

토카막 핵융합로의 전망

J.세필드 · J.갈람보스

오크리지국립연구소(미국)

이 글은 금년도 10월 일본 동경에서 개최되는 WEC 제16차 총회의 발표 논문 Division 2 Future Sustainable Energy Supply PS/SRD 2.3 「Non-Fossil Energy Technologies」 가운데 한 부분을 발췌·번역한 것이다.

1. 서 론

본 논문에서는 우선 자기(磁氣)핵융합 에너지 분야에 있어서의 연구현황 및 앞으로의 계획에 대해서 간단히 살펴본 후, 핵융합 발전소의 기본이 되는 토카막 자기핵융합 장치의 개발 전망에 대해 논하였다.

지금까지 2MW급의 JET와 10MW급의 TFTR이라는 2기의 토카막장치에서 많은 양의 핵융합 에너지를 생산해냄으로써 핵융합로와 중수소-삼중수소(D-T) 플라즈마에 관한 기술분야에서 상당한 진전이 있었는데, 이는 가열, 연료, 검사 및 소재분야에 있어서 새로운 기술이 많이 개발된 덕택이었다.

그동안의 연구성과를 토대로 국제 핵융합 실험로인 ITER과 미국의 TPX 핵융합 실험로의 설계를 시작할 수 있었다. ITER은 D-T 플라즈마를 오랫동안 유지하는 것이 가능하고, 점화 제어가 가능하다는 것을 입증하는데 그 목적이 있다.

ITER에서는 또 핵융합 발전소를 만드는데 필수적인 기술이 종합적으로 입증되고, 핵융합 에너지를 실제로 이용하기 위해 필요한 기기들과 고열속(高熱速)의 통합 시험이 수행될 것이다.

한편 미국의 TPX는 보다 개선된 방법의 정상

상태 플라즈마 운전시험을 통해 ITER을 지원하게 될 것이며, TPX와 ITER를 통해 얻은 연구 성과들은 최적 실증로를 개발하는데 사용될 것이다.

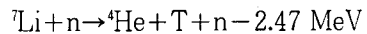
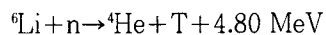
핵융합 반응 연료에는 여러가지가 있는데 여기서는 중수소-삼중수소(D-T) 연료를 사용하는 경우만을 살펴보고자 하며, 이때의 핵융합 반응은 다음과 같다.



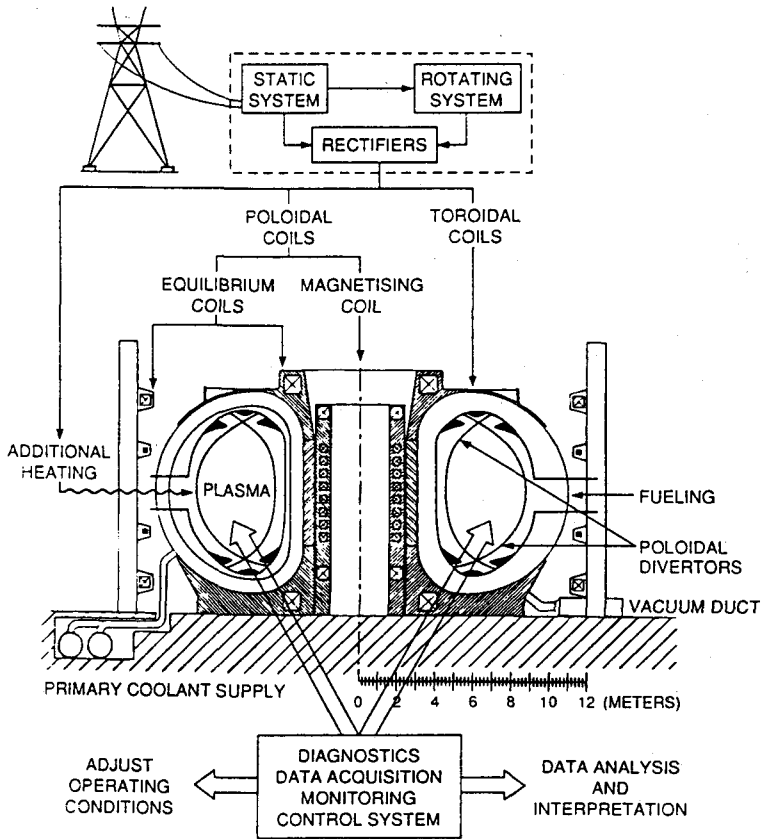
(D: 중수소, T: 삼중수소, ${}^4\text{He}$: 헬륨, n: 중성자)

위에서 핵융합 반응의 부산물로 생기는 헬륨을 제거하여 D-T 연료의 회석을 방지하고 14 MeV라는 아주 높은 에너지를 갖는 중성자를 다루는 일은 매우 중요하다. 헬륨과 중성자는 모두 핵융합로를 이루고 있는 구조물을 방사화시키거나 또는 이를 손상시키기도 한다.

핵융합 반응의 연료로 쓰이는 중수소는 물속에 충분히 들어 있지만 삼중수소는 특별한 방법으로 만들어내야 한다. 보통은 리튬이 함유된 블랑켓으로 플라즈마를 둘러 싸서 핵융합 반응에서 생긴 중성자와 다음과 같은 반응을 일으켜 삼중수소를 만들어낸다.



중수소와 헬륨을 이용한 핵융합 반응도 있는데



(그림 1) 토카막 원자로의 형태

이에 대한 평가는 본 논문에서 다루지 않기로 한다.

자기 핵융합 에너지의 환경, 안전성 및 경제성에 관한 위원회(ESECOM)에서 핵융합로의 환경 문제와 안전성, 국민보건 및 경제성에 관한 연구들을 수행한 바 있다.

연구결과에 의하면 D-T반응에서 생기는 14MeV 중성자에 의한 구조재의 유도 방사능이 낮고 구조재료가 일평방 미터당 15MW·y 이상에 해당하는 14MeV 중성자속에 견딜수만 있다면 자기핵융합로의 전망은 매우 밝다고 한다.

따라서 핵융합로 개발에 있어서 가장 중요한 것이 바로 구조재료 개발이며, 이를 위해 국제 핵융합 재료 조사시설(IFMIF)이라는 14MeV 중성자 선원을 발생시키는 장치를 설계중에 있다.

마지막으로 본 논문에서는 ITER와 TPX의 개발 및 자기핵융합 발전소의 구조재료 연구 프로그램을 통해 얻을수 있는 결과들이 무엇인지 살펴보고자 한다. 그리고 그 결과로부터 핵융합로에서 예상되는 장점들을 평가한 후 이를 가압경수로의 경험과 비교해 보고자 한다.

2. 토카막 장치

지금까지 자기핵융합 분야에서 토카막 장치에 가장 많은 연구비가 투자되었으며 당연히 가장 많은 연구성과가 얻어졌고, 따라서 현재로서는 토카막 장치가 핵융합 발전소에 이용할 수 있는 가장 확실한 방법이라고 생각된다.

(그림 1)에 표준 토카막 장치의 단면도가 나와

있는데, 이 토카막 장치를 이용하면 발전소 설계를 하는데 있어서 가장 중요한 아래와 같은 선결 조건들을 해결할 수 있다.

- 열 이송율과 D-T 연료의 이송율이 낮을 것
- 연료의 회석을 최소화시킬 수 있도록 헬륨재(ash)의 제거율이 높을 것
- 헬륨을 효율적으로 제거하기 위한 전환시스템이 있어야 하고 벽체에서의 불순물 생성과 생성된 불순물의 유입을 최소화 시킬 것
- 플라즈마 유지에 필요한 재순환 동력이 낮은 상태에서도 플라즈마를 붕괴시키지 않고 정상 상태로 운전할 수 있을 것
- 단순한 형태의 자기 유도 코일 장치를 설계하여 비용을 줄이고 이의 유지, 보수가 용이하도록 할 것
- 출력 밀도를 높여줌으로써 이상적인 발전원가(COD) 한계치에 근접할 수 있도록 간단한 코일 장치로도 플라즈마 압력을 높일 수 있을 것

자기 압력에 대한 플라즈마 압력의 비를 베타(Beta)라고 부르는데 베타의 최대값은 다음과 같이 쉽게 평가할 수 있다.

$$\text{베타의 한계값} \approx \beta_N \cdot \frac{I(M_A)}{B(T) \cdot a(m)} \%$$

여기서 (I)는 플라즈마 전류이고, (B)는 도우넛(Torus)형 코일의 자장이며, (a)는 중심면에서 플라즈마의 작은쪽 반경이다. 토카막 장치의 경우 보통 β_N 은 3내지 6의 범위 내에 있다.

토카막 장치에 전류를 공급하는 변압기가 펄스의 존속시간을 제한하기 때문에 토카막 장치는 연속운전이라는 관점에서 볼때 만족스러운 장치는 아니다.

연속운전을 위해서는 플라즈마 전류를 공급하기 위해 다소 복잡한 시스템이 요구되고 있는데 반해, 현재의 장치로는 ‘붕괴(distruption)’라고 부

르는 플라즈마 제어 상실 사태가 발생할 수 밖에 없기 때문이다.

플라즈마 붕괴를 막고 전류 공급상의 어려움을 최소화시키기 위하여 무유도(non-induction) 전류 공급 장치가 70% 이상을 차지하는 운전 방식이 개발되었다. 부츠트랩(bootstrap) 전류가 차지하는 비율이 이정도만 되어도 외부 전류공급 장치에서 공급하는 전류의 양을 크게 줄일 수 있다.

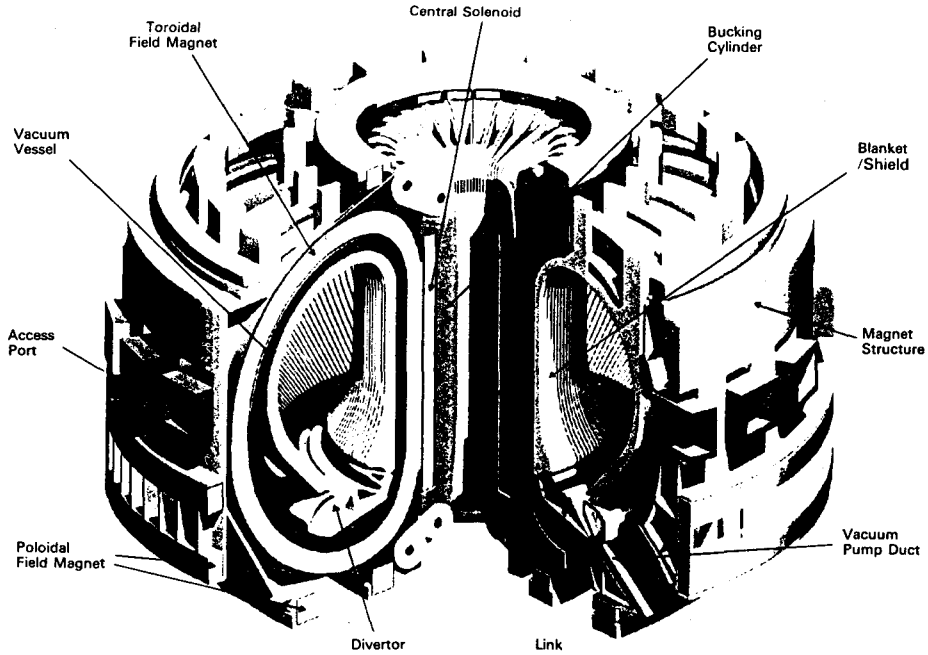
기존의 토카막 장치가 안고 있는 또 다른 문제점은 앞서 정의한 베타값이 약 5% 정도로 매우 낮다는 점인데, 원자로급 플라즈마를 얻기 위해서는 상당히 복잡하면서도 높은 자장(ZRT)의 초전도 코일이 필요하다.

현재의 최적화된 토카막 장치를 이상적인 장치와 비교해 볼 수도 있는데, 이상적인 장치에서는 코일장치에 소요되는 비용이 적고 대부분의 비용은 플라즈마 가입장치나 삼중수소 증식 덮개(Blanket), 차폐체, 입자처리 계통, 열전달 계통 발전기, 건물등과 같은 필수불가결한 기기설비에 투자되어야 한다.

현재까지 개발된 어떤 시스템도 위의 기준을 완전히 만족시키지는 못하지만 도우넛 모양의 토카막 장치는 그중에서도 가장 성공적인 시스템으로서 위의 일부 요건들을 만족시켜 준다. 토카막이나 기타 여러가지 도우넛형 시스템에 대한 논의는 생략하겠다. 필요하다면 최근에 발간된 저서인 “The Physics of Magnetic fusion”를 참조하기 바란다.

3. ITER과 TPX

토카막 프로그램의 성공으로 ITER 플랜트가 착수되기에 이르렀다. ITER의 개념 설계작업(CDA)은 1989년 완성되었고, 유럽경제연합과 일본, 러시아, 미국의 4개국 공동투자 방식으로



(그림 2) ITER의 형태

국제원자력기구(IAEA)의 후원하에 상세 설계작업(EDA)이 진행중에 있다.(그림 2 참조)

ITER 프로그램을 통해 D-T플라즈마를 이용해서 지속적인 자기핵융합의 실현이 눈앞에 현실로 다가서고 있다.

ITER을 이용하면 핵융합 발전소에서 문제가 되는 분야는 어떠한 것이고, 또한 제2절에서 제시한 조건들을 만족시키기 위해서는 토카막 시스템의 어떠한 점들이 개선되어야 할 것인지가 분명하게 나타날 것이다.

ITER의 설계개념은 비교적 보수적인 물리적 가정에 토대를 두고 있으며, 플라즈마 전류를 공급하는 변압기를 사용하여 일단 점화가 되면 플라즈마 상태를 최소한 15분 동안 유지할 수 있음을 보증할 수 있도록 충분한 여유도를 주어 설계된다.

ITER 핵융합로의 크기와 비용을 결정하는 요소는 변압기의 크기와 헬륨재 처리방식의 효율이

다. 플라즈마 전류의 소요량이 낮고, 따라서 변압기와 보조설비의 규모를 줄일 수 있는 토카막 운전방식들과 무유도 전류 공급장치가 단기간의 펄스 출력장치에 대해서는 개발되어 있지만 지속적인 핵융합 장치에 대해서는 그렇지가 못하다.

신형 원자로 연구(ARIES)에서 개발된 펄스 출력 장치에 대한 운전방식들은 훨씬 우수한 발전소의 개발 가능성을 보여주기도 한다.

TPX는 연구소, 대학 및 산업체들이 공동으로 참여하는 미국의 국가적 사업으로 추진되고 있다. ITER과 TPX프로그램을 통해 헬륨재 축적량과 구조재의 벽체에서 생성되는 불순물의 양을 줄이기 위한 불순물 최소화 기술을 개발하고 주어진 베타값 하에서 보다 높은 핵융합 에너지를 얻기 위한 연구개발이 이루어질 것이다.

이러한 연구개발 결과들이 다시 TPX에 반영될 것이고, 15분동안 정상상태로 플라즈마를 유지하는 시험이 추진될 것이다.

〈표 1〉 ITER와 TPX의 기본특성

	ITER	TPX
장 반경(m)	8.10	2.25
단 반경(m)	3.00	0.50
이 격 율	1.60	2.0
도우넛 자기장(T)	5.70	4.0
플라즈마 전류(MA)	24.0	2.0
펄스 시간(초)	≥1,000(∞)	1,000(∞)
연료	D-T	D-D
연료 증식 덮개	phase 2	No
정격 핵융합 출력(MW)	1500	-

TPX에서 입증된 운전상의 개선 사항들중 일부는 다시 ITER에 적용함으로써, 낮아진 플라즈마 전류로 정상상태에서 효율적인 운전이 가능하게 될 것이다.

ITER과 TPX의 기본적인 특성들이 〈표 1〉에 수록되어 있다. 〈표 1〉에 비록 ITER의 출력이 1500MW로 나타나 있기는 하지만, 불순물 제거만 잘된다면 베타 한계값 근처에서의 열효율은 블랑켓에서 일어나는 발열반응 이득을 포함하여 5000MW 이상이 된다는 점을 인지할 필요가 있다.

4. 발전단가(COE)

핵융합 발전소의 전력요금 계산에 사용된 모델은 일반적인 원자로에 대한 연구에서 유도된 것으로서 SUPERCODE라는 전산코드에서 채택하고 있는 모델이다. 발전단가(COE)는 다음 식으로부터 계산된다.

$$COE \approx \frac{\text{고정비용} \times \text{자본비용} + \text{운전유지비} + \text{연료비}}{\text{순변제율} \times \text{전기출력} \times \text{이용율} \times \text{연간운전시간}} + \text{폐지비용}$$

여기서 고정비용 변제율이란 건설중 차입한 비용의 연간 변제비율을 말하며 불변 미국 달러로 약 0.1정도 된다. 자본비용에는 건설기간중 지급

된 이자가 포함된다. 운전 유지비는 핵분열 원자력발전소의 경우와 비슷할 것으로 추산되는데, 그 이유는 비록 이용하는 기술들이 다소 다르기는 하겠지만 유지보수에 필요한 사람들의 수는 비슷할 것으로 생각되기 때문이다.

연료비는 소모되는 중수소의 구입비용에다 발전소 전 수명기간 동안 사용된 리튬 증식 덮개의 연간 할당비용을 합한 비용이다. 폐지 비용은 핵분열 원자력 발전소의 폐지 비용 산정 방식에 따라 0.5mill/kWh로 평가하였다.

핵융합 발전소의 이용율(정격 출력에서의 부하율)은 기기와 계통의 신뢰도와 유지보수 요건에 대한 자료가 부족하기 때문에 가장 불확실성이 큰 인자이며, 목표값으로 0.75로 설정하였다. 한편 순 전기출력은 다음과 같이 계산된다.

$$P_e = [0.14P_f + 0.8(1 + g_n)P_f] \eta_e - P_{BOP} - P_{aux}$$

여기서 P_f 는 핵융합 출력이고, g_n 은 증식덮개에서의 발열 이득율이며, η_e 은 유효-전기 전환효율이다. P_{BOP} 는 발전소 유지를 위해 사용된 전력량이고 P_{aux} 는 플라즈마 장치를 유지하고 핵융합로를 구동하기 위해 사용한 보조 전력량(MWe)이다. 위에서 사용된 0.14라는 값은 70%의 핵융합 출력이 유효 열에너지로 전환된다는 것을 의미하는데, 이는 열을 받는 모든 자재의 표면이 동일

〈표 2〉 핵융합 발전소의 전기출력 대차대조 및 전력 요금 계산에 이용된 자료

전기출력 대차대조	
열출력 대 전기출력 효율	0.45 ¹⁾
플라즈마 열출력의 전기출력 변환율	70%
증식 덮개의 에너지 이득	0.30
전류 공급장치 효율 (전력 단자 대 플라즈마 효율)	72%
비용 계산시의 가정 자료	
건설기간(년)	6
발전소 수명(년)	30
평균 부하율	75%
간접 또는 예비비의 비율	46% ²⁾
고정비용 변제율 ³⁾	0.0966
유효 자본비 ⁴⁾ (/년)	0.1135
인플레이션(/년)	0.05
직접 비용	10분의 1(같은 종류일때) ⁵⁾

1) 고온의 헬륨 냉각 계통 도입시

2) 자료 출처 : ITER CDA

3) 불변 미국 달러

4) 유효 자본비는 고정비용 변제율과는 서로 독립 변수이며 자본인자 평가 목적으로만 사용됨.

5) 토카막 발전소에는 20%의 비용 절감율이 적용되었음.

(발전소 수가 두배로 늘어날 때마다 94%의 학습율과 동등)

하게 고온을 유지하지는 않을 것이기 때문이다.

컴퓨터 코드인 SUPERCODE를 이용하면 이상적인 핵융합로 설계를 할 수 있는데, 이 컴퓨터코드는 토카막 물리학과 공학적 모델들을 하나의 최적화 드라이버로서 결합시켜 놓은 것이다. 계산시에는 핵융합로 모델링을 위한 플라즈마 물리학과 ITER-CDA 장치를 모델링하기 위해 개발된 엔지니어링/비용 분석 방법이 이용된다.

또한 표준 발전소 모델들이 들어 있어서 모든 경우에 최적화 FOM(figure-of-merit)으로서 최소 발전단가가 이용된다. 〈표 2〉에 원자로 모델링에 사용된 일부 가정들이 수록되어 있다. 비용 모델들은 ARIES연구에서 사용된 것들과는 다르

다. 그 이유는 토카막과 관련된 비용들을 ITER-CDA 설계사항에 맞추어 규격화시켰기 때문이다.

나머지 발전소 비용들의 평가방법은 ARIES연구에서 사용된 방법과 유사하다. 제시된 모든 경우에 대해서 온도와 밀도에 대한 포물선 형태가 되도록 조정된 체적평균 운송모델을 사용하였다.

또 플라즈마 전류와 전류구배 및 플라즈마 기하학 사이의 관계를 제공해 주는 고정경계 자기수력 역학(MHD) 평형 계산법도 이용하였다.

물리적 모델링에는 불순물 함량, 출력 평형, 베타 제한치, MHD 요건, 전류 공급, 알파입자 밀폐 및 유도 전압-초(volt-second)등에 관한 제한치들이 포함되어 있다. 엔지니어링 모델들에는

〈표 3〉 ITER과 유사한 원자로의 설계인자

	ITER 수준 $B_N < 3.5, K = 1.6$		개선된 수준 $B_N < 6.0, K = 2.0$ 90%의 BS분율
	1200MWe급	1800MWe급	2000MWe급
발전단가(mills/kWh)	132	102	63
자본비용(1993년, 10억불)	8.21	9.41	5.95
f(회전율, %)	28.5	25.6	11.7
노심 질량(kt)	43.9	49	24.4
MPD(kWe/t)	27.3	36.7	79.6
주 반경(m)	8.1	8.1	6.50
중형비	2.55	2.39	1.95
플라즈마 전류(MA)	22.0	26.3	13.3
축상 자장(T)	4.83	4.83	4.53
$B_{max} - TF_{coil}$ (T)	11.4	12.3	11.3
q95	3.0	3.0	4.0
핵융합 출력(MW)	1960	4290	4120
인입 출력(MW)	216	279	32
부스트랩 비율	0.37	0.36	0.90
플라즈마 에너지 이득, Q	13.7	15.4	131.0
ITER-89PH 인자	1.92	1.76	2.22
총 베타(%)	5.10	5.60	9.01
벽체의 중성자 부하(MW/m ²)	1.72	2.32	3.48

도우넛장(Foroideal field:TF) 코일과 플로이달(poloidal) 코일, TF 코일결, 차폐, 전환장치, 인입 전력 및 벽체의 중성자 부하 등에 대한 제한치들이 포함되어 있다.

여기서 사용된 가정들중 J.Galambos등이 상용 토카막의 평가시 사용한 가정들(참고 문헌 11)과 가장 크게 차이가 나는 점은 ITER 기본설계에서 한발 더 나아가 헬륨재의 농도를 5%로 더욱 낮게 가정하였다는 점과 신장율(95% 표면에 대해 $K=2$ 를 적용)을 약간 높게 가정하였다는 점이다.

리튬블랑켓과 제1벽체는 바나듐 구조물과 액체

리튬 냉각재/증식재로 구성되어 있다. 〈표 3〉은 표준 핵융합로 설계에 사용된 인자들을 보여준다.

5. 핵융합 발전단가와 핵분열 발전단가 비교

핵분열 원자로들의 성능과 관련 비용들은 정기적으로 분석되고 있다. 1200MWe급의 가압경수로에 대한 분석이 Delene에 의해 이루어졌으며, 600MWe급에 대한 미래의 최적 성능이 미국 에너지 인식 협회에 의해 예측된 바 있다.

〈표 4〉 핵분열로와 핵융합로의 발전단가 비교

(1993년 경상가격, 이자율=0.097, 단위=mills/kWh)

	자본비용	운전유지비용	연료비용 및 폐기 비용	계
ITER-1200 ^a	116	9.5	6.5	132
ITER-1800 ^a	88	8	6	102
ITER-2000 Advanced ^{a, b, c}	50.5	7.5	5	63
PWR 최적 경험 ^d	42.5	10	8	60.5
핵분열-최적 예상값 ^e	28.5	9.5	8	46
핵융합로-2000 ^{a, f}	≤28	≤7	~5	≤40

- a. 건설기간 6년-기본 ITER(K=1.6 등), 10기의 동일 발전소를 지을 경우 단위 발전소당 단가
- b. H-모드 인자 2, $\beta_n=6.5\%$ 헬름, 90% 부스트랩 전류, 핵융합관련 부품 가격 20% 감소
- c. 발전단가는 대략 $Pe^{-0.5}$ 에 비례
- d. J.Delene, 1990, 1200 MWe, 8년의 건설 선행 기간
- e. U.S.Council for Energy Awareness, 1992, 600 MWe, 5년의 건설기간, 우라늄 가격에 대한 낙관적인 가정
- f. 핵융합로-2000은 전자석 시스템을 제외한 모든 기기나 시설물을 지칭함

〈표 4〉에는 핵융합로의 예상 발전단가와 핵분열로의 현재 발전단가들이 비교되어 있다.

ITER-1200 $\beta_n=3.5\%$ m-T/MA의 베타 제한치에서 중간 핵융합 출력을 갖고 운전되는 ITER 설계를 토대로 한 1200MWe급의 핵융합로이다.

ITER-1800은 동일한 베타 제한치로 운전되는 유사한 설계의 융합로로서 고출력 제어와 보다 빈번한 장비교체에 따른 비용 증가분이 포함되어 있다. ITER-2000 Advanced는 토카막보다 진보된 특성을 적용하여 보다 작게 설계되었으며 단위 비용이 20% 감소된다고 가정하였다. 핵융합로-2000은 구성기기가 최소화된, 즉 전자석없이 점화되는 2000MWe급의 D-T시스템이다.

핵융합 특유의 설비들을 배치하였을 경우 핵융합로의 예상 발전단가가 기존 발전원의 발전단가와 비슷해진다는 것을 보여주기 위하여 이와 같은 최소한의 시스템을 예로 들었다. 한편 ITER-2000의 경우에는 발전단가가 이상적인 핵분열로의 최소 발전단가보다 약 50% 정도 높은 것에 불과하였다.

비록 예상되는 최적의 핵분열로와 경쟁하기 위해서는 관련기술을 더욱 개량시켜야 할 필요가 있지만 이 자료를 통해서 신형 토카막 원자로가 경쟁력을 가지게 될 수도 있음을 알 수 있다. 그러나 Dolan이 분석한 바와 같이 경쟁력을 갖기 위해서는 발전소의 규모가 핵분열로 보다 더욱 커야 할 것이다.

이 분석결과에는 핵융합로의 잠재적인 안전성 향상과 저방사화 재료들을 이용함으로써 얻어지는 방사능 감소 및 폐기물 영향감소 등의 이점은 고려되어 있지 않다.

6. 재료 및 증식 불량켓

ESECOM 연구에서 자기핵융합 에너지의 환경 문제에 안전성 및 경제성을 조사한 바 있는데, 기존 핵융합 발전소들에 대한 자료와 현존하는 그리고 미래에 예상되는 핵분열 발전소의 자료를 서로 비교하였다.

연구의 대상이 된 핵융합로중에서 증식 불량켓, 구조 및 냉각방식에서 크게 차이가 나는 몇개의

토카막을 선정하였다.

- V-Li 토카막은 액체 리튬을 냉각재 및 삼중수소 증식매체로 이용하며, 구조재로는 바나듐 합금을 사용함.
- RAF-He 토카막은 냉각재와 증식매체로서 각각 헬륨과 고체 산화리튬을 이용하며, 구조재로는 저방사화 페라이트강을 사용함.
- SiC-He 토카막은 냉각재와 증식매체로서 각각 헬륨과 고체 산화리튬을 이용하며, 구조재로는 탄화규소 복합체를 사용함.

모든 발전소 수명은 전출력 운전기준으로 30년을 가정하였으며, 플라즈마와 접촉하는 재질(즉 제1벽)과 제1벽 뒤편에 설치된 증식 블랑켓의 수명은 20MW-년/m²에 해당하는 14MeV 중성자 선속으로 가정하였다.

따라서 75% 부하율로 가동되고 중성자속이 5MW/m²라고 하면 약 5년마다 블랑켓을 교환하여야 할 것이다. 경제적인 측면에서 보면, 성능 및 비용요소를 어떻게 가정하느냐에 따라 핵융합 발전의 예상단가가 유사한 출력의 핵분열 발전소 발전단가와 비슷해질 수 있었다.

성능 및 발전단가가 비슷할 경우 핵분열로에 비해 핵융합로가 가질 수 있는 이점들은 안전성과 환경분야에서 찾을 수 있다.

위에서 거론된 재료들은 핵분열발전에 사용되는 재료들에 비해 상대적으로 방사화 방지능력이 낮고 또 보다 짧은 시간내에 붕괴되며, 특히 핵융합로에서는 악티나이드가 생성되지 않는 장점이 있다. 핵융합로에 사용되는 재료별로 시간이 경과함에 따른 방사능준위의 변화와 핵분열로의 예가 (그림3)에 나와 있다. 방사성 폐기물의 관점에서 보면 핵융합이 핵분열에 비해 100배 정도 유리하다. 또 운전중 방출되는 방사성물질의 측면에서도 핵융합이 핵분열보다 유리할 것으로 예상된다.

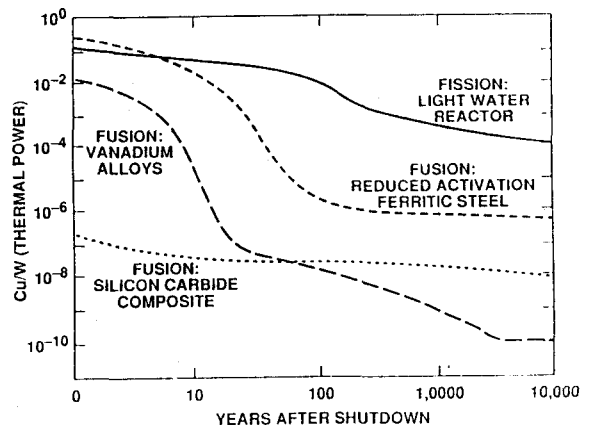
핵확산측면에서 보면, 핵융합발전소의 경우 비

록 엄격한 삼중수소 계량 관리가 요구되기는 하지만, 핵분열물질이 부지내에 있을 수가 없으므로 핵분열물질을 반입하기가 더욱 어려울 것이고, 또 반입여부를 탐지하는 것도 핵분열발전소에 비해 유리할 것으로 본다.

따라서 저방사화 재료들을 개발할 수만 있다면 핵융합이 훨씬 더 매력적인 발전원이 될 수 있다. 블랑켓과 제1방벽에 사용될 수 있는 재료개발이 첫번째 관문이다. 이 재료는 고강도의 14MeV 중성자 속(~5MW/m²)을 받게 되며, 운전온도 범위에서 열전도도가 낮아야 한다. 경제적인 이유로 인하여 이 재료는 약 20MW-년/m²의 중성자선속에 견딜수 있어야 한다.

이 중성자선속은 재료내부에서 원자당 약 200번의 위치 변동을 야기시키고 구조물내에 헬륨과 수소를 발생시킨다. 발생된 기체들은 구조물내에서 뭉쳐져 기포를 형성할 수 있으며, 그렇게 될 경우 구조재료의 부풀음 현상이 생긴다.

따라서 다음과 같은 주요 특성들이 변화하지 않고 그대로 유지되어야 한다.



(그림 3) 정지후 핵융합발전소와 핵분열발전소의 방사능 비교

이러한 환경에서 다음과 같은 주요 성질들이 유지되어야 한다.

- 열전도도
- 낮은 부풀음
- 강도
- 낮은 연성 - 취성 천이 온도
- 냉각재와 증식체로서의 화학적 양립성

아울러, 제1방벽과 블랑켓 및 플라즈마로부터 멀리 떨어진 설비들은 방사화 생성물질의 붕괴 열이나 방사능과 같은 안전성 및 환경관련 요건들을 만족시킬 수 있도록 방사화 생성물의 방사능이 충분히 낮아야 한다.

우수한 방사화 특성을 가진 원소들에는 리튬과 베릴륨, 탄소, 규소, 티타늄, 바나듐, 크롬, 철, 탄탈륨 그리고 텅스텐 등이 있다.

방사화 특성이 나쁜 원소들에는 구리, 몰리브덴, 질소, 니오븀 그리고 니켈 등이 있다. 방사화 특성이 나쁜 원소들은 비록 극미량만 존재해도 우수한 재료들의 방사화 준위 하한치를 결정하게 된다.

ITER/TPX를 기본으로 한 핵융합로의 단가분석에 사용된 바나듐합금/액체리튬으로 제1방벽과 블랑켓을 설계하는 개념이 ITER을 위한 연구에서 개발되었다.

지금까지 재료의 검증과 선택은 핵분열로에서 조사시키거나, 고에너지 이온조사 및 재료내에서 헬륨을 발생시키는 여러가지 기술들을 이용함으로써 이루어졌다.

재료의 검증을 위하여 새로운 설비들이 요구되고 있다. 유동 리튬표적에 가속된 중수소 이온을 충돌시키는 방법을 이용하여 작은 체적의 강력한 14MeV 중성자원을 발생시키는 장치가 국제원자력기구의 후원하에 개발되고 있다.

대형 블랑켓 구조물을 시험하기 위해서는 보다 큰 체적의 중성자원이 필요하다. ITER 또는

TPX 같은 설비가 이러한 목적으로 사용될 수 있다.

지난 20여년 동안 중성자 조사 손상문제에 대해 많은 연구가 이루어져 몇개의 후보 재료를 선정할 수 있었다. 현재는 바나듐합금과 페라이트(마르텐사이트)강, 탄화규소 등에 관해 집중적인 연구가 행해지고 있다. 베릴륨과 탄소복합체 그리고 텅스텐이 플라즈마와 접촉하고 있는 재료로서 고려되고 있으며 바나듐합금(크롬+티타늄)의 핵융합로내 조사 시험으로부터 고무적인 결과가 얻어진 바 있다.

7. 결 론

자기핵융합로 개념중 가장 많은 연구개발이 이루어진 것이 바로 토카막 장치이다. 이 장치는 ITER, TPX 및 기타 후속 프로그램들을 거쳐 21세기 중반경까지는 경제적인 자기핵융합 발전소의 건설을 가능하게 할만한 잠재력을 가지고 있다.

핵융합로의 경우 규모가 커짐에 따라 경제성이 크게 향상됨으로 약 2000MWe급 정도의 대형 발전소가 선호되고 있다. 도우넛형 토카막의 다른 설계 개념들도 몇몇 주요분야에서 좋은 성능을 보여주고 있으며, 이 성능을 개량함으로써 좋은 발전소를 만들 수도 있다. 좋은 발전소를 건설하기 위해서는 저방사화 재료의 개발이 필수적이다.

긴밀한 국제적 협력 덕분에 핵융합의 모든 분야에서 상당한 진전이 이루어지고 있다. 21세기 중반까지 핵융합에너지를 이용 가능하도록 하기 위해서는 활발한 연구개발 프로그램이 계속 유지되어야 한다. ㉔

(번역/한국전력 전력연구원 송명재 박사)