

生質航油之國際應用趨勢及研發現況

陳佳欣^{1*} 郭家倫² 趙裕³ 黃文松⁴

摘要

隨著全球經濟的發展和環保意識的抬頭，生質航空燃油近年來的需求成長相當迅速，歐美各國競相投入政策制定和技術的研發，同時擬定航空器減碳策略及混摻生質航油之標準。有鑒於此，本文主要探討生質航油於國際的應用發展趨勢及研發現況，並分析美國、歐洲及亞洲生質航油應用於航空產業的需求量及接受度，進一步剖析現階段生質航油的技術進展及市場潛力。另外，本文亦說明目前臺灣生質航油技術的發展現況，由於臺灣尚無商用載客飛機使用生質航油的實例，此顯示國內航空產業在政策、技術成熟度、市場環境、風險評估等各方面，尚有相當的發揮空間，唯目前國內已有研發單位積極發展相關技術，未來希冀能據此與世界的潮流接軌。

關鍵詞：減碳，生質航油，航空產業，國際民航組織

1. 前言

根據國際空運協會(International Air Transport Association, IATA)統計資料顯示，航空產業每年所產生的二氧化碳排放量約佔全球總量的2-3% (IATA, 2015；IRENA, 2017)，雖然相較於其他產業碳排放量較低，但隨著全球經濟的發展和廉價航空的盛行，每年預計有30億乘客搭機前往世界各地，從旅客人數、旅客周轉量、運價水平等指標近年來均維持正向成長，載客率平均每年成長5% (圖1)。隨著航空產業的興盛，運轉產生的二氧化碳排放量也逐年提升(IATA, 2015)，不僅是碳排放量增加，飛行引擎所排放的氣溶膠(aerosol)和顆粒汙染物，會改變大氣層中的含水量，造成航機雲(contrail cirrus clouds)的產生，進而破壞大氣環境，同時造成氣候變遷的現象(Moore *et al.*, 2017)。

航空燃油為提供飛機渦輪引擎使用之油品，種類繁多，碳鏈多介於C8-C16間，並根據鏈長及使用引擎分為航空汽油(C7-C11)和航空煤油(C12-C15)，汽油用於早期的活塞引擎，而煤油用於噴射引擎，並根據夏天、冬天或北極地區等有不同的閃火點及凝固點要求。一般而言，商用載客飛機燃油以JetA及JetA1最為常用，而JP系列則為軍機或高速超音波戰機，為軍用航油，特性及用途各不同(表1)。航空燃油可透過原油的蒸餾液獲得，謂之石化航空燃油，成分約為20%鏈烷烴(paraffins)，40%異鏈烷烴(isoparaffins)，20%環烷烴(naphthenes)和20%芳香烴(aromatics)，這些組成成份在燃料特性中扮演關鍵角色，例如高氫碳比的鏈烷烴和異鏈烷烴可提高每單位質量燃料的熱密度；環烷烴有助於降低凍結點，對於高空飛航相當重要；芳香烴有助於材料相容性，防止飛

¹核能研究所 助理研究員

²核能研究所 工程師

³核能研究所 副研究員

⁴核能研究所 研究員

*通訊作者電話: 03-4711400#5106, E-mail: wis7435@iner.gov.tw

收到日期: 2017年08月10日

修正日期: 2017年11月11日

接受日期: 2017年11月14日

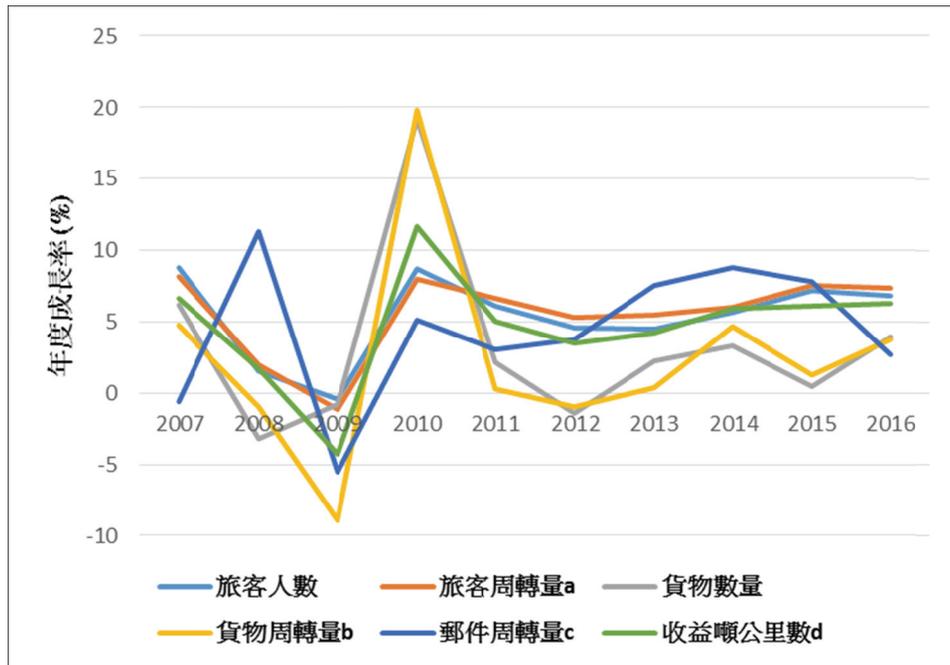


圖1 歷年航空運輸之統計分析

- 旅客周轉量：反應航空運輸產業旅客運輸工作量之綜合性指標，為旅客人數(人)乘以航段距離(公里)之總和。
 - 貨物周轉量：反應貨物在空中位移之綜合性生產指標，為貨物運輸工作量。將貨物量(噸)乘以航段距離(公里)之總和即為貨物周轉量。
 - 郵件周轉量：反應郵件在空中位移之生產指標，為郵件運輸工作量。另外，運輸總周轉量=旅客周轉量+貨物周轉量+郵件周轉量。
 - 收益噸公里數：指運輸收入與其所對應的運輸總周轉量之比，反應實際航空產業之實際平均運價水平。計算公式：收益噸公里數=運輸收入(元)/運輸總周轉量(噸公里)。
- 數據來源：ICAO (2016)，本研究繪製。

機的密封元件洩漏等功能 (Blakey *et al.*, 2011; Mawhood *et al.*, 2014)。另外，航空燃油亦可透過可再生之生質物或植物油品，經轉化萃取而成，稱之生質航空燃油。生質航油經過不同比例摻配於石化航空燃油中，經測試後符合航空燃油之規範，即可運用於商業載客，且飛機引擎不需修改即可相容，為drop-in biofuel。一般航空燃油Jet A1須符合美國材料和測試協會(American Society for Testing and Materials, ASTM) D6155之認證，而混摻生質航油則另外經ASTM D7566認證才可用於飛航。

生質航油目前被認為具有緩解氣候變化之潛力，美國太空總署(The National Aeronautics and Space Administration, NASA)近期發表一篇氣候科學研究，指出混摻生質航空燃油可使飛機發動時產生的顆粒污染物排放量減少50%-

70% (Moore *et al.*, 2017)。該研究針對試驗飛機在空中污染物的排放量進行量測，於試驗飛機中添加Jet A或1:1混摻生質航空燃油的飛機進行航行觀測，研究飛機於試驗飛機後面飛行並測量排放的污染物，兩機距離30-150公尺，飛行高度為9,140-10,970公尺，結果顯示混摻生質航空燃料的試驗機組，所產生的氣溶膠排放量顯著低於常規化石航空燃料。此原因在於生質航油幾乎不存在硫化物及芳香族化合物等化學物質，所以燃燒時所產生的顆粒污染物相較於石化航油少，因此被認為是潔淨的綠色燃油。而此次研究也是全球首度公布飛機使用生質航空燃料的環境影響數據，有助於未來生質航油作為緩解氣候變化之可行性評估。

為了減緩全球氣候變遷，IATA於2009年宣告2020年須達到碳中和、2050年溫室氣體排

表1 航空燃油種類

種類	特性	閃點*	凝固點	燃燒淨熱	商用/軍用	用途
Jet A	煤油燃料(kerosene)	38°C	最高-40°C	42.8 MJ/kg	商用	適用美國，不含靜電逸散劑
Jet A1	煤油燃料(kerosene)	38°C	最高-47°C	42.8 MJ/kg	商用	通常含靜電逸散劑
Jet B	高度易燃之煤油汽油混參燃料	-20°C	最高-47°C	42.8 MJ/kg	商用	用於寒冷天氣
JP-1	煤油燃料	38°C	-60°C	43.1 MJ/kg	軍用	早期(1947年)噴氣燃料
JP-2	煤油燃料	N/A	比JP-1高	N/A	軍用	用於噴氣燃料，比JP-1更易生產
JP-3	煤油與汽油混參	N/A	N/A	N/A	軍用	用於噴氣燃料，比JP-2更易揮發
JP-4	50-50煤油與汽油混參(類似Jet B)	N/A	最高-58°C	42.8 MJ/kg	軍用	1951-1995年美國空軍使用燃料(avtag)
JP-5	煤油噴射燃料	60°C	最高-46°C	42.6 MJ/kg	軍用	航空母艦(avcat)
JP-6	煤油噴射燃料，具有較低凝固點和熱氧化穩定性(類似JP-5)	60°C	-53°C	N/A	軍用	XB-70戰神轟炸機
JP-7	渦輪燃料，低揮發	60°C	-30°C	43.5 MJ/kg	軍用	SR-71黑鳥偵察機，用於高速超音波飛機
JP-8	煤油燃料(類似Jet A1)	38°C	最高-47°C	42.8 MJ/kg	軍用	柴油替代品，可用於發電發熱
JP-9	渦輪燃料	21°C	-54°C	N/A	軍用	用於巡航導彈
JP-10	高密度合成燃料	55°C	-79°C	N/A	軍用	用於巡航導彈
JPTS	渦輪燃料	43°C	-53°C	42.8 MJ/kg	軍用	用於USAF U-2戰機

*閃火點：能夠閃爍起火的最低溫度。

資料來源：台灣中油公司石油產品規範 (2017)；CAMEO Chemicals (2017)；ExxonMobil Aviation (2017)；BOEING (2017)，本研究蒐集整理。

放相較於2005年降低50%之目標，並開始推動航空器使用生質燃料。2016年國際民航組織(International Civil Aviation Organization, ICAO)更通過全球第一個規範航空業的減排協議，透過燃油效率提升、優化飛機航行的操作程序、提升空中交通管理的系統效率以及政策補助等措施，改善航空產業對環境的影響，未來希冀在產業界、政府單位、非政府組織以及民眾共同努力下，讓地球停止「燒」下去。

2. 國際生質航空燃油現況

從國際趨勢來看，2008年Virgin Atlantic航空公司首次使用「生質航空燃油」進行飛行，

從倫敦飛往阿姆斯特丹，此次使用的生質柴油是由棕櫚油和椰子油加工製成，混摻比例為20%，首次驗證生質航油應用於商用機組的可行性及相容性，不但刺激更多航空業者加入生質航油的腳步，更有效活絡整體航空產業之供應鏈，從原料供應、航油生產、混摻配比、燃料運送等，逐步使生質航油投入大量且常規性的商業載客行程，包括KLM皇家荷蘭航空公司、加拿大波特航空、芬蘭航空等多家知名航空公司(表2)，有效提升生質航油於國際上的接受度、需求量及使用量。根據ICAO的統計資料顯示，國際上使用生質航空燃油的需求趨勢愈來愈明顯，倡議使用生質航油的國家也逐年增加(Adams, 2017)，目前生質航油供應鏈遍布世

表2 使用生質航油的商業性航班

航空公司		航班	起點	終點	起始日期	生質航油 供應者	料源
皇家荷蘭 航空公司		B737	阿姆斯特丹	巴黎	2011.06.22	SkyNRG	廢食用油
		777	紐約	阿姆斯特丹	2013.03.08		
		A330	阿姆斯特丹	南美阿魯巴	2014.05.16		
德國漢莎 公司		A321	德國漢堡	法蘭克福	2011.07.15	Neste Oil	混合料源
		A320	法蘭克福	柏林	2014.09.15	Amyris	糖質燃料
		747	法蘭克福	華盛頓	2012.01.12	Neste Oil	混合料源， 降低38噸 CO ₂ 排放
芬蘭航空		A321	阿姆斯特丹	赫爾辛基	2011.07.18	SkyNRG	廢食用油
		A330	赫爾辛基	紐約	2014.09.23	SkyNRG	廢食用油， 10%混摻。
英特傑特 航空		A320	墨西哥	圖斯特拉古 鐵雷斯	2011.07.21	ASA	麻瘋樹
墨西哥航空		B777	墨西哥	馬德里	2011.08.01	ASA	麻瘋樹
		777	墨西哥	聖保羅	2012.06.18	ASA	混合料源
西班牙航空		A320	馬德里	巴塞隆納	2011.10.03	ASA	亞麻芥油
湯姆森航空		B757	英國伯明翰	西班牙阿雷 西費	2011.10.03	SkyNRG	廢食用油
法國航空		A321	法國圖盧茲	巴黎	2011.10.13	SkyNRG	廢食用油， 50%混摻。
聯合航空		787-800	休士頓	芝加哥	2011.11.07	Solazyme	藻油，40% 混摻。
泰國航空		777-200	曼谷	清邁	2011.12.22	SkyNRG	廢食用油
智利航空		A320	聖地牙哥	智利	2012.03.07	SkyNRG	廢食用油
澳洲航空		A330	雪梨	澳洲	2012.04.13	SkyNRG	廢食用油
波特航空		Q400	多倫多	渥太華	2012.04.17	SkyNRG/ Honeywell	廢食用油
捷星		A320	墨爾本	澳洲荷伯特	2012.04.19	SkyNRG	廢食用油
加拿大航空		A319	多倫多	墨西哥	2012.06.18	SkyNRG	廢食用油
北歐航空		737-800	斯德哥爾摩	奧斯陸	2014.10.07	SkyNRG Nordic	廢食用油， 10%混摻。
挪威航空		737-800	卑爾根	奧斯陸	2014.11.11	SkyNRG Nordic	廢食用油， 50%混摻。

資料來源：IATA (2015)，本研究繪製。

界各地，較興盛的地區分別位於北美洲、歐洲及亞太地區，而隨著中國和印度兩大經濟體的

發展，旅客和貨運量的增加更進一步帶動了生質航油市場的擴張。另外，料源的可取得性也

是一關鍵因素，在產油國家和料源豐富的地區具有相當大的誘因建立生質燃料之市場，例如盛產玉米、甘蔗的美國和巴西，在生質航油的發展更是迅速。而生質航油主要以產業界為領導族群，由產業界帶動全球的需求量增加，在產業供應鏈團體、政府研究單位、非政府組織以及綠色環保團體共同努力下，推動相關綠色

計畫，以加速生質航油產業之成長。且生質航油具有顯著的減碳效益，大部分的生質物從原料採收到燃燒殆盡，全程均具有超過50%以上的減碳成效(圖2)。整體而言，目前生質航油的進展大多仍停留在研發及評估階段(圖3)，未來實際運用到商轉化生產、經濟可行性評估以及供應鏈網絡合作等商業模式還有一段距離。

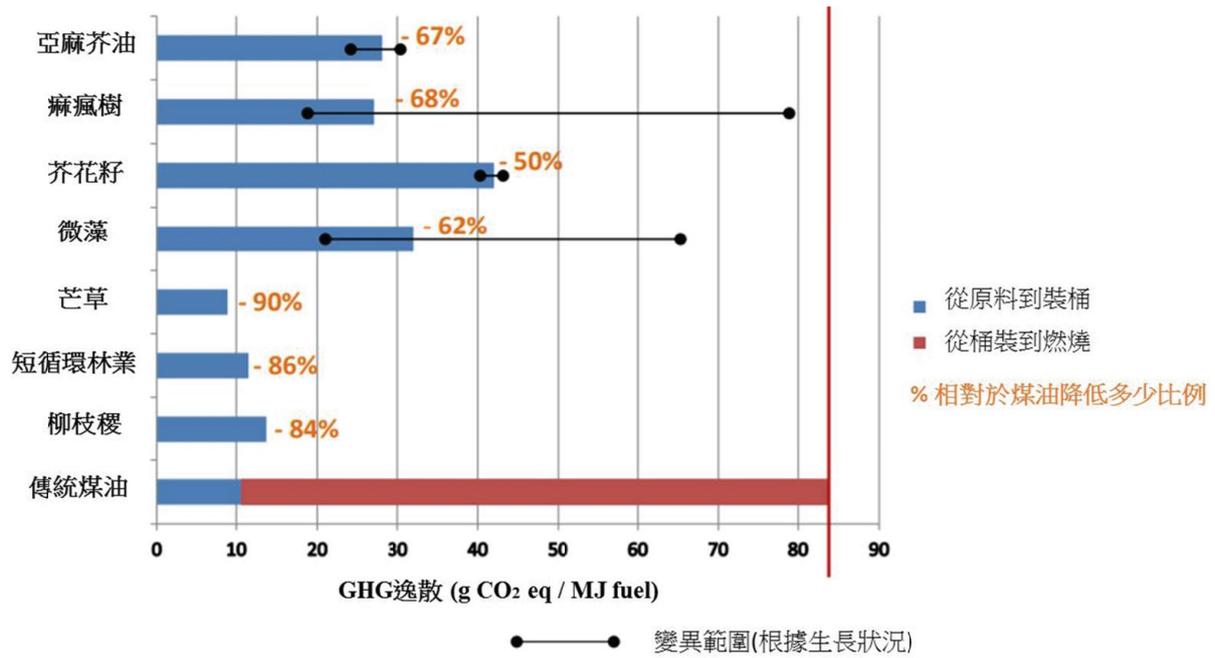


圖2 生質航油之減碳效益

資料來源：ICAO (2016)；SWAFEA (2011)。

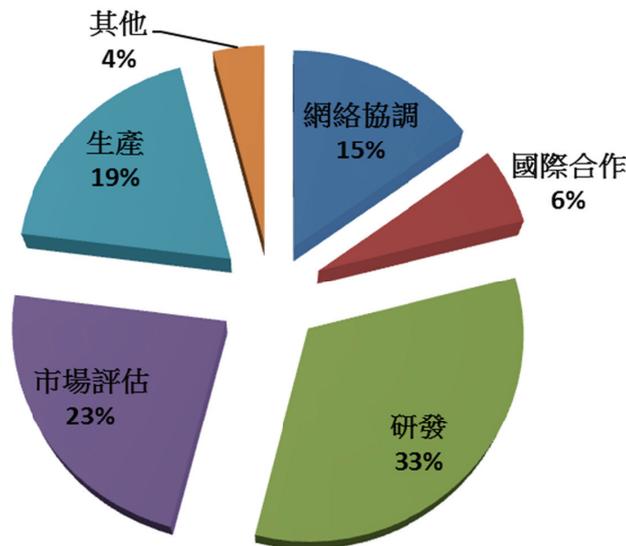


圖3 生質航空燃油的階段發展
數據來源：IATA (2015)，本研究繪製。

2.1 美國之生質航油現況

美國在能源政策及法規的推動下，生質航油產業快速發展，基於2005年能源政策法，美國環保署(Environmental Protection Agency, EPA)訂定「再生燃料標準」(renewable fuel standard, RFS)，強制規定美國所銷售的運輸燃料用油必須包含一定比例之生質燃料，以減少溫室氣體的排放，此標準的制定對生質航油的產業發展具有決定性影響，不僅加速生產製造商的供應，也增加了航空業者的使用需求，形成綠色環保供應鏈。2013年美國聯航與AltAir簽訂承購合約(表3)，並協議於2015年開始，供應長達3年的HEFA (hydroprocessed esters and fatty acid)燃料，使位於加州的煉油廠改裝生產90千

噸/年的再生柴油及航油。2014年香港國泰航空和Fulcrum能源公司簽訂每年100千噸的航空燃油，於內華達州利用費托轉換法將城市固體廢棄物轉成燃油，此案例產製之生質航油不僅符合再生燃料標準，更獲得美國國防部軍用生質精煉獎，後續亦實際應用於軍用戰機。隔年，美國聯合航空公司亦投資Fulcrum能源公司3千萬美金，成為航空產業史上最大的替代能源投資案，而Fulcrum能源公司也建置首座垃圾航油廠，於2017年進行商業運轉，預計每年生產1億8千萬加侖的生質航油。除了Fulcrum公司，後續有更多生質航油製造商投入，例如Red Rock、REG synthetic fuels、Diamond Green Diesel、SG Preston等廠商，總計每年產能約為499百萬加侖的生質航油(圖4)。

表3 航空公司與製造商簽訂承購合約(offtake agreements)

Airline	Supplier	Volume [t/yr]	Product	Duration	Start delivery	Contract date
United	Altair	17,000	HEFA	3 years	2015	2013
Cathay	Fulcrum	100,000	FT (waste)	10 years	2017	2014
Southwest	Red Rock	10,000	FT (forest residues)	n/a	n/a	2014
British Airways	Solena	50,000	Municipal solid waste	10 years	2017	2012

資料來源：IATA, 2015。

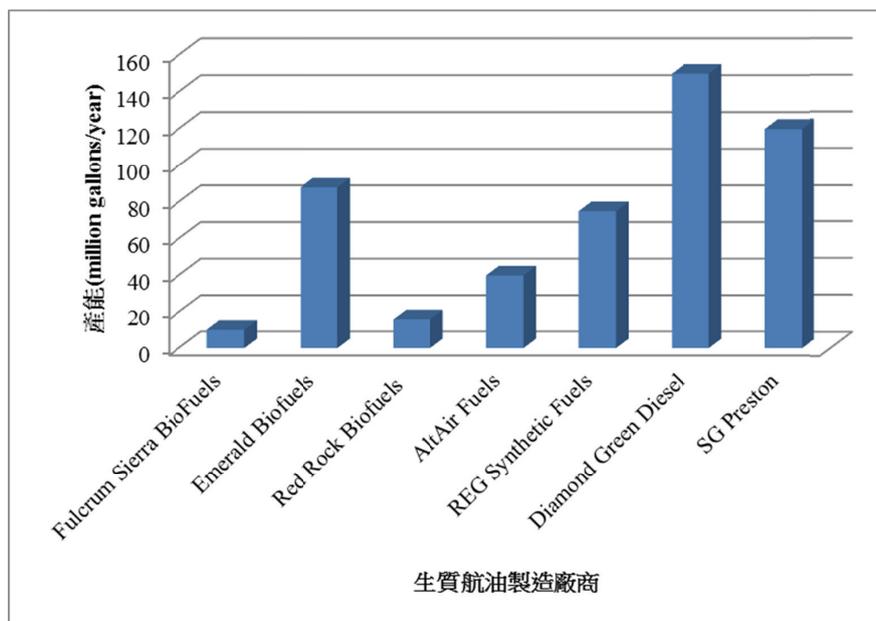


圖4 生質航油之產能

數據來源：DOE, 2017，本研究繪製。

因應IATA 減碳的要求，未來將會有更多的航空公司使用生質航空燃油，生質航空燃油的需求量和接受度也將隨之上升。另外，為了確保美國滿足再生燃料標準使用總量之目標是否達成，美國環保署制定生質燃料序號制度 (renewable identification number, RIN)，清點從製造商、經銷商、進口商等產業供應鏈之RIN 額度，藉以追蹤每年生質航空燃油的使用量(歐陽孚，2012)。美國祭出多種策略與規範，讓生質航油市場趨於樂觀。

2.2 歐洲生質航空燃油現況

歐盟106年的BJ10航油政策，必須在航油中加入10%生質航油，因此許多國際大廠已陸續投入研發與測試(吳榮宗與康文成，2017)。另外，為了因應巴黎協議，歐盟、空中巴士 (Airbus)和航空燃油製造商共同發表歐洲先進生質燃油飛行路徑圖(European Advances Biofuel Flightpath)。此行動聚焦於下列議題，例如混摻生質燃油(drop-in biofuels)如何標準化，並

應用於商用飛機；如何與供應鏈全面合作，發展全世界永續認證之框架；如何將生質航油的製造成本合理化；公私部門如何共同合作，以確保生質航油市場之運作機制；如何健全航空產業供應鏈之融資財務結構，使第二代生質航油計畫據以實現；如何加速先進航油技術的發展，特別是藻油的技術開發；如何向歐洲公民溝通採用生質航油之益處，並尋求相關支持等議題。此飛行路徑圖不僅制定短中長期計畫，也說明目前歐洲國家執行的計畫及相關關鍵技術(表4)，目前較為成熟的技術主要以FT-SPK (Fischer Tropsch-synthesis paraffin kerosene)和 HEFA-SPK (hydroprocessed esters and fatty acid-synthesis paraffin kerosene)為主。

目前歐洲油品市場以奈斯特石油公司 (Neste oil)最具規模，為芬蘭最大國有控股公司，此公司利用HEFA+技術建置3座大規模的生質燃油廠，預計每年可產800千噸的生質航油，足以達到2020年之目標，更預估未來在2020年將2百萬噸生質燃油混摻於煤

表4 歐洲生質航油使用的關鍵技術及預計產量

Project-Location	Technology Type	Planned Total Production Capacity, t/a	Planned Aviation Biofuel Production Capacity, t/a	Start-up Date
Neste Oil-Netherlands	HEFA	800,000	*	2011
Neste Oil-Singapore	HEFA	800,000	*	2010
Neste Oil-Finland 1	HEFA	190,000	0	2007
Neste Oil-Finland 2	HEFA	190,000	15,000	2009
UOP-Italy	HEFA		0	
UOP-Spain	HEFA		0	
BTG-Netherlands	PO	1,000,000	50-100,000 t/a HOP	
Evergent Techn.	HPO		0	
Neste/Stora Enso-Finland	FT		0	
ForestBTL Ajos-Finland	FT	140,000	0	2017
Solena-UK	FT	120,000	50,000	2015
UPM/Carbona-France	FT	100,000	0	2017
CEA-France	FT	22,000	15,000	2018

* = Possibility exists to dedicate tens of thousands of tons capacity to renewable aviation fuel production, if a demand exists.

資料來源：Schroecker *et al.* (2013)。

油(kerosene)供航空產業使用。另外，荷蘭 SkyNRG是歐洲大型的永續航油的供應商，主要是利用廢食用油來產製生質航油，並提供超過20家航空業者使用，轉換技術成熟，故初步推測目前此公司在廢食用油的集運物流成本最高，包括廢食用油的蒐集、運送、前處理、庫存、供應穩定性及可靠性等，皆是未來可以改善的方向。

歐盟為了履行京都議定書之減碳承諾，制定了歐盟碳排交易體系(European Union Emission Trading Scheme, EU ETS)，將二氧化碳碳排放權視為一種商品，利用市場機制強制歐洲各成員國進行碳排的總量管制。雖然歐盟利用各種手段和策略來推廣綠色燃油，然而，整體而言，目前歐洲面臨的最大挑戰在於永續料源的成本過高以及缺乏各成員國的強力支持。

2.3 亞洲生質航空燃油現況

亞洲部分，中國油品產業也逐漸踏入生質航油的市場。根據報導指出，中國石化公司和美國波音公司合資創建航空節能減碳技術，利用廢食用油提煉航空燃油，也就是俗稱的「地溝油」煉製成航油，讓中國成為繼美國、法國、芬蘭之後，為第四個擁有生質航油自主研發技術之國家。統計顯示，中國大陸每年消耗約2,900萬噸的食用油，而航空產業每年需消耗2,000萬噸航油，故使用廢食用油作為提煉生物航油的生產原料是深具潛力(電力知識庫，2012)。2015年首次利用生質航油來進行商業載客飛行，從上海虹橋機場到北京首都機場，此次飛行更宣示了中國航空產業進入減碳領域的決心。除了中國大陸的進展外，值得注意的是，和臺灣地理環境相似的日本亦持續重視生質燃料產業布局政策，利用「次世代航空燃油組織(Next Generation Aeronautical Innovation Hub Center)」去擬定生質航油製造策略和路徑圖，展現出日本要進入生質航油市場的決心和行動，並於2017年6月在橫濱蓋了第一家生質航油的試驗工廠，預計在2019年啟動商轉廠運

轉，產製下一個世代環保的再生航油。

3. 生質航空燃油之技術

生質航空燃油的技術演進，最早可追溯到二次世界大戰，當時參戰國家無不將資源全數投入戰爭，當時由於石油的供給缺乏，德國、日本及英國更積極開發新型燃料的製程，以供給戰機飛行，並透過各式各樣的料源，利用不同技術轉換成航油，有名的費托製程(Fischer-Tropsch Process)便是從此時開始應用。在日本殖民期間，日本在新竹興建「海軍第六燃料廠」，就是利用天然氣合成及糖蜜醱酵產生的丁醇，經觸媒及加氫程序生產航空用燃料-異辛烷，此創舉亦成為臺灣發展生質航油之始祖(林威廷，2017)。關鍵技術部分，由技術路徑圖(圖5)可知，原料來源可以是生質物、油脂及藻類，經水解、汽化等化學製程產生糖類、脂肪酸及合成氣，接著透過生物發酵或化學轉化產生中長鏈之碳水化合物，最後氫化變成可混摻於飛航器之油品。

截至目前為止，美國材料試驗協會(ASTM)認證了五種生質航空燃油的轉換技術(DOE, 2017)，最高混摻比例達50%，以下針對這五種不同技術進行說明分析(表5)：

(1) ATJ-SPK (alcohol to jet- synthesis paraffin kerosene醇轉化成煤油)

ATJ是將乙醇或異丁醇(isobutanol)，利用脫水等化工製程轉換為烯烴(olefins)，再進一步利用聚合和氫化轉化為航空煤油(kerosene jet)。此技術於2011年獲得ASTM認證，具有將木質纖維素廢棄物轉化為飛機燃料的潛力，目前美國華盛頓州立大學及克羅拉多Gevo公司正在共同合作開發，從玉米中萃取分離出澱粉，再將澱粉或糖利用代謝工程技術轉化為異丁醇，後續利用化工製程轉為生質航油。目前最高混摻比例為30% (DOE, 2017)。

(2) HEFA (hydroprocessed esters and fatty acid加氫脂肪酸)

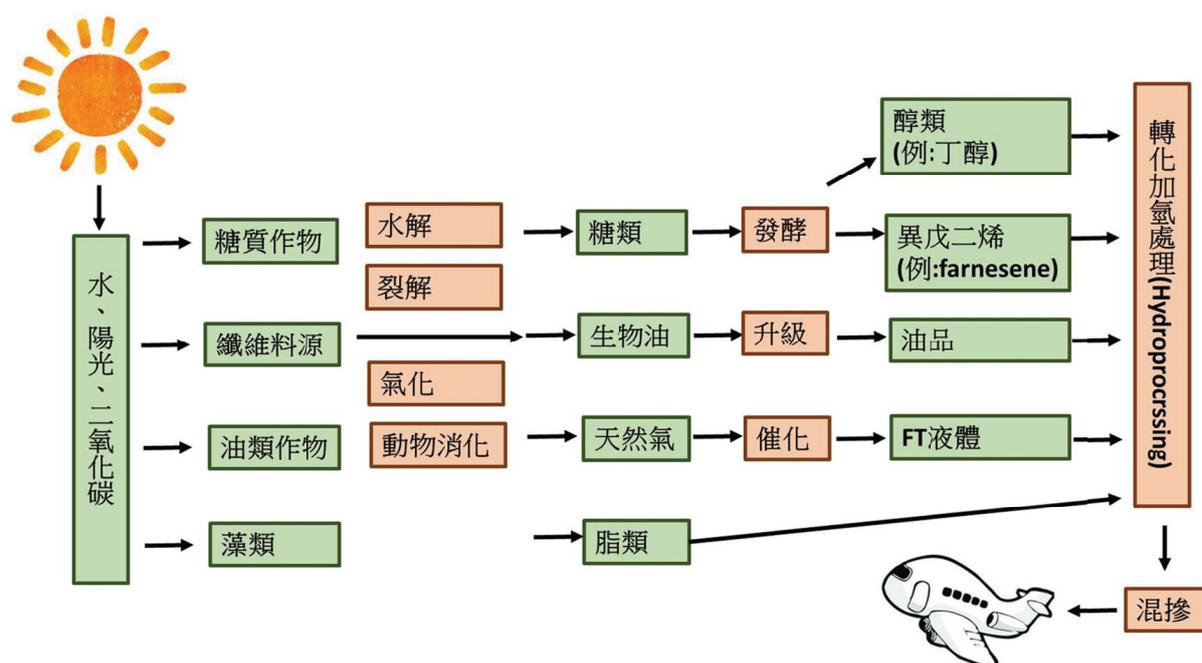


圖5 生質航空燃油不同關鍵技術路徑圖

資料來源：IRENA (2017)。

表5 生質航空燃油轉換技術之技術差異化(本研究繪製)

轉換路徑	技術差異性
ATJ-SPK	原料：乙醇或異丁醇 製程：醇類脫水、聚合及加氫 燃油技術成熟度：TRL7 最高混摻比例：30% 優勢：可由多元料源轉換而來
HEFA	原料：廢棄油脂 製程：油品加氫、異構化或循環化 燃油技術成熟度：TRL9 最高混摻比例：50% 優勢：製程簡單、油品穩定性佳
FT-SPK	原料：都市固體廢棄物或木材生質物 製程：轉換成合成氣，透過FT合成再轉為液態碳氫化合物 燃油技術成熟度：TRL7-8 最高混摻比例：50% 優勢：技術成熟、可由多元料源轉換而來
FT-SKA	原料：與FT-SPK相同 製程：將FT-SPK之合成煤油添加芳香烴 燃油技術成熟度：TRL7-8 最高混摻比例：50% 優勢：技術成熟、可由多元料源轉換而來、油品抗爆震
SIP	原料：糖類，可由生質物萃取 製程：液態重組或生物發酵 燃油技術成熟度：TRL5-7 最高混摻比例：10% 優勢：建廠成本較小、可採用生化製程

利用廢食用油品、加氫處理的蔬菜油 (Hydrotreated vegetable oils, HVO)或藻油等原料，經過加氫或異構化處理等化學製程來產製生質航油，由於HVO/HEFA為長碳鏈(C16)烷烴，不含芳香烴、氧、硫等物質，相較於脂肪酸甲酯(FAME)具有穩定性佳、冷流特性好以及減少硫化物的排放等優勢。目前Neste Oil公司利用此技術積極發展中。

(3) FT-SPK (Fischer Tropsch-synthesis paraffin kerosene費托-合成煤油)

將廢棄物或固態生質物經過氣化產生合成氣，經鈷或鎳等催化劑及加壓高溫等適當條件下，合成液態的烴或碳氫化合物 (hydrocarbon)，利用費托合成進行氣體液化，產生大量直鏈的烷烴，可作為柴油燃料。此方法的優勢在於多元料源，可從煤、天然氣或生質物等資源來合成煤油，並適用於石油貧缺而煤礦生質物資源豐富之地區。

(4) FT-SKA (Fischer Tropsch-synthesis kerosene with aromatics費托-含芳香族合成煤油)

添加烷基化的苯(alkylated benzenes)於FT-SPK之合成煤油。由於芳香烴具有抗爆震的能力，但不利於低溫流動性，所以適當比例的添加對於航空燃油是有益的，有研究指出，芳香烴的含量多寡對燃油箱的密封劑具有影響，添加芳香烴的航空燃油可有效使密封劑的體積膨脹，增加密封劑的密封性能，避免飛機燃油洩漏的情況產生。

(5) SIP (synthesis iso-paraffinic fuels)

利用生化方式，將發酵的糖轉變為長碳鏈的碳氫化合物，並利用加氫製程合成異鏈烷烴(iso-paraffin)，此技術於2014年獲得ASTM認證，加入煤油的混摻比例為10%，此技術與DSHC (direct sugar to hydrocarbon)類似。

雖然ASTMD7566認證了五種技術，但仍有超過15種以上具有潛力的路徑來產製生質航油(DOE, 2017)，例如液相重組將糖進行催化轉化(CCS-APR, catalytic conversion of sugars by aqueous phase reforming)、脂質催化加氫

(catalytic hydrotreating of lipids)、將纖維物質解聚加氫(hydrotreated depolymerized cellulosic jet, HDCJ)、生物粗萃物共處理製程(co-processing biocrude)、酒精中間物進行催化提升(CATJ-SKA, catalytic ATJ-synthetic kerosene with aromatics)、乙醇催化提升(catalytic upgrading of ethanol)、加氫脂肪酸製程擴充(HEFA expansion)以及熱裂解氫化液化(pyrolysis and hydrothermal liquefaction, HTL)等關鍵技術正在積極開發中，除了技術外，在設備的改善及製程的精進亦在加速進行，以期有效降低成本，創造生質航油的全球市場。

4. 生質航空燃油之市場潛力

目前HEFA生質航油商轉廠的生產規模大約是每年43億公升，然而在2014年，全球航空燃油的消耗量為每年3,140億公升(IRENA, 2017)，由數據可知，生質航油供應量在全世界需求量的占比仍少於1.5%，所以，在生質航油的供應生產端仍有一段成長的空間。另外，針對航空產業來說，燃油的成本為營運最主要之支出，隨著國價油價的波動，燃油成本約占總成本的20%至40% (遠東航空, 2017)，當油價高漲時，國際航空燃油附加費也隨之提高。透過技術經濟分析，以農業廢棄物每噸乾重售價美金106元、小麥稻桿(wheat straw)為212美元之標準去進行計算，可知不同技術量產的生質航油最低銷售價格(MFSP, minimum fuel selling prices)是不同的，研究結果顯示，以HEFA方法產製的生質航油價格最低，而DSHC售價最高(表6)，此售價可能因設備成本、投資成本、產品純度或副產品種類而有所不同。以商業運轉規模來說，目前ATJ所需的建廠成本最低，大約需要美金90-96百萬。整體而言，需根據不同地區的料源種類、技術發展、產業趨勢去進行生質航油的產製評估。

由於生質航油目前並非是商業化產品，且航空公司是透過簽訂合約的方式與生產者取

表6 不同轉化技術產製的生質航油之最低售價、應用狀態及建廠成本

轉化技術	料源	生質航油最低售價 (每噸)	應用狀態	建廠成本 (每天進料500噸)
ATJ-SPK	稻桿/農業廢棄物	USD 2,700-3,935	示範	USD 90-96
HEFA	廢食用油(UCO)	USD 1,518	商轉	USD 265-855
FT-SPK	稻桿/農業廢棄物	USD 2,024-2,980	示範	USD 434-1,575
FT-SKA	稻桿/農業廢棄物	USD 2,024-2,980以上	示範	USD 434-1,575以上
SIP	稻桿/農業廢棄物	USD 5,397-7,196	小規模商轉	USD 662 (包含前處理、 酵素水解、發酵)

數據來源：De jong and Hoefnagels (2015)；IRENA (2017)，本研究整理繪製。

得油品，價錢通常保密，故在生質航油的成本部分難以估算。多數研究根據不同料源植物產量去進行估算，容易有高估產量和低估設備成本的情況發生。就算HEFA技術成熟，但由於料源成本過高，料源的可取得性及永續性也是一大問題，所以整體生質航油市場風險偏高。另外，就售價來說，植物油的售價皆比柴油及航油高，也讓生質航油的發展飽受障礙，2016年大豆油每噸是美金799元，棕櫚油每噸727美元，然而航空燃油的售價則是每噸400美元，於成本效益分析上深具挑戰，在2015年統計資料顯示，永續航空燃油比傳統化石燃油貴2-7倍(IRENA, 2017)。但IATA樂觀表示，未來還是可以透過投資研究、政府補助及營運經驗來逐步進行改善，並以環保角度出發，發展永續且對環境友善的再生新能源。

5. 國內生質航空燃油現況

目前國內航空用油完全使用石化燃料，且尚無商用載客飛機使用生質航空燃油的實例，表示臺灣的生質航油產業在國家政策、技術成熟度、市場環境、風險評估等各方面仍有相當大的發揮空間。然而隨著國際減碳趨勢及ICAO的全球航空器減碳協議，估計未來生質航油的添加是勢在必行。就整體而言，臺灣在生質航油領域仍面臨不少問題。就制度面來說，我國缺乏可靠的生質航空燃料政策，依目前的原油價格及技術能力，國家政策的支持、生質航油

標準的制定及獎勵制度的擬訂應是初期推動技術產業前進的必要手段。就技術面來說，在國內學研單位的努力下，目前已持續投入生質物產製油脂技術的開發，唯無論是化工製程亦或是生化製程，相關技術皆仍在研發階段。就經濟面來說，由於美國頁岩油的衝擊，使產油國組織和俄羅斯的減產協議大打折扣，油價仍持續處於低迷狀態，加上料源成本過高、產業鏈未成熟、市場環境不完善等因素，此皆為國內生質產業發展遲緩的原因。

目前國內已有許多研究單位陸續進行生質航油製程技術研發，例如中油綠能所即利用植物油經加氫去氧製成綠色柴油，再進一步透過裂解異構化處理得到生質航油，經由不同參數的控制，分析樣品外觀、結構、凝固點、密度及成分等，以尋找最佳化製程條件(莊浩宇等，2016)；南開大學以蓖麻油為原料生產生質航油，將蓖麻油在連續流動的固定床進行加氫處理，且發現運用鎳負載的沸石，能使異構物和烷烴(i/n)比例在4.4-7.2，並達到高烷烴產率(Liu *et al.*, 2015)；工研院則利用高油脂藻類生產生質航油前驅物，製程包含養殖、收集與脫水、萃取、轉酯化等步驟，研究初期聚焦於微藻養殖系統及藻油萃取技術，未來可透過熱水解法HTL-CHG(Hydrothermal Liquefaction-Catalytic Hydrothermal Gasification)等技術加工處理，提高辛烷值以滿足航空燃油的需求(陳志洋，2017)，綜觀國內外技術發展，預期未來生質航油將是油品發展的趨勢之一。另一方面，近年

來核研所(Institute of Nuclear Energy Research, INER)則是投入生化製程生產生質航油的關鍵技術開發，為了降低整體產製生質航油的成本，提高產業界的投資意願，除導入生質精煉的設計理念，併同生產高附加價值的生質化學品，以期提高成本效益外，亦積極建構生質航油生產菌株，運用分生技術大幅提升菌株的生產效率及精進菌株之最適化培養，並進一步導入碳鏈長度控制及燃油外泌等先進改良技術，改善過去氫化處理及油脂萃取時需投入較高能耗的問題。

6. 生質航空燃油之展望

因應國際間航空產業持續發展的趨勢，替代性的航空燃油已具有相當大的發展潛力，因此由本文分析可知，目前美國、歐洲及亞洲地區許多國家均已積極制定相關法令，並推動其產業鏈之擴張，技術開發方面則如雨後春筍般蓬勃發展。至於在國內方面，現階段仍以廢食用油轉化為生質航油為較成熟的技術，但基於廢食用油的產量畢竟有限，多數仍需仰賴進口，因此未來開發以非糧生質原料為料源進行生質航油製程技術，亦應為相當具有潛力的選項，不但可以有助於確保國內的能源安全及分散能源供給風險，在全球市場趨勢下，亦可以全球各地當作技術出海口，深具市場潛力，據此希冀未來國內可結合產官學研的研究量能，共同推動航油產業升級，並與世界趨勢接軌，提升我國航空業在全球的競爭力。

參考文獻

- 台灣中油股份有限公司石油產品規範，2017。燃料類規範。
- 吳榮宗與康文成，2017。臺灣發展生質液態能源之發展與優劣勢，中技社通訊。
- 林威廷，2017。生質航空燃油的發展與規範，科學月刊，科技報導423期。
- 莊浩宇、張揚狀與康文成，2016。加氫處理技術應用於產製生質燃料，中油綠能所研發成果。
- 陳志洋，2017。藻類生質航空燃油的發展方向與挑戰，產業技術評析。
- 歐陽孚，2012。RIN：一項驗證RFS2的工具與能源衍生商品，BioEnergyToday生質能源趨勢網站，https://bioenergytoday.net/2012/02/19/renewable_identification_number/。
- 電力知識庫，2012。台經院，網址：<http://5power.tier.org.tw/power/>。
- 遠東航空，2017。國際航空燃油附加費。
- Adams, Rick, 2017. Sustainable Fuels? Believe It. ICAO JOURNAL, vol. 72, pp 20-21.
- Blakey, S., L. Rye and C. W. Wilson, 2011. Aviation gas turbine alternative fuels: A review. Proceedings of the Combustion Institute, 33, 2863-2885.
- BOEING, 2017. http://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/principles/environment/pdf/Backgrounder_Boeing_biofuel.pdf.
- CAMEO Chemicals, 2017. <https://cameochemicals.noaa.gov/chemical/11696>.
- De jong, Sierk and Ric Hoefnagels, 2015. The feasibility of short-term production strategies for renewable jet fuels – a comprehensive techno-economic comparison, pp. 778-800.
- DOE (U.S. Department of Energy), 2017. Alternative Aviation Fuels: Overview of Challenges, Opportunities, and Next Steps, pp. 1-88.
- ExxonMobil Aviation, 2017. <https://www.exxonmobil.com/English-FI/Commercial-Fuel/pds/GLXXJetFuel-Series>.
- IATA (International Air Transport Association), 2015. IATA Sustainable Aviation Fuel Roadmap, pp. 1-119.
- ICAO (International Civil Aviation Organization), 2016. Presentation of 2016 Air transport

- statistical results, pp. 1-13.
- IRENA (International Renewable Energy Agency), 2017. Biofuels for Aviation.
- Liu, Siyang, Qingqing Zhu, Qingxin Guan, Liangnian He and Wei Li, 2015. Bio-aviation fuel production from hydroprocessing castor oil promoted by the nickel-based bifunctional catalysts, 183, 93-100.
- Mawhood, Rebecca, Adriana Rodriguez Cobas and Raphael Slade, 2014. Establishing a European renewable jet fuel supply chain: the technoeconomic potential of biomass conversion technologies, pp. 1-53.
- Moore, Richard H., Kenneth L. Thornhill, Bernadett Weinzierl, Daniel Sauer, Eugenio D'Ascoli, Jin Kim, Michael Lichtenstern, Monika Scheibe, Brian Beaton, Andreas J. Beyersdorf, John Barrick, Dan Bulzan, Chelsea A. Corr, Ewan Crosbie, Tina Jurkat, Robert Martin, Dean Riddick, Michael Shook, Gregory Slover, Christiane Voigt, Robert White, Edward Winstead, Richard Yasky, Luke D. Ziemba¹, Anthony Brown, Hans Schlager and Bruce E. Anderson, 2017. Biofuel blending reduces particle emissions from aircraft engines at cruise conditions, vol 432, pp. 411-426.
- Schroecker, Doris, Ewout Deurwaarder and Philippe Schild, 2013. Two million tons per year: A performing biofuels supply chain for EU aviation, pp. 1-37.
- SWAFEA (Sustainable Way for Alternative Fuels and Energy In Aviation), 2011. http://images.slideplayer.com/15/4682405/slides/slide_7.jpg.

The Global Application of Aviation Biofuels and Its Technology Development

Chia-Hsin Chen^{1*} Gia-Luen Guo² Yu Chao³ Wen-Song Hwang⁴

ABSTRACT

With the development of global economy and the rise of environmental awareness, the demand for aviation biofuel has grown up rapidly in recent years. Europe and the United States have been working on the policy formulation and technology development. They have the key technologies to produce aviation biofuels by their own. To achieve the goals of CO₂-emission reduction, they also develop the quality standards and blending ratio for certified use of aviation biofuels. This study focuses on the development of aviation biofuels in international application trend. The data show that the demand and acceptance of aviation biofuels that used in airline industry in the United States, Europe and China. Furthermore, the major bottleneck of bio-aviation oil is global marketing and commercialization of advanced green biofuels. In addition, there's no commercial flights powered by aviation biofuels in Taiwan. Obviously, the development of policy incentives, technology readiness level (TRL), market based mechanism (MBM) and financing concept is still lacking in Taiwan. We hope to catch up the trend of the world in the future. It will not only be helpful for reduction CO₂ emission, but also mitigate global climate change.

Keywords: Carbon reduction, Aviation biofuels, Aviation industry, ICAO

¹ Assistant Researcher, Institute of Nuclear Energy Research (INER).

² Engineer, INER.

³ Associate Researcher, INER.

⁴ Researcher, INER.

*Corresponding Author, Phone: +886-3-4711400#5106, E-mail: wis7435@iner.gov.tw

Received Date: August 10, 2017

Revised Date: November 11, 2017

Accepted Date: November 14, 2017