

連載講座 よくわかる核融合炉のしくみ

第10回 炉内機器を修理する遠隔保守ロボット

大型重量物を高精度で操作する最先端ロボット技術

日本原子力研究開発機構 柴沼 清



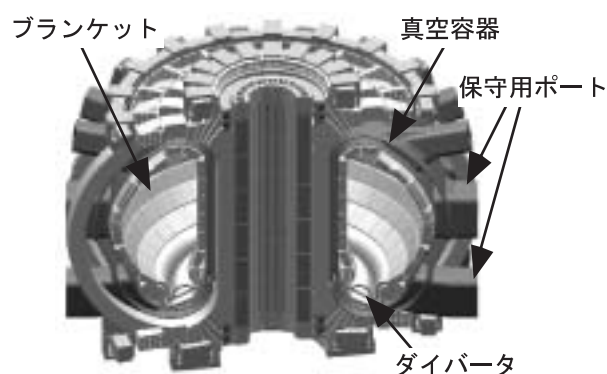
はじめに

核融合炉のブランケットやダイバータなどの炉内構造物は、核融合反応時に発生する中性子により放射化され、核融合反応を停止した後もガンマ線の線量率が最大500 Gy/hに達します。このため、これらの炉内構造物が損傷したり故障した場合には、人が炉内に近づくことができないために、これらの保守はロボットにより行う必要があります。本稿では、国際熱核融合実験炉 ITER を例に取り、核融合炉の炉内構造物の保守を行う代表的なロボットについて、求められる機能や研究開発の現状を紹介しします。

炉内構造物の保守を行うロボットに求められる機能は何ですか？

ITER の代表的な炉内構造物であるブランケット (ここでは中性子遮蔽用ブランケット) やダイバータはドーナツ状の真空容器内に取り付けられています。これらの構造物が損傷した場合には、まず損傷部分をロボットにより真空容器内(炉内)で取り外します。次に ITER トカマク本体の外部に設置された炉内構造物の修理を行うホットセルという施設に搬送します。ここで損傷部の修理を行ってから、真空容器内に搬送し、最後にロボットにより元の場所に取り付ける手順となります。ドーナツ状の真空容器の内壁のほとんどは、ブランケットとダイバータにより覆われています。これらのブランケットやダイ

バータの交換保守を行うためには、真空容器の外に一たん取り出す必要があります。このため、第1図に示すように、真空容器の赤道部と下部に開けられた狭い保守用ポートから取り出せるように、ブランケットの場合約400個、ダイバータの場合54個のユニット構造体に分割されています。なお、このユニット構造を採用することにより、特にブランケットの場合、局所的な損傷に対して該当するユニット構造体のみを保守対象とすることができ、効率的な保守が可能となります。1個のブランケットおよびダイバータの重量や大きさはそれぞれ、約4トンで約2 m(幅)×1 m(高さ)×0.5 m(厚さ)、約11トンで約3.5 m(長さ)×2 m(高さ)×0.4~0.9 m(厚さ)となります。これを、ロボットによりプラズマ対向面における段差として±2 mm以下の高精度で設置する必要があります。特に、ブランケットでは、ブランケットに発生する電磁力を真空容器により強固に支持するために、さらに厳しい精度設置が要求されています。具体的には、ブランケットには、真空容器との取り合い構造(キー構造)部で不用なガタがないように、±0.25 mm以下の高精度な設置精度が要求されています。このように、ITERの炉内構造物の保守では、高い放射線環境下の中で、ドーナツ状



第1図 ITERの炉内構造物

Intelligible Seminar on Fusion Reactors (10) Remote Maintenance Robot for In-Vessel Components-Advanced robot technology for handling of large-heavy components with high positioning accuracy: Kiyoshi SHIBANUMA. (2005年 8月30日 受理)

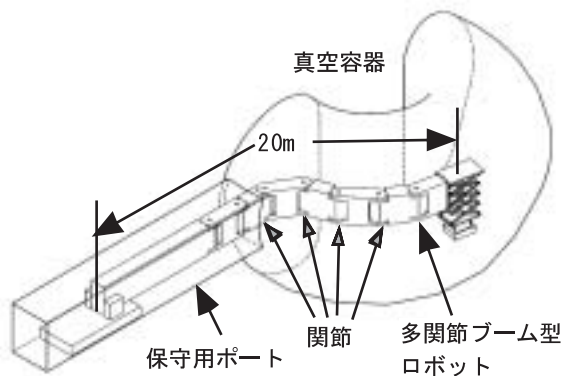
の狭い真空容器の中に侵入し、大型重量物を高精度で操作可能な移動式のロボットが必要となります。

また、炉内構造物は高温プラズマを包み込むように設置されていることから、高熱負荷を受けるため冷却水により冷却され、各ユニットには冷却配管が接続されています。このため、炉内構造物の保守交換時には、狭い空間的な制約の中で冷却配管の切断や溶接を可能とするロボットも必要となります。

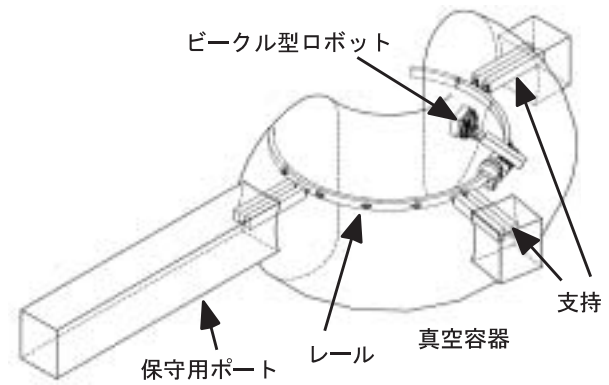
・大型重量物を高精度で操作するロボットとはどのようなロボットですか？

代表的な炉内構造物であるブランケットの保守用ロボットについて、その特徴を次に説明します。

ブランケット保守用ロボットには、狭くて長いドーナツ状真空容器内で、安定に4トンのブランケットを高精度で取り扱うことが要求されます。また、ブランケット等の炉内構造物は、低強度の構造体であり、その上に直接ロボットの支持を取ることはできない等の制限があります。このため、例えば、第2図の多関節ブーム型ロボットは、欧州連合の核融合装置であるJET(Joint European Torus)の容器内保守用ロボットとして開発されました。これは、炉内構造物に接触することなく、狭くて長い場所に移動可能となります¹⁾。このロボットは、多関節型の片持ち梁構造であり、実際に遠隔操作により250 kgのダイバータ板の保守交換に使用されました。これを例えば、ITERに適用した場合、約10 mの主腕(片持ち梁)を介して最大長6 mの副腕(ロボットアーム)の先端に4トンのブランケットを把持し、所定の場所に ± 0.25 mmの以下の高精度で設置することが要求されます。この場合、片持ち梁構造のために、剛性が低下し、たわみや振動によりブ



第2図 多関節ブーム型ロボット

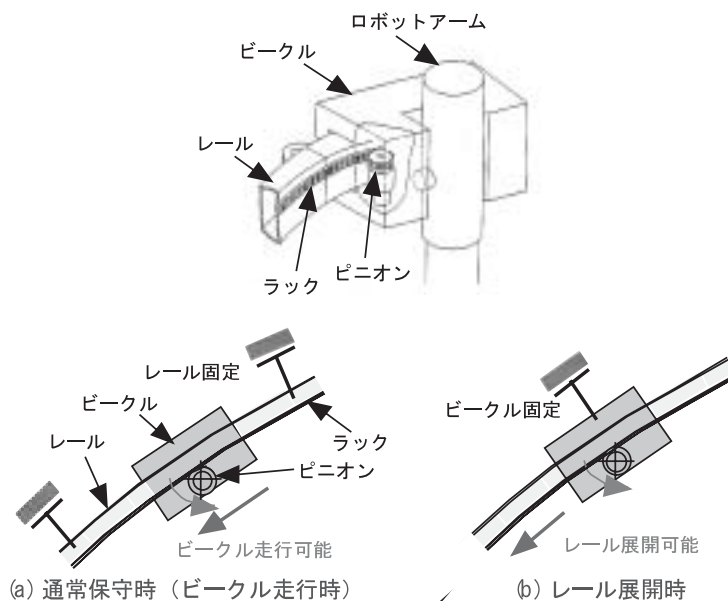


第3図 ビークル型ロボット

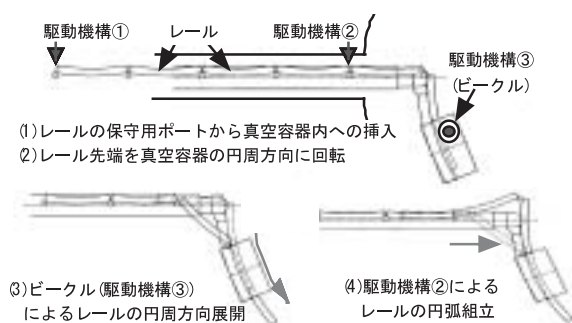
ランケットを安定に保守することは困難と予想されました。

このため、第3図に示すような真空容器内で保守作業をロボットにより安定に行うために、真空容器内に敷設したレールを真空容器の回りから多点で支持し、支持されたレール上を移動可能なロボット(ビークル型ロボット)により、ブランケットの保守を行うシステムを考えました²⁾。

レールが90°との4点で支持されるため、レールの剛性が高いのが本システムの特徴です。ただし、信頼性を向上させるためにレールをできるだけ単純構造とすること、およびレールを真空容器内に安定に展開することの2つを同時に両立させる方法が新たな課題となりました。このため、第2図に示す従来の多関節ブーム型ロボットとは異なり、レールの関節には関節を動作させるための駆動源を持たない単純構造としました。レールの展開は、8リンクからなる多関節レールの繰返し動作を利用することに着目し、新しいレールの展開方法を考えました。通常保守時には、第4図に示すように、レールが展開され固定された後には、ビークルはラックとピニオンの走行機構によりレール上を走行します。ここで、ビークルを固定し、レールをフリーにした状態で、この走行機構を動作させた場合、レールはビークルの走行機構により送り出されます。このレールが押し出される原理を利用すれば、レールの関節部には何の駆動源も必要とせず、レールの真空容器内への展開が可能となります。具体的には、第5図に示すように、ビークルの走行機構とレールを保守ポート内で真空容器内に送り込む2つの補助機構、の合計3つの駆動源のみで、レールを構成する各リンクをシーケンシャルな繰返し動作により展開することができます。これにより、関節ご



第 4 図 ビークルのレール走行機構を用いたレールの展開



第 5 図 繰返し動作を採用したレールの炉内への展開方法

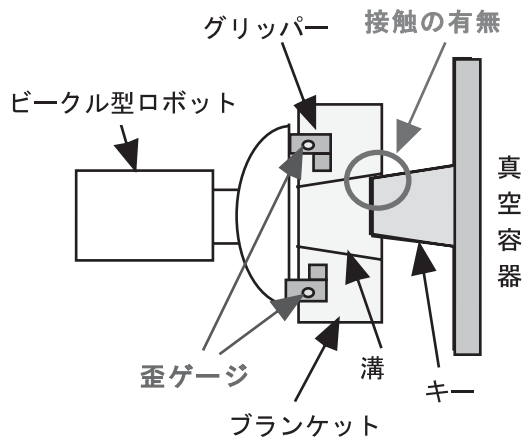
とに駆動源を持つ従来の多関節レール機構に比べて、大幅なレール機構の単純化を達成しました。本方式の技術的な成立性は実規模システムを用いてすでに実証済みです³⁾。

ここで、ビークル型ロボットに要求される機能は、単にレール上を走行するだけではありません。真空容器内の任意の位置に設置されたブランケットにアクセス可能で、かつブランケットを把持した状態で他の真空容器内に設置されたブランケットと干渉しないで移動可能なことが要求されます。このため、ビークル型ロボットは約10以上の自由度(関節やスライド機構)を持つと同時にコンパクトな設計が要求されます。コンパクトな設計とは、ビークル型ロボットの重量を、ハンドリングするブランケットの重量の約2倍程度に抑えることです。これを従来の移動式ロボットと比較した場合、例えば10 kg

をハンドリングする移動式ロボットの重量は100 kg程度となり、可搬重量の約10倍となります。これにより、核融合ロボットがいかにコンパクトな設計を要求されているかがわかってと思います。

ブランケット交換保守時の位置精度の要求値に対して、レール展開後のレール位置の再現性はあまり期待できません。このため、ブランケット交換保守時における高精度なロボットの位置補正が必要となります。この場合、通常はカメラをロボットに設置して、作業員がカメラからの視覚情報を見ながら作業を行うことが想定されます。しかし、ITERの場合、ブランケットは真空容器内にすき間なく密に設置されています。このため、例えば上下左右のブランケットが設置された状態で、その中央にブランケットを取り付ける場合、取り付けようとするブランケットの周囲が他のブランケットにより塞がれているために、ブランケットの位置決めに必要な取付け用ブランケットの背後の視覚情報を正確に取得することはできません。このため、ブランケットを±0.25 mm以下の高精度で真空容器に設置されたキー構造体に取り付けることが保証できません。この問題を解決する方法として、粗計測用の距離センサと歪みゲージを用いた精密計測用の接触センサを組み合わせたセンサ制御システムを新たに開発しました。レーザー使用の距離センサは、計測しようとする面の反射率や形状等により、その性能が大きく左右されるため、常に高精度な計測を保証するこ

とはできません。このため、距離センサは粗計測に用い、精密計測には、接触の有無による単純な ON/OFF 情報により相対位置を正確に計測できる接触センサを採用しました。第 6 図に示すように、まず、ブランケットを把持しているロボットアームの把持部に取り付けた歪みゲージを用いて、ブランケットは真空容器内壁に取り付けられたキーとの各方向の接触情報を収集します。次に、収集した接触情報からロボットアームの姿勢を補正することにより、取り付けようとするブランケットの位置を正確に制御することができます。このセンサ・フィードバック制御システムの有効性は、レールの展開同様に、実規模ピークル型ロボットにより実証済みです(第 7 図)。距離センサによる粗計測および接触センサによる精密計測によるフィードバック制御により、ブランケットをキー構造体に ± 0.25 mm 以下の高精度で取り付けすることに成功しました⁴⁾。

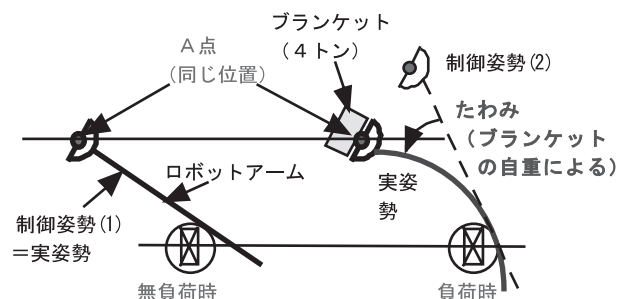


第 6 図 歪みゲージを用いた接触センサによるブランケットの精密計測概念

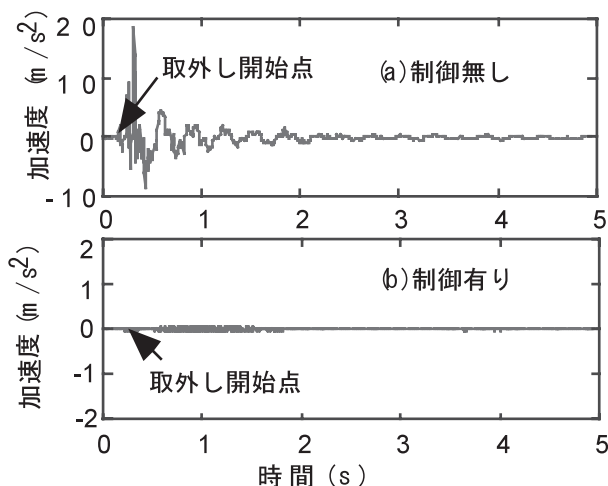


第 7 図 実規模ピークル型ロボットを用いたセンサーフィードバック制御によるブランケットの取付け試験

さらに、ITER では、4 トンのブランケットをハンドリングすることから、従来のロボット技術ではあまり考慮されていなかった重量物の取付け・取外し時の急激な負荷変動の制御が新たな課題となります。例えば、4 トンのブランケットをロボットアームが急に受けた場合、急激な負荷変動によりロボットアームは衝撃力を受け、大きな変形と振動が発生します。このため、ロボットアームが損傷する可能性があり、大重量のブランケット保守を行う上で、ブランケット受渡し時の衝撃力を回避する必要があります。このため、この課題を解決するための制御法として、第 8 図に示すように、ロボットアームの無負荷状態の姿勢(制御姿勢(1))、およびブランケットを負荷した状態の姿勢(制御姿勢(2))をそれぞれ記憶し、負荷状態(無負荷または負荷)に応じて記憶したロボットアームの姿勢を切り替えることにより、負荷変動時の急負荷および急除荷による衝撃力を回避する方法を新たに考えました。具体的には、まず保守作業の流れ(シーケンス)に合わせて、ロボットアームがブランケットを負荷しているかどうかを予期します。次に、予期したロボットアームの負荷状態から、ロボットアームの姿勢をあらかじめ記憶したデータ(制御姿勢(1)または(2))から決定し、そのデータに基づいてロボットアームの姿勢を変更します。この方法により、ロボットアームへの負荷が変わっても、ロボットアームの姿勢が負荷変動後の姿勢にすでに変更されていることとなります。このため、ロボットアームにはもはや急負荷および急除荷が発生しないことになり、ロボットアームへの衝撃力は回避されます。第 9 図(a)は、この制御法を適用しない条件下で、ロボットアームにブランケットが急に負荷された場合の結果です。この場合、ロボットアーム先端で約 20 m/s^2 (2 G) の加速度が発生し、最大約 60 mm のたわみが発生しました。これに対



第 8 図 ブランケットの取付け・取外し時における衝撃回避制御概念



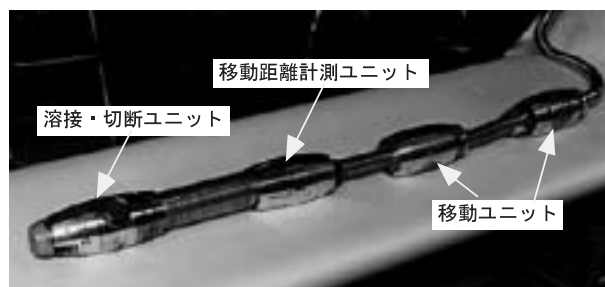
第9図 ブランケットの取外し時における衝撃回避制御の試験結果

して、上述した制御法を適用した場合、第9図(b)に示すように、衝撃加速度をほぼゼロに抑えることに成功しました⁵⁾。

・配管の溶接・切断を行うロボットとはどのようなロボットですか？

ブランケット等の炉内構造物の保守交換時には、冷却配管の溶接、切断が必要となります。配管の外側からアクセスして溶接・切断を行う従来の方法では、配管回りに溶接ロボット等を設置するためのスペースが必要となります。また、要求によっては、そのスペースからの放射線を遮蔽するための着脱可能な遮蔽体の設置が必要となります。このため、配管の外側からアクセスする方法では、コンパクトな炉の設計を行うことが困難となります。そこで、従来と発想を変えて、配管の内側からアクセスして、溶接・切断を行えば、コンパクトな炉の設計が可能となります。しかし、配管は、単に直管のみで構成されているわけではなく、曲がり部や枝管も存在することから、曲がり管や枝管にも対応した溶接・切断ロボットが必要となります。これらを考慮して、曲がり管や枝管にも対応可能な光ファイバをレーザービームの伝送系に採用し、しかも同一のロボットで溶接と切断が可能なYAGレーザーを用いた冷却配管の溶接・切断ロボットを開発しました。溶接・切断ロボットを第10図に示します。本ロボットは、母管外径100mm(曲げ半径400mm)で板厚6mm、枝管外径60mmで板厚3mmの溶接・切断に適用可能です。

曲がり管に対応するために、溶接・切断ロボット



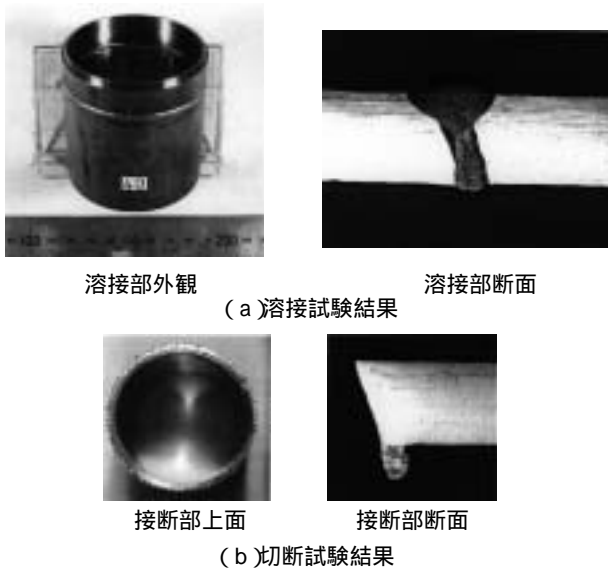
(a)溶接・切断ロボットの全体構成



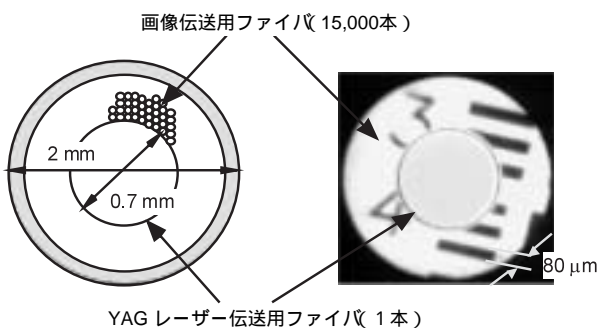
(b)曲がり管内通過状況(母管外径：100mm，曲げ半径：400mm)

第10図 YAGレーザーを用いた配管内アクセスによる配管溶接・切断ロボット

は、溶接・切断ユニット、移動ユニット(2台)、移動距離計測ユニットの4つのユニットから構成されます。走行機構は、曲がり管内を安定に走行するために2台の移動ユニットから構成され、コンパクトで推進力が大きい「尺取り虫」型走行機構を採用しました。2台のユニットが交互に固定と移動を繰り返すことにより走行が可能となります。溶接・切断ユニットは、レーザービーム伝送用の光ファイバ、レーザービームの集光レンズ、ミラー、ノズル、溶接・切断時のレーザービームの安定な位置決めを確保するための位置合せ機構、および軸回りの回転機構から構成されます。以上のYAGレーザーを用いた溶接・切断ロボットによる冷却配管の溶接・切断試験結果を第11図に示します。第11図(a)から欠陥のない良好な溶接部が観察され、さらに溶接部に関する非破壊検査、真空リーク検査、強度試験を通してYAGレーザーを用いた溶接ロボットによる溶接の健全性を確認しました。また、第11図(b)から凹凸の少ない切断面が観察され、さらにこの切断面をそのまま用いて再溶接を行った結果、第11図(a)と同等の溶接性能を得ることを確認しました。これらの結果から、YAGレーザーを用いた溶接・切断ロボットによる冷却配管の溶接・切断について実現性を確認しました⁵⁾。



第11図 溶接・切断ロボットによる枝管の溶接・切断試験結果(外径60 mm、板厚 3 mm)



第12図 複合ファイバの概念と画像の伝送試験結果

また、第12図に示すように、中心に設置されたYAG レーザー伝送用の1本のファイバの周りに画像伝送用のイメージファイバの構成要素となる多数の極細径光ファイバを配置し、これら2種類のファイバを一体化した「複合ファイバ」を新たに開発しました⁷⁾。これを配管の溶接・切断ロボットに適用することにより、1本の複合ファイバでYAG レーザービームと画像の並列伝送が可能となります。これにより、レーザーによる配管の溶接・切断だけでなく、溶接・切断前後の配管内部の位置確認も含めた視覚確認が可能となります。また、溶接・切断中におけるレーザービームの反射を解析することにより、溶接・切断特性も評価可能となり、溶接・切断作業の信頼性を大幅に向上させることが期待できます。

．おわりに

核融合炉の炉内構造物が損傷を受けた場合に、そ

の保守を行う遠隔保守ロボットが必要となります。現在 ITER で考えている代表的な保守ロボットとして、ブランケット保守用ロボットと冷却配管の溶接・切断ロボットを例に取り、ITER で要求されるロボット技術に関する機能と開発の現状を述べました。これらの代表的なロボットについて、実規模ロボットを製作し放射線のない環境下で試験を行った結果、ITER で要求されるロボット技術に関する基盤を確立できました。また、放射線への対応に関しては、上述したロボットを ITER で予想される放射線環境下で試験を行うことができる巨大な放射線照射試験設備は、現在のところ世界中のどこにもありません。このため、ロボット自体の開発と並行して、ロボットを構成するモータやセンサ類の耐放射線性機器について単体での研究開発が進行中です⁸⁾。これらの耐放射線性に関する試験結果を基に、長寿命が期待できるものとできないものに分類し、長寿命が期待できないものについては定期的な交換または機器の周りに遮蔽体を設置する等の処置が考えられており、現在、最終的な仕様が検討されているところです。今後、ITER の建設段階において製作された遠隔保守ロボットは、建設サイトに用意された試験スタンドを用いて、さらなる高度化・高信頼化に向けて各種の改良が加えられることが予想されます。これらの試験を通して、最終的には炉内構造物であるブランケットやダイバータなどの保守をロボットにより実環境下で実証することにより、将来の商業ベースとなる核融合炉の保守ロボット技術が確立していくものと思われます。

参考文献

- 1) J. R. Dean, *et al.*, "JET remote maintenance during active operation", *Fusion Technol.*, 11, 253 (1987).
- 2) K. Shibamura, *et al.*, "Development of in-vessel remote maintenance system for fusion experimental reactor", *Proc. 91 Int. Symp. on Advanced Robot Technology*, 127(1991).
- 3) S. Kakudate, K. Shibamura, "Rail deployment and storage procedures and test for ITER blanket remote maintenance", *Fusion Eng. Des.*, 65, 133 (2003).
- 4) S. Kakudate, K. Shibamura, "Sensor based control test for remote installation of ITER blanket

module", *Fusion Eng. Des.*, 65, 33(2003).

5) S.Kakudate, *et al.*, " Mechanical characteristics and position control of vehicle/manipulator for ITER blanket remote maintenance ", *Fusion Eng. Des.*, 51-52, 993(2000).

6) K. Oka, *et al.*, " Development of bore tools for pipe welding and cutting ", *J. Robotics and Mechatronics*, 10, 104(1998).

7) 岡 潔, " リアルタイム遠隔観測機能を有する YAG レーザー溶接用複合型ファイバーシステム ", *レーザー研究*, 31, 612(2003).

8) K. Obara, *et al.*, *High Gamma-rays Irradiation Tests of Critical Components for ITER In-vessel Remote Handling System*, JAERI-Tech 99-003 ,

(1999).

著者紹介

柴沼 清(しばぬま・きよし)



1980年早稲田大学理工学研究科機械工学専攻修士課程修了, 日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)入所。JT-60用中性粒子入射加熱装置(NBI)のクライオポンプの研究開発に従事。87年からはITER概念設計活動に参加。93年6月~98年4月, ITER共同中央チーム核工学部遠隔操作グループリーダー。現在, トカマク本体機器および遠隔保守ロボットの研究開発に従事。核融合研究開発部門ITERトカマク本体開発グループリーダー。工学博士。

From Editors 編集委員会からのお知らせ

— ホームページ更新情報 —

<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/> (11/10 現在)

- ・ 英文論文誌が科学技術振興機構の電子アーカイブ対象誌に選定され, 今後1998年以前の掲載論文についても順次電子化され, J-STAGEに掲載されることになりました。
- ・ 電子投稿についてのお問合せは, 事務局電子投稿担当 e-submit@aesj.or.jp まで。
- ・ 投稿された論文の査読状況は下記にてご確認下さい。
<http://wwwsoc.nii.ac.jp/aesj/publication/ronbunshi.htm>



— 最近の編集委員会の話題より —
(2005年10月31日第5回幹事会)

- ・ 英文論文誌の特集号の発行について検討。論文の投稿・審査方法等について, 会議の運営委員会と協議していくこととした。
- ・ Web 査読システムの電子化については, 現在事務局でテスト中であり, 本年度中に運用開始予定。
- ・ 英文・和文論文誌の本文体裁を2006年発行分から一部変更することとした。
- ・ 「記事執筆の目安」について, 10月号に紹介記事を掲載

したが, 今後, 記事を依頼する際には「執筆要領」とこの目安を添付する。また, 投稿原稿の場合には, これに沿って執筆するようコメントすることとした。

- ・ 10月18日に企画委員会・学生連絡会・YGN・WIN・(男女共同参画WG)と編集連絡会メンバーで会合し議論した。YGNのメンバーから学会員になっているメリットなり, やりがいがわからないという意見があった。
- ・ 企画委員会がどのようなマイルストーンで改革しようとしているのか, 定期的に発信すべきとの要望が出された。
- ・ 近藤原子力委員長へのインタビュー記事企画の内容について説明があった。
- ・ Web 上での学会誌評価アンケートシステム(学生連絡会作成)について, 来年1月運用開始予定との報告があった。
- ・ 国内ニュース記事については, やや難しい内容であるとの意見があり, 技術に限らず幅広い記事の提案を諮問委員に依頼した。
- ・ ニュースや会議報告でかなり時間を経ってから掲載されるものがあるので, 会議開催前に執筆を依頼する等, 担当グループで検討することとした。

編集委員会連絡先 hensyu@aesj.or.jp