

JT-60SA 真空容器セクタ製作完了と 全体組立てへの取組み

Completion of Vacuum Vessel Sector Manufacturing and Approaches to Overall Assembly of JT-60SA

早川 敦郎

水牧 祥一

濱田 崇史

■ HAYAKAWA Atsuro

■ MIZUMAKI Shoichi

■ HAMADA Takashi

JT-60SA (Super Advanced) は、日欧が共同で建設中のトカマク型核融合実験装置である。

東芝は、装置を構成する主要機器のうち、プラズマを閉じ込める真空容器の製作と組立てを担当した。真空容器に要求される高い寸法精度を実現するため、工場での真空容器セクタの製作、現地でのセクタどうしの接続、及び据付けの3段階で精度を確保する取組みを行い、真空容器全体の組立てを±10 mmの精度で完了した。当社はまた、プラズマを閉じ込めるための高磁場を作り出す超電導コイルのうち、超電導コイルを極低温に保持するための熱遮蔽板や、真空容器や超電導コイルなどの機器を収める真空断熱槽といった主要機器の他、装置を運転するために必要な補機類を含むトカマク装置全体の組立設計を進めている。

The JT-60SA experimental tokamak type thermonuclear fusion device is currently under construction as a joint project between Japan and the European Union.

Toshiba has been assigned the manufacturing and assembly of the vacuum vessel of this medium-scale tokamak type device. In order to meet the requirements for high-accuracy assembly of the vacuum vessel, we have established a manufacturing procedure to secure the accuracy of assembly consisting of the following three stages: (1) manufacturing of the vacuum vessel sectors at our factory, (2) welding connection of each sector, and (3) assembly at the installation site. As a result, we have completed the assembly of the vacuum vessel within the tolerance of ±10 mm. We are now continuing our efforts to design an overall assembly procedure for the components of the superconducting magnets including thermal shields, cryostat, and utility supply systems.

1 まえがき

JT-60SAは、日欧の協力で進められている核融合開発に関する幅広いアプローチ (Broader Approach) 活動のなかで、核融合発電装置の工学技術の検証を目的としてフランスに建設が進められているITER (国際熱核融合実験炉) の補完装置として位置づけられる中型のトカマク型核融合実験装置である⁽¹⁾。その目的は、1985年に運用を開始して2009年より解体が行われた臨界プラズマ試験装置 JT-60で整備された加熱装置や電源など、既設の設備を最大限に再利用しながら、磁場コイルを超電導化することにより、核融合プラズマを100秒間程度維持し、核融合発電の実現に向けた長時間運転と制御方法を実証することにある。装置は日本側の実施機関である独立行政法人 (現 国立研究開発法人) 日本原子力研究開発機構の那珂核融合研究所で2013年1月に建設が始められ、2019年のプラズマ初点火を目指して組立てが進められている (図1)。

東芝は、2008年から2014年にかけてこの装置でプラズマを閉じ込めるための真空容器を製作し、現地で溶接組立てを行っている。更に、トカマク装置全体組立ての検討も行っており、欧州側が製作するトロイダル磁場 (TF) コイルや、熱遮蔽板、内蔵物などの組立手順、及び組立てに必要な組立て用

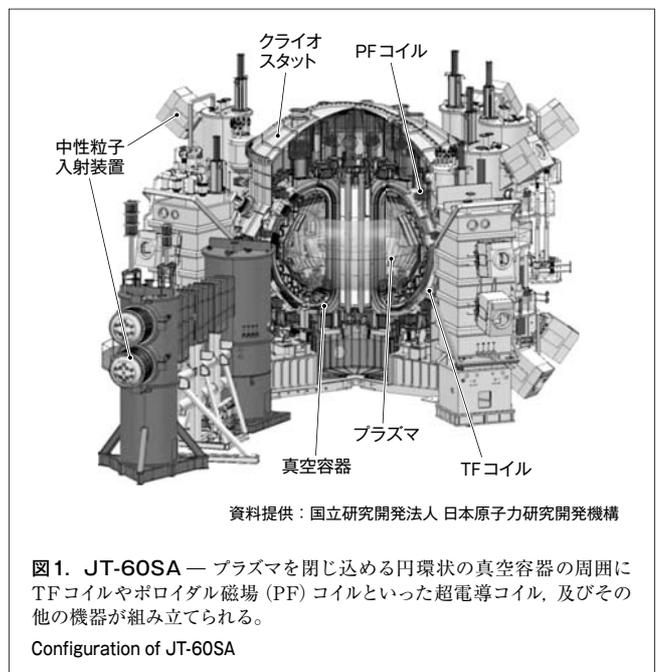


図1. JT-60SA — プラズマを閉じ込める円環状の真空容器の周囲にTFコイルやポロイダル磁場 (PF) コイルといった超電導コイル、及びその他の機器が組み立てられる。

Configuration of JT-60SA

ツールの設計を進めている。ここでは真空容器製造における技術課題への対処と装置全体の組立設計への当社の取組みについて述べる。

2 真空容器セクタの製作

真空容器は、内部に核融合プラズマを生成して保持するための直径約10 m、高さ6.6 m、総質量約150 tの円環状の大型溶接構造物であり、円周方向に分割したセクタとして製作される(図2)。当社は、全セクタ10体に加え、真空容器を床面から支持する重力支持脚9体、及び加熱や計測のために真空容器に設けられた貫通孔に接続されるポート54体を製作した。

2.1 真空容器の構造

真空容器セクタは核融合反応で発生する中性子を遮蔽するホウ酸水を循環させるための二重壁(外壁と内壁)間をリブで補強した、D字型の断面を持つ(図2)。

各セクタはD字型として完成すると陸上輸送できるサイズを超えるため、内側(インボード)と外側(アウトボード)に分割して工場で作製し、現地で両者を接続して完成した(図3)⁽²⁾。

2.2 溶接方法の選定と施工条件の最適化

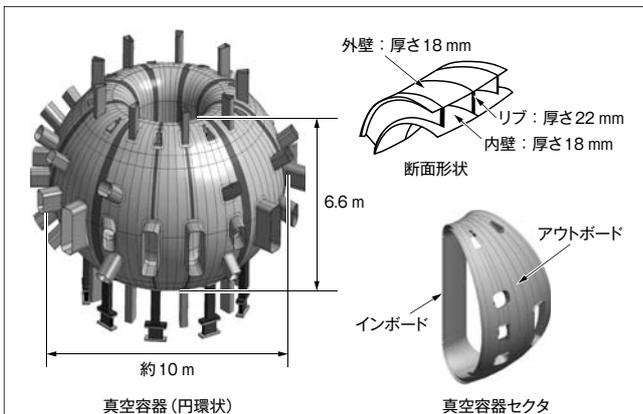
真空容器製作上の技術課題は、溶接箇所が多く、溶接に伴う変形が生じるにもかかわらず、高い寸法精度が要求されている点である。この課題を解決するため、溶接時の入熱を極力抑えた溶接法を選定し、施工条件を確立するための研究開発を行った⁽³⁾。

真空容器の代表的な溶接箇所の継手構造を図4に示し、それぞれで取り入れた施策を以下に述べる。

(1) 内壁どうし及び外壁どうしを接続する突合せ継手

溶接変形の抑制と溶接時間の短縮のため、溶着量の削減を図った。このために、通常使われるJ字型開先のTIG(Tungsten Inert Gas)溶接の代わりにV字型開先を採用し、溶接アークを狭い領域に集中できるプラズマ溶接を適用した。

(2) 内壁とリブ間を接続するすみ肉継手 内壁とリブ間の



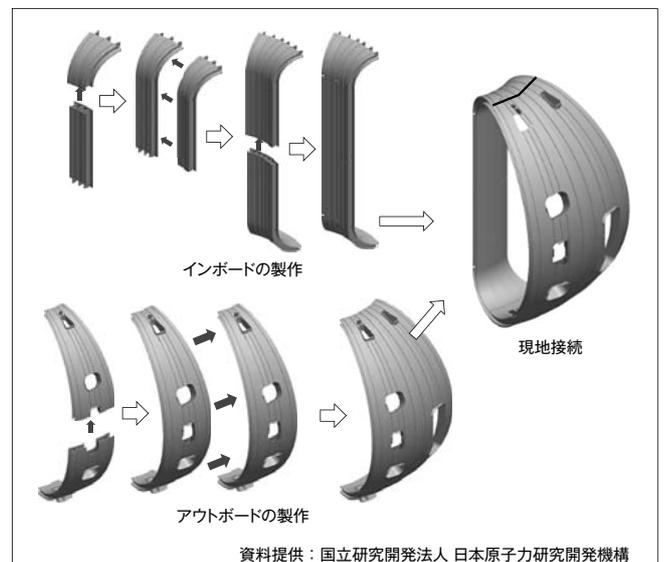
資料提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

図2. 真空容器の構造 — 真空容器は直径約10 m、高さ6.6 mの円環状であり、二重壁構造となっており、総質量は約150 tである。

Structure of vacuum vessel

継手はTIG溶接に比べて溶着速度の大きいMAG(Metal Active Gas)溶接を採用した。溶接対象物の角度(溶接姿勢)に応じて溶接に必要な入熱量の測定を行った例を図5に示す。こうした測定結果に基づいて、できるだけ小さい入熱で溶接を実施した。またリブの両側を同時に溶接するツイン溶接を採用し、溶接によるリブの倒れを抑制した。

(3) 外壁とリブを接続するプラグ継手 外壁をリブに載せて外壁とリブの重なり部を完全溶け込みTIG溶接により接続した後、溶着速度の大きいMAG溶接で埋めるプラグ継手とした。この溶接では、外壁とリブが重なる領域を溶融させるため、外壁とリブの機械加工と組立てを



資料提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

図3. 真空容器セクタの製造手順 — 真空容器は10分割して製作され、各セクタは工場内で内側(インボード)セクタと外側(アウトボード)セクタとして製作され、現地で一体化してD字型の形状とする。

Flow of vacuum vessel sector manufacturing

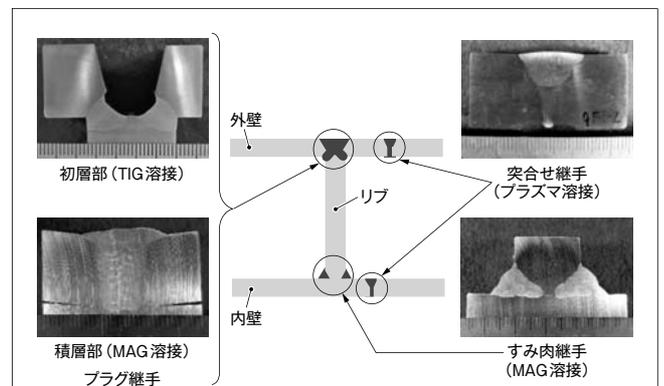


図4. 溶接継手 — 真空容器の二重壁を構成する溶接継手は、(1)内壁どうし及び外壁どうしの突合せ継手、(2)内壁とリブ間のすみ肉継手、及び(3)外壁とリブ間のプラグ継手の3種類に大別される。

Welding joints for double walls

精度よく行うことがポイントである。

2.3 モックアップ部分試作と実機製作

実機製作に先立ち、溶接変形予測、並びに組立て用ツールの設計及び溶接手順の最終確認のため、真空容器セクタ20°分の上半分のモックアップを部分試作した(図6)。試作結果を反映させて、実機セクタの製作を始めた後も10体目のセクタ製作まで製造手順の改善を続け、全セクタを高い精度で製作できた。

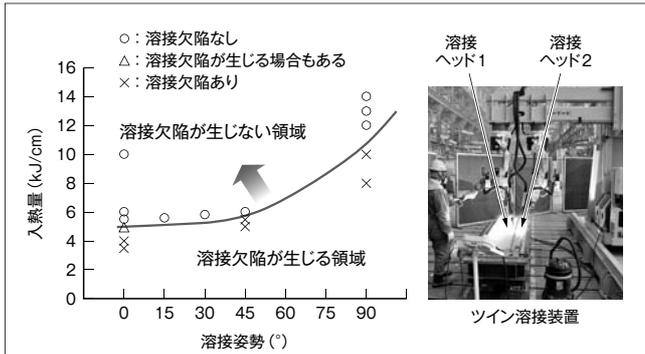


図5. ツイン溶接装置と溶接条件 — 内壁とリブ間の溶接には、ツインMAG溶接を採用した。また、溶接姿勢と入熱量の関係を測定して、溶接欠陥が生じない溶接条件を確立した。
Twin-metal active gas (twin-MAG) welding machine and welding conditions

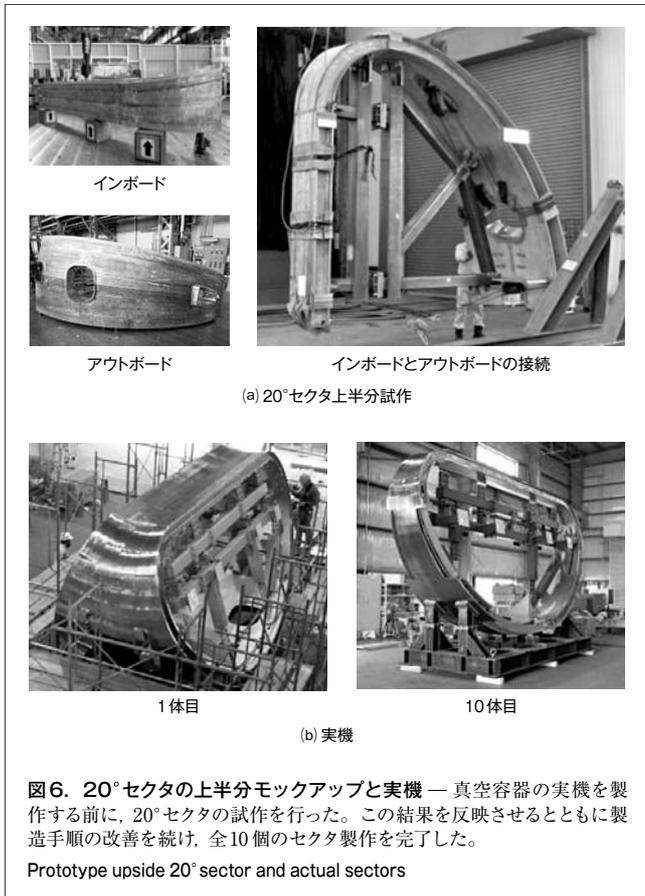


図6. 20°セクタの上半分モックアップと実機 — 真空容器の実機を製作する前に、20°セクタの試作を行った。この結果を反映させるとともに製造手順の改善を続け、全10個のセクタ製作を完了した。
Prototype upside 20° sector and actual sectors

3 重力支持脚の製作

真空容器全体を200℃程度まで加熱するベーキングと呼ばれる運転モードがあり、このとき真空容器の直径は熱膨張により約26mm大きくなる。重力支持脚にはこの変形を吸収する一方で、真空容器を床面から支え、地震時に加わる荷重やプラズマ運転中に作用する電磁力にも耐える構造が要求される。そのため、支持脚全体を上部と下部に分割し、上部を台形断面を持つ中空の支持柱、下部を板ばね構造とすることで柔軟性と剛性を併せ持つ構造を実現した(図7(a))。支持脚下部は厚さ15mmの板ばね9枚で構成されている。このような重力支持脚9体で真空容器を支持する構造として、図7(b)に示す解析モデルを用いて電磁力と地震力が作用した場合の構造解析を行った。水平方向の荷重を図7(c)に示す矢印の向きに印加した場合、印加方向と垂直に近い位置にある重力支持脚(⑦と⑧)の最外面の板ばねにもっとも大きな応力が発生するが、いずれも許容値以下であることを確認した。

支持脚下部の製作方法としては、機械加工で製作した板ばね9枚を電子ビーム溶接により接続することを計画していたが、溶接に伴う仕上げや検査の工程を省略でき、より効率的に製作する方法として、ブロック状の材料に放電加工により板

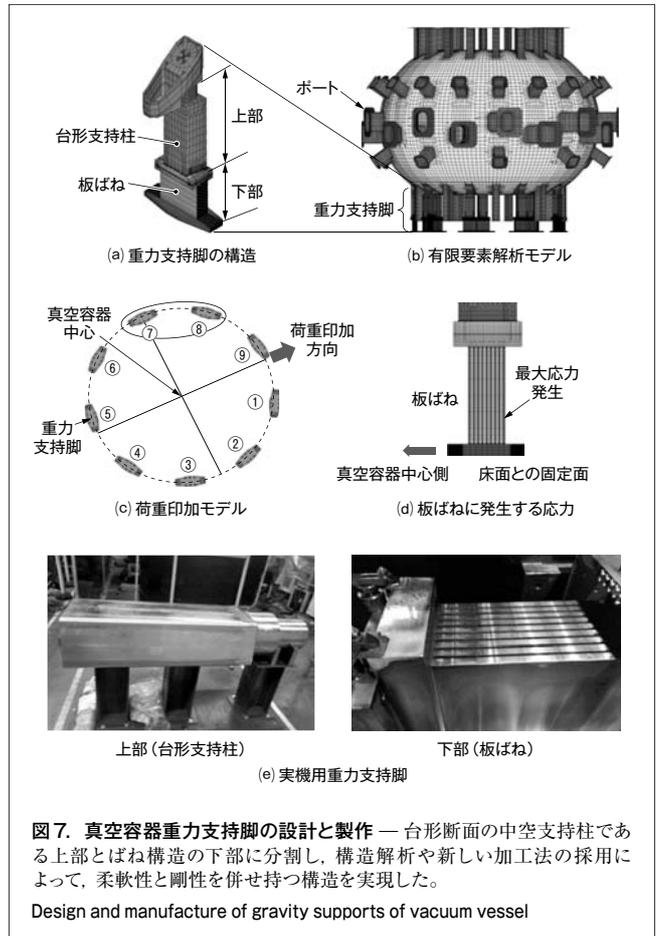


図7. 真空容器重力支持脚の設計と製作 — 台形断面の中空支持柱である上部とばね構造の下部に分割し、構造解析や新しい加工法の採用によって、柔軟性と剛性を併せ持つ構造を実現した。
Design and manufacture of gravity supports of vacuum vessel

ばね間のスリット加工を行う方式を採用した。こうして製作した重力支持脚の実機を図7(d)に示す。

4 真空容器の組立て

真空容器をJT-60SA装置に組み込むため、10個のセクタを架台の上に並べて外径約10mの円環状に溶接接続する。ただし、最後の20°分のセクタはTFコイルを真空容器の周囲に回し込んで設置するため、接続しないであけておき、最後のTFコイル組立てと同時に接続を行う(図8、図9)。

各セクタ間の溶接部は、内壁どうし及び外壁どうしの突合せ溶接であり、その厚さは主要部が18mm、アウトボード下側の一部が30mmであり、1周約30mの長さがあるため非常に大規模な溶接となる。このように大規模な溶接でありながら、他の機器との干渉を避けるために、真空容器の形状は高い精度が必要であり、更に高真空を長期間にわたって維持するために十分な溶接品質も確保する必要がある。これを実現するため、以下の手法により溶接品質を確保しながら真空容器全体の形状精度として、円環中心側の壁面位置で設計値±10mm以下を実現した。

4.1 セクタ間の溶接手順と事前準備

9セクタをまとめて配置し、8本の溶接線を同時に溶接していけば全体形状を管理でき、リスクが小さい。しかし、足場や溶接機の必要数が増えるため、溶接線ごとに溶接を行っていく方針とした⁽⁴⁾。溶接の精度と品質を確保するために行った事前準備と手順は、次のとおりである。

溶接に先立ち、セクタ単体の製作誤差に起因する溶接部の目違い(溶接面のずれ)と隙間を補正するため、溶接するセクタどうしの端面を仮合せして両端面を油圧ジャッキで修正する。その後、セクタ間を橋渡しする板を用いて端面間を拘束し



資料提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

図8. 完了した真空容器340°分の溶接接続 — 大規模な溶接でありながら、高い精度と十分な品質を確保した。この後、20°の開き口よりTFコイルなどを挿入して組み立てる。

Welding connection of 340° of vacuum vessel

溶接を行う。更に、セクタ間溶接時の変形や、単体製作時の大きな誤差を吸収するため、セクタ間の一部(8か所中5か所)に幅約100mmのセクタ端面間の形状に合わせて加工した補正板を挿入して溶接した。

4.2 レーザ計測システムによる高精度組立て

組立精度を確保するため、3次元レーザ計測システムを用いて据付けと位置調整を行った。各セクタは製作時に形状を3次元的に計測しており、このデータを基に設置誤差が最小になるように据付姿勢と位置を決めた。溶接部の収縮量は工場製作の経験から予測し、据付位置の設定に反映させた。

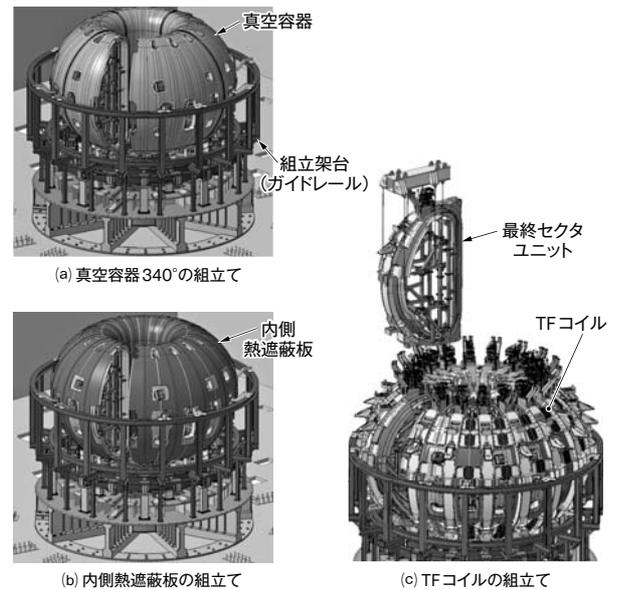
4.3 セクタ間溶接と溶接変形のモニタリング

溶接変形を抑制するため、溶着量を低減できる狭開先のTIG溶接を採用した。溶接時に内・外壁の溶着量を調整して角変形を抑えるとともに、溶接中にも3次元計測を行い、変形量を確認しながら施工した。また、各セクタは接続されるたびに位置を計測し、収縮による変位分だけ位置を補正した。この位置調整を容易に行えるように真空容器セクタの支持部には無潤滑の摺動(しゅうどう)材を組み込んだ。

5 全体組立手順の検討

当社は、2008年から2014年にかけて、トカマク装置全体の組立手順の検討と組立てに必要なツール類の設計を行ってきている⁽⁵⁾。

現在、真空容器340°分の組立てが完了しており(図8、図9(a))、



資料提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

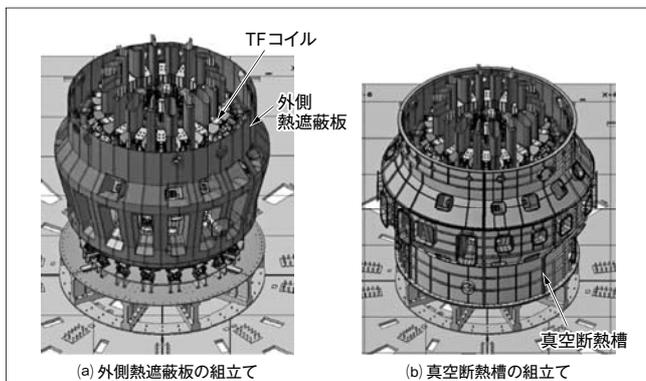
図9. 内側熱遮蔽板とTFコイルの組立て — 真空容器の完成後、その周囲に内側熱遮蔽板とTFコイルを組み立てる。

Assembly of vacuum vessel thermal shield and toroidal coils

今後、真空容器周囲への内側熱遮蔽板の設置 (図9(b)) やTFコイルの組立て (図9(c)) などを行う。

内側熱遮蔽板は、20°分の開口部から挿入し、真空容器に沿って回し込んで組み立て、その後、TFコイルの組立てを2016年から行う。TFコイルは全高約10 m、質量が1台当たり22 tの大型機器であるが、中心位置精度1 mm以内で据え付けなければならない。組立て途中の自重による変形まで考慮する必要があるため、レーザ計測システムによりコイル位置を計測し、位置ずれを補正する機構をコイルの仮支持構造物に組み込む。TFコイル18個のうち最後の1個と真空容器の最終セクタを組み合わせて20°分の開口部に挿入し、TFコイルを組み立て、真空容器の最終セクタも両側面を既設真空容器と接続すれば、TFコイルが周囲を取り囲んだ円環状の真空容器 (図9(c)) が完成する。

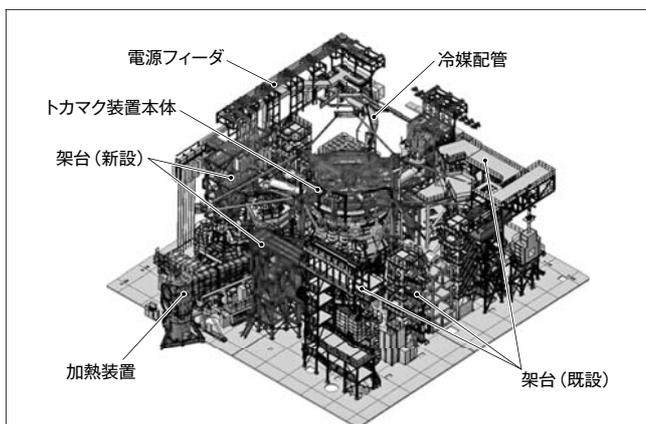
次のステップでは、この状態のTFコイルの外側に、円形で



資料提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

図10. 外側熱遮蔽板と真空断熱槽の組立て— TFコイルの組立て完了後に、その周囲にPFコイルや、外側熱遮蔽板、真空断熱槽などを組み立てる。

Assembly of cryostat thermal shield and cryostat



資料提供：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

図11. JT-60SAの組立完了予想図— 装置本体の周囲に電源フィーダや、冷媒配管、加熱装置、計測器などを設置する架台などが設けられる。

Rendering of completed assembly of JT-60SA

水平に置かれるポロイダル磁場 (PF) コイル6個を鉛直方向に並べて設置し、この後に各超電導コイルの冷媒配管や電源フィーダを敷設しながら外側熱遮蔽板を取り付け (図10(a))、最後に真空断熱槽を装置外周に組み上げる (図10(b))。

トカマク装置本体の組立てと並行して、周囲では低温機器用のバルブボックスや、超電導コイルのターミナルボックス、架台、真空排気設備、電源フィーダ、冷媒配管の工事などを行い、図11に示す組立完了に至る。プラズマ加熱装置など各種の構成機器は複数の国内外ベンダーが製作し、周辺部の架台やユーティリティ系の工事も同時並行で行う必要があり、当社は一連の機器の組立手順を検討するとともに、工程やエリア計画といった現地工事計画を策定している。

6 あとがき

当社は、2008年の要素試作開始から2015年の現地溶接完了まで、8年間にわたりJT-60SA真空容器の製作と据付けに取り組み、その過程で大型溶接構造物を精度よく製作し、据え付ける技術を確立した。今後この経験を、TFコイルなど大型機器の組立てにも生かすとともに、装置全体組立ての完遂に向けて主導的な役割を担っていく。

文献

- (1) Pietro, E. D. et al. Overview of engineering design, manufacturing and assembly of JT-60SA machine. *Fusion Eng. Des.* **89**, 9-10, 2014, p.2128 - 3135.
- (2) Masaki, K. et al. JT-60SA vacuum vessel manufacturing and assembly. *Fusion Eng. Des.* **87**, 5-6, 2012, p.742 - 746.
- (3) Asano, S. et al. Fundamental welding R&D results for manufacturing vacuum vessel of JT-60SA. *Fusion Eng. Des.* **86**, 9-11, 2011, p.1816 - 1820.
- (4) Shibama, Y. et al. Welding technology on sector assembly of the JT-60SA vacuum vessel. *Fusion Eng. Des.* **98-99**, 2015, p.1614 - 1619.
- (5) Shibanuma, K. et al. Assembly study for JT-60SA tokamak. *Fusion Eng. Des.* **88**, 6-8, 2013, p.705 - 710.



早川 敦郎 HAYAKAWA Atsuro

電力システム社 原子力事業部 原子力先端システム設計部 主務。核融合機器のエンジニアリング業務に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



水牧 祥一 MIZUMAKI Shoichi, Ph.D.

電力システム社 京浜事業所 機器装置部主査。博士 (工学)。核融合・超電導機器の設計及びエンジニアリング業務に従事。低温工学・超電導学会、プラズマ・核融合学会会員。
Keihin Product Operations



濱田 崇史 HAMADA Takashi

電力システム社 京浜事業所 溶接センター。溶接技術開発及びエンジニアリング業務に従事。
Keihin Product Operations