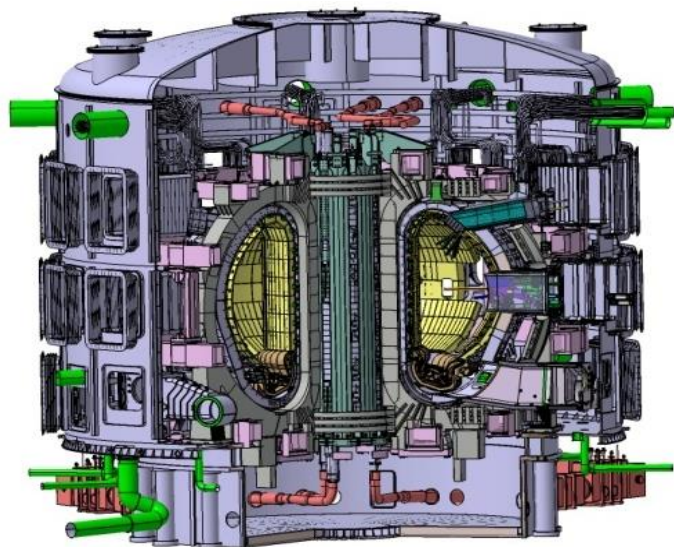


科目名：核融合エネルギーとイーター

イーター計画(III) 日本の貢献・ものづくり



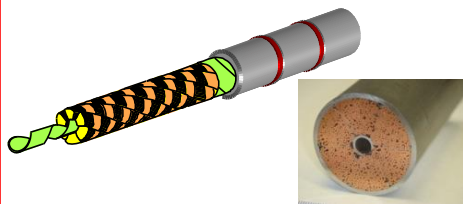
量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー研究開発部門
井上多加志

平成29年7月14日（金） 第4時限15：50～17：15 東京文京学習センター

- 調達取決めの締結状況
- 我が国の調達貢献
 - 超伝導コイル：TFコイル及びCS導体
 - 加熱・電流駆動：EC高周波加熱、NB入射加熱
 - ブランケット用遠隔保守機器
 - ダイバータ（外側垂直ターゲット）
 - トリチウム除去設備
 - プラズマ計測装置
- ITER機構の活動支援

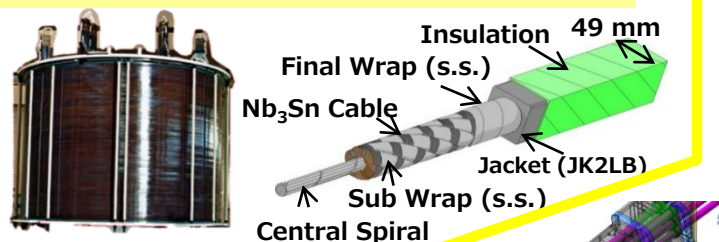
トロイダル磁場(TF)コイル

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%

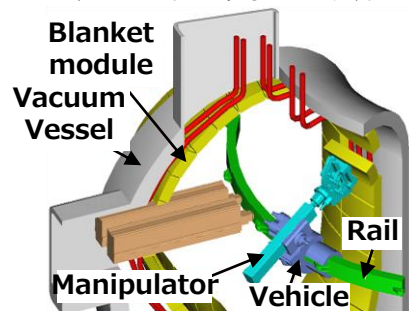


計測装置 (設計中)

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ー
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

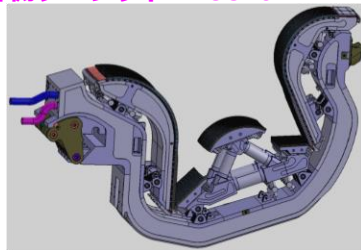
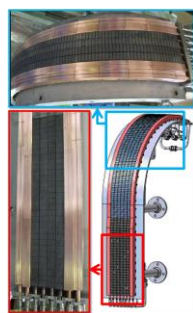
ジャイロトロン
水平ポートランチャー

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%

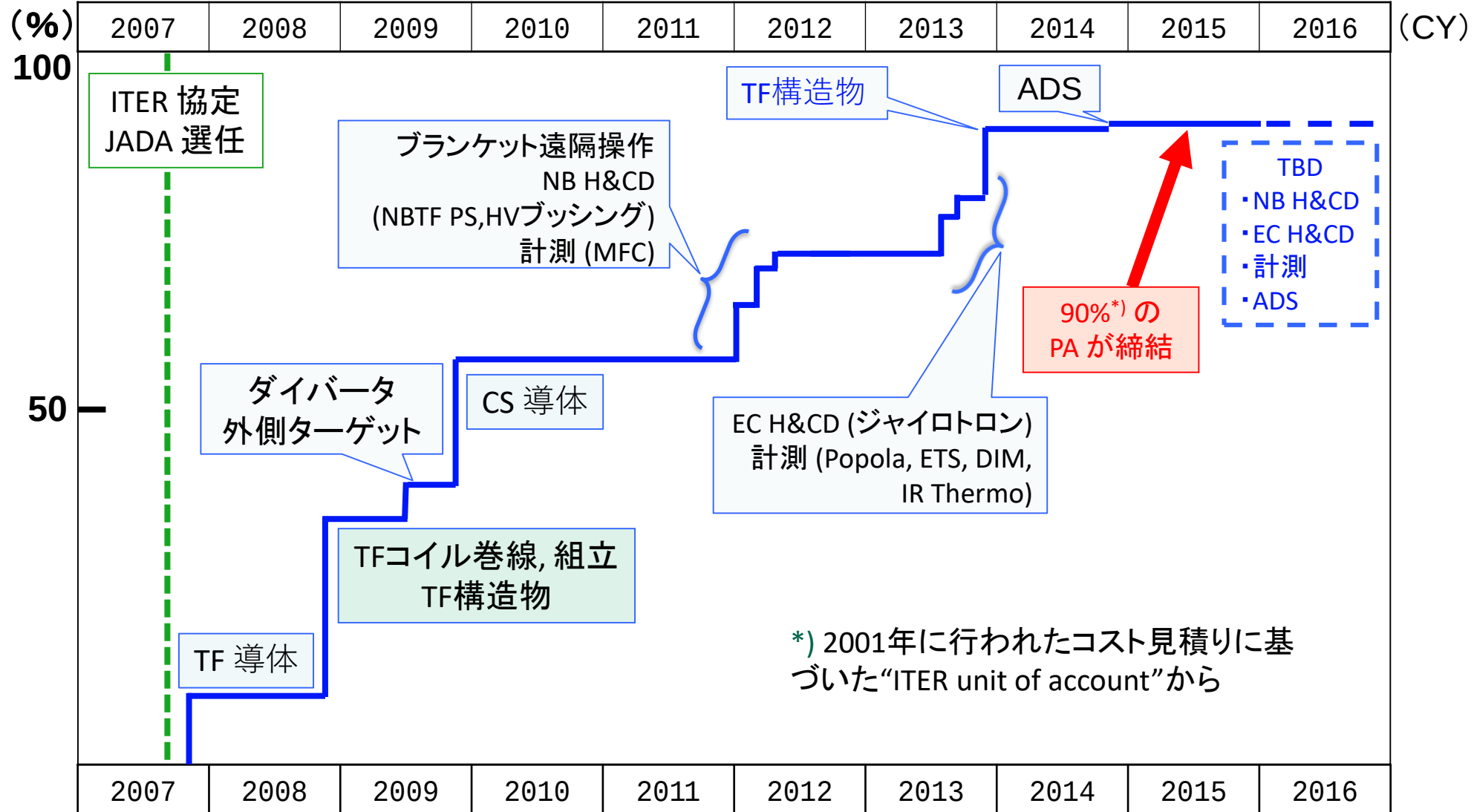


トリチウム除去設備

(ADS、設計中)



調達取決めの進展



JADAは、日本によるITER物納調達への総合的貢献のうち、90%の価値（“ITER unit of account”から）に相当する12のPAを締結した。

トロイダル磁場 (TF) コイル (周方向に18個配置)

- コイル19個 (1個は予備) のうち
 - TF導体: 全体の25%
 - TFコイル構造物: 100%
 - TFコイル巻線: 9個分
 - 構造物と巻線一体化: 9個分

直流運転、
11.8T、68kA、
Nb₃Sn導体

中心 (CS) ソレノイド (同じ大きさのコイル6個を積重ねた構造)

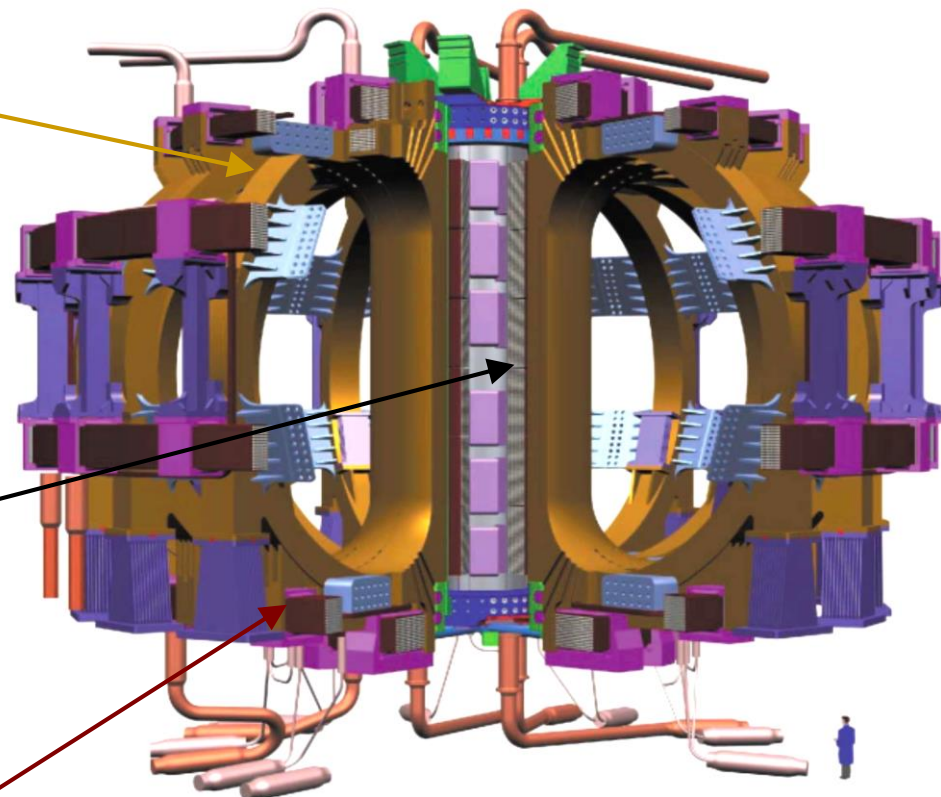
- コイル7個 (1個は予備) のうち
 - CS導体: 100%
 - CSコイル巻線は米国が担当

パルス運転、
13.5T、42kA、
Nb₃Sn導体

ポロイダル磁場 (PF) コイル (TFコイルの外側に6個配置)

- EU、ロシア、中国が担当
- 日本は調達分担しない

パルス運転
6T、45kA
NbTi導体

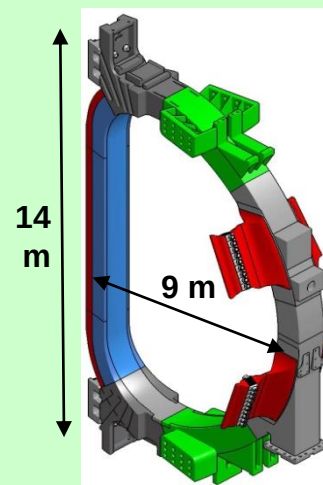


マグネット・システム総重量	10,000トン
Nb ₃ Sn素線重量	550トン
NbTi素線重量	250トン
TFコイル容器重量	3,600トン

超伝導導体



TFコイル



コイル容器の間に溶
接後、樹脂を含浸し、
コイルが完成

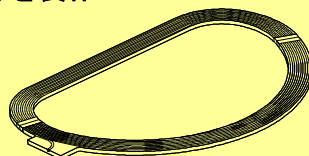
コイル巻線

ラジアルプレートの製作



ラジアル・プレート(RP)

熱処理した導体をラジアルプレートの
溝に巻付け、ダブル・パンケーキ
(DP)を製作



ダブル・パンケーキ(DP)

7個のDPを重ね、絶縁
を施し巻線が完成



巻線

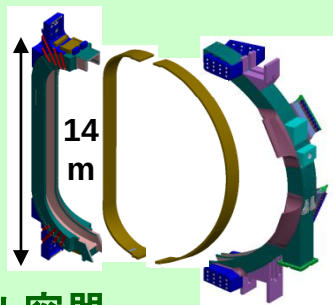
構造物(コイル容器)

素材の製作



鍛鋼品、圧延板

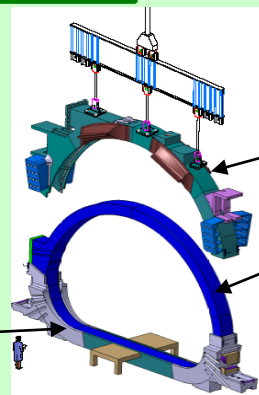
素材を機械加
工、曲げ成形
した後、溶接にて
容器部材を製
作



コイル容器

巻線とコイル
容器を組み立
てる

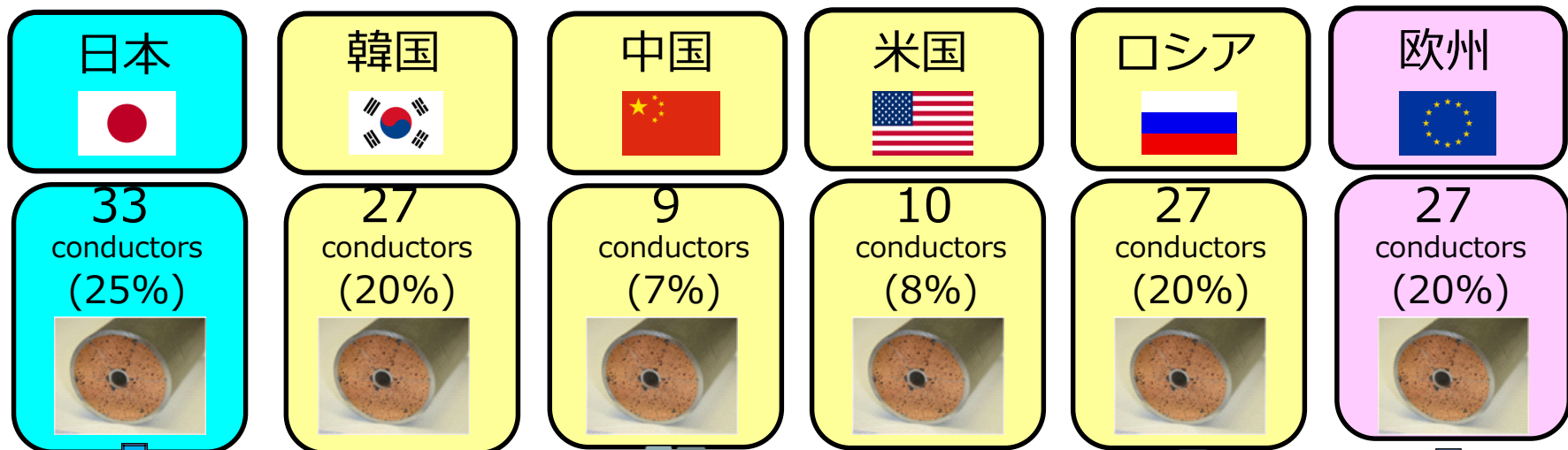
コイル容器



コイル容器

巻線

一体化作業



TF
導体

TFコイル 9WP
巻線パック

3 導体

6 導体

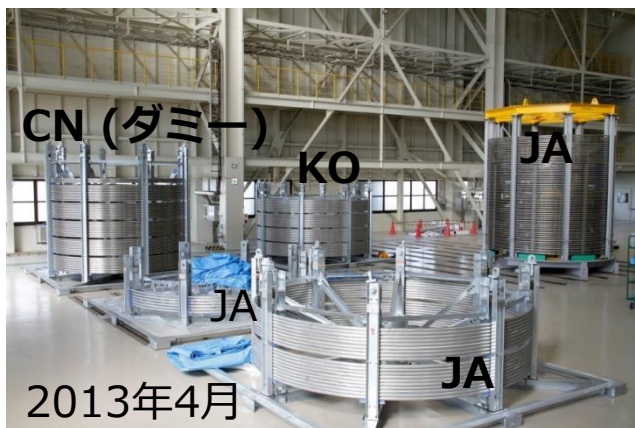
10WP

TFコイル
構造物

19 構造物

9 構造物
TFコイル
組立

9 コイル



10 構造物



全極がTFコイル用導体の
製作を完了

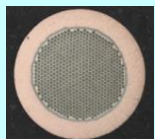
10 コイル

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)

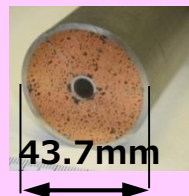


導体製作



950m

導体製造工場全景
(竣工 : H22年1月12日)



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

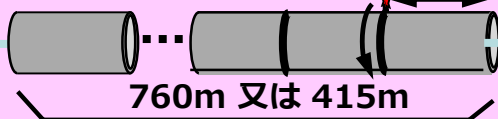
ジャケット(13m/本)



長尺化

突合せ溶接

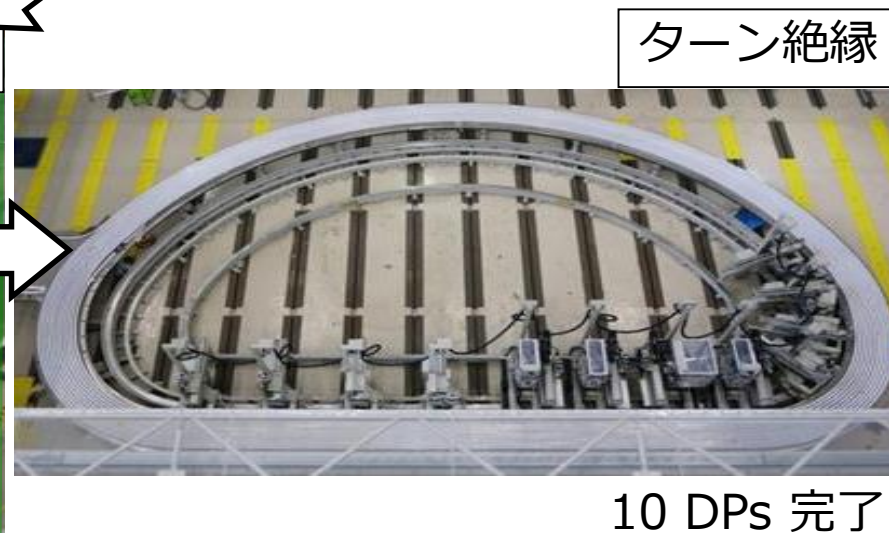
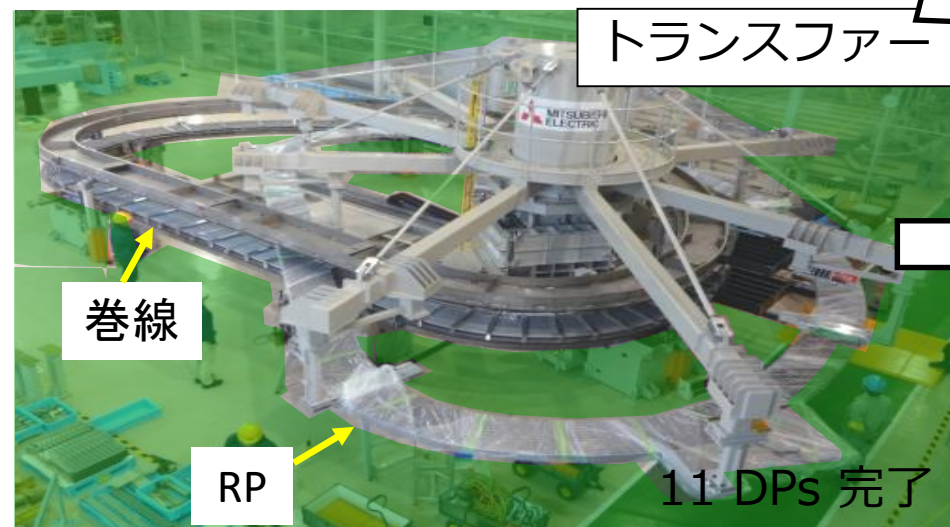
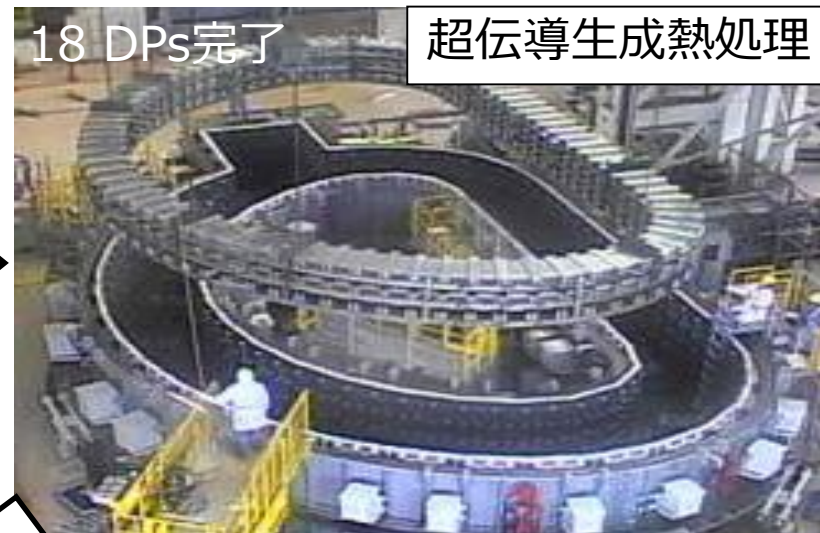
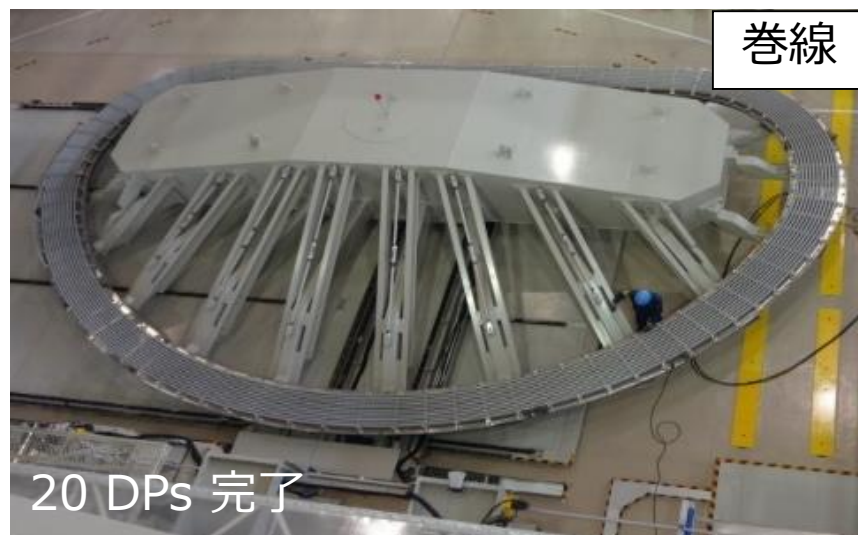
ジャケット
13m



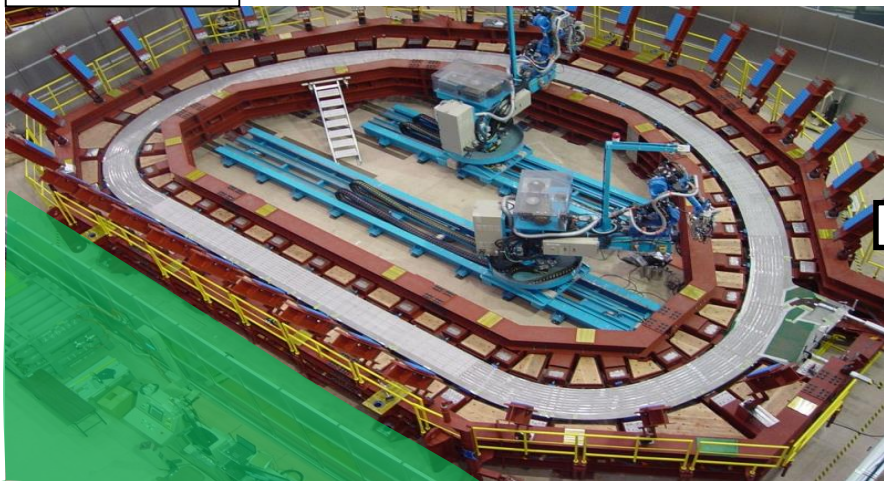
撚線引込み
圧縮成形
曲げ成形

完成した導体

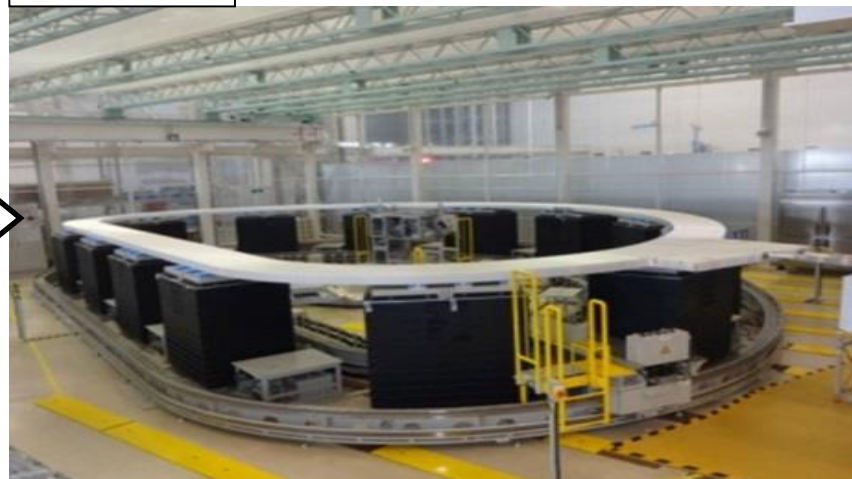
(ITER計画で最初の物納)



CP 溶接



DP 絶縁



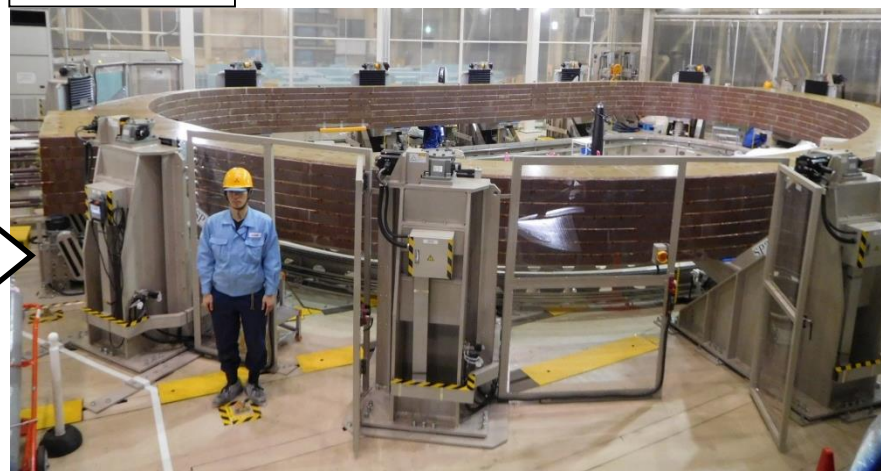
9 DP's 完了

7 DP's完了

DP 樹脂含浸



DP 積層



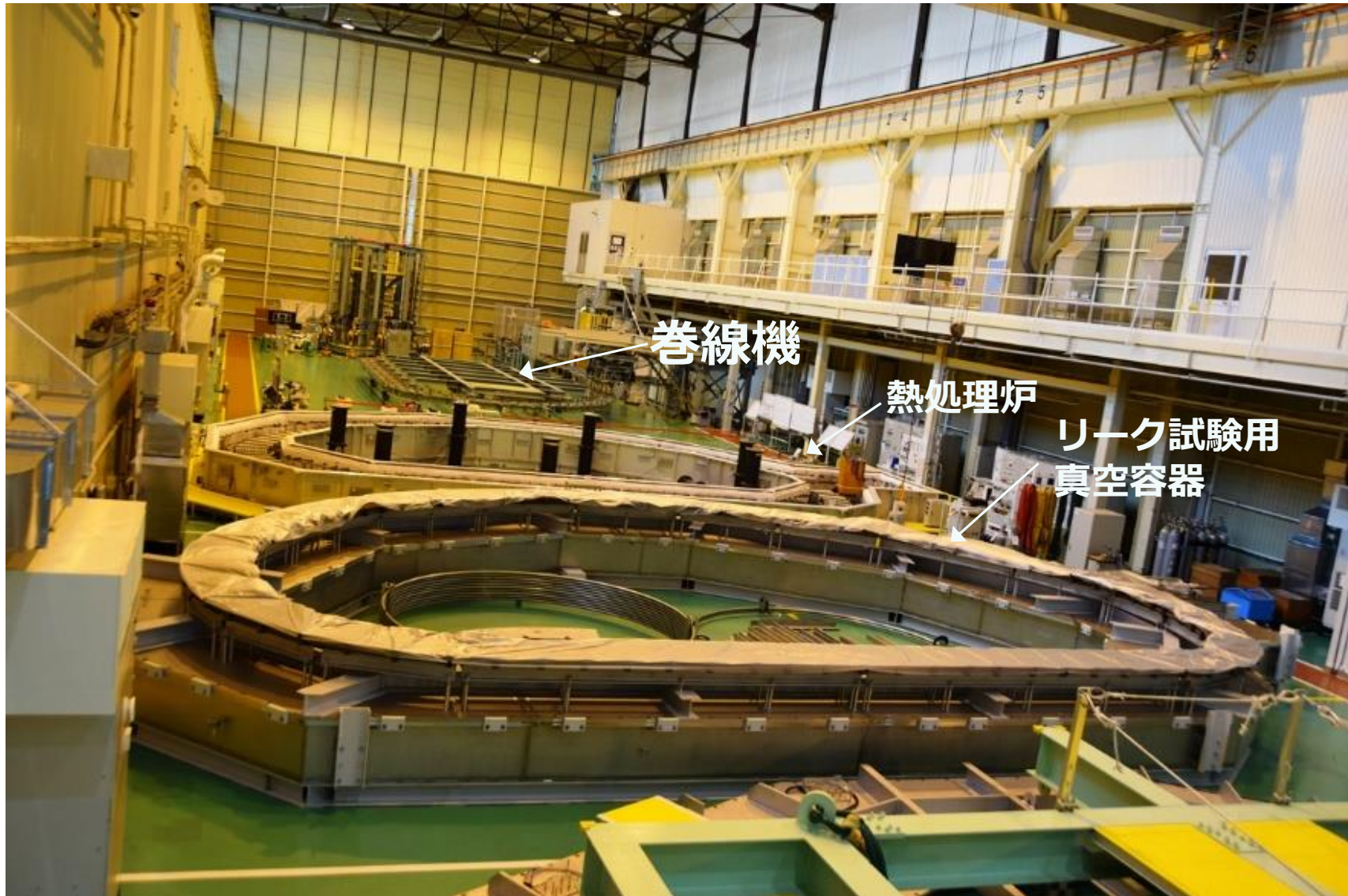
7 DP's完了

TF1号機用DP積層完了 (2016年12月)

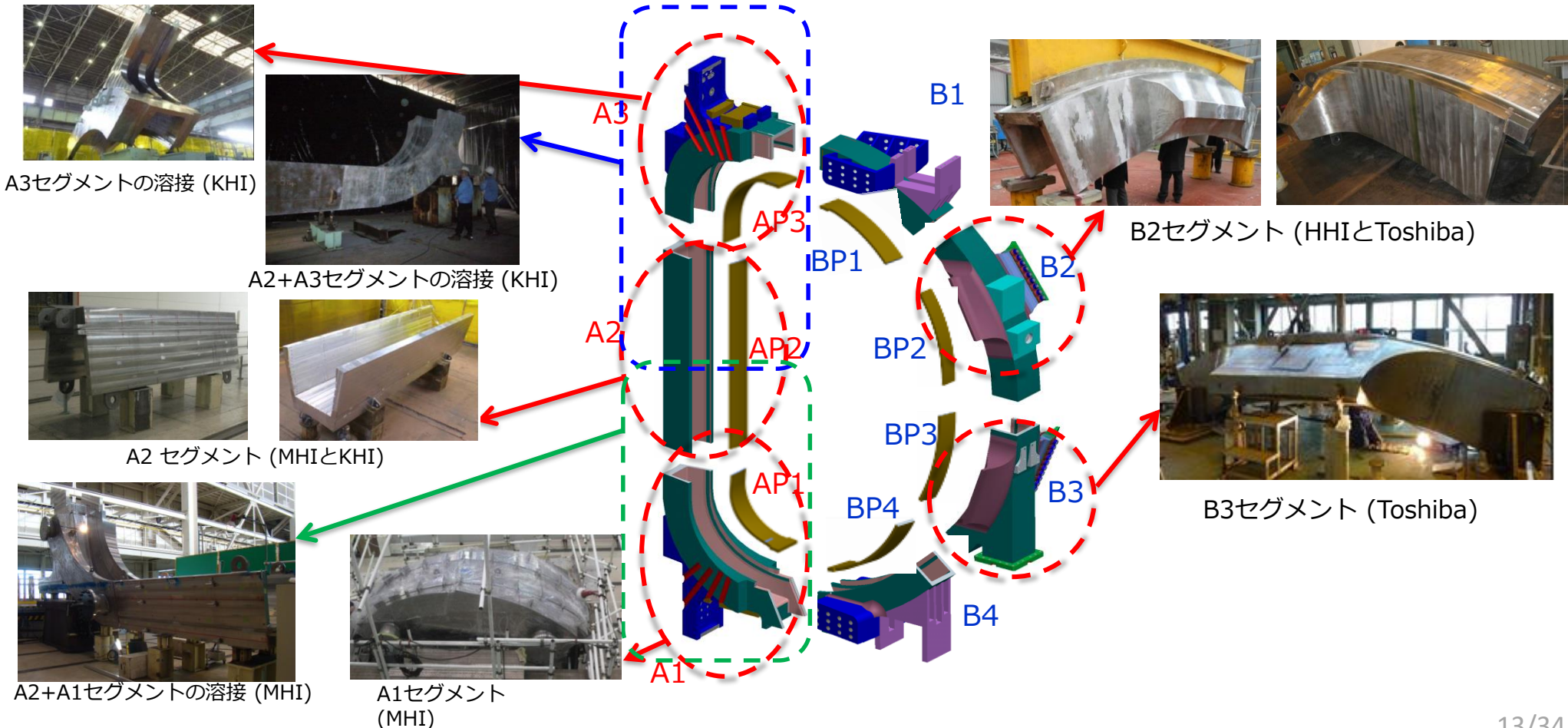


TFコイル1号機の7つのDPを積層、DP絶縁を2017年1月に完了。
ITER理事会が設定したマイルストーンをスケジュール通りに達成。

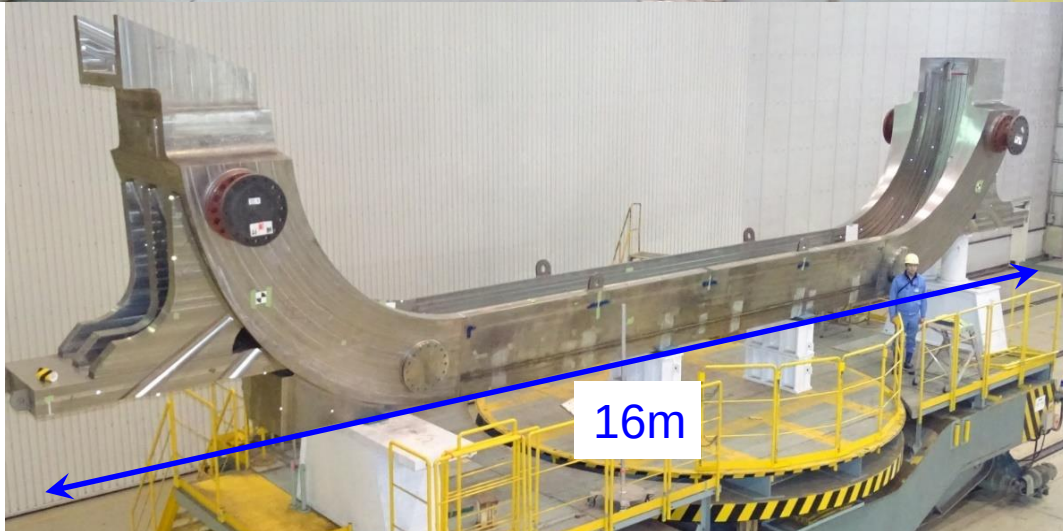
東芝の第2製造ラインもTFコイルの量産に向けて調整運転・試運転を完了。



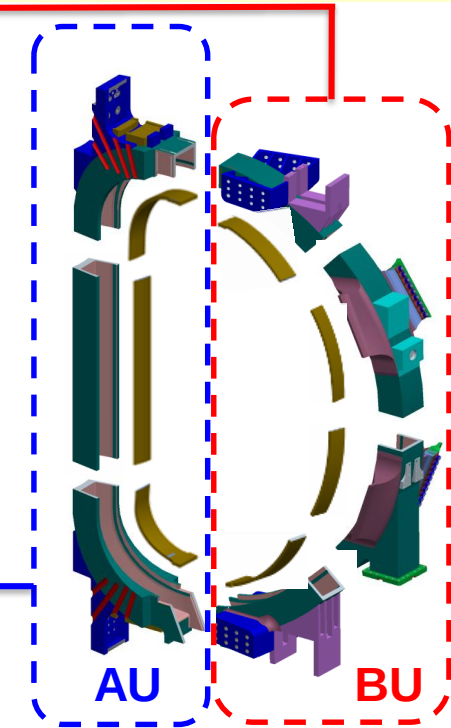
- TFコイル構造物 (TFCS) は厚さ150mm以上の厚肉ステンレス鍛造材製。
- TFコイル構造物すべての実機大試作を完了。厚肉材の溶接変形抑制法を確立。
- 実機用TFCSの製作を2014年4月に開始。



最初のTFコイル用構造物の完成間近 (MHI及びHHI)

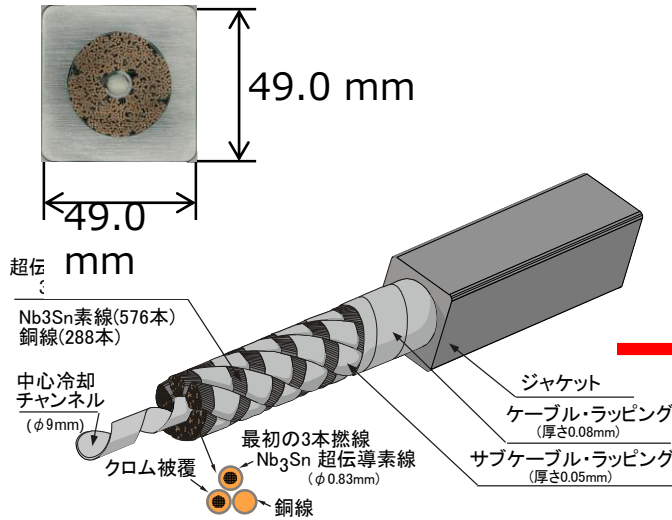


アウトボード側サブアセンブリ (HHI)
4つのベーシックアセンブリで構成
最終機械加工工程



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



製作数量 :

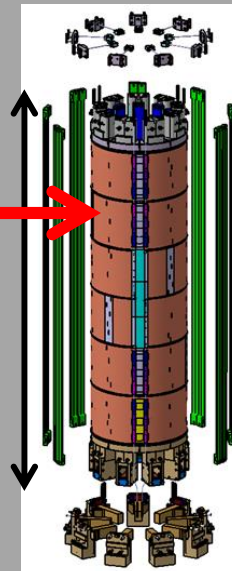
918 m (15.6 ton) x 42本

613 m (10.4 ton) x 7本

導体総重量: 700 トン

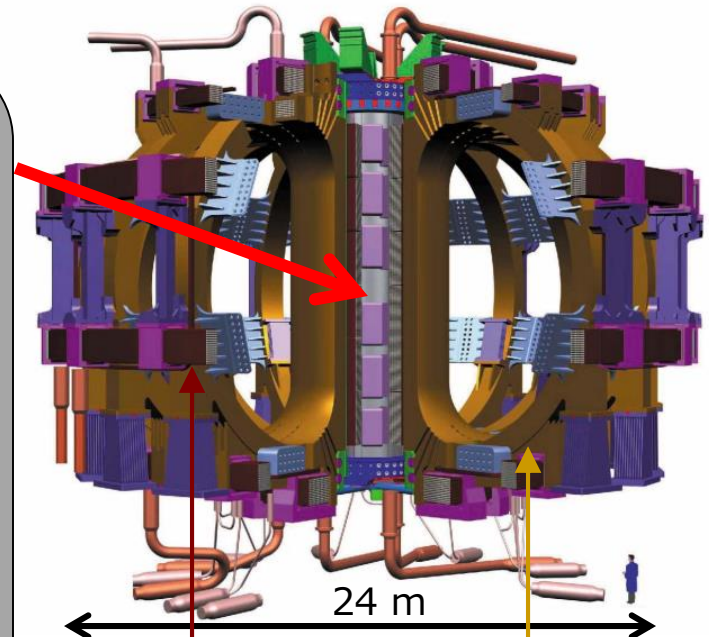
中心ソレノイド

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

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

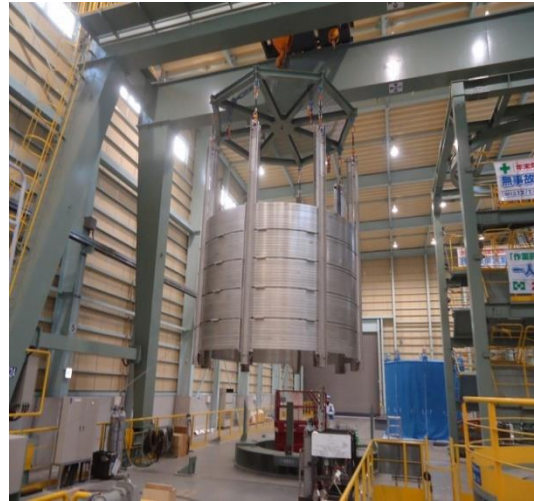
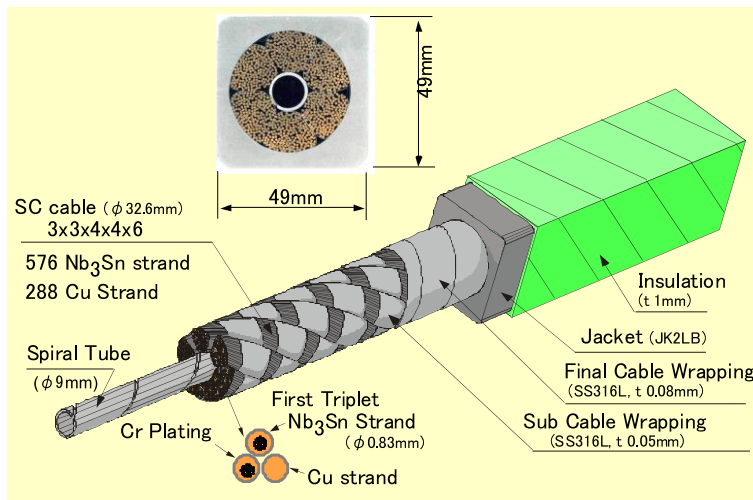
QST 中心ソレノイド (CS) 用導体 (2)



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



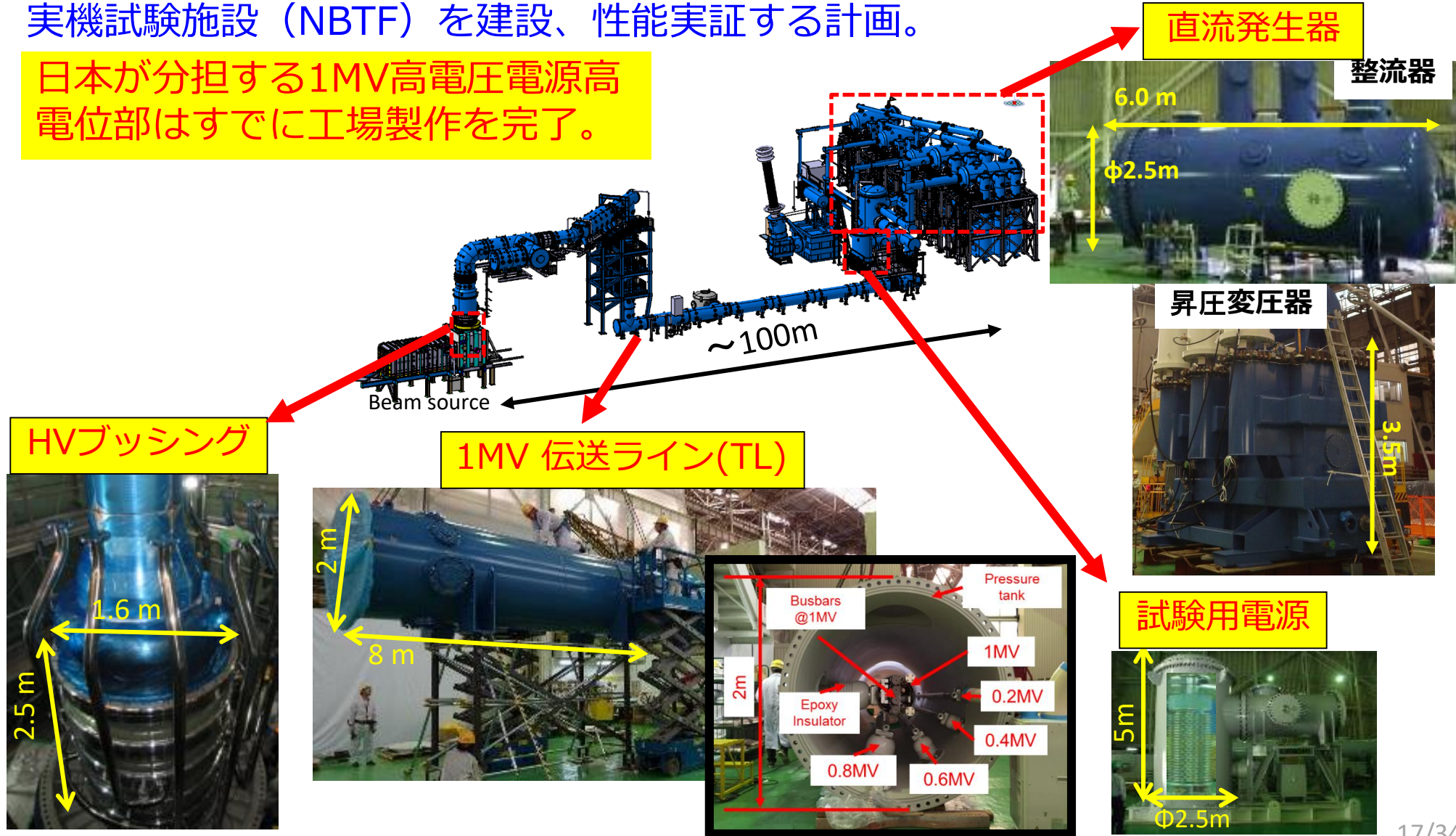
CS導体の量産は新日鉄住金エンジ@北九州で進行中。
合計40導体をアメリカに輸送完了。

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





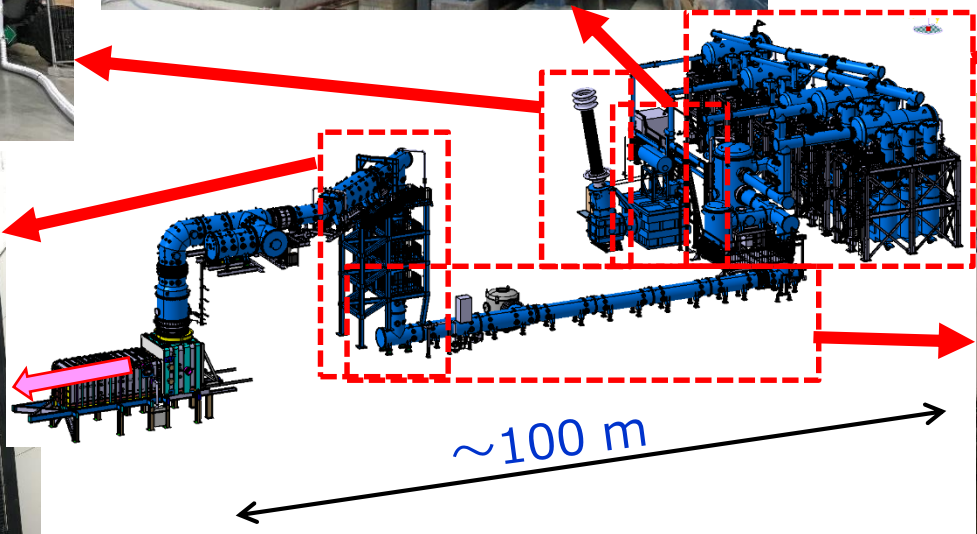
1 MVブッシング



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：

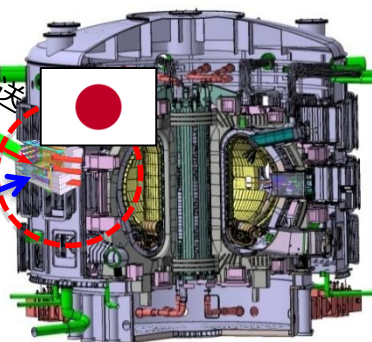
要求される電力変調（5kHz、100%）に成功

2013年9月にジャイロトロンの調達
取決めに締結。

2015年12月実機製作開始。

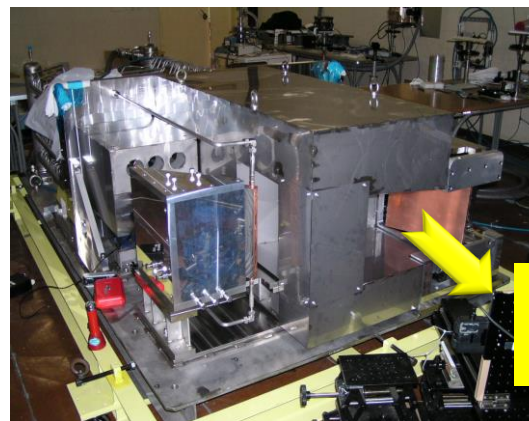
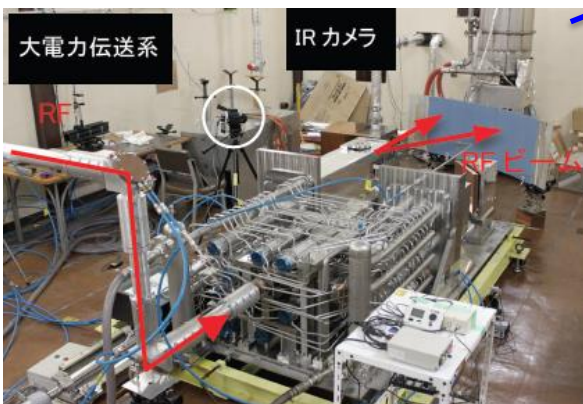


人工ダイヤモンド窓



エネルギー伝送
150m

水平ランチャー (アンテナ) の開発



マイクロ波
放射

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。

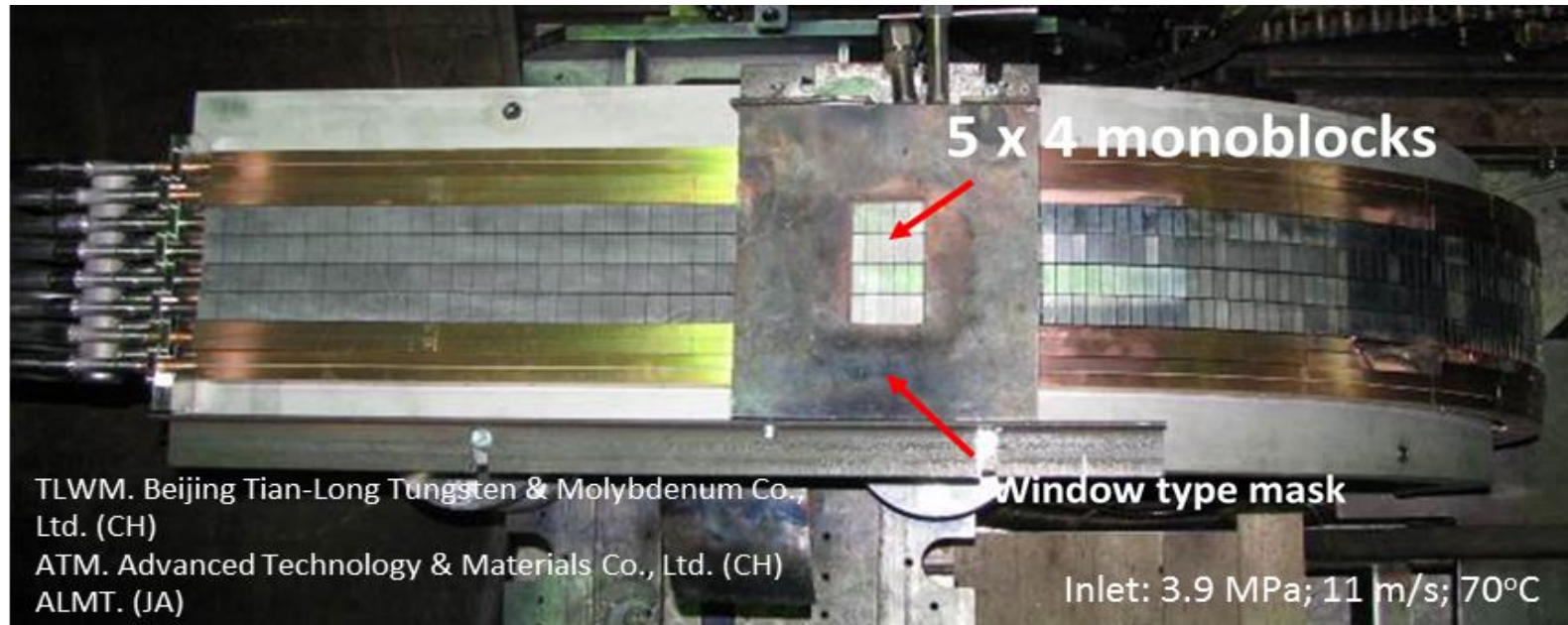
QST 高周波（電子サイクロトロン）加熱装置



- ✓ 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。



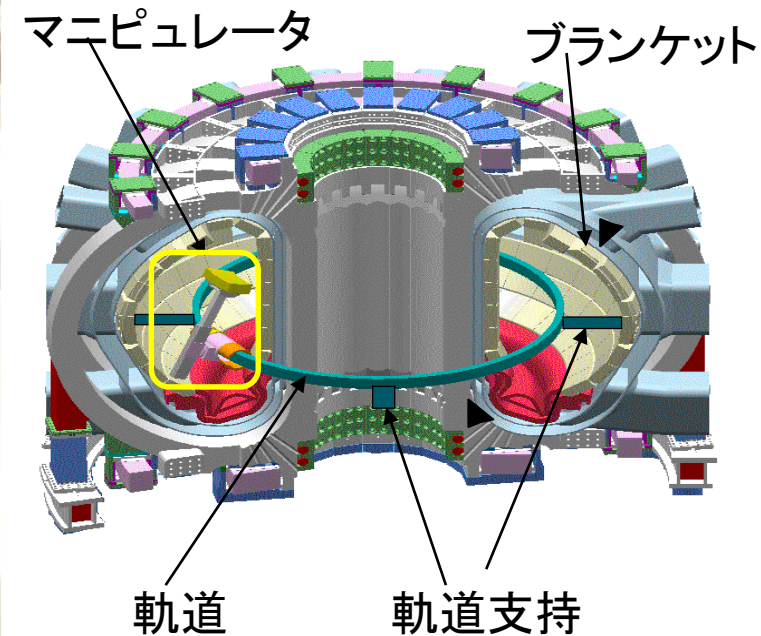
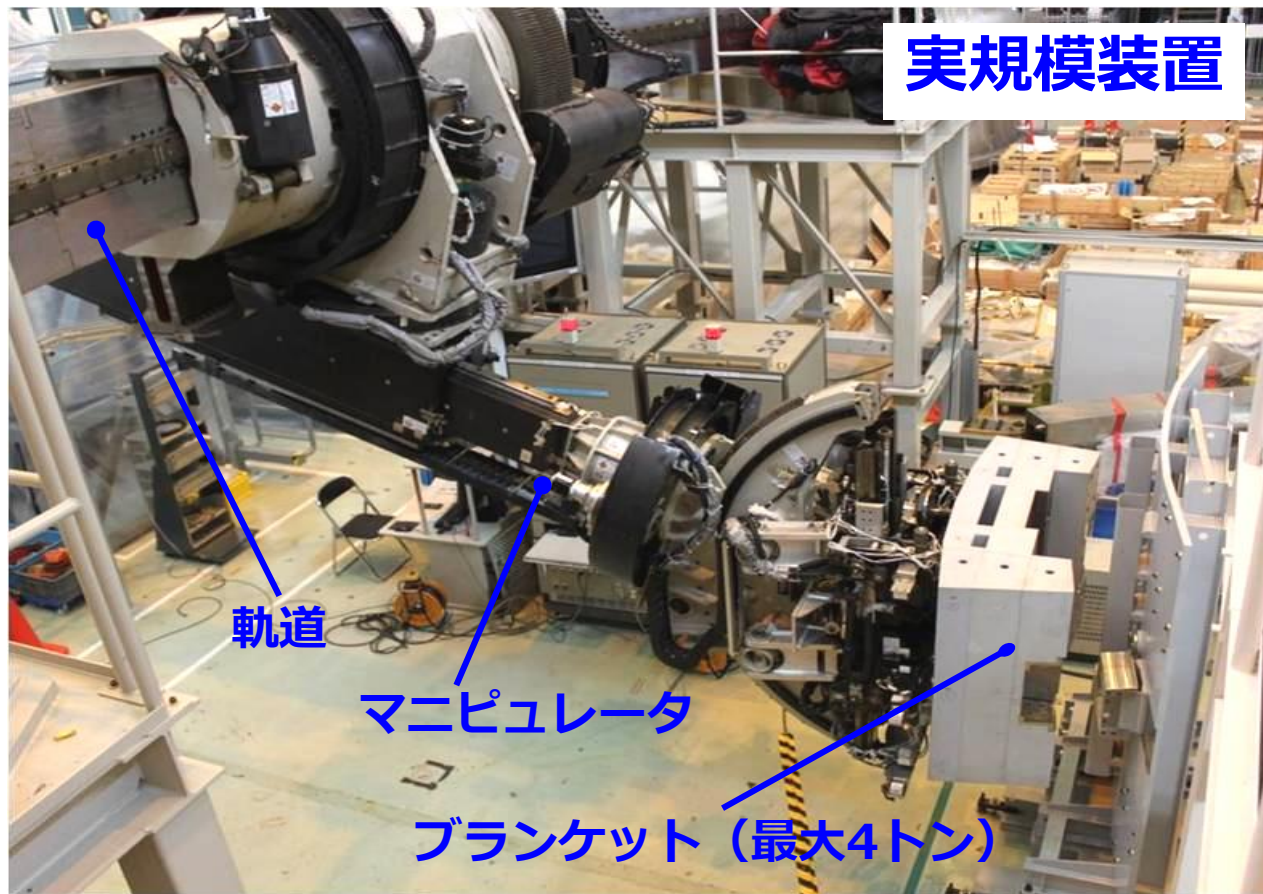
プラズマに対向するダイバータについて、実規模プロトタイプを製作。
電子ビーム照射して高熱負荷繰返し耐久試験@ロシア・エフレモフ研究所を実施。



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)

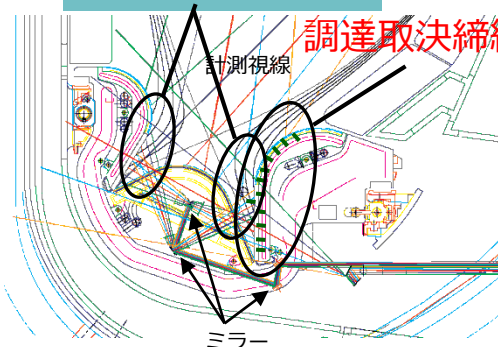
調達取決 : H24年3月

ダイバータ不純物 モニター

調達取決 : H25年8月

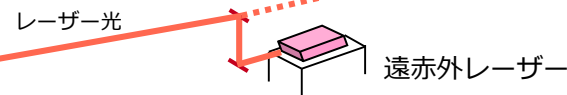
ダイバータ サーモグラフィー

調達取決締結 : H25年8月

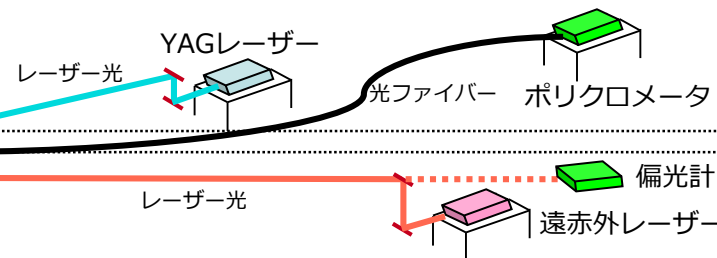


ポロイダル偏光計測装置 (上部ポート光学系)

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

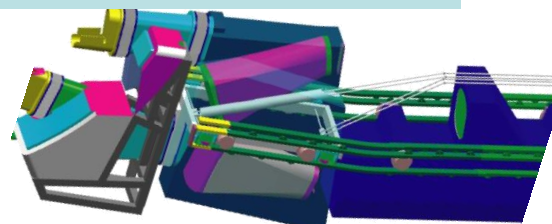


ポロイダル偏光計測装置 (水平ポート光学系)

調達取決締結 : H25年8月

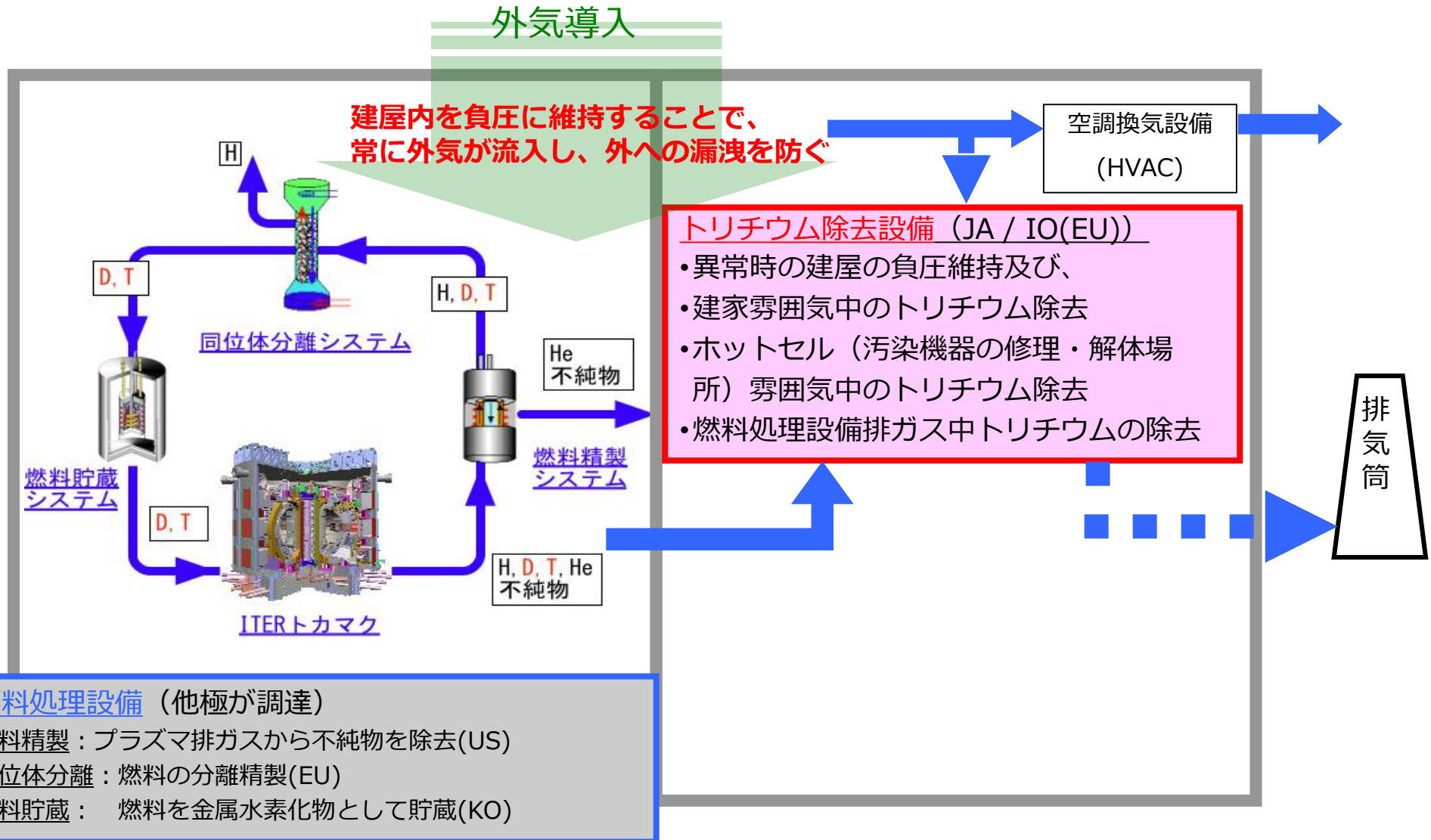
偏光計測に基づく電流分布・電子密度分布・電子温度分布の同時測定法及び高速にプラズマ平衡を計算する新手法の開発は、世界初の成果。

ダイバータ計測支持構造体



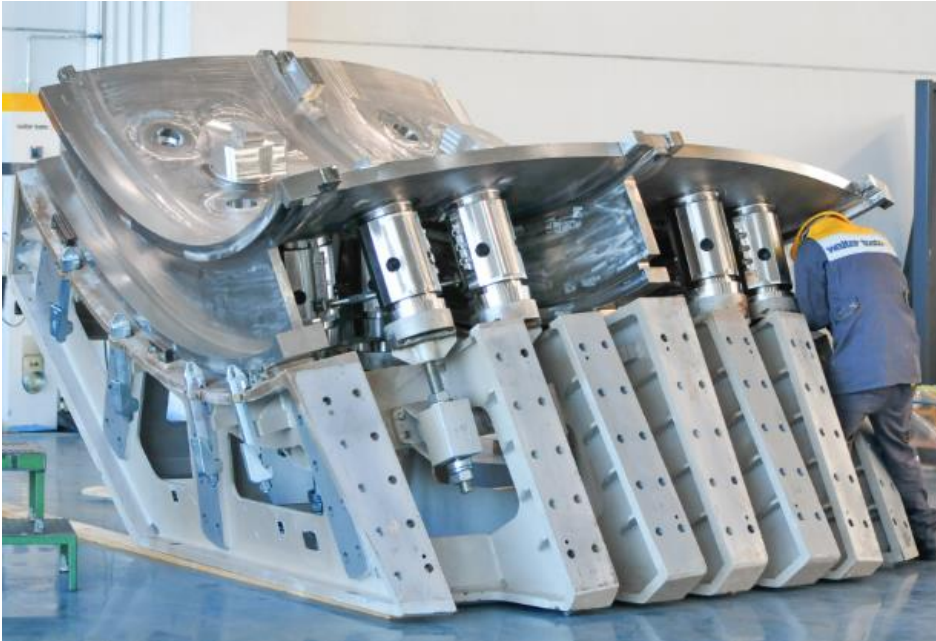
調達取決締結予定

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





最初のサブセグメントアセンブリの完成
#5セクタ 2017年3月



最初のサブセグメントアセンブリ
#6セクタ 2017年4月





TFコイル巻線部 2機分が完成 2017年4月



1st Winding Pack Final RT tests completion

70 Double Pancakes (DP) to build:

- ☑ Winding of 69 DP completed ⇒ **99%**
- ☑ 68 Radial Plates completed ⇒ **97%**
- ☑ Heat treatments and insertion of 61 DPs completed ⇒ **87%**
- ☑ Cover plates welding of 43 DP completed ⇒ **61%**
- ☑ 37 DP impregnated & compl. ⇒ **53%**



2nd Winding Pack impregnation completion

10 Winding Packs (WP) to build:

- ☑ 1st WP: ready for cold test
- ☑ 2nd WP: impregnation completed
- ☑ 3rd WP: ground insulation completed (January 2017)
- ☑ 4th WP: stacking (7 DP) and jointing completed (March 2017)



Vacuum impregnation (VPI) of 1st Double Pancake .



Winding of 2nd Double Pancake



PF1 1st DP VPI



Interlayer isolation



Manufacturing of joint lead

PF#1 コイルのダブルパンケーキ製作は工程通り進捗

写真提供：ITER機構

28/34



ITERサイト内のPFコイル巻線建屋にてF4EのPFコイル巻線作業が進捗中



March 2017

Lower cylinder components have arrived;
preparing for next welding operation



Shipment of 6 sectors of Cryostat Lower
Cylinder Tier-1 (January 2017)

ITERサイト内のクライオスタット組立建屋にてINのクライオスタット組立作業準備中



巻線工程

#1、#2モジュール分は完成済み



#1モジュール巻線熱処理



調整運転を完了したモジュール倒立装置

アメリカ国内工場(GA)にて中心ソレノイドの巻線工程が進展中

QST 電源設備 (PPEN、ACDC)



PPEN main transformer Unit 2&3 arrived at IO in April



PPEN e-house passed SDAT



- ✓ The AC/DC Unit 5 passed the Factory Acceptance Test (FAT) in March.
- ✓ The first AC/DC transformer arrived at ITER site in March.

写真提供：ITER機構

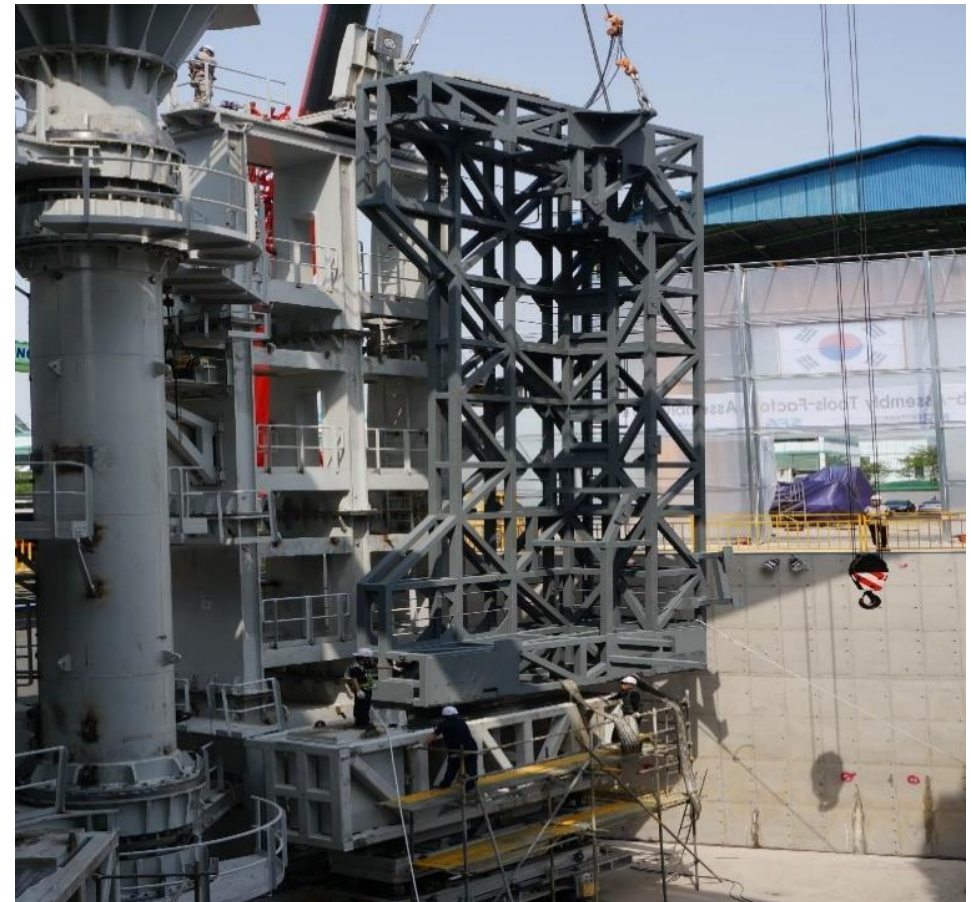
パルス電力ネットワーク、AC/DCコンバータ機器の製作が進展



真空容器40° セクタ、熱遮蔽、TFコイルを組み立てて一体化する巨大なセクタサブアセンブリツールが完成。IOサイトへ海上輸送中。



セクタ サブ アセンブリ ツール



アウトボード側熱遮蔽のセクタフレームを使った荷重試験

- ITERは、35年の長期にわたる、**現在日本が参加する国際協力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**。
- 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。