

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

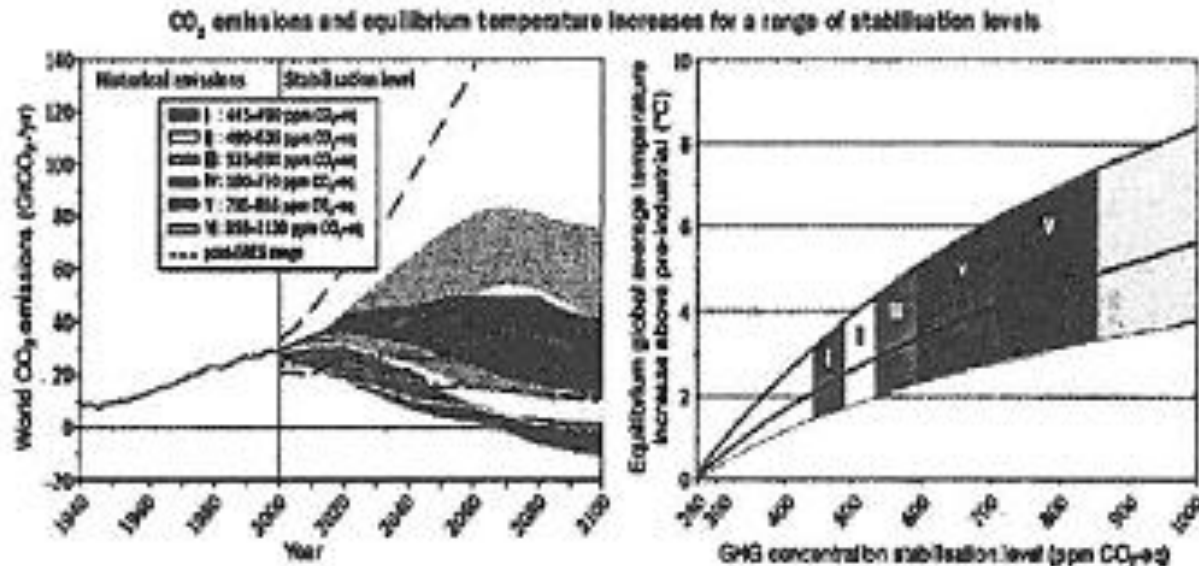
Ch. 1 에너지와 지구환경 문제

- 21세기 후반에 있어서 핵융합 에너지의 역할에 대한 정량적 평가
 - 자원량 및 자원의 지역적인 편재성
 - 공급 안정성
 - 안전성, 안심감
 - 핵확산 저항성
 - 방사성 폐기물
 - 이산화탄소 배출량
 - 발전 비용

1.1 21세기 핵융합의 역할

- 화석 에너지를 대체하는 새로운 에너지원의 요구조건
 - 환경친화적
 - 안정 공급
 - 세계 규모에서의 에너지 공급을 충족할 수 있는 자원량
 - 자원의 지역적인 편재나 사회적인 도입의 제약이 적을 것
 - 자급성, 에너지 안보

Fission, 수력,
풍력, 태양광,
Biomass?



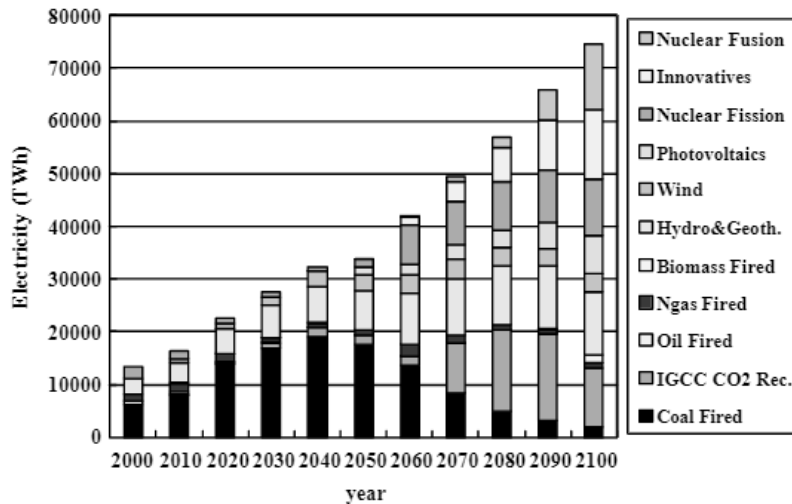
IPCC 4차 보고서

1.1 21세기 핵융합의 역할

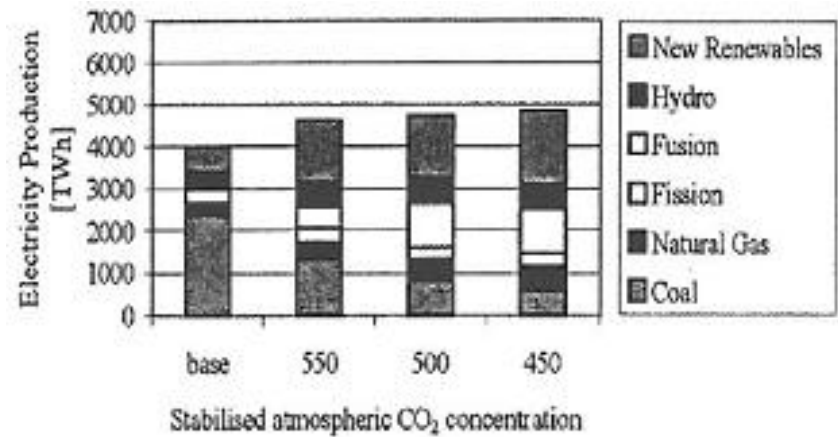
- 핵융합 에너지
 - 환경 적합성
 - 자원량/공급 안정성, 안전성
 - 핵확산 저항성, 방사성 폐기물의 처리/처분 등 관점에서 뛰어난 가능성과 사회수용성을 가짐.

1.1 21세기 핵융합의 역할

- 핵융합 에너지
 - 환경 적합성



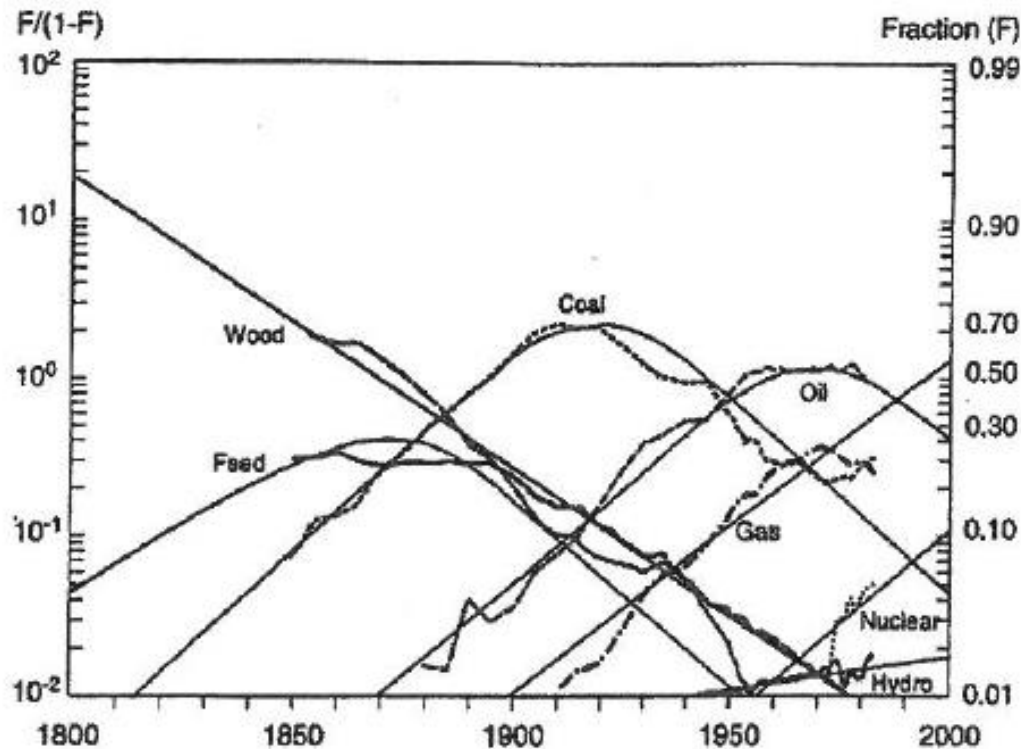
2100년에 550ppm 달성을 위한 시나리오
(핵융합 2050년 도입)



이산화탄소 농도에 대한 각종 에너지원의
도입량 (유럽 MARKAL 모델)

1.1 21세기 핵융합의 역할

- 미국의 1차 에너지원 공급 비율에 대한 추이



새로운 에너지를 도입하기 위해서는 기술개발과 함께 사회 인프라 정비 등도 필요하며, 수십 년에서 100년 정도의 시간을 필요로 함.

1.1 21세기 핵융합의 역할

- 핵융합 에너지

- 환경 적합성
- 자원량/공급 안정성, 안전성
- 핵확산 저항성, 방사성 폐기물의 처리/처분 등 관점에서 뛰어난 가능성과 사회수용성을 가짐.

→ 21세기의 에너지, 환경 문제에 기여하기 위해서는
가능한 빠른 시기에 핵융합 에너지를 실현시키는 것이 필요

1.2 핵융합의 특성

• 자원량

- D: 물에서 GS법(물-황화수소 이중 온도 교환법)으로 분리 후 electrolysis
캐나다의 제조 능력만으로 100만 kw 급 핵융합플랜트 약 1만기분 제조 가능

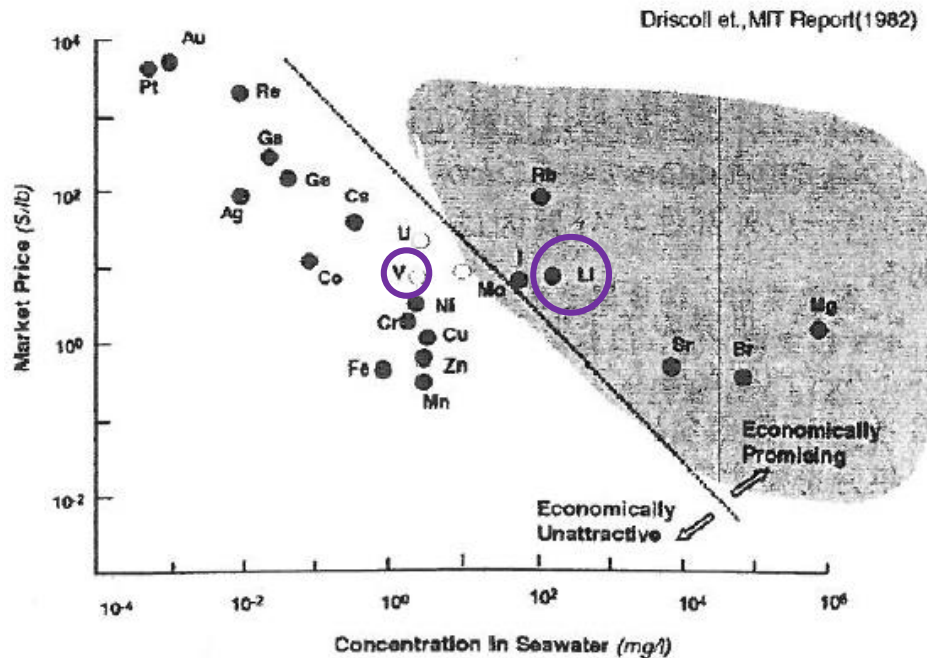
	리튬	니오븀 (초전도 선재)	베릴륨 (중성자증배재)	바나듐 (구조재)
핵융합로 1대분 (30년)	304 톤	207 톤	30 톤	2400 톤
세계 총수요량	4.5×10^5 톤	3.1×10^5 톤	4.5×10^4 톤	3.6×10^6 톤
연간 소비량 (A)	1.5×10^4 톤	1.0×10^4 톤	1.5×10^3 톤	1.2×10^5 톤
매장량 (B)	9.4×10^6 톤	4.2×10^6 톤	8.0×10^5 톤	2.7×10^7 톤
소비년수 (=B/A)	630 년	420 년	530 년	225 년
	해수로부터	재이용	다른 증식재 (납)	해수로부터

100만 kw 핵융합로 1500대 (현재 전세계 전력 소비량 해당) 30년 운전 기준

1.2 핵융합의 특성

- 자원량

- D: 물에서 GS법(물-황화수소 이중 온도 교환법)으로 분리 후 electrolysis
캐나다의 제조 능력만으로 100만 kw 급 핵융합플랜트 약 1만기분 제조 가능
- Li: 해수 자원량 사용 시 1000기 핵융합 플랜트 2300 만년 운용
핵융합 플랜트의 고온 배수 이용 시 1기 당 연간 최대 약 230톤 회수 가능



1.2 핵융합의 특성

HW: Bq (Becquerel)?

- **안심감**

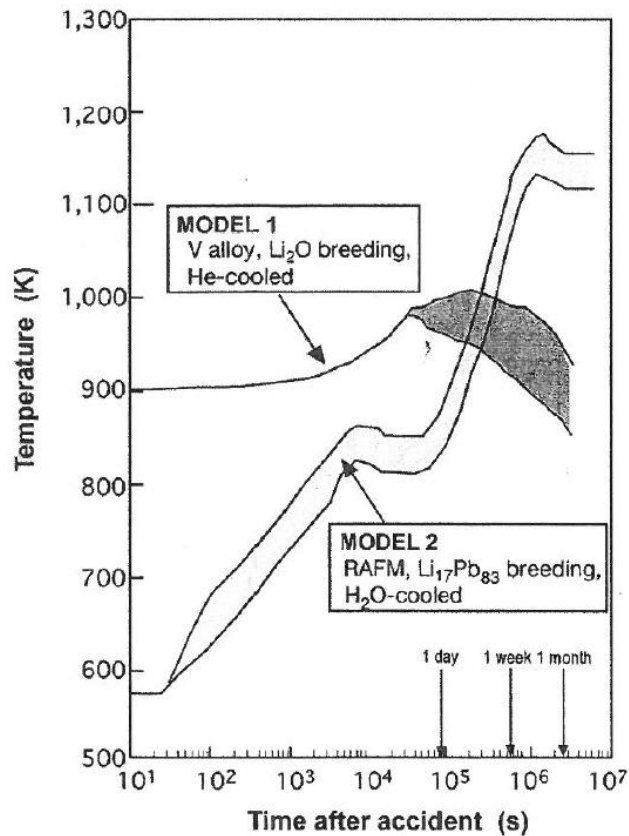
- T: 노심 플라즈마 (수 mg), 노내 기기 재료 (수백 g), 연료순환계나 저장계 (수 kg) 내에 존재
- BHP (Biological Hazard Potential: 잠재적 방사선 리스크 지수): 플랜트 내에 존재하고 있는 방사성 물질을 그 법적 최대 허용 농도까지 희석시키기위해 필요한 공기량
 $BHP(m^3) = (\text{방사성 물질의 베크렐 수})/(\text{최대 허용 농도})$

	핵융합로 (T: 4.5 kg)	핵분열로 (I^{131})
방사선량 (Bq)	1.7×10^{18}	5.4×10^{18}
법적 최대 허용 농도(Bq/m ³)	5×10^3	10
잠재적 방사선 리스크 지수: BHP (m ³)	3.5×10^{14}	5.4×10^{17}
BHP값의 상대비	1	1,500

1.2 핵융합의 특성

- 안전성

- 핵분열로: '멈춘다', '식힌다', '가둔다'
- 핵융합로: 삼중수소나 방사화물을 가두는 것이 중요



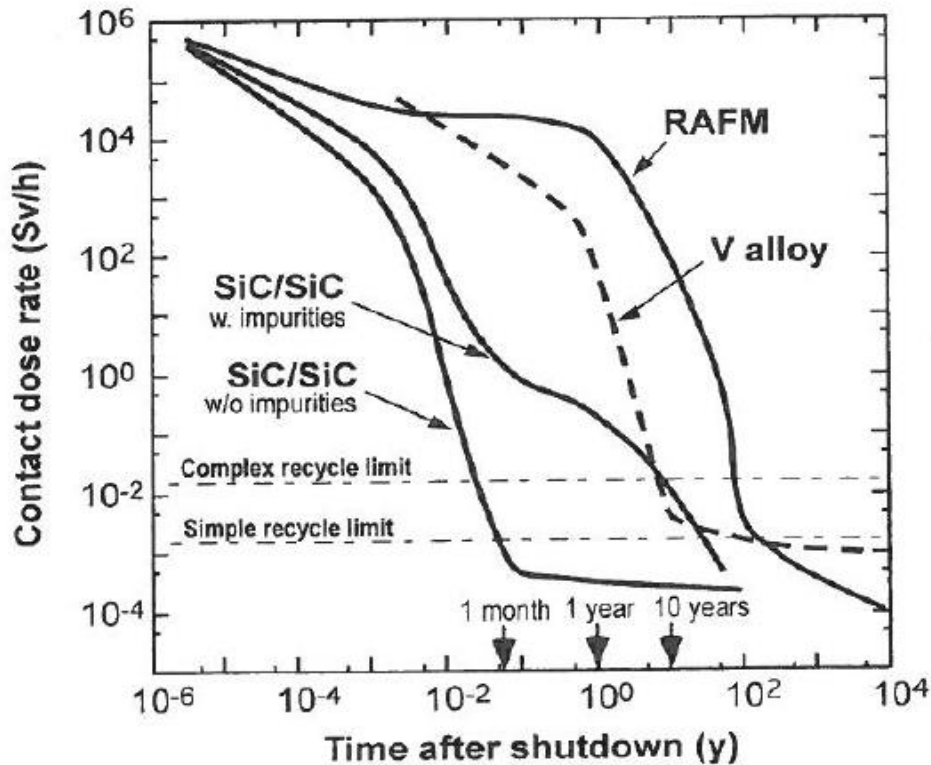
LOCA시 붕괴열에 의한 구조재 온도 상승 추이

1.2 핵융합의 특성

HW: Sv?

- 안전성

- 핵분열로: '멈춘다', '식힌다', '가둔다'
- 핵융합로: 삼중수소나 방사화물을 가두는 것이 중요

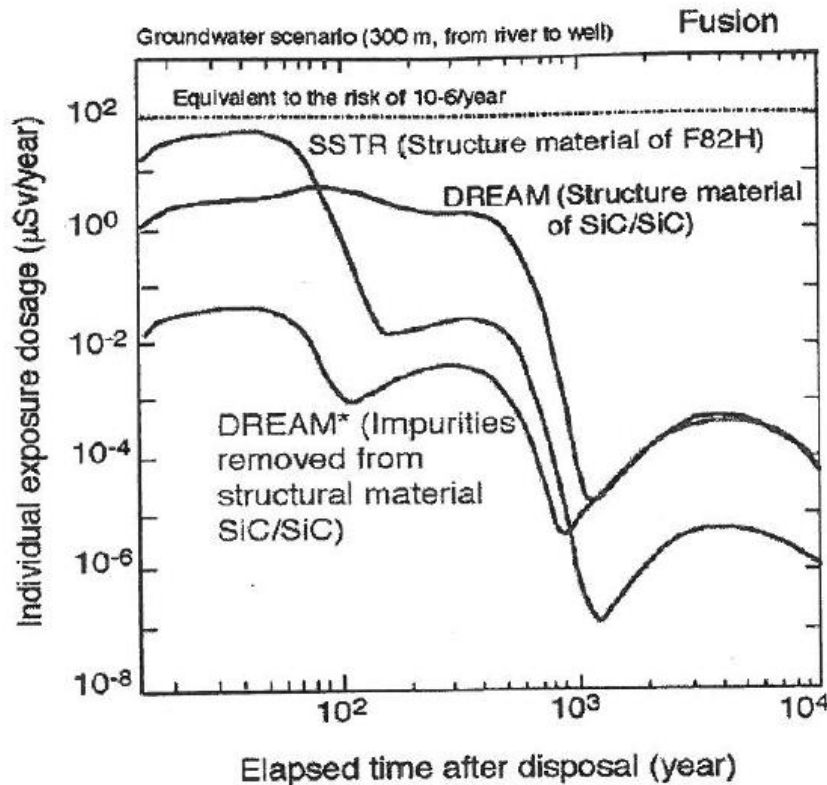


핵융합로 운전 정지 후의
구조재 표면에서의 피폭
선량 시간 변화

1.2 핵융합의 특성

- 안전성

- 핵분열로: '멈춘다', '식힌다', '가둔다'
- 핵융합로: 삼중수소나 방사화물을 가두는 것이 중요

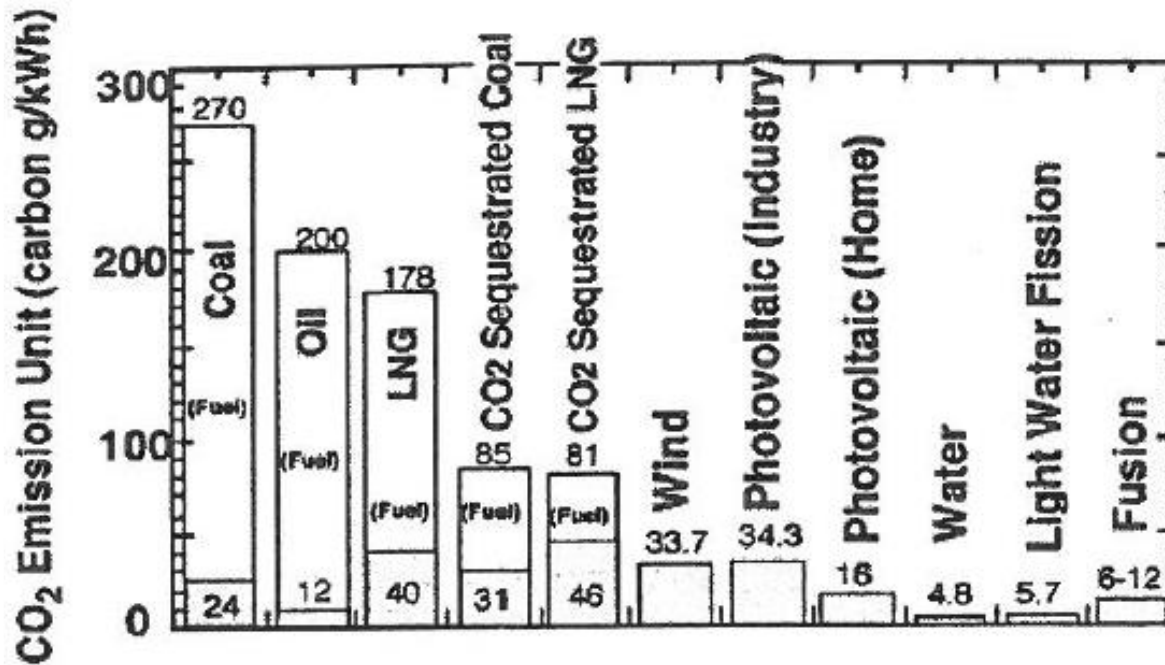


고방사성 폐기물(처분 체적 2만 m^3)을 50-100 m의 지층 콘크리트 피트에 처분했을 때 일반 환경에서의 개인 피폭 선량의 연대 추이

1.2 핵융합의 특성

- 이산화탄소 배출량

- 연료소비, 플랜트 제조 등에서 발생
- 회수 설비로 저감할 수 있으나, 발전 단가 상승
- 핵융합 경우 Life cycle 분석 결과 화석 연료의 1/20 이하

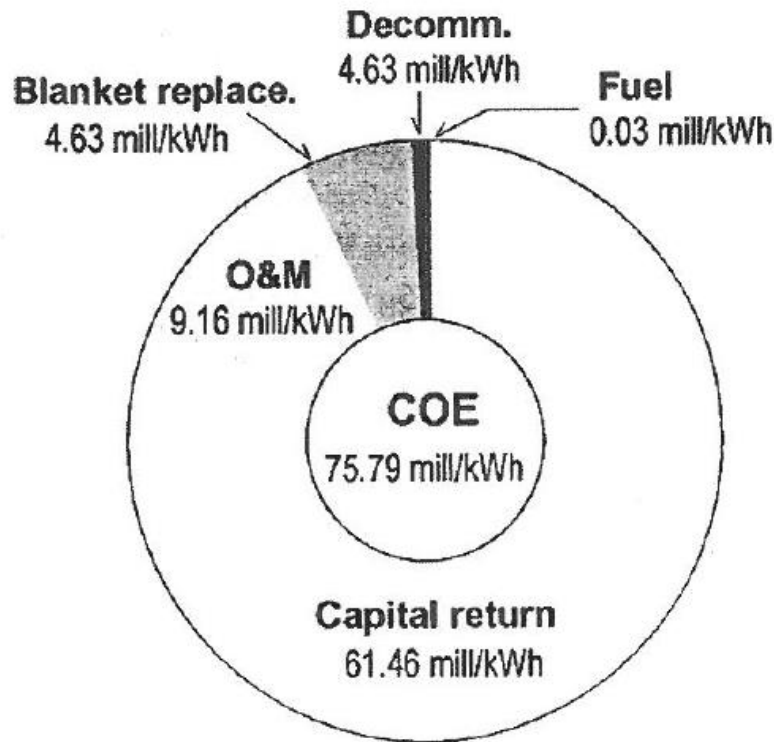


1.2 핵융합의 특성

HW: mill/kWh?

- 발전 비용

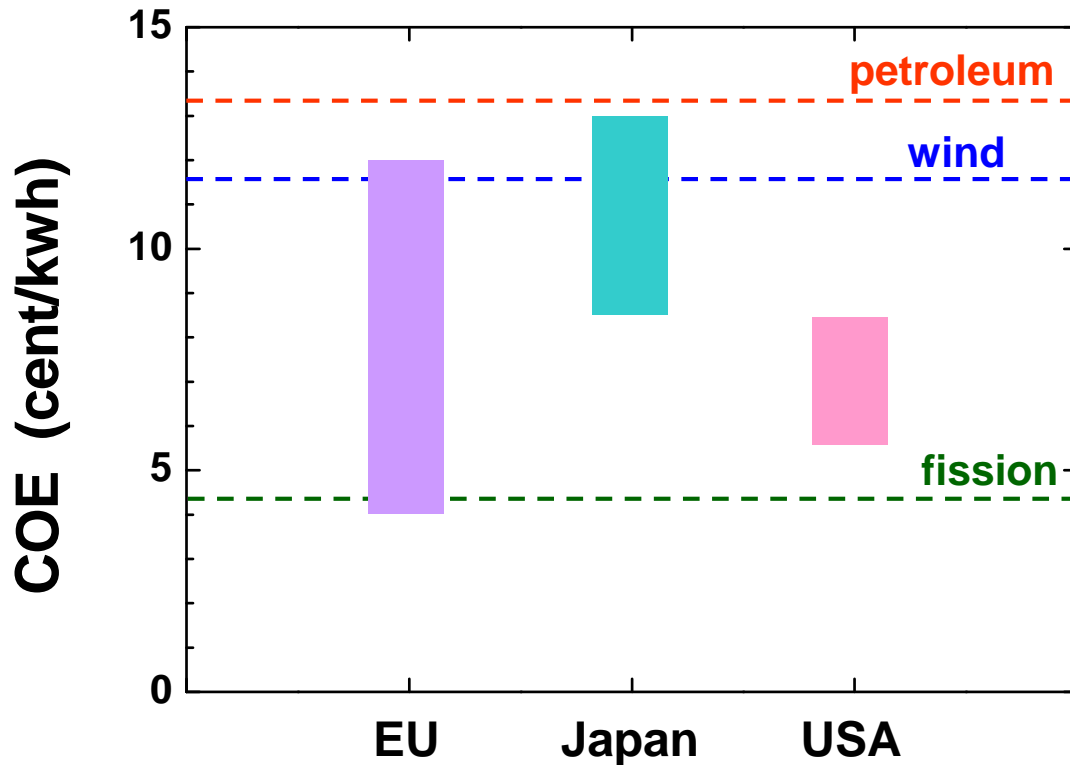
- 발전 단가 (COE: Cost Of Electricity): 플랜트 건설비, Blanket이나 Divertor 교체비, 연료비, 운전보수비, 폐로 경비 등을 기초로 산출
- 건설비 ~80% Cf. 화력발전은 연료비가 큰 비중 차지



1.2 핵융합의 특성

- 발전 비용

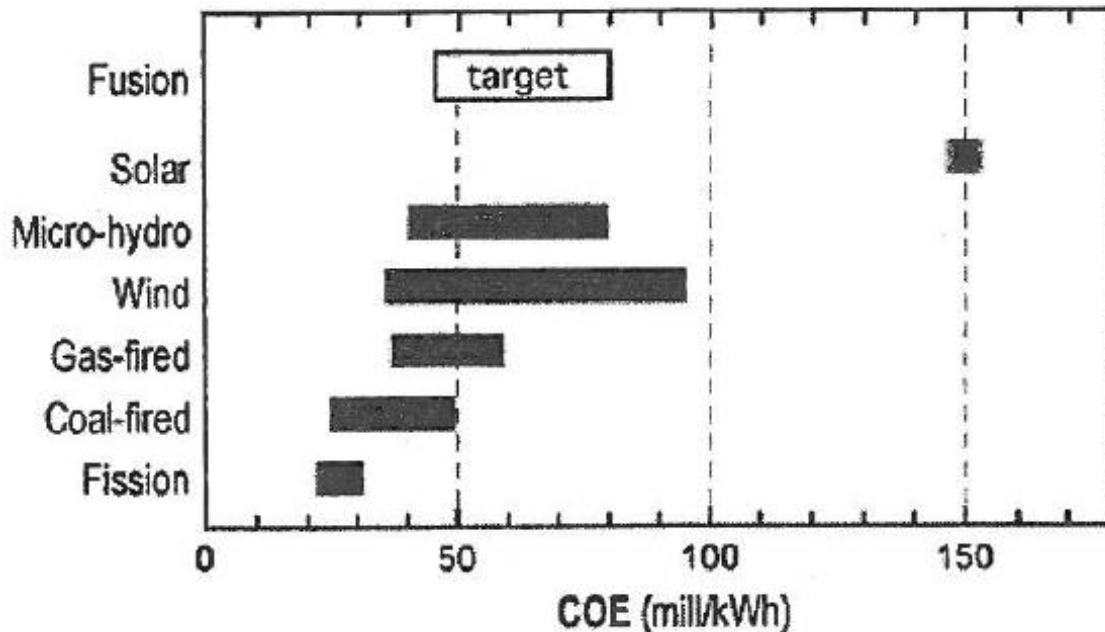
- 발전 단가 (COE: Cost Of Electricity): 플랜트 건설비, Blanket이나 Divertor 교체비, 연료비, 운전보수비, 폐로 경비 등을 기초로 산출
- 건설비 ~80% Cf. 화력발전은 연료비가 큰 비중 차지



1.2 핵융합의 특성

- 발전 비용

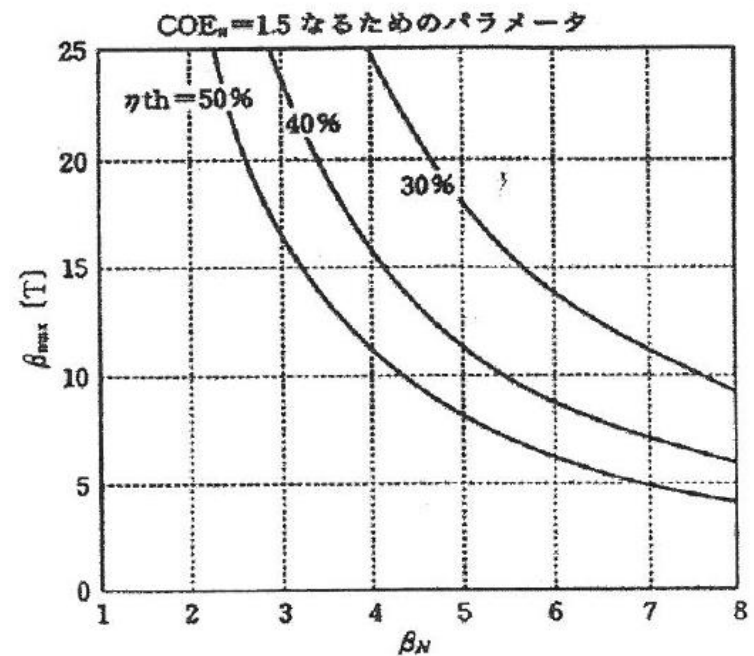
- 발전 단가 (COE: Cost Of Electricity): 플랜트 건설비, Blanket이나 Divertor 교체비, 연료비, 운전보수비, 폐로 경비 등을 기초로 산출
- 건설비 ~80% Cf. 화력발전은 연료비가 큰 비중 차지
- IEA의 평가 결과 제시된 핵융합로가 목표해야 할 발전 단가: 핵융합로의 발전 단가는 석탄 플랜트의 2배 이하 정도로 억제



1.2 핵융합의 특성

• 발전 비용

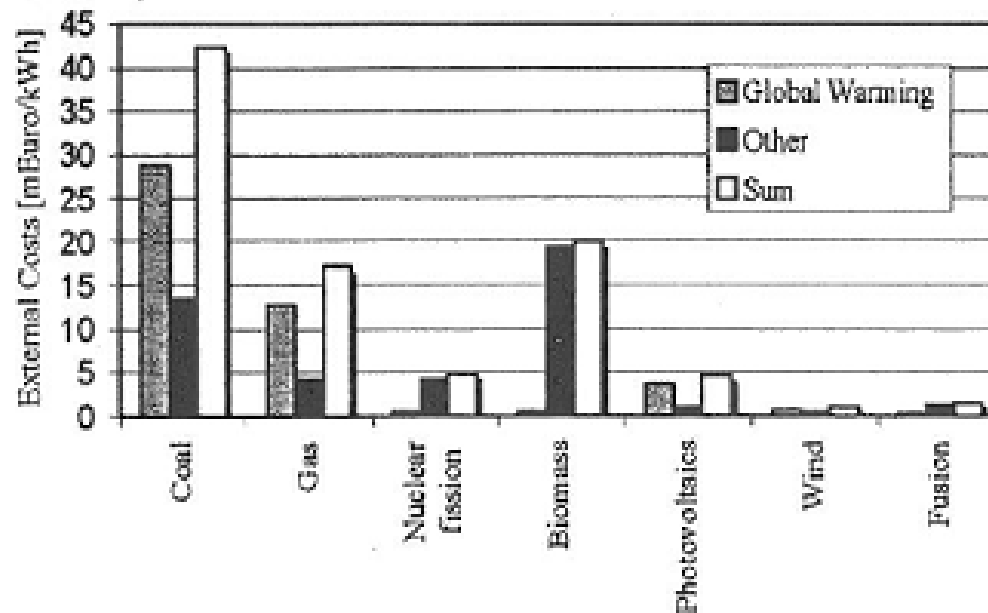
- 발전 단가 (COE: Cost Of Electricity): 플랜트 건설비, Blanket이나 Divertor 교체비, 연료비, 운전보수비, 폐로 경비 등을 기초로 산출
- 건설비 ~80% Cf. 화력발전은 연료비가 큰 비중 차지
- IEA의 평가 결과 제시된 핵융합로가 목표해야 할 발전 단가: 핵융합로의 발전 단가는 석탄 플랜트의 2배 이하 정도로 억제
- 석탄 화력 플랜트로 규격화된 발전 단가 (COEn = 1.5) 가정 시 핵융합 발전 주요인자



1.2 핵융합의 특성

- **간접 비용 (External costs)**

- 에너지의 외적성질에 대한 비용: 환경변화나 공중 위생 등 사회적 영향
- 핵융합 에너지의 외부성 비용 요인은 C-14의 생성에 의함.



HW. Why C-14 in Fusion?

1.2 핵융합의 특성

- 21세기 후반 이후의 에너지 공급 기술에 요구되는 조건
 - 자원량이 풍부하며 편재하지 않을 것
 - 환경에 대한 부하가 가능한 한 작을 것
 - 비용이 합리적 범위일 것
 - 충분한 에너지를 안정적으로 공급 가능할 것
 - 안전하며 안심스러울 것

1.2 핵융합의 특성

• 평가 지표

- 연료 자원량의 지표로써 가채년수
- CO₂ 삭감 효과의 지표로써 CO₂ 배출량의 역수
- 경제성 지표로써 발전 원가의 역수
- 운전 시 Hazard의 지표로써 잠재적 방사선 Risk 지수의 역수

	A타입	B타입	C타입
	ITER Phy. base로 Conservative model	원형로 SSTR Moderate model	Neg. Shear 고경제로 Advanced model
주반경 R	7.46 m	7.0 m	5.4 m
전기출력(Net)	100만 kW	108만 kW	100만 kW
최대 토로이달 자장	12 T	16.5 T	12.5 T
Troyon 계수	3.0	3.5	5.5 (negative shear)
건설 비용	9800억엔	7200억엔	4800억엔
건설 단가	98만엔/kW	66만엔/kW	48만엔/kW
COEn (하한값~상한값)	2.16~2.70	1.6~1.8	1.04~1.30
건설 단가/COEn	44.5~36.3만엔/kW	41.3~36.7만엔/kW	46.2~36.9만엔/kW

1.2 핵융합의 특성

• 평가 지표

- 연료 자원량의 지표로써 가채년수
- CO₂ 삭감 효과의 지표로써 CO₂ 배출량의 역수
- 경제성 지표로써 발전 원가의 역수
- 운전 시 Hazard의 지표로써 잠재적 방사선 Risk 지수의 역수

