

**高速実験炉「常陽」における
原子炉容器内保守・補修技術開発**
— 「常陽」炉心上部機構の交換に向けた技術開発 —

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel
of the Experimental Fast Reactor Joyo
-Development of Repair Techniques for UCS Replacement of Joyo -

高松 操 小林 哲彦 長井 秋則
Misao TAKAMATSU, Tetsuhiko KOBAYASHI and Akinori NAGAI

大洗研究開発センター
高速実験炉部
Experimental Fast Reactor Department
Oarai Research and Development Center

July 2012

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

高速実験炉「常陽」における原子炉容器内保守・補修技術開発 — 「常陽」炉心上部機構の交換に向けた技術開発 —

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター 高速実験炉部

高松 操、小林 哲彦、長井 秋則

(2012 年 4 月 24 日受理)

ナトリウム冷却型高速炉における原子炉容器内保守・補修技術の開発は、供用中の原子炉の安全性及び健全性を確認する重要な役割を有する。高速実験炉「常陽」では、計測線付実験装置不具合に起因した燃料交換機能の一部阻害に係るトラブルを一つの契機として、炉心上部機構の交換作業に係る検討・技術開発を進めた。

「常陽」炉心上部機構は、予め交換することを想定したものでないこと、また、30 年以上の供用により表面線量率が高くなっていることから、ここでは、以下に示す課題に係る解決策について検討を進めた。

- (1) 旧炉心上部機構ジャッキアップ・引抜作業中の旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等防止策
- (2) キャスク総重量の低減策

上記 (1) においては、汎用非線形有限要素解析プログラム Abaqus (Standard Version 6.7-1 : 3 次元モデルを使用) を用いて、旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等を防止するための荷重許容値を設定するとともに、旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等の原因となる干渉・接触を防止するための監視因子及び制御因子 (荷重、水平度、水平方向位置、引抜速度等) をまとめ、必要な治具類を整理した。また、上記 (2) に関連し、揚重設備やドアバルブを取り外すことができる多段式キャスクの採用を検討し、キャスク総重量 (旧炉心上部機構を収納) を、格納容器クレーンの最大容量である 100 トン以下にできる見通しを得た。

炉心上部機構の交換作業は、平成 26 年 (2014 年) に実施される計画である。本作業の完遂及び蓄積された経験は、「常陽」の復旧のみならず、稀少な知見として、ナトリウム冷却型高速炉における原子炉容器内保守・補修技術開発に大きく資することができるものと考えている。

**Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel
of the Experimental Fast Reactor Joyo
-Development of Repair Techniques for UCS Replacement of Joyo -**

Misao TAKAMATSU, Tetsuhiko KOBAYASHI and Akinori NAGAI

Experimental Fast Reactor Department, Oarai Research and Development Center,
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received April 24, 2012)

Development of repair techniques in the reactor vessel of sodium cooled fast reactors is important to secure its safety and integrity. With the incident as an opportunity, repair techniques for Upper Core Structure (UCS) replacement was developed in Joyo.

Since the UCS of Joyo was designed as an eternal structure and it has high dose rate due to the irradiation for over 30 years, the following subjects were mainly discussed in this study as critical tasks.

- (1) Prevention of deformation during jack-up and retrieval of the UCS
- (2) Reducing UCS cask weight

In order to resolve above (1), the allowable load to prevent the deformation of the UCS and guide sleeve were evaluated using finite element method analysis code with 3-D model. Furthermore, the general design of the equipment were established based on the requirement of monitoring and control of the factors (load, flatness, inclination and pull-up speed etc.) and gap observation to achieve UCS jack-up and retrieval. Concerning with above (2), multistage cask without crane and doorvalve was suggested in this study. As a result of this study, total weight of cask (including UCS) was reduced to be less than 100ton, which is the maximum load of the crane in the reactor containment vessel of Joyo.

The UCS replacement is scheduled in 2014. Achievement of the UCS replacement and accumulated experience will be able to provide valuable insights for further improving and verifying repair techniques in sodium cooled fast reactors.

Keywords: Fast Reactor, Joyo, Upper Core Structure

目 次

1. 諸言	1
2. プラントの概要	5
3. 炉心上部機構交換作業の概要	9
3.1 炉心上部機構交換作業に使用する治具類	10
3.2 炉心上部機構交換作業における主な懸案事項	12
3.2.1 旧炉心上部機構ジャッキアップ作業における主な懸案事項	12
3.2.2 旧炉心上部機構引抜・収納作業における主な懸案事項	13
3.2.3 新炉心上部機構装荷作業における主な懸案事項	13
3.2.4 炉心上部機構交換作業全般における主な懸案事項	13
4. 炉心上部機構交換作業における主な懸案事項の解決策の検討	17
4.1 仮設バウンダリ及び作業環境空間線量率の管理方法に係る検討結果	17
4.2 旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等防止策に係る検討結果	21
4.2.1 荷重許容値の検討結果	21
4.2.2 ナトリウムブリッジせん断抵抗による案内スリーブの変形等防止方策の検討結果	25
4.2.3 旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触防止策の検討結果	26
4.3 旧炉心上部機構ライナ固定方法の検討結果	36
4.4 キャスク総重量の低減方策の検討結果	39
5. 炉心上部機構交換作業用機材等の機能確認試験計画	43
6. 結言	45
謝辞	46
参考文献	46
付録-1 ナトリウムブリッジ形成位置等の評価	49
付録-2 旧炉心上部機構温度分布測定結果	55
付録-3 小回転プラグ水平度評価結果	58

Contents

1. Introduction	1
2. Plant description of Joyo	5
3. Outline of UCS replacement	9
3.1 Equipments for UCS replacement	10
3.2 Subjects in UCS replacement	12
3.2.1 Particular subjects in UCS jack-up	12
3.2.2 Particular subjects in UCS retrieval	13
3.2.3 Particular subjects in UCS loading	13
3.2.4 General subjects in UCS replacement	13
4. Discussions	17
4.1 Management of temporal boundary and environment dose rate	17
4.2 Prevention of deformation of UCS and guide sleeve	21
4.2.1 Evaluation of allowable load	21
4.2.2 Prevention of deformation caused by sodium bridge	25
4.2.3 Prevention of deformation caused by UCS interference and contact	26
4.3 Holding measure of UCS liner	36
4.4 Reducing UCS cask weight	39
5. Ex-vessel function test plan	43
6. Conclusion	45
Acknowledgements	46
References	46
Appendix-1 Evaluation of sodium bridge location etc.	49
Appendix-2 Temperature distribution of UCS	55
Appendix-3 Evaluation of flatness of small rotating plug	58

1. 諸言

高速実験炉「常陽」(ナトリウム冷却型高速炉(以下、「SFR」):熱出力 140MWt)では、平成 19 年 5 月 15 日から開始した第 15 回施設定期検査において、照射試験が終了した計測線付実験装置(以下「MARICO-2」)を照射位置(炉心第 3 列【炉心アドレス:3E3】)から炉内燃料貯蔵ラック(以下「炉内ラック」)R16 に移動し、MARICO-2 の保持部と試料部の切離作業を実施した。また、MARICO-2 の保持部と試料部の切離作業を実施した後、回転プラグを回転し、基準位置に復旧した(MARICO-2 保持部は、照射位置【3E3】直上に移動)。MARICO-2 の概略構造及び移動軌跡を図 1.1 に示す。

その後、燃料交換作業を開始するため、燃料交換機を回転プラグに設置し、回転プラグをジャッキダウンしたところ、燃料交換機のホールドダウン軸において、荷重異常(荷重低下:干渉物が存在)が確認された(図 1.2 参照)。なお、ホールドダウン軸は、炉心燃料集合体を引き抜く際に、周囲の 6 集合体が浮き上がらないようにする機能を有する円筒形の装置(燃料交換機の一部)であり、当該作業時において炉内ラック R16 近傍に位置した。

図 1.3 に、耐放射線性ファイバスコープ等を用いた原子炉容器内の観察結果を示す(炉心の崩壊熱が十分に小さくなったタイミングで、ナトリウム液位を集合体頂部以下まで下げて実施)。当該観察では、①炉内ラック R16 に装荷された MARICO-2 試料部上部が屈曲している、②炉心上部機構整流板に変形が生じていることが確認されている¹⁾。MARICO-2 試料部と保持部が接続された(切離不能)状態で回転プラグを操作したために、MARICO-2 試料部が、炉内ラック上に突き出した状態で、炉心上部機構と接触したことが原因であり、現在、「常陽」では、回転プラグ燃料交換機能の一部阻害が生じている。

炉心上部機構は、回転プラグの一部を構成し、①炉心と制御棒駆動機構等の相対的位置を、制御棒の引抜・挿入が確実に実施される位置に保持する機能、②炉心と集合体出口冷却材温度測定用熱電対の相対的位置を、集合体の出口冷却材温度の測定が確実に実施される位置に保持する機能等が要求されている機器である。今回、炉心上部機構に設置されている集合体出口冷却材温度測定用熱電対 115 本のうち、センター孔案内スリーブに隣接した少なくとも 2 本について、相対位置の変位があることが確認されており、「常陽」の復旧にあたっては、MARICO-2 試料部を回収するとともに、炉心上部機構の交換が必須であることが確認された。なお、変位した熱電対案内用フィンガを原子炉内で補修することは、作業スペース等の観点で、困難である。

上記を踏まえ、「常陽」では、平成 21 年より、炉心上部機構の交換及び MARICO-2 試料部の回収に係る検討を開始した。ここでは、「常陽」復旧に必要な 2 項目のうち、炉心上部機構の交換に係る検討・技術開発について報告する^{2)~4)}。なお、炉心上部機構の交換作業は、過去に仏国ラプソティで実施された実績はあるものの、世界でも数少ない大規模な炉内構造物の交換作業である。本作業の完遂は、「常陽」の復旧のみならず、稀少な経験として、SFR における今後の原子炉容器内保守・補修技術開発に大きく資することができるものと考えている。

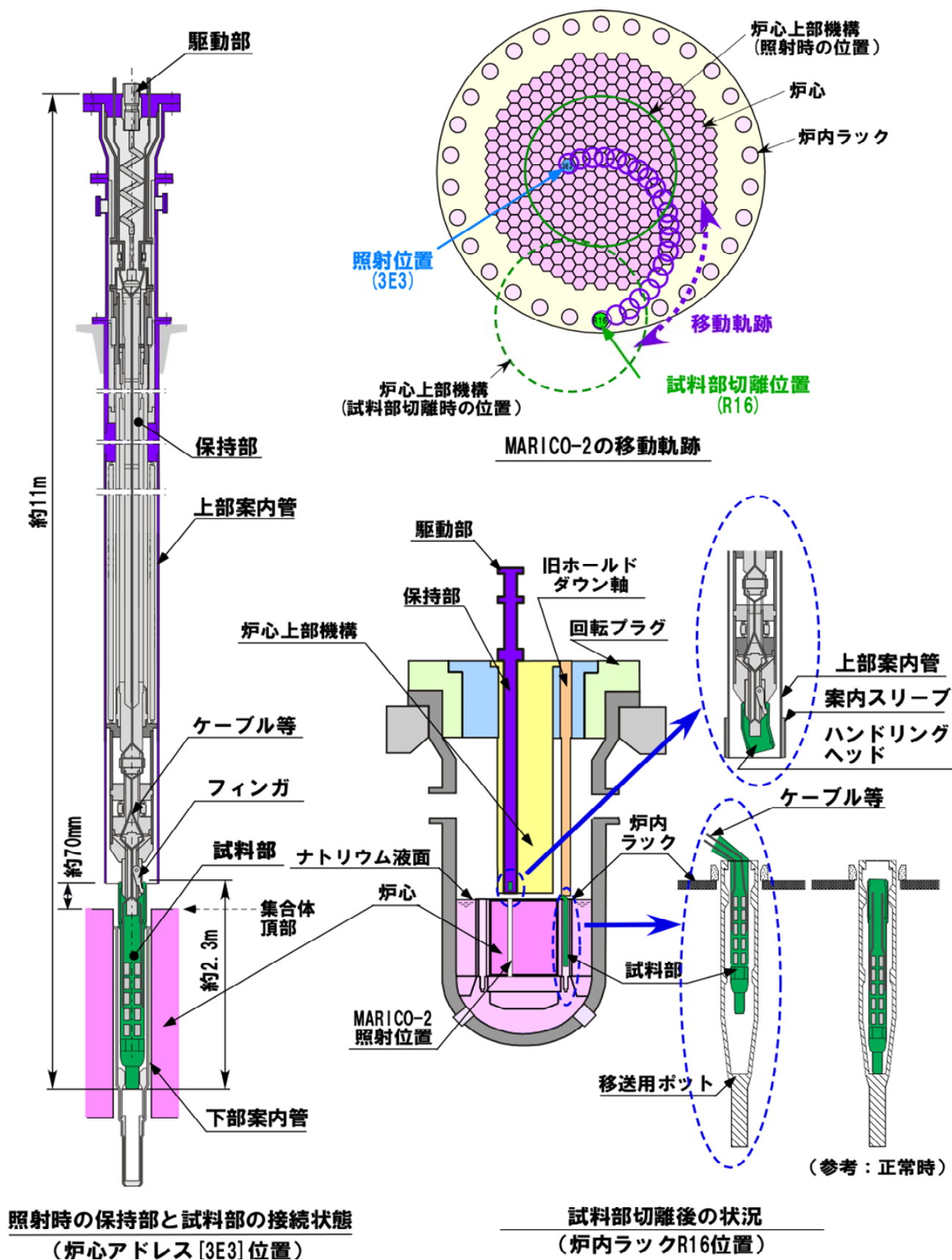


図 1.1 MARICO-2 の概略構造及び移動軌跡

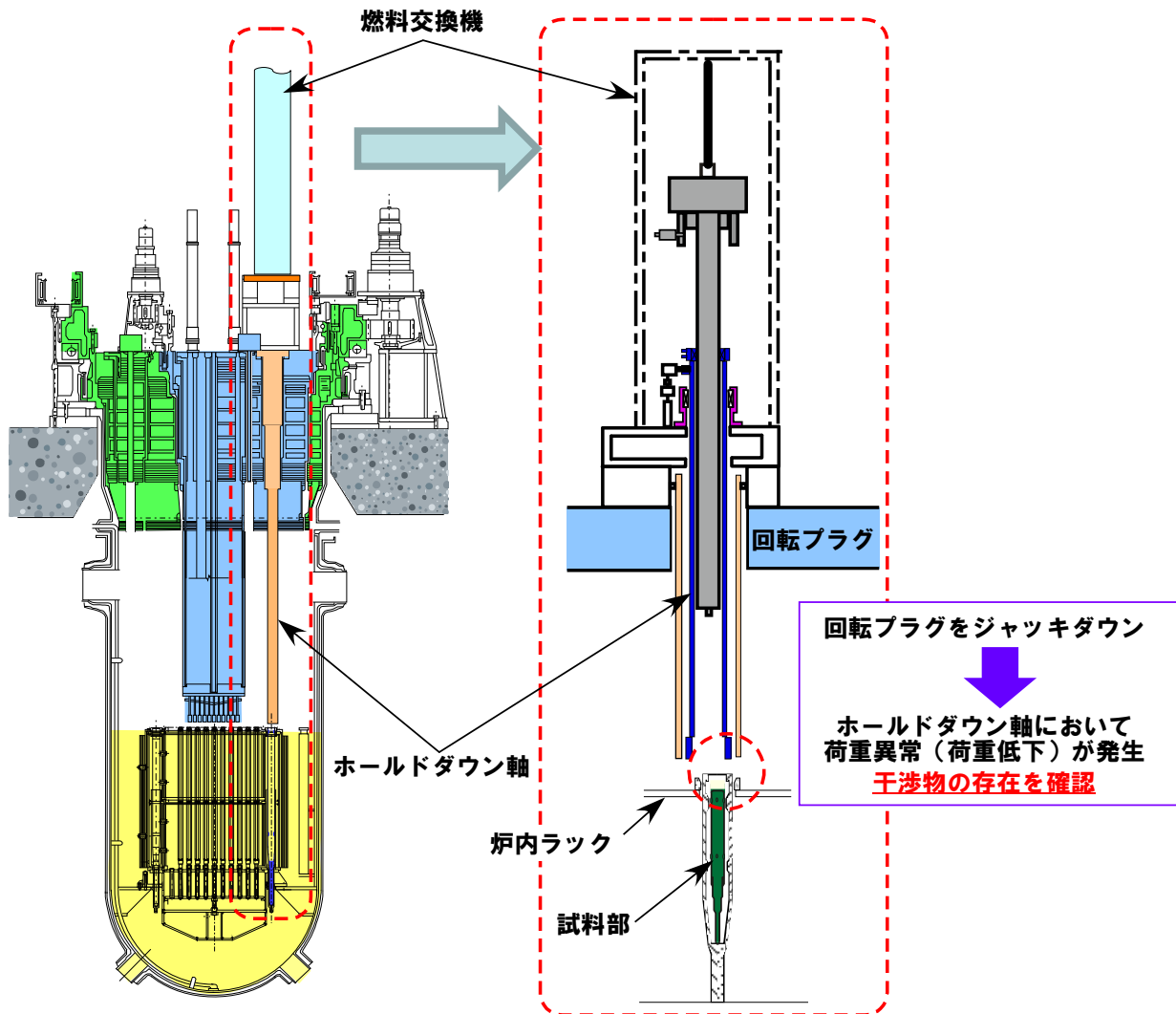


図 1.2 燃料交換機及びホールドダウン軸の概略構造

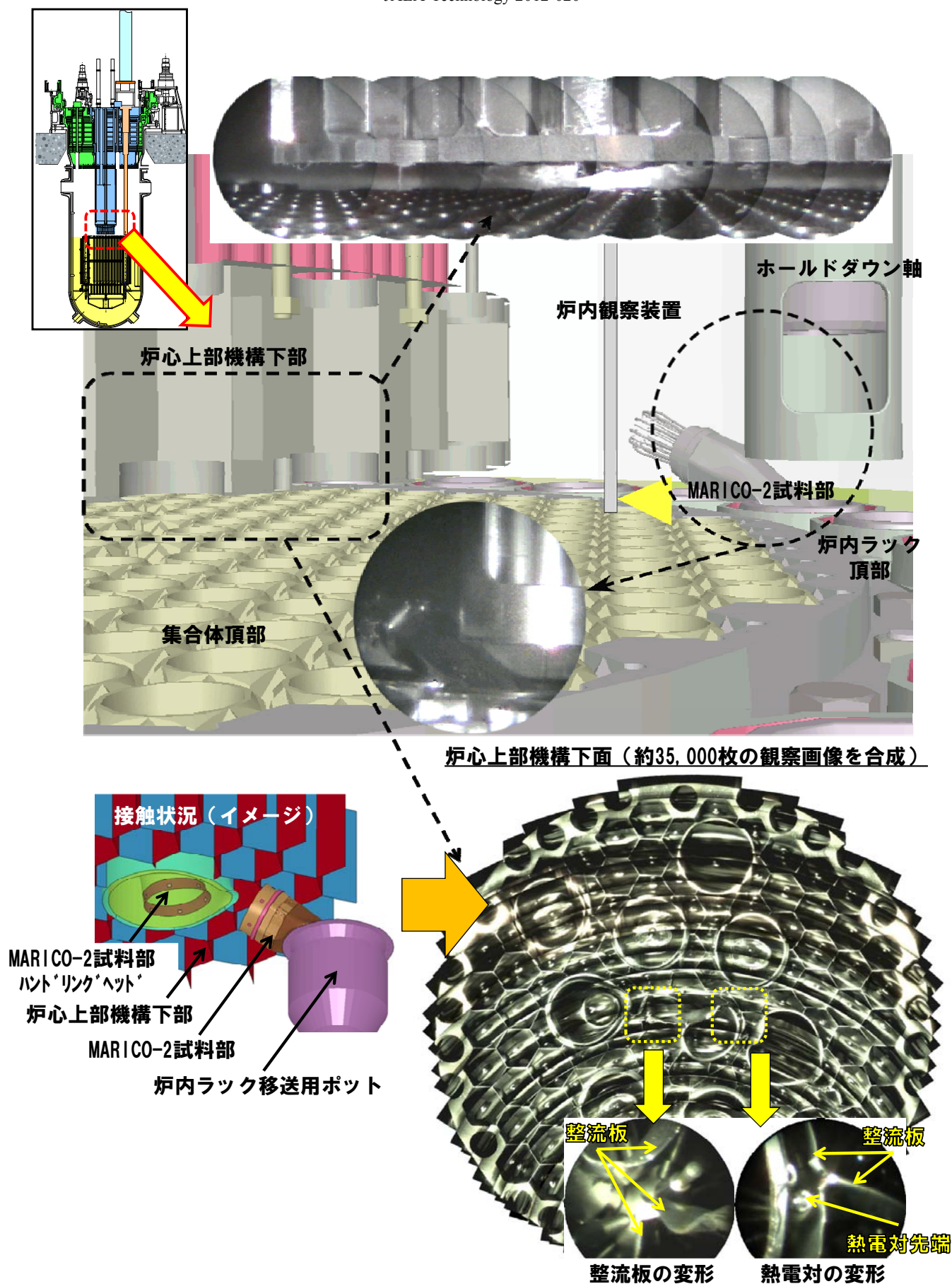


図 1.3 耐放射線性ファイバースコープ等を用いた原子炉容器内の観察結果

2. プラントの概要

高速実験炉「常陽」は、我が国で最初的高速増殖炉として、昭和 52 年に増殖炉心（MK-I 炉心）で初臨界を達成し、プルトニウムの増殖性等の SFR に関する種々の貴重なデータと運転保守経験を蓄積した。「常陽」は、照射用炉心（MK-II 炉心：昭和 57 年に初臨界達成）を経て、現在、高性能照射用炉心（MK-III 炉心：平成 15 年に初臨界達成）での運転により、高速増殖炉実用化に向けた燃料・材料開発等に供されている。「常陽」のプラント概要を以下に示す。

(1) 全体概要

「常陽」のプラント概念図を図 2.1 に示す。「常陽」は、ループ型 SFR であり、炉心で発生した熱（熱出力：140MWt）は、1 次主冷却系により、主中間熱交換器を介して 2 次主冷却系に伝達され、主冷却機において大気中に放出される。

原子炉定格出力運転時の原子炉入口・出口ナトリウム温度は約 350℃・約 500℃である。原子炉停止時にあつては、ナトリウム温度は約 200℃に保持される。原子炉容器内のナトリウムは自由液面を有し、当該液面上はアルゴンガス雰囲気（圧力：最大約 980Pa（100mmAq）に制御）となっている。

(2) 原子炉容器

「常陽」原子炉容器の構造を図 2.2 に示す。原子炉容器は、内径約 3.6m・高さ約 10m の円筒容器構造を有し、炉心燃料集合体等や炉内構造物（炉心上部機構、炉心支持板、炉内ラック等）を内包する。原子炉容器の上部には、回転プラグが設置されている。

ナトリウム液面は、通常、原子炉容器出口配管の上方（GL-6100）に保持される。メンテナンス時にあつては、原子炉容器内ナトリウムをドレンすることで、ナトリウム液面位置を変更することが可能である。

(3) 回転プラグ

回転プラグは、大回転プラグ及び小回転プラグで構成され、カバーガスバウンダリ機器として、原子炉容器の上部に設置されている（図 2.2 参照）。大回転プラグ及び小回転プラグの直径は、それぞれ約 4730mm、約 2870mm であり、約 3200mm の厚さを有する。大回転プラグの中心位置は、原子炉容器の中心位置と同じである。一方、小回転プラグの中心位置は、原子炉容器及び大回転プラグの中心位置から 500mm オフセットした位置となっている。燃料交換作業等は、大回転プラグと小回転プラグの角度を組み合わせることで、燃料交換孔等の位置を対象集合体直上に位置させることで実施される。回転プラグには、小回転プラグ上に炉内検査孔（A）及び燃料交換孔、大回転プラグ上に炉内検査孔（B）を有している。

(4) 炉心上部機構

炉心上部機構は、小回転プラグに設置され、カバーガスバウンダリの一部を構成する（図 2.2 参照）。炉心上部機構は、直径：最大約 1345mm、高さ：約 6330mm の円筒構造（図 2.3 参照）であり、合計 11 箇所の貫通孔（センター孔 1 箇所、制御棒用孔 10 箇所（6 箇所には、制御棒駆動機構及び上部案内管を設置））を有する。また、炉心上部機構の下部には、整流板及び集合体出口冷却材温度測定用熱電対が設置されている。

炉心上部機構には、①制御棒の挿入等を正しく行うことができるように、炉心と上部機構の相対的位置を正しく保持する機能、②集合体の出口冷却材温度の測定を正しく行うことができるように、炉心と上部機構の相対的位置を正しく保持する機能等が要求される。

今回、炉心上部機構に設置されている集合体出口冷却材温度測定用熱電対 115 本のうち、センター孔案内スリーブに隣接した少なくとも 2 本について相対位置に変位があり、集合体の出口冷却材温度を正しく測定できないことが確認されている。また、整流板や案内スリーブに変形が生じており、継続使用した場合には、当該部品の破損・脱落が生じる可能性があることを踏まえると、当該保持機能を復旧するとともに、原子炉の安全性を担保するためには、炉心上部機構を交換する必要がある。

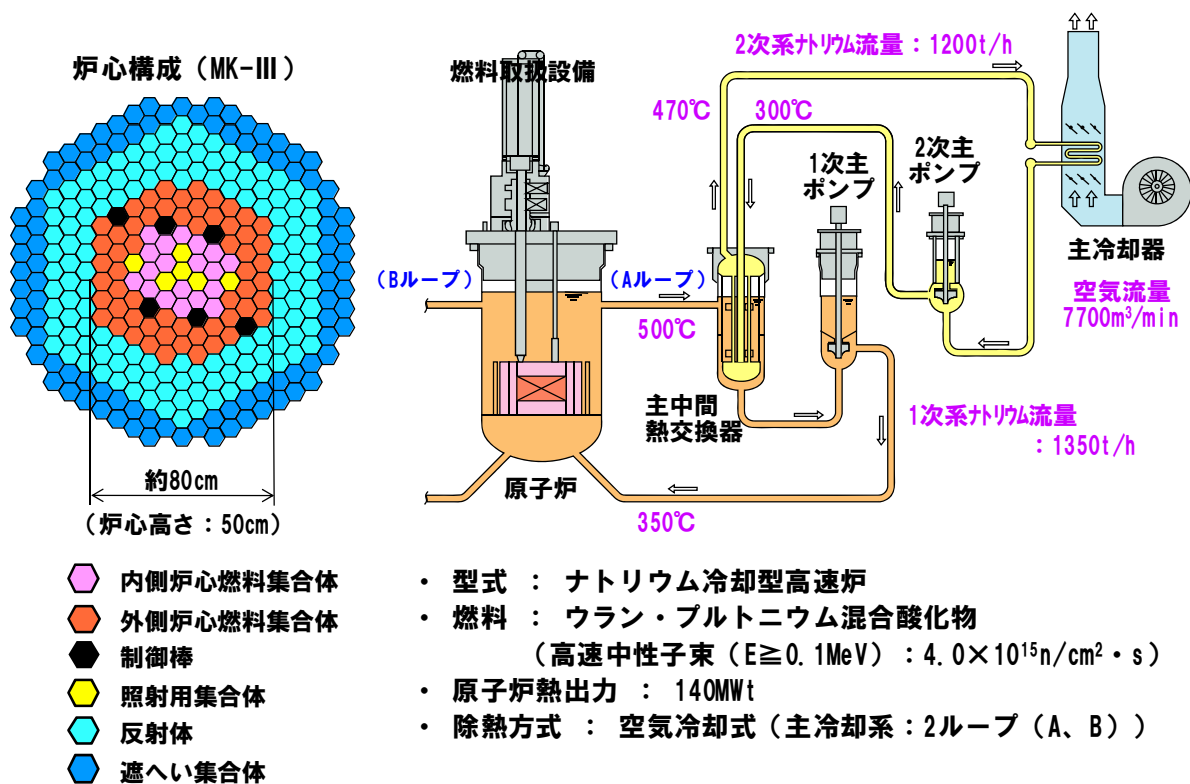


図 2.1 プラント概念図

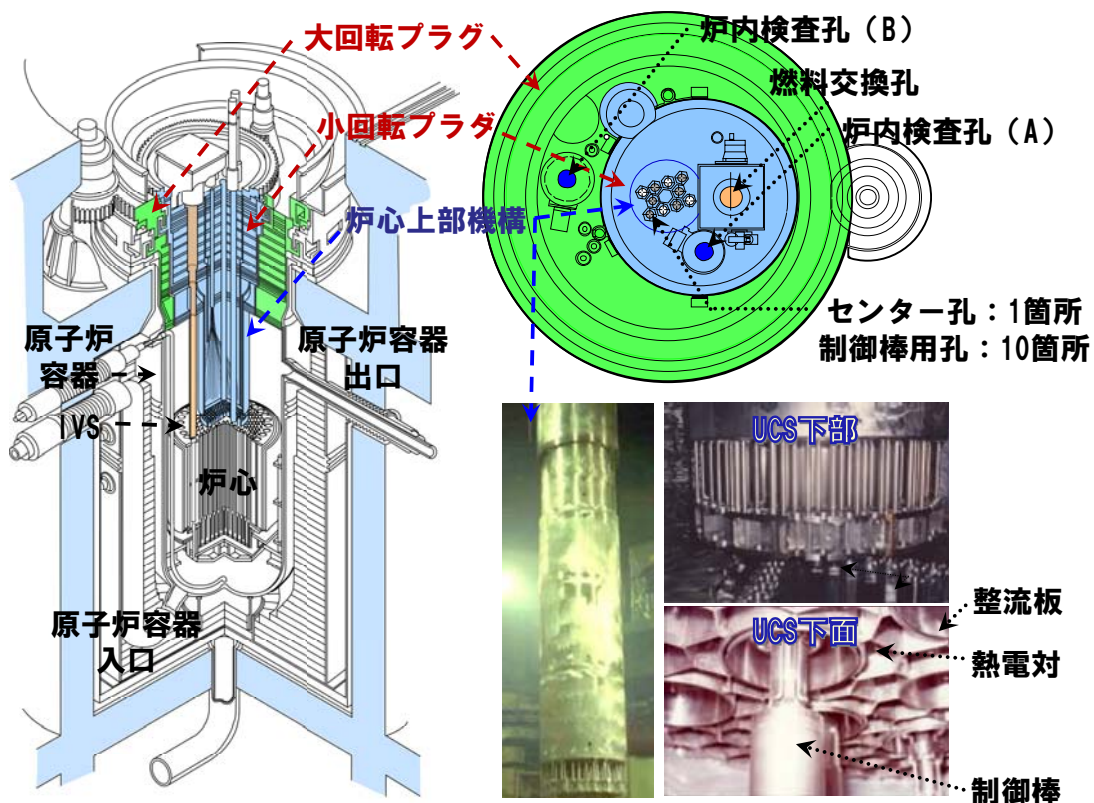


図 2.2 原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構の構造

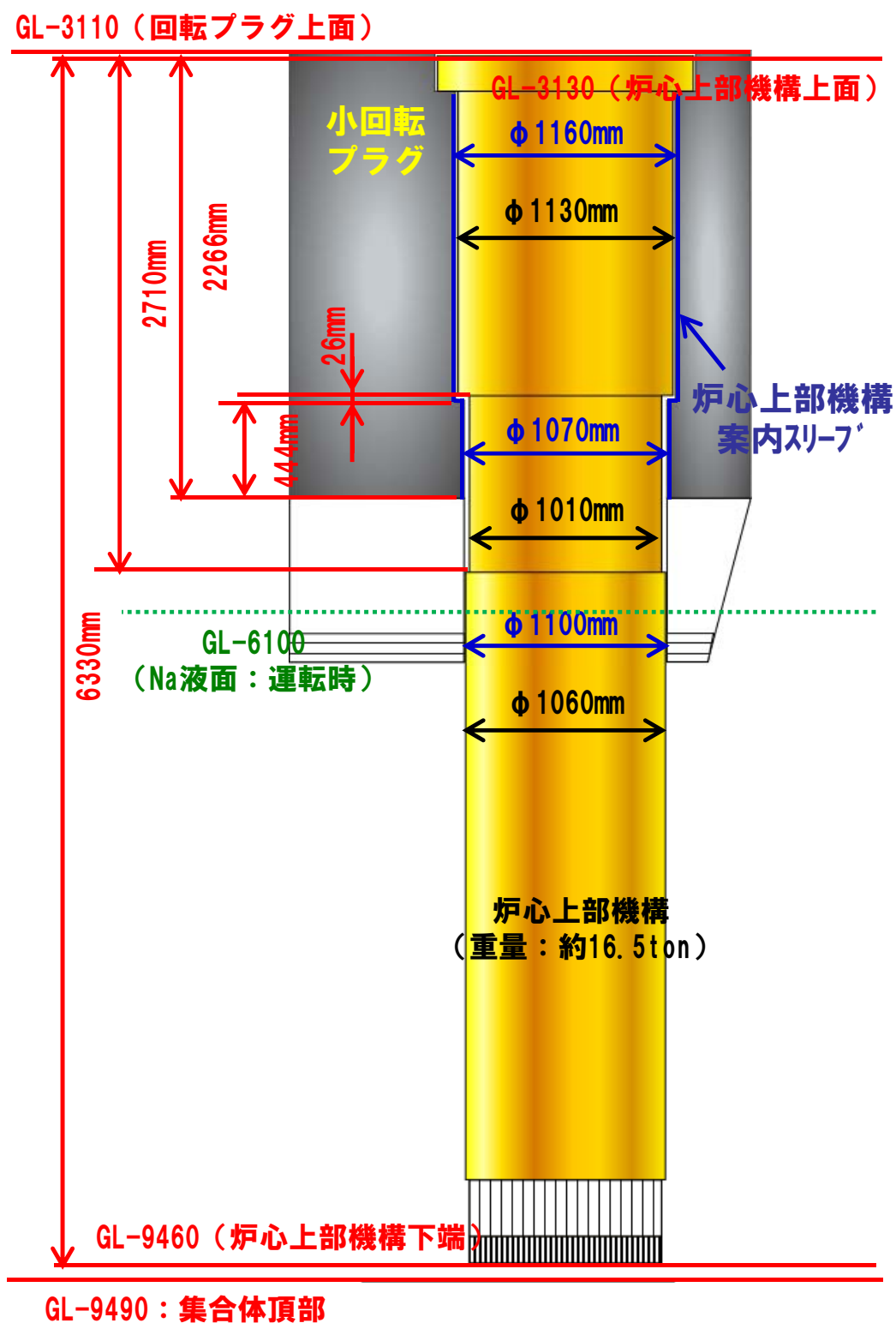


図 2.3 炉心上部機構及び案内スリーブの構造及び寸法

3. 炉心上部機構交換作業の概要

「常陽」の炉心上部機構は、交換することを前提に設計されたものではなく、これまでに交換した実績も有していない。SFR における炉心上部機構の交換実績として、海外において、過去に仏国ラプソティにおいて実施された例があるが、大規模な炉内構造物の交換作業経験は世界でも数少ない。供用中の SFR における原子炉容器内保守・補修作業にあつては、以下の作業環境に留意する必要がある。「常陽」における炉心上部機構交換作業計画の策定にあたっては、ラプソティで得られた知見を参考とするが、ラプソティが運転初期に炉心上部機構を交換したのに対して、「常陽」では、炉心上部機構を長期間使用しているため表面線量率が高くなっていること、また、下部に太径部を有し、構造が異なるために、引抜に際してより高度な管理技術が必要となること等、いくつかの相違点があり、これらの懸案事項に対する対応等を十分に検討した上で、下記作業環境条件に配慮した。

- (1) 中性子束が高いため、炉内構造物の放射化量が大きい。
- (2) 原子炉容器内にはナトリウムが存在する。
- (3) 原子炉容器及び回転プラグは、カバーガスバウンダリを形成している。※1
- (4) 原子炉容器内部は高温及び高線量下にある。

※1： 原子炉容器内には冷却材であるナトリウムが存在する。ナトリウムは化学的活性が高いため、液面上部には、常時、カバーガスとしてアルゴンガスが充填されている。原子炉容器上部には、カバーガスのバウンダリとして回転プラグが設置されており、原子炉容器内へのアクセスは、回転プラグに予め設けられた貫通孔を用いて行われる。そのため、原子炉容器内へのアクセスには、位置、数及びサイズに制限がある。

3.1 炉心上部機構交換作業に使用する治具類

炉心上部機構交換作業の概略手順を図 3.1.1 に示す。炉心上部機構交換作業は、①旧炉心上部機構ジャッキアップ、②旧炉心上部機構引抜・収納、③新炉心上部機構装荷のステップで進められる。作業に使用する主な治具類を以下に示す。炉心上部機構交換作業の完遂には、供用中の SFR における原子炉容器内保守・補修作業における作業環境に考慮し、これらの治具類を設計・製作する必要がある。

- (1) ジャッキアップ治具
- (2) ガイド筒
- (3) ドアバルブ
- (4) キャスク（引抜・収納治具）
- (5) 仮設ピット蓋

なお、今回の作業では、炉心上部機構を、原子炉容器の中心位置ではなく、偏心した位置で交換する。図 1.3 に示したように、MARICO-2 試料部の上部は屈曲している。既設の回転プラグ貫通孔のサイズは、屈曲した MARICO-2 試料部よりも小さく、これらの孔を用いて、MARICO-2 試料部を回収することは困難である。そのため、MARICO-2 試料部回収作業においては、旧炉心上部機構を撤去した孔より、MARICO-2 試料部を回収することを計画している。一方で、炉心上部機構の下端は、MARICO-2 試料部と干渉することが確認されており、炉心上部機構交換位置を MARICO-2 試料部直上とすることは不可能であるため、本作業では、MARICO-2 試料部に炉心上部機構を近接させた位置を交換位置とすることとした。

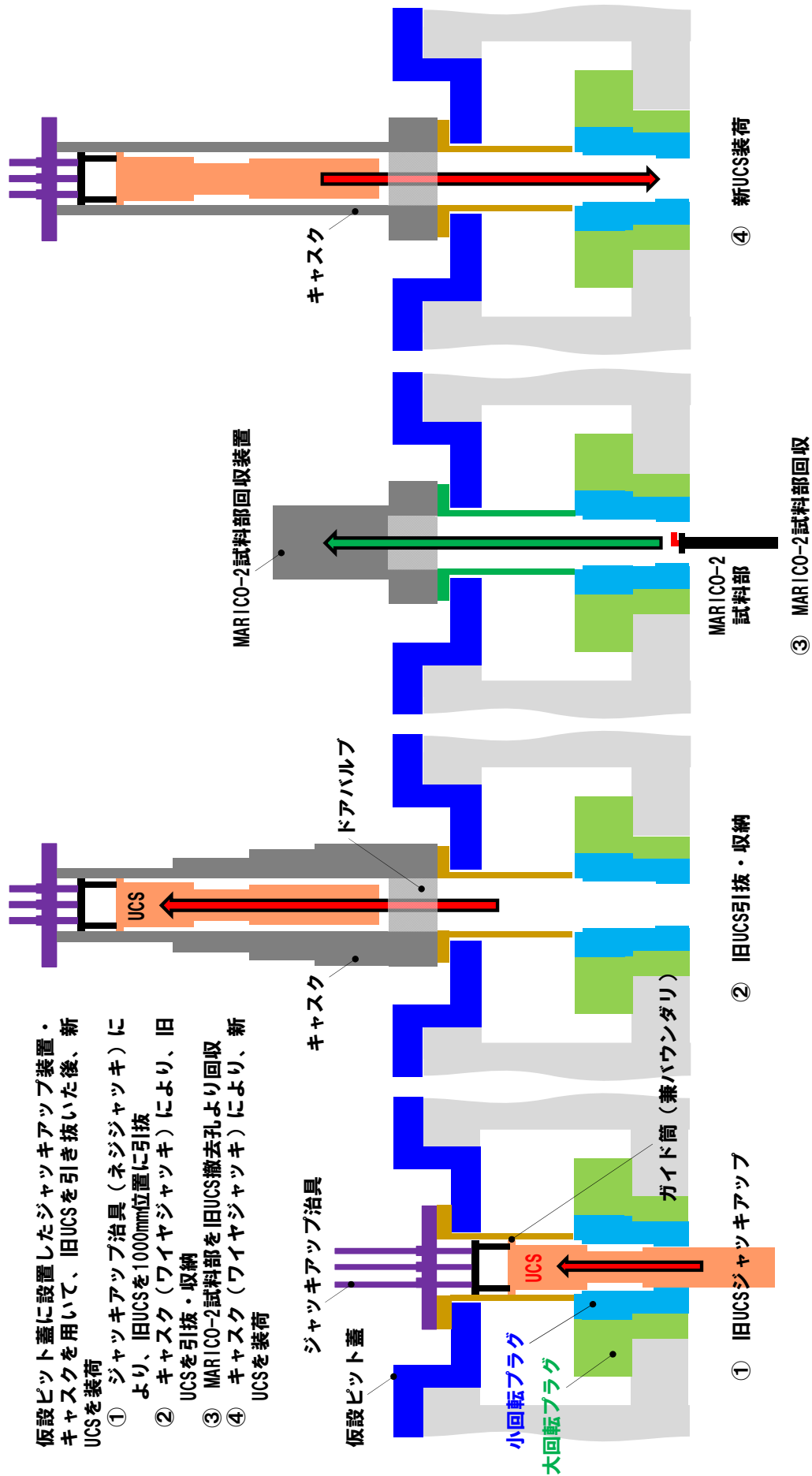


図 3.1.1 炉心上部機構（UCS）交換作業の概略手順

3.2 炉心上部機構交換作業における主な懸案事項

3.2.1 旧炉心上部機構ジャッキアップ作業における主な懸案事項

(1) ナトリウムブリッジせん断抵抗による案内スリーブの変形等

旧炉心上部機構は、「常陽」建設時より、30年以上使用された機器であり、旧炉心上部機構ジャッキアップ（地切り）時には、旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップに形成されたナトリウムブリッジ（ギャップを閉塞し、ブリッジ化した蒸着ナトリウム）のせん断により生じる抵抗により、案内スリーブが変形・破損（以下、「変形等」）する可能性がある（図 3.2.1 参照）。

案内スリーブは、下端が小回転プラグに固定された厚さ 5mm の薄肉構造物であり、過大な荷重が付加された場合には、水平部に変形等が生じる。案内スリーブが大きく変形等した場合、新炉心上部機構の装荷が困難となるため、旧炉心上部機構のジャッキアップは、荷重を制限し、当該変形等を防止する必要がある。

(2) 旧炉心上部機構と小回転プラグの干渉による旧炉心上部機構の変形等

図 2.3 に示したように、旧炉心上部機構太径部の外径は $\phi 1060\text{mm}$ である。一方、案内スリーブ細径部の内径は $\phi 1070\text{mm}$ であり、旧炉心上部機構引抜時の最小ギャップは、5mm となる。旧炉心上部機構は長さ 6330mm の長尺物であり、旧炉心上部機構引抜時の水平度が十分でない場合、図 3.2.2 に示すように、旧炉心上部機構と小回転プラグが干渉し、旧炉心上部機構の変形等（部品脱落を含む）の可能性がある。旧炉心上部機構の変形等を防止するためには、旧炉心上部機構の水平度や水平方向位置、ギャップの状況等を監視し、旧炉心上部機構適切な状態に維持すること、さらに、干渉した場合にであっても、旧炉心上部機構を変形等させないような荷重管理等が必要となる。

上記 3.1 で述べたように、炉心上部機構の交換作業においては、ネジジャッキを用いて、1000mm 位置までの旧炉心上部機構引抜作業を実施する。後述するワイヤジャッキでは、精密な水平度管理及び荷重管理等が困難であると判断し、旧炉心上部機構太径部が、案内スリーブ細径部を通過するまでの範囲をネジジャッキで対応することにした。

(3) 旧炉心上部機構ライナの固定

旧炉心上部機構据付部の構造を図 3.2.3 に示す。旧炉心上部機構上部は制御棒取付板と遮へい部胴により構成される。制御棒取付板と遮へい部胴はボルトにより連結されている。一方で、炉心上部機構上面の位置調整を目的として据付面に設置されたライナは、炉心上部機構が交換することを前提に設計されたものではないため、制御棒取付板や遮へい部胴と連結されていない構造を有する。旧炉心上部機構撤去後にあっては当該部の線量率が高くなること、また、バウンダリを形成した状態での作業となること等より、旧炉心上部機構撤去後にライナのみを撤去することは作業安全及び効率の観点で適当でないと考えられるため、ライナを炉心上部機構（制御棒取付板もしくは遮へい部胴）と連結する方策が必要となる。

3.2.2 旧炉心上部機構引抜・収納作業における主な懸案事項

(1) キャスク総重量の低減

旧炉心上部機構は「常陽」建設時より 30 年以上使用された機器であり、高い表面線量率を有する。炉心から約 1.5m 上方の炉心上部機構の中性子照射量の計算精度を考慮して約 1 桁の設計裕度を見込んだ場合、キャスクの総重量は当該キャスクの取り扱いに使用する格納容器クレーンの最大容量 100 トンを大きく超過する。「常陽」では、海外でも実施例の少ない原子炉容器内の線量率測定により、計算誤差に係る設計余裕を低減し、旧炉心上部機構の表面線量率の最適化を図っている⁵⁾が、キャスク総重量を 100 トン以下とするためには、さらにキャスクの構造を最適化する必要がある。なお、炉心上部機構の表面線量率 (1cm 線量当量率：2011 年 10 月 1 日時点) は、最大 113Sv/h である。

(2) 旧炉心上部機構と小回転プラグの接触による旧炉心上部機構の変形等

上述したように、旧炉心上部機構引抜時の旧炉心上部機構と案内スリーブの最小ギャップは、5mm となる。図 3.2.2 に示すように、旧炉心上部機構と小回転プラグが接触した場合、旧炉心上部機構が変形等する可能性がある。旧炉心上部機構の変形等を防止するためには、旧炉心上部機構の水平度や水平方向位置、ギャップの状況等を監視し、旧炉心上部機構適切な状態に維持すること、さらに、干渉した場合にあっても、旧炉心上部機構を変形させないような荷重管理等が必要となる。

3.2.3 新炉心上部機構装荷作業における主な懸案事項

新炉心上部機構の装荷作業における主な懸案事項を以下に示す。なお、これらの懸案事項に対する方策については、今後、別途報告することとするが、基本的には、旧炉心上部機構引抜・収納作業を逆手順にて実施するものであり、事前のモックアップ試験等を通じて、具体化を図る計画である。

- ・ 案内スリーブの健全性確認方法 (変形有無確認方法及び蒸着ナトリウム除去方法等)
- ・ 新炉心上部機構用 O リング (EPDM ゴム (エチレンプロピレンゴム) 製) の交換方法 (溝清掃方法及び O リング設置方法等)
- ・ 新炉心上部機構の据付方法及び据付精度確認方法※1

※1： 炉心上部機構には、制御棒駆動機構が設置される。そのため、炉心上部機構の据付作業においては、制御棒のラッチ及びデラッチや挿入性に影響が生じないように据付精度が要求される。また、炉心上部機構は、集合体出口冷却材測定用熱電対を有しており、対象となる集合体と熱電対の相対変位が大きくならないように配慮する必要がある。

- ・ 新炉心上部機構の挿入性向上方法 等

3.2.4 炉心上部機構交換作業全般における主な懸案事項

(1) 仮設バウンダリの適切な管理

炉心上部機構交換作業においては、1 次系カバーガスバウンダリが開放されるため、放射性物質拡散防止及び不純物混入防止の観点で、仮設バウンダリを形成する必要がある。

(2) 作業環境空間線量率の適切な管理

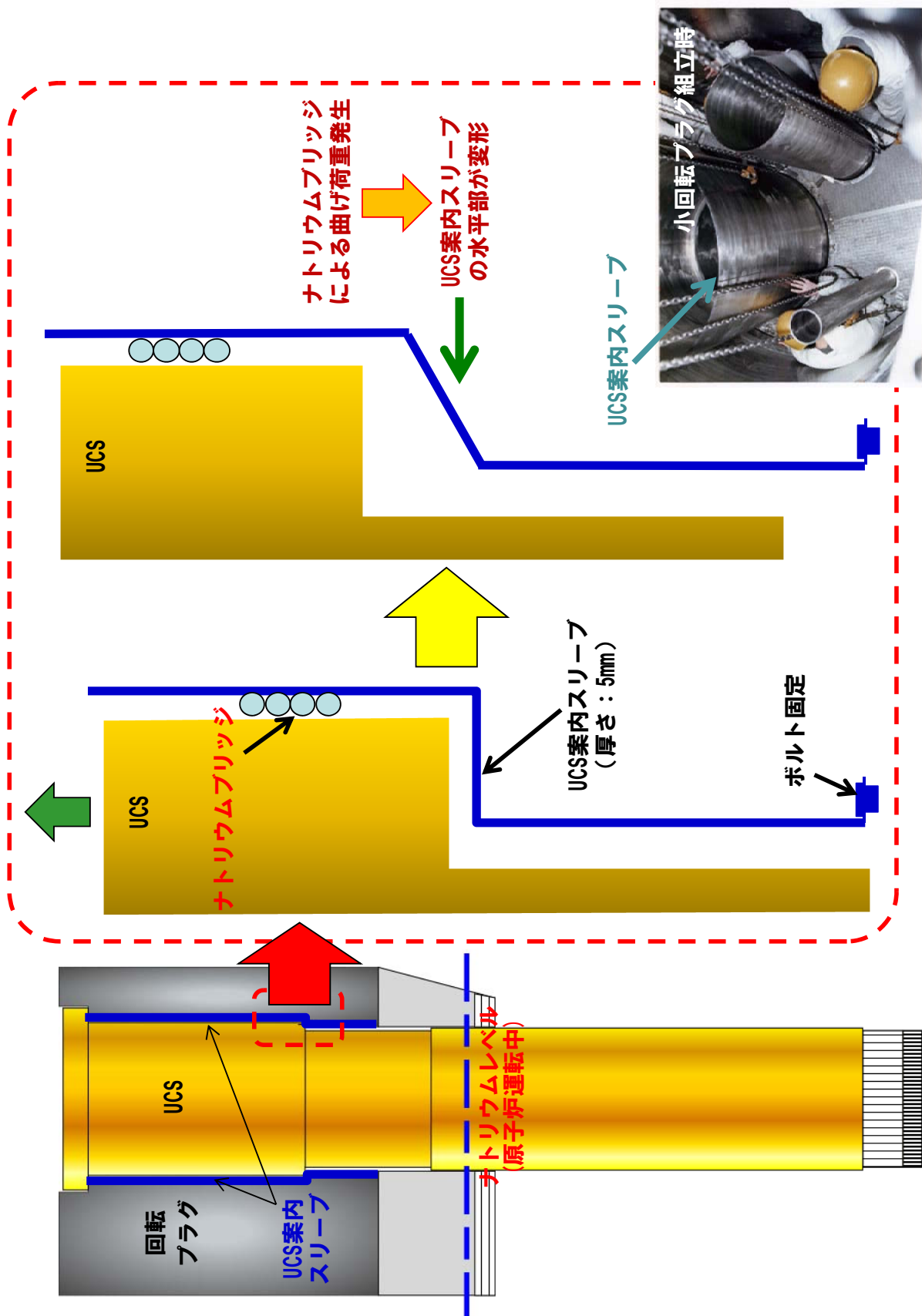
旧炉心上部機構引抜・収納時には、高い表面線量率を有する旧炉心上部機構が作業環境中に存在する。また、旧炉心上部機構撤去後にあっても、旧炉心上部機構を撤去した孔より、原子炉容器内構造物から放射線が放出されるため、適切な遮へいを講じ、作業環境の空間線量率を適切に管理するとともに、必要に応じて、立入禁止区域・立入制限区域を設ける必要がある。

(3) プラント条件の適切な設定

上述した懸案事項を解決する前提として、炉心上部機構交換作業時のプラント条件を適切に設定する必要がある。特に、仮設バウンダリの適切な管理においては、原子炉容器内のカバーガス圧力調整が重要となる。

(4) 重量物運搬時の適切な荷重（接地圧）管理

炉心上部機構交換作業においては、キャスクをはじめとし、多くの重量物を使用する。重量物運搬時に施設等を破損させないように、適切な荷重（接地圧）管理が必要となる。



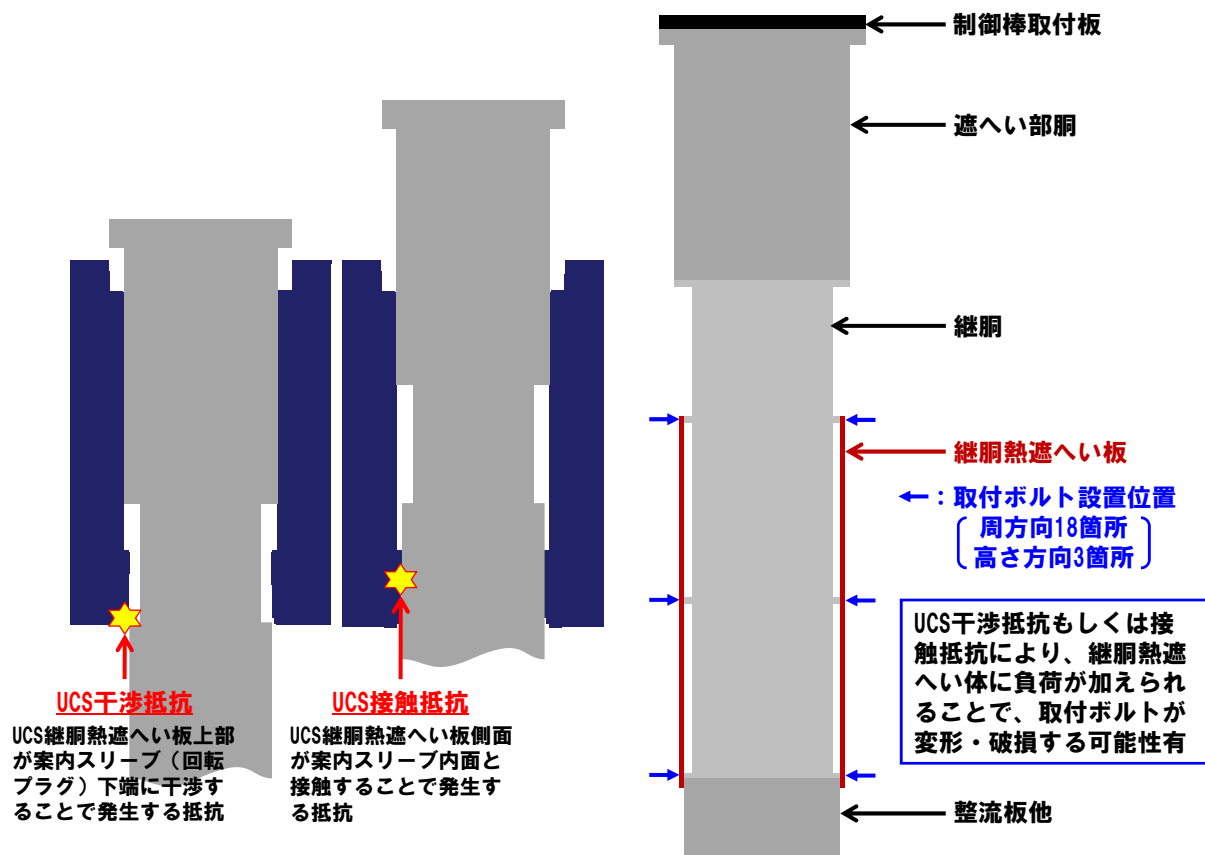


図 3.2.2 旧炉心上部機構と小回転プラグの干渉・接触による変形等

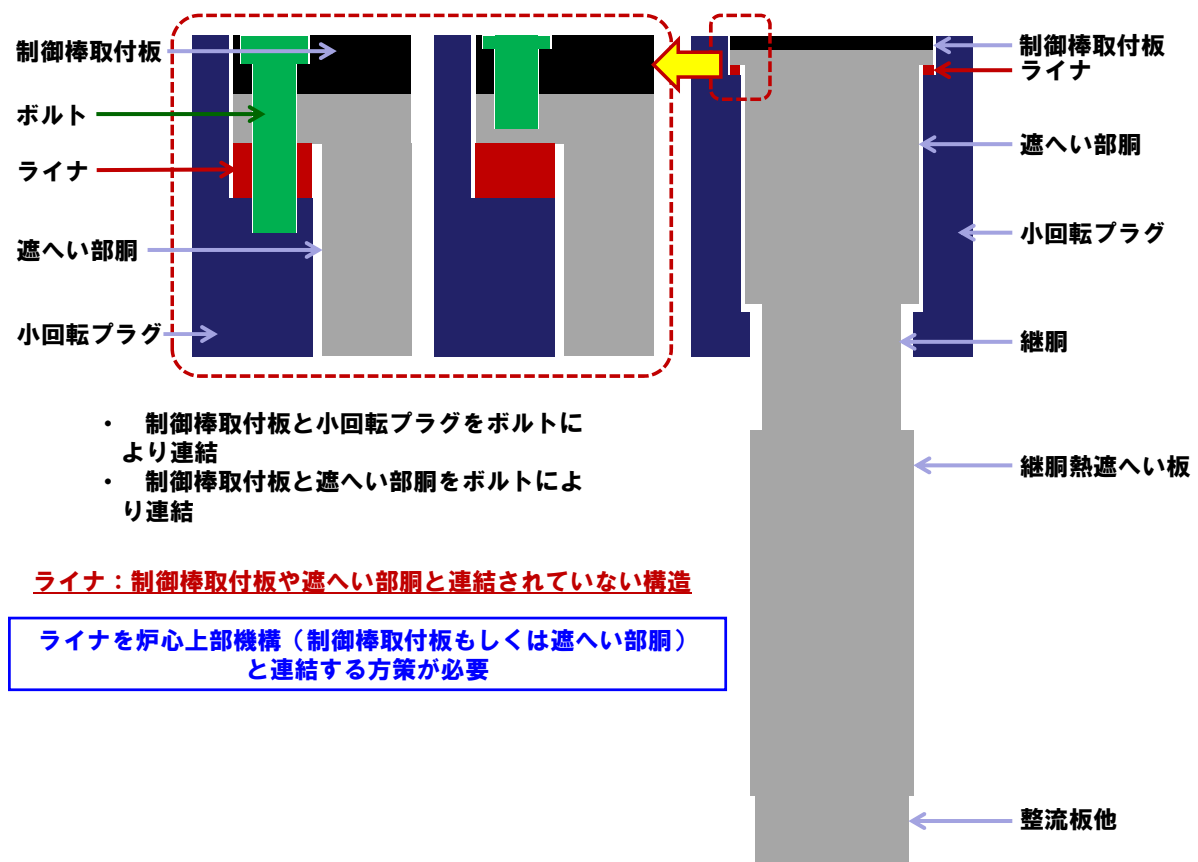


図 3.2.3 旧炉心上部機構据付部の構造

4. 炉心上部機構交換作業における主な懸案事項の解決策の検討

上記 3. に示した懸案事項のうち、炉心上部機構交換作業の全工程において、配慮が必要となる懸案事項は、「仮設バウンダリ及び作業環境空間線量率の管理方法（プラント条件の設定を含む）」である。また、当該管理が適切に実施されることを前提とした場合の主な懸案事項は、「旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等防止策」、「旧炉心上部機構ライナの固定方策」及び「キャスク総重量の低減方策」である。これらの解決策に係る検討結果を以下に示す。

4.1 仮設バウンダリ及び作業環境空間線量率の管理方法に係る検討結果

炉心上部機構交換作業では、全工程において、(1) 仮設バウンダリ、(2) 作業環境空間線量率の適切な管理が求められる。仮設バウンダリ及び作業環境空間線量率の管理方針（案）を以下に示す。なお、当該管理方針（案）は、現時点での検討結果であり、作業要領等策定に向けたステップにおいて、最適化等に向けた変更が生じる可能性がある。

(1) 仮設バウンダリの管理方針（案）

仮設バウンダリの設置イメージを図 4.1.1 に示す。仮設バウンダリには、現状ビニルバックを使用する計画である。ビニルバックの片端は小回転プラグ遮へい部胴上部フランジに、反対側の片端はガイド筒に接続される。

ビニルバックは過去に「常陽」で実施した MK-III 冷却系改造工事において、仮設バウンダリとして使用された実績を有しており、取付及び作業時の自由度が高いことから、狭い作業エリアでの仮設バウンダリとして有用であることが確認されている。ただし、その使用にあたっては、ビニルバック内圧力を 100～150Pa 程度とし、作業を阻害するビニルバックの膨張を抑制する必要がある。

図 4.1.1 に示したように、ビニルバックは独立した給排気設備を有し、圧力が 100～150Pa 程度となるよう、清浄アルゴンガスが供給もしくは内部ガスが排気される。また、原子炉容器においては 1 次系カバーガスが上方のビニルバックに放出されないよう、ヘッド差を考慮した圧力（目標：約 130Pa 以下（回転プラグ下面付近））で制御される。当該運用により、仮設バウンダリの役割の一つである放射性物質拡散防止が達成される見込みである。

仮設バウンダリのもう一つの役割である不純物混入防止については、ビニルバックに酸素濃度計を設置し、酸素濃度の継続的な監視とともに仮設バウンダリの早期異常検知を図ることで達成される。過去の実績においては、ビニルバック内の酸素濃度を 1000ppm 以下とするよう管理（実績：500ppm 以下で管理可能）しており、本作業においても同様の基準を設ける計画である。なお、アルゴンガスの空気に対する比重は 1.38 であり、静定状態にあっては、アルゴンガスが下方に、空気が上方に位置するため、バウンダリ上部に酸素濃度計を設置することで原子炉容器内への不純物混入を抑制することが可能となる。

(2) 作業環境空間線量率の管理方針（案）

「常陽」管理区域の遮へい区分を以下に示す。炉心上部機構交換作業においては、作

業手順に応じて当該遮へい区分に準拠したエリア設定を行い、必要な遮へいを設けるとともに立入制限・時間制限を設けることで、作業者の被ばくを低減する計画である（一例：図 4.1.2 参照）。図 4.1.2 に示すように、旧炉心上部機構ジャッキアップ時や旧炉心上部機構引抜・収納後にあつては空間線量率が高いエリアは限定されており、当該管理を運用できる見込みである。今後、放射化した旧炉心上部機構本体の放射能を考慮し、作業中の運用管理方法を検討する計画である。

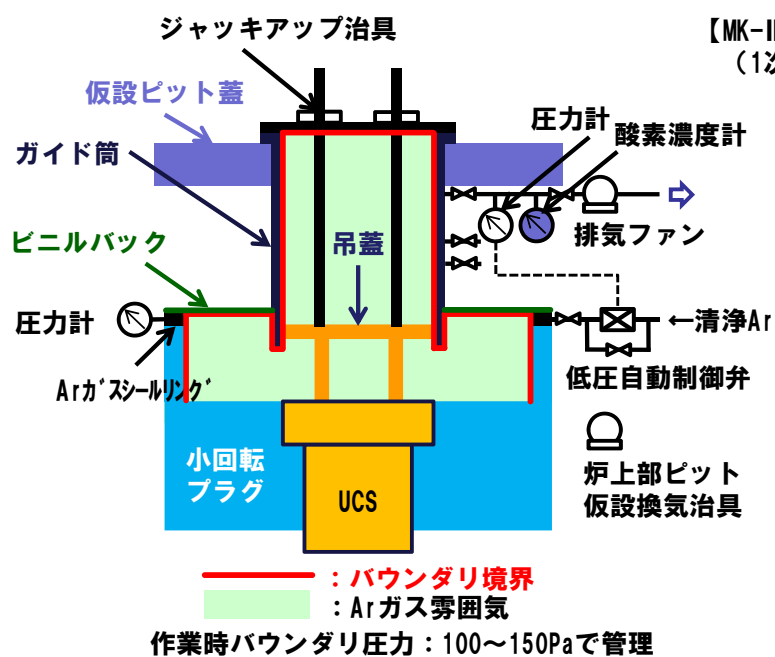
A 区域： 従業員が常時作業する区域（ $20 \mu \text{Sv/h}$ 以下）

B 区域： 従業員が常時作業する場所ではないが、機器、設備の点検、保守、燃料取扱作業等で必要に応じ時間を制限して立ち入る区域（ $80 \mu \text{Sv/h}$ 以下）

C 区域： 故障、修理等、必要な時以外には原子炉の運転中、停止中にかかわらず、従業員が立ち入ることのないと考えられる区域（ $320 \mu \text{Sv/h}$ 以下）

D 区域： 原子炉の運転中、停止中にかかわらず、従業員が立ち入ることがないと考えられる区域

なお、原子炉容器内のナトリウム液面位置を変更することで、作業環境空間線量率を低減することが可能である。炉心上部機構交換作業にあつては、一連の作業で実施する MARICO-2 試料部回収作業において原子炉容器内作業監視装置が必要となることから、ナトリウム液面を GL-9540（集合体頂部の 50mm 下方）としている。しかし、ナトリウム液面を GL-7600 とした場合、カバーガス空間の空間線量率が約 1 桁低減することが確認されており、被ばく低減の観点においてナトリウムを遮へい体として活用することは有効な施策であると考ええる。



【MK-III冷却系改造工事におけるビンルバック使用例】
(1次冷却系配管切断に係るモックアップ試験時)



図 4.1.1 仮設バウンダリの設置イメージ

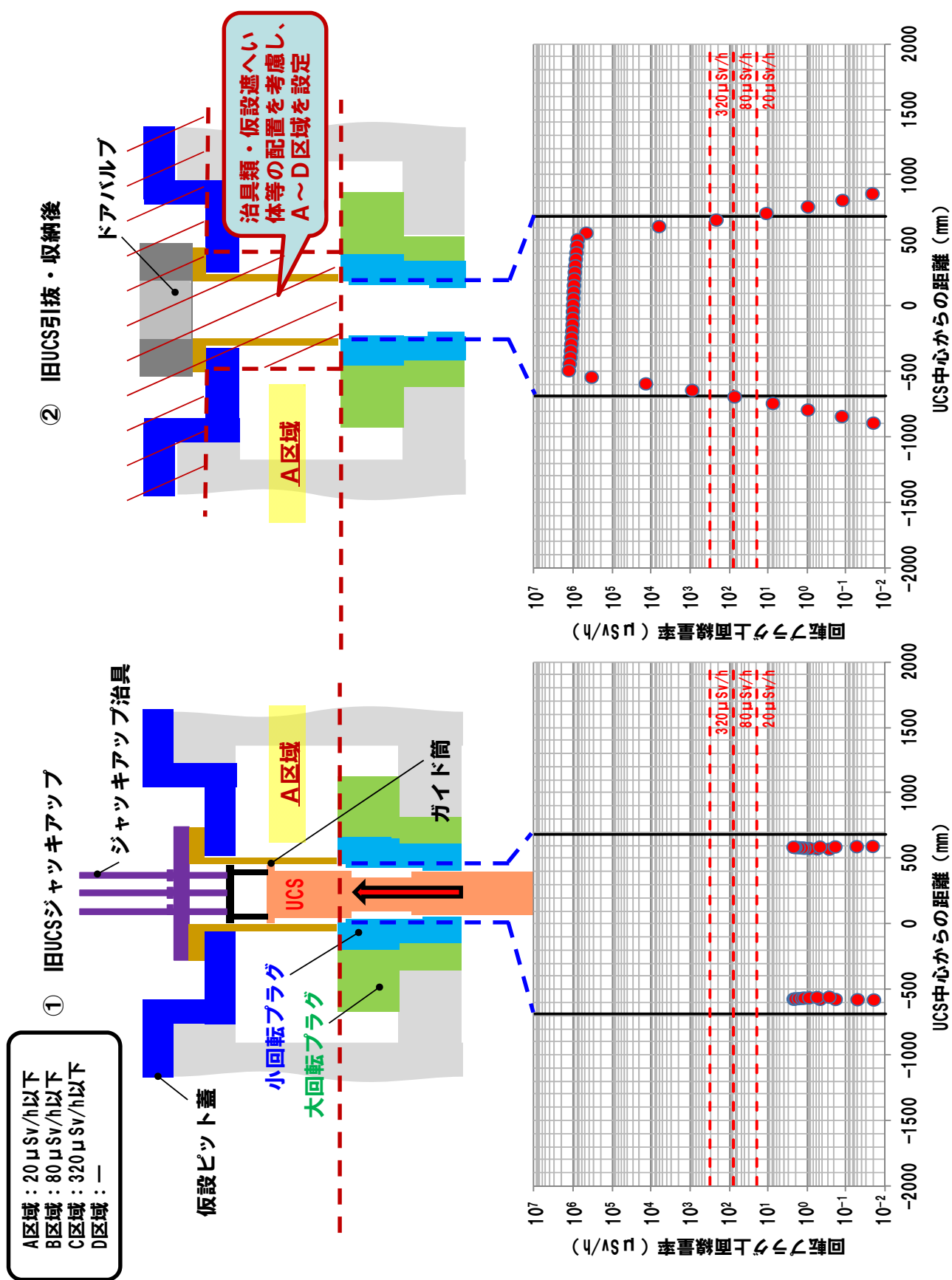


図 4.1.2 炉心上部機構交換作業時のエリア設定イメージ

4.2 旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等防止策に係る検討結果

旧炉心上部機構引抜時にあっては、(1) ナトリウムブリッジせん断抵抗による案内スリーブの変形等、(2) 旧炉心上部機構と小回転プラグの干渉による旧炉心上部機構の変形等、(3) 旧炉心上部機構と小回転プラグの接触による旧炉心上部機構の変形等が生じる可能性がある。

これらの事象は旧炉心上部機構ジャッキアップ時に発生する可能性があることから、ここでは旧炉心上部機構ジャッキアップ時に着目し、変形等防止策の検討を実施した。検討結果を以下に示す。

4.2.1 荷重許容値の検討結果

旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等を防止するためには、荷重を制限し、変形等する恐れのある部位に過剰な応力が付加されないようにする必要がある。旧炉心上部機構のジャッキアップにより、付加される抵抗（応力）は(1) リンギング力、(2) ナトリウムブリッジせん断抵抗、(3) 炉心上部機構干渉抵抗及び炉心上部機構接触抵抗である。

(1) リンギング力

リンギング力は、旧炉心上部機構の据付面が真空状態等であり、大気圧により押し付けられている状態で発生する力である。旧炉心上部機構は、約 30 年以上の期間、小回転プラグに据え付けられた状態にあり、据付面は、約 16.5 トンの自重により、密着させられている。小回転プラグ据付面は、厚肉構造を有しており、リンギング力作用点において、変形等が生じる可能性はないと判断できるが、リンギング力が解除された際に、ナトリウムブリッジがせん断されていなければ、当該部に過大な負荷が生じることになる。

(2) ナトリウムブリッジせん断抵抗

旧炉心上部機構と小回転プラグのギャップには、蒸着ナトリウムによりナトリウムブリッジが形成されている可能性がある。ナトリウムブリッジは、旧炉心上部機構遮へい部胴と案内スリーブ（上部）のギャップに形成されていると推定される（付録-1 参照）ため、ナトリウムブリッジせん断抵抗が大きくなり、当該部に過大な負荷が生じた場合には、案内スリーブが変形する可能性がある（図 3.2.1 参照）。

(3) 炉心上部機構干渉抵抗及び炉心上部機構接触抵抗

旧炉心上部機構を 444mm 以上ジャッキアップした領域においては、旧炉心上部機構と案内スリーブが干渉もしくは接触し、抵抗が生じる可能性がある（図 3.2.2 参照）。旧炉心上部機構継胴熱遮へい体（太径部）上端が案内スリーブ下端と干渉することで、継胴熱遮へい体取付ボルトに過大な負荷が生じた場合には、当該ボルトに変形等が生じる。また、旧炉心上部機構継胴熱遮へい体上端・側面と案内スリーブ下端の接触により過大な抵抗が発生した場合には、継胴熱遮へい体取付ボルト及び案内スリーブに変形等が生じる。

上記 (1) ～ (3) を踏まえて設定した「旧炉心上部機構ジャッキアップ時の荷重許容値」を図 4.2.1.1 に示す。リンギング力については、据付面全体が真空状態にあることを

仮定した場合、旧炉心上部機構のジャッキアップ（地切り）時において、リンギング力の解除に、約 3.37 トンの引抜力が必要となる見込みである。また、上述したように、リンギング力が解除される際に、ナトリウムブリッジがせん断されていなければ、当該部に過大な負荷が生じることになるため、ここでは変形量を制限するため、引抜速度（ジャッキアップ速度）を 2mm/h（ネジジャッキストローク約 0.03mm/回転×66 回転/h に相当）に制限することとした。なお、案内スリーブの強制変形量が 2mm 以下であれば、案内スリーブ全体に与える永久歪は無視できるものと考えている（リンギング力は、真空状態が開放されることで、解除されるため、実機においては、2mm よりも小さい量で、リンギング力が解除されると見込んでいる）。

ナトリウムブリッジせん断抵抗、炉心上部機構干渉抵抗、炉心上部機構接触抵抗に係る許容引抜力は、それぞれ 0.72 トン、1.09 トン、1.73 トンである。許容引抜力の算出には、汎用非線形有限要素解析プログラム Abaqus (Standard Version6.7-1 : 3 次元モデル) を用いた。評価結果の詳細を以下に示す。荷重許容値は、旧炉心上部機構の自重 16.5 トンに、許容引抜力を加算することで、設定される。

i) ナトリウムブリッジせん断抵抗

ナトリウムブリッジは、旧炉心上部機構遮へい部胴と案内スリーブ（上部）のギャップに形成され、周方向に、360°、240°、120°、1.5° の範囲で分布することを想定し、許容引抜力を評価した結果を表 4.2.1.1 に示す。表 4.2.1.1 より、ナトリウムブリッジが局所的に偏在した場合に、許容引抜力が小さくなることが確認されており、ここでは、最も保守的な 1.07 トンを荷重管理上の許容値とした。

ii) 炉心上部機構干渉抵抗及び炉心上部機構接触抵抗（図 3.2.2 参照）

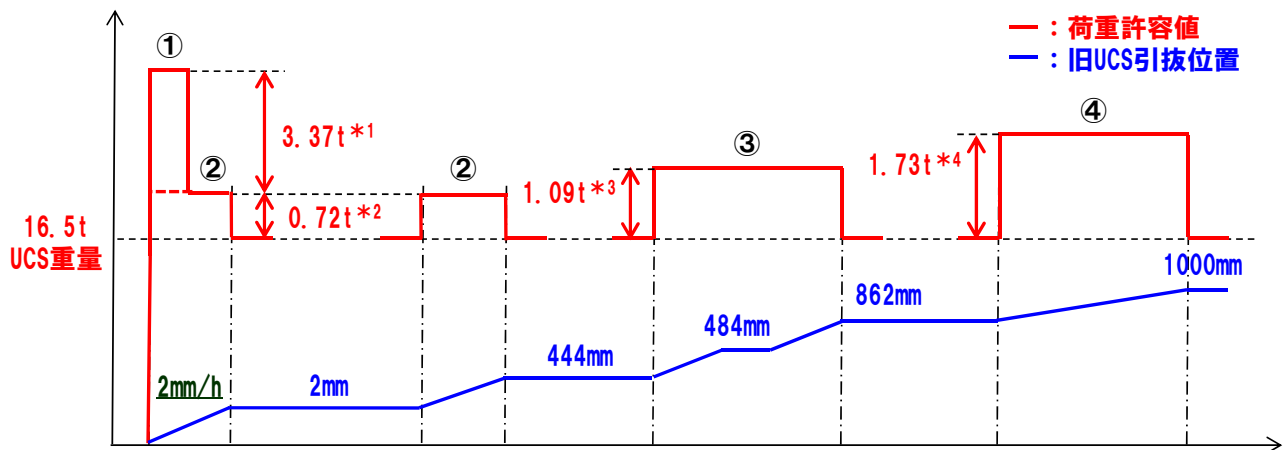
炉心上部機構干渉抵抗及び炉心上部機構接触抵抗については、継胴熱遮へい板の上端に荷重が付加されたケース（上段の取付ボルト 1 箇所：炉心上部機構干渉抵抗）、継胴熱遮へい板の側面に荷重が付加されたケース（中段の取付ボルト 1 箇所：炉心上部機構接触抵抗）について、取付ボルトの塑性変形を防止できる許容引抜力を評価した。また、当該許容引抜力の裕度を確認するため、継胴熱遮へい板の上端に荷重が付加されたケースについて、取付ボルト 1 箇所の塑性変形を許容する場合の許容引抜力を評価した。表 4.2.1.2 に示すように、炉心上部機構干渉抵抗及び炉心上部機構接触抵抗に係る許容引抜力は、それぞれ 1.09 トン、1.73 トンであり、ここでは、当該値を荷重管理上の許容値とした。なお、取付ボルト 1 箇所の塑性変形を許容する場合には、許容引抜力は 2.23 トンとなる。炉心上部機構接触時にあっては、継胴熱遮へい板と案内スリーブが同材料（SUS304）であることから、SUS/SUS 面での焼き付きにより、固着が生じる可能性がある。当該値は、焼き付きにより固着が生じた場合に、評価上、取付ボルトの 1 箇所の塑性変形を許容することとして引抜（ジャッキアップ）作業を継続する場合に適用することを考えている。

表 4.2.1.1 ナトリウムブリッジせん断抵抗に対する許容引抜力評価結果

ケース No.	想定ケース	荷重許容値 (トン)
1	ナトリウムブリッジが 360° に存在	8.32
2	ナトリウムブリッジが 240° に存在	4.76
3	ナトリウムブリッジが 120° に存在	2.46
4	ナトリウムブリッジが 1.5° に存在	0.72

表 4.2.1.2 炉心上部機構干渉抵抗及び接触抵抗に対する許容引抜力評価結果

ケース No.	想定ケース	荷重許容値 (トン)
1	炉心上部機構と案内スリーブが干渉 (取付ボルトの塑性変形を防止)	1.09
2	炉心上部機構と案内スリーブが接触 (取付ボルトの塑性変形を防止)	1.73
3	炉心上部機構と案内スリーブが干渉 (取付ボルト 1 箇所の塑性変形を許容)	2.23



*1 : リンキング力

*2 : 蒸着Naせん断抵抗許容値 (案内スリーブ変形等防止)

*3 : UCS干渉抵抗許容値 (UCS継胴熱遮へい板変形等防止)

*4 : UCS接触抵抗許容値 (UCS継胴熱遮へい板変形等防止)

- ① ステップ1 : 荷重許容値 17.22トン (=16.5トン+0.72トン)
 ステップ2 : 荷重許容値 20.59トン (=16.5トン+0.72トン+3.37トン)
 ※ 旧UCSジャッキアップ速度 : 2mm/h
 ※ 荷重許容値を17.22トンに設定し、旧UCSジャッキアップを開始 (ステップ1) し、リンキング力の影響が大きいと判断された段階で、荷重許容値を20.59トン (ステップ2) に変更
- ② 荷重許容値 17.22トン (=16.5トン+0.72トン)
 ※ リンキング力が解除された段階で、荷重許容値を17.22トンに変更
- ③ 荷重許容値 17.59トン (=16.5トン+1.09トン)
- ④ 荷重許容値 18.23トン (=16.5トン+1.73トン)

図 4.2.1.1 旧炉心上部機構 (UCS) ジャッキアップ時の荷重許容値

4.2.2 ナトリウムブリッジせん断抵抗による案内スリーブの変形等防止方策の検討結果

現在、旧炉心上部機構遮へい部胴と案内スリーブ（上部）のギャップには、高さ 6mm のナトリウムブリッジが形成されている（付録・1 参照）ことを想定している。過去の知見として、ナトリウムブリッジのせん断応力は、ナトリウムせん断速度とナトリウム温度に依存することが確認されている。上記 4.2.1 に述べたように、ナトリウムブリッジせん断抵抗に対する許容引拔力は 0.72 トンであり、ここでは、当該許容引拔力を満足する最大引拔速度について検討した。

(1) 最大引拔速度の評価方法

金属ナトリウムのせん断応力評価式を以下に示す。金属ナトリウムのせん断応力は、せん断速度及び温度により決定される。許容引拔速度は、当該式を用いて、せん断応力が 3.3kg/cm^2 (≈ 0.72 (トン) $\times 1000 / 213$ ($\text{cm}^2: \pi \times \phi 113\text{cm} \times 0.6\text{cm}$)) を超えないよう設定する。なお、ナトリウムブリッジが形成される旧炉心上部機構と案内スリーブ（上部）のギャップの温度は、少なくとも 80°C 以上と推定される（付録・2 参照）が、ここでは保守的にナトリウム温度を 50°C とする。

$$\sigma_{\text{smax}} = 0.0337V^{0.229}e^{2.16/RT}$$

σ_{smax} : せん断応力 (kg/cm^2)
 V : せん断速度 (mm/min)
 R : 気体定数 ($\text{kcal/mol} \cdot \text{K}$)
 T : 絶対温度 (K)

(2) 許容引拔速度の評価結果

旧炉心上部機構の引拔速度を $12,000\text{mm/h}$ (200mm/min) とした場合、せん断応力は 3.29kg/cm^2 となる。したがって、旧 UCS ジャッキアップ時に許容される最大引拔速度は $12,000\text{mm/h}$ (200mm/min) となる。

なお、仮に、許容引拔力を 0.225 トン（案内スリーブ変形等防止のための許容引拔力簡易評価時の値）とした場合、許容される最大引拔速度は 82mm/h (1.367mm/min) となる。本検討において、3 次元有限要素解析を適用した結果、許容引拔力を当初簡易評価の約 3 倍とすることが可能となった。最大引拔速度を 100 倍以上とすることが可能となっており、当該評価により作業上の制約を大きく緩和することができた。

4.2.3 旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触防止策の検討結果

旧炉心上部機構の引抜作業においては、荷重制限を設け旧炉心上部機構や案内スリーブの変形等を防止することとしているが、実作業においては、旧炉心上部機構と案内スリーブが干渉・接触させないことが肝要である。旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触が生じる要因は、①変形による干渉・接触、②傾きによる干渉に大別される。

(1) 変形による干渉・接触

旧炉心上部機構等の使用期間中に生じる可能性のある変形は、①熱変形、②スエリング、③曲がり、④熱膨張の4種類である。それぞれの変形に対する評価結果等を以下に示す。

① 熱変形

【問題点】

旧炉心上部機構下部は、原子炉運転中、約 500℃以上のナトリウム中に存在するため、熱クリープ変形が生じる可能性がある。

【評価結果等】

旧炉心上部機構は、遮へい部胴フランジにおいて小回転プラグに据え付けられている。旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触が懸念される継胴熱遮へい板（太径部）には、鉛直方向（自重）の応力が付加されるのみであり、直径変化が生じるような熱クリープ変形は発生しない。また、継胴熱遮へい板は合計 48 本（周方向 16 本×3 段）の取付ボルトにより、内側の継胴に固定されており、熱変形は抑制される。よって、旧炉心上部機構引抜作業を阻害するような熱変形は生じていないと判断できる。

② スエリング

【問題点】

旧炉心上部機構下部は、原子炉運転中、炉心燃料集合体等の直上に位置することから、高速中性子によるスエリングによる変形が生じる可能性がある。

【評価結果等】

旧炉心上部機構継胴熱遮へい板（太径部）の高速中性子照射量は、最も炉心に近い下端位置にて約 $1.5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ である。有意なスエリングが生じる高速中性子照射量は 10^{21}n/cm^2 のオーダーであり、当該照射量に伴って生じるスエリング（膨張）は $10^{-4}\%$ (10^{-3}mm のオーダー) 以下となることから、旧炉心上部機構引抜作業を阻害するようなスエリングは生じていないと判断できる。

③ 曲がり

【問題点】

旧炉心上部機構は MARICO-2 試料部と接触したことが確認されている。当該接触により、旧炉心上部機構に曲がりが生じる可能性がある。

【評価結果等】

旧炉心上部機構上端を固定点とし、MARICO-2 試料部との接触により 100kN の荷重（解析値及び MARICO-2 試料部ラッパ管を曲げるために必要な荷重（実測値：約 50kN）及び MARICO-2 試料部と炉心上部機構下部の接触シミュレーションにおける荷重（解析値：約 80 kN）を包絡する荷重を設定）が旧炉心上部機構下部に付加されたことを想定すると、遮へい部胴に付加される曲げ応力は 40.6N/mm^2 となる。また、旧炉心上部機構継胴上端を固定点とし、上記と同様に、MARICO-2 試料部との接触により、100kN の荷重が旧炉心上部機構下部に付加されたことを想定すると、継胴に付加される曲げ応力は 38.1N/mm^2 となる。両者とも、設計時に用いる許容引張応力（降伏点の 1/1.6）である 110N/mm^2 を下回っており、弾性範囲内にあることが確認できることから、旧炉心上部機構引抜作業を阻害するような曲がりとは生じていないと判断できる。

④ 熱膨張

【問題点】

旧炉心上部機構の引抜速度が大きい場合、旧炉心上部機構の熱膨張により旧炉心上部機構の引き抜きが阻害される可能性がある。

【評価結果等】

原子炉容器内のカバーガス温度を測定した結果（ナトリウム液面位置：GL-9540）、旧炉心上部機構下端付近の温度は約 165°C 、案内スリーブ下端付近の温度は約 142°C であることが確認されており、 ΔT は約 23°C となる。保守性を見込み、当該 ΔT を約 30°C とした場合、旧炉心上部機構引抜作業時の最小ギャップは約 0.25mm 減少すると推定されるが、当該ギャップのノミナル値である 5mm を大きく下回るため、旧炉心上部機構引抜作業を阻害するような熱膨張は生じることはないと判断できる。

(2) 傾きによる干渉・接触

旧炉心上部機構引抜時に、旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触を生じされる傾きは、①旧炉心上部機構の傾き、②小回転プラグの傾きである。旧炉心上部機構上端から継胴熱遮へい体上端までの長さが $2,710\text{mm}$ 、旧炉心上部機構引抜時の最小ギャップが 5mm であることを踏まえると、旧炉心上部機構と案内スリーブ（小回転プラグ）に許容される相対的な傾きは約 1.8mm/m となる。平成 22 年 8 月に回転プラグのジャッキダウン確認試験を実施し、小回転プラグの傾きは 0.1586mm/m であることを確認（付録-3 参照）しており、旧炉心上部機構の傾きを 1.5mm/m 以下で管理できれば、旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触防止が可能となる。なお、最も保守的に許容される相対的な傾きを評価した場合、当該許容値は約 0.7mm/m （ $=5\text{mm}/6.33\text{m}$ （旧炉心上部機構全長））となる。後述する対策は、当該精度以上を確保することを目標に、検討等を進めたものである。

上記水平度管理等を実施するため、旧炉心上部機構引抜時にあっては、①3 本のジャッキ（ネジもしくはワイヤ）の適用（3 点支持）、②水準器を用いた水平度管

理、③ロードセルを用いた水平度管理、④ガイド筒水平方向位置調整機能の付加、⑤レーザー測長器を用いた水平方向位置管理を実施するとともに、⑥旧炉心上部機構嵌合部監視治具及び⑦旧炉心上部機構狹隘部監視治具を適用することを検討している。上記治具類の配置イメージ（一例：旧炉心上部機構ジャッキアップ時）を図 4.2.3.1 に示す。

① 3本のジャッキ（ネジもしくはワイヤ）の適用（3点支持）

引抜治具の一例として、ジャッキアップ治具の概略構造を図 4.2.3.2 に示す。ネジジャッキは、 0° 、 120° 、 240° 方向に設置され、旧炉心上部機構を 3 点支持する構造を有する。3 箇所のネジジャッキを同期させることを基本とするが、独立した制御を可能とし、必要に応じて、傾きの調整ができる配慮する計画である。当初、油圧ジャッキを使用することを検討したが、制御性等を踏まえ、本作業ではネジジャッキを採用することとした。ネジジャッキのストロークは約 0.03mm/回転であり、精密な調整が可能である。なお、ジャッキアップ治具は仮設ピットに設置したガイド筒上に据え付けられるため、その反力は炉上部に設置した仮設ピット蓋に付加される。仮設ピット蓋が歪むことも想定されるが、歪みによって生じる傾き等は、ネジジャッキの独立制御により緩和される。

② 水準器を用いた水平度管理

旧炉心上部機構の水平度管理は、旧炉心上部機構上面に水準器を設置することで管理する。水準器の設置イメージを図 4.2.3.3 に示す。2 つの水準器を 90° の相対位置で設置し、旧炉心上部機構の水平度を監視する計画である。

③ ロードセルを用いた水平度管理

旧炉心上部機構を保持する 3 箇所のジャッキにはロードセルをそれぞれ設置する。ロードセルの合計値により上記 4.2.1 で述べた荷重管理を実施するとともに、個々のロードセル指示値が均等化されていることを確認することで、旧炉心上部機構の水平度管理に資することを計画している。

④ ガイド筒水平方向位置調整機能の付加

ガイド筒の概略構造を図 4.2.3.4 に示す。ジャッキアップ治具はガイド筒上に据え付けられるため、ガイド筒を水平方向にスライドさせることで旧炉心上部機構の水平方向位置を調整することが可能である。当該機能を確保するため、ガイド筒フランジには水平方向位置調整用の押しボルトが合計 8 箇所設置される。後述する、レーザー測長器、旧炉心上部機構嵌合部監視治具及び旧炉心上部機構狹隘部監視治具の測定値及び観察画像を確認し、必要に応じて、水平方向位置を調整する計画である。

⑤ レーザー測長器を用いた水平方向位置管理

旧炉心上部機構の水平方向位置管理は、小回転プラグ上面にレーザー測長器を設置することで管理する。レーザー測長器の設置イメージを図 4.2.3.3 に示す。4 つのレーザー測長器を配置し、旧炉心上部機構表面との距離を計

測することで、旧炉心上部機構中心が、原則として案内スリーブ中心と一致するよう監視する計画である。

⑥ 旧炉心上部機構嵌合部監視治具

旧炉心上部機構嵌合部監視治具の設置イメージを図 4.2.3.5 に示す。ここでは、小回転プラグの炉内検査孔（A）に案内管に組み込んだ 2 本のビデオスコープを設置することで、旧炉心上部機構と案内スリーブの嵌合部を下方から監視し、旧炉心上部機構の水平方向位置管理に資することを計画している。

図 4.2.3.5 に示したように、耐放射線ファイバースコープ（画素数：30,000）を用いた観察では、鮮明度が不足する。本作業では、ビデオスコープを適用することで鮮明度の向上を図る（図 4.2.3.5 参照：ここでは、暗幕を設置した状態でビデオスコープ内蔵の LED 照明を使用した。実機においては、1 本あたりの LED 照明の照度が模擬体を用いた予備試験時によりも強化されていること、ビデオスコープが 2 本となること、また、ゲインやシャッタスピードの調整代が確保されていることから、更なる鮮明度向上が可能である）。今後、当該治具を事前に実機に適用し、機能及び性能を確認する。

なお、ビデオスコープの耐放射線性は 1,000Gy である。当該部の線量率は 2～5Gy/h であり、200～500 時間の使用が可能となる。また、ビデオスコープの最高使用温度は 100℃であり、当該部の温度が 140～160℃であることを踏まえると、ビデオスコープの冷却が課題となる。旧炉心上部機構嵌合部監視治具では、案内管内部にアルゴンガスをブローダウンするとともに、ビデオスコープが挿入される冷却管にもアルゴンガスを通気することでビデオスコープを冷却する。

⑦ 旧炉心上部機構狭隘部監視治具

旧炉心上部機構狭隘部監視治具の設置イメージを図 4.2.3.6 に示す。ここでは、旧炉心上部機構の部分引抜後に旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップに当該治具を挿入し、旧炉心上部機構狭隘部を上方より監視することで、旧炉心上部機構の水平方向位置管理に資することを計画している。旧炉心上部機構狭隘部監視治具は、ファイバースコープもしくはビデオスコープ、及びガイド管で構成される。計測点は旧炉心上部機構の水平方向位置管理にすするため、その方位と調整必要量が明確になるよう 4 点としている。

旧炉心上部機構狭隘部監視治具の検討における主な課題は、①案内スリーブ表面の蒸着ナトリウムの付着防止方法、②ガイド管の挿入方法である。上記①については、ダミースコープを装荷したガイド管をギャップに挿入し、ガイド管内部へのナトリウム混入を防止することを検討中である。ガイド管を目標位置とした後に、ダミースコープをファイバースコープもしくはビデオスコープを交換することで、スコープ先端部（レンズ部）へのナトリウム付着を防止できると見込んでいる。ただし、蒸着ナトリウムによりガイド管の挿入が阻害されるリスクを排除することは困難であり、継続的な検討が必

要である。また、上記②についても幾何学的にガイド管の挿入が可能であることを確認しているものの、スコープ先端を確実に狹隘部上部に誘導する方法等、多くの検討課題を有しているため、旧炉心上部機構狹隘部監視治具の適用可否については、今後、判断することを考えている。

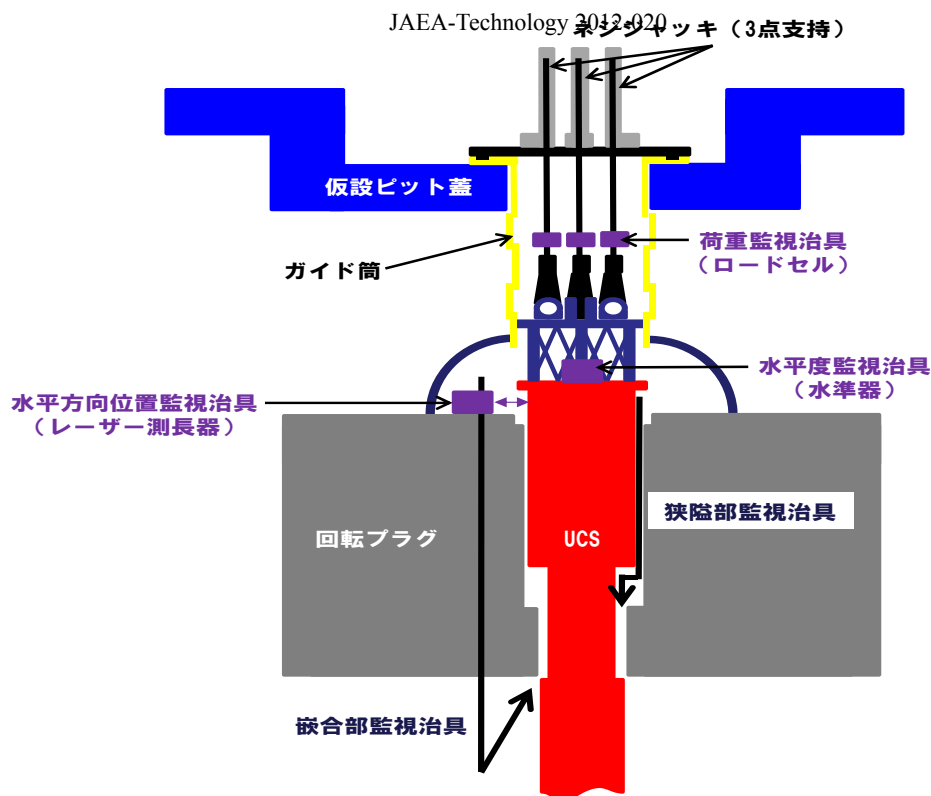


図 4.2.3.1 水平度管理用治具類の配置イメージ
(一例：旧炉心上部機構ジャッキアップ時)

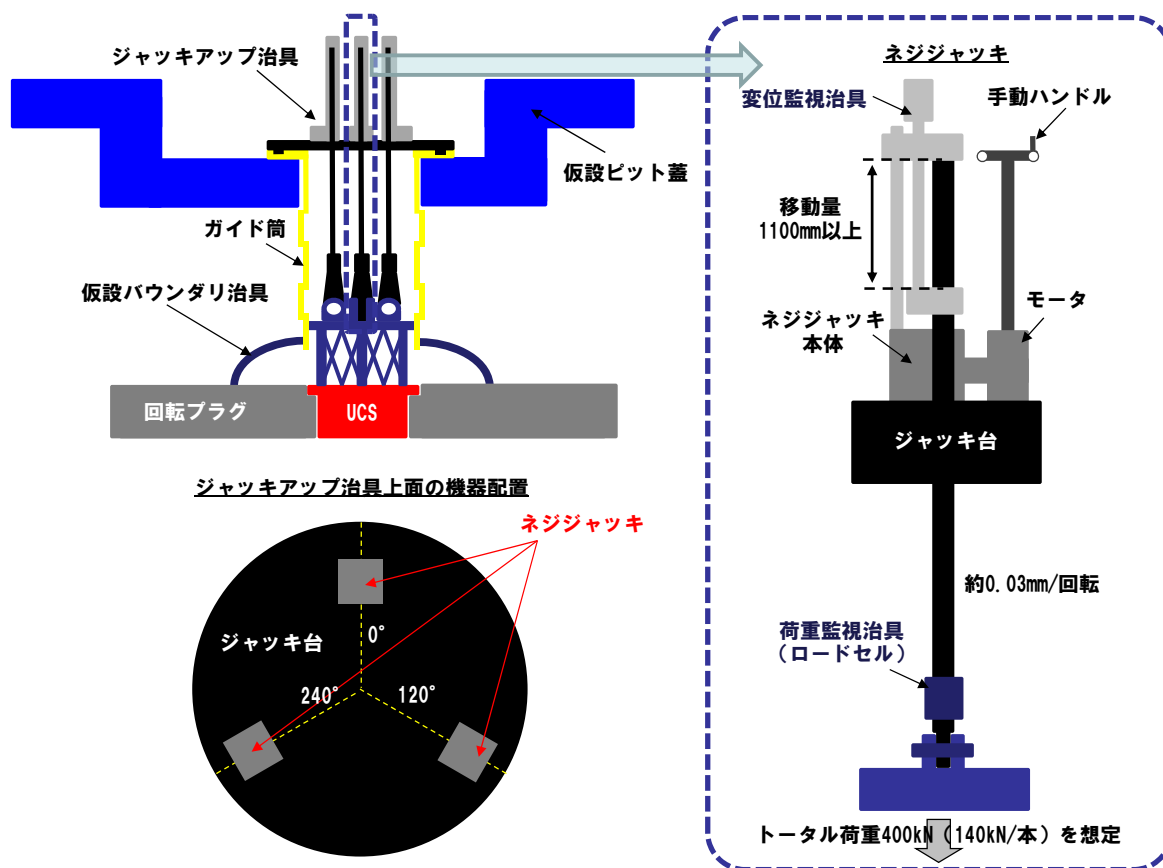


図 4.2.3.2 ジャッキアップ治具の概略構造

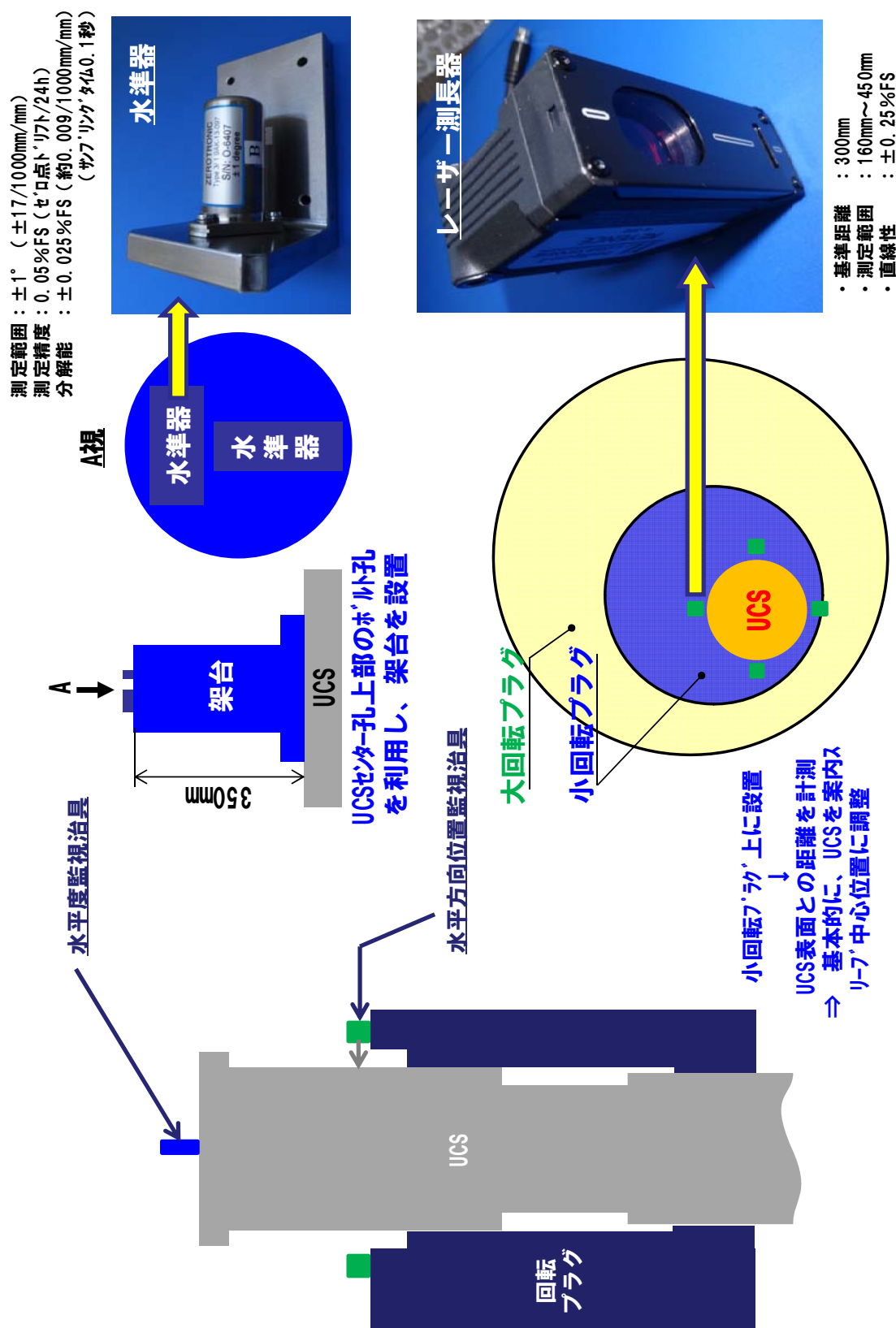


図 4.2.3.3 水準器・レーザー測長器の設置イメージ

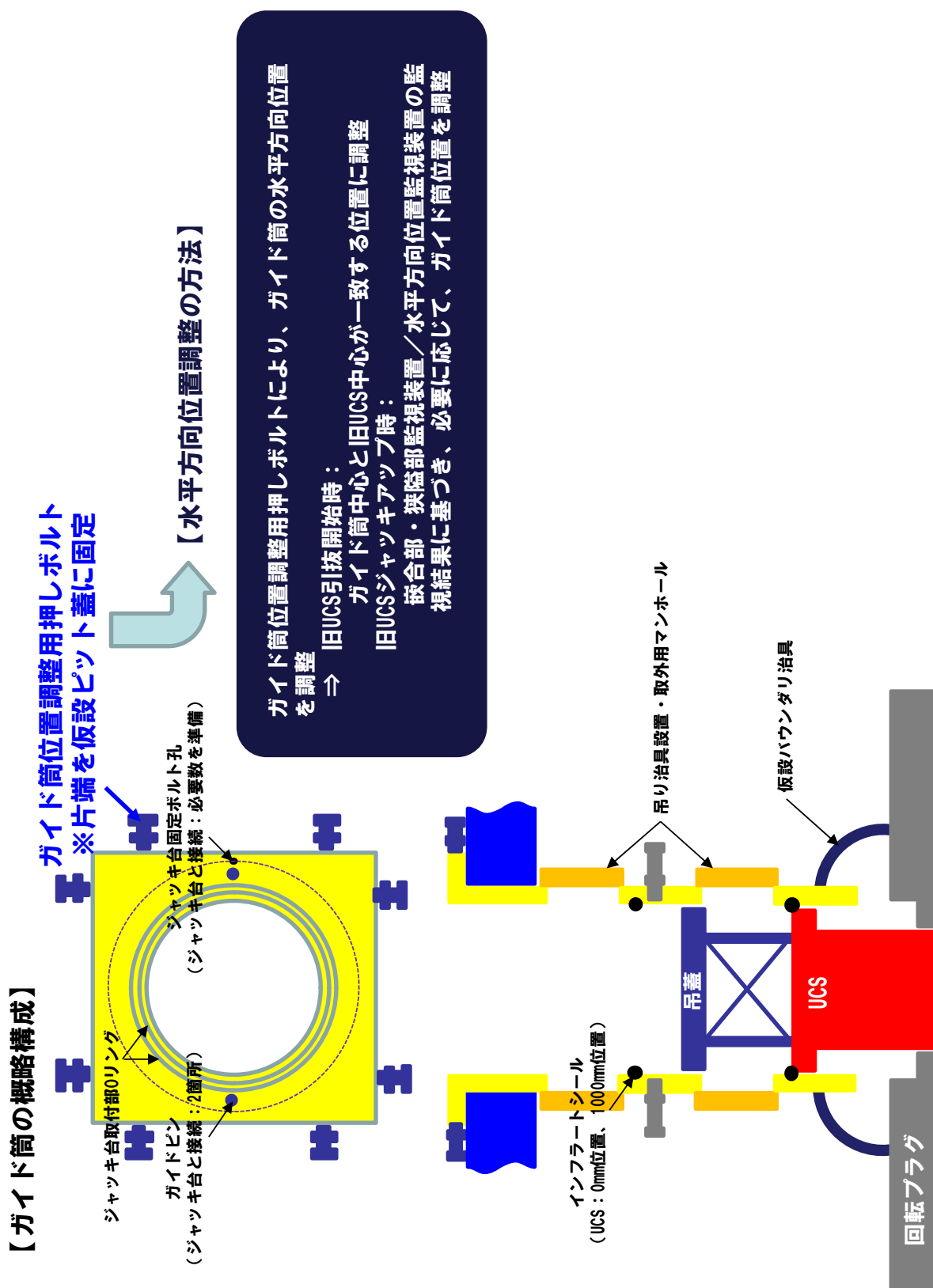


図 4.2.3.4 ガイド筒の概略構造

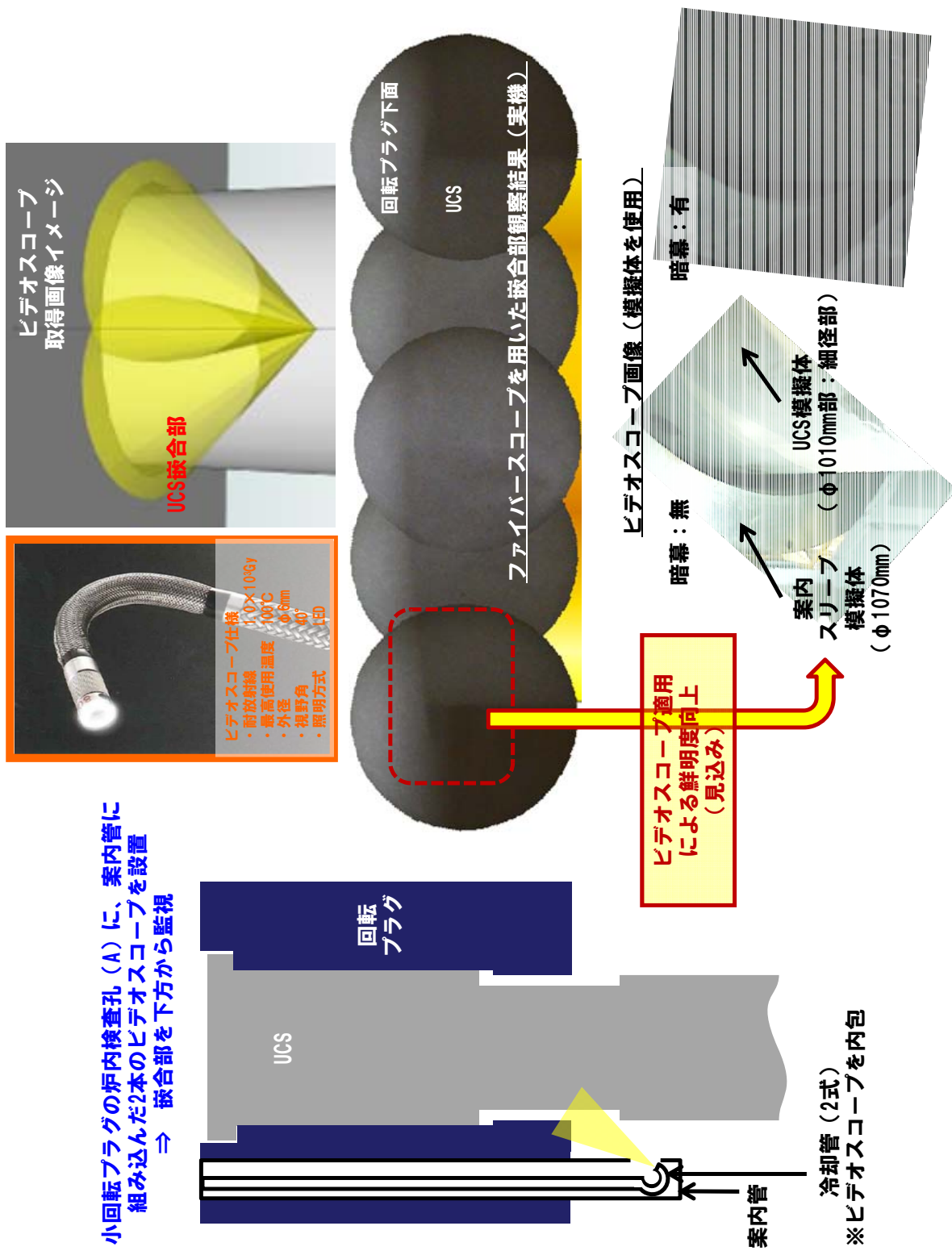
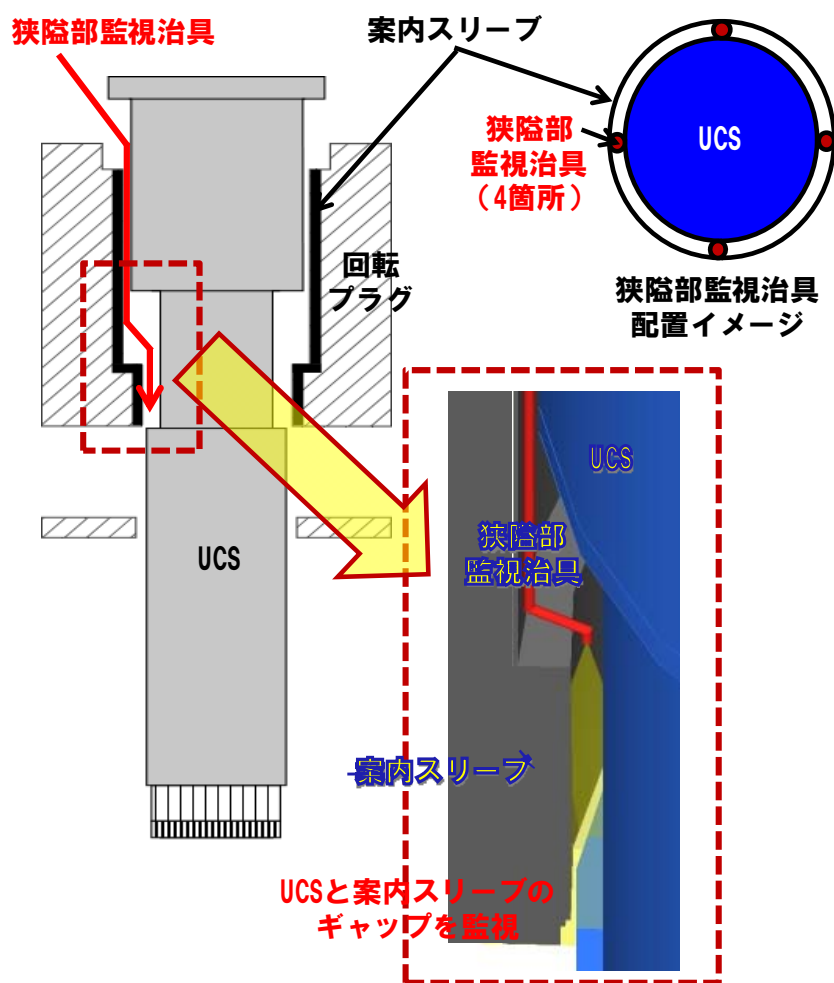


図 4.2.3.5 旧炉心上部機構嵌合部監視治具の設置イメージ



旧UCS部分引抜後に、旧UCSと案内スリーブのギャップに
監視治具を挿入し、旧UCS狭隘部を上方より監視

図 4.2.3.6 旧炉心上部機構狭隘部監視治具の設置イメージ

4.3 旧炉心上部機構ライナ固定方法の検討結果

前述したように、旧炉心上部機構ライナは、旧炉心上部機構の制御棒取付板や遮へい部胴等に固定されていない。ここでは、当該ライナを制御棒取付板に固定し、炉心上部機構本体とともに、引抜・収納するための固定ボルトを開発した。固定ボルトの概略構造を図 4.3.1 に示す。固定ボルトは、テーパボルトとロックボルトで構成され、旧炉心上部機構の据付ボルト撤去後、当該孔に設置される（6～8 箇所）。位置決め用ナットを用いてロックボルト固定面をライナのボルト孔内面位置に調整した後、テーパボルトを締付ナットにより引き上げることで、ロックボルト固定面をライナのボルト孔内面に押し付けることで、ライナを制御棒取付板に固定するものである。また、テーパボルトは、固定面のスリップにより、ライナが落下することがないように、落下防止リンクを有する。

ライナ固定ボルトに付加される全荷重（想定）は、約 35,000N（自重約 1,200N＋リンギング力約 33,000N）である。固定ボルト 1 本に要求される保持力は約 6,000N であり、モックアップ試験の結果、図 4.3.2 に示すように、締付トルクを 20Nm 以上とすることで、当該保持力を有することを確認することができた。また、図 4.3.3 に示すように、リンク機構が正常に動作すること、また、リンク機構により、ライナを保持できることを確認した。

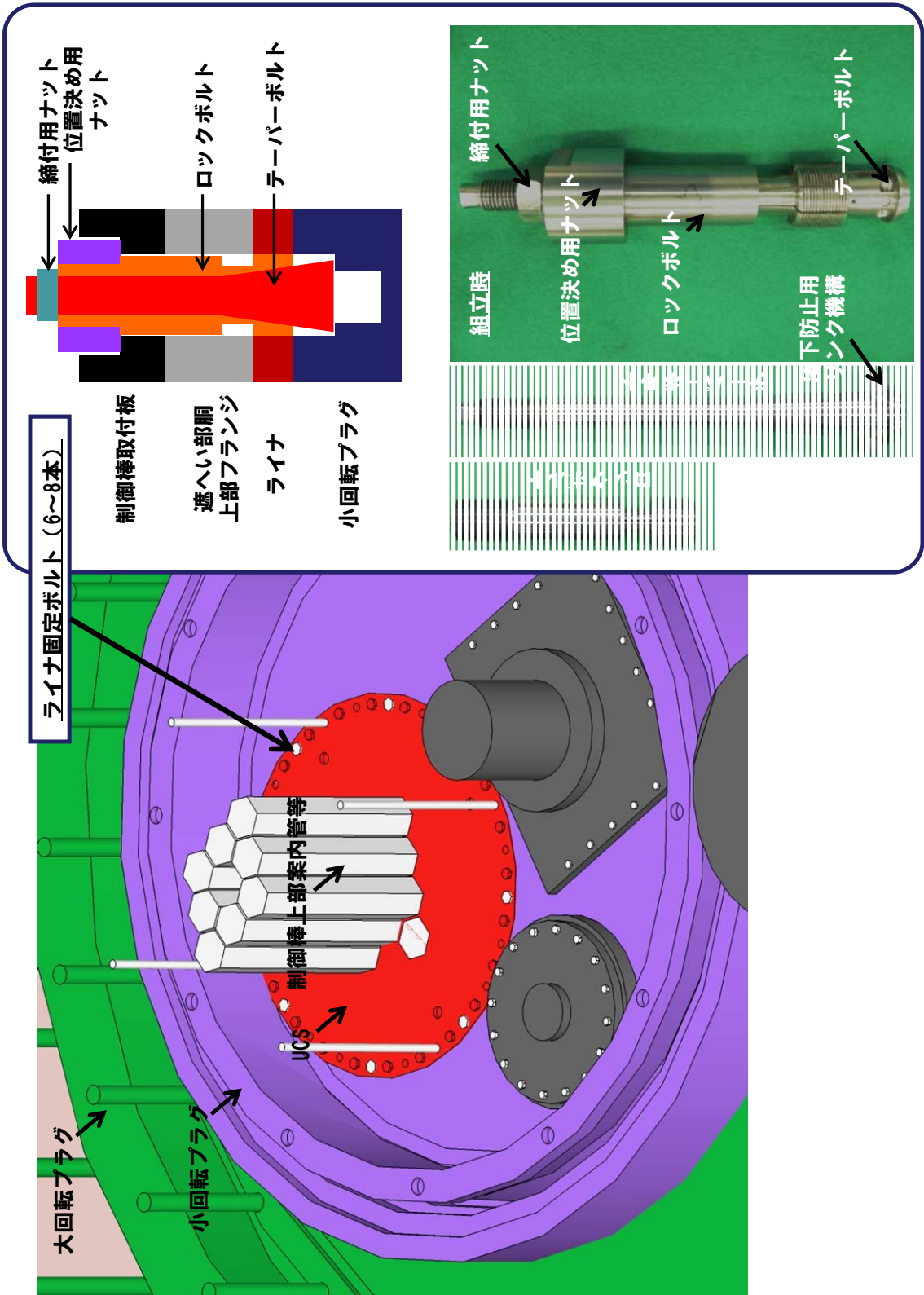


図 4.3.1 旧炉心上部機構ライナ固定ボルトの概略構造

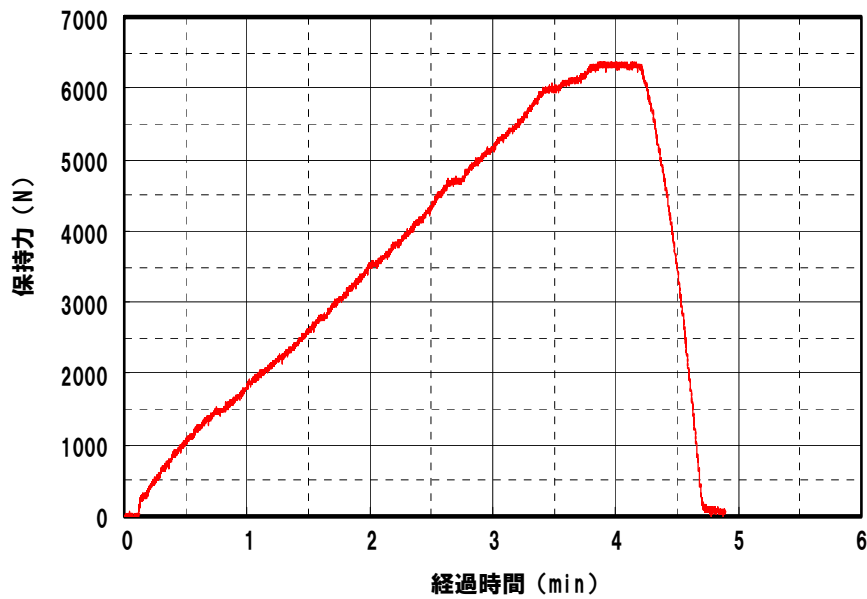


図 4.3.2 旧炉心上部機構ライナ固定ボルト保持力確認結果

動作確認結果



変位及び荷重の状況

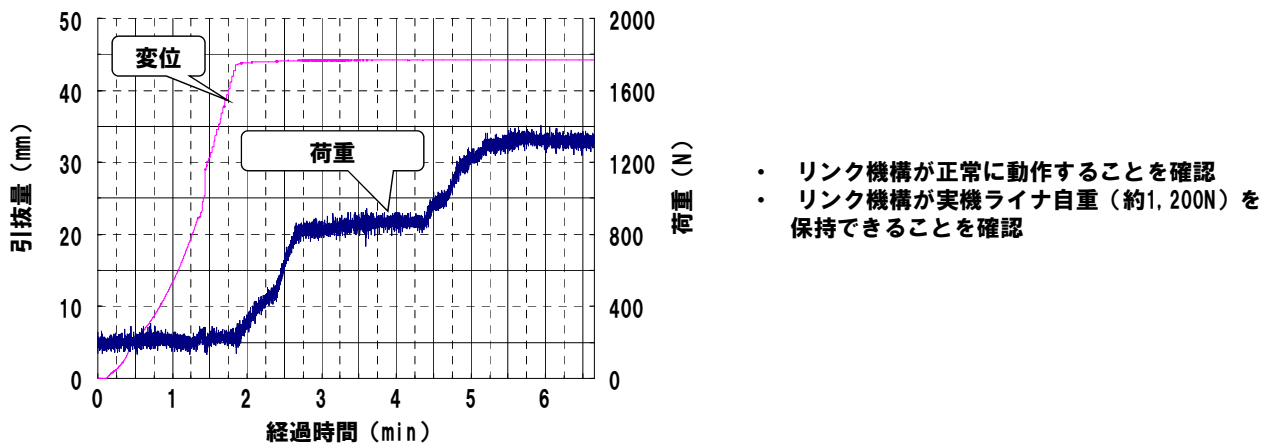


図 4.3.3 旧炉心上部機構ライナ落下防止用リンク機構動作確認結果

4.4 キャスク総重量の低減方策の検討結果

前述したように、旧炉心上部機構を収納するキャスクについては、原子炉容器内の線量率測定により計算誤差に係る設計余裕を低減し、旧炉心上部機構の表面線量率の最適化を図っている（第 1 ステップ）。当該線量率評価結果を踏まえて実施したキャスク胴厚さの評価結果を図 4.4.1 に示す。キャスクの設計にあたっては、軽水炉等においてキャスク表面線量率 2mSv/h にて作業実績等を有することから、これに安全率 2 を考慮してキャスク表面線量率が 1mSv/h を超えないよう遮へい厚さを決定している。

遮へい厚さの設定においては、キャスク重量を低減するため、旧炉心上部機構表面線量率について最適化したデータを用いるとともに、4 種類（段）のキャスク厚さを用いることとした。一般的に、キャスクの厚さは 1～2 種類であるが、ここではキャスク厚さを 4 種類とすることで、過剰な余裕を排除している。

また、ここでは付帯設備の重量低減を図っている（第 2 ステップ）。一般的に、揚重設備やドアバルブはキャスクと一体化されるが、本作業に使用するキャスクにおいては、揚重設備やドアバルブをキャスクと切り離して取り扱える構造とした。

揚重設備の概略構造を図 4.4.2 に示す。キャスクの上部には取り外し可能な揚重設備が設置される（ワイヤジャッキ）。ワイヤジャッキ（ワイヤジャッキを包絡する仮設バウンダリ（ビニルバック）を形成）は、キャスク上部の開口部を介して旧炉心上部機構上部の吊蓋と締結され、旧炉心上部機構の引抜・収納に供される。旧炉心上部機構の吊蓋は、最終的にキャスク上部内側に固定され、キャスク（バウンダリ）の一部となるため、キャスク取扱時には揚重設備一式を取り外すことが可能である。

ドアバルブの概略構造を図 4.4.3 に示す。ドアバルブは、原子炉容器側のバウンダリを形成するためのゲートバルブと、キャスク下側開口部のバウンダリとなる下蓋を移動しジャッキアップする機構を有する。ジャッキアップした下蓋はキャスクに固定され、キャスク（バウンダリ）の一部となる。また、原子炉容器側のバウンダリはゲートバルブにより確保されるため、キャスクを単独で取り扱うことが可能となる。

以上の方策を講じた結果、旧炉心上部機構（約 16.5 トン）を含めたキャスク総重量は約 93.4 トンとなり、当該キャスクの取り扱いに使用する格納容器クレーンの最大容量 100 トン以下とできる見込みを得た。

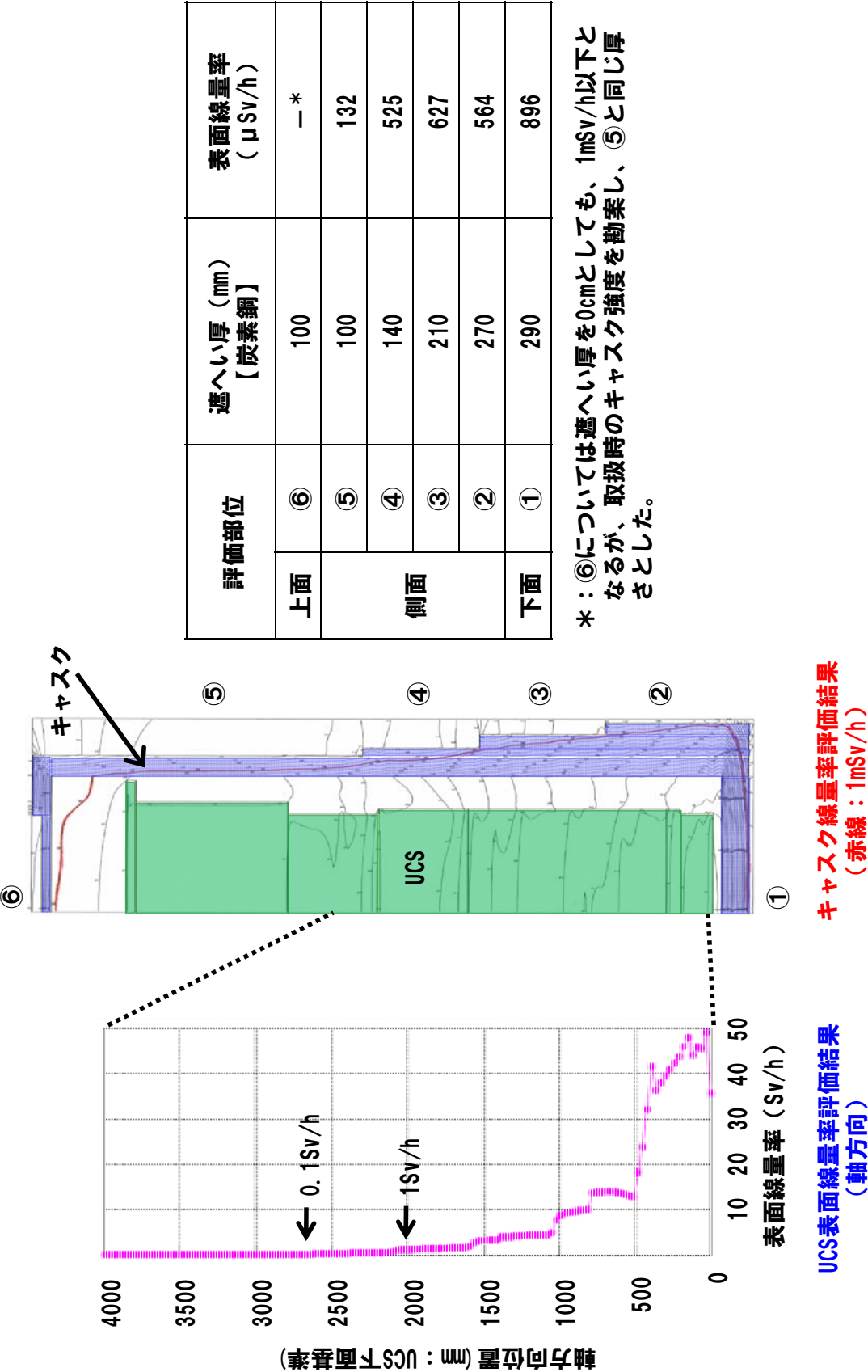


図 4.4.1 旧炉心上部機構キャスクの遮蔽厚さ評価結果

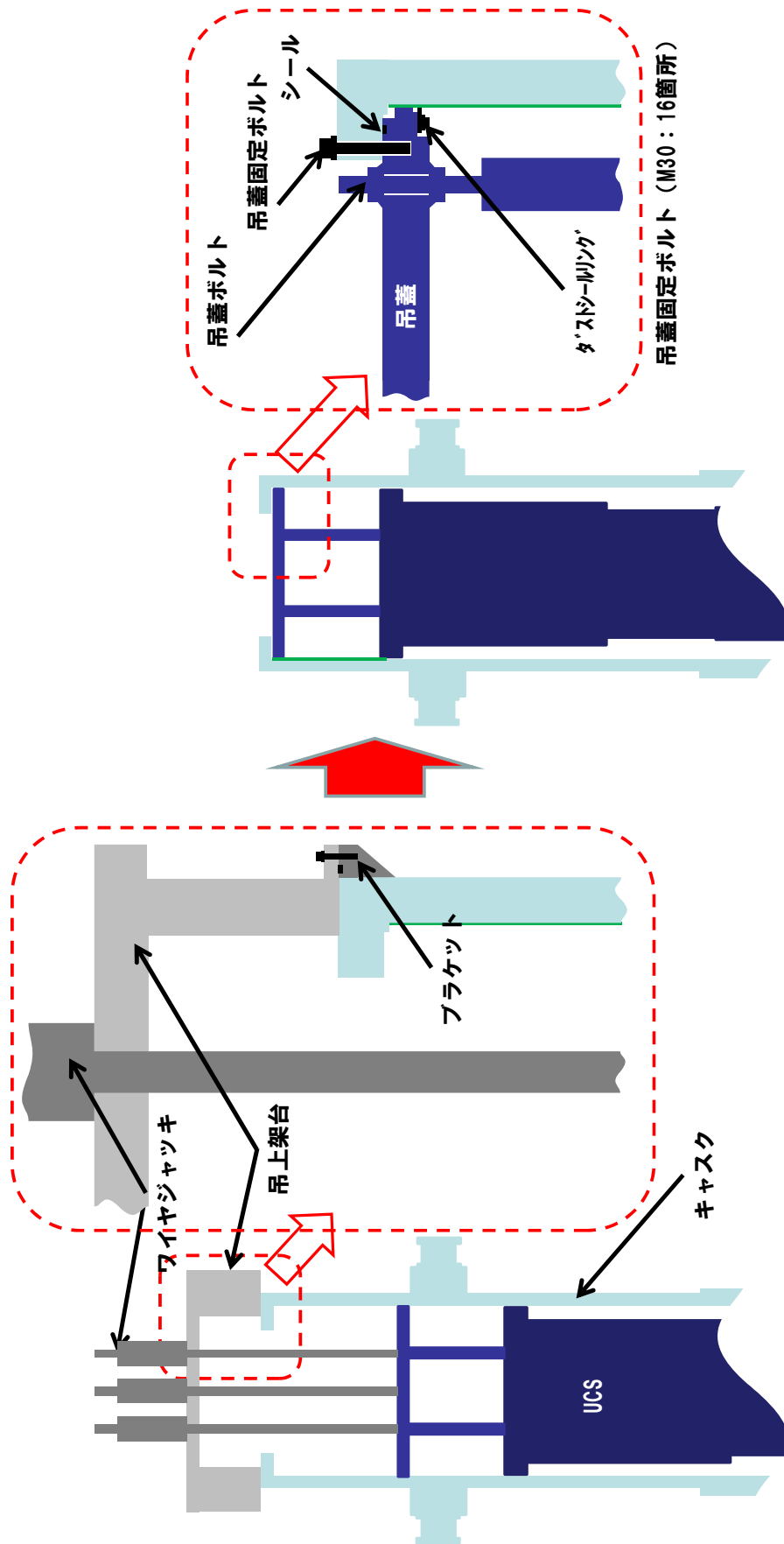


図 4.4.2 旧炉心上部機構揚重設備の概略構造

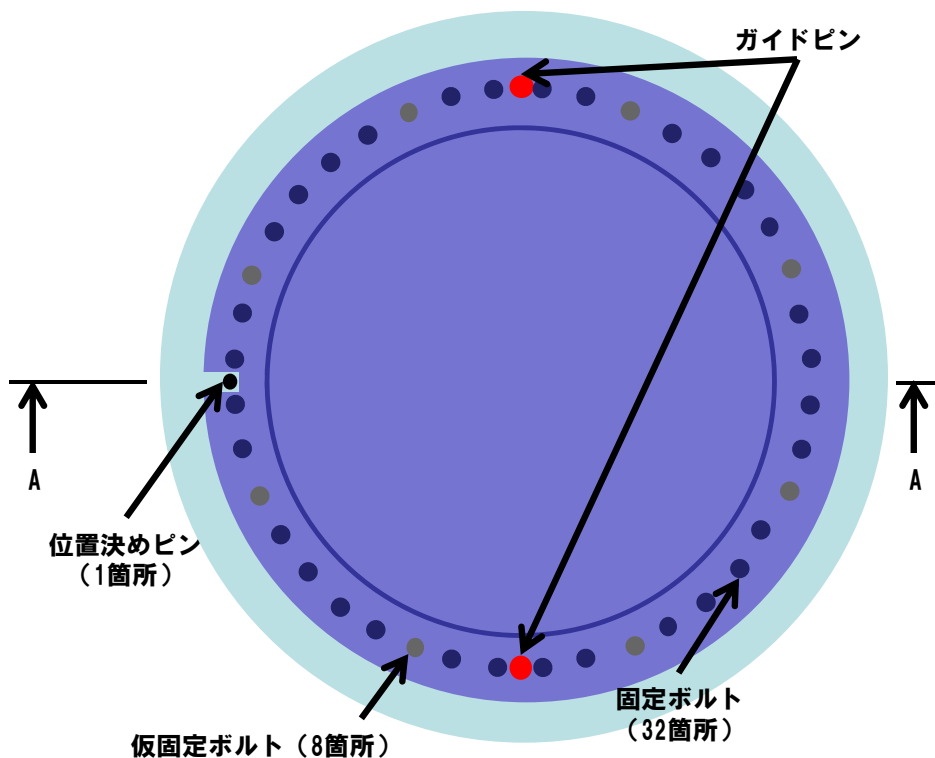
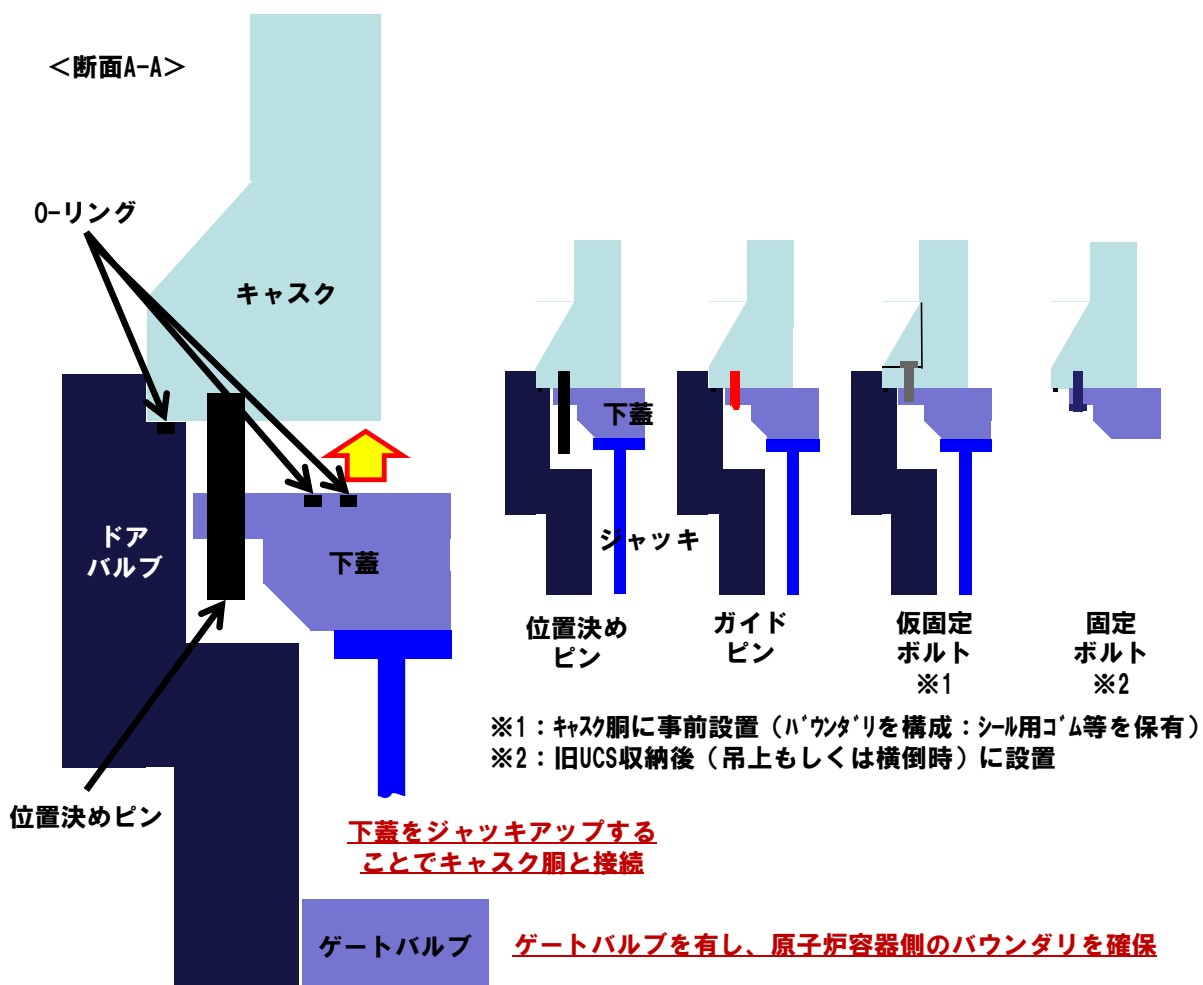


図 4.4.3 旧炉心上部機構ドアバルブの概略構造

5. 炉心上部機構交換作業用機材等の機能確認試験計画

「常陽」の炉心上部機構は、交換することを前提に設計されたものではなく、これまでに交換した実績も有していない。また、SFRにおける炉心上部機構の交換作業は、海外において過去に仏国ラプソティにおいて実施された実績はあるものの、世界でも数少ない大規模な炉内構造物の交換作業となる。これらを踏まえると本作業の完遂には模擬体等を用いた綿密なモックアップ試験が必要となる。特に、旧炉心上部機構ジャッキアップ時には、旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形が生じるリスクが大きいことから、ここでは、まず旧炉心上部機構ジャッキアップ作業用機材等の炉外機能確認試験計画について検討した。

旧炉心上部機構ジャッキアップ作業の完遂に向けたポイントは、①バウンダリ設備の確実な運用・管理を前提とし、②監視治具を用いた状態管理を綿密に実施して、③ジャッキアップ治具を確実に運用・管理することである。

平成 24 年度に予定している旧炉心上部機構ジャッキアップ作業用機材等の炉外機能確認試験では実機大（寸法及び重量）の模擬体を用いて、上記ポイントを確実に運用するための作業経験及び知見を取得するため、以下の確認試験を計画している。

(1) 旧炉心上部機構嵌合部監視治具及び狭隘部監視治具の機能確認試験

旧炉心上部機構ジャッキアップ作業の完遂には、旧炉心上部機構嵌合部や狭隘部の視認性を確保し、干渉・接触がないことを確認しつつ、ジャッキアップ作業を実施することが肝要と考えている。炉外機能確認試験の第 1 ステップとして、当該監視治具の取付性や機能及び性能を確認する。

(2) 旧炉心上部機構ジャッキアップ治具の機能確認試験

旧炉心上部機構ジャッキアップ作業の完遂には、旧炉心上部機構嵌合部監視治具及び狭隘部監視治具の運用とともに、水平度、水平方向位置及び荷重を確実に監視・管理する必要がある。また、ジャッキアップ治具には、水平度、水平方向位置及び荷重について、安定したデータが得られる運用管理、及びこれらのパラメータ緩和措置を講じることが出来る操作性が要求される。炉外機能確認試験の第 2 ステップとして、ジャッキアップ治具の運用・管理性を確認する。

(3) 旧炉心上部機構仮設バウンダリの機能確認試験

上記 (1) (2) の作業は、原子炉容器上部に設置された仮設バウンダリで実施される。ここでは、炉外機能確認試験の第 3 ステップとして、仮設バウンダリを取り付け、圧力制御性等を含めた作業性・運用性に問題がないことを確認する。

(4) 旧炉心上部機構ジャッキアップ作業手順検証試験（総合機能確認試験）

炉外機能確認試験の最終ステップとして、上記 (1) ～ (3) 等の治具構成一式を模擬し、作業手順を検証する。作業手順の検証にあたっては、作業性の確保に留意するとともに、制御因子（引抜力、引抜速度、ストローク等）や監視項目（荷重、水平度及び水平方向位置等）の妥当性について検証する。なお、ここでは、2 種類の模擬体（炉心上部機構継胴熱遮へい部（太径部））を準備することを計画している。フェーズ I では、基本的に旧炉心上部機構ジャッキアップが可能と考えられるノミナル寸法の模擬体を使用し、

試験手順等を最終レビューする中で各治具の裕度等に係るデータを取得・把握等する。

フェーズⅡにおいては、最大公差等（想定される最も厳しい寸法）を考慮した模擬体により、旧炉心上部機構ジャッキアップ時の監視項目の変化及び制御因子の妥当性を把握・確認等する。

これらの試験により得られた知見を各治具の設計に反映する。今後、旧炉心上部機構キャスク（引抜・収納治具）や新炉心上部機構キャスク（装荷治具）についても、同様の手順で治具の機能等について検証する計画である。

6. 結言

炉心上部機構の交換作業は世界でも数少ない大規模な炉内構造物の交換作業である。高速実験炉「常陽」では、今回のトラブルを一つの契機として、炉心上部機構の交換作業に係る検討・技術開発を進めた。以下に主な成果を示す。

- (1) 供用中 SFR の作業環境を考慮した上で、炉心上部機構交換作業の概略手順をまとめ、作業に必要な治具類を整理した。
- (2) 炉心上部機構交換作業全工程において、配慮が必要となる「仮設バウンダリ及び作業環境空間線量率の管理方法（プラント条件の設定を含む）」について、管理方針（案）を定めるとともに、当該方針（案）が運用可能である見込みを得た。
- (3) 炉心上部機構交換作業時における主な懸案事項である①旧炉心上部機構及び案内スリーブの変形等防止策、②ナトリウムブリッジせん断抵抗による案内スリーブの変形等防止策、③旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉・接触防止策、④旧炉心上部機構ライナの固定方法、⑤キャスク総重量の低減策について検討し、解決策を検討・整理した。
- (4) 上記（1）～（3）の妥当性等を検証するための炉心上部機構交換作業用機材等の機能確認試験計画を策定した。

本作業の完遂は、「常陽」の復旧のみならず、稀少な経験として、SFR における原子炉容器内保守・補修技術開発に大きく資することができるものと考えている。

謝 辞

「常陽」炉心上部機構の交換に向けた技術開発にあたっては、高速実験炉部、高速炉技術課、高速炉第1課、高速炉第2課の多くの方々のご協力をいただいた。また、懸案事項の抽出及び解決策の検討にあたっては、(株)三菱重工株式会社に多大なるご助成をいただいた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Misao TAKAMATSU, Kazuyuki IMAIZUMI 他 : "Development of Observation Techniques in Reactor Vessel of Experimental Fast Reactor Joyo", Journal of Power and Energy System, Vol.4, No.1, p.113 - 125 (2010)
- 2) 芦田貴志、高松 操他 : “ナトリウム冷却型高速炉の原子炉容器内観察・補修技術の開発(3) (1) 炉心上部機構の交換”、日本原子力学会 2009 年秋の大会 (2009 年)
- 3) Takashi SEKINE, Takashi ASHIDA 他 : "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo", FR '09 (2009)
- 4) 関根 隆、高松 操他 : “ナトリウム冷却型高速炉の原子炉容器内観察・補修技術の開発(4) (2) 炉心上部機構の交換 (その 2)”、日本原子力学会 2010 年春の年会 (2010 年)
- 5) 伊東秀明、前田茂貴他 : “「常陽」原子炉容器内構造物の放射化量とガンマ線量率分布の測定評価”、JAEA-Technology 2010-049 (2010)

付録資料

付録-1 ナトリウムブリッジ形成位置等の評価

付録-2 旧炉心上部機構温度分布測定結果

付録-3 小回転プラグ水平度評価結果

This is a blank page.

付録-1

ナトリウムブリッジ形成位置等の評価

1. 概要

旧炉心上部機構ジャッキアップ時には、旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップに形成されたナトリウムブリッジのせん断抵抗が生じる。当該影響評価にあつては、ナトリウムブリッジの形成位置及び高さを確定する必要がある。ここでは、ナトリウムの蒸着メカニズム等を考慮し、ナトリウムブリッジの形成位置及び高さを評価した。

2. ナトリウムの蒸着メカニズム

ナトリウムの蒸着メカニズムには、①蒸気凝縮、②ミスト沈着がある。「蒸気凝縮」は、カバーガス中に含まれるナトリウム蒸気が、壁面に直接凝縮するものである。一方、「ミスト沈着」は、ナトリウム蒸気が、カバーガス中で凝縮・ミスト化し、壁面に沈着するものである。

壁面温度が高い場合（410～430℃以上）には「蒸気凝縮」、低い場合（410℃以下）には「ミスト沈着」が支配的となる。壁面温度が高い場合には、ナトリウムの飽和蒸気圧が大きく（ナトリウム表面と壁面付近での飽和蒸気圧差が小さく）、ナトリウムミストが発生しない。その結果、蒸気凝縮によるナトリウムの壁面蒸着が支配的となる。一方、壁面温度が低い場合には、ナトリウムの飽和蒸気圧が小さくなるため、ナトリウムミストが発生し、ミスト沈着によるナトリウムの壁面蒸着が支配的となる。

原子炉運転中の旧炉心上部機構壁面温度は、回転プラグ下端位置を除き、410℃を下回って（付録-2 参照）おり、「常陽」にあつては、ミスト沈着が支配的となる。

3. ナトリウムブリッジの形成部位

旧炉心上部機構と案内スリーブには、①上部ギャップ（鉛直）：15mm、②水平ギャップ：26mm、③下部ギャップ（鉛直）：30mm が存在する（旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップの構造及び寸法：図 3.1 参照）。ナトリウムミストは、壁面温度がナトリウムの融点以上であっても、壁面への沈着が生じるため、蒸着ナトリウムは旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップ全面に存在すると推定される（回転プラグ下面周辺観察結果：図 3.2 参照）。そのため、ナトリウムブリッジの形成部位評価においては、上記①～③のすべてが評価対象となる。

3.1 ナトリウムブリッジの形成条件

ナトリウム蒸着に係る過去の実験等において、ナトリウム蒸着はカバーガス対流量が抑制される（水平方向流れや渦が形成）部位で発生することが確認されている。一方で、以下の条件にあつては、沈着したナトリウムミストの流下等の効果により、ナトリウムブリッジが形成されないことが確認されている。

【鉛直】 壁面温度：150℃以上・ギャップ：25mm 以上

⇒ ナトリウムが液滴化（10mm）し、流下するため、ギャップが 25mm 以上であれば、ナトリウムブリッジは形成されない（図 3.3 参照）。

【水平】 壁面温度：100℃以上・ギャップ：13mm 以上

⇒ 上方にナトリウムの液滴、下方にナトリウム堆積物が存在することを想定し、表面張力により保持可能な重量及び体積を算出した結果、①ナトリウムの液滴は、半径が 8.02mm を超過すると流下すること、②ナトリウム堆積物は、高さが 4.66mm を超過すると流下するとの判断でき、ギャップが 13mm 以上であれば、ナトリウムブリッジは形成されない（図 3.3 参照）。

3.2 ナトリウムブリッジの形成部位評価

上部ギャップ（鉛直）、水平ギャップ、下部ギャップ（鉛直）におけるナトリウムブリッジの形成可否評価結果を以下に示す。以下の検討結果より、ナトリウムブリッジの形成部位は、上部ギャップ入口部（炉心上部機構遮へい部胴下端付近）と判断した。

① 上部ギャップ（鉛直）：15mm

ギャップが 25mm 以下であり、ナトリウムブリッジが形成される可能性がある。また、上部ギャップ入口部（炉心上部機構遮へい部胴下端付近）は、「流路縮小」及び「方向変化」が生じる部位であり、カバーガス対流量が抑制される（水平方向流れや渦が形成）部位に該当することから、ナトリウムブリッジは、当該部に形成される可能性が高いと推測できる。なお、上部ギャップ（鉛直）の上方部については、入口部でのナトリウムブリッジ形成による流路閉塞により、ナトリウムミストの輸送が妨げられることから、ナトリウムブリッジが形成されることはないと判断した。

② 水平ギャップ：26mm

当該部の壁面温度は、少なくとも 200℃を上回ると推定される。壁面温度：100℃以上・ギャップ：13mm 以上の条件を満足しており、ナトリウムブリッジが形成されない。

③ 下部ギャップ（鉛直）：30mm

当該部の壁面温度は、少なくとも 200℃を上回ると推定される。壁面温度：150℃以上・ギャップ：25mm 以上の条件を満足しており、ナトリウムブリッジが形成されない。

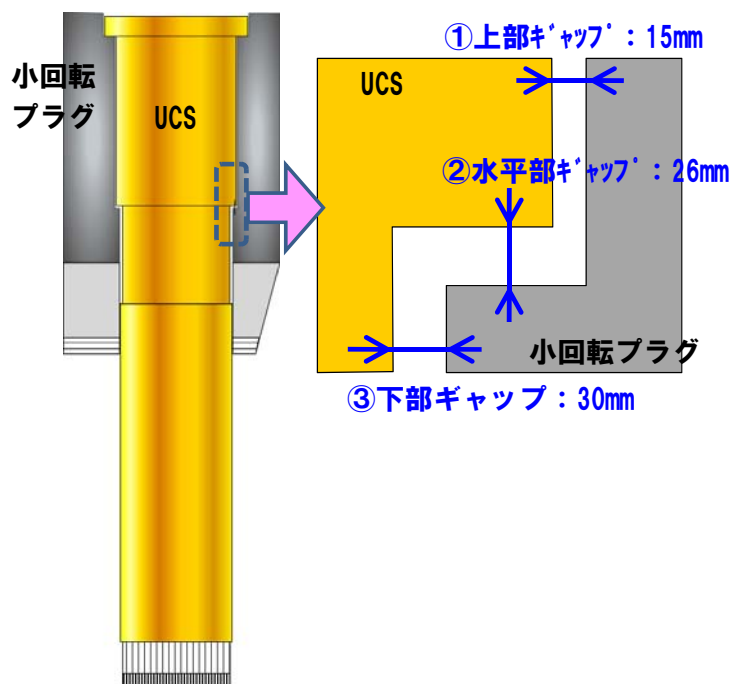


図 3.1 「常陽」炉心上部機構と案内スリーブのギャップの構造及び寸法（詳細）

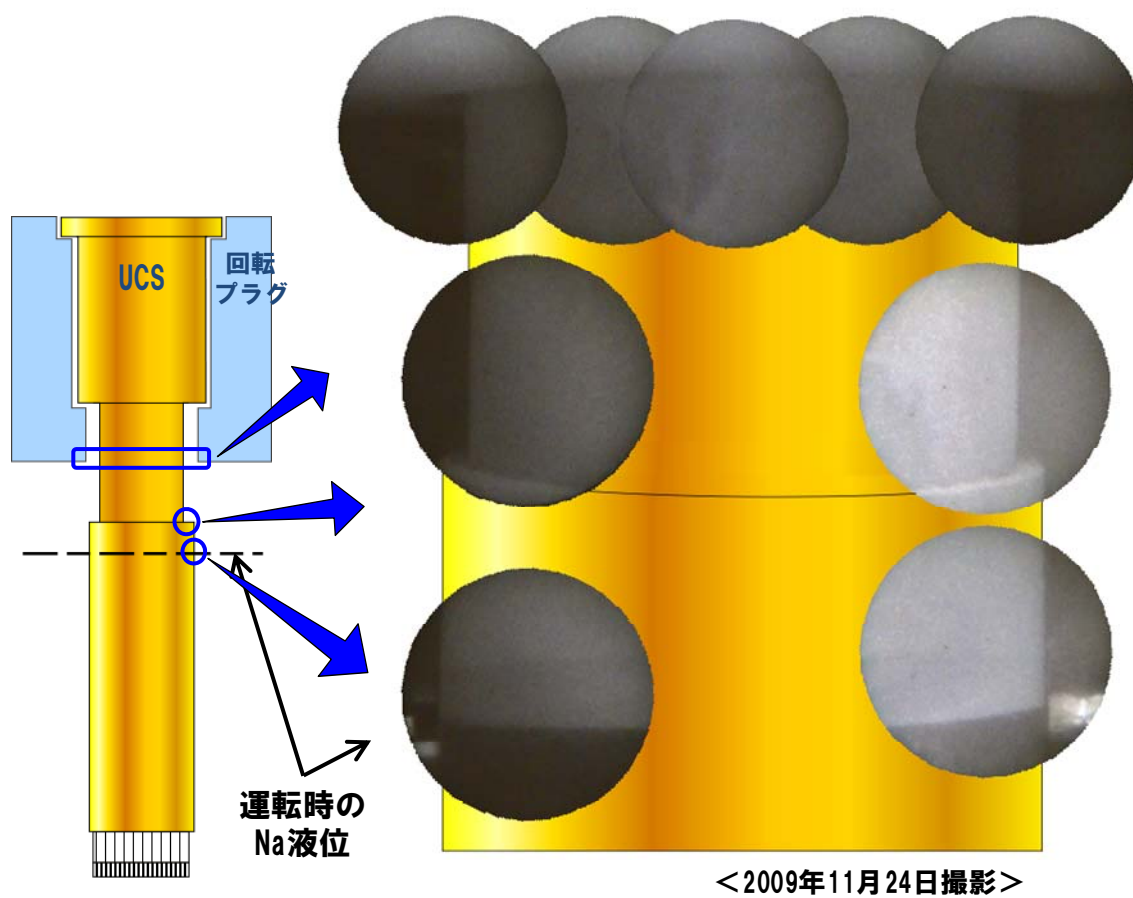
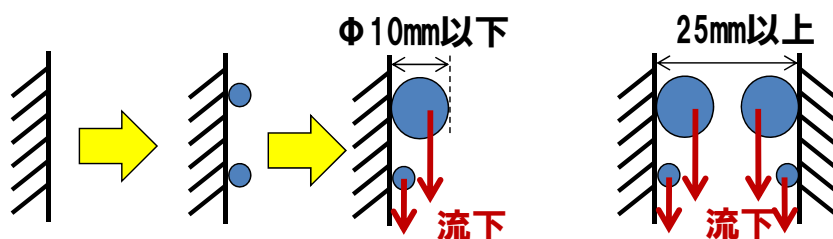


図 3.2 回転プラグ下面周辺観察結果

- 鉛直キップ : キップ幅25mm以上 (150℃以上) → ナトリウムブリッジの発生なし



- 水平キップ : キップ幅13mm以上 (100℃以上) → ナトリウムブリッジの発生なし

上方液滴半径 (100℃) : 8.02mm

下方堆積物厚さ (100℃) : 4.66mm

合計 : 12.68mm

→ ナトリウムブリッジ発生防止最小キップ : 13mm

※ 表面張力により保持可能な重量・体積を算出

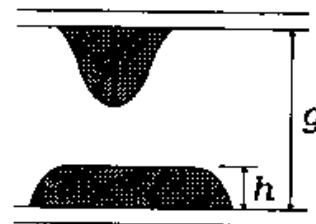


図 3.3 ナトリウムブリッジが形成されないための条件

4. ナトリウムブリッジの高さ

原子炉運転中の上部ギャップ入口（遮へい部胴下端付近）の温度は約 250～320℃と推定される。したがって、ナトリウムブリッジは、液体状態で形成され、表面張力によりギャップに保持される。そのため、ナトリウムブリッジが過度に発達した場合には、流下する。したがって、ナトリウムブリッジ高さは、約 30 年の運転期間中に一定量で飽和すると推定できる。ナトリウムブリッジ高さの評価モデル及び評価結果を図 4.1 に示す。ナトリウムブリッジ温度を 100、200、300、400℃とした条件（接触角は保守的に 0°）で、ナトリウムブリッジ高さを評価した結果、ナトリウムブリッジ高さは、最大でも 3mm を超えることはないことを確認した。なお、上部ギャップ（鉛直）の壁面温度（原子炉運転中）は、150℃以上と推定される。当該確認結果を踏まえ、今後の検討等にあつては、保守性を考慮し、安全係数「2」を見込んだ「6mm」をナトリウムブリッジ高さとする事とした。

5. まとめ

旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップに形成されたナトリウムブリッジのせん断抵抗に係る影響評価・検討にあつては、上記評価結果を踏まえ、ナトリウムブリッジは、上部ギャップ（鉛直）下部に形成され、6mm の高さを有することを評価・検討のインプットとする。

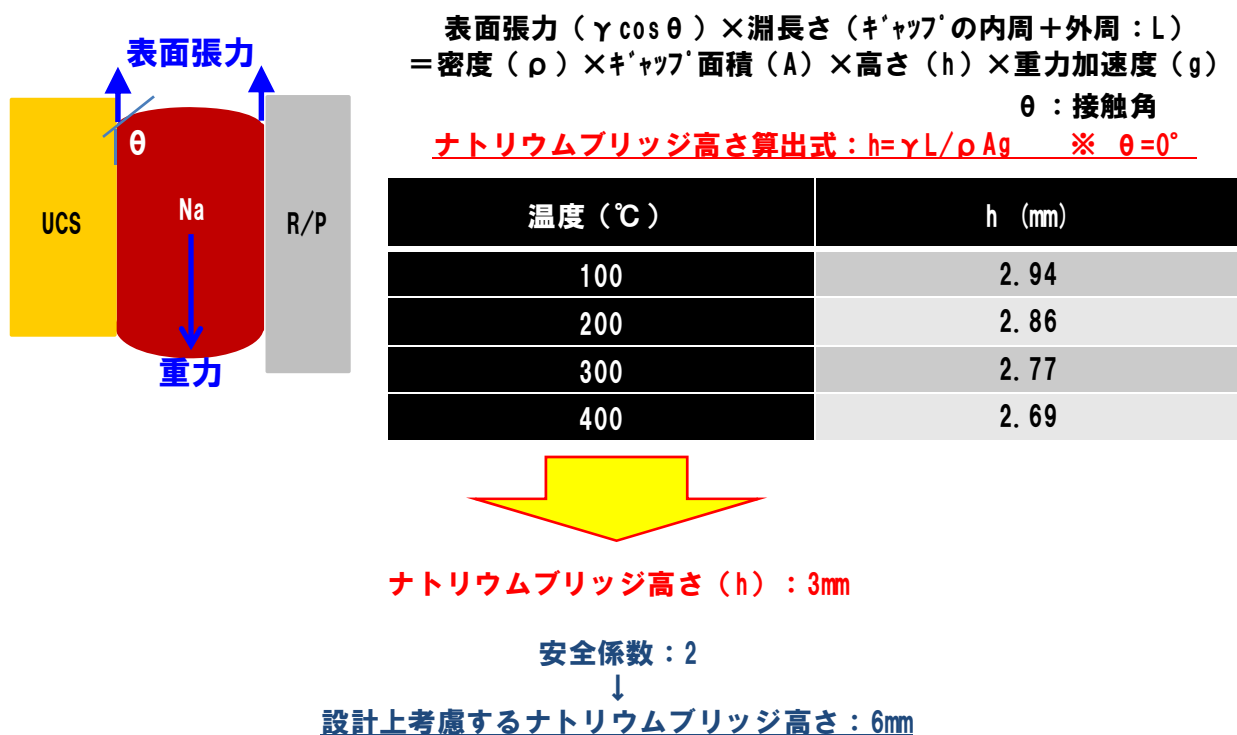


図 4.1 ナトリウムブリッジ高さの評価モデルと評価結果

付録-2

旧炉心上部機構温度分布測定結果

ナトリウムブリッジの形成位置及び高さの評価（付録-1 参照）等においては、炉心上部機構の温度等がインプットデータとして要求される。ここでは、「常陽」における過去のデータ等を調査し、旧炉心上部機構温度分布の測定結果を整理した。

- ・ 旧炉心上部機構温度分布（原子炉運転中）：図 1 参照
- ・ 旧炉心上部機構温度分布（原子炉停止中：Na 温度約 250℃）：図 2 参照
- ・ 旧炉心上部機構温度分布（原子炉停止中：Na 温度約 200℃）：図 3 参照

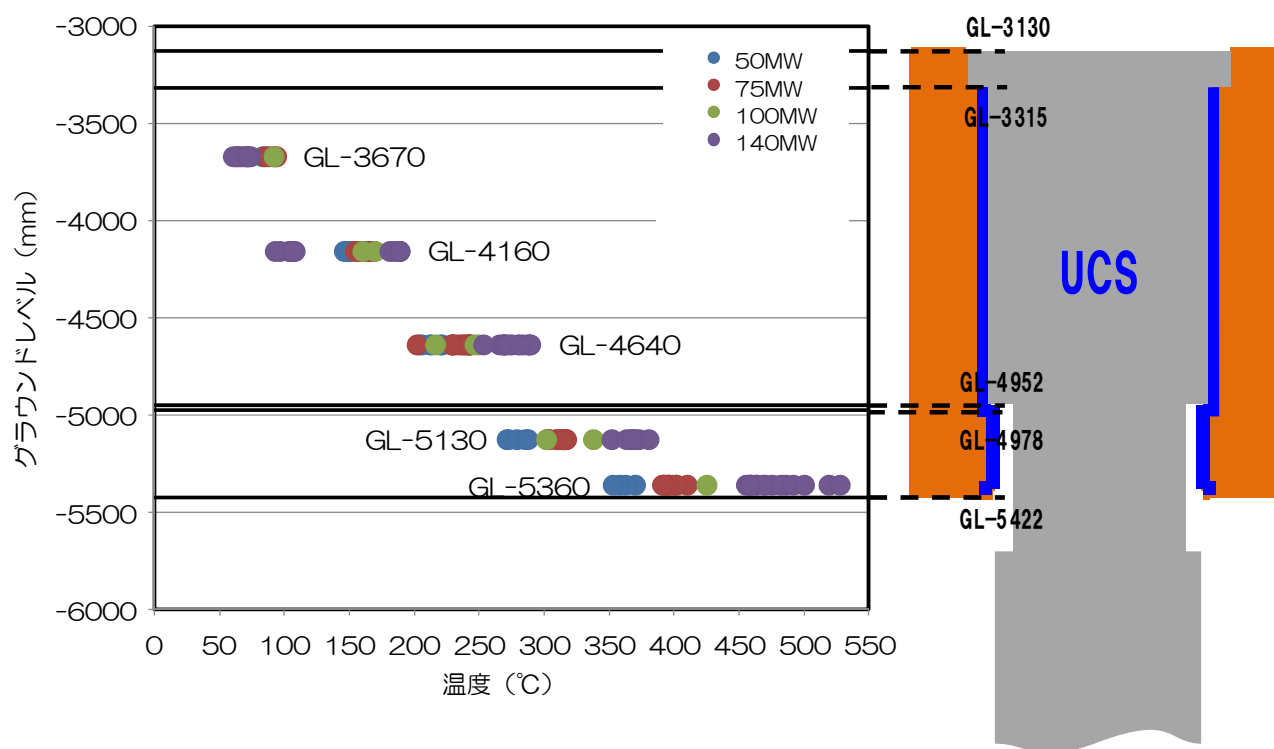


図 1 旧炉心上部機構温度分布（原子炉運転中）

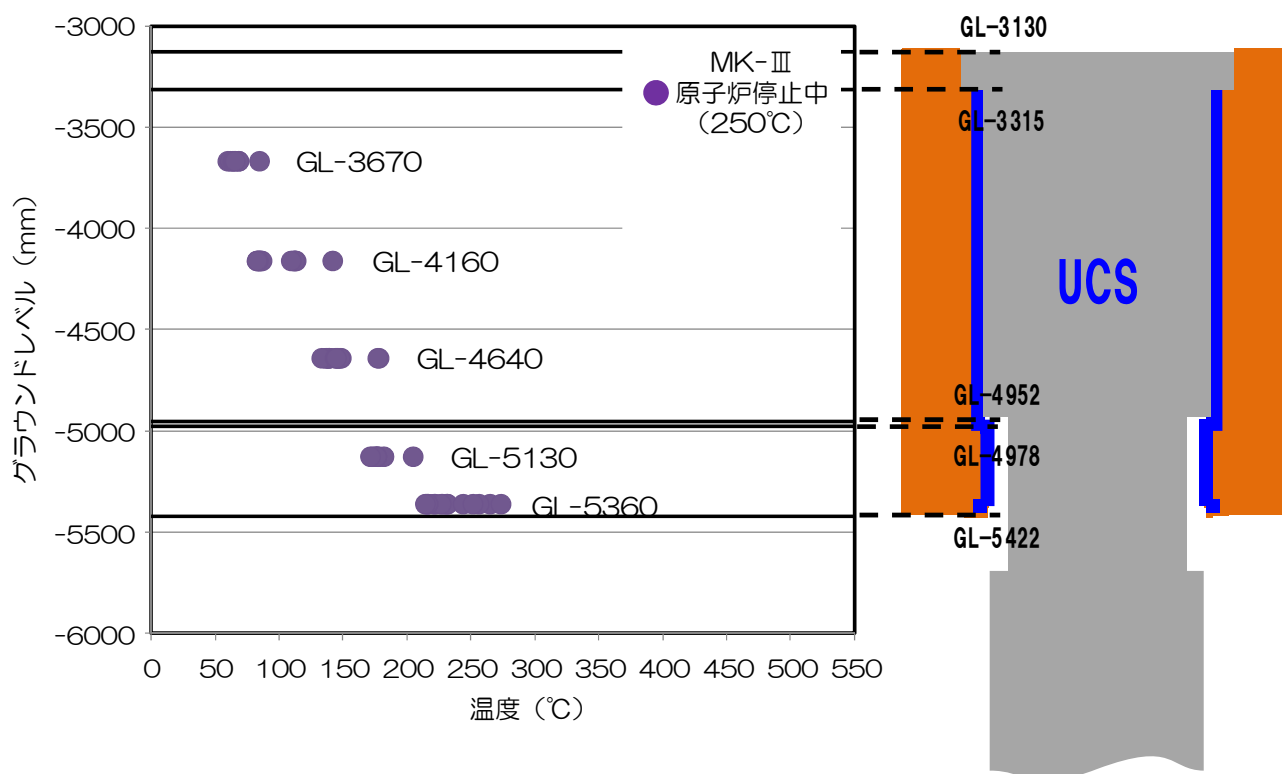


図 2 旧炉心上部機構温度分布（原子炉停止中：Na 温度約 250°C）

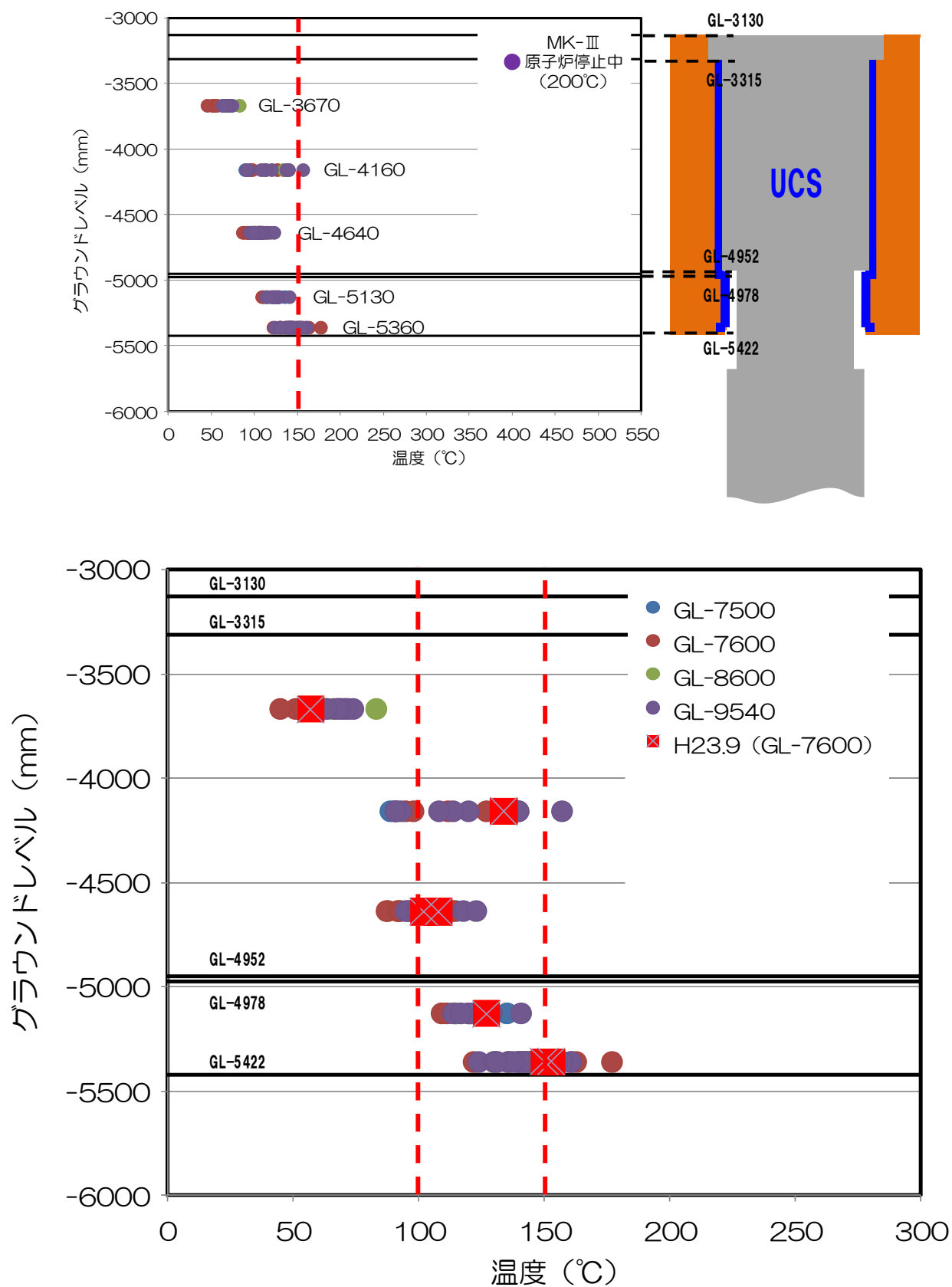


図3 旧炉心上部機構温度分布（原子炉停止中：Na 温度約 200°C）

付録-3

小回転プラグ水平度評価結果

1. 概要

炉心上部機構交換作業時にあっては、炉心上部機構と回転プラグの接触・干渉を防止・抑止するため、合理的に達成可能な範囲で回転プラグを水平にすることが肝要である、平成 22 年 8 月 4 日～31 日に実施した回転プラグジャッキダウン確認試験結果に基づく、小回転プラグ水平度評価を以下に示す。

2. 回転プラグジャッキダウン確認試験結果

回転プラグジャッキダウン確認試験では、大・小回転プラグを炉心上部機構交換作業実施時の位置（大：253.98°・小：115°）とし、ジャッキアップ位置（基準）より、回転プラグをジャッキダウンして、下降量を計測した。測定結果を以下に示す。なお、当該ジャッキダウンにあたっては、事前に大・小回転プラグを 10～20° の間隔でジャッキアップ及びジャッキダウンを実施（合計 8 回）し、蒸着ナトリウムの影響緩和を図っている。

大回転プラグ		小回転プラグ	
測定器 No.	下降量 (mm)	測定器 No.	下降量 (mm)
L045 (r=2005・ $\theta=28.1^\circ$)	-19.1	S045 (r=1140・ $\theta=33.2^\circ$)	-19.1
L135 (r=2005・ $\theta=130.5^\circ$)	-19.3	S135 (r=1140・ $\theta=116.4^\circ$)	-19.2
L225 (r=2005・ $\theta=242.3^\circ$)	-19.3	S225 (r=1140・ $\theta=228.2^\circ$)	-19.3
L315 (r=2005・ $\theta=314.8^\circ$)	-19.0	S315 (r=1140・ $\theta=320.9^\circ$)	-18.9

※ 測定器位置：大・小回転プラグ中心からの距離・角度

3. 小回転プラグの水平度の評価手順

小回転プラグは、大回転プラグに設置されていることから、小回転プラグの水平度評価にあつては、測定で得られた大回転プラグの水平度に、大回転プラグに対する小回転プラグの相対水平度を合成し、鉛直方向に対する傾きを算出する必要がある。評価手順を以下に示す。

- (1) 大回転プラグの測定点を XYZ 座標に展開し、平面の式 ($aX+bY+cZ+d=0$) を算出
- (2) 小回転プラグの測定点における Z 方向変位を考慮した上で、当該測定点を XYZ 座標に展開し、平面の式 ($aX+bY+cZ+d=0$) を算出
- (3) 上記 (2) で算出した平面の式より、小回転プラグの水平度を評価

4. 小回転プラグ水平度評価結果

上記評価の結果、小回転プラグ上面に係る平面の式は、 $5.36412 \times 10^{-6}X + 6.77744 \times 10^{-6}Y +$

$5.44916 \times 10^{-2}Z + 1 = 0$ となった。当該式より算出される水平度(最大)は 0.1586/1000(mm/mm) である (図 1 参照)。

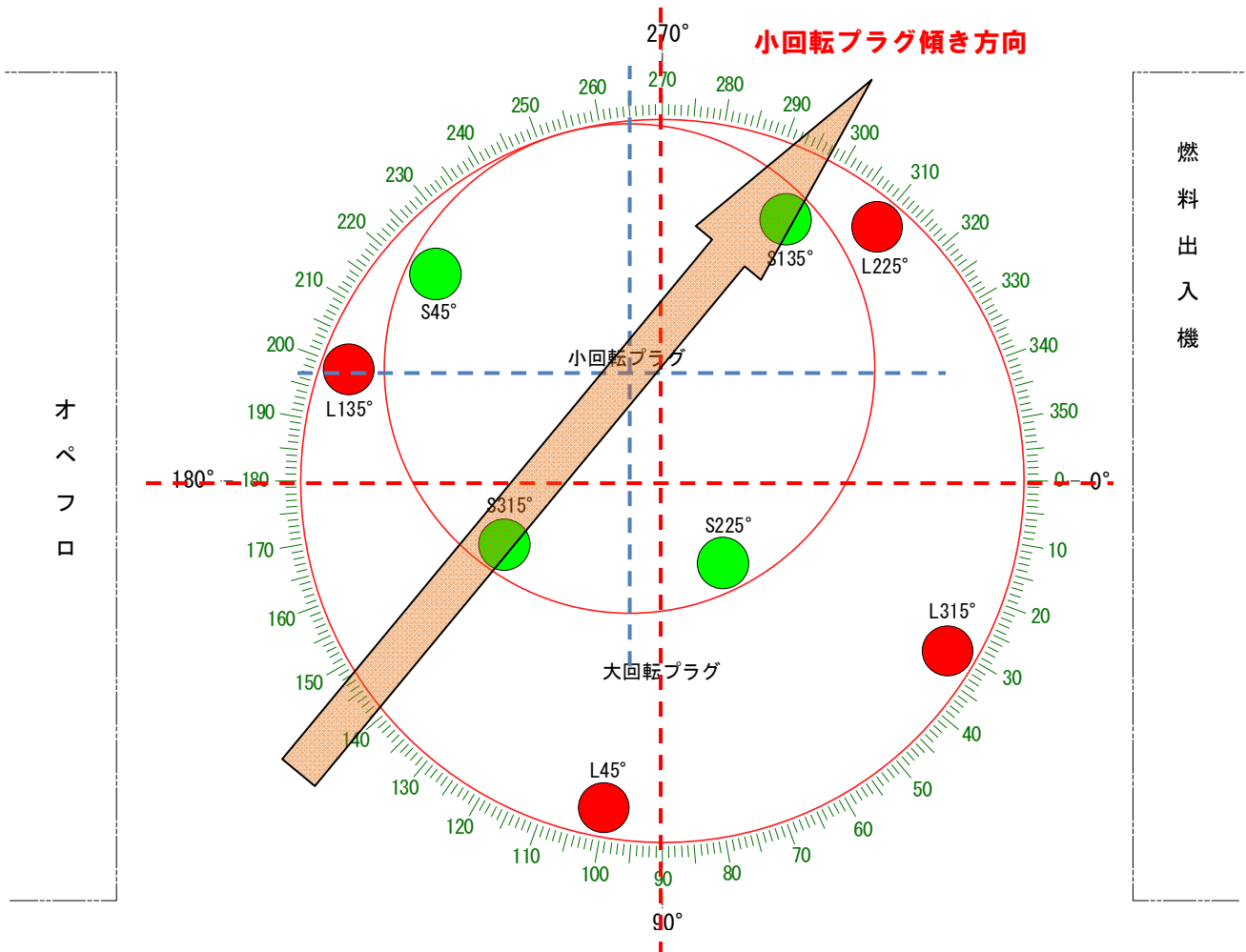


図1 小回転プラグの傾き方向

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質モル		mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	数メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
電界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の) 1	1
比誘電率 ^(b)	(数字の) 1	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束密度	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光束流	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
照射度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘着力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎平方メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
表面電位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	m ⁻¹ sA
放射強度	グレイ毎秒	Gy/s	kg ⁻¹ s ³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	′	1′=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1L=1l=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852m
バイン	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm ²)2=10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベベル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s
ストークス	St	1 St =1cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb =1cd cm ⁻² =10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトリ	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≐ (10 ⁷ /4π)A m ⁻¹

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「≐」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1フェルミ≐1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J (「15°C」カロリー) , 4.1868J (「IT」カロリー) 4.184J (「熱化学」カロリー)
ミクロン	μ	1 μ =1μm=10 ⁻⁶ m

