

# Introduction to Nuclear Fusion

Prof. Dr. Yong-Su Na

# **Radioactivation and selection of material in a blanket**

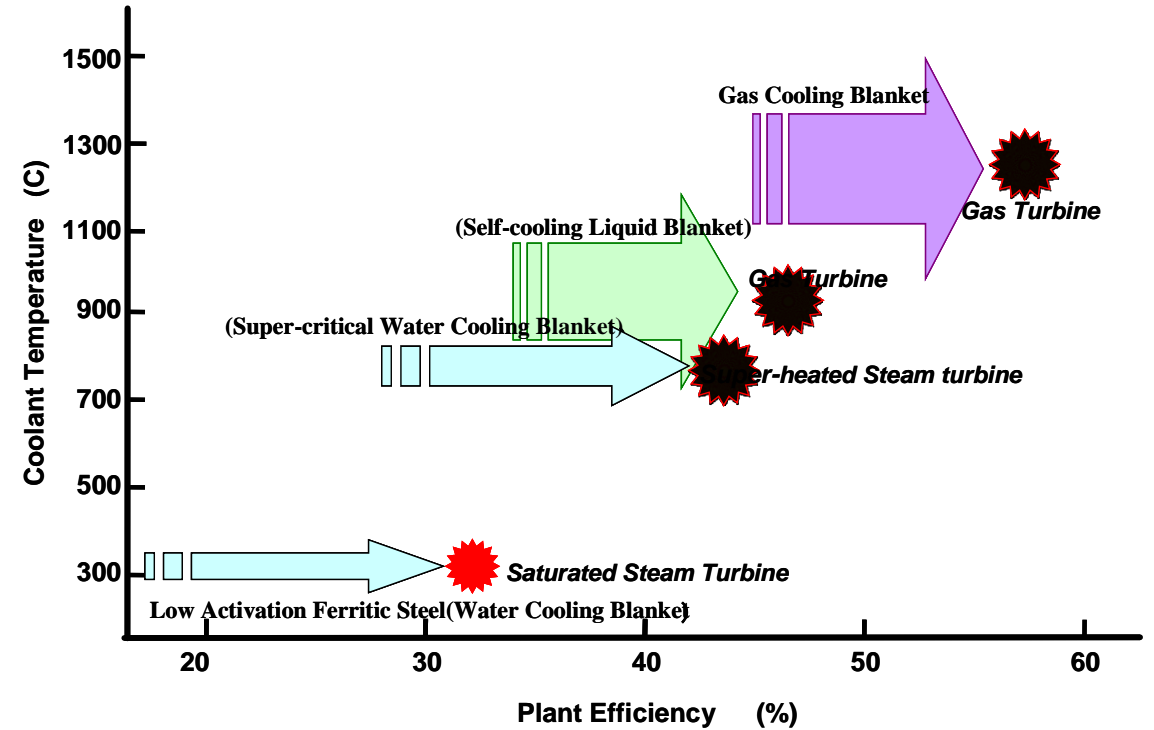
# Structural Materials

- **Requirements**

- Low activation
- High heat conductivity
- Minimal swelling
- High plant efficiency

- **Advanced materials**

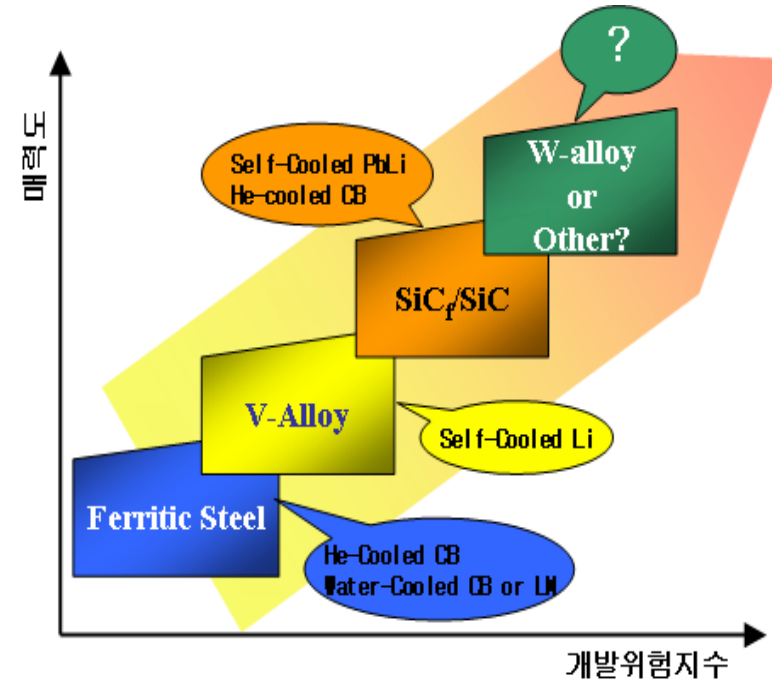
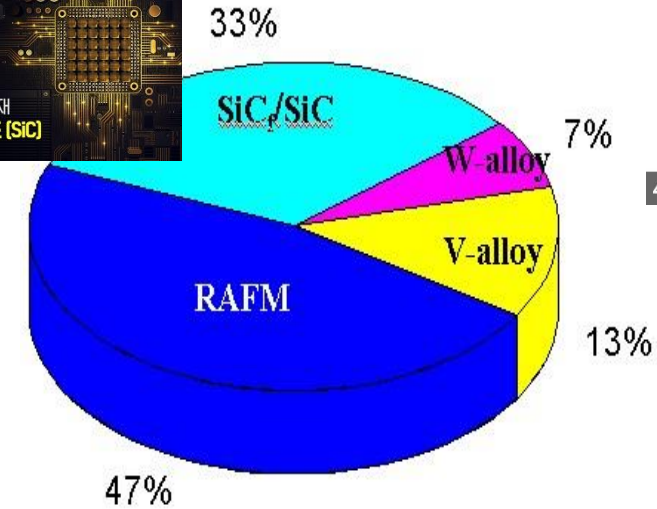
- Reduced-activation ferritic steels (RAFS, RAFM)
- Vanadium alloys
- SiC/SiC composites



# Power Extraction

## ● 구조재 선택

- 현재 해외에서 연구개발 중인 블랭킷 중 구조재로서 채택하고 있는 재질은 RAFM 강이 월등하게 많음.  
그러나 현재 가능한 구조재의 종류는 매우 제한적임.
- $\text{SiC}_f/\text{SiC}$  복합체는 구조재로서의 우수성은 널리 인지되고 있으나, 실제 복잡한 구조의 제작성이나 고온, 고열과 높은 조사에서의 거동과 성능에 관련된 불확실성이 있기 때문에 특성변화에 대한 더 연구가 필요.
- W 합금 과 V 합금 등도 역시 마찬가지로 고효율의 에너지변환시스템에 적합하지만, 합금의 개발을 위한 산업시설의 개발과 함께 부가적인 기술개발을 필요로 할뿐 아니라, 제작성과 비용 문제 등이 있음.
- 보다 높은 열효율을 위해서는 더 높은 구조재 개발 위험의 부담을 감소해야 함.



# Radioactivation

- Radiation damage occurs by atom displacement and by nuclear transmutation involving primarily those producing  $^4\text{He}$ .
- Typical atomic displacement and gas production for 1 MW/m<sup>2</sup> neutron wall loading (typical on FW):

Material	Displaced atoms (10 <sup>7</sup> atoms/s)	He production (10 <sup>7</sup> atoms/s)	H production (10 <sup>7</sup> atoms/s)
Fe	3.6	35	150
Ni	3.9	130	400
Mn	3.6	27	100
Nb	2.3	9	30
Ti	5.0	34	50
Cu	4.9	32	170
<sup>6</sup> Li		3100	3100
<sup>7</sup> Li		360	370

- Displacement rate not strongly dependent on the type of material whereas the gas production rate sensitive to material choices.
- Lithium possess a significant gas-production capacity but if this occurs in the liquid, pressure buildup and swelling are not a problem as it can be in solids.

# Radioactivation

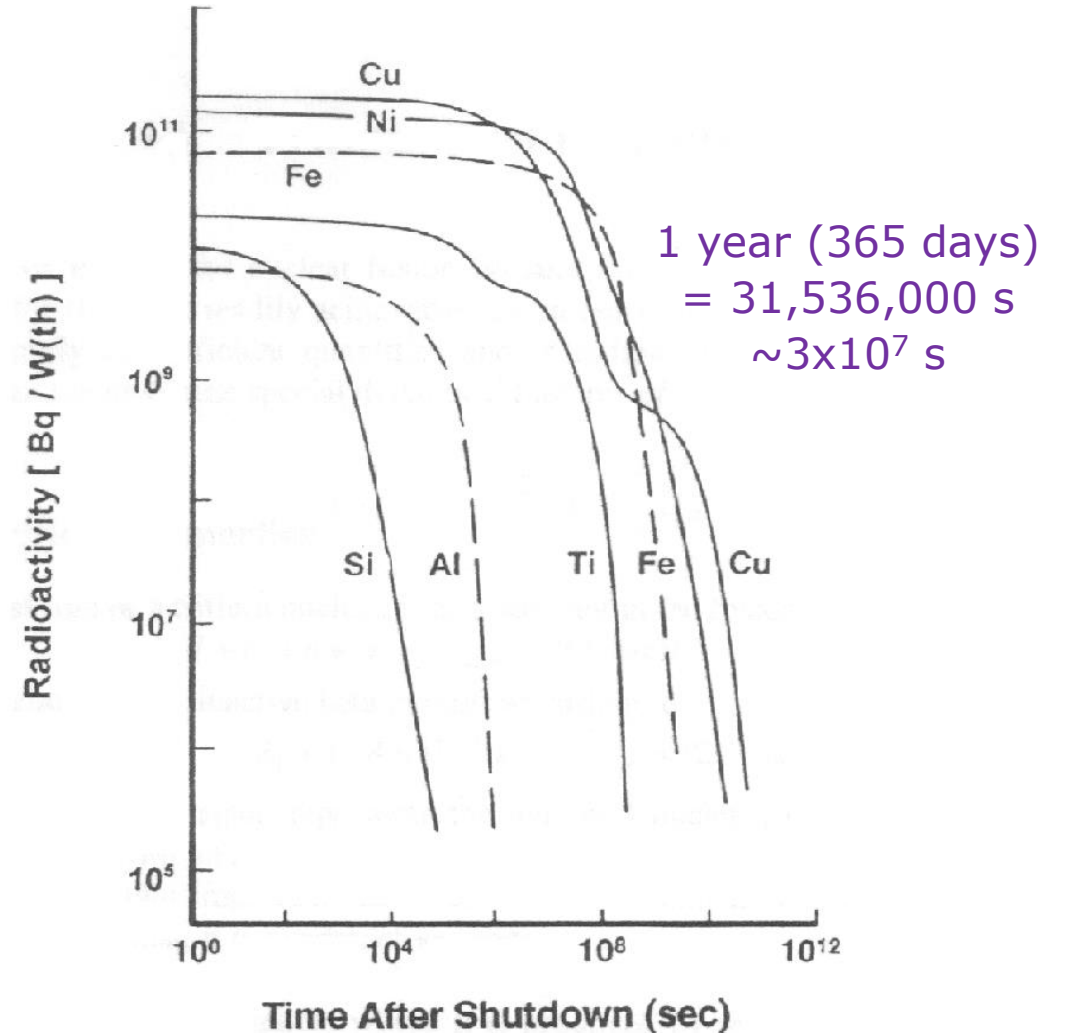
- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation:  
most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.

- 하전입자의 방출 (핵변환)  
고에너지의 중성자가 원자핵에 충돌하여 복합핵을 형성하고, 형성된 여기상태의 복합핵이 양성자와 알파입자 등과 같은 하전입자를 방출하고 다른 원소로 변환되는 반응.

# Radioactivation

- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation: most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.
- The level of radioactivation, along with other radioactivity aspects such as the T inventory will be a key factor in determining the environmental impact of fusion reactors.

1 Bq (becquerel): unit of radioactivity (SI unit).  
activity of a quantity of radioactive material in which one nucleus decays per second

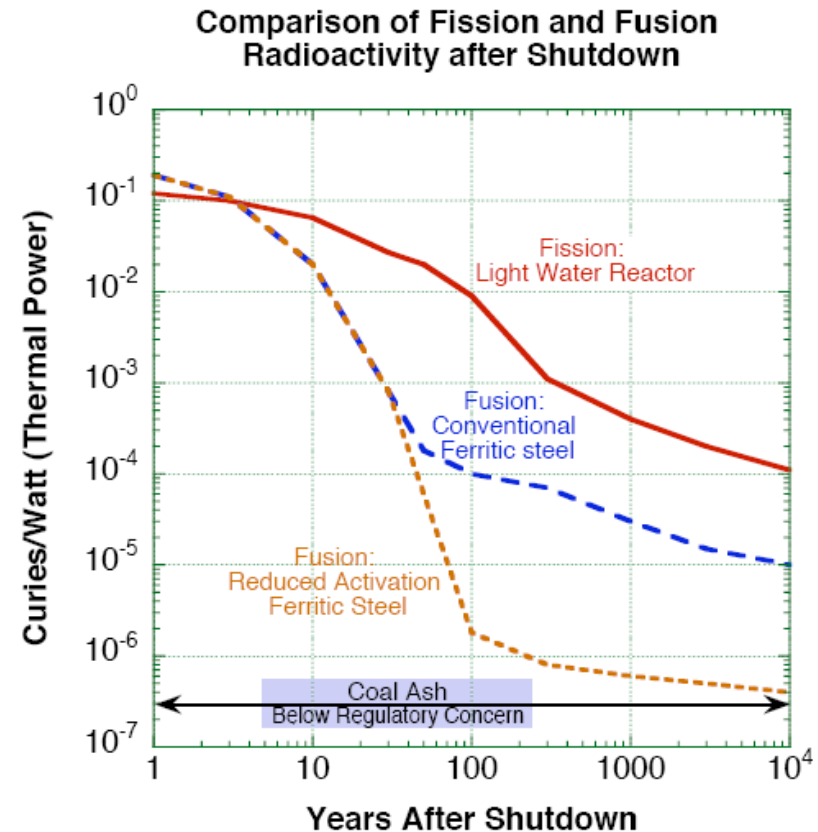


The residual radioactivity of selected elements irradiated for 2 years in a typical first wall flux of  $1.5 \text{ MW/m}^2$

# Radioactivation

- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation: most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.
- The level of radioactivation, along with other radioactivity aspects such as the T inventory will be a key factor in determining the environmental impact of fusion reactors.

1 Ci (curie):  $3.7 \times 10^{10}$  decays per second (Bq)  
~ activity of 1g of the radium isotope  $^{226}\text{Ra}$   
studied by the Curies





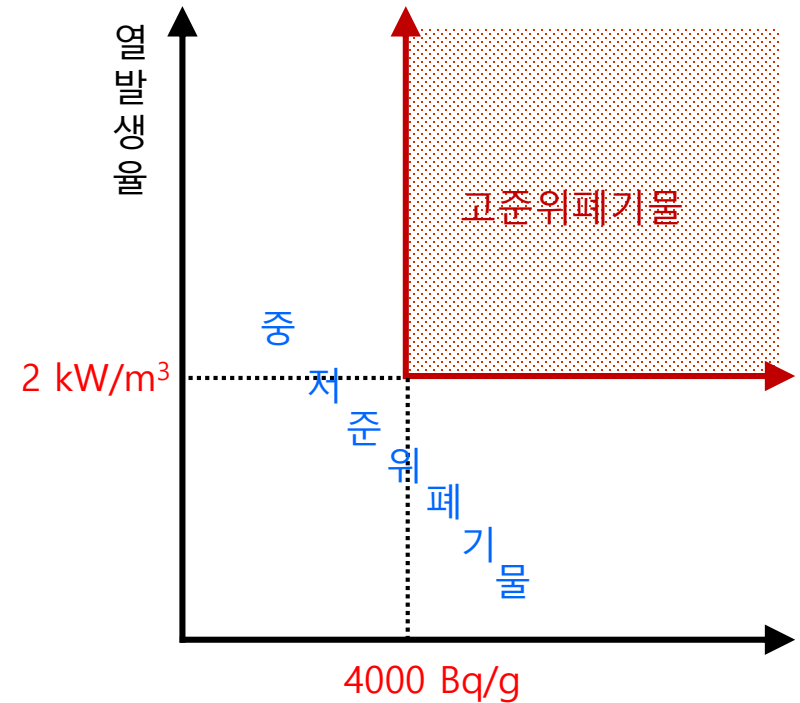
# 방사성폐기물 분류

원자력안전법시행령 제2조 및 고시 2011-29 제3

- 고준위방폐물 : 방사능 농도 및 열발생률이 규정치 이상인 방폐물

방사능 농도	반감기 20년 이상의 알파선을 방출하는 핵종으로 4000 Bq/g 이상
열발생률	2kW/m <sup>3</sup> 이상

- 중·저준위방폐물 : 고준위방폐물 이외의 방폐물



반감기가 20년 이상의  
알파선 방출 핵종 농도

# 방사성폐기물 분류

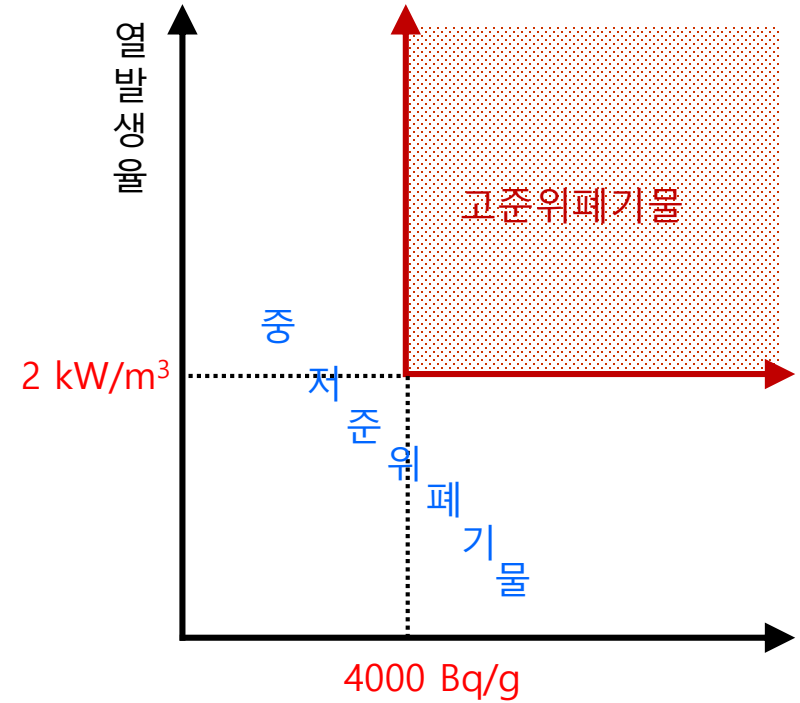
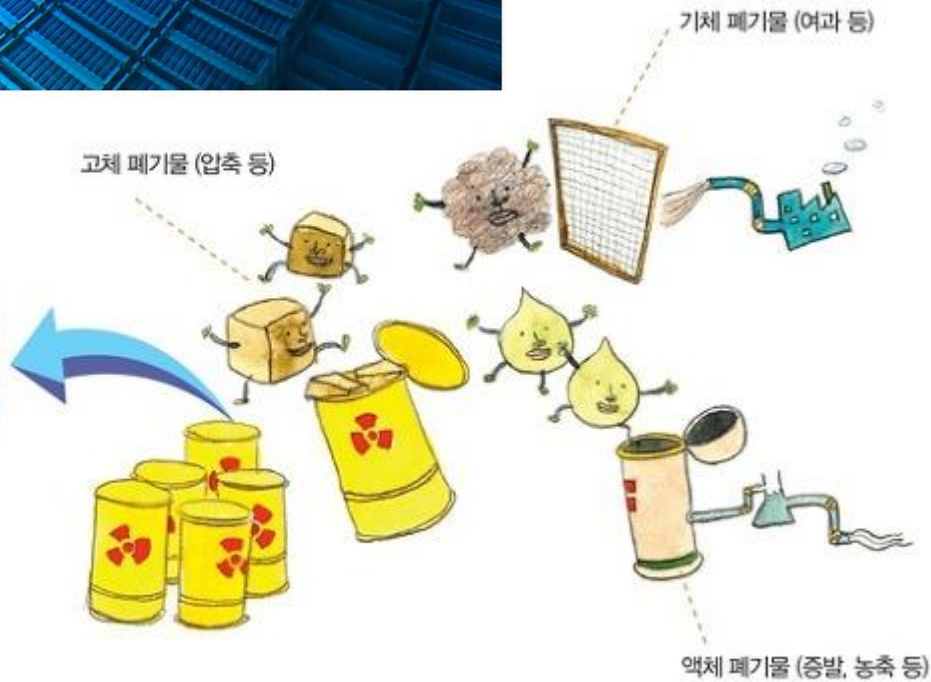
원자력안전법시행령 제2조 및 고시 2011-29 제3



사용후핵연료



고체 폐기물 내부 모형



반감기가 20년 이상의 알파선 방출 핵종 농도

# 방사성폐기물 분류

## 방사성폐기물 분류 체계

구분	분류 기준	방폐물 예시	처분 방식
고준위 폐기물	반감기 20년 이상의 알파선을 배출하는 핵종으로, 방사능 농도는 4000Bq/g 이상이고 열발생률은 2kW/m <sup>3</sup> 이상	사용후핵연료	심층처분 가능
중준위 폐기물	저준위폐기물 농도 기준 이상	핵연료 손상기간 중에 발생된 폐수지, 폐필터 등	심층, 천층(동굴)처분 가능
저준위 폐기물	방사능 농도가 자체처분 허용 농도의 100배 이상이고 저준위폐기물 농도 기준 미만	중준위에 해당하지 않는 집고체, 폐수지, 폐필터 등	심층, 천층(동굴, 표층) 처분 가능
극저준위 폐기물	방사능 농도가 자체처분 허용 농도 이상이고 자체처분 허용 농도의 100배 미만	오염도가 낮은 집고체, 해체 중에 발생된 오염도가 낮은 콘크리트	심층, 천층처분 (동굴, 표층, 매립형) 가능



경주 방사능폐기물처리장 (지하처분)

# Radioactivation

- Neutron-induced transmutations in blanket materials also result in radioactivation: most important with respect to reactor maintenance, storage of reactor components.
- The level of radioactivation, along with other radioactivity aspects such as the T inventory will be a key factor in determining the environmental impact of fusion reactors.

	<b>Eurofer (Europe)</b>	<b>F82H (Japan)</b>
<b>An element</b>	<b>Composition (wt%)</b>	<b>Composition (wt%)</b>
<b>Fe</b>	<b>89.04</b>	<b>89.924</b>
<b>C</b>	<b>0.11</b>	<b>0.09</b>
<b>Cr</b>	<b>9.0</b>	<b>7.7</b>
<b>W</b>	<b>1.1</b>	<b>1.94</b>
<b>Mn</b>	<b>0.40</b>	<b>0.16</b>
<b>V</b>	<b>0.20</b>	<b>0.16</b>
<b>Ta</b>	<b>0.12</b>	<b>0.02</b>
<b>N2</b>	<b>0.03</b>	<b>0.006</b>
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

RAFS (RAFM):  
Reduced Activation Ferritic (Martensitic) Steel

# Structural Materials

- **F82H steel**

- Fe-8~9Cr-1~2W-V, Ta:

Tempered Martensite 석출경화형 내열강

Mod9Cr 내열강 (T91: 9 Cr-1MoVNb)에

저방사화 특성을 부여:

Mo→W, Nb→Ta, N 저감, 고순도화

- 강도, 인성, 내식성 등의 관점에서

Ni, Cr을 함유

- Mo나 Nb 등의 미량 첨가 원소의

방사화도 포함하며, 경우에 따라서는

상당히 높은 잔류 방사능 발생 가능

Heat treatment condition:

Normalizing (1040°C×40 min/A.C.),

Tempering (750°C×60 min/A.C.)

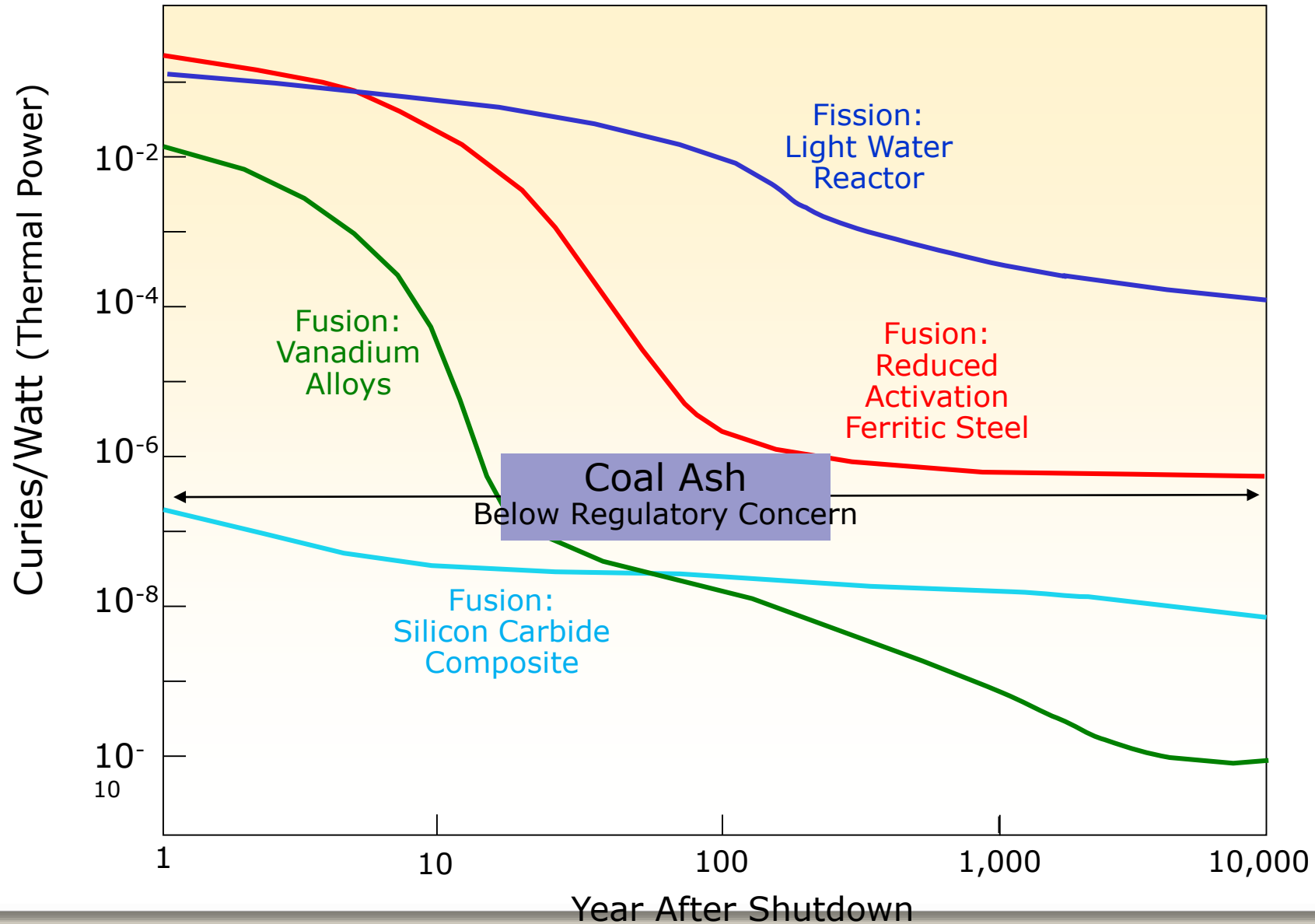
	F82H IEA heat (5 ton heat)
Fe	Bal.
C	0.09
Si	0.07
Mn	0.1
P	0.003
S	0.001
Cr	7.87
Ni	0.02
Mo	0.0003
V	0.19
Nb	0.0002
N	0.006
Co	0.003
Ti	0.004
Ta	0.04
W	1.99

# Structural Materials

- **ARAA (advanced reduced-activation alloy)**
  - 9Cr–1.2W based ferritic–martensitic steel with 0.01 wt.% Zr
  - The mechanical properties, thermal properties and physical and magnetic properties of ARAA show similar temperature dependencies to those observed for Eurofer 97.
  - However, ARAA exhibits a much longer creep–rupture time than conventional RAFM steel, which suggests a positive effect on Zr addition.
  - The enhanced creep strength of ARAA by the addition of Zr is attributed to the reduced temperature-dependence of the yield strength.

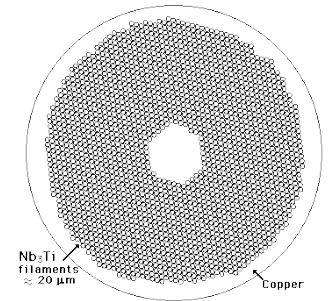
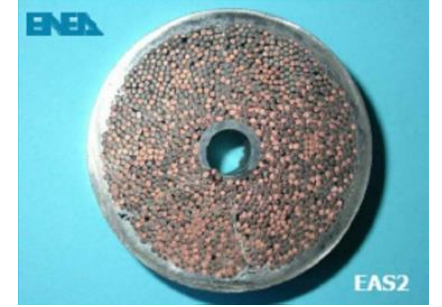
*"Development of Zr-containing advanced reduced-activation alloy (ARAA) as structural material for fusion reactors", Y.B. Chun et al, Fusion Engineering and Design, **109–111**, 629 (2016)*

# Structural Materials



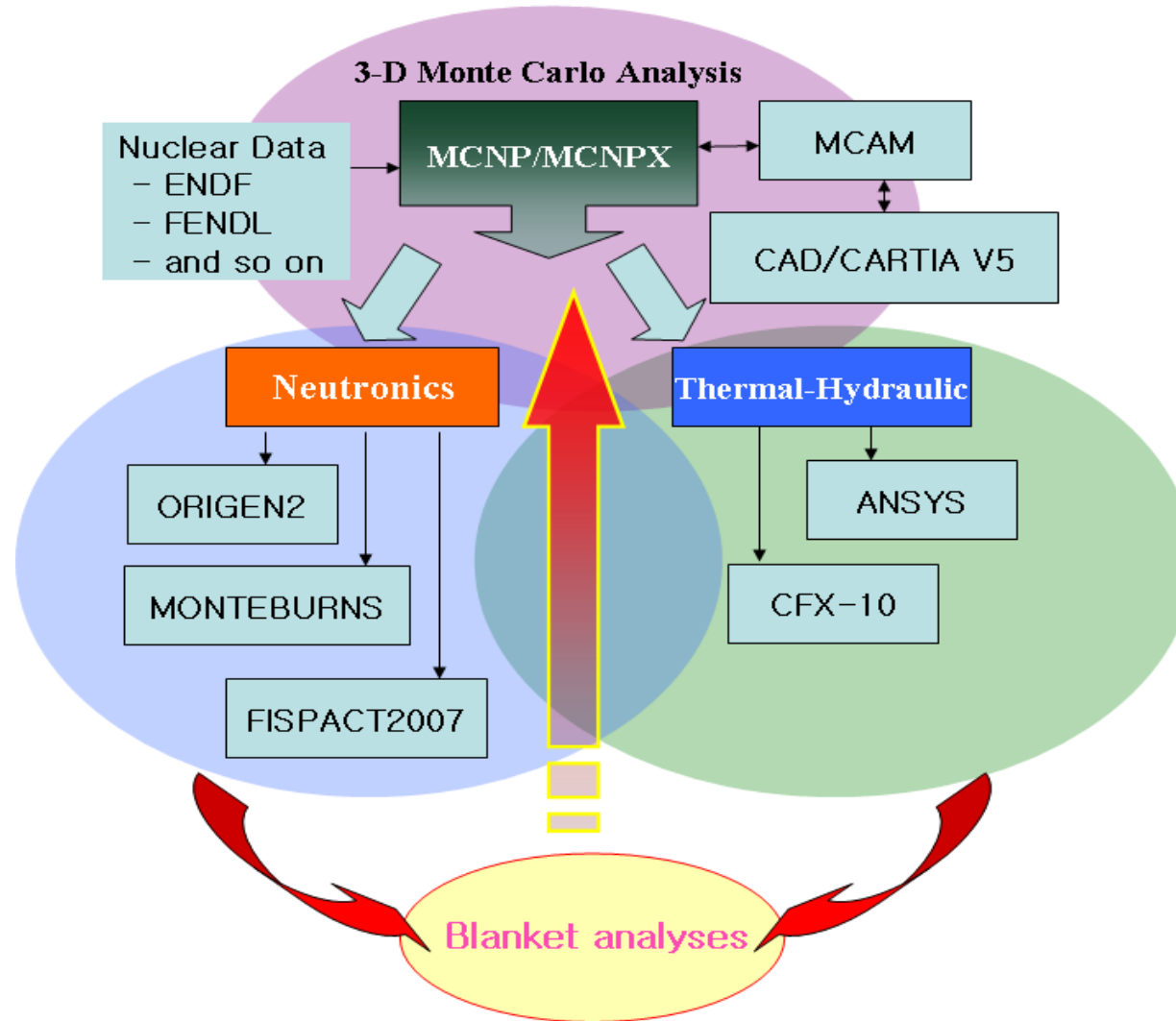
# 방사선 차폐 기술

- **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 감소시켜야 함.
  - 계측기기, 가열장치, 구조체 중 용접부 등 차폐: 특히 용접부가 모듈 교환 시 재용접 가능하기 위해서는 헬륨 생성량을 기준치 이하로 억제하는 차폐 구성이 필요.





# Blanket Design



# Blanket Design

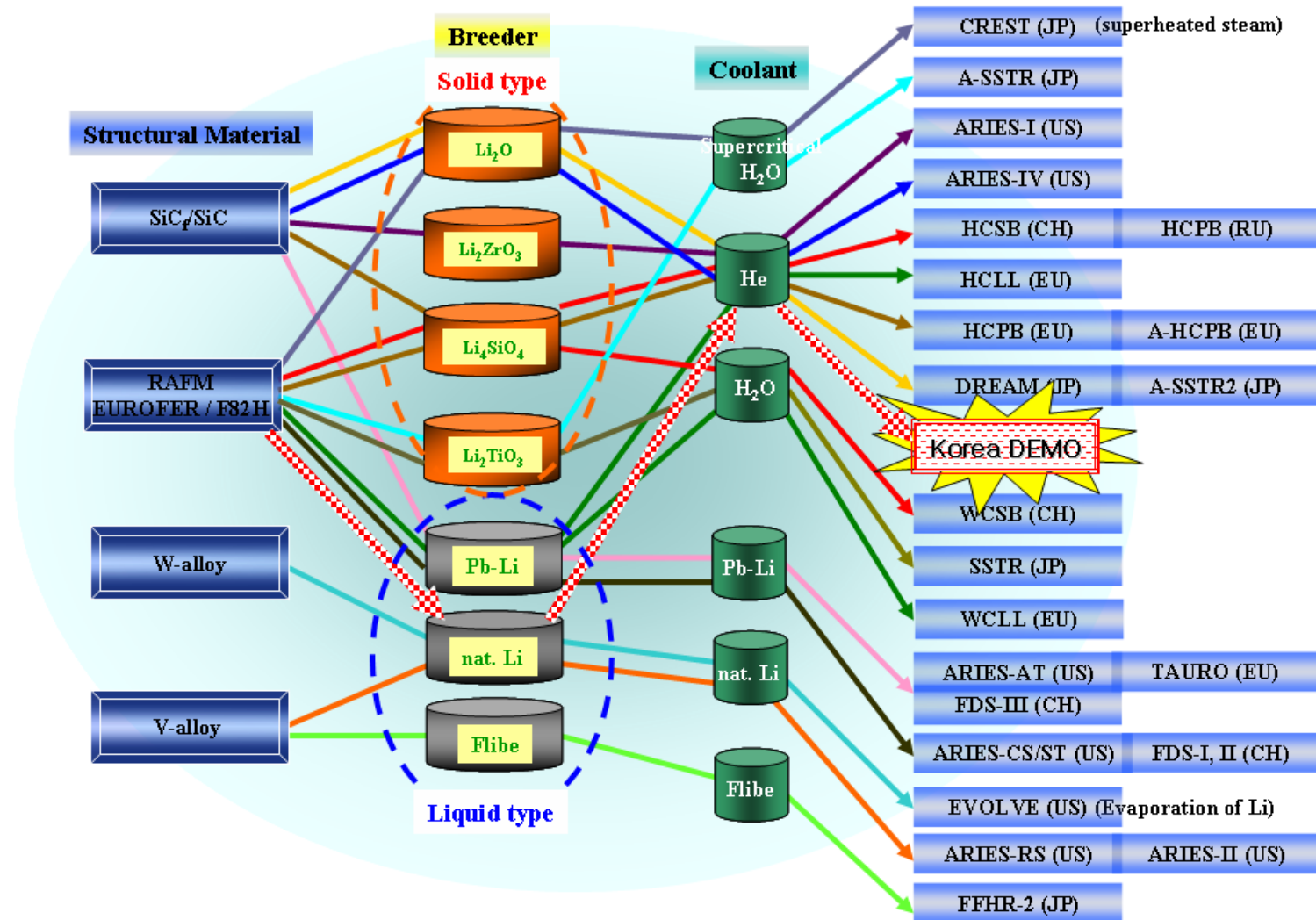
- 설계의 구체적 절차

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

# Blanket Types

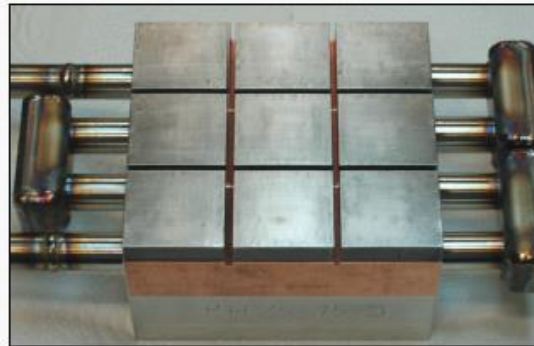
	저방사화 페라이트강	바나듐계 합금	세라믹스재 (SiC/SiC 복합재)
냉각 매체	<p>경수를 가압수 (압력 15 MPa 정도, 온도 300°C 정도: 33% 전후 발전 열효율), 또는 과열/초임계 증기 (압력 25 MPa 정도, 온도 500-550°C 정도: 40-42% 발전 열효율)로 이용.</p> <p>표면의 라이너 연구에 의해 LiPb(액체 금속)를 사용할 수 있을 가능성도 있음.</p>	<p>Liquid Lithium을 온도 600~800°C 정도에서 이용 (40-45% 발전 열효율)</p>	<p>He gas를 고온(~1000°C)에서 이용</p>
특징	<p>현상 기술의 연장상에서 대응 가능. 구조재로서의 대량 용융 기술도 확립되고 있어, 가장 실용화에 가까운 재료일 것임.</p>	<p>Tritium breeder와 coolant를 겸용 가능 (단, 강자장 중에서 유동시키려면 MHD 연구 필요). RAFS 보다 개선된 저방사화 성능이 기대됨.</p>	<p>~1000°C로 함으로써 높은 발전 열효율 (&gt; 45%) 초저방사화 재료이기도 함. 저방사화 페라이트와 리튬납의 조합으로 라이너로서의 이용도 고려되고 있음.</p>

# Blanket Types



# Blanket 제작 기술

- Blanket에는 플라즈마로부터의 방사선이나 고열이 직접 입사함과 동시에 큰 전자력이 작용함: 제열성과 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)

# Blanket 제작 기술

## ● 고온등방가압법 (HIP: Hot Isostatic Pressing)

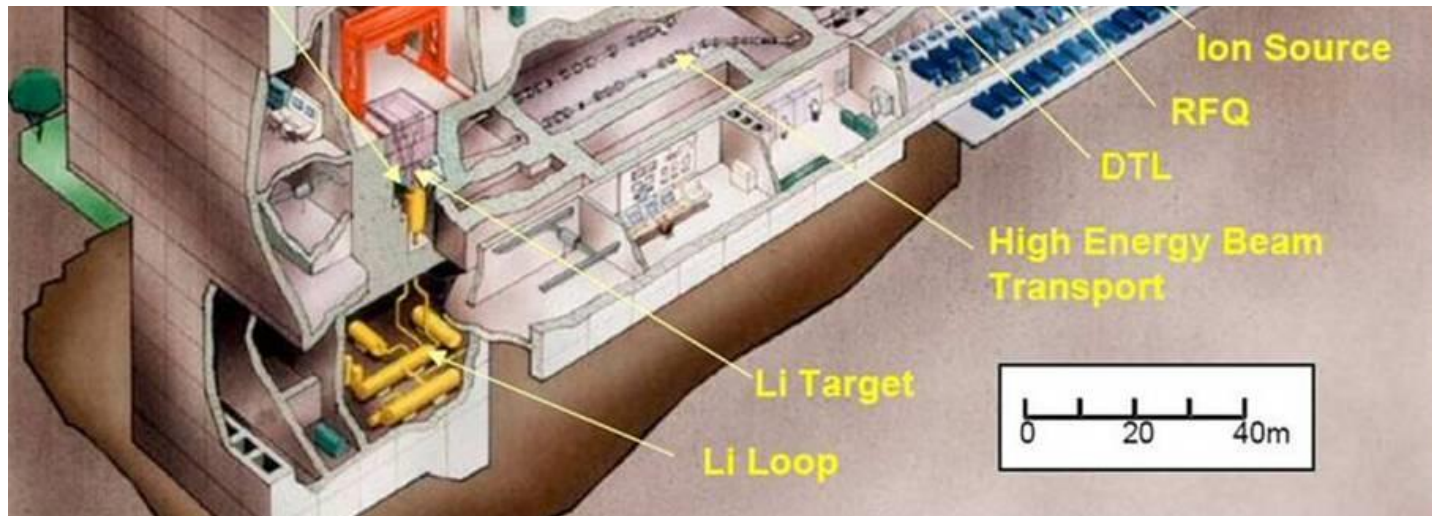
- Blanket에서는 이종재료로 이루어지고 복잡한 구조를 가진 부품을 넓은 면적에 걸쳐 과도한 변형을 방지하면서 강고히 접합하는 것이 요구됨.
- 용접이나 납땀, 폭착 등의 방법은 넓은 면적에서의 접합이 불가능하고, 충분한 강도를 확보할 수 없으며 변형이 큼.
- HIP: 용접하는 물체끼리 고온 하에서 높은 압력으로 누르고 눌린 물체의 경계면에서 물질 성분이 상호 확산하는 현상을 이용. 확산 접합의 일종. 일반적인 확산 접합은 기계적으로 일축압접인 것에 비해 HIP법은 gas에 의한 정압을 이용하므로 형상(판압, 곡면)에 관계없이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

# International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)



- \$700M
- Only small samples, a few square centimeters in size

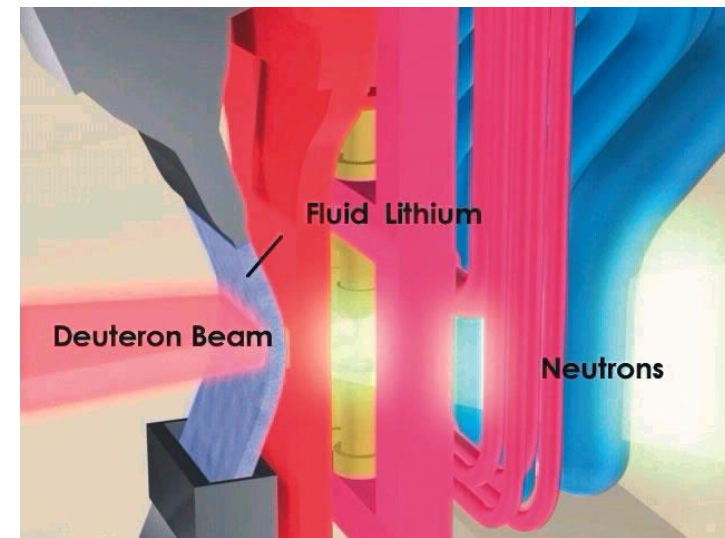
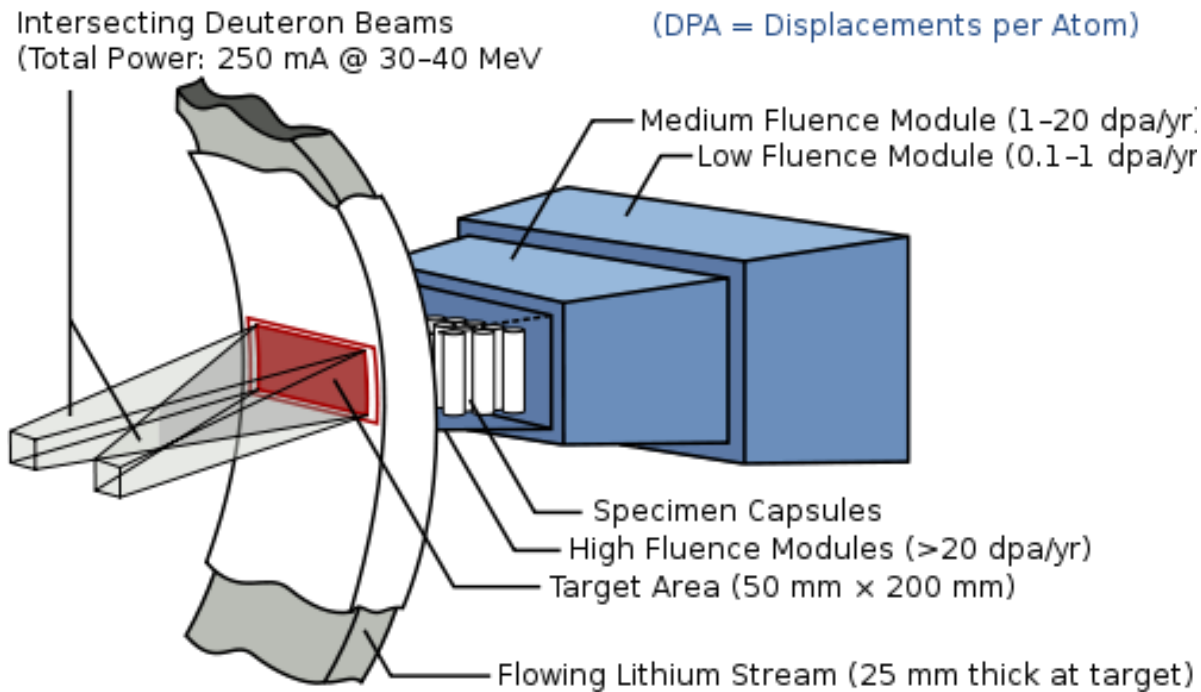
PIE: Post Irradiation Examination  
 RFQ: Radio Frequency Quadrupole  
 DTL: Drift Tube Linac



Typical Reactions	${}^7\text{Li}(d,2n){}^7\text{Be}$	${}^6\text{Li}(d,n){}^7\text{Be}$	${}^6\text{Li}(n,T){}^4\text{He}$
Deuterons	40 MeV	2x125 mA	Beam footprint 5x20 cm <sup>2</sup>

# International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)

- IFMIF Target Area





# Main Parameters of IFMIF Accelerator

Particle Type	D <sup>+</sup>
Ion Injector	100 keV, 140 mA
RFQ	175 MHz, 8 MeV, 125 mA
DTL	175 MHz, 8-40 MeV, 125 mA
Number of Accelerators	2 (parallel operation)
Output Current	250 mA
Beam spot on Target	20 cm (horizontal) x 5 cm (vertical)
Output Energy	32, 36 or 40 MeV
Duty Factor	CW
Availability	> 88%
Maintainability	Hands on
Design Lifetime	40 years

# Target Specification of IFMIF

- Lithium Target

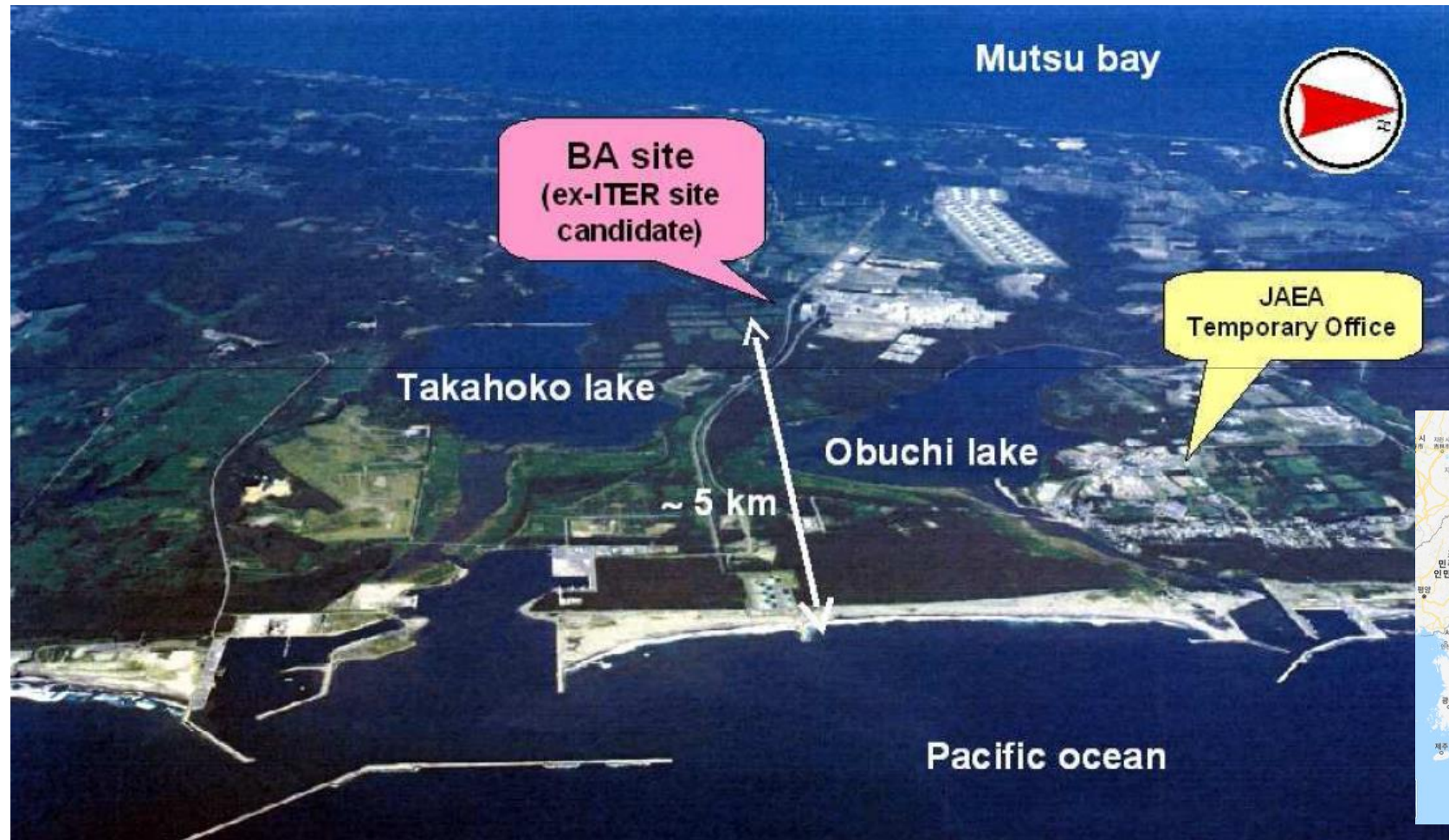
Jet Thickness	0.025 m (for 40 MeV D <sup>+</sup> )
Jet Width	0.26 m
Jet Velocity	15 m/s (range 10-20)
Inlet Temperature	250 °C
Outlet Temperature	300 °C

- Irradiation Volume (dpa in iron)

High Flux (> 20 dpa/fpy*)	0.5 L
Medium Flux (1.0 to 20 dpa/fpy)	6 L
Low Flux (0.1 to 1.0 dpa/fpy)	7.5 L
Very Low Flux (0.01 to 0.1 dpa/fpy)	> 100 L

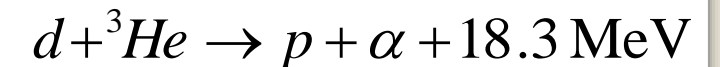
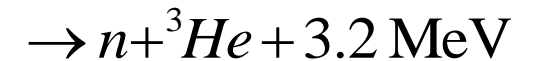
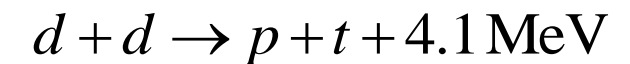
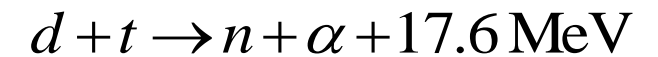
\* fpy = full power year

# International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)



# International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF)

- To simulate neutron field in the blanket (and possibly in other components) of DEMO relevant devices using accelerator-based D+Li source based on the similarity of nuclear responses (e.g. displacement damage production, gas production) in the materials after irradiation
- To be criticized by the small testing volume ( $\sim 500 \text{ cm}^3$  for highest flux area) and the high energy tail of neutron spectrum
- To apply Small Specimen Testing Technique (typical dimensions  $\sim \text{mm}$  in thickness,  $\sim \text{cm}$  in length) to avoid excessive activation and overcome smallness of volume
- Nuclear data above 20 MeV have an important role to provide the level of proximity of the irradiation condition to the actual condition in DEMO.



# IFMIF

Irradiation Parameter	DEMO	ITER	IFMIF HFTM*	IFMIF MFTM**
Total n-flux (n/cm <sup>2</sup> s)	1.3x10 <sup>15</sup>	4x10 <sup>14</sup>	(4-10)x10 <sup>14</sup>	(2-6)·10 <sup>14</sup>
H production (appm/fpy)	1200	500	1000-1500	300-500
He production (appm/fpy)	300	120	250-600	70-120
Displacement damage production (dpa/fpy)	30	< 2	20-55	7-10
H per dpa (appm/fpy)	40	45	40-50	30-50
He per dpa (appm/fpy)	10	11	10-12	8-14

- MCNPX calculations in Fe-alloys based on extended nuclear data libraries & detailed geometry models
- \*HFTM: High Flux Test Module
- \*\*MFTM: Medium Flux Test Module

# Fusion Testing Requirements

	<b>Required</b>	<b>ITER</b>
Neutron wall load	$> 1 \text{ MW/m}^2$	$(0.57 \text{ MW/m}^2)$
Neutron fluence	$> 6 \text{ MW}\cdot\text{y/m}^2$	$(0.1 \text{ MW}\cdot\text{y/m}^2)$
Long pulse	$> 1000 \text{ s}$	$(400 \text{ s})$
Testing area/volume	$> 10 \text{ m}^2/5 \text{ m}^3$	

- IFMIF only provides radiation damage effects
- For Blanket/PFC development, testing in Non-fusion facilities (Lab. Exp. + fission reactors + Accel. n) and Fusion facilities
- Small size, low-fusion power DT plasma-based device (“Component Test Facility”) in which Fusion Nuclear Technology experiments can be performed in fusion environment.