

核融合実験炉において増殖ブランケットなどの大型炉内構造物を分解保守するための遠隔機器の開発

Development of the Remote Maintenance Equipment System of Large In-Vessel Components such as Breeding Blanket of Fusion Experimental Reactor

わが国の核融合実験炉の開発は、日本原子力研究所が中心となって進められている。核融合実験炉の開発にあたって、ブランケットなどの大型炉内構造物の分解保守用遠隔機器の開発は最重要課題の一つである。最大質量約40 tの大型複雑形状の炉内構造物を、隣接するトロイダル磁場コイル間の制限された狭小な空間から、しかも自動遠隔操作で分解保守する技術は未踏の開発分野であり、日本原子力研究所と日立製作所は共同で、大型炉内構造物の遠隔操作による分解保守シナリオの概念構築、および遠隔操作機器の概念設計を行ってきた。さらに、技術開発の第一段階として遮へいブランケットの分解保守性を実証するための $\frac{1}{5}$ 縮小モデル遠隔機器を共同で開発した。本装置で分解保守のための基本動作が確認でき、把持機構、重力バランス機構、ガイド機構などに多くの重要な成果を得た。今後、この $\frac{1}{5}$ 縮小モデルを用いて、遠隔操作の自動制御方法の開発を行い、全体の炉構造と整合のとれた分解保守用遠隔機器の実用化を進めていく予定である。

溝口忠憲* *Tadanori Mizoguchi*
 柴沼 清** *Kiyoshi Shibamura*
 金森直和** *Naokazu Kanamori*
 大塚道夫*** *Michio Ootsuka*
 梶浦宗次**** *Souji Kajiura*
 田村勝広***** *Katsuhiko Tamura*

1 はじめに

核融合の国内次期計画であるFER(核融合実験炉)は、現在運転中の大型トカマク試験装置JT-60Uと核融合原型炉(デモ炉)との間の中間ステップとして位置づけられ、その開発が進められてきた¹⁾。一方、日本、米国、EC、ソ連の四極間の国際協力によるITER(国際熱核融合実験炉)の概念設計検討が、1988年から友好かつ精力的に進められている^{2),3)}。3年間の概念設計研究の成果を踏まえ、今後6年間の予定で大型工学R&D(Research and Development)を含めた工学設計研究が開始されようとしている。

核融合実験炉では強力な磁場に閉じ込められた約1億度に達する重水素と三重水素の超高温プラズマが実際に核融合反応を起こし、大量の熱と中性子を放出する。超高温プラズマに面する第一壁保護板、ダイバータ受熱板などは過酷な熱負荷や中性子負荷にさらされるため、頻繁に交換する必要がある。また、第一壁と一体構造のトリチウム増殖ブランケットは、増殖材であるリチウムの補充あるいは交換を前提に設計しなければならない。一方、DT(D:重水素, T:三重水素)燃焼後の炉内の誘導放射能の線量率は260 C/kg·h{ $\sim 10^6$ R/

h}以上に達すると予想され、人間がアクセスすることは不可能である。したがって、核融合実験炉の炉構造設計にあたっては、真空容器内に設置されるダイバータやブランケットなどの炉内構造物を、遠隔操作によって分解保守する必要があり、遠隔機器の開発は最重要課題の一つである。

ブランケットの交換は、隣接するトロイダル磁場コイル間の制限された狭小な空間を利用して、1セクタ当たり多分割して行わなければならない。最大重量約40 t、全長約20 mの大型炉内構造物を数ミリメートルの正確さで、限定された空間から、しかも自動遠隔操作で分解保守する技術は未踏の開発分野であろう。日本原子力研究所と日立製作所は共同で、遮へいブランケットなどの大型で複雑な形状の炉内構造物の分解保守のシナリオ検討、および遠隔操作機器の概念設計を進めてきた。また、設計検討に加えて、技術開発の第一段階として、ブランケットの交換分解保守性を実証するための $\frac{1}{5}$ 縮小モデル遠隔操作機器を開発してきた。本機によって遠隔機器の基本動作が実証でき、把持機構、重力バランス機構、ガイド機構などに多くの有効な結果を得た。

* 日立製作所 日立工場 工学博士 ** 日本原子力研究所 核融合工学部炉構造研究室 *** 日立製作所 エネルギー研究所
 **** 日立製作所 日立工場 ***** 日立設備エンジニアリング株式会社

以下に、これら全体システムの概要と基本動作実証のために開発した $\frac{1}{5}$ 縮小モデルについて述べる。

2 全体システム概要

2.1 炉構造概要

FERの全体構造鳥観図を、例として図1に示す⁴⁾。プラズマ主半径4.7 m、副半径1.5 m、プラズマ電流15 MA、軸上磁場5 Tである。トロイダル磁場コイルは12本の超電導磁石で、その最大経路磁界は12 Tである。ポロイダル磁場コイルは上下7本ずつ合計14本の超電導磁石で構成される。隣接するトロイダル磁場コイルの間には、上部ポート、水平ポートおよびダイバータ排気ダクトが設置されている。上部ポートはクライオスタットのベルジャ部を貫通しており、遮へいブランケットを分解保守する際のメンテナンスポートの役目を果たす。

FER設計では、大型炉内構造物である遮へいブランケットは、1セクタ当たり上部遮へいプラグ、トーラス外側センタモジュール、左右二つのサイドモジュール、トーラス内側センタモジュールおよび左右二つのサイドモジュールの合計7モジュールに分割されている。トーラス全体は12セクタから構成されていることから、総計84個のモジュールが分解保守の対象となる。

2.2 分解保守遠隔機器システムの概要

遮へいブランケットを、上部ポートから挿入あるいは取り出す分解保守システムの全体概要を図2に示す。分解保守遠隔操作機器は、主遠隔機器と副遠隔機器から構成され、全体がダスト飛散防止のための二重シール扉を内蔵したキャスクの中に収められている。主遠隔機器は、遮へいブランケット

をつかむための把持機構、上下移動させるための昇降機構、水平方向に移動させるためのテーブル式移動機構から構成される。また、副遠隔機器は、遮へいブランケットを確実に分解・組立するための補助機構としての引張り突っ張り機構と、それを炉内展開させるための伸縮アーム機構、およびテーブル式水平方向移動機構から構成される。主遠隔機器と副遠隔機器との干渉を避けるため、テーブル式水平方向移動機構は親子方式とし、それぞれ独立の駆動軸を持っている。主遠隔機器、副遠隔機器の同期をとりながら遠隔操作制御することによって、より確実な分解保守特性を持たせたのが本遠隔機器システムの最大の特徴である。

2.3 分解保守シナリオ

分解保守の全体の流れは以下のとおりである。(1) 遮へいブランケットを分解保守するための遠隔操作機器を、キャスクと一体で配管処理が終わった後の上部ポートの真上に設置する。(2) ダスト飛散防止のための二重シール扉を上部ポートに接続する。(3) その後、二重シール扉を開口して上部ポートを開封する。(4) 主副遠隔機器で遮へいブランケットの一つのモジュールを引き出し、キャスク内に格納する。(5) 二重シール扉を閉じる。(6) キャスク全体を運搬機に載せ炉室外に搬出する。以上の手順を繰り返す。

遮へいブランケットの分解手順は、まず(1) 上部遮へいプラグを垂直一方向で引き抜く。(2) 外側センタモジュールを垂直一方向で引き抜き、(3) 外側サイドモジュールの左右いずれかをいったんトロイダル方向に移動させて、上部ポート開口部の真下に持ってきてから垂直一方向に引き抜く。(4) 残りの外側サイドモジュールを同様の手順で引き出す。(5) 内側センタ

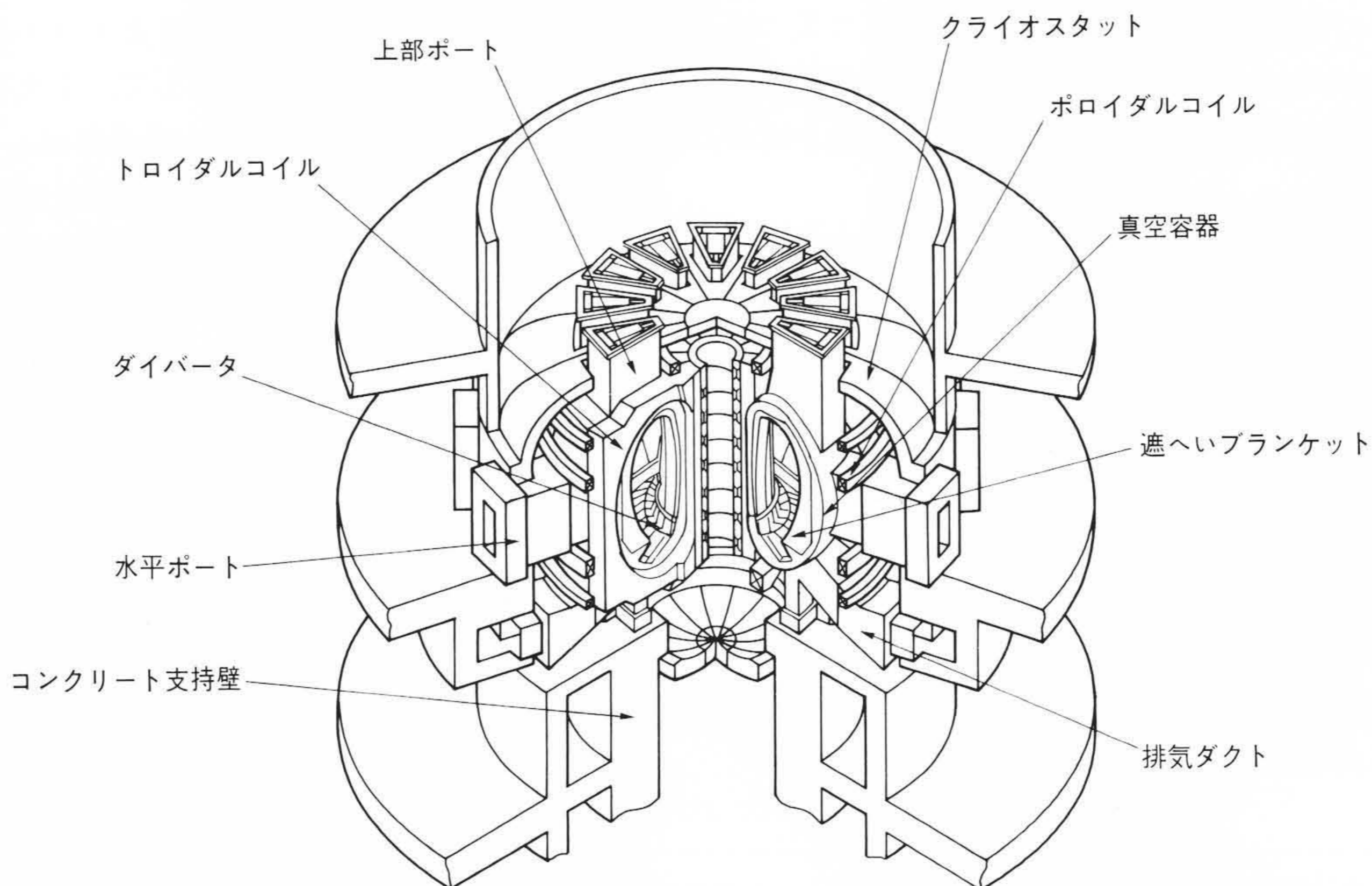


図1 FER全体構造鳥観図 FER(核融合実験炉)の炉心本体を含めた炉本体全体構造の鳥観図を示す。

モジュールをガイドに沿って斜め上方向に引き上げ、ポート内に入ったところで垂直方向に引き出す。(6)内側サイドモジュールの左右いずれかをいったんトロイダル方向に移動させた後、半径方向に移動させて上部ポート開口部の真下に持ってきてから垂直方向に引き抜く。(7)最後に残りの内側サイドモジュールを同様の手順で引き抜く。逆に組み立てる場合の各モジュールの挿入は、これらの逆の手順で行う。

2.4 副遠隔機器の役割

センタ遮へいプラグ、外側および内側センタモジュールの分解・組立は、適切なガイド機構とバランス調整機構を組み合わせることにより、主遠隔機器による垂直方向への昇降移動操作だけで可能である。

一方、サイドモジュールを真空容器内に設置または真空容器から取り出す場合、トロイダル方向に対する精密な移動が必要である。約15 mの長尺構造物に対し、上部での一点把持によるつり下げ操作で精密な位置を決めることは非常に困難である。例えば、サイドモジュールは、巨大な電磁力に対して真空容器に強固に支持されるように、真空容器のトロイダル方向に設置されたLバー構造によって支持固定される。サイ

ドモジュールを取り出す際に、真空容器とのLバー支持構造部が焼きばね現象などでかじったりした場合、主遠隔機器によるつり上げ操作だけでは、機器を破損するおそれがある。このような場合、副遠隔機器の引張り突っ張り機で、サイドモジュールの重心近傍あるいは適切な場所をトロイダル方向に引くことにより、より確実にサイドモジュールをLバー支持構造部から解除することが可能であろう。

サイドモジュールのLバー支持構造部への挿入も主遠隔機器操作だけでは困難であるが、副遠隔機器の突っ張り機能を使うことにより、確実に所定の位置に設置することが可能となる。

3 遠隔操作機器要素技術の開発

3.1 $\frac{1}{5}$ 縮小モデル概要

遮へいブランケット分解保守の基本動作を実証する目的から、 $\frac{1}{5}$ 縮小モデルを開発した。装置の全体構造を図3に示す。本装置はトーラス1セクタ分の模擬真空容器、遮へいブランケット、および遠隔操作機器ユニットとその架台から構成される。実機では、各モジュールを垂直方向に引き上げて、キ

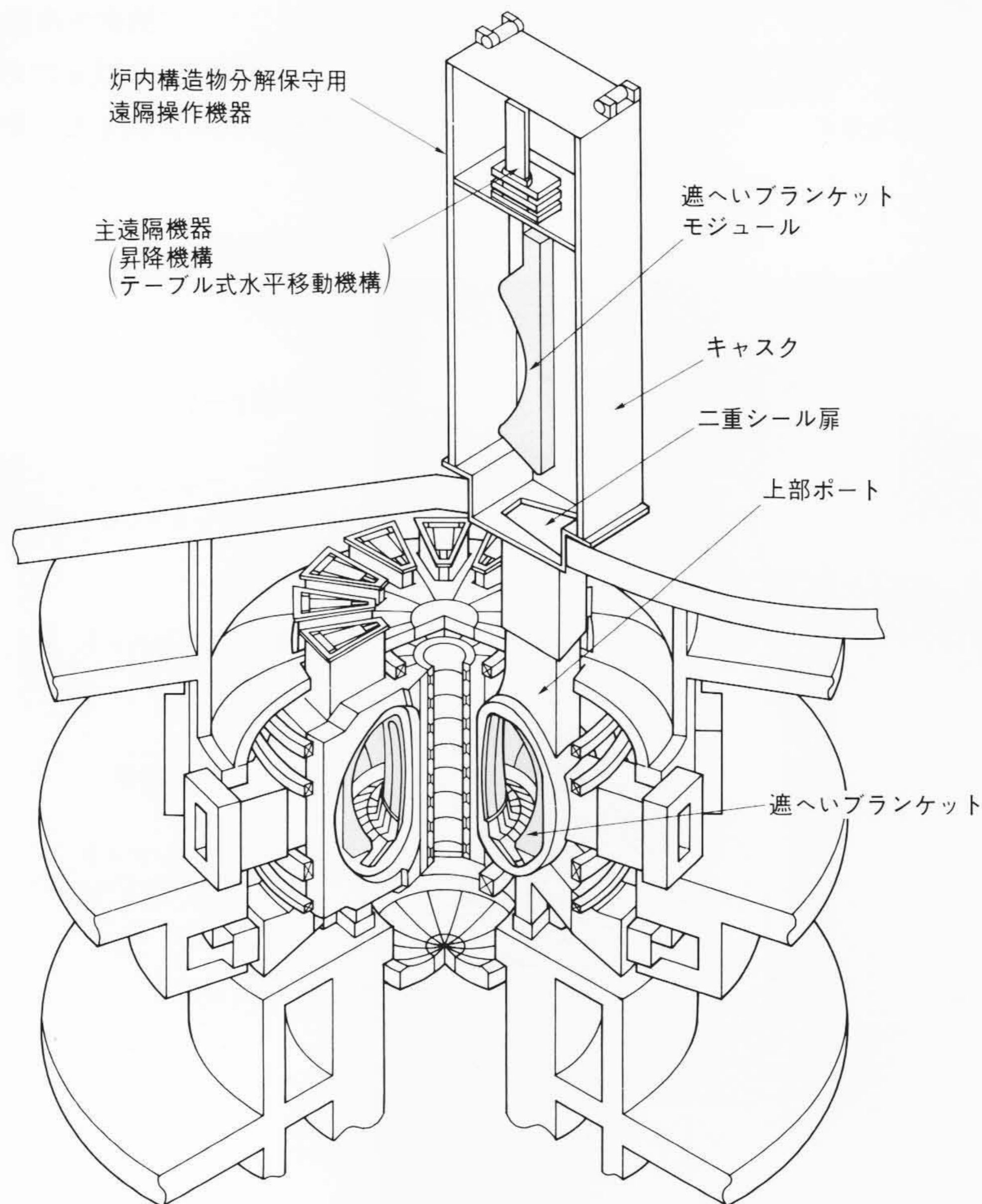


図2 遮へいブランケット分解保守概念図 炉内構造物分解保守用遠隔操作機器によって、遮へいブランケットを上部ポートから引き抜いている概念図を示す。

ヤスク内に格納して炉室から運び出す。本モデルでは遮へいブランケットを上部ポートまで引き上げて、そのポートから引き抜けることが確認できれば、基本原理は実証できるとの観点に立ち、約25 cmから50 cm引き上げるだけの構造とした。引き抜けることを確認後、水平方向に移動させて、仮置き場に置く構造としている。

に置く構造としている。

3.2 模擬真空容器および遮へいブランケット

模擬真空容器と遮へいブランケットを組み立てた状態を図4に示す。模擬遮へいブランケットは5体で、センタ遮へいプラグの重量は40 kg、外側センタモジュール80 kg、外側サイドモジュール70 kg、内側センタモジュール50 kgおよび内側サイドモジュール60 kgである。上部ポート形状、および模擬真空容器と遮へいブランケットの取り合い面はFERの実形状を忠実にモデル化し、基本動作を忠実に模擬できる構造に留意した。また、各モジュールを真空容器に支持固定し、最終的な位置決めを行うための支持構造、すなわち外側センタモジュールのTバーおよびTスロット構造、外側および内側サイドモジュールのLバー構造、内側センタモジュールのフック構造なども忠実にモデル化してある。さらに、全モジュールが所定の位置に収まった状態での各モジュール間のギャップは5 mm以下とした。

遠隔操作による各モジュールの簡単で精度のよい設置および取り出しに際しては、ガイド機構が重要な役割を果たす。本装置には3種類のガイド機構を導入した。特に各モジュールと真空容器との支持構造体である外側センタモジュールのTバーや、内側センタモジュールのフックを真空容器に挿入するには、適切なガイド機構が複雑な制御よりも有効であろう。

各モジュールをつり上げるための把持構造は、重力支持だけを行う簡単なフック式とし、把持の位置はできるかぎり重

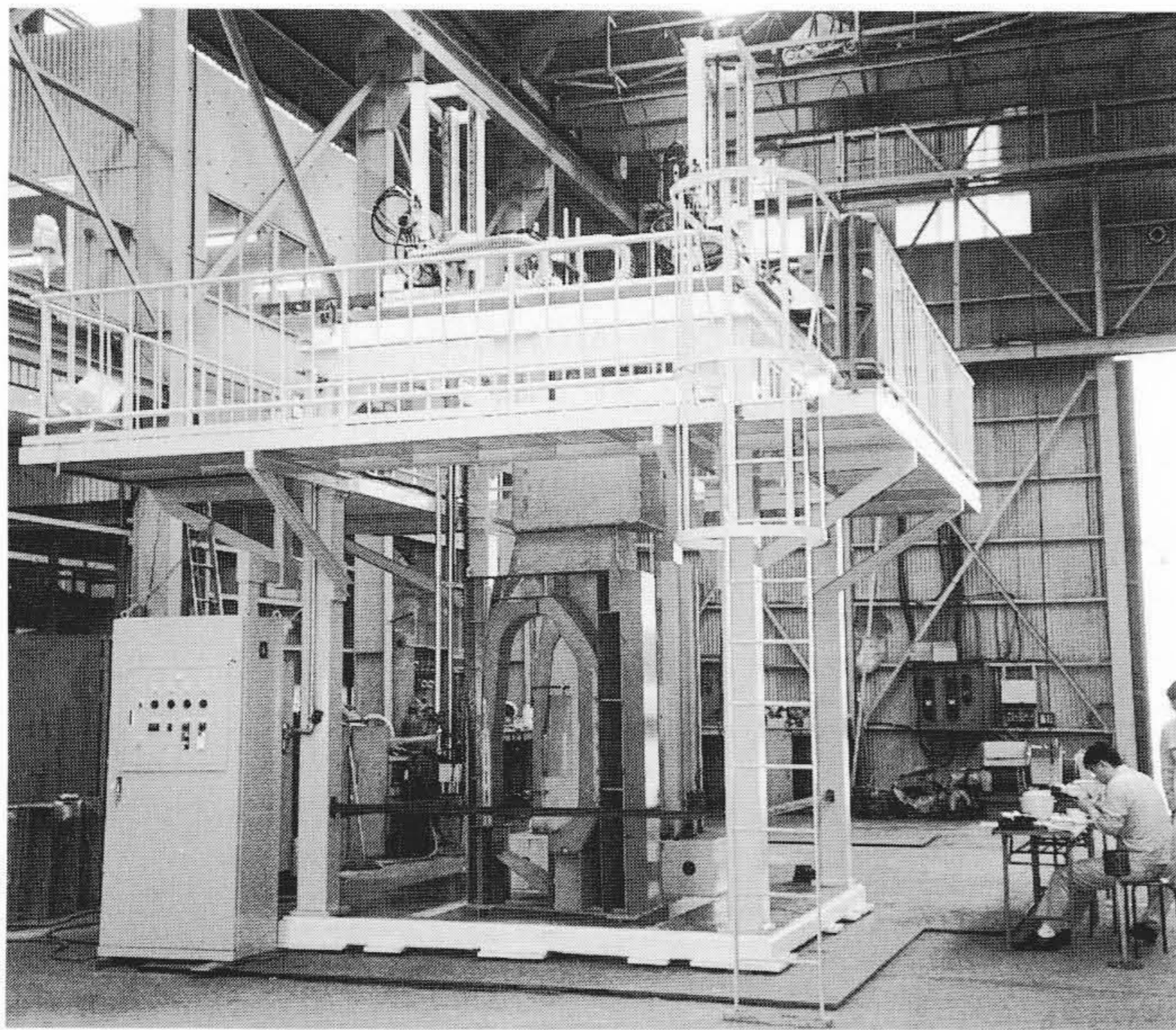


図3 遮へいブランケット分解保守遠隔機器縮小モデルの全体
模擬真空容器、模擬遮へいブランケット、主副遠隔操作ユニットおよび全体架台を含めた $\frac{1}{5}$ 縮小モデルの全体を示す。

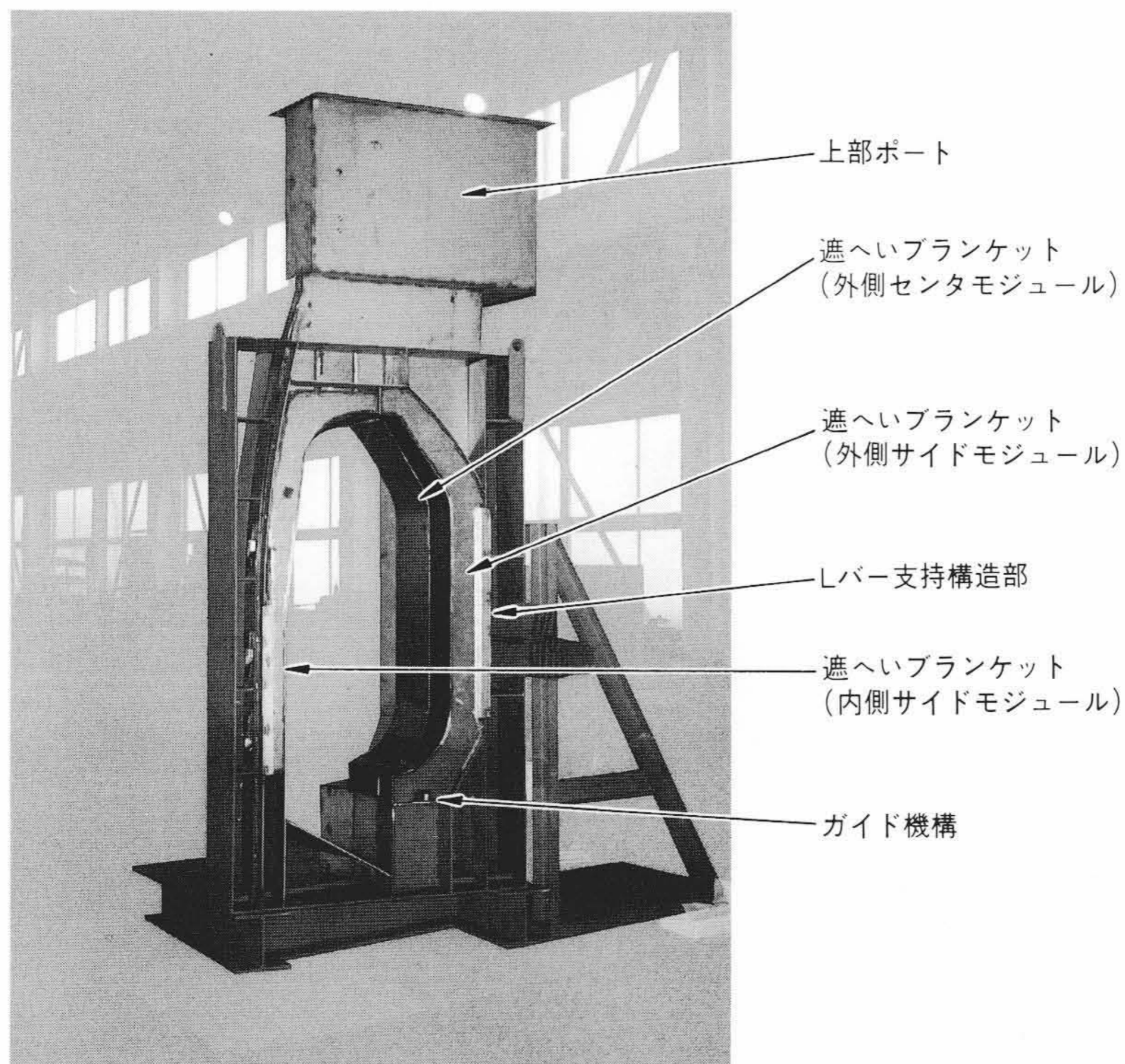


図4 模擬真空容器・遮へいブランケット構造体
FER真空容器および炉内構造物
1セクタ分の $\frac{1}{5}$ 縮小モデルでの模擬構造体を示す。

心に近い位置とした。ただし、内側のモジュールのように重心位置のずれているものはバランスウェートを付けて重心の補正を行う。姿勢制御は分解・組立する場合の重要な因子である。

3.3 遠隔機器モデル

遠隔機器モデルは、遮へいブランケットを把持し、搬入・搬出するための主遠隔機器ユニットと、各モジュールを引っ張ったり押したりする副遠隔機器ユニットから構成される。水平移動は主、副遠隔機器ともラックピニオンギヤ駆動方式テーブル構造である。主遠隔機器ユニットの垂直方向移動はスクリージャキ方式とし、最大ストローク500 mm、最大掲載質量500 kgである。副遠隔機器ユニットは2段伸縮テレスコープとスクリージャキ方式の組み合わせにより、上部ポート最上部から真空容器低部まで約2.5 m炉内展開できる。また、主遠隔機器ユニットとの干渉を避けるため、その両側に外側サイドモジュール用、内側サイドモジュール用おのおの別々に二組みの副遠隔機器ユニットを配置した。

副遠隔機器ユニットが、外側、内側のサイドモジュールを所定の位置の支持部から引き出したり、あるいは所定の位置に設置するとき押し出す力はかなり大きいものである。実機では、外側サイドモジュールの最大質量は約30 tもあり、したがって、副遠隔機器の引張り突っ張り機構には少なくとも数トンの力が必要であろう。本装置では、引張り突っ張り部のアームの他端に支点用の固定ピンを付け、その固定ピン

を遮へいブランケットを載せる固定支持棚に設けた穴に挿入し、それを支点として遮へいブランケットを引いたり押したりする構造とした。ガイド付きエアシリンダで最大150 kgfの力を出せる。実際には、各サイドモジュールの重心に近いところで引いたり押したりするのが適切であり、そのような個所に引張り突っ張り機構を設置できる構造上のくふうが必要であろう。

3.4 動作試験

基本動作実証の一例として内側サイドモジュールを引き出している例を図5、6、7に示す。図5は、副遠隔機器ユニットを上部ポートから炉内に展開しているところである。図6は、内側サイドモジュールをトロイダル方向に移動するために、引張り突っ張りアームを内側サイドモジュールに挿入すると同時に、固定ピンを真空容器の支持棚に挿入しているところである。また図7は、主遠隔機器と副遠隔機器ユニットを同時に動作している状態を示す。この状態で、引張り突っ張りアームをトロイダル方向に引っ張ることによってサイドモジュールが真空容器のLバー支持部から取り出される。逆に挿入する場合には、内側サイドモジュールを搬入後、副遠隔機器ユニットを所定の位置に設置し、アームを押し出せば確実に内側サイドモジュールを真空容器のLバー支持部に設置することができる。

最後に、姿勢制御とガイド機構を適切に設定することにより、単純な動作で挿入できる例を図8に示す。同図は内側センタモジュールを、バランスウェートを調整して最適な姿勢で上部ポートから挿入しているところである。内側センタモジュールおよび上部ポートにはガイド機構が設置されており、このガイドはその面に沿って内側センタモジュールを下ろしていき、支持固定のためのフック部が自動的に挿入されるよう設計されている。左右のサイドモジュールの最上部

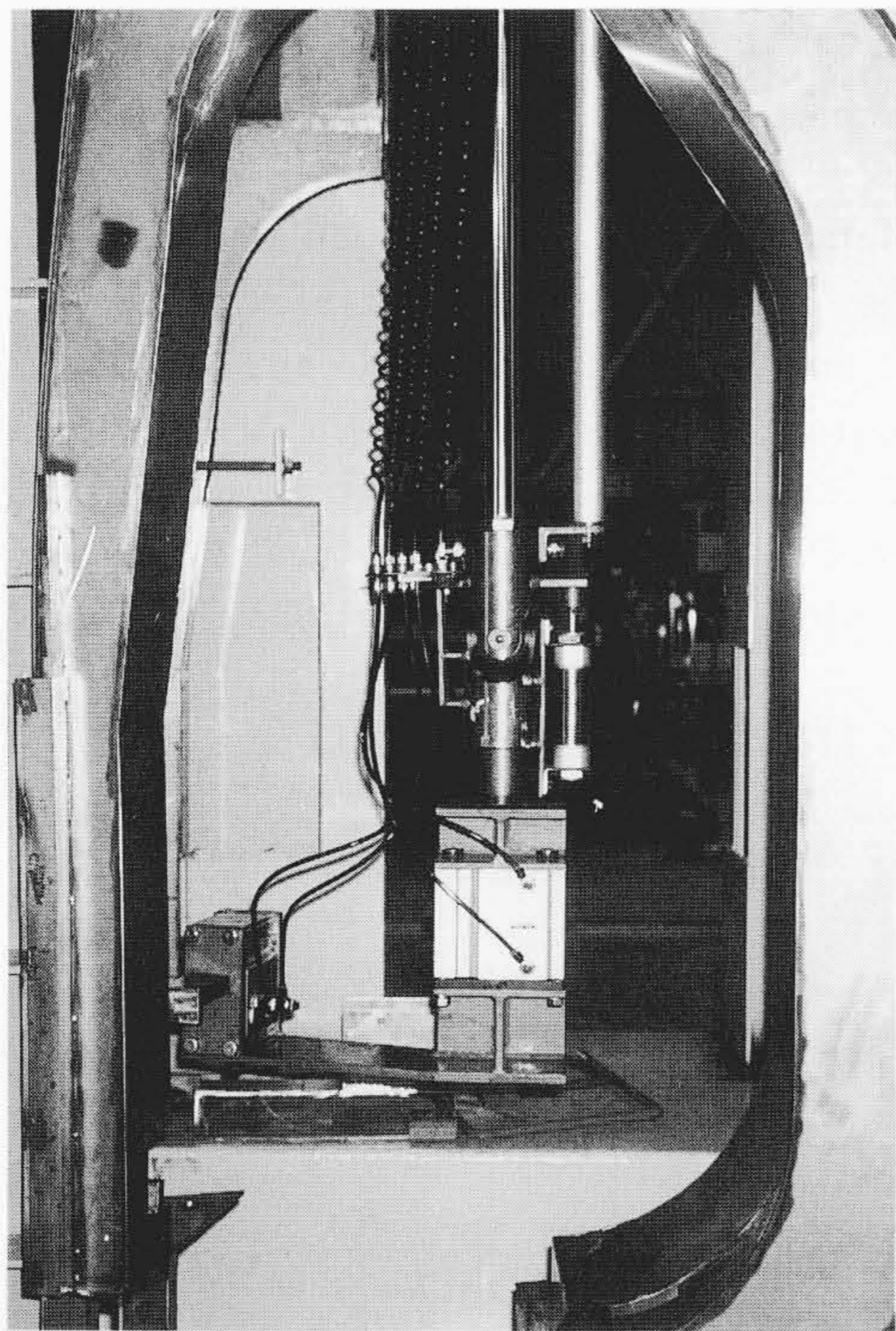


図5 副遠隔機器ユニット(引張り突っ張り機構)の炉内展開状態
テレスコープにより、副遠隔機器ユニットの引張り突っ張り機構部を上部ポートから炉内に展開している状態を示す。

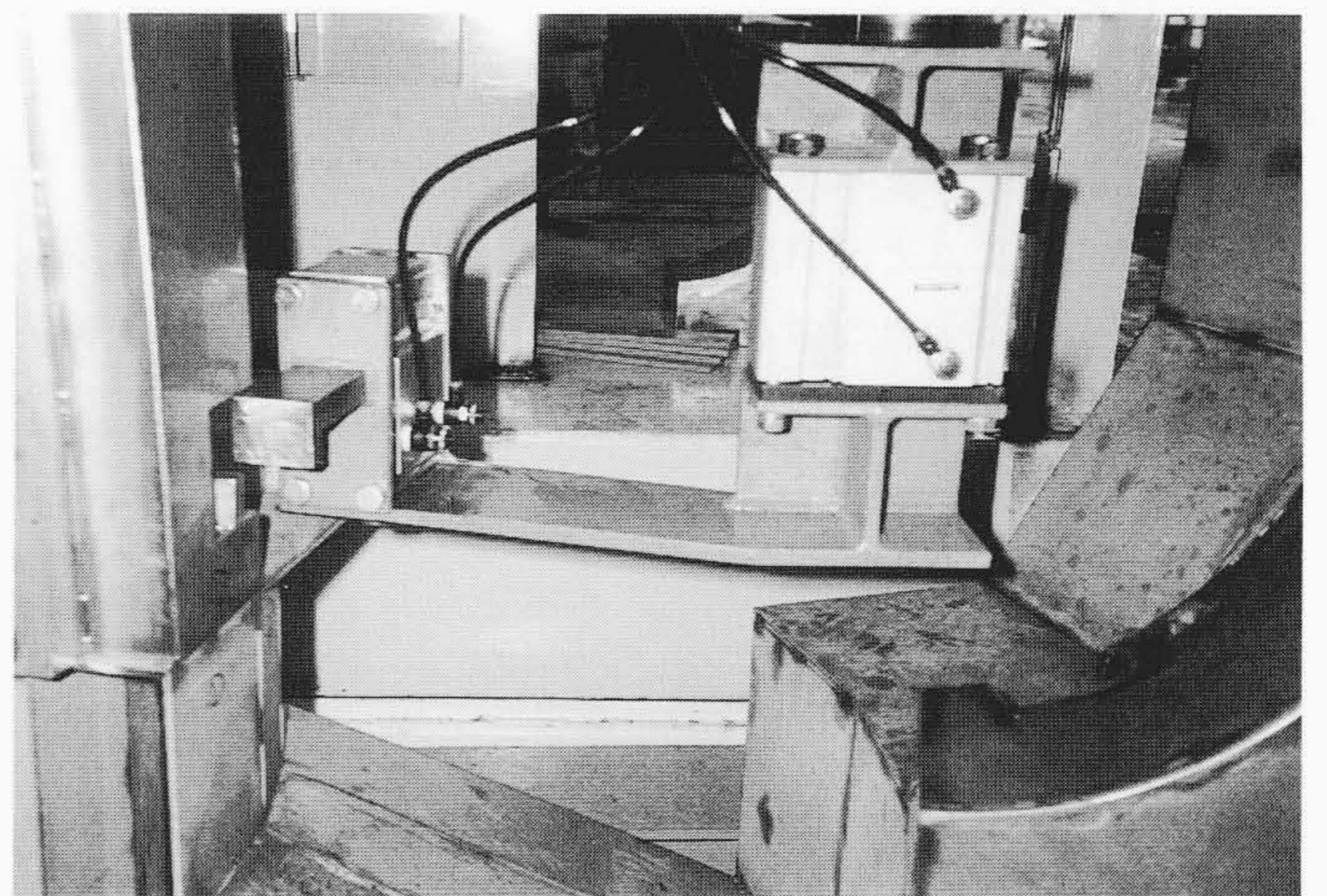


図6 引張り突っ張りアームの内側サイドモジュールの所定位置への挿入状態
引張り突っ張りアームと固定ピンを、同時に所定の位置に挿入しているところを示す。

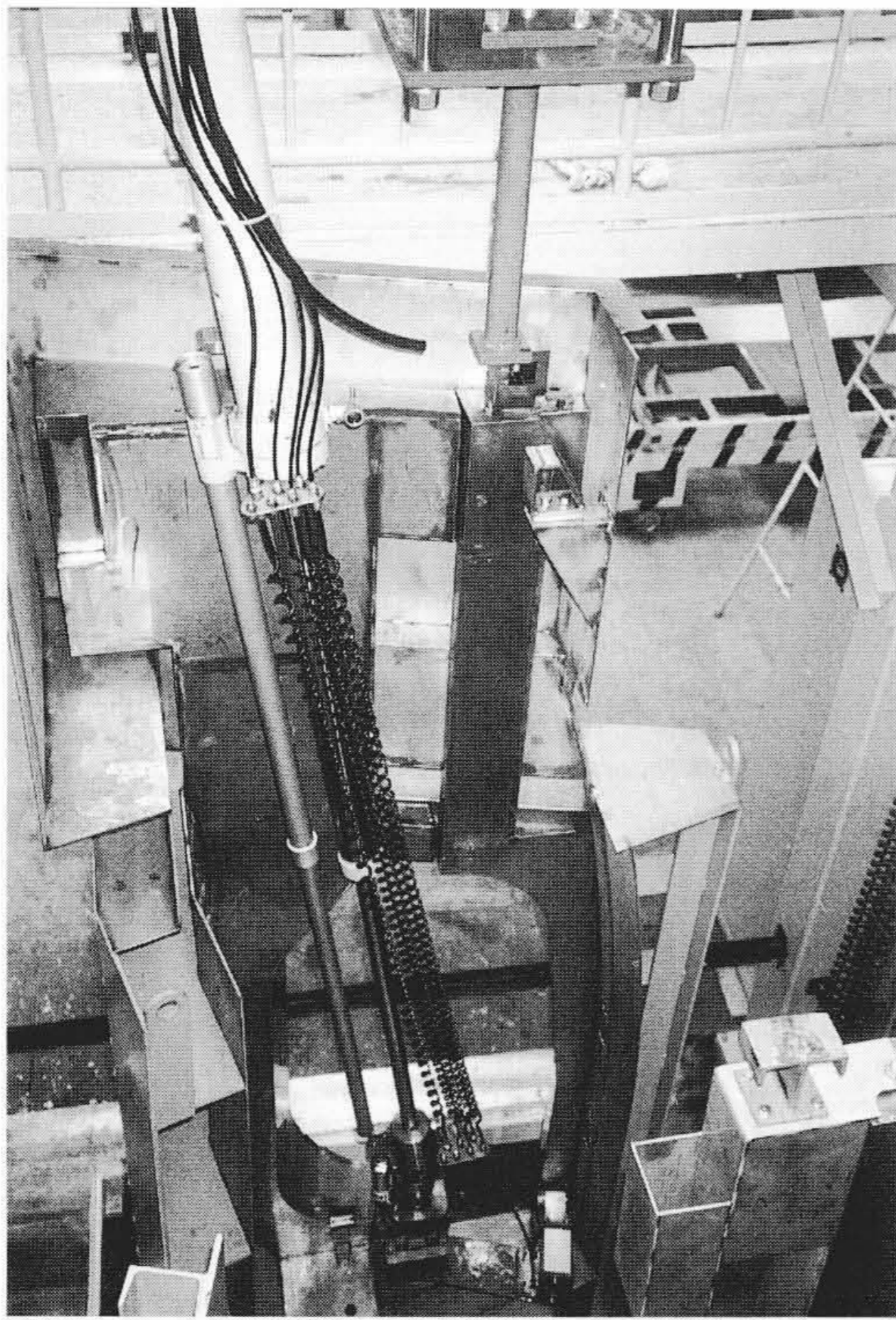


図7 主、副遠隔機器の同時動作による内側サイドモジュールの固定支持解除状態 主遠隔機器ユニットで内側サイドモジュールを保持しながら、副遠隔操作ユニットの引張り突っ張り機構を動作させて固定支持状態を解除しているところを示す。

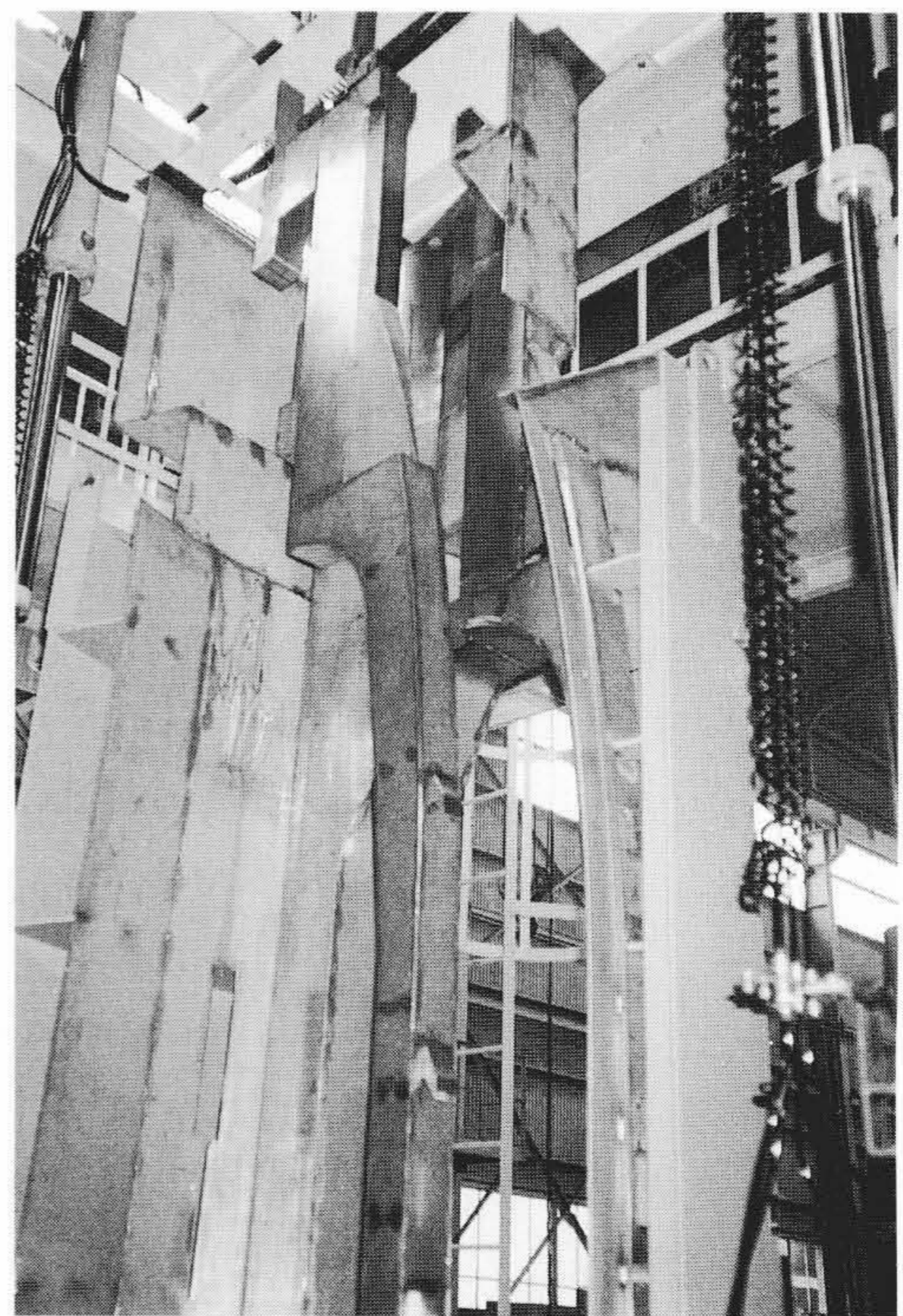


図8 遮へいブランケット内側センタモジュール上部引き抜き状態 遮へいブランケットの内側センタモジュールを、バランス調整をとりながら上部ポートから引き出している状態を示す。

に設けられたガイド面に沿っての単純な降下移動動作だけで、フック式支持構造が確実に挿入できることが確認できた。

制御方式を極力単純化した目視による運転方法ではあるが、この方式による遮へいブランケットの分解保守遠隔操作に伴う基本動作が、世界で初めて実証できた。

4 おわりに

核融合実験炉の炉内構造物、特に遮へいブランケットの分解・保守の必要性と、そのための遠隔機器の開発について述べた。開発の第一段階として基本動作実証のための $\frac{1}{5}$ 縮小モデルを開発し、多くの重要な結果を得た。中でも、姿勢制御の重要性が把握できたこと、ガイド機構の重要性と最適な構造が把握できたこと、自動制御化のための貴重な情報が多く得られたことは大きな成果であり、上部ポートからの分解保守の可能性が基本的に実証できたことはきわめて大きな前進

である。今後、これらの成果を取り入れて遠隔操作の自動制御方法の開発を行い、全体の炉構造と整合のとれた分解保守用遠隔機器の実用化を進めていく予定である。

参考文献

- 1) S. Matsuda, et al.: Conceptual Design Study of the Fusion Experimental Reactor(FER), Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Washington(1990) IAEA-CN-53/G-2-2
- 2) K. Tomabechi: ITER: Conceptual Design, Proc. 13th Int. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, Washington(1990) IAEA-CN-53/F-1-1
- 3) IMC: ITER Conceptual Design Report, IAEA ITER/DS/No.18, IAEA Vienna(1991)
- 4) 日本原子力研究所: 核融合研究開発の現状, 1989年