## 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
```

# Ch. 2 토카막로의 기초

#### • Tritium

#### 삼중수소 한수원 자료 참고

- The name is formed from the Greek word "tritos" meaning "third".
- Total steady state atmospheric and oceanic quantity produced by cosmic radiation  $\sim$  50 kg  $_{\rm Tritum (TU) 260.9^{\circ} (ko/m^2)}$



http://lhs2.lps.org/staff/sputnam/chem\_notes/Unitll\_Radioactivity.htm http://www-pord.ucsd.edu/whp\_atlas/pacific/maps/tritum/pac2600\_tritium\_final.jpg

#### • Tritium production by heavy water reactors (HWR)

- Extracted from the coolant and moderator of HWR  $n+_1^2H\rightarrow_1^3H$
- Tritium could also be produced by placing lithium into control and shim rods of fission reactors.

# Ch. 2 토카막로의 기초

#### Tritium

$$^{3}_{1}T \rightarrow ^{3}_{2}He^{1+} + e^{-} + \overline{V}_{e}$$

$$n \rightarrow p^{+} + Neutrino ("First postulpreserve conditions of the serve conditi$$

$$n \rightarrow p^+ + e^- + \overline{v}_e$$

no ("little neutral one" in Italian by Fermi): ostulated in 1930 by Wolfgang Pauli to ve conservation laws in beta decay

http://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino

# Ch. 2 토카막로의 기초

#### • Tritium

- Half life of 12.32 years with decay rate of  $1.78 \times 10^{-9} \, \text{s}^{\text{-1}}$
- Releasing 18.6 keV of energy with 5.7 keV of an average kinetic energy of electrons
- Nuclear activity (decay rate of 1 kg of tritium)

$$Act = \left|\frac{dn_t}{dt}\right| = \lambda_t n_t = \frac{\lambda_t M_t}{m_t} = \frac{1.78 \times 10^{-9} \, s^{-1} \times 1kg}{5 \times 10^{-27} \, kg}$$

$$= 3.56 \times 10^{17} Bq$$
  
=  $\frac{3.56 \times 10^{17}}{3.7 \times 10^{10}} Ci$   
≈  $10^7 Ci$ 

1 Bq (becquerel): unit of radioacitivity (SI unit). activity of a quantity of radioactive material in which one nucleus decays per second
1 Ci (curie): 3.7x10<sup>10</sup> decays per second (Bq) ~ activity of 1 g of the radium isotope <sup>226</sup>Ra studied by the Curies

## **Tritium Export**

• Total tritium to be received:

#### ~ 29 kg due to tritium decay

- Decay rate: 5.47 %/year (Half life: 12.3 year)
- ITER Tritium Plant will be ready by 2016.
- Tritium available worldwide: ~ 20 kg (2006, Canada OPG) (+ Korea WTRF)
- ITER Tritium credit: \$30M/kg
- Market value: \$100M-\$200M/kg (~1억/g)
- Only one supplier for ITER written on the ITER documents now: Canada
- Canada OPG sells  $\sim$  0.1 kg/year for other purposes.
- There is no other kg's order civilian tritium source at all.
- WTRF can produce more than 0.7 kg/year from year 2006.
- We have Tritium and good reason to supply.
- Korea is a partner for ITER, Canada is not.
- Korea is to procure the Tritium Storage and Delivery System for ITER.

*C. S. Kim, "Tritium Export Preparation for ITER Operation and Fusion Applications", May 25, 2006, NFRI* 





# **Mechanisms of tritium transport**



- 1) Intragranular diffusion
- 2) Grain boundary diffusion
- 3) Surface adsorption/ desorption
- 4) Pore diffusion
- 5) Purge flow convection

Purge gas composition: He + 0.1% H<sub>2</sub> Tritium release composition: T<sub>2</sub>, HT, T<sub>2</sub>O, HTO

$$\frac{dN_{t,c}}{dt} = F_{+t,c} - F_{-t,c} - R_{dt} = f_t F_{+t,c} - R_{dt} = 0 \quad \text{Steady state} \quad F_{+t}$$

Tritium decay neglected due to shorter time scale  $f_t$ : r

JN

*f*<sub>t</sub>: respective burn fraction of tritium

$$\frac{dN_{t,b}}{dt} = F_{+t,b} - F_{-t,b} - \lambda_t N_{t,b} - \mathcal{E}_b N_{t,b}$$

$$= C_t R_{dt} - \frac{N_{t,b}}{\tau_{t,b}} - \lambda_t N_{t,b} - \mathcal{E}_b N_{t,b} \quad \longleftarrow \quad \frac{1}{\tau_b} = \frac{1}{\tau_{t,b}} + \lambda_t + \mathcal{E}_b$$

$$= C_t R_{dt} - \frac{N_{t,b}}{\tau_b}$$

$$N_{t,b}(0) = 0$$

$$N_{t,b} = Ae^{-\frac{t}{\tau_b}} + B = C_t R_{dt} \tau_b \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_b}}\right)$$

$$\frac{P_{et} C_t \tau_{t,b}}{P_{et} C_t \tau_{t,b}} = \frac{1}{T_{t,b}} + B = C_t R_{dt} \tau_b \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_b}}\right)$$

$$\frac{dN_{t,x}}{dt} = F_{+t,x} - F_{-t,x} - \lambda_t N_{t,x} - \varepsilon_x N_{t,x} 
= \frac{N_{t,b}}{\tau_{t,b}} - \frac{R_{dt}}{f_t} - \lambda_t N_{t,x} - \varepsilon_x N_{t,x} 
= \frac{C_t R_{dt} \tau_b}{\tau_{t,b}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_b}} \right) - \frac{R_{dt}}{f_t} - (\lambda_t + \varepsilon_x) N_{t,x} 
= A_0 - A_1 e^{-\frac{t}{\tau_b}} - A_2 N_{t,x}$$

$$F_{-t,x} = F_{+t,c} = \frac{1}{f_t} \\
N_{t,b} = C_t R_{dt} \tau_b \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_b}} \right) \\
N_{t,x} = R_{t,c} = \frac{1}{T_{t,c}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_b}} \right) + \frac{1}{T_{t,c}} \left( 1 -$$

$$A_0 = R_{dt} \left[ C_t \left( \frac{\tau_b}{\tau_{t,b}} \right) - \frac{1}{f_t} \right], \quad A_1 = R_{dt} C_t \left( \frac{\tau_b}{\tau_{t,b}} \right), \quad A_2 = \lambda_t + \varepsilon_x$$

 $R_{dt}$ 

 $\boldsymbol{\Gamma}$ 

 $\boldsymbol{\Gamma}$ 



## 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

HW. 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)

$$(\Delta E)_{\max} = \frac{1}{2}m_1v_1^2 \frac{4m_1m_2}{(m_1 + m_2)^2} = \frac{4A}{(A+1)^2}E_{inc} \qquad A: 반발 원자핵의 질량수$$
  
 $E_{inc}$  kinetic energy of the incident ion (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 γ선을 방출하고 기저상태로 돌아감.
- 방출된 γ선이 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.

결국 중성자는 열중성자로 변하여 원자핵에 포획·흡수되거나 혹은 베타붕괴를 통해 붕괴함 (반감기 ~ 14.8분).  $n \rightarrow p^+ + e^- + \overline{\nu_e}$ 

- 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.
- · 중성자의 에너지가 낮을 수록 일어나기 쉬움. 1 eV 이하에서 포획단면적은 1/v에 비례하여 증가 열중성자에서 쉽게 발생
- ex) <sup>59</sup>Co(n,γ)<sup>60</sup>Co • 중성자의 에너지가 낮을 수록 일어나기 쉬움.
- 되어 에너지를 γ선(포획 γ선)의 형태로 방출하고 안정화됨 (n,γ). • 중성자를 포획한 원자핵은 질량수가 1만큼 많은 동위원소가 됨. 방사성인 경우가 많음.
- 중성자의 속도가 느려지면 (< 1 keV) 원자핵에 충돌하여도 산란이 일어나지 않고 그대로 원자핵에 포획되어 흡수됨. 포획 직후 원자핵은 여기상태가 되어 에너지를 γ선(포획 γ선)의 형태로 방출하고 안정화됨 (n,y).



## 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. <sup>14</sup>N(n,p)<sup>14</sup>C는 저속 중성자에 의해 발생.
   <sup>10</sup>B(n,α)<sup>7</sup>Li은 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 조사
   시키면 바륨의 동위 원소가 생성된다는 것을 처음으로 입증



## 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 따 라 붕괴하면서 화학 원소를 변화시킴. 붕괴 진행과정에서 방출되는 방사선 은 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 원자
   와의 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·m<sup>2</sup>/kg: 단위 길이당 비전리 events에 의해 손실된 에너지 (displacement damage는 충돌에 의한 에너지 손실에 비례)

Incident

Particle

Interstitial

Frenkel pair 🔵 Vacancy

#### 2) Atomic Displacement



Vacancy 결함



Interstitial 결함



Substitutional atom



Frenkel 결함



Schottky 결함 (공공과 침입형 원자의 쌍) (양이온 공공과 음이온 공공의 쌍)

### 2) Atomic Displacement



#### Edge and Screw Dislocation (전위)





#### Stress states around an edge dislocation

http://en.wikipedia.org/wiki/Dislocation

#### 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 깸.
   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**



 $D + Li \rightarrow n + Be$ 



PIE: Post Irradiation Examination RFQ: Radio Frequency Quadrupole





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

		Li Target	Ion Source RFQ gy Beam
Typical Reactions	<sup>7</sup> Li(d,2n) <sup>7</sup> Be	<sup>6</sup> Li(d,n) <sup>7</sup> Be	<sup>6</sup> Li(n,T)⁴He
Deuterons	40 MeV	2x125 mA	Beam footprint 5x20 cm <sup>2</sup> 28



#### • IFMIF Target Area





#### **Main Parameters of IFMIF Accelerator**

Particle Type	D+		
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+)	
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

- 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 (~500 cm<sup>3</sup> for highest flux area) and the high energy tail of neutron spectrum
- To apply Small Specimen Testing Technique (typical dimensions ~ mm in thickness, ~ 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)	1.3·10 <sup>15</sup>	4·10 <sup>14</sup>	(4-10)·10 <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

Strategy of Fusion Materials Development and the Intense Neutron Source IFMIF, A. Möslang

### **Fusion Testing Requirements**

	Required	ITER
Neutron wall load	> 1 MW/m <sup>2</sup>	(0.57 MW/m <sup>2</sup> )
Neutron fluence	> 6 MW•y/m <sup>2</sup>	(0.1 MW·y/m <sup>2</sup> )
Long pulse	> 1000 s	(400 s)
Testing area/volume	> 10 m <sup>2</sup> /5 m <sup>3</sup>	

- 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.