令和５年３月１７日
核融合エネルギーフォーラム
第15回全体会合
筑波大学大学会館

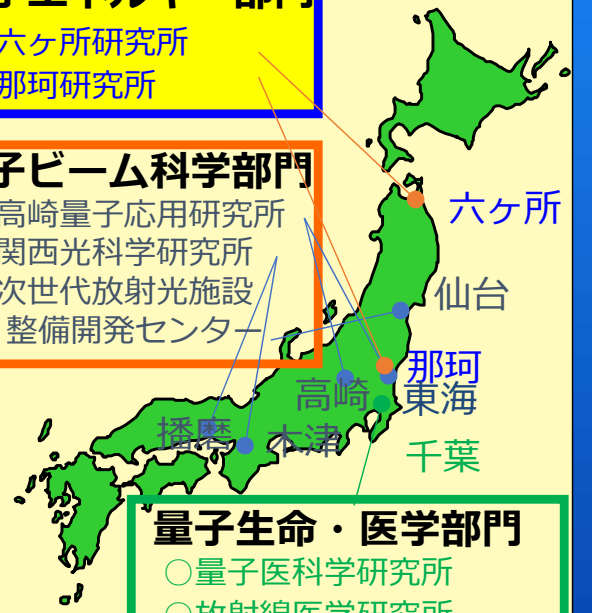
ITER/BA計画の現状と展望
- QSTの活動状況 -

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　池田佳隆

量研（QST）：3部門からなる総合研究機関

量子エネルギー部門
- ○六ヶ所研究所
- ○那珂研究所

量子ビーム科学部門
- ○高崎量子応用研究所
- ○関西光科学研究所
- ○次世代放射光施設整備開発センター

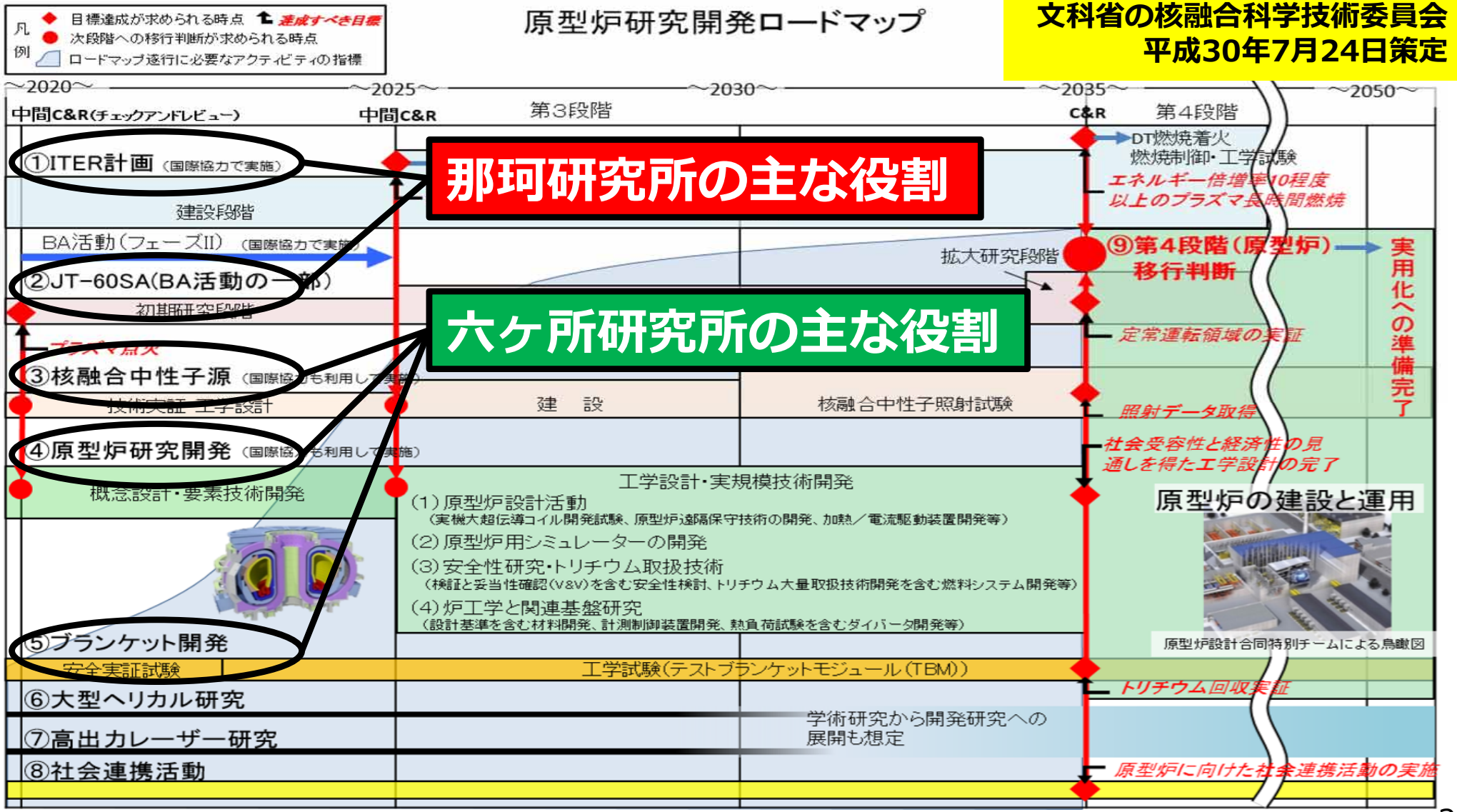


量子生命・医学部門
- ○量子医科学研究所
- ○放射線医学研究所
- ○QST病院
- ○量子生命科学研究所

ITER計画とBA活動（那珂研：JT-60SA、六ヶ所研：IFERC、IFMIF/EVEDA）の国際協力を活用し、核融合研究開発を推進

我が国の核融合開発戦略：原型炉研究開発ロードマップ

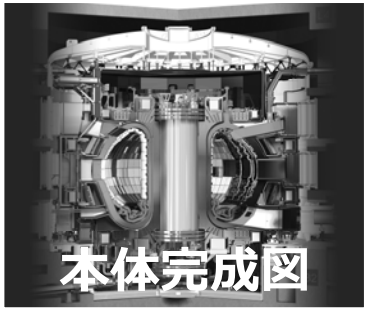
- **核融合原型炉への移行判断をITERの核燃焼が見込まれる2035年頃に行う**こと、それまでに**2回の中間C&Rを実施**。
- **第1回C&Rは、昨年終了し、第2回C&R（2025年頃）に向けた段階に移行。**

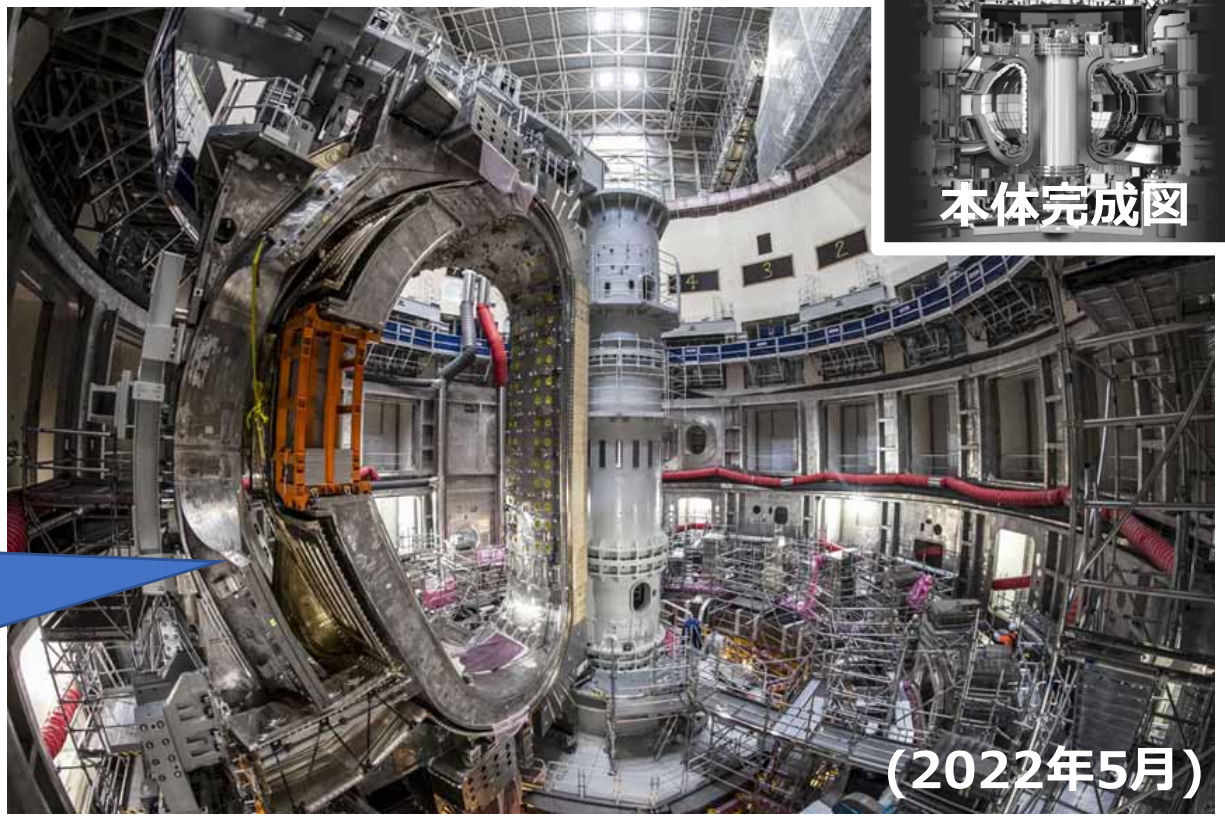


ITER Project

① ITER計画：核融合燃焼の実証

- **世界7極（日、欧、米、露、中、韓、印）が協力し、熱出力50万kWを目指す。**
- **2025年頃の運転開始を目指して、建設真っ最中。現在、全体の約78%の進捗率。**
- **2035年頃に、50万kWの核燃焼試験を実施予定。**





TFコイル1号機(2020年1月)

- **トカマク建屋に、全部で40度セクター9基のうち最初の40度セクターが仮設置。**
- **この40度セクターは、日本が製作したトロイダル（TF)磁場コイル1号機と2号機の2機が組み込まれている。**

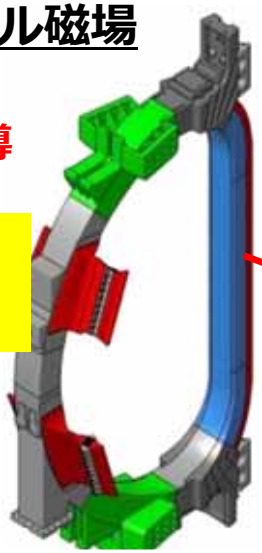
日本が製作分担する最先端のITER主要機器

超伝導コイル

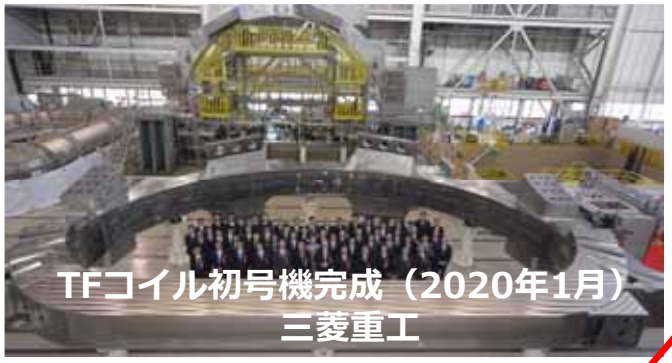
超伝導トロイダル磁場（TF)コイル

世界最大の超伝導磁場コイル

日本分担8機+予備1機のうち、7機がITERサイト到着



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
イーエナジー
日立金属ネオマテリアル

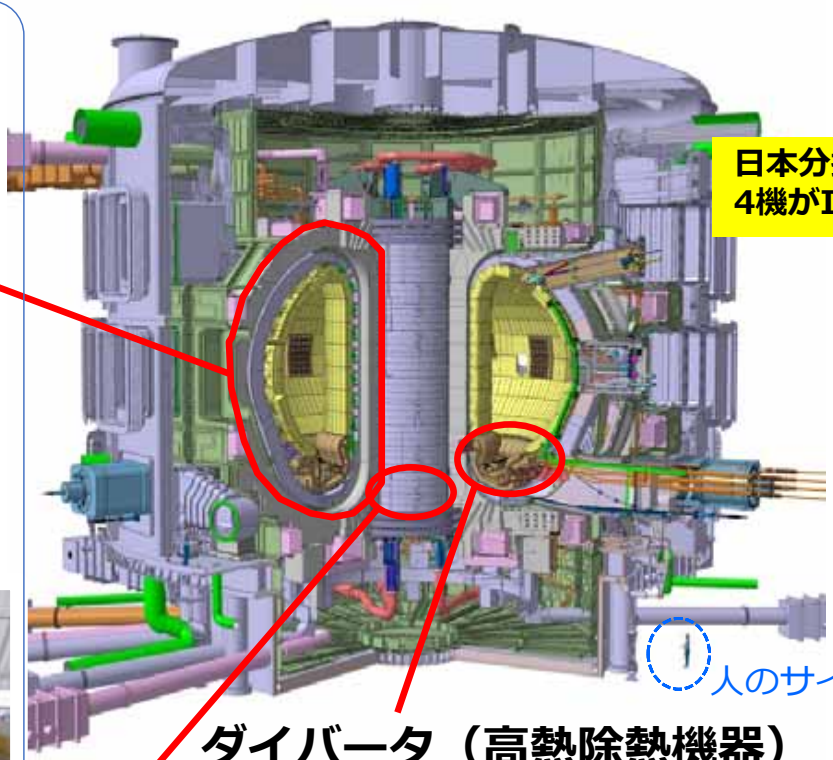


TFコイル初号機完成（2020年1月）
三菱重工

超伝導中心ソレノイド導体

日本分担全数は完了

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



1人のサイズ

加熱装置

高周波加熱装置

日本分担の8機が製作済。4機がITERサイト到着

世界最高の1MW出力管

キヤノン電子管デバイス
東京電子

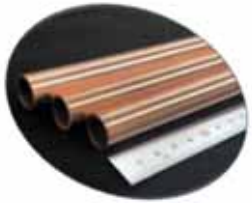
中性粒子入射加熱装置

世界最高の1MeV,40A重水素ビーム

日立製作所
京セラ

ダイバータ（高熱除熱機器）

高熱負荷～20MW/m²

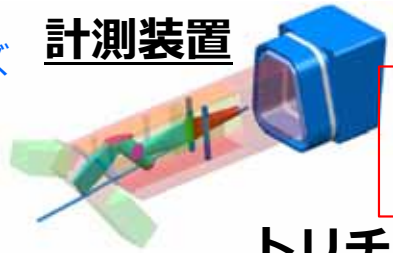


銅合金冷却管

タングステンモノブロック

三菱重工、日立、金属技研
アライドマテリアル
大和合金・三芳合金工業

計測装置



東芝
三菱重工
トヤマ
岡崎製作所
清原光学

遠隔保守機器

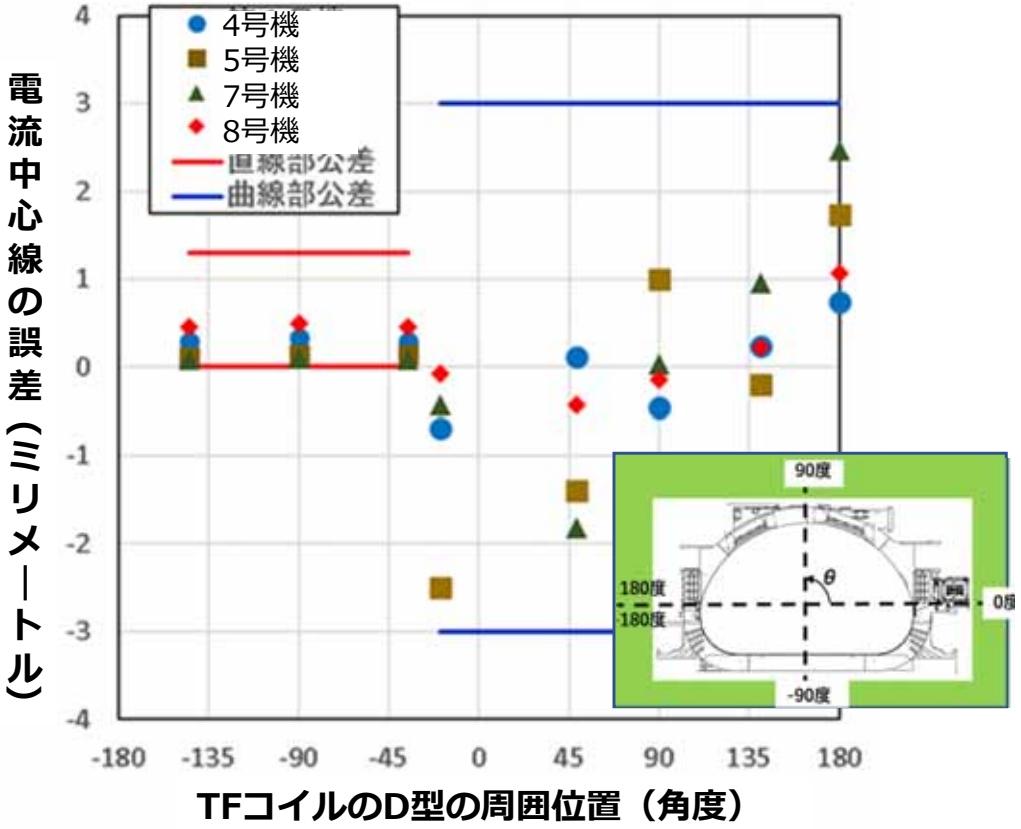
東芝、エーテック
スギノマシン、愛知産業

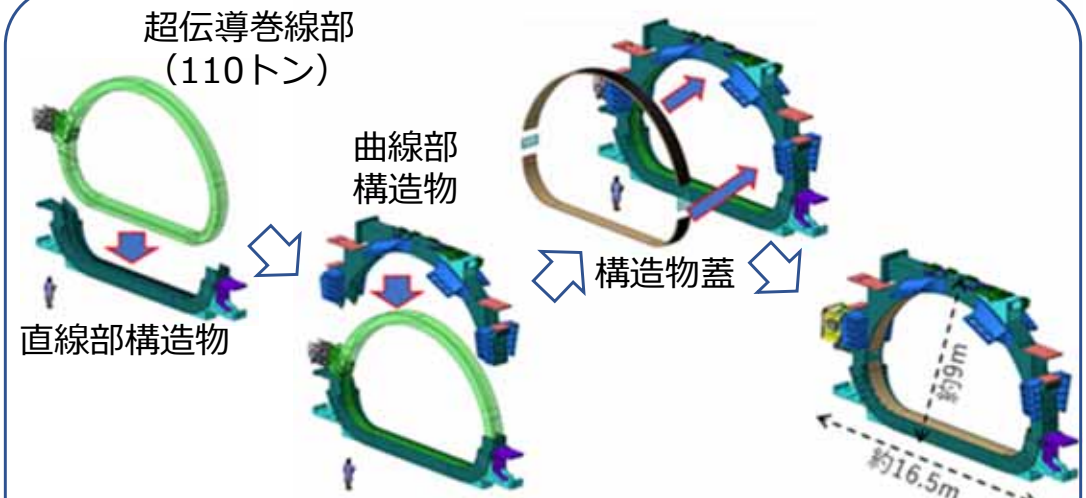
トリチウムプラント設備

日揮

最近のトピックス（１）：　日本調達の8機目のTFコイル完成

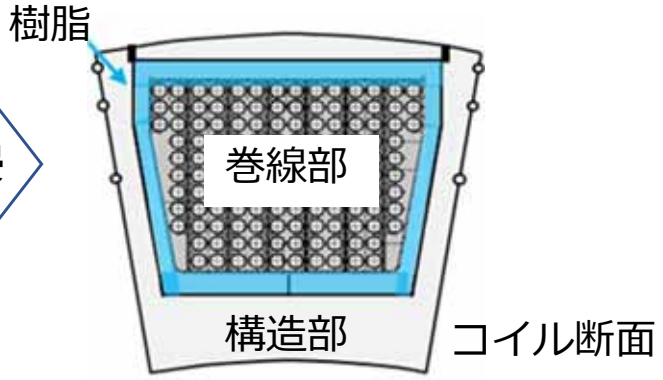
- ITERに組み込むTFコイル全18機のうち、**日本分担分8機の全ての製作を完遂。**
- **電流中心線の誤差：±３mm**（全長約16.5m、幅約9m、重さ約310トン）





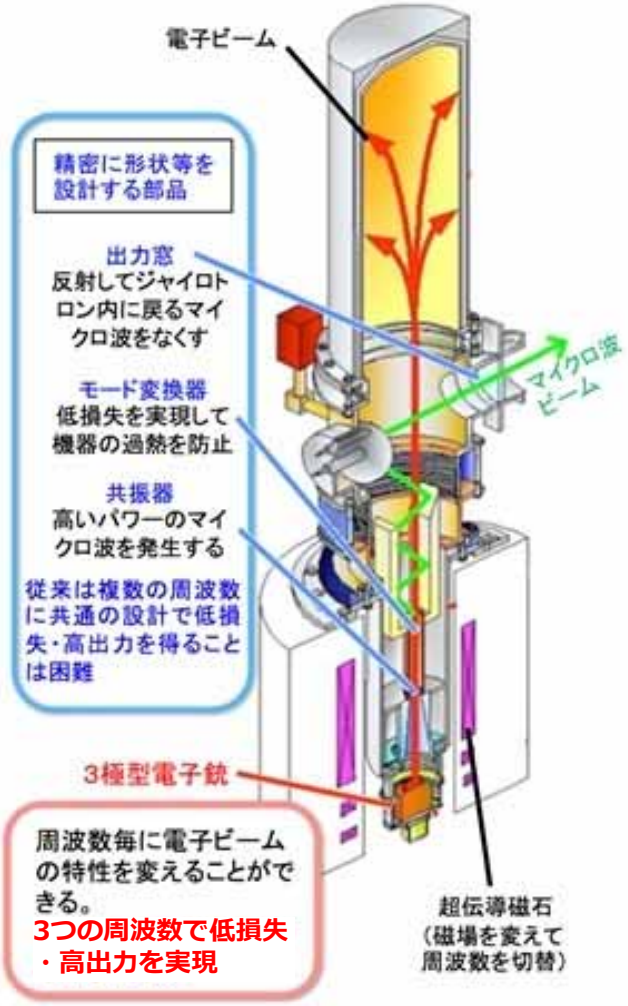
巻線部と構造部の組合せ

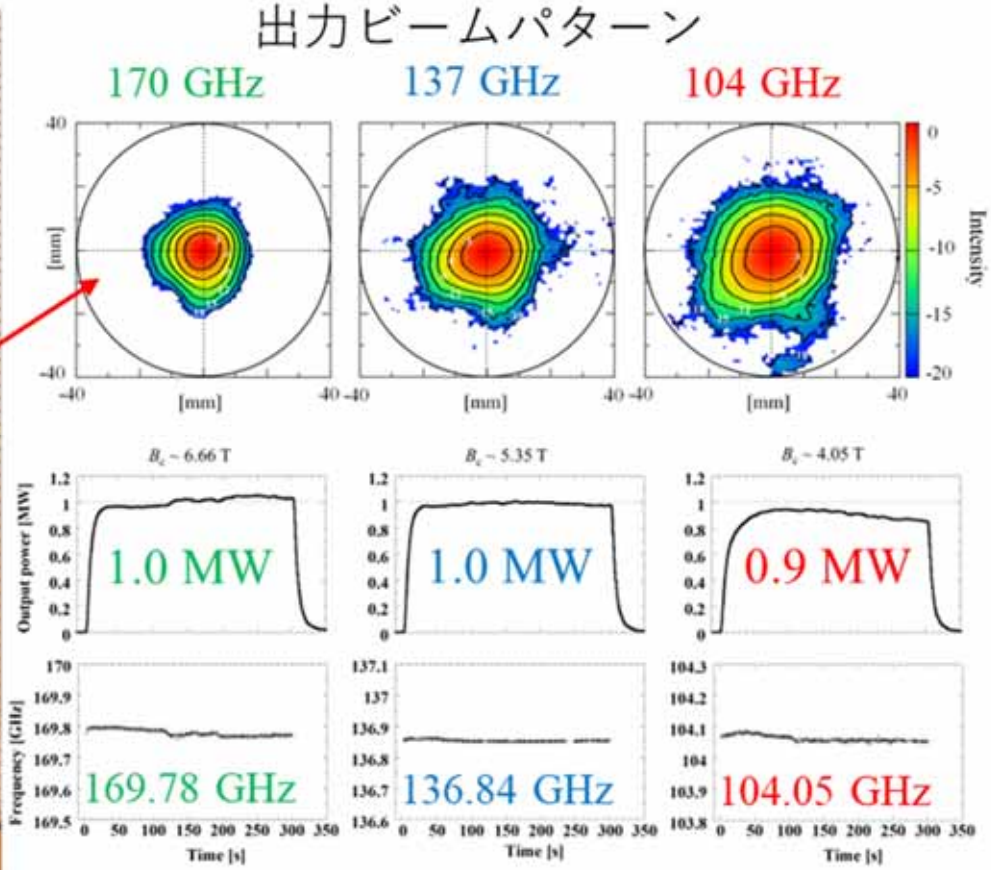
樹脂含侵



最近のトピックス（２）：ジャイロトロンで3周波数の大電力発振に成功

- ITERジャイロトロンで、**170GHｚ(基本仕様）に加え、104GHz、137GHzにおいても1 MW・300秒の大電力・長パルス発振に成功。**
- ITERで様々な位置の加熱が可能となり、**幅広い運転領域に対応可能に。**





低電力損失かつ最適なビーム形状で入射されるように金属ミラーの配置や曲率を設計

最近のトピックス（３）：ITER機構の副機構長に鎌田さんが就任

ITER副機構長

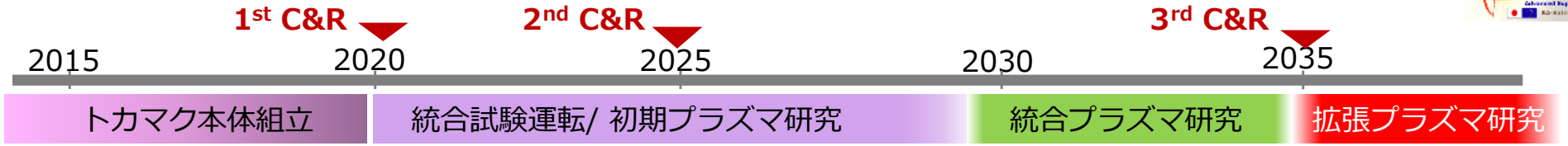
- ITER機構の**副機構長として、QSTの鎌田裕氏が2023年3月15日に着任。**
- **科学技術担当として**、今後のITER機構の戦略ビジョンの実施等、全体運営に関しバラバスキ機構長を補佐するとともに、**科学・技術関連プログラムの統合**などを担う。
- なお、管理担当の副機構長として、**中国のルオ・デロン氏（前 中国国内機関長）が選出**され、4月1日に着任予定。
- その他、**建設担当、チーフ科学者、チーフ技術者の3名の副機構長を今後、設ける模様。**

ITER理事会（昨年11月）にて

- 既に搬入済の機器の不具合に関し補修が必要であることが判明。
- 補修方針の策定と速やかな対策実施を行う予定。
- これらを考慮して、**今後、ベースラインの更新を進める。**

② サテライト・トカマク(JT-60SA)

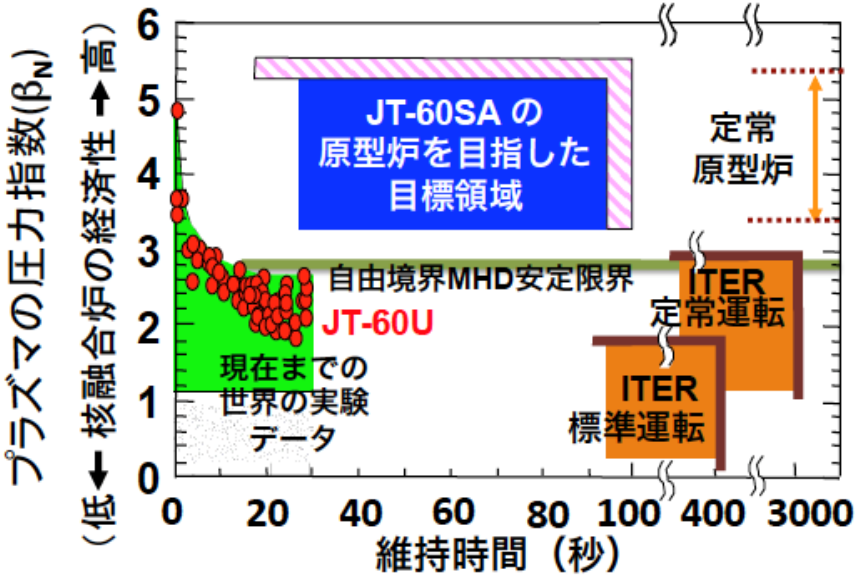
- ITERを先導＆高性能プラズマ開発 -

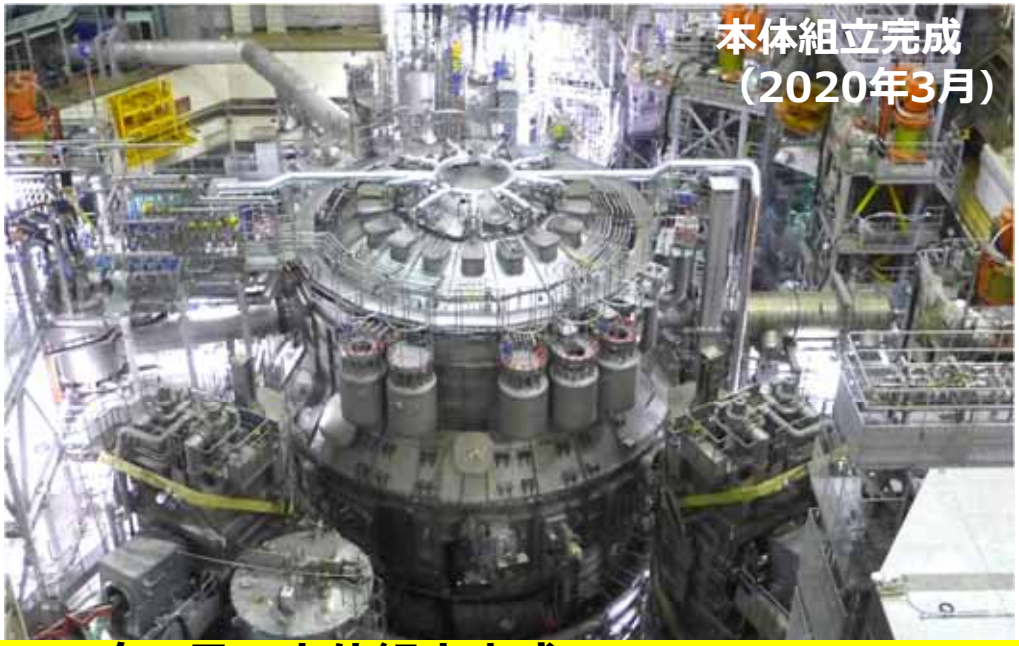


- ITERに先行し建設/運転/実験を行い、**ITERを先導**。
- 魅力的な原型炉（核融合発電炉）に向け、**高性能プラズマ（高β、定常）を開発。**
- 若い研究者の人材育成を行い、**ITERに派遣しITERをリード**。
- 日欧及び世界の研究者が集まる、**世界的な研究開発拠点（那珂研）。**

【プラズマ性能の目標領域】

圧力指数を2倍に出来ると、核融合出力は4倍となることから、原型炉の小型化の道を拓く。

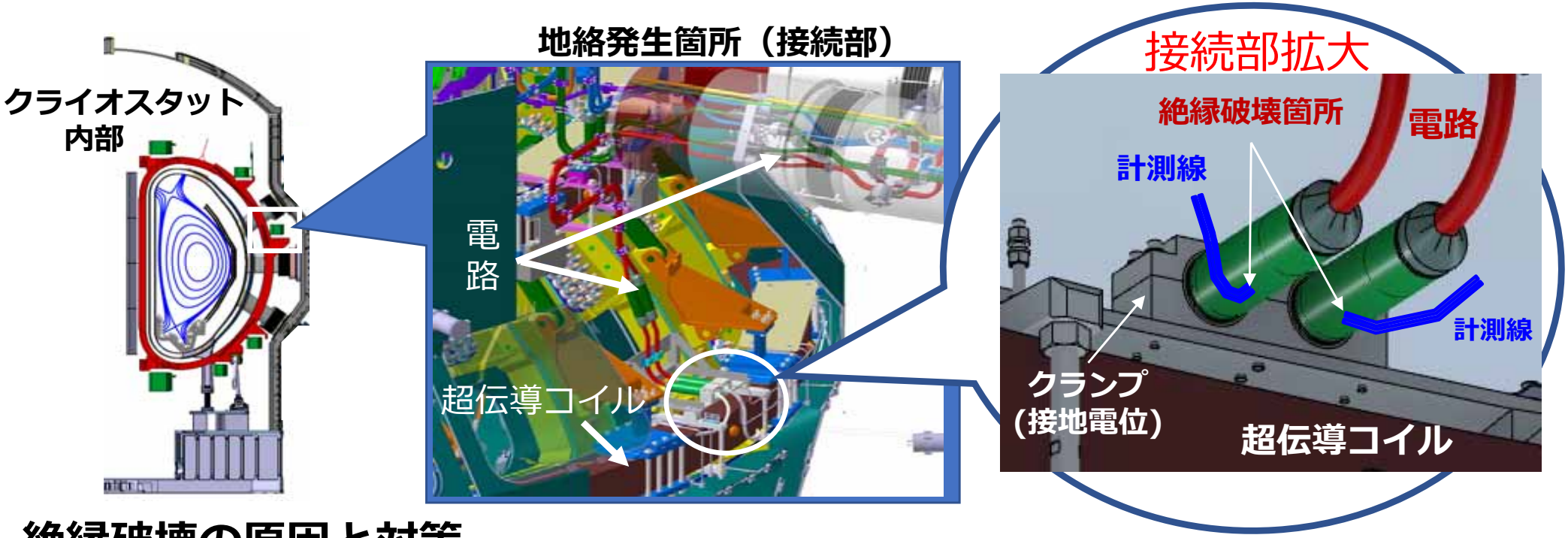




2020年3月：本体組立完成。
2020年4月：統合試験運転開始。
2020年11月：超伝導コイルの超伝導転移確認。
2021年3月：超伝導コイル電路接続部でトラブル

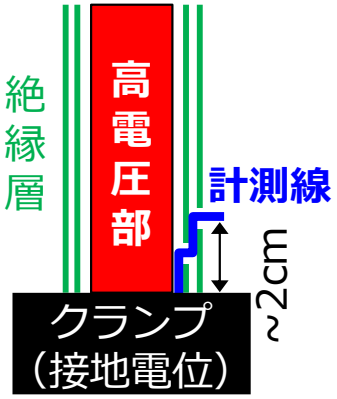
トラブルの原因と対策

トラブル：超伝導コイルと電路の接続部で絶縁不良による絶縁破壊発生



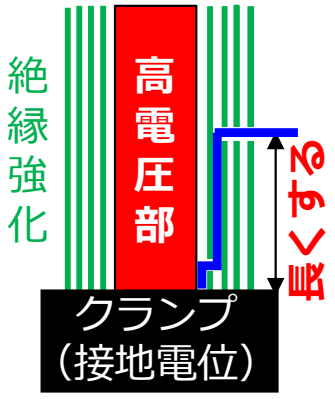
絶縁破壊の原因と対策

原因：計測線の引出処理不良



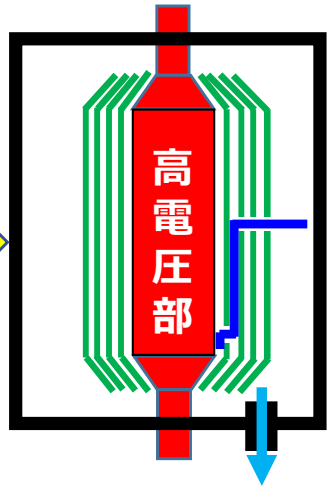
補修

対策：引出処理と絶縁強化



確認

確認：パッシェン試験



真空排気して放電しやすい圧力で絶縁性能確認

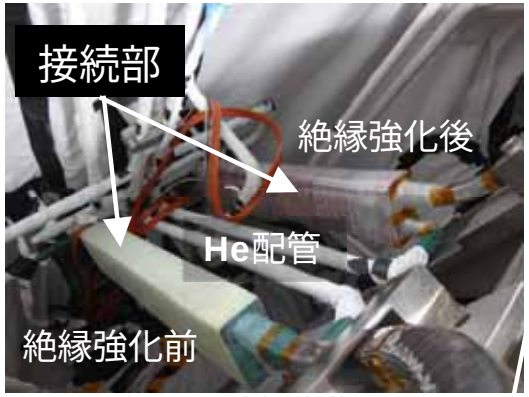
絶縁補強の水平展開

接続部の絶縁補強

- 計測線の引出距離が不十分な接続部が、他に2か所あった。
- 引出距離が十分であっても接続部は絶縁破壊の危険性が高い。

→ **類似構造を有する接続部（約100箇所）の絶縁強化と部分パッシェン試験を実施。**

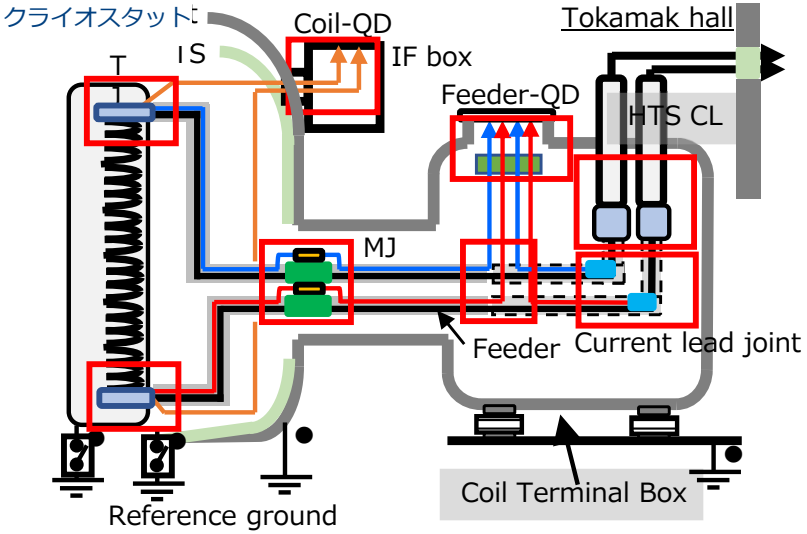
EF1接続部



TF接続部

部分パッシェン試験

超伝導コイル群の絶縁性能の確認：グローバルパッシェン試験



各コイル系統の模式図

試験手順

- EF/CS/TF(13系統)を個別に実施
- 0.1, 1, 10, 50, 100, 500, 1000 Pa
  各圧力で電圧を印加
- 放電電圧の低いArを使用
  絶縁不良を見つけ出し易い
  放電時のダメージも抑えられる

絶縁補強の現状と今後の方針

グローバルパッシェン試験結果（昨年末）

- **運転時の想定圧力（10^{-4} Pa以下の高真空）では、想定印加電圧（EF/CS：3kV、TF：90V/２kV「QPC動作時」）の耐電圧性能を確認。**
  しかし、Arガスが導入されると耐電圧低下（絶縁破壊が発生）。
- ガス導入時の絶縁破壊箇所は絶縁強化箇所とは異なる場所（可視カメラで確認）。
  EF/CS放電最低電圧：0.6~1.0 kV
  TF放電最低電圧：0.7~1.1 kV

対策案

1）ファーストプラズマまで

・新たに見つかった絶縁破壊箇所の絶縁補強及びグローバルパッシェン試験による性能確認。
・クライオスタット内の**真空度変化の高速検出と電源遮断インターロック追加。**
・極低温時、運転真空度での絶縁性能の確認。
・コイル印加電圧を制限して、コイル通電試験。

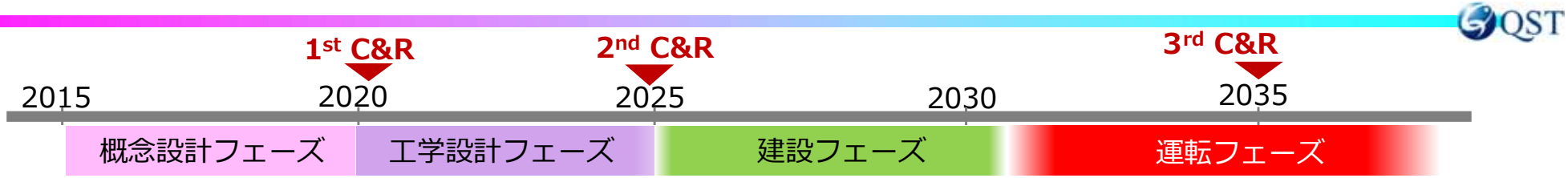
2）ファーストプラズマ（今年夏ごろ予定）

・**コイル印加電圧を制限してファーストプラズマを目指す。**
・プラズマ運転の調整/確認。
　放電シナリオ、着火と立ち上げ、平衡制御、壁調整等

3）ファーストプラズマ以降

・**加熱装置＆真空容器内機器の据付期間に、定格運転に向けた絶縁補強作業を追加。**

③ 核融合中性子源：核融合材料の中性子耐久性評価



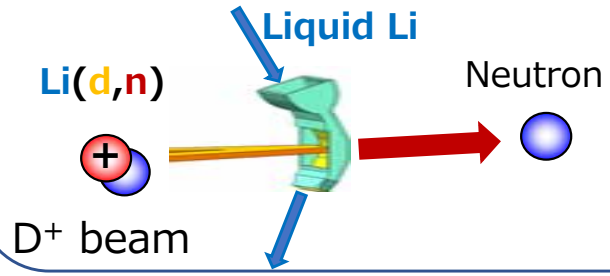
BA活動 (IFMIF/EVEDA)

大電流加速器開発

● D^+, 125mA, 9MeV 連続運転

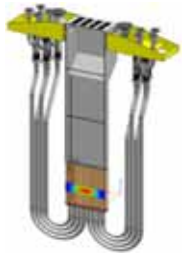
液体Liターゲット開発

● 液体リチウム流の制御



照射試験体開発

● プロトタイプ

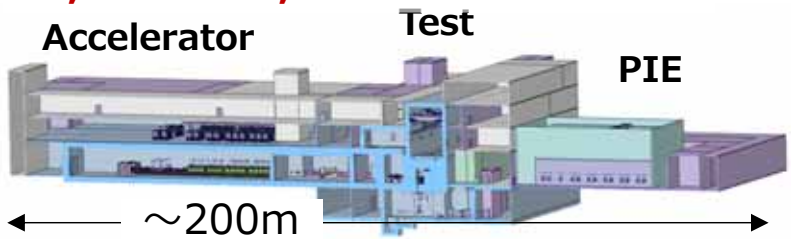


国内活動

サイト設計/ 中性子応用

QST 六ケ所研サイト

D^+, 125mA,40 MeV: A-FNS



Neutron flux : ~10^{14}/cm^2s

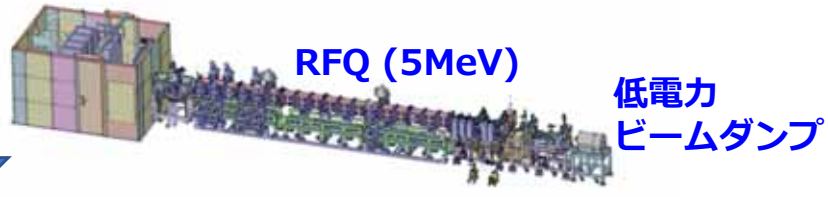
設計活動

大電流加速器の開発状況：IFMIF原型加速器

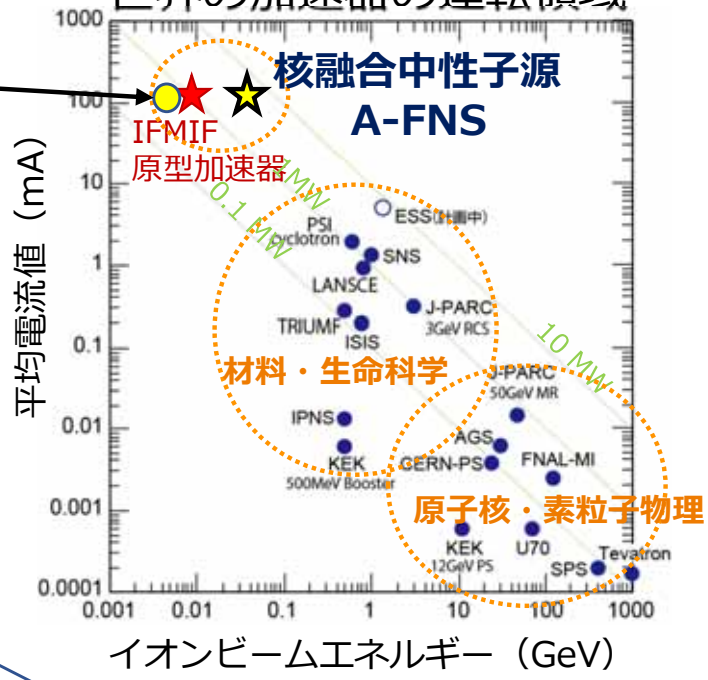
IFMIF原型加速器：日欧協力のもと、**段階的アプローチで世界最高ビーム電流の加速実証**を行い、核融合中性子源の加速器主要部を開発。

【① 125mA、5MeV、短パルス】

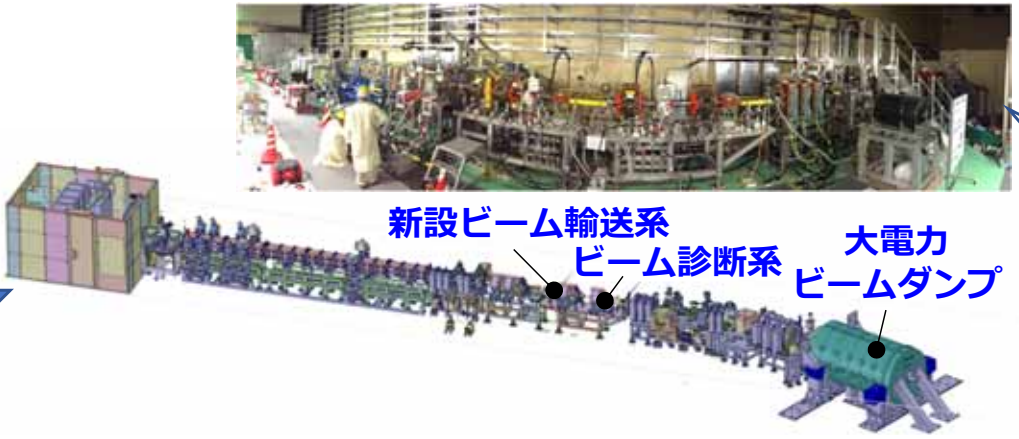
2019年 125mA,5MeV 達成



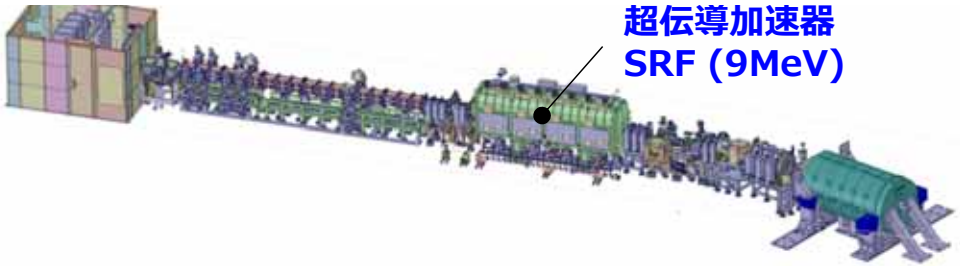
世界の加速器の運転領域



【② 125mA、5MeV、長パルス】：現在



【 ③ 125mA、9MeV、長パルス】

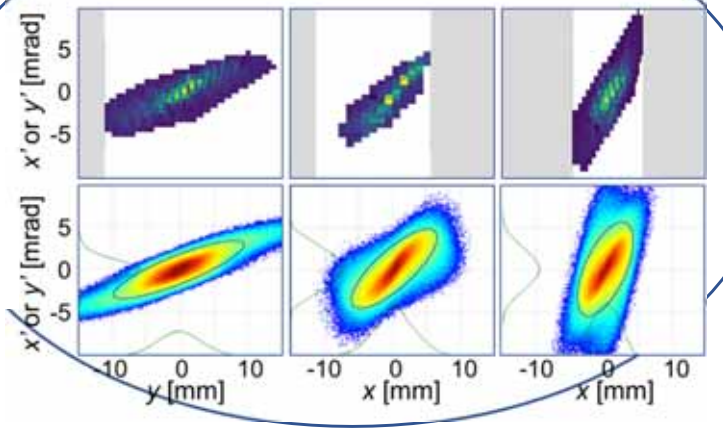


ビーム診断結果

（バンチャー/四極磁石を変化）

計測結果

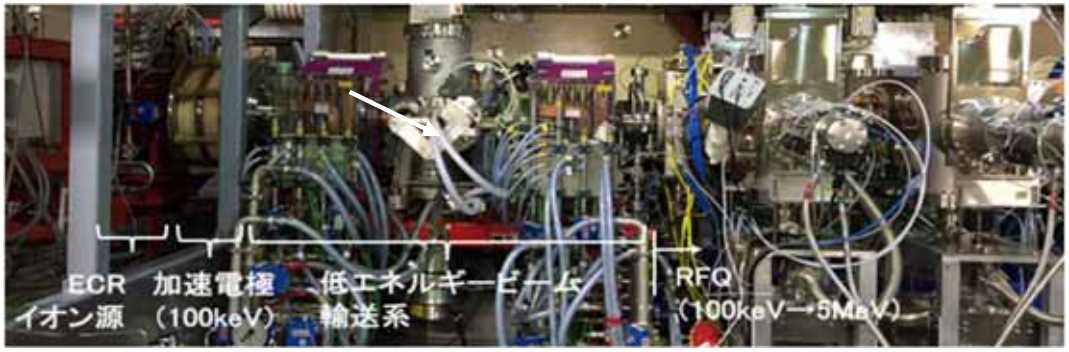
シミュレーション

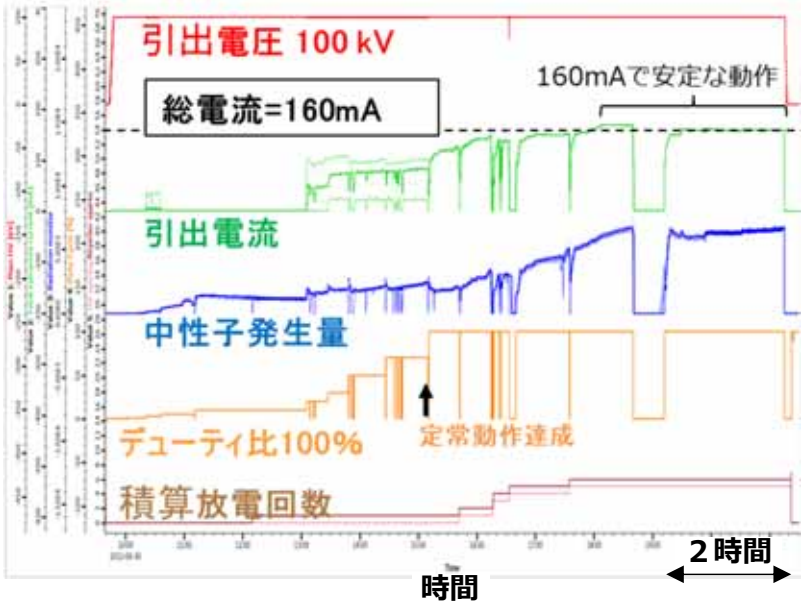


入射器/超伝導加速器の進展

【入射器】

- 100KeV/160mAの定常運転の成功





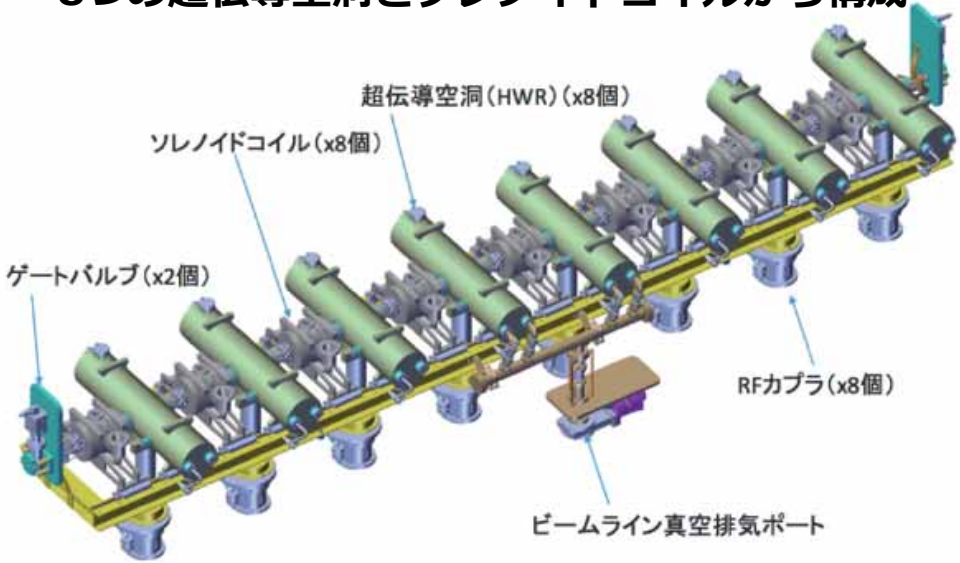
【超伝導加速器】

- 欧州部品が揃い、六ヶ所研で組立開始

欧州作業員による
空洞組立の様子

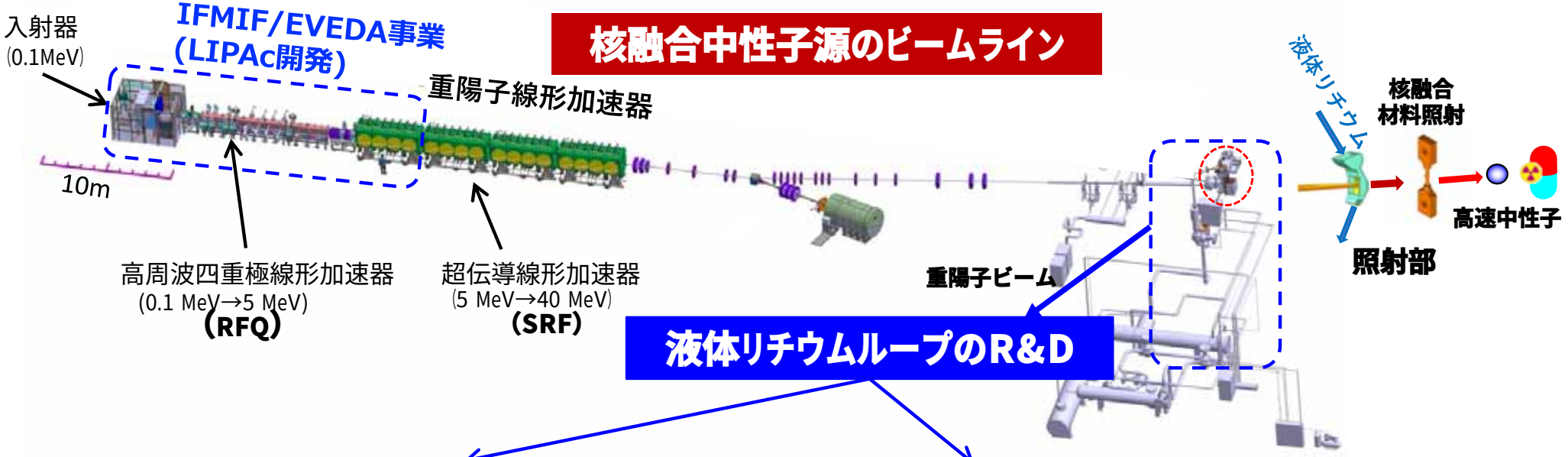
クリーンルーム内に
並べた空洞

超伝導加速器（SRF）：
8つの超伝導空洞とソレノイドコイルから構成



今後、入射器＋RFQ（高周波四重極加速器）で、５MeV/125mAの長パルス動作を行い、その後、SRF（超伝導加速器）を組込み、９MeV/125mAの最終目標の達成を目指す。

液体リチウムループのR&Dの進展

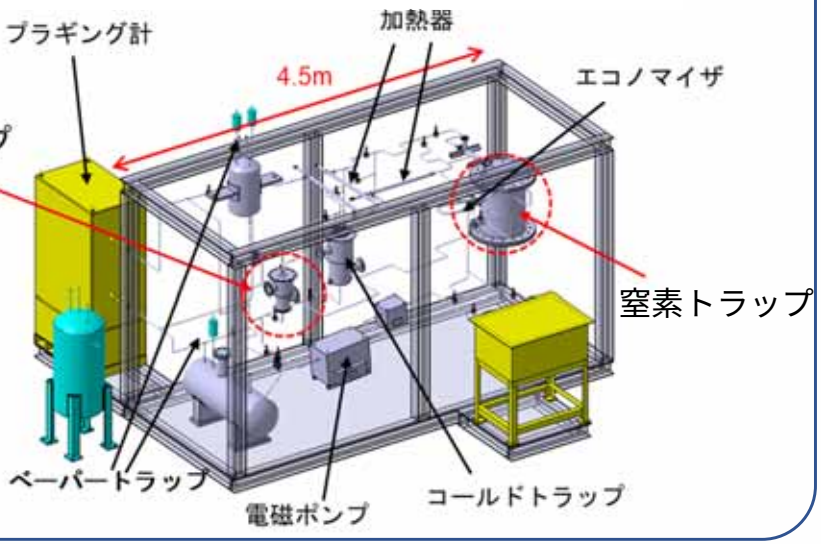


リチウムの安全な取り扱いに関するR&D

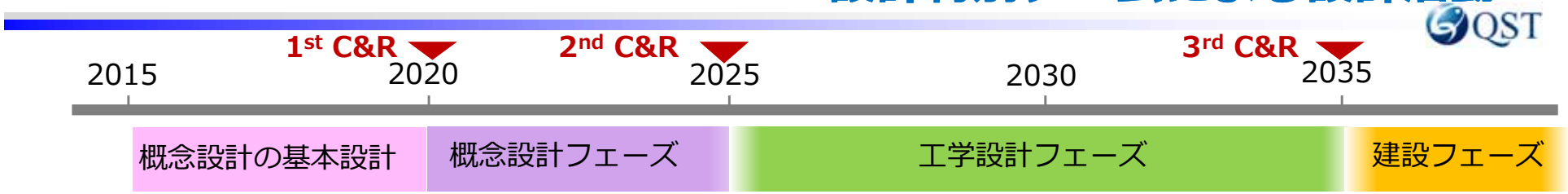
水分濃度条件を変えた燃焼試験

リチウム中の不純物除去(トラップ)性能を評価する装置の設計が完了、部品製作を開始

令和４年10月に製作完了したペーパートラップ



④ 原型炉研究開発：BA活動と全日本体制の原型炉合同設計特別チームによる設計活動



- BA活動で日欧共通課題に関し検討・研究開発を行い、それらの成果を**我が国の原型炉プラント概念の基本設計を提示**。第1回C&Rを経て、**現在、概念設計フェーズに進展**。
- 我が国の原型炉設計のために、QSTに産学（**現在146名, QST:39、大学:59、産業界:48**）からなる**原型炉設計合同特別チームが設置**。司令塔を六ヶ所研に置き、課題ごとにネットワーク化。

BA活動(IFERC)

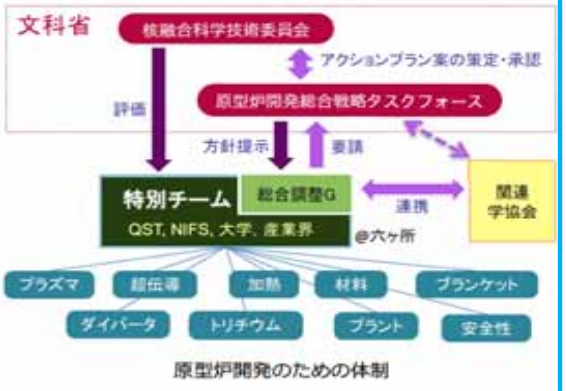
日欧の専門家会合

- 日欧共通の概念設計研究
- 日欧共通の設計手法、設計ツールの開発
- 日欧共通の材料等関連データの拡充
- ITER遠隔実験に向けた技術開発　等

＋

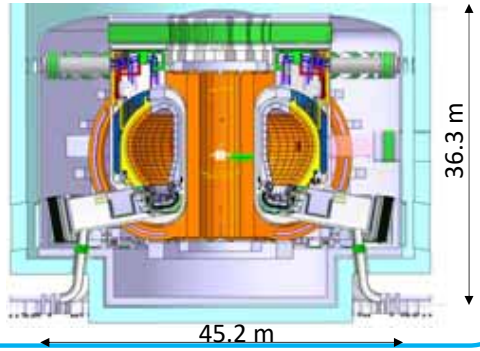
国内活動

原型炉設計合同特別チーム



原型炉開発のための体制

主要機器を統合した炉心構造



原型炉プラント概念の基本設計

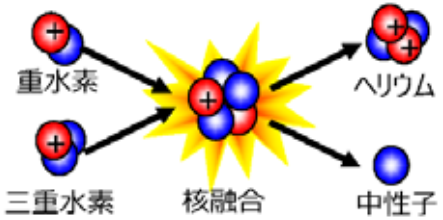
炉本体	プラント設備
・定常運転 ・核融合出力：～150万kW	・加圧冷却水 (15.5MPa,～300℃) ・電気出力：～70万kWe (発電端)

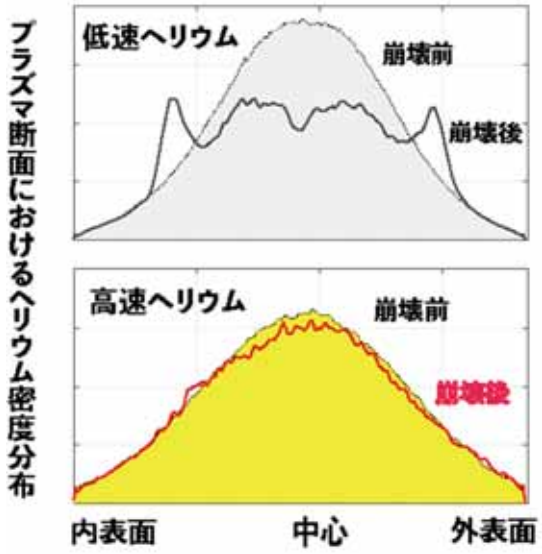
CSC(計算機シミュレーションセンター)活動

- 核融合専用スーパーコンピューター（JFRS-1）による、ITERに貢献するシミュレーション研究が進展。

【ヘリウム排気予測】

JETとの共同研究により、従来の考え方(プラズマ中心部で内部崩壊と呼ばれる不安定性が起こると、自己加熱のための高速ヘリウムも排出される)を覆し、**DT運転時、高速のヘリウムは閉じ込めたまま、低速化したヘリウムのみを灰として排出できる運転領域を、JFRS-1を用いたシミュレーションで発見**。

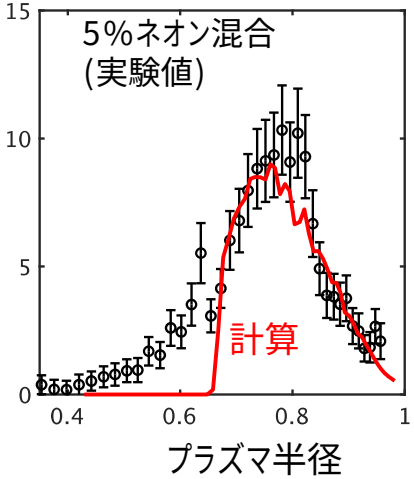




【ディスラプション緩和予測】

プラズマ中へ入射された**水素-ネオン混合ペレットが、溶発で生じるプラズマ塊の分布を理論的に予測、これを核融合研のLHD装置を用いたペレット実験結果と比較し、理論的予測の実験検証に成功**。水素-ネオン混合ペレットは、水素単体よりも効率的にプラズマを冷却できることを明らかにした。

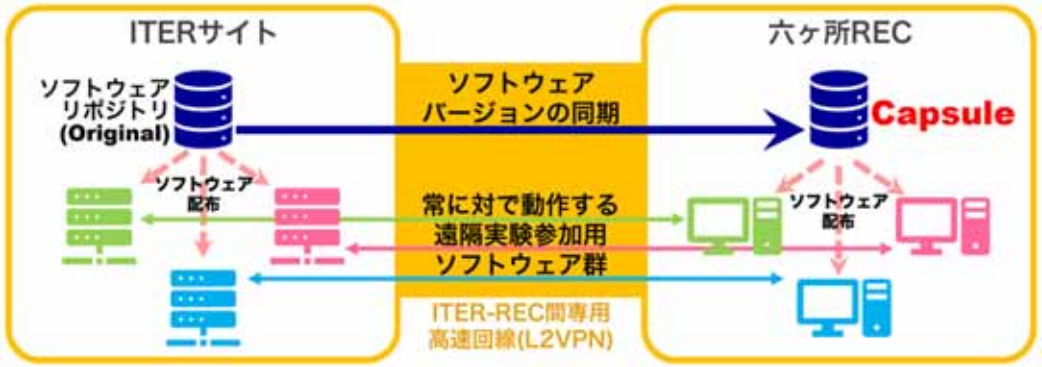
計算と実験で得られた電子密度の比較



実験検証したモデルによりディスラプション緩和装置の性能評価シミュレーションを実施し、ITER機構に提供。
(ITER主要機器設計への貢献)

REC (ITER遠隔実験センター)活動

- ITER機構と共同研究で、ITER機構CODACセクションが開発している**遠隔実験参加用ソフトウエア群の試験を開始**。

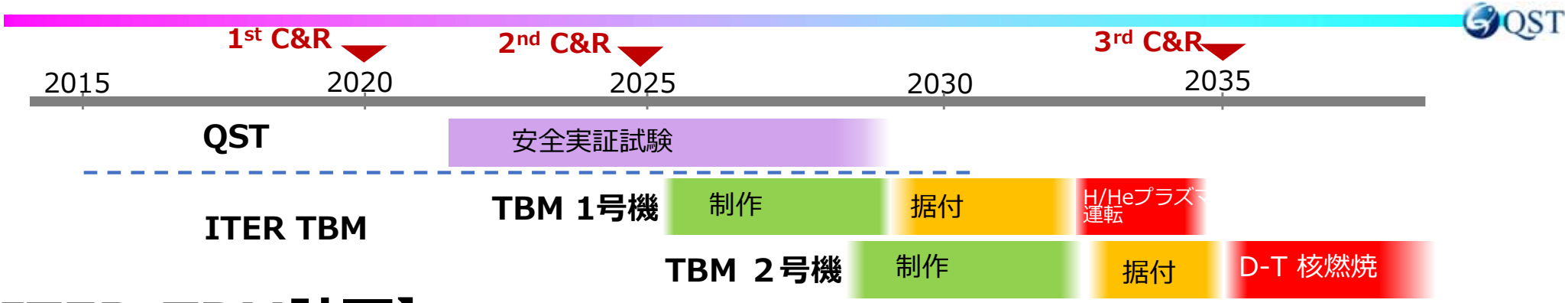


ITER
運転時

QSTとしては、計算機/遠隔実験/最新データを組合わせた核融合情報科学センター構想を検討。

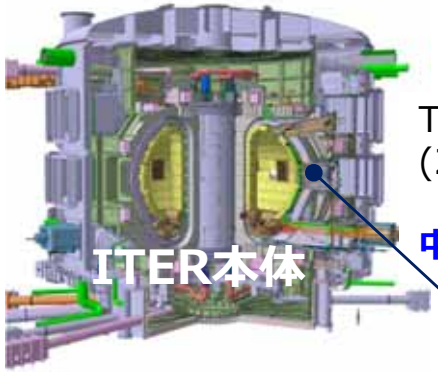
核融合情報科学センター構想

⑤ ブランケット開発：ITER-TBM計画で、発生エネルギー(熱)取出と燃料(三重水素)生成を実証



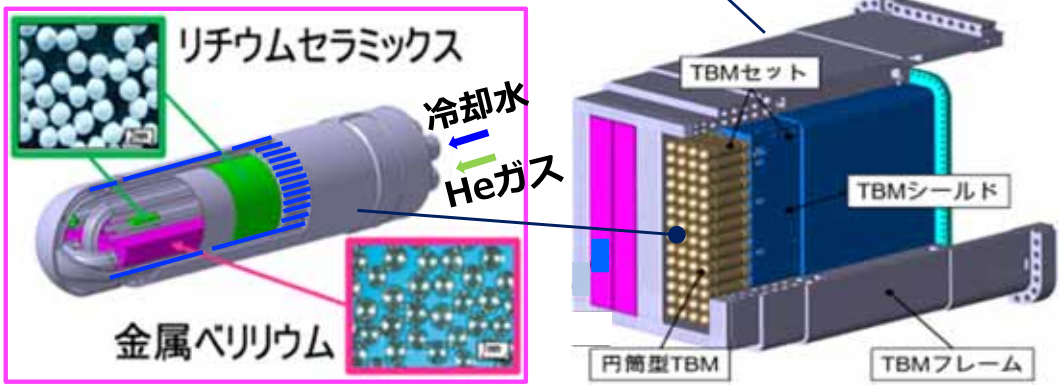
【ITER-TBM計画】

ITERに各極のブランケット試験体を装着し、熱取出し＆燃料生成を実証（国際競争）



TBM用に2ポートが用意
(2種類/ポート：**計4種類**
「日本、欧州、欧州＋韓国、中国」を国際競争で評価)

日本案（水冷セラミック増殖材方式）



安全実証試験（六ヶ所研）

ITER運転条件（高熱負荷、高温高圧水：PWRと同等）でTBMから**水漏れ等が起きないことを実証**する。

ブランケット工学試験棟
(2021年6月竣工)

「除熱」「腐食」「水－ベリリウム反応」
「水漏れ検知」等をモックアップで試験

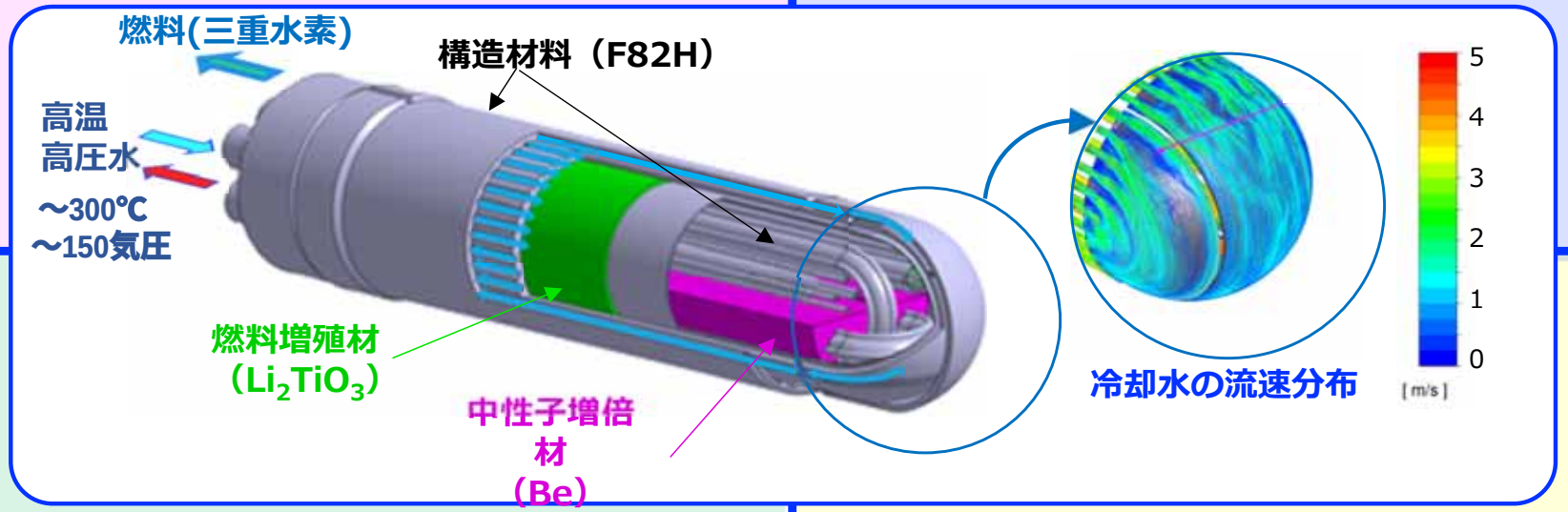
ブランケット工学試験棟で ITER-TBM安全実証試験が開始

① 高熱負荷試験

⇨ プラズマからの熱を設計通りに除熱できることを検証

② 流動腐食試験

⇨ 高温高圧水が流れによる構造材料の腐食が問題ないことを確認



③ 高温高圧水噴出試験

⇨ 高温高圧水が漏洩した時の圧力等の伝わり方を検証し、安全機構の設計に反映

④ Be-水反応試験

⇨ Beに水がかかった時の化学反応　（温度上昇や水素発生）を評価

まとめ

① ITER
- ✓ 日本分担機器は、概ね順調に製作が進展。
- ✓ 科学技術担当の副機構長に鎌田氏が着任。
- ✓ 今後、ベースラインの更新が予定。

② JT-60SA
- ✓ 超伝導コイルの電路接続部の絶縁補強作業を実施。
- ✓ グローバルパッシェン試験から、万が一、真空度劣化が起きた場合を想定すると、運転電圧に制限が必要。
- ✓ 初プラズマは夏頃。その後、定格運転に向けた絶縁補強作業を追加予定。

③ 核融合中性子源
- ✓ 5 MeV、125mAの長パルス運転に向け、入射器の長パルスを実証。
- ✓ 9 MeV、125mAに向け、超伝導加速器の組立が進展。

④ 原型炉研究開発
- ✓ 原型炉設計は、概念設計フェーズ段階に進展。
- ✓ 計算機シミュレーションセンターやITER遠隔実験センターで、ITER機構と連携が進展。
- ✓ ITERの運転開始を見据えた、核融合科学情報センター構想を検討。

⑤ ブランケット開発
- ✓ ITER-TBM計画として、日本は水冷セラミック増殖（WCCB)方式を推進。
- ✓ 六ヶ所研で、水冷のWCCB方式ブランケットの安全実証試験が開始。