

幅広いアプローチ(BA)活動(フェーズII) の検討状況について

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
核融合エネルギー研究開発部門長
牛草 健吉

平成30年10月31日
核融合科学技術委員会



概要

- 我が国の核融合エネルギー研究開発におけるBA活動の位置づけ
- これまでの達成状況
 - 国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業
 - 国際核融合材料照射施設の工学実証工学設計(IFMIF/EVEDA)事業
 - サテライト・トカマク(JT-60SA)計画事業
 - まとめ・国内活動への展開
- BA活動フェーズIIの基本的事項
- フェーズIIIにおけるIFERC事業の検討状況
- フェーズIIIにおけるIFMIF/EVEDA事業の検討状況
- フェーズIIIにおけるサテライト・トカマク(JT-60SA)計画事業の検討状況

我が国の核融合エネルギー研究開発 におけるBA活動の位置づけ

我が国の核融合研究開発におけるBA活動の位置づけ

- 原子力委員会が定めた第三段階核融合研究開発基本計画等に基づき、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の実証、及び原型炉建設判断に必要な技術基盤構築を進めるために、国のプロジェクトとして、ITER計画及び核融合エネルギーの研究分野における幅広いアプローチ(BA)活動を国際共同で実施。
- BA活動は原型炉の早期実現のため、ITER計画を支援・補完。日本の実施機関に日本原子力研究開発機構、現在は量子科学技術研究開発機構が指定されている。

試験装置の段階

(科学的実現性)

超高温プラズマの実現

JT-60

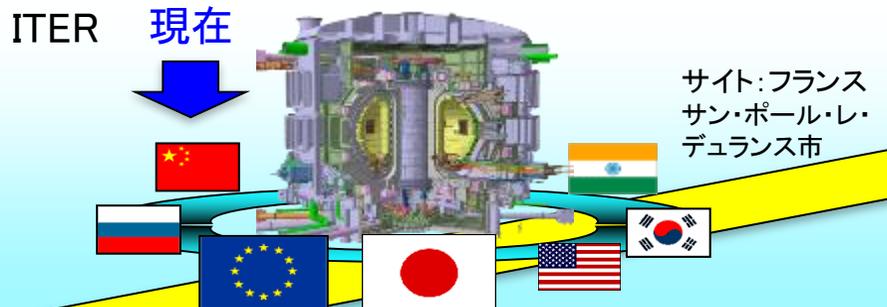
世界最高のエネルギー増倍率
1.25
世界最高イオン温度
5.2億度



実験炉の段階

(科学的・技術的実現性)

持続的な核融合燃焼の実証 50万kW



原型炉の段階

(技術的実証・経済的実現性)



原型炉

発電実証
経済性の見通し

実用化

ITERを支援する

幅広いアプローチ(BA)活動

- 原型炉に向けた技術基盤構築と国際的な拠点形成
- 原型炉のための研究実績の蓄積と人材育成



サテライト・トカマク(JT-60SA)計画事業



国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業

国際核融合材料照射施設の工学実証工学設計(IFMIF/EVEDA)事業

ITERでできないことを補う

BA活動の経緯

- ◆ 2004年1月に、ITER国際チームと6極の専門家の作業会合にて、“Report of the Broader Approach to Fusion Power”の報告書を作成。
- ◆ 2005年5月の日欧共同文書において、日欧が各々460億円相当の資金を負担し、ITERホスト極にならなかった方の極でBA活動を実施することを合意。
- ◆ 2005年6月にBA活動を日本で実施することを決定(ITER計画は欧州での実施が決定)。
- ◆ 2005年8～9月にITER計画推進検討会(座長:有馬朗人)において、我が国から提案すべきと考えるBA活動について検討。
- ◆ 同検討会の報告を踏まえ、日本からBA活動の候補として、以下を提案(最終的に以下の3事業がBA協定に盛り込まれた)。
 - ◇ IFERC(国際核融合エネルギー研究センター)
 - ◇ IFMIF-EVEDA(国際核融合材料照射施設工学実証工学設計活動)計画
 - ◇ サテライト・トカマクとしてのトカマク国内重点化装置計画
- ◆ 2005年7月～2006年6月、日欧協議(活動内容、資金割合、実施の枠組み等)
- ◆ 2006年11月22日、ブラッセルにおいてBA協定に仮署名、BA活動実施に関する共同宣言に署名。
- ◆ 2007年2月5日、東京においてBA協定に署名。
- ◆ 2007年5月9日、BA協定の締結について国会で承認。
- ◆ 2007年6月1日、口上書を日欧が交換し、BA協定が発効。
- ◆ 2007年6月21日、第1回BA運営委員会(東京)にて、3事業長を任命。
.....
- ◆ 2018年4月26日、第22回BA運営委員会(茨城県那珂市)を開催。

幅広いアプローチ(BA)活動の概要

- 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~)【日欧協議中】

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

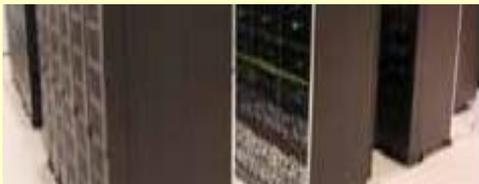
発電のための技術の研究開発



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



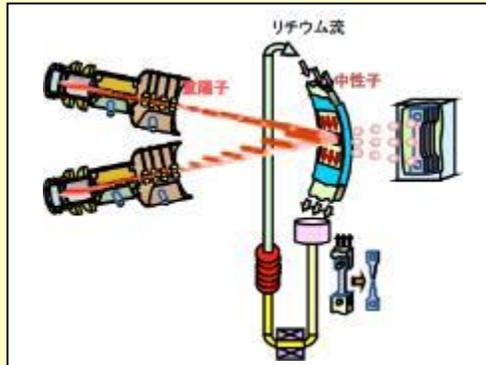
国際核融合材料照射施設の工学実証工学設計(IFMIF/EVEDA)事業

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



茨城県那珂市

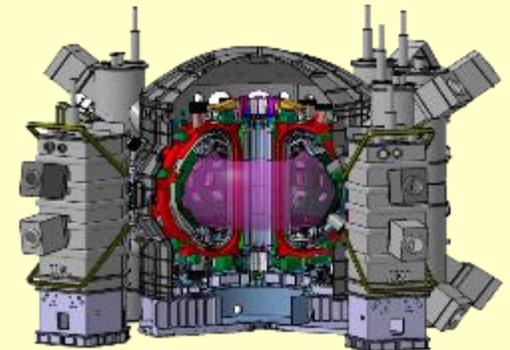
サテライト・トカマク(JT-60SA)計画事業※

ITERの支援研究

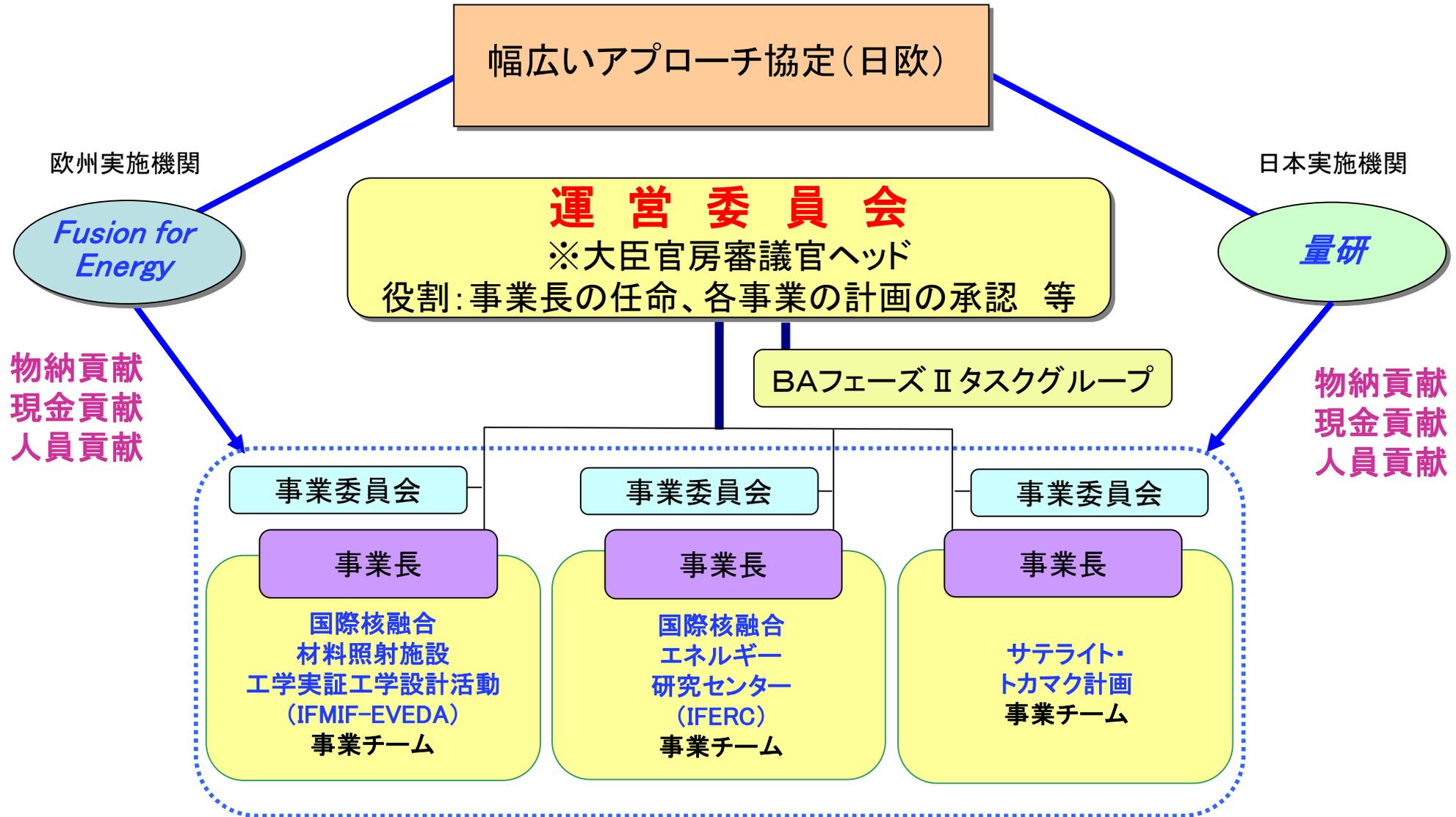
ITERでの研究に先立ち、プラズマ生成法を準備

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



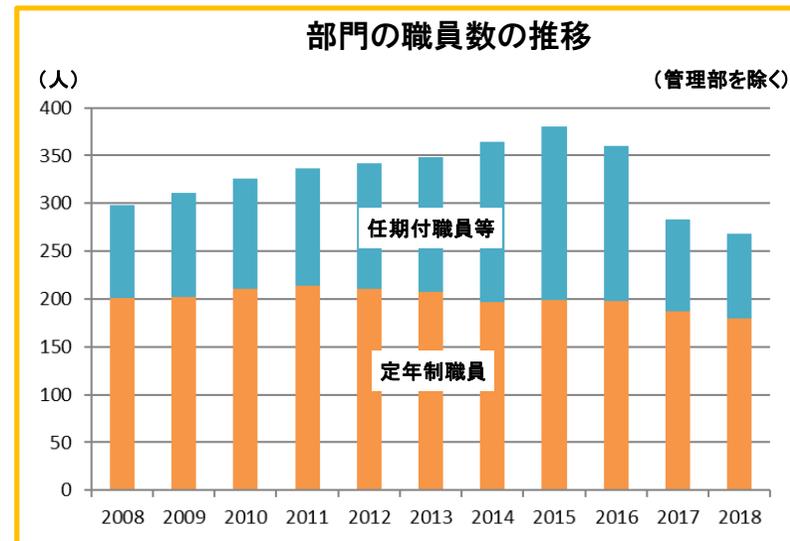
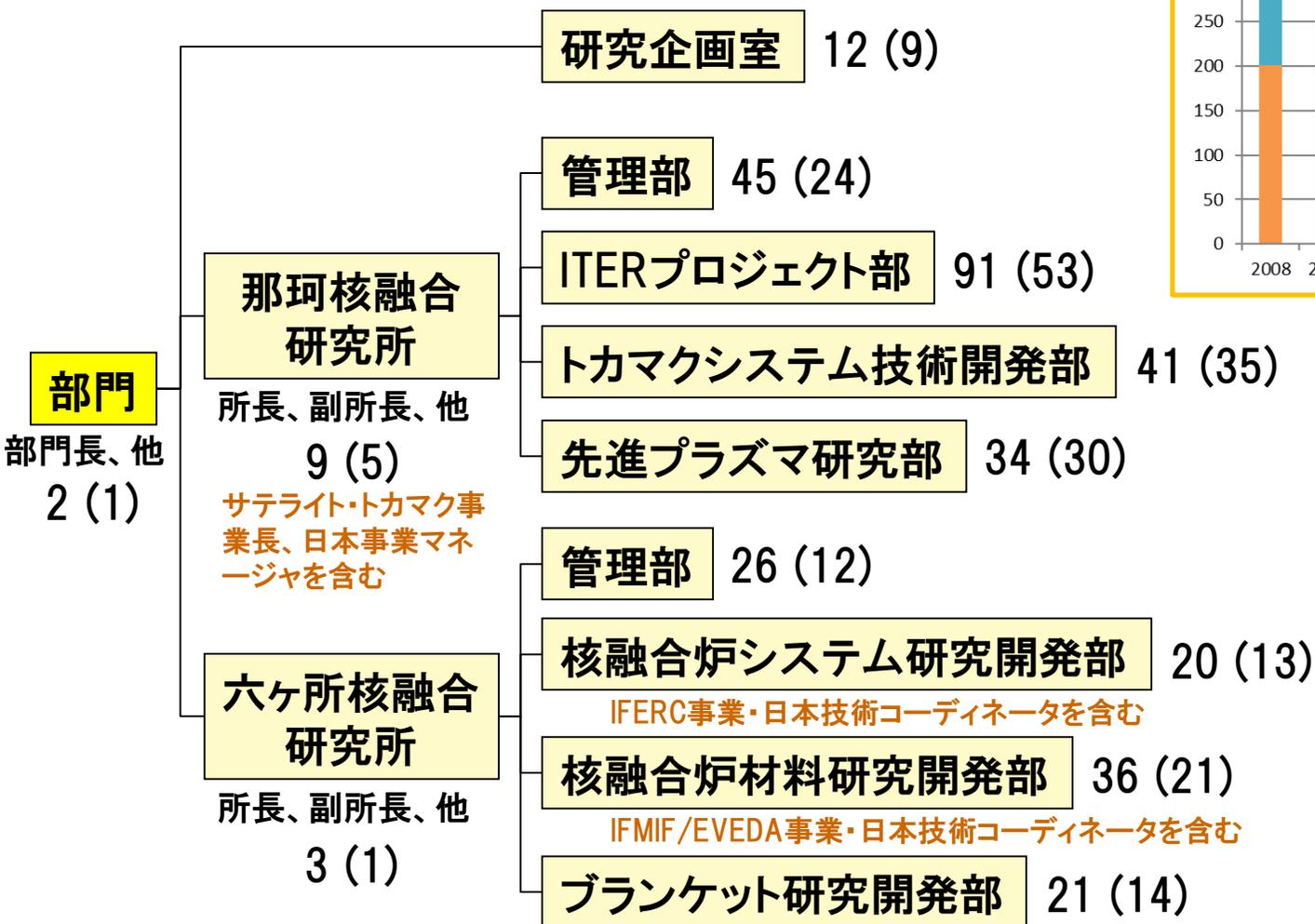
幅広いアプローチ(BA)の実施体制



日本の実施機関における実施体制(量子科学技術研究開発機構)

核融合エネルギー研究開発部門の組織

2018.4.1現在
数字は職員等。括弧内はそのうちの定年制職員数。



サテライト・トカマク事業を主に実施

IFERC事業
IFMIF/EVEDA事業を主に実施

これまでの達成状況

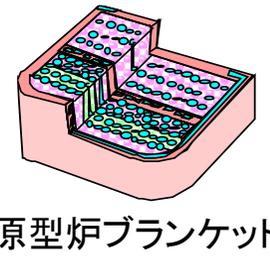
フェーズI進捗状況の全体

年度	細目	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	
幅広い ア プ ロ ー チ 活 動	IFERC事業	原型炉設計・R&D ★第1中間報告書 ★第2中間報告書 最終報告書☆ ○原型炉プラント全体概念、機器概念、コストなど幅広い課題を日欧共同で分析 ○SiC/SiC複合材料データベースの拡充 ○低放射化フェライト鋼の原型炉規模製造技術の見通し、データベース拡充 ○JETタイル試料の分析(材料の変化やトリチウム吸蔵量) ○先進中性子増倍材ペリライド微小球のkg規模造粒と有効熱伝導率測定 ○リチウム含有量を向上した先進トリチウム増倍材微小球の製造													
		計算機シミュレーションセンター 機種選定・調達 運用 個別運用 新スパコン運用 ○日欧共同で1.2Pflopsの高性能計算機システムを導入・運用 ○平均利用率約90%を維持 ○日欧の研究者により600編以上の学術論文を刊行													
		遠隔実験センター 設計・検討 整備・運用 ○ソフト開発及び遠隔実験設備等を整備 ○ITERとの高速データ転送実証 ○東大TST-2装置と遠隔実験成功 ○WESTとの遠隔実験を予定													
		加速器設備 加速器組立開始★ 入射系D⁺ビーム★ RFQ H⁺ビーム★ SRF D⁺ビーム★ ○IFMIF原型加速器入射器の重陽子ビーム試験で目標性能を達成 ○8系統高周波によるRFQの陽子ビーム加速に成功													
	IFMIF/EVEDA 事業	標的設備 リチウムループ完成★ 実証試験 分解・分析 ○IFMIFの最大流速条件(20m/s)を達成 ○目標流速での長時間安定性を実証													
		試験設備 設計・試験 ○照射試験モジュールの実証試験を実施 ○微小試験片の試験法と試験技術を評価													
		工学設計 ○中間工学設計報告書を完成													
	サテライト・トカ マク(JT-60SA) 計画事業	機器製作 組立開始★ 調整運転 組立完了☆ ○欧州からクライオスタットベースが搬入され組立開始 ○3つの超伝導平衡磁場コイルをクライオスタットベース上に仮設置 ○真空容器340°の組立完了 ○欧州調達の超伝導トロイダル磁場コイル18機の組立完了 ○真空容器360°の組立完了 ○欧州が調達した冷凍機システムの設置完了後に調整運転を実施 ○欧州調達電源の順次設置と受入れ試験の実施 ○JT-60SA用中性粒子入射装置の長時間運転技術を開発 ○リサーチプランVer.4の完成													

国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業

○六ヶ所村の国際核融合エネルギー研究センターにおいて、以下の研究活動を実施する。

- ① 原型炉概念設計に向けた研究活動
原型炉の共通概念を確立すべく、安全性等に関する検討を行う。
- ② 原型炉R&D(研究開発)活動
原型炉に関する以下の5つの研究開発を行う。
 - SiC/SiC複合材
 - トリチウム技術
 - 原型炉ブランケット用材料工学
 - 原型炉ブランケット用先進中性子増倍材
 - 原型炉ブランケット用先進増殖材
- ③ 核融合計算機シミュレーションセンター
プラズマ挙動や材料開発等に関連するシミュレーションを行う。
- ④ ITER遠隔実験センター
ITERの実験条件の提案や実験データの収集、解析等を行う。

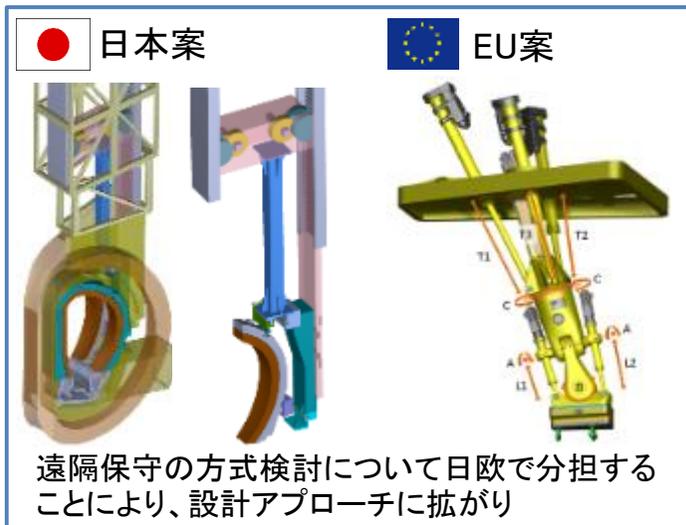


IFERC事業①: 原型炉設計

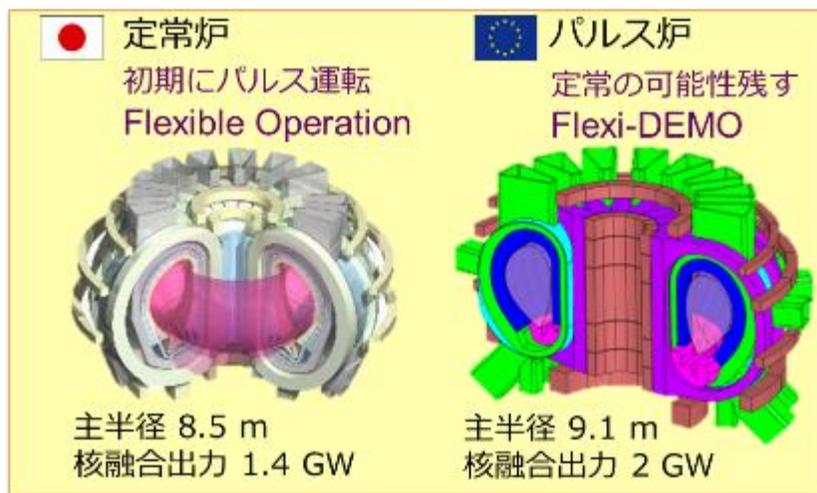
- 原型炉を構成する技術要素案を日欧共同で検討
- これまで、原型炉設計技術調整会合9回、設計タスク会合30回、R&D関係者との合同技術調整会合5回を開催
- 重要設計課題の分析
 - ✓ ダイバータ、遠隔保守など
- 技術検討を踏まえて、原型炉基本概念を探索
 - ✓ 日本は定常炉、欧州はパルス炉
- 日欧共同による設計報告書
 - ✓ 2015年2月 中間報告書を編纂
 - ✓ 2017年2月 第2中間報告書を編纂、2020年3月までに最終報告書(予定)



第28回原型炉設計タスク会合(2017年6月、独ガルヒン)



ブランケットセグメント移送機器概念



BA活動で検討中の原型炉概念

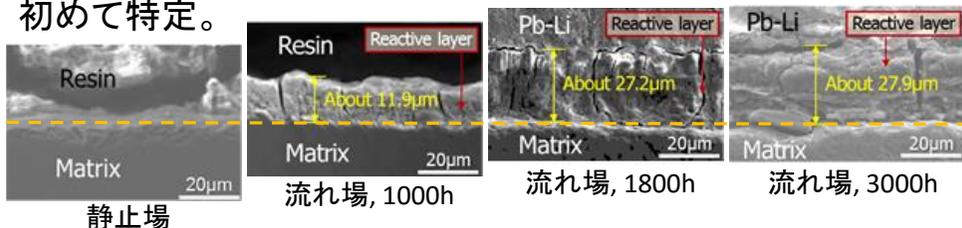


第2中間報告書(2017年2月)

IFERC事業②: 原型炉研究開発(R&D)

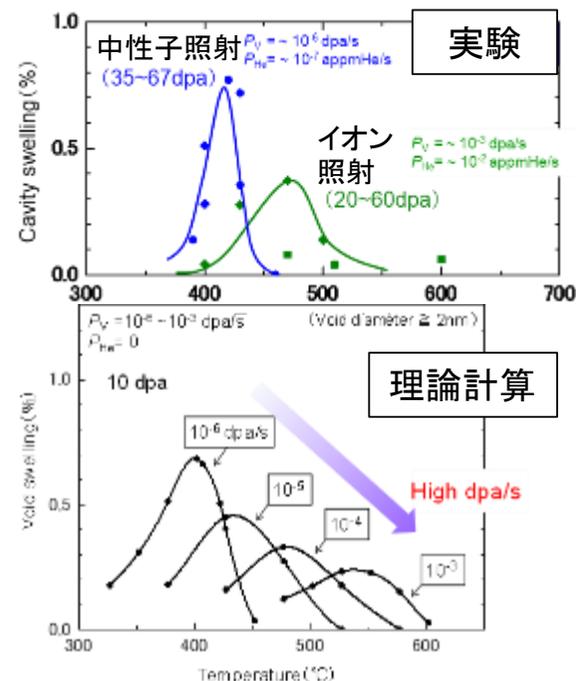
SiC/SiC複合材料

日欧合意した3000時間までの液体リチウム鉛腐食試験を実施し、長時間側で腐食が加速することなく、安定となることを初めて特定。



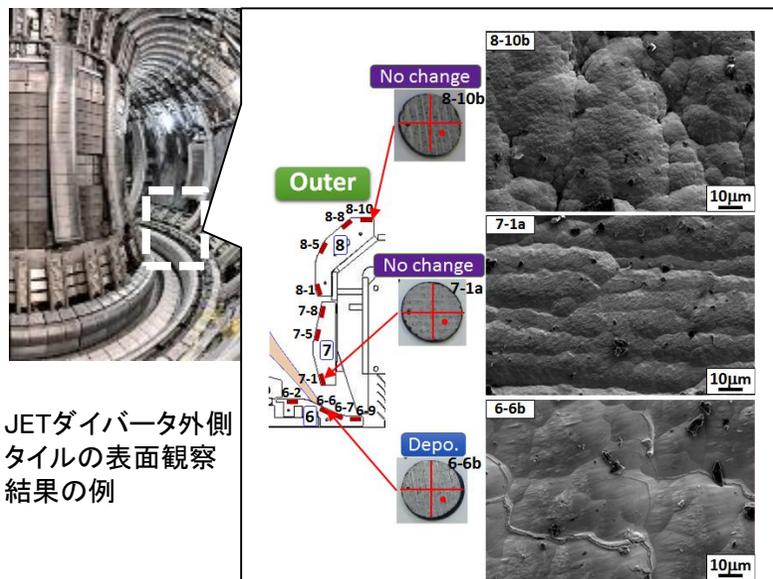
低放射化フェライト鋼

核融合中性子照射効果予測技術確立に向けて、損傷導入速度が原子炉中性子照射より1000倍速いイオン照射で実験的に観測されたスウェリングピーク温度の違いを理論計算で再現。



トリチウム取扱技術

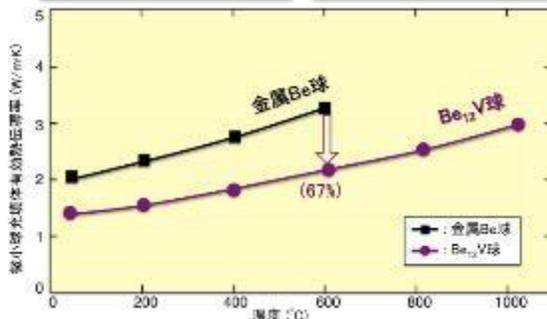
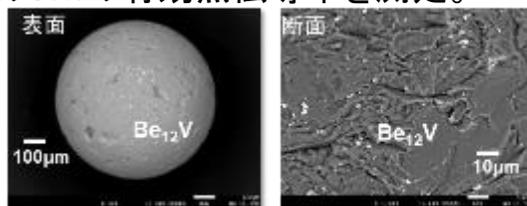
JETのタイル試料を六ヶ所施設に搬入し、材料の変化やトリチウム吸蔵量を測定。ITERや原型炉でのトリチウム計量管理にとって貴重なデータを取得。



JETダイバータ外側タイルの表面観察結果の例

先進中性子増倍材

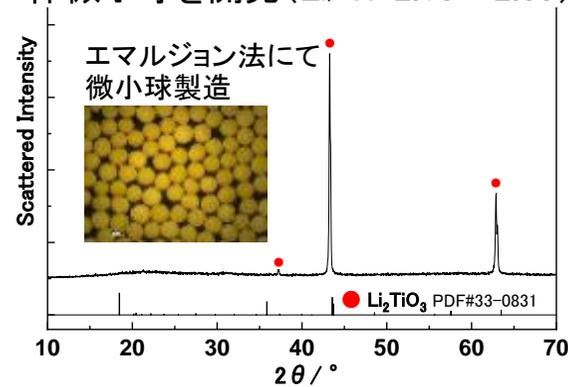
組成均質化処理が不要な $Be_{12}V$ 微小球のkg規模の造粒を達成し、Be金属の67%の有効熱伝導率を測定。



$Be_{12}V$ ベリライド微小球充填体の無負荷時の有効熱伝導率測定結果(金属Be球との比較)

先進トリチウム増殖材

従来より多くのLiを含有する新たな固溶体微小球を開発(Li/Ti=2.15→2.69)



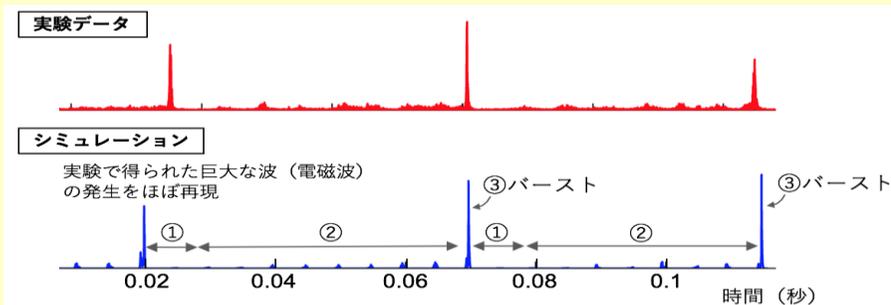
IFERC事業③:核融合計算機シミュレーションセンター

- 計画どおりにCSC&REC棟、電源系、冷却設備等を完成させ、2012年1月からCSCスパコンの運用を開始。
- CSCスパコンを5年間にわたり円滑に運用し、2016年12月末に運用を停止。
- 第2サイクル以降、85%を越す高い平均利用率を達成。効率のよいスパコン環境を日欧の研究者に提供。
- 日欧合わせて640編の査読付論文がCSCスパコンの利用成果として刊行。



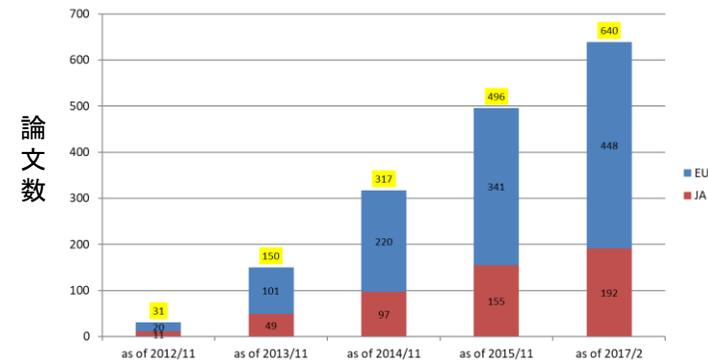
高エネルギー粒子シミュレーション

時間スケールの異なる高速粒子と電磁流体の長時間ハイブリッドシミュレーションに成功し、間欠的バースト(高速粒子の大量損失)を再現することに成功した。これにより間欠的バーストを避けて安定にITERなどの核融合炉を運転する糸口を得た。(Nature Communications 2018年8月16日号に掲載)



サイクル	第1	第2	第3	第4	第5
平均利用率*	65.6%	85.9%	89.7%	91.4%	93.8%

*) メンテナンス週を除く



IFERC事業④: ITER遠隔実験センター(REC)

六ヶ所サイトとITER等を高速インターネットで接続、六ヶ所に居ながら遠隔実験を可能にするシステムを整備。H29年度から、遠隔実験の実証試験を開始。H30年度には、欧州のトカマク装置を用いた遠隔実験を予定。

年度	H28	H29	H30	H31
遠隔実験ソフトウェアの開発	→			
遠隔実験室等の整備	→			
高速データ転送試験	●→			
総合機能試験		●→	●→	●→

現在

遠隔実験センターの整備完了

ITERと遠隔実験センター間の高速データ転送試験



専用の高速国際ネットワーク回線

30分毎に1TBのデータを50時間に亘り繰り返し転送に成功。



遠隔実験センター (六ヶ所)

SINET5

東京大TST-2装置 (柏キャンパス)

東京大TST-2核融合装置の遠隔実験に成功(H29年12月13日)

遠隔実験をプレスに公開
新聞3社、朝日Webニュース、等に動画掲載

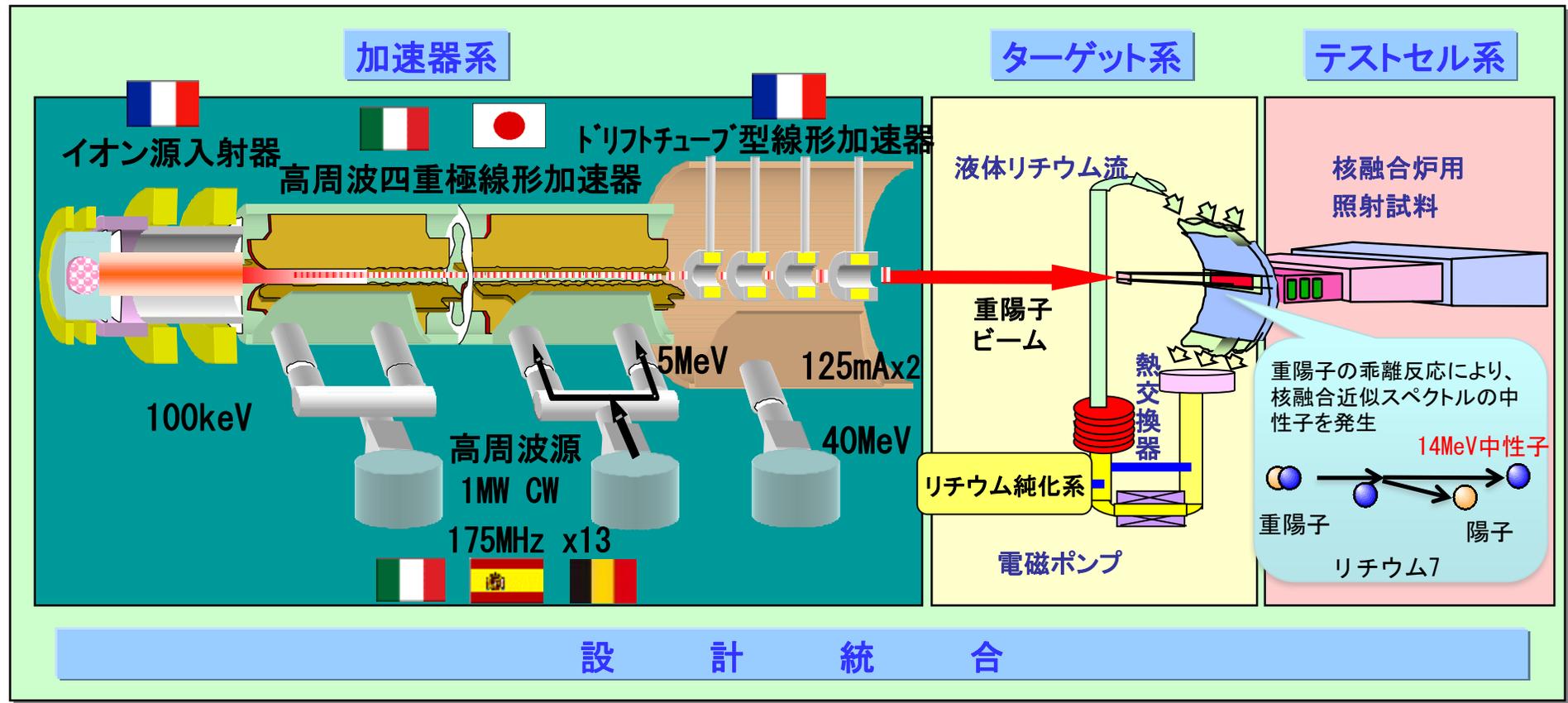
ITERを想定して欧州への遠隔実験の実証(予定)

- ・ フランストカマク装置(WEST) (H30年予定)
 - 遠隔実験センター
 - ← 遠隔実験
 - ← 国際ネットワーク回線
 - (フランス、英国)
- ・ 英国トカマク装置(JET) (H31年予定)

国際核融合材料照射施設の工学実証工学設計(IFMIF/EVEDA) 事業

○国際核融合材料照射施設(IFMIF)^{【注】}の建設判断に必要な主要機器の工学実証(原型コンポーネントの製作プロセスの開発とIFMIFの運転上クリティカルとなる長時間耐久性などの性能実証)と工学設計を行う。

【注】原型炉の候補材料に中性子を照射し、材料の試験を行うための施設



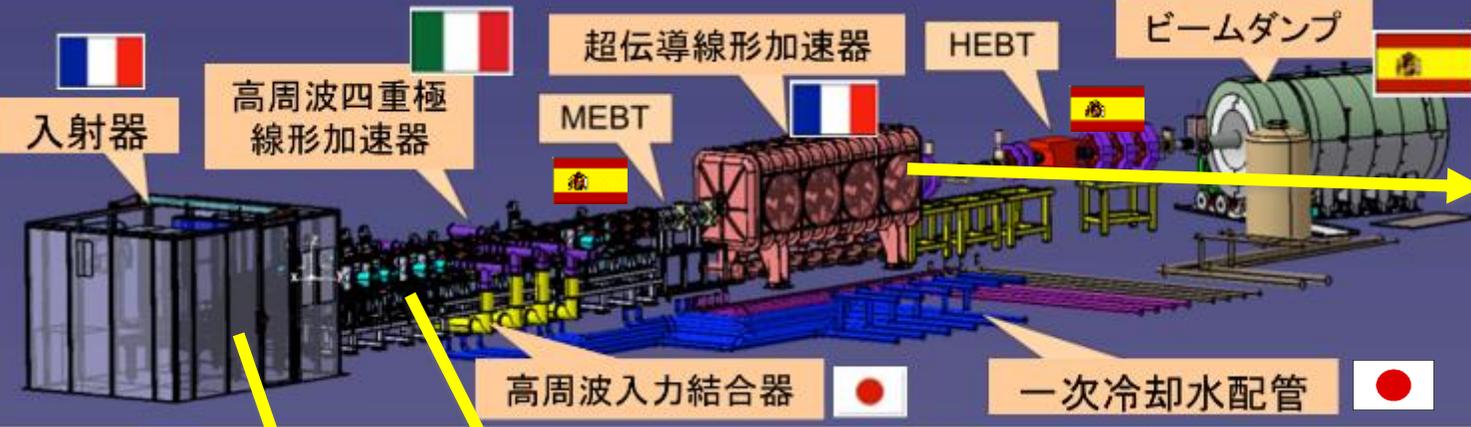
IFMIF/EVEDA事業：原型加速器開発

IFMIF(重陽子を40MeVまで加速x2ライン)

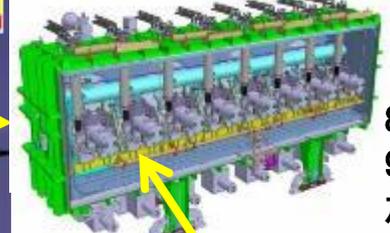


主要部分の実証

IFMIF/EVEDA原型加速器(9MeV, 125mA, 重陽子ビーム加速の実証)



超伝導線形加速器SRF(製作中)



8台直列で
9MeVまで
加速



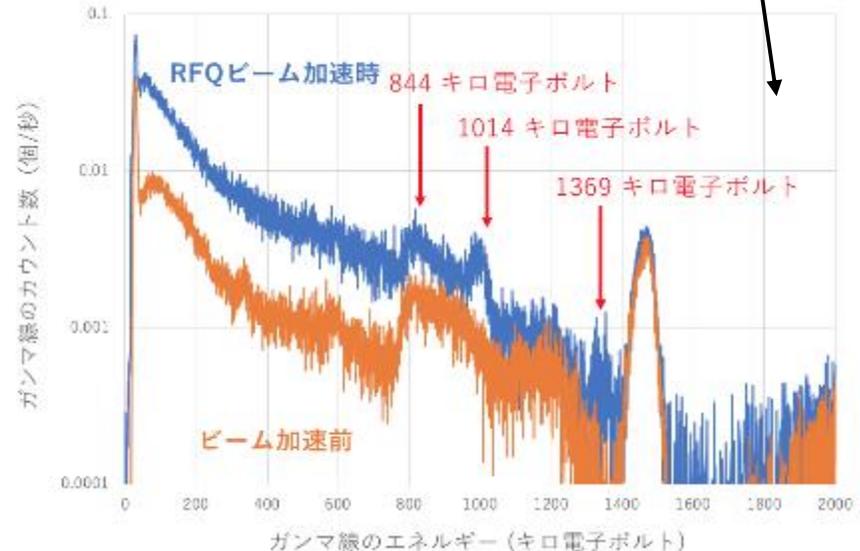
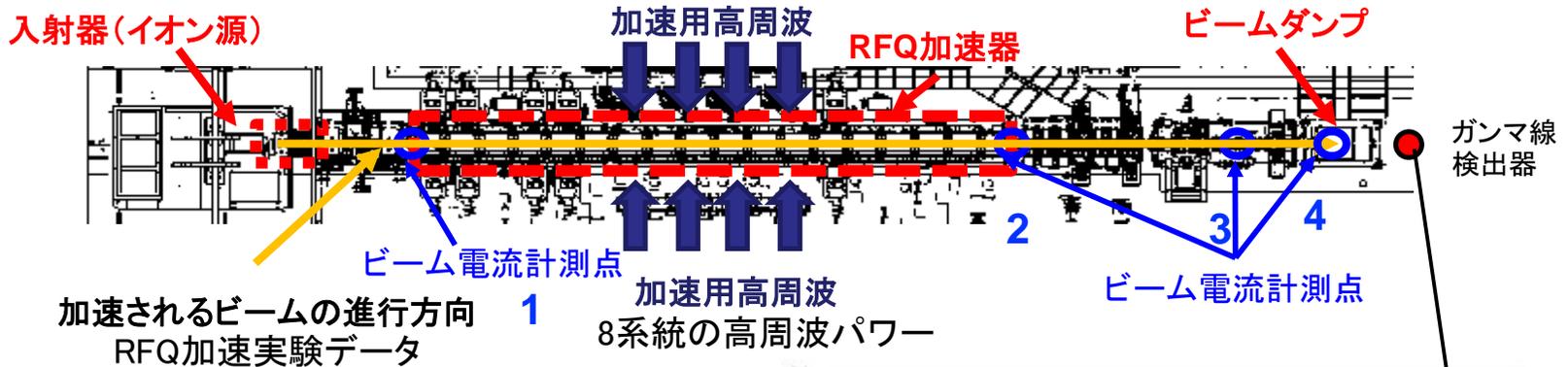
高周波四重極線形加速器RFQ(5MeVまで加速)

入射器(重陽子ビームの
100keV/144mA加速成功)



IFMIF/EVEDA事業：原型加速器開発の現状

- 8系統高周波によるRFQ陽子ビーム加速(2.5MeV)に成功(H30年6月13日)
- ビームパルス幅0.3ms、電流値25mA、通過率93%を達成
- H30年度：RFQによる重陽子ビーム加速、SRF組立て H31年度：SRF据付・調整、9MeVビーム加速



50keVのエネルギーの入射ビームがRFQで加速され2.5MeVになって出力(陽子ビーム電流25mA)。

ビームダンプで発生したガンマ線の測定結果。陽子ビームが加速されてビームダンプに入射したことを示す。 17

サテライト・トカマク(JT-60SA)計画事業

BA活動におけるサテライト・トカマク計画とトカマク国内重点化装置計画の合同計画

○ITERの技術目標達成のための支援研究

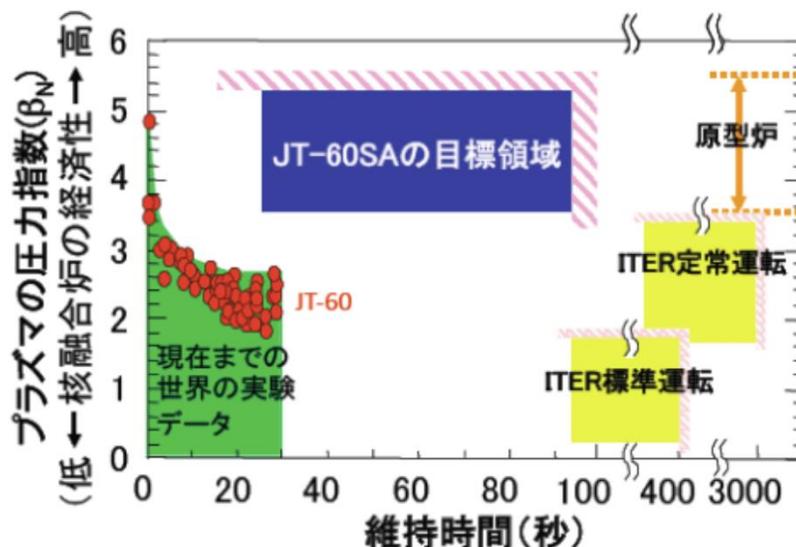
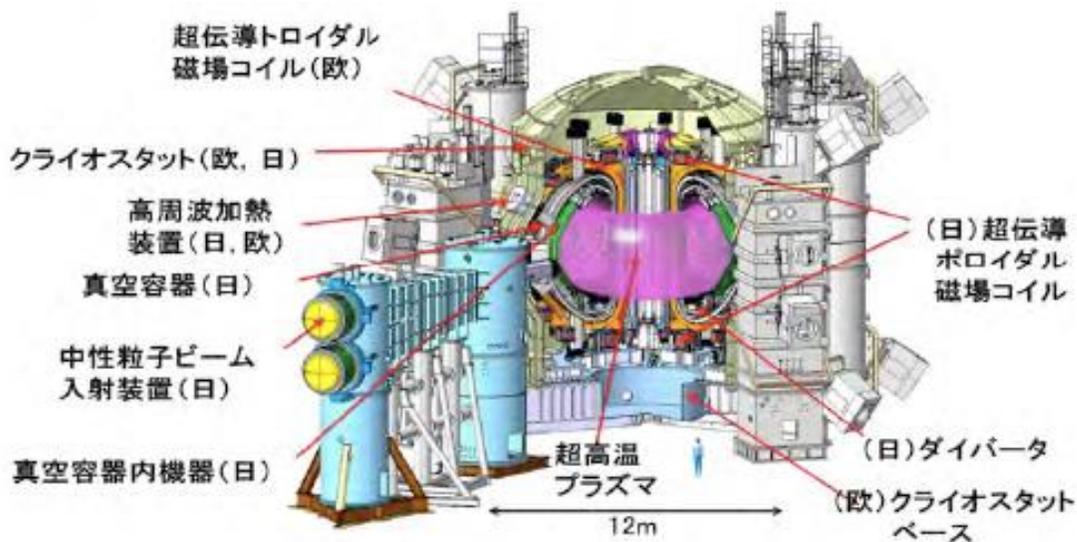
臨界条件クラスのプラズマを長時間(100秒程度)維持する高性能プラズマ実験を行い、その成果をITERへ反映させる。

○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カプラズマを100秒程度維持し、原型炉の運転手法を確立する。

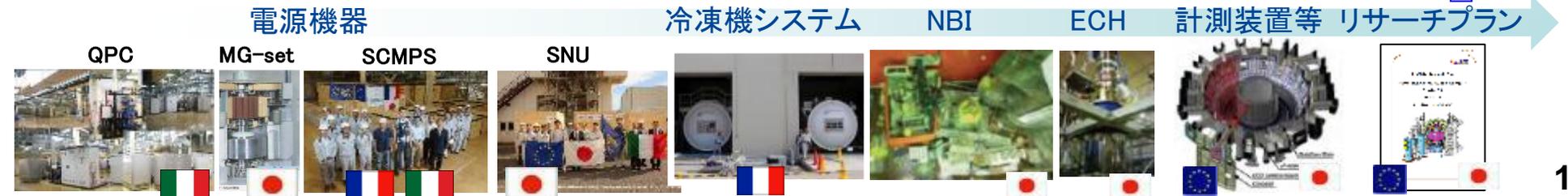
我が国唯一の大型トカマク装置で、世界の実験装置の中でITERに対して最も大きな支援を行う能力を有するとともに、ITERでは実施が難しい高圧カプラズマ定常化研究開発を実現できる世界で唯一の装置。欧州が大規模予算で貢献する我が国初の実験装置。ITER・原型炉開発を主導する人材を育成する。

==>この研究計画を国内コミュニティ(若手中心)に共同企画



サテライト・トカマク計画事業：JT-60SA建設の進展

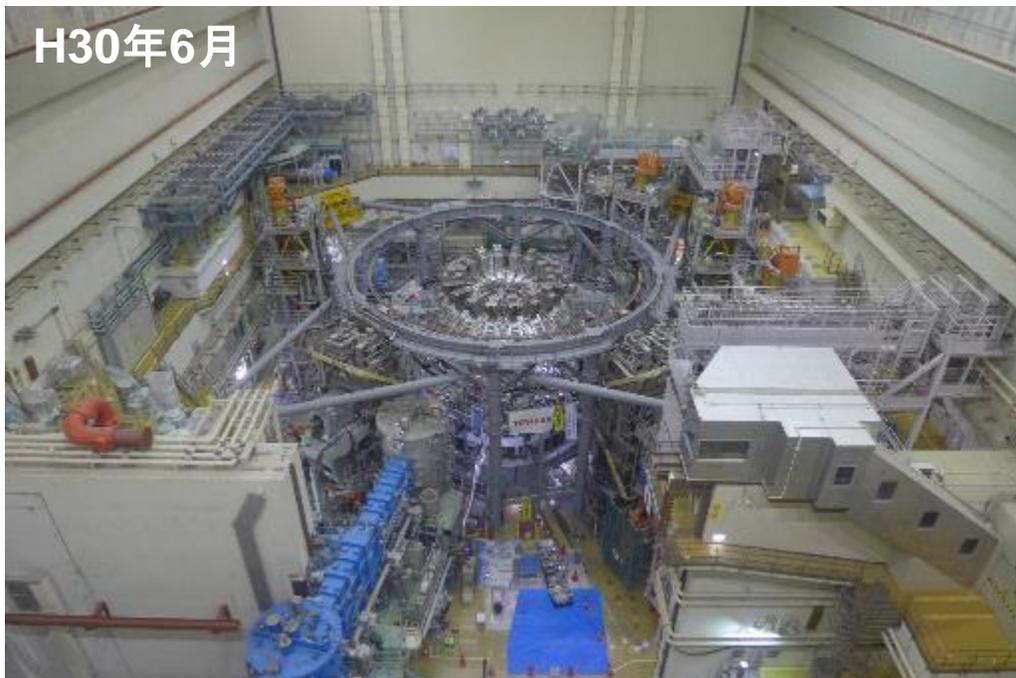
- H30年7月までに日欧合計30件（日本調達分17件、欧州調達分13件）、全ての物納貢献分に対して調達取り決めを締結し、機器製作及び組立・設置作業を進めている。
- 第20回運営委員会（H29年4月）は、「JT-60SA組立がH32年3月に完了する」ことを承認し、初プラズマの生成がH32年9月になることに留意。



サテライト・トカマク計画事業：建設状況

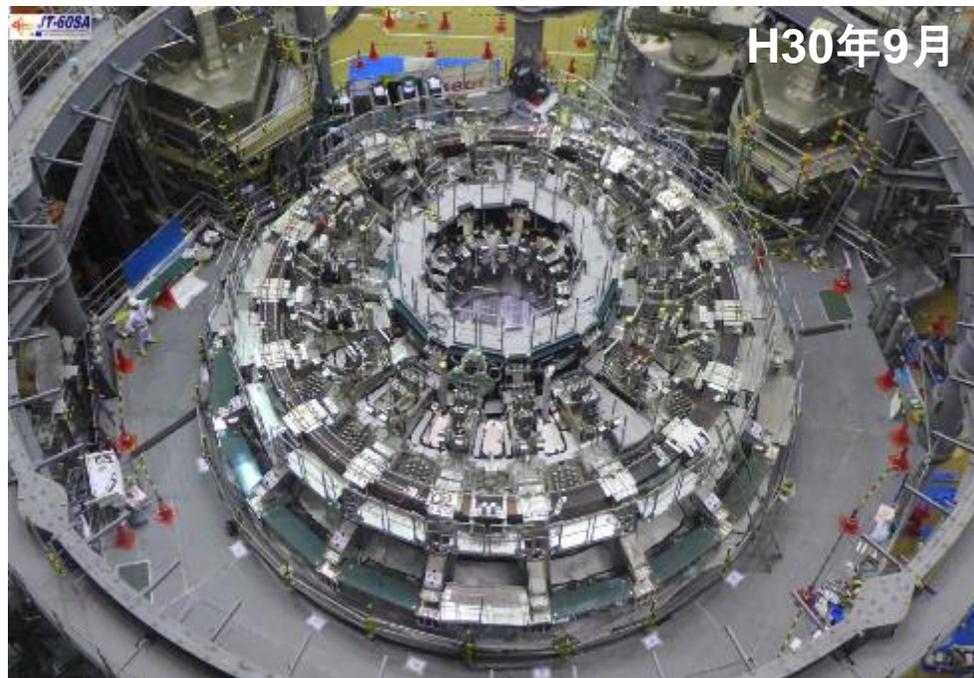
- TFコイル全18機の組込み後、真空容器の最終セクター一部の溶接を実施し、8月に真空容器360°が完成。さらに、上側EFコイル3機を組込み。
- 現在、ポートサーマルシールドの設置、下側EFコイルの設置準備を実施中。
- 今後、クライオスタットサーマルシールド、超伝導コイルを冷却する冷媒配管の組立、CS設置等を順次実施予定。

H30年6月



本体室の全景

H30年9月



上側EFコイルを組み込んだJT-60SA本体

サテライト・トカマク計画事業:リサーチプラン

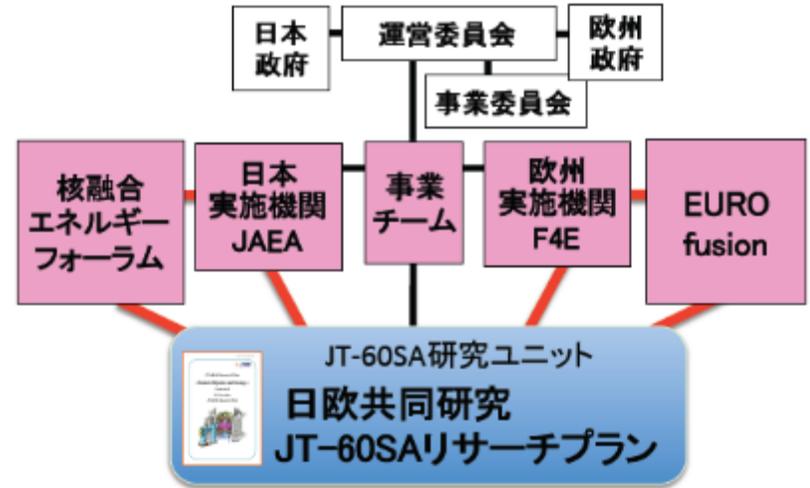
JT-60SAリサーチプラン:ITERと原型炉に向けたJT-60SAの研究計画を日欧で検討

初版(Ver.1.0, H21年)の策定後、7回の改訂を経て、
現在 Ver.4 (H30年9月完成, Web公開)

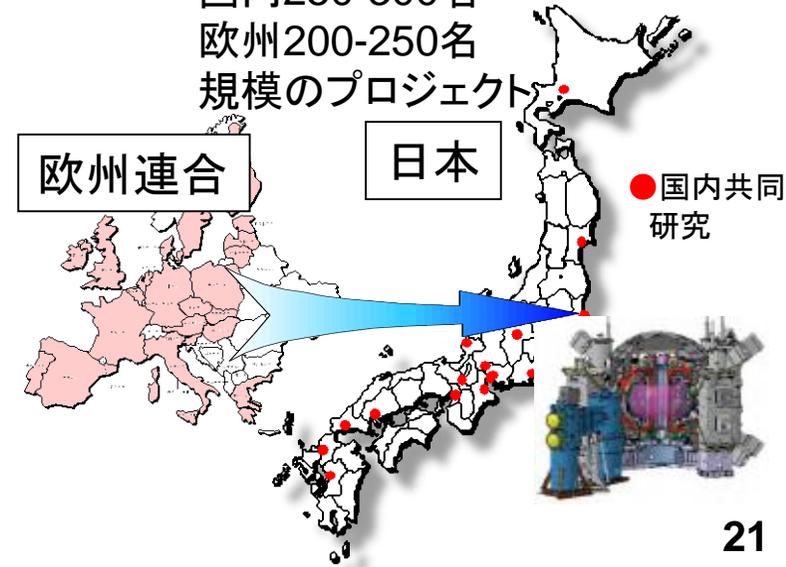
8つの研究領域毎に、JT-60SAの実験研究を担う若手研究者を中心に企画・提案。日欧の研究コミュニティで密接な議論を重ねて完成。
=>国内・日欧の研究協力の下で改訂を進め、実験開始へ。

共著者数 435名:

- ・日本174名:18研究機関
- ・欧州261名:14カ国、33研究機関



実験開始後 参加研究者数
国内250-300名
欧州200-250名
規模のプロジェクト



第6回 研究調整会議 (2017年5月)

これまでの達成状況のまとめ①

※ これまでの事業の達成状況のまとめを、研究計画・評価委員会「研究開発計画」で示されたアウトプット指標、アウトカム指標に則して示す。

■ アウトプット指標： 予備的な原型炉設計活動と研究開発活動を完了する。

- 予備的な原型炉設計活動に関しては、原型炉プラント全体概念、機器概念、コストなど幅広い課題を日欧で分析し、これまでの共同作業の成果を2017年2月に第2中間報告書として取りまとめた。日欧の異なる原型炉のコンセプトを比較することにより、効率的にそれぞれの課題を明確化し検討を行った。
- 原型炉研究活動に関しては、SiC/SiC複合材料、低放射化フェライト鋼、トリチウム工学、先進中性子増倍材、先進トリチウム増殖材の5つのタスクが順調に進展し、原型炉技術基盤構築に必要なデータを蓄積した。材料データの拡充とJETタイルの分析を継続している。
- これらの成果を今後の原型炉開発に有効に活用・拡充するため、2020年3月までに原型炉設計最終報告書を取りまとめられる見通しであり、基本設計から概念設計へ移行する技術基盤の構築が大きく進展した。

■ アウトカム指標： 原型炉の工学設計に向けた見通しが得られる。

- これまでの日欧共同の活動により、原型炉のシステム全体を俯瞰し、ダイバータや遠隔保守など原型炉の成立性に関わる重要設計課題が効率的に明確化されており、工学設計に向けた見通しが得られると考えられる。
- その見通しの下、アクションプランで設定されている2020-2025年の概念設計において、工学設計に向けて必要な重要設計課題の解決策を検討し、2025年から開始することが想定されている工学設計へと円滑に繋げていくことが可能になると考えられる。
- BA活動での成果を基に原型炉設計特別チームが形成され、原型炉に向けた産学官による全日本的な活動に有効的に発展した。

これまでの達成状況のまとめ②

■アウトプット指標：BA協定に基づくJT-60SAの組立工程を完了し、運転を開始する。

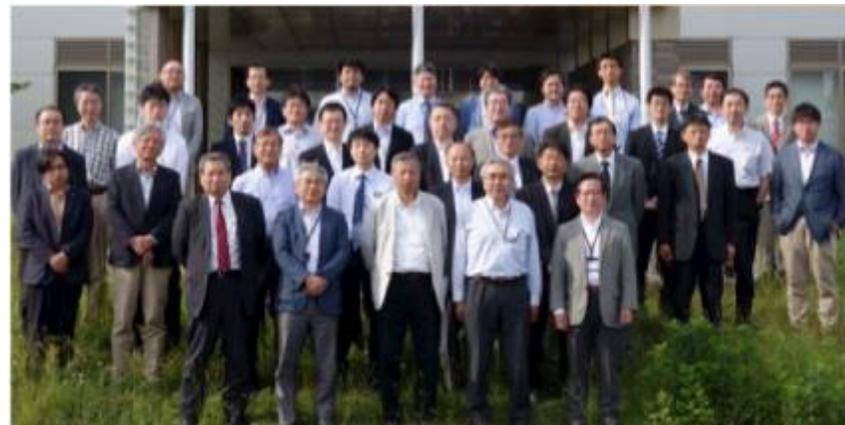
- BA運営委員会で承認された事業計画に従い、技術調整会議、事業調整会議、設計レビュー会議等の欧州との綿密な打合せを適切な時期に多数回行うことで、設計及び製作の統合、設計の合理化等の検討・調整を行い、効率的にJT-60SA機器製作及び組立の作業を計画どおり進めている。
- 精密な調整が必要なJT-60SA本体の組立では、18機の超伝導トロイダル磁場コイルの設置を組立精度 $\pm 1\text{mm}$ （要求値 $\pm 3\text{mm}$ ）という非常に高い精度で完了し、真空容器 360° の組立てが終了。量研が組立手順、組立方法、必要な治具を考案し、計測方法を指導。これらは、ITER建設の先駆的な実績となるとともに、原型炉の組立にとって極めて重要な知財となり、原型炉開発へ有効的に貢献。この成果により誤差磁場が小さくなり、将来の実験でプラズマ不安定制御など先進プラズマの重要な研究課題の解決がより期待される。
- 現在、ポートサーマルシールドの設置と下側平衡磁場コイル3機の設置準備を行っている。また、完成した冷凍機システムの調整運転や電源の試験等を日欧共同で実施。今後、真円度の製作誤差仕様 4mm を大幅に上回る $\sim 0.4\text{mm}$ の高精度で製作が完了した中心ソレノイドやクライオスタット胴部の設置及び周辺機器の整備等を行い、計画どおり2020年3月に組立工程が完了する見通し。2020年4月からは総合調整運転に移行し、運転を開始できる見込みであり、ITER計画の支援に必要なデータの取得が期待される。

■アウトカム指標：JT-60SAについて、先進プラズマ研究開発のプラットフォームが構築される。

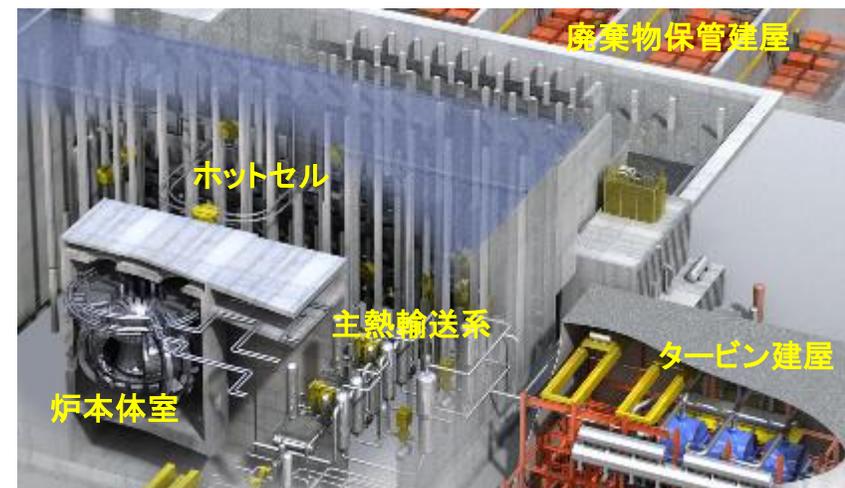
- JT-60SA研究計画（リサーチプラン）は、日欧の幅広い研究コミュニティと連携して検討を行っている（Ver.4.0の共著者数 435名、日本は18研究機関174名、欧州は14カ国33研究機関261名）。このリサーチプランを策定するとともにJT-60SAに関する日欧共同研究の推進及び情報交換を目的として、JT-60SA 研究調整会議（Research Coordination Meeting）を開催し、日欧多数の研究者が参加して、ITER及び原型炉での課題を共有するとともに、その課題解決に向けた議論を行っている。このように、大型国際研究拠点であるJT-60SA運転開始後の研究開発を円滑かつ効率的に実施するための取組みを行っている。
- 平成30年9月に改訂されたJT-60SAリサーチプランVer.4.0では、Initial Research Phaseでの大目標に同意するとともに、研究項目の優先順位や炭素（CFC）壁からタングステン壁への移行戦略について議論した。また、ITER機構から、JT-60SAに期待される電磁流体的（MHD）不安定性の安定化やディスラプション緩和等、R&Dが提案され、ITERの技術目標達成に向けて必要な連携を強化している。
- 現在、欧州の研究機関や日本の大学等からのJT-60SA実験への参加体制について議論している。JT-60SAの運転が開始されれば、多くの日欧研究者及び学生が参画できる先進プラズマ研究開発のプラットフォームが構築される見通しであり、ITER実験開始を見越した若い世代の人材育成にもプラットフォームが有効に活用され得ると考えられる。

国内活動への展開：原型炉設計特別チーム活動

- 原型炉基盤構築のため、産学官のオールジャパンの体制を六ヶ所核融合研究所に設置（H27年6月）
H30年7月現在、メンバー総数は97名（QST:28、産業界:34、大学等:35）
- 総合戦略タスクフォースのアクションプランに沿って原型炉開発活動
 - ✓ 原型炉概念設計
 - ✓ 材料を中心とした研究開発
 - ✓ ボトルネックになる緊急課題への対処、広いコンセンサスの形成のためWG活動を展開
 - 超伝導コイルWG、ブランケットWG、運転計画WG、ダイバータ物理WG、シミュレーションWG
- メーカー等の協力により、原型炉プラント全体概念の検討
- 定期的な情報発信を実施、関連学協会・機関との連携
 - ✓ 週報、月報、特別チームだより（プラ核誌）、学会講演等
 - ✓ 低炭素社会に向けた核融合の役割（RITE）
 - ✓ 希少資源の確保戦略（JOGMEC）



第8回全体会合（H30年6月、六ヶ所）



原型炉本体周辺の設備・機器配置図

国内活動への展開：新核融合大型計算機

- 日欧共同で調達・運用してきた核融合大型計算機は計画どおり2016年末にて運用終了。2017年2月に欧州が所有権を持つスパコン及び周辺機器の撤去、一部システムの所有権を移転。
- 2017年3月より2018年3月まで所有権を移転した一部システムを日本の計算機として運用。
- 2016年から日本の新核融合大型計算機の調達準備活動を開始。2018年6月より運用開始。
- 新核融合大型計算機(Japan Fusion Reactor Simulator 1:JFRS-1)を六ヶ所研に導入し、IFERC-CSC活動で得られた成果の展開、有効利用を図り、原型炉/ITER/JT-60SA/中性子源開発などの核融合研究開発を効率的に推進。



JFRS-1の主な仕様

Cray XC50を中心とするシステム

総理論演算性能： 4.208PFLOPS

総主記憶容量： 256.87TB

外部記憶装置容量： 27PB

Linpack性能： 2.787PFLOPS

(世界61位、国内11位、2018年6月時点)

CPU : Intel Xeon Gold 6148 (Skylake)

1370ノード/2740CPU/54800core

BA活動に係る共同/委託研究の実績件数

公募型及び一般共同研究	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29
トカマク国内重点化装置に係る公募型共同研究 ¹⁾	30	32	32	31	29	23	25	25	24
BAに係る公募型共同研究	58	62	65	73	56	66	49	51	35
JT-60SA装置設計に関する公募型委託研究	3	3	3	3	3	3	3	3	2
合計(件)	91	97	100	107	88	92	77	79	61

- 1) H27からはITERの炉心プラズマに係る課題を含むことを明らかに示すために「トカマク炉心プラズマに係る公募型共同研究」へ名称変更。

BA活動フェーズIIの基本的事項

BA活動フェーズIIの基本的考え方

○ 「必要性」の観点

- これまでの活動によって、i) 青森県に国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)が一大研究開発拠点として形成されるとともに、来年(2019年)度には、ii) 国際核融合材料照射施設(IFMIF)の開発に必要不可欠な原型加速器の完成、iii) 世界最高水準の先進超伝導トカマク装置JT-60SAの完成、といった主だった研究環境の整備完了が予定されており、今後、いよいよ研究成果をあげていく段階。
- 日欧間で、BAフェーズIを発展的に継続することが日欧双方の核融合研究開発の利益になると共通認識。
- 日欧の実施機関や研究所等の専門家からなるタスクグループにおいて、中間報告がまとめられ、
 - ① IFERCについては、原型炉設計活動やそれに必要なR&D、計算機シミュレーション、遠隔実験の準備等の実施
 - ② IFMIF/EVEDAについては、現行事業で完成した原型加速器の高度化等
 - ③ JT-60SAについては、装置の運転を通じたITERや原型炉のための運転シナリオ開発等及び、それに必要な装置の高度化

を進めるべきとの結論。

○ 「有効性」の観点

- BA運営委員会を中心として、日欧の良好な連携体制がこれまで構築されており、その体制を発展的に継続することにより、日欧の人材、知識を集約して有効的に研究開発を進めることができ、お互いの相乗効果が期待できる。

○ 「効率性」の観点

- BAフェーズIIにおいても、フェーズIIに引き続き、欧州は、財政的な負担を続ける意思を示している。それを活用しながら、我が国の核融合拠点を充実させていくことのできる事業であり、効率性は非常に高い。
- また、上述の緊密な連携体制のなかで、国際協力に伴う意思疎通の困難さ、非効率さを改善できている。
- 日欧間で毎年財政状況を踏まえて実施していくこととしており、効率的に事業を実施していく。

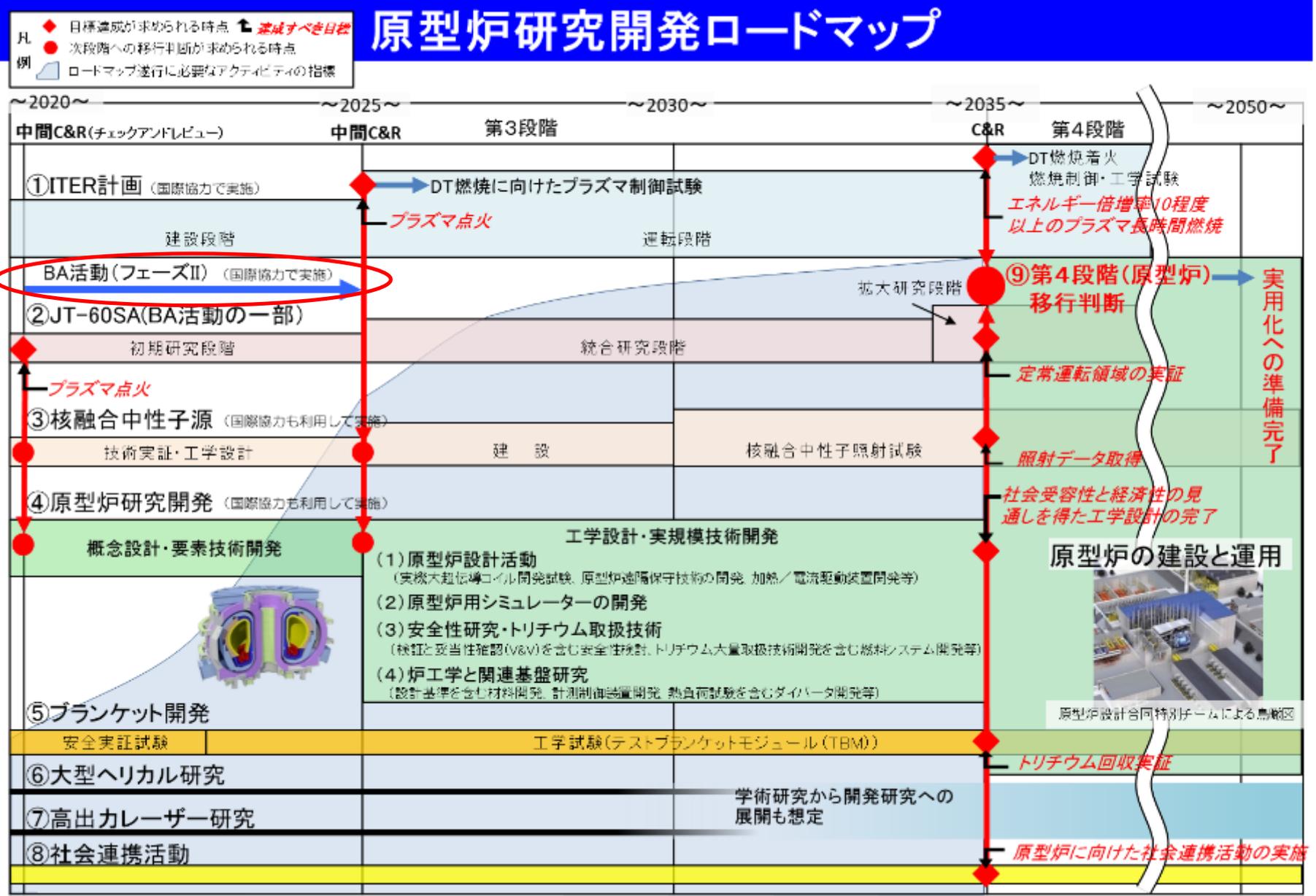
我が国の目標とフェーズIIでの取組

	第2回中間C&Rまでの達成目標 (BA事業関連のみ)	フェーズIIでの取組	
原型炉に関わる材料開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 核融合中性子源の建設開始、及び材料照射データ取得計画の策定 	IFMIF/ EVEDA	<ul style="list-style-type: none"> ● 核融合中性子源の建設に必要な加速器・ターゲット設備・試験施設の高度化を実施。 ● 中性子源の設計検討。
	<ul style="list-style-type: none"> ● 原子炉照射による80dpaまでの低放射化フェライト鋼の重照射データの検証を完了 ● 原子炉照射によるブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射挙動の評価 		<ul style="list-style-type: none"> ● 低放射化フェライト鋼のデータ検証・データベース構築を実施。ブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射は第2回中間C&Rの達成目標と合致。
原型炉設計	<ul style="list-style-type: none"> ● 炉心、炉工学技術の開発と整合をとり、高い安全性を確保し経済性見直しにも配慮した原型炉概念設計の完了 ● 工学設計と技術基盤確立に向けた炉心、炉工学開発課題の確定と開発計画の作成 	IFERC	<ul style="list-style-type: none"> ● 日欧共通部分に限定されるが、第2回中間C&Rに繋がる成果を期待。 ● 炉心・炉工学開発課題の多くは日欧共通と考えられ、第2回中間C&Rの達成目標と合致。
炉工学技術開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 超伝導コイル、ダイバータ、遠隔保守、加熱・電流駆動、燃料システム、計測・制御等の中規模またはプラント規模の炉工学開発計画の作成 		<ul style="list-style-type: none"> ● 概念設計以降の炉工学開発計画策定はBA原型炉設計のスコープ内。
	<ul style="list-style-type: none"> ● JT-60SA等によるプラズマ対向材特性を含むダイバータ関連データの取得 		<ul style="list-style-type: none"> ● プラズマ対向材特性を含むダイバータ関連データの取得。
原型炉を見据えた高ベータ定常プラズマ運転技術の確立	<ul style="list-style-type: none"> ● JT-60SAによる高ベータ非誘導電流駆動運転の達成。 ● ダイバータを含む統合シミュレーションのJT-60SA等による検証。 ● JT-60SAによる原型炉プラズマ対向壁と整合したダイバータ研究計画の作成。 	サテライト・トカマク (JT-60SA)	<ul style="list-style-type: none"> ● 原型炉に向けた定常高圧カプラズマの運転シナリオ開発(高ベータ非誘導電流駆動運転の達成含む)。 ● 高密度・高放射損失に特化したITER運転シナリオ開発(ダイバータを含む統合シミュレーションの検証用データの取得含む)。 ● 原型炉プラズマ対向壁と整合したタングステン被覆モノブロックダイバータへの変更計画の作成。

● 計算機シミュレーションセンター及びITER遠隔実験センター：
(第2回中間C&Rの達成目標はないが)

ITER/JT-60SAの目標達成の支援・加速、これらの成果活用による原型炉設計の支援のため、同時進行が不可欠

原型炉研究開発ロードマップにおけるBA活動(フェーズII)の位置づけ



フェーズIIにおけるIFERC事業の検討 状況

IFERC事業のフェーズIIの考え方

- BAフェーズ1の活動を発展的に継続するために、フェーズ1の活動を再構成

✓ 日欧協力によるシナジーを強調

IFERC

✓ IFERC事業内・BA事業間の協力

IFERC

✓ ロードマップ、アクションプランを部分的に実施



原型炉開発のためにBA活動を有効活用

を念頭に

BA計画／国内事業の二面性

①原型炉設計R&D調整センター活動:

- ・ 原型炉設計: 基本設計から概念設計へ(工学設計段階へのつながり)
- ・ 原型炉R&D: 原型炉設計の基盤となる材料データベース構築

IFERC

IFERC

→ 予備的な原型炉設計活動と研究開発活動を完了



② 計算機シミュレーションセンター活動:

日欧共同の研究プロジェクトを開始、高性能計算機の相互利用

IFERC

→ ITER実験、原型炉設計のためのシミュレーションコード群の開発を着実に進展



③ ITER遠隔実験センター活動:

IO及び他事業(JT-60SA, IFMIF)との連携による遠隔実験、大量データ転送・保存・解析手法

IFERC

→ ITER遠隔実験に向けた環境を整備



フェーズIIにおけるIFERC事業のスケジュール

副事業名	2020	2021	2022	2023	2024	2025
	 BA フェーズII					
①原型炉設計活動	 概念設計					
②原型炉研究開発	 構造材料の開発					
	 材料腐食データベース					
	 照射装置、試料製作		 増殖機能材料の照射試験			
	 トリチウム技術の開発					
③計算機 シミュレーションセンター	 シミュレーション共同研究、計算資源提供					
	 JFRS-1			 次期スパコン		
④遠隔実験センター	 ITER遠隔実験の準備、大量データ転送・解析技術					

① 原型炉設計活動の計画

- システム設計・統合化に重点を置いた概念設計研究(重要機器の設計含む)
- 共通設計基準(リスク評価)に基づく技術オプションの選定
- 共通の設計手法、設計ツールの開発

項目	目指す成果
(1)システムコード	工学モデル、コストモデルの更新によるシステム評価の信頼性改善
(2)プラズマシナリオ	<ul style="list-style-type: none">• 全運転フェーズ(起動・定格・停止)における加熱・電流駆動シナリオ• 熱・粒子負荷の過渡変動に対するプラズマ対向機器の保護方策
(3)ダイバータと熱排出	<ul style="list-style-type: none">• ダイバータ設計の改良• モデル／コード改良によるシミュレーションの信頼性向上
(4)増殖ブランケットと燃料回収	燃料システム全体の概念 (増殖ブランケット、トリチウム回収系、冷却材純化系、トカマク排気処理系)
(5)遠隔保守	リスク評価に基づく遠隔保守技術の選定、開発方針・計画
(6)超伝導コイル	コイル巻線構造(Winding Pack)の概念構築
(7)プラントシステム	電力変換系、電力系、冷凍系、トリチウム除去系の設計。建屋、サイト配置
(8)安全性	<ul style="list-style-type: none">• 原型炉システムに適合する事故防止／影響緩和系の概念• 放射性廃棄物の管理方策、関連施設の概念図

② 原型炉研究開発活動の計画

- 原型炉設計の基盤となる材料関連データの拡充
日欧協力が有効な課題に焦点をあてて研究開発活動を計画

項目	目指す成果
(1) 炉内機器のための 構造材料開発	炉内機器構造設計基準のための技術基盤開発 ・低放射化フェライト鋼、銅合金、タングステンの設計対応データベース開発 ・構造設計基準のための材料評価手法 ・重照射を受ける炉内構造物の設計技術基盤開発
(2) 材料腐食 データベース開発	水冷却系、液体PbLi増殖系の材料構成について ・炉内機器のための材料腐食ハンドブック ・腐食生成物(ACP)評価モデル開発 (低放射化フェライト鋼、銅合金を対象)
(3) 増殖機能材料の 中性子照射実験	先進増殖機能材料(Li_2TiO_3 、 Be_{12}V など)の中性子照射試験による 初期中性子照射データ(トリチウム放出挙動、照射後特性試験)
(4) トリチウム回収・イン ベントリ評価のための トリチウム技術	・トカマク排気処理系(TEP)の設計と関連技術 ・プラズマ対向材料のトリチウム保持、ダスト挙動データ(JETタイルなど)

③ 計算機シミュレーションセンター (CSC)の計画

- コンピューターシミュレーションに係る日欧共同研究を開始
- 核融合研究加速のための高性能計算機資源の提供

項目	目指す成果
(1) コンピューターシミュレーションの共同研究	<ul style="list-style-type: none"> • 核融合関連コード開発 • 高性能コンピューティングのためのシミュレーション技術
(2) 高性能計算機の計算資源提供	<p>協議により、以下のいずれかによる計算資源を提供</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. 日欧が別個のスパコンを調達、双方のスパコンの計算資源の一部を交換 2. 核融合専用スパコンを共同調達 3. 日欧が別個のスパコンを調達、計算センター設計・運用のための技術情報交換 (計算資源の交換なし)



● JFRS-1 (六ちゃん-2)
(六ヶ所研、2018年導入)



● Marconi (CINECA、2016年導入)
の一部を核融合に利用

2019年以降に次期スパコンに関する協議を開始し、計算資源提供の在り方を、BA運営委員会において、2020年に判断する計画

④ ITER遠隔実験センター (REC) の計画

- ITER遠隔実験に向けた試験、IT技術の開発・試験を実施する

項目	目指す成果
(1) ITER遠隔実験参加に向けた試験	<ul style="list-style-type: none">IOとの連携による遠隔実験の試験 (プラント状態、実験状態、遠隔データアクセスなど)他事業(JT-60SA、IFMIF/EVEDA)との連携によるREC機能試験
(2) 大量データの高速転送・保存、解析手法の開発	<ul style="list-style-type: none">高速データ転送・保存技術の開発 (高速通信手法の検証)大規模データ解析手法の研究

SINET5 欧州回線

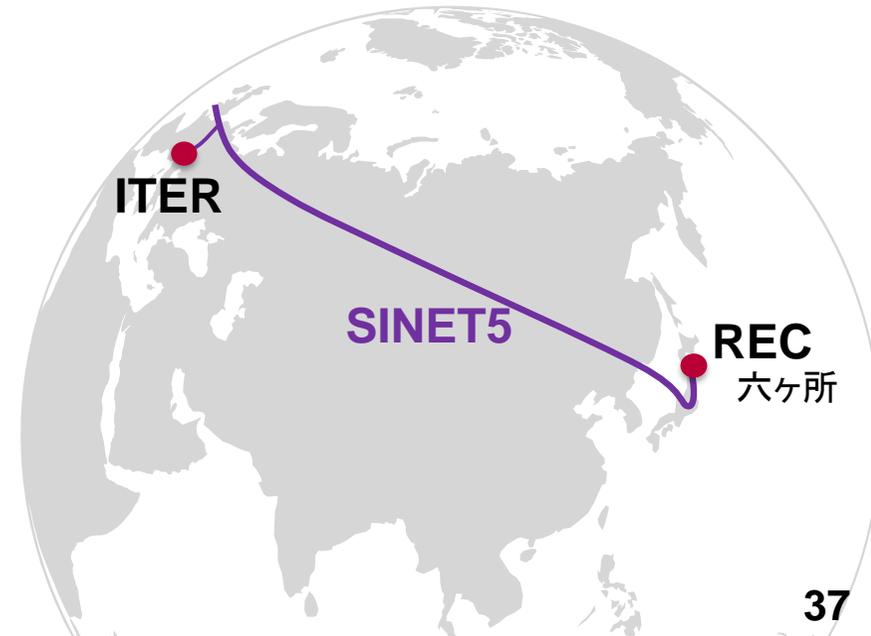
六ヶ所 - 青森 - 東京 - (シベリア経由) - 欧州

100 Gbps

10 Gbps x2

2016年 欧州回線の1/2 (10 Gbps) を利用し、
ITER-REC間の高速データ転送を検証

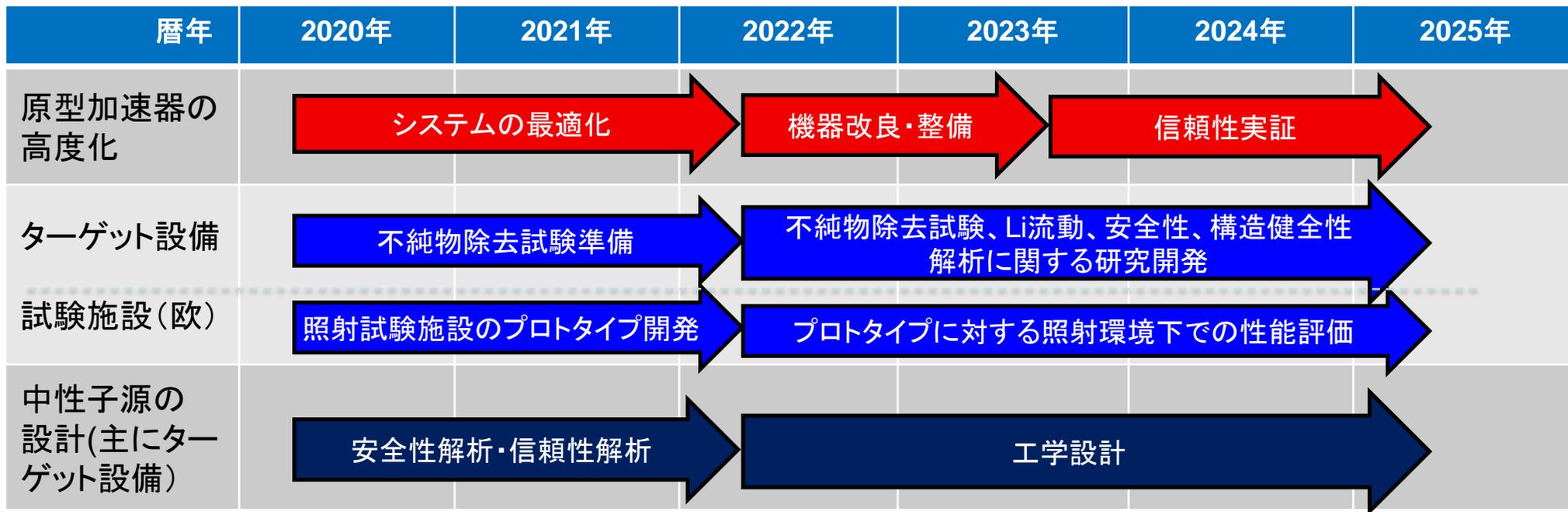
→ 更に高速の大量データ転送実証を目指す



フェーズIIにおけるIFMIF/EVEDA事業 の検討状況

IFMIF/EVEDA事業の全体像

- 原型炉設計のためには、炉の中で想定される厳しい核融合中性子照射環境を模擬した材料照射実験を行う必要があり、そのための中性子源を開発する必要がある。
- 現行BA活動では、中性子源の工学実証のために製作した原型加速器の完成と、必要最小限の運転(9MeVのビーム生成)まで実施する予定。また、ビームのターゲットとなるリチウムループについて、実規模試験ループを完成させ、長期間安定運転の実証に成功している。
- BAフェーズIIでは、原型加速器について信頼性等の実証のために連続運転ができるよう高度化を図るほか、リチウムループにおける不純物除去システムの開発を行う。また、将来の中性子源に向けて必要な概念設計及び工学設計を行う。



ロードマップ
(中性子源)

↑ 中間C&R

核融合中性子源の概念設計・要素技術開発

↓ 中間C&R

核融合中性子源A-FNSの概要

目的: 核融合科学技術委員会策定の「核融合原型炉研究開発の推進に向けて」に基づいて、「チェックアンドレビュー項目」及び「アクションプラン」で示されるとおり、**原型炉段階への移行判断のために、以下の照射データを2035年頃までに取得。**

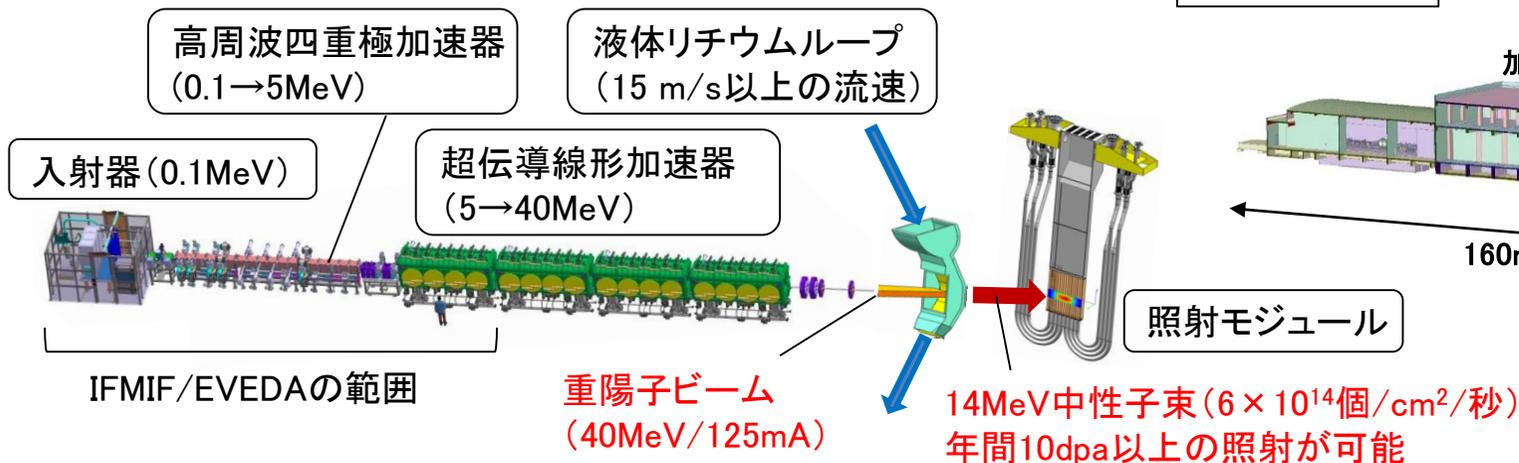
- 炉材料の候補材である低放射化フェライト鋼の20dpa照射データ、ブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射データ
- ブランケットのトリチウム挙動評価技術の検証
- 計測・制御機器材料の耐照射性評価

応用利用: 中性子の医療・産業利用(例 医療用アイソトープ製造等)

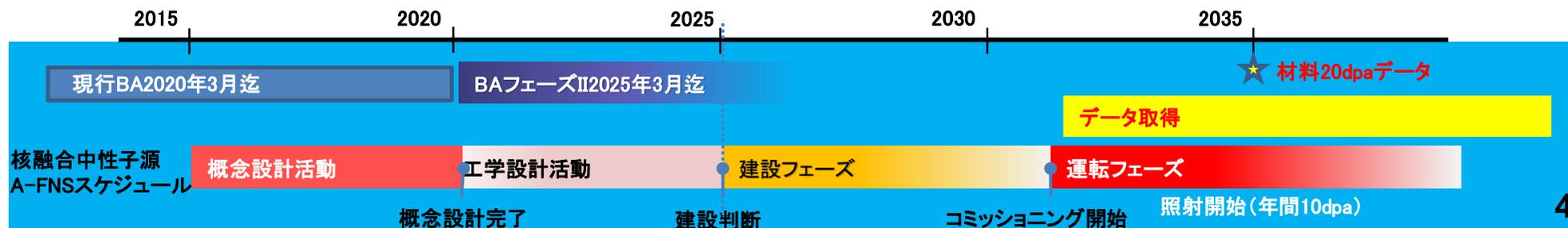
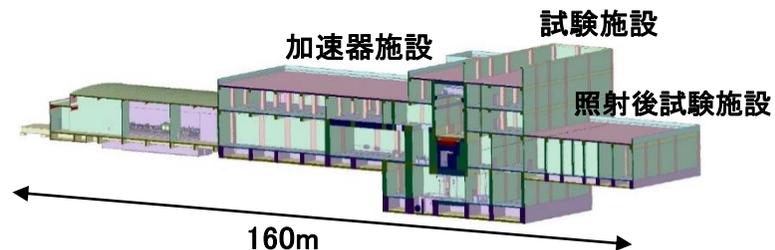
○幅広いアプローチ(BA)活動のIFMIF/EVEDAから得られた成果を基に建設

**世界に類のない大電流・定常運転が可能な加速器の開発
最大毎秒20mの高速リチウム流の長時間安定運転の実証**

A-FNSの概念図

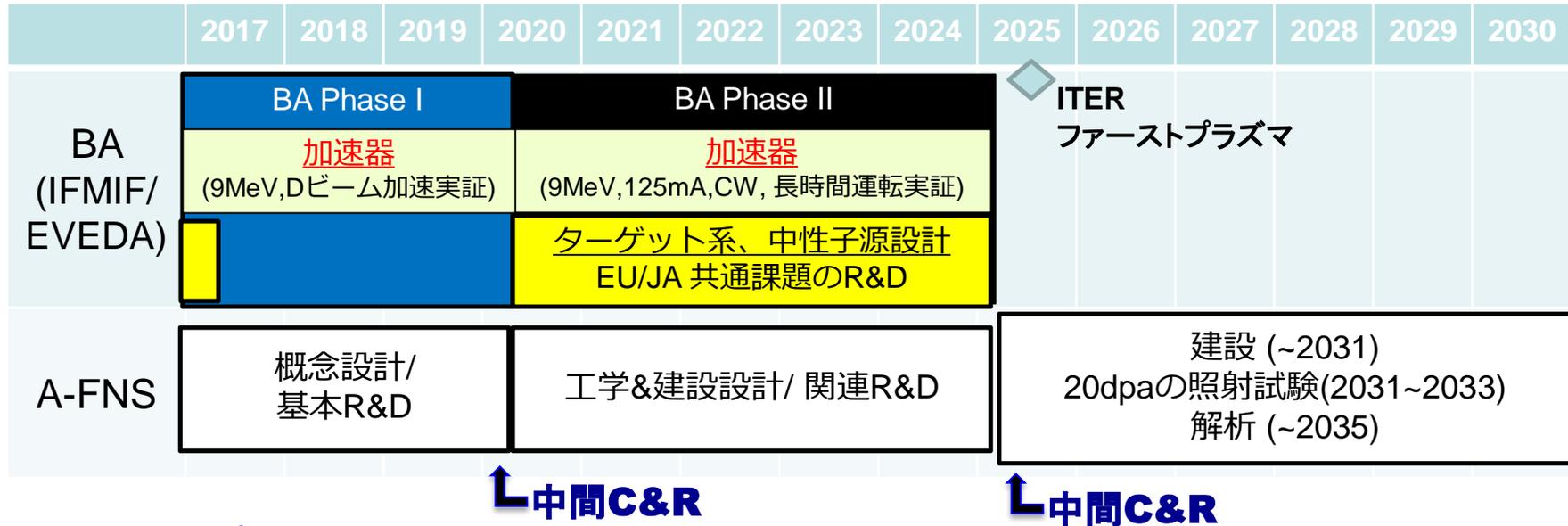


A-FNS建屋図



IFMIF/EVEDA事業の全体像

IFMIF/EVEDA と A-FNSのスケジュール



(1) IFMIF原型加速器

9MeV、125mA加速の連続運転の実証を目的とする。合わせて、信頼性確認試験を行う。

2020年4月—2022年3月：性能実証試験

2022年4月—2023年9月：長期メンテナンス、機器改良

2023年10月—2025年3月：信頼性確認試験

(2) 中性子源(一部)

ターゲット系のR&D (日欧共通課題)

中性子源設計(日本は主にターゲット系の設計)

A-FNSの建設に関しては、BAフェーズIIの進展状況を反映しつつ、国内計画として設計・検討を推進し、並行して欧州におけるDONESの進展状況を踏まえて、日欧間の調整を実施していく。

フェーズIIで行うべきこと(原型加速器)

1) 9MeV/125mAの大電流重陽子ビームの連続加速の実証

-前例のない大電流ビーム加速の実証は、中性子源開発へ必須のステップ

a) 大電流ビーム制御手法の確立

125mAビーム加速の際に、RFQ内蓄積RF電力が大きく変動し、ビーム不安定化の可能性がある。
安定なビーム加速のため、大電流ビーム加速に追従した、RFパワー・冷却制御手法の開発が必要
(異常停止時に発生する大電力RF反射対策を含む)。

b) 大電流ビーム加速試験において重陽子ビームの高通過率の実現

ビームロス、加速器表面の破損・劣化、想定外の発熱、放射化、SRFのクエンチをもたらす。
ビームアライメント、ガイド磁場・RF制御の最適化実験、実験解析・シミュレーションの強化を行い、
高ビーム通過率を実証する(目標ビームロス:RFQ=4%程度、SRF=1W/m、 10^{-4} %程度)。

2) 信頼性実証

a) RFQ用RF源の半導体化

現在RF源として175MHz4極管システムを採用しているが、175MHz帯において、より信頼性の高い半導体増幅器が、近年進歩し、IFMIFに適用可能なレベルとなった。

そこで、RFQ用RF源を半導体増幅器に置き換え、システムの信頼性の向上を図る。

フェーズIIで行うべきこと(中性子源)

(1) ターゲット系(日欧)

- ・ Li純化系試験(日、欧)
- ・ Liループの流動特性と最適化試験、計測(日、欧)
- ・ 安全関連システムの強化(日、欧)
- ・ ELTLで使用された材料の分析・構造健全性評価(日)
- ・ LIFUS6での腐食侵食研究(欧)
- ・ リモートハンドリングシステムの研究開発(欧)

(2) 照射モジュール(欧)

- ・ 先進照射モジュールの設計とプロトタイプ製作
- ・ プロトタイプモジュールの原子炉での照射試験と実証

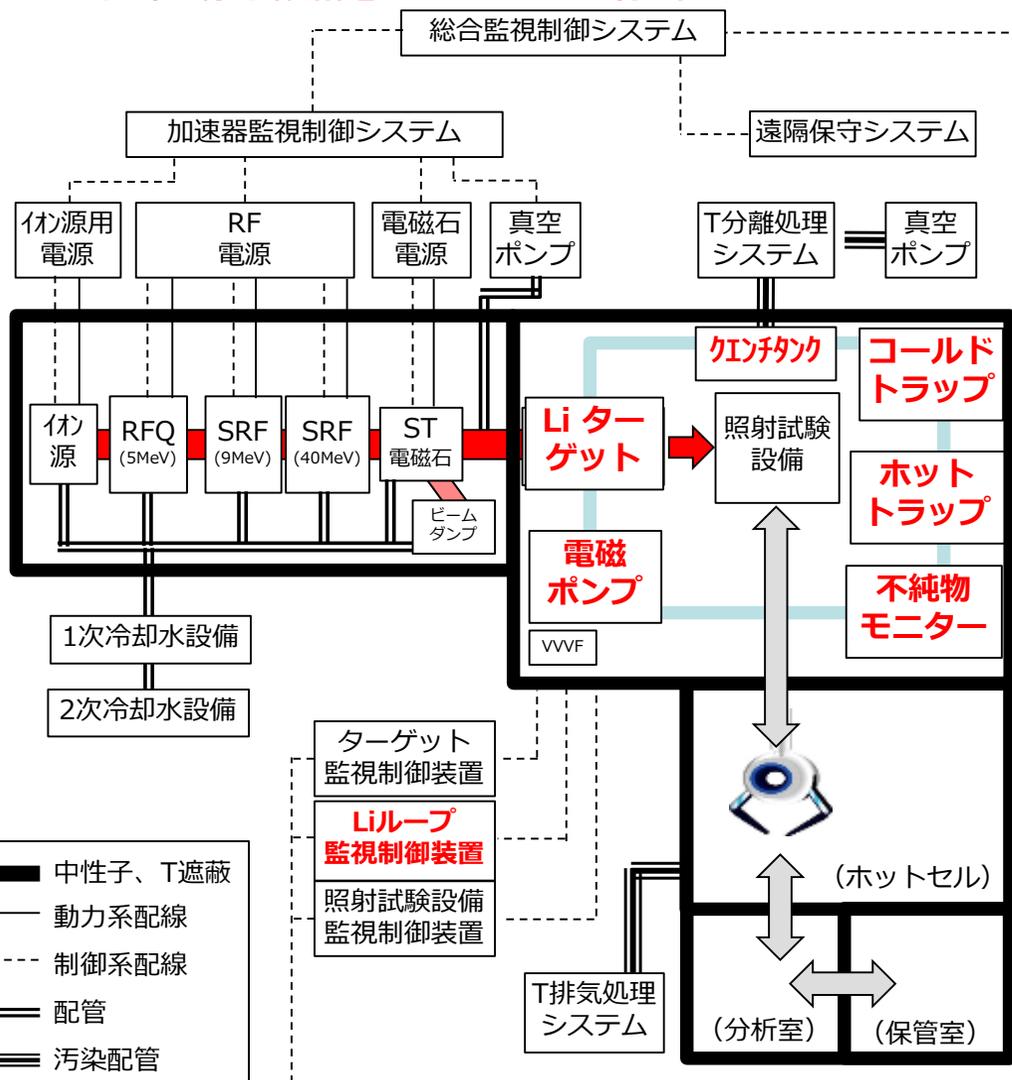
(3) 中性子源設計(日欧)

- ・ ターゲット系に関する部分の設計(日)
- ・ BAフェーズIの結果からのフィードバック設計(欧)

フェーズIIで行うべきこと(中性子源)

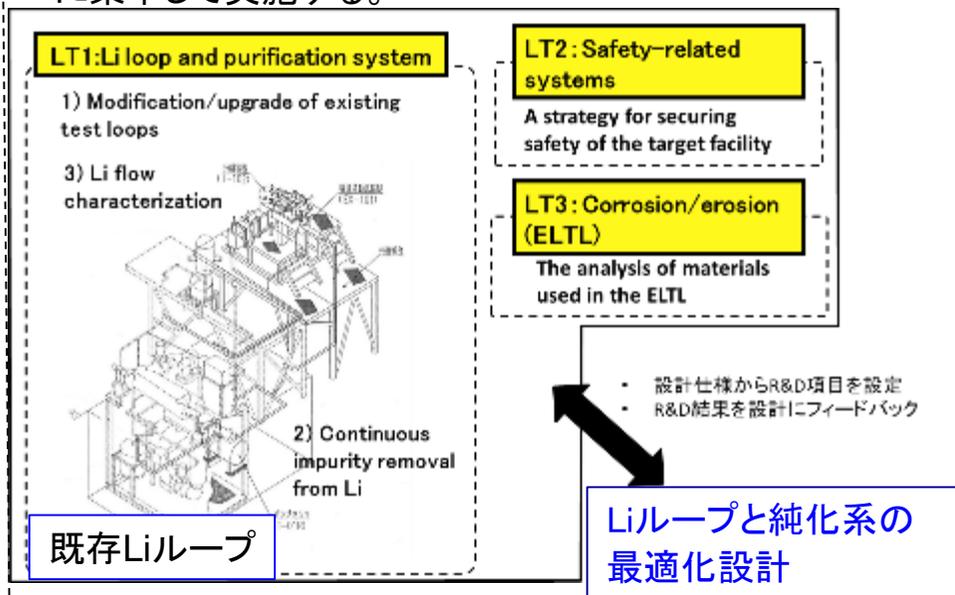
中性子源における日欧共通課題R&DをフェーズIIで実施する。
本R&Dは日本におけるA-FNS設計検討にも資する。

(A-FNSの全体設計は、国内計画として行う。
図中、赤字設備をフェーズII内で行う。)



フェーズIIでターゲット系に関するR&D及び設計を行う(日)。

フェーズIからの継続性を考慮し、ターゲット系の継続課題のR&D、ターゲット系の設計(欧州と共通課題)に集中して実施する。



- LT1: ターゲット周りを中心とした最適化及びLi純化系性能に関する最終検証を既存ループを改修して実施
- LT2: Liループ安全性確立のための計測技術検証をはじめとしたR&Dによる最終検証
- LT3: ELTLに適用した材料の腐食・浸食をはじめとした詳細評価による材料健全性の確認

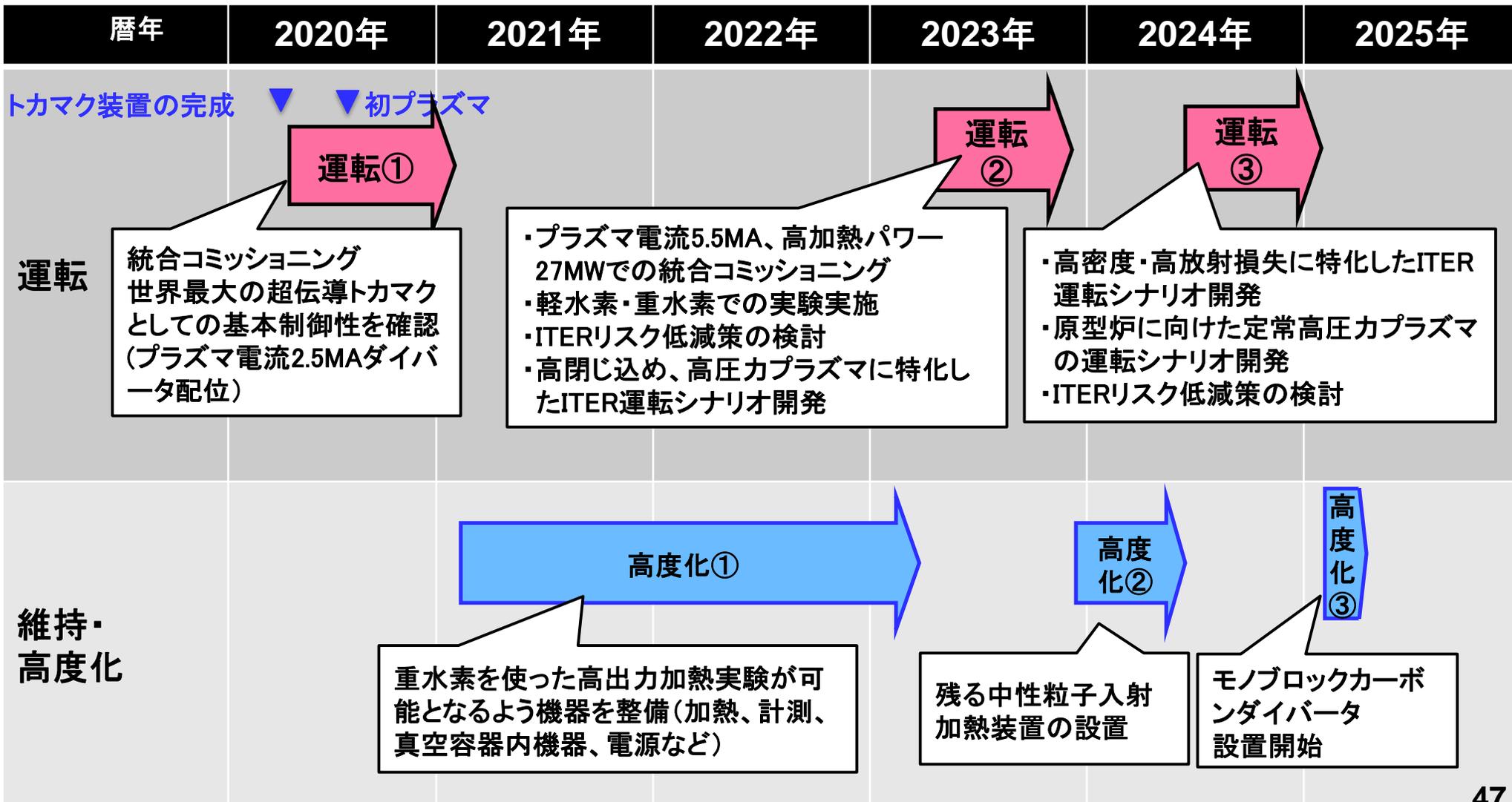
フェーズIIにおけるサテライト・トカマク (JT-60SA)計画事業の検討状況

事業の長期計画(段階的实施)を以下のように具体化する。
 (ITERのリスク低減・効率的実施のためにITERの研究計画と整合。
 日本の原型炉へ向けたアクションプランとそのC&R計画と整合。
 日欧研究コミュニティが取りまとめたJT-60SAリサーチプランVer.4に基づく。)

	Phase	期間 (予定)	燃料	年間中性 子発生量 (個/秒)	遠隔保 守機器	ダイバータ	正イオン源 NBI (垂直入射)	正イオン源 NBI (接線入射)	負イオン 源NBI	NBエネルギー 上限	ECRF 110 GHz & 138 GHz	最大加 熱パ ワー
初期研究 段階	phase I	2020-2021 (5ヶ月)	H	-	R&D	上側 炭素	0	0	0	0	1.5MWx5s	1.5MW
		2023 (2ヶ月)				3MW	3MW		1.5MWx100s +	19MW		
	phase II	2023 (6ヶ月)	D	3.2E19		下側* 炭素 ダイバータ排気	6.5MW			20MW x 100s 30MW x 60s duty = 1/30	1.5MWx5s	26.5MW
		2024-2025 (8ヶ月)										33MW
統合研究 段階	phase I	2026- 2028	D	4E20	使用	下側* 炭素モノブロック ダイバータ排気	13MW	7MW	10MW	7MW x 100s	37MW	
	phase II	2030 -	D	1E21		下側* タングステン被 覆モノブロック ダイバータ排気						
拡張研究 段階		>5y	D	1.5E21		先進ダイバータ タングステン被 覆モノブロック ダイバータ排気	16MW	8MW		34MW x 100s	41MW	

* 上側ダイバータ(高熱負荷は短時間)は常に使用可能

世界最大の超伝導トカマクとしての制御性を確認する。
ITER&原型炉のためのプラズマ実験を実施し、「初期研究段階」を完了する。



1. 事業の運営

BAフェーズIIを含め、日欧の統合事業チームで

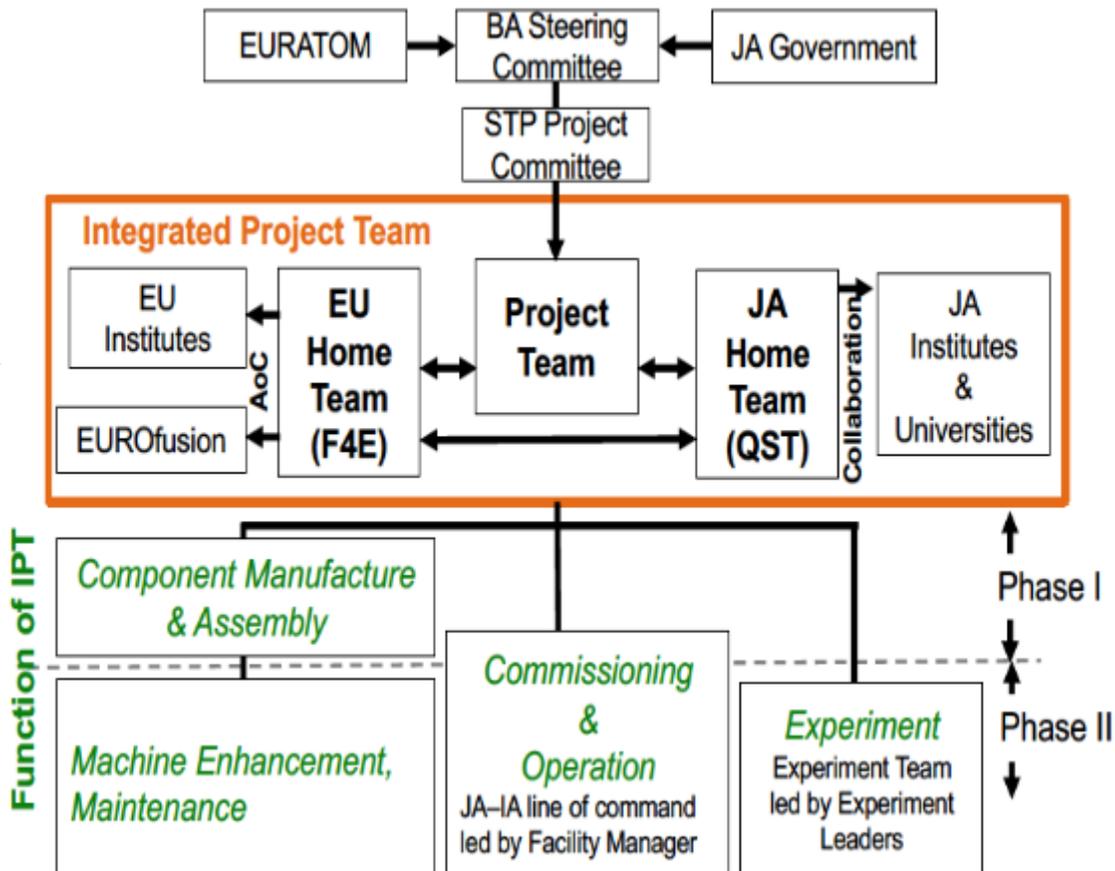
- i) 機器整備・組み立て、
- ii) コミッショニング・運転
(QSTの責任の下で実施)、
- iii) 実験
を進める(右図)。

2. 事業長

BAフェーズIIでは、日本側事業マネージャを事業長、欧州側事業マネージャを副事業長として統合事業チームを運営する。

3. 施設長 (Facility Manager)

コミッショニング・運転、法令・規制遵守を含む施設の運用・安全管理は、日本側実施機関の責任で、その指揮命令系統の下で実施する。これらを司る施設長を置く(日本側事業マネージャが任命しBA運営委員会に通知)。



4. 実験チームと実験リーダー

BA分及び日本国内分の実験全体を、単一のJT-60SA実験チームで実施する。実験チームは2021年3月の統合コミッショニングの完了後に組織する。

実験チームを指揮する実験リーダー(日本2名、欧州1名)を、各々日欧事業マネージャが提案し、BA運営委員会が任命する。年間実験計画及び実験結果報告は実験リーダーが作成し、事業マネージャ及び事業長に提出。事業長がBA運営委員会に事業の年間計画及び年次報告として提出する。

装置の利用時間(マシンタイム)は、装置整備や運転費への貢献度に応じ、日欧に割り当てる。

