# Fusion Reactor Technology I (459.760, 3 Credits)

Prof. Dr. Yong-Su Na

(32-206, Tel. 880-7204)

#### **Contents**

Week 1. 에너지와 지구환경 문제

Week 2-3. 토카막로의 기초

Week 4-6. 토카막로의 설계

Week 8-9. 노심 플라즈마에 관한 기반과 과제

Week 10-13. 노공학 기술에 관한 기반과 과제

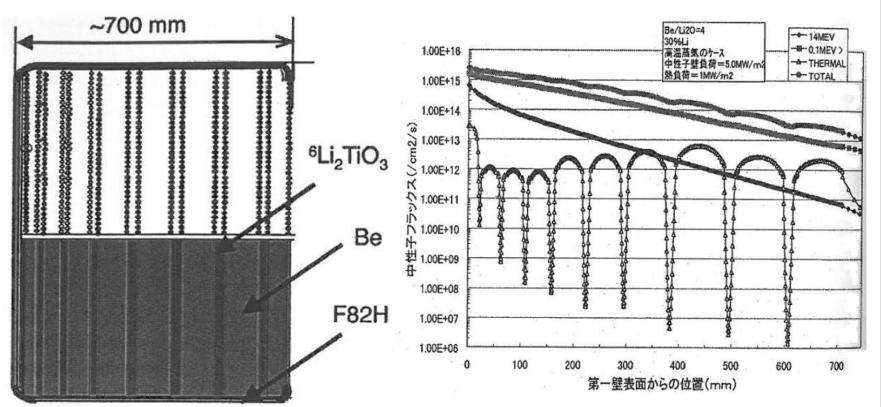
Week 14. 상용로의 길 / Project Presentation

- Tritium의 자기 생산
- TBR > 1.08

TBR > 1.02: tritium 붕괴, 그 외 요인에 의한 감소 고려
TBR > 1.05: 핵 데이터(FENDL-3 by IAEA)의 오차 (5~10%),
모델링의 오차 (3~7%), 설계에 유래하는 불확정 요인 (0~3%)
TBR > 1.08: 핵융합로 도입 초기 다음 호기 이후의 초기 장착분의
제조 고려 (1900년대 후반 핵분열로 정도의 도입 pace 상정 시)

- 개념설계 단계: blanket을 slab 또는 원통 모델에 단순화하여 1차원 계산으로 국소 TBR을 계산, 증식 영역의 면적점유율(plasma에 면하는 면적 중 증식 영역이 차지하는 비율)을 곱해 TBR을 산출

- Tritium의 자기 생산
- 고체 증식 수냉각 blanket. 2차원 Slab 모델 1차원 중성자 수송 코드 ANISN을 이용해 계산



- Tritium의 자기 생산
- TBR > 1.08

TBR > 1.02: tritium 붕괴, 그 외 요인에 의한 감소 고려
TBR > 1.05: 핵 데이터(FENDL-3 by IAEA)의 오차 (5~10%),
모델링의 오차 (3~7%), 설계에 유래하는 불확정 요인 (0~3%)
TBR > 1.08: 핵융합로 도입 초기 다음 호기 이후의 초기 장착분의
제조 고려 (1900년대 후반 핵분열로 정도의 도입 pace 상정 시)

- 개념설계 단계: blanket을 slab 또는 원통 모델에 단순화하여 1차원 계산으로 국소 TBR을 계산, 증식 영역의 면적점유율(plasma에 면하는 면적 중 증식 영역이 차지하는 비율)을 곱해 TBR을 산출
- Tokamak의 VV 중 중성자속은 DT 반응으로 생성한 14 MeV 중성자뿐만 아니라 blanket이나 divertor 등의 기기에서 반사된 저에너지의 중성자로 구성되어 있음. 예) ITER: 14 MeV 중성자속은 전체의 약 20% 정도
- NBI port와 같은 대구경 port, blanket의 case를, 보강 rib, module 간 캡 등은 면적점유율을 감소시킴.

- Tritium의 자기 생산
- Blanket 상정 설치 면적과 기하학적 점유율 및 중성자 공학적 점유율 (SlimCS의 예)

중성자 공학적 면적점유율 = 기하학적 면적점유율 x 중성자 공학적 효과

영역	기기		표면적(m²)	기하학적 면적점유 율	중성자 공 학적 효과	중성자 공 학적 면적 점유율
증식영역	Blanket	증식영역	555	75.9%	~0.98	74.1%
비증식 영역		Case틀	53	7.3%	1.2	8.9%
		보강 Rib	22	3%	1.2	3.6%
		Module 간 캡	7	1%	0	0%
	Divertor (SN)		86	11.8%	1.0	11.8%
	Port		7.5	1%	1.6	1.6%

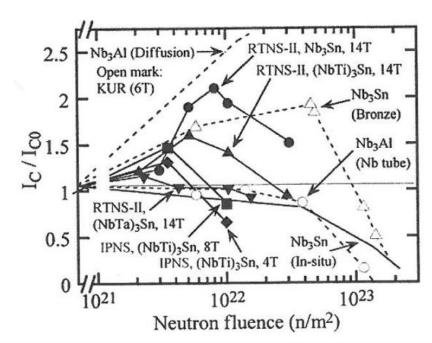
- Tritium의 자기 생산
- Blanket 상정 설치 면적과 기하학적 점유율 및 중성자 공학적 점유율 (SlimCS의 예)
- NBI port는 면적점유율 ~1% 정도로 TBR에 큰 영향을 주지 않음.
- Divertor가 TBR 감소의 가장 큰 요인임.

Cf. SlimSC: SN Divertor에 30 cm두께의 blanket을 설치 → 0.018 TBR 개선

- Case틀이나 보강 Rib도 TBR 감소에 영향: 노심 plasma의 disruption 빈도, disruption 시상수, blanket 내압(냉각재 파단 등의 사고 시 내압도 포함) 등에 따라 설계가 달라짐. Blanket과 더 나아가는 핵융합로의 안전성에 관련되므로, TBR의 관점에서는 얇은 것이 바람직하지만, 신중한 설계가 필요

- Tritium의 자기 생산
- Li 감소: 증식층의 두께가 1 cm 이상일 경우, 평균 중성자 벽부하 3 MW/m²에서 3년간 운전(SlimCS의 수냉각 고체 blanket의 경우) 시 TBR의 감소율은 1% 이하 6Li(n, α)T 반응의 단면적이 열중성자에 대해 크며, 열중성자의 평균 자유 행정이 1 mm 정도이기 때문에, 증식층의 표면층만이 반응하고 중심부는 반응하지 않기 때문. 표면의 6Li가 연소해도 심부에 미반응 6Li가 남아있기 때문에, 증식층을 전체로 보면, TBR은 그정도로 저하하지 않음.
- 순수 TBR ≥ 1.05를 만족하기 위해 1.42의 국소 TBR 필요

- 수명 노본체의 수명
- 정기적 교환을 전제로 하는 blanket이나 divertor를 제외하면 핵융합로 본체의 수명은 초전도 코일(초전도선, 안정화 도체, 절연재)의 수명 특히 조사 손상에 의한 열화에 의해 거의 정해짐.
- 초전도선의 조사 손상: 중성자 조사에 민감, 중성자 조사에 의해 임계 온도의 저하나 임계 전류의 저하를 초래



- 초전도 코일의 조사 손상에 의한 수명으로는 1x10<sup>21</sup> n/m<sup>2</sup> 부근으로 설계하는 것이 적당함.

- 수명 노본체의 수명
- 구리안정화재료의 조사 손상:

4.5 K에서의 중성자의 튕김 효과에 의한 무산소 동의 저항률:

 $\rho/\rho_0$ 

 $= 1 - 2 \times 10^3$  Fluence(dpa)

초전도 코일이 상온까지 상승하는 정기적 보수 점검 기간에 조사 손상의 anneal 효과가 기대됨 - 상온까지의 승온에 의해 저항률의 변화는 약 80% 회복. 200~300°C까지 baking이 가능할 경우 저항률은 매우 개선됨.

→ 구리안정화재료의 조사 손상에 의한 저항률 변화는 초전도 코일의 수명에 중대한 영향을 주지 않음.

- 수명 노본체의 수명
- 유기절연재의 조사 손상:

FRP 등 유기 절연재의 경우, 중성자에 의한 튕김 효과보다도 γ선에 의한 전자 여기 효과에 의한 가교 절단 등에 의해 기계적 강도가 열화됨. 초전도 코일은 비교적 두꺼운 금속의 케이스가 있기 때문에, 코일 외부로 부터의 γ선은 충분히 차폐됨. 따라서, 입사한 중성자가 코일 케이스나 코일, 구리안정화재료와 반응하며, 2차적으로 생성되는 γ선이 주로 영향을 미침.

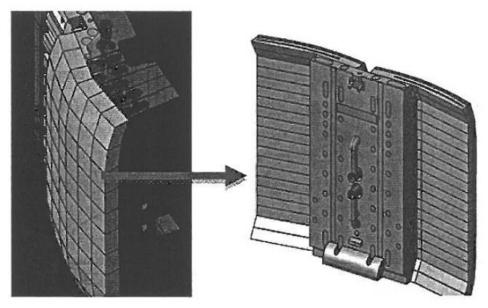
- 예) 에폭시 베이스 FRP: 초전도 코일의 수명은 유기 절연재의 수명으로 정해짐. 중성자 플루엔스  $\sim 1x10^{20} \text{ n/m}^2$
- 예) 폴리이미드계 유기 절연재: 유기 절연재와 초전도선재의 수명은 대부분 동일. 중성자 플루엔스 ~ 1x10<sup>21</sup> n/m<sup>2</sup>
- 운전 기간 30년, 가동률 75% 경우, 초전도 코일에 있어서의 중성자속의 설계 목표치는 < 1.4x10<sup>12</sup> n/m<sup>2</sup>s

- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- Armour재의 마모 손상: plasma로부터 나온 열이나 입자가 주는 표면손상 Physical sputtering: 입사하는 입자의 운동 에너지에 의한 표면의 원자 또는 분자가 방출되는 현상. 입사 입자의 운동 에너지에 임계값이 존재하며, armour재의 원자량이 클수록 임계 에너지도 커짐.
  - 예) 중수소 이온 입사에 대해 탄소: ~10 eV, 텅스텐: ~300 eV. SOL의 이온 온도는 수 10 eV 이하이므로 텅스텐 armour에서는 거의 발생하지 않음.
  - Chemical sputtering: 입사 입자와 표면이 화학적으로 반응하여 마모손상하는 현상. 탄소 armour의 경우, 메탄 등의 탄화 수소 반응으로 발생하지만, 헬륨이나 텅스텐에서는 대부분 문제가 되지 않음.

Cf. sputtering의 관점에서는 High Z 재료인 텅스텐이 바람직하지만, 만일 sputtering이나 용융에 의해 armour재가 불순물로써 plasma 속에 혼입한 경우, plasma의 온도를 저하시키며, 심한 경우에는 disruption을 일으킴.

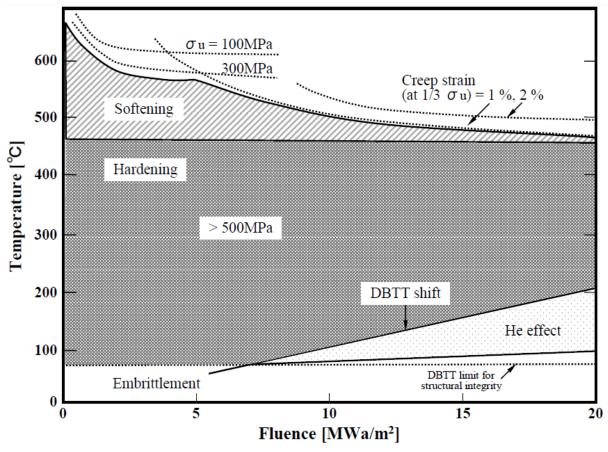
- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- Armour재의 마모 손상:

ITER: 불순물의 혼입을 고려하여, blanket armour재로서 Be(10 mm두께) 채용



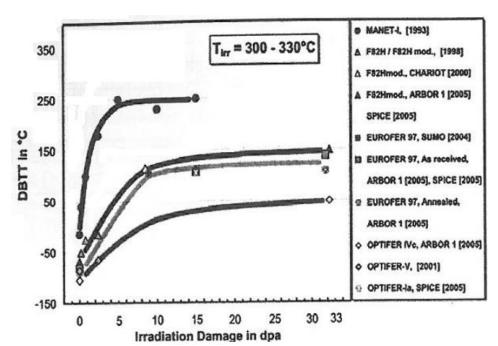
원형로: 구조 재료로 구성되는 제1벽에 3~4 mm두께의 텅스텐을 붙일 것을 상정하고 있음. 예열 성능이나 tritium 증식 성능에 미치는 영향 등을 고려하여 두께 결정. 텅스텐 armour의 마모손상은 sputtering보다는 disruption이나 ELM(주로 Type-I)에 의한 용융에 의해 정해짐.

- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- 구조재료의 조사 손상: 저방사화 철강재료의 design window



- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- 구조재료의 조사 손상:

중성자 조사에 의한 인성의 저하가 가장 큰 문제. 중성자 조사에 의한 생성된 헬륨이 미치는 영향에 대한 연구 필요.



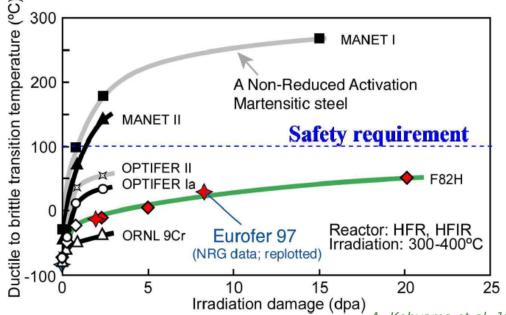
Blanket의 수명/교환 시기는 2 년 정도로 예상하지만, blanket 의 사용 온도, 냉각재의 종류, 압력 등에 영향을 받으므로 상 세한 검토가 필요

원자로의 조사에 의한 각종 저방사화 페라이트강의 연성 취성 천이 온도 (Ductile-Brittle Transition Temperature)의 변화

- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- 구조재료의 조사 손상:

중성자 조사에 의한 인성의 저하가 가장 큰 문제. 중성자 조사에 의한 생성된

헬륨이 미치는 영향에 대한 연구 필요.



Blanket의 수명/교환 시기는 2 년 정도로 예상하지만, blanket 의 사용 온도, 냉각재의 종류,

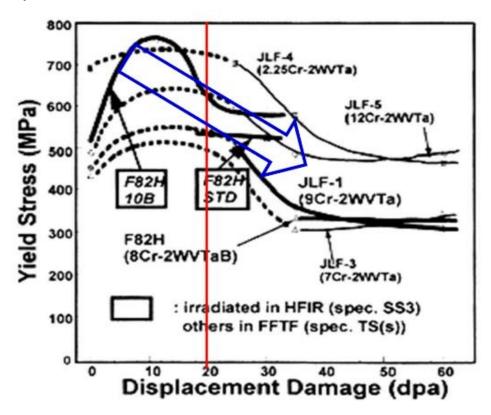
] 압력 등에 영향을 받으므로 상 <sub>25</sub> 세한 검토가 필요

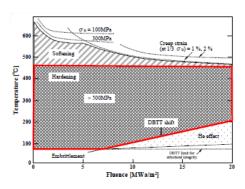
A. Kohyama et al, Journal of Nuclear Materials 233-237 (1996) 138-147

원자로의 조사에 의한 각종 저방사화 페라이트강의 연성 취성 천이 온도 (Ductile-Brittle Transition Temperature)의 변화

- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- 구조재료의 조사 손상:

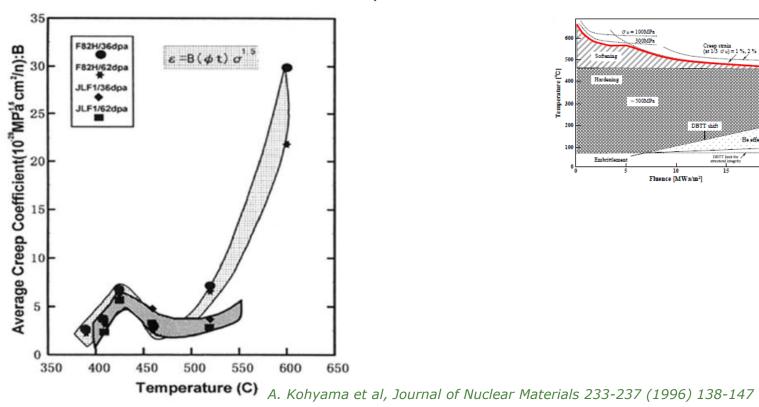
20 dpa 이상 영역에서의 저방사화 철강재료의 조사경화 감소

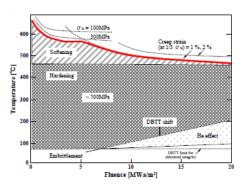




- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- 구조재료의 조사 손상:

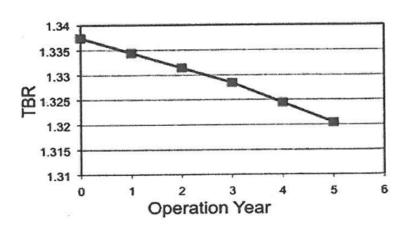
500℃ 이상의 영역에서의 조사에 의한 creep 속도의 가속은 9Cr 계에서 현저히 저하 → 9Cr 계의 내조사 creep 특성이 가장 우수





- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- Tritium 증식재 속의 <sup>6</sup>Li burnup:

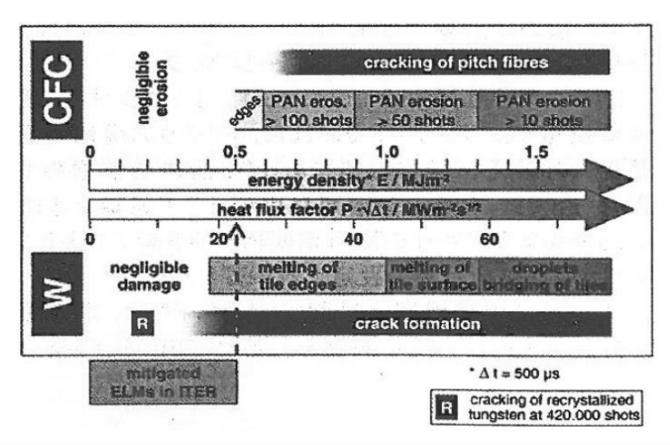
고체 증식형 blanket에서는 tritium 증식재 속의 Li의 연소를 고려하여 그 blanket의 사용 기간 내 TBR이 1이상이 되도록 교환 시기를 설정해야 함. 예) Slim CS (고체 증식 수냉각 blanket): 평균 열부하가 3 MW/m<sup>2</sup>으로 3년간 운전하면, TBR이 6% 감소 (blanket 내 중성자속은 변화하지 않는다고 가정)



- 수명 Blanket의 수명과 교환 시기
- **Tritium 증식재/중성자 증배재의 조사 손상**:

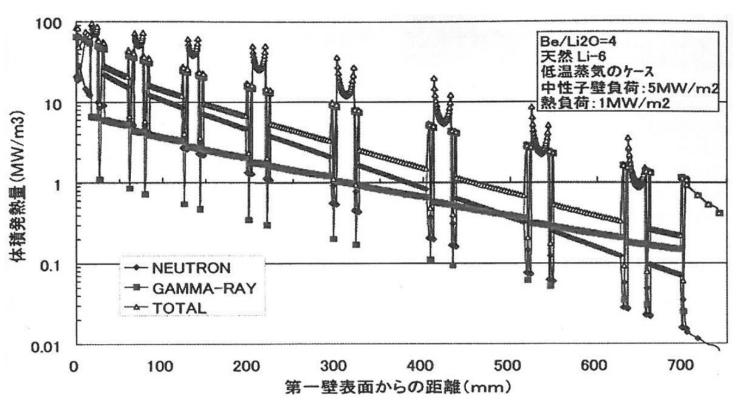
  tritium 증식재나 중성자 증배재는 중성 조사에 의해 swelling 등의 치수 변화,
  기계적 특성이나 tritium 방출 특성 등의 변화 발생이 우려됨.
  - Tritium 중식재: 일부 재료에 대해 5%의 Li 연소도까지의 조사 데이터가 있지만, 원형로의 설계에서는 약 20%의 Li 연소도, 약 80 dpa의 중성자 플루엔스, 1000℃까지의 데이터 취득이 요구됨.
  - 금속 베릴륨: 3000 appm He, 약 30 dpa의 조사 데이터가 있지만, 원형로 설계에서는 약 2000 appm He의 헬륨 생성량, 약 50 dpa의 중성자 플루엔스, 900℃까지의 데이터 취득이 요구됨.

- 수명 Divertor의 수명과 교환 시기
- 텅스텐 armour의 마모손상은 sputtering보다는 disruption이나 ELM(주로 Type-I)에 의한 용융으로 정해짐.



- 수명 Divertor의 수명과 교환 시기
- 텅스텐 armour의 마모손상은 sputtering보다는 disruption이나 ELM(주로 Type-I)에 의한 용융으로 정해짐.
- ITER: Typ-I ELMs 에너지는 20 MJ(10 MJ/m²)로 CFC, 텅스텐 모두 중대한 손상을 끼침. 1 MJ (0.5 MJ/m²)까지 ELM의 에너지를 억제할 수 있다면 1 shot 당 104회의 ELM으로써 diveror armour의 수명은 100-1000 shot이 됨.
- 원형로: divertor부로 들어가는 정상적인 유입 에너지는 ITER(약 100 MW)와 비교하여 5~6배 큰 500~600 MW가 상정되고 있음. 그것만으로도 성립할 수 있는 divertor의 설계가 매우 어려움.
- → Blanket과 함께 원형로 설계가 가장 어려운 과제 중 하나임.

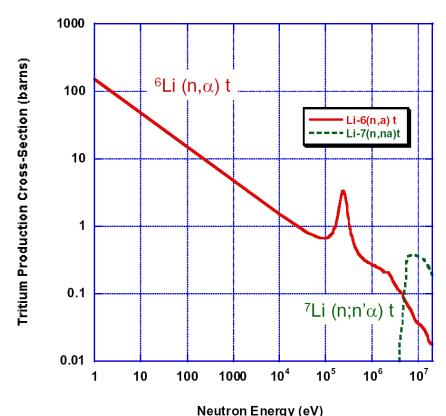
- 효율
- 핵융합 출력 밀도: 수냉각 고체 증식 blanket(천연 리튬의 경우)의 증식 제1층 표면에서, 핵발열은 100 MW/m³정도이지만 30~40% 농축 6Li에서는 200~300 MW/m³ 정도임.



## **Tritium Breeding**

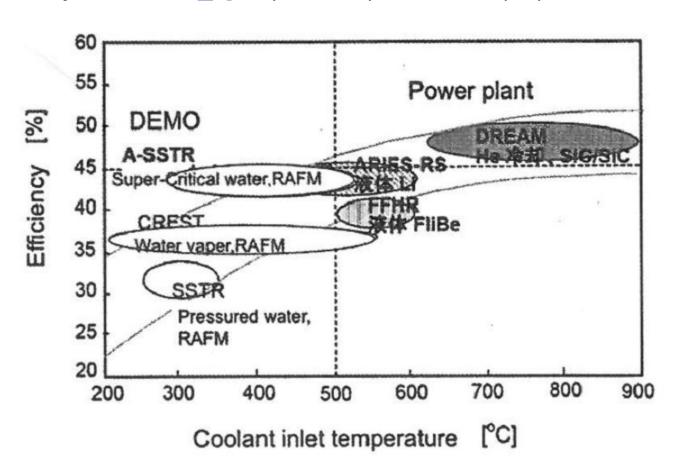
 Tritium production by neutron-induced reactions with natural lithium (<sup>6</sup>Li:<sup>7</sup>Li=7.5:92.5)

 $^{6}$ Li + n → T + He + 4.78 MeV: thermal and epithermal neutron energy range  $^{7}$ Li + n → T + He + n' – 2.47 MeV: fast neutron energy range



- The <sup>7</sup>Li(n,n'a)t reaction is a threshold reaction and requires an incident neutron energy in excess of 2.8 MeV.

- 효율
- Blanket의 온도 조건 설정: 핵융합로의 발전 효율과 직결됨.



- 효율
- 보조기 설비의 효율

#### (1) 가열장치

원형로의 가열/전류 구동에는 NBI와 ECRH가 주요한 후보임.

NBI: 원형로의 가속 에너지는 1~2 MeV, 연속 운전 요구. ITER에 비해 종합적인 고효율화가 필요하며, 50% 이상의 효율이 요구

ECRH: 도파관과 mirror에 의한 launcher로 plasma에 입사할 수 있기 때문에, 개구부가 작고 중성자의 누출이 적어 원형로 및 동력로에서는 가장 유망시되고 있는 가열 장치

#### (2) 냉동 설비

초전도 코일의 냉각(약 5 K, 0.4 MPa의 초임계 헬륨 이용)에 주로 필요. 초전도 코일의 열부하는 열전도나 복사에 의한 정상 열부하, 핵발열, 도체의 교류 손실, 구조체의 와전류 손실 등에 의함.

**예) ITER:** ~43 kW 냉동 능력의 헬륨 냉동기 필요. 액체 헬륨의 업무율은 70.3 (액체 헬륨 온도에서 1 W를 얻으려면 70 W의 동력이 필요)

- 효율
- 설비 이용률
- (1) 운전/보수 기간비율

원형로의 운전 기간에 대한 보수 기간비는 75% 정도. 원형로 이후의 핵융합로에 있어서는 원격 보수 방식이 운전/보수 기간 비율뿐만 아니라 노의 성립성그 자체를 좌우하기 때문에, 개념 설계 단계부터 충분한 검토가 필요. 핵융합로본체를 규제하는 법 및 전기 사업법에 의해 터빈 등의 정기 점검을 할 필요가 있어서 운전/보수 기간비율을 고려하는데 있어서 법 규제도 고려해야 함.

#### (2) 장치 건설 .VS. 운전시 이용률

원형로의 건설 기간은 10년, 운전 기간은 30년으로 상정되고 있음. 경수로에서는 주요 구조체인 압력 용기의 방사선 손상이 장치의 수명을 정하고 있지만, 핵융합로에서는 밀폐 격벽인 진공 용기는 blanket에 의해 보호되고 있기 때문에, 조사 손상은 그다지 크지는 않음. 직접 핵융합 plasma로부터의 중성자에 노출되는 blanket을 정기적으로 교환하면 30년 이상 운전할 수 있을 가능성이 있으며, 향후 검토 과제.