

出國報告（出國類別：開會）

參加 2007 燃料電池技術研討會

服務機關：台灣電力公司

姓名職稱：李文台 化學師

派赴國家：美國

出國期間：96 年 10 月 13 日~ 10 月 22 日

報告日期：96 年 11 月 26 日

行政院及所屬各機關出國報告提要

出國報告名稱：參加 2007 燃料電池技術研討會

頁數 28 含附件：是否

出國計畫主辦機關/聯絡人/電話：

台灣電力公司人事處/陳德隆/2366-7865

出國人員姓名/服務機關/單位/職稱/電話：

李文台/台灣電力公司/綜合研究所/化學師/8078-2248

出國類別：1 考察2 進修3 研究4 實習5 開會

出國期間：96 年 10 月 13 日~10 月 22 日 出國地區：美國

報告日期：96 年 11 月 26 日

分類號/目

關鍵詞：氫氣儲能及燃料電池、固態氧化物燃料電池

內容摘要：(二百至三百字)

本次出國行程主要赴美國參加於 10 月 15-19 日舉辦「2007 燃料電池技術研討會」，本次國際性會議係全球燃料電池界共同參與者，參與人士超過 2 千人，包括技術專家、研究學者、投資公司、業界廠商等，今年研討會主題是「燃料電池邁向獨立自主能源之路」，進而衍生相關的能源安全與造成全球氣候變遷議題，內容涵蓋電力設施、住宅、交通運輸工具及攜帶型產品等，討論內容包含高低溫燃料電池關鍵元件技術研發、燃料電池整合及製造技術、如何降低成本、燃料、貯存、產品可靠性、壽命及應用等，並有近 200 家燃料電池研發單位及廠商，展示最新之研發成果及產品，因此，本所乃遴派負責執行氫氣儲能及燃料電池關鍵材料技術計畫相關人員，由化學室李文台化學師前往參加此次國際會議，參加該研討會可蒐集各種關鍵資訊，並瞭解氫能與燃料電池相關技術世界發展趨勢，本次的重點為高溫型固態氧化物燃料電池相關技術發展關鍵資訊之蒐集，以利本公司後續相關研究計畫之規劃、推行與完成。

(上傳訊息：open.nat.gov.tw/reportwork; Password: C09503821)

本文電子檔已傳至出國報告資訊網 (<http://report.gsn.gov.tw>)

出國報告審核表

| | | |
|-------------------------------------|--|-----------------------|
| 出國報告名稱：參加 2007 燃料電池技術研討會 | | |
| 出國人姓名 | 職稱 | 服務單位 |
| 李文台 | 綜合研究所化學師 | 台灣電力公司 |
| 出國期間：96 年 10 月 13 日至 96 年 10 月 22 日 | | 報告繳交日期：96 年 11 月 26 日 |
| 出國計畫主辦機關審核意見 | <p>■1.依限繳交出國報告</p> <p>■2.格式完整（本文必須具備「目地」、「過程」、「心得」、「建議事項」）</p> <p>■3.內容充實完備。</p> <p>■4.建議具參考價值</p> <p>■5.送本機關參考或研辦</p> <p><input type="checkbox"/> 6.送上級機關參考</p> <p><input type="checkbox"/> 7.退回補正，原因：<input type="checkbox"/> 不符原核定出國計畫 <input type="checkbox"/> 以外文撰寫或僅以所蒐集外文資料為內容以 <input type="checkbox"/> 內容空洞簡略 <input type="checkbox"/> 電子檔案未依格式辦理 <input type="checkbox"/> 未於資訊網登錄提要資料及傳送出國報告電子檔</p> <p><input type="checkbox"/> 8.本報告除上傳至出國報告資訊網外，將採行之公開發表： <input type="checkbox"/> 辦理本機關出國報告座談會（說明會），與同人進行知識分享。 <input type="checkbox"/> 於本機關業務會報提出報告</p> <p><input type="checkbox"/> 9.其他處理意見及方式：</p> | |
| 層轉機關審核意見 | <p><input type="checkbox"/> 1.同意主辦機關審核意見<input type="checkbox"/> 全部 <input type="checkbox"/> 部分_____（填寫審核意見編號）</p> <p><input type="checkbox"/> 2.退回補正，原因：_____</p> <p><input type="checkbox"/> 3.其他處理意見：</p> | |

說明：

- 一、出國計畫主辦機關即層轉機關時，不需填寫「層轉機關審核意見」。
- 二、各機關可依需要自行增列審核項目內容，出國報告審核完畢本表請自行保存。
- 三、審核作業應於報告提出後二個月內完成。

| | | | |
|-----|-----|-----|-------|
| | 單位 | 主管處 | 總經理 |
| 報告人 | 主管： | 主管： | 副總經理： |

目 錄

頁次

| | |
|----------------|----|
| 壹、目的及任務----- | 1 |
| 貳、出國行程----- | 3 |
| 參、會議內容及心得----- | 4 |
| 肆、結論及建議----- | 27 |

壹、目的及任務

一、由於地球上蘊藏的化石燃料銳減以及燃用化石燃料造成全球氣候變遷問題，再生能源之開發日益重要，其中氫能與燃料電池之利用為重要解決方案。依據經濟部能源局「能源科技研發規劃」決議，氫能與燃料電池列為我國最優先重點研發方向，並指定氫能與燃料電池作為本公司新能源研發項目，其中各國對相關之高溫固態氧化物燃料電池（SOFC）及低溫質子交換膜燃料電池（PEMFC）關鍵材料正積極研發，本所目前正規劃並執行相關研發計畫。

二、美國於 10 月 15-19 日舉辦「2007 燃料電池技術研討會」(2007 Fuel Cell Seminar & Exposition)，本次國際性會議係全球燃料電池界共同參與者，參與人士超過 2 千人，包括技術專家、研究學者、投資公司、業界廠商等，今年研討會主題是「燃料電池邁向獨立自主能源之路」，進而衍生相關的能源安全與造成全球氣候變遷議題，內容涵蓋電力設施、住宅、交通運輸工具及攜帶型產品等，討論內容包含高低溫燃料電池關鍵元件技術研發、燃料電池整合及製造技術、如何降低成本、燃料、貯存、產品可靠性、壽命及應用等，並有近 200 家燃料電池研發單位及廠商，展示最新之研發成果及產品，參加該研討會可蒐集各種關鍵資

訊，並瞭解氫能與燃料電池相關技術世界發展趨勢，本次的重點為
高溫型固態氧化物燃料電池相關技術發展關鍵資訊之蒐集，以
利本公司後續相關研究計畫之規劃、推行與完成。

貳、出國行程

本次赴美國參加「2007 燃料電池技術研討會」(2007 Fuel Cell Seminar & Exposition) 之行程如下表所示：

| 日期 | 活動 | 備註 |
|----------|-----------------|----|
| 10/13~14 | 台北 — 洛杉磯 — 聖安東尼 | |
| 10/15~19 | 聖安東尼 | |
| 10/20~22 | 聖安東尼 — 洛杉磯 — 台北 | |

叁、會議內容及心得

本次國際性研討會主題是「燃料電池邁向獨立自主能源之路」，進而衍生相關的能源安全與造成全球氣候變遷議題，內容涵蓋電力設施、住宅、交通運輸工具及攜帶型產品等，本次所有與會人員約 2300 人，參與國家約 36 國，包括技術專家、研究學者、投資公司、業界廠商等，展示公司約 175 家。

本次會議論文主題，主要區分為高溫燃料電池議題(High Temperature Fuel Cells)、低溫燃料電池議題(Low Temperature Fuel Cells)、展示及後端使用者議題(Demonstrations/End User Perspectives)、商業化路徑議題(Pathways to Commercialization)等四部份，本次會議發表之論文包括現場發表及壁報發表約 502 篇，其中現場發表又分場次包括：

A. High Temperature Fuel Cells

SOFC/MCFC

B. Low Temperature Fuel Cells

PEM Fuel Cells/DMFC/PAFC

C. Demonstrations/End User Perspectives

Stationary Power/Fuel Cell Markets/Transportation/Fuel Cell Formal Education/Curriculum Development/Public Awareness/Hydrogen/

Residential Scale/Portable Power

D. Pathways to Commercialization

Global Overview/Economic Considerations/Government Incentive Programs/Fuel Processing/Fuel Cell Testing and Modeling/Manufacturing Advancements

茲將參加各相關主題所獲得論文發表心得作概要介紹說明，列述如下，並將本次重點高溫型固態氧化物燃料電池相關技術發展關鍵資訊整理於后。

1. Operation of 1kW class SOFC stack and system for residential power generation application

Y-S. Yoo, T. Lee, J. Choi, S-Y. Yang, T-S. Park

Korea Electric Power Research Institute, Daejeon, Korea, Republic of

韓國電力研究院（KEPRI）從事1kW級SOFC住宅型發電系統開發應用，高溫固態氧化物燃料電池（SOFC）具有高電力轉換效率、符合環境要求、熱電聯供裝置(combined heat and power, CHP)、燃料多元化、並可應用於定置型及交通運輸等工具電力設施之優點，近年來SOFC發展迅速，尤其住宅型CHP之應用更引起廣泛注意，KEPRI從2003~2006開始執行1kW級SOFC住宅型發電系統開發應用之國家計畫，系統以天然氣為燃料，結果顯示40A時，電力為1.13 kW，50 A時，電力為1.3 kW，同時可回收0.57-1.2 kW熱水電力，此1kW級SOFC開發金屬連接器，10cm x 10 cm單電池之電解質為YSZ，電力密度在

750°C 為0.32 W/cm²，在650°C 為0.2 W/cm²，國家計畫第二階段

(2007~2010) 將發展5kW級SOFC，主要目標系統效率為35%，全效率為75%。

2. Carbonate Fuel Cell Power Plant Using Renewable Fuels

S. Abens, R. Sanderson, G. Steinfeld

FuelCell Energy, Inc., Danbury, CT

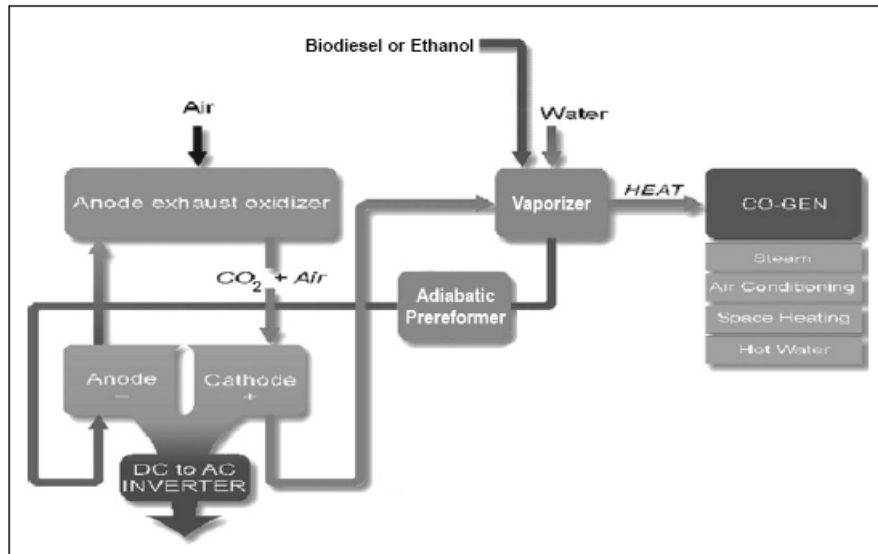
美國FuelCell Energy, Inc. (FCE)公司利用替代燃料開發高溫型碳酸鹽燃料電池，使用生質能及乙醇建立重組燃料技術，此公司已開發0.5MW碳酸鹽燃料電池，其主要設備流程如下圖，替代燃料可提供高效率、低排放燃料電池電力系統，因此可降低溫室氣體之排放，其主要化學反應為

(1) Reforming: $C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (n+m/2) H_2$ Endothermic

(2) Shift: $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ Exothermic

(3) Methanation: $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$ Exothermic

Major Equipment Process Schematic Arrangement for the Biodiesel Carbonate Fuel Cell Power Plant



Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

3. US DOE Fossil Energy Fuel Cell Program

W. Surdoval

NETL, Pittsburgh, PA

美國能源局(DOE)與國家能源技術實驗室(National Energy

Technology Laboratory,NETL)及太平洋西北國家實驗室(Pacific

Northwest NationalLaboratory, PNNL)合作，執行固態能源轉換聯盟

(Solid State Energy Conversion Alliance, SECA) 國家計畫，致力於

推動10kW以下SOFC產品之商品化，發展低成本、符合環境要求及燃

料多元化之固態氧化物燃料電池(SOFC)，SECA四項主要研究發展

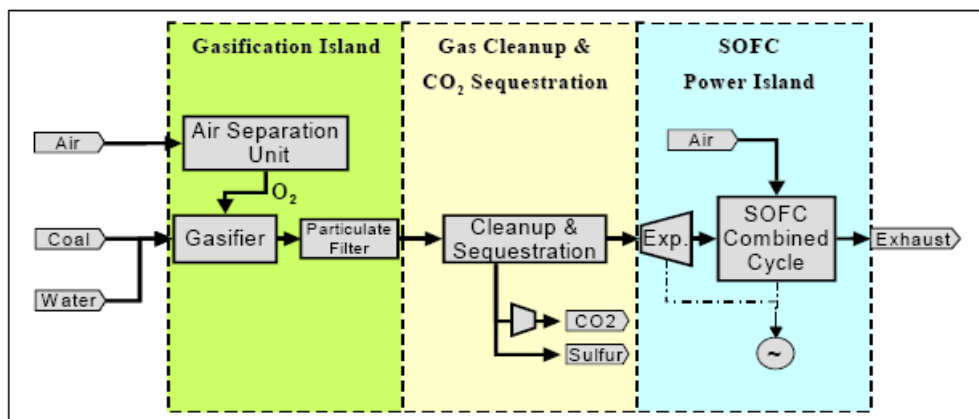
方向：降低成本、煤碳來源(Coal-Based)系統、製造及核心技術等，

SECA對於固態氧化物燃料電池降低成本目標，於2010年前至\$400/

kW，煤碳來源(Coal-Based)系統係利用煤碳氣化燃料電池(Integrated

Gasification Fuel Cell·IGFC)，主要是因為美國煤碳儲存量很大，IGFC

熱效率性能超過50% ，本計畫未來於2010年將併入FutureGen國家計畫。SECA評估SOFC核心技術之優先秩序，第一階段為氣密封裝、連接器、破損分析三項；第二階段為高溫熱交換器、陰極開發、燃料處理及陽極開發，第三階段為材料價格。



Coal Based Integrated Gasification Fuel Cell Power Plant Block Flow Diagram

Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

4. Development of Delta-Type High Power Density Solid Oxide Fuel Cells

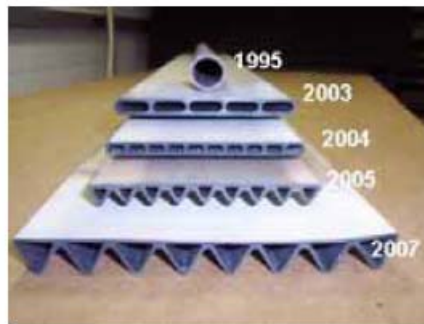
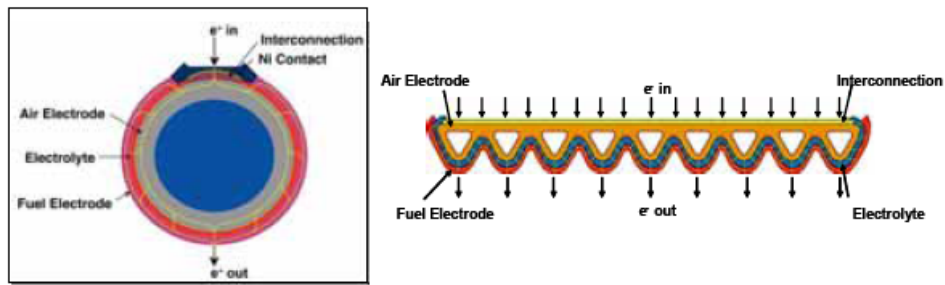
K. Huang

Siemens Power Generation, Inc., Pittsburgh, PA

美國西門子電力公司（Siemens Power Generation, Inc）開發

Delta-Type高電力密度定置型固態氧化物燃料電池（SOFC），為新一代高效率發電設計，為一種多通道平板設計，其有效表面積可增加50%，下圖為單通道及9通道剖面比較圖及該公司歷年發展之幾何圖形，

Comparison of cross-sections of single-channel cylindrical and 9-channel Delta cells



Evolution of Siemens SOFC geometry

Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

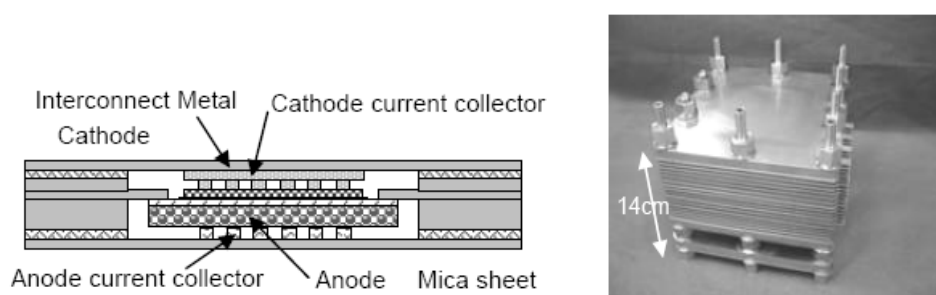
本元件係利用大氣電漿噴塗技術（Atmospheric Plasma Spray、APS），可使剖面厚度均勻及密度高，即噴塗效果佳，經實驗結果於 $880^{\circ}\text{C}\sim 1020^{\circ}\text{C}$ 燃料使用率為78%，最大電流密度 $500\text{mA}/\text{cm}^2$ ，而總電力輸出 $2.3\sim 2.4\text{kW}$ 。

5. Integrated SOFC Power Stack Development at NGK SPARK PLUG CO., LTD.

M. Shibata, H. Ishikawa, H. Uematsu, H. Sumi, Y. Oguma, Y. Todo, K. Furusaki
NGK SPARK PLUG CO., LTD., Nagoya, Japan

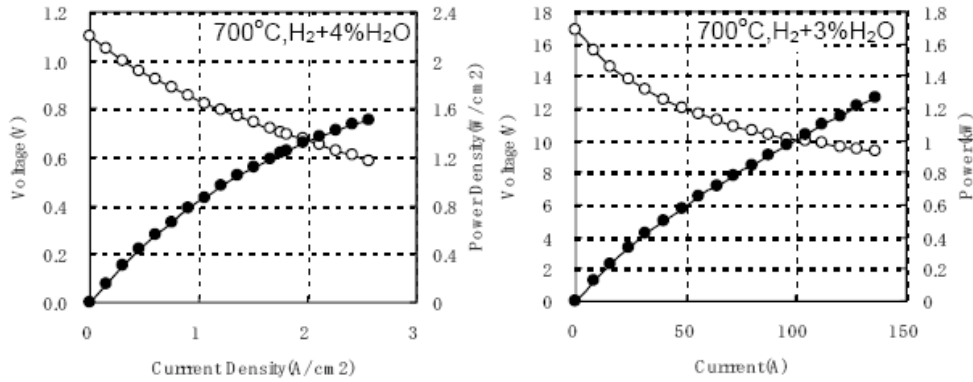
日本新能源及產業技術發展組織（NEDO）自1989年開始研究SOFC之商業化，目前已進行至第四階段（2004-2007年）之SOFC系

統發展，目標在驗證系統之耐用性及可靠度。日本政府研究SOFC產品商業化至今已有16年，但直到2000年才大力支持SOFC計畫，其研究重點在發展能同時提供電與熱，應用在住家型之SOFC系統、及發展SOFC在交通運輸工具之應用。目前日本政府正在進行小型SOFC定置型系統開發計畫，預計2007年完成大規模測試，主要參與廠商包括：Kyocera、TOTO、住有商事等。日本重電工業NGK公司發展SOFC電池堆產品，目前主要目標為家庭用定置型電力系統之開發，核心技術包括小型化、降低成本、快速達到運轉溫度等，即需改善電力密度為 $0.8\text{W}/\text{cm}^2$ （ 700C 於 0.7V ，尺寸為 100cm^2 ）以上， 1kW 之輸出力僅需15組電池堆，為解決電池堆熱管理技術，設計整合型結構，將燃料重組器置於底部，而二組燃燒室置於兩端，如此設計可使溫度分佈均勻，達到最佳熱效率，單電池剖面及電池堆圖如下所示，



Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

實驗結果顯示於 700°C 及 1.33cm^2 反應面積時，需 4% 氫氣供應量，即電力密度為 $1.23\text{W}/\text{cm}^2$ ，已超過目標值 $0.8\text{W}/\text{cm}^2$ ，因此估計於 700°C 及 3% 氫氣供應量，15 組電池堆可達到 1.1kW ，如下圖所示。



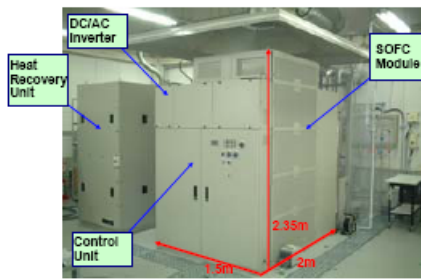
Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

6. Development of Intermediate-Temperature SOFC Modules and Systems

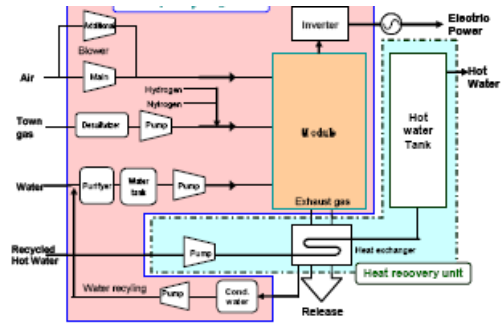
M. Shibata , N. Murakami , T. Akbay , K. Hoshino , K. Hosoi , H. Nakajima , J. Kano , F. Nishiwaki , T. Inagaki , S. Yamasaki
 1Mitsubishi Materials Corp., Naka-shi, Japan
 2 The Kansai Electric Power Co., Inc., Amagasaki, Japan

日本關西電力公司與產業界合作自2001年起開發中溫SOFC定置型發電系統，其運轉溫度為600°C ~ 800°C，此時可利用較便宜不鏽鋼材料製作模組，包括分離器及燃料重組器等，電解質材料為La_{0.8}Sr_{0.2}Ga_{0.8}Mg_{0.15}Co_{0.05}O_{3-δ} (LSGMC)，陽極材料為Ni-Ce_{0.8}Sm_{0.2}O_{2-δ}(Ni-SDC)，陰極材料為Sm_{0.5}Sr_{0.5}CoO_{3-δ} (SSC)，從1kW模組開始，逐漸發展3kW、5kW，最後2006年以10kW（16組電池組）為目標，於2004年已完成1kW級CHP示範系統，耐久性試驗已超過2,000小時，而2006年以10kW級CHP示範系統如下圖所示

Overview of the 10kW-class CHP system



System flow diagram



Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

7. Innovations in Membranes for PEM Fuel Cells Enabling Commercialization

G. Escobedo¹, K. Barton², B. Choudhury¹, D. Curtin³, R. Perry¹

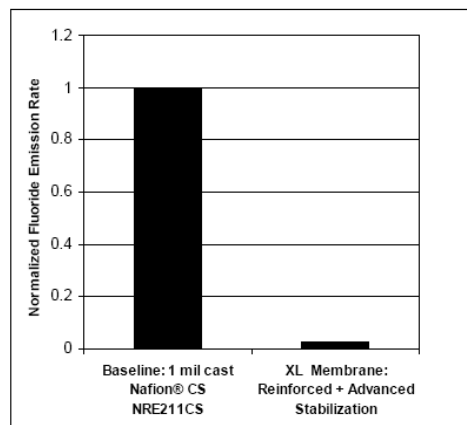
¹DuPont Fuel Cells, Wilmington, DE

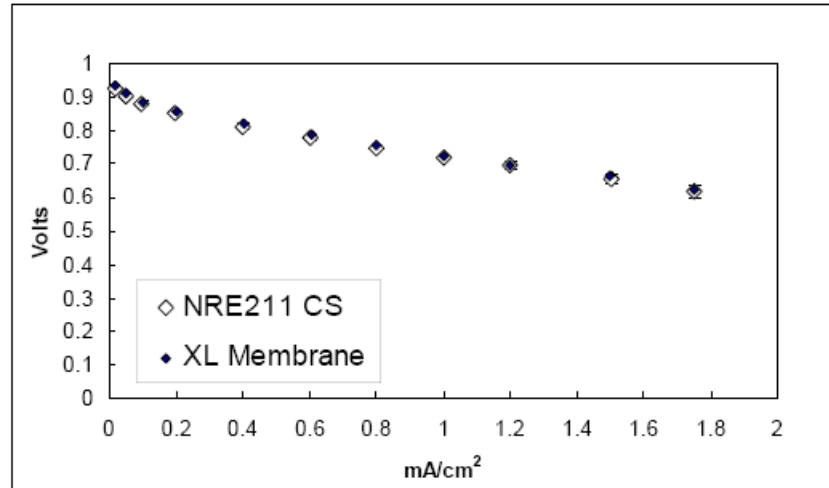
²DuPont Fuel Cells, Towanda, PA

³DuPont Fuel Cells, Fayetteville, NC

美國杜邦公司最近發展質子交換膜（PEM）燃料電池之新型薄膜商業化，其新型質子交換膜對PEM燃料電池更具效率，其耐久性更佳，其中Nafion® XL薄膜比市場現有薄膜之耐久性更佳，在薄膜電極組（MEA）之發展也是快速，該公司提供汽車產業更佳功能之薄膜，其對濕度敏感度可降低，及較高溫度操作條件。Nafion® XL薄膜相對氟排放速率比原來產品系列低很多，及其I-V曲線如下圖所示。

Relative Fluoride Emission Rate (FER) in accelerated OCV Fuel Cell test.





Fuel cell performance of Nafion® NRE211 CS and XL.

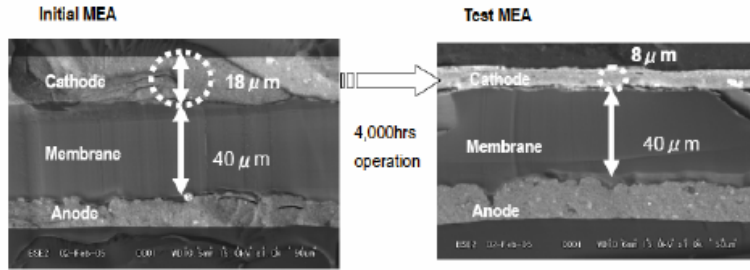
Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

8. Progress of Highly Durable MEA for PEMFC Under High Temperature and Low Humidity Conditions

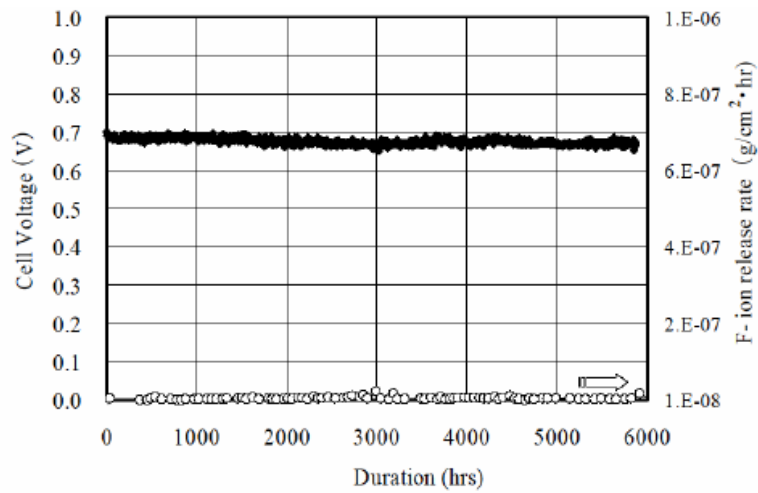
E. Endoh

Asahi Glass Co. Ltd., Yokohama, Japan

日本Asahi Glass公司為知名PEMFC薄膜製造公司，其Perfluorosulfonic acid (PFSA)高分子材料在120°C及低濕度條件下，耐久度為5,000小時，而其化學穩定度又比碳氫高分子材料更高，但在低濕度條件下，一般的PFSA薄膜亦容易分解，且其玻璃轉換溫度（glass transition temperature）只有80°C，因此只能在低溫（below 80°C）及高濕度(ca.100% RH)下運轉，另該公司新開發複合高分子薄膜(NPC)在120°C 溫度及 50% 相對濕度下已運轉6,000小時，其中NPC MEA-I之掃描式電子顯微鏡影像及耐久度如下圖所示。



Cross-sectional SEM image of the NPC MEA-I



Durability of the NPC MEA-VII:

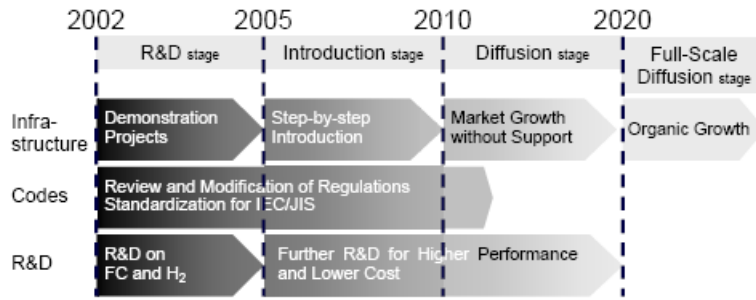
Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

9. Japan’s Approach to the Commercialization of Fuel Cell Hydrogen Technology

T. Kogaki

Deputy Director, Tokyo, Japan

日本燃料電池及氫能計畫由國家主導，在能源部門大力推動燃料電池及氫能技術開發，包括燃料電池性能、耐久性及成本降低等，於2030年前主要目標150萬輛燃料電池汽車及12.5GW定置型燃料電池系統，其策略性結構如下圖所示。



Scenarios for commercialization of hydrogen and fuel cell technology.

Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

為建立定置型燃料電池市場，1kW PEFC 住宅型發電系統在日本各種不同氣候條件下，已設置 1200 座系統，今年（2007）底前將再設置 930 座系統，各種運轉實測數據將被蒐集，作為維護運轉之參考，下圖為日本各地裝設 1kW PEFC 住宅型共生發電系統分佈地圖。



Number of demonstration site of 1 kW PEFC cogeneration system in each area.

Ref. of “2007 Fuel Cell Seminar & Exposition”

10 . The Department of Energy’s Fuel Cell Program

N. Garland¹, T. Benjamin²

¹Department of Energy, Washington, DC

²Argonne National Laboratory, Argonne, Illinois

美國能源局(DOE)開發及示範燃料電池電力系統技術，包括運

輸、定置型電力系統及攜帶型電力系統之應用，其成本、性能及耐久性必需與目前現有技術競爭，針對運輸工具燃料電池壽命為5,000小時，定置型電力系統燃料電池壽命為40,000小時，燃料電池計畫主要成本及技術目標如下表。

| Characteristic | Units | 2010 target | 2015 target |
|---|---|-------------|-------------|
| Cost | \$/kW | 45 | 30 |
| Durability with cycling | hours | 5000 | 5000 |
| Non-Pt Catalyst Activity per volume of supported catalyst | A/cm ³ @800mV _{iR-free} | >130 | 300 |
| Pt Catalyst Mass Activity | A/mgPt @900mV _{iR-free} | 0.44 | 0.44 |

11. 固態氧化物燃料電池相關技術發展情形

現今最逼切的議題是能源和環境問題，即如何節約有限的能源資源和如何降低二氧化碳和其他污染物的排放為各國努力的目標。對已開發國家如何減少總耗能，對已發展中國家如何建立起最先進的有效利用能源的體系，為達到這個要求，我們急需在發電和運輸兩個領域中開發高能源利用效率的新技術。

燃料電池是近年來全球能源界寄予厚望之潔淨能源技術，世界各國之政府機構、研究單位、產業界等紛紛成立聯盟及研發團隊，投入策略制定、技術研發及產品開發推廣之行列，期望能在近期內將此綠

色能源技術落實到人類的日常生活中。目前已開發和正在開發的燃料電池，按所用的電解質分類有鹼性燃料電池（AFC）、高分子電解質或質子交換膜燃料電池（PEFC 或 PEMFC）、磷酸鹽燃料電池（PFC）、熔融碳酸鹽燃料電池（MCFC）和固態氧化物燃料電池（SOFC），前三項即 AFC、PEMFC 和 PFC 屬低溫型的燃料電池，它們的操作溫度低於 573K，後兩類即 MCFC 和 SOFC 屬高溫型燃料電，操作溫度高於 873K，其中高溫 SOFC 的操作溫度為 1173-1273K，燃料電池不像其他類熱機那樣效率受卡諾迴圈的限制，不管是低溫型的還是高溫型的其發電效率一般都可以達到 40-70%，能量利用效率一般高於 50%，高的可達 90%，高溫型燃料電池的發電效率和能量利用效率都要顯著地高於低溫型燃料電池。

固態氧化物燃料電池（solid oxide fuel cell）SOFC 是一種清潔高效率的能源轉換裝置，可以直接使用來源廣泛、價格低廉的各種碳基燃料，燃料容易儲存、運輸，不需貴金屬催化劑，可適用於大型發電系統，亦可用作分散式電源和中小型移動電源；若固態氧化物燃料電池與氣體透平機相結合並穩定運行時，能提供使用礦物燃料時的最高發電效率 65-70%，熱效率可大於 80%，如果把燃料電池用作為熱電聯供裝置（CHP，combined heat and power），則其電效率可超過 50% 而能量效率可達到 90%，也即此時的熱能利用占 40%，由於能量利

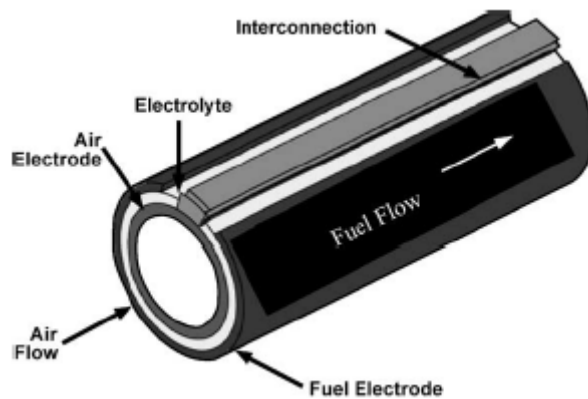
用效率大幅度提高使化石燃料的消耗得以大幅度下降，從而使排放的溫室氣體和污染氣體也能有很大的減少。

11.1 SOFC 系統不同設計的發展及應用

作為把化學能轉化為電能的裝置，SOFC 的發展的最初目標是作為發電廠中的發電機提供電能。在 SOFC 系統的發展過程中出現過多種電池的設計，兩種最常用的 SOFC 的設計是管式和板式。

11.1.1 管式設計 SOFC 系統

對管式 SOFC 系統設計可以用 Siemens-westinghouse 的設計作代表來說明，如下圖所示。

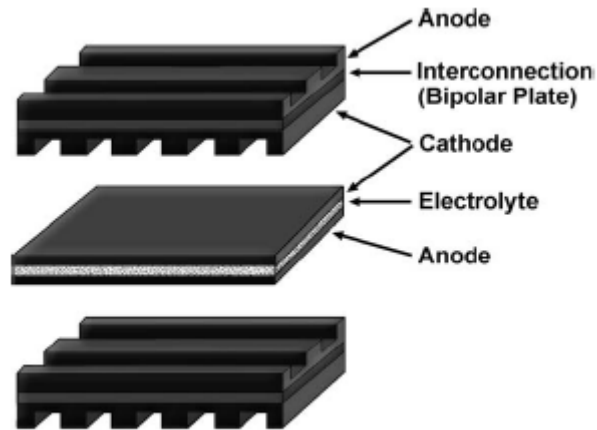


Sr-或 Ca-摻雜的 LaMnO_3 陰極基體管是用擠壓和燒結法制成；YSZ 電解質用電化學汽相沉積法以約 40 微米的緻密層形式沉積；鎳/YSZ 陽極既可以用鎳/YSZ 漿液燒結的方法也可以先沉積鎳漿液再用電化學汽相沉積 YSZ 的方法。摻雜的鉻酸鋇連接器沿池管長度方向用等離子噴塗法沉積。管式設計的 SOFC 的一端是封閉的。在操作時，氧化劑（空氣或氧氣）通過位於電池管內的陶瓷噴射管引入到電池封閉

端附近的噴射口流出通過由電池和同軸的噴射管形成的環狀空間；燃料由電池管外部封閉端流向電池管開口端，在燃料流過電極表面時被電化學氧化的同時產生電力。經過電反應後的氧化劑從電池管的開口端流出，與已有部分消耗的燃料氣在後燃燒器中混合並燃燒。一般情況下，在電化學反應中燃料的利用率為 50-90%。沒有利用燃料的一部分可再回到燃料流中，其餘的被燃燒以預熱新鮮空氣和/或燃料氣。從燃料電池出來的廢氣的溫度與操作條件，一般在 873-1173K 之間。Siemens Westinghouse 公司的管式設計的 100kW SOFC 在荷蘭已運行了遠超過 14000 小時，而 25kW 的 SOFC 在日本也運行了 13194 小時以上。它們計畫在 2004 年建立 250-1000 kW SOFC 的熱電聯供發電站和 300-1000 kW 的 SOFC/透平組合發電系統。

11.1.2 平板式設計 SOFC 系統

管式設計 SOFC 系統由於其輸出功率密度低只能用於定置型的發電裝置。相反，SOFC 的板式設計則可以提供大到約 $2\text{W}/\text{cm}^2$ 的輸出功率密度，完全能夠適用作為可移動的發電裝置，當然用作為定置型發電裝置也是毫無問題的。下圖所示的是具有代表性的板式設計 SOFC 單電池組件。



平板式設計的 SOFC 的電池組件幾乎都是薄的平板。聯接到兩電極上的槽形的雙極板形成了氣體流動的通道，它不僅作為連接電池陽極和陰極的電連接器而且也作為隔離燃料和氧化劑氣體的雙極氣體分離器。電池採用低成本的通用陶瓷加工技術如帶鑄 (tape casting)、塗漿燒結 (slurry sintering)、篩網印刷 (screen printing)、等離子噴灑 (plasma spraying) 等燒結技術。在國際上，不同的國家、單位和組織已發展出若干不同的板式 SOFC 設計，而且採用不同的製造工藝，可分為電解質負載、陰極負載和氧極負載板式 SOFC 設計。在電解質負載的板式 SOFC 電池設計中，電解質的厚度 (有代表性的電解質是鈮穩定化的氧化鋯 YSZ) 一般是 50-150 微米，由於電解質層較厚電池的歐姆電阻高，因此也僅適合於在高溫 1273K 下操作。在電極負載的板式 SOFC，電解質的厚度能夠顯著地降低，一般是 5-20 微米，因此降低了電池的歐姆電阻，因而有可能在較低的溫度如 1073K 下或更低的溫度下操作。通常選擇陽極 (Ni/YSZ 金屬陶瓷) 作為負載

體，因為它有很高的熱導率和電導率、也有很好的機械強度以及與電解質間的化學相互作用最小等優點。韓國的 Kimd 等在實驗室內已燒結成功 1073K 時的功率密度達 $1.8\text{W}/\text{cm}^2$ 的這類陽極負載的板式 SOFC。在西北太平洋國家實驗室 (Pacific Northwest National Laboratory PNNL) 也製備出類似的陽極負載板式 SOFC，他們用帶鑄法製備約 10 微米厚的 YSZ 電解質和約 600 微米厚的 Ni/YSZ 陽極，並在一起於 1623K 溫度下共燒結 1 小時，陰極是 Sr 摻雜的錳酸釧 (LSM)，LSM+YSZ，或者是 Sr 摻雜的鐵酸釧 (LSF)，用篩網印刷法把它們塗漬到電解質層上然後再燒結。這些電池的性能很大程度上取決於陰極和陰極/電解質介面的微結構。PNNL 正在做這方面的優化工作以達到高而穩定的電池性能。對這類電極在 1073K 時能達到的最大的輸出功率密度為 $1\text{W}/\text{cm}^2$ (在 0.7V 時，空氣作氧化劑， $97\%\text{H}_2+3\%\text{H}_2\text{O}$ 作燃料)。

11.2 SOFC 關鍵元件材料

SOFC 是由電解質、陽極、陰極和連結器所組成。因此 SOFC 的材料研究包括這四種材料的研究，但主要是前三類材料的研究和開發。在電解質和電極材料中，電解質材料的研究發展是 SOFC 研究發展中核心。固體氧化物燃料電池是以氧離子傳導電解質概念為依據，在氧離子傳導電解質中氧化物中的氧離子 (O^{2-}) 從空氣電極 (陰極)

一邊移向燃料電極（陽極）一邊並與燃料（H₂、CO 等）反應產生電壓，把化學能轉化為電能。有多種氧化物結構具有氧化物離子導電性，例如螢石結構（fluorite）、鈣鈦礦結構（perovskite）、(pyrochlore) 和（brownmillerite）等，分別介紹如下。

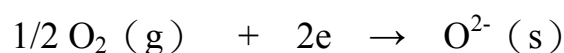
11.2.1 SOFC 電解質材料

電解質材料需要在工作溫度範圍內具有高氧離子導電率（0.1S/cm），低的電子導電率（至少低於離子導電率三個數量級），在還原和氧化氣氛都具有高的穩定性，容易製備成緻密的陶瓷薄膜，且與陽極和陰極材料有好的相容性並具有相近的熱膨脹係數。

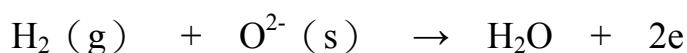
目前已研究和開發並正在研究和開發的固體氧化物燃料電解質一般可分為高溫型和中溫型兩大類。高溫型電解質是指氧化鋯基電解質，它具有螢石結構；中溫型電解質有氧化鈾基、鎳酸釷基和氧化鈷基等幾類。其中氧化鈾基和氧化鈷基電解質也具有螢石結構，而鎳酸釷則具有鈣鈦礦型結構。

11.2.2 電極材料和連接器材料

SOFC 中電解質用以傳導氧離子，而燃料電池的電化學反應則發生於電極中。在 SOFC 的陰極（空氣極）上接受來自外電路的電子而發生如下的反應：



O^{2-} 離子通過固體電解質傳到 SOFC 的陽極並在陽極表面上與燃料發生如下的電化學反應：



產生的電子通過外電路有傳回到陰極上，完成 SOFC 的發電任務。

由此不難看出，電極包括陽極和陰極起著電化學反應的催化劑和傳導電流的雙重作用。為了加快電化學反應需要電極有大的表面積，因此與緻密的電解質不同，電極需要是多孔性的且有很高電催化活性的材料。為了很好的傳導電流，與電解質一樣電極要有高的電導率(低的電阻)，但與電解質僅需要單一的氧離子電導率不同它可以而且需要有高電子電導率或高的混合電導率。高的電催化活性和高的電導率是電極材料的兩個最基本要求，做為電極材料還有其他非常重要的要求，包括在高溫操作條件下的化學和物理穩定性如與電解質材料的最小反應性熱膨脹係數的匹配性和結構組成的穩定性、與電解質和連接器材料的很好的相容性、很好的氣體滲透性、易加工性以及價格便宜等。所使用的固體電解質不同，其相應的電極材料也不相同。前面對電解質材料的討論可以瞭解，固態氧化物電解質基本上可分為高溫型和中溫型兩種。

SOFC 傳統陽極材料為 Ni-YSZ 金屬陶瓷，最近有一新材料係納米

CeO₂ 微球材料，具有很大的比表面積，在 600°C 可提高輸出功率達 600mW/cm²；陰極材料主要是使用 LSM + YSZ 等複合材料，但是隨著工作溫度降低時，其催化活性顯著降低，致使電池性能明顯降低，故有新材料是使用 LSC 或 LSCF 等，可增加氧催化活性；連接器材料要求在氧化和還原氣氛下性質穩定，並具有高電子導電性和高溫機械強度，以及與接觸材料熱膨脹係數匹配且化學相容性，在中溫型 SOFC 可採用合金材料來替代加工困難的氧化物陶瓷作為連接器，主要三種合金為 Cr 基合金、Ni 基合金和 Fe 基不鏽鋼等。

11.3 SOFC 系統的燒結技術

固態氧化物燃料電池電解質、電極和聯結器材料的研究和發展是 SOFC 裝置和技術研究發展的基礎。把性能優異的電解質材料、陰極材料、陽極材料和連接器材料合理連結到一起形成固體氧化物燃料電池堆再發展成為實用的 SOFC 裝置涉及到許多燒結技術問題和精巧的設計問題。不管是為了降低電池的歐姆損失、還是為了減少電解質電極材料的消耗降低成本或是為了提高單位重量和體積的輸出功率密度，都要求減低電解質層的厚度也就是應該把電解質層薄膜化，同樣也應把陰極和陽極薄膜化。因此，SOFC 的燒結技術中最重要的是其電解質陶瓷材料及電極陶瓷材料的薄膜化技術。

用於燒結 SOFC 的任何工藝過程需要確保其過程每一步的環境條

件不會毀壞所用材料包括電解質電極和聯結器材料的全部特性：高的離子導電率（電解質）和總導電率（電極）、高的物理和化學穩定性、高的機械強度、熱膨脹係數的匹配性等；而且燒結過程應該是低成本的和容易放大的。歸納起來，用於製備陶瓷薄膜的方法不外乎如下幾種：塗漬（coating）、沉積（deposition）、噴塗（spraying）、濺射（sputtering）、輥壓（calendering）、帶鑄（casting）、印製（printing）以及它們的組合如噴塗沉積（spray deposition）等。因所使用的動力源、加熱原理和方式等不一樣，每種方法又延伸出多種陶瓷薄膜製備技術，如沈積法有化學氣相沈積（chemical vapor deposition，CVD）、電化學氣相沈積（，electrochemical vapor deposition，EVD）、電暈沈積（electrophoretin deposition，EPD）、氣相電解沈積（vapor-phase electrolytic deposition，VPD）、噴射氣相沈積（jet vapor deposition，JVD）、極化電化學沈積（polarized electrochemical vapor deposition，PEVD）、脈衝鐳射沈積（pulse laser deposition，PLD）和等離子體金屬有機化學氣相沈積（plasma metal organic chemical vapor deposition，PMOCVD）等；又如噴塗可分為熱解噴塗（pyrolysis spraying，PLS）、等離子體噴塗（plasma spraying，PSS）、液體射流等離子體噴塗（liquid-injection plasma spraying，PIPS）、鐳射噴塗（laser spraying，LS）和真空等離子體噴塗（vacumm plasma spraying，VPS）

等。

在實驗室中通常是為了深入研究和綜合評價電解質或/和電極材料的性能而把電解質和電極材料製成單電池，常用的製備方法是把電解質粉體材料用油壓機在高壓下把其壓成片再燒結，然後再在燒結體兩面塗上漿狀電極材料再進一步燒結製成 SOFC 單電池。SOFC 單電池中的電解質層應該是非常緻密的以阻止燃料和氧化劑氣體間的相互滲透，而陰極和陽極層則應該是多孔性以利於燃料和氧化劑氣體滲透到電解質/電極介面進行電化學反應。

肆、結論及建議

- 1、美國透過固態能源轉換聯盟（Solid State Energy Conversion Alliance，SECA）國家計畫將其國家實驗室、工業界及學術界等資源結合起來，廣泛深入研究 SOFC 的材料、電池堆系統，目標訂於 2010 年實現 SOFC 商業化；日本新能源及產業技術發展組織（NEDO）自 1989 年開始研究 SOFC 商業化，目前已進行至第四階段（2004-2007 年）之 SOFC 系統發展，目標在驗證系統之耐用性及可靠度，其研究重點在發展能同時提供電與熱，應用在住家型之 SOFC 系統、及發展 SOFC 在交通運輸工具之應用。目前日本政府正在進行小型 SOFC 定置型系統開發計畫，預計 2007 年完成大規模測試；歐盟 Real-SOFC 計畫啟動低溫 SOFC 研究專案計畫，將工作溫度降到 600°C 以下，為一新的發展方向。
- 2、現今世界先進國家仍大力推動 SOFC 商業化之發展，其核心技術之研究開發包括(1)單元電池材料研製及製程開發，(2)電池組組裝技術與測試，(3)系統整合構裝與測試，(4)模擬評估與設計最佳化，及(5)電力調控系統。
- 3、由於 SOFC 產業未來具有龐大之市場商機，及符合國家能源安全及環境友善之政策，因此我國亦可參考美國的 SECA 計畫、歐盟的 Real-SOFC 計畫、及日本的 NEDO 計畫，由政府主導整合研究

機構、學術界、產業界之研發能量，積極推動 SOFC 產品商業化，爭取國際市場。

- 4、經濟部能源局之政策指示與任務分工，積極開發氫能與再生能源相關關鍵元件之材料技術，其中包含固態氧化物燃料電池項目，本所應積極擬訂固態氧化物燃料電池關鍵材料技術之技術地圖，第一階段 SOFC 陶瓷電解質研製、SOFC 電極研製、SOFC 測試平台建立、精密儀器建立、第二階段 SOFC 電極組研製、SOFC 單電池測試、耐久性量測、第三階段燃料電池組整合、先導型產品開發、氫能/再生能源/SOFC 整合。