

廢物利用：生質物氣化技術的前世今生

文／吳耿東

前言

生質能 (biomass energy 或 bioenergy) 的基本觀念來自利用反應過程的二氧化碳淨排放被視為零；當植物行光合作用，吸收陽光、二氧化碳及水分後，產生氧氣，並促進了植物的生長；而後再將植物取之作為燃料，在產生能源利用的過程中，其所釋放之二氧化碳再回到大氣中，形成一沒有增加二氧化碳淨排放的循環，因此，生質能被列為再生能源的一種 (吳耿東，2008)。依我國「再生能源發展條例」(行政院，2019) 第三條第二項的定義，生質能指「農林植物、沼氣及國內有機廢棄物直接利用或經處理所產生之能源」；但在第三條中屬再生能源的「國內一般廢棄物」(即家庭垃圾) 與「一般事業廢棄物」(如工廠廢料) 亦屬於廣義的生質能源，在國際上一般則以其組成「生物可降解」(biodegradable) 的部分作為認定標準。經由上述如農林植物等生質物 (biomass) 或廢棄物轉換為生質能的技術中，相較於國內較常見的垃圾直接燃燒的焚化發電或是養豬場的畜牧廢水沼氣發電，本文將介紹一項既古老又新穎的生質物氣化技術，在國內雖已研發超過 20 年，但目前在臺灣仍處於萌芽的階段。

壹、氣化技術的內涵

氣化程序是指在高溫下進行非催化性的部分氧化 (partial oxidation) 反應，將含碳的固態物質 (如生質物、廢棄物或煤炭等) 轉換成氣態燃料，即所謂的「合成氣」(syngas)，主要包括一氧化碳、氫氣、甲烷等，可直接做為鍋爐與發電機組之燃料，產生所需之蒸汽及電力 (吳耿東、李宏台，2001)；合成氣亦可經由觸媒反應合成生質燃油 (biofuels) 或化學品，圖 1 即是生質物氣化的流程圖。簡單的說，氣化就是把固體燃料先轉換成煤氣的氣體燃料，再進行利用。為什麼要這麼做呢？為什麼不直接燃燒呢？主要的目的還是在提昇燃料應用的能源效率。想像有一塊木頭及一根火柴，木頭容易點著嗎？如果木頭換成一瓶酒精呢？如果換成一桶瓦斯？顯而易見，大家都常聽過瓦斯氣爆的新聞，就知道氣體燃料的威力 (當然也相當危險，請勿任意進行此類實驗)。一般固體燃料的能源效率約為 15%~20% 左右 (如垃圾焚化爐)，氣體燃料的能源效率可達 35% 以上；當然，轉換的過程中也會損失能源，約在 5% 左右，整體而言，能源效率提高了一倍。

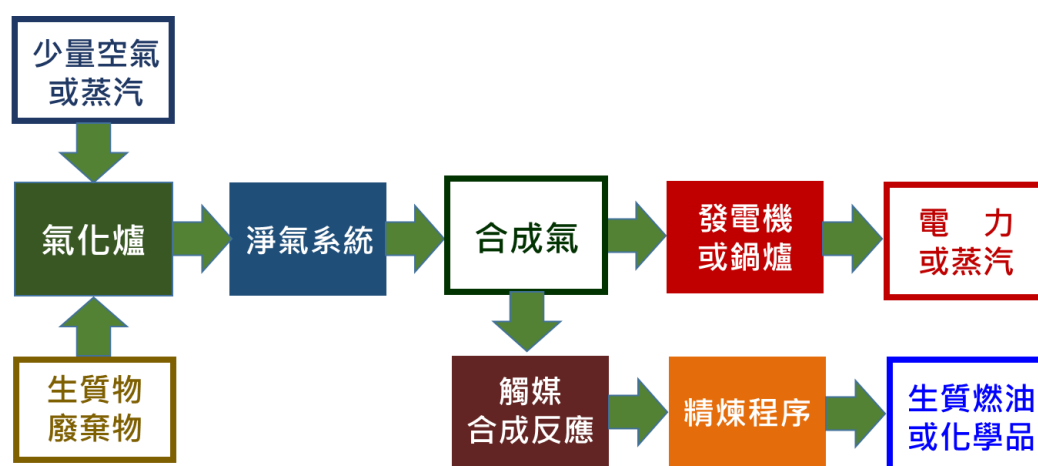


圖 1. 生質物氣化流程圖

前面提到，當固體燃料轉換為氣態燃料的過程是一種「部分氧化」的反應，而所謂的部分氧化就是提供反應的空氣量比完全燃燒所需的空氣量少。當碳氫化合物完全燃燒時，會產生二氧化碳及水，這時候的理論空氣量也就是化學計量空氣 (stoichiometric air)，但在實際操作上，會比計量空氣（即 100%）多出 20%~50%，以確保可以燃燒完全。氣化則是使用了 15%~40% 左右的計量空氣，也就是造成燃燒不完全，但我們通常以空氣等值比 (equivalent ratio, ER) 表之，或稱空燃比、空氣因子，當 ER 為 1 時即為完全燃燒，氣化反應的 ER 值則通常在 0.15-0.4 之間。而大家所熟知的不全完燃燒，如瓦斯中毒事件，就是產生對人體有危害的一氧化碳。是的，氣化程序所產生的氣態燃料就是一氧化碳，還有氫氣、甲烷及二氧化碳等，因此稱為合成氣；上述除了二氧化碳外，其他如一氧化碳等皆是可燃的氣體燃料。氣化的主要反應是一種吸熱反應 (endothermic reaction)，所需的熱量則是來自放熱反應 (exothermic reaction) 的燃燒，所以氣化合成氣中才會含有二氧化碳，因此整個氣化過程可以說是「要先燃燒自己，才能照亮別人」。

一般氣化反應的程序主要可分為四個階段，第一階段為乾燥反應 (drying)，以蒸發反應物 (即原料) 所含之水氣，溫度約為 100–150°C，在此階段，反應物並未被分解。第二階段為裂解反應 (pyrolysis)，係對反應物進行熱分解，溫度約為 150–700°C，會產生氣體、揮發性焦油 (tar) 或燃料油及焦炭 (char) 殘留物。第三階段為氧化反應 (oxidation)，即是對裂解產生之焦炭、焦油及氣體進行氣化或部分氧化，為一種燃燒放熱反應，溫度約為 700–2,000°C。第四階段為還原反應 (reduction)，在缺氧的狀況下進行高溫的化學反應，但因是吸熱反應，所以溫度較氧化反應階段為低，約為 800–1,100°C。此部分的熱源可以由氧化 (燃燒) 階段來提供 (吳耿東、李宏台，2001)。

以氣化技術處理生質物或廢棄物具有不少優點，除了上述提及以固體燃料先轉換成氣態燃料 (合成氣) 再利用，可以提昇能源效率外，還可有效回收及利用生質物或廢棄

物所蘊藏之能源，而且進料彈性大，用途廣。氣化反應為部分氧化，所需空氣量較直接燃燒時少，除塵設備投資低，可大幅降低 PM2.5，氮氧化物及二氧化碳產生量較少，污染較少；更重要的是，反應為部分氧化，剩餘氧量很少，可避免戴奧辛前驅物氯酚之產生。此外，一般生質物氣化的爐體構造簡單，操作相對容易（吳耿東、李宏台，2001）。

貳、氣化技術的前世

根據記載（Tata Energy Research Institute，2000），氣化技術始於 17 世紀中葉的歐洲，1669 年 Thomas Shirley 首次以碳氫化合物進行了較粗略的氣化實驗；30 年後，Dean Clayton 由煤的熱裂解實驗得到合成氣。在歷經近百年的發展，Robert Gardner 於 1788 年獲得了第一個關於氣化的專利，而 1792 年英國人默多克（William Murdock, 1754-1839）首次點燃合成燃氣供作屋內照明，此後氣化的合成氣即被用於烹飪及取暖等。1807 年位於倫敦的 Pall Mall 道路以煤炭氣化產生的「town gas」（即煤氣）點亮了整條街道的街燈，如圖 2 所示（Rowlandson, 1809），成為全球第一條以合成氣街燈照明的街道，此後 town gas 的生產使用一直持續增加，並盛行於 1850 年代的倫敦，之後才被天然氣及較便宜的化石燃料（fossil fuel）所取代，但迄今仍可在倫敦找到這些煤氣燈座，目前也還有極少部分的煤氣燈仍在使用的，例如位於倫敦西敏寺附近的史密斯廣場聖約翰堂（St. John's Smith Square）門口的街燈（如圖 3 所示），當然現在已經改用瓦斯作燃料了，並由英國天然氣公司（British Gas）負責維護。當時的合成氣（一氧化碳及氫氣）又稱為「水煤氣」（water gas），主要是由煤炭加上高溫的水蒸汽進行氣化反應而生成的，所以才有此稱謂，這個反應又稱為水煤氣反應（water gas reaction），屬吸熱反應：



全球第一個氣化爐則成型於 1812 年，係使用油作為燃料；到了 1840 年，世界首座商業用途的氣化爐建於法國，1878 年首次成功地將合成燃氣用於引擎發電，1901 年蘇格蘭人 J. W. Parker 更利用合成燃氣作為汽車引擎燃料，從此氣化技術便進入了一個新的紀元（吳耿東、李宏台，2001）。第一個工業化應用的氣化爐則始於 1926 年，德國 Rheinbraun 公司建置了世界第一個流體化床（fluidized bed）的氣化爐，即溫克勒高溫氣化爐（high-temperature Winkler gasifier, HTW），並以褐煤（lignite）為原料，生產合成氣作為鐵礦（iron ore）的還原氣體（reducing gas）。氣化技術及其應用在廿世紀初有相當不錯的發展，但不敵石油工業的興起，逐漸衰退，然而在兩次世界大戰中卻因石油的短缺而再次蓬勃發展，尤其是在第二次世界大戰時，氣化技術十分熱門

(吳耿東、李宏台，2001)。

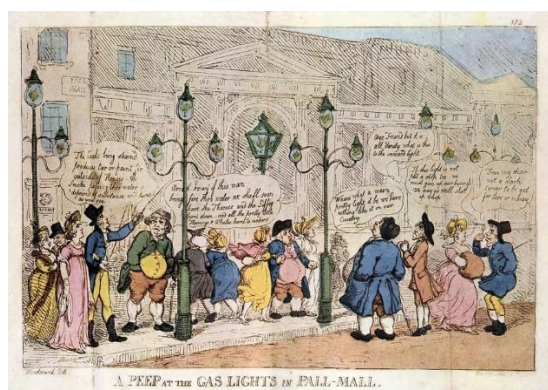


圖 2. 1807 年倫敦 Pall Mall 道路以煤炭氣化產生的合成氣點亮街燈 (Rowlandson, 1809)
(圖片來源：紐約大都會藝術博物館)



圖 3. 倫敦史密斯廣場聖約翰堂門前的煤氣燈 (圖片來源：取自：谷歌街景，2020 年 11 月)

在 1985 年著名電影《回到未來》(Back to the Future) 的最後一幕，瘋狂科學家布朗博士開來了一台迪羅倫 (DeLorean) DMC-12 跑車 (您可以在環球影城看到這部車)，他打開後車後的反應器，然後說：「我需要燃料!!!」 (I need fuel!!!)，並將一堆香蕉皮、垃圾、啤酒等等置入反應器中 (如圖 4)，然後車子就飛起來了！這個「反應器」就是一個標準的氣化爐概念，雖然在電影中，這個反應器還標示了「核融合」(fusion) 的字樣。這個概念在現實世界中是真的，所不同的是，我們的車子不會飛。

在二戰期間，因為戰爭導致石油的短缺，當時很多運輸用的柴油車均加掛一個氣化爐，以木炭或木材作為原料，將其氣化後之合成氣則注入柴油引擎機，作為車輛的動力，例如，1939 年 (昭和 14 年) 日本頸城自動車株式會社在二戰期間所生產的「薪車」(見圖 5(左)) (日本頸城自動車株式會，2021)；員林客運公司也曾在二戰期間改裝原有的巴士為木炭車 (見圖 5(右)) (文化部，2018)。或許您也注意到了，那時候的柴油車怎麼沒有想到要使用生質柴油 (biodiesel) 呢？事實上 1893 年柴油引擎發明時，是使用花生油去驅動的，但直接利用這些植物油的缺點是分子太大、黏度過高。二戰期間確實有人使用過桐油代替柴油，但現代大量使用生質柴油是 1980 年代後才開始的，所以，當年的木炭車反而較為盛行。或許您還有一個疑問，使用汽油的汽車呢？在缺油的二戰期間就直接使用酒精代替了，也有人在情急不得以之下，把酒直接加入了汽車油箱；而今世界各國也開始添加生質酒精於汽油中供汽車使用，即酒精汽油 (gasohol)。

I need fuel !!!



圖 4. 電影《回到未來》的場景（圖片來源：環球影業，取自：網路電影資料庫 (IMDb)）



圖 5. 二戰時期的木炭車

（左）1939 年日本的「薪車」（圖片來源：日本頸城自動車株式會社，2021）

（右）員林客運公司的木炭車（圖片來源：文化部，2018）

以氣化合成氣直接作為車輛燃料，一直是一項未竟事業；1979 年因伊朗革命造成第二次石油危機，油價在當時由每桶美金 15 元漲到美金 39 元（1981 年 2 月）（EIA, 2021），於是可取代柴油的氣化技術再度復活，圖 6 即是 1981 年時掛氣化爐的柴油車（National Research Council, 1983）；即使在現代，仍有人在努力發展這種掛氣化爐的車子（Kurkela, 2010），如圖 7 所示。只是隨著油價的下降，這類車子就會被束之高閣。想像一下未來，當石油用罄之際，您也許買得起雙 B 的車子，但沒有汽柴油可用時，每天要開車出門，您必須倒一桶垃圾在您車子的氣化爐，沒有垃圾時，還需向鄰居借個一桶，屆時的垃圾都是寶貝。當然，受限於氣化爐的尺寸及重量，這個技術在短期內仍

難以完全商業化，您現在不需太擔心，今晚就想開始囤積垃圾，那樣環保局會先來開罰單的。

如前所言，二戰之後，氣化技術的應用再因石油及天然氣的充裕而急遽下降，在 1950 年代裡是一項被遺忘的技術。氣化技術的再次興起是在 1970 年代之後，肇因於能源危機，也使得煤炭氣化再度受到重視。而於此同時，因歐洲伐木等事業帶來環境的問題，使得氣化技術開始利用木屑等農業廢棄物，即生質物 (biomass) 作為氣化原料，開啟了廢棄物氣化技術的發展，更大量地被應用於能源較缺乏的發展中國家。在歷經近 40 多年的發展，現今廢棄物氣化技術已被認為是極具潛力的代替能源之一，可同時解決環境污染及能源短缺問題 (吳耿東、李宏台，2001)，表 1 為綜整氣化技術的發展歷程 (吳耿東，2003)。

表 1. 氣化技術發展歷程 (吳耿東，2003)

1669	Thomas Shirley 以碳氫化合物進行粗略的氣化實驗
1699	Dean Clayton 由煤的熱裂解實驗得到合成燃氣
1788	Robert Gardner 獲得了第一個關於氣化的專利
1792	英國 William Murdock 首次點燃合成燃氣供作屋內照明
1812	第一個氣化爐成型，使用油作為燃料
1840	世界首座商業用途的氣化爐建於法國
1850's	倫敦利用煤炭氣化生產「town gas」(即煤氣) 提供照明
1878	首次將合成燃氣成功地用於引擎發電
1901	蘇格蘭人 J. W. Parker 利用合成燃氣作為汽車引擎燃料
1914	一次世界大戰，氣化技術蓬勃發展
1937	二次世界大戰，石油短缺，氣化技術十分熱門
1950's	氣化技術為一項「被遺忘的技術」
1970's	能源危機，煤炭氣化再度受到重視
1970's	歐洲因伐木等帶來環境問題，氣化技術開始利用生質物
1990~	廢棄物氣化技術大規模發展



圖 6. 1981 年能源危機時期掛氣化爐的柴油車 (圖片來源: National Research Council, 1983)
(左) 菲律賓馬尼拉的吉普尼 (Jeepney) 木炭車, 使用 20 kg 木炭進行氣化可跑 160 km
(右) 美國邁阿密的林肯大陸豪華轎車 (Lincoln Continental limousine), 使用約 50 kg 的木材進行氣化可跑約 137 km



圖 7. 以氣化合成氣作為燃料的現代汽車
(左) 日本岩國市的現代木炭車 (圖片來源: フォートラベル株式会社 (for Travel, Inc.), 2007, 取自: <https://4travel.jp/travelogue/10187886>)
(中) (右) 掛有氣化爐的現代芬蘭車輛, 以 130 kg 泥煤 (peat) 為原料, 可跑 130 km (圖片來源: Kurkela, 2010)

參、氣化技術的今生

現代的氣化技術則大都運用於發電利用, 或作為供暖及供應製程蒸汽的熱利用, 除了以煤炭為原料, 少數大型的氣化複循環 (integrated gasification combined cycle, IGCC) 發電廠外, 以生質物為原料的氣化發電系統也逐漸蓬勃發展, 特別是在歐洲地區。

以芬蘭為例, 最受矚目的是位於芬蘭拉第 (Lahti) 凱米耶爾維 (Kymijärvi) 發電廠內的 70 MWth 循環式流體化床 (circulating fluidized bed, CFB) 氣化混燒 (co-firing) 示範系統, 在全球生質物氣化發展中為最成功。此氣化爐建於 1998 年, 主要使用之生質燃料包括樹皮、木屑、廢枕木、廢輪胎等, 其所產生之低熱值、粗合成氣直接注入現存的 138 MWe 燃煤鍋爐進行混燒, 可取代 15% 之煤炭燃料, 每年可節省 130 萬歐元 (約合新台幣 3,600 萬元), 投資回收年限約九年 (吳耿東, 2010), 並在商轉 20 年後, 於 2019 年正式除役 (Isaksson et al., 2019)。此外, 位於芬蘭西部瓦薩市 (Vaasa)

的瓦斯基洛托 (Vaskiluoto) 第二電廠建於 1982 年，原是一座供應 230 MW 電力及 175 MW 地區供熱的汽電共生廠，每年使用 32 至 60 萬公噸的煤炭，已於 2013 年在其粉煤鍋爐旁增設一座 140 MW 循環式流體化床氣化爐，為目前全球最大之生質物氣化爐，其以木質生質物料源，產生之氣化合成氣即注入既有之粉煤鍋爐內，可取代原有電廠 25-40% 的煤炭，每年可減少 23 萬噸 CO₂ 的排放 (Isaksson, 2015)，如圖 8 所示。上述電廠採用氣化混燒方式是因為原有的燃煤鍋爐是屬粉煤 (pulverized coal, PC) 鍋爐，即把煤炭磨成粉末再噴入鍋爐燃燒，但生質物較難進行研磨，若欲進行生質物的混燒，則適合先將生質物進行氣化後，再以產出之合成燃氣注入鍋爐內進行間接混燒 (吳耿東、李宏台，2002)。



圖 8. 全球最大循環式流體化床氣化爐所在的芬蘭瓦斯基洛托氣化混燒發電系統

(左) 發電廠全景 (圖片來源: Partanen, 2013)

(右) 140 MW 氣化系統全景 (圖片來源: Isaksson, 2015)

另外，隨著氣化技術的成熟，以及依循「循環經濟」理念的廢棄物處理方式，為接續已除役的芬蘭凱米耶爾維電廠，2012 年在其原址建置了全球首座以「固體再生燃料」(solid recovered fuel, SRF) 全氣化的凱米耶爾維第二發電示範廠 (Kymijärvi II)，如圖 9 所示 (Isaksson, 2015)，包括兩座 CFB 氣化爐，可提供 50 MW 電力及 90 MW 的熱能給拉第地區。



圖 9. 芬蘭凱米耶爾維第二發電廠，為全球首座 SRF 全氣化發電示範廠 (圖片來源: Partanen, 2013)

在國內方面，工業技術研究院曾於 1999 年至 2004 年在經濟部能源局的資助下，建置國內最大的 900 kWth 循環式流體化床生質物氣化先導系統（工業技術研究院，2004）；近來，在科技部「綠能科技聯合研發計畫」補助下，國立中興大學已建立一座 100 kW_e 下吸式生質物氣化發電整合微電網系統（如圖 10 所示），屬商業化之原型系統，也是國內首座結合微電網的氣化系統，利用新式的小型下吸式氣化發電系統，將農業廢棄物轉換為可燃的合成氣後，直接進入新型發電機組進行發電，且無焦油及廢水問題；其所產生的電力經由充電區，進行可攜式熱插拔電池的充電，再將電池送至各小區域的微電網系統，供應個別社區電力之使用。此一技術之成功開發，不僅可大幅降低設置成本，並使生質能發電設施與微電網得以分離設置，增加分散式能源電力應用的廣度與深度（Wu et al., 2020; Wu et al., 2021）；正在進行推廣的這套系統不僅適用於國內的偏鄉地區，也適用於十分缺電的東南亞國家偏遠村落。



圖 10. 國立中興大學生質物氣化發電微電網系統（圖片來源：Wu et al., 2020）

肆、氣化技術的未來

除了發電利用外，由氣化程序產生的合成氣（CO + H₂），可以再經由觸媒反應合成各種液態燃料（如汽柴油或航空用油）或各式化學品，成為氣化未來的發展重點之一，特別是在運輸用液態燃料的製造，即 BtL (biomass to liquid) 技術。過去這項由氣化延伸的應用技術中，最成熟，也最著名的就是費托 (Fischer-Tropsch, F-T) 合成技術。

F-T 技術始於 1920 年代，由德國化學家費歇爾 (Franz Fischer, 1877-1947) 與托羅普施 (Hans Tropsch, 1889-1935) 在德國魯爾區穆爾罕 (Mülheim, Ruhr) 的煤炭研究所 (Kaiser-Wilhelm Institute for Coal Research, KWI) 利用一氧化碳及氫氣為原料，在鐵 (Fe)、鈷 (Co) 及鈦 (Ru) 基的觸媒作用下，成功地合成液態的碳氫化合物，即 F-T 燃料(柴油) (吳耿東等, 2003)，並於 1925 年申請德國專利 (Fischer and Tropsch, 1925)，開啟了由碳、氫元素合成長鏈碳氫液態燃料的新紀元，也引發了其他國家相繼投入研究，這項也算是有點古老的技術，但也影響了日後所有的化學合成反應。

在 1930 年代中期至 1945 年二次世界大戰結束前，德國即進行液態合成燃料 (如柴油) 之商業化的生產，總計建立了 12 座煤炭氣化廠 (產製 CO 及 H₂) 及九座 F-T 油品合成工廠 (Stranges, 2003)。造成 F-T 技術之開發風潮，主要係德國本身並不產油，但卻擁有豐富的煤礦，使得德國科學家極欲反其道而行，雖不能取得原油進行汽柴油的精煉，但企望能藉由合成方式製造油品，於是大規模地將煤轉化為替代石油。而 F-T 技術的成功，使得在二次大戰期間急需油品的德國大量投入商業化開發，同時期的英、美、日等國亦加入競爭行列 (吳耿東等, 2003)。在二戰末期，因德國仍有油品可供戰爭使用，這使得同盟國十分緊張，於是美國中央情報局 (CIA)，以及英國軍情六處 (MI6) (就是著名的 007 系列電影主角詹姆士龐德所屬的單位) 均派員潛入德國，一探究竟，然後再由盟軍去轟炸這些 F-T 工廠，連費托兩位科學家所屬的煤炭研究所也在 1944 年被炸掉，後於 1953 年重建。

二次大戰後，F-T 合成技術的發展除了在觸媒方面的改善外，製備原料也不限煤炭，天然氣亦是製備原料的重要來源。目前最大商業化規模的 F-T 燃料廠是在南非，Sasol 公司早於 1955 年即在南非的 Sasolburg 建立一日產 8,000 bbl 的商業化 F-T 廠 SASOL 1 Plant。這也有其歷史因素，因為南非因早年的種族隔離政策，導致受到一些經濟制裁，但南非產煤，可利用氣化及費托技術生產柴油，不受國際局勢的影響。

近年來全球因能源危機隱憂再起，使得這項古老的技術再度受到重視，並開始研發利用生質物或廢棄物作為氣化原料，進而產製 F-T 合成柴油，又稱之為「綠色柴油」 (green diesel) (Boerrigter et al., 2003)。儘管費托技術十分成功，但當氣化原料由煤炭改為生質物或廢棄物時，因為生質物氣化合成氣中的氫氣與一氧化碳比例與煤炭氣化的合成氣組成不同，使得這項技術在目前的進展較為緩慢，但前景可期。

結語

以目前的發展現況，生質能氣化發電在臺灣要能成功推廣，必須同時整合 (integration) 法規 (regulations) (含制度、獎勵措施等)、經濟 (economy) (含成本效益) 及技術 (technology) 的三個面向，亦即 RETI 法則 (Wu et al., 2017)，這亦適用於其他國家。另一方面，聯合國永續發展目標 (Sustainable Development Goals, SDGs) 的第七項，即確保所有的人都可取得負擔得起、可靠的、永續的，及現代的能源，而生質物氣化這項既古老又新穎的技術，有機會成為這項目標的關鍵技術，且讓我們拭目以待！

吳耿東

國立中興大學森林學系副教授

參考文獻

工業技術研究院 (2004)。廢棄物能源技術開發與推廣計畫 (V) 期末報告。經濟部能源局，台北。

文化部 (2018)。北斗古文書老照片數位化建置計畫，取自：

<https://bhedu.moc.gov.tw/home/zh-tw/oldphoto/4526#&gid=1&pid=9>，新北新莊。

日本頸城自動車株式會社 (2021)。社史 No.5，取自：<https://www.marukei-g.com/publics/index/104/>，新潟，日本。

行政院 (2019)。再生能源發展條例，2019 年 05 月 01 日修正。

吳耿東 (2003)。國外廢棄物氣化技術發展現況。2003 廢棄物能源利用暨高溫氣體淨化技術研討會，台北，2003 年 10 月 29 日至 30 日。

吳耿東 (2008)。認識生質能源。物理雙月刊，30(4)，P377-388。

吳耿東 (2010)。流體化床與生質能—以氣化技術為例。科學發展月刊，450，P20-25。

吳耿東、李宏台 (2001)。廢棄物氣化技術。工程月刊，74(4)，P85-96。

吳耿東、李宏台 (2002)。生質物發電利用技術現況與發展。台電工程月刊，651，P77-95。

吳耿東、萬皓鵬、李宏台 (2005)。生質物利用 Fischer-Tropsch 反應轉換燃料技術。生質能源應用與展望研討會，台北，P67-78。

Boerrigter, H., H. den Uil, and H.-P. Calis (2003). *Green Diesel from Biomass via Fischer-Tropsch Synthesis: New Insights in Gas Cleaning and Process Design*. Pyrolysis and Gasification of Biomass and Waste, P371-383, CPL press, Newbury, UK.

EIA.(2021). *The Monthly Energy Review (MER)*, August 2021, 269pp. U.S. Energy Information Administration, USDOE, Washington, DC.

Fischer, F. and H. Tropsch. (1923). *Über die Herstellung synthetischer Oelgemische (Synthol) durch Aufbau aus Kohlenoxyd und Wasserstoff*. *Brennstoff-Chemie*, 4, PP276-285.

Fischer, F. and H. Tropsch. (1925). *Verfahren zur Gewinnung mehrgliedriger Paraffinkohlenwasserstoffe aus Kohlenoxyden und Wasserstoff auf katalytischem Wege*. *German Patent, No. 484,337*.

Isaksson, J. (2015). *Commercial CFB Gasification of Waste and Biofuels – Operational Experiences in Large Scale*. 2015 Gasification Technologies Conference, Colorado Springs, US.

Isaksson, J., J. Haapakoski, and E. Kurkela. (2019). *Large Scale Operational Plants in Finland*. IEA Task 33 Meeting, Birmingham, UK.

Kurkela, E. (2010). *Thermal Gasification for Power and Fuels*. VTT, Finland.

National Research Council (1983). *Producer Gas: Another Fuel for Motor Transport*, 107pp. The National Academies Press, Washington, DC.

Partanen, W. (2013). *Smart CHP from Biomass and Waste: It Cost Money to Throw Energy Away*. 2013 Gasification Technology Conference, Colorado Springs, US

Rowlandson, T. (1809). *A Peep at the Gas Lights in Pall-Mall*, Painting collected by the Metropolitan Museum of Art, New York.

Stranges, A. N. (2003). *Germany' s Synthetic Fuel Industry 1927-45*. AIChE 2003 Spring National Meeting, Paper No. 80a, New Orleans, LA.

Tata Energy Research Institute (2000). A Historical Perspective. *TERIvision*, 30, P4.

Wu, K.-T., W. Y. Liu, Y. Y. Su, E. Andoko, D. Maynard, M. Chavez, and H. Wang. (2017). Best Practices for Developing the Green Energy Smart Farm in the APEC Region. *APEC#217-RE-01.13*, 216pp, Energy Working Group, APEC, Singapore.

Wu, K.-T., K. C. Yang, H. J. Lai, and S. S. Hsiau (2020). *Developing a Distributed Community Power Plant via a Biomass Gasification Power Generation System Integrated with the Portable Microgrid Set*. 2020 CSME Conference, Huwei, Yunlin, Taiwan, Nov. 20-21, 2020.

Wu, K.-T., K. C. Yang, H. J. Lai, and T. K. Lee (2021) .*Construct a Net-zero Carbon Emission Community via the Biomass Gasification-based Microgrid Power System*. 45th National Conference on Theoretical and Applied Mechanics, New Taipei, Taiwan, Nov. 18-19, 2021.