

核融合エネルギー開発への取り組み

Activities toward Realization of Nuclear Fusion Reactor

仙田 郁夫 大田 裕之 佐藤 潔和

■ SENDA Ikuo ■ OTA Hiroyuki ■ SATO Kiyokazu

核融合発電の実現を目指して、核融合実験装置の開発が進められており、東芝は、これらのプロジェクト向けに機器を開発し納入している。既に国内で運用中のLHD (Large Helical Device) 向けに大型超電導コイルなどの主要機器を納めた。

現在、日欧協力でJT-60SA (Super Advanced) の建設が、また、わが国を含む7か国の国際協力でITER (国際熱核融合実験炉) の建設が本格的に始まろうとしている。当社は、JT-60SA向けの真空容器の供給と装置全体の組立て、及びITER向けのトロイダル磁場コイルや炉内遠隔保守装置などの試作と実機の製作を通じて、これらのプロジェクトに参画している。

With the aim of realizing a nuclear fusion reactor, experimental nuclear fusion reactors are currently under development through international cooperation.

Toshiba has been contributing to related domestic and international projects by supplying main equipment, as exemplified by the large superconducting magnetic coils for the Japanese Large Helical Device (LHD) project. We are currently manufacturing a vacuum vessel and participating in the assembly studies for the JT-60 Super Advanced (JT-60SA) Tokamak, which is a joint international research and development project involving Japan and Europe. We have also been engaged in research and development of equipment for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) Project in collaboration with seven countries including Japan, which has entered the construction phase, including the design work for the serial production of toroidal field coils and a remote maintenance system.

1 まえがき

核融合発電は、水素など軽い元素の原子核どうしの融合反応で発生するエネルギーを利用する、将来有望なエネルギー源である。高い安全性や、豊富な燃料、環境に優しいという特長から、国内及び国際協力による実験炉プロジェクトにおいて、燃焼運転とその高効率化のための開発が進められている。

核融合装置は、反応する燃料を磁場で閉じ込める磁気閉込め核融合装置と、小さなカプセル内の燃料をレーザーで加熱圧縮する慣性核融合装置に大別される。東芝は、主に磁気閉込め装置向けに主要機器を提供することで、その開発に貢献してきた。今までに納入した物理実験装置及び機器は、国内プロジェクトではJFT, JT-60, JT-60U (独立行政法人 日本原子力研究開発機構 (以下、原子力機構と略記)), LHD (大学共同利用機関法人 自然科学研究機構 核融合科学研究所)、及び大学の実験設備向けに、大型磁場コイル、加熱・電流駆動装置、電源などがあり、海外プロジェクトでは、DIII-D真空容器 (米国のGeneral Atomic社) やHot Plasma Experimental Device (インドのサハラ研究所) 向けなど豊富な実績を持っている。

現在建設が進められているITERやJT-60SAは、核燃焼運転や長時間運転など原型炉に向けた技術開発を目的としており、核融合エネルギーの開発は核融合発電に向けて工学技術の開発段階にある。

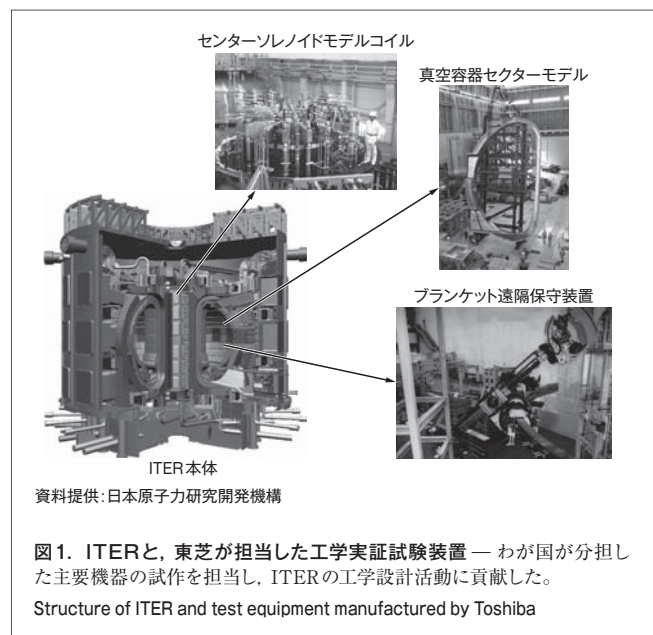


図1. ITERと、東芝が担当した工学実証試験装置 — わが国が分担した主要機器の試作を担当し、ITERの工学設計活動に貢献した。

Structure of ITER and test equipment manufactured by Toshiba

現在当社は、ITER, JT-60SA, 及びLHDなど、国内及び国際協力プロジェクトに積極的に参画している。

2 ITERへの取り組み

当社はITERプロジェクトの初期から参画しており、工学実証試験では、わが国が分担した主要機器の試作を担当した

(図1)。センターソレノイドモデルコイルは最大磁場 13 T (T: テスラ) を発生するとともに 1.2 T/s の磁場変動に耐える。真空容器セクターモデルでは大型溶接構造物 (9 (幅) × 15 (高さ) m) を公差 ± 3 mm で製作した。また、ブランケット遠隔保守装置では、直径 16 m の軌道展開と 4 t の模擬ブランケットを操作するなどの成果を上げ、ITER 工学設計活動に貢献した。

ITER は、建設サイトがフランスのカダラッシュに決まり、参加国間の調達分担が取り決められた。当社は、以下に述べるトロイダル磁場コイル (TFC) の実規模試作や、ブランケット遠隔保守装置の調達契約前の設計、試作などを担当している。

2.1 TFCの実規模試作

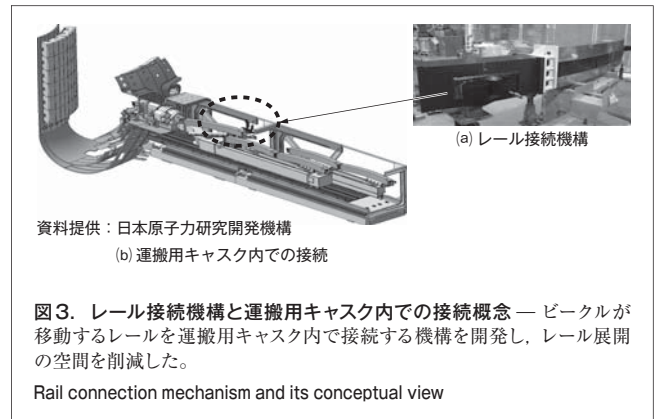
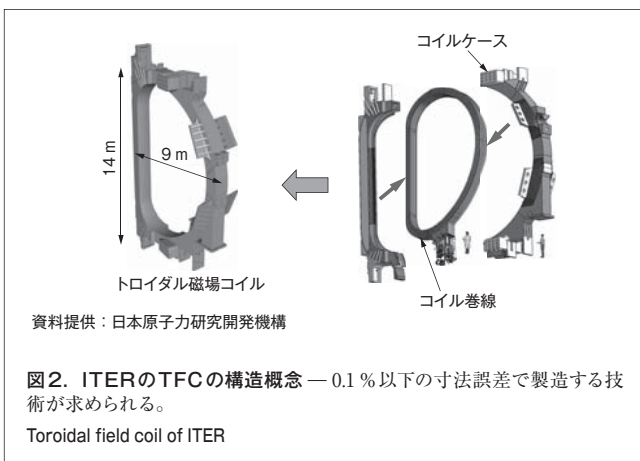
ITER の TFC は、最大 12 T の高磁場により高温、高密度のプラズマを閉じ込める超電導コイルで、外形寸法 9 (幅) × 14 (高さ) m、質量約 300 t の大型構造物である。

わが国の分担は、コイルケース 19 セットとコイル巻線 9 セットの製作、及びトロイダルコイル 9 個の組立てである。高い精度の磁場分布を実現するために、0.1 % 以下の寸法誤差で製造する技術が求められ、コイルの巻線技術、機械加工、及び溶接などの製造技術の検証が不可欠である。当社は、実規模試作において、コイル巻線やコイルケース構造物の製造性の検証を進めており (図2)、実機製作に向けてコスト低減などの活動を展開する計画である。

2.2 ブランケット遠隔保守装置の調達前の設計、試作

ITER では、核融合反応で発生する中性子で炉内機器が放射化されるため、機器を遠隔で保守する必要がある。ITER 遠隔保守システムは、ブランケットやダイバータなどのプラズマ対向機器を炉内及びホットセル建屋において保守するための装置と、これら装置の制御システムから構成される。わが国は、その中で、ブランケット遠隔保守装置の調達を担当する。

ブランケット遠隔保守装置は、工学設計活動において検証を実施したビークル方式を採用している (図1)。この方式では、炉内に展開したレール上をビークルが走行する。工学設計以降も、構造や運動性と制御性について合理化の検討とそれ

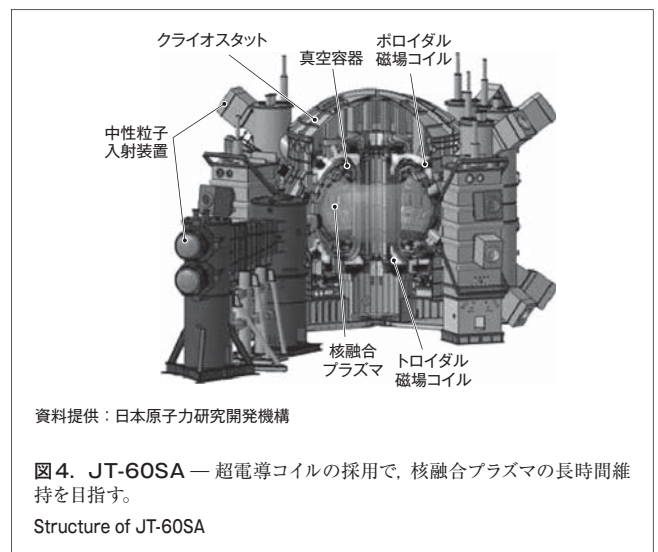


に関連する開発を継続してきた。例えば、分割レールを運搬用キャスク (容器) 内で接続する機構を開発し (図3)、レール展開の空間を削減した。また、制御装置ではバーチャルリアリティを活用し、操作性を向上させる設計を進めている。今後、この装置は実機製作の段階に進み、2016年ころに現地試験を終え、ブランケットの初期組立てに使用される計画である。

3 JT-60SAへの取組み

JT-60SAは、日欧協力の幅広いアプローチ (BA) 活動のなかで、ITERの補完装置として位置づけられる (図4)。既設のJT-60の設備を最大限に利用しながら、磁場コイルを超電導化することで核融合プラズマを 100 s 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が目的で、原子力機構の那珂核融合研究所内に建設される。装置の製作はわが国と欧州の共同で進められ、2012年1月に建設着手、2016年3月にプラズマ初点火が計画されている。

当社は、図5(a)に示すトーラス形状の真空容器の製作を担当する。真空容器は内壁、外壁、及び補強リブから成る二重



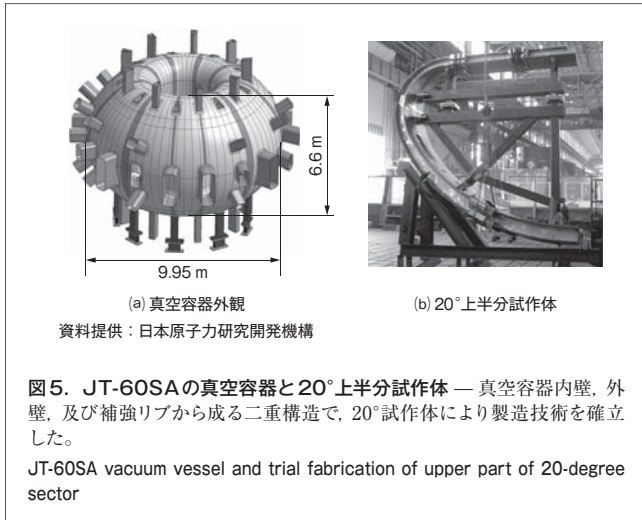


図5. JT-60SAの真空容器と20°上半分試作体 — 真空容器内壁、外壁、及び補強リブから成る二重構造で、20°試作体により製造技術を確認した。

JT-60SA vacuum vessel and trial fabrication of upper part of 20-degree sector

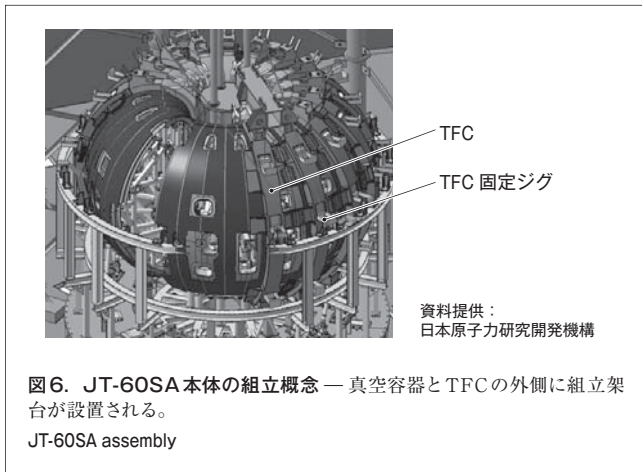


図6. JT-60SA本体の組立概念 — 真空容器とTFCの外側に組立架台が設置される。

JT-60SA assembly

壁構造である。トラス方向20°上半分の試作(図5(b))によって製造技術を確認し、2009年11月から実機の製作を開始した。40°で分割した真空容器を順次製作し、2014年度末までに現地で組立てを完了する計画である。

また、原子力機構と協力して、装置全体の組立設計を進めている(図6)。当社は、欧州が製作を担当するTFCなどJT-60SA本体の組立手順と組立に必要なジグの設計を担当するとともに、既設電源の改造や、運転の長時間化に寄与する新規電源の設計などにも参加している。

4 LHDへの取り組み

LHDは、核融合科学研究所が、わが国独自方式のヘリカル型装置による核融合研究を本格的に行うため、1990年から8年計画で建設した装置である(図7)。当社は、これまで培ってきた超電導技術やプラズマ加熱システムの製作実績などを生かして直径11.7 mの世界最大級の強制冷却型超電導ポロイダル磁場コイルや、負イオン源を用いた出力5 MWを超える中性粒子入射加熱装置(NBI)、エネルギー回収型168 GHz

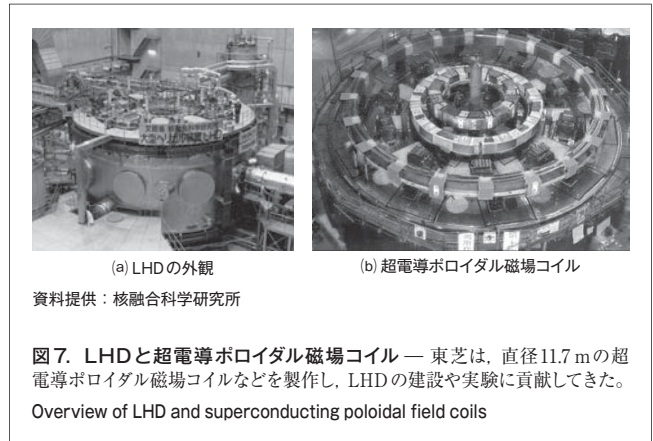


図7. LHDと超電導ポロイダル磁場コイル — 東芝は、直径11.7 mの超電導ポロイダル磁場コイルなどを製作し、LHDの建設や実験に貢献してきた。

Overview of LHD and superconducting poloidal field coils

ジャイロトロンによる電子サイクロン共鳴加熱装置(ECH)などを製作し、LHDの建設や実験に貢献してきた。

LHDのプラズマ閉込め性能を向上するには高精度の磁場が必要であり、コイルの寸法誤差を2 mm以下に抑えるため、実規模のコイルの試作結果を反映して実機を製作した。NBIプラズマ加熱装置用の負イオン源では、改良を重ねた結果、5~6 MWの安定出力を達成した。また、電源装置では、当社の水力発電技術を生かして開発した立軸フライホイール発電機技術を適用し、250 MVAの設備をLHD向けに納入した。

5 あとがき

核融合は、人類の将来のエネルギー問題や環境問題を解決する有望なエネルギー源と考えられてきたが、ITERの建設によって、いよいよ核融合エネルギーの開発に向けて動き出した。

当社は、ITERやJT-60SAの本体、超電導コイル、遠隔保守装置のほか、関連機器の製造及びシステムの取りまとめを通してこれらのプロジェクトに積極的に参画し、核融合エネルギーの実用化を視野に入れた開発に取り組んでいく。



仙田 郁夫 SENDA Ikuo, Ph.D.

電力システム社 新技術応用事業推進統括部 新技術応用システム技術部主幹、理博。核融合システムの開発に従事。日本原子力学会、プラズマ・核融合学会会員。
New Technology Application Business Div.



大田 裕之 OTA Hiroyuki

電力システム社 原子力事業部 原子力開発設計部長。新型炉などの開発に従事。日本原子力学会会員。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



佐藤 潔和 SATO Kiyokazu, D.Eng.

電力システム社 京浜事業所 機器装置部長、工博。加速器など先端機器の設計・製作に従事。日本原子力学会、日本物理学会、日本加速器学会、日本放射光学会会員。
Keihin Product Operations