



CFETR项目总体介绍

万元熙^{1, 2}

¹ University of Science and Technology of China, Hefei, China

² Institute of Plasma Physics, CAS Hefei, China

E-mail: wanyx@ipp.ac.cn or wanyx@ustc.edu.cn

2016年4月27-29日, 上海

高温与高场超导材料及其应用技术研讨会



CFETR

Chinese Fusion Engineering Test Reactor

中国（磁约束）聚变工程实验堆

是一个全超导托卡马克型的聚变工程实验堆



问 题

- **为什么要建设CFETR，其基础及科学技术目标？**
- **为什么CFETR必须是超导托卡马克？**



内 容

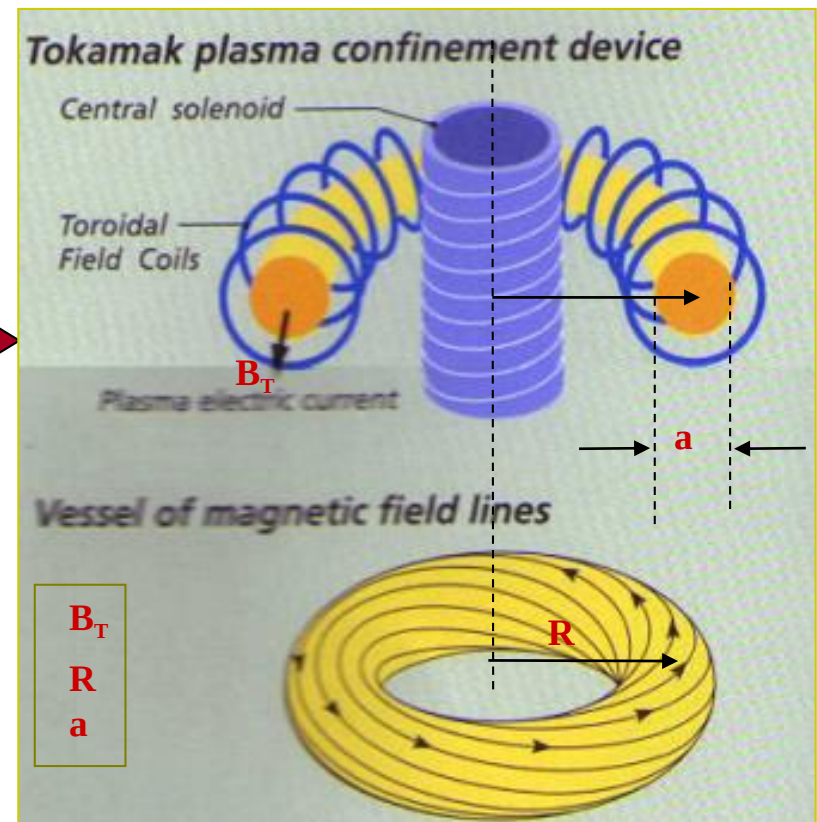
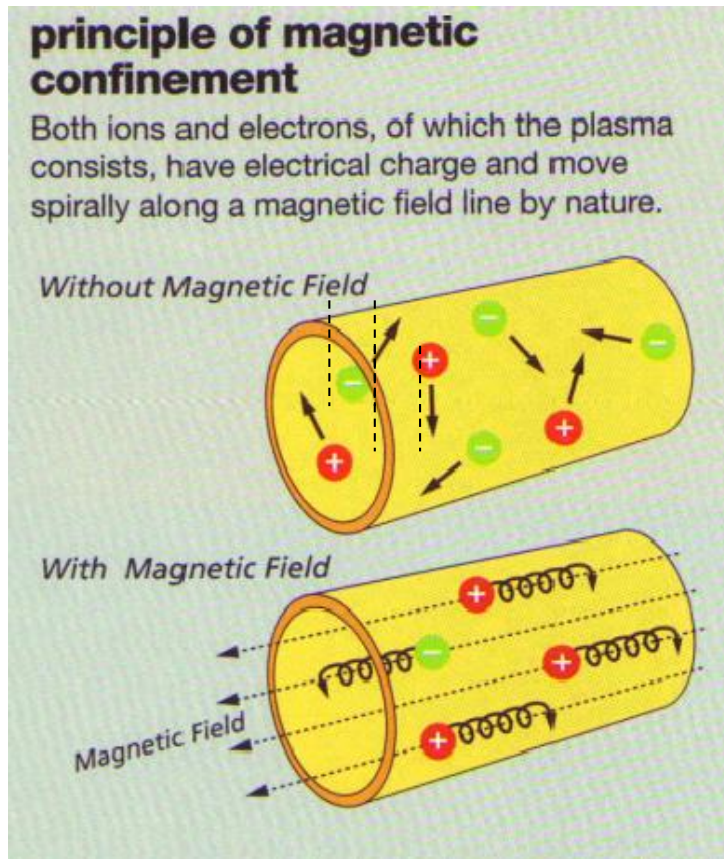
1. 聚变能的开发在托卡马克装置上取得重大进展：
 - 托卡马克
 - 从T3 - ITER
 - 超导托卡马克是实现稳态运行的必要条件；
 - 从 ITER—PFPP
2. CFETR项目介绍
 - 科学目标
 - 建设基础
 - 总体工程概念设计
 - 已开始的预制研究
 - 期望和计划——尽快开始工程设计和更多部件的预研
3. 小结



磁场可以约束带电粒子

磁约束

托卡马克，磁镜，仿星器...



磁容器可盛装和约束高温等离子体

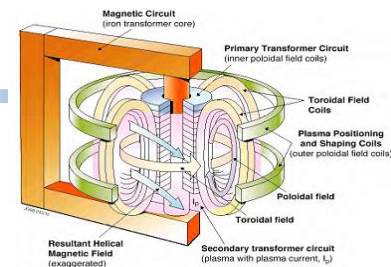


开发聚变能的研究在 托卡马克类型的磁约束实验 装置上取得了突破性进展！



托卡马克环形磁容器的实际构成

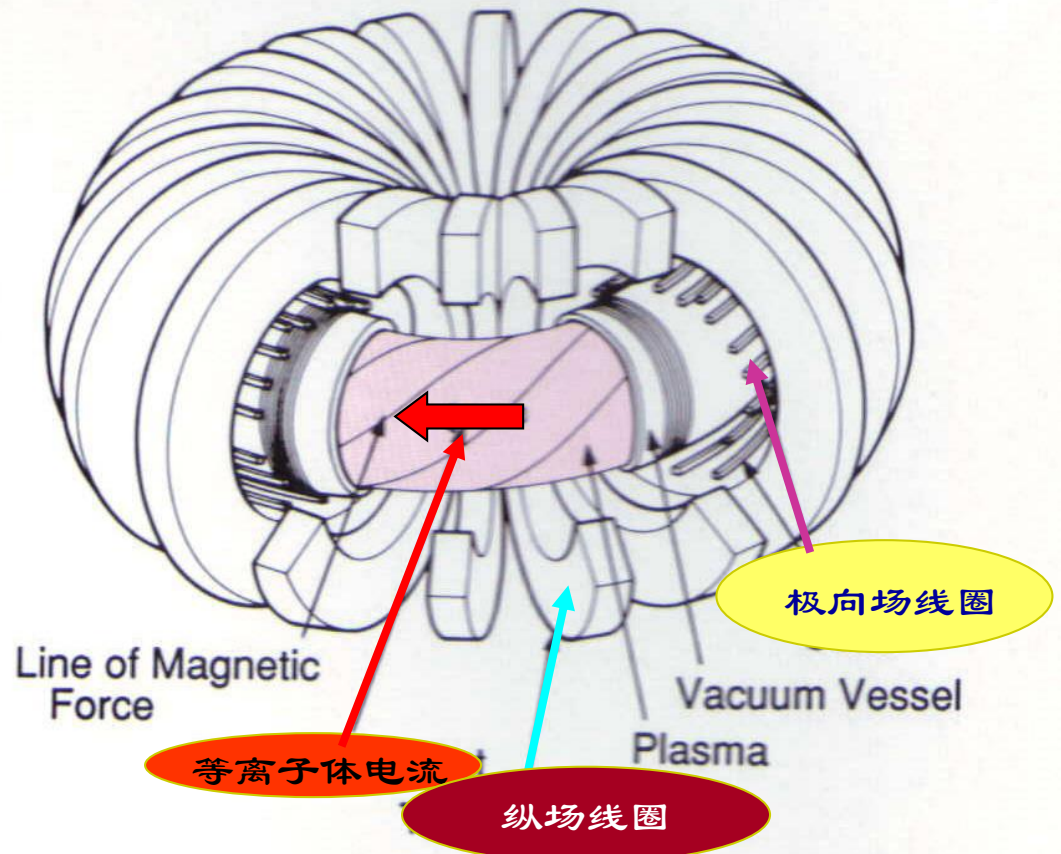
Toroidalnaya Kamera Magnitnaya



Tokamak

(环形磁容器)

Tokamak-Type Reactor



构成托卡马克环形磁容器的三个基本磁场：

- 纵向磁场；
- 极向磁场
- 等离子体电流磁场

最重要的工程参数是：

大半径： R

小半径： a/b

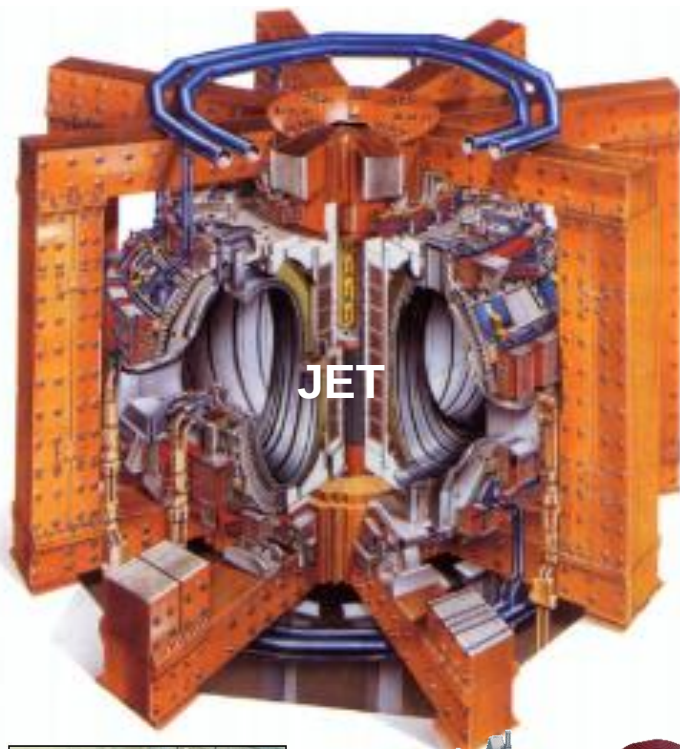
纵场强度： B_T

等离子体电流 I_p



在托卡马克上开发核聚变能的科学可行性已经得到了证实！

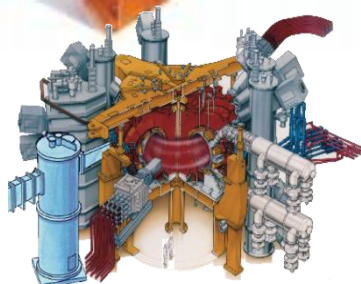
欧洲联合环JET是世界上已建成的最大常规托卡马克之一



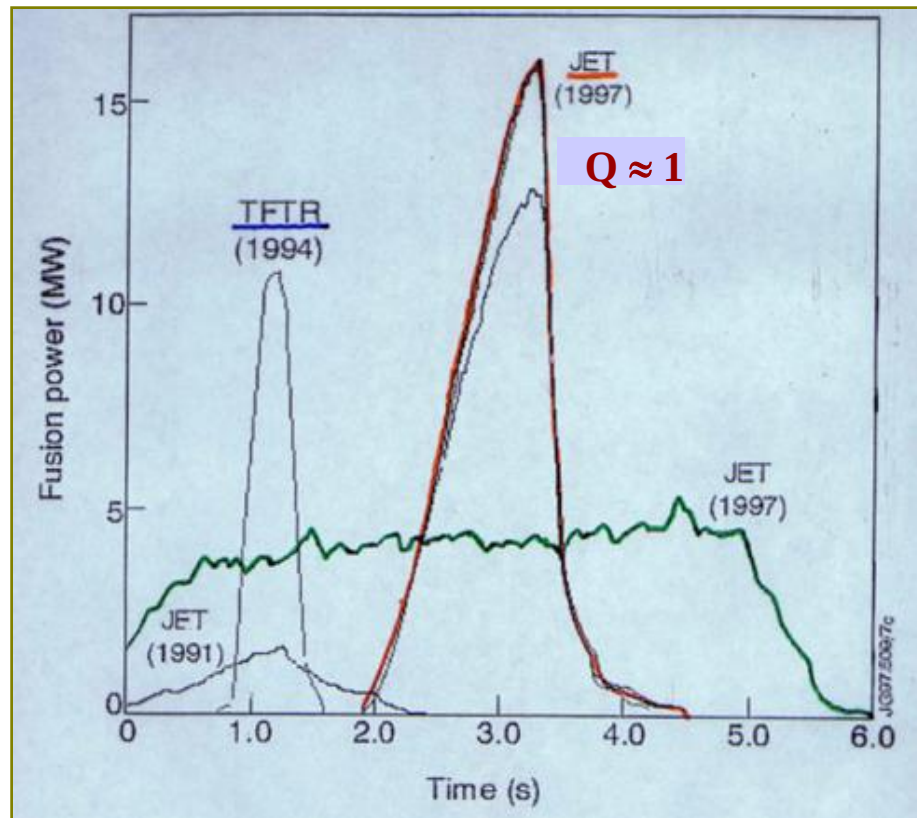
JET



TFTR



JT-60



- 最高温度达到 2-4 亿度；
- 最高聚变输出功率超过 16 兆瓦；
- 功率放大因子 Q = 聚变输出功率/输入功率, 已达到 1.25；



磁约束聚变正在发生里程碑的重大转变:

- Discovers from many medium size devices and theory progress :

- $q \rightarrow I_p$
- Density limit
- β limit
- τ_E
- P_{L-H}
- Tech. developments: NBI, ICR, ECR, LH
-

$$\left. \begin{array}{l} \text{Density limit} \\ \beta \text{ limit} \\ \tau_E \end{array} \right\} nT\tau$$



T-3

~1968



TFTR



JET

~1996

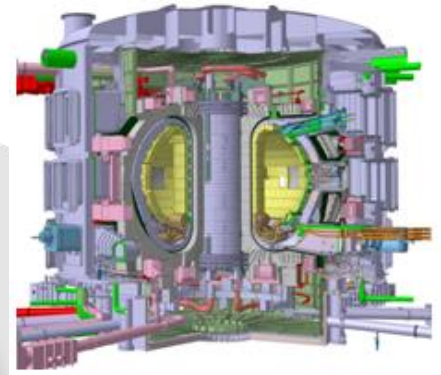
$$P_{fus} \propto n \times T \times \tau_E > 10^{21} \text{ m}^{-3} \times s \times \text{keV}$$

$$Q \sim 1$$

获得聚变（燃烧）等离子体



JT-60



ITER

2006

$$E_{fus} \propto (n \times T \times \tau_E) \times t_{\text{burning}}$$

$$Q > 1$$

获得稳态燃烧等离子体

基础研究

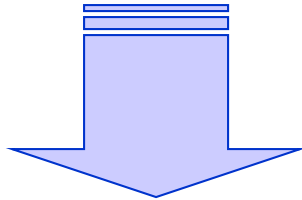




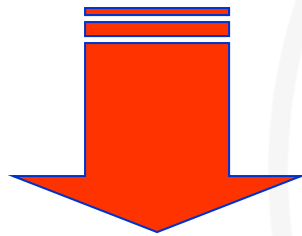
开发聚变能必须经过二个关联和必要的阶段-1

获得聚变功率：改善约束达到劳森判据——得失相当

$$P_{\text{fusion}} \propto n * T * \tau_E > 10^{21} \text{ m}^{-3} * \text{s} * \text{kev}$$



获得聚变能量：“长”时间维持“燃烧”



$$E_{\text{fusion}} \propto (n \times T \times \tau_E) \times t \text{ “燃烧”}$$



开发聚变能必须经过二个关联和必要的阶段-2

- 为了能够长时间保持燃烧状态，托卡马克环形磁容器
 - 由外部磁体产生的磁场必须稳态 $\Rightarrow$ 超导磁体；
 - 必须维持稳态的等离子体电流； $\Rightarrow$ 无感电流驱动
 - 其它物理和技术问题：如破裂控制等
- 稳态运行充分必要条件
- 所以超导托卡马克是聚变堆稳态运行以获得实用聚变能源的必要条件之一！

$$E_{\text{fusion}} \propto (n \times T \times \tau_E) \times t$$

“燃烧”



托卡马克物理和工程技术前沿研究领域

建设超导托卡马克，实现长脉冲或者稳态运行，
研究在这种条件下各种先进运行模式，成为了以开发能源
为目标的聚变最前沿的物理和工程技术研究领域！！！！

$$E_{\text{fusion}} \propto (n \times T \times \tau_E) \times t_{\text{“燃烧”}}$$



磁约束聚变正在发生里程碑的重大转变:

- Discovers from many medium size devices and theory progress :

- $q \rightarrow I_p$
- **Density limit**
- **β limit**
- τ_E
- P_{L-H}
- Tech. developments: NBI, ICR, ECR, LH
-

$$\left. \begin{array}{l} \text{Density limit} \\ \beta \text{ limit} \\ \tau_E \end{array} \right\} nT\tau$$



T-3

~1968



TFTR



JET

~1996

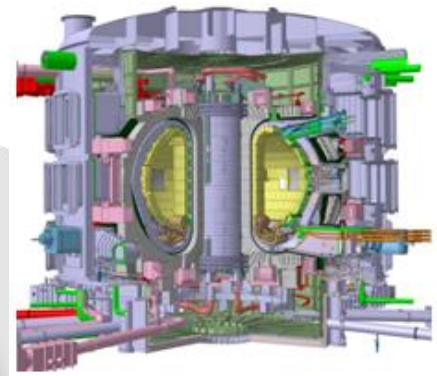
$$P_{fus} \propto n \times T \times \tau_E > 10^{21} \text{ m}^{-3} \times s \times \text{keV}$$

$$Q \sim 1$$

获得聚变 (燃烧) 等离子体



JT-60



ITER

2006

$$E_{fus} \propto (n \times T \times \tau_E) \times t_{\text{burning}}$$

$$Q > 1$$

获得稳态燃烧等离子体

基础研究





2006年11月21日七方共同建造ITER的签字仪式在法国举行





关于国际热核聚变实验堆 ITER

科学目标：功率放大倍数达到 $5\sim 10$, 聚变功率达到 $40\sim 70$ 万千瓦, 一次放电聚变燃烧维持时间 $400\sim 3000$ 秒;

集成演示未来能提供能源的聚变堆的物理和工程技术基础：

规模：是一个耗资超过百亿, 10年才能建成, 总重超过2万3千吨的最大国际合作项目;

科学基础：它是在许多托卡马克上获得的实验定标率的基础上的适当外推; 根据这一定标率的外推在托卡马克上开发聚变能的科学可行性已被证实;

重要意义：是各国建实用聚变堆前最重要的共担风险的堆工程技术和堆物理集成发展研究, 目标是为建造未来具有实用意义的聚变堆奠定基础;



ITER 现状：进展和目标

The ITER Project *moving forward at full speed*

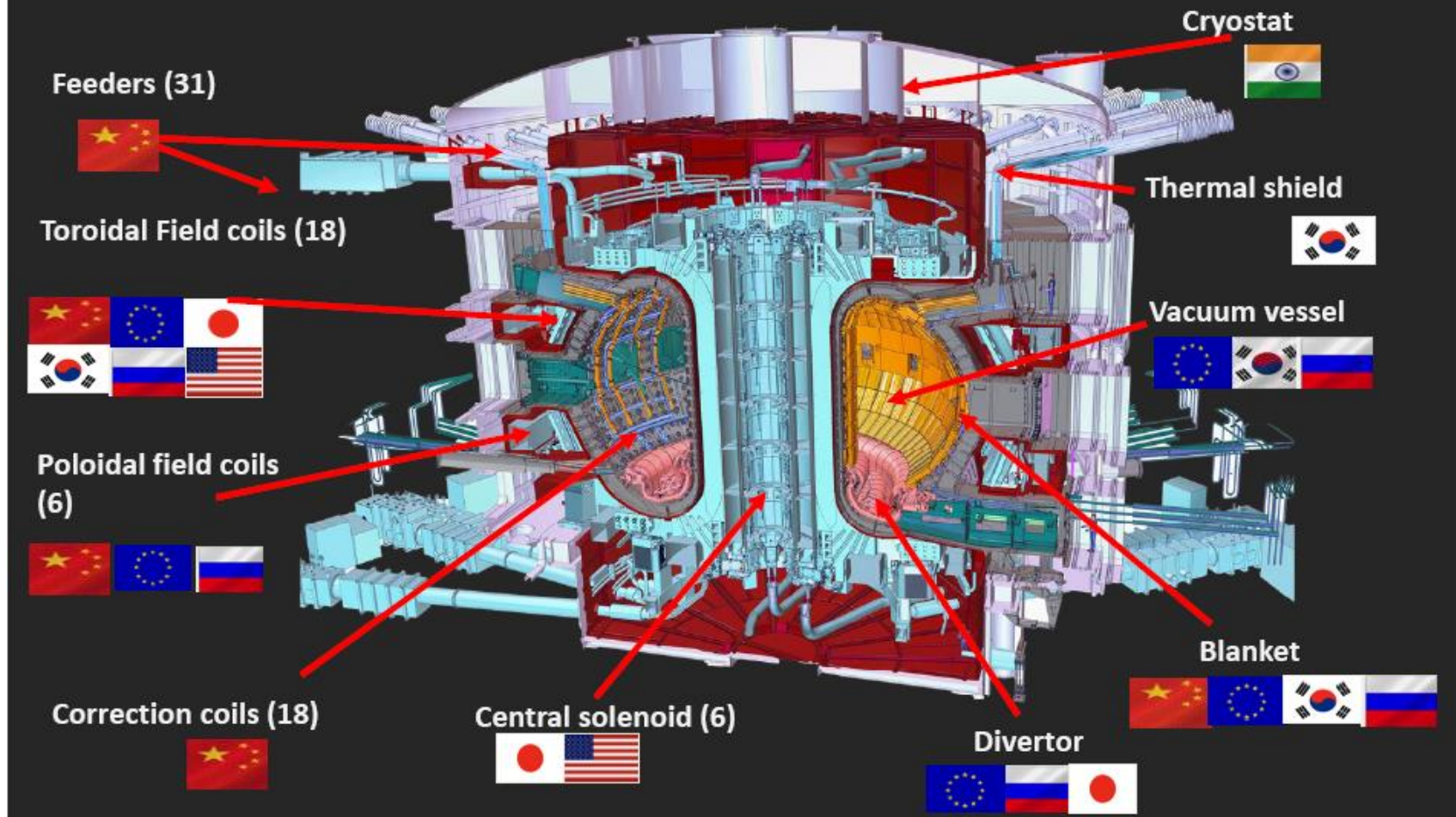
- 场地和各部件加工正在顺利推进，已陆续运抵现场
- 总装准备工作和总装已经开始招标；
- 预期2025年建成放电；
- 预期2030年前后开始氦氘运行，逐步实现 $Q \geq 10$ ，
聚变功率 40 万千瓦，400-3000秒长脉冲放电

Bernard Bigot
ITER Director General



ITER 现状：采购包分担

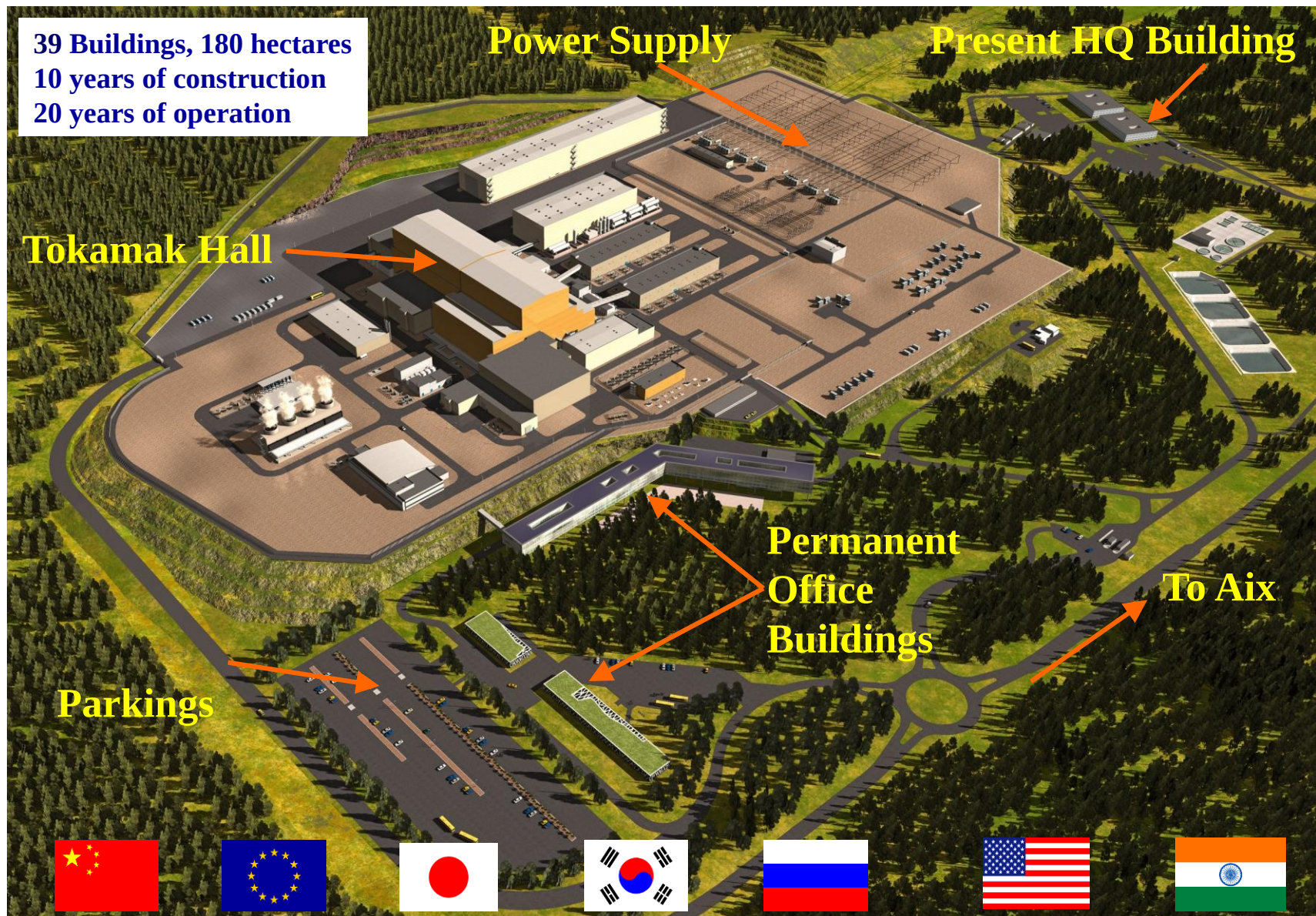
Who manufactures what?
The ITER Members share all intellectual property





国际热核聚变实验堆 (ITER) 建筑群

39 Buildings, 180 hectares
10 years of construction
20 years of operation





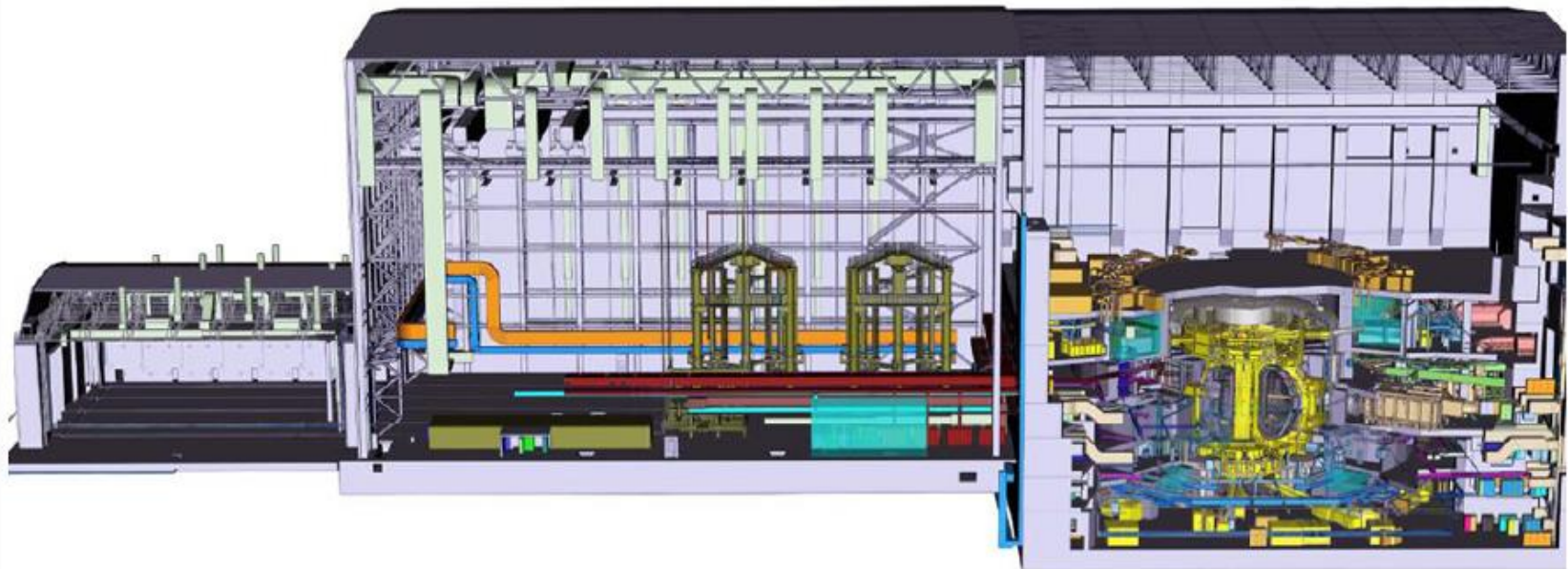
ITER 现状：场地建设进展





ITER 现状：主机厅

Tokamak System Integration



Cleaning facility building 17

Assembly hall 13

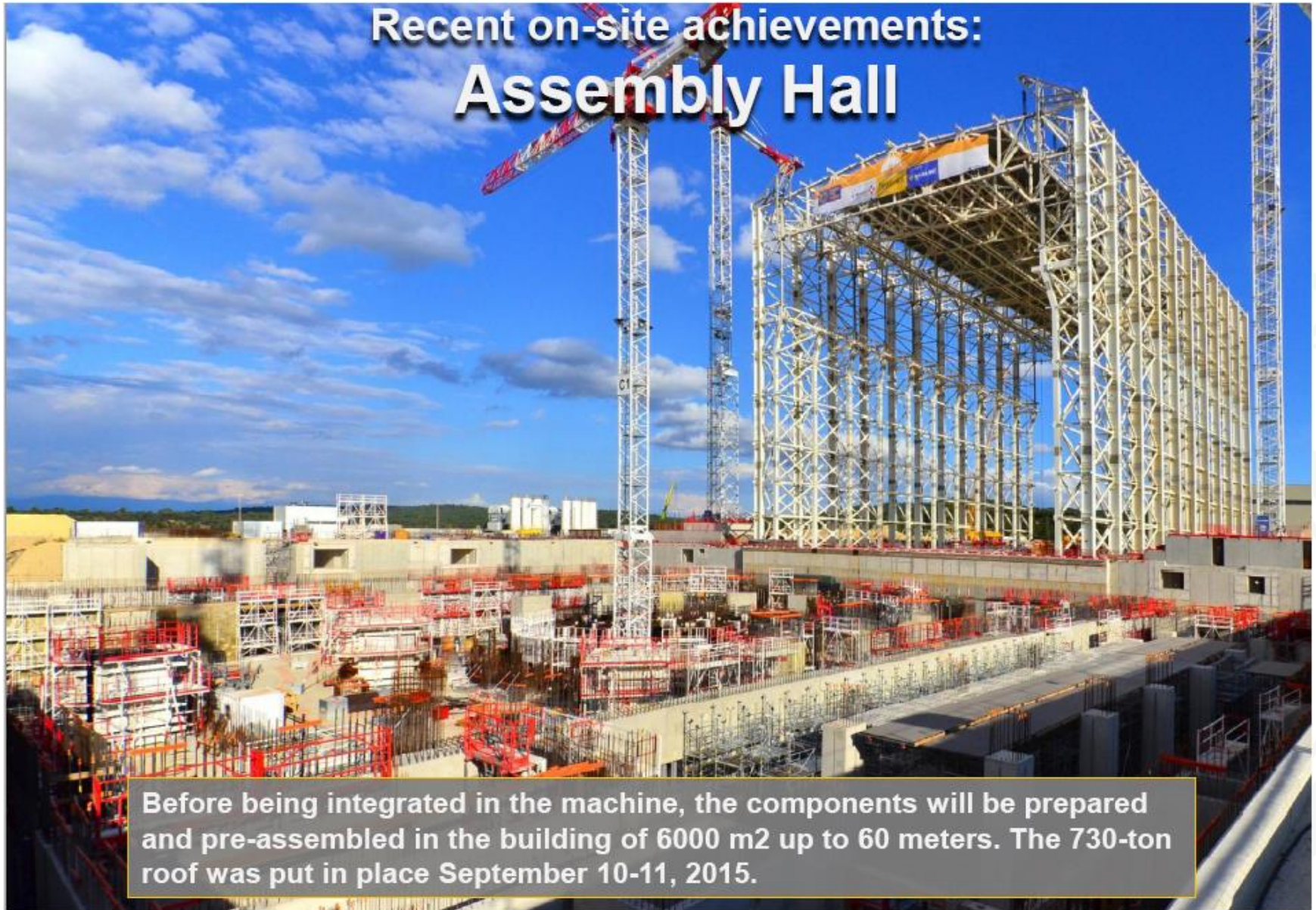
TOKAMAK building 11

- ❑ Introduction of the Tokamak components in Building17;
- ❑ Preparation and sub-assembly of the sectors in Building13;
- ❑ Transport of the sector sub-assemblies via 2x750 ton crane to the Tokamak Pit;
- ❑ Final assembly of the components/sub-assemblies in the Tokamak Pit.



ITER 现状：主机厅进展

Recent on-site achievements:
Assembly Hall



Before being integrated in the machine, the components will be prepared and pre-assembled in the building of 6000 m² up to 60 meters. The 730-ton roof was put in place September 10-11, 2015.



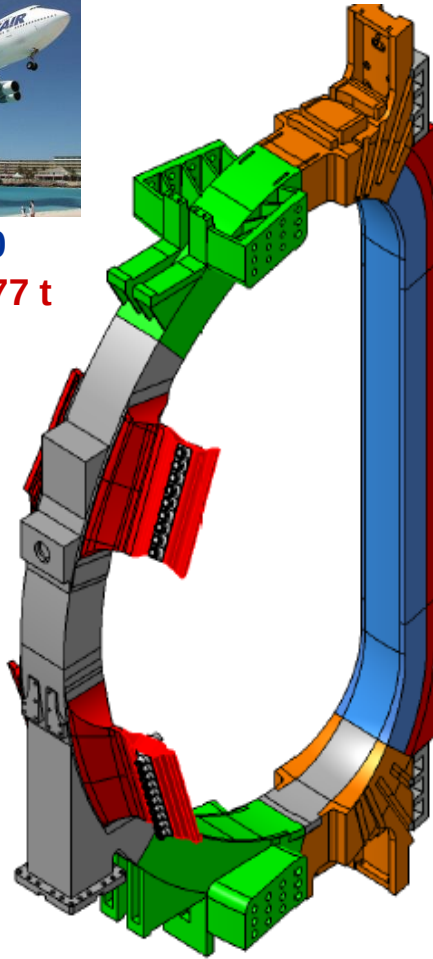
ITER 超导磁体系统 :

- 产生并维持典型托卡马克磁容器
- 感应产生兆安量级的等离子体电流

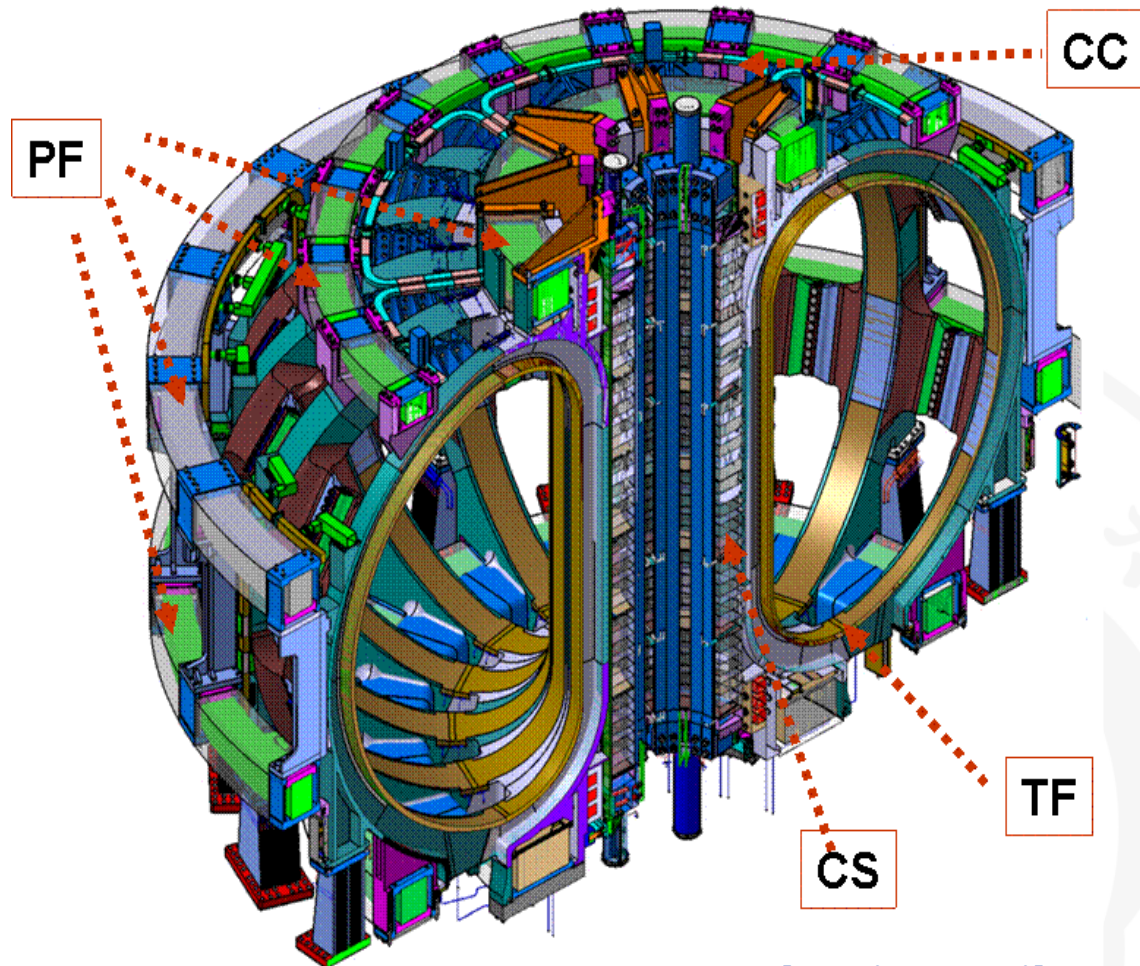


B747-300

(Max. T.W) ~377 t



Mass of (1) TF Coil :
16 m Tall x 9 m Wide, ~360 t



- 48 superconducting coils
 - 18 TF coils
 - 6 CS modules
 - 6 PF coils
 - 9 pairs of CC



ITER 超导磁体系统

Table 1.1-1 Overall Magnet System Parameters

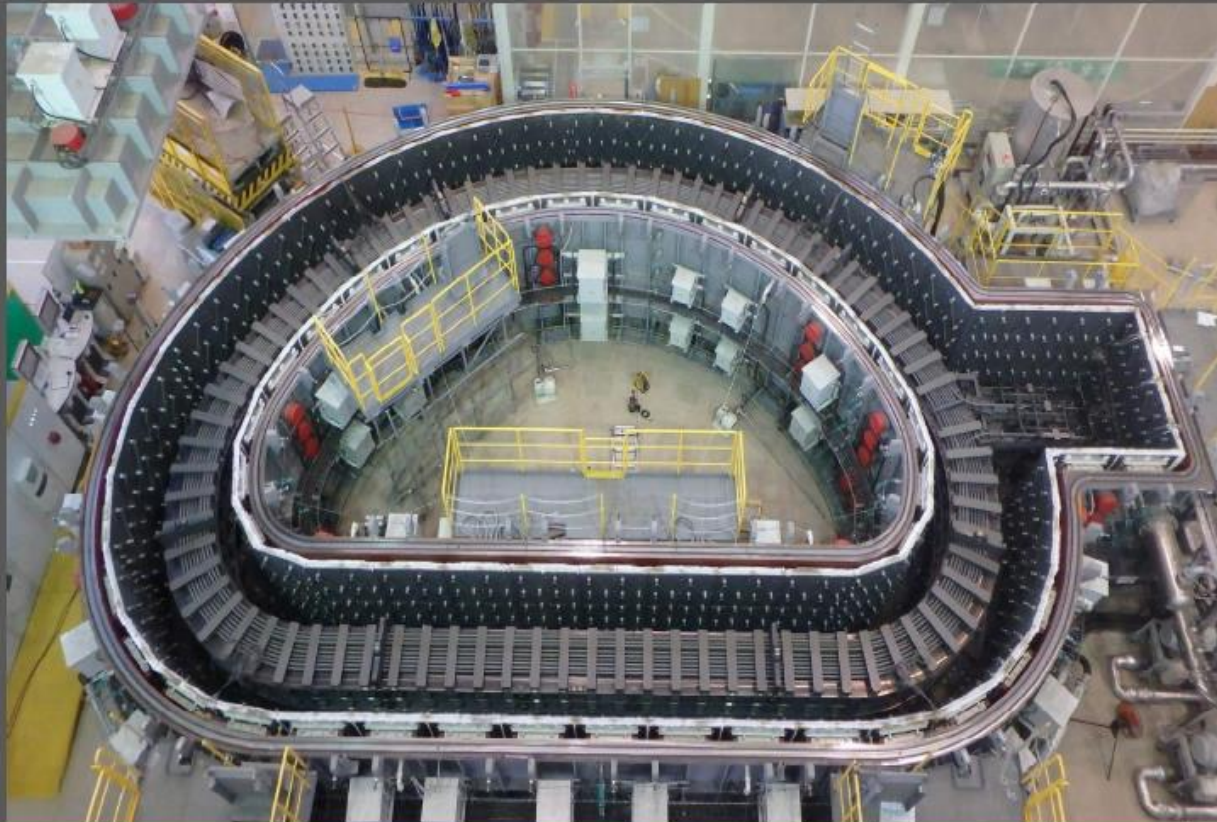
Number of TF coils	18
Magnetic energy in TF coils (GJ)	~ 41
Maximum field in TF coils (T)	11.8
Centering force per TF coil (MN) (~~100吨)	403
Vertical force per half TF coil (MN)	205
TF electrical discharge time constant (s)	11
CS peak field (T)	13.5
Total weight of magnet system (t)	~ 10,135



ITER 现状：TF磁体热处理

Manufacturing progress

Japan



Japan is manufacturing half of the 18 giant toroidal field coils needed for ITER. Here, the D-shaped pancake windings are heat treated at 650 °C for 100 hours to react tin and niobium to form the superconducting compound niobium-tin.



ITER 现状：真空室加工

Manufacturing progress

Korea

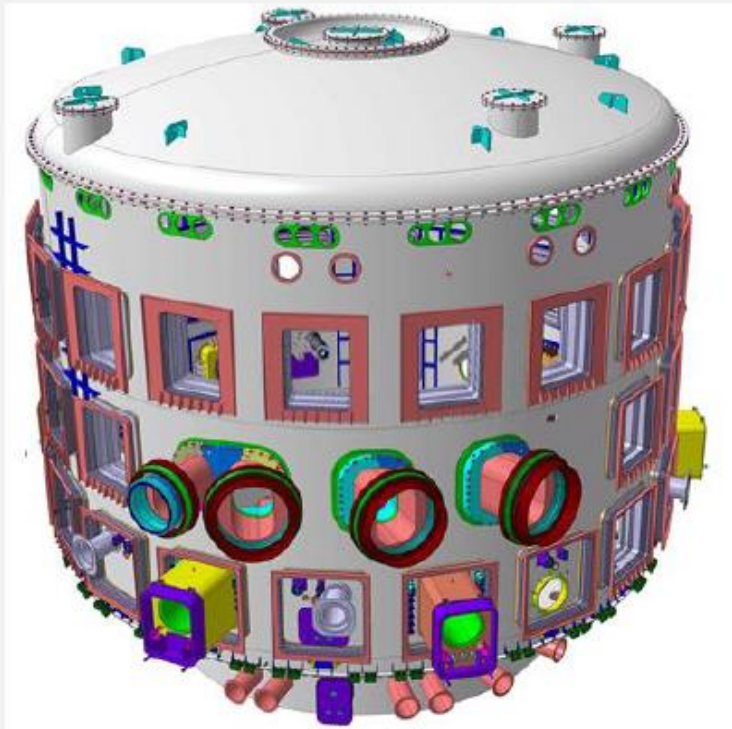


In Korea, where two of nine vacuum vessel sectors are under construction, welding is carried out on the upper section of an inner shell—only a small piece of the full component.

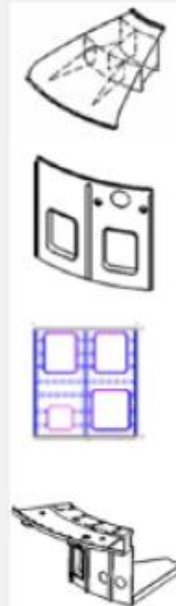


ITER 现状：外杜瓦系统

ITER Cryostat Overview



*Factory
Fabrication*



*Site Workshop
Fabrication*



*In-Pit
Assembly*



- ❑ ITER Cryostat forms a vacuum tight container, surrounding the entire Tokamak Machine subjected to external pressure and designed to evacuate to a base pressure of 1×10^{-4} Pa;
- ❑ Cryostat supporting system is designed to provide the support to Superconducting Magnet System and Vacuum Vessel. (Cryostat Dimension: $\sim 30\text{m}$ high, 30m diameter)



ITER的不足之 CFETR的目标

- **ITER 最大不足是：**

有效燃烧时间太短（14年的氦运行实验期内D-T燃烧时间仅为 4% 约 ~ 6.72月）；

- **绝大部分包层仅为屏蔽包层，结果是：**

- ☞ 没有足够的、具有实用价值的聚变能量输出；

- ☞ 不能在实际的运行实验中实现（演示）氦自持；

- ☞ 因为有效的燃烧时间太短(占空比太低)，因此不能充分进行有关DEMO和未来聚变能电站要求的有关材料、包层功能以及重要部件（例如偏滤器）的实验研究；

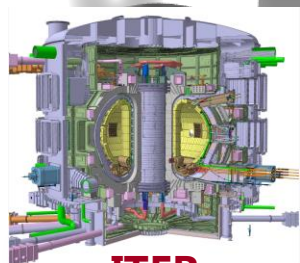
- **因此，国际聚变界一致认为必须在设计和建造聚变电站之前建设和运行工程实验堆**



新的里程已经开始: 从 ITER 到 FPP

● 将面临的挑战:

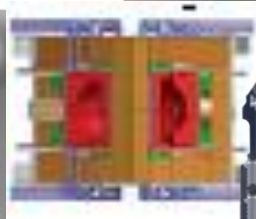
- “燃烧”等离子体稳态运行物理可行性?
- “燃烧”等离子体稳态运行工程可行性?
- 维持稳态等离子体电流、加热在物理、技术上的挑战;
- 偏滤器物理和工程技术
- 氚的增殖和自持—物理和工程技术挑战?
- 聚变堆材料: 第一壁材料; 包层结构材料; 增殖包层功能材料;
- 核环境下的遥操作;
- 先进运行模式物理和工程上的可行性?
-



ITER

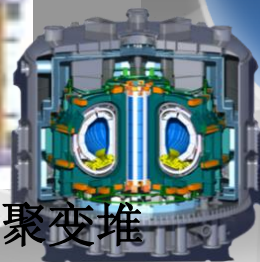
$P_f \sim 0.5 \text{ Gw}$
 $4\text{kgT} / 15\text{年}$

~2006



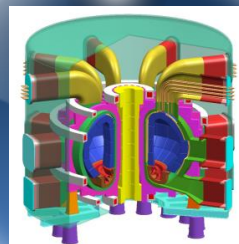
CTF

~??



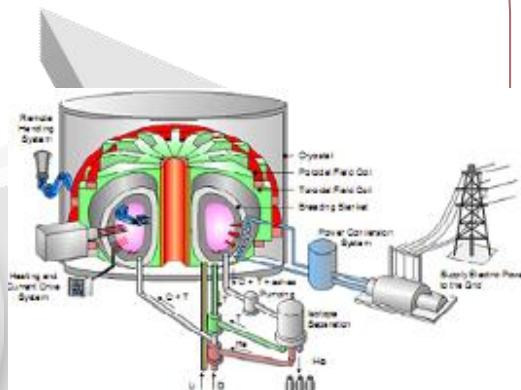
CFETR

?



DEMO

~??



FPP

$P_f \sim 1-3 \text{ Gw}$
 $\sim 56-168\text{kgT}/\text{年}$

2050?

获得稳态燃烧等离子体  聚变堆稳态运行  获得聚变能



未来挑战

● ITER:

- “燃烧” 等离子体稳态运行物理可行性？
- “燃烧” 等离子体稳态运行工程可行性？
- 维持稳态等离子体电流、加热在物理、技术上的挑战；
- 偏滤器物理和工程技术
- 先进运行模式物理和工程上的可行性？

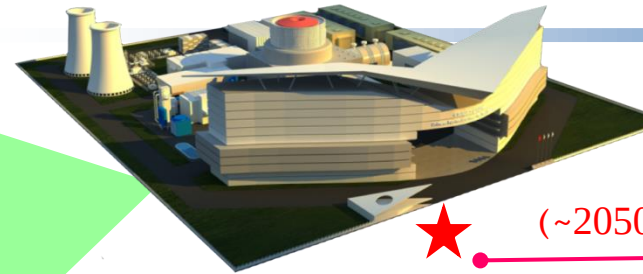
● CFETR:

- 氚的增殖和自持：物理和工程技术挑战？
- 聚变堆材料：第一壁材料；包层结构材料；增殖包层功能材料；
- 核环境下的遥操作；
- 包层高效发电



中国磁约束聚变发展路线图 (讨论)

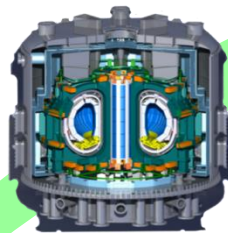
PFPP



★ (~2050)

**1GWe, Power
Plant Validation**

CFETR



★ (~2021)

(2030 start operation)

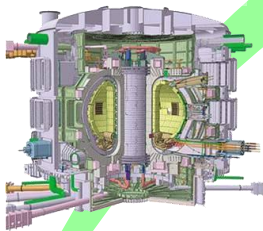
I: $Q=1-5$, steady state, $TBR>1$, $>200MW$, $10dpa$

II: DEMO validation, $Q>10$, CW, $1GW$, $50dpa$

Phase I : $Q=10$, $400s$, $500MW$, Hybrid burning plasma

Phase I I: $Q=5$, $3000s$, $350MW$, steady-state burning plasma

ITER



EAST

Advance PFC, steady-state advanced operation

HL-2M

Advanced divertor, high power H&CD, diagnostics

J-TEXT

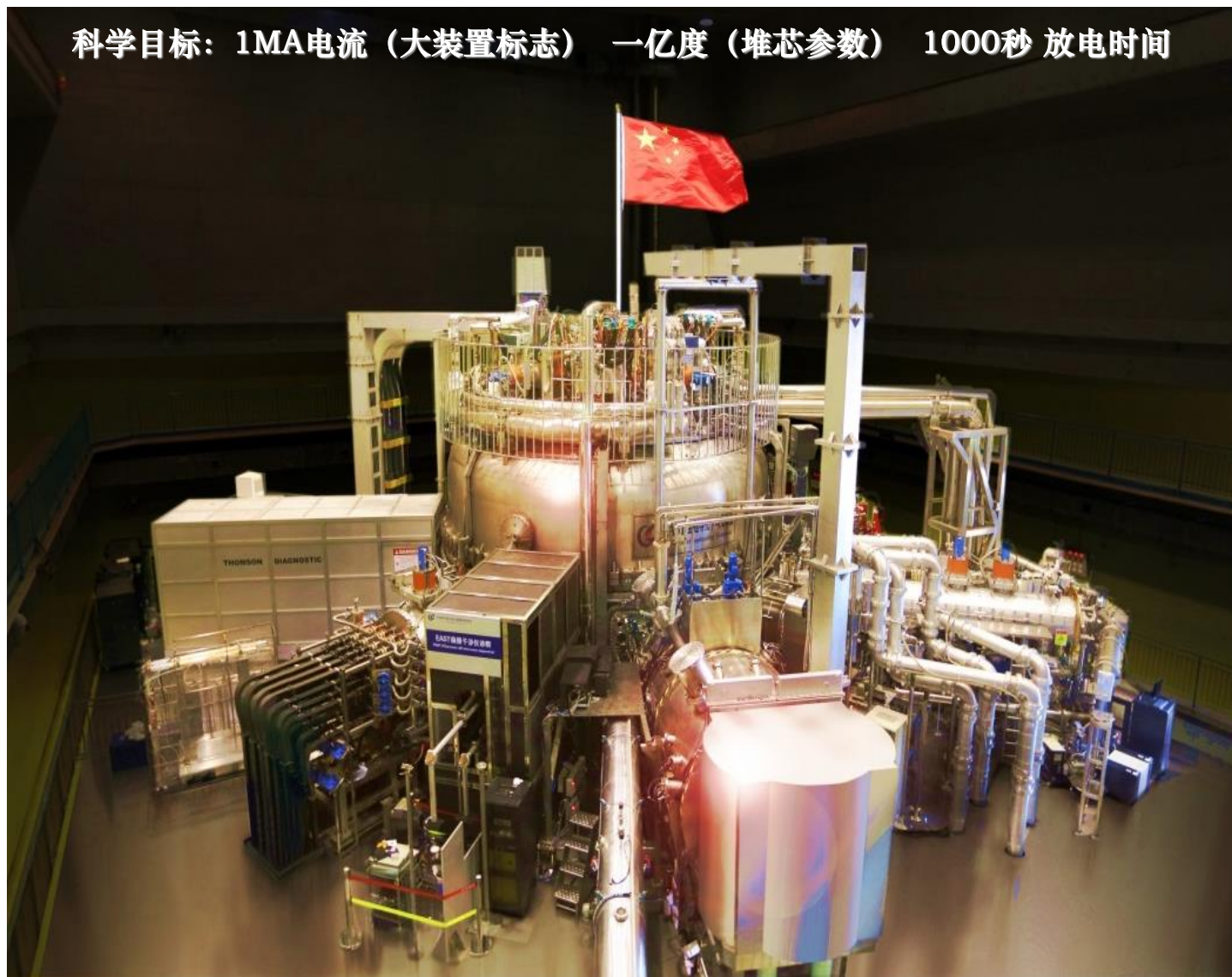
Disruption mitigation, basic plasma

2015 2020 2025 2030 2035 2040 2045 2050 2055 2060



我国建设CFETR的基础 — (1) 建成全超导托卡马克EAST装置

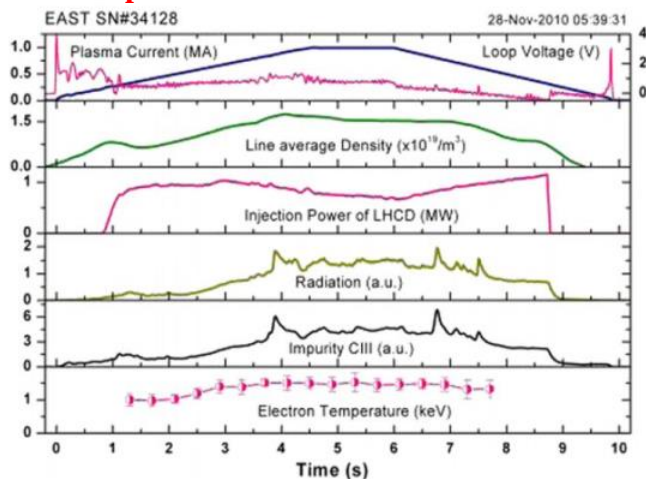
科学目标：1MA电流（大装置标志） 一亿度（堆芯参数） 1000秒 放电时间



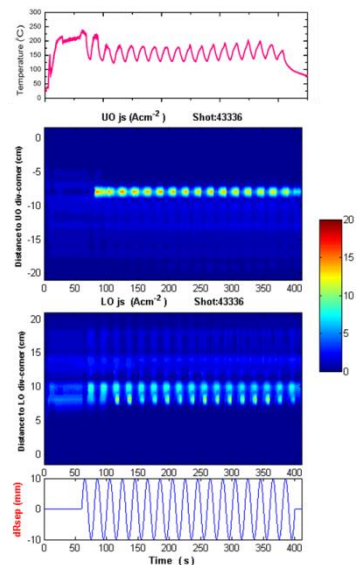
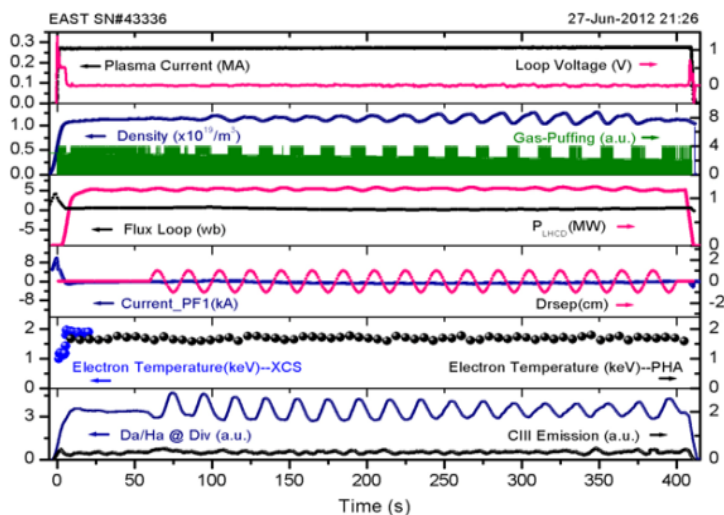


EAST的研究进入国际前沿—1MA, 400s稳态运行

$I_p = 1\text{MA}$



411s 稳态运行

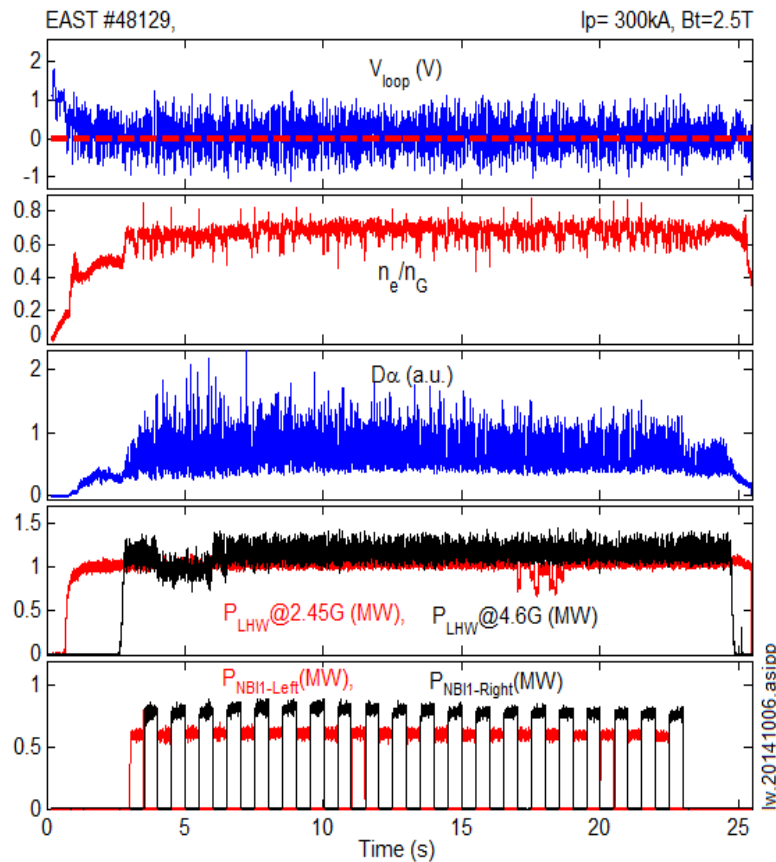
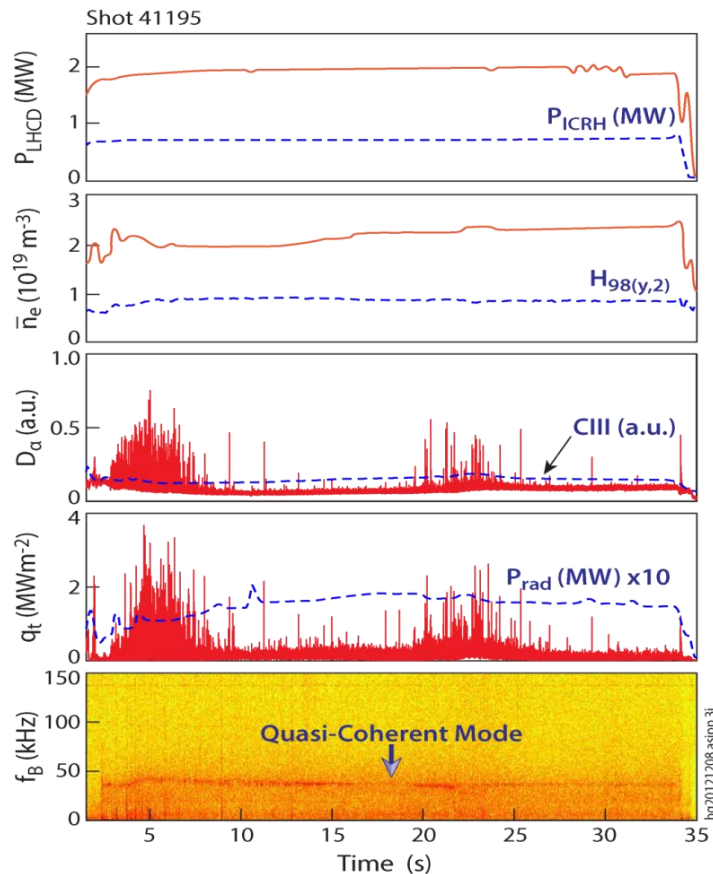


获得了411s的中心等离子体密度约 $2 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$ 、中心电子
温度大于2000万度的高温等离子体

(JET : 60s)



EAST的研究进入国际前沿——获得高约束稳态等离子体

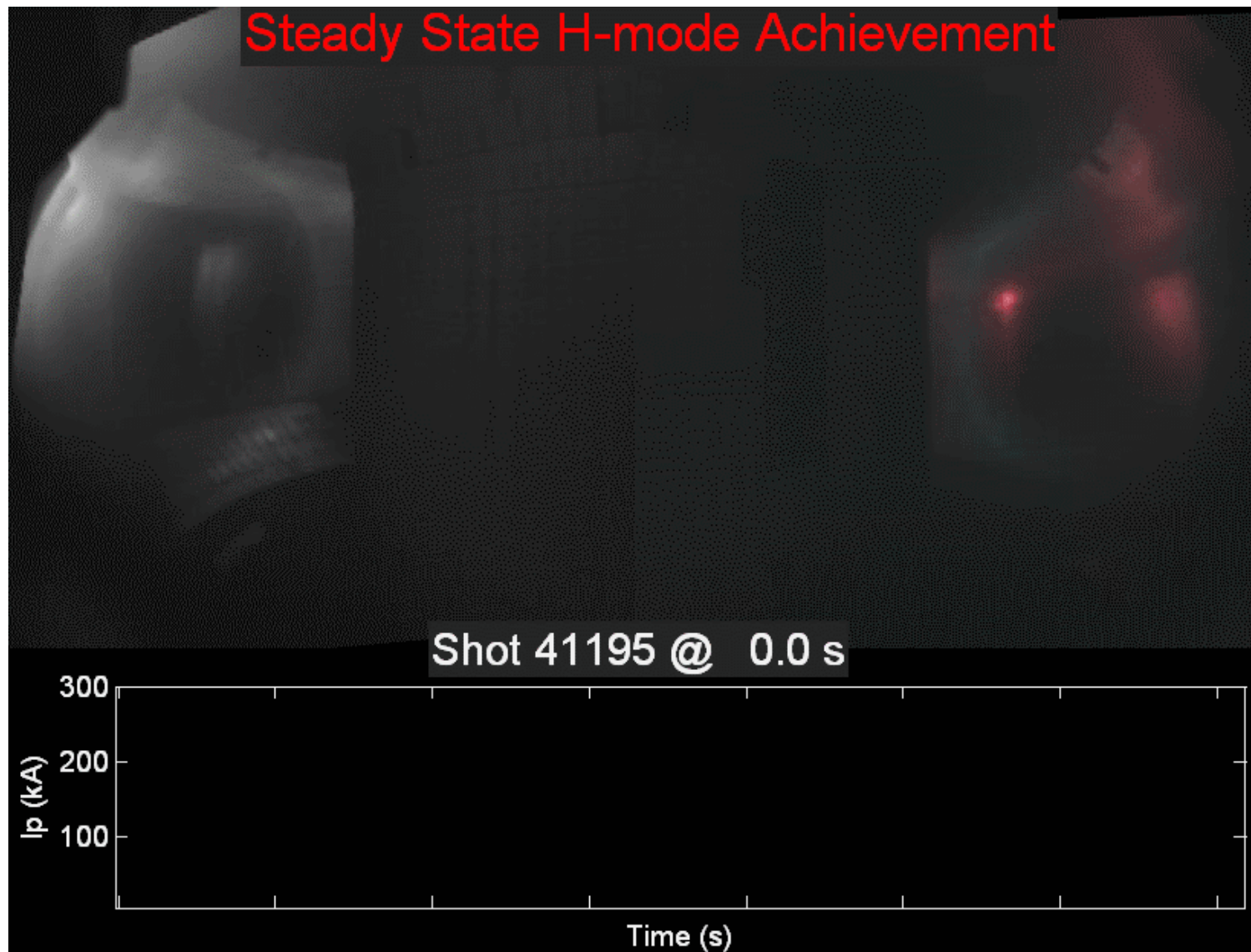


获得稳定重复超过 30 秒的 H 模等离子体放电
(JET : 12s)



EAST的研究进入国际前沿——获得高约束稳态等离子体

Steady State H-mode Achievement





国家决定依托科技大学成立磁约束聚变堆总体设计组

(2011年3月16日)



科学技术部司发函

国科基函〔2011〕3号

关于成立磁约束聚变堆总体设计组(筹备)的通知

教育部科技司,中科院基础局,中核集团科技部:

为全面消化吸收国际热核聚变实验堆(ITER)设计技术,掌握聚变堆相关的物理和工程设计及关键技术,开展我国磁约束聚变堆总体设计研究,经研究,决定成立磁约束聚变堆总体设计组(筹备)。磁约束聚变堆总体设计组(筹备)由19名成员组成,万元熙教授任组长,李建刚研究员、刘永研究员和汪小琳研究员任副组长。磁约束聚变堆总体设计组(筹备)成员名单见附件。总体设计组成员可根据需要适当增补或调整。

磁约束聚变堆总体设计组(筹备)的职责是:

1. 全面收集、整理、保存、吸收、消化和利用ITER总体设计

及总体管理技术资料;

2. 开展我国聚变堆总体设计研究,编制聚变堆总体设计各项任务的规划、计划和实施方案,根据发展需求对计划实施提出调整建议,为条件成熟时建造中国聚变堆奠定必要的设计基础;

3. 研究提出聚变堆设计人才培养方案建议,并根据需要协助推进实施;

4. 完成科技部交办的其它任务。

中国科学技术大学作为磁约束聚变堆总体设计组(筹备)依托单位,科技部将每两年对依托单位进行评估。

请各有关部门和单位支持磁约束聚变堆总体设计组(筹备)的工作。

附件:磁约束聚变堆总体设计组(筹备)成员名单



(此件主动公开)

主题词:成立 聚变 设计 通知

抄送:中国科学技术大学、总体设计组各成员单位。

磁约束聚变堆总体设计组(筹备)成员名单

组长:	万元熙	教授	中国科学技术大学
副组长:	李建刚	研究员	中科院等离子体物理所
	刘永	研究员	核工业西南物理研究院
	汪小琳	研究员	中国工程物理研究院
成员(按姓氏笔画排序)			
	万发荣	教授	北京科技大学
	万宝年	研究员	中科院等离子体物理所
	冯开明	研究员	核工业西南物理研究院
	叶民友	研究员	中科院等离子体物理所
	庄革	教授	华中科技大学
	吴宜灿	研究员	中国科学技术大学/中科院等离子体物理所
	李强	研究员	核工业西南物理研究院
	杨青巍	研究员	核工业西南物理研究院
	武松涛	研究员	ITER组织/中科院等离子体物理所
	段旭如	研究员	核工业西南物理研究院
	翁凯	研究员	中科院等离子体物理所
	郭后扬	研究员	中科院等离子体物理所
	龚俊	研究员	核工业标准化研究所
	傅鹏	研究员	中科院等离子体物理所
	虞清泉	研究员	中科院等离子体物理所/德国等离子体研究所



组长 万元熙



副组长: 汪小琳



副组长: 李建刚、刘永





完成了CFETR 工程概念设计

经过四年的国内外研讨和设计，总体组**确定了CFETR的**

科学目标，完成了CFETR的总体工程概念设计，在完成ITER

采购包的同时CFETR某些项目的预研取得重要进展；

CFETR 项目受到国内外同行高度关注！



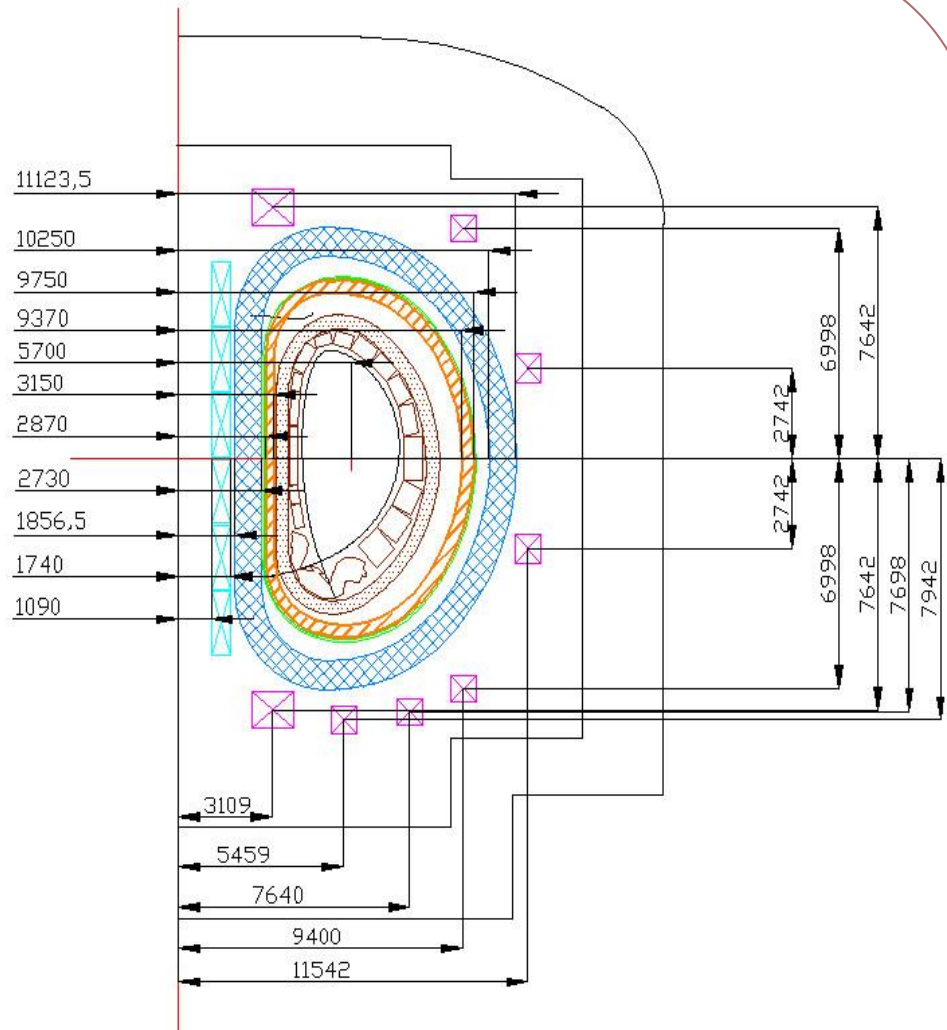
CFETR 的科学目标

- 基于ITER , 超越 ITER ;
 - 聚变功率第一步 : $P_f = 50 \sim 200\text{MW}$; 第二步 : 1000MW ;
 - 年有效“燃烧”运行时间等于大于50% 的长脉冲或者稳态运行 ;
 - 通过先进增殖包层实现氚自持和热能转换发电 ;
 - 基于现有ITER物理基础 ($k \sim 1.8-2$, $q > 3$, $H \sim 1$) , 但具有进一步升级的能力 ;
 - 实现和演示聚变能源堆包层和偏滤器等涉核部件的遥控安装和维护 ;
- 为进一步建造原型聚变电站 (PFPP)奠定物理工程技术基础



CFETR 装置的总体布局

- $B_t = 4.5 - 5T$;
- $I_p = 7-10MA$;
- $R = 5.7m$;
- $a = 1.6m$;
- $K = a/b = 1.8 \sim 2.0$;
- $\beta_N \sim 2-3$; $q_{95} \geq 3$;
- Triangularity $\delta = 0.4-0.8$;
- Single-null diverter;
- Neutron wall loading $\approx 0.5MW/m^2$;
- Duty cycle time = 0.3-0.5;
- $TBR \sim 1.2$
- Possible upgrade to $R \sim 6.0 m$,
 $a \sim 2 m$, $B_t = 5T \sim 7T$, $I_p \sim 14 MA$





CFETR上可以实现的关键参数范围

Operation mode	A	B	C	D	E	ITER-SS	Upgrade
I_p (MA)	10	10	10	8	8	9	15
P_{aux} (MW)	65	65	65	65~70	65	59	65
Q_{95}	3.9	3.9	3.9	4.9	4.9	5.2	3.9
W(MJ)	171~174	193	270~278	171	255	287	540
P_{Fus} (MW)	197~230	209	468~553	187~210	409	356	1000
Q_{pl}	3.0~3.5	3.2	7.2~8.5	2.7~3.2	6.3	6.0	15
T_{i0} (keV)	17.8~18.5	29	19.8~20.8	20.6~21	21	19	25
$N_{el}(10^{20}/m^3)$	0.75	0.52	1.06	0.65	0.94		1
n_{GR}	0.6	0.42	0.85	0.65	0.95	0.82	0.85
β_N	1.59~1.62	1.8	2.51~2.59	2	2.97	3.0	2.7
$\beta_T(\%)$	~2.0	2.3	3.1~3.25	2	2.97	2.8	4.2
$f_{bs}(\%)$	31.7~32.3	35.8	50~51.5	50	73.9	48	47
$\tau_{98Y2}(s)$	1.82~1.74	1.55	1.57~1.47	1.37	1.29	1.94	1.88
$P_N/A(MW/m^2)$	0.35~0.41	0.37	0.98	0.33~0.37	0.73	0.5	1.38
$I_{CD}(MA)$	3.0~3.1	7.0	2.45	4.0	2.76		3.0
H_{98}	1	1.3	1.2	1.3	1.5	1.57	1.2
$T_{burning}(S)$	1250	SS	2200	14/SS	SS		?

ThPO-3 B. Wan, etc.



CFETR设计任务分解（分类）

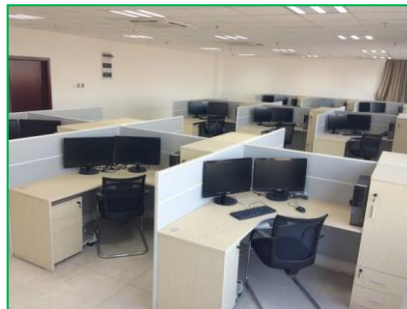
1. 反应堆总体（物理、工程）集成设计；
2. 聚变堆物理和运行实验；
3. 加热、电流驱动物理和工程技术；
4. 诊断及CODAC；
5. 聚变堆总体结构（真空室、真空系统、杜瓦、冷屏）；
6. 低温、超导磁体及其支撑系统；
7. 内部部件（包层、核反应、偏滤器、材料）；
8. 电源，水冷及技术支持系统；
9. 遥控安装及维护；
10. 燃料循环及处理；
11. 辐射防护及安全；
12. RAMI分析；
13. 工程总体管理及标准化；
14. 厂房和选址



建成先进3D设计平台



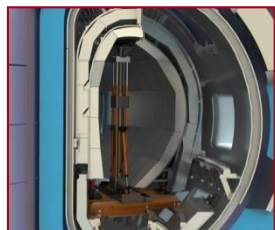
Design and management servers



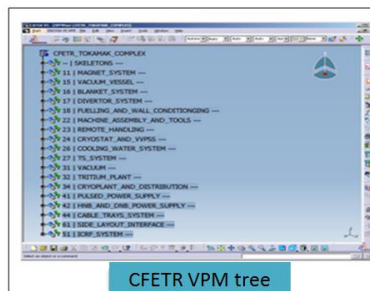
Terminals of the design cloud



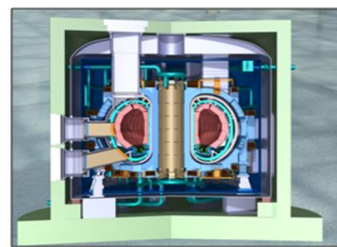
Virtual reality system



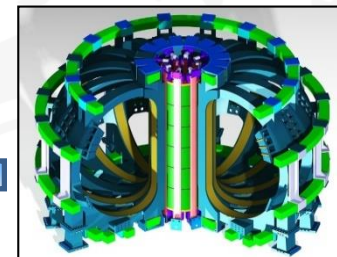
Remote handling



CFETR VPM tree



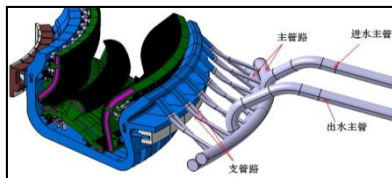
CFETR main machine



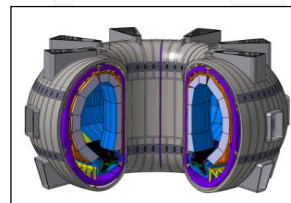
Magnet



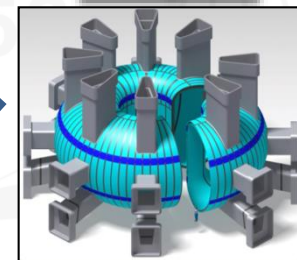
Cryostat



Divertor



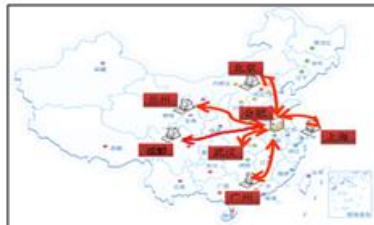
Blanket



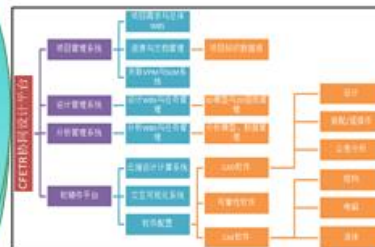
Vacuum Vessel



先进设计平台的特点



- Advanced data compression technology
- Complete data sharing
- Remote design on any terminal on the internet

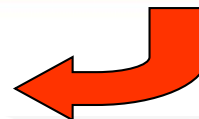


- Centralized data storage
- High correlation and traceability
- Safe and data tolerant



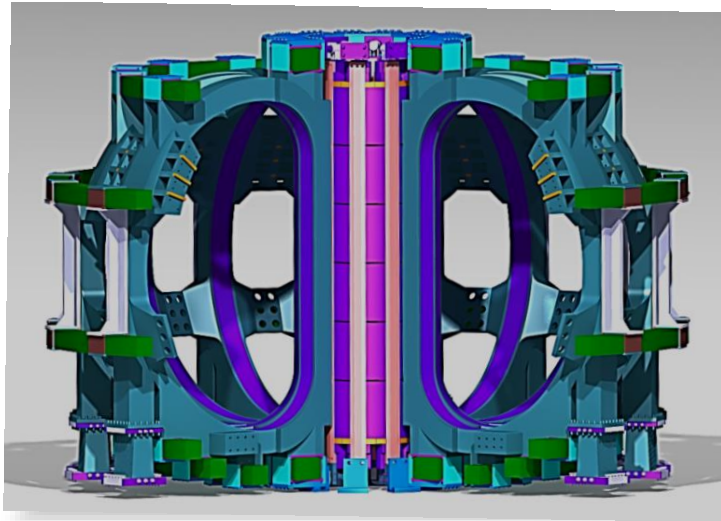
- Frequent 3D stereo review
- No need of physical mockups
- Inaccessible positions in reality become examinable

[3D-CFETR .wmv](#)

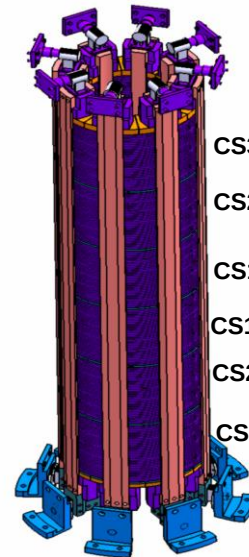
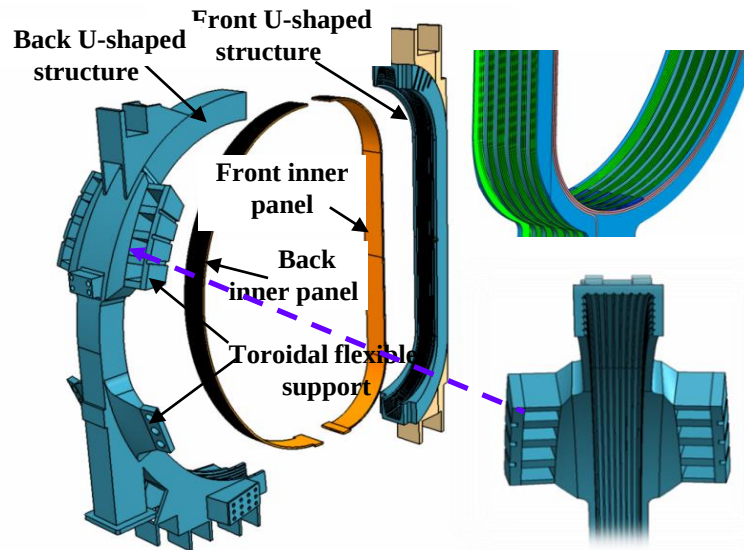




CFETR 超导磁体系统



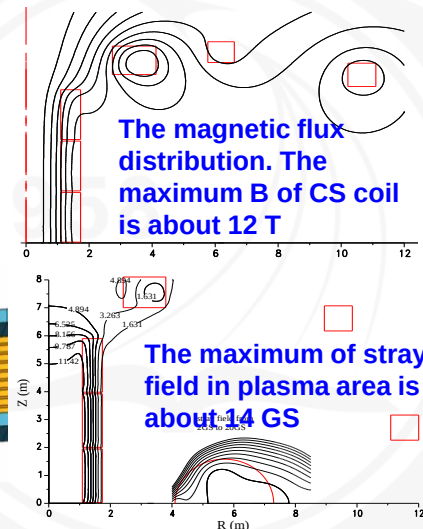
CFETR main parameters (ITER-Like/Super-X/Snowflake)				
Parameter	ITER-Like	Super-X	Snowflake	ITER
Number of TF coils	16	16	16	18
Plasma current (MA)	10	10	10	15
Central magnetic field(T)	5.0	5.0	5.0	5.3
Maximum current of TF coil (kA/turn)	67.4	67.4	67.4	68
Major radius(m)	5.7	5.7	5.7	6.2
Minor radius(m)	1.6	1.6	1.48	2.0
Ohm field coil center radius(m)	1.415	1.415	1.415	2.055
Maximum Volt second	160	160	160	240-250
Elongation	1.8/2.0	1.8/2.0	2.17/2.14	1.70/1.85
Number of PF coils	6	8	8	6



Tightening Tie Plate block



Bottom support structure





Present State and Future Plan for Nb₃Al Superconductor

Our Current Level

Aim within 3-5 years

Aim within 5-8 years

MATERIALS

LTD Nb₃Al strands:
Cu-matrix; Dia.0.70-1.20 mm; 700–1000 m; 18 filaments; $J_c(4.2K, 15T)=200-300 \text{ A/mm}^2$ for long strands.

RHQ Nb₃Al wires:
700–1000 m; Dia.0.70-1.20 mm; 18 or 48 filaments with Cu wrap; $T_c=18.0 \text{ K}$, $J_c(4.2K, 15T) = 600-800 \text{ A/mm}^2$ for long strands.

RHQ Nb₃Al strands:
2000–3000 m; Dia.0.70-1.20 mm Cu stabilization; 48 or 56 filaments; $J_c(4.2K, 15T) = 1000-1200 \text{ A/mm}^2$ for long strands.

MAGNETS

Nb₃Al magnet with a field of 15.2 T; Bore size 20 mm, Outer Dia. 65 mm. Height 120 mm

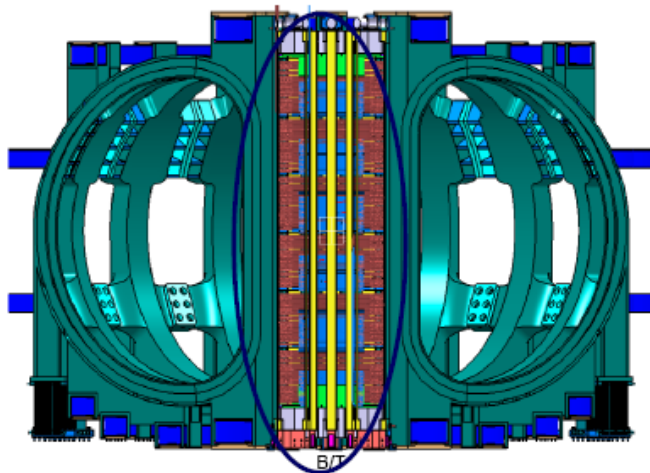
16T or 18T Nb₃Al High-field Solenoid Magnets with **React and Wind** process.

100–200 m Nb₃Al CICC with Dia.42.6 mm and Operation Current of 46 kA at 13 T.

Full-size React and Wind Nb₃Al Insert for CFETR DEMO with a field of 15-16T.

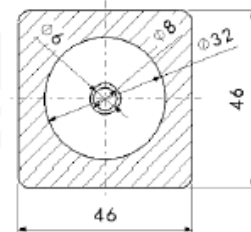
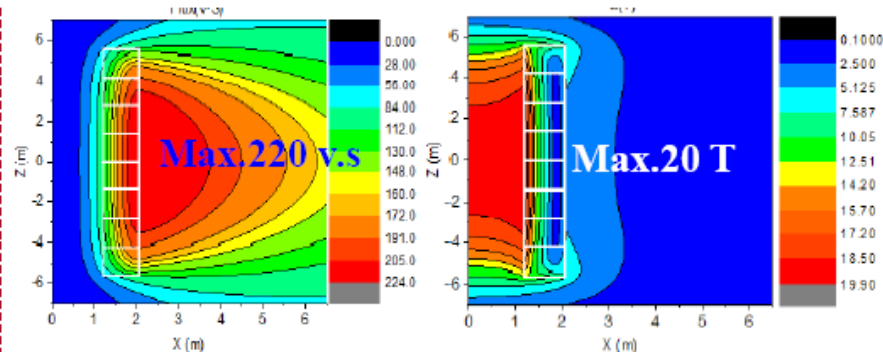
WE HAVE A DREAM! Full-size React and Wind Nb₃Al TF and CS coils for DEMO within 8-10 years.

COILS	R(m)	Z(m)	ΔR (m)	ΔZ (m)	TURNS
CS1U	1.625	0.7	0.85	1.4	476
CS2U	1.625	2.1	0.85	1.4	476
CS3U	1.625	3.5	0.85	1.4	476
CS4U	1.625	4.9	0.85	1.4	476
CS4L	1.625	-4.9	0.85	1.4	476
CS3L	1.625	-3.5	0.85	1.4	476
CS2L	1.625	-2.1	0.85	1.4	476
CS1L	1.625	-0.7	0.85	1.4	476



Bi2212-High temperature Superconducting Central solenoid

CS coils include eight Bi2212 coils. Each coil consists of 14 double pancake



Bi2212 strands cabling and CICC structure

Parameters	HTS coil
Centerline location R/m	1.625
Total turns of each coil	476 turns, 14 DP(34 turns)
Number of Superconducting wire/turn	525
Minimum piece length	400 m
Cable configuration	(1sc+1 Cu) $\times 3 \times 5 \times 5 \times 7$
Dimension of each turn/m	46 mm $\times$ 46 mm
Operation current of each turn/kA	51.00
Operation current density /A/mm ²	200
B_{max} /T	20 T

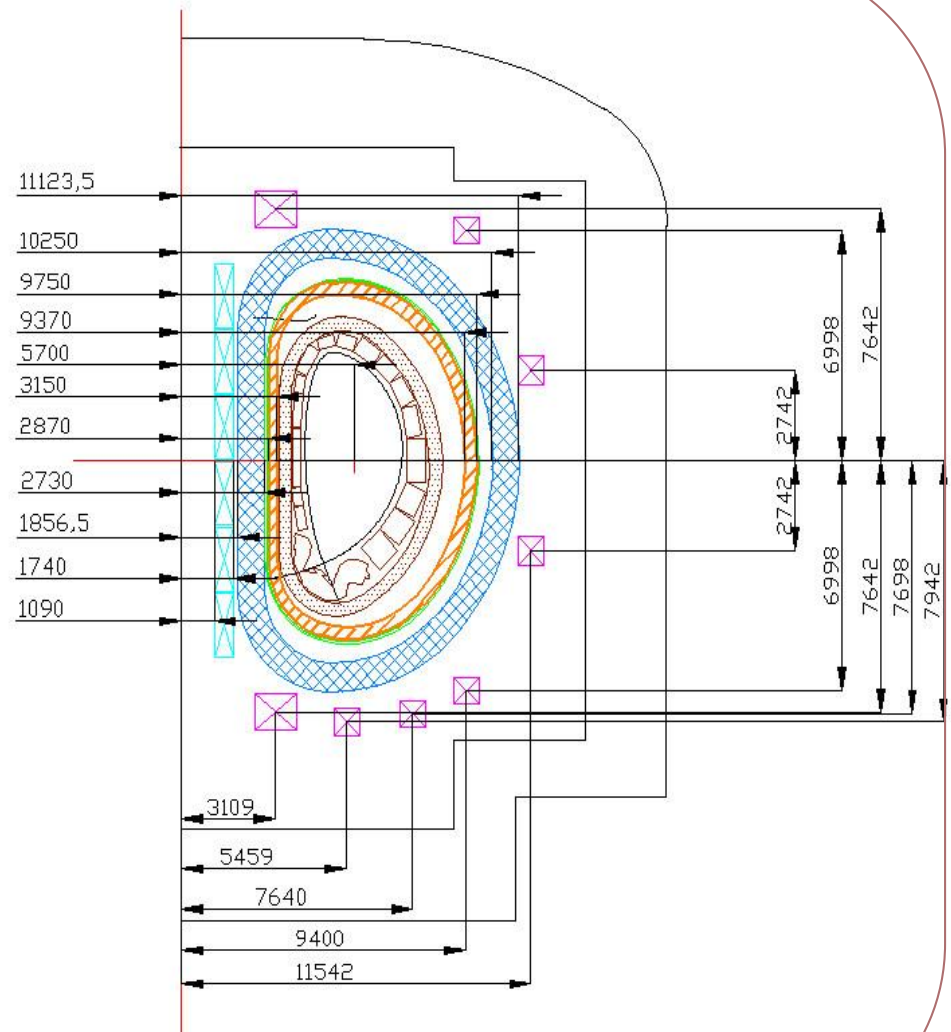


CFETR 装置的总体布局

- $B_t = 4.5 - 5T$;
- $I_p = 7-10MA$;
- $R = 5.7m$;
- $a = 1.6m$;
- $K = a/b = 1.8 \sim 2.0$;
- $\beta_N \sim 2.3$; $q_{95} \geq 3$;
- Triangularity $\delta = 0.4-0.8$;
- Single-null diverter;
- Neutron wall loading $\approx 0.5MW/m^2$;
- Duty cycle time = 0.3-0.5;
- $TBR \sim 1.2$
- Possible upgrade to $R \sim 6.0 m$,
 $a \sim 2 m$, $B_t = 5T \sim 7T$, $I_p \sim 14 MA$

使用

Bi-2212
Nb₃Al

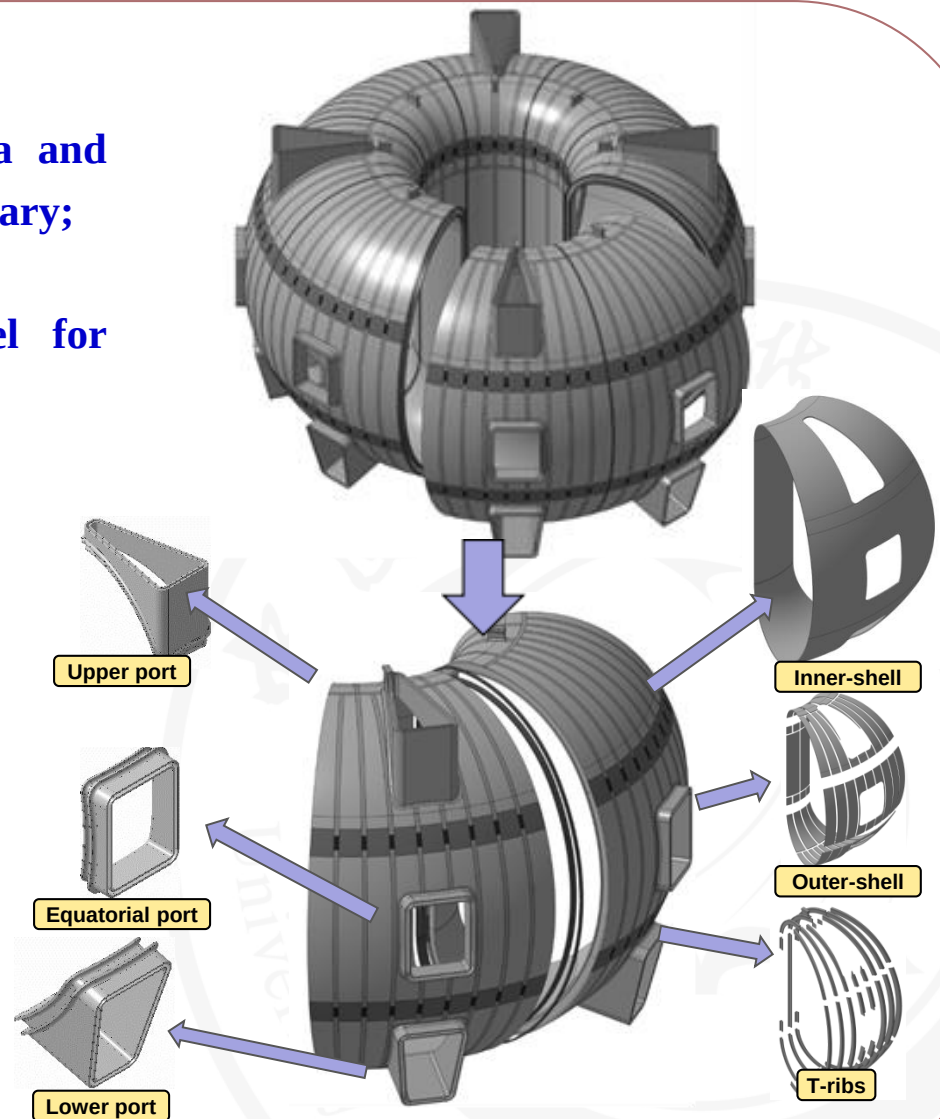


CFETR 真空室

- A torus shaped double wall structure;
- To provide high vacuum for plasma and primary radiation confinement boundary;
- To support in-vessel components
- Important space of the Vacuum Vessel for plasma;
- First safety barrier;

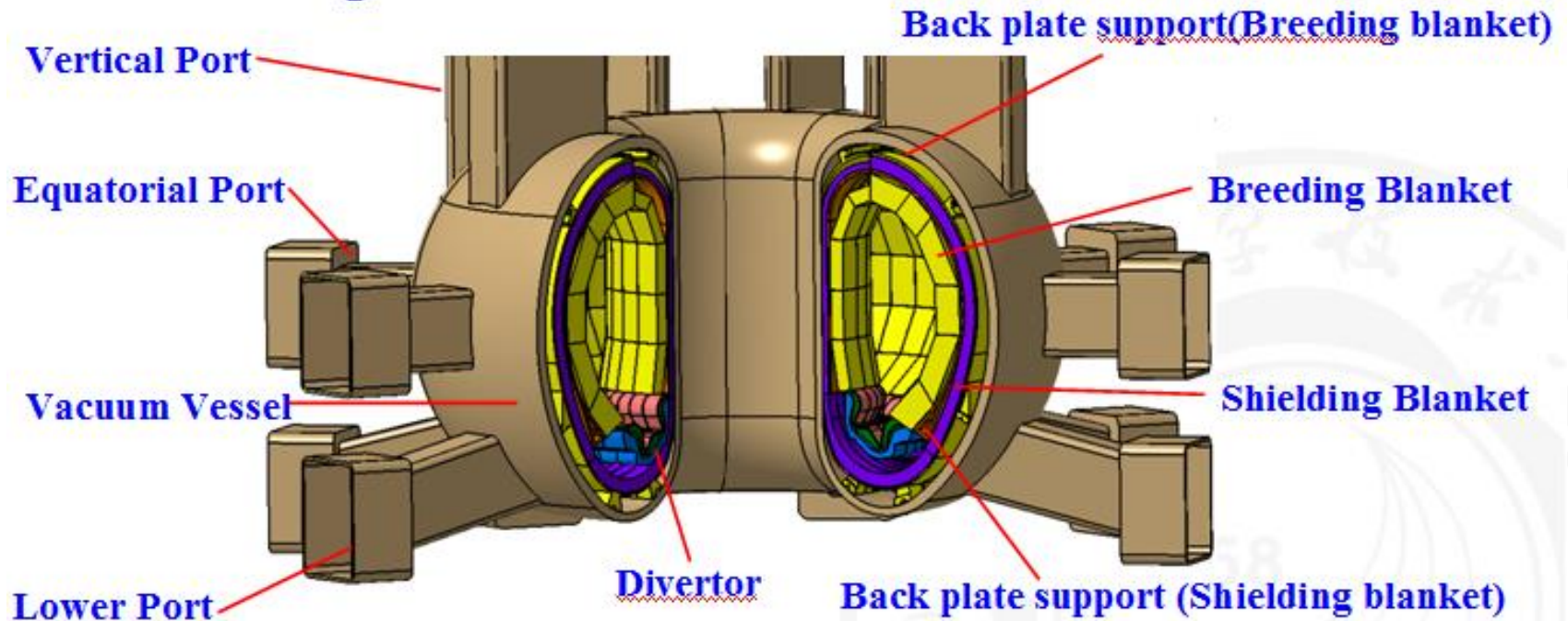
The vacuum vessel:
4 upper ports
8 equatorial ports
8 lower ports.

These ports are used for
equipment installation,
vacuum pumping,
maintenance, etc.



CFETR 包层

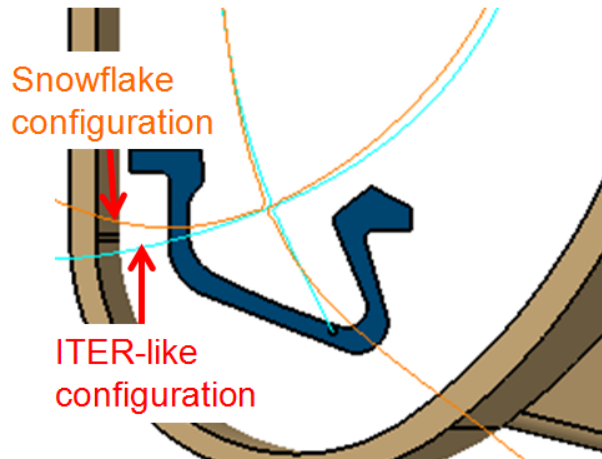
◆ Blanket configuration



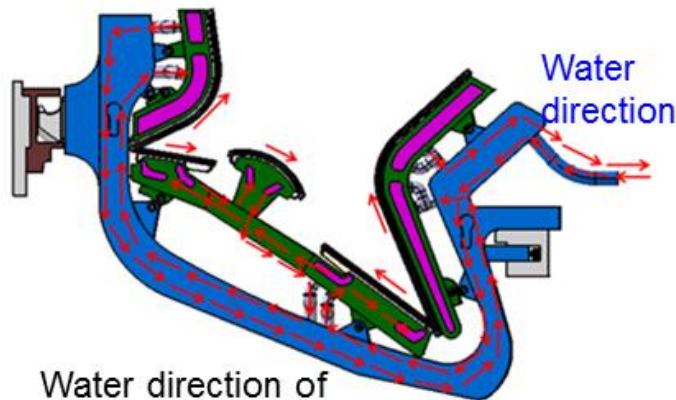
The CFETR blanket system composed of tritium breeding blanket and shielding blanket.



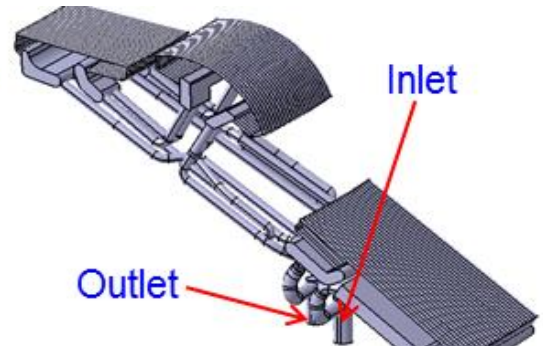
CFETR 偏滤器



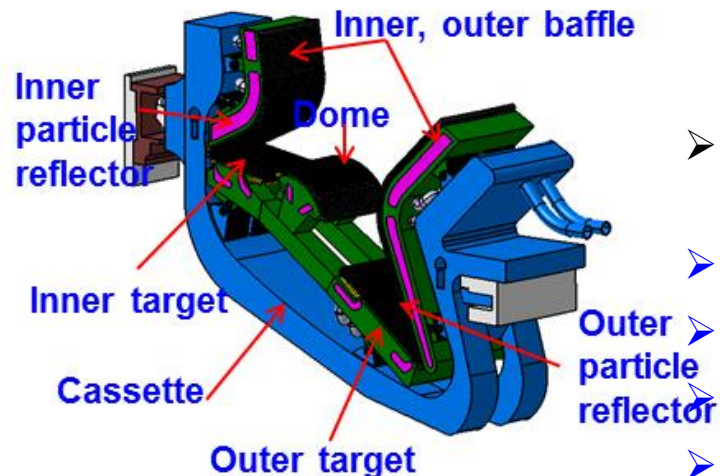
Divertor plasma configuration



Water direction of snowflake divertor



Cooling channel model

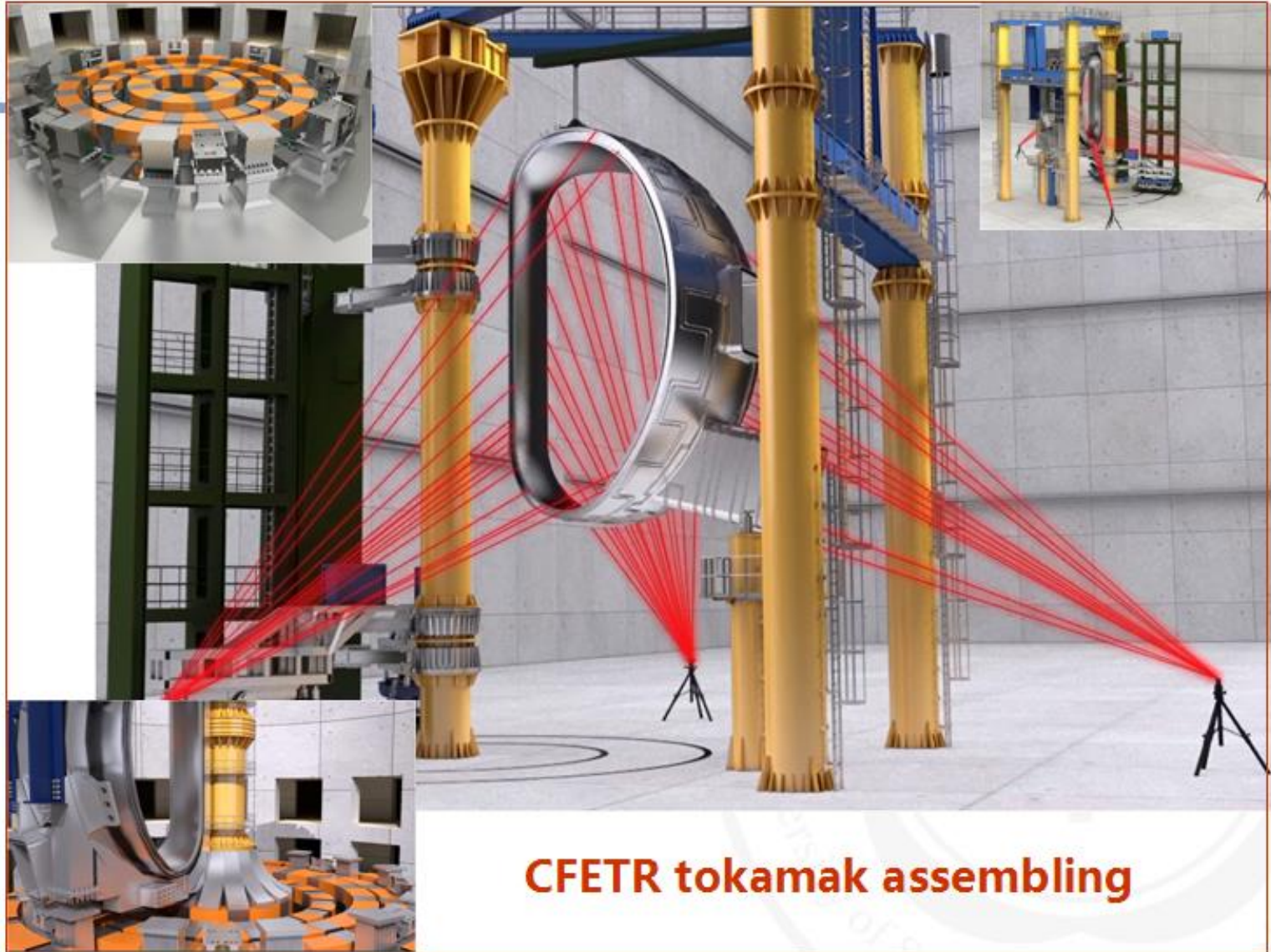


Snowflake divertor design

- Three configurations: **ITER-Like**, **Snowflake** and **Super X**.
- New structure with 'vertical reflector': inner baffle, inner particle reflector, inner target, dome, outer target, out particle reflector and outer baffle.
- Cassette structure for easier RH handling. **Shared cassette between snowflake and ITER-like divertor.**
- **Small incident angle $\sim 16^\circ$.**
- **Closed 'V' shape configuration.**
- **Pumping gap between dome and targets.**
- **Divertor cooling scheme was developed.**
- **Support design compatible with RH was finished.**



CFETR tokamak 总装



CFETR tokamak assembling



CFETR工程概念设计总结

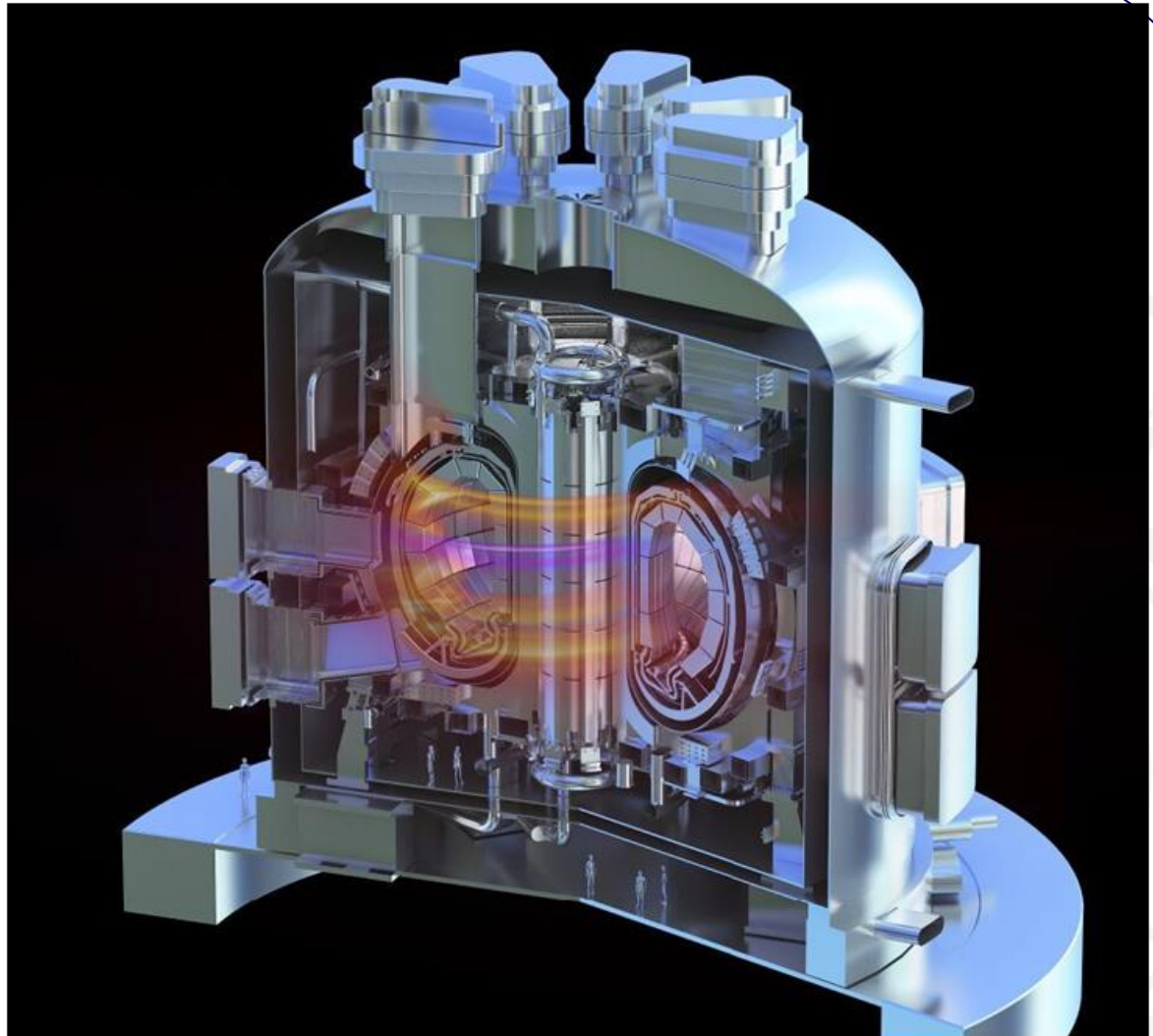
- $I_p = 7-10 \text{ MA}$
- $B_{t0} = 4.5-5.0 \text{ T}$
- $R_0 = 5.7 \text{ m}$;
- $a = 1.6 \text{ m}$;
- $k = a/b = 1.8 \sim 2.0$
- $q_{95} \geq 3$;
- $\beta_N \sim 2-3$

P_{fusion} : 200MW~1GW

Possible upgrade to

$R \sim 5.9 \text{ m}$, $a \sim 2 \text{ m}$,

$B_t = 5 \text{ T}$, $I_p \sim 14 \text{ MA}$





Chinese Fusion Engineering Test Reactor

(CFETR) Integration assembling with the RH)

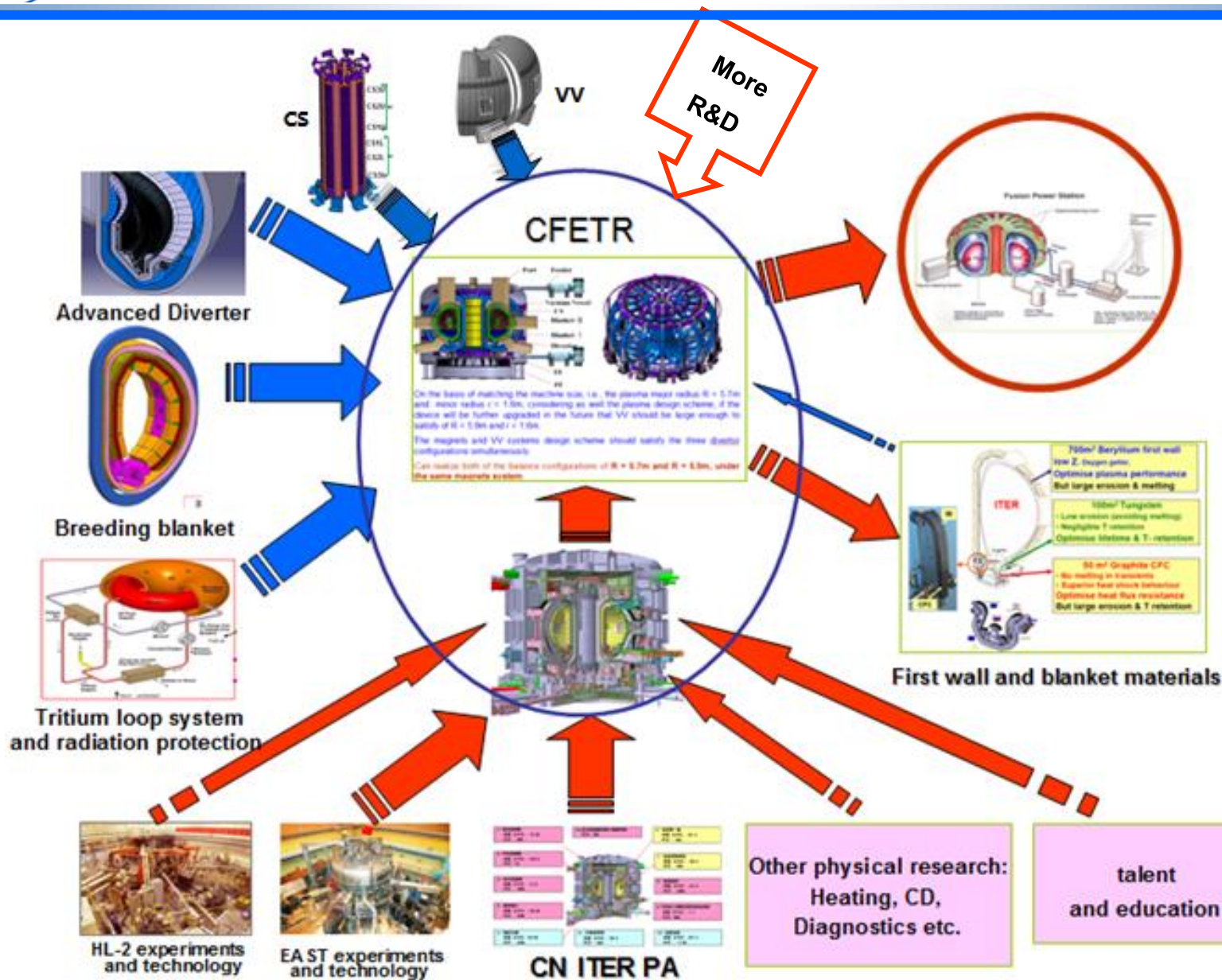




CFETR某些关键部件的 预研制已经开始！



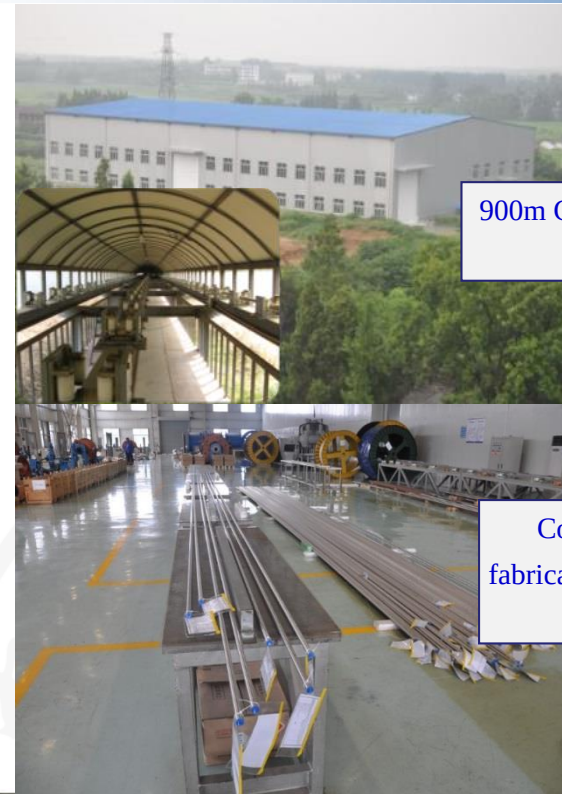
CFETR R&D 发展战略





CFETR 关键部件预研 —— 已建成三条超导导体生产线

- ◆ 3 jacketing lines and conductor integrating facility were set up in ASIPP.
- ◆ 2 parallel buildings were set up for conductor integrating, NDE, cabling, acceptance test.
- ◆ All conductors produced by CN DA were accepted with their first tests.
- ◆ The first ITER oversized components, PF5 conductor, arrived at ITER site in June.



900m CICC jacket line

Conductor fabrication process



Ceremony for 1st shipping



TF conductor arriving Italia



TF conductor arriving Japan



PF conductor arriving ITER site



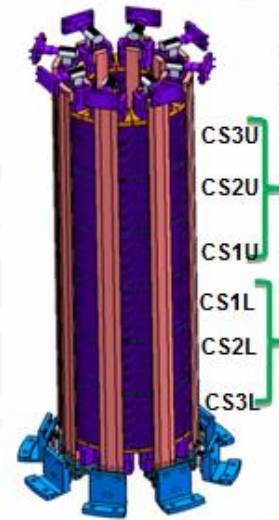
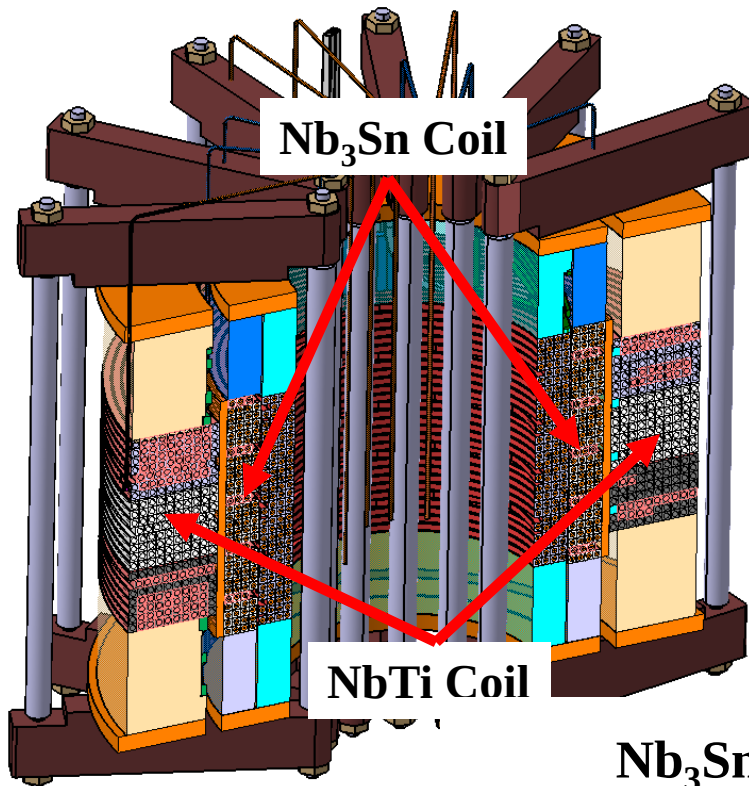
已开始1/32 节全尺寸 CFETR 真空室研制



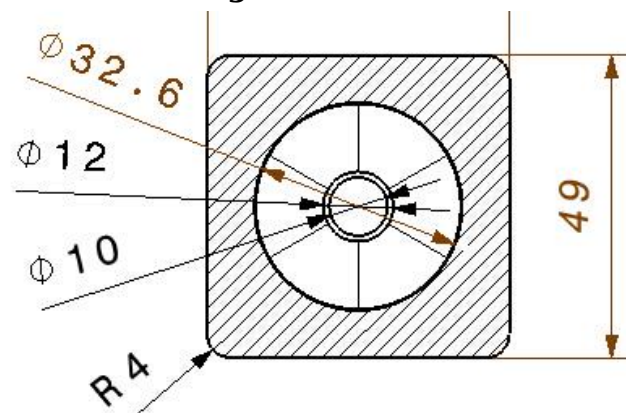
已开始1/6全尺寸 CFETR 中心螺管线圈研制

Coil Parameters

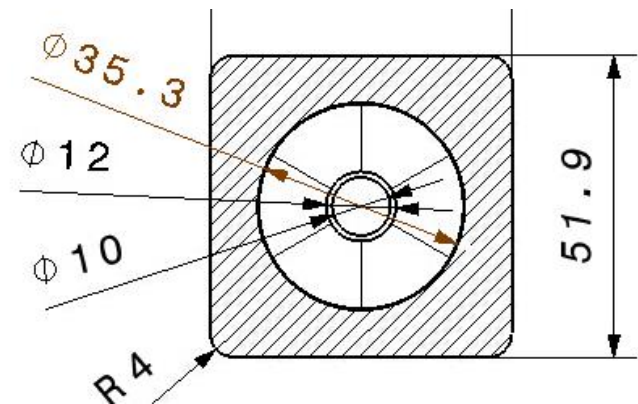
Design Parameters of CFETR CS Model Coil	
Max. field	12 T
Max. field rate	1.5 T/s
Inner radius	750 mm
Coil structure	Hybrid magnet Inner: Nb_3Sn coil Outer: NbTi coil
Conductor type	Nb_3Sn CICC NbTi CICC



Nb_3Sn Conductor

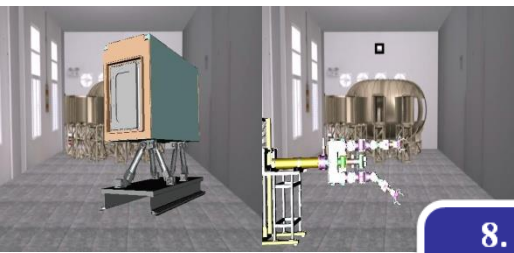


NbTi Conductor





各种遥控系统的研制正在取得进展



1. Tokmak RH flexible In-Vessel Viewing System



2. ITER parts Transfer Cask



8. system integrating and testing

7. vision grabbing and scene modeling



~ 80%

3. Blanket RH maintenance system



6. multifunction inspection and rescue robot



5. RH master-slave robot and man-machine interactive control system



4. large scale heavy load maintenance robot arm system





EAST 上的遥控检测和维修实验取得成功





召开了多次有国际最著名聚变专家参加的研讨会





国际顾问委员会由国际最著名的聚变专家组成





CFETR受到国际聚变界高度关注

**总体组已完成了CFETR的总体工程概念设计，
受到国内外同行高度关注，纷纷要求进一步扩大
交流、合作！ 许多国外专家要求到中国来工作！**



期望和建议

- **期望国家尽早决定正式开始CFETR的工程设计和关键部件的预研！它将为建造CFETR奠定设计和预研基础！**
- **全力支持先进超导材料（如Bi2212 和Nb₃Al）的研发，希望早日取得成功，它将是CFETR升级（聚变功率由200MW升级到1000MW）的关键；**
- **由中国牵头建造CFETR将使中国在聚变能的开发领域引领国际前沿！也将使我国先进超导材料的研发和产业发展进入国际最先进行列！**



小 结

- **国际聚变界决定联合建造ITER 是磁约束聚变能源开发研究重要的里程碑进展，合作各方必须确保它的成功。**
- **做为开发聚变能源重要一步，中国聚变工程实验堆的设计和预研，包括遥操作已经取得了重要进展；**
- **CFETR需要得到超导研究和产业界的大力支持才有可能实现一期和升级运行，它的成功对建设未来先进聚变能电站十分重要！**
- **通过广泛国际合作和国内聚变界的共同努力，期望中国聚变工程实验堆 CFETR 能在2030年建成，在2050年前后开始聚变示范堆的建设。**

核聚变能的成功开发将造福全人类，值得我们全力以赴！



Thanks for your attention !