

Fusion Reactor Technology I

(459.760, 3 Credits)

Prof. Dr. Yong-Su Na

(32-206, Tel. 880-7204)

Contents

Week 1. Introduction

Week 3-6. Basic Concept of Tokamak Fusion Reactor

Week 9-10. Blanket Concept

Week 11. Material

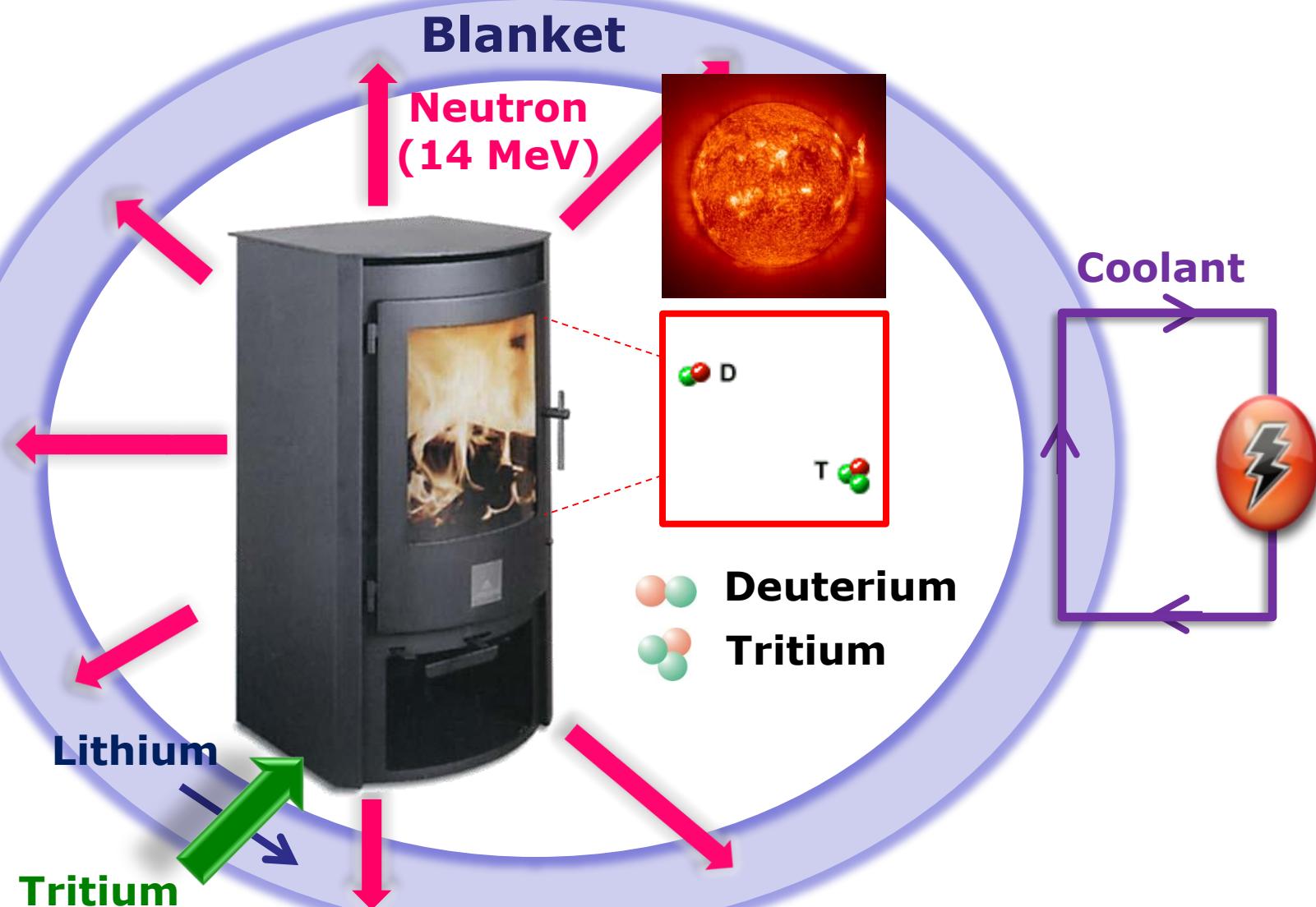
Week 12-14. Fusion Reactor Design

Week 15. Safety

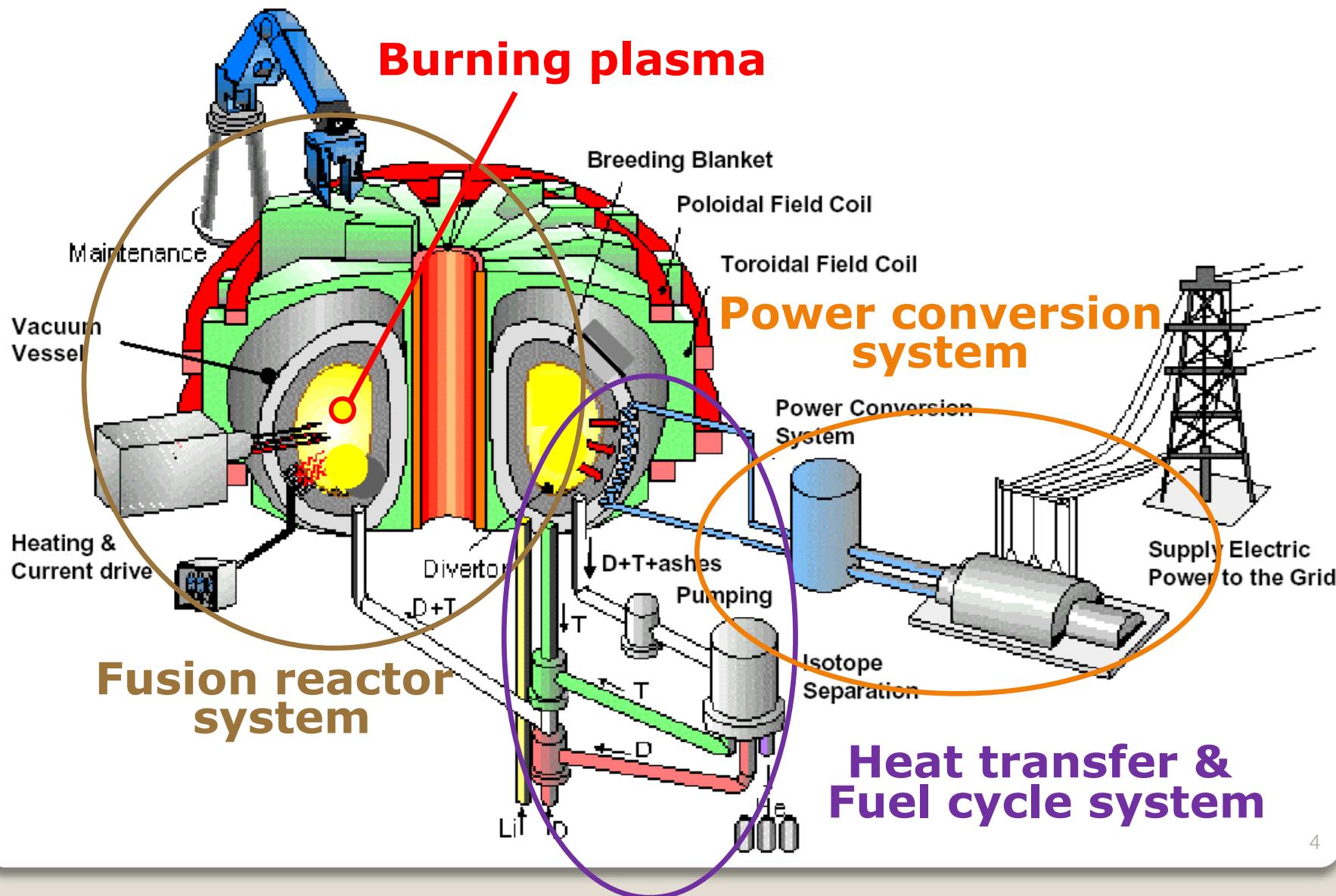
Week 16. Operation and Maintenance

Week 17. Presentation

Fusion Power Plant (FPP) System

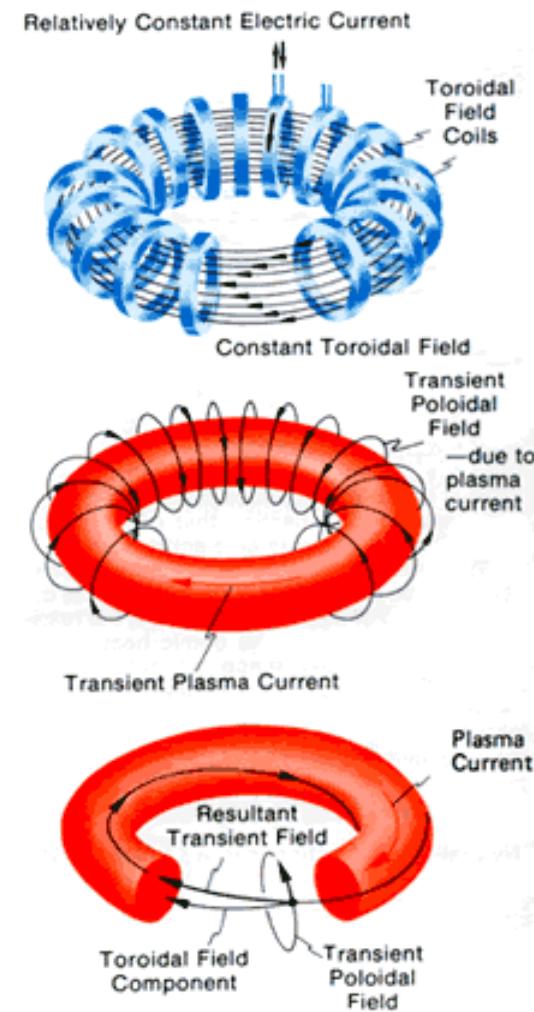
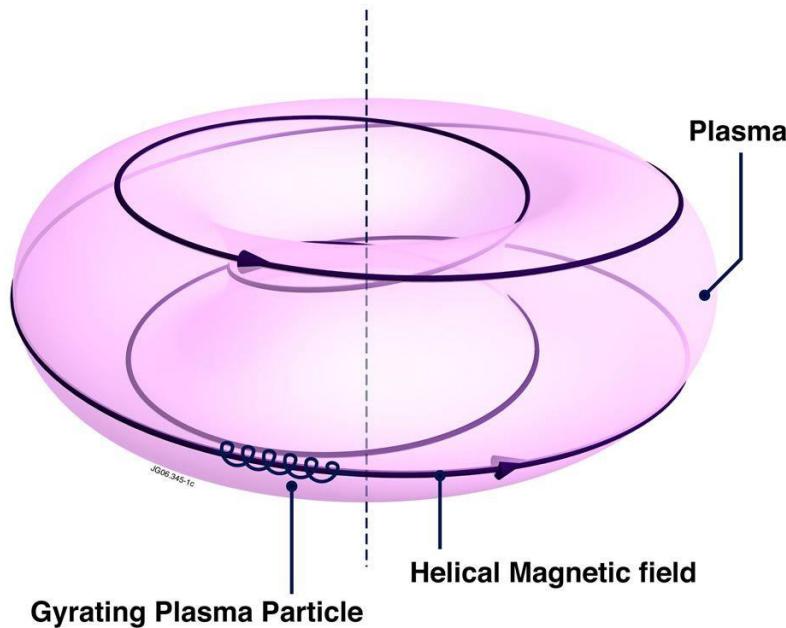


Fusion Power Plant (FPP) System



2.2 토카막 핵융합로의 구성

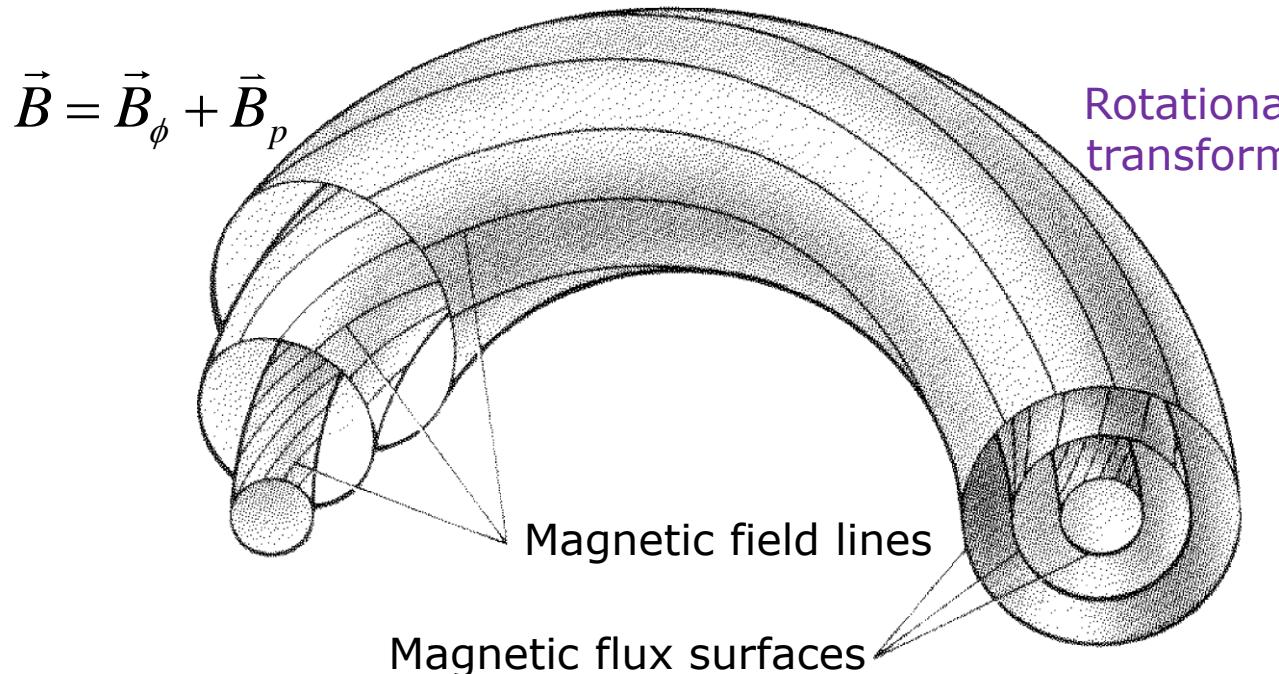
- 플라즈마 밀폐를 위한 구조



Basic Tokamak Variables

HW. First paper?

- Safety factor $q = \text{number of toroidal orbits per poloidal orbit}$



Rotational transform

$$\iota = \frac{\Delta\theta}{\Delta\phi} = \frac{r}{B_\phi} \frac{B_\theta}{2\pi R}$$

$\Delta\theta$?
when $\Delta\Phi=2\pi$

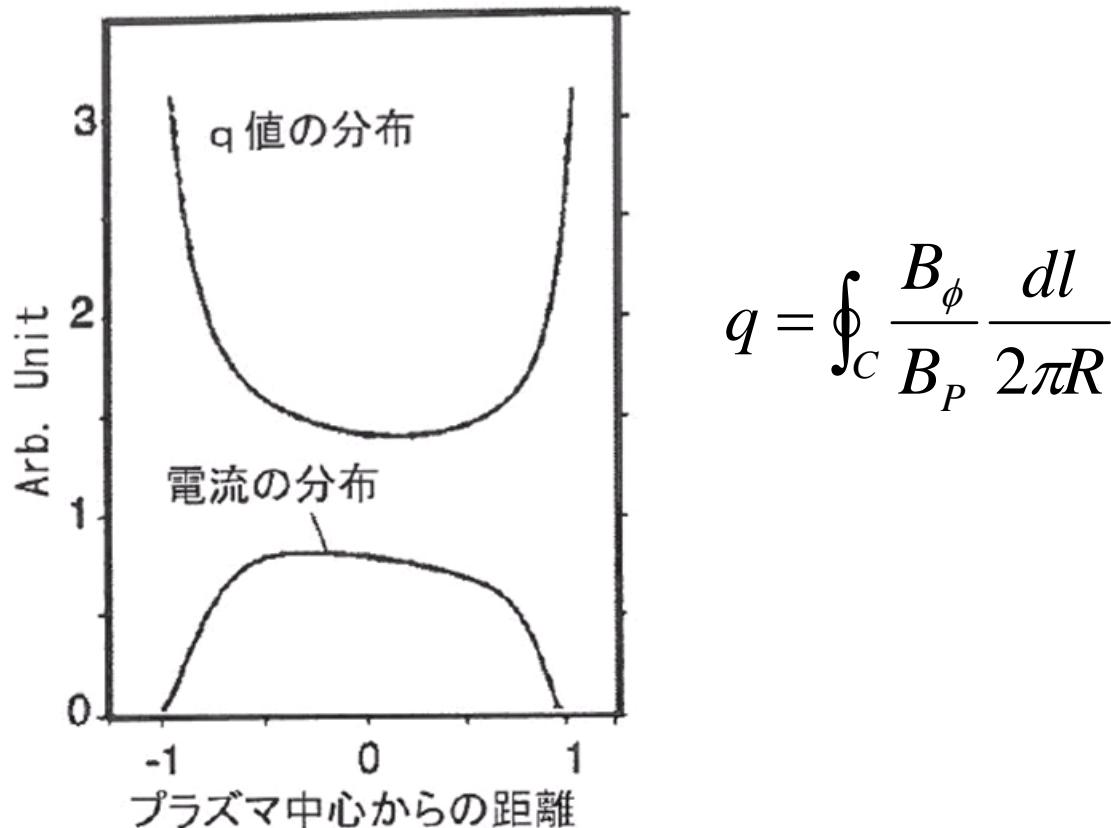
$$\frac{Rd\phi}{B_\phi} = \frac{rd\theta}{B_\theta}$$

- The effect of the twisted magnetic field lines—each of which completely traces out a magnetic flux surface by its revolutions around the toroidal and poloidal axes—is to create a system of nested toroidal flux surfaces which guide ion motion.

$$q = \frac{\text{number of toroidal windings}}{\text{number of poloidal windings}} = \frac{2\pi}{\iota} = \frac{r}{R} \frac{B_\phi}{B_\theta}$$

2.2 토카막 핵융합로의 구성

- 플라즈마 밀폐를 위한 구조



2.3 플라즈마의 평형과 자기 형성

- 플라즈마의 역학적 평형: The Grad-Shafranov Equation

- Momentum equation $\vec{J} \times \vec{B} = \nabla p$

$$\nabla p = (\vec{J}_\phi + \vec{J}_p) \times (\vec{B}_\phi + \vec{B}_p)$$

- aim: to express each term with ψ and F

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad \rightarrow \quad \vec{B}_p = -\frac{1}{R} \vec{e}_\phi \times \nabla \psi$$

$$\mu_0 \vec{J}_p = \nabla \times \vec{B}_\phi \quad \rightarrow \quad \vec{J}_p = -\frac{1}{\mu_0 R} \vec{e}_\phi \times \nabla F, \quad B_\phi = \frac{F(\psi)}{R} \quad \psi_p = 2\pi\psi$$
$$\mu_0 I_p = 2\pi F$$

$$\mu_0 \vec{J}_\phi = (\nabla \times \vec{B})_\phi \quad \rightarrow \quad J_\phi = -\frac{1}{\mu_0 R} \Delta^* \psi$$

2.3 플라즈마의 평형과 자기 형성

- 플라즈마의 역학적 평형: The Grad-Shafranov Equation

- Momentum equation

$$\begin{aligned}\nabla p &= \left(\vec{J}_\phi + \vec{J}_p \right) \times \left(\vec{B}_\phi + \vec{B}_p \right) \\ &= \left(\vec{J}_\phi - \frac{1}{\mu_0 R} \vec{e}_\phi \times \nabla F \right) \times \left(\vec{B}_\phi - \frac{1}{R} \vec{e}_\phi \times \nabla \psi \right) \\ &= -\vec{J}_\phi \times \left(\frac{1}{R} \vec{e}_\phi \times \nabla \psi \right) - \left(\frac{1}{\mu_0 R} \vec{e}_\phi \times \nabla F \right) \times \vec{B}_\phi \\ &= \frac{\vec{J}_\phi}{R} \nabla \psi - \frac{\vec{B}_\phi}{\mu_0 R} \nabla F\end{aligned}$$

← $A \times (B \times C) = B(A \cdot C) - C(A \cdot B)$

$$\vec{J} \times \vec{B} = \nabla p$$

Symmetry

$$\begin{aligned}\vec{J}_p &= -\frac{1}{\mu_0 R} \vec{e}_\phi \times \nabla F \\ \vec{B}_p &= -\frac{1}{R} \vec{e}_\phi \times \nabla \psi \\ B_\phi &= \frac{F(\psi)}{R} \\ J_\phi &= -\frac{1}{\mu_0 R} \Delta^* \psi\end{aligned}$$

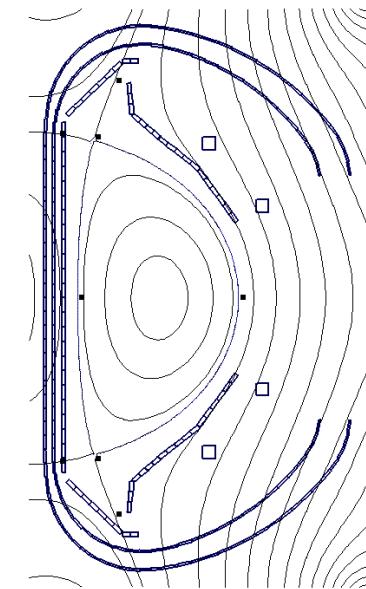
$$J_\phi = R \frac{dp}{d\psi} + \frac{B_\phi}{\mu_0} \frac{dF}{d\psi} = R \frac{dp}{d\psi} + \frac{F(\psi)}{\mu_0 R} \frac{dF}{d\psi} = -\frac{1}{\mu_0 R} \Delta^* \psi$$

2.3 플라즈마의 평형과 자기 흐름

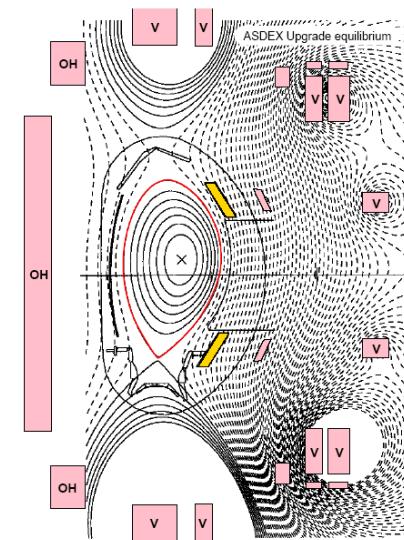
- 플라즈마의 역학적 평형: The Grad-Shafranov

$$\Delta^* \psi = -\mu_0 R^2 \frac{dp}{d\psi} - F \frac{dF}{d\psi}$$

\uparrow \uparrow \uparrow
 $\mathbf{J}_\Phi \times \mathbf{B}_p$: strength of \mathbf{B}_p ∇p : plasma load on a magnetic flux surface $\mathbf{J}_p \times \mathbf{B}_\Phi$: strength of \mathbf{B}_Φ

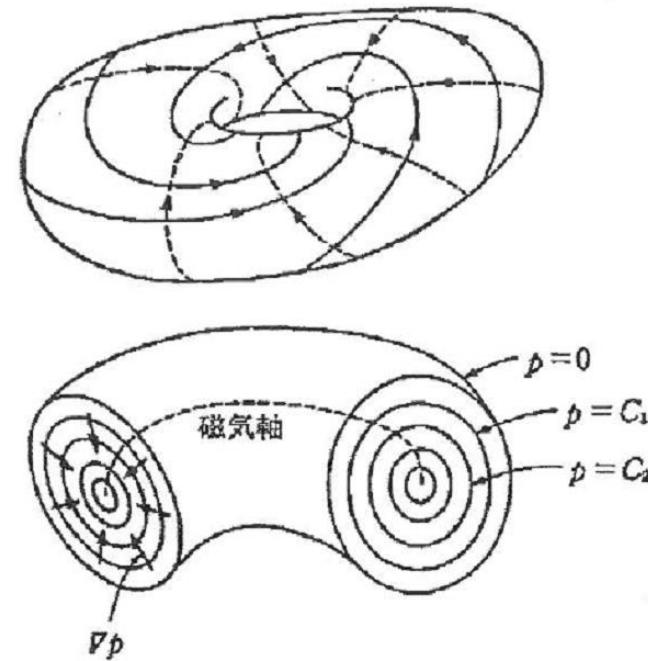
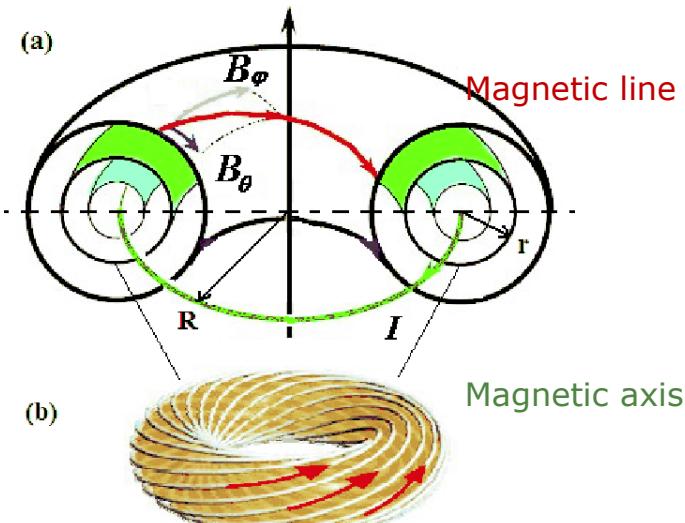


- BCs: provided by the transformer-induced poloidal magnetic field outside the plasma
- In practice, the G-S equation is solved numerically to find the geometrical location of the magnetic surfaces and the radial distribution of the axial current density in a way that is consistent with the experimentally measured pressure profiles (p) and the externally applied field (F).



2.3 플라즈마의 평형과 자기 형성

- 플라즈마의 역학적 평형: The Grad-Shafranov Equation



2.3 플라즈마의 평형과 자기 형성

- **플라즈마 자기 형성**

- 강한 자기 가열: 핵융합 반응에서 발생한 α 입자(He 이온)의 에너지에 의해 플라즈마의 온도를 핵융합 반응이 지속하는 약 1억도로 유지하는 것이 자기 점화. 핵융합로의 플라즈마는 이 자기 점화 조건에 가까운 상태로 유지되지만, 핵융합에 의한 발생열의 양도 분포도 밀도나 온도의 값이나 분포에 강하게 의존함.
- 자기 구동 전류: 고온/고압의 플라즈마에서는 플라즈마가 스스로 전류(bootstrap 전류, bootstrap current)를 발생함. 외부로부터의 에너지 입사로 구동한 전류와 자기 구동 전류를 합친 전체 전류의 분포가 평형을 이루면서 안정적인 것으로 되어야 함.
- 압력 분포의 변화에 따른 효과: 상기의 자기 구동 전류는 압력 분포에 따라 크게 변화하지만, 그 압력은 자기 구동 전류를 포함한 자장에 의해 역학적 평형을 충족해야 함.