

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
－炉心上部機構交換作業用
循環型カバーガス微正圧制御システムの開発－

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel
of the Experimental Fast Reactor Joyo
- Development of Cover Gas Recycling System with Precise Pressure Control -

宇敷 洋 奥田 英二 鈴木 信弘 高松 操
長井 秋則

Hiroshi USHIKI, Eiji OKUDA, Nobuhiro SUZUKI, 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

February 2016

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

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

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 — 炉心上部機構交換作業用循環型カバーガス微正圧制御システムの開発 —

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
宇敷 洋*、奥田 英二、鈴木 信弘*、高松 操、長井 秋則

(2015 年 12 月 2 日 受理)

供用中のナトリウム冷却型高速炉の原子炉容器は、冷却材であるナトリウムと、そのカバーガスとしてアルゴンガスを内包する。そのため、カバーガスバウンダリを開放する際には、仮設バウンダリを確保した上で、カバーガスを微正圧に制御することで、カバーガスの放散を抑制し、かつカバーガス中への不純物混入を防止することが要求される。2014 年 5 月～12 月に実施された高速実験炉「常陽」の炉心上部機構交換作業では、カバーガスバウンダリが開放されるため、カバーガスの微正圧制御が要求されたが、仮設バウンダリであるビニルバッグの健全性を維持するため、最大 20m³/h のアルゴンガスブローを約 2 ヶ月の長期間に亘って継続する必要がある、既存の設備及び手順では対応が困難であることから、循環型カバーガス微正圧制御システムを開発し、実機に適用した。

循環型カバーガス微正圧制御システムには、最大 20m³/h のアルゴンガスが原子炉容器内に供給される条件で、カバーガス圧力を 100～150Pa の管理目標に保持するための微正圧制御性ととともに、資源節約のため、排気されたカバーガスを循環・再利用するためのリサイクル性を確保することが要求される。「常陽」では、2013 年 12 月 12 日～20 日に、当該システムを実機に試験運用するとともに、炉心上部機構交換作業に適用することで以下の成果を得た。最大 20m³/h のアルゴンガスが原子炉容器内に供給される条件で、基本的に、管理目標である 100～150Pa の範囲内にカバーガス圧力を制御できることを確認した。排気されたカバーガスに含まれるナトリウムベーパーを除去するとともに、当該ガスを 30℃以下に低減し、冷却ガスとして再供給できることを確認した。

これらの成果は、世界的にも例の少ない大規模な原子炉容器内補修作業である「炉心上部機構交換作業」の作業環境を整備し、当該作業の安全な推進に大きく貢献した。また、ここで蓄積された経験やデータは、稀少な知見として、今後のナトリウム冷却型高速炉の原子炉容器内保守・補修技術の開発に資するものと期待される。

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
-Development of Cover Gas Recycling System with Precise Pressure Control-**

Hiroshi USHIKI*, Eiji OKUDA, Nobuhiro SUZUKI*,
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 December 2, 2015)

The reactor vessel of a sodium-cooled fast reactor (SFR) in service is filled with sodium coolant and cover gas (argon gas). In case of an in-vessel repair with cover gas boundary open, installation of a temporary cover gas boundary is necessary and the cover gas pressure is required to be slightly positive in order to prevent a cover gas release and a contamination of impurities. During upper core structure (UCS) replacement in Joyo from May to December 2014, as a part of the temporary cover gas boundary, a vinyl bag which has inferior thermal resistance was installed. Therefore cooling gas supply at a maximum of 20 m³/h was required to maintain proper temperature during the work for almost two months. This requirement would place impractical burden on workers and facilities. On the basis of this requirement, a cover gas recycling system with precise pressure control was developed and adopted to Joyo during the UCS replacement.

This system was required (a) to control the cover gas pressure in the range of 100-150Pa while constantly supplying cooling gas at a maximum of 20 m³/h and (b) to recycle the exhaust cover gas and supply it as the cooling gas for resource conservation. The performance was successfully confirmed with the in-vessel test and the adoption result for the UCS replacement as follows: The cover gas pressure could be controlled in the range of 100-150 Pa while constantly supplying cooling gas at a maximum of 20 m³/h. Sodium vapor could be removed from the exhaust cover gas, of which temperature could be reduced below 30 °C, and it could be recycled. As a result, the UCS replacement was completed successfully, and the experience accumulated through this work is expected to improve the in-vessel repair techniques in SFRs.

Keywords: Sodium-cooled Fast Reactor, Joyo, Upper Core Structure, In-vessel Repair Techniques, Cover Gas Pressure Control

※ Collaborating Engineer

*Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

目 次

1. 緒言	1
2. 炉心上部機構交換作業等の概要	2
3. 炉心上部機構交換作業時に必要なアルゴンガスブロー流量の評価	7
3.1 評価ケース	7
3.2 評価結果	7
3.3 循環型カバーガス微正圧制御システムへの反映事項	10
4. 循環型カバーガス微正圧制御システムの開発	15
4.1 基本方針	15
4.2 システム構成	16
5. 循環型カバーガス微正圧制御システムの機能確認試験	27
5.1 試験の概要	27
5.2 試験結果	27
6. 循環型カバーガス微正圧制御システムの実機適用結果	34
7. 結言	36
謝辞	37
参考文献	37

Contents

1. Introduction	1
2. Outline of UCS replacement	2
3. Evaluation of required amount of cooling gas blowdown in UCS replacement	7
3.1 Evaluation cases	7
3.2 Results	7
3.3 Reflection of the results in the development	10
4. Development of cover gas recycling system with precise pressure control	15
4.1 Basic policy	15
4.2 Equipment	16
5. Performance confirmation tests of cover gas recycling system with precise pressure control	27
5.1 Outline of tests	27
5.2 Tests results	27
6. Application results of cover gas recycling system with precise in JOYO	34
7. Conclusion	36
Acknowledgements	37
References	37

図リスト

図 2.1	プラント概念図-----	3
図 2.2	原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構（UCS）の構造-----	4
図 2.3	1 次アルゴンガス圧力制御設備の概念図-----	4
図 2.4	炉心上部機構交換作業の概略手順-----	5
図 2.5	炉心上部機構交換作業時の仮設バウンダリの構成-----	6
図 3.1	アルゴンガスブロー流量の評価ケース-----	11
図 3.2	解析評価モデル-----	12
図 3.3	アルゴンガスの供給口の数量が温度分布に与える影響評価結果-----	13
図 3.4	仮設バウンダリ内温度分布の評価結果-----	14
図 4.1	循環型カバーガス微正圧制御システムの系統図-----	19
図 4.2	循環型カバーガス微正圧制御システムの構造図-----	20
図 4.3	インターロッカー覧-----	21
図 4.4	排気ライン先端部の概略図-----	22
図 4.5	ナトリウムベーパートラップの概要図-----	24
図 4.6	原子炉容器カバーガス圧力の調整方法-----	25
図 4.7	冷却器の構造図-----	26
図 5.1	試験工程-----	30
図 5.2	ブロワ機能確認試験時のライン構成-----	31
図 5.3	アルゴンガス置換方法-----	32
図 5.4	原子炉容器内カバーガス圧力の制御性-----	33
図 6.1	炉心上部機構交換作業時のナトリウムベーパーの付着状況-----	35

1. 緒言

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、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トラブル^{1)~3)}への復旧措置の一環として、平成 26 年 5 月~12 月に、炉心上部機構交換作業を実施した。

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機器である。供用中の SFR にあつては、原子炉容器に冷却材であるナトリウム及びカバーガスとしてアルゴンガスを内包するため、原子炉容器内保守・補修作業においてカバーガスバウンダリを開放する際には、仮設バウンダリを確保した上で、カバーガスを微正圧に制御することで、カバーガスの放散を抑制し、かつカバーガス中への不純物混入を防止することが要求される。炉心上部機構交換作業では、仮設バウンダリとしてビニルバッグを使用しており、その健全性維持には、高流量のアルゴンガスブローを約 2 ヶ月の長期間に亘って継続し、ビニルバッグを冷却する必要がある、既存の設備及び手順では、膨大な量のアルゴンガスを要するとともに、カバーガスの微正圧制御に要する運転員とプラント設備の負荷が大きく、対応が困難であつた。

上記課題を解決するため、「常陽」では、循環型カバーガス微正圧制御システムを開発し、実機に適用した。本報告書では、循環型カバーガス微制圧制御システムの開発成果及び実機適用時の使用経験より得られた知見について報告する。

2. 炉心上部機構交換作業等の概要

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、回転プラグ及び炉心上部機構の構造を図 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を内包する。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、ナトリウムが化学的に活性であることを踏まえ、アルゴンガス雰囲気となっている。なお、当該アルゴンガス圧力は、1 次アルゴンガス圧力制御設備の給排気弁の開閉により、通常、490Pa±200Pa に制御されている（図 2.3 参照）。

原子炉容器とその上部に設置された回転プラグ（炉心上部機構を含む）は、アルゴンガス（カバーガス）のバウンダリを形成している。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る。大回転プラグ及び小回転プラグの直径は、それぞれ 4730mm、2870mm であり、各々、約 3200mm の厚さを有する。炉心上部機構は、小回転プラグに設置されており、カバーガスバウンダリの一部を構成し、直径：最大約 1345mm、高さ：約 6330mm の円筒構造を有する機器である。また、炉心上部機構には、センター孔 1 箇所と、原子炉出力を制御する制御棒用の孔 10 箇所が設けられている。小回転プラグには、炉内検査孔（A）及び燃料交換孔、大回転プラグには炉内検査孔（B）といった原子炉容器内へのアクセス孔が設置されており、これらのアクセス孔は、カバーガスバウンダリ構成機器としてドアバルブ等を有する。

炉心上部機構交換作業の概略フローを図 2.4 に示す。炉心上部機構交換作業では、炉心上部機構据付面の O リング交換等において、仮設バウンダリを介した作業が必要となるため、仮設バウンダリの一部にビニルバッグを使用している（図 2.5 参照）。原子炉容器内のカバーガス温度は約 150℃と高温であり、仮設バウンダリと原子炉容器カバーガス雰囲気が導通した状態にあっては、温度差（密度差）に起因する浮力により、高温カバーガスが仮設バウンダリに流入し、耐熱性に劣るビニルバッグの健全性を阻害するおそれがある。このため、炉心上部機構を引き抜いた状態にあっては、当該貫通孔にアルゴンガスを流し、高温カバーガスの上昇を抑制する必要がある。しかし、炉心上部機構交換作業においては、旧炉心上部機構を引き抜いた後、新炉心上部機構が装荷されるまでの期間に、回転プラグに直径約 1m の貫通孔が形成されるため、循環型カバーガス微正圧制御システムの開発にあっては、プラントの構造等に留意した上で、高流量のアルゴンガスブローを約 2 ヶ月の長期間に亘って継続することが要求された。

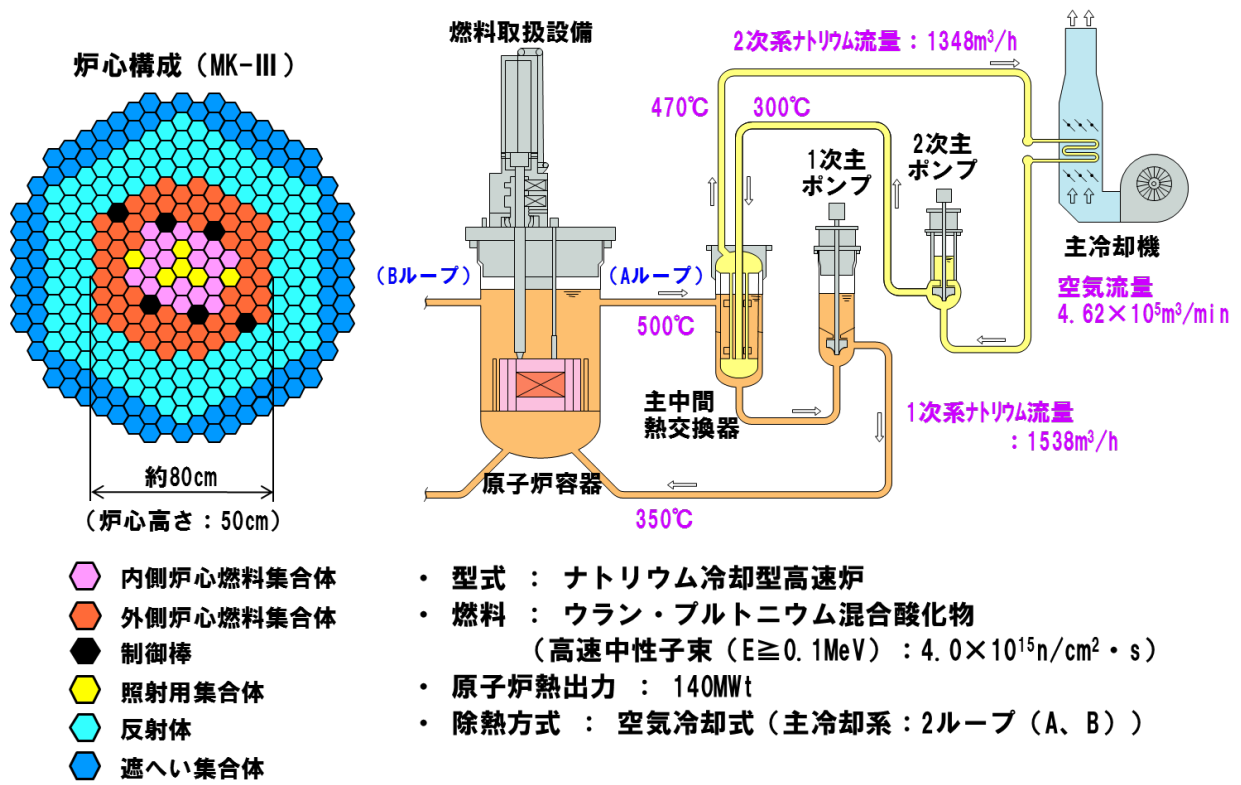


図 2.1 プラント概念図

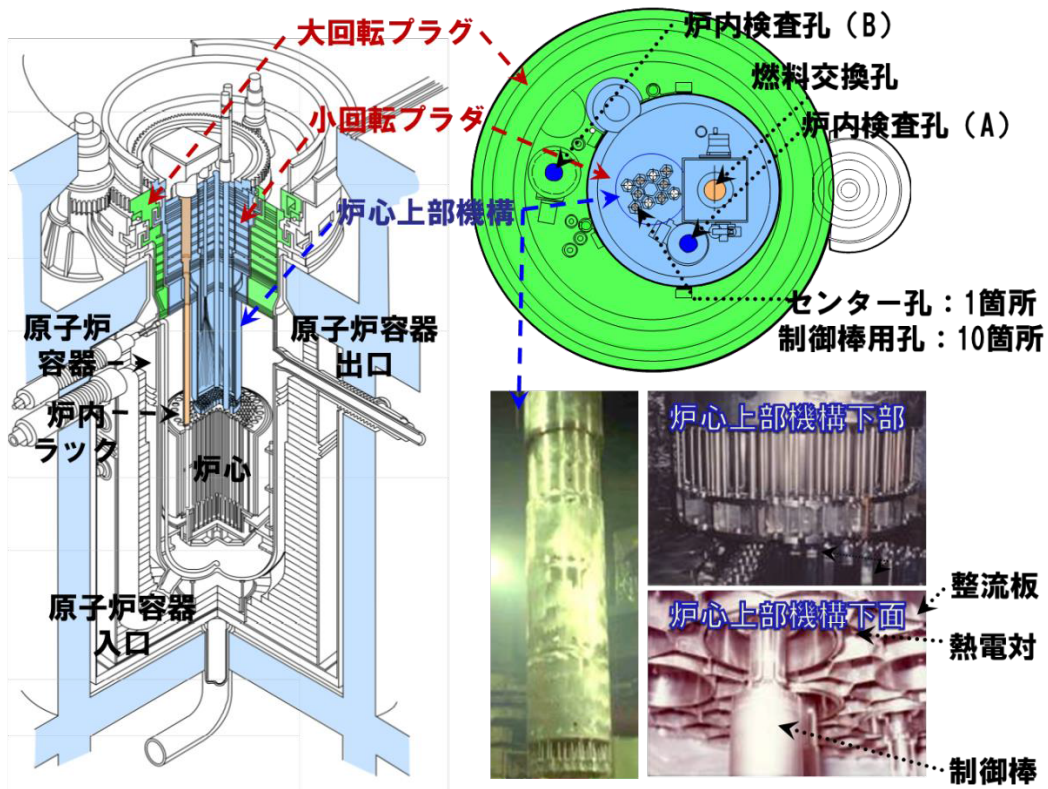


図 2.2 原子炉容器、回転プラグ及び炉心上部機構（UCS）の構造

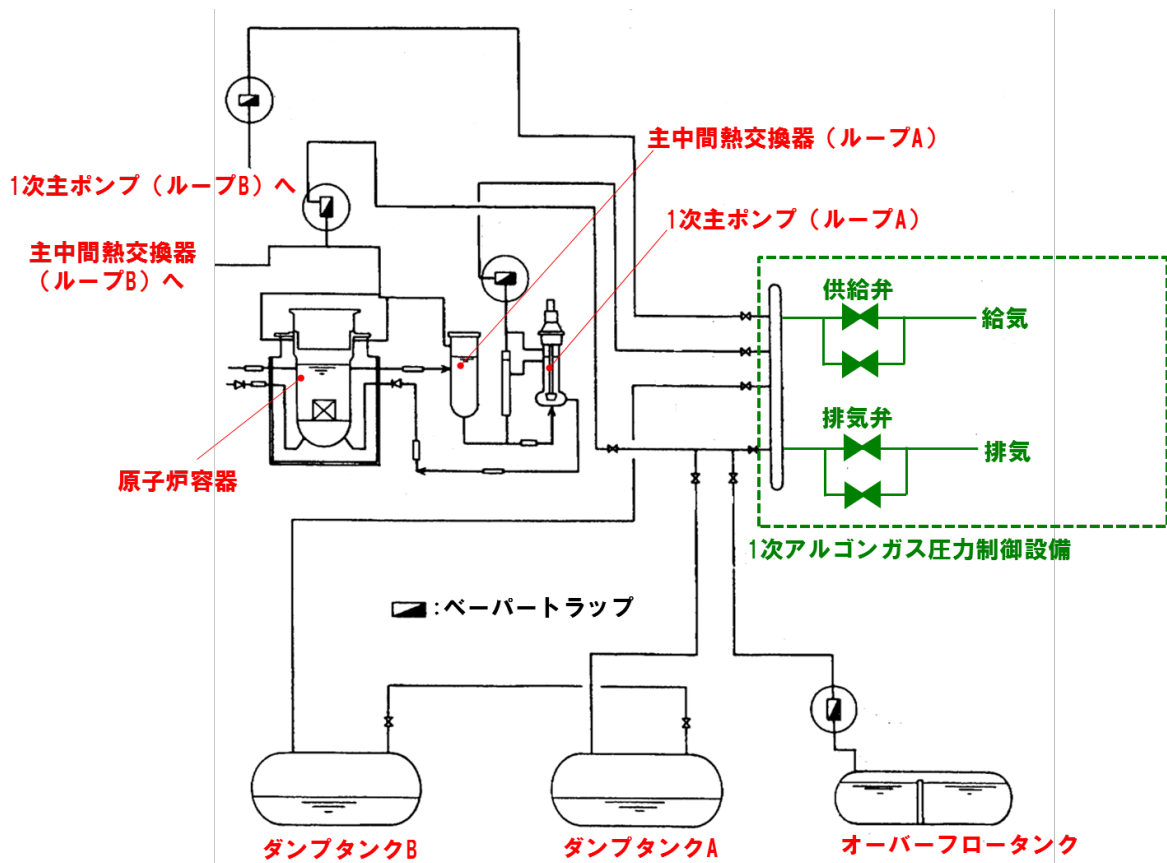


図 2.3 1次アルゴンガス圧力制御設備の概念図

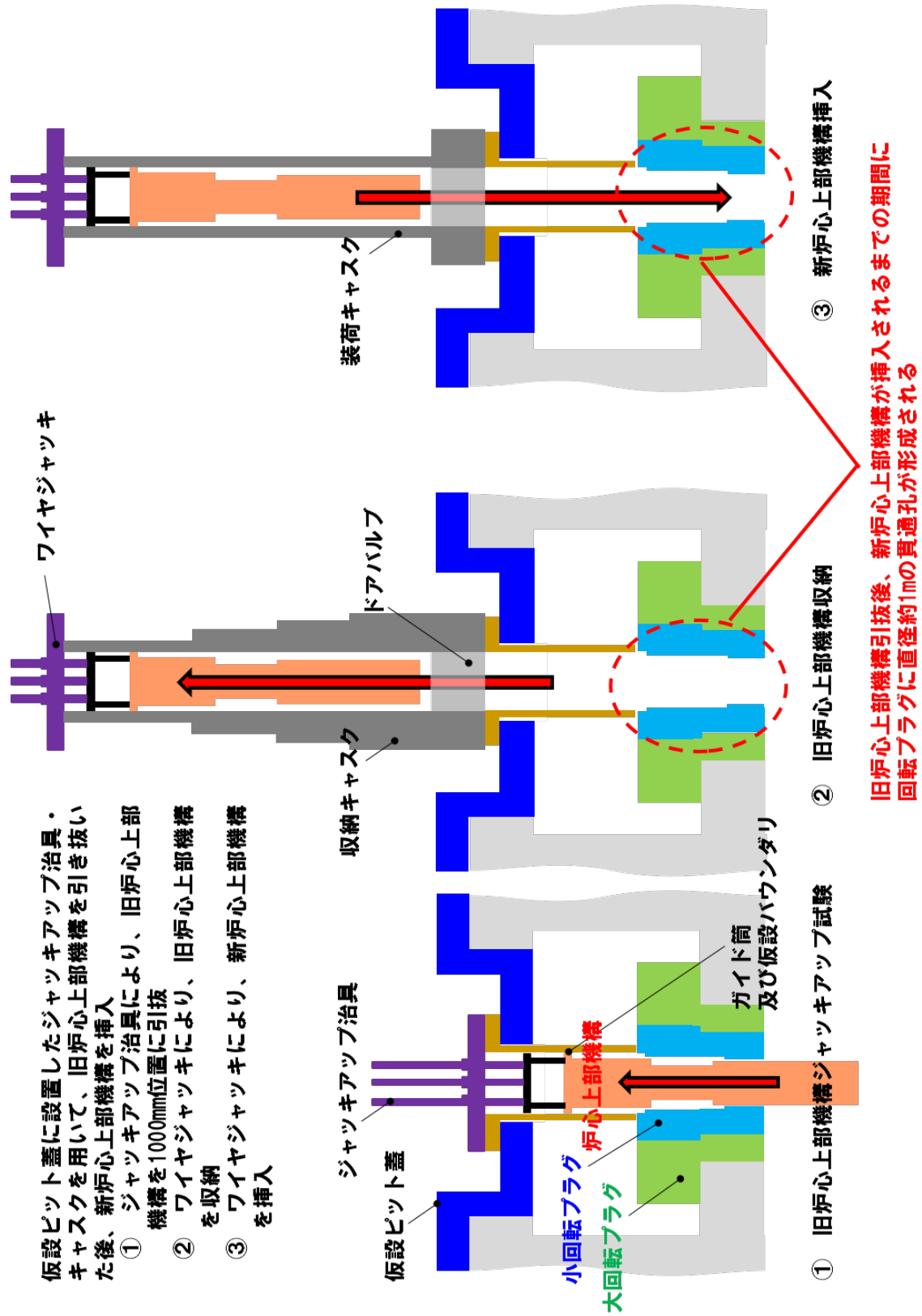


図 2.4 炉心上部機構交換作業の概略手順

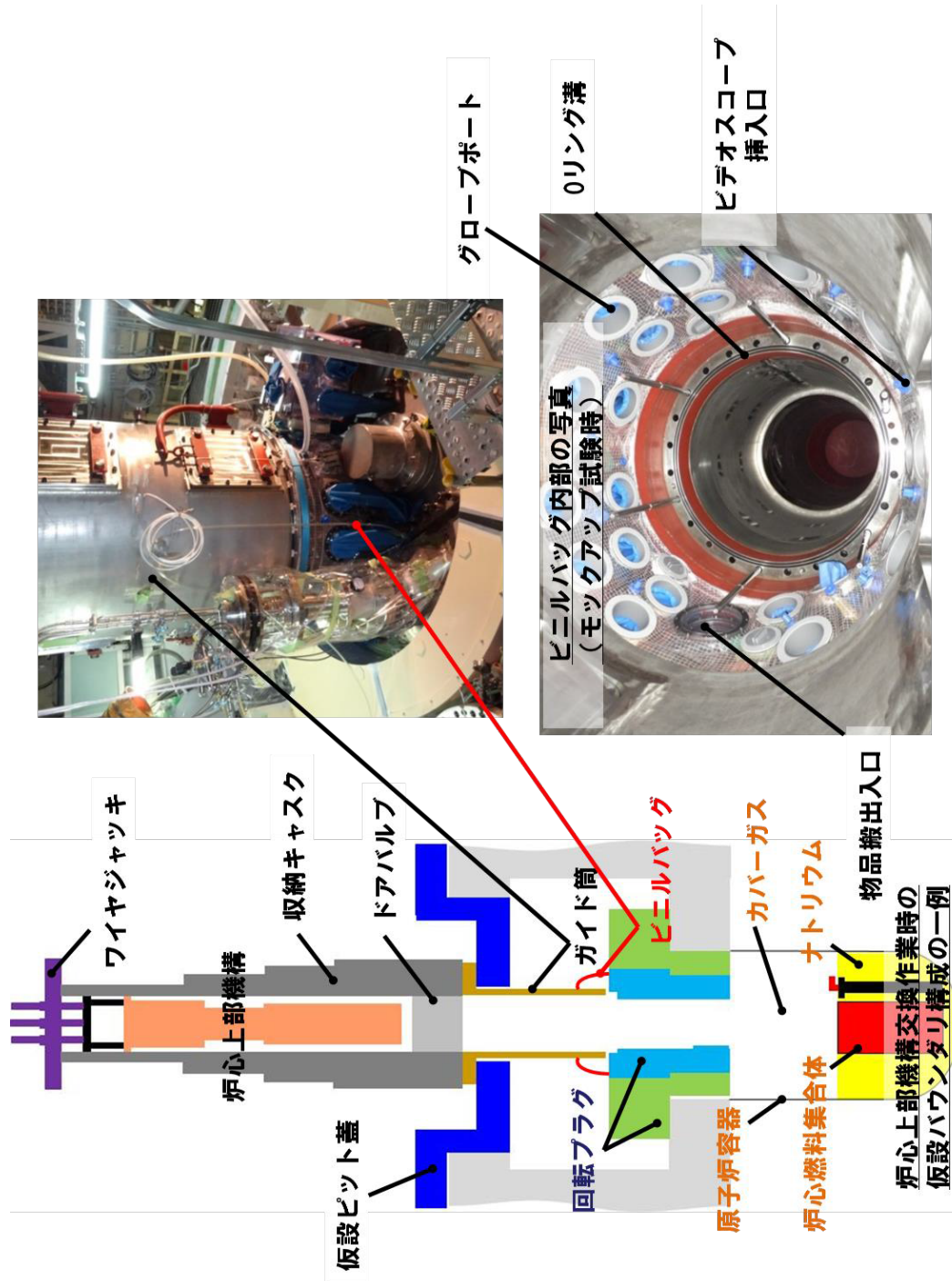


図 2.5 炉心上部機構交換作業時の仮設バウンダリの構成

3. 炉心上部機構交換作業時に必要なアルゴンガスブロー流量の評価

3.1 評価ケース

炉心上部機構交換作業時に必要なアルゴンガスブロー流量は、流路面積に依存する。そこで、アルゴンガスブロー流量の評価にあたっては、流路面積に応じた最小必要流量を求めるため、炉心上部機構交換作業の手順を踏まえ、以下の2ケースを対象とした（図 3.1 参照）。

(1) 旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時

※ 貫通孔に炉心上部機構が一部挿入された状態：流路面積最小

(2) 旧炉心上部機構収納時

※ 貫通孔に挿入物がない状態：流路面積最大

3.2 評価結果

3.2.1 旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時に必要なアルゴンガスブロー流量の評価にあたっては、以下に示す実験式^{4)~6)}を用いた。この実験式は、SFR 用制御棒駆動機構の設計検討において、鉛直環状ガス空間での高温ガスの上昇流防止に必要なブローダウン流量を算定するための実験等に基づき策定されたものである。

鉛直環状ガス流路上端への高温ガス到達防止に係る実験式

$$Gr / (Re^{1.43} \cdot (1/De)) \leq 3.74 \cdot \dots \cdot \dots \quad (3.2.1.1 \text{ 式})$$

※ ここで、 $Gr (= (g \cdot B \cdot De^4 \cdot (dT/dz)) / \nu^2)$ (グラスホフ数)、 $Re (= v \cdot De / \nu)$ (レイノルズ数)、 $De (= (di^2 - do^2) / (di + do))$ (等価直径)である。

等価直径 De は、案内スリーブの内径 (di) を 1.16m、旧炉心上部機構の外径 (do) を 1.13m として算出した。また、温度勾配 dT/dz 等の算出にあたっては、貫通孔上端のガス温度を 20℃、貫通孔下端のガス温度を 150℃とした。算出結果を以下に示す。なお、当該実験式にあたっては、鉛直環状ガス空間のギャップや貫通孔上端・下端の温度差（温度勾配）が大きくなるほど、必要なアルゴンガスブロー流量が大きくなる。

- ・ 等価直径 De : 0.03m $(= (1.16^2 - 1.13^2) / (1.16 + 1.13))$
- ・ 温度勾配 dT/dz : 57.37℃/m $(= (150 - 20) / 2.26)$
- ・ 体積膨張率 B : 0.0028 /℃ $(= 1 / ((150 + 20) / 2 + 273.15))$
- ・ 動粘性係数 ν : $1.94 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$

(ガスの平均温度 85℃での物性値⁷⁾を使用)

旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時に必要なアルゴンガスブロー流量の評価結果は、3.2.1.1 式において 1.3m³/h であった。当該評価結果をふまえ、旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時において、高温のカバーガスが回転プラグ上面に到達することを防止し、ビニルバッグの健全性を維持するために必要となる最小流量は 3m³/h とした。

3.2.2 旧炉心上部機構収納時

旧炉心上部機構収納時にあっては、回転プラグに直径約 1m の貫通孔が形成される。当該条件に対して必要なアルゴンガス流量を評価する適切な実験式等がないことから、ここでは、3 次元熱流動解析コード “AQUA”⁸⁾を用いて、旧炉心上部機構収納時に必要なアルゴンガスブロー流量を評価した。評価モデル及び評価結果を以下に示す。

3.2.2.1 評価モデル

旧炉心上部機構収納時に必要なアルゴンガスブロー流量の評価にあたり、原子炉容器カバーガス領域、貫通孔、ビニルバッグ及びガイド筒をモデル化した。評価モデル及び評価条件等を以下に示す。なお、供給方法の検討のため、アルゴンガス供給口として供給口①、供給口②の 2 箇所を設定した。

(1) 評価モデル (図 3.2 参照)

- ・ 座標系： $r-\theta-z$ 3 次元円筒座標系 1/3 セクター（対称性を考慮）
- ・ メッシュ分割： $49^r \times 60^\theta \times 164^z$
 - 周方向： 2° / 1 メッシュ
 - 径方向：最大 40mm / 1 メッシュ・最小 2.5mm / 1 メッシュを温度勾配等に応じて配置
 - 鉛直方向：原子炉容器カバーガス領域 2000mm
 - 貫通孔 2268mm
 - ビニルバッグ 800mm (10mm / 1 メッシュ)
 - ガイド筒 2710mm
- 総メッシュ数：342000 メッシュ
- ・ アルゴンガス供給*1：供給口① ガイド筒上端より均一に供給
供給口② ビニルバッグ近傍の周方向 6 ヶ所 (60° 間隔) から供給
- ・ アルゴンガス排気：原子炉容器カバーガス領域の外周より排気

*1： 評価にあたっては、まず、以下に示すケースにより、アルゴンガスの供給口を 1 ヶ所にした場合と複数とした場合の温度分布に与える影響をサーベイした。

- ・ ケース A：ガイド筒上端 1 ヶ所よりアルゴンガスを供給（供給口①を使用： $9.6\text{m}^3/\text{h}$ ）
- ・ ケース B：ガイド筒上端（供給口①を使用： $3.6\text{m}^3/\text{h}$ ）及びビニルバッグ近傍（供給口②を使用： $6.0\text{m}^3/\text{h}$ ）よりアルゴンガスを供給

サーベイ結果を図 3.3 に示す。図 3.3 に示すように、どちらのケースにあっても、ビニルバッグ温度は、 $55\sim 65^\circ\text{C}$ であり、アルゴンガスの供給口を 1 ヶ所にした場合と複数とした場合の温度分布は概ね同じであった。これは、高温カバーガスの上昇流とアルゴンガスブローによる下降流が混合する領域が、ビニルバッグ内部（図 3.3 白点線部）ではなく、貫通孔位置（図 3.3 黄点線部）にあることが原因と推定される。したがって、貫通孔上端から流入するアルゴンガスの総流量が同じであれば、アルゴンガスの供給口の数量が温度分布に与える影響は無視でき

ると判断でき、本評価では、アルゴンガスの供給口としてガイド筒上端 1 ヶ所（供給口①）のみを使用することとした。

(2) 温度条件

- ・ ガイド筒上端～貫通孔下端のガス初期温度 : 30℃*2
- ・ 貫通孔下端～原子炉容器カバーガス領域初期温度 : 150℃
- ・ 供給するアルゴンガスの温度 : 30℃*2

*2: 3.2.1 で述べた旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時の評価では貫通孔上端の温度を 20℃としたが、ここでは、当該温度が高いほうが保守的であるため、当該部及びその周辺の温度を 30℃とした。

(3) 境界条件

- ・ ガイド筒上端（アルゴンガスブロー供給口）：30℃一定
- ・ 原子炉容器カバーガス領域（GL-7396：当該モデルの下端）：150℃一定
- ・ ビニルバッグ及びガイド筒：外表面から 50cm 離れた位置の空気温度を 30℃とし、ビニルバッグ及びガイド筒の内部のアルゴンガスが当該空気と熱交換するように設定
- ・ 上記以外の境界（貫通孔等）：断熱

3.2.2.2 評価ケース

旧炉心上部機構収納時に必要なアルゴンガスブロー流量を評価するため、以下のケースについて“AQUA”による解析を行うこととした。

- ・ ケース 1：3.6m³/h のアルゴンガスを供給
- ・ ケース 2：7.2m³/h のアルゴンガスを供給
- ・ ケース 3：9.6m³/h のアルゴンガスを供給（ケース A に相当）
- ・ ケース 4：14.4m³/h のアルゴンガスを供給
- ・ ケース 5：21.6m³/h のアルゴンガスを供給

3.2.2.3 評価結果

“AQUA”による仮設バウンダリ内温度分布の評価結果を図 3.4 に示す。図 3.4 に示すように、アルゴンガスブロー流量を増加させることで、ビニルバッグ温度は低減される。ビニルバッグについては、実機環境を模擬したクリープ試験より 80℃まではバウンダリ機能を維持できることを確認しているが、ビニルバッグの素材である塩化ビニルのガラス転移温度が 70～80℃であることを考慮し、ここでは、ビニルバッグ温度を 60℃以下に保持することを目標とし、旧炉心上部機構収納時に必要なアルゴンガスブロー流量を算定した。ビニルバッグ温度を 60℃以下に保持できるのは、ケース 4（14.4m³/h のアルゴンガスを供給）及びケース 5（21.6m³/h のアルゴンガスを供給）であり、ビニルバッグ温度はそれぞれ 50～60℃及び 45～55℃であった。旧炉心上部機構収納時に必要なアルゴンガスブローの最小流量については、上記結果を踏まえ、20m³/h とした。

3.3 循環型カバーガス微正圧制御システムへの反映事項

上記より、旧炉心上部機構ジャッキアップ試験時及び収納時にあつては、3～20 m³/h のアルゴンガスブローを必要とすることを確認した。循環型カバーガス微正圧制御システムについては、最大 20 m³/h のアルゴンガスのリサイクル流量に対応できるものとするとともに、当該流量を上記範囲で変動させた場合にも、適切に追従し、カバーガスを微正圧に制御できるように設計するものとした。

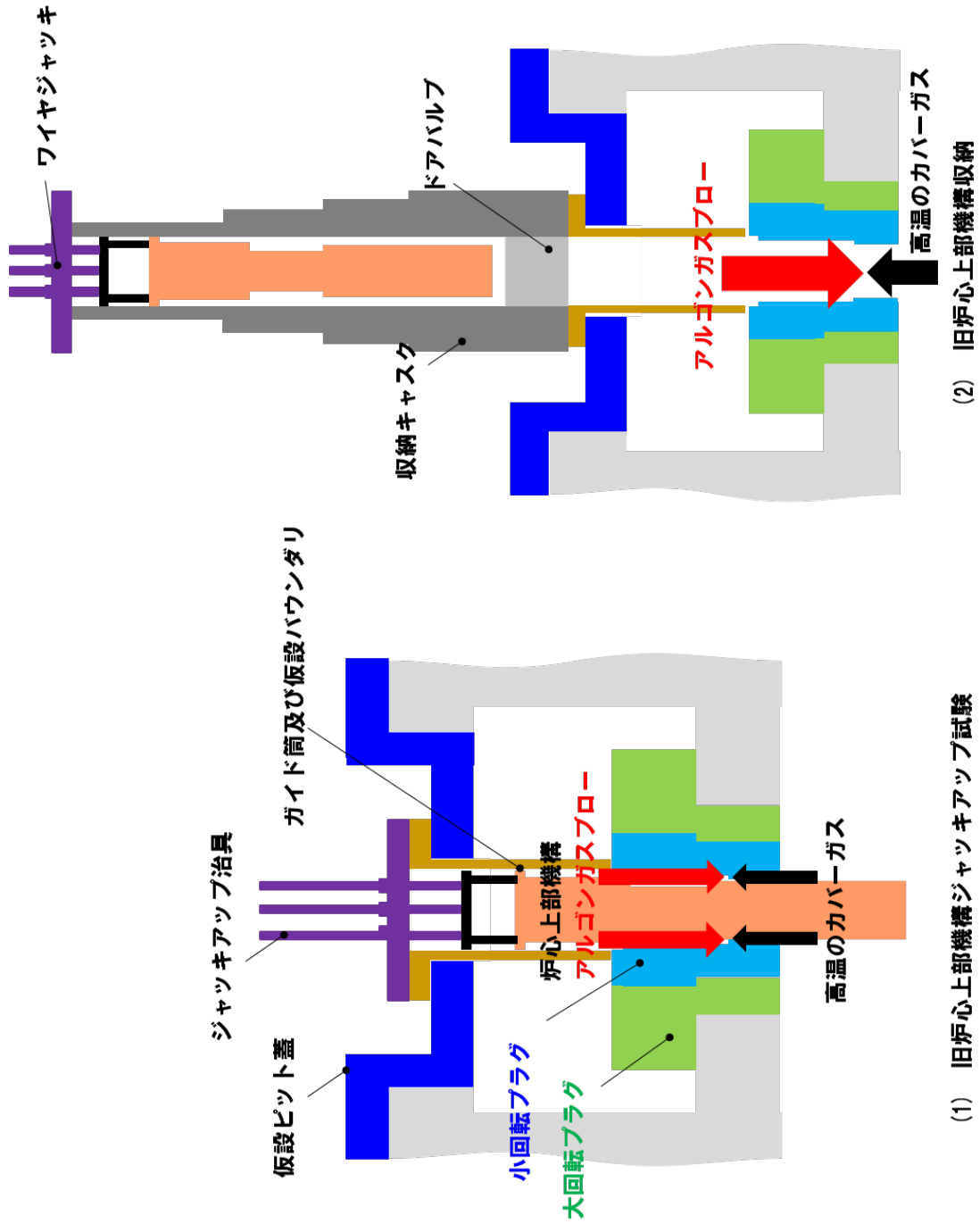


図 3.1 アルゴンガスブロー流量の評価ケース

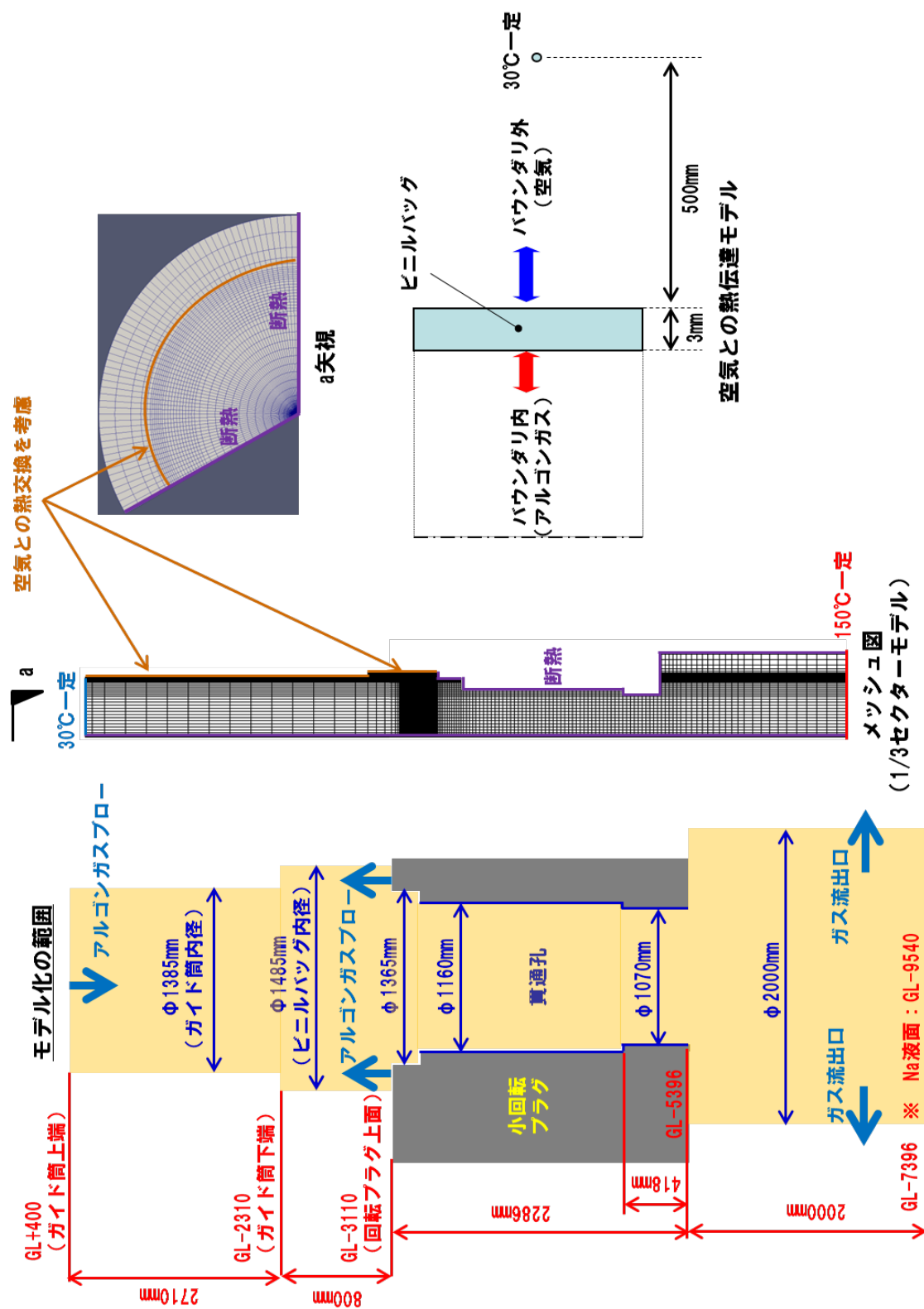


図 3.2 解析評価モデル

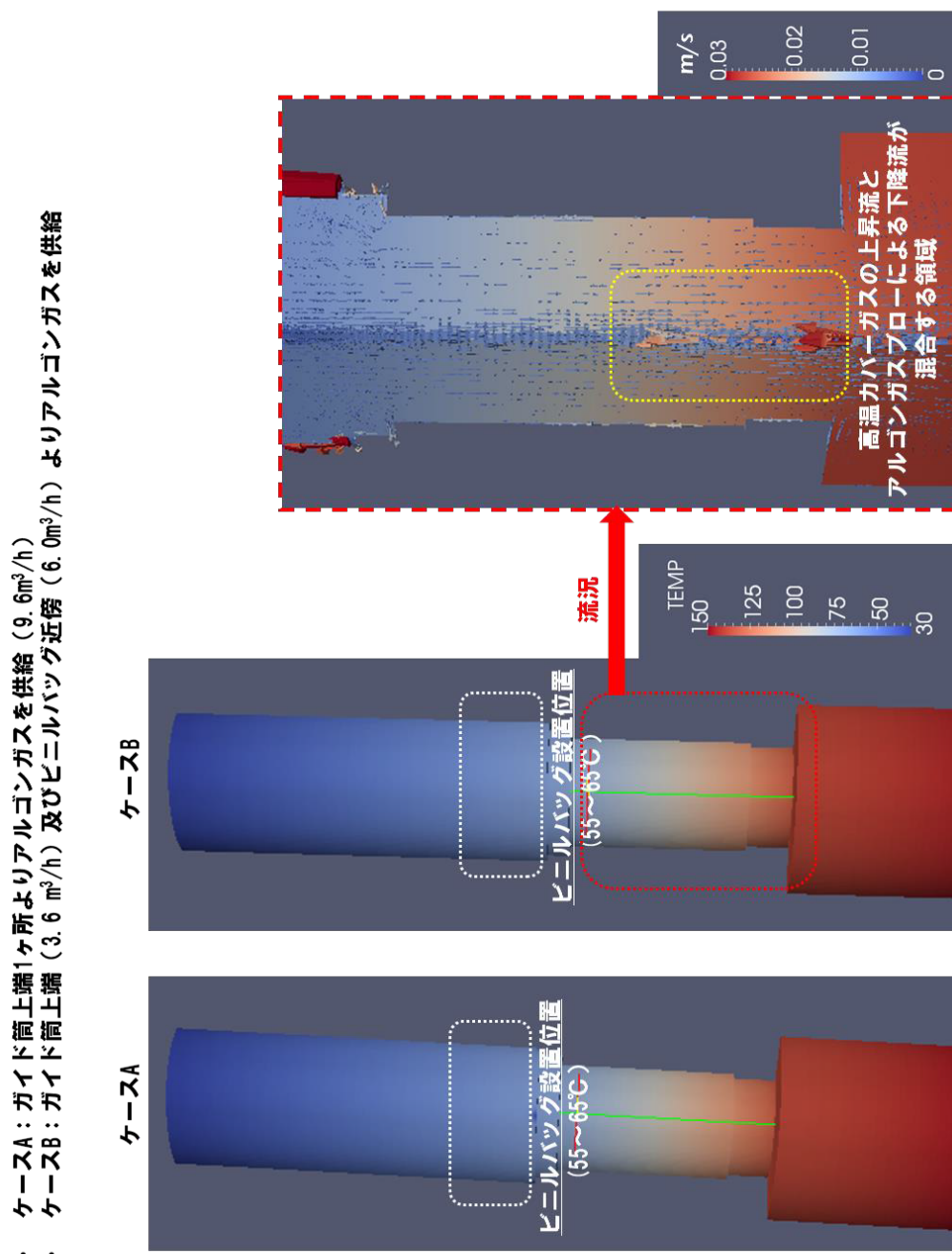


図 3.3 アルゴンガスの供給口の数量が温度分布に与える影響評価結果

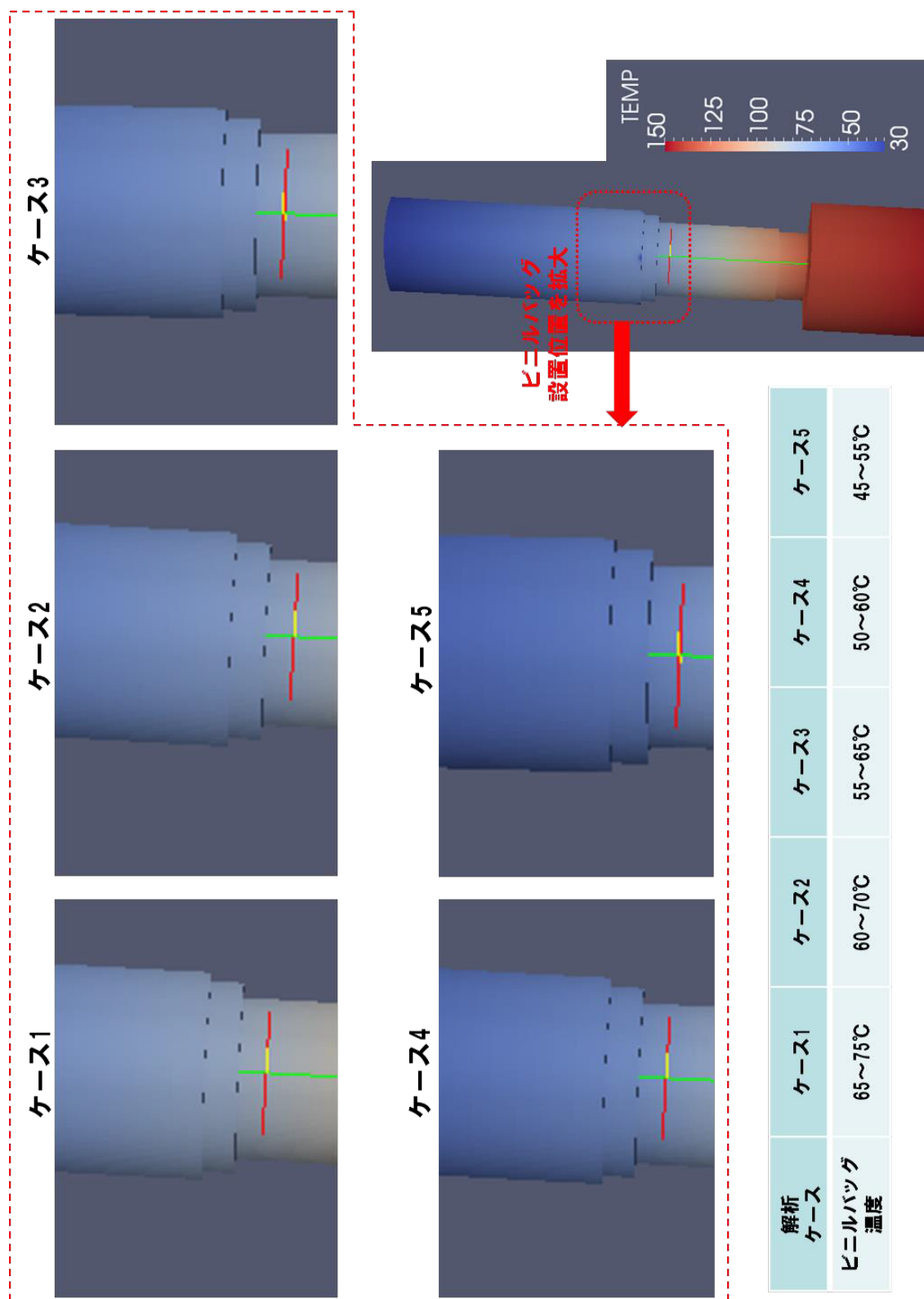


図 3.4 仮設バウンダリ内温度分布の評価結果

4. 循環型カバーガス微正圧制御システムの開発

4.1 基本方針

循環型カバーガス微正圧制御システム設計の基本方針を以下のとおりとする。

- ① 炉心上部機構交換作業では、炉心上部機構据付面の O リング交換等において、ビニルバッグを介した作業が行われる。その作業性を確保するため、過去の経験や炉心上部機構交換作業におけるフルモックアップ試験の知見から、カバーガス圧力を 150Pa 以下にする。
- ② カバーガス圧力を 100Pa 未満の極微正圧とした場合には、過去の経験によりカバーガス中に不純物が混入するおそれがあるため、循環型カバーガス微正圧制御システムについては、カバーガス圧力を定常的に 100～150Pa の間で自動制御することを管理目標とする。
- ③ カバーガス圧力は、格納容器内圧力をベースとした差圧計を用いて計測されるため、格納容器大扉開放等により格納容器内圧力を変動させた場合、カバーガス圧力の支持値が見かけ上変動し、外乱が生じるが、その場合でも、カバーガス圧力を正圧（0～1000Pa：ビニルバッグの最大使用圧力未満）に維持し、速やかに管理目標値である 100～150Pa に回復させるものとする。
- ④ 資源の節約のみならず、液体アルゴン受入設備や気化設備の負荷を軽減するため、循環型カバーガス微正圧制御システムでは、原子炉容器内に供給したアルゴンガスを回収し、再利用することとする。カバーガスの再利用にあたっては、含有されるナトリウムベーパーの除去及びガス温度の低減が課題であり、当該システムには、ナトリウムベーパートラップや冷却器を設けることとする。なお、炉心上部機構交換作業時のカバーガス容積は約 208m³ であり、旧炉心上部機構収納時に必要な最小流量（炉心上部機構交換作業における最大供給流量）である 20m³/h のアルゴンガスを原子炉容器内に供給した場合、カバーガス圧力は約 3.8Pa/s で上昇する。例えば、既設の 1 次アルゴンガス圧力制御設備により、この圧力制御を行う場合、排気弁の開閉操作回数は約 5500 回/日に至る。カバーガスの微正圧制御においては、許容される圧力変動幅（圧力制御範囲）が 100～150Pa と小さいことから、既設の 1 次アルゴンガス圧力制御設備を用いた自動制御では、その給排気弁にハンチング事象（圧力が上下動し、給排気弁の開閉が交互に繰り返される事象）が頻発するおそれがあり、そのため、微正圧制御を行う場合は、運転員の手動操作による排気弁の開閉で対応することを基本としているが、炉心上部機構交換作業において要求される頻度（約 5500 回/日）で当該操作を実施した経験はなく、また、短期間であっても対応が困難であることが容易に推定できるため、循環型カバーガス微正圧制御システムでは、カバーガス圧力の自動制御が必須である。

- ⑤ 既設の 1 次アルゴンガス圧力制御設備が、長期間に亘り、高頻度で動作した場合には、当該設備の劣化・損傷等が懸念されるため、循環型カバーガス微正圧制御システムは、1 次アルゴンガス圧力制御設備から独立したものとし、1 次アルゴンガス圧力制御設備の動作に期待しないようにしたが、循環型カバーガス微正圧制御システムがなんらかの不具合により停止することを想定し、既設の 1 次アルゴンガス圧力制御設備（自動制御）については、圧力制御範囲を、通常の 290～690Pa から 40～170Pa とし、これをバックアップとする。

4.2 システム構成

循環型カバーガス微正圧制御システムの系統図及び構造図を図 4.1 及び図 4.2 に示す。当該システムは、主に、①排気ライン先端部（軸封装置含む）、②排気ライン、③ナトリウムベーパートラップ（第 1 ベーパートラップ及び第 2 ベーパートラップ）、④ブロワ及び排気流量調整弁、⑤冷却器、⑥バッファータンク及び供給タンク等で構成される。また、当該システムに、不純物が混入した場合や不具合が発生した場合に、ブロワ等を速やかに停止するためのインターロックを有する（図 4.3 参照）。主要構成機器の概要を以下に示す。

① 排気ライン先端部（軸封装置含む）

排気ライン先端部の概略図を図 4.4（1/2、2/2）に示す。排気ライン先端部は、大回転プラグ上の炉内検査孔(B)ドアバルブ上に設置した軸封装置を介して、原子炉容器内に挿入される。軸封装置では、排気ライン先端部を支持するとともに、排気ライン先端部の挿入口（軸封部）に設けたグランドパッキンと排気ライン先端部表面と密着させることでカバーガスバウンダリを確保している。また、軸封部には中間加圧ラインを設けており、常時アルゴンガスを供給することで、中間加圧部の圧力を上方もしくは下方のエリアよりも高いものとし、グランドパッキンにリークが生じた場合にあっては、カバーガスの放散及びカバーガス中への不純物の混入を防止できるようにしている。なお、排気ライン先端部を挿入した炉内検査孔(B)には、通常、遮蔽プラグが挿入されている（図 4.4（2/2）参照）。排気ライン先端部では、カバーガスを吸い上げるため、その吸い上げ口を上方にした場合には、炉内検査孔(B)スリーブ内面に、カバーガス中のナトリウムベーパーが付着・堆積し、遮蔽プラグの再挿入を阻害する可能性があるため、カバーガスの吸い上げ口は、回転プラグ下面付近（GL-5396：ナトリウム液面から約 4144mm 上方の位置）とした。

② 排気ライン

排気ライン先端部から吸い上げられたカバーガスは、排気ラインを経由して、ナトリウムベーパートラップに流入する。排気ラインについては、長さ約 25m のベローズ管とし、伝熱面積を大きくすることで、周囲雰囲気温度を 30℃とした場合にあっては、ナトリウムベーパートラップに流入するカバーガスの温度を 35℃以下とし、ナトリウムベーパーが確実に除去される設計している。なお、実機では、試験時の周囲雰囲気温度（冬場に試験を実施した周囲雰囲気温度は約 15℃）と概ね同じレベルまでカバーガス温度を低減できるこ

とを確認している。また、排気ラインの敷設距離が長いこと、また、肉厚が薄いことを考慮し、当該ラインに不具合が発生した場合にあっても、循環型カバーガス微正圧制御システムを停止することなく、その交換作業を実施できるように、排気ラインは 2 系統化し、それぞれ単独で内部空気置換・取り外し・取り付け・内部アルゴンガス置換ができる構造とした。

③ ナトリウムベーパートラップ

カバーガス中のナトリウムベーパーがブロワに流入した場合、その機能を阻害する可能性があるため、ブロワの前段には、ナトリウムベーパーを除去し、ブロワへの流入を防止するためのナトリウムベーパートラップを設置した。図 4.5 に示すように、ナトリウムベーパートラップは金属メッシュを有する第 1 ベーパートラップと HEPA フィルタを有する第 2 ベーパートラップで構成される。

ナトリウムベーパートラップのうち、第 2 ベーパートラップについては、過去の経験等より、循環型カバーガス微正圧制御システム運転中に HEPA フィルタが目詰まりすることが想定されたため、2 系統化し、それぞれ単独で、フィルタ取り外し・取り付け・ガス置換ができる構造とした。

④ ブロワ及び排気流量調整弁

ナトリウムベーパーが除去されたカバーガスは、ブロワにより、バッファータンクに送られる。ただし、ブロワから吐出されたガスは、排気流量調整弁を経由し、ブロワ吸入部に戻ることができるようにしており、ブロワは一定流量で運転させるものの、バッファータンクに送られるガスの流量（カバーガス排気流量（原子炉容器カバーガスの吸い上げ流量））は、排気流量調整弁の開度により調整される。なお、ブロワについては、系統の圧力損失を保守的に 30kPa とした上で、最大 20m³/h のアルゴンガスの供給に対応できるものを選定した。

カバーガス圧力と排気流量調整弁開度の相関設定の一例を図 4.6 に示す。カバーガス圧力は、原子炉容器内へのアルゴンガスブローにより、基本的に上昇するように維持されるため、カバーガスの圧力は、そのアルゴンガスブロー流量に応じて排気流量を調整することで制御される。排気流量調整弁の開度は、カバーガス圧力に応じて自動的に自動調整されるようにしており、アルゴンガスブロー流量とカバーガス排気流量がバランスすることで、カバーガス圧力を所定の範囲に制御できるようにしている。なお、ここでは、カバーガス圧力を、管理目標である 100～150Pa に確実に維持するため、カバーガス圧力と排気流量調整弁開度の相関設定は、110～140Pa を目標に調整することとした。なお、カバーガス圧力と排気流量調整弁開度の相関設定は、アルゴンガスブロー流量により異なるため、その都度、設定を適切なものに変更できるようにした。

⑤ 冷却器

ブロワ吐出のガスは、圧縮熱により温度が上昇する。カバーガスをアルゴンガスブローとして再利用するためには、当該ガス温度をアルゴンガスブロー流量評価条件の 30℃以下にすることが要求される。当該要求に対応するため、ブロワ吐出には、図 4.7 に示す冷却器を設置した。冷却器はフィン付伝熱管及びクーラーで構成され、ブロワの運転により生じる圧縮熱約 280W を徐熱するために必要な能力を有するものとしている。

⑥ バッファータンク及び供給タンク

循環されたガスは、バッファータンクを経由して、供給タンクに送り込まれ、原子炉容器内に再供給される。供給タンクについては、アルゴンガスブロー配管等の圧力損失を考慮した上で、必要なアルゴンガス流量を確保できるように、一方で、アルゴンガスブロー配管等に破損が生じた場合に、過度なアルゴンガスの放出が生じないように、供給タンク圧力が 30～40kPa となるようにバッファータンクからの供給流量を調整している。

バッファータンクは、循環ラインに不具合が生じた場合（例：ブロワトリップ）にあっても、供給タンクへのアルゴンガスの供給を継続できるように、清浄アルゴンガス自動供給ラインを設置し、30kPa 以上の圧力を確保できるようにしている。また、排気流量が多くなった場合に備え、バッファータンク圧力が 40kPa を超過した場合に作動する安全弁を有している。なお、バッファータンク及び供給タンクの容量は約 1.5m³である。

カバーガスの再利用にあたっては、不純物が混入していないことを確認することも重要であり、供給タンク及びバッファータンクには酸素濃度計を設けている。なお、酸素濃度が制限値である 500ppm を超過した場合には、ブロワの自動停止により、不純物の混入を抑制できるものとし、ブロワ停止中にあつては、バックアップである既設の 1 次アルゴンガス圧力制御設備により、カバーガス圧力は 40～170Pa で自動制御される。

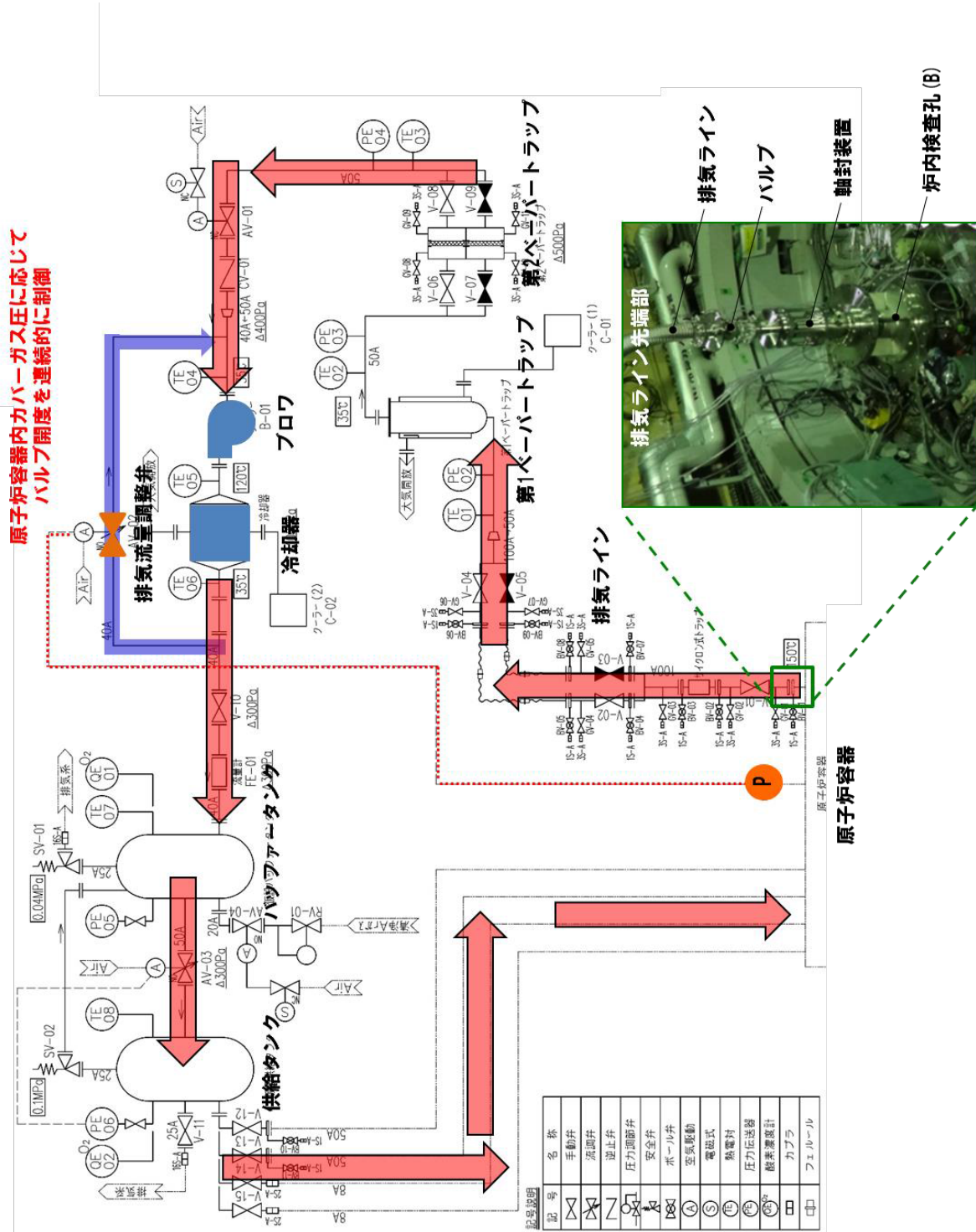
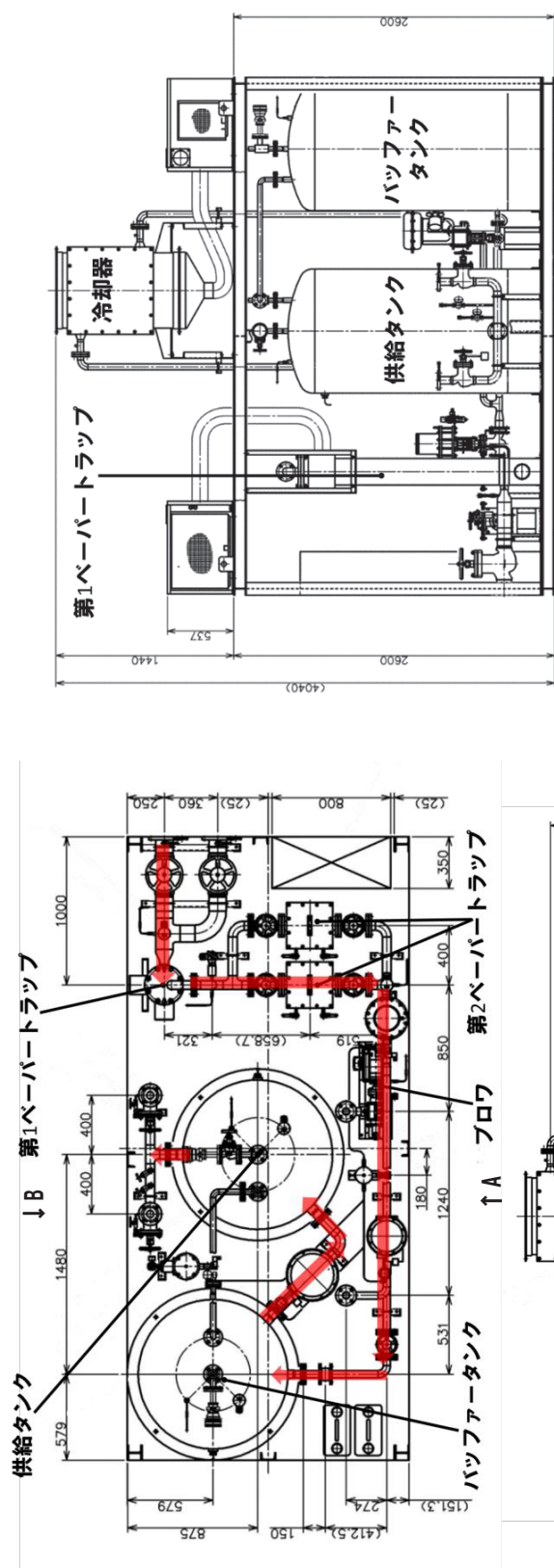


図 4.1 循環型カバーガス微正圧制御システムの系統図



単位:mm

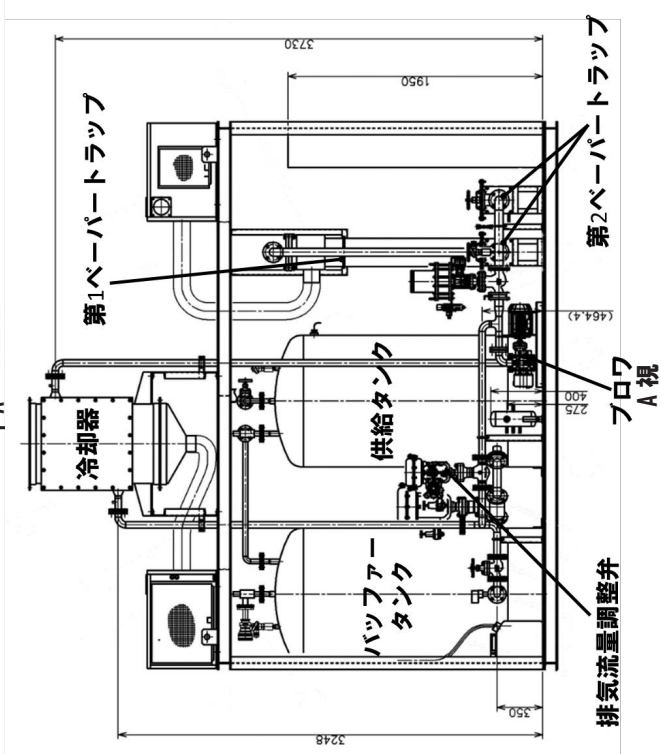


図 4.2 循環型カーバークラス微正圧制御システムの構造図

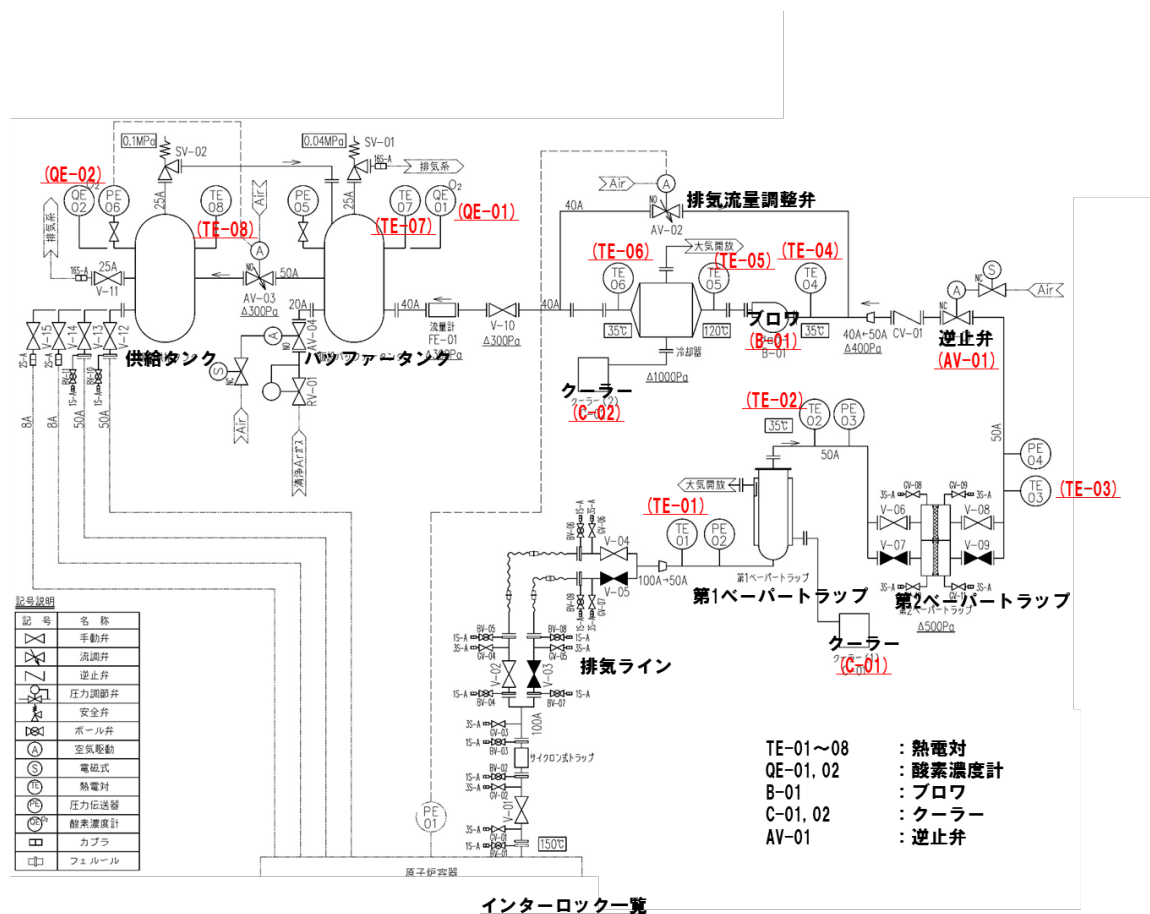


図 4.3 インターロッカー一覧

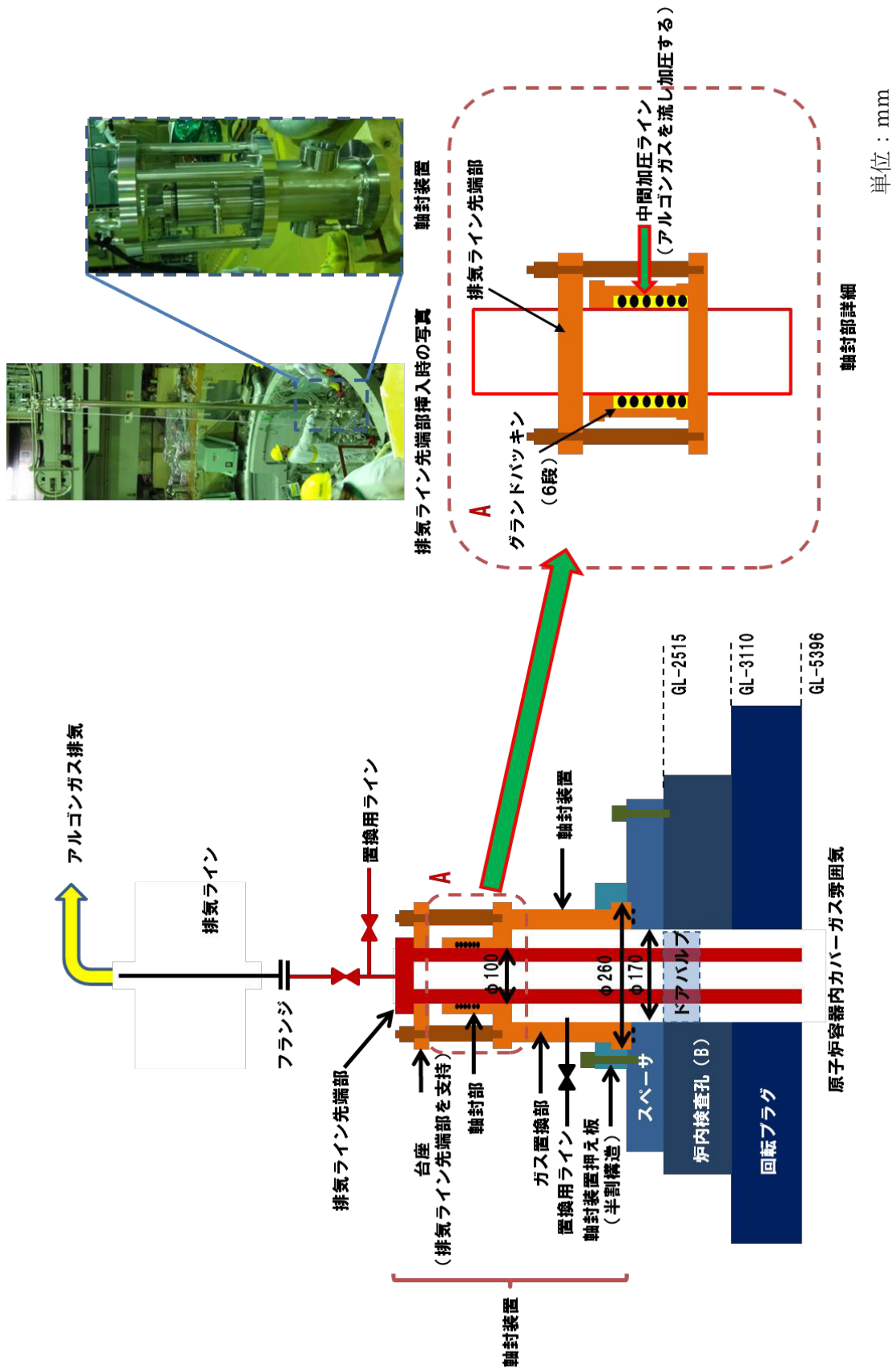


図 4.4 排気ライン先端部 (軸封装置を含む) の概略図 (1/2)

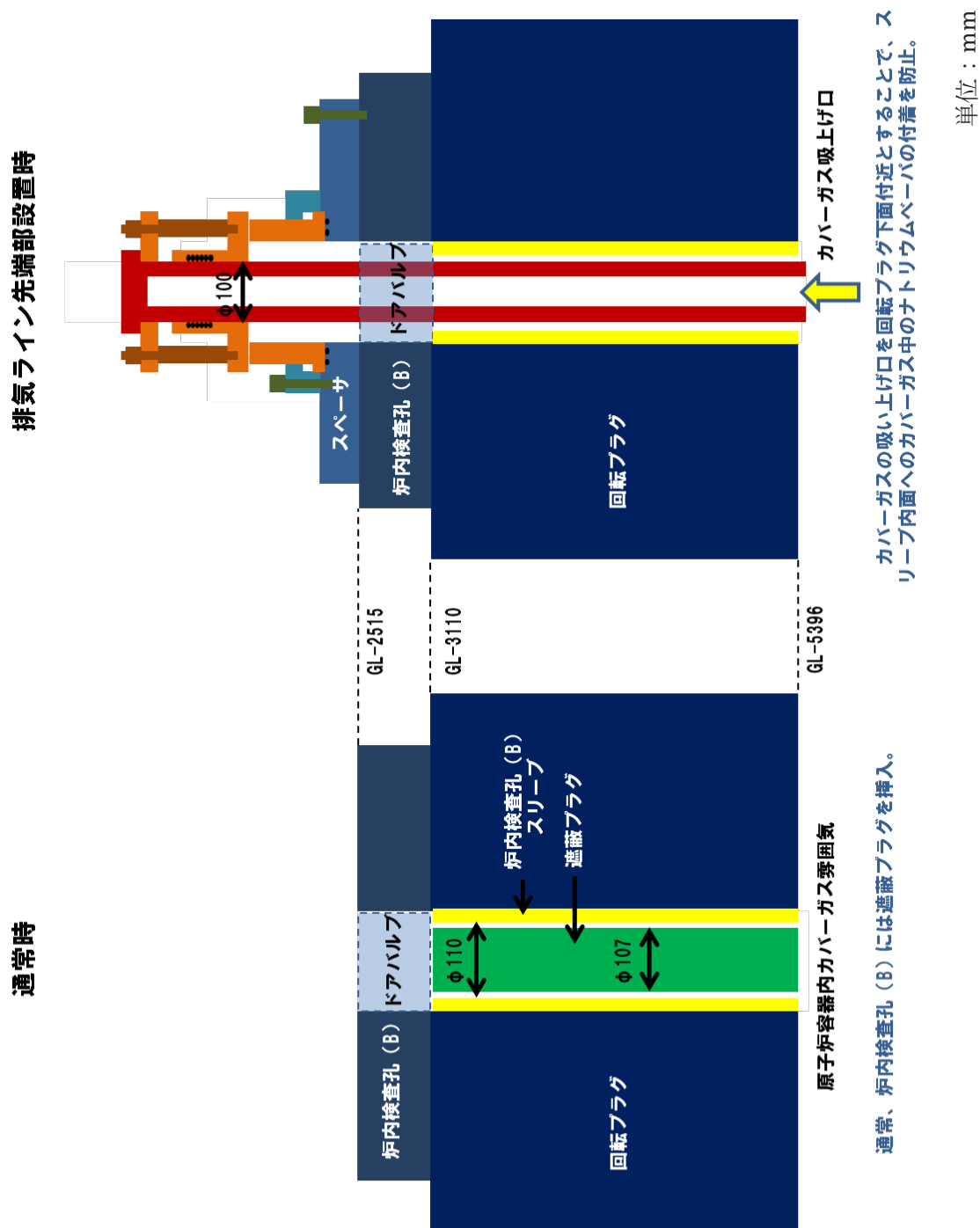


図 4.4 排気ライン先端部 (軸封装置を含む) の概略図 (2/2)

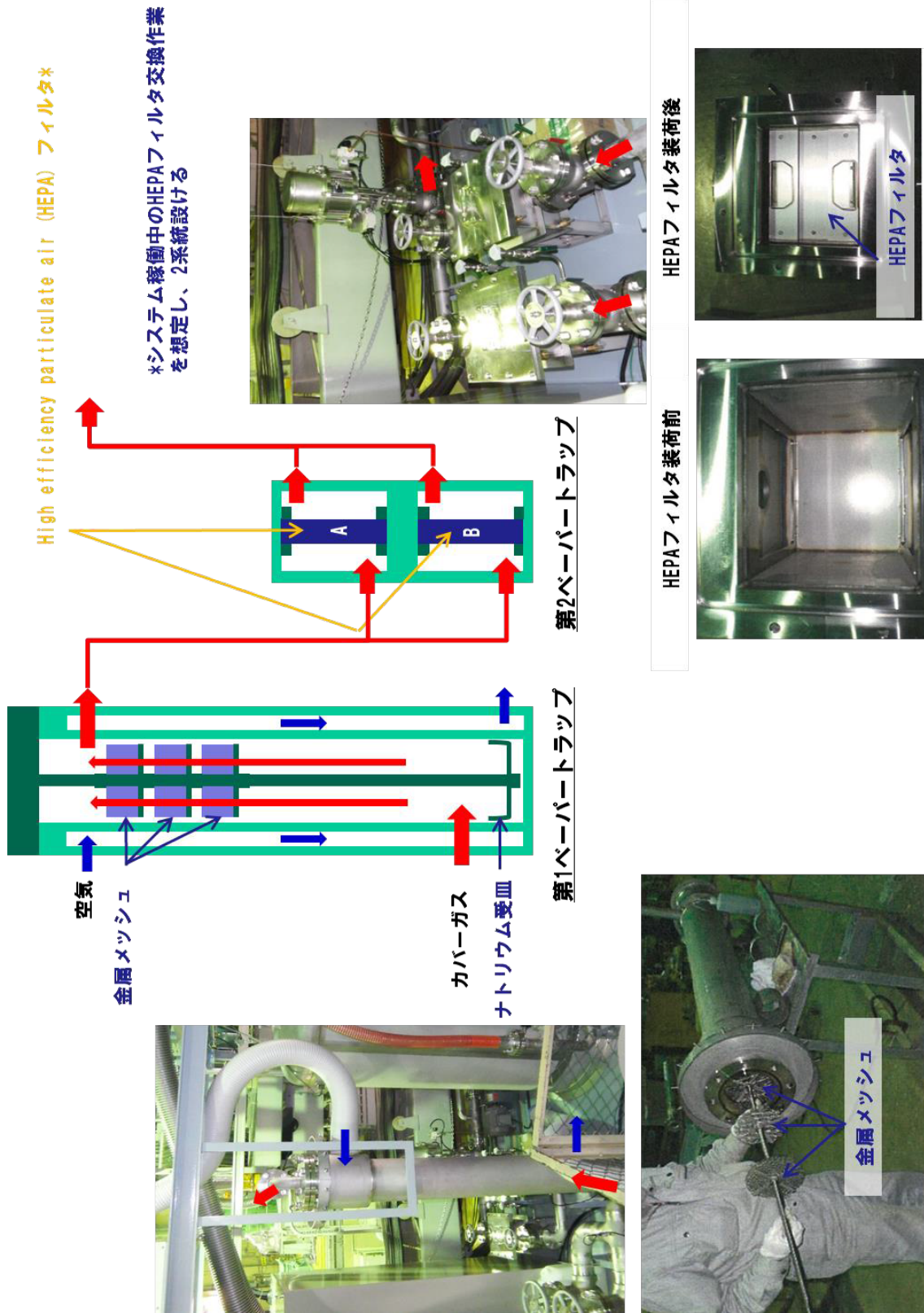
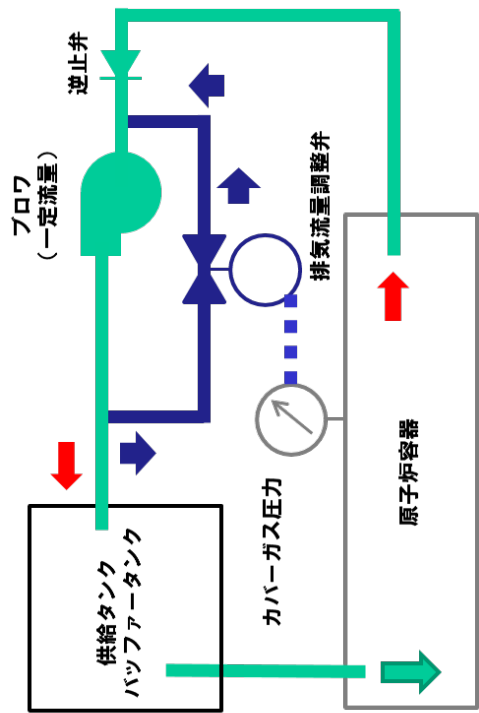


図 4.5 ナトリウムベーパートラップの概要図



- アルゴンガスフロー流量 > カバースペース排気流量の場合
 - ⇒ 原子炉容器内のカバースペース圧力が上昇
 - ⇒ 排気流量調整弁の開度減少
 - ⇒ 循環ライン中のカバースペース流量減少
 - ⇒ カバースペース排気流量増加
 - ⇒ アルゴンガスフロー流量 = カバースペース排気流量
- アルゴンガスフロー流量 < カバースペース排気流量の場合
 - ⇒ 原子炉容器内のカバースペース圧力が減少
 - ⇒ 排気流量調整弁の開度増加
 - ⇒ 循環ライン中のカバースペース流量増加
 - ⇒ カバースペース排気流量減少
 - ⇒ アルゴンガスフロー流量 = カバースペース排気流量

カバースペース圧力と排気流量調整弁開度の
関連設定の一例（ジャッキアップ試験時）

カバースペース圧力(Pa)	排気流量調整弁の開度(%)
130	100
132	45
148	35
150	10
160	0

主に弁開度はこの範囲で動作



カバースペース圧力は、アルゴンガスフローにより上昇方向に保持される。本設定ではカバースペース圧力130Pa以上で排気流量調整弁開度を小さくするものとした。ただし、弁開度が約45～100%までの領域では、排気流量の開度追従性が鈍いことから、カバースペース圧力制御は、排気流量に対して高い追従性を有する約45%以下の領域を使用することとした。システムの特性上当該領域では、排気流量が一時的に供給流量を上回るため、カバースペース圧力が瞬時に110Pa程度まで低下するが、弁開度が100%となるため、排気流量は0となり、カバースペース圧力は再度上昇方向に保持される。

図 4.6 原子炉容器カバースペース圧力の調整方法

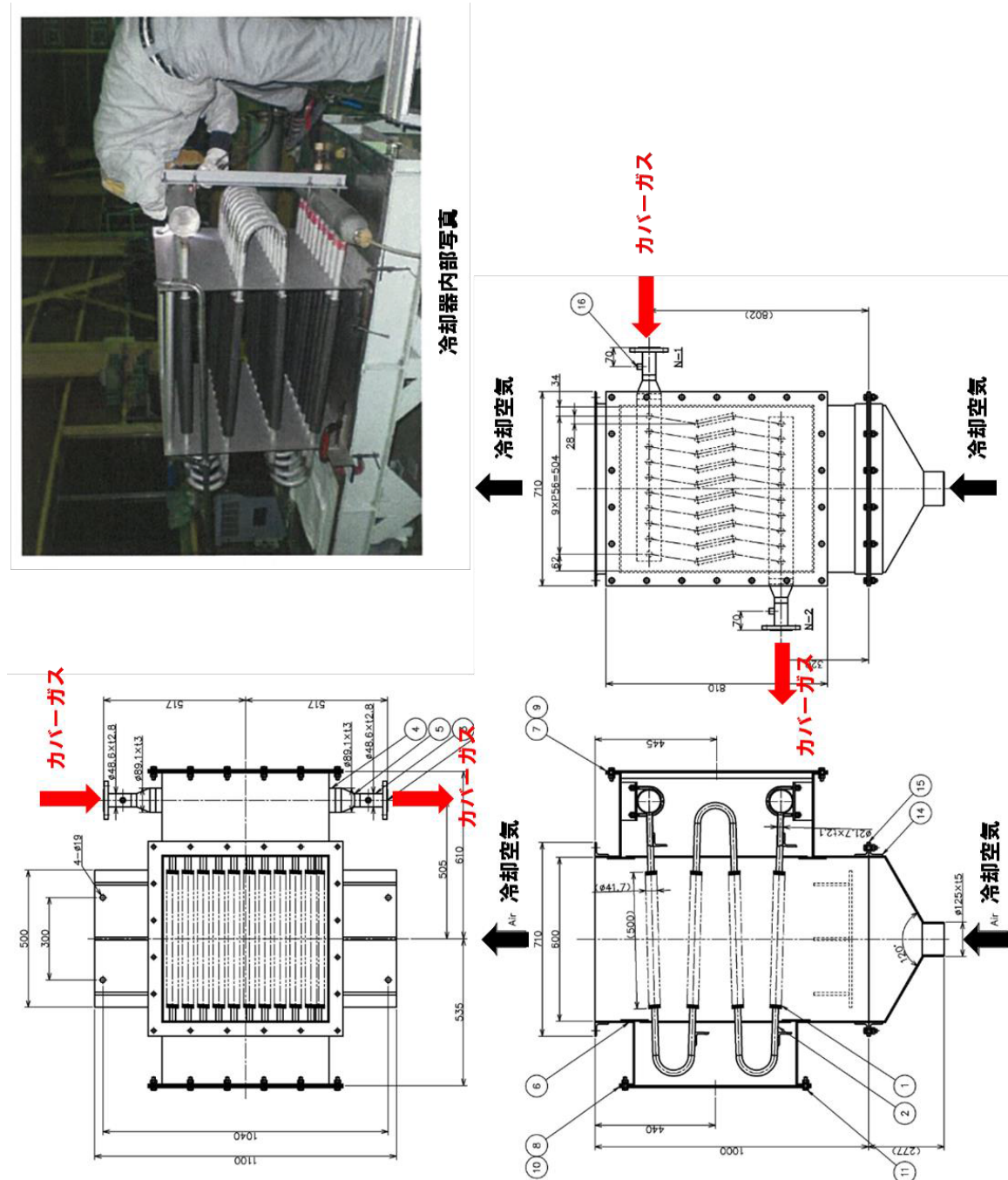


図 4.7 冷却器の構造図

5. 循環型カバーガス微正圧制御システムの機能確認試験

5.1 試験の概要

循環型カバーガス微正圧制御システムの機能を確認するため、炉外機能確認試験、炉内機能確認試験、試運転（約 1 ヶ月）を実施した。試験工程を図 5.1 に示す。炉外機能確認試験では、ブロワについて必要な流量が確保できること、アルゴンガス置換が実施できること及びインターロックが正常に動作することを確認した上で、炉内機能確認試験及び試運転のステップに移行するものとした。炉内機能確認試験では、短時間（合計：約 30 時間以上）の運転において、循環型カバーガス微正圧制御システムに要求される圧力制御性及びリサイクル性が確保されること、試運転では、約 1 ヶ月の連続運転においても、これらの機能が正常に確保されることを確認した。

5.2 試験結果

(1) 炉外機能確認試験

① ブロワ機能確認試験

ブロワ機能確認試験では、図 5.2 に示すライン構成で、ブロワを運転し、以下の機能を確認した。

- (a) 圧力損失を 30kPa とした条件で要求された 20m³/h を上回る 90m³/h のガス流量を確保できることを確認した。
- (b) ブロワを運転することで、バッファータンク圧力を 30kPa（バッファータンクに清浄アルゴンガスが供給される設定値）以上に加圧できることを確認した。なお、ブロワの運転により、バッファータンク圧力を 40kPa 以上に加圧することが可能であり、40kPa を超過した場合には、バッファータンクの安全弁が作動することも併せて確認した。
- (c) ブロワの運転により生じる圧縮熱約 280W に対し、冷却器は約 335W の除熱機能を有し、循環したカバーガスを 30℃以下にできることを確認した。

② アルゴンガス置換試験

循環型カバーガス微正圧制御システムの運転を開始する際には、カバーガス中への不純物混入を防止するために、事前にシステム内部をアルゴンガスに置換する必要がある。アルゴンガス中の酸素濃度の制限は 500ppm 以下である。

循環型カバーガス微正圧制御システムのアルゴンガス置換試験においては、アルゴンの比重が空気より大きいことを考慮して、低い位置に設置される排気ラインの最下端からアルゴンガスを供給し、高い位置に設置される供給タンクの最上端から排気するライン構成としている（図 5.3 参照）。試験では、当該排気ガスの酸素濃度を計測・確認し、システム内部がアルゴンガスに置換され、酸素濃度計の制限を満足することを確認する。なお、ブロワを閉め切り運転した場合、ブロワに過負荷が生じ故障するおそれがあるため、アルゴンガス置換時にあつては、ブロワは停止状態とし、供給タンクの最上端から排気するラインにより系統内を負圧にすることで、アルゴンガスを

流入させる。ただし、排気ラインについては、設計最低圧力が -10kPa であるため、系統内の負圧は -5kPa を目標に調整するものとした。アルゴンガス置換試験結果を以下に示す。

- (a) 20 時間のアルゴンガス置換により、酸素濃度の制限である 500ppm を下回る 100ppm 以下まで酸素濃度を低減し、循環型カバーガス微正圧制御システムをアルゴンガス置換できることを確認した。
 - (b) 循環型カバーガス微正圧制御システムの圧力は -5kPa に安定して保持され、アルゴンガス置換中のアルゴンガス置換を阻害するようなリーク等がないことを確認した。
- ③ インターロック試験
- インターロック試験により、各機器の異常信号に対してインターロックが正常に作動することを確認した。

(2) 炉内機能確認試験及び試運転

① カバーガス圧力制御性確認結果

循環型カバーガス微正圧制御システムには、 $5\sim 20\text{ m}^3/\text{h}$ のアルゴンガスブローを実施した状態で、カバーガス圧力を管理目標とした $100\sim 150\text{Pa}$ で制御することが要求されるが、炉内機能確認試験は、炉心上部機構交換作業前に実施するため、原子炉容器へのアルゴンガス供給経路に制限があり、アルゴンガス供給流量 $3\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $6\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $9\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $12\text{ m}^3/\text{h}$ でのカバーガス圧力の制御性のみを確認することとした。なお、ここでは、カバーガス圧力について、管理目標である $100\sim 150\text{Pa}$ を満足するように $110\sim 140\text{Pa}$ で維持するものとした。カバーガス圧力制御性確認試験の一例 ($12\text{ m}^3/\text{h}$ 供給時) を図 5.4 に示す。図 5.4 に示すように、格納容器大扉開操作により、格納容器内圧力が約 100Pa 上昇するものの、循環型カバーガス微正圧制御システムにより、カバーガス圧力の低下を抑制し、カバーガス圧力を正圧に維持できること、また、その後、 $110\sim 140\text{Pa}$ に回復することを確認した。格納容器大扉閉操作時にあっては、格納容器内圧力が約 100Pa 低下するが、循環型カバーガス微正圧制御システムにより、カバーガス圧力の上昇を抑制し、カバーガス圧力を 1000Pa 未満（ビニルバッグ最高使用圧力）に維持した上で、 $110\sim 140\text{Pa}$ に回復し、循環型カバーガス微正圧制御システムが、十分な制御性を有することを確認した。なお、格納容器大扉閉以降も、建家内扉の開閉により、 50Pa 程度の外乱が生じているが、これらに対しても十分な制御性を有している。以上より、循環型カバーガス微正圧制御システムは、いずれのアルゴンガス供給流量においても、カバーガス圧力を $110\sim 140\text{Pa}$ で維持できることを確認した。

さらに、炉内機能確認試験では、循環型カバーガス微正圧制御システムの電源を「切」とし、電源喪失を模擬した。ブロワ等の停止により、バッファータンク及び供給タンクの圧力は一時的に低下するものの、バッファータンクの圧力が 30kPa を下回ったところで、清浄アルゴンガスが供給され、必要なアルゴンガスブロー流量を確保できる

こと、また、バックアップとした既設の 1 次アルゴンガス圧力制御設備によりカバーガス圧力が制御されることを確認した。

試運転においては、アルゴンガス供給流量を $3 \text{ m}^3/\text{h}$ とし、約 1 ヶ月の連続運転を行うことで、循環型カバーガス微正圧制御システムに不具合が生じないこと、また、炉内機能確認試験と同様に、カバーガス圧力を $110 \sim 140 \text{ Pa}$ に維持できることを確認した。

② アルゴンガスのリサイクル性確認結果

アルゴンガスの再使用にあたっては、温度低減・ナトリウムベーパー除去・不純物混入防止が課題となる。アルゴンガスのリサイクル性の確認にあたっては、原子炉容器へのアルゴンガス供給流量約 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ とし、炉内機能確認試験においては約 30 時間、試運転では約 1 ヶ月間の運転を行い、以下の成果を得た。

- ・ 冷却器等が正常に動作し、供給タンクのアルゴンガス温度を 30°C 以下に維持できることを確認した（冬場に試験を実施したため、カバーガス温度は、約 15°C の周囲雰囲気温度と概ね同じレベルまで低減できた）。
- ・ 第 1 ベーパートラップ及び第 2 ベーパートラップの差圧の上昇はなく、アルゴンガス供給流量を約 $3 \text{ m}^3/\text{h}$ とした条件では、ナトリウムベーパーの影響をほぼ無視できることを確認した。
- ・ 供給タンク及びバッファータンクの酸素濃度が、 100 ppm 以下で維持できることを確認した。なお、循環型カバーガス微正圧制御システムでは、アルゴンガスの供給元である供給タンク及びバッファータンクに酸素濃度計を設置したが、今後、より確実な管理・監視を行うためには、窒素濃度計を併用することやブロワ運転時に負圧となる排気ライン等にも酸素濃度計を設置することが有効と考えられる。なお、循環型カバーガス微正圧制御システム運転前のアルゴンガス置換では、炉外機能確認試験時と同じ手法を用いたが、排気ライン等の敷設状態により、空気の滞留が生じたケースがあった。当該事象に対しては、アルゴンガスの供給と真空引きを繰り返すこと、また、ブロワに過負荷が生じない条件でブロワを短時間起動し、系統内のガスをミキシングすることが有効であることを確認した。

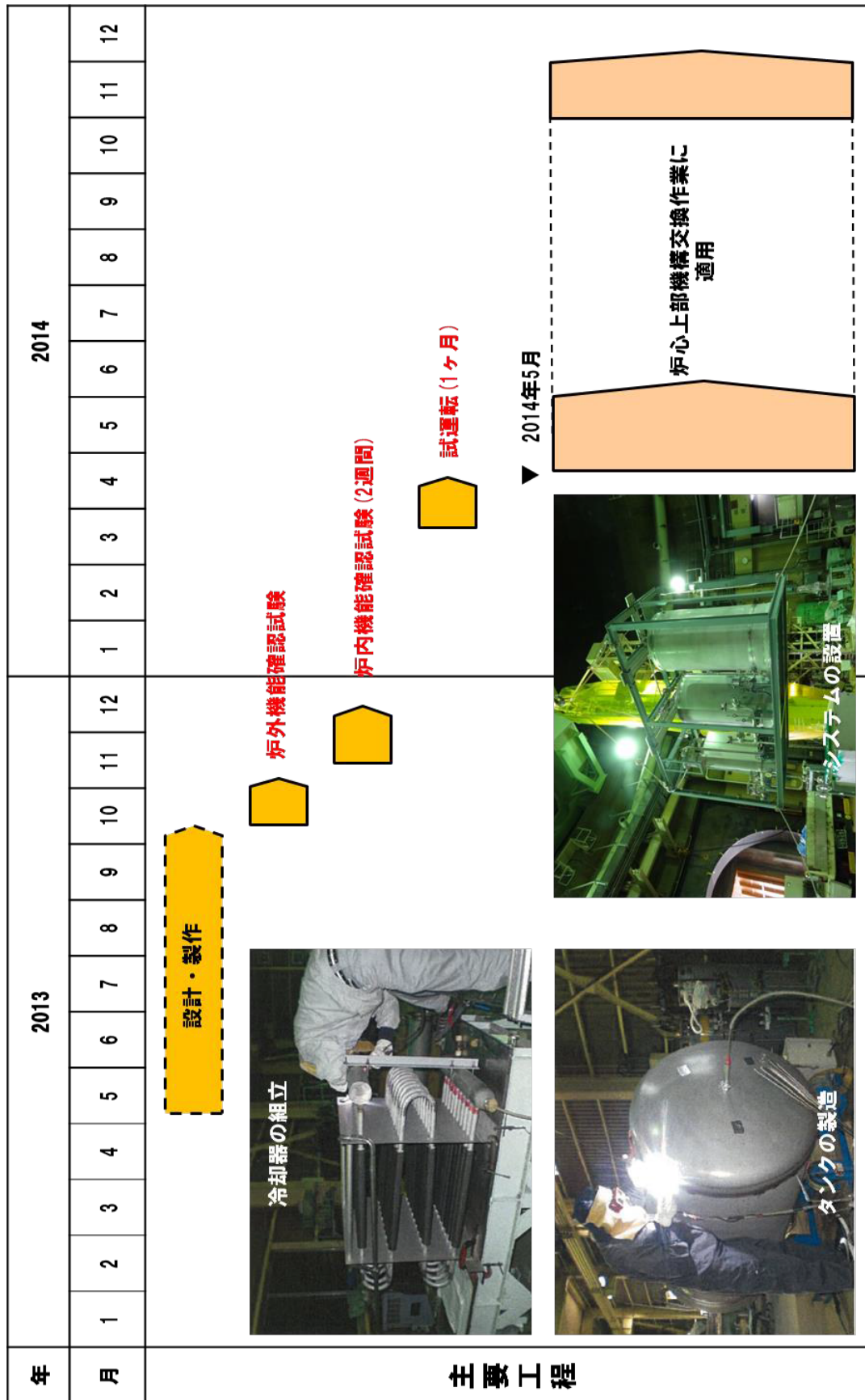


図 5.1 試験工程

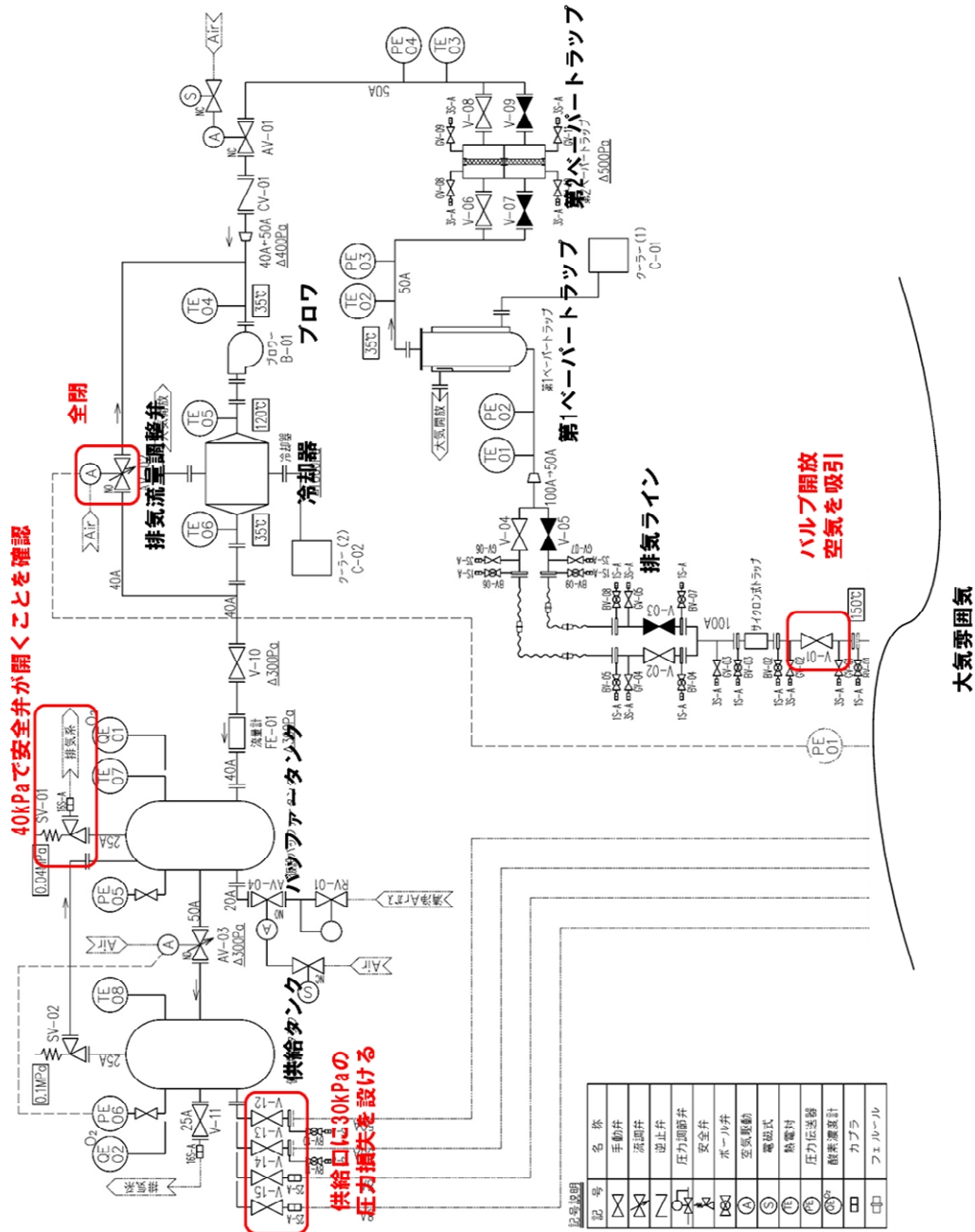


図 5.2 ブロワ機能確認試験時のライン構成

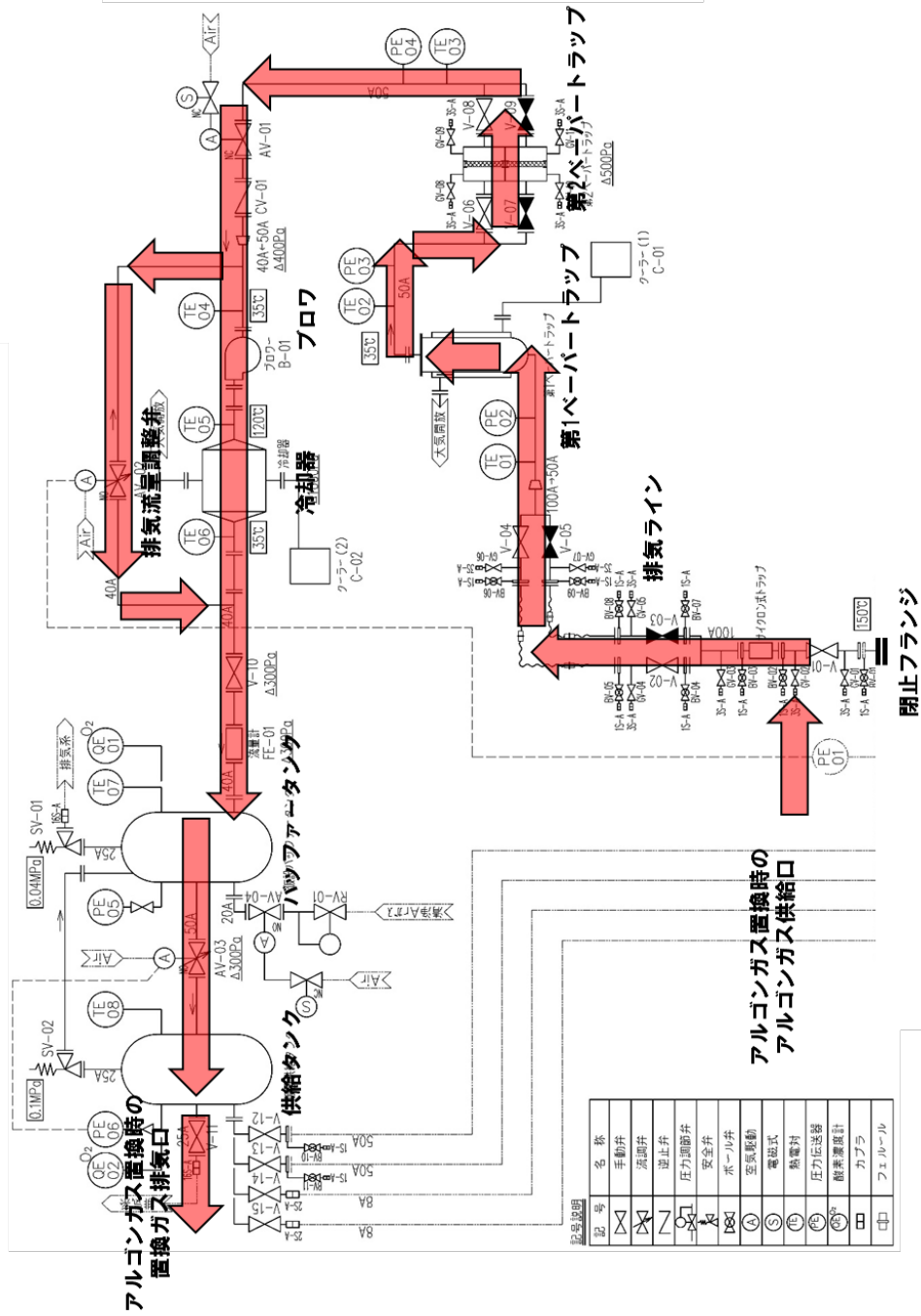


図 5.3 アルゴンガス置換方法

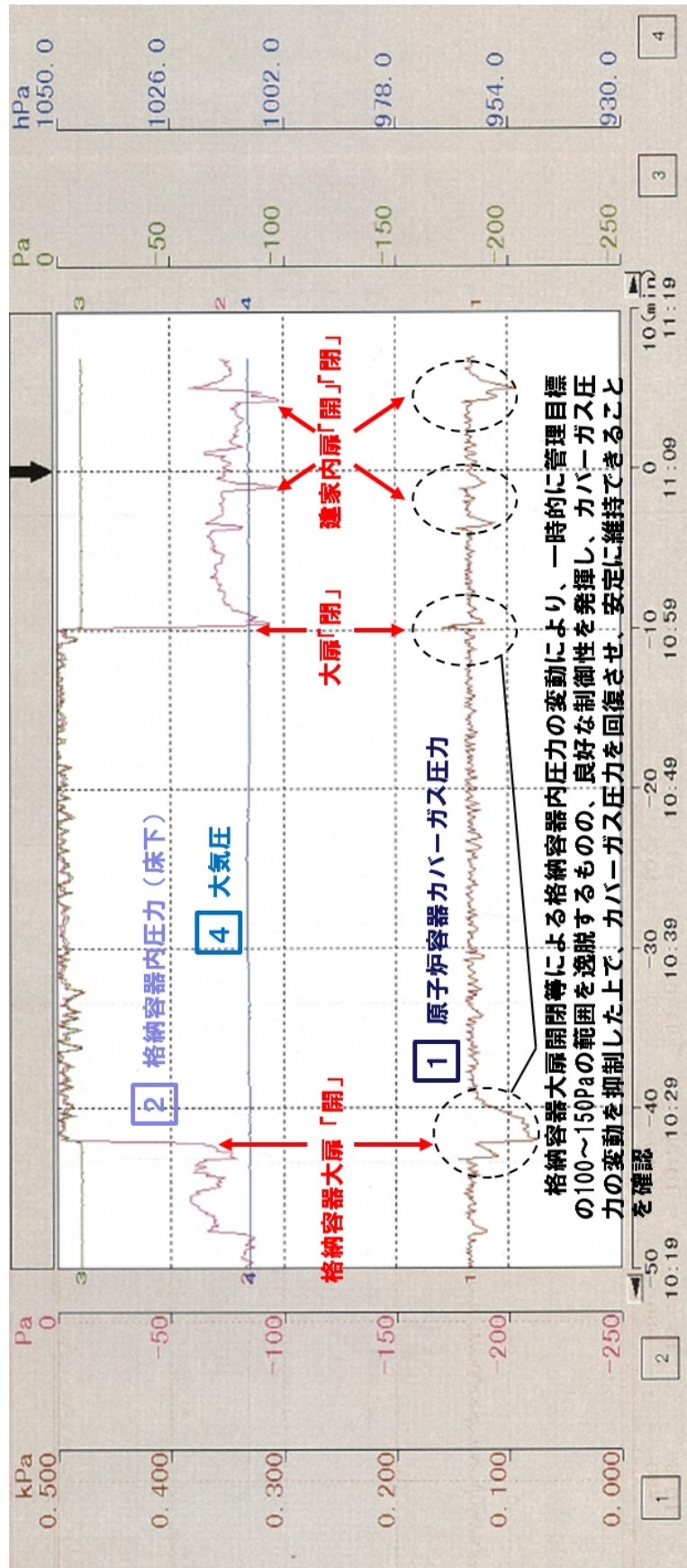


図 5.4 原子炉容器カバースガス圧力の制御性

6.循環型カバーガス微正圧制御システムの実機適用結果

循環型カバーガス微正圧制御システムは、炉外及び炉内機能確認試験、約 1 ヶ月の試運転のステップを経て、炉心上部機構交換作業に適用された。当該作業にあつては、最大で約 2 ヶ月の連続運転を行い、以下の成果を得た。

- ・ 最大約 20m³/h のアルゴンガスを供給した状態で、カバーガス圧力を基本的に 110～140Pa で維持するとともに、ビニルバッグ温度を 60℃以下に保持し、その健全性確保に貢献した。また、大型機器搬入・搬出のための格納容器大扉開閉操作による外乱の影響で、カバーガス圧力が一時的に 100～150Pa の管理目標を逸脱するものの、十分な制御性を有し、カバーガス圧力が 110～140Pa に回復することを確認した。
- ・ 冷却器等が正常に動作し、供給タンクのアルゴンガス温度を 30℃以下に維持できた。
- ・ アルゴンガス供給流量が少ない場合にはナトリウムベーパーの流入は無かったが、アルゴンガス供給流量を最大約 20 m³/h とした際には、排気ライン先端部からナトリウムベーパーが流入した。排気ライン先端部と排気ラインの接続部、第 2 ベーパートラップ出入口の内表面観察結果を図 6.1 に示す。ここでは、排気ライン先端部と排気ラインの接続部に、内表面を覆うようにナトリウムベーパーが付着しているものの、第 2 ベーパートラップの入口にあつては、ナトリウムベーパーの付着が、主な機能に影響ない程度であること、また、第 2 ベーパートラップの出口にあつては、ナトリウムベーパーの付着がないことが確認できた。上記結果より、ナトリウムベーパーは有効に機能したと考えられる。なお、炉心上部機構交換作業時にアルゴンガス供給流量を最大約 20 m³/h とした際には、第 2 ベーパートラップの差圧が上昇し、約 1 週間に 1 回の頻度で HEPA フィルタの交換が必要となった。
- ・ 供給タンク及びバッファータンクの酸素濃度を 100ppm 以下で維持した。なお、循環型カバーガス微正圧制御システムでは、アルゴンガスの供給元である供給タンク及びバッファータンクに酸素濃度計を設置したが、今後、より確実な管理・監視を行うためには、窒素濃度計を併用することやブロワ運転時に負圧となる排気ライン等にも酸素濃度計を設置することが有効と考えられる。

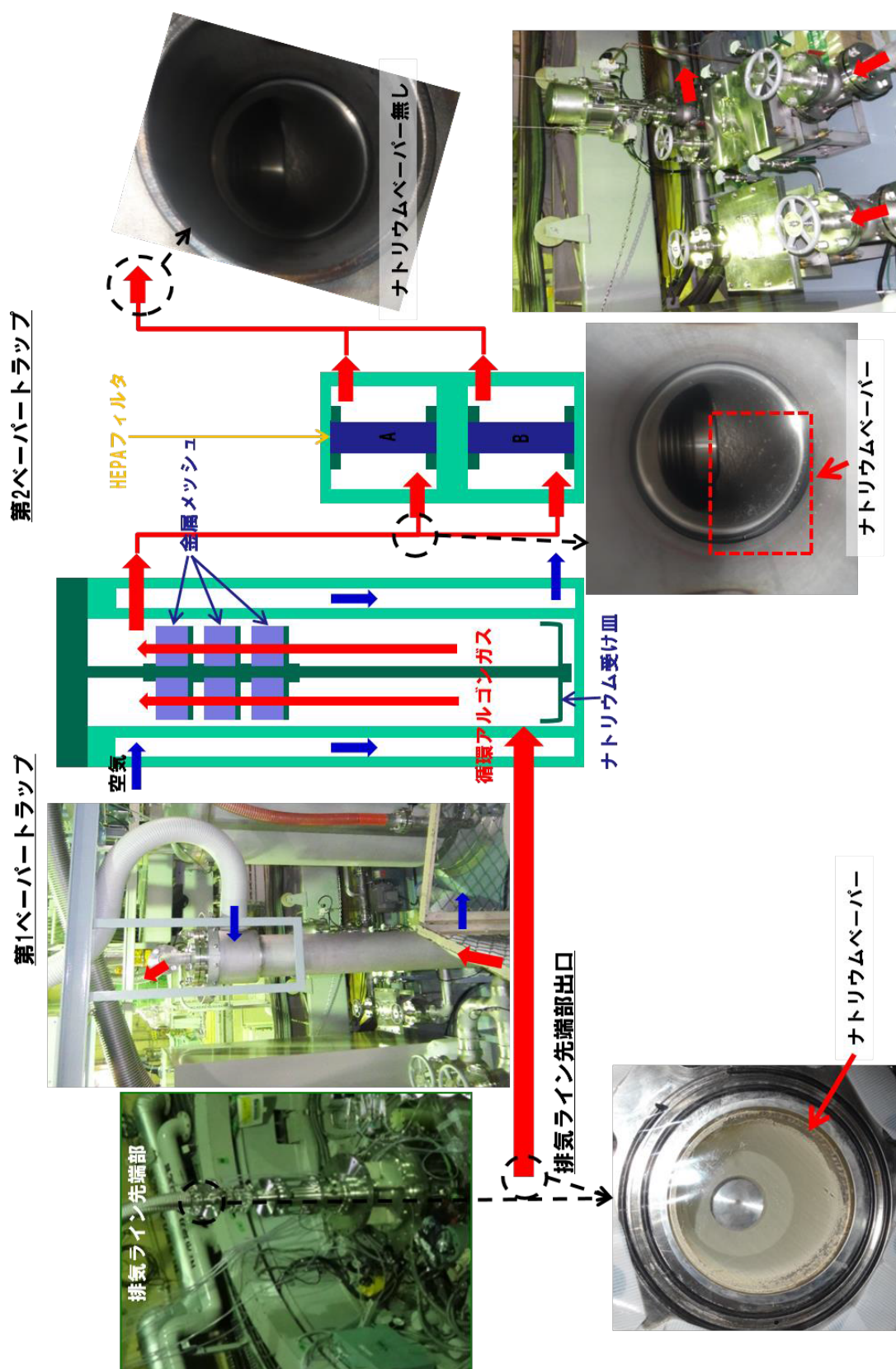


図6.1 炉心上部機構交換作業時のナトリウムベーパーの付着状況

7. 結言

SFR における原子炉容器内保守・補修作業では、軽水炉にはない技術開発が必要である。当該作業時のカバーガス微正圧制御は、その典型的な一例である。高速実験炉「常陽」では、炉心上部機構交換作業に向け、循環型カバーガス微正圧制御システムを開発し、実機に適用した。以下に主な成果を示す。

- (1) 炉外機能確認試験、炉内機能確認試験及び試運転を経て、循環型カバーガス微正圧制御システムを「炉心上部機構交換作業」に適用し、当該作業において、3～20m³/h のアルゴンガスを原子炉容器に供給した状態で、カバーガス圧力を、基本的に管理目標である 100～150Pa を満足するように維持した。安定したカバーガス圧力制御は、世界的にも例の少ない大規模な炉内補修作業である「炉心上部機構交換作業」の作業環境を整備し、当該作業の安全な推進に大きく貢献した。
- (2) これまで、手動操作により実施していたカバーガス圧力の微正圧制御を自動化することで、運転員の負担を大幅に低減した。
- (3) 排気されたカバーガスに含まれるナトリウムベーパーを除去するとともに、当該ガスを 30℃以下に低減し、冷却ガスとして再供給できることを確認した。良好なリサイクル性により、アルゴンガスの消費量だけでなく、プラントの既設設備への負荷を大幅に低減し、その劣化・損傷のリスクを排除した。

今回開発した循環型カバーガス微正圧制御システムは、SFR の原子炉容器内保守・補修作業において必要となるカバーガスの微正圧制御に係る技術レベルを大きく向上させたものであり、ここで蓄積された経験やデータを希少知見として、後継 SFR における供用期間中の保守・補修に反映することで、今後の原子炉容器内保守・補修技術の開発に大きく資するものと期待される。

謝 辞

「常陽」炉心上部機構交換作業用循環型カバーガス微正圧制御システムの設計・製作においては、助川電気株式会社に多大なるご助成をいただいた。また、当該システムの炉内及び炉外機能確認試験、試運転、実機適用時においては、高速実験炉部、高速炉技術課、高速炉第1課、高速炉第2課、保全・照射技術開発課の多くの方々の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) Takashi SEKINE, Takashi ASHIDA et al. : "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo", FR '09, Kyoto, JAPAN (2009).
- 2) 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, Paris, FRANCE (2013).
- 3) Eiji OKUDA, Chikara ITO et al. : "Restoration for damaged components in reactor vessel of the experimental fast reactor Joyo", 2013 ANS Winter Meeting, Washington, USA (2013).
- 4) 藤本、池岡、山岸他 : “CRDM メカニカルシールガスブローダウン試験 (第1報)”、1981年日本原子力学会春の年会 (1981) .
- 5) 深田、上田、佐野 : “CRDM メカニカルシールガスブローダウン試験 (2)”、1984年日本原子力学会分科会 (1984) .
- 6) 深田、上田、藤本 : “CRDM メカニカルシールガスブローダウン試験 (3)”、1984年日本原子力学会分科会 (1984) .
- 7) 高須、磯崎他 : “ナトリウム技術実用物性値表”、PNC-TN941 81-73 (1981) .
- 8) H. Kamide, M. Igarashi et al. : “Study on mixing behavior in a tee piping and numerical analyses for evaluation of thermal striping” Nuclear Engineering and Design 239, (2009), pp.58-67.

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		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	ウェーバ	Wb	Vs	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
光束度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
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のみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてののみ使用される。

(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
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
表面電荷	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 =0.1 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 元系の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

