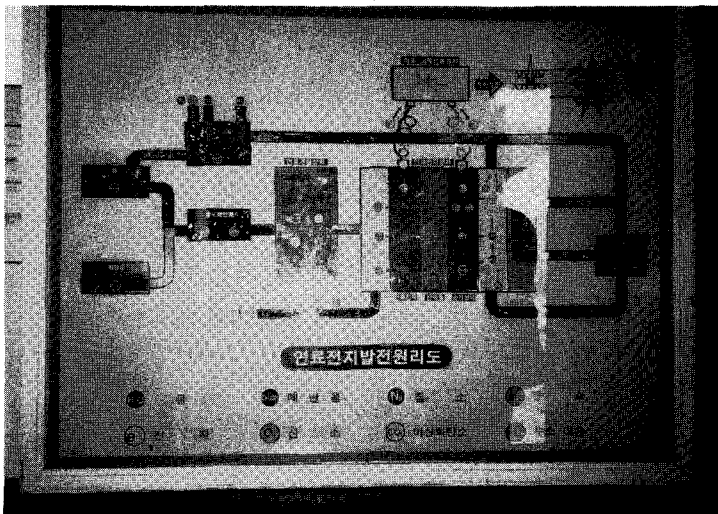




# 새로운 에너지 技 術로서의 燃料電池

한국 동력자원 연구소  
에너지節約技術센터長  
崔 壽 鉉(工博)



## I. 序 論

연료전지(Fuel Cells)는 發電用 연료와 공기를 공급하는 한 지속적 으로 전력을 생산하는 새로운 개념 의 發電機이다. 발전용 燃料로는 일 반적으로 천연가스, 도시가스, 메탄 을, 석탄가스등 炭化水素 系列의 화 석연료가 광범위하게 사용되며 우주 선과 같은 특수용에서는 순수한 수 소와 산소가 사용된다.

국내에서는 광범위한 의미로 대체 에너지로 분류되고도 있으나 技術的 으로는 發電 效率를 획기적으로 향 상시키고 공해요인이 없는 에너지節 約形의 새로운 發電技術이다.

燃料電池의 기본적인 원리는 오래 전부터 알려진 바 있으나 수소를 사 용한 최초의 연료전지는 1839년에 W. R. Grove에 의해 실험된 바 있 으며 1950년대에 F. T. Bacon 등에 의해 연구된 바 있다. 연료전지로서 의 실제 이용은 美國에서 유인우주 선에 사용된 것이 처음이며 일반 에 너지기술로의 개발은 1967년 미국의 가스회사들이 천연가스의 판매확대 를 목적으로 研究開發費를 지원하면 서 본격화되었다.

火力發電과 같은 熱機關이 갖는 Carnot Cycle에 의한 열효율의 제약 을 받지 않는 아주 높은 효율의 새 로운 발전방식으로서 연료전지기술 이외에도 MHD發電技術등이 '60 년대부터 연구개발되어 왔으나 실용 화면에서 연료전지가 가장 근접해 있다고 할 수 있다. 또한 환경오염의 발생요인이 매우 적기 때문에 최근 에 대두되고 있는 地球環境 문제와

도 관련되어 많은 관심의 대상이 되고 있는 기술이며, 대도시의 효율적인 에너지(電氣와 熱) 공급대안으로 유망시되는 기술이다.

연료전지는 현재의 기술수준에서는 출력 40KW-11MW 급이 개발되어 시험되고 있으며 '90년대 후반부터 일부 실용화되면서 21세기의 새로운 에너지기술로 이용될 것으로 전망된다.

## II. 연료전지 발전이란 ?

### 1. 發電의 기본원리

기본적인 연료전지의 구성은 두개의 電極 사이에 이온 전달매체인 電解質이 포함되어 있으며, 연료가 陰極으로 공급되고 공기가 陽極으로 공급되면 전극표면에서 전기화학반응이 이루어지면서 發電된다. 연료전지의 기본 구성과 발전원리는 그림 1에 보여진 바와 같다.

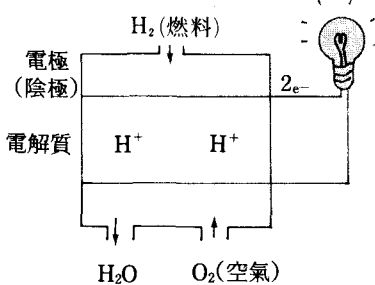


그림 1 연료전지의 기본원리

### 2. 發電시스템 구성

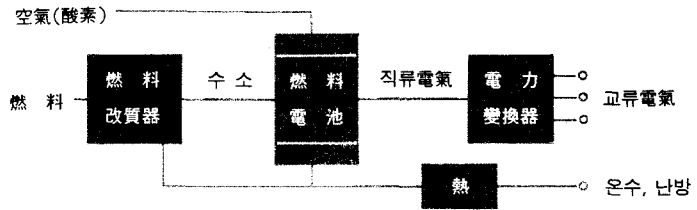


그림 2 연료전지 發電시스템 구성

연료전지가 발전설비로서 수용가가 필요한 商用 電力을 공급하기 위한 주요 구성요소는 그림 2에서 보는 바와 같다.

- 연료 개질기

천연가스, 도시가스 또는 메탄올과 같은 발전연료를 수소성분이 많은 가스로 전환시켜 필요량 만큼 연료전지로 공급함.

- 연료전지 본체

直流 전력을 발전하는 핵심장치로서 필요 용량에 따라 여러개의 스택으로 구성된다. 그림 1에 보여진 연료전지의 기본인 單位電池(Single cell)를 수십내지는 수백장을 적층시켜 적정 電氣容量을 發電할 수 있는 하나의 덩치를 스택(Stack)이라 함.

- 전력변환기

연료전지 본체에서 발전된 直流 전력을 필요한 商用전력으로 바꾸어 주는 直·交流 변환, 주파수제어, 전압제어 및 위상제어의 기능과 발전기로서의 부하추종을 포함한 각종 제어 기능을 수행함.

- 熱 회수 및 공급

발전시의 반응열을 회수하여 필요

시에 사용함으로써 熱併合發電이 가능함. 회수된 열의 일부는 연료개질시에 필요한 熱源으로 사용되기도 함.

## III. 기술의 종류와 특성

### 1. 연료전지의 종류

표 1에서 보는 바와 같이 종류에 따라 작동온도가 상이하며 高溫 연료전지의 경우는 증기터어빈과의 複合發電도 가능하다. 알카리연료전지는 특수용으로 사용중이며 일반적으로는 磷酸연료전지가 기술적으로 실용화에 가장 근접해 있다.

### 2. 技術의 特性

전기화학반응에 의한 直接變換 기술이기 때문에 Carnot cycle에 의한 열효율 제한을 받지 않으므로 효율

이 매우 높으며 환경공해 발생요인이 거의 없다는 뚜렷한 특성을 가지며 이외에도 전력기술로서의 필요한 여러가지 장점을 갖고 있다.

- 효율 특성

궁극적으로 50%를 능가하는發電效率이 가능하며 출력용량 규모에 무관하게 높은 효율로 발전하므로서 발전부문에 대규모 에너지절약이 가능함.

- 열병합발전 및 복합발전

반응열의 회수이용으로 에너지의 종합 이용효율을 높일 수 있으며 중소 용량규모로 건물 또는 지역단위

열병합발전용과 공장용으로의 다양한 이용이 가능함.

- 環境 특성

NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> 및 粉塵등의 발생이 기존 화력에 비하여 무시할 정도이며 터어빈등에 의한 소음발생 요인이 없으므로 건물내 설치도 가능함.

- 기타 특성

起動停止가 용이하고 부하추종성도 매우 양호하며 설비 용량규모 또는 부하율에 관계없이 비교적 일정한 효율로 발전함. 건설 면적이 상대적으로 적으며 모듈화 생산으로 단기간 건설이 가능함.

들이 가스연료의 판매확대를 목적으로 연구개발비를 지원하기 시작한 것이다. 즉, 1967년에 미국 28개 가스회사(캐나다 1개 회사 포함)가 TARGET(Team to Advanced Research for Gas Energy Transformation) 계획으로 출력 12.5KW의 磷酸연료전지의 개발을 위한 연구개발비 지원을 시작하면서 본격화되었다.

日本은 1972년부터 미국의 개발계획에 참여하고 있으며, 에너지여건의 惡化와 대도시 지역의 경제적인 전력공급의 필요성등으로 자체 기술에 의한 개발도 병행하고 있다. 유럽의 경우는 미국과 일본이 강력한 기술 보호정책을 추진하면서 이들 국가의 기술독점에 대응하기 위해 1980년대부터 개발을 추진하게 되었다.

현재로서는 기술보유면에서는 美國이 가장 앞서고 있으나 실용화를 위한 노력에서는 日本이 앞서가고 있는 추세이다.

2. 美國의 개발동향

① PC-11, PC-18, PC-25의 개발

건물단위로 설치하여 電氣와 熱을 동시에 공급하기 위한 소규모 연료전지설비는 1967년 가스회사들의 지원과 UTC의 기술개발로 1976년까지 기초연구(4년), 현장실험(3년) 및 제품화 연구(3년)로 구분되어 총 10년간 수행되어 PC-11이라고 불리우는 출력 12.5KW급이 최초로 개발되어 시험되었다.

PC-11의 시험결과로 연료전지

표 1 연료전지의 종류

종 류	작동 온도	연 료	기술 수준
알카리(AFC)	상온-100C	순수 수소	사용중(우주선)
인산형(PAFC)	150-220C	천연가스, 메탄올등	실용화단계
음용탄산염형(MCFC)	600-700C	천연가스, 석탄가스	개발단계
고체산화물(SOFC)	800-1000C	석탄가스	연구단계
고분자전해질(PERC)	상온-120C	수소, 메탄올 등	실용화단계

표 2 火力發電과 燃料電池發電의 특성비교

區 分	火力發電	燃料電池	効 果
發電效率	38-42%	50-60%	에너지節約
公用期間	石炭, 石油 火力에 비해 無視		Clean energy
立 面 積	310坪/MW	120坪/MW	國土活用
地 位 價	遠隔地域	都心地	送配電投資 輕減
建設期間	6 年	3 年	經濟的 建設

IV. 最新 技術開發 動向

1. 開發 背景

일반 에너지기술로서의 연료전지 기술개발의 배경은 美國의 가스회사

술의 우수한 에너지절약 효과와 환경특성이 실증되면서 1977년부터는 DOE(Department of Energy)가 국가계획으로 출력 40KW의 열병합 발전용(PC-18) 연료전지발전기의 개발을 추진하였다. 1985년까지 추진된 계획은 GRI(Gas Research Institute)도 연구개발비를 지원하고 있으며 기술개발은 UTC가 담당하여 총 5,600만 달러의 개발비를 투입하여 49기를 제작 실험한 바 있다.

현재는 건물용의 200KW급(PC-25)을 상용화시키기 위한 Prototype이 제한적으로 생산 공급되고 있다. 상용화를 목표로 개발중인 PC-25기종의 성능은 <표 4>에 주어진 바와 같다.

#### ② 대형 발전기술

1971년부터 9개 電力會社의 연구비지원으로 UTC에 의해 출력 1,000KW급 1기가 처음으로 건설되어 Northeast Utility 회사의 전력계통선에 연결되어 1979년까지 시험되었다. 본 계획에는 총 3,500만 달러 규모가 투입되었으며 1973년부터 EPRI(Dlectric Power Research Institute)도 연구비를 지원하였고

1975년부터는 DOE가 기술개발을 주도한 바 있다.

1979~1985년 기간중에는 交流出力 4.5MW의 발전소가 2기 개발되어 Con. Edison 전력회사에 의해 뉴욕 맨하탄과 日本 동경전력회사에 의해 五井발전소에 각각 건설되어 실증시험된 바 있으며 日本에 건설된 2호기에서 세계 최초로 정격 4.5MW 발전에 성공하였다.

최근에는 11MW급 연료전지발전소(PC-20)가 미국 기술에 의해 일본에 건설되어 전력기술로서의 신뢰도 확인을 위하여 가동중에 있다(설계특성은 표3 참조).

#### ③ 개발 체계

기술개발은 국가 주도로서 DOE가 총괄하며 개발초기에는 磷酸연료전지의 개발은 항공우주국(NASA)의 Lewis Center가 주관하였으며 용융탄산염 연료전지기술은 ANL(Argonne National Laboratory)에서 주관하였으나 현재는 DOE 산하의 METC(Morgantown Energy Technology Center)에서 정부가 주도하는 모든 종류의 연료전지기술의 개발을 주관하고 있다.

#### ④ 기업의 역할

인산연료전지와 용융탄산염 연료전지 관련 기술은 이미 企業에 완전 移轉되어 정부지원에 의한 개발과 GRI와 EPRI 지원의 기술개발에 참여하고 있다.

인산연료전지의 개발에는 IFC(미국의 UTC와 日本 東芝의 합자회사)와 Westinghouse/ERC가 주도하고 있으며 용융탄산염 연료전지는 IFC, ERC 및 M-C Power회사가 주도하고 있다. 상대적으로 기초연구단계인 固體電解質 연료전지는 Westinghouse가 주력하고 국가연구소와 대학에서도 전극 개발을 추진하고 있다.

민간기업의 기술보유는 미국정부의 기술보호 정책의 일부로서 연료전지와 같은 최첨단기술의 타국으로의 이전을 거의 불가능하게 하는 주요 원인이 되고 있다.

### 3. 日本의 기술개발 동향

1960년대부터 대학, 국가연구소 및 기업에서 기술개발을 추진하였으며 1972년부터는 동경가스회사와 대판가스회사가 미국의 TARGET계획에 참여하여 미국에서 개발된 試製品을 도입하여 운전하기 시작하였다.

정부주도의 자체 개발은 1973년 에너지피동 이후 통산성 산하의 공업기술원이 주도한 Sunshine계획에서 알카리연료전지와 고체 전해질 연료전지에 대한 기반연구를 수행하였으며, 1981년부터는 Moonlight계획에서 장기 국책과제로 실용화 개발을 적극 추진하고 있다.

표 3 磷酸 연료전지 발전설비의 최근 技術水準

구 분	FP-50	PC-25	PC-20
정격 출력	50KW	200KW	11MW
발전단 효율(ηHV)	36%	36%	41.1%
발전 연료	도시가스	도시가스	천연가스
전극 면적	2,000cm <sup>2</sup>	4,000cm <sup>2</sup>	1m <sup>2</sup>
전류 밀도(A/cm <sup>2</sup> )	~240	~300	~200
단위 출력 용량(KW)	50	200	670
기술 개발국	일본	미국	미국

① Moonlight 계획

에너지節約을 위한 새로운 기술의 실용화를 목적으로 통산성 공업기술원 주관으로 추진되고 있는 본 계획에서의 연료전지개발은 표 4에 보여진 바와 같다.

특수용의 알카리연료전지는 1984년에 출력 1KW 스택을 개발하여 시험한 바 있으며 일반 기술로서 실용화에 가장 근접된 磷酸연료전지는 1,000KW 발전소 2기가 개발되어 中部電力과 關西電力에서 각각 실증 시험되었으며 현지설치용 200KW급 발전설비가 2기 개발되어 시험중에 있다. 용융탄산염 연료전지기술은 기반기술연구에 이어 10KW급이 시험된 바 있으며 1KW급 발전설비가 개발중이다.

Moonlight 계획에서는 1981~1990년 기간중에 연료전지기술의 개발을 위해 총 280억엔 규모의 연구개발비가 투입된 것으로 보고되고 있다.

다.

② 기술개발 체계

국가주도의 연구개발은 통산성 공업기술원에서 주관한다. 基礎技術의 연구단계에서는 대학이나 여러 국가연구소에서 연구를 수행하도록 공업기술원이 지원하며 기반 기술이 확보된 후의 실용화개발은 공업기술원 산하의 新에너지 산업기술 종합개발기구(NEDO)의 주관으로 기업주도의 기술개발을 추진하고 있다.

즉, Moonlight 계획에서 '70년대 기반기술이 확립된 인산연료전지는 1981년부터 NEDO 주관의 기업기술로 개발되었으며 용융탄산염 연료전지는 1984년부터 NEDO에서 주관하고 있다. 고체전해질 연료전지는 공업기술원에서 국가연구소 등으로 기반기술 연구를 계속 지원하였으며 금년부터 부분적으로 NEDO에서 주관하여 기술의 실용화 준비를 하고 있다.

③ 민간기업의 역할

민간기업에서의 관련기술에 대한 개발투자는 매우 적극적으로 수행되고 있다. 대부분 증전기회사들이 업종 변경의 대상기술로 연료전지기술을 선택하여 개발을 추진하고 있으며 특히 東芝, 富士, 日立, 三菱, IHI, 日本鋼管, 三洋 등이 정부의 연료전지 개발계획에 적극 참여하고 있다.

또한 기술을 직접 개발하는 여러 민간 기업외에 전력회사와 가스회사와 같은 민간기업들도 연료전지의 이용을 위하여 많은 연구개발비를 지원하므로써 일본에서의 관련기술의 실용화에 크게 기여하고 있다.

4. 유럽의 기술개발

독일 Siemens 등에서의 특수용도의 연료전지개발을 제외하고는 미국과 일본의 기술독점에 대한 방어적인 개념에서 1980년대에 들어서 개발이 본격적으로 추진되었다.

네덜란드는 미국으로부터 25KW의 인산 연료전지 스택을 도입하여 시험한 바 있으나 자체 개발은 용융탄산염 연료전지 개발에 주력하고 있다. 1986년부터 국가계획으로 추진하고 있는 용융탄산염 연료전지의 개발은 1989년에 1KW 스택을 개발한 바 있으며 현재 10KW급의 개발을 추진하고 있다.

이태리는 1986년부터 VOLTA 계획을 수립하여 연료전지의 자체 개발을 추진하고 있다. 1KW급 인산연료전지 스택을 개발한 바 있으며 미국 IFC의 스택으로 1MW급 발전소

표 4 日本의 연료전지 개발계획(Moonlight 계획)

구 분	1981	1983	1985	1987	1989	1991	1993	1995
인산형 (PAFC)	<p style="text-align: center;">1,000KW 발전소</p> <hr style="width: 80%; margin: auto;"/> <p style="text-align: center;">현지설치용 200KW</p>							
용융탄산염형 (MCFC)	1KW 10KW		100KW급			1MW급		
고체전해질형 (SOFC)	500W							
알카리형 (AFC)	1KW							

표 5 국가별 기술수준 비교(1991년)

구분	AFC	PAFC	MCFC	SOFC
12KW급		11MW(P)/-	100KW(S)	5KW(S)
수 KW급		11MW(P)/-11MW(P)	10KW(S)	500W(S)
50KW급		-/-	10KW(S)개발중	개발중
-		1KW(S)/-1MW(P)	50KW(S)추진	기초연구
-		-/25KW(P)	1KW(S)	기초연구
-		0.5KW(S)/5KW(P)	기초연구	기초연구

- 註 : 1. AFC는 특수용(우주선, 잠수함등)으로 小容量이나 高度의 기술 필요  
 2. PAFC의 경우 A/B에서 A=自國 技術, B=핵심기술(연료전지本體) 輸入  
 3. ( )內 : P=전체 發電設備(Plant), S=연료전지 本體(Stack)

가 건설중이다. 특히 국민투표에 의한 원자력발전소의 건설반대는 연료전지기술의 개발을 적극 추진 시키는 계기가 된 것으로 알려져 있다.

燃料電池의 각 종류별로 각국의 기술 수준에 대한 비교는 표 5에 요약된 바와 같다.

### 5. 국내 기술개발 현황

전반적으로 연구개발의 초기단계이나 최근 2~3년 동안 연구인력의 확대와 함께 관련 기술의 개발에 대한 관심이 빠르게 확산되고 있다.

연료전지에 대한 기초연구는 '80년대 초부터 연구소와 대학에서 부분적으로 수행된 바 있으나 본격적인 연구는 1985년부터 動資研/韓國電力에 5KW급 인산연료전지발전설비 특성에 대한 연구가 수행된 바 있다. 직류출력 5.9KW의 日本 Fuji 전기 제작의 공냉식 연료전지본체(스택)가 도입되어 동자연의 시험설

비에 연결되어 1988. 6. 13 국내에서는 최초로 발전에 성공하였으며 메탄올 연료개질기, 인버터, 운전을 위한 각종 제어장치 및 데이터 자동처리시스템 등이 국내에서 설계제작되어 주변기술에 대한 기술 축적과 연료전지시스템 종합기술에 대한 경험을 얻은 바 있다.

연료전지의 핵심기술의 電極을 비롯한 본체(스택)의 국내개발은 1987년부터 과기처 국책사업으로 추진되고 있으며 1989년부터는 동자부의 대체에너지 개발사업이 추진되면서 더욱 확산되고 있다. 연료전지의 실용화를 목적으로 하는 대체에너지 개발사업에는 湖南精油, 油公, 金星産電, 東西産業 등의 기업도 참여하고 있다.

현재까지는 동력자원연구소에서 30W급의 연료전지본체(스택)가 설계제작되어 실험된 것이 가장 앞선 것으로 보고되고 있다.

## V. 에너지技術로서의 實用化 展望

### 1. 실용화 시기

인산 연료전지기술은 이제 연구단계를 지나 인류의 생활 주변에서 필요에 따라 전기와 열을 편리하게 공급할 수 있는 새로운 에너지기술로 사용될 전망이다.

물론 여러종류의 연료전지가 효율과 신뢰성을 향상시키고 다른 기술보다도 좋은 경제성을 확보하기 위하여 지속적으로 연구개발이 이루어질 것이지만 기술적으로 인산을 전해질로 사용하는 연료전지가 '90년대에 우선적으로 실용화되어 사용될 것이며, 용융탄산염 및 고체전해질 연료전지가 2010년대에 각각 사용될 것으로 전망된다.

특히 인산 연료전지의 경우는 현재 전력기술로서의 신뢰성 확립을 위해 시험운전중인 東京電力의 11MW 연료전지 발전소가 성공적으로 시험이 완료될 때 지역단위 분산 전원용으로서의 실용화는 매우 빠르게 확산될 것으로 예측된다.

### 2. 경제성

일반 에너지技術로서의 연료전지는 많은 연구개발비가 투입된 실정 이기는 하지만 제한적으로 Prototype이 생산되기 시작한 인산연료전지의 경우 單位용량당의 설치비용이 표 6에서 보는 바와 같이 매우 빠르게 낮추어 지고 있다.

표 6 연료전지 設置費(\$/KW)

年 度	美 國	日 本
70년대 후기	12,000	-
80년대 초기	10,000	-
1990년	2,500	20,000('89)
1992년	-	7,000
1995년	1,500	2,400
장용량 기준	1,000-1,300	1,500-2,000

주) ○ 환산기준 : \$1=120엔  
 ○ 미국은 200KW급, 일본은 50KW급 Prototype 기준이며 상용화목표는 대용량기준임

표 7 日本의 연료전지 發電設備 설치전망

구 분	2000년	2010년
총 용량(KW)	225	1,080
○ 電氣事業用	(105)	(550)
○ 自家設備	(120)	(530)

### 3. 실용화 대상 및 설비용량

40-200KW급이 건물단위의 열병합발전기로서 가장 빠르게 실용화될 것이고, 5-25MW급 발전설비가 도시의 지역단위 또는 工場에서의 熱공급을 포함한 分散 電源用으로 계통에 투입되며, 용융탄산염 또는 고체전해질 연료전지에 의해 실현될 100-600MW 발전소가 복합발전기술로서 계통에 투입될 것이다.

日本의 경우는 건물의 열병합과 도시의 분산전원 기술로서 인산연료전지의 도입을 적극 추진하여 2000년도에 전기사업용 105萬KW를 포함한 총 225萬KW의 연료전지 발전설비를 이용할 계획이다.

### VI. 結 論

에너지의 이용효율이 높아 대규모 에너지절약이 가능하고 환경면에서 깨끗한 기술인 연료전지는 에너지여건이 악화되고 지구환경 문제가 더욱 深刻해 지면서 21세기의 중요 에너지기술로서 더욱 부각되고 있다. 에너지기술로서의 연료전지는 30여년의 기술개발을 통해 '90년대 후반부터는 도심지의 전기와 열의 공급 수단으로서 실용화되기 시작될 것으로 전망된다.

우리나라와 같이 에너지의 해외의존도가 높고, 석유의존도를 낮추기 위해 천연가스의 도입을 확대하고 있는 경우에는 천연가스를 주연료로

하는 고효율의 새로운 발전 기술인 연료전지기술은 에너지절약과 환경측면에서 매우 유망한 기술이 될 것이다. 특히 에너지절약이라는 국가적 문제와 함께 유연탄 火力과 原子力을 주축으로 하는 발전소에 신규 건설에 따르는 환경문제, 발전소 立地難 및 과다한 설비투자(송전설비 포함) 등의 문제는 장기전원개발과 전기사업 부문에서의 적절한 대책을 필요로 한다.

부하가 집중된 지역에 설치되어 전기와 열을 동시에 경제적으로 공급하는 방식은 향후 대도시 지역의 에너지 공급방식으로 보편화될 것이며, 연료전지기술은 이러한 새로운 에너지공급 방식에 매우 적합한 기술이자 기존의 기술들이 갖고 있는 여러가지 문제들을 해결할 수 있는 기술이다.

앞에서 살펴 본 기술수준을 고려할 때 국내에서도 최소한 2010년까지 전력공급 대안에는 적정 용량의 연료전지발전소의 이용을 고려하는 것이 바람직하다. 이를 위하여서는 선진 기술의 도입에 의한 이용과 에너지기술 자립측면에서의 과감한 기술개발 투자가 병행하여 이루어져야 할 것이다.