

2022年3月8日(火)13:00-17:00

ITER/BA計画の現状と展望

— 量研の活動最近のハイライト —

核融合エネルギーフォーラム第14回全体会合
「核融合の拓く未来を九州から」
共催：九州大学応用力学研究所



栗原研一
量研・量子エネルギー部門長

日本の研究開発の進め方: 実用化への道

1976年-2008年

1992年-現在-2040年代

~2050年頃~

試験装置

実験炉

原型炉

実燃焼を起こし持続させる研究開発

原型炉

発電実証
経済性が見通し

商用炉で電力供給へ

JT-60計画

超高温プラズマの
実現 (1990年代)

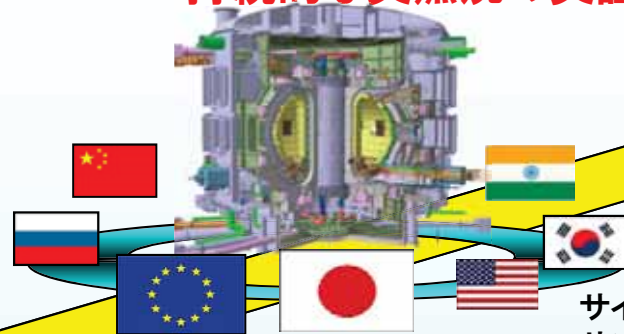
世界最高のエネルギー増倍率
1.25(実燃料換算値)
世界最高イオン温度
5.2億度



【那珂研究所】

国際熱核融合実験炉ITER

持続的な実燃焼の実証 50万kW



サイト: フランス
サン・ポール・レ・デュランス市
(カダラッシュ)

ITERを支援する
JT-60SA計画

【那珂研究所】



ITERで
できないことを補う

ITERを利用する

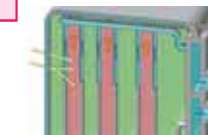
実燃焼を活用する研究開発

原型炉設計

【六ヶ所研究所】



ブランケット開発



構成材料の開発



中性子照射
試験施設の開発



日欧共同事業
「核融合エネルギー研究分野における幅広いアプローチ(BA)活動」も活用して実施

ITER計画

実験炉ITER計画

実燃料で持続的な燃焼反応の実証

熱出力 50万kW, エネルギー増倍率10(外部加熱5万kW)

約30m

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
実燃料運転 2035年

ビゴ機構長



多田
副機構長



ITERプロジェクト



TOKAMAK
& PLANT SYSTEMS

ITERハイテク機器は、日本企業が貢献



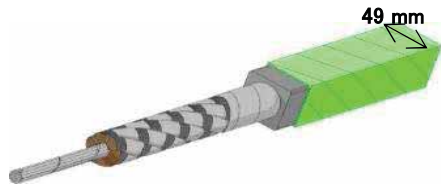
90.4%の調達取決め締結
FOAK (First of a Kind:
世界初唯一無二) 機器

極低温-269°Cでも十分な強度を持つ
窒素含有鍛造ステンレス材の最高強
度部は日本製鋼所のみ製造可能。

三菱重工
三菱電機
東芝エネルギーシステムズ
日鉄エンジニアリング
JASTEC
日立金属ネオマテリアル

中心ソレノイド(CS)コイル

日本分担: CSコイル導体(全数)



日鉄エンジニアリング
JASTEC
古河電気工業
日立金属ネオマテリアル

トロイダル磁場(TF)コイル

日本分担: TFコイル導体



33導体(25%)

TF構造物

19機分(全数)

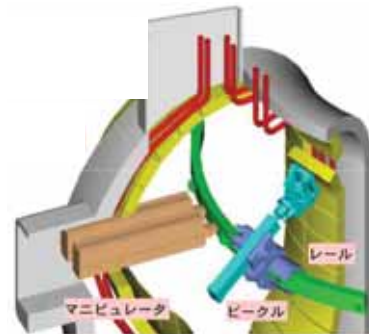
TFコイル巻線・一体化

9機分(47%)

プラズマ計測装置(一部)

日本分担: 電子温度・密度計測、中性子
計測など5つの計測装置(約15%)

ブランケット遠隔保守機器

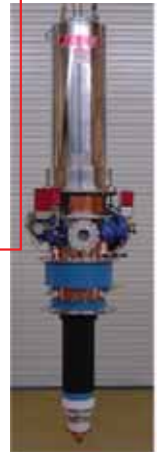


東芝
エーテック
スギノマシン
愛知産業

高周波(EC)加熱装置

日本分担: ジャイロトロン8基
(全体の1/3)、水平ランチャー
(ポートプラグを含む)

東芝
三菱重工
トヤマ
岡崎製作所
清原光学



キャノン電子管デバイス
東京電子

ダイバータ外側ターゲット



金属技研
アライドマテリアル
大和合金・三芳合金工業

三重水素プラント

日本分担: 三重水素除去系



日揮

中性粒子入射加熱装置

日本分担:

1MV電源高電圧部 3機(全数)
高圧ブッシング 3機(全数)
加速器 1機(33%)



日立製作所
京セラ

ITER建設サイトの現状

初プラズマまでの組立て進捗度 **約76%** 到達(2021年12月末)

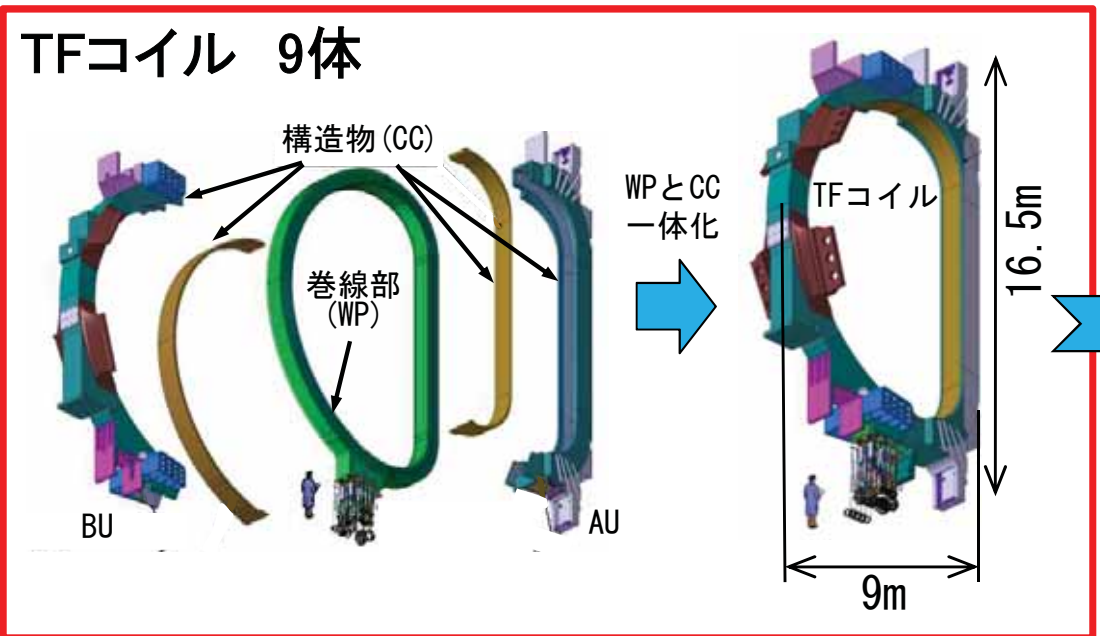


トロイダル磁場(TF)コイル – 全体進捗状況

日本の調達責任



工場からITERサイトへ輸送(第6号機)



構造物:19体

**日本9体
欧州10体**

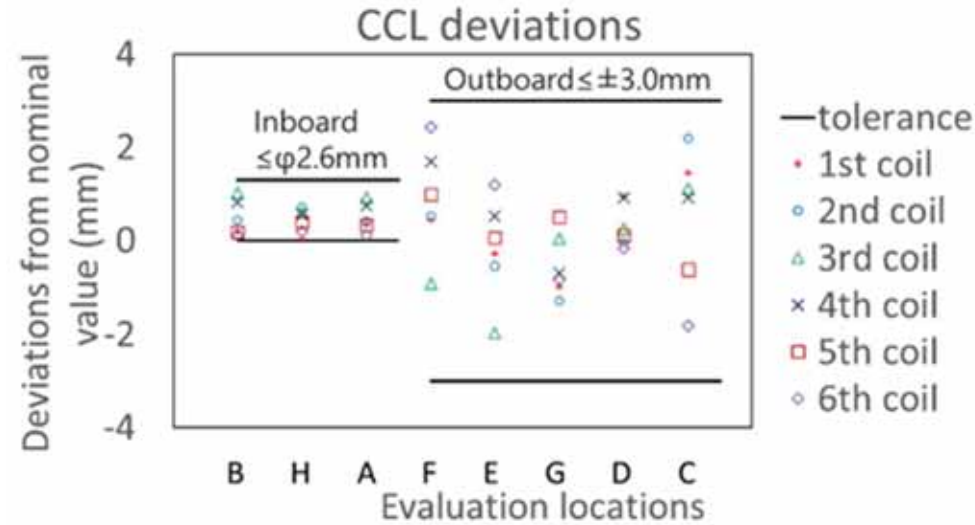
巨大な電磁力からTFコイルを守る大型構造物の全量製作を完了

| 担当 | | 日本向け | | | | | | | | | 欧州向け | | | | | | | | | |
|-----|----|------|---|---|---|---|---|---|---|---|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| 号機 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 構造物 | 内側 | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M | M |
| | 外側 | M | M | T | M | T | M | T | T | M | H | H | H | H | T | T | T | T | T | T |
| | 出荷 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 巻線部 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| コイル | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

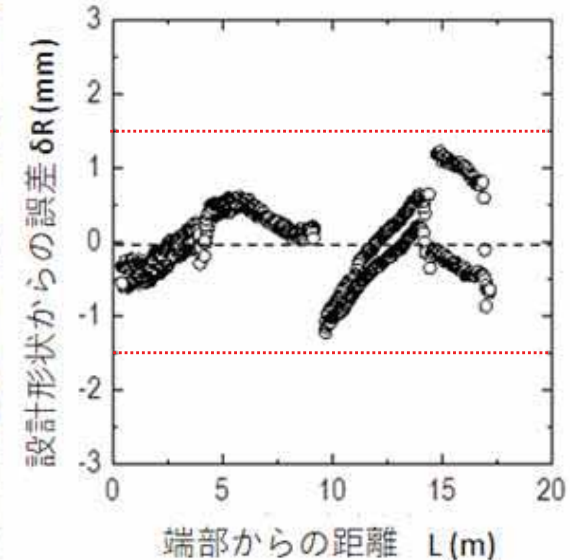
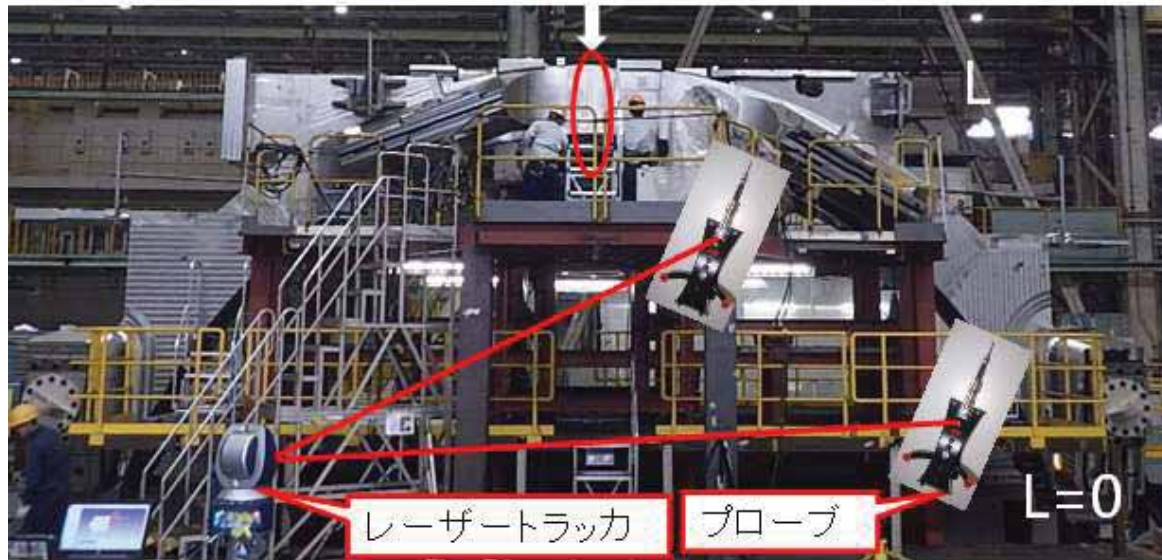
課題克服例1: トロイダル磁場(TF)コイル - 高度な技術で目標達成

大型構造物の溶接技術を確立

- 高精度の測量技術で、適宜変形量を計測、形状矯正を行うことで、一体化中のCCL位置を常に把握しながら製作を進めた。その結果、全てのTFコイルについて、CCL位置公差を達成
- 溶接中にレーザートラッカで厚板の構造物形状を高精度に計測、溶接変形をリアルタイムで補正・矯正することで、溶接変形による製作誤差を±1.5 mm以内に制御することを実現(機械加工工程を短縮)



溶接継手



高周波加熱装置 – ジャイロトロン全数の製作を完了

- ITERジャイロトロン
全8機、その補機等
の製作を完了



- ジャイロトロン5号
機の性能確認試験
完了

- 全8機分の加速
電源等がITERサ
イトに到着

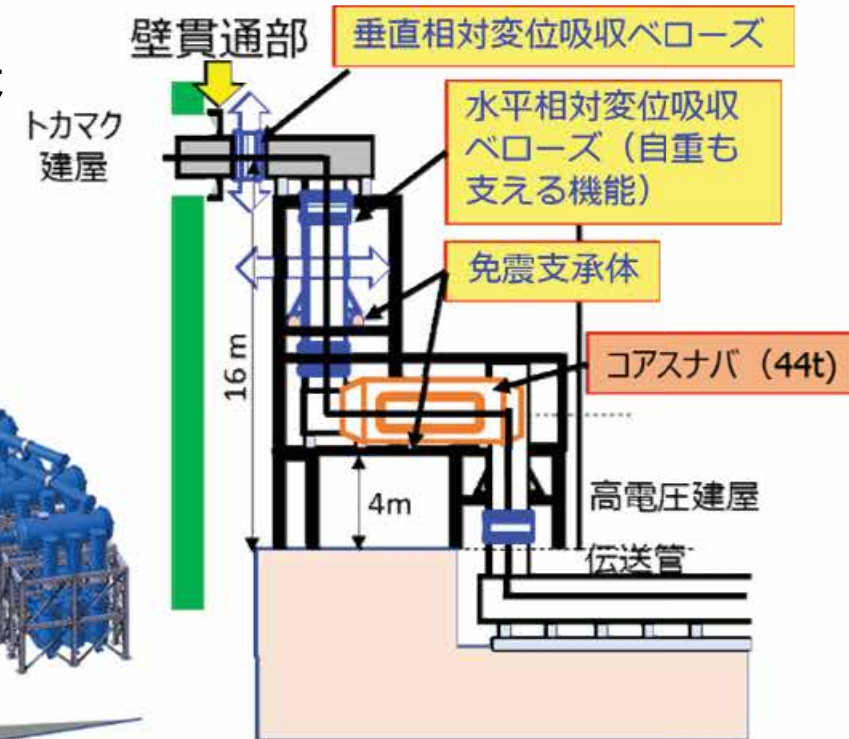
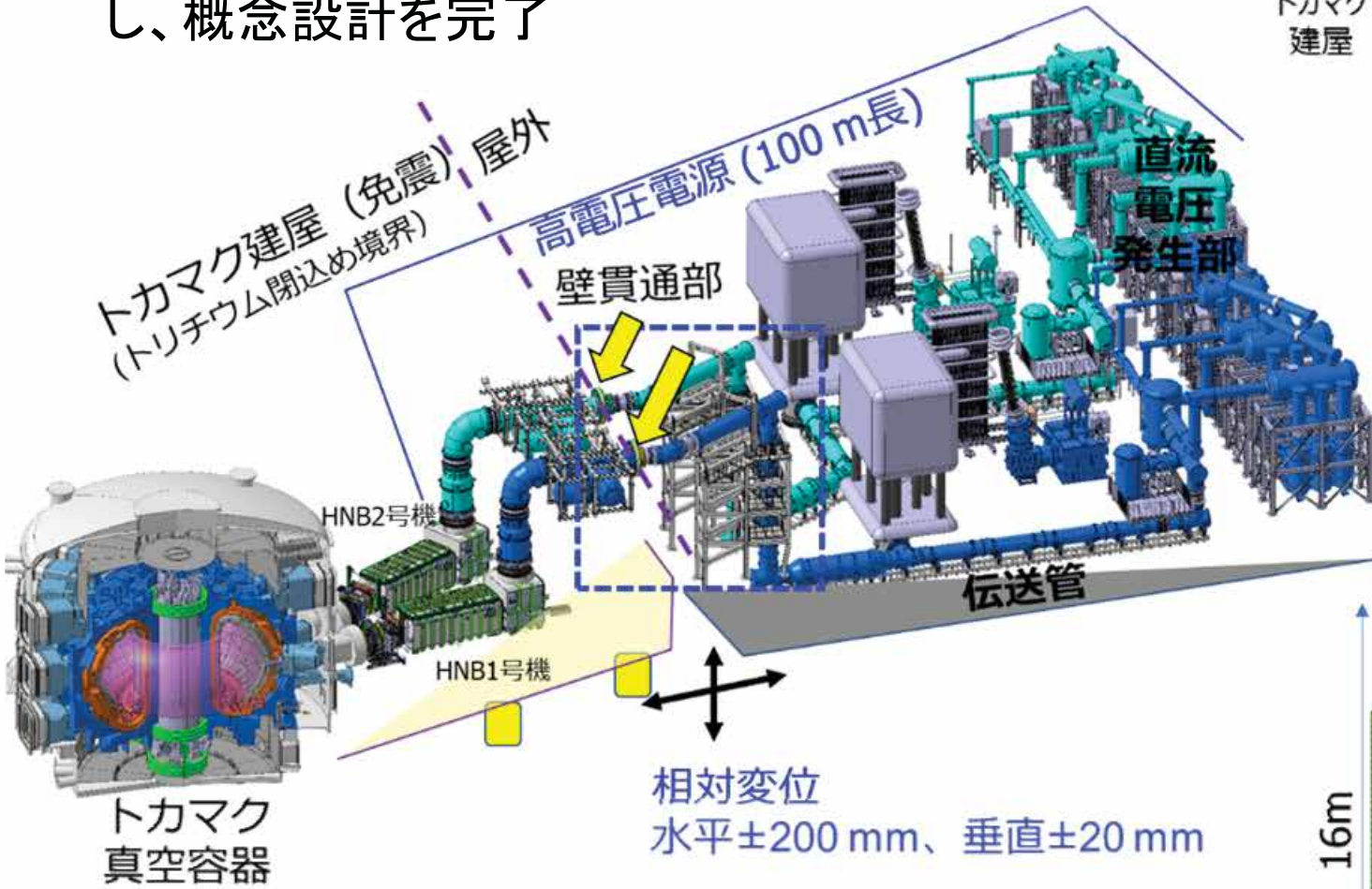


- ITERジャイロトロン
の輸送開始。



課題克服例2 中性粒子入射加熱装置 - 原子力安全機器概念設計

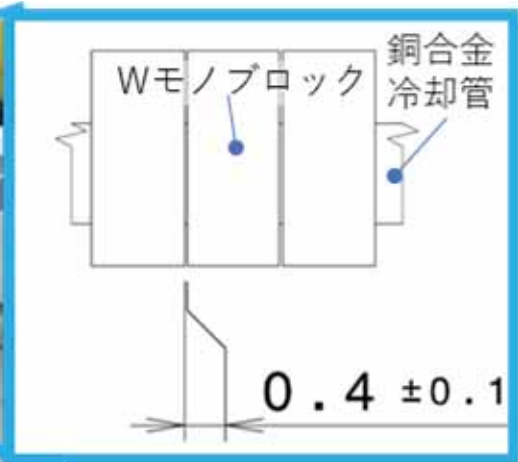
70トンを超える重量物に対して、地震時の**免震・非免震間**の相対変位を吸収する設計は非常に困難。ベローズの構造と免震支承体の組み合わせを工夫し、概念設計を完了



既存の原子力施設でこのような大型構造物が建屋壁を貫通する事例はなく、新しい技術を開発したものの

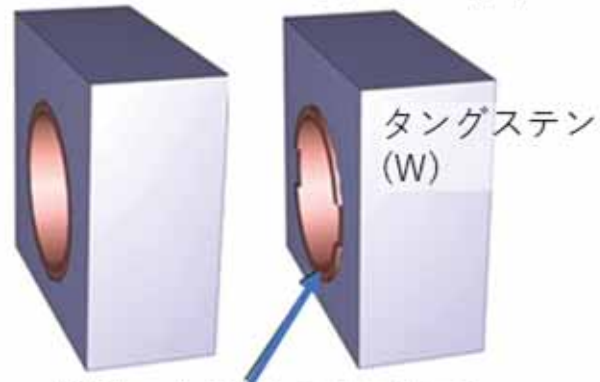
ダイバータ - 高熱負荷試験用テストアセンブリ完成

ITER機構が実施するプラズマ対向ユニット(PFU)の製作認証試験の一つである高熱負荷試験に向けて、PFUプロトタイプを8本製作し、これらを試験架台に取り付け、**高熱負荷試験の準備を計画通り完了**



PFUではWモノブロックの間隔を開け、銅合金冷却管に接合されている。

従来型 Wモノブロック 新型スペーサ付きWモノブロック



新型は無酸素銅緩衝層を突起状(高さ0.4mm)に加工

BA活動等

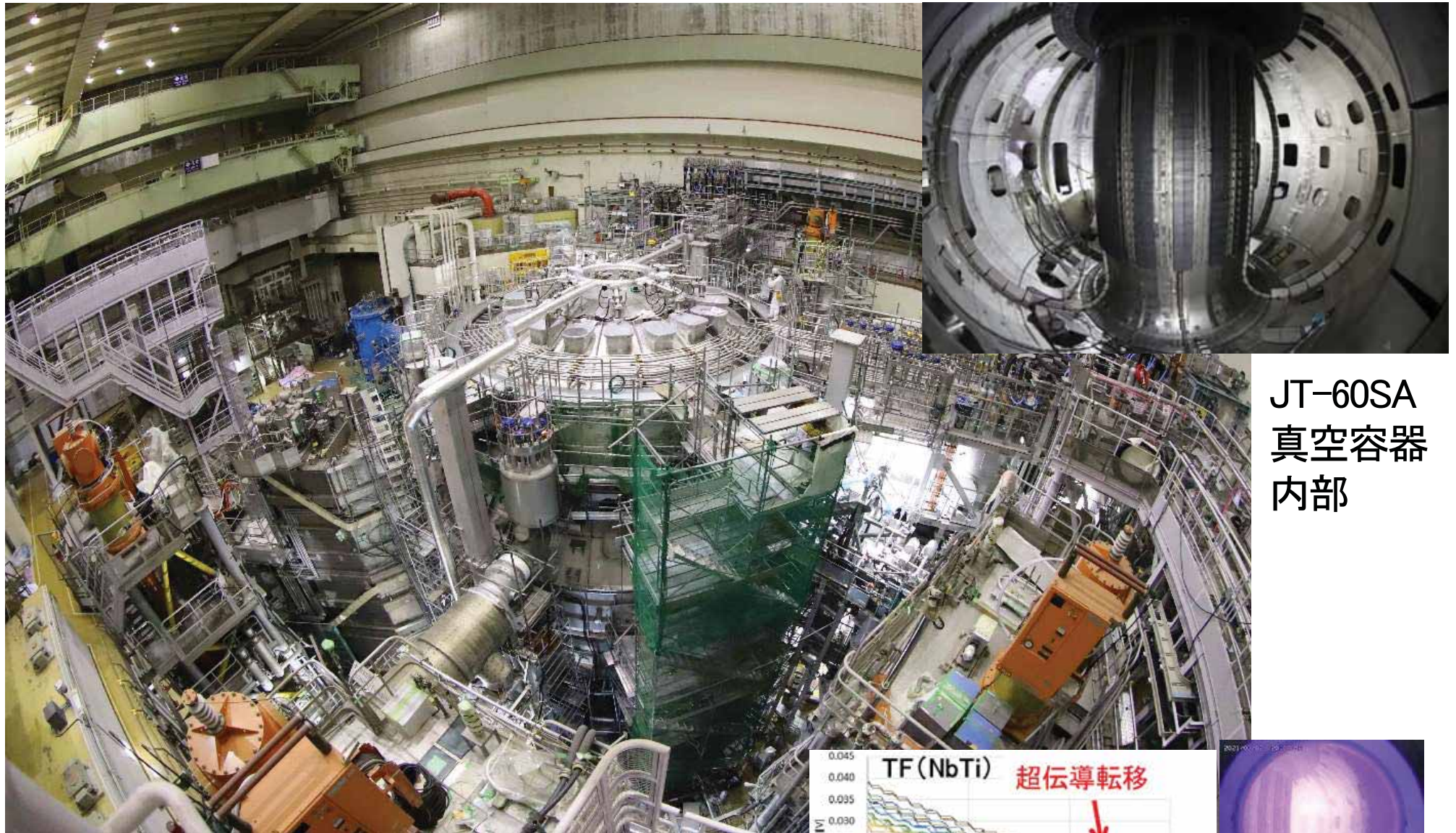
○JT-60SA

○IFMIF/EVEDA

○ブランケット開発

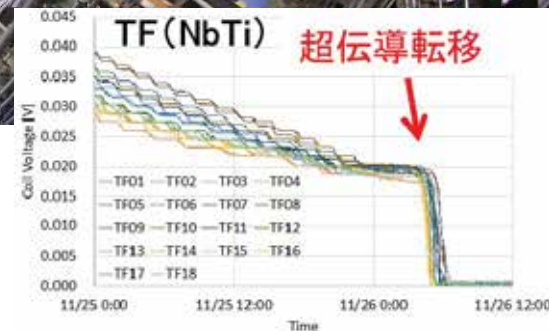


大型実験装置JT-60SA (Super Advanced)



JT-60SA
真空容器
内部

2020年11月27日に全ての超伝導コイルが超伝導化。2021年3月高周波入射によりプラズマ着火。**2022年秋頃の初プラズマ着火を目指す。**



ECRプラズマ

その後のJT-60SA統合試験運転と経緯：地絡事象の発生

R2年4月より統合試験運転を開始

【目的】設計通り運転できること/プラズマが想定通りに制御できることの確認

コイル通電試験中に達成した電子サイクロトロン共鳴 (ECR) プラズマ

→ 真空排気とリーク試験

→ 極低温機器調整運転

→ 超伝導コイル冷却

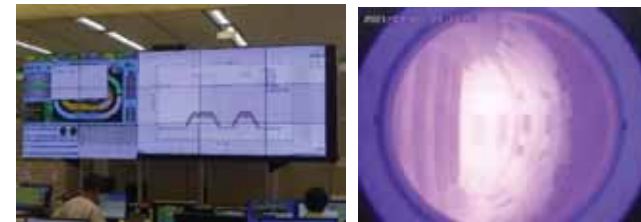
→ ベーキング+リーク試験

→ コイル通電試験(TF:100%, PF:25%)

→ プラズマ運転

→ コイル通電試験(PF:100%)

→ プラズマ運転



開始 (R2年4月)

統合試験運転

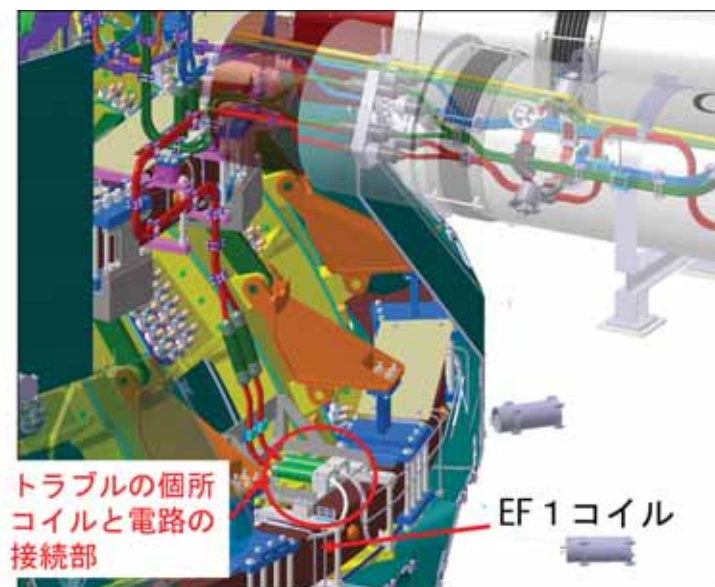
中断 (R3年3月)

➤ コイル通電試験の最終段階でEF1コイルの電圧制御試験中にトラブルが発生

- 超伝導コイルへの電流が増加
- 電源の過電流インターロックが作動し電流を遮断
- JT-60SAは安全に停止 統合試験運転を中断

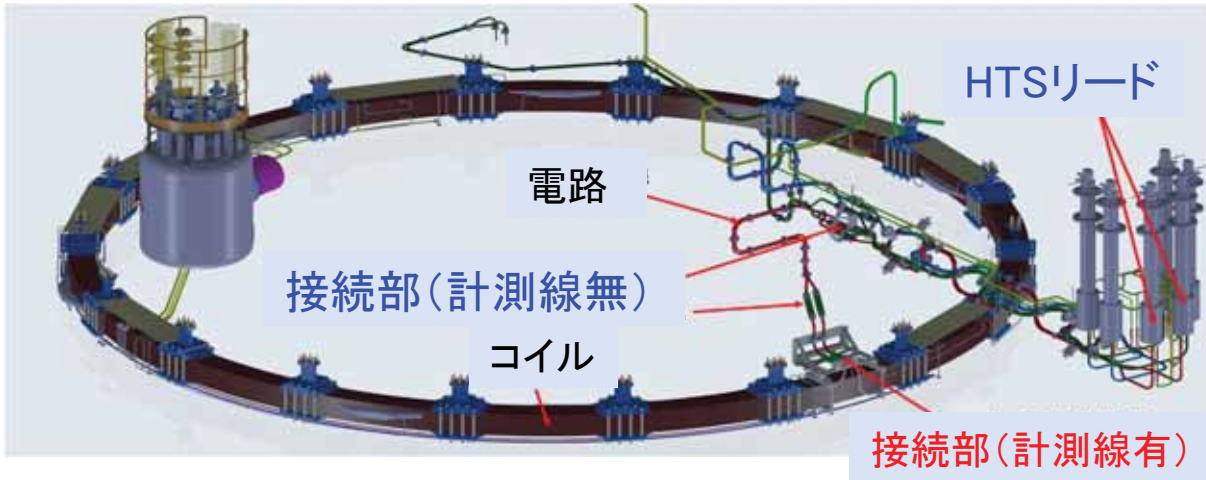
コイル昇温後4月8日から実施した調査の結果

- 超伝導コイルに近い電路の接続部の外殻に放電痕
- 超伝導コイル自体に損傷はない
- 日本と欧州の専門家により、事象の根本原因を特定するための解析を実施、対策を策定



超伝導コイル接続部の補修改修計画を立案と実施

- ・改良絶縁方法と試験方法をモックアップを用いて確立
 - ・補修と水平展開改修を実施（局所耐電圧試験を含む）
 - ・放電しやすい圧力における耐電圧試験（パッシュェン）試験を実施
- 十分な改良と試験の後、統合試験の運転を再開することとした

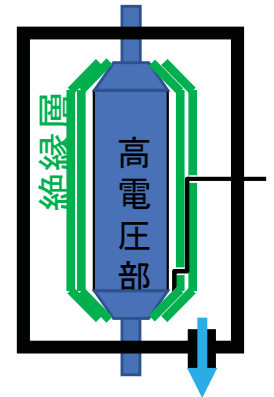


- 接続部計測線の施工を改善
 - ・絶縁施工を強化
 - ・局所限界耐電圧試験を導入
- 同じ構造の箇所だけでなく、類似箇所も絶縁を強化して再発を防止

全84か所

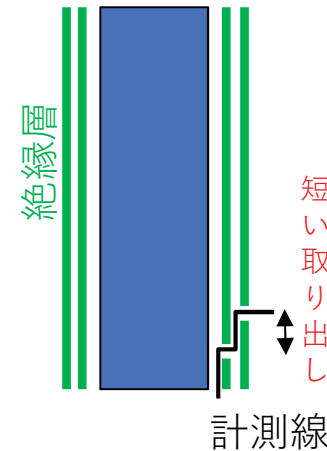
統合試験運転は遅延することとなったが、損傷した接続部を効果的に修復するとともに、同様の事象の再発防止につなげるとともに、ITERに経験知見を提供

局所限界耐電圧試験
(パッシュェン試験)

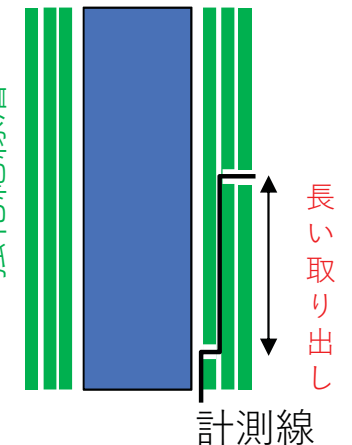


真空排気して放電しやすい圧力へ改良

絶縁性能不足

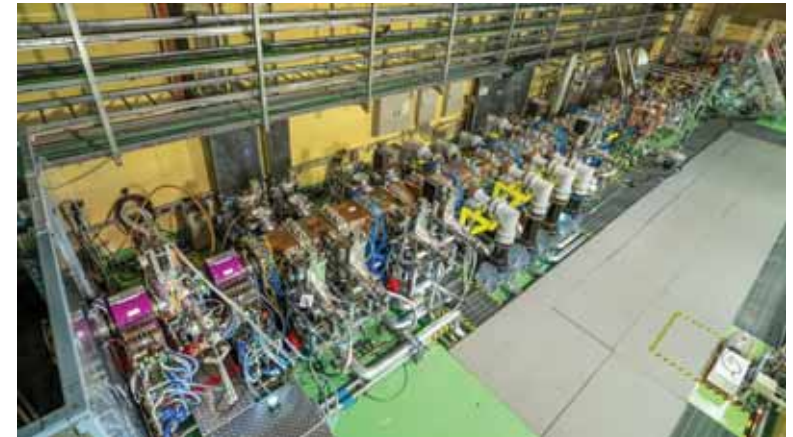


強化絶縁層

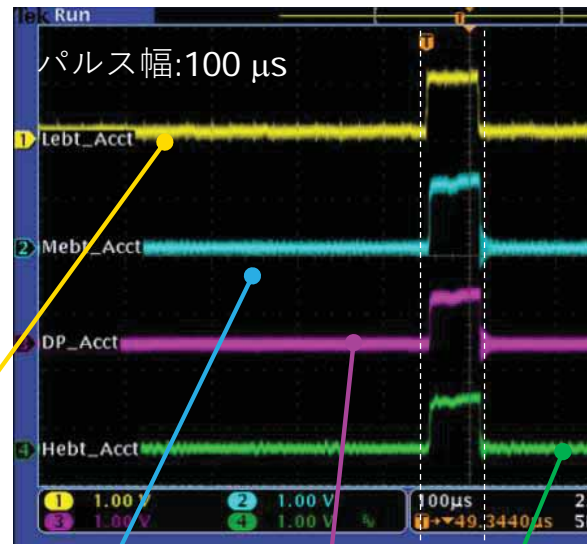


IFMIF原型加速器の 5MeV重陽子ビーム加速試験を7月に開始

高周波四重極加速器 (RFQ) と大電力ビームダンプを組み合わせた長パルス重陽子ビーム試験として、新設したビーム輸送系に
2021年7月に初めてビームを入射し、**大電力ビームダンプまでの5MeVx16mAビーム加速に成功**

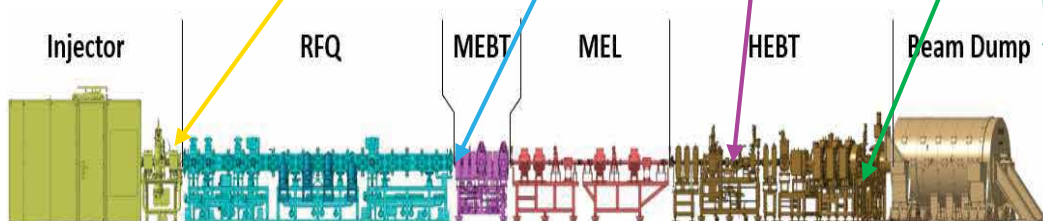


試験中のIFMIF原型加速器



六ヶ所の遠隔実験室

ビーム電流:
約16 mA
ほぼ100%ビーム
ダンプに到達

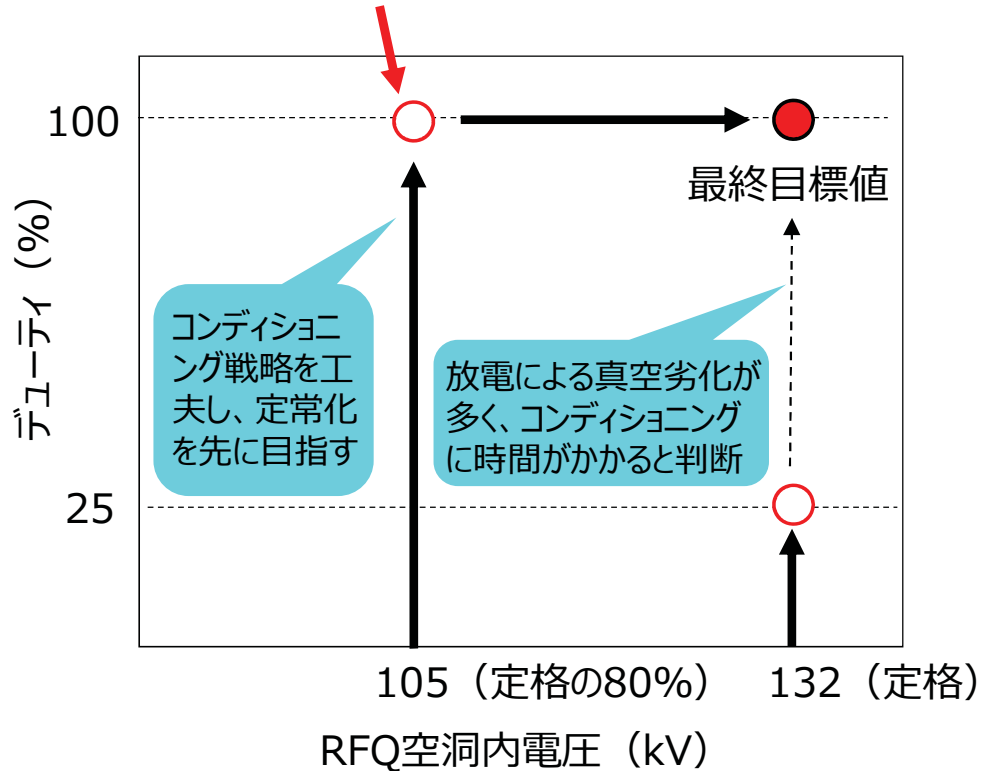


遠隔データ転送システムを利用して欧州から参加

RFQの高周波コンディショニングの定常化に成功

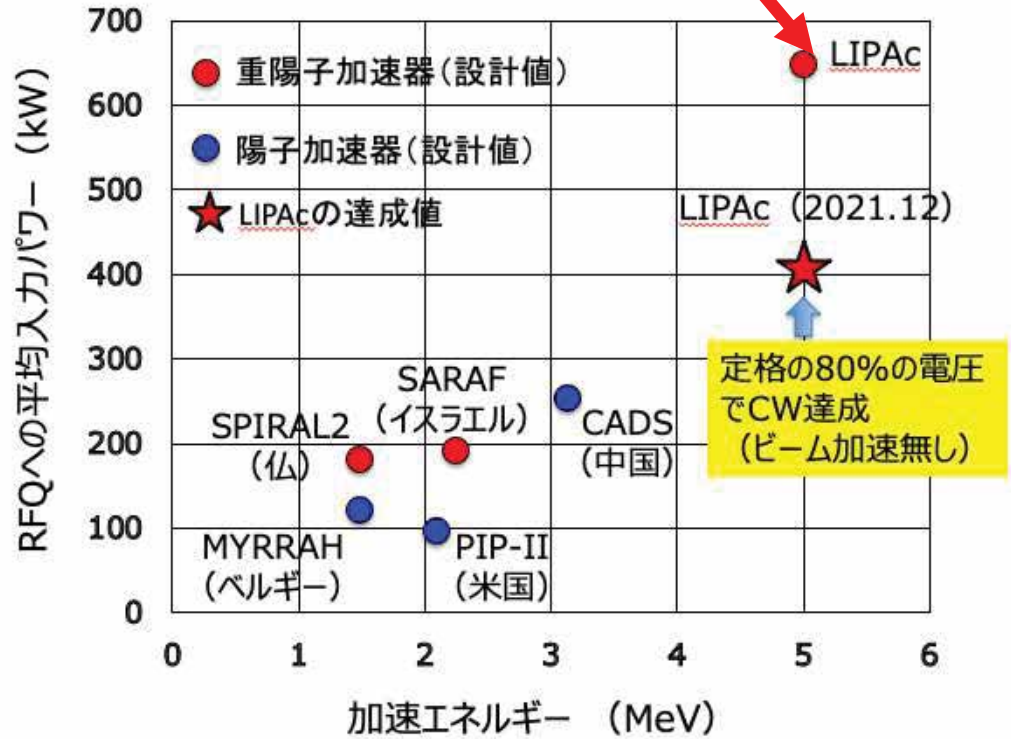
- 重水素加速の定格132 kVでDuty 25% (パルス幅5ms、繰り返し50Hz) までのRFQのRFコンディショニングを完了
- 重陽子ビーム加速に必要な定格電圧132kVの約80%の105kVの電圧で**定常動作 (CW) までのコンディショニングに成功。**

R4年度に計画していたRFQのコンディショニングの定常化を、高周波システムの安定化、欧州との連携により**前倒して達成**



LIPAcのRFQは世界中の定常イオン加速器の中でも**非常にチャレンジングな性能**

- 世界最長 9.8m
- 大電力入射 650kW
- 8系統の同期入射



ブランケット工学試験棟・安全実証試験装置整備

- ITER-TBMの詳細設計は2025年末の最終設計承認に向け段階的に進展。
- 最終承認に向け必要な検証データ取得のため、ブランケット工学試験棟が2021年6月竣工し、TBM安全実証試験装置製作・据付が進展



完成したブランケット工学試験棟

- TBMシステムの最終設計承認に必要と考える高温高压水に関する4つ安全実証試験を計画
- 装置の製作を進め、ブランケット工学試験棟へ据付開始
 - 高熱負荷試験: ITERと同等の表面熱負荷: 除熱性能、健全性の検証
 - 高温高压水噴出試験: In-Box LOCA模擬: 圧力・温度応答、筐体構造健全性の検証
 - Be-水蒸気反応試験: In-Box LOCA模擬: Beと水蒸気/水との反応性検証
 - 流動腐食試験: 冷却水流動模擬: 構造材料腐食、放射化腐食生成物量評価



熱負荷試験装置



高温高压水噴出試験装置



流動腐食試験装置



ベリリウム-水蒸気反応試験装置

リチウム資源確保



- 電気自動車だけでなく、ハイブリッド自動車等や家庭・再生エネ用蓄電池に必要な**大型リチウム電池の市場は急拡大**。
- 海外リチウム生産量には限界があり、遅くとも2030年には需給バランスが崩れ、**リチウム資源が枯渇する予測**。

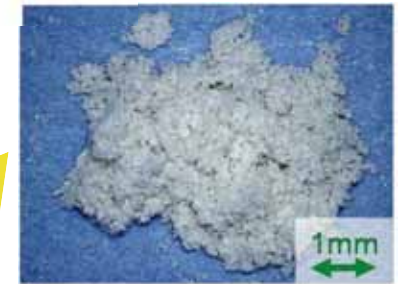
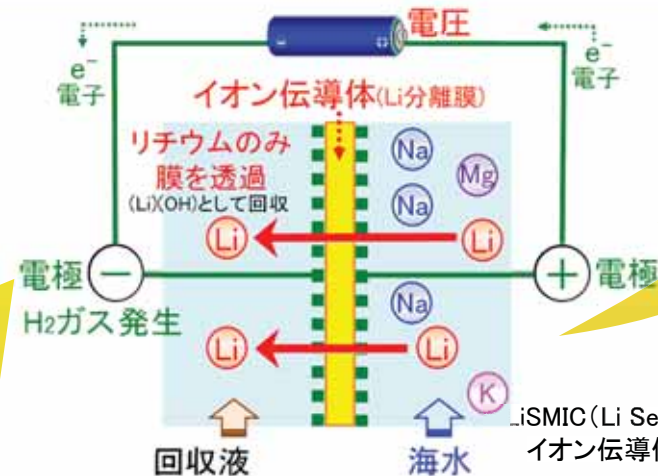
リチウム生産性を大幅に高める新技術「LiSMIC*」を開発



目標：電池原料の炭酸リチウム
 輸入価格約1500円/kgより、**製造コスト安い**。



LiSMICにより、リチウム資源の枯渇問題を解決へ



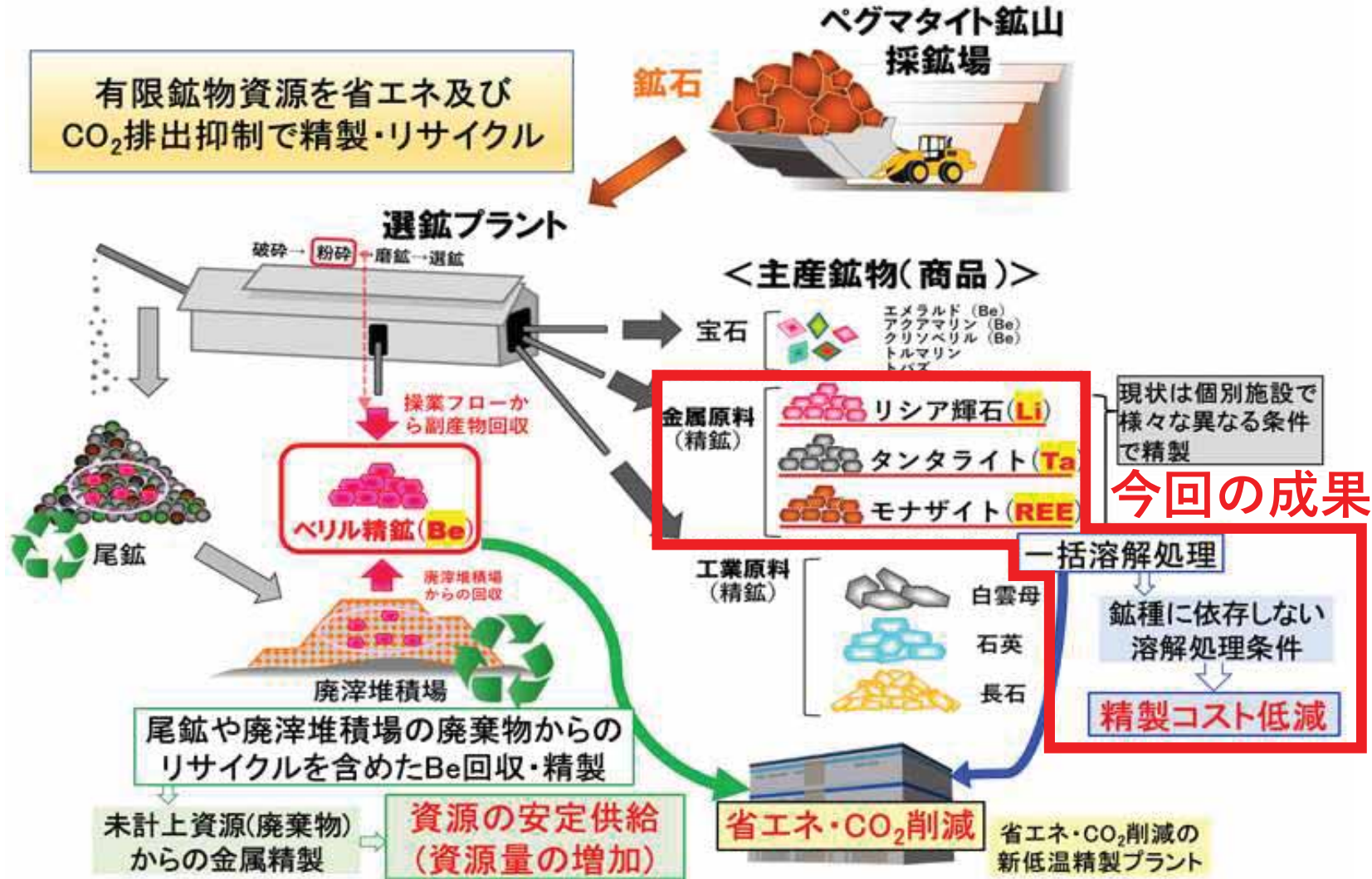
電池の原料となる
高純度リチウム

LiSMIC (Li Separation Method by Ionic Conductor)
 イオン伝導体をLi分離膜とし、Liのみを選択的に回収する技術

ベリリウム資源確保

革新的ベリリウム精製技術が、鉍種に依存しない技術に発展（六ヶ所研）
 - 複数鉍種の一括溶解処理に見通し -

JST「共創の場形成支援プログラム」においてQSTのベリリウム精製技術が、**鉍種に依存せず**に**ほぼ同様の条件で溶解処理**できることを明らかにした。これにより、これまで個別施設で様々な異なる条件で精製していた**種々の鉍種を一括処理**できる可能性を見出した。



人材育成

JT-60SA実験チーム

- 実験チームの全ての活動を取り纏める**実験リーダー**(日本2名(量研職員)、欧州1名)が**任命**され、日欧研究者で構成される実験チームを発足。
- 専門グループ; **運転領域開発、MHD安定性と制御、輸送と閉じ込め、高エネルギー粒子挙動、ペDESTAL及び周辺プラズマ特性、ダイバータ/SOL/PWIのリーダー**(日欧各3名づつ)を選定。

オンサイトラボ

- 国内の大学等との連携(研究、人材育成)強化のために、那珂研究所に大学/NIFS計6機関の研究拠点(オンサイトラボ)を設置。

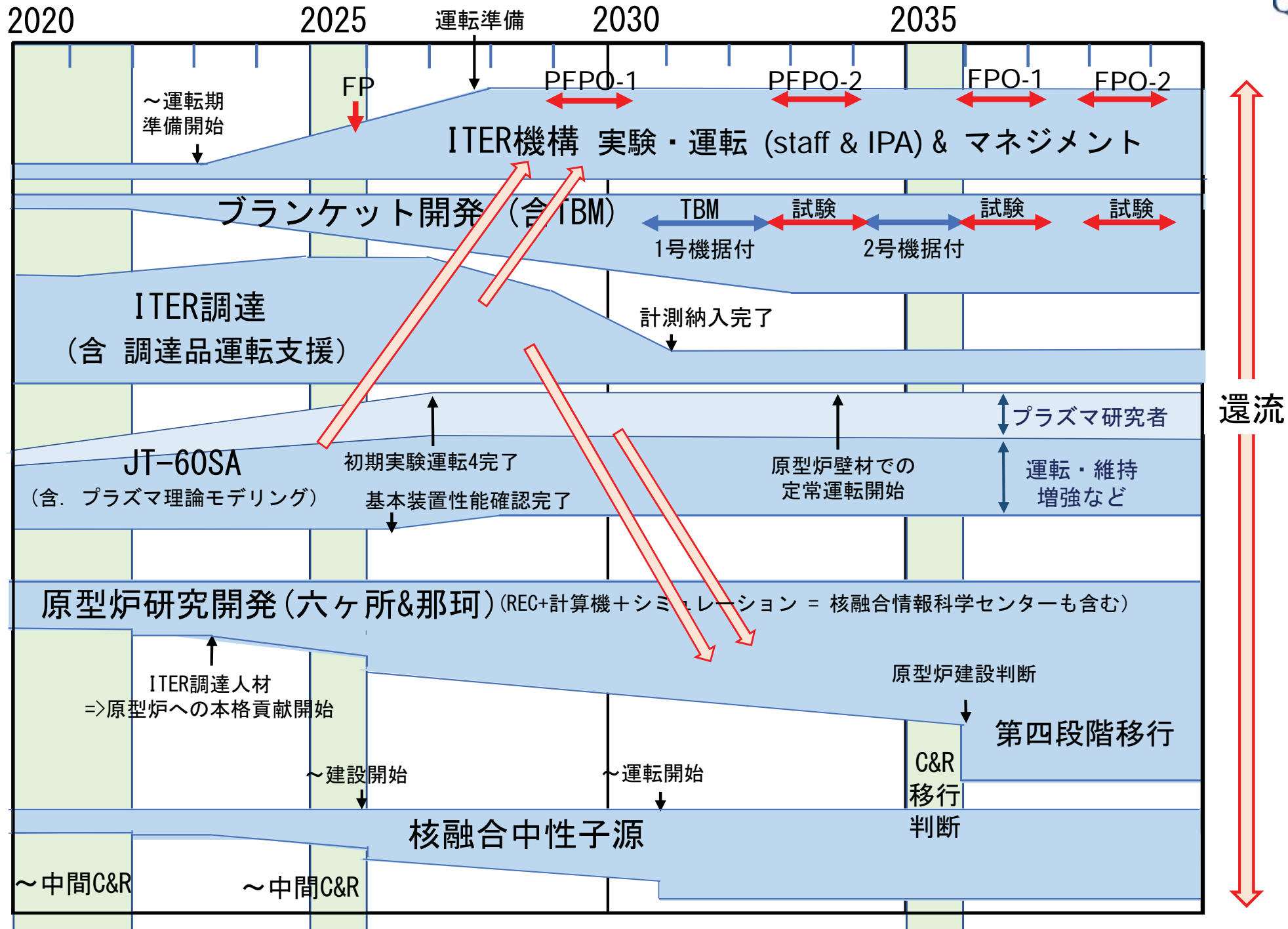
ITERにおける実験運転チーム案の議論

- 実験運転に向けた体制や各極の研究者参加の形態等を2021年集中的に議論。
- 今後、ITER機構科学運転ドメインにおいて引き継ぎ実施案へ。

ITER・原型炉に向けた人材育成

- 日本の人材育成・人材流動のイメージと人材規模増強。

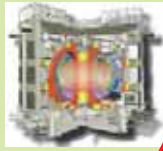
QST研究開発人材の増強と流れのイメージ図



ITER時代の研究者の人材育成パス

原型炉設計・建設・運転

ITER実験・運転チーム



ITER機構職員 含 実験リーダー等

協力研究者 として参加
(長期, 短期・遠隔)

ITER日本実験チーム(仮称)
QST・NIFS・大学参加 (QST運営)

産業界

NIFS・
総研大



LHD

教員

ポスドク*

学生*

*各大学からの特別研究員を含む

核融合理工学学術研究

実験・理論・機器開発・原型炉設計

大学



QUEST,
GAMMA10,
TST-2, LATE,
Heliotron-J,
学内連携組織
等

教員

ポスドク

学生

QST

教員

ポスドク

学生

職員

ポスドク

那珂&六ヶ所



JT-60SA

理論・モデリング
工学機器開発
原型炉設計

大学オンサイトラボ



欧州

ITER・原型炉に向けて必要な人員数の評価

2035年で約1200名（ITER派遣 約90名）

日本に必要な人材（産業界は別途必要）

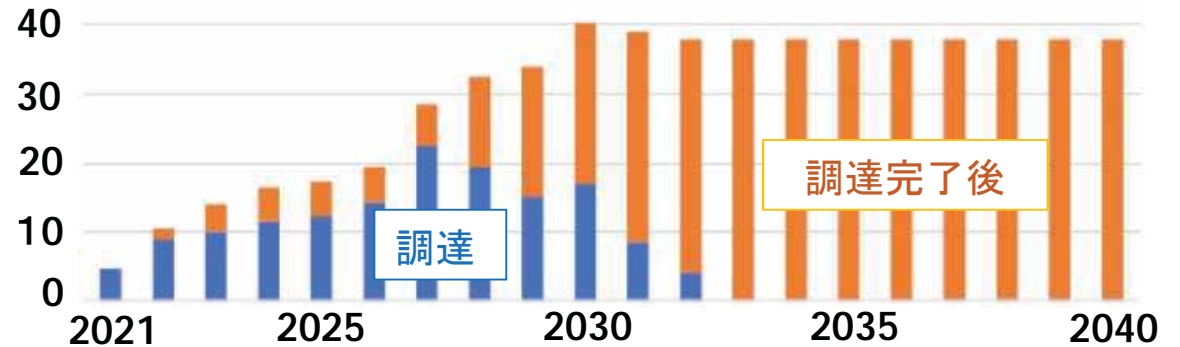
第12 回核融合科学技術委員会(H29)

| | 2035年 |
|----------------|-------|
| 炉設計 | 26 |
| 超伝導コイル | 60 |
| ブランケット | 58 |
| ダイバータ | 59 |
| 加熱・電流駆動 | 188 |
| 理論・シミュレーション | 93 |
| 炉心プラズマ | 240 |
| 燃料システム | 60 |
| 材料・規格基準(中性子源含) | 170 |
| 安全性 | 28 |
| 稼働率と保守 | 35 |
| 計測・制御 | 39 |
| 社会連携 | 33 |
| 合計 | 1089 |

（JT-60SA装置技術 80名含む）

ITER機構への派遣者

ITER調達機器分野



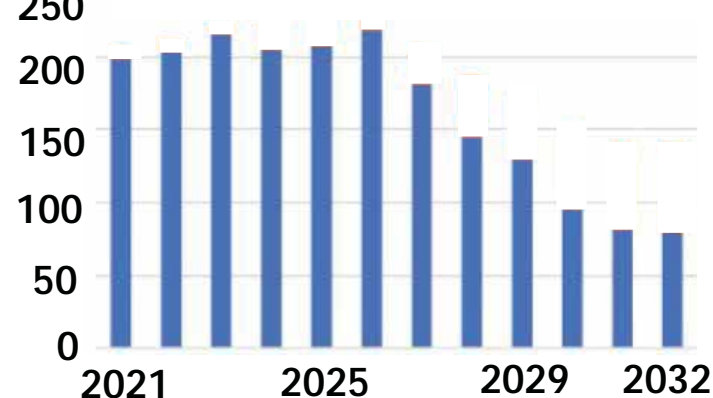
その他炉工学(2035年)

- 燃料サイクル: 4
- ブランケット: 3
- 規制安全性: 1

2035年 全約90名

プラズマ研究 (2035年): 40

ITER調達那珂研従事者



御清聴ありがとうございました。