

特集 巨大構造物の事故防止と保全**核融合実験炉の遠隔保守**

Remote maintenance for fusion experimental reactor

小泉 興一

(日本原子力研究所)

武田 信和

(日本原子力研究所)

Koichi KOIZUMI

Member

Nobukazu TAKEDA

Member

1 序

近年、軽水炉の保全について、その学問的体系化を通じた最適化が計られているが、これは軽水炉がプラント技術として成熟期を迎えたことによる必然的な流れであるように思われる。これに対して核融合炉はまだ実験炉を計画している段階であり、保全技術そのものの確立が現在の最大の課題である。しかし、次段階である実証炉では経済的な成立性も問われるため、軽水炉と同様に保全の最適化が議論されることは間違いない。保守機器の開発等、核融合実験炉の保全技術を構築するにあたっては、実験炉における各種保守試験を通じて得られるデータが将来の議論に用いられることを予想し、有効な情報が取得できるよう考慮しなければならない。ここでは、日米欧露 4 極の国際協力によって 1988 年から設計が開始された国際熱核融合実験炉 (International Thermonuclear Experimental Reactor, ITER)[1] の保全のうち、遠隔操作によって行なわれる炉心部の保守について紹介する。

ITER の炉心部は、ダイバータ、ブランケット、真空容器、超伝導コイル、クライオスタット、中性粒子入射加熱装置 (NBI)、高周波加熱装置、クライオポンプ、計測装置等の各種機器から構成される。炉心を構成するこれらの機器は、プラズマの DT 燃焼によって発生する中性子により放射化するため、機器の点検・保守は、全て遠隔操作機器による保守が条件となる。この遠隔保守を実現するため、ITER の工学設計活動 (Engineering Design Activity, EDA) では、遠隔操作機器の設計・開発だけでなく、保守される対象機器の構造設計をはじめ、機器へのアクセス方法や放射化物の運搬・保管方法、ホットセル内での炉外保守についても遠隔保守を考慮した設計を進めている。特

に損傷頻度の高いダイバータ、ブランケット等の炉内構造物の遠隔保守については、遠隔操作機器設計の成立性の実証と対象機器との取合を確認するため、工学 R&D として、実規模級のモックアップ試験を進めている。本稿では、ITER の保守・保全の基本思想と特に保守頻度が高いダイバータ、ブランケットの保守設計と保守機器開発の現状について報告する。

2 保守の基本思想**2.1 遠隔保守区分と保守シナリオ [2]**

核融合実験炉の遠隔保守では、各構成機器の環境条件、使用条件、損傷条件が異なるため、必要とする保守条件が大きく異なる。このため、ITER では、構成機器をこれらの条件に従って分類し、それぞれに適した保守シナリオを定めている。ITER における保守区分とその対象機器例を Table 1, 保守シナリオを Table 2 に示す。

保守設計では、保守時間の短縮による運転稼働率の最大化を図るため、保守方法と遠隔操作機器を標準化して遠隔機器の数と種類を最小に留めると共に、可能な限り並行作業を行い、保守時間全体の短縮を図る。また、構造物の交換を行う場合でも放射性廃棄物量を低減するため、構造物のモジュール化を行うと同時に廃棄される交換部分を最小に抑えて再利用を行う。例えば、ダイバータの場合には、損耗が予想されるプラズマ対向部のみを炉外 (ホットセル内) で交換し、ダイバータの主要構造部のカセット本体は再利用を行う。

2.2 炉内保守

炉内保守は、超伝導コイルの昇温や予冷にそれぞれ約 1ヶ月を必要とするため、通常クライオスタットの真

Table 1 Remote handling classification in ITER.

RH Class	Definition	Example
1	Components that require scheduled remote maintenance or repair Task should be achieved in the minimum time needed. Shall not require opening the cryostat	Divertor cassettes Closure plates and plugs in RH port In-vessel inspection NB ion source
2	Components that do not require scheduled remote maintenance but are likely to require unscheduled maintenance or very infrequent remote maintenance Repair and replacement time should be short Shall avoid opening the cryostat where possible	Blanket module Cryopumps RF antenna and mirror Diagnostics
3	Components not expected to require remote maintenance during the lifetime of reactor The projected maintenance time in case of failure may be long	Coils (TF, CS, PF) Thermal shield VV sector VV port extension Port bellows Diagnostics
4	Components than do not require remote maintenance or repair	

Table 2 Remote maintenance scenario of reactor components.

Task	RH Scenario
Inspection	Inspection through vacuum vessel port Inspection of damage/deformation and leak testing
In-situ (in-vessel) repair	Utilize VV horizontal port opening Repair plasma facing components, leak and electrical insulation
Class 1 (Replacement of divertor cassettes)	Utilize divertor port opening of VV Replace divertor cassettes, shield plugs and cooling pipes Install into shield cask through double-seal door
Class 2 (Replacement of blanket module)	Utilize horizontal port opening of VV Replace blanket module, shield plugs and cooling pipes Install into shield cask through double-seal door
Class 3 (Magnet replacement)	Open the cryostat upper lid Removal/replacement of TF coil with VV sector using travelling crane

空を保持したまま、コイルの昇温なしに行う。このため、ダイバータ、ブランケット及びポート内機器(加熱装置、試験用ブランケットモジュール、計測装置等)の保守作業は、真空容器とクライオスタットを接続する水平ポート及びダイバータポートを真空境界として実施する。これらの作業では、移動用キャスク内に遠隔保守機器を収納し、移動用キャスクをクライオスタットのフランジに接続してポート内へアクセスす

る。なお、保守時には、放射化物が外部へ漏洩することを防止するため、キャスクとクライオスタット間に二重シール扉を設置する。

2.2.1 ダイバータ保守

ダイバータは、頻繁な交換を必要とする保守クラス 1 機器であり、保守時間の短縮をはかるため、現在設計が進められているコンパクト ITER* の工学設計では、ダイバータ構造全体をトロイダル方向に 54 個のカセットに分割している。各カセットの重量は 12 トンである。ダイバータ保守の設計要件を Table 3 に示す。ダイバータの交換は、移動用キャスクと二重シール扉を用いて 120 度毎に設置された 3 つの保守ポートから行う。保守ポートには、ダイバータカセットをラジアル(半径)方向へ移動させるためのラジアルレールが設置されており、ダイバータ全体を真空容器下部に設けられた 2 本のトロイダルレール上に設置し、この 2 種類のレール上を走行する 3 種類の移動装置(中央カセット移動装置: CCC, 隣接カセット移動装置: SCC, 及び一般カセット移動装置)を使用してカセットの交換を行う。

1. 中央カセット移動装置: 本装置は、保守ポートの前面に配置されている中央カセットを交換する

*平成 10 年から開始された EDA 延長期間において対象としている設計案。プラズマ物理における最新の成果を反映して機器の最適化を行なった。主半径は EDA の最終設計報告書に示された設計案の 8.1m に対して 6.2m と、非常にコンパクトな設計になっている。

Table 3 Design requirements on divertor maintenance.

Items	Major parameters
Environment	• Atmosphere: Dry nitrogen • Pressure: 1 bar • Temperature: below 50°C • Gamma radiation: < 30 kGy/h
Replacement frequency	• Basic performance phase: 3 times • Extended performance phase: 5 times
Total duration time for replacement	• 1 cassette: < 2 months • All cassettes: < 6 months
Cassette replacement	• Dead weight: ~12ton/cassette • Number of cassettes: 54 • Maintenance port: 3 pumping ducts
Installation tolerance	• ± 2 mm in radial direction between cassettes

ための移動装置で、カセットの下部空間に挿入され、カセットの支持機構を解除した後、カセットを持ち上げて径方向へ搬送する台車である。径方向にはトラクタを用いて牽引する。

2. 隣接カセット移動装置：本装置は、中央カセットに隣接した両側カセットを通常の位置から径方向への引き出しが可能な中央カセット位置へ移動するための装置であり、移動台車とフォークから構成される。ローラーと電動ジャッキから構成されるフォークは、レール溝に沿ってカセットの底部に挿入され、カセットを持ち上げて移動台車上までトロイダル方向に搬送する。移動台車の径方向への移動は、中央カセット移動装置と同じトラクタを使用する。
3. 一般カセット移動装置：本装置は、カセットを径方向に搬送する移動用台車とカセットをトロイダル方向に移動し、移動用台車に乗せる周方向移動装置から構成される。周方向移動装置はレールに沿って長距離の移動が可能であり、両側カセット移動装置と同様にカセットを持ち上げて搬送するフォークを備えている。

2.2.2 ブランケット保守

ブランケット保守の設計要件を Table 4 に示す。ブランケットは、頻繁な交換を必要としない遠隔保守クラス 2 の機器であり、全体は、約 400 個に分割されたモジュールから構成されている。保守時間に対する仕様は、1 モジュール、1 トロイダル配列、及び全モジュールに対して、各々 8 週間、3 ヶ月及び 24 ヶ月以

Table 4 Design requirements on blanket maintenance.

Items	Major parameters
Environment	• Atmosphere: Dry nitrogen • Pressure: 1 bar • Temperature: below 50°C • Gamma radiation: 30 kGy/h
Replacement frequency	• Basic performance phase: 3 times • Extended performance phase: 5 times
Total duration time for replacement	• 1 module: < 8 weeks • One toroidal array: < 3 months • All modules: < 24 months
Module replacement	• Dead weight: ~4ton/module • Number of modules: ~400 • Gripping length: 1~2 m • Maintenance port: 4 horizontal ports
Installation tolerance	• ± 2 mm in radial direction between modules • 50mm clearance between module and port wall • 20mm clearance between adjacent modules

内である。重量 4 トンのモジュールを安定に、かつ迅速に交換するため、保守時には、多関節レールを真空容器のトロイダル方向に展開し、そのレール上を走行し、作業を行う「ビークル型マニピュレータ」を使用する。マニピュレータには、モジュールの把持、固定用ボルトの締結、モジュール冷却配管のプラズマ対向面側からの溶接・切断等に対応する各種のエンドエフェクターを用意する。軌道を形成する多関節レールは、1 システムで真空容器内の 180 度分をカバーし、180 度の対面に位置する水平ポートから 2 システムを炉内に展開し、接続する。他の対面する 2 ポートでは、軌道の支持及びモジュールの搬出/搬入を行う。本システムの特徴は、1) 軌道が 90 度毎の 4 つの水平ポートで強固に支持されるため重量物を安定に搬送できる、2) 荷重支持の役割を担う多関節レール軌道は、モータ、素子等を持たない単純構造であり、信頼性が高い、及び、3) 1 つの軌道上に最大 4 台のマニピュレータを設置することができるため、並列作業により保守時間を大幅に短縮できることである。ダイバータカセットの交換と同様、モジュールは、二重シール扉を使用して放射化物が外部へ漏洩することを防止してキャスクに収納し、炉外へ搬送する。従来の設計では、対面する 180 度ポート外側のピットエリアに一体型軌道を収納する空間を設けていたが、コンパクト ITER の工学設計では、収納スペースの小型化を図るため、Fig.1 に

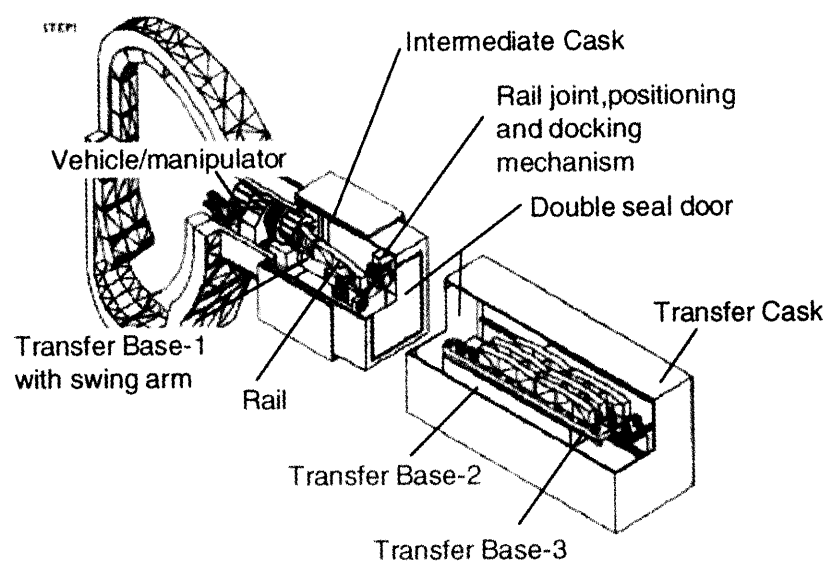


Fig. 1 Cask based in-vessel transporter for blanket maintenance.

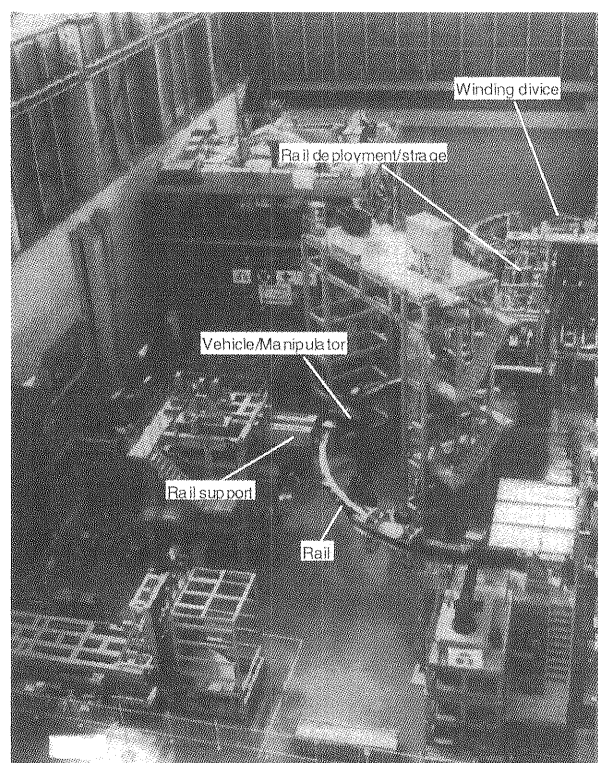


Fig. 2 Vehicle type manipulator system for blanket maintenance.

示すように、一体型軌道を分離してキャスクによって軌道を搬送し、ポート内で軌道を組立て、炉内に展開する「キャスク型軌道展開・収納方式」を採用している。本方式は、必要に応じて、任意の水平ポートを使用した軌道の部分展開ができるため局所的な交換にも柔軟な対応が可能である。

2.3 遠隔保守機器開発の現状

2.3.1 ブランケット保守

ITER の 7 大 R&D の 1 つとして、ビークル型保守システムの製作・試験を日本が分担し、Fig.2 に示す実規模試験装置 (軌道一体型) を製作して、1) 軌道レールの炉内への展開・固定、収納性能、及び 2) 重量 4 トンのブランケットモジュールを $\pm 2\text{mm}$ の精度で取り扱う基本性能を実証した [3]。また、4 トンのブランケットモジュールの取り付け及び取り外し時における急激なモジュールの重量移動に伴うマニピュレータへの衝撃力を抑制する新しい制御方法を考案し、着脱試験によってその有効性を実証した [4]。CCD カメラ等からの視覚情報が期待できない実機の高放射線環境では、仮想現実を用いたシミュレーション・モニタリング技術とマニピュレータ先端に取り付けた位置及び力センサー情報に基づくフィードバック制御技術を組み合わせた制御技術が必要であり、現在、以下の項目に重点をおいた技術開発を進めている。

- 1) 運動解析に基づくシミュレーション技術
- 2) 作業のリアルタイムモニタリング
- 3) ブランケットとの相対位置計測に基づくマニピュレータの制御技術
- 4) 位置と力のハイブリッド制御技術

なお、キャスク型軌道の展開・収納及び事故時のレスキューを含めた運転裕度についても平成 13 年 7 月ま

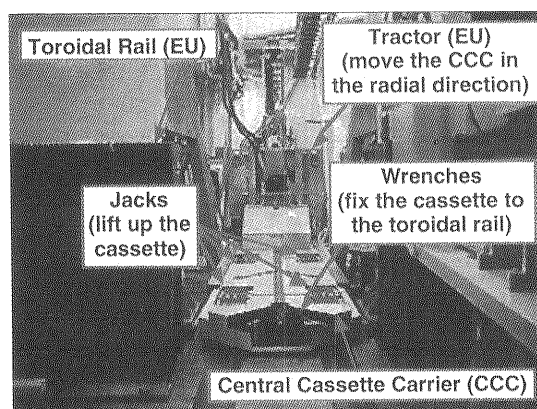


Fig. 3 Central Cassette Carrier (CCC) in the Divertor Test Platform (DTP) in ENEA.

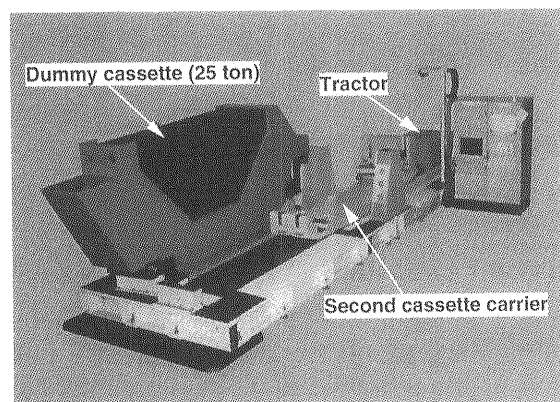


Fig. 4 Second Cassette Carrier (SCC) for divertor cassette maintenance.

でに試験を実施する予定である。

2.3.2 ダイバータ保守

欧州 (EU) が幹事極となり、ITER の 7 大工学 R&D として実規模級の遠隔機器、遠隔操作ツールの試験を進めている。日本は、Fig.3 に示す中央カセット移動装置 (CCC) 及び Fig.4 に示す隣接カセット移動装置 (SCC) の開発と試験を担当し、中央カセット移動装置については、欧州 (イタリア) の新技術・エネルギー・環境公社 (ENEA) ブラジモネ研究センターに輸送し、現在、組み合わせ試験を進めている。これまでに、両移動装置とも 25 トンのダイバータカセットを ± 0.5 mm 以内の精度で設置する試験を終了し [5]、現在は、センサによる制御の高度化試験と異常時のレスキューを含め、保守機器の限界性能と運転裕度を確認する限界性能試験を継続している。また、ダイバータ保守及びブランケット保守の共通機器である搬送用キャスクについても、Fig.5 に示す二重シール扉と自動高さ調

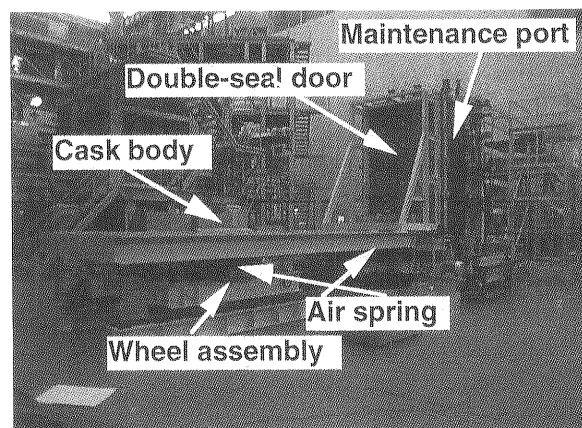


Fig. 5 Transfer cask with double seal door.

整機構を備えた実規模搬送キャスクを開発し、気密性と接続時の設置精度を確認した。

3 まとめ

核融合炉の運転を継続し、必要な稼働率を確保するためには、遠隔操作機器による保守が必要不可欠である。この遠隔保守を実現するためには、保守の対象機器の構造設計の他、アクセス方法や放射化物の運搬・保管方法、ホットセル内での作業について、遠隔保守を考慮した設計が必要である。ITER の保守シナリオに基づいてこれまで主要な遠隔保守機器の開発と基本性能試験を終了しているが、実作業に対応するためには、計測と力の計測情報に基づく制御の最適化と保守時間の短縮、耐放射線性の改良、事故時のレスキューやフェイルセーフ性の実証等、多くの技術課題が残されており、長期的な視点での技術開発が必要である。

参考文献

- [1] ITER Agreement and Protocol 1, IAEA, Vienna, ITER EDA Documentation Series No.1 (1992).
- [2] トカマク保守シナリオと遠隔操作機器: プラズマ・核融合学会誌, 第 73 巻増刊 (1997).
- [3] S. Kakudate et al.: Remote Handling Demonstration of ITER Blanket Module Replacement, 17th IAEA Fusion Energy Conference, (1998).
- [4] S. Kakudate et al.: Mechanical Characteristics and Position Control of Vehicle/Manipulator for ITER Blanket Remote Handling, 5th International Symp. on Fusion Nucl. Tech., (1999).
- [5] N. Takeda et al.: Performance Test of Divertor Cassette Transporter for ITER, Fusion Technology, (1998), pp.1099-1102.