船舶硫氧化物排放標準以及各排放控制區更嚴格的排放標準，如燃料的硫含量減少到符合0.1%的標準。 ➢ 再生甲醇可以為實現IMO的溫室氣體減排目標提供途徑。 ➢ 世界很多港口已開始規劃甲醇加注基礎建設。 ➢ 已有多艘大型船舶正準備或採用甲醇。由柴油發動機提供動力，改裝後可同時使用甲醇和柴油。正在開發的甲醇優化發動機有望發揮更好的性能。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 甲醇作為船用燃料，目前存在技術競爭，如選擇性催化還原(Selective catalytic reduction)、洗滌器(Scrubber)、過濾器(Filter)、排氣再循環系統(Exhaust recirculation systems)等。 ❑ 甲醇存在替代燃料間的競爭，如低硫燃油、液化天然氣(LNG)、氫氣、氨等。

其他可能之燃料用途	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 直接甲醇燃料電池(Direct methanol fuel cell, DMFC)可用於發電。 ➢ 甲醇為好的液態氫載體，1公升的甲醇比1公升的液態氫的含氫量高。若是用於燃料電池，甲醇很容易重整為氫氣。 ➢ 甲醇可作為瓦斯爐、工業鍋爐、窯爐和家庭供暖的燃料。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 目前DMFC的價格高昂且產量有限。 ❑ 應進一步改善甲醇重整成氫氣的過程，以盡量降低重整裝置造成額外一氧化碳之產生。

污染物排放	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➢ 甲醇燃燒時的污染物排放減少，如甲醇沒有碳碳鍵(Carbon-carbon bonds)，可實現無煙燃燒，即沒有PM；本身不含硫，因此沒有SO_x；燃燒後NO_x含量較低。 ➢ 甲醇與化石燃料相比，低碳和再生甲醇可以減少二氧化碳的總體排放。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 不完全燃燒會導致生成甲醛和甲酸等污染物。

健康和安全	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 甲醇與汽油相比，在火災中產生的熱量較少，傳遞給周圍的熱量也少。可用抗醇泡沫撲滅甲醇所引起的火災。 ➤ 自然界中本身就存在低濃度的甲醇。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 甲醇高度易燃，燃燒時會產生低溫不發光的清藍色火焰，在強光下可能較難發現。燃燒時不會產生煙。 ❑ 甲醇會在空氣中形成爆炸性混合物。 ❑ 甲醇有毒，通過吸入、皮膚和眼睛接觸以及食入，都可能發生中毒現象。攝入量超過20 mL可能會致命，較少的量將會導致不可逆的失明。甲醇的代謝和毒性與乙二醇類似。 ❑ 甲醇、甲醛和甲酸的降解產物是其毒性的原因，處理和分配時，應採取適當的預防措施。

對環境的影響	
優點	缺點
<ul style="list-style-type: none"> ➤ 甲醇為水溶性，很容易被生物降解。甲醇完全溶於水，若將甲醇釋放到水中，其將迅速分散至低濃度，使天然存在的微生物在相對較短的時間內將其降解。 ➤ 甲醇在水處理廠用於反硝化(Denitrification)。甲醇是生物體分解廢水中含氮化合物的能量來源。 ➤ 甲醇是一種天然存在的物質，不會發生生物累積(Bio-accumulate)。 ➤ 依據危險品法規，沒有環境危害。 	<ul style="list-style-type: none"> ❑ 可洩漏到環境中，若甲醇釋放到土壤，則可能進入地下水。

2. 甲醇和再生甲醇的挑戰³¹

再生甲醇的挑戰與其他再生替代燃料相同，其主要為依賴氫氣的生產及高昂的成本。

(1) 生質甲醇 (Bio-methanol)

生產成本低於E-甲醇，但仍高於天然氣及煤產製的灰色甲醇，大多數先進的再生甲醇工廠的資本成本相對較高，容易面臨融資困難。即便已成功具備先進技術，盡可能降低技術和商業風險，但在商業規模推廣中也難以獲得融資，最主要是目前各國的政策通常僅提供短期、基於部分配額的規劃，其無法支撐及滿足成功實施先進再生燃料所需的長期低價。此外再生電力的電價、產品的合約、相關解決風險障礙的評估，都是重要關鍵。從長期角度來看，生物質可能可以滿足全球能源的需求，但也有一些限制，包含土地可用性、對土壤的影響、土壤侵蝕、對水和肥料需求、生物多樣性、土地使用權，以及大氣和水排放污染物等。

(2) E-甲醇 (E-methanol)

用二氧化碳和氫氣生產的甲醇最大的挑戰是成本，其核心重點是需要透過高耗能的電解水程序才能取得氫氣，目前每噸氫氣的產製需要50 MWh的電力，其與電解槽的電力成本直接相關，因此降低電力的成本是最主要的挑戰。此外二氧化碳的取得成本也非常重要，無論是透過工廠捕捉的碳或DAC，都會影響最終的價格。如圖6-1所示，甲醇的價格是氫氣與二氧化碳的函數，粉紅色的區塊為當前化石基甲醇的價格，淺藍色區塊為當前的E-甲醇價格，仍高於化石基甲醇數倍，隨著技術的開發及再生能源的增加，預估2050年時，如綠色區塊可降至每噸約於630美元。

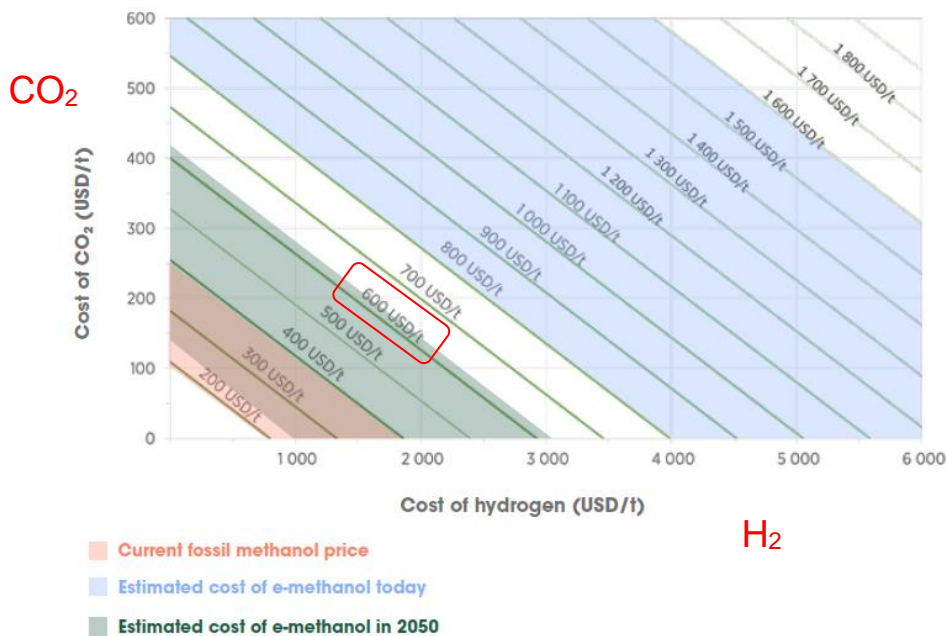


圖6-1: 綠氫現在和未來的成本

資料來源: IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

³¹ IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Chapter 5.4

依據IRENA對於再生甲醇前景的預測，如圖6-2的再生甲醇價格，可透過政策性、技術性、市場性等機制，於2050年時，生質甲醇可降至每噸約227至884美元，E-甲醇每噸約250-630美元。

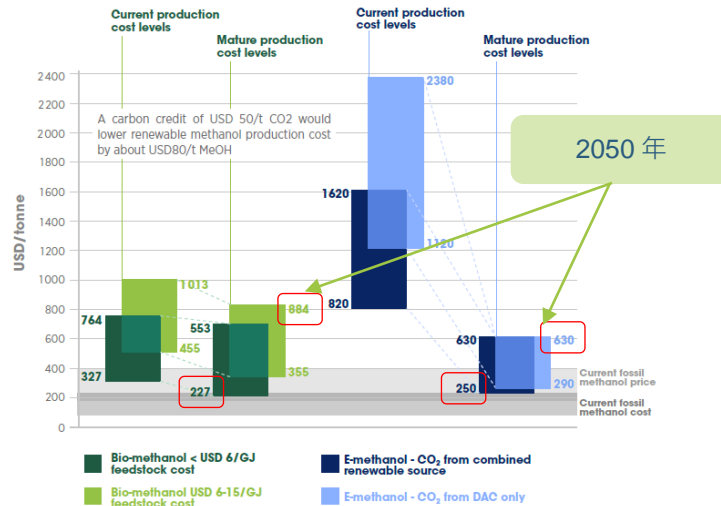


圖6-2: 到2050年，生質甲醇和E-甲醇當前和未來生產成本
資料來源:IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol"

3. 再生甲醇的展望

根據亞洲甲醇市場服務公司(Methanol Market Services Asia, MMSA)的統計資料，如圖6-3所示，甲醇使用逐年遞增並廣泛用於化工原料及燃料等。隨著降低溫室氣體的 policy，含碳甲醇，其生產原本透過天然氣等化石原料，進而改良透過生物質或更環保的方式取得。GENA Solutions Oy(GENA)表示目前再生甲醇產量仍少，至2023年統計約為0.5百萬噸(Mt)，如圖6-4所示，目前再生甲醇以生質甲醇為主，但隨著政策支持及技術的發展，預估到2029年時，再生甲醇可生產達19.7百萬噸(Mt)，且E-甲醇的生產量會大幅提升。

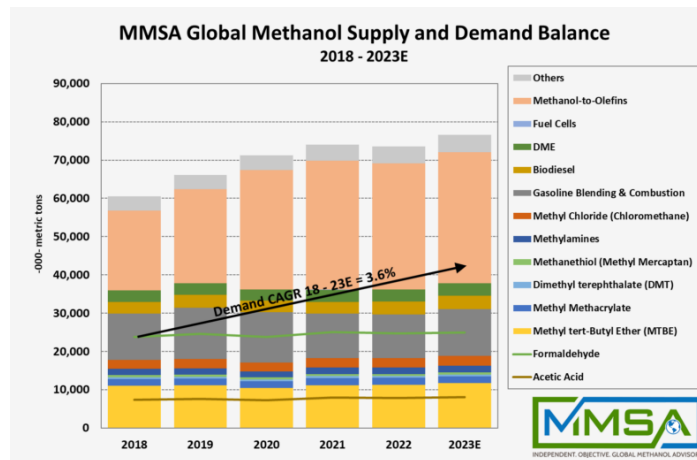


圖6-3: MMSA統計2018至2023年度甲醇的需求量上升

資料來源:MI, "Methanol price and supply/demand", <https://www.methanol.org/methanol-price-supply-demand/>

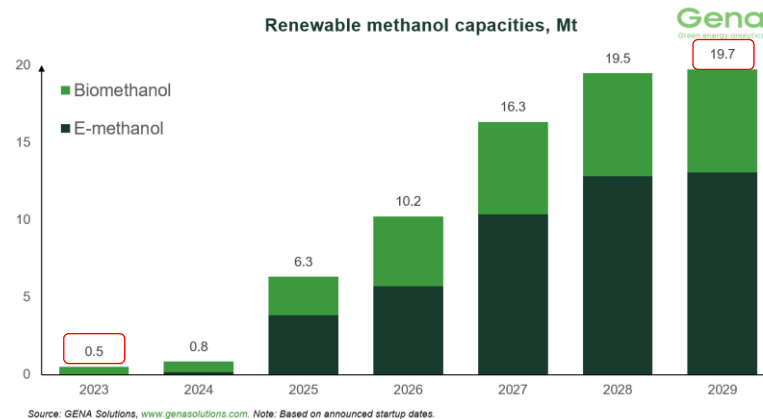


圖6-4: GENA預估2023至2029年度生質甲醇與E-甲醇的產量
資料來源:GENA, "Renewable methanol update", 26 February 2024,
https://www.genasolutions.com/analysis_and_insights/6

4. 促進再生甲醇的願景³²

- (1) 對於整體產業鏈的投資，包含相關技術開發、基礎建設及部署等應達到一定的規模才有效益。甲醇已可用於內燃機，也是重要的化學產品，目前使用灰/藍色甲醇，未來將會以綠色甲醇取代。再生甲醇生產的規模經濟、技術改進，將會產生競爭性定價，也必須取得針對性的投資支持，包含對生產資本支出的直接補貼及貸款擔保等保證。政府及業界也要盡量降低成本並積極佈署相關的基礎設施。
- (2) 除透過政府的公共政策，創造公平的競爭環境外，也要推動電業對於再生能源的投資並擴大農林部門對於生物質的利用，於此降低OPEX。此外也要加強BECCS或DAC的建設及投資。公共政策應鼓勵各部門、各機構共同實現減碳政策。
- (3) 甲醇是重要的化工產品來源，透過化工業的市場力量，關切消費品的碳強度，致使再生甲醇可從碳足跡和溢價機制中取得重要的平衡。
- (4) 主管機關將節能減碳的口號確實轉換為長期監管措施和支持，燃料的標準及相關配額的監管措施應考量市場現有的碳強度，以利制定相關定價及激勵方式，以確保再生甲醇的市場可持續成長。
- (5) 鼓勵國與國之間的貿易合作，分別在生產地和消費端創造就業機會，並透過合作強化新型甲醇產業的競爭力。作為綠色燃料和綠色的化學品，再生甲醇可以在再生電力資源充足的國家或地區生產，並以碳作為載體，轉換成易於運輸的液體分子形式。透過多國的投資，可實現能源和原料供應多元化的目標，並降低政治因素造成的能源短缺風險。
- (6) 需有合理的再生能源政策，以確保再生甲醇和其他有前景的燃料可以得到公平的稅賦和長期穩定的價格保障。

³² IRENA and MI, "Innovation Outlook: Renewable Methanol", Box 1.

參考文獻

- EMSA, “*Study on the Use of Ethyl and Methyl Alcohol as Alternative Fuels in Shipping*”
- IEA, “*Coal 2023- Analysis and forecast to 2026*”
- IEA, “*Net Zero Roadmap – A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach*”
- IEA, “*The Future of Hydrogen*”
- IEA, “*The Role of E-fuels in Decarbonising Transport*”
- IMO, “*CCC 3/INF.23 Information on a German project called MethaShip*”
- 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) on the 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships (2023 IMO Strategy)*”
- IMO, “*MEPC.391(81) 2024 Guidelines on Life Cycle GHG Intensity of Marine Fuels(2024 LCA Guidelines)*”
- IMO, “*Methanol as Marine Fuel: Environmental Benefits, Technology Readiness, and Economic Feasibility*”
- IMO, “*MSC.1/Circ 1621 - Interim Guidelines for the Safety of Ships Using Methyl/Ethyl Alcohol as Fuel*”
- IRENA and MI, “*Innovation Outlook: Renewable Methanol*”
- IRENA, “*Global Renewable Outlook*”
- IRENA, “*International Trade and Green Hydrogen*”
- Green Hydrogen Organisation, “*Green Hydrogen Standard 2.0- The Global Standard for Green Hydrogen and Green Hydrogen Derivatives, GHS 2.0*”
- MAN Energy Solutions, “*The benefits of methanol*”, <https://www.man-es.com/discover/the-benefits-of-methanol>
- MAERSK, “*Maersk to deploy first large methanol-enabled vessel on Asia - Europe trade lane*”
- MI, “*Marine Methanol Future-Proof Shipping Fuel*”
- MI, “*Methanol Safe Handling Manual*”
- Nanyang Technological University, “*Methanol as a Marine Fuel*”
- 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*”
- CR, 「*第129期技術通報*」
- 葛庆杰, 「*工业催化第六章 合成气化学*」, 2016,24(3): 82-104