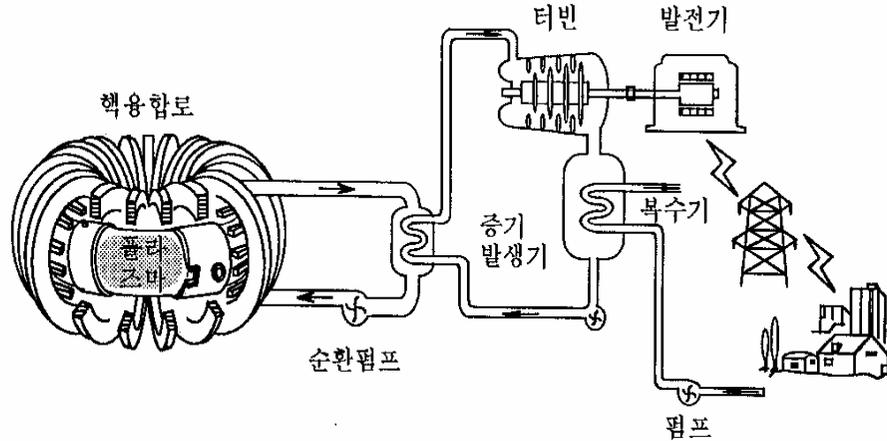
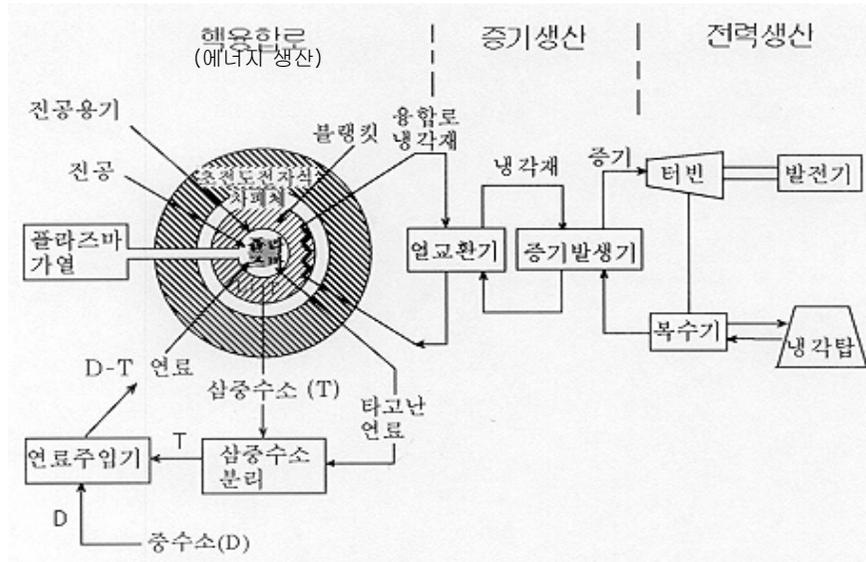


핵융합 발전의 매력

• 핵융합 발전소 개략도



• 자장핵융합 발전소 구성도



- 지역편중 없는 값싼 무한정 연료로 에너지 안보 확보
- 대기 및 방사성 환경오염 없는 깨끗한 에너지로 거부감 해소
- 원자로 용융사고 위험 없는 고유 피동 안전성으로 불안감 제거
- 핵무기 전용 가능성 없는 핵 비확산성으로 국제분쟁 해결
- 다양한 응용 기술의 파급효과

핵융합 에너지 근원

- 핵반응



- 질량결손

$$\Delta m = (m_a + m_b) - (m_c + m_d)$$

- 질량결손 에너지

$$E = \Delta m c^2$$

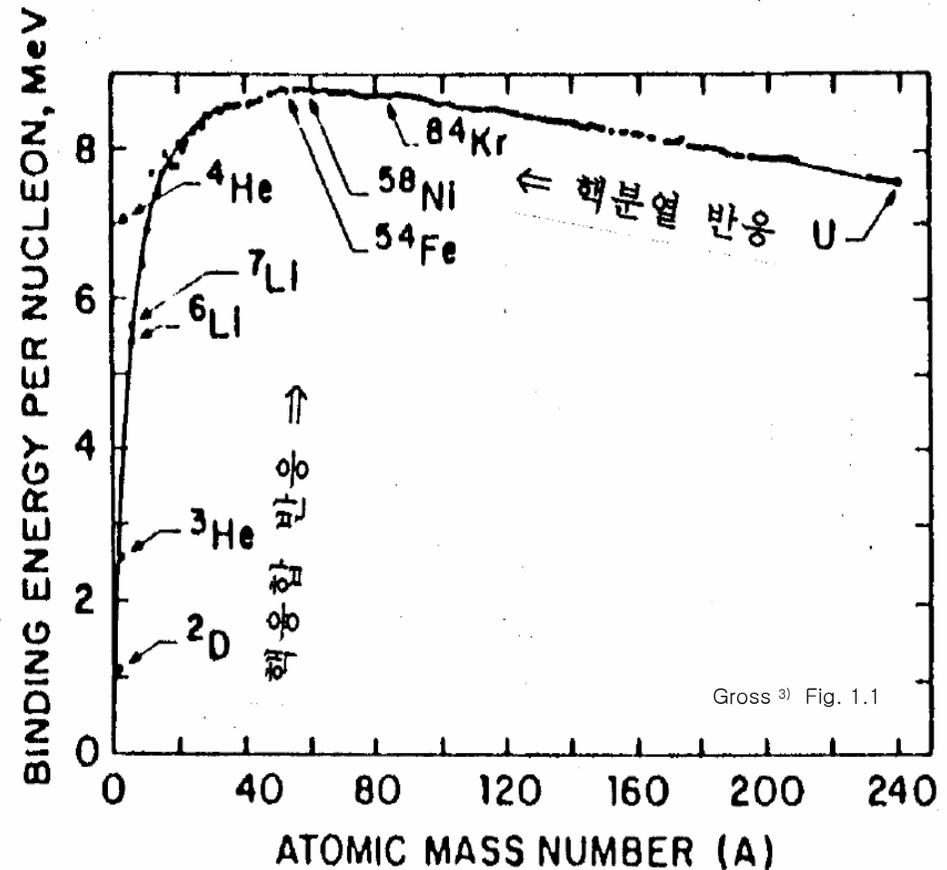
(Einstein 공식)

- $\Delta m > 0$

핵분열 에너지 : $A > 60$

핵융합 에너지 : $1 < A < 60$

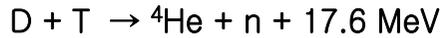
- 핵자 당 질량결손 에너지



핵융합 연료

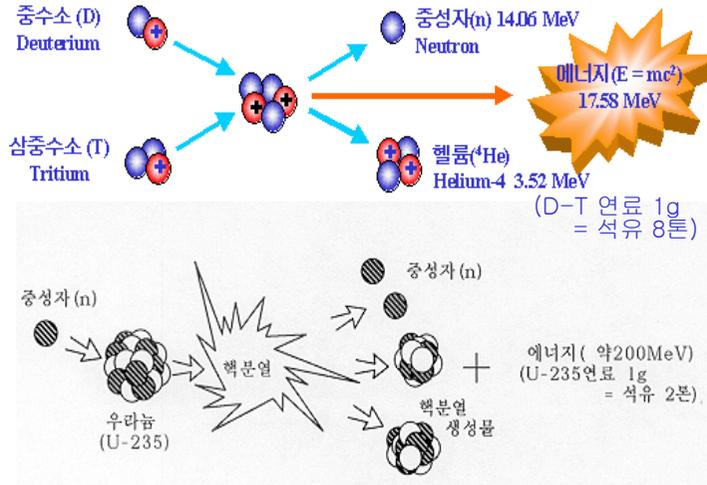
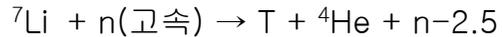
제1세대 핵융합로

D-T :

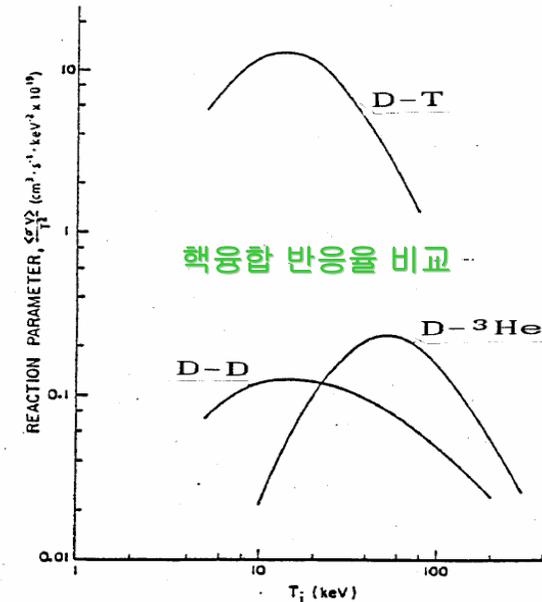


(가장 쉬운 핵융합 반응)

삼중수소 증식

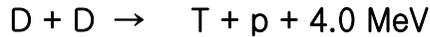


$$R_{12} = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle \propto \langle \sigma v \rangle / T^2$$



핵융합 반응을 비교

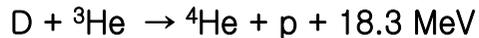
제2세대 핵융합로



(해수로부터 무한정의 연료)

제3세대 핵융합로

D-3He :



(가장 깨끗한 반응의 연료)

DT 1kg \rightarrow 10⁸ kWh

1톤 D \rightarrow 1 GWe \rightarrow 석탄 2x10⁶ 톤

해수 1 리터 \rightarrow 휘발유 300 리터

핵융합 연료의 장단점 비교

(○ 우수, △ 보통, X 불량)

	D-T	D-D	D- ³ He
• 핵반응 (개발 용이성)	○	△	X
• 핵연료 공급 및 가격(경제성)	△	○	X
• T 재고량(방사성위해) 최소화	X	△	○
• 중성자방사화 (폐기물)최소화	X	△	○
• 직접발전 가능성(고열효율)	X	△	○

핵융합 반응 연구의 갈래

- **열핵융합 (Thermonuclear Fusion)**

핵융합 연료를 초고온 플라즈마로 만들어 활발한 열운동으로 연료 이온들을 핵력이 미치는 거리까지 접근시켜 핵융합을 실현

- **뮤온 촉매 핵융합 (Muon-Catalyzed Fusion)**

질량이 207배나 무거우나 전자와 같은 성질을 가진 뮤온으로 궤도전자를 대체시켜 D-T 이온을 만들면 핵사이의 거리가 1/200 이하로 접근되어 쉽게 핵융합반응을 일으킴

- **핵스핀 편극 핵융합 (Polarized Fusion)**

연료핵의 스핀을 자장 방향으로 편극 시키면 핵융합 단면적이 약 1.5배 증가되어 더 쉬운 조건에서 핵융합이 가능

- **상온 핵융합 (Cold Fusion)**

중수 속에 백금(Pt) 양극과 팔라듐(Pd) 음극을 가진 전기화학 cell에서 과도한 열의 발생이 핵융합 반응 결과라는 주장 (M. Fleischmann & S. Ponds, 1989.3)

- **Sonoluminescence (Sono fusion, Bubble Fusion)**

중수소가 섞인 아세톤에 중성자발생기 (10^6 n/s)로 기포를 발생시켜 음파를 보내면 발광(10^{-9} s)과 함께 과도한 열과 중성자를 측정했다는 주장 (R. Taleyarkhan, ORNL, 2001.1)

열핵융합 실현 조건

• 임계(Breakeven) 조건

- 입력 에너지와 출력 에너지가 균형을 이루는 과학적 실증조건
- 과학적 실증실험에서의 목표

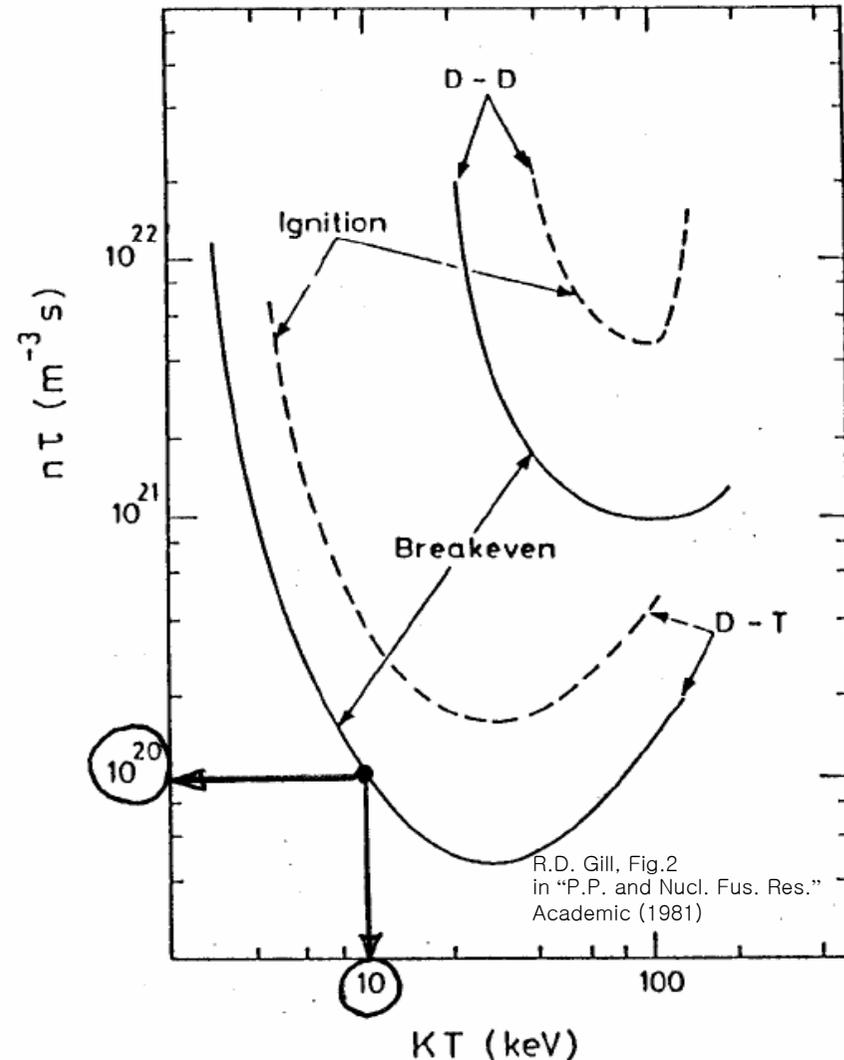
가열조건 : $T = 10 \text{ keV} (10^8 \text{ K})$

가둠조건 : $n\tau = 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$
(Lawson Criterion)

• 점화(Ignition) 조건

- 외부 에너지 공급 없이 핵융합 반응이 지속되는 상업로에서 요구되는 상업적 실증조건

$$n\tau T = 7 \times 10^{21} \text{ m}^{-3}\text{s keV}$$

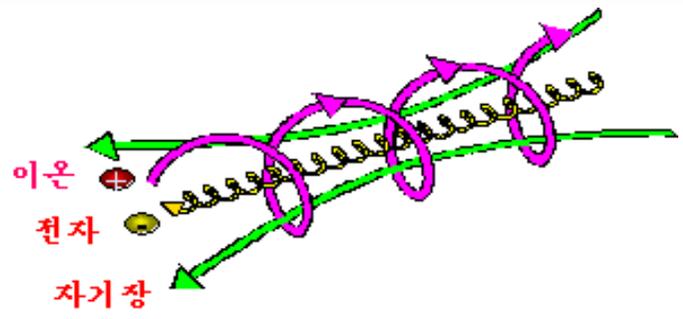
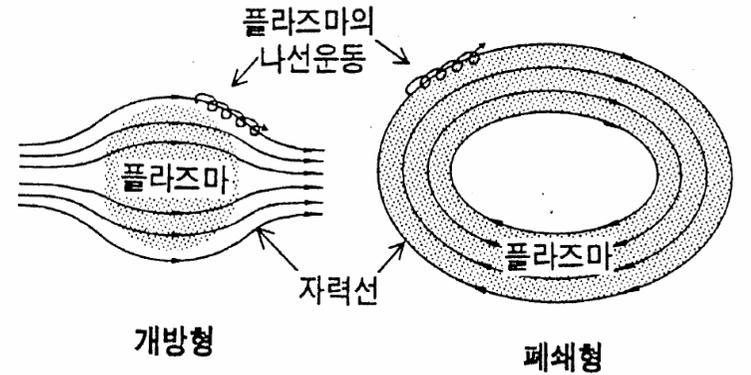


가둠방법에 따른 핵융합 종류

• 자장핵융합 (Magnetic Fusion)

고압 진공 자기장 그릇 형태
 ($T \approx 10 \text{ keV}$, $n \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $\tau \approx 1 \text{ s}$)

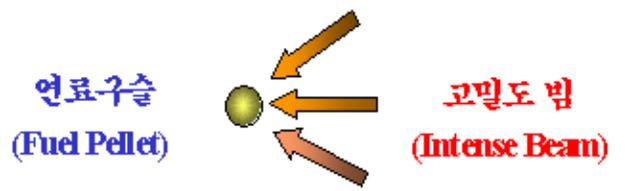
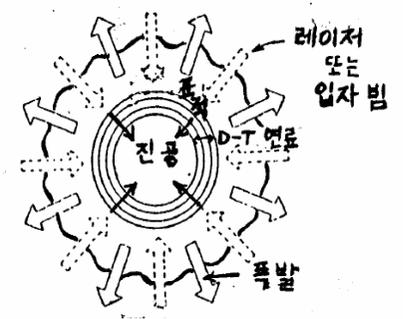
(개방형 : Magnetic Mirrors, Linear Pinches 등)
 (폐쇄형 : Tokamak, Stellarator, RFP, Compact torus, Bumpy torus 등)



• 관성핵융합 (Inertial Fusion)

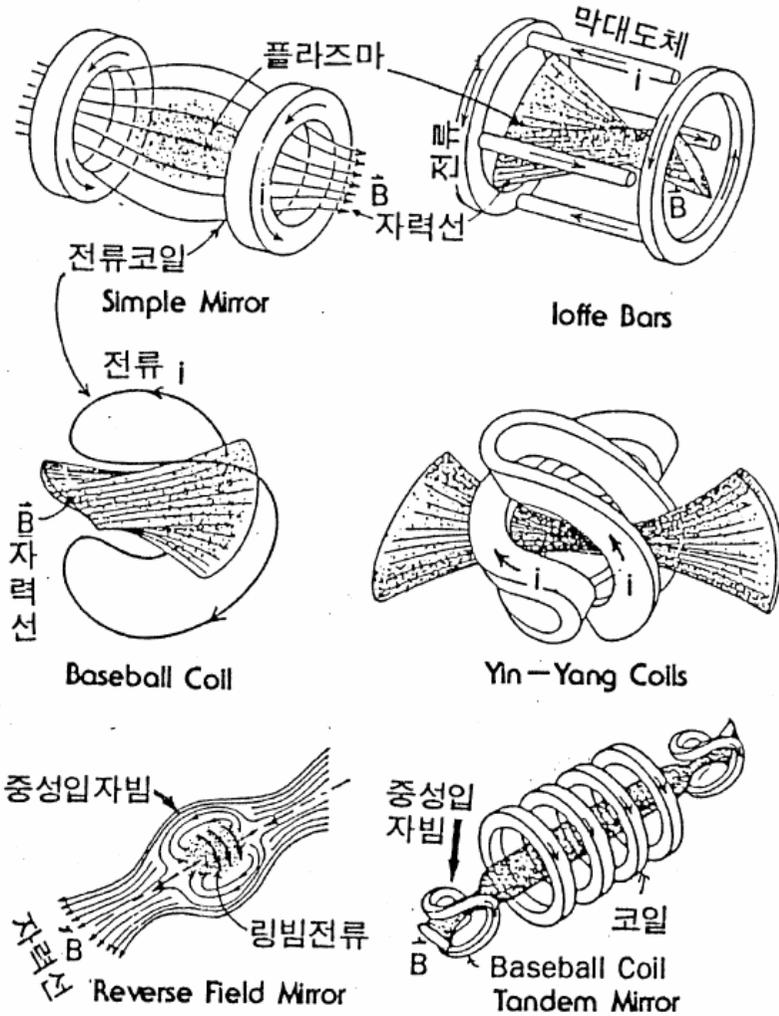
초고밀도 초소형 수소폭탄 형태
 ($T \approx 15 \text{ keV}$, $n \approx 10^{29} \text{ m}^{-3}$, $\tau \approx 10^{-9} \text{ s}$)

(레이저 핵융합 : CO₂, Nd-glass, KrF lasers)
 (입자빔 핵융합 : 경 또는 중 이온 입자가속기)

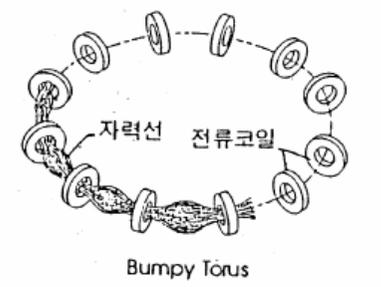
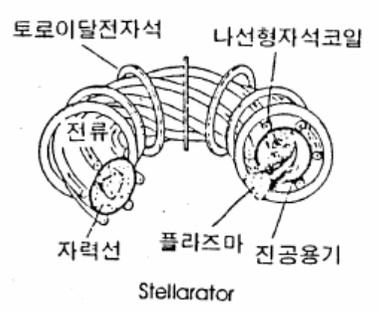
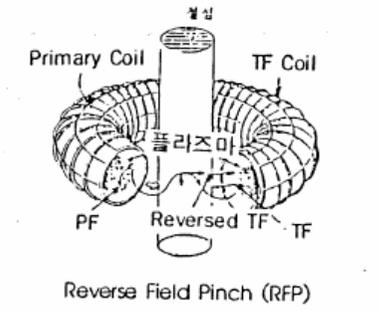
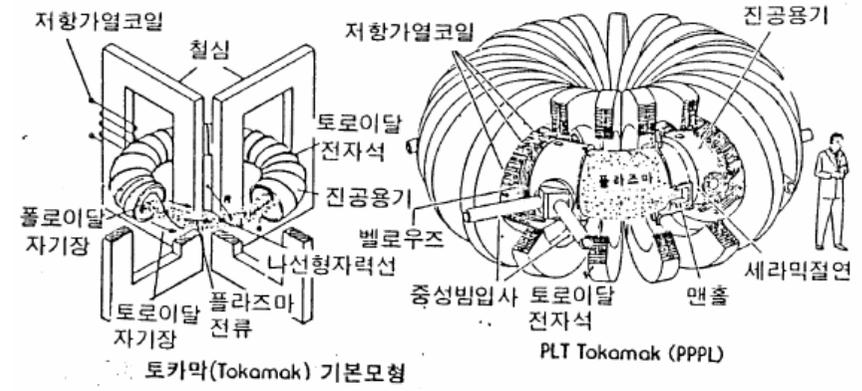


자장가둠 핵융합장치

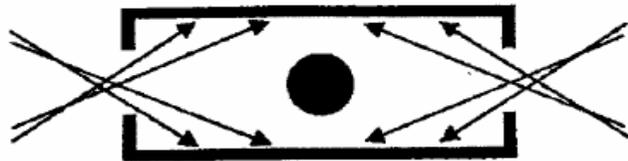
• 개방형 (Open Confinement System)



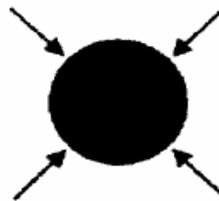
• 폐쇄형 (Toroidal Confinement System)



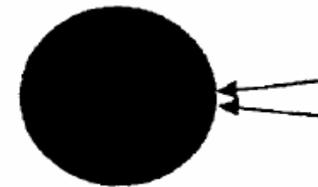
관성가둠 핵융합장치 개념도



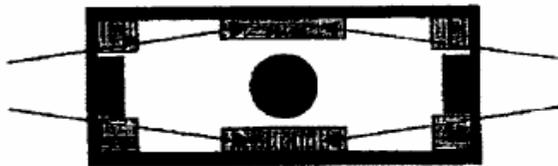
Laser indirect drive



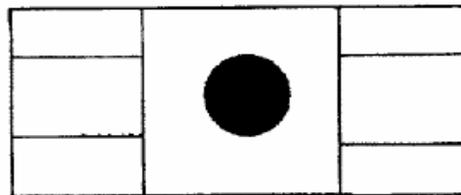
Direct drive
(NIF, OMEGA, Nike)



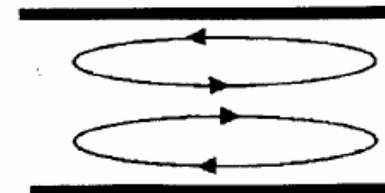
Fast Ignitor
(NIF, GEKKO)



Ion beam indirect drive
(IRE, NIF, Z)

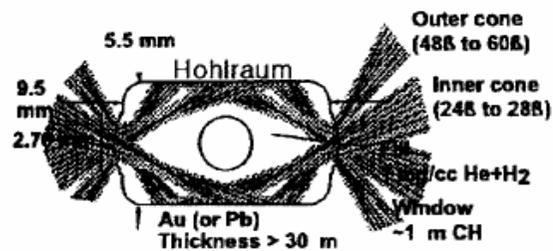


Z-pinch
(Z, NIF)

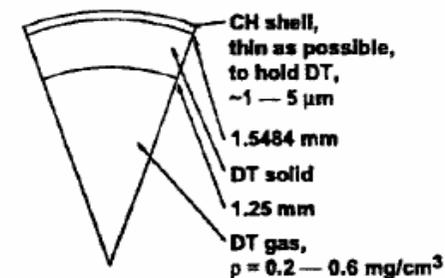


Magnetized target fusion
(Z, Atlas, Shiva Star)

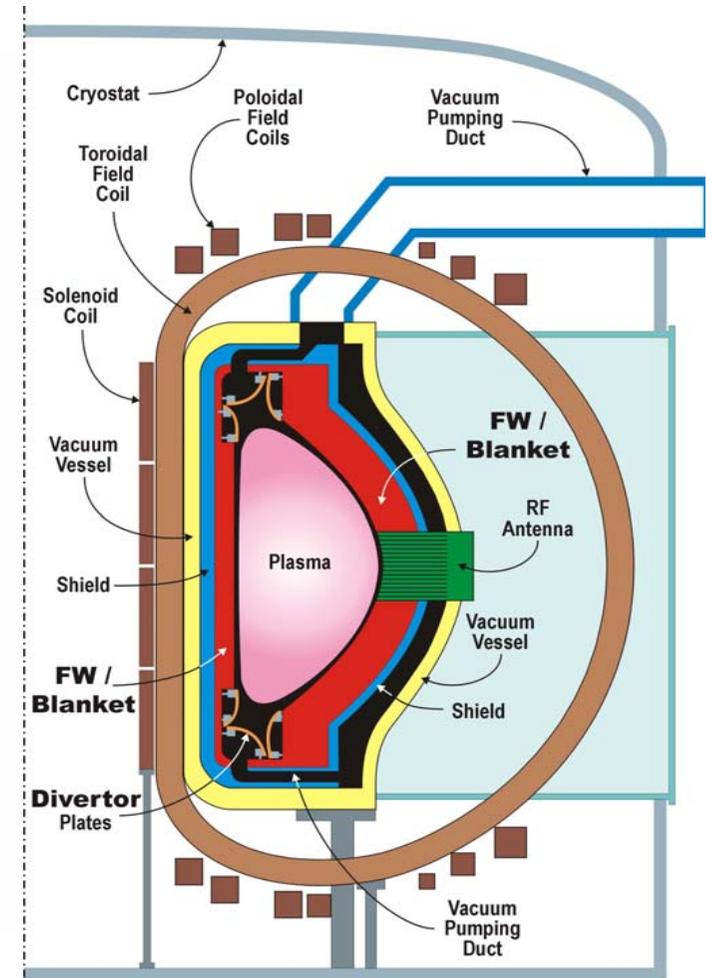
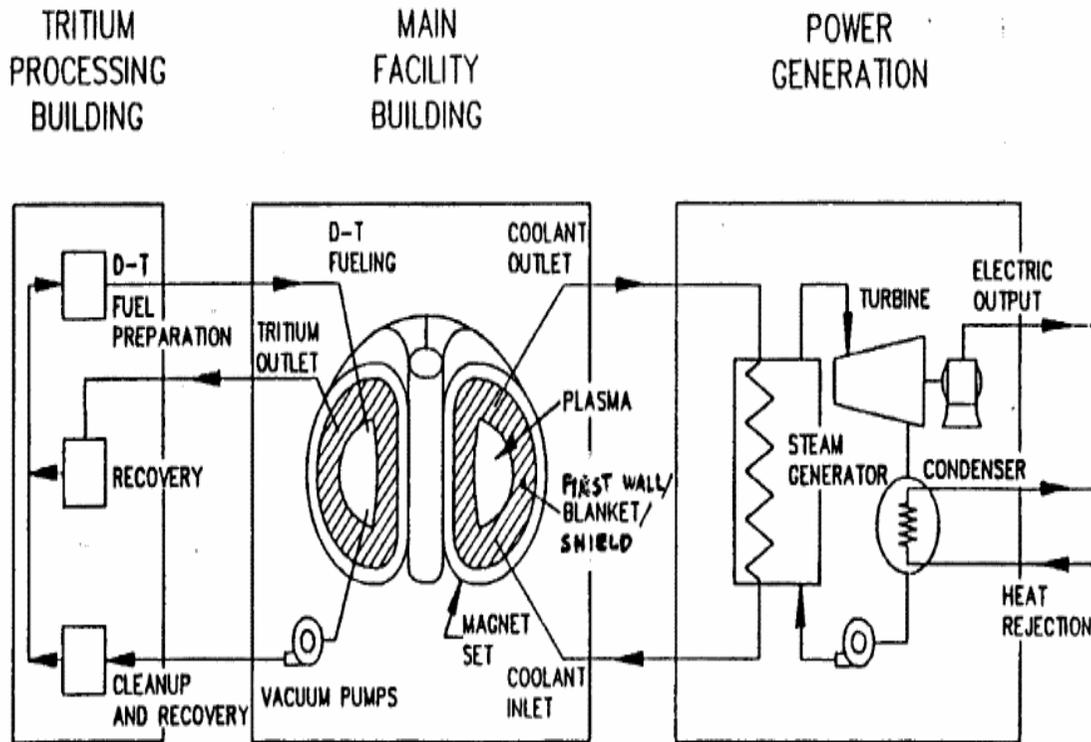
Indirect Drive



Direct Drive



핵융합 발전소와 핵융합로 개념도



Cross-section of ARIES-AT (from IAEA-CN-77)

핵융합로 관련 과학기술

- **노심 플라즈마 (50%-50% D-T, $T=10^8$ K)**
 - 플라즈마 생성 및 전류 구동
 - 플라즈마 가열 (저항, 중성빔 입사, 고주파 등)
 - 플라즈마 평형 및 불안정성
 - 플라즈마 진단
 - 불순물 제어 (Divertor, Limiter)
 - 연료주입 및 사용후 연료 제거
- **제1벽 (초고온내열, 비자성, 고강도, 내방사성)**
 - 고 에너지 입자, 복사, 열 부하 퇴적 영역
 - 플라즈마 - 벽 상호작용
 - 표면처리(C, Be 등)에 의한 불순물 제어
 - 방사선 상해, 중성자 loading, 접합 가공
- **Blanket (T = 800-1300 K)**
 - 삼중수소 증식 (Li, Li-Pb, LiO₂, Li₂BeF₄, LiAlO₂)
 - 중성자 감속 및 냉각재 (경수, He, 액체금속)
 - 부식, 자기장 내에서 pumping, 방사능, 환경영향
- **전자석 보호 차폐 및 단열 (Pb, LiH)**
- **초전도전자석(TF, PF, VF) 및 극저온설비(T= 4 K)**
 - 수냉식 도체 코일
 - 초전도 전자석 (NbTi, Nb₃Sn)
 - 극저온 설비 (T < 20 K)
- **인체 보호 차폐 및 단열**
- **원격조정 및 정비 시설**
- **환경영향 평가**
 - 삼중수소 취급 및 중성자 방사화
 - 환경공해 평가 및 부유 자기장 영향
 - 안전 규제 및 인허가
 - 부지 선정, 폐로 처리 문제
- **경제성 평가**
 - 발전 단가 (투자, 연료, 수리유지비)
 - 가동율 및 신뢰성 분석
 - 정비 문제
 - 핵융합-핵분열 혼성로
- **발전 보조설비 (NSSS, BOP)**

기술개발 단계에 따른 중점 해결과제

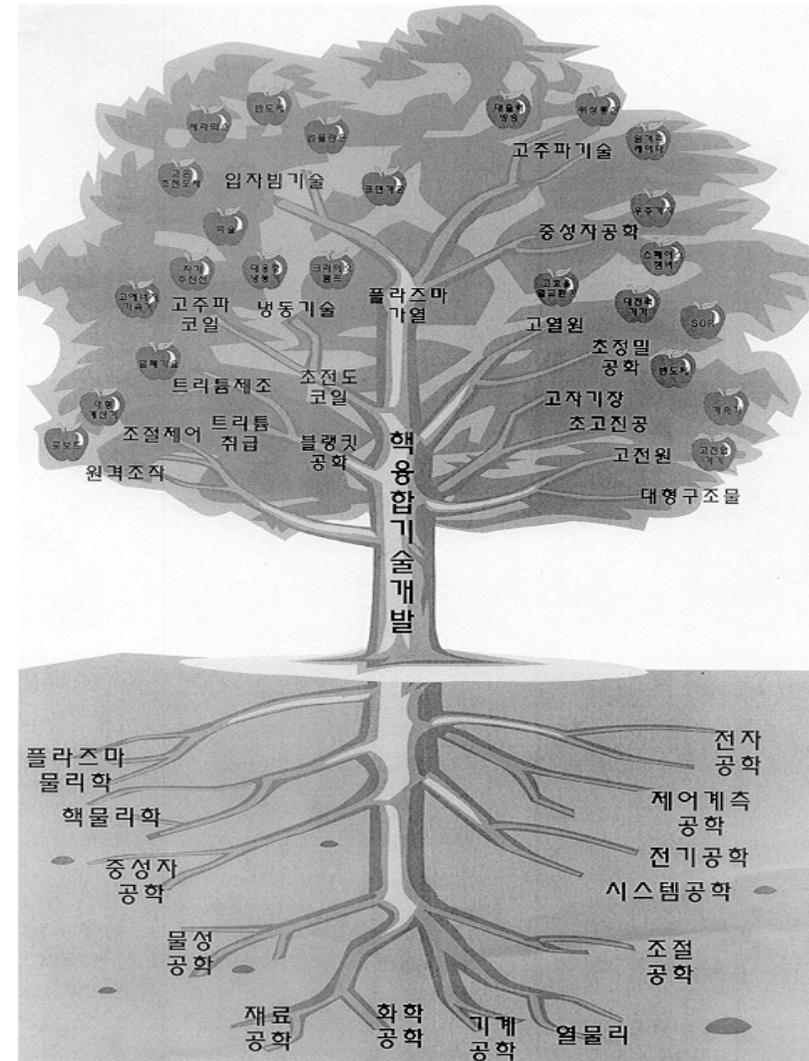
- **과학적 실증단계 (임계 달성)**
 - 노심 플라즈마 관련 물리 및 공학 (밀폐, 가열)
 - 불순물 제어 및 플라즈마 대향재료 (PFC)
- **공학적 실증단계 (정화 목표)**
 - 제1벽 및 플라즈마 대향재료, 저방사화 재료
 - 블랭킷 / 차폐체
 - 초전도 전자석 및 극저온
 - 원격조정 및 정비
 - BOP
- **상업적 실증단계 (연속 운전)**
 - 연속 전류구동
 - 안전성 및 환경 영향 평가
 - 경제적 타당성 및 신뢰성
 - BOP

핵융합 발전 관련 기술의 파급효과

(☆ : 파급효과가 큼, ○ : 파급효과가 있음)

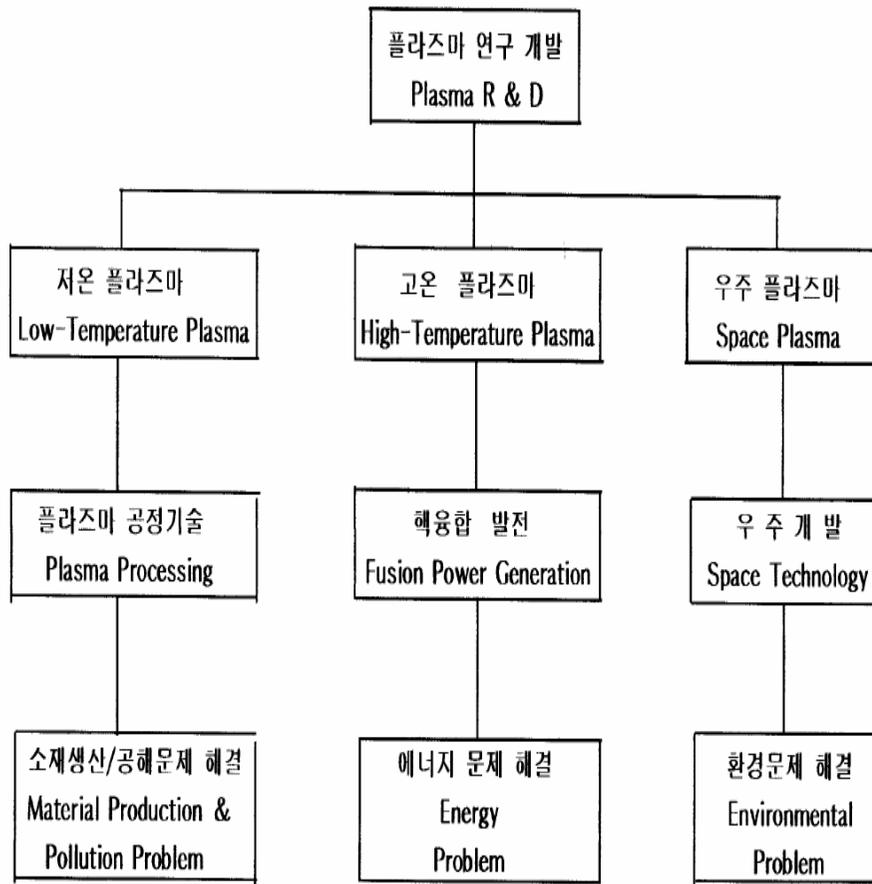
분야	에너지	전자	정보	고에너지가속기	해양우주	생명과학	고온	일반산업	기타공통
핵융합기술	지	자	보	기	주	학	통	업	통
중성자공학 · 핵융합로공학	☆			○					
고진공기술	○			☆	○			☆	
초전도 자석 기술	☆	○		○			○		○
극저온 기술	○	○		○		○			
고에너지 빔 기술		☆		☆				☆	
고주파 에너지 기술			☆	○				○	
Power Electronics 기술	☆			○					○
계측 제어 기술	○	☆		○		○			☆
Computation 통신 기술		☆	○	○	○				
재료	☆			○	○	○	☆	○	
생산 가공 기술	☆			○				☆	
System Engineering	☆			○					○
보수 점검 기술	☆			○	○				○
기타	○	○							○

Data from Japan Atomic Forum (1987)



플라즈마 응용 기술개발

• 플라즈마 응용 분야



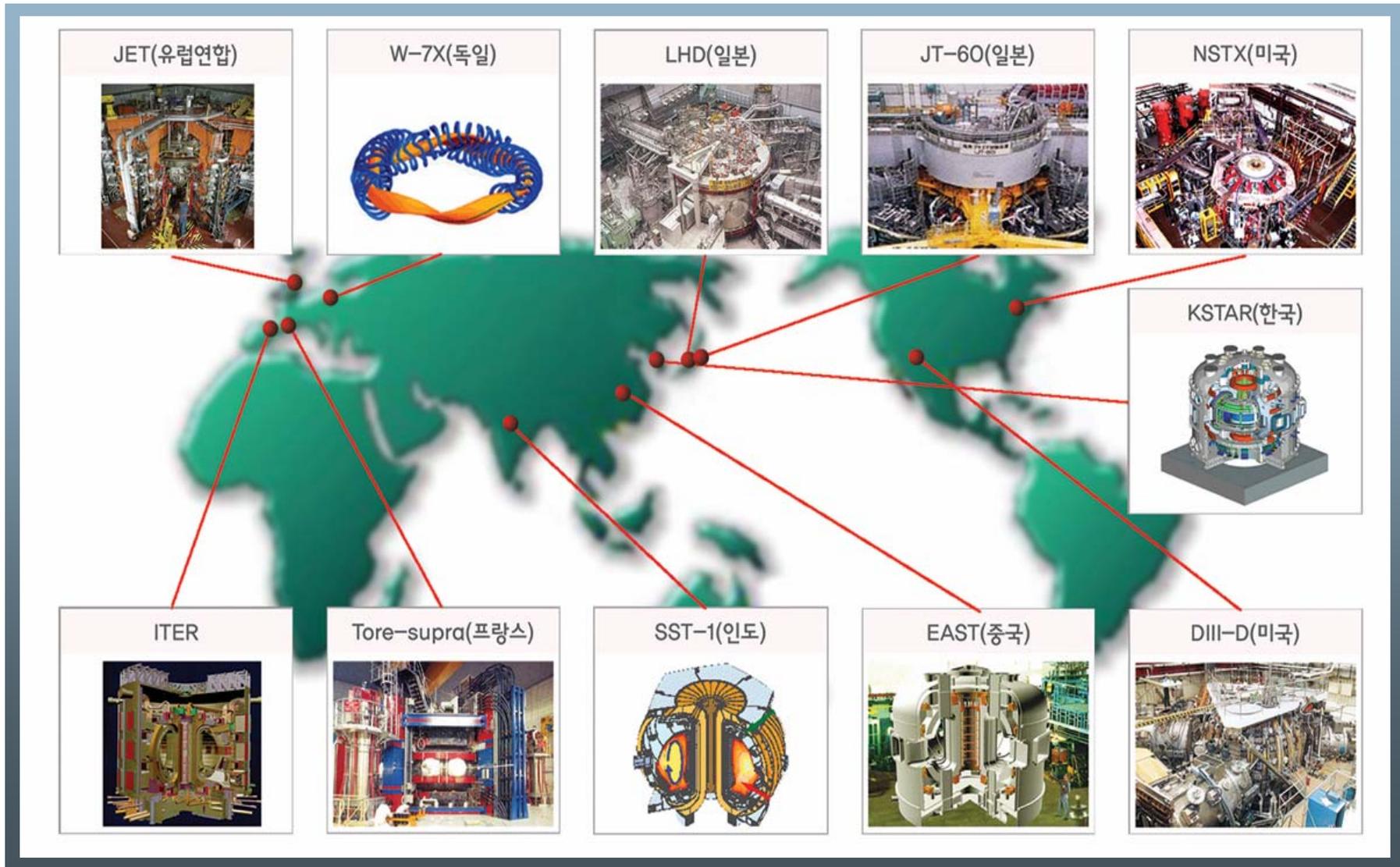
• 저온 플라즈마 응용기술

분 야	응 용 기 술
원자핵공학	방사선 계측기, 동위원소 분리, 원자로해체, 핵폐기물 처리, 플라즈마 계측, 핵융합로벽 코팅, 핵연료 피복재 코팅
전기·전자공학	고주파 발전관, 태양전지, 대전류스위치류, 방전관, 전자유체 펌프 및 발전기, IC제조, 정전도장, 초미세가공, 초전도 후막
열 공 학	용접, 절단, 피막 제조, 산화물 용해, 결정 성장, 정제, 환원, 금속 제련, 고온 기체 제조, 열차단장벽, 표면강화
기계공학	방전 가공, 로켓 추진, 입자 빔, 가속기, 이온 주입기, 각종 기계 및 공구 코팅
재료 및 화학공학	고분자 중합, 신소재 합성, 표면개질, 표면코팅, 표면청정, 화학분석, 폐기물분해
광 공 학	방전 조명, 기체 레이저, 살균, 식각광원, 분광기술, 광학기기 초자류 표면 코팅

핵융합 개발 역사

- 1920년대 : 플라즈마 물리학의 시작
(*Plasma 용어, 핵융합 = 태양 에너지 근원*)
- 1930년대 : 플라즈마 물리학의 기반 조성
(*방전 플라즈마, 우주 플라즈마, D-D 융합반응*)
- 1940년대 : 핵융합 비밀 연구 (미국, 소련, 영국)
- 1950년대 : 핵융합 개발 본격 시작
(*수폭 실험, 핵융합 공개 연구, 국제협력 시도*)
- 1960년대 : 다양한 자장가둠 장치 실험
(*토카막 등장, 관성 핵융합 실험 시작*)
- 1970년대 : 대형 임계장치 및 핵융합 설비 건설
- 1980년대 : 임계 실험 (JET, TFTR, JT-60, T-15)
- 1990년대 : 핵융합 과학적 실증, 공학시험로 설계
(*국제 공동 개발 노력*)
- 2000년대 : 공학시험로 및 상업로 건설 및 실험
(*ITER, DEMO, PROTO, 혼성로, 상업로*)

각국의 대표적 자장가둠 핵융합 장치



현존하는 주요 토카막형 핵융합 장치

장치명	국가	내반경 Minor Radius a(m)	평창 Elongation K	주반경 Major Radius R(m)	플라즈마 전류 Plasma Current I(MA)	중심자기장B Toroidal Field B (T)	입력전력 Input Power P(MW)	장치 가동 년도
ITER	국제공동	2.0	1.75	6.2	15	5.3	73+	
JET	유럽연합	1.00	1.8	2.96	7.0	3.5	42	1983
JT-60U	일본	0.85	1.6	3.2	4.5	4.4	40	1991
TFTR	미국	0.85	1.0	2.50	2.7	5.6	40	(1982) closed
TORE- SUPRA	프랑스	0.80	1.0	2.4	2.0	4.2	22	1988
T-15	러시아	0.70	1.0	2.4	2.0	4.0	-	1989
DIII-D	미국	0.67	2.5	1.67	3.0	2.1	22	1986
ASDEX-U	독일	0.5	1.7	1.67	1.4	3.5	16	1991
TEXTOR- 94	독일	0.46	1	1.75	0.8	2.6	8	1994
FT-U	이탈리아	0.31	1.0	0.92	1.2	7.5	-	1988
TCV	스위스	0.24	3.0	0.875	1.2	1.43	4.5	1992
C-MOD	미국	0.22	1.8	0.67	1.5	8.07	4.5	1992
MAST	영국	0.5	3	0.7	2	0.63	6.5	1999
NSTX	미국	0.67	1.9	0.85	1.0	0.6	11.5	1999

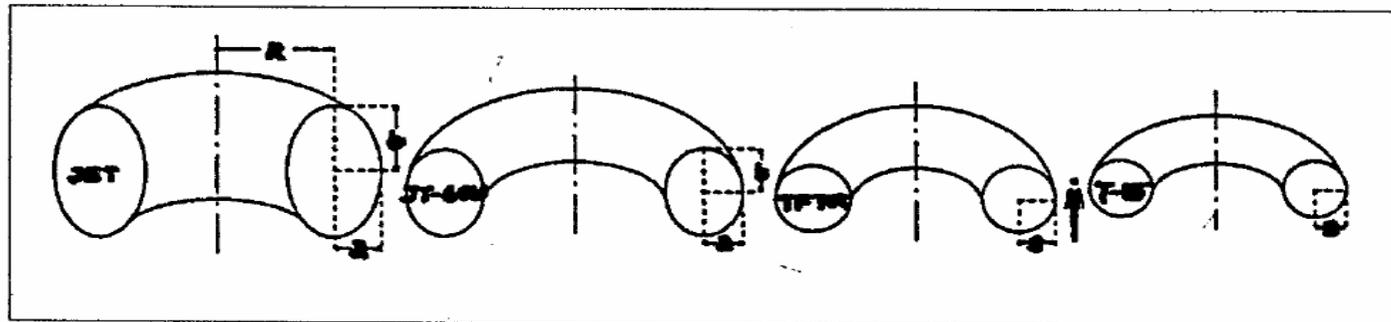
자료: <http://www.iter.org>.

Courtesy of NFRCl¹⁶

세계 4대 토카막 임계로

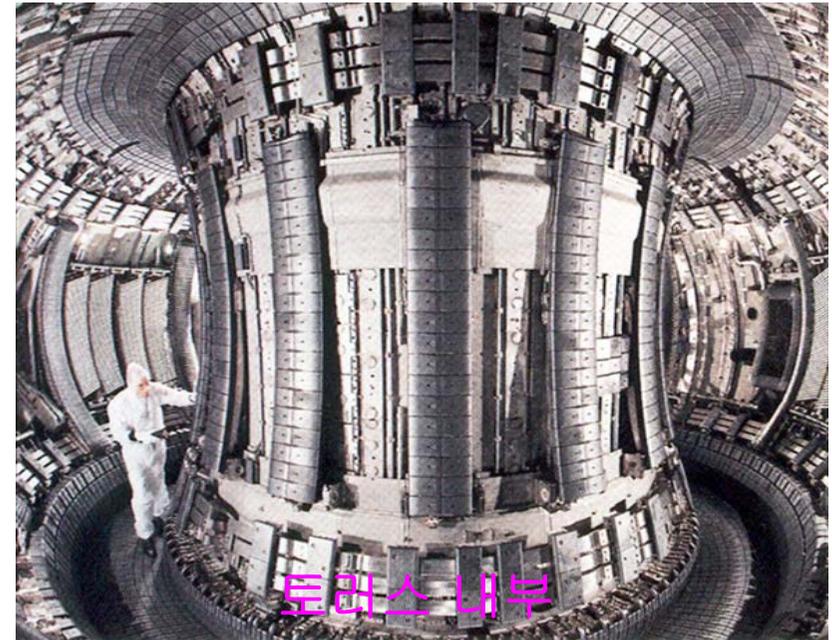
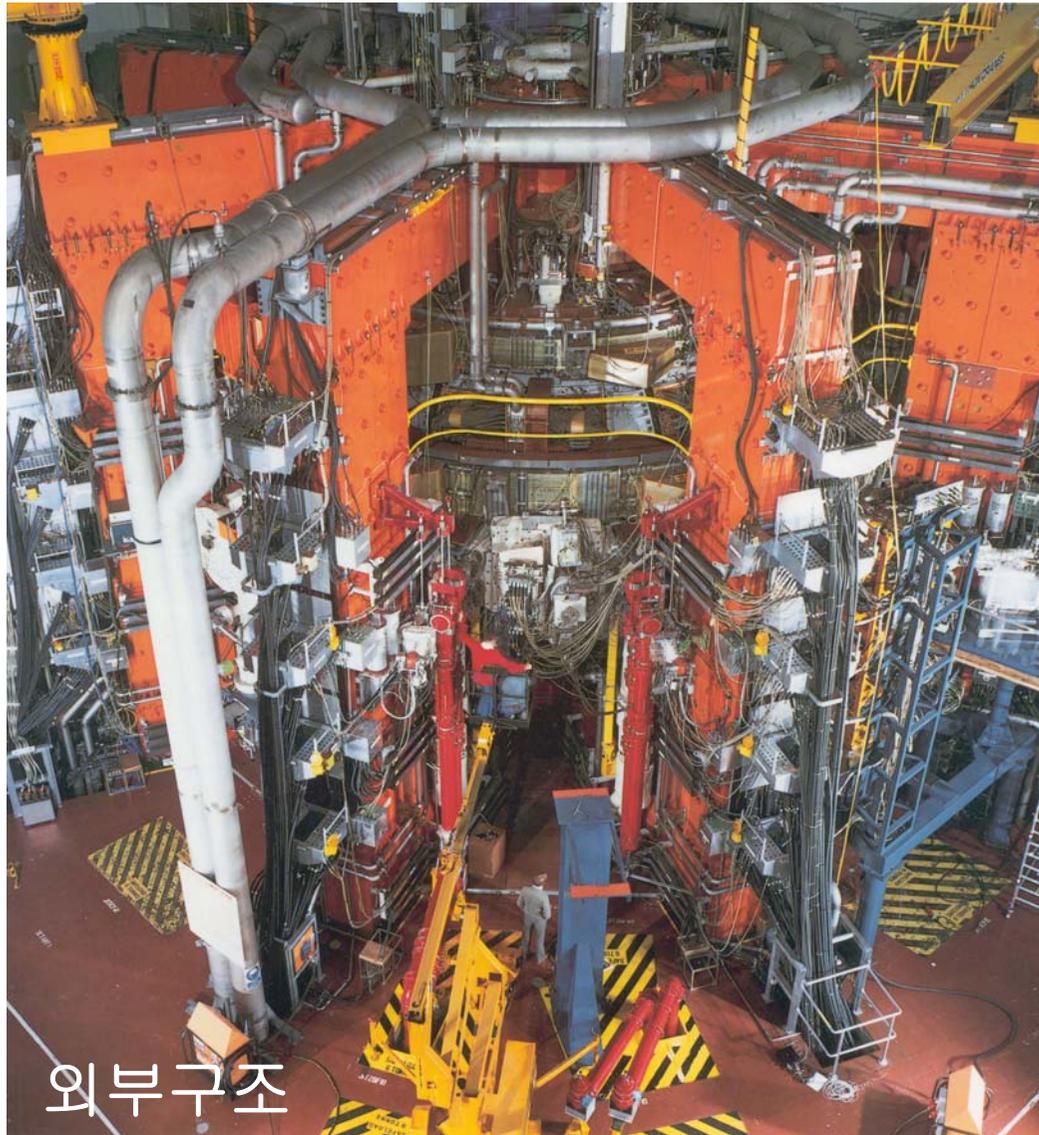
장 치 명	JET	JT-60U	TFTR	T-15
국 가	유럽연합	일본	미국	러시아
주반경 R(m)	2.96	3.4	2.48	2.43
부반경 a/b(m)	1.25/2.1	1/1.5	0.85	0.75
자장세기 (T)	3.5	4.2	5.2	3.5
플라즈마 전류 (MA)	7	6	2.5	1.4
소재지	영국Culham 연구소	일본원자력 연구소	Princeton 대학	Kurchatov 연구소
본체완성시기	1983	1985/91	1982	1987

97.5 Shut-down



유럽연합(EU) JET 토카막

Courtesy of UKAEA at Culham ²¹⁾

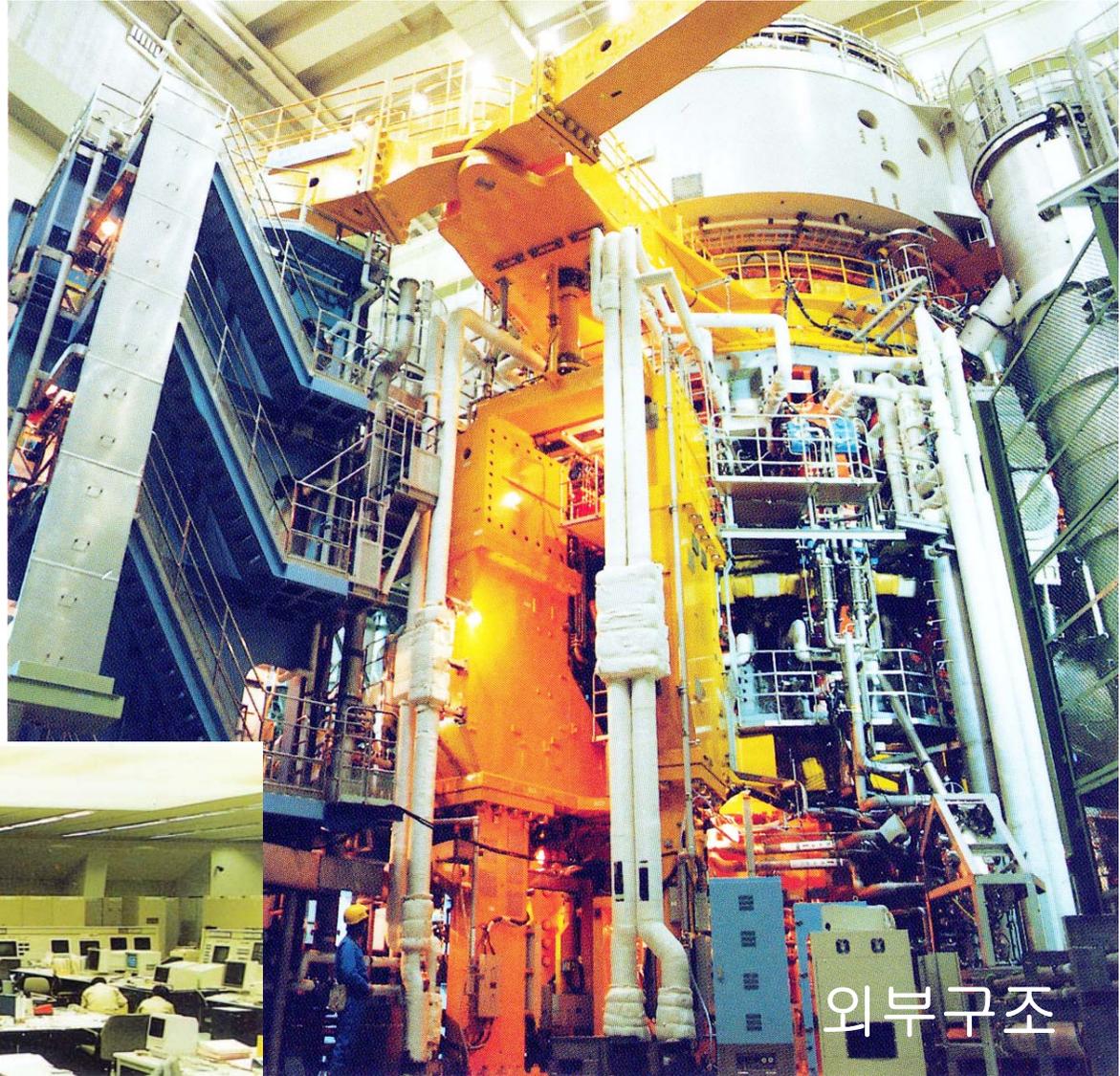


일본 JT-60U 토카막

Courtesy of JAERI ¹⁸⁾



개조 전 JT-60



외부구조



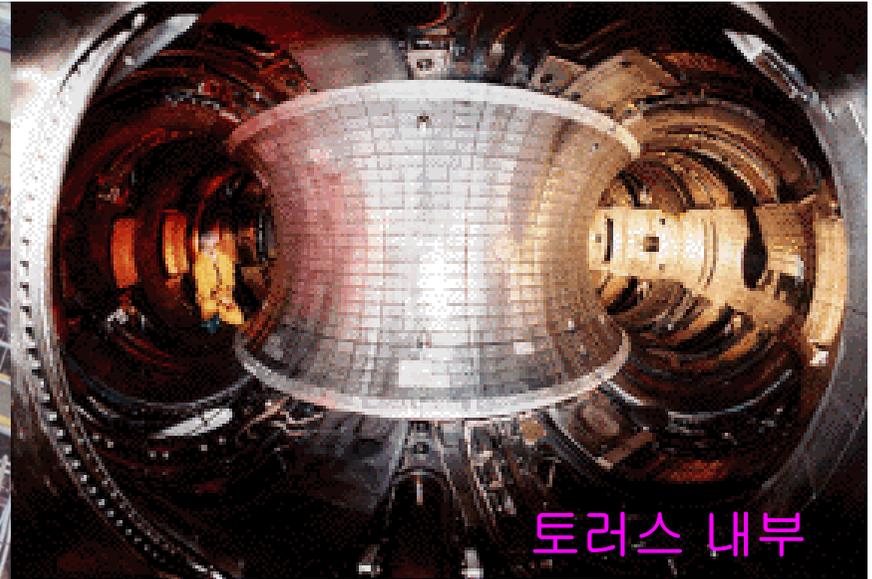
조정실

미국 TFTR 토카막

Courtesy of PPPL ²⁸⁾



외부구조



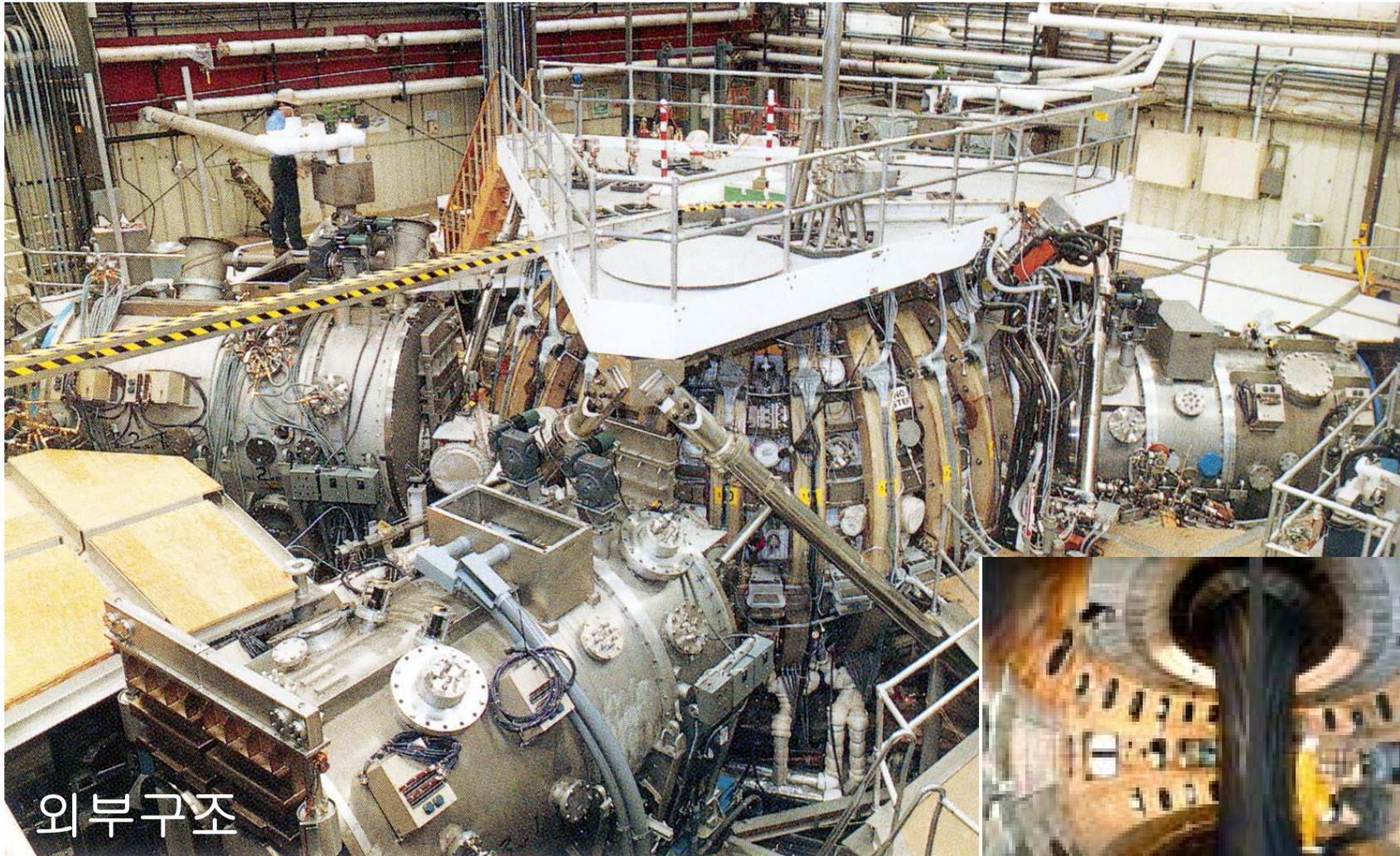
토러스 내부



조립과정

미국 DIII-D 토카막

Courtesy of GA ³²⁾



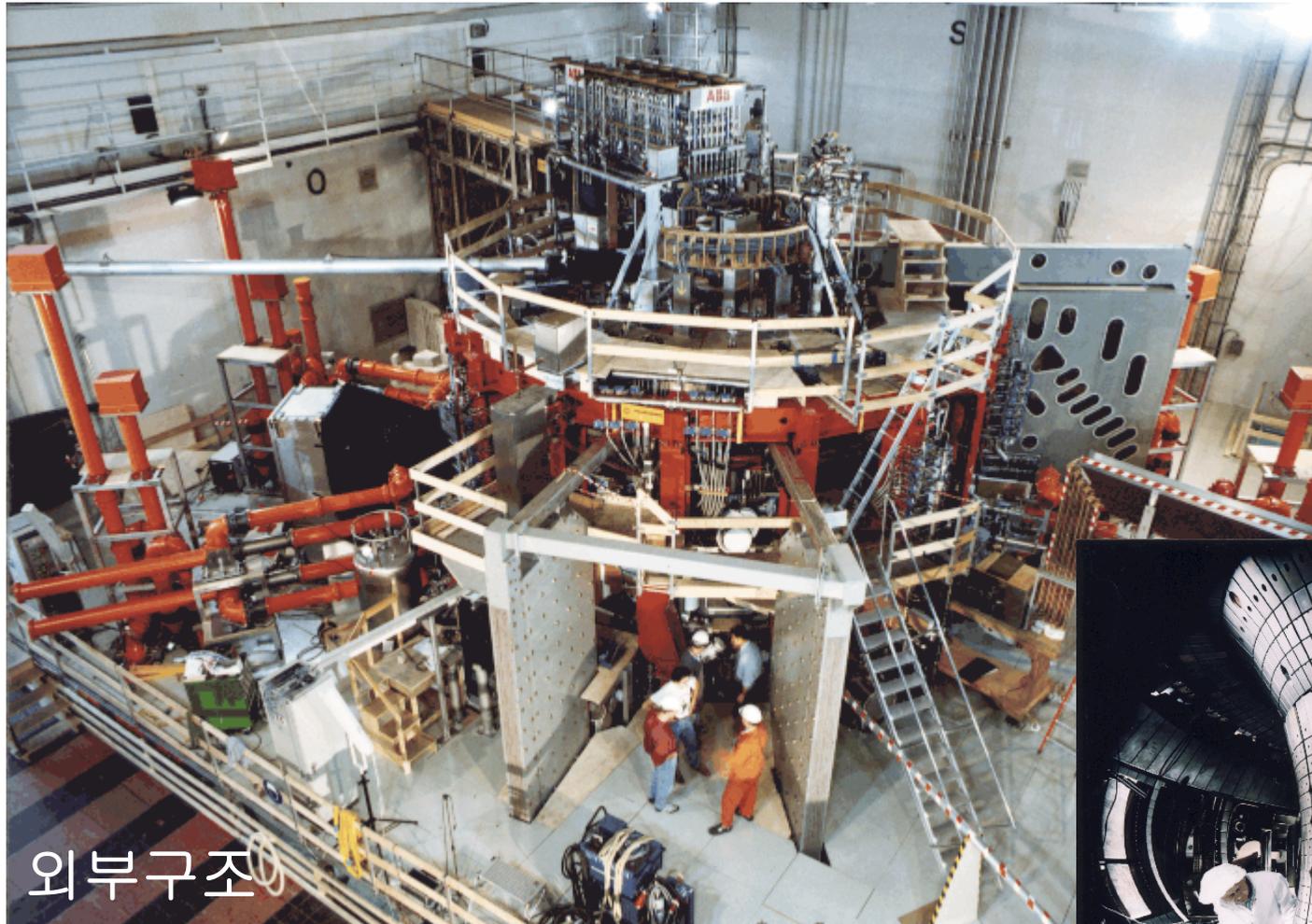
외부구조



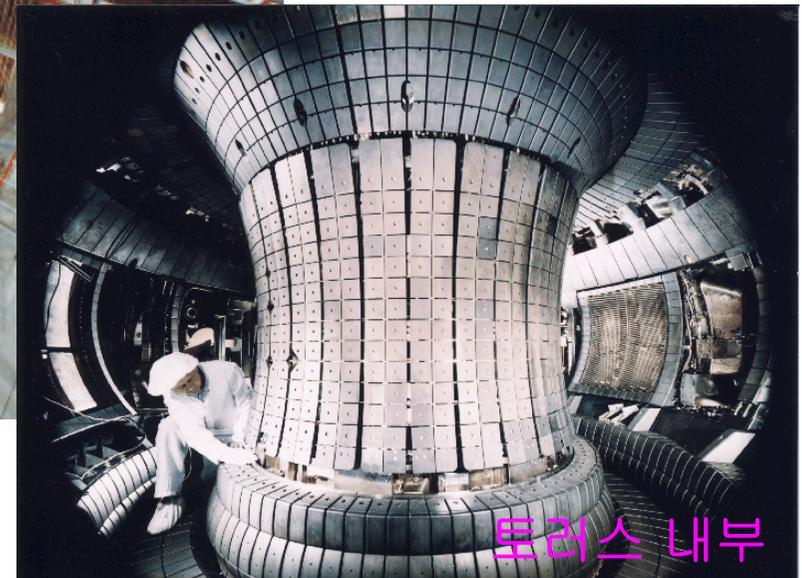
토러스 내부

독일 ASDEX-U 토카막

Courtesy of MP-IPP ar Garching ²³⁾



외부구조



토러스 내부

프랑스 Tore Supra 초전도 토카막

Courtesy of ITER Site at Cadarache ²⁰⁾



외부구조



진공용기

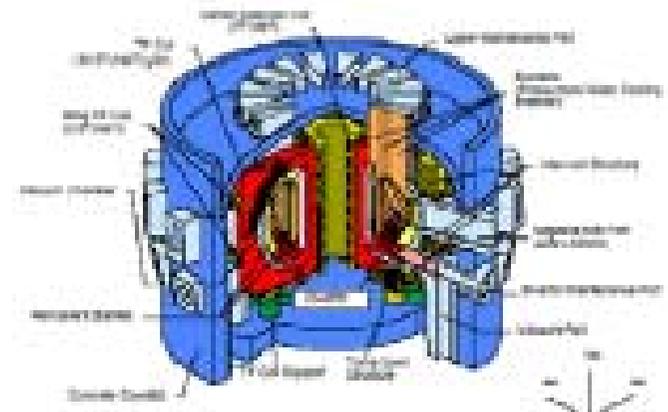
기타 핵융합 장치



러시아 T-15 임계 토카막
(Kurchatov Research Instit., Russia)



중국 HT-7 토카막
(IPP-Chinese Academy of Science)



일본 SSTR 공학시험 토카막
(Power Plant System Study at Japan)



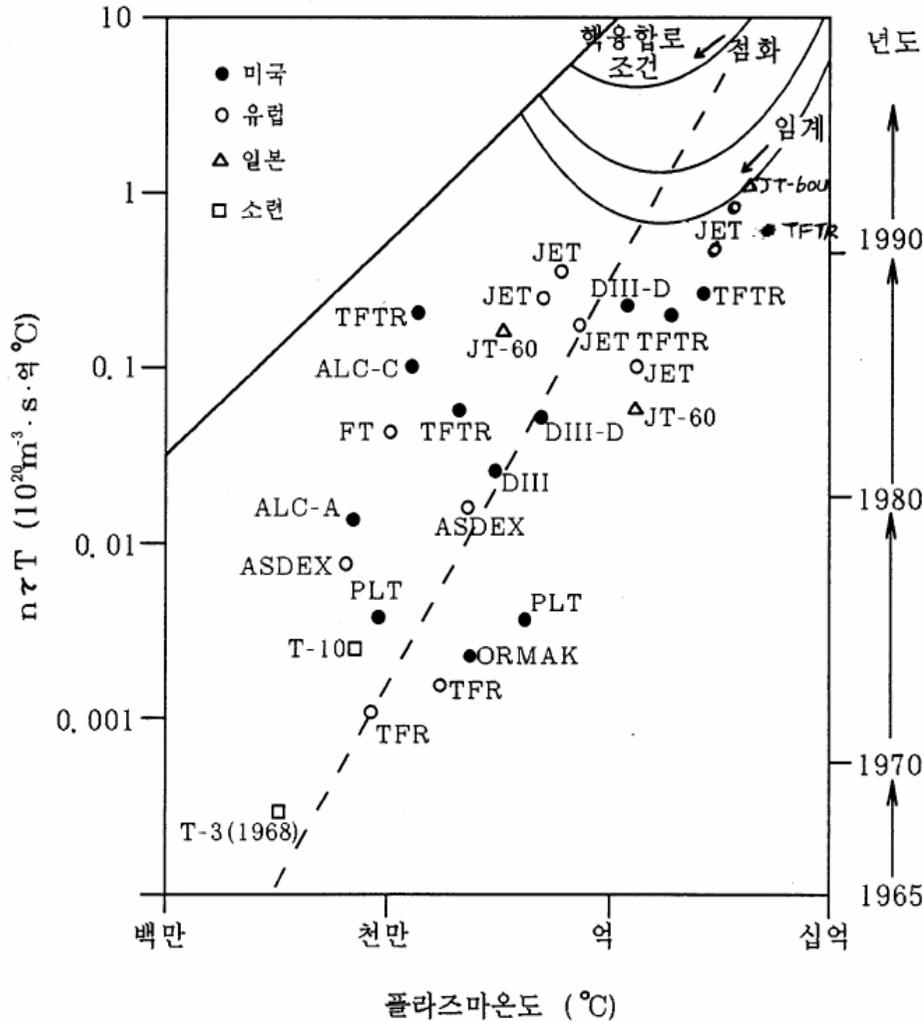
미국 NIF 레이저 핵융합 장치
(LLNL, USA)



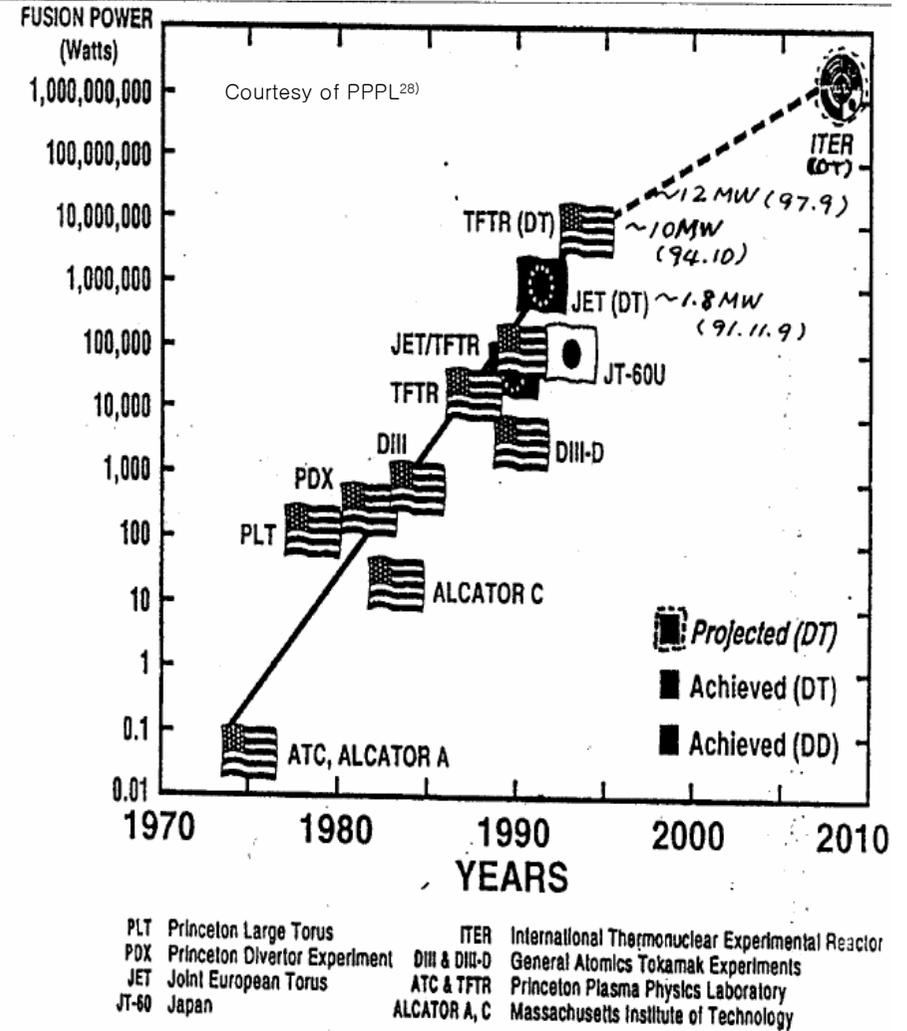
우리나라 한빛 미러 플라즈마 장치
(NFRC, Korea)

토카막 개발 진전 상황

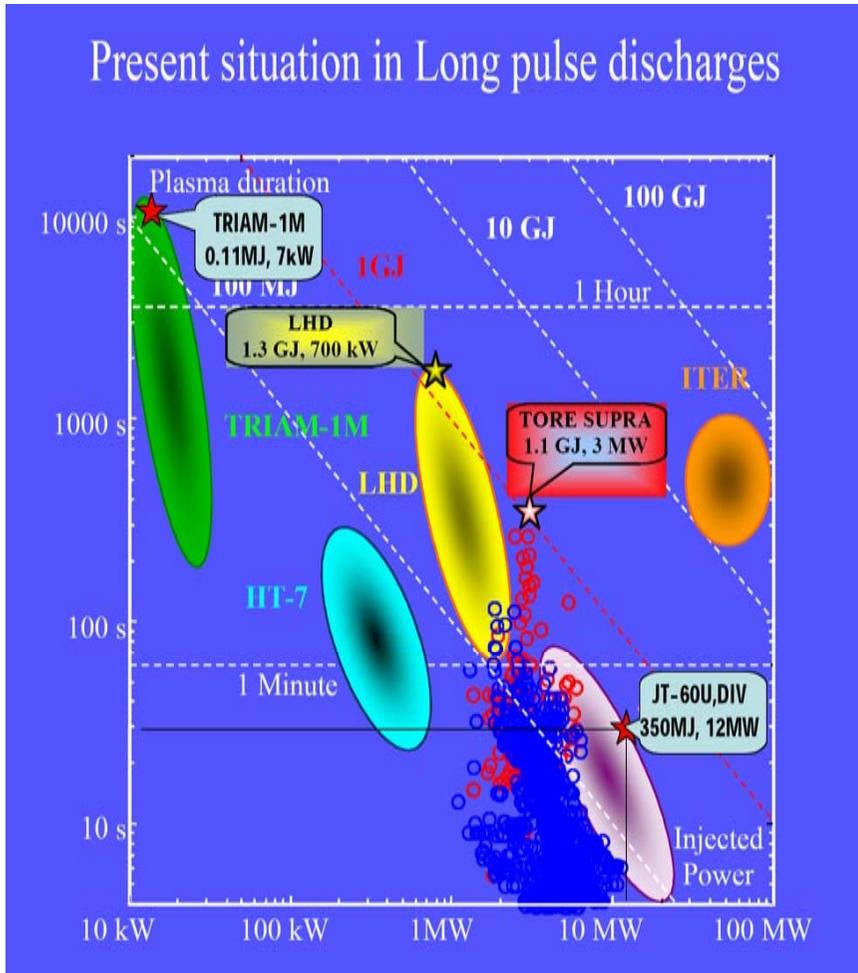
가동 및 가열 실험 성과



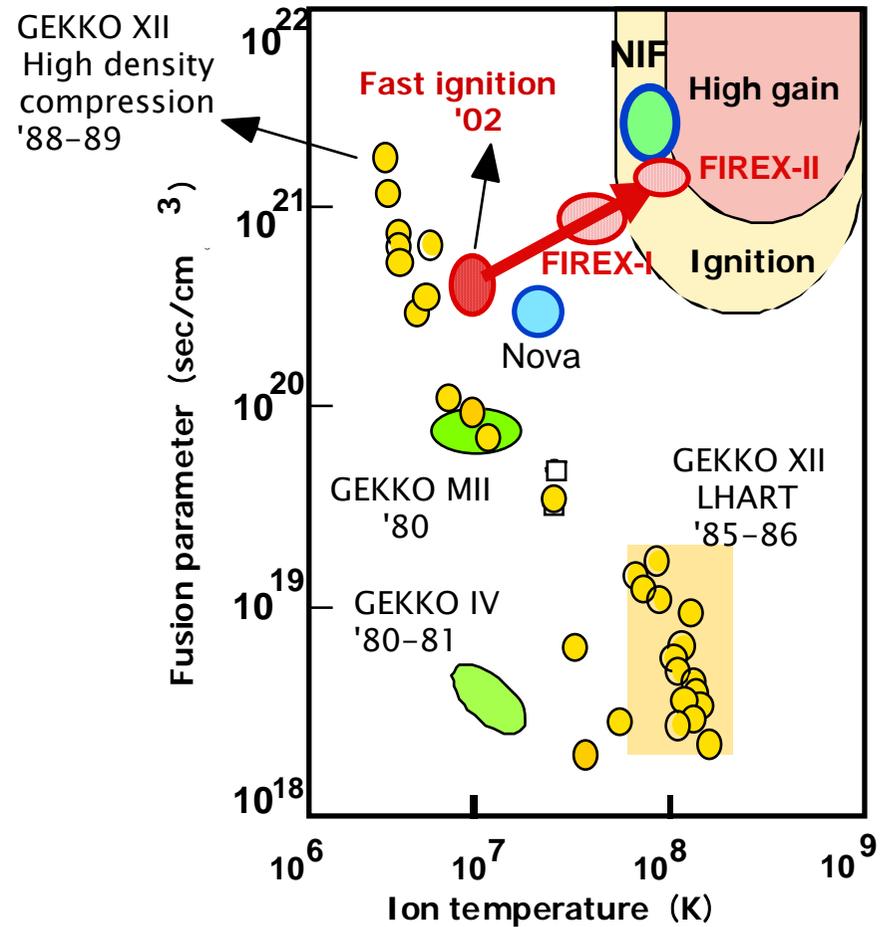
핵융합 출력 성과와 예상



장시간 운전 및 관성 핵융합 개발 상황



Courtesy of NIFS¹⁷⁾



Courtesy of ILE at Osaka University

핵융합 상업로 설계활동

Tokamaks :

UWMAK-I, II, III (1973-77, UW, 2376 MW_{th})
NUWMAK (1979, UW, 5.1/1.13m, 7.2MA, 12T, 2100MW_{th})
STARFIRE (1980, ANL, 7/1.94m, 10.1MA, 11T, 4000MW_{th})
ARIES-I (1991, UCLA, 6.75/1.5m, 10.2MA, 11.3T, 2544MW_{th})

Tandem Mirror :

MARS (1983, LLNL, 3400 MW_{th})

Stellarator :

UWTOR-M (1982, UW, 24.09/4.77m, 4.5T, 4800MW_{th})

Compact Reactors :

CRFPR (1982, LANL, 4.3/1.6m, 18.5MA, 5.2T, 3350MW_{th})
OHTE (1981, GA, 5.91/0.74m, 12.4MA, 11T, 3800MW_{th})
RIGATRON (1981, INESCO, 0.8/0.32m, 16T, 1325MW_{th})

EBT :

EBTR (1981, LANL, 35/1m, 10T, 1214MW_e)

Laser Fusion :

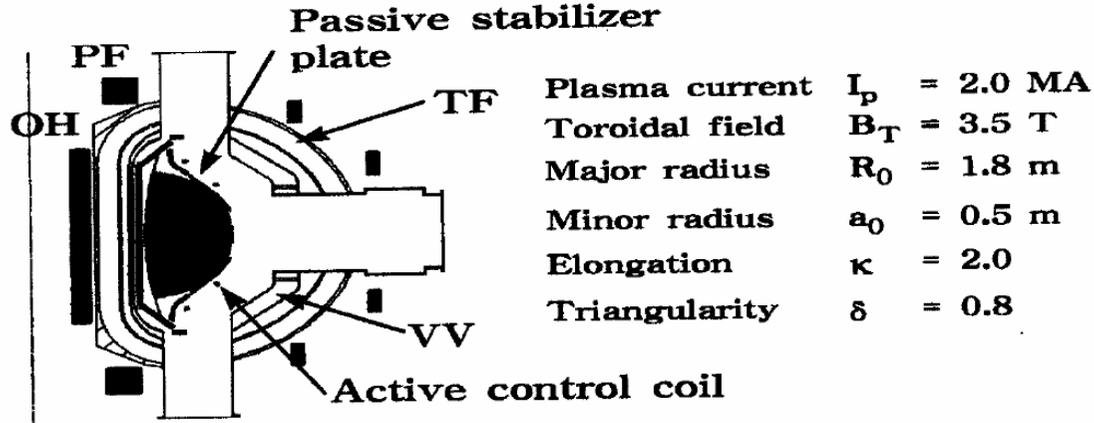
SOLASE (1977, UW, Gas-phase laser, 3340MW_{th})

우리나라 Tokamak 장치

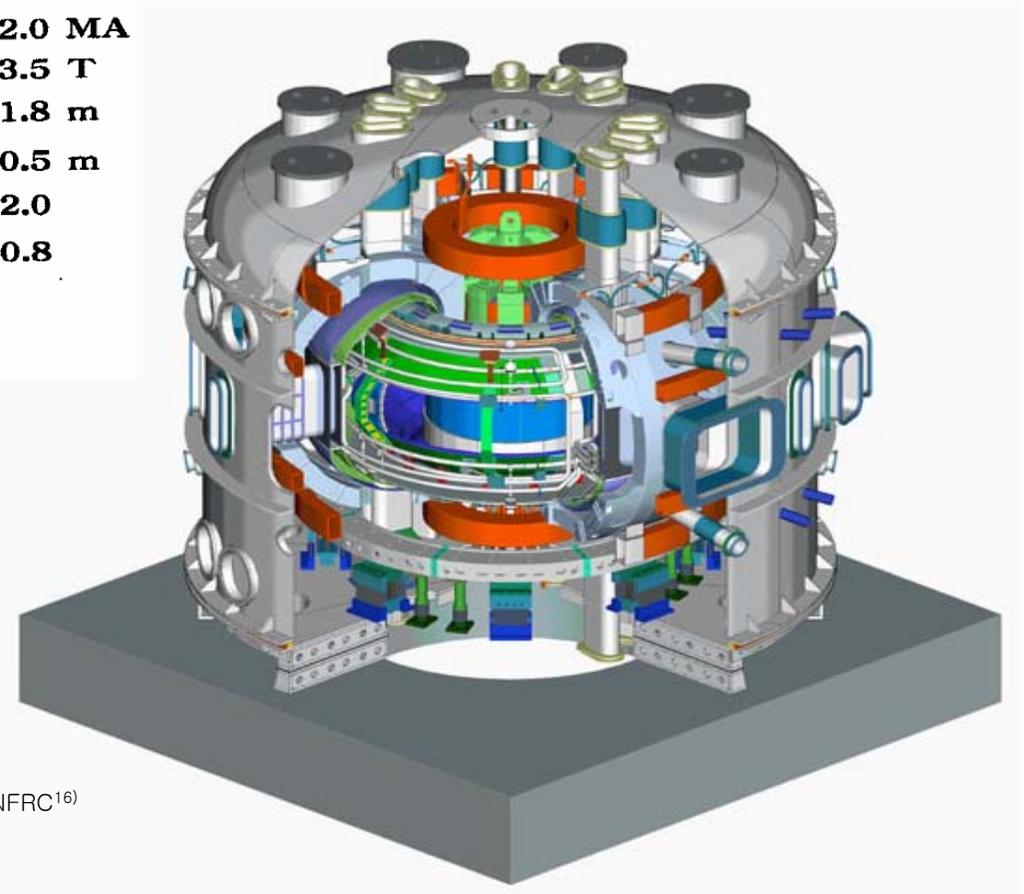
Device	SNUT-79	KAIST-T	KT-1	(KT-2)	KSTAR
R (m)	0.65	0.53	0.27	1.4	1.8
a (m)	0.15	0.15	0.05	0.25	0.5
B (T)	3	10	4	3	3.5
I (MA)	0.12	0.08	0.1	0.5	2.0
t_{pulse} (s)	0.05	0.05	0.1	5	300
<i>Institute</i>	SNU	KAIST	KAERI	KAERI	KBSI
<i>Year started</i>	1979	1990	1986	1993	1995
<i>Status</i>	OH expts. Shut-down in 2000	Remodel of PRETEXT OH expts.	OH expts.	Canceled	Super- conducting To be completed in 2007

KSTAR 토카막

- 주요 제원

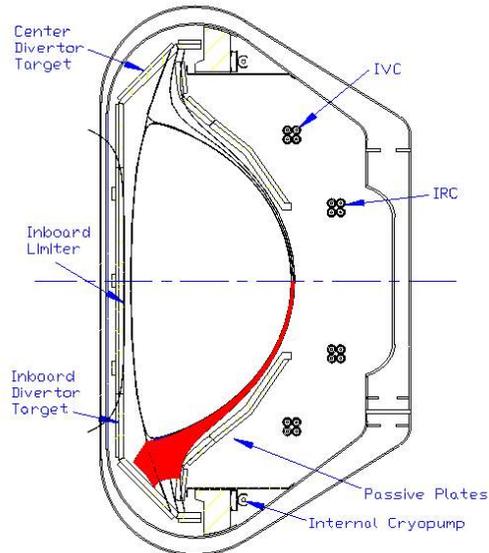


- 조감도



Courtesy of NFRC¹⁶⁾

- 진공용기 단면도

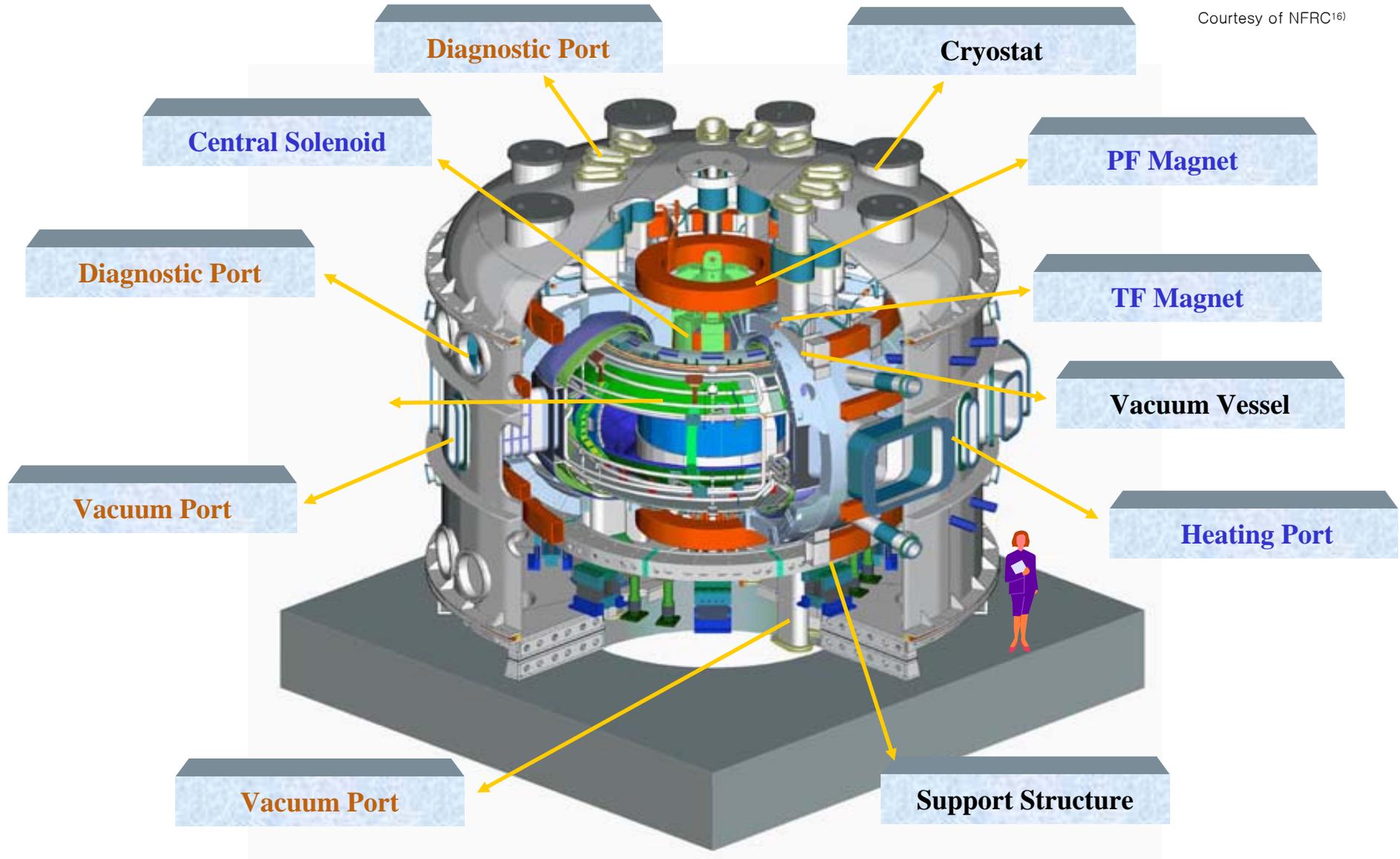


KSTAR

(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)

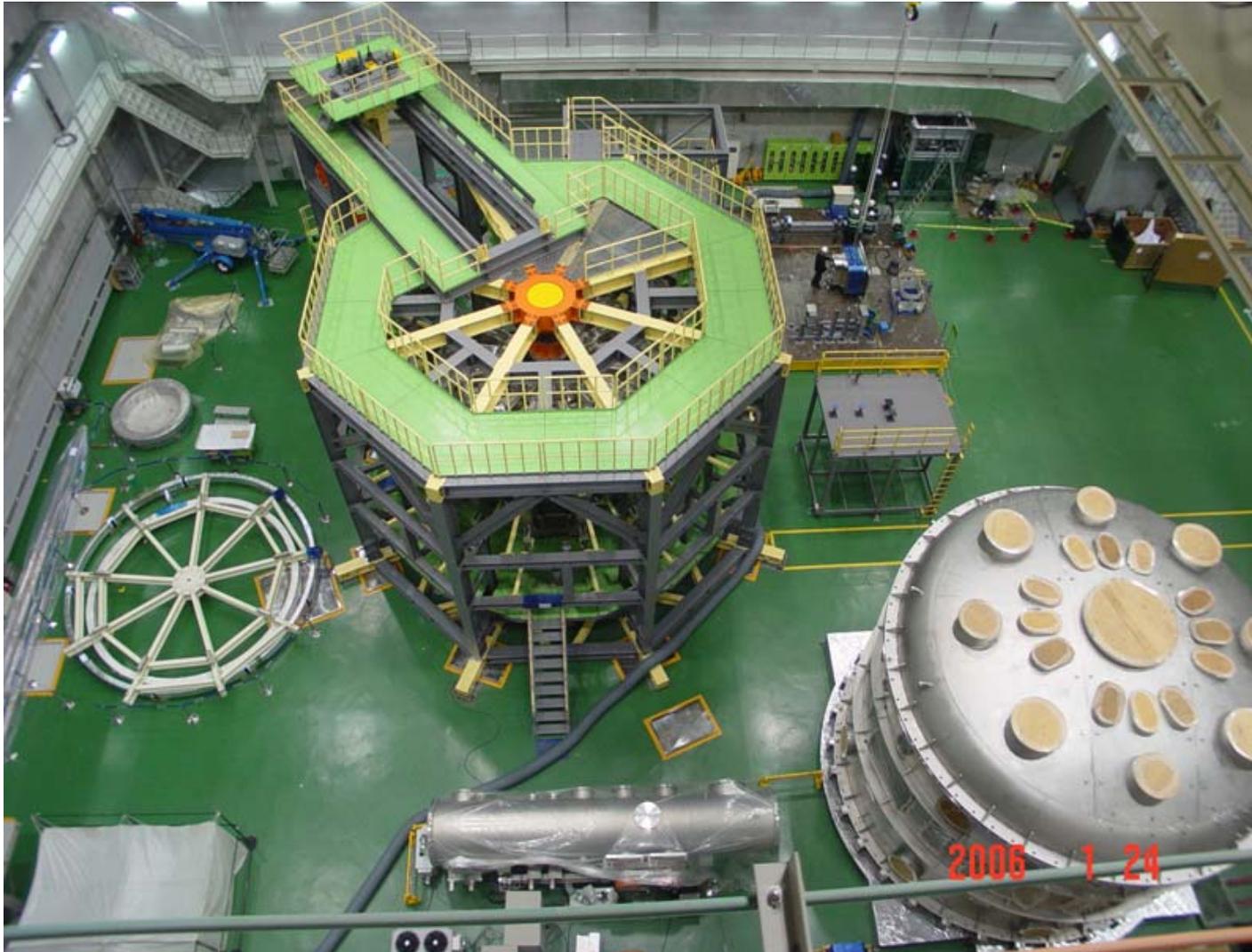
KSTAR 토카막 주장치 구조

Courtesy of NFRC¹⁶⁾

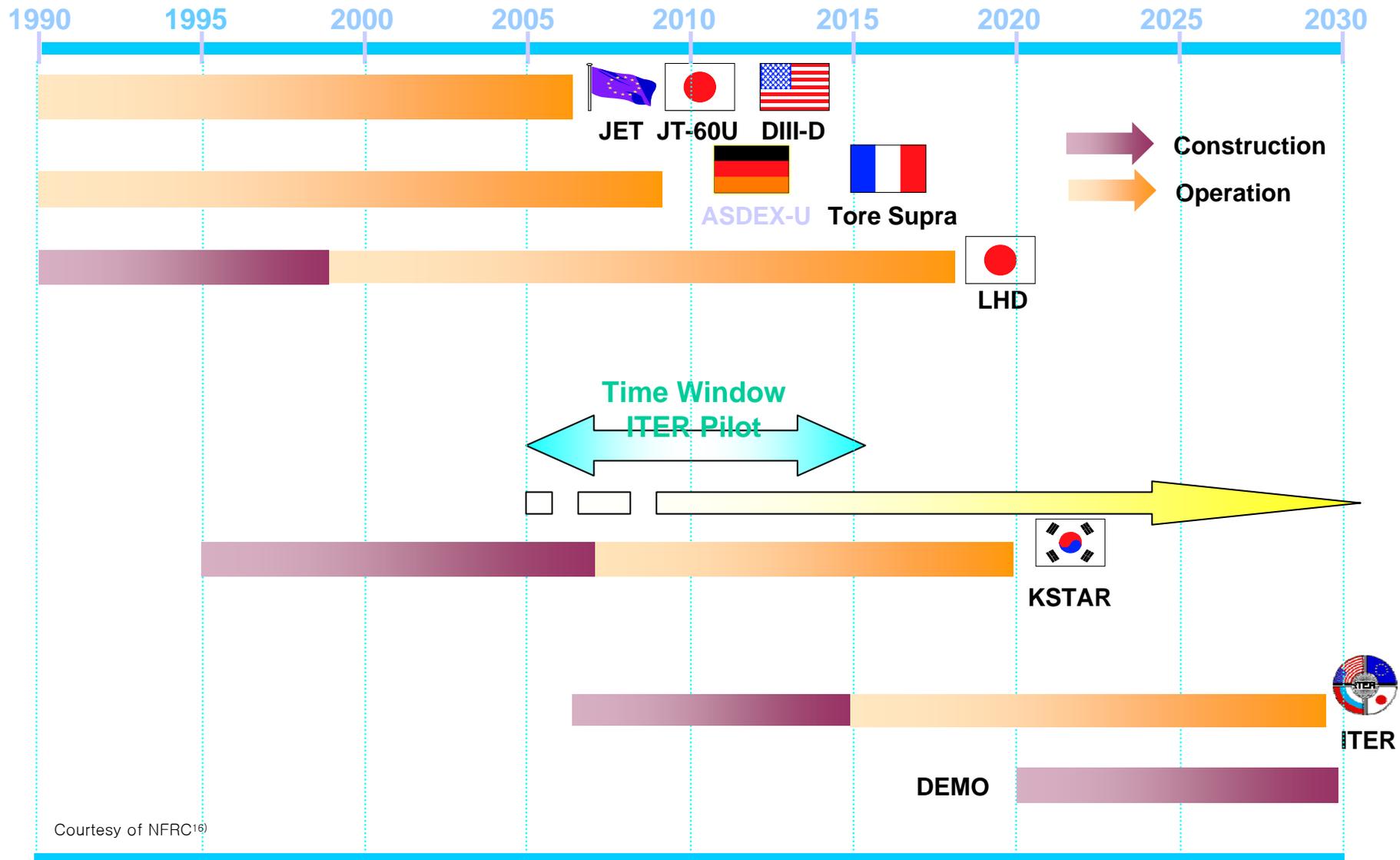


KSTAR 조립 현황 (2006년 1월24일 현재)

Courtesy of NFRC¹⁶⁾



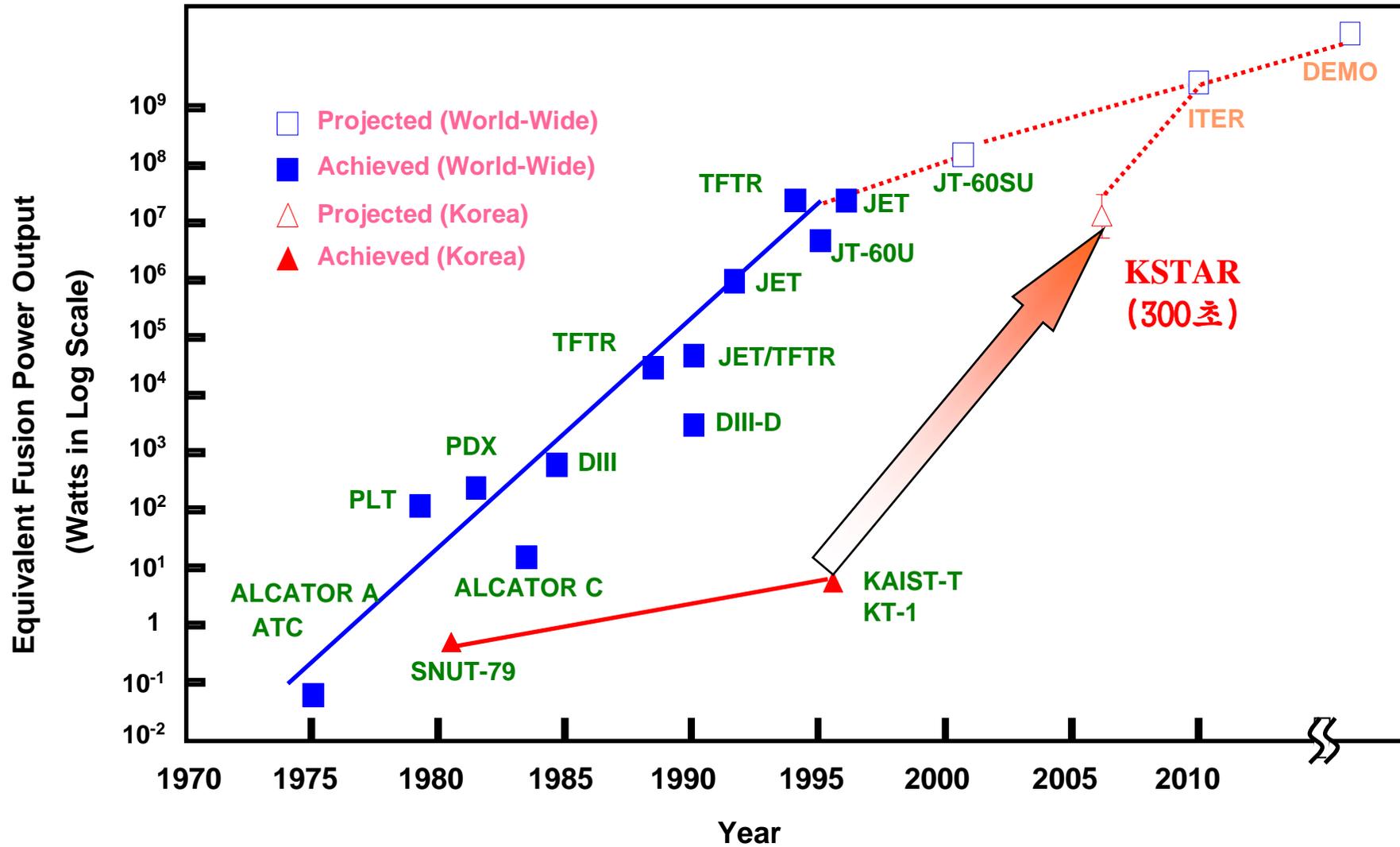
세계 핵융합 개발 일정과 KSTAR 위치



Courtesy of NFRC¹⁶⁾

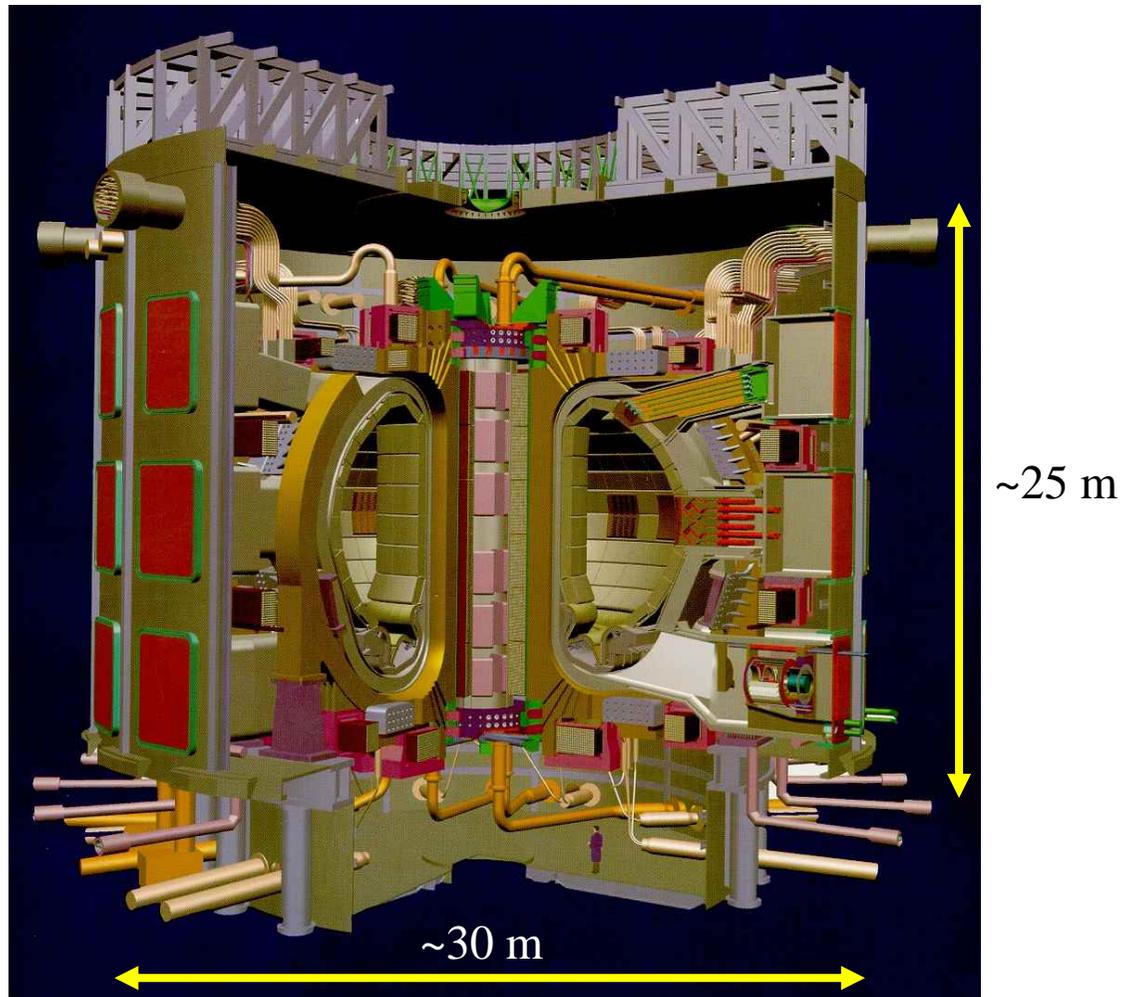
국내 ITER 참여 전략

Courtesy of NFRC¹⁶⁾



ITER (국제핵융합실험로) 토카막

International Thermonuclear Experimental Reactor



Courtesy of ITER, International Organization¹⁹⁾

ITER 개발사업 개요

ITER 사업 목표

- 핵융합 에너지의 평화적 이용목적에 따라 핵융합 발전 상용화를 위한 공학적 실증 실험로 (열출력 **500 MW** 이상) 건설로 과학기술적 실현 가능성을 증명

기술적 목적

- 중수소와 삼중수소 연료로 장시간 운전과 궁극적으로 정상상태의 운전을 목표
- 핵융합로 구현을 위한 첨단기술과 구성 부품들을 통합한 성능 실험
- 핵융합의 안전성과 환경 친화성을 검증

참여 국가

- 1988 – 1998 : 유럽연합(EU), 일본, 러시아, 미국
- 1999 – 2002 : 유럽연합(EU), 일본, 러시아, 캐나다
- 2003 – : 유럽연합(EU), 일본, 러시아, 미국, 중국, 한국 (2006년 인도 추가)

ITER 사업 추진 일정 및 사업비

ITER 추진 경위

- 1985 : US-Russia 정상회담(레이건-고르바초프)에서 ‘핵융합 공동연구개발 추진성명’
- 1988.4 : IAEA 산하에 ITER Council을 구성
- 1988 – 90 : ITER 개념설계(CDA)
- 1991 – 98.7 : ITER 공학설계(EDA)
- 1998.7 – 2001.7 : 비용 절감(50%)을 위한 공학설계 변경으로
ITER-FEAT(Fusion Engineering Advanced Tokamak) 설계 완료
- 2002 : 참여국간 ‘공동이행 협정(안)’ 마련을 위한 협상회의 및 ITER 건설 후보지 신청
(France Cadarache, Spain Vandellos, Japan Rokashomura, Canada Clarington)
- 2005.6.28: 건설 후보지 확정 (France Cadarache)
- 2006년말까지: 공동이행협정(JIA; Joint Implementation Agreement) 체결
및 ‘ITER 국제핵융합에너지개발기구(ILE; ITER Legal Entity)’ 설립
- 2007년부터 8년간 장치 건설 후, 20년간 운전 및 5년간 해체 페로

추정 사업비

- 기투자 설계비: 약 15억 USD
- 추정 건설비: 약 50억 USD
 - 건축토목 등 기반 시설: 10억 USD 유치국 부담
 - 장치 건설비: 40억 USD 참여국간 분담

ITER 총 소요비용

직접 투자비(장치 및 건물)

2755 kIUA = 3.956 US B\$ (CY2003)

단위 kIUA

건설 비용 ~ 3302

직접투자(장치& 건물) 2755

유지 & 보수 477

건설기간 중 연구개발 ~ 70

운전 비용 (1년평균) ~ 188

인건비 60

에너지 소비 ~ 30

연료 ~ 8

유지 & 성능 향상 ~ 90

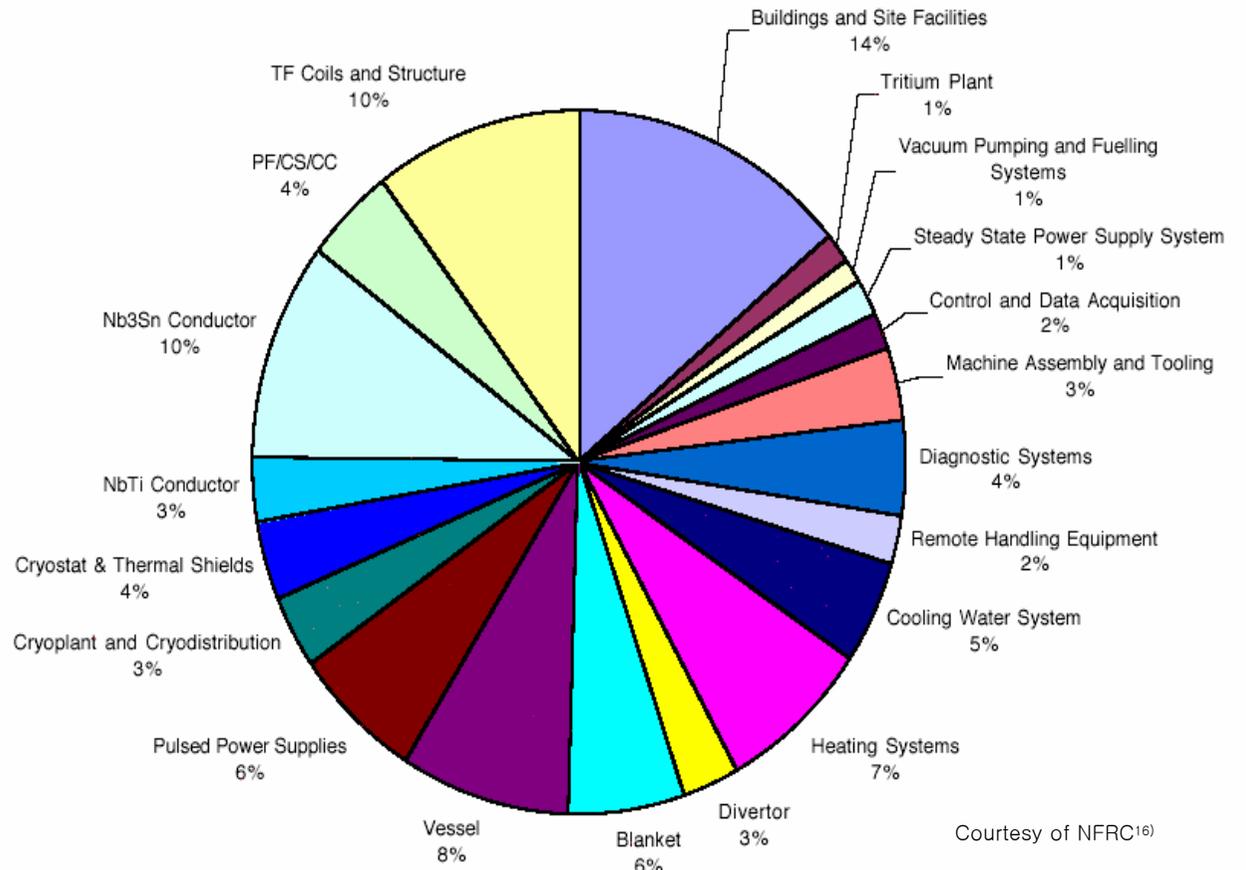
해체 비용 335

총비용 (10년간 운전시) ~ 5517

1 kIUA = 1 US M\$ (CY1998)

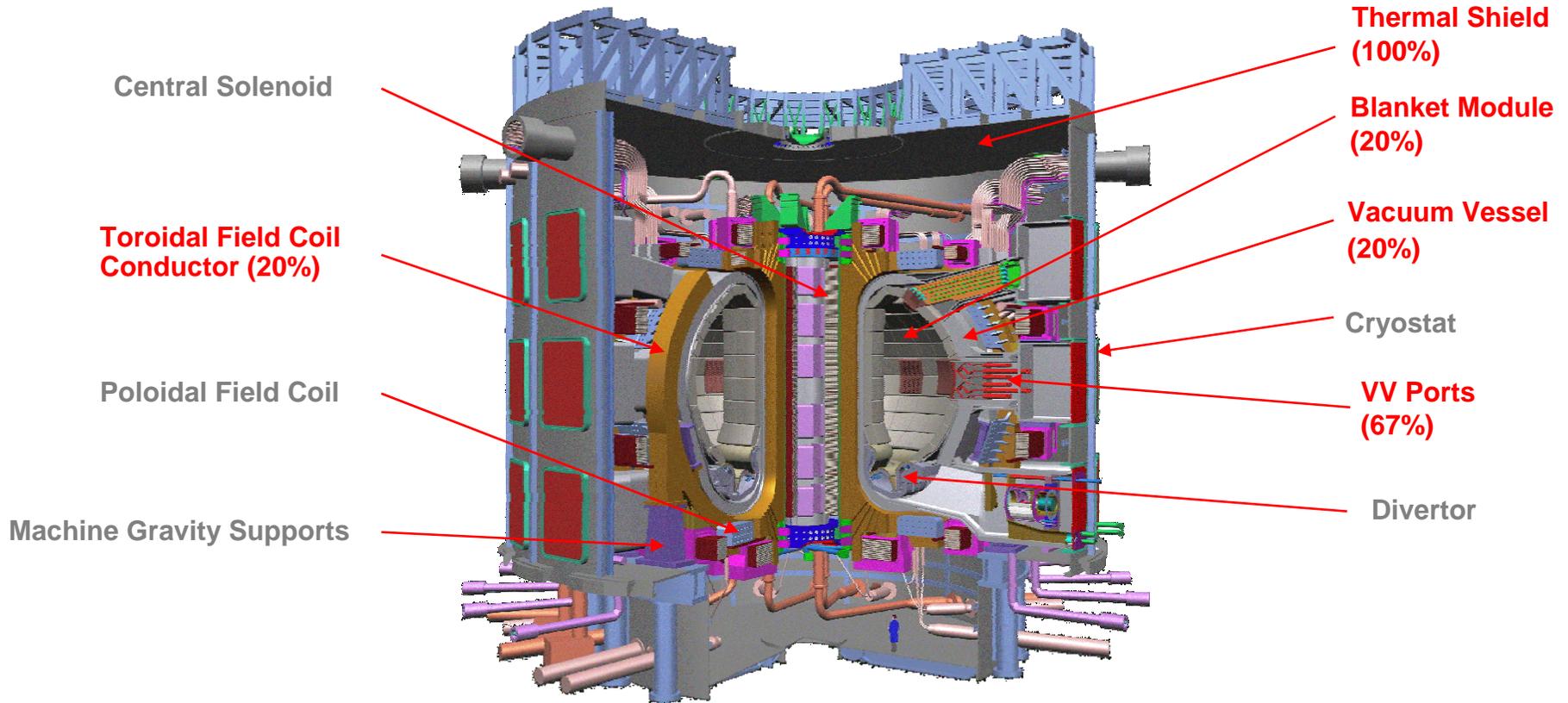
= 1.436 US M\$ (CY2003)

5517 kIUA = 7.9 US B\$ (CY 2003)



Courtesy of NFRC⁽⁶⁾

한국의 조달 예정 품목



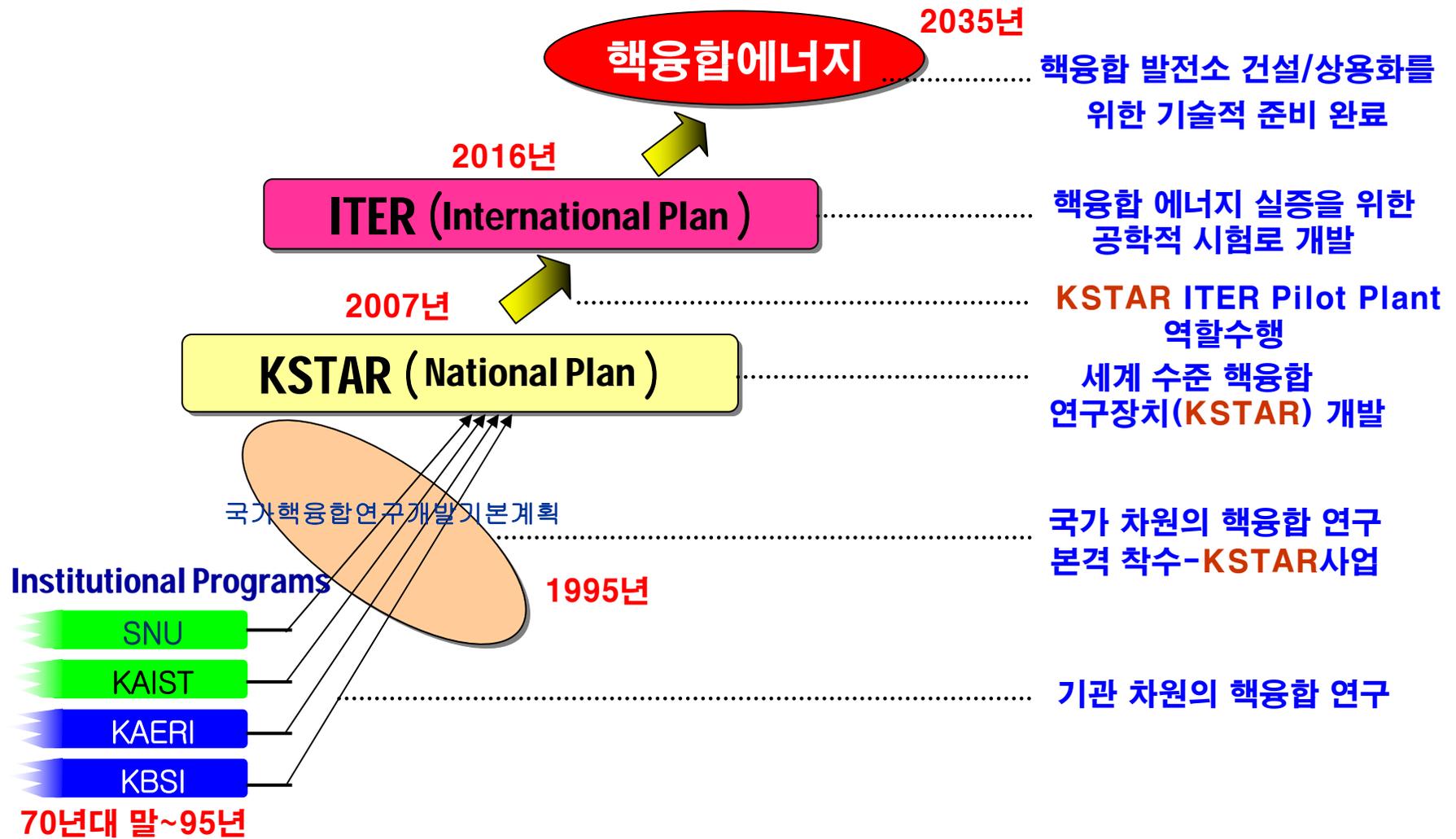
Courtesy of NFRC¹⁶⁾

Assembly Tooling (100%)
 Tritium Storage & Delivery (88%)
 Power Supply-AC/DC Converters (65%)
 Diagnostics (4%)

현물조달분 (총 9개 품목)
 : 270 kIUA (4700억*)
 현금조달분 : 32 kIUA (550억)

『국가핵융합에너지개발 기본계획』 전략 및 목표

Courtesy of NFRC¹⁶⁾



국가 핵융합에너지개발 목표

Courtesy of NFRC¹⁶⁾

2040년대 한국형 핵융합발전소 건설을 위한
핵융합에너지 상용화 기술 확보

● **3단계(2021~2035)**
한국형 핵융합발전소 건설능력 확보

- ITER 운영 및 부품시험을 통한 핵융합로 핵심 부품 개발
- DEMO(실증로) 건설 주도하여, 전기생산 실증 실험
- 2035년까지 한국형 핵융합발전소 공학설계 완성

● **2단계(2011~2020)**
핵융합에너지 기술 선진 강국 진입

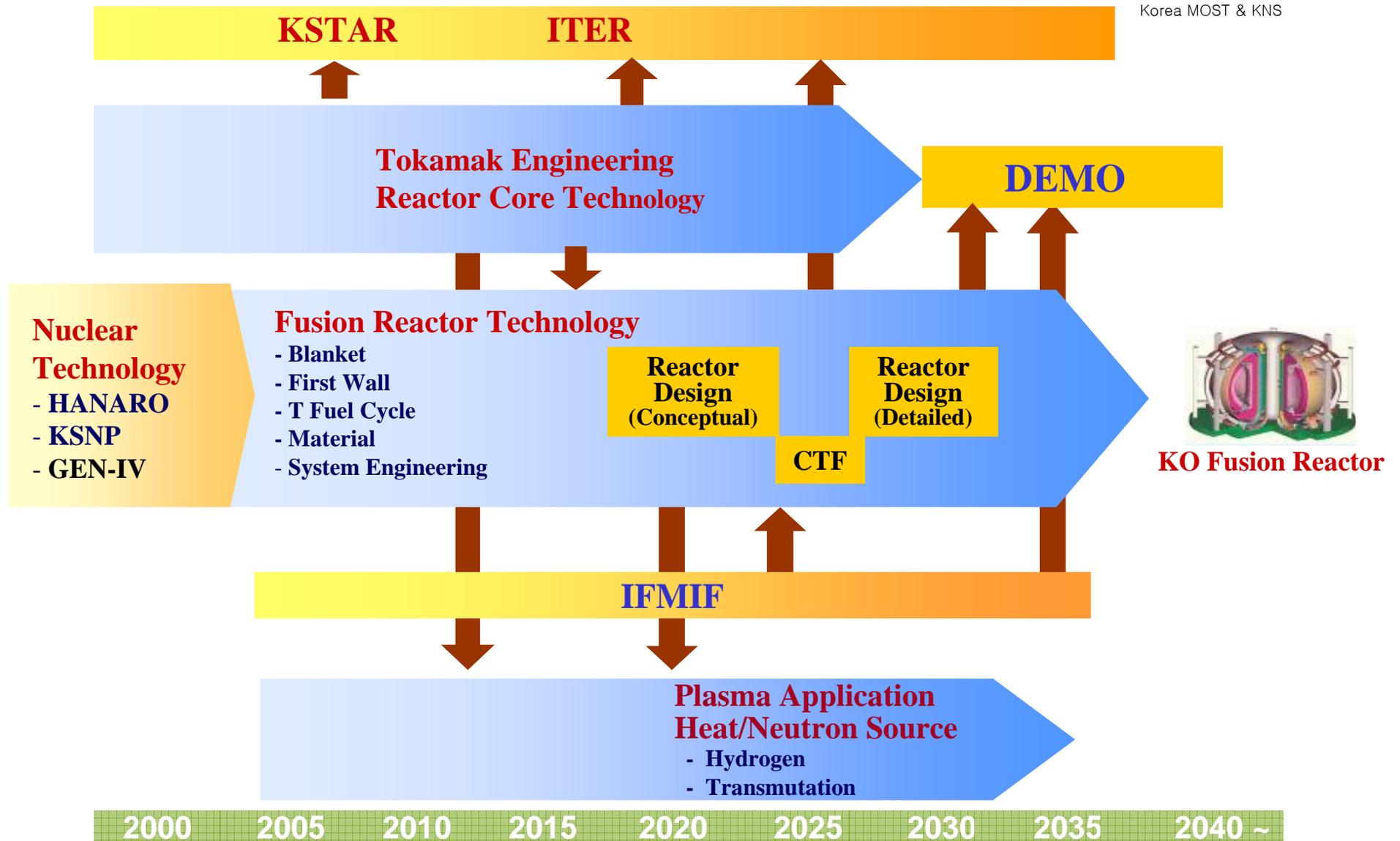
- KSTAR장치의 성능향상
- 2016년부터 ITER 운영참여로 핵융합로 운영 및 제어기술 확보
- DEMO(실증로)공학설계 및 핵융합로 핵심 공학기술 기반 확보
- 최첨단 파급기술의 산업화를 통한 신산업 창출

● **1단계(2006~2010)**
핵융합에너지 개발 추진기반 확립

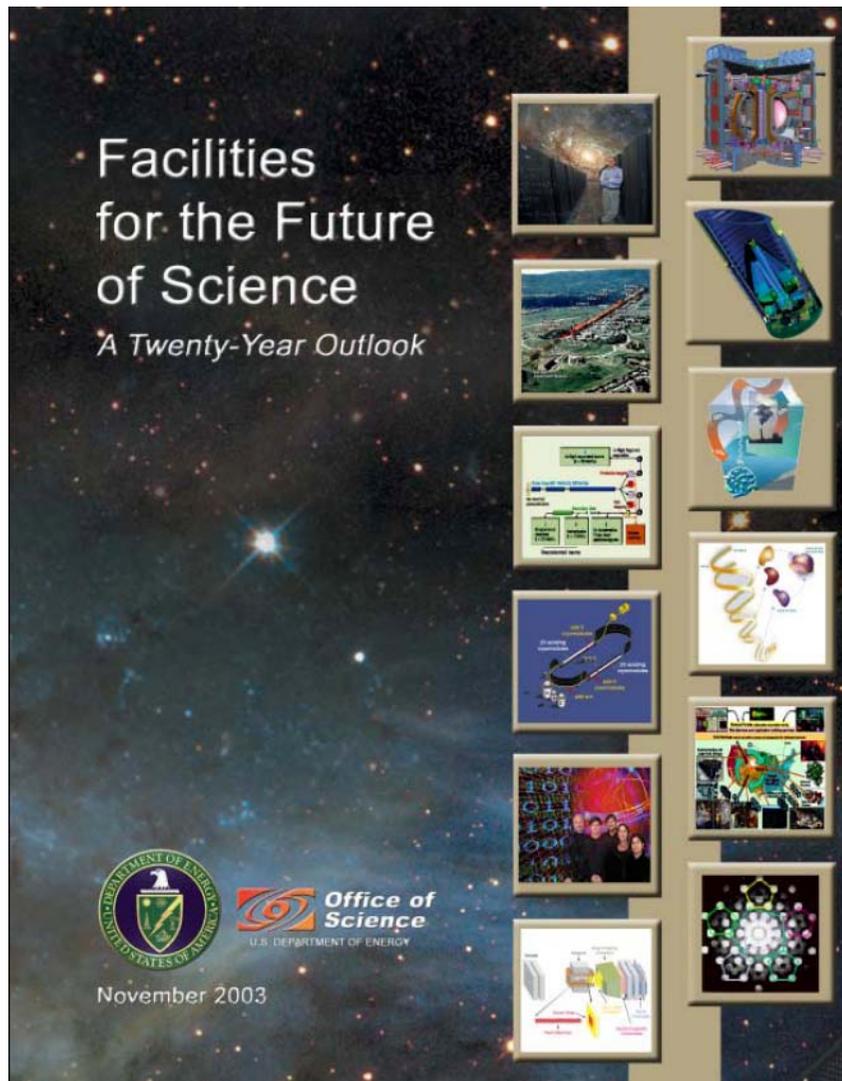
- 2007년 KSTAR 장치 완공 및 운영 (핵융합 연구기반 확립)
- ITER 장치 건설 참여로 핵융합로 장치기술 습득
- 블랭킷 등 핵융합로 공학기술 개발 착수
- 핵융합에너지 개발 추진체계 구축

Fusion Technology Road Map (NuTRM)

From NuTRM Report (2005.6)
Korea MOST & KNS



미국의 향후 20년 미래 과학기술



From US DOE Report (2003)

Facilities for the Future of Science: A Twenty-Year Outlook

Contents

A Message from the Secretary	3
Steward of the World's Finest Suite of Scientific Facilities and Instruments	5
Introduction	8
Prioritization Process	9
A Benchmark for the Future	10
The Twenty-Year Facilities Outlook—A Prioritized List	11
Facility Summaries	14
Near-Term Priorities	14
Priority: 1 ITER	14
Priority: 2 UltraScale Scientific Computing Capability (USSCC)	15
Priority: Tie for 3 Joint Dark Energy Mission (JDEM)	16
Linac Coherent Light Source (LCLS)	16
Protein Production and Tags	17
Rare Isotope Accelerator (RIA)	18
Priority: Tie for 7 Characterization and Imaging of Molecular Machines	19
Continuous Electron Beam Accelerator Facility (CEBAF) 12 GeV Upgrade	20
Energy Sciences Network (ESnet) Upgrade	20
National Energy Research Scientific Computing Center (NERSC) Upgrade	21
Transmission Electron Achromatic Microscope (TEAM)	22
Priority: 12 BTev	23
Mid-Term Priorities	24
Priority: 13 Linear Collider	24
Priority: Tie for 14 Analysis and Modeling of Cellular Systems	24
Spallation Neutron Source (SNS) 2-4MW Upgrade	25
Spallation Neutron Source (SNS) Second Target Station	26
Whole Proteome Analysis	27
Priority: Tie for 18 Double Beta Decay Underground Detector	27
Next-Step Spherical Torus (NSST) Experiment	28
Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) II	29
Far-Term Priorities	30
Priority: Tie for 21 National Synchrotron Light Source (NSLS) Upgrade	30
Super Neutrino Beam	30
Priority: Tie for 23 Advanced Light Source (ALS) Upgrade	31
Advanced Photon Source (APS) Upgrade	32
eRHIC	32
Fusion Energy Contingency	33
High-Flux Isotope Reactor (HFIR) Second Cold Source and Guide Hall	34
Integrated Beam Experiment (IBX)	35

자장핵융합 과학기술 개발 요약(1)

• 과거 수행 연구개발

- 플라즈마 입자 궤적운동 및 충돌 효과
- 플라즈마 평형 및 수송 현상
- 플라즈마 불안정성 및 가둠
- 플라즈마의 중성빔 및 고주파에 의한 가열 및 전류구동
- 경계 플라즈마 물리 및 관련 장치
- 불순물 제어 연구

• 현재 도전 연구개발

- 고압 정상상태 운전에서 플라즈마 비이상 수송 및 난류 현상
- H-mode 현상, Enhanced reverse shear 관련 물리
- Advanced Tokamak Operation

자장핵융합 과학기술 개발 요약(2)

- 미래에 해결할 차기 연구개발

- 비이상 에너지 손실 문제 해결을 위한 플라즈마 수송과 난류 해석
- 점화조건에서 D-T 플라즈마의 안정 가둠
- 입자 자체가열과 안정 연소제어
- Divertor 내에서 고에너지 입자와 출력 취급
- 연속 전류구동과 disruption 제어
- 사용후 연료 중 헬륨 재 제거
- 장수명, 저방사화 구조재 개발
- 대형 초전도 전자석
- 삼중수소 증식 및 Blanket
- 새로운 혁신적인 자장가둠 개념 창안
- 핵융합 발전용 최적 자장가둠 장치 결정