### 小特集

## 超伝導トカマク装置 JT-60SA にみる大型核融 合装置の機器製作と装置組立の核心

The Core of Component Manufacturing and Device Assembly of Large Fusion Devices: Superconducting Tokamak JT-60SA as a Typical Example

## 1. JT-60SA プロジェクトとは

#### 1. The JT-60SA Project

#### 鎌田 裕

KAMADA Yutaka 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 (原稿受付:2020年4月20日)

JT-60SA 計画は,日欧の幅白いアプローチ活動(BA 活動)のサテライト・トカマク計画と,わが国のトカマ ク国内重点化装置計画の合同計画である.その目的は,核融合装置技術開発と核融合プラズマ研究開発を融合し つつ,ITERの技術目標達成のための支援研究と,原型炉に向けたITERの補完研究(高圧力プラズマの定常維持) を行うこと,これらによってITER・原型炉開発を主導する人材を育成することである.

#### Keywords:

fusion, ITER, DEMO, research plan, project

#### 1.1 はじめに

JT-60SA は、2007年の日欧の幅広いアプローチ(Broader Approach: BA)活動(BA 活動)開始以降,建設が順調に進み、2020年3月に装置が完成した.

本小特集では,超伝導コイル,真空容器,電源,冷凍機 などの主要機器を中心に,この国際熱核融合実験炉ITER に次ぐ大型超伝導トカマク装置JT-60SAの機器製作と装置 組立について,要求される高精度の理由と,その目標達成 に向けた施策を述べる.同時に,工程遵守をどのように実 現させてきたかについても述べていく.また,国際共同で 一つの装置システムを完成させるための要諦を記す.これ らは,各国の原型炉の設計活動に資するとともに,特にト カマク本体の組立に向かうITERに大きく貢献するもので ある.

以下,本小特集の第1章として,JT-60SA プロジェクト の概要を記す.

#### 1.2 JT-60SA 計画の目的

JT-60SA 計画[1,2]は, BA 活動のサテライト・トカマク

計画と、わが国のトカマク国内重点化装置計画の合同計画 である.量子科学技術研究開発機構 (QST) 那珂核融合研 究所の臨界プラズマ試験装置 JT-60を, 日欧が製作した機 器を用いて超伝導装置に改修し, i)ITER の技術目標達成 のための支援研究と, ii)原型炉に向けたITERの補完研究 を行うこと、これらによってiii)ITER・原型炉開発を主導 する人材を育成することが目的である. ITER の支援では, 臨界プラズマ条件クラスの高性能プラズマを長時間 (100秒程度)維持する実験を, ITER に先行あるいは並行 して実施し、その成果によって ITER 計画を効率的に進め る. ITER の補完では、ITER では行うことの難しい「原型 炉に必要な高出力密度を可能とする高圧力プラズマの長時 間維持 | を実現し、コンパクトで経済性の高い定常(パル ス運転でない)原型炉の運転領域と制御手法を確立する. 図1に, JT-60SA 装置の位置付け, 図2に JT-60SA がめざ す高圧力プラズマ領域を示す.

JT-60SA の初プラズマ(2020年秋予定)は, ITER の初プ ラズマ(2025年12月予定)よりも5年早い(図3). このた め, JT-60SA の装置の組立や統合コミッショニングの経験

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

author's e-mail: kamada.yutaka@qst.go.jp



図1 ITER 及び原型炉に貢献する JT-60SA の位置付け.



図2 JT-60SA の高圧カプラズマ長時間維持の目標領域.

は ITER に大きく貢献する. さらに, JT-60SA の運転で明 らかにする「トカマクシステムとしての工学評価」によっ て,設計や製作の妥当性や裕度,あるいは改善・合理化の 分析を行い,ITER や原型炉に貢献する.JT-60SA で高パ ワーでの加熱実験が始まるのは2023年であるが,これも ITER のプラズマ加熱実験開始(2028年)より5年早い.こ の間,JT-60SA を用いて,ITER のリスク低減(ディスラプ ション回避・緩和や ELM 緩和など)あるいは効率的な運 転に必要な研究を行う.ITER の加熱実験開始後は,ITER とJT-60SA は相互に協力しながら,ITER の DT 運転や原 型炉の設計に必要な研究を行っていく.そして,このよう な研究を進めていくための,ITER とJT-60SA との研究協 力協定が2019年11月に締結された.また,この研究スケ ジュールは,我が国の核融合研究開発ロードマップに従っ たものである.

2007年から開始された BA 活動は,その第一期 (BA Phase I) を完了し,2020年4月から [BA Phase II] として 新たな段階に進むことが日欧両政府によって決定された.



図3 ITER, JT-60SA, 原型炉のスケジュール. JT-60SA は実験 と装置増強を行いつつ ITER および原型炉へ貢献していく.

JT-60SA に関しては, BA Phase I で装置が完成し, Phase II で,いよいよ統合コミッショニング(プラズマ運転を含 む),装置増強,実験を進めていく.実験開始後は,国内研 究者200-300名,欧州を中心とする外国研究者200-250名 程度が実験に参加することが想定される.さらに,日欧の 大学のオンサイトラボラトリーを那珂核融合研究所に設置 していく(2020年4月時点で,東大,名大,九大と取り決め を調印し,筑波大,京大と手続きを進めている).これらに よって, JT-60SA は,大型国際研究拠点として,活動を開始 する.

#### 1.3 JT-60SA 装置の特長

JT-60SA 装置の特長は,超伝導大型トカマク,高いプラ ズマ形状ファクター,高パワー・長時間かつ多彩なプラズ マ加熱・電流駆動・運動量注入,高いプラズマ安定制御性 能,そして,高い熱・粒子制御性能等である.

JT-60SA のプラズマの大きさは, ITER の約 1/2 (体積で は約 1/8)の130 m<sup>3</sup>, プラズマ電流 I<sub>P</sub> の最大値は ITER の約 1/3 の 5.5 MA であり, ITER の完成までは世界で1 番大き なトカマク装置となる.**表1** に代表的な装置パラメータ, 図4 に世界の超伝導トカマク装置のプラズマ断面を示す.

プラズマの形状は,高圧力プラズマの安定性を向上する ために,ITERと比べてずんぐりとしたドーナツ状(プラ ズマ大半径と小半径の比 R/a が小さい)で,プラズマ断面 の楕円度や三角度を大きくしている.これらの形状をまと めた形状ファクターは,ITER の 4.3 に対して JT-60SA は

#### 表1 JT-60SA プラズマの主要パラメータ.

プラズマ電流 Ip	5.5MA
トロイダル磁場 B <sub>t</sub>	2.25T
大半径 Rp	2.97m
小半径 ap	1.18m
楕円度 K <sub>x</sub>	1.93
三角度 δ <sub>x</sub>	0.5
アスペクト比	2.5
プラズマ体積 V <sub>p</sub>	133m <sup>3</sup>
加熱パワー P <sub>heat</sub>	41MW



図4 世界の超伝導トカマクのプラズマ断面.SST-1(印), EAST (中), KSTAR (韓), WEST (仏) は稼働中.

Special Topic Article



図5 プラズマ制御のための真空容器内機器群.

7.0 であり、図1の高い圧力指数の達成を可能としている. プラズマ加熱は合計 41 MW×100秒間の高パワー・長パ ルス入射であり、世界のトカマク装置の中で最も多彩な加 熱・電流駆動・運動量注入が可能である.その内訳は、 500 keV・10 MW の負イオン源中性粒子ビーム (NB) (プ ラズマ電流順方向接線入射),85 keV・合計24 MWの12ユ ニットの正イオン源 NB (順方向接線入射4 MW,逆方向接 線入射4 MW,垂直入射16 MW)、及び入射角度可変・ 2 周波数可変(110 GHz+138 GHz)・7 MW の電子サイク ロトロン加熱である.これらの組み合わせを変えること で、「加熱分布」、「運動量注入分布」、「電流駆動分布」を 独立に制御できる高い制御性を獲得している.

高圧力プラズマを安定に制御するため,JT-60SAの真空 容器内には様々な機器を設置する(図5).まず,プラズマ の不安定性を受動的に抑制するための安定化板(導体製で, そこに流れる渦電流で磁場揺動の成長を抑える)を設置す る.また,高速位置制御コイル,誤差磁場補正コイル,抵 抗性壁モード制御コイルなどの真空容器内コイル群を用い て,プラズマの位置や磁場の乱れを能動的に高速制御する.

プラズマから出てくる熱や粒子を受けとめる主役のダイ バータ部は、遠隔保守による脱着が可能なカセット方式を 採用しており、高熱流東下での熱・粒子制御を可能とする W型構造である.ダイバータ材料は15 MW/m<sup>2</sup>の高熱流束 に耐える炭素(CFC)製水冷却でスタートして幅広い実験 領域を確保する.そして、実験の進展を踏まえて、2030-2033年頃にITERや原型炉と同様のタングステン材に取り 替える計画である.

JT-60SA では三重水素を用いずに重水素で実験を行う. ITER は重水素と三重水素を用いた燃焼プラズマの実現を最大のミッションとする失敗のできない計画であるために,様々な設計が保守的となっているが,JT-60SA は先進的で挑戦的な研究を進める役割を持っている.このような将来へ向けた柔軟性を持たせていることもJT-60SAの特長である.

#### 1.4 装置の製作と組立

JT-60SAは、日欧各々が製作した機器を那珂核融合研究 所に持ち寄り、1台の超伝導トカマク装置として組み立て る.欧州は、F4E(Fusion for Energy)が実施機関となり、その下にCEA(フランス)、ENEA(イタリア)、CNR-RFX(イタリア)、CIEMAT(スペイン)、KIT(ドイツ)、CEN-SKN(ベルギー)の6つの国立研究機関が参画している。日本の実施機関は量子科学技術研究開発機構(QST)である。機器製作の日欧分担を図6に示す。

このような構成機器の製作にあたっては、まず各機器 が、その要求性能・機能を満足することが大切であり、そ れらは皆達成された. その上で, 大型超伝導トカマク装置 として、コイルや真空容器などの本体機器に重要であった ことは、機器の製作精度と設置精度である。特に、プラズ マの MHD 安定性の要請から, 誤差磁場を 10<sup>-4</sup> 程度に抑え ることが求められる.このため、JT-60SAの本体機器の大 きさは約10mであることから、その10<sup>-4</sup>オーダーである 1~数 mm を追求すべき製作・設置誤差とした.勿論,本 体機器間の取り合いや支持を工夫し、超伝導コイル冷却時 や通電時、高加熱パワー長時間運転時などの様々な状態 で、機器相互の干渉が無いことも必要条件である.このよ うな要求の下、例えば中心ソレノイドは限られた空間の中で 最大の磁束が得られるようにパンケーキ間の接続の工夫を行 い、真空容器は電磁力に強く且つ誘導電流を抑える高抵抗 を両立させる二重壁構造とする工夫を行った, 一方, 超伝 導コイルの運転に不可欠な冷凍機システムは、大型である ことに加えて,大きな変動熱負荷を平準化制御する工夫を 行った. 超伝導コイルを駆動する電源では、プラズマ着 火・立ち上げ用と位置形状制御用の2種類の電源を複合し たシステムを構築するなど、様々な最適化を図っている.

第2章以降,このような様々な特徴を持つJT-60SAの機器とそれらの組立に関して,超伝導コイル(第2章),低温 冷凍機(第3章),電源設備(第4章),真空容器及び容器 内機器(第5章),組立(第6章),プロジェクト管理(第 7章)の順に紹介していく.

#### 1.5 JT-60SA の炉心プラズマ研究

JT-60SA は, ITER 及び原型炉を「飛躍無く予測できる」 臨界プラズマ条件クラスのプラズマ領域で研究開発を進め る装置である[2].即ち,プラズマ現象を決定する主要な



図 6 JT-60SA 装置の日欧機器製作分担.

3つの無次元量(規格化ラーマ半径,規格化衝突周波数, 規格化プラズマ圧力)で,ITER及び原型炉級のプラズマ を研究することができる.これは、図4に示した各国の装 置の中で,唯一JT-60SAのみが満足する条件である.また, プラズマの維持時間(典型的には100秒間)は,プラズマ内 部での電流拡散時間やプラズマ対向壁での粒子リサイクル 時間等,炉心プラズマの振る舞いを決める最も長い時定数 よりも十分長く設定している.

さて、核融合炉では、多くのプラズマ性能を全て同時に 満たさなくてはならない.即ち、高い閉じ込め性能で所要 の核融合出力を得、プラズマに面する第一壁への熱流を許 容範囲に保ちつつ、高い出力密度でコンパクトな炉心と し、且つ小さな循環電力で定常的にプラズマを維持する必 要がある(図7).このためには、エネルギー閉じ込め改善 度、規格化プラズマ圧力、自発電流割合、非誘導電流割合、 規格化電子密度、燃料純度、加熱パワーに対する放射パ ワー割合の7つの要素に関して十分高い値が必要である. しかし、原型炉で要求されるこのような高い総合性能はこ れまで実現されたことがない.この、「定常原型炉に必要 な炉心プラズマ総合性能」の達成をめざすのが、JT-60SA である.そして、このような高い総合性能を、信頼性の高 い現実的な運転で定常的に維持する手法を開発していく.

一方、ITERへの貢献に関しては、ITERと相似のプラズ マ形状、ITERと同じ制御手法等を用いて、主にITERの標 準運転(Hモード)を対象とする研究を進め、ITERが目的 を効率良く達成するための支援を行っていく、その際、 ITERの軽水素・ヘリウム、重水素、重水素-三重水素の 各運転期に必要なデータをITERに先行して取得するこ と、また、ITERの実験で生じた課題に迅速に対応するこ とが大切な役割である(図3).特に、ディスラプションが 発生した際に、壁への瞬間的な熱流やプラズマを囲む構造 物での電磁力の発生などを緩和する「ディスラプション緩 和」手法の確立が重要である.

#### 1.6 JT-60SA リサーチプラン

JT-60SA の研究計画は、「JT-60SA リサーチプラン」と して公開されている[3,4]. 2010年以降, 国内及び欧州の研 究コミュニティとの幅広い共同検討体制を構築して, JT-60SA リサーチプラン Ver.4 が2018年9月に完成した. 共著者数は、435名で、日本174名(18研究機関)、欧州261 名(14カ国, 33研究機関)である.このリサーチプランは, 最近改訂された ITER のリサーチプラン, 日本の核融合原 型炉研究開発ロードマップと整合させつつ、JT-60SA を用 いてどのような研究を進めていくかについて、運転領域開 発,安定性,閉じ込め、ダイバータ等の8つの専門研究領 域毎に、JT-60SAの実験研究を担う若手研究者を中心に企 画・提案したものである. これら各章の日本側代表者は QST (当時 JAEA) 1 名,大学 1 名である. その人選にあた り、2010年の活動開始時のQST代表者は30代前半から40歳 程度とした. それから10年を経た現在, これらの人材が, 大型国際研究拠点としてのJT-60SAの研究活動をリードす る役割を担っている.

#### 1.7 日欧の運営体制

JT-60SA 事業は、日本側実施機関である QST, 欧州側実 施機関であるF4E, 及び両者を調整する事業チームが、日 欧の研究機関等と協力しつつ、「統合プロジェクトチーム」 を形成して運営している(図8).その役割は、1)機器製 作と装置の組立,及び装置増強とメインテナンス、2)装置 のコミッショニングと運転(責任は日本側実施機関)、3) 実験、の実施である.これまでの BA Phase I では、1)が 主要な役割であったが、2020年4月以降の BA Phase II で は、2)と3)を含めた運営となる.

事業の円滑な推進に最も必要な事柄は、この「統合プロ ジェクトチーム」の一体感である.2007年の事業開始以来 2020年3月時点までの間に、事業調整会議(マネジメント を含む総合調整.2-3週毎のTV会議)を230回,技術調整 会議(年3回程度で日欧交互開催,主要メンバー全員参加) を34回,研究調整会合(年1回那珂研で開催,日欧研究コ ミュニティの専門家が参加.上記リサーチプラン活動や日 欧研究協力の総括)を8回開催している.様々な技術情報 や実施要領などを全員がデータとして共有しつつ、このよ うな多くの会話を通じて、日欧相互の信頼が醸成され、事 業の目的・意義、進展、課題をチームが共有することがで きている.

#### 参考文献

- [1] P. Barabaschi et al., Nucl. Fusion 59, 112005 (2019).
- [2] Y. Kamada et al., Nucl. Fusion 53, 104010 (2013).
- [3] 研究最前線「JT-60SA リサーチプラン」吉田麻衣子 他,プラズマ・核融合学会誌 88,650 (2012).
- [4] JT-60SA Research Plan Version 4.0, Sept. 2018, http:// www.jt60sa.org/pdfs/JT-60SA\_Res\_Plan.pdf



図7 炉心プラズマに求められる性能.





## 2. 長時間プラズマ生成の世界最大級超伝導コイル

#### 2. The World's Largest Class of the Superconducting Coils for the Long Duration Plasma Operation

土 屋 勝 彦 TSUCHIYA Katsuhiko 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 (原稿受付:2020年4月20日)

JT-60SAのプラズマ性能に大きく影響を与える超伝導コイルは、18個のトロイダル磁場(TF: Toroidal Field) コイル、6個のプラズマ平衡磁場(EF: Equilibrium Field)コイル、そして4つのモジュールから成る中心ソレノ イド(CS: Central Solenoid)から構成される.これらの超伝導コイルは日欧で分担して調達し、TFコイルは欧州 が、EFコイルとCSは日本が担当した.2019年までに、極めて精度の高い製作公差(10m以上のサイズに対し大 きくても1.3 mm)を実現して全ての超伝導コイルの製作を完了し、本体に組み込んだ.

#### Keywords:

JT-60SA, superconductor, TF coil, CS, EF coil

#### 2.1 概要[1-3]

JT-60SA 装置において使用される超伝導コイルは,D 型形状を持つ18個のトロイダル磁場(TF)コイルと,これ らTFコイル群を囲むように設置される6個の円形のプラ ズマ平衡磁場(EF)コイル,装置中心に設置されプラズマ に磁束を供給するための4つのモジュールから成る中心ソ レノイド(CS)から構成されている(図1).これらのコイ ルは日欧で分担して調達し,TFコイルは欧州が,ポロイダ ル磁場コイル(EFコイルとCS)は日本がそれぞれ担当し た.

平衡磁場(EF)コイル

#### 2.2 超伝導導体

#### 2.2.1 諸元[4]

超伝導線材は,TFコイルとEFコイルがニオブ・チタン,高磁場環境下で使用するCSはニオブ・スズを採用している.図2に各コイルに用いられている導体断面図を示し,表1に諸元を示す.

いずれのコイルも強制冷却型のケーブル=イン=コン ジット導体を採用している.これは、ジャケットと呼ばれ るステンレス製の矩形管で撚線を覆い、この管の中に冷媒 である超臨界圧へリウムを流すことで効率よく超伝導撚線 を冷却できるものである.特に、電流値が時間とともに変 動するパルス型コイルであるCSとEFコイルに用いている 撚線には、中心に撚線の無い空間(ステンレス鋼製中心ス パイラル管)が通っており、パルス運転によって生じる AC ロス等によって発熱した際に冷媒の流れが阻害されな いよう常に冷却できるようにしている.また、EFコイル用



National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

EF3

author's e-mail: tsuchiya.katsuhiko@qst.go.jp

	TF	CS	EF-H	EF-L
最大通電電流值(kA)	25.7	20	20	20
最大経験磁場(T)	5.65	8.9	6.2	4.8
ジャケット材質	SS316L	SS316LN	SS316LN	SS316LN
超伝導素線	NbTi	Nb <sub>3</sub> Sn	NbTi	NbTi
超伝導素線数	324	216	450	216
銅線本数	162	108	0	108
総導体長(m)	24,600	12,100	7,500	20,000
素線の総長(km)	8,000	2,610	3,380	4,320

表1 超伝導導体諸元.

導体には、コイルを設置する場所に応じて低磁場用と高磁 場用の2種類を採用し、例えば低磁場用の導体の超伝導材 を少なくするなど、超伝導材の物量を最適化している.

#### 2.2.2 製作

CSとEF両コイル用の導体は、素線および撚線工程まで いずれも古河電工製である.ジャケットは CS 用が丸穴矩 形型で EF コイル用は丸管であるが、後者は撚線と一体化 する時に角型に成形している.この撚線とジャケットの一 体化は,量研(当時,原子力機構)那珂研究所内に,約 700mにおよぶ直線状の製作ラインを含む導体製作棟を新 たに製作し、一本13m(EFコイル用)ないし7m(CS 用)のジャケットを必要な長さだけ芋継ぎし、その中に撚 線を通して導体を製作し、スプール状に巻き取った(複合 化). 導体の複合化にあたっては、ジャケット内に撚線を 通しやすくするように、完成時のサイズよりも大きめに 作っておき,撚線を通した後,縮径(コンパクション)工 程にて全体を引き絞り,必要な断面を得ている. 丸管のEF コイル用導体は、この工程時に矩形成形も行っている. TF コイル用の導体製作工程も同様で、ニオブ・チタン素線を 撚り合わせる工程からジャケットとの複合化はイタリアの 導体製作メーカで行われた. この TF コイルに用いられて いるニオブ・チタン素線は日本の古河電工製で、素線の状 態でイタリアまで送られている.つまり、JT-60SAの超伝 導材は全て日本製である.

#### 2.3 トロイダル磁場コイル

#### 2.3.1 基本構造と諸元[5]

JT-60SA 装置の TF コイルは D 型の形状を持ち, コイル ケースに格納された巻線, 支持構造体であるコイルケー ス, 並びに外側コイル間支持構造物 (OIS: Outer Intercoil Structure) から構成されている.図3に概要と実物の写真 を示す.

巻線は6層のダブルパンケーキコイルから成り,全体で 72ターン,通電電流は最大25.7 kAである.18個のTFコイ ルは直列で通電(6個のコイルで一組となる,計3つの回 路を形成している)され,起磁力は6.66 Tmであり,いわ ゆる標準シナリオと呼ばれるプラズマ電流5.5 MA 運転時 におけるプラズマ中心磁場は2.25 Tとなる.

この巻線はコイルケースという強固なステンレス鋼製の 容器に格納されている.これは、本コイルの周辺にEFコイ ル、CSといったポロイダルコイル群が取り付けられるこ とから、自分自身に加え、これらのコイルが生成する高い



図3 TF コイル構造概念図と実物の写真(重力支持脚は別途用意 されるので、写真にはない).

電磁力に耐えうる支持構造体となるためである.装置内側 の直線部にはウェッジを設けており,TFコイル自身が発 生する電磁力(向心力とフープ力)によって隣接するコイ ル同士を支えあう支持方法を採用している.また,装置外 側には,ポロイダル磁場コイル通電時に生じる転倒力によ る「倒れ」に対する支持となるOISが設置されている.こ のOISはコイル本体とは別部品となっており,EF2コイル 台座真下とリンク機構でつながっているが,コイルケース の側面とOISの間には表面が滑らかなパッドが当てられて いるだけであり,転倒力によるトロイダル方向変位に対し てはOISに力が伝わるが,フープ力による径方向変位につ いては力が伝わらない構造である.これにより,コイル間 を引きはがす力となるフープ力をOISから縁切りさせるこ とができるので,OIS間をつなぐボルトに生じるせん断力 を低減させ,構造を簡素化することができた.

重力支持脚(GS: Gravity Support)は逆 V 字構造となっ ており、脚部途中にサーマルアンカーを設け、超伝導コイ ルシステム唯一の室温接触部となる脚の底部からの熱の侵 入を防いでいる.

#### 2.3.2 実機製作

TF コイルは欧州のフランス, イタリア両国のコイル メーカにより, スペアコイルを含め各10個ずつ製作された.

超伝導素材はニオブ・チタンを用いており、イタリアの メーカで製作された導体を伊仏両国のコイルメーカ(イタ リア=ASG社、フランス=GE社(旧アルストム社))に送 られ巻線の製作を行っていた.

まず導体をD型に巻きつつガラステープでターン間絶縁 を施工してダブルパンケーキ(DP: Double Pancake) コイ ルを製作した.そして6つのダブルパンケーキコイルを積 層したのち,パンケーキコイル間を電気的に接続するジョ イントを設置した.その後,真空含浸により巻線全体を絶 縁した.この完成した巻線は,地絡のないことを確認する パッシェンテストを実施した後コイルケースに格納し, ケースと巻線の間に絶縁材を充填して硬化してから,外部 業者にて外形の最終加工を実施した.配管作業及び試験は 最終加工より戻ってからコイルメーカにて実施した. コイル構成部品であるコイルケースとOISはイタリアと フランスのメーカがそれぞれ全量製作した.重力支持脚は 全量フランスのメーカで製作され,コイルとは別にメーカ から直接日本に送付された.

#### 2.3.3 検査と精度

コイル本体部は、イタリア、フランスの各コイルメーカ において、巻線と絶縁、そしてコイルケースへの格納と冷 媒管の設置まで行い、全てフランスの原子力・代替エネル ギー庁(CEA)サクレー研究所に送られ、冷却および定格 での通電試験などを実施して基本的性能が満たされている ことを確認したのち、同研究所内にてOISと一体化(スペ アを除く)された.完成後、搬出港であるベルギーのゼー ブルッへまで陸送され、本港から日本(茨城港日立港区) まで海上輸送された.那珂研究所までは最寄りの港より陸 送され、研究所において受入検査を実施し、日本への移送 中に異常(変形、地絡、冷媒管の詰りなど)が発生してい ないことを確認してから本体に設置した.

製作精度については、トカマク中心側となる D 型の直線 部においてより高い精度が求められ、要求値±2mm(設置 精度含む)に対し、概ね±1.5mmで製作された.数個のコ イルのみ若干逸脱したが、後述する TF コイルの設置時に これを吸収することで、要求値を満足した.

#### 2.4 中心ソレノイド

#### 2.4.1 基本構造と諸元[6,7]

CSは4つのソレノイドモジュールで構成され、単体モ ジュールのサイズ(直径,高さ)やターン数は全て共通で あり,いずれも高さ約1.6m, 直径約2m, ターン数は549で ある(表2).装置上の配置に関しては、冷却後の装置中心 に対して4つのモジュールが上下対称となるよう, CS2モ ジュールとCS3モジュールの間に装置の中心が来るよう に位置づけられている. また、4つのモジュールはそれぞ れ別個の電源で制御され、時々刻々電流の変化するパルス コイルである.最大電流は20kAで、プラズマ着火時に供 給される磁束は44 Wb である.最大経験磁場は9T 近くに なることから、超伝導線材はニオブ・スズを採用してい る. 1つのモジュール当たり, オクタ (8重) パンケーキ (OP: Octa Pancake) コイル6つとクアッド(4重)パン ケーキ (QP: Quad Pancake) コイル1つから構成されてい る. 各パンケーキコイルの接続(ジョイント)部は, TF コイルや後述する EF コイルではコイル巻線の側面から飛

表 2 CS, EF コイル諸元.

721	内. 、、米化	最大経験	運転温度	直径	導体長	パンケーキ
111	ターン奴	磁場(T)	(K)	(m)	(km)	コイル構成
CC1 4	E 40	80	FF	20	20	6 OP
051-4	549	0.9	5.5	2.0	2.8	+ 1 QP
EF1	142	4.8	4.8	12.0	5.2	12 SP
EF2	154	4.8	4.8	9.6	4.5	12 SP
EF3	247	6.2	5	4.4	3.0	7 DP
EF4	353	6.2	5	4.4	4.3	10 DP
EF5	152	4.8	4.8	8.1	3.7	7 DP
EF6	180	4.8	4.8	10.5	5.7	14 SP

び出ている構造であるのに対し, CS は導体端部面同士を 付け合わせて融着しコイル本体に巻き込む構造としている ため,限られた空間でコイル径を可能な限り大きくでき, 供給磁束も大きくすることが可能となった(図4).

4つのモジュールは、タイプレートと呼ばれる支持構造 物によって一体化されている.図5に全体の写真を示す. 一体化にあたっては4つのモジュールに対して鉛直方向に 予荷重を与えることができる構造としている.この予荷重 印加は必須な操作で、コイル運転に伴う冷却時において、 支持構造物に対し巻線の方がより大きく収縮することか ら、収縮差によるギャップをなくすために常温の状態にお いて予め荷重をかけ、冷却後でもギャップが生じないよう にしておくものである(プレコンプレスと呼称).実際に



図4 CSとEFコイルのジョイント構造比較.コイル円筒表面の 外に出張る部分が小さいCSの方が、周辺との干渉が少ない (=空間を広くとれる)ことを示す.



図5 CS 全体の写真(本体設置直前の状況).

は、CS間の電磁力によるギャップ生成要因も含まれるの でこれも考慮して一体化作業を行っている.

一体化された CS は, TF コイル底部において, EF4 コイ ルと共通の支持座により固定されており, 全部で9脚の重 力支持脚を持つ.装置底部にあるこの支持脚だけで約 100トンもの重量物を支えていることから, 地震荷重が加 わると CS頭頂部が大きく揺らぎ TF コイルに衝突しかねな いため,振れ止め器具を CS頭頂部全周にわたり, 9 か所配 置している.

#### 2.4.2 実機製作

CS は製作メーカ内で,全てのモジュール巻線製作と一体化施工を実施した.ニオブ・スズは650℃の熱処理を行わないと超伝導の性質を持たないので,まず巻線成形をしたのち熱処理を行い,ターン絶縁のためのテーピングを実施した.テーピング実施時には,パンケーキコイル間の層間をテーピング装置が通過できるように空間を開けねばならないが,ニオブ・スズは歪みに対して非常に弱いため,超伝導性能の劣化が生じない程度の歪みに相当するだけ層をほぐしてテーピング装置の通れる空間をつくり,慎重に絶縁施工を行った.パンケーキコイル積層後は,真空含浸によってモジュール全体を絶縁硬化することで対地絶縁施工を行った.

4つのモジュールはタイプレートが設置されている9箇所 に置いた油圧ラムで全体を約37.5 MNの力でプレコンプレ スし一体化した.製作工場(三菱電機:神戸市和田岬)か らは,一旦全体を横倒しにした状態で茨城港日立港区まで 海上輸送の上,TFコイルと同様に那珂研究所まで陸送した.

#### 2.4.3 製作精度

ポロイダルコイル共通の要求事項として,磁場のトロイ ダル非対称性に起因するプラズマ不安定性を発生させない ように,真円に近い形状で製作することが挙げられる.巨 視的不安定性低減の観点から許容される誤差磁場分布よ り,CSで求められる許容非円形度は4mmとされている (表3)が,最大0.3mmで非常に精度よく製作できている. これは,CS用の導体の丸穴部が必ずしも同じ場所に位置 しないために最薄部の厚みが長手方向の位置によって異な り,導体の剛性に強弱ができるので,巻線機のベンダーが 曲げる力を一定にしても導体の曲率が一定にならない現象 があったことから,導体を送り出す方向を逆転できる巻線 機を採用し,最初の曲げにおいて設計値からの差が生じて も導体の送り方向を往復させて調整し,理想の曲率まで調 整できるように工夫したことが主因である.

表 3 各 CS, EF コイルにおいて要求される公差 (真円度) と製作 実績との比較.

コイル	直径 (m)	実現公差 (mm)	要求公差 (mm)
CS	2.0	0.3	≤4.0
EF1	12.0	0.3	≤8.0
EF2	9.6	0.4	≤7.0
EF3	4.4	0.2	≤6.0
EF4	4.4	0.6	≤6.0
EF5	8.1	0.6	≤7.0
EF6	10.5	1.3	≤8.0

加えて、一体化時において、モジュールを一個積み上げ るごとに傾斜や位置を計測および調整することで、4つの モジュールの電流中心のばらつきを直径1.1 mmの円筒内 に収めることができた.これは、すべてのモジュールが幾 何的にほぼ同一線上に並んでいることを意味する.これに より、位置制御の精度向上だけでなく、全てのモジュール に定格電流を流すプラズマ着火時において1つの巨大なソ レノイドとして振る舞い、精度の高い磁束供給ができると 考えられる.

#### 2.5 平衡磁場コイル

#### 2.5.1 基本構造と諸元[8,9]

EF コイルは6つの円形のコイルから構成されており, それぞれのコイルが個々別々のターン数およびサイズを 持っている.図6,図7に各コイルの写真を示す.表2に 諸元をCS とともにまとめた.

前述のとおり, EF コイルには高磁場用と低磁場用の 2種類の導体が用いられ,前者は EF3, EF4の2つのコイ ルに,後者は残りの4つのコイルに使用されている.最大電 流はいずれの EF コイルも 20 kA (正負とも)で, CS 同様 電流値が時間的に変動するパルス型コイルの一種である.

巻線は,製作可能な導体長の制約により,比較的直径の 小さいEF3,4およびEF5コイルはTFコイルと同様にダブ ルパンケーキ (DP) コイルを, EF1,2,6コイルはシングル パンケーキ (SP: Single Pancake) コイルを,それぞれ1本 の導体から巻線し,これらパンケーキコイルの積層後ジョ



図6 クライオスタット底部に仮置きされた EF4,5,6 コイル.



図7 超伝導コイル巻線棟にて搬送待ちの EF1,2,3 コイル.

イントを接合してからプリプレグテープで対地絶縁を施 し、最終的な形状を得ている.

全てのEFコイルはTFコイルの周辺に設置されるため, TFコイルとつながる部分には、巻線を挟むようにして設 置するクランプ構造の支持金具を配置している.TFコイ ル上には台座を設けており、これらの台座とEFコイルの 支持金具の間に支持脚を介して固定される.EFコイル運 転時に生成する自分自身のフープ力はもちろんのこと、自 分自身が通電されていなくてもTFコイル単独通電時には TFコイルからのフープ力を受けるため、これらの電磁力 によって生じるEFコイル支持とTFコイル台座間の相対 変位を吸収できるように、支持脚は板バネ構造を持ってい る.巻線を挟むクランプ板間には、CSほどではないが冷却 時と運転時に巻線と支持金具との間にギャップが生じうる ので、これを打ち消す分の予荷重をかけている.

#### 2.5.2 実機製作

EF コイルのうち, EF4, 5, 6 各コイルは TF コイルに位 置することから, TF コイルはもちろんのこと, 真空容器が 本体に設置される前に先行して製作し本体に仮置いておく 必要があった.そのうえ, EF コイルは最大直径が約 12 m あることから, 製作メーカの工場からの輸送は困難であっ たため, JT-60SA 計画の比較的早期の2008年に, 那珂研究 所の敷地内にコイル製作のための建屋である超伝導コイル 巻線棟を建設した.最初に製作した EF4 コイル(直径が小 さいことから,巻線まで完成された状態で製作メーカから 輸送可能であった)以外の5つのコイルは,この超伝導コ イル巻線棟において,コイル製作メーカの協力を得て製作 された.また,1号機である EF4 コイルも,最後の工程で ある支持構造物と冷媒配管の設置は超伝導コイル巻線棟で 実施した.

超伝導コイル巻線棟にて完成したコイルは,那珂研究所 敷地内を移動して本体室へと運び込まれるが,外から本体 室内へ通常使用される搬入口はコイルのサイズに比して狭 く,そのままでは搬入できない.そこで,既設の搬入口の 脇に幅2.4 m,高さ約14 mの縦長の貫通口を設け,コイル を一旦起立させてこの貫通口を通し,本体室に入ったとこ ろで再度横置きにするという方法を採った(図8).この ために使用する運搬治具の設計・製作も並行して進め,問 題なく作業することができた.

#### 2.5.3 製作精度

EF コイルはプラズマ平衡磁場コイルという名の通りプ ラズマ形状と位置を制御するコイルであるため, 誤差磁場 を発生させないよう真円に近づけるよう製作する必要があ る.各EFコイルに求められる非円形度は,比較的サイズの 小さいEF3,4コイルでは6mm以内,10mを超える大き なEF1,6コイルでは8mm以内と評価されている(**表**3) が,実機における電流中心の非円形度は,大きくても要求 値の1/6である1.3mm,コイルによっては0.2mm程度と 一桁以上小さく製作することに成功した.この高精度の製 作を実現できたのは,(ア)パンケーキコイル巻線後の絶縁 硬化までの工程まで同じ治具を使用して量産したため,一 つのコイルを構成する複数のパンケーキのサイズのばらつ



図8 大型EFコイル搬入状況(貫通口を通過し建屋内に入ったと ころ).

きを小さくできたことと,(イ)真円からの凸凹が生じて非 円形度を高めることがジョイントの近傍で生じうるが,こ のジョイント部をあるセクションに集中させることなく, パンケーキコイルごとにジョイントの位置をトロイダル方 向(円周方向)に散らす構造としたことで誤差が平均化さ れたこと,これら(ア),(イ)2つの工夫を実施したことに よるものである.

以上の結果, 誤差磁場を非常に小さくでき, 高い精度で のプラズマ制御が可能であることが期待できる.

#### 2.6 まとめ

世界的に類を見ない大きさを持つ超伝導コイルの集合体 である JT-60SA 超伝導コイルシステムについて,別章で述 べる組立工程に支障なく高い精度での製作を完遂すること ができた.これは,導体製作より10年以上の年月にわたっ て日欧各拠点の各方面の多大なる協力を得ることで達成し た画期的な成果であると言える.今後の実稼働フェイズに て想定の性能を実現できることを期待するものである.

#### 参 考 文 献

- [1] K. Yoshida et al., Physica C 470, 1727 (2010).
- [2] K. Yoshida *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. **22**, 4200304 (2012).
- [3] Y. Koide *et al.*, Nucl. Fusion **55**, 086001 (2015).
- [4] K. Kizu et al., Fusion Eng. Des. 86, 1432 (2011).
- [5] V. Tomarchio *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 20, 572 (2010).
- [6] H. Murakami *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 28, 4200705 (2018).
- [7] H. Murakami *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 30, 4200805 (2020).
- [8] K. Tsuchiya et al., Fusion Eng. Des. 88, 551 (2013).
- [9] K. Tsuchiya *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 30, 4202705 (2016).

# 小特集 超伝導トカマク装置 JT-60SA にみる大型核融合装置の機器製作と装置組立の核心 3. 超伝導コイル冷却のための超大型極低温冷凍機システム

#### 3. Large-Scale Helium Refrigerator System to Cool Superconducting Magnets

濱田一弥,夏目恭平 HAMADA Kazuya and NATSUME Kyohei 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (原稿受付:2020年4月20日)

JT-60SAでは、超伝導コイル、クライオポンプ(Cryopump)及びサーマルシールド(Thermal shield)を冷却す るために、極低温ヘリウムを供給する必要があり、4.5 K で 9 kW の冷凍能力を有する超大型極低温ヘリウム冷凍 システムを建設した.本冷凍システムの特徴は、1)これまで経験のない、2.1 kg/s という大量の超臨界ヘリウム が供給可能であること、2)トカマク型核融合装置では、プラズマを制御するために超伝導コイルは変動する電流 で運転が行われるため、交流損失による変動熱負荷が生じ、冷凍機の安定運転のためにこれを平準化する制御機 構を有すること、である.本章では、極低温ヘリウム冷凍機システムの概要と性能試験結果について解説する.

#### Keywords:

plasma, fusion, helium refrigerator, supercritical helium, superconducting magnet

#### 3.1 はじめに

極低温ヘリウム冷凍機システム(以下,冷凍機システム) は,超伝導コイル(4.4 K),サーマルシールド(80 K)およ びクライオポンプ(3.7 K)を冷却することを目的とし て,欧州が調達を担当して建設された.冷凍機システムは 2015年から模擬ヒーターを用いた試験を実施し,所定の冷 凍性能を有することを確認し完成した.冷凍機システムの 大きな特徴は,JT-60SAの超伝導コイルが変動電流で運転 を行うため,被冷却体で発生する熱負荷も変動し,これを 自動制御で平準化して,冷凍システムを安定に運転できる ことである.熱負荷の平準化は,ITERにおいても冷凍機 の安定な運転を行う上で重要な課題であり,JT-60SAでの コイル冷却の経験はITERの運転において重要な知見とな ることが期待される.本解説では,冷凍機システムの概要 と試運転の結果としてパルス熱負荷時の冷凍システムの挙 動について説明する.なお機器の据付や冷凍設備としての 適用規格,法令に関しては,参考文献[1]に詳しく記述されている.

#### 3.2 冷凍機システムへの要求と変動熱負荷への 対策

冷凍機システムは、18個のトロイダル磁場(Toroidal Field: TF)コイル、6個の平衡磁場(Equibirium Field: EF) コイル、4モジュールで構成される中心ソレノイド(Central Solenoid: CS)、高温超伝導電流リード、ダイバータ用 クライオポンプ及び80Kサーマルシールドを冷却するた めに用いられる.**表1**に各被冷却体の重量や冷却条件をま とめる[2].超伝導コイルには、0.5 MPaに加圧した液体 ヘリウム(超臨界ヘリウム)を合計2.1 kg/sを供給するこ とが要求される.コイルで発生する熱負荷は時間的に変化 し、平均で3.7 kW である.超臨界へリウムを供給するため のポンプの圧縮仕事により、2 kW の熱負荷が発生する.合

Magnets	No. of units	Weight	Cooling condition during plasma operation	
TF coil	18	22 ton (TF coil + Coil case + outer intercoil structure)/ per coil, Total 396 ton.	Total 876 g/s at 4.4 K Averaged heat load: 1.8 kW	
EF coil	6	Total: 128 ton	Total 960 g/s at 4.4 K	
CS coil	4	Total: 113.5 ton (4 CS modules+strcutures)	Average heat load: 1.9 kW	
Cold circulator		2 units for magnets, total heat load: 2 kW at 4.4 K		
Cold compressor		$400 \mathrm{g/s}$ , heat load: ${\sim}0.8 \mathrm{kW}$		
High temp. superconducting current leads		13 pairs, flow rate: 25 g/s, temperature: 50 K		
Diverter cryopump		Flow rate: 270 g/s, heat load: 84 W, inlet temp.: 3.7 K at 0.47 MPa		
80K thermal shield		Weigth: 96 ton, flow rate: 404 g/s, heat load: 42 kW, inlet temp.: 80 K		

表1 定格運転時の非冷却体の冷却条件.

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

corresponding author's e-mail: hamada.kazuya@qst.go.jp

計の熱負荷は、45 K換算で6.5 kWである.先に述べたよう に、JT-60SAの運転はパルス的に行われる.CS,EFコイル は、プラズマに電流を誘導して加熱するとともに、プラズ マの位置を制御するため、変動電流による運転が行われ る.そのため、CS,EFコイルやTFコイル構造物では、交 流磁場による渦電流で、変動する熱負荷が発生するため、 これを除熱する必要がある.図1に超伝導コイル用冷凍機 システムを単純化したものを示す.冷凍システムは、ヘリ ウム冷凍機と超臨界へリウムを循環するためのポンプとへ リウムを冷却する熱交換器と液体へリウムタンクから構成 される.コイルに送られたヘリウムは熱負荷で温度が上昇 し、ポンプに戻る際に熱交換器で熱交換して液体へリウム を蒸発させるので、冷凍機や圧縮機への戻り流量が一時的 に増加する.このため、冷凍機内部の熱交換器の温度は低 下し、精密機械であるタービン膨張機の運転温度範囲を逸



図1 単純化したヘリウム冷凍機システム.

脱することになる. その場合、タービン膨張機はインター ロックが働き、停止する可能性がある.また、室温圧縮機 は戻り流量の増加に自動的に対応するよう、バイパス弁を 閉めて流量を増やそうとするが、能力を超えた流量増加の 場合には,入口圧力は上昇し,運転範囲を逸脱するとイン ターロックが動作し停止することになる. 一旦圧縮機が停 止すると、復帰には数日を要し、プラズマ実験の効率を著 しく低下させるため,変動熱負荷に対する対策が必要とな る.このように、4Kで動作する超伝導コイルを使用する トカマク型核融合炉において、ヘリウム冷凍機を安定に運 転できるよう変動熱負荷を制御することは重要であり, ITERにおいても同様である.JT-60SA冷凍システムは,変 動熱負荷を積極的に平準化するために、(1)冷凍機へ戻る 低温ヘリウムの流量を液体ヘリウムタンクの圧力をモニ ターして PID 制御で自動制御する, (2)コイルを循環する ヘリウムの流量を低減して、コイルで発生する熱をゆっく りと回収する、という方法を採用した. 冷凍機システムの 性能試験ではこの平準化機構を模擬熱負荷で確認したの で,後でその結果を説明する.

80 K サーマルシールドは 80 K の加圧ヘリウムガスで冷 却され,室温からコイルへの輻射を防止するために使用さ れ,熱負荷は 42 kW である.JT-60SA プロジェクトで は,ヘリウム冷凍システムは欧州が調達して,日本に設置 することとなっており,Airliquide 社製のヘリウム冷凍機 システムが採用された.

#### 3.3 ヘリウム冷凍システムの概要

図2に冷凍システムの全体配置を示す.システムは、主 に、ヘリウムガスを供給する室温圧縮機、4.5 K で9 kW 相当の冷凍能力を有する冷凍機コールドボックス(Refrigerator Cold Box: RCB)と超伝導コイル及びクライオポンプ に加圧した液体ヘリウム(超臨界ヘリウム)を循環供給す るための補助コールドボックス(Auxiliary Cold Box: ACB) から構成されている. ACB には、熱交換器を有する7 m<sup>3</sup>の



図2 JT-60SA 極低温冷凍機システムの鳥瞰図.

液体ヘリウムタンク及び2台の低温ヘリウム循環ポンプ (Cold circulator)と液体ヘリウムタンク内を0.11 MPaまで 減圧して飽和蒸気圧を下げて,液体ヘリウム温度を4.3 K にするための低温ヘリウム圧縮機(Cold compressor)を装 備する.冷凍システムを簡略化したプロセスフローを図3 に示す.ヘリウムガスは,室温圧縮機で1.55 MPaに圧縮さ れ,定格運転時には,約680g/sがRCBに供給される.所 要電力は約2MWである.RCBでは,液体窒素を用いてへ リウムガスを80Kまで冷却し,3台のタービン膨張機を用 いて5Kまで冷却したのちACB内のJT弁で7m<sup>3</sup>の液体へ リウムタンクに液化する.液体ヘリウムタンクは,被冷却 体からの急激な熱負荷を緩衝し,被冷却体に送る冷媒の温 度を安定化させる役割を持ち,Thermal Damper と呼ばれ る.ACBは,TFコイル,CS/EFコイル,クライオポンプ に以下のように冷媒を供給する.

超伝導コイル冷却系においては、2台の低温へリウム循 環ポンプがDamper内部の液体へリウム熱交換器を通し て、0.5 MPa、4.5 Kの超臨界へリウムを約1.8 kg/s(約 54 m<sup>3</sup>/hrに相当)の流量でTFコイル及びCS/EFコイルに 循環供給し,除熱する.コイルから戻る暖かいへリウムは、 ダンパー内の熱交換機で冷却され、蒸発したダンパー内へ リウムはコールドコンプレッサーを介して、冷凍機に送ら れ、高圧側のヘリウムガスを冷却しながら室温に戻り、室 温コンプレッサーで再度圧縮され冷凍機に供給される.コ イルが通電中に超伝導状態から常伝導に転移(クエンチ) した場合、系内の圧力が上昇するので、圧力に応じて、 250 m<sup>3</sup>のクエンチタンクにヘリウムガスを放出し、ヘリウ ムガスを大気に放出することなく、ヘリウム冷却系の圧力 を制御する.

ダイバータ・クライオポンプにおいては、冷凍機から供給される低温へリウムを 3.7 K に冷却するため、ACB 内の



図3 冷凍システムのプロセスフロー図.

3.6 K ヘリウムタンク内を 0.05 MPa まで減圧して飽和温度 を下げる.このため室温で動作する 3 台の真空圧縮機が用 いられる.

高温超伝導電流リードについては、低温端は45Kの超 臨界ヘリウムで冷凍機から供給されて冷却される.高温端 には50Kの加圧したヘリウムガスが供給される.

80 Kサーマルシールドには,80 Kの加圧したヘリウムガ スが供給され、サーマルシールド通過後、冷凍機で冷却さ れ、補助コールドボックスで液化される.

#### 3.4 冷媒分配系

RCB と ACB から供給される低温ヘリウム (80 K, 50 K, 4.5 K, 3.7 K) は,低温集合配管 (Main cryogenic transfer line)を通じてクライオスタットへ送られる.図4はクラ イオスタットのカット図である.低温集合配管から連絡さ れた配管は、クライオスタット内で分岐し、周囲に設置さ れたバルブボックス (Valve Box: VB) に接続される.VB 内部の配管には測温素子、オリフィス板、導圧管を備え、 冷媒の温度、流量、圧力を計測し、バルブで各系統の流量 を調節するために使用される.VBからの配管は、再びクラ イオスタット内部に戻り、超伝導コイルやサーマルシール ドなどの被冷却機器に接続する.被冷却機器からの戻りの 経路も同様にVBを経由して、低温集合配管を通じて冷凍 機システムに接続される.

18個のTFコイル,6個のEFコイルと4個のCSモジュールはそれぞれ並列に冷媒が流れる.図5に簡略化されたTFコイルの冷媒系統図を示す.TFコイルでは,室温からの冷却過程(クールダウン)の時と冷却完了後の通電運転の時とで,一部の流路が異なる.流路の変更には,低温集合配管に設置された2つのバイパス弁を用いる.コイルケースは巻線に比して大きな熱容量を持つため,クールダウン時には,超伝導導体の長く狭い巻線流路をバイパスし,圧力損失が小さいコイルケースに冷媒を多く流すことで除熱を促進する.巻線はコイルケースからの熱伝導に



図4 バルブボックス及びコイルターミナルボックスを有するク ライオスタット内部の配管の様子.



図5 冷媒分配系の冷却系統図.

よっても冷却される.一方で通電運転時には、コイル巻線 における発熱を速やかに除去するため、バイパス弁の開閉 を冷却過程時とは反対にすることで、コイル巻線流路に最 大限の冷媒を流す.超伝導コイルに電流を供給する高温超 伝導電流リードや超伝導給電線(フィーダー)には、低温 集合配管からコイルターミナルボックス(5台)へ、4.5 K と 50 K の冷媒配管を分岐して、冷媒を分配する.

#### 3.5 制御システム[3]

冷凍システムの制御システムに,Siemens 社製の制御シ ステム PCS 7 を採用し,圧縮機運転,ヘリウム精製運 転,クールダウン,ヘリウム循環ポンプによる定常運転及 び実験後の昇温等一連の運転を自動制御にて行う.クール ダウンについては,マグネットやサーマルシールド内部の 温度差による熱応力を極力少なくするため,温度計測値を から冷媒供給温度を設定して冷却する.JT-60SAでは,コ イル及びサーマルシールドの入口出口の温度差は40 K以 下とし,100 K以上では-2 K/hr 以下,100 K以下では 5 K/hr 以下の冷却速度を管理しながら自動での冷却を行 う.TFコイルに関しては18個あり,それぞれ圧力損失が異 なることから,クールダウン前には流量バランスを確認す る.また,EF/CSコイルについては,冷却が均一になるよ うに,重量配分に応じて冷媒の供給量を決定する.

プラズマ実験中については,以下の自動運転モードに よって実験が行われる.

- 通常運転(Normal operation mode):プラズマ運転 モードと運転後定常状態になるまでの保持期間 (Dwellモード)から構成される。
- 短期保持運転:夜間,週末の減量運転モードである. コイルへの流量は通常運転の約1/6である300g/sとし,最小限度の冷凍機電力で被冷却体を低温に保持する.
- ベーキング運転:真空容器を200℃に昇温するベーキング運転を約3週間行う.この時,80Kサーマルシールドの熱負荷は、定常運転時の42kWから135kWへ増加する.これは、3.4 m<sup>3</sup>/hrの液体窒素消費量に相当する.4Kでの冷凍能力が限定されることや、コイ

ルの通電は行わないために,コイルへの超臨界へリウムの流量は,60 g/s に下げて低温状態(20 K - 40 K)を保持し,電流リードとクライオポンプの冷却は停止する.

#### **3.6** 冷凍機の性能試験[3,4]

性能試験においては以下の項目について,正常に動作す ることを確認した.

- インターロック、アラーム警報機能試験
- バルブ, 計測機, 制御装置の動作確認
- 温度, 流量測定試験
- 各回転機器(圧縮機,タービン,循環ポンプ,コール ドコンプレッサー)の単体性能試験
- 自動制御プログラム試験
- 変動熱負荷試験
- 非常停止状態から想定される復帰運転法の確認試験

これらの中で,変動熱負荷試験は,プラズマ実験におい て冷凍機システムを安定に運転することを確認する上で重 要であることから,次節で詳しく説明する.

#### 3.7 変動熱負荷試験

冷凍機システムの性能試験は,被冷却体が完成する前に 実施する必要があり,TFコイル,EFコイル/CS及びクラ イオポンプの熱負荷を模擬するために,図3に示す ACB 内でヘリウムの循環系統をバイパス弁で短絡し,バイパス 弁下流に取り付けた電気ヒータで熱負荷を発生させ,自動 制御がうまく動作するかを確認した.また,80Kサーマル シールドについても同様にバイパス系統に取り付けた電気 ヒーターで熱負荷を発生させ,冷凍機システムが安定に動 作するかどうかを確認した.

図6はプラズマ実験中にコイル及びクライオポンプでの 発生が予想される熱負荷である.プラズマ電流は5.5 MA で100秒間保持され、その制御のため、CS、EF コイルは変 動電流での運転が行われる.コイルで発生した熱は超臨界 ヘリウムの流れとともに、ACB に戻り、熱交換機で冷却さ れる.ピーク時には、冷凍機の定格の冷凍能力 6.5 kW に対 して、超伝導コイルから約8 kW の熱負荷が ACB に戻るた め、熱負荷の平準化が必要となるので、冷凍機システムの



図6 TF, CS, EF, クライオポンプで想定される予想熱負荷の例.

性能試験ではこの変動熱負荷の状態を電気ヒーターで模擬 した運転を行った.図7にその結果を示す.0秒はプラズ マの運転開始である. 図7上側のグラフは、コイル熱負荷 を模擬して、電気ヒーターを用いて1800秒毎の変動熱負荷 を3回繰り返して加えた様子を示している.図7の下側の 図の通り、電気ヒーターで発生する熱をゆっくりと ACB 内のダンパーで回収するために、TF/構造物の冷却系統の ヘリウム流量を 879 g/s から 451 g/s に自動的に減少させ た. RCB に戻るヘリウムの量は、ダンパー内の圧力上昇率 を計測しながら,低温ヘリウム圧縮機の流量をコントロー ルした. 戻り流量は冷凍機の温度バランスや室温圧縮機の 運転範囲に影響がないような範囲でコントロールされてい ることが分かる.ダンパー内の圧力は、戻り流量を絞るこ とにより0.05 MPaまで上昇してピークに達し、圧力の時間 変化からピークを検出して、今度は冷凍機への戻り流量が 減りすぎないように、低温ヘリウム圧縮機の流量を増やす 制御を自動的に行った、以上の通り、変動熱負荷の冷凍機 への影響を低減できる自動制御方法を実証した.

#### 3.8 おわりに

JT-60SA 極低温冷凍機システムの概要と性能試験結果を 紹介した. ヘリウム冷凍機と超伝導コイルを用いる磁場閉 じ込め核融合装置では,安定な運転のために変動熱負荷の 平準化制御が重要である.本冷凍機システムは,模擬の熱 負荷を用いて,その制御が可能であることを示した. 2015 年に完成したシステムは,定期的な運転を通じて,運転員 の訓練や制御プログラムの改良を進めており,2020年に開 始される統合コミッショニングに向けての準備は整った.



図7 電気ヒーターによる模擬変動熱負荷(下)と低温循環ポン プと低温圧縮機の流量コントロール及びダンパー内圧力.

本冷凍機システムの運転の経験や熱的な挙動は, ITER の冷凍システムの制御や運転においても役立つことが期待 される.

#### 参考文献

- [1] 吉田 清 他: 低温工学 50, 575 (2015).
- [2] F. Michel *et al.*, AIP Conf. Proc. **1434**, 78 (2012).
- [3] C. Hoa et al., IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng. 278, 012104 (2017).
- [4] K. Kamiya et al., J. Phys. Conf. Ser. 897, 012015 (2017).



## 4. 超伝導コイルへ給電するための大型電源設備

#### 4. Large-Scale Power Supply System for Superconducting Coils

島田勝弘,森山伸一 SHIMADA Katsuhiro and MORIYAMA Shinichi 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (原稿受付:2020年4月20日)

超伝導トカマク装置 JT-60SA では超伝導トロイダルおよびポロイダル磁場コイルに対し、プラズマ制御で必要となる直流電力を供給および制御する電源設備が必須となる.本設備は、既設の臨界プラズマ試験装置 JT-60 用電源設備を有効に再利用し、新規製作した電源と組み合わせた大型電源設備である.本章では、超伝導コイル へ給電するための大型電源設備の全体構成や特徴およびそれを構成する各電源機器について紹介する.

#### Keywords:

JT-60SA, large-scale power supply system, thyristor converter, switching network unit (SNU), quench protection circuit (QPC)

#### 4.1 はじめに

超伝導トカマク装置 JT-60SA では、100秒を超える長パ ルス放電を実現するために超伝導コイルを採用する.最大 2GJの磁気エネルギーを蓄える超伝導コイルに必要な電力 を供給する電源設備は、既存の臨界プラズマ試験装置 JT-60 用電源設備を最大限活用し,新規製作した電源を組 み合わせて構成し、約250 MVA(水力発電所一基分相当) の大電力を制御する.本電源設備は、核融合エネルギーの 早期実現のための幅広いアプローチ (BA) 活動の一環とし て,日本の実施機関である量子科学技術研究開発機構と欧 州の実施機関である Fusion for Energy (F4E) が物納貢献 により共同で進める国際事業[1]により、2011年に設計製 作を開始し2018年に機器据付および各電源機器の単体試験 が完了した.現在,ファーストプラズマおよび実験運転に 向けた本電源設備の試運転が進行中である.本章では, JT-60SAの超伝導コイルへ給電する大型電源設備の全体構 成およびそれらを構成する各電源機器について紹介する.

#### 4.2 電源設備全体構成

JT-60SAでは、円環の周方向に磁場を生成するトロイダ ル磁場(Toroidal Field: TF)コイルと、断面方向に磁場を 生成するポロイダル磁場(Poloidal Field: PF)コイルが超伝 導化されている.TFコイルは全18個の同一のコイルの直 列接続で構成し、これらコイルに対し1台の直流電源によ り必要な電力を供給する.PFコイルは4つの中心ソレノ イド(Central Solenoid: CS)モジュールと6つの平衡磁場 (Equilibrium Field: EF)コイルで構成し、各コイルに対し て独立の直流電源を有する.上記直流電源には、既存設備 を有効に再利用して整備された交流電源システムから交流 電力を供給し,当該電源は超伝導コイルに必要な直流電力 を給電する.

#### 4.2.1 交流電源システムの構成

JT-60SAの交流電源系統の概略を図1に示す.那珂核融 合研究所は、所内に変電所を有し、商用電力系統から 275 kVの超高圧で受電する. 受電した電力は各系統で降圧 して各設備に送電している. JT-60SA のようなトカマク型 核融合装置のコイルへの給電では、非常に大きな電力を瞬 時に変化させる必要があるため、商用電力系統から見ると 大きな変動負荷となる. 電圧降下や周波数変動等による商 用電力系統への悪影響を考慮すると,直接商用電力系統か ら給電することは難しい. そのため, JT-60SA では JT-60 で使用していた2台のフライホイール付き電動発電機 (H-MG, M-MG) を再利用し、運転に必要なエネルギーの 大部分を回転体の運動エネルギーとして蓄積しておき, コ イルへの給電時に必要な電力を取り出して供給する.これ らの電動発電機は、1枚106 tonのフライホイールがH-MG には3枚, M-MGには6枚, 発電機の回転子に接続さ れ、非常に大きな運動エネルギーを蓄積することができ る. なお,発電機の放出エネルギーは,H-MGで2.6GJ, M-MGで4GJとなり、M-MGについては世界最大級のフラ イホイール付き電動発電機である[2,3].

上記の交流電源システムから供給する交流電力は,各直 流電源に給電され,直流電力に変換して超伝導コイルに給 電する.TFコイル電源は,容量が2.2 MVAと小さく,か つ連続運転であるため商用電力系統から所内変電所を介し て直接受電する.一方,PFコイル電源は220秒通電/ 1800秒周期のパルス運転であり,図2に示すように,プラ ズマ着火・立上げ時に必要な電力が合計で230 MVA に達

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

Corresponding author's e-mail: shimada.katsuhiro@qst.go.jp



図1 JT-60SA 交流電源システム構成図.



図2 典型的な PF コイル通電における有効電力, 皮相電力および エネルギー消費量. し,かつ1回の運転に必要な合計エネルギーは約1.2 GJ となる[4].電力変動が非常に大きいため,PFコイル電源 は,容量400 MVA,放出エネルギー2.6 GJを有するH-MG から給電する.また,M-MGについてはプラズマの外部加 熱装置である中性粒子ビーム入射(NBI)装置への給電に 用いる予定である.

#### 4.2.2 トロイダル磁場コイル電源の回路構成

TF コイル電源の回路図を図3に示す.TF コイル電源 は、連続定格の1台の直流電源(サイリスタ変換器)と、 3台のクエンチ保護回路(Quench Protection Circuit: QPC) で構成する.これらの機器は欧州が調達した新規製作機器 である.なお、各電源機器の詳細については第4.3節にて紹 介する.

TF コイルは,定格電流 25.7 kA であり,プラズマ中心で 2.25 T の周方向(トロイダル)磁場を発生させることがで



図3 TF 電源回路構成図.

きる.超伝導トロイダル磁場コイルの抵抗はほぼゼロであ り,かつ磁場は一定に制御されるため,電源から見ると定 常時には電流は一定でかつ電圧をほとんど必要としない. したがって,TFコイル電源の定格出力電圧は80V(無負荷 時)と比較的低く設計された.そのため,TFコイルの励磁 または減磁に約25分を要する.TFコイルは実験当日の朝 に励磁し,実験当日の夜に消磁する運転パターンを想定し ている.

TF コイル電源回路には、次節で紹介するポロイダル磁 場コイル電源回路と異なり、QPC が3 台あり、TF コイル 6 本に対し1 台ずつ配置した.これによりQPC動作による 対地電圧上昇を 1/3 に抑えることができ、コイルの絶縁設 計の観点から優位となる.

なお、電路の途中に設置されている極性切換器を操作す ることにより、トロイダル磁場の方向を反転する実験を行 うことができる.

#### 4.2.3 ポロイダル磁場コイル電源の回路構成

第4.2.2節で紹介した TF コイルは電流一定の連続運転 であるのに対し, PF コイルは実験シーケンスに従った 220秒通電 (30分周期)のパルス運転となる. PF コイルは, 主にプラズマの着火立ち上げを含むプラズマ平衡制御で用 いるため,コイル電流が常に変化する運転となる. この運 転を実現するため,10個のPFコイルに対し,それぞれ独立 の電源を設置した.一例として,中心ソレノイドモジュー ルCS4用および平衡磁場コイルEF6用電源回路を図4およ び図5に示す.これらの機器はブースター電源と受電用変 圧器を除き新規製作である.なお,各電源機器の詳細につ いては第4.3節にて紹介する.

超伝導コイルを用いたトカマク型核融合装置では、プラ ズマ着火/立ち上げ時のみ高電圧を必要とし、それ以外の 期間では、低電圧で十分である.そのため、当該電源は、プ ラズマ着火/立ち上げ期間のみ運転する高電圧発生用機器 (スイッチング・ネットワーク・ユニット (Switching Network Unit: SNU)、ブースター電源)と定常的に運転する低電圧 電源 (ベース電源)で構成した.加えて、超伝導コイルが クエンチ (超伝導から常伝導に遷移する現象)した場合に、 コイルを保護する QPC を各コイルに設置した.

表1に各 PF コイル電源の機器構成とその定格を示す. 高電圧発生用機器として, CS モジュールとプラズマ中心 より内側の EF3 および EF4 コイルでは SNU を, プラズマ 中心より外側の EF1, EF2, EF5 および EF6 コイルでは, ブースター電源を用いる. SNU は急激にコイル電流を減衰 させて電磁誘導による周回電圧でプラズマを着火させるこ とを目的とし, ブースター電源はプラズマ着火/立ち上げ 時の磁場分布制御を目的としている. TF コイル電源と異 なり, PF コイルでは電流を正負に流す必要があるため, ベース電源および QPC は両極性である. また, TF コイル と同様に, PF コイルにも極性切換器が設置されており, 反 転磁場での実験が可能である.



図4 CS4 電源回路構成図.





#### 4.3 主要直流電源機器の構成および特徴

#### **4.3.1 PF/TF コイル電源(ベース電源)**[5,6]

TF コイル用直流電源は、4並列の単極性サイリスタ変 換器で構成した(図3).この変換器の交流側電圧は、同一 仕様の2台受電用変圧器から給電するため同位相となるの で、直流側のリアクトルを省略することができる利点があ る.PF コイル用のベース電源(図6)は、4並列の両極性 サイリスタ変換器で構成した(図4,5).一部のEF コイ

PFコイル	ベース電源	高電圧発生用機器 [スイッチング・ネットワーク・ユニット(SNU)/ブースター電源]		クエンチ保護回路 (QPC)
CS1	$\pm$ 1.0 kV / $\pm$ 20 kA	SNU	0 to $-5.0$ kV / $\pm 20$ kA	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
CS2	$\pm$ 1.3 kV / $\pm$ 20 kA	SNU	0 to $-5.0$ kV / $\pm 20$ kA	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
CS3	$\pm$ 1.3 kV / $\pm$ 20 kA	SNU	0 to $-5.0$ kV / $\pm 20$ kA	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
CS4	$\pm$ 1.0 kV / $\pm$ 20 kA	SNU	0 to $-5.0$ kV / $\pm 20$ kA	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
EF1	$\pm1.0$ kV / +10 $\sim-20$ kA	ブースター	$\pm$ 5.0 kV / +4.0 $\sim$ $-$ 14.5 kA	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
EF2	$\pm0.97$ kV / +10 $\sim-20$ kA	ブースター	$\pm$ 5.0 kV / +4.0 $\sim$ $-$ 14.5 kA	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
EF3	$\pm0.97~\mathrm{kV}$ / $\pm20~\mathrm{kA}$	SNU	0 to $-5.0 \text{ kV} / \pm 20 \text{ kA}$	$\pm 3.8~\mathrm{kV}$ / $\pm 20~\mathrm{kA}$
EF4	$\pm0.97~\mathrm{kV}$ / $\pm20~\mathrm{kA}$	SNU	0 to $-5.0 \text{ kV} / \pm 20 \text{ kA}$	$\pm 3.8 \ \mathrm{kV} \ / \ \pm 20 \ \mathrm{kA}$
EF5	$\pm$ 0.97 kV / $+$ 10 $\sim$ $-$ 20 kA	ブースター	$\pm$ 5.0 kV / +4.0 $\sim$ -14.5 kA	$\pm$ 3.8 kV / $\pm$ 20 kA
EF6	$\pm$ 1.0 kV / +10 $\sim$ -20 kA	ブースター	$\pm$ 5.0 kV / +4.0 $\sim$ -14.5 kA	$\pm$ 3.8 kV / $\pm$ 20 kA

表1 各 PF コイル電源の構成と定格.



図6 ベース電源 (EF2, EF3 用).

ル用電源(EF1, EF2, EF5, EF6)を除き, 順方向と逆方 向のサイリスタ素子を逆並列接続した Back-to-Back (BTB) 方式の変換器が採用され、正負両方向の電流を流 すことができる.この方式の特徴として、制御が複雑にな るが、受電用変圧器の利用率を上げることができ、かつ変 換器を小型化できる利点がある.また、コイル電流ゼロク ロス(極性反転)時には、各変換器の出力端に設置された リアクトルを介して変換器間に循環電流(2kA)を流すこ とにより円滑に運転することができる. TF コイル用直流 電源および PF コイル用ベース電源どちらにも,出力端に クローバ回路を並列に接続した.クローバ回路は、電源の 故障やコイルクエンチ発生など緊急に電源を停止する必要 がある場合に,電源出力端子を短絡して交流側と直流側を 切り離し,安全に電源を停止させる機能を有している.な お、本回路は、高速動作(動作時間:約1ms)のサイリス タと低速動作(動作時間:約50ms)の機械式投入器で構 成した.

ベース電源は,表1に示すように多少仕様が異なるが, すべての電源をサイリスタ変換器4台の並列接続で構成 し,盤列および盤内機器構成を同一に標準化することで, コスト低減を図った.

#### 4.3.2 クエンチ保護回路(QPC)[7,8]

超伝導コイルは、常伝導コイルに比べ平均電流密度を高 くできる利点があるが、何らかの要因で超伝導状態を維持 できなくなり常伝導状態に転移(クエンチ)した場合に, 発生する熱により超伝導コイルを損傷してしまう問題があ る. そのため、クエンチが発生した場合にコイル内部に蓄 積された磁気エネルギーを速やかに外部で放出させる必要 があり、その保護装置として QPC を各コイルに設置した (図7). JT-60SA 電源設備の QPC は, 超伝導コイルに対し 直列に接続した(図3,4,5). QPCは、圧縮空気で動作 する機械式スイッチと電力用半導体素子 IGCT で構成され たハイブリッドの直流電流遮断スイッチ、コイルの磁気エ ネルギーを消費する放電抵抗器および直流遮断スイッチの バックアップ装置として、爆薬により電路を遮断するパイ ロブレーカ(爆発型ヒューズ)で構成した. コイルがクエ ンチした場合には、ハイブリッドの直流電流遮断スイッチ により電流を遮断し,放電抵抗器に電流を転流させ,コイ ルの磁気エネルギーを急速に消費する. 万が一電流遮断失 敗した場合には、パイロブレーカにより電流を遮断するこ とができる.なお,QPCによる電流遮断は,QPC が動作開 始指令を受信してから 350 ms 以内に完了する.

QPCは,直流電流遮断スイッチを機械スイッチと電力用 半導体素子で構成したハイブリッドスイッチを採用し,高 価な電力用半導体素子を短時間定格仕様にすることで,コ スト低減を図ることができた.



図7 QPC (EF3用).

Special Topic Article

**4.3.3** スイッチング・ネットワーク・ユニット(SNU)[9-11] スイッチング・ネットワーク・ユニットは、プラズマの 着火/立上げのための高電圧 (最大5kV) を発生する短時 間定格の電源機器である(図8). SNUは,直流電流の遮 断のための機械式スイッチ(ByPass Switch: BPS)と電力 用半導体素子 IGCT を用いた静止型遮断器 (Static Circuit Breaker: SCB) で構成するハイブリッドスイッチと複数台 の放電抵抗器で構成した(図4). 放電抵抗器 R1 は抵抗値 の異なる4つの並列抵抗器 R11, R12, R13, R14 で構成さ れ、全15通りの抵抗値を選択できる。同様に、放電抵抗器 R2は抵抗値が等しいR21とR22の2つの並列抵抗器で構成 され,全2通りが選択可能である.実験放電前に次回プラ ズマ放電シナリオに従い上記抵抗器を選択しておき、プラ ズマ着火/立ち上げ期間にプラズマ周回電圧を発生させる ための高電圧を超伝導コイルに印加することができる. な お, SNUも QPC と同様に直流電流遮断スイッチとしてハ イブリッドスイッチを採用することで、コスト低減を図る ことができた.

#### 4.3.4 ブースター電源

ブースター電源は JT-60 の垂直磁場(V) コイル電源[2] を再利用して構成した(図9).計16台のサイリスタ変換 器で構成された JT-60 V コイル電源を4分割し,2直列2 逆並列サイリスタ変換器として再構成し EF1, EF2, EF5, EF6 コイル用の高電圧発生用電源に割り当てている (図5).本電源は±5 kV が出力可能な短時間定格電源機 器であり,主にプラズマ立ち上げ時の形状制御に用いる. ベース電源と同様に,電流ゼロクロス領域を滑らかに運転 するために,変換器間に循環電流を流す.なお,ブース ター電源は短時間定格であるため,不使用期間では並列に 接続された機械式スイッチ(BPS)を閉じて,主回路電流 を本スイッチに流す.

#### 4.4 電源機器組合せ通電試験

第4.3節で紹介した各電源機器の性能を評価するために, 各コイル電源回路において,模擬負荷(インダクタンス: 7.64 mH)を用いた通電試験を順次実施中である.一例と



図 8 SNU (CS3 用).

して、ベース電源, SNU および QPC で構成された CS 3 電 源回路の通電試験結果を図10に示す.本試験では、時刻 t=-40 sからベース電源による通電を開始し, t=0 sで SNU 動作, t=63 s で QPC 動作を実施した.

図10に示す結果から、(i)ベース電源が指令値どおりに電 流を制御でき、(ii)時刻 t=0 s で SNU が動作し、ハイブリッ ドスイッチにより主回路電流が抵抗に転流され5kV の電 圧を模擬負荷に印加でき、(iii)時刻 t=63 s にて模擬指令にて QPCを動作させ、ハイブリッドスイッチにより主回路電 流を放電抵抗に転流させ、電流を急速に減衰できたことが わかる.したがって、本試験結果から、CS3 の各電源機器 が設計どおり動作できることが確認できた.

#### 4.5 まとめおよび今後の予定・展望

本章では,JT-60SA の超伝導コイルへ給電するための大



図9 ブースター電源.



型電源設備の全体構成や特徴,およびこれを構成する各主 要な電源機器について紹介した.これらの電源は,各コイ ル電源回路において模擬負荷を用いた電源機器組合せ試験 を実施中であり,その後,ファーストプラズマおよび実験 運転に向けた超伝導コイルを用いた通電試験を実施予定で ある.

なお、本電源設備には、プラズマ性能向上のために JT-60SA 真空容器内に設置される予定の3種類の容器内コ イルである高速プラズマ位置制御コイル、抵抗性壁モード 抑制コイルおよび誤差磁場補正コイルに給電するための電 源機器を将来追加配備する計画である.加えて、本格稼働 するNBI装置に給電するための交流電源機器の整備などを 予定しており、さらに大規模な電源設備へと増力する計画 である.

最後に,JT-60SA 用電源設備の直流電源機器構成は,現 在建設中の国際熱核融合実験炉 ITER [12] と類似してお り,先行して据付調整試験を行っている JT-60SA 用電源設 備での経験が、ITER を含む将来のトカマク型核融合炉用 電源の設計製作および運転に貢献できれば幸いである.

#### 参 考 文 献

- [1] Y. Kamada et al., Nucl. Fusion 53, 104010 (2013).
- [2] R. Shimada et al., Fusion Eng. Des. 5, 47 (1987).
- [3] K. Miyachi, J. Plasma Fusion Res. 73, 427 (1997).
- [4] K. Shimada et al., Plasma Sci. Technol. 15, 184 (2013).
- [5] L. Novello et al., Fusion Eng. Des. 98, 1122 (2015).
- [6] P. Zito *et al.*, 27th IEEE Symp. Fusion Engineering (SOFE 2017) (2017).
- [7] E. Gaio et al., Nucl. Fusion 58, 075001 (2018).
- [8] A. Maistrello *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercon. 24, 3801505 (2014).
- [9] F. Burini *et al.*, Proc. 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2014), 5035 (2014).
- [10] A. Lampasi et al., Fusion Eng. Des. 98-99, 1098 (2015).
- [11] A. Lampasi *et al.*, Energies 11, 996 (2018).
- [12] https://www.iter.org/

## ● ● 小特集 超伝導トカマク装置 JT-60SA にみる大型核融合装置の機器製作と装置組立の核心

## 5. 先進的プラズマ用の真空容器及び容器内機器

#### 5. The Vacuum Vessel and In-vessel Components for Advance Plasma Research

芝間祐介,武智 学

SHIBAMA Yusuke and TAKECHI Manabu 国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構

(原稿受付:2020年4月20日)

真空容器は、プラズマが生成される超高真空の空間を提供する容器である。超高真空を維持するベーキング 運転が可能で、プラズマ着火を阻害する誘導電流を低減する高抵抗な薄肉構造が望まれる。プラズマ実験運転時 では、ダイバータ機器等の容器内機器を支持すると共に、超伝導コイルの核発熱を低減するために放射線を遮蔽 する必要がある。実験運転中に作用する電磁力に健全であると共に、ベーキング運転時の熱変位を吸収する構造 が望まれる。

#### Keywords:

double wall, vacuum vessel, magnetic sensor, in-vessel components

#### 5.1 真空容器

真空容器は、プラズマが生成される超高真空の空間を提 供する容器である.超高真空を維持するために、真空容器 を加熱して容器表面に吸着した水分などの不純物を取り除 くベーキングが必要である.プラズマの着火を阻害する誘 導電流を低減するために高い電気抵抗の薄肉構造が望まれ るが、運転中に作用する電磁力や地震に対して健全な構造 は肉厚が必要である.プラズマ実験運転時には、生成され た中性子による核発熱で、超伝導コイルの超伝導状態が常 伝導状態に戻ることがないように遮蔽する.また、プラズ マの近くに設置されるダイバータ機器、第一壁、制御コイ ル等の容器内機器を支持する.

JT-60SA 装置では,供用期間を10年間とし,プラズマ実 験運転を18000回,ベーキング運転を200回で計画した. JT-60Uで使用した建屋,加熱や排気設備を再利用するた め,真空容器をJT-60Uと同様に18セクタ(20度セクタ)で 構成し,既設設備と各セクタのポートでの取合を可能にし た.プラズマが生成される真空空間をJT-60Uの倍以上に 相当する 290 m<sup>3</sup>とし,図1に示すように,外径10 m,高さ 6.6 m のトーラス型の真空容器を製作した.ここでは,真空 容器に要求される性能と,製作する前に構築した設計,実 際の製作については10体に分割したセクタの製作までを説 明する.セクタの現地組立とその結果については,第6章 で説明する.

#### 5.1.1 真空容器への要求

真空容器は、以下の性能を満足する必要がある.

- 1) 超高真空空間の生成(10<sup>-5</sup> Pa)
- 2) 高抵抗の薄肉構造(15 μΩ)
- 3) 電磁力に健全な構造(鉛直 7.5 MN,水平 2.5 MN)

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

- 4) 地震に健全な構造(地表 200 gal)
- 5) 中性子遮蔽
- 5.1.2 設計

真空容器は超高真空を維持するベーキング運転が可能 で,設計荷重に健全かつ高抵抗な薄肉の二重壁構造として 設計された.製作では,溶接入熱を制限する部分溶込み溶 接を採用して形状寸法を確保した.

#### 5.1.2.1 容器の設計

外径 10 m のトーラス型の真空容器をポロイダル方向の リブで内外壁を接続する二重壁構造とした(図2). 超伝 導コイル内の核発熱を抑制するために,必要な遮蔽水の厚 さが140 mmと算出され[1],この壁間隔以上でトロイダル 方向の一周抵抗 15 μΩ以上[2]を満足する板厚 18 mm の オーステナイト系ステンレス鋼 316L で二重壁を構成した. 実機では,ガンマ線源となるコバルト含有量を 0.05 w%以 下に制限した 316L 材を用いた.

超高真空を維持するベーキング温度を200℃に設定し、 二重壁間に高温の窒素ガスを循環させてベーキング運転を



corresponding author's e-mail: shibama.yusuke@qst.go.jp

する[3]. プラズマ実験運転時には,発生する中性子を遮 蔽するために50℃の遮蔽水を充填する.

プラズマ実験中に作用する最大電磁力については、プラ ズマ電流 5.5 MA が崩壊する場合として算出し、この電磁 力に耐えるために二重壁のポロイダルリブを 22 mm で強 度に必要な本数を配置した(図2).これらの電磁力で実 験運転中に点検する必要がないように、通常運転で起こり 得る事象として構造の安全率を設定した.

設計では震度6弱の地震に対しても、健全性を維持する 設計としている.

#### 5.1.2.2 重力支持脚の設計

重力支持脚を、トロイダル磁場コイルとポロイダル磁場 コイルの隙間を最大限に利用する台形断面の上部構造と、 径方向に鋼板を積層した板バネ部で構成し、クライオス タット架台へ絶縁材を介してボルト締結する(図3).

上部構造の容器側を M210 のボルトとし,現地でねじ込 む構造とした.上部構造と板バネは現地での溶接により一 体化する.板バネの板面の法線を装置中心に配置するとと もに,径方向に剛性が低いことを利用することにより真空 容器のベーキング中の熱変位を吸収する.トロイダル方向 に高い剛性を利用して地震等の水平荷重に抵抗する.

容器内への垂直アクセスを偶数セクタに集中させ、重力 支持脚を9基で構成し奇数セクタ下部に配置した.

真空容器の重量は、充填される遮蔽水(65トン)と容器 内機器(145トン)を合わせて供用中の重量が400トンと算



図2 真空容器40度セクタと二重壁構造.



図3 重力支持脚(左)と製作中の部材(右).

出された.真空容器の総重量と支持構造が設計され、ボル ト構造で支持される真空容器の応答周波数も減衰率5%と して約6Hzと算出される.電磁力の作用する時間は 数十msと短いため、真空容器と支持脚が減衰振動により 1回のプラズマ崩壊で被る疲労損傷も決まる.

荷重条件を表1に整理する.いずれの設計荷重も全事象 頻度が1万回以下と低サイクル疲労の領域で供用される [4,5].

#### 5.1.2.3 設計と製作

通常の容器に比べ内壁と外壁を接続する二重壁構造の溶 接長は長く、さらに、外径10mのトーラス型の複雑な開口 を有する容器に対し板厚18mmの材料は薄く、材料への入 熱に起因する溶接ひずみが全体寸法の精度を確保すること を難しくすることは当初から懸案であった.このため、製 作精度を保つために溶接量の削減が不可欠になる.

これまでの核融合試験装置で採用されてきた応力基準で 設計することが望まれた.応力基準では、無欠陥を想定し て供用中に疲労破壊を生じないよう、構造の各部材に十分 な安全率を採用する.真空容器にこの設計手法をそのまま 踏襲すると、以下の理由で合理的ではない.

- 内壁及び外壁は,壁間に遮蔽水が充填されるため,耐
  圧部材であり圧力境界である.しかし、リブは耐圧部
  材ではない.
- ・トーラスの外径10mに対し,二重壁構造の内外壁の板 厚が18mmと薄いため,溶接変形が容器形状の確保を 困難にする.
- ・ 72のポート開口が二重壁構造を貫通して設置される。
  既存の設備に合わせるために形状が複雑で、溶接量も 多くなる。

例えば,強度的には,内外壁とリブの接続部に融合不良 なく完全に溶込んだ(完全溶込み)溶接にする必要はない. 非溶着部を有する部分的に溶込んだ(部分溶込み)溶接に して溶接量の低減を図ると,溶接変形を抑制できるが非溶 着部が残る.この健全性の保証が設計荷重に対して要求さ れる.健全性が確保されれば,リブは両壁と必ずしも完全 溶込み溶接である必要はない.

さらに、二重壁構造では閉止溶接が必要である.しかし、 閉止部の壁間(流路)側へのアクセスができないため、非 破壊検査(NDT)が制限される.フィルムの挿入が不可能 であるために放射線透過探傷法による欠陥の検出が困難で あり、また、材料がステンレス鋼であるために超音波探傷 法による欠陥の寸法評価も困難である.溶接する材料の裏

表1 運転時の荷重条件.

運転状態		古壬八約	容器温度	発生頻度	設計回数	備考
		何里万艰	[°C]	[n]	[n]	
メン	·テナンス	自重	20	200	200	総重量400トン
	ベーキング	壁間気圧	200	200	200	窒素ガス圧0.38 MPa
、呂、哈		壁間水圧		200	200	
地币	プラズマ実験	プラズマ崩壊	50	300	3000	フラスマ実験連転 設計回数18000回
		TF高速減磁		200	200	成可回致10000回
	緊急	地震	200 (50)	1	10	水平0.6 G, 鉛直0.4 G

側の溶け込みを確認できない箇所については,部分溶込み 溶接として非溶着長を定義して設計する必要がある.

溶接部に非溶着部の存在を前提とする設計を採用する場 合,有効な非破壊検査が適用できない溶接部に欠陥が存在 しても,供用中に大規模な破損(崩壊,破断等)が生じな いように設計する必要がある.供用中に想定する設計荷重 は,回数としては低サイクル疲労側にある.真空容器の破 損は,以下の理由から局所的な領域に限定される.

- プラズマ崩壊により真空容器に生じる応力分布は、ポロイダル方向、トロイダル方向のいずれの方向にも不均一である。作用する領域の周辺では応力勾配が急峻である。また、遮蔽水圧は0.38 MPaと小さい。このため、広範囲な高応力状態の発生は回避できる。
- ・ 真空容器に適用される 316L 材は,延性,靭性共に優れ,安定き裂成長を与える材料である.不安定破壊を 生じる限界き裂長さに達する前に,遮蔽水の漏洩,あ るいは局所的な延性破断が破損の形態である可能性が 高く,真空をモニターする電離真空計で極めて高感度 に検出できる.

部分溶込み溶接は,溶接長を長くするポロイダルリブと 内外壁間の接続で施工範囲を限定して入熱を削減するのに 効果的である.

図4に示すように、例えば、外壁とポロイダルリブとの 間の安全率については、疲労強度に裕度(疲労強度低減係 数4)を採用することで、溶接部に非溶着部が存在しても 健全性を確保する[4].部分溶け込み溶接を採用しても供 用中に大規模な破損が生じない設計を採用し、健全性をモ ニターすることが可能で、同時に、形状寸法を確保するた めに溶接量を低減する製作方法を採用して製作を開始し た.

#### 5.1.3 セクタの製作

製作性を部分試作で検証して,真空容器の製作を開始した.工場製作では,現地までの陸上輸送,トーラス形状に 組み立てる溶接を踏まえて,製作単位を40度セクタにした.現地でトカマクを組み立てる方法を真空容器,真空容 器熱遮蔽体,トロイダル磁場コイルの順に各々を340度ま で組み立て、最後のトロイダル磁場コイルと、残りの真空 容器と真空容器熱遮蔽体を一体として組み込む設計にし た.このため、最終20度セクタに隣接する2セクタを30度 セクタとし、全部で10体のセクタを製作することにした.

二重壁構造を製作する方法と手順,溶接に伴う変形,拘 束治具を長手約1mの部分試作で検証して,20度セクタの 上半分を試作(図5)した.試作の結果から,以下の点が 明確になった[4].

- ・同じ形状のセクタを複数製作するため、溶接品質の安定性と変形を抑制するためにロボットによる溶接を計画した。溶着金属の積層を優先する MAG 溶接と溶接品質の高い TIG 溶接を併用した。内壁とリブを左右同時に MAG 溶接で接続し(図5)、外壁とリブを初層TIG 溶接、残層を MAG 溶接で接続することにした。
- インボードの直線部(図6)では、構造が比較的単純 であるため、単体製作時の直線性が予測通りに確保され、高い製作精度が実現できた.アウトボードとの組 立後も直線性が保たれているので実機の組立の基準を インボードにした.
- アウトボードでは、外壁を溶接すると曲率半径が大きくなり、天頂部と水平部の誤差が大きくなり、両端で約10mmの変形が残った、プレスで矯正した結果、設計形状に近づけることができた、実機では、専用の型を用意して、矯正精度を向上させた。



図5 20度セクタ上半分の試作.



図4 閉止溶接部の疲労強度検証試験(左),得られた設計疲労曲線(右).



図6 セクタ製作手順(左)と製品1体目(右).



a. IB 内壁半径, b. IB/OB 内壁距離, c. 高さ

インボートとアウトボードの接続では、治具で拘束すれば、天頂部の溶接による全体形状の変形は少なく、現地で溶接してもインボードとアウトボードの単体の形状の組み合わせ寸法で仕上がることがわかった。

製作精度と溶接変形の低減,品質と溶接する姿勢,検査 に見通しを得て実機の製作を開始した.溶接変形が累積し ないように,図5に示す分割で製作の主要な段階で矯正す ることにした.実機の製作では,40度セクタをインボード とアウトボードに2分して工場製作し,現地で一体化した (図6). このようにして製作したセクタは,図7に示す通り,局所的な公差外れは第一壁等容器内機器の設置精度で カバーできる範囲であり,全てのセクタで問題なく使用で きると判断した[6].

#### 5.1.4 まとめ

真空容器のセクタ製作を2009年11月に開始,試作で製作 性を検証した工場製作は高精度で2014年4月に終了した. 重力支持脚では2015年3月に終了した.これらのセクタを 現地において一体化したことを次章で述べる.

#### 5.2 容器内機器

#### 5.2.1 はじめに

容器内機器は、以下のカテゴリーに分別される.

- 1) プラズマ対向壁
- 2) 真空容器内コイル
- 3) 電磁気検出器
- 4) 真空排気装置

それぞれのカテゴリーに属する機器を表2に示す.機器 の健全性の確認,プラズマの制御性の確認を主な目的とす るファーストプラズマ期間はオーミック加熱と1.5 MWの 電子サイクロトロン加熱(ECH)のみであるため,容器内 機器はプラズマ生成と制御のために必要最低限なものを設 置した(表2).また,安定化板や下側ダイバータなどがな いため,電磁気検出器の保護のために保護リミタの設置を 行った.本章ではJT-60SAの容器内機器の全体構成および その構造,設置について紹介する.

#### 5.2.2 容器内機器共通の要求条件

容器内機器は共通して以下の要求条件を有する.

- 1) 超高真空中に設置するため,機器表面からの放出ガ スの少ない材料を用いる.
- 2) 強磁場中で使用するため磁性の持たない材料を用い る.
- 3) ベーキングの温度(200℃) に耐える.
- 4) ディスラプション時の振動に耐えうる構造を持つ.
- 5) 放射線(9 MGy) に耐えうる材料を用いる.

カテゴリー	機器	ファースト	フルス
		プラズマ	ペック
プラズマ対向壁	内側第一壁	空冷	水冷
	安定化板	—	水冷
	下側ダイバータ		水冷
	上側ダイバータ	空冷	水冷
真空容器内コイル	FPCC		有り
	EFCC		有り
	RWMC		有り
電磁気検出器	AT プローブ	8	137
	TC プローブ	17	23
	ワンターンループ	27	34
	ロゴスキーコイル	2	4
	(プラズマ電流)		
	反磁性ループ	1	3
	ロゴスキーコイル	—	48
	(ハロー電流)		
	サドルループ	—	36
	ロゴスキーコイル	4	4
	(真空容器渦電流)		
真空排気装置	クライオパネル		18

表 2 JT-60SA の容器内機器.

これらの要求を満たすため、真空容器内の雰囲気に接す る材料は金属ではステンレスやインコネル、絶縁材はセラ ミック (MgO など)が用いられる.プラズマ対向壁は高温 のプラズマからの熱に対して耐性を持つ必要があり、 JT-60SA では当初はカーボンタイルを使用する.機器の設 計に大きく影響するディスラプションについては、シミュ レーションを行うことにより機器に流れる誘導電流やハ ロー電流を決定し[7]、また、メジャーディスラプション及 び垂直移動現象 (Vertical Displacement Event: VDE)の回 数をそれぞれ2000回及び300回として振動試験などの試験 条件を設定し、試験を行った.

#### 5.2.3 プラズマ対向壁[8]

JT-60SA では最大41 MW の追加熱が100秒入射され る.これから発生する輻射熱や、ダイバータでのプラズマ の接触により高温になるため、真空容器や他の容器内機器 の保護のためのプラズマ対向壁を設置する.JT-60SA のプ ラズマ対向壁は以下の4点で構成される.

- 1) 内側第一壁
- 2) 安定化板
- 3) 下側ダイバータ
- 4) 上側ダイバータ

それぞれの真空容器内の配置図を図8に示す.

5.2.3.1 内側第一壁

内側第一壁は中心ソレノイドを囲むセンターポストを囲 むようにトーラスの強磁場側に設置されており,プラズマ の輻射からの真空容器および電磁気検出器等の保護を行 う.また,プラズマ立ち上げ時のリミターの役目を担う. これらの条件により内側第一壁の要求性能は前述の5.2.2 章の要求に加え以下となり,これらを満たすように設計, 製作及び設置が行われた.

 1) 熱負荷:輻射熱 0.3 MW/m<sup>2</sup>×100 秒, リミタ配位時 2.2 MW/m<sup>2</sup>×2 秒に耐える.

- プラズマ電流 5.5 MA のディスラプション時のハロー電流に耐える.
- 3)リミター配位時の熱負荷の集中を回避するため第一 壁の段差は±1 mm 以下にする.

内側第一壁は固定座, ヒートシンク及びタイルで構成され る.固定座は図9(a)に示すように真空容器上に2本1組 で溶接によって固定される.固定座はトロイダル方向に 36組,すなわち72列設置される.1組の固定座には図9 (b)に示すように1列のCuCrZr製ヒートシンク板がポロ イダル方向に23個ボルトにて固定される.さらにグラファ イトタイルが,1個のヒートシンクに2個ボルトどめにて 固定される(図9(c)).ヒートシンク及びタイルの総数は それぞれ828,1656個となる.

#### 5.2.3.2 安定化板

安定化板は高プラズマ圧力時のプラズマの安定化,及び 垂直不安定性の安定化のためにトーラスの外側(低磁場 側)に設置される.また,真空容器内コイル及び電磁気検 出器のプラズマ輻射やディスラプションからの保護の役目 も担う.安定化板はトロイダル及びポロイダル方向とも多 角形構造とすることにより,第一壁が設置しやすい構造と なっている.また,真空容器同様にプラズマ着火時に安定 化板での磁束の消費を行わない目的で高抵抗とするため, また,高強度と軽量化を両立するために,10mm厚の SUS316Lをリブで接続する二重壁(壁間は90mm)の構造 とした.基本的にポロイダル方向に4箇所の座をトロイダ ル方向にトロイダル磁場コイル(Toroidal field coil: TFC)直下に溶接にて18箇所設置する(図10(a))これにポ ロイダル方向のフレームをボルトと溶接にて固定し(図10



図8 プラズマ対向壁の真空容器内配置図.



図9 内側第一壁の構成.



図10 安定化板の構造と組立.

(b)),これに二重壁を固定する(図10(c)).この二重壁の プラズマ側にヒートシンクを配置し(図10(d)),1枚の ヒートシンクに2枚ずつのグラファイトタイルを設置す る.ヒートシンクとタイルは大きさを除き,前述の内側第 一壁のものと同様となる.要求性能は前述の内側第一壁と ほぼ同じであるが,リミターとしての使用は考えられてい ない.

#### 5.2.3.3 下側ダイバータ[9]

基本的に下側シングルヌル配位である JT-60SA は最 終的に加熱パワーと放電時間が41 MW×100秒に 達する.そのため下側ダイバータにかかる最大の熱 負荷は輻射にて~2 MW/m<sup>2</sup>×100 秒,ダイバータ足にて ~15 MW/m<sup>2</sup>×100 秒となり、これらの熱の排出のために 水冷による強制冷却が必要となる.また、JT-60SAの特長 である広範囲のプラズマ断面形状制御性とダイバータプラ ズマ性能を両立するために IT-60U にて良好な結果を得た W形状のダイバータ形状を採用した.また、ダイバータ部 は数年毎のメンテナンスが必要であるが、真空容器内線量 率が1mSv/hを超えるため、遠隔保守による修理・交換が 必要であり、これに対応するためカセット構造を採用し た.また、炭素壁でスタートするが、適切な時期に金属(タ ングステン)壁に変更可能な設計としている.図11に下側 ダイバータの構造を示す.ダイバータ足は内側,外側の ターゲットに接し,熱負荷は外側ターゲットにて最大の



図11 下側ダイバータの構造.

15 MW/m<sup>2</sup>に達する. そのために, 第一壁には炭素繊維強 化炭素(carbon fiber reinforced carbon: CFC)モノブロッ クを採用する. ダイバータ部では積極的に不純物ガスにて 熱輻射を促すため, バッフルは1 MW/m<sup>2</sup>,ドームは 2 MW/m<sup>2</sup>の熱負荷を受ける.また,バッフルには最大5秒 間足を乗せて運転することを想定している.**表3**に下側ダ イバータの各部の熱条件と第一壁を示す.

カセットの交換時には配管の切断と接続が必要なため, 遠隔保守が可能なレーザー光による管内溶接の開発を行っ た[10].カセット側のパイプと真空容器側のパイプの接合 部は図12(c)の円で囲む位置にあり,上部のカバーを外し 溶接ツールを挿入する(図12(b)).図12(a)に示す溶接 ツールを用いてレーザー光を接合部に照射し溶接を行う. この溶接ツールではあらかじめ溶接部の測定が可能であ り,その測定結果をもとに高精度に照射位置の制御を行う ことにより,開先合わせが比較的不十分な状態でも確実に 溶接を行うことが可能となった(図12(d)).ファースト プラズマ時には下側ダイバータは設置されないが,この技 術の確立をもとに,ダイバータカセットの組立が開始され た.

#### 5.2.3.4 上側ダイバータ

前述のようにファーストプラズマ時には下側ダイバータ を設置しないが、ダイバータ配位の制御性の検討などを行 うために上側ダイバータを設置する(図13).上側ダイ バータはファーストプラズマ時と中性粒子ビーム入射装置 増強前までの使用とするため、水冷は行わない.これらの 条件により内側第一壁の要求性能は5.2.2章の要求に加え 以下となり、これらを満たすように設計、製作及び設置が

表3 下側ダイバータの熱条件と第一壁.

	熱条件(100秒)	第一壁
内側バッフル	$1 \ MW/m^2$	CFC, Graphite tile
内側ターゲット	$10 \ MW/m^2$	CFC monoblock
ドーム	$2 \text{ MW/m}^2$	CFC tile
	$(10 \text{ MW}/\text{m}^2: 5 秒)$	
外側ターゲット	$15 \ MW/m^2$	CFC monoblock
外側バッフル	$1 \text{ MW/m}^2$	CFC, Graphite tile
カバー	$0.3 \mathrm{MW}/\mathrm{m}^2$	Graphite tile



図12 レーザー光による管内溶接.

行われた.

- 1)熱負荷:ECH立ち上げオーミック加熱運転
  1.5 MW/m<sup>2</sup>×5秒+0.5 MW/m<sup>2</sup>×10秒, ECクリーニング時 2.2 MW/m<sup>2</sup>×2秒に耐える.
- 2) プラズマ電流 2.5 MA のディスラプション時のハ ロー電流に耐える.
- 3) ダイバータ足の熱負荷の集中を回避するため第一壁 の段差は±1 mm 以下にする.

真空容器は上から見て72角形であり、その1辺に平行(ト ロイダル方向)にC型綱を真空容器に溶接によって設置 し、ポロイダル方向にH型綱を2つのC型綱にまたがるよ うにしてボルト及び溶接によって固定する(図13).H型 綱には第一壁となるグラファイトタイルが設置される. ファーストプラズマに向け、2020年3月に設置を終了した.

#### 5.2.4 真空容器内コイル

JT-60SA は超伝導装置であるが、プラズマの高速制御の ために真空容器内に常伝導(銅)線材を用いたコイルをが 必要となる.そのため、図14に示すように、プラズマの上 下不安定性安定化、位置の高速制御のための高速位置制御 コイル(Fast plasma Position Control Coils: FPCCs),誤差 磁場の補正及び ELM 緩和を行うための誤差磁場補正コイ ル(Error Field Correction Coils: EFCCs),及び高圧力時に 発生する抵抗性壁モードを制御する抵抗性壁モード制御コ イル(Resistive Wall Mode control Coils: RWMCs)をファー







図14 真空容器内コイル及び真空容器(VV)と安定化板(SP)の 一部.

ストプラズマ後に設置する[11].

#### 5.2.4.1 高速位置制御コイル

高速位置制御コイルは図14に示すようにトロイダル方向 に周回するコイルであり、上下2本を安定化板と真空容器 の間に設置する.水平,垂直方向に制御を行うようにする ため、独立してそれぞれに電源を持つ.線形化した Grad-Shafranovの式と3次元有限要素法解析を用いた垂直不安 定性,ELM 及びミニコラプス時のプラズマ位置制御性の シミュレーション解析により、必要な電源のスペックが決 定され、5kA で24ターン、すなわち120kAT と決定した. この条件により FPCC の要求性能は5.2.2章の要求に加え 以下となる.

- 1)熱負荷:5kA×100sの1/4のデューティーでショット間(1800秒)にて冷却できる.
- プラズマ電流 5.5 MA のディスラプション時の誘導 電流による電磁力に耐える.
- 3)絶縁材を冷却する必要があるため、ベーキング時に コイルを冷やすことによる真空容器との熱伸びの差 による応力に耐える。

これらの条件を満たすようにコイルの線材の断面,水冷 チャンネルの径,冷却水量,及びコイルケース厚などが決 定された(**表4**).また,真空容器への設置は板バネを介し て行うこととした.ファーストプラズマ後にコイルの製作 は真空容器内で行われ,真空容器内に巻線機を導入して巻 線及び絶縁材のキュアを行い,ステンレス製のコイルケー スに入れて真空境界とする.

#### 5.2.4.2 誤差磁場補正コイル

主にトロイダル及びポロイダルコイルの製作,設置誤差 を原因とする誤差磁場を補正するために誤差磁場補正コイ ルが安定化板と真空容器の間に設置される.トロイダル モード数が3までの誤差磁場を射程とするためトロイダル 方向に6組設置する.また,想定される製作,設置誤差を もとにモンテカルロ法で最大の誤差磁場を求め,これから ポロイダル方向に3つ必要なことがわかり,また,必要な 電源スペックが決定された[12].EFCCの要求性能は前述 のFPCCと同様であるが,電源及びコイルの接続の工夫に よりディスラプション時の誘起電流は流れないため,電磁 力は最大電流値のみを考慮すれば良い.これらの条件を満 たすようにEFCCの仕様が決定した(表5).また,真空容 器への設置は図15に示すような,棒バネ構造を有する 3種類の座を用いることとした.EFCCは18個全て製作が 終わり,座の有限要素法シミュレーション及び試作と試験

表4 FPCC (	の主な仕様
-----------	-------

項目	値
個数	2
導体断面	$22 \times 22 \text{ mm}^2$
導体冷却穴径	16 mm
コイル中心半径	3975 mm
コイルターン数	$23 \not \!$
電流値	5.22 kA
端子間最大電圧	2 kV



図15 EFCC と固定座.

表 5	EFCC の主な仕様.
~ ~	

項目	值
個数	$18 (6 \times 3)$
導体断面	$14 \times 14 \text{ mm}^2$
導体冷却穴径	8 mm
コイルサイズ (上下)	3660×870 mm
コイルサイズ (中)	900×3070 mm
コイルターン数	$35 \not P - \gamma  (6 \times 6 - 1)$
電流値(上下)	860 A
電流値 (中)	1300 A

が行われ、必要な機能を持つことが確認されている[13].

#### 5.2.4.3 抵抗性壁モード制御コイル

抵抗性壁モード制御コイルは図14に示すような額縁型の コイルであり、トロイダルモード数が3までの抵抗性壁 モードに対応するためトロイダル方向に6組安定化板のプ ラズマ側に設置する.ポートの制約により、ポロイダル方 向は3つ設置を行うため、合計18個設置される.これらの 条件をもとに、MHD安定性と3次元有限要素法を用いた 抵抗性壁モード制御シミュレーションを行い、必要な電源 スペックが決定された[11]. RWMCの要求性能は前述の FPCCと同様であるが、絶縁材に高温対応のものを用いる ため、ベーキング時に冷却する必要がなく、熱伸びの差に よる応力を考慮する必要はない.これらの条件を満たすよ うに RWMC の仕様が決定した(**表6**).

#### 5.2.5 電磁気検出器

JT-60SA では**表**7に示す電磁気計測器が設置される [14.15]. プラズマ形状/位置制御に必要な最小個数のプ ローブ及びワンターンループはコーシー条件面法を用いて 評価した[16]. そのほか,対象とする MHD 不安定性の構 造や周波数によって,プローブやサドルループの個数や周 波数特性,鎖交面積を決定した.また,プラズマ電流や蓄 積エネルギーのようなプラズマの基本的な重要なパラメー タを計測するロゴスキーコイルや反磁性ループについては 冗長性を持たせてある.

電磁気検出器の要求性能は5.2.2章の要求に加えそれぞ れのセンサーに応じた耐電圧を持たなければならない.特

表6 RWMC	の主な仕様.
---------	--------

項目	値
個数	$18 (6 \times 3)$
導体断面	$8 \times 8 \text{ mm}^2$
導体冷却穴径	4 mm
コイルサイズ (標準)	731×700 mm
コイルサイズ (大)	1141×700 mm
コイルターン数	8 ターン (4×2)
電流値(上下)	275 A

#### 表7 電磁気検出器の目的及び個数.

計測器名	目的	個数
AT プローブ	MHD 診断,プラズマ形 状/位置制御	137 $(18 \times 6 + \alpha)$
TC プローブ	プラズマ形状/位置制御	23
ワンターンループ	磁束,周回電圧	34
ロゴスキーコイル	プラズマ電流	4
反磁性ループ	蓄積エネルギー	3組
ロゴスキーコイル	ハロー電流	48個
サドルループ	低モード MHD 揺動, 誤	36個
	差磁場,磁気島	
ロゴスキーコイル	真空容器渦電流	4 組

にパッシェン領域付近にて高い耐電圧を要求される反磁性 ループ(1500 V)やワンターンループ(1200 V)には新し く開発した接続箱を採用して,高耐電圧と容易な接続を両 立している.

#### 5.2.6 ファーストプラズマに向けた容器内機器の設置

設置にあたっては図16に示すレーザートラッカーとリフ レクターやプローブを用いて計測を行った.レーザート ラッカーのベンチマークは本体室内の壁や柱などに設置さ れているが,これらを用いて真空容器内に2世代目のベン チマークを設定した.真空容器は周辺機器の組立が進むに 従い位置が変わることが危惧されたため,定期的に2世代 目のベンチマークの測定を行い,容器内機器の設置は真空 容器内のベンチマークの移動が無いことを確認してから開 始した.

内側第一壁の設置にあたっては、真空容器の内壁の垂直



図16 JT-60SA に用いたレーザートラッカーと補器.

面に設置するため、多くのレーザートラッカーに対応し、 比較的廉価なため数を多く所有できるリフレクターを用い て計測を行った. リフレクターを用いる場合, 計測場所は リフレクターの中心であるため、計測値にオフセットが 乗ってしまうが、垂直面を計測する場合、オフセットは水 平方向のみとなるため、補正は容易である.熱の集中を避 けるため、内側第一壁のタイルは±1 mm 以内の誤差で設 置する必要があるが、真空容器には±10mm程度の変位が あるため、これらを吸収するために、図9(c)に示す固定座 とヒートシンクとの間にカスタマイズしたシムを入れるこ とにより、これを達成した.ファーストプラズマ時にはプ ラズマ電流が定格の約半分の2.5 MAとなるため、内側第 一壁はハロー電流を考慮して図17に示すようにトロイダル 方向におよそ半分のみの設置となっている.また、オー ミック加熱のみとなるため、水冷却は行わず、銅合金の ヒートシンクの代わりにヒートシンクと同型のステンレス の台座を設置した.

一方,上側ダイバータは真空容器上部の曲面部に設置す るため、リフレクターによる計測値からオフセットを補正 して正確な位置を得ることは容易でない.そのため、測定 点を直接計測可能な T-probe とこれに対応した AT-960 を 用いて測定を行った.真空容器はトロイダル方向に36角形 であり、36本のC型鋼を持ちいて36辺とする.上側ダイ バータも内側第一壁同様にタイル表面で±1 mm 以内の誤 差で設置する必要があるが、真空容器の歪みをシムを用い ることによって3次元的に修正することは不可能である. そこで、T-probe でC型鋼を溶接する真空容器壁の位置を 詳細に計測し、これを CAD に入れ、C型鋼を加工し、さら にシムを用いる手法により、要求精度にて設置を完了した (図18).

電磁気検出器の設置にあたっては、レーザートラッカー で計測を行いながら設置を行った.ワンターンループは基 準とする垂直位置もしくは半径方向に対して±1 mm 以 内、ミルノフコイルである TC プローブについてはトロイ ダル方向のばらつきは±1 mm 以内、傾きの誤差は0.8 度未 満となっている.また、非常に精度の高い設置を要求され る反磁性ループについては、トロイダル方向に±0.3 mm 以内の精度で設置することに成功した.

#### 5.2.7 まとめ

JT-60SAの真空容器内機器はファーストプラズマに向け て全ての主要機器の製作と設置を2020年3月に終了した. 全ての機器はレーザートラッカーと3DCADを用いること により,目的とする精度での設置が可能となった.

#### 参 考 文 献

[1] A.M. Sukegawa et al., PNST 2, 375 (2011).



図17 ファーストプラズマ時の内側第一壁



図18 上側ダイバータの設置状況.

- [2] H. Urano et al., Fusion Eng. Des. 100, 345 (2015).
- [3] S. Sakurai et al., Fusion Eng. Des. 84, 1684 (2009).
- [4] Y.K. Shibama *et al.*, Proc. ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, Baltimore, USA, PVP2011-57440.
- [5] S. Asano et al., Fusion Eng. Des. 136, 661 (2018).
- [6] Y. Shibama et al., Fusion Eng. Des. 125, 1 (2017).
- [7] M.Takechi et al., Fusion Eng. Des. 146, 2738 (2019).
- [8] D. Tsuru et al, Phys. Scr. T171, 014023 (2020).
- [9] S. Sakurai et al., Fusion Eng. Des. 85, 2187 (2010).
- [10] T. Hayashi et al., Fusion Eng. Des. 101, 180 (2015).
- [11] M. Takechi *et al.*, Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conf. FTP/P6-30 (2010).
- [12] G. Matsunaga et al., Fusion Eng. Des. 98/99, 1113 (2015).
- [13] H. Murakami *et al.*, IEEE Trans. Appl. Supercond. 26, 4204805 (2016).
- [14] M. Takechi et al., Fusion Eng. Des. 96-97, 985 (2015).
- [15] M. Takechi et al., Fusion Eng. Des. 123, 965 (2017).
- [16] M. Takechi et al., Plasma Fusion Res. 13, 3402118 (2018).



## 6. 超大型トカマク機器の精密な組立

#### 6. Precise Assembly of Large Tokamak Device

芝間祐介, 土屋勝彦, 松永 剛 SHIBAMA Yusuke, TSUCHIYA Katsuhiko and MATSUNAGA Go 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (原稿受付: 2020年4月20日)

真空容器や超伝導コイル等の直径 10 m を超えるトカマク機器を,組立シナリオを構築して各機器の位置を 組立中に計測して数 mm の公差で組み立てる.真空容器をセクタに分割して工場製作し,溶接収縮量を予測して 中心側で±10 mm の公差で溶接組立した.装置中心に高精度に機械加工した架台を設置して,トロイダル磁場コ イルを中心側下部で±1 mm 以下に組み立てた.各機器の構造と組立に応じた調整法を用いて実現した組立は, 今後の大型トカマク装置の建設に適用できると考えられる.

#### Keywords:

assembly scenario, welding assembly, on-site alignment, superconducting tokamak

#### 6.1 トカマク機器の組立

JT-60SA 装置は,高さ15.5 m,直径15 m,総重量2600ト ンのトカマク型核融合実験装置である.既存の設備を最大 限に利用する改修であり,欧州と分担して機器を調達す る.運転中の熱変位等でも干渉せずに,さらにトロイダル 磁場(Toroidal Magnetic Field: TF)の誤差を10<sup>-4</sup>にする ため[1],装置中心側を±1.5 mm以下で製作したトロイダ ル磁場コイルを,組立基準に対してコイルの装置中心側の 下部で±1.0 mm以下に据え付ける.

既設の建屋と設備の取合位置,機器の設計寸法を反映した3次元 CAD モデルを作成して,全ての機器の位置と干渉を確認した.装置の組立シナリオを構築して現地での組立を開始した.

各機器の構造に応じてカスタマイズし、10m規模の真空 容器等のトカマク機器を同様に数ミリの公差に収めて組み 立てた.

#### 6.1.1 全体組立のシナリオ

現地組立の手順の概略は,第7章の図1に示す通りであ る.クライオスタット架台を組み立て,その上にトカマク 機器を組み立てる.JT-60SA装置では,真空容器,真空容 器熱遮蔽体,トロイダル磁場コイルの順に各々を340度ま で組み立て,最後のトロイダル磁場コイルと,残りの真空 容器,真空容器熱遮蔽体を一体として組み込み,それぞれ を一体化する方式を採用した.一体化後に,平衡磁場 (Equilibrium Magnetic Field: EF)コイルをトロイダル磁場 コイルに設置し,ポートとクライオスタットの熱遮蔽体胴 部を組み立てた.クライオスタット胴部を組み立て,中心 ソレノイドを設置,熱遮蔽体上部を設置してクライオス タットを閉止すると主要機器の組立が完了する.

#### 6.1.2 組立の計測と座標

2012年12月から現地組立の準備を開始した. 解体した JT-60Uの基礎を利用してトカマクを組み立てるため,基 礎の中心,既設中性粒子ビーム入射装置の基準座と建屋の 基準を計測して,本体室に組立座標の中心と方位を定義し



図1 JT-60U 解体後の本体室(左)にレーザートラッカーを用い て基準座標を構築(右).



図2 3次元 CAD を用いたレーザートラッカー計測の視野評価.

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

corresponding author's e-mail: shibama.yusuke@qst.go.jp

た(図1).図2に示すように、3次元CADモデルで視野 を評価した計測点をレーザートラッカー(空間分解能: 15µm+64µm/m)を用いて計測して、組立中の実機の設置 位置を管理した、クライオスタット架台(図3)のみ、セ オドライトで計測して据え付け、据付後にレーザートラッ カーで計測して設置位置を評価した.

欧州で製作されたクライオスタット架台を2013年3月迄 の2ヵ月で据え付けた.クライオスタット架台は,真空容 器,トロイダル磁場コイルのそれぞれの重力支持脚とクラ イオスタット胴部と,ボルト締結で取り合う.製作では, 工場仮組を行い,取合位置が±1mmで製作されているこ とを確認した.部品間には仮組時に施工した合わせ用のピ ン構造があり,工場で仮組した精度を再現した.架台の下 部構造を周方向に3分割(120度)で製作した.本体室に構 築した座標XYの中心と下部構造の中心の位置ずれが Φ2mmに収まる要求に対し,これを満足する精度で据え 付けた.2mmの位置ずれの影響が十分に小さいため,周 辺設備との取り合いをトカマク組立後にカスタマイズする とし,クライオスタット架台の座標系をトカマクの主要機 器を組み立てる座標とした.

#### 6.2 真空容器

トロイダル方向に10分割して工場製作された真空容器セ クタを現地のクライオスタット架台上に設置し,溶接して 組み立て,トーラス形状の真空容器にした.溶接すると継 ぎ手とその周辺に溶接入熱に伴う歪みが生じる.最終的な 誤差が小さくなるように溶接歪みを考慮しつつ順に接続し た.

真空容器の製作公差は,装置中心側±10mm,外側 ±20mm,設置高さ±5mmである.最終セクタで設計公 差を最大で6mm逸脱した.しかし,運転中に周辺機器と 干渉することは無く,第一壁やダイバータ等の設置精度で カバーできる範囲であるので問題ないと判断した.

#### 6.2.1 セクタ間溶接のシナリオ

ふたつの真空容器セクタを直接突き合わせて短工期に溶 接する方法(直接法)と、より精度の高いトーラス形状に するためにセクタ間に計測に基づいた約100 mm 幅の調整 材(スプライスプレート)を挟み溶接する方法(スプライ ス法)を併用して,真空容器セクタの組立を計画した (図4).

セクタ間を溶接して接続するために,接続する二重壁の 全周で,セクタ間の隙間と目違いをいずれも1mm以下に 合わせる必要がある.図5に,接続するセクタの端面を矯 正する様子を示す.本体に設置する前に,3mm以下まで 合わせるために,予荷重を与えTIGアークで入熱して材料 の降伏応力を下げることで矯正する技術を事前に準備した [2].本体に設置した後に,調整してさらに1mm以下に合 わせ,セクタ間を溶接接続した.セクタ間の溶接では,自 動溶接機を利用して作業の効率を図った[2].

最初に,直接法で3体の80度セクタを製作し,次にスプ ライス法で中規模の2体の110度セクタ,1体の120度セク タを製作した(図4).これら3体の中規模セクタをスプ



図4 真空容器セクタを80度に接続する直接法(上)と形状を調 整できるスプライス法(下).



図5 溶接開先の隙間と目違いを矯正するために真空容器セクタ を仮合わせ(左),端面矯正(右).



図3 クライオスタット架台の組立の進展.

ライス法で接続して,短工期で形状精度を満足する340度 セクタを製作した.セクタの工場製作の経験から,ひとつ の溶接線で4mmの収縮が生じる知見を得てセクタを拡大 する設計に反映し,各セクタを設置する位置を与えた (図6).特に,340度の製作では,最終セクタを径方向に 6mm外側に設置して接続することで,溶接収縮により トーラス形状が保たれる設計をした.340度セクタの製作 の結果,中心側で±4mm,外側で+8mm/-2mmの形状 誤差でできた[3].

真空容器を340度まで製作した後に,熱遮蔽体とトロイダル磁場コイルを340度まで組み立てた.

#### 6.2.2 最終セクタと製作結果

真空容器の最終セクタをトロイダル磁場コイル,熱遮蔽体と一体にしてトカマクに組み込み(図7),両側をスプライス法で溶接接続した.最終セクタを除けば公差内で製作されたが,最終セクタの特にインボード側でトーラス中心側に10mm以上の誤差を生じた.溶接変形を対称にするために,コイル中心から真空容器の左右が対称の形状となる20度セクタを最終セクタに選択してはいたが,以下の理由で,最終セクタの周辺で溶接収縮が予想を上回ったと考えられる[4].

- ・ 340度セクタの製作までは、溶接線をポートセクション間とし、二重壁の外壁と内壁を同時に施工することで、内外壁間の収縮バランスを管理することができた。しかし、最終セクタの一体化では、真空容器の外に熱遮蔽体があり、溶接アクセスが真空容器のプラズマ側からに制限される。拘束治具もプラズマ側に限定され、20度セクタの狭隘な空間に十分な拘束治具を設置できないため、溶接収縮を従来通りに抑制できなかった。溶接施工も外壁を施工後に内壁を施工することで、収縮バランスを従来通りに管理できなかった。
- ・最終セクタではトロイダル磁場コイルと一緒に設置するため(図7)、スプライス溶接線がポート開口を縦断する.ポート管台を二重壁と現地で製品の姿勢に合わせて溶接接続するために、従来のセクタ間以上に溶接入熱量が多くなり収縮量が増大した.

運転中に他の機器と干渉を生じないことを確認した. し

かし,容器に設置される機器については,これらの誤差を 吸収して設置する必要が生じた.

#### 6.3 超伝導コイル

欧州でトロイダル磁場コイル (TF コイル)を,日本で平 衡磁場コイル (EF コイル)と中心ソレノイド (CS)を製作 した.クライオスタット架台を組み立てた後に装置下部に 設置する平衡磁場コイルを仮置きし,トロイダル磁場コイ ルを組み立てた後にすべての平衡磁場コイルと中心ソレノ イドを組み立てた.

#### 6.3.1 TF コイルの組立

真空容器熱遮蔽体を340度まで組み上げた後に,真空容器の最終20度セクタの空間にトロイダル磁場コイルを吊り 降ろし,設置する位置まで回し込み据え付けた(図8).日 本がトロイダル磁場コイルの位置を計測し,コイル間をひ とつずつボルト締結したが,装置外側をトロイダル方向に 一体にして拘束し転倒力に抵抗する構造要素(シアパネ ル)の設置では,コイル側のシアパネル締結部の計測結果 に合わせてシアパネルが面接触するように欧州がカスタマ



図7 一体化して設置する直前の最終セクタ.



図6 矯正済のセクタを起立させて姿勢計測と同時に本体室の設置位置を計測(左),セクタを設計位置に設置して隣接するセクタと容器 内外から開先合せ(中),直接法で3体の80度セクタを現地製作(右).

#### イズした.

#### 6.3.1.1 要求精度

トロイダル磁場コイルの位置を組立治具で調整した.ト ロイダル磁場コイルの中心側コイル間支持構造(Inner Intercoil Structure: IIS)で位置を出す治具をクライオスタッ ト架台の中心に設置した(図8).汎用ジャッキを用いて, 図9に示す通り,計測点A,B,Gをレーザートラッカーで 計測しながら2ヵ所で姿勢を調整して方位と位置を調整し た.計測点A,B,Gは超伝導コイルのコイルケースの中に あるワインディングパックの電流中心線の製作後の計測結 果から定義される.製作と据付の両方の累積誤差は ±25 mm以下である.

#### 6.3.1.2 TF コイル設置誤差の調整方法と工夫

位置調整,シム厚の調整が済んだトロイダル磁場コイル 同士を接続する.トロイダル磁場コイルを,コイル間に絶 縁材(G10材)と位置と姿勢を調整するシムを挟み,IIS の上下でボルトとピンを用いて締結した.こうして,最終 セクタの反対側に一体目のコイルを設置して,このコイル を基準に左右交互にバランスを図り組み立てた.TFコイ ルは340度の真空容器に回し込んで据え付けるために形状 を拘束する治具を取り付けられない.このため,組立中の 重力支持を常に組立架台から取り,**図9**に示す装置中心下 部のIIS位置調整治具(1)の位置出し治具に沿わせて設置す ることで自動的に中心位置が±1.0 mm 以下に合う嵌合い 構造を準備した.その上で,(2),(3)の仮支持構造中に組 み込まれた高さ,トロイダル方向,径方向に位置を調整す る押しボルト機構を用いてインボード側のA,B,Gの3点 とアウトボードのH点をレーザートラッカーで計測しなが ら据付姿勢を確認してコイルを固定した.進捗に応じ,重 力支持脚をコイルに締結した.

ふたつのコイルの外側コイル間支持構造(Outer Intercoil Structure: OIS)間を5ヵ所のシアパネルで接続す る.シアパネルは2枚のステンレス板で挟み、ボルトで締結 される.トロイダル磁場コイルの設置後にシアパネルを締 結する取合部の絶対位置を計測してカスタマイズされ、プ レート1ヵ所を22本のボルトで電気絶縁材を介して締結し た.こうして最初のセクタに対し、左右交互に8体ずつ設 置、最終のセクタでは、真空容器及び真空容器熱遮蔽体も 閉止するために、これらの20度と一体化の上で組み込んだ. TF コイルを組立では、組立の公差がこれらの位置で

1F コイルを組立では、組立の公差がこれらの位置 ±1.5 mm 以下を達成した[5].

#### 6.3.2 EF コイルの組立

#### 6.3.2.1 要求精度

第2章で述べたように、6個の円形のEFコイルは、全て TFコイルを外部から取り巻くように設置され、各コイル の設置台座はTFコイル上に設けられている.そのため、



#### 図8 TFコイルー体目の吊り込み(1, 2)と回し込み(3).



図9 TF コイルの計測点(左),位置調整治具(中)とIIS.中心下部位置出し治具詳細(右).

EF コイルの位置は, TF コイルの製作精度と設置精度の影響を直接受ける.特に,装置外側に設置される EF1, 2, 5, 6の各コイルは,元々製作許容誤差が大きい TF コイルの曲 線部に設置されるため, EF コイルの台座となる TF コイル の位置が18個全て対称性良く同じ箇所(径方向,鉛直方向) に位置付けされるとは限らない.その一方で,EF コイルは 円形であり,その中心の位置が装置中心から逸脱してしま うと,トカマク装置の特徴である対称性を損なう原因とな る.そこで次のような方法を採用した.

#### 6.3.2.2 EF コイル設置誤差の調整方法

EFコイルはTFコイル上に板バネ付き支持脚を介して設置されている.装置中心近くに設置される比較的半径の小 さいEF3,4コイルはTFコイル一つ置きに9か所,他のコ イルは全てのTFコイル上に据え付けられる.各設置ポイ ントにおいて,板バネ支持脚は2枚(EF1のみ1脚)あり, EFコイルの支持金具(クランプ)とTFコイル上の台座に ボルト留めされる.この板バネ支持脚に現地合わせでボル ト穴を設けることで,EFコイルの径方向の設置誤差を最 小化することにした.

まず, EF コイルの支持金具のボルト穴位置を計測し, 次 に TF コイルが18体組みあがった後に TF コイル上の台座 の穴位置を計測した.両者のデータに基づいて,各コイル のセクションごとにボルト穴を開け (カスタマイズし)た. これにより,セクションごとに程度の異なる TF コイルの 製作・設置の誤差と EF コイルの製作誤差を吸収した.カ スタマイズの場所について図10に示す.以上の操作によ り,径方向の TF, EF 両コイルに生じる誤差を補正した.

鉛直方向については、EF コイルは予めコイルの高さ方 向の電流中心(これが設置位置の基準となる)と、上述の 支持脚にボルト穴を開ける位置との差をコイル製作段階で 計測しておき、これと TF コイル設置後の台座の実測位置 から設計設置位置からの差分を求め、足りない分に対して はシムと呼ばれる薄板を支持脚(脚長はマイナス公差で製 作している)と TF 台座の間に挟むことで微調整した.

各コイルの設置位置は設計に対し,径方向2mm以内, 高さ方向も平面度(高さのばらつき)を最大2mmに収め, いずれも要求値の半分以内であった.特に径方向の位置の ずれを小さくできたことは,前述したEFコイルの非円形 度の精度と併せて,対称性の良いプラズマ制御に寄与でき ると考えられる.

#### 6.3.3 CS の組立

#### 6.3.3.1 要求精度

第2章で述べたように、中心ソレノイドは4つのソレノ イドモジュールで構成されており、コイル冷却時の熱収縮 においても、それぞれのモジュール間にギャップが発生し ないように予荷重を印加して9つのタイプレートにより強 固に一体化している.したがって、独立したEFコイルの組 立とは異なり、一体化された CS の組立精度は4つのモ ジュールに対して系統的な影響を与えるため、EF コイル の組立時の平面度4mmに対して、倍の精度すなわち平面 度2mmの組立精度が要求されている.また、直径約3m、 高さ約12mの縦長構造で、総重量が100トンにも及ぶ大型



図10 EF コイル支持脚に実施したカスタマイズの場所(例として EF2 コイルの場合を示す).

重量物であるとともに,既に組み上げられた18体の TF コ イルの内側に挿入する組立となる.TF コイル内面と CS 外面の公称ギャップはわずか14 mm であるが,それぞれの 製作精度及び既に組み立てられた TF コイルの組立精度か ら,ギャップが10 mm を下回る箇所も現れ,極めて高度な 組立が要求されることとなった.

#### 6.3.3.2 組立準備と位置調整

極めて高度な組立を実現するために、周到な準備を行っ た. まずは,向かい合うことになる TF コイル内面と CS 外面の計測である.通常,近接する機器の取り合いや空間 は、高精度の計測が可能なレーザートラッカーを用いて、 いくつか代表点を計測することで、組立時の空間と最終位 置を決定する. CS組立においては、TFコイルとCSが広範 囲かつ狭隘に向かい合うため、代表点ではなく面計測が必 要となった.そこで,欧州 (F4E)の協力のもと,TFコイ ル内面と CS 外面の三次元計測を計画した. 欧州から招聘 した計測チームは、三次元レーザースキャナとともに来日 し、日欧協力して三次元計測を実施した.その結果、CS 外面にある一部のタイプレート, ヘリウム冷媒配管, 超伝 導フィーダと TF コイル内面の空間が極めて近接すること が判明した (図11). そこで, この三次元計測結果に基づい て、タイプレートについては CS 側で追加工による修正を 行い、追加工が困難なヘリウム冷媒配管、超伝導フィーダ については TF コイル側を加工した. それぞれの修正後, 再度, 三次元計測を実施し, 三次元 CAD 上で, 組立及び運 転時においても必要なギャップが確保されていることを確 認した.

CS 組立において, CS が縦長構造であることが困難を極めた.機器の組立には大型クレーンを使用するが, クレーンでは三軸方向への平行移動が基本である. そのため, 機

器の傾きについては、吊りワイヤの一部にチェーンブロッ クを用いて、その長さで調整する.しかしながら、CSの全 長と挿入すべきTFコイル上面が10mを超える位置である ことを考慮すると、クレーンの揚程不足により、傾き調整 のチェーンブロックが使用できない.そこで、CSをクレー ンで吊る時に、吊り治具と吊りワイヤ間との間にシムを挿 入し、数回の吊り込み調整でその厚みや位置を最適化し、 組立時のCSの傾きを事前に4mmまで最小化した.

CS吊り込み及びTFコイルの内側への挿入時には、CS とTFコイルの衝突を回避するために、CSに事前にレー ザートラッカーの計測点を設置し、実時間でその位置デー タをmm単位でモニタしながら、正確なクレーン操作をオ ペレータが行った(図12).また、クレーンの揺れなどで CSとTFコイルが接触した場合、直ちに操作を停止できる ように約80点もの接触センサを事前にCSの突起部に設置 し、監視した.細心の注意を払いながら、CSが支持される TFコイル側のマウントプレートに着地させ、CSの上端・ 下端の計測を行いながら、最終位置と傾きを計測し、シム 厚による傾き調整後、ボルトにて固定した.CS固定後の最 終位置計測では、CS中心位置の水平方向のずれが0.58 mm (中点位置)、高さ方向のずれが1.2 mm、垂直方向の傾きが 約8mのコイル全長に対して 1.6 mm と極めて高精度に要 求精度を達成した.

#### 6.4 クライオスタット胴部

超伝導コイルを組み立てた後に,2019年8月に,クライ オスタット熱遮蔽体の設置の進捗に合わせ,クライオス タット胴部の組立を開始した.クライオスタット胴部は, トカマク機器を支持する架台と共に,極低温で運転される 機器を外気より10<sup>-3</sup> Paの真空で断熱する容器の側胴部で ある.胴部の最大直径14m,高さ11mで,国内の陸上輸 送の制限から,上部4mと下部7mに分割し,さらにそれ ぞれを4分割と8分割のトロイダルセクタに,低コバルト 含有のステンレス鋼304を用いて欧州で製作した.



図11 CS と TF コイルとの間の空間(上面より).

#### 6.4.1 胴部セクタの組立

架台と同様に工場で仮組し,各セクタの製作精度が,セ クタ間の取り合い部で±2mm,ポート取り合い中心軸で ±8mmであることを確認した.部品間には仮組時に施工 した合わせ用のピン構造があり,工場での精度を再現でき た.下部の8セクタをひとつずつトカマクに設置して溶接 で真空シールし,あらかじめ一体化した上部4セクタを真 空シール溶接して設置した(図13).

#### 6.5 まとめ

2020年3月,クライオスタット上蓋の設置をもって、ト カマク機器の主要機器の組立は終了した.真空容器とクラ イオスタットを接続するポート延長管,超伝導フィーダ, 低温配管を別途接続する.

#### 参 考 文 献

- [1] G. Matsunaga et al., Fusion Eng. Des. 98-99, 1113 (2015).
- [2] Y. Shibama et al., Fusion Eng. Des. 98-99, 1614 (2015).
- [3] Y. Shibama et al., Fusion Eng. Des. 125, 1 (2017).
- [4] Y. Shibama et al., submitted to Fusion Eng. Des.
- [5] S. Davis et al., Fusion Eng. Des. 146, 369 (2019).



図12 CS 組立時の状況.



図13 据付中のクライオスタット胴上部.

## ● ● 小特集 超伝導トカマク装置 JT-60SA にみる大型核融合装置の機器製作と装置組立の核心

## 7. 日欧一体による JT-60SA プロジェクト管理

#### 7. Collaborative Management of JT-60SA Project between EU and Japan

花田磨砂也 HANADA Masaya 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (原稿受付:2020年4月20日)

世界最大のトカマク実験装置である JT-60SA 本体の機器製作及び組立を実施するに当たっては、JT-60SA プロジェクトリーダー,日欧のプロジェクトマネージャーが強力なリーダーシップを発揮し,"一つのチーム"を 作り上げた.本プロジェクトで開発した"一つのチーム"により,機器製作や組立作業で発生した様々の想定外事 象を解決し,計画通りに JT-60SA 本体の建設を2020年3月に終了した.

#### Keywords:

fusion, One team, management, leadership

#### 7.1 はじめに

JT-60SA プロジェクトにおいては,国際熱核融合実験炉 ITER 同様,国際協力の下,日本及び欧州が分担して機器 を製作し,ホストである量子科学技術研究開発機構 (QST)の那珂核融合研究所にJT-60SAを設置する.機器 の設置は2013年1月から開始しており,最初に,欧州製の クライオスタットベースを設置した.その後,下側の超伝 導平衡磁場コイル3体,真空容器,真空容器熱遮蔽体,欧 州製超伝導トロイダル磁場(Toroidal Field: TF)コイル 18体,欧州製クライオスタット胴体12体,クライオスタッ ト熱遮蔽体,中心ソレノイド(Central Solenoid: CS),クラ イオスタット上蓋を設置した(図1).いずれの機器も,厳 密な工程管理のもとに製作され,組み立てられた.その結 果,計画通りに,2020年3月にJT-60SA本体の組立工事を 終了した.

本プロジェクトは、日欧政府間の運営委員会やその直下 の事業委員会などによって運営されているが、本章におい ては、機器の製作や設置工事をより直接的に管理する体制 及び、その成果について報告する.

#### 7.2 プロジェクト管理

現地での本体組立工事を手戻りなく,円滑に進めるため には,本体工事の工程管理に加えて,機器の製作,試験・ 検査,輸送を含めた現地到着日等の,機器製作工程を厳密



図1 JT-60SA 組立工事の進捗.

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

author's e-mail: hanada.masaya@qst.go.jp

に管理するとともに、JT-60SA を構成する合計23600個の 部品間の取り合いの整合を確実に担保する必要がある.本 プロジェクトにおいては、機器を製作する前に、日欧で分 担する機器の設計や製作に関する技術調整会合(Technical Coordination Meeting: TCM)を4ヶ月に1回の頻度で 開催し、機器間の取り合いを調整した.加えて、現地での 組立工事の工程管理や製作した機器間の取り合いの整合を 図るために、3週間に1回の頻度で、プロジェクト調整会 合(Project Coordination Meeting: PCM)を日欧間で開催し た.同会議を通して、欧州及び日本が製作する機器の調達 状況を協議し、現地での組立作業の工程を調整した.さら に、組立工程が遅れる恐れが生じた場合には、臨時調整会 議(Ad Hoc Coordination Meeting: AHCM)を開催し、案件 ごとに日欧間で協議し、問題を解決した.

これらの日欧共同の会議体に加えて,QST は独自に,日本が担当する機器製作や組立の工程を厳格に管理するため に,1年間の計画を年度初めに協議する会合(JT-60SA 工程会議)を開催するとともに,この計画に基づいた進捗 を確認するために1か月に1回,及び1週間に1回の頻度 で,会合を開催した.さらに,QSTと工事受注業者との工 程調整会議を,1週間に1回の頻度で実施した(図2).そ れぞれの会議の時間を1~2時間程度に限定し,複数の会 合を通して,工事の遅延を早期に発見し,迅速にかつ適切 な対策を講じた.

会議体に加えて,JT-60SA システム全体の工程や取り合いを統合管理するグループをQST内部に新たに設けた.同 グループが中心となり,プラント工程会議や週間工程調整 会を主催し,QST内部や現地組立業者との工程調整を実施 するとともに,欧州及び日本が調達した機器の取り合いの 調整を行った.工程管理に関しては,プロジェクト会議や 工程調整会議を通して,全体のマスター工程表から切り出 した一月及び1週間の工程を管理した.さらに,作業工程 に加えて,QSTと機器製作業者が協力して作成した納入品 リストを用いて,製作機器の現地到着日を管理した.さら に,機器間の取り合いについては,製作後に実測した寸法 を反映した機器の取り合いリストを作成し,機器間の取り 合いの整合を最終確認した.

現地の組立工程に遅延が発生した場合には,個別案件ご とに,遅延回復に向けたタスクフォース会議等を速やかに 開催し,工程表を改定した.改定した工程表を用いて,組 立作業工程を管理し,3か月以内目標に遅延が回復するこ



図2 JT-60SA プロジェクトで開催した会合.

とをめざした.

#### 7.3 想定外事象で発生した遅延に対する具体的 な対策

想定外事象で発生した遅延に対する具体的な対策を2例 紹介する.

最初に, TF コイルの製作の遅延に対する対応について 紹介する.2017年,欧州調達のTF コイルの製作が遅延し, 組立作業が3か月以上遅延するという想定外の事象が発生 した.発生後速やかに,PCM や AHCM で遅延回復案を協 議した.会合では,日欧プロジェクトリーダーの強力な リーダーシップの下,欧州側が空輪費用を負担することに よって,TFコイル2台を,当初予定していた船輸送から空 輸送に変更し,1.5か月回復させることを日欧間で取り決め た(図3).さらに,空輸のみでは遅延を完全に回復するこ とができなかったため,日本側が夜間作業の監督者を提供 するとともに,作業費用の一部を欧州側が負担し,後続作 業の一部を,夜勤を含む2直体制で実施することを取り決 めた.取り決め後,速やかにTFコイルを空輸するととも に,後続作業を2直で行い,3か月の遅延を回復した.

次に、CSに関する想定外事象について紹介する. 2019年 5月に, CS を仮挿入した際に, 要求精度 (±2 mm) で CS を装置中心に挿入することが困難な事象が発生した. TF コイルの遅延に対する対応と同様に、不具合発生後速やか に、PCMやAHCMを開催し、不具合の原因究明のために、 製作された実機CSの外表面やTFコイルのインボード側の 形状を詳細に測定することを取り決めた.測定に当たって は、欧州が自前の測量チームを緊急に QST に派遣し、レー ザートラッカー用いて、測定を実施した. その結果をもと に、1週間に1回の割合でAHCMを開催し、CSの外形を 決めているタイプレートの位置を内側に8mm 程度小さく すること, TFコイルのインボード面を1-16mm程度切削 することを決定した. また, これらの対策を日本が担当す ることを取り決めたものの,専門業者から,TFコイルの現 地切削については、6か月以上の期間と多額の費用が要求 された.そこで、欧州と協議し、欧州の技術支援のもとに、 QST が切削用治具の製作や作業要領の作成を地元業者に 対して主導した.また,業者が実施した現地作業において も, QST は切削作業の進展を随時把握し, 段階的に1日当



図3 空輸した超伝導トロイダル磁場コイル.

たりの作業時間を増加し、最終的には24時間体制で作業を 実施することを主導した.その結果、専門業者が見積もっ た6か月の作業期間を3か月に短縮することに成功した (図4).これらの一連の作業を実施するに当たっては、日 欧間で作業の費用を分担するとともに、QSTが作業監督者 を提供するとともに、本不具合による遅延を最小化するた めに、CS挿入後に実施する予定だった作業の組み換えを 主導した.

#### 7.4 まとめ

JT-60SAの本体組立を計画通りに実施できた要因の一つ は、複数の会合を通して、速やかに遅延を見つけ、必要な 遅延回復策を適切に実施したことである.この実施体制を 実現するためには、日欧間の相互理解と信頼関係の醸成が 必要不可欠である.JT-60SAプロジェクトでは、日欧それ ぞれのプロジェクトマネージャーが相互理解を図り、日欧 相互の信頼関係を高いレベルに持ち上げるとともに、強力 なリーダーシップを発揮し、日欧で取り決めたことをそれ ぞれの極において確実に実行した.このようなトップの行 動を通して、広く日欧の関係者の信頼関係が深まり、日欧



図4 TF コイルの切削.

が一つのチームとなり,プロジェクト運営した.その結果, 想定外の事象が毎年のように生じたが,計画通りに,建設 を終了することができた. • 小特集 超伝導トカマク装置 JT-60SA にみる大型核融合装置の機器製作と装置組立の核心

## 8. まとめ

#### 8. Summary

花田磨砂也 HANADA Masaya 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 (原稿受付:2020年4月20日)

日欧の幅広いアプローチ(Broader Approach: BA)活動 の一つであるサテライトトカマク計画は2007(平成19)年に 開始され,欧州が製作したクライオスタットベース(CB) を那珂核融合研究所に2013(平成25)年1月に設置すること を以て建設が開始された.CB設置後,真空容器,超伝導磁 場コイル,熱遮蔽体などを設置し,2020(令和2)年3月に, クライオスタット上蓋を設置し,JT-60SA本体の建設を終 了した.また,本建設工事と並行し,1次冷却水設備等の 既存設備の整備,欧州が製作した世界最大容量を有する冷 凍機の現地据付,超伝導磁場コイル電源の据付を行った. さらに,システム全体を制御する中央制御システムの更新 などを行い,中央制御システムと各構成機器との間で,機 器保護のためのインターロックも含めた制御に関する統合 リンケージ試験も2020(令和2)年3月に終了した.

本体の機器製作や据付工事と並行して、JT-60SA に向け た加熱装置や遠隔保守装置の開発を進めた結果, 150 A/m<sup>2</sup>, 500 keV の水素負イオンビームを118秒間生成 することに成功した.これは、JT-60SAの要求性能 (130 A/m<sup>2</sup>, 500 keV, 100秒)を超える成果であり、世界で 初めて実用化レベルの大強度ビームを100秒以上加速した ことを実証した.また、高周波加熱装置においても、高パ ワー・長時間運転で使用する 110 GHz, 138 GHz の両方に おいて要求性能である1MW,100秒間の発振に成功(2014 年) するとともに、82 GHz, 110 GHz, 138 GHz の 3 つの高 周波に対応した偏波器を世界で初めて開発した. さらに, 定期交換が求めれるダイバータの遠隔保守機器の開発の一 環として、狭隘な空間に配置されたダイバータ冷却水配管 を溶接するために、新たにレーザーを用いた管内溶接を開 発した. 冷媒配管間のギャップ距離や軸ずれに対する溶接 可能領域を、従来よりも大幅に拡大することに成功した. いずれの技術も国際熱核融合実験炉 ITER に応用されるこ とが期待されている.加えて,JT-60SA プロジェクトで開 発した大型機器をきわめて高い精度で設置する技術、すな わち、3次元 CAD を用いた組立シュミレーション、レー

ザートラッカーを用いた測量による機器の位置出し,高精 度で機器を設置するための治工具類なども ITER に応用さ れることが期待されている.

これらの技術開発に加えて、検討段階では予想しなかっ た様々な想定外事象に対するプラント管理も ITER への応 用が期待されている。第7章で紹介した TF コイルや CS に起因する工程遅延に加えて,真空容器熱遮蔽体の設置や 真空容器の支持脚設置に対しても、事前検討では想定でき ない事象が発生した.問題が発生する都度,日欧及び受注 業者と綿密に協議を深め、一体となり、後続作業の組み換 えや合理化などを絶えず実施した.これらの遅延回復対策 に加えて,きわめて長期にわたるプロジェクトにおいて, 本プロジェクトにかかわる人々の士気を高い状態で維持す るために,アウトリーチ活動を通して,プロジェクトの節 目である2013(平成25)年3月に「JT-60SAの欧州製作機器 の初搬入と組立開始を披露する式典」, 2015(平成27)年3 月に「JT-60SAの欧州による主要機器搬入及び現地作業開 始並びに真空容器の初期組立完了を披露する式典」, 2017 (平成29)年1月に「JT-60SA のフランス及びイタリアによ る超伝導トロイダル磁場コル製作と日本による同コイル組 立開始を披露する式典」,などを開催した.

これらのJT-60SAプロジェクトで開発した機器製作や据 付技術,及びプロジェクト工程管理などをITER機構は高 く評価し,JT-60SAプロジェクトに研究開発協力を要請し た.この要請に応えて,2019(令和元)年11月にITER-BA 協定を締結した.

今後JT-60SA プロジェクトは,2020(令和2)年4月から 新たな局面に移行しており、システム全体の統合コミッ ショニングを開始した.真空容器とクライオスタットの真 空リーク試験等を行った後、真空容器及びクライオスタッ トを真空引きし、その後、超伝導コイルを冷却したの ち、2020(令和2)年秋頃に初プラズマを生成する予定であ る.

National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology, Naka, IBARAKI 311-0193, Japan

author's e-mail: hanada.masaya@qst.go.jp

#### 小特集執筆者紹介 20



鎌田 裕

量研那珂核融合研究所 副所長, JT-60SA 計 画事業長. 1988年に東京大学大学院原子力工 学専攻博士課程を修了し、日本原子力研究所 に入所.以来,JT-60でのプラズマ研究,

JT-60SA 計画, ITER 計画の推進に従事. 大事な言葉はフォ ア・ザ・チーム. 妻と2人の息子あり(孫はまだ). 趣味はサ ボテン栽培(55年目),水彩画(これで結婚),料理(和洋中), サッカー (全くご無沙汰),大工仕事.



#### 土屋勝彦

量子科学技術研究開発機構 JT-60 マグネット システム開発グループ 上席研究員. 筑波大学 大学院物理学研究科 博士 (理学). 日本原子 力研究所を経て、2016年より現職. 今世紀に

入ってから次期装置設計や JT-60SA 用超伝導コイル設計に従 事. ここ数年で急に衰え始めた視力に難儀している日々です.



## はま だ かず や

量子科学技術研究開発機構 極低温超伝導機 器開発グループリーダー及び JT-60 マグネッ トシステム開発グループリーダー.工学博士 (神戸大学). 2019年3月にITER機構から

戻って、4月より現職.現在、JT-60SA 統合コミッショニング 開始にむけ、ヘリウム冷凍システムや超伝導コイル関係機器 の最終確認や運転・試験法案の取りまとめを行っています. 外出自粛していましたが、落ち着いてきたのでハイキングを 再開したいです.



#### 夏日恭平

量子科学技術研究開発機構 那珂核融合科学研 究所 トカマクシステム技術開発部主任研究 員. 総合研究大学院大学 物理科学研究科 博 士(工学). 2014年より那珂核融合研究所勤

務. JT-60SA 計画においてヘリウム冷凍機システムの調達及 び冷媒分配システムの設計・製作に従事.趣味は旅行.ここで はないどこかに行きたいと続けてきて今ここ.次はどこ.



#### 島田勝弘

量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所 トカマクシステム技術開発部 主幹技術 員. 2000年東京工業大学大学院理工学研究 科・修士(工学).主にJT-60SA用電源の研究

開発を行っています.趣味は旅行.1歳半になるわんぱくな息 子を連れて,いろいろな場所に行ければいいなと思っていま す.



ショニングに取り組みます.

#### 森山伸一

量子科学技術研究開発機構 那珂核融合研究所 トカマクシステム技術研究部部長, (兼)電源 制御グループリーダー,理学博士(筑波大学), 歯医者の待合室で読んだダイエット本の方法 を試したら12キロ減りました. 身軽になった体で SA のコミッ



### 芝間祐介

量子科学技術研究開発機構 JT-60 本体開発グ ループ上席研究員. 筑波大学大学院工学研究 科修士取得中退,博士(工学).真空容器の設 計から製作までを担当して,装置の構造を内 外の専門家と一緒に考えてきました. 超電導コイル構造系に

動吸振器の構成, R6 法の導入, メンテナンス不要な構造設計 に興味があります.海辺の散策,鳥の観察とラグビー観戦を子 等と一緒に楽しんでいます.



#### 武 智 学 量研機構上席研究員. 高校卒業後ファミレス 店員を経て大学に入り3ヶ月で中退後, 鐵工 所勤務を経て再度大学入学.修士取得後3年

間自動車部品販売店員を経て博士課程へ. そ の後何年かポスドク後竹治さんの代わりに現職. だから大丈 夫.趣味・小特集執筆.アル中.著者紹介が面白くない…とダ メだししないでください>北澤さん.



#### おなが 副

量子科学技術研究開発機構 JT-60本体開発グ ループリーダー・JT-60システム統合グループ リーダー・上席研究員. 2002年名古屋大学大 学院工学研究科・博士(工学). JT-60 では高

エネルギー粒子・MHD 不安定性の実験研究に従事. 2008年以 降, JT-60SA 計画に本格参加. 容器内コイル設計, 計画調整番 頭, 容器内機器調達, トカマク本体組立/本体設備整備のとり まとめ、と年を追うごとにプラズマから遠いところへ守備範 囲を拡大中.趣味は DIY と旅行.旅先では「酒を求め,肴を求 めさまよう…」.現在,コロナ自粛解禁待ち.週末は息子(10 歳)のソフトボール少年団に同伴し球拾い.成長著しい息子を 見守りつつ, 衰え始めた自分の現状打破を検討中.



### 花田磨砂也

量子科学技術研究開発機構 核融合エネルギー 部門 那珂核融合研究所 副所長, イオンビー ム工学を中心に核融合工学全般を専門とし, JT-60, ITER などの中性粒子入射装置の開

発・研究, JT-60SA 製作・建設に従事.4年前から, 趣味とし ての野菜作りに奮闘中.