

Fusion Reactor Technology II

(459.761, 3 Credits)

Prof. Dr. Yong-Su Na
(32-206, Tel. 880-7204)

Contents

Week 1. Review of Tokamak Reactor Concept

Week 2-4. Tokamak Reactor Critical Issues

Week 5. Blanket Concept I

Week 6. Blanket Concept II, Tritium Fuel Dynamics

Week 7. First Wall Loading, Impurity Effect, Radioactivation

Week 9. Presentation I

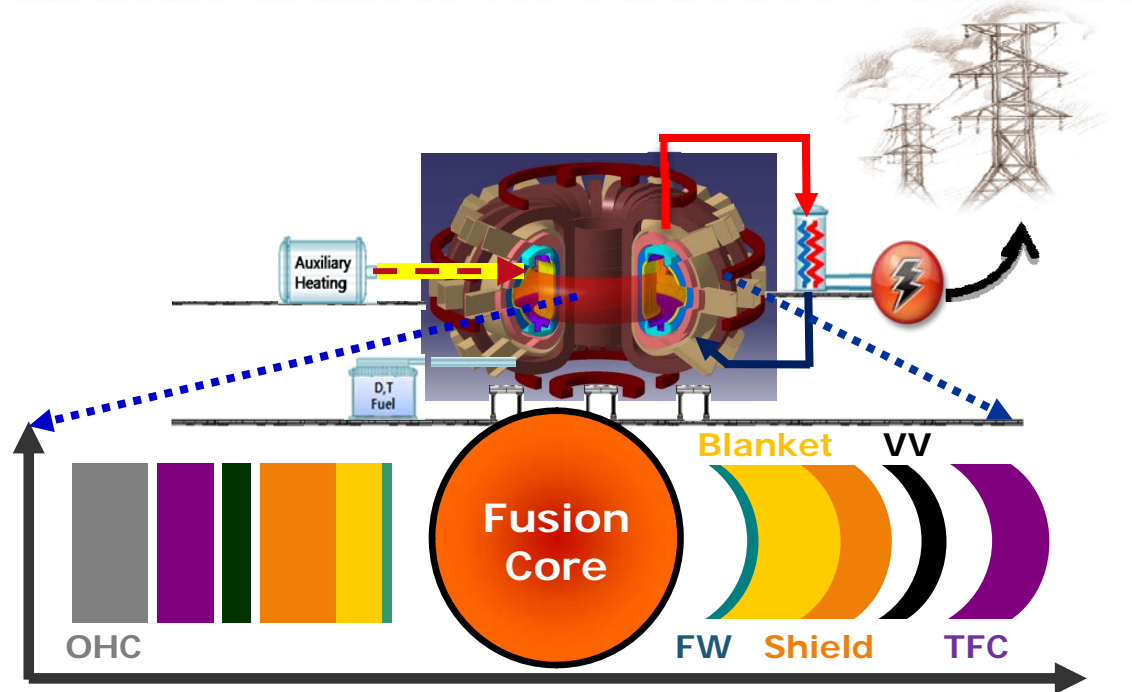
Week 10. Blanket and Material Issues

Week 11-12. Types of Blanket in ITER and DEMO

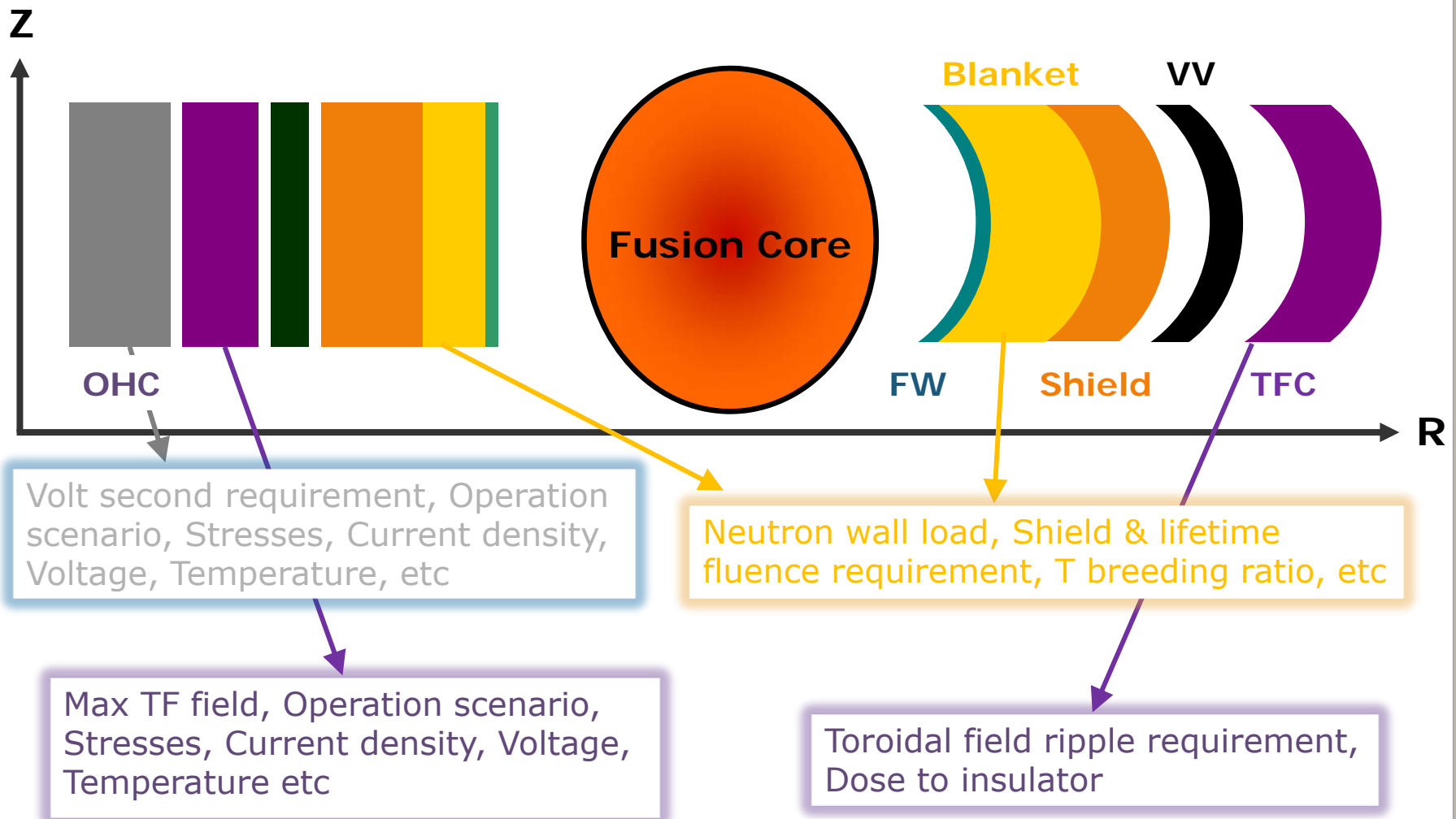
Week 13. Plasma Facing Components

Week 14. Presentation II

Radial build in fusion reactors



Radial build in fusion reactors



1. 블랑켓의 역할

- 1) To sustain a sufficiently clean plasma domain
- 2) To recover energy from the emitted radiation and reaction products
- 3) To shield the surrounding structures and personnel
- 4) To breed tritium required in the D-T reactor core

2. 트리튬의 증식 생산

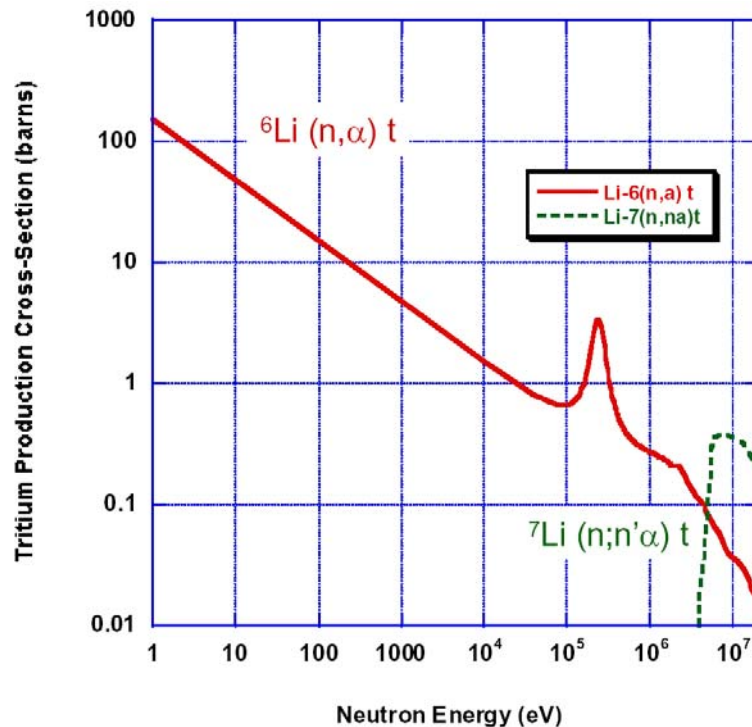
- 트리튬: 방사성 동위원소.

12.3년의 반감기로 베타붕괴해서 헬륨으로 변환

- 중성자와 천연 리튬(${}^6\text{Li} : {}^7\text{Li} = 7.4 : 92.6$)과의 반응

${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \text{He} + 4.78 \text{ MeV}$: 낮은 중성자 에너지에서 반응

${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \text{He} + n' - 2.47 \text{ MeV}$: 높은 중성자 에너지에서 반응



The ${}^7\text{Li}(n, n'\alpha)\text{T}$ reaction is a threshold reaction and requires an incident neutron energy in excess of 2.8 MeV.

2. 트리튬의 증식 생산

- 트리튬: 방사성 동위원소.

12.3년의 반감기로 베타붕괴해서 헬륨으로 변환

- 중성자와 천연 리튬(${}^6\text{Li} : {}^7\text{Li} = 7.4 : 92.6$)과의 반응

${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \text{He} + 4.78 \text{ MeV}$: 낮은 중성자 에너지에서 반응

${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + \text{He} + n' - 2.47 \text{ MeV}$: 높은 중성자 에너지에서 반응

- TBR (Tritium Breeding Ratio):

생성되는 트리튬의 수(total tritium production rate in blanket)와 핵융합 반응으로 소비되는 트리튬(tritium destruction rate in core)의 수의 비, 1 보다 커야함. → 중성자 증배 필요

$$C_t = \frac{\int_{V_b} \int_{v_n} \sigma_{n6}(v_n) N_6 N_n(v_n) v_n dv_n d^3r + \int_{V_b} \int_{v_n} \sigma_{n7}(v_n) N_7 N_n(v_n) v_n dv_n d^3r}{\int_{V_c} N_d N_t <\sigma v>_{dt} d^3r}$$

N_6, N_7 : ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ atom densities in the blanket volume V_b

σ_{n6}, σ_{n7} : corresponding microscopic neutron absorption cross sections

N_n : speed dependent neutron density, v_n : neutron speed

V_c : fusion core volume

2. 트리튬의 증식 생산

- 중성자 증배 반응



- 트리튬 소비율

$$C_T = 55.7 P_f f_d \text{ (g/yr)}, P_f: \text{핵융합반응출력(MW)}, f_d: \text{가동률}$$

Ex. $P_f = 2500 \text{ MWt}$ (전기출력 1000 MWe), $f_d = 0.8 \rightarrow 100 \text{ kg}$ 소비

Cf. CANDU(중수로)에서의 트리튬 생산량 $\sim 2 \text{ kg/yr}$

Cf. Tritium available worldwide: $\sim 20 \text{ kg}$ (2006, Canada OPG)
(+Korea WTRF)

- ITER tritium credit: \$30 M/kg

- Market value: \$100M-\$200 M/kg (1억/g)

3. 블랑켓의 방식

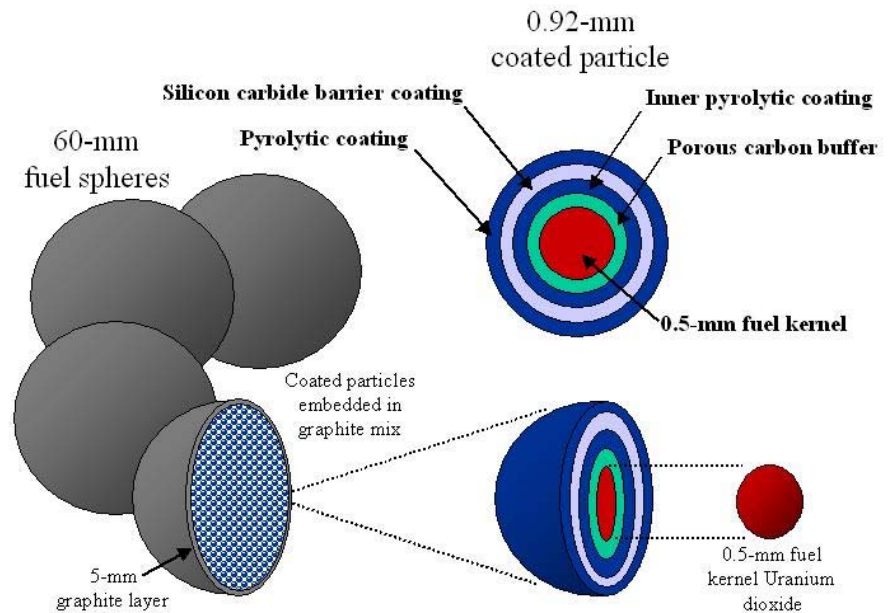
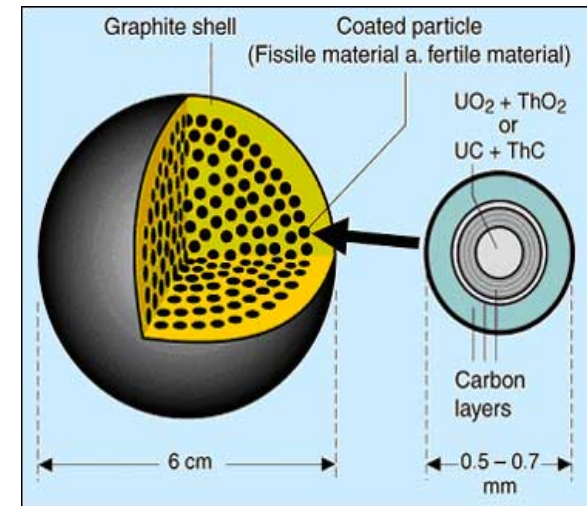
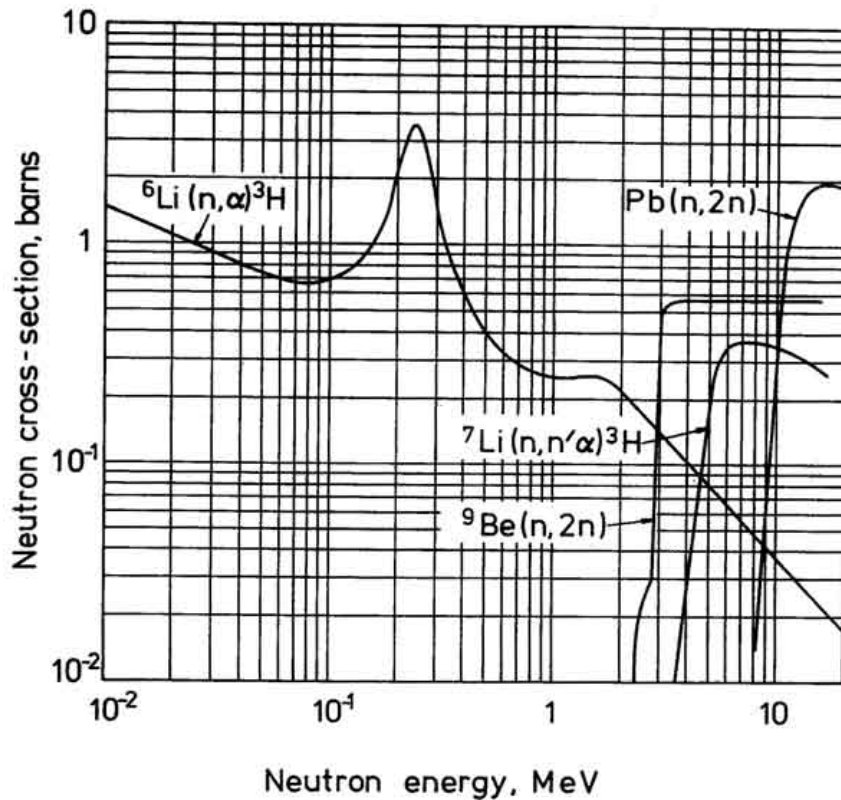
- 증식재의 형태에 따라 고체 증식재와 액체 증식재로 나뉨.

고체증식재	액체증식재
Li_2O , Li_2TiO_3 , Li_2ZrO_3 , Li_2SiO_4	액체 리튬, 액체금속, FLiBe (용융염: molten salt fluids)
화학적으로 안정 잠재적인 안정성 높음 구조재와의 양립성이 우수함	방사선 손상 경미 높은 TBR
중성자 조사에 의한 손상	화학적으로 활성 - 구조재 부식 액체리튬의 안정성 문제 MHD 압력 손실로 인한 유속 감소: 전기절연막 필요

4. 블랑켓의 구조

- 상자용 용기 속에 직경 1 mm 정도의 미소구 형상의 고체증식재 및 중성자 증배재 충전.
- 중성자 증배재 (multiplier): (n , xn)-type material
고에너지 중성자와의 반응을 위해 플라즈마 근처에 배치
- 증식재: 증배재 후방에 배치. 반사된 중성자를 효과적으로 이용하기 위해 증배재 전면에도 얇게 배치.
- Reflector: graphite 등 사용.
- 냉각관/냉각패널: 증식재, 증배재, 구조재와 중성자와의 반응에 의해 발생한 열을 제거. 각 재료를 소정의 온도 범위로 유지.
증배재로 Be 사용할 경우 고체증식재의 고온에서의 공존성 문제를 피하기 위해 증식재층과 증배재층 간에 칸막이 설치.
He 가스로 트리튬 이송
- 제1벽: 플라즈마에 면하므로 높은 열부하를 받음.
내부에 냉각유로 설치
- 블랑켓용기: 제작성, 원격보존성 및 전자기력 절감을 고려한 소형 모듈방식

4. 블랑켓의 구조



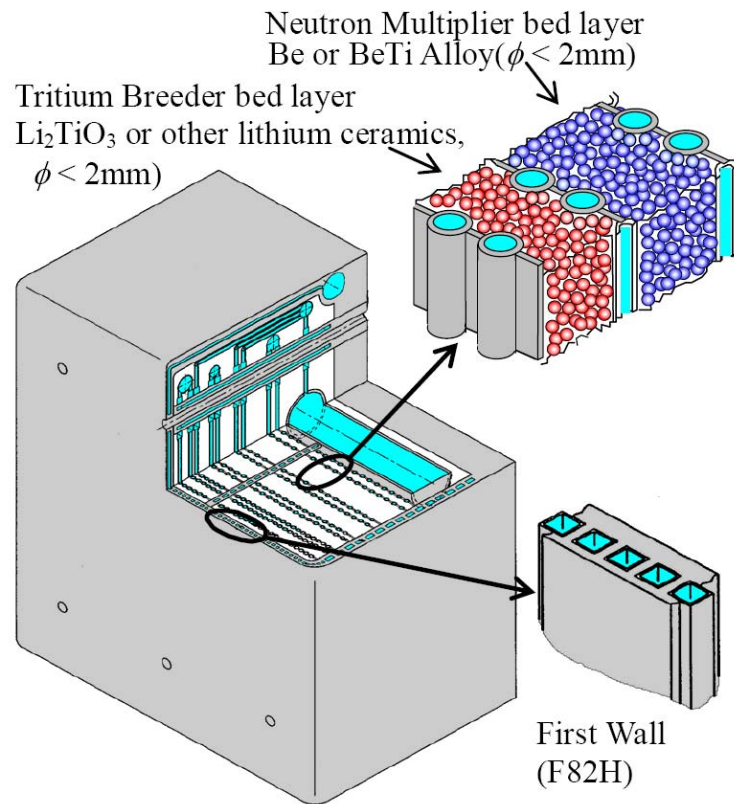
4. 블랑켓의 구조

- 블랑켓 시스템: 블랑켓 구조체, 냉각·발전계, 트리튬회수계, 공학안전계로 구성
- 냉각·발전계: 경수로와 같은 구성.

초임계압수를 이용할 경우 고온·고압($\sim 290\text{-}540^{\circ}\text{C}$, 25MPa)의 1차 냉각수 이용, 블랑켓 냉각 및 직접 발전(45% 열효율) 또는 증기발생기에서 1차 냉각수와의 열교환에 의해 발생시킨 증기로 발전

- 트리튬회수계: 저온흡착탑 이용, 헬륨가스 중 수소동위원소를 흡착 및 회수. 흡착탑의 재생처리 시, 팔라듐 투과막을 통해 흡착탑 내의 잔류 헬륨을 분리해서 순도를 높인 트리튬을 연료순환계로 이송
- 공학안전계: 블랑켓 내부로의 냉각수 누출 발생(LOCA) 대비. 냉각수 증발에 따른 과도한 내압상승에 의한 블랑켓 용기 파손을 피하는 것을 목적으로 압력을 개방 및 압력억제 탱크 장비

4. 블랑켓의 구조



Japan DEMO 2001 Blanket Concept

5. 트리튬 증식 기술

- 상용 핵융합로 100 kg/yr (~ 400 g/day) 정도의 트리튬 요구
- TBR ~ 1.1 이상 요구: 재료표면으로의 흡착, 방사성 붕괴분의 보충, 저장용 트리튬의 확보
- TBR 계산: neutronics – 물질과 중성자와의 상호작용의 단면적(핵데이터)과 계산기법의 개발이 중요.
블랭킷의 복잡한 구조 고려해야 함 (3-D).

Material	Estimated Upper Limit Breeding Ratio, C_T
${}^6\text{Li}$	1.1
Natural Li	0.9
${}^9\text{Be} + {}^6\text{Li}$ (5%)	2.7
Pb + ${}^6\text{Li}$ (5%)	1.7

Materials encompassing the entire fusion core

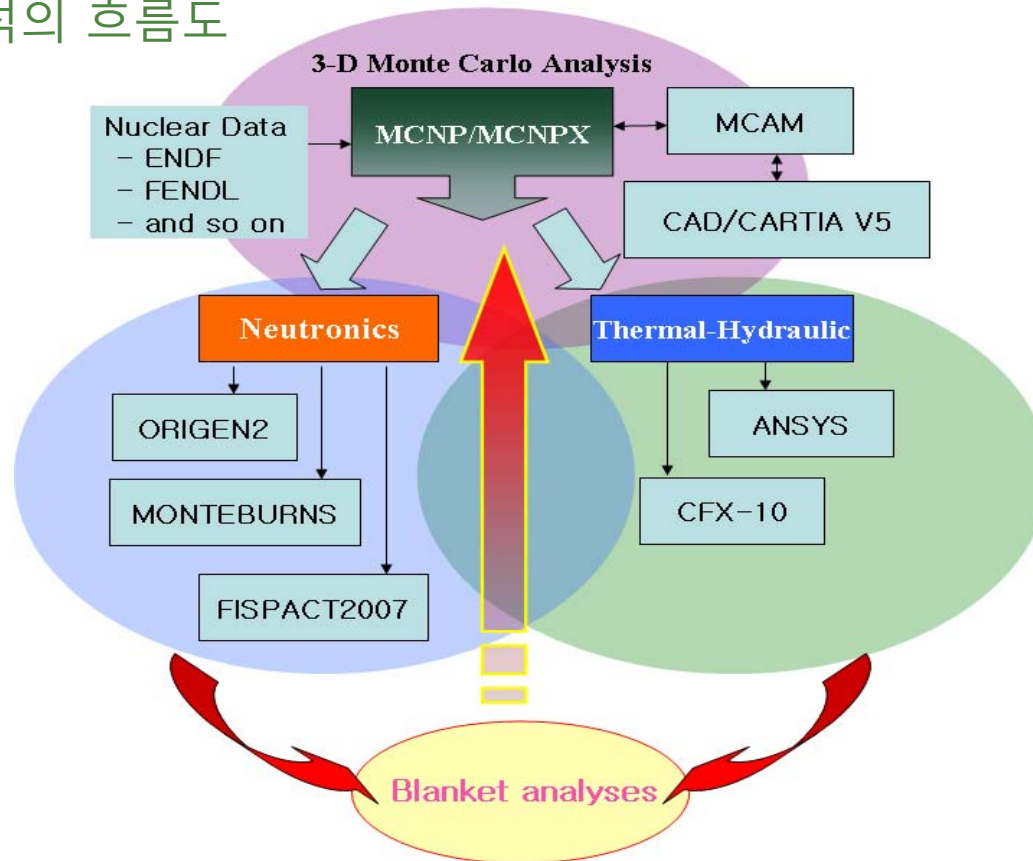
5. 트리튬 증식 기술

Material	Calculated Tritium Breeding Ratio, CT
$\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$	1.6
LiPb	1.4
FLIBE	1.1
LiAlO_2	0.9
Li_2O	1.3
Li_2SiO_4	0.9
Li_2ZrO_3	1.0

- In a “typical” blanket 1 cm thick with 10% volume fraction of 316 SS, preceded by a 1 cm steel front-wall and backed by a 100 cm thick shield: Use of the various solid breeders generally requires an added neutron multiplier

5. 트리튬 증식 기술

Neutronics 해석의 흐름도



- 블랭킷 설계: 방사선 차폐, 열에너지로의 변환과 제열, 구조강도, 플라스마 대향면의 블랭킷 점유율 등의 다양한 관점 하에 트리튬 증식재, 중성자 증배재, 냉각재, 구조재, 차폐재의 구성으로 구조 결정 됨.

5. 트리튬 증식 기술

- Neutronics 해석의 구체적 절차

1. 크기 및 구조 등 제원이 정해진 블랑켓.
2. 제안된 블랑켓에 대한 3-D Monte Carlo에 의한 neutronics 해석
→ 에너지변환과정, 삼중수소 증식과정, 안전성 등을 해석함:
중성자 에너지, 중성자 선량, 방사선 선량과 블랑켓의 차폐 정도의 분석 등.
3. MCNP/MCNPX/MONTEBURNS/ORIGEN2 코드에 의한 TBR, 트리튬 생성량 및 He/H 생성량의 평가.
4. MCNP/FISPACT/ORIGEN2 코드에 의한 블랑켓의 방사화 및 핵변환/붕괴 정보의 평가
5. MCNP에 의해 계산된 중성자 수송계산결과를 이용하여 블랑켓 각 구성부분에 대한 열-수력(thermal hydraulics) 해석: MCNP와 연계하여 CFX-10 과 ANSYS 코드 사용
해석 → 블랑켓 각 구성부품에 대한 열 분포도 얻음.
6. ANSYS/CFX 코드에 의한 블랑켓 각 구성부품(제1벽과 증식영역)의 온도 분포계산
→ 열 스트레스 분석
7. 만족할 만한 결과를 얻을 때까지 2-6항의 결과를 feedback하여 1항을 수정 또는 변경 혹은 결정 → 수정/변경 시 2항부터 다시 반복 → feedback →.....

5. 트리튬 증식 기술

- 고체증식재

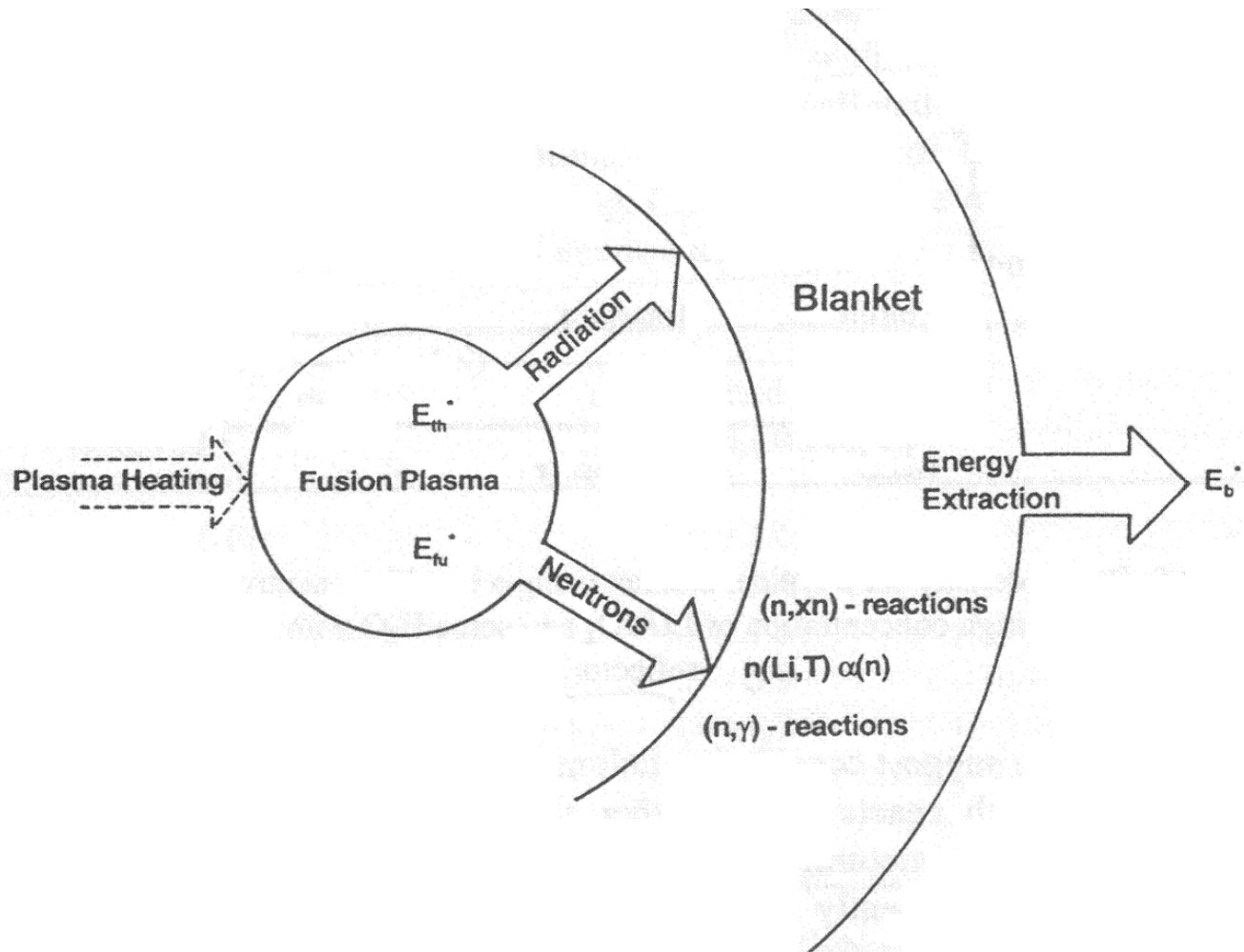
- 리튬세라믹스에 대한 트리튬 용해도, 흡착량, 구조재료와의 반응성, 트리튬 확산계수 등의 설계 데이터베이스 필요
- 중성자 조사에 의해 생성된 트리튬은 결정립 내에서의 확산, 표면이탈반응 등을 통해 sweep gas 중에 방출됨.
- 온도를 높여 확산 속도를 빠르게 하고, sweep gas에 H₂ 첨가해서 표면반응을 빠르게 함.
(트리튬 회수에 필요한 체류시간을 1일 이내로 줄임).
- Sweep gas로부터의 트리튬 회수법:
HT gas의 흡착, HTO의 cold trap, 흡착

5. 트리튬 증식 기술

- 액체증식재: 냉각재의 기능을 겸할 수 있음.

Li	$\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ (Lithium-lead eutectic)	FLiBe ($\text{LiF} \cdot \text{BeF}_2$) (Molten salt fluids)
트리튬 회수 어려움: 수소동위체의 용해도가 큼	트리튬 회수 쉬움: 트리튬 용해도가 매우 작음	
트리튬의 구조재료를 통한 투과누출이 작음: 트리튬이 Li 중에 모임	트리튬의 투과누출이 큼: 구조재료의 세라믹 코팅막 등의 투과장벽이 필요	FLiBe 중의 트리튬 화학형 TF나 T_2 에 의해 구조재의 부식 증가 또는 트리튬 추가누출 증대
		화학적으로 안정하고 고온 사용이 가능

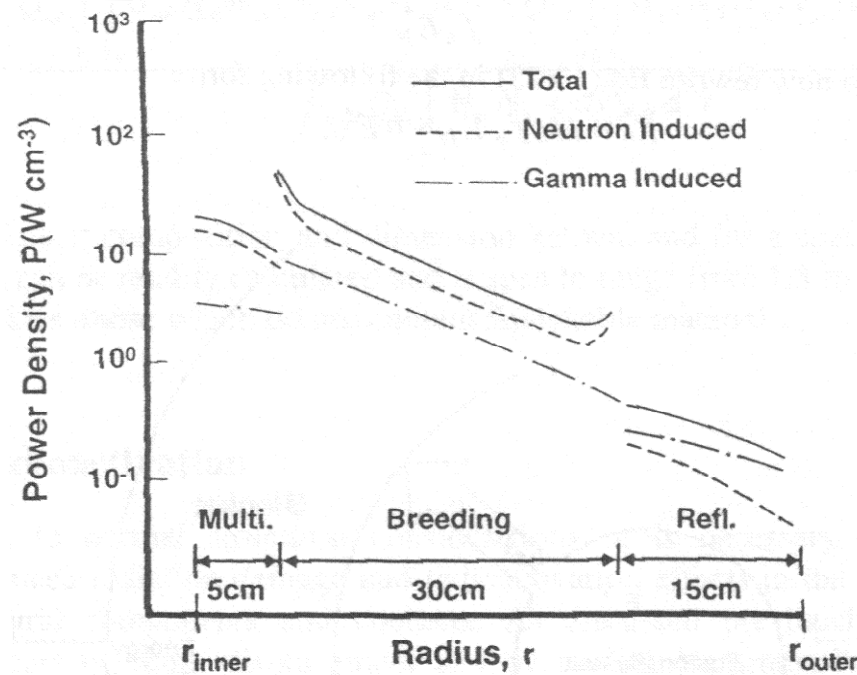
6. 열을 꺼내는 기술



Energy flows into and from a fusion reactor blanket

6. 열을 꺼내는 기술

- D-T 핵융합 반응에 의해 생성된 14.1MeV 중성자 하나가 블랭킷에 입사될 때 마다 중성자와 블랭킷 구성물질과의 핵반응에 의해 전체적으로 약 18~20 MeV 발열



Power density for a typical blanket using a Be neutron multiplier zone followed by a high concentration of LiAlO_2 and some H_2O with an outer graphite reflector

6. 열을 꺼내는 기술

- D-T 핵융합 반응에 의해 생성된 14.1MeV 중성자 하나가 블랭킷에 입사될 때 마다 중성자와 블랭킷 구성물질과의 핵반응에 의해 전체적으로 약 18~20 MeV 발열
- 에너지증배계수 (blanket multiplication factor)
= 블랭킷 내의 발열 / 입사 중성자 에너지(14.1MeV)
= 1.3~1.4

$$M_b = \frac{bf_n E_{fu}^* + \sum_l E_{nl}^*}{f_n E_{fu}^*} = b + \frac{\sum_l \int_{V_b} R_{nl} Q_{nl} d^3r}{f_n \int_{V_c} R_{fu} Q_{fu} d^3r}$$

For D-T fusion and assuming lithium as the only neutron reactive substance in the blanket

$$= b + \frac{Q_{n6} \int \int_{V_b} \sigma_{n6} N_6 N_n(v_n) v_n dv_n d^3r + Q_{n7} \int \int_{V_b} \sigma_{n7} N_7 N_n(v_n) v_n dv_n d^3r}{f_{n,dt} Q_{dt} \int_{V_c} N_d N_t \langle \sigma v \rangle_{dt} d^3r}$$

b : blanket coverage factor depending on the specific blanket geometry
 f_n : fraction of the fusion energy carried by the neutrons
 E_{nl}^* : total energy released by an l -type neutron-induced reaction.

6. 열을 꺼내는 기술

- Energy removable from the blanket

$$E_b^* = b(f_n E_{fu}^* + E_{rad}^*) + \sum_l E_{nl}^* = M_b f_n E_{fu}^* + b E_{rad}^*$$

- 블랭킷의 냉각시스템은 주로 냉각재, 구조재료, 발열분포에 의해 결정됨:
리튬화합물이 있는 증식재 영역이 고발열 영역

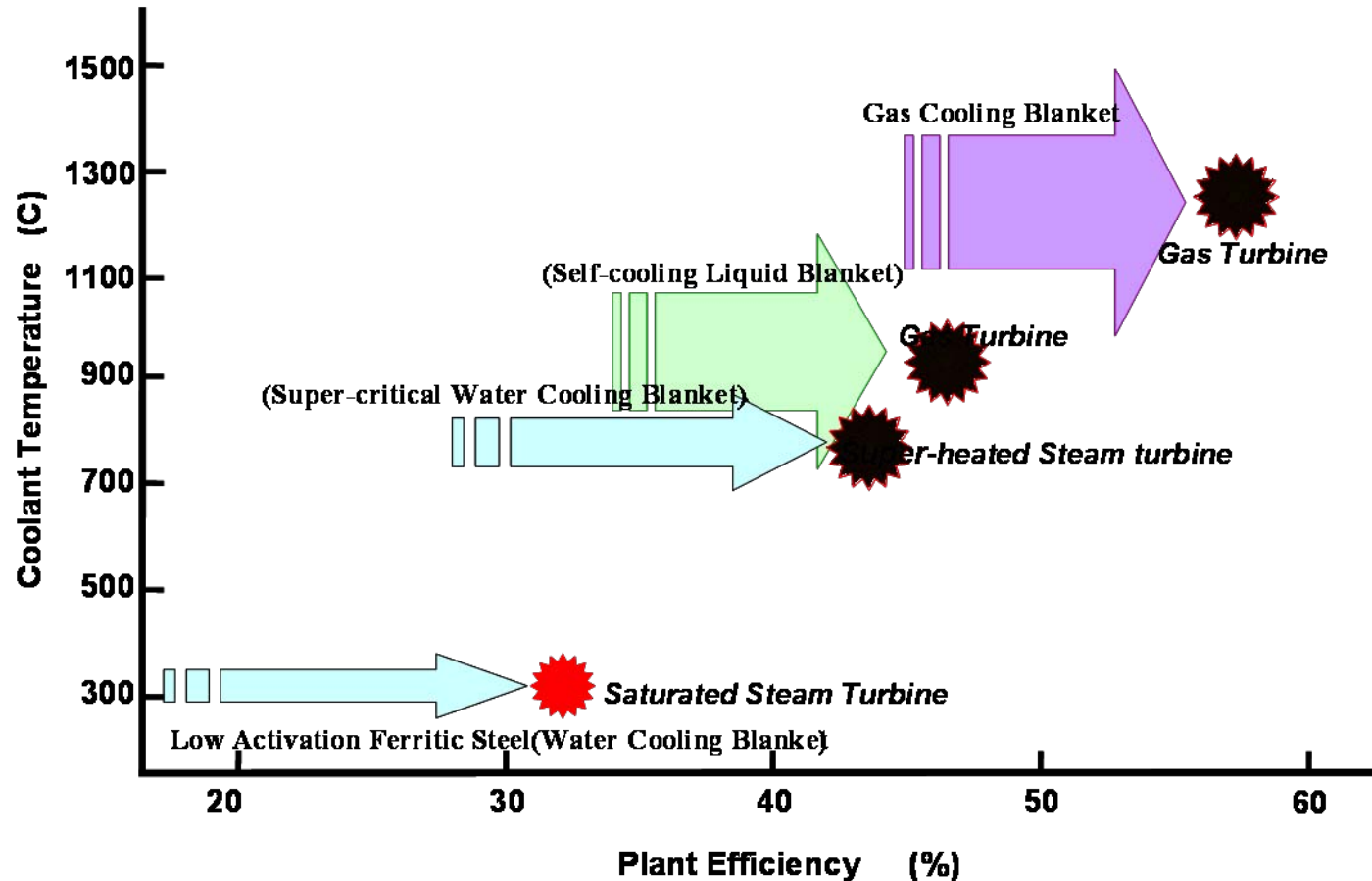
	ITER	DEMO
FW 열부하 (MW/m ²)	0.2~0.5	0.5-1
중성자벽부하 (MW/m ²)	1	3-5
중성자 Fluence (MWa/m ²)	0.5	> 10

- 냉각

- First wall - 높은 제열성능 요구. 유속을 높이고 냉각관 간 사이를 좁힘.
열응력을 낮게 함.
- 증식재 및 증배재 영역 - 트리튬의 방출을 가능한 높일 수 있는 온도로 제어. 냉각관 적절히 배치

- 발전효율: 냉각재 출구온도에 의해 결정됨 - 냉각재와 구조재의 양립성

6. 열을 꺼내는 기술



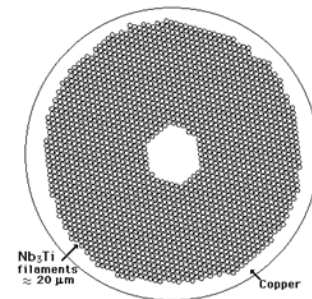
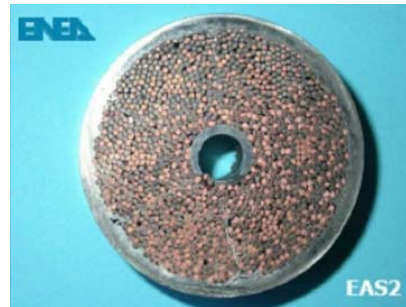
냉각재 출구온도와 발전효율의 관계

6. 열을 꺼내는 기술

냉각재	장점	단점
물(경수)	<ul style="list-style-type: none"> - 전열특성이 좋음 - 비교적 저유속으로 큰 제열성능을 얻음 - 자장의 영향을 받지 않음 - 펌프동력 양호 - 구조재와의 공존성 높아 차폐성능 양호 - 경수로 기술 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 중성자 흡수반응 단면적이 큼 (TBR 저하) - 냉각수의 로내 및 증식영역으로의 누출에 의한 압력상승 대책 필요
He gas	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적으로 불활성, 취급 용이 - 구조재와의 공존성 양호 - 고온 취급 가능으로 고발전효율 기대 	<ul style="list-style-type: none"> - 열용량이나 열전달률이 비교적 작아 제열한계가 낮음 - 펌프동력이 커짐 - 차폐성능이 낮아 차폐체가 두꺼워 짐
액체 금속	<ul style="list-style-type: none"> - 전열특성이 양호 - 저압에서 고온운전 가능 - 냉각재와 증식재를 겸함으로 인해 블랭킷 구조의 간략화 - 반응생성물의 인출이나 성분조정 등을 연속해서 할 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> - 화학적으로 활성 - MHD 압력 손실이 큼 (전기절연피복 설치 또는 기액이층류로 전기전도율 내리는 방법 등 고려)

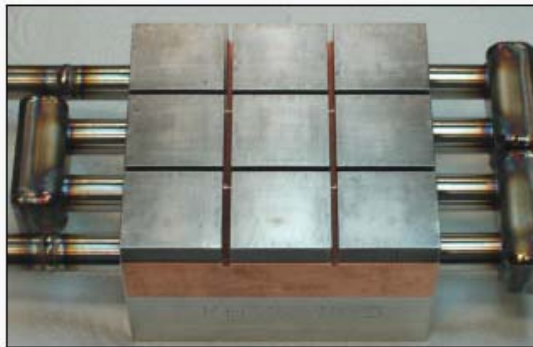
7. 방사선 차폐 기술

- 생체차폐: 원자로나 방사성 물질 취급 시설의 차폐와 유사
 - 작업자: 방사선 작업장의 선량당량률, 운전 정지 후 로실 선량당량률 평가
 - 일반 공중: 운전 중 및 정지 후 피복선량당량률 평가
- 기기차폐: 초전도코일 차폐가 핵심
 - 초전도코일 차폐: 중성자 및 감마선의 조사에 의해 소정의 핵발열량을 넘게 되면 quench 발생. 안정화 구리, 절연재, 권선부의 방사선 손상에 의해 자석의 건전성 손상. 차폐체 두께 결정이 중요.
 - Inboard 차폐체: 두께가 토카막형 핵융합로의 주변경에 영향을 미침 (노심설계). 초전도코일까지 중성자속 충분히 감쇠시켜야 함.
 - 계측기기, 가열장치, 구조체 중 용접부 등 차폐: 특히 용접부가 모듈 교환 시 재용접 가능하기 위해서는 헬륨 생성량을 기준치 이하로 억제하는 차폐 구성이 필요.



8. 블랭킷 제작 기술

- 블랭킷에는 플라스마로부터의 방사선이나 고열이 직접 입사함과 동시에 큰 전자력이 작용함: 제열성능과 강고한 구조가 동시에 필요
 - 스테인리스 강, 페라이트 강, 버나뎀 합금, 탄화규소 등의 구조재료 사용
 - ITER: 제1벽 armour 재료로 Be 사용. 구리합금을 heat sink재로 사용. 원형 스테인리스강을 냉각관 재료로 사용.
 - DEMO: 페라이트 강 사용 시 열전도율이 SS 보다 2배 가량 높기 때문에 heat sink 제거할 수도 있음. 이 경우 효율적인 제열을 위해 원관 주변에 단형배관이 밀접하게 설치됨.



Small scale PFCs
for Tests (EU)

Be primary first wall module

Be tiles (10 mm), CuCrZr heat sink (10 mm),
316L coolant tubes / backing plate (30 mm)

8. 블랭킷 제작 기술

- 고온등방가압법 (HIP: Hot Isostatic Pressing)
 - 블랭킷에서는 이종재료로 이루어지고 복잡한 구조를 가진 부품을 넓은 면적에 걸쳐 과도한 변형을 방지하면서 강고히 접합하는 것이 요구됨.
 - 용접이나 납땜, 폭착 등의 방법은 넓은 면적에서의 접합이 불가능하고, 충분한 강도를 확보할 수 없으며 변형이 큼.
 - HIP: 용접하는 물체끼리 고온 하에서 높은 압력으로 누르고 눌린 물체의 경계면에서 물질 성분이 상호 확산하는 현상을 이용. 확산 접합의 일종. 일반적인 확산 접합은 기계적으로 일축압접인 것에 비해 HIP법은 gas에 의한 정압을 이용하므로 형상(판압, 곡면)에 관계없이 접합 가능
 - HIP법에서는 온도, 압력 및 유지시간이 주요 시공 조건임.
 - HIP 처리 시에는 접합 계면의 표면의 거칠음을 작게 함과 동시에 고온으로 유지해서 접합계면 표면의 진공 탈가스 처리를 함. 접합이 어려운 이종재료의 경우에는 접합계면에 중간층 삽입

9. 각국의 블랭킷 구성 현황

