

ITERブランケット遠隔保守装置技術

Technologies for ITER Blanket Remote Handling System

重松 宗一郎

■ SHIGEMATSU Soichiro

松蔭 武士

■ MATSUKAGE Takeshi

島村 光明

■ SHIMAMURA Mitsuaki

7極の国際協力で建設が進められているITER (国際熱核融合実験炉) では、核融合反応で発生する中性子を遮蔽するブランケットの据付・保守作業を遠隔で行うため、ITERブランケット遠隔保守装置 (BRHS) が使用される。

東芝は、BRHSのうち炉内に展開する機器の製作を担当し、2017年からの実機製作に向けた詳細設計及び要素技術の検証を進めている。現在、1992年から2001年までに実施したITER工学設計活動における実規模での研究開発などプロジェクト発足当初からの開発実績に基づき、地震荷重などITER国際核融合エネルギー機構 (以下、ITER機構と略記) の仕様に合致させるための設計最適化を行っている。また、実機製作までに解決すべき多様な技術課題には、実規模研究開発及び、制御方法やブランケット冷却配管の切断、溶接などのツールに関する要素技術開発の実績を踏まえ、ITER機構及び国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 (JAEA) と連携しながら開発に取り組んでいる。

At the ITER Tokamak, currently under construction as an international experimental nuclear fusion research and engineering project, a blanket remote handling system (BRHS) will be used to facilitate the installation and maintenance of blanket modules, which serve as a shield against neutrons produced in the fusion reaction, by robotic devices such as manipulators.

Toshiba has been engaged in the development of the ITER BRHS based on its experience accumulated through design studies and a full-scale demonstration using a mockup during the ITER engineering design activities (EDA) implemented from 1992 to 2001. We are now carrying out both the detailed design to conform with the required specifications, such as earthquake loads, etc., and the verification of elemental technologies for the ITER BRHS aimed at the manufacturing of equipment to be deployed in the vacuum vessel, with the start of series production scheduled for 2017. By making use of technologies cultivated through the development of manipulator control methods and cutting and welding tools for the blanket cooling pipes, we are making efforts to overcome various issues in collaboration with the ITER Organization and the Japan Atomic Energy Agency (JAEA).

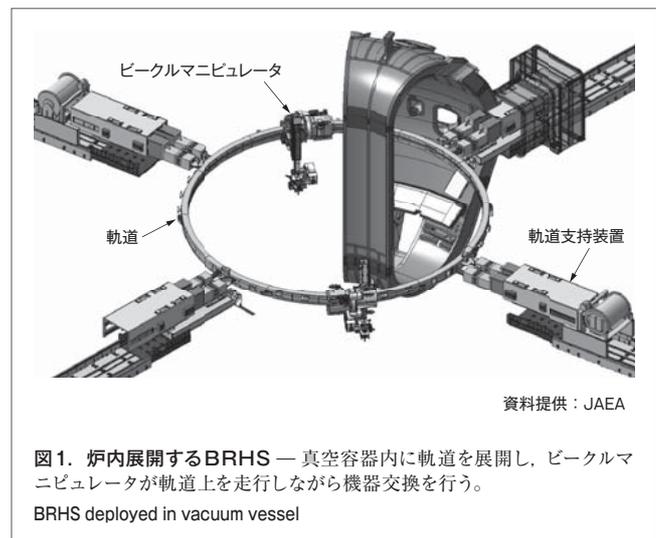
1 まえがき

核融合装置の炉内機器は、核融合反応で発生する高エネルギー中性子 (14 MeV) の照射を受けて損傷するため計画的な交換が必要である。またITERは工学試験装置であるため、中性子照射による損傷だけでなく、核融合反応を発生させるプラズマとの接触などによる炉内機器の損傷が想定され、非計画的な交換も効率的に行う必要がある。更に炉内機器は中性子により放射化するため、BRHSの導入が必須である。

東芝は、BRHSのうち炉内に展開する機器の製作を進めている。ITERの運転計画に影響を与える重要な機器であり、ここでは実機製作に向けた当社の取組みについて述べる。

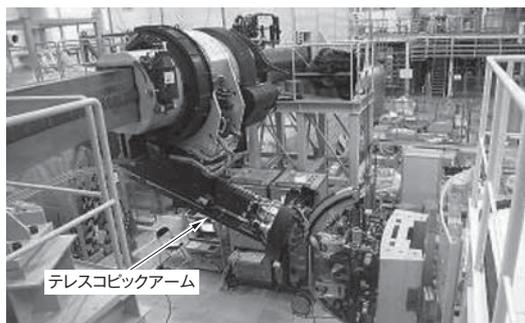
2 BRHSに求められる機能

ITERの炉内機器は、中性子を遮蔽するブランケット、燃焼プラズマから漏れる熱を処理するダイバータ、及び計測装置やプラズマ加熱装置などから成る。ブランケットはプラズマに面する第一壁と遮蔽壁とを分離できる構造を持つ。わが国はBRHSの製作を担当しており、当社も開発の初期段階から参



画している。BRHSで炉内に展開する機器 (図1) の主な仕様は、次のとおりである。

- (1) 可搬最大質量: 4.5 t
- (2) (ガンマ) γ 線環境: 250 ~ 500 Gy/h
- (3) 耐放射線積算量: 1 MGy



資料提供：JAEA

図2. 実規模ビークルマニピュレータ — ITER 工学設計活動で製作し試験を実施した。

Full-scale demonstration of vehicle manipulator in ITER EDA

- (4) 計画保守：総数440体の第一壁を2年間で交換
- (5) 非計画保守：第一壁3体を2か月で交換

BRHSは、運転開始後のブランケット保守作業の他、初期組立て時のブランケット据付作業にも使用される計画である。

当社は、ITER 工学設計活動においてBRHSの設計及び実規模研究開発を担当し、実規模ビークルマニピュレータの試作などを行った(図2)。その後合理化設計などを経て、BRHSのうち炉内に展開する機器の第I期製作作業を2015年2月に受注した。現在、仕様検討の他、次章で述べる技術課題に取り組んでおり、2017年からの実機製作に向けた設計作業を進めている。第I期に含まれない補機類や、制御装置、冷却配管の切断・溶接装置などのツール類は今後発注が予定されている。

3 技術課題への取組み

ブランケットの保守では、真空容器ポートに固定された軌道支持装置で4点支持される軌道を炉内に展開し、その軌道上を伸縮可能なテレスコピックアームを持つビークルマニピュレータが走行しながら、先端のエンドエフェクタ及び把持装置を用いて炉内機器の交換を行う。ITERではブランケットの計画交換と非計画交換の両方への効率的対応を考慮し、この方式が採用された。

BRHSの全体概要を図3に示す。通常、BRHSはホットセル建屋に保管される。使用時には、機器をキャスクに載せ、トカマク建屋の回廊を經由してトカマク本体のポートに接続され、ポートから軌道やビークルマニピュレータを炉内に展開する。作業実施前に、ホットセル建屋又はアセンブリ建屋のテストスタンドで検証試験を実施する。これら機器を、ホットセル建屋に設置された制御盤や動力盤、及び制御建屋の制御室に設置されたマスタマニピュレータや運転支援装置により操作する。このように、BRHSには多くの機器や施設との協調が求められる。

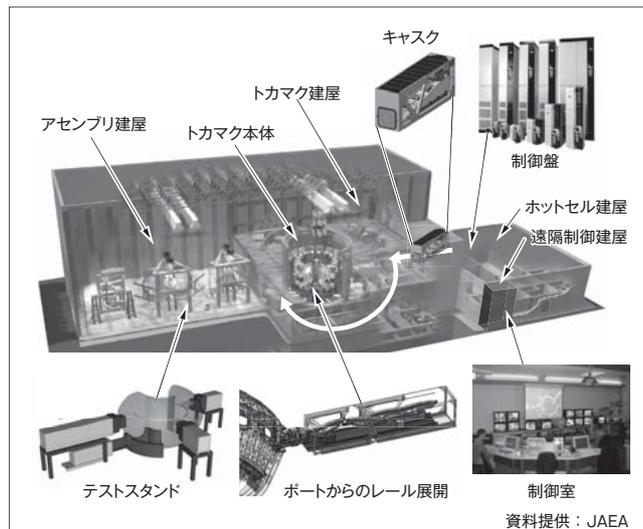


図3. BRHSのシステム構成 — BRHSはホットセル建屋で保管され、使用時には多くの機器や施設と協調して作業を行う。

System configuration of BRHS located in ITER buildings

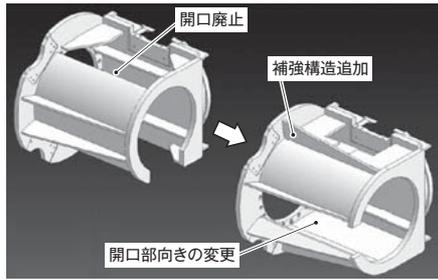
3.1 機構設計

BRHSは最大4tのブランケットを把持し搬送する必要があるため、重量物を様々な姿勢で取り扱うために機械的強度が要求される。また、初期組立ての際には近くに作業員がいることや、把持したブランケットが落下した場合安全機器である真空容器を損傷する可能性があることから、安全相当(Safety Relevant)機器に分類される。地震発生時には次の2段階の設計健全性が求められる。

- (1) 機能保持健全性 (SL1事象) 事象発生後の機能健全性を確保すること
 - (2) 施設保持健全性 (SL2事象) 脱落や分離などで、安全機器である真空容器やキャスクを損傷させないこと
- 更に、BRHSは真空容器内で稼働するため、潤滑部には固体潤滑を適用するか、グリースを使用する場合はグリースがたれて真空容器内に付着しないよう二重シールを施した密閉構造にする必要がある。

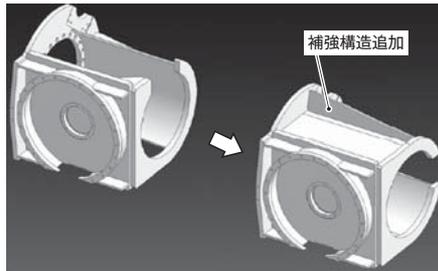
これらの条件を総合的に満たす設計を実施するため、BRHSの構造解析を実施し、その結果を各部の設計条件として構造の最適化を進めている。構造設計として、テレスコピックアームを軌道に支える部位のフレーム構造体であるビークルフレームの設計見直し例を図4に示す。ビークルフレームには、ブランケットを把持しテレスコピックアームを伸ばした状態で大きなモーメントが発生するため、開口部などの構造変更や補強リブの追加で構造強度を増加させる見直しを行った。

また耐放射線性の仕様を満たすため、炉内で使用するモータや、計測器、潤滑剤、潤滑部を覆うベローズ、配線部品などは耐放射線性が検証された部材を使用する。耐放射線性が未検証の機器は、製作開始までに試験で検証する。



変更前

変更後



変更前

変更後

資料提供：JAEA

図4. ビークルフレームの補強設計 — 地震荷重に耐えるためにビークルフレームの補強設計を実施した。

Design for reinforcement of vehicle frame

3.2 制御設計

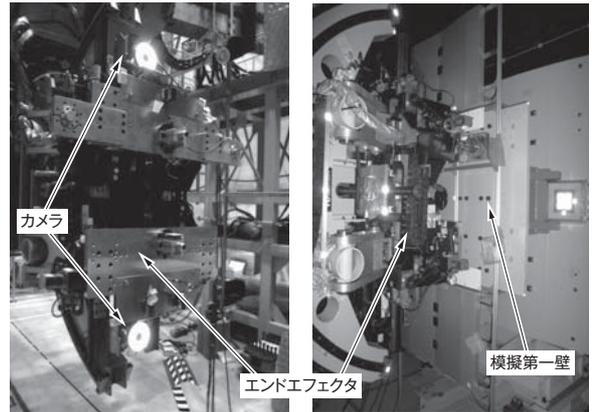
炉内のマニピュレータは、制御室のマスタマニピュレータを用いて遠隔で操作される。ブランケット取付けでは、把持爪がブランケット表面から10 mm手前まで接近した時点で、手先を位置精度 ± 5 mm、姿勢精度 $\pm 0.4^\circ$ で制御し、その後は取付け座とブランケットとの取合い部テーパ構造により、挿入時に ± 0.25 mmの位置精度を達成する。4 tの重量物を把持しながら、手先を仕様の位置精度で制御するため、次の手順を適用した。

(1) BRHS座標系での制御 BRHSの座標系及び、ブランケット把持時の軌道やビークルマニピュレータのたわみを評価する構造シミュレータにより、手先位置を制御

(2) 画像処理による位置制御 ビークルマニピュレータ搭載カメラにより炉内機器の把持穴を検出し、これを画像処理することで手先位置を同定して仕様の精度に制御

この画像処理による手先位置同定システムを試作し、JAEAの実規模試験装置を用いて制御シナリオを検証した(図5)。エンドエフェクタの上下に設置したカメラを用いてブランケットの把持穴を模擬したマークを検出し、画像処理によりエンドエフェクタの位置と姿勢を求め、取付け座に対する相対的な位置制御を行う。真空容器内を模擬した暗室で試験した結果、炉内照明の輝度及び位置の最適化により、要求精度が得られることを確認した。

BRHSの制御システムには、ITERプラント全系制御との協



資料提供：JAEA

図5. 画像処理による手先位置同定システムの検証試験 — JAEAの実規模試験装置を用いて、ビークルマニピュレータ搭載カメラの画像を処理して手先位置を同定する試験を実施した。

Demonstration of identification of end-effector position by image processing

調運用や、BRHSの運転に必要な多数の検出器データの処理、安全確保のための制御ロジック構築などの技術課題があり、今後ITER機構やJAEAと連携して取り組む。

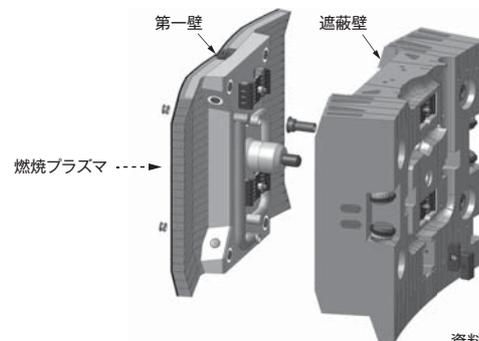
3.3 ツール設計

ITERのブランケットは第一壁と遮蔽壁に分離する構造(図6)を持ち、真空容器内面にボルトとキーで固定される。また、第一壁と遮蔽壁は水冷却であり、交換の際に実施する冷却配管の切断と溶接の技術は、遠隔保守上の大きな課題である。限られた空間で作業を行うため、ツールの試作試験を実施しながら要素技術開発を進めている。遠隔保守に必要なツールは多種多様で、ブランケットの設計とも密接に関わることから、ITER機構やJAEAと連携して設計の最適化を図る。

主なツールの開発状況について次に述べる。

3.3.1 冷却配管切断ツール 炉内作業のため切り粉

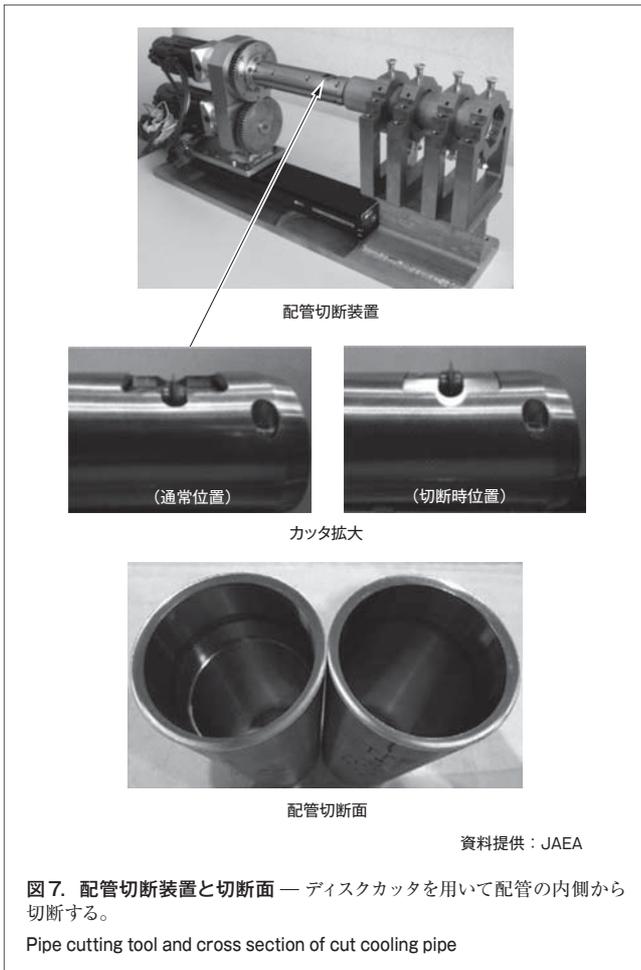
の発生を低減させるとともに、切断面の形状が再溶接に適し



資料提供：JAEA

図6. 分離方式ブランケット — 第一壁と遮蔽壁に分離できる構造で、交換の際には冷却配管を切断したり溶接したりするためのツールが必要になる。

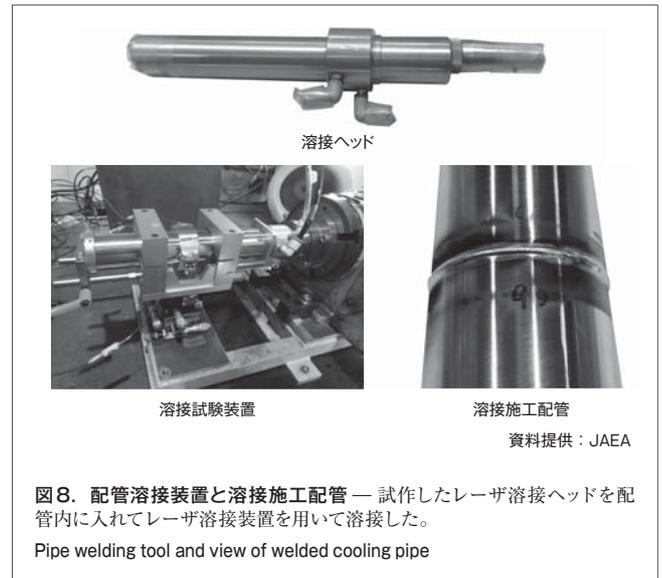
Blanket module incorporating separated first wall and shield block system



ていることが求められる。試作した配管切断装置とこの装置で切断した配管断面を図7に示す。配管の内側からディスクカッタで切断する方式を採用し、切り粉がほとんど発生しないこと、切断面が再溶接可能な形状であること、及び切断姿勢に依存せず再現性の良い切断が繰り返し可能であることを検証した。

3.3.2 冷却配管溶接ツール 中性子照射部の再溶接性や全姿勢での溶接施工性を考慮し、レーザー溶接の適用を主案に検討を進めている。試作したレーザー溶接ヘッド、実機相当の配管を用いた溶接試験装置、及び溶接後の配管を図8に示す。切断と同様に、配管内に溶接ヘッドを入れて内側から施工するため、限られた空間で作業可能な多機能ヘッドが求められる。開発したヘッドは、注入するシールドガスの流れやレーザー光の配管への入射角を調整することで溶接ヘッド光学系の損傷を低減する機能と、溶接時に発生するヒュームの吸引や開先を目視検査する機能を備える。溶接試験装置を用いた溶接条件の最適化により、良好な溶接が可能であることを検証した。

3.3.3 溶接部検査ツール 配管の目視検査とリーク試験用ツールの開発と検証を計画している。



3.3.4 レスキューツール、把持ツール、ブランケット固定用ボルト締結ツール 炉内で動けなくなった装置を回収するにはレスキューシステムが必要である。BRHSは外部から駆動できる外部駆動軸を持っており、万一動けなくなっても、レスキューツールを用いて外部駆動軸にアクセスして装置を駆動して回収できる。レスキューツール、把持ツール、及びボルト締結ツールは、炉内構造のモックアップによる動作試験を計画している。

4 あとがき

当社は、BRHSのうち炉内に展開する機器の第I期製作作業を2015年に受注し、詳細設計と要素試験を進めている。2017年からの実機製作に向け、ITER機構やJAEAと連携して設計の最適化に取り組んでいる。



重松 宗一郎 SHIGEMATSU Soichiro
電力システム社 原子力事業部 原子力機械システム設計部主務。
核融合向け遠隔保守装置の開発・設計に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



松蔭 武士 MATSUKAGE Takeshi
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。
核融合及び先端システム機器の制御装置の開発・設計に従事。
Nuclear Energy Systems & Services Div.



島村 光明 SHIMAMURA Mitsuki
電力システム社 京浜事業所 機器装置部主査。
原子力関連施設の自動遠隔機器や装置の設計・製作に従事。
Keihin Product Operations