

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 —

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of
the Experimental Fast Reactor Joyo
- Replacement of Upper Core Structure -

伊藤 裕道 大田 克 川原 啓孝 小林 哲彦

高松 操 長井 秋則

Hiromichi ITO, Katsu OHTA, Hirotaka KAWAHARA, Tetsuhiko KOBAYASHI
Misao TAKAMATSU and Akinori NAGAI

高速炉研究開発部門
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
Sector of Fast Reactor Research and Development

May 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは国立研究開発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。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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
Institutional Repository Section,
Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department,
Japan Atomic Energy Agency.
2-4 Shirakata, 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, 2016

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 —

日本原子力研究開発機構 高速炉研究開発部門 大洗研究開発センター 高速実験炉部
伊藤 裕道*、大田 克*、川原 啓孝、小林 哲彦、高松 操、長井 秋則

(2016 年 2 月 2 日 受理)

高速実験炉「常陽」では、計測線付実験装置の不具合に起因した燃料交換機能の一部阻害に係る復旧措置の一環として、炉心上部機構交換作業を平成 26 年 3 月 24 日に開始し、同年 12 月 17 日に完了した（炉心上部機構交換作業のために一時的に取り外した回転プラグ上搭載機器及び計装ケーブル等の復旧は平成 27 年 6 月 23 日に完了）。

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ため、旧炉心上部機構引抜作業にあつては、案内スリーブとの間に蓄積したナトリウムのせん断抵抗及び案内スリーブとの干渉により、旧炉心上部機構を引き抜くことができないリスクがあつた。このため、第一段階として旧炉心上部機構ジャッキアップ試験を実施し、旧炉心上部機構を確実に引き抜ける見通しを得た上で、旧炉心上部機構収納作業に移行することとした。

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験では、旧炉心上部機構を 1000 mm 位置までジャッキアップした結果、有意なナトリウムせん断抵抗は発生しなかったことが確認された。あわせて、旧炉心上部機構と案内スリーブとの有害な干渉もなく、次のステップである旧炉心上部機構収納作業を問題なく実施できる見通しを得た。

旧炉心上部機構引抜作業では、ワイヤジャッキ治具を使用するとともに、旧炉心上部機構と案内スリーブが干渉することを想定し、その回避手順を整備した。その結果、これらの治具・手順が有効に機能し、当該作業を完遂できた。

新炉心上部機構装荷作業では、案内スリーブとの干渉により損傷等が生じないように装荷すること、及び制御棒の挿入性の観点から所定の位置に精度よく据え付けることが必要であつた。このため、装荷前に仮蓋を案内スリーブに通過させることにより装荷に必要なスペースが確保されていることを確認した。また、位置調整・揺動防止のためのガイドローラー及び所定の位置に精度よく据え付けるための拘束治具を使用した。この結果、有害な干渉がなく装荷され、要求据付精度 ± 1.02 mm に対し、 0.35 ± 0.1 mm の精度で据え付けることができた。

本作業は 30 年以上使用した原子炉容器内の大型構造物の交換作業であり、得られた経験及び知見は、「常陽」のみならずナトリウム冷却型高速炉における原子炉容器内補修技術開発に大きく資するものである。

大洗研究開発センター：〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002

※技術開発協力員

*三菱重工業株式会社

**Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast
Reactor Joyo
- Replacement of Upper Core Structure -**

Hiromichi ITO*, Katsu OHTA*, Hirotaka KAWAHARA,
Tetsuhiko KOBAYASHI, Misao TAKAMATSU and Akinori NAGAI

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

(Received February 2, 2016)

In the experimental fast reactor Joyo, as a part of the restoration work of a functional failure of fuel handling that occurred due to a trouble of a test rig, the replacement of the upper core structure (UCS) was started from March 2014, and was completed in December 2014 (Parts on the rotating plug including instrumentation cables that temporally removed for the UCS replacement were fully restored in June 2015).

Since the UCS replacement was not anticipated in the original design, and was not replaced in the past, a risk of deformation of the UCS and guide sleeve caused by shearing resistance of deposited sodium and interference with guide sleeve during removal of the UCS was considered. Therefore, a jack-up test was planned ahead of the removal of the UCS to confirm the possibility of the extraction.

In the jack-up test, the UCS was jacked-up to 1000 mm without significant sodium shearing resistance and interference. Consequently, it was confirmed that the next UCS retrieval stage can be conducted.

In the retrieval of the UCS, a procedure was prepared with the use of wire-jack equipment assuming the interference between the UCS and the guide sleeve. As a result, with the procedure and wire-jack were effectively functioned, the work was successfully completed.

In the installation of the new UCS, emphasis was placed on how to install the UCS without interference with the guide sleeve and how to precisely adjust the UCS to proper position in consideration of the control rods insertion. Therefore, a temporary plug was inserted to confirm necessary space for the UCS installation. Also, guide roller and restraining tool to precisely adjust the UCS position were applied. As a result, the UCS was installed with no significant interference, and installed with the accuracy of $0.35 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$, which satisfied the required $\pm 1.02 \text{ mm}$.

As this work was a replacement of a large component in reactor vessel serviced more than 30 years, its accumulated experience and insights are expected to ensure reliability of repair techniques in SFRs (Sodium-cooled Fast Reactors).

Keywords: Sodium-cooled Fast Reactor, Joyo, Upper Core Structure

※ Collaborating Engineer * Mitsubishi Heavy Industries Ltd.

目 次

1. 緒言	1
2. プラントの概要	2
3. 炉心上部機構交換作業の概要	7
3.1 旧炉心上部機構引抜作業の概略手順	7
3.2 新炉心上部機構装荷作業の概略手順	8
3.3 新炉心上部機構の概要	11
3.4 炉心上部機構交換作業用機材の概要	15
3.4.1 揚重設備	15
3.4.2 キャスク及びドアバルブ	16
3.4.3 仮設ピット蓋及び仮設バウンダリ（ビニルバッグ）	17
3.4.4 仮蓋	18
3.4.5 ガイドローラー	18
3.4.6 拘束治具	19
3.4.7 その他	19
4. 炉心上部機構交換作業に係るフルモックアップ試験	32
4.1 フルモックアップ試験体の概要	32
4.2 試験項目及び試験結果	33
5. 炉心上部機構交換作業結果	38
5.1 プラント状態	38
5.2 旧炉心上部機構引抜作業結果	38
5.2.1 旧炉心上部機構引抜作業の状況	38
5.2.2 旧炉心上部機構ジャッキアップ試験結果	47
5.2.3 旧炉心上部機構収納作業結果	54
5.3 新炉心上部機構装荷作業結果	58
5.3.1 新炉心上部機構装荷作業の状況	58
5.3.2 新炉心上部機構用 O リング設置作業結果	62
5.3.3 新炉心上部機構挿入作業結果	62
5.4 その他	70
5.4.1 カバーガスバウンダリの管理	70
5.4.2 作業環境線量率の挙動	70
5.4.3 旧炉心上部機構用 O リングの経年劣化評価	71
5.4.4 大型重量物等の輸送	72
6. 結言	86
謝辞	87
参考文献	87

Contents

1. Introduction	1
2. Plant description of Joyo	2
3. Outline of UCS replacement	7
3.1 Outline of removal procedure of existing damaged UCS	7
3.2 Outline of installation procedure of new UCS	8
3.3 Outline of new UCS	11
3.4 Outline of tools for UCS replacement	15
3.4.1 Hoisting tool	15
3.4.2 Cask and door valve	16
3.4.3 Temporary pit cover and temporary boundary (vinyl bag)	17
3.4.4 Temporary plug	18
3.4.5 Guide roller	18
3.4.6 Restraining tool	19
3.4.7 Others	19
4. Full mock-up test related to UCS replacement	32
4.1 Outline of Full mock-up	32
4.2 Test items and results	33
5. Results of UCS replacement	38
5.1 Plant status	38
5.2 Results of removal of existing damaged UCS	38
5.2.1 Status of removal of existing damaged UCS	38
5.2.2 Result of jack-up test	47
5.2.3 Result of retrieval of existing damaged UCS	54
5.3 Result of installation of new UCS	58
5.3.1 Status of installation of new UCS	58
5.3.2 Result of O-ring installation for new UCS	62
5.3.3 Result of insertion of new UCS	62
5.4 Other things	70
5.4.1 Management of cover gas boundary	70
5.4.2 Dose rate behavior	70
5.4.3 Aging evaluation of O-ring for existing damaged UCS	71
5.4.4 Transport of heavy equipment	72
6. Conclusion	86
Acknowledgement	87
References	87

表リスト

表 4.2.1	フルモックアップ試験の概要	34
表 5.4.1	大型重量物輸送品一覧	78

図リスト

図 2.1	プラント概念図	4
図 2.2	原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構の構造	4
図 2.3	炉心上部機構の構造及び寸法	5
図 2.4	旧炉心上部機構下端部の変形状況	6
図 3.1	炉心上部機構交換作業の概略手順	9
図 3.1.1	旧炉心上部機構引抜時に想定されるリスク	10
図 3.3.1	炉心上部機構の概略構造	12
図 3.3.2	炉心上部機構におけるカバーガスバウンダリ	14
図 3.4.1	ジャッキアップ治具の概要	20
図 3.4.2	旧炉心上部機構の引抜位置と許容荷重の関係	21
図 3.4.3	ガイド筒の概要	22
図 3.4.4	ワイヤジャッキ治具の概要	23
図 3.4.5	旧炉心上部機構収納キャスクの概要	24
図 3.4.6	新炉心上部機構装荷キャスクの概要	25
図 3.4.7	ドアバルブの概要	26
図 3.4.8	仮設ピット蓋の概要	27
図 3.4.9	ビニルバッグの概要	28
図 3.4.10	仮蓋の概要	29
図 3.4.11	ガイドローラーの概要	30
図 3.4.12	拘束治具の概要	31
図 4.2.1	作業時に生じる炉心上部機構試験体の振れ等の確認状況	36
図 4.2.2	大型重量物のハンドリング方法等の確認状況	37
図 5.2.1	旧炉心上部機構引抜作業の実績工程	39
図 5.2.2	旧炉心上部機構引抜作業の状況	40
図 5.2.3	旧炉心上部機構ジャッキアップ試験の時系列	49
図 5.2.4	0～2 mm 位置引抜時の荷重挙動	50
図 5.2.5	ナトリウム付着の状況	51
図 5.2.6	付着ナトリウムの化学成分分析結果	51
図 5.2.7	2～1000 mm 位置引抜時の荷重挙動	52
図 5.2.8	旧炉心上部機構の水平方向位置調整時の作業風景	53
図 5.2.9	旧炉心上部機構収納作業の時系列	55

図 5.2.10	旧炉心上部機構収納作業時の荷重挙動	56
図 5.2.11	ワイヤ拵替時の荷重・水平度挙動	56
図 5.2.12	旧炉心上部機構下面の観察結果	57
図 5.2.13	案内スリーブの観察結果	57
図 5.3.1	新炉心上部機構装荷作業の実績工程	59
図 5.3.2	新炉心上部機構装荷作業の状況	60
図 5.3.3	仮蓋挿入・引抜時の荷重挙動	64
図 5.3.4	仮蓋挿入前後の案内スリーブ観察結果	65
図 5.3.5	新炉心上部機構用 O リングの設置状況	66
図 5.3.6	新炉心上部機構挿入作業の時系列	67
図 5.3.7	新炉心上部機構挿入作業時の荷重挙動	68
図 5.3.8	回転プラグ上のビニルバック内を通過する新炉心上部機構の状況	69
図 5.4.1	カバーガスバウンダリの構成	73
図 5.4.2	炉心上部機構交換作業時のアルゴンガスの流れ	74
図 5.4.3	鋼製バウンダリの概要	75
図 5.4.4	旧炉心上部機構引抜作業中のエリアモニタ指示値	76
図 5.4.5	旧炉心上部機構用 O リングの外観観察結果	77
図 5.4.6	旧炉心上部機構用 O リングの断面観察結果	77
図 5.4.7	炉心上部機構交換作業用大型重量物の輸送経路	79
図 5.4.8	旧炉心上部機構収納キャスク保管用スキッドに係る積載車詳細	80
図 5.4.9	ジャッキアップ治具に係る積載車詳細	80
図 5.4.10	旧炉心上部機構収納キャスクに係る積載車詳細	81
図 5.4.11	仮設ピット蓋 (F-4) に係る積載車詳細	81
図 5.4.12	ドアバルブに係る積載車詳細	82
図 5.4.13	仮設ピット蓋 (F-2) に係る積載車詳細	82
図 5.4.14	仮設ピット蓋 (F-3) に係る積載車詳細	83
図 5.4.15	新炉心上部機構・新炉心上部機構装荷キャスクに係る積載車詳細	83
図 5.4.16	大型重量物輸送隊列	84
図 5.4.17	大型重量物輸送の様子	85

1. 緒言

高速実験炉「常陽」（ナトリウム冷却型高速炉『以下、「SFR」』）では、平成 19 年に原子炉容器内で計測線付実験装置（以下「MARICO-2」）が干渉物となる事故が発生した。炉内観察¹⁾の結果、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 本のうちのセンター孔に隣接した少なくとも 2 本の熱電対及び整流板に変形が生じていることが確認され、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た。加えて、MARICO-2 が変形し、炉心上部機構と干渉することから、燃料交換機能の一部阻害が生じていることを確認した。このため、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し、上述の機能を復旧させる必要があった。

復旧手法について検討した結果、炉心上部機構を撤去し、その撤去孔より干渉物である MARICO-2 の試料部を回収するとともに、新炉心上部機構を再装荷することが必要であることが判明した^{2), 3)}。

「常陽」では、炉心上部機構の交換及び MARICO-2 試料部の回収に必要な技術開発及びその作業手順の整備を進め、平成 26 年 5 月～12 月に炉心上部機構交換作業及び MARICO-2 試料部回収作業を完遂した。その後、炉心上部機構交換作業のために一時的に取り外していた回転プラグ上搭載機器及び計装ケーブル等の復旧を実施し、燃料交換機能の復旧を完了した。

炉心上部機構交換作業では、想定されるリスクを踏まえて、機材及び工法の概念設計を行い⁴⁾、炉外モックアップ試験⁵⁾により、これらの機材及び工法が妥当であることを確認した上で、実機作業に着手した。本報告書は、炉心上部機構交換作業により得られた経験・知見等をまとめたものである。

2. プラントの概要

高速実験炉「常陽」は、我が国で最初の SFR 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、SFR 実用化に向けた燃料・材料開発等に従事している。「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。原子炉停止時にあっては、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（通常 490±200 Pa 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 3.6 m・高さ約 10 m の円筒容器構造を有し、炉心燃料集合体等の炉心構成要素や炉内構造物（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 mm）に保持される。メンテナンス時にあっては、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 4730 mm、2870 mm であり、3200 mm の厚さを有する。大回転プラグの回転中心位置は、原子炉容器の中心位置と同じである。一方、小回転プラグの回転中心位置は、原子炉容器及び大回転プラグの中心位置から 500 mm オフセットした位置となっている。燃料交換作業は、大回転プラグと小回転プラグの回転角度を組み合わせることで、小回転プラグに設置された燃料交換孔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 2.3 参照）。炉心上部機構は、直径：最大 1345 mm、高さ：6330 mm の円筒構造であり、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))を有しており、制御棒を所定の位置に支持する。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、燃料集合体とその周辺部の集合体出口冷却材温度を測定できるようになっている。

炉内観察の結果、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本のうちのセンター孔に隣接した少なくとも 2 本の熱電対及び整流板に変形が生じていることが確認され(図 2.4 参照)、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た。加えて、MARICO-2 が変形し、炉心上部機構と干渉することから、燃料交換機能の一部阻害が生じていることを確認した。このため、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し、上述の機能を復旧させる必要があった。

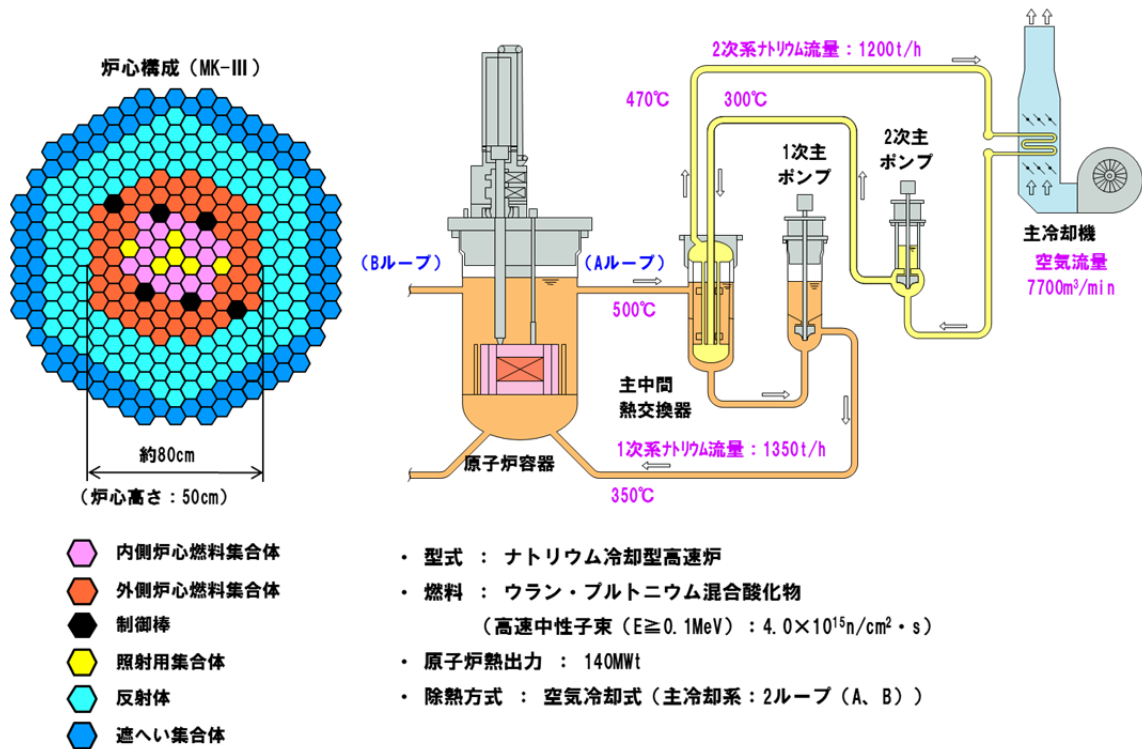


図 2.1 プラント概念図

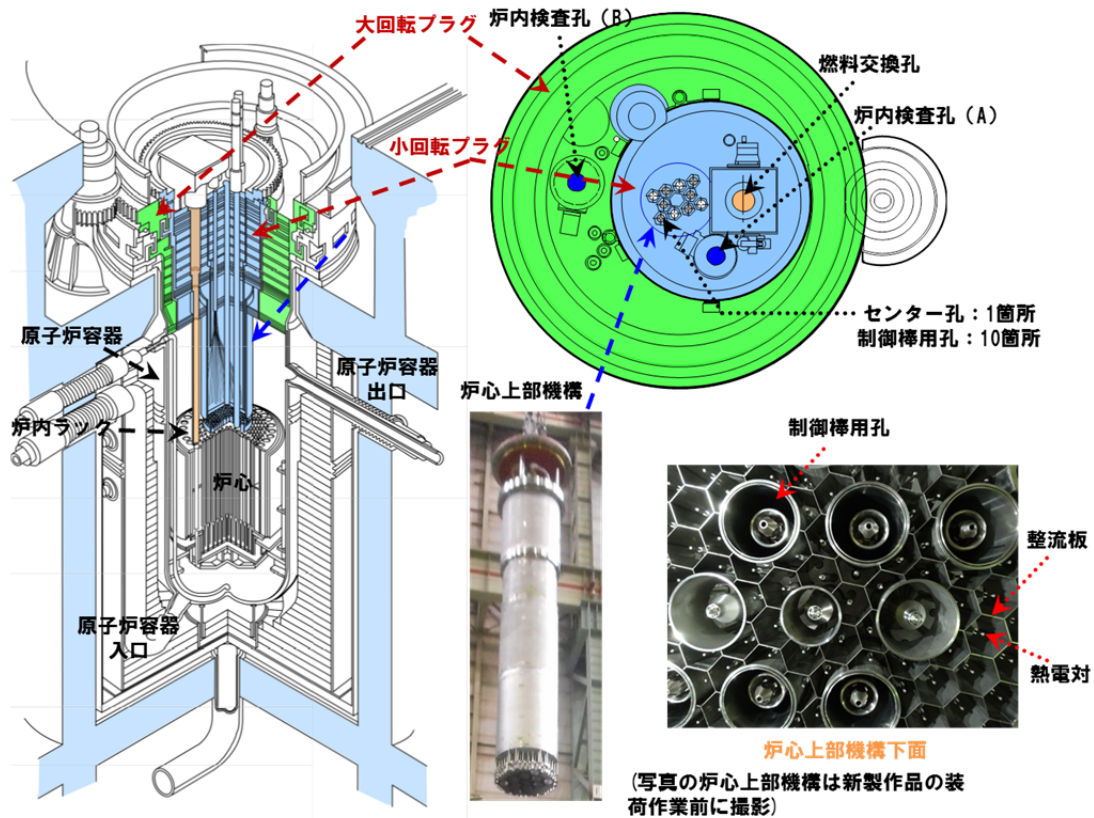


図 2.2 原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構の構造

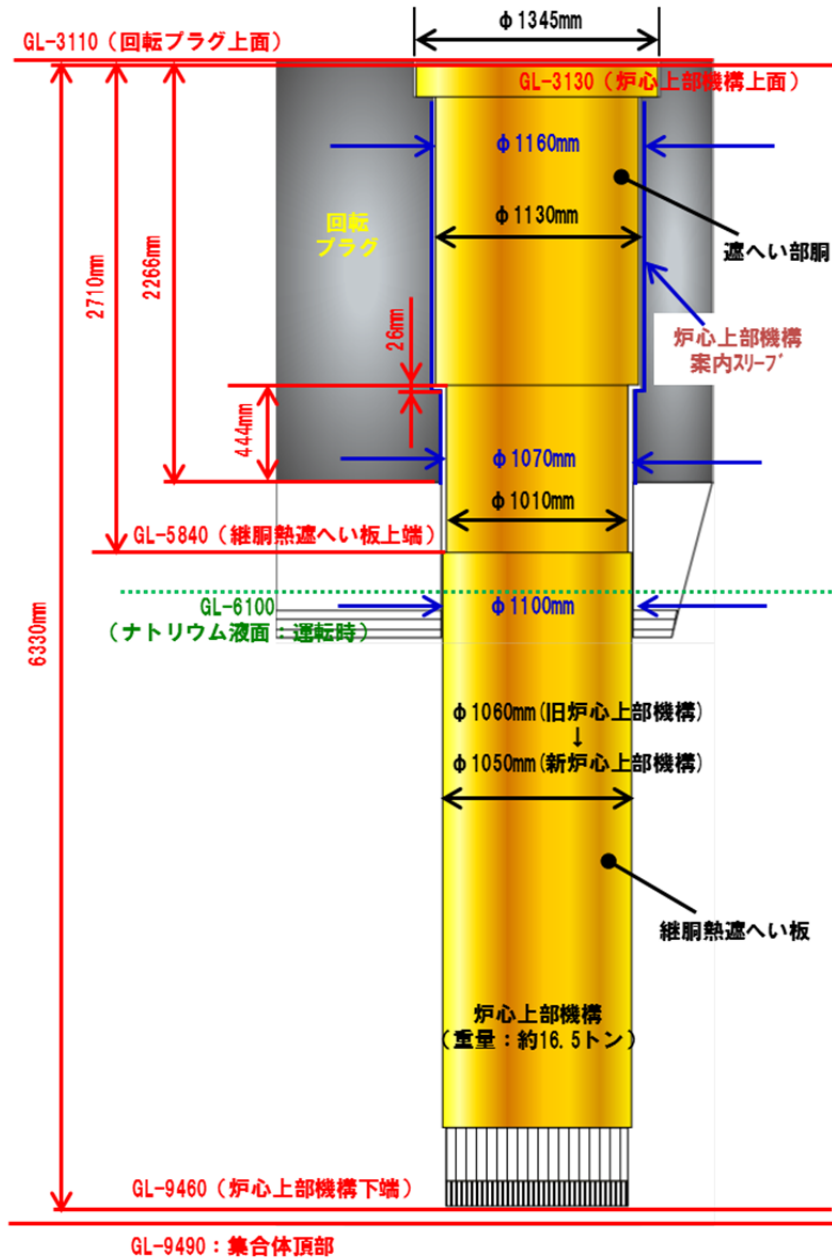


図 2.3 炉心上部機構の構造及び寸法

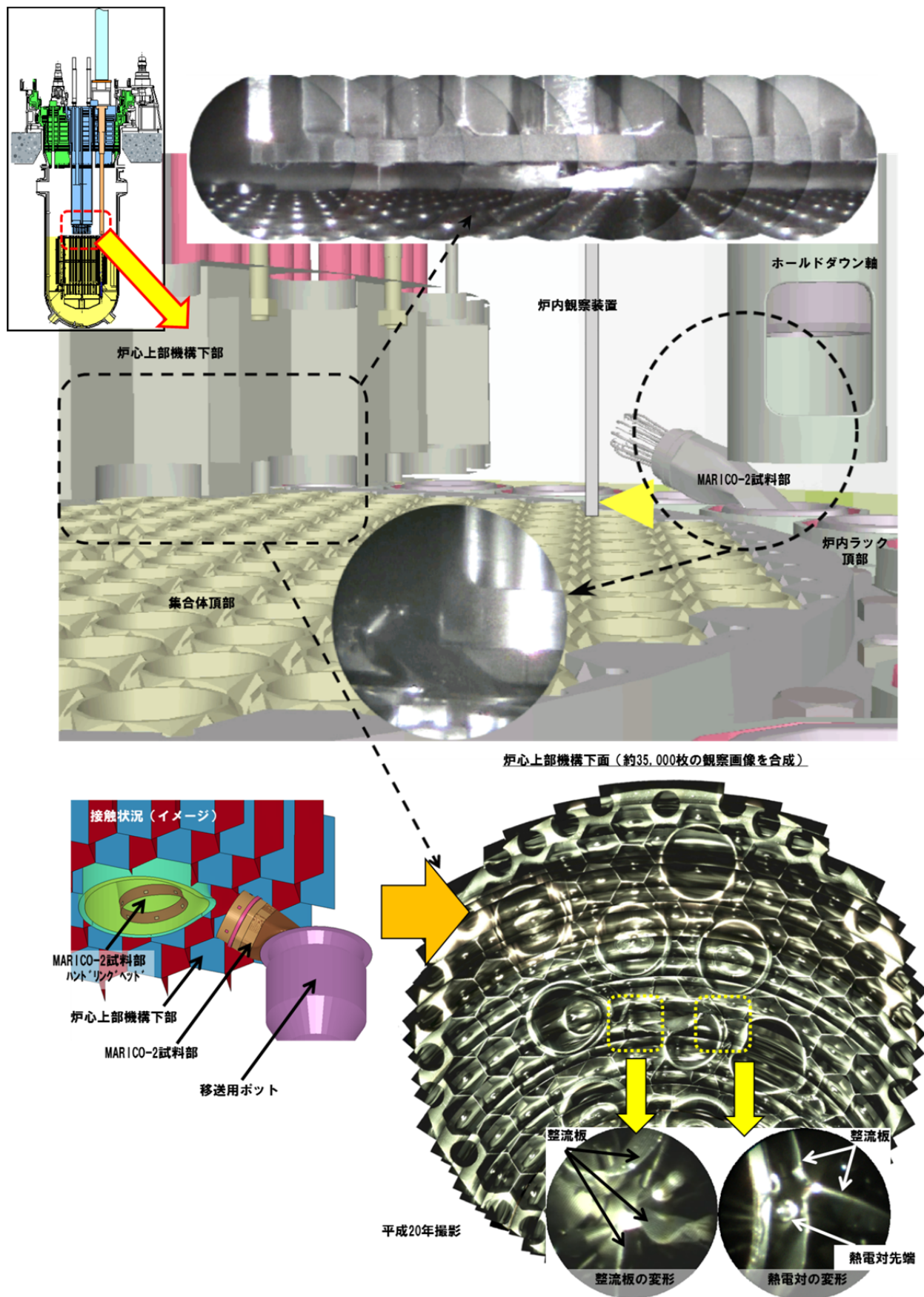


図 2.4 旧炉心上部機構下端部の変形状況

3. 炉心上部機構交換作業の概要

炉心上部機構交換作業の概略手順を図 3.1 に示す。炉心上部機構交換作業は、旧炉心上部機構引抜作業及び新炉心上部機構装荷作業に大別される。各作業の概要を以下に示す。

3.1 旧炉心上部機構引抜作業の概略手順

「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ため、旧炉心上部機構引抜作業にあつては、以下の事象により、当該作業の継続が困難となるリスクが懸念された。

- ・ 旧炉心上部機構が挿入されている案内スリーブは、肉厚 5 mm の薄肉構造物である。30 年以上の使用により、旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップが、蒸着ナトリウムにより閉塞されている場合には、旧炉心上部機構引抜時に当該ナトリウムをせん断することによる抵抗（以下、「ナトリウムせん断抵抗」）が生じる。過大なナトリウムせん断抵抗は、案内スリーブに変形及び損傷（以下、「変形等」）を生じさせるおそれがある。
- ・ 旧炉心上部機構太径部の外径が $\phi 1060$ mm（設計値）である一方で、案内スリーブ細径部の内径は $\phi 1070$ mm（設計値）であり、旧炉心上部機構引抜時のギャップはノミナルで片側 5 mm となる。一方、旧炉心上部機構は長さ 6330 mm 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、旧炉心上部機構と案内スリーブが干渉し、抵抗が生じる可能性がある。過大な干渉抵抗は、旧炉心上部機構に変形等を生じさせるおそれがある。

上記リスクの概念図を図 3.1.1 に示す。これらの事象を防止するためには、引抜作業中の旧炉心上部機構の水平度や水平方向位置等を監視し、旧炉心上部機構を適切な状態に維持すること、さらに、ナトリウムせん断抵抗もしくは干渉抵抗が発生した場合にあつても、旧炉心上部機構等を変形させないような荷重管理が必要となる。このため、旧炉心上部機構引抜作業においては、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に相当する 1000 mm 位置までの引抜作業と 1000 mm 位置以降の引抜作業を区分し、前者を「旧炉心上部機構ジャッキアップ試験」、後者を「旧炉心上部機構収納作業」とした。

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験では、ジャッキアップ治具により、旧炉心上部機構を 1000 mm 位置まで引き抜くことで、以下のデータを取得し、確実に引き抜くことができる見通しを得ることを目的としている。また、ホールドポイントとして旧炉心上部機構収納作業への移行可否を判断することで、当該作業が継続困難となるリスクの軽減策とした。

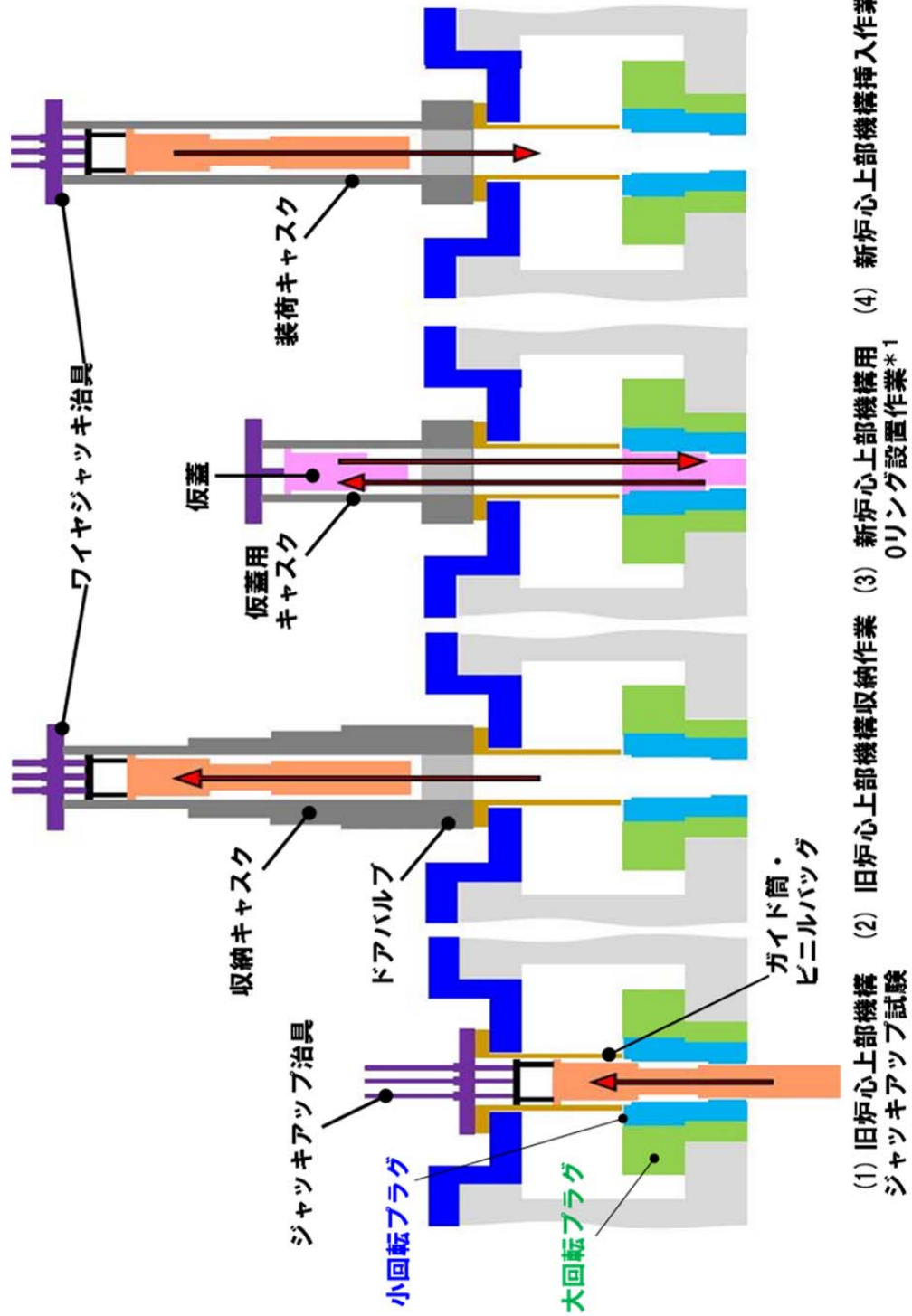
- ・ ナトリウムせん断抵抗に係るデータ取得（発生有無確認／挙動確認／旧炉心上部機構引抜作業への影響確認等）
- ・ 旧炉心上部機構引抜手順の妥当性を検証するためのデータ取得（干渉抵抗発生有無確認／挙動確認／旧炉心上部機構引抜作業への影響確認／旧炉心上部機構引抜位置最適化データ取得等）

旧炉心上部機構収納作業では、ワイヤジャッキ治具により、旧炉心上部機構を収納キャスク

に収納する。その後、収納キャスクを建家外に搬出し、原子炉建家・原子炉付属建家の北側に隣接する旧廃棄物処理建家内まで輸送し、保管する。

3.2 新炉心上部機構装荷作業の概略手順

2.にて述べたように、炉心上部機構は、カバーガスバウンダリの一部を構成する。炉心上部機構は、2重Oリング構造を有しており、新炉心上部機構を装荷するためには、当該Oリングを交換する必要がある。このため、新炉心上部機構を案内スリーブ内に挿入する前に、遮へい体を設けた仮蓋を挿入し、炉内からの放射線を遮へいした状態で、新炉心上部機構用Oリングを設置することとした。また、仮蓋を挿入することにより、新炉心上部機構の装荷に必要なスペースが確保されていることを確認することとした。以上から、新炉心上部機構装荷作業は、仮蓋の挿入、新炉心上部機構用Oリング設置、仮蓋の引抜、新炉心上部機構挿入の手順とし、仮蓋の挿入、新炉心上部機構用Oリング設置及び仮蓋の引抜までを「新炉心上部機構用Oリング設置作業」、新炉心上部機構の案内スリーブ内への挿入（検査、後片付けまで含む）を「新炉心上部機構挿入作業」と区分した。

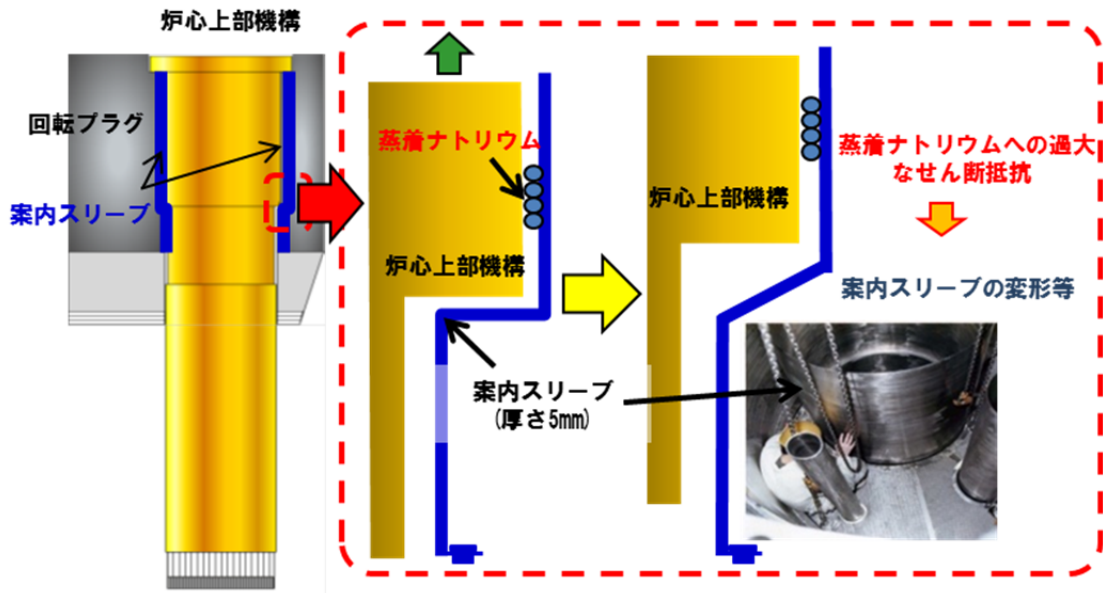


旧炉心上部機構引抜作業

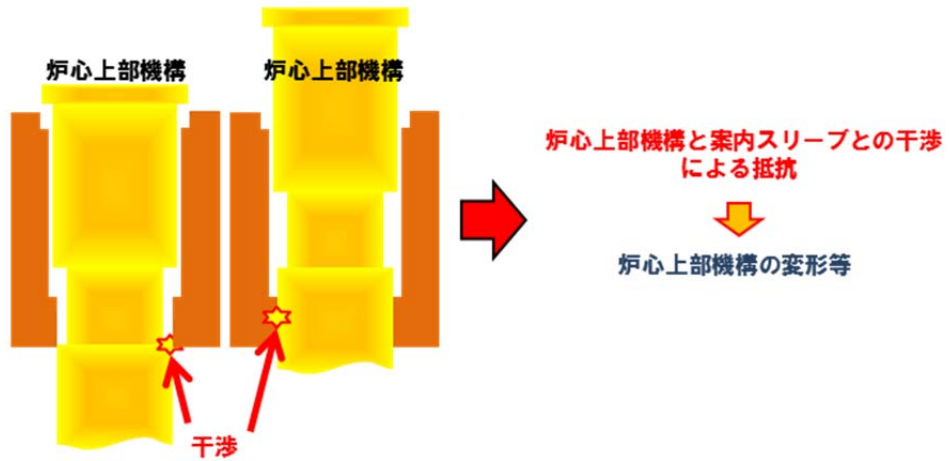
新炉心上部機構装荷作業

*1：仮蓋を挿入した状態で
0リング設置作業を実施

図 3.1 炉心上部機構交換作業の概略手順



蒸着ナトリウムのせん断抵抗による案内スリーブの変形等



炉心上部機構と案内スリーブの干渉による炉心上部機構の変形等

図 3.1.1 旧炉心上部機構引抜時に想定されるリスク

3.3 新炉心上部機構の概要

炉心上部機構は、基本機能として、放射線遮へい機能・熱遮へい機能・カバーガスバウンダリ機能が要求される。

新炉心上部機構の概略構造⁸⁾を図 3.3.1 に示す。新炉心上部機構の主要寸法・構造は、基本的に旧炉心上部機構と同じであり、上述した基本機能について同様の機能を有する。設計・製作にあたり、既設品から変更した主な点は下記とおりである。

(1) 据付性向上

新炉心上部機構の据付時において、回転プラグ内に挿入する際のギャップに余裕代を設けるため、継胴熱遮へい板外径を 1060 mm から 1050 mm に小径化するとともに、継胴熱遮へい板の上端・下端部にテーパを設けた。

(2) 照射機能拡大のためのセンター孔の拡大

センタープラグ用貫通孔内径を大きくし、 $\phi 150$ mm までの照射装置を装荷可能とした。

(3) 不要な貫通孔の削除

カバーガスバウンダリの安全性・信頼性向上のため、過去の使用実績を踏まえ、不要な貫通孔を削除した。なお、原子炉容器内のナトリウム流況に影響が生じないように、整流板については、既設品の形状を踏襲している。

また、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、かつ、②集合体の出口冷却材温度の測定を正しく行う機能が求められている。炉心上部機構は、貫通孔に制御棒駆動機構及び上部案内管を保持することで上記①の要求機能に対応している。また、炉心上部機構の下部に、整流板及び集合体出口冷却材温度測定用熱電対を設けることで上記②の要求機能に対応している。なお、炉心上部機構は、制御棒駆動機構及び上部案内管を保持する貫通孔以外に、センタープラグ・ダミープラグ・熱電対プラグ・埋設熱電対プラグを装荷する貫通孔等を有している。カバーガスバウンダリは、各貫通孔にプラグ等を装荷することで確保される(図 3.3.2 参照)。

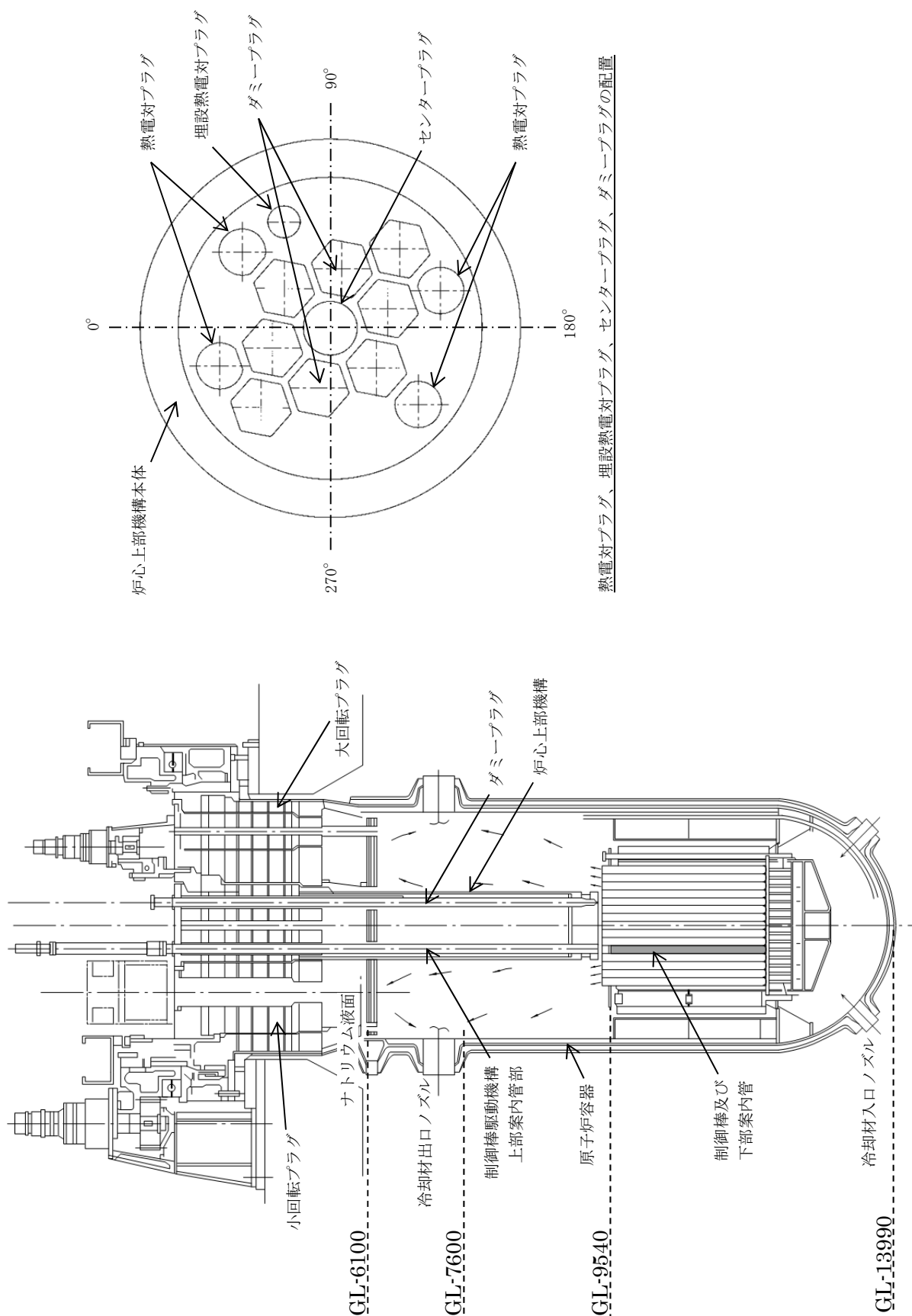


図 3.3.1 炉心上部機構の概略構造 (1/2)

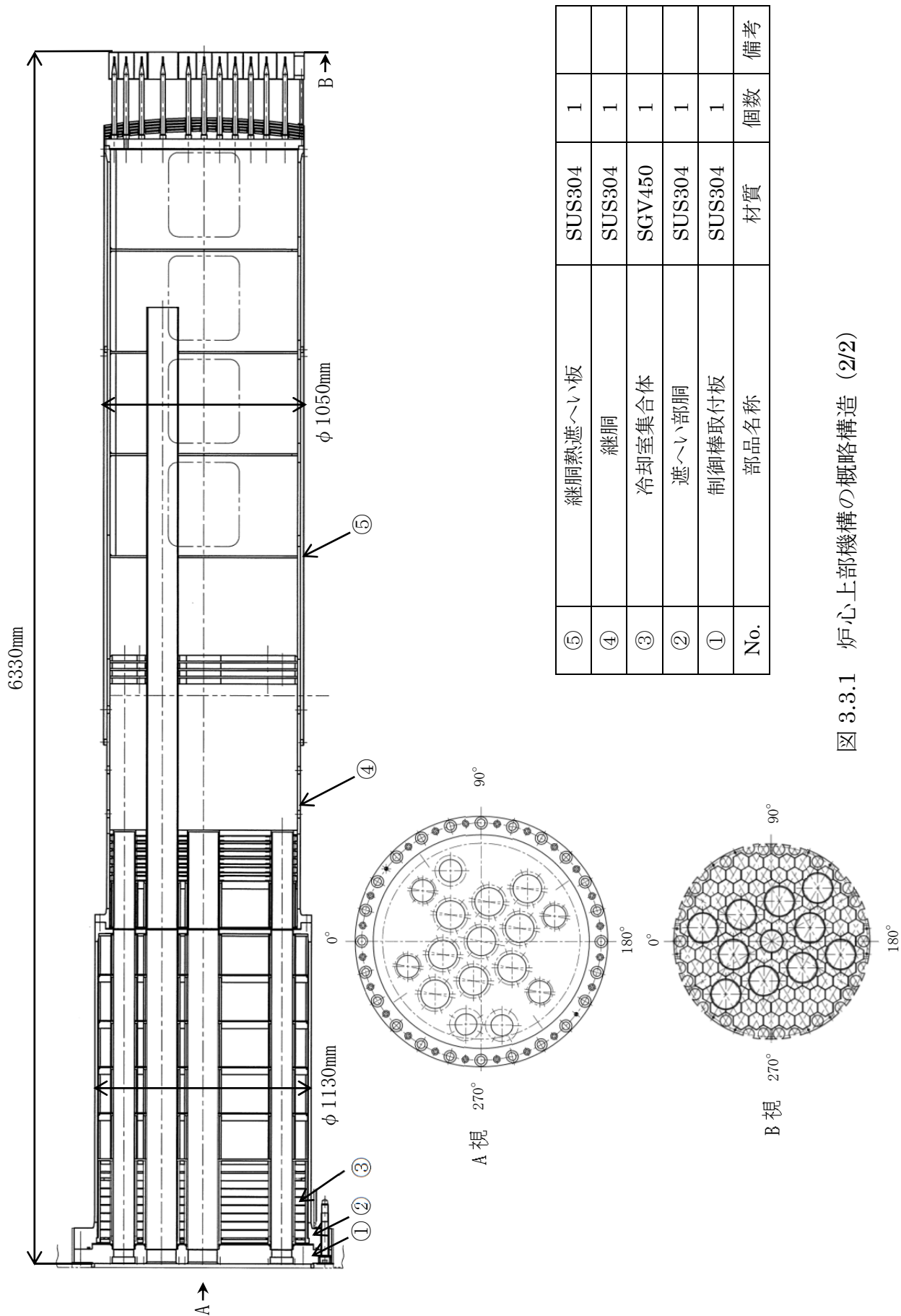


図 3.3.1 炉心上部機構の概略構造 (2/2)

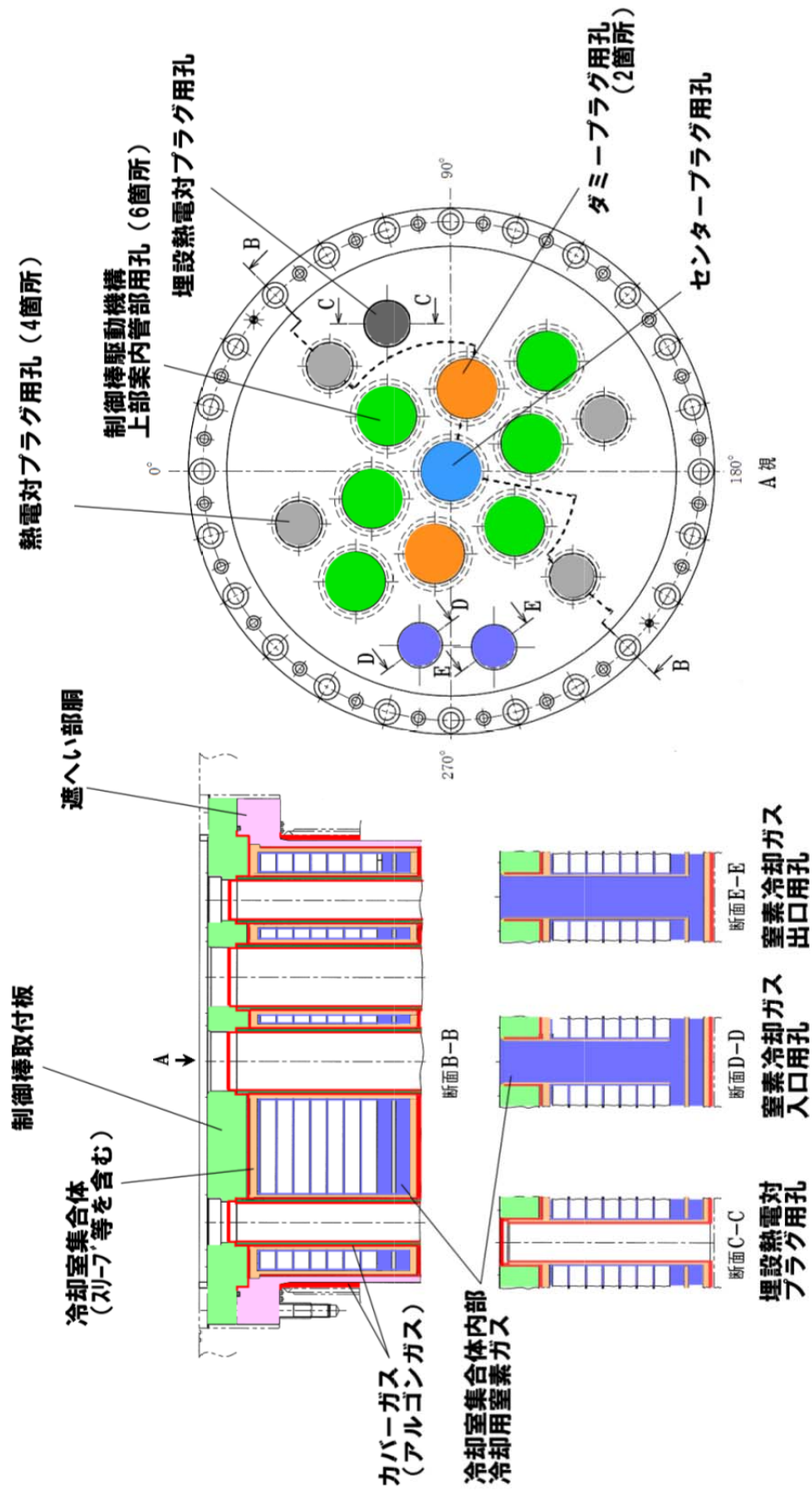


図 3.3.2 炉心上部機構におけるカバーガスバウンダリ

3.4 炉心上部機構交換作業用機材の概要

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験、旧炉心上部機構収納作業、新炉心上部機構据付作業時の主要機材である揚重設備（ジャッキアップ治具／ワイヤジャッキ治具）、キャスク、ドアバルブ、仮設ピット蓋、仮設バウンダリ（ビニルバッグ）、仮蓋、ガイドローラー、拘束治具等の概要を以下に示す。

3.4.1 揚重設備

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験（旧炉心上部機構の 0～1000 mm 位置引拔）では、揚重設備に高精度な水平度管理及び荷重管理が要求される。一方、旧炉心上部機構収納作業では、旧炉心上部機構をキャスク内に収納するため、旧炉心上部機構を 1000 mm 位置から約 12000 mm 位置まで引き抜くストロークを確保する必要がある。これらの要求事項に対応するため、ジャッキアップ試験時に使用するジャッキアップ治具と、その後の引抜に対応するワイヤジャッキ治具を設計・製作した。

(1) ジャッキアップ治具⁵⁾

ジャッキアップ治具は、3 本のネジジャッキを円周方向均等に配置した 3 点支持構造を有し、吊蓋を介して旧炉心上部機構に接続される（図 3.4.1 参照）。吊蓋と炉心上部機構は吊ボルトにより接続される（ワイヤジャッキ治具を用いる場合も同様）。旧炉心上部機構のジャッキアップにあたっては、各ネジジャッキを同時に動作させることを基本とするが、必要に応じて、独立して動作させることも可能である。各ネジジャッキを独立して動作させることにより、傾き及び荷重の均等化処置（水平度調整により、ネジジャッキの同時動作のズレ等により生じる傾き及び各ネジジャッキへの荷重の均等化）を実施できるようにしている。ジャッキアップ中の旧炉心上部機構の水平度・荷重は、吊蓋上に設置された水準器、3 本のネジジャッキに設置されたロードセルにより計測・監視される。3 本のネジジャッキ Z1、Z2、Z3 軸の配置は図 3.4.1 に示すとおりであり、後述するワイヤジャッキ治具の場合も同じである。過大なナトリウムせん断抵抗の発生や旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉によりロードセルに偏荷重が発生した場合は、許容荷重を超過しないよう運用することで、旧炉心上部機構等の変形・損傷を防止する。当該許容荷重は、炉外モックアップ試験により、旧炉心上部機構と案内スリーブの相対位置に応じて、7060 N、10690 N、16965 N とした（図 3.4.2 参照）。

ジャッキアップ治具はガイド筒上面に設置される。ガイド筒の概要を図 3.4.3 に示す。ジャッキアップ治具は、ガイドピン及びジャッキ台固定ボルトによりガイド筒に設置され、2 重 O リングにより、ガイド筒との間がシールされる。ガイド筒には水平方向位置調整用押しボルト（合計 8 箇所）が設けられており、旧炉心上部機構と案内スリーブが干渉した場合は、当該ボルトにより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・ジャッキアップ治具の偏心を是正する。また、ガイド筒は、旧炉心上部機構の 1000 mm 位置まで引抜後、旧炉心上部機構を一時的に保持するための保持サポートを有する（合計 4 箇所）。さらに、ガイド筒にはインフラートシール（2 重）が設置されており、揚重設備をジャッキアップ治具からワイヤジャッキ治具に変更する際のカバーガスバウンダリとしても機能する。ガ

イド筒内部は、炉心上部機構交換作業時においてアルゴンガス置換されるが、当該インフラートシールにより、ガイド筒内部上方を独立して隔離し、空気置換することが可能である。空気置換後、ガイド筒に設けたアクセス用マンホールを開放し、ジャッキアップ治具からワイヤジャッキ治具へ揚重設備の変更を実施する。揚重設備変更後、ガイド筒内部上方を再度アルゴンガス置換し、旧炉心上部機構引抜作業は継続される。

(2) ワイヤジャッキ治具

ワイヤジャッキ治具の概要を図 3.4.4 に示す。ワイヤジャッキ治具は、ジャッキアップ治具と同様に、3 本のワイヤジャッキを円周方向均等に配置した 3 点支持構造を有する。各ワイヤジャッキは、ワイヤジャッキ本体、上部・下部クランプ、ワイヤ巻取装置、油圧ユニット、吊上げ架台等により構成されている。ジャッキは、1 動作あたり 300 mm のストロークを有し、クランプの開閉およびジャッキの伸縮を繰り返すことによって、旧炉心上部機構を 1000 ～11426 mm 位置まで、及び新炉心上部機構を 11593 ～0 mm（着座）まで取り扱う構造となっている。

旧炉心上部機構引抜作業においては、ジャッキアップ治具を併用するのに対し、新炉心上部機構挿入作業においては、新炉心上部機構の外径を小さくする設計変更により、許容水平度が大きくなったため、装荷作業全体をワイヤジャッキ治具で実施することとした。

旧炉心上部機構収納作業及び新炉心上部機構挿入作業にあたっては、各ワイヤジャッキを同期させることを基本とするが、必要に応じて、各ワイヤジャッキを独立して制御することにより傾きを調整できるようにしている。また、ジャッキアップ治具と同様に、水準器とロードセルにより水平度・荷重*が計測・監視される。水平度は、許容水平度（ 0.178° （3.11 mm/m））に対して、 0.120° （2.10 mm/m）以内に制御する。許容荷重は、旧炉心上部機構引抜時においては、旧炉心上部機構下端部が案内スリーブ細径部上端を通過する 4104 mm 位置までは、ジャッキアップ試験に引き続き 16965 N とした。一方、新炉心上部機構挿入時においては、開始高さの 11593 mm 位置から新炉心上部機構下端部が案内スリーブ細径部上端に到達する 4390 mm 位置までは 8629 N、新炉心上部機構の $\phi 1050$ mm 部が案内スリーブ細径部上端に到達する 4390～3990 mm 位置は 10689 N、それ以降の 3990～0 mm（着座）は 16867 N とした。

*：引抜時：自重に付加される荷重として検知、挿入時：自重から軽減される荷重として検知

3.4.2 キャスク及びドアバルブ

旧炉心上部機構収納キャスクの概要を図 3.4.5 に示す。旧炉心上部機構収納キャスクは重量約 65 トン（下蓋含む）、内径 1404 mm、全長 7715 mm（下蓋含む）、幅 2540 mm の円筒型炭素鋼製容器であり、内部に引き抜かれた旧炉心上部機構を収納するとともに、引抜完了後は保管容器として使用される。

旧炉心上部機構収納キャスクについては、原子炉容器内の線量率測定⁹⁾に基づき評価した旧炉心上部機構の表面線量率分布に基づき、キャスク表面線量率が 1 mSv/h を下回る遮へい厚さ（最大 270 mm）を確保しつつ、「常陽」格納容器内旋回クレーンでのハンドリングが可能な重

量とするために、表面線量率に応じて4段階の遮へい厚さとした。また、「常陽」格納容器内でのキャスク立起しを安全かつ効率的に実施するため、反転架台及び吊天秤を有している。

新炉心上部機構装荷キャスクの概要を図 3.4.6 に示す。新炉心上部機構装荷キャスクは、重量約 45 トン（新炉心上部機構含む）、内径 1400 mm、全長 7465 mm、幅 2540 mm の円筒型炭素鋼製容器である。工場より出荷された新炉心上部機構を「常陽」まで輸送するための輸送容器としても使用される。また、「常陽」において上部案内管を新炉心上部機構に装荷するため、一時的に吊蓋を撤去することが可能な構造となっている。さらに、反転架台及び吊天秤を旧炉心上部機構収納キャスクと共用できるようになっている。

ドアバルブの概要を図 3.4.7 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を有しているとともに、旧炉心上部機構収納キャスク底部開口部の下蓋を操作する機構を有する。また、ゲートバルブ～下蓋間の雰囲気空気を空気／アルゴンガスに置換するための給排気ポートを有している。旧炉心上部機構収納作業後に下蓋は旧炉心上部機構収納キャスクに固定され、キャスク（バウンダリ）の一部となる。下蓋がキャスクに固定された後にあっても、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。なお、新炉心上部機構装荷キャスクについては、ドアバルブへの据付後にキャスク内部をアルゴンガス置換することが可能であることから、ドアバルブでの下蓋操作は、旧炉心上部機構引抜キャスクについてのみ行われる。旧炉心上部機構引抜キャスクと同様に、旧炉心上部機構の表面線量率分布に基づき、最大 270 mm の遮へい厚さを有している。

3.4.3 仮設ピット蓋及び仮設バウンダリ（ビニルバッグ）

仮設ピット蓋の概要を図 3.4.8 に示す。仮設ピット蓋は 4 組（F-2～5）で構成され、キャスク等の交換作業用機材の据付ベースとして、炉上部に設置される。仮設ピット蓋は、旧炉心上部機構収納作業等に必要な揚程を確保するため、オフセット構造を有する（上面レベル：GL+400 mm（中央部）／GL+1000 mm（中央部以外））。炉心上部機構の真上に設置される仮設ピット蓋（F-3）には、炉心上部機構を通過させるための貫通孔が設けられている。また、キャスク、ドアバルブと同様に、旧炉心上部機構の表面線量率より、設置位置に応じて最大で鉄 100 mm＋コンクリート 600 mm の遮へい厚さを有し、炉心上部機構及び炉内からの放射線を遮へいする。

炉心上部機構交換作業では、小回転プラグとガイド筒の間に、仮設カバーガスバウンダリ設備としてビニルバッグを使用した。ビニルバッグの概要を図 3.4.9 に示す。ビニルバッグは、小回転プラグ上に設置された取付金物とガイド筒下部に設置された取付治具により接続され、炉心上部機構交換作業中のカバーガスバウンダリを構成する。ビニルバッグにはグローブ用ポート、治具類搬出入用ポート、ビデオスコープ挿入用ポートが設けられ、ビニルバッグを介した作業や物品の出し入れ及びビニルバッグ内の観察が可能な構造となっている。

ビニルバッグの内部圧力は、ビニルバッグに設けたアルゴンガスの給排気ラインにより制御される。なお、ビニルバッグは、炉心上部機構交換作業中に旧炉心上部機構及び原子炉容器内からのふく射熱によるビニルバッグ昇温を抑制するための冷却ラインを有する。ビニルバッグ冷却用のアルゴンガスは、ビニルバッグ上部の取付治具に接続された冷却ラインにより、ビニ

ルバッグ内に供給される。また、旧炉心上部機構収納作業時には、旧炉心上部機構とビニルバッグの接触を防止するため、ビニルバッグ内側に防護板を設置している。当該防護板は、治具類搬出入ポートより搬出入され、冷却用アルゴンガスの流路形成及びふく射熱によるビニルバッグ昇温抑制の役割も果たしている。

3.4.4 仮蓋

仮蓋の概要を図 3.4.10 に示す。仮蓋は、炉心上部機構案内スリーブ内に挿入することにより、新炉心上部機構の装荷に必要なスペースが確保されていることを確認するとともに、新炉心上部機構用 O リングを設置する際の炉内からの放射線を遮へいすることを目的として使用される。仮蓋は、太径部外径 $\phi 1140$ mm 及び細径部外径 $\phi 1050$ mm の胴を有し、胴下端には、案内スリーブに蒸着ナトリウムが付着していた場合に搔き落とすための刃が設置されている。また、仮蓋挿入後に新炉心上部機構用 O リングを設置するため、仮蓋上部に O リング把持部を設けるとともに、胴部に遮へい体を設け、当該 O リング設置作業時の線量率を低減する。仮蓋の挿入・引抜作業では仮蓋用キャスクを使用し、挿入・引抜作業時の水平度監視のため、仮蓋には水準器が設けられている。

胴の太径部外径 $\phi 1140$ mm は、炉心上部機構案内スリーブの太径部内径 $\phi 1160$ mm に対し、10 mm の蒸着ナトリウム堆積を考慮するとともに、新炉心上部機構の遮へい部胴外径 $\phi 1130$ mm に対して 10 mm（片側 5 mm）の裕度を確保するように考慮して設定したものである。

また、細径部外径は、新炉心上部機構の下部側の最大径となる継胴熱遮へい板外径と同じ $\phi 1050$ mm としている。これは、旧炉心上部機構の引き抜き時に、継胴熱遮へい板（旧炉心上部機構の外径は $\phi 1060$ mm）が案内スリーブ細径部の内径 $\phi 1070$ mm を通過するため、 $\phi 1060$ mm のスペースが確保されていると判断できることから、仮蓋と案内スリーブが干渉するリスクを低減するために新炉心上部機構と同じ外径としたものである。

搔き落とし刃（材質 SUS304）は、太径部及び細径部の下端全周に設置し、取り外しが可能な構造とした。仮蓋太径部下端には、 60° 及び 20° の領域を搔き落とす部分刃を設けた。また、当該部分刃によるナトリウムを搔き落としが十分でない場合に備えて、オプション刃として、 4° 及び 1° の領域を搔き落とす部分刃も準備し、必要に応じて、交換できる構造としている。

3.4.5 ガイドローラー

ワイヤジャッキによる新炉心上部機構の挿入中は、ワイヤジャッキの特性により新炉心上部機構が揺動することが想定される。さらに、新炉心上部機構挿入中の 6145 ～4104 mm 位置では許容水平度が小さいため、ワイヤジャッキによる揺動等により、新炉心上部機構と案内スリーブが干渉するおそれがある。干渉が発生した場合の荷重は、ワイヤジャッキの荷重インターロックにより許容値に対し十分な裕度をもって緩和されるが、ワイヤジャッキによる新炉心上部機構の揺動防止、干渉発生回避及び水平位置調整のための対策として、ガイドローラーを設置することとした。ガイドローラーは、許容水平度の小さい上記の範囲を包絡する 6245 ～940 mm 位置の範囲で使用することとした。

ガイドローラーの概要を図 3.4.11 に示す。ガイドローラーは、モックアップ試験の結果を踏

まえて、小回転プラグに 3 箇所設置し、新炉心上部機構挿入時の揺動防止及び干渉発生時の回避操作が可能な構造とした。また、ガイドローラーは、仮蓋挿入・引抜時にも使用した。

3.4.6 拘束治具

新炉心上部機構は、制御棒を炉内へ挿入する機能を確保するために、所定の位置に据え付けられる必要がある。新炉心上部機構の据付位置は、制御棒全 6 体における上部案内管（炉心上部機構側）と下部案内管（炉心側）の芯ズレ量を検討し、その芯ズレ量が最小となる位置（180° 方向：0.87 mm、270° 方向：1.37 mm）を設定し、要求据付精度を±1.02 mm とした。この精度内に新炉心上部機構を装荷するため、拘束治具を使用した。拘束治具の概要を図 3.4.12 に示す。拘束治具は、ガタが実測値で約 0.77 mm（設計値（最大）：0.85 mm）であり、新炉心上部機構の挿入作業時において、制御棒取付板のフランジボルト孔がガイドボルト先端を通過した後、同フランジボルト孔に設置される。これにより、新炉心上部機構の据付位置が±約 0.77 mm（実測値）の精度で制限され、要求据付精度を満足する。

3.4.7 その他

(1) 仮設架台

仮設ピット蓋の上側には、キャスク等の交換作業用機材を取り扱うための仮設架台が設置される。仮設架台は、キャスクをドアバルブ上まで搬入する方向のみ追加設置が可能な構造としている。仮設架台により、キャスク上部へのワイヤジャッキ設置・取扱等が可能となる。

(2) 観察治具

旧炉心上部機構の引抜時における炉心上部機構と案内スリーブの状況を確認するため、ビデオスコープを用いた嵌合部観察治具⁶⁾を使用した。嵌合部観察治具は、仮蓋の挿入前後の案内スリーブ観察にも使用した。

また、旧炉心上部機構引抜後、旧炉心上部機構下面の状況及び案内スリーブ側の状況を確認するため、耐放射線カメラ⁶⁾を使用した。

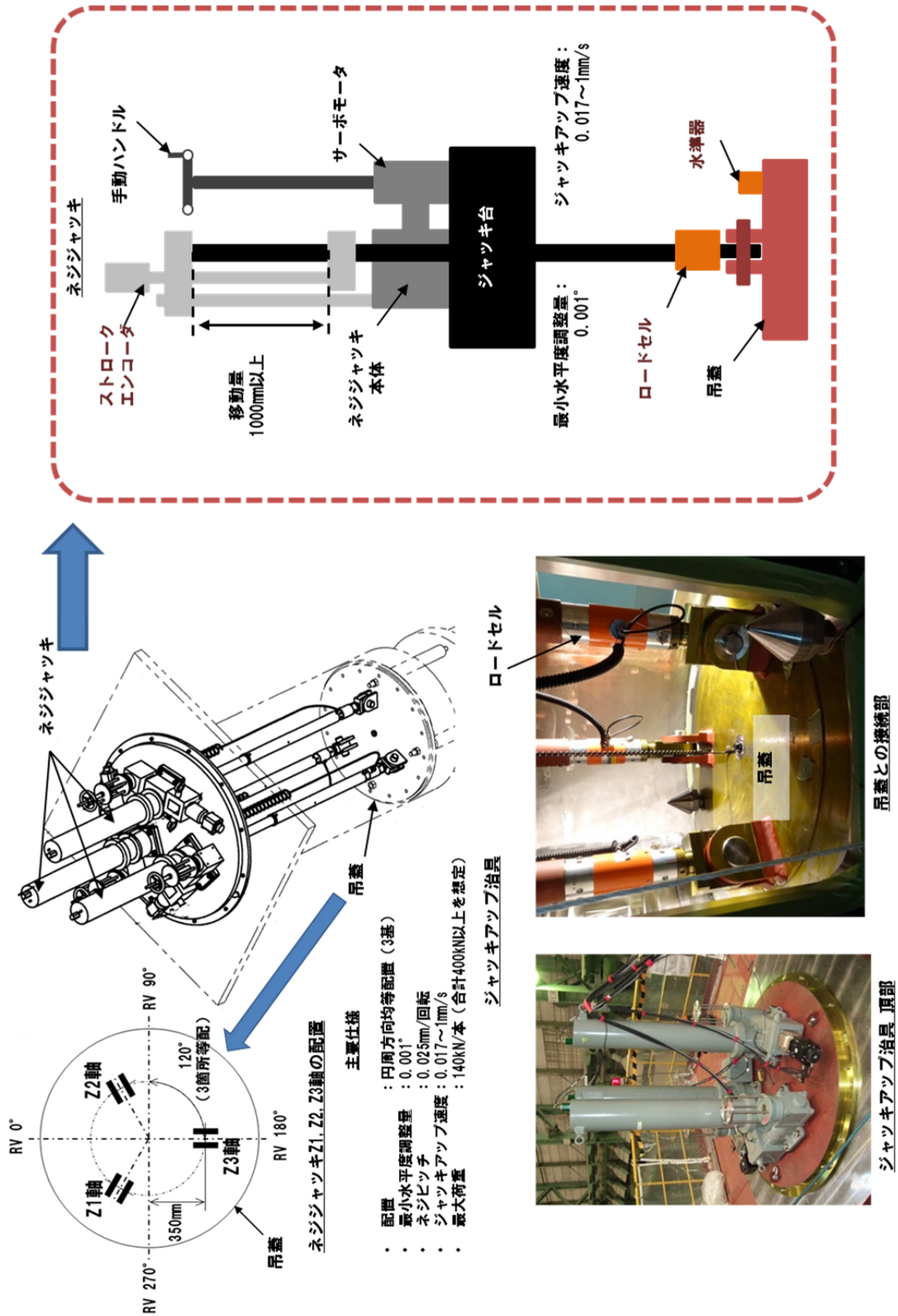


図 3.4.1 ジャッキアップ治具の概要

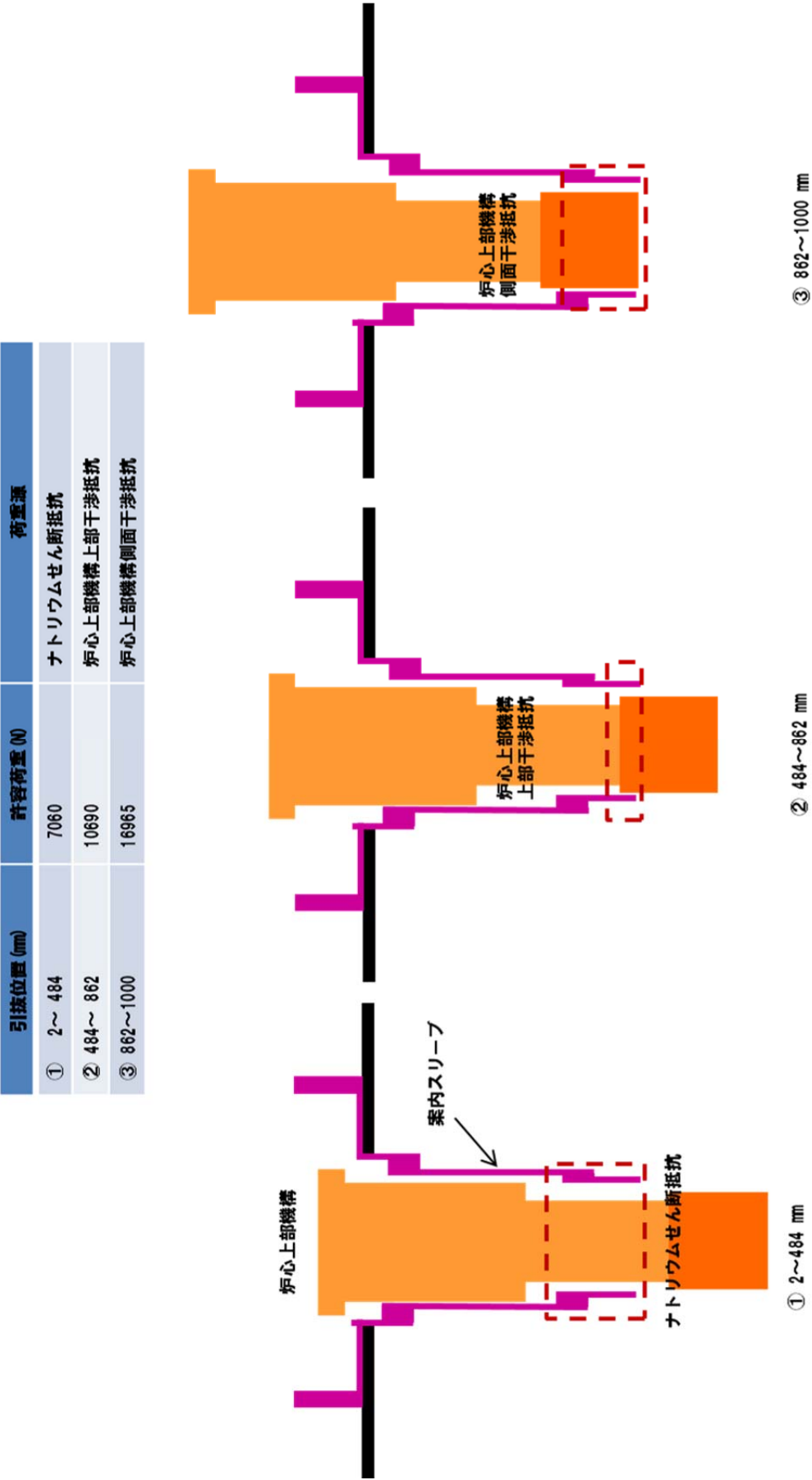


図 3.4.2 旧炉心上部機構の引抜位置と許容荷重の関係

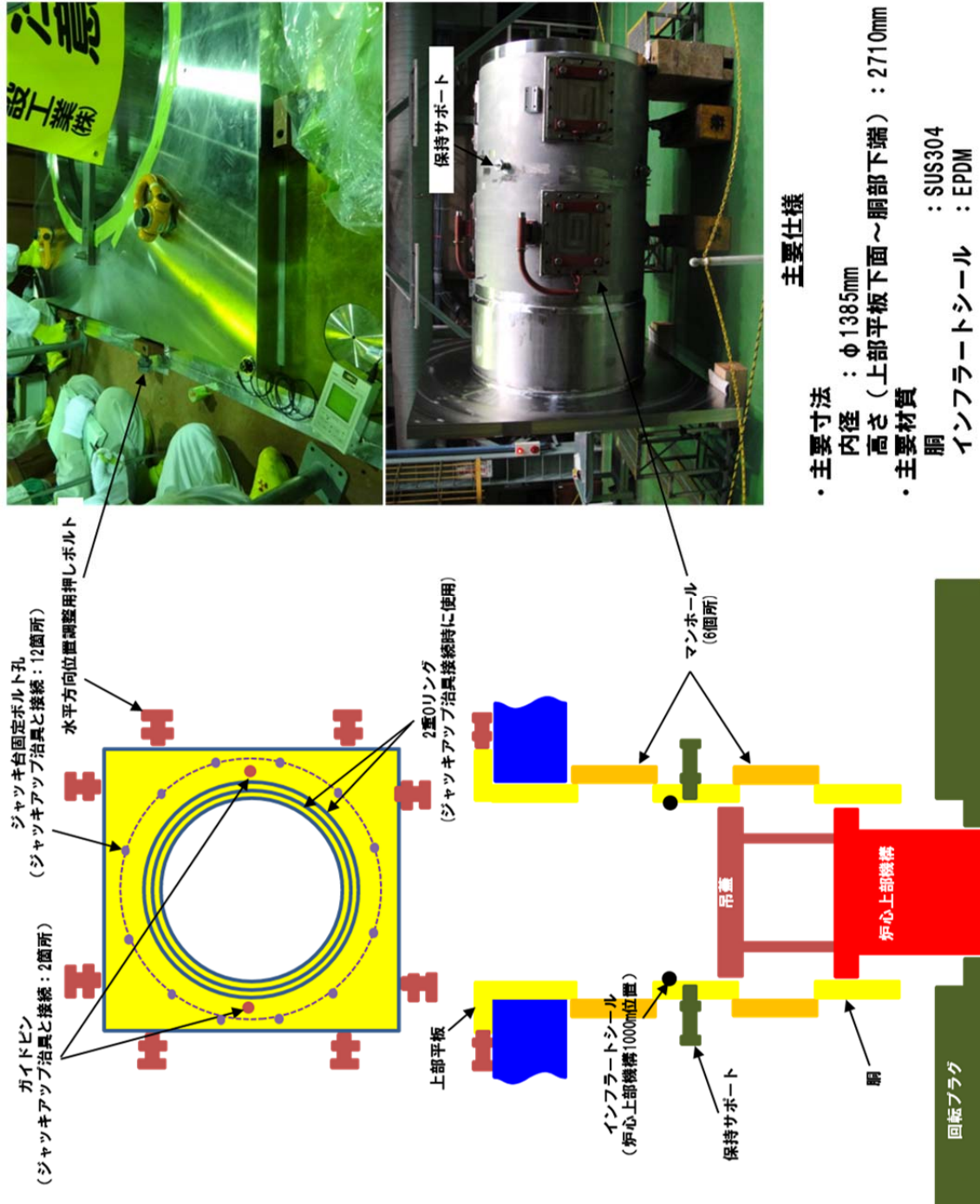


図 3.4.3 ガイド筒の概要

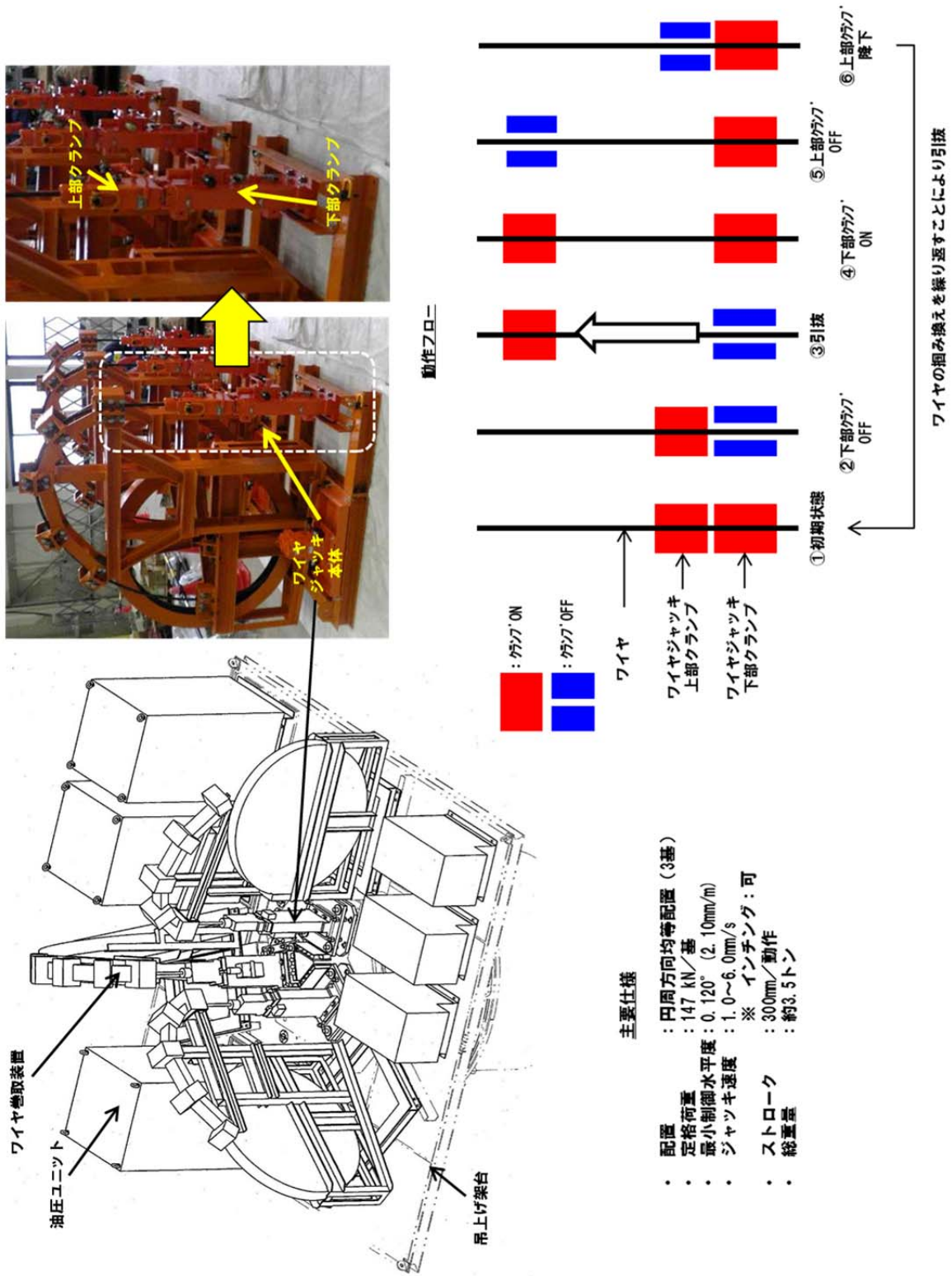


図 3.4.4 ワイヤジャッキ治具の概要

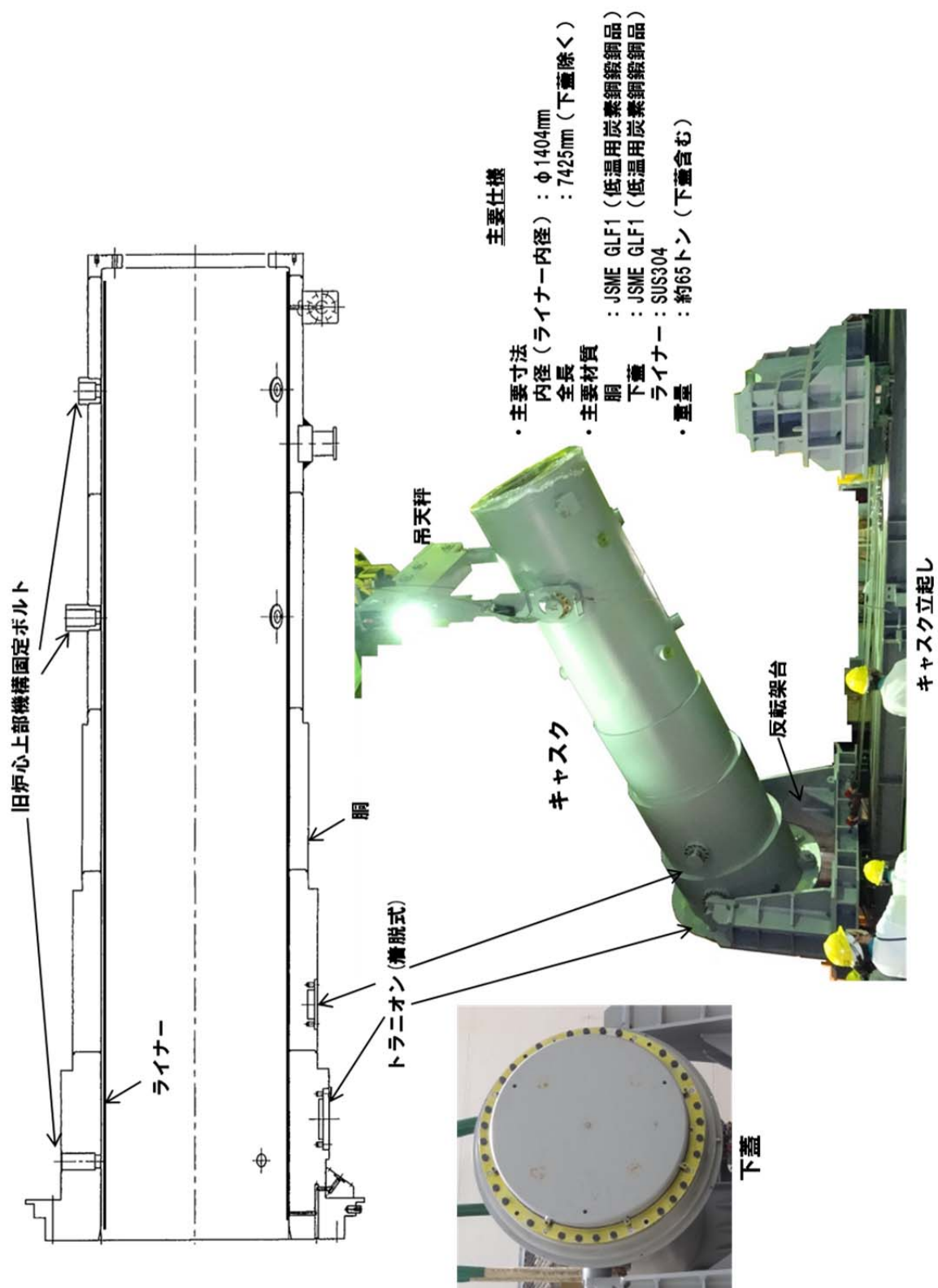
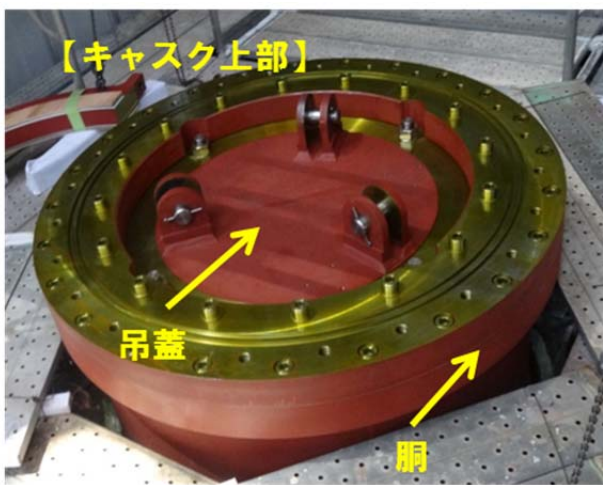
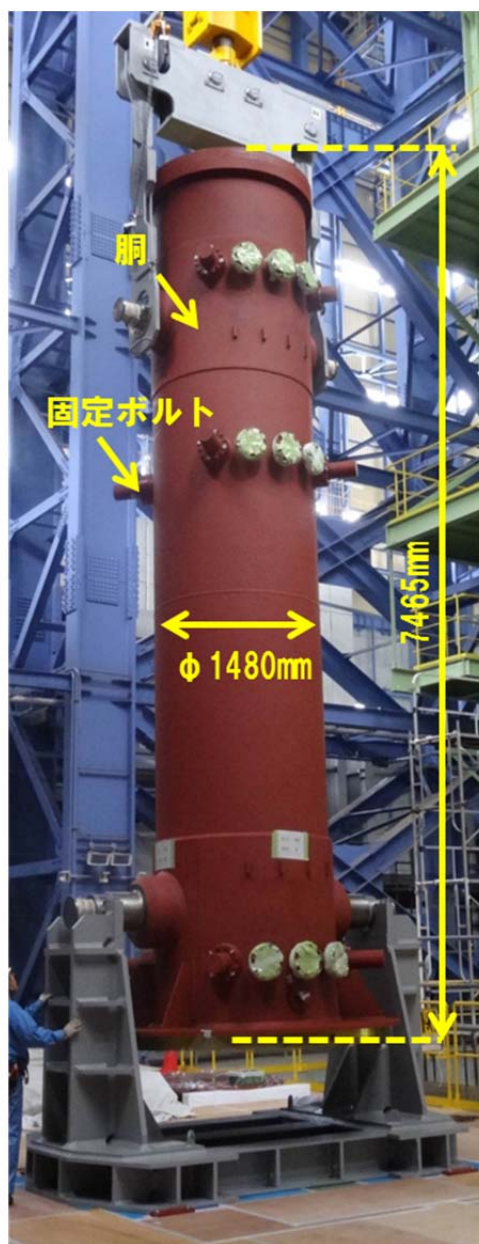


図 3.4.5 旧炉心上部機構収納キャスクの概要



主要仕様

- ・ 主要寸法
 - 内径（ライナー内径）：φ 1400mm
 - 全長：7465mm
- ・ 主要材質
 - 銅：SM490A
 - ライナー：SUS304
- ・ 重量：約45トン（新炉心上部機構含む）

図 3.4.6 新炉心上部機構装荷キャスクの概要

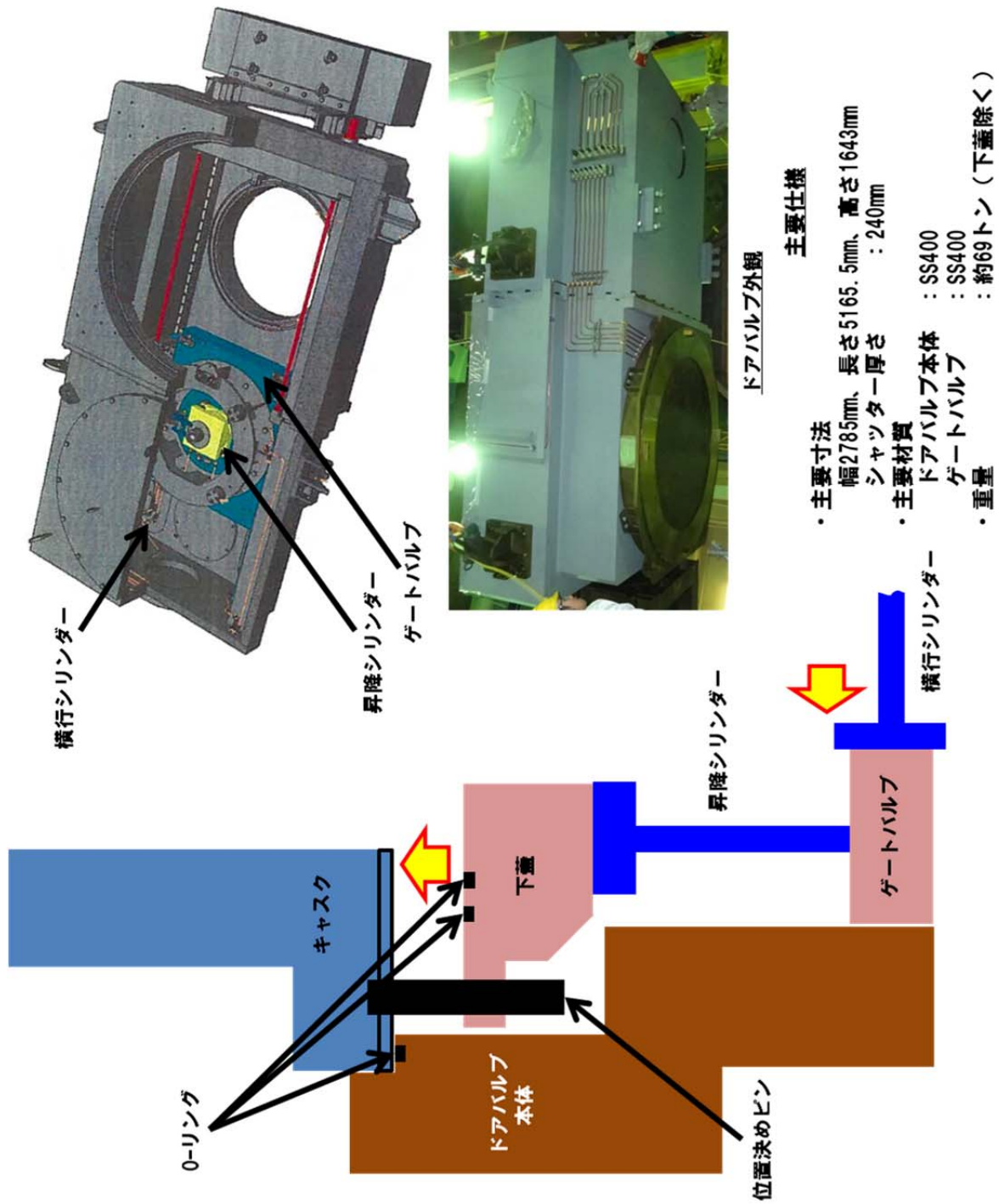


図 3.4.7 ドアバルブの概要

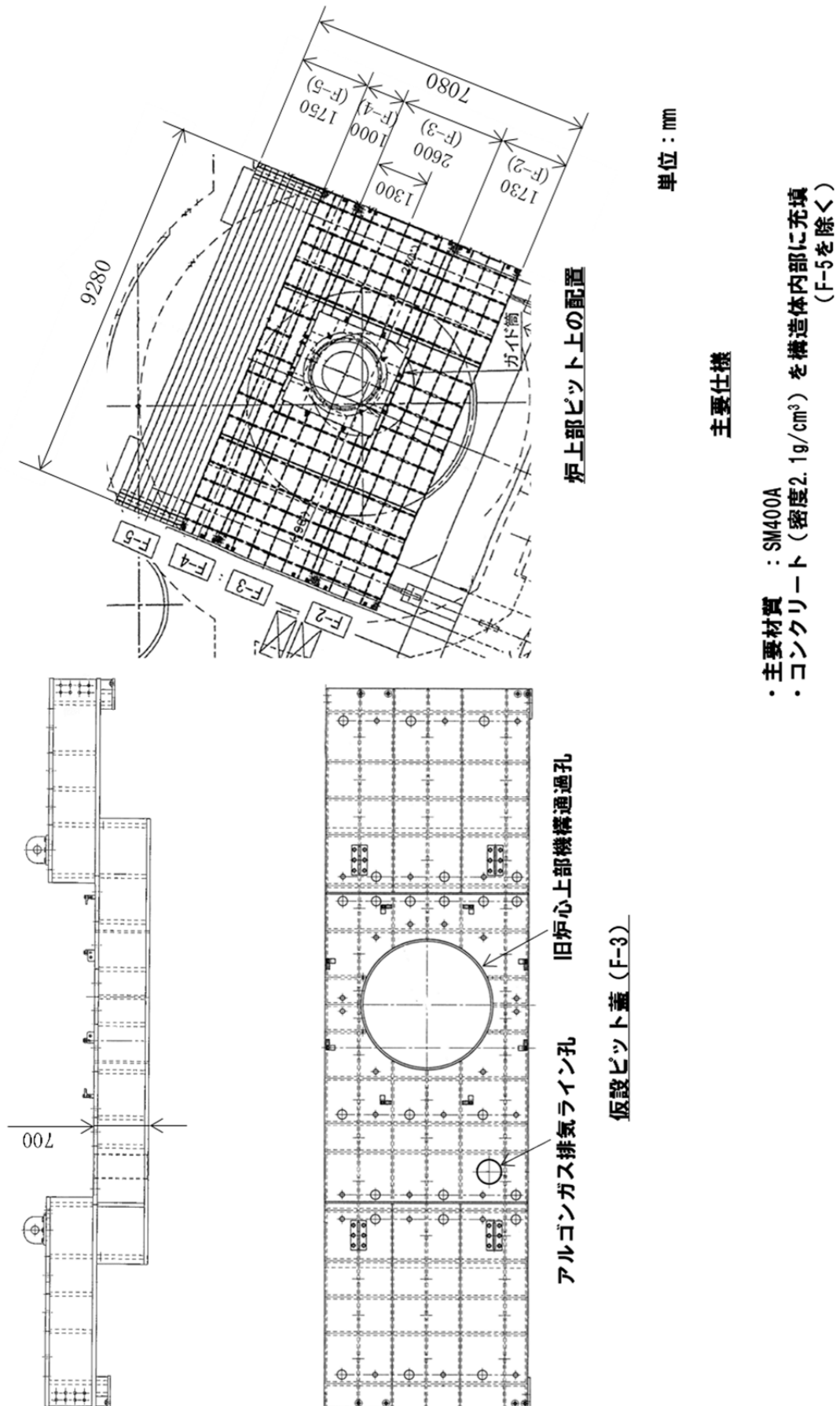


図 3.4.8 仮設ピット蓋の概要

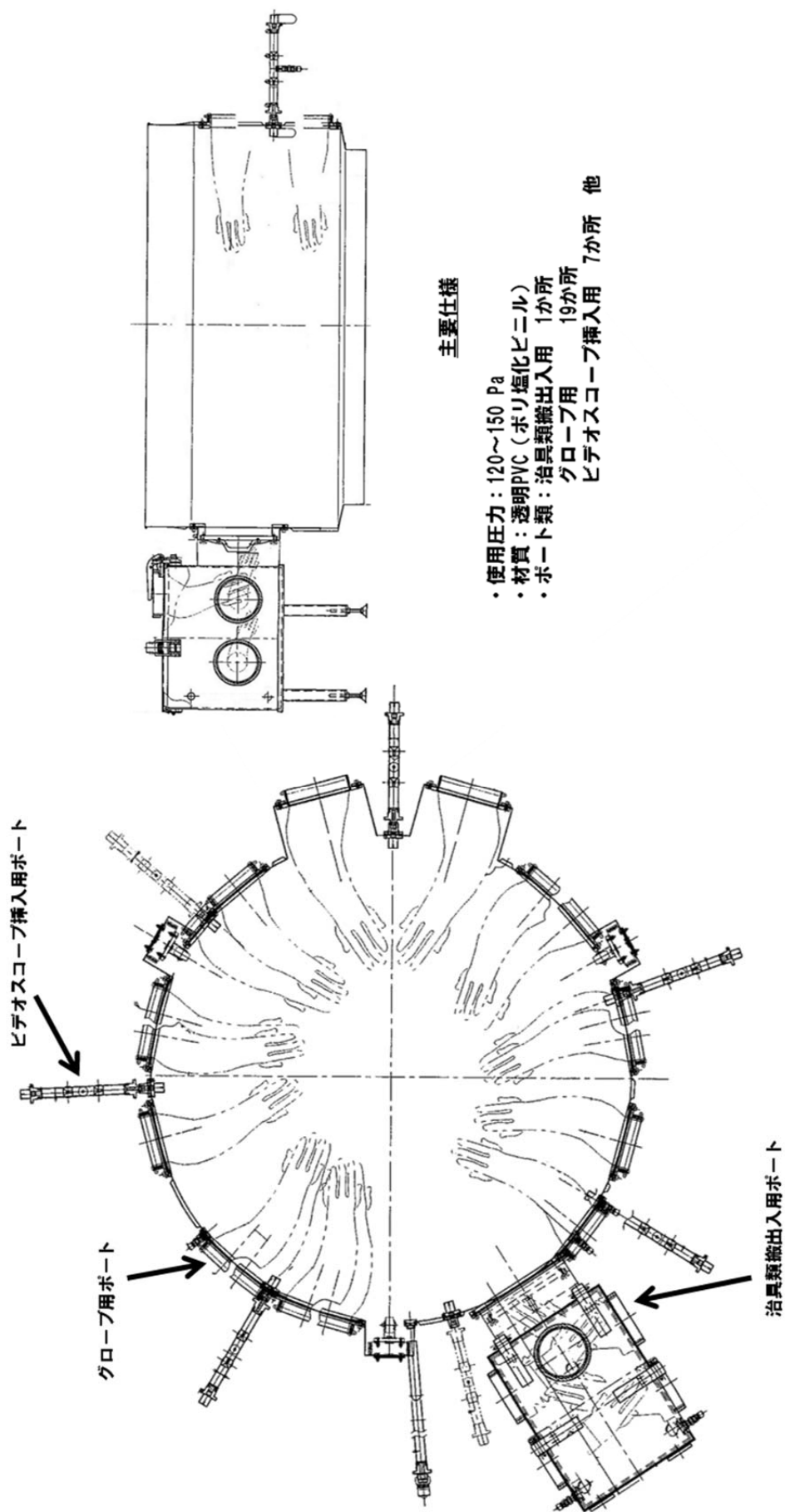


図 3.4.9 ビニルバッグの概要

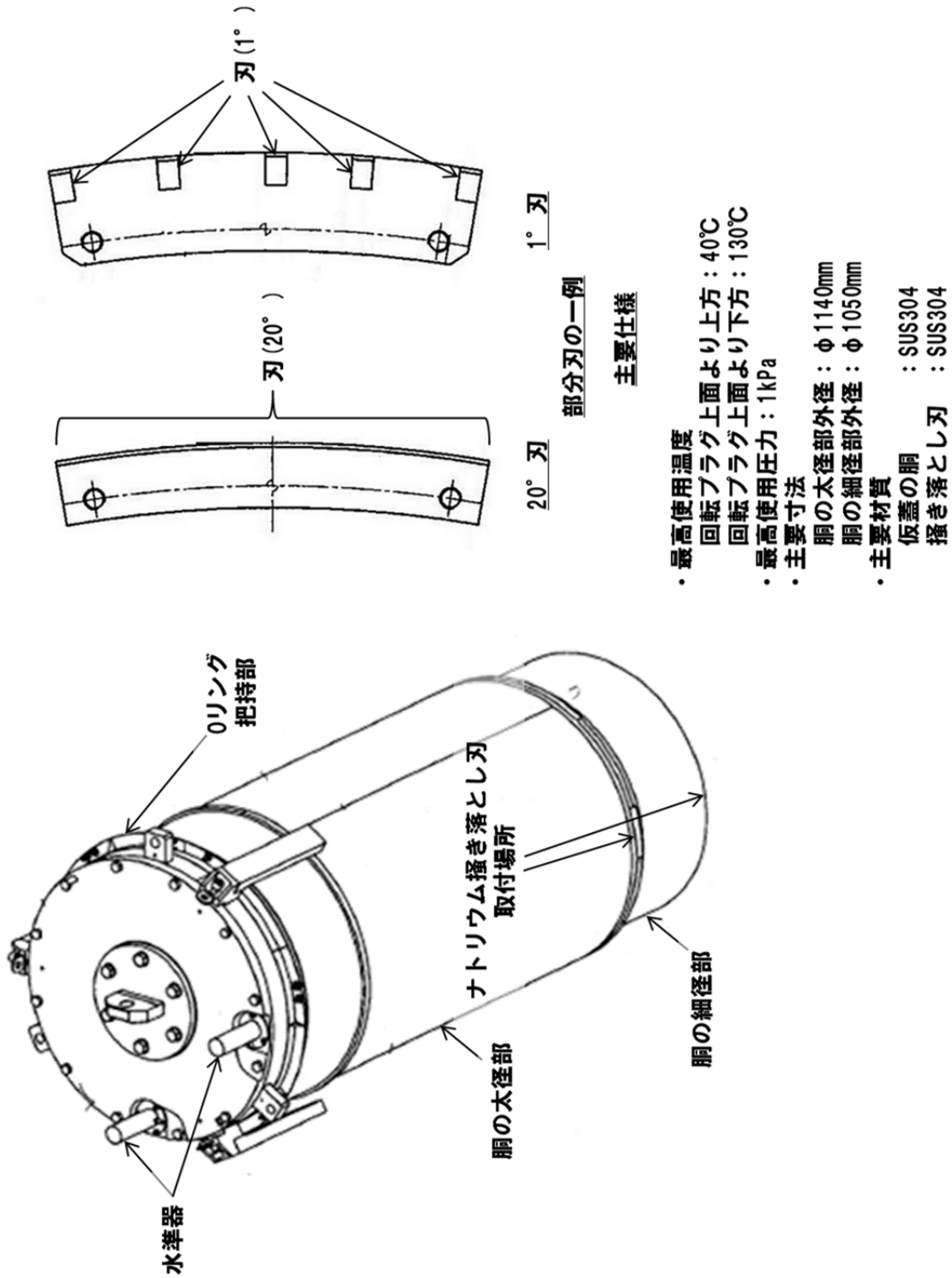


図 3.4.10 仮蓋の概要

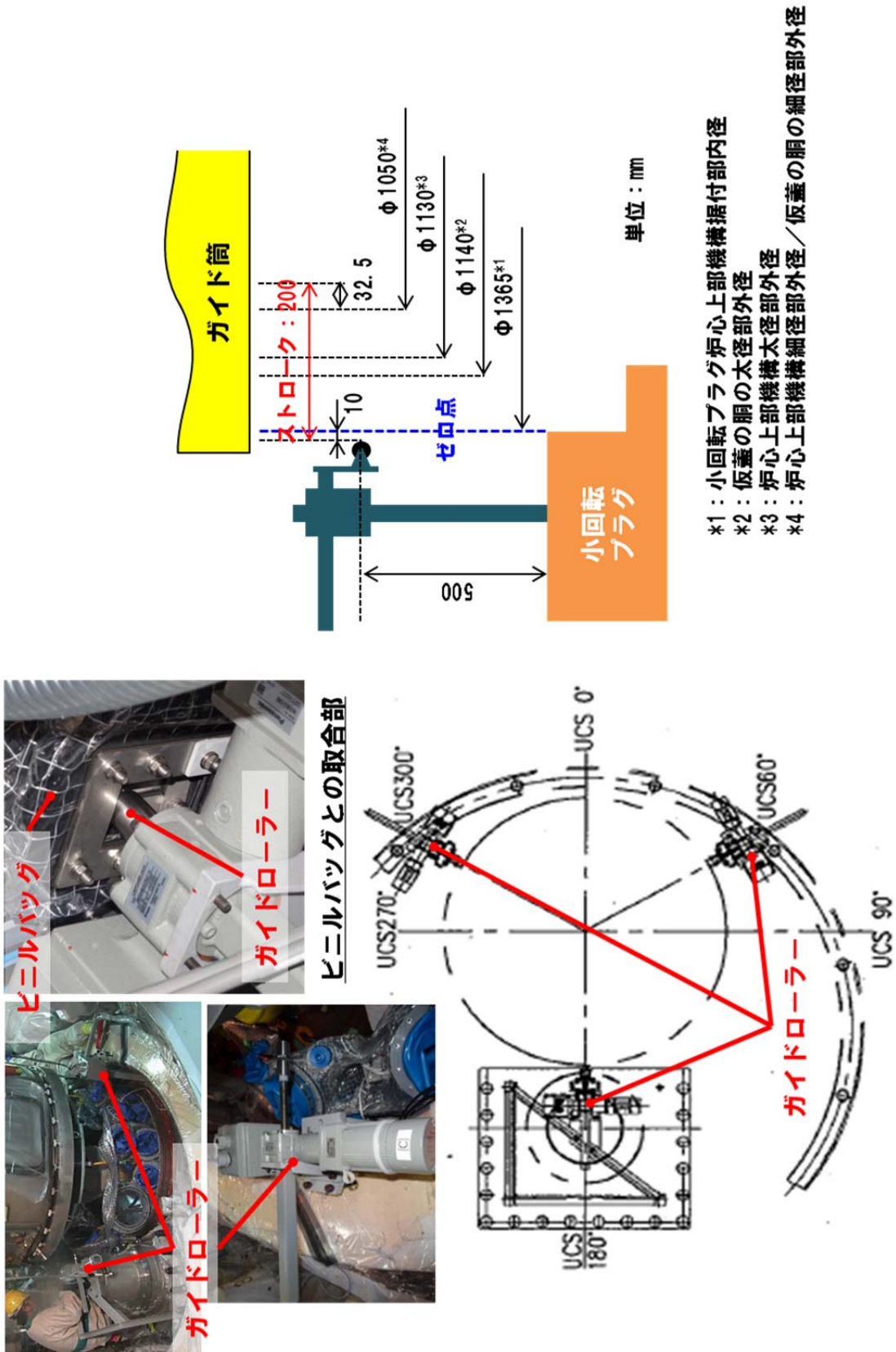


図 3.4.11 ガイドローラーの概要

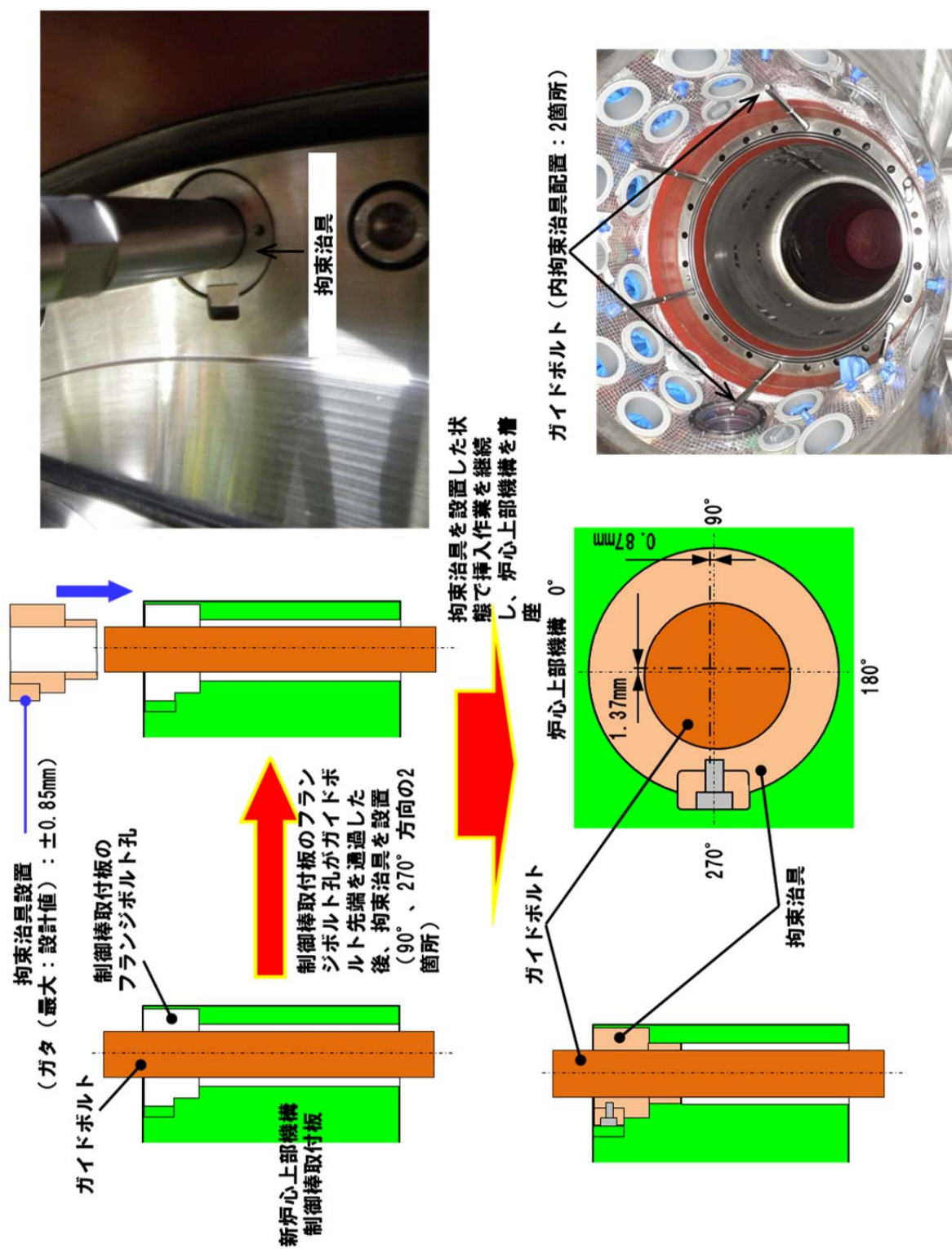


図 3.4.12 拘束治具の概要

4. 炉心上部機構交換作業に係るフルモックアップ試験

4.1 フルモックアップ試験体の概要

炉心上部機構交換作業に先立ち、実機に使用する機材と実機大のフルモックアップ試験体を用いたフルモックアップ試験を実施し、作業手順・機材運用方法を確認するとともに、作業トレーニングの実施による作業員の習熟度向上を図った。また、得られた知見等を炉心上部機構交換作業要領書等に反映した。

フルモックアップ試験では、約 12 m×12 m×8 m の試験架台に、実機大のモックアップとして、小回転プラグ模擬体、案内スリーブ模擬体、炉心上部機構試験体等を設置することで、実機の作業環境を模擬した。なお、案内スリーブ模擬体の下部については、実機において製作及び据付時に歪み等が生じている可能性を考慮し、ノミナル内径φ1070 mm に対し、長径φ1070 mm、短径φ1065 mm の楕円とし、炉心上部機構試験体と案内スリーブ模擬体のギャップが一部小さくなるようにした。また、炉心上部機構試験体は、上部試験体と下部試験体で構成し、ダミーウェイトを用いて実機の重量及び重心を模擬するように調整した。

4.2 試験項目及び試験結果

フルモックアップ試験として、引抜性確認試験、ワイヤジャッキ治具機能確認試験、ドアバルブ非常時対応試験等を実施した。各試験の概要及び結果を以下に示す。

(1) 引抜性確認試験

ジャッキアップ治具について一連の操作を実施し、当該治具の運用に係るパラメータ（ストローク、速度等）の設定に係るデータを取得するとともに、荷重及び水平度を許容値内に制限しつつ、0～1000 mm 位置までジャッキアップするための要求機能を満足することを確認した。引抜性確認試験の結果、ジャッキアップ治具の操作及び運用に問題等がないこと、旧炉心上部機構ジャッキアップ試験手順が妥当であることが確認できた。また、旧炉心上部機構ジャッキアップ後、据付面の既設 O リングを回収する必要があるため、実機と同様にビニルバッグを介した当該作業に係るトレーニングを実施した。

(2) ワイヤジャッキ治具機能確認試験

ワイヤジャッキ治具に係る一連の操作を実施し、当該治具の運用に必要なパラメータ（ストローク、引抜・挿入速度及び油圧）の設定に係るデータを取得するとともに、荷重及び水平度を許容値内に制限しつつ、収納・挿入作業（実機の引抜位置と同等の 1000～11426 mm（引抜）及び 11426 ～0 mm（挿入））を実施し、炉心上部機構交換作業に係る知見を得た。また、図 4.2.1 に示すように、キャスク上部から引抜・挿入時に生じる炉心上部機構試験体の振れ等を確認した。また、ワイヤジャッキに設けた荷重及び水平度に係るインターロックが正常に動作するとともに、インターロック作動時の対応手順が妥当であることを確認した。さらに、フルモックアップ試験の準備作業をドアバルブやキャスク等の大型重量物の設置作業トレーニングとし、作業員の習熟度向上を図るだけでなく、不要な偏心等が生じないように、これらを炉心上部機構直上の所定の位置に設置できることを確認し、大型重量物の設置に伴う仮設ピット蓋の撓み等を計測することで、実機作業におけるキャスク真直度確保に必要なデータを取得した。

(3) ドアバルブ非常時対応試験

炉心上部機構交換作業において、ドアバルブは、遠隔操作によりゲートバルブの開閉を行う。何らかの事象により、ゲートバルブの「閉」に失敗した場合を想定し、その対応方法の妥当性を確認した。ドアバルブは、非常時のバックアップ機能として、専用操作治具を使用することによって、ゲートバルブを手動で「閉」にできるよう設計されている。本試験により、当該機能が正常に動作することが確認できた。また、遠隔操作によるゲートバルブ「閉」に失敗した状態においては、高線量率雰囲気での手動操作となることから、被ばくを低減させるため、当該作業に必要な人員・時間等に係るデータを取得した。

(4) その他

上記を除くフルモックアップ試験の概要を表 4.2.1 に示す。フルモックアップ試験では、一連の炉心上部機構交換作業を、機器類の設置、ボルト類の取付等に至るまで実施することによって、機材のハンドリング方法、設置手順、設置位置取合い等を明確化し、作業要領の策定に資するデータを取得するとともに、作業トレーニングを兼ねることで作業員の習熟度向上を図ることができた（図 4.2.2 参照）。

表 4.2.1 フルモックアップ試験の概要 (1/2)

(引抜性確認試験、ワイヤジャッキ治具機能確認試験、ドアバルブ非常時対応試験を除く)

項目	確認内容
シールリング撤去・設置方法確認	・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 溶接部除去手順 ・ 養生方法／清掃方法
旧炉心上部機構据付ボルト 撤去方法確認	・ 工具の配置／作業姿勢 (ビニルバッグ作業を含む) ・ 許容トルク ・ ネジ穴手入れ方法／養生方法
テーパピン取付・取外し方法確認	・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 拡孔方法
吊蓋・吊ボルト設置方法	・ ハンドリング方法／設置位置取合い ・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 許容トルク ・ ネジ穴手入れ方法 ・ 水平度の計測／調整方法
ライナロックボルト* ¹ 設置方法確認	・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 許容トルク／締付時形状／機能 ・ ネジ穴手入れ方法
ガイドボルト* ² 設置方法確認	・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 許容トルク／再取付性 ・ ネジ穴手入れ方法 ・ 真直度計測／調整方法
旧炉心上部機構位置計測方法確認	・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 罫書き方法 ・ 計測／調整方法
仮設ピット蓋設置方法確認	・ 大型重量物ハンドリング方法 ・ 設置位置取合い／固定方法 ・ 水平度の計測／調整方法 ・ 隙間養生／ネジ穴手入れ方法 ・ たわみ計測
ガイド筒設置方法確認	・ 設置手順／設置位置取合い ・ 水平度の計測／調整方法 ・ 水平方向位置の計測／調整方法
ガイドローラー設置方法確認	・ 設置手順／設置位置取合い ・ 初期位置の計測／調整方法 ・ 前進・後進の計測／調整方法
キャスク内アルゴンガス置換方法確認	・ 工具の配置 ・ 置換時間・酸素濃度の計測方法 ・ 圧力の計測／調整方法
炉心上部機構 Oリング設置・漏えい検査方法	・ 工具の配置／作業姿勢 (ビニルバッグ作業を含む) ・ 旧 O リングの回収方法 ・ O リング設置面の清掃方法 ・ 新 O リングの設置方法、漏えい検査方法
仮蓋設置方法	・ 設置手順／設置位置取合い ・ 水平度の計測／調整方法 ・ ナトリウム交換刃の取替作業性

表 4.2.1 フルモックアップ試験の概要 (2/2)

(引抜性確認試験、ワイヤジャッキ治具機能確認試験、ドアバルブ非常時対応試験を除く)

項目	確認内容
ジャッキアップ治具 設置・撤去方法	・ 事前機能確認項目 ・ 設置手順／設置位置取合い ・ 吊蓋との接続手順／作業姿勢 ・ リークチェック ・ 撤去手順
ビニルバッグ取付性確認 (取付金物用ボルト穴施工方法) (取付金物設置方法) (ビニルバッグ設置方法)	・ 工具の配置／作業姿勢 ・ 切削性 ・ 養生方法／清掃方法 ・ 気密性確保方法／リークチェック ・ 作業時間 ・ ビニルバッグ破損時対応
鋼製バウンダリ* ³ 設置確認	・ 設置位置取合い／固定方法 ・ リークチェック
圧力調整装置／酸素濃度監視装置 設置方法	・ 接続取合い／機能 ・ ガス置換方法／作業時間
ドアバルブ設置方法	・ 事前機能確認項目 ・ 大型重量物ハンドリング方法 ・ 設置位置取合い／固定方法／機能 ・ リークチェック
キャスク設置方法	・ 大型重量物ハンドリング方法 ・ 設置位置取合い／固定方法 ・ リークチェック
ワイヤジャッキ治具設置方法	・ 事前機能確認項目 ・ 設置位置取合い／固定方法／機能 ・ 上部ビニルバッグ取付方法 ・ リークチェック
仮設架台設置方法確認	・ 組立手順／作業性 ・ 設置位置取合い（キャスクの搬入時のための コの字開口部寸法） ・ 追設部／転倒防止サポートの設置方法

* 1 ライナロックボルト⁴⁾：旧炉心上部機構据付面に設置しているライナを炉心上部機構に固定するためのボルト

* 2 ガイドボルト：旧炉心上部機構ジャッキアップ時の揺動防止及び新炉心上部機構挿入時の所定の位置へのガイドのため、炉心上部機構据付ボルト孔に設置するボルト

* 3 鋼製バウンダリ：旧炉心上部機構収納作業中の万一のビニルバッグ破損時に備えてビニルバッグの外側に設置される。

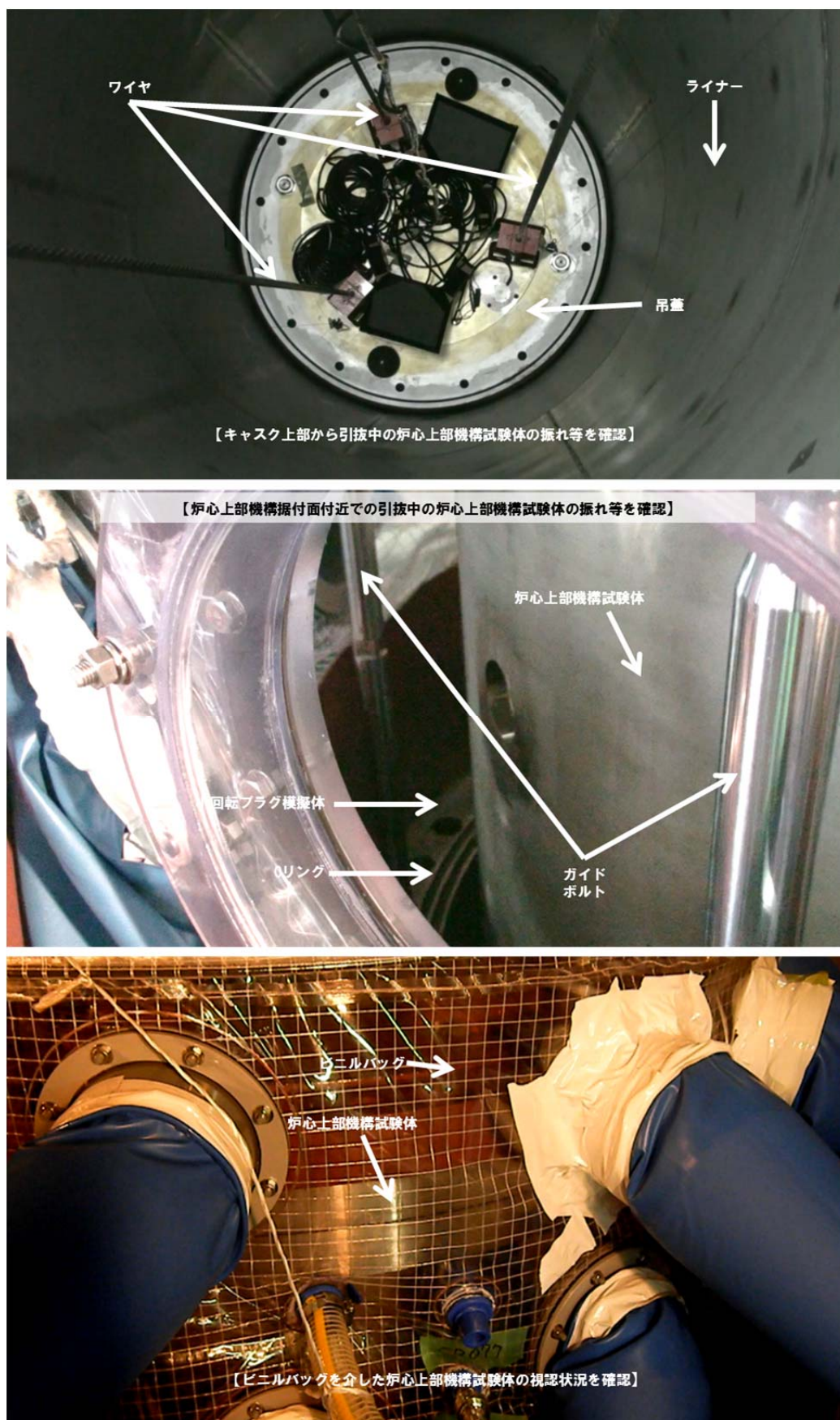


図 4.2.1 作業時に生じる炉心上部機構試験体の振れ等の確認状況



図 4.2.2 大型重量物のハンドリング方法等の確認状況

5. 炉心上部機構交換作業結果

5.1 プラント状態

炉心上部機構交換作業時のプラント状態を以下に示す。なお、旧炉心上部機構ジャッキアップ試験開始から新炉心上部機構挿入作業完了までの作業期間中は、ビニルバッグ等による仮設カバーガスバウンダリが構成されることから、カバーガス圧力は、原子炉容器からカバーガスが流出するリスクを低減することを目的として通常より低い圧力とした。

- (1) ナトリウムレベル : GL-9540 mm ^{*1}

^{*1} : ナトリウム液面は、通常、原子炉容器出口配管の上方 (GL-6100 mm) に保持されるが、ナトリウムは、不透明であるため、炉心上部機構交換作業中に炉内観察を行うために、ナトリウム液位を下げる必要がある。あらかじめ炉心崩壊熱が十分に小さいことを確認し、ナトリウム液位を集合体頂部以下 (GL-9540 mm) とした。

- (2) カバーガス圧力 : 110～140 Pa ^{*2}

^{*2} : 循環型カバーガス微正圧制御システム ¹⁰⁾ により、カバーガス圧力を制御 (既設圧力制御設備をバックアップとして使用 : 40～170 Pa) した。

- (3) ナトリウム温度 : 約 200℃
 (4) カバーガス温度 : 約 150℃
 (5) アルゴンガス供給系 : 運転中
 (6) 廃ガス処理系 : 運転中
 (7) 1次補助冷却系 : 停止

5.2 旧炉心上部機構引抜作業結果

旧炉心上部機構引抜作業として、平成 26 年 5 月 7 日に旧炉心上部機構ジャッキアップ試験 ¹¹⁾ を実施し、5 月 8 日～5 月 28 日にかけて旧炉心上部機構収納作業を実施した (旧炉心上部機構のキャスクへの収納は 5 月 22 日に実施)。主な作業結果を以下に示す。

5.2.1 旧炉心上部機構引抜作業の状況

旧炉心上部機構引抜作業の実績工程を図 5.2.1 に示す。また、主要作業の状況・主要機材の配置等を図 5.2.2 に示す。旧炉心上部機構引抜作業は、事前に定めた手順に基づき、問題なく実施できた。

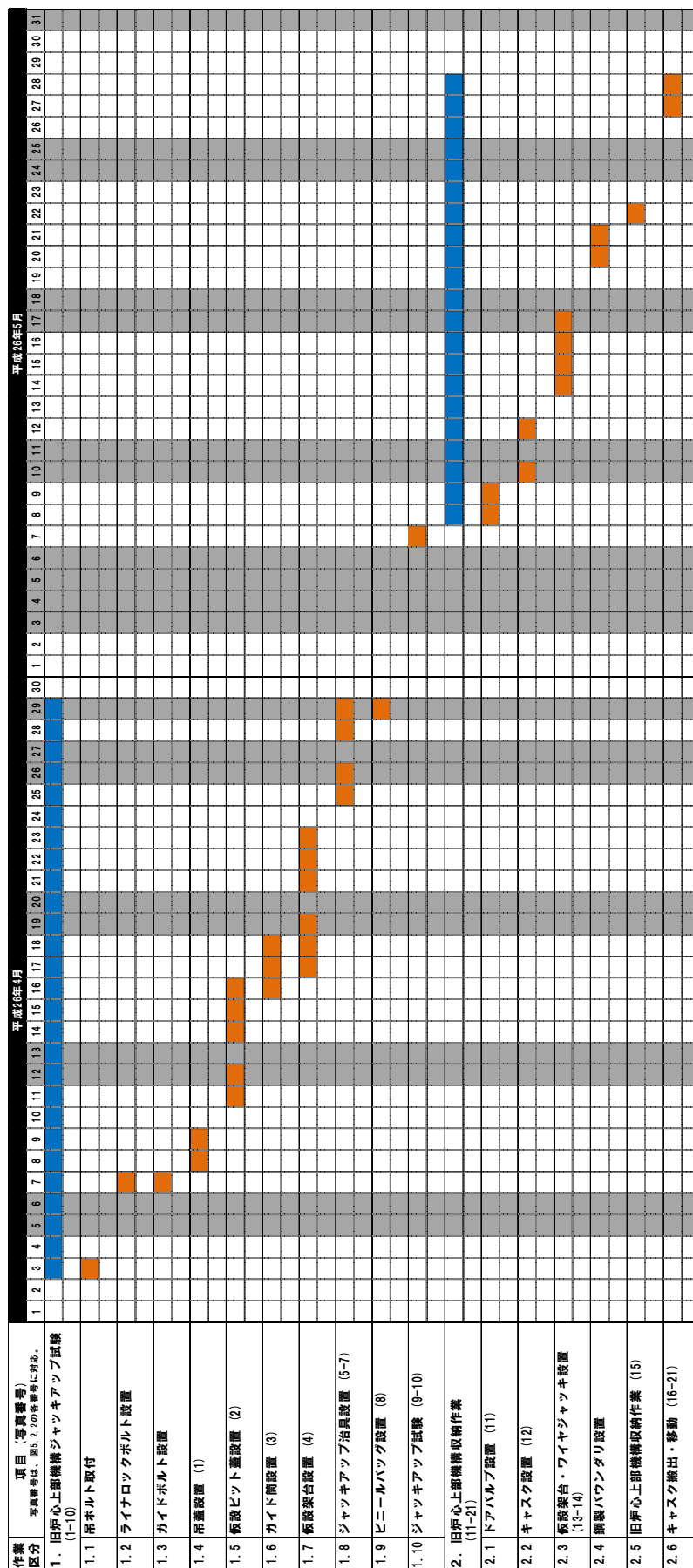


図 5.2.1 旧炉心上部機構引抜作業の実績工程

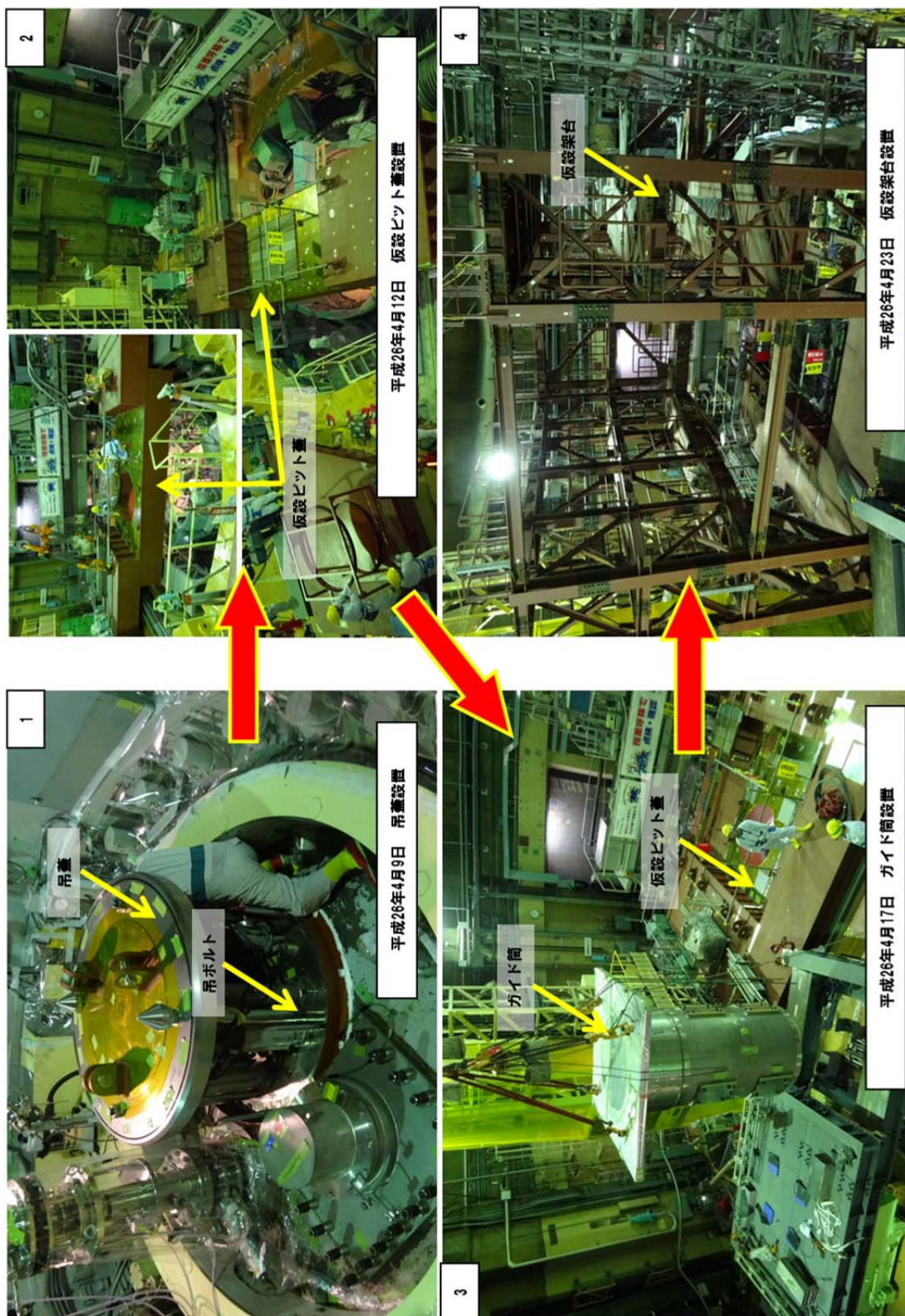


図 5.2.2 旧炉心上部機構引抜作業の状況 (1/7)

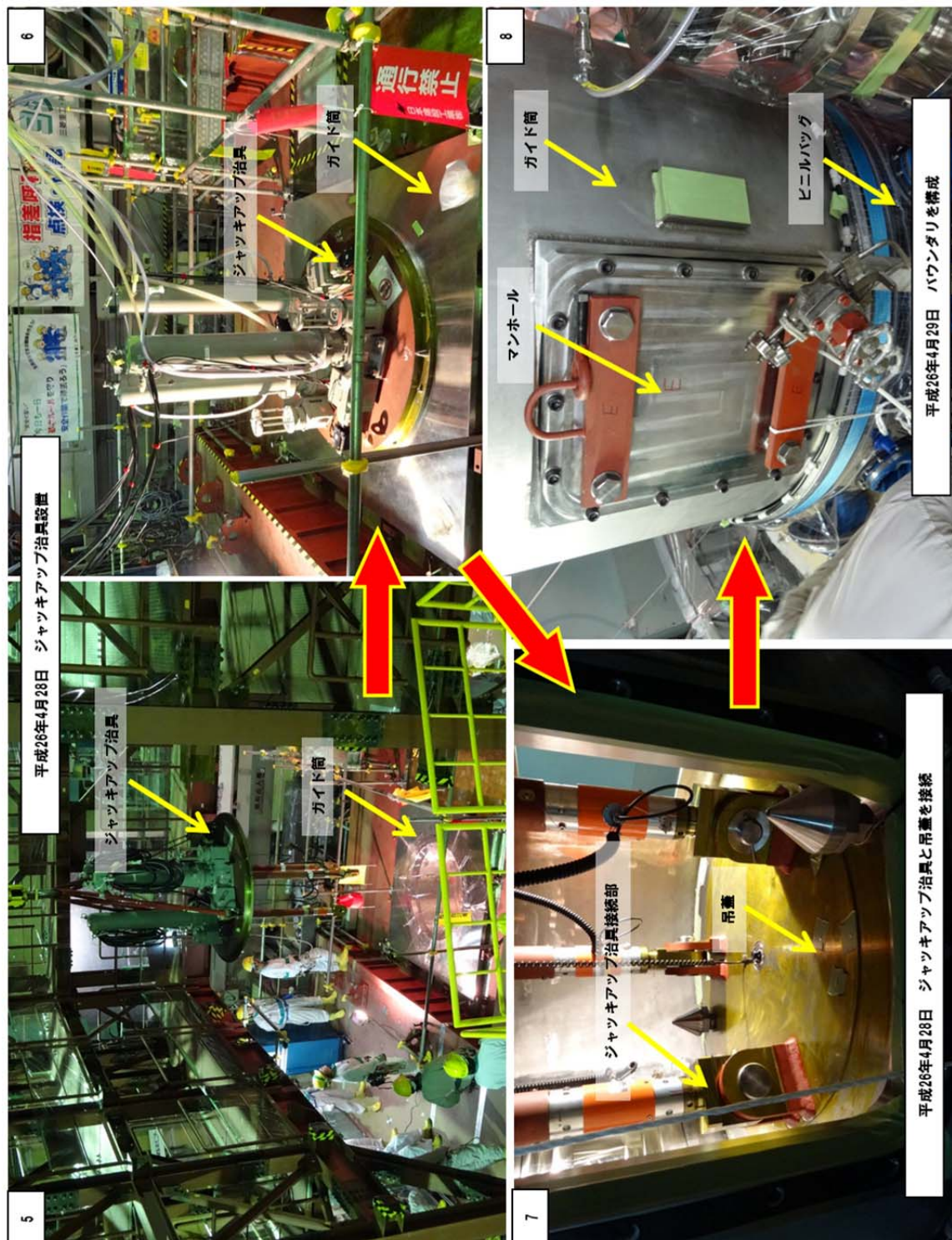


図 5.2.2 旧炉心上部機構引抜作業の状況 (2/7)

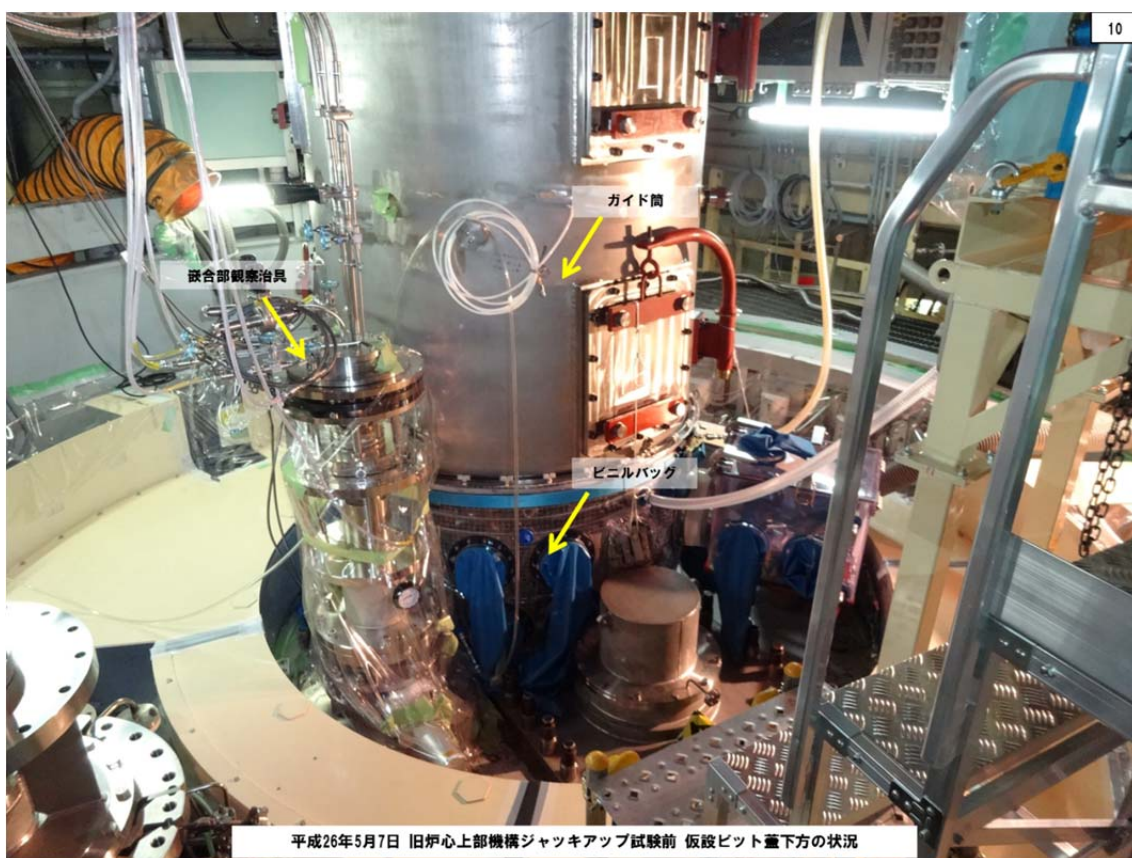


図 5.2.2 旧炉心上部機構引抜作業の状況 (3/7)

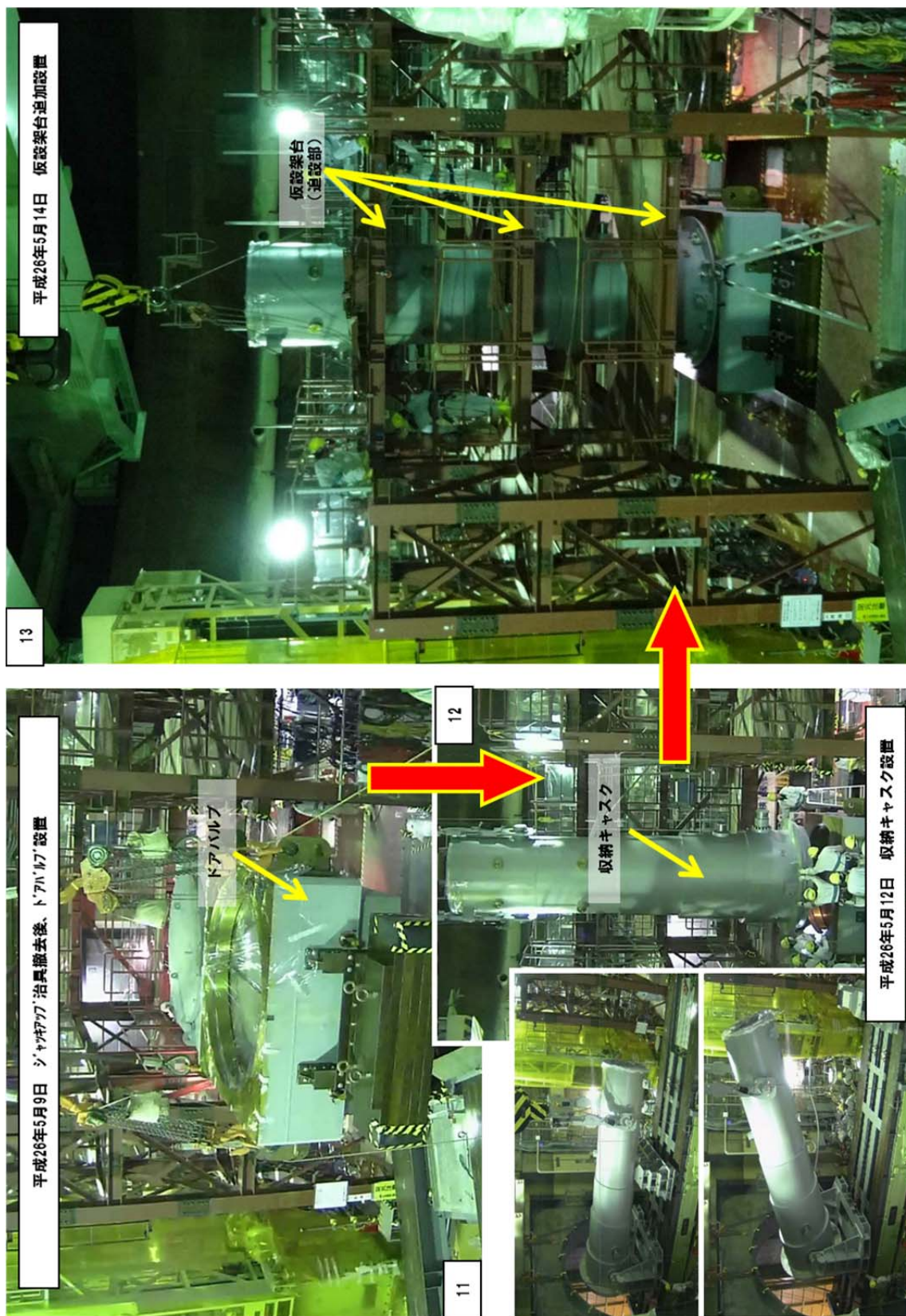


図 5.2.2 旧炉心上部機械構引抜作業の状況 (4/7)

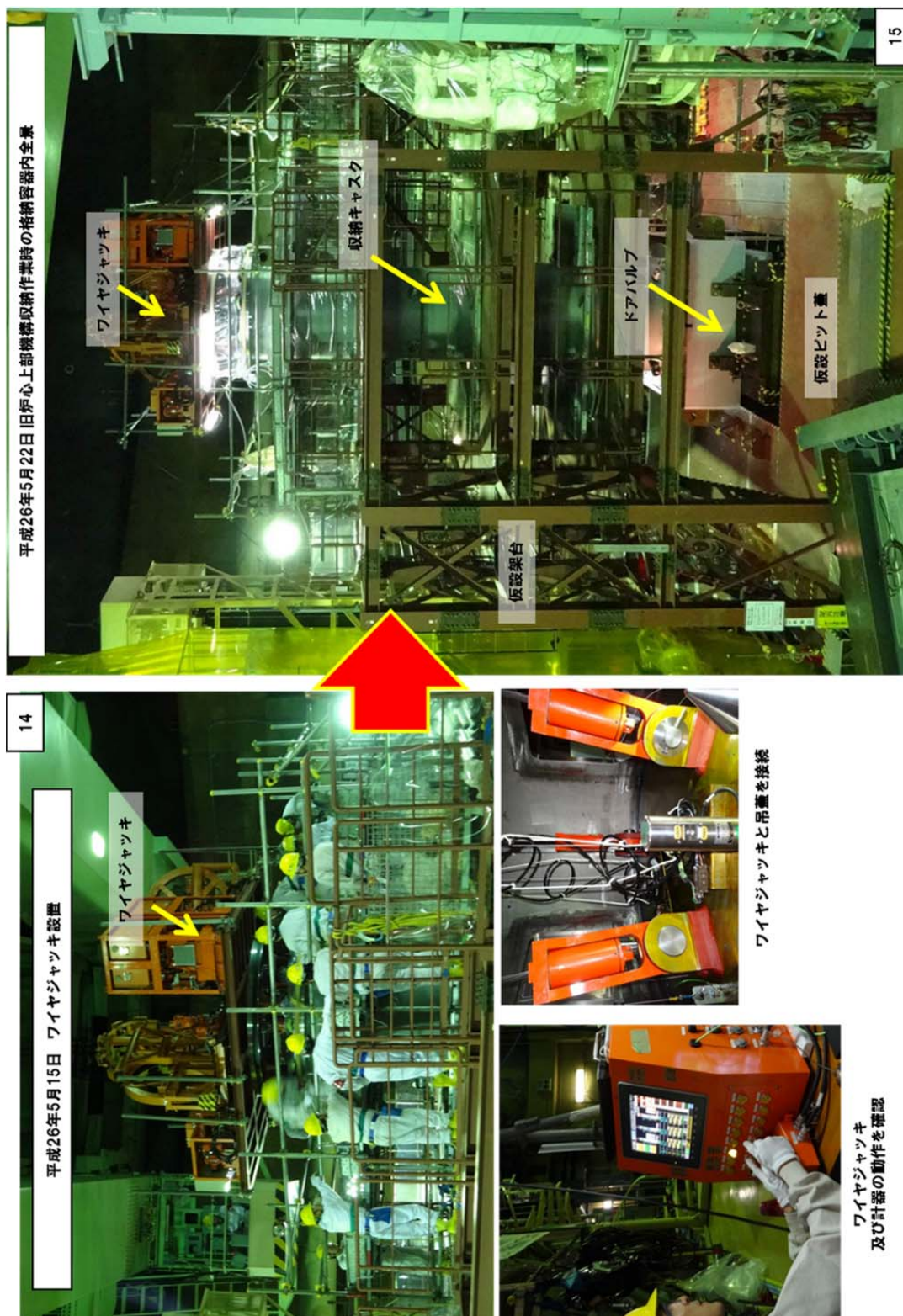


図 5.2.2 旧炉心上部機構引抜作業の状況 (5/7)

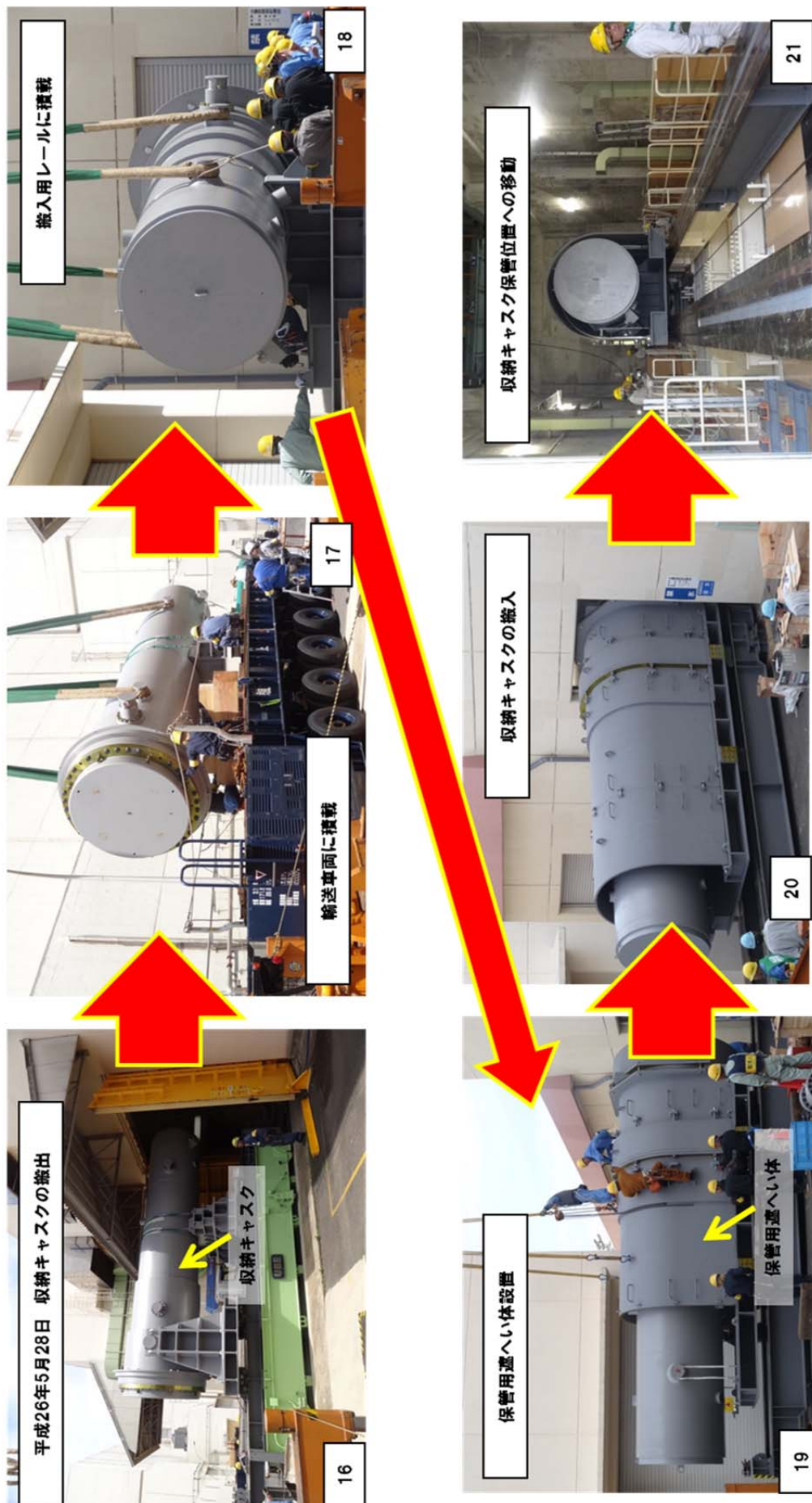


図 5.2.2 旧炉心上部機構引抜作業の状況 (6/7)



図 5.2.2 旧炉心上部機構引抜作業の状況 (7/7)

5.2.2 旧炉心上部機構ジャッキアップ試験結果

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験の時系列を図 5.2.3 に示す。平成 26 年 5 月 7 日 10 : 30 より、旧炉心上部機構のジャッキアップが開始された。その後、旧炉心上部機構は 11 : 00 に 2 mm 位置、12 : 48 に 494 mm 位置、15 : 30 に 862 mm 位置、16 : 20 に 1000 mm 位置にジャッキアップされた。1000 mm ジャッキアップ完了後、ガイド筒に設けた保持サポートに旧炉心上部機構を保持させ、旧炉心上部機構ジャッキアップ試験を終了した。ジャッキアップ試験では、試験中に総荷重がステップごとに定められた許容荷重を超過することはない、旧炉心上部機構及び案内スリーブに異常は発生しなかったことから、次のステップの旧炉心上部機構収納作業を問題なく実施できると判断した。主な結果を以下に示す。

(1) 0～2 mm 位置ジャッキアップ試験

0～2 mm 位置ジャッキアップ試験時の荷重挙動を図 5.2.4 に示す。炉心上部機構は原子炉カバースペースを構成する機器であり、試験開始時に、計画外の旧炉心上部機構揚重が発生しないように、ジャッキアップ試験は旧炉心上部機構の設計重量である 16500 kg を下回る荷重（約 49 kN）を各ネジジャッキに負荷した状態で開始された（総荷重（実績）：144.8 kN）。0～2 mm 位置引抜時には、旧炉心上部機構と案内スリーブのギャップに蓄積された付着ナトリウムのせん断時に、ナトリウムせん断抵抗が発生することを想定しており、ここでは、案内スリーブの変形・損傷を防止するため、ナトリウムせん断抵抗の許容荷重を 7060 N（炉心上部機構等の自重を含む合計荷重 168.9 kN）に設定した。なお、ジャッキアップ速度は 2 mm/h とした。

図 5.2.4 に示したように、総荷重は引抜開始から 0.75mm 位置引抜以降まで上昇し、その後 2 mm 位置引抜完了まで約 165 kN で推移した。顕著な荷重上昇は発生せず、ナトリウムせん断抵抗は概ね無視できるレベルであった。ナトリウムについては、図 5.2.5 に示すように、旧炉心上部機構全面に付着していることを確認した。付着ナトリウムを回収し分析した結果、当該ナトリウムの構造は密な金属結晶構造ではなく、微粒子が凝集・堆積した構造（多孔性構造）であった。ギャップ等に付着するナトリウムの性状や位置は、当該位置に至るまでの流路や温度分布、純度管理の状況に依存するため、これを正確に予測することは困難であるが、今回はナトリウムがせん断された形跡もない（案内スリーブ表面にナトリウムが残存していない）ことから、当該ナトリウムがせん断されるのではなく、案内スリーブと接触していた付着ナトリウムの表面が脆性破壊し、案内スリーブ表面を滑る形となり、ナトリウムせん断抵抗が発生しなかったと考えられる。

また、参考として回収した付着ナトリウムの化学成分分析を実施し、生成時期を調査した（図 5.2.6 参照）。化学成分分析結果から Na 酸化物と Na 水素化物の割合を求めると、Na 酸化物の割合が 2.48 wt%、Na 水素化物の割合が 0.67 wt% となり、これによりナトリウム堆積物中の金属ナトリウムの割合は 97.4 ± 2.3 wt% となった。当該分析では、 ^{22}Na 濃度についても測定を実施し、その濃度が 5.6 Bq/g であることを確認した。 ^{22}Na は、原子炉運転中に ^{23}Na (n,2n) ^{22}Na 反応により生成される。半減期（約 2.6 年）を考慮し、逆減衰曲線により過去の分析結果と比較した結果、MK-II 炉心運転初期の 1 次冷却系の ^{22}Na 濃度と概ね一致した。この結果より、

当該付着ナトリウムは、昭和 61 年以前に堆積し、これ以降においては、堆積が継続されなかったことを確認した。ナトリウムの堆積が継続されなかった原因としては、ナトリウムミストの上昇ルートが閉塞したこと等が考えられる。

(2) 2～1000 mm 位置ジャッキアップ試験

2～1000 mm 位置ジャッキアップ試験時の荷重挙動を図 5.2.7 に示す。2～1000 mm 位置引拔では、494 mm 位置及び 862 mm 位置にてホールドポイントを設けている。494 mm 位置では、旧炉心上部機構太径部上端が案内スリーブ細径部下端に到達する 484 mm 位置を通過したことを確認する。862 mm 位置では、旧炉心上部機構太径部上端が案内スリーブ細径部上端に到達する 862 mm 位置に到達したことを確認する。なお、干渉により発生した荷重を精度よく検知するため、2 mm 位置において荷重計をゼロリセット（旧炉心上部機構等の自重をキャンセルアウト）した。

2～494 mm 位置のジャッキアップ試験において、引拔速度を 1 mm/s（2～444 mm）及び 0.017 mm/s（444～494mm）とした。引拔中に許容荷重内の偏荷重が生じたため、合計 3 回の荷重均等化措置を実施した（図 5.2.7 の一点斜線位置）。荷重均等化措置時を含むそれぞれの引拔位置において、許容荷重を超えるような荷重の上昇は発生せず、旧炉心上部機構上端が案内スリーブ細径部下端を通過する位置までのジャッキアップを完了した。

494～862 mm 位置のジャッキアップ試験において、当初、引拔速度は 1 mm/s としたが、約 500 mm 位置以降、偏荷重が上昇傾向となった。そこで、インターロック荷重の裕度を増すため、ジャッキアップ速度を段階的に 0.1 mm/s まで下げる運用を行った。あわせて、約 717～746 mm 位置において合計 4 回の荷重均等化措置を実施した（図 5.2.7 の一点斜線位置）。荷重均等化措置実施後も偏荷重が上昇傾向にあったことから、約 750 mm 位置において、旧炉心上部機構と案内スリーブとの間に干渉が生じているものと判断し、ガイド筒に設置された水平方向位置調整用押しボルトを操作してジャッキアップ位置調整（約 0.7 mm）を実施した。調整時の作業風景を図 5.2.8 に示す。当該調整後、偏荷重は減少したことから、ジャッキアップ作業の継続を阻害するような干渉は回避されたものと判断した。なお、図 5.2.7 の 750 mm 位置以降に示すように、ジャッキアップ位置調整作業後より、偏荷重の傾向が変化した。これは、ジャッキアップ位置調整により、荷重バランスが変化したものと考えられる。許容荷重内の変化であったため、ジャッキアップ作業を継続し、862 mm 位置までのジャッキアップを完了した。

上述のとおり、約 500 mm 位置以降、偏荷重が上昇傾向となったことから、862 mm 位置以降のジャッキアップ試験において、ジャッキアップ速度を引き続き 0.1 mm/s とした。最終的に許容荷重を超過することなく、旧炉心上部機構を 1000 mm 位置までのジャッキアップを完了した。なお、図 5.2.7 に示したように、最終的に、旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉に起因する抵抗(もしくは、蒸着ナトリウムに起因する抵抗)により、総荷重が約 10 kN 増加した状態で終了している。

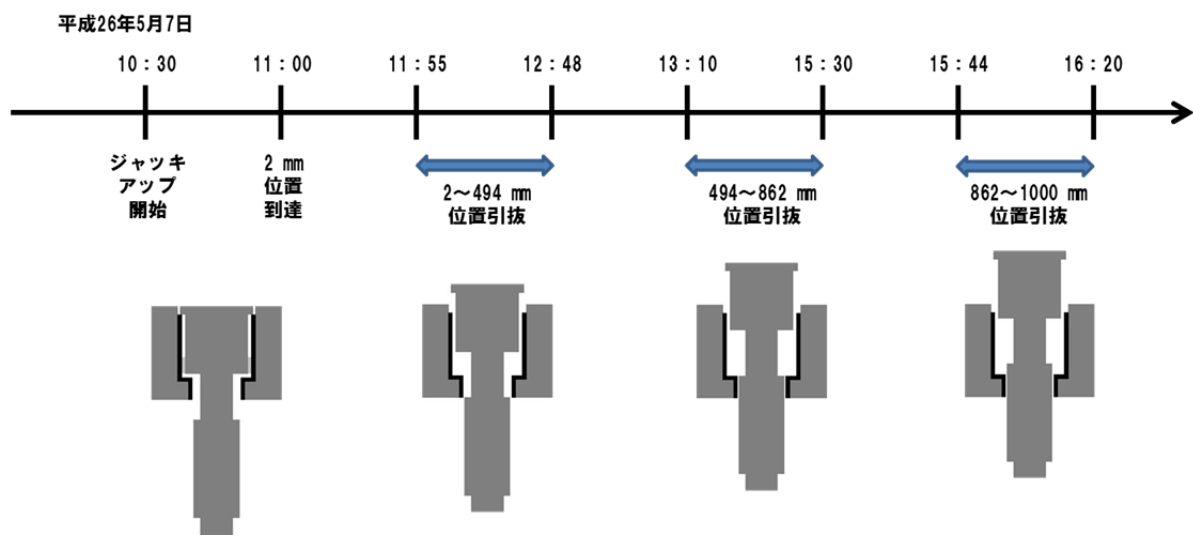


図 5.2.3 旧炉心上部機構ジャッキアップ試験の時系列

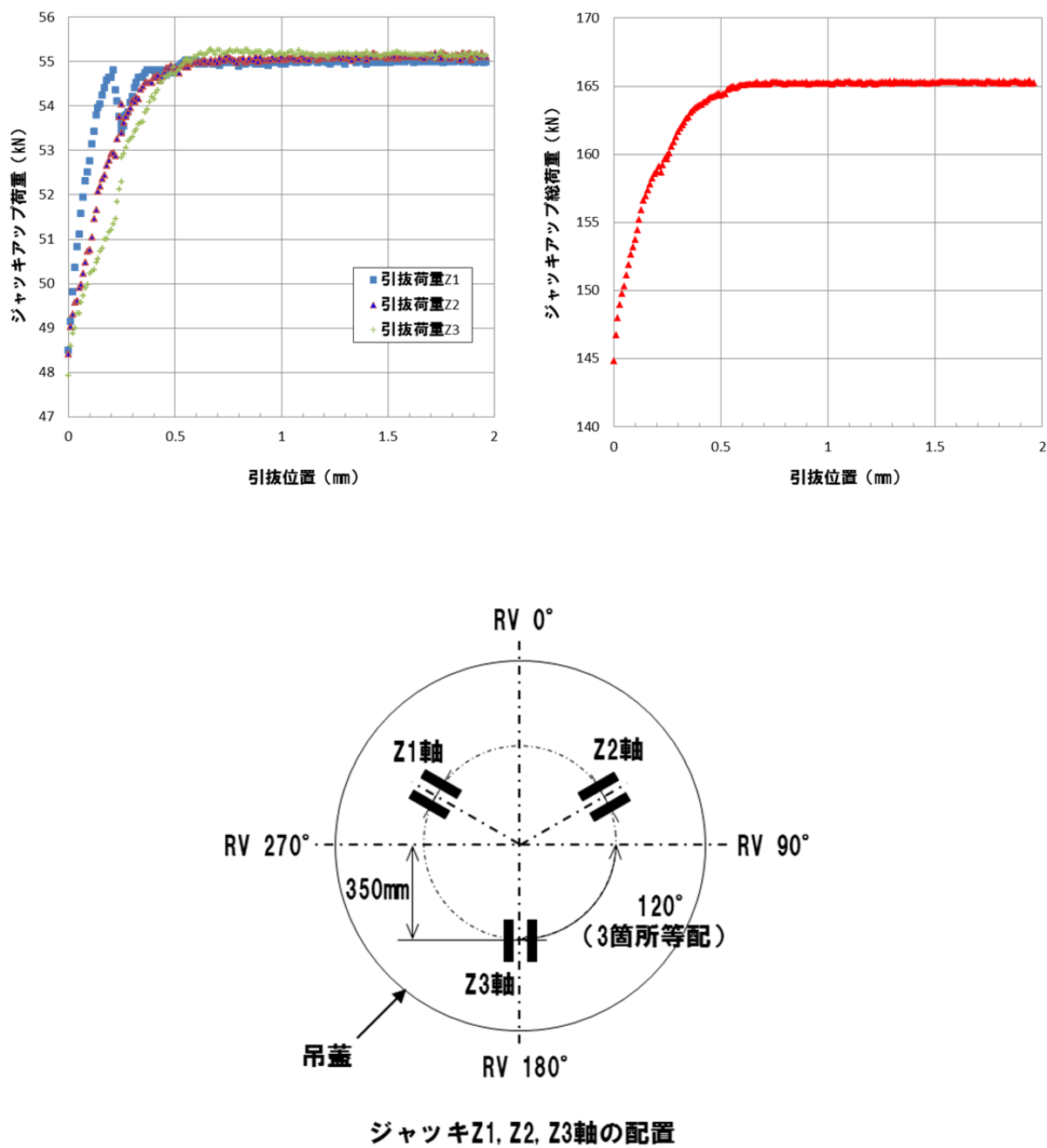


図 5.2.4 0～2 mm 位置引抜時の荷重挙動



炉心上部機構制御棒取付板下のナトリウム付着状況



炉心上部機構据付面のナトリウム付着状況

図 5.2.5 ナトリウム付着の状況

分析成分	濃度
Na (金属)	97.4 ± 2.3wt%
O	0.64 ± 0.02wt% (Na ₂ O : 約2.48wt%)
H	0.028 ± 0.002wt% (NaH : 約0.67wt%)
²² Na	5.65 ± 0.29Bq/g

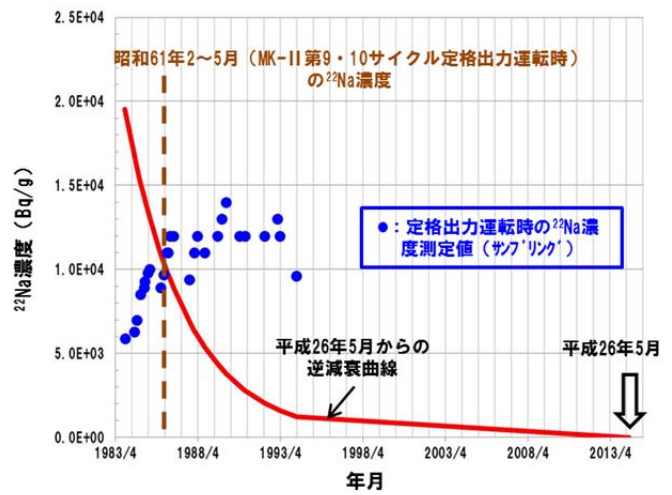


図 5.2.6 付着ナトリウムの化学成分分析結果

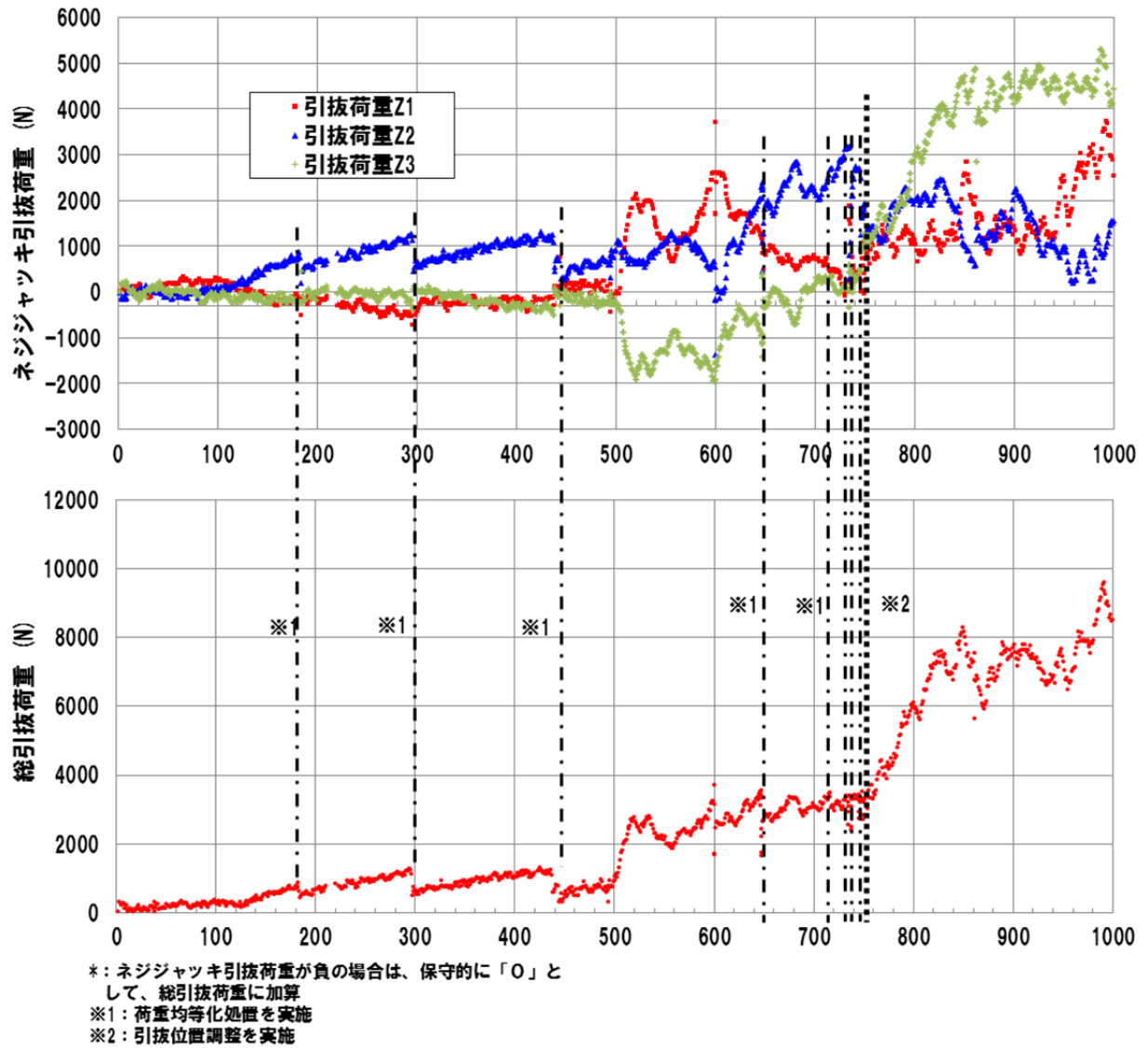


図 5.2.7 2～1000 mm 位置引抜時の荷重挙動

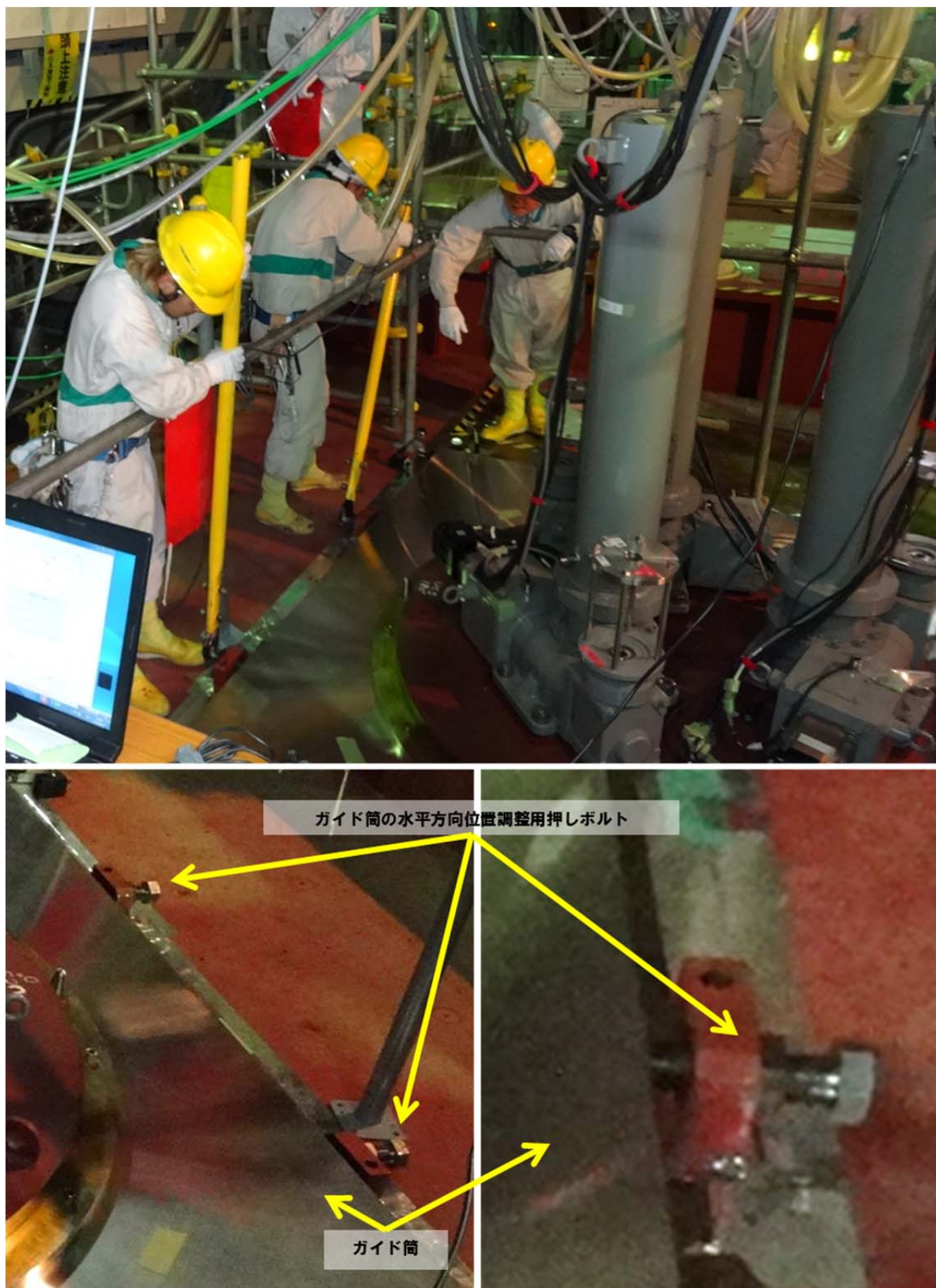


図 5.2.8 旧炉心上部機構の水平方向位置調整時の作業風景

5.2.3 旧炉心上部機構収納作業結果

旧炉心上部機構収納作業の時系列を図 5.2.9 に示す。平成 26 年 5 月 22 日 11 時 00 分より、旧炉心上部機構収納操作が開始され、12 時 40 分に 4480 mm 位置、13 時 58 分に 11426 mm 位置（上限）に旧炉心上部機構が到達し、14 時 15 分にドアバルブを「閉」とした。その後、旧炉心上部機構収納キャスクを建家外に搬出し、原子炉建家・原子炉付属建家の北側に隣接する旧廃棄物処理建家内まで輸送し、作業を完了した。主な結果を以下に示す。

5.2.3.1 収納時の荷重挙動

旧炉心上部機構収納作業時の荷重挙動を図 5.2.10 に示す。初期引拔荷重は、ジャッキアップ試験完了時と同様の、約 176 kN（静荷重 165 kN+引拔荷重 9 kN）であった。その後引拔が進むにつれて、許容荷重内での旧炉心上部機構と案内スリーブの干渉に起因する抵抗（もしくは、蒸着ナトリウムに起因する抵抗）が減少し、約 4250 mm 位置以降については、約 170 kN で概ね安定して推移した。収納作業中は、引拔上限となる 11426 mm 位置まで、許容荷重（181 kN）を超過することはなかった。なお、図 5.2.11 に示すように、約 4250 mm 位置以降からは、約 4250 mm 位置以前と比べて引拔荷重・水平度の挙動が変化した。この原因については、当該位置以降の引拔操作において、案内スリーブから旧炉心上部機構が完全に引き抜かれたことにより、旧炉心上部機構との干渉の可能性が無くなったため、引拔速度を増加させたことに伴って、ワイヤの摺換時に発生する荷重バランス（水平度）の変化が大きくなったことが推定される。

5.2.3.2 旧炉心上部機構下面及び案内スリーブの観察

旧炉心上部機構下面の観察結果⁶⁾を図 5.2.12 に示す。当該観察作業は、旧炉心上部機構引拔作業の最終段階において、耐放射線カメラを用いて実施した。旧炉心上部機構下面の状況は、平成 20 年に観察した結果と一致し、旧炉心上部機構収納作業において、脱落部品が生じていないことを確認した。また、案内スリーブの観察結果を図 5.2.13 に示す。案内スリーブに有意な変形等はなく、新炉心上部機構装荷に問題がないこと、及び設定した荷重条件が妥当であったことを確認した。

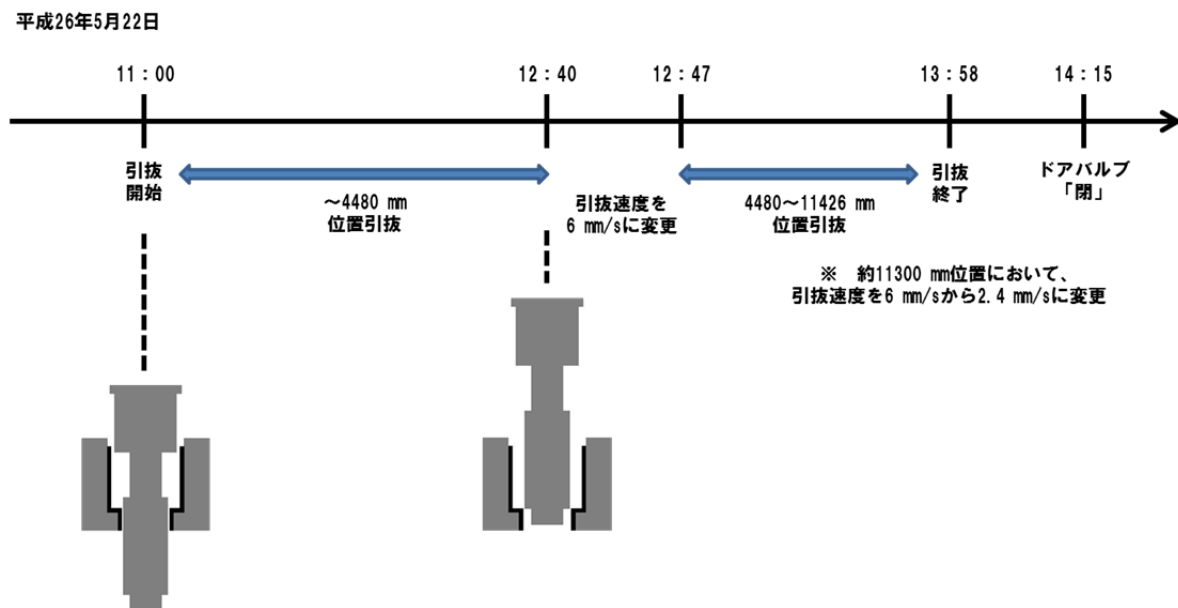


図 5.2.9 旧炉心上部機構収納作業の時系列

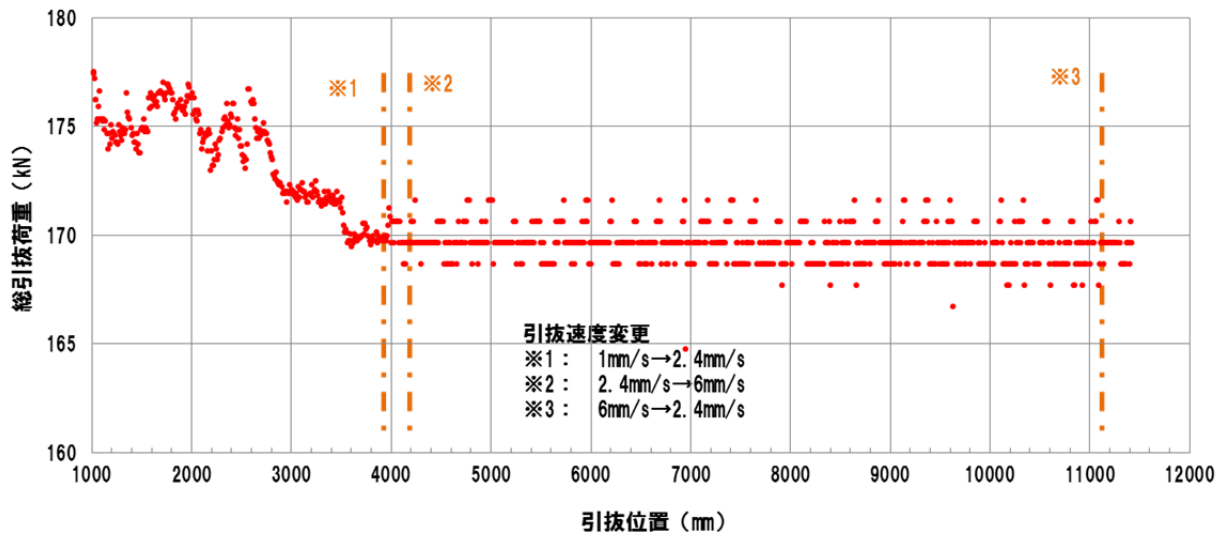


図 5.2.10 旧炉心上部機構収納作業時の荷重挙動

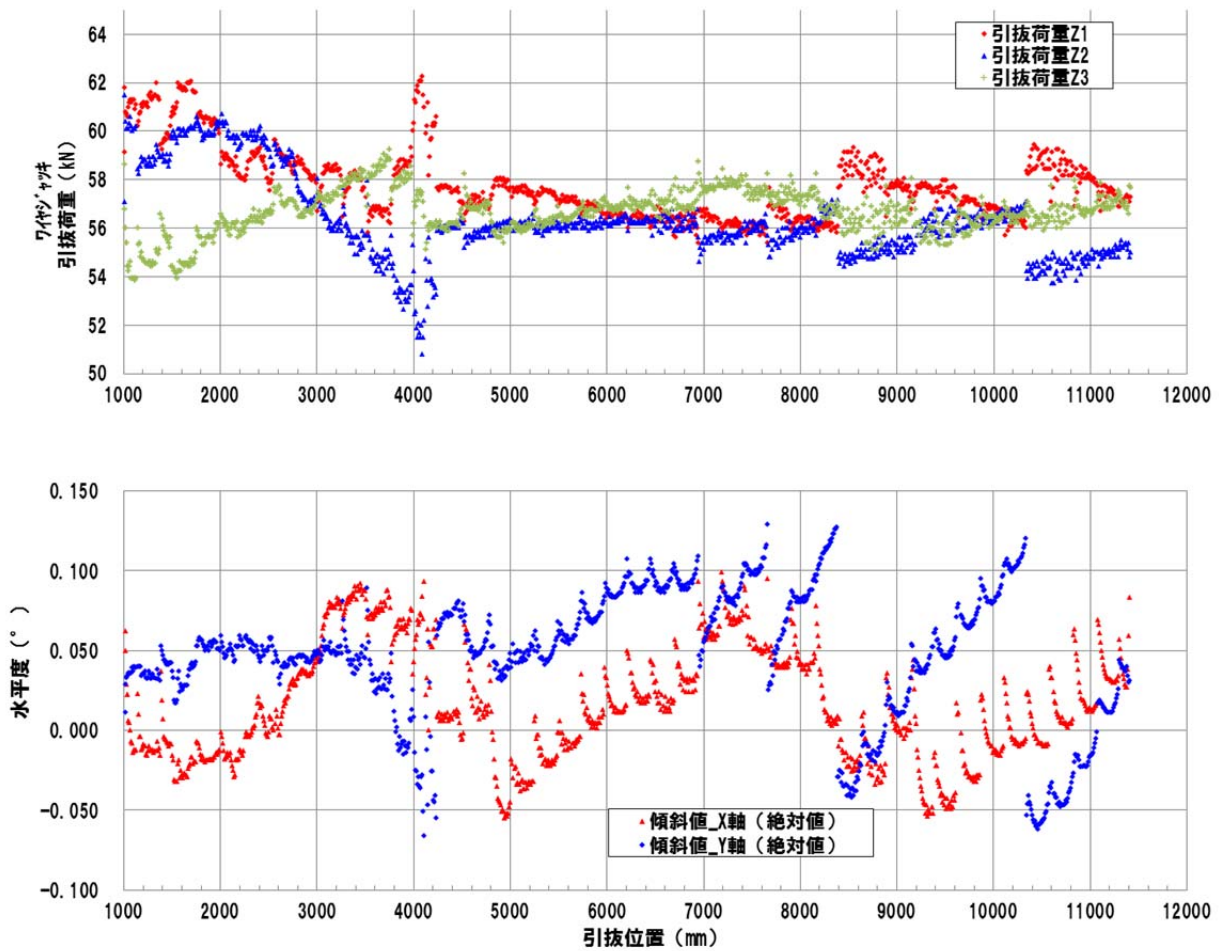


図 5.2.11 ワイヤ捆替時の荷重・水平度挙動

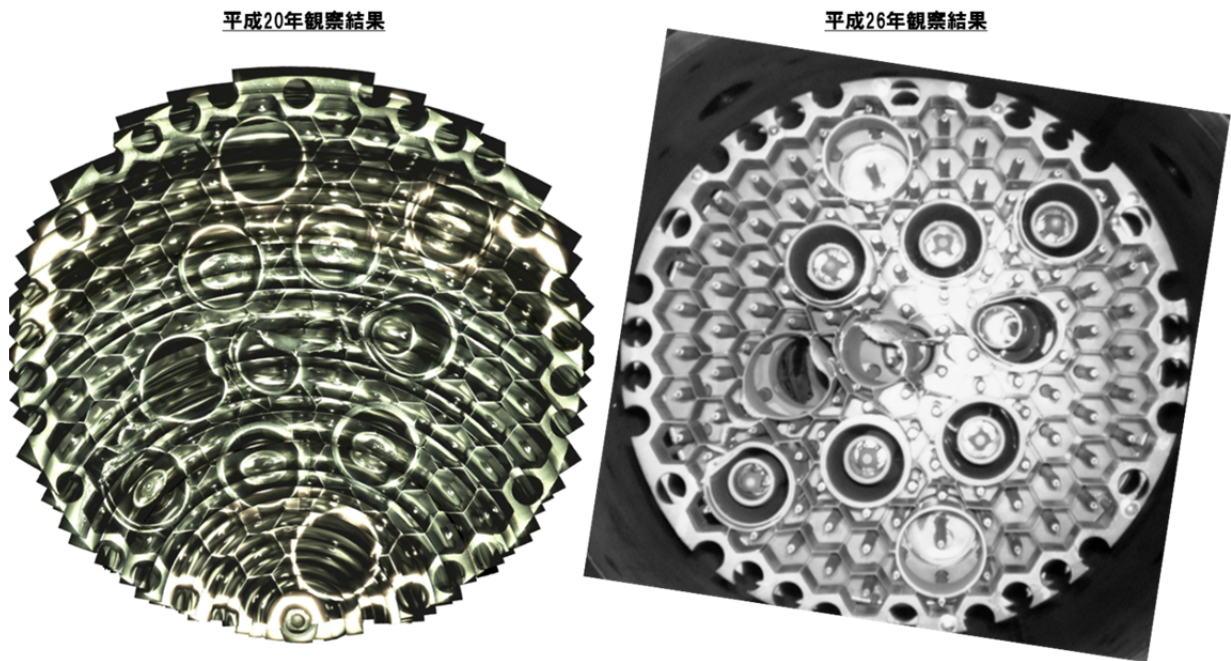


図 5.2.12 旧炉心上部機構下面の観察結果

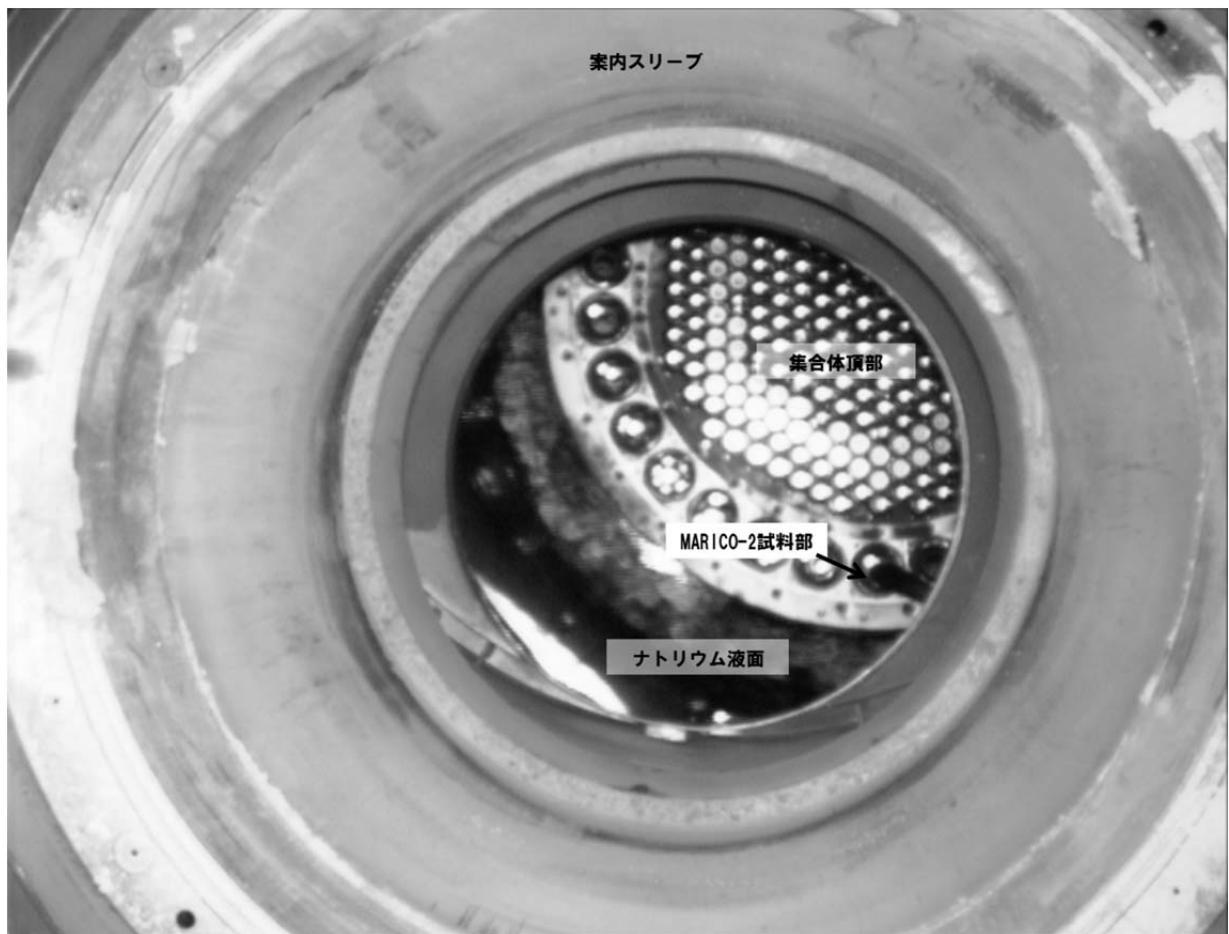


図 5.2.13 案内スリーブの観察結果

5.3 新炉心上部機構装荷作業結果

新炉心上部機構は、平成 26 年 6 月 27 日に大洗研究開発センターに搬入され、同センター内において、新炉心上部機構への上部案内管の組込作業を実施した。その後、「常陽」において、10 月 31 日に MARICO-2 試料部回収作業から新炉心上部機構装荷作業へと引き継がれ、11 月 1 日～12 月 17 日にかけて旧炉心上部機構収納作業を実施した（新炉心上部機構の挿入は 11 月 20～21 日に実施）。主な作業結果を以下に示す。

5.3.1 新炉心上部機構装荷作業の状況

新炉心上部機構装荷作業の実績工程を図 5.3.1 に示す。また、主要作業の状況・主要機材の配置等を図 5.3.2 に示す。旧炉心上部機構引抜作業は、事前に定めた手順に基づき、問題なく実施できた。

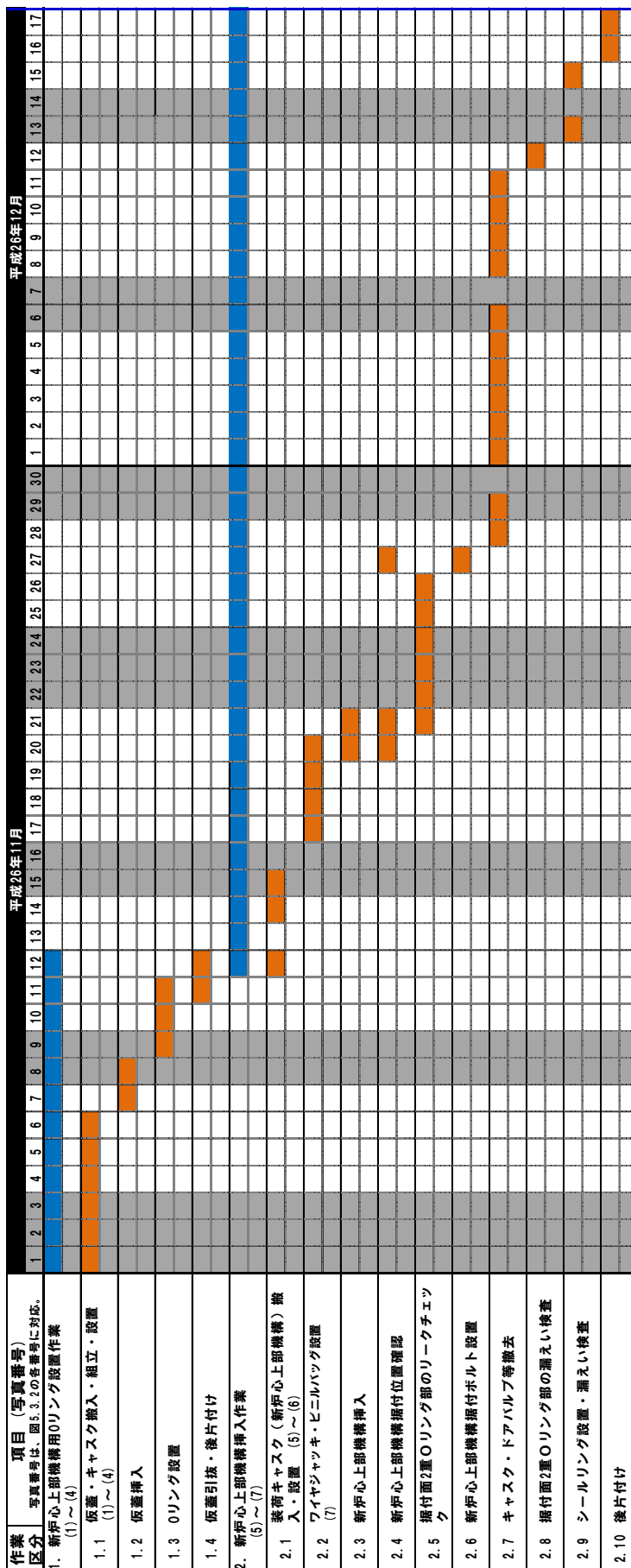


図 5.3.1 新炉心上部機構装荷作業の実績工程

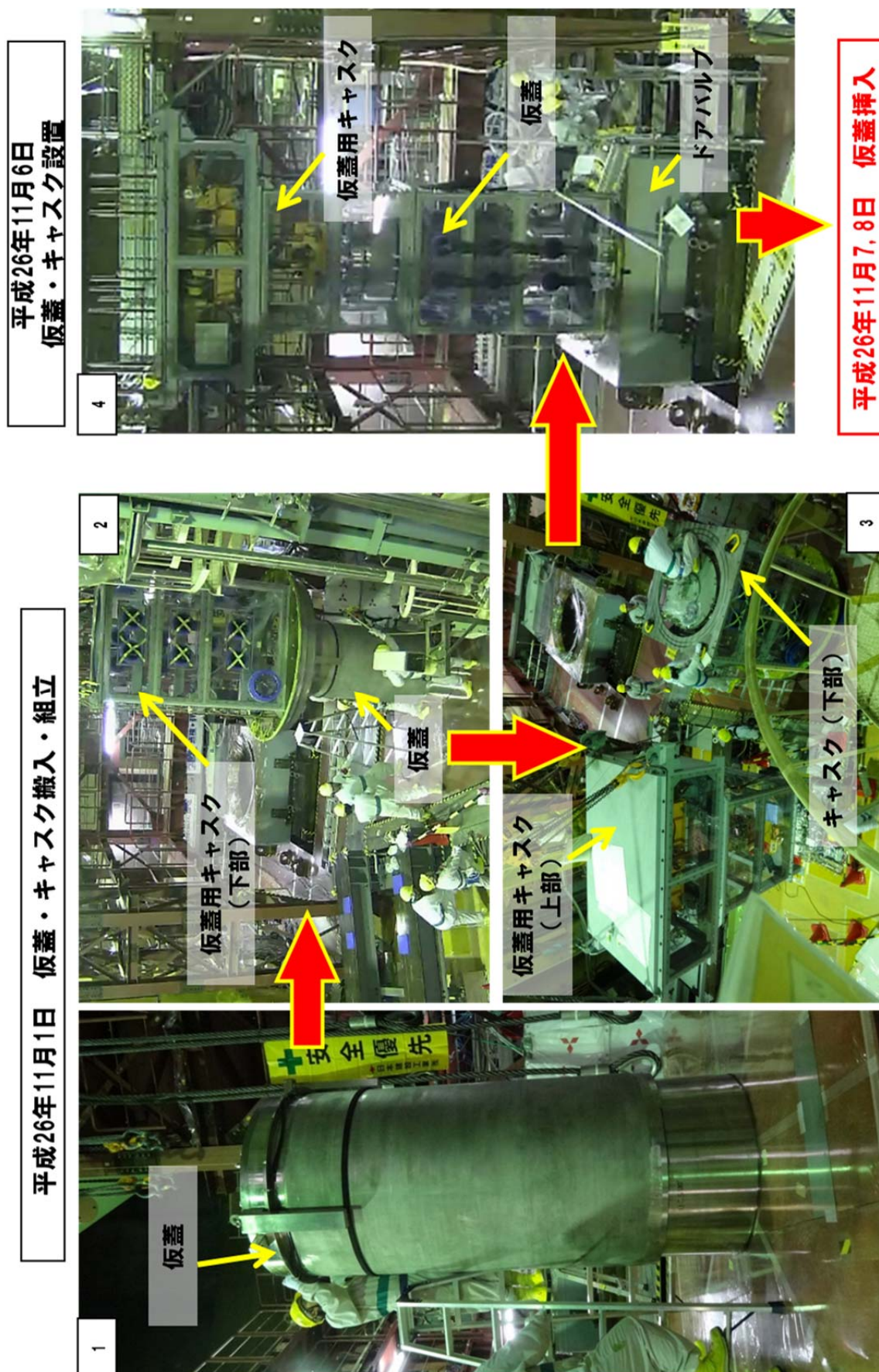


図 5.3.2 新炉心上部機構装荷作業の状況 (1/2)

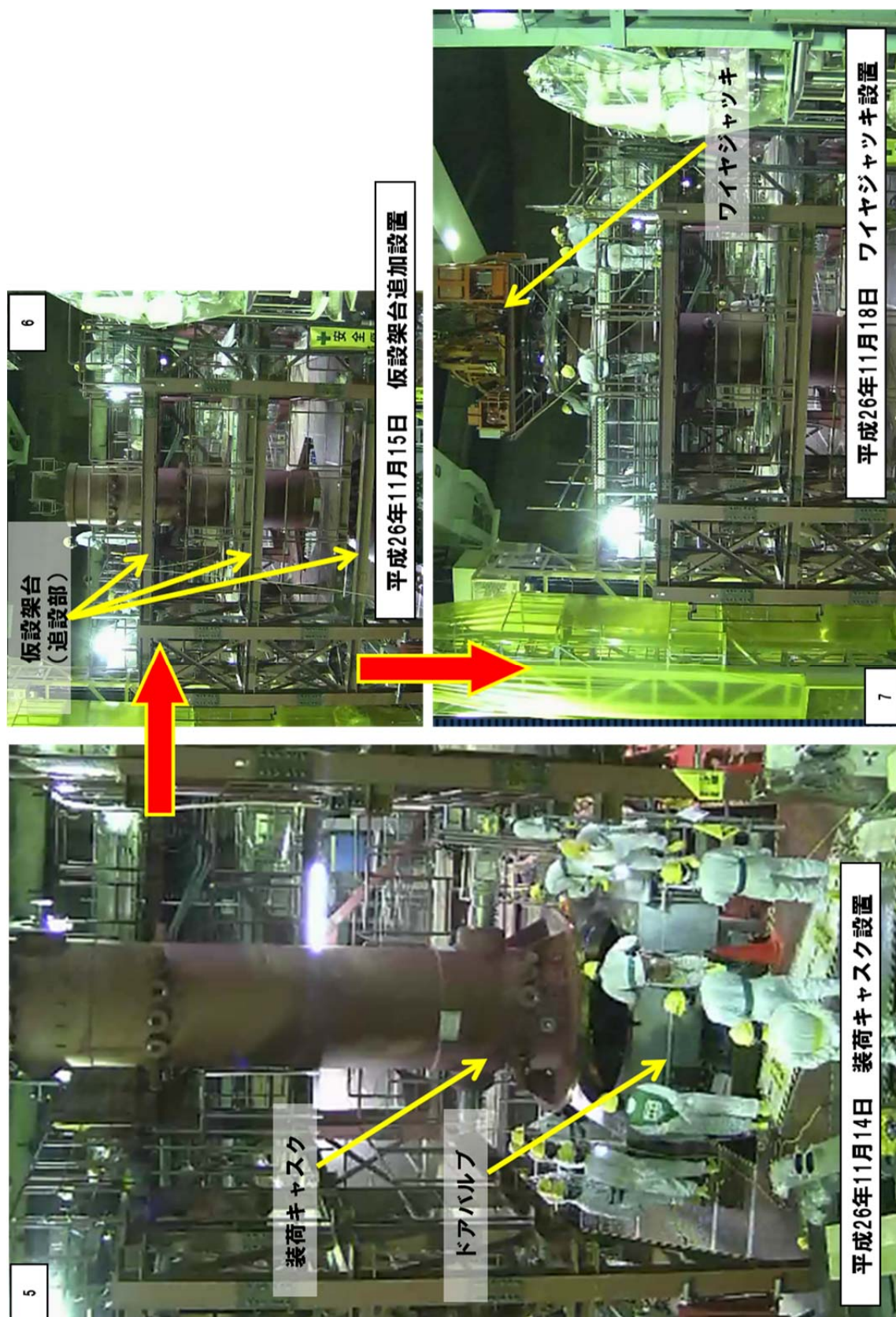


図 5.3.2 新炉心上部機構装荷作業の状況 (2/2)

5.3.2 新炉心上部機構用 O リング設置作業結果

(1) 仮蓋挿入・引抜

仮蓋挿入・引抜時の荷重挙動を図 5.3.3 に、仮蓋の挿入前後の案内スリーブ観察結果を図 5.3.4 に示す。仮蓋の挿入前後の案内スリーブ観察には、旧炉心上部機構の引抜時における炉心上部機構と案内スリーブの状況確認にも使用した、ビデオスコープを用いた嵌合部観察治具を使用した。仮蓋の挿入・引抜中の荷重（仮蓋の自重含む）は 51～52 kN で安定に推移した。また、嵌合部観察の結果、案内スリーブ（孔径の最も小さいφ1070 mm 部）について、有意な接触痕及び残存している付着ナトリウムがないことを確認した。以上から、仮蓋と案内スリーブとの干渉がなく、新炉心上部機構の装荷に必要なスペースが確保されていることを確認した。

(2) O リング設置

新炉心上部機構用 O リング設置作業は、仮蓋を挿入した状態で、ビニルバッグを介して実施した。本作業では、O リング設置面（2 重 O リング部の溝を含む）を清掃した後、2 本の O リングを設置した。新炉心上部機構用 O リングの設置状況を図 5.3.5 に示す。

本作業は、狭隘なエリアでの作業であったが、清掃に使用した工具、清掃方法、O リングの設置方法をフルモックアップ試験により確認していたこともあり、新炉心上部機構用 O リングを O リング溝に問題なく設置することができた。

5.3.3 新炉心上部機構挿入作業結果

新炉心上部機構挿入作業の時系列を図 5.3.6 に示す。新炉心上部機構の挿入は 11 月 20 日 10:35 より開始し、翌 21 日 2:15 に着座（0 mm 位置）を完了した。図 5.3.7 に新炉心上部機構挿入作業時の荷重挙動を示す。新炉心上部機構の挿入中の総荷重は、約 170 kN で概ね安定に推移した。約 4472 mm 位置において、新炉心上部機構と案内スリーブに干渉等が生じたものの、ワイヤジャッキ治具における高精度な水平度管理及び荷重管理が、ガイドローラーと相まって有効に機能し、新炉心上部機構挿入作業の継続を阻害するような干渉等の発生をこの 1 回に限定することができた。また、当該干渉等の発生時には、事前に整備した運用手順に基づき、ガイドローラーにより、挿入位置を約 5 mm スライドさせることで、干渉等を回避できしており、当該手順が妥当であったことが確認できた。主な結果を以下に示す。

(1) 11593～6245 mm 位置

新炉心上部機構が装荷キャスクより炉内へ向けて挿入され、干渉等発生の恐れのない当該範囲において問題なく実施できた。

(2) 6245～940 mm 位置

この位置では、新炉心上部機構の揺動防止と干渉発生時の回避操作の実施を目的として、ガイドローラーが取り付けられた。約 4472 mm 位置において、新炉心上部機構と案内スリーブに干渉が生じたが、荷重インターロックの作動により、許容荷重を超過することなくワイヤジャッキが停止した。その後、事前に整備した運用手順に基づき、ガイドローラーにより、挿入位置を約 5 mm スライドさせることで、干渉を回避し、挿入作業を継続した。

(3) 940～100 mm 位置

本位置では、ガイドローラーにより新炉心上部機構がサポートされ、新炉心上部機構の制御棒取付板のフランジボルト孔がガイドボルトを通過する様子をカメラにより確認した。回転プラグ上のビニルバック内を通過する新炉心上部機構の状況を図 5.3.8 に示す。

(4) 100～0 mm (着座)

着座の直前となる 100 mm 位置で、新炉心上部機構の制御棒取付板のフランジボルト孔に拘束治具を設置し、新炉心上部機構を着座させた。

新炉心上部機構の据付ボルト設置後の据付位置確認を実施した。据付位置確認の結果、下記に示すとおり、最もはなれた角度方向でも、新炉心上部機構の要求据付精度 ± 1.02 mm 以内となる、最大 0.35 ± 0.1 mm の精度で据え付けられたことを確認した。

(据付位置確認結果^{*1,*2})

0°位置 (90°-270°方向)	: -0.05 ± 0.1 mm
90°位置 (0°-180°方向)	: -0.28 ± 0.1 mm
180°位置 (90°-270°方向)	: 0.13 ± 0.1 mm
270°位置 (0°-180°方向)	: -0.35 ± 0.1 mm

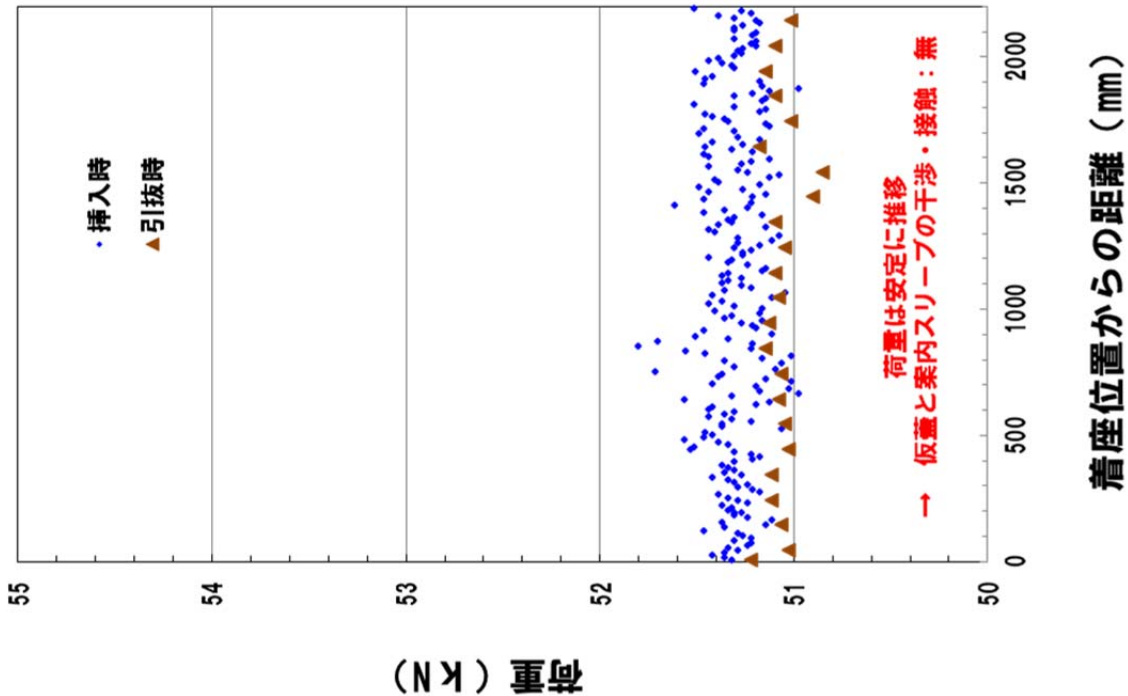
*1 据付位置の正負について

- ・ 90°-270°方向 : 90°側 (+) / 270°側 (-)
- ・ 0°-180°方向 : 0° 側 (+) / 180°側 (-)

*2 据付位置確認結果の ± 0.1 mm について

据付位置確認は、回転プラグ上のマーキング（規定位置）と新炉心上部機構のマーキングのズレ量を 0°、90°、180°、270°において計測する。また、マーキングに起因する誤差として ± 0.1 mm を考慮している。

据付位置確認後、12 月 12 日に新炉心上部機構の据付面 2 重 O リング部（新炉心上部機構と回転プラグ間）の漏えい検査を実施した。漏えい検査では、新炉心上部機構のリークチェックポートを通じて 2 重 O リングの間をアルゴンガスで加圧し、精密圧力計により圧力測定を行い、漏えい率を求めた。検査の結果、漏えい率は許容値 $1.013 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ に対し $2.861 \times 10^{-7} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ であり、許容値を満足した。以上により新炉心上部機構挿入作業を完了した。



【仮蓋の状況】

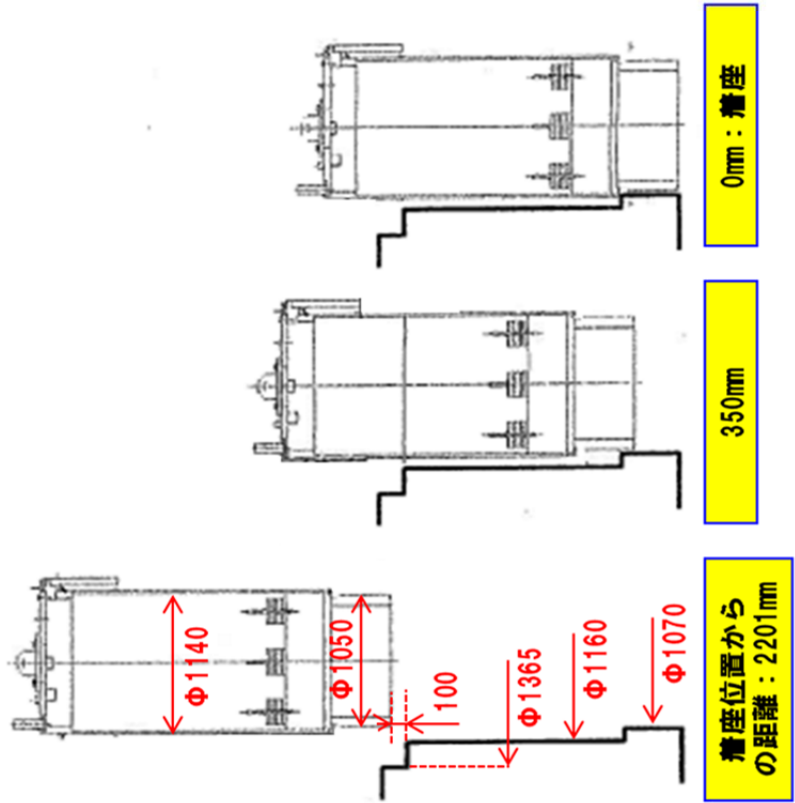


図 5.3.3 仮蓋挿入・引抜時の荷重挙動

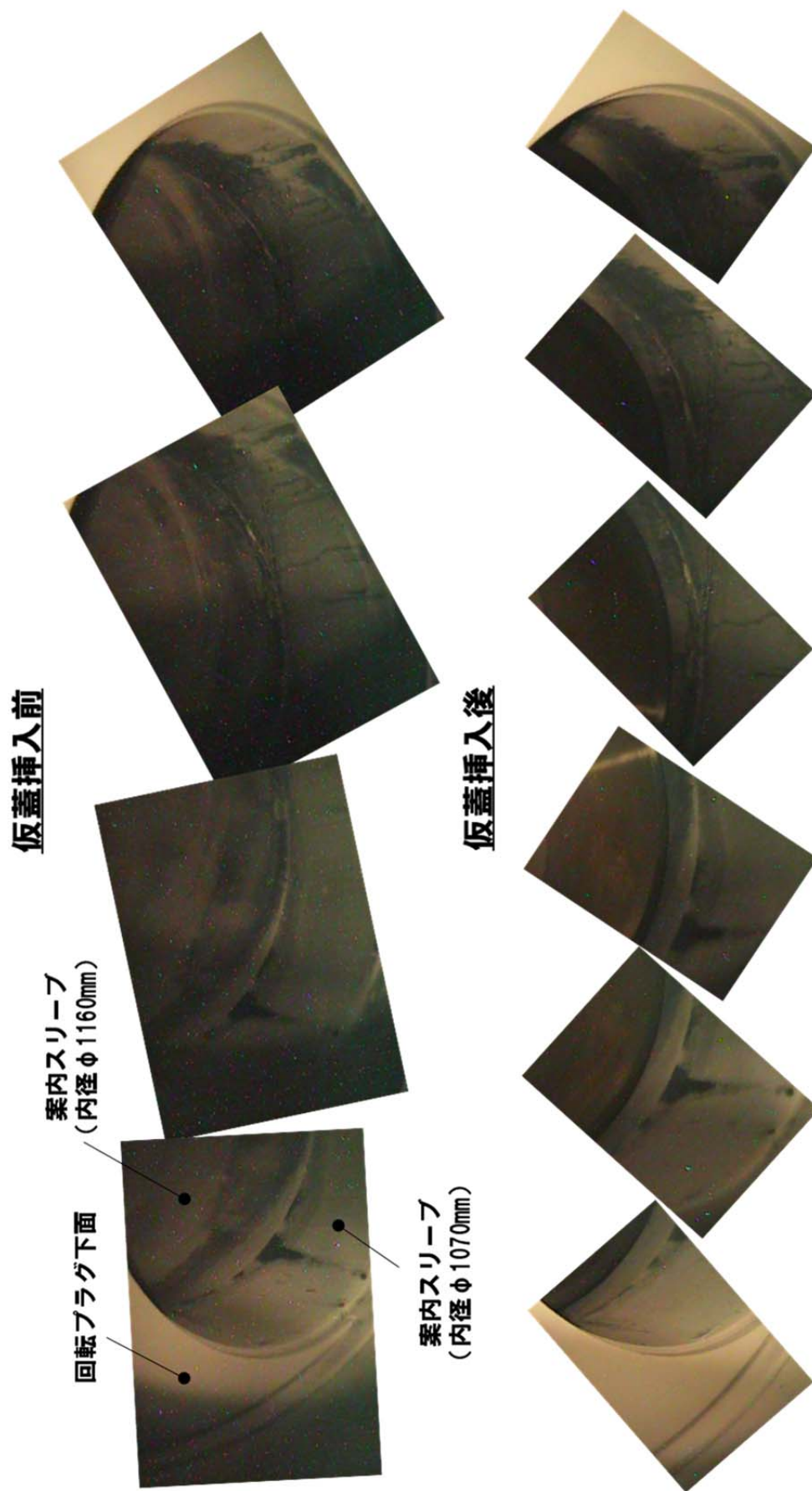


図 5.3.4 仮蓋挿入前後の案内スリーブ観察結果

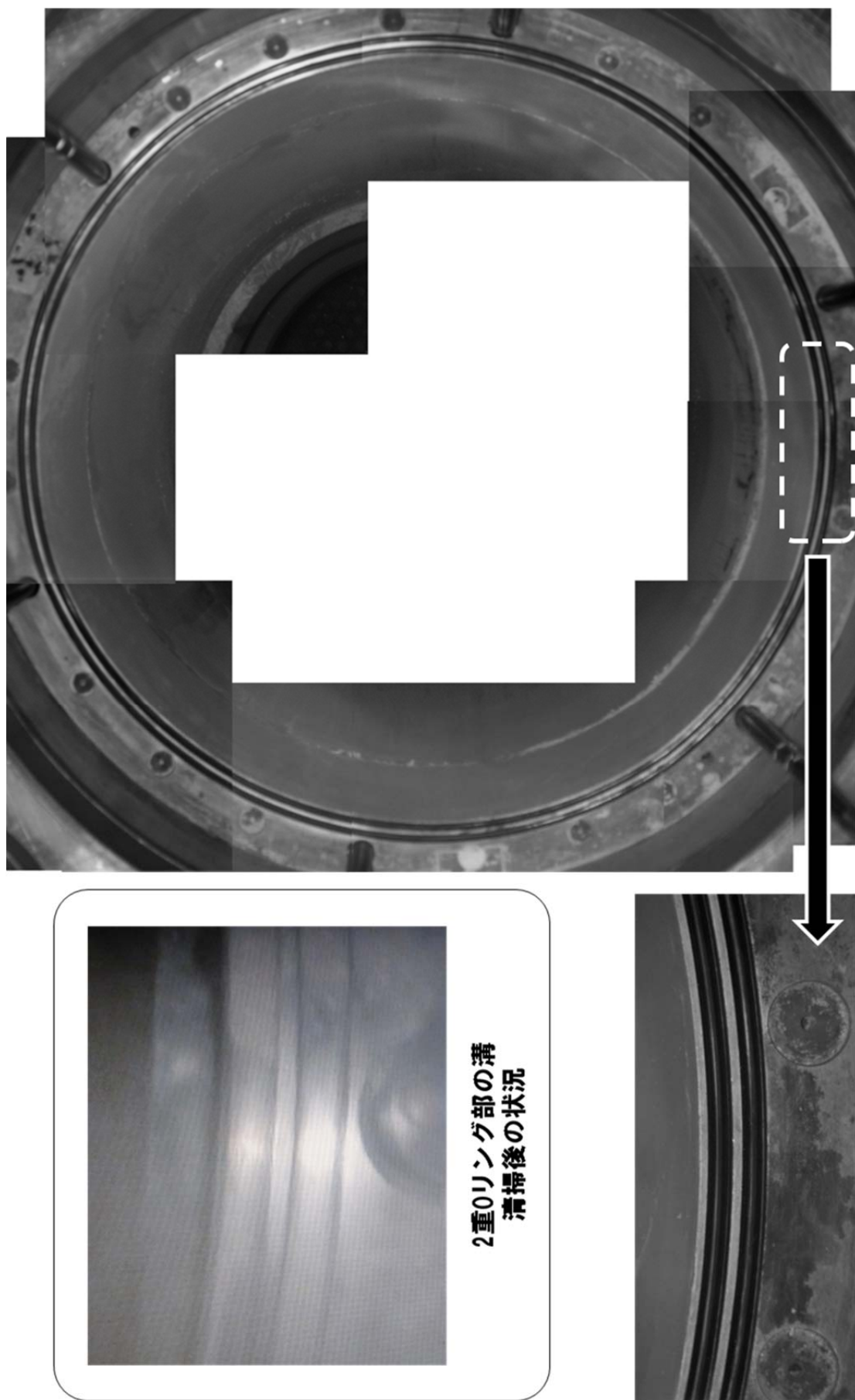


図 5.3.5 新炉心上部機構用 O リングの設置状況

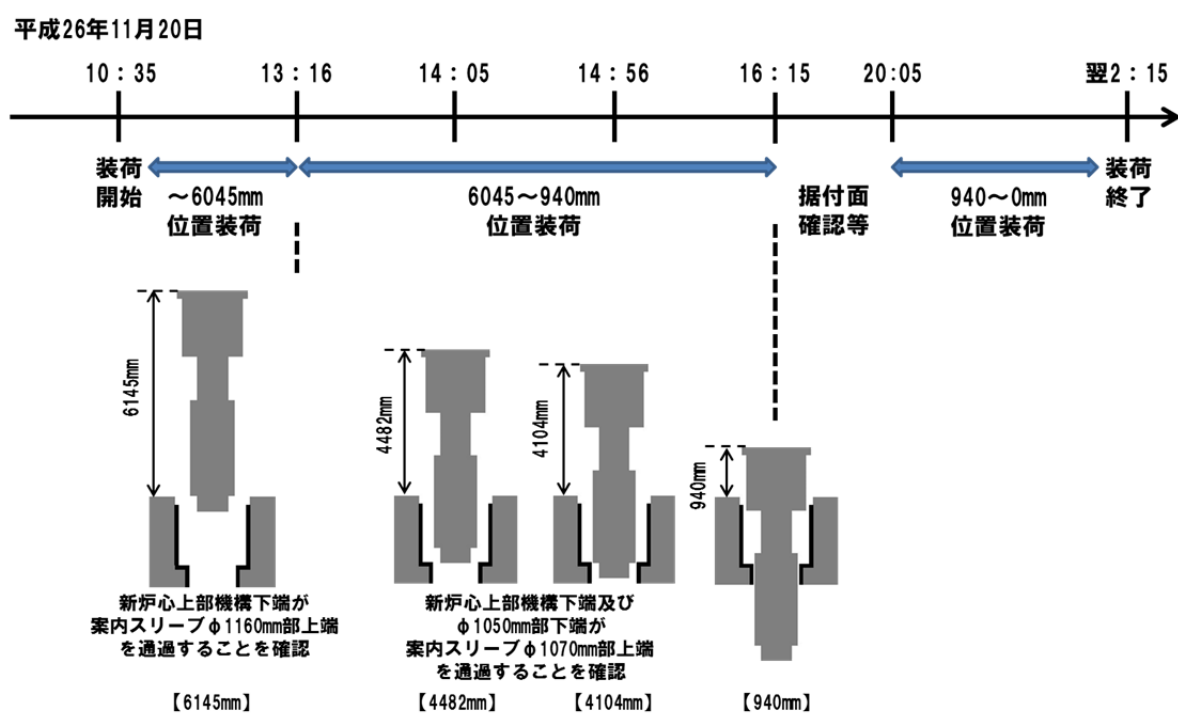


図 5.3.6 新炉心上部機構挿入作業の時系列

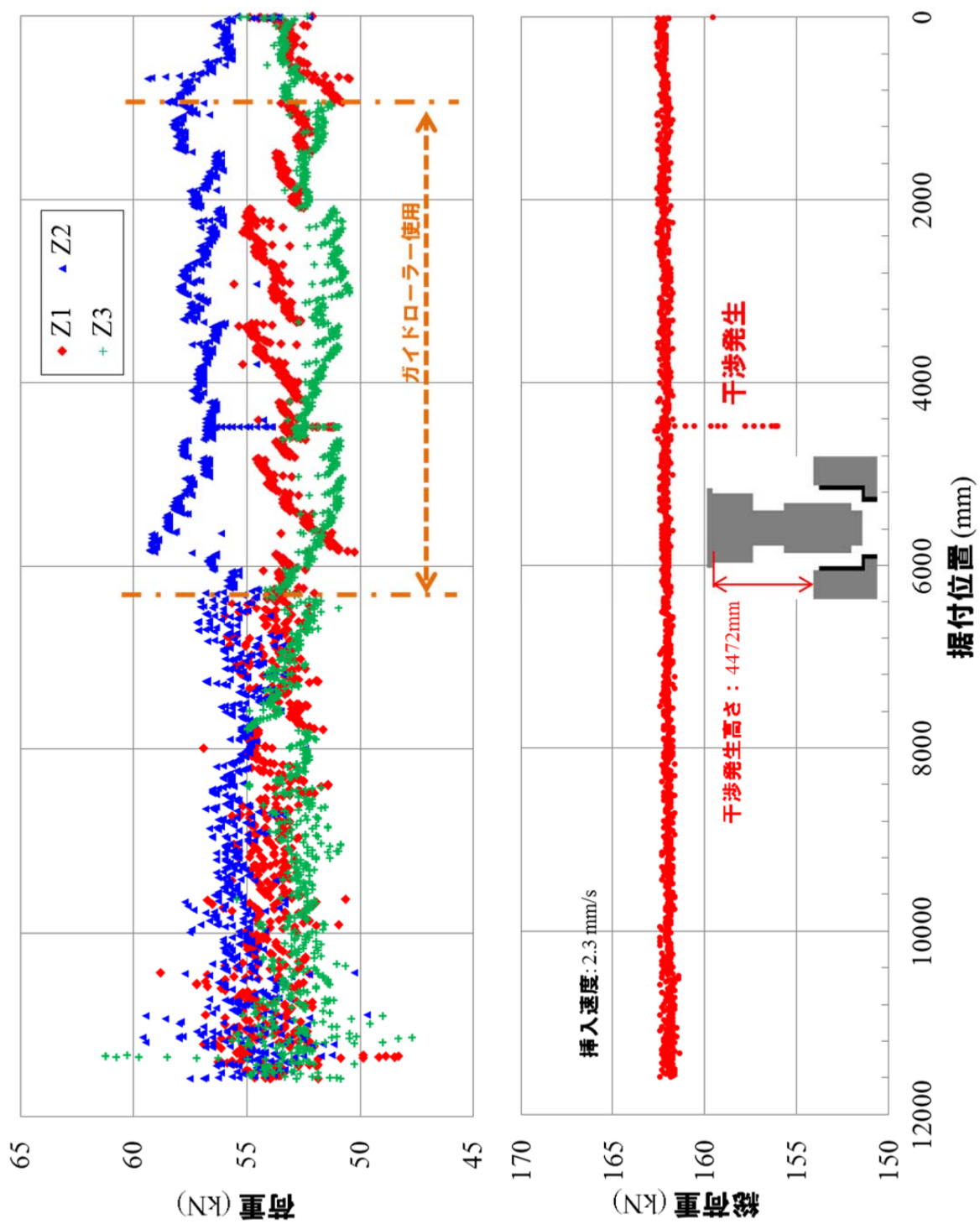


図 5.3.7 新炉心上部機構挿入作業時の荷重挙動

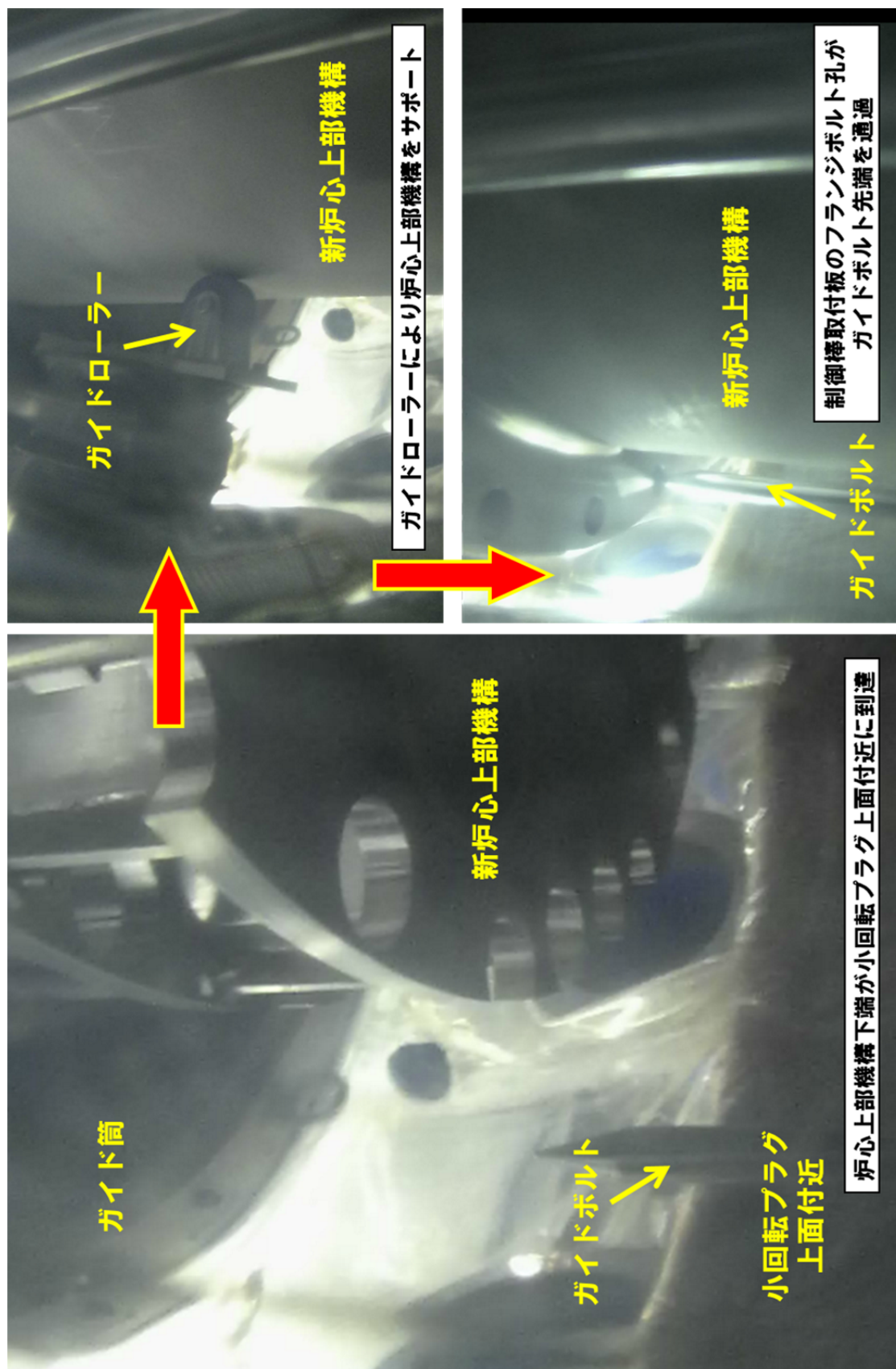


図 5.3.8 回転プラグ上のビニルバック内を通過する新炉心上部機構の状況

5.4 その他

5.4.1 カバーガスバウンダリの管理

炉心上部機構交換作業のステップに応じたカバーガスバウンダリの構成を図 5.4.1 に示す。炉心上部機構交換作業では、事前に定めた管理手順に基づき、原子炉容器内カバーガス圧力を 110～140 Pa に制御する一方で、ビニルバッグ圧力を 120～150 Pa で制御することとした。また、ジャッキアップ試験開始後～新炉心上部機構装荷作業完了までの、原子炉容器とビニルバッグが導通した状態にあつては、アルゴンガスブローを実施することにより、原子炉容器内からの高温カバーガスの上昇を抑制し、ビニルバッグ温度を概ね 60℃以下に管理し、作業期間中のカバーガスバウンダリの健全性を確保した。

ビニルバッグ内側に設置した防護板については、旧炉心上部機構収納作業時において、旧炉心上部機構からの輻射熱によるビニルバッグ昇温抑制の観点で有効であった。一方、旧炉心上部機構引抜作業にて、十分なアルゴンガスブローにより、高温のカバーガスの上昇を防ぐことが可能であることが確認できたことから、旧炉心上部機構からのふく射熱に係る対応を必要としない新炉心上部機構装荷作業においては、防護板の設置を不要とし、作業の効率化を図った。

ビニルバッグ圧力は、循環型カバーガス微正圧制御システム¹⁰⁾により制御される。アルゴンガスの流れを図 5.4.2 に示す。アルゴンガスブローダウン流量は、ブローダウン面積に応じて、旧炉心上部機構ジャッキアップ試験（0～1000 mm 位置引抜）時において約 0.1 m³/min、旧炉心上部機構収納作業（1000～11426 mm 位置引抜）時及び新炉心上部機構装荷作業時において約 0.3 m³/min とした。なお、旧炉心上部機構収納作業時にあつては、旧炉心上部機構が高い表面線量率を有していることから、仮設ピット蓋下面の作業環境線量率が高くなり、ビニルバッグが破損した際に作業員が近接できないことを踏まえ、図 5.4.3 に示すように、鋼製バウンダリをビニルバッグ外側に設置している。ビニルバッグ圧力を微正圧に維持しつつ、必要に応じて鋼製バウンダリ圧力を微負圧にすることにより、万一のビニルバッグ破損時においても、流出したアルゴンガスの作業環境中への放散及びバウンダリ外部雰囲気原子炉容器内混入を防止している。

5.4.2 作業環境線量率の挙動

炉心上部機構交換作業時の作業環境線量率測定結果の一例として、旧炉心上部機構引抜作業中のエリアモニタ指示値を図 5.4.4 に示す。旧炉心上部機構は、30 年以上の使用実績を有するため、その放射化により高い表面線量率を有する。作業環境線量率を低減するため、炉心上部機構交換作業用機材の概要で述べたように、必要に応じて遮へい体を設置した。また、計画外の被ばくを防止するために、旧炉心上部機構収納作業中（引抜位置 1000 mm 以上）～新炉心上部機構装荷作業中は、仮設ピット蓋より下のエリアへの立入を禁止し、全ての作業を仮設ピット蓋より上の位置で操作することとしている。

立入を禁止した仮設ピット蓋下方のエリアにおいては、作業環境線量率が一時的に 100 mSv/h を超過したことが確認された（事前評価値は 400 mSv/h 以上）。なお、仮設ピット蓋上面やその他のエリアにおける作業環境線量率は、仮設ピット蓋等による適切な遮へい対策により、最大約 5 μ Sv/h であった。

最終的に炉心上部機構交換作業全体における個人最大被ばく線量は 0.13 mSv、総線量は 1.1 人・mSv であり、適切な被ばく量低減対策により、延べ 4000 人が従事した本作業の被ばく量を極めて小さくすることができた。

5.4.3 旧炉心上部機構用 O リングの経年劣化評価

旧炉心上部機構の設置されていた O リングについては、プラント状態等からシール機能に問題がない状態であることを確認しているものの、カバーガスバウンダリとして 30 年以上使用した O リングを回収した稀少な機会であることを踏まえ、外観観察、断面観察及び硬度測定による経年劣化調査を実施した。主な結果等を以下に示す。

(1) 対象品

① 旧炉心上部機構用 O リング（内側）

寸法：直径 ϕ 1170 mm／幅 10 mm

材質：EPDM（硬さ：JIS Hs 70 $\pm$ 5）

員数：1 本（O リング撤去の際に 1 箇所を切断した状態）

② 旧炉心上部機構用 O リング（外側）

寸法：直径 ϕ 1204 mm／幅 10 mm

材質：EPDM（硬さ：JIS Hs 70 $\pm$ 5）

員数：1 本（O リング撤去の際に 1 箇所を切断した状態）

(2) 外観検査

旧炉心上部機構用 O リングの外観観察結果を図 5.4.5 に示す。外観観察では、O リング表面にシール機能を阻害する有害な摩耗痕、圧縮痕やキズがないことが確認できた。

(3) 断面観察（寸法・変形状況確認を含む）

旧炉心上部機構用 O リングの断面観察結果を図 5.4.6 に示す。断面形状は、使用箇所（O リング溝：深さ 8 mm、幅 12 mm）に模した形状に圧縮永久歪を起し（圧縮永久歪は一般的なシール寿命である 80%を超過）、変形していた。しかしながら、幅寸法最小部分を光学顕微鏡にて確認したところ、最小部でも 8.4 mm あり、0.4 mm の有効つぶし代が確保されていることが確認できた。

(4) 硬度測定

旧炉心上部機構用 O リングの硬度は、Hs81（内側）／85（外側）であり、硬化劣化していることが確認できた。一方、ゴム弾性は喪失されていないことが確認できた。

上記（1）～（4）を踏まえると、旧炉心上部機構用 O リングは硬化劣化し、圧縮永久歪はシール寿命に到達しているものの、十分な有効つぶし代を保有し、かつゴム弾性も保たれていることから、シール機能が保持されていたことが確認できた。

5.4.4 大型重量物等の輸送

炉心上部機構交換作業で使用した機材は、3.4 にて述べたように大型重量物が含まれる。これらのうち、公道における重量・寸法上の輸送制限に該当する機材については海上輸送とし、大洗港より水揚げ後は大洗研究開発センターまで陸上輸送を実施することとした。炉心上部機構交換作業に使用した機材のうち、その陸上輸送にあたり、公道における重量・寸法上の陸上輸送制限緩和を得るために特別な手続きを要し、夜間陸上輸送を実施した大型重量物の一覧を表 5.4.1 に示す。これらの機材は、作業時期に応じて、平成 26 年 3 月 12 日、15 日、もしくは 6 月 25 日に大洗港に到着し、3 月 13～14 日、17～18 日、もしくは 6 月 27 日に大洗研究開発センターに輸送された。輸送経路を図 5.4.7 に示す。輸送経路には、涸沼川橋下を通過する「経路 A」と袖ヶ浦橋を使用する「経路 B」があり、袖ヶ浦橋の重量制限より、車両積載総重量が 40 トンを上回るものについては「経路 A」、40 トン以下のものについては「経路 B」を使用している（仮設ピット蓋（F-4）については、車両積載総重量が 40 トン以上であったが、特例により「経路 B」を使用）。積載車詳細を図 5.4.8～図 5.4.15、輸送隊列を図 5.4.16 に示す。なお、輸送にあたっては、車両総重量・寸法より、必要となる特殊車両通行許可及び制限外積載等許可を取得した（上空／幅員／看板／信号に係る障害物：無）。大型重量物輸送の様子を図 5.4.17 に示す。当該輸送は、計画に基づき、安全に終了した。

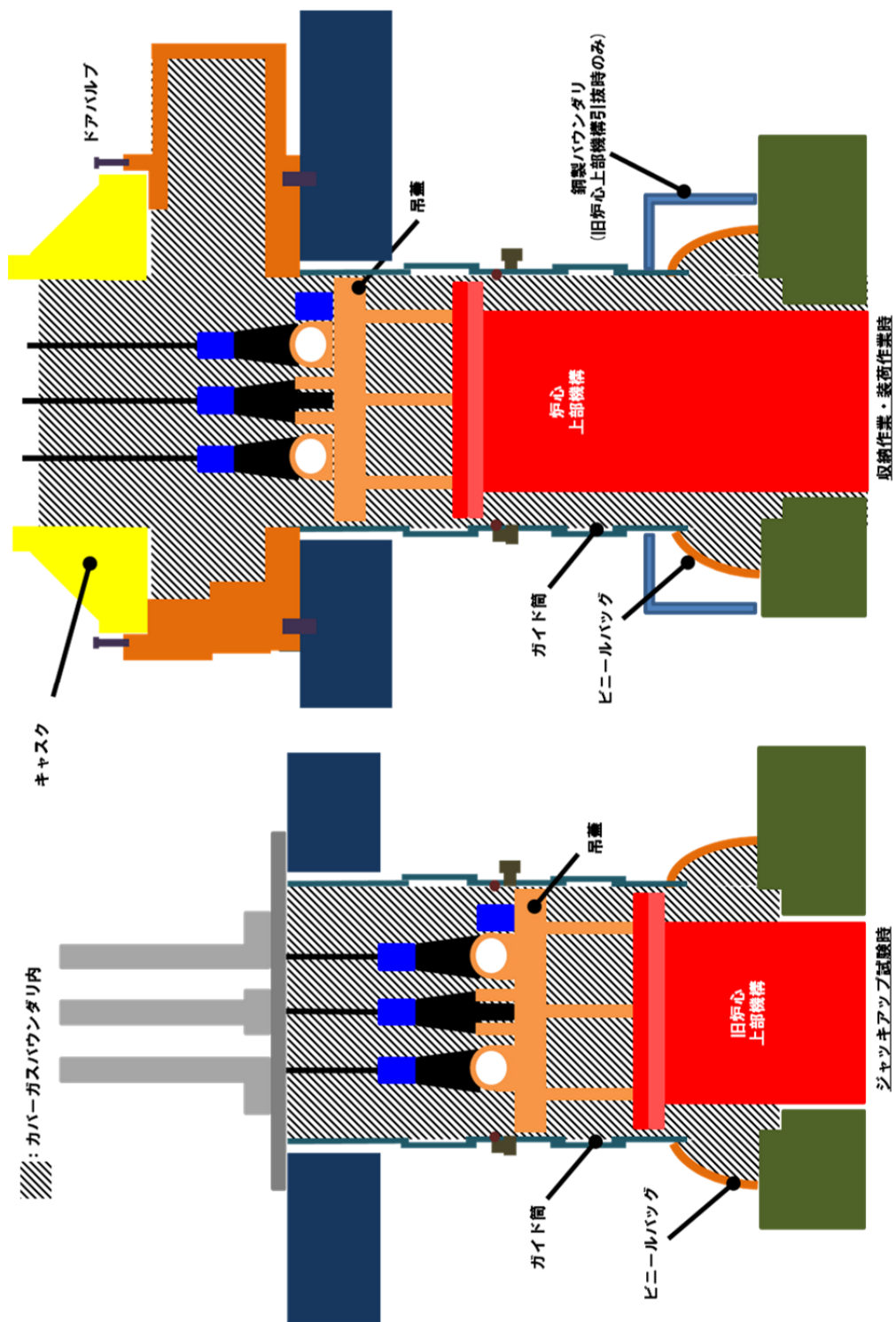


図 5.4.1 カバースタンドの構成

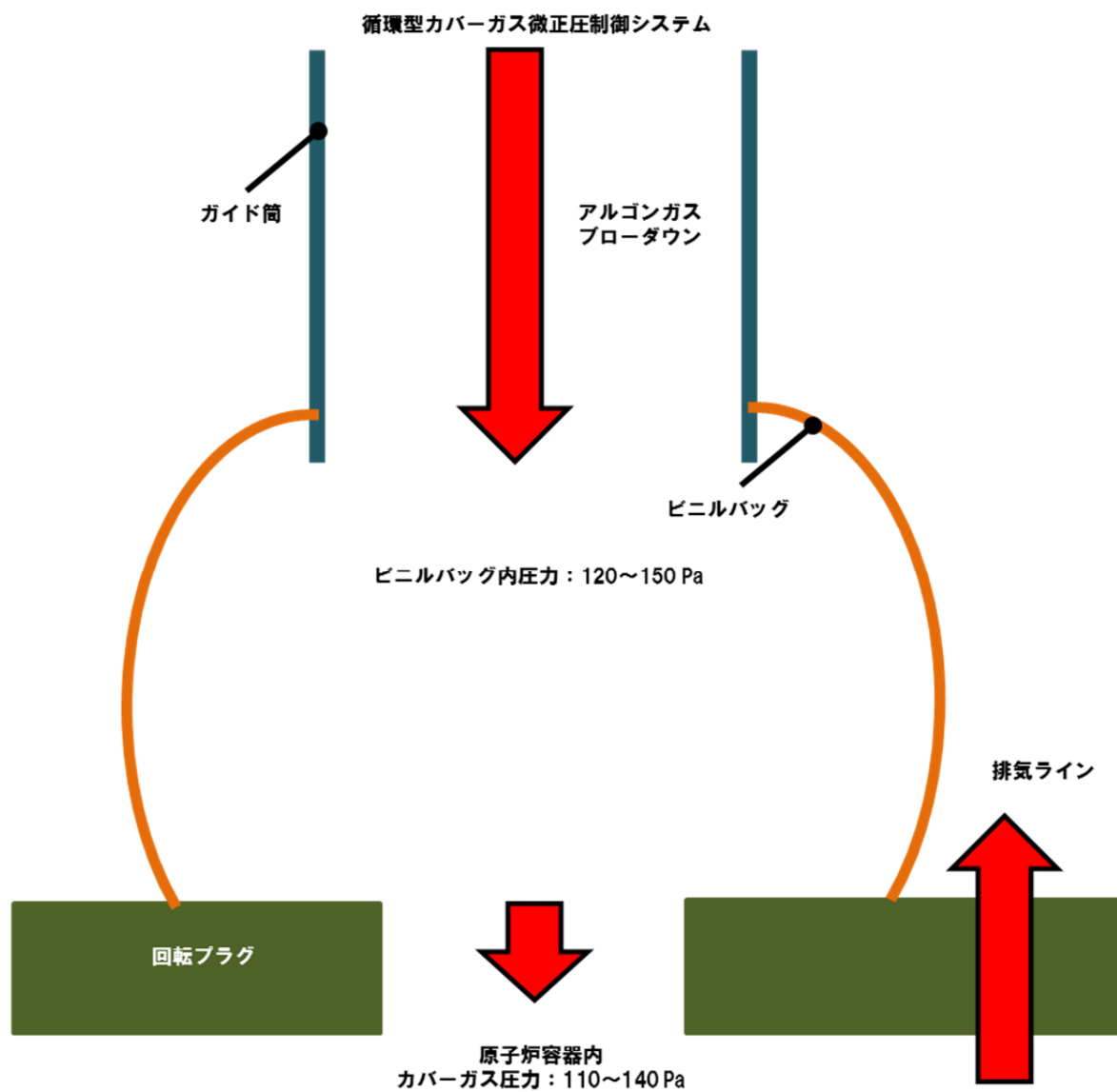


図 5.4.2 炉心上部機構交換作業時のアルゴンガスの流れ

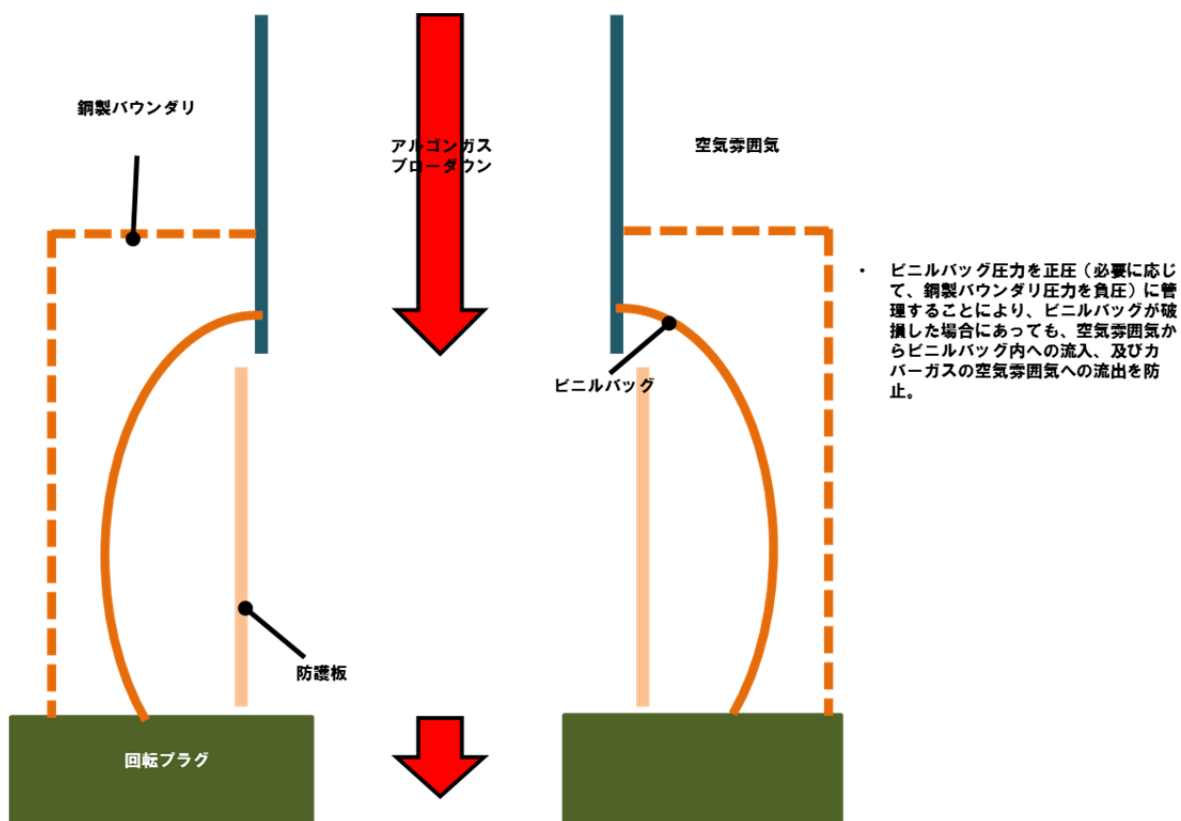


図 5.4.3 鋼製バウンダリの概要

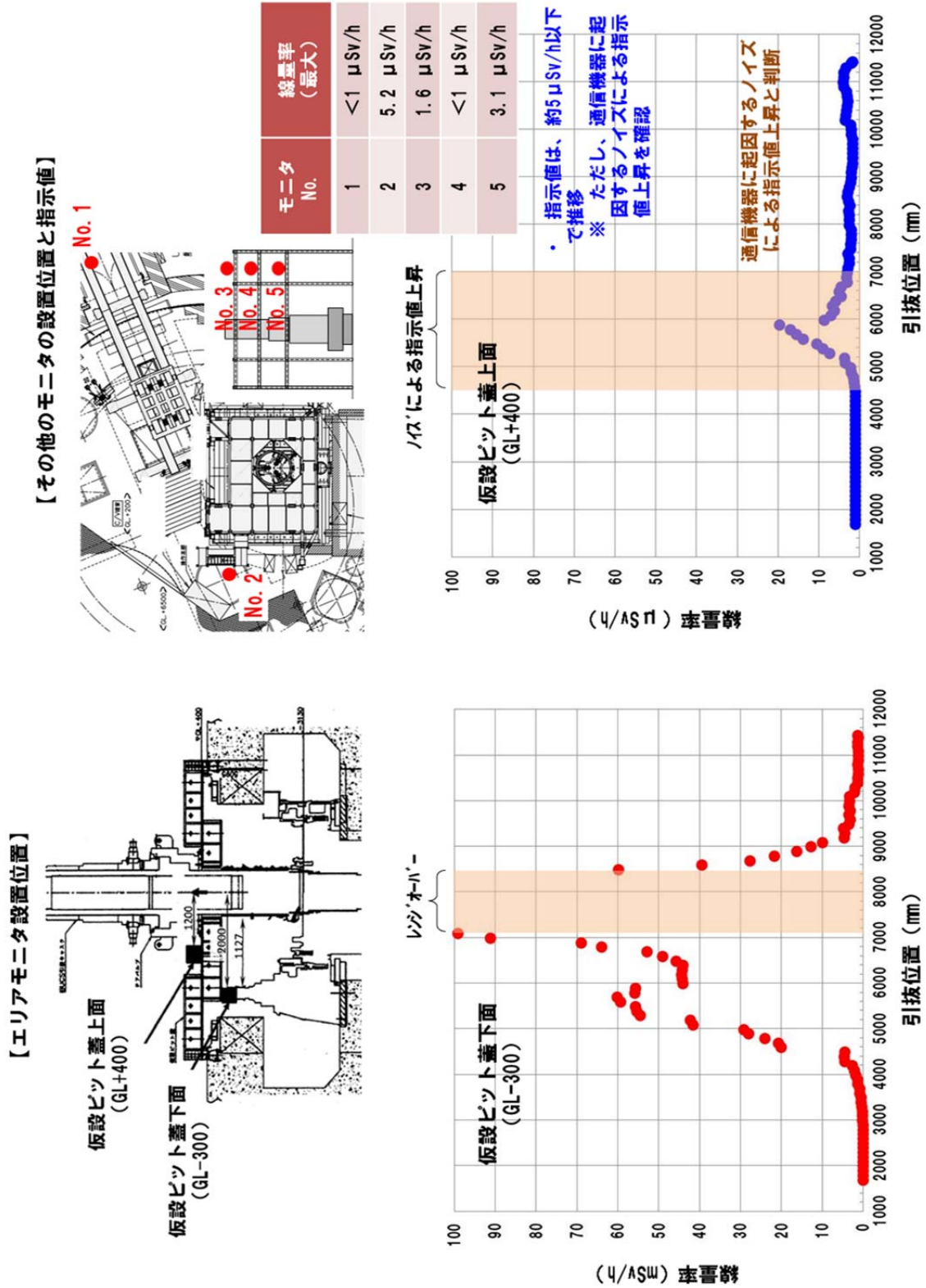


図 5.4.4 旧炉心上部機構引抜作業中のエリアモニタ指示値

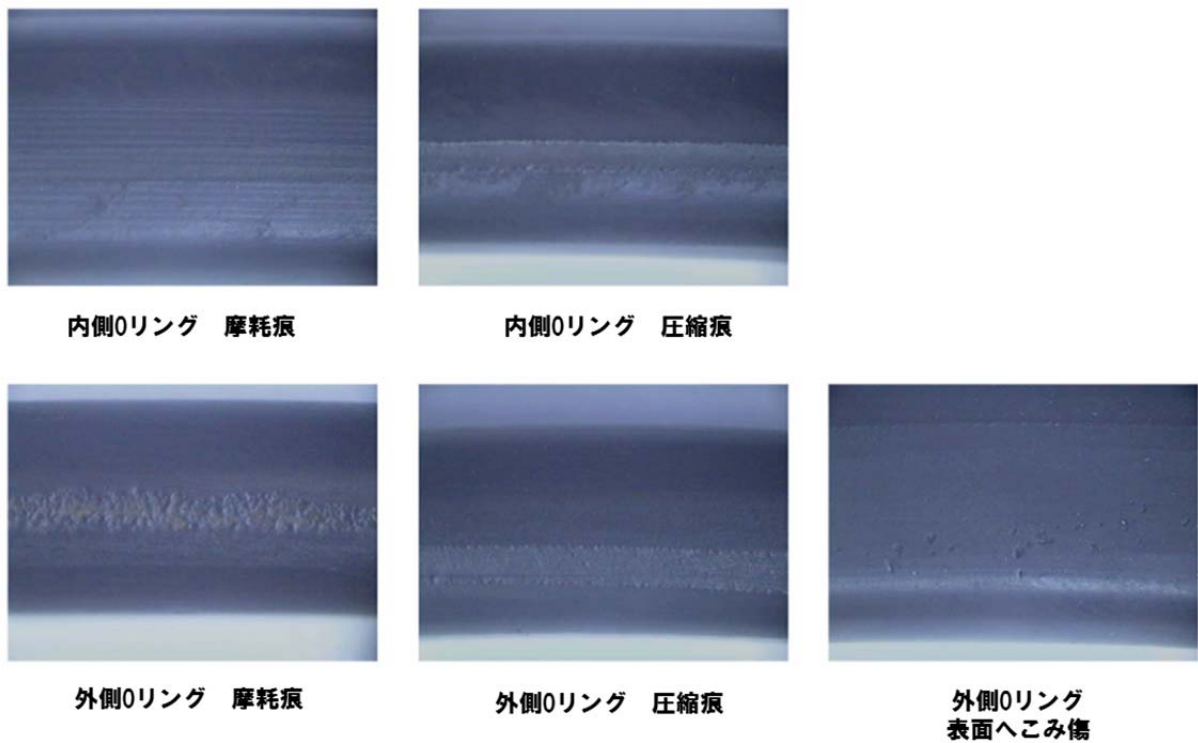


図 5.4.5 旧炉心上部機構用 O リングの外観観察結果

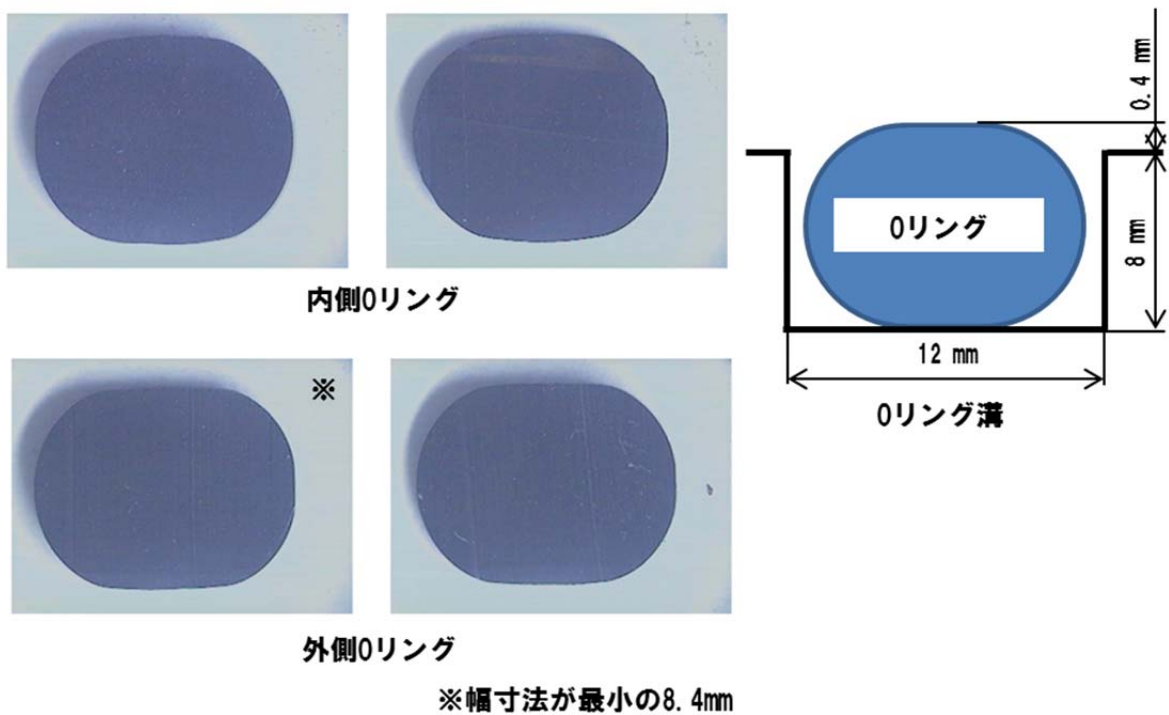


図 5.4.6 旧炉心上部機構用 O リングの断面観察結果

表 5.4.1 大型重量物輸送品一覧

輸送物名称	陸送用車両	車両積載寸法 (mm) (長さ×幅×高さ)	車両積載 総重量	特殊車両 通行許可	制限外 積載等許可	輸送経路	輸送日時
旧炉心上部機構 収納キャブ保管用スリッド	低床 トラレーザ	17010×2990×1650	34730 kg	該当	—	経路 B	平成 26 年 3 月 13 日 22 : 00～24 : 00
ジャッキアップ治具	低床 トラレーザ	16580×2990×4618	25500 kg	該当	該当	経路 B	平成 26 年 3 月 13 日 23 : 00～翌 1 : 00
旧炉心上部機構 収納キャスク	多軸キャリア	11980×3190×4615	94800 kg	該当	該当	経路 A	平成 26 年 3 月 14 日 1 : 00～3 : 00
仮設ピット蓋 (F-4)	トラレーザ	16880×2990×2480	46920 kg	該当	—	経路 B	平成 26 年 3 月 17 日 22 : 00～24 : 00
ドアバルブ	多軸キャリア	11980×3190×3888	108500 kg	該当	該当	経路 A	平成 26 年 3 月 17 日 23 : 30～翌 1 : 30
仮設ピット蓋 (F-2)	低床 トラレーザ	17892×3190×2480	79300 kg	該当	—	経路 A	平成 26 年 3 月 18 日 1 : 00～3 : 00
仮設ピット蓋 (F-3)	多軸キャリア	11980×3190×3380	97500 kg	該当	—	経路 A	平成 26 年 3 月 18 日 2 : 00～4 : 00
新炉心上部機構 装荷キャスク (新炉心上部機構含む)	多軸キャリア	11980×3200×4615	83500 kg	該当	該当	経路 A	平成 26 年 6 月 27 日 0 : 00～1 : 00

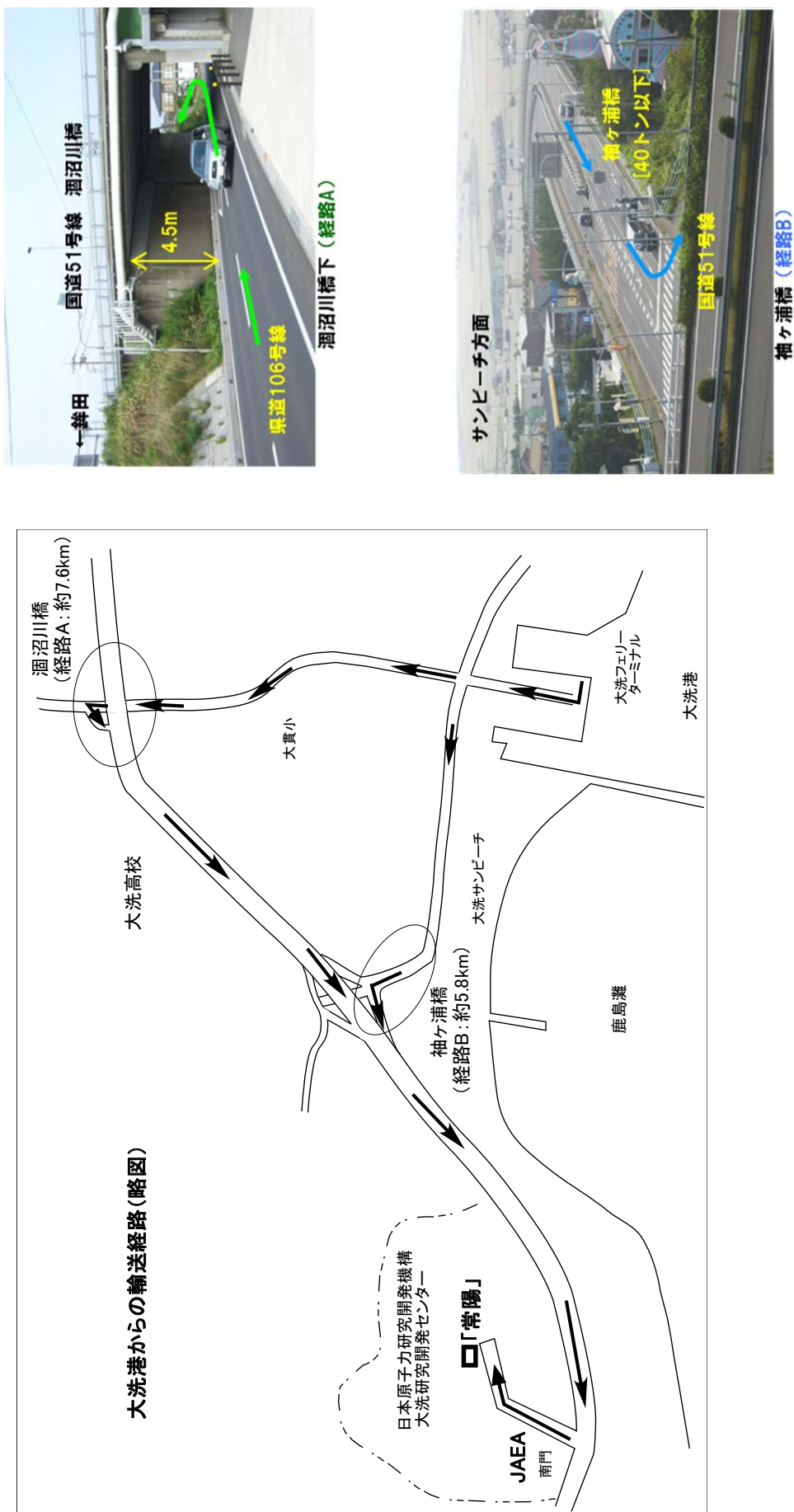


図 5.4.7 炉心上部機構交換作業用大型重量物の輸送経路

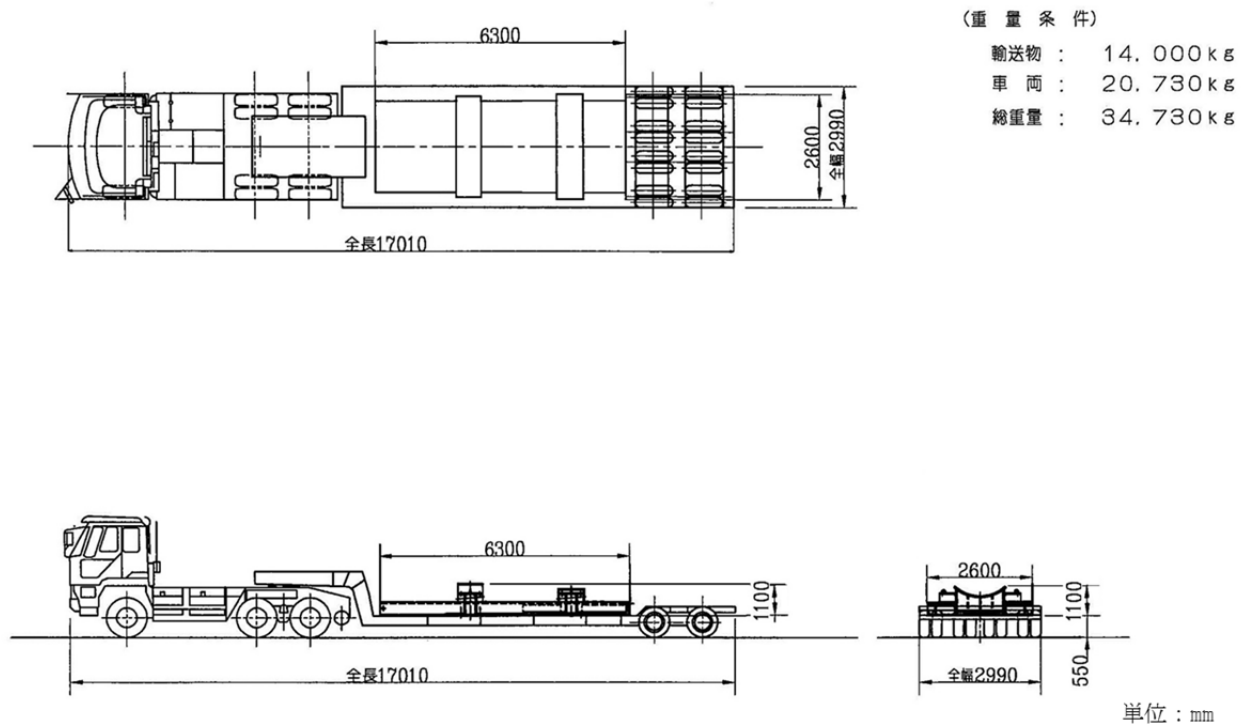


図 5.4.8 旧炉心上部機構収納キャスク保管用スキッドに係る積載車詳細

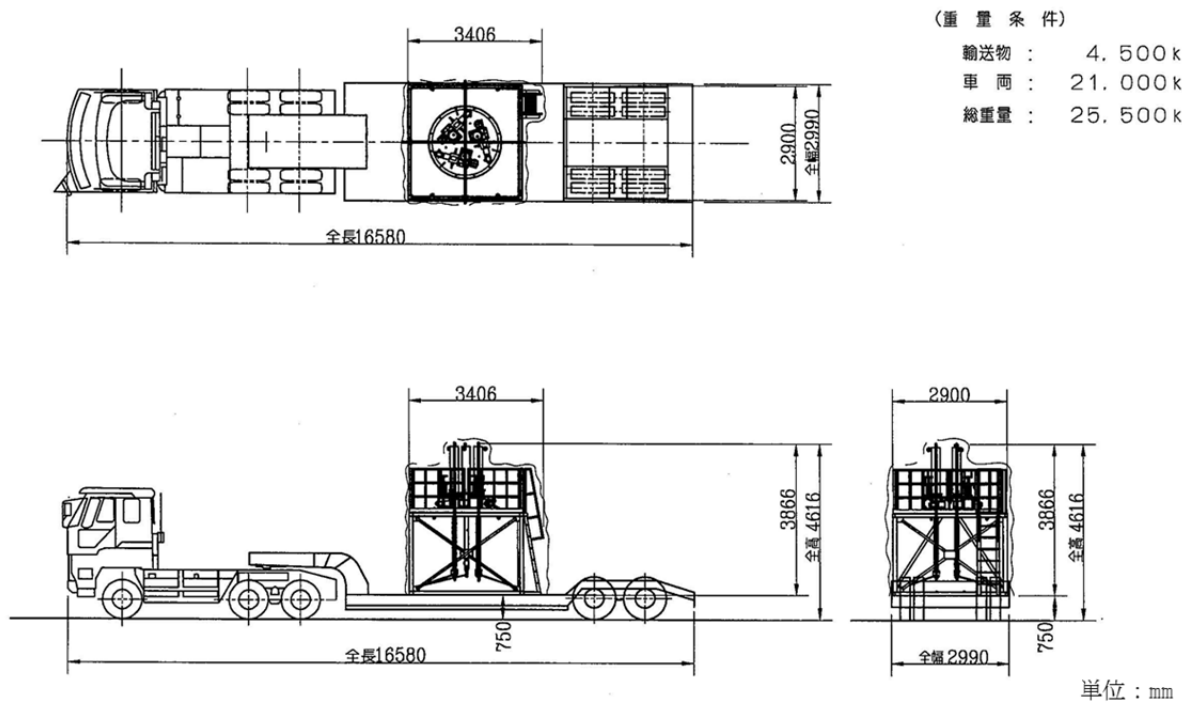


図 5.4.9 ジャッキアップ治具に係る積載車詳細

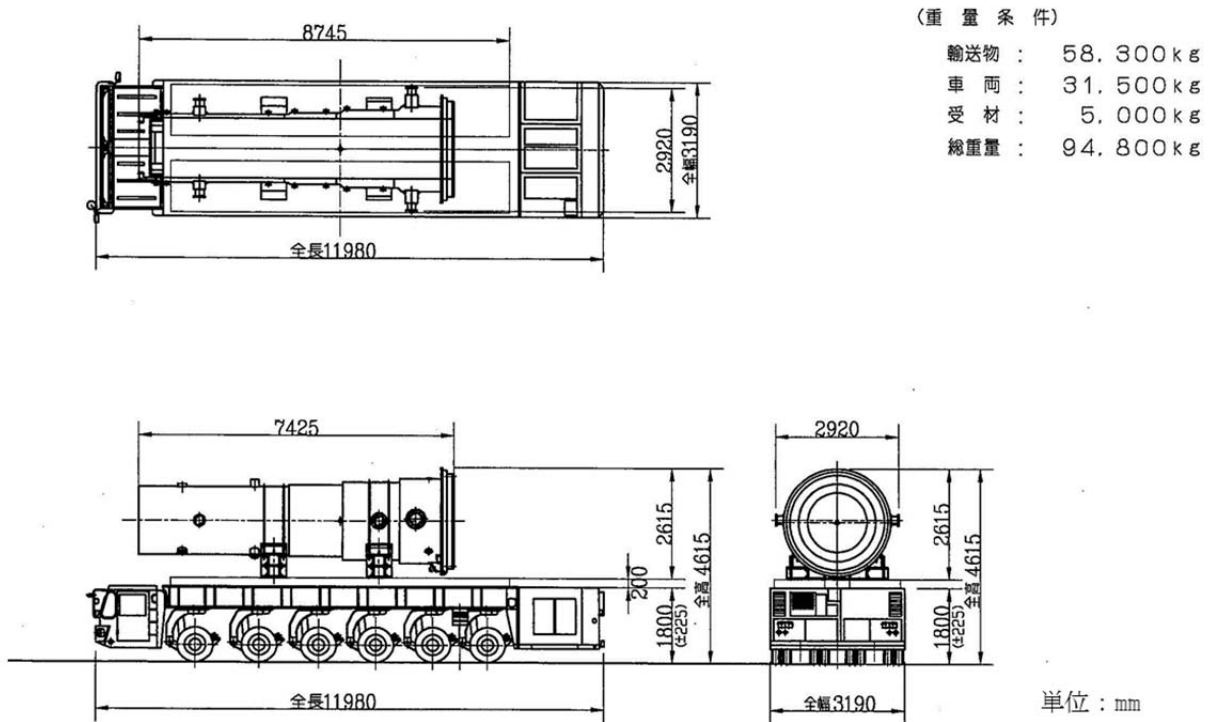


図 5.4.10 旧炉心上部機構収納キャスクに係る積載車詳細

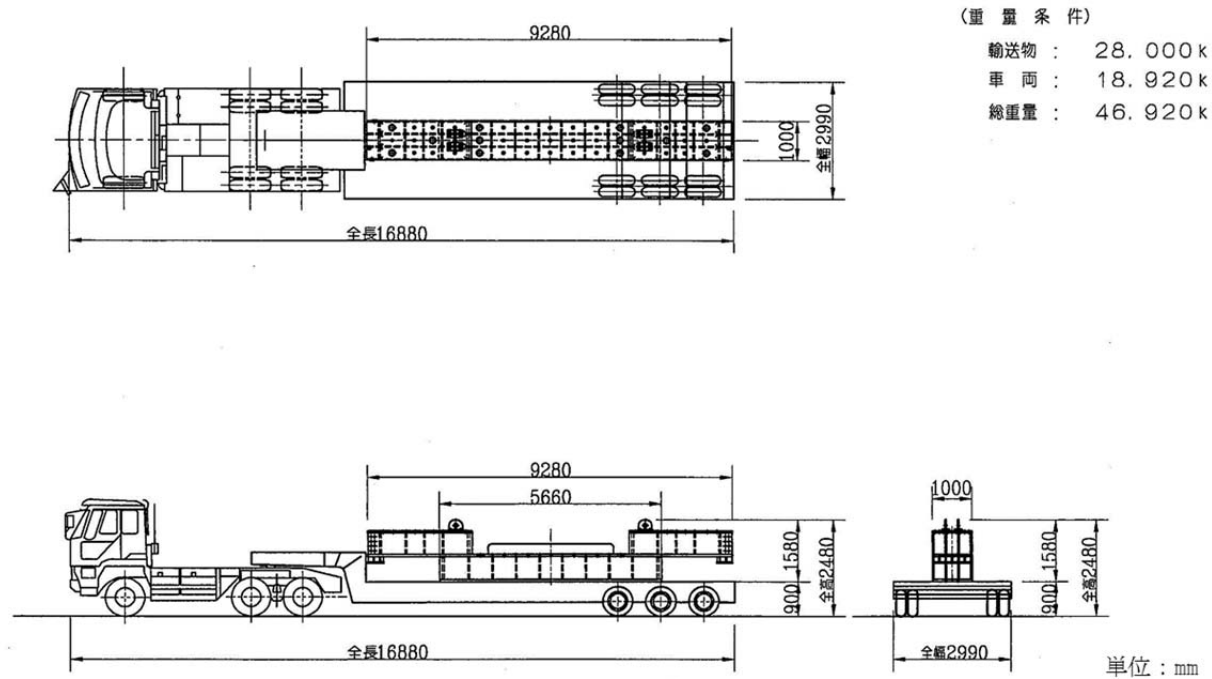


図 5.4.11 仮設ピット蓋 (F-4) に係る積載車詳細

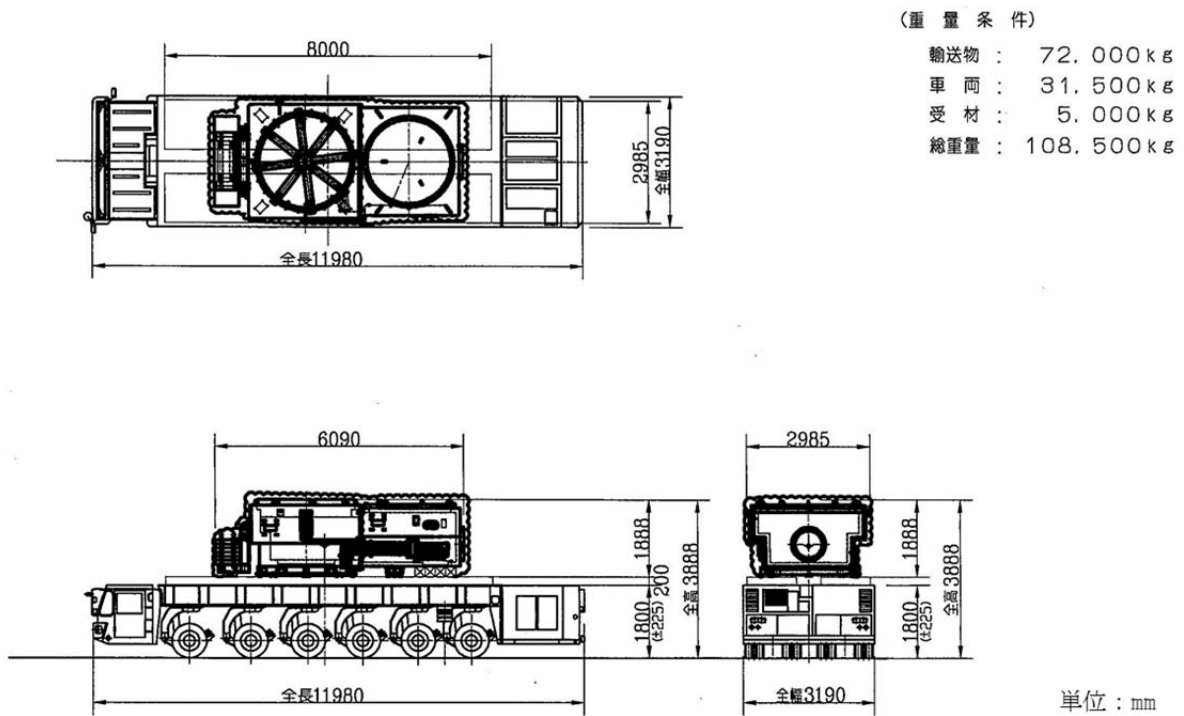


図 5.4.12 ドアバルブに係る積載車詳細

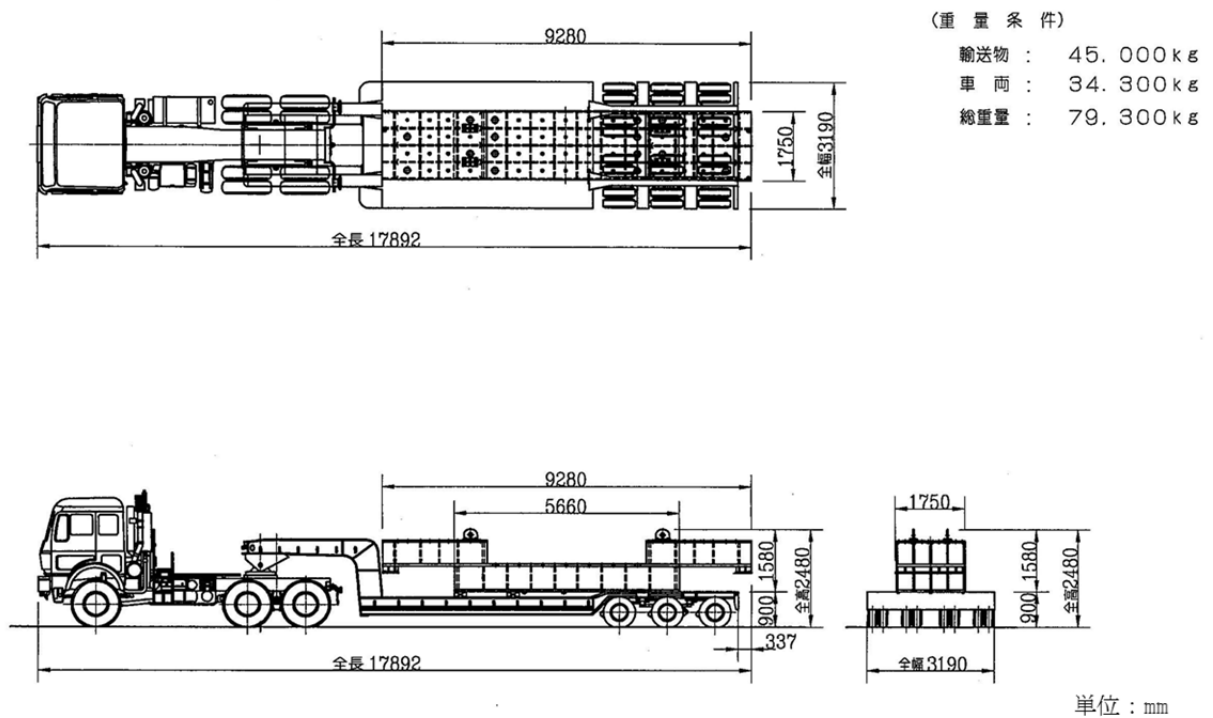


図 5.4.13 仮設ピット蓋 (F-2) に係る積載車詳細

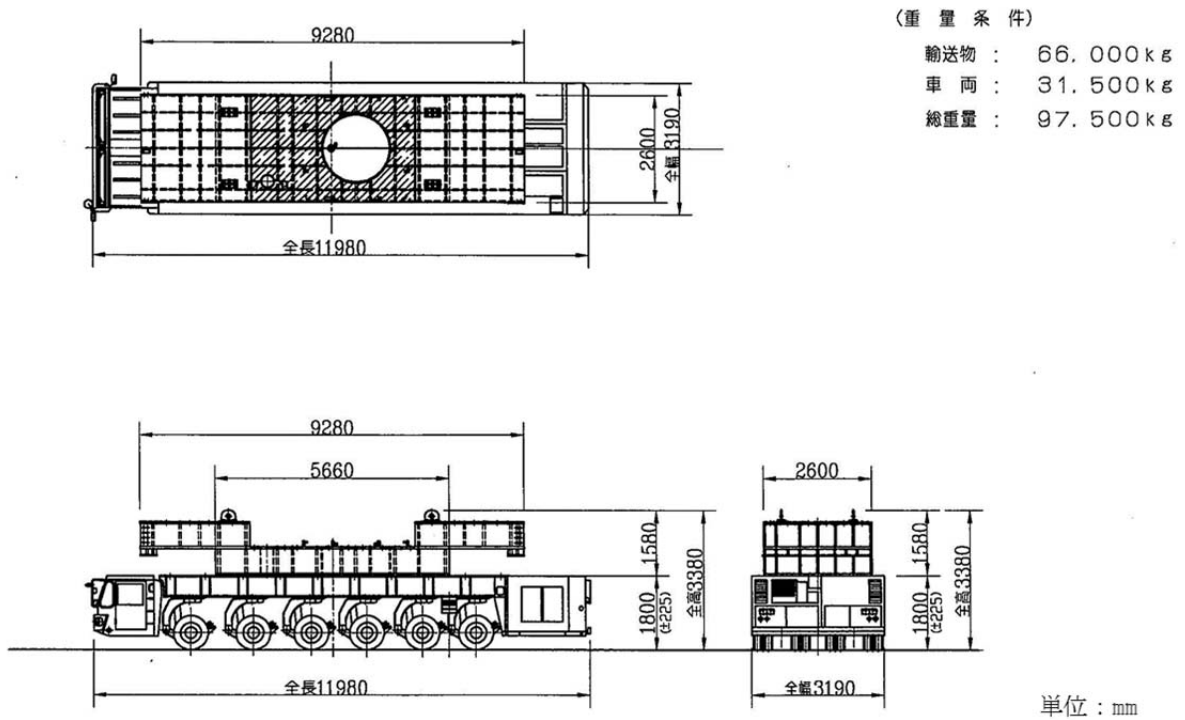


図 5.4.14 仮設ピット蓋 (F-3) に係る積載車詳細

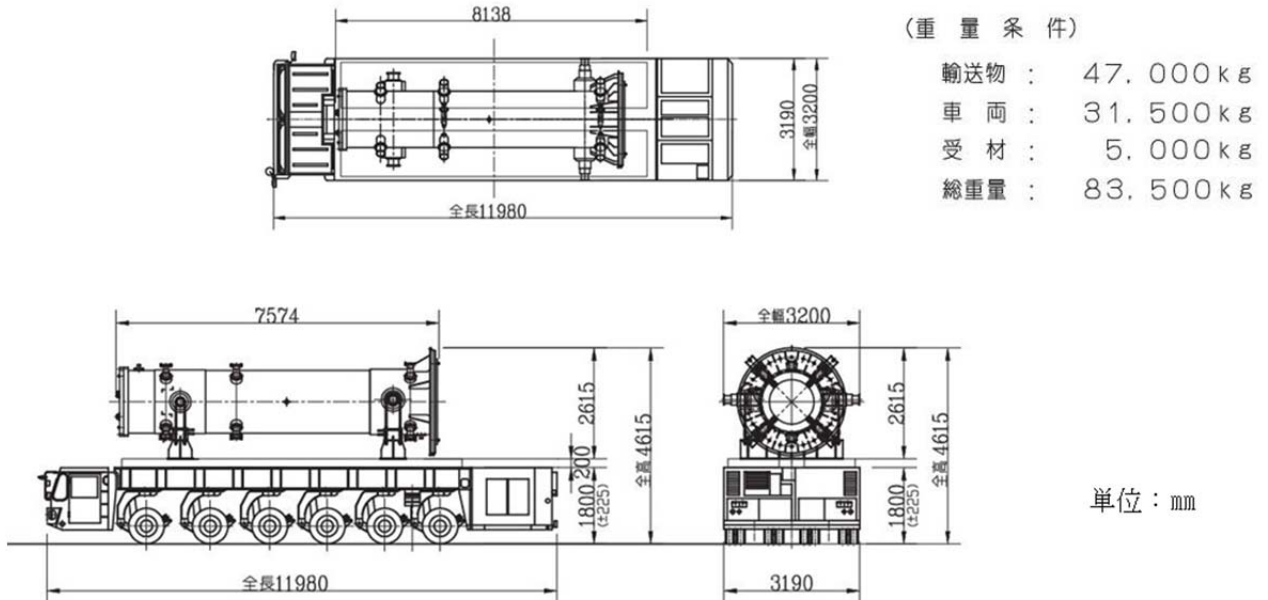


図 5.4.15 新炉心上部機構・新炉心上部機構装荷キャスクに係る積載車詳細

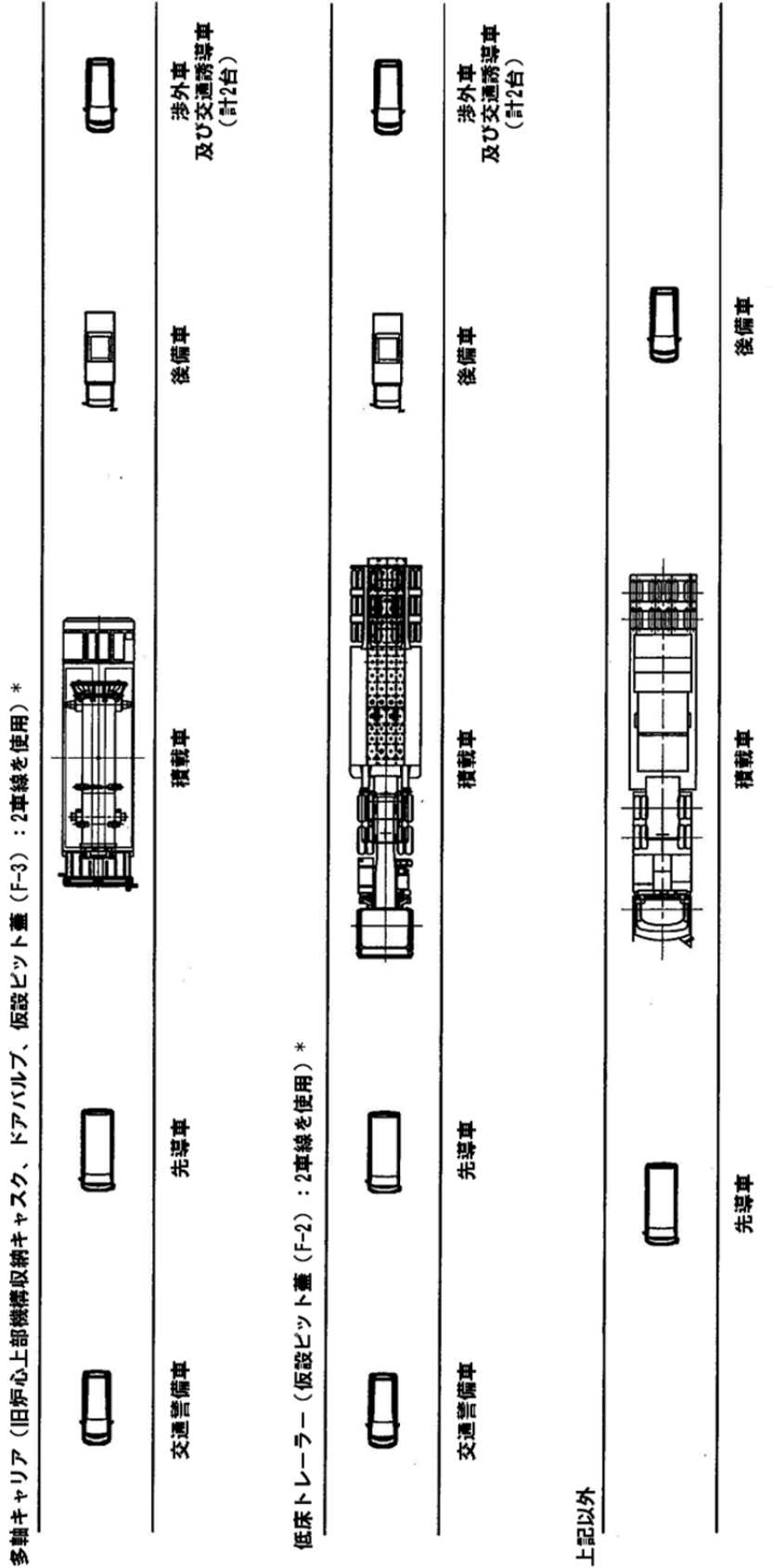


図 5.4.16 大型重量物輸送隊列

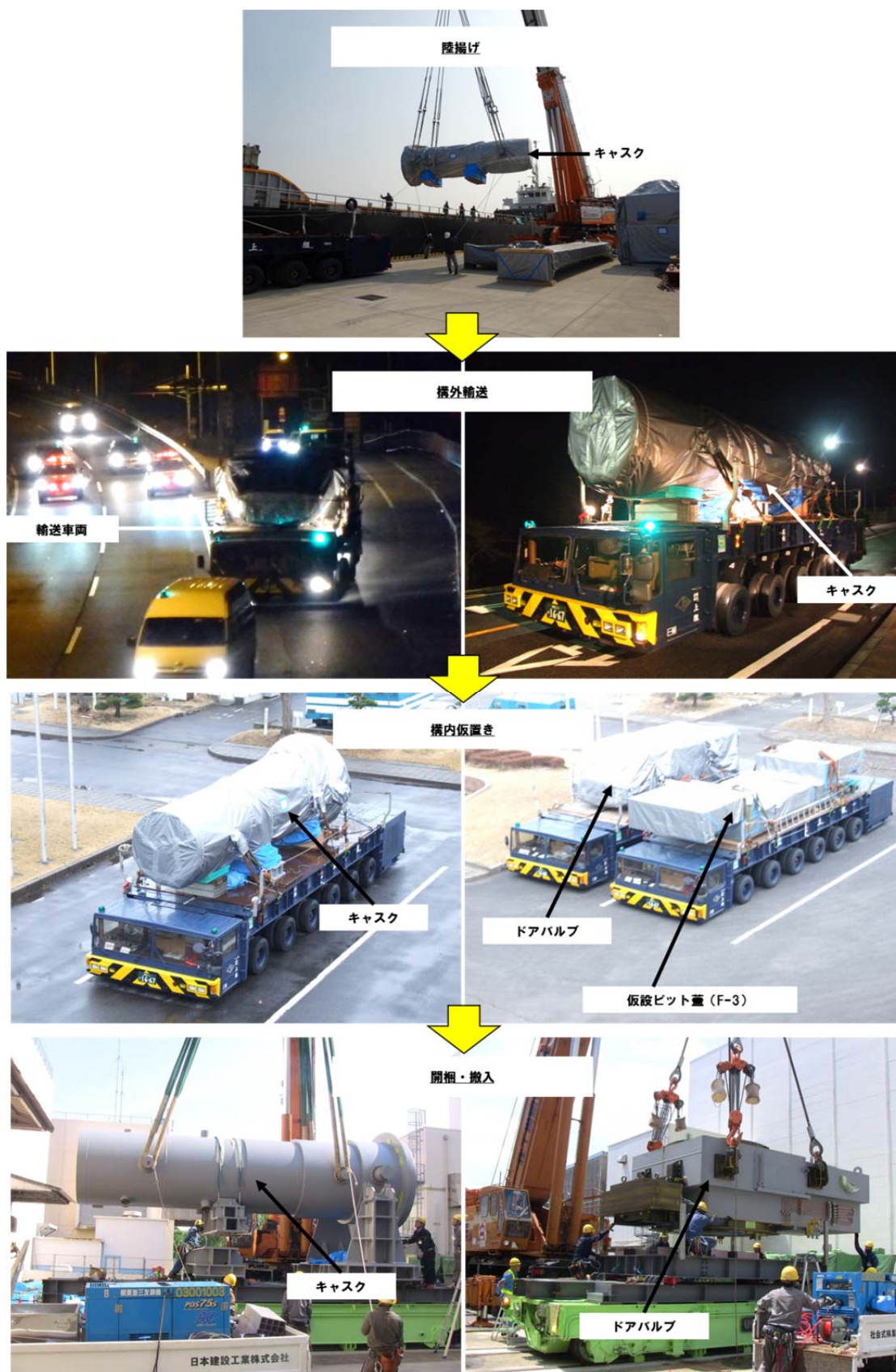


図 5.4.17 大型重量物輸送の様子

6. 結言

高放射線・高温環境の SFR における原子炉容器内補修には、軽水炉にはない技術開発が必要であり、その技術レベルを高め、供用期間中の保守・補修に反映することにより SFR の信頼性の向上に寄与することができる。SFR における炉心上部機構の交換は、仏国ラプソティの運転初期に実施された例¹²⁾がある程度で、世界的に稀少である。「常陽」では、供用中の SFR の作業環境を考慮して検討・開発した機材及び工法を実機に適用し、炉心上部機構交換作業を成功裏に終了させることができた。以下に主な成果を示す。

- (1) 供用中の SFR 作業環境を考慮し、検討・開発した機材及び工法をフルモックアップ試験により確認するとともに実機に適用し、炉心上部機構交換作業を安全に完遂することができた。
- (2) フルモックアップ試験を作業トレーニングの場として活用し、作業員の習熟度向上を図ることで、炉心上部機構交換作業を確実に推進することができた。
- (3) 既設のカバーガスバウンダリが大きく開放される環境下において、作業要求に応じた仮設のカバーガスバウンダリを確保し、適切に運用することができた。
- (4) 事前に設定した許容荷重を超えることなく、旧炉心上部機構引抜作業を進めたことで、案内スリーブの健全性を損なうことなく、旧炉心上部機構引抜作業を完了し、新炉心上部機構装荷作業に引き継いだ。
- (5) 新炉心上部機構挿入作業では、拘束治具の使用等により、要求据付精度 $\pm 1.02 \text{ mm}$ に対し、最大 $0.35 \pm 0.1 \text{ mm}$ の精度で据え付けることができた。
- (6) 旧炉心上部機構に付着したナトリウムの化学成分分析、カバーガスバウンダリとして 30 年以上の長期間供用した O リングの経年劣化評価を実施し、SFR の保守に係る貴重な知見を得た。

30 年以上使用した原子炉容器内の大型構造物である炉心上部機構交換作業の完遂により蓄積された経験及び知見は、「常陽」のみならず、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ものと期待される。

謝 辞

炉心上部機構交換作業では、作業を実施して頂いた三菱重工業株式会社、放射線管理を担当して頂いた放射線管理第1課をはじめ、大洗研究開発センター内関係部署に多大なるご協力をいただいた。ここに記して、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Misao TAKAMATSU, Kazuyuki IMAIZUMI et al. : "Development of Observation Techniques in Reactor Vessel of Experimental Fast Reactor Joyo", Journal of Power and Energy System, Vol.4, No.1, (2010) pp.113-125.
- 2) Takashi SEKINE, Takashi ASHIDA et al. : "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo", FR '09 (2009).
- 3) Misao TAKAMATSU, Takashi ASHIDA et al. : "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo (2)", FR '13 (2013).
- 4) 高松 操、小林 哲彦他 : “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 - ”、JAEA-Technology 2012-020 (2012) , 60p.
- 5) 伊藤 裕道、高松 操他 : “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 (その2) - ”、JAEA-Technology 2014-024 (2014) , 28p.
- 6) Eiji OKUDA, Jun SASAKI et al., “Replacement of Upper Core Structure in Experimental Fast Reactor Joyo - (3) Development of In-Vessel Observation Techniques for UCS Replacement - ” ICAPP 2015(2015).
- 7) 奥田 英二他 : “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 - 高速炉における原子炉容器内観察技術開発 (その2) - ”、 JAEA-Technology 2015-005 (2015) , 36p.
- 8) 大田 克他 : “「常陽」交換用炉心上部機構の設計・製作”、 JAEA-Technology 2015-026 (2015) , 180p.
- 9) 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 (2011) ,129p.
- 10) Hiroshi USHIKI, Eiji OKUDA et al., “Replacement of Upper Core Structure in Experimental Fast Reactor Joyo - (2) Development of Cover Gas Recycling system with Precise Pressure Control - ” ICAPP 2015(2015).
- 11) Hiromichi ITO, Nobuhiro SUZUKI, et al., “Replacement of Upper Core Structure in Experimental Fast Reactor Joyo - (1) Existing Damaged Upper Core Structure Jack-up Test - ” ICAPP 2015(2015).
- 12) J.P. Delisle, R. Allegre, M. Besoux, et al., “Replacement of the Rapsodie control plug. Experience with an important operation,” International Atomic Energy Agency, ISBN 92-0-050278-4 (1978), pp.413-422.

This is a blank page.

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량	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 組立単位	
	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	毎メートル	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
磁界の強さ	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	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(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		A s
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	ウェーバ	Wb	V s	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	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
光照射量	クーロンのメ	lm	cd sr m ²	cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	1/s	m ⁻² cd 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
酸素活性化	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	秒ルカ	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
角速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電表面積	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ =m ² kg s ⁻³
放射輝度	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
酵素活性濃度	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	名称	記号	乗数	名称	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=60 s
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/10 800) rad
秒	″	1″=(1/60)′=(π/648 000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 l=1 dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表 7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI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	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=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=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) 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。
ベレル	B	
デシベル	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	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 =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオット	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≡ (10 ³ /4 π) A m ⁻¹

(a) 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=1 cGy=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=0.2 g = 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	cal	1 cal=4.1858 J (「15℃」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
ミクロン	μ	1 μ =1 μm=10 ⁻⁶ m

