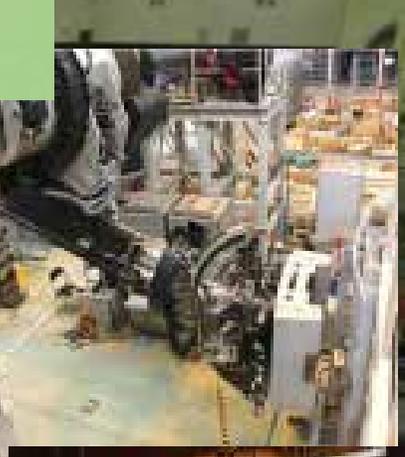
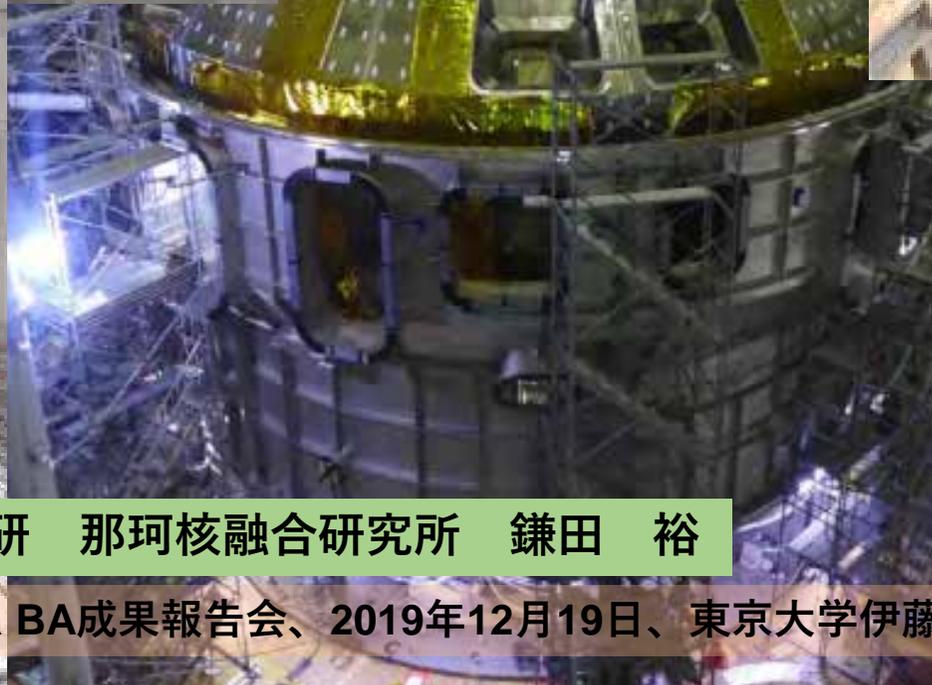


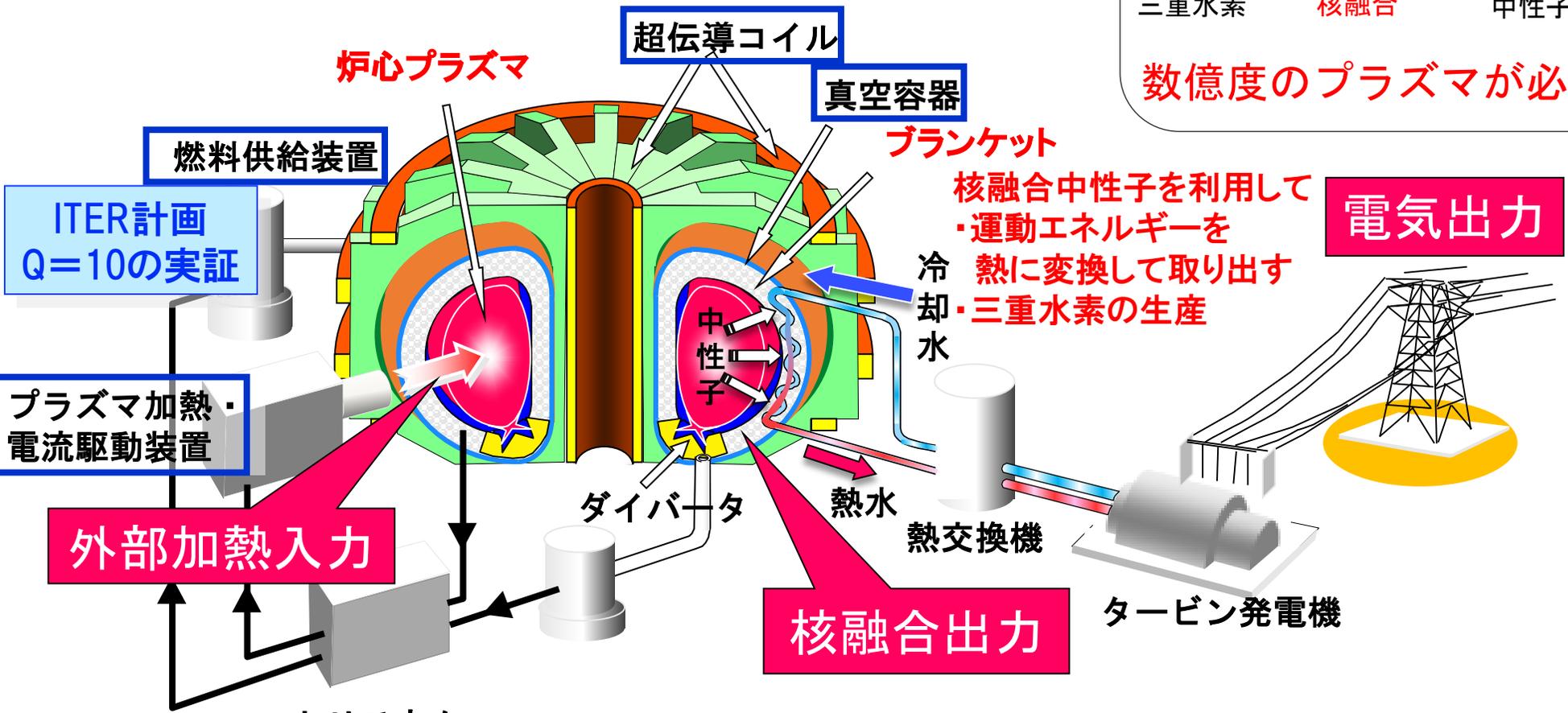
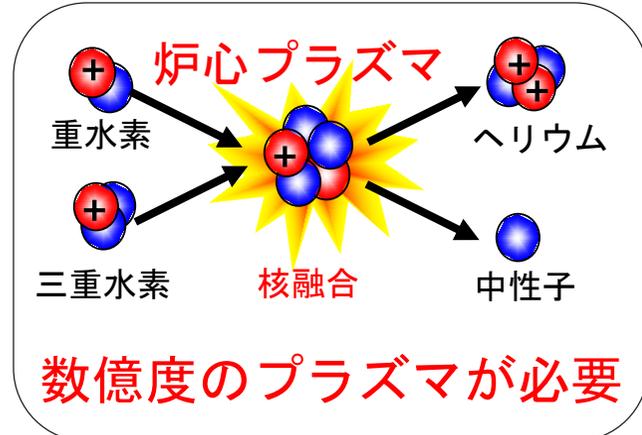
ITERの機器製作活動 及び JT-60SA建設の進展



量研 那珂核融合研究所 鎌田 裕

ITER BA成果報告会、2019年12月19日、東京大学伊藤国際学術センター

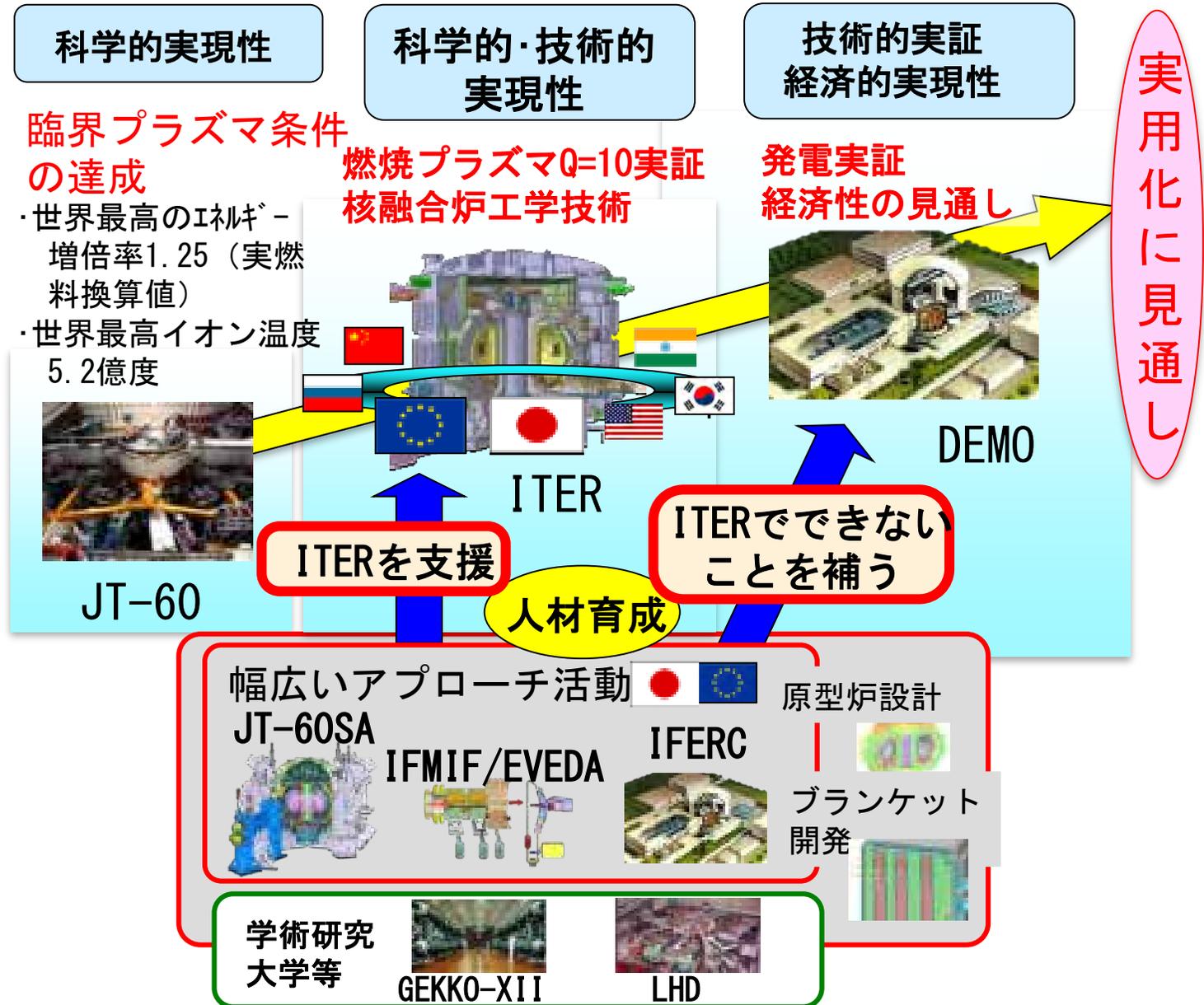
核融合発電炉のしくみ



エネルギー増倍率 $Q = \frac{\text{核融合出力}}{\text{外部加熱入力}}$ 実用炉では30~50

原型炉段階への移行：2035年頃

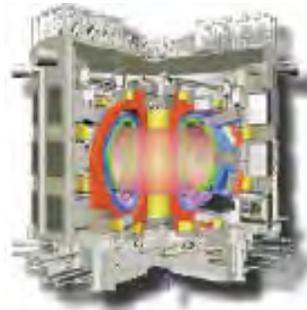
日本の核融合研究の進め方



ITER (燃焼プラズマ) と JT-60SA (高圧カプラズマ) で原型炉技術が完成 日本は、ITER と JT-60SA の両者を使って研究開発



核融合プラズマ研究開発の要点

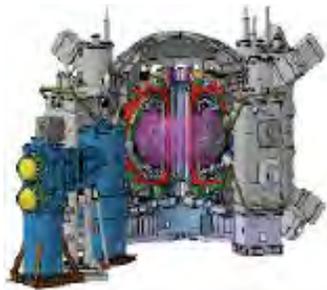


ITER

自己加熱 = 燃焼プラズマ

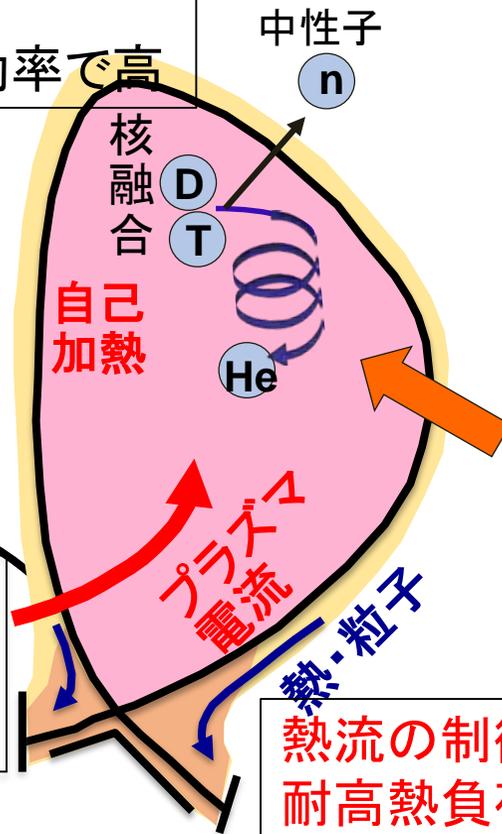
(高い閉じ込め効率で高温高密度)

JT-60SA



高い出力密度
(高プラズマ圧力)

非誘導で全プラズマ電流を定常維持
(高プラズマ圧力)



核融合反応パワーの
1/5が自己加熱パワー

自己加熱割合
原型炉 : 80 - 86%
ITER : 67% (Q=10)

熱流の制御と
耐高熱負荷ダイバータ

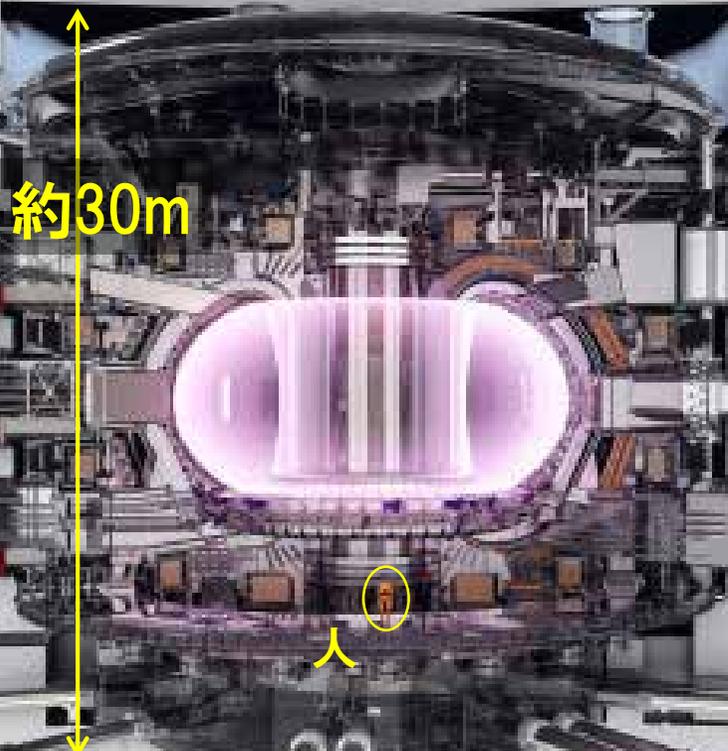
ITER,
JT-60SA

ITERプロジェクト：世界7極参加



実燃料で持続的な核融合燃焼の実証

熱出力 50万kW, エネルギー増倍率10(外部加熱5万kW)



日、欧、米、ロ、印、中、韓が
共同で建設中

サイト: フランス
サン・ポール・レ・デュランス市

ITER機構(国際機関)を2007
年に設立

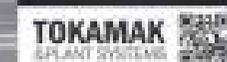
各国国内機関(実施機関)が
構成機器を分担して製作
QSTは日本の国内機関

建設開始 2007年
初プラズマ運転 2025年
核融合運転 2035年

ビゴ機構長



多田 副機構長
Lee 副機構長



ITERで日本が製作分担する機器

超伝導トロイダル 磁場コイル

- ・33導体(約33%)
- ・19構造物(全部)
- ・9巻線・一体化(約50%)



高周波 加熱装置

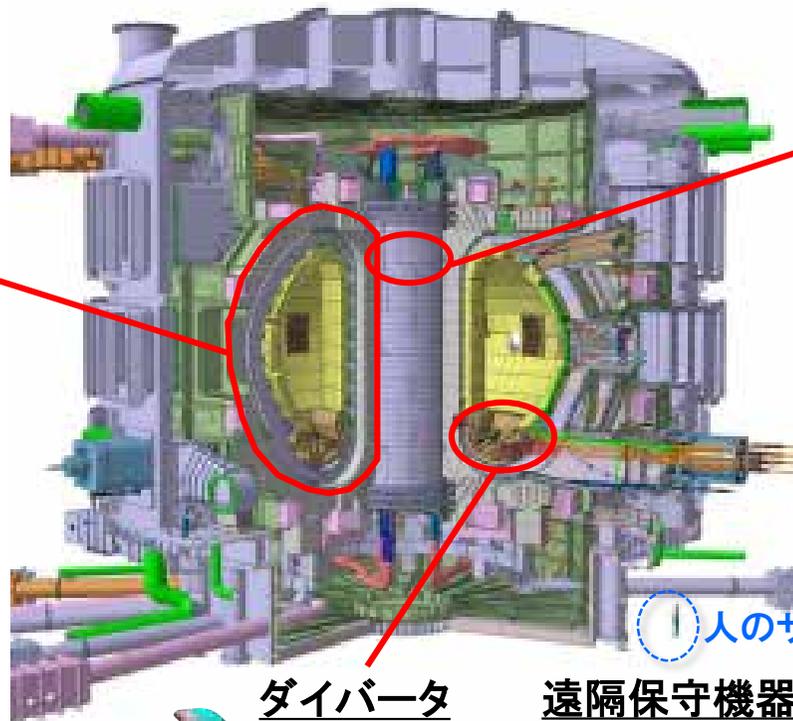


中性粒子ビー ム入射加熱装 置



- ・ジャイロトロン8機(約33%)
- ・水平ランチャー(全部)

- ・1MeV電源高圧部3基(全部)
- ・高電圧プッシング3基(全部)
- ・加速器1基(約33%)



ダイバータ



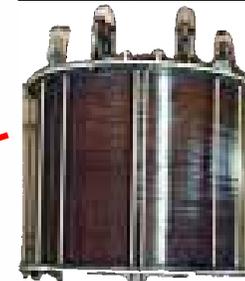
外側ターゲット
(全部)

遠隔保守機器



ブランケット遠隔保守装置
(全部)

超伝導中心ソレノイド導体



・49導体(全部)

計測装置



・6計測装置
(約15%)

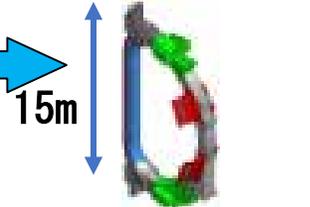
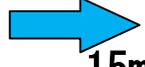
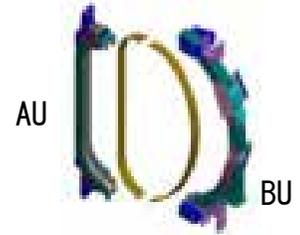
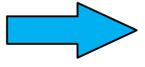
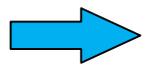
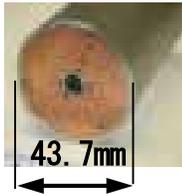
①人のサイズ

トリチウムプラント設備



トリチウム除去系(50%)

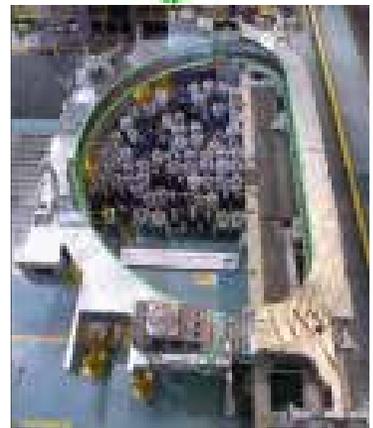
超電導トロイダル磁場コイル製作の進展



コールド試験前の
TFコイル1号機巻線部
(第1製造ライン)



TFコイル3号機用
巻線部 (第2製造ライン) 日本向け構造物1号機



欧州向け構造物5号機



TFコイル巻線部の製作進捗
3体完成

JA/EU	JA									EU										
号機	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
AU	■	■	■	■			■			■	■	■	■	■	■	■				
BU	■			■		■				■	■	■	■	■	■					
出荷	■	■	■	■						■	■	■	■	■	■					

緑：製作完了

TF構造物の製作進捗
日本用3体、欧州用4体完成

高精度で完成間近のトロイダル磁場コイル一号機



ギャップ・ミスアライメント：
 $0.25 \pm 0.25\text{mm}$ の高精度

外側と内側構造物の嵌め合い
確認試験（昨年1月終了）



リーク：
 $5 \times 10^{-8} \text{ Pam}^3/\text{s}$ 以下

巻線部低温試験
（昨年11月終了）

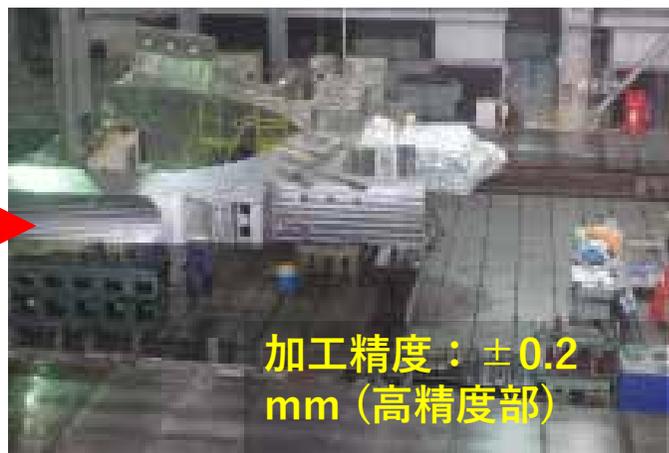


巻き線部と構造物の一体化
作業に着手（本年3月）



温度管理：
 $\pm 5 \sim 8^\circ\text{C}$ 以内

構造物内部に樹脂を注入する含浸
作業（本年9月終了）



加工精度： ± 0.2
mm（高精度部）

機械加工完了12月

来年1月末
完成予定

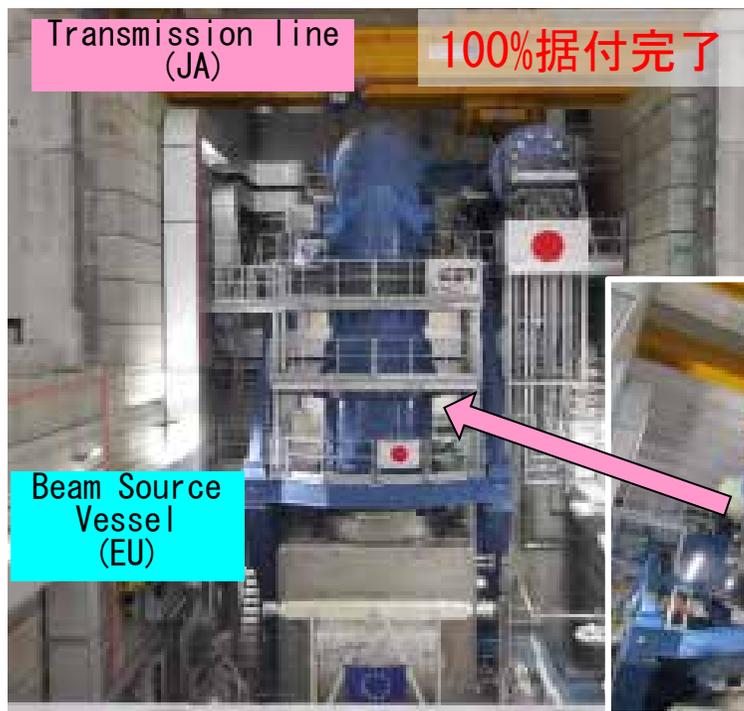
中性粒子ビーム入射加熱装置の試験施設電源完成

ITERのプラズマの加熱： 100万V, 40Aの粒子ビーム
実規模試験施設をイタリアのパドバに建設。

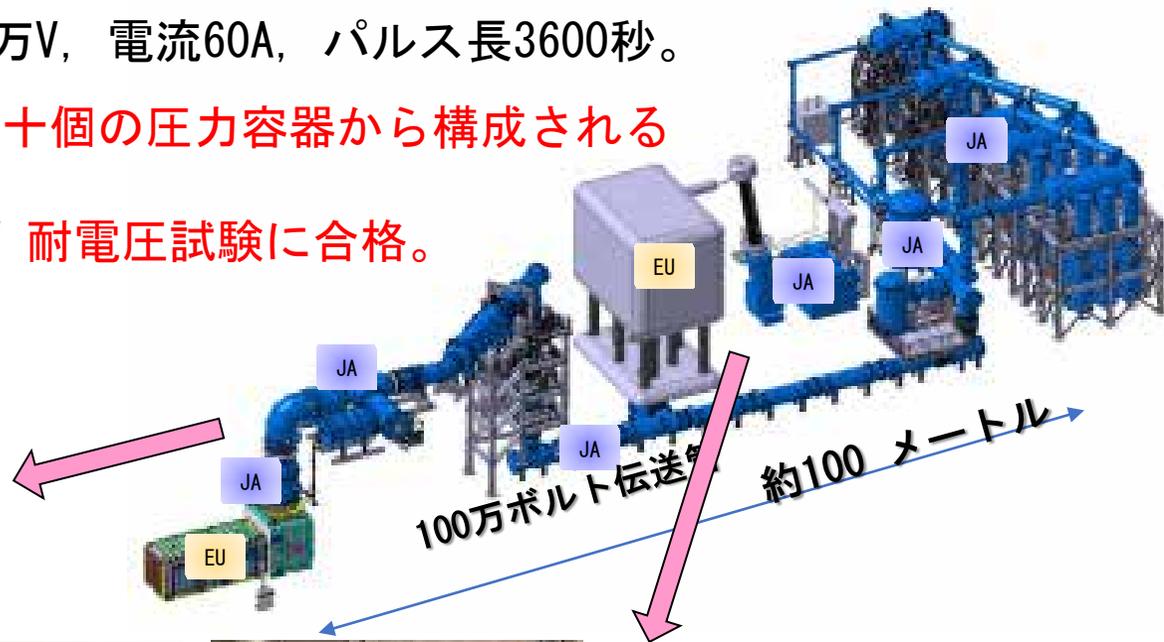
日本は、試験施設&ITER実機の直流超高電圧電源の開発・製作を担当

【高電圧電源の必要性能】 直流電圧100万V, 電流60A, パルス長3600秒。

- 2015年-2019年：全長100メートル、数十個の圧力容器から構成される日本担当電源機器の据付を完了。
- 2019年11月、高電圧電源全体の120万V 耐電圧試験に合格。
- 来年は、100万Vの出力試験を開始。



JA, EU, RFX, IO



高周波加熱装置の製作進展

大型の発信管ジャイロトロン

ITER全体で24機、日本は8機を製作を担当

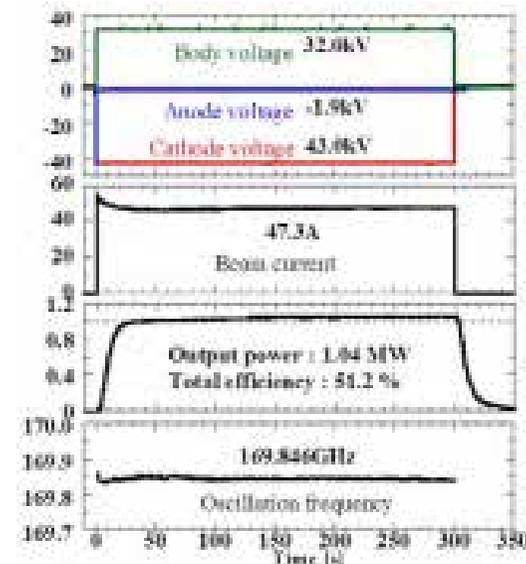
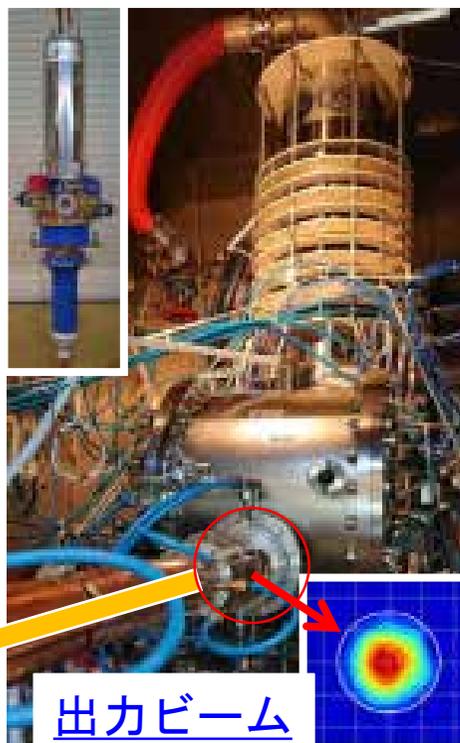
これまでに4機の製作を完了

製作したジャイロトロン2機の性能確認試験を実施、
要求性能を満足することを確認

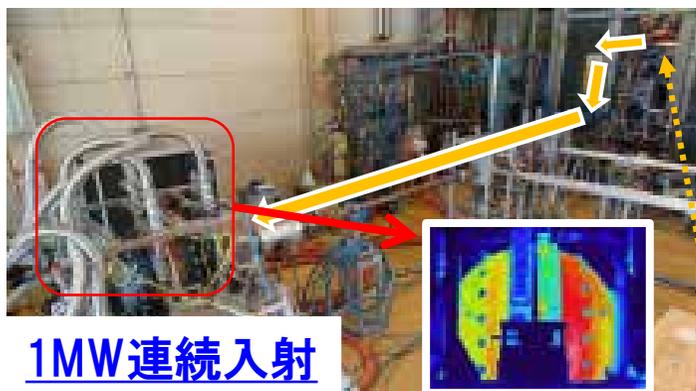
(完成試験性能要求)

- ・ 周波数/出力/効率：
170GHz/1MW/50%以上
- ・ 出力変調周波数：
1~5kHz/60秒以上
- ・ パルス幅：300秒以上
- ・ 運転信頼度：95%以上

大電力・長パルス試験装置



1.04 MW出力、51.2%効率、
パルス幅300秒の性能確認(2機目)



性能確認試験の様子

1機目 3機目 4機目のジャイロトロン

ダイバータプラズマ対向ユニット製作の進展



受熱面：タングステン
強制水冷却 (4MPa, 70°C)
必要受熱能力：20MW/m²

実規模プロトタイプ製作を進めている。

タングステンモノブロック

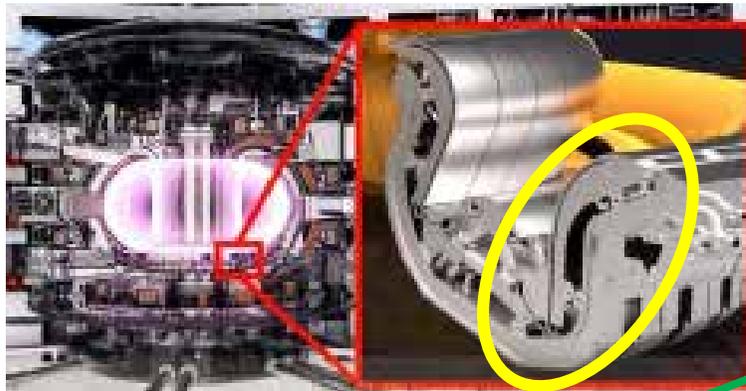
約3,600枚のタングステンモノブロックの製作完了

支持構造体用ステンレス (XM-19) 鍛造材

今年度中に完了の見込み

冷却管

クロムジルコニウム銅製冷却管製作完了



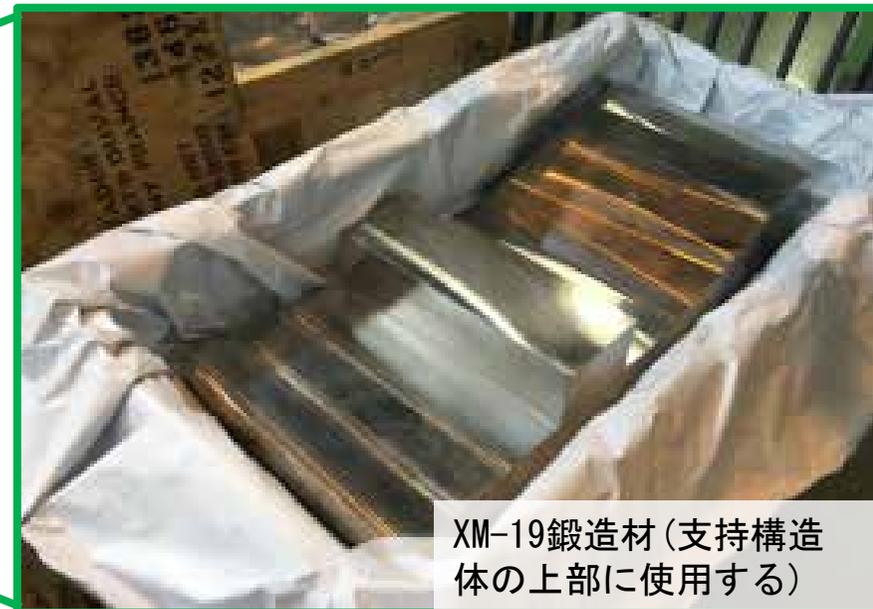
タングステン

約30mm



タングステン
モノブロック
(支持脚付き)

ステンレス製支持
構造体 (XM-19)

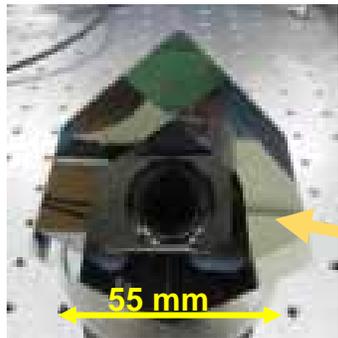


XM-19鍛造材 (支持構造
体の上部に使用する)

プラズマ計測装置製作の進展

- 日本が調達する5つの計測装置のうちポロイダル偏光計、周辺トムソン散乱計測装置で**試作／試験を行いつつ、最終設計が前進。**

ポロイダル偏光計の機器配置図



真空容器内に設置する
タングステン製回帰反射鏡



真空容器内機器の
健全性確認試験



実機長のレーザー伝送路



自動レーザー
光軸調整機構

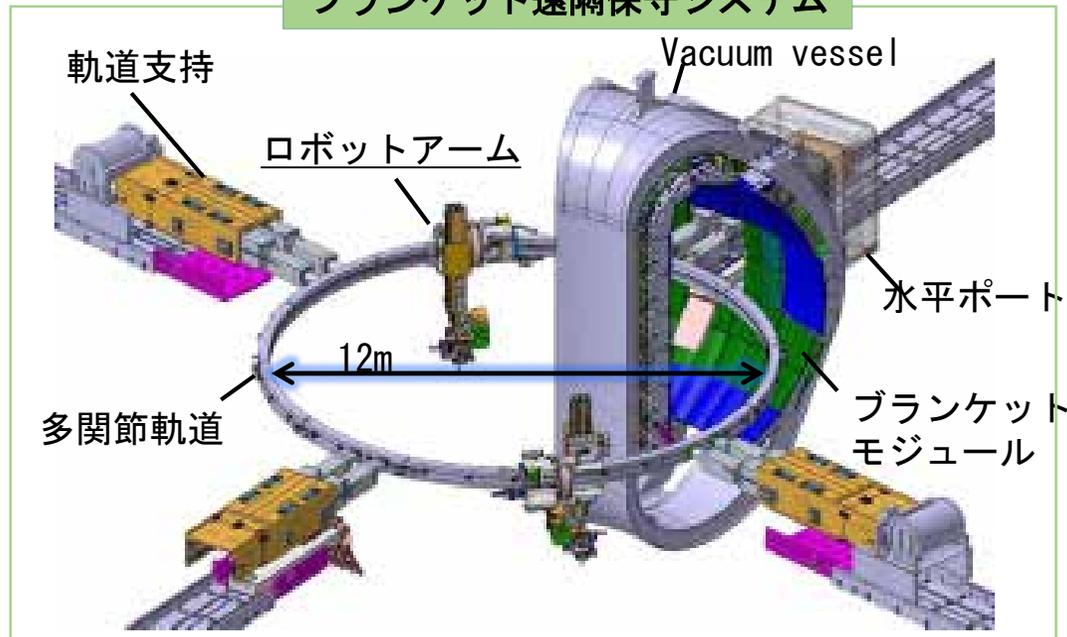


遠赤外線レーザー
プロトタイプ製作

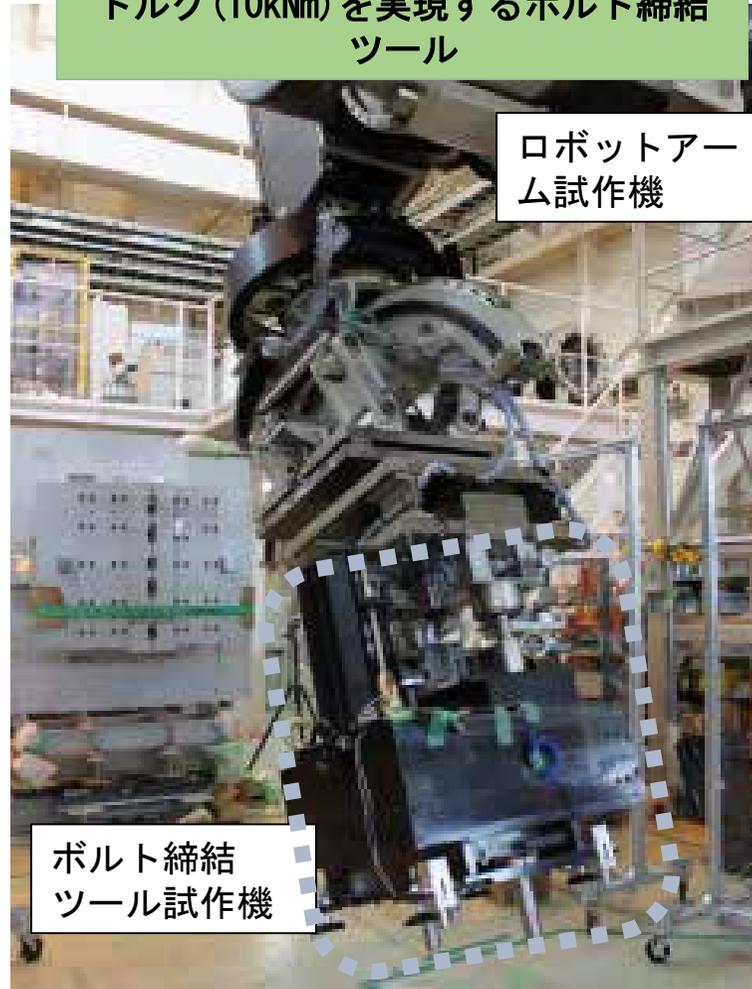
ブランケット遠隔保守機器製作の進展

- 最大4トンのブランケットモジュールを精密取付する大型ロボットアームを開発中
- 主な開発上の課題：
 - 多様なツール類の開発
 - ✓ 10kNm大強度トルク締結ツール
 - ✓ 内径43mmの配管内部に遠隔でアクセスを可能とする配管溶接／切断／検査ツール等
 - 精密位置決め手法の開発
 - ブランケットモジュールと真空容器間のギャップは0.5mm
 - 耐放射線性機器の開発

ブランケット遠隔保守システム



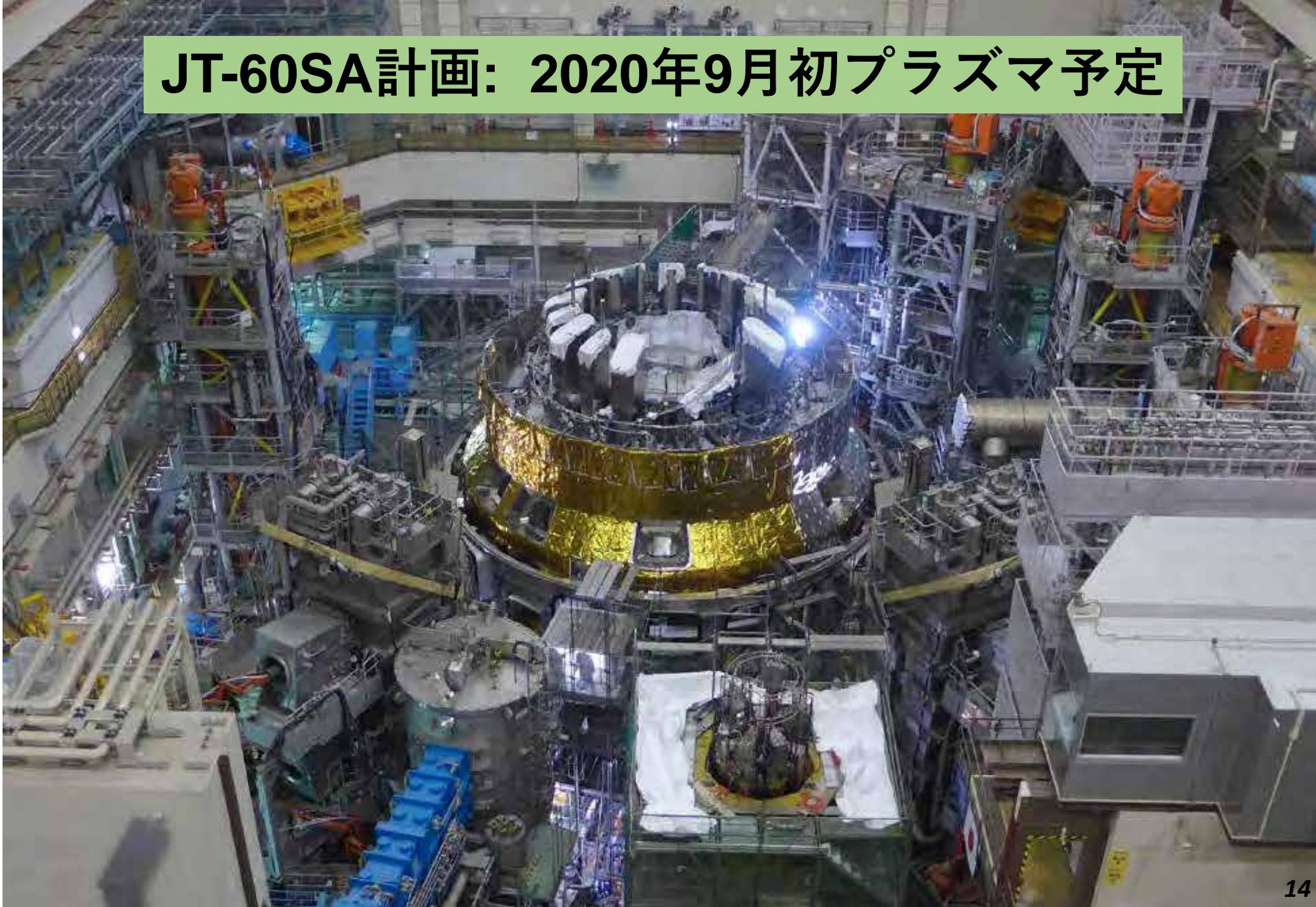
強大な電磁力を支持するための大強度トルク (10kNm) を実現するボルト締結ツール



ロボットアーム試作機

ボルト締結ツール試作機

JT-60SA計画: 2020年9月初プラズマ予定



JT-60SA事業 (2007~)

大型超電導トカマク装置 「高圧力での安定性に優れたプラズマ形状」

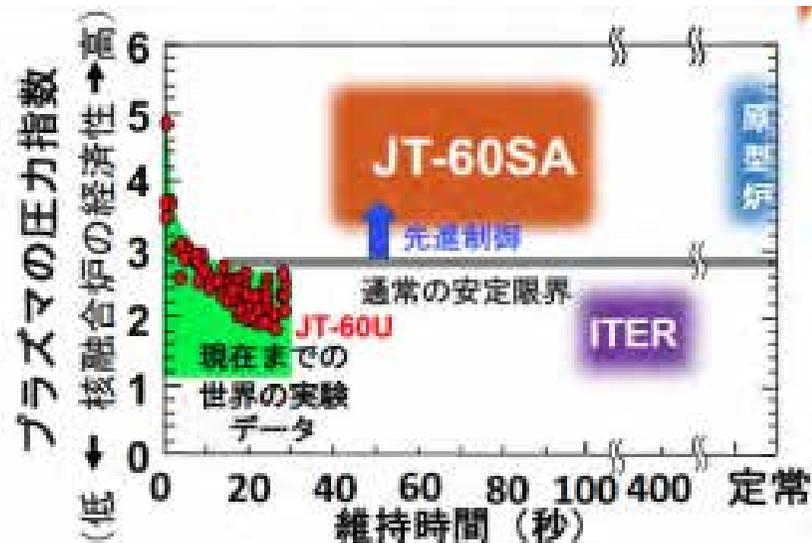
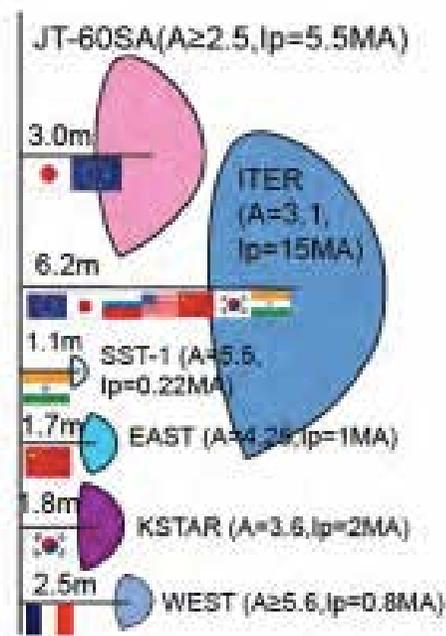
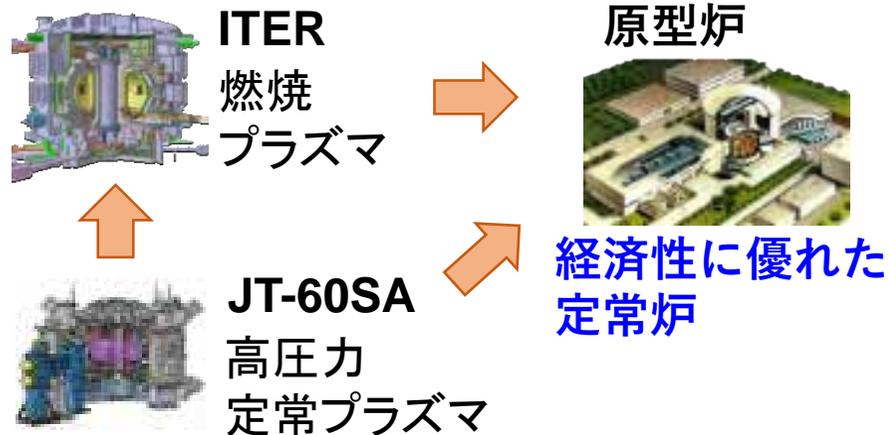
ITERの支援研究

ITERのリスク低減と効率的運用に貢献する。
臨界条件クラスのプラズマを長時間(100秒程度)維持する高性能プラズマ実験を行う。

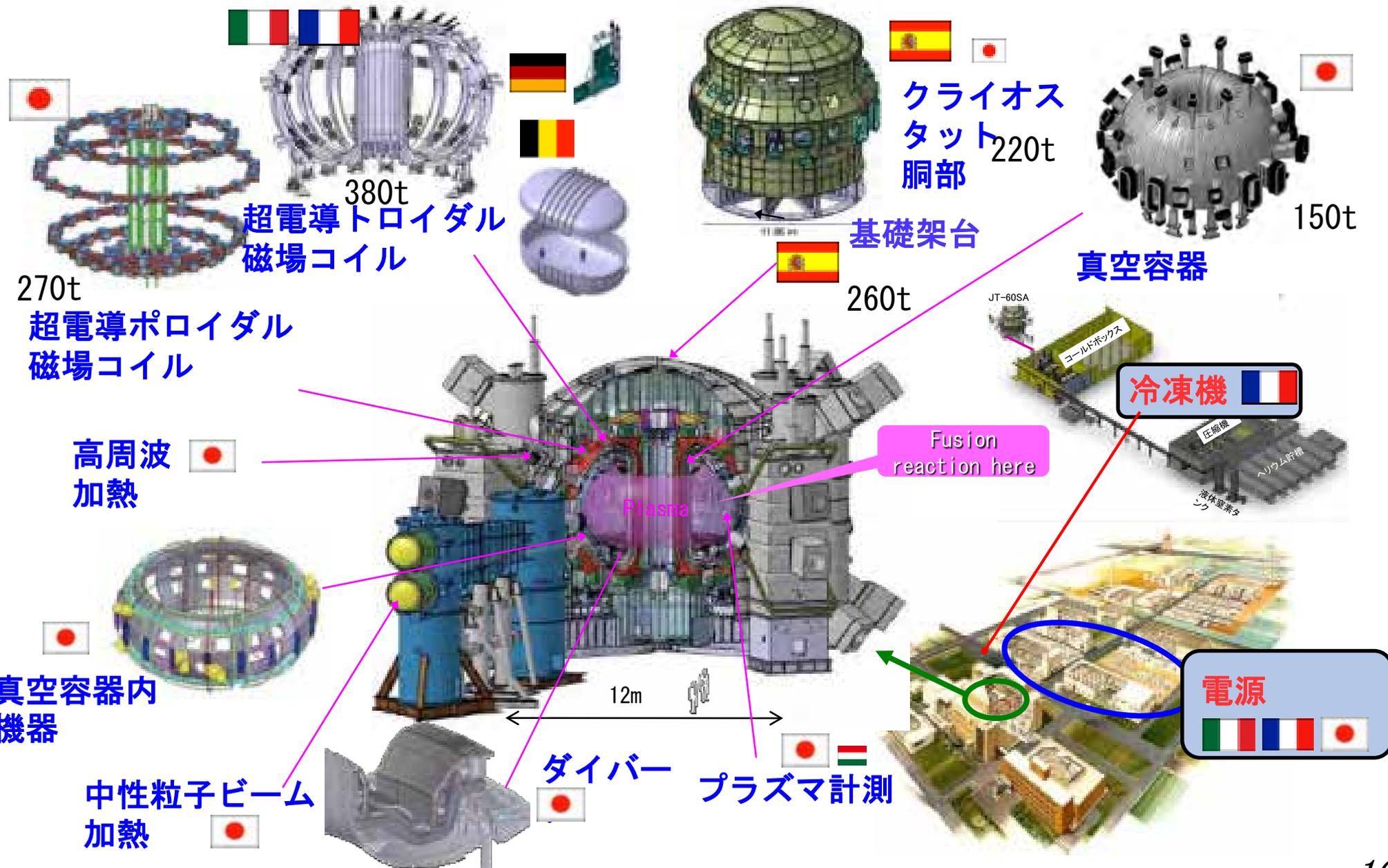
原型炉に向けたITERの補完研究

原型炉で必要となる高出力密度を可能とする高圧力プラズマを100秒程度維持し、原型炉の運転手法を確立する。

ITER・原型炉開発を主導する人材の育成



日欧で機器製作を分担



2020年3月の組立完成に向けて計画通り進むJT-60SA事業

=> 統合コミッショニング&ファーストプラズマ2020年9月

Mar., 2013 クライオスタットベース (Spain)

Jan., 2014 下側平衡磁場コイル (Japan)

真空容器 (Japan)

真空容器サマルシールド (Japan)

Aug., 2018 18 TF + 6 EF-coils (Italy, France, Germany)

TFコイルと上側平衡磁場コイル (Japan)

中心ソレノイド (Japan)

クライオスタット (Spain)

TFコイル低温試験設備 (Belgium, France)

TFコイル (France, Italy)

高温超伝導電流リード (Germany)

クライオスタット (Spain)

JT-60SA

ファーストプラズマ2020年9月

クエンチ保護回路 (Italy)

電源 電動発電機 (Japan)

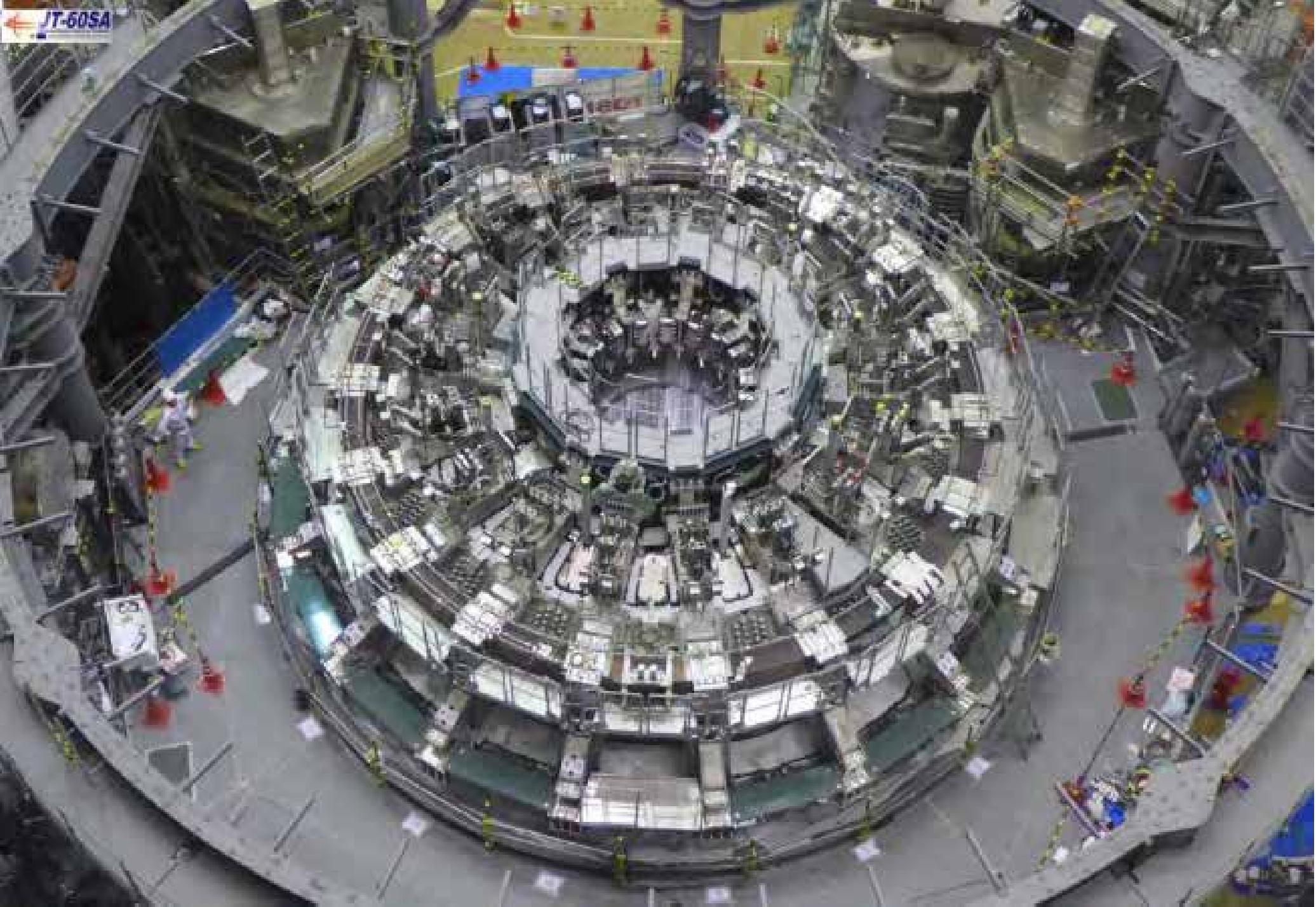
超伝導コイル用電源 (Italy, France)

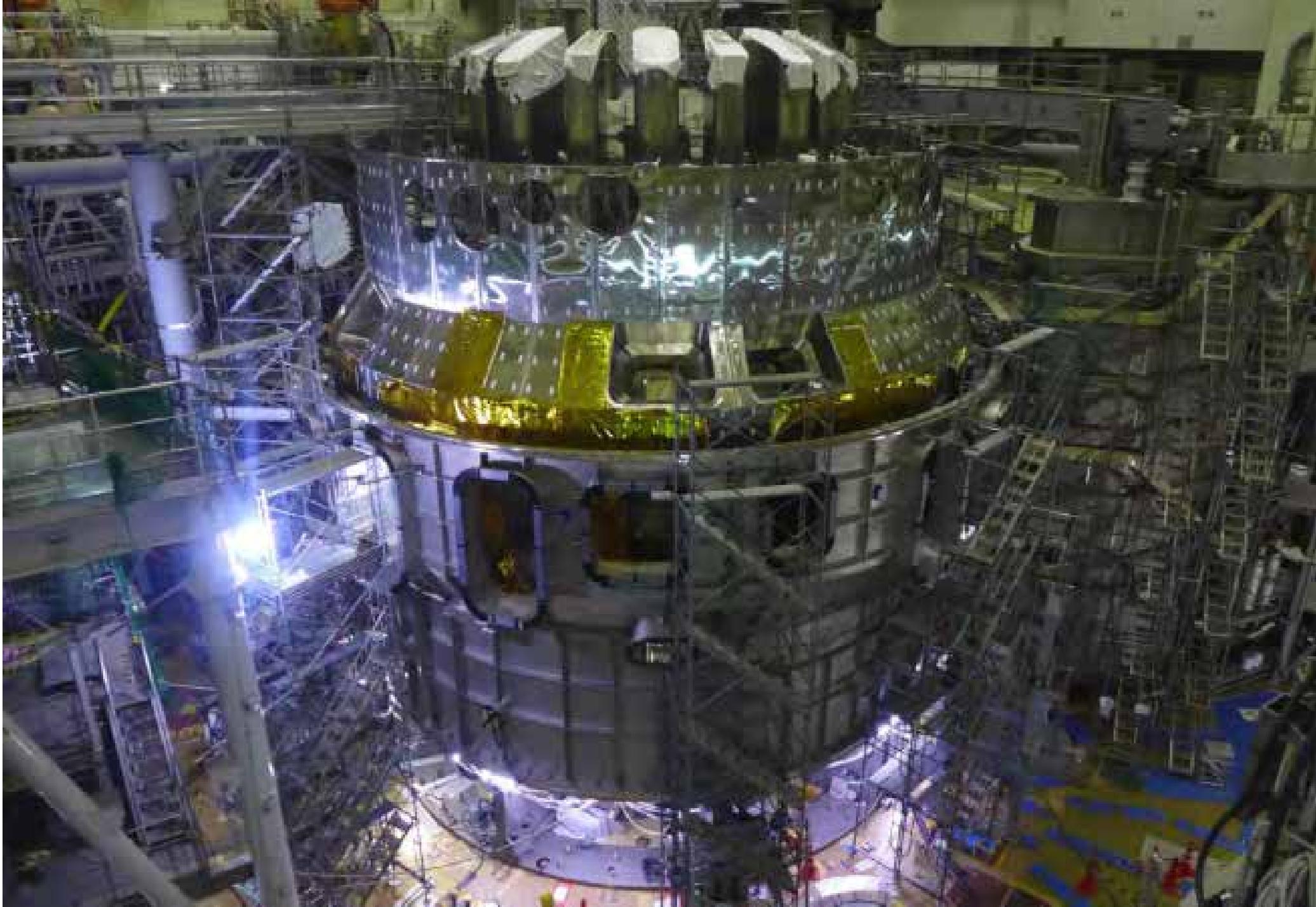
冷凍機 (France, EU)

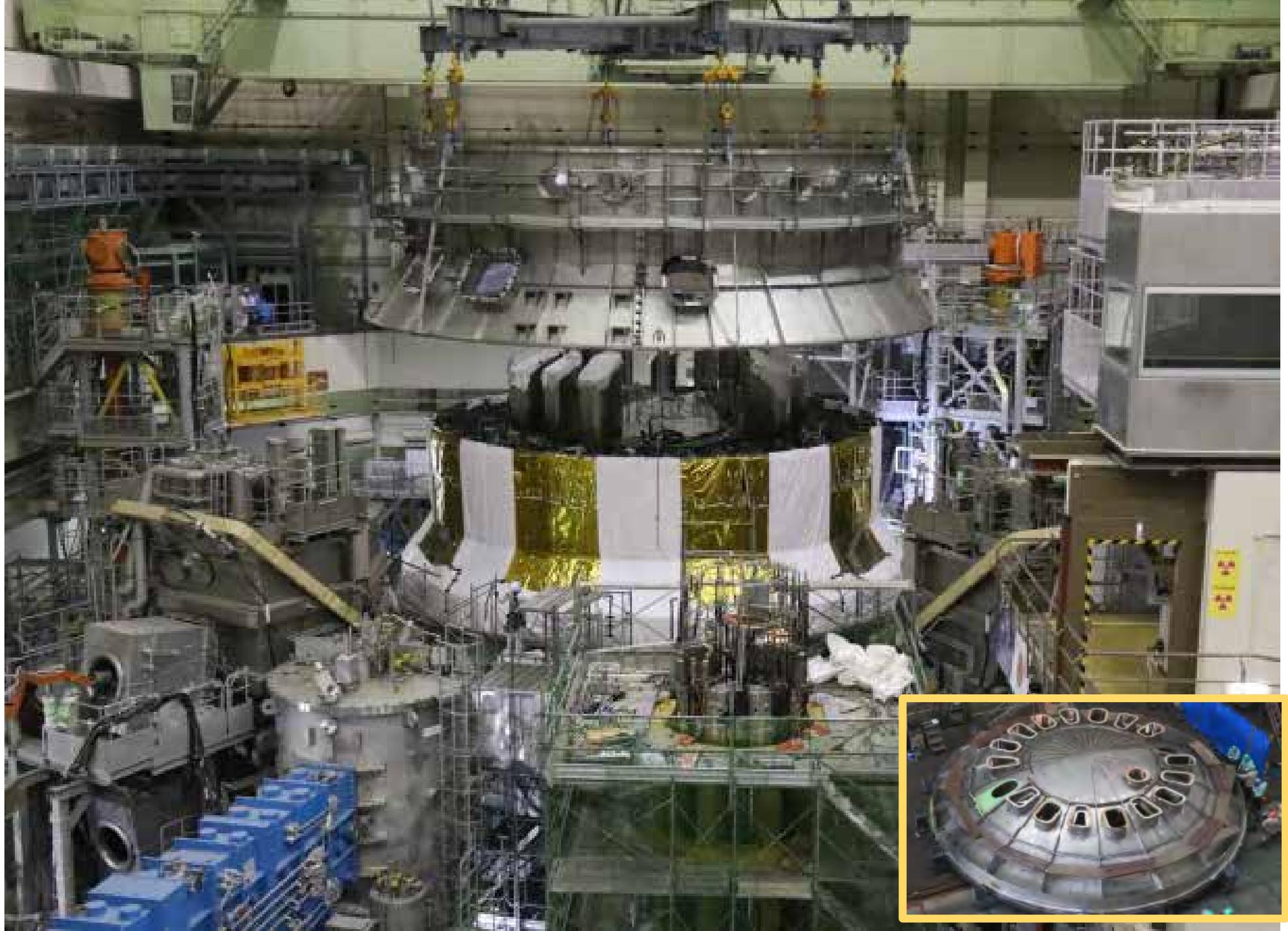
NBI (Japan)

ECRF (Japan, EU)

計測機器など (Japan)









高精度の機器製作と組み立てを実現

許容される磁場の誤差： $\sim 1/10000$

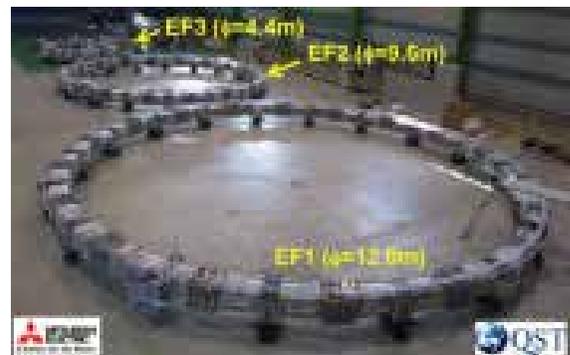
\Rightarrow 10m サイズの機器で 1mm~数mm の誤差が目標

\Rightarrow 製作・組立：全て達成

基礎架台：上面水平度0.6mm



EFコイル：0.3-1.3mm



センターソレノイド
0.3-0.4mm

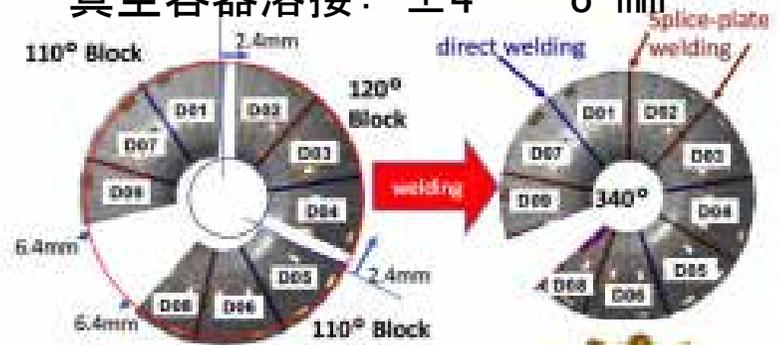
TF, コイル2 mm



真空容器 $\pm 2 - 5$ mm



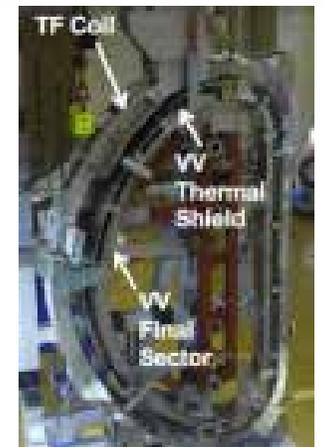
真空容器溶接： $\pm 4 - 8$ mm



TF 組み立て： ± 1 mm

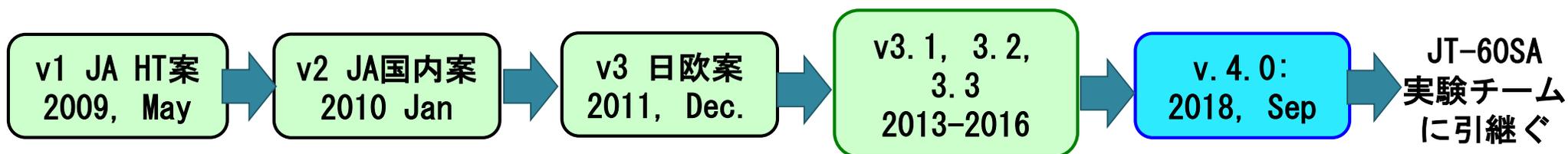


Laser tracker

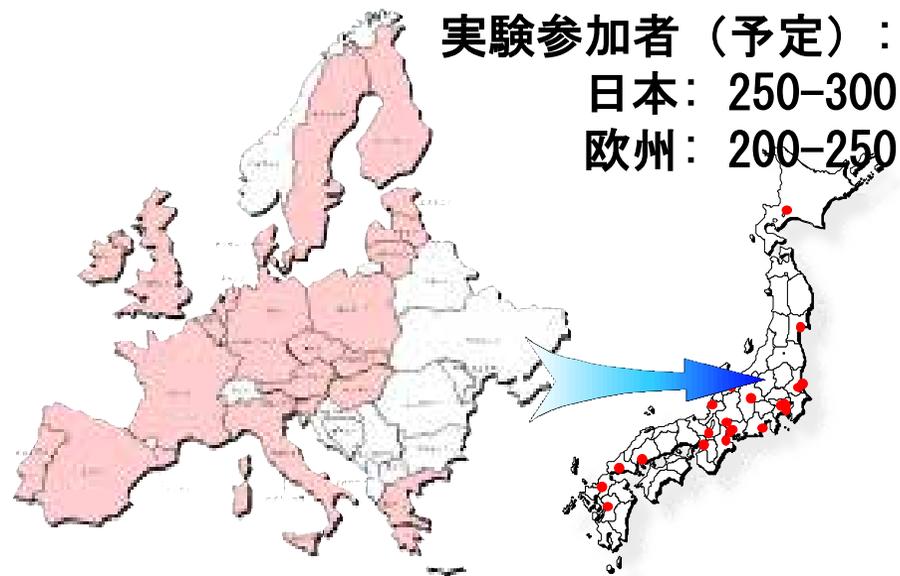
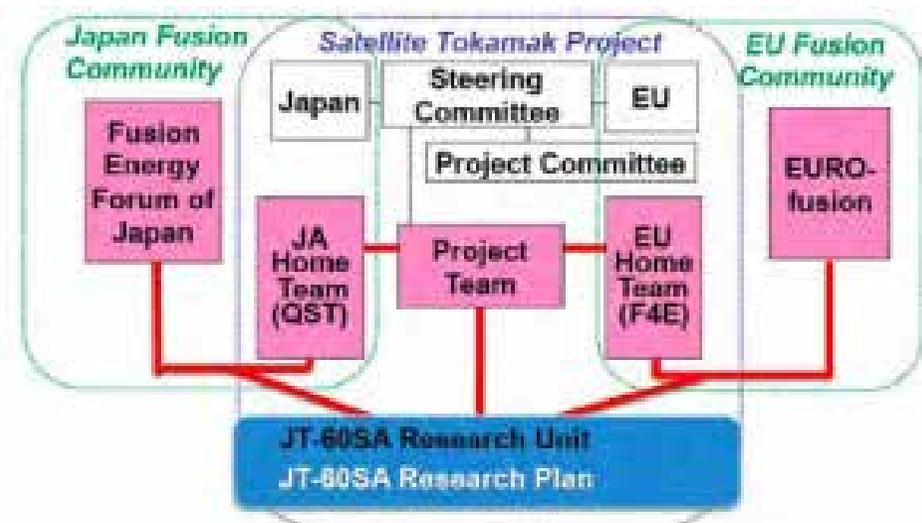


JT-60SAリサーチプランを策定

日欧JT-60SA研究ユニット：日欧の研究コミュニティとともに、2009年に発足。
リサーチプラン策定活動を実施。JT-60SAの実験研究を担う若手研究者を中心に企画・提案



JT-60SA リサーチプラン Ver. 4.0 が2018年9月に完成。
共著者 435名：日本174（18研究機関）、欧州261（14カ国，33研究機関）



実況中継

那珂核融合研究所 中央制御室

JT-60SA 放電シーケンスの様子

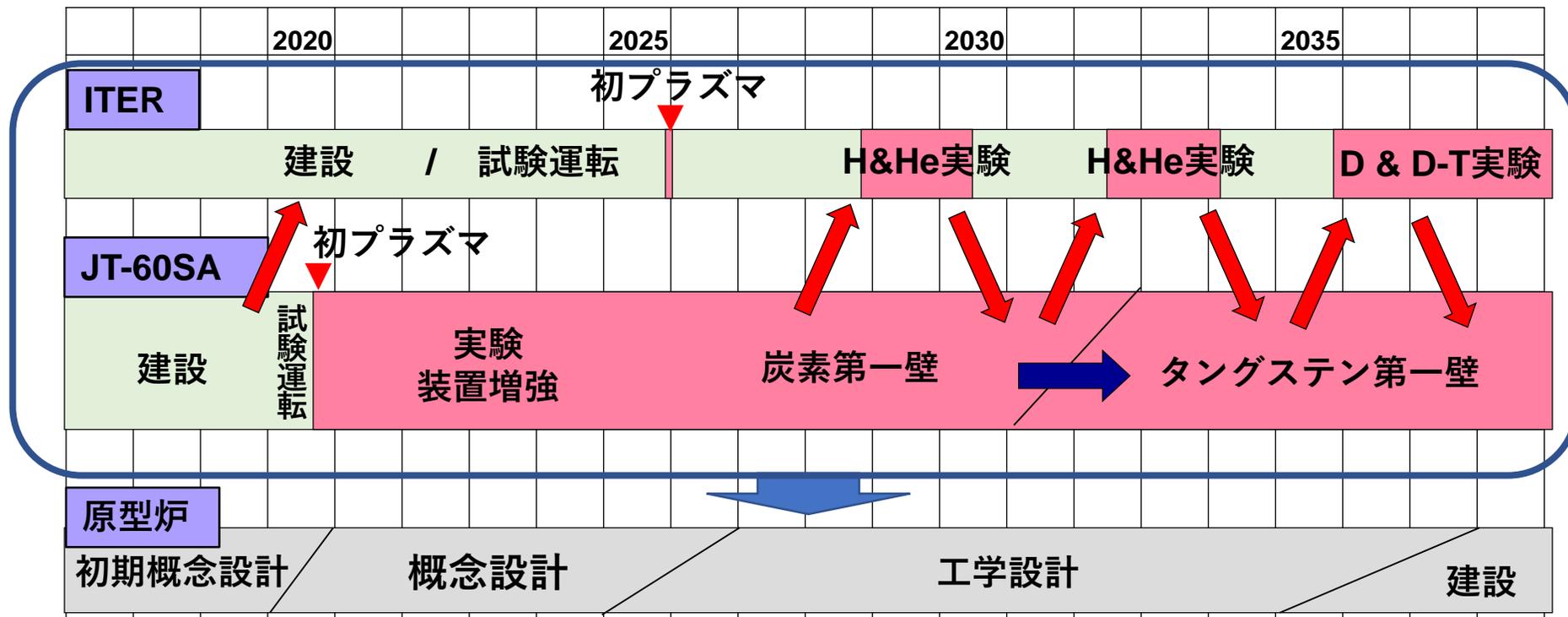
井手俊介 先進プラズマ研究部長

ITERとJT-60SAを用いて、核融合原型炉を実現

JT-60SA 機器製作、組み立て、トカマクシステム評価
 コミッショニング、実験、解析、モデリング => **ITER**

ITER & JT-60SA 協力取り決め: 2019年11月20日署名完了

日本 & 欧州大学の「オンサイトラボラトリー」を那珂研究所に設置



御清聴ありがとうございました。