

先進綠能材料

日期：2011 年 經濟部技術處 產業技術白皮書

出處：產業篇 標題貳

主題分類：綠能科技領域 第四章

=====

文章內容

一、生質材料開發與應用技術

(一) 技術研發目標

台灣現面臨石化產業升級的挑戰，朝低碳高值化產業結構調整，故本技術企圖建立以自然界生質物替代石油為原始原料往下製造化工基礎構件(Building Block)的技術，一方面可改變以低「化石碳」含量的生質基礎化工材料供應化工業中下游業者加工製造綠色產品之需，一方面可使原石化產業逐漸轉向低碳高值化的化學產業，扭轉國人對化學工業危害環境的負面印象，朝向支持發展低「化石碳」化工業，以維繫台灣經濟之發展。此外，也能以非石化塑膠材料供應資通訊產業建立綠色低碳的產品品牌，以符合未來歐美日市場對消費性產品需符合環境永續發展的規定。

台灣生產的消費品應用到石化工業的中間體產品主要以塑膠與樹脂為最大宗(占 37%)，其次是紡織纖維(17%)、橡膠(2%)、其餘雜項(44%)。這些高分子材料又以聚烯烴、聚芳香烴、芳香與脂肪聚酯、聚胺基為最大類，應用於五大泛用塑膠約 603 萬公噸，芳香聚酯約 275 萬公噸。由於上述高分子材料因物性不同、規格繁雜，若全部以生質材料(Biomaterials)替代，勢必得投入相當高的研發經費，衡量國家研發預算有限，規劃優先開發其應用性廣的生質塑膠起始原料，以有限的經費投入生質聚酯材料替代物性與規格比較單純、單價較高的芳香與脂肪聚酯，預期本技術在 2013 年可完成原型(Prototype)的生質聚酯單體與產品應用，待初步產品技術突破與 2015 年初期推廣市場滲透成功後，可帶動企業界投入開發其他生質材料與應用產品，切入全球年均增長率達 8~10%的生質塑膠市場之供應。

本技術開發以非糧料源的綠色生質高分子及其複合材料，應用於資通訊等領域為主。一方面以非糧料源為訴求，建立二項構件(1)衣康酸(IA, Itaconic Acid)-衣康酸與壓克力酸結構相近，具耐光、耐熱、耐磨、及耐水解之特性，將可取代石化材料系熱塑性彈性體(TPE, Thermoplastic Elastomer)之市場；(2)5-羥甲基糠醛(HMF, 5-Hydroxymethyl Furfural)-HMF 具糠醛系單體之不對稱分子特性，將可開發出具有獨特物性的高性能綠色材料，以此二項構件做為一系列生質材料的來源。

另一方面將生質材料做高價值的應用，選擇以資通訊產業的基板產業、模組/元件外裝材、建材及膠帶為應用標的，輔以綠色材料驗證，強化資通訊及化學產業在世界的競爭力。相關技術目標如下。

在衣康酸的生產與基因改質(Modification)菌開發技術方面，運用現代生物技術，發展高效率新穎菌種與發酵技術，期能大幅降低衣康酸生產成本，提供國內業者開發衣康酸衍生物與相關聚合物原料。透過基因工程與合成生物學(Synthetic Biology)，將順烏頭酸脫羧酶(CAD, Cis-aconitic Acid Decarboxylase)的基因轉殖到大腸桿菌或酵母菌(*Yarrowia Lipolytica*)上，利用物種差異性低、容易操作培養及對高濃度產物耐受性佳等特性，開發新型高產率工業菌種。初估轉化率> 40%即具市場競爭力(< 2 美元/公斤)，透過降低碳源成本及提高生產製程效率，達到降低衣康酸生產成本之目標。2011 年技術目標為開發代謝能力穩定之工業型衣康酸生產菌株，以 5L 醱酵槽生產衣康酸，達到轉化率≥ 50% (g/g)、產量≥ 60 g/L、穩定度> 90%。

在 HMF 及其衍生物開發技術方面，透過觸媒系統的篩選與設計，結合化工工程技術，開發以生質原料合成 HMF 及其下游衍生物技術。2011 年的技術目標為 1.建立反應萃取蒸餾合成 HMF 技術，HMF 產率≥ 80 mol%；2.建立 HMF 衍生單體合成與純化技術-單體純度> 99.5%；3.建立 HMF 衍生單體之聚合驗證技術。

在開發可應用於機殼產業以及民生產業之生質基材/石化基材之複合材料方面，透過不同程度的去支鏈化降解澱粉及官能化改質技術來調控澱粉系生質材料之熔融流變加工性以及低吸濕特性。將塑化及官能化改質後之熱可塑性澱粉(TPS, Thermoplastic Starch)導入一般塑膠或工程塑膠進行混煉，研製成高性能生質合膠。2011 年技術目標為開發超高韌性生質合膠複合材料技術，並建立生質合膠在電腦滑鼠包雛型品之應用評估技術，以澱粉基生質原料使用量≥ 25%、凹口耐衝擊強度≥ 30 kgf.cm/cm、熱變形溫度(HDT, Heat Distortion Temperature) ≥ 80°C。

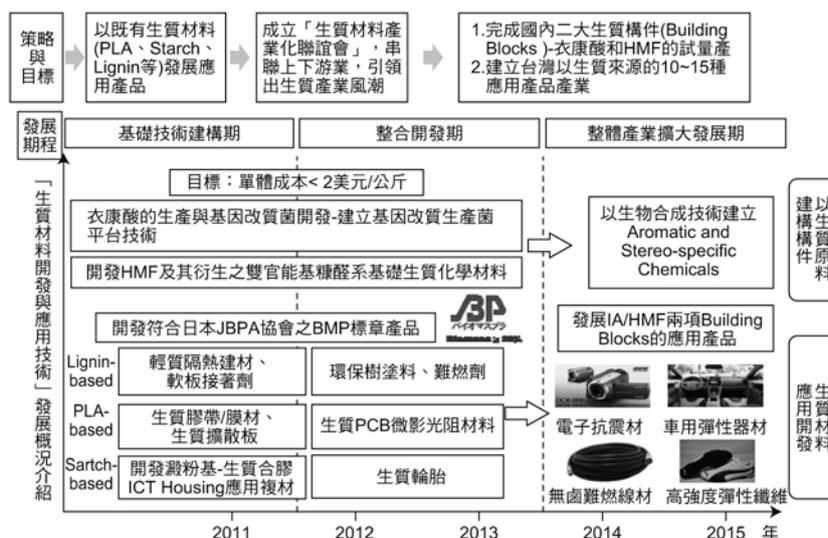
在生質膜材開發與應用技術方面，使用生質材料如聚乳酸樹脂(PLA, Poly Lactic Acid)，來製作保護或包裝膜材以及照明用光擴散材料。進行生質高分子材料的改質研究，以使其加工特性、物性與材料的可靠度能夠符合生質板/膜材應用的規格需求。2011 年技術目標為 1.生質照明用光擴散材料-聚乳酸樹脂含量> 25%、出光效率≥ 80%、照度角≥ 120 度；2.質膠帶-生分解材料含量≥ 90%、伸長率≥ 50%、收縮率≤ 1.5% @100°C、黏著力 600 gf/25 mm(膠材生質組成≥ 25%)。

在生質木質素高性能高分子材料與應用技術方面，建立木質素分離純化與高性能、高分子應用化學技術，開發可溶性生質木質素多元醇(Lignin Polyol)材料取代石化原料，成為重要之關鍵工業原料，以應用於民生化工產業之緩衝材、高性能綠色建材及綠色資通訊產業之包裝、外殼及軟硬基板材料。2011 年技術目標為建立生質輕質隔熱建材技術(木質素醇經基化改質率官能基數≥ 25%、木質素使用量≥ 25%、壓縮強度≥ 2.0 Kgf/cm²、難燃性 94UL V2 耐燃以上)。

(二) 技術發展藍圖

本技術藍圖之發展期程分為基礎技術建構期、整合開發期、整體產業擴大發展期三階段，其規劃為二大主軸 1.用生質原料建構構件技術—開發具經濟效益之衣康酸及 HMF 生產技術，目標於 2013 年生質材料單體成本低於 2 美元/公斤；2.生質材料做高價值應用-以開發高性能民生化工產業用之生

質高分子技術為近期目標，應用於膠帶(包裝)膜材、高性能綠色建材、緩衝材、家具、運動器材、鞋材等，進而開發綠色資通訊產業之光學膜板材、外殼及軟硬基板材料等之生質高分子技術。所開發之應用產品，皆符合日本生物塑料協會(JBPA, Japan BioPlastics Association)之生質產品(BMP, Bio-mass Plastics)標章(生質含量大於 25%)，可協助業者建立自主性生質基高分子化學工業技術，提升國際競爭力，並能提升生質原料之價值。產業發展策略初期將以既有生質材料聚乳酸樹脂、澱粉、木質素等發展應用產品；中期成立生質材料產業化推動聯誼會，串聯起上下游，引領出產業風潮；長期完成二項新構件產品及其衍生應用材料，以建立生質產業。技術之藍圖規劃見圖 2-2-4-1-1 所示。



資料來源：工研院材化所整理，2011 年 8 月。

圖 2-2-4-1-1 生質材料開發與應用技術發展藍圖

(三) 產業效益

由於台灣為全球資通訊產品之生產王國，不管是自創品牌或代工的供應鏈關聯廠商之價值鏈非常大，對全球資通訊產業具舉足輕重之地位。發展生質材料產業，不僅訴求節能、減碳、減廢及回收資源再利用，更使台灣之資通訊產業能符合國際環保法規；日本已確定 2020 年消費的所有塑膠的 25% 需來自可再生資源政策；西班牙已確定 2010 年後，完全禁止用石油基塑膠袋，25% 的購物袋必須使用可降解材料製造；法國農業法律規定，到 2010 年超市所用的購物袋必須全部使用生物降解塑膠。本技術將可協助台灣產業生產生質源產品，不受制於國外之原料供應，符合外銷至歐美日的環保綠色規定，且可降低對石化系之依賴，降低石化上下游產業應用群所造成的全球溫室暖化效應。

衣康酸的生產與衍生物開發成果可協助國內廠商開發彈性體材料之需求，同時具備環保、性能提升與製程簡單等優點，符合國內聚酯與紡織產業對新穎材料之期盼。協助國內廠商利用衣康酸開發聚酯彈性體系列產品，將可應用於資通訊產業之各種管線包覆材、彈性緩衝運動器及包裝材等。熱塑性彈性體市場需求以 6% 的年均成長率持續且快速增長，到 2013 年該市場需求總量將達到 350 萬噸/年，市值可達到 137 億美元。當完成產品開發量產，初期預計可取代 10% 目前熱塑性彈性材料，至少每年有 10 億美元以上的產值。

以 2007 年全球每年在聚酯(Polyester)市場需求量約 4,120 萬公噸，尼龍約需 440 萬公噸做估計，若以 HMF 衍生物為基礎之聚酯與聚氨基材料技術成功後，在市場滲透初期搶占市場 10%，每年分別將有 412 萬公噸與 44 萬公噸需求，將近約 70 億美元產值，並因使用生質材料可降低每年對石油用量，相當減少二氧化碳排放約 1,056 萬公噸，估計可在 15 年內逐年推廣替代以化石原料為基礎的聚酯與聚氨基全部塑膠材料。

至於在生質合膠應用於資訊通產業之機殼複材方面，開發機殼產業用之生質合膠複合材料，具有市場競爭力且符合節能、減碳、減廢之訴求，並符合歐盟廢電子電機設備指令(WEEE, Waste Electronics and Electrical Equipment)、生態化設計指令(Eup, Eco-design Requirements for Using Products)對資通訊產品之要求，本技術所開發之生質機殼具有高流動性，因此具能源消耗量較低的好處。2011 年將難燃劑替代可塑劑導入澱粉基生質合膠，一方面可減少可塑劑的用量，一方面可開發具難燃機能之澱粉合膠功能性材料，本技術正輔導國內業者，透過申請政府業界科專的合作方式，將此高性澱粉合膠技術應用到高值化資訊系塑件產品，協助國內廠商打造企業綠色形象。

最後，就高性能木質素高分子材料開發而言，木質素來源可為稻殼或紙廠廢棄物—木粉，其來源大宗且穩定，為對環境極少污染之碳中和技術產品，所開發之生質高分子可應用於國內重要之民生化工產業之綠色產品及高性能綠色資通訊產業產品，例如建築板材、塑膠發泡複合材及銅箔基材。估計至 2015 年，生質材料約占台灣合成樹脂產值新台幣 1,000 億元中的 5%，約 50 億元。根據 Prisma 之預測，全球銅箔基材在 2013 年將穩定成長，產值約 5 億美元，如果木質素系銅箔基板能取代原材的 10%市場，每年至少會有 5,000 萬美元以上的產值，未來本技術將更進一步導入現行最大宗的傳統玻璃布基板(FR-4)，其市場效益將擴大數十倍以上。

二、可攜式電能材料與應用系統之開發技術

(一) 技術研發目標

近年來隨著無線手機之新運算、通訊和娛樂等多功能的整合應用，消費者不僅要求使用環境的方便性與快速傳輸，更開始重視手機電源的供應量充足性，估算消費者有意願且會長時間使用手機應用功能之一天所需耗電量，約為 4,220 mAh，相當於 4 顆鋰電池(1,200 mAh/Cell)的電量。然而，現今電池容量增加的速度，尚無法趕上需求增長的速度，而未來 iPad、iPhone 將附有微投影機之功能，此設計更將使耗電量大增，現今消費者唯一解決方案只能攜帶多顆電池解決缺電問題，而多顆電池仍面臨充電時間冗長(> 2 hr/Cell)，因此在消費者希望滿足不斷電電力需求及擁有輕薄短小的可攜式裝置壓力下，使得全球國際大廠紛紛投入可攜式燃料電池(Portable Fuel Cell)系統及其膜電極組(MEA, Membrane Electrode Assembly)之關鍵材料技術開發，將其應用於掌上型隨身多功能充電器等電源供應解決方案。而台灣多年來已經累積豐碩之特用材料研發及製造經驗，再加上具有資通訊技術(ICT, Information and Communication Technology)產業競爭優勢，於燃料電池(Fuel Cell)的應用開發上更占有優勢地位。

燃料電池依觸媒材料、燃料種類及操作設計之不同，分類成多種不同設計之燃料電池系統，由於可攜式電子產品有體積及操作環境之限制(可攜式電子產品表溫不得超過 50°C)，高溫操作型(操作溫

度 > 150°C) 燃料電池，因保溫/隔熱不易等問題，易引發熱安全疑慮，因而中/高溫系統皆不適用於此類別之電子產品，因此較適合可攜式電能應用者，此乃為低溫系統(120°C 以下)如直接甲醇燃料電池(DMFC, Direct Methanol Fuel Cell)、質子交換膜燃料電池(PEMFC, Proton Exchange Membrane Fuel Cell)、鹼性燃料電池(AFC, Alkaline Fuel Cell)等。其中鹼性燃料電池系統，則因傳導羥離子(OH⁻)之交換膜其導電度過低問題，為提升 MEA 效率，因而必須在反應燃料中添加氫氧化鉀(KOH)，以提升交換膜 OH⁻傳導能力，但 KOH 易與空氣中之二氧化碳反應形成碳酸鉀(K₂CO₃)，導至碳酸鹽沉降問題而須清洗交換膜再生，此將增加燃料罐體積(兩極均需要燃料罐，直接甲醇燃料電池及質子交換膜燃料電池則僅有陽極有燃料罐)以及系統設計之難度，因此 AFC 較不適合做為低溫系統之燃料電池。至於 DMFC 與 PEMFC 則視應用之載具及情境各有優劣，以小型常溫操作型可攜式電能而言，其中 PEMFC 之 MEA 雖然具有優異之放電特性，但可攜式之氫氣來源及電池堆氫氣洩漏問題，長久以來一直無法有效解決，致使 PEMFC 應用於小型之可攜式電能受限。而 DMFC 具有系統設計簡化(不需額外加濕)、燃料攜帶便利(液體燃料不需高壓罐儲存)及高安全性(無洩漏爆炸危險)之優點，因此可做為現有電腦、通訊與消費性電子產品(3C, Computer, Communication, Consumer Electronics)之電力供應，甚至可拓展至未來智慧型手機/平板電腦等高功率電子商品及遠端監控等工業產品之電源解決方案。

直接甲醇燃料電池依系統控制模式，可區分成主動式以及被動式兩類。主動式直接甲醇燃料電池，主要透過各種泵以及參數的高度整合控制，達到系統運作最佳化。被動式直接甲醇燃料電池的操作，則透過智能材料與結構設計的整合，達成燃料輸送、內部水回收的功能，免除對液體與空氣幫浦的依賴，達到體積與成本降低的需求。

發展至今，可攜式 DMFC 已有多種商品販售，應用於野營、遠距監測及緊急備用電源等特殊需求用途上。主動式直接甲醇燃料電池雖有較高之發電功率，但存在著周邊輔助元件(BOP, Balance of Plant)體積太大等問題，而無法將系統尺寸縮至很小，於可攜式產品之發展因而受限，使得現今之發展主軸由主動式系統漸轉為被動式系統。因此，本技術開發之方向將運用主動式系統累積之研發能量，進行被動式系統之研究開發，並將兩者整合概念後，注重材料與系統整合設計，以創新智能材料設計及結構設計，取代 BOP，維持 DMFC 穩定操作，並大幅縮減燃料電池體積與成本，期使被動式直接甲醇燃料電池之性能與成本，皆能滿足高階電子商品對可攜式電能之需求。本技術分為四個研發項目，透過開發低甲醇滲透率之質子交換膜、高甲醇轉化率之陽極觸媒、高耐受性之新型陰極觸媒，及低成本高導電度之氣體擴散層(GDL, Gas Diffusion Layer)，再以膜電極組之結構設計、分散及電極塗佈技術能力將以上四項創新材料予以整合，提升被動式操作之膜電極組性能及壽命，達至 30 mW/cm²@32°C (業界領先廠商 Toshiba 其商品為 20~25 mW/cm²)及 1,000 小時，最終目標則是提升性能/壽命達現階段之兩倍。而在系統端則與材料端同步開發，應用情境導入問題，一方面回饋材料開發，另一方面解決系統設計整合之控制策略，發展以低成本、可量產性、小型化，以及安全穩定操作之設計為基礎之直接甲醇燃料電池系統。

(二) 技術發展藍圖

在過去十年，燃料電池開發者為突破營運困境，積極思考燃料電池的利基市場，拓展燃料電池的

相關應用，包括野外應用、遠端遙測、工程單位、休閒產業或是堆高機的應用等，且均有商業化燃料電池導入，此外加上政府積極補助推廣如熱電(Thermoelectricity)共生發電系統(如日本 ENE-farm)等之綠能應用，皆可感受到燃料電池已逐漸由政府/學術研究計畫轉型為新興能源產業。

要使燃料電池成功商品化，對於燃料電池系統及膜電極組之積極研發是不可或缺的，其整體發展的技術藍圖見圖 2-2-4-2-1，同時亦積極布局關鍵技術之專利。在主動式系統方面，將著重於減少周邊多且複雜之 BOP 元件，透過陰極被動回水技術的導入及陽極燃料輸送機構簡化，簡化直接甲醇燃料電池水回收槽及陽極混合槽系統設計，以減低 BOP 元件數量、進一步降低系統體積及成本，此外亦針對特殊應用市場積極建立特製化膜電極組之設計能力。整合於電子產品需求行動電源(含永續供電之行動充電器)之被動式系統，因為操作溫度較低以及操作環境條件不同，因而其膜電極組之功率密度較低，而影響被動式燃料電池之性能。因此開發重點主要以突破被動式操作環境之限制，使觸媒材料發揮效能，透過智能材料與結構設計的整合，達成燃料輸送、內部水回收的功能，減少 BOP，降低體積與成本。未來被動式 DMFC 之成本目標為 32 美元/W，而掌上型隨身多功能充電器之產品規格為 2 W/5 V 輸出，因此成本可控制在 50 美元/部。而隨著可攜式電能元件之成功開發(行動電源)，將可解決智慧型手機或平板電腦等電子產品之電源不足問題，未來整合國內 3C 電子產品(如智慧型手機、平板電腦)等產業能量，不斷電之行動電源將可使國內 3C 電子產品更具特色，促進產業升級。而可攜式發電系統，如電動車充電站、遠距監測用途、遠端智慧網路、緊急救災及安全防災監測用電能供應等較大型之電源則將由主動式燃料電池予以實現，配合關鍵材料量產化及成本降低，可加速其實用化之腳步，可強化國內天然災害之預防、監測及救災技術，未來對提升社會福祉及國土安全有莫大貢獻。



資料來源：工研院材化所整理，2011 年 8 月。

圖 2-2-4-2-1 可攜式電能材料與應用系統之開發技術發展藍圖

(三) 產業效益

近年來國內燃料電池可以說是蓬勃發展，透過政府科技專案之研發投入及技術輔導，台灣的燃料電池產業鏈已逐步成形，尤其是 DMFC 透過完整之專利布局及技術研發在國際地位上已處技術領先

群中。在產業鏈上投入質子交換膜燃料電池有純氫系統之亞太燃料電池、真敏國際、博研、佳百裕、台達電子及重組器系統之台達與大同；可攜式系統用 DMFC 則有南亞科技、思柏科、揚光綠能與新普科技投入開發。而在燃料電池關鍵材料上，義芳化學投入觸媒之研發，碳能投入 GDL 之研發與生產，中強光電及南亞科技則積極投入 MEA 製作，讓台灣燃料電池產業開始具備基礎材料之開發能力，逐漸建構完整的產業鏈。雖然國際燃料電池產業仍屬於市場萌芽期及形成期，而台灣已建構趨近完整之燃料電池元件及材料產業鏈，對於下世代之儲能元件提早進行產業技術及市場布局，未來將可在國際上逐步展露頭角取得市場先機，並開創新一代綠能產業。

未來燃料電池之商品化將從利基市場導入應用，將針對應用端之需求而有不同之設計。未來攜帶式電子產品對於電池有輕薄短小之需求，因此被動式燃料電池產品將先應用於 3C 整合電子產品上，尤其是高單價、高附加價值之智慧型手機及平板電腦。根據 Freedonia Group 之預估 2013 年全球各類燃料電池之市場總值將達 19 億美元，2018 年可攜式燃料電池之出貨數量將占燃料電池之 98%；Frost & Sullivan 則預測 2013 年微型燃料電池(Micro Fuel Cell)之出貨量將達 650 萬部。因而在整體產業建構方面，將利用台灣 3C 電子產品之設計中心之優勢及能量，積極結合國內品牌廠商如宏達電、宏碁及華碩等國際級大廠，以及國外之機構或公司進行產業策略聯盟，以立足台灣放眼世界之思維，建構具有國際競爭力之台灣燃料電池產業，落實可攜式電子產品整合直接甲醇燃料電池之技術目標，期使可攜式燃料電池之行動電源成為國內綠能產業發展的技術方向，並對國內整體產業貢獻最大效益，預估未來創造可攜式電能年產值達新台幣百億元之商機。

三、熱電發電模組及節能應用技術

(一) 技術研發目標

國內鋼鐵、石化、水泥及金屬等產業的耗能與二氧化碳排放比率占居全國前五名，雖然上述產業已利用各種廢熱回收(Waste Heat Recovery)方式進行廢熱回收，但整體廢熱回收比率平均只有三成左右，關鍵在於許多大量的中低溫廢熱(< 500°C)及輻射熱，目前尚無經濟有效的廢熱回收技術。以一貫作業鋼廠為例，尚未能回收利用的廢熱高達 25,000 GKcal/年，等同於 1,850 萬噸/年之二氧化碳排放，對能源浪費及環境之衝擊甚鉅。熱電溫差發電技術係直接利用材料本身的特性，在材料冷熱兩端形成溫差來發電，具有體積小、彈性大、安裝容易及無動件等優點，可較節省空間、降低維修成本，且不受天候影響可 24 小時發電，是一小而美的發電系統，恰好可彌補現有汽電共生及鍋爐預熱等廢熱回收技術上之不足，已被視為極具發展潛力的綠能技術。過去由於熱電模組之熱電轉換效率不佳(約 3~5%)而未受到普遍重視，主要是受制於材料熱電優值(ZT, Figure of Merit)只在 1 左右，然近年來在奈米材料不斷突破及節能減碳的需求帶動下，熱電技術不論在材料性能或模組性能方面已有顯著提升，材料熱電優值可達 1.3~1.5，單層模組效率可達 6.5%。國內在熱電技術之發展起步相對較國外晚，但如前所述國內工業廢熱數量驚人，對潛在的廢熱回收技術具有強烈需求，因此藉由熱電發電技術之研究發展來協助企業進行廢熱回收發電及節能減碳，極具經濟及環保效益。

國內熱電發電技術的發展重點在於開發高效率熱電發電材料及模組技術，在高效率熱電材料部分包括 1.開發低溫熱電材料(適用於 300°C 以內溫區):材料系統以碲化鉍系(Bi_2Te_3 , Bismuth (III) Telluride)

為主，材料製程以長晶及粉末燒結為主，材料之 $ZT_{max} > 1.0$ ；2.開發中溫熱電材料(適用於 250~500 °C 溫區)，初期以 PbTe/GeTe 系為主， $ZT_{max} > 1.3$ ，接著開發環境友善及低成本熱電材料，如 Zn_4Sb_3 、Silicides 或 $CoSb_3$ 系；3.開發寬溫域熱電材料，以涵蓋大溫區之應用，利用熱壓或擠型技術成形；4.利用高能球磨及火花電漿燒結技術，開發具奈米晶粒及結構之熱電材料，材料之 $ZT_{max} > 1.5$ 。

而在高效率熱電發電模組(Thermoelectric Generator Modules)部分主要開發單層結構(適用於 300°C 以內溫區)及雙層結構熱電發電模組(適用於 RT~500°C 溫區)之組裝技術及界面接合技術。單層熱電發電模組在冷熱端溫差 250°C 時，熱電轉換效率大於 7%；雙層結構熱電發電模組在冷熱端溫差 500°C 時，熱電轉換效率大於 12%。

在熱電發電系統應用方面，初期以鋼廠廢熱回收為主要標的，協助鋼鐵公司根據現場條件及環境，設計與開發適合的熱電材料及模組以組裝成熱電發電系統，並衡量現場環境設計較適化的集熱及熱交換裝置，以達到最佳化之熱電轉換效率；進而將此技術推展至石化、水泥及金屬熔鑄等產業上，包括石化廠排熱煙道之廢熱回收、水泥廠窯爐之廢熱回收等，以達到減少工業廢熱排放與節能減碳之雙重效益。

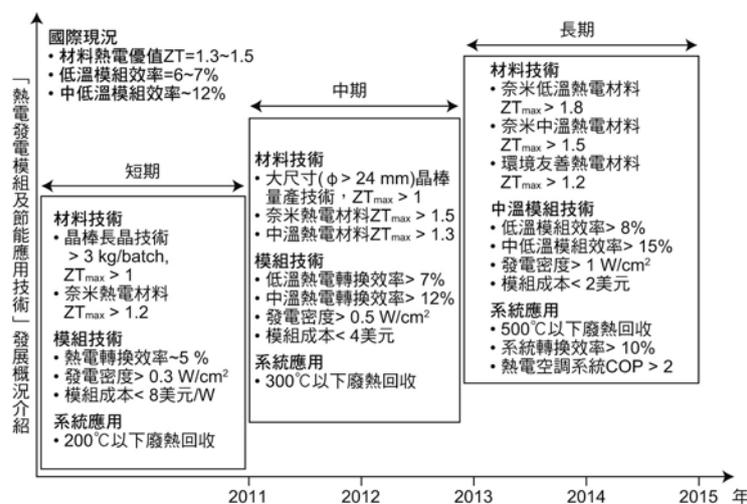
2011 年的技術目標，在材料部分為開發具奈米結構之熱電材料技術，藉由熱傳導率(K)之降低及維持足夠功率因子(Power Factor, $S^2 \sigma$)的前提下提高材料熱電優值($ZT > 1.3$)；開發環境相容之中溫用熱電材料(Zn_4Sb_3)， $ZT > 1$ 。在模組部分為開發高效率之熱電發電模組反擴散接合技術及組裝技術，模組效率 > 6%。在模組應用則協助鋼廠執行熱電前瞻業界科專計畫，以建立鋼廠廢熱回收之熱電發電系統。

(二) 技術發展藍圖

熱電發電技術已是世界各國未來積極發展的綠能科技，包括美國、歐盟、日本、中國大陸、韓國、俄羅斯、烏克蘭、東歐、伊朗及以色列等國家均在政府經費支持下結合產業、學術單位及研究單位致力於次世代熱電材料及模組技術之開發，希望於 2020 年達到材料熱電優值 $ZT > 2$ ，模組熱電轉換效率達到 15% 之目標。根據 2011 年國際熱電論壇成果發表顯示，目前已商業化之熱電材料優值 $ZT \sim 1.2$ ，熱電發電模組效率在 6~7% 左右；而目前國際上發表的熱電材料優值 ZT 值在 1.3~1.5，最具代表性的為美國麻省理工大學發表的 P-Type Bi-Sb-Te 奈米結構熱電材料， $ZT = 1.4$ ；在中低溫雙層熱電模組部分以美國 BSST 及日本 Komatsu 公司發表的 12.1% 最高。而國內參考目前國外熱電材料及模組之技術發展現況，以及美國能源部計畫、日本 NEDO 計畫規劃於 2015 年熱電技術之發展目標，而擬定技術發展之藍圖，見圖 2-2-4-3-1 所示，分成目前 2010 年之技術發展概況、2011~2012 年的中期技術目標及 2013~2015 年之長期技術目標，茲說明如下。

在 2010 年技術發展概況方面，國內熱電發電技術之發展分為二大項，一為高效率熱電材料開發，另一為高效率熱電發電模組開發。2010 年已建立大尺寸 Bi-Te 單方向晶棒材批大量產技術，藉由精確控制長晶時固液界面的溫度梯度及成長速率，以及較適化的合金組成及摻雜元素控制，成功開發出單方向晶棒材直徑 24 mm，長度 250 mm 以上，每支重量約 700 g，材料熱電優值 ZT_{max} 值 ~ 1.05 ，晶棒沿長晶方向之熱電特性(功率因子)變異度在 $\pm 5\%$ 以內，整支晶棒之品質相當穩定，已達到國際商業

化產品水平。本材料技術之成功開發將使國內能夠自製高品質的熱電晶棒無需仰賴進口；除材料技術開發之外，本技術同時開發熱電模組組裝技術，包括材料及晶粒切割技術、表面金屬化電鍍技術、陶瓷電路基板技術、組裝治夾具設計及熱電材料與基板之錫焊接合技術等，而其使用的熱電材料即是上述自行開發的單方向晶棒。2011 年已建立 40 mm x 40 mm 熱電發電(TEG, Thermoelectric Generator)模組組裝所需的設備及技術，此種尺寸之熱電發電模組，在冷熱端溫差 $\Delta T = 240^{\circ}\text{C}$ 時，模組熱電轉換效率達 5.02%，模組發電量達 6.5 W，性能優於美國 Hi-Z 及加拿大 Thermo Electric 公司之模組產品，但與領導廠商烏克蘭 Altec-M 公司的 5.6% 仍有一些差距。本階段所建立之材料及模組技術已規劃技術移轉予國內大企業，未來將使台灣擁有自主化的熱電材料及模組技術，以供應國內需求甚至開拓國際市場。



資料來源：工研院材化所整理，2011 年 8 月。

圖 2-2-4-3-1 熱電發電模組及節能應用技術發展藍圖

在中期技術目標(2011~2012 年)方面，在材料部分主要延續 2010 年的研究基礎，一方面進一步開發多管式熱電晶棒長晶技術，每 batch 之晶棒產能達 3 公斤以上， $ZT > 1$ ，達量產規模；另一方面開發 Bi-Te (2011~2012)系奈米結構熱電材料，使材料熱電優值 $ZT > 1.5$ ；再則發展中溫用(300~500°C)熱電材料，使材料之 $ZT_{max} > 1.3$ 。在模組部分，開發單層 Bi-Te 系熱電發電模組，熱電轉換效率 $\eta > 7\% @ \Delta T = 250^{\circ}\text{C}$ ，發電密度 > 0.5 W/cm²，模組成本 < 4 美元/W；同時開發中溫熱電發電模組的模組組裝及介面接合技術，組成中低溫發電模組(RT~500°C)，其熱電轉換效率 $\eta > 12\% @ \Delta T = 500^{\circ}\text{C}$ ，以達國際頂尖水準。

在長期技術目標(2013~2015 年)方面，在低溫熱電材料部分目前 P-type 以 Bi-Sb-Te 系為主，N-type 以 Bi-Te-Se 系為主，不過由於 Te、Se 全球蘊藏量有限，隨著 Te、Se 在太陽能及熱電上之應用激增，原料成本有可能增加，因此有必要開發替代性材料，以降低發電成本壓力；而在中溫材料部分，雖然 PbTe 系及 GeTe 系材料性能優異及穩定，但 Pb 為毒性材料，Ge 及 Te 原料價格昂貴，因此有需要開發替代性材料以符合環保及低成本之環境需求。而為提升材料熱電優值，如何有效操控奈

米結構熱電材料的熱電性質更顯重要；再則發展寬溫域或多段式熱電材料以涵蓋高溫差應用範圍。本技術預計達成之各項技術指標包括低溫熱電材料 $ZT > 1.8$ ，中溫熱電材料 $ZT > 1.5$ ；模組部分，低溫發電模組轉換效率 $> 8\% @ \Delta T = 250^\circ\text{C}$ ，中溫模組效率 $> 15\% @ \Delta T = 500^\circ\text{C}$ ，模組成本 < 2 美元/W；低溫及中溫廢熱源之發電系統效率分別要大於 6% 及 10%，此為極具挑戰的技術指標。

(三) 產業效益

高效率熱電材料及系統應用技術可針對不同廢熱源提供完整之整合技術，除可實際應用在國內鋼廠廢熱現場上，根據鋼廠初估適合於熱電發電回收之廢熱總量達 6,331 Gkcal/年，預計可回收發電相當熱能為 95 Gkcal/年¹，相當於發電量 1.1 億度，年節能效益潛力達新台幣 2.2 億元，二氧化碳減量潛力達 7 萬噸/年(以每度電碳排放 0.638 公斤計)。若進一步擴及其他高耗能及二氧化碳排放產業，預計可回收 377 GKcal/年之廢熱，相當於發電量 4.4 億度，年節能效益潛力達 8.8 億元，每年可減少 28 萬噸的二氧化碳氣體排放。此外也將整合國內材料、設備、模組至系統等相關廠商形成完整的上中下產業鏈，建立國內自主技術能力，成為全球少數具有熱電技術垂直整合應用之國家，除帶動國內熱電產業發展，亦可為台灣開拓商機無限的熱電發電市場。

本技術對國內產業之預期效益，就經濟面效益而言，目前全球熱電模組產值約達新台幣 120~130 億元，市場應用包括小型冰箱、冷藏櫃、雷射二極體溫控、半導體(Semiconductor)設備溫控、汽車椅背、基因工程、電子設備冷卻、衛星及太空發電裝置等，分散於中國大陸、日本、美國、俄羅斯、烏克蘭及歐盟等國家，而台灣在全球製造供應鏈上則只扮演使用者角色。在熱電發電部分目前產值約 10 億元左右，但隨著在汽車廢熱、工業廢熱及感測器自主電力供應之應用逐漸成形，其相關產值根據日本 Kaomatsu 公司預估未來 10 年可達 500 億元以上。本技術將促進國內企業投資於熱電材料之製造技術、元件模組之組裝技術及系統之整合技術，並適度整合上中下游廠商形成一完整的垂直供應鏈及產業，發揮台灣之製造優勢，以便在未來全球持續成長的熱電市場占有一席之地。而經由廢熱熱電發電產生之電力預估每年可達數億度，可節省產業用電及提高能源使用效率，並創造數十億元之產值。

就環保面效益而言，本熱電發電技術已陸續在國內鋼廠、石化廠、水泥廠及金屬熔鑄廠等主要耗能及二氧化碳排放的產業安裝熱電發電示範系統，同時也促使上述產業積極投入資源及人力於熱電發電系統整合之開發及測試。未來將循序漸進擴大其安裝面積及場所，提高其工業廢熱回收比率、降低數十萬噸二氧化碳排放量、改善現場作業環境，對企業落實環保愛地球及善盡社會責任具有極大之意義。

¹ (6,331 Gkcal x 15%熱擷取率 x 10%平均轉換效率=95 GKcal)。