

# **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

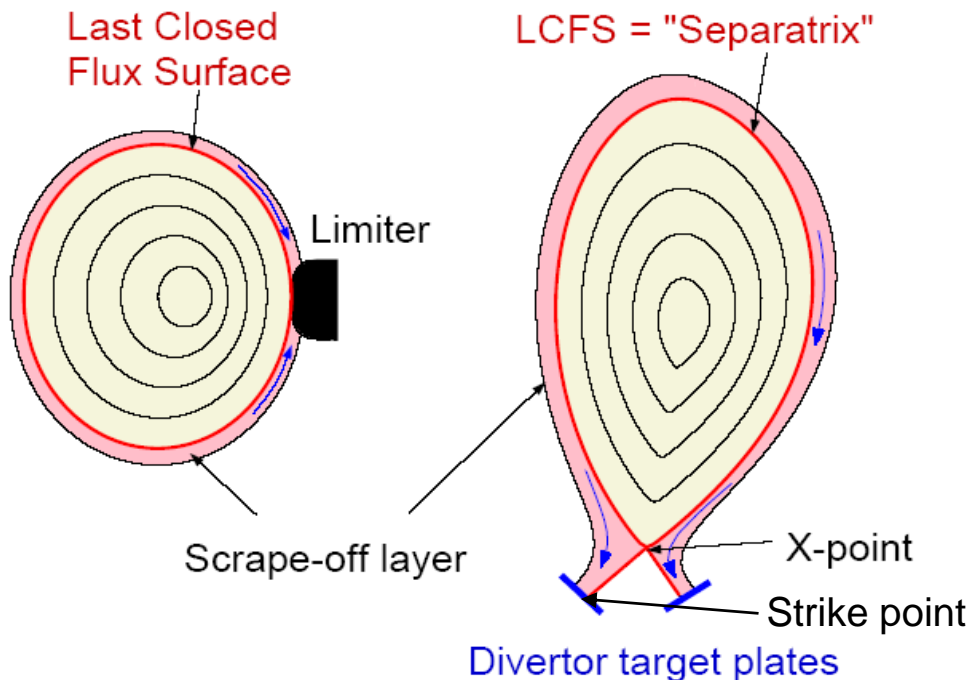
Week 11-12. Types of Blanket in ITER and DEMO

Week 13. Plasma Facing Components

Week 14. Presentation II

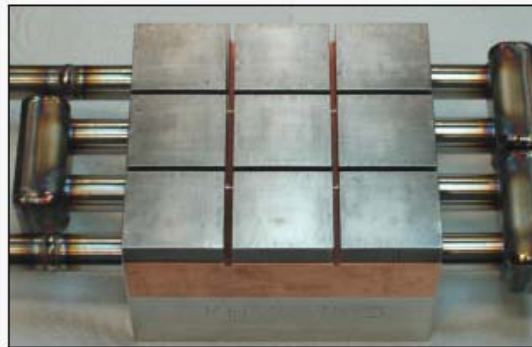
# 1. 플라스마대향기기(PFC)의 역할

- 제1벽 (FW): 플라스마로부터의 방사열, 중성입자 (원자, 분자), 하전입자 (이온, 전자), 중성자로부터 블랭킷이나 진공용기를 보호하는 것
- Divertor: 플라스마 중의 불순물을 reactor 외부로 배출해서 플라스마의 순도를 유지
- Limiter: 플라스마의 위치 제어



## 2. 플라즈마대향기기(PFC)의 기본 구성

- Armour 재료: 플라즈마로부터의 입자나 열에서 표면을 보호함.  
플라즈마대향재료라고도 함.
- 냉각구조: Armour 재료 아래에 위치하여 열을 제거
- 지지구조: PFC 전체를 지지
- FW, Divertor, Limiter에서는 그 기능이나 부하에 따라 각각 다른 Armour의 형상이나 재료, 냉각구조나 냉각조건, 지지구조의 형상이나 지지방법 등이 채용됨.



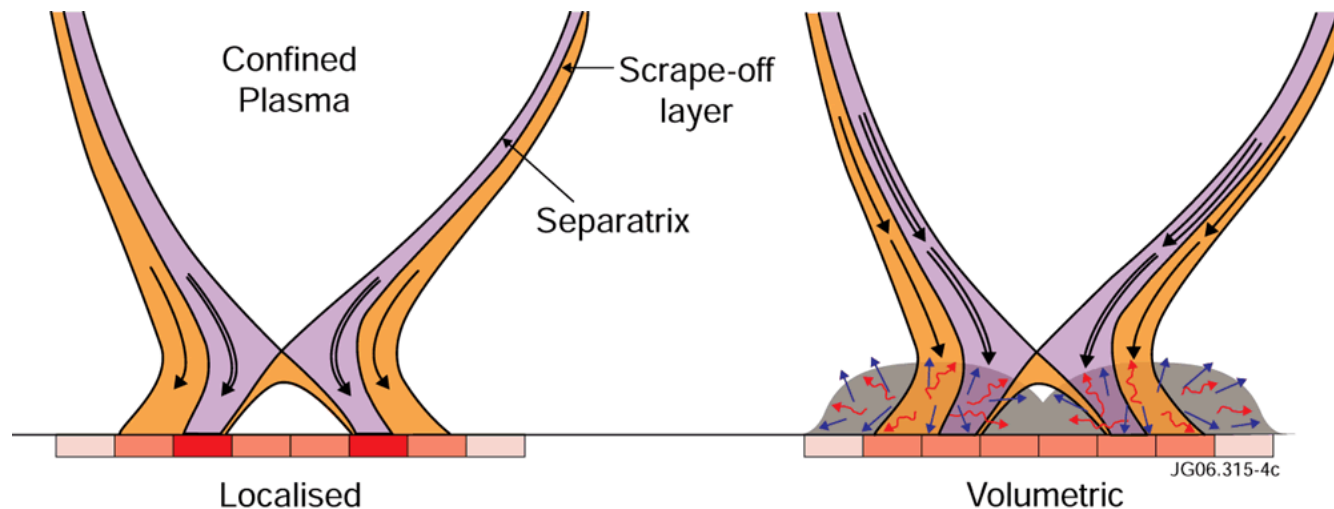
Small scale PFCs  
for Tests (EU)

### **Be primary first wall module**

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

### 3. Divertor의 기능

- D-T 핵융합 반응을 통해 발생하는 헬륨재와 플라즈마 주위의 벽 등에서 방출된 미량의 산소나 수분 등 불순물은 이온 상태로 자력선에 감겨있기 때문에 그대로는 제거할 수 없음.
- 자력선을 늘려서 고체벽과 교차시킴으로 자력선에 따라 플라즈마에서 누출되는 이온을 저온의 고체벽으로 이끌고, 그 표면에서 재결합시키고, 중성의 원자·분자로 변환해서 진공펌프로 밖으로 배출하는 방법



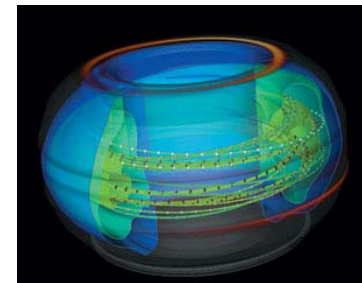
## 4. Armour 재료와 손모과정

- Physical sputtering: 충돌 에너지 > 표면 원자의 결합 에너지  
중수소 이온이 탄소재에 입사할 때: 10 eV  
중수소 이온이 텅스텐에 입사할 때: 300 eV
- Chemical sputtering: 입사입자와 표면 원자의 화학반응으로 발생  
threshold 값이 특별히 없음.  
탄소재료의 경우:  $4\text{H} + \text{C} \rightarrow \text{CH}_4$ ,  $4\text{D} + \text{C} \rightarrow \text{CD}_4$



KSTAR Coupon

- Transient event  
예) Disruption: 1/000s 정도의 단시간에  
600-10<sup>6</sup> MW/m<sup>2</sup>에 달하는 에너지 부하로  
표면 용융, 증발 발생

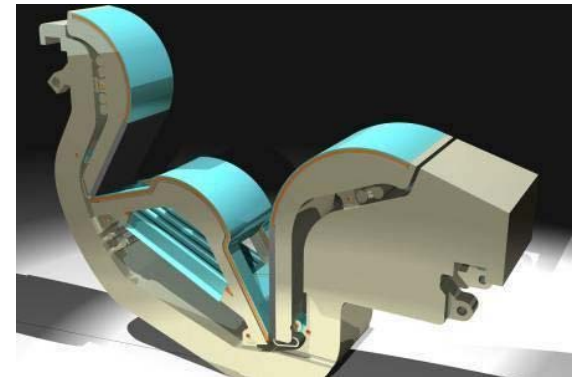
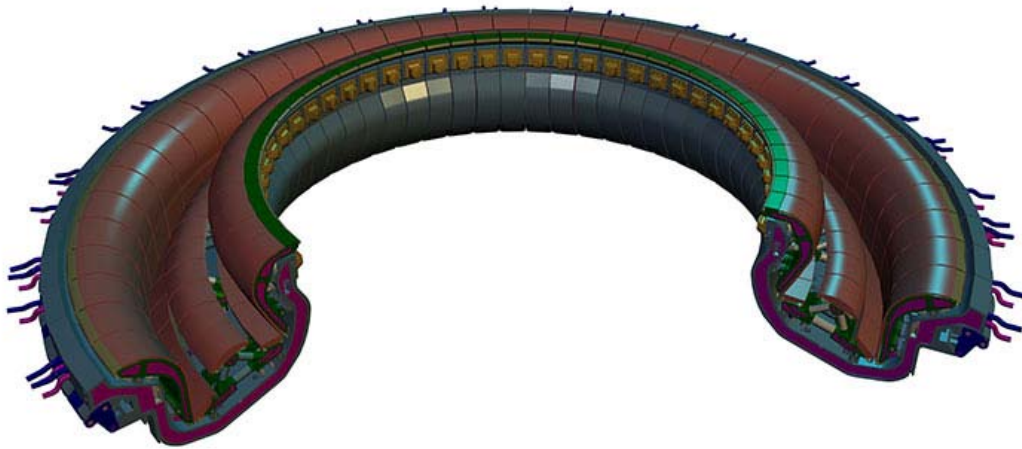


## 4. Armour 재료와 손모과정

- Sputtering 이나 증발로 인한 플라즈마 내로의 impurity 혼입과 이에 따른 플라즈마 방사손실을 막기 위한 방법
  - Low Z material 사용: 탄소 ( $Z = 12$ ), 베릴륨 ( $Z = 9$ )
  - sputtering 손모가 작은 재료 사용: threshold energy가 높은 텅스텐이나 수소 등과 반응하지 않는 재료 채용
  - 중성자에 대한 재료의 조사 열화가 적은 재료 사용

## 4. Armour 재료와 손모과정

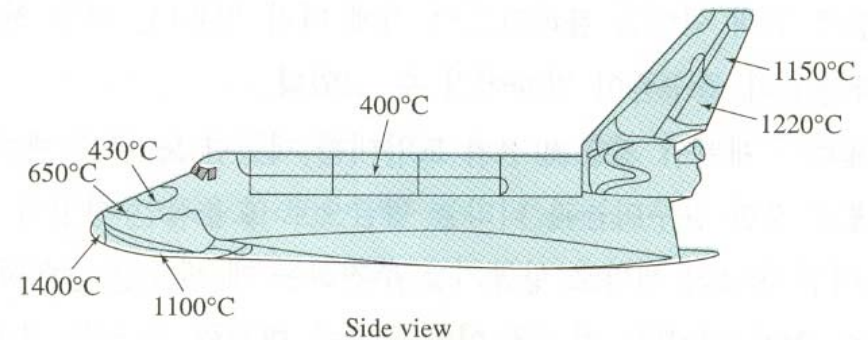
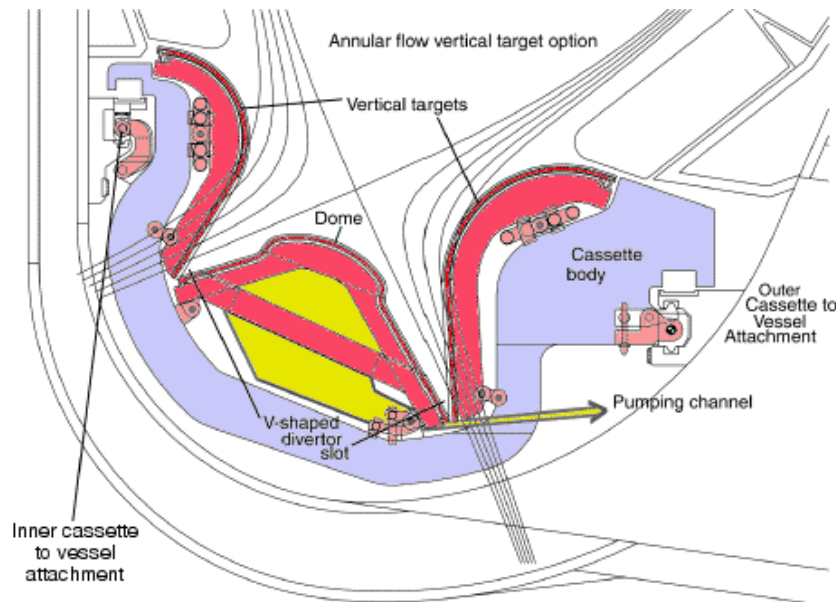
- ITER
  - Divertor의 carbon armour의 두께: ~20 mm
  - Sputtering에 의한 손모량: ~9 mm (약 3년간의 운전: 1000s discharge, 3000회)
  - Disruption에 의한 손모량: ~9mm (3년간 약 300회 발생)
  - Disruption 열부하가 들어가지 않는 부분은 텅스텐 채용
  - FW: Be 채용





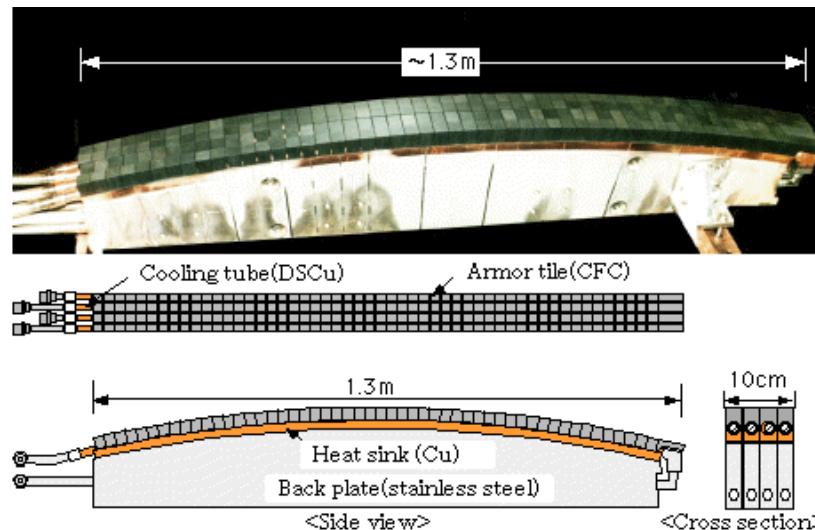
## 5. 플라스마로부터의 열

- 플라스마 에너지의 약 20%가 divertor에 집중됨.
- 자력선에 수직인 수열면에서 에너지를 받게 될 경우:  $200 \text{ MW/m}^2$
- 자력선에 대해 수열면을 비스듬히 해서 실효적인 수열면적 증대, 열부하 절감:  
ITER:  $5^\circ$  - 열부하 1/10 감소 ( $20 \text{ MW/m}^2$ )
- Detached plasma: divertor 영역에 H, Ar 등 impurity gas 혼입하여  
열부하 절감 ( $5\text{-}20 \text{ MW/m}^2$ )



## 6. 냉각 구조 재료

- 냉각관 내부의 큰 온도 구배에 따라 열(구부림) 응력 발생
- Divertor 냉각관은 동합금 (copper alloy) 사용
  - 강도에 뛰어난 알루미늄 분산강화 동, 석출경화 동 (크롬지르코늄 동)은 1.5 mm 두께로 약 25 MW/m<sup>2</sup> 견딜 수 있음.
  - 스테인리스 강: 기존 원자력 기기에서 사용. 0.5 mm 두께에도 2 MW/m<sup>2</sup> 밖에 견디지 못함.
- FW은 열부하가 0.1-0.5 MW/m<sup>2</sup>이기 때문에 두께 1 mm 정도의 스테인리스 강 사용



A full-scale  
ITER divertor mock-up  
(JAEA)

## 7. Armour 재료와 냉각 구조의 접합

- 열저항이 작은 야금적인 용접 방법 (예) 납땜) 필요

- 통과열유속 = 접촉열저항  $\times \Delta T$

- Armour 재료를 냉각 구조에 볼트 등으로 고정할 경우:

접촉열저항 =  $5 \text{ kW/m}^2/\text{K}$ ,  $\Delta T \sim 1000^\circ\text{C}$  (통과열유속 =  $5 \text{ MW/m}^2$ )

- 기존에는 탄소재 armour와의 젖는 성질이 좋은 은땜이 사용되었지만, 은은 중성자에 의해 고도로 방사화 됨. 또한 핵변환(카드뮴으로 변환)으로 특성이 떨어지기 때문에 ITER에서는 저방사화 관점에서 Cu-Ti 계나 Cu-Mn 계 사용
- Armour재인 탄소계 재료나 텅스텐의 선팽창률은 동합금의 약 1/3 정도이므로 야금적으로 접합하면, 선팽창률의 차이에 의해 접합부에 큰 열응력이 발생하여 armour가 박리하게 됨: 중간에 순동 층을 삽입해 납땜 온도에서 실온으로 냉각 시 탄소재료와 텅스텐과 함께 순동이 소성 변형하는 성질을 이용해 접합부에 발생하는 응력을 완화시킴.
- Armour 탄소재료에는 탄소섬유를 안에 넣어 강도를 높인 탄소섬유 강화 복합재료 (CFC) 사용



## 8. Divertor 냉각 구조의 전열 유동

- Divertor의 고열 부하 제거를 위해서는 비등 현상을 이용해야 함.

- 열유속 = 열전달률  $\times \Delta T$

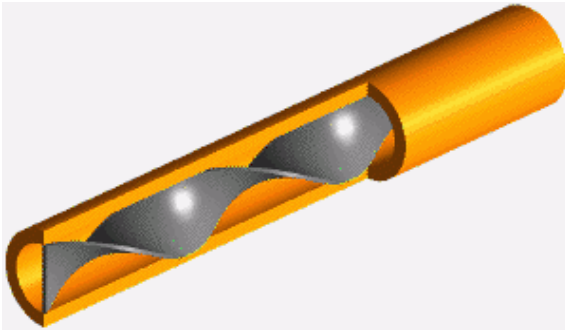
- ITER: 내경 15 mm 냉각관에 10 m/s 냉각수를 흘림.

열전달률 =  $4 \times 10^4$  MW/m<sup>2</sup>K,  $\Delta T \sim 500^\circ\text{C}$  (열유속 = 20 MW/m<sup>2</sup>)

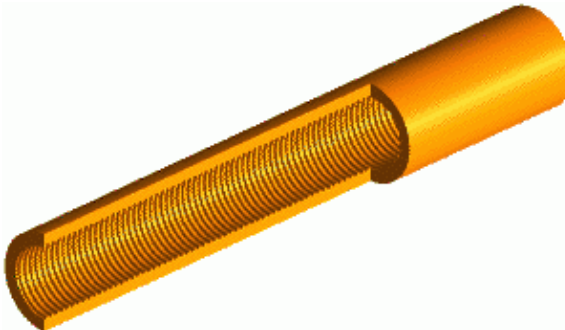
- 비등 전열의 경우, 열유속이 증가했을 때 전열면에 충만한 기포가 열저항이 되고, 단시간에 급격한 전열면 온도의 상승을 야기. 이 현상은 대부분의 경우 전열면의 용융을 일으켜 냉각관에서의 물 누출이 발생하기 때문에 소손 (burn out)이라 하고, 이 때의 열유속을 한계열유속이라 함.
- 한계열유속과 통상 사용하는 열유속의 비를 안전율이라 함: 1.1-1.5의 안전율을 확보하는 것이 일반적임.

## 8. Divertor 냉각 구조의 전열 유동

- Divertor의 경우, 냉각관의 방향에 따라 nonuniform하게 가열이 이루어지므로 한계열유속데이터가 거의 없음. 다양한 형상의 냉각관에 대한 연구결과 냉각관 중에 리본상태의 테이프를 넣은 스월관이 냉각관으로 채용됨. 스월관은 보통의 평골관에 비해 약 2배의 한계열 유속을 가지고 있음.
- High performance cooling tube



- Swirl tube: This cooling tube is made of copper and has a twisted tape inside to enhance its heat removal capability by generating spiral flow of the coolant.



- Screw tube: This cooling tube has screw threads on the inner wall of the tube to enhance its heat removal capability.

## 8. Divertor 냉각 구조의 전열 유동

- Divertor 수열기기의 냉각 구조 재료로 사용하고 있는 동합금은  $100^{\circ}\text{C}$  이하로 중성자 조사를 받으면 취화해서 필요한 강도를 얻을 수 없게 됨:  
운전 중 고온으로 유지해야 함 (냉각수 입구 온도:  $100\text{-}140^{\circ}\text{C}$ ).

## 9. Divertor 냉각관의 열피로

- Divertor plate는 플라즈마 대향표면부터 가열되기 때문에 기기 내부에 큰 온도구배가 생겨 구부림응력이 발생함 → 운전이 반복되면서 fatigue 발생
- PFC의 수명을 고려할 때는 armour재의 손모에 대한 수명과 함께 구조재의 피로수명을 고려해야 함.
- 냉각관의 피로파괴는 냉각수가 로내로 누출되기 때문에 신뢰성 관점에서 가장 중요한 과제 중 하나임.
- Divertor의 피로 수명 평가 시 냉각관 재료인 동합금의 기계물성이 사용온도나 제작 시의 열이력으로 크게 변화한다는 점을 주의해야 함.  
따라서 유효인장강도나 young's modulus 등의 물성치는 이러한 온도조건이나 이력을 고려해서 측정해줘야 함.

## 10. 현 시점에서의 기술적 총괄

- PFC 기술은 열이나 입자부하에 견딜 수 있는 armour 재료, armour 재료와 냉각 구조의 접합기술, 고열부하를 제거하는 냉각기술, 그리고 기기의 건전성을 확보하는 피로 수명 평가 등 재료공학, 야금공학, 열공학, 구조공학을 포함한 종합기술임.
- 현재까지 ITER의 정상 열부하인  $5 \text{ MW/m}^2$ 에 3000회, 비정상 열부하인  $20 \text{ MW/m}^2$ , 10초에 1000회 견딜 수 있는 실 규모가 큰 divertor가 개발됨. 이 시험회수는 약 3년간 운전 기간에 해당하는 것으로 ITER divertor는 armour 재료의 손모 등을 고려해서 3년 마다 교환하는 설계로 되어있음.
- ITER 이후 DEMO, 상용로의 요구 조건
  - 발전효율을 높이기 위해 냉각수 온도를 보다 고온으로 하는 것이 요구됨.  
예)  $500^\circ\text{C}$ 의 초임계수
  - 중성자의 양이 100배 정도 늘어나는 점을 감안, 중성자에 의한 재료의 조사 열화에 대한 데이터 축적 필요: 기기의 저방사화나 신뢰성 향상