



プロジェクトレビュー ITER 計画の機器開発・製作の進展

4. ITER ブランケット遠隔保守機器の開発

4. Development of Remote Maintenance System for ITER Blanket

野口悠人, 丸山孝仁, 齋藤真貴子, 武田信和, 角館 聡

NOGUCHI Yuto, MARUYAMA Takahito, SAITO Makiko, TAKEDA Nobukazu and KAKUDATE Satoshi

* 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

(原稿受付: 2016年2月26日)

ITERでは、供用期間中の構造上の機能(主には除熱)を確保するために、真空容器内機器(ダイバータ、第一壁など)の保守・交換を実施することによってプラントの安全で継続的な運転を維持する計画である。保守・交換対象機器の一つであるブランケット(第一壁と遮蔽ブロックからなる)を交換する遠隔保守機器(保守ロボット)は、放射線環境下(ガンマ線, 250 Gy/hr)で大型・大重量(4 t)機器の高精度ハンドリングが要求される。原子力機構では、これらの要求を満足する保守ロボットに関わる調達取決めを2011年にITER機構との間で締結した。この取決めに基づいて、製作開始前の製作レビュー(Manufacturing Readiness Review)に向けた構造・機構に関する製作設計を実施している。加えて、最終仕様を明確にするための技術開発として、保守ロボットの操作性向上のためのヒューマン・マシン・インターフェース制御技術、内径42mmの管内アクセス型溶接切断技術、保守ロボットに使用する耐放射線機器開発などを実施した。

Keywords:

ITER, remote handling, in-vessel maintenance, rad-hard component, human machine interface, laser welding, swage cutting

4.1 はじめに

ITER(国際熱核融合実験炉)では、燃料となる重水素とトリチウムの核融合反応によって14 MeVの中性子が発生し、トカマク本体[1]を構成する大型・大重量の真空容器内機器(ブランケット等)が放射化される。これらの容器内機器が故障や損傷した場合には、人のアクセスが不可能であり、遠隔保守機器(保守ロボット)による保守・交換が必要である。

核融合分野における従来の保守ロボットには、欧州JETで開発された多関節ブーム型保守ロボットがある[2]。本ブーム型ロボットは片持ち支持構造であるため先端での撓みや、振動が大きく、ITERブランケットのような大型・重量機器の高精度なハンドリングに適用することは困難である。これを解決するために、ドーナツ型真空容器内の全てのブランケット領域にアクセス可能で、大型・重量物であるブランケットを狭い真空容器内で高精度にハンドリングできるように、容器内に軌道を設置し、軌道上を移動可能な保守アームによりブランケットの交換保守を行う「軌道走行ビークル型保守ロボット」がITER真空容器内のブランケット遠隔保守方式に採用された[3]。

ITER協定に基づいて本保守ロボットの本格的な製作を進めるために、原子力機構は2011(平成23)年12月にITER機構(IO)との間で「ブランケット遠隔保守機器調達取決め」を締結し、日本が当該遠隔保守機器の調達を分担して

*現在の所属: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

いる。現在、この調達取決めに基づいて、最終設計レビューに向けた設計を実施中である。

本章では、保守ロボットの設計及び技術開発の進展について報告する。最初に、保守ロボットの設計条件であるITER保守条件について整理する。次に、この保守条件を満足する保守ロボットの概要及び製作仕様を明確にするために進めている以下の技術開発について示す。

- 1) ヒューマン・マシン・インターフェース(HMI)制御技術
- 2) 衝撃荷重の抑制
- 3) 耐放射線機器開発
- 4) ブランケット冷却配管の溶接切断技術開発

最後に設計の進展について簡単に触れることとする。

4.2 保守要件

ITER運転時の構造健全性の維持や、損傷時に運転(実験)計画に与える影響を加味し、真空容器内機器は定期交換機器、不定期交換機器(損傷したら交換)、メンテナンスフリー機器(ただし、万が一の故障を考慮し、交換のシナリオ検討だけは要求されている。)の3つに分類されている。このうちブランケット[4]はプラズマからの高熱負荷を除熱する機能を有する第一壁と、プラズマから発生される中性子を遮蔽する機能を有する遮蔽ブロックから構成され、第一壁は定期交換機器として、遮蔽ブロックは不定期

corresponding author's e-mail: noguchi.yuto@qst.go.jp

交換機器として位置付けられている。ブランケットの主要な保守条件を以下に示す。

- ・ガンマ線線量率 : 250 Gy/hr
- ・保守時の温度 : 50度以下
- ・雰囲気: 乾燥空気あるいは窒素
- ・磁場 : 1 mT 以下
- ・ブランケット重量
 - 第一壁: 最大 約 1 t
 - 遮蔽ブランケット: 最大 約 4 t
- ・ブランケットの最終設置精度: 0.5 mm
(支持構造であるキーにより最終的に位置決めされる)
- ・ブランケットの個数: 約440個
- ・ブランケットの保守期間

全交換 (440個)	: 2 年以内
1 個	: 8 週間以内
- ・ロボット構成部品の耐放射線強度: 5 MGy (目標値)
この値を満足できれば, 2年間の保守作業期間内でロボットは連続運転が可能となる。
- ・保守ロボットの可搬性能: 最大 4.5 t
- ・放射化ダスト (ベリリウム, タングステン) の除染性
保守ロボットへの付着を考慮し除染しやすい単純構造 (凹凸がない構造, 交換しやすいユニット構造)
- ・グリース潤滑材の使用条件: 真空容器に漏れ出さないように2重シール構造内でのみ使用 (2重シール構造適用できない場合はドライ潤滑材を使用)
- ・ハロゲン化物の使用禁止
ハロゲンを含有するケーブル等が万が一火災により燃焼した場合には, 発生するハロゲン化物が安全系の性

能を著しく低減するように作用するため, その使用を禁止している。

4.3 保守ロボットの概要

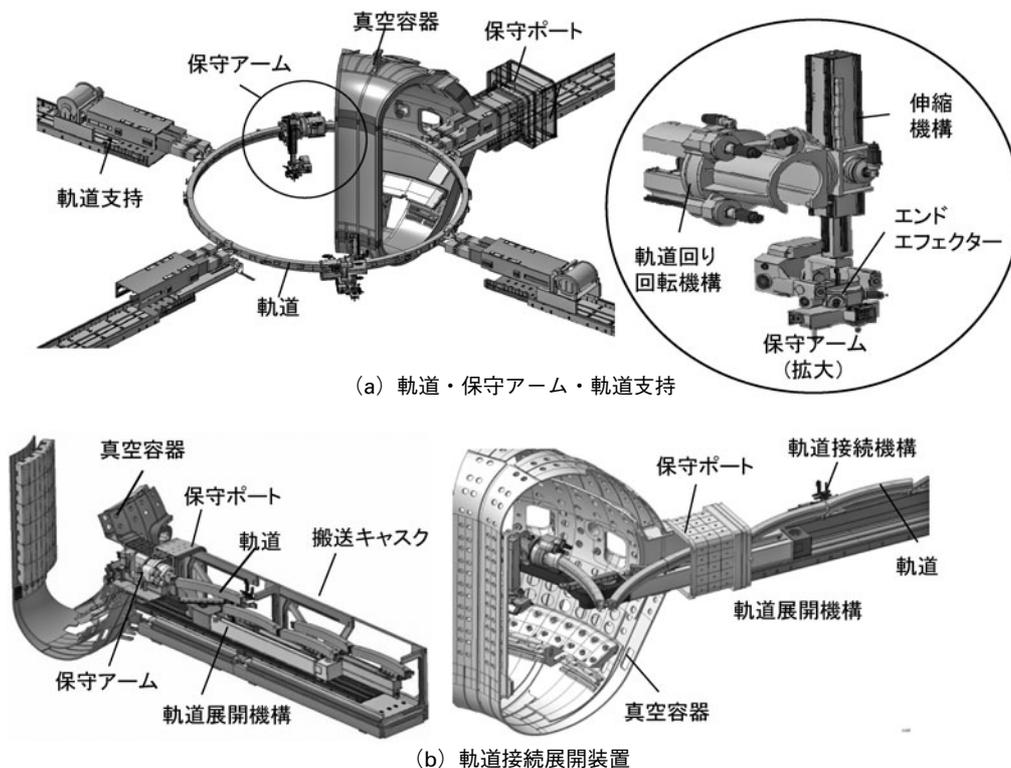
前節の保守要件を満足する保守ロボットは, 図1に示すように軌道 (真空容器内にリング状に敷設), 保守アーム (軌道上を走行可能), 軌道支持機構 (軌道の支持), 真空容器内に保守アームなどを設置する軌道接続/展開装置から成る。

(1) 軌道・保守アーム・軌道支持

軌道は, ブランケットの交換保守時にはドーナツ状の真空容器内でリング状構造体となることが要求されるため, 保守の最初の段階で軌道を直線状の保守ポートからドーナツ状の真空容器内に展開する必要がある。このため, 軌道は多関節構造を採用している。真空容器内に展開された後は, 軌道は大型・大重量ブランケットを高精度で取り扱うための基準構造体となる必要があり, 真空容器の赤道面に設置された4つの水平ポートから90度ごとに軌道支持機構により強固に支持される。保守アームは軌道を走行する以外に軌道周りに回転可能な機構を持ち, 最大6mの伸縮機構とブランケットを把持するエンドエフェクタを備えている (図1(a)) [5]。

(2) 軌道接続展開装置

真空容器内へ保守アームや軌道を設置するために要求される条件は, 1) 容器内の保守空間 (高さ11m, 幅5.5m) に比較し, 狭隘な保守ポート (高さ2.2m, 幅1.7m) を通過して炉内に保守アームや軌道を設置すること, 2) 保守アームはキャスク (長さ: 8.5m, 幅: 2.5m, 高さ:



i) キャスク搬送可能なようにモジュール化 ii) モジュール化した機構を組み合わせる軌道の接続展開

図1 保守ロボットの概要。

3 m) によって自在に搬送できるサイズであることの2つである。これら2つの要求条件を満足するために、保守ロボットの主要な機構要素である軌道と軌道接続機構、展開機構をモジュール化し分割した。モジュール単体では目的の作業は不可能であるが、作業目的に応じて機構要素である各モジュールを組み合わせて保守作業を実現する。分割した軌道は軌道接続機構によって接続され、保守ポート内に直線状の姿勢を形成しながら、軌道展開機構によって真空容器内へ敷設・展開される。最終的には360度のリング軌道となる(図1(b))[6]。

4.4 遠隔保守ロボットの技術開発

放射線環境下で大型・大重量ブランケットを高い精度でハンドリングするという要求性能を満足する保守ロボットを調達するために、操作者にとって扱いやすい操作(制御)技術やロボットを構成する部品の耐放射線開発、冷却配管の溶接・切断技術などの開発を進め、最終設計仕様を明確にした。

(1) ヒューマン・マシン・インターフェース(HMI)制御技術

ITERでの保守作業はプラントの構造健全性維持のための定期交換、突発的な容器内の損傷あるいは試験条件の変更に対応する不定期交換、ロボット自身の故障や保守作業中のトラブル(ボルトの固着、溶接中の溶着など)への対応など、多様な保守の形態に対応できる柔軟性を持つ必要がある。このため、ITER遠隔保守の操作機能(上位制御システム)に関するアーキテクチャは、図2に示すように、保守作業を管理するTask supervisor、ロボットのキネマティクス解析や動力学解析、撓み予測のための静解析を行うVirtual reality system(VR)、保守作業を視覚的に補助するViewing system、ロボットの位置姿勢や力(モータトルク、グリップからの反力など)を計測するMeasuring system、保守作業中のトラブルや故障事象からリカバリーするための情報を管理するRemote Diagnosticsから構成し、多様な保守に対応可能な柔軟性を持つ操作系とした。

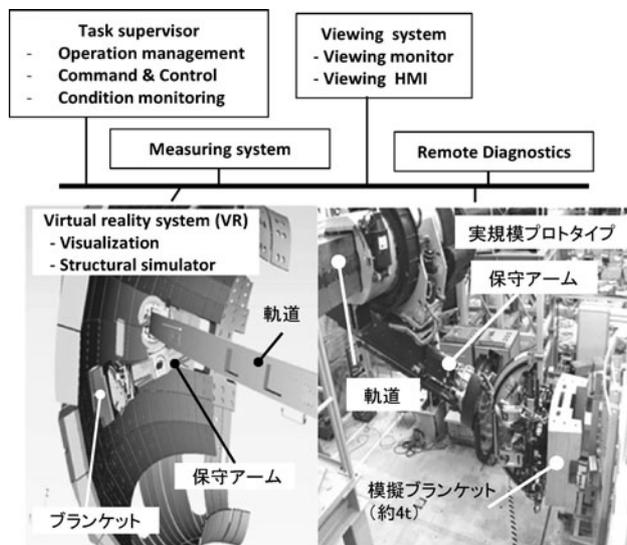


図2 上位制御システム及びVR機能の実規模試験。

この操作系機能を検証するために実機プロトタイプを使用した遮蔽ブランケット模擬体(重量 約4トン)の交換実証を行い、アーキテクチャ設計の一部であるVR機能の妥当性を確認した[7-9]。

(2) 衝撃荷重の抑制

約4tの大重量ブランケットの取付け・取外し時の急負荷・急除荷に伴って発生する衝撃力により、ロボットアームは大きな損傷を受ける可能性がある。この場合、保守の継続が困難となり、衝撃力を防止するための対策が必要となる。

急負荷・急除荷試験の結果からロボットアームの過渡的応答は1/100秒のオーダーであることがわかっている。従来の制振制御によりロボットアームを構成する減速機を含めた駆動機構を制御して衝撃時の振動を抑制するためには、ロボットアーム先端での応答速度が10 m/s以上、すなわち現状の減速機に比べ250倍以上の応答性能を持つ減速機が必要となり、現実的な駆動機構を構成することは、ほとんど不可能である。そこで、動的な衝撃力を静的な制御で防止する方法を採用した。急負荷・急除荷時の保守ロボットへの負荷条件は、ロボットアームがブランケットを把持している場合(負荷時)と把持していない場合(無負荷時)の2つである(図3)。この点に着目し、これらの2つの負荷条件を取付け・取外し時における負荷の急変直前に切り替えることにより、動的な問題を静的で単純な問題に置き換えた衝撃防止法を適用することによって、ブランケット取付け・取外し時における急負荷・急除荷の発生要因を排除し、ロボットアームへの衝撃を防止できることを実証した(図4)[10]。

(3) 耐放射線機器開発

保守要件である2年間の保守期間で保守ロボットを連続運転し、保守作業の稼働率を上げるためには、構成部品の信頼性を高くして故障確率を低減することが重要である。

故障の支配要因は放射線による部品の機能劣化である。構成部品に関し故障モード影響解析(FMEA: Failure Mode Effect Analysis)を実施し、故障モードと致命度を明

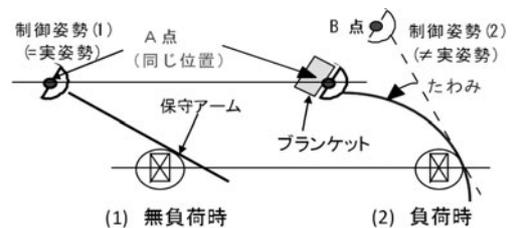


図3 無負荷時と負荷時の2つの姿勢。

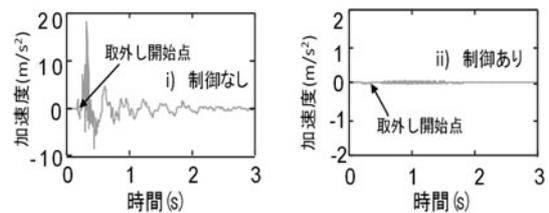


図4 保守アームへの衝撃荷重の抑制。

確にした。この結果に基づいて、耐放射線機器開発を実施した(表1)。FMEA結果から、故障頻度と、その故障が与える致命度の観点から、電気系の部品では電気絶縁材、機械系部品では潤滑材の耐放射線強度を上げることが故障率の低減に最も効果があるため、最初に潤滑材グリースと減速機の組合せによる機械特性評価試験、ロボットの動作源である低コスト耐放射線サーボモータの開発を重点的に実施した[11]。

(a) グリースと減速機の組合せによる機械特性評価試験

保守ロボットは小型化と高出力トルクを得るために最大2 kW程度の低出力ACサーボモータと高減速率の減速機(ハーモニックドライブ減速、RV減速機など)を組み合わせる設計としている。減速機の高速回転部はドライ潤滑などの適用が困難であるため、グリース潤滑を採用している。グリースは、潤滑機能である基油と、基油を保持する増ちょう剤から構成される。要求される耐放射線性能は、増ちょう剤の機能低下により基油が外に漏れ出さないこと、増ちょう剤硬化によりモータの回転負荷に影響を与えないこと、である。これらの要求条件を満足する潤滑材として、1) 減速機用標準グリースであるSK-2グリース(増ちょう剤に石けん基、基油に精製鉱物油を使用)、2) 既に耐放射線実績を持ち市販されているグリースGK-1(増ちょう剤に特殊ベントナイト、基油にポリフェニルエーテル系合成油を使用)を候補材とし、両者のちょう度(粘度)変化と機械特性(モータに与える負荷)を比較する選定試験を進めた。図5にグリースの硬さを定義した混和ちょう度と積算線量との関係を示した。積算照射量が大きくなるとSK-2はちょう度が増加(軟化)し、GK-1は逆にちょう度が低下する(硬化)傾向にある。図6は、グリースのちょう度変化(硬化あるいは軟化)の影響が減速機の効率(=出力/入力)に与える影響を示している。積算線量が増加するに従いSK-2、GK-1ともに効率は低下し、目標積算線量である5 MGyでの効率はGK-1で約50%ほどである。加えて、

表1 保守ロボットの耐放射線機器開発。

部品		許容積算線量
潤滑剤	GK-1 グリース(市販品、耐放射線性) 増ちょう剤:特殊ベントナイト 基油:ポリフェニルエーテル系合成油	10 MGy (カタログ値)
ACサーボモータ	モータ_1(特注、高価) 絶縁材:セラミックス(SiO ₂) 潤滑:ドライ潤滑	50 MGy
	モータ_2(市販品改良、安価) 絶縁材:ポリイミド被覆 潤滑:グリース潤滑	8 MGy
ハロゲンフリーケーブル	シース:耐燃性架橋ポリオレフィン 絶縁体:PEEK	3.2 MGy
多芯コネクタ	絶縁体:グラスファイバー強化ポリエステル	4.5 MGy
カメラ	撮像管(市販品)	2 MGy (カタログ値)
ペリスコープ(潜望鏡)	鉛ガラス等	20 MGy 照明 8500 lx

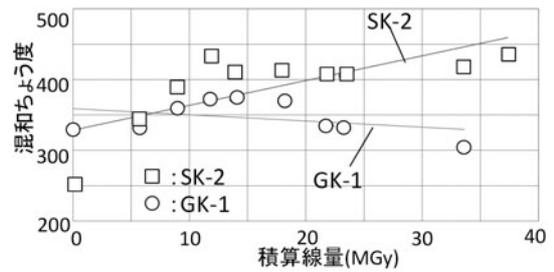


図5 グリースの混和ちょう度。

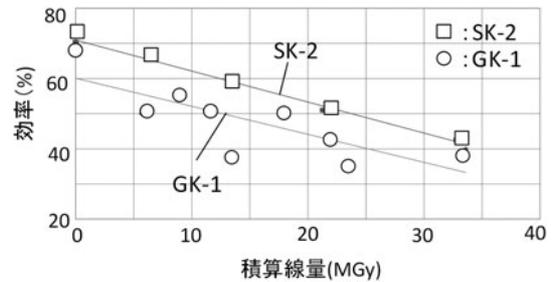


図6 グリース充填した減速機の効率。

SK-2では、初期の段階からグリース基油がシール部より漏れ出していることが確認された。この結果からGK-1は増ちょう剤が硬化し、効率が下がるが、基油を強く保持して油漏れを起こすリスクを抑えることができるため、候補材の一つとして選定できる。今後、潤滑油の保持剤の硬化を抑制する処方検討を行う計画である。

(b) 低コスト耐放射線サーボモータ

同期電動機型モーターと回転検出器であるレゾルバを組み合わせ位置制御を可能としたモーターがサーボモータである。基本的な構成部品は、磁石、ケーブル、軸受け、ブレーキからなる。このため、表1に示す通り、放射線強度を高めるために、FMEA結果に基づいて部品選定を行い、コスト低減の観点から市販品サーボモータのケーブル電気絶縁材と潤滑剤を、それぞれ、ポリイミド材と、前項で潤滑剤として使用したGK-1グリースに交換し、耐放射線試験を実施した。その結果、積算照射量8 MGyにおいて電気機械性能の判定基準である電気絶縁抵抗10MΩ以上、回転部の回転トルク0.05 N・m以下を満足し、目標の5 MGyを越える性能を得ることができた。

(4) ブランケット冷却配管の溶接切断技術

冷却配管の溶接と切断に共通する技術要件は、狭隘な42 mm内径配管の内側からアクセス可能な溶接切断ツールヘッドを技術開発することである。

溶接においては、中性子照射による再溶接時のヘリウムバブル生成を抑制するため、低い入熱量で溶接が可能なレーザー溶接を主案に技術開発を進めた。レーザー溶接の技術課題は、内径42 mmの狭隘空間に高い熱エネルギー(2.5 kW)を受ける光学部品(ミラー、レンズ)を配置せざるを得ず、これらの部品に溶融金属(火花)であるスパッタや金属蒸気であるヒュームが付着することを避けられないため、溶接回数ごとに出力が低下し、10回程度で溶接が不可能となることであった。この問題を解決するため、①

スパッタ低減のために金属溶融面に与えるレーザーの熱衝撃を抑制するためのレーザー出力の最適化と、②ヒューム（金属蒸気）を回収する吸い込み流路と流量の最適化を行い、妥当性検証試験を行った。この結果、スパッタの発生低減とヒューム回収の2つの効果により、50回以上の溶接に成功し、配管内アクセス型レーザー溶接の溶接条件や光学設計仕様を明確にした（図7）[12]。

切断においては、容器内の高真空を運転時に維持するために、保守時には厳しい防塵管理が行われる。この管理条件に従えば、冷却配管の切断に溶融金属を吹き飛ばすレーザー溶断などは使用できない。このため、切り屑の発生が無い機械式切断方式として、配管内面にカッタ刃を押し込み塑性変形させ、カッタ刃の回転により連続的に円周方向に塑性変形を発生させるディスクカッター型切断機構を開発した。塑性変形を発生させるカッタ刃押し込み機構は小型化のために「くさび」機構を適用した。検証試験の結果、切り屑の発生が無く、再溶接可能なきわめて良好な切断面（表面あらさ0.03 μm以下）となり、真空容器の防塵要求を

満足したことから切断方式として選定した（図8）[13]。

4.5 製作設計の進展

製作設計の一環として、保守要件である地震荷重（設計地震加速度は真空容器ポート部で約46 m/s²。この加速度で保守アームに負荷される荷重は9トン程度）に耐える構造設計及び、保守ロボット自体の故障に対応するレスキュー設計を実施した。前者については、参考文献[14]を参照されたい。一方、後者については、放射線環境であるため人手によるレスキュー作業は困難である。これを解決する設計について以下に示す。

従来の故障時のレスキュー設計はモーターやケーブルなどの二重化が主流である。一方、多自由度ロボットでは二重化によりサイズや重量増加になり、作業性が著しく低下する。これを避けるためにFMEAに基づいた機構設計を実施し、外部から故障した駆動系にアクセスして、故障軸を駆動するレスキュー設計を採用している。

人間が近づけない放射線環境下で保守作業を行う保守ロボットにとって、保守ロボットを構成する部品の想定外故障はリカバリーに多大な時間を要し、プラントの運転稼働率を著しく低下させるため致命的な事象である。故障は、部品の信頼性を高め、保守/点検による予防保全を講じれば故障確率を小さくできるが、その確率がゼロにはならない。よって、想定外故障がないように、起こり得る故障事象とその原因を評価し、保守ロボット自身の故障に対するレスキュー法を技術的に確立する必要がある。

保守ロボットは、機能（機構）別に見ると、保守アームによる容器内機器搬送機能、保守アームや軌道を容器内に設置する機能、冷却配管の溶接切断機能に大別され、全体で100軸以上の自由度（モータ駆動機構）から構成される。ここでは、基本的な考え方を確立するために、プランケットを交換する保守アームに主眼を置いて、FMEAに基づく致命度分類と故障事象に対する具体的なレスキュー方法について述べる。

(a) 故障モードと致命度 (Failure Criticality) の同定

故障モードと致命度の同定には、機器の故障を体系的に解明するFMEAを適用した。信頼性ブロック線図から保守アームの機器構成を分類すると、機械系部品としては重量物の負荷に耐えうる強度部材、減速機やベアリングのような駆動系部品、電気系部品としてはサーボモーター/エンコーダーやケーブル/コネクタが挙げられる。これらのメカトロニクス部品の故障モードは、機械系部品の場合、摺動部分を有する駆動系に集中し、故障原因としては、焼き付き、摩耗（凝着摩耗、アプレシブ摩耗、疲れ摩耗：ピッチング、フレーキング）等が考えられる。また、電気系部品の場合は、絶縁劣化が故障モードの支配的な因子として同定できる。以上の結果から、致命度を分類すると以下のようになる。

- I Catastrophic：機器の機能を全く果たせない。
 - ・ 構造部材の破損
 - ・ 歯車などの焼き付き、疲労破損

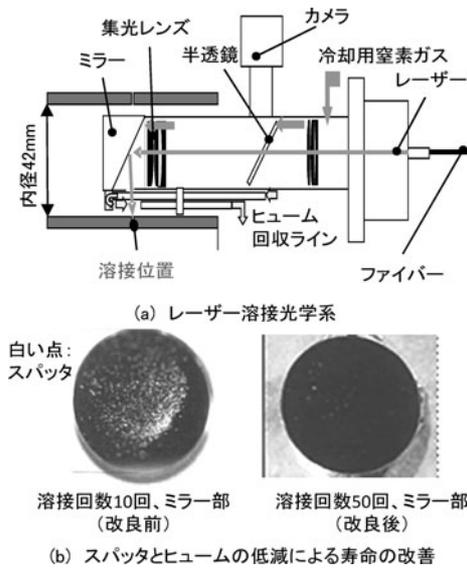


図7 冷却配管レーザー溶接技術。

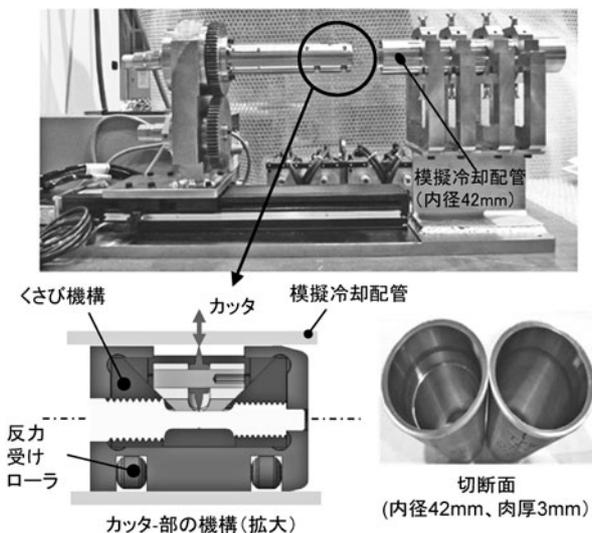


図8 ディスクカッター機械切断。

- II Critical：機器の機能がほぼ失われる。
- ・歯車などのピッチング，スポーリング，スコアリング
 - ・電気系部品の絶縁劣化
- III Marginal：機器の機能は保たれるが不完全
- ・軽度の凝着摩耗やアブレシブ摩耗，疲れ摩耗

(b) 故障時のレスキュー設計

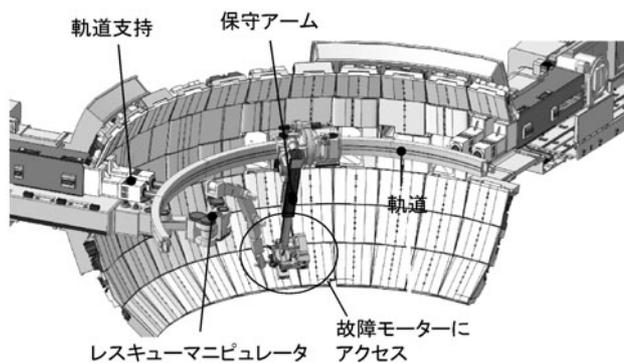
前項(a)の評価結果と耐放射線性試験結果を考慮すると、放射線環境下で最も起こり得る故障事象は、電気系部品の絶縁劣化(致命度 II)によりモーターが動作しないという故障事象である。よって、致命度IIの故障に重点をおいた設計を行った。

この致命度IIの場合、モーターを含めた駆動系は外力を加えれば回転できることに着目し、モーターを両軸(通常、回転伝動軸は片側のみであるが、回転伝動軸を長くして、モーター内部を貫通させ、両側に回転伝動軸を持つ構造)構造として、モーター前部を減速機への回転力入力側、モーター後部を故障時の回転力導入側とした。これにより、保守アームのモーターが故障した場合、図9に示すように、レスキューマニピュレータが、故障モーター後部の回転力導入軸にアクセスし、レンチにより回転導入軸を回転することによって、保守アームを回収する収納姿勢にする。第4.4節のHMI制御技術である三次元モックアップを使用したVR機能により、ブランケット交換時の全ての保守アーム姿勢について、レスキューマニピュレータのアクセス性に関するキネマティクス解析を実施し、レスキューアーム設計の妥当性を確認した[15]。

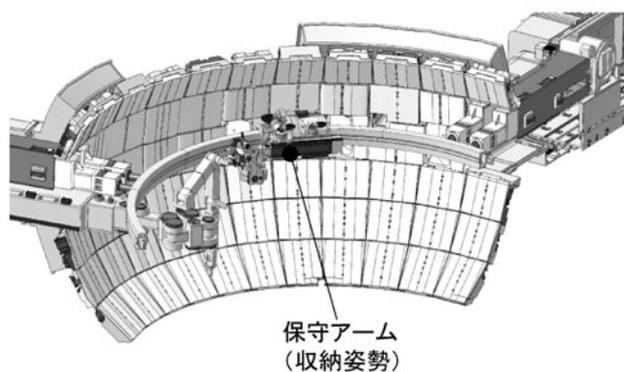
4.6 まとめ

ITERブランケット遠隔保守ロボットの設計及び技術開発の進展についてまとめた。保守ロボットの一部である保守アームは製作に着手している。一方、制御システムや冷却配管溶接切断ツールについては、2018年後半の最終設計レビューを経て、本格的な製作に着手する予定であり、製作仕様を明確にする技術開発を進めている。この技術開発の一つとして、放射線環境下で大重量構造体を高精度でハンドリングするための上位制御システム(操作系)及び衝撃荷重抑制技術について紹介した。今後、これらの技術を統合し、故障時のレスキュー技術も含めた制御システムの実証試験を実規模プロトタイプにより行う計画である。

加えて、ITER保守ロボットに使用される構成部品の耐放射線機器開発は、これまでの照射試験データに基づいて、FMEA手法により故障モードと、その故障が保守の稼働率に与える影響を評価するとともに、放射線による故障要因となる材料を特定して開発を進めている。今後、ロボット構成部品の耐放射線強度の目標値である5MGyを満足する事が難しい部品(材料)については、交換を前提とした交換容易性に重きを置いたユニット構造などの設計を実施するとともに、例えば、グリース潤滑の代替として



(a) 保守アーム故障時のレスキュー



(b) 保守アーム回収のための収納姿勢

図9 故障時のレスキュー設計。

DLC (Diamond Like Carbon) によるドライ潤滑などの先進材料開発や視覚情報を得るためのカメラ等の技術開発を行う計画である。

参考文献

- [1] <http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/index.php>
- [2] A.C. Rolfe, Fusion Eng. Des. **36**, 91 (1997).
- [3] K. Shibamura and T. Honda, Fusion Eng. Des. **55**, 249 (2001).
- [4] M. Merola *et al.*, Fusion Eng. Des. **85**, 2312 (2010).
- [5] S. Kakudate *et al.*, Fusion Eng. Des. **83**, 1850 (2008).
- [6] M. Nakahira *et al.*, Fusion Eng. Des. **84**, 1394 (2009).
- [7] D. T. Hamilton and A. Tesini, Fusion Eng. Des. **87**, 1611 (2012).
- [8] N. Takeda *et al.*, Fusion Eng. Des. **83**, 837 (2008).
- [9] A. Aburadani *et al.*, Fusion Eng. Des. **88**, 1978 (2013).
- [10] 吉見 卓 他：“大重量を扱うマニピュレータのための制御システム”，日本ロボット学会誌 **19**, 90 (2001).
- [11] M. Saito *et al.*, Fusion Eng. Des., in press, (2016).
- [12] H. Tanigawa *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 999 (2012).
- [13] S. Shigematsu *et al.*, Fusion Eng. Des. **87**, 1218 (2012).
- [14] Y. Noguchi *et al.*, ICONE-23 proceedings (DVD)(2015).
- [15] 丸山孝仁 他：“ITER遠隔操作ロボットの故障における復旧”計測自動制御学会第15回システムインテグレーション部門講演会 **10**, 3405010 (2014).