

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. 3 토카막로의 설계

- 설계의 개관

- 목표 성능이 같다고 해도 공학적인 설계는 여러 가지 선택이 가능
- 향후 설계의 방침을 정하게 되는 개념 구축이 중요
- 통합설계의 관점에서 개념 설계의 큰 흐름, 핵융합로의 요건 및 제약 조건과 power flow 살펴보기

3.1 설계의 개관

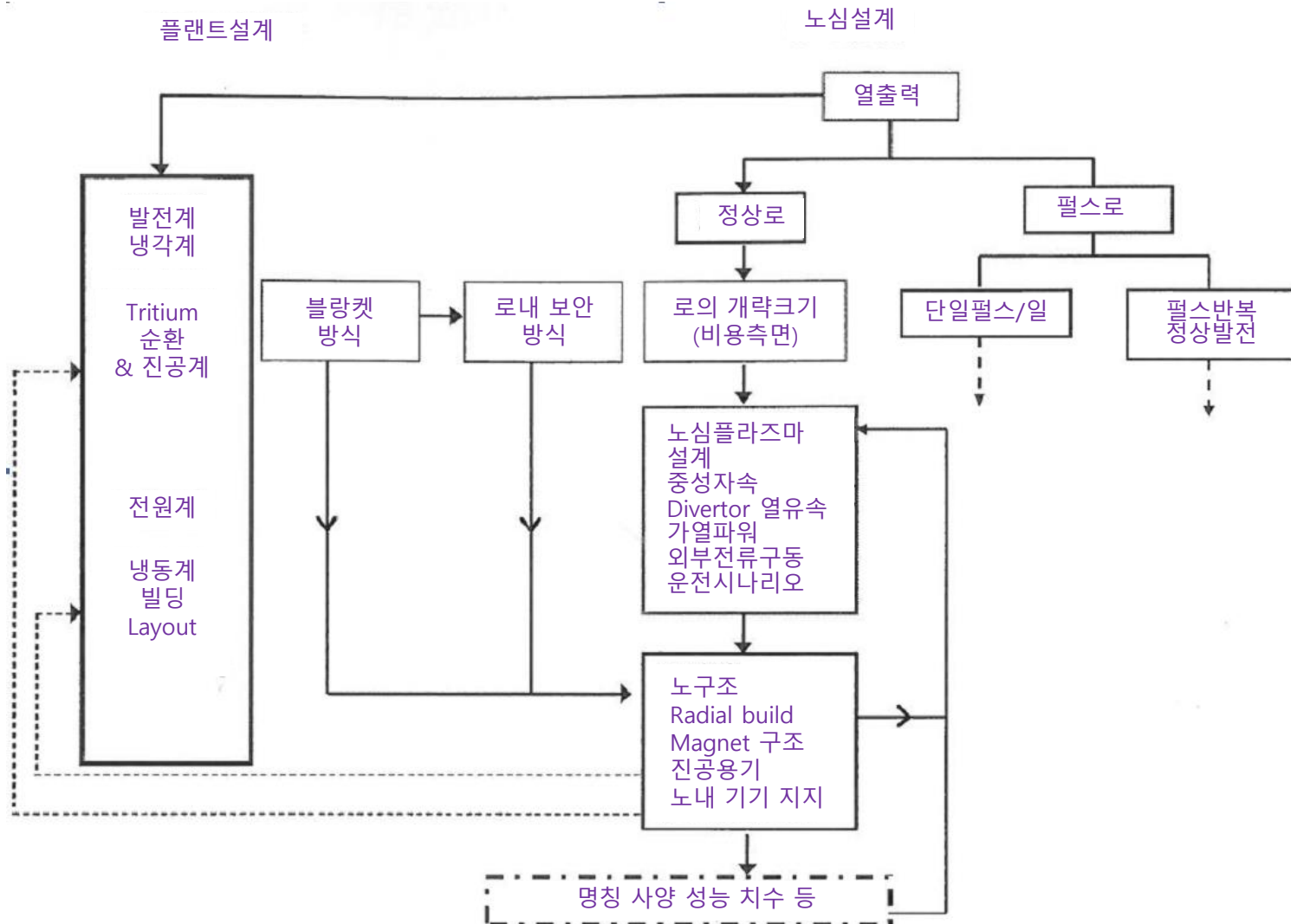
- 개념 설계의 큰 흐름 (실증로 기준)

- 규정은 없으므로 상용로의 단계에서는 전기 출력부터 결정
- 국민적 이해, 상용로에 대한 전망 등을 고려하여 핵융합 열출력 목표 설정
- 노심 설계와 플랜트 설계로 나누어 진행:

대략적인 사양만 정해지면 비교적 독립적으로 설계 진행 가능.

설계가 진행된 단계에서 재검토 수행

3.1 설계의 개관



3.1 설계의 개관

- 개념 설계의 큰 흐름 (원형로 기준)

- 시스템 코드를 사용하여 Radial Build를 만들어 핵융합 출력, 발전 출력, 주요 구조물의 물량, 건설 비용 등을 대략 계산하고 최적화를 실시
- 상용로의 경우 개념 설계 시 설계 방침을 결정해야 함: 경제성, 사회 수용성, 안전성, 저순환 부하 등을 고려하면서 발전단가나 건설단가 등의 설계 목표치를 정해야 함.

3.1 설계의 개관

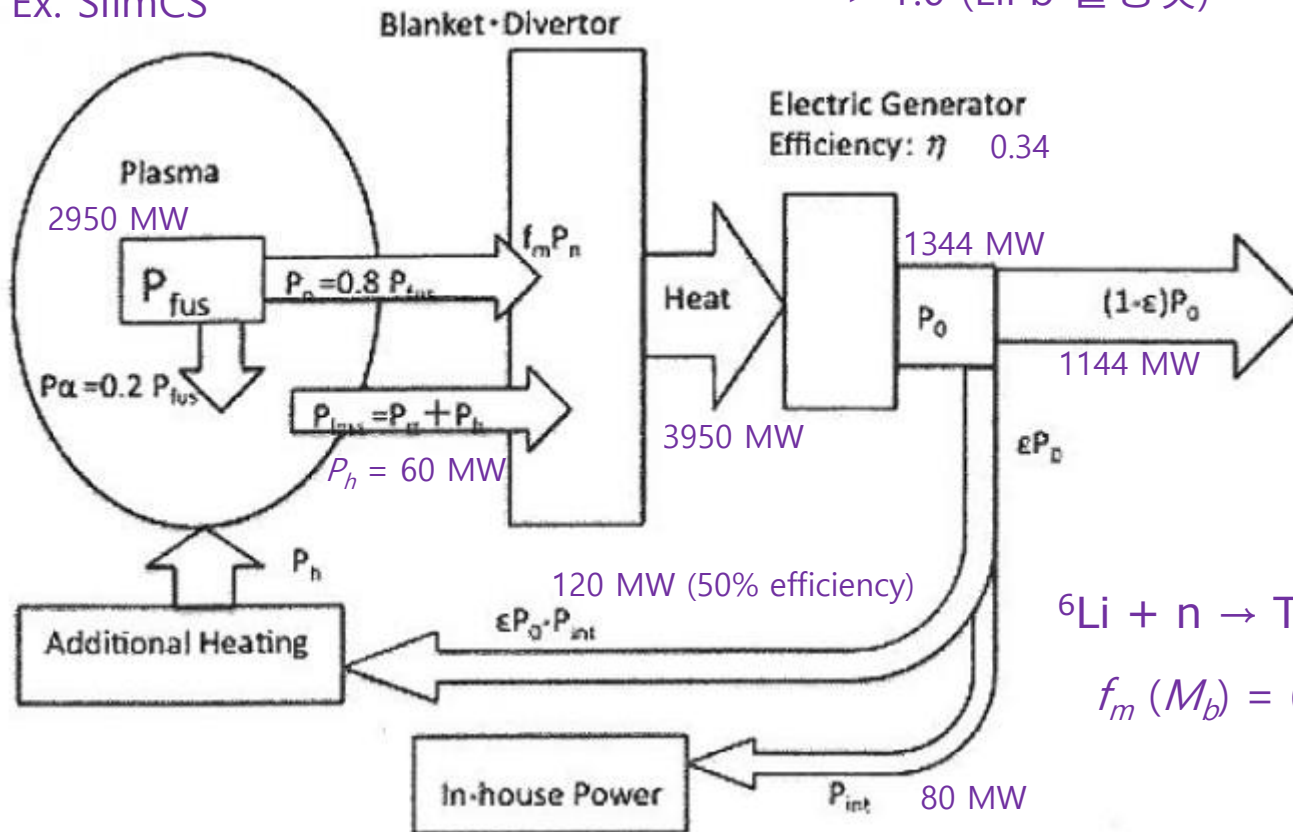
- 핵융합로의 요건

- 소내 전력을 고려하여 발전소로서 순수한 발전 출력이 있어야 함.
- $TBR > 1$

3.1 설계의 개관

- 핵융합로의 power flow

Ex: SlimCS



에너지 증배율 $f_m (M_b)$:

1.41 (ITER 차폐블랭킷(스텐레스강+냉각수))

1.47 (SlimCS 수냉각 고체증식블랭킷)

> 1.6 (LiPb 블랭킷)

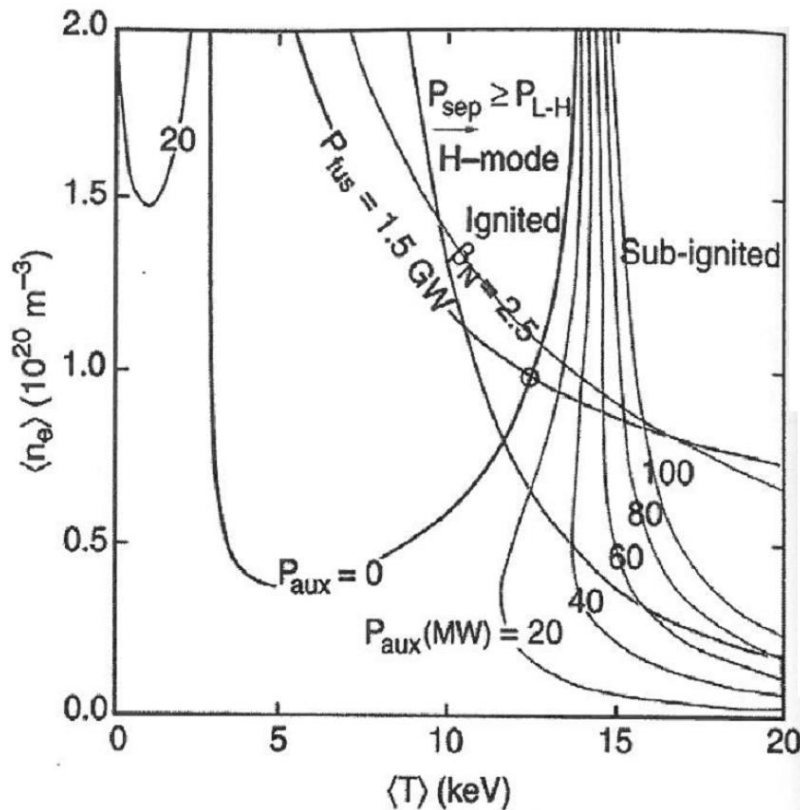


$$f_m (M_b) = (14+4.8)/14 = 1.34$$

3.1 설계의 개관

- 핵융합로의 운전 영역과 동작점

- 핵융합로의 설계에는 $n\tau-T$ diagram 보다는 POPCON diagram이 유효함:
핵융합 연소가 비교적 안정하며 제어성이 좋은 상태인지, 본질적으로 불안정하며 지속적인 제어가 필수인지 판단 가능



FDR-ITER-EDA의 POPCON diagram
($R = 8.14 \text{ m}$, $I_p = 21 \text{ MA}$)

3.1 설계의 개관

- 핵융합로의 운전 영역과 동작점
 - 전류 구동 파워가 있을 경우에는 ($P_{aux} \neq 0$) 제어성을 확보할 수 있으므로 반드시 자기 제어성이 있는 영역에서 운전하지 않아도 출력 제어가 가능
 - 전류 구동 효율이 플라즈마 온도에 비례함을 고려하면, 고온측의 운전이 유리
 - 정상 토카막의 운전점을 $P_{aux} = 0$ 곡선보다 좌측의 저온 영역 (< 10 keV)로 설정하는 설계 예는 거의 없음.
 - $P_f = f(A_1, A_2, A_3, \dots)$, A_i : actuator such as coil currents, H&CD power, etc
플라즈마 제어를 위한 시뮬레이션 코드 개발이 필수적이고 코드 개발과 ITER나 KSTAR, JT-60SA 등에 의한 code validation이 중요

3.1 설계의 개관

- 핵융합로의 설계의 제약 조건

- 1980년 경을 경계로 핵융합로 개념 설계가 크게 변화함.
 - (1) 1980년 경 부터 압력 상한의 비례척이 알려짐
 - (2) 3대 토카막이 1980년대 초반에 가동해 연구 진전
 - (3) bootstrap current 존재 확인 (1971 Bickerton, 1988 Zarnstorff)
- 물리상의 성능 지표와 주요한 성능 제약
 - (1) 플라즈마 압력 상한에 대한 제약 (β_t, β_N):
 - no-wall limit $\beta_N \sim 3.5$, ideal limit $\beta_N > 5.5$
 - (2) 플라즈마 밀도의 상한: Greenwald density limit
 - 초과 시 밀폐 성능 급격하게 저하.
 - 플라즈마 전류 증가 시 전류 구동의 어려움.
 - (3) 에너지 밀폐 성능:

$$\tau_E \propto I_P^{0.93} R^{1.97} A^{-0.58} P_{heat}^{-0.69}$$

3.1 설계의 개관

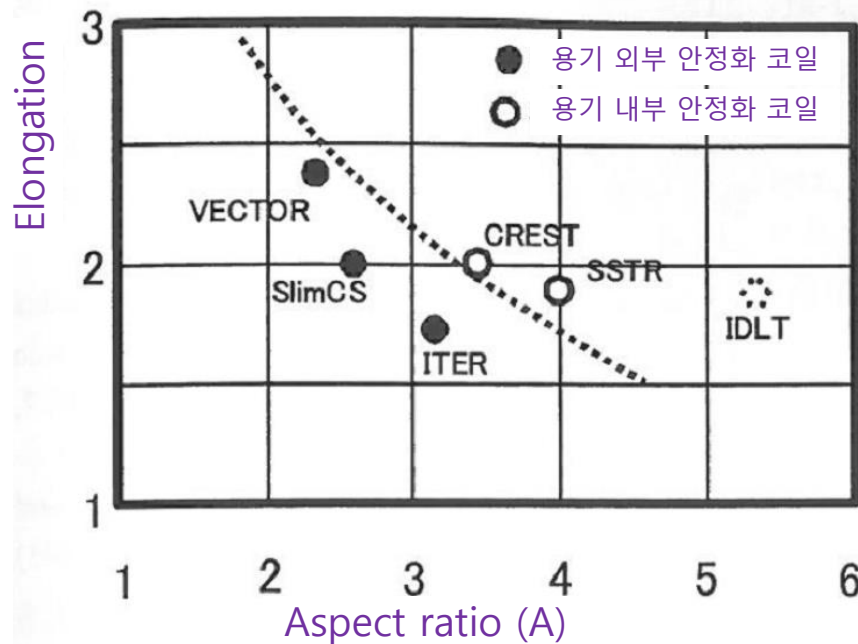
- 핵융합로의 설계의 제약 조건

- 물리상의 성능 지표와 주요한 성능 제약

(4) Elongation과 vertical instability(상하 불안정성)

$\kappa \uparrow \rightarrow \beta_N, \tau_E, n \uparrow$ as $I_p \uparrow$ at constant q
 vertical instability에 의해 제한됨.

Low aspect ratio일수록 vertically stable \rightarrow higher κ



3.1 설계의 개관

- 핵융합로의 설계의 제약 조건

- 물리상의 성능 지표와 주요한 성능 제약

- (5) Bootstrap current와 비율

- $\beta_N > 3.5$ 일 경우, 75% 이상 BSC fraction 설계도 가능함.

- 플라즈마 전류의 외부 제어성은 감소하게 되므로
안정한 운전을 실현하는데 주의가 필요함.

$$j_{BS} = -A^{-1/2} B_p^{-1} \frac{dp}{dr}$$

$$p \propto [1 - (r/a)^2]$$

$$\beta_t = \beta_p A^{-2} q^{-2}$$

$$\frac{I_{BS}}{I_P} \approx 0.3(n+1)A^{-1/2} \frac{\beta_p}{q} = 0.3(n+1)A^{3/2} \beta_t q$$

3.1 설계의 개관

- 핵융합로의 설계의 제약 조건

- 공학 설계상의 주요 제약

- (1) 자장 강도: 현재 13 T 정도, Nb₃Al 경우 ~ 16 T, 고온초전도체 경우 ~20 T

- (2) Divertor의 열부하: SOL에 유입하는 power 전부가 divertor plate 에 집중될 경우, 견딜 수 있는 재료 전무함. 10 MW/m² 정도로 생각하고 설계 수행.

- (3) Blanket과 first wall: 중성자 벽부하에 의해 결정됨.

$$P_W = 0.8P_f/S$$

소형 핵융합로일수록 power density가 늘어나 공학적으로 어려워짐.

- (4) 안전상의 고려

유지 보수를 포함, 통상 운전시에도 삼중수소 등 방사성 물질의 밀폐는 특별한 제약이 됨. 계량 관리, 폐기물 처리 처분에 대해서도 고려가 필요함.