

東海大学大学院令和6年度博士論文

核融合炉における放射線遮蔽体を含む  
Diagnostic rackの構造に関する研究

田中 優

## 目次

第 1 章	序論.....	3
1.1	核融合発電の位置づけ.....	3
1.2	核融合炉の概要.....	4
1.3	核融合炉におけるポートの中身と Diagnostic rack の役割.....	6
1.4	Diagnostic rack における課題 .....	8
1.5	研究の目的と位置づけ.....	13
第 2 章	炭化ホウ素粉を用いた軽量な中性子遮蔽体の開発 .....	15
2.1	中性子遮蔽体における課題と炭化ホウ素粉を用いた中性子遮蔽体の提案 ...	15
2.2	炭化ホウ素粉を用いた試験体の試作と密度比の計算 .....	16
2.3	中性子のモンテカルロシミュレーションによる炭化ホウ素粉を用いた中性子遮蔽体の妥当性検証.....	20
2.4	実機へ向けた試作.....	24
2.5	まとめ .....	28
第 3 章	Diagnostic rack 及び固定機構の開発.....	29
3.1	既存研究における課題と新提案 .....	29
3.2	既存研究と新提案の比較検討.....	33
3.3	設計の具体化 .....	47
3.4	固定機構の試作による設計の妥当性検証 .....	53
3.5	まとめ .....	61
第 4 章	高周波伝送ラインにおける遠隔保守対応の電気コネクタの開発 .....	63
4.1	遠隔保守電気コネクタの考案.....	63
4.2	試作と設計の妥当性検証.....	67
4.3	まとめ .....	71
第 5 章	結論.....	73
参考文献	.....	76
謝辞	.....	79

# 第1章 序論

## 1.1 核融合発電の位置づけ

日本の消費電力は2000年代に入ってから飽和しているが [1]、国立研究開発法人科学技術振興機構の試算によると、今後、データセンターなどの増加に伴って、消費電力は増大していくことが予測されている [2]。日本の総発電量は2022年時点では、カナダ、アメリカ、韓国に次いで世界4位である。発電には燃料などの資源が必要であるが、日本は十分な資源がなく、輸入に頼っており、輸入依存度が世界1位である [3]。経済産業省資源エネルギー庁は、この状況を「多くの資源を海外に依存せざるを得ないという、日本が抱えるエネルギー需給構造上の脆弱性」とし、エネルギー政策において解決すべき課題の一つとしている [4]。2020年に経産省が公開したカーボンニュートラルの産業イメージにおいては、次世代の主要電源の一つとして、高温ガス炉と並んで核融合炉が紹介されている。高温ガス炉は原子炉であるため燃料はウランであり、輸入に頼らざるを得ない。この頃から核融合炉に関する議論が活発化し、2023年に内閣府はフュージョン・イノベーション戦略を策定した [5]。

核融合発電の利点として以下が挙げられている。

- ・ 発電の過程において二酸化炭素が発生しない
- ・ 豊富な燃料
- ・ 安全性
- ・ 低レベルの放射性廃棄物

発電の過程においては、原子力発電所と同様に二酸化炭素が発生しない。核融合発電の燃料として三重水素と重水素を用いられることが予定されている。これらは、海水に含まれているため、海水から分離・回収することにより、燃料として使用することができる。海に囲まれている日本にとっては、発電のための資源を十分確保できる可能性があることを意味する。核融合炉は炉の内部で核融合反応を発生させ、そこから出てくる中性子の運動エネルギーを熱に変換して、水蒸気タービンを回し、発電機を用いて発電する。核融合反応は限られた条件下のみで維持されるため、核分裂反応を用いた原子炉と異なり、核融合炉への冷却水供給がストップすると直ちに中性子源となるプラズマが消滅するため安全性が高いと言われている。また、核融合反応で発生する中性子によって核融合炉の一部は放射化するが、原子炉において地層処分を必要とする使用済み燃料ほどの高レベルの放射性廃棄物ではないため廃炉が容易である。このような利点があるため、核融合発電実現のために研究開発が進められている。特に日本においては、発電のための資源を輸入に頼る必要がなくなる可能性が

ある。核融合発電を実現することは、エネルギー需給構造の脆弱性を改善し、国益に資する。

## 1.2 核融合炉の概要

最近のトカマク型核融合炉開発の一例として核融合実験炉 ITER を用いて、核融合炉の概要を説明する。2007 年に発行された ITER 協定に基づいて、日本、米国、欧州、ロシア、中国、韓国、インドの 7 極の国際協力によってフランスに ITER の建設が進められている。ITER 協定は「エネルギー問題と環境問題を根本的に解決するものと期待される核融合エネルギーの実現に向け、国際約束に基づき、核融合実験炉 ITER の建設・運転を通じて、核融合エネルギーの科学的・技術的実現可能性の確立を目指す。」ことを目的としている。今後、ITER による科学的・技術的実現可能性が確立されれば、日本が概念設計が進めている核融合実証炉 JA DEMO [6] [7]などの設が開始されるものと計画である。

トカマク型核融合炉を用いた発電方法を図 1 に示した。真空容器の中で重水素と三重水素のプラズマを生成し加速した中性粒子ビームや電磁場を用いた加熱で核融合反応を起こし、中性子を発生させる。ブリーディングブランケットのリチウムと中性子の核反応によって三重水素の生産 [8]と崩壊熱を用いて水を温めて、発電タービンを回し、発電する。 [9]。

フランス政府から委託された ASN（日本の原子力規制庁に相当する機関、L'Autorité de sûreté nucléaire）は ITER の許認可審査を行うことになっており、製造の段階から ASN による監査が ITER 機構及び製造業者の工場等において行われている [10]。この許認可は、フランスにおける原子力発電所の許認可に相当するものとなっており、世界で初めて原子炉発電所に相当する発電が可能なプラントとして ITER は扱われている（現状、JT-60SA も含めて国内で使用されている実験炉等は旧原子炉等規制法（現核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律）は適用されていない）。適用される法規制から伝搬して最終的に構造に関わる規格として何を適用すれば良いかが決まる。ITER では、RCC-MRx（Règles de conception et de construction des matériels mécaniques des installations nucléaires hautes températures, expérimentales et de fusion）が真空容器等の安全に関わる機器の構造に関わる規格（原子力コードと一般的に呼ばれる）となっている。この原子力コードでは、材料の製造方法・機械的特性・不純物の許容範囲、構造強度を担保するための試験方法、溶接などの機器製造の方法、製造環境などが定義されている。研究開発の段階であるとしても、この原子力コードを遵守しなければ、ITER の許認可は得られず、実験を実施することはできない。

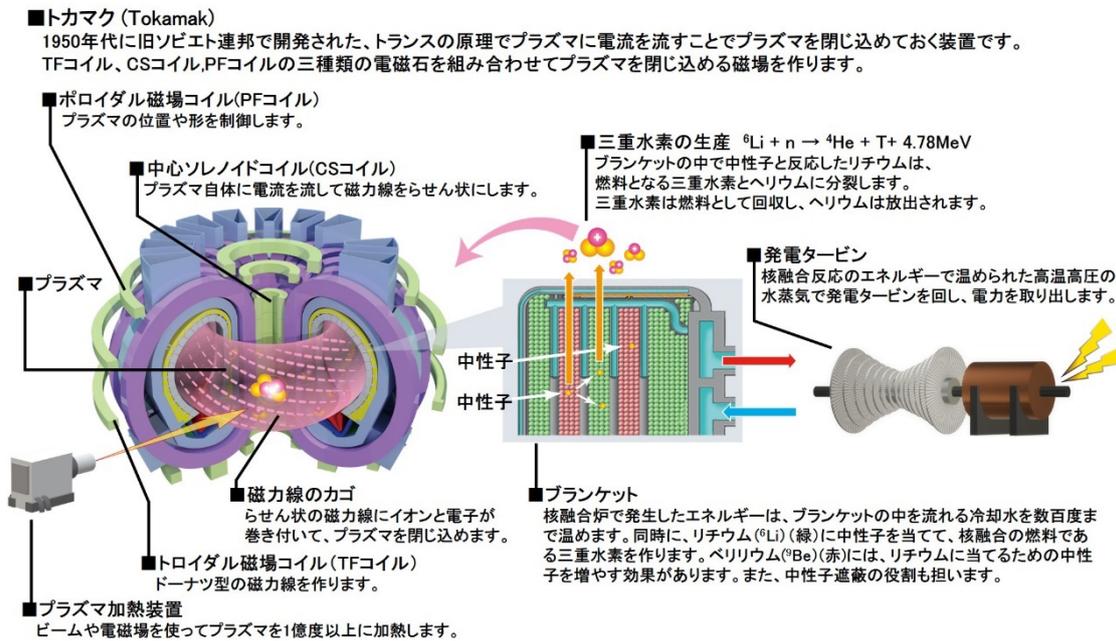
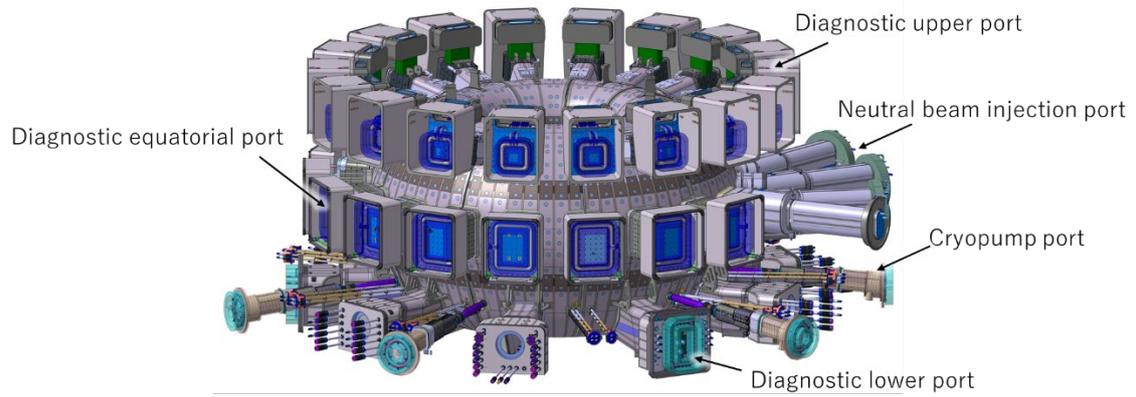


図 1 The methodology to generate electricity by tokamak nuclear fusion [9] (文部科学省ウェブサイト利用規約に従って転載) .

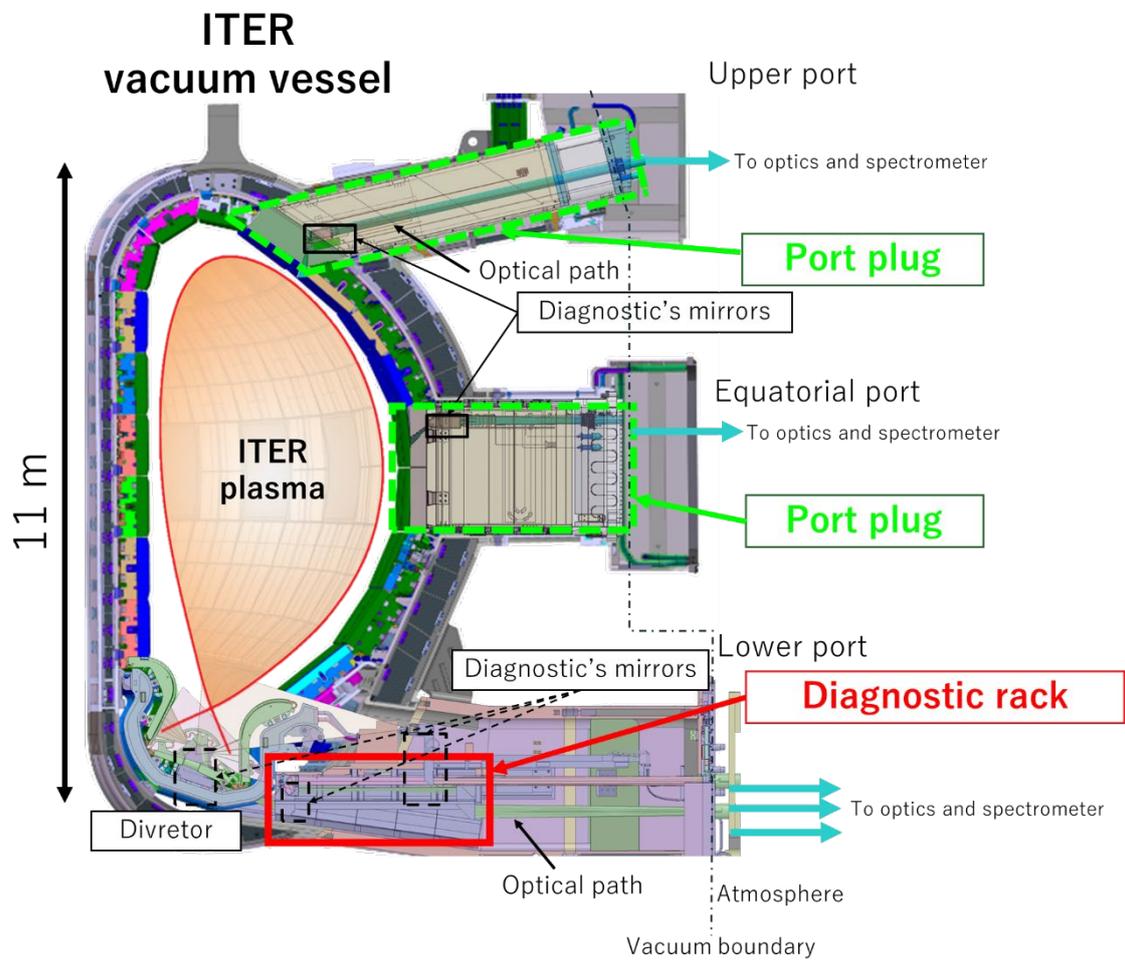
### 1.3 核融合炉におけるポートの中身と Diagnostic rack の役割

トカマク型核融合炉の真空容器には真空排気、プラズマの加熱、プラズマの計測、真空容器内への遠隔保守機器の導入などのために各種のポートが取り付けられている（図 2）。図 3 は真空容器を横から見た断面である。斜め上方向（上部ポート）、水平方向（水平ポート）、斜め下方向（下部ポート）に真空容器からポートが伸びている。真空容器を上から見たときに、20 度毎にポートが取り付けられており、合計 54 ポートある。大半のポートには計測機器が配置されるため、計測用ポートとして使用される。ITER においては約 50 の計測機器が約 100 のパラメータの測定を行うことになっている。計測機器には、測定精度、高稼働率、安全境界の保護、放射線環境、中性子による核発熱、プラズマによる輻射熱、大きな電磁力荷重など、厳しい要求・環境で機能を維持する必要があるため、今まで核融合炉に関する実験に使用されてきたプラズマ計測機器とは違って、きわめて高い信頼性が求められる。これらの計測機器をポート内に収納し、支持する役割を有するポートプラグあるいは Diagnostic rack がある。ポートの形状により、ポートプラグあるいは Diagnostic rack のどちらの支持構造を使用するかが決まる。上部・水平ポートにはポートプラグ、下部ポートには Diagnostic rack が配置される。

Diagnostic rack は、計測機器の搭載と放射線遮蔽の役割を有している。計測機器は、真空容器内のダストやプラズマ及び中性粒子による物理スパッタなどによって性能が劣化するため、定期的にメンテナンスのためにポートから取り出す必要がある。そのため大半の計測機器は真空容器及びポートに直接配置することはなく、ポートプラグや Diagnostic rack に搭載される。また、計測機の電子機器（カメラ、分光器、アンプなど）は、放射線による故障や真空環境に適用できないため、大気側に配置される（大気中であっても MGy オーダーの吸収線量となるので重厚な遮蔽は必須）。このスペースをインタースペースと言う。ここにはメンテナンスのために作業員が立ち入ることになる。作業員の放射線防護のために Diagnostic rack は遮蔽体として機能する必要があり、インタースペースの運転停止後線量率（14 日後）を  $100 \mu\text{Sv/h}$  まで低減することが ITER における設計要求となっている。



☒ 2 ITER vacuum vessel with ports.



☒ 3 The cross-section of ITER tokamak.

## 1.4 Diagnostic rack における課題

Diagnostic rack は主材料としてステンレス製の鍛造材料が使用される。D-T 運転が開始されると、Diagnostic rack は放射化するため、作業員によってポート内から取り出すことができない（再インストールも同様にできない）。そこで、遠隔保守ロボットを用いる必要がある。遠隔保守ロボットは、福島第一原子力発電所の廃炉作業において知られているが [11]、ITER においても様々な種類の遠隔保守ロボットが開発中である。真空容器内下部には、プラズマから放出されたイオンなどを受け止めるダイバータの交換を行うダイバータ遠隔保守システム (DRHS: Divertor remote handling system) [12]や、プラズマから真空容器を保護及び放射線遮蔽の役割を有するブランケットの交換を行うブランケット遠隔保守機器などがある [13]。Diagnostic rack の交換にも、DRHS が使用される。DRHS は放射線環境化で動作する必要があるため、使用可能な耐放射性を有したモーターや、電子機器の制限により可搬可能質量が約 10 トンとなっている。Diagnostic rack はこの質量以下に設計する必要があり、Diagnostic rack 及び搭載される中性子遮蔽体は軽量化する必要がある。ポート内の中性子のエネルギーを考慮し、炭化ホウ素の焼結体を中性子遮蔽材として使用する先行研究がある [14]。しかしながら、炭化ホウ素の多孔質構造が燃料粒子であるトリチウム雰囲気には曝されると、表面にトリチウムが吸着し、核融合炉の内のトリチウム保有量を増加させることが問題となる可能性が高い。トリチウムは放射性物質のため、ITER においては、設置許可において厳格に保有量の上限が定められている。保有量管理の観点から可動性 (mobilizable) のあるトリチウムの存在は好ましくない。

Diagnostic rack が搭載する計測機器の一つにダイバータ不純物モニターがある [15]。この計測機器はダイバータカセットの隙間からダイバータプラズマが発する光 (200-1000 nm) を観測する計測機器である (図 4)。ダイバータカセット間は 20 mm の隙間となっており、ダイバータ不純物モニターはこの隙間と同じ幅で集光する。この光路が 1 mm でもずれると光量が足りなくなる可能性があるため、Diagnostic rack の設置精度 $\pm 1$  mm 以下にする必要がある。また、核融合炉のライフサイクル期間中 (現段階では ITER のライフサイクルを想定)、最大 10 回程度、Diagnostic rack は取り出す必要があるが、再度インストールする際の設置位置の再現性も $\pm 1$  mm 以下にする必要がある。

DRHS は Cassette multi-functional mover (CMM) と Manipulator arm (MAM) から構成されている。MAM は専用のツールを把持することができ、ボルト締結などを行うため、遠隔保守によって操作する部分へのアクセス性が重要となる。また、視認性も重要となる。CMM 及び MAM にはカメラが搭載されているが、カ

メラを配置できる場所には限りがある。そのため、カメラの視野も考慮して、遠隔保守による操作部の設計を行う必要がある。この遠隔保守によるダイバータの交換には 100%に近い信頼性が求められており、万が一失敗した場合には、ダイバータが交換できず劣化により破損する。最悪の場合、安全境界である真空容器の破損につながり、核融合炉の運転が継続不能になる可能性がある。表 1 に示されるように、ITER において、ダイバータ、ブランケット、Diagnostic rack は遠隔保守クラス 1 に該当しており、最も高いレベルに分類されている。Diagnostic rack は ITER のライフサイクル 20 年間ポート内に残置しても問題ない。しかし、ダイバータを取り出すためには、下部ポートから取り出す必要があり、ダイバータの交換と同様に 100%に近い信頼性が求められている。これらの信頼性を担保するために遠隔保守による操作は極めて単縦で、手数を少なくする必要がある。また、遠隔保守の妥当性を検証するために、モックアップを製作して、全タスクについて検証することが ITER における設計要求事項の一つになっている。

核融合炉の下部ポートの環境において、Diagnostic rack は様々な荷重に曝されることになる。核融合反応によって生成された中性子による核発熱、プラズマによる輻射熱、プラズマディスラプション [16] によって発生する渦電流とトロイダル磁場のカップリングによる電磁力、地震による振動の伝播などがある。図 5 に荷重の流れを示しているが、プラズマ、地震、冷却系統が荷重の源となって、最終的に Diagnostic rack に伝播していることが分かる。これらの荷重によって Diagnostic rack が変形することによって、Diagnostic rack もしくは周辺機器に高い応力が発生し、破損することが問題となる。

真空、放射線環境化では、ガス放出と耐放性の観点から、金属製の被覆を用いる MI (Mineral insulated) ケーブルを使用する必要がある。通常ケーブルには樹脂材料が使用されるが、樹脂からのガス放出量が多量であるため、真空環境下での使用は避けられている。また、放射線によって樹脂製の被覆が劣化し絶縁性能が失われる可能性がある。MI ケーブルは電気コネクタで接続・切断されるが、被覆がステンレス製のため可とう性が低く、上述の遠隔保守にて接続・切断を行うことは難しい。その対策として芯線にセラミックのスリーブを通した可とう部を設ける構造が一般的であるが、高周波伝送においてインピーダンスの非整合による電力損失を引き起こす原因となる。

以下に Diagnostic rack の開発に関わる課題をまとめる

- I. Diagnostic rack の質量制限及びガス吸着によるトリチウム保有量の増加
- II. Diagnostic rack の設置位置再現性と高い遠隔保守性の担保及び（核融合炉における）荷重による破損

III. 遠隔保守で接続・切断される電気コネクタへの MI ケーブルの使用と高周波電力の損失

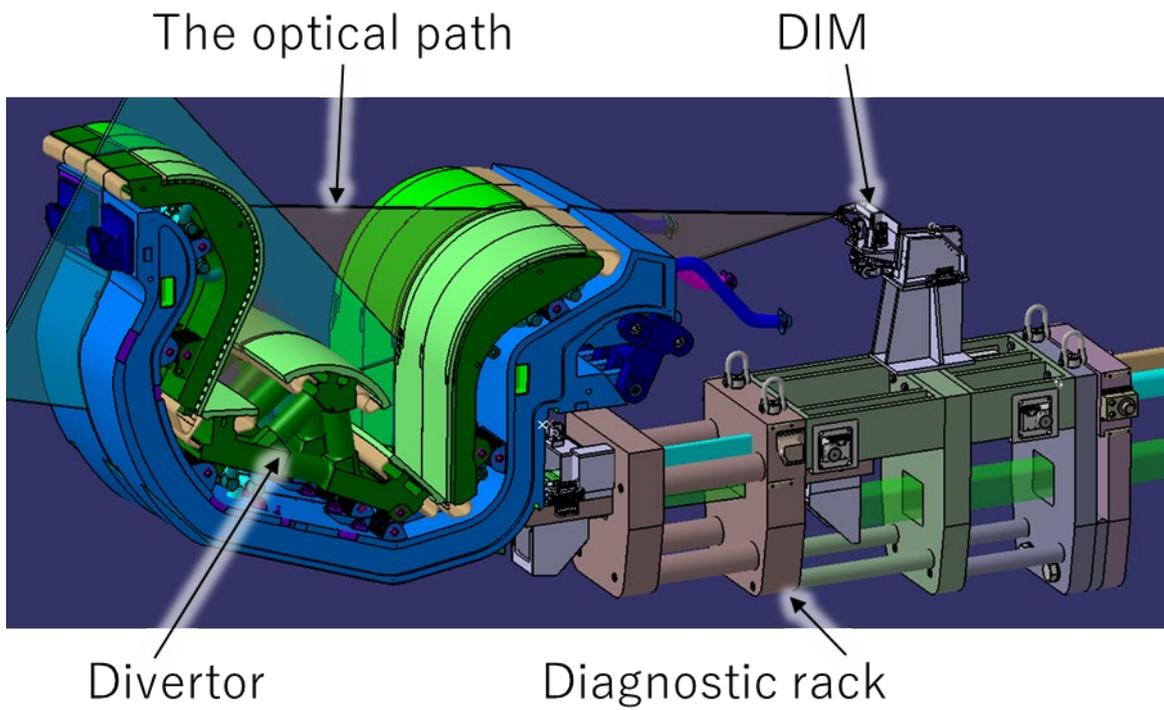


図 4 The situation of the optical path for DIM through the gap of divertors.

表 1 The remote handling class [17].

Classification	Task	RH provision
<b>RH class 1</b>	Scheduled maintenance tasks	Plant designed to be RH-compatible for maintenance. Maintenance equipment procured and operation sequences planned in detail prior to machine operations. Maintenance tasks verified on physical mock-ups before design is finalized.
<b>RH class 2</b>	Task probability $> 3 \cdot 10^{-1}$ but not scheduled tasks (in 20-year period)	Plant designed to be RH-compatible for maintenance. Maintenance equipment procured and operation sequences planned in detail prior to machine operations. Novel aspects of maintenance tasks verified on physical mock-ups before design is finalized.
<b>RH class 3</b>	Task probability $> 3 \cdot 10^{-2}$ but $< 3 \cdot 10^{-1}$ (in 20-year period)	Plant designed to be RH-compatible for maintenance. Maintenance equipment procured and operation sequences planned in detail prior to machine operations.

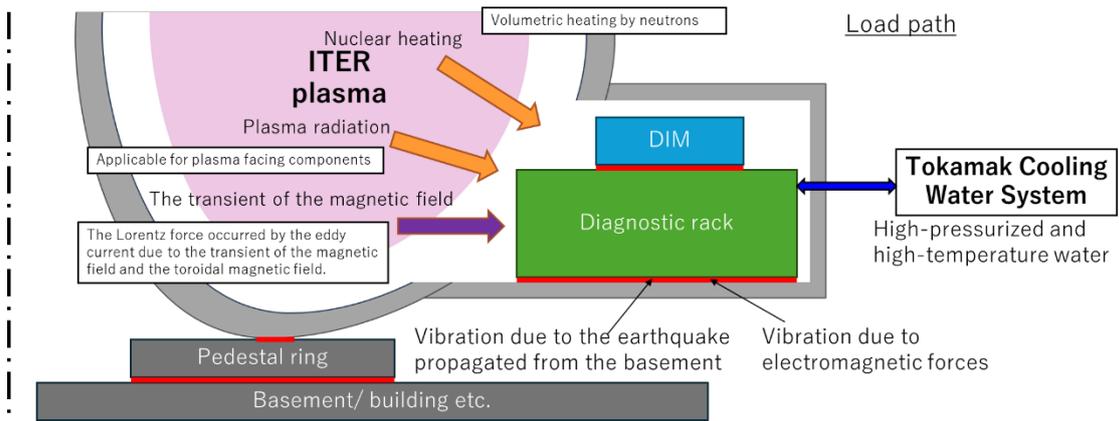


图 5 The load path.

## 1.5 研究の目的と位置づけ

本論文は、0 で述べた課題を解決し、Diagnostic rack の開発を進展させることを目的としている。各課題の詳細、解決するための方法及び検証方法を第 2 章以降で述べる。

第 2 章では、Diagnostic rack の質量制限及びガス吸着による核融合炉内の燃料粒子の希釈・トリチウム保有量の制限について説明する。中性子遮蔽材としては比較的軽量の炭化ホウ素の粉をステンレス製の容器に振動・プレス充填する新しい中性子遮蔽体を提案する。遮蔽体を試作し、粉のサイズの組み合わせ及び振動充填とプレス充填の組み合わせの影響などを評価する。最適な組み合わせによって得られる炭化ホウ素の密度を考慮して、MCNP (monte carlo N-particle transport code) を用いた遮蔽計算を行い、Diagnostic rack の中性子遮蔽体として適用可能か検討する。

第 3 章では搭載するプラズマ計測機器から求められる $\pm 1$  mm の位置再現性と遠隔保守性の担保及び核融合炉における荷重について説明する。橋梁の支承の構造を流用することによって高い位置再現性を得て、それが核融合炉における荷重によって破損せず、遠隔保守によって操作可能である Diagnostic rack の固定機構を提案する。構造解析シミュレーションを用いて既存の二つの設計案 (ITER 機構、Ioffe 研究所) と比較することにより本提案の優位性を評価する。本提案の実規模のモックアップを製作し、位置再現性及び各固定点に発生する反力を測定する。また、得られた測定結果について構造解析シミュレーションを用いて妥当性を検証する。

第 4 章では、遠隔保守で接続・切断する電気コネクタにおいて、核融合炉内では金属製の被覆を用いる MI (Mineral insulated) ケーブルの必要性とプラズマ計測機器のための高周波電力伝送路における電力損失について説明する。硬い MI ケーブルに支持点を持たせず、可とう部として使用する新しい電気コネクタの構造を提案する。この提案の実現可能性を、コネクタ接続・切断時の移動に MI ケーブルが応力的に問題なく追従するか構造解析シミュレーションで検証を行う。また、駆動時の抵抗力の算出、モックアップを用いた実際の接続・切断時の抵抗力の測定を行うことにより、開発した電気コネクタの設計妥当性及び裕度を検証する。

第 5 章では、本論分の総括として、第 2 章から第 4 章の各研究で得られた成果をまとめた。

今回、開発を進めた Diagnostic rack は ITER 向けであるが、ここで開発する構造及び機器は、将来の実証炉などに適用できる可能性が高い。例えば、日本で設計が進められている、JA DEMO [6] [7] の概念設計の基本設計を見てみると、

Diagnostic rackと同様に放射線遮蔽体として「Shield plug」を遠隔操作でポートの中に固定する必要がある。Shield plugはブリーディングブランケットを真空容器内に配置するとともに、ポート内の放射線遮蔽の機能を有するが、具体的にこれらの機器の固定方法は検討されていない。また、計測機器をこのShield plugに搭載することは十分考えられる。核融合炉における荷重に耐え、計測機器が要求する位置再現性を満足する固定機構が必要となる。

欧州連合が概念設計を進めている核融合実証炉EU DEMO [18]において、水平ポートはポートプラグによって安全境界が形成される。しかし、安全境界に対する設計要求の影響を大きく受けるため、担保すべき機能が多岐にわたり、ポートプラグの設計の難易度が上がる（機能の物理要素への割り当てが難しくなる）。よって、将来的には安全境界は単純な封止フランジのみで持ち、放射線遮蔽及び計測機器の搭載についてはDiagnostic rackのような構造物単独で持つことが理想と考える。

これらの例のとおり、今回開発するDiagnostic rackは今後の核融合炉に転用できる可能性が高く、本論文が核融合炉による発電の実用化に寄与するものと思われる。

## 第2章 炭化ホウ素粉を用いた軽量な中性子遮蔽体の開発

### 2.1 中性子遮蔽体における課題と炭化ホウ素粉を用いた中性子遮蔽体の提案

ITER 下部ポート統合機器の一部として、図 6 に示すとおり下部ポートには放射線遮蔽及び計測機器を搭載するために Diagnostic rack 及びバックプレートが配置される。Diagnostic rack にはダイバータ不純物モニターが搭載される。Diagnostic rack とバックプレートは、大気側に配置されるインタースペース支持構造体及びポートセル支持構造体上の計測機器のメンテナンスを行う作業員の放射線防護のために必要であり、中性子及び二次的に発生するガンマ線を遮蔽する必要がある。ITER における要求として、メンテナンスが行われるエリアにおいては運転停止後線量率（14 日後）を  $100 \mu\text{Sv/h}$  以下に抑える必要がある。周辺のポートからのガンマ線の回り込みを考慮すると、下部ポート第 2 番においては、 $50 \mu\text{Sv/h}$  程度に抑える必要がある。また、Diagnostic rack 及びバックプレートは放射化するため、遠隔保守ロボットを用いてインストールされる。遠隔保守ロボットの可搬可能質量が 10.5 トンとなっているため、Diagnostic rack 及び中性子遮蔽体の材質、形状等は最適化する必要がある。計測機器の質量が 1 トンとなる見込みのため、Diagnostic rack の質量としては 9.5 トン以下に抑える必要がある。

本研究では軽量で、高速中性子に対して良い中性子吸収 ( $n, \alpha$ ) 断面積を有する、炭化ホウ素を使用することを提案した。既存研究として炭化ホウ素の焼結体を使用したものがあるが [14]、焼結体のため、製作性・経済性が悪い。また、真空雰囲気曝露のため、ガス吸着が問題となる。炭化ホウ素は多孔質構造なため、表面積が見た目以上に大きい。脱ガスのためにベーキングを施したとしても、その効果は一度大気に曝してしまうと失われてしまう。それはガス放出の主な原因が、炭化ホウ素内部に吸蔵されたガスではなく、表面に吸着したガスであることを意味する。このガス放出は、核融合反応のための燃料となる重水素などの燃料となるガスの密度を低下させるだけでなく、ITER における真空容器内の三重水素保有量（4 kg が限度）を増加させる要因となる可能性が高い。そこで、焼結体の代わりに粉を使用することで製作性・経済性を改善し、粉をステンレスの容器に充填・封止することで真空雰囲気に炭化ホウ素が曝されない遮蔽体の構造を提案している。

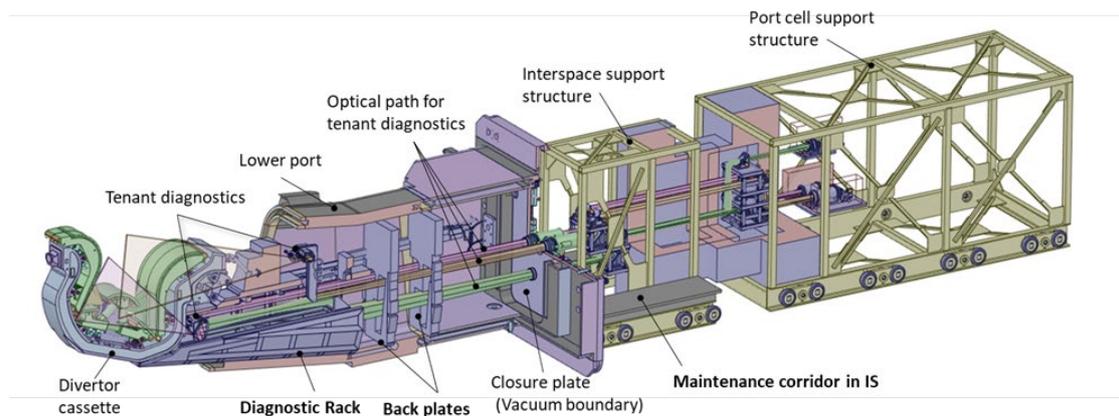


図 6 Components of Lower Port Integration [19] ((Fusion Engineering and Design の Copyright に従って引用。以下、第 2 章、第 3 章の図も同様。)) .

## 2.2 炭化ホウ素粉を用いた試験体の試作と密度比の計算

炭化ホウ素粉は、図 7 に示す写真の通り平均粒子サイズ 2 mm と 0.2 mm を用いた。1 粒子サイズで完全な球を想定した場合には、最大の密度比は 74% となることが知られている。炭化ホウ素の真密度に近づけるために、大きい粒子の隙間に小さな粒子を入り込むことを想定し、サイズの違う 2 つの粒子サイズを適用した。また、写真の通り、原材料に近い炭化ホウ素粉は球状ではなく、砂利のような形状なため、密度比は想定より小さくなることが予想される。

製造工程の概念図を図 8 に示す。励振力 720 N、周波数 50 Hz の振動機 (EXEN 株式会社製) を用いて、ステンレス製容器 (直径 80 mm、長さ 100 mm、厚さ 1.5 mm) の中に 2 種類の炭化ホウ素粉を充填する。その後、約 30 トンのプレス圧力でプレスし (図 9)、炭化ホウ素粉を潰す。蓋には真空封止用の配管が溶接されている。この蓋は容器に溶接される。真空封止のために配管に真空ポンプを接続し、容器内の大気を排気する。数十 Pa まで圧力が下がったことを確認し、パイプをプレス機で潰し、端部を溶接することにより真空封止が完了する。真空封止を施すことにより、容器の厚みを薄くすることができる。遮蔽体を真空容器内に入れたときに、真空封止していないと、容器内外の圧力差によって発生する応力により容器が破損するためである。さらに、容器が薄くなると、炭化ホウ素の空間的な占有率も高めることができるので、遮蔽体としては好ましい。

表 2 のとおり、全部で 6 ケースの試験体を製作した。炭化ホウ素粉の種類、プレス及び振動充填の有無の組み合わせを変化させ、炭化ホウ素の真密度に対する密度比（炭化ホウ素の真密度  $2525 \text{ kg/m}^3 \div$  試験で得られた密度）を計算した。なお、密度比は、容器及び蓋の重さ、容器の内容積、充填した炭化ホウ素粉の重さ、から計算している。計算結果を表 2 にまとめた。2 mm の粉をそのまま容器に注いだ場合の密度比は 52.9% となるが、プレス充填を施すと 69.5% となり、約 17% 程度密度比が増加した。0.2 mm の粉の場合には、何もせずに容器に注いだ場合には密度比は 46.8%、プレスを施した場合には 58.5% となり、プレスによる密度比の増加は 12% にとどまった。2 種類の粉を混ぜた場合、振動充填を施すと 71.4%、振動充填に加えてプレスを施すと 76% まで密度比は向上した。2 種類の粉を振動充填することが密度比向上のためには効果的であることが分かった。



図 7 Left: 2 mm made by 3 M (Germany) and Right: 0.2 mm made by ZHENG XING ABRASIVE (China) [19].

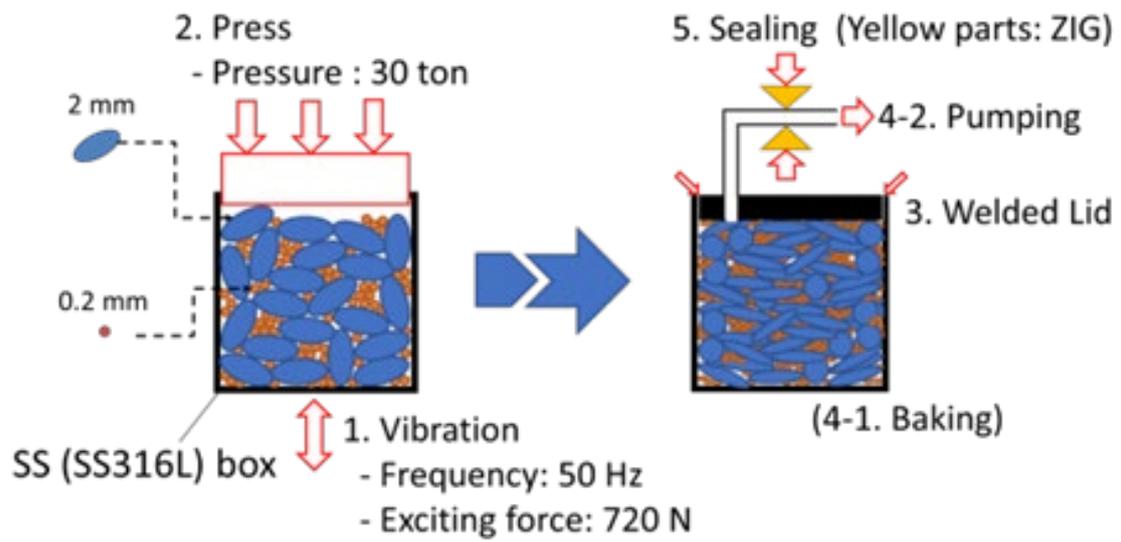


図 8 The procedure of manufacturing [19].

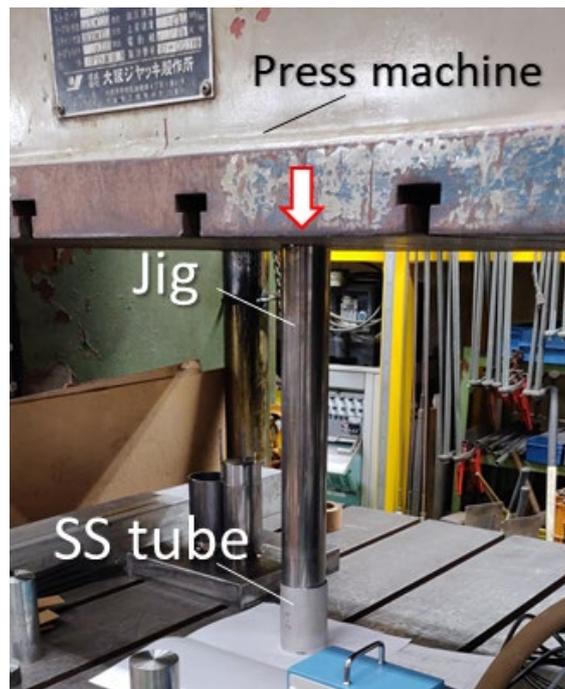


図 9 Configuration while pressing [19].

表 2 Results of prototyping (density ratio to the actual density of B4C).

ケース No.	粒子サイズの組み合わせ (mm)	プレス及び振動充填の有無	密度比 (%)
1	2	N/A	52.9
2	2	プレス	69.5
3	0.2	N/A	46.8
4	0.2	プレス	58.5
5	2 + 0.2	振動	71.4
6	2 + 0.2	プレス+振動	76.0

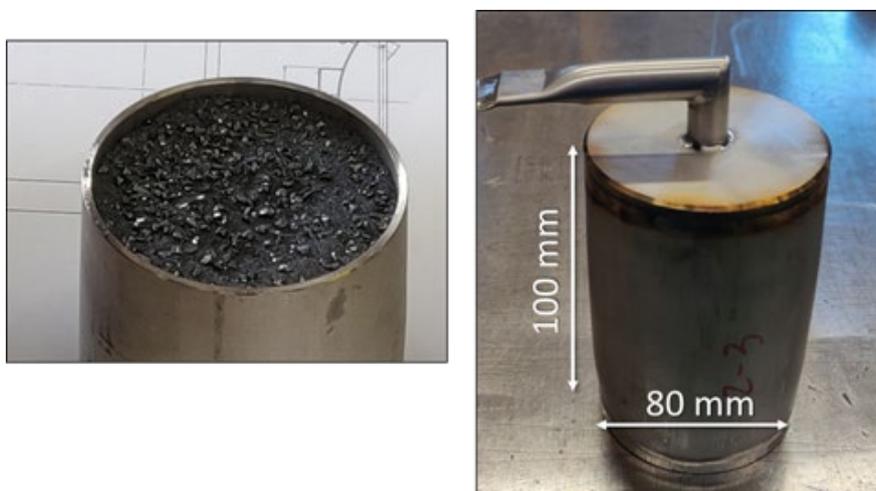


図 10 Left: Surface after vibration and press processes and Right: prototyping after all processes [19].

## 2.3 中性子のモンテカルロシミュレーションによる炭化ホウ素粉を用いた

### 中性子遮蔽体の妥当性検証

振動充填及びプレスを施した炭化ホウ素粉の密度比を適用した遮蔽解析を実施した。計算コードとしては MCNP を使用し、モデルは ITER 機構から提供される C-model\_R181031 を使用した。トカマクを上から見たときの 40 度を切り出し、切断面に周期境界条件を適用したモデルとなっている。また、図 12 に示す領域の運転停止後線量率を計算するために、Direct-1-step 法を用いて自動計算するためのパッチファイルである D1SUNED3.1.2 を使用した。また、反応断面積のデータセットとして、Fendl-3.1d を使用した。C-model に対して新たに今回の解析の対象である Diagnostic rack 等を追加するための CAD を用いた作業は Super MC を用いて行った [20] [21]。放射線遮蔽体として、Diagnostic rack には、運転停止後線量率を  $50 \mu\text{Sv/h}$  以下に低減することと、9.5 トン未満の質量にすることが求められている。今回は 3 ケースの解析を実施した。ケース 1 は Diagnostic rack とバックプレート、ケース 2 は Diagnostic rack、バックプレート及びバーティカルプレート（ステンレス製）、ケース 3 は Diagnostic rack、バックプレート及びバーティカルプレート（炭化ホウ素製（炭化ホウ素の真密度の 70%とする））とした。バーティカルプレートによってドックレッグ構造が形成され、中性子源となるプラズマを直接見通すことができなくなるため運転停止後線量率の低減が図られる。また、炭化ホウ素に材質を変更することによって、遮蔽能力は落とさずに、質量のみ軽くすることができる。

運転停止後線量率の計算結果を

表 3 Results of Neutronics for cases.

に示す。ケース 1 では運転停止後線量率は最大  $154 \mu\text{Sv/h}$  となり、要求値を満たしていない。これは、図 13 に示す中性子束の分布図を見てもわかるように、中性子が、中性子の源となるプラズマから直接評価領域の方まで到達し、評価領域近くがガンマ線源となるためと考えられる。そこで中性子の到達を妨げるためにドックレッグ構造をケース 2 及び 3 には適用している。ケース 2 を見ると、新たに追加したバーティカルプレートによって、中性子束が評価領域まで到達していないことが分かる。運転停止後線量率についても最大  $56 \mu\text{Sv/h}$  まで削減できており、要求値に近づけることができています。しかし、新たな構造物が追加されたことによって質量が 9.6 トンとなり、要求値の 9.5 トンを超えている。そこでケース 3 ではバーティカルプレートの材質をステンレスから炭化ホウ素（試作によって求めた真密度の 70%の密度）に変更し解析を行った。

その結果、運転停止後線量率は  $45 \mu\text{Sv/h}$ 、質量は  $9.35$  トンとなり、どちらの要求も満たせることが分かった。

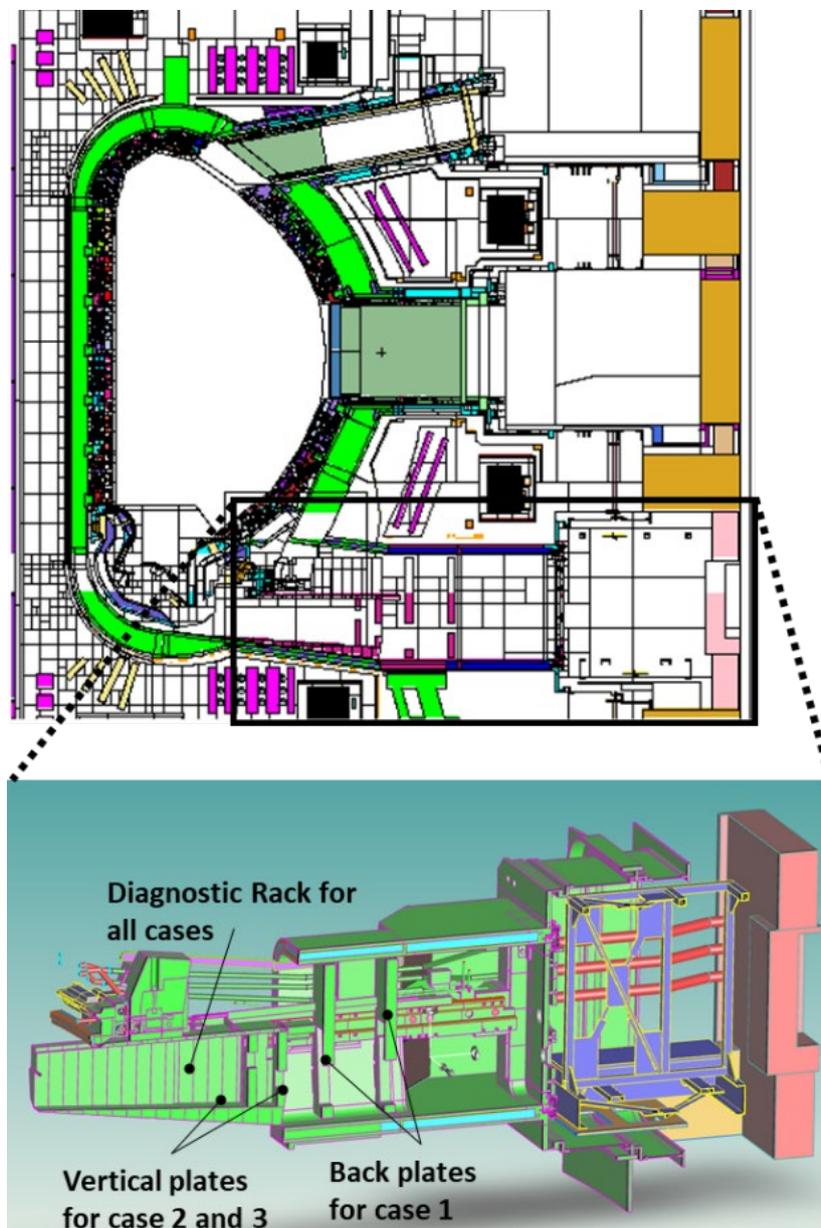
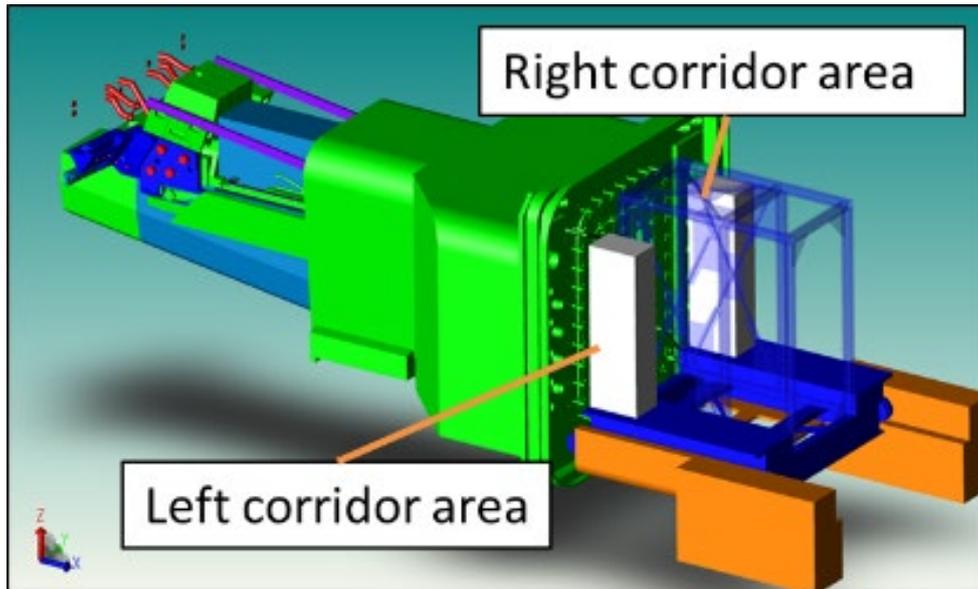
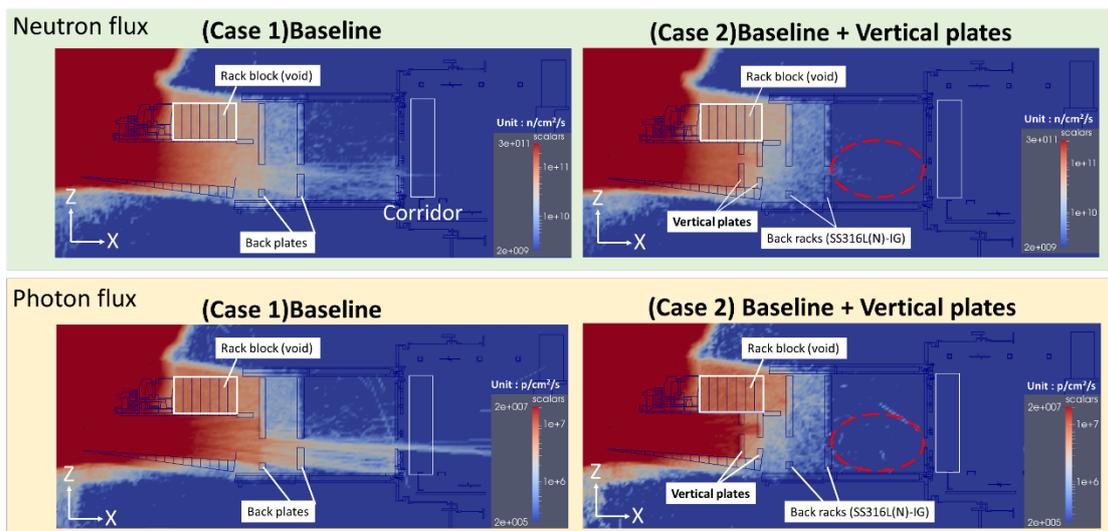


図 11 Neutronics model (C-model) [19].



☒ 12 SDDR evaluation area in corridors [19].



☒ 13 Neutron and photon flux vertical maps [19].

表3 Results of Neutronics for cases.

Case	SDDR in $\mu\text{Sv/h}$ (error in %)		Weight (tons)	Requirement	Assessment
	Left corridor	Right corridor			
(Case 1) Baseline (Diagnostic rack + back plates)	145 (6.2%)	154 (7.0%)	9.2	SDDR $\leq 50 \mu\text{Sv/h}$  Weight $\leq 9.5$ tons	Not Satisfied
(Case 2) Baseline + Vertical plates (SS316L)	56 (9.5%)	54 (9.5%)	9.6		Not Satisfied
(Case 3) Baseline + Vertical plates (70% of the actual density of $\text{B}_4\text{C}$ )	45 (8.6%)	41(8.3%)	9.35		Satisfied

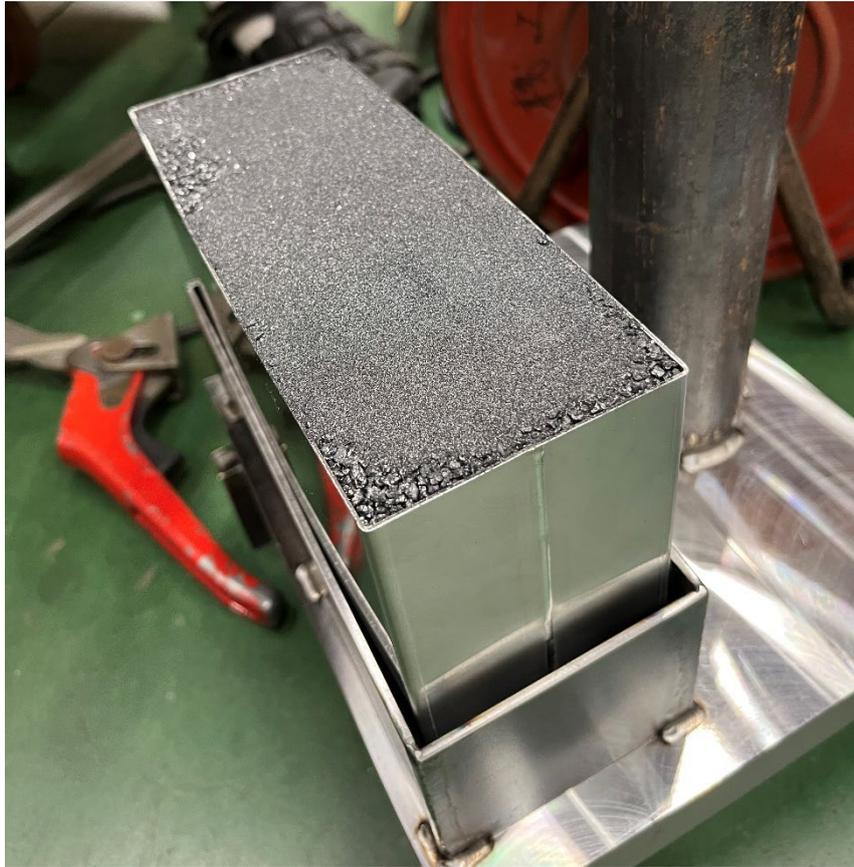
## 2.4 実機へ向けた試作

実用化に向けて、実機サイズの遮蔽体の試作及び外圧に対する座屈応力を調べるために圧壊試験を行った。遮蔽体が配置される真空容器の中は最大で 0.2 MPa になるため、炭化ホウ素粉が十分充填され、座屈応力に十分裕度があるか確認することを試験の目的とした。

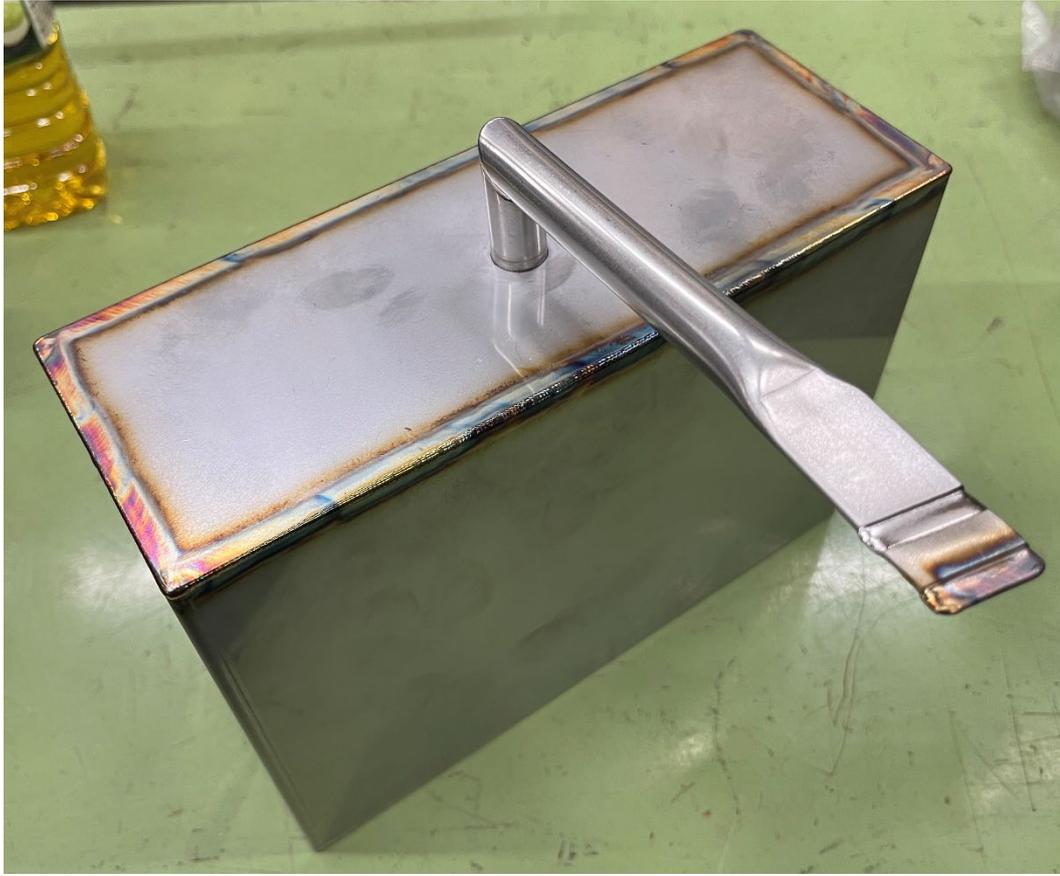
Diagnostic rack に取り付けることを考慮して、容器を箱型 (200 mm x 150 mm x 75 mm) にし、2.2 における試作と同様の方法で製作した。ただし、プレス充填時のプレスによって箱が変形したため、プレス充填は行わず、振動充填のみ行った。粉のサイズ及び組み合わせは表 2 のケース No. 5 を適用した。試作途中の様子と試作した遮蔽体の写真を図 14、図 15 に示す。容器の体積と充填した炭化ホウ素粉の質量から密度を計算すると、 $1857.5 \text{ kg/m}^3$  であった。炭化ホウ素の真密度  $2525 \text{ kg/m}^3$  と比較すると、振動充填のみであるが、74%の密度比を得ることができた。

座屈応力の裕度を確認するために、水圧による圧壊試験を実施した。海洋研究開発機構の中型高压実験水槽装置 [22] を用いて行った。この装置により水圧を大気圧から昇圧していき、装置に設置されたビデオカメラの映像から座屈の発生を観測し、その時の圧力を座屈荷重とする。圧力は水槽上部にと取り付けられている圧力計で計測する (図 16)。比較対象として中身が空のまま真空封止した箱に対しても同じ試験を実施する。中身が空の箱を NS-1、炭化ホウ素を充填した箱を NS-2 と命名した。

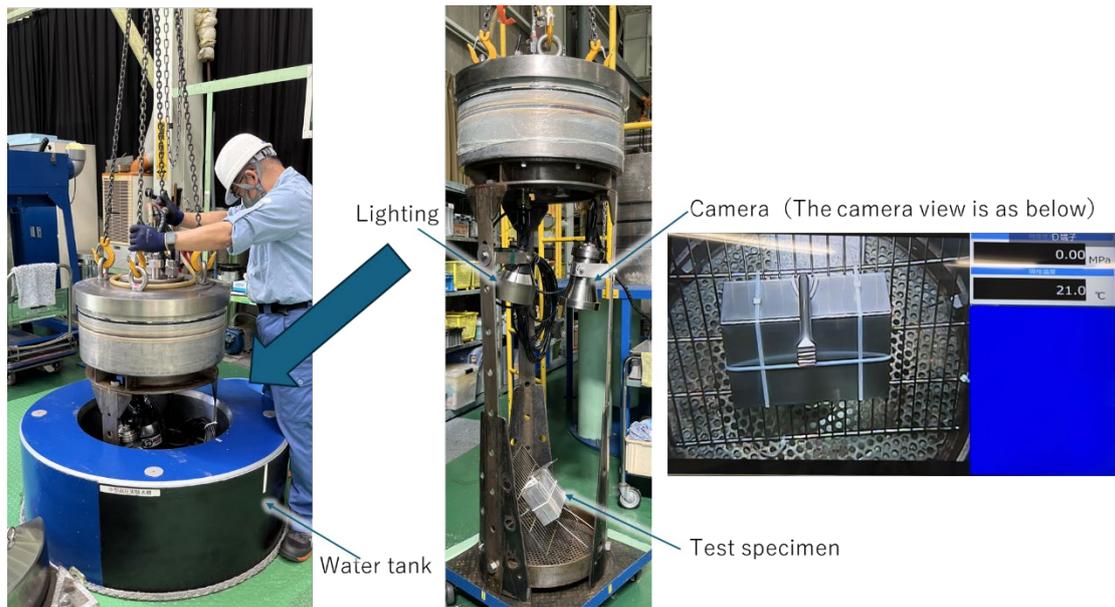
試験の結果、NS-1 は外圧 0.1 MPa からスタートして徐々に外圧をあげていくと、0.25 MPa 付近で大変形 (外圧座屈) が生じた (図 17 左)。なお、0.225 MPa までは大変形が起っていないことが観測されている。NS-2 は、外圧 0.1 MPa からスタートして、徐々に外圧をあげていき、1 MPa まで外圧をあげても大変形が生じることはなかった。外圧検査を更に継続して、10 MPa まで昇圧したが、構造は安定しており、大変形を起すことはなかった (図 17 右)。



☒ 14 The picture just after packing the B4C powder (Ave. size 2 mm and 0.2 mm).



☒ 15 The shielding prototyped



☒ 16 The test facility



NS-1: buckled



NS-2: no impact

☒ 17 Test specimens after being tested.

## 2.5 まとめ

炭化ホウ素粉をステンレスの容器に充填し、封止した新しい中性子遮蔽体を提案した。試作によって2種類のサイズ(2 mmと0.2 mm)の炭化ホウ素粉の密度比を真密度(2525 kg/m<sup>3</sup>)の76%(1915 kg/m<sup>3</sup>)まで高めることができた。

遮蔽計算においては70%の密度比を考慮して運転停止後線量率を計算した。その結果、要求値である50 μSv/hを下回ることができ、さらに質量についても要求値である9.5トンを下回る9.4トンに抑えることができた。

また、実機に向けて、本アイデアを採用した箱型の遮蔽体を試作し、座屈破壊試験を実施した。箱型の炭化ホウ素粉の密度比は74%となり、円筒の試作と同等の密度比が得られることが確認できた。また、座屈破壊試験の結果、炭化ホウ素粉が容器の中で強度部材として機能し、座屈強度が中が空の容器と比較すると増大していることが確認できた、この箱型の遮蔽体は外圧による座屈破壊に対して十分な裕度を持っていることが分かった。

この新たな中性子遮蔽体は、ガス放出量が少なく、水-ステンレスで構成された遮蔽体などと比べても軽量なため、(もちろん中性子のエネルギーに依るが) ITERだけでなく、DEMO炉などにも適用できる可能性がある。

## 第3章 Diagnostic rack 及び固定機構の開発

### 3.1 既存研究における課題と新提案

図 18 に下部ポート内の様子を示す。下部ポート内において、固定機構を用いた Diagnostic rack の精度の良い配置及び堅牢な固定は、搭載する計測機器であるダイバータ不純物モニターがダイバータカセットの隙間 20 mm からプラズマの光を安定して集光するために極めて重要となる。光路が理想的な位置から 1 mm でもずれると、光量が不足し、ダイバータ不純物モニターは計測機器としての機能を維持できなくなる。Diagnostic rack の主な材質はステンレスとなるが、重水素-三重水素の核融合反応によって発生する中性子によって放射化される。さらに、三重水素や、ベリリウムなどによって表面が汚染される。その結果、Diagnostic rack に触れることはもちろん、近づくことも難しくなるため、人手によるメンテナンスができなくなる。そこで遠隔保守による計測機器の配置や、固定機構の駆動などが、必要とされている。Diagnostic rack の質量は約 10 トン、長さは 3 メートルになるにもかかわらず、遠隔保守によって高精度に操作する必要がある。これらの遠隔保守は、ITER のライフサイクル 20 年間に於いて 10 回程度実施される見込みであるが、ダイバータ不純物モニター及びダイバータの修理、交換が必要な場合には、さらに回数が増える。

プラズマ消失現象の一つである VDE (vertical displacement event) によって真空容器に電磁力発生する。この電磁力により下部ポートが励振され、加速度荷重として Diagnostic rack に載荷されるため、固定機構は堅牢である必要がある。Diagnostic rack は DRHS [23]によって下部ポート内に配置される。DRHS は本来ダイバータのインストールのためのものであり、CMM (cassette multi-functional mover) と MAM (radial manipulator arm) で構成されている。MAM はパイプの切断・溶接ツールや、ボルト締結ツールを把持することができる。Diagnostic rack は下部ポート側壁に配置されるレール状の DRR (divertor radial rail) 及び DSP (divertor support pad) に配置される。プラズマ運転時 (Normal operation) 及びベーキング運転時 (Baking operation) には Diagnostic rack の温度は 70 °C もしくは 240 °C となるが、下部ポートの温度 (DSP 及び DRR の温度の等しい) は 100 °C もしくは 200 °C となり、温度差が発生する。図 19 に示した通りプラズマ運転時には 30 °C の温度差により約 1.5 mm の隙間が発生する。ベーキング運転時には 40 °C の温度差により 2 mm の干渉が発生する。隙間が発生すると上述のような電磁力により Diagnostic rack が動き、DSP 及び DRR に衝突し、破損させる可能性が出てくる。一方、干渉が発生すると熱応力が増大し、機器が破損する可能性が出てくる。

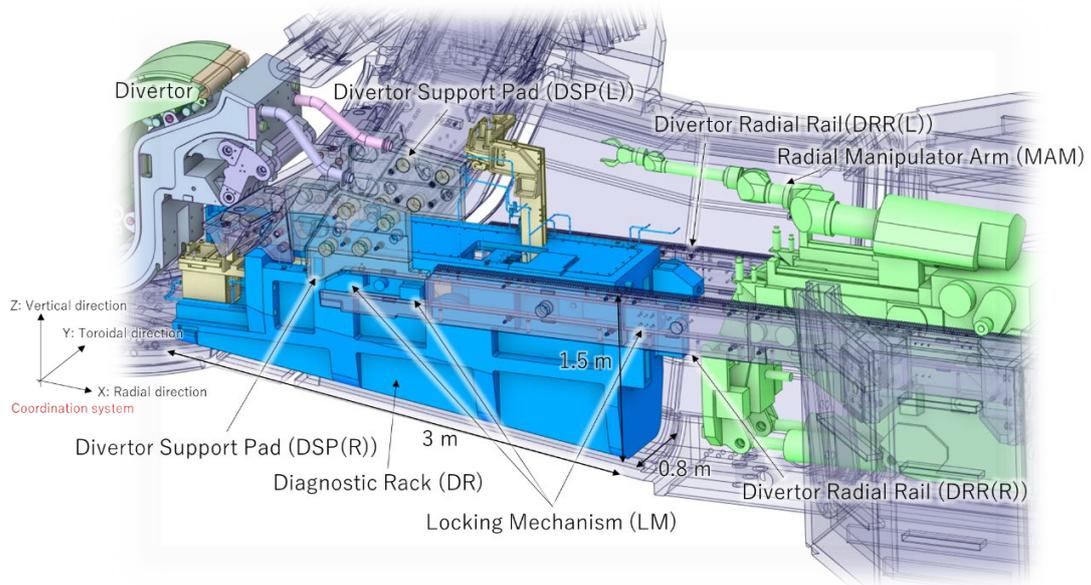
固定機構が解決すべき課題及び要求に以下にまとめる。

1. 位置再現性は $\pm 1$  mm 以下にすること
2. ITER 下部ポートの環境において構造的に破損しないこと
3. 可能な限り手数が少なく、単純な遠隔保守で機能すること
4. プラズマ運転及びベーキング運転時の熱膨張差を許容すること

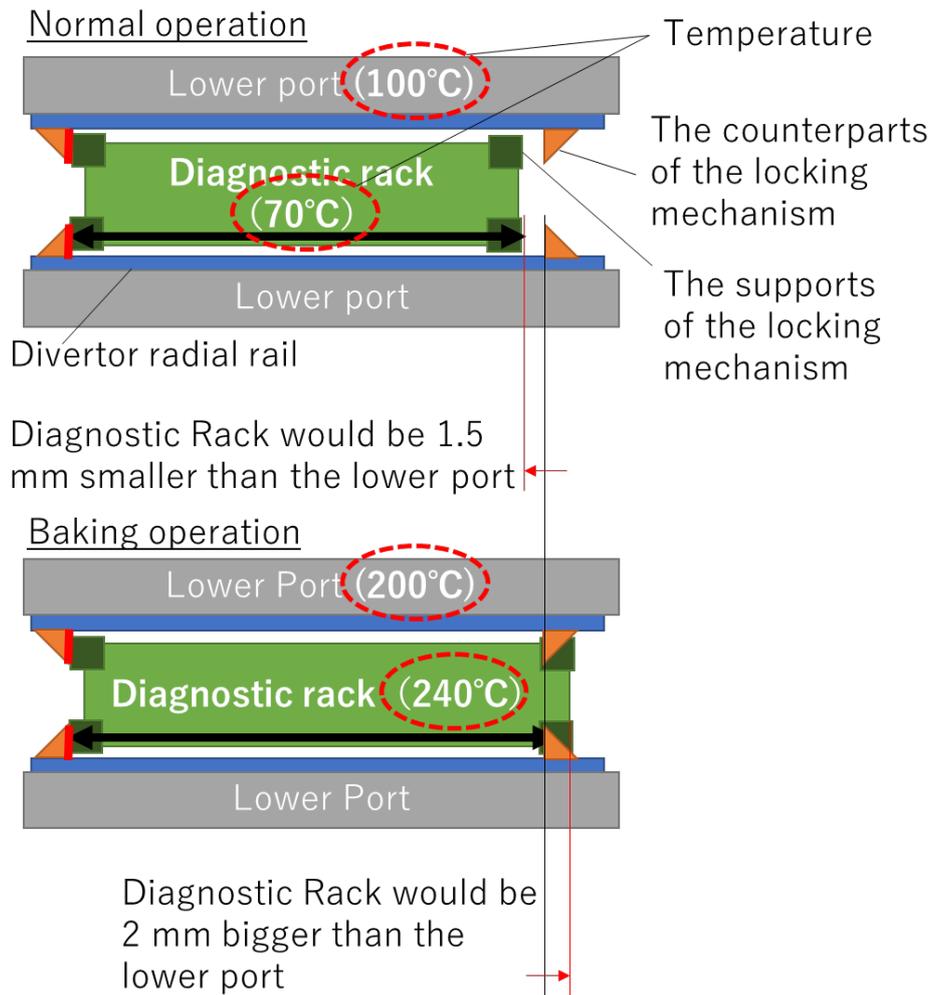
既存二案をタイプ 1 及び 2 と呼び、それぞれロシアの ITER 国内代表機関と ITER 機構が開発を行っている。タイプ 1 は油圧ツールを用いてボルトを回転することによって発生するプリロードと摩擦力で Diagnostic rack を固定する仕組みとなっている。タイプ 2 については、DRR 上に配置されるプッシャーと呼ばれる別の機器によってプリロードを発生させ、DRR と DSP に 11 か所の接触面を設けることで、Diagnostic rack を固定する設計となっている [24]。

しかしながら、これらの設計案は課題を抱えている。タイプ 1 については、真空脱ガスのためのベーキングによって発生する温度差によって、Diagnostic rack の位置がずれる可能性がある。タイプ 2 については 11 か所の接触面すべての反力を制御する必要があるが、現実的には、ずれが発生するため実現は難しい。さらに、両者の設計案は遠隔保守性が悪い。それは、Diagnostic rack とは別に、固定機構を DRR 上に配置することと、半径方向及びトロイダル方向の 2 方向に反力を発生させる必要があるためである。これらによって、プラントとして遠隔保守作業の管理において重要な、遠隔保守による作業時間が増加し、トカマク全体のメンテナンス時間を切迫する可能性が高くなる。

本研究ではタイプ 3 して新たな提案を行う。この固定機構は上述の課題を解決する。固定方法としてはダイバータカセットを曲げることによって反力を得るダイバータの固定方法に類似する部分がある [12]。



☒ 18 Environment of Diagnostic Rack with Locking mechanism in Lower Port #02 [25].



☒ 19 The mechanism of the phenomena causing the gap and interference between the diagnostic rack and lower port [26].

### 3.2 既存研究と新提案の比較検討

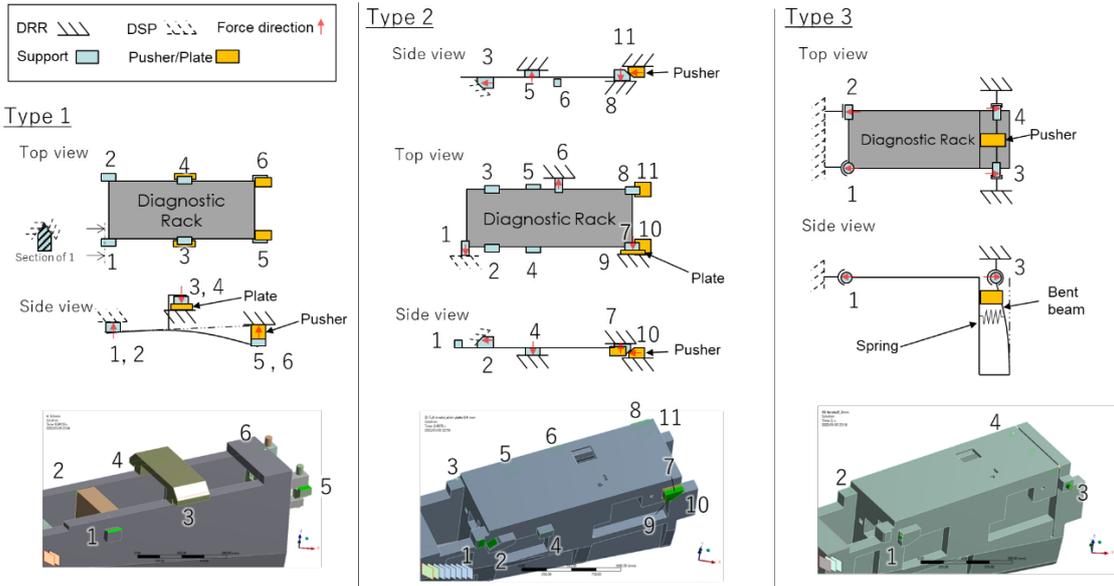
各設計案の概念図を図 20 にまとめた。数字で示している各接触面における反力を、Diagnostic rack を固定するために維持する必要がある。反力が失われて隙間ができると、電磁力や加速度荷重によって Diagnostic rack が動き、接触面に衝突荷重が発生する。最悪な場合、安全境界で真空容器を破損させる可能性がある。各提案共にビームもしくは板バネを弾性範囲内で曲げるような構造となっており、この曲げによって反力を発生させ、外部荷重が発生した場合にも反力を維持できるような構造となっている。

各設計案について詳細に説明する。図 21 にタイプ 1 の接触部を示す。このタイプは 6 つの接触部がある。2 つは DSP、4 つは DRR と接触することになる。接触面 5 と接触面 6 をプッシャーを油圧ツールで動作させることによってジャッキのように働かせる。このタイプは、この原理を利用しており、接触面 3 と 4 を視点として、各接触面において、垂直方向に対して大きな反力を発生させることができる。そして、水平方向に対しては、摩擦力で固定する構造となっている。このタイプでは、接触面 1 が半径方向の動きに対する抵抗力となる摩擦力を発生させるとともに、トロイダル方向の位置決めとして振る舞うことを想定している。Diagnostic rack と固定機構はステンレスで製作されることとなっている。図 22 の通り、まず、MAM によって把持された油圧ツールによってボルトが回転させられ、プッシャーが DRR を押す。プッシャーはボルトの軸力によって接触面の反力を維持するが、これらの作業のまえに、接触面 3 と 4 のために DRR 上にハードストッパーと呼ばれるパーツを遠隔保守で配置する必要がある。このハードストッパーの設計はまだ実施されていない。詳細な検討はまだ実施されていないが、MAM がハードストッパーを把持できるのか、接触面 3 と 4 の箇所に遠隔保守機器がアクセスできるか不明である。

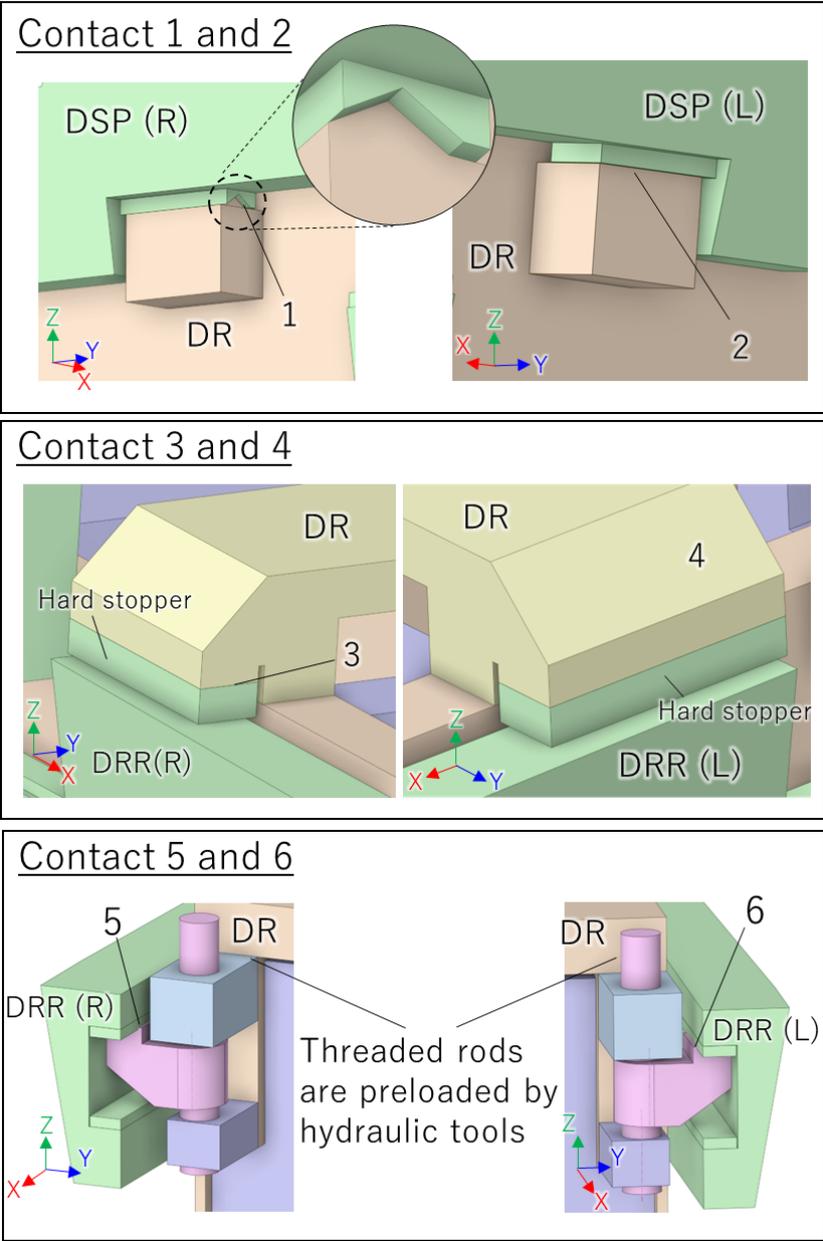
タイプ 2 は、図 23 に示されているように、11 の接触面を持つことを特徴としている。3 つの接触面は DSP との接触、残りは DRR との接触となる。接触面 1、6、9 はトロイダル方向の反力を提供する。接触面 2、3、10、11 は、半径方向および垂直方向の両方で反力を発生させるために傾斜面を用いている。接触面 4、5、7、8 は垂直方向に対して受動的な反力受けとして機能する。反力は図 24 の中に示される、プッシャーによって生成される。接触面 6 は一時的にプッシャー 1 によって押され、接触面 10 と 11 はプッシャー 2 によって押される。プッシャーについてはこれまでに成熟した設計がない。接触面 6 のプッシャー 1 は一時的に配置されるもので、DRR と Diagnostic rack の間にトロイダル方向にプリロードを維持するためにシム板を挿入する。接触面 10 と 11 のプッシャー 2 は DRR に配置され、Diagnostic rack を半径方向に押す。Diagnostic

rack と固定機構はステンレス製となっている。前述の通り、プッシャーはトロイダル方向と径方向の反力を発生する。図 24 に示しているように、最初のステップ(a)では、プッシャー1によって Diagnostic rack 全体がわずかに変形し、ボルトが油圧ツールを用いて遠隔保守によって締め付けられる。第二ステップ(b)では、ボルトとギアおよびシム板を備えたプッシャー2が DRR 上に配置され、プッシャー2のボルトが油圧ツールによって締め付けられる。最後に、ステップ(c)では、プッシャー1が除荷され、Diagnostic rack がわずかに除荷時の形状に戻ろうとする反力をトロイダル方向の反力として利用する。このシーケンスは、プッシャーの設計によって変更される可能性があり。プッシャーの設計は未成熟であり、プッシャー1へのアクセス性や、CMMを用いた遠隔保守性に不明確な点が多い。

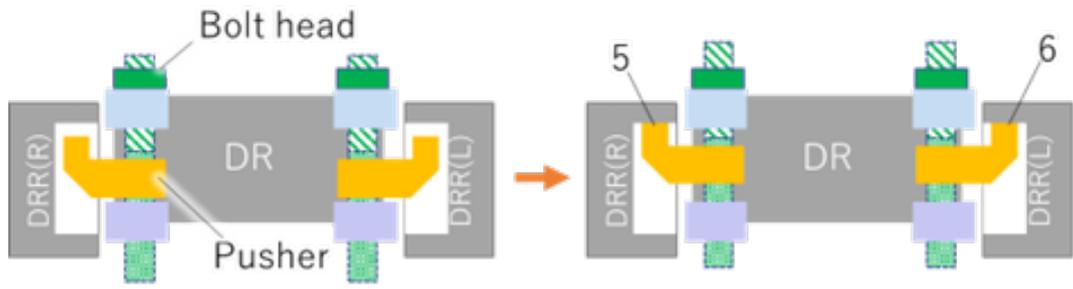
今回新たに提案するタイプは、図 26 に示しているように、4つの接触面を有することを特徴としている。2つの接触面は DSP との接触で、残りは DRR との接触面となる。反力は曲げられた板バネと補助スプリングによって生成される。曲げられた板バネの反力を増加させることで、将来的にスプリングを取り除くことが可能となる。この増加は、曲げられた板バネの厚みや材料を変更することで可能となる。接触面1の形状は、トロイダル方向と垂直方向の位置を決めるために、球状となっている。接触面2は、ベーキング時の温度差 40 °C (Diagnostic rack : 240 °C、真空容器 : 200 °C) によるトロイダル方向の熱膨張を許容できるように、トロイダル方向へのスライドを許容するように設計された円筒状である。接触面3と4は、DRRの穴に挿入されるピンとなる。DSPには接触面1と2のための反力受けが必要となり、球状および円筒状のカップ状となっている。各接触面の材質は降伏応力が大きいニッケル合金（例えばインコネル625）で製作することを考えている。図 26 に示されているように、最初のステップ(a)では、遠隔保守によって操作されるボルトテンショナーの一種であるプッシャーによって Diagnostic rack の板バネが曲げられる。次に、ステップ(b)では、ピンの軸が DRR の穴の軸付近に到達し、DRR の穴に挿入される。最後に、ステップ(c)ではプッシャーが除荷される。曲げられた板バネの反力は、各接触面でバランスし、Diagnostic rack を固定する。ピンを挿入するメカニズムはまだ未設計であるが、CMM と MAM によるすべての操作は Diagnostic rack の後方（プラズマから遠い方）に集約されている。固定機構へのアクセスポイントは CMM と MAM 側を向いており、容易にアクセスでき、良好な視認性がある。



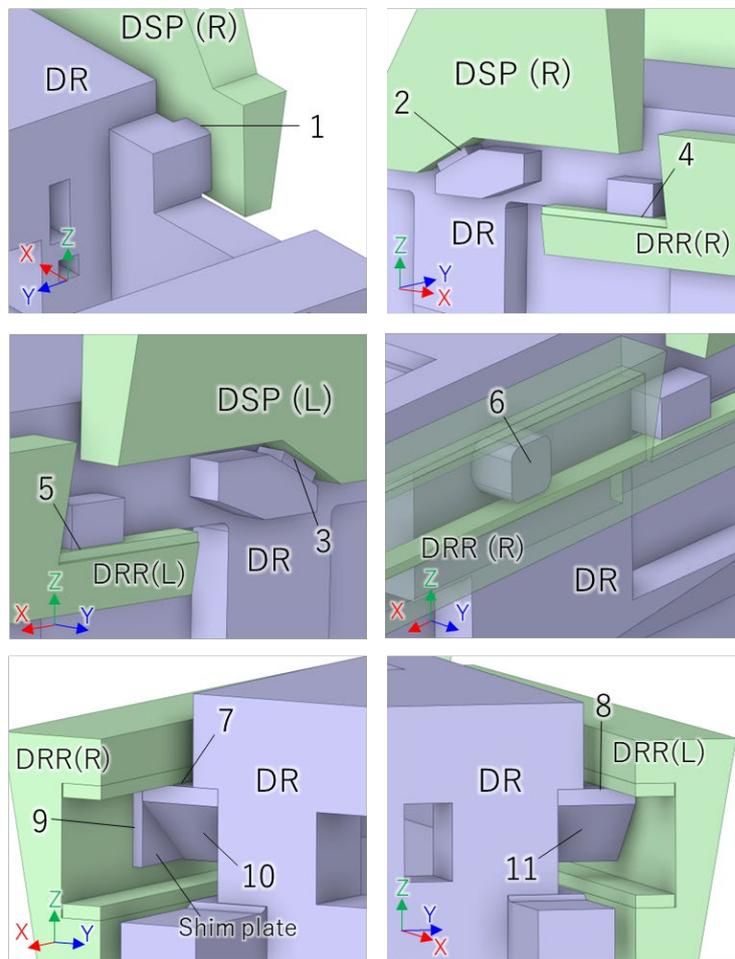
☒ 20 The Summary of the three types of Locking mechanism [25].



☒ 21 Contacts of Type 1 [25].



☒ 22 Sequence of preloading for Type 1 [25].



☒ 23 Contacts of Type 2 [25].

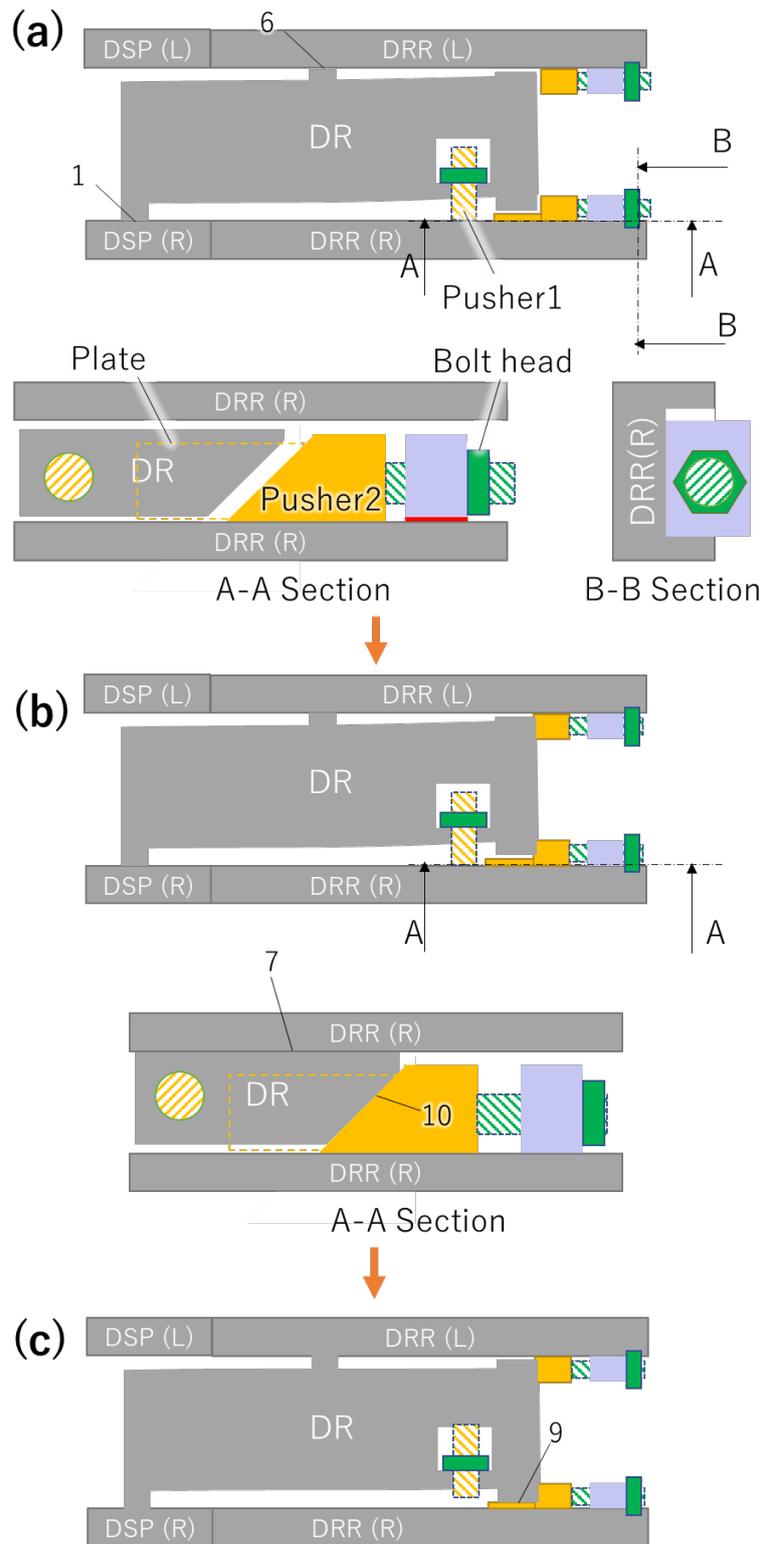


图 24 Sequence of preloading for Type 2 [25].

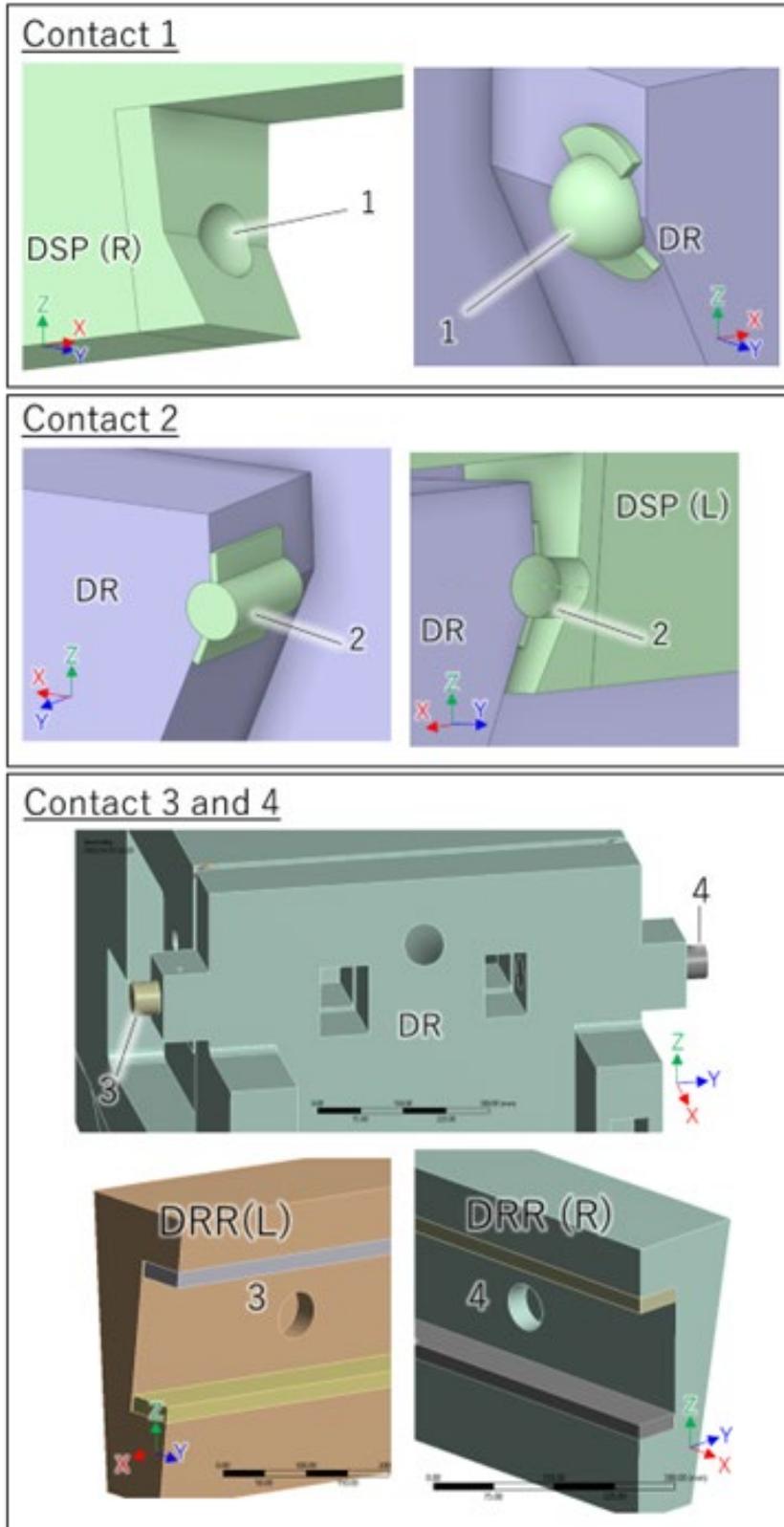


图 25 Contacts for Type 3 [25].

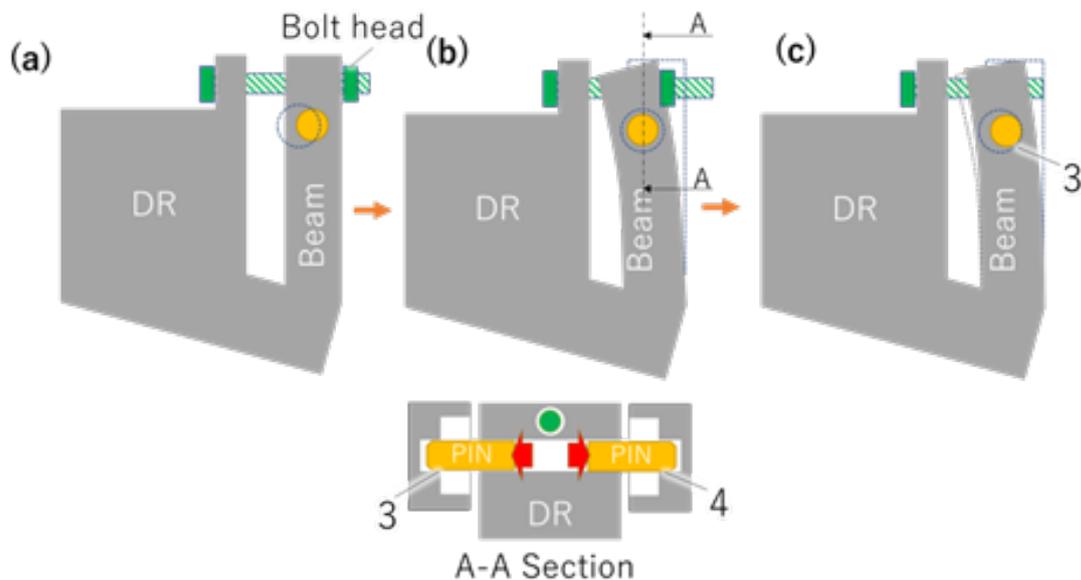


図 26 Sequence of the preloading for Type 3 [25].

ANSYS Workbench を使用して構造解析シミュレーションを行った。解析は2段階からなる。まず、板バネを曲げて、ピンを挿入した状態を初期状態として、次に外部荷重を加える。外部荷重には、地震や VDE イベントによる加速度、自重、電磁解析から抽出される電磁力が含まれる。表 4 にこれらの外部荷重をまとめる。座標系は図 18 で定義される。解析では各接触面における非線形接触条件として摩擦（摩擦係数：0.15）を考慮した。さらに、タイプ 3 のバネは、バネ定数が 25kN/mm バネ要素として定義される。

解析結果は各タイプの変形として図 27 から図 29 に示している。これらの図における赤い矢印は変位の方向を示す。各タイプ、各方向の反力は図 30 にまとめられている。各グラフは中央で分けられ、左側がプリロード時（固定機構有効時）の反力（初期状態）、右側が外部荷重を加えた状態での反力を表している。これらのグラフは各タイプの特徴を理解するのに役立つ。

タイプ 1 は、想定通り垂直方向に剛性があり、この原理により変形が生じる。接触面 1 と 2 が荷重点、接点 3 と 4 が支点、接点 5 と 6 が力点である。図 30(a)の赤い矢印に示されるように、外部荷重の適用により接触面 1 の垂直方向の反力が大幅に変化し、38%減少する。半径方向の変位に対する抵抗力が弱い可能性が高い。これは、外部荷重を加えた時の半径方向の反力の喪失及び符号の逆転は、各接触面が半径方向に対して平面のために滑ることを示している。

タイプ 2 では、半径方向とトロイダル方向のプリロードを生成するために 2 種類のプッシャーがあるため、変形は複雑である。図 30 の(b)の赤い矢印に示されるように、接触面 1 のトロイダル方向、接触面 2 と 3 の半径方向および垂

直方向の反力が変化する。接触面 1 のトロイダル方向の反力は外部荷重条件下でほとんど維持されず、約 85%減少する。接触面 2 の径方向の反力は 78%減少する。垂直方向の場合も 78%減少する。これらの減少は、反力を維持するのに十分なプリロードの維持が難しいことを示している。

タイプ 3 では、変形は主に板バネの曲げによるものである。図 30(c)の赤い矢印に示されるように、接触面 1 の各方向および接触面 2 の径方向の反力が大幅に変化する。接触面 1 と 2 の半径方向の反力はそれぞれ 43%および 59%減少する。接触面 1 のトロイダルおよび垂直方向の反力は外部荷重条件下で現れる。これは接触面 1 の形状が球形であるため、トロイダルおよび垂直方向に対してサポートとして機能することを意味する。

タイプ 1 とタイプ 3 の接触面 1、タイプ 2 の接触面 1 と 2 は同じ機能を有しており、各コンセプトを比較するために重要である。これらの接触面はトロイダルおよび垂直方向での位置を固定するため、タイプ 2 の接触面 1 と 2 は、タイプ 1 および 3 の接触面 1 に相当すると考える。タイプ 2 の接触面 1 は主にトロイダル方向に対する固定に寄与し、接触面 2 は主に垂直方向に対する固定に対して機能する。図 31 に示すように、各タイプの接触面の反力を初期状態であるプリロード時（破線）と外部荷重時（実線）のそれぞれでプロットする。横軸はプリロードの変化、縦軸は反力を表す。各タイプは似た傾向であるが、タイプ 1 および 2 は接触面の反力を維持するには大きなプリロードを発生させる必要があることが分かる。タイプ 1 は外部荷重の載荷時に、半径方向に滑ることが分かる。これは 500 kN のプリロード時に半径方向の反力の向きが変わるためである。これは半径方向の平らな接触面を有することによる。また、摩擦のみでは固定できないことが分かる。さらに、垂直方向の反力は約 300 kN のプリロード時に失われる。最小値以下の結果がないのは、接触面が接触していないこと示す。タイプ 2 では、400 kN のプリロード時に半径方向および垂直方向の反力が失われる。この解析から、タイプ 3 が他のタイプと比べて外部荷重が載荷された状態で各方向に最も高い反力を、最も低いプリロードで維持できることが分かる。

表 4 External loads.

	Ax [m/s <sup>2</sup> ]	Ay [m/s <sup>2</sup> ]	Az [m/s <sup>2</sup> ]
Seismic	-3.3	-1.65	9.9
VDE	-34.476	-14.222	35.88
Dead Weight	N/a	N/a	9.8

Electro-	Fx [kN]	Fy [kN]	Fz [kN]

Magnetic load	41.1	8	-19.9
	$M_x$ [kN*m]	$M_y$ [kN*m]	$M_z$ [kN*m]
	98.9	-17.9	-119.3

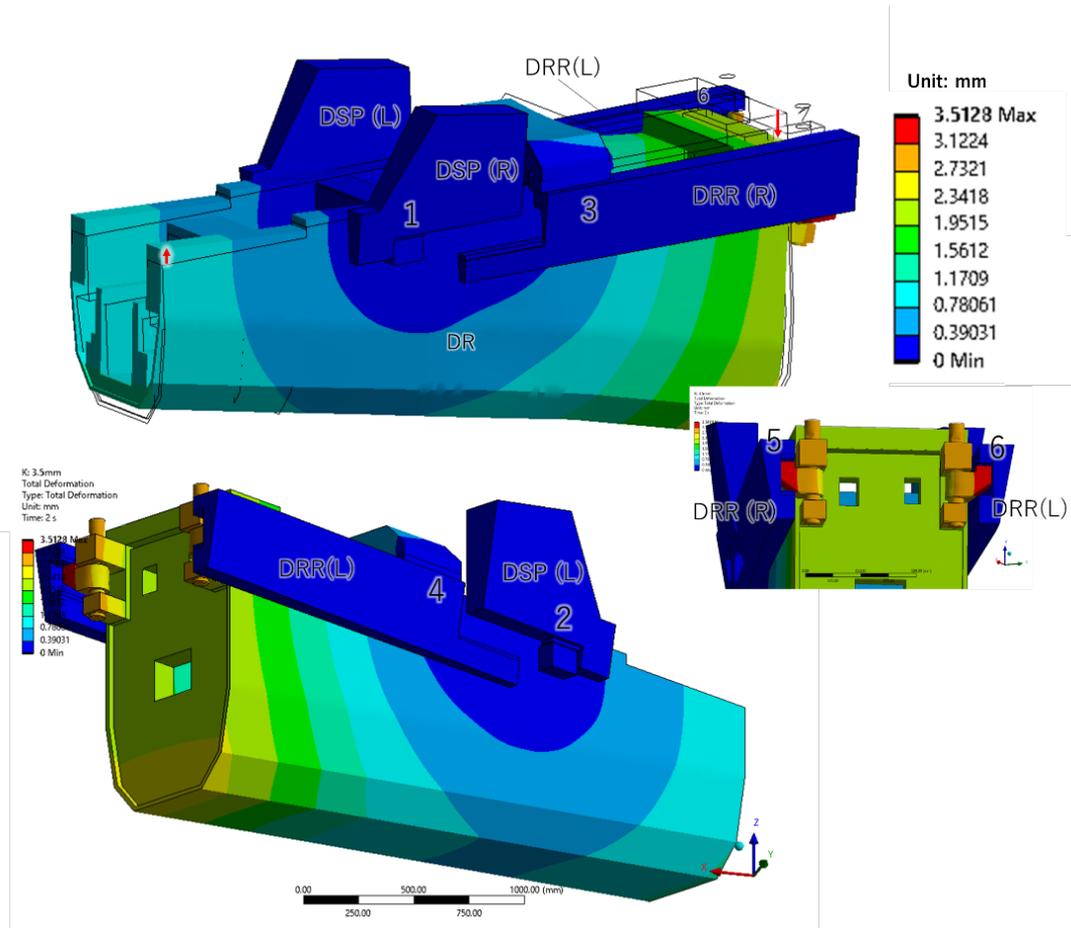
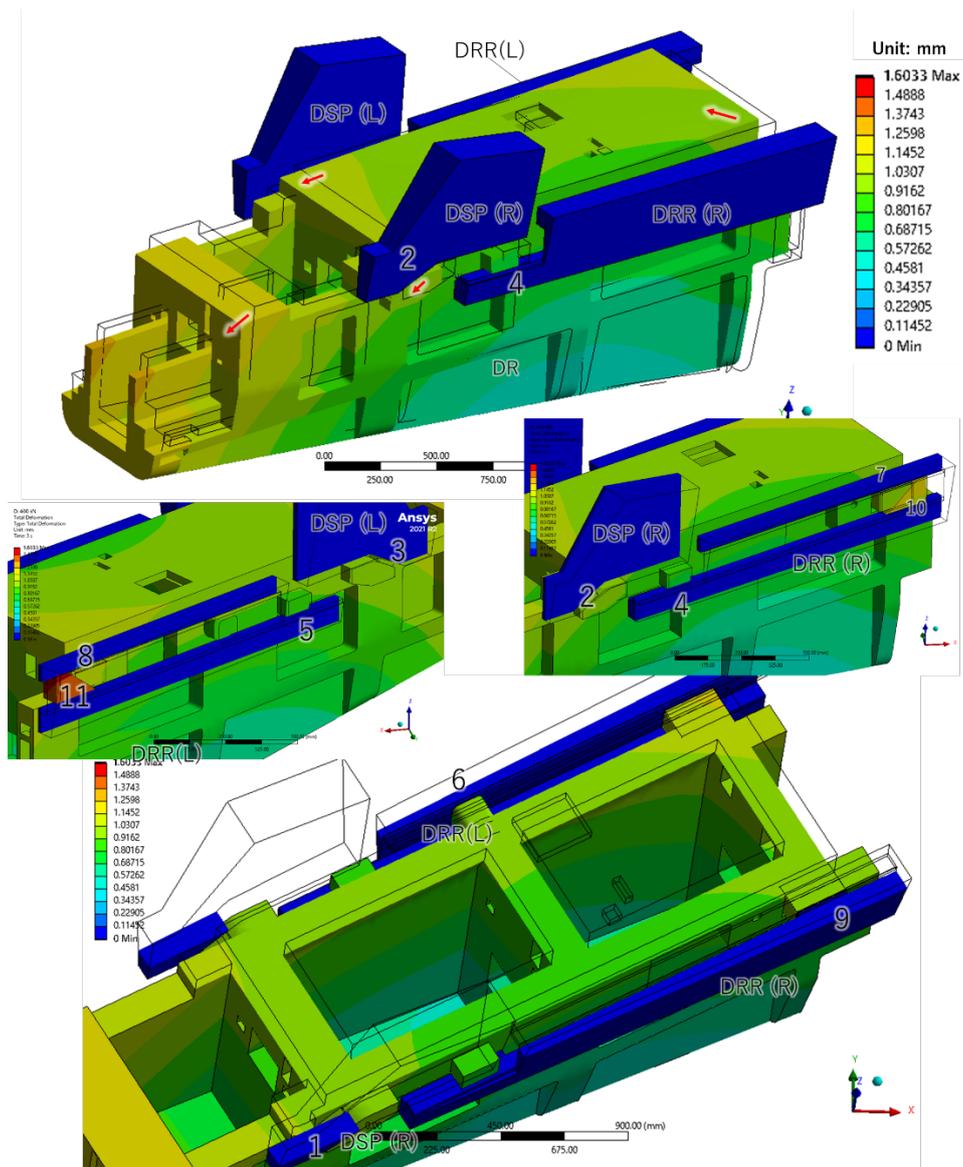
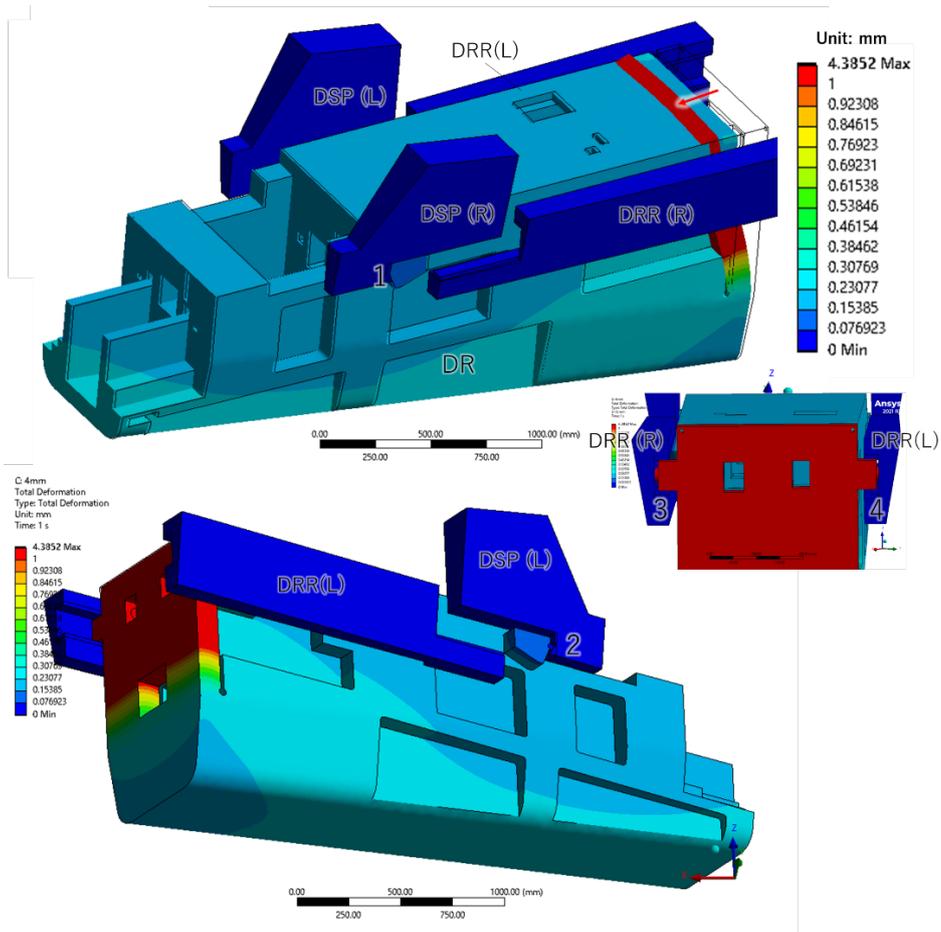


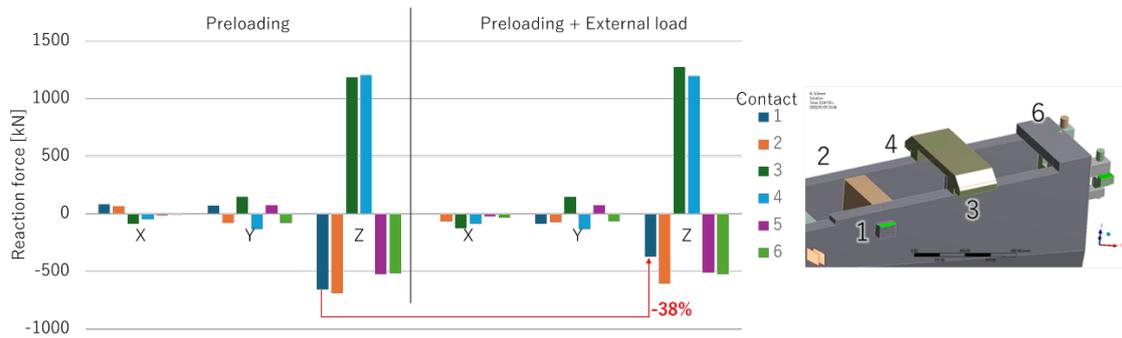
图 27 The deformation of Type 1 at the external load state [25].



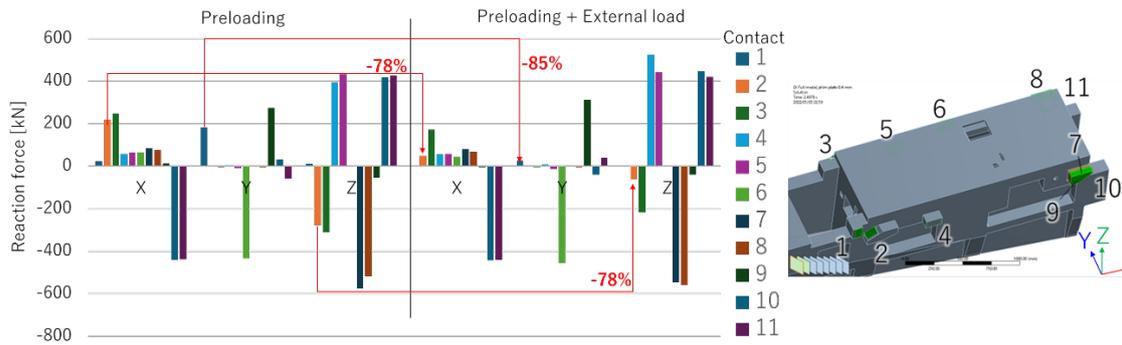
☒ 28 The deformation of Type 2 at the external load state [25].



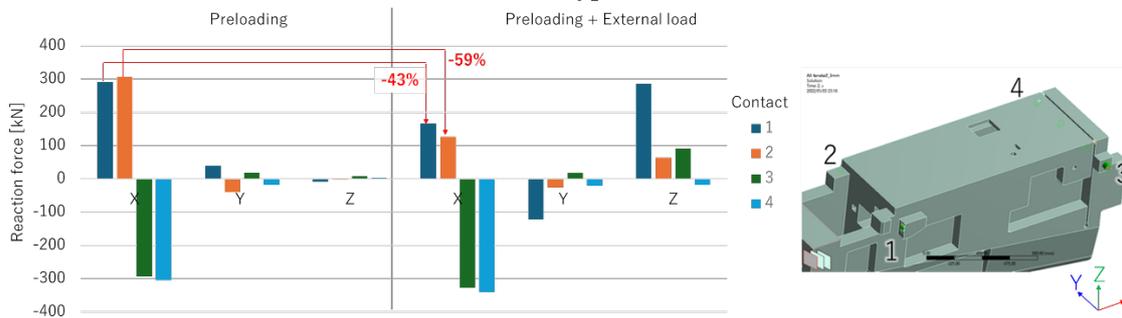
☒ 29 The deformation of Type 3 at the external load state [25].



(a) Type 1

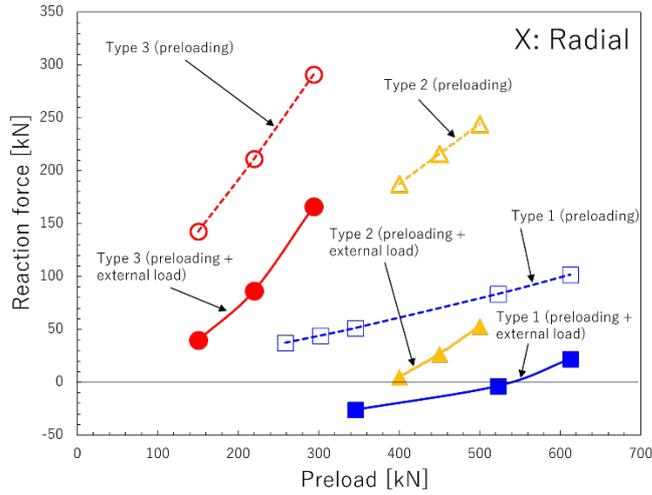


(b) Type 2

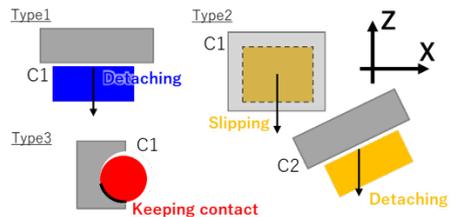
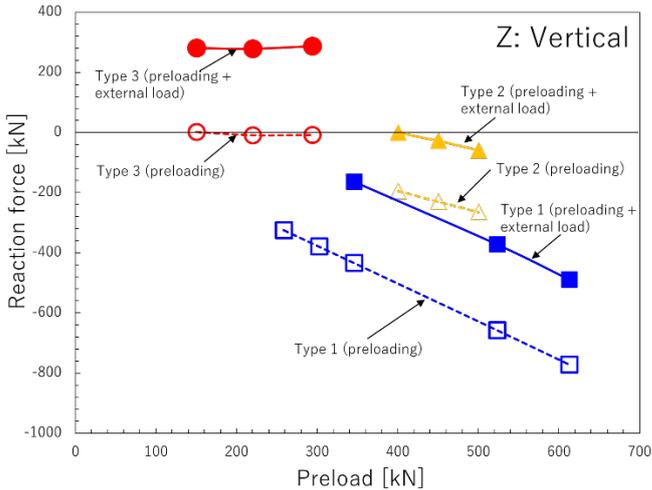
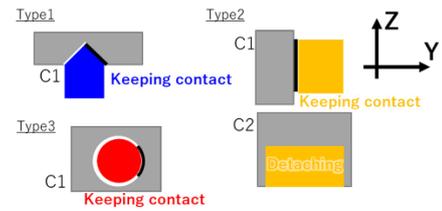
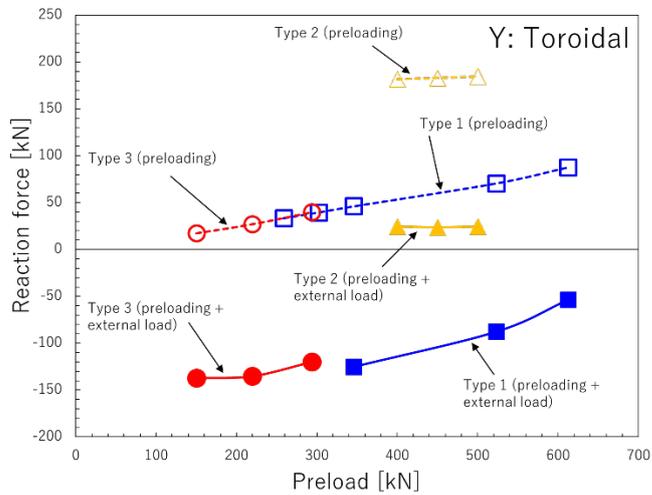
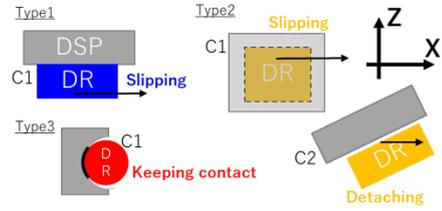


(c) Type 3

- ☒ 30 The comparison of the reaction forces at the preloading (left) and the external load state (Right) for each type [25].



i.e. the expected contact status at 300 kN preloading



☒ 31 The reaction forces against the preload variation for the contact 1 for Type 1 and 3 and the contact 2 for Type 2 [25].

### 3.3 設計の具体化

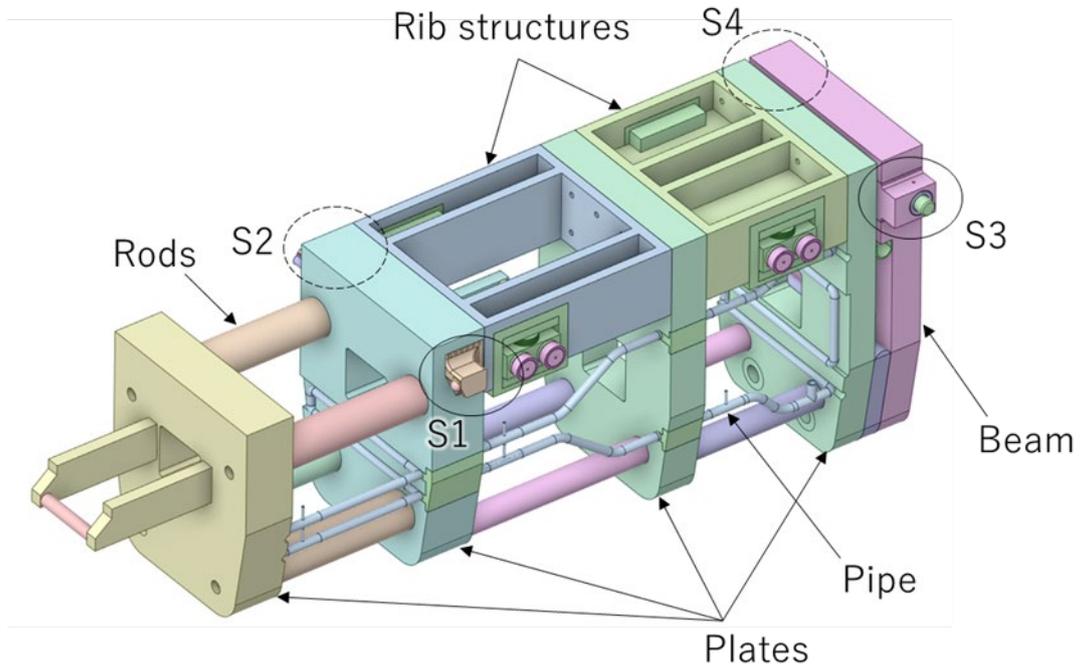
3.1 で述べた 4 つの技術的課題の解決及び 3.2 で行った設計案の比較結果を考慮して、Diagnostic rack を図 32 に示すように具体化した。具体化前の概念設計では、巨大な単一鍛造ブロックを切削して製作することが想定されていたが、具体案では複数のステンレス板をリブ構造で繋ぐことによりパーツ化する案を採用した。リブ構造で固定機構によって発生する反力を支え、ロッドで振動を防ぐ構造となっており、ステンレス板が主に放射線遮蔽体として機能する。この構造の採用により、巨大な単一鍛造ブロックの必要性がなくなり、製作性が大幅に改善された。さらに、具体案では、すべての部品がボルトと位置決めピンを使用して組み立てられるため、厚板の溶接などはなく、溶接の品質管理が不要になるようにした。冷却構造については、流路形成のためのガンドリルではなく、パイプを使用した単純な設計が採用された。板部分は半円形の溝が加工されており、パイプの埋め込み、クランプしている。パイプの固定方法は今後詳細に検討予定である。パイプを使用することで、炉内において、試験検査が難しいことを理由に使用が避けられるプラグ溶接などを除外することができた。図 33 に示されるように、固定機構は、4 つのサポートとそれらの DSP/DRR に配置される反力受け及び板バネで構成される。サポートと反力受けはインコネル、板バネは日本産業規格の SUH660 を使用して製作される。サポートは Diagnostic rack に取り付けられ、反力受けは DSP と DRR にそれぞれ配置される。曲げられた板バネの反力は、サポートとそれらの反力受けに再分配される。図 34(a) に示されるように、S1 と S2 が CS1 および CS2 と接触した後、板バネは油圧のボルトテンショナーを使用してボルトを締め付けることにより曲げられる。この段階で板バネとそれに対向する板の隙間は 20 mm ある。その後、(b) に示されるように板バネが曲がり、隙間が 3~8 mm に減少し、サポート S3 および S4 が DRR の反力受け (CS3 および CS4) に挿入される。最後に、(c) に示されるように、ボルトテンショナーを除荷することで、反力がサポートに再分配される。

サポート 1 (S1) は、球状の接触面を有する長方形のキーであり、Diagnostic rack にボルトで取り付ける。サポート 1 の反力受け (CS1) は、球状のカップであり、DSP にボルトで取り付ける。球状の接触面は球状のカップと隙間ばめ程度の公差で接触する。サポート 2 (S2) は S1 に似ているが、樽状である。S2 の反力受け (CS2) は円筒形のカップである。樽状にすることによって、Diagnostic rack はトロイダル方向の熱膨張および  $\pm 0.5$  mm の位置ずれを許容することができる。また、位置ずれが発生した場合、反力受けとの接触

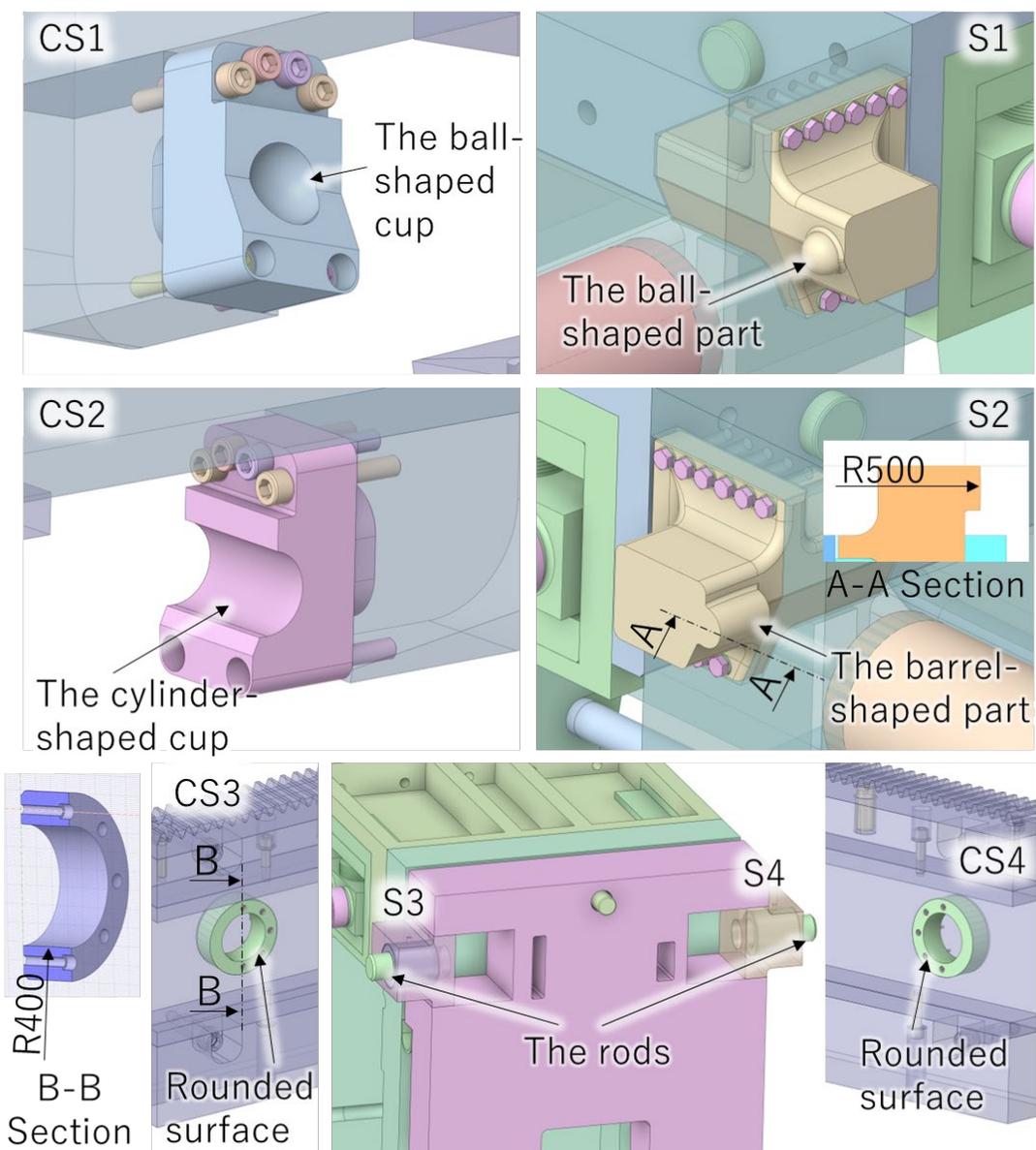
面が変化するが、樽状の接触面なため、常に面一面接触を維持することにより線一面接触による高応力を防ぐことができる。同じ概念がサポート 3 (S3) およびサポート 4 (S4) にも適用される。反力受け (CS3 及び CS4) は、線一面接触による高応力を防ぐために、R400 の円環面となっている。

図 35 に示すように、S1 は位置の基準点として機能し、Diagnostic rack の回転を許容する。他の 3 つのサポートは、この回転によって接触面の位置が変化するが、曲面を用いることで許容することができる。この回転は各接触面の加工公差、累積される組立公差、熱膨張などで発生する。この設計により、構造的に位置を固定し、設置時に良好な位置再現性、安定性を実現することができる。

既存の研究 [25] では、固定機構の特性を調査し、各サポートにおいて最大 150 kN の反力が失われることが分かっており、このとき板バネに発生している反力は 180 kN であり、板バネの曲げ量の 1.5 mm に相当する。これは、板バネの寸法を考慮して単純梁のまげ理論から計算することができる：長さ=850 mm、幅=770 mm、厚さ=125 mm。その結果、下部ポートと計測支持構造座の熱膨張差 1.5 mm を加えて、最低 3 mm 以上板バネを曲げる必要があることが分かった。また、材料強度の観点から、板バネ、各サポートに発生する応力を考えると (梁の曲げ理論 [27] とヘルムの接触応力 [28])、板バネは最大 8 mm まで曲げることができる。ヘルツ接触応力は、800 mm 直径の円筒 CS3 と平面 S3 の接触を想定し、板バネを 8 mm 曲げたときに S3 に発生する反力 490 kN の力を適用すると、975 MPa となる。この応力は Inconel の降伏応力超えるが、塑性変形を考慮した検討を今後行うことも考えられるため、目標値と板バネの最大曲げ量は 8 mm と設定しておく。この段階では、板バネの曲げ量の目標範囲は 3 mm から 8 mm と設定できた。



☒ 32 The new design of the diagnostic rack [26].



☒ 33 The shape of each support and counterpart for the locking mechanism. The supports, S1-S4, are on the diagnostic rack. The counterparts, CS1 and CS2, are on the Divertor Support Pad and CS3 and CS4 are on the Divertor Radial Rail [26].

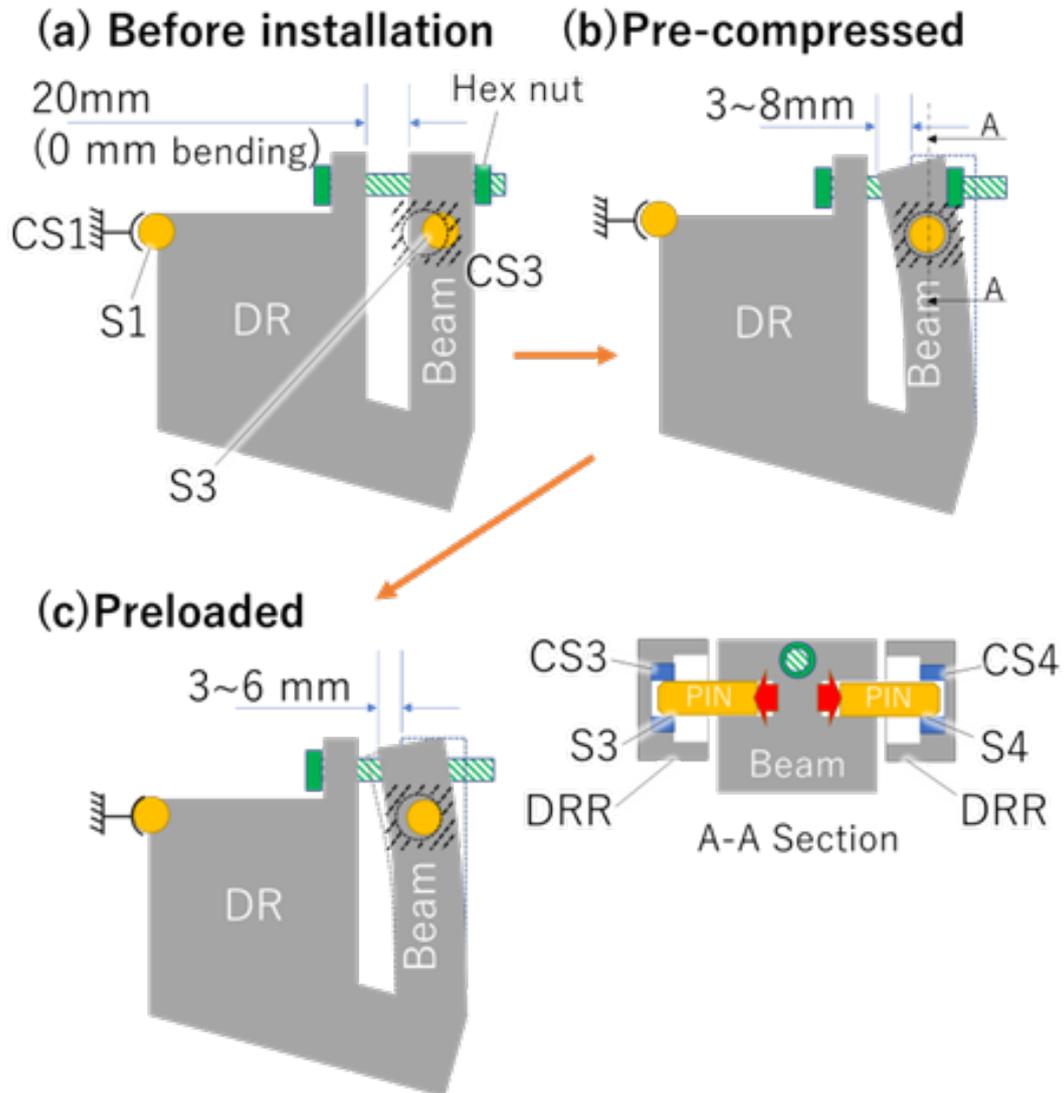
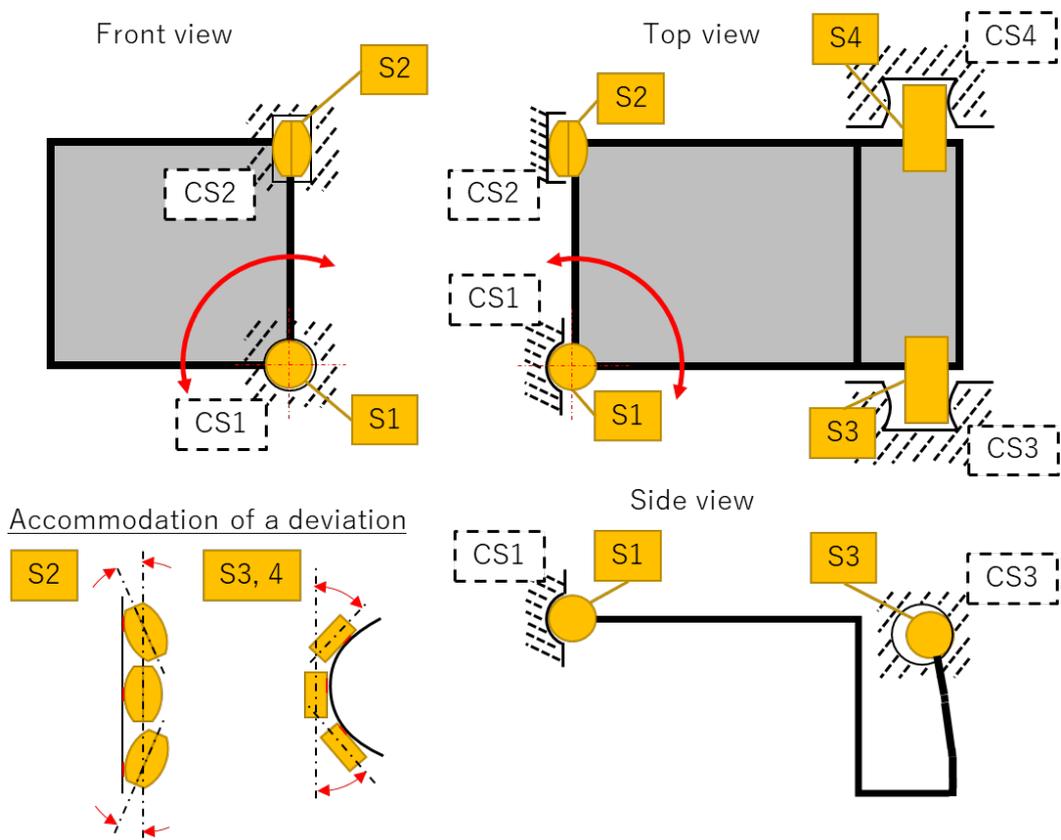


图 34 The preloading procedure: (a) It's ready to be compressed, and the gap of 20 mm between the beam and the diagnostic rack would be decreased by the beam bending; (b) The beam is bent in the range from 3 mm to 8 mm by tightening the hex nut or hydraulic bolt tensioner while the pins of S3 and S4 in the beam would be moved and inserted into the hole as CS3 and CS4 in the Divertor Radial Rail; (c) After untightening the hex nut, the reaction force of the bent beam would be redistribute to each support [26].



☒ 35 The schematic of the locking mechanism (three-view drawing) and the theory of the accommodation of a deviation (bottom-left). Red arrows indicate acceptable movement of the diagnostic rack and how to accommodate a deviation [26].

### 3.4 固定機構の試作による設計の妥当性検証

固定機構のモックアップを製作し、各サポートにおける位置再現性と反力のバランスを検証した。また、製作公差と製作性の観点から固定機構の実現可能性を確認した。図 36 に示されているように、モックアップとして製作した範囲は Diagnostic rack の強度に寄与する部分とサポートのみとした。モックアップの主要構造は炭素鋼で構成され、サポートは実際の Diagnostic rack と同様に Inconel 625 を使用した。モックアップのサイズは 2.2 m x 0.8 m x 1.2 m である。モックアップが発生できる反力は 60 kN 程度となっており、実際の Diagnostic rack が発生する反力より小さい。しかし、今回は位置再現性と反力のバランス度合の検証に焦点を当てており、反力が実際の Diagnostic rack に近づくと位置再現性及び反力のバランス度合は改善されると考えられるので、保守的な試験結果が得られた。

幾何公差は図 37 の通り設定した。これらの幾何公差は図 35 に示すように固定機構の位置ずれの許容範囲から決定した。製作実績も同様に図 37 に示している。図 38 に示しているように、S1：球と S2：樽は最終工程で幾何公差を満たすために加工され、3D スキャナー (MetraSCAN3D) を使用して、形状を測定し、その形状から加工後寸法を計測した。

図 39 に試験環境を示す。緑色部分のフレームは DSP 及び DRR を模擬しており、固定機構のこの中に配置され、反力を受ける構造となっている。

位置再現性は、約 50 kN の反力を発生させ、モックアップをフレームに配置した。配置→位置測定→取り出しのサイクルを 10 回行った。プリロードの値は図 36 の G1 変位によって調節することができる。G1 の変位を板バネの曲げ量と呼ぶ。隙間の減少は、板バネがより曲がることによって、より大きな反力が得られることを意味する。モックアップ上のサポート近くに設けた穴の位置を 3D スキャナーで測定した。この 3D スキャナーは 0.03 mm の精度で形状を測定することができる。3D スキャナーはソフトウェア内でモックアップの形状を点データとして作成し、その後モックアップの形状の表面データを再生成する。1 回目の測定結果を基準とし、2 回目以降の測定結果を基準と比較する。基準座標系は図 39 に示される通り、柱の角に設定した。

位置再現性の測定結果を図 40 と図 41 に示している。結果には、板バネの曲げ量 (0.6、1.7、2.2 mm) に対する測定結果が含まれている。板バネの曲げ量を増加させることで、反力を増加させるのと同様に、位置再現性が改善されている。測定結果の中で最も位置がずれたのは S4 の 0.34 mm であった。測定後から偏差  $2\sigma$  を考慮すると、0.49 mm であることが分かった。計測機器からの要求値である  $\pm 1$  mm 未満は十分満たせる見通しを得た。

反力は各板バネの曲げ量 (0.6 mm、1.7 mm、および 2.2 mm) において 5 回測定した。反力の測定には圧力測定フィルム (製品名: プレスケール、富士フィルム株式会社製) を使用した。この圧力測定フィルムは、 $\pm 10\%$  の精度で圧力を測定することができ、加圧されると加圧部が着色し、圧力に応じて濃さが変わる。専用のソフトウェア (FPD8010、富士フィルム株式会社製) 及びスキャナーを使用して着色したフィルムを分析することによって反力を計算することができる。測定フィルムは、図 42 に示されるように、CS1 および CS2 の背面、および S3/S4 と CS3/CS4 の接触面に配置した。

圧力測定フィルムを使用した測定結果は図 43 の通りである。明暗は圧力の大きさを示している (明るい色は低圧、濃い色は高圧)。分析結果は図 44 のグラフにまとめられている。これらは 5 回の測定の平均値である。各サポートの反力は力の平衡により同じレベルであるべきだが、バランスが取れているように見える。2.2 mm の曲げ量の時の S2 についてはデータの取得が適切にできなかったため除外しているが、各サポートで反力がバランスすることは予測できると考える。

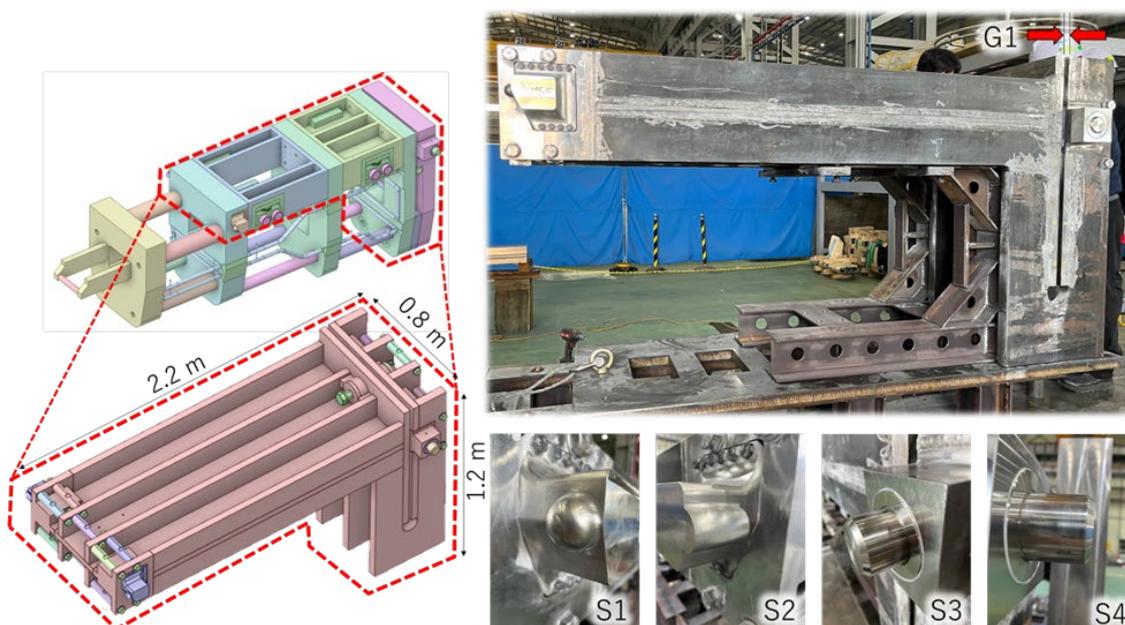
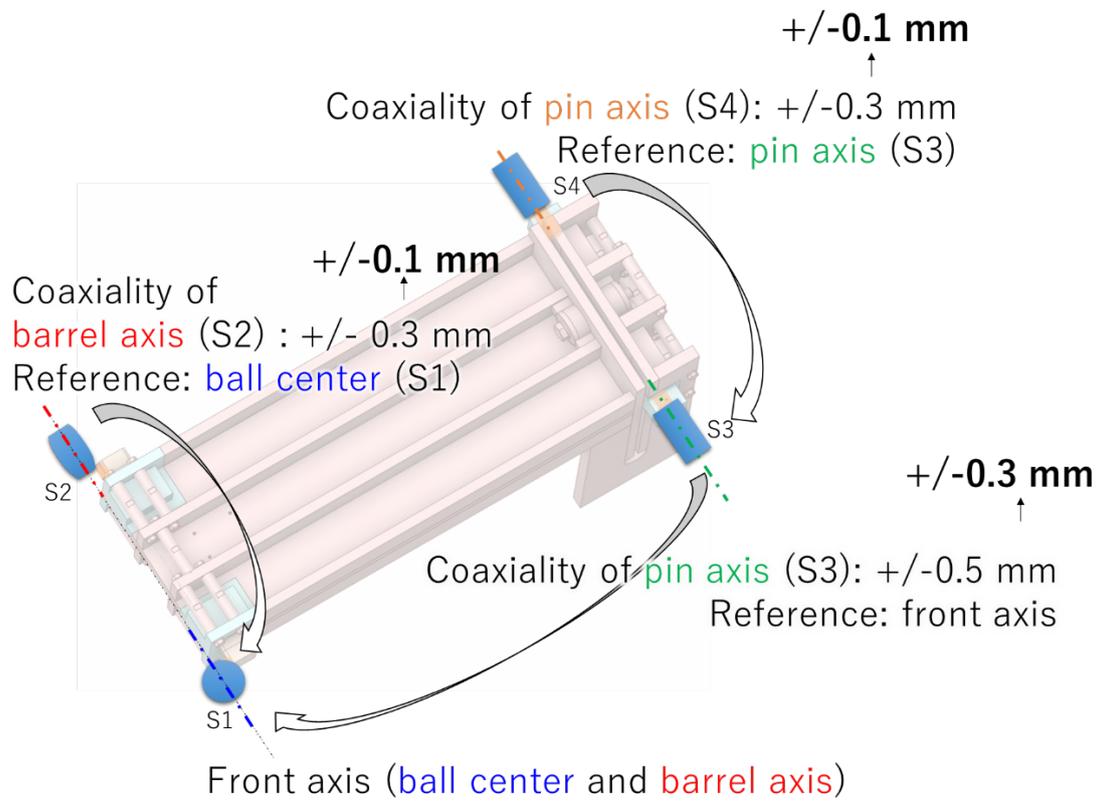


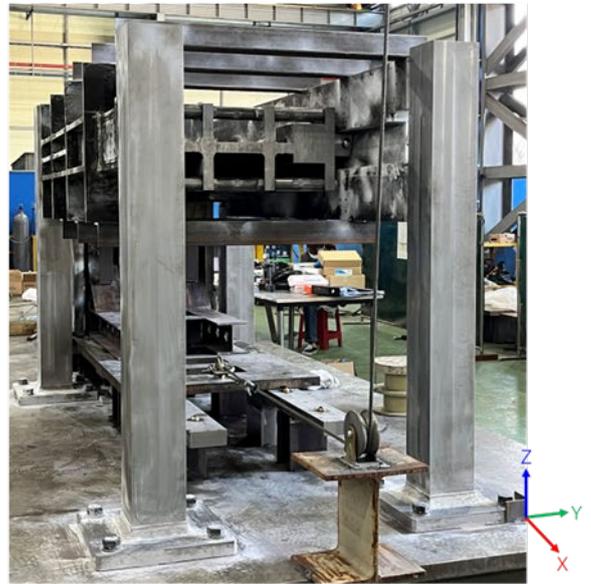
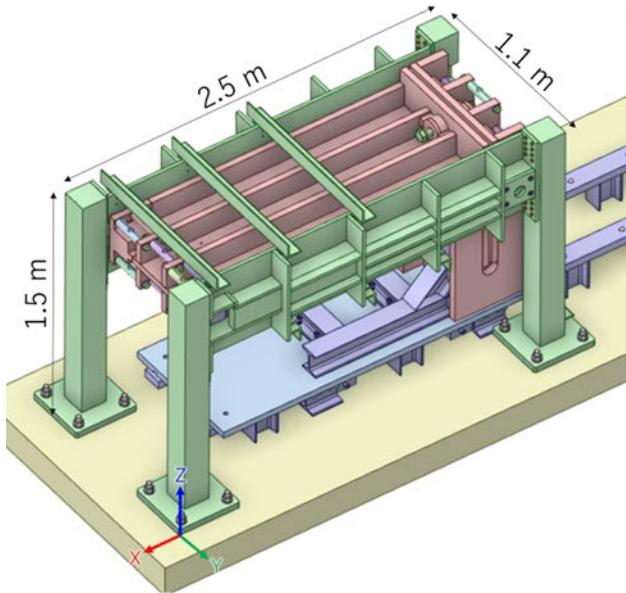
図 36 The scope of the mock-up (left), the manufactured mock-up (right) and the manufactured supports (bottom-right) [26].



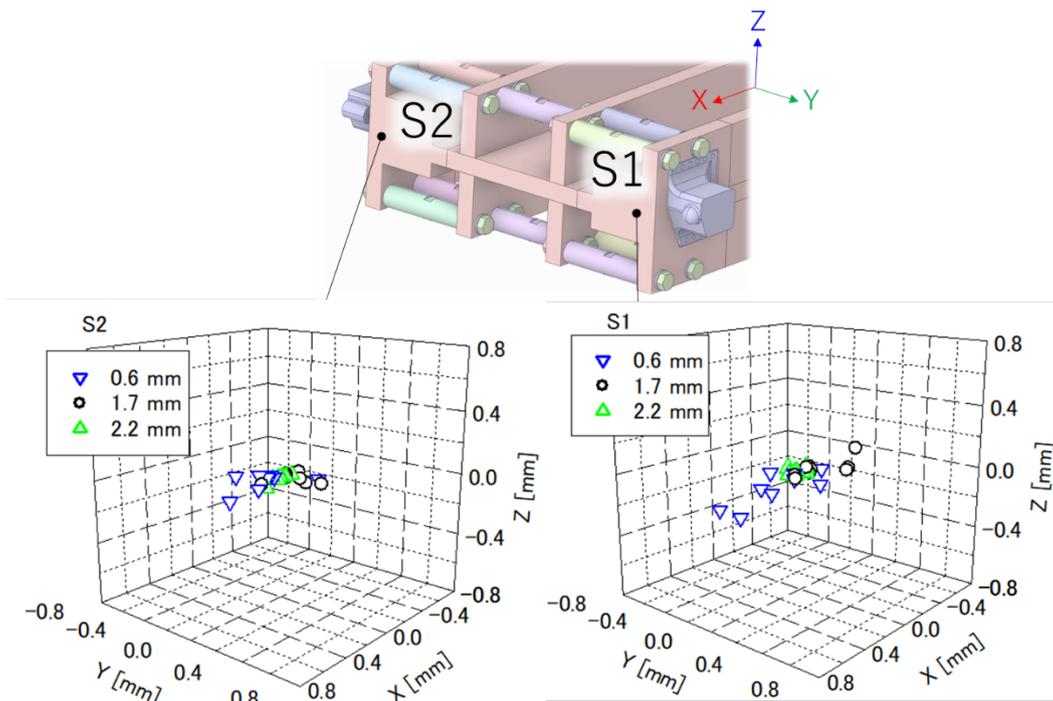
☒ 37 The **assumption and achievement** (bold) of the mechanical tolerances [26].



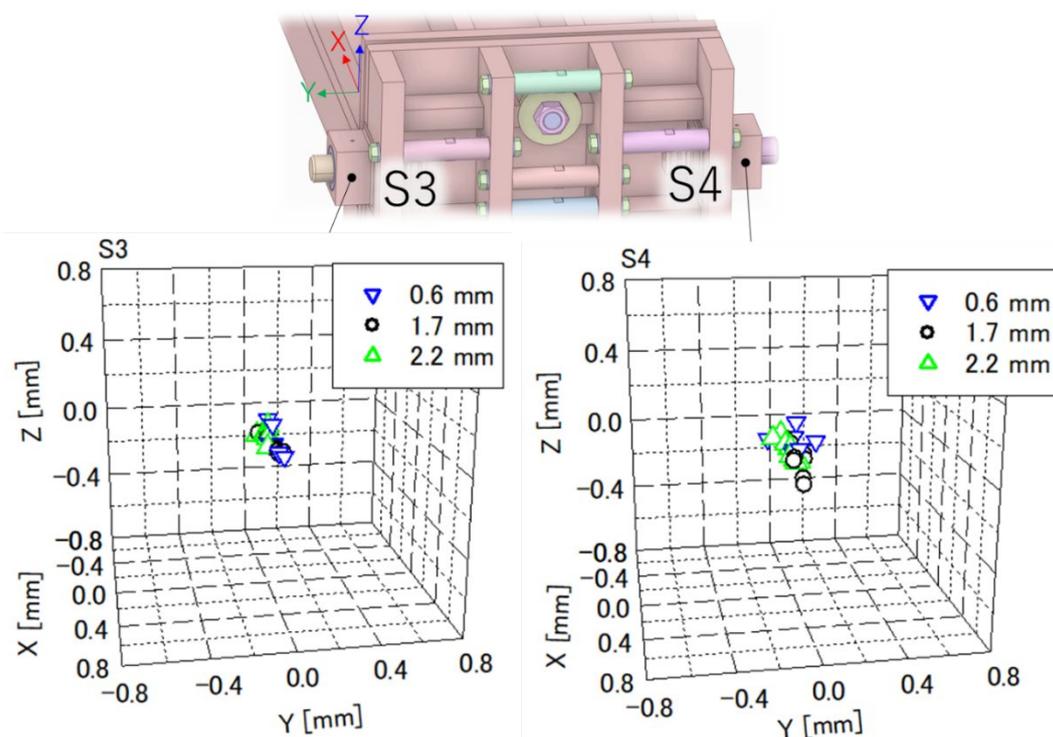
☒ 38 The final machining for S2 with the main body [26].



☒ 39 The mock-up CAD model (left) and the manufactured mock-up (right) [26].

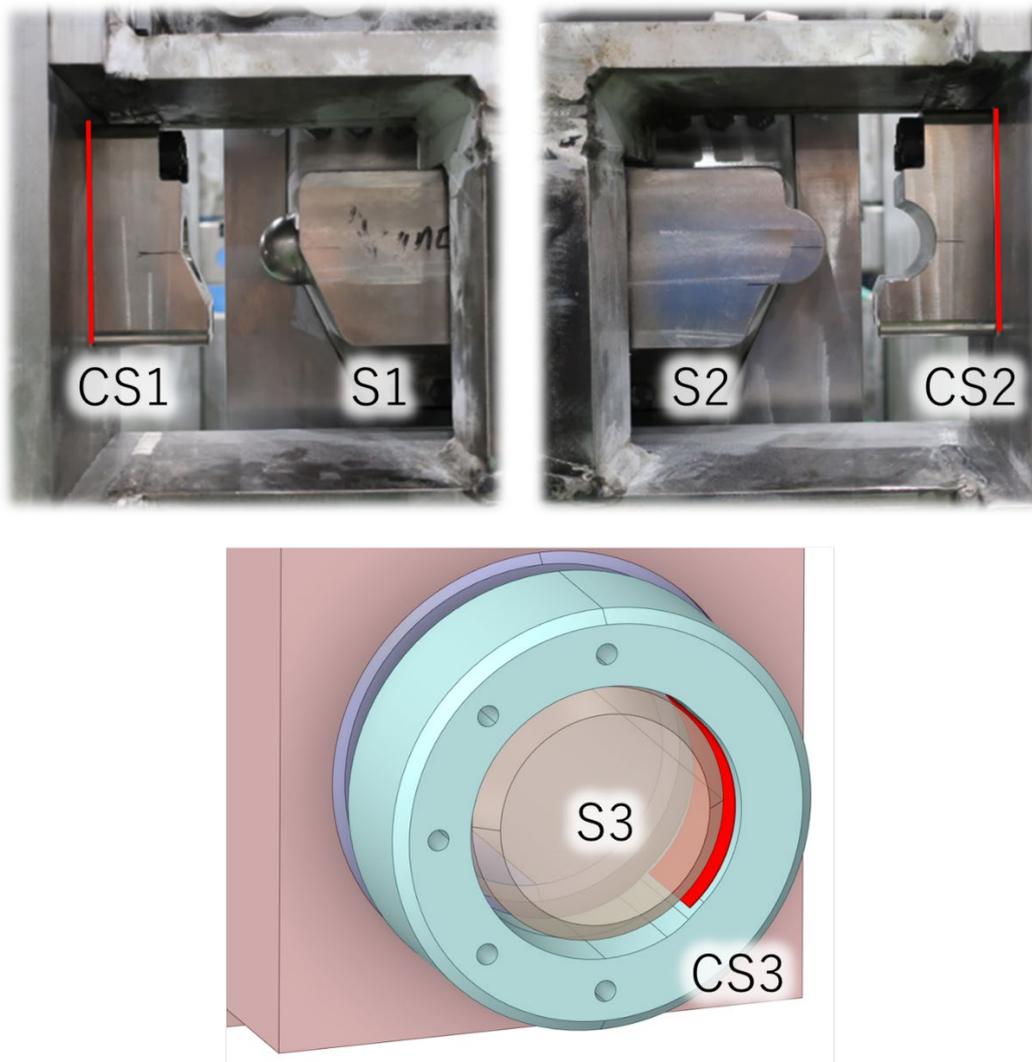


☒ 40 The plots of the 3D scanner measurement result for the positioning repeatability test at the points of S1(right) and S2 (left) [26].

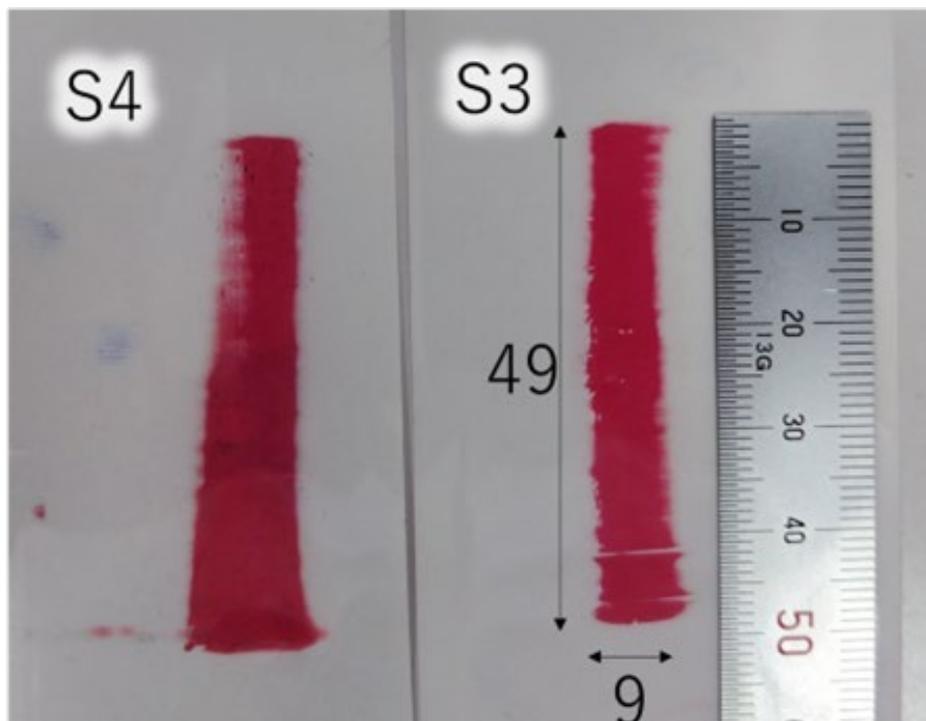


☒ 41 The plots of the 3D scanner measurement result for the

positioning repeatability test at the points of S3(left) and S4(right) [26].



☒ 42 The measurement film locations in red lines behind of CS1 and CS2, and surface on the CS3 and CS4 [26].



☒ 43 The pressured measurement films by 2.2 mm G1 Displacement) at the measurement film locations [26].

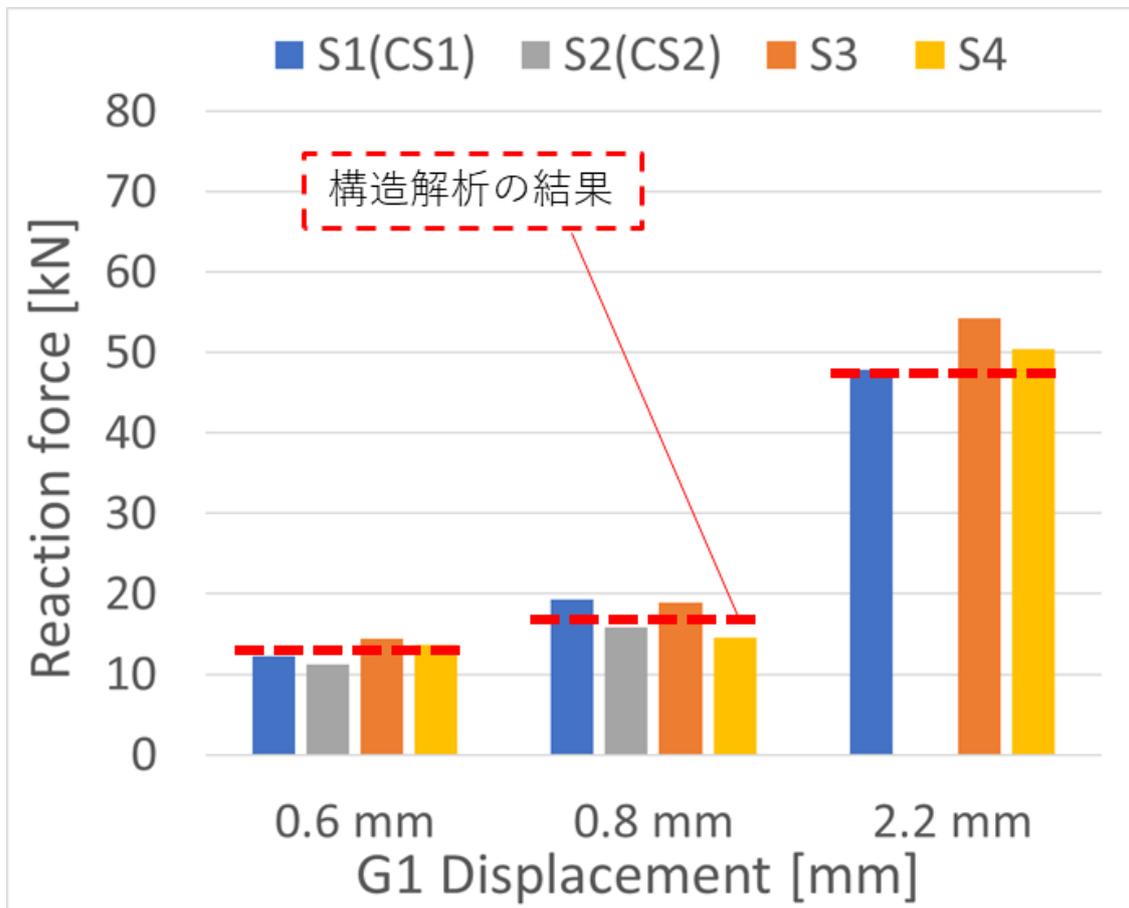


図 44 The results of the reaction force measurement for each support at each G1 Displacement [26].

### 3.5 まとめ

Diagnostic rack の固定機構については既存の二案（タイプ 1、タイプ 2）と本研究で提案したタイプ 3 を構造解析シミュレーションを用いて比較した。Diagnostic rack に搭載する計測機器から求められている位置再現性と ITER における荷重によって反力が失われないことに重点を置いて比較した。まず、タイプ 1 は摩擦で位置決めをしていることが特徴となっているが、熱サイクルにより容易に位置がずれることが想像できる。タイプ 2 は、全方向に対して 11 個の接触面に反力を発生させて固定するため位置ずれの発生は抑制できているが、11 個の接触面に発生する反力を制御することは極めて難しいと考えられる。タイプ 3 は、球状のサポートで位置決めを行い、ピンを穴に差し込むことによって最終的に固定する構造なため、位置ずれの可能性が構造的に少なく、位置再現性が良いと考えられる。次に、反力について述べる。タイプ 1 は摩擦で半径方向の位置決めをしているために、反力の方向が容易に逆転（滑る）してしまうことが分かった。タイプ 2 については剛性が高すぎるために、外部荷重によって変形すると、ただちに反力が失われる。タイプ 3 については、小さなプリロードにも関わらず、板バネが変位を許容することができ、外部荷重によって反力が失われないことが確認できた。

遠隔保守の観点から重要なことは、最小の手順で、単純な操作を行えることである。タイプ 1 及びタイプ 2 は、反力受けの構造として、DRR 上に構造物を配置する必要があるが、遠隔保守の観点では、質量制限があるため、この操作は容易ではない。タイプ 3 は遠隔保守によって操作される箇所が、遠隔保守機器の周辺に集中して配置され、なおかつ、単純な操作で固定機構を動作させることができる。また、タイプ 3 の構造は、遠隔操作を必要とする核発電所や衛星などの宇宙産業を含むさまざまな産業に適用可能である。タイプ 3 の設計は単純であるが、単純な遠隔操作で十分な反力を生み出すことができる。球や円筒などの形状は複雑であるが、板バネを用いたシンプルな構成となっているため、他の産業へ適用は難しくはない。

タイプ 3 をベースに Diagnostic rack 及び固定機構の設計具体化を行った。遮蔽体として機能するステンレス部分は、鍛造材の板材とし、その板材をリブ構造で繋ぐ構造とした。これにより、巨大な一体の鍛造ブロックから Diagnostic rack を製作する必要がなくなる。板材は、固定機構によって発生する反力を支持する強度だけ確保すれば良いため、ロードパス上のみにリブ構造を設け、それ以外の部分は棒で板材を繋ぐ構造とした。また、各パーツはボルト締結で組立可能な構造となっており、原子炉内の構造物においては、品質担保を難しさから極力避けるべき溶接をなくした。固定機構の板バネの材質は

SUH660 を採用することにより、曲げ量を大きくとることができ、板バネは最大 8 mm まで曲げることが可能となった。必要な曲げ量は最低で 4 mm 程度と見積もられているため、十分裕度を持った設計ができていることが分かる。この裕度によって、機微な曲げ量の制御が必要でないため遠隔保守による操作が簡便となる。また、計測機器等の質量や、荷重に応じて曲げ量を増減できるので、異なる計測機器を搭載した場合への汎用性を向上することができた。

固定機構のモックアップ製作と試験を実施し、固定機構の設計の妥当性を確認した。結果は、位置再現性が、 $2\sigma$  で 0.49 mm の偏差となり良好な位置再現性を示した。また、板バネの曲げ量を増加することにより、反力を増加させると位置再現性は改善することが分かった。一方、反力の測定結果は、期待通り、各サポートでバランスすることが分かった。

将来の作業として、取り合い点などの累積公差に影響を与える機器を考慮した公差解析、詳細な応力解析などが必要不可欠である。また、真空環境では、冷間溶接が問題となり、固定機構の接触面で発生する恐れがある。そのため、冷間溶接を防ぐためのコーティング材の検討を進めており、今後のモックアップ製作時にはコーティングを施す予定である。

# 第4章 高周波伝送ラインにおける遠隔保守対応の 電気コネクタの開発

## 4.1 遠隔保守電気コネクタの考案

### 4.1.1 解決すべき課題

遠隔保守で接続・切断する電気コネクタ（図 45、図中では RHEC (Remote handling electrical connector)）において、核融合炉内では金属製の被覆の MI (Mineral insulated) ケーブルの必要性とプラズマ計測機器のための高周波電力伝送路における電力損失について説明する。

真空、放射線、磁場などによって樹脂製の被覆を持ったケーブルを使用できないなどの環境的な要因により電気コネクタの設計と実現は困難となる。高周波伝送が計測機器から要求されており [29] [30]、過負荷による発熱や、インピーダンスのミスマッチによるパワーロスには避ける必要がある。既存研究 [31] とは異なり、本研究では電氣的な問題を排除するために MI ケーブルのみを伝送線として使用している。MI ケーブルの被覆はステンレス製、絶縁材として酸化マグネシウムや、アルミナなどが一般的に充填されている。その中に芯線が通してある構造となっているが、MI ケーブルの剛性が、コネクタの接続・切断の遠隔保守において問題となる可能性がある。MI ケーブルの可とう性が小さいため、反力が大きく遠隔保守によって電気コネクタを動かすことができない可能性がある。電気コネクタの接続・切断ができない場合には、Diagnostic rack を下部ポート内から取り出すことができなくなり、それに応じてダイバータの取り出しが不可能になる可能性があった。ダイバータの取り出しが不可能になると、最終的に安全境界である真空容器が破損する可能性が出てくるため、継続して核融合炉の運転できなくなる可能性がある。そこで、本章では支持部の間を長くとり MI ケーブルを可とう部として利用することで、電気コネクタの接続・切断時の移動を許容する構造の電気コネクタを提案した。構造解析シミュレーションを用いて、MI ケーブルの束が曲がることによって発生する応力を評価し、さらにプロトタイプ製作により設計の妥当性を検証した。

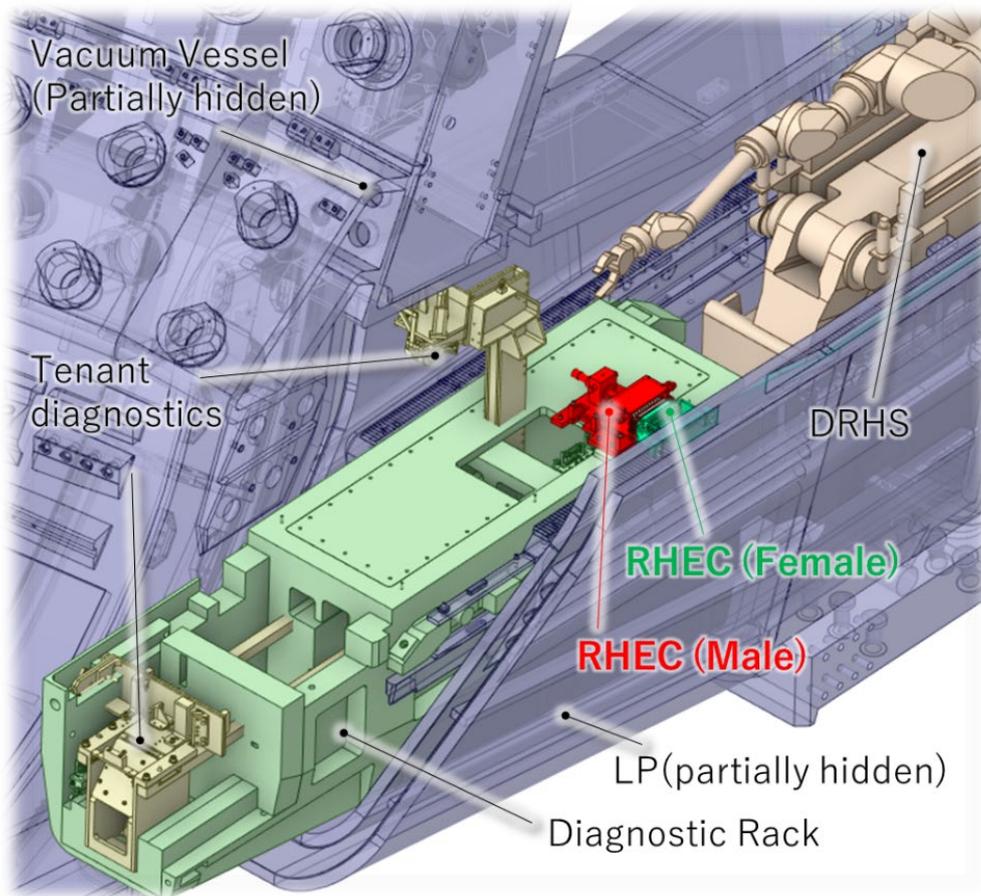


図 45 Location of DR and RHEC [32] (Plasma and Fusion Research の Copyright Statement に従って引用。以下同様。).

#### 4. 1. 2 要求を満たす設計案

図 46 に示すとおり、電気コネクタはコネクタ部、MI ケーブルバンドル、駆動機構及び位置調節機構で構成されている。このコネクタは合計 36 本（2 本は計測機器の圧空動作シャッターのリミットスイッチ、4 本は計測機器の高周波伝送用、30 本は熱電対）の MI ケーブルを接続する予定である。Diagnostic rack 上のオス側の電気コネクタは Diagnostic rack をポートから取り外す際に周辺機器との衝突を避けるために 60 mm 駆動させる必要があるため、MI ケーブルバンドルを、電気コネクタの駆動に合わせて曲げる必要がある。そこで MI ケーブルバンドルを支持部の間を 1.2 m の長さを持たせ、可とう部とした。

駆動機構は、1/50 の減速機と遠隔保守機器 (DRHS) との取り合い点となる六角ボルト、リニアガイドから構成した。この減速機により、1.3 Nm の入力トルクで 5000 N の軸力を発生させる。この軸力を用いて電気コネクタの駆動を行っ

た。

位置調節機構は、電気コネクタ接続時には非常に重要な要素となる。電気コネクタのオス側とメス側の位置は常に一定ではなく、Diagnostic rack を下部ポート内に配置したときの位置や、プラズマ運転中の各構造物の温度差による熱膨張差などによって変化する。例えば、プラズマ運転時には、Diagnostic rack（電気コネクタのオス側）と下部ポート側壁（電気コネクタのメス側）の間には約 40 °C の温度差が発生することがわかっており、図 46 に示す X 方向に対して +1.9 / - 1.0 mm、Z 及び Y 軸周りに +/- 0.06 度の角度ずれを発生させることが分かっている。よって、電気コネクタをこれらの位置ずれを許容する必要がある。そこで、ガイドピンと皿ばねを用いてこれらの位置ずれを許容する構造とした。

電気コネクタが理想的な位置（位置ずれが無い）に配置された場合に駆動に必要な軸力及びトルクを各種ケーブルのターミナル（MI ケーブルの端部が接続されるパーツ）の摩擦力の測定、ANSYS を用いた MI ケーブルバンドルの応力・反力解析及び種々のリニアガイドの摩擦力（カタログ値）から計算した。

電気コネクタ及び電気コネクタ内部の MI ケーブル接続部となるターミナルはストーブリ社が製作しており、これはカタログ品の CombiTac CT シリーズに相当する。ユニバーサル試験機を用いて、ターミナルの挿抜時の摩擦力を測定した。ターミナルは三種類あり、高周波伝送用の同軸ケーブル用ターミナル、熱電対用のツイストペアケーブル用ターミナル、リミットスイッチなどの信号線用ツイストペアケーブル用ターミナルとなっている。3 種類のターミナルの中で最も大きい摩擦力は 16.1 N となり、同軸ケーブル用のターミナルであった。一つの電気コネクタに必要なターミナルは 20 個となるため、16.1 N × 20 個でターミナルの摩擦力は 322 N と見積ることができる。

MI ケーブルバンドルは ANSYS において、図 47 の通りモデル化して解析した。MI ケーブルは、反力に寄与するパイプのみをモデル化している。境界条件とし、電気コネクタに接続される部分を 60 mm 移動、反対側を MI ケーブルバンドルの支持部とし、完全固定とした。解析の結果、最大応力は約 115 MPa となり、ステンレスの 0.2% 耐力より十分低いことが分かった。また、支持部に発生する反力は X 方向に 17 N、Y 方向に 97 N、Z 方向に 870 N となることが分かった。この Z 方向の力は駆動方向に対して垂直方向となるため、リニアガイドに発生する摩擦力はこの力によって発生する。オイレス工業の BTU40 に相当するブッシュを使用することを想定すると摩擦係数は 0.2 であることがカタログから分かっており、垂直抗力 870 N 及び電気コネクタの質量 (20 kg) を考慮すると、駆動方向に対する摩擦力は 213 N になることが分かった。

上述の 3 つの要素から発生する反力及び摩擦力の合計は 632 N となり、減速

機のギア比及びウォームホイールにおける軸力とトルクの換算式から必要トルクは 0.17 Nm と求めることができる。これは駆動機構のスペックの 16%程度のトルクとなるため、十分裕度をもった駆動機構の設計ができていることが分かる。

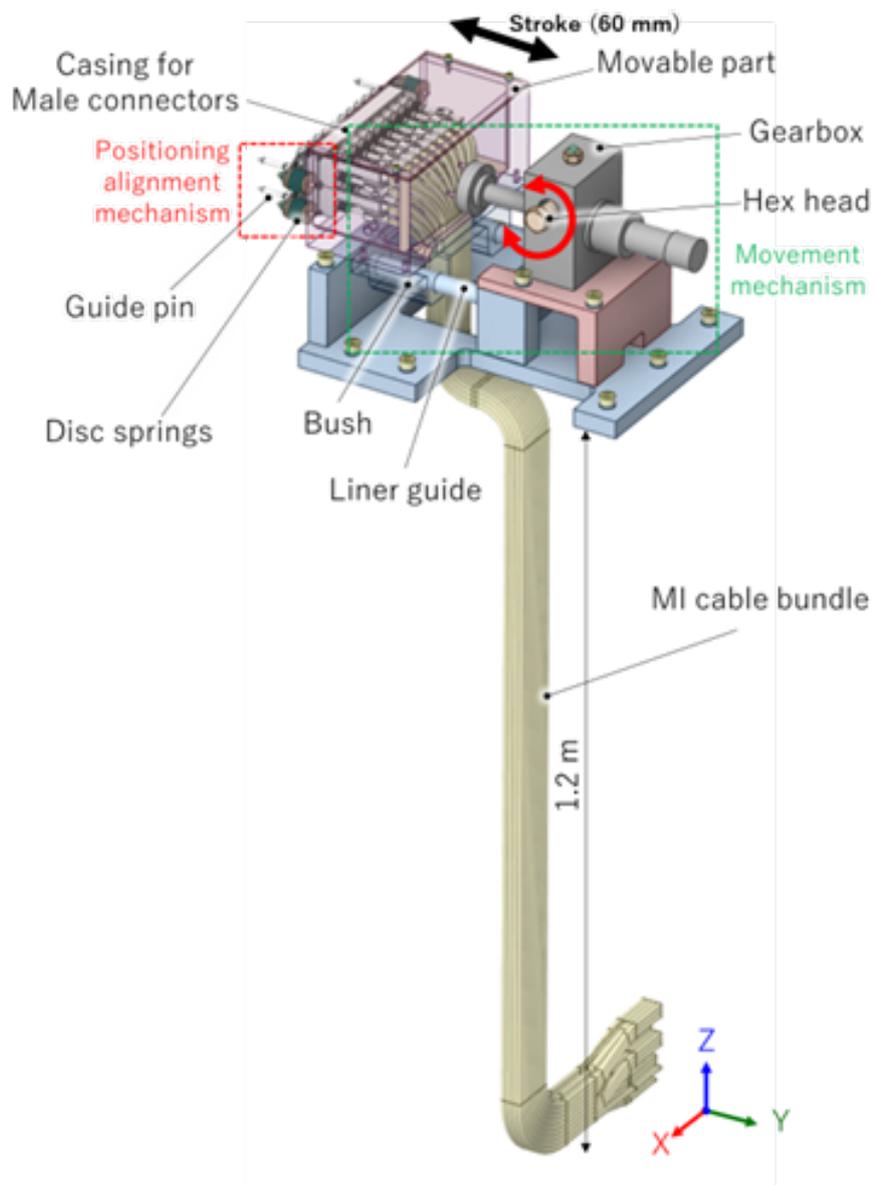


図 46 Configuration of RHEC [32].

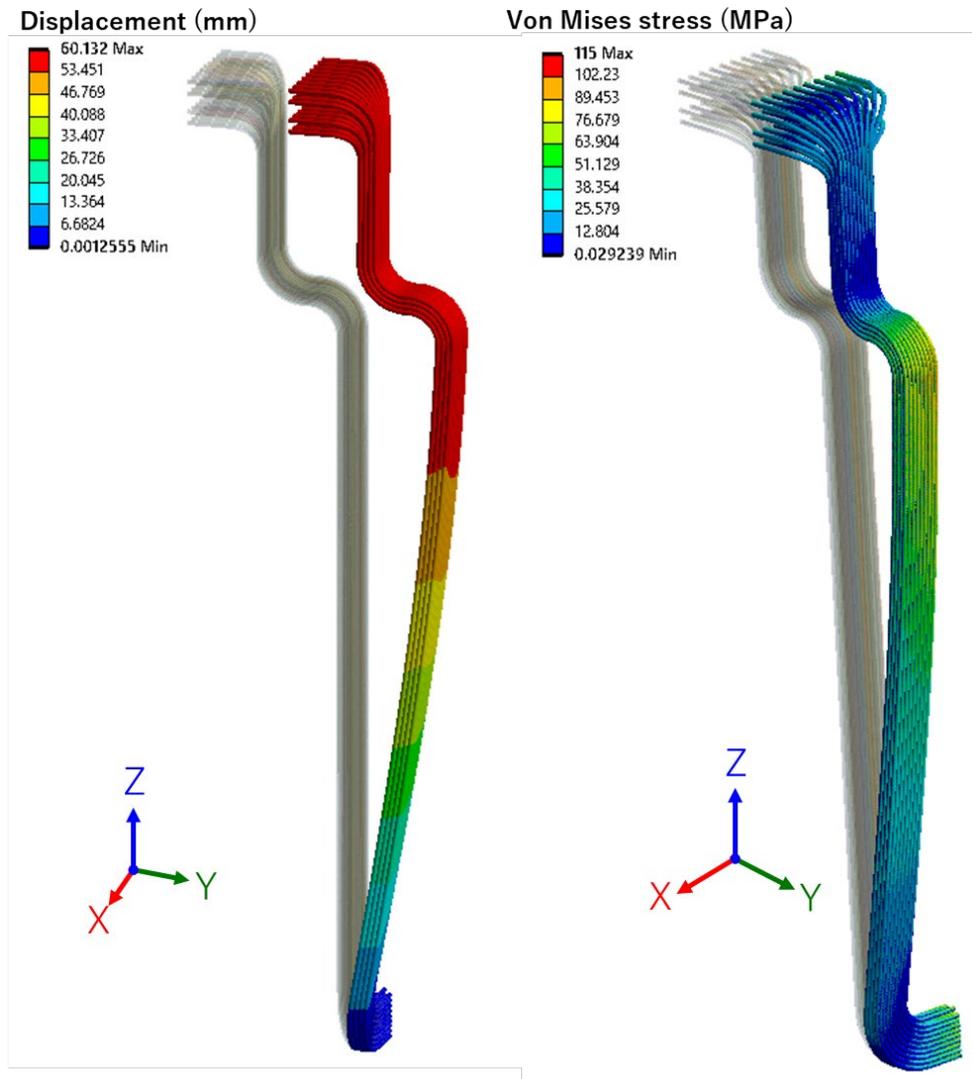


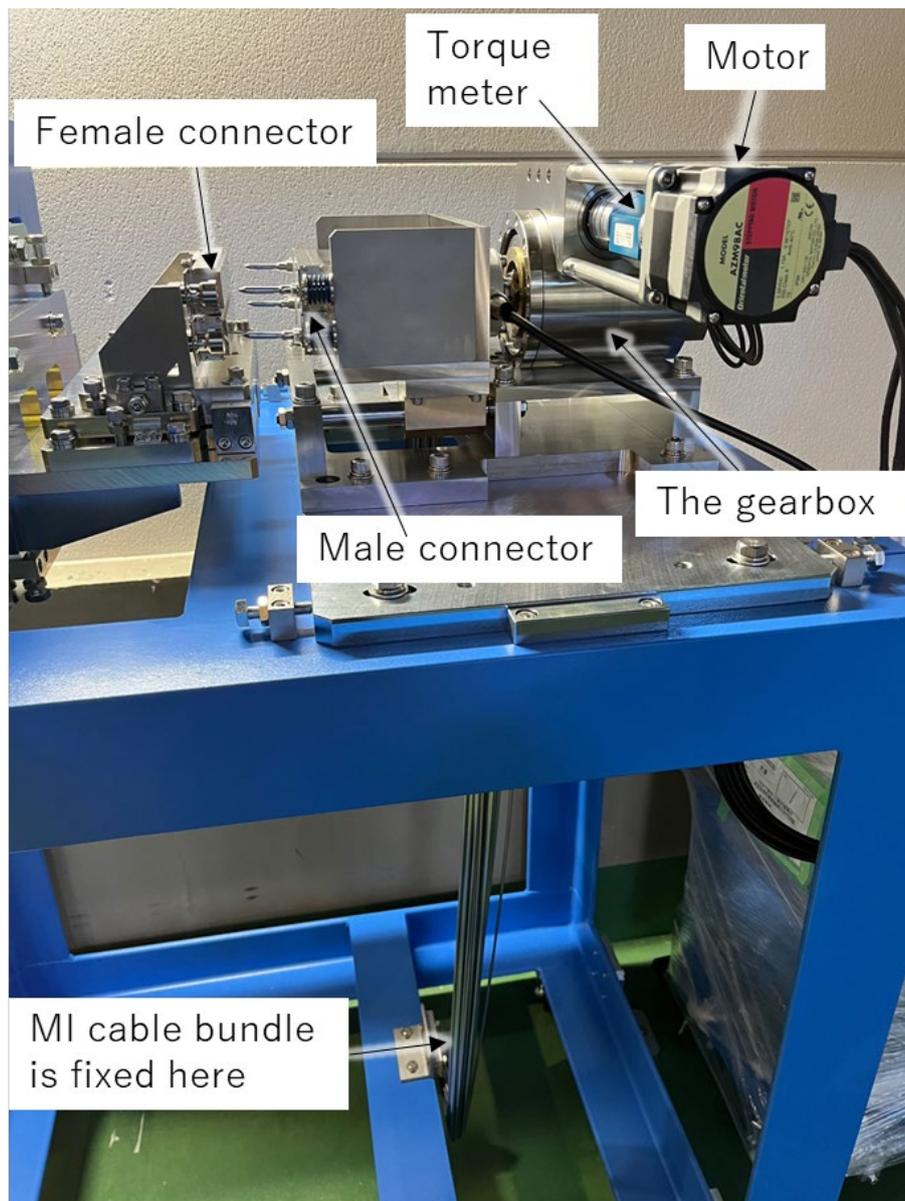
図 47 Analysis result Displacement (left) and Von Mises stress (Right) showing the original position as the shadow [32].

## 4.2 試作と設計の妥当性検証

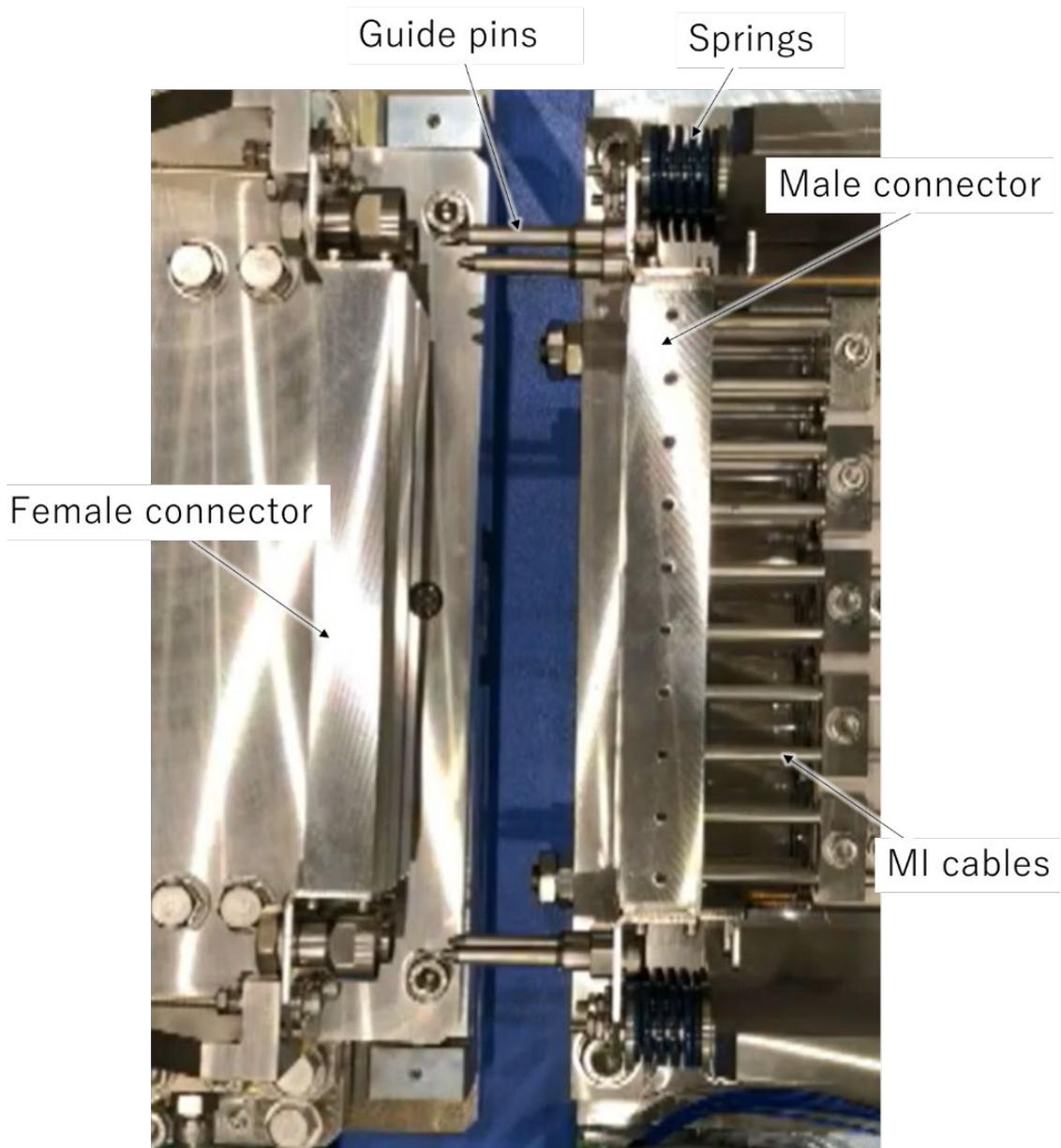
電気コネクタのプロトタイプは駆動機構及びMI ケーブルバンドル（ステンレス配管で代用）を含めて、図 48 のとおり製作した。また、電気コネクタ部の拡大写真を図 49 に示す。プロトタイプには軸力測定のためのロードセルとトルク測定のためのトルクメーターを搭載している。トルクはDRHSが発生できる最大トルクである 60 Nm を下回る必要がある。

図 50 に軸力とトルクの測定結果を示す。駆動機構はステッピングモーターによって動作し、60 mm のストロークで、0-400 秒で電気コネクタが接続され、401-800 秒で切断される。グラフは軸力とトルクの変化を前述の接続・切断時

の時間を横軸にとって示している。理想的な電気コネクタの位置では、トルクは0.3 Nm、軸力は0.38 kNとなり、事前の見積りである0.31 kNに近い。あえて位置ずれ（垂直及び水平方向に+2 mm、垂直及び水平方向の軸周りに+1 度、駆動軸周りに-1 度）を発生させた状態では、軸力及びトルクは大きく変化した。これらの変化は電気コネクタのオス側とメス側の接触状態の変化によるもので、図中 (a) の領域では、MI ケーブルバンドルの反力が主に寄与している。(b) の領域ではガイドピンと穴が接触することによる摩擦力が主に変化に寄与している。(c) の領域では、電気コネクタが接続され、位置調節機構の皿ばねが潰されることによるばね反力が主に変化に寄与している。(c) の時に軸力及びトルクは最大値をとり、それぞれ、2.6 kN、1.1 Nmとなった。この測定で再現した位置ずれは予想される位置ずれよりも17倍程度大きい値を設定しており、十分な裕度を持たせた条件であるものの、駆動機構の設計値である、1.3 Nmのインプットに対して5 kNの軸力のアウトプットよりも、得られる軸力は小さくなることが分かった。



☒ 48 The RHEC prototyping [32].



☒ 49 The magnification picture of the connectors [32].

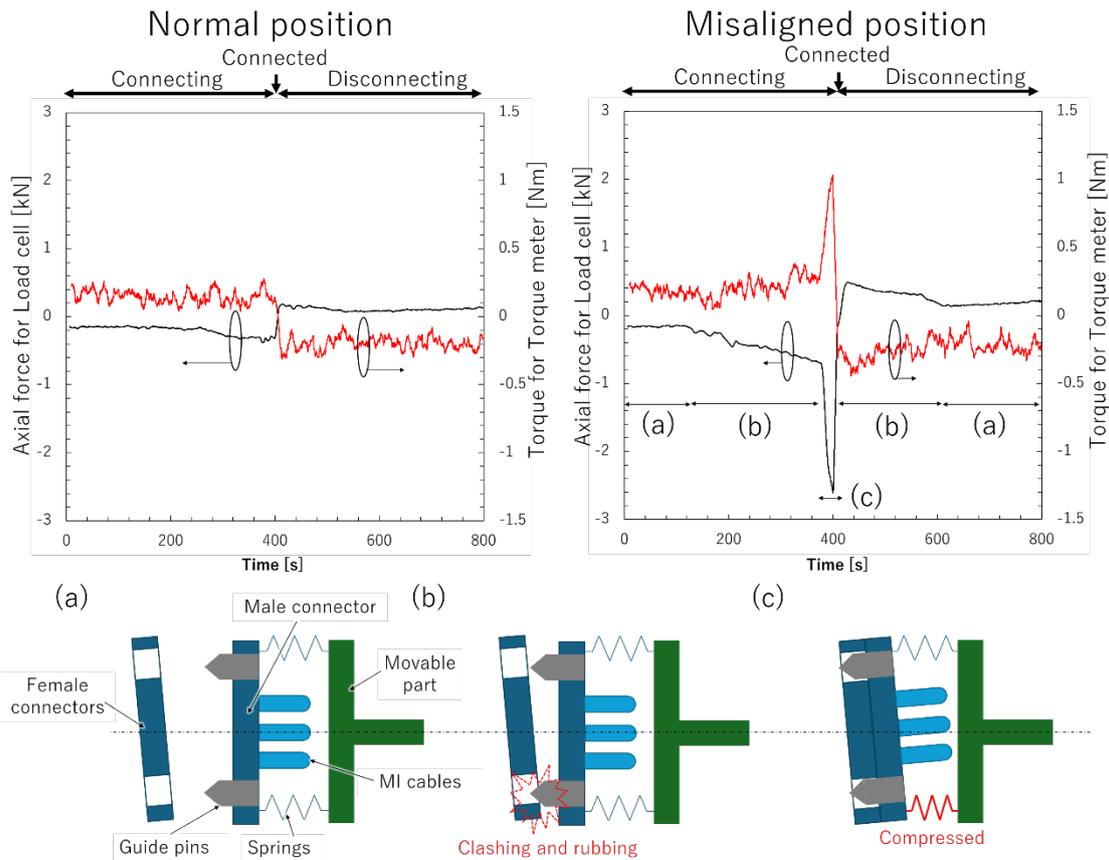


図 50 The results of the axial force for the load cell and the torque for the torque meter, and pictures for each state: (a) connecting/disconnecting state, (b) touching/detaching state of the guide pins on the holes, and (c) Connected state [32].

### 4.3 まとめ

遠隔保守に対応した電気コネクタの設計を考案し、設計の妥当性について検証を行った。

電気コネクタは可とう部として、高周波伝送の妨げとなるセラミックビーズなどを芯線に通したケーブルを除外し、支持部を電気コネクタから 1.2 m 程度離れた位置にもった MI ケーブルを使用することとした。これにより、小さなトルクで電気コネクタを駆動しつつ、計測機器に必要な高周波の伝送を容易にすることができる設計を考案した。電気コネクタの接続に必要な軸力は 632 N、トルクは 0.17 Nm と見積もられ、これは、DRHS が発生可能なトルクである 60 Nm より十分小さい。MI ケーブルバンドルに発生する応力は 115 MPa となるが、十分ステンレスの 0.2%耐力より小さく、実現可能な電気コネクタの設計ができ

ていることが分かった。

電気コネクタのプロトタイプを製作し、設計の妥当性検証を行った。理想的な位置では、(電気コネクタのオス側とメス側の位置ずれがない)、電気コネクタの接続・切断に要する軸力は0.38 kN、その時に必要なトルクは0.3 Nmとなり、事前の見積もりである0.31 kNに非常に近い値が得られ、設計が妥当であることを明らかにした。駆動機構の減速機については、仕様では1.3 Nmのトルクで5 kNの軸力が得られるはずであったが、1.1 Nmのトルクで、2.6 kNの軸力にとどまった。減速機の今後の改良が望まれる(具体的にはギア等の材質変更による効率向上)。コネクタのオス側とメス側の位置調整機構については、効果的に機能し、想定よりも大きな位置ずれを発生させて試験をしたにもかかわらず、駆動機構は問題なく動作した。このプロトタイプは大きな問題が発生することなく駆動し、電気コネクタの接続と切断が実施できることを示し、DRHSとの取り合い条件についても満足することが示された。

## 第5章 結論

本論文では、トカマク型核融合炉の計測用ポート内に配置される Diagnostic rack の構造に関する研究を行った。

核融合炉では、真空容器の中でプラズマを加熱し、核融合反応を発生させる。核融合反応の生成物である中性子によって、ポートを含む核融合炉内の構造物は放射化するため、人手によるメンテナンスが不可能となる。そのため、遠隔保守（遠隔でロボットを操作し、メンテナンスを行う）が必要となるが、既存の核融合炉実験炉等では、ポート内の機器の放射化レベルが比較的低いため、本格的な遠隔保守が必要とされていなかった。

核融合実験炉である ITER 以降の核融合炉においては Diagnostic rack は、人が近づくことができないレベルに放射化するため、遠隔保守が必須となる。本論文において、遠隔保守を考慮した Diagnostic rack の構造を検討したが、放射線環境によって制限される遠隔保守ロボットの仕様（可搬可能質量の制限及びアクセス性の制限）が、遠隔保守を必須とする構造物の開発において、考慮すべき重要な要素であることが分かった。

本論文では、遠隔保守における課題を解決するために、軽量な中性子遮蔽体の開発、遠隔保守可能な Diagnostic rack の固定機構の開発及び電気コネクタの開発を行った。

以下に、本論文の成果について述べる。

### 1. 炭化ホウ素粉を用いた軽量でガス吸着の少ない中性子遮蔽体の開発

炭化ホウ素粉をステンレスの容器に充填し封止した新しい中性子遮蔽体を提案した。炭化ホウ素を使用することで金属を主とした中性子遮蔽材と比べると比較的軽量になる。原材料に近い粉を用いることで比較的安価に中性子遮蔽体を製造することができ、容器の形状を変えることで様々な形状を容易に製作できる。また、ステンレスの容器に入れることでガス吸着の問題を解決した。

試作によって2種類のサイズ（2 mm と 0.2 mm）の炭化ホウ素粉を振動充填し、プレスすることにより密度比を炭化ホウ素の真密度（2525 kg/m<sup>3</sup>）の76%（1915 kg/m<sup>3</sup>）まで高めることができることを明らかにした。

遮蔽計算においては70%の密度比を考慮して、運転停止後線量率を計算し、ITERにおける、運転停止後線量率の要求値である 50  $\mu$ Sv/h 及び質量制限である9.5 トンを下回ることができた。これにより具体的に核融合炉に適用可能な中性子遮蔽体の提案であることを明らかにした。

## 2. 遠隔保守可能で、核融合炉における荷重に耐える固定機構の開発

本研究では、球と曲面を特徴とする固定点と Diagnostic rack の構造の一部を板バネとして使用する固定機構を提案した。他機関が開発中の二案と構造解析シミュレーションを用いて比較を行い、必要な反力 600 kN を、本提案が三案の中で最も効率よく発生できる構造になっていることを明らかにした。また、本提案が三案の中で ITER における電磁力などの荷重によって各固定点の反力が失われにくく、油圧ジャッキで板バネを曲げることにより、固定機構を動作させるための遠隔保守を三案の中で最も単純化できた。本研究における提案が優位であることを明らかにした。球と曲面の固定点を用いることにより幾何的に設置位置が決まる構造をしており、モックアップを用いた位置再現性の測定結果は、 $2\sigma$  で 0.49 mm の偏差となり良好な位置再現性を示した。これにより、本固定機構を有する Diagnostic rack に、高い設置精度・位置再現性を必要とするプラズマ計測機器を搭載可能であることを明らかにした。また、プラズマ計測機器だけでなく、高い設置精度・位置再現性が要求される機器を搭載する構造物に、本提案の固定機構の適用が考えられる。

## 3. 遠隔保守可能で、高周波伝送における損失を削減可能な、MI ケーブルを使用した電気コネクタの開発

可とう部として支持部の間隔を長くした。MI ケーブルを使用することによって、小さなトルクで挿抜可能で、計測機器に必要な高周波伝送における電力損失を低減可能な電気コネクタの設計を考案した。電気コネクタの挿抜に必要なトルクは 0.17 Nm と見積もられ、これは、遠隔保守機器が発生可能なトルクである 60 Nm より十分小さいことが確認された。また、電気コネクタ挿抜時に可とう部の MI ケーブルが曲げられることにより発生する応力は、構造解析シミュレーションを用いて、被覆材であるステンレスの 0.2% 耐力より十分小さいことが確認された。この設計を基にプロトタイプを製作し、電気コネクタ挿抜時のトルクを測定した。トルクは 0.3 Nm となり、設計値である 0.31 kN に非常に近い値が得られ、想定通りの結果が得られた。この提案の実現性が確認できたことにより、核融合炉内で使用可能で、遠隔保守に対応した高周波伝送ラインの電気コネクタの実用化を大きく推進することができた。

本論文で論じた、これらの研究により、遠隔保守に対応した Diagnostic rack の構造を考案することができた。本研究の成果は、ITER においては、実用化されており、Diagnostic rack の製造が数年内に開始される予定である。ま

た、発電を実証するための実証炉においても、本研究の成果が適用されることが期待されており、核融合炉の実用化への貢献度は大きいと考える。

## 参考文献

- [1] 電気事業連合会, “日本の電力消費,” [オンライン]. Available: <https://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyoku/japan/>.
- [2] 総務省, “電力量の爆発的増加と地球温暖化の加速,” [オンライン]. Available: <https://www.soumu.go.jp/johotsusintokei/whitepaper/ja/r04/html/nd121160.html>.
- [3] 電気事業連合会, “主要国の電力事情,” [オンライン]. Available: <https://www.fepc.or.jp/enterprise/jigyoku/shuyoukoku/index.html>.
- [4] 経済産業省, “令和4年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2023）,” [オンライン]. Available: <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2023/html/3-10-0.html>.
- [5] 内閣府, “フュージョンエネルギー・イノベーション戦略,” [オンライン]. Available: [https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion\\_senryaku.pdf](https://www8.cao.go.jp/cstp/fusion/fusion_senryaku.pdf).
- [6] Y. Someya, "Progress in design and engineering issues on JA DEMO," *28th IAEA Fusion Energy Conference*, 2021.
- [7] K. Tobita, "Overview of the DEMO conceptual design activity in Japan," *Fusion Engineering and Design*, vol. 136 Part B, pp. 1024-1031, 2018.
- [8] 鈴木 哲, "3.ブランケットの構造を理解する," *J. Plasma Fusion Res*, vol. 82, no. 11, pp. 768-774, 2006.
- [9] 文部科学省, “核融合研究,” [オンライン]. Available: [https://www.mext.go.jp/a\\_menu/shinkou/iter/019.htm](https://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/iter/019.htm).
- [10] ASN. [Online]. Available: <https://www.asn.fr/tout-sur-l-asn/l-asn-en-region/provence-alpes-cote-d-azur/iter>.
- [11] 大隅久, “福島第一原子力発電所の廃炉に向けたロボット技術の現状と課題,” 2021. [オンライン]. Available: [http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2021/siryu25/1\\_haifu.pdf](http://www.aec.go.jp/jicst/NC/iinkai/teirei/siryu2021/siryu25/1_haifu.pdf).
- [12] S. Esqué, *Fusion Engineering and Design*, vol. 89, pp. 2373-2377, 2014.
- [13] 野口悠人, "4. ITER ブランケット遠隔保守機器の開発," *J. Plasma Fusion Res.*, vol. 92, no. 6, pp. 408-413, 2016.
- [14] J. Guirao, "Standardized integration of ITER diagnostics Equatorial Port Plugs," *Fusion Engineering and Design*, vol. Part B, no. 146, pp. 1548-1552, 2019.
- [15] H. Ogawa, "Engineering design and R&D of Impurity Influx Monitor (divertor) for ITER," *Fusion Eng. Des.*, vol. 83, p. 1405, 2008.

- [16] 河野康則, "ディスラプションを制御する～物理現象の理解と制御技術の進展," *J. Plasma Fusion Res*, vol. 86, no. 1, pp. 3-16, 2010.
- [17] S. Ciochhio, "Project Requirement (PR)," ITER Organization, 2019.
- [18] P. Spaeh, "Structural pre-conceptual design studies for an EU DEMO equatorial EC port plug and its port integration," *Fusion Engineering and Design*, vol. 161, p. 111885, 2020.
- [19] S. TANAKA, "Novel Concept of Neutron Shield for ITER Diagnostic Lower Port Integration," *Fusion Engineering and Design*, vol. 169, no. 112427, 2021.
- [20] Y. Wu, "Multi-functional Neutronics Calculation Methodology and Program for Nuclear Design and Radiation Safety Evaluation," *Fusion Science and Technology*, vol. 74, pp. 321-329, 2018.
- [21] Y. Wu, "CAD-Based Monte Carlo Program for Integrated Simulation of Nuclear System Super MC," *Annals of Nuclear Energy*, vol. 82, pp. 161-168, 2015.
- [22] 国立研究開発法人海洋研究開発機構, "中型高圧実験水槽装置の概要," [オンライン]. Available: [https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/yokosuka/img/chugata\\_kouatsu\\_jikken.pdf](https://www.jamstec.go.jp/j/about/equipment/yokosuka/img/chugata_kouatsu_jikken.pdf).
- [23] C. Damiani, *Fusion Engineering and Design*, vol. 136, pp. 1117-1124, 2018.
- [24] "I. V. Buslovkov," *Fusion Engineering and Design*, vol. 112903, p. 173, 2021.
- [25] S. TANAKA, "Locking Mechanism of Diagnostic Rack in ITER Lower Port #02," *Fusion Engineering and Design*, vol. 193, no. 113808, 2023.
- [26] S. TANAKA, "The diagnostic rack design and the functional demonstration of the locking mechanism for ITER diagnostic lower port integrations," *Fusion Engineering and Design*, vol. 200, no. 114194, 2024.
- [27] T. S, THEORY of ELASTICITY, 1951.
- [28] H. Hertz, "Über die berührung fester elastischer Körper," *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 92, pp. 156-171, 1896.
- [29] A. Ushakov, *Fusion Engineering and Design*, vol. 111546, p. 154, 2020.
- [30] U. Stephan, *Fusion Engineering and Design*, vol. 113079, p. 117, 2022.
- [31] J. Kyytinen, *Fusion Engineering and Design*, vol. 112243, p. 165, 2021.
- [32] S. TANAKA, "Design and Prototyping of Remote Handling Electrical Connector for Diagnostic Rack in ITER," *Plasma and Fusion Research*, vol. 18, no. 1405070, 2023.
- [33] 経済産業省, "2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略," [オンライン]. Available:

- <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012.html>.
- [34] 東京電力ホールディングス, “ロボット技術の活用,” 東京電力ホールディングス, [オンライン]. Available:  
<https://www.tepco.co.jp/decommission/principles/technology/robot/index-j.html>.
- [35] J. Palmer, "ITER'S DIVERTOR REMOTE HANDLING SYSTEM SIGNED OFF," 2012. [Online]. Available: <https://www.iter.org/newsline/244/1372>.
- [36] "ITER 計画・幅広いアプローチ活動の概要," [Online]. Available:  
[https://www.mext.go.jp/content/20220112-mext\\_kaisen-000019860\\_1.pdf](https://www.mext.go.jp/content/20220112-mext_kaisen-000019860_1.pdf).
- [37] J.M.Martinez, "ITER vacuum vessel structural analysis completion during manufacturing phase," *Fusion Engineering and Design*, vol. 109 Part A, pp. 688-692, 2016.

## 謝辞

この度の博士論文の研究及び学位申請にあたり、多大なる支援と導きを賜りました全ての方々に心から感謝申し上げます。

まず、最初に、修士課程時代より私の学問的な道の手を見守り、本学位審査の主査として指導して下さいました利根川昭教授に深く感謝いたします。教授からの貴重なご指導と温かい励ましは、私の研究活動において不可欠なものでした。

次に、会社員時代の上司であり、現在の研究における指導者でもある伊尾木公裕さんに感謝いたします。伊尾木さんから学んだ実務と知識は、現在の研究において大きな影響を与えています。

また、量子科学技術研究開発機構の上司として、大きな支えとなった波多江紀仰さんと先輩である丸山敏之さんに心より感謝します。二人の協力なくして、研究成果の発表は成し遂げられませんでした。

ITER 機構における同僚であり、本研究における協力者である Daniel Nagy さんと Jaemin Kim さんにも特別な感謝を表します。彼らの専門知識と協力が、本研究の進行において大きな助けとなりました。

学位審査を担当して下さいました、大山龍一郎教授、沖村邦雄教授、堀澤秀之教授、桑畑周司准教授の皆様にも、厳正な審査と貴重なご意見を賜り、心より感謝申し上げます。

最後に、私を常に支え、愛情深く励ましてくれた家族に、最大の感謝を捧げます。家族の存在がなければ、この学位への道の手を乗り越えることはできませんでした。

この論文は、上記のすべての方々の支援の賜物であり、深い感謝の気持ちを込めて、この謝辞を献げます。