

特集記事 「核融合エネ	ルギー開発の現状」(4)
ITER 及び幅広いアプロ	ーチ活動を中心とした
核融合開	発の現状
量子科学技術	研究開発機構
谷口 正樹 Masaki TANIGUCHI	并手 俊介 Shunsuke IDE
石井 康友 Yasutomo ISHII	春日井 敦 Atsushi KASUGAI
中本 美緒 Mio NAKAMOTO	平塚 淳一 Junichi HIRATSUKA
池田 亮介 Ryosuke IKEDA	河村 繕範 Yoshinori KAWAMURA

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構(量研)は、文部科学大臣から ITER 計画における国内機関、BA 活動における実施 機関の指定を受けて、国際研究協力プロジェクトである ITER 計画及び日欧協力による BA 活動を実施している。

本稿では、我が国における核融合エネルギー開発の中 核的事業である ITER (イーター)計画、及び同計画を支 援・補完し、核融合エネルギーの早期実用化に向けて実 施している幅広いアプローチ (BA) 活動の全体像を概説 する。

2. ITER 計画

ITER 計画は、核融合実験炉 ITER の建設・運転を通 して核融合エネルギーの科学的・技術的実証を行うこと を目的とした大型国際プロジェクトである。日本・欧州・ 米国・ロシア・韓国・中国・インドの7極が参加し、現 在、フランスのサン・ポール・レ・デュランス市におい て 2025 年の運転開始 (ファーストプラズマ)を目標に建 設が進められている。日本は、ITER における主要機器 の開発を担当するなど重要な役割を担っており、量研が 日本国内機関として機器等の調達活動を推進している。



図1 TF コイルの構造

本稿では、日本調達機器のうち、トロイダル磁場コイ ル、中性粒子入射加熱装置、高周波加熱装置を取り上げ、 その開発状況を紹介する。また、ITERを用いて増殖ブ ランケットの科学技術的成立性を実証するテストブラン ケットモジュール (TBM) 試験計画の状況についても紹 介する。

2.1 ITER トロイダル磁場コイルの開発

量研は, TF コイル全 19機(予備1個を含む)のうち9 機の調達及び全 19機のコイル容器の調達を担当してい る。ひとつの TF コイルは高さ 16.5m, 幅 9m, 重量約 310 トンの世界最大のニオブ・スズ超伝導コイルであり, そ の構造を図1に示す[1]。

巻線部 (WP) は D 型の形状の 7 つのダブル・パンケー キ (DP) から構成される。それぞれの DP の製作は,1) 導 体の巻線作業,2) 冷媒入口配管の取付けと導体端部の電 気的接続部 (ジョイント)の取付け,3) 導体の熱処理作 業,4) ラジアル・プレート (RP) 製作、5) 導体の RP 溝へ のトランスファ作業、6) 導体絶縁作業、7) カバー・プレー ト (CP) 溶接作業、8) DP 絶縁及び含浸作業の順に進めら れる。完成した DP を 7 枚積み重ねて対地絶縁を施すこ とで WP を成型する。さらに、ジョイント接続、冷媒配 管組立及び計測線の取付けを行うことでターミナル部組



立を完了し、完成検査を終えたところで WP が完成する。

これまでに4機分のWP製作を完了しており、そのう ち最初の2機分のWPについては、完成検査の一環とし て、110トンにも及ぶWPに対し全体の平均温度のばら つきを50K以内に収めながら80Kまで冷却し、冷凍前 後のヘリウム漏洩検査で気密性が劣化しないことを確 認した。また、冷凍前後の常温での電気試験を実施する ことで、WPの絶縁性能を確認した。3機目についても 同様の検査を行うが、冷却による性能の劣化の懸念は払 しょくされたことから、4機目以降は冷却試験を省略し、 製作を加速させている。

コイル容器は、ITER 中心側のインボード側の容器 (AU)及びその蓋(AP)、外側のアウトボード側の容器(BU) 及びその蓋(BP)の4個のサブ・アッセンブリから構成 される。各部品の長さは最大16.5m、4個のサブ・アッ センブリの総重量は約200トンにも及ぶ[2]。それぞれ のサブ・アッセンブリの製作は、1)メインボディの製作、 2)付属部品の製作、3)ベーシック・セグメントの製作(メ インボディと付属部品の溶接作業)、4)ベーシック・セ グメント同士の溶接作業、5)最終機械加工、6)冷却配 管埋設作業、7)仮組検査の順に進められる。

WPは4機が完成検査を完了し、1機が完成検査に入っている。コイル容器についても欧州分6機と日本分5機の製作を完成させており、既に量産化している。完成したコイル容器とWPを一体化させることでTFコイル完成となる。

一体化作業は、1)AUの設置、2)WPのAU内への挿入、
3)BUの設置及びAU-BU間の溶接、4)WPの傾き調整、
5)AP、BPのはめ込みとAU、BUへの溶接(封止溶接)、
6) コイル容器とWPの隙間の含浸、7)最終機械加工、8) 最終検査の順に進められる。

コイル容器の溶接では、運転時のコイルにかかる歪み に耐えうる構造強度を持たせるため、厳しい溶接品質を 要求されている。溶接品質達成のためには、コイル容器 の赤道面から規定される約 6.6m の寸法や、周方向全長 16.5m にわたる開先に対し、1 mm程度の精度で開先合わ せを行う必要がある。コイル容器製作の最終ステップで は寸法検査に加えて仮組検査を実施し、個々の寸法だけ でなく、対となるサブ・アッセンブリとの組立性も確認 している。日本向けコイル容器4機の仮組検査において は、要求精度を達成している。これらの検査から得られ た知見と寸法検査のデータから5機目以降ではCAD ソ フト上で組立性を確認する手法を確立することで、製作 の効率を上げることに成功している。

コイル容器内の WP の挿入についても、真空容器内に プラズマを閉じ込めるための磁場を精度よく生成すると いうTFコイルの機能を担保するため、TFコイルの電 流中心位置に対し、インボード側で φ 2.6mm、アウト ボード側ではトロイダル方向に±3mmという厳しい要 求精度が設けられている。また、一体化含浸において、 樹脂の注入可能な WP とコイル容器の隙間 4mm を確保 する必要がある。一体化作業前には、それぞれのコイル 用のWPとサブ・アッセンブリの寸法測定結果と合わせ て、これまでの試作及び製作より予測した溶接変形から、 一体化作業後の電流中心位置及び含浸隙間の事前評価を 行っている(図2)。この評価結果を反映し、一体化作 業を進めたことで、既に2機のTFコイルを完成させた。 日本の TF コイル1号機目は世界初の ITER TF コイル完 成となり、2020年4月に ITER 機構へ到着している。2 号機目についても同4月に ITER 機構へ向けて出荷され た。

2.2 ITER 中性粒子入射加熱装置用高電圧電源機器の開 発

ITER プラズマの加熱・電流駆動の主要機器である中 性粒子入射加熱装置(Neutral beam injector: NBI)では、エ ネルギー 1MeV、電流 40A の負イオンビームを 3600 秒 間連続出力し、中性化して ITER プラズマ中に入射する。 これは従来の NBI 装置に比べエネルギー2倍、電流2倍、 連続運転時間は 360 倍にもなる超高性能な要求値である ため、実機に先立ち、実機と同規模の NB 実機試験施設 (NBTF、建設地イタリア)を建設し、実機の性能実証試 験を行う。日本は、この超高性能負イオンビームの生成 に必要な直流 1MV 高電圧電源機器の調達を担当し、本 機器の製作・輸送・現地据付を完了し、現地での欧州側 機器との統合試験を進めている [3-4]。

図3に本高電圧電源機器の全体図を示す。変圧器と 整流器で構成される直流発生器(DCG)では、欧州調達 のインバーターから三相交流 6.5kV を受電して直流 0.2 MVを出力し、DCG5 基を直列に繋ぐことで 1MV の電 圧を発生する。この電圧は直流フィルターコンデンサ (DCF)で平滑化され、100mに渡る伝送管を通って負イ オンビーム源まで送電される。また負イオンビーム生成 時、1MV電位上で負イオンを作る欧州調達の低電圧電 源(HVD1)に電力を供給するための 1MV 絶縁変圧器も 日本の調達である。これら DCG 用変圧器、1MV 絶縁変 圧器では、内部の 1 次 2 次巻線間に直流電圧最大 1MV が印加されるため、その電気絶縁構造の実現が課題で あったが、試作を通じてこれを実現した。また、それ以 外の機器は、0.6MPaの絶縁ガス(六フッ化硫黄:SF6)を 充填した圧力容器内に高電圧部を据付ける構造とし、大 気絶縁に比べ約 1/5 程度の絶縁距離短縮を実現してコン パクト化した。また、長尺な伝送管では、運転時の熱伸 び・地震時の変位発生時、1MV 絶縁のために使用して いる多数の絶縁物に過度な力を与えない変位吸収機構を 実現した。

さらに大きな課題は、これら電気技術に関する挑戦だ けではなく、機器数が多く巨大であるため、工場では各 機器の個別試験に限られたこと、また各国の共同調達で あることから、全てを組み合わせた試験は現地でしかで きないという点であった。そこで、現地作業では、日本 から技術管理のための人を派遣し、工場レベルのダスト 管理を行うフード内で組み合わせを実施した。また、全 ての機器を組み合わせた後に一括で電気絶縁試験を行う ための試験電源(TPS, 1.3MV 発生)も開発した。現地試 験では、欧州機器の外部放電発生などのトラブルがあっ たものの、関係者で協議して対策を行い、2019年11月 までに、ITER 機構と合意している電気絶縁確認試験、 (1)1.2MV で1時間、(2)1.06MV で5時間の電圧印加、(3) 過電圧時の動作を模擬するための1.06MV-1.26MV を5 回昇降圧、の3 種類の試験を成功裏に完了した。

2020年は、欧州が調達するインバーターから電力を 受電し、模擬負荷抵抗・短絡ギャップを用いて、電源定 格である 1MV、60A の発生、さらに短絡させた際の電 源機器全体の健全性を確認する。これらの技術・知見は、 2021 年から開始する ITER 実機用電源の調達に反映して いく。



図3 直流1MV 高電圧電源機器 全体図

2.3 ITER 高周波加熱装置の開発

ITER では、プラズマの生成、加熱・電流駆動などを 目的として、周波数 170GHz、トータルパワー 20MW の マイクロ波をプラズマに入射する電子サイクロトロン加



図4 日本の ITER ジャイロトロンの構成図



図5 水平ポートランチャーの外観図

熱・電流駆動装置が設置される。本装置は、マイクロ波 発生装置(ジャイロトロン)24 機と、内壁がコルゲート 構造を持つ円筒形導波管を用いた24 系統のマイクロ波 伝送系、マイクロ波のプラズマへの入射方向を制御する アンテナ(ランチャーと呼ぶ)5機から構成される。量 研は、8機のジャイロトロンと1機のランチャーを調達 するための研究開発を進めてきた。

ジャイロトロンは図4に示すように、電子銃、空胴、 モード変換器、ミラー、出力窓、コレクターなどから構 成された高さ約3mの真空管である。電子銃部で生成さ れた中空状の電子ビームは、超伝導マグネットの強磁場 中で旋回運動をしながら加速され、空胴にて電子の旋回 エネルギーが高周波電磁界と相互作用するサイクロトロ ンメーザーの原理によりマイクロ波発振モードを励起 し、モード変換器とミラーを介して出力窓からガウス分 布状のマイクロ波ビームを放射する。放射されたビーム は、2枚のミラーを有する準光学整合器により導波管へ 結合され、真空容器に設置されるランチャーまで低損失 でマイクロ波エネルギーを伝送する。ジャイロトロン内 では、電子は進行方向と旋回方向の2つの運動により螺 旋運動を行うが、量研では、発信に直接寄与する旋回エ ネルギーを個別に制御し、高効率な発振を可能とするカ ソード・アノード・ボディの三つの電極を有する三極管 方式のジャイロトロン開発を進めてきた。

ITER ジャイロトロンの性能要求は、周波数 170 GHz、 出力1MW、電力効率50%、定常動作、最大5kHzで の出力変調 (ON/OFF 運転) などがあるが、これまでにエ ネルギー回収技術による電力効率の改善、大口径空胴に よる高出力発振技術開発、人工ダイヤモンドの出力窓へ の搭載、半導体スイッチを適用した出力変調のための電 源開発などに成功し、2013年に ITER の要求性能を世界 で初めて実証することに成功した。さらに、10年以上 の ITER の運転期間に1 MW で定常及び繰り返し動作を 安定に実現するため、空胴における熱負荷を従来設計よ り約30%低減する改良や、安定した発振性能を実現す るための緻密なアノード電圧制御法などの開発を経て、 2018年に最初の ITER ジャイロトロン実機を完成させた [5]。これまでに、6機の ITER ジャイロトロンの製作が 完了し、2機の完成検査に合格している。今後は、2025 年に予定するファーストプラズマ達成に向け、残り2機 の製作と完成検査を、ITER 現地での統合試験を順次進 める。

量研が調達するランチャーは、ITERの真空容器の水 平ポートに接続され、図5に示すように24機のジャイ ロトロンから伝送されたマイクロ波を8系統ごとに上中 下段に分けて、各系統に設置される可動ミラーによって マイクロ波ビームのプラズマへの入射角度を制御する。 ランチャー内にて99%以上の伝送効率と要求されてい るプラズマ電流駆動分布を同時達成するマイクロ波伝送 設計の開発に成功し、現在、構造設計を含めた最終設計 作業を進めている。

2.4 テストブランケットモジュール試験計画

ITER (実験炉)の次の装置である DEMO(核融合原型 炉)ではエネルギー源としての観点から、核融合エネル ギーを熱として取り出し、燃料トリチウムの製造も担う トリチウム増殖ブランケットが重要機器となる。増殖ブ ランケットの科学技術的成立性を ITER にて実証するの が、テストブランケットモジュール (TBM) 試験計画で ある。日本は、量研を実施担当として TBM 試験計画に 参画しており、水冷却固体増殖(WCCB)方式のテストブ ランケットシステム(TBS)の開発を主導している。

TBS は TBM と遮蔽体を合わせた TBM セット、TBM から熱を取り出すための水冷却システム (WCS)、TBM 内の生成トリチウムを回収するトリチウム回収システム (TES)、トリチウム生成量の推定に必要な TBM と周辺の中性子データを取得する中性子放射化箔気送管システム (NAS)、これらの運転制御、データ収集を行う計装制御システムで構成され、TBM セットは真空容器内、それ以外はトリチウム建屋等に設置される (図6)。TBS は、ITER 機構による概念、詳細、最終設計の3段階の承認を経て、製作へと進む。現在は詳細設計段階にあり、2023 年末を期限とした詳細設計承認、2025 年末を期限とした最終設計承認を得て製作に入り、2029 年末を期限として TBS を ITER に持ち込む。

詳細設計は、概念設計レビューで認識された ITER と の取合いについて、条件を決定し、産業界の協力を得て 具体的な設計を進めている。特に TBM の筐体は、プラ ズマ閉込磁場への作用抑制のため、構造材料である低放 射化フェライト鋼の使用量が制限されているが、その制 約下でも高温高圧の冷却水による荷重に耐えられるよ う、円筒形状を採用することを ITER 機構に申請し受理 されたところである。その設計の過程で、増殖性能を向 上する方法として、筐体内側にエンベロープと称する増 殖材単一層を設けることを考案した [6]。現在、解析に



図6 テストブランケットシステムの概略

基づく健全性確認と製作性を考慮した設計改善を進めて いる。

TBS は各極が有する設備であるため、取合い条件を ITER 機構と確認しながら設計を進めるが、ITER の建屋 建設も進んでおり、限られた尤度の中で最大限の「TBM 試験に求める成果」が得られるよう交渉を進めている。 量研では、TBM の安全実証試験施設の整備が進行中で、 早ければ 2021 年度中には稼働する。産学との一層強固 な協力体制を築いて進める必要がある。

3. BA 活動

幅広いアプローチ(BA)活動は、ITER 計画の支援と核 融合エネルギーの平和利用の早期実現に向け、日本と欧 州原子力共同体により実施している国際共同プロジェク トである。2007年6月に日欧政府間の協定発効ととも に開始された BA活動は、2020年3月で当初の活動を 完了した。2020年4月からは、BAフェーズIIとして新 たな事業計画の下、茨城県那珂市の量研那珂核融合研究 所において「サテライト・トカマク計画事業」、青森県六ヶ 所村の量研六ヶ所核融合研究所において「国際核融合材 料照射施設の工学実証・工学設計活動事業」及び「国際核 融合エネルギー研究センター事業」を進めている。本稿 では、これらの事業の進捗について紹介する。

3.1 国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動 事業

核融合反応で発生する中性子環境を模擬するため、重 陽子 - リチウム (d-Li) 核反応による加速器駆動型中性 子源である国際核融合材料照射施設 (IFMIF)の検討が 国際協力の下 1990 年代より進められてきた。IFMIF は 40MeV-125mA という大電流の重陽子加速器 2 台から合 計 250mA の大電流重陽子ビームを連続的に液体リチウ ムに入射することで 20dpa/ 年以上の高い中性子束を発 生させる。IFMIF に必要となる大電流加速はこれまで類 を見ないものであり、既存の加速技術とのギャップが大 きい。このため、BA 活動の下、IFMIF 工学実証・工学 設計活動 (IFMIF/EVEDA 事業) が 2007 年に開始された。 量研はこの事業の日本の実施機関として六ヶ所核融合研 究所において欧州との協力で IFMIF 原型加速器 (LIPAc) の建設・運転を実施している。

LIPAcは、重水素イオン源(入射器)-高周波四重極加 速器(RFQ)-中エネルギービーム輸送系(MEBT)-超伝導 線形加速器(SRF)-ビーム診断系(D-Plate)-高エネルギー



ビーム輸送系 (HEBT) -ビームダンプ (BD) から構成され た全長約 36m の大電流重陽子線形加速器であり(図7) [7]、9MeV-125mA の重陽子ビームを連続運転する仕様 である。

LIPAcの大きな特徴は、加速器を構成する各機器の製作を欧州及び日本の研究機関がそれぞれ担当し、六ヶ所 核融合研究所において加速器として1つに組み上げるという国際協力である点である。これまで、欧州の研究 機関において、加速器機器のR&D及び製作が行われ、 現在六ヶ所核融合研究所において欧州で製作した機器を 組立・調整し、ビーム試験を段階的に実施している。

第一段階は入射器のみの 100keV の重陽子ビーム出力 であり、フランス・CEA サクレー研究所が開発した入 射器を六ヶ所核融合研究所に据付後、2014 年に 100keV-140mA の重陽子ビームを 0.15π mm mrad の低エミッタ ンスで発生させ、その目標性能実証を完了した。

第二段階としては、5MeV までの RFQ によるビーム 加速であり、世界で最も長い 9.8m の RFQ が 2016 年に イタリア・INFN レニャーロ研究所から搬入され、2017 年に入射器との接続を完了した。また MEBT、ビーム 診断系は 2016 年にスペイン・CIEMAT から搬入され、 2017 ~ 2018 年にかけて調整が完了した。

これまでのビーム加速試験で、日欧合同チームが、世 界最大電流の重水素イオンを生成する入射器、世界最 長のRFQ及びそのRFQに世界最大パワーを注入する高 周波システムの調整を行い、短パルス(1ms)ながらRFQ による125mAの大電流の重陽子ビームの5MeVの加速 に成功した。この成果は、IFMIF原型加速器のRFQの 設計値を満たすもので、核融合中性子源の開発にとって 極めて重要なマイルストーンを達成したものである。

今後 RFQ の定常ビーム加速試験を実施し、さらにその後は、六ヶ所サイトに建設したクリーンルームの中で SRF を組み上げた後、RFQ に接続させ、事業の最終目標である、重陽子を用いた 9MeV-125mA の定常加速を 目指した試験を実施する。

量研では、IFMIF/EVEDA事業で得られた原型加速器 とターゲットである液体リチウムループの知見を基に、 我が国の原型炉開発ロードマップで求められている核融 合中性子源として A-FNS 計画を進めている [8]。同計画 では、核融合材料開発だけでなく中性子を利用し医療用 RI 製造や産業応用を可能とするもので、今後、国内の 幅広い分野の専門家と連携をとりながら、A-FNSの実 現を目指したいと考えている。

3.2 国際核融合エネルギー研究センター事業

六ヶ所核融合研究所に設立された国際核融合エネル ギー研究センター(IFERC)は、主に原型炉設計 R&D 調 整センター、核融合計算機シミュレーションセンター (CSC)、ITER 遠隔実験センター(REC)の3つの活動か ら構成される。量研は、文部科学省核融合科学技術委員 会の定めた原型炉研究開発ロードマップに沿った、核融 合原型炉の開発を目指した研究開発を行っている。日欧 の原型炉の概念は、日本が定常炉、欧州がパルス炉とい うように、異なった概念を持っているが、共通の技術課 題も多く、日欧での原型炉に関する BA 活動を進めるこ とにより、日本の原型炉開発を補完している。

3.2.1 原型炉設計 R&D 調整センター

原型炉設計 R&D 調整センターでは、日欧共通課題に 関する原型炉設計活動、原型炉に関するR&D活動を行っ ている。2007年の BA 活動の開始とともに、日欧でワー クショップなどにより日欧共通の研究開発項目を検討 し、2010年頃から共同設計作業を行ってきた。原型炉 R&D活動では、原型炉における熱の取り出し、核融合 炉の燃料である3重水素(T)の増殖、熱や中性子の遮蔽 の機能を受け持つブランケットに関連する R&D を中心 として実施してきている [9]。ブランケットの構造材料 に関しては、原子炉で照射したデータを整理し、設計対 応データベース整備、核融合中性子照射効果予測技術基 盤構築などを進めている。また、欧州の核融合実験装置 JET (英) での DT プラズマ実験で使われたタイル試料な どを、T,Be, 放射化物を同時に取り扱える世界で唯一の 施設である六ヶ所研の R&D 棟施設に搬入し、日欧共同 でT吸蔵量の評価などを行った。この成果は、核燃焼 プラズマを取り扱う ITER や核融合原型炉での T 計量管 理技術の確立に役立つ。

これらの成果は2020年3月に最終報告書として取り 纏められた。また、これまでの日欧共同作業の成果も取 り込んだ日本の原型炉設計活動も全日本的な活動として 進んでいる(図8)。現在、これまでの研究成果を基にし た日欧共同事業が継続されている。



図8 日本の核融合エネルギー発電プラントの全体概念図

3.2.2 計算機シミュレーションセンター

核融合炉実現のためには、電磁波と多数の荷電粒子が 相互作用することにより炉心プラズマ中に生じる乱流や 不安定性を抑制、制御する必要がある。このような炉心 プラズマの解析、予測にはスーパーコンピューターによ るシミュレーションが必須であるため、日欧共同の計算 機シミュレーションセンター (CSC) が設立され、2012 年から 2016 年までの 5 年間に渡りスパコン Helios の運 用を行い、日欧の核融合研究者に計算機資源の提供を 行った。Helios(約1.5PF)は、運用開始当時、世界で12位、 国内で京速計算機に次ぐ2位の計算性能を持ち、このよ うな高性能スパコンを核融合専用として利用できたこと により、将来の ITER 実験予測、原型炉炉心シミュレー ションに必要なコード開発を実現することが出来た。こ れらの成果も含めて、5年間で639編の査読付き論文が Helios を利用して刊行された。現在、これらの研究成果 を継続的に進展させるため、六ヶ所研のスパコン JFRS-1(Japan Fusion Reactor Simulator-1、約 4.3PF)の 50%の計 算機資源を利用して日欧共同シミュレーション研究プロ ジェクトが行われている。

3.2.3 ITER 遠隔実験センター

IFERCでは、ITERに六ヶ所核融合研究所から遠隔で 参加するための設備、システムの開発をITER遠隔実験 センター(REC)として進めている。日本から1万km 程度離れた遠隔地での実験にリアルタイムで参加するた めには、現地の研究者と遠隔サイトの研究者が、時間遅 れ無しで実験データを共有し、円滑なコミュニケーショ ン環境を実現することが必要である。また、ITER実験 データは、今後期待できる唯一の核燃焼プラズマ実験 データであり、日本の原型炉開発のための貴重なデー タである。RECでは、ITER実験で創出される約100PB/ 年(電子図書約3億冊分に相当)のデータ全てをRECに 転送し、六ヶ所核融合研究所のスパコンを使って解析す る予定である。これらの設備、技術の開発は、国内外の 研究所、大学等と協力し実証試験を行ってきた。2018 年11月には、ITERサイトの近隣にある核融合実験装 置WEST(仏 CEA)を用いた遠隔実験の実証に成功した [10]。

3.3 サテライト・トカマク計画事業

サテライト・トカマク計画とは、量子科学技術研究開 発機構の那珂核融合研究所のJT-60トカマク装置を超伝 導装置JT-60SA(JT-60 Super Advanced)として改修する もので、日欧協力のサテライト・トカマク計画と国内の トカマク国内重点化装置計画の合同計画として進められ ている[11]。JT-60SA は我が国唯一の大型トカマク装置 であり、世界の核融合実験装置の中で、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力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である。サテライト・トカマク計 画の大きなミッションは以下の三つである:

○ 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力プラズマを 100 秒程度 維持し、原型炉の運転手法を確立する。

○ ITER・原型炉に向けた人材育成: ITER・原型炉開発 を主導する人材を育成する。

装置の外観図を図4.2.1-1 に示す。18本のトロイダル 磁場コイル、6本の平衡磁場コイル、4本の中心ソレノ イドの全てが超伝導コイルである。前二者がニオブチタ ン(NbTi)製、後者がニオブ3スズ(Nb3Sn)製である。主 な装置パラメータを表4.2.1-1 に示す。装置サイズは、 ITER のほぼ半分であり、ITER が完成するまでは世界最 大の超伝導トカマクである。加熱装置は中性粒子ビーム 入射装置 NBI (34MW) と、電子サイクロトロン波帯高 周波入射装置 ECRF (7MW)である。

核融合出力はプラズマの圧力(プラズマの密度と温度 の積)の二乗に比例するため、同じ装置サイズ(~同じ建 設コスト)であれば圧力の高いプラズマを用いる方が経 済性は高い。圧力の指標としてプラズマの圧力を磁場の 圧力で規格化した規格化圧力を用いる。ITERでは、核 融合燃焼の実証のため、これまでの世界的な研究で信頼 性の高さが実証されている標準 H-mode プラズマを標準 運転プラズマとしているが、これは比較的規格化圧力の 低い(~1.8)プラズマである。一方経済性の要求される



図 9 JT-60SA の外観図

表1 JT-60SA の主要パラメータ

プラズマ電流 I _P	5.5MA
トロイダル磁場 B _t	2. 25T
大半径 R _p	2.97m
小半径 a _p	1.18m
プラズマ体積 V _p	$133 \mathrm{m}^3$
加熱パワー	41MW
フラットトップ時間	100 s

原型炉では、より高い規格化圧力(~3.4-5.5)を目指す。 また、ITER では放電時間はプラズマの特性時間である 電流染み込み時間より短い 400 秒を目指すが、原型炉は 数ヶ月~1年の定常運転が要求される。

JT-60SA では、高プラズマ電流運転と高加熱パワーに より ITER の標準運転プラズをより ITER に近い高プラ ズマ温度(~10-20keV)領域で試験するとともに、超伝 導コイルを用いることで、原型炉で要求される高圧力 プラズマを長時間定常に維持することを目指す。また、 JT-60SA 加熱装置は、単にプラズマを加熱するだけでな く、トカマクプラズマで重要な役割を担うプラズマ電流 の一部を駆動したり、プラズマにトルクを与えることに よりプラズマを回転させることが可能でありさらにそれ らの空間分布を変えることもできる。トカマクプラズマ の性能や安定性は圧力の空間分だけでなく、これら電流 分布や回転分布にも大きく左右されることが知られてい る。これらにより、ITER での燃焼プラズマ実現に向け、 より詳しい知見を得て最短で安全な道のりを切り開くと ともに、原型炉実現に必須の高圧力プラズマの定常維持 の原理実証とそのための物理理解の深化を目指す。JT-60SA で行うべき研究については日欧のプラズマ研究者 が10年近くにわたる議論を行い、430人を超える日欧 の著者による JT-60SA 研究計画(JT-60SA Research Plan) として纏められた [12]。

サテライト・トカマク事業は日欧共同で進められてき た。JT-60SA 装置の製作に関しては、ITER と同様に日 欧で折半し進められてきた。欧州ではさらに加盟国間 でその分担を配分している。各コンポーネントの製作 は、2010年より日欧双方で順次開始された。JT-60SA は JT-60と同じ場所に設置されるため、JT-60SAの組立て に先立ち JT-60 の解体が 2010 年から 2012 年にかけて行 われた。これは、核融合装置の世界で最初の解体作業で あり、そのため多くの R&D が行われた [13]。欧州や国 内で製作されたコンポーネントは那珂核融合研究所に送 られ、2013年3月にスペインが製作したクライオスタッ ト・ベースを設置したことを皮切りに現地組立てを開始 した。真空容器は日本分担で複数のセクターに制作した ものをクライオスタット・ベースの上に設置し、お互い を溶接して一体化した。この際、溶接による変形をあら かじめ予測するとともにレーザートラッカーを用いた現 場での精密な計測を行い、現場で補正しつつ組み立てる ことにより高精度の組立てを実現した。欧州分担コン ポーネントの中で最大のトロイダル磁場コイルは、イタ リアとフランスで製作を行い、ベルギーにある試験装置 で超伝導試験を行ったのち日本に送られた。1~2ヶ月 に1機ずつ送られてくるトロイダル磁場コイルを、レー ザートラッカーを用いた現場での精密な計測と設置時に 細かな補正を施すことにより、mm 単位の精度での組上 げに成功した。平衡磁場コイルと中心ソレノイドは日本 側の分担であるが、詳細な計測を行いつつ巻き上げるこ とにより、直径が最大(12m)の平衡磁場コイルでも真円 からのズレが 0.3mm (要求値は 8mm) という高い精度 での製作に成功し、設置に関しても 1mm 程度の精度を 達成した。10mクラスの装置で1mmクラスの製作/設 置誤差を達したことは、これらの誤差による磁場の誤差 が 1/10000 程度に抑えられていることを意味する。プラ ズマは基本的にはコイルが作る閉じ込め磁場に影響さ れ、その磁場の誤差が1/10000程度以内であることが、 これまでの研究から安定で性能の良いプラズマを作る上 での一つの指標とされており、この観点から JT-60SA は 非常に良い精度で製作・組立てされたと言える。コイル だけでなく、真空容器の内側に取り付けられプラズマと 接する第一壁等も、高精度の計測と高度な位置合わせ等 の技術開発により、1mm オーダーの精度で設置された。 これにより、プラズマと不均一に接することによる熱負 荷の偏りを防ぐことができる。

JT-60SA 本体組立てと並行して、超伝導コイルの電源 や超伝導コイルを冷却するための冷凍機システム、NBI や ECRF 加熱装置や計測機の整備が、日欧分担で進めら れている。

2013 年から開始された、JT-60SA 本体の組立ては 2020 年 3 月に完了した(図 4.2.1-3)。今後、JT-60SA 装 置の真空排気や超伝導コイル冷却など、順を追って各機 器の健全性を確認しつつ動作させ、2020 年秋ごろに最 初のプラズマを着火する、統合試験運転を開始する予定 である。

参考文献

- [1] N. Koizumi et al., "Progress in Procurement of ITER Toroidal Field Coil in Japan," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol.26, no.4, 4203004, 2016
- [2] M. Iguchi et al., "Progress of ITER TF Coil Case Fabrication in Japan," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 28, no. 3, 4202105, 2018.
- [3] 渡邊和弘他: 5. ITER NBTF 電源高電圧機器の製作, J. Plasma Fusion Res., 2016, vol. 92, no. 6, p. 414-419.
- [4] H. Tobari, "COMPLETION OF DC 1MV POWER SUPPLY SYSTEM FOR ITER NEUTRAL BEAM TEST FACILITY", IAEA FEC, FIP/P1-10, 2018.
- [5] Y. Oda, et al., Nucl. Fusion 59, 086014 (2019).
- [6] H. Gwon et al., Tritium breeding capability of water cooled ceramic breeder blanket with different container designs, 30th Symposium on Fusion Technology (SOFT2018), P4.166, 16th 21st Sep., 2018, Sicily, Italy
- [7] A. Kasugai et al., "国際共同プロジェクト IFMIF 原型 加速器 (LIPAc) の開発 ", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [8] A. Kasugai et al., "QST における先進核融合中性子源 (A-FNS) 計画 ", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [9] J.-H. Kim, M. Nakamichi: "Compatibility of advanced tritium breeders and neutron multipliers", Fusion Engineering and Design, Vol.156, 111581 (2020)
- [10] S. Tokunaga, et al.: "Remote experiment with WEST from ITER Remote Experimentation Centre", Fusion Eng. Des. 154, 111554 (2020)
- [11] P. Barabaschi, et.al., "Progress of the JT-60SA project", 第12回 MAGDA コンフェランス予稿集,大分, 2003

- [12] JT-60SA Research Unit, "JT-60SA Research Plan", https://www.qst.go.jp/uploaded/attachment/6690.pdf
- [13] Y. Ikeda, et.al., "Safe disassembly and storage of radioactive components of JT-60U torus", Fusion Eng. And Design, Vol.89, No.9-10, pp.2018-2023 (2014) (2020 年 5 月 24 日)

著者紹介

著者:谷口 正樹	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:ITER・BA に関する国際交渉を	
担当	
著者:井手 俊介	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:プラズマシナリオ開発、加熱電	
流駆動、閉じ込め	
著者:石井康友	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野 : プラズマ物理学	
著者:春日井敦	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:核融合中性子源、加速器技術	
著者:中本 美緒	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:超伝導マグネット	
著者:平塚 淳一	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:中性粒子入射加熱、高電圧ブッ	
シング	
著者:池田 亮介	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:ジャイロトロン開発、電子サイ	
クロトロン共鳴加熱	
著者:河村 繕範	
所属:量子科学技術研究開発機構	
専門分野:化学工学、核融合炉燃料システ	
ム開発	