

History of ITER in Korea

Hyeon Gon Lee
Korea Institute of Fusion Energy

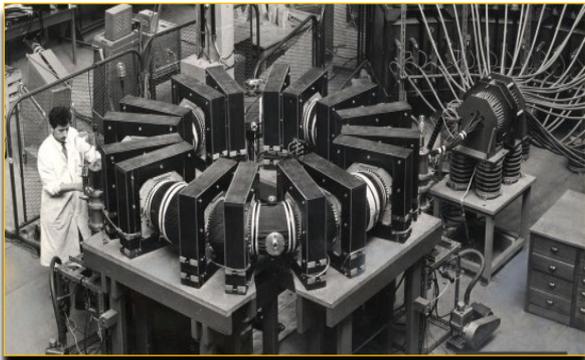
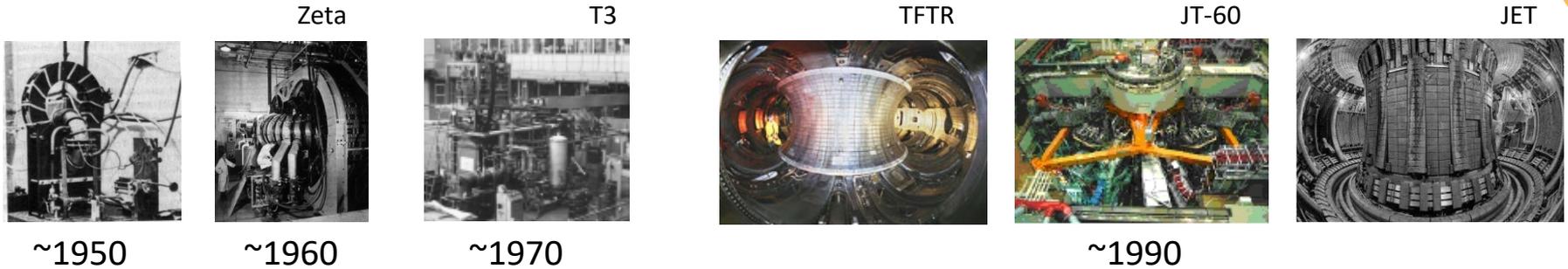
KFCC Workshop
Gyeongju, 12-14 November 2021



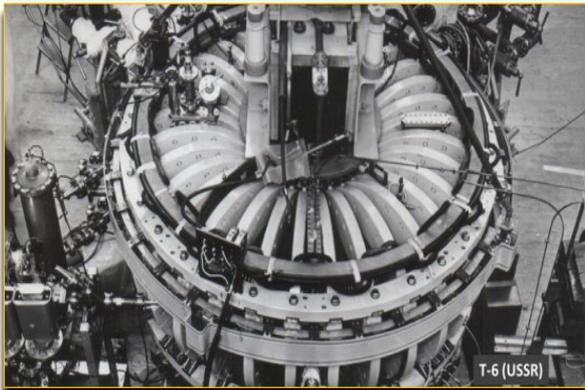
한국핵융합에너지연구원
KOREA INSTITUTE OF FUSION ENERGY

1. Fusion Energy Research 역사
2. ITER 사업 역사
3. ITER 한국사업 역사
4. ITER 사업 현황
5. 대형 R&D 사업 국제협력 Q&A

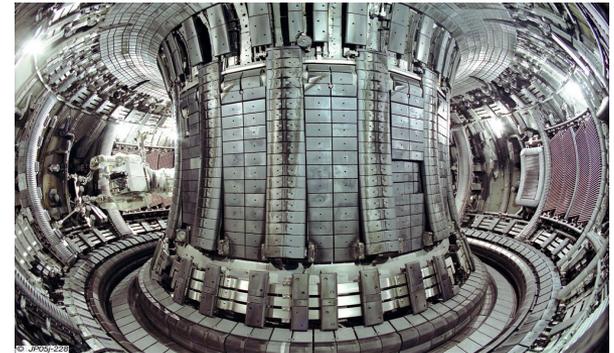
Constant R&D Progress for 60 years



TA-2000,
France,
1957



T-6, USSR,
1965



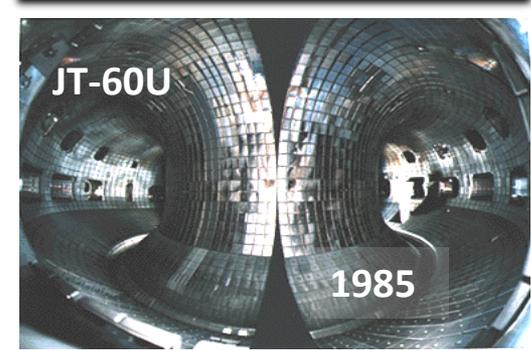
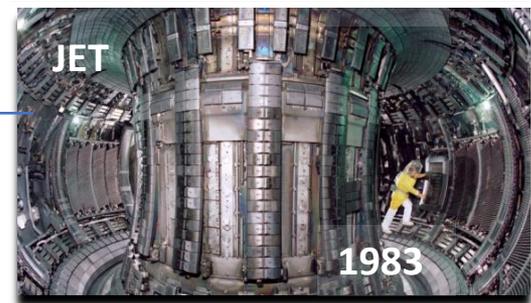
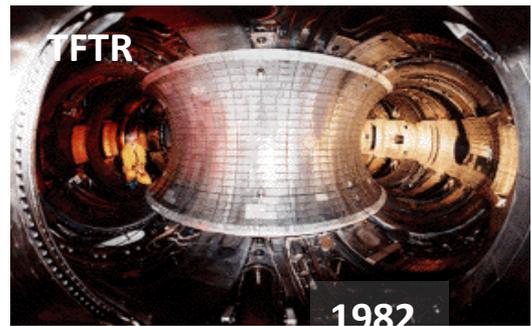
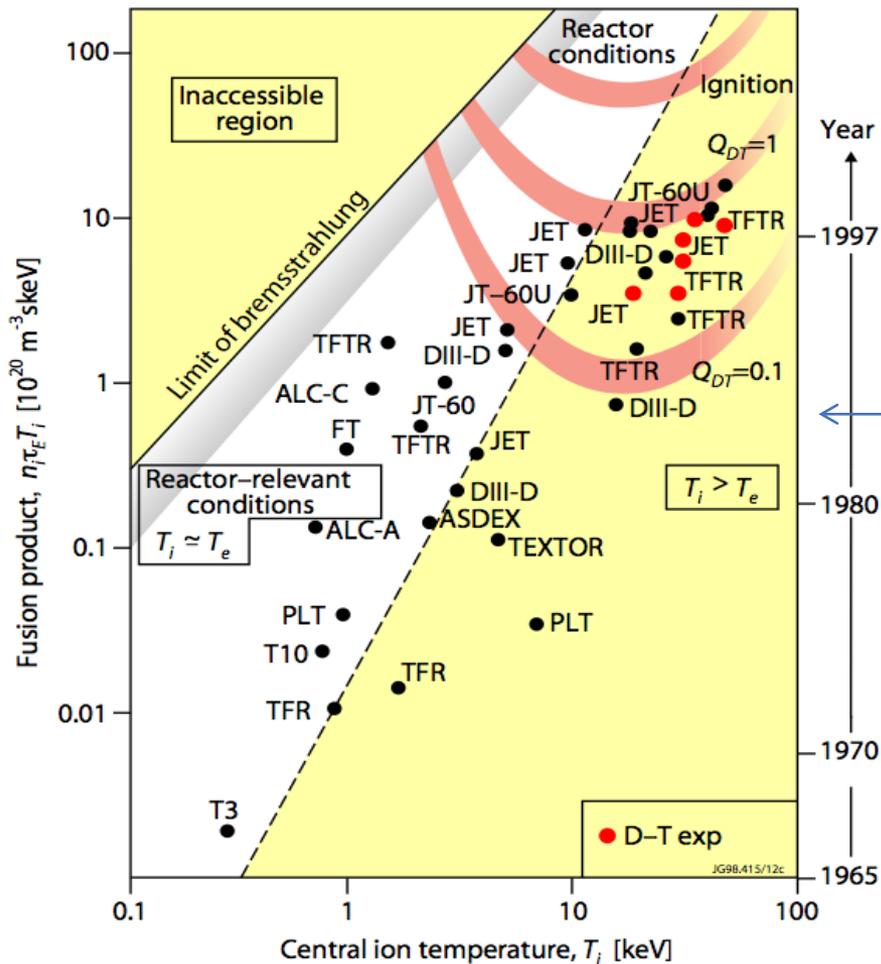
JET,
EU,
1984



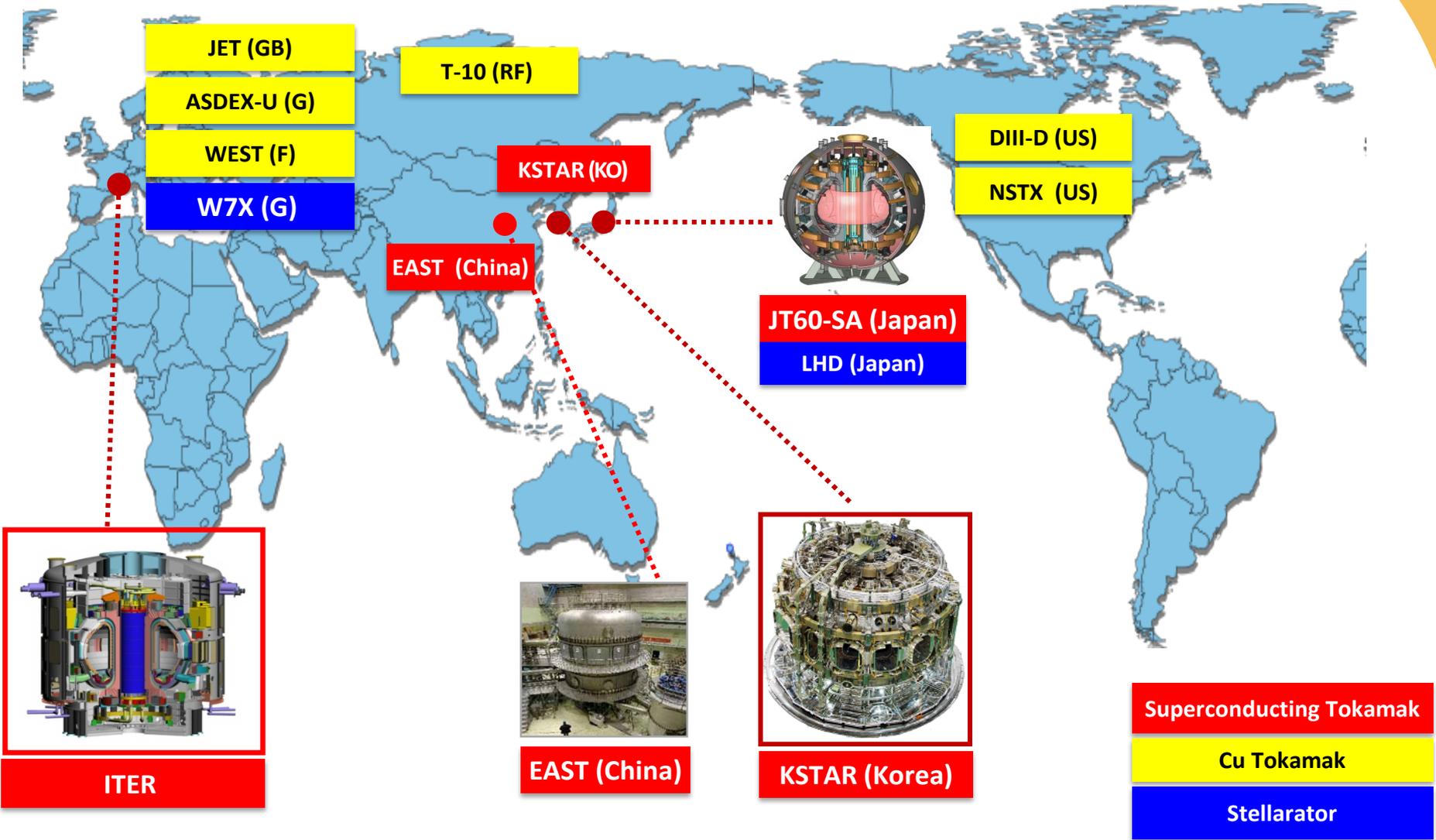
KSTAR,
Korea,
2008

Tokamak Research

- 1980s - Large tokamaks come into operation: JET (EU), TFTR (US), and JT-60U (JA)



세계 핵융합 연구장치



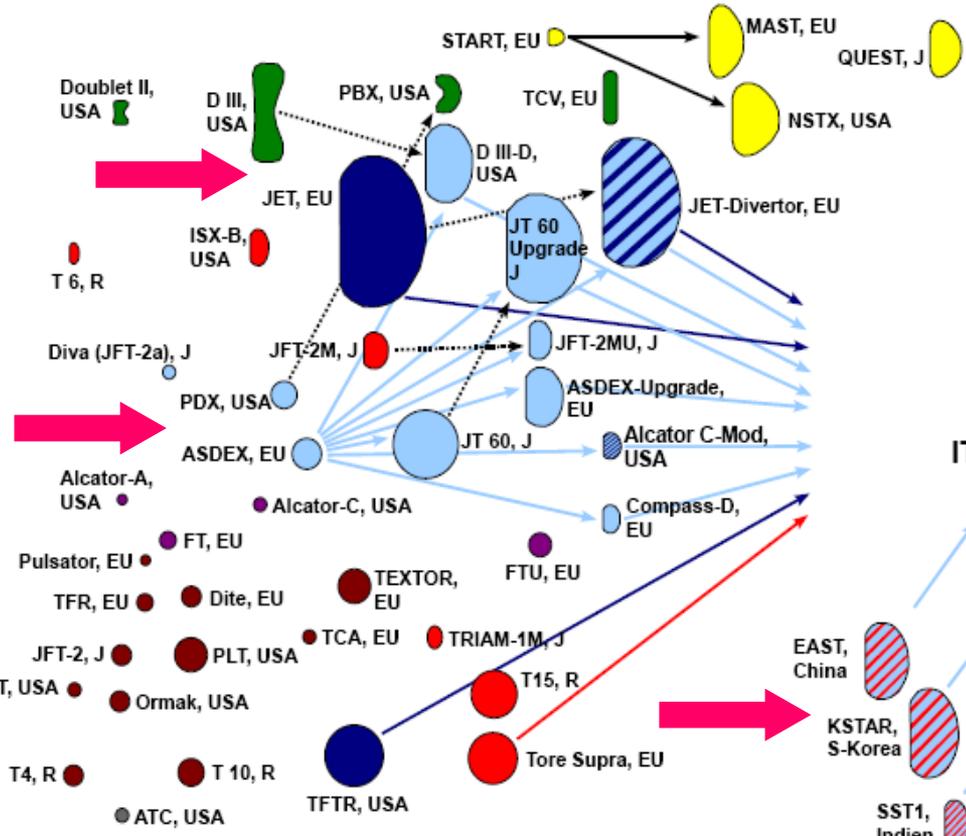
핵융합 연구와 ITER 사업

◆ 20th Century: US-EU-RF-JA lead fusion studies:
As a result, the fusion research reached on the final demonstration to assess the scientific and technological feasibility of fusion energy realization.

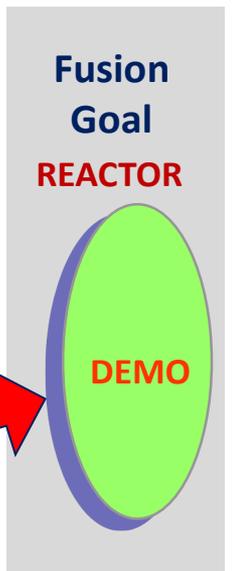
ITER Project:
International research project in participation of world leading scientists & engineers

By K. Lackner

- Spherical tokamaks
- Strongly shaped
- Divertor
- High field
- Superconducting
- Compression
- DT operation



ITER:
 • elongierter (D-förmiger) Querschnitt
 • Divertor
 • Supraleitung
 • Tritium-Betrieb



1. Fusion Energy Research 역사
- 2. ITER 사업 역사**
3. ITER 한국사업 역사
4. ITER 사업 현황
5. 대형 R&D 사업 국제협력 Q&A

Historical Background

- ITER was seen by the USA and the Soviet Union as a way to maintain **east-west scientific collaboration** without jeopardising defence or industrial secrecy.
 - It is believed that ITER has started by the US-USSR summit meeting. ⇒ Politically true but scientifically not accurate.



- ITER is followed by **many years of scientific research**, on the best way to harness fusion energy, which has culminated in the large tokamak experiments such as JET/TFTR with 16/10 MW of fusion power and JT-60 with 520 M°C.
- 1975~1980's: expanding phase from medium to large tokamaks, good days for international **competition and cooperation**.
 - There had been preceding efforts toward international cooperation called **INTOR** under the **IAEA Joint design study** (methodology) of fusion reactors by international collaboration, continued for almost 10 years **(1978-1987) until the start of ITER**.
 - However, the next generation machine in each country is still **within a domestic program**, INTOR-J, INTOR-US etc., JET in EC, and JT-60U in Japan, etc.
 - FER (Fusion Experimental Reactor) program was the main line of activity.

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor)



November 1985

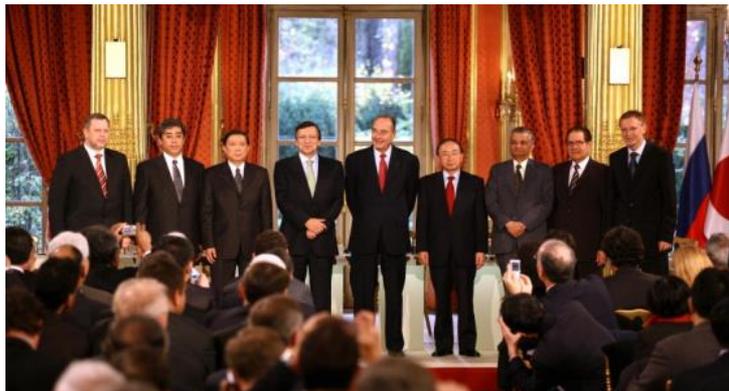
At the Geneva Summit in 1985, President Reagan and General Secretary Gorbachev give a decisive political push to an international effort to develop fusion energy...

...“as an inexhaustible source of energy **for the benefit of mankind**” ...



28 June 2005

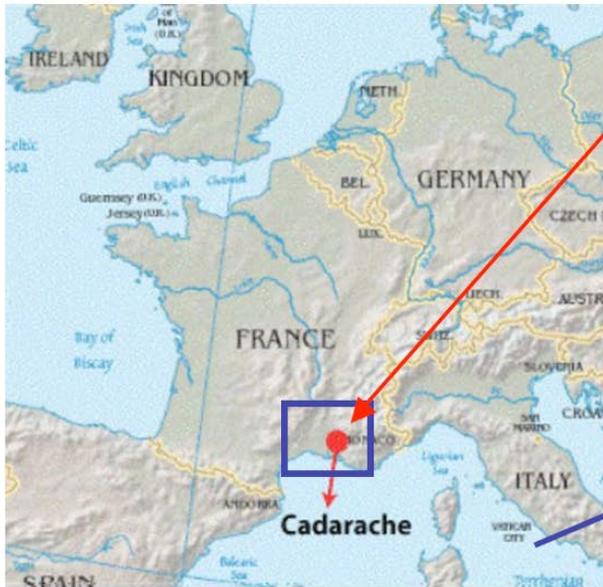
The ITER Parties unanimously agreed to build ITER on site proposed by Europe.



21 November 2006

On November 21, 2006, the ITER Agreement was signed at the Elysee Palace in Paris by the seven Parties.

Itinerary of ITER Site



ITER Site

— = Itinerary of ITER Components



- **Worldwide collaboration since 1988 under IAEA**
 - Soviet Union, USA, Japan, European Union
- **Conceptual design (CDA) completed in 1991**
- **Detailed engineering design (EDA) finalized in 2001**
- **Negotiations among the Parties completed in 2006**
 - USA rejoined in 2003, having left in 1999.
 - China and Korea joined in 2003.
 - Selection of Cadarache, France, as the construction site in June 2005.
 - India joined in December 2005.
 - Agreement initialed on 24 May 2006.
 - **Signature on 21 November 2006.**
 - Ratification to be completed in 2007.



ITER 사업 추진 경과

1988년 4월

- ITER 사업 출범 (국제원자력기구(IAEA) 산하에 ITER 이사회 구성)
※ 1985년 미·소 정상회담 "핵융합 연구개발 추진에 관한 공동성명" 채택

2001년 7월

- ITER 공학설계단계 완료 (최종설계 보고서 FDR 발간)

2003년

- 미국(1월) 재가입, 중국(1월) 및 한국(6월) ITER 가입

2005년 6월

- ITER 건설부지 확정 (프랑스 카다라쉬)

2005년 12월

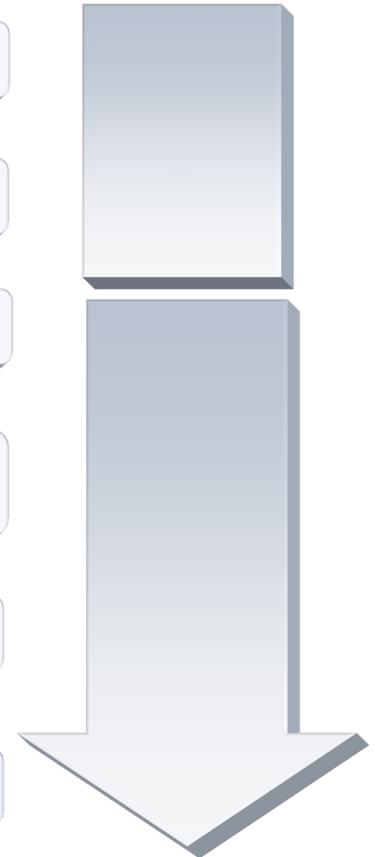
- ITER 공동이행협정 협상 완료 ('05.12, 제주)
- 참여국간 비용분담 및 조달품목 할당 확정, 인도 가입

2006년 11월

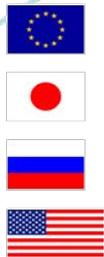
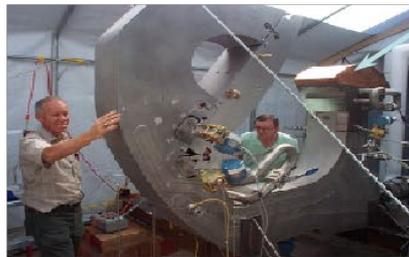
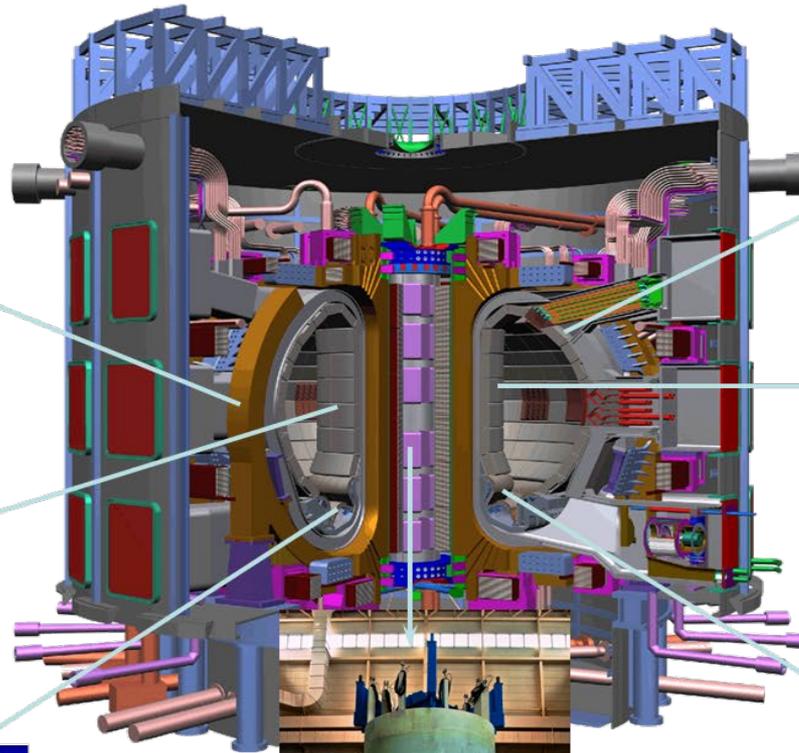
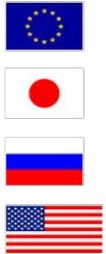
- ITER 공동이행협정(JIA) 서명 ('06.11.21, 파리)

2007년 10월

- ITER 공동이행협정(JIA) 발효 및 ITER 기구 공식 발족 ('07.10.24)



R&D during CDA & EDA (1988~2001)



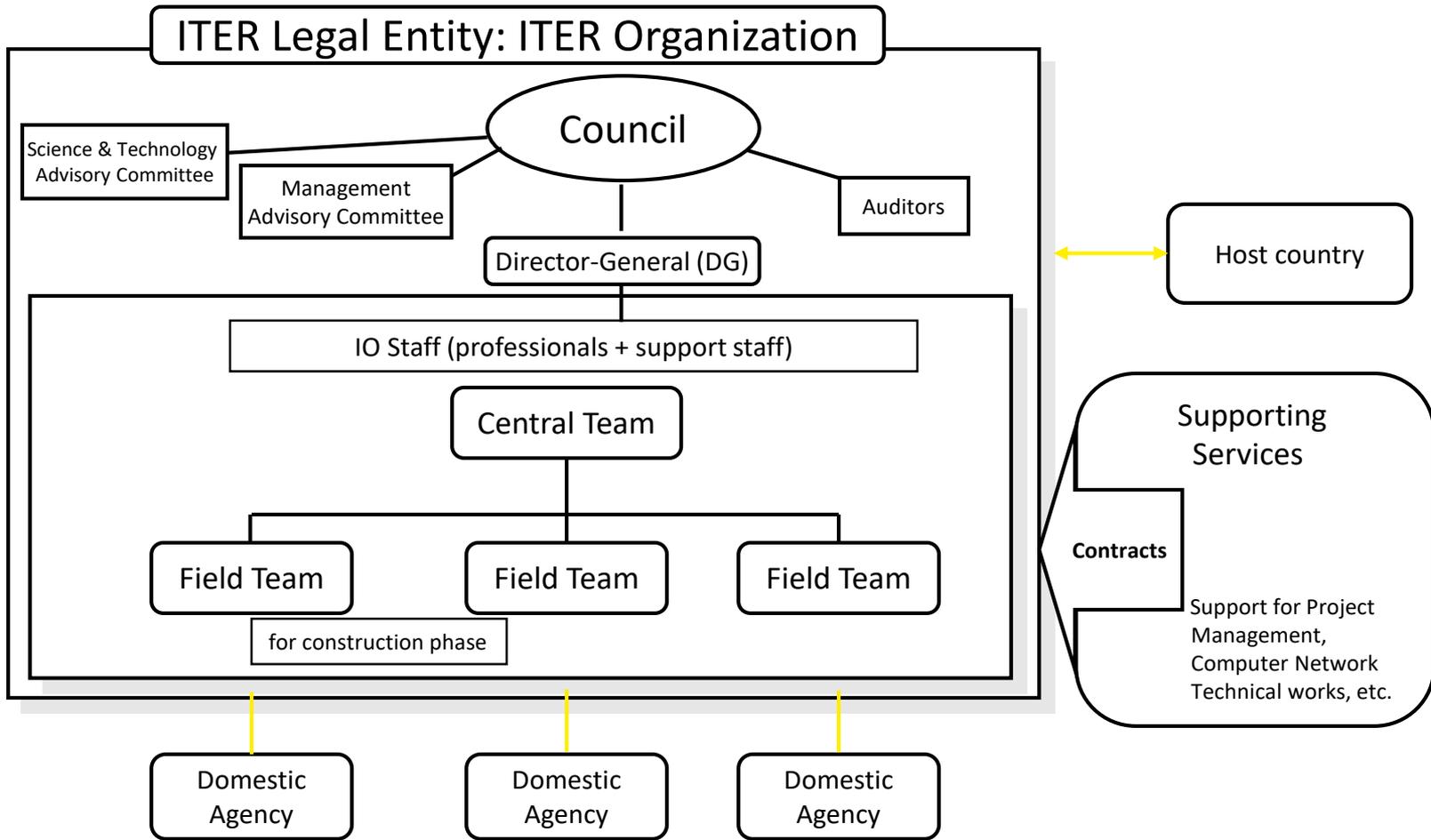
ITER Design during CDA & EDA (1988~2001)

- ① **Conceptual Design Activities (CDA) : '88.04. ~ '90.12. : “프로젝트 정의 및 디자인”**
 - 장치의 기술적 성격 정의 및 개념 설계 : **about 10 person for joint work at IPP Garching (독)**
 - 소규모 연구개발 수행 (small scale R&D)
 - 장치의 실현을 위한 미래 연구개발 및 일정, 비용, 인적 자원 등 정의
 - 설계의 안정성 및 환경적 분석 실행 및 건설부지의 기술적 성격 정의
 - 설계 주체 : ITER Council (International Team, Home Teams) (**미국, EU, 러시아, 일본**)

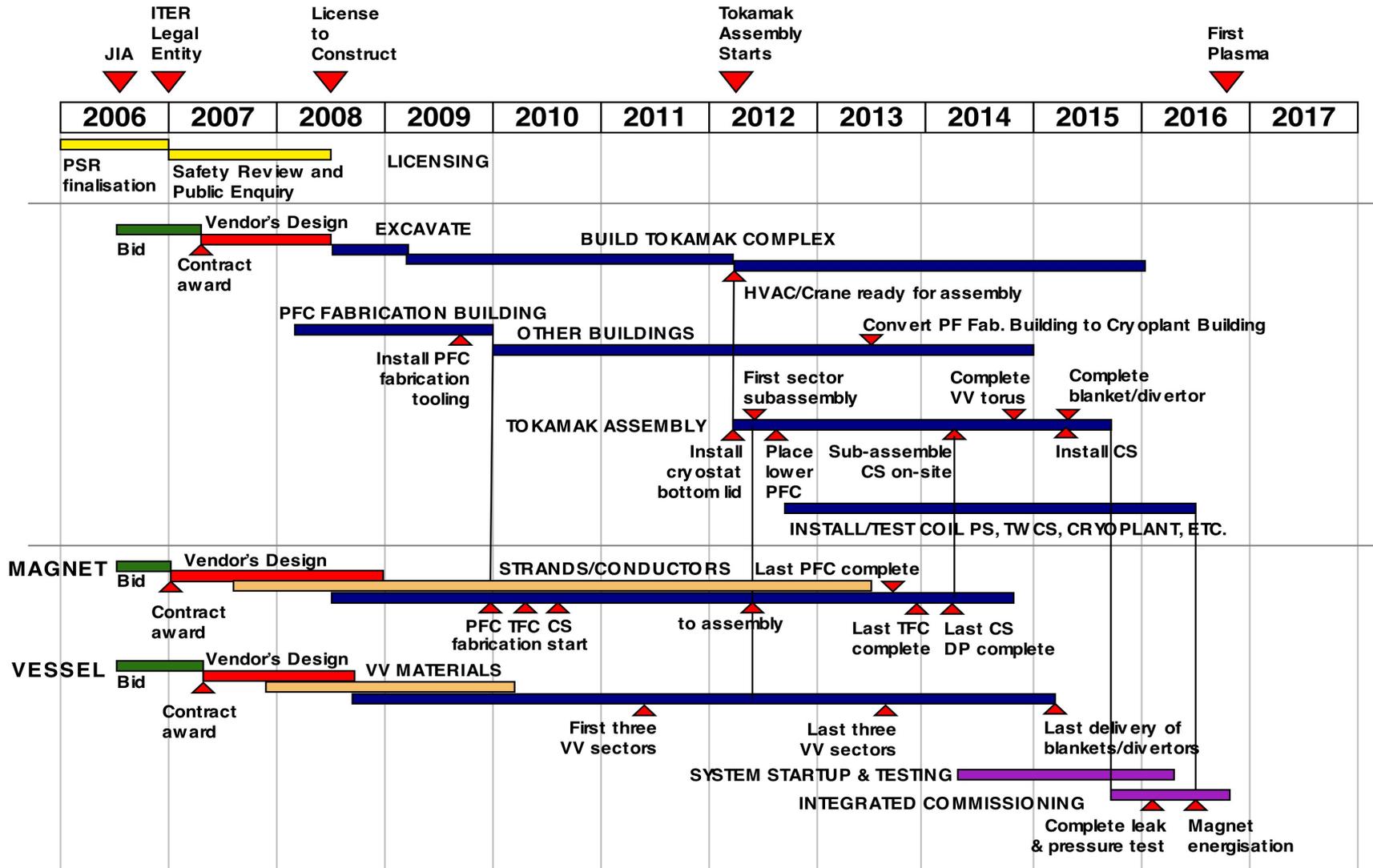
- ②-1 **Engineering Design Activities (EDA) : '92.07. ~ '98.07.**
 - CDA의 성공적인 연구 이후 공학설계 추진 : three design centers, each 50 professionals
 - 설계범위 확대, R&D 수행 증대 (large scale technology R&D)
 - 참여국간 지적재산권 및 비용관련 문제 발생에 따라 '92.7월 EDA 협정 체결
 - CDA 개념설계에 따라 구체적인 공학설계를 활동을 수행하고, 이를 바탕으로 사업비용 등을 산정함
 - 설계 주체 : ITER 이사회, ITER Central Team, 4개 Home Teams (**미국, EU, 러시아, 일본**)

- ②-2 **Engineering Design Activities(EDA) Extension : '99 ~ '01.07.**
 - **ITER 기술적 요구조건을 충족하되, 성능 향상된 장치운영(H-모드)을 설계기준(baseline) 도입**
 - 1단계 EDA의 ITER 보다는 축소된 모형(1/2 비용)의 새로운 ITER 설계 완성(현재 ITER, '01.7월)
 - 설계 주체 : ITER 이사회, ITER Central Team, 3개 Home Teams (**EU, 러시아, 일본 (미국 탈퇴)**)

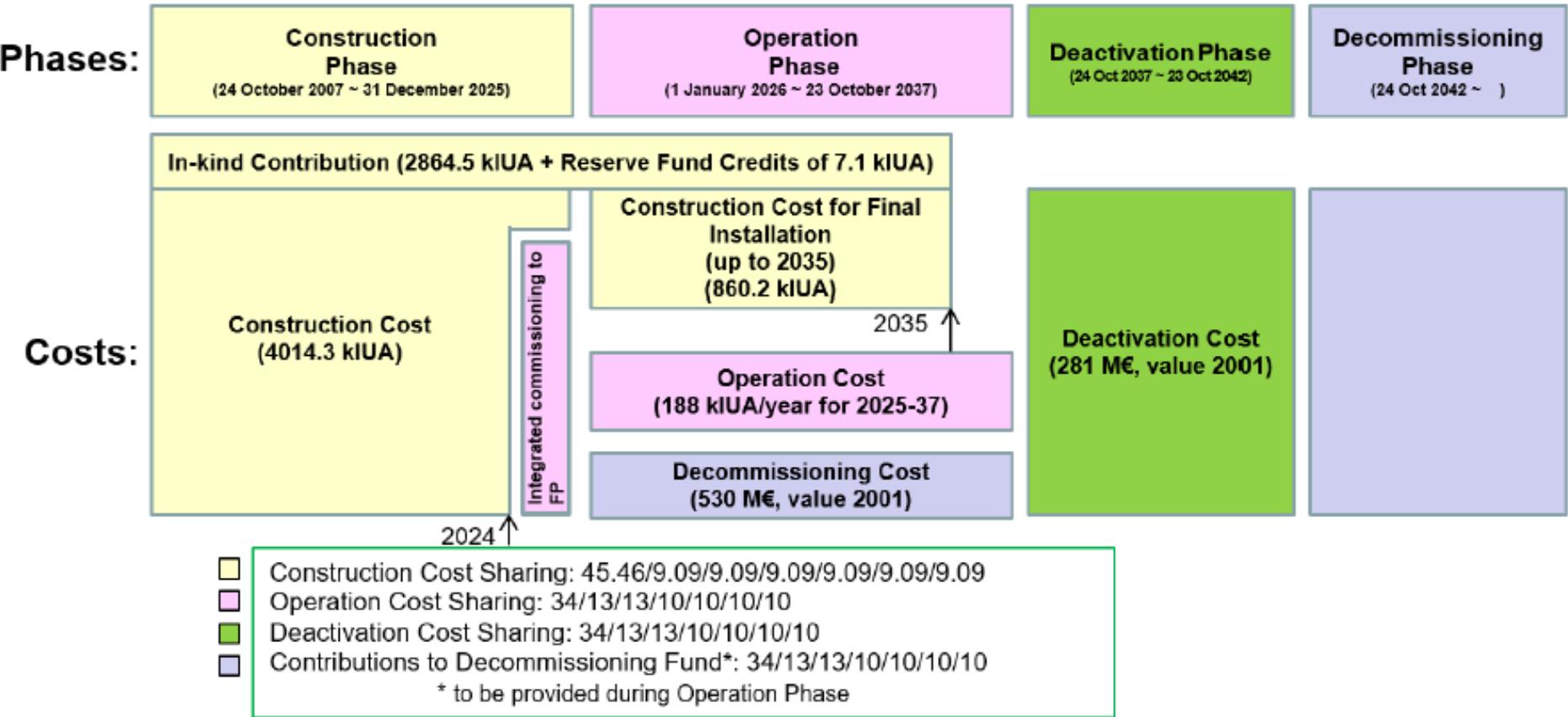
- ③ **Coordinated Technical Activities (CTA) : '02.12까지**
 - CTA는 EDA 이후 잠정적 시기, ITER 부지 선정, 건설 준비하고, 사업의 완결성 유지하고자 함
 - 잠정부지/환경에 적합한 설계 완성을 위한 수정 작업, 인허가 준비 및 조달방안 기술적 구체화 등 검토
 - 설계 주체 : ITER International Team, 3개 **Participation Parties** (EU, 러시아, 일본)



Early ITER Construction Plan



Overall ITER Project Phase/Cost

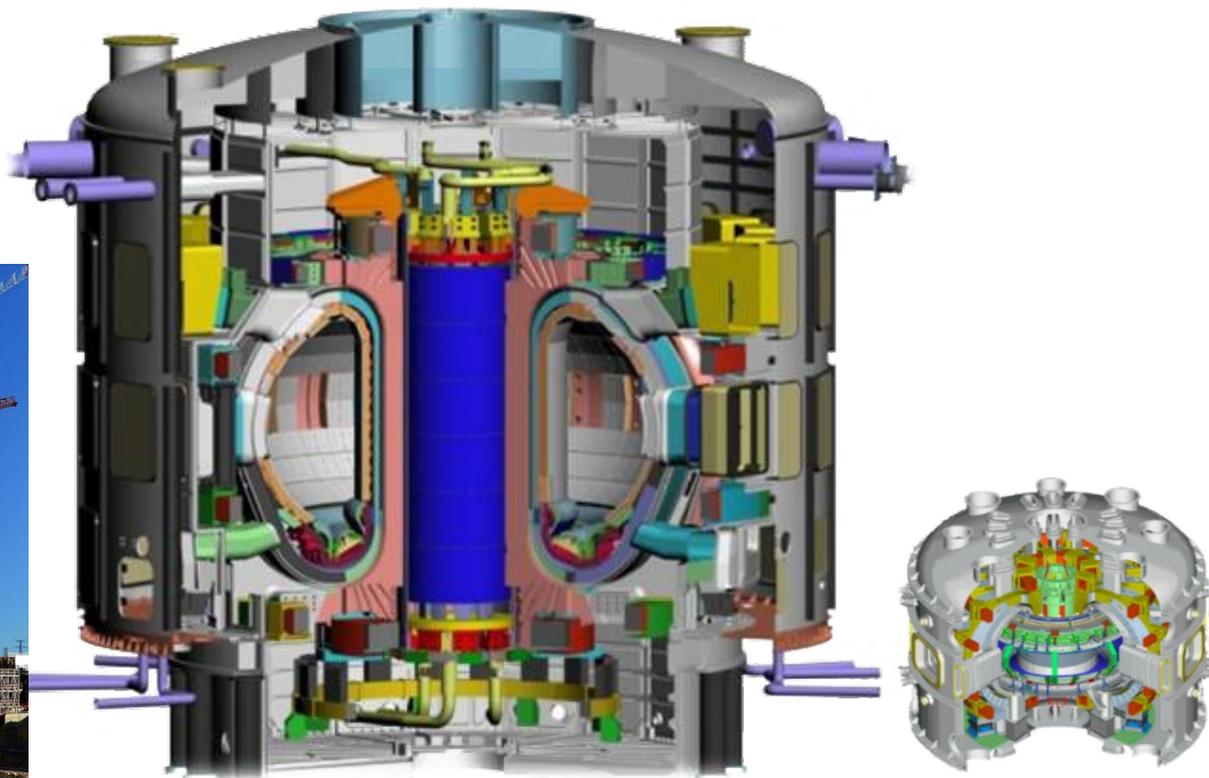


Footnote: all the in-kind procurements are supposed to be attached to the Construction Phase

- **사업목표 : 핵융합에너지 생산 공학적 실증**

- 열출력 500MW, 증폭율(Q) 10배 달성 목표
- '25.12 : 건설 완공; '35.12: 핵융합 연소 실증
- 7개회원국 : 미국, 유럽, 일본, 러시아('88.4), 중국('03.1), **한국('03.6)**, 인도('05.12)

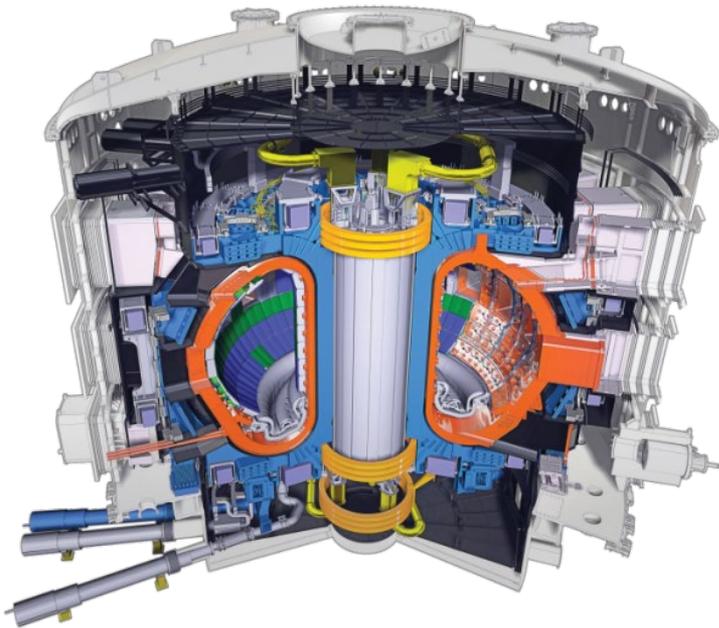
- **ITER ("the way" in Latin)**
is the essential next step in
the development of fusion.



ITER

KSTAR

- **ITER** is on the way to commercial fusion reactor and it will **demonstrate the feasibility and integration of science and technologies**, and **safety** features for a fusion reactor;
- The self-sustained D-T burning plasma in ITER will generate **500 MW** which is **10 times more power** than it receives;
- ITER enterprise will create a new **collaborative culture and standard solving energy and environmental problems** and contributing to the world peace;

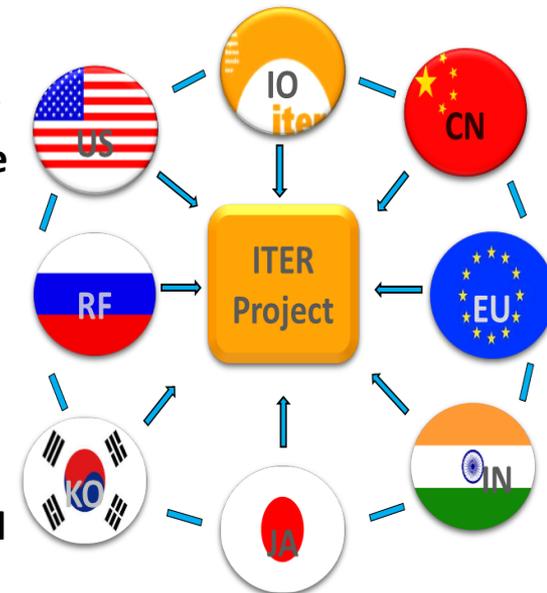


$R=6.2$ m, $a=2.0$ m, $I_p=15$ MA, $B_T=5.3$ T,
 $m=23,000$ tons, (H) 29.0 m x (D) 28.6 m

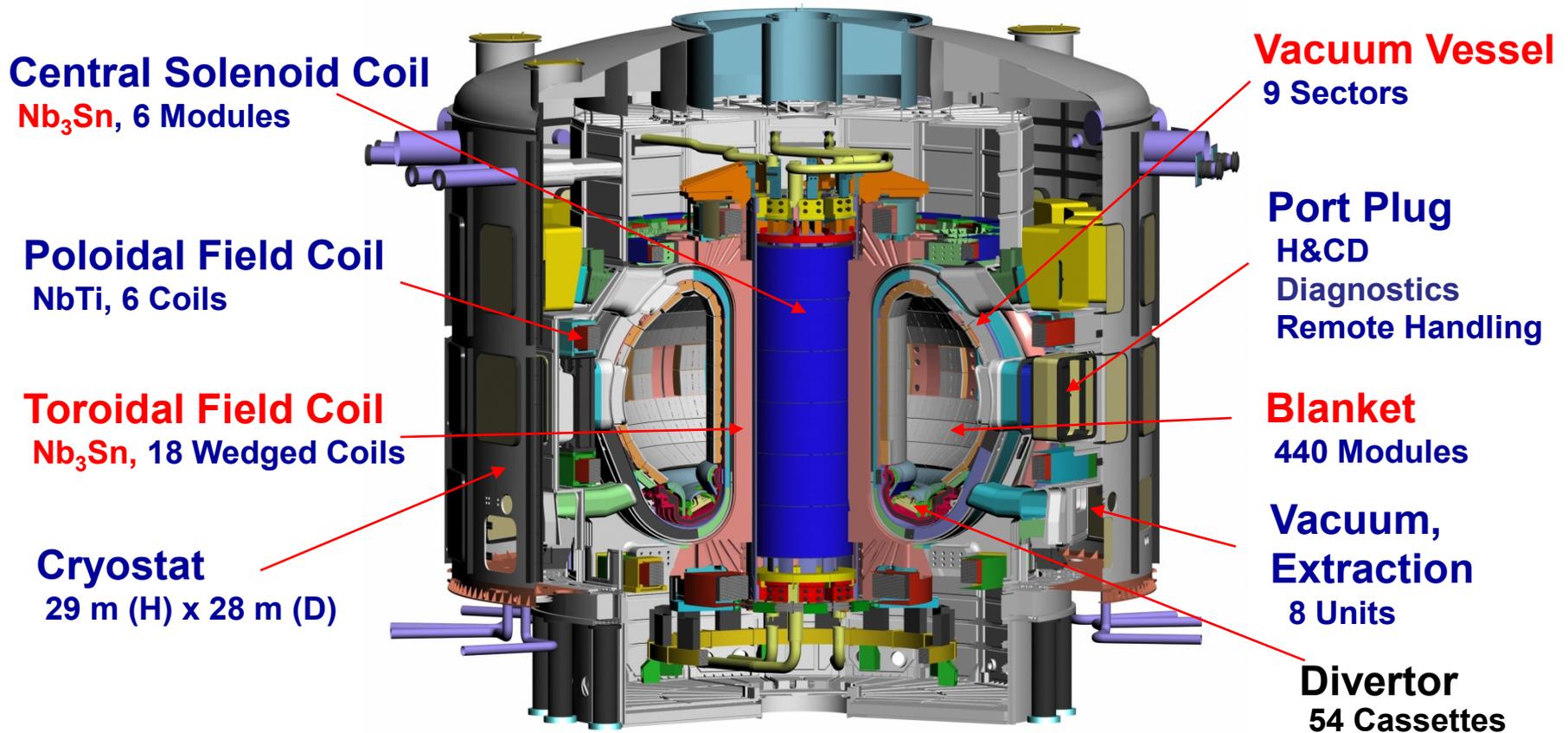
➤ An integrated project:

Central Team & Seven Domestic Agencies (DAs)

- The 7 ITER Members make in-cash and in-kind contributions (90%) to the ITER Project. They have established DAs to handle the contracts to industry.
- The IO Central Team manages the ITER Project in close collaboration with the 7 DAs.
- The ITER Members share all intellectual Property generated by the Project.



핵융합로(토카막형 ITER)의 구성



- ◆ 1992~2001 CDA, EDA (R&D)
- ◆ 2001 FDR (Baseline 2001)
- ◆ 2007 ITER Baseline 2007

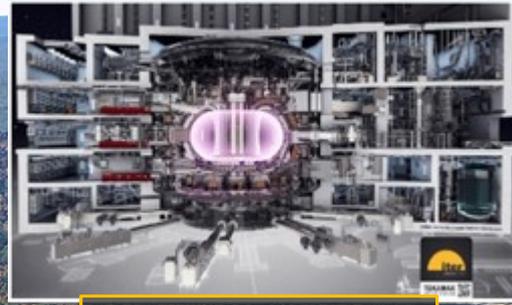
On Friday 9 November 2012, French Prime Minister signed the official decree that authorizes the ITER Organization to create the *Installation nucléaire de base (INB No.174) ITER*.

ITER 공사 현장 (프랑스 카다라쉬)

◆ ITER 달성 목표 ⇒ '25.12: 건설 완공, '35.12: 핵융합 D-T 연소 실험

2020. 12 사진

공정률('21.6월 기준): ~ 74.1%
전체부지: 180ha(180만m²)
건설부지: 42ha(42만m²)



PF Coil Building

Tokamak Complex

Assembly Hall

ITER Organization HQ



1. Fusion Energy Research 역사
2. ITER 사업 역사
- 3. ITER 한국사업 역사**
4. ITER 사업 현황
5. 대형 R&D 사업 국제협력 Q&A

- 1995. 12 「국가 핵융합연구개발 기본계획」 수립
- 1996. 01 핵융합연구개발사업단 출범 및 KSTAR 사업 착수
- 2003. 06 국제핵융합실험로(ITER) 프로젝트 공식 가입
- 2005. 10 「국가핵융합연구소」 설립 (기초연 부설)
- 2006. 12 「핵융합에너지개발진흥법」 공포
- 2007. 08 「국가핵융합에너지개발 진흥기본계획」 수립
- 2007. 09 **KSTAR 완공식**
- 2007. 10 ITER 국제기구 출범
- 2012. 11 플라즈마기술연구센터 개소 (군산)
- 2017. 04 제3차 핵융합에너지개발 진흥기본계획('17~'21) 수립
- 2018. 12 세계 최초 이온 온도 1억도 달성(초전도 장치에서)
- 2020. 11 **세계 최장 이온 온도 1억도 20초 운전 달성**
- 2020. 11. 20 「한국핵융합에너지연구원」 설립 *

* 과학기술분야 정부출연연구기관 등의 설립·운영 및 육성에 관한 법률



핵융합연구개발사업단 출범



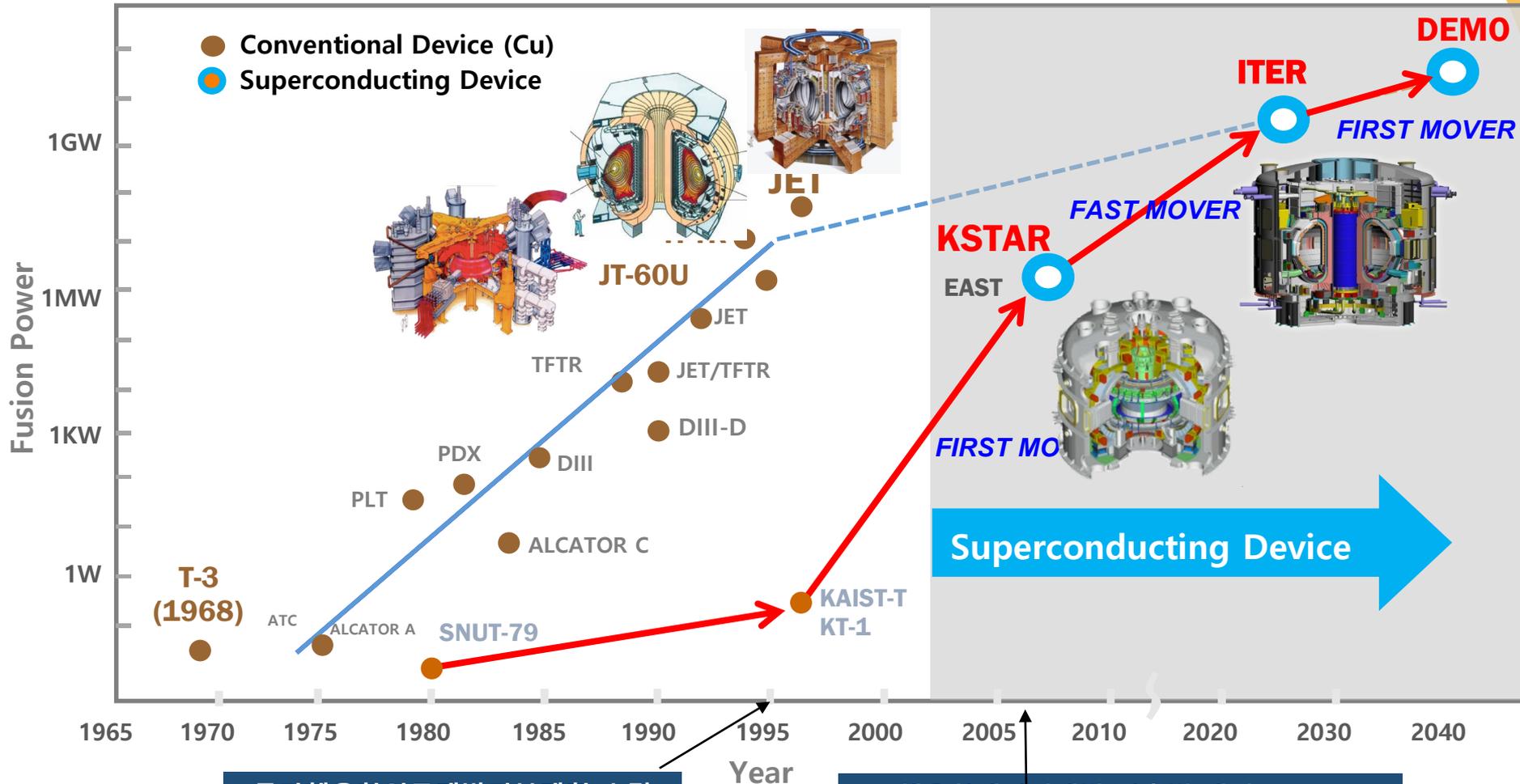
「핵융합에너지개발진흥법」 공포



「과기출연법」 국회 본회의 통과

한국 핵융합에너지 개발 전략

구리 전자석(펄스 운전) ⇒ 초전도 전자석(연속 운전)



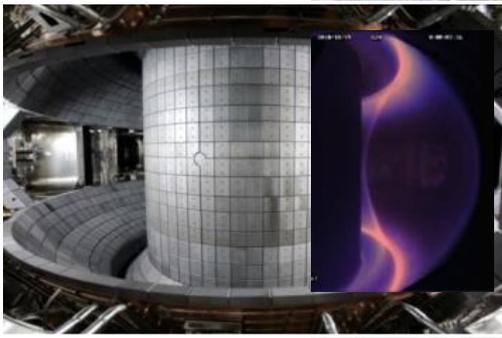
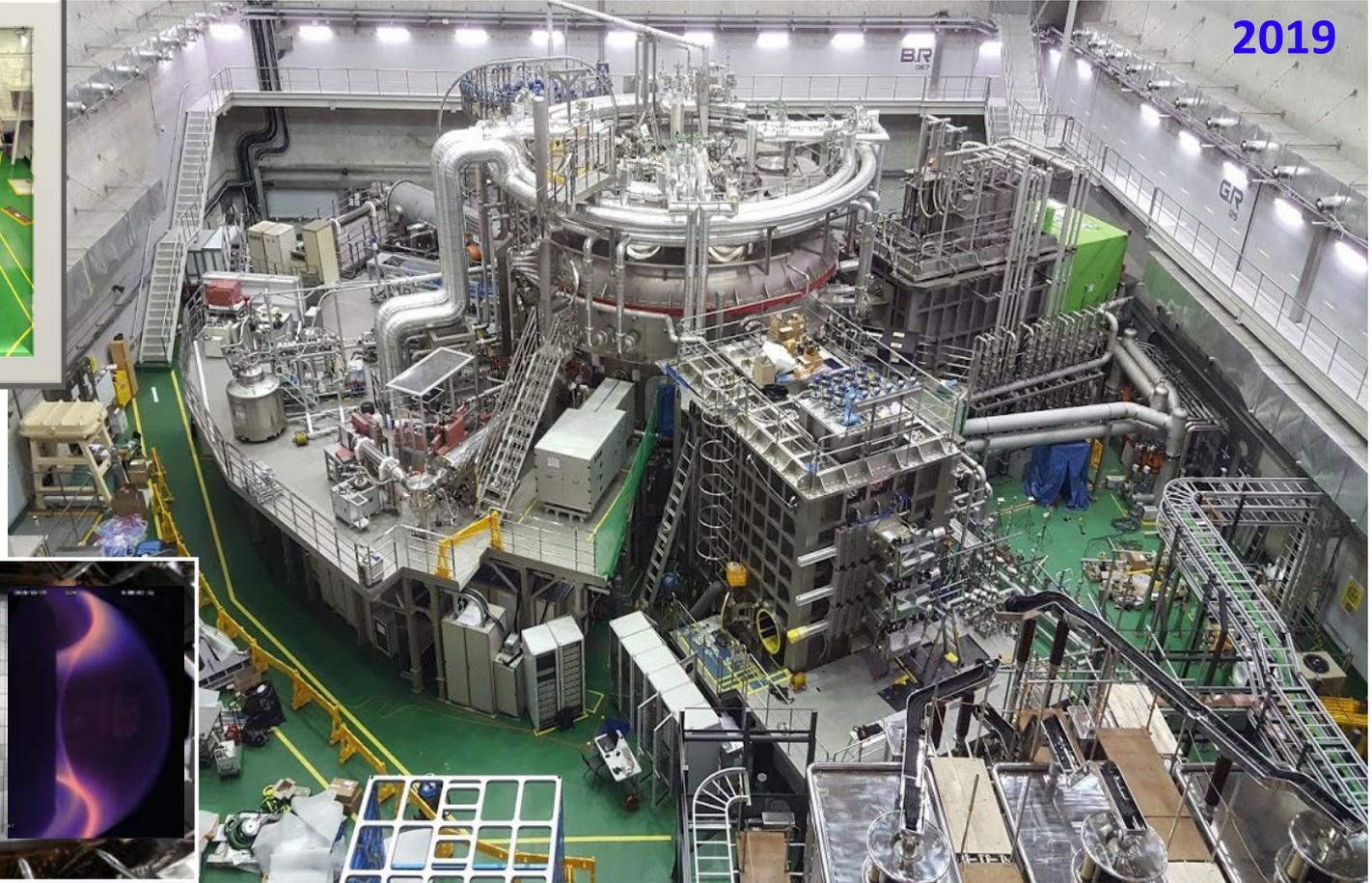
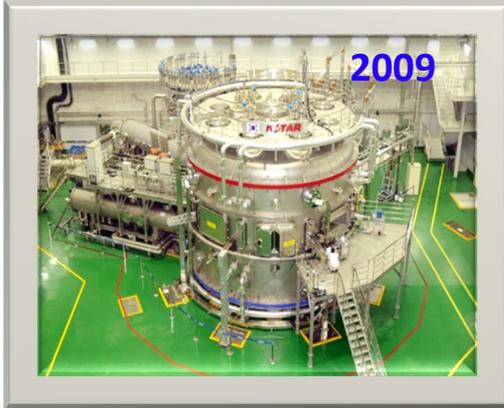
국가핵융합연구개발기본계획 수립
KSTAR 개발 시작 (1995)

핵융합에너지개발 진흥법 재정 (2006)
핵융합에너지개발 진흥기본계획 수립 (2007)

사업목표

고온, 고밀도 핵융합 플라즈마의 장시간 유지 기술 개발

- 1억도 1.5 초 달성('18), 1억도 20초 이상 ('20), 1억도 300초 달성 ('25)



(건설기간 : '95.12 ~ '07.8 (11년 8개월) / 최초 플라즈마 : '08. 6)

아국 ITER 사업참여 및 추진 경위

2002년 12월

- ITER 참여의향서(Letter of Interest) 전달

2003년 6월

- 한국의 ITER 가입(제12회 국과위에서 참여 방침 결정)

2005년 10월

- 국내 핵융합연구 전담기관으로 “핵융합연구센터” 출범
※ 핵융합연구센터 산하에 “ITER 사업단” 조직(부서) 신설

2005년 12월

- “국가핵융합에너지개발 기본계획” 확정(제19회 국과위)
※ KSTAR→ITER→DEMO→FPP (2040년대 한국형핵융합발전소 건설 비전 제시)

2006년 12월

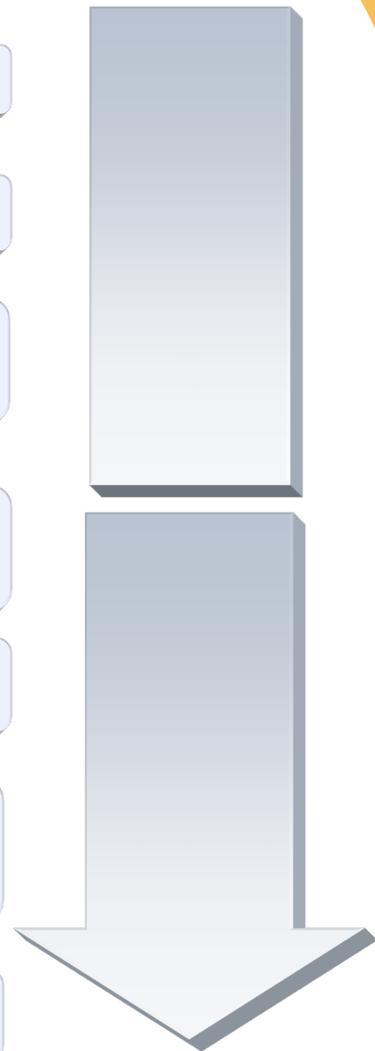
- “국가핵융합에너지개발진흥법” 제정 공포('06.12.26)

2007년 4월

- ITER 국제핵융합에너지기구 및 특권면제협정 국회 비준
- 국회비준동의(안) 통과('07.4.2) 및 비준서 IAEA 기탁('07. 4.13)

2007년 9월

- ITER 한국사업단(KO-DA) 지정(과기부 고시 및 훈령)



ITER 사업 목표

- ◆ ITER 건설·운영 참여를 통해 2040년대 국내 상용 핵융합발전소 건설을 위한 원천기술 확보
 - 대용량의 청정 및 친환경적 에너지원 확보로 국가 에너지 자립 및 에너지안보에 기여

※ “국가핵융합에너지개발기본계획”의 로드맵에 따라 핵융합에너지 실용화 추진

ITER 사업 내용

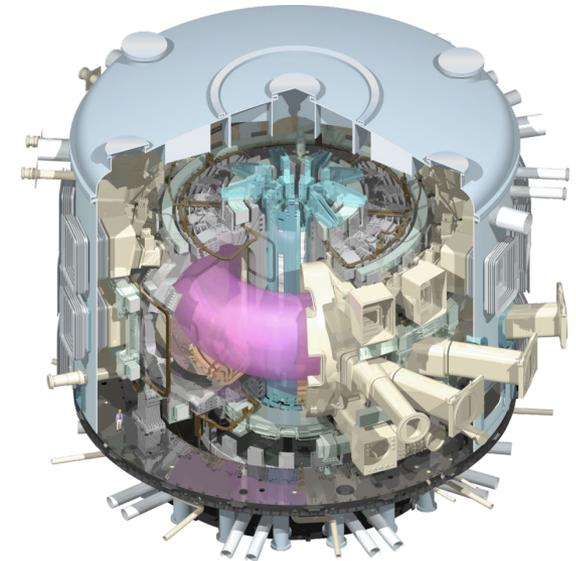
- ◆ 건설사업 참여내용 : 아국 할당 조달품 제작 납품, 현금조달, 핵심기술개발, 인력파견
- ◆ 건설사업기간 : 2004년~2015년 (12년) : ※ ITER 총사업기간 : ~ 2042년까지
 - 건설사업비 : 8,767억원 (부가세 불포함, '05.12기준 불변가)
 - ITER 참여 총사업비 : 약 1조6천억원 (건설분담금「8,767억원」, 운영 및 실험 비용 분담금
방사능 감쇄 분담금, 폐로 분담금 약 7,500억원)

Roles of ITER Korea (Korean Domestic Agency)

- The “ITER Korea (KO-DA)” at National Fusion Research Institute (NFRI) is performing all activities with respect to the ITER Korea Project with full responsibilities as the **Domestic Agency of the Republic of Korea.**



- **Main Roles and Responsibilities**
 - On time delivery of the KO procurement packages in complying with IO QAP
 - Selection and dispatch KO experts to IO
 - Management of KO procurement activities
 - Collaboration and coordination activities with IO and other DAs



설립근거

- ◆ 한국기초과학지원연구원(법인) 정관 개정 ('07. 9.)
- ◆ ITER 공동이행협정 발효 ('07. 10.)
- ◆ 국제핵융합실험로(ITER) 공동개발사업 처리운영규정 제정 ('07. 12.)

연혁

- ◆ “ITER 한국사업단” 발족 ('07. 9.)
 - 국가핵융합연구소(NFRI) 산하 조직
 - ITER 사업 국내전담기관(Domestic Agency) 정부 지정

주요임무

- ◆ 우리나라에 **할당된 10개 조달품목의 적기 제작 및 납품**
- ◆ 핵융합 상용화 기술 확보를 위한 **핵심기술 개발**
- ◆ 전문인력 파견을 통한 핵융합에너지 실용화 **전문인력 양성**
- ◆ ITER 한국사업 **종합관리 및 ITER 기구와의 협력**

ITER 사업 한국 참여 필요성

- ◆ 에너지 절대 빈곤 국가로서 **미래의 지속가능한 대체에너지원 확보 절실**
 - 에너지의 97% 이상을 해외에 의존
- ◆ ITER 사업은 핵융합에너지 **실용화 가능성 입증의 유일한 기회**
- ◆ ITER 사업은 핵융합에너지 **원천기술 확보의 유일한 기회**
 - 배경지식재산 **실시권 확보** 및 향후 획득 지식재산권 **소유권 확보** (ITER 공동이행협정)
- ◆ **최소 위험부담으로 핵융합에너지 실용화 입증 및 상용화를 앞당길 수 있는 유일한 기회**
 - 투자비용 최소화 (10% 비용 투자로 전 분야 지식재산권 확보 투자 효과)
 - 개발 시간 단축 (전세계 대부분의 핵융합 전문가 참여)

ITER 사업 참여에 따른 경제적 효과 (단기적)

- ① 현물분담금 대부분(약 6,100억원)은 국내산업체 매출로 고용증대 및 산업경쟁력 강화 기여
- ② 파견인력 인건비(약 420억원)는 우리나라의 고급 전문 양성 비용에 해당
- ③ 핵심기술개발비 및 국내기반구축비(약 720억원)는 미래 핵융합 상용화에 대비한 투자
- ④ ITER 참여로 약 1,500억원 규모 해외 수주 가능 (약 1,000억원은 기확보)
 - 월성원전에서 생산되는 삼중수소 활용 가능 (1,000억원 이상 추정)
- ⑤ 분담금으로 해외에 지불되는 비용은 약 1,200억원 정도

핵융합 상용화 이후의 경제적 효과 (장기적)

- ① 국가에너지 자립을 통한 에너지 안보 확보 : 경제적 가치 이상의 국가 최우선 과제
- ② 환경적, 사회적 비용 절감 : 이산화탄소 무방출, 고준위 폐기물 무발생
 - 교토 의정서(97) 및 발리 로드맵(07.12) 등에 능동적 대처
- ③ 차세대 국가 성장 동력원으로서의 역할 : 2050년대 이후 핵융합 에너지 수출 시장 기대
- ④ 초고온, 초전도, 극저온, 고진공 등 극한 기술 활용분야의 산업 기술 경쟁력 강화 가능
- ⑤ 플라즈마 응용 등 신산업 창출 가능

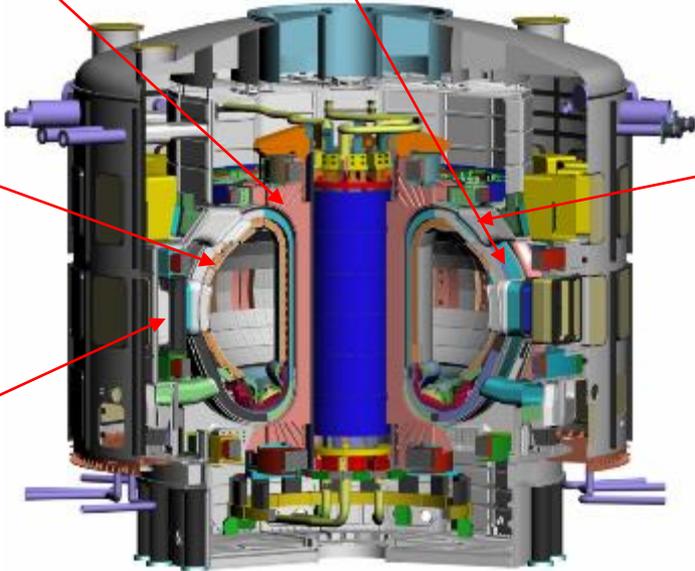
우리나라 할당 조달품목

TF 초전도 도체 (Conductor)
 총 조달금액(kIUA) : 215.01
 아국참여율 : 20.18%
 아국조달금액(kIUA) : 43.39
 (조 달 완 료)

블랑켓 차폐블록(Shield Block)
 총 조달금액(kIUA) : 56.34
 아국참여율 : 49.82%
 아국조달금액(kIUA) : 28.07

조립장비(Assembly Tooling)
 총 조달금액(kIUA) : 18.55
 아국참여율 : 99.90%
 아국조달금액(kIUA) : 18.53

진공용기 본체 (Vacuum Vessel)
 총 조달금액(kIUA) : 118.85
 아국참여율 : 21.20%
 아국조달금액(kIUA) : 25.20



열차폐체 (Thermal Shield)
 총 조달금액(kIUA) : 26.81
 아국참여율 : 100%
 아국조달금액(kIUA) : 26.81

진공용기 포트 (Port)
 총 조달금액(kIUA) : 75.06
 아국참여율 : 73.69%
 아국조달금액(kIUA) : 55.31

삼중수소 저장·공급시스템
 총 조달금액(kIUA) : 12.50
 아국참여율 : 94.25%
 아국조달금액(kIUA) : 11.79

전원공급장치 (AC/DC Converters)
 총 조달금액(kIUA) : 112.27
 아국참여율 : 40.60%
 아국조달금액(kIUA) : 45.58

진단장치 (Diagnostics)
 총 조달금액(kIUA) : 206.12
 아국참여율 : 1.99%
 아국조달금액(kIUA) : 4.10

테스트 블랑켓 모듈 (TBM)
 아국조달분
 : HCCR TBS (TBM 시스템)
 조달가치 : 해당사항 없음

* 총 조달 금액 : 258.78 kIUA

핵융합에너지 개발 산업체 요소 기술

분야	핵융합 핵심기술	산업체 기술 분야
노심	연소 플라즈마 물리(전자기 유체물리, 통계물리)	<ul style="list-style-type: none"> - 고속 데이터 처리(슈퍼 컴퓨터) 기술 - AI 운전 및 첨단 I&C 기술 - HMI(Human Machine Interaction)
핵융합로 구조물/시스템	초전도 자석 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 초전도 선재(Nb₃Si, NbTi 등) 제작 기술 - 초전도 선재 연선(Cabling) 기술 - 조관용 튜브 특수 스테인리스강 제조 기술 - 대형 초전도 자석 제작 기술
	대형 구조물 제작 기술	<ul style="list-style-type: none"> - 대형 구조물 설계 및 구조해석(복합 하중) 기술 - 대형 자석 구조물 정밀 제작 기술 - 정밀 3차원 측정(Metrology) 및 분석 기술
	진공용기	<ul style="list-style-type: none"> - 저방사화 스테인리스강 소재 제조 기술 - 후판 정밀용접(TIG, E-beam 등) 및 변형제어 기술 - NDE(대형 RT, PAUT 등) 기술 - 대형 초정밀 가공, 성형 기술 - 고진공 취급 기술
	열차폐체	<ul style="list-style-type: none"> - 극저온 구조물 설계 및 해석 기술 - 대면적 은도금 기술 - 내시경 정밀 측정(Endoscope) 기술 - Seamless 스테인리스 Long 파이프 제작 기술 - 대형 초정밀 가공, 성형 기술
	조립장비	<ul style="list-style-type: none"> - 대형 구조물 초정밀 조립 기술 및 구조해석 기술 - 대형 조립장비 정밀 제작 기술

분야	핵융합 핵심기술	산업체 세부 기술
핵융합로 공학기술	중식블랑켓	<ul style="list-style-type: none"> - 중성자 해석 및 차폐 기술 - 삼중수소 추출 기술 - 진공 브레이징, HIP 등 이종소재 접합 기술
	핵융합 재료/디버터	<ul style="list-style-type: none"> - Ferritic Steel 구조재 제조 기술 - Li 증식재, Be 증배재 페블 제조 기술 - 텅스텐 대면재(First Wall 및 디버터) 제조기술 - 고속 냉각/열교환 설계·해석 기술
	Hot Cell	<ul style="list-style-type: none"> - 고중량 원격조작 로봇 제어 기술 - 부품 교체 원격조작 기술
부대장치	가열/전류구동장치	<ul style="list-style-type: none"> - 고출력 Gyrotron/Klystron 설계·제작 기술 - Corrugate Waveguide, 고출력 RF 안테나 설계·제작 - 고에너지 음이온빔 중성입자빔 설계·제작 기술 - 고전압 부상 기술
	진단장치	<ul style="list-style-type: none"> - 고출력 레이저, 분광기 설계·제작 기술 - 마이크로파/광/X선 등 각종 검출기, 센서 기술 - 고진공, Feedthroughs, 셔터, Window 설계·제작 기술
	연료주기	<ul style="list-style-type: none"> - 삼중수소 취급기술 - TEP 및 ISS 설계·제작 기술 - 삼중수소 연료 저장·공급 기술
플랜트 시스템	액체 헬륨	<ul style="list-style-type: none"> - 극저온 냉동 기술 - 액체헬륨 생산 및 공급 기술
	대전력 정류	<ul style="list-style-type: none"> - 대형 변압기, 대전류 AC/DC Converters - 대전력 펄스(AC) 운전 기술
BOP	냉각수/열교환기/터빈	<ul style="list-style-type: none"> - 열수력 해석 - 원자력 발전소 및 기타 발전소 기술과 동일

1. Fusion Energy Research 역사
2. ITER 사업 역사
3. ITER 한국사업 역사
- 4. ITER 사업 현황**
5. 대형 R&D 사업 국제협력 Q&A

Overview of ITER Site

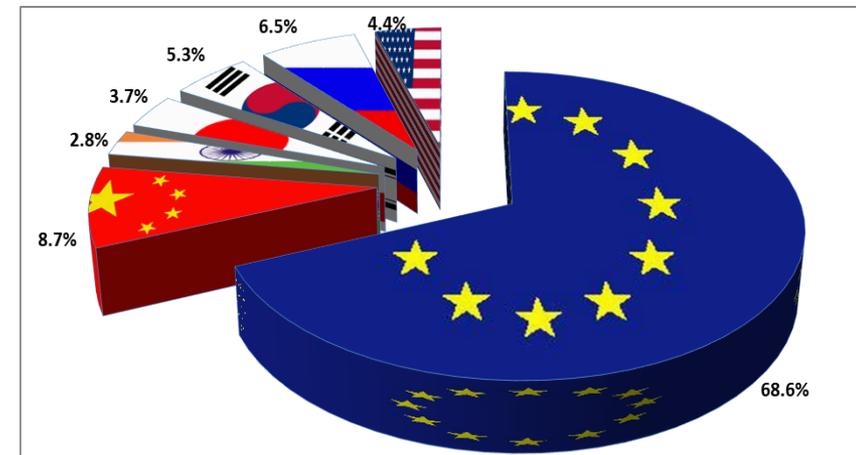


IO Human Resources Statistics (31 August 2021)

- ❑ The IO had 1016 staff members:
 - 733 P staff
 - 283 G staff

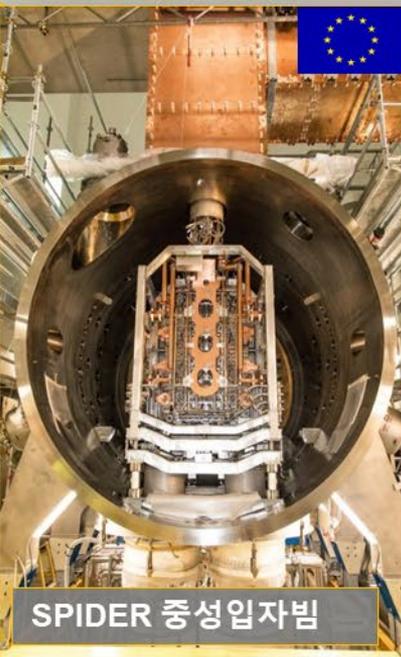
- ❑ The IO is implementing the 2021 Recruitment Plan (and newly agreed 120 positions for 2022 & 2023 will be gradually included). Since the end of September 2016, the IO has appointed 510 new staff members; among them 213 (42%) are non-Europeans;

- ❑ In 2021, departures of 35 staff; 80 positions have been advertised; 2486 applications have been received through the DAs and 346 candidates have been shortlisted/interviewed.

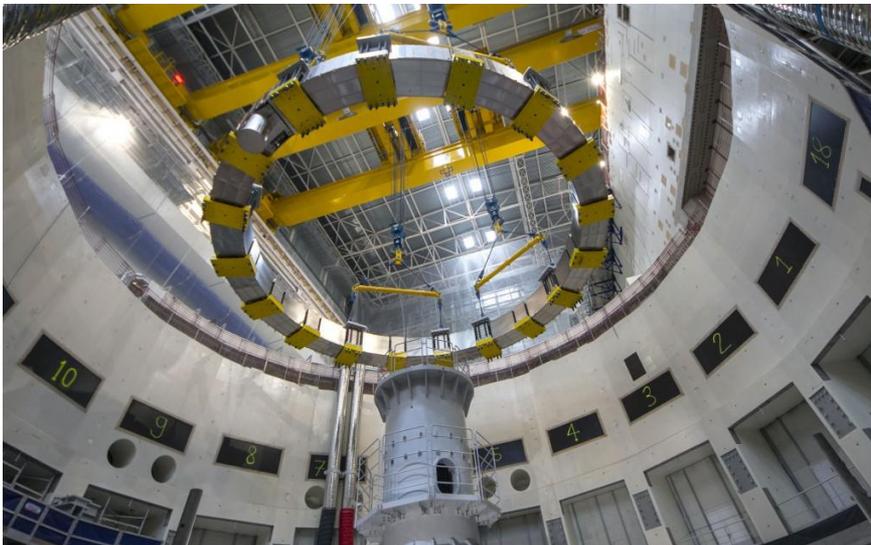


IO Staff by Member (G, P & Higher)
(incl. TCWS, VAS, PostDoc & SCSN)

핵융합에너지 연구와 산업 (ITER 회원국 조달품목 제작 현황)



Successful Installation of PF Coil #5 on 16



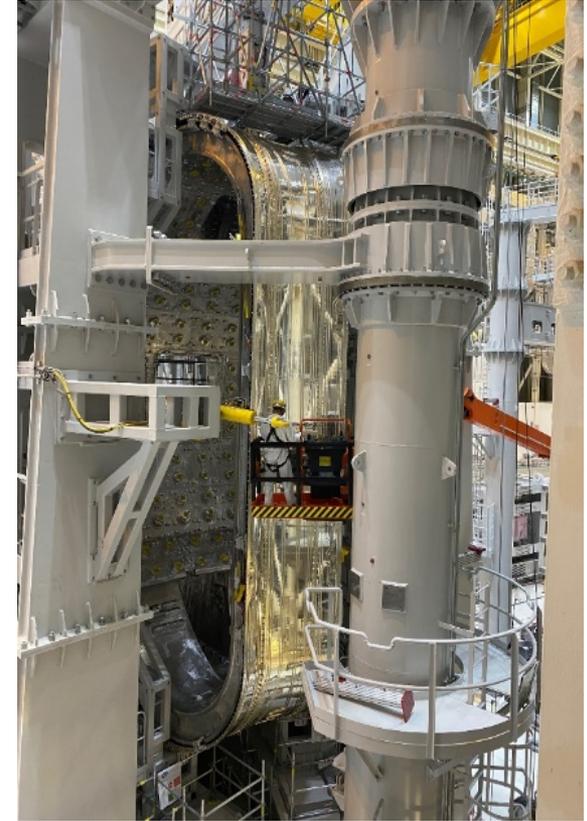
Progress of Installation and Assembly



Central Column installation in the Pit



TF Coils #12 and #13 in SSAT#2



VVTs #6: Insulation Test

Progress of Vacuum Vessel (VV)



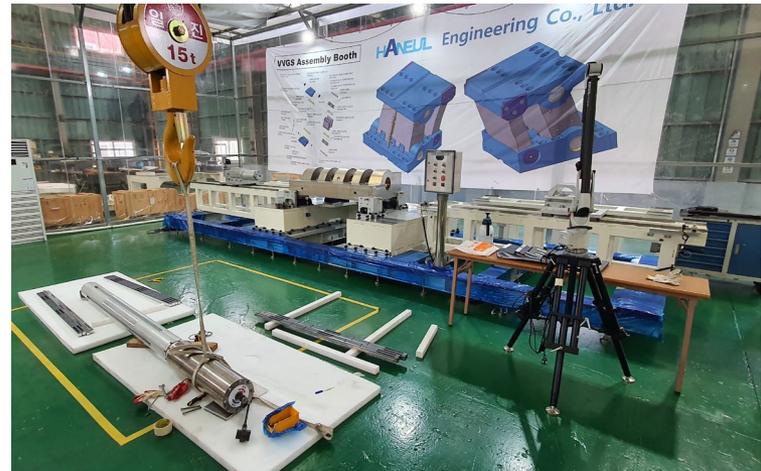
S7: Site Acceptance Test ongoing



S8: Final assembly in progress



NB Port Extension #5: Outer Shell Assembly



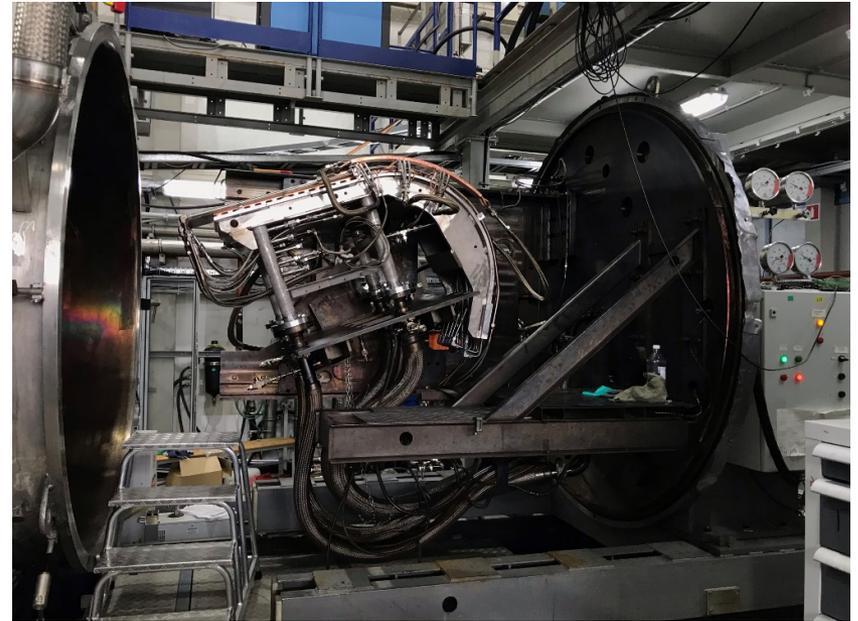
VVGS #6: final assembly

Progress of Divertor



← DIVERTOR CASSETTE FULL-SCALE PROTOTYPE
MANUFACTURED BY WALTER TOSTO

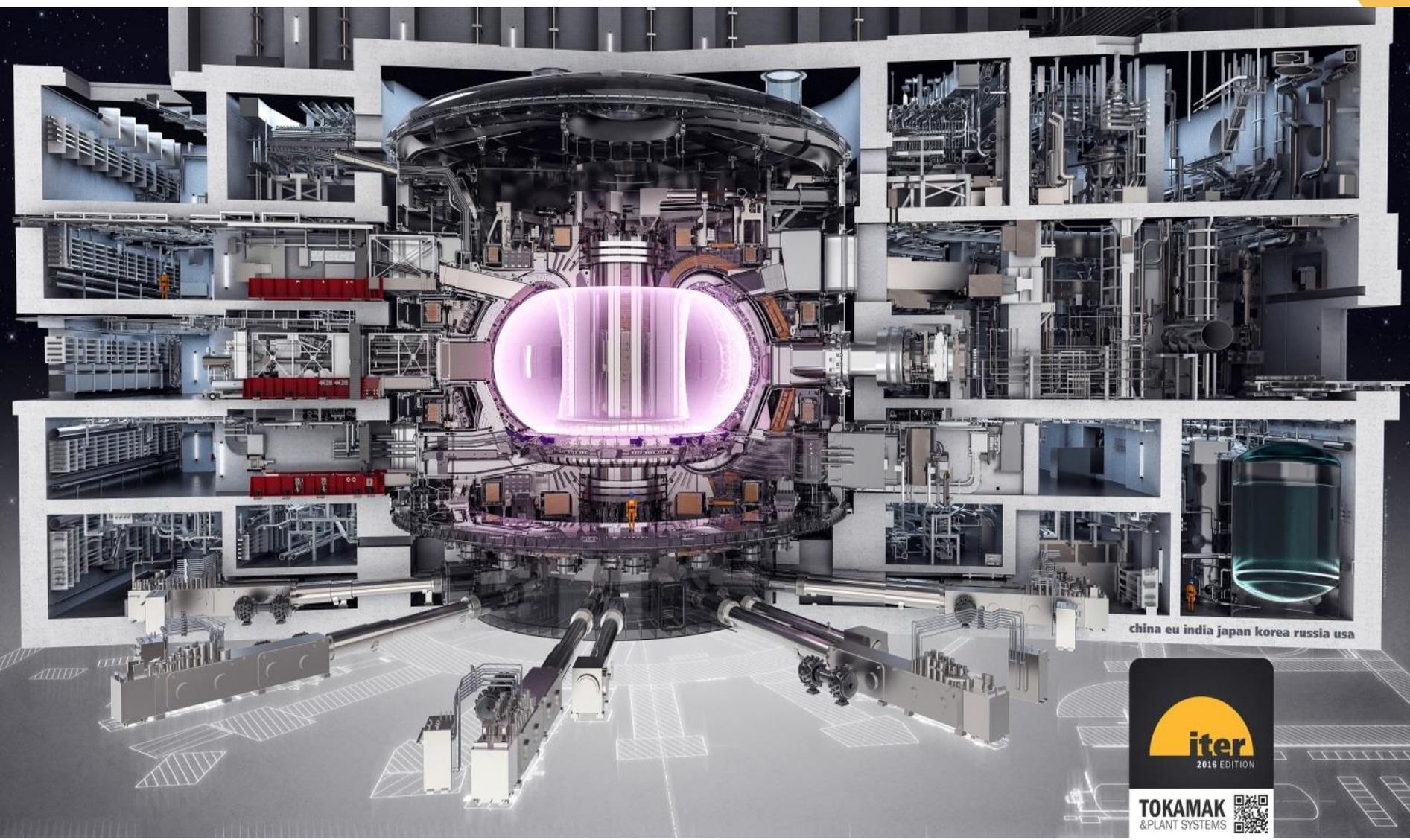
Successful High Heat Flux testing
up to 20 MW/m² at Efremov Institute (RF). ▼



← EU full-scale Divertor prototype manufactured
by ANSALDO NUCLEARE



ITER Tokamak



1. Fusion Energy Research 역사
2. ITER 사업 역사
3. ITER 한국사업 역사
4. ITER 사업 현황
5. 대형 R&D 사업 국제협력 Q&A

● International Enterprise

- A number of stake-holders: there are too many different views on ITER.
- In-kind procurement system: there are too many interfaces.
- Roles and responsibilities of IO and 7 DAs are not clearly defined.
- Quality: how to control and manage the quality of in-kind components/system.

● First-of-a-kind Fusion Device -> Technical Challenges

- Design of key components is not completely frozen until now. It is still on-going for 6 years after the start of construction.
- There are no explicit lessons learned on a number of technical issues. The mechanism of decision making is too late.

● Fusion Reactor -> Safety Requirements

- Safety issues: IO should respect the French Nuclear Regulations.
- Safety requirements come later since site-selection after FDR 2001 baseline.

- R&D 국제협력

- 조약 : 정부간 협정, 국회 비준(법적효력)
- 사업비 : 국가 의무 지출 사업
 - 투자비 리스크 절감, 투자 대비 성과(지적자산 확보)

- 양자간 협정 또는 다자간 협정

- 양자 협정 : 의사 결정(이해 관계) 단순, 사업관리/감독 장단점
- 다자 협정 : 의사 결정(이해 관계) 복잡, 사업관리/감독 장단점



한국핵융합에너지연구원
KOREA INSTITUTE FOR FUSION ENERGY

인류의 미래를 밝힐

새로운 태양,

한국핵융합에너지연구원이
만들어갑니다.

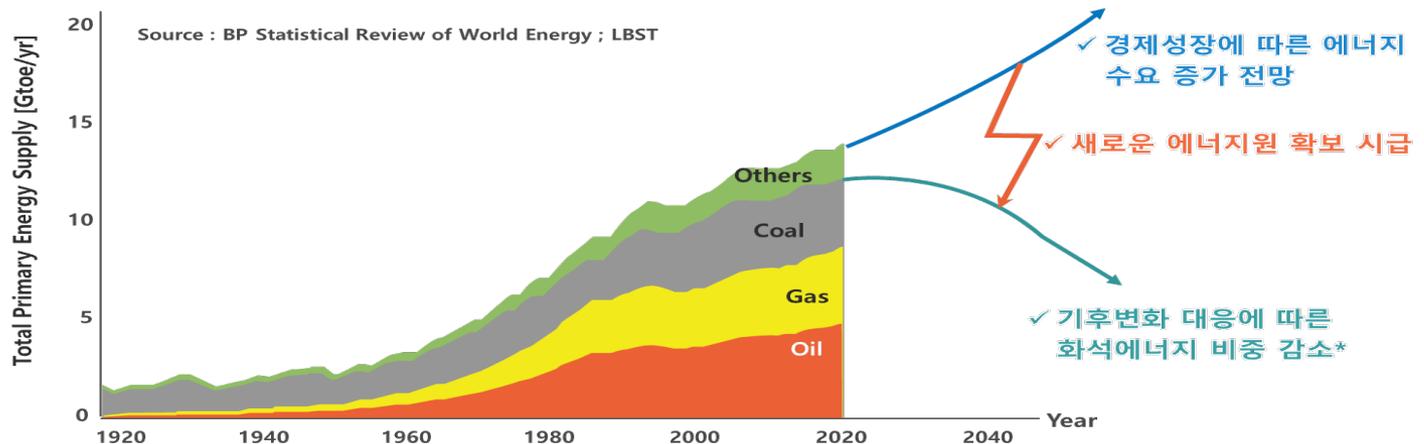
감사합니다.



참고 자료

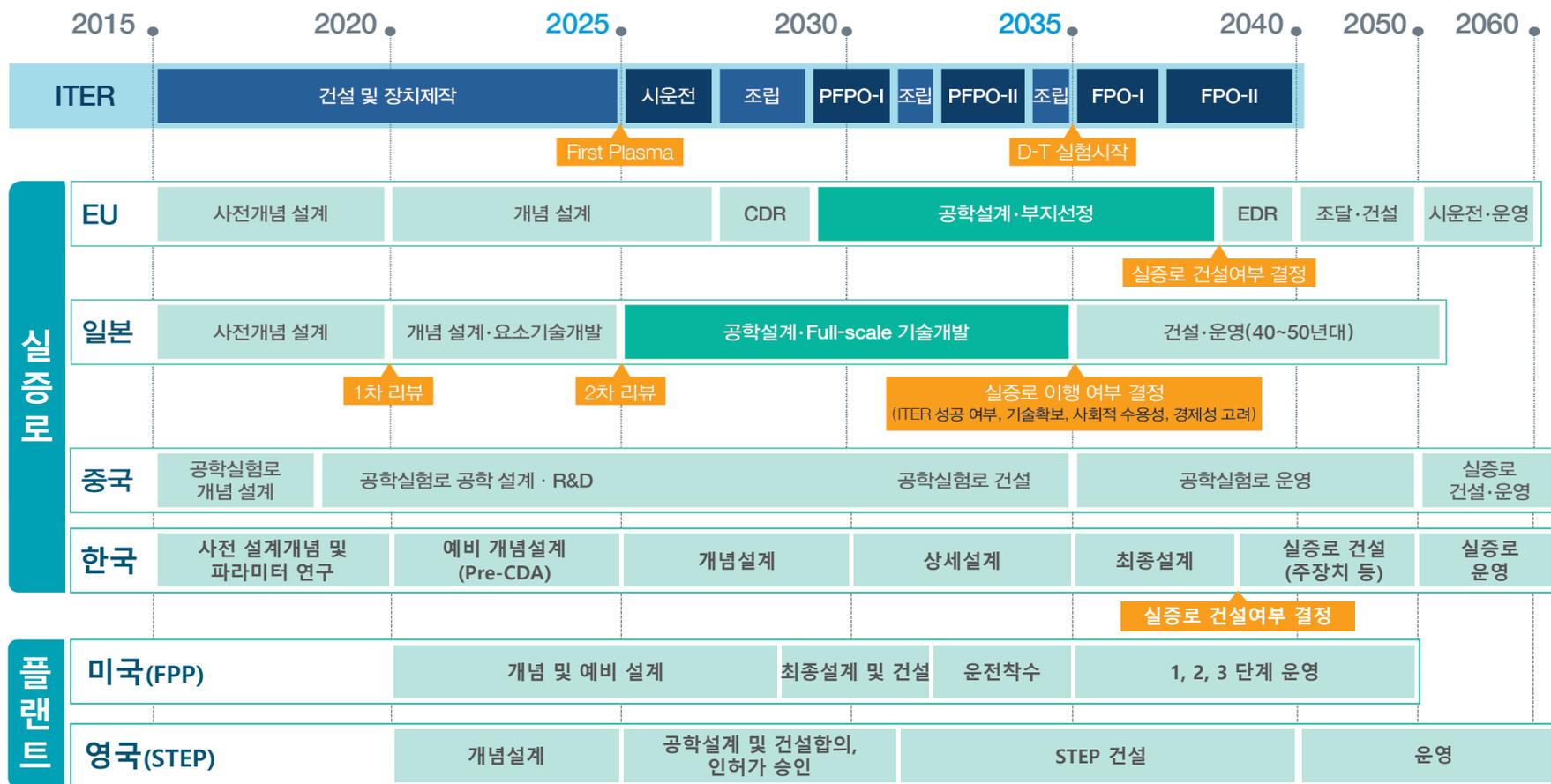


- 파리협정('16년 발효), UN 기후정상회의('19.9) 이후, 韓, 美, 日, 中, 英, EU 등의 '2050 탄소중립' 선언으로 **2050 탄소중립의 글로벌 의제화**
* EU('19.12)·中('20.9)·日('20.10)·韓('20.10), 美('21.1, 탄소중립 추진 시사)
- 관계부처 합동 '2050 탄소중립 추진전략'('20.12.7) 마련 등, 2050 탄소중립을 실현하기 위한 사회경제적 전분야 전략을 마련 중
- 신재생 에너지원 확보를 위한 친환경 에너지 개발을 위한 **R&D의 적극 추진**
- 과학기술관계 장관회의 '2050 탄소중립 실현을 위한 탄소중립 연구개발 투자전략(안)'('21.3.31) 마련(10대 핵심 분야에 "핵융합" 포함)
- 미래에너지를 위한 핵융합 핵심기술의 선제적인 준비 확보
 - 핵융합 전력생산 실증 핵심기술 개발(열에너지 변환 기술, 연료주기, 재료 등 공학기술)
 - 지속적인 기술 고도화 및 종합 기반 조성

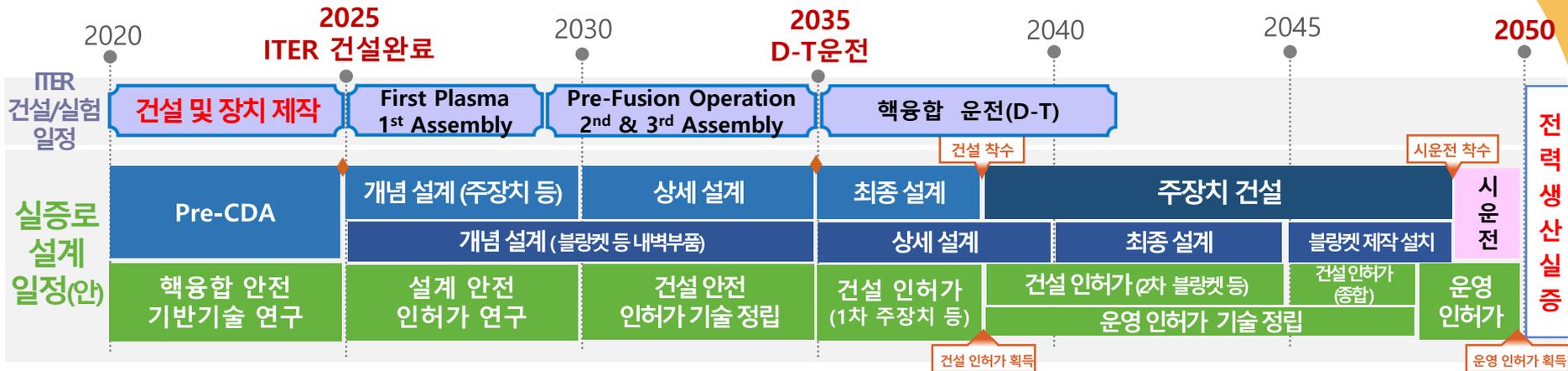


국가별 DEMO 로드맵

EU, 일본, 중국의 경우 '50년대 전력생산 실증을 위해 로드맵 수정, 최근 미국, 영국의 경우 탄소중립의 핵융합에너지 기여를 위해 공격적인 로드맵 구축



핵융합 실증로 설계 및 건설(예시 검토)

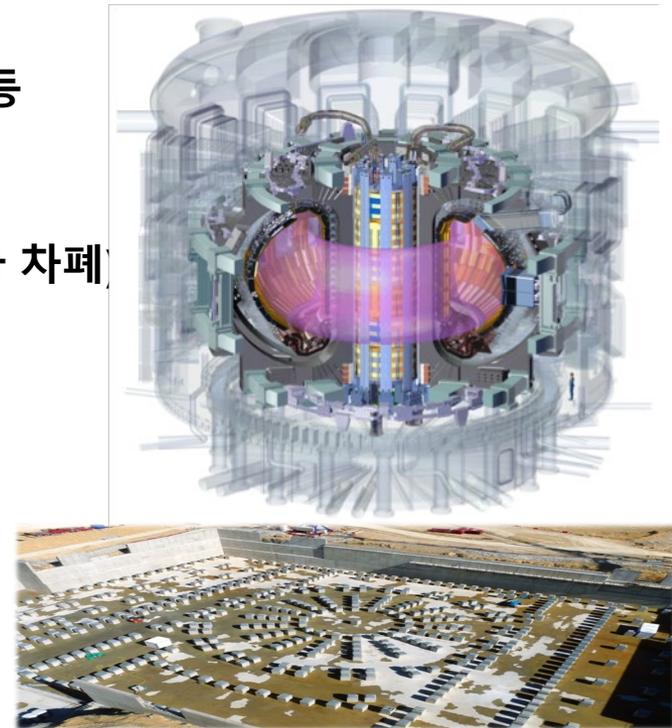


■ (실증로 설계) 상세설계 및 인허가의 단계별 추진으로 DEMO 조기 건설 착수 추진

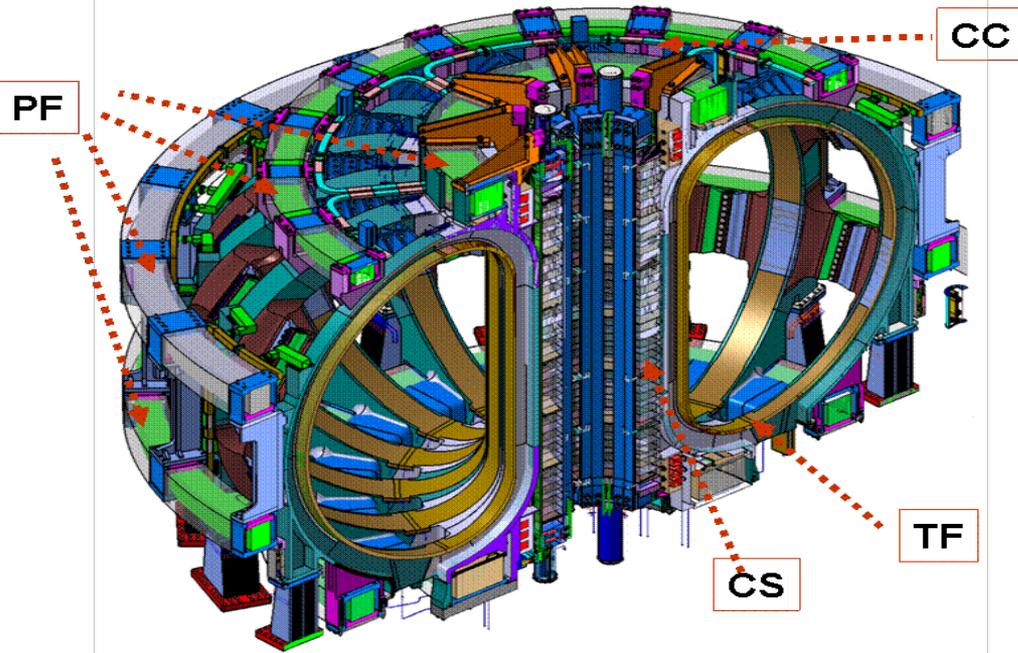
- 토카막 방식의 핵융합로에서 D-T 핵융합 반응을 이용하여, **그리드 공급 가능 전력생산(~500MWe)과 삼중수소 연료의 자급자족(Self-sufficient, TBR>1.05)을 실증 및 경제성(COE) 타당성 분석 및 점검 가능**
- ITER의 경험을 활용하기 위해 **ITER와 유사한 크기로 설계 방향 설정**
- K-DEMO 설계 및 건설 인허가를 2단계로 구분하여, ITER 기술 기반 **토카막 주장치(1단계)**를 조기 추진하고, 동시에 **증식블랑켓 등 내벽부품(2단계)** 기술 확보를 통해 건설기간 최적화
- (1단계) 주장치, BoP, 건물 등 ITER를 통해 확보된 기술 기반 상세설계 및 주장치 건설 인허가 수행
- (2단계) 증식블랑켓, 디버터 등 내벽부품 및 가열전류구동 기술 확보 후 상세설계 및 건설 인허가 수행

핵융합에너지 설계/제작/건설 기술 Challenges

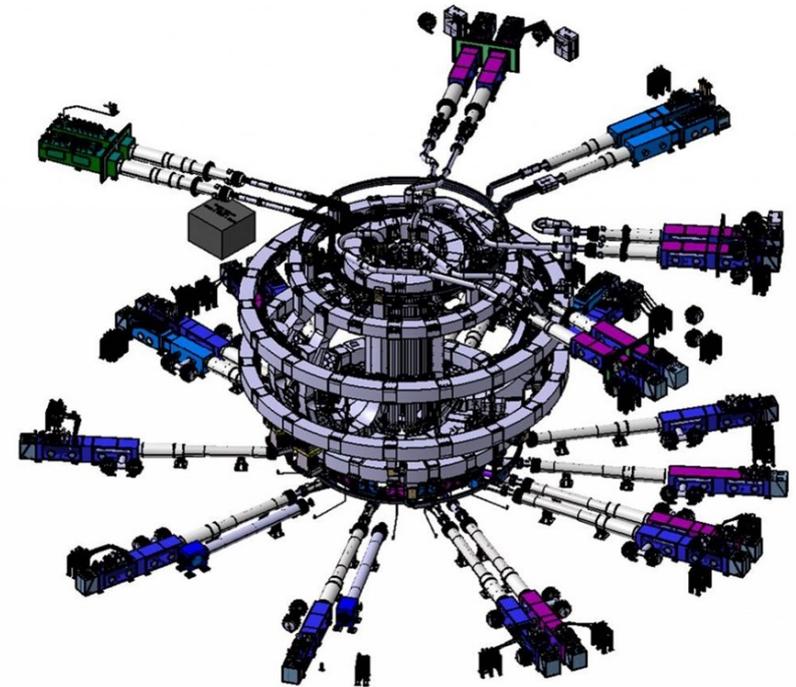
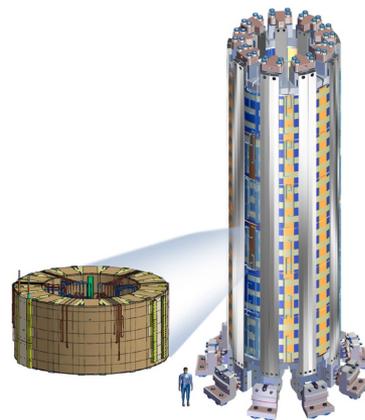
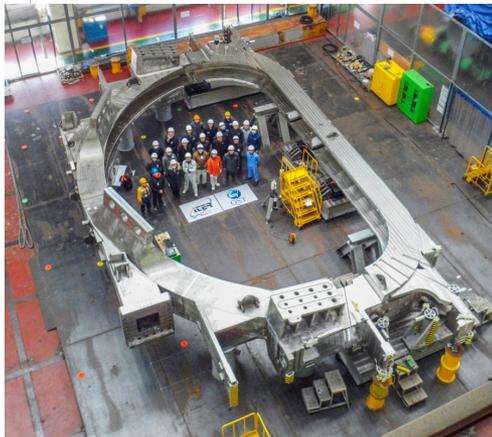
- **노심** : 연소 플라즈마 물리학 (Maxwell's Equations, Electromagnetic Physics)
 - 연소 플라즈마 (Steady-state 운전 시나리오) : 핵융합 반응 (14.1 eV 고속 중성자)
 - 플라즈마 전류 (15 MA), - ITER (Q~10, 500 MW) → Fusion Plant (Q~50, 3000 MW)
- **핵융합로** : 초전도자석 기술, 재료 기술, 중성자-열-전자기 부하 해석, 원격 조작 기술 등
 - **First Wall** (고속 냉각) : 재료(대면재)
 - **블랑켓** (중성자 차폐, 삼중수소 증식, 냉각/열교환) : 재료(구조재, 기능재 등)
 - **디버터** : 재(He) 배출, 열(Heat) 배출(고속 냉각/열교환)
 - **초전도 자석 시스템** (TF, PF, CS) : Nb₃Si (Nb₃Al), NbTi, 등
 - **진공용기** : 재료 (구조재)
 - **저온용기** (초전도자석 저온 운전을 위한 열차폐체)
 - **부대장치(Ancillary System)** : - 가열 및 전류구동 (중성자 차폐)
- 진단 및 HMI
- **플랜트 시스템** : 삼중수소 기술, 극저온 냉동 기술 등
 - 삼중수소 연료주기
 - 액체헬륨 생산 및 공급
 - Hot Cell, 폐기물
 - 전기 (AC/DC Converters) : 펄스(AC) 운전
- **BOP** : 냉각수, 열교환기, 터빈



초전도자석 시스템(고자기장)



- 10,000 tons of magnets, with a stored magnetic energy of 51 GJ, produce the magnetic fields that initiates, confines, shapes and controls the ITER plasma.
- Manufactured from Nb_3Sn or $Nb-Ti$, the magnets become **superconducting** when cooled with supercritical helium in the range of 4 K (-269 °C).



▪ 저온용기

진공보온(10^{-4} mbar) 스텐레스

직경 : ~30 m

높이 : ~30 m

질량 : ~3500 t

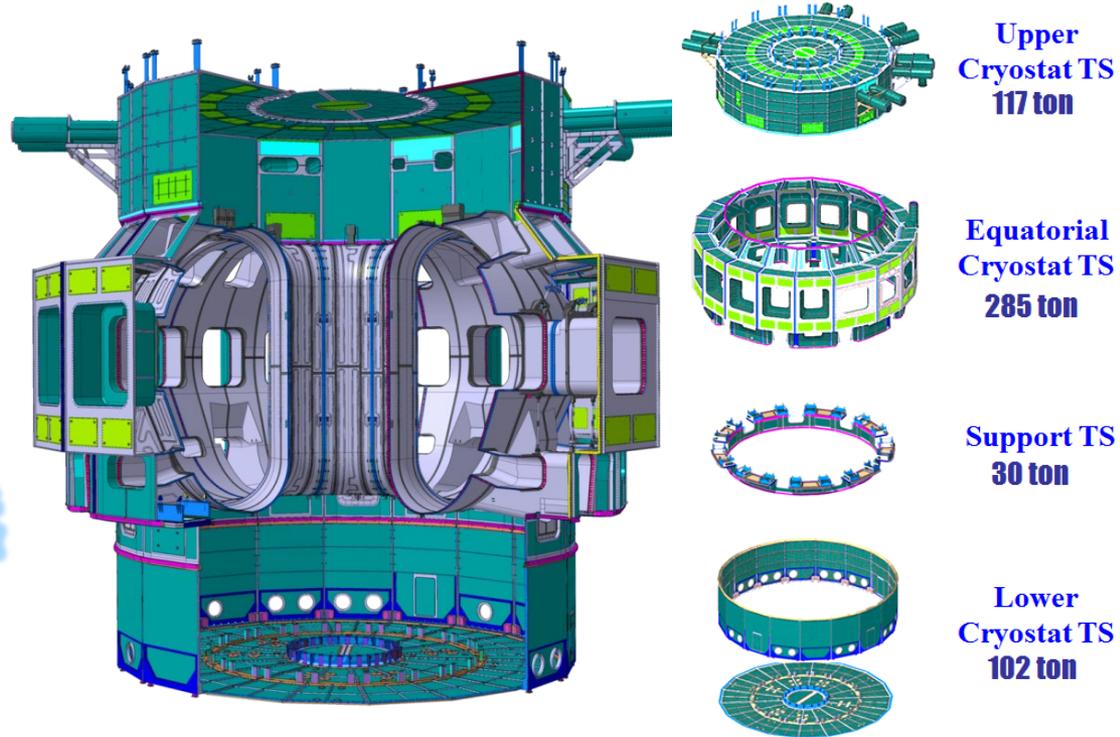


▪ 열차폐체

크기 : 25 m x 25 m SS 304L(N)

은도금 : 5-10 μm , 0.05 of emissivity

He 가스 냉각 (80K)

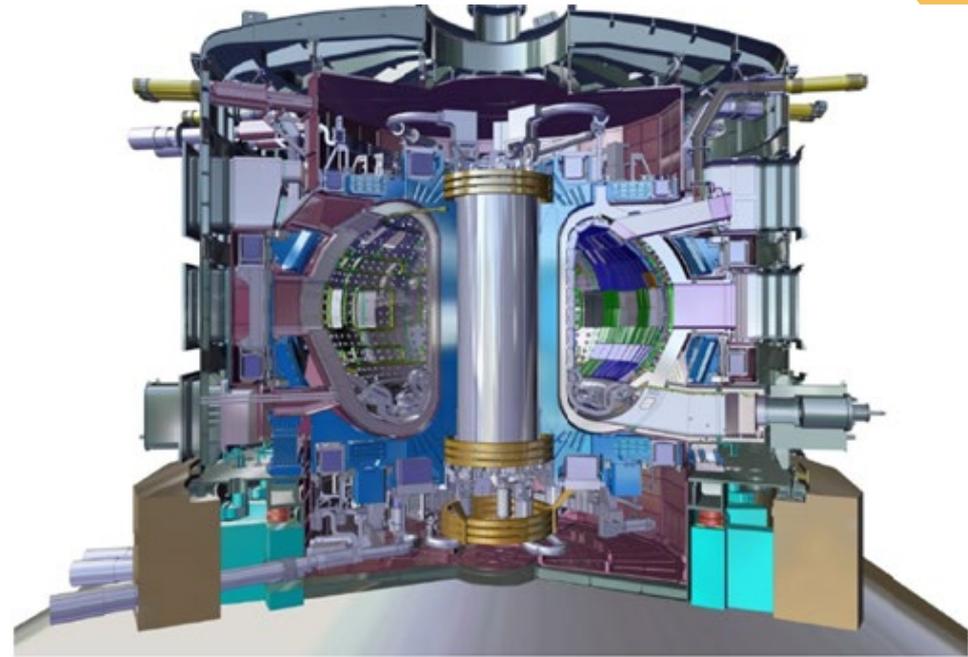


● 삼중수소

- 진공용기 매부
- 삼중수소 연료주기 장치(연료 공급, 진공 펌핑, 공정 등)
- 삼중수소 저장고
- 핫셀 시설(삼중수소 오염 폐기물)

● 중성자 방사화

- 진공용기 내벽 부품(블랑켓, 디버터 등)
- 용기 내부 대면재의 표면 침식 먼지
- 냉각수 내부의 방사화된 부식물



- ◆ **Confinement** is the most important safety function that is achieved by a coherent set of physical barriers and / or auxiliary techniques.
- First confinement system designed to prevent releases of radioactive materials into the accessible **working areas**.
- Second confinement system prevents releases to the **general public and the environment**.

핵융합로 내벽 고열에 견디기

Summer sunny day

1 kW/m²



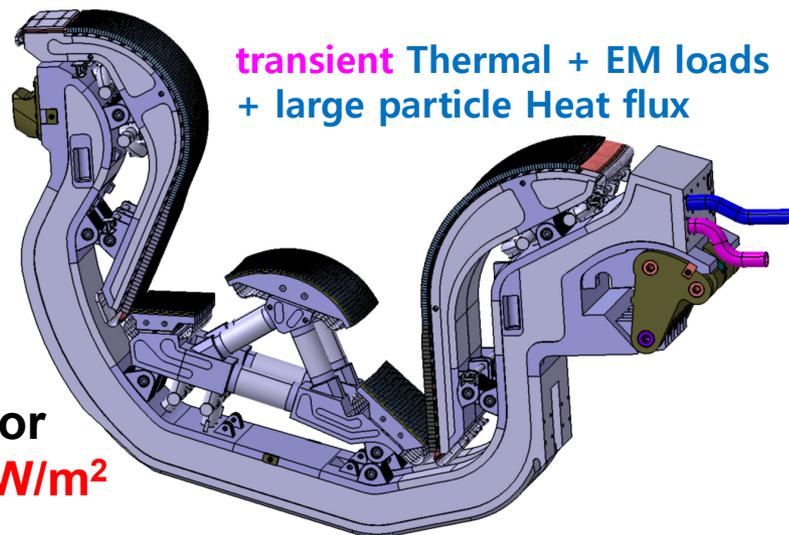
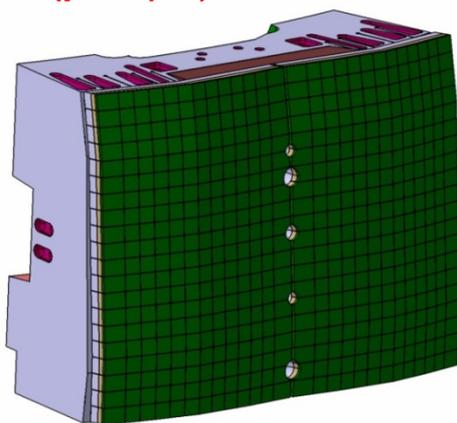
Space shuttle
(re-entry)

500 kW/m²

ITER Blanket First Wall

(peak) 5,000 kW/m²

radiation Thermal +
transient EM loads



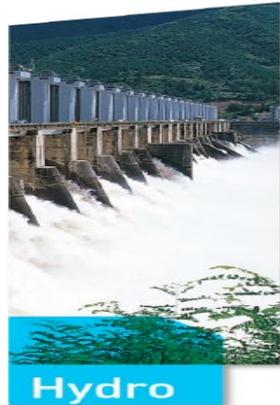
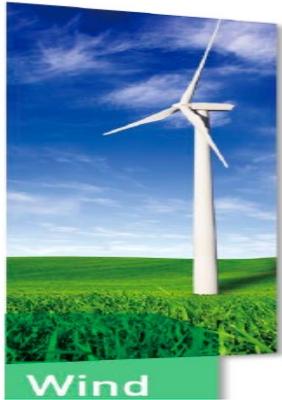
transient Thermal + EM loads
+ large particle Heat flux

ITER Divertor

(peak) 20,000 kW/m²

21세기 화석연료의 대안(에너지와 생활)

◆ 현재 세계 에너지 소비의 **80%** 이상 - 석유, 석탄, 천연가스 등의 **화석연료에 의존**



신재생 에너지

청정, 안전 기후변화에 영향을 받음, 에너지 밀도 낮음

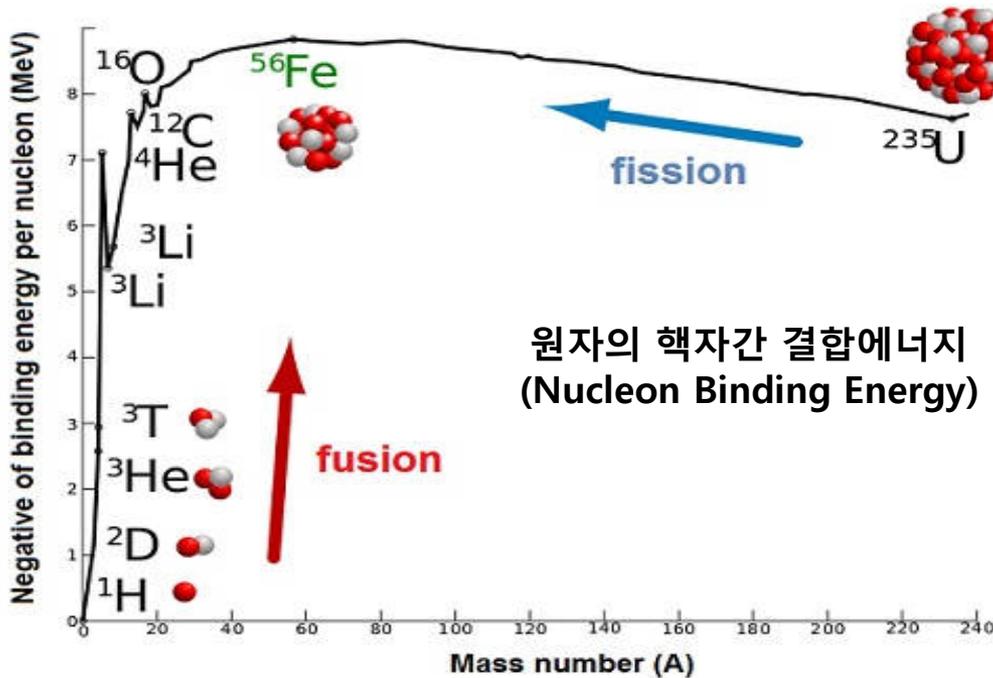
원자력과 핵융합

청정, 기후변화의 영향 적음, 에너지 밀도 높음

자연의 힘	에너지 원천	에너지 변환 (광합성, 대기)	에너지 저장	에너지 증계	에너지 실용
- 중력 - 전자기력 - 약력	- 핵융합에너지	태양전지, 수력, 풍력, 발전소, 식물(바이오)	석탄, 원유, 천연가스, 곡물 (수소, 충전기)	석유(내연기관), 전기, 수소(수소전지), 식품	동력, 조명, 운송, 난방, 식량
- 강력(핵력)	- 핵분열에너지 (원자력)	발전소	(수소, 충전기)	전기, (수소)	동력, 조명, 난방,

핵융합과 핵분열(에너지)

- 철(⁵⁶Fe)보다 무거운 원자는 핵분열(Fission)을 통해 에너지 방출
- 철(⁵⁶Fe)보다 가벼운 원자는 핵융합(Fusion)을 통해 에너지 방출



Fission

Neutron ^{235}U

Fission Fragment

Fission Energy

Neutron

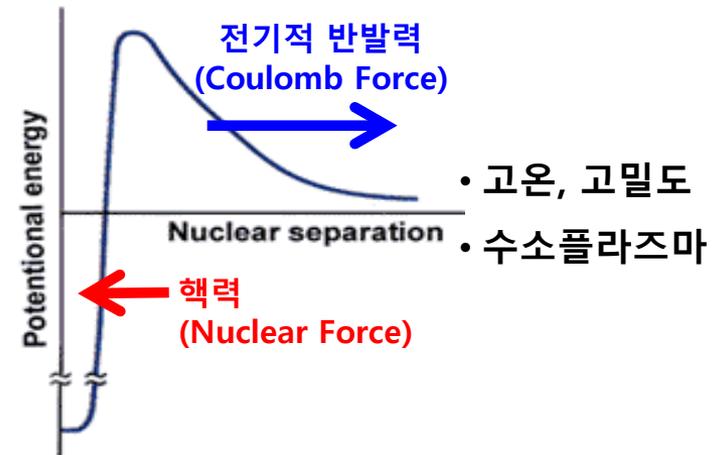
Fission Fragment

$E = mc^2$

중수소 (D) 중성자 (n) : 14.1 MeV

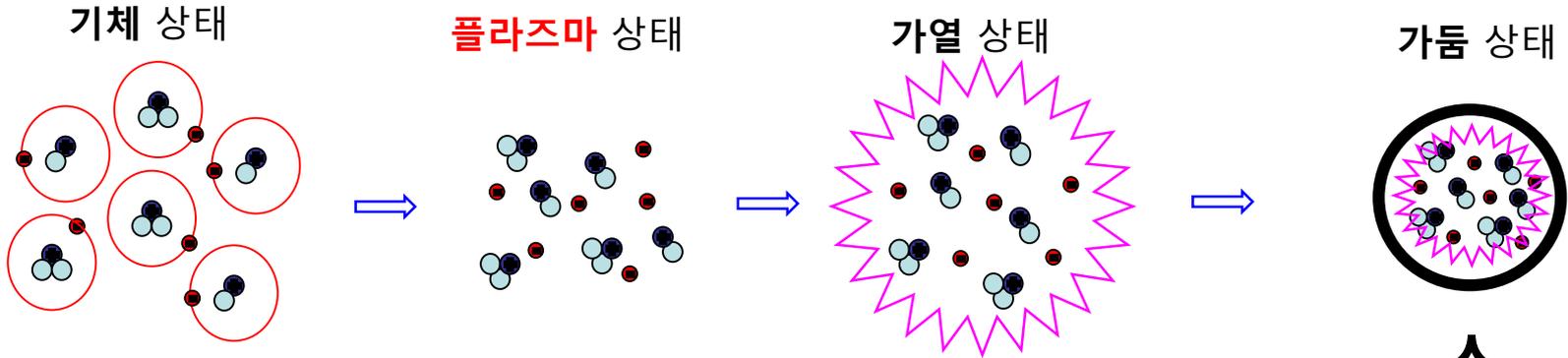
17.6 MeV

삼중수소 (D) 헬륨 (He) : 3.5 MeV

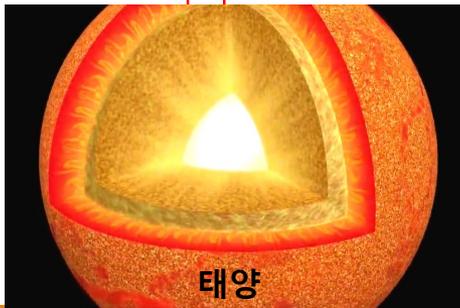
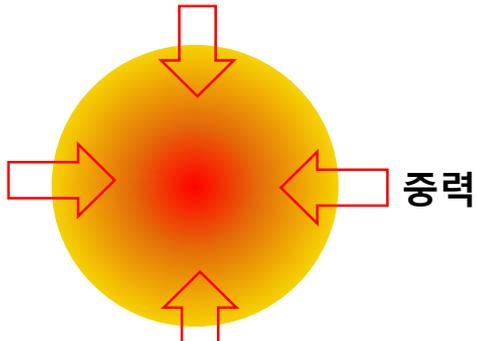


핵융합에너지는 가벼운 원자핵들이 융합하여 무거운 원자핵으로 바뀌는 과정에서 발생

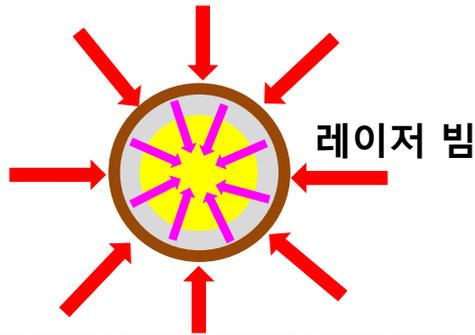
플라즈마의 가둠 형태



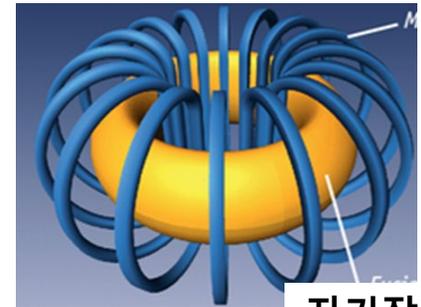
중력에 의한 가둠



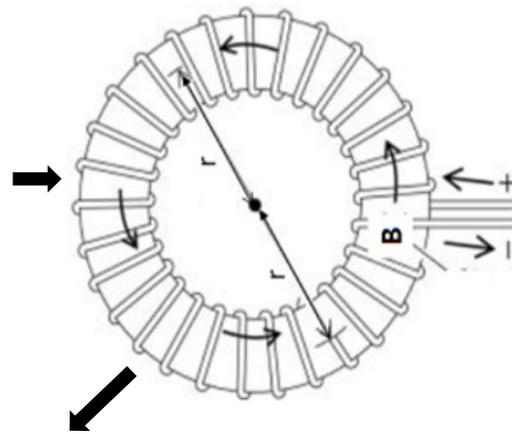
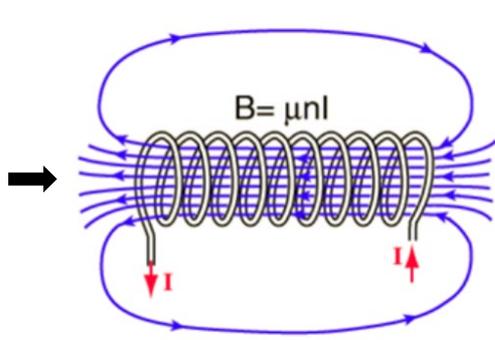
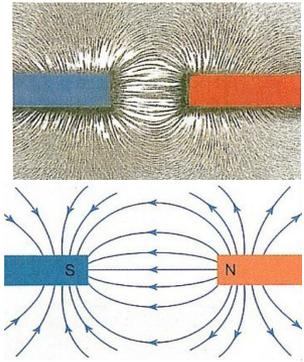
관성에 의한 가둠



자기장에 의한 가둠

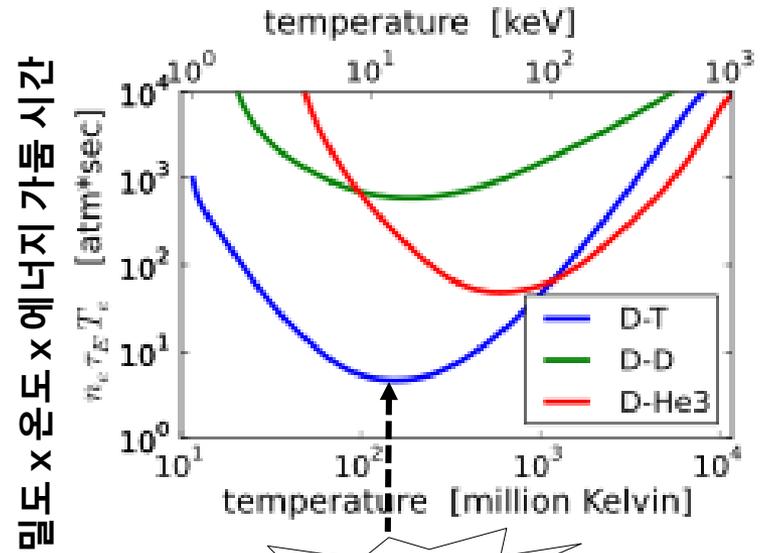
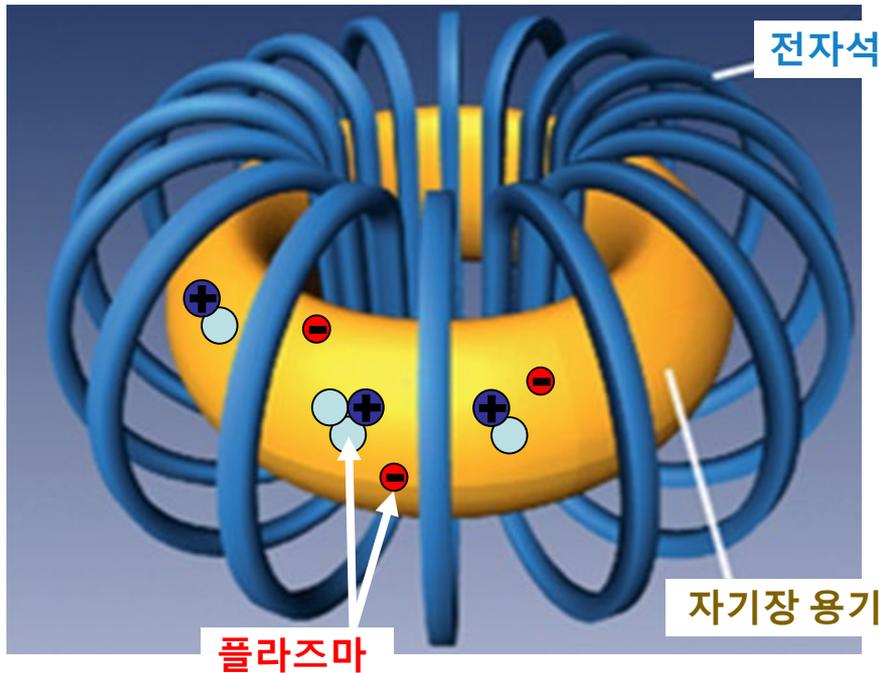


지구상에서 핵융합 방법



전하를 띤 입자들은 자기장에서 회전운동(로렌즈법칙)을 한다.

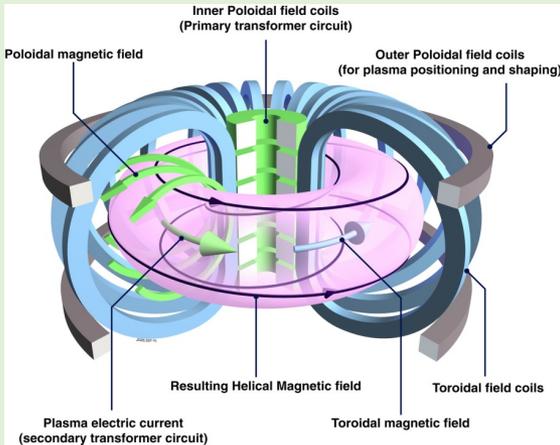
- 핵융합 점화 조건(Lawson Criteria)
 - $n \times T \times \tau_E \geq 3 \times 10^{21} \text{ keV s / m}^3$ (D-T 핵융합의 경우)
- 플라즈마 밀도 (n) : $> 1 \times 10^{20} / \text{m}^3$ (약 $0.3 \times 10^{-3} \text{ mbar}$)
- 플라즈마 온도 (T) : $> 15 \text{ keV}$ (~ 1.5 억도)
 - 플라즈마 압력 (밀도 x 온도) ~ 3 기압
- 단열 효과 (τ_E) : $> 2 \text{ s}$ (에너지 유지시간, 장치 크기 비례)



약 1.5 억도

Tokamak

Aspect ratio: 2.5~3.5



- 플라즈마 전류 구동 필요
- 온도, 밀도, 가둠시간 등 핵융합 발전조건 만족

- (US) TFTR, DIII-D
- (EU) JET, (CN) EAST
- (KO) KSTAR,
- (JA) JT60-SA
- (IO) ITER

Spherical Tokamak

Aspect ratio: 1~2
No CS, Low TF field

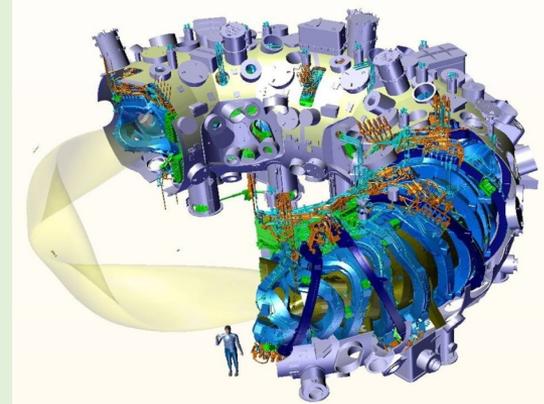


- Need start-up current
- High β operation
- High bootstrap current

- (UK) START, MAST-U
- (US) NSTX-U
- (UK) STEP

Stellarator

플라즈마 전류 필요 없음 \Rightarrow
no disruptions, steady state



- Challenges to engineering (remote maintenance)
- Manufacturability of magnet

- (JA) LHD
- (German) Wendelstein 7-X