

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

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 실용 플랜트로서 요구 특성
 - 발전 비용이 충분히 합리적 범위
 - 고신뢰성(설비 이용률)
 - 우수한 에너지 안보성
 - 선택의 폭이 넓은 입지점
 - 용이한 운전 보수

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 실용 플랜트로서 요구 특성

원자로 형	주요 목적	주요 기술 개발	SFR 예시
실험로	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로의 기본 원리 입증 • 원자로의 안전성 검증 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 증식 특성 입증 • 핵연료 및 피복관 개발 (중성자 조사시험) • 중성자 조사환경에서 피동 원자로 정지계통 입증 (JOYO SASS시험) • 원자로 고유 안전성 입증 (EBR-II, SHRT시험) 	EBR-II, JOYO, CEFR, FBTR
원형로	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 기술의 신뢰성 입증 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 시스템 통합 기술 실증 • 장기 운전을 통한 신뢰성 확보 • 소듐 취급 기술 개발 • 원형로에서도 실험로로서의 기능을 일부 수행함 (중성자 조사시험, 고유안전성 입증) 	MONJU, Phenix, ASTRID, BN-350, PFBR
실증로	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 기술의 경제성 입증 	<ul style="list-style-type: none"> • 원자로 건설 단가 예측 • 실제 운전을 통한 발전 단가 예측 	BN-800

ITER

K-DEMO

by 김상지 (KAERI)

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

• 플랜트의 경제성

- 저렴한 발전 단가가 바람직하나 기술적으로 확립되어있는 기존의 에너지 시스템보다 압도적으로 저렴하기를 기대하기 어려움.
- 정부나 국민이 보급에 대한 강한 의지를 가지고 있다면, 시장 진입이 가능 (원자력의 선례)
- 비용 이외의 특성이 우수하다면 직접 비용으로 허용될 가능성이 있는 정도 상정

COEn: 현행 석탄 화력 전원의 평균적 발전 단가로 규격화된 COE

	상용화에 바람직한 목표 (전력회사 관점)	실재한 참고 데이터	초대 핵융합로에 상정되는 성능 목표
경제성	COEn < 0.7 (Advanced Light Water Reactor 목표)	경수로 운용 초기: COEn > 1.1-1.2 (낮은 가동률) CO ₂ 회수 석탄 화력: COEn < 1.5	설계치로서 COEn < 1.0 만일 불가능하다면 COEn < 1.5를 상한 목표로 개발

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 운전 특성
 - 출력 안정도
 - 계획 외 정지율
 - 부분 부하 운전 (부하 추종 운전)

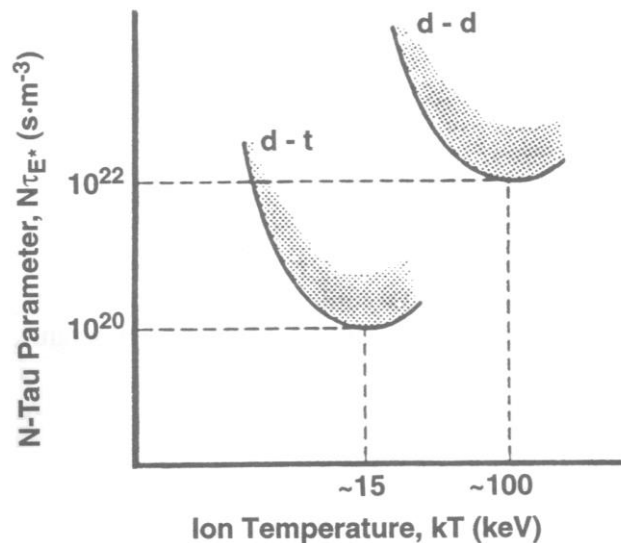
	상용화에 바람직한 목표	실재한 참고 데이터	초대 핵융합로에 상정되는 성능 목표
출력 안정도	$\pm 0\%$	일부하 곡선상의 미세 변동: $\sim 1\%$	$< 1\%$
계획 외 정지율	$\sim 0\%$	경수로: 1.5%, 0.2 사고/연, 0.5 사고/연 (1985-90)	0.5 사고/연 (including disruptions)
부하 추종 용량	$\sim 17\%/h$, 100%-50%의 범위	경수로는 일본에서는 베이스로드로만 사용	긴급 시 부분 부하 운전

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 운전 특성

- 출력 안정도
- 계획 외 정지율
- 부분 부하 운전 (부하 추종 운전):

핵융합 플랜트는 최대 출력 운전이 물리 특성 상 수월한 면이 많으며, 반대로 정격 이하의 소출력에서는 자기 점화 상태 또는 고에너지 증배율 상태 (high Q)를 유지할 수 없을 가능성이 있음.



2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 운전 특성

- 출력 안정도
- 계획 외 정지율
- 부분 부하 운전 (부하 추종 운전):

핵융합 플랜트는 최대 출력 운전이 물리 특성 상 수월한 면이 많으며, 반대로 정격 이하의 소출력에서는 자기 점화 상태 또는 고에너지 증배율 상태 (high Q)를 유지할 수 없을 가능성이 있음.

초기의 핵융합 플랜트는 베이스로드 전원(수요에 따라 정지 또는 부분 부하로 운용하는 방식을 하지 않고, 가능한 정격 출력으로 운전하는 전원)으로 도입될 가능성이 높으며, 부하 추종 특성의 중요성은 높지 않을 것임. 효율이 떨어져도 긴급 시에는 50% 정도 부분 부하 운전이 가능한 것이 바람직하고 출력 변화율은 시간 당 17% 정도가 실용적으로 바람직함.

Non-linear Plasma Activity

- **Disruptions**

- Disruptions are fast (~ 1 ms) global instabilities that may arise in magnetic confinement fusion devices that use plasma current for confinement such as tokamak, ST, etc.
- Termination of confinement, uncontrolled loss of thermal and magnetic energy
 - shift of the plasma column
 - heat load damage to plasma facing components (PFCs)
 - large mechanical stresses from $\mathbf{J} \times \mathbf{B}$ forces during current quench (large negative voltage spike in the transformer)
 - rapid cooling of the plasma
 - Highly efficient conversion of poloidal magnetic energy into "runaway" electrons through avalanche amplification, resulting in a > 5 MA of relativistic electron beam

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

• 출력 규모

- 대출력이 될수록 COE가 낮아질 가능성이 높음.
- 전력회사는 투자 리스크를 낮추기 위해 점차로 출력 규모를 높이려고 함.
- 미래에는 대형 플랜트가 바람직하지 않을 것으로 예상됨.
- 수출 시에도 분산 전원의 보급을 고려할 때 대형 플랜트는 바람직하지 않음.

	상용화에 바람직한 목표	실재한 참고 데이터	초대 핵융합로에 상정되는 성능 목표
설계 출력 범위	1 GWe부터 설계 가능할 것. 최대 1.5-2.0 GWe (이 경우, 설치는 한정됨)	ALWR: 1.35 GWe 프랑스 경수로: 1.7 GWe FBR 목표: 1-1.5 GWe	2 GWe 이하로 가능한 작은 쪽이 바람직함.

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

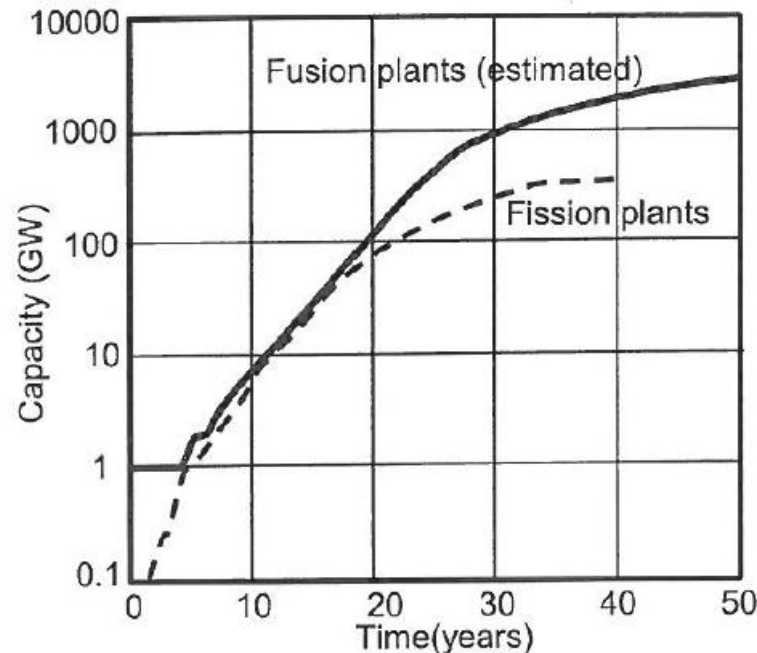
- Availability (설비 이용률)

- 플랜트를 정격 출력으로 1년간 연속 운전 했을 경우에 발전할 수 있는 전력량과 실제로 발전할 수 있는 전력량의 비율: 정기 점검의 기간이 무고장 시의 최대치를 결정

	상용화에 바람직한 목표	실재한 참고 데이터	초대 핵융합로에 상정되는 성능 목표
설비 이용률	80% 이상	경수로의 역사: 1975: 40%, 1985: 75%, 1995: 80%	(계획 외 정지를 포함하지 않음) 설계치로 85% 이상 (점검기간 < ~50일) 초기 운전치로 >70% 성공

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 도입 속도와 트리튬 증식률 (TBR)
 - 자기 증식 뿐만 아니라 차세대 플랜트의 초기 장착 트리튬도 생산해야 함.
Cf. FBR 경우 Plutonium이 충분히 생산되어 있음.
 - 증설 속도는 TBR에 크게 의존
 - 핵분열로의 역사와 동일 정도의 증식 속도를 위해서는, $TBR > 1.08$ 필요



2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 도입 속도와 트리튬 증식률 (TBR)
 - 자기 증식 뿐만 아니라 차세대 플랜트의 초기 장착 트리튬도 생산해야 함.
Cf. FBR 경우 Plutonium이 충분히 생산되어 있음.
 - 증설 속도는 TBR에 크게 의존
 - 핵분열로의 역사와 동일 정도의 증식 속도를 위해서는, $TBR > 1.08$ 필요

	상용화에 바람직한 목표	실재한 참고 데이터	초대 핵융합로에 상정되는 성능 목표
가능한 도입 속도	경수로의 역사와 동일 정도	경수로 역사에서는 최대 15 GWe/연	초대 노는 TBR~1.1이 바람직함.

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

- 도입 속도와 트리튬 증식률 (TBR)

- 자기 증식 뿐만 아니라 차세대 플랜트의 초기 장착 트리튬도 생산해야 함.

Cf. FBR 경우 Plutonium이 충분히 생산되어 있음.

- 증설 속도는 TBR에 크게 의존

- 핵분열로의 역사와 동일 정도의 증식 속도를 위해서는, $TBR > 1.08$ 필요

- 트리튬 입수가 불필요한 운전 개시 시나리오:

- 1) Direct Tritium production by DD reactions

- 2) Tritium production in the blanket by neutrons generated by DD reactions

운전 초기에 수 개월 동안 빔 입사 전력 공급이 필요 ($Q < 1$)

플랜트 운영 사업자의 초기 장착 트리튬 입수 불안을 줄일 수 있음.

트리튬 가격의 상한 억제 효과

트리튬을 외부로부터 플랜트에 반입할 필요가 없음.

→ 공중 수용성 증가

2.1 핵융합로에 요구되는 일반 요건

	상용화에 바람직한 목표	실재한 참고 데이터	초대 핵융합로에 상정되는 성능 목표
경제성	COEn < 0.7	경수로 운용 초기: COE n > 1.1-1.2 CO ₂ 회수 석탄 화력: COEn < 1.5	설계치로써 COEn < 1.0, 만일 불가능하다면 COEn < 1.5를 상한 목표로 개발
운전 특성	±0%	일부하 곡선상의 미세 변동: ~1%	<1%
출력 안정도	~0%	경수로: 1.5%, 0.2 사고/연	0.5 사고/연
계획 외 정지	~17%/h, 100%-50%의 범위	, 0.5 사고/연(1985-90)	(including disruptions)
부하 추종 용량	1 GWe부터 설계 가능할 것. 최대 1.5-2.0 GWe(이 경우, 설치는 한정된다)	경수로는 일본에서는 베이스로드로만 사용.	긴급 시 부분 부하 운전
설계 출력 범위	ALWR: 1.35 GWe 프랑스 경수로: 1.7 GWe FBR 목표: 1-1.5 GWe		2 GWe 이하로 가능한 작은 쪽이 바람직하다.
설비 이용률	80% 이상	경수로의 역사: 1975: 40%, 1985: 75% 1995: 80%	(계획외 정지를 포함하지 않음) 설계치로 85% 이상 초기 운전치로 >70%
가능한 도입 속도	경수로의 역사와 동일 정도	경수로 역사에서는 최대 15GWe/연	초대 노는 TBR~1.1이 바람직하다.