

Introduction to Nuclear Fusion

Prof. Dr. Yong-Su Na

Irradiation

1. 중성자와 물질과의 상호작용

- 중성자는 물질을 구성하는 원자의 궤도전자에 Coulomb force를 미치지 않기 때문에 원자, 분자를 직접 전리시키지 못함.
- 주요 상호작용
 - 탄성산란
 - 비탄성산란
 - 중성자 포획
 - 하전입자의 방출 (핵변환)
 - 핵분열 반응

중성자와 plasma ion 간 scattering 효과는 무시할만한가? 왜?

1) 탄성산란

- 중성자가 원자핵과 탄성충돌하여 원자핵은 운동에너지를 가지고 recoil 되고, 중성자는 그 만큼 운동에너지를 잃고 산란되는 현상 (n,n)
- 중성자의 에너지 < 원자핵의 여기에너지 (~1 MeV)
- Maximum of energy transferred to the atom by head-on collision (반발원자핵의 에너지)

$$(\Delta E)_{\max} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \frac{4m_1 m_2}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{4A}{(A+1)^2} E_{inc}$$

A : 반발 원자핵의 질량수
 E_{inc} : kinetic energy of the incident neutron

- 수소원자핵일 때 최대
- 중원소의 경우에는 무시할 수 있을 만큼 작음.
- 가벼운 원소의 물질은 투과하기가 어렵고, 무거운 원소의 물질은 투과하기 쉬움.
- 반발원자핵은 궤도전자의 일부 또는 전부를 바꿀 정도로 고속으로 움직임.
 - 근처의 원자, 분자를 전리·여기 시킴 (반발핵에 의한 간접적인 전리·여기).

2) 비탄성산란

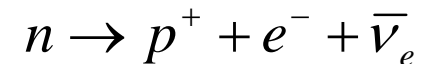
- 중성자가 원자핵과 충돌하면서 원자핵에 반발에너지를 줌과 동시에 핵을 여기시키는 현상 (n, n')
- 중성자에 의해 여기된 원자핵은 곧 γ 선을 방출하고 기저상태로 돌아감.
- 방출된 γ 선이 주위의 원자, 분자를 전리·여기 시킴 (간접적인 전리·여기).
- 중성자의 에너지가 높을 수록 일어나기 쉬움 ($>$ 핵의 여기에너지).
수 MeV가 되면 탄성산란과 같은 비율로 일어남.
핵의 여기에너지 보다 작아지면 일어나지 않음.

3) 포획

- 중성자의 속도가 느려지면 ($< 1 \text{ keV}$) 원자핵에 충돌하여도 산란이 일어나지 않고 그대로 원자핵에 포획되어 흡수됨. 포획 직후 원자핵은 여기상태가 되어 에너지를 γ 선(포획 γ 선)의 형태로 방출하고 안정화됨 (n, γ).
- 중성자를 포획한 원자핵은 질량수가 1만큼 많은 동위원소가 됨. 방사성인 경우가 많음.



- 중성자의 에너지가 낮을 수록 일어나기 쉬움.
1 eV 이하에서 포획단면적은 $1/v$ 에 비례하여 증가
열중성자에서 쉽게 발생
cf) 고속중성자 (500 keV ~ 10 MeV). 저속중성자 (1 eV ~ 500 keV)
- 공명포획: 특정한 원자핵이 특정한 에너지의 중성자에 대하여 높은 포획단면적을 나타내는 현상. 핵종에 따라 고유값을 가짐.
- 결국 중성자는 열중성자로 변하여 원자핵에 포획·흡수되거나 혹은 베타붕괴를 통해 붕괴함 (반감기 ~ 14.8분).



4) 하전입자의 방출 (핵변환)

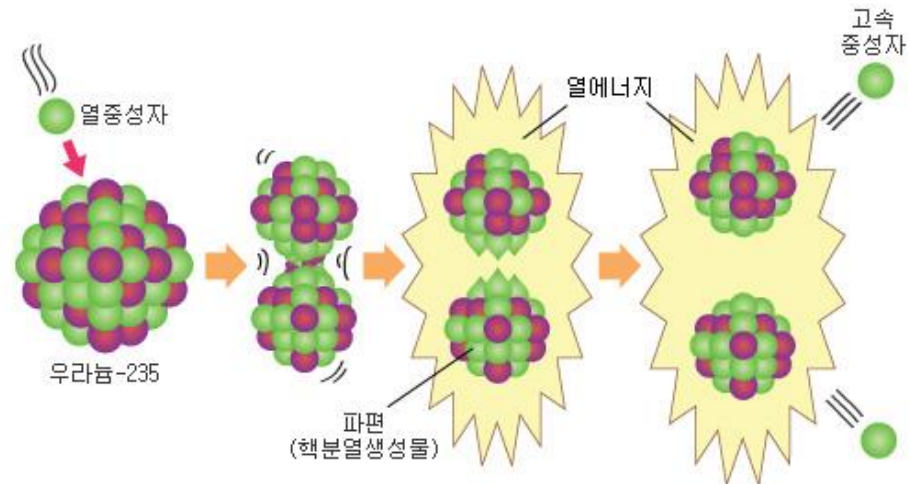
- 고에너지의 중성자가 원자핵에 충돌하여 복합핵을 형성하고, 형성된 여기상태의 복합핵이 양성자와 알파입자 등과 같은 하전입자를 방출하고 다른 원소로 변환되는 반응.
- 방출된 하전입자는 주위의 원자, 분자를 전리·여기시킴 (간접적인 전리·여기).
- 핵반응의 단면적은 산란단면적에 비해 압도적으로 작음.
- 중성자의 에너지가 어느 threshold 이상일 경우 발생 (> 수 MeV).
에너지가 높을 수록 여기 상태의 복합핵의 여기에너지가 높아지기 때문에 하전입자의 운동에너지의 형태로 방출함.

Cf. $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ 는 저속 중성자에 의해 발생.

$^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ 은 열중성자에 의해 발생.

5) 핵분열 반응

- 큰 원자(보통 우라늄, 플루토늄)의 원자핵이 두 개 이상의 다른 원자핵으로 쪼개지는 현상
- 핵분열의 결과로 보통 2, 3개의 중성자가 다시 생겨남. 연쇄 반응
- 1938년 독일의 오토 한과 프리츠 스트라우스만이 우라늄에 중성자를 조사시키면 바륨의 동위 원소가 생성된다는 것을 처음으로 입증



핵분열의 원리

우라늄 235가 중성자를 흡수하면 원자핵이 2개로 쪼개진다.

핵분열이 일어날 때는 많은 에너지와 함께 2~3개의 중성자도 함께 나온다.

©EnCyber.com

2. 물질에 대한 조사손상

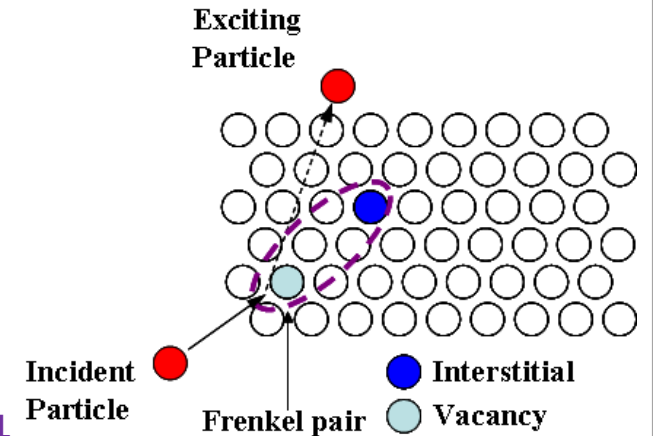
- 물질에 대한 조사 손상의 영향은 다음과 같이 분류되어짐.
 - Impurity production
 - Atomic displacement
 - Ionization

1) Impurity Production

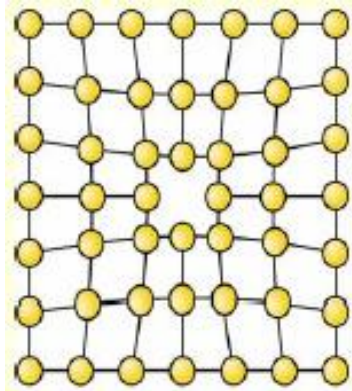
- 방사성 핵으로 변환되는 것은 중성자에 의한 중성자 포획, 하전입자 방출, 핵분열 등을 통해 발생.
- 중성자가 입사한 경우, (n,α) 및 (n,p) 반응 등을 통해 양성자 및 알파입자가 생성되고, 재료 내에서 중성화되어 양성자는 수소로, 알파입자는 헬륨이 됨. 실내온도에서는 이들이 기체로 존재하므로, 근접한 원자에게 압력을 가하여 고체에서는 이 내부압력에 물질의 swelling을 유발.
- 방사선 조사에 의해 생겨난 불순물은 결정체에 전기적, 기계적 성질을 바꿀 수 있는 구조결함을 야기함.
- 중성자 포획을 통해 발생한 방사성 핵종(동위원소)은 decay scheme 에 따라 붕괴하면서 화학 원소를 변화시킴. 붕괴 진행과정에서 방출되는 방사선은 물질에 흡수되어 방출에너지에 따라 물질과의 상호작용을 반복함.
- 이온이 조사된 경우, 핵의 이온 흡수는 즉시 화학 원소를 바꾸어 핵변환이 일어남.

2) Atomic Displacement

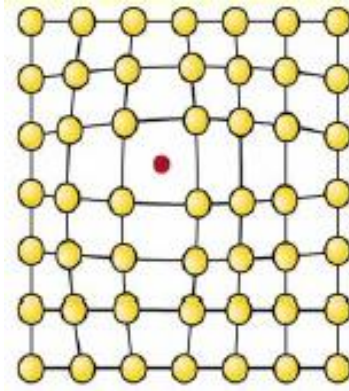
- 원자의 정상적인 위치에서 원자의 위치 이동. 즉, 위치를 이동한 원자는 빈 격자 공간을 남기고, interstitial 위치에 머물거나 혹은 격자구조에서 다른 원자와의 내부교체가 발생. 양성자, 중성자, 150 keV 이상의 전자에 의해 주로 발생
- Atomic displacement는 탄성충돌을 통해 또는 방사선에 의해 유기된 여기(excitation)를 원자 운동, 즉 되튀김 운동으로 변환함에 의해 발생. (하전입자가 물질을 통과 시, 하전입자에너지는 궤도전자의 여기 및 물질들의 nuclei와의 탄성충돌에 소비됨.)
- 탄성충돌에 의해 튕겨난 원자는 primary knock-on. Interstitial, vacancy와 함께 Frenkel pair 구성. 이차 displacement를 야기하기도 함.
- 결함(vacancy, interstitial, Frenkel pairs, dislocation 등)은 이차입자의 비적을 따라 발생.
- 비전리에너지손실(no-ionizing energy loss: NIEL)을 사용하여 정량화. NIEL, MeV/m, MeV·m²/kg: 단위 길이당 비전리 events에 의해 손실된 에너지 (displacement damage는 충돌에 의한 에너지 손실에 비례)



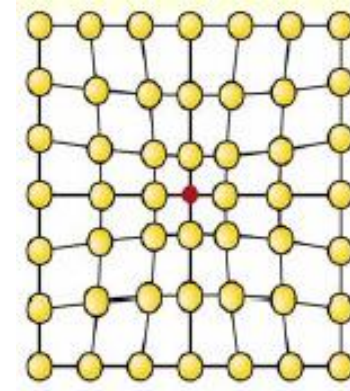
2) Atomic Displacement



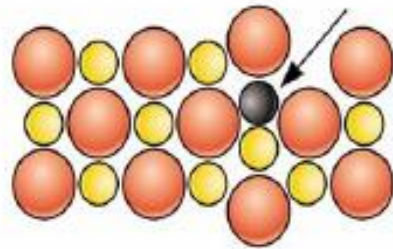
Vacancy 결함



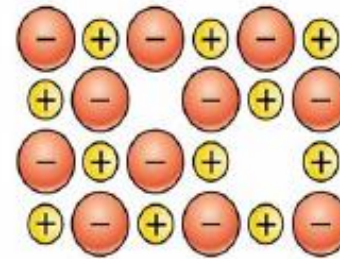
Interstitial 결함



Substitutional atom

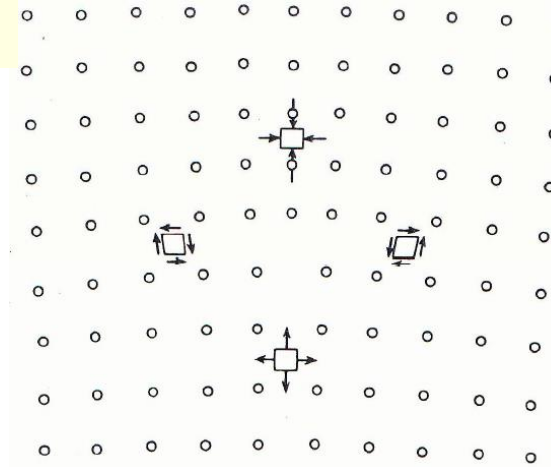
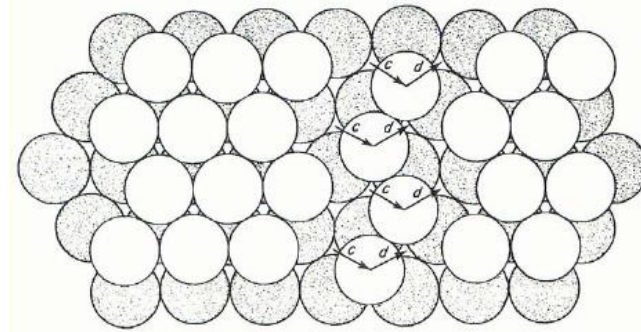
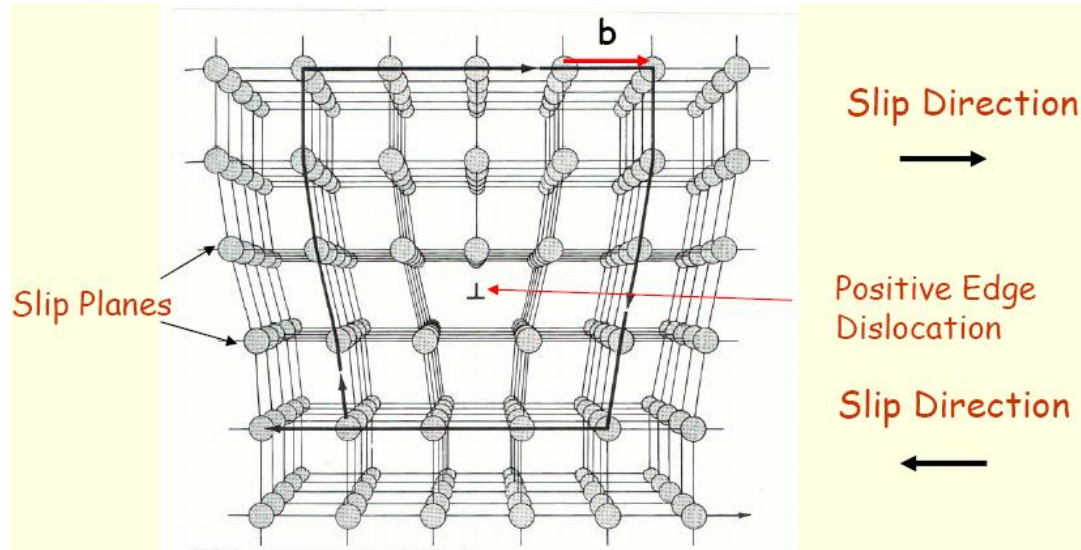


Frenkel 결함
(공공과 침입형 원자의 쌍)

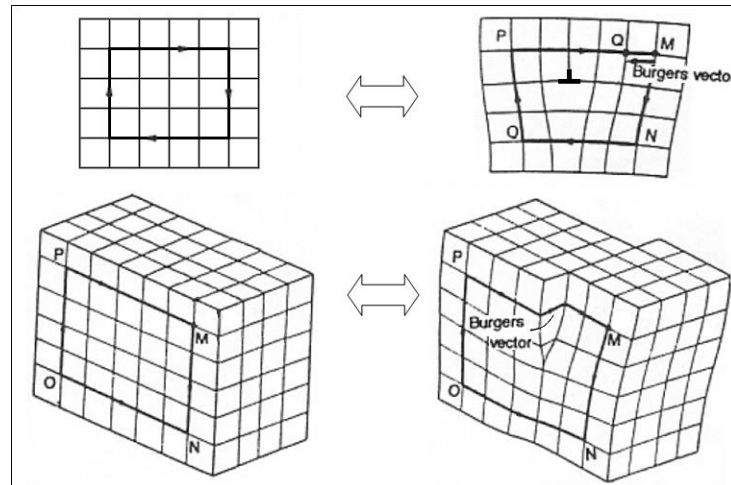


Schottky 결함
(양이온 공공과 음이온 공공의 쌍)

2) Atomic Displacement



Edge and Screw Dislocation (전위)



Stress states around an edge dislocation

2) Atomic Displacement

- Temperature dependency of shape of dislocation loops



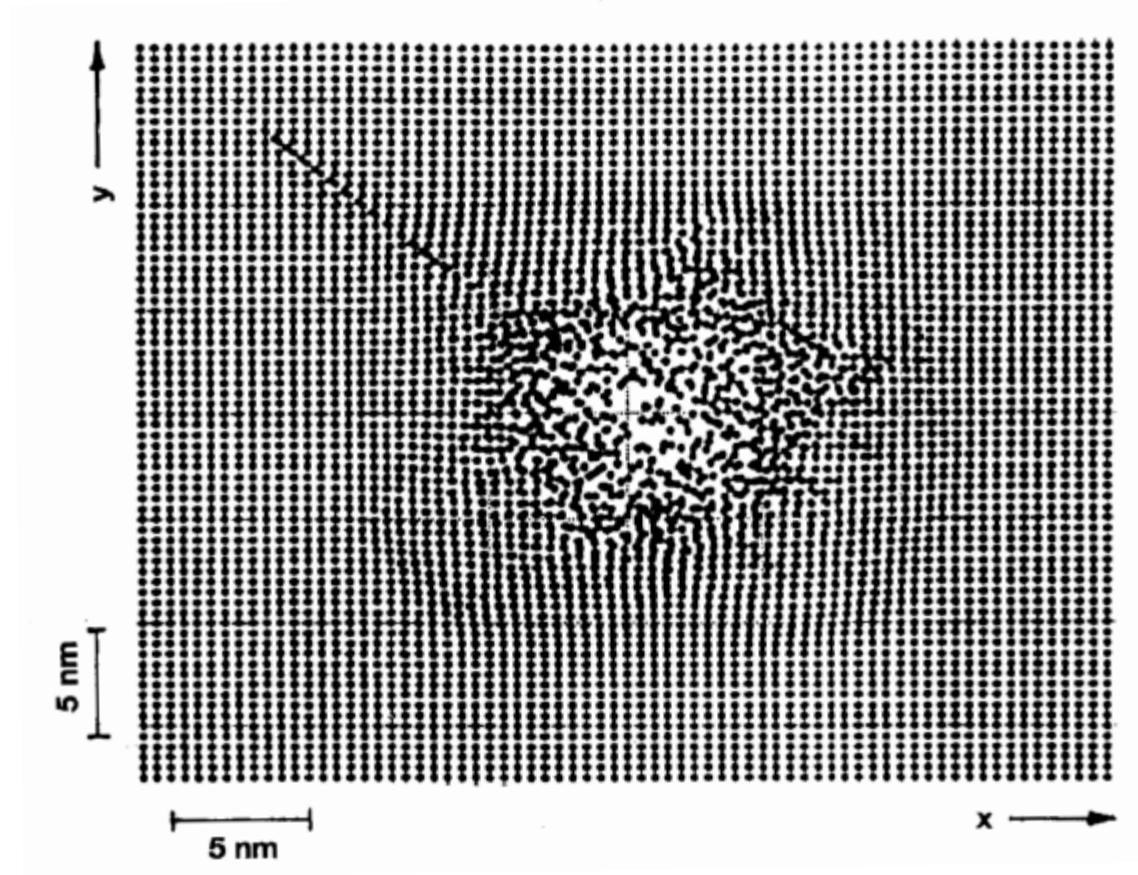
Flower shape (420°C, Fe-8Cr-1)



General shape (380°C , Pure Fe)

Courtesy of Bumsu Park
(Hokkaido University)

2) Atomic Displacement

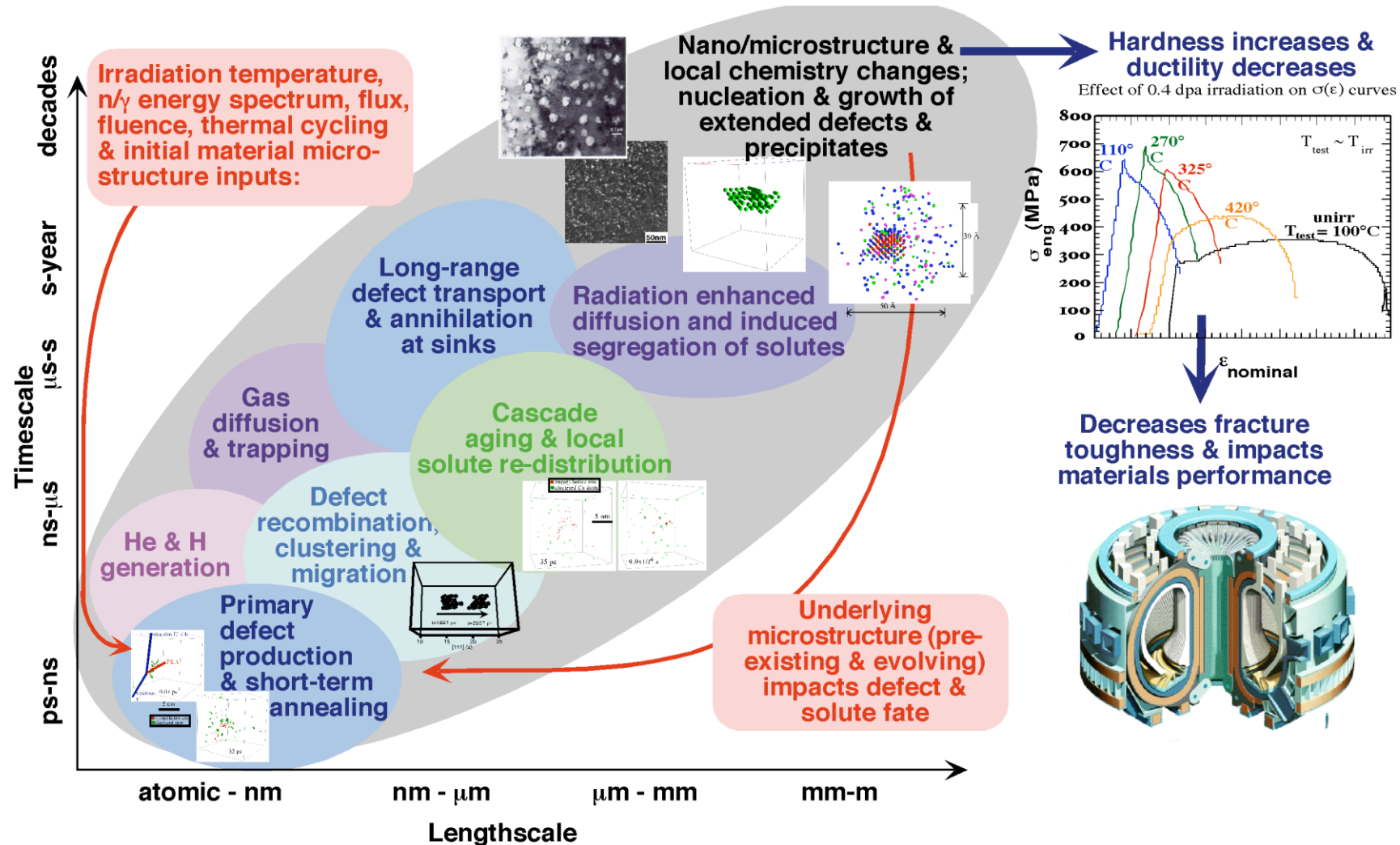


MD simulation of a displacement cascade
produced by a 10 keV primary knock-on atom
in an fcc lattice
(Ghaly and Averback)

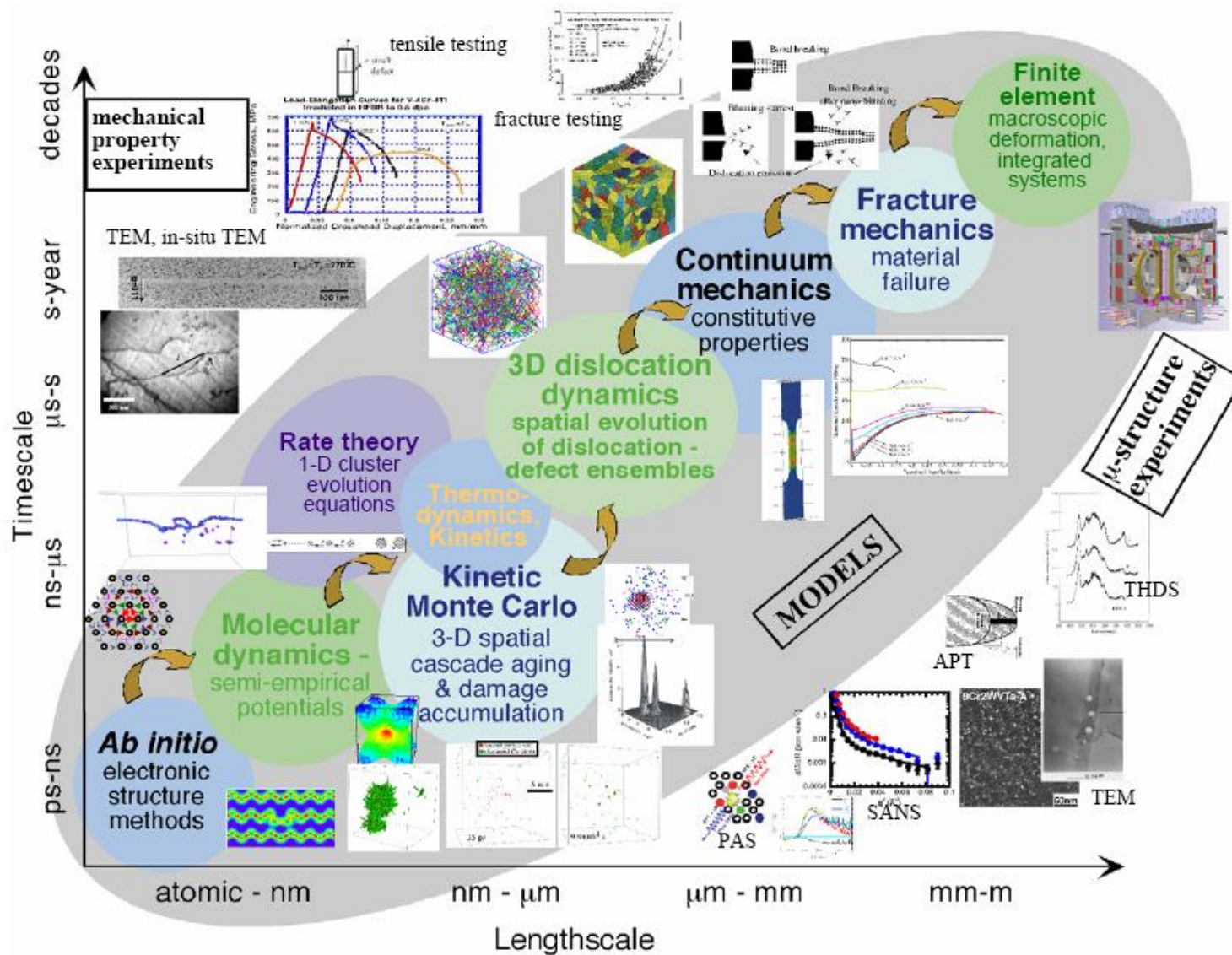
3) Ionization

- 원자로부터의 전자제거와 하전입자의 이동경로에서 이온쌍을 형성하는 것
- 전리는 전자가 중성원자에 붙거나 제거되는 것.
- α, β, p 은 물질을 직접적으로 전리시킬 수 있지만, n, γ 는 간접적으로 일으킴.
- 전리에 의해 아래 순서로 분자형성에 대한 손상이 증가함.
 - Metallic bond (least damaged): 금속결합
 - Ionic bond: 이온결합
 - Covalent bond (most damaged): 공유결합 ex) 생체조직
 - 작은 체적에서의 large energy release. Thermal heating: 방사차폐체에 중요
- 물과 유기물에서 흡수된 전리에너지의 대부분은 화학적 결합을 깬.
금속의 경우에는 열로 나타나고 결과적으로 물질의 성질을 변화시킬 수 있음.
- 중성자는 metallic bond, ionic bond에 주로 손상을 가함.

Physical Phenomena in Radiation Effects

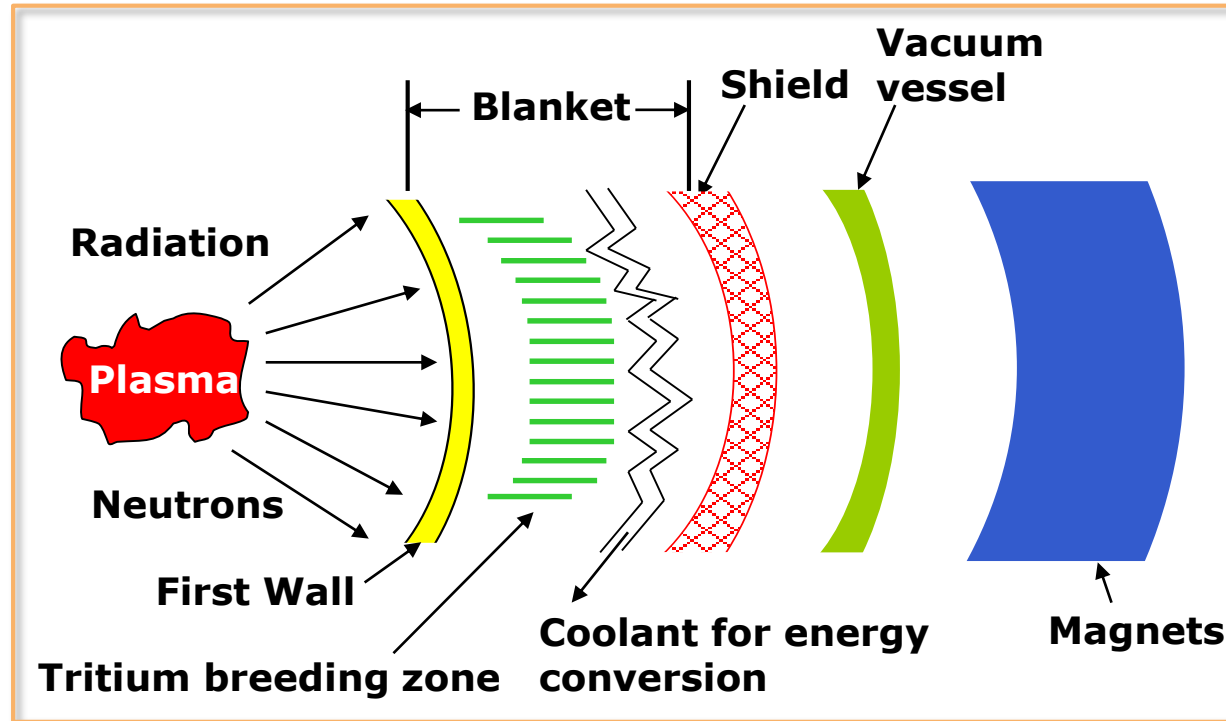


Simulation Hierarchy



Fusion materials

Radial Build in Fusion Reactors



Candidate Materials in Fusion

- **First Wall**

- High Z (W, W-alloy)
- Low Z (Be, Be-alloy)
- C/C composite

- **Blanket Structural material**

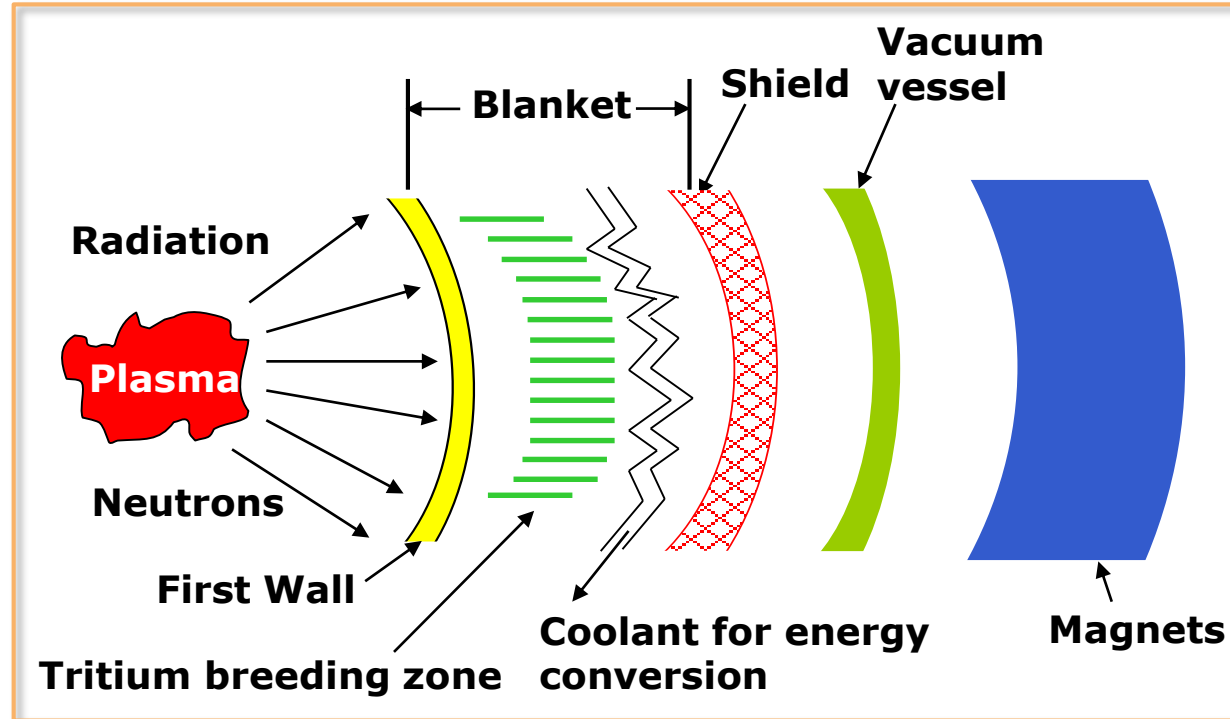
- FM steel (ODS steel)
- V-alloy
- SiC_f/SiC composite

- **Tritium Breeding material**

- Li based Oxides
- Liquid Li (Li, Li-Pb)
- Flibe / Flinabe

- **Neutron multiplier**

- Be, LiPb



- **Coolant**

- Li, LiPb, He
- Molten salt, Water

- **Shield**

- Ceramics

- **Magnets**

- Nb₃Sn
- Nb₂Al₃
- HTS

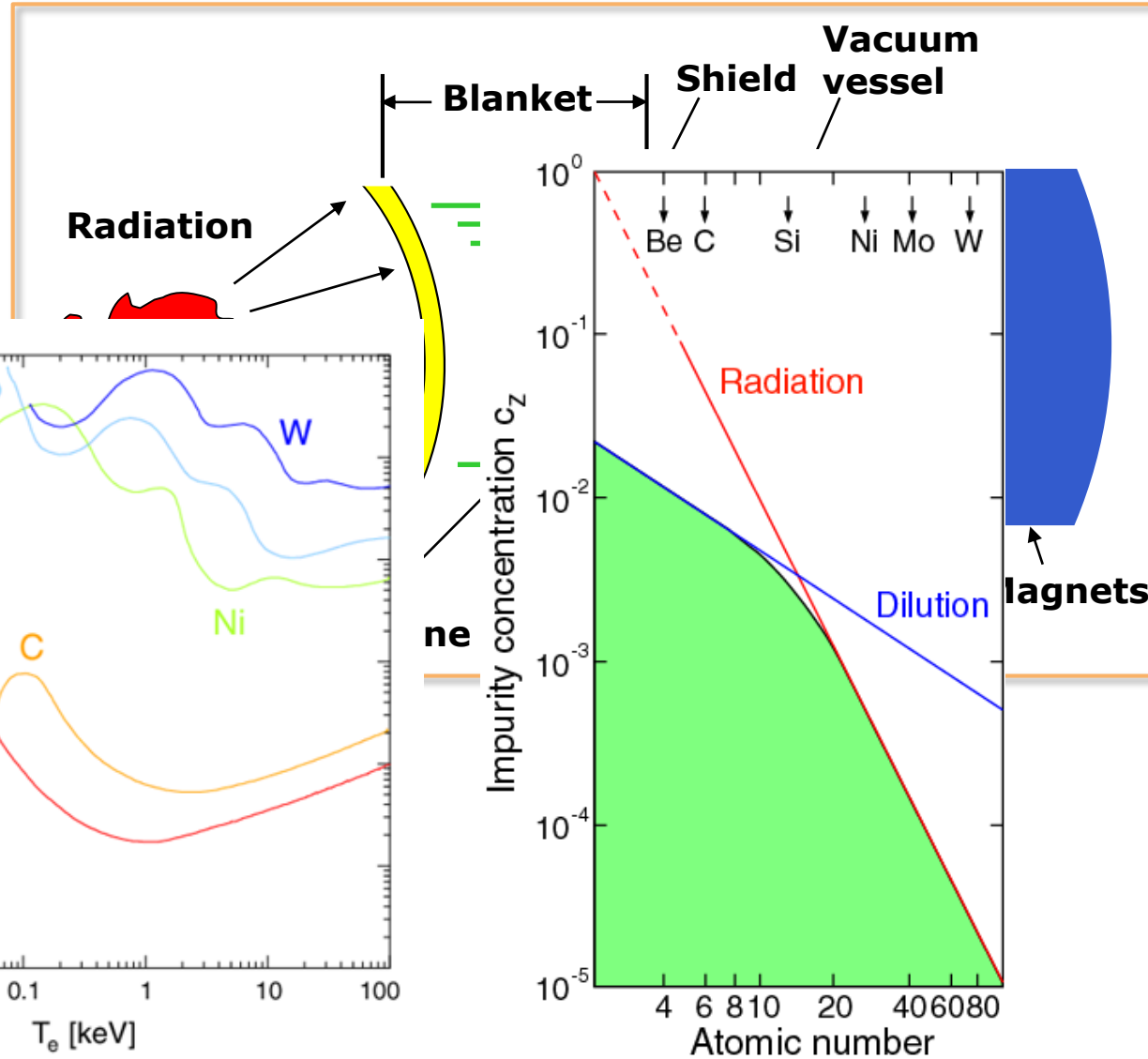
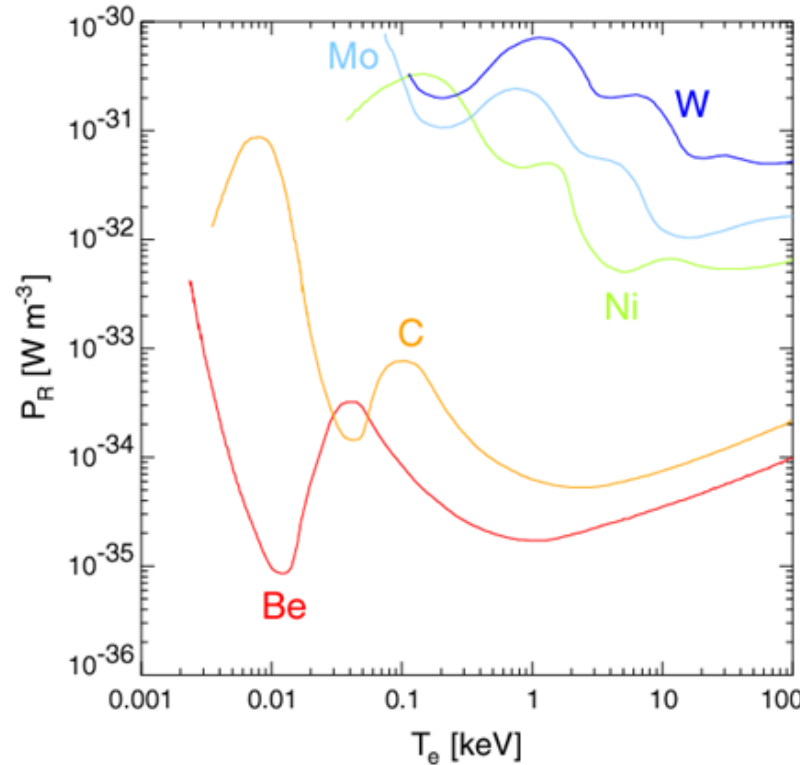
- **Tritium Storage Bed**

- ZrCo
- Uranium

Candidate Materials in Fusion

- **First Wall**

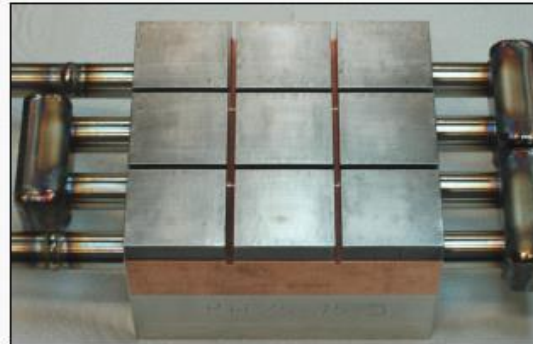
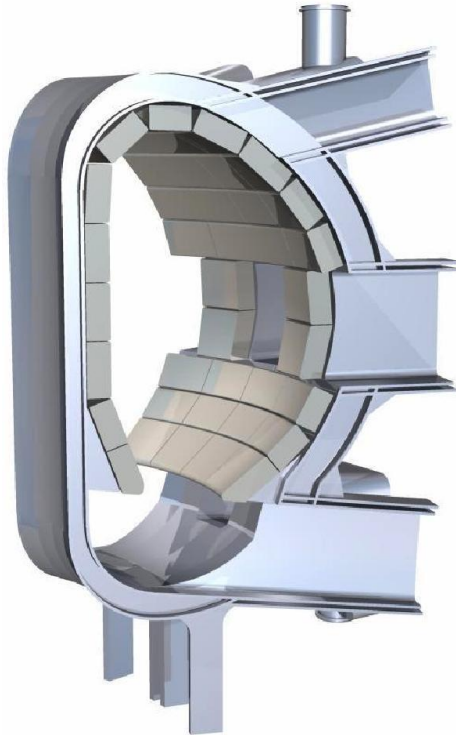
- High Z (W, W-alloy)
- Low Z (Be, Be-alloy)
- C/C composite



The First Wall and Other Materials

- **The first wall**

- Withstand a tremendous amount of heat from the plasma
- must not contaminate the plasma
- be compatible with the fusion products that impinge on them



Small scale PFCs
for Tests (EU)

Be primary first wall module

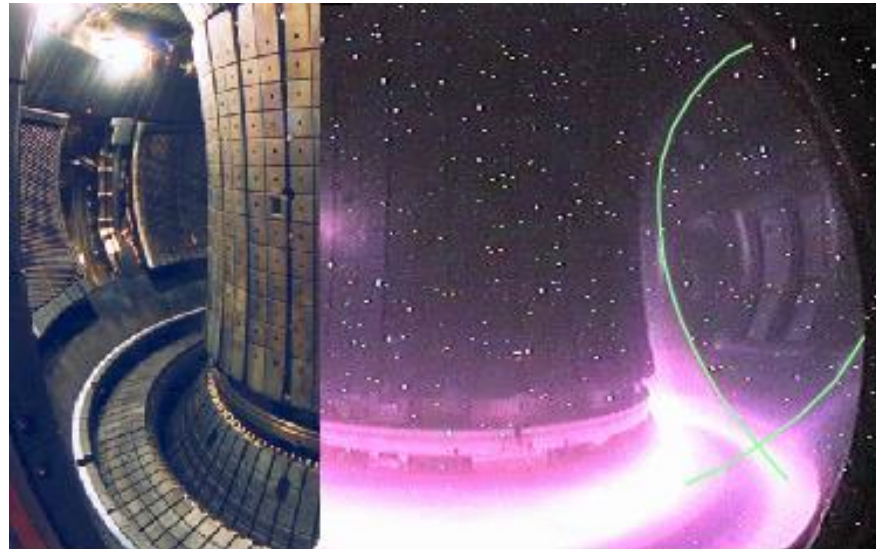
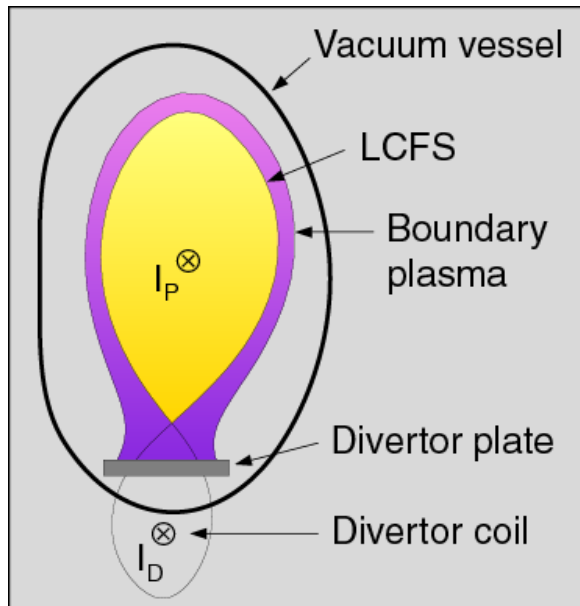
Be tiles (10 mm), CuCrZr heat sink (10 mm),
316L coolant tubes / backing plate (30 mm)

Hot isostatic Pressing

The First Wall and Other Materials

- **The Divertor**

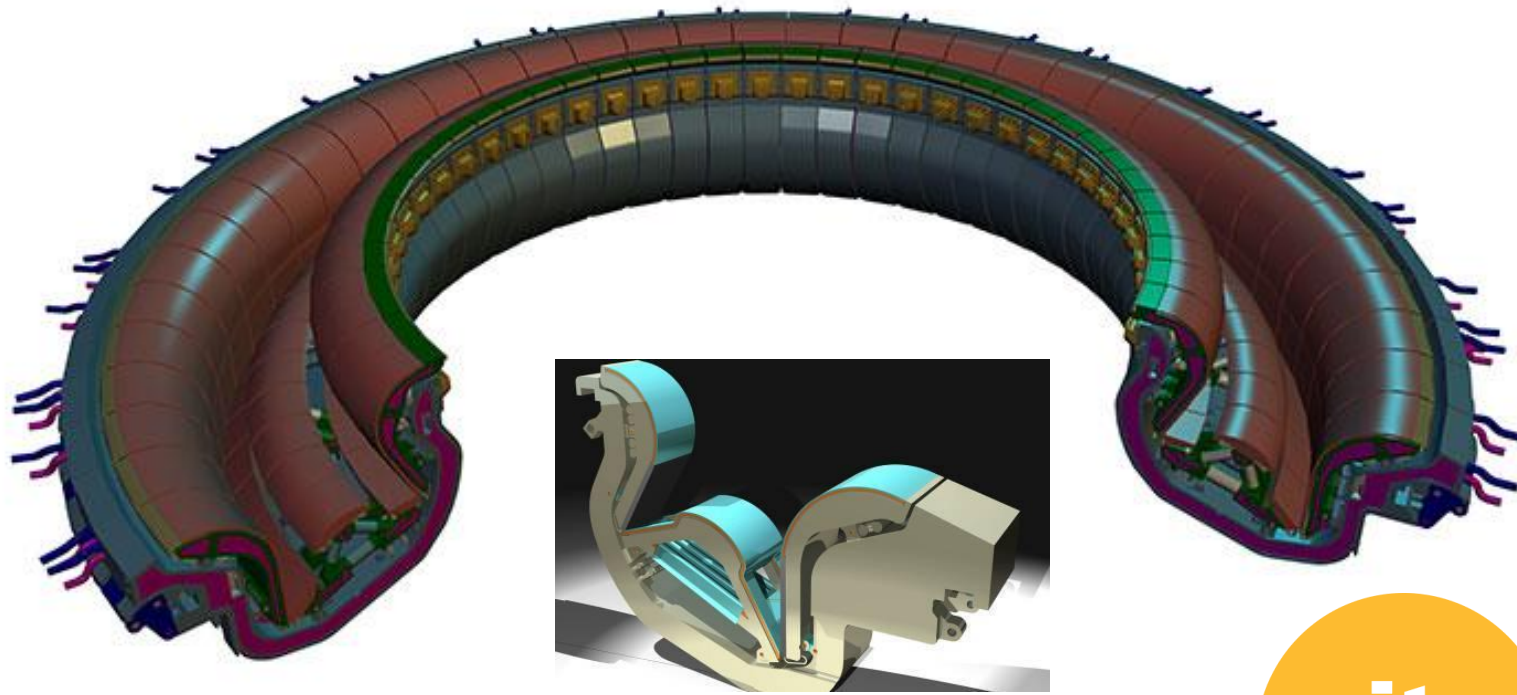
- Bending outer magnetic fields away from plasma by means of auxiliary magnetic coils → Removing outer layer of plasma to external chamber → Cooling → Neutralising → Pumping away



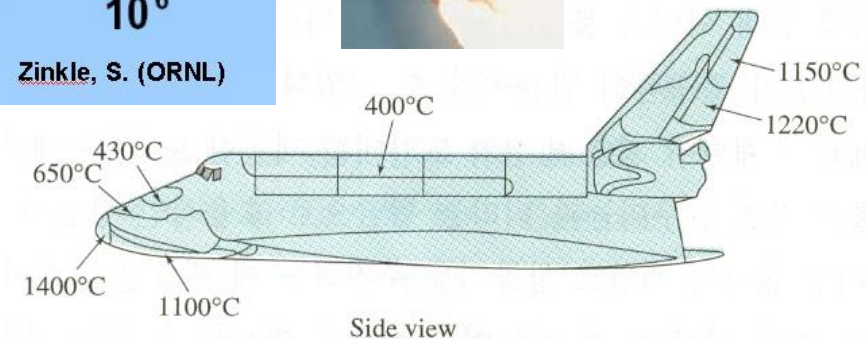
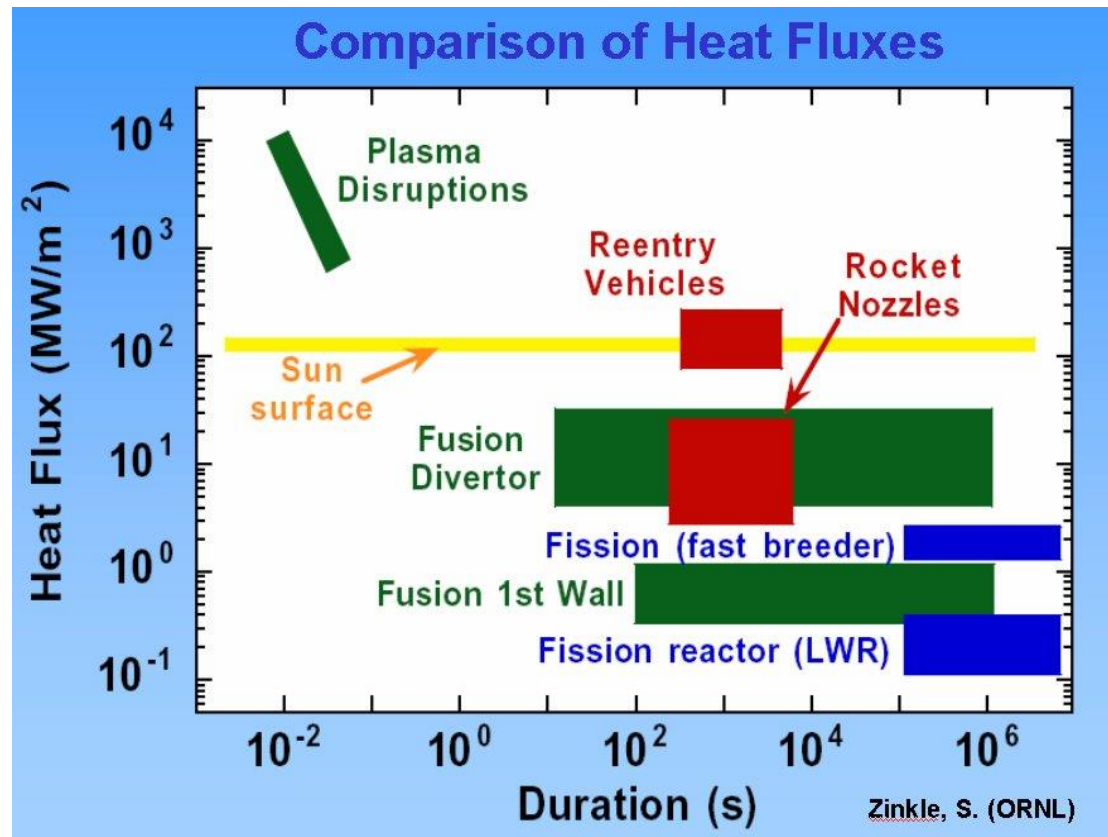
The First Wall and Other Materials

- **The Divertor**

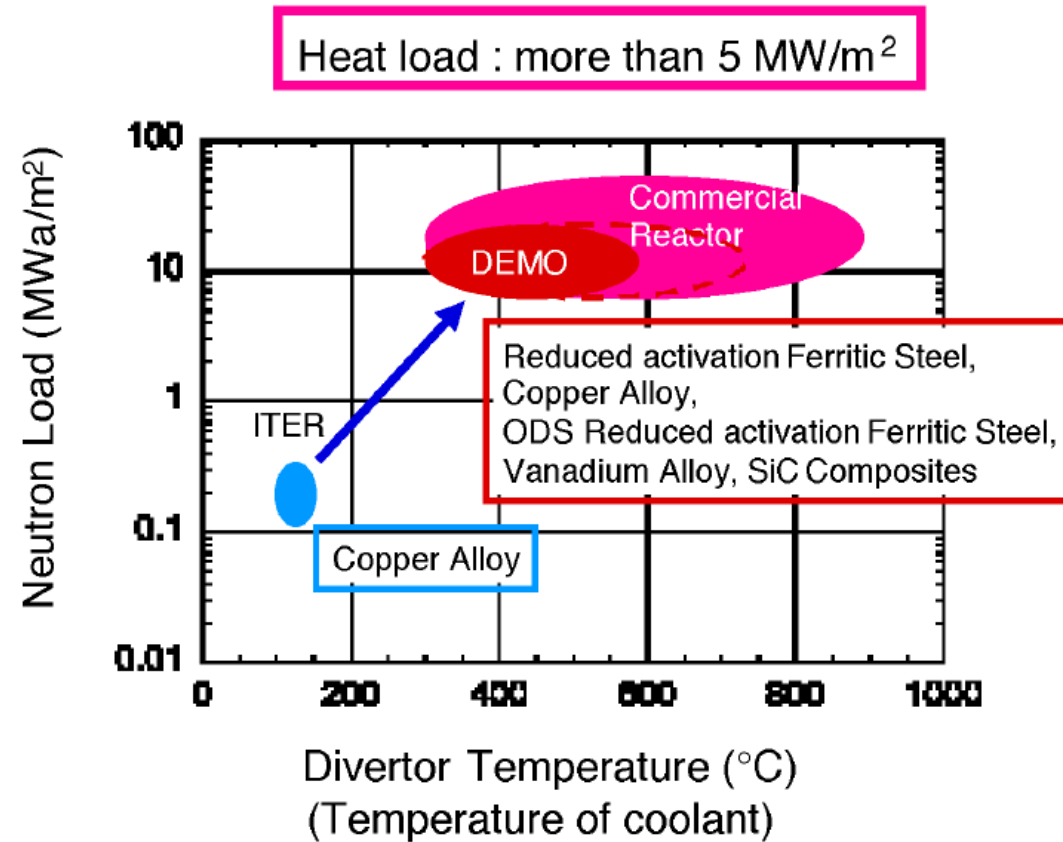
- Bending outer magnetic fields away from plasma by means of auxiliary magnetic coils → Removing outer layer of plasma to external chamber → Cooling → Neutralising → Pumping away



The First Wall and Other Materials



The First Wall and Other Materials



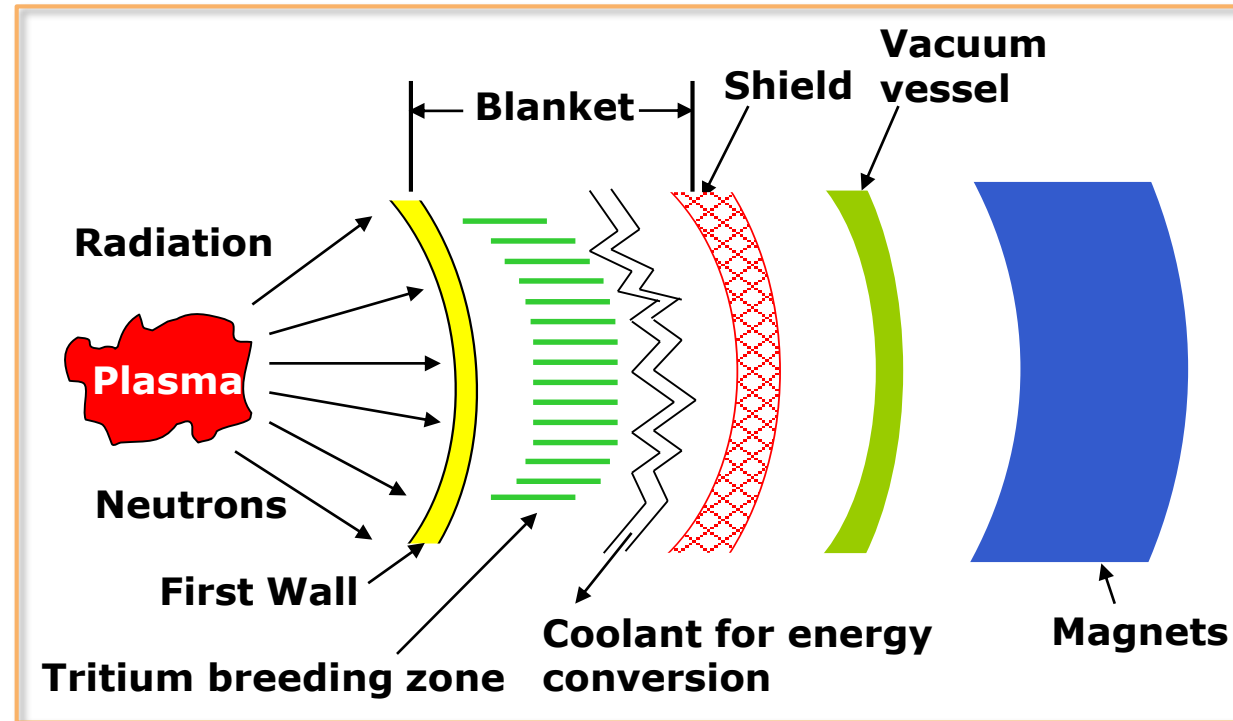
Candidate Materials in Fusion

- **First Wall**

- High Z (W, W-alloy)
- Low Z (Be, Be-alloy)
- C/C composite

- **Blanket Structural material**

- FM* steel (ODS** steel)
- V-alloy
- SiC_f/SiC composite



*FM: Ferritic Martensitic

**ODS: Oxide Dispersion-Strengthened