

整體而言，
 將生物技術整合至
 其他產業的創新發展
 儼然成為現代的科技潮流，
 而工業生技則完全
 符合此宏觀趨勢。
 過去工業化發展
 使人們的物質
 生活水準快速提升，
 卻同時引發環境破壞問題，
 如今將藉由生物技術
 扭轉其惡名昭彰的形象，
 並高唱環境友善、
 降低汙染、提高效率、
 創造收益的口號
 捲土重來，
 在酵素與生物轉化技術
 持續精進的情況下，
 預期未來各種工業製程
 採用生物技術的
 現象會更普遍，
 甚至將影響
 工業生產的本質。

前瞻工業生技 未來發展趨勢

許嘉伊

扭轉資源耗竭，開拓綠色經濟

面對未來人口快速增長，如何生產充足的糧食與能源、有效運用有限的資源，成為當前急迫的課題，再加上全球氣候變遷現象更是雪上加霜，人們面對空前嚴峻挑戰的時刻，生物科技延伸的綠色概念科技成為眾望所歸。經歷金融風暴衝擊後，綠色經濟與綠色復甦策略再度成為全球產業經濟發展的焦點，已開發國家極力朝向永續經營的大道邁進，開發中國家也將環境議題納入推動成長的權衡要素。於各國政策引領下，不僅學研機構加碼資源再生、節能減碳、降低汙染科技之研發，產業界也紛紛投入相關技術之落實，舉凡目前備受重視的工業酵素、生質能源、生物材料等項目，皆期望將生物技術結合工業、能源、環保等產業，運用「工業生技」扭轉資源耗竭的命運，開創潔淨科技、永續成長的新局面。

透過技術平臺之建立，工業生技將生物、微生物、酵素資源轉化應用於各種產業，包括以生物原料取代石化原料所製造的生質能源、生物材料等產品，或是將生物資材用於提高製程效率、減少反應步驟、降低汙染。一般而言，儘管工業生技普遍具備環保概念，符合現代企業社會責任之趨勢，但高成本的因素受限了其產業應用的進展。因此，未來研發方向將以提高成本效益為重點，使傳統製程改良反映於整體收益提升，將廢棄物與副產物

再利用以創造額外獲利，或是利用基因改造與代謝工程來增加產出。預期隨著大環境驅使，加上科技日新月異發展下，工業生技將逐漸克服成本壓力，應用層面日益擴大，影響所及不只限於工廠生產，也與民眾的食衣住行息息相關。

由於生物材料可替代石化塑料，在原油價格回升及永續農業推動的影響下，預期將持續刺激生物材料的創新發展。

運用前瞻科技，發展新創工業

就應用層面而言，工業生技是指將生物技術用於酵素、化學品、材料、能源之製造與生產，其中工業酵素、生質能源、生物材料皆是目前深受重視並積極商業化的項目。另外生物技術於環境監測、生物復育、資源開採等方面也有相關應用。經濟合作開發組織(OECD)綜合科技發展、市場供需、政經氛圍、環境永續等因素，勾勒出2015、2030年工業生技的前瞻發展趨勢，以下就各領域分述現況及未來研發重心與產業概況(表1、表2)。

(一) 工業酵素

酵素為生物體內促進生化反應進行的蛋白質，被用於加速工業反應，以降低成本、減少環境腳印、減少能源消耗、消除有害副產物。Global Industry Analysts機構指出，2012年全球工業酵素市場超過29億美元，應用於食品及飼料、清潔劑、紡織、皮革、造紙等工業，其中食品及飼料用途約占45%。酵素於工業應用已行之有年，酵素被添加至清潔劑以改善低溫環

境的洗淨力，用於紡織業去除澱粉與蠟等不純物，造紙業則用於木質素分解以減少化學漂白劑用量，及製造變性澱粉以增強紙漿強度，增加紙類產品用途。食品業經常使用各種水解酵素，甚至已有多種酵素以保健食品方式供直接食用。在動物飼料方面，添加植酸酶(phytase)可提高豬雞利用飼料中的磷，減少有機磷排造成水質優養化的現象。由此可見，酵素種類及功用之廣泛。

目前已有多項酵素來自基因改造微生物，利用分子標誌輔助技術(MAS)及高效篩選等工具，從自然界尋找具商業利用價值的酵素更是如火如荼的展開，預期未來將發展出更多具特定功能或可於特定環境作用的酵素，不僅使製程縮短，亦達到原料利用率提高、能源耗費量減少、汙染產出降低等成效。此外，透過生物探勘將獲得更多基因用於微生物改造，而改良的微生物可使多步驟反應濃縮成單一步驟處理，或是一種微生物具備製造多種化學產物的功能，將大幅改良工業製程，降低生產成本。

丹麥公司Novozymes為工業酵素領導公司，全球市占率超過45%，從微生物篩選酵素用於各種工業應用，提供Unilever、P&G、Henkel等大客戶有關酵素之解決方案。DuPont與美國能源局及Diversa公司合作，已開發可同時發酵五碳糖及六碳糖的技術，並應用至纖維素酒精製造。工業酵素的進展不僅止於改良現有製程，更加快纖維素酒精等創新技術落實至產業應用的腳步。

(二) 生質能源

生物精煉(biorefinery)是將生物質(或稱生質能, biomass)轉化為化學品或能源，字面概念

表1 OECD預測2015年工業生技發展

技術	定義	目前現況	2015年發展預測
工業酵素	酵素為生物體內催化生化反應的蛋白質。已被用於化學工業及食品與飼料、清潔劑、紡織、造紙等工業。	現代生物技術製造之酵素已添加至食品、飼料、清潔劑等產品。酵素還被用於節省紡織製程能源消耗、提升紙張品質等。目前已將基因改造、分子標誌輔助等生物技術用於改造、篩選酵素。	工業酵素應用已成熟，且預期未來仍持續成長。更多有效的酵素及製程可降低生產成本，並減少能源消耗、降低有害副產物，減少環境汙染。
生物精煉	生物精煉是整合多項轉換製程，以生物質為原料製造能源、化學品等。相較於石油精煉，生物質來源為多元化。	全球已有幾百個生質能源精煉廠營運，且多數使用玉米或甘蔗作為原料。而利用草、樹或農業與城市廢棄物製造纖維素酒精、化學品方面，處於先導與示範工廠階段。	技術發展及試驗興盛將促成重要進展。新的副產物利用方法有助於生物精煉模式拓展。已可使用各種生物質作為原料，或者至少原料來源種類將增加。
生質能源	用生物質製造的能源稱為生質能源，部分運用生物製程。現代生物技術已用於開發具有利於能源生產特性的新植物品種，或是改變製程以提高轉化效率、使用新的生物質原料。	其發展受到高能源價格及政府支持刺激。目前生質酒精與生質柴油產量僅占運輸燃料的小部分，且大多是使用發酵及轉酯化技術生產。研發已朝向纖維素轉化及微生物製造等技術拓展，將有益於提高經濟效益，並降低環境及糧食安全疑慮。	新植物品種可提高產量，但針對特定製程的植物品種仍有待開發。整體生質能源產量將提高，主要仰賴於製程放大方面的技術進展，部分貢獻來自纖維素生質能源，以及微生物製造能源之進展。
化學品製造	利用生物製造能源、酵素、溶劑、氨基酸、有機酸、維生素、抗生素、聚合物等化學品。生物製造通常被用來取代化學合成方法。	目前化學品中用生物製造的產品僅占2%，但生物技術具有使反應條件趨於溫和、降低能源需求、減少廢棄物產生、降低環境影響等優點。研發目標為提高效率，以提升競爭力。	生物製造產品占化學品市場10%以上，成長最快的領域為特用化學品與聚合物。成長動力來自生物催化、發酵技術、代謝工程之創新進展。許多生物製程使用具特定功能或可於特定環境作用的酵素。
生物材料製造	將生物製造化學品用於製造生物材料，例如生物聚合物製成生物塑膠。生物塑膠又分為生物可分解與不可分解，生物不可分解生物塑膠可再回收利用。	雖然生物材料占市場比重仍低，但已有一些大型生物聚合物工廠營運。目前生物材料以生物可分解為主，但研發將加重生物不可分解生物塑膠之開發。	生物塑膠雖然僅占整體市場的小部分，但仍是重要發展項目。許多生物不可分解塑膠已經使用生物技術製造。
環境保護	利用生物感測監測環境狀況，或利用微生物、植物去除環境中的汙染物，進行生物復育。	由於生物感應器不具價格競爭力，且生物復育需開發特殊功能的微生物或植物，因此生技應用於環境領域進展緩慢。	生物感測提供長期監測需求（例如水資源）最佳的解決方案。研發將仰賴醫藥、農業、生物安全領域產出的跨領域應用。
資源開採	利用微生物提高資源開採效率，增加礦產萃取率，或改變油井條件提高開採量。	雖然已有利用生物技術提高資源開發效率的案例，但相關的研發及商業活動較少。	礦產及原油需求提高將有利於此技術發展。但因為開採現場屬於開放空間，微生物使用將受到較嚴格的限制。

資料來源：OECD (2009), The Bioeconomy to 2030，台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

類似於石油精煉，但生物精煉的原料多樣化，其來源可為各種動物、植物、微生物。未來隨著可利用的生物原料增加，及副產物利用方式創新，將可提高生物精煉的商業價值，使其產

能與模式隨之擴增。

生質能源即是透過生物精煉，用生物製造能源，由於涉及能源安全及降低溫室氣體排放兩大目標，各國祭出補助措施輔導該產業成形。

表2 OECD預測2030年工業生技發展

- 1.開發更多改良的酵素以因應持續成長之化學應用需求。
- 2.改良的微生物可使多步驟反應精簡成單一步驟處理，或一微生物可製造多種化學產物。其中，有些用於改良生物的基因來自生物探勘。
- 3.即時監測之生物感測已應用於環境汙染控制與生物量測。
- 4.已利用甘蔗與纖維素原料製造高密度的生質能源。
- 5.生物塑膠等生物材料市場占有率擴大，尤其是於利基市場方面。

資料來源：OECD (2009), The Bioeconomy to 2030, 台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

目前進展項目最快的是生質酒精及生質柴油，依OECD-FAO資料指出，2007年全球生質酒精（或生質乙醇）產量約520億公升，美國及巴西各占51%及37%，全球生質柴油產量約102億公升，歐盟占60%，預估2017年全球生質能源產量將增加一倍以上。目前美國生質酒精主要原料為玉米，巴西酒精原料為甘蔗，歐盟生質柴油主要來自油菜籽，由於糧食作物生產能源引發搶糧爭議，因此發展非糧食來源（例如農業廢棄物、樹木）或使用微生物（例如微藻）生產能源的技術成為研發重點。

過去樹木、草、玉米桿都是經由燃燒釋放能量，現在則可製成纖維素酒精等液態能源加以利用，但目前商業化進展仍處於先導工廠階段，其中的關鍵技術在於如何有效去除木質素，用纖維素及半纖維素發酵製造乙醇。加拿大Iogen公司為纖維素酒精的開路先鋒，2004年已於加拿大完成全球首座示範工廠，從農業廢棄物提煉酒精。美國企業DuPont也用玉米桿、柳枝稷(switchgrass)等材料製造纖維素酒精，並與Danisco合作，結合雙方的精煉技術與酵

素專長（酵素公司Genencor 被併入Danisco旗下）加速研發。此外，DuPont還與英國石油公司British Petroleum合作開發生質丁醇，雖然丁醇與乙醇皆為酒精，但丁醇可提高汽油混合比例，且丁醇比起乙醇更適合使用現有的汽油管線進行運送與儲存。由於僅需變更少部分設備即可使用現有的生質乙醇廠製備丁醇，生質丁醇可謂下一代的生質酒精。

生物技術除了用於開發新的酵素、改良微生物改進發酵技術外，另一項重點為改善製程、提高成本效益，例如降低生質柴油轉酯化成本、減少生質酒精發酵的前處理作業成本。由於酵素大幅影響纖維素酒精之作業時間與效率，因此其研究進展將左右纖維素酒精商業化量產的時程。除此之外，利用基因改造技術、分子標誌輔助技術開發油脂含量高的植物與藻類、可表現澱粉分解酵素的作物、降低木質素提高纖維素含量的樹木等，皆有助於纖維素、藻類等新原料的商業應用。未來生質能源製程放大技術將更臻成熟，OECD預估2015年以後，基改低木質素桉樹與松樹可能用於纖維素能源製造，基改低木質素草將通過相關環境安全評估後問世，邁入商業化階段。屆時，利用藻類生產生質柴油可能已出現先導工廠模式。

（三）生物材料

將生物為原料製造之化學品加工製成各種材料，例如用生物聚合物製成生物塑膠。生物塑膠又分為生物可分解與生物不可分解兩類，生物可分解的生物材料強調產品可經由堆肥作用回歸自然的低汙染性，常用於拋棄式產品，例如塑膠袋、農業覆蓋膜、裝食物的容器、盤子與杯子等。生物不可分解的生物材料則用於耐

久性產品，例如電子儀器、汽車、紡織品、不織布等，強調其來自天然、減少溫室氣體排放的優點，經由回收再利用達到環保目的。

雖然生物材料占市場比重仍低，但已有大型的生物聚合物工廠開始營運，目前生物材料以生物可分解產品為大宗，而生物不可分解生物材料將帶動第二波成長，預測2015年已有多項生物不可分解塑膠運用生物技術，未來生物材料市場將逐漸擴大，尤其是利基市場方面更為顯著。

美國企業Cargill用玉米發酵生產聚乳酸(Poly lactic acid, PLA)，製造生物可分解塑料及纖維，並以NatureWorks®、Ingeo™ 品牌行銷。NatureWorks擁有全世界最大產能的PLA工廠，年產能達3億磅，相當於14萬公噸。PLA已被用於製造一般民生用品，例如塑膠盒、塑膠袋、布料等，美國最大的連鎖超市Walmart、英國連鎖百貨Marks & Spencer，甚至麥當勞都採用生物可分解生物塑膠，由於藉此措施拉攏消費者的企業也愈來愈多，帶動生物塑膠應用普及化。

美國Metabolix公司則以微生物作為生物工廠，將醣類與植物油當做原料發酵後生產PHAs (polyhydroxyalkanoates)，以Mirel™ 品牌行銷。PHAs是一類天然聚酯(polyester)，為生物可分解材料。不同特性的PHAs用於取代聚苯乙烯(PS)與聚丙烯(PP)等石化產品，也可用作微波盒上的紙張塗料。

Bio-PDO™ 為一種用玉米製造的生物不可分解生物材料，是Sorona®、Cerenol™ 聚合物的主要成分，Sorona®纖維用於製造衣服、泳衣、地毯，Cerenol™ 則作為熱塑性彈性體的基材、

汽車塗料等用途。DuPont開發出將葡萄糖轉化為1,3-丙二醇(1,3-Propanediol, PDO)的技術，且投入商業級工廠建造，使得原本用石油生產的PDO多了新的來源——玉米。Bio-PDO™ 不僅來自再生資源，且製程比石化PDO節省40%能源消耗、減少20%溫室氣體排放。

由於生物材料可替代石化塑料，在原油價格回升及永續農業推動的影響下，將持續刺激生物材料創新發展。然而與生質能源一樣，開發廢棄物與非糧食競爭原料的生產技術備受重視，現在已有利用基因改造柳枝稷提高聚羥基丁酯(PHB)產量的研發成果。

隨著各項新技術之商業化，加上歐盟等先進國家陸續推出各種環保規範的壓力下，預期工業界採用生物技術製程、生物資材的比例將持續提高。

(四) 環境保護

除了可改善初級產業生產、降低工業製程的廢料與汙染外，生物技術亦有利於環境復育及監控。已有利用植物、微生物來進行重金屬吸收、毒物分解的實例，例如日本用水稻吸收重金屬鎘，進行生物復育。後續研發方向為利用分子標誌輔助技術、基因改造技術、代謝工程研究等工具提升植物、微生物對於極端環境的耐受度，以增加環境復育的應用範圍。

由於生物感測通常需配合較繁複的前製作業，且尚不具價格競爭力，而生物復育需仰賴特殊微生物與植物之開發，因此生物技術應用於環境領域的進展緩慢。但是，生物感測適用於水資源等長期監測，加上生物恐怖攻擊、化學武器、爆炸品監測方面，生物感測提供即時

表3 全球化學品產值及生物技術應用比例

化學品類別	2005年			2010年			2025年		
	總數	生技類	生技比例	總數	生技類	生技比例	總數	生技類	生技比例
大宗化學品	475	0.9	0.2%	550	5~11	0.9~2.0%	857	50~86	5.8~10.0%
特用化學品	375	5	1.3%	435	87~110	20.0~25.3%	679	300~340	44.2~50.1%
精細化學品*	100	15	15.0%	125	25~32	20.0~25.6%	195	88~98	45.1~50.3%
聚合物	250	0.3	0.1%	290	15~30	5.2~10.3%	452	45~90	10.0~19.9%
總和	1,200	21.2	1.8%	1,400	132~183	9.4~13.1%	2,183	483~614	22.1~28.1%

單位：十億美元

注：*藥品產值未被納入計算。
資料來源：USDA (2008), U.S. biobased products-market potential and projections through 2025, OECD (2009), The Bioeconomy to 2030, 台灣經濟研究院生物科技產業研究中心整理。

檢測的效果，突顯其發展之必要性。整體而言，環境復育與監測將仰賴生物技術於醫藥、農業、生物安全方面的跨領域應用。

(五) 資源開採

礦產業與石油業也應用微生物及酵素增加礦產萃取率、改變油井條件以提高開採量，但相關的研發及商業活動仍為少數。目前礦業與石油業使用的微生物大多是從自然界篩選後直接應用，未來利用基因工程、分子標誌輔助技術將可提高微生物、酵素於極端環境作用之能力。但由於礦產開採及環境保護應用皆屬於開放空間使用，若涉及基改微生物則需審慎評估對環境的衝擊，相關應用也會因為法規而受限。

隨著上述各項新技術之商業化，加上歐盟等先進國家陸續推出各種環保規範的壓力下，預期工業界採用生物技術製程、生物資材的比例將持續提高。美國農業部(USDA)預測全球生技產品占化學品比例將從2005年的1.8%，提高至2025年的22.1~28.1%，產值從212億美元成長至

4,830~6,140億美元(表3)。化學品可細分為大宗化學品、特用化學品、精細化學品、聚合物，其中生物技術應用比例最高者為特用化學品與精細化學品，該比重於2025年將大幅提高至五成。

四大層面影響未來發展

工業生技產業前景一片看好，但其未來發展仍需觀察下列四大影響層面：(1)合成生物學(synthetic biology)及代謝工程之進展，將生物元件組合創造出客製化功能的產品，其中調控技術的精準度，以及密閉式空間之可行性皆為影響要素；(2)競爭技術排擠工業生技應用。儘管一般認為生質能源較化石燃料更具有低碳的優勢，但相較於太陽能、風能、地熱能、潮汐能、核能等，其他自然資源似乎提供了更便宜且環境友善的能源，滿足相同需求的產業將出現排擠效應；(3)國際油價及農作物等生物原料價格為重要的供需指標，雖然短期內政府部門推出補助措施，但唯有產品具市場競爭力產業

才得以蓬勃發展。此外，公共設施與民間設備之轉換成本，也是生質能源產業發展需考量的項目；(4)相關法規之規範，例如基因改造生物之使用條件、評估成本，甚至社會大眾對新科技之接受程度，皆會左右產業前進的步伐。

整體而言，將生物技術整合至其他產業的創新發展，儼然成為現代科技潮流，工業生技則完全符合這個宏觀趨勢。過去工業化發展使人們的物質生活水準快速提升，卻同時引發環境破壞問題，如今工業產業將藉由生物技術扭轉其惡名昭彰的形象，高唱環境友善、降低汙染、提高效率、創造收益的口號捲土重來。而酵素與生物轉化技術持續精進的情況下，預期未來各種工業製程採用生物技術的現象將更普遍，且石化工業被工業生技取代的比例將逐漸擴大，甚至影響工業生產的本質。☞

（作者為台灣經濟研究院助理研究員）

■參考文獻

- 1.FAO (2008), The state of food and agriculture, Part I-Ch 4, Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- 2.GIA (2008), Industrial enzymes: a global strategic business report, Global Industry Analysts, Inc., USA.
- 3.OECD (2009), The Bioeconomy to 2030, Ch3,4,7,8, Organization for Economic Cooperation and Development: Paris.
- 4.USDA (2008), U.S. biobased products-market potential and projections through 2025, Ch IV, United States Department of Agriculture.
- 5.陳政忻(2007), “Agricultural Biotechnology

International Conference (ABIC) 2007現場紀實”，農業生技產業季刊，No.12，行政院農業委員會委託台灣經濟研究院生物科技產業研究中心出版。