

1. 다음 각 물음에 맞는 답을 골라 그 기호들을 모두 적어라 (36점).

1) (D-D)p 핵융합 반응: $D + D \rightarrow T + p$ 에서 $E = 4 \text{ MeV}$ 의 핵융합에너지가 방출될 때, 삼중수소와 양성자가 가지고 나오는 에너지의 비($E_T : E_p$)는?

- a) 4 : 0 b) 3 : 1 c) 1 : 1 d) 1 : 3 e) 0 : 4

2) 핵융합반응단면적(σ_f)과 관련된 다음 설명 중 틀린 것은?

- a) 원자핵이 열운동 속도가 커지면 쉽게 핵융합반응을 일으킬 수 있으므로, 플라즈마 온도 상승에 따라 σ_f 가 계속 커진다.
 b) 같은 온도에서 Coulomb 산란단면적보다는 항상 훨씬 작다.
 c) 100 keV 이하 온도에서는 D-T 반응이 D-D 반응보다 더 큰 σ_f 값을 갖는다.
 d) 핵융합반응율 $R_{12} = n_1 n_2 \langle \sigma_f v \rangle$ 도 100 keV 이하 온도에서는 D-T 반응이 D-D 반응보다 항상 더 큰 값을 갖는다.

3) 플라즈마 내에서 입자들끼리의 충돌과 관련하여 맞는 것은?

- a) 한 입자가 큰 각도로 산란이 일어난 것은 대부분의 경우, 다른 한 입자와 우연히 만나 단번에 Coulomb force에 의해 작용된 척력이나 인력 때문이다.
 b) Debye shielding 효과 때문에 한 입자의 주변에 있는 다른 많은 입자들의 영향력은 무시될 수 있어서 Coulomb 산란에는 관계가 없다.
 c) 전자와 전자의 평균충돌시간(τ_c^{ee})이 이온과 이온의 평균충돌시간(τ_c^{ii}) 보다 길다.
 d) 전자와 전자의 평균충돌시간(τ_c^{ee})은 평균 에너지가둠시간(τ_E^{ee})과 같다.

4) 자장가둠 플라즈마에서 발생될 수 있는 radiation에 대해서 틀린 말은?

- a) 제동복사(bremsstrahlung)은 e-e, i-i 보다 주로 e-i 충돌에 의한 가속도 변화로 발생한다.
 b) 토카막에서 발생하는 cyclotron radiation power는 bremsstrahlung power에 비해 항상 작기 때문에 무시한다.
 c) 불순물이 핵융합 연료플라즈마에 미량이라도 섞이면 높은 원자번호 때문에 제동복사에 의한 냉각이 급격히 일어날 수 있다.
 d) 불순물은 여기나 재결합 과정에서 line radiation들이 나오고, 특히 온도가 낮을 때 이러한 line radiation에 의한 power loss가 커진다.

5) 다음 중에서 저온핵융합 방법이 아닌 것은?

- a) Sonofusion b) Spin polarized fusion c) Thermonuclear fusion d) Muon catalyzed fusion

6) 핵융합로 운전조건과 관련된 다음 말 중 맞는 것은?

- a) 점화(ignition) 상태로 운전하기 위해서는 계속해서 플라즈마 부가가열을 해야한다.
 b) 같은 온도에서 요구되는 가둠조건 $n\tau_E$ 값은 점화 상태보다 임계상태에서 더 크다.
 c) 임계조건에서 요구되는 연료플라즈마 입자밀도는 표준상태에서 공기입자의 밀도보다 작다.
 d) 토카막에서 pulsed 운전을 하면서 주입한 핵융합 연료를 단 한번에 핵융합반응으로 전부 태워 버린다.

7) 핵융합로 발전의 상업적 실증 단계에서 중점적으로 개발하는 분야가 아닌 것은?
 a) 경제성 b) 연속운전 c) 불순물 제어 d) 안전성 e) 신뢰성

8) 평형상태의 자기핵융합플라즈마에서 자속면(magnetic flux surface)과 관련하여 틀린 말은?

- a) 자력선에 의해 완전히 덮여 있는 표면으로 된 자속면들은 이들을 가로 질러 지나가는 자력선들로 연결되어 있다.
- b) 자속면은 플라즈마의 등압면과 일치된다.
- c) 토카막에서 자속면의 공간적인 분포는 Grad-Shafranov 방정식으로부터 찾을 수 있다.
- d) 자속면의 공간적인 분포는 곧 플라즈마 입자들의 공간적인 분포와도 일치된다.

9) Magnetic mirror의 mid plane에서 입자의 pitch angle θ_o 에 대한 trapping condition을 다음 중에서 찾아라 (B_o =mid plane에서 자기장, B_m =반사지점에서 자기장).

- a) $\sin^2 \theta_o > \frac{B_m}{B_o}$
- b) $\sin^2 \theta_o > \sqrt{\frac{B_m}{B_o}}$
- c) $\tan \theta_o > \sqrt{\frac{B_o}{B_m - B_o}}$
- d) $\tan \theta_o > \frac{1}{\sqrt{1 - B_m/B_o}}$

10) 다음 방정식들 중에서 같지 않은 것 하나를 골라라.

- a) $\Delta^* \psi = -\mu_o R^2 \frac{dp}{d\psi} - \mu_o^2 F \frac{dF}{d\psi}$
- b) $\beta_p = 1 + \frac{\langle B_\phi^2 \rangle_{\psi(a)} - \langle B_\phi^2 \rangle}{\langle B_p^2 \rangle_{\psi(a)}}$
- c) $\nabla p = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$
- d) $\frac{\partial(RB_\phi)}{\partial \psi} = \frac{\mu_o j_p R}{(d\psi/dr)}$

11) 토카막에서 다음 자기장 성분 중 전자석코일 전류로 직접 발생 시키지 않는 것은?

- a) 토로이달 자기장 b) 플로이달 자기장 c) 수직 자기장 d) 단면형상 자기장

12) 모두 Good curvature 자력선들로만 이루어져 있지 않은 장치는?

- a) Cusp mirror b) Simple mirror c) Baseball coil d) Yin-Yang coils e) Tokamak

2. 50%-50% D-T 핵융합 발전소의 전체 열효율(η_{out})이 40 %이고, 가열장치의 효율(η_{in})이

100 %일 때, Lawson criterion이 $n\tau_E = \frac{1.8 kT}{1.76(MeV) \langle \sigma v \rangle_{DT} - 0.6 A_{br} \sqrt{kT}}$ 로 주어짐을

유도하라 (15점).

3. $n_i = 10^{20} m^{-3}$, $T_i = 30 keV$ 인 50%-50% D-T 플라즈마를 $B_{min} = 1 T$, $B_{max} = 2 T$ 인 Magnetic mirror 장치에 발생시켰다 (10점).

1) 이 장치 내에 trap되는 D와 T 이온의 밀도는 대략 몇 m^{-3} 이냐?

2) 만약 mirror coil이 놓여 있는 면에서 자기장 B_{max} 를 2 T에서 3 T로 높인다면

Mirror confinement time의 비인 $\frac{\tau_{M3T}}{\tau_{M2T}}$ 는 얼마가 되겠느냐?

4. 다음과 같은 설계 제원을 가지고 있는 원형 단면의 토카막 플라즈마가 있다.

$$R_o = 3 \text{ m}, \quad a = 1 \text{ m}, \quad n_e = n_i = 10^{20} \text{ m}^{-3}, \quad T_e = T_i = 10 \text{ keV}, \quad B_t = 9 \text{ T}$$

이 토카막을 안전인자 $q(a) = 3$ 을 가지고 운전하려고 할 때, 다음에 답하라 (20점).

(필요하면 다음 값들을 이용하라.

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}, \quad \mu_o = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}, \quad k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$$

- 1) 플라즈마 경계 표면에서 Helical한 자력선이 torus를 한바퀴 돌아올 때마다 플로이달 방향으로 몇 도가 shift 되겠느냐?
- 2) 토카막 플라즈마에 토로이달 방향으로 걸어주어야 할 total 전류 I_ϕ 는 몇 A인가?
- 3) 토로이달 베타값 β_t 와 플로이달 베타값 β_p 의 비를 구하라.
- 4) 토카막 플라즈마를 안정되게 운전하면서 얻을 수 있는 total 베타 β 값의 범위를 구하라.

5. 다음 물음에 대하여 자세히 설명하라 (25점).

- 1) Magnetic mirror에서 ambipolar potential 의 형성 mechanism과 그 역할
- 2) Tokamak에서 vertical field의 역할
- 3) 상용 발전소 출력급의 D-T 핵융합로를 운전할 때, 적정 플라즈마 밀도를 결정하기 위해 고려해야할 사항
- 4) 열핵융합로의 임계상태에서 요구되는 $n\tau_E$ 에 대한 가둠조건을 실현시키기 위해 연구개발되고 있는 크게 두 가지 종류의 가둠 방법과 그 차이점
- 5) High Q_p 값을 얻기 위해서 Tandem mirror의 운전에 있어서 공학기술적 어려움과 이의 완화 방법

1. 1) d 2) a 3) d 4) b 5) b, c 6) c
 7) c 8) a 9) c 10) d 11) b 12) b, e

2. Operating condition for Lawson criterion (break-even) in the fusion power plant:

Required input power = Output electric power

⇒ Heating power to compensate loss power = Output electric power

$$\Rightarrow \frac{P_{rad} + P_{th}}{\eta_{in}} = \eta_{out} (P_f + P_{rad} + P_{th})$$

$$\Rightarrow P_{rad} + P_{th} = \eta_{in} \eta_{out} (P_f + P_{rad} + P_{th})$$

For $n_i = n_e = n$, $n_D = n_T = n/2$, $T_i = T_e = T$, $P_{rad} \approx P_{br}$, $\eta_{in} = 1$, $\eta_{out} = 0.4$

$$A_{br} n^2 \sqrt{kT} + \frac{3nkT}{\tau_E} = (1) (0.4) \left(\frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle_{DT} \times 17.6 (MeV) + A_{br} n^2 \sqrt{kT} + \frac{3nkT}{\tau_E} \right)$$

$$\Rightarrow n\tau_E = \frac{1.8 kT}{1.76 (MeV) \langle \sigma v \rangle_{DT} - 0.6 A_{br} \sqrt{kT}}$$

3. 1) Trapped particle fraction outside the loss-cone region in the velocity space:

Assuming initially isotropic velocity distribution without collisions,

$$f_{trap} = \frac{\text{trapped ptls.}}{\text{total ptls.}} = \frac{2 \int_0^\infty f(v) v^2 dv \int_0^{2\pi} d\phi \int_{\theta_o}^{\pi/2} \sin\theta d\theta}{2 \int_0^\infty f(v) v^2 dv \int_0^{2\pi} d\phi \int_0^{\pi/2} \sin\theta d\theta}$$

$$= \frac{-\cos\theta \Big|_{\theta_o}^{\pi/2}}{-\cos\theta \Big|_0^{\pi/2}} = \frac{\cos(\pi/2) - \cos\theta_o}{\cos(\pi/2) - \cos 0} = \frac{0 - \cos\theta_o}{0 - 1}$$

$$= \cos\theta_o = \frac{\sqrt{R_m - 1}}{\sqrt{R_m}} = \sqrt{1 - 1/R_m}$$

where $R_m \equiv B_{max}/B_{min}$: mirror ratio

Since $R_m \equiv B_{max}/B_{min} = 2/1 = 2$, $f_{trap} = \sqrt{1 - 0.5} = \sqrt{0.5} \approx 0.7$

$$\therefore n_{trap} = n_i f_{trap} = 10^{20} \times 0.7 = 7 \times 10^{19} m^{-3}$$

2) Since $\tau_M \propto \ln R_m$, $\frac{\tau_{M3T}}{\tau_{M2T}} = \frac{\ln(3/1)}{\ln(2/1)} = \frac{\ln 3}{\ln 2} \approx \frac{1.098}{0.693} \approx 1.6$

4. 1) Poloidal shift can be found from the rotational transform ι .

$$\iota(a) = \frac{2\pi}{q(a)} = \frac{2\pi}{3} = 120^\circ$$

2) Since the safety factor $q(a)$ for a circular cross-sectional tokamak plasma is given as $q(a) = \frac{a}{R} \frac{B_t}{B_p(a)}$, the poloidal field produced by toroidal plasma current I_ϕ is determined as

$$B_p(a) = \frac{a}{R_o} \frac{B_t}{q(a)} = \frac{1}{3} \frac{9}{3} = 1 \text{ T.}$$

From Ampere's law, $I_\phi = \frac{2\pi a B_p(a)}{\mu_o} = \frac{2\pi(1)(1)}{4\pi \times 10^{-7}} = 5 \times 10^6 \text{ A} = 5 \text{ MA}$

$$3) \frac{\beta_t}{\beta_p} = \frac{\langle p \rangle / (B_t^2/2\mu_o)}{\langle p \rangle / (B_p^2/2\mu_o)} = \frac{B_p^2}{B_t^2} = \frac{1^2}{9^2} = \frac{1}{81} \approx 0.0123$$

$$4) \beta \equiv \frac{\langle p \rangle}{B^2/2\mu_o} = \frac{\langle p \rangle}{B_p^2/2\mu_o + B_t^2/2\mu_o} = \frac{\langle p \rangle}{B_p^2/2\mu_o} \frac{B_p^2}{B_p^2 + B_t^2} = \beta_p \frac{B_p^2}{B_p^2 + B_t^2}$$

In order to suppress the ballooning instability, $\beta_p < A \equiv \frac{R_o}{a} = \frac{3}{1} = 3$.

Therefore, $\beta = \beta_p \frac{B_p^2}{B_p^2 + B_t^2} < A \frac{B_p^2}{B_p^2 + B_t^2} = 3 \frac{1^2}{1^2 + 9^2} = \frac{3}{82} \approx 3.66 \%$

i.e., $\beta < 3.66 \%$