

評価単位6「核融合に関する研究開発」における評価の基準について

資料5-1
量子科学技術研究開発機構(第20回)
令和3年3月22日

総論		ITER計画の推進		
中長期目標の記載	「第三段階核融合研究開発基本計画」(平成4年6月原子力委員会)、「イーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の設立に関する協定」(平成19年10月発効、以下「ITER協定」という。)、 「核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取組を通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との協定」(平成19年6月発効、以下「BA協定」という。)、等に基づき、核融合研究開発を総合的に推進し、核融合エネルギーの実用化に向けた国際共同研究を行う。 「ITER(国際核融合実験炉)計画」(以下「ITER計画」という。)、及び「核融合エネルギー研究分野における幅広いアプローチ活動」(以下「BA活動」という。)、を国際約束に基づき、着実に実施しつつ、実験炉ITERを活用した研究開発、JT-60SAを活用した先進プラズマ研究開発、BA活動で整備した施設を活用・拡充した理工学研究開発へ事業を展開することで、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に向けた必要な技術基盤構築を進める。 大学、研究機関、産業界などの意見や知識を集約してITER計画及びBA活動に取り組むことを通じて、国内連携・協力を推進することにより、国内核融合研究との成果の相互連携を進め、核融合エネルギーの実用化に向けた研究・技術開発を促進する。	1) ITER計画の推進 ITER協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、国内機関としての業務を着実に実施するとともに、実験炉ITERを活用した研究開発をオールジャパン体制で実施するための準備を進める。		
中長期計画の記載	核融合エネルギーは、資源量が豊富で腐敗しないといった供給安定性、安全性、環境適合性、核拡散抵抗性、放射性廃棄物の処理処分等の観点で優れた社会受容性を有し、恒久的な人類のエネルギー源として有力な候補であり、長期的な視点からエネルギー確保に貢献することが期待されており、早期の実用化が求められている。このため、「第三段階核融合研究開発基本計画」(平成4年6月原子力委員会)、「イーター事業の共同による実施のためのイーター国際核融合エネルギー機構の設立に関する協定」(平成19年10月発効)、「以下「ITER協定」という。)、 「核融合エネルギーの研究分野におけるより広範な取組を通じた活動の共同による実施に関する日本国政府と欧州原子力共同体との協定」(平成19年6月発効)、「以下「BA協定」という。)、 「エネルギー基本計画」(平成28年4月1日閣議決定)等に基づき、核融合エネルギーの実用化に向けた研究開発を総合的に進める。具体的には、「ITER(国際核融合実験炉)計画」及び「核融合エネルギー研究分野における幅広いアプローチ活動」(以下「BA活動」という。))を国際約束に基づき、着実に実施しつつ、実験炉ITERを活用した研究開発、JT-60SAを活用した先進プラズマ研究開発、BA活動で整備した施設を活用・拡充した理工学研究開発へ、相互の連携と人材の流動化を図りつつ、事業を展開する。これにより、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の実証、及び原型炉建設に向けた必要な技術基盤構築を進めるとともに、核融合技術を活用したイノベーションの創出に貢献する。 研究開発の実施に当たっては、大学、研究機関、産業界などの研究者・技術者や各界の有識者などが参加する核融合エネルギーフォーラム活動等を通じて、国内意見や知識を集約してITER計画及びBA活動に取り組むことにより国内連携・協力を推進し、国内核融合研究との成果の相互連携を進め、核融合エネルギーの実用化に向けた研究・技術開発を促進する。	1) ITER計画の推進 ITER協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、大学、研究機関、産業界等との協力の下で、国内機関としての業務を着実に実施する。また、実験炉ITERを活用した研究開発をオールジャパン体制で実施するための準備を進める。 2) ITER建設活動 我が国が国際責任を有する超伝導体、超伝導コイル及び中性粒子入射加熱装置実験炉施設用機器の製作を完了するとともに、高周波加熱装置、遠隔保守装置等の製作を進める。また、ITER建設地(仏国 サン・ポール・レ・ランス)でイーター国際核融合エネルギー機構(以下「ITER機構」という。))が実施する機器の設計・組立等の統合作業を支援する。	b. ITER計画の運営への貢献 ITER建設地への職員等の積極的な派遣などによりITER機構及び他種国内機関との連携を強化し、ITER計画の円滑な運営に貢献する。また、ITER機構への我が国からの人材提供の窓口としての役割を果たす。	c. オールジャパン体制の構築 ITER建設地での統合作業(設計・組立・試験・検査)や完成後の運転・保守を見据えて、実験炉ITERを活用した研究開発をオールジャパン体制で実施するための準備を進める。
年度計画の記載		1) ITER計画の推進 ITER(国際核融合実験炉)計画における我が国の国内機関として、国際的に合意した事業計画に基づき、我が国が国際責任を有する機器の設計や製作を進めるとともに、ITER国際核融合エネルギー機構(以下「ITER機構」という。))が実施する統合作業を支援する。また、ITER機構及び国内機関との協力を推進し、ITER計画の円滑な運営に貢献する。また、ITER計画に対する我が国の人的貢献の窓口及びITER機構からの業務委託の連絡窓口としての役割を果たす。	b. ITER計画の運営への貢献 ITER機構への職員等の積極的な派遣によりITER機構及び他種国内機関との連携を強化し、ITER機構と全国内機関が一体となったITER計画の推進に貢献する。また、ITER機構でのJPC活動に職員等を長期派遣するとともに、ITERプロジェクト・アソシエイト制度(IPA)を活用し、ITER機構と国内機関との共同作業を促進する。さらに、ITER計画に対する我が国の人的貢献の窓口及びITER機構からの業務委託の連絡窓口としての役割を果たす。	c. オールジャパン体制の構築 ITERを活用した研究開発をオールジャパン体制で実施するための準備として、関連活動を通じて、統合作業に関する情報・経験の蓄積について産業界と連携を継続する。また、核融合エネルギーフォーラムを活用し、ITER事業に関する我が国の意見の集約を行う。
中長期的なプロジェクト計画	R2年度 R3年度 R4年度 (参考)R5年度以降(4.5年のタイムスパンとして記載)	・R1年度に完成させたトロイダル磁場(TF)コイル初号機をITERサイトに輸送する。また2-3号機の製作を完了して量産技術を確立し、ITERサイトへの輸送を完了する。 ・イバドバに建設しているITER中性粒子入射加熱装置実験炉施設NBTFに向け日本が調達した1MV電源高電位部を欧州が調達した電源・制御機器と組み合わせて行う統合試験を進める。 ・初プラズマに必要な機器(TFコイル、ジャイロトロン及びNBTF電源高電位部)の製作・試験を進めるとともに、初プラズマ後に必要な機器(NB実験電源ほか、ダイハータ垂直ターゲット、計測機器)の製作を継続・本格化する。 ・初プラズマに必要な機器(TFコイル及びNBTF電源高電位部)の製作・試験を進めるとともに、初プラズマ後に必要な機器(NB実験電源ほか、ダイハータ垂直ターゲット、計測機器)の製作を継続する。 ・初プラズマに必要な機器の製作を完了する。加熱実験に向けて初プラズマ後に必要な機器の製作を推進する。		
困難度	<研究開発(プロジェクト)成果> R2年度 R3年度 R4年度 (マネジメント等運営上の成果)	困難度 ・ITER計画は、7種が分組して主要構成機器を調達し、ITER機構が一体の核融合実験炉に組み立てる期間がプロジェクトであり、日本の調達機器はすべて世界最高性能を有する機器でシステムとしての一つの機能を合理的に構築するための高度なシステムエンジニアリング、プロジェクトマネジメントに基づく調整が不可欠である。ITERに特有の調整の困難さを別紙の2に示す。 ・NBTFおよびITER実験NBの高電位電源には日本の一社のみが実績を有する1MV直流高電位の発生と絶縁の知識と経験が必要である。例えば、1MVが印加される電源・電源室内での防塵、表面清浄性などを徹底的に管理の上で高電圧電源機器取組が必要である。このため、NB電源のイバドバでの現地立上げや試験については、GSTとメーカーによる自主的な技術者の立会いによる協議や、調整等の直接指導を前提として作業準備を積んでいる。しかしながら、コロナ損による日稼働での移動の制限により計画に重大な障害が発生し、工程の大規模な遅延に陥る大きな困難が伴う。そのため、遠隔での協議、指示、操作による試験を正しく実施するための技術基盤を単独で構築し、試験体系と工程調整を円滑に進める実用基盤を構築している。なお、国内移動が可能な試験を除く、R2年度中(国)間を跨いでFOAK機器の大規模な試験・検査(メーカー間の部品移動を除く)を計画しているのは日本のみである。	困難度	困難度
顕著な成果となる事象(GST)	R2年度 R3年度 R4年度 (マネジメント等運営上の成果)	・プラズマ電流密度分布の測定に使用する大出力の遠赤外線レーザー等において、当初目標のITERが求める高い稼働率を確保することに加え、要求出力が5割近く上回る世界最良クラスの出力を達成する。レーザー出力が增大することで、実験の検出や光学系の設計合理化とコスト削減が可能となる技術に見通しを得る。 ・ITER機構の求める検査品質を確保するための試験体を用いた高熱負荷耐久試験を実施し、要求される耐久性能を達成できることを明らかにするとともに、得られるプラズマ中の中性粒子データから熱負荷試験値を低減可能に示すことにより、ロシアの熱負荷試験装置での実施を課せられたコストが掛かる熱負荷試験回数を削減し、コスト削減及び試験実施に伴うスケジューリングのリスク低減に繋がると見通しを得る。 ・FOAK機器として2周波数ジャイロトロンを開発し、2周波数で1MW、効率50%、10秒以上の長パルス動作を実現する。2周波数で世界最良クラスの性能を発揮することで、ITERの加熱実験における運用範囲を計画以上に拡大するとともに、将来のコスト低減に繋がる。 ・高熱負荷試験用プラズマ対向ユニット実験機長プラズマの製作を完了し、要求される稼働率10MW/m ² ×5000サイクル及び120MW/m ² ×300サイクルに対して最大サイクル回数について要求寿命の1年分に相当する10%増を実現する。実験ダイハータの寿命延長によって運転コスト低減に繋げる。	成果となる事象	成果となる事象
特に顕著な成果となる事象(GST)	R2年度 R3年度 R4年度 (マネジメント等運営上の成果)	・従来仕様に対し、フランスの法改正の確認や品質要求の詳細分析を行い、ITER機構やメーカー等と協議・調整して、コスト削減につながる仕様緩和・工数削減を実現。 ・NBTF用高電圧電源は、本来、日本の専門家が現地で直接指揮して初めて達成できる世界でも稀な1MV統合試験を、高精度な遠隔指示により日本人現地在不在のまま実施して達成。 ・NBTFを利用して性能の肝となる電気設計の合理化を調整する調整を行い、実現できた順にはITERで使用される機器の仕様合理化に反映させる。 ・現地指示手順を円滑に進めるよう、日本側ではR&Dを通じて現地立上げを加速する方法を促進し、ITER機構とはそれを実現する調整を行い、工程加速を実現する。	成果となる事象	成果となる事象
	R2年度 R3年度 R4年度 (マネジメント等運営上の成果)	・別の国が調達した大規模かつハイテク機器間を、ITER計画において初めて組み合わせて実際に動作させるという、NBTF用の巨額電流機器の統合試験において、遠隔で行う試験機体統合構築、工程調整を実施して製作工程を短縮し、1MV定格出力を発生する技術的困難度の高い試験を完了、新型コロナウイルスの影響で現地立上げが制限される中、遠隔での技術管理体制を確立。 ・ITERダイハータの温度計測器の開発では、常温-3000℃にわたる他に類を見ない広範な温度レンジで、温度の関数である放射率の下で10%といった高い測定精度及び高精度のその調整が要求されており、現実的なコストでは実現の見込みがなかった。そのため、重量かつコンパクトな広範囲の温度計測器を構築して測定精度の要求を満了する新たな温度計測器の創制概念を構築し、プロトタイプ試験による実効性確認を経て、実用化の見える見通しを得る。他分野への具体的な応用例として、高精度での温度測定が必要となる、溶鉱炉や火力発電所の温度測定への応用が期待される。 ・NBTF用高電圧電源は、1MV出力時に負荷を短絡させ瞬間にゼロVにする過熱試験を実施し、回路解析上可能性のある、絶縁性能を10%以上上回る過電圧発生時に耐える性能を実現し、NBTFのビーム試験の稼働率を計画以上に高める可能性を得る。 ・FOAK機器として2周波数ジャイロトロンを開発し、2周波数で1MW、効率50%、100秒以上の長パルス動作を実現する。2周波数で世界最良クラスの性能を発揮することで、ITERの加熱実験における運用範囲を計画以上に拡大するとともに、将来のコスト低減に繋がる。 ・電子線改良による1MW超、高効率(これまでより10~15%増)ジャイロトロン開発、および共振安定化を達成し、将来のコスト低減の可能性を拓く。	成果となる事象	成果となる事象

先進プラズマ研究開発(BA活動(JT-60SA)含む)		
<p>2)幅広いアプローチ活動を活用して進める先進プラズマ研究開発 BA協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、サテライト・トカマク計画事業を実施機関として着実に実施するとともに、国際的東履行に不可欠なトカマク国内重点化装置計画を推進し、両計画の合同計画であるJT-60SA計画を進め運転を開始する。ITER計画を支援・補完し原形炉建設判断に必要な技術基盤を構築するため、JT-60SAを活用した先進プラズマ研究開発へ展開する。さらに、国際的に研究開発を主導できる人材育成に取り組む。</p>		
<p>2)幅広いアプローチ活動を活用して進める先進プラズマ研究開発 BA協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、BA活動におけるサテライト・トカマク計画事業を実施機関として着実に実施するとともに、国際的東履行に不可欠なトカマク国内重点化装置計画(国内計画)を推進し、両計画の合同計画であるJT-60SA計画を進め運転を開始する。ITER計画を支援・補完し原形炉建設判断に必要な技術基盤を構築するため、炉心プラズマ研究開発を進め、JT-60SAを活用した先進プラズマ研究開発へ展開する。さらに、国際的に研究開発を主導できる人材の育成に取り組む。</p> <p>a. JT-60SA計画 BA活動を進めるサテライト・トカマク事業計画及び国内計画の合同計画であるJT-60SA計画を着実に推進し、JT-60SAの運転を開始する。</p> <p>① JT-60SAの機器製作及び組立 JT-60SA 超伝導コイル等の我が国が調達責任を有する機器の製作を進めるとともに、日欧が製作する機器の組立を行う。</p> <p>② JT-60SA運転のための保守・整備及び調整 JT-60SAで再使用するJT-60既存設備の保守・改修、装置技術開発・整備を進めるとともに、各機器の運転調整を実施してJT-60SAの運転に必要な統合調整を実施する。</p> <p>③ JT-60SAの運転 ①及び②の着実な実施を踏まえ、JT-60SAの運転を開始する。</p>	<p>b. 炉心プラズマ研究開発 ITER計画に必要な原形プラズマ制御研究やJT-60SAの中心的課題の解決に必要な高ベータ研究を進めるとともに、統合予測コードの改良を進め、精度の高い両装置の総合性能の予測を行う。また、運転を開始するJT-60SAにおいて、ITERをはじめとする超伝導トカマク装置において初期に取り組むべきプラズマ着火等の炉心プラズマ研究開発を進める。</p> <p>c. 国際的に研究開発を主導できる人材の育成 国際協力や大学等との共同研究等を推進し、ITER計画やJT-60SA計画を主導できる人材の育成を行う。</p>	
<p>2)幅広いアプローチ活動を活用して進める先進プラズマ研究開発 サテライト・トカマク計画事業の作業計画に基づき、実施機関としての活動を行うとともに、国際的東履行に不可欠なトカマク国内重点化装置計画(国内計画)を推進し、両計画の合同計画であるJT-60SA計画を進め運転を開始する。</p> <p>a. JT-60SA計画 ① JT-60SAの機器製作及び組立 欧州との余や製作現場での調整の下、JT-60SA本体付帯設備の整備を完了するとともに、実験運転に向けた装置増強のための調達機器の設計・協議を進め、整備に着手する。</p> <p>② JT-60SA運転のための保守・整備及び調整 JT-60SAで再使用するJT-60既存設備の点検・保守・改修を実施する。統合試験運転を実施するために必要な、再利用機器の保守・整備を実施する。また、加熱及び計測機器等をJT-60SAに適合させるための開発・整備を行う。</p> <p>③ JT-60SAの運転 ①及び②の着実な実施を踏まえ、JT-60SAの運転を開始する。日欧研究者による研究協力を進めるとともに、日欧研究者で構成される実験チームの発足準備を進める。</p>	<p>b. 炉心プラズマ研究開発 JT-60の実験データ解析やDIII-D(米)、JET(英)等への実験参加・データ解析を行う。JT-60等の実験データを用いた検証や物理モデルの精緻化及びコードの改良を進めることにより、プラズマ内部からダイバータ領域までを含んだ統合コードの予測精度を向上させる。また、プラズマの安定性や輸送を制御する手法、JT-60SAにおけるプラズマ着火や制御の研究開発を進める。これらにより、ITERの原形プラズマ実験や、JT-60SAの定常高ベータに必要な輸送特性や安定性、原形炉に向けたプラズマ最適化の研究を実施する。</p> <p>c. 人材育成 国際協力や大学等との共同研究等を推進し、ITER計画やJT-60SA計画を主導できる人材の育成に貢献する。</p>	
世界最大の超伝導トカマク装置であるJT-60SAIにおいて初プラズマを達成し、13年に渡る装置建設を完了。	共同研究、オンサイトラボ、国際協力等を活用し人材育成を進める。	
JT-60SAIにおいてプラズマ制御性を確認し、統合試験運転を完了。 加熱実験運転に向けた装置増強に着手。	共同研究、オンサイトラボ、国際協力等を活用し人材育成を進める。 JT-60SA国際核融合スクールを実施する。	
加熱実験運転に向けた装置増強を実施。	共同研究、オンサイトラボ、国際協力、JT-60SA国際核融合スクール等を活用し人材育成を進める。	
加熱実験運転に向けて装置増強を継続しつつ、加熱実験運転を開始する。	人材育成を進め、ITER等に人材を供給する。	
困難度(研究開発)	困難度	困難度
-JT-60SAIは、ITERや原形炉に外挿しうるプラズマ維持時間を達成するため超伝導コイルを使用するが、既存の超伝導トカマク装置に比べて規模、性能、精度が数倍から1桁上で装置全体としてFOAK機器の集合体といえる。それぞれ独自の試験設備を安全動作させ、システムとして制御動作させることよってはじめて成る初プラズマでの生成自体が極めて困難な目標である。特に超伝導コイルは常伝導コイルに比べてゆとりとしか電流値を定量化されなかったため、プラズマ着火時などプラズマ電流が急激に変化する際、磁場を素早く制御することが難しく、制御能力の範囲で初プラズマの生成に必要な精密な磁界の制御や電界の発生を実現するためには装置の特性を的確に把握し制御パラメータを設定する必要があり難易度が高い。		
-超伝導コイルは常伝導コイルに比べてゆとりとしか電流値を定量化されなかったため、大型超伝導トカマク装置におけるプラズマの安定生成・維持に必要な制御は極めて困難であり、試行錯誤を行って制御の最適化を図っていく必要がある。		
-JT-60SAIに設置する加熱装置である、電子サイクロトロン加熱装置は1系統当たり1メガワットの100ギガヘルツ帯ミリ波を長時間安定して出力する性能が求められるが、同様の装置は世界に存在しない。500kV、10MWのイオン中性粒子入射加熱装置も同様である。ITER向け機器開発では従来機器と異なり、これシステム性能を満たすために必要な性能を確認しているが、システムとして要求性能を満たすべく設置されるJT-60SAの加熱装置はまさにFOAK機器であり、要求される性能を満足すること自体が困難である。		
困難度(マネジメント)	困難度	困難度
-JT-60SAIは欧州の複数の国、研究所、メーカーが製作した機器と日本製機器から構成されており、運転を実施するに当たり、国書が相互に異なる者間の交渉・調整を不断に行う必要があり、マネジメント上、多大な困難を伴っている。更に、コロナ禍により、対面での交渉・調整が出来なかったことや欧州側人員の来日制限から、より一層の交渉・調整能力が必要な状況が発生した。		
-コロナにより、欧州側人員の来日が制限され、技術者、研究者併せて当初予定の80人員が8人員に激減し、欧州が設計・製作し調達した大型機な機器である「冷凍システム」と「電源システム」について、製作業者から技術者の派遣がほとんどなされない状況となり、機器の調整に具体的支援が生じた。例えば欧州製作の「電源システム」の調整においてはメーカー技術者の派遣が当初予定の5名に押し、入国できた技術者が1名であり、技術支援が途切れる危機に瀕し、これに対応するマネジメントが必要となった。加えて、複雑な機構を持つ高電圧大電力電源機器の機械的調整はビデオ会議システム等による遠隔支援が極めて困難。	-コロナにより、欧州側人員の来日が制限され、技術者、研究者併せて当初予定の80人員が8人員に激減した。欧州から多数の技術者、研究者が参加するJT-60SAの総合調整運転の現場にオンサイトラボを活用して学生が参加することにも大きな意義がある国内共同研究の観点からも大きな影響がある。	
同上	同上	
同上(コロナ禍を除く)		
成果となる事象(研究開発)	成果となる事象	成果となる事象
-コロナ禍による周辺機器組立における狭い部での同時作業人数制限や、欧州側人員の長期にわたる来日制限による欧州調達機器の現地調整の遅延による遅延により、当初より大幅に短縮されたプラズマを用いた試験期間の中で、世界最大の超伝導トカマク装置JT-60SAIにおいて初プラズマプラズマを達成。多くの課題を前回の試みで解決してきた13年間にわたる超伝導活動の集大成であるとともに、ITERに直接貢献できる唯一の装置であるJT-60SAの初プラズマ達成は、大型超伝導トカマク装置の組立、試験運転、初プラズマ達成に必要な種々の機器調整などに重要な知見を与えITER計画の成功をより確実にする極めて大きなマイルストーンである。		
-当初より大幅に試験期間が短縮された欧州からの現地での直接的な支援がうけられない中で、JT-60SAにおいてプラズマ電流0.5MA以上のダイバータ配位を形成(プラズマ電流値の意義を別紙の③に示す)		
-JT-60SAで要求される加熱装置等の世界最高レベルの性能について、測定精度を勘案して有意な超越といえる、「年度目標を上回る性能」を達成する。加熱装置等の性能を向上させるためには装置技術や設置・調整技術を有意に改善する必要がある。性能向上をもたらす要素が同定されることは、設計の合理化の指針となり、将来のコスト低減等に繋がる。		
成果となる事象(マネジメント)	成果となる事象	成果となる事象
-コロナ禍において対面での交渉・調整が出来なかった中で、計画を着実に実行するための工夫を実施。具体的には、欧州調達機器の製作業者から技術者の派遣がほとんどなされない状況となり、機器の調整に具体的支援が生じた場合、これを解決するマネジメントとして、データ共有システムの構築を推進すべく調整を行う必要があるが、情報セキュリティの不安がなく且つ効果的な遠隔技術サポートを可能にする詳細なノウハウの共有を短期間で立ち上げ、構築するシステムの指針を明らかにする。		
-安全管理を徹底し、13年間、無事故・無災害を達成。		
-国内外の複雑な調整を行い、第一回JT-60SA国際核融合スクールを実施。日欧計20名の学生を募集予定。日欧の大学の教授等にアンケートを行ったところ、回答が得られた計46名のうち85%がJIFSに参加する可能性がある学生・若手研究者を指導していると言う興味を示している。		
-加熱装置性能の目標超越を可能にするうえで重要となる、欧州調達電源の性能発揮に必要な、欧州からの効果的技術支援を可能にするマネジメントを行う。		
成果となる事象(研究開発)	成果となる事象	成果となる事象
-JT-60SAIにおいて当初より大幅に試験期間が短縮された欧州からの現地での直接的な支援がうけられない中で、超伝導トカマク装置としては最大級のプラズマ電流1MA以上のダイバータ配位を形成(プラズマ電流値の意義を別紙の③に示す)		
-JT-60SAで要求される加熱装置や計測装置等の世界最高レベルの性能について、測定精度を勘案して顕著な超越といえる、「年度目標を10%以上回る性能」を達成する。加熱性能や運転効率に繋がるビーム電流、発熱出力、伝送効率、絶縁耐圧、安定性や、計測性能に係る個別の技術要素等が10%以上向上することは、得られた余裕を活用して他の部分の設計や仕様を合理化、簡略化するなど具体的なコスト削減に繋がるのみならず、実験運転における運用範囲の拡大と計画以上の領域での研究の可能性を広げる。		
成果となる事象(マネジメント)	成果となる事象	成果となる事象

核融合理工学研究開発(BA活動(IFERC、IFMIF-EVEDA、実施機関活動)、ITERテストプランケット含む)	
<p>3) 幅広いアプローチ活動等による核融合理工学研究開発 BA協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、BA活動として進める国際核融合エネルギー研究センター事業等を実施機関として着実に推進するとともに、原型炉建設判断に必要な技術基盤構築に向けて、推進体制の構築及び人材の育成を進めつつ、BA活動で整備した施設を活用・拡充し、技術の蓄積を行う。</p>	<p>b. BA活動で整備した施設を活用・拡充した研究開発 ① 原型炉設計研究開発活動 原型炉建設判断に必要な技術基盤構築のため、概念設計活動、低放射化フェライト鋼等の構造材料重照射データベース整備活動、増進ブランケット機能材料の製造技術や先進機能材料の開発、トリチウム回収技術開発を拡充して推進する。 ② テストプランケット計画 ITERでの増進ブランケット試験に向けて、試験モジュールの評価試験・設計・製作を進める。 ③ 理論・シミュレーション研究及び情報集約拠点活動 計算機シミュレーションセンターを活用し、核融合プラズマの動特性を中心としたプラズマ予測精度の向上のためのシミュレーション研究を進める。また、ITER遠隔実験センターを国際的情報集約拠点として活用する。 ④ 核融合中性子源開発 六ヶ所中性子源の開発として、IFMIF原型加速線の安定な運転・性能向上を行うとともに、リチウムループの建設、照射試験設備及びトリチウム除去システムの整備、ビーム・ターゲット試験の準備を開始する。</p>
<p>3) 幅広いアプローチ活動等による核融合理工学研究開発 BA協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、BA活動として進める国際核融合エネルギー研究センター事業等を実施機関として着実に事業を推進する。また、原型炉建設判断に必要な技術基盤構築に向けて、技術の蓄積を行う。</p> <p>a. 国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業並びに国際核融合材料照射施設(IFMIF)に関する工学実証及び工学設計活動(EVEDA)事業 ① IFERC事業 予備的な原型炉設計活動と研究開発活動を完了するとともに、計算機シミュレーションセンターの運用及びITER遠隔実験センターの構築を完了する。 ② IFMIF-EVEDA事業 IFMIF原型加速器の実証試験を完了する。 ③ 実施機関活動 理解増進、六ヶ所サイト管理等をBA活動のホスト国として実施する。</p>	<p>b. BA活動で整備した施設を活用・拡充した研究開発 ① 原型炉設計研究開発活動 原型炉概念の基本設計を継続し第一回中間C&Rに向けて、これまでの設計検討を報告書にまとめる。低放射化フェライト鋼等の炉内構造物材料の中性子重照射後の材料試験及び評価を継続する。これらの活動を強化するため、核融合科学研究所と連携して大学等との共同研究を継続する。さらに、フュージョン事業等を含めたトリチウム回収技術開発を継続する。 ② テストプランケット計画 ITERに設置し試験を行うテストプランケットシステムの詳細設計(予備設計)を進める。また、詳細設計レビュー(PDR)に向け、生産量設計する。さらに、最終設計承認に必要と考える安全実証試験データの取得のための装置の製作設計を完了し、製作を開始するとともに、同装置を設置するブランケット工学試験機の建設を進める。 ③ 理論・シミュレーション研究及び情報集約拠点活動 核融合プラズマ予測精度の向上のためのモデルの高度化を継続するとともに、開発したコードによる実験予測を実施する。核融合研究専用パソコン(JRS-1)の運用を継続し、原型炉を見据えつつITER計画等への貢献を踏まえた計算資源の配分を行う。 ④ 核融合中性子源開発 概念設計に基づき、核融合中性子源A-FNSの工学設計活動計画の検討を行う。また、欧州における核融合中性子源開発の動向について情報収集・情報交換を行う。</p>
<p>3) 幅広いアプローチ活動等による核融合理工学研究開発 BA協定の下、国際的に合意した事業計画に基づき、BA活動として進める国際核融合エネルギー研究センター事業等を実施機関として着実に事業を推進する。また、原型炉建設判断に必要な技術基盤構築に向けて、技術の蓄積を行う。</p> <p>a. 国際核融合エネルギー研究センター(IFERC)事業並びに国際核融合材料照射施設(IFMIF)に関する工学実証及び工学設計活動(EVEDA)事業 ① IFERC事業 IFERC事業では、原型炉設計対応の材料データベース、材料特性ハンドブックの整備(照射、腐食データを含む。)、核融合中性子照射効果予測技術の基盤構築を進める。原型炉設計活動としては、安全性解析、炉内機器や加熱・電流駆動システムの検討等を実施する。ITER遠隔実験センターでは、他のBA事業やITER機構との協力を進める。また、欧州実施機関と大型計算機に係る技術情報や関連する研究活動等に関する情報交換、日欧共同研究プロジェクト等への計算資源の提供を行うとともに、シミュレーション研究を進める。 ② IFMIF-EVEDA事業 IFMIF-EVEDA事業では、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、長ハルス重陽子ビーム試験を実施する。また小型リチウムループの設計を行い、実化系・純度型複素OR&Dを開始する。 ③ 実施機関活動 BA活動及び核融合についての理解促進を図るため、引き続き一般見学者等の受け入れや各種イベントへの参加、施設公開等を行う。また、六ヶ所核融合研究所の維持・管理業務を継続する。</p>	<p>b. BA活動で整備した施設を活用・拡充した研究開発 ① 原型炉設計研究開発活動 原型炉概念の基本設計を継続し第一回中間C&Rに向けて、これまでの設計検討を報告書にまとめる。低放射化フェライト鋼等の炉内構造物材料の中性子重照射後の材料試験及び評価を継続する。これらの活動を強化するため、核融合科学研究所と連携して大学等との共同研究を継続する。さらに、フュージョン事業等を含めたトリチウム回収技術開発を継続する。 ② テストプランケット計画 ITERに設置し試験を行うテストプランケットシステムの詳細設計(予備設計)を進める。また、詳細設計レビュー(PDR)に向け、生産量設計する。さらに、最終設計承認に必要と考える安全実証試験データの取得のための装置の製作設計を完了し、製作を開始するとともに、同装置を設置するブランケット工学試験機の建設を進める。 ③ 理論・シミュレーション研究及び情報集約拠点活動 核融合プラズマ予測精度の向上のためのモデルの高度化を継続するとともに、開発したコードによる実験予測を実施する。核融合研究専用パソコン(JRS-1)の運用を継続し、原型炉を見据えつつITER計画等への貢献を踏まえた計算資源の配分を行う。 ④ 核融合中性子源開発 概念設計に基づき、核融合中性子源A-FNSの工学設計活動計画の検討を行う。また、欧州における核融合中性子源開発の動向について情報収集・情報交換を行う。</p>
<p>・大電力ビームダンプとRFQを組み合わせたIFMIF原型加速線の長ハルス重陽子ビーム試験を開始</p>	<p>・試験モジュールの評価試験・設計・製作を進める。</p>
<p>・大電力ビームダンプとRFQを組み合わせたIFMIF原型加速線の長ハルス重陽子ビーム試験を継続する ・超伝導リアップの調整・運転に必要な高圧ガス許認可の調整と冷凍機の整備を実施</p>	<p>・TBSの詳細設計レビューに向けITER機構から提出要請のある図書の作成準備を完了するとともに、安全実証試験開始にむけた4つの試験装置の製作を進め、新たに竣工したブランケット工学試験機への搬入付け作業を開始する。</p>
<p>・事業計画に従い、大電力ビームダンプとRFQを組み合わせたIFMIF原型加速線の長ハルス重陽子ビーム試験を完了する。 ・超伝導リアップをIFMIF原型加速器に搬入付け、試験を開始する。</p>	<p>・TBSの詳細設計を完了し、最終設計承認にむけた安全実証試験を開始する。</p>
<p>・9MeV大電流の長ハルス重陽子ビーム加速を達成する。</p>	<p>・当初予定されているTBSの安全性確認試験を完了する。</p>
困難度	困難度
<p>IFMIF/EVEDA事業で目標としている大電流の重陽子ビームの連続加速はこれまでに無い(重陽子加速器のこれまでの世界記録はIPAcの125mA/500kV、1ミクロ秒、加速線のビーム電流とビームエネルギーの幅を別紙の4に示す)。大電流では、ビーム中の重陽子の密度が高く、重陽子間の反発力によりビームが拡がり易いためビーム伝達損失が起きやすく、連続運転では中性子発生による放射化、過大熱負荷による表面溶融などが生じる可能性が高い。これを抑えるため、ビーム入射器から大電力ビームダンプまで全てのビームラインにおいて、非常に高い精度の調整と十分なメンテナンスが必要とされるとともに、ビーム損失を最小限に抑える極めて精度の高い計測制御、運転手技の確立が要求される。</p>	<p>・テストプランケットシステム(TBS)は、核融合反応で生じた高速中性子のエネルギーから発電に使う熱を取り出すとともに、燃料のトリチウムを生産するという、従来の発電炉で重要な機能であり、ITER参加国間で従来のデファクトスタンダードに向けた技術開発競争の対象である。技術的には、極めて高い放射線耐性、トリチウムの閉じ込めと回収機能、高温高圧水等を用いた効率的な熱利用等の困難な課題を解決する必要がある。加えて、ITERでの実証試験に向けては、厳しいフランス原子力規制当局の認可を得るための最大かつ極めて厳格な作業と対応が必要である。</p>
<p>・重陽子超伝導リアップは世界で初めての機器であり、大電流であるがゆえにわずかな損失による発熱が超伝導状態の破壊を引き起こす。また、放射化を低減する観点から原因となるビーム伝達損失を低減する必要がある。そのため100kW級の従来の加速器と比べて1/10の10⁻⁶mと極めて低いビーム伝達損失条件が課されている。</p>	<p>同上</p>
<p>・同上</p>	<p>同上</p>
困難度	困難度
<p>・多数の国や機関が個別に機器を製作し、その設計者・製作者が参加し、現場レベルでの計画調整を行うため、修理やメンテナンスについて困難さを伴う。</p> <p>・IFMIF原型加速線の運転、機器調整は欧州から機器製作を担当した技術者が来日し、共同で運用することを前提に体制を構築しているため、今年度当初より追加による設備での出陣の専門家が来日できなかったことは、現場の専門スタッフの半減となり、これをカバーするために日本人スタッフへの負担の増大、加速器試験計画遂行や欧州側担当機器の調整作業に大きな支障が発生。</p>	<p>・ITERに持ち込むTBSの設計は各種独自のもので、ITERを利用して性能を競う国際コンテストに勝利し、国益のためブランケットの国際標準を確立する必要がある。この設計を円滑に進めるためには、多くの知財管理を含め利害が相反する箇所もあるITER機構を含む複数の国(国)との間の交渉・調整を不断に行う必要があり、マネジメント上、多大な困難さを内在している。</p> <p>・同時に試験できるTBSが6つから4つに削減される中、国際競争のスタートラインを維持するため4つのTBSに落ちるといった調整が必要であった時期に加えて、コロナ禍により、対面での交渉・調整が出来なかったことから、より一層の交渉・調整能力が必要。</p> <p>・炭素社会、EV化等の国を挙げた加速によりリチウム資源の需給バランス崩壊が刻々と迫る中、知財戦略及びビームチューブ製造に携わる多岐の利害関係者(関連企業、投資ファンド、研究機関、関係各省)の利害等が錯綜し、ブランケットの機能材であるリチウム回収技術の社会実装に向けた戦略的連携・協力関係の構築と醸成には、度重なる多くの困難を伴った。このため、六ヶ所研では新たな対応体制を立ち上げると、金所レベルで対応が必要である。</p> <p>また、ベリリウム資源の100%輸入(米製企業注)に由来する安定な資源確保が困難な中、国内で多くの企業や大学との共同研究や連携を模索し、将来の安定な資源確保に向け、困難な産学連携推進体制を構築することが必要である。</p>
<p>・多数の国や機関が個別に機器を製作し、その設計者・製作者が参加し、現場レベルでの計画調整を行うため、修理やメンテナンスについて困難さを伴う。また成果の共有、成果の詳細について、日欧双方の慣習や意見の相違、調達分担のアンバランスのため合意形成までに非常に多くの調整と議論が繰り返され、スムーズな意思決定に困難さを伴う。</p>	<p>・TBSの設計に係る交渉・調整上の困難度は前年度と同様であるが、特に、ポート統合との関係で、特別な配慮を要する中国(非ホワイト国)との調整が本格化するため、より一層困難となる。</p>
<p>・同上</p>	<p>・同上</p>
成果となる事象	成果となる事象
<p>・六ヶ所研で開発したマイクロ波加熱によるベリリウム精製技術は、従来技術に比べて、安全な低温湿式密封処理で、工程数は約半分、使用エネルギーは1/100以下、プラント規模も数10分の1である。核融合炉の技術の産業展開に向けて、本技術を活用した重要鉱種(27種)リサイクル検討優先鉱種(22種)の有効な資源の安定確保に向けて大型の外部資金を獲得し産業化の可能性を拓く。</p>	<p>・TBSの詳細設計に関わる、ITER18番水平ポートの設計統合を前倒して達成し、製作性の検討に注力し、設計合理化とコスト低減に繋げる。</p> <p>・TBS構成機器の実規模試験用試験による設計妥当性を前倒して実証することで、合理化とコスト低減を推進する。</p>
成果となる事象	成果となる事象
<p>・想定外のコロナ禍により欧州スタッフが来日できない中、IFERC事業と協力しIFERCの技術を利用した大容量高速データ通信とオンラインでの欧州からの遠隔実験参加を実現。BA活動のシナジー効果を示す。</p>	<p>・TBS試験用型当ポート削減により当初の6つのTBM計画のうち2つが廃止する事となったが、ITER機構や他機関との調整・協議の結果、日本が採用した冷却・増強方式の有用性が認められ初期4計画の1つとして選択される。</p>
<p>・10および18番ポート共有相手種である中国との設計協議を、ポートマスターに指名されることにより主導的に進め、知財流出のリスクを低減するとともに、委員研究員のITER派遣の継続を含めてITER機構と協議して主導し、調整を滞りなくすすめる。</p>	<p>・引き続き10および18番ポート共有相手種である中国との設計協議を主導し、18番ポート内に配置する日中TBSの共通機器の設計に関する調整を完了する。</p>
成果となる事象	成果となる事象
<p>・ブランケットの機能材であるリチウムを分離膜を利用して回収する技術は、従来技術に比べて小規模の設備で短時間に高純度のリチウムを低減して高純度のリチウムを分離できる特徴を有しており、その技術を用いた産業展開として、GSTアライアンス事業の下、外部資金を活用した使用済みリチウムイオン電池リサイクルのためのリチウム回収・分離技術の開発を進め、リチウム回収の生産コストを評価するため、分離膜を従来の膜厚から200μmにマルチ化したスタック(集約)化装置を新たに開発する。R2年度の実験結果に基づき、海外輸入価格の半額以下という低価格で使用するリチウムイオン電池からリチウム回収(リサイクル)が可能となるコスト評価を実証する。</p>	<p>・ブランケットの機能材であるリチウムを分離膜を利用して回収する技術は、従来技術に比べて小規模の設備で短時間に高純度のリチウムを低減して高純度のリチウムを分離できる特徴を有しており、その技術を用いた産業展開として、GSTアライアンス事業の下、外部資金を活用した使用済みリチウムイオン電池リサイクルのためのリチウム回収・分離技術の開発を進め、リチウム回収の生産コストを評価するため、分離膜を従来の膜厚から200μmにマルチ化したスタック(集約)化装置を新たに開発する。R2年度の実験結果に基づき、海外輸入価格の半額以下という低価格で使用するリチウムイオン電池からリチウム回収(リサイクル)が可能となるコスト評価を実証する。</p>
成果となる事象	成果となる事象

評価単位6「核融合に関する研究開発」における評価の基準に関する補足

① 各 FOAK 機器の特徴：

- ✓ TF コイルは、強大な電磁力に耐えるため溶接が難しい特殊なステンレス製構造物の溶接と加工が必要であり、世界最大（高さ 16m、重さ約 300 トン）、最高性能（12 テスラ）に加えて、トカマクのプラズマ閉じ込め用コイルとして、18 個のコイルを高精度で組み立て、約 2mm の精度で円形磁場を発生する点で高エネルギー加速器などのコイルより格段に大型でありながら高い位置精度、組立精度が求められており、その実現のために TF コイルの形状加工、内蔵する超伝導巻線の据付位置も mm オーダー（1/10000 の精度：通常の加工品は 1/1000 程度）での制御が必要となっている。
- ✓ 中性粒子入射加熱装置実機試験施設（NBTF）の高圧電源は百万ボルト（1MV）の直流高電圧を発生する電源であり、同時に百万ボルトの絶縁が必要となる。中国等では直流高電圧送電が広がりつつあり、0.8MV までは日本と欧州の各一社のみが対応可能な技術力を有するものの、1MV となると日本の一社のみが実績を有する。この一社が有するのはガス、油、気中絶縁であり、1MV 真空絶縁については世界で QST のみが ITER に向けた技術開発に成功している。このため、NBTF 電源の現地組立においては、QST とメーカーの日本人技術者の立会いが不可欠であったところ、コロナ禍で入国が制限されることとなり、リモートで万一の間違えも無い様に試験を実施するため、新たな技術開発とマネジメントの工夫が必要となった。

NBTF 及び ITER の実機 NB の電源技術の特殊性と運転領域を図 1 に示す。

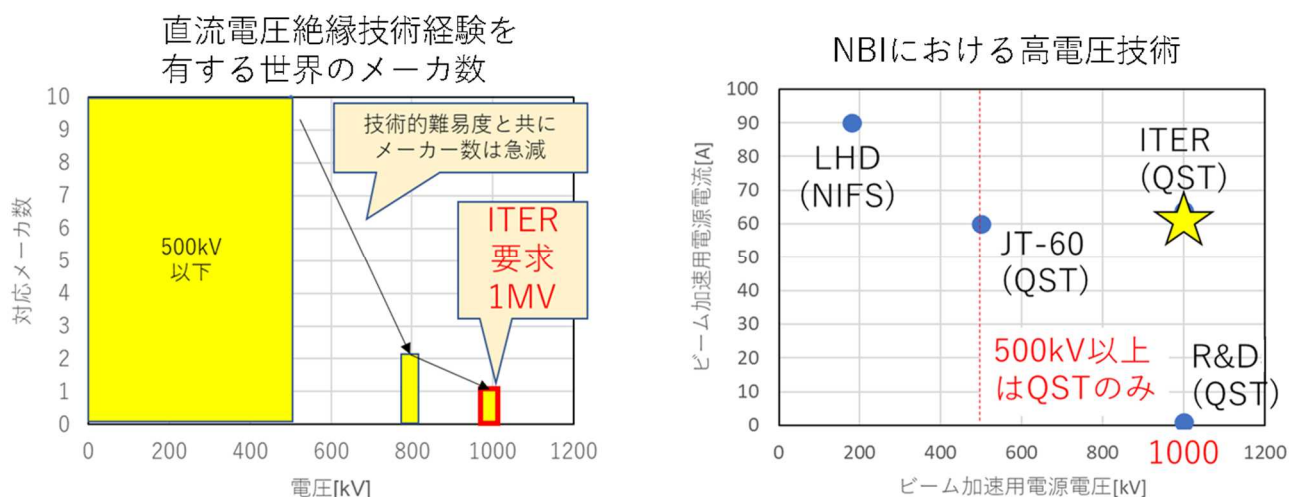


図 1 超高压直流絶縁技術の特殊性と中性粒子入射加熱装置(NBI)運転領域

- ✓ ITER ダイバータの温度計測器は常温～3000℃にわたる他に類を見ない広範なレンジ(通常数 100℃)での温度測定が求められていること、3000°といった高温では放射温度計が用いられるが、その温度測定に欠かせない放射率が温度の関数であり、広範なレンジの温度変化では高い精度を満たせないこと、その中でその場放射率校正を行って 10%といった高い測定精度を実現することが要求されており、そのためには新たな温度測定手法が必要であった。

- ✓ ジャイロトロンは、電子ビームと磁場の相互作用により一定の周波数の電磁波を発生し、これをプラズマ中に入射して、電磁波の周波数とプラズマ中の磁場が「電子サイクロトロン共鳴」する条件において、電磁波のエネルギーをプラズマ中の電子に伝搬してプラズマを加熱するものである。これまでに日本、ロシアで MW 級のジャイロトロン開発に成功している。通常、一つのジャイロトロンで形状と磁場を決めてしまうと特定の周波数の電磁波しか出すことができない。このため、電子サイクロトロン加熱法ではプラズマ中のある磁場の局所しか加熱できず、QST ではジャイロトロンの形状はそのまま、磁場を変えて異なる周波数の電磁波を発生する研究を続けてきた。2つの異なる周波数の電磁波を一つのジャイロトロンで発生することはロシア他でも成功しておらず、日本だけが可能な技術である。

② ITER に特有の調整の困難さ：

国際プロジェクトでは多国間の調整が必須となります。しかし他のプロジェクトと比較して、ITER 計画における調整のむつかしさとして、以下を挙げることができます。

- ✓ 7 極が構成機器を物納して一体の装置に組み上げるが、それぞれの構成機器が FOAK 機器であること。物納機器自身が相当に大きく複雑、複数の機能を担うこととなっており、ジェット機の主翼、導体、といった単能機器の組合せではないことが難しさの一つ。
- ✓ ITER 自身の詳細仕様、細部取合い設計が確定する前に機器設計・製作進んでおり、機器完成後に取合いの微調整が不可避となっていること。機器一つ一つの独立性が高い加速器などであれば上記の進め方が機能するが、トカマクは多くの機器・プラントが一体として核融合反応という一つの機能を達成するため、設計統合への依存度が高く、取合い調整は複雑かつ困難。
- ✓ ITER 機構自身、計画とともに設立されていることから、調整機能を実現する仕組み作り（マネジメント）をイチから議論して作り上げてきていること。
- ✓ 国際宇宙ステーション(ISS)は米、露、加、日、欧州 11 ヶ国（ベルギー、デンマーク、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ノルウェー、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス）の 15 ヶ国が参加しておりますが、設計・統合・調整は米国が一元的に管理しております。ITER は、中国、インドの様な知財等の扱いが難しい国が参加していることと、重要事項は理事会での全会一致が原則であることと、前述の様に、ITER 機構による統合・調整が機能するまでに長い時間が掛かったため機器間の調整には多大な時間と労力が必要です。

③ プラズマ電流値の意味

核融合プラズマではダイバータ配位（図 2）は必須です。ダイバータ配位を形成するためには、高精度の形状制御が不可欠です。大型超伝導トカマクでは、プラズマ生成時に金属性の真空容器に流れる渦電流（図 3：JT-60SA では 1MA 程度に達します）、時間応答の遅い超伝導コイル等の制約があります。また最大定格に比べて低いプラズマ電流領域での精密な電磁気計測等が必要です。さらに、ダイバータ配位に移行するまでは内側第一壁と接触を続けるので、プラズマが接触した壁から過剰なガスが発生してプラ

ズマの維持を阻害しないように、壁調整（壁面の吸蔵ガスを減らす清掃）が必要です。さらに、ダイバータ配位に移行したときにはダイバータ板と接触するため、内側第一壁に加えてダイバータ板の調整も必要となります。これらを満たしながらダイバータ配位の形成までプラズマを育てていくのは多くの困難が予想されます。JT-60SA では、最初電圧制御でプラズマを生成したのち、電流中心制御を経てプラズマ形状制御に移行します。プラズマ生成時には 1MA 程度ある渦電流の影響やプラズマ形状の同定精度等を考慮すると、0.4-0.5MA 程度から形状制御に移行できると想定しています。形状制御に移行できたのちにダイバータ形成を行います。そのため、0.5MA ダイバータ配位の形成がマイルストーンと考えております。

これまで、超伝導トカマクで得られているダイバータプラズマのプラズマ電流の最大値は韓国 KSTAR 装置の 1.2MA ですが、1MA を超えるのに数年を要しております。この他の超伝導トカマクで 1MA を超えた装置はありません。統合試験運転の短期間で 1MA のダイバータ配位まで到達できれば、他にはないユニークな成果と考えます。

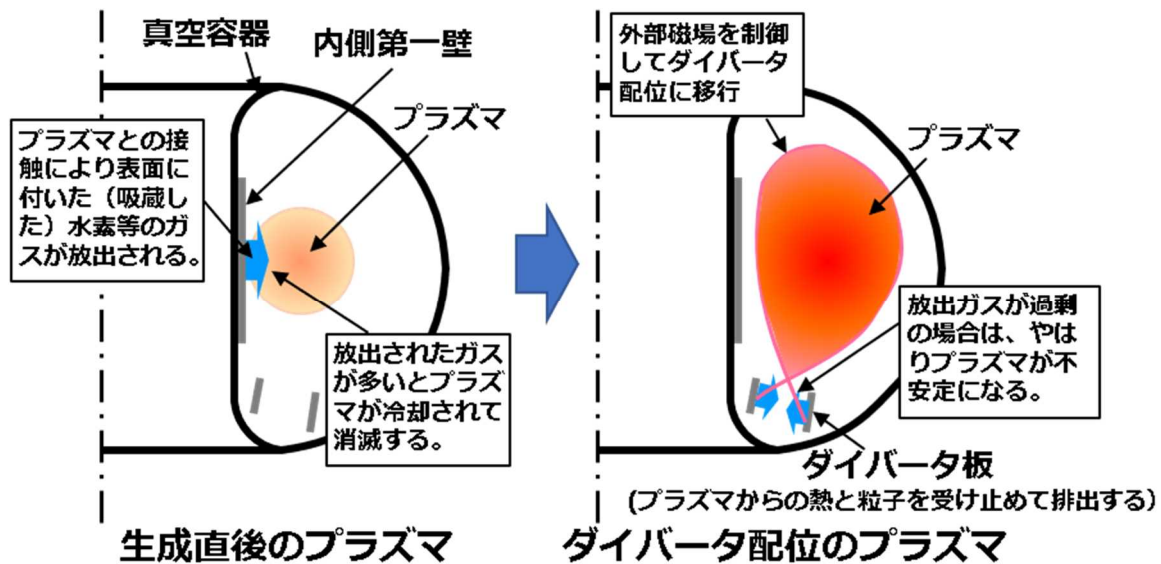


図2 ダイバータ配位、内側第一壁とダイバータ板の説明

プラズマを生成し電流を流すために
トランスの原理で周方向に電圧を掛ける

真空容器に流れる渦電流
加熱や計測用の枝管（ポート）の開口部を回り込む様に複雑な経路で流れる。
JT-60SAでは~1MAに達し、生成直後のプラズマ電流（数10~数100kA）よりも大きく、プラズマ領域の磁場を乱すため真空容器内部のプラズマの制御が難しい。

JT-60SAの真空容器
通常のトカマク装置の真空容器は渦電流を減らすために、薄肉構造または高抵抗部を設けるが、ITERやJT-60SAの真空容器は、遮蔽性能等を確保するため、厚肉（20~80mm×2の二重壁）になっており、プラズマ生成時に真空容器に流れる渦電流が極めて大きい。

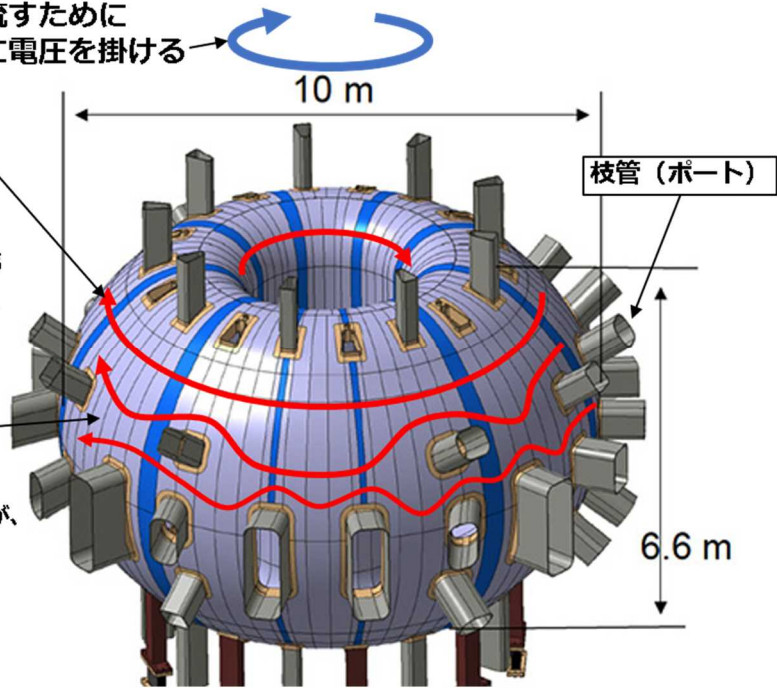


図3 真空容器と渦電流

④ IFMIF/EVEDA 用原型加速器 (LIPAc) の運転領域

LIPAc は、世界最大の重陽子加速器です。その運転領域を図4、5に示します。

重陽子ビーム(2019年7月)(最大電流値。
平均電流値ではないため参考データ)

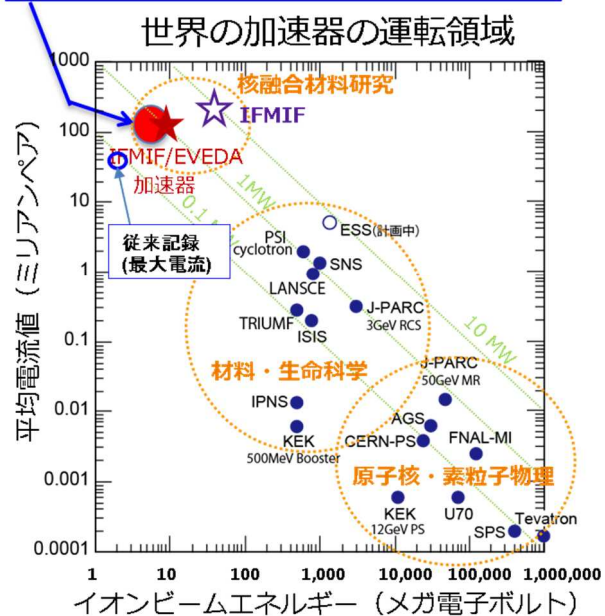


図4 現存する世界の加速器の運転領域

最終的な目標である核融合中性子源 IFMIF は星（白ヌキ）、IFMIF/EVEDA 用原型加速器(LIPAc)の最終目標は星（赤）、2019/7 のRFQ（高周波4重極加速器）による重陽子ビーム加速を赤丸で示しています。

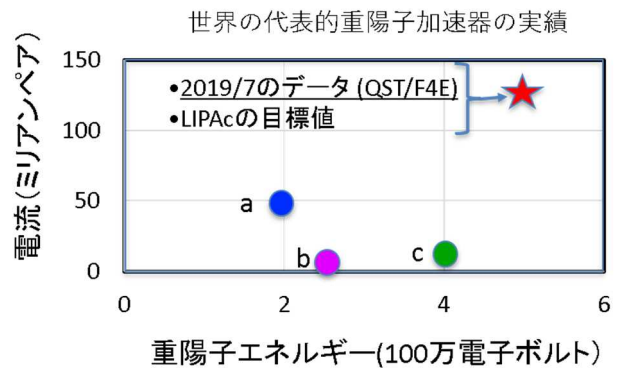


図5 世界の代表的な重陽子加速器の実績

- 赤星：LIPAc のRFQの目標値および今回得られた結果（125 ミリアンペア、500 万電子ボルト）
- a: PKUNIFTY（北京大学）（45 ミリアンペア、200 万電子ボルト）
- b: SARAF(イスラエル)（5.6 ミリアンペア、225 万電子ボルト）
- c: LLNL(米国)（10 ミリアンペア、400 万電子ボルト）