

**INER-F-0115**

**INER-F-0115**

**出國報告（出國類別：實習）**

**赴德國 Juelich 國家實驗室  
觀摩研習報告**

服務機關：行政院原子能委員會核能研究所

姓名職稱：許智淵 副工程師

派赴國家：德國

出國期間：95年10月3日至95年12月17日

報告日期：96年2月14日

## 摘要

本次奉派赴德國Forschungszentrum Jülich國家實驗室之能源發展研究中心(Institut für Energieforschung, IEF)，參與直接甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)研究實習。德國Forschungszentrum Jülich為歐洲DMFC研究發展重鎮，該中心在kW級DMFC之發展經驗已相當成熟，具備10kW電池組測試平台並開發應用於1.5kW之DMFC電動代步車。此次公差與其相關研究單位進行技術交流及測試研究。實地實習訓練並了解其在低溫燃料電池的各項研究發展。實習期間參與研究項目包括：DMFC電化學及半電池(Half Cell Test)量測分析、堆疊電池組設計組裝、堆疊電池組效能功率量測分析、系統整合觀摩研習及高溫質子交換膜燃料電池等研究，並蒐集其測試平台架構及相關技術資料，有助於本所在DMFC研究規劃及相關領域技術開發。並就未來學術交流之議題進行研討，對於本所後續拓展DMFC研發工作，建立DMFC國際合作關係，有相當裨益。

# 目 次

(頁碼)

摘要.....	i
一、目的.....	1
二、過程.....	2
三、心得.....	3
四、建議事項.....	8

# 圖目錄

頁碼

圖 1.	Forschungszentrum Jülich 研發中心相關資訊。 .....	9
圖 2.	Forschungszentrum Jülich 之燃料電池的發展。 .....	9
圖 3.	Forschungszentrum Jülich 之 MEA 製程。 .....	10
圖 4.	Forschungszentrum Jülich 之 MEA Development 量產製造技術(1).....	10
圖 5.	Forschungszentrum Jülich 之 MEA Development 量產製造技術(2).....	11
圖 6.	Forschungszentrum Jülich 之 Stack Development 量產製造技術(1).....	11
圖 7.	Forschungszentrum Jülich 之 Stack Development 量產製造技術(2).....	12
圖 8.	Forschungszentrum Jülich 之 Stack Development 量產製造技術(3) .....	12
圖 9.	Forschungszentrum Jülich 之 Stack Development 量產製造技術(4) .....	13
圖 10.	Forschungszentrum Jülich 之堆疊電池組測試平台(1) .....	13
圖 11.	Forschungszentrum Jülich 之堆疊電池組測試平台(2) .....	14
圖 12.	Forschungszentrum Jülich 之堆疊電池組測試平台(3) .....	14
圖 13.	Forschungszentrum Jülich 之堆疊電池組效能測試- 不同溫度測試 .....	15
圖 14.	Forschungszentrum Jülich 之堆疊電池組效能	

測試-不同濃度測試 .....	15
圖 15. Forschungszentrum Jülich 之堆疊電池組效能測試- 連續運轉效能測試 .....	16
圖 16. Forschungszentrum Jülich 之電化學量測分析- 全電池量測 .....	16
圖 17. Forschungszentrum Jülich 之電化學量測分析- 全電池量測 .....	17
圖 18. Forschungszentrum Jülich 之電化學量測分析- 半電池量測(1) .....	17
圖 19. Forschungszentrum Jülich 之電化學量測分析- 半電池量測(2) .....	18
圖 20. Forschungszentrum Jülich 之電化學量測分析- 半電池量測(3) .....	18
圖 21. Forschungszentrum Jülich 之高溫質子交換膜 燃料電池研究發展(1) .....	19
圖 22. Forschungszentrum Jülich 之高溫質子交換膜 燃料電池研究發展(2) .....	19
圖 23. Forschungszentrum Jülich 之 DMFC 堆疊電池組發展 .....	20
圖 24. Forschungszentrum Jülich 之 DMFC 研發現況(1)...	20
圖 25. Forschungszentrum Jülich 之 DMFC 研發現況(2)...	21
圖 26. Forschungszentrum Jülich 之 DMFC 研發現況(3)...	21

## 一、目的

本所目前積極進行燃料電池相關各項計畫與技術研發，亟思瞭解歐美先進國家技術開發現況與未來研究發展規劃。此次公差德國 Forschungszentrum Jülich 國家實驗室能源發展研究中心(Institut für Energieforschung, IEF)，參與直接甲醇燃料電池(Direct Methanol Fuel Cell, DMFC)研究實習，除了解德國研究單位在低溫燃料電池 kW 級 DMFC 電池組研究發展現況外，並蒐集各項測試平台架構及相關研發技術資料。實習過程中參與研究項目包括：DMFC 電化學及半電池(Half Cell Test)量測分析、堆疊電池組設計組裝、堆疊電池組效能功率量測分析、系統整合觀摩研習及高溫質子交換膜燃料電池等研究。實習之心得配合本所小型 DMFC 燃料電池研究基礎，有助於本所未來在燃料電池研究之規劃及相關領域技術之發展。

## 二、過程

本所於 2006 年 6 月 27~28 日舉行台灣小型燃料電池研討會，曾邀請德國 Forschungszentrum Jülich 國家實驗室能源發展研究中心 DMFC 計畫主持人 Mr. Jürgen Mergel 與會，其對於本所低溫燃料電池之研發成果及結合產業界之卓越成效表示肯定，並請本所提案派員至該中心參與研究工作，以強化雙方建立之合作管道。

經安排聯繫後，赴德國 Forschungszentrum Jülich 國家實驗室觀摩研習，自 95 年 10 月 03 日至 95 年 12 月 17 日止，共 76 日。

10 月 3 日 ~ 10 月 4 日：

去程，台北出發，經德國法蘭克福機場轉往科隆中央車站，抵達位於北萊茵-威斯特法倫邦(Nordrhein-Westfalen)的 Jülich，在 Mr. Christian Trappmann 協助下於 Forschungszentrum Jülich 辦理報到。

10 月 5 日 ~ 12 月 15 日：

在低溫燃料電池研發計畫負責人 Mr. Jürgen Mergel 安排下參與研究實習，公差期間安排實習指導之專家及所進行研究之工作如下：

指導專家	研究工作項目
Dr. Martin Müller	堆疊電池組效能測試分析及結果討論
Mr. Ayan	堆疊電池組組裝及燃料電池測試平台指導
Dr. Klaus 及 Dr. Stähler	MEA 電化學量測分析、半電池(Half Cell Test) 測試指導
Dr. Christoph Wannek	高溫質子交換膜燃料電池(HT-PEFC)之研發指導
Ms Sina Chirayath	高溫質子交換膜燃料電池之 PBI 製程及量測指導

12 月 16 日 ~ 12 月 17 日：

回程，從 Jülich 經科隆中央車站，德國法蘭克福機場回桃園國際機場。

### 三、心得

本所目前積極進行燃料電池相關各項計畫與技術研發，亟思瞭解先進國家技術開發現況與未來研究發展規劃，此次公差主要參與德國 Forschungszentrum Juelich 國家實驗室能源發展研究中心(IEF)之 kW 級 DMFC 電池組發展研究，研習項目包括：DMFC 電化學及半電池(Half Cell Test)量測分析、堆疊電池組設計組裝、堆疊電池組效能功率量測分析、系統整合觀摩研習及高溫質子交換膜燃料電池等研究。經由此行之實習訓練，除蒐集了解德國 Forschungszentrum Jülich 國家實驗室 kW 級 DMFC 電池組發展研究現況，配合本所小型 DMFC 燃料電池關鍵零組件開發及系統整合相關技術研究基礎，有助於本所未來在燃料電池研究之規劃及相關領域技術之發展。

Forschungszentrum Jülich 為 Helmholtz Association 15 個研究中心之一，而 Helmholtz Association 是目前德國最大的科學研究團體(scientific research community)。該中心成立於 1956 年 12 月，佔地約 2.2 平方公里，年預算約為 3.6 億歐元，職員超過 4 千餘人，科學家約有 1300 人(含 PhD Students and Scholars)。每年固定有來自全世界 50 多國 700 人次以上的科學家來此進行研發資訊交流，為歐洲研究重鎮之一(見圖 1)。

Forschungszentrum Jülich 原先的研發重點為核能領域的相關研究，隨著核能應用之勢微，在核能方面的研究漸漸僅著重於核廢料處置技術的研發推廣，近幾年並已轉型調整研發方向為材料、能源、資訊、生命科學及環境等五大領域，Fuel Cells R&D 為能源領域中的一部分研究，燃料電池的發展又分成 High-temperature fuel cell (SOFC)，Low-temperature fuel cell(DMFC/PEMFC)及 Fuel gas production systems 等三項研究項目，DMFC 是 Low-temperature fuel cell 中之一研究項目(見圖 2)，目前從事其研究之員工約為 28 人。

茲簡述此次參加實習研究之心得重點如下：

#### 1. 膜電極組(Membrane Electrode Assembly, MEA)製程：

膜電極組製程為將 GDE(Gas Diffusion Electrode)熱壓於質子交換膜(Proton Exchange Membrane, PEM)，其流程為(見圖 3)：將備製

之觸媒劑漿料，利用自動化塗佈製作平台(與 Coatema Coating Machinery GmbH合作開發)(見圖 4)，均勻塗佈於含PTFE之氣體擴散層碳布(Gas Diffusion Layer, GDL)，續將GDE熱壓於Membrane，完成MEA製作。自動化膜電極組製作平台的開發(見圖 5)，除發展展示量產及低成本製造技術外，並可提升自製MEA製程品質。經由實際量測分析，評估其效能功率，其品質相當一致。

## 2. 電池組組裝及流道設計：

電極結構採用柔性石墨材料(見圖 6-7)，具易加工且重量輕等優點，同樣具量產及低成本製造技術。流道設計於Anode側為單蛇型式(見圖 8)，由於反應區域達 $320 \text{ cm}^2$ ，反應面積較大，故燃料進出口採雙進雙出設計型式，並規劃為4個燃料供應區域，使甲醇水溶液燃料可平均分配於反應區域內。Cathode側為平行流道設計(見圖 9)，其優點為可使反應區之生成水在不需較大之空氣壓力下，搭配Air Blower及風扇等零組件即可輕易移除。不僅可減低Air Pump在系統BOP(Balance of Plate)中較高的電能消耗，並能免除噪音等問題，此設計可以作為本所DMFC研發小組未來在提升電池組效能功率時流道設計之參考。

## 3. 燃料電池測試平台：

在Dr. Martin Müller指導下，實際參與DMFC之測試實驗(見圖 10-12)，建立測試操作流程，強調進行量測時保護堆疊電池組之步驟。堆疊電池組測試平台配備10kW電子負載器，具有可即時監控燃料及空氣之流量、溫度及壓力等功能，甲醇水溶液燃料濃度係利用比重計即時精確監控，配合甲醇水溶液濃度、溫度及密度數據資料參考表，設定甲醇水溶液量測密度。此外，Dr. Mueller強調，由於測試溫度影響甲醇水溶液之濃度，故在實驗平台參數設定準備期間，需等待操作溫度至設定值，方可開啓純甲醇Dosing Pump，並等待其監測螢幕之密度值至Steady State，以精準控制量測實驗時甲醇水溶液之濃度。

#### 4. 堆疊電池組效能功率量測分析：

在完成燃料電池測試平台之操作訓練後，即進行3-Cell堆疊電池組效能功率量測分析，測試結果如表一所示，操作溫度70 °C時，最大輸出功率60W，功率密度為62 mW/cm<sup>2</sup>。除實驗量測外，並計算評估所需燃料及氣體之化學劑量比 (Stoichiometric  $\lambda$ )，以驗證理論及實際值之差異性。

表一. 3-Cell DMFC Stack 效能功率量測

Single Cell Stack active area	320 cm <sup>2</sup>
Operation Temp.	70 °C
V_cathode ( $\lambda$ )	10 L/min ( $\lambda=3$ )
m_anode ( $\lambda$ )	15 kg/hr ( $\lambda=6$ )
Methanol conc.	0.5 M
Methanol_density	977.5 kg/cm <sup>3</sup>
I_step	5A / 3min
Test Range	0-60A
Power Output	60 W
Power Density	62 mW/cm <sup>2</sup>

#### 5. 堆疊電池組長效性測試及能源轉換效率比量測分析：

在溫度及濃度效能測試極化曲線分析後(見圖 13-14)，進行約240hr電池組連續運轉效能測試，評估MEA之Durability(見圖 15)。依據暫態分析之結果，設定操作溫度70°C，甲醇水溶液流量設定為m\_Anode=15 kg/hr及空氣供應為 V\_Cathode=10 L/min，當設定定電流30A時，運轉期間Stack輸出電壓值由1.3V降至1.2V，且無需暫停作Purge以排除積水之步驟。於實驗結果後，計算Fuel Efficiency及Methanol Crossover，可更詳盡了解電池組之優劣特性，由此測試可知電池組之膜電極組、電池組組裝及Low Pressure流道設計等皆相

當良好。

#### 6. DMFC 電化學量測分析：

由Dr. Klaus及Dr. Stähler負責相關研究(見圖 16-20)，除詳盡解說電化學量測分析原理，並就半電池(Half Cell Test)做實驗量測，利用H<sub>2</sub>做為燃料之曲線數據作為參考依據，針對Anode及Cathode之半電池測試結果與參考值做比較討論，藉以分析MEA之優劣及特性。除全電池之極化曲線分析量測，亦可在Cathode側填充N<sub>2</sub>做類似半電池量測(Quasi-Half Cell Test)，其亦能增進對膜電極組之效能進行瞭解分析。

#### 7. 高溫質子交換膜燃料電池(HT-PEFC)研究發展：

Dr. Christoph Wannek負責高溫質子交換膜燃料電池(HT-PEFC)之研發(見圖 21-22)，採用PBI (Polybenzimidazole)作為質子交換膜材料，而非傳統PEM型式，其優點為操作於高溫下，可解決傳統燃料電池之CO毒化問題。由於使用H<sub>2</sub>做為燃料，其輸出功率可為DMFC之4-10倍，如考慮燃料儲存之問題，可搭配重組器(Reformer)，設計發展RMFC(Reformer Methanol Fuel Cell)燃料電池。此研究為Forschungszentrum Jülich未來之重點研究方向之一。

#### 8. 實驗室安全方面：

在實驗室內一律穿著實驗衣。由於純甲醇溶液為有毒物質，添加甲醇時，則需穿戴實驗手套及護目鏡。所有氣瓶皆置於室外，管線皆配置整齊，並附安全閥及開關，可即時監測氣體是否洩漏。

#### 9. 表二為德國 Forschungszentrum Jülich 國家實驗室 DMFC 堆疊電池組發展近程表(見圖 23)。輸出功率由初始 2W 發展至 kW 級之堆疊電池組，Stack 單位體積功率密度由 1 W/L 提升至 100 W/L。目前本所研發之堆疊電池組亦有 100 W/L 體積功率密度之研發水準。

表二. 德國 Forschungszentrum Jülich 國家實驗室 DMFC 堆疊電池組  
發展近程表

Year	Power Output	Power Density of Stack	Specific Power of Stack
1999	2W	1 W/L	0.24 W/Kg
2000	50W	7 W/L	4.5 W/Kg
2001	500W	120 W/L	38.5 W/Kg
2002	650W	138 W/L	59 W/Kg
2002	500W-2.5 kW (Model)	112 W/L	37 W/Kg
2004	150W-1.4kW	100 W/L	110 W/Kg

10. Forschungszentrum Jülich 目前研發現況：

設計反應面積為 320cm<sup>2</sup>，單電池長效性測試已達5000h，堆疊電池組10-cell Stack輸出功率為300W，可連續運轉1000h。應用於電動代步車之堆疊電池組為100-cell Stack，經系統整合及長期運轉500h測試，其運轉輸出功率為1.8kW，最大輸出功率可達3kW。並由展示圖表得知，未來將規劃應用於廠務堆高搬運機(Fork Lift Truck)之電源供應系統(見圖24-26)。

## 四、建議事項

1. 已充分掌握 Forschungszentrum Jülich DMFC Stack 流道設計及製程組裝之優點，進行 Low Pressure Drop 流道設計，對於本所燃料電池研發小組，在堆疊電池組及系統整合改良，將有相當的助益。
2. 在燃料電池應用方面，現今本所已發展 20/25W 可攜式 DMFC 電源供應系統，應用於 Notebook PC 使用，除持續提升其輸出功率外，可考慮應用於運輸機具，如電動代步車等。
3. 高溫質子交換膜燃料電池(HT-PEFC)之研究為新穎燃料電池之研發趨勢，可作為本所研發小組未來研究方向之參考，如能進行研究發展，未來可與國際研究團隊做學術交流或技術合作等。
4. 在實驗室安全方面，建議比照參考其規範，如穿戴防護衣、防護手套及護目鏡等強調工作人員安全防護。實驗室硬體設備，除注意環境通風等，如能規劃將所有氣瓶放置於室外，並規劃管線配置及安全裝置等，將可提升實驗人員及實驗室安全，更合乎國際級研究水準。



### Juelich Research Center at a Glance

<b>Founded:</b> Dec. 1956	<b>Area:</b> 2.2 km <sup>2</sup>	<b>Legal Form:</b> PLC
<b>Operator:</b> • Federal Republic of Germany (90 %) • State of North Rhine-Westphalia (10 %)		
<b>Budget:</b> 360 Mio. EURO in 2005		
<b>Bodies:</b> • Partners Meeting • Supervisory Board • Board of Directors • Scientific and Technical Council		<b>Scientific/Technical Structure:</b> • 12 Departments (36 Institutes) • 6 Central Departments • 2 Programme Groups • 2 Project Management Groups
<b>Staff:</b> 4200 Including: • 1200 Scientists • 400 Postgraduate Students • 150 Undergraduate Students • 370 Trainees  Visiting Scientists: more than 700 annually from more than 50 countries		

Institute for Energy Process Engineering (I WV3)

圖 1. Forschungszentrum Jülich研發中心相關資訊。

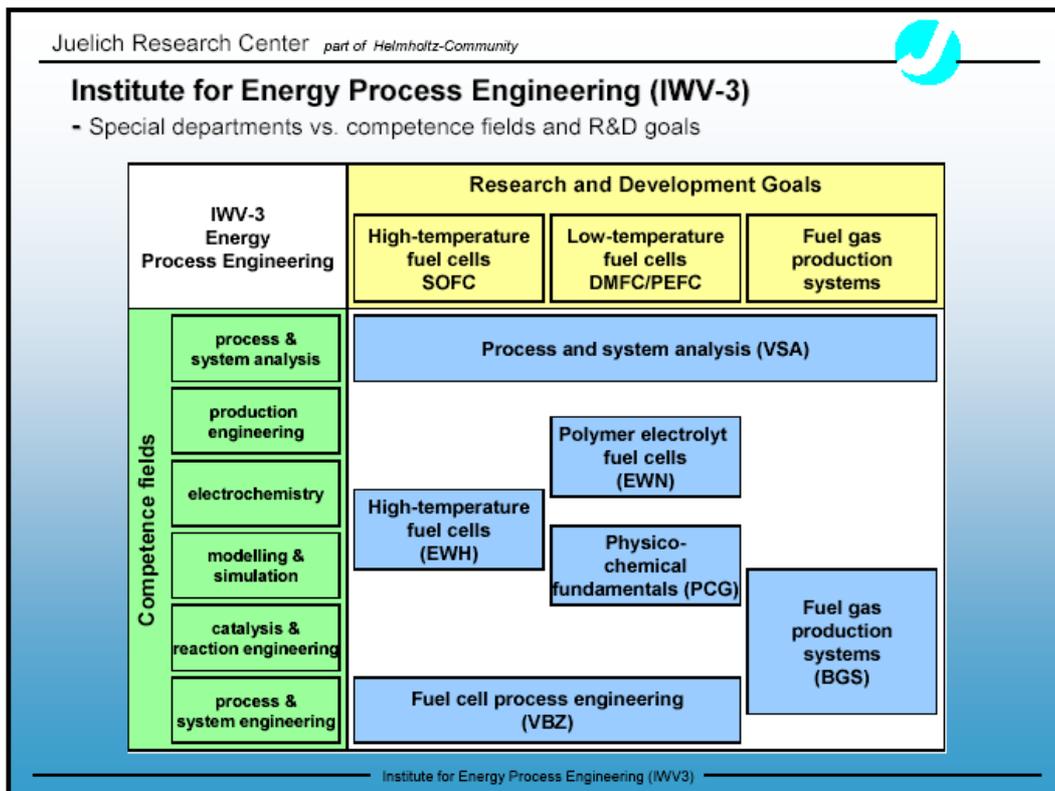


圖 2. Forschungszentrum Jülich之燃料電池的發展。

Production steps

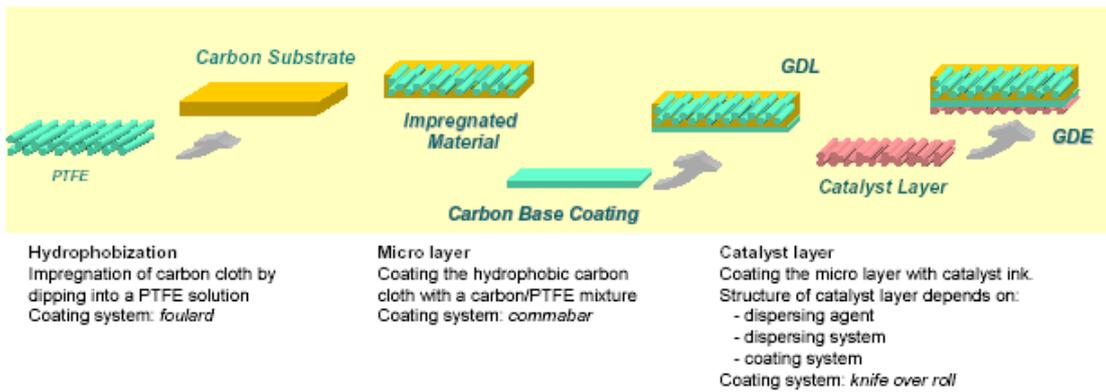
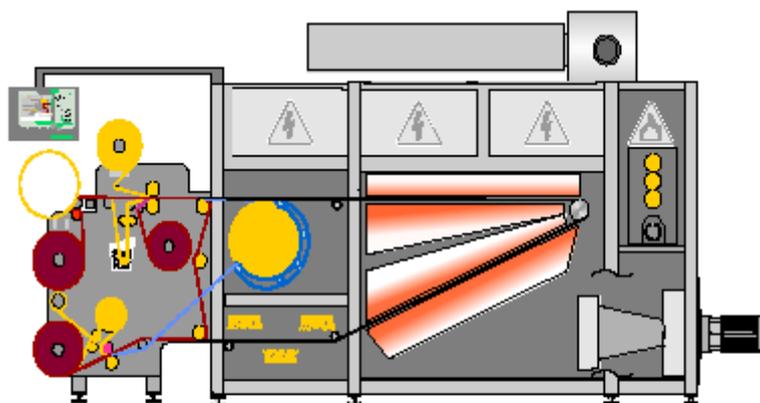


圖3. Forschungszentrum Jülich之MEA製程。



Coating machinery

Several coating systems knife over roll, commabar, foulard, screen printing • drying oven • several IR heaters • belt laminating • press station • laminating/ delaminating station  
 • coating speed: 0.1 – 15 m/min • startup in 2001

圖4. Forschungszentrum Jülich之MEA Development量產製造技術(1)



### Challenges in MEA manufacture

- Continuous machine fabrication will cut manufacture costs and improve quality

### Continuous coating techniques

- Knife over roll
- Slot coating
- Screen-printing



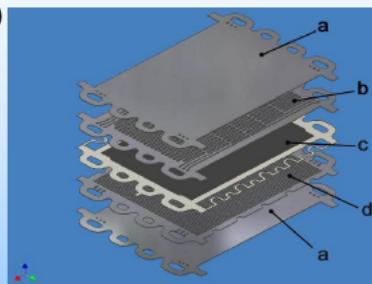
Institute for Energy Process Engineering (IWV3)

圖5. Forschungszentrum Jülich之MEA Development量產製造技術(2)



### Components of a DMFC stack - Development and demonstration of high volume/low-cost manufacturing technique

- Bipolar plate (plain graphite)
- Flow field anode (meander structure)
- Membrane Electrode Assembly (MEA)
- Flow field cathode (parallel channels)



Automatic assembling of the MEA →



圖6. Forschungszentrum Jülich之Stack Development量產製造技術(1)

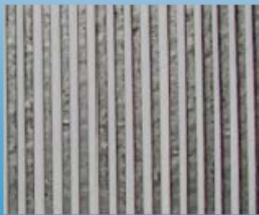


## New graphite layers design for DMFCs to reduce size and weight

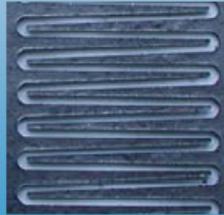
- ©SIGRAFLEX: Expanded Graphite foil exhibit advantageous properties:

physical property	unit	F...10Z		F...18Z	
		in-plane	through-plane	in-plane	through-plane
density	g/cc	1.0		1.8	
thermal conductivity	W/(mK)	155	4.8	295	3.5
spec. electr. resistance	$10^{-4}$ Ohm·m	9	650	6	-
permeability coefficient for air (DIN 51925)	cm <sup>2</sup> /s	-	$< 2 \cdot 10^{-5}$	-	$6 \cdot 10^{-4}$
tensile strength	N/mm <sup>2</sup>	$\geq 4$	-	18	-
elongation at break	%	$\geq 1$		$\geq 1$	

Source: SGL Carbon Group



Flow field cathode



Flow field anode



Assembly 1.3 kW DMFC Stack

Institute for Energy Process Engineering (IWW3)

圖7. Forschungszentrum Jülich之Stack Development量產製造技術(2)



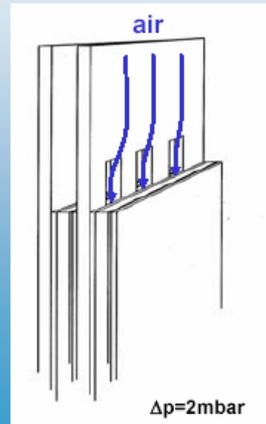
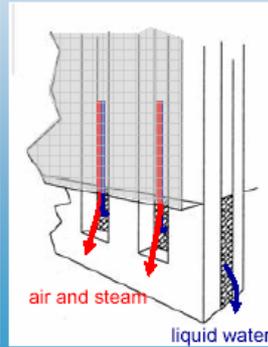
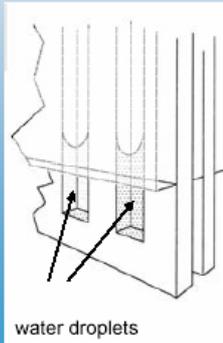
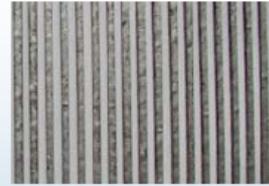
圖8. Forschungszentrum Jülich之Stack Development量產製造技術(3)



### Optimization of meander flow fields

- Pressure drop and flow in meander flow channels

- ◆ low pressure drop in cathodic flow channels leads to higher system efficiency
- ◆ in large manifolds the flow distribution is homogeneous
- ◆ removal of droplets by integrated wick structure
- ◆ low stoichiometric flow rates are possible



Institute for Energy Process Engineering (IW3)

圖9. Forschungszentrum Jülich之Stack Development量產製造技術(4)



圖10. Forschungszentrum Jülich之堆疊電池組測試平台(1)

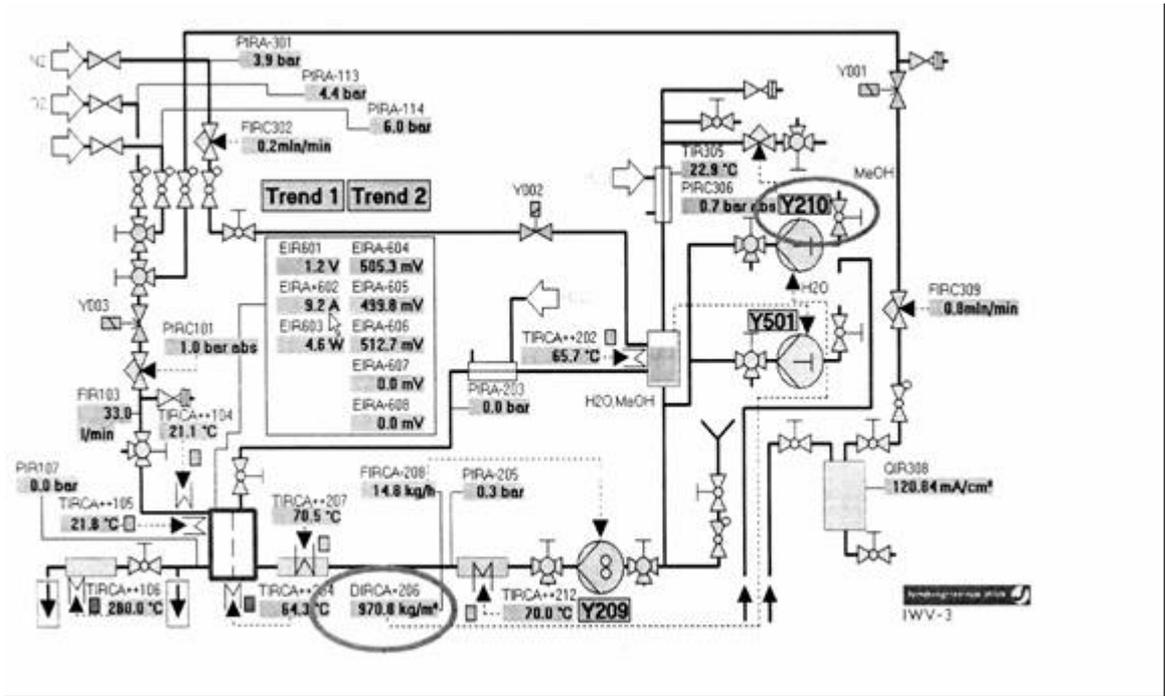


圖 11. Forschungszentrum Jülich之堆疊電池組測試平台(2)

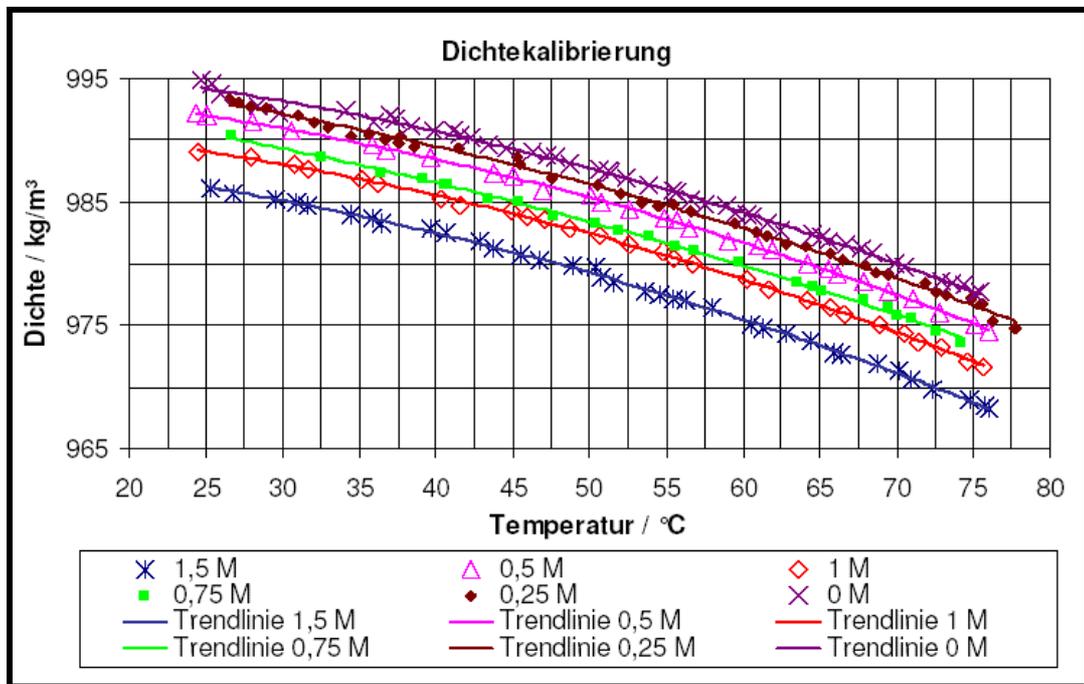


圖 12. Forschungszentrum Jülich之堆疊電池組測試平台(3)

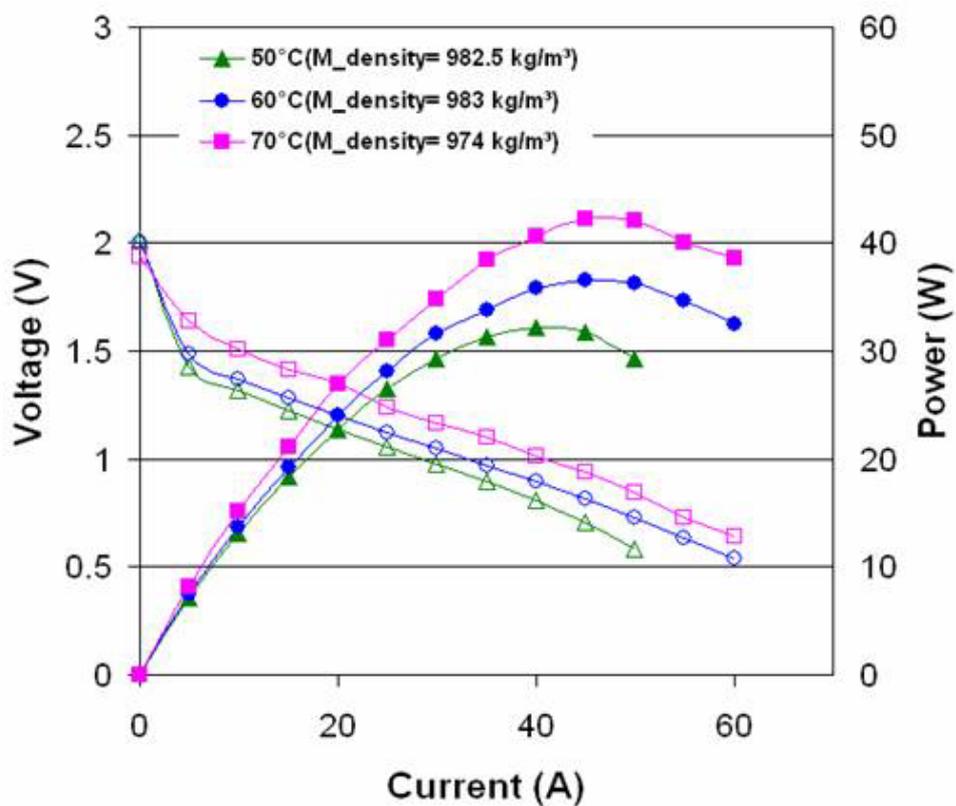


圖 13. Forschungszentrum Jülich之堆疊電池組效能測試-不同溫度測試

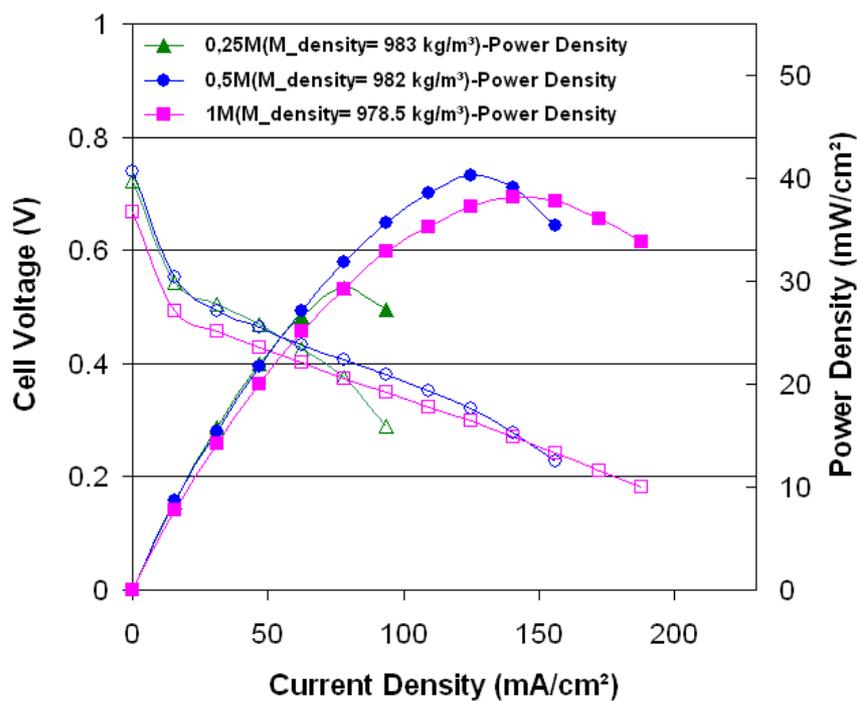


圖 14. Forschungszentrum Jülich之堆疊電池組效能測試-不同濃度測試

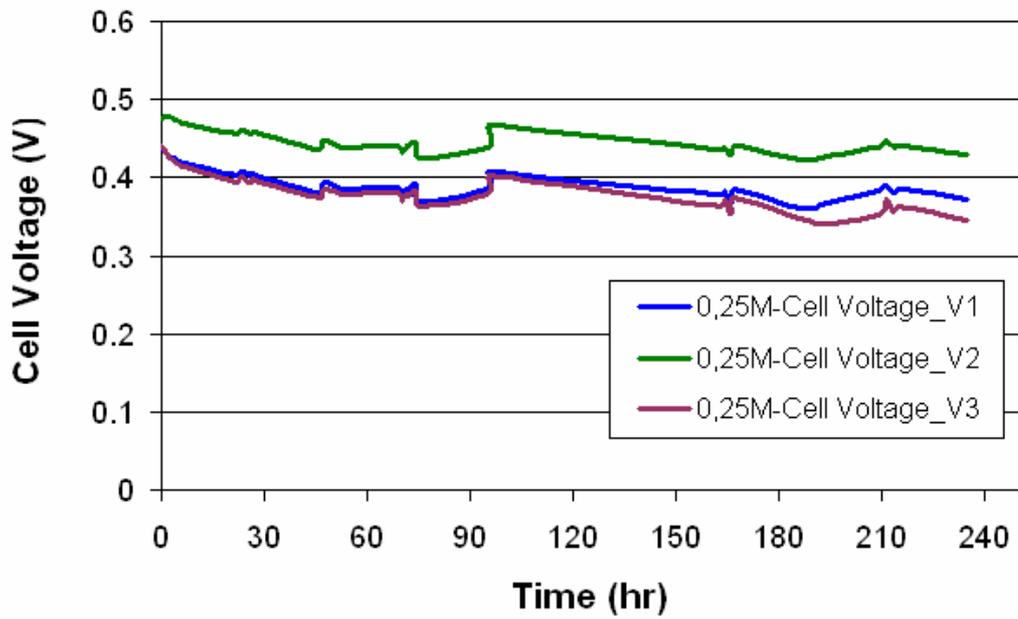


圖 15. Forschungszentrum Jülich之堆疊電池組效能測試-連續運轉效能測試

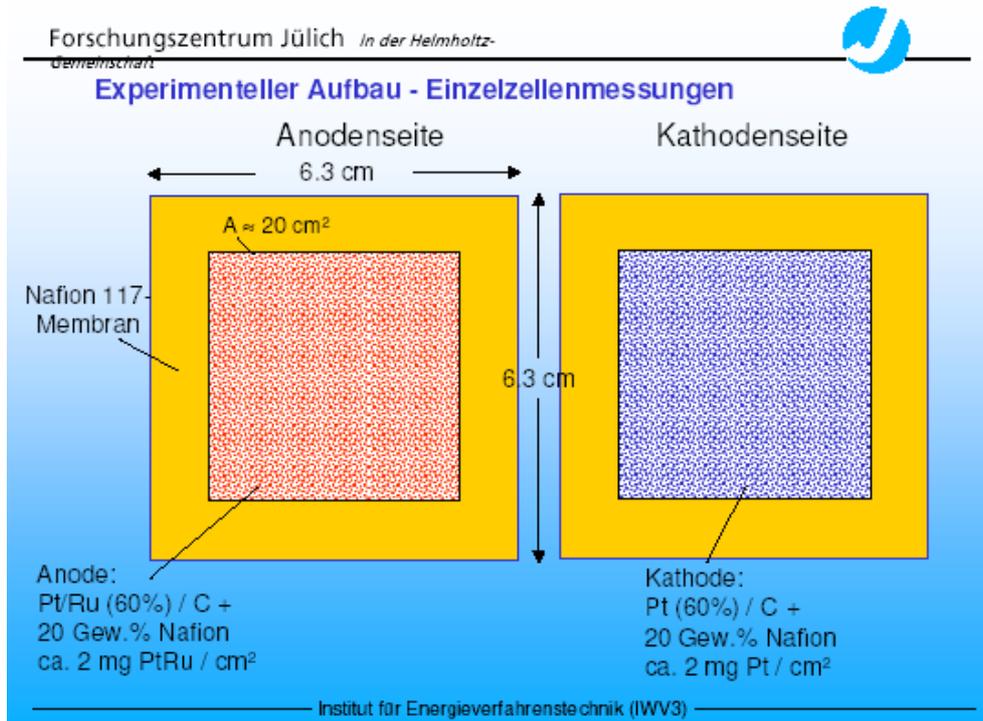


圖 16. Forschungszentrum Jülich之電化學量測分析-全電池量測(1)



### Experimenteller Aufbau - Einzelzellenmessungen

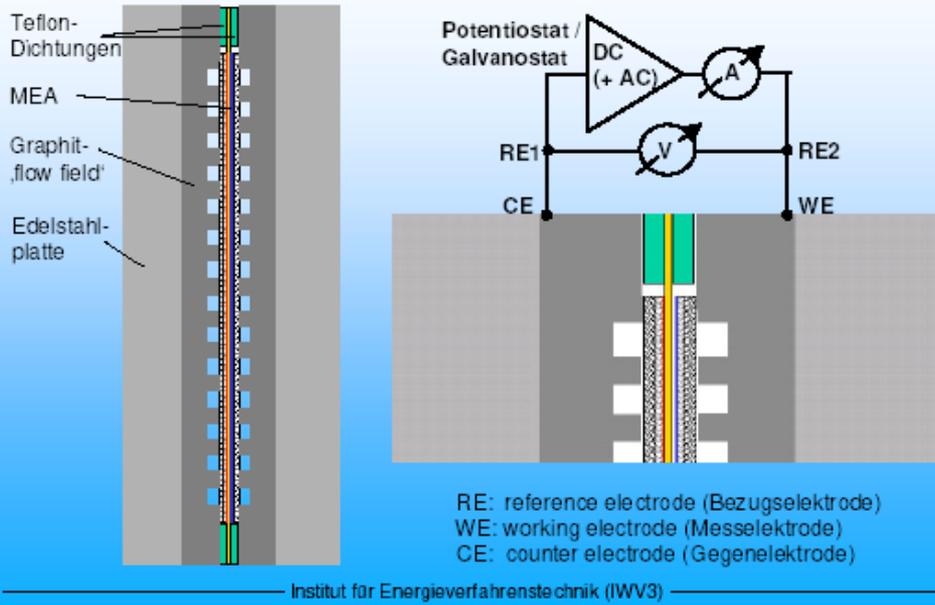


圖 17. Forschungszentrum Jülich之電化學量測分析-全電池量測(2)



### Experimenteller Aufbau - Halbzellenmessungen

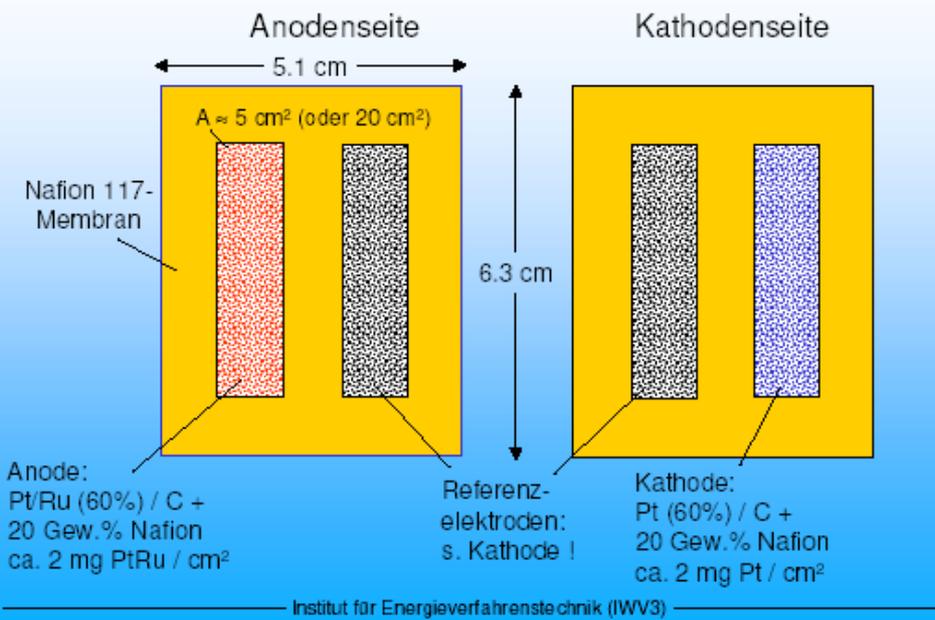


圖 18. Forschungszentrum Jülich之電化學量測分析-半電池量測(1)

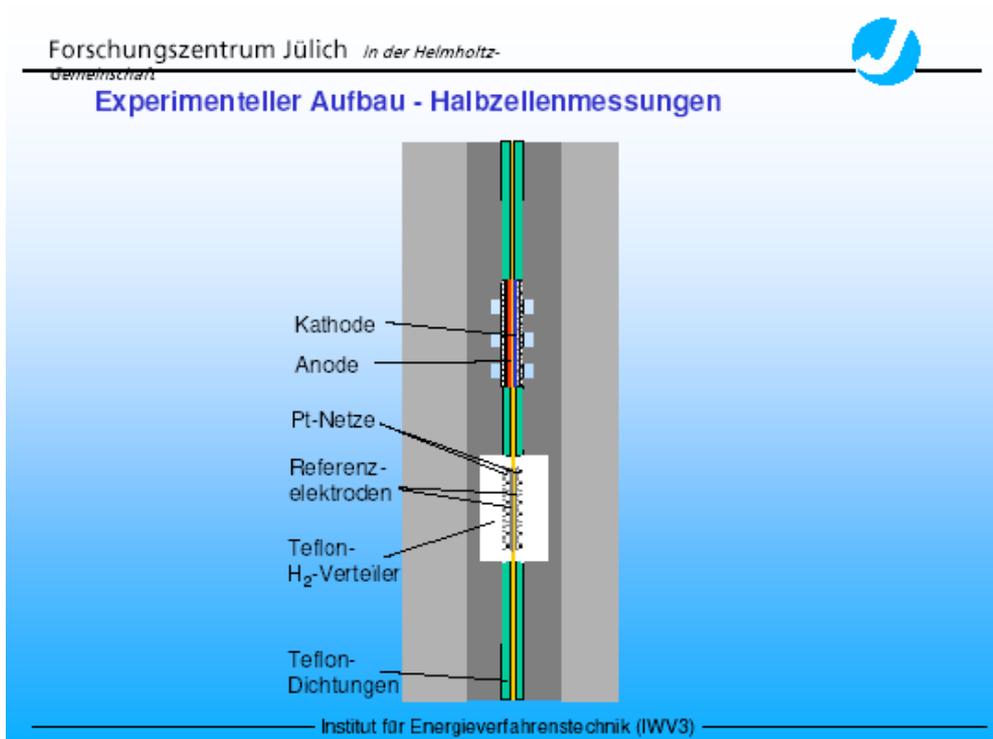


圖 19. Forschungszentrum Jülich之電化學量測分析-半電池量測(2)

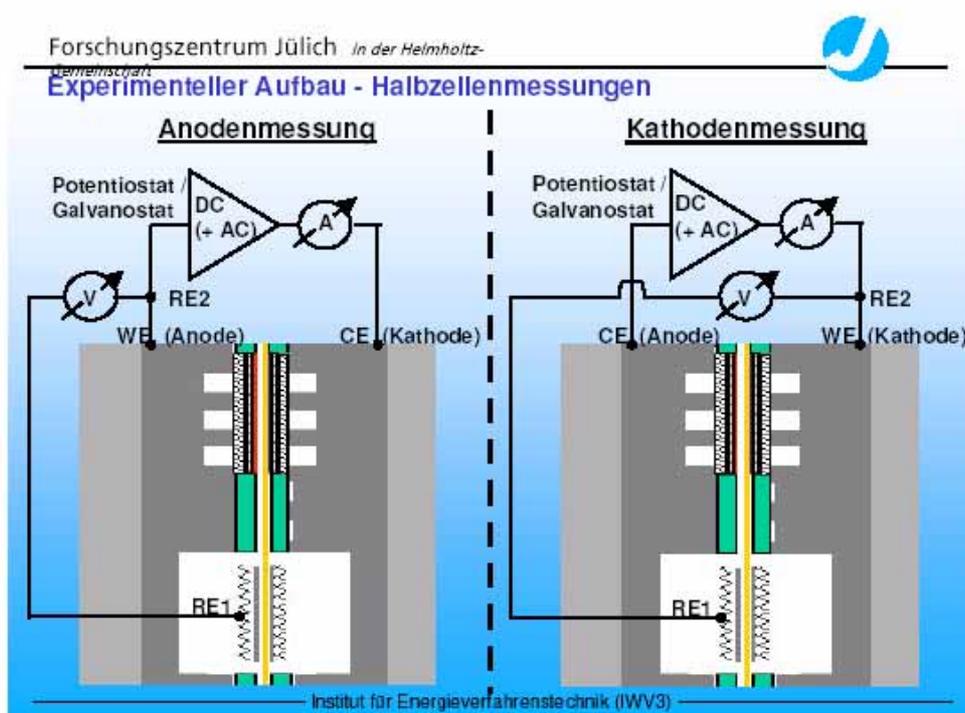
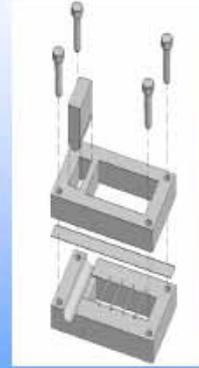
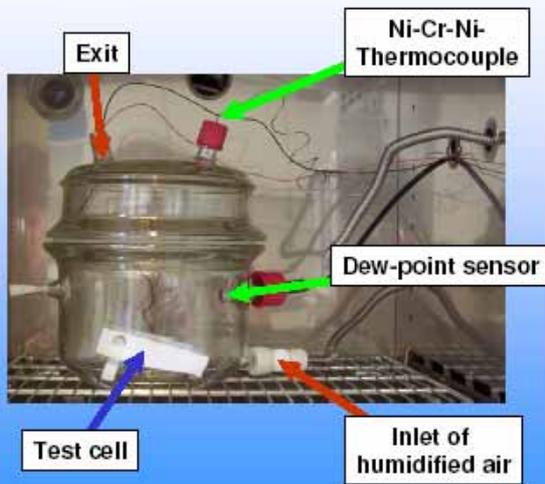


圖 20. Forschungszentrum Jülich之電化學量測分析-半電池量測(3)



### Determination of membrane conductivity up to 180 °C (FZJ)



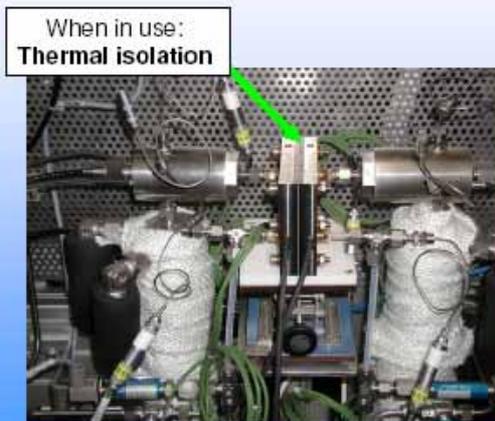
- 4-point method
- Membran threaded
- Anvil ensures contact with electrodes

Institut für Energieverfahrenstechnik (IVV3)

圖21. Forschungszentrum Jülich之高溫質子交換膜燃料電池研究發展(1)



### Fuel cell test facility (T ≤ 180 °C; FZJ)



- Automated operation and data logging
- Active area of the MEA up to 100cm<sup>2</sup>
- Humidification of anodic and cathodic gas streams
- Determination of dew points at the cell inlet
- Determination of the water-balance
- Graphite flow fields

Institut für Energieverfahrenstechnik (IVV3)

圖22. Forschungszentrum Jülich之高溫質子交換膜燃料電池研究發展(2)

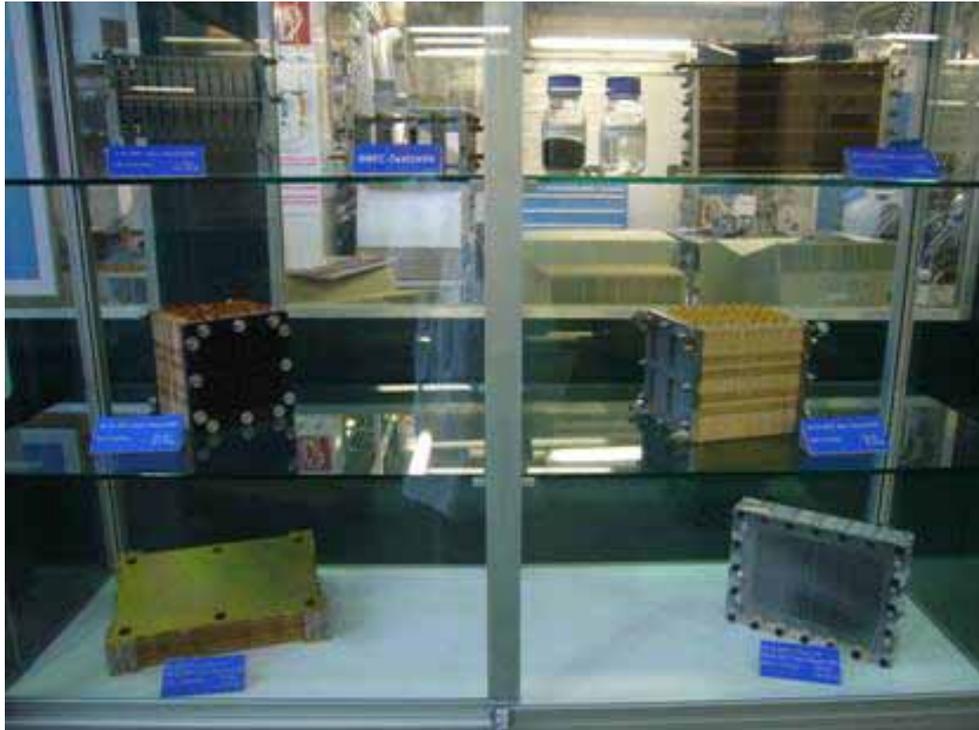


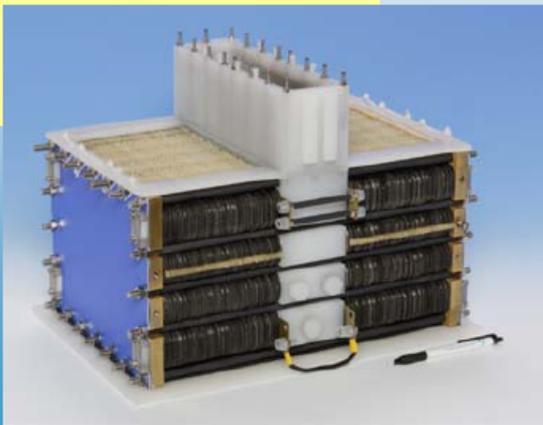
圖23. Forschungszentrum Jülich之DMFC堆疊電池組發展

Juelich Research Center *part of Helmholtz-Community* 

---

**New Stack design / 'low-cost' materials**  
- DMFC Stack 2006

Number of cells:	100
Single cell area:	320 cm <sup>2</sup>
Temperature:	35 - 70°C
Power:	<b>2,0 kW @ 0,45 V single cell voltage</b>
MEA (Precious metal loading):	5 mg/cm <sup>2</sup> /cell
Air stoichiometric flow $\lambda$ :	4
Pressure loss:	<b>2 mbar</b>
Spec. power density:	<b>155 W/kg</b>



Institute for Energy Process Engineering (IWW3)

圖24. Forschungszentrum Jülich之DMFC研發現況(1)



### New Stack design / 'low-cost' materials

- DMFC Stack 2005

Number of cells:	100
Single cell area:	310 cm <sup>2</sup>
Temperature:	35 - 70 °C
Power:	1,3 kW @ 0,45 V single cell voltage
MEA (Precious metal loading):	4 mg/cm <sup>2</sup> /cell
Air stoichiometric flow $\lambda$ :	4 - 8
Pressure loss:	2 mbar
Spec. power density:	90 W/kg

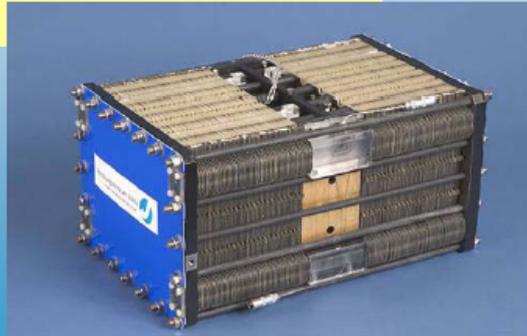


圖25. Forschungszentrum Jülich之DMFC研發現況(2)



### Simplify system design and engineering

- Possible applications for DMFCs

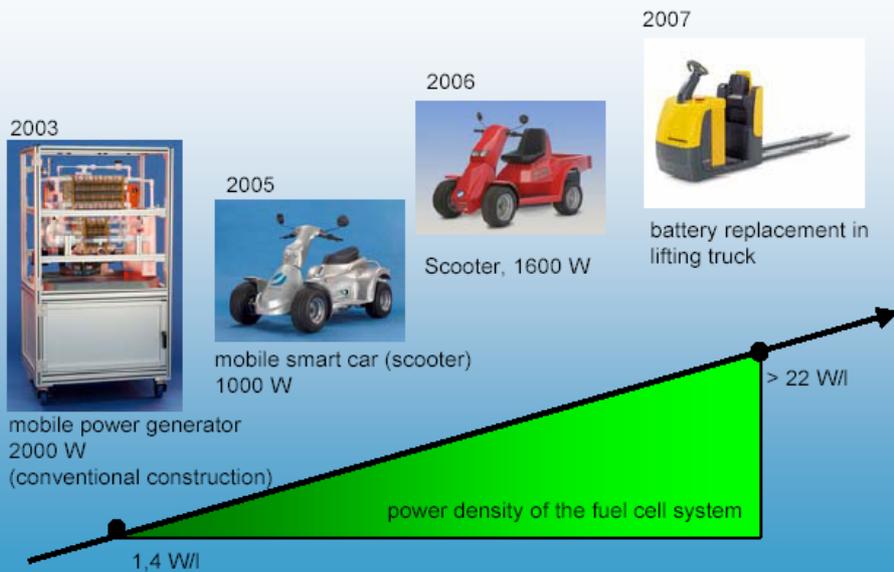


圖26. Forschungszentrum Jülich之DMFC研發現況(3)