

원자력과 수소에너지

민병태 · 이강일 · 권선길 · 강영호

한국원자력연구소

1. 서 론

세계2차 석유과동시 석탄을 제외한 세계의 화석 연료가 약30년 정도 사용 가능할 것으로 전망됨에 따라 대체에너지를 개발하기 위한 연구가 수행되어 왔다. 그러나 아직까지 화석연료를 완전히 대체할 수 있는 에너지는 개발되지 않았으나, 가장 유망한 대체에너지는 수소로 전망되고 있다. 수소는 현재 공업원료로 대량 사용되고 있으며, 향후 자동차, 항공기, 가정의 취사연료 등으로 사용될 수 있고, 연료전지에 의한 발전과 수송 및 운송이 가능하므로 기존의 화석연료를 거의 대체할 수 있는 많은 장점이 있다. 따라서 수소의 제조, 저장, 수송 및 취사용 연료와 연료전지에 이르기까지 다양한 연구가 진행되고 있으나, 아직 개발 여지가 많이 남아있다. 특히 경제성 있고, 대량으로 무공해의 수소를 제조하기 위한 전기와 고온의 열원 확보 방법이 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다.

기존의 화석연료를 사용한 수소제조는 공해물질 배출, 화석연료의 한계성 및 지역적인 편재 등으로 많은 문제점이 있다. 이에 비해 원자력은 고속 증식로가 실용화 된다면, 향후 몇천년을 사용할 수 있는 막대한 에너지로 평가되며, 거의 무공해로 전력과 고온의 열을 제공할 수 있어 원자력과 수소에너지계의 연계는 필연적인 것이다. 그러나 원자력발전의 안전성에 대한 의구심과 방사성 폐기물의 위험성, 원유가의 하락은 기존의 가압경수로 마저도 많은 반대에 직면하고 있는 실정이다. 그렇지만 에너지 부존자원이 거의 없는 우리나라로서는 원자력은 필요불가결한 에너지원일 것이다. 최근에는 원자력 선진국에서 수동 안전형 원자로 및 고유 안전형 원자로와 같은 실질적으로 안전성을 확실하게 보장할 수 있는 신형 안전로에 대한 연구가

수행되고 있다. 특히 우라늄광이 소모되기 전에 핵융합 기술이 실용화 될수 있다고 가정할때, 일차 에너지원은 무한하다고 생각할수 있다. 그러므로 전기 생산과 기타 연료를 동시에 해결 할수있는 원자력과 수소 에너지를 연계할수 있는 새로운 에너지체통의 개발이 필요하다.

그러나 수소가 무한, 무공해이고, 그의 다양한 이용성 때문에 인류에게 필요한 에너지로서의 모든 조건을 만족시킬 수 있다는 "신앙성"은 또다른 측면에서 생각해 보아야 할 것이다. 수소를 제조하는 과정이 공해물질을 배출하지 않는다는 가정, 즉 "허구성"을 잘 파악하여 대체하는 것만이 차세대에너지 정책에 정확한 기본방향을 제시할수 있을 것이다.

본 논문에서는 원자력과 수소에너지 연계의 필요성 및 실용성, 그리고 그의 구성사회에 대한 예들 들고 최종적으로 문제점 등에 대하여 기술하였다.

2. 본 론

2. 1 대체에너지

2. 1. 1 대체에너지의 필요성

1) 에너지 소비경향

인류는 기원전 2000년간 $6Q(1Q=10^{16}Btu=2.52 \times 10^{17}Kcal)$, 기원후 18세기 까지는 $4Q$ 의 에너지를 소비하여 전체 $10Q$ 정도를 사용하였다. 그러나 19세기의 석탄시대에는 $1Q$ 에너지를 소비하였고, 20세기의 석유시대에서는 에너지 대량소비시대가 되어 1950년 부터 1975년까지 $4Q$ 를 소비하였다.¹⁾ 이것은 산업의 발달과 인구증가에 따른 에너지 소비량의 급증 외에도 고급에너지의 선호와 일인당 에너지소비량 증가에 의한 것이다. 예로서 1988년 OECD는 전세계 인구 50억중 단지 약16%를 차지

표1. 전세계 화석 에너지 자원의 매장량

구 분	최대매장량	확 인 매 장 량 (R)					생산량(P) 1983년	가체기간 R/P년
		총 계	OECD(%)	OPEC	공산권	개도국		
석 유	1.4 ~ 3.1 조 bb1	6,693 억 bb1	8.9	64.5	12.6	14.0	207.5 억 bb1	32.2
석 탄	10조 톤	6,870억톤	46.6	0.2	38.6	14.6	40억톤	171.8
천연가스	295~340 조m ³	90조m ³	14.8	31.4	42.0	11.8	1.56조m ³	57.7
우 라 늑	9.7~24.4 백만톤	2,860천톤	59.9	10.6	0.3	29.2	36,426톤	78.5*
신 재 생 에 너 지 중 화석 연료	—	4,100 억톤	97.6	—	1.4	1.0	소 량	—

* 고속증식으로 사용시 3000년

하나, 전세계 에너지 소비량의 50%를 사용하여, 개도국의 산업발달에 따라 에너지 소비량이 급증할 것으로 예측할수 있다.²⁾

2) 화석연료의 문제점

가) 지역적 편재 및 한계성

지구상에 6억년간 축적된 화석연료의 총 매장량은 약10,000Q 정도로 추정되며, 이중 장래기술로서 가체 가능한 양은 전체의 3.5%인 36Q 정도이다. 표1은 전세계 화석연료 에너지원의 최대 매장량과 가체년수등을 나타낸 것이다.³⁻⁵⁾ 표1에서 보는 바와같이 석유와 천연가스는 OPEC나 공산권에서 70%이상을 차지하여 지역적으로 편재되어 있다. 또한 석탄을 제외하고는 가체기간이 30년에서 70년 정도로 짧다. 그러나 우라늄은 고속증식으로 상용화 될 경우, 3000년간 사용할 수 있는 거의 무한자원으로서 원자력의 이용은 매우 안정된 에너지를 제공할 수 있을 것이다.

나) 환경오염

화석연료의 가장 큰 문제점은 매우 많은 공해물질을 배출하는 것이다. 1988년의 경우 전체 에너지중 화석연료가 차지하는 비율은 88%로서 CO₂만도 222억톤을 배출하였다. 탄소량으로 환산시 약 60억톤으로 광합성 등에 의해 지구가 순환할수 있는 탄소량은 28~40억톤으로 추정되어 1/3로 감소시켜야 한다. 이들 공해물질에 의한 온실효과는 기

온의 상승과 빙하의 용융에 따른 해수면의 상승으로 지표면을 크게 잠식할 것으로 예상되고 있다.⁶⁾ 또한 NO_x, SO_x 기체에 의한 산성비는 인위적인 산림자원의 개발과 더불어 지구의 생태계에 심각한 위협을 주고있다. 따라서 환경문제에 대한 대처방안이 없으면 대형 화력발전소의 건설은 어려울 것으로 평가되고 있다.⁷⁾ 그러므로 화석연료는 에너지 수요가 급증하는 시대에서 공업원료로서 유용하게 사용할수 있도록 절약하여야 할 것이다.

2. 1. 2 대체에너지 개발현황

석유 1,2차 파동에 따른 에너지 절감과 에너지의 다양화, 에너지자원의 활발한 개발 외에 산유국의 전쟁에 따른 원유의 과잉공급 등으로 1980년대 중반 이후부터 원유가는 크게 하락되었고, 에너지 문제는 심각성을 벗어나 그 대처 방안에도 소홀히 하게 되었다. 그러나 원유가는 1990년대 부터 상승 국면으로 접어들 것으로 예상되며, 이의 파급효과는 다른 화석에너지에게도 영향을 주어 연쇄적인 상승세를 이룰 것이다. 에너지 부존자원이 거의 없는 국내 형편으로서는 대체에너지 개발이 필수적인 것이다.

대표적인 대체에너지인 태양에너지는 지구에 매년 5300Q의 에너지를 보내나, 약0.7%인 1.2x10¹⁴ KWh가 지구에 도달한다. 그러나 그의 약47%는 공기중에 흡수되고, 물의 증발과 광합성에 이용되

표2. 세계 각 도시의 년평균 및 월평균 일사량

국 명	도 시 명	위도(N)	일 사 량 (Kcal/m ² -day)						
			년평균	1	3	5	7	9	11
한 국	서 울	37.5	2,584	1563	2751	3687	2775	2788	1777
한 국	세 주	33.5	3,063	1280	3051	4145	4503	3161	2079
미 국	메 디 슌	43	3,370	1440	3020	5070	5510	3980	1680
스웨덴	스톡홀름	59	2,410	290	2010	4670	5000	2430	320
일 본	동 경	36	2,610	1900	2740	3430	3360	2540	1850
인 도	칼 카 타	22	6,810	5320	7010	7840	8160	6450	5570

며, 지표면에는 22%(1kw/m²)가 도달된다.⁸⁾ 그러나 국내의 년평균 일사량은 표2에서 보는바와 같이 2,600Kcal/m²으로 북반구에 위치한 스웨덴의 스톡홀름보다 겨우 약8% 많은양이다.⁹⁾

또한 태양에너지는 에너지밀도가 낮고, 계절, 기후, 시간에 따라 변하는 불연속성으로 국내에서는 기존의 화석연료를 극히 일부만 대체할 수 있다.

그외 풍력, 파력, 조력, 바이오매스, 지열 등의 이용도 에너지 밀도가 낮아 일부 지역에서만 이용될 수 있을 뿐이다. 국내의 대체에너지 개발은 태양, 수소력, 메탄가스와 왕겨탄이 주종으로, 1988년의 경우 에너지 총수요의 단지 0.2%정도만을 점유하고 있다.¹⁰⁾ 특히 무공해로 대량생산이 가능하여 신대체에너지로 예상되는 수소의 제조 및 이용기술도 매우 미약하므로 이에 대하여 기술하고자 한다.

2. 2 수 소

2. 2. 1 수소의 특징

수소는 Yoshida가 4E(Ecological, Economic, Energetic, Export)라 언급한 바와 같이 무공해로서 경제적이고, 에너지효율이 높으며, 기술수출을 할 수 있는 특징이 있다.

수소의 가장 큰 특징으로서는 연소 생성물이 물이므로 완전 무공해인 점이다. 또한 물분해에 의해 수소제조후, 연소되어 물로 재순환 되는 주기는 단지 약24시간 소요되어 생태학적인 균형을 유지할 수 있다. 이에 비해 화석연료는 광합성 등에 의해 다시 화석연료로 되는 데 수백년이 소요되어 생태학적인 평형을 유지할수 없다. 환경오염에 따른 인체건강의 손상 등을 고려할때 수소에너지는 훨씬

경제성이 있다. 한편 수소는 현재 화학, 금속공업에서 원료로 대량 사용되고 있으며, 앞으로는 자동차, 항공기, 냉난방보일러, 주택의 취사용 연료로 사용될 것이다.^{12, 13)} 또한 연료전지에 의한 발전으로 전력의 저장이란 측면에서도 매우 활용성이 크다.¹⁴⁾ 수소는 액체, 기체 및 금속 수소화물로의 저장과¹⁵⁾ 기존의 천연가스 수송관을 개조하여 각 가정으로 수송이 가능한 특징도 지니고 있다.¹⁶⁾

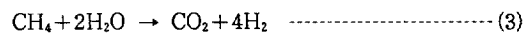
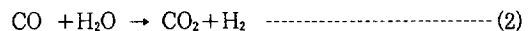
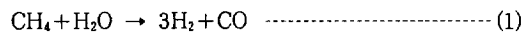
2. 2. 2 수소제조방법

1) 화석연료에 의한 수소제조¹⁷⁻¹⁹⁾

석탄의 기화방법은 18세기에 알려져 약 150년동안 도시가스, 공업용 가열기체와 석유화학의 중요한원이 되었으나 매우 저가의 천연가스가 도입됨에 따라 석탄기화공정은 거의 폐쇄되었다. 그러나 석탄은 200년간 사용할 수 있는 가장 풍부한 화석연료 자원으로 잠정적인 주요공정으로 남게 될 것이다

석탄기화의 상업적으로 중요한 두공정은 석탄을 SNG로 제조하는 Lurgi공정과, 수소만을 목적으로 하는 koppers-Totzerk(k-T) 공정이 있다. 그 밖에 석탄 및 천연가스의 스팀개질, 탄화수소의 부분산화, 스팀-철 제조공정이 있다.

대표적인 천연가스의 스팀개질 공정은 다음식(1~3)과 같이 수소를 제조한다.



보통 조업온도는 1000~1120K, 압력은 16.8~33.5기압, 스팀대 메탄비는 3:1에서 6:1이다. 메탄의 전환비는 65~85%이고, CO의 25~75%가 CO₂

로 전환된다. 이공정은 반응식에서 보는 바와 같이 CO₂가 대량 배출되고, 540℃의 고온이 요구된다. 이 열은 고온가스냉각로(HTGR; High Temperature Gas-Cooled Reactor)에 의해 제공될 수 있으므로, 연소용 연료를 약 40% 절약할 수 있다. 마찬가지로 석탄의 스팀으로 직접 기화하는 공정에 HTGR 열을 이용할 수 있다.²⁰⁻²¹⁾

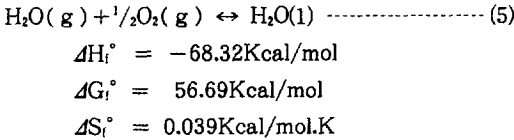
화석연료를 사용한 수소제조는 현재 가장 저렴한 공정이나 화석연료의 문제점으로 장래에는 물을 분해하여 수소를 제조하여야 할 것이다.

2) 물분해에 의한 수소제조방법

물분해에 의한 수소제조시의 열효율 η_1 는 식(4)와 같다

$$\eta_1 = \frac{\text{표준상태에서 물분해에너지}}{\text{공정에 필요한 총 에너지}} \quad \text{----- (4)}$$

정은 정압하에서 운전되는 가역공정에서는 식(5)와 같이 1몰의 수소와 1/2몰의 산소가 반응하여 액체물 1몰을 생성한다.²²⁾



각 효율을 정의하면,²³⁾

• Carnot $\eta_c = (T_h - T_c) / T_h = W_{\max} / Q_t$ ----- (6)

• LHV(Lower Heating Value)
 $\eta_L = -\Delta H_f^\circ (\text{H}_2\text{O}, g) / Q_t = 57.80\text{Kcal} / Q_t$ (7)

• HHV(Higher Heating Value)
 $\eta_H = -\Delta H_f^\circ (\text{H}_2\text{O}, l) / Q_t = 68.32\text{Kcal} / Q_t$ --- (8)

• 자유에너지 효율
 $\eta_G = -\Delta G_f^\circ (\text{H}_2\text{O}, l) / Q_t = 56.69\text{Kcal} / Q_t$ ----- (9)

여기서,

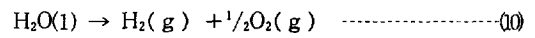
- W_{\max} : 최대일
- T_h : 열원의 온도
- T_c : 방출열의 온도
- $Q_t = q_1 + \frac{W_i}{\xi}$

- q_1 : 직접 유용하게 공급한 일
- W_i : 직접 유용한 공급 열대 유용한 일
- ξ : 열에너지의 전환효율

H-O 결합강도는 104Kcal/mol로 매우 높으므로 이들을 분리하기 위해서는 고온의 열이나, 전기가 필요하다. 물분해 방법으로는 광분해, 방사선분해, 광생물학적분해 등 여러방법이 있으나,^{24, 25)} 대량생산이 가능한 전기분해와 열화학공정에 대해서만 다루고자 한다.

가) 물의 전기분해²⁶⁻²⁸⁾

물을 전기분해하여 수소로 제조하는 기술은 1900년부터 시작되어 80년 이상 이용되고 있다. 물의 전기분해 원리는 직류전기를 물에 통과시켜 식(10)과 같이 물을 분해시킨다.



이 때 전해액은 이온전도성이 크고, 완충용액을 형성하도록 대부분 황산 같은 강산과, 산산화칼륨 같은 강염기를 사용하나, 산전해액은 부식문제가 있어 주로 알칼리 전해액을 사용한다. 또한 발생하는 수소와 산소 기체가 혼합되지 않도록 다공성 격막등을 사용한다. 전지반응에 대한 엔탈피 변화는 식(11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S = -nFE_{rev} \quad \text{----- (11)}$$

$n = 2$, $F = 96500\text{c/mol}$ 이므로 25℃에서 $E_{rev} = 1.48\text{V}$ 이다. 실제 전지에서는 전극과 용액간 등의 저항이 있으므로 과전압(η)을 곱해주며, 전지효율은 다음(12)식과 같이 표현된다.

$$\eta_1 = \frac{\Delta H}{\Delta G + \text{loss}} = \frac{\Delta H}{nF(E_{rev} + \sum\eta + iR)} \quad \text{--- (12)}$$

$\sum\eta + iR = 0$ 인 이상적인 전극에서는 $\eta_1 = 1.2$ 로 120% 효율을 얻을 수 있다. 그러나 실용적인 전지는 보통 1.9~2.2V로서 효율이 70~80%이다. 효율을 높이기 위해 고온 고압에서 전기분해하거나 전지전압을 낮추기 위해 물에 SO₂ 등을 주입시켜 반응시킨다.^{29, 30)} 이에 대한 예는 전기분해와 열

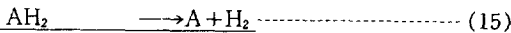
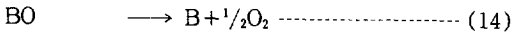
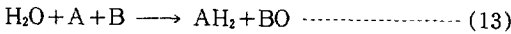
화학의 병합공정에서 다룰 예정이다.

전기분해는 구동부분이 없으므로 신뢰성 있고, 고장이 없으며, 인력소요가 적다. 가장 큰 특성은 생성된 수소와 산소를 동시에 분리해 내는 점이다.

단점은 발전과 물분해 효율을 고려하면 전체 효율이 약35%로 낮고, 고가의 전기를 사용하는 점이다.

나) 열화학순환공정²⁾

열화학순환공정은 다음 반응식(13-15)에서 보는 바와 같이 물과 어떤 화합물이나 원소(A, B)를 반응시켜, 산소와 수소화합물(AH₂, BO)로 생성시킨 후, 그 화합물을 가열 분해하여 최종 생성물로서 수소와 산소를 제조하는 공정이다.



분해시 생성되는 반응 부산물(A, B)은 물분해에 사용되도록 재순화시키는 완전 폐쇄주기(closed cycle)로서 공해물질을 배출하지 않도록 한다.

이 공정은 열을 직접 분해에 이용하므로 열효율이 높으며, 이때 필요한 고온의 열은 태양, 고온가스냉각로, 핵융합열 등을 이용하는 연구가 수행되고 있다. 열화학순환공정은 고온의 열을 이용하여 일이 없이 ($\Delta G=0$) 물을 분해 시키므로 ΔS° 값이 매우 낮아 $\Delta G^\circ/\Delta S^\circ = \Delta T$ 식에서 매우 고온이 요구된다.

이같은 ΔG 값을 극복하기 위해 여러가지 연구가 수행되었다. Funk는 최초로 2단계 이하로 물분리는 불가능하고 3단계 이상으로 반응주기가 이루어져야 함을 이론적으로 나타내었다.³⁾

열효율식(6, 8)에서 방출온도 25°C와 150°C일 경우 계산된 η_H 와 η_c 는 표3과 같다. 여기서 η_H 는 최대일을 하였다고 가정하여 식(6)과 (8)에서

$$\eta_H = \frac{\Delta H}{\Delta G} \cdot \frac{\Delta G}{Q_c} = 1.205\eta_c \text{에서 계산된 값}$$

이다.

이 공정이 전기분해보다 경제성이 있기 위해서는 열효율이 50%정도 되어야 하므로, 표3에서 방

표3 열원 및 방출온도에 따른 효율

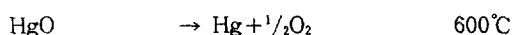
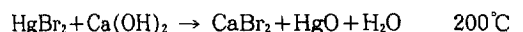
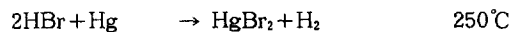
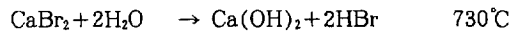
T _b (°C)	T _c = 25°C		T _c = 150°C	
	η_c	η_H	η_c	η_H
1300	0.810	0.976	0.731	0.881
1200	0.798	0.961	0.713	0.859
1100	0.783	0.943	0.692	0.834
1000	0.765	0.923	0.668	0.805
900	0.746	0.899	0.639	0.770
800	0.722	0.870	0.606	0.730
700	0.694	0.836	0.565	0.681
600	0.659	0.794	0.515	0.621
500	0.614	0.740	0.453	0.546
400	0.557	0.671	0.371	0.448

출열 온도가 150° 일때 열원의 온도는 450°C 이상 되어야 함을 알수 있다. 실제로는 다단 공정에서 열손실이 크므로 열화학순환공정은 보다 고온의 열이 필요함을 알수 있다.

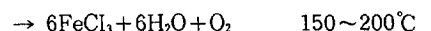
열화학순환공정을 찾기 위하여 원소에 의한 화합물의 형성과, 이들의 상호반응 및 밀폐식 순환주기가 이루어지도록 반응식을 배열하는 전산프로그램이 개발되었다. 전산프로그램으로 탐색된 공정수는 수십억개가 될 수 있으나 열화학적 및 취급의 안전성을 고려하여 수백종이 발표되었고, 실용적인 것은 수십종에 지나지 않는다. 또한 공정의 타당성을 검색하기 위해서는 평형상태조성과, 열역학 특성치의 계산, 공정 흐름도의 작성 및 전체 열효율을 계산하기 위한 전산프로그램이 필요하다. 다음에는 대표적인 열화학순환공정의 몇가지 예를 보인다.

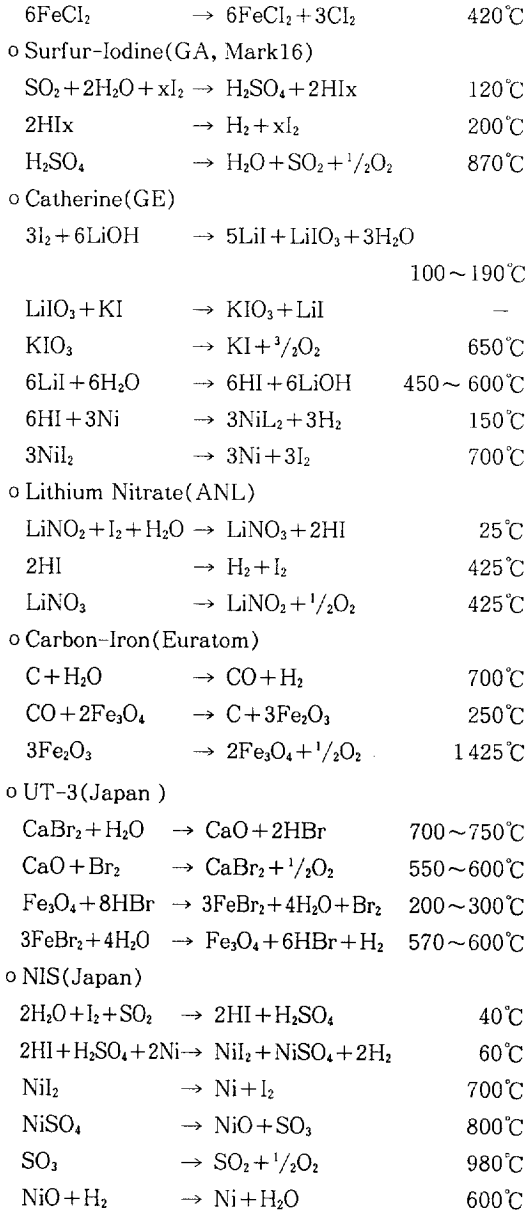
• 열화학순환 공정의 예

○ Mark 1(Euratom)



○ Mark 9(Euratom)

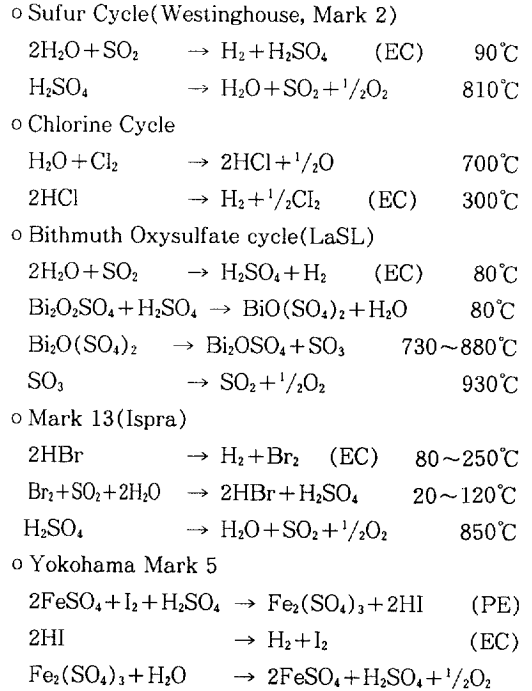




이들 공정들은 물을 분해하기 위하여 대부분 할로젠 화합물이 포함되어 있으며, 안정된 할로젠 화합물을 분해하기 위하여 고온의 열이 필요함을 알 수 있다. 그러므로 일부 태양열의 이용도 가능하나 고온의 열을 공급하기 위한 HTGR과의 연계가 불가피함을 알 수 있다.

다) 병합공정

전기분해와 광분해를 열화학공정과 연결하여 전기를 줄이거나 반응이 용이하도록 하기 위한 것이다, 다음은 대표적인 병합공정의 예이다.



2. 3 원자력과 수소에너지

수소제조에는 대량의 전력과 고온의 열이 소요되는 데, 이를 공급할 수 있는 에너지원은 태양열, 원자력과 핵융합로이다. 그러나 태양열은 앞서 지적한 바와 같이 일부만 대체 가능하고, 핵융합로는 연구단계이다.

2. 3. 1 원자력

현재 원자력 발전은 가압경수로(PWR: Pressurized Water Reactor)가 주로 상용화 되어 있다. 국내에서 1988년도 총 발전설비 1.99×10^7 중에서 원자력이 차지하는 비중은 6.67×10^6 으로 약 35%를 차지하며, 총 발전한 양 8.5×10^7 MWh 중 약 50%인 4.0×10^7 을 원자력에 의해 발전하였다.³³⁾원자력발전은 현재까지 약 40년의 발전경험을 갖고 있으며, 방사성 폐기물의 처리 및 처분만 잘 된다면 가장 무공해 발전이라 할 수 있다.^{34, 35)}또한 고속중식로(FBR; Fast Breeder Reactor)가 실용화 될 경

우 거의 무한자원이며 고도의 기술 집약형 산업이다. 예로서 1988년 원자력 발전단가는 27원/KWh로서 이중 우라늄 정광값은 2원으로 단지 7%만을 차지하므로 기술의 자원화가 에너지 자립이 될 수 있어, 에너지 부존자원이 거의 없는 국내 형편으로서 원자력의 이용은 매우 적합한 것이다. 또한 석탄화력의 81%, 석유화력의 25%의 저렴한 가격으로 전기를 제공할 수 있다. 특히 HTGR(High Temperature Gas-Cooled Reactor)은 700~1000°C의 고온의 열을 제공할 수 있는 원자로로 개발중이다. 그러므로 수소제조에 필요한 전기와 고온의 열을 원자력에 의해 거의 무공해로 무한정 제공할 수 있으므로, 수소제조와 원자력의 연계는 필수적이라 할 것이다. 기존의 가압경수로 및 FBR은 잘 알려져 있으므로 설명을 생략하고 고온의 열원으로 관심이 되고 있는 고온가스 냉각로에 대해서만 간단히 언급한다.

• 고온가스 냉각로(HTGR)³⁶⁻³⁸⁾

HTGR의 연료는 UO_2 , ThO_2 로서 약 0.5 μ m크기로 입도화 한후 그림1의 하부와 같이 약 1700°C에서 pyrocarbon, SiC 등으로 4중 코팅한다. 이들을 수만개를 모아 흑연으로 코팅된 직경 60mm의 연료공이나, 원주형태로 제조한다(그림 1의 상부). 여기서 흑연의 피복관 및 감속제 역할을 한다.

그림2는 pebble bed reactor의 예로서 상부에서

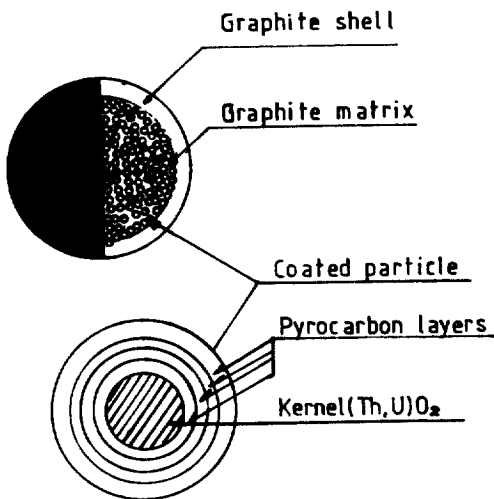
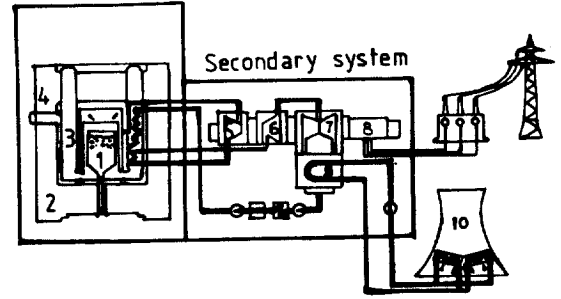


Fig. 1. HTGR fuel element.

Primary system



- | | |
|---------------------------------------|----------------------|
| 1.Reactor core | 6.MP sec. of turbine |
| 2.Prestressed concrete reactor vessel | 7.LP sec. of turbine |
| 3.Steam generator | 8.Generator |
| 4.Helium circulator | 9.Surface condenser |
| 5.HP sec. of turbine | 10.Dry cooling tower |

Fig. 2. HTGR schematic flow diagram.

연료공을 연속주입하고, 발생되는 열은 헬륨기체를 붙여넣어 약 700~900°C의 고온의 열을 회수하도록 하였다. 연소된 연료공은 channel을 따라 서서히 하강하여 하부로 나오며, 파손된 연료를 제거하고, 연소도를 측정하여 연소도에 따라 새로운 연료공과 같이 상부로 재장전 된다.

HTGR의 장점은 고온의 열을 회수할 수 있고 열의 밀도가 4~6W/cm²으로 낮아 안전하게 도심에 설치 가능하며, 원자로계통 압력이 10~20기압으로 낮고, 풍부한 토륨자원의 이용 및 연료의 연속교체에 따른 연속운전 등이다.

단점은 700~900°C의 열원이 공업적으로 사용하기에는 약간 낮고, 열의 밀도가 낮아 대형화하여야 하며, 아직 완전한 안전성을 확보하지 못한 점이다. 독일에서는 볼트파손 및 직자운전으로 1991년경 HTGR운전을 중지할 예정이나, 소련에 기술판매하기로 예정되어 실용성은 상존해 있다. 미국은 MHTGR(Modular HTGR)로서 개발 중에 있고, 일본에서는 VHTGR에 대한 많은 연구가 수행되고 있다.

2. 3. 2 원자력을 이용한 수소제조

이상에서 언급한 바와 같이 원자력을 수소제조에 이용하기 위한 방안을 구상하여 보았다. 그림3은 원료물질의 원자로 특성에 따른 주 핵분열물질이나, 생성물을 기준으로 한 것이다.

PWR은 약 3.3% 농축된 U-235을 핵분열하고,

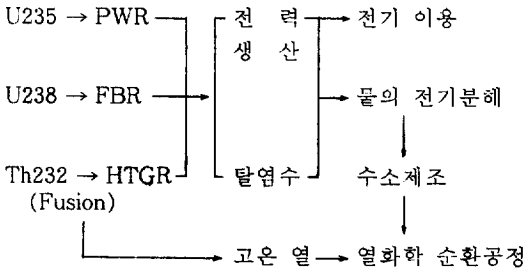


Fig. 3. 원자력을 이용한 발전 및 수소제조.

FBR은 U-238을 Pu-239로 증식하며, HTGR은 Th-232이 증식된 U-233 등을 이용하여 모두 전기를 생산할 수 있다. 전기는 직접적인 이용 외에 물의 전기분해에 의해 수소를 제조할 수 있으며, 해수를 탈염수하여 수소제조용 물로 제공할 수도 있다. 또한 HTGR은 고온의 열을 이용하여 열화학순환공정에 의해 수소를 제조할 수 있다. 이들은 장래에 모두 핵융합로에 의해 대체할 수 있을 것이다.

원자력을 이용한 수소제조 문제점은 FBR과 HTGR이 아직 실용화 되지 않은 점이다. 또한 열화학순환공정은 완전한 밀폐주기를 이루며, 열효율이 높고, 경제성 있는 공정이 아직 개발되지 않은 점이다.

2. 3. 3 원자력을 이용한 전력과 수소에너지 공급 체계

앞서 검토한 바와 같이 기존의 석탄기화 등에 HTGR을 이용하여 수소를 제조하여, 석탄을 절약할 수 있다. 또한 물의 전기분해시 전력을 공급할 수 있고, 열화학공정이나 병합공정에도 모두 고온의 열이 필요하므로 HTGR의 열원은 필수적이며, 기타 원자력 발전도 긴요함을 알 수 있다.

다음에는 HTGR, FBR에 의해 전력공급과 수소 에너지를 공급하고자 하는 원자력-수소에너지계에 대한 몇가지 예를 들었다.

1) 독일식 에너지공급 계획³⁹⁾

원자력에 의해 모든 2차 에너지를 공급한다는 가정하에 풍부한 동위원소인 U-238과 Th-232를 이용하기 위해 FBR, HTGR의 병합과 LWR-HTGR-FBR 병합공정을 고려하였다. HTGR의 U-233은 FBR의 blankets에서 공급한다.

그림4는 3억6천만 인구가 1인당 10KW의 에너지를 소비한다는 가정하에 발전과 수소생산(혹은

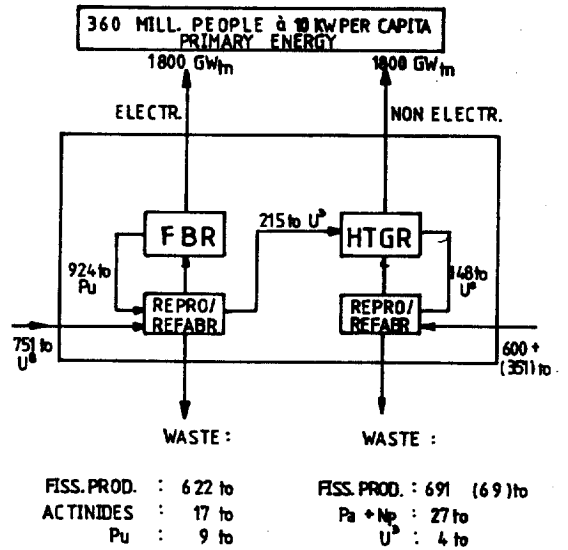


Fig. 4. A Fuel cycle for an all nuclear society. (yearly throughputs)

다른 2차에너지)을 위한 계획이다. 매년 U-238 751톤, Th-232 951톤이 필요하며, 총 동력은 FBR 발전과 HTGR에 의한 비전기 부분 각각 1800GW로서 공급한다.

2) 미국식 에너지 공급계획^{40, 41)}

2020년 미국에서의 에너지 수요는 10^{17} Btu/yr에 이를 것으로 전망하였다. 이중 반이 전기이고, 나머지 반은 운송용 연료로서의 수소이다. 미국 인구의 약 반이 해안에서 100마일 이내에 거주한다고 가정하여 이에 필요한 에너지는 5×10^{16} MW의 공장을 100개(평균 50마일 거리)에서 공급할 수 있다.(그림 5). 폐열은 해수에서 탈염수를 공급할 수 있도록 하였다. 각 공장은 고온 에너지를 최대로 얻기 위하여 FBR과 병합되었다.

영으로 성장하는 안정된 에너지계에서 원자력계는 HTGR 전환비 0.9이고 전체 FBR 증식비가 1.4라고 기준하여 증식로의 전환(HTGR) 비가 4:1인 selfsustaining이 될 것이다, 이 계에서 FBR은 자체내에 필요한 Pu-239와 HTGR이 유지하기 충분한 U-233을 공급한다. HTGR연료가 1400K까지 기체온도가 상승되도록 개발된다면, 방출온도 367K인 기체터빈 공장효율은 0.5($\eta_c=65\%$)이고, 수소공장의 방출온도 450K로 효율은 0.7(이론은

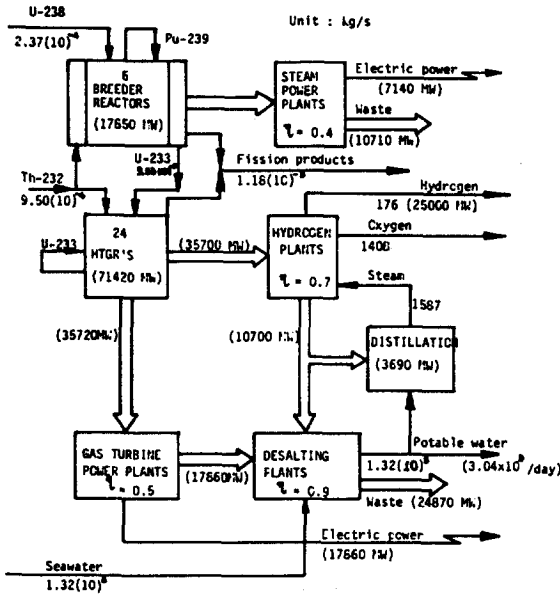


Fig. 5. Large offshore energy complex.

0.9)로 운전된다. 또한 수소와 전력수급외에 이 공장들은 관개와 산업 혹은 도시 사용용 물을 공급할 수 있다. 이같이 큰 복합체에서 중요한 영향은 환경에 미치는 폐열이다. 이 열은 대부분은 탈염수(약 50°C정도)에 저장하고 나머지 부분은 대양이나, 공기 냉각으로 대기로 방출한다.

도시 밀집지역 근처에 거주하는 나머지 인구 밖에 필요한 에너지는 1000개의 비슷한 복합체에 의해 10%용량으로 공급될 수 있다. 이들과 해안 복합체 사이의 중요한 차이는 탈염공장 대신 다른 폐열계로 바꾸는 것이다. 수소와 기체 터빈 공장의 폐열온도가 높다면 주택 난방과, 저압공정의 증기 발생에 사용될 수 있다.

2. 4 결과 및 토의

기존의 화석연료는 한계성 자원이라는 측면외에도 공해물질을 대량으로 배출하므로 환경을 크게 오염시켜 주 에너지원으로서의 역할을 다할 시대는 그리 멀지 않을 것이다. 이에 비해 수소는 거의 무한자원의 clean에너지며, 그 용도의 다양성으로 화석에너지를 거의 대체할 수 있다고 절대적으로 믿어왔다. 그러나 이것은 수소제조와 관련된 공정들, 즉 발전 및 열원 공급 과정은 물론 제조과정도 기술적으로 가능하고, 공해물질을 배출하지 않는다

는 전제하에 clean에너지로서의 존재가치가 있을 것이다.

현재 수소를 대량으로 제조할 수 있는 방법은 일차적으로 석탄이나 천연가스개질에 HTGR열을 이용하는 것으로 화석연료를 절감하고 공해물질 배출을 줄일 수 있다. 그러나 공해물질 배출이 거의 없는 수소제조 공정은 물을 분해해야할 것으로 발전과 열은 원자력에 의존하는 수밖에 없다. 차후 핵융합이 실용화되면 인류는 영원히 에너지의 위기에서 벗어날 수 있을 것이다.

그러나 HTGR과 FBR은 아직 실용화 되지 않았으며, 열화학공정에서 단1%만의 원료물질의 손실이 발생하였을 때, 연간 수십억톤의 수소제조 경우 그 양은 방대한 양이 되고, 손실 비용은 매우 크게 될 것이다. 열화학적 수소제조공정은 대부분 할로젠 원소를 사용하므로 이의 부식문제, 취급성 및 환경오염 가능성에 대해서도 연구평가되어야 할 것이다.

수소의 액화 및 고체 수소화물의 저장, 수송, 부식, 연료전지의 개발, 자동차 및 가정용 취사 등의 연료로 안전하게 사용할 수 있는 장치개발도 선결되어야 할 과제들이다.

물의 열화학 공정은 규모가 방대하고, 투자비가 많이 소요되며, 원유가의 하락 등으로 1980년대 중반이후로 연구가 침체되고 그 이용면에서만 주로 연구되고 있다. 그러나 물분해에 의한 수소제조나 HTGR의 연계에 의한 열화학순환공정이 연구되어야 할 것이다. 동시에 앞서 지적된 기술적인 문제 및 재료개발과 환경평가가 이루어져야 진정한 의미로서의 수소에너지 시대를 맞이 할 수 있을 것이다.

3. 결 론

1. 화석연료의 한계성 및 환경오염 방지를 위해 무공해인 대체에너지가 개발되어야 한다.
2. 수소를 무공해로 대량 생산하기 위해서는 물의 전기분해 및 밀폐식 열화학순환공정과 이들의 병합공정이 가장 유망하다.
3. 수소제조 과정에서의 공해물질 배출이 없어야 하며, 이에 필요한 전기 및 고온의 열은 원자력 발전과 HTGR-FBR의 병합에 의해 공해물질을

가장 적게 배출하여 제공될 것으로 판단된다.

4. 원자력과 수소에너지계에 의해 전력과 열의 공급이 가능하므로 국내에서 아직 연구되지 않은 HTGR과, 그 열원을 열화학공정 등에 이용하기 위한 열교환 계통연구가 추진되어야 할 것이다.
5. HTGR 열원의 실용화는 시간이 소요되므로 태양열을 이용하는 공정도 고려되어야 하며, 향후 핵융합로의 실용화에 대비하여 이의 열 이용면에 대해서도 연구되어야 한다.

참고문헌

1. Penner, S.S and L.Iserman, "Energy ; Vol.1 Demands, resours, impact, technology, and policy", Addison-Wesley pub. com. 373pp (1976)
2. OECD, "International Energy Agency ; Energy prices and taxes, third quarter 1986", 308pp (1987)
3. International Energy Agency, "Energy policies and programmes of IEA countries", Andre-Pascal, Paris, 588pp (1989)
4. 한필순, 발행, "2000년을 향한 원자력 장기 발전 연구", 한국에너지 연구소, KAERI/RR-459/85, 45pp (1985)
5. 동력자원부, "제6차 경제사회 발전 5개년 계획, 에너지 자원부분 계획", 281pp (1986)
6. El-Wakil, M.M., "Power plant technology ; chap.7 Enviromental aspects of power generation", McGraw-Hill Book Comp., 710-764 (1984)
7. 홍옥희, "화력발전소 건설과 환경영향 평가", 에너지 협의 회보, 12, 37-45 (1989)
8. Bockris, J.O'M., "Energy ; The solar-hydrogen alternative", John Wiley & Sons, New York, 365pp (1975)
9. 이종원, "우리나라 대체에너지 개발 현황과 전망", 에너지 관리 6 (56), 2-31 (1981)
10. 고재범, "대체에너지 기술개발 정책 방향", 에너지 관리, 150호, 80-83, (1978)
11. Ohta Tokio, 김길환 역, "수소에너지", 전파과학사, 214pp (1981)
12. Sogame, E., K. Yanagawa, et al., "Liquid hydrogen and the Japanese space program", in proc. of the 3rd world hydrogen energy conference in Tokyo, 1611-1621 (1980)
13. Peschka, W., "Operating characteristics of a LH₂ fueled car and of a semiautomatic LH₂ refueling station", ibid, 1516-76
14. Butler, J.N., M. Dienst, "Elcetrochemistry of fuel cell electrodes. Hydrogen evolution at a solid indium electrode", Report R-11, 42pp
15. Suuberg, W.S.Y. and C. Waide, "Modeling studies of fixed-bed metal-hydride storage systems", in proc. of the THEME conf., Miami Beach, 621-643 (1974)
16. Reynolds, R. A. and W. L. Slager, "Pipeline transporation of hydrogen", ibid, 533-43 (1974)
17. Robin, A. M. and W. G. Schlinger, "Gasification of coal liquification residues", The 13th Intersociety Energy conversion Engineering conf., San Diego, California, (1978)
18. Rudloph, P., "The Lurgi process, the route to SNG from coal", presented at the 4th synthetic pipeline gas symposium, Chicago, (1972)
19. Standen, A., editor, Kirk-Othmer encyclopedia of chemical technology, 2nd. ed., vol. 11, Interscience publ., New York, 347p (1966)
20. Wiegand, D. et al., "The significance of the HTGR temperature in the economic use of nuclear heat for coal gasification" in proc. of the international conference on the HTR process application, London, paper 13 (1974)
21. Juentgen, H. et al., "Kinetics, heat", ibid, paper 12
22. Ohta, T., "Solar hydrogen energy system, chap. 5 Thermochemical hydrogen production", 81-114 (1979)
23. ibid, "chap. 2 Solar hydrogen energy system", 25-33 (1979)
24. Davis, D.D., "Solar synthetic-fuel production ; hydrogen from the sun" USAEC report NP-29017561, 32pp (1982)
25. Hillmer, P. and H. Gest, J. Bacteriol., 129, 723

- (1977)
26. Mrochek, J.E., "The economics of hydrogen and oxygen production by water electrolysis and competitive processes", *Abundant Nuclear Energy*, Washington, S. 107-122 (1969)
27. Kuhn, A.T., editor, "Industrial electrochemical processes, chap. 4," Elsevier, Amsterdam, (1972)
28. Nuttall, L. J., "Production and application of electrolytic hydrogen: Present and future", *ACS Symp. Ser.*, 116, 191-212 (1979)
29. Farbman, G. H., "The Westinghouse sulfur cycle hydrogen production process", *Hydrogen Energy Distrib., Symp. Pap.*, 317-37 (1978)
30. Xiaoyuan, L., "A new hybrid thermochemical cycle for production of hydrogen from water", *Sci. Sin., Ser. B.(Engl. ed.)*, 29(7), 709-17 (1986)
31. Funk, J. E., and R.M.Reinstrom, "Final report Energy depot electrolysis systems study", *USACE report TID-20441 vol 2(suppl.)*, (1964)
32. Cox, K. E. and M. G. Bowman, "Thermochemical production of hydrogen from water", *USAEC report LA-UR-78-2996*, 21pp (1977)
33. 안병화, 발행, "한국전력통계" 58호, 80pp (1989)
34. 한필순, 발행, "에너지 자립의 길", 한국에너지연구소, 30pp (1986)
35. 한필순, 발행 "은실효과와 에너지 전략", 원자력동향, 한국에너지 연구소, 7(8), 86-100 (1989)
36. Onuki, K., S. Shimizu, et al., "Coupling of thermochemical hydrogen production processes with an HTGR", *Int. J. Hydrogen Energy*, 9(5), 391-6 (1984)
37. Trauger, D. B., G. D. Whitman, "Gas-cooled reactor program semiannual progress report" *USAEC report UCRL-3807*, 288pp (1965)
38. Singh, J., H. F. Niessen, "The nuclear heated steam reformer—design and semitechnical operation experiences", *Nuclear Engineering and Design* 78, 179-94 (1984)
39. Hafele, W. and W. Sassin, "Application of nuclear power other than for electricity generation", *Report RR-75-40*, 120pp (1975)
40. Hammond, R. P., "Nuclear-industrial complexes", *USAEC report LA-5795-C*, 39-44 (1974)
41. Booth, L. A., J. D. Balcomb, "Nuclear heat and hydrogen in future energy utilization", *USAEC report LA-5456-MS*, 28pp (1973)