JAEA-Technology 2016-017 DOI:10.11484/jaea-technology-2016-017



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3) —

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast Reactor Joyo

-Observation Technical Development in a Reactor Vessel of the Fast Reactor (III)-

奥田 英二 佐々木 純 鈴木 信弘 高松 操 長井 秋則

Eiji OKUDA, Jun SASAKI, 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

C

日本原子力研究開発機構

July 2016

Japan Atomic Energy Agency

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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) 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 — 高速炉における原子炉容器内観察技術開発(その3) —

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

奥田 英二、佐々木 純*、鈴木 信弘*、高松 操、長井 秋則

(2016年6月13日 受理)

ナトリウム冷却型高速炉(以下、「SFR」)における原子炉容器内観察では、高温・高線量率・ 原子炉容器内への限定されたアクセスルートの制約がある。高速実験炉「常陽」では、観察画 像の画質・鮮明度向上を目的とし、耐放射線カメラを用いた原子炉容器内観察を実施した。主 な成果は、(1)耐放射線カメラを、ナトリウム冷却型高速炉における原子炉容器内観察に適用 し、高い画質・鮮明度を有する画像を取得できることを確認した。(2)耐熱性に劣る耐放射線 カメラの温度上昇抑制対策を講じ、供用中 SFR の実機環境下において、問題なく使用できる ことを確認した。(3) SFR における原子炉容器内観察に係る装置設計・作業手順策定等に係る 経験を蓄積するとともに、当該観察に係る実機検証データを拡充することができた。

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 SFR の原子炉容器内観察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

JAEA-Technology 2016-017

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast Reactor Joyo -Observation Technical Development in a Reactor Vessel of the Fast Reactor (III)-

Eiji OKUDA, Jun SASAKI^{**}, 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 June 13, 2016)

Since In-vessel observation (IVO) equipment for Sodium cooled Fast Reactor (SFR) is required to be designed to withstand the severe conditions (high temperature, high radiation dose and limited access route), fiberscope or periscope was used to be applied. However, in order to attain IVO with higher quality and resolution, IVO using a radiation resistant camera was conducted in the fast experimental reactor Joyo and obtained the following results; (1) IVO with higher quality and resolution could be achieved using a radiation resistant camera under the actual reactor condition. (2) Thermal resistance was the primary concern for the operation of the radiation resistant camera. However, due to the proper measures for preventing temperature ascent of the radiation resistant camera, the radiation resistant camera could perform successfully. (3) The experience accumulated in the design of IVO equipment, operating procedures and the demonstration results provided valuable insight to improve IVO techniques in SFR.

Keywords: SFR, Joyo, In-vessel Observation, Radiation Resistant Camera

*Collaborating Engineer

目 次

1.	緒	출 	1
2.	炉,	心上部機構交換作業における原子炉容器内観察の概要	2
3.	耐	放射線カメラの概要	6
4.	耐	放射線カメラ使用にあたっての課題及び解決策	9
5.	耐	放射線カメラを用いた炉心上部機構下面及び案内スリーブ観察結果	13
6.	耐	放射線カメラを用いた原子炉容器内観察で得られた知見と改善策の検討	16
6	5.1	照明の影響について	16
6	5.2	放射線及び温度の影響について	16
6	5.3	その他	17
7.	結	言	19
謝話	辛		19
参え	岑 文	献	20

Contents

1.	In	troduction	1	
2.	01	utline of IVO in the Upper Core Structure replacement work	2	
3.	01	utline of the radiation resistant camera	6	
4.	Su	abjects and resolution for the radiation resistant camera	9	
5.	Tł	he observation result of using the radiation resistant camera	13	
6.	Oł	btainments and betterments for IVO throughout this observation	16	
6	3.1	Light influence	16	
6	3.2	High radiation and high temperature influence	16	
6	5.3	The others	17	
7.	Сс	onclusion	19	
Acknowledgements 19				
Re	fere	ences	20	

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の構造	3
図 2.3	炉心上部機構交換作業の概略手順	4
図 2.4	旧炉心上部機構下面及び貫通孔(案内スリーブ)の観察イメージ	5
図 3.1	耐放射線カメラの外観	$\overline{7}$
図 3.2	耐放射線カメラと観察対象物の幾何学的配置	$\overline{7}$
図 3.3	耐放射線カメラ炉外機能確認試験結果等	8
図 4.1	駆動装置(兼カメラ収納容器)の概略構造	11
図 4.2	駆動装置(兼カメラ収納容器)の取付状況	12
図 4.3	耐放射線カメラの冷却方法の概要	12
図 5.1	旧炉心上部機構下面観察画像	14
図 5.2	案内スリーブ観察画像	15
図 6.1	案内スリーブ詳細観察画像	18

1. 緒言

高速実験炉「常陽」における、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)}の原因究明や、復旧計画立案に資する情報取得等を目的とした原子炉容 器内観察では、主に、耐放射線ファイバスコープを使用してきた^{4)~6)}。ただし、耐放射線ファ イバスコープは、視野が狭く観察対象に近接しなければ十分な画質・鮮明度を確保できないた め、詳細な観察には、観察対象物へ近接して使用される。一方で、SFR における原子炉容器内 観察にあっては、観察対象物への近接が困難な場合があり、その場合、ファイバスコープでは 十分な画質・鮮明度が確保できない。

平成26年5月~12月に実施した炉心上部機構交換作業では、旧炉心上部機構の引抜きにより、大きな開口部が形成され、また、旧炉心上部機構が高い表面線量率を有することから、作業雰囲気には線量率上昇が生じるため、耐放射線ファイバスコープを観察対象物に近接させるための作業を実施することは困難であった。

上記に鑑み、「常陽」では、炉心上部機構交換作業における機器構成や手順を踏まえた上で、 観察対象物に近接できない場合にあっても、高い画質・鮮明度を確保できる耐放射線カメラを 観察ツールとし、当該作業に適用した。本報告書では、耐放射線カメラを用いた原子炉容器内 等観察結果及びその使用経験に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における原子炉容器内観察の概要

「常陽」は、我が国で最初の高速増殖炉として、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 を蓄積した後、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、炉心燃料集合体や炉内構造物等を内包する。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。

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、小回転プラグの貫通孔(案内スリーブ)に挿入 されたものであり、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。

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試験、②旧炉心上部機構収納及 び③新炉心上部機構挿入のステップで構成される(図 2.3 参照)。なお、炉心上部機構交換作業 時にあっては、原子炉容器内のナトリウム液面を、燃料集合体頂部より 50mm 下方の位置とし た。炉心上部機構交換作業における観察対象物は、旧炉心上部機構下面及び貫通孔(案内スリ ーブ)であり、耐放射線カメラを用いた観察は、上記②の旧炉心上部機構収納作業終了時に実 施することとした。なお、旧炉心上部機構は、30 年以上の使用により放射化し、高い表面線量 率を有するため、一般的なカメラでは、放射線による機能劣化が生じる。ここでは、十分な信 頼性を確保するため、耐放射線カメラを用いることとした。旧炉心上部機構下面及び案内スリ ーブ観察時の耐放射線カメラ配置のイメージを図 2.4 に示す。なお、原子炉容器内のカバーガ ス温度は約 150℃と高温であるため、炉心上部機構を引き抜いた状態にあっては、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ことで、ガイド筒の内部温度(旧炉心上 部機構下面及び案内スリーブ観察時の耐放射線カメラ設置位置雰囲気温度)を 80℃以下(ガイ ド筒の下端に設置された仮設バウンダリ(ビニルバッグ)の設計温度(80℃)に基づき設定) に保持するものとしている。



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



- 4 -



図 2.4 旧炉心上部機構下面及び貫通孔(案内スリーブ)の観察イメージ

3. 耐放射線カメラの概要

耐放射線カメラの主要仕様を以下に示す(外観:図3.1参照)。なお、耐放射線カメラには、 パン・チルト機構を有するものを使用し、遠隔操作によりカメラ本体を反転することで、上方 に位置する旧炉心上部機構下面及び下方に位置する案内スリーブの観察を実施できるようにし ている。

型式	: ミルス・システムズ製 STS-71 PTZ カメラ(撮像管)
水平解像度	:600 TV 本
耐放射線量率	:3×10 ³ Gy / h 以下
耐放射線量	: 10 ⁶ Gy 以下
最高使用可能温度	: 55 °C
照明	: ハロゲンランプ(20W×2 個(図 3.1 参照))
映像	:モノクロ
視野角	:25.8° (短辺)/34.4° (長辺)
ズーム	:10倍(光学5倍、アナログ2倍)
	※ ズーム機能使用時の視野角:5.4°(短辺)/7.2°(長辺)

耐放射線カメラと観察対象物(旧炉心上部機構下面及び案内スリーブ)の幾何学的配置を図 3.2 に示す。図 3.2 に示すように、耐放射線カメラは、2,983mmの距離において、旧炉心上部 機構下面全域を一度に観察できる視野角を有するとともに、ズーム機能及びパン・チルト機能 により、局所的な詳細観察にも対応できるものとしている。また、耐放射線カメラの使用にあ たっては、実機大の炉心上部機構下面部の模擬体を用いた炉外機能確認試験を実施し、 2,983mmの距離において、厚さ約 0.8mmの整流板を明瞭に観察できること(必要な照度を確 保できることを含む)を確認している(図 3.3 参照)。



図 3.1 耐放射線カメラの外観



図 3.2 耐放射線カメラと観察対象物の幾何学的配置



4. 耐放射線カメラ使用にあたっての課題及び解決策

耐放射線カメラの使用にあたっては、(1) 炉心上部機構交換への適合性(カバーガスバウン ダリの確保を含む)及び(2) 高温環境下における耐放射線カメラの健全性確保が、主な課題 であった。これらの課題に対する解決策の検討結果を以下に示す。

(1) 炉心上部機構交換作業への適合性(カバーガスバウンダリの確保を含む)

旧炉心上部機構は、上方に設けたワイヤジャッキ等により引き抜かれることから、ガイ ド筒内部には、ワイヤやケーブル類が存在する。また、旧炉心上部機構収納時には、旧炉 心上部機構がガイド筒内を通過することから、耐放射線カメラは、旧炉心上部機構収納作 業終了時に、所定の位置に設置される必要がある。一方、旧炉心上部機構を引き抜いてい る状態にあっては、ガイド筒が、カバーガスバウンダリの一部を形成すること、また、旧 炉心上部機構下面は、30年以上に及ぶ原子炉容器内での使用に伴う放射化により、高い表 面線量率を有し、旧炉心上部機構が収納キャスクに収納された状態であっても、ガイド筒 周辺の作業環境線量率が高いことから、作業員が近接し、耐放射線カメラを所定の位置に 設置することは困難であった。そのため、耐放射線カメラは、事前にカバーガスバウンダ リ内に設置するものとし、観察時に、遠隔操作により、耐放射線カメラを所定の位置に移 動するための駆動装置が必要となった。

駆動装置(兼カメラ収納容器)の概略構造を図 4.1 に示す。耐放射線カメラは、駆動装 置の駆動部(スライド機構)に取り付けられる。駆動装置は、観察時以外において、耐放 射線カメラを駆動装置ケーシング内に収納する一方で、観察時には、電動モータにより、 遠隔操作にて耐放射線カメラを所定の位置に移動できる構造を有する。なお、耐放射線カ メラの位置は、収納位置及び観察位置に設けたリミットスイッチの作動状態を、カメラコ ントロールユニットにあるランプ表示にて確認できるようにしている。

また、駆動装置は、気密構造とし、図 4.2 に示すように、ガイド筒のアクセス孔に、旧 炉心上部機構ジャッキアップ試験前に取り付けることとし、旧炉心上部機構収納後にカバ ーガスバウンダリを開放する作業を不要とした。なお、ガイド筒アクセス孔と駆動装置の 接続部には、**0** リング及びパッキン、また、リークチェック用のポートが設けている。

上記運用により、耐放射線カメラの実機設置時間は長期化するものの、旧炉心上部機構の表面線量率(実測に基づく推定値)が、最大124 Sv / h であること⁷⁾を踏まえると、耐放射線カメラの仕様(耐放射線量率:3×10³ Gy / h/耐放射線量:10⁶ Gy)に鑑み、放射線に起因して、その健全性が阻害されることはないと判断した。

(2) 高温環境下における耐放射線カメラの健全性確保

耐放射線カメラの最高使用可能温度は約55℃である一方、ガイド筒内部の温度は、最大約80℃であり、高温環境下における耐放射線カメラの健全性確保が大きな課題となった。 当該課題に対しては、以下により対応することとした。

 駆動装置ケーシングには、冷却ガスラインを設け、冷却用アルゴンガス(30℃以)

下)を常時供給することで、駆動装置ケーシング内部温度の上昇を防止する(図 4.3 参照)。

- 駆動装置ケーシングの開口部(ガイド筒との接続部)には、熱遮へい板を設置し、 開口面積を低減することで、駆動装置ケーシング内の冷却用アルゴンガスがガイド 筒内部に流出するものとし、ガイド筒内部の高温カバーガス(80℃を想定)が駆動 装置ケーシング内に流入することを防止する(図4.3参照)。なお、熱遮へい板は、 駆動部(スライド機構)に取り付けられており、耐放射線カメラをガイド筒内の所 定の位置に移動する際には、耐放射線カメラとともに、ガイド筒内に移動される。
- ・ 観察時における耐放射線カメラの温度上昇を抑制するため、耐放射線カメラに冷却用アルゴンガスを直接吹き付けるラインを設けるとともに、耐放射線カメラに温度センサを取り付け、最高使用可能温度である 55℃を超えると、カメラコントロールユニットのアラームランプが点灯するものとした。なお、アラームランプが点灯した場合には、遠隔操作により、耐放射線カメラを駆動装置ケーシング内部に収納・冷却するものとした。



図 4.1 駆動装置(兼カメラ収納容器)の概略構造

ガイド筒外観



駆動装置(兼カメラ収納容器)取付状況



図 4.2 駆動装置(兼カメラ収納容器)の取付状況





図 4.3 耐放射線カメラの冷却方法の概要

5. 耐放射線カメラを用いた炉心上部機構下面及び案内スリーブ観察結果

「常陽」では、平成26年5月22日に、旧炉心上部機構を収納キャスクに収納する作業を実施した。当該作業時のプラント状態を以下に示す。なお、旧炉心上部機構の引き抜きにより、既設のカバーガスバウンダリが開放され、ガイド筒や仮設バウンダリ(ビニルバッグ)等の仮設機器によりカバーガスバウンダリが形成されていることから、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に、カバーガス圧力は、通常より低いものとしている。

- (1) ナトリウムレベル : GL-9540mm (燃料集合体頂部より 50mm 下方)
- (2) カバーガス圧力 : 特別低圧制御モード(0.04~0.17kPa)*
 * 別途、循環型微正圧制御システムを導入し、カバ ーガス圧力を 0.1~0.15kPa(目標)に制御(上記特 別低圧制御モード(既設設備)はバックアップとして 使用)
- (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

耐放射線カメラを用いて取得した旧炉心上部機構下面の観察画像を図 5.1 に示す。また、参考として、耐放射線ファイバスコープを用いて取得したもの ⁵⁾ を併せて示す。耐放射線カメラを用いた観察画像においては、高い画質・鮮明度が確保されており、厚さ約 0.8mm の整流板を明瞭に識別するできることを確認した。

案内スリーブの観察画像を図 5.2 に示す。なお、本観察では、案内スリーブの下方に位置する燃料集合体頂部の観察も実施している。耐放射線カメラと燃料集合体頂部までの距離は 8,640mm(ノミナル値)であるが、六角形状を有する燃料集合体(対面間距離:78.5mm(ノミナル値))を十分に識別できることが確認できた。



(4枚の画像を合成)

図 5.1 旧炉心上部機構下面観察画像



6. 耐放射線カメラを用いた原子炉容器内観察で得られた知見と改善策の検討

6.1 照明の影響について

「5. 耐放射線カメラを用いた炉心上部機構下面及び案内スリーブ観察結果」に示したように、耐放射線カメラは、炉心上部機構下面及び案内スリーブを明瞭に観察することが可能であり、SFRにおける原子炉容器内観察技術として、十分に有効であることが証明された。しかしながら、照明方法を改善することで、さらに明瞭な観察画像を取得できる可能性がある。

本観察では、耐放射線カメラに設置したハロゲンランプ(20W×2 個)を使用している。 当該照明は、8,640mm(ノミナル値)下方の燃料集合体頂部の観察にも十分な光量を有し ているものの、耐放射線カメラ設置位置と同一位置より、照明を供給することから、燃料集 合体間のような形状が複雑な被写体の場合、光が乱反射して上方の耐放射線カメラまで光が 届かずに暗い画像となる部分が存在した。また、光量を大きくした場合には、一部にハレー ションが生じ、当該部が不明瞭となることが確認された。なお、これらの現象は、ビデオカ メラを回転プラグの貫通孔に設置して実施した燃料集合体頂部観察においても発生してい る。「常陽」では、二方向からの照明を確保し、その光量を調節することで、より明瞭な画 像を取得できることを確認 ⁵⁾しており、耐放射線カメラを使用する場合にあっても、同様 の手法を適用することで、さらなる改善が期待できる。ただし、SFR にあっては、カバー ガスバウンダリを形成した状態で観察を実施する必要があるため、原子炉容器内に照明装置 等を挿入するためのアクセスルートが制限される。本観察においても、回転プラグ上のアク セス孔が、その他の用途に使用されており、二方向からの照明を確保することができなかっ た。原子炉容器内への照明装置等の導入方法については、今後も課題となる。

6.2 放射線及び温度の影響について

本観察において、供用中 SFR の実機環境(高線量率・高温)下にあっても、耐放射線カ メラのチルト・パン機能及びズーム機能は問題なく動作しており、耐放射線カメラは、SFR における原子炉容器内補修作業における詳細観察にも、十分に適用できることが確認でき た。

なお、今回の観察では、結果的に、ガイド筒の内部温度を 40~60℃程度で保持できたた め、「4. 耐放射線カメラ使用にあたっての課題及び解決策」に示した耐放射線カメラの温度 上昇抑制方策を相まって、最大約 30 分間の観察において、耐放射線カメラの温度センサが 動作することによるアラームランプの点灯はなかった。駆動装置ケーシング内に収納した状 態にあっても、同様である。ただし、大きな熱源に近接する場合には、その輻射熱の影響も 十分に考慮することが肝要である。

旧炉心上部機構収納時、旧炉心上部機構がガイド筒内を通過中に、旧炉心上部機構が高温 (カバーガス温度と同程度(約150℃)の温度と推定)であることから、周囲の機材の温度 が上昇することが想定されており、実作業においても当該事象が確認された。一方、耐放射 線カメラは、駆動装置ケーシング内に収納し、さらに、その開口部(耐放射線カメラの前面) に熱遮へい板を設置したことから、輻射熱の影響を直接的に受けることなく、過度な温度上 昇を防止できた。

6.3 その他

「常陽」において、炉心上部機構を交換した実績はなく、供用後の案内スリーブの観察は、 初めての経験であった。案内スリーブの詳細観察画像を図 6.1 に示す。また、本観察で得ら れた知見を以下に示す。

- ・ 炉心上部機構据付面にナトリウムの堆積が確認された。ただし、当該ナトリウムは、原子炉運転中に据付面に堆積したものではなく、旧炉心上部機構収納作業時に旧炉心上部機構側面の堆積ナトリウムが落下したものと考えられる。
- ・ 案内スリーブ鉛直部の内面については、一部を除き、ナトリウムの堆積は確認されなかった。ただし、堆積ナトリウムは、旧炉心上部機構を引き抜いた際に、原子 炉容器内に落下した可能性もある(燃料集合体頂部にナトリウムの堆積は確認されていないが、原子炉容器内のナトリウムは約 200℃に保持されており、落下した堆積ナトリウムは、液体ナトリウムとなることが想定される)。
- ・ 案内スリーブ水平部には、ナトリウムの堆積が確認された。ただし、本観察では、
 奥行きを把握することが困難であり、その堆積量は不明である。また、案内スリーブ水平部近傍の鉛直部内面には、小さい粒状及び薄い膜状のナトリウムが確認された。
- ・ 案内スリーブに有意な変形等はなく、旧炉心上部機構を引き抜いたことで、その 健全性が阻害されるような事象が生じていないことを確認した。



図 6.1 案内スリーブ詳細観察画像

7. 結言

SFR における原子炉容器内観察用ツールとして、耐放射線カメラを「常陽」に適用し、以下の成果を得た。

- (1) 耐放射線カメラを用いて、旧炉心上部機構下面及び貫通孔(案内スリーブ)を観察し、 高い画質・鮮明度を有する画像を取得できることを確認した。
- (2) 耐熱性に劣る耐放射線カメラの温度上昇抑制対策を講じ、供用中 SFR の実機環境下に おいて、問題なく使用できることを確認した。
- (3) SFR における原子炉容器内観察に係る装置設計・作業手順策定等に係る経験を蓄積するとともに、当該観察に係る実機検証データを拡充することができた。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SFRの原子炉容器内観察技術の開発に資するものと期待される。

謝 辞

耐放射線カメラ及び駆動装置の設計・製作においては、富士電機株式会社に多大なるご助成 をいただいた。また、原子炉容器内観察作業においては、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

- 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).
- 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) 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, pp.113 - 125 (2010).
- 5) 今泉和幸 斉藤隆一他:"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-"、JAEA-Technology 2012-027 (2012),49p.
- 6) 内藤裕之 板垣 亘他: "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 - 高耐放射線ファイバスコープの開発- (共同研究)"、JAEA-Technology 2012-009 (2012),100p.
- 7) 伊藤秀明 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.

_

表 1. SI 基本 単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	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	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
物質量	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					
AI 立長 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 さ , 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 ⁸				
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

	SI祖立単位				
組立量	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	
立体鱼	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	Ν		m kg s ⁻²	
E 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	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$	
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	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	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	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	

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²	
表 面 張 九	リニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	$m m^{-1} s^{-1} = s^{-1}$	
角 加 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	
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A	
誘 電 卒	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ペンリー毎メートル	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	ダレイ毎秒	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}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v

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	۰	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, 1	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	ŀ	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J	
ダル	- F	\sim	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg	
統一原	子質量単	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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{ m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な間径は
ベル	В	対数量の定義に依存。
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	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx				
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²				
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	1 G =1Mx 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	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq	
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$	
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy	
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv	
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$	
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m	
メー	ートル	/系	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg	
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa	
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa	
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J	
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)	
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$	