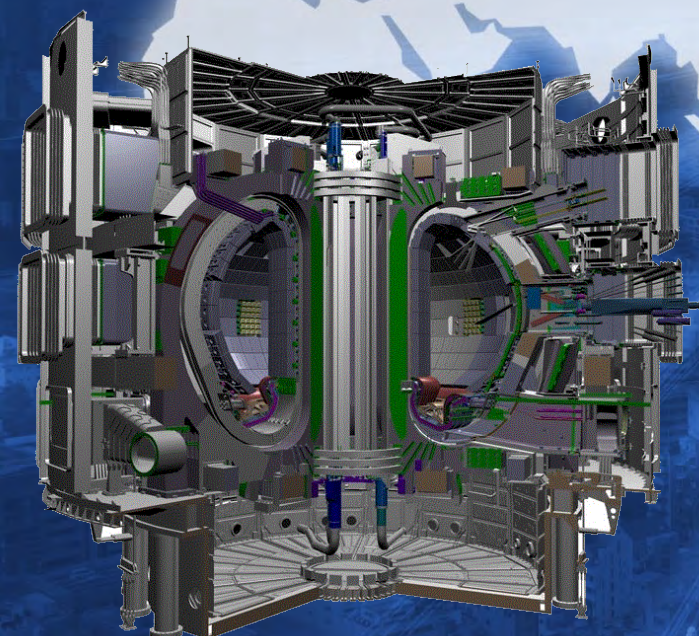
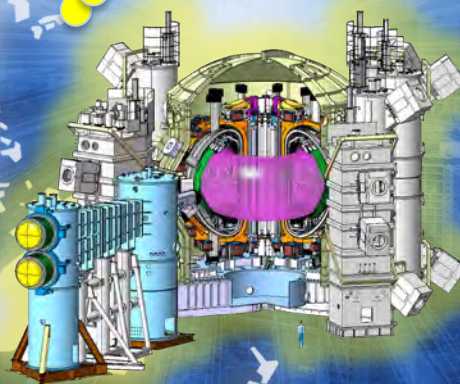


ITER計画／BA活動の現状と今後 及び核融合発電炉に向けた課題について

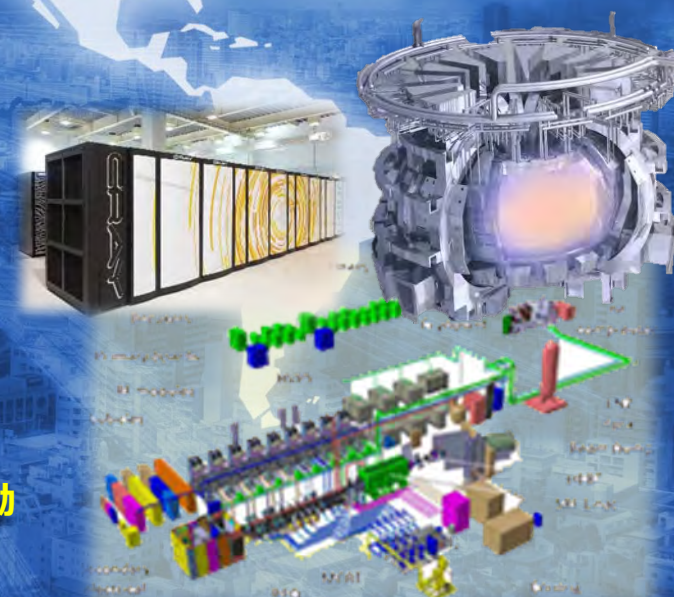


ITER計画



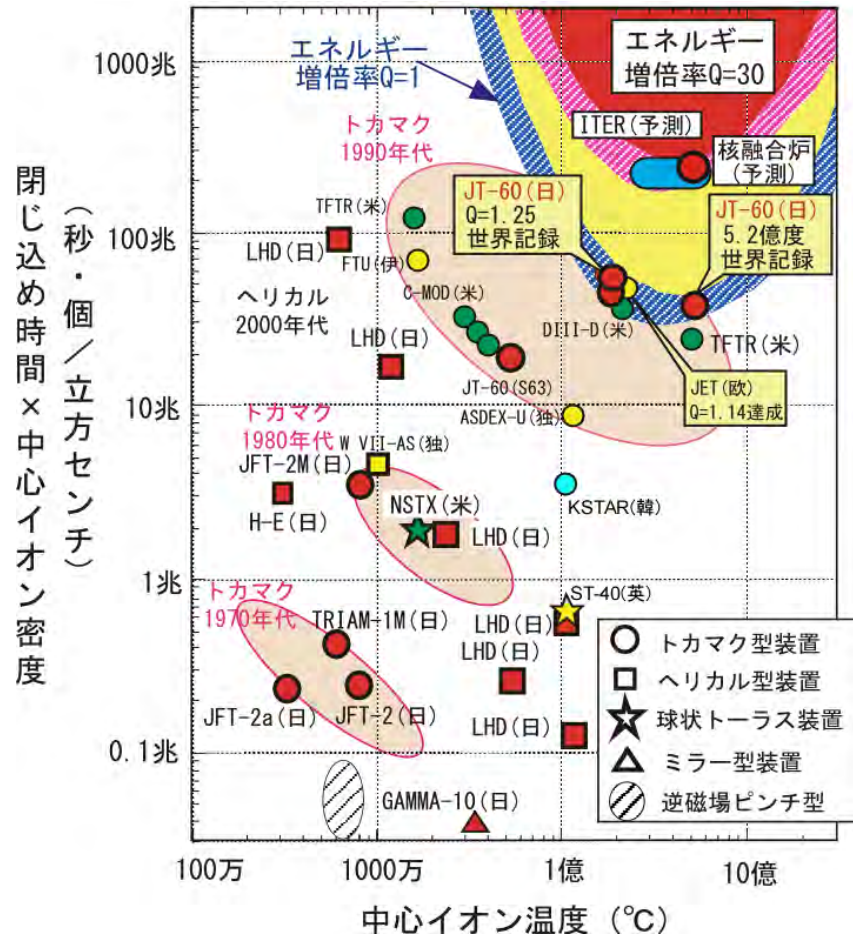
BA活動

幅広いアプローチ活動



量子科学技術研究開発機構

Q=核融合出力／外部加熱入力



核融合出力 $\propto$ (密度 $\times$ 温度) 2

核融合出力を増やすために重要な3つの要素

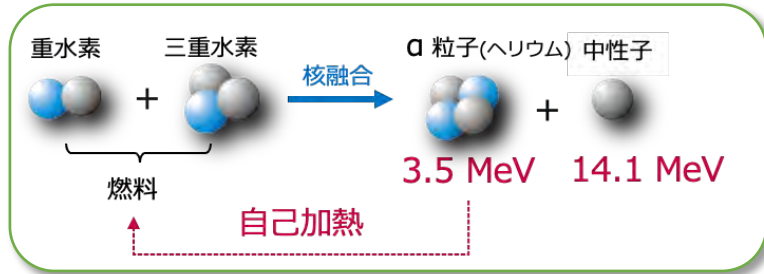
1. 核融合が起こる回数を増やすため
密度を上げる
2. 熱が逃げないように閉じ込める
(閉じ込め時間を長くする)
3. 核融合が起こりやすい温度(数億
度)まで温度を上げる

=>ローソン図における $Q=1$ の領域を目指し、プラズマ性能を向上する研究が世界中で進められてきた

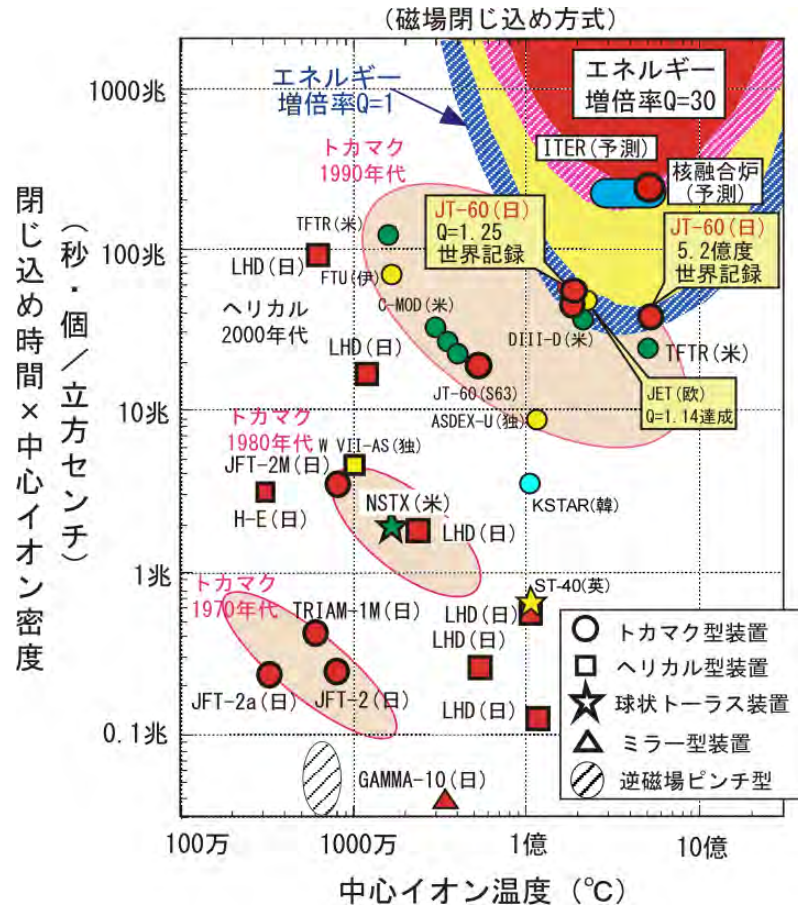
1970～80年代:装置の大型化による性能向上

1980～90年代: 上記に加え、加熱装置とプラズマの高性能化により $Q=1$ に到達

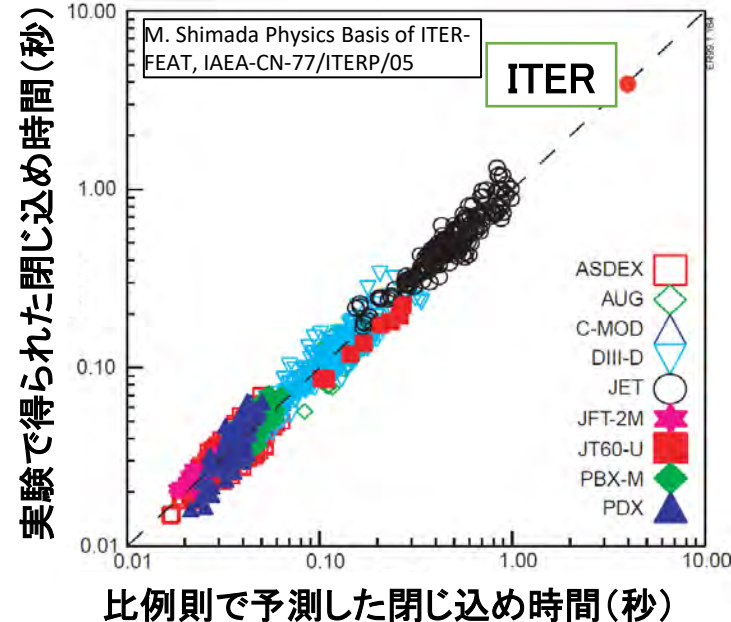
2007年：エネルギー源としての見通しを得るためITER計画/BA活動を開始



- $Q=1$ のプラズマは、外部加熱の2割しか自己加熱がなく、外部加熱主体の制御が可能
- $Q=10$ のプラズマは、外部加熱の2倍の自己加熱。自己加熱主体の燃焼プラズマが制御できることの実証は、核融合発電炉の実用化に必須。
- ITERの設計は、世界中のトカマク装置の成果に基づき導出された比例則に基づいており、ITERプラズマでも成立することの確認も重要



$$\text{比例則: } \tau_{E,th}^{IPB98(y,2)} = 0.0562 I_p^{0.93} B_T^{0.15} P^{-0.69} n_e^{0.41} M^{0.19} R^{1.97} \epsilon^{0.58} \kappa_a^{0.78}$$



この比例則に基づいて原型炉の設計を進めている

●意義

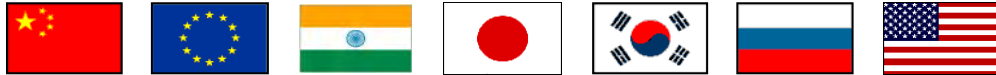
◇核融合エネルギーの実現の見通しを得る。

●技術目標

- ◇核融合出力と外部からの入力の方が10以上の**燃焼プラズマ**を**長時間(300～500秒以上)**生成する。
- ◇超伝導コイルや加熱装置などの**核融合工学技術**を統合し、その有効性を実証する。
- ◇将来の核融合炉に必要なブランケットなどの**機器試験**。
- ◇**環境・安全性**の実証、等

●運営

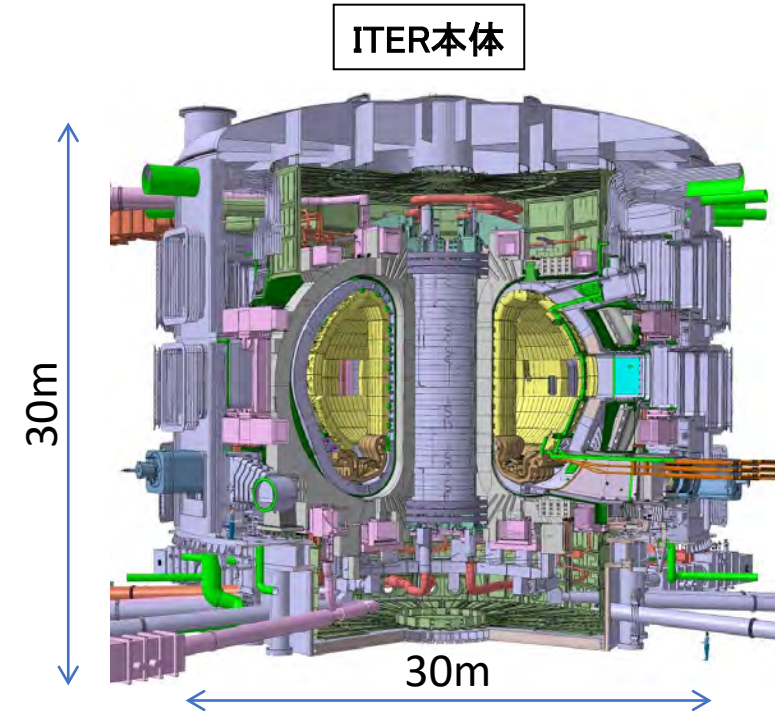
- ◇各参加極の国内機関(**7極、33カ国**)が機器を分担して製作し(物納方式)、ITER機構(IO)が統合。



●ベースライン2024(これに沿って当面の取組を進めることで合意)

◇DD(重水素-重水素)核融合運転開始:2035年

◇DT(重水素-三重水素)核融合運転期開始:2039年



主要パラメータ

核融合出力	500 MW
Q (核融合出力／外部加熱パワー)	≥ 10
プラズマ燃焼時間	300-500 秒
プラズマ主半径 (R)	6.2 m
プラズマ副半径 (a)	2.0 m
プラズマ電流 (IP)	15 MA
プラズマ体積	約840立方米
本体重量	2万3千トン

QST 超伝導コイルや加熱装置などの製作は着実に進展

- 日本を始め、ITER加盟極での機器製作は着実に進展しており、世界初のFOAK機器を製作する技術が蓄積できている
- NB試験施設やトロイダル磁場コイルの低温試験など実規模試験に向けて準備中
- ITERサイトでのトカマク本体組立はベースライン2024より前倒しで進んでいる

超伝導トロイダル磁場コイル

・33導体(約33%)
・9巻線 & 一体化 (約50%)

株式会社 有沢製作所
ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社
東芝エネルギーシステムズ株式会社
日鉄エンジニアリング株式会社
株式会社日本製鋼所
株式会社プロテリアル金属
三菱重工業株式会社
三菱電機株式会社

完了



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(全部)

キヤノン電子管デバイス株式会社
ジャパンスーパーコンダクタテクノロジー株式会社
東京電子株式会社
株式会社トヤマ
株式会社ノーケン

ジャイロトロン
完了



超伝導中心ソレノイド導体

・49導体(全部)

完了

ジャパンスーパーコンダクタ
テクノロジー株式会社
日鉄エンジニアリング株式会社
古河電気工業株式会社
株式会社プロテリアル金属

遠隔保守機器

ブランケット遠隔保守装置(全部)

愛知産業
エーテック株式会社
株式会社スギノマシン
双日マシナリー株式会社
東芝エネルギー
システムズ株式会社

人のサイズ

中性粒子入射加熱装置

・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%)



京セラ株式会社
日新電機株式会社
株式会社日立製作所

ダイバータ

外側ターゲット
(全部)



計測装置

・6計測装置
(約15%)

株式会社岡崎製作所
帝国イオン株式会社
東芝エネルギーシステムズ
株式会社

株式会社トヤマ
三菱重工業株式会社
三菱電機株式会社
株式会社フォトクロス

トリチウムプラント設備

トリチウム除去系(50%)
日揮株式会社



株式会社アライドマテリアル
大阪冶金興業株式会社
有限会社菊地製作所
金属技研株式会社
助川電気工業株式会社
大同特殊鋼株式会社
株式会社日立製作所
三菱重工業株式会社
大和合金株式会社



- 核融合エネルギーの早期実現を支援する活動として、日欧で3つの事業を共同で実施
- 期間：フェーズⅠ（2007年6月～2020年3月）、フェーズⅡ（2020年4月～）

茨城県那珂市

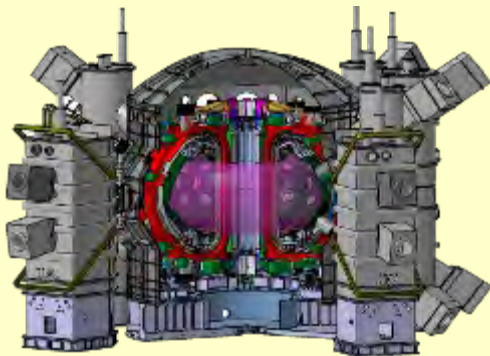
サテライト・トカマク (JT-60SA) 計画事業

ITERの支援研究

ITERでの研究に先立ち、
プラズマ生成法を準備

原型炉のための 挑戦的研究

ITERでできない高出力運転
の信頼性等の実証

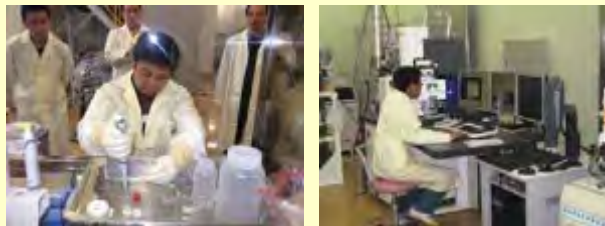


青森県六ヶ所村

国際核融合エネルギー研究 センター（IFERC）事業

原型炉設計・研究開発

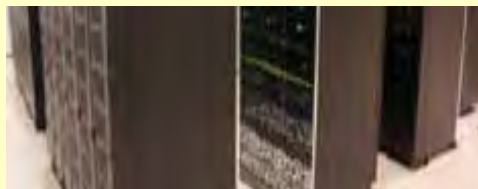
発電のための技術の研究開発



ITER遠隔実験

ITER遠隔実験センターの整備

計算機シミュレーション



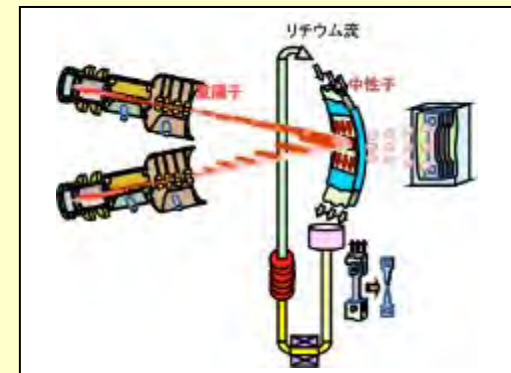
国際核融合材料照射施設の 工学実証/工学設計 (IFMIF/EVEDA) 事業

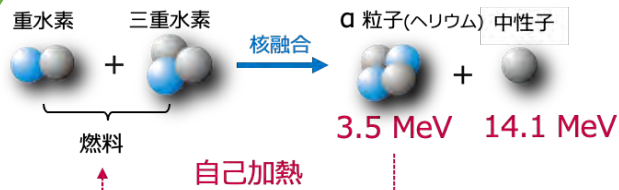
要素技術の工学実証

核融合材料の中性子照射施設
に必要な、原型加速器とリチ
ウムターゲットの工学実証

IFMIFの工学設計

実証データに基づく工学設計



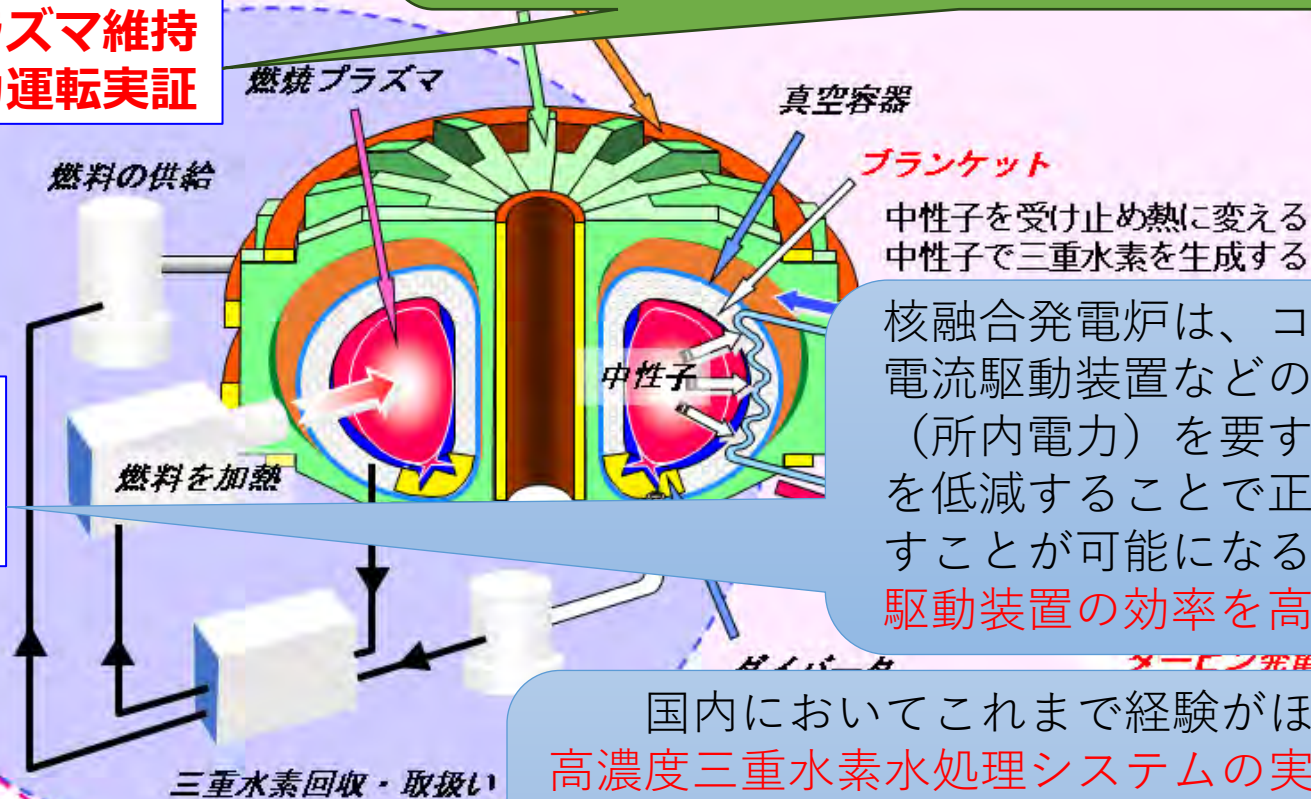


Q=10を超える燃焼プラズマを長時間維持するとともに、高い核融合出力が得られる高圧力運転を実証することで、核融合発電炉における定格運転圧力を決定することが課題。
(ITER計画/BA活動で解決予定)

**燃焼プラズマ維持
・ 高圧力運転実証**

**加熱装置の
高効率化・
高出力化**

**燃料システムにおける
三重水素取扱技術や
ペレット生成技術**



核融合発電炉は、コイル電源や加熱・電流駆動装置などの運転に大きな電力（所内電力）を要する。この所内電力を低減することで正味の発電量を増やすことが可能になるため、加熱・電流駆動装置の効率を高めることが課題。

国内においてこれまで経験がほとんどない高濃度三重水素水処理システムの実証や燃料ペレット製造技術の検証など様々な技術検証が課題。これらの課題解決は、核融合発電炉における燃料システムの安全性確保と許認可取得に不可欠。

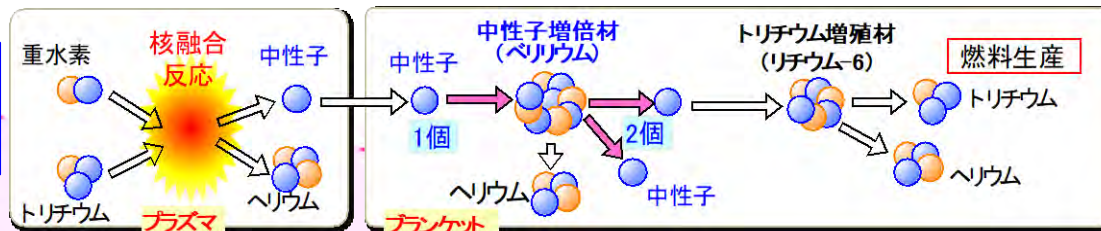
核融合発電炉実機用超伝導導体の品質確認試験や将来の商用炉に向けた**強磁場・電磁力環境下でも動作する高温超伝導導体の開発**が課題であり、超伝導導体の試験やR&Dが必要。

超伝導導体性能確認

超伝導コイル
(TF, PF)

プラズマ

真空



ブランケットにおける燃料増殖技術と放射化したブランケットの遠隔保守技術

熱の取り出しと燃料増殖($TBR > 1$)を両立するブランケットの開発が課題。

実用に供し得る稼働率を実現するとともに、放射化物を安全に取り扱うための遠隔保守技術の開発と放射化物の定量的評価も課題。

運転の許認可を得るため、構造材料である低放射化フェライト鋼の寿命確認のためのデータ蓄積が課題。

ブランケット

中性子を受け止め熱に変える
中性子で三重水素を生成する

冷却水/ガス

熱交換器

高温水/ガス

ダイバータ

タービン発電機

ダイバータ除熱性能向上

小型で高出力の核融合発電炉はダイバータ熱負荷がITERより高くなるため、**ITERよりも除熱性能の高いダイバータの開発**が課題。

參考資料

QST 日本が分担するITER機器の製作状況

- 2023年11月に超伝導トロイダル磁場コイル最終号機をITER建設サイトに納入し、**日本が担当する全9機の製作・輸送を完遂**。欧州担当分も完成し、2024年7月に式典を開催。
- ダイバータ外側ターゲット**実規模プロトタイプ**を製作するとともに、量産化ラインによる**実機用材料の製造を開始**。**2台目のプロトタイプ完成(7/23プレス)**と**実機初号機完成(10/2プレス)**。
- 高周波加熱装置用**ジャイロトロン8機が完成**し、現地の据付作業を開始。**初号機の据付完了(8/21プレス)**。

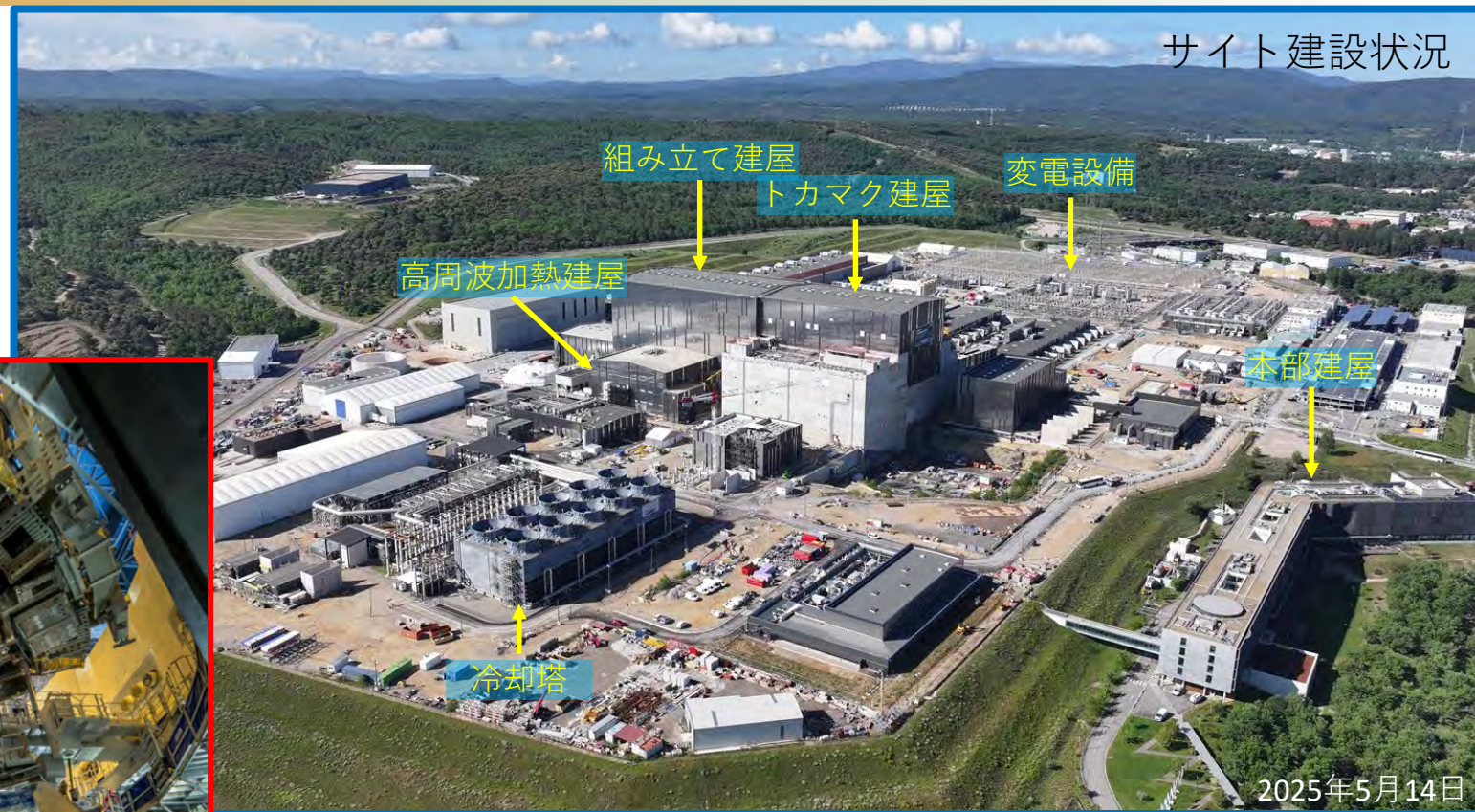


← コイル完成式典：
2024年7月1日

← 超伝導トロイダル磁場コイル
ダイバータ外側ターゲット →
実機初号機
ジャイロトロン
↓



写真:ITER機構提供



トカマク建屋では、真空容器+TFコイルの2セクターを設置済み

⇐40度セクター設置中の写真

#7(下側): 日本製+欧州製のTFコイル

#6(上側): 日本製のTFコイル2機

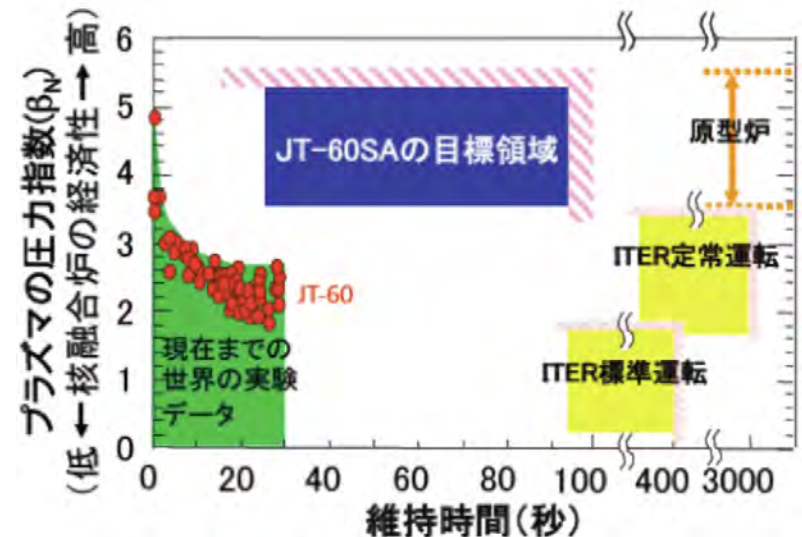
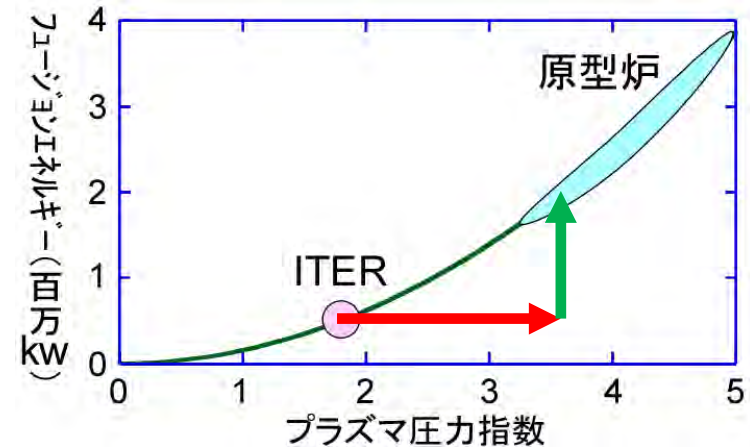
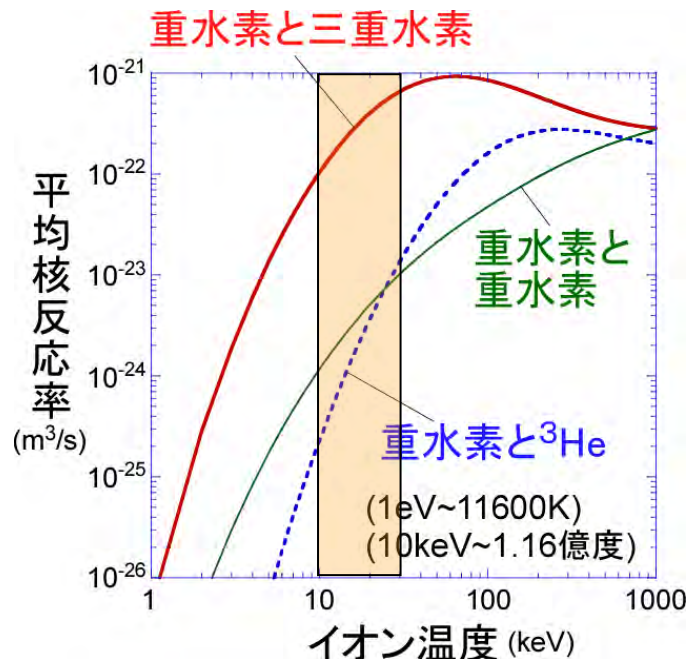
QST 核融合炉実現における高出力運転の意義

- ITERより **2 倍圧力の高い運転**が実現できれば、ITERと同じ大きさのプラズマで **出力を4倍**にできる
- 制御できる圧力には限界があるので、どこまで可能かをJT-60SAで見極める
- 圧力をプラズマ電流などで規格化したプラズマ圧力指数 (β_N) が指標

$$\text{核融合出力} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E$$

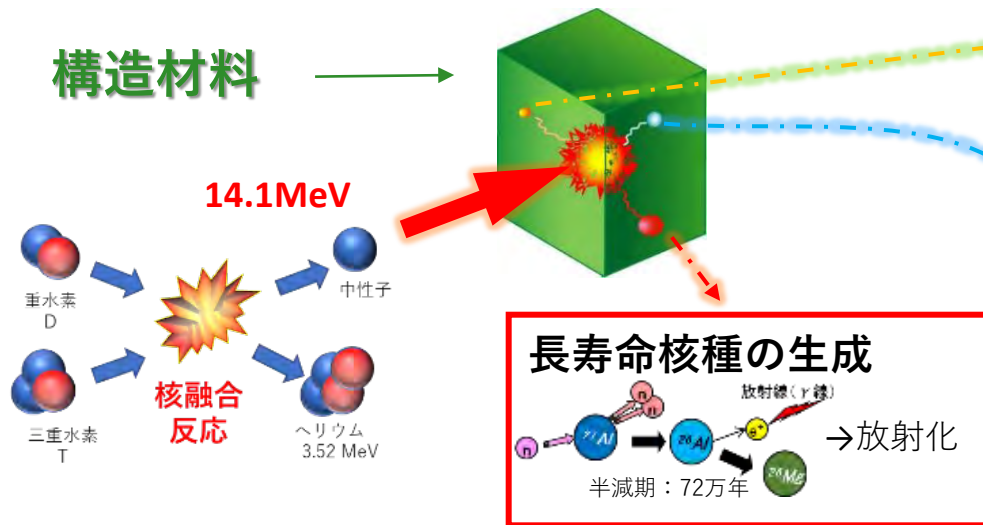
数億度の領域では $\langle \sigma v \rangle \sim T^2$

$$\Rightarrow \text{核融合出力} \sim n_D n_T T^2 \sim \text{圧力}^2$$



QST 核融合炉実現における核融合中性子源の意義

原子炉での80dpaまでの照射データ取得済
溶接部におけるデータ取得などDB拡充中



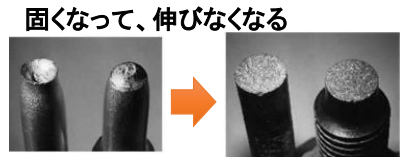
核融合炉内の実環境下(核融合中性子照射下)
における材料の寿命を明らかにすることが必要

使用中の特性変化

→ 特性変化量を把握するとともに、変化を前提とした構造健全性と寿命を保証する設計技術開発が必要

弾き出し損傷

→ 固く・脆くなる



固くなって、伸びなくなる

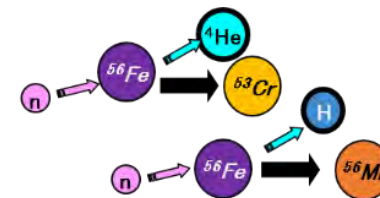
ビリヤードのように原子が弾きだされて傷が入る

脆く、割れやすくなる



原子炉ではなく核融合炉で顕著となる現象

核変換生成ガス元素 → より膨らむ・脆くなる



ヘリウムや水素が材料中で発生する

膨らむ(スウェリング)



- 核融合炉の建設前にデータを蓄積するため、核融合中性子と同じような高いエネルギーを持つ中性子を得るため、加速器を使った中性子源が必要

QST JT-60SA プラズマ体積世界一を達成

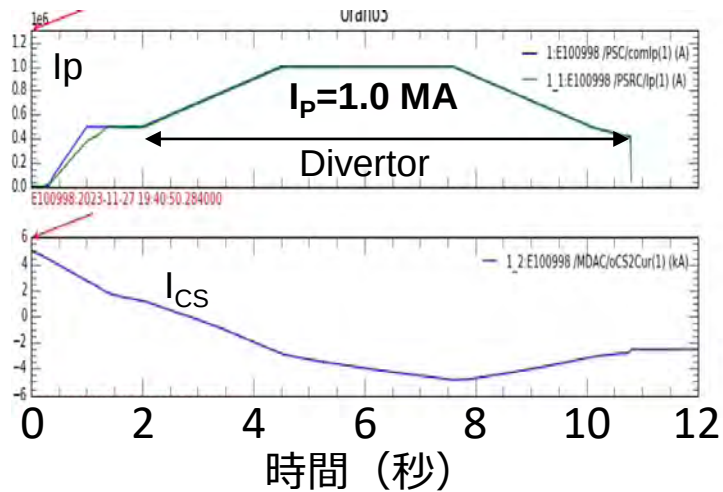
○11月27日（プラズマ試験20日目）に**プラズマ電流1MAのダイバータ配位**を維持

- ・フラットトップ約3秒間、CSコイル電流はほぼ消費

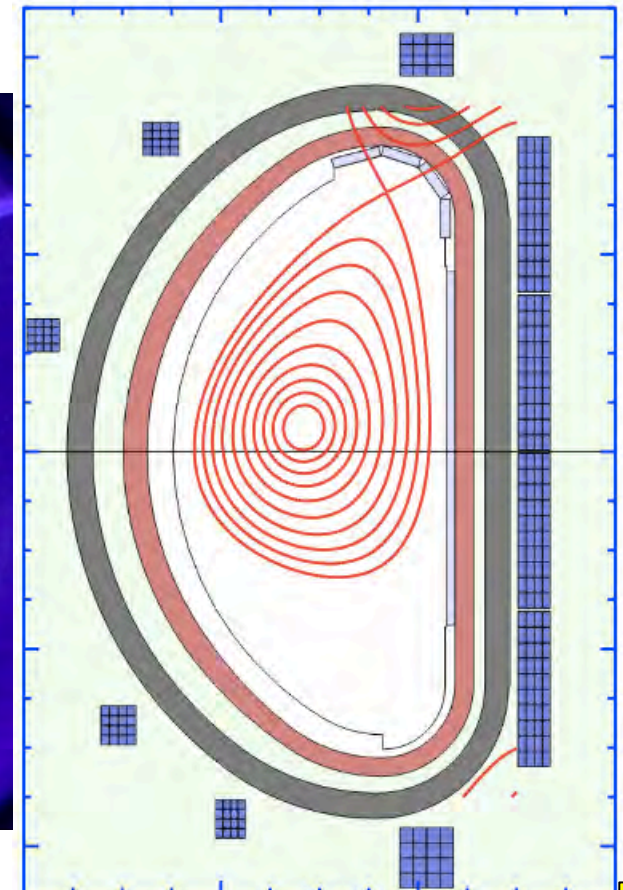
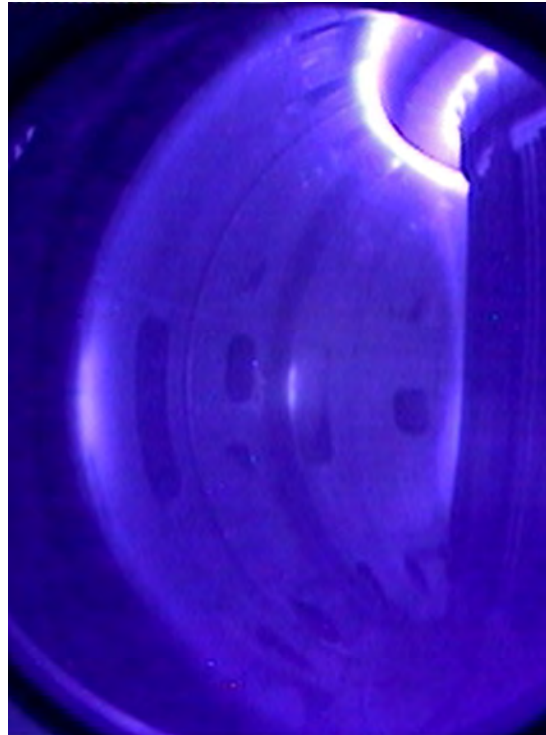
○**プラズマ電流1.2MAのダイバータ配位を達成**

- ・ $\bar{n}_e \sim 5 \times 10^{18} \text{m}^{-3}$ 、 $T_e(0) \sim 1 \text{keV}$ 、 $\kappa \sim 1.6$ 、ECH 82GHz: 1秒、110GHz: 3.5秒

○加熱実験に向けた装置増強作業に移行



プラズマ体積 160m^3
世界記録認定



- ITER遠隔実験センター（REC）では、2024年8月に専用回線を100Gに増強
- 2018年6月から運用してきたJFRS-1の運用を2025年3月に停止し、2025年7月からNIFSと共同で調達した新スパコンの運用を開始
- 炉内機器のための構造材料開発データベースの拡充、中性子増倍材・三重水素増殖材の開発、これら機能材の原子炉照射試験も進展

○ ITER遠隔実験参加システムの構築・試験

- REC室において、ITER主制御室のオペレータと同等な情報をリアルタイムでモニタできる環境が完成。

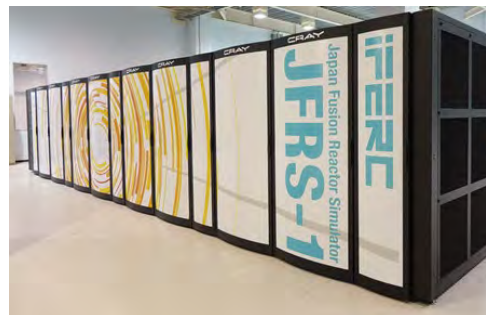


○ RECへ転送したデータの解析環境構築

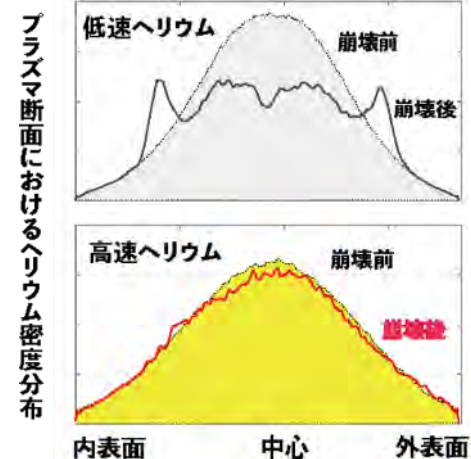
- ITER機構側と協力してデータアクセス(Unified Data Access)試験システムの構築を進めている。

○ IFMIF、JT-60SAとの協力

- IFMIFへの遠隔実験参加システムを運用。
- JT-60SAへの遠隔実験参加システム構築で日欧合意。試験運用を開始（2025年8月）



NIFSと共同で調達した新スパコン

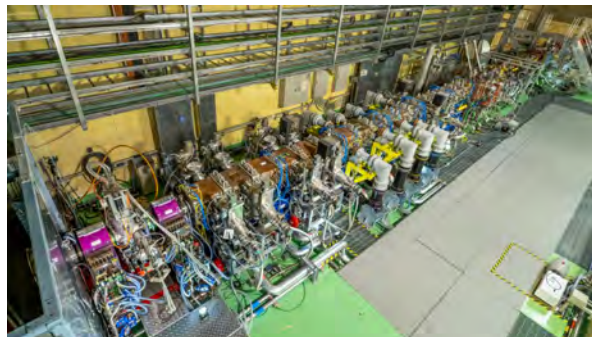
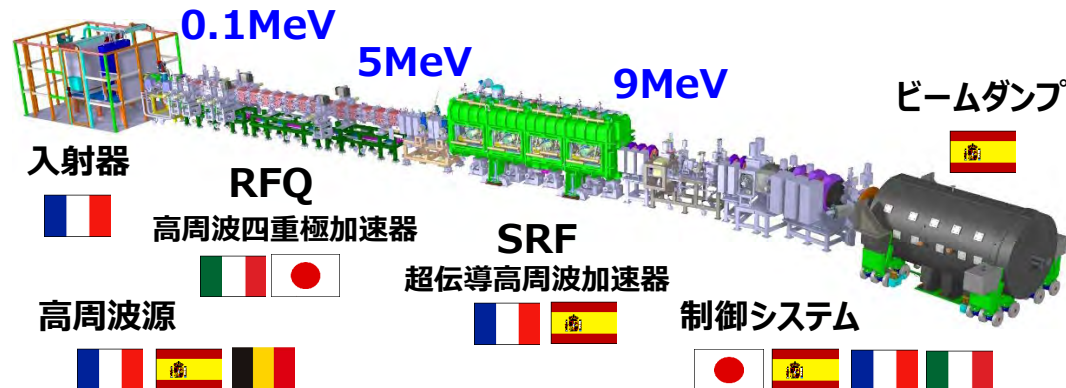


核融合反応で発生するアルファ粒子(高速ヘリウム)とヘリウム灰(低速ヘリウム)のうち、不要なヘリウム灰がITERでも発生が想定される炉心プラズマ中心の鋸歯状振動によって選択的に排出される可能性を初めて明らかにした。(**燃焼プラズマ(ITER)の性能予測に資する成果**)

- 5MeVでの原型加速器（LIPAc）の実証試験（R6年6月末現在）
 デューティ**8.75%**（3.5ms、25Hz、継続時間約1分）を達成@ビーム電流約119mA
 パルス長**4.4ms**に到達@ビーム電流約115mA。
 平均ビーム電力40-45kWは稼働中のRFQとしては世界最大
- 9MeV加速試験に向けたSRFの組立作業を実施中。2026年に9MeVでのビーム試験を開始予定。

原型加速器（LIPAc）開発

125mA, 9 MeV 重陽子（連続）



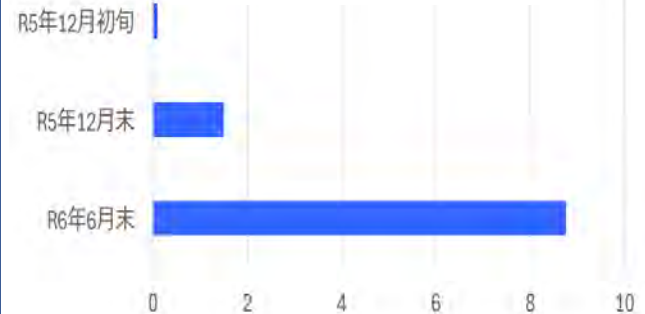
入射器とRFQが**連結された加速器**でビーム加速試験を実施中



遠隔実験室で欧州からも**リモート**で実験参加

● LIPAc実証試験の進展

デューティ (%)



● SRFの組立作業の様子



