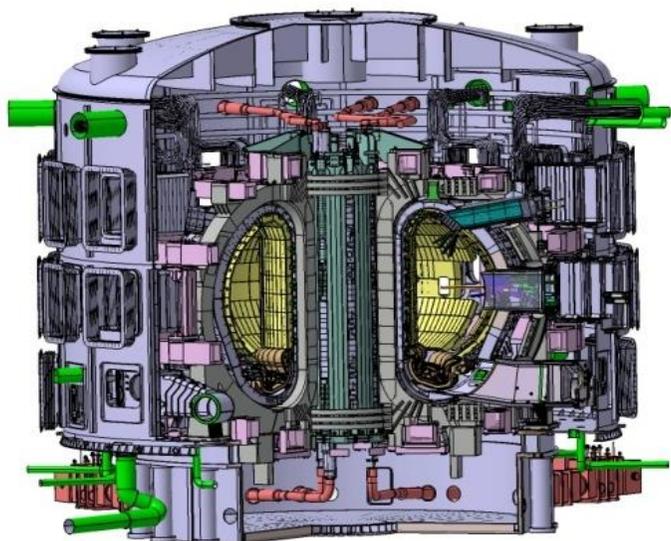


国際熱核融合実験炉ITERの 建設と日本の貢献



国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー研究開発部門
ITERプロジェクト部
井上多加志

平成29年6月2日（金） 東工大 先導原子力研究所コロキウム

井上多加志

(水戸市在住。東京生まれ、横浜育ち)

東京工業大学 工学部 機械物理工学科卒 (1984年3月)

「内壁に滑らかな突起列を有する円管の強制対流熱伝達」

同大学院 総合理工学研究科 エネルギー科学専攻修士課程修了

「過渡沸騰における発泡の促進と除熱の増大」 (1986年3月)

日本原子力研究所那珂研究所入所 (1986年4月)

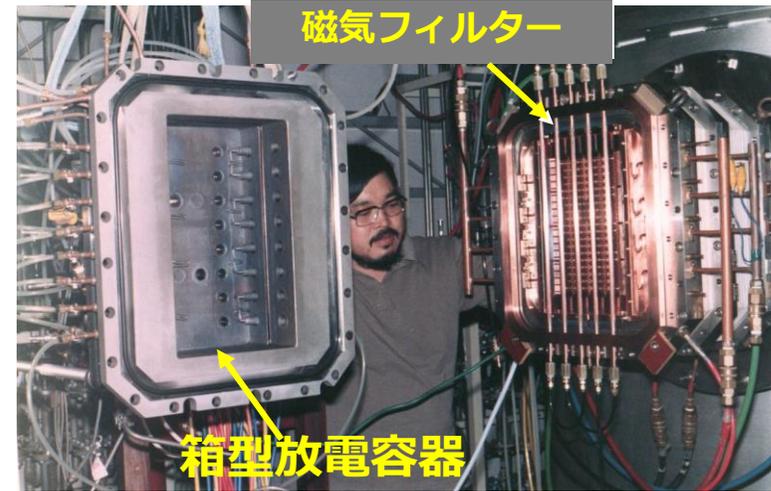
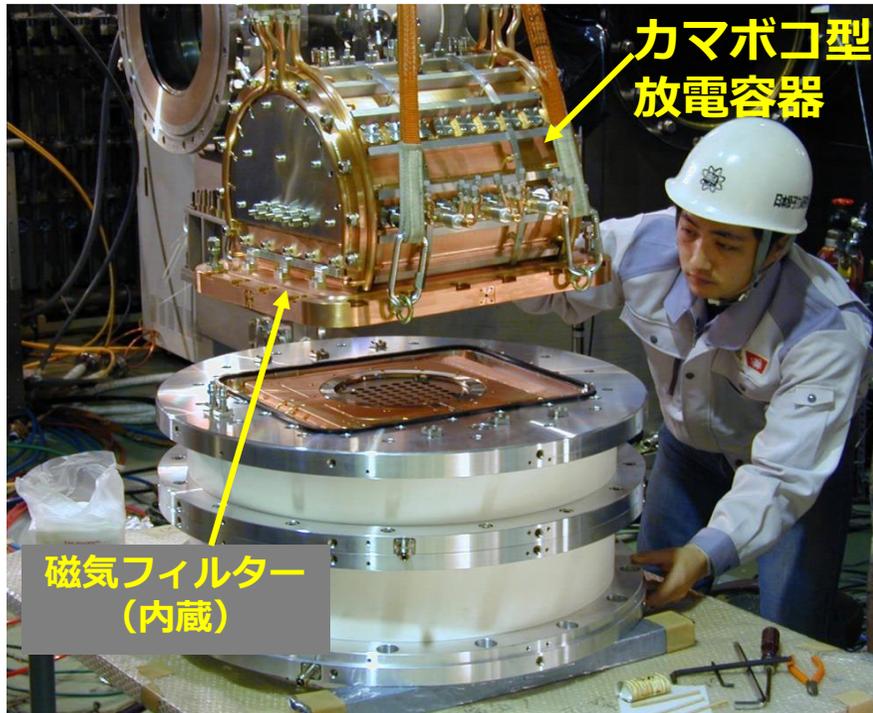
日本原子力研究開発機構を経て

量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所

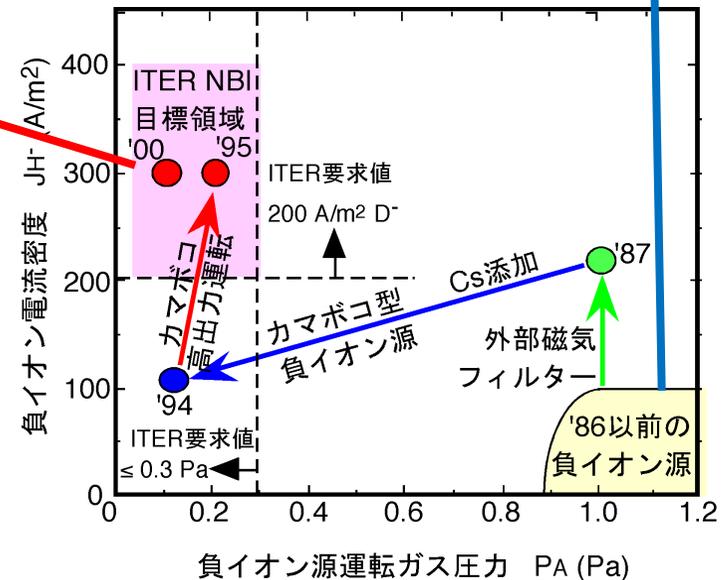
ITERプロジェクト部

博士 (工学) (東京工業大学 原子核工学専攻 2004年)

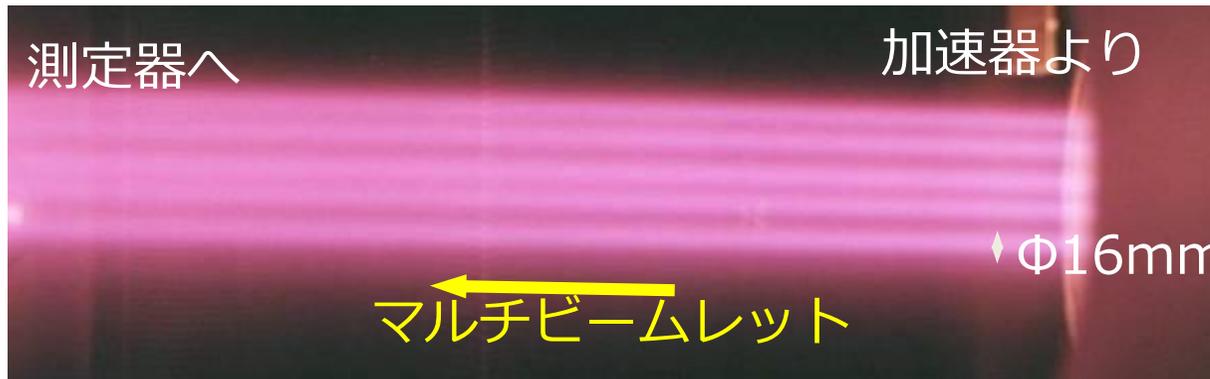
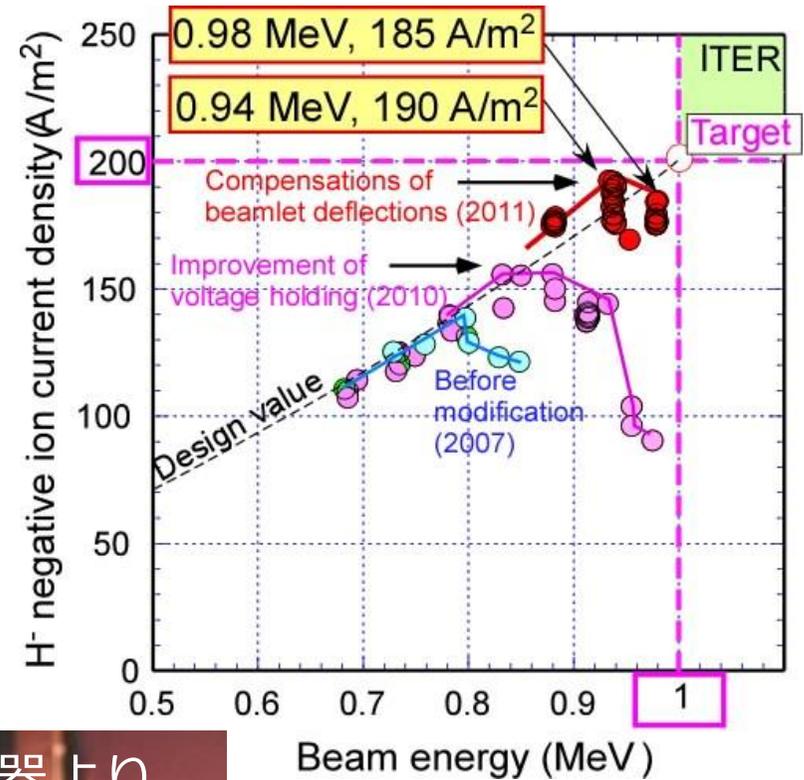
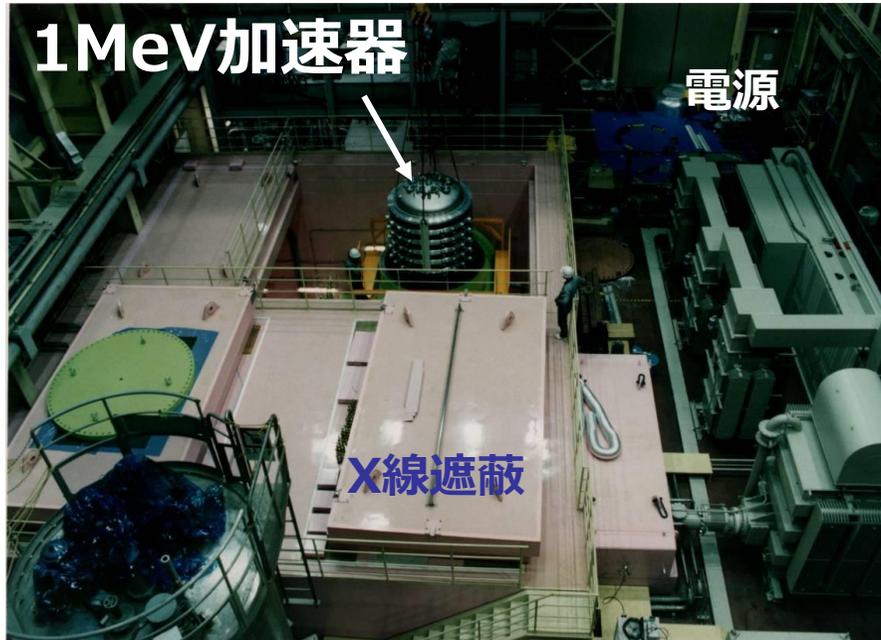
「中性粒子入射装置用高出力負イオン源と加速器の開発研究」



「磁気フィルター」、カマボコ型負イオン源を考案、低ガス圧で高効率に高密度の水素イオンを生成 ($300\text{A/m}^2\text{H}^+\text{@}0.2\text{Pa}$) し、世界でいち早くITER要求性能を達成 (1995)。



QST 講演者紹介：負イオン加速器



1 MV直流高電圧の真空絶縁を実現し、ITER要求性能 (1MeV、200A/m²)の負イオンビーム加速に成功 (2011)。

- ITER計画の位置付け
- ITERの主要な技術目標と主要パラメータ
- ITER建設サイトの状況とITER機構
- 日本の貢献（1）：我が国が分担する物納機器
 - トロイダル磁場（TF）コイルと構造物
 - 中心ソレノイド（CS）導体
 - 中性粒子入射装置実機試験施設（NBTF）
 - 電子サイクロトロン加熱用ジャイロトロン
 - ダイバータ、ブランケット遠隔保守、計測、トリチウム除去装置
- 日本の貢献（2）：人的貢献
 - ITER機構職員募集
 - ITERプロジェクト アソシエイツ
 - ITERインターンシップ

第3段階核融合研究開発計画（原子力委員会、1992年6月）

プラズマ実験段階

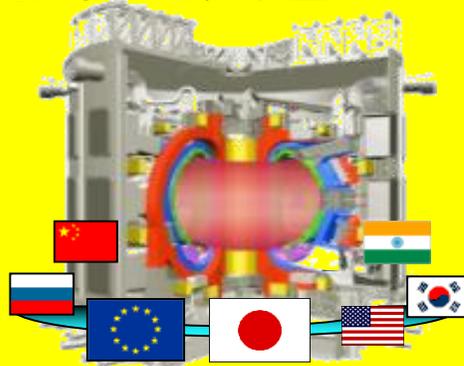
科学的事実

実験炉段階

科学的/技術的事実

ITER

- 500 MWの核融合エネルギー出力
- 持続的な核融合燃焼の実証



原型炉段階

技術的事実・経済的事実

原型炉



- 発電
- 経済的事実

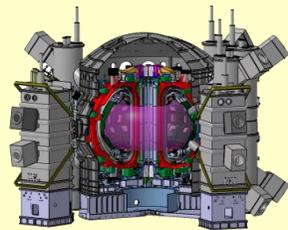
JT-60



幅広いアプローチ(BA)活動

2007年6月～

[茨城県那珂市]



・ サテライトトカマク (JT-60 超伝導化)



[青森県六ヶ所村]



- IFMIF
- 原型炉設計
- シミュレーション研究

ITERは第三段階計画の中核装置であり、国際協力下でフランスに建設されている「日本の実験炉」との位置付け

1985～

2007～

21世紀中葉

- 1985年 米・ソ主脳会議（レーガン-ゴルバチョフ会談）で、核融合の国際共同開発に合意（冷戦構造の崩壊）。日、欧にも呼び掛けて、ITER計画が発足。
- 1988-1990年 概念設計活動（CDA）
- 1992-1998年 工学設計活動（EDA）
- 1998-2001年 延長EDA（日、欧、露）。日本提案による設計の大転換・コスト低減。
- 2001-2005年 サイト選定、日欧露加の4極に加え、米中韓が参加。2003年末に加離脱。
- 2005年 ITERサイトがサンポール・レ・デュランスに決定、印が参加。
- 2006年 ITER協定の署名
- 2007年 ITER機構発足、

7極参加（日欧米韓中露印）
世界人口の半数以上(35億人)が関与
世界のGDPの3/4以上



2008.8
 ▲ JT-60
 運転終了

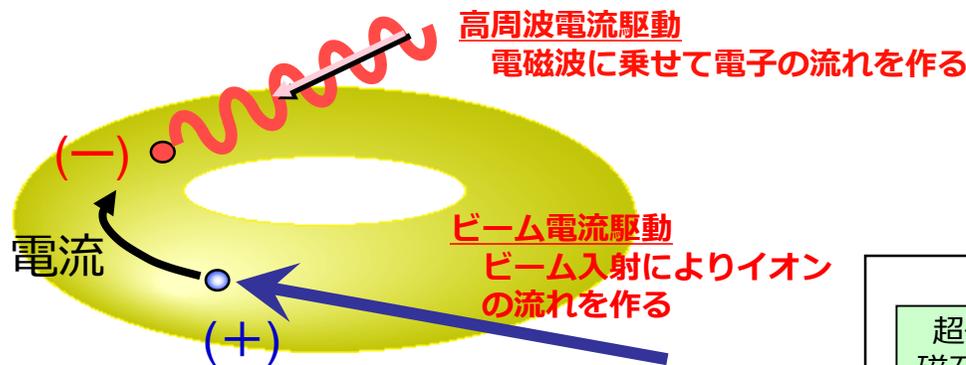
35年の長期にわたる国際プロジェクト
核融合研究: ~40年スパン
日本はものづくりの知恵と経験で貢献。

炉心プラズマの核融合性能

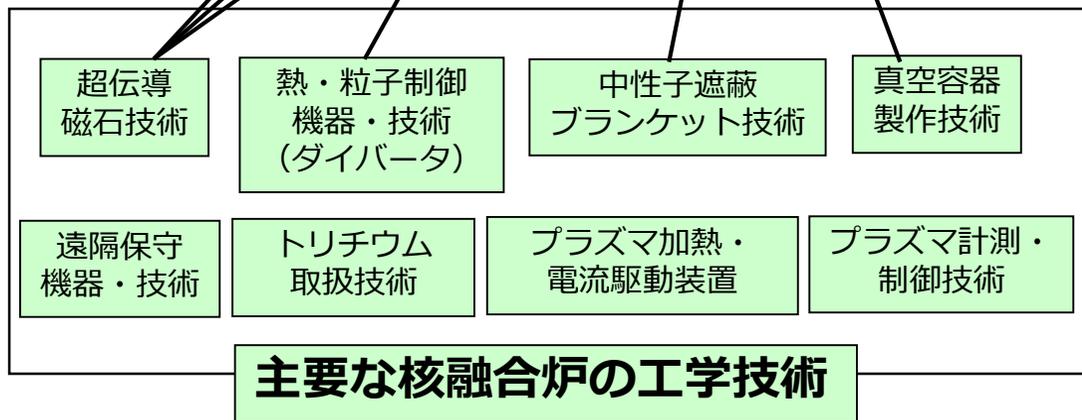
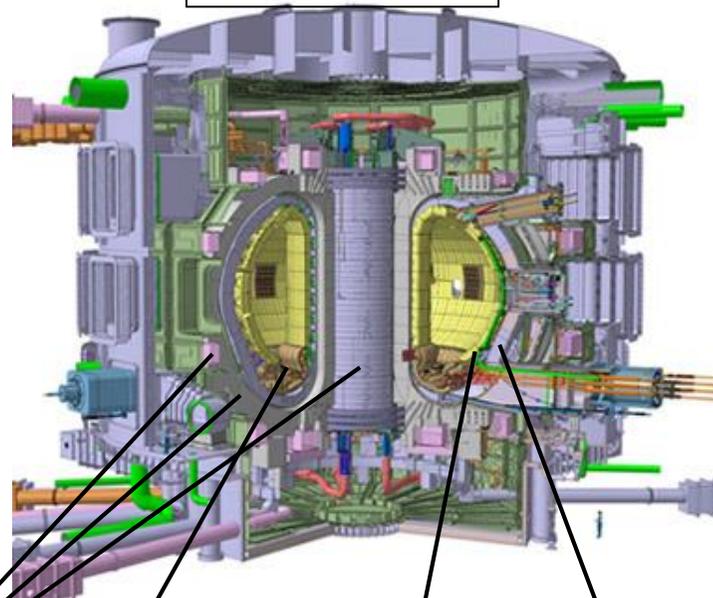
- 誘導運転において、エネルギー増倍率 $Q \geq 10$ 、300~500秒間の核融合燃焼を達成。

$$Q = \frac{\text{核融合出力}}{\text{外部入射パワー}}$$
- 誘導によらない $Q \geq 5$ の定常運転実証を目指す。

誘導によらない電流発生の場合

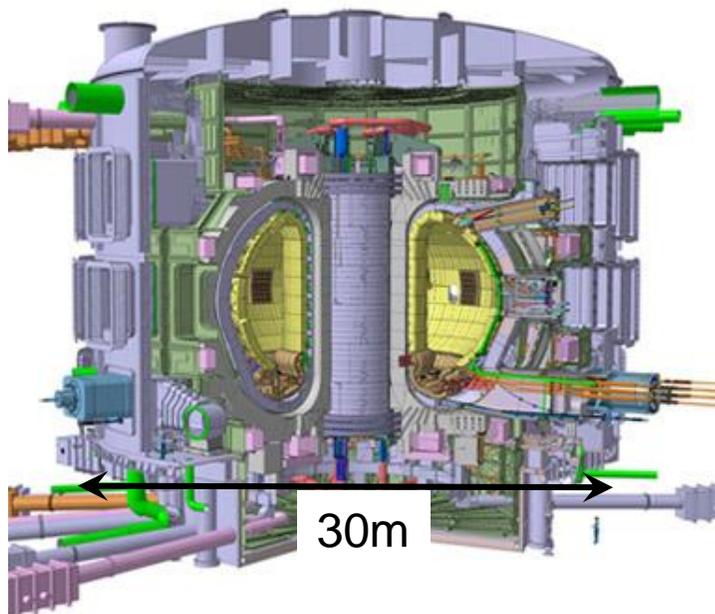


ITER本体概要図

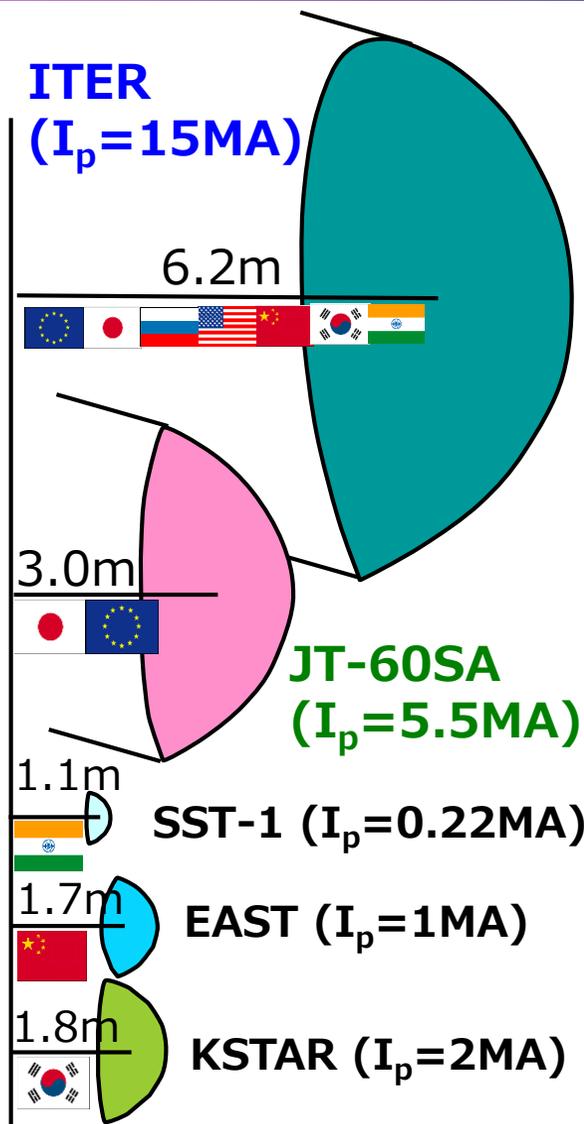


核融合工学技術

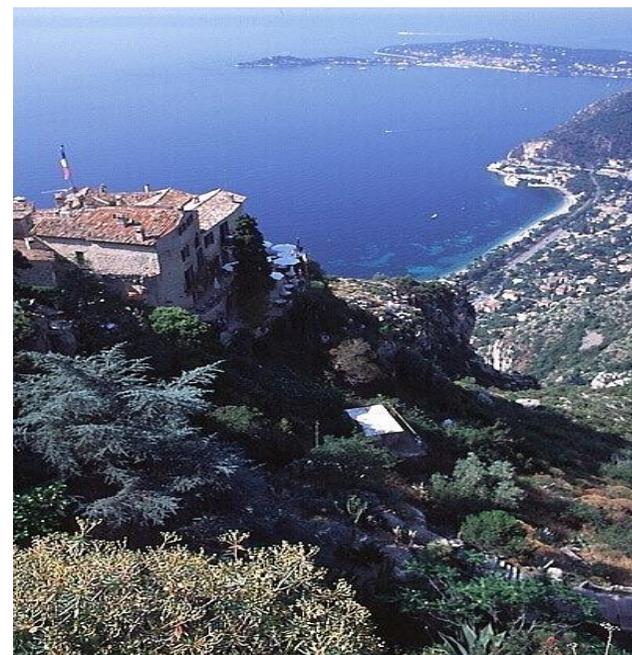
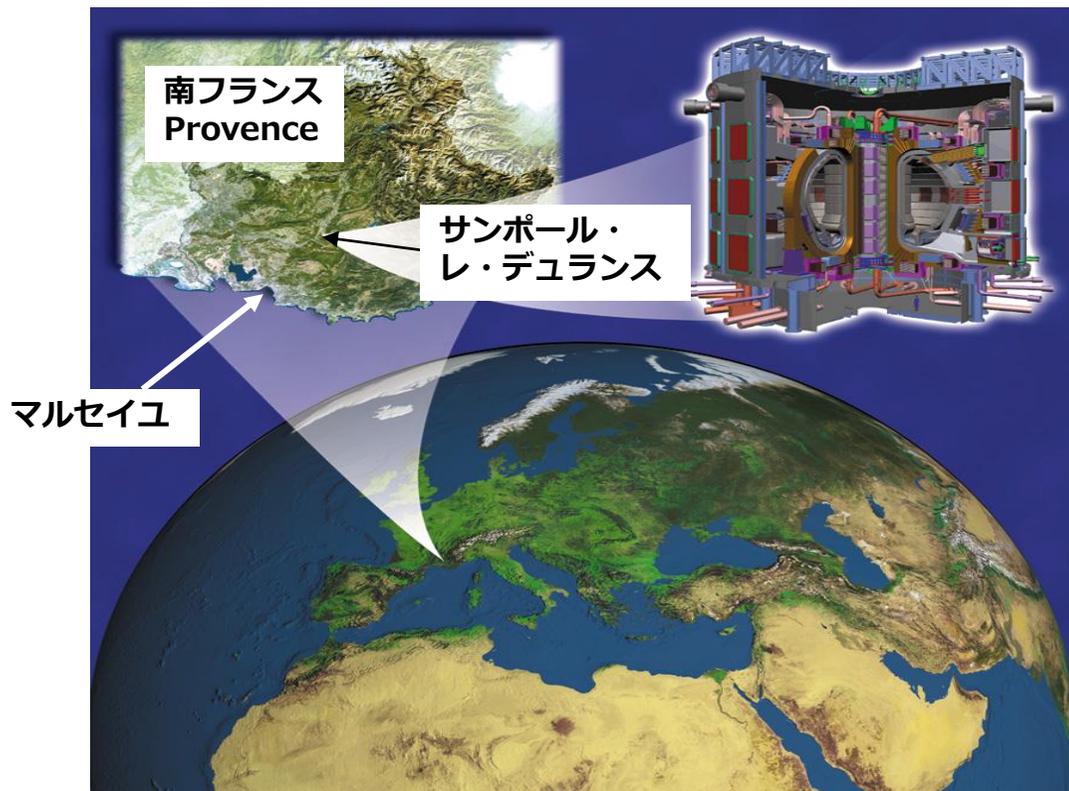
- 核融合炉の主要な工学技術を統合し、その有効性を実証。
- 将来の核融合プラントのための工学機器 (熱・粒子制御機器等) の試験。



- ・全核融合出力 500 MW
- ・Q (エネルギー増倍率) ≥ 10
- ・プラズマ誘導燃焼時間 ≥ 400 秒
- ・プラズマ主半径 (R) 6.2 m
- ・プラズマ副半径 (a) 2.0 m
- ・プラズマ電流 (I_p) 15 MA
- ・トロイダル磁場 5.3 T (6.2 m半径点)
- ・外部加熱・電流駆動パワー 73 MW



世界の非円形超伝導トカマク



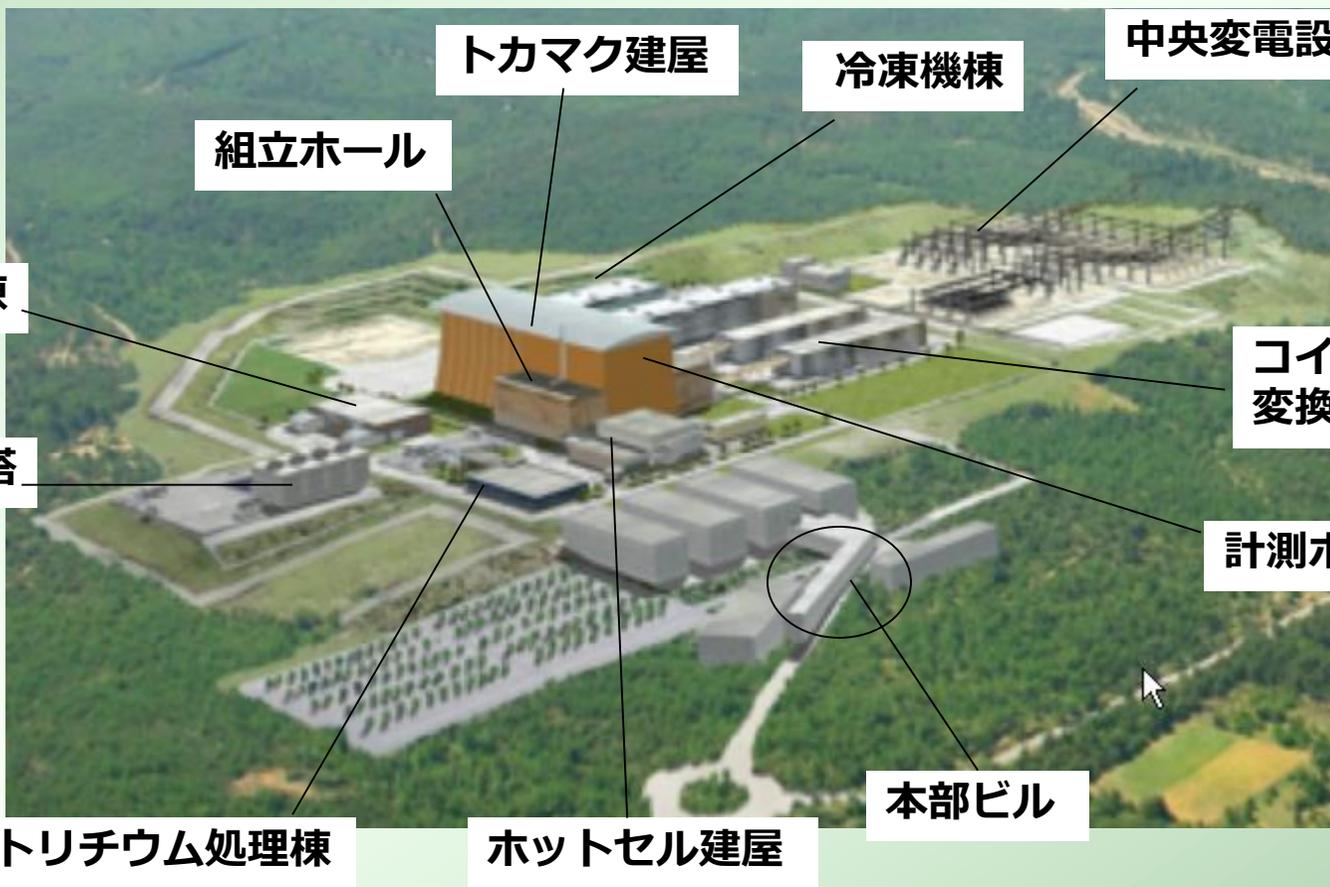
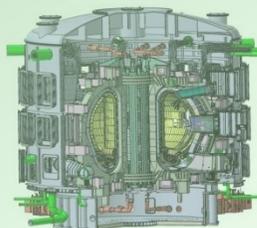
マルセイユ・エクスメノスク

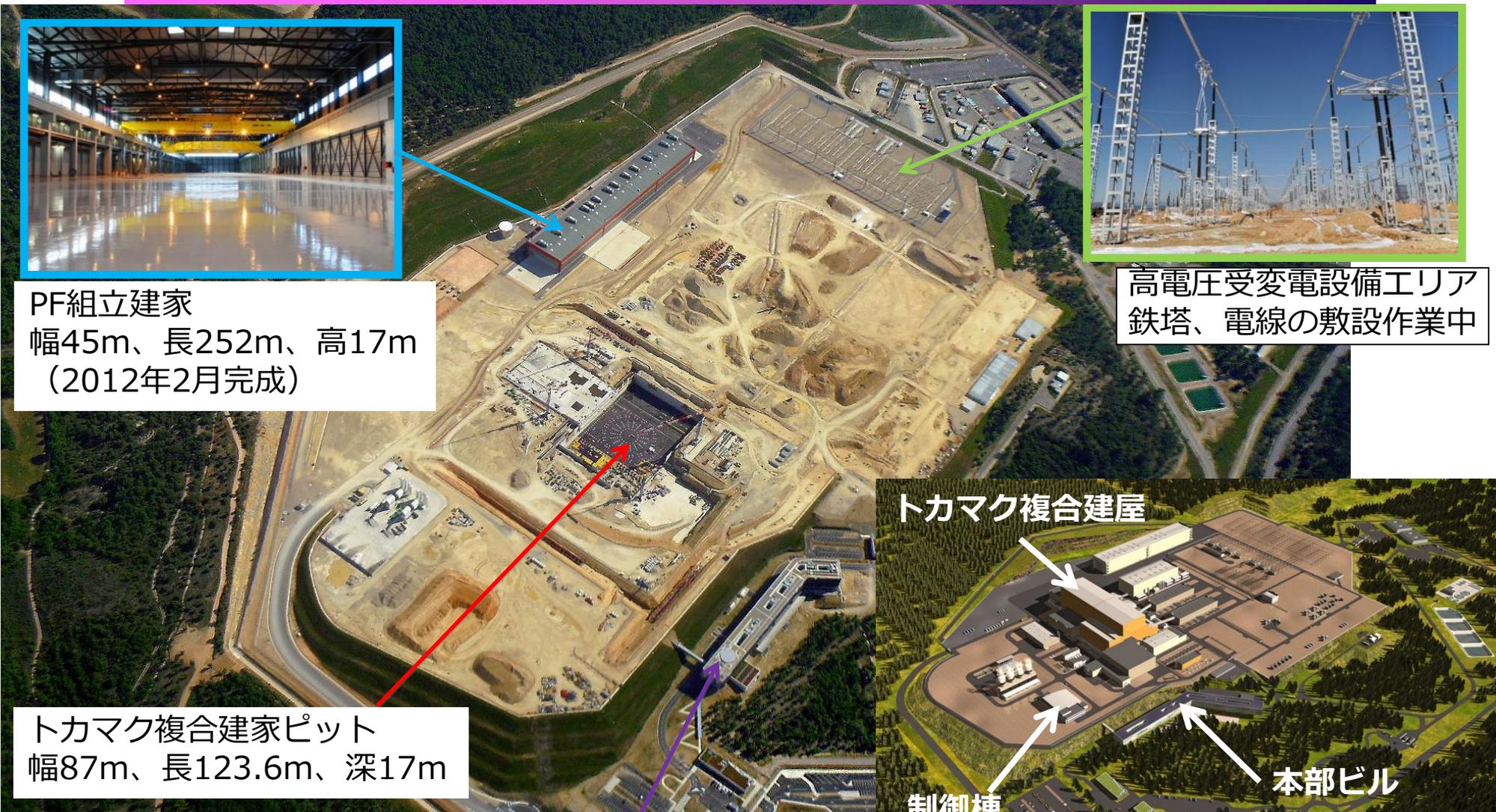




ITER
完成予想図

CEAカダラッシュ研究所





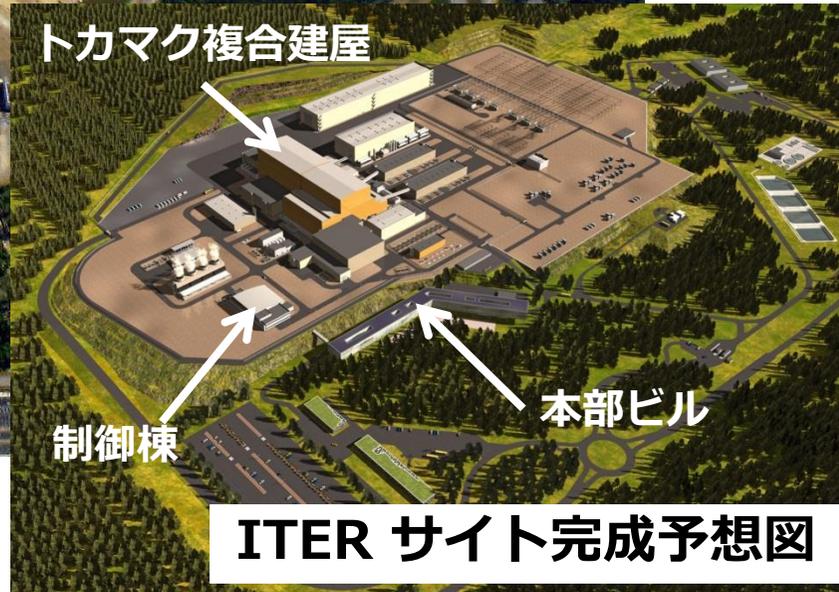
PF組立建家
幅45m、長252m、高17m
(2012年2月完成)



高電圧受変電設備エリア
鉄塔、電線の敷設作業中

トカマク複合建家ピット
幅87m、長123.6m、深17m

本部ビル (2012年10月完成、
2013年1月17日竣工式典)



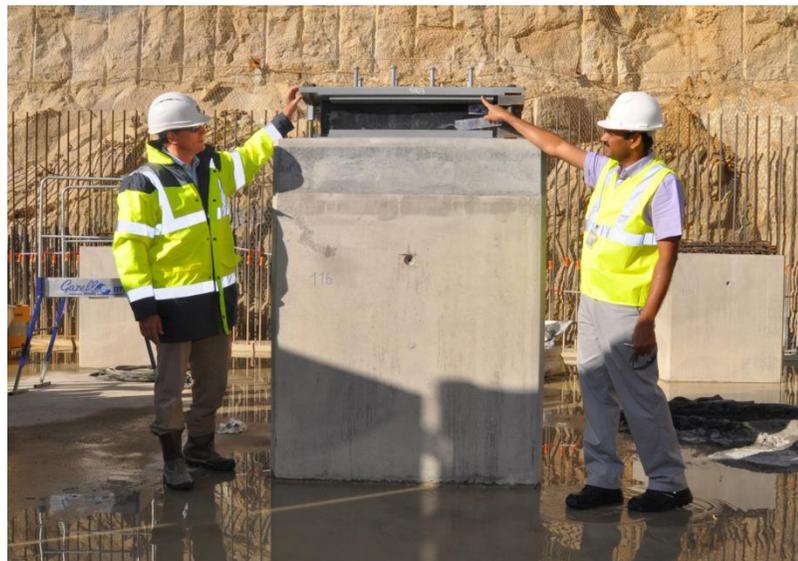
トカマク複合建屋

制御棟

本部ビル

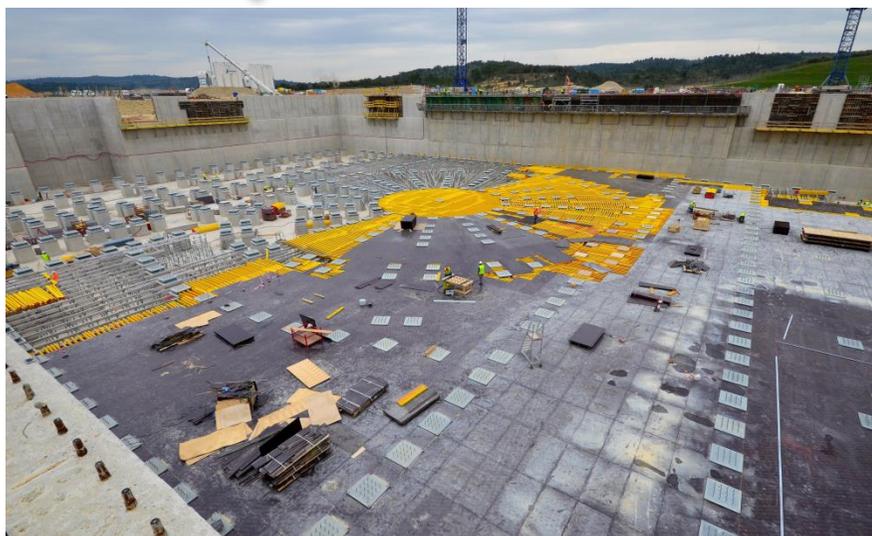
ITER サイト完成予想図

2012年4月：トカマク複合建家の支持構造が完成。493個の免震パットを設置。



↓ 2013年4月

2013年6月

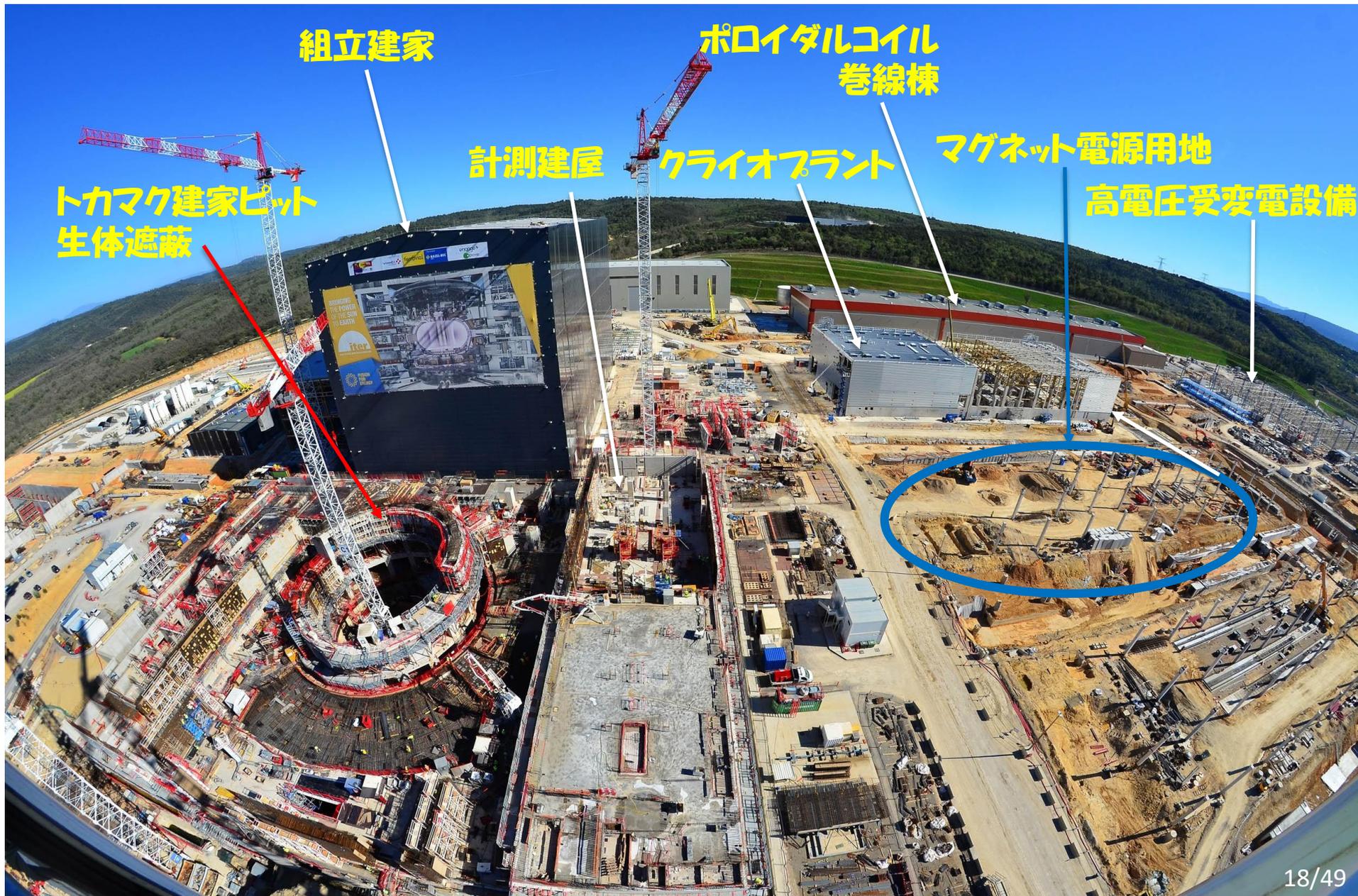


2014年4月



QST ITERサイト建設状況 (2016年4月)







岡山克巳
(前) 計画管理副本部長
⇒建設管理本部長



多田栄介副機構長



ベルナル・ビゴ機構長

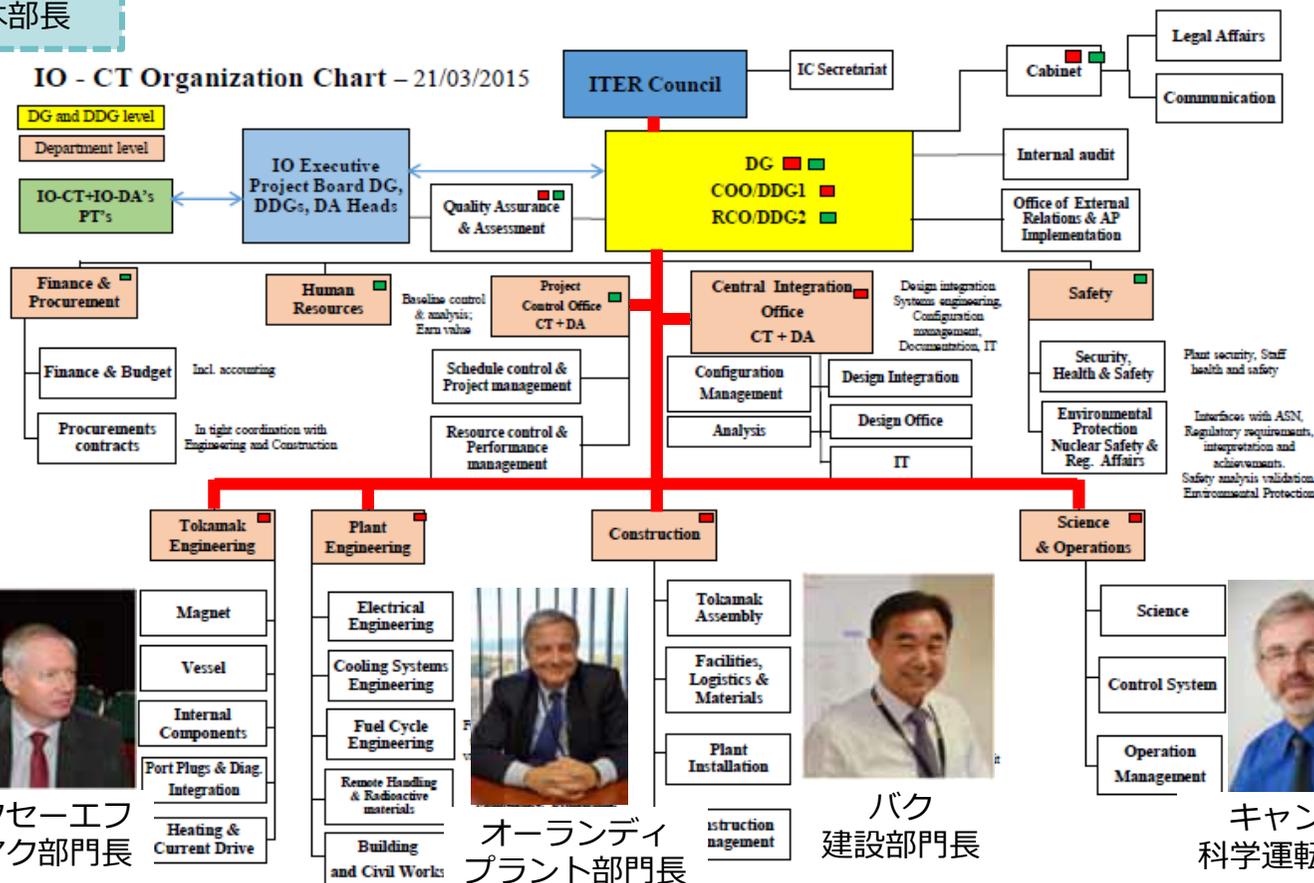


小野塚正紀
中央統合本部長



ヤネシツ
中央統合本部次長

IO - CT Organization Chart - 21/03/2015



管理部門

科学技術部門



アレクセーエフ
トカマク部門長



オーランド
プラント部門長



バク
建設部門長

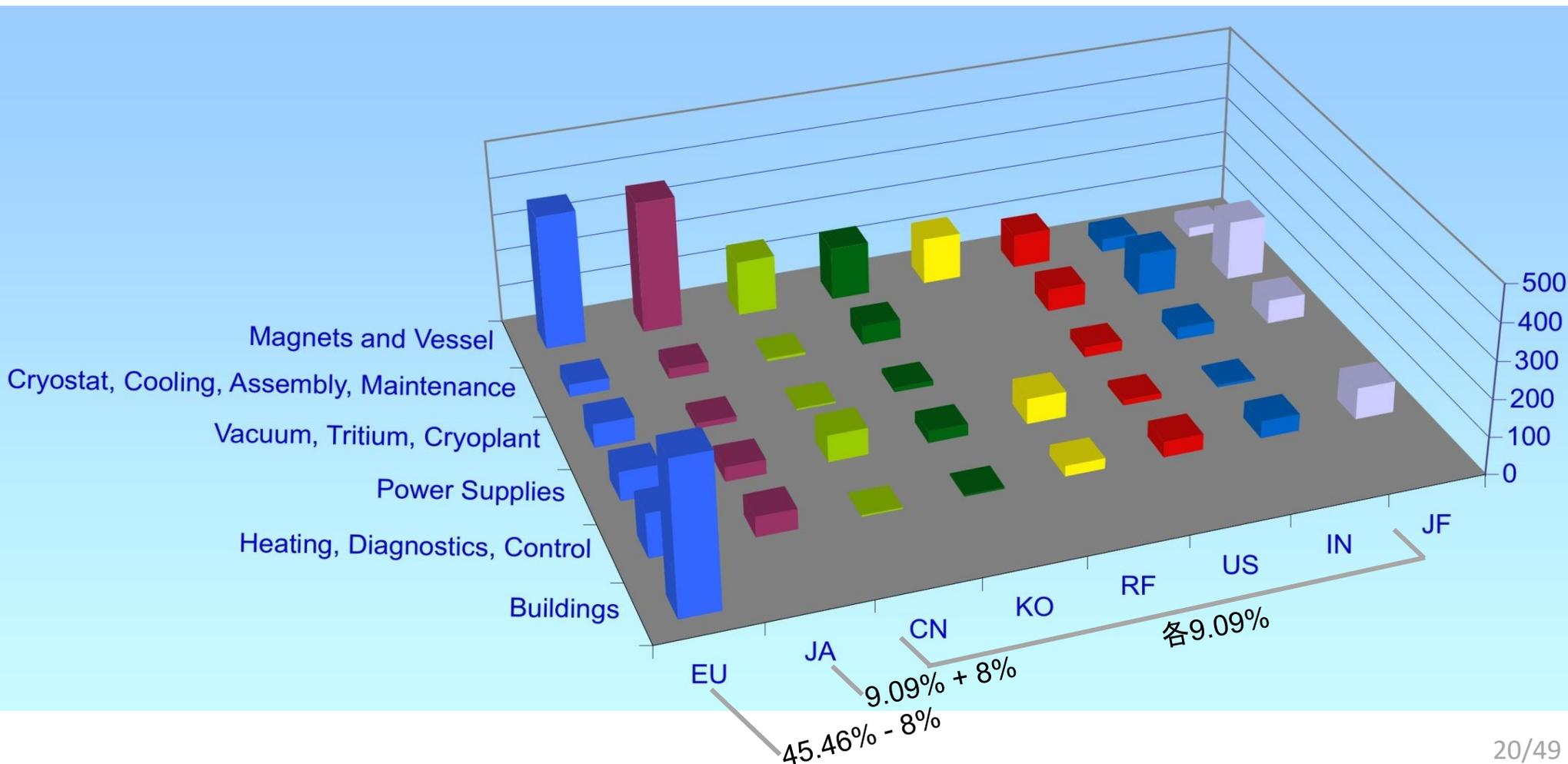


キャンベル
科学運転部門長

各極による物納



- 各極の技術基盤や核融合開発計画に基づいて分担を決定
- 各極の貢献度に従った公平な分担：建物や居室等はホスト国欧州が分担
- 各極及びシステム間の取合調整や設計統合、全体組立はITER機構が所掌



QST 我が国が分担する物納機器



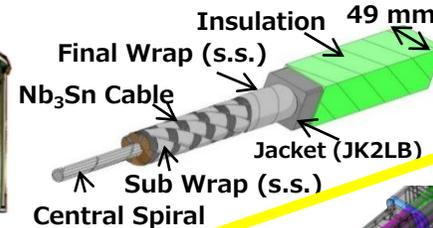
トロイダル磁場(TF)コイル

TFコイル導体: 25%
TFコイル巻線、一体化: 47%
TFコイル構造物: 100%



中心ソレノイド(CS)コイル

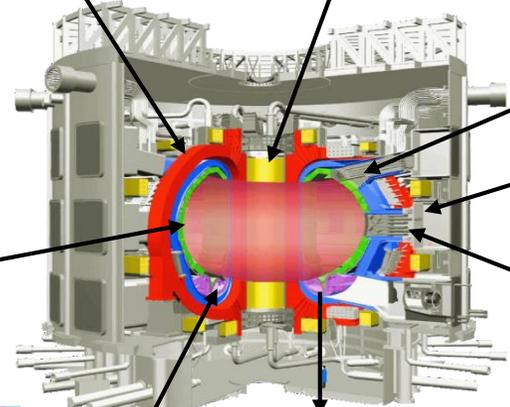
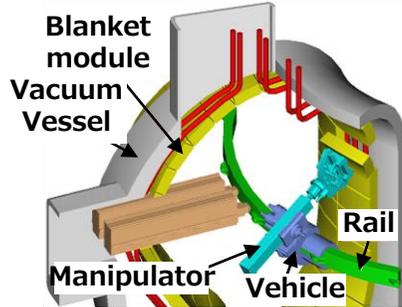
CSコイル導体: 100%



計測装置 (設計中)
マイクロフィッションチャンバー
ポロイダル偏光計
周辺トムソン散乱計測器
ダイバータ不純物モニタ
赤外サーモグラフィ
上部ポート統合
下部ポート統合

ブランケット遠隔保守 (設計中)

マニピュレータ付ビークル



電子サイクロトロン加熱 (設計中)

ジャイロトロン
水平ポートランチャー

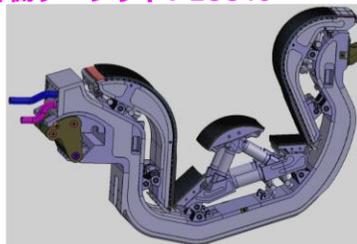
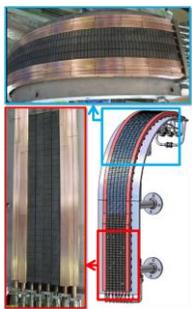


中性粒子入射加熱

HVブッシング: 100%
1 MV電源高電位部: 100%
1 MeV加速器: 33%



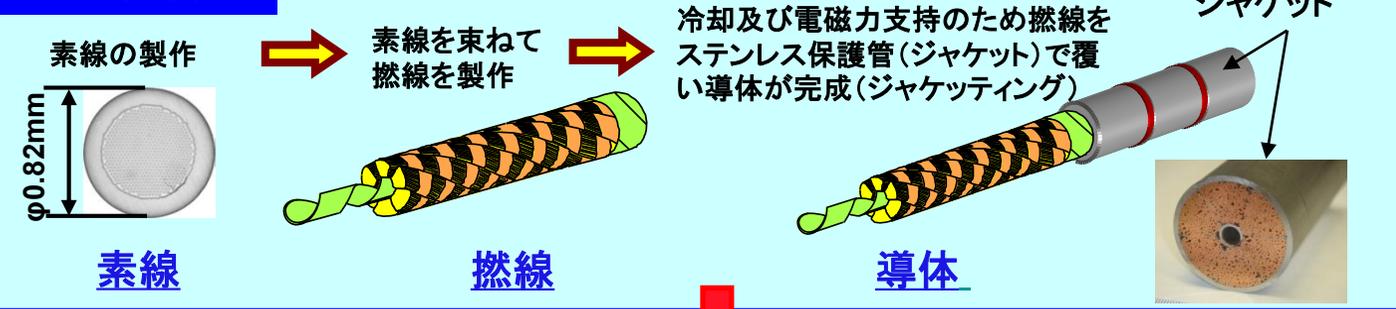
ダイバータ (R&D中)
外側ターゲット: 100%



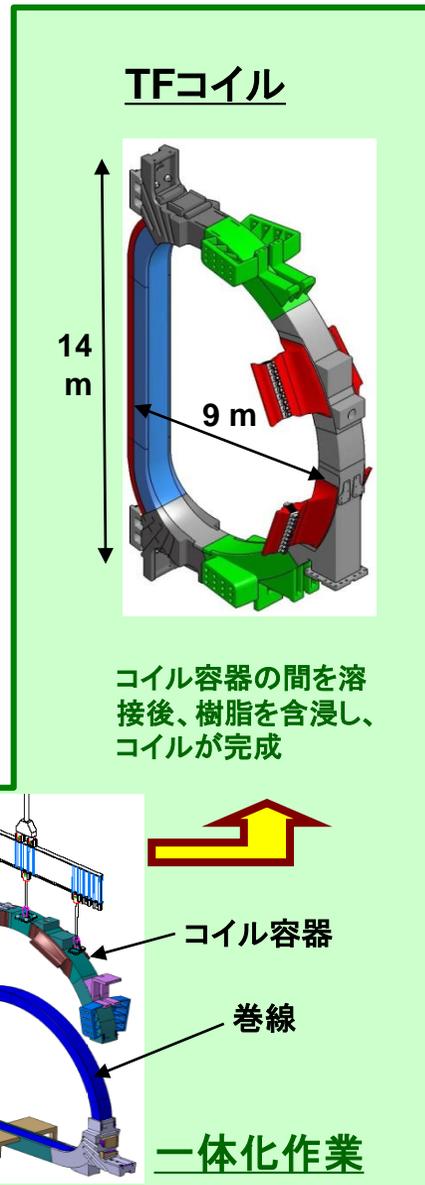
トリチウム除去設備 (ADS、設計中)



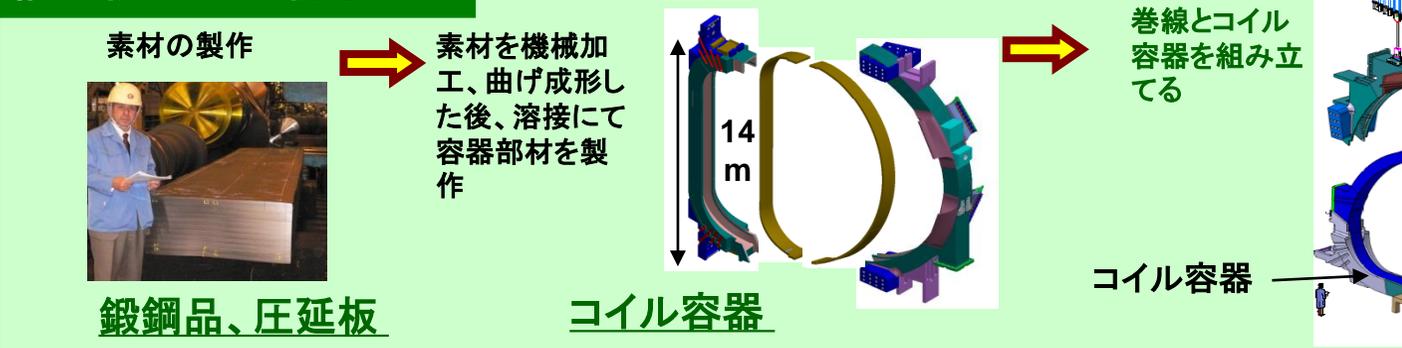
超伝導導体

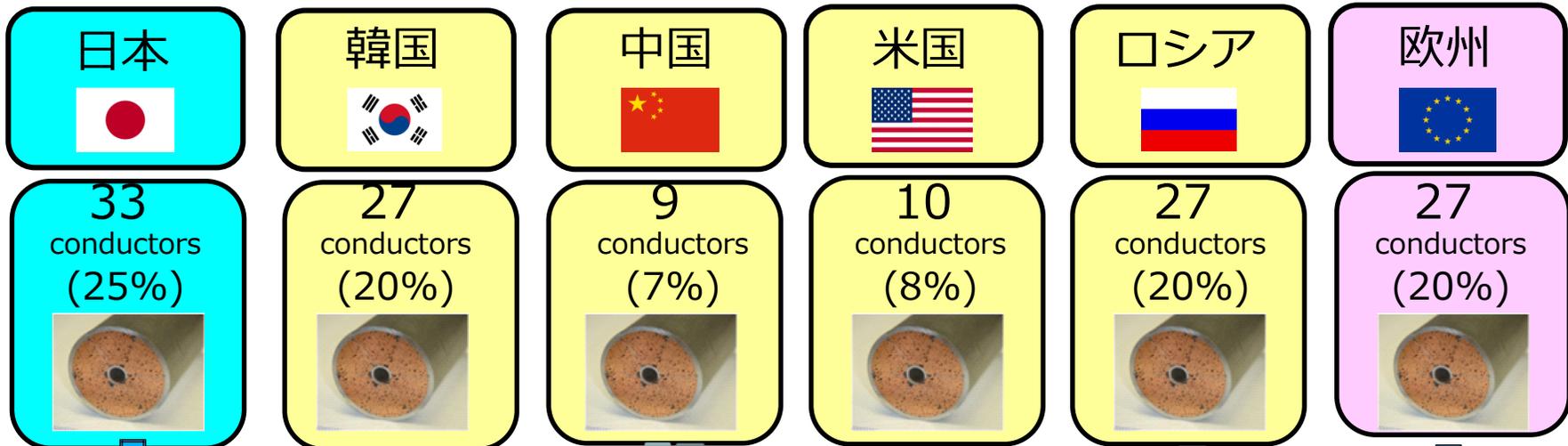


コイル巻線



構造物(コイル容器)





TF
導体

TFコイル
巻線パック

TFコイル
構造物

9 構造物
TFコイル
組立

9 コイル

19 構造物



10 構造物



**全極がTFコイル用導体の
製作を完了**

10 コイル

QST TFコイル導体全33本の製作を完了



素線製作

(1~20km/本)



素線断面
(φ0.82mm)



ボビンに巻かれた素線

撚線製作



ボビンに巻かれた撚線

超伝導線 : 900本
銅線 : 522本
(415m, 760m)

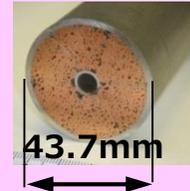


導体製作



950m

導体製造工場全景
(竣工 : H22年1月12日)



43.7mm

日本は世界に先駆けて
全導体製作を完了
(H26年12月)



プロジェクト全体で全
導体製作を完了

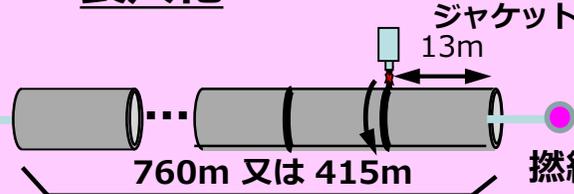
撚線引込み
圧縮成形
曲げ成形 **完成した導体**
(ITER計画で最初の物納)

ジャケット(13m/本)

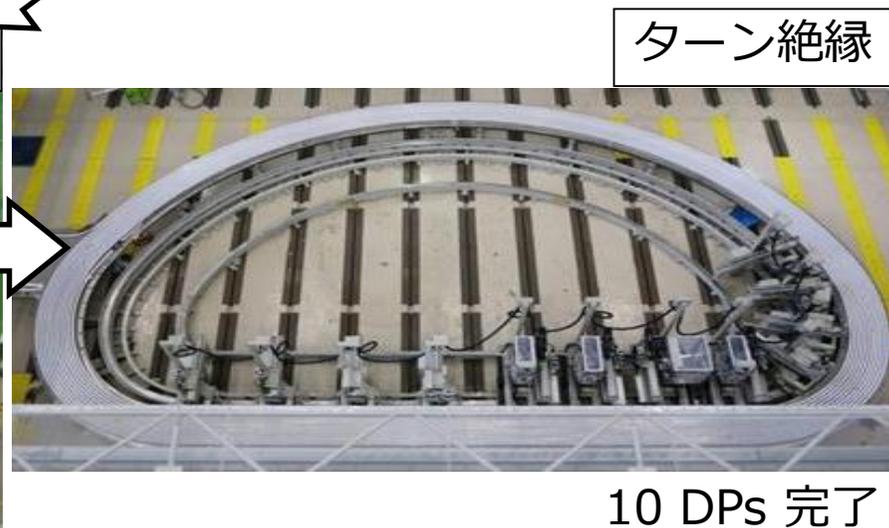
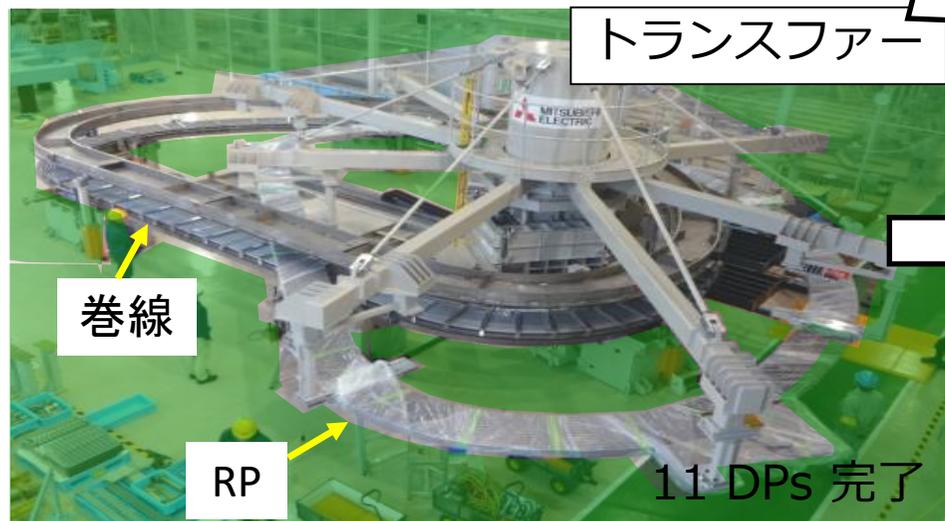
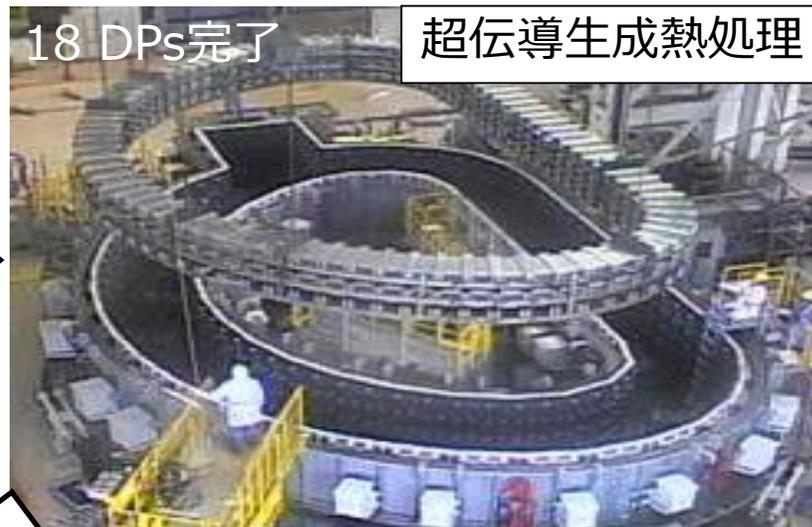
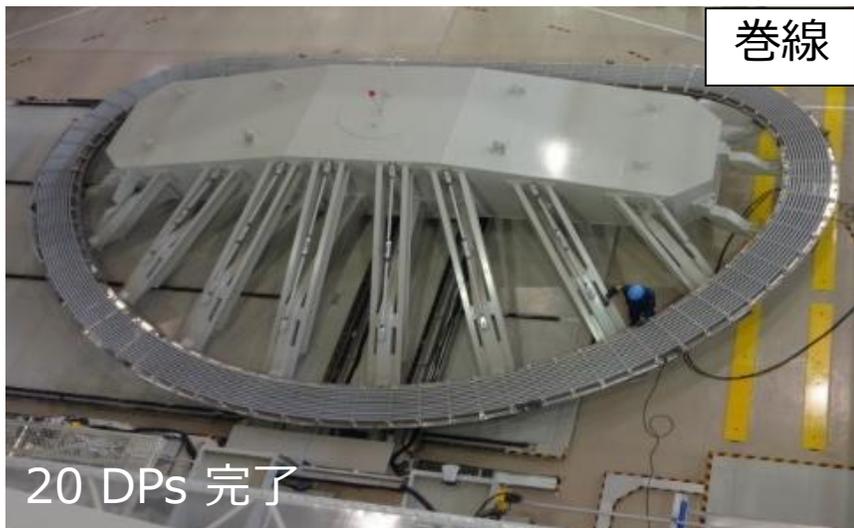


長尺化

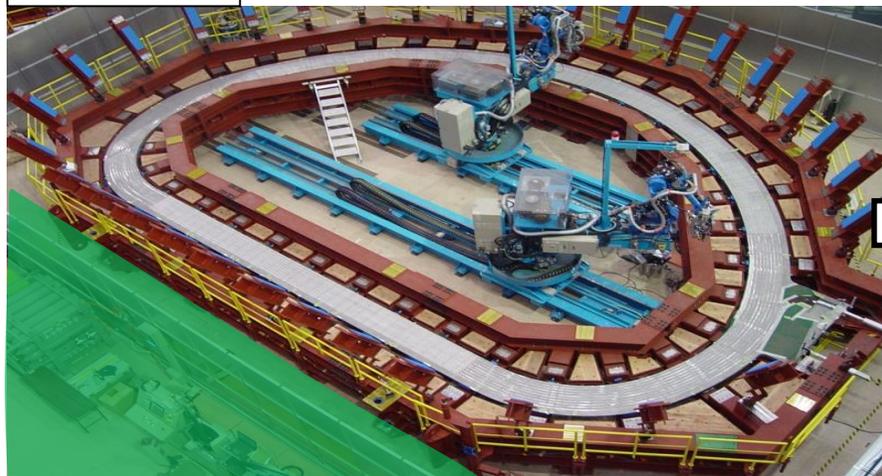
突合せ溶接



撚線引込み
圧縮成形
曲げ成形



CP 溶接



DP 絶縁



9 DPs 完了

7 DPs完了

DP 樹脂含浸

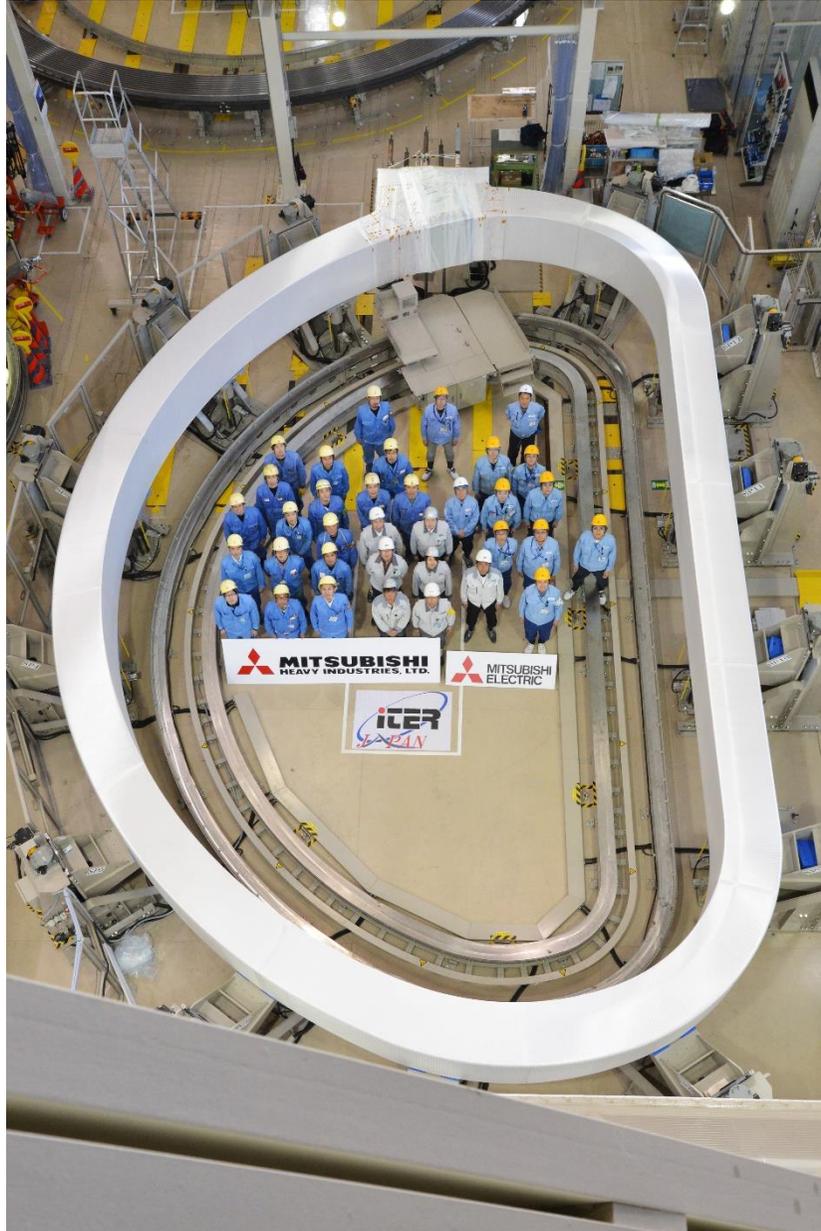


DP 積層



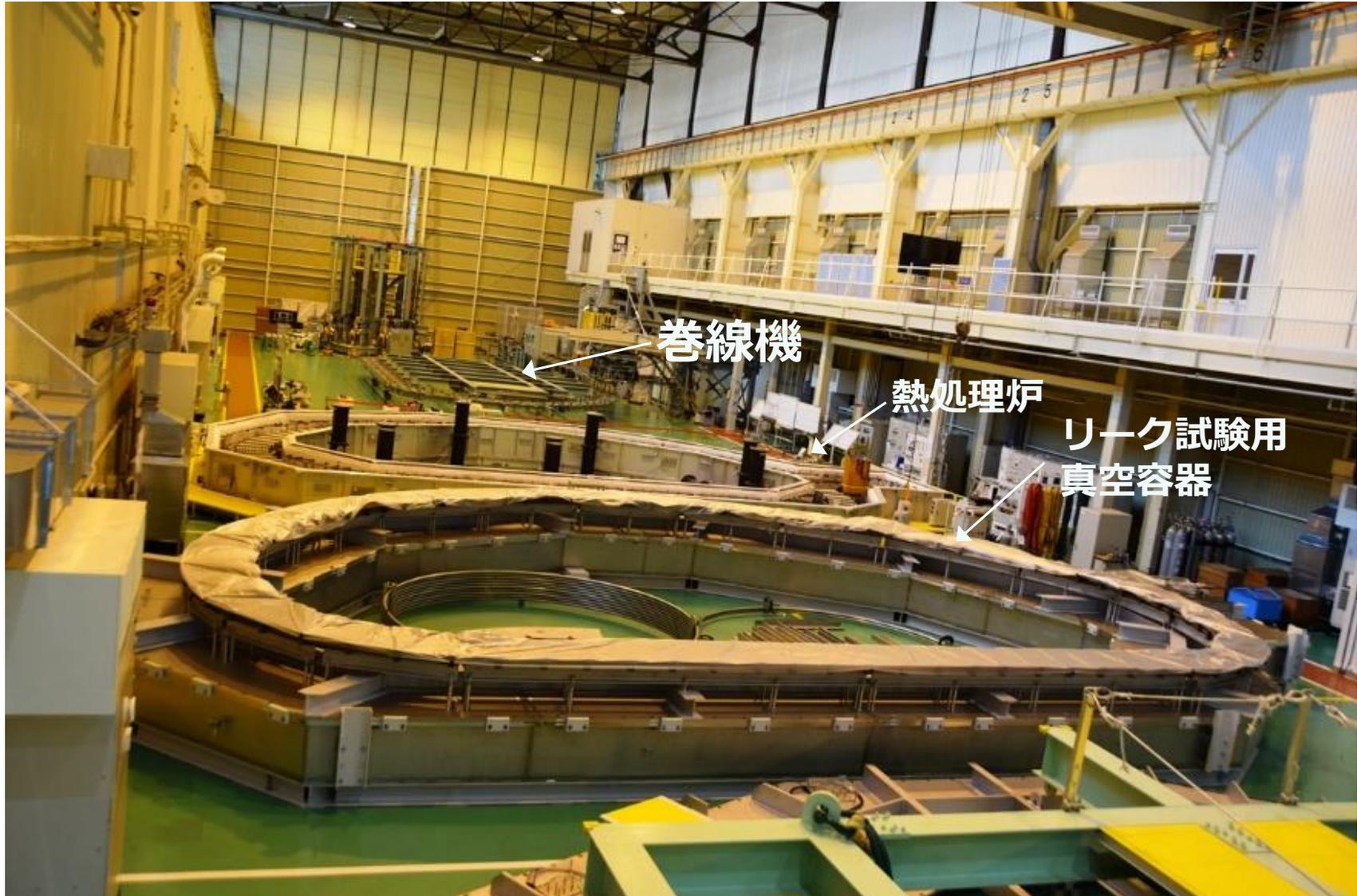
7 DPs完了

TF1号機用DP積層完了 (2016年12月)

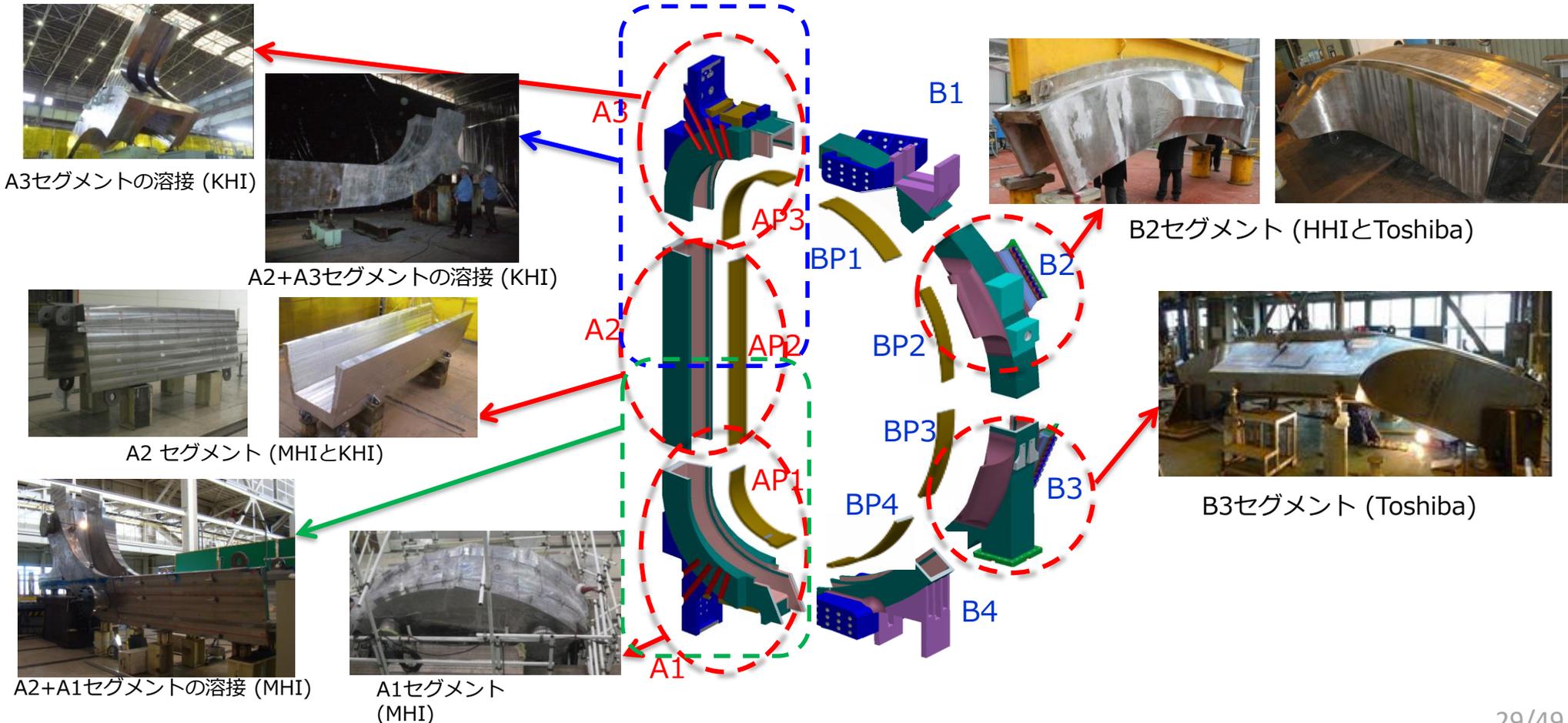


TFコイル1号機の7つのDPを積層、DP絶縁を2017年1月に完了。
ITER理事会が設定したマイルストーンをスケジュール通りに達成。

東芝の第2製造ラインもTFコイルの量産に向けて調整運転・試運転を完了。



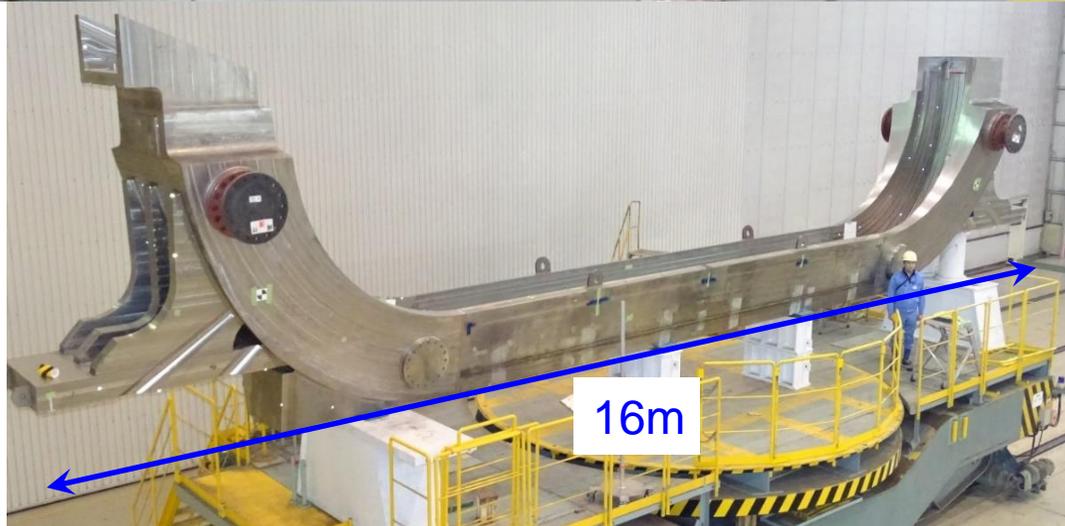
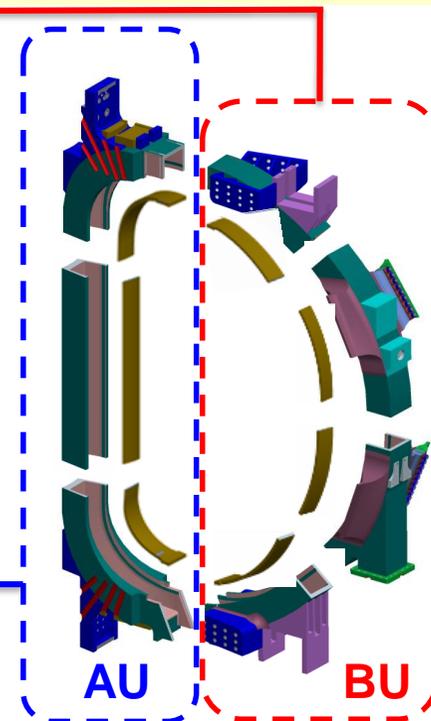
- TFコイル構造物 (TFCS) は厚さ150mm以上の厚肉ステンレス鍛造材製。
- TFコイル構造物すべての実機大試作を完了。厚肉材の溶接変形抑制法を確立。
- 実機用TFCSの製作を2014年4月に開始。



最初のTFコイル用構造物の完成間近 (MHI及びHHI)

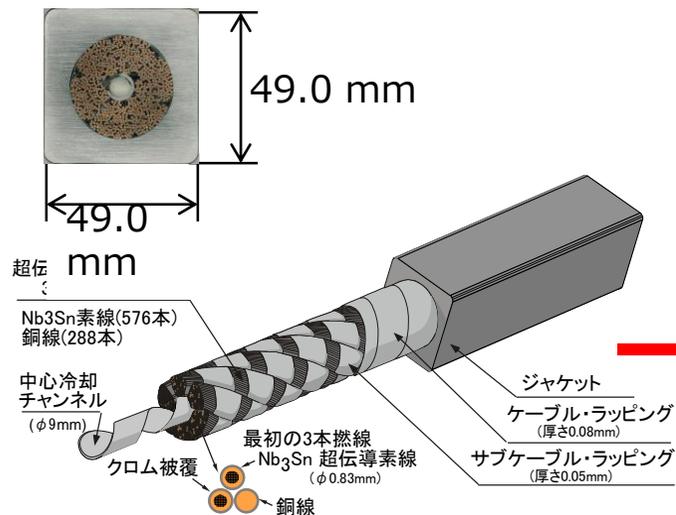


アウトボード側サブアセンブリ (HHI)
4つのベーシックアセンブリで構成
最終機械加工工程



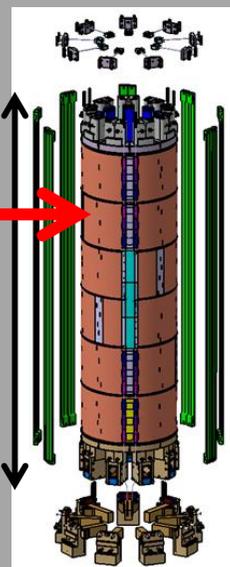
インボード側サブアセンブリ (MHI)
3つのベーシックアセンブリで構成
完成済

調達取決め締結2009年12月



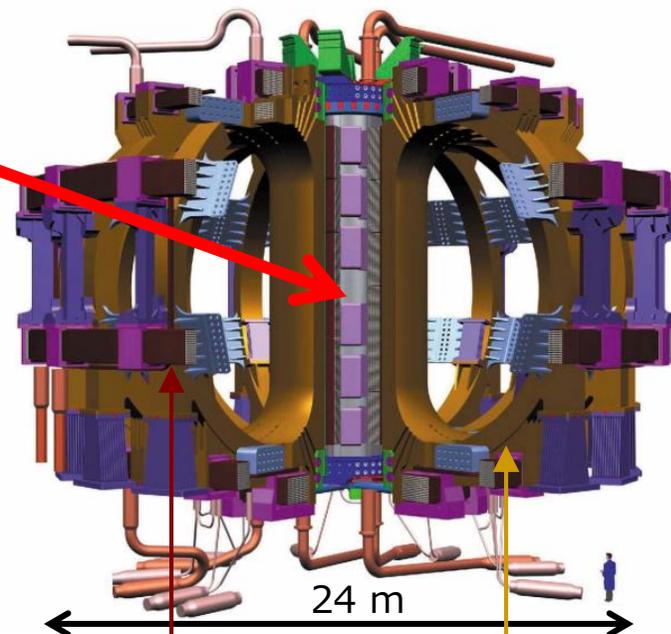
中心ソレノイド

超伝導材料: ニオブ3スズ



総重量: 953 トン

パルス運転、
磁場: 13T, 電流: 45kA



ポロイダル磁場コイル
ニオブチタン

トロイダル磁場コイル
ニオブ3スズ

製作数量:

918 m (15.6 ton) x 42本

613 m (10.4 ton) x 7本

導体総重量: 700 トン

マグネット・システム総重量	10,000トン
ニオブ3スズ素線重量	550トン
ニオブチタン素線重量	250トン

超伝導導体

ITER
超伝導コイルシステム

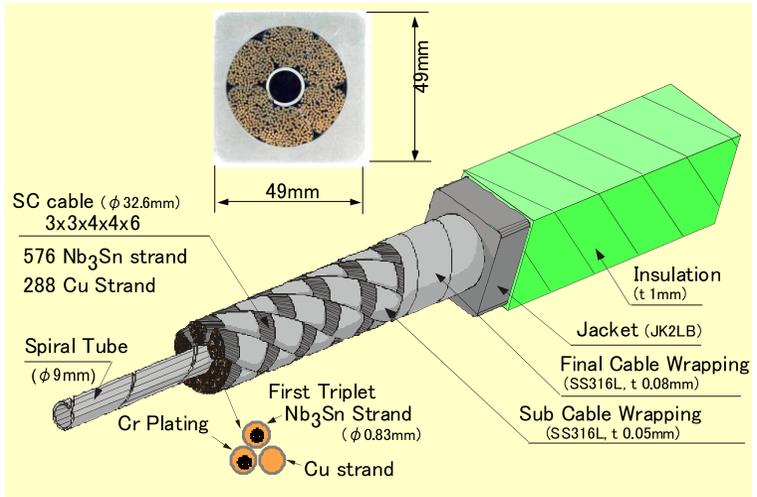
QST 中心ソレノイド (CS) 用導体 (2)



日本はすべての中心ソレノイド (CS) 導体の調達を分担。
CSの製作を担当するアメリカへ導体完成品を輸送する責を負う。

		Completed	Total amount	Percentage
Strand		24,680 km	24,150 km	98%
Cable	qP (613 m)	7 units	7 units	96%
	hP (918 m)	42 units	40 units	
Conductor	qP (613 m)	7 units	7 units	88%
	hP(918 m)	42 units	36 units	

2017年6月現在



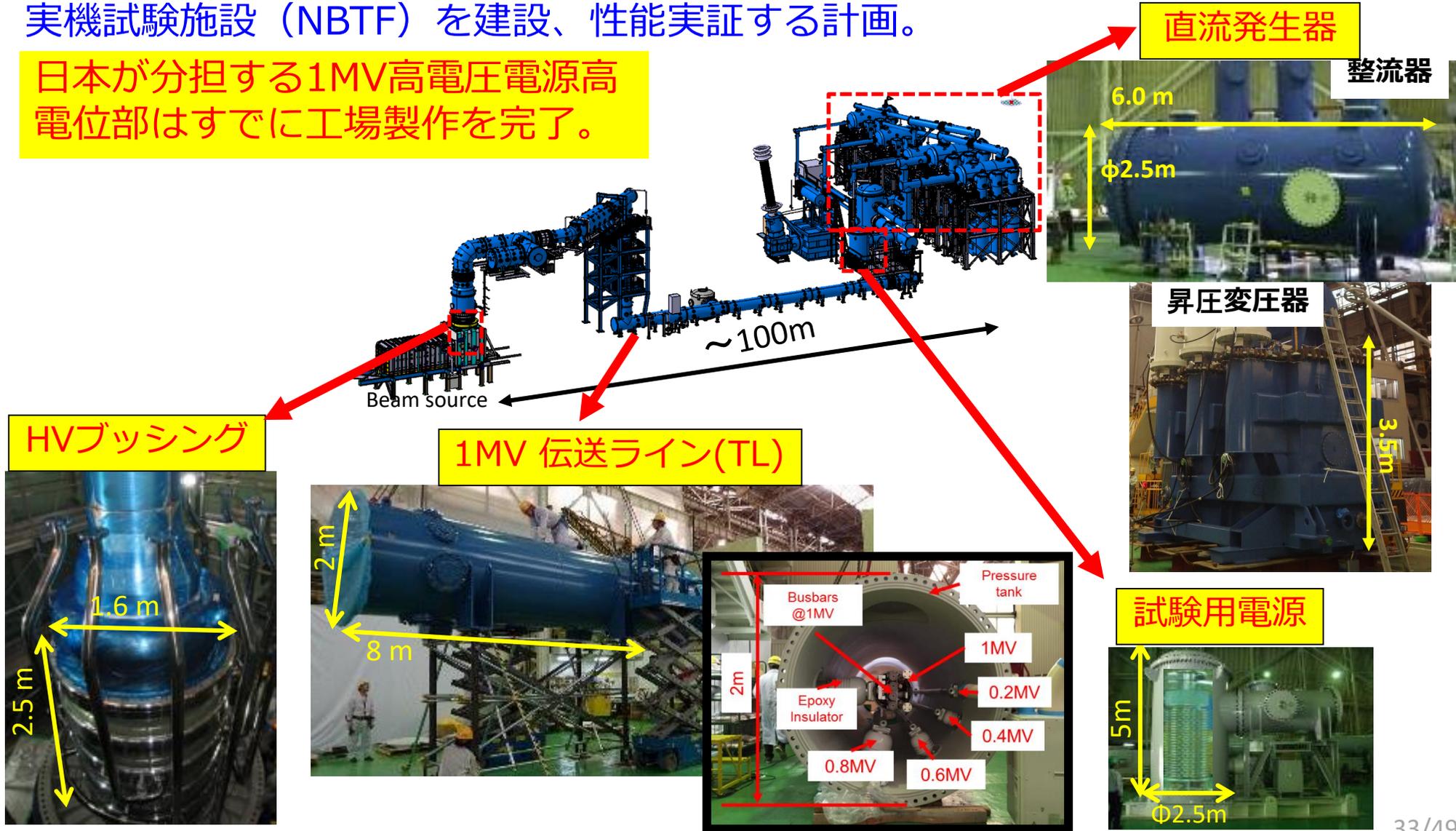
CS導体の量産は新日鉄住金エンジ@北九州で進行中。
合計40導体をアメリカに輸送完了。

QST 中性粒子入射加熱装置 (NBI)



ITER NBIの要求性能は既存設備の2倍以上。このためイタリア・パドバに
実機試験施設 (NBTF) を建設、性能実証する計画。

日本が分担する1MV高電圧電源高
電位部はすでに工場製作を完了。



2015年12月NBTfサイトにおいて日本調達機器の据付作業を開始

伊・パドバRFX研主催の式典

日本調達機器の到着

ニエゾット
RFX研理事長

板倉
文科省審議官

ビゴ
IO長官

ガリバ
欧州委員会部長

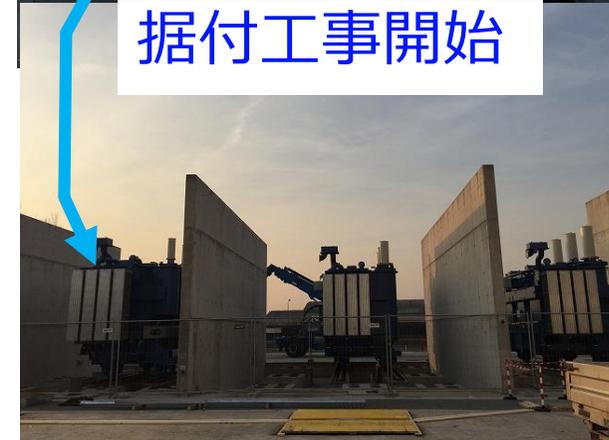


ミール
伊・文科省

地元3紙に掲載



据付工事開始





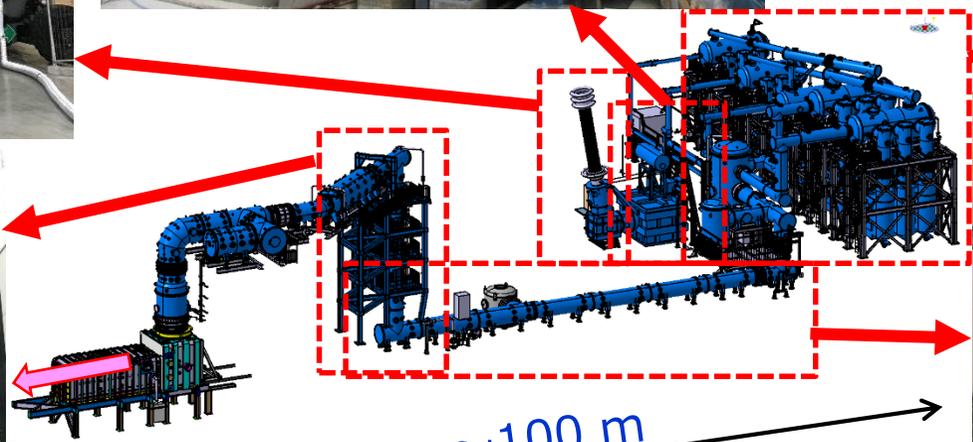
1 MVブッシング



1 MV 絶縁変圧器



1 MV 直流発生器



伝送系 支持構造



伝送系

約90%の機器はすでにイタリア・パドバのNBTFサイトに据付済。

日本の調達範囲

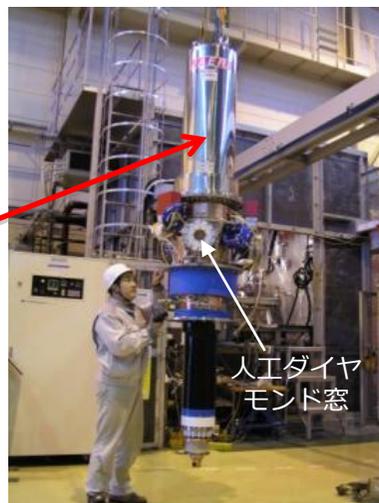
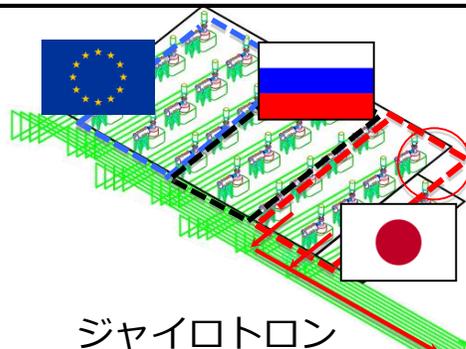
- ・ 8基のジャイロトロン
- ・ 水平ランチャー

ジャイロトロンの開発

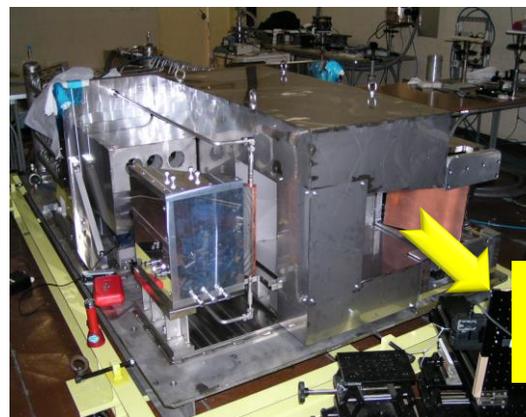
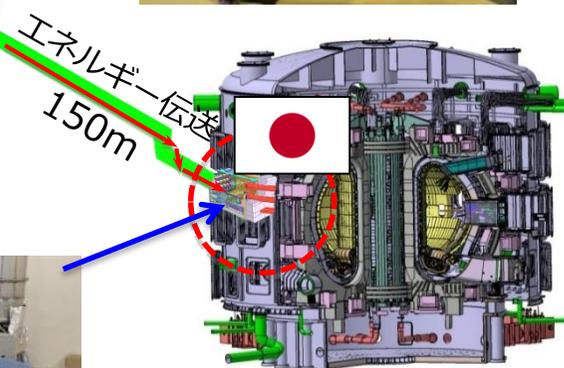
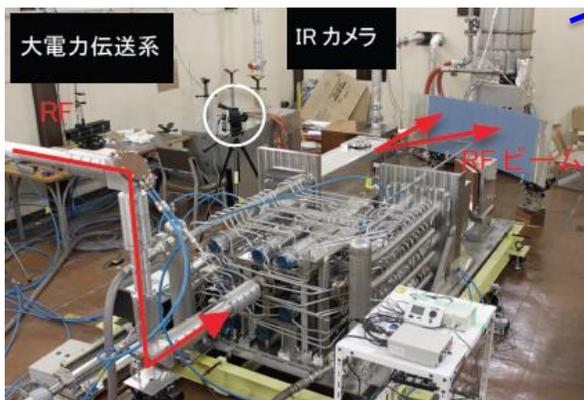
基本性能は2009年までに達成：
周波数 170GHz (マイクロ波)、出力 1 MW、
パルス幅 500秒、電力変換効率 50%

プラズマ不安定抑制の要求：
要求される電力変調 (5kHz、100%) に成功

2013年9月にジャイロトロンの調達
取決めを締結。
2015年12月実機製作開始。



水平ランチャー (アンテナ) の開発



ランチャーモックアップを製作し、
製作性やマイクロ波放射性能を確認。

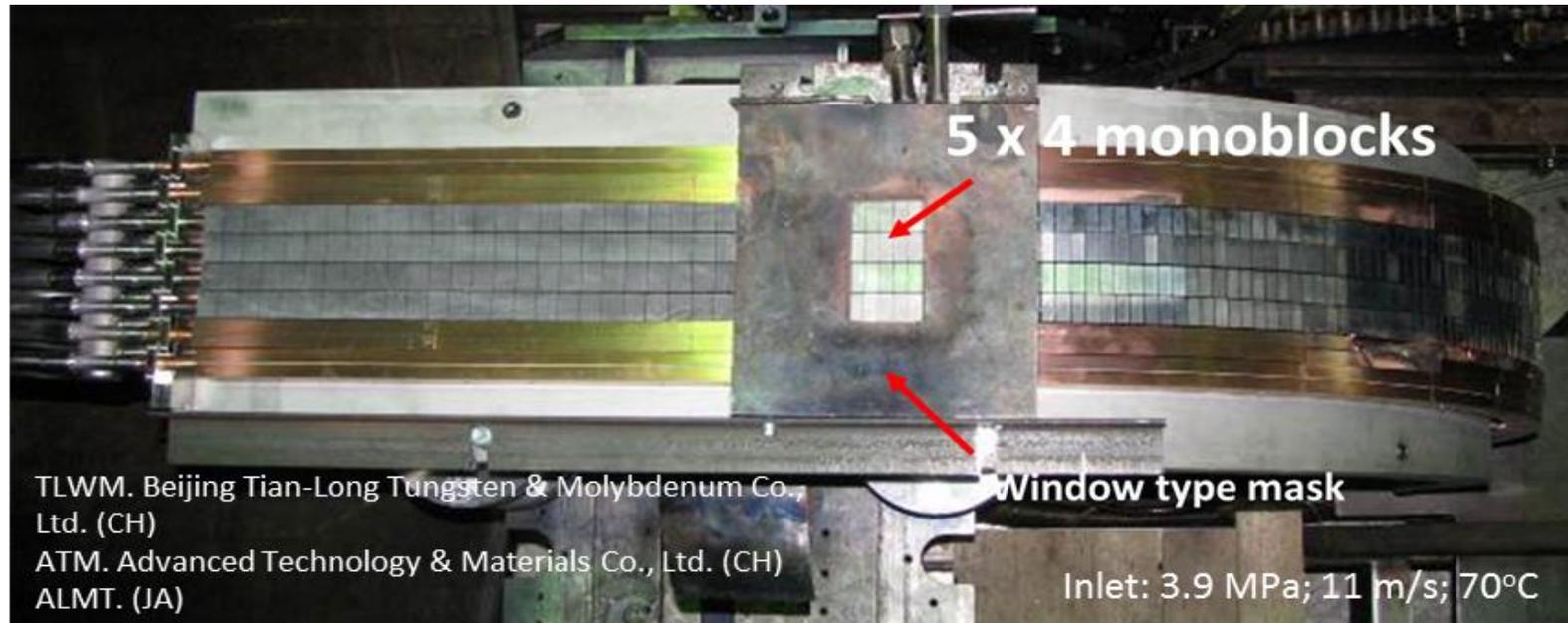
QST 高周波（電子サイクロトロン）加熱装置



- ✓ ITER用ジャイロトロン1号機は2016年12月にQST那珂研に予定通り納入。
- ✓ 那珂研で高出力試験を行った後、ITERサイトへジャイロトロンを出荷予定。



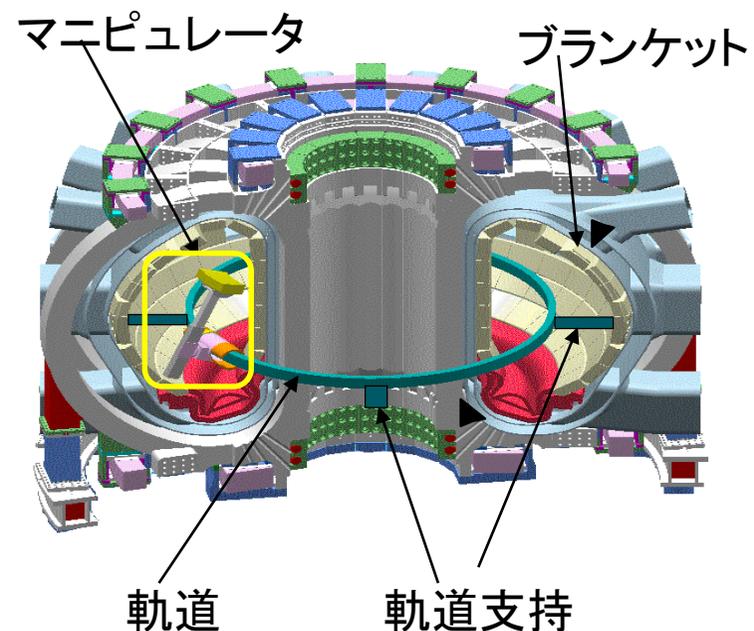
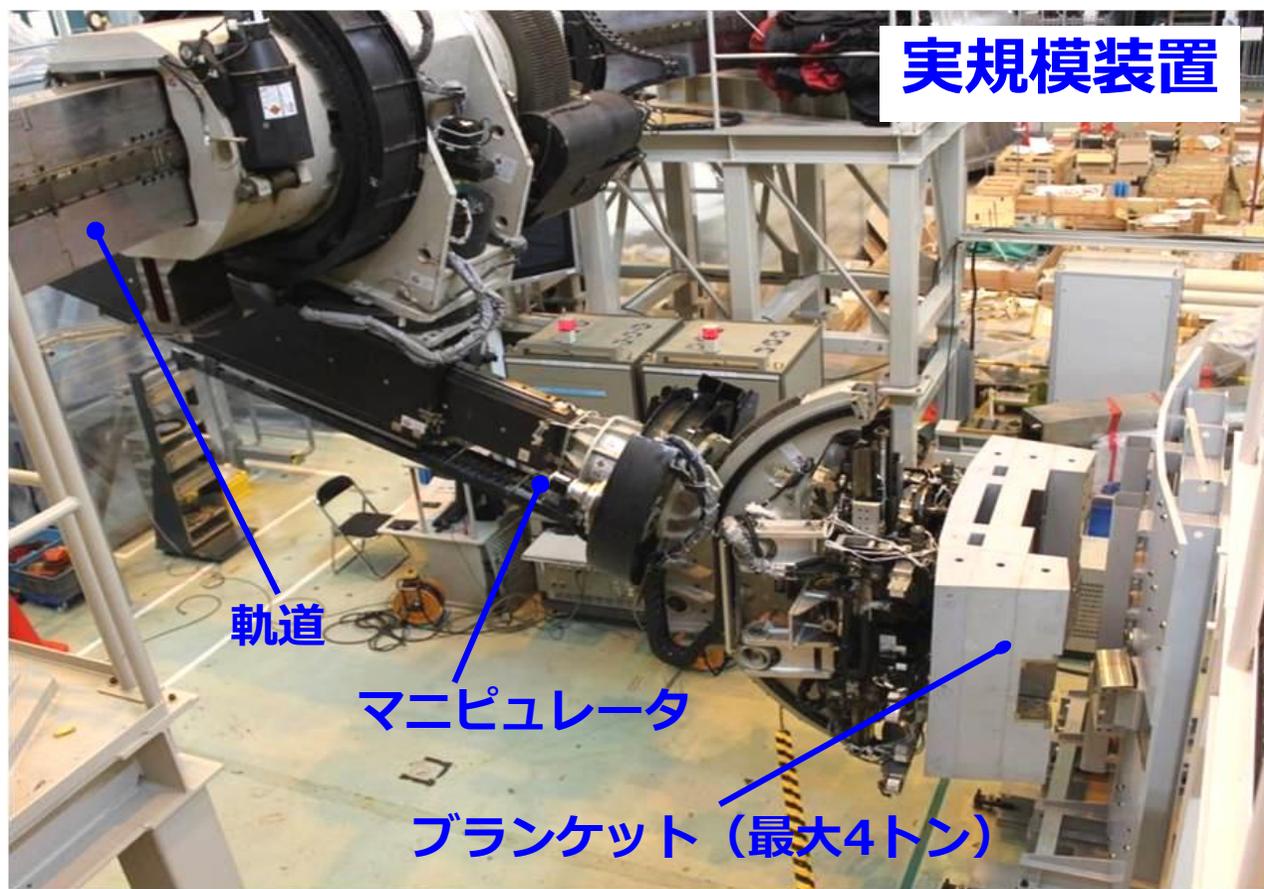
プラズマに対向するダイバータについて、実規模プロトタイプを製作。
電子ビーム照射して高熱負荷繰返し耐久試験@ロシア・エフレモフ研究所を実施。



20 MW/m²、1000 サイクル照射後の受熱面 (タングステン)

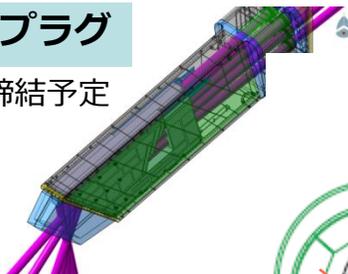
- 20MW/m² の高熱負荷を1000サイクル繰り返した後も、プラズマ対向ユニット (PFU) の除熱性能の劣化はなく、タングステン受熱面の損傷もないことを確認。
- ITER要求性能を世界で初めて満足。

- 炉停止後、真空容器内に軌道を展開し、ビークルを走行させ、マニピュレータでブランケットを保守する遠隔システムを提案、開発を行ってきた。
- 工学設計活動の中で開発した実規模装置（ビークル・マニピュレータと軌道）を利用して、実機に向けた設計検証、最終仕様を固めている。



上部ポートプラグ

調達取決締結予定



マイクロフィッション チェンバー (MFC)

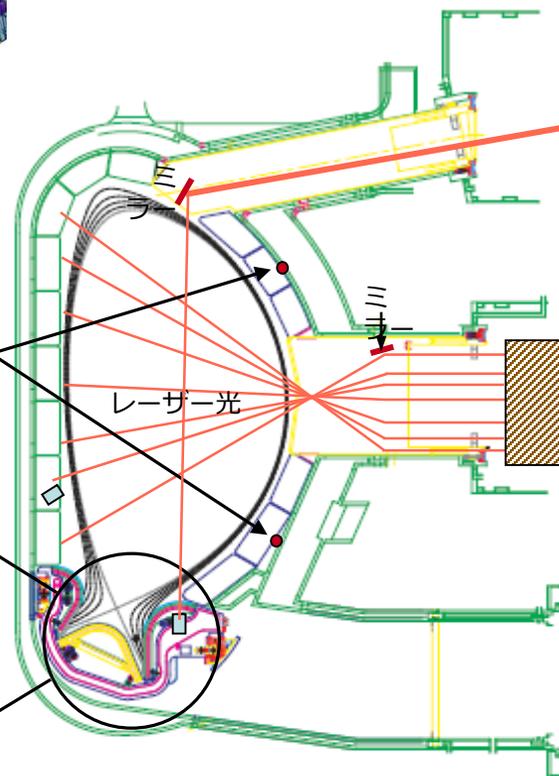
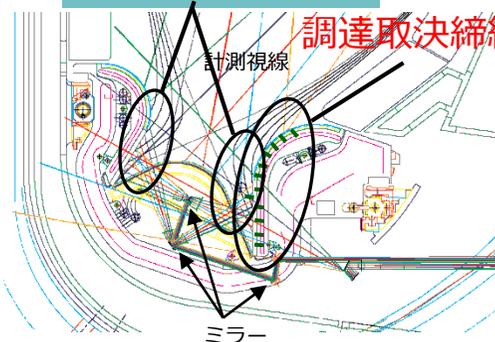
調達取決 : H24年3月

ダイバータ不純物 モニター

調達取決 : H25年8月

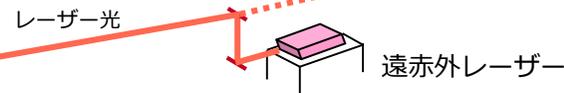
ダイバータ サーモグラフィー

調達取決締結 : H25年8月



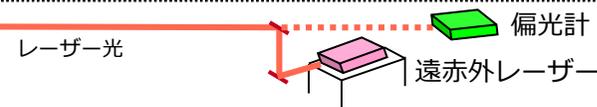
ポロイダル偏光計測装置 (上部ポート光学系)

調達取決締結 : H25年8月



周辺トムソン散乱計測装置

調達取決 : H25年8月

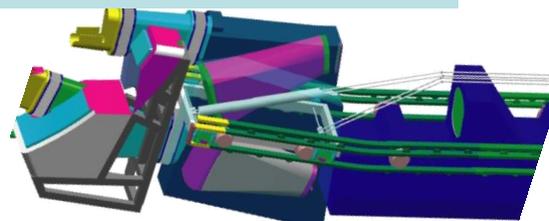


ポロイダル偏光計測装置 (水平ポート光学系)

調達取決締結 : H25年8月

偏光計測に基づく電流分布・電子密度分布・電子温度分布の同時測定法及び高速にプラズマ平衡を計算する新手法の開発は、世界初の成果。

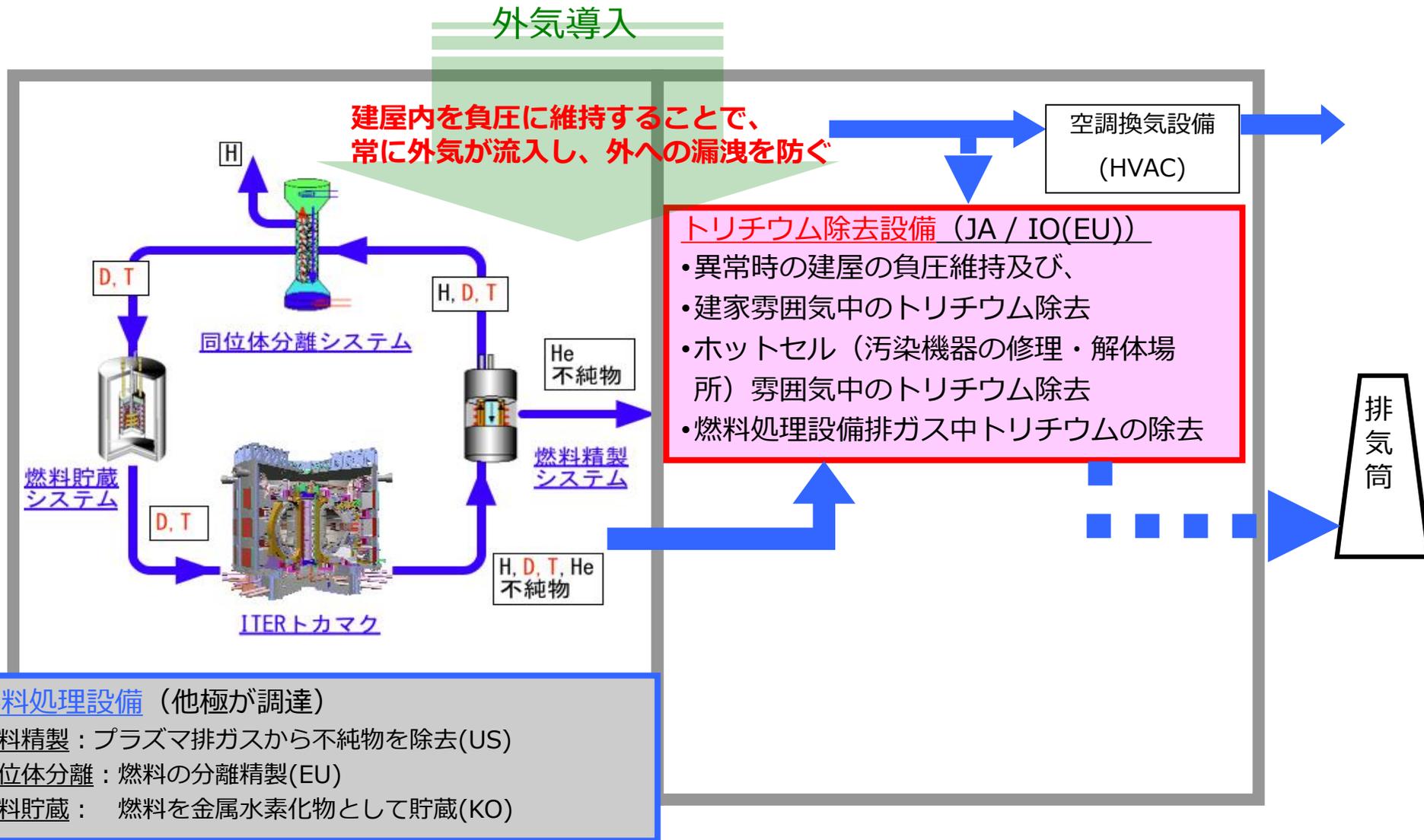
ダイバータ計測支持構造体



調達取決締結予定

トリチウム除去設備

トリチウムプラントは燃料処理設備とトリチウム除去設備(DS)からなる



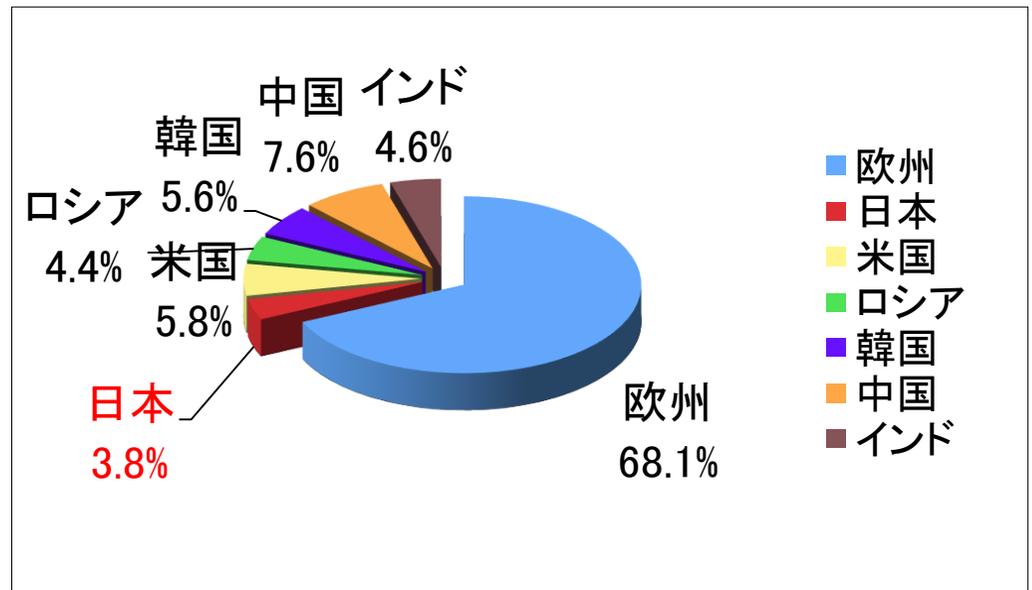
- 2017年4月末時点で、ITER機構は**専門職員数498人**、**支援職員数272人**で、**合計770人**（核融合の専門家に加え、一般機械、電気、プラント工学等を専門とする技術者や事務職を採用）
- 日本国内機関はITER機構が行った121件の職員募集に対して、邦人からの応募21件（H28年度実績）について応募書類を確認のうえ、ITER機構への推薦手続を行った。
- 2017年3月末時点で、**日本からの人材は、専門職員：19人**、うち、**シニア級は7人**。
- **支援職員6人**。

日本人職員数は7極中最低。

参加極ごとの職員数（2017年4月末）

	専門職員	支援職員	合計
欧州	339	197	536
日本	19	6	25
米国	29	14	43
ロシア	22	14	36
韓国	28	3	31
中国	38	30	68
インド	23	8	31
合計	498	272	770

専門職員の各極比率（2017年4月末）



QST那珂ITERのHPにITER職員公募情報を掲載

<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/index.html>

http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/staff/page6_1.html



- 随時、ITER機構職員の募集情報を更新
- **IO職員募集の応募書類（履歴書）の書き方指南改訂中**
- HPには**応募案内**に加え、**面接受験の手引き**を掲載
- 公募情報の直接提供希望者のための**登録制度**を2008年6月から開始、現在43名が登録

- 原子力機構のホームページに、随時、ITER機構職員公募に関する情報を掲載するとともに、原子力学会、プラズマ・核融合学会、物理学会、核融合エネルギーフォーラム、原産協会、NIFS核融合ネットワーク、JREC-INを通じてアナウンス。
- ITER機構職員公募情報の周知について、JST、JSPF、産総研、理研と連携(ホームページへの掲載)。
- ITER 計画の理解促進を目的にITER 計画の説明展示を7回出展し、ITER 計画の概要と現況、日本が調達する機器(超伝導コイル、加熱機器ほか)等の情報を発信した。
- ITER機構職員募集説明会を企画し、平成26年度は国内で7回(福岡市、京都市、那珂市、東京都、金沢市、仙台市、富山市)を実施するとともに、より効果的・効率的な情報提供のための登録制度を運営した(2月末現在43名が登録)。
- 産業界に向けたITER企業説明会を2007年から開始し、計23回を開催。現在、88社が登録。ITER計画の現状や日本が分担する調達の状況及び今後の予定などについて紹介。

ITERプロジェクト アソシエイツ プログラム：

- 企業などに在籍しながら(人材は企業側にキープ)、ITER機構に人材を派遣できるプログラム
⇒IO職員になるには日本企業を退職せざるを得ず、任期後の再就職難が日本人職員数が増えない最大の問題と言われている。
- 給与、手当の一部をITER機構が負担
⇒ほぼ全額がIOから支給されるが、具体的な待遇は協議
- QST(現地支援事務所を含む)、ITER機構 (Agence ITER France含む)が全面的に派遣を支援

ニーズ：

- トカマク本体関連技術部門、プラント関連技術部門、現地工事計画管理、プロジェクト管理、設計統合、品質管理、運転・保守管理などの部門への専門家派遣。(また、物理、運転・保守計画、調達・契約、品質保証部門などの分野でのニーズもあり)

ITER機構（IO）は学生の皆様に、様々な分野で大学・大学院教育を終えた学生の方が実践的な仕事を通して、今までの教育経験で得た知識を活用できる機会を提供しています。

対象と期間

- 対象カテゴリー： A（修士課程の学生）、B（大学学部生以上）、S（博士課程）
- 年間募集人数：カテゴリーA・B：各10名、カテゴリーS：15名
- 応募者の国籍：ITER 参加国（日、EU、米、露、中、韓、印）の国籍を有する、若しくはIO と特別なパートナーシップ協定を締結している学校か大学からの応募
- 期間： 4 - 6 か月（カテゴリーA）、 3ヶ月以内（カテゴリーB）
2年以上4年以内（カテゴリーS）
- 対象とする分野：主に技術系の分野
例：原子力工学、物理学、電気工学、情報工学他、詳細下記参照ください。

https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/WebText_2014/Attachments/321/2017_internshiplist_v2.pdf

但し、人事、財務、コミュニケーション、プロジェクト調整、法的事務等の支援も可。

対象分野の例

Internship Topics ITER -2017

Subject	Department	Section	start
Development an application web for Unified Data Access to retrieve data based on plotly, https://plot.ly/python/		CODAC Section	2017
Improvement of documentation for ITER Data Dictionary used in the Integrated Modelling and Analysis Suite (automated workflow to created interactive documentation: XML à HTML)		Confinement & Modelling Section	2017
Development of synthetic diagnostics for modelling of ITER plasmas with the Integrated Modelling and Analysis Suite		Confinement & Modelling Section	2017
Development of synthetic actuators to model behaviour of heating and current drive systems by application of the Integrated Modelling and Analysis Suite Heating and Current Drive workflow		Confinement & Modelling Section	2017
Creation of Live Display workflow to present complex processed data in (quasi-) real time using tools such as Python and Matplotlib (e.g. display evolving: plasma equilibria; magnetic spectrograms; stability diagrams; etc.)		Confinement & Modelling Section	2017
Modelling of edge plasma MHD (magnetohydrodynamics) stability of tokamak plasmas, including the nonlinear interaction between pressure gradients in the plasma core and in the pedestal, and implications for the confinement of energy in ITER H-mode (High confinement mode)plasmas		Confinement & Modelling Section	2017
Closed loop simulation of density control loop for ITER using the PCSSP (Plasma Contron System Simulation Platform) and MAS (Integrat		Stability & Control	2017



処遇

- 就業時間：15歳以上の学生は35時間/週 の超過は不可となっています。
- 詳細は、ITER 機構ウェブサイト：<https://www.iter.org/jobs/internships>、Welcome Booklet：
https://www.iter.org/doc/www/content/com/Lists/WebText_2014/Attachments/321/welcome_booklet_2017.pdf) 及び「ITER 機構インターンシッププログラムの概要」をご確認ください。
- インターンはITER 機構職員としての扱いは受けられません。（ITER 協定およびITER 機構職員規則に定義される「職員」としての特権、特典（例：IO の給与、年金制度、社会保障等）の対象外。）
- 手当の支給： カテゴリーA：1300 ユーロ/月、カテゴリーB：650 ユーロ/月
カテゴリーS：個別対応
- 出張旅費：原則支給なし。A、BではScience & Operations Department Headの承認により可能性有。

応募

- カテゴリーA、B：履歴書、希望分野と日時を記載した表書き、成績証明書（いずれも英語）をHR-recruitment@iter.orgに送付してください。
- カテゴリーSについては個別に対応します。QSTまでご連絡ください。

- ITERは、35年の長期にわたる、**現在日本が参加する国際協カメガサイエンスプロジェクト**の中で最大規模のもの。
- ITERでは、ITER機構と7極の国内機関（日欧米露韓中印）が協力して調達を分担。日本は物納機器の90%の機器の製作中。国内メーカーで大型超伝導コイルの製作、NBI用超高電圧電源などハイテク機器の製作が進んでおり、**ものづくりの知恵と経験でITER計画を牽引**。
- 人員派遣、国内の核融合コミュニティ及び産業界のITER計画への参画を推進・支援。**さらに多くの日本人の参加を期待**。
- 日本は引き続きITER計画を通して核融合の科学的実証に貢献し、**核融合エネルギーの早期実用化**をオールジャパン体制で推進する。