

ITER計画及びJT-60SA統合試験運転の進展 Progress of ITER project and present status of JT-60SA integrated commissioning

ITER/BA成果報告会2023@イノホール
令和6年1月15日

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
量子エネルギー部門 那珂研究所
東島 智

HIGASHIJIMA Satoru
Naka Fusion Institute, Fusion Energy Directorate
National Institutes for Quantum Science and Technology

フュージョンエネルギー実現へのロードマップ Roadmap to realize fusion energy

- 那珂研究所では、**原型炉に向けた技術基盤・人材基盤構築**に向け、ITER計画及びJT-60SA計画を一体的に推進
- **我が国の産業界の競争力向上**を目指し、産業界からの参画を促進のため、フュージョンテクノロジー・イノベーション拠点化

試験装置

科学的実現性

JT-60



超高温プラズマの実現

世界最高イオン温度
5.2億度を達成

現在 実験炉

核融合燃焼の実証

ITER機構

那珂研究所

知見・技術・
人材の共有



ITERを支援する

ITERでできないことを補う

今世紀中旬 原型炉

発電実証

熱出力: ~150万kW (連続運転)



整流器棟

変電所

ホットセル

原型炉本体

蒸気タービン

欧州

F4E、EUROfusion等

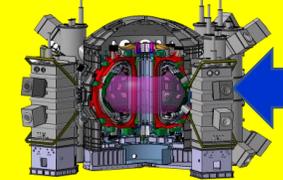
研究所レベルの参画促進

PPPL、GA、UCI (米)



幅広いアプローチ (BA) 活動

【茨城 那珂研】



JT-60SA

【青森 六ヶ所研】



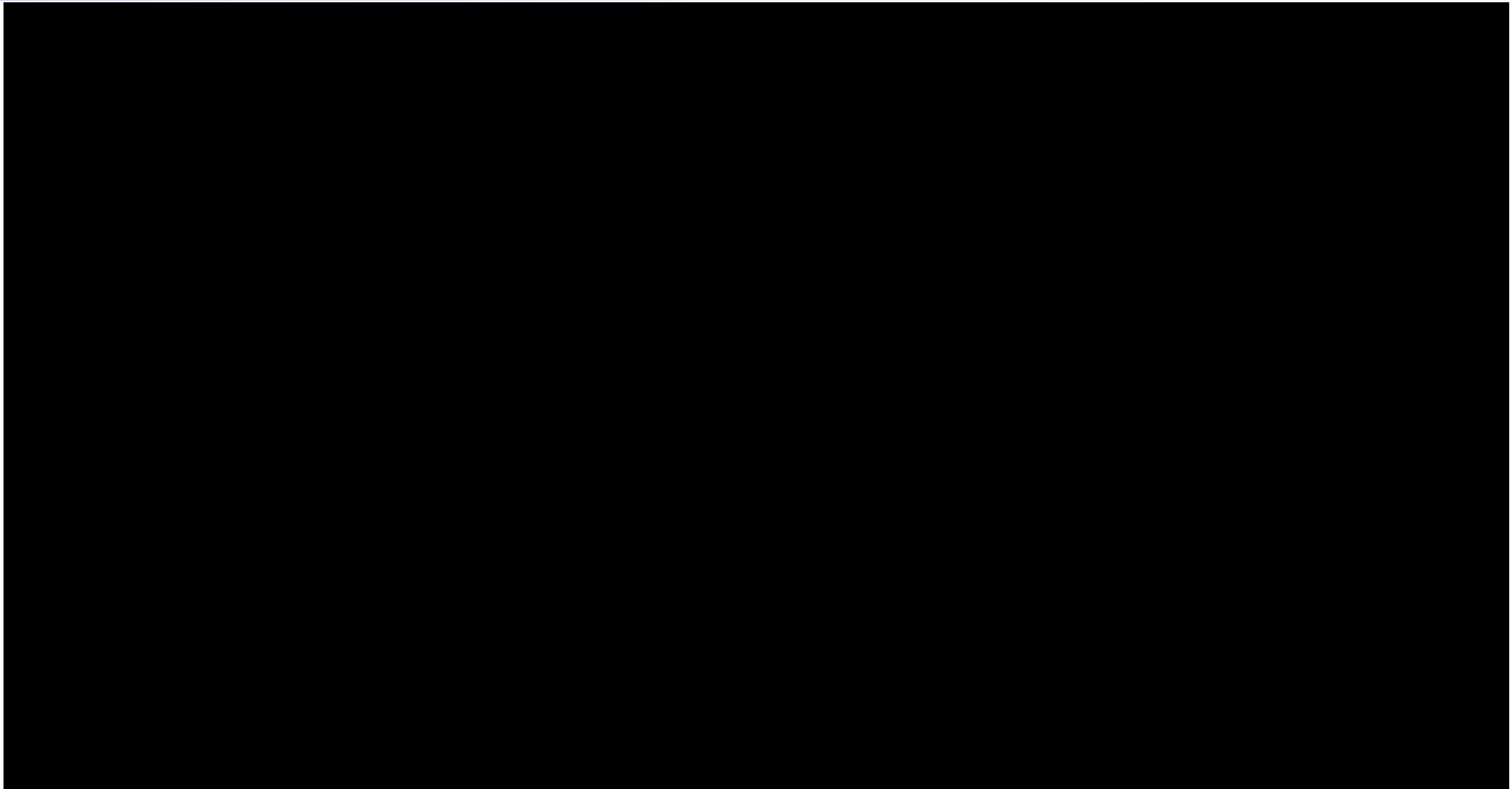
IFERC

IFMIF/EVEDA

産業界の参画促進

フュージョンテクノロジー・イノベーション拠点

ITER計画 ITER project



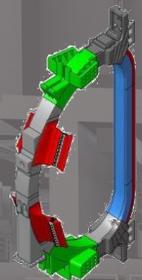
ITER計画における我が国の調達機器

Japanese procurement components in ITER project

ベースラインに従い、遅滞なく調達機器をITER機構に引き渡す

超伝導トロイダル 磁場 (TF) コイル★

- ・33導体 (約25%)
- ・19構造物 (全数)
- ・9巻線・一体化 (約50%)



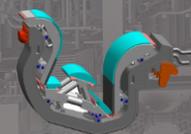
超伝導中心ソレノイド (CS) 導体

- ・49導体 (全数)



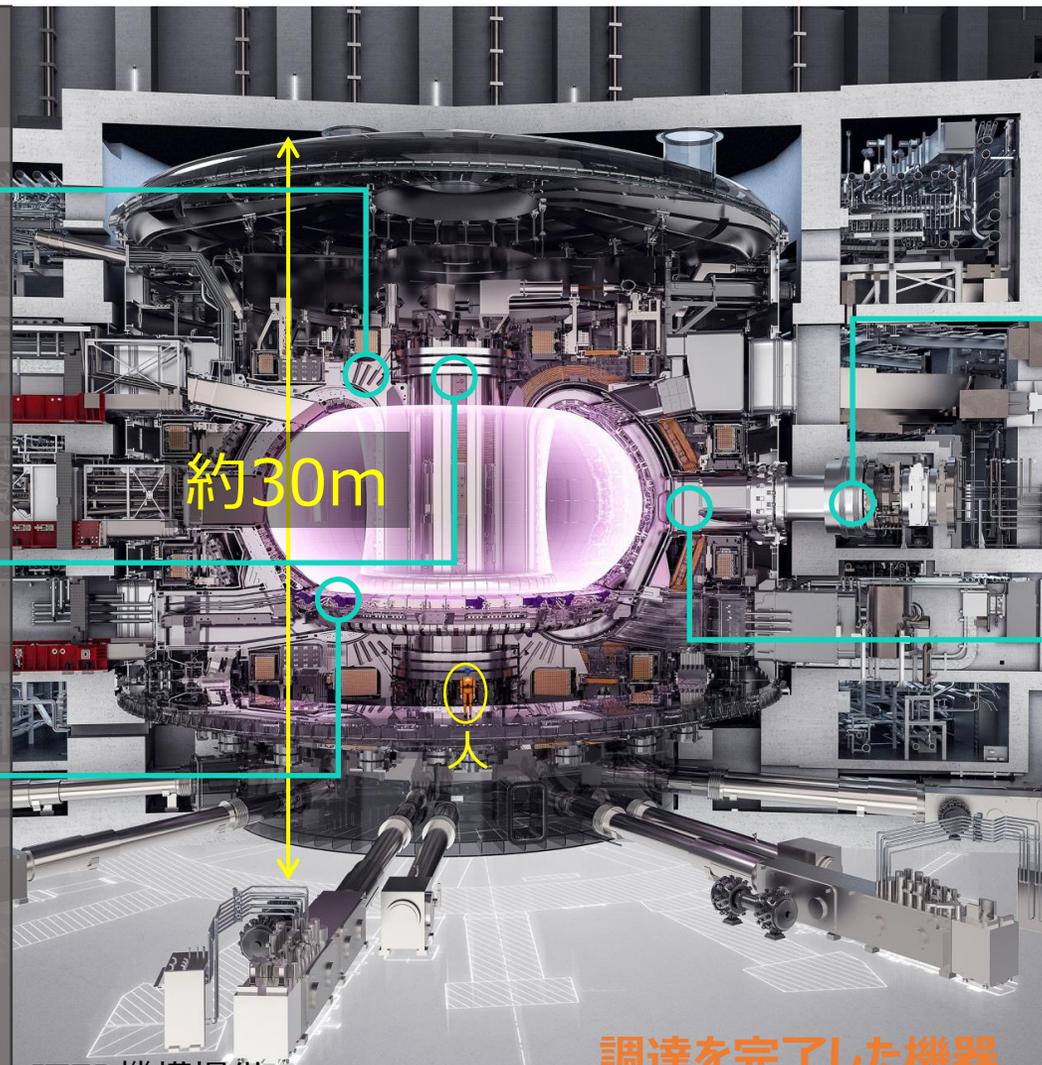
ダイバータ★

- ・外側ターゲット (一式)



遠隔保守機器

- ・ブランケット遠隔保守装置 (一式)

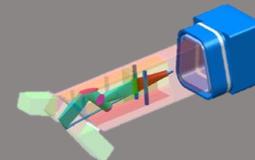


ITER機構提供

調達を完了した機器

計測装置

- ・6計測装置 (約15%)



中性粒子ビーム (NB) 入射加熱装置

- ・1MeV電源高圧部3基 (全数)
- ・高電圧ブッシング3基 (全数)
- ・加速器 1基 (約33%)



高周波加熱装置

- ・ジャイロトロン8機 (約33%)
- ・水平ランチャー (一式)



トリチウムプラント設備

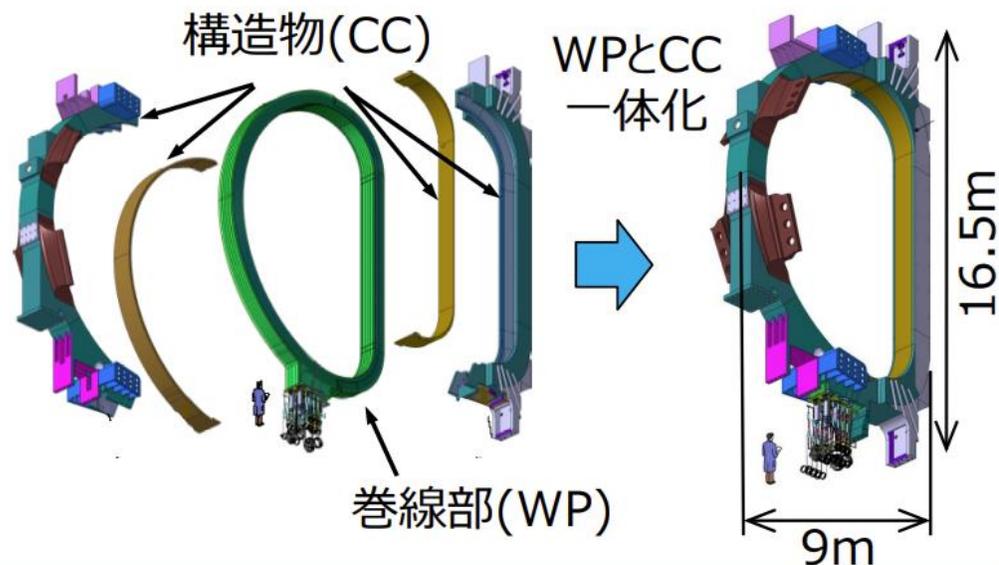
- ・トリチウム除去系 (50%)



超伝導トロイダル磁場 (TF) コイル Superconducting Toroidal Field (TF) Coils

- TFコイル最終号機は2023年11月にITER建設サイトに納入し、2008年の調達取決め締結から15年をかけて、日本メーカーの底力と皆様のご支援により、我が国が担当する全9機の製作を完遂。
- TFコイル製作の完遂に対して、ITER機構より、欧州と共同でITER Award 2023を受賞。

TFコイル:9機 (うち1機はスペア)



ITER機構へのTFコイル最終号機の引渡し

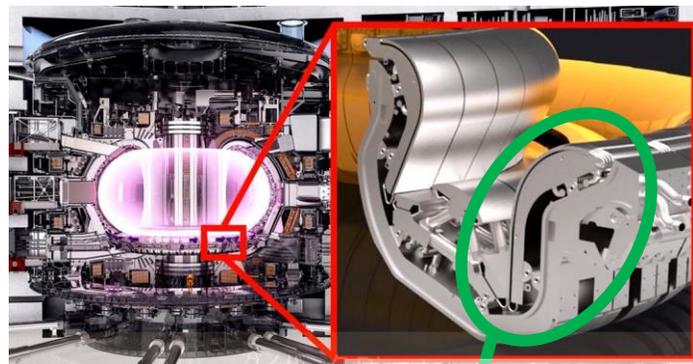


ITER機構から表彰

三菱重工業/三菱電機, 東芝エネルギーシステムズ

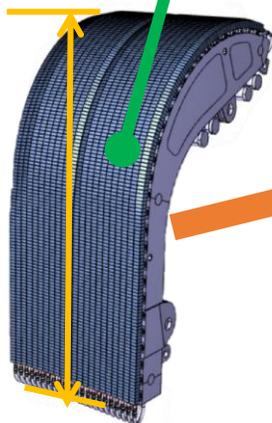
ダイバータ・外側ターゲット Divertor Outer Target

- ▶ プラズマ対向ユニット(PFU)プロトタイプがITER機構の認証試験（高熱負荷試験）に合格し、実機製作を開始。
- ▶ 外側ターゲット・プロトタイプが完成し、最終受入試験である高温ヘリウムリーク試験を実施中。



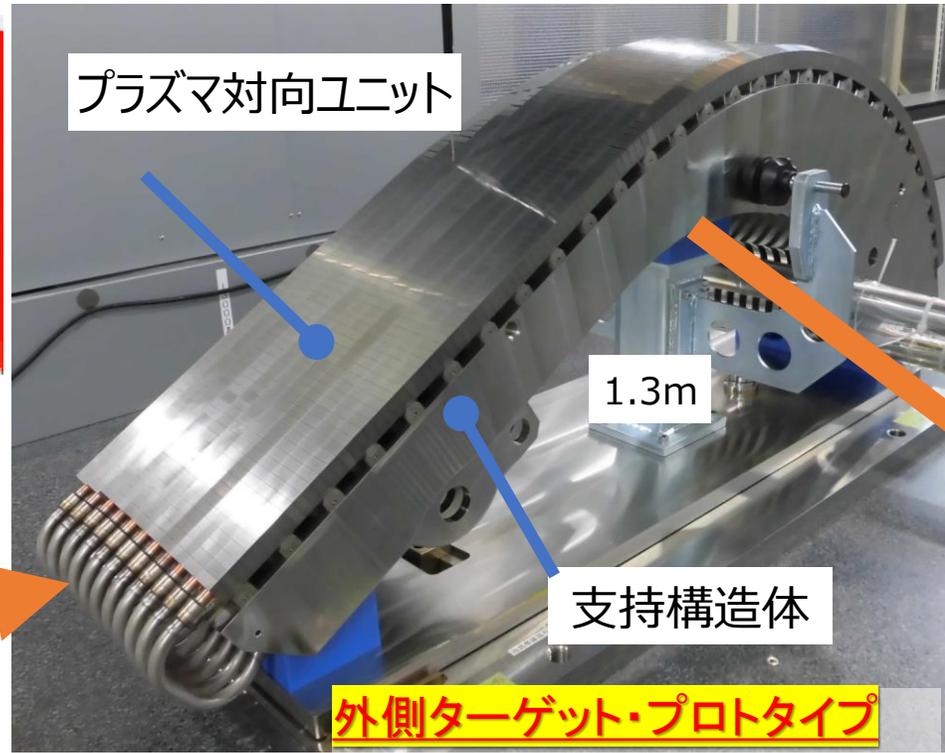
ITER

ダイバータカセット



1.3m

外側ターゲット



プラズマ対向ユニット

1.3m

支持構造体

外側ターゲット・プロトタイプ

三菱重工業/大阪冶金、金属技研、
アライドマテリアル、大和合金、大同特殊鋼



真空容器
(高温ヘリウム
リーク試験装置)

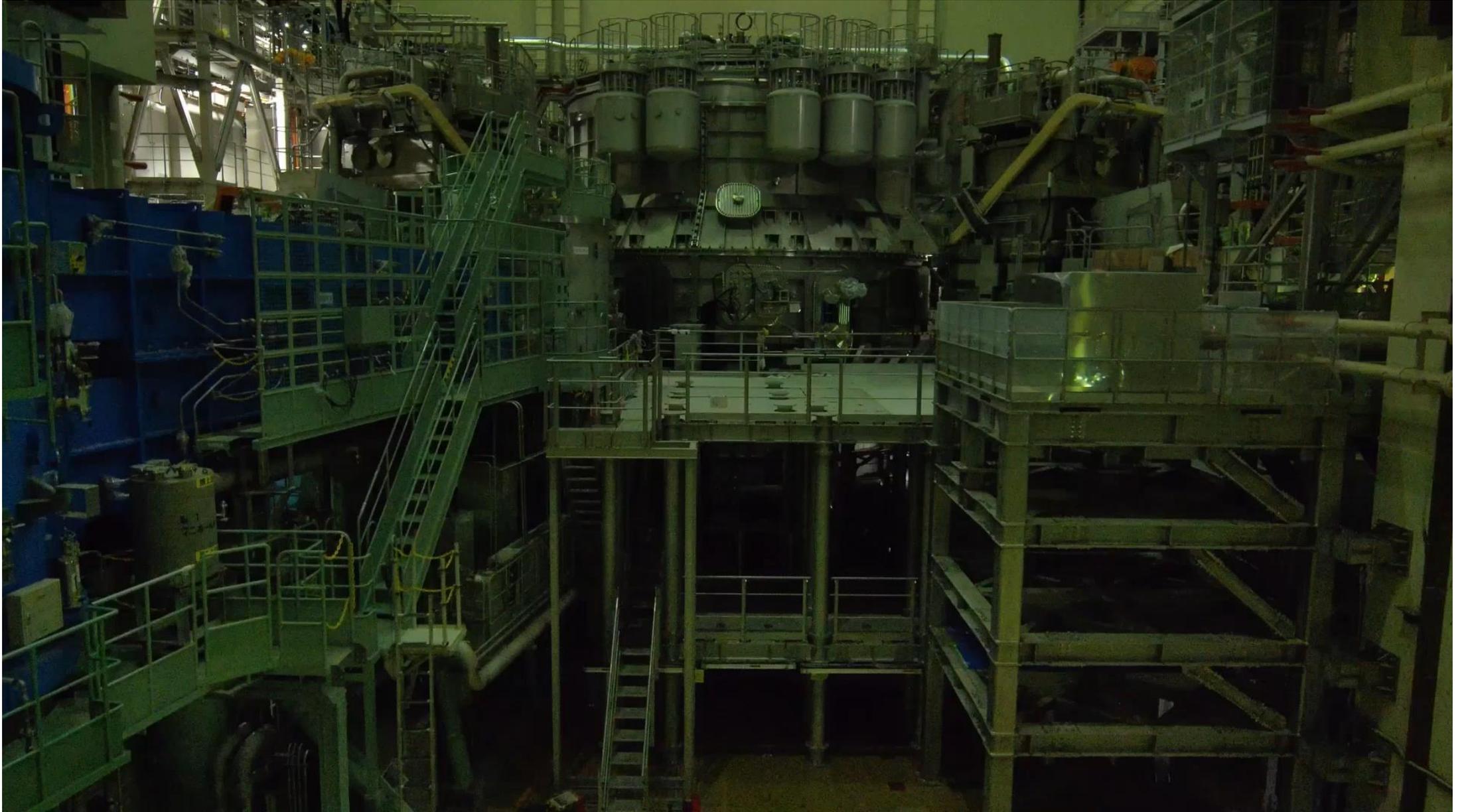
外側ターゲット
プロトタイプ

那珂研に設置した高温ヘリウムリーク試験装置

助川電気工業

JT-60SA(Super Advanced)計画

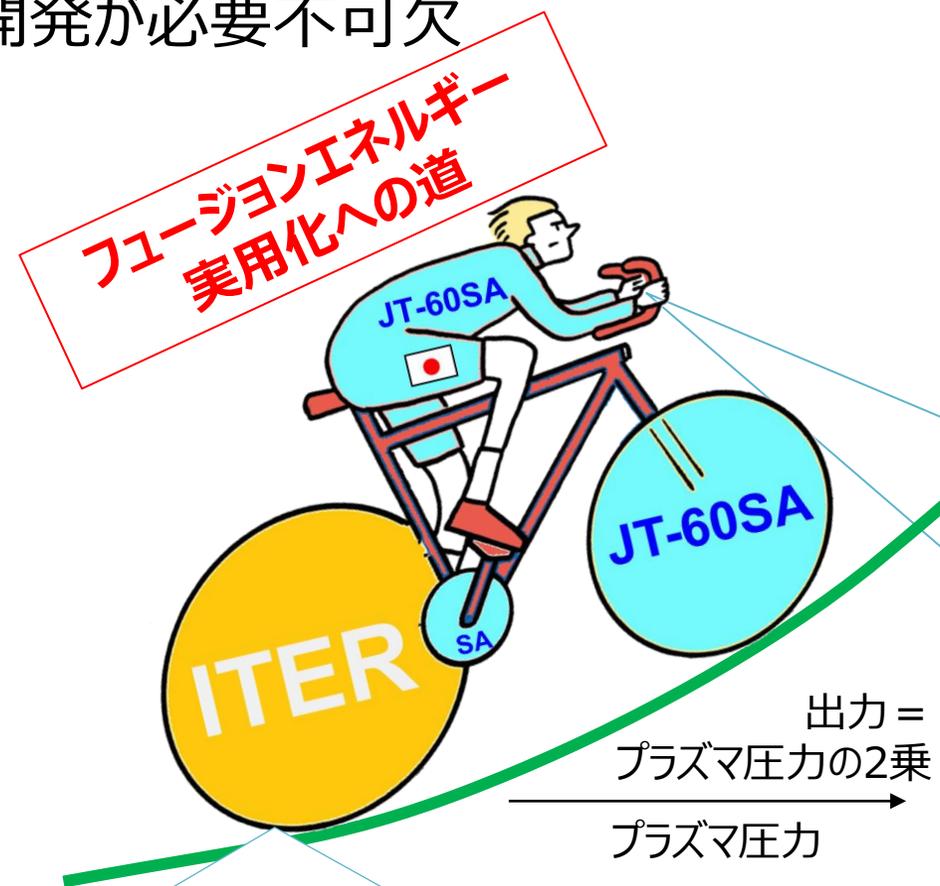
JT-60SA project



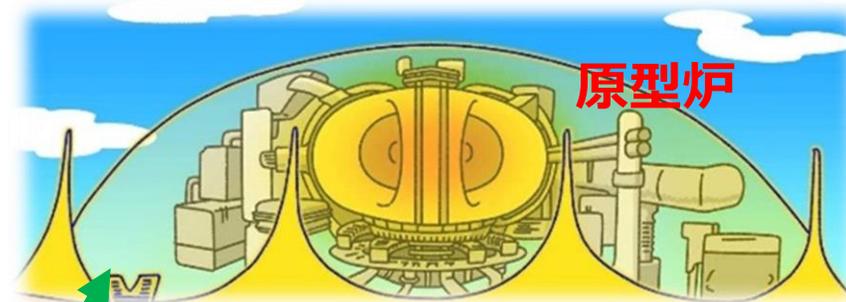
JT-60SA計画の役割

Role of JT-60SA project

フュージョンエネルギーの経済性向上（装置の小型化等）には、高いプラズマ圧力での運転手法の開発が必要不可欠



ITERは「後輪」
 実際の燃料を用いて安定な運転を実証



<JT-60SAが担う役割>

- 「運転手」
 世界唯一の高圧カプラズマ実験装置で、**我が国の次世代リーダー**を育成
- 「前輪」
 先んじて課題を抽出し、**ITERを主導**
- 「ギア」
 ITERよりも高い圧力で効率的な運転を開発し、**装置の小型化・高度化を実現**

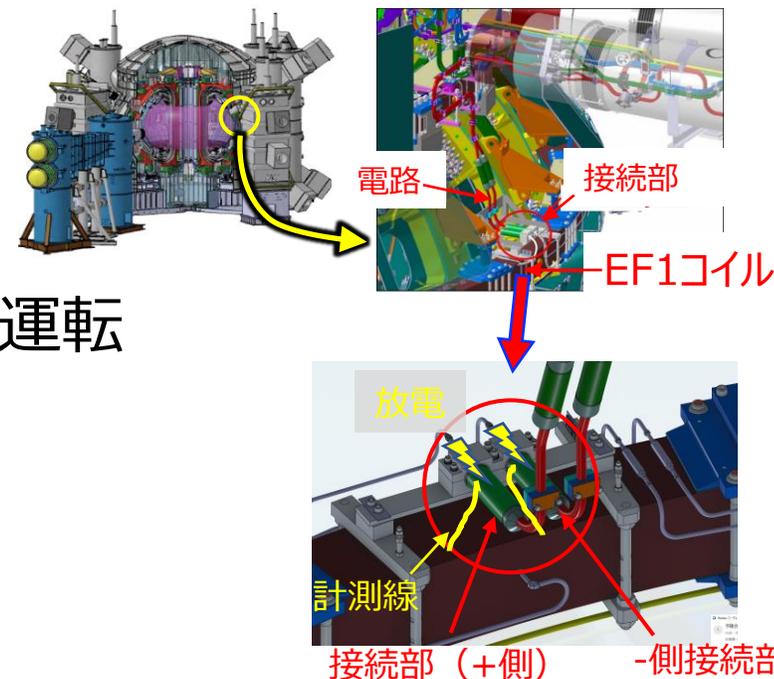
フュージョンエネルギーの実用化には、ITERとJT-60SAが共に必要

統合試験運転 Integrated commissioning

2013年 組立開始 → 真空容器、各コイルの組立据付精度1mm以内
2020年 組立完了 → 統合試験運転開始

※ 統合試験運転の流れ

- ①真空容器・クライオスタットの真空排気 → ②コイル冷却
- ③超伝導遷移確認 → ④コイル通電試験 → ⑤プラズマ運転



2020年12月 ③までは順調に完了 → ④コイル通電試験
2021年3月 ④の最中にEF1電路接続部で短絡事象が発生
→ 絶縁構造に問題 → 補修必須

2023年5月 補修完了（約2年間：同/類似構造の電路、約100箇所を補修）
CS/EFコイルへの不要な印加電圧（リップルなど）低減のための改造
初プラズマに必要な性能を確保できたため、統合試験運転再開

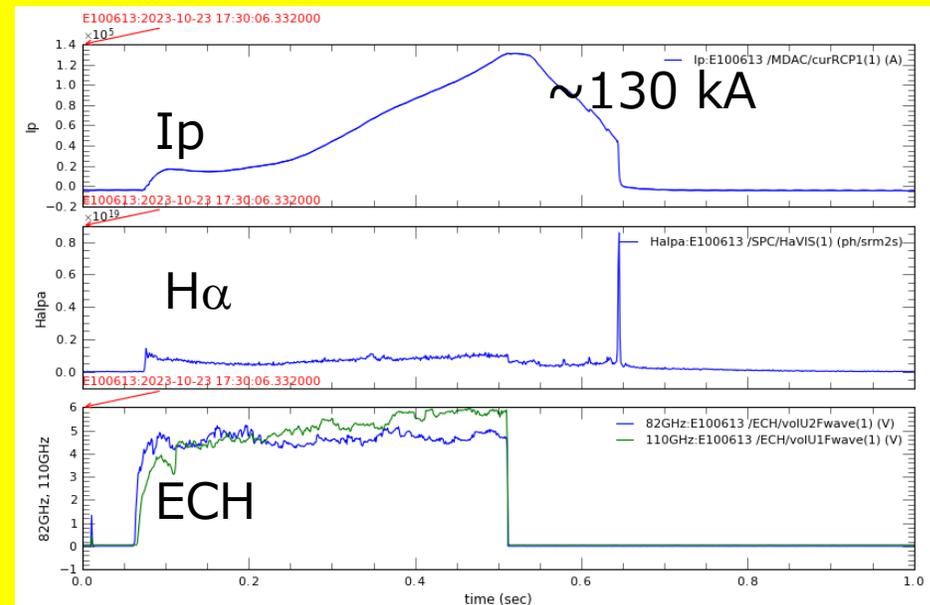
初プラズマ達成 Achievement of the first plasma

- 意義：国際協力の下、物納方式で建設した各機器・設備がシステムとして連携して機能し、世界最大の超伝導トカマク装置を完成・運転。→同様な方式のITERにも見通し。



10月23日：JT-60SA初プラズマ生成

- ✓ リミタープラズマ、 $I_p = 130 \text{ kA}$ @BT=2.04、放電時間0.5秒
- ✓ $\bar{n}_e \sim 3.2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, $T_e(0) \sim 0.3 \text{ keV}$, Heガス
- ✓ ECH 82GHz: 0.8MW、110GHz: 0.5MW



MA級のダイバータプラズマ達成

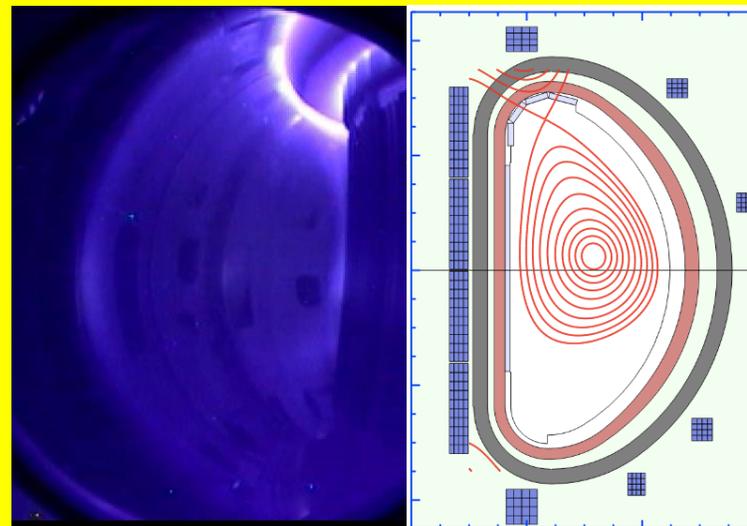
Achievement of MA-class divertor plasma

- 意義：プラズマを使って超伝導装置での位置や形状の制御を実証し、ITERや原型炉でのより大きなプラズマの制御も見通す。



11月27日：MA級ダイバータプラズマ生成

- ✓ $I_p=1.0\text{MA}$ @BT=2.04、放電時間10秒、フラットトップ1.5秒
- 今回の最大プラズマ電流のプラズマ放電
- ✓ $I_p\sim 1.2\text{MA}$, $\bar{n}_e\sim 5\times 10^{18}\text{ m}^{-3}$, $T_e(0)\sim 1\text{ keV}$, $k\sim 1.6$
- ✓ ECH 82GHz: 1sec、110GHz: 3.5sec



JT-60SA運転開始記念式典（2023年12月1日）

JT-60SA inauguration ceremony (Dec. 1st, 2023)

- 盛山文科大臣、高市科技担当大臣、シムソン欧州委員のご臨席のもと、1MAダイバータ放電を披露。共同プレス声明にて、JT-60SAの高度化支援、人材育成の共同強化を表明。
- 世界最大トカマクの称号をJETからJT-60SAに継承。

プラズマデモンストレーション



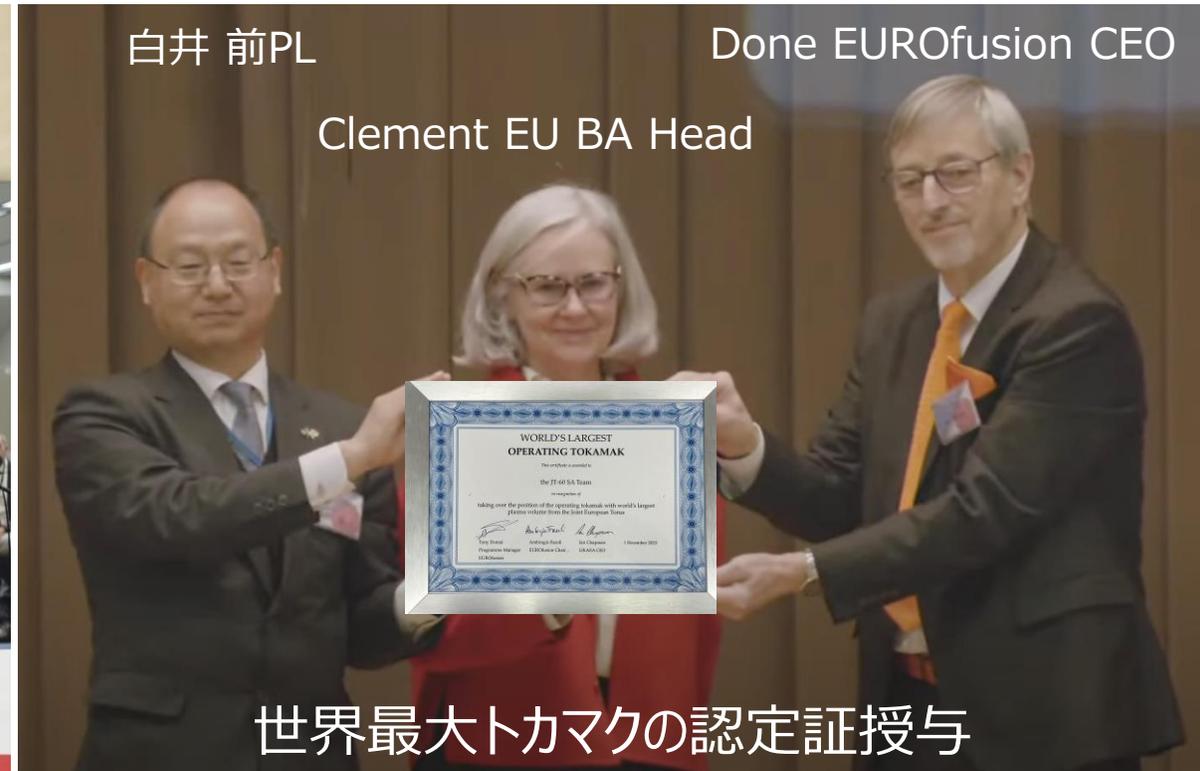
シムソン委員

盛山大臣 高市大臣

白井 前PL

Done EUROfusion CEO

Clement EU BA Head



世界最大トカマクの認定証授与

今後の予定：装置増強

Future plan : Machine Enhancement

- 容器内機器、加熱装置、計測装置などの装置を増強。
- その後、本格的なプラズマ加熱実験を実施。

統合試験運転では、

- 容器内機器：リミター、上側ダイバーター（炭素タイル）
- 計測装置：CO₂干渉計/偏光計、可視カメラ/分光器、EDICAM、etc…
- 加熱装置：ECRF（入射パワー1.5 MW）

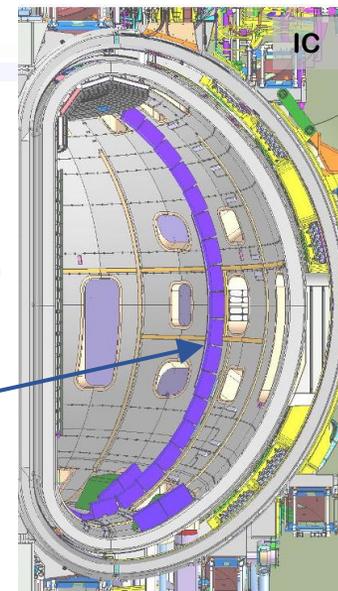


装置増強（容器内機器の据付など）では、

- 安定化版：冷却水配管付きヒートシンク+炭素タイル
- 容器内コイル：
 - 誤差磁場補正コイル（EFCC）
 - 抵抗性壁モード安定化コイル（RWMC）
 - 高速プラズマ位置制御コイル（FPPCC）
- ダイバータ：第一壁（炭素）+ CuCrZrヒートシンク
- 加熱パワー：3 MW(ECRF) + 16/23.5 MW (H/D NBI)
- 計測装置：トムソン散乱、ECE、CXRS、etc…
- その他：クライオポンプ、ペレット入射装置、MGI

加熱パワー(1.5 MW)

リミター



加熱パワー
(H/D: 19/26.5 MW)

大量ガス入射装置(MGI)

炭素タイル

容器内コイル

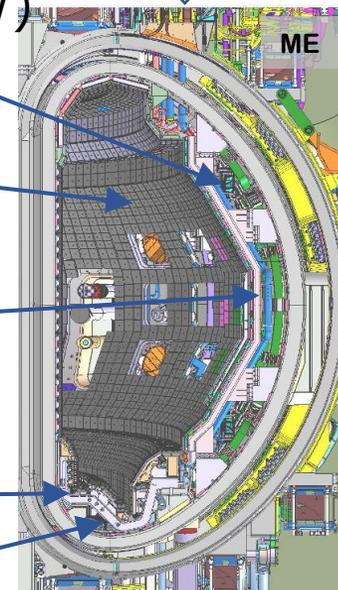
安定化板

ペレット

計測装置

ダイバータ

クライオポンプ



本格的なプラズマ加熱実験運転に向けて Toward JT-60SA full-scale experiment

トピカルグループリーダー

実験リーダー



Maiko Yoshida, Jeronimo Garcia, Hajime Urano

Operation Regime Development

Takuma Wakatsuki
(QST, Japan)



MHD Stability and Control

Gianluca Pucella
(ENEA, Italy)



Transport and Confinement

Luca Garzotti
(UKAEA, UK)



High Energy Particle Behaviour

Yevgen Kazakov
(LPP-ERM/KMS, Belgium)



Pedestal and Edge Physics

Nobuyuki Aiba
(QST, Japan)



Divertor, SOL and PMI

Tomohide Nakano
(QST, Japan)



- トピカルグループリーダーは2022年2月に任命。同年4月に実験チーム調整会合を開催。
 - ✓ 各リーダーの役割と活動予定を共有
- プラズマ実験フェーズに向けた活動とトピカルグループ会合を開始。
 - ✓ 装置増強後の重要な実験項目と今後の研究活動
 - ✓ 実験目的に基づいた優先順位の高い計測器とアクチュエータ
 - ✓ 最新研究の報告、JT-60SAに関する発表内容のレビュー
- 実験チームへの参加：国内分は炉心プラズマ共同研究を通して

JT-60SA国際フュージョンスクール (JIFS)

JT-60SA International Fusion School

- 2023年9月4~15日：第1回目JIFSを開催
- 将来国際的に活躍できる人材の育成
- 日欧、ITER機構から第一線の研究者24名の講師
- 開校式、座学、実験、懇親会
- JT-60SA運転開始記念式典の際に署名された、共同プレス声明を受け、さらに強化して来年も実施予定



まとめ

Summary

- ITER機器の調達
 - 超伝導トロイダル磁場コイルの全数製作完了
 - タングステンダイバータなど他の調達機器の調達も本格化

- JT-60SA計画
 - 超伝導コイル絶縁の補修、超伝導コイルへの不要な印加電圧低減などを終え、初プラズマに必要な性能を確保できたため、統合試験運転を再開
 - 10月23日、初トカマクプラズマ達成！
 - 11月27日、MA級ダイバータプラズマ生成に成功！
 - 12月1日、JT-60SA運転開始記念式典
 - 成功裏に統合試験運転を終え、装置増強に着手

- JIFSなどの機会を利用した人材育成と、フュージョンテクノロジー・イノベーション拠点などを通じた産業界との連携