



## 固碳微生物開創生質能源新局面 纖維素丁醇技術

在今日強調環保與永續的趨勢中，能源技術的創新是推動節能減碳的重要關鍵，可取代高價石油的生質能源，更是各國重視與大力推動之再生能源。因此，由工研院所研發的「零碳纖維素丁醇生產技術」(ButyFix) 不僅深受矚目，更在美國2013年全球百大科技研發獎(R&D 100 Awards) 中獲得能源科技類的肯定，在全球亟待突破的生質燃料領域，此項技術可望將各地農林廢棄物變成最有效的能源，為地球能源、生態環境與經濟提供新動能。

文 魏茂國

圖片 工研院綠能所提供

當植物吸收了空氣中的二氧化碳，轉化為生質燃料，經過燃燒後再將二氧化碳排放出來，整個循環構成零碳排放，不像化石燃料是在短時間內，挖掘長期儲存於地底的碳來使用，令溫室氣體濃度快速增加，因此以生質燃料來取代化石燃料，已成為減碳環保的重要方式。

目前因運輸用途而產生的二氧化碳，約占了全球碳排放量的25%，特別是長程運輸工具，包括車輛、航空、船舶等。如果想以電池，或是經壓縮的天然氣等作為替代能源，能量密度都不夠高；所以用生質燃料替代化石燃料，以減少二氧化碳的排放，是減碳政策下的關鍵作為之一。美國、巴西、歐盟等地都積極發展生質能源，甚至連其他南美洲、非洲及亞太地區也相當投入；根據國際能源總署(IEA)的估計，自2012年至2018年，全球生質燃料產量將成長25%以上，達每日240萬桶。

現行生質燃料的運用，主要還是以生質酒精(ethanol, 乙醇)為主，約占生質燃料中的70%，美國與巴西即為最主要的生產國；據工研院產業經濟與趨勢研究中心(IEK)估計，2012年全球生質酒精產量約為820億公升，規模達535億美元。巴西是甘蔗酒精的生產大國，對於汽油中生質酒精的強制添加比例，甚至高達20%(E20，即生質酒精占20%、汽油占80%)；美國也運用玉米等原料生產生質酒精，估計在2012年，光是玉米酒精的生產量就達500億公升。

生質燃料的發展如火如荼，不過從應用面來看，丁醇(butanol)卻比乙醇還更具優勢。工研院綠能所所長童遷祥指出，由於丁醇的含碳量較高，能量密度也更高，性質上比起乙醇更接近汽油，更易與汽油混合使用；此外，丁醇與水的親和性低，在儲存及運輸上不易吸收水分、造成腐蝕，在使用上更具優

勢，但因缺乏低成本生產技術，尚未進入生質燃料市場。

## 以纖維素生產能源

目前生質酒精的生產方法，是利用玉米、薯類、甘蔗等作物，經微生物發酵後將其中的糖 ( $C_6H_{12}O_6$ ) 轉化為乙醇 ( $C_2H_5OH$ )。童遷祥表示，這種第一代生質燃料，除了會造成與民爭糧、爭地的疑慮外，真正透過使用生質酒精而減少的碳排放，其實並沒有想像中那麼高；因為這些農作物料源必須經過種植、施肥、收成、運輸等流程，都會產生溫室氣體排放，而且在發酵轉化為酒精的過程中，每生產一單位生質酒精，就會同時排放出一單位的二氧化碳 ( $CO_2$ )，原本糖中的6個碳，只有4個碳會轉化成酒精，也就是會造成三分之一的碳損失。

將生產與使用過程所排的碳算進去，相較於燃燒一單位汽油，改用玉米酒精約可減少23%左右的碳排放，甘蔗酒精因施肥較少又可以將蔗渣當成製程所需的燃料，能產生約50%的減碳效果。但這些成效還不夠好，於是開發第二代的生質能源時，就改採纖維素為主原料，像稻桿、玉蜀黍桿、甘蔗渣，或是農林廢棄物如木屑等；由於使用的是過去捨棄不用的廢棄物，排碳放量已計算在主要原料如玉米、稻米等上，因此減碳效果可高達60%至80%。

改採纖維素生產生質能源，還具有穩定價格的功能。例如以玉米為料源的生質酒精廠，容易受到市場價格波動的影響，好比在遭遇乾旱時原料成本就會升高。但如果製程也能使用纖維素，就可適時依原料成本採用不同料源，平時以纖維素來生產；當農作物生產過剩時，則可適量使用該作物，透過這種調節手段可避免穀賤傷農，因此纖維素技術不僅受到環境部門歡迎，連農業部門也願意提供建廠的政策誘因。

但即使改採纖維素為料源，在生質酒精的發酵生產過程中，仍不免會排放二氧化碳；因此工研院希望以更好的丁醇 ( $C_4H_9OH$ ) 來取代酒精。事實上，過去生產生質丁醇的「ABE發酵法」已存在數十年，此法正如其名稱的英文字母，會將糖發酵，依大約3:6:1的比率轉化為丙酮 (acetone)、丁醇、乙醇等三種主要產物，但此法在過程中所產生的丁醇，在濃度高時會抑制發酵，因此需要不斷將丁醇移出，不僅影響生產速度與效率，而且所生產的丁醇因濃度較低，還需經過濃縮純化，使得整個生產過程變得相當耗能，成本也較由石油裂解的丁醇高，無法有效應用和普及。

與生質酒精類似的是這種ABE發酵方式，在生產過程中同樣避免不了二氧化碳的排放，會產生2個碳的損失；碳的最高理論利用率只有67%，若以重量轉化率（每單位重量的糖可以轉化的產出重量）來看，理論上最高雖可達51%，但實際上卻只能產生約30%的丁醇。因此如何提高碳的轉化利用率，就



纖維素水解產醱技術  
可將各種農林廢棄物轉化成醱，  
且醱之濃度可達50% (w/w)，  
可提供生產生質丁醇所需之原料。  
圖中為蔗渣與其生成之醱液。



近無碳損丁醇醱酵之微生物。  
上圖為電子顯微鏡下之微生物，  
下圖為固定化後之菌體顆粒。

是工研院在投入生質丁醇技術時的首要考量。

### 無碳損失 價值更高

由工研院所研發的ButyFix技術最大的突破，主要是結合纖維素水解產醣，與近無碳損的丁醇醱酵技術，在水解產醣方面，開發出溫和的化學反應程序，取代目前常用之酵素水解技術，使得纖維素水解更有效率也更具經濟可行，而醱酵技術方面，工研院研發團隊則利用特殊菌株，在特定之控制條件下，會改變其原有的代謝反應路徑，將糖分子所含之碳幾乎完全醱酵成產品，此是目前全球其它研發團隊尚無法獲致的研發成果。參考國外生命週期之計算基準，結合此二技術，所生產之丁醇可以達到「零碳」排放之效果，亦即使用本技術之生質丁醇，減碳效益達100%。

童遷祥進一步解釋，生物在長期演化過程中，為了適應環境，累積了許多時下環境用不到的基因，但是當遇到環境改變時，某些基因就會被激發、活化，展現出平時不曾出現的特異功能；秉持這個想法，研究團隊在持續多方試驗下，果然發現了讓菌株不排碳的新代謝路徑，產生令人振奮的結果。生質能源產業的成本結構中，原料占了近70%的比例，轉化效能的提升，對成本的影響很大；以ButyFix技術為例，糖發酵的重量轉化率達到70%以上，是傳統ABE製程的二倍以上，若是在相同產量下，原料需求大幅降低，不僅成本跟著降低，排碳量也隨之減少，對於減碳的貢獻也就更大。

除了成本優勢外，由於丁醇性質比酒精更接近汽油，當與汽油混合使用時，可以添加的比例比酒精更高，在不更改引擎的狀況下，一般允許添加生質丁醇的量為酒精的1.6倍，例如美國法規目前允許添加10%酒精，丁醇則為16%。「因此，若是使用ButyFix技術生產生質丁醇不但減碳效益達100%，更有其使用上的優勢。」童遷祥說。

此外，丁醇還可以做為化學品使用，雖然化學領域的使用量僅約運輸用途的10%，但每年仍有300至400萬公噸的市場，而且其價格比生質燃料市場行情高許多，由於本技術較現有石油裂解或ABE醱酵都有成本優勢，化學品會是我們技術在市場未飽和前的主要應用產品；也因為有這種單價較高的應用，丁醇技術在商業化初期，建廠規模可以縮小卻仍有足夠經濟性。除生產丁醇之外，在整個生產程序中還有許多變化，可以以此技術生產其他產品，例如可以做為製造香料、醫藥與其他化學品等用途的丁酸。

至於國際上其他生質丁醇的生產技術，童遷祥表示，有的技術是嘗試透過微生物，將空氣中的二氧化碳擷取至製程中使用，但這種技術複雜度高、轉化效率也低；也有其他技術著重在改造微生物來提高產物中丁醇的比率，但仍無法克服排碳造成的轉化率上限。

## 商業模式讓技術創新如虎添翼

ButyFix 技術研發至今近二年，難得的是其中的丁醇發酵技術，是工研院主動運用自有經費投入的應用研究，並結合能專計畫下的纖維素產醣技術，而且已經過 500 公升的放大試產，特性與效果也相當穩定。

不過童遷祥認為，為了使專利保護得更有效，接下來研發團隊還將持續加強微生物的基因轉殖研究，將菌種的特異功能與基因做更明確的對照以構築更多專利壁壘，另一方面也希望藉由持續改良菌種基因，使得丁醇的產出濃度能夠再提高，生產速度更快，以保持技術領先地位。

有了好技術，還要搭配好的商業模式，才能跨越死亡之谷，將技術成功的商業化。在商業模式方面，以 ButyFix 技術來說，若是將現成的生質酒精廠改裝，轉換成以這項新技術來生產生質丁醇，投資最少，幾乎只有發酵製造的部分需要調整，其他不論是原料來源，或是運銷供應系統等幾乎都可維持原樣；甚至因更接近汽油、無腐蝕性的特色，還能先在供應端混合，直接以油管輸送至加油站，不像酒精必須以油罐車運送到加油站才能進行混合，運輸成本較高。現在全球生質酒精廠有超過 300 座，這種技術授權改裝生產的商業模式比蓋新廠更能快速提升市場占有率，需要的資金也較少，童遷祥樂觀地預期，這個商業模式如果可以不斷複製，假以時日，培植出一家台灣「殼牌石油」公司並非癡人說夢。

在生質能源受到極大重視的今日，ButyFix 技術投入商業生產，可以兼顧能源自給與減碳目標，對缺乏能源的台灣來說，是個相當大的誘因。

童遷祥不諱言，國外設置纖維素酒精工廠，通常需要 2 至 3 億美元，對新創公司而言，要以未經驗證的技術去說服投資者投入是相當大的挑戰；加上未來在台投產時大部分料源可能必須得依靠進口，生產成本勢必較高，因此初期除了台灣之外，亦可能尋求料源充足又有政策獎勵的境外地區，去設一個規模較小的丁酸廠來驗證技術，由單價較高的化學品市場做起，待跨越死亡之谷後，再採全球授權生產的模式，逐步實現量產生質燃料的目標。

煤炭、天然氣、原油是在地底下經過百萬年轉化的化石能源，人類以現代科技已能從生質物製造出對應的生質炭、沼氣及生質酒精，其中液態燃料較相同熱值的氣態或是固態燃料的價值高出二到三倍，更是三者中最高值化的技術。

除了做為燃料外，丁酸和丁醇還是石化業不可缺少的中間原料，工研院獨特的無碳損醣酵技術除了提高原料使用率及降低碳排放之外，將來或許更可用於高階有機物之生物合成，將此技術進一步發揚光大。童遷祥最後感性地指出，ButyFix 技術的商業化，希望不只是工研院與台灣產業的成功，更能夠為全球的減碳做出具體的貢獻。

ButyFix 技術  
投入商業生產，  
可兼顧能源自給與減碳目標，  
對缺乏化石能源的國家  
有極大的誘因。