高速実験炉「常陽」の原子炉容器内観察・補修技術開発 炉心上部機構の交換作業

高松 操^{1,*}, 川原 啓孝¹, 伊藤 裕道^{1,†1}, 宇敷 洋^{1,†2}, 鈴木 信弘^{1,†3},
佐々木 純^{1,†4}, 大田 克^{1,†4}, 奥田 英二¹, 小林 哲彦¹,
長井 秋則¹, 坂尾 龍太^{2,†5}, 村田 長太郎², 田中 淳也²,
松坂 康智², 立野 高寛², 原 正秀², 岡崎 弘祥²

Development of Inspection and Repair Techniques for
Reactor Vessel of Experimental Fast Reactor “Joyo”

Replacement of Upper Core Structure

Misao TAKAMATSU^{1,*}, Hirotaka KAWAHARA¹, Hiromichi ITO^{1,†1}, Hiroshi USHIKI^{1,†2}, Nobuhiro SUZUKI^{1,†3},
Jun SASAKI^{1,†4}, Katsu OHTA^{1,†4}, Eiji OKUDA¹, Tetsuhiko KOBAYASHI¹,
Akinori NAGAI¹, Ryuta SAKAO^{2,†5}, Chotaro MURATA², Jyunya TANAKA²,
Yasunori MATSUSAKA², Takahiro TATSUNO², Masahide HARA² and Hiroyoshi OKAZAKI²

¹Oarai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency,
4002 Narita, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki 310-1393, Japan

²Nuclear Energy Systems Division, Energy & Environment, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.,
1-1 Wadasaki-cho 1-chome, Hyogo-ku, Kobe 652-8585, Japan

(Received April 28, 2015; accepted in revised form September 17, 2015; published online January 26, 2016)

In the experimental fast reactor “Joyo”, it was confirmed that the top of the irradiation test subassembly of the material testing rig named “MARICO-2” was broken and bent onto the in-vessel storage rack as an obstacle, damaging the upper core structure (UCS). In this paper, we describe the in-vessel repair techniques for UCS replacement, which are developed in Joyo. The UCS replacement was conducted in the following four stages: (1) jack-up of the existing damaged UCS, (2) retrieval of the existing damaged UCS, (3) installation of the O-ring, and (4) insertion of the new UCS. Since the UCS replacement was not anticipated in the original design, the work conditions at Joyo were carefully investigated, and the obtained results were applied to the design of special handling equipment. The UCS replacement was successfully completed in 2014. In-vessel repair techniques for sodium-cooled fast reactors (SFRs) are important in confirming the safety and integrity of SFRs. However, the techniques demonstrated in the actual reactor environment with high temperature, high radiation dose, and remaining sodium are insufficient to secure the reliability of these techniques. The experience and knowledge accumulated in the UCS replacement provide valuable insights into further improvements of in-vessel repair techniques for SFRs.

KEYWORDS: FBR, sodium-cooled fast reactor, upper core structure, in-vessel inspection and repair, recovery, sodium, cover gas, MARICO-2, high temperature, high radiation dose

¹ (国研)日本原子力開発機構 大洗研究開発センター, ² 三菱重工業(株)エネルギー・環境ドメイン 原子力事業部

* Corresponding author, E-mail: takamatsu.misao@jaea.go.jp

^{†1} 三菱重工業(株)(Mitsubishi Heavy Industries, LTD.)より出向, ^{†2} 現在, 三菱 FBR システムズ(株)(Mitsubishi FBR Systems, INC.)

^{†3} 東興機械工業(株)(Tohkou Machine Industry, Co. LTD.)より出向, ^{†4} (株)アセンド(Ascend, Co. LTD.)より出向

^{†5} 現在, (国研)日本原子力開発機構(Japan Atomic Energy Agency)

I. 緒 言

高速実験炉「常陽」は、我が国で最初的高速増殖炉として、1977年に増殖炉心(MK-I炉心)で初臨界を達成し、その後、照射用炉心(MK-II炉心：1982年に初臨界達成)を経て、現在、高性能照射用炉心(MK-III炉心：2003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きた。しかしながら、2007年に「計測線付実験装置(以下、「MARICO-2」)との干渉による回転プラグ燃料交換機能の一部阻害」が発生し、現在、停止状態にある。当該トラブルに関わる原子炉容器内観察結果をFig. 1に示す。Fig. 1に示すように、このトラブルにより、MARICO-2の一部(以下、「試料部」)が原子炉容器内の燃料貯蔵ラック上で破損・変形し、また、MARICO-2試料部との接触により、炉心上部機構(以下、「UCS」)の下端が部分的に損傷したことが確認された¹⁾。「常陽」では、MARICO-2試料部の回収およびUCSの交換に必要な技術の開発およびその作業手順の整備を進め、2014年5月～12月にMARICO-2試料部回収作業およびUCS交換作業を完遂した。本報告は、このうち、UCSの交換に関わる技術開発・作業手順整備に関する成果を、作業実績等を踏まえて総括するものである。

II. プラントの概要

「常陽」は、熱出力140 MWtのナトリウム冷却型高速炉(以下、「SFR」)である。原子炉容器、回転プラグおよびUCSの概略構造をFig. 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、炉心燃料集合体等や炉内構造物を内包する。また、内包する炉心燃料集合体等を冷却するため、原子炉容器にはナトリウムが充填されており、原子炉停止中、その温度は約200℃に保たれる。原子炉容器内のナトリウムは自由液面を有し、当該液面上には、ナトリウムが化学的に活性であることを踏まえ、カバーガスとして不活性ガス(アルゴンガス：約140～160℃)が充填される。原子炉容器上部に設置された回転プラグ(UCSを含む)は、カバーガスバウンダリの役割を果たしており、原子炉容器内へのアクセスは、回転プラグにあらかじめ設けられた貫通孔を用いて行われる。なお、ナトリウム液位は、通常、原子炉容器出口配管の上方(GL-6100 mm)に保持されるが、メンテナンス時には、炉心崩壊熱が十分に小さいことを確認した上で、原子炉容器内のナトリウムをドレンし、ナトリウム液位を変更することができる。UCS交換作業に当たっては、同時期に実施するMARICO-2試料部回収作業において集合体頂部付近へのアクセスが必要となることを踏まえ、ナトリウム液位を集合体頂部より50 mm低い位置(GL-9540 mm：床下メンテナンスモード)としている。

回転プラグの一部であるUCSは、Fig. 2に示すように直径が最大約1,345 mm、高さが約6,330 mmの円筒構造

物であり、その下部には、整流板および集合体出口冷却材温度測定用熱電対を有する。Fig. 1に示すように、今回、炉心上部機構に設置されている集合体出口冷却材温度測定用熱電対が変形し、集合体の出口冷却材温度を正しく測定できないこと、また、整流板に変形が生じたことを踏まえ、炉心上部機構を交換することとした。

III. UCS交換作業の概略手順

UCS交換作業の概略手順をFig. 3に示す。UCS交換作業は、旧UCS引抜作業および新UCS装荷作業に大別される。各作業の概要を以下に示す。

1. 旧UCS引抜作業の概要

「常陽」の旧UCS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UCS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UCS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UCS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UCS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および損傷(以下、「変形等」)を生じさせる恐れがある。
- 旧UCS太径部の外径が $\phi 1,060$ mm(設計値)である一方で、案内スリーブ細径部の内径は $\phi 1,070$ mm(設計値)であり、旧UCS引抜時のギャップは片側5 mmとなる。旧UCS引抜時の水平度が十分でない場合、旧UCSと案内スリーブが干渉もしくは接触(以下、「干渉等」)による抵抗(以下、「干渉等抵抗」)が生じる。過大な干渉等抵抗は、旧UCSに変形等が生じさせる恐れがある。

上記事象の概念図をFig. 4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UCSの水平度や水平方向位置等を監視し、旧UCS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等抵抗が発生した場合にあつても、旧UCS等を変形させないような荷重監視が必要となる。そのため、旧UCS引抜作業においては、旧UCS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1,000 mm位置までの引抜作業と1,000 mm位置以降の引抜作業を区分し、前者を「旧UCSジャッキアップ試験」、後者を「旧UCS収納作業」とした。旧UCSジャッキアップ試験では、「IV. UCS交換作業に関わる技術開発および作業手順整備の概要」に示す検討結果等を踏まえた上で、旧UCSを1,000 mm位置まで引き抜くことで、以下のデータを取得し、これまでの検討の妥当性を検証することにより、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、ホールポイントとして旧 UCS 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関わるデータ取得(発生有無確認/挙動確認/旧 UCS 引抜作業への影響確認等)
- ・ 旧 UCS 引拔手順の妥当性を検証するためのデータ取得(干渉等抵抗発生有無確認/挙動確認/旧 UCS 引抜作業への影響確認/旧 UCS 引抜位置最適化データ取得等)

2. 新 UCS 装荷作業の概要

上述したように、UCS はカバーガスバウンダリの一部を構成する。UCS 据付面は、2 重 O リング構造を有しており、新 UCS 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。新 UCS 装荷作業においては、作業環境等に留意し、新 UCS 用 O リングの設置作業を 1 つのステップと位置付け、新 UCS を挿入する前に実施することとし、新 UCS 装荷作業を「新 UCS 用 O リング設置作業」と「新 UCS 挿入作業」に区分した。

IV. UCS 交換作業に関わる技術開発 および作業手順整備の概要

1. 揚重設備に関わる技術開発および作業手順整備

(1) 旧 UCS 引抜/新 UCS 挿入作業用揚重設備の概略構造

旧 UCS ジャッキアップ試験では、上述したように、揚重設備に高精度な水平度管理および荷重管理が要求される。一方、旧 UCS 収納作業では、旧 UCS をキャスク内に収納するため、旧 UCS を 11,426 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、旧 UCS ジャッキアップ試験(旧 UCS の 0 ~ 1,000 mm 位置引抜)用にジャッキアップ治具を、旧 UCS 収納作業(旧 UCS の 1,000 ~ 11,426 mm 位置引抜)用にワイヤジャッキ治具を開発し、実機に適用することとした^{2,3)}。ジャッキアップ治具とワイヤジャッキ治具を用いた旧 UCS 引抜イメージを Fig. 5 に示す。なお、新 UCS 挿入時にあっては、新 UCS 太径部の外径を $\phi 1,050$ mm に低減して製作する等の挿入性向上策を講じており、全ストロークについてワイヤジャッキ治具で対応することとした。

(a) ジャッキアップ治具の概略構造

ジャッキアップ治具の概略構造を Fig. 6 に示す。ジャッキアップ治具は、3 本のネジジャッキを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 UCS に接続される。旧 UCS のジャッキアップに当たっては、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、独立に単独動作させることも可能であり、必要に応じて水平度を

調整できるようにしている。また、より精密な水平度調整が求められる事象が発生した場合の対応として、ジャッキアップ治具には手動操作機構を設けた。ネジジャッキの 1 つを単独で手動操作した場合、旧 UCS の水平度は、 0.0024° /回転(0.041 mm/m/回転)で微調整される。なお、旧 UCS の水平度は、吊蓋上に設置された水準器により計測・監視される。各ネジジャッキはロードセルを有し、荷重の増減により干渉等を早期に検知し、旧 UCS や案内スリーブの変形等を防止することができる。

(b) ワイヤジャッキ治具の概略構造

ワイヤジャッキ治具の概略構造を Fig. 7 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周方向均等に配置した 3 点支持構造を有する。また、旧 UCS 引抜や新 UCS 挿入に当たっては、各ワイヤジャッキを同時に動作させることを基本とするが、独立して制御することも可能であり、必要に応じて水平度を調整できるようにしている。また、ワイヤジャッキは、油圧ジャッキに連結された 2 つのクランプを有し、1 動作当たりのストロークを最大 300 mm とし、Fig. 7 に示すように、順次これらのクランプを掴み替える(1 動作当たりの最大ストローク: 300 mm)ことで、11,426 mm 以上の引抜・挿入ストロークに対応できるものとしている。なお、旧 UCS もしくは新 UCS の水平度は、吊蓋上に設置された水準器により計測・監視される。各ワイヤジャッキはロードセルを有し、荷重の増減により干渉等を早期に検知し、旧 UCS もしくは新 UCS の変形等を防止することができる。

(2) UCS と案内スリーブに干渉等が発生した場合の 揚重設備の運用手順整備

旧 UCS ジャッキアップ試験時および新 UCS 挿入作業時には、UCS と案内スリーブが干渉もしくは接触し、作業継続が困難となるリスクが特に大きいため、当該リスクの低減を目的とし、①干渉等が発生した位置を同定し、②当該干渉等を回避する手順を整備するためのモックアップ体を用いた干渉等模擬試験を実施した⁴⁾。

モックアップ体を用いた干渉等模擬試験の結果を Fig. 8 に示す。ここでは、案内スリーブ模擬体に幅 50 mm の干渉板を設置し、UCS 模擬体と当該板が干渉した際の荷重挙動データを取得した。UCS が案内スリーブに干渉もしくは接触した場合には、その発生方向に重心が移動し、3 本のジャッキに負荷される荷重のバランスに偏りが生じる。この特性を利用し、旧 UCS ジャッキアップ試験等では、取得された偏荷重データに基づき重心の移動方向を逆算し、干渉等が発生した位置を同定することとした。Fig. 8 に示すように、偏荷重データに基づき算出した干渉位置は、干渉板を設置した位置とおおむね一致しており、本手順が有効であることを確認した。

また、干渉等を回避する手順については、使用する揚重設備が異なる(旧 UCS ジャッキアップ試験: ジャッキアッ

Fig. 7 Structure of wire jack-up equipment

Fig. 8 Results of interference simulation test

ブ治具/新 UCS 挿入作業：ワイヤジャッキ治具)ため、設備に応じて対応方法を整備した。ジャッキアップ治具およびワイヤジャッキ治具使用時の干渉等回避方策を Fig. 9 に示す。

ジャッキアップ治具については、精密な水平度管理を実現するため、高い剛性を確保し、旧 UCS と一体構造化している。そのため、Fig. 9 に示すように、ジャッキアップ治具はガイド筒上面に設置するものとし、ガイド筒に設けた水平方向位置調整用押しボルトにより、ガイド筒を水平 2 方向にスライドさせることで、旧 UCS の偏心を是正し、旧 UCS と案内スリーブの干渉等を回避できるようにした。この対応方法については、設計値で 5 mm である旧 UCS と案内スリーブのギャップを、製作公差等を考慮した上で保守的に最小 0.65 mm としたモックアップ体を用いた干渉等模擬試験により、干渉検知・回避作業を繰り返すことで、UCS 模擬体を 1,000 mm 位置までジャッキアップできることを確認した。

Fig. 9 Escape measure from interference between UCS and guide sleeve

Fig. 10 Structure of vinyl bag

一方、ワイヤジャッキ治具については、軟構造であること、また、重量物であるドアバルブおよびキャスク(合計約 130 t)の上部に設置される (Fig. 9 参照)ため、ガイド筒をスライドさせることによる偏心是正手順が適用できないことから、回転プラグ上面に設けたガイドローラーにより、新 UCS の偏心を是正し、新 UCS と案内スリーブの干渉等を回避できるようにした。

2. カバーガスバウンダリ設備に関わる技術開発および作業手順整備

(1) カバーガスバウンダリ設備の概略構造

UCS 交換作業時には、鋼製のガイド筒、ドアバルブおよびキャスク等を設置した (Fig. 3 参照) 上で、小回転プラグとガイド筒の間に、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。ビニルバッグの概略構造を Fig. 10 に示す。ビニルバッグは、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を有し、ビニルバッグを介した作業や物品の出し入れおよ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。また、ビニルバッグには、上述のアルゴンガスの給排気ラインと別に、UCS 交換作業中のビニルバッグ昇温を抑制するための冷却ラインが設置されている。ビニルバッグ内のアルゴンガスの流れを Fig. 11 に示す。ビニルバッグ冷却用のアルゴンガスは、ガイド筒とビニルバッグ上部の接続部に設けられた冷却ラインにより、ビニルバッグ内に供給される。なお、旧 UCS 収納作業時には、旧 UCS 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、治具類搬出入用ポートから出し入れし、ビニルバッグ使用中に設置もしくは撤去できる構造を有し、冷却用アルゴンガスの流路形成および輻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。

(2) カバーガスバウンダリの管理手順

UCS 交換作業では、原子炉容器内カバーガス圧力を別途開発した循環型カバーガス微正圧制御システムにより 110~140 Pa に制御する⁵⁾一方で、ビニルバッグ圧力を、原子炉容器内カバーガス圧力より若干高めめの 120~150 Pa で制御することを基本とした。「常陽」において、カバーガスバウンダリを開放する際には、空気等の不純物の混入を防止するとともに、万一仮設のバウンダリに破損が生じた場合のカバーガス放散を抑制するため、カバーガス圧力を微正圧で保持しており、UCS 交換作業におけるカバーガス圧力管理方法は、この方針を踏襲したものである。

原子炉容器内カバーガス圧力とビニルバッグ圧力は、独立に制御されるが、旧 UCS ジャッキアップ開始以降にあつては、原子炉容器とビニルバッグが導通するため、高温のカバーガスが上昇し、ビニルバッグの健全性が阻害されることがないように、ビニルバッグ上方から、アルゴンガスをブローダウンしている。Fig. 11 に示したように、アルゴンガスは、ビニルバッグから原子炉容器に流入するが、ビニルバッグ圧力は、原子炉容器内カバーガス圧力に追従して変動するため、原子炉容器とビニルバッグが導通

した状態での圧力制御は、主に原子炉容器内カバーガス圧力を制御する循環型カバーガス微正圧制御システムにより実施される。アルゴンガスブローダウンは、上述したように、高温のカバーガスの上昇抑制を目的としており、必要なアルゴンガスブローダウン流量は、案内スリーブ内に構造物(旧 UCS 等)が存在し、ブローダウン面積(ビニルバッグから原子炉容器に流入するアルゴンガスの流路面積)が小さい場合と案内スリーブ内に構造物がなく、ブローダウン面積が大きい場合とで異なることから、ここでは、アルゴンガスブローダウン流量を旧 UCS ジャッキアップ試験時には約 5 m³/h 以上(最大)、旧 UCS 収納作業時には約 20 m³/h(最大)にする等、ブローダウン面積に応じて調整した。なお、ここでは、約 20 m/s 以上の流速を確保した上で、作業員の近接の有無等の状況に応じた安全余裕も、必要に応じて見込んでいる。

V. フルモックアップ試験

UCS 交換作業では、作業手順や機材運用方法を確認するとともに、得られた知見等を作業要領書等に反映するため、事前に、実機に使用する機材と実機大のモックアップ体を用いたフルモックアップ試験を実施した。フルモックアップ試験では、約 13 m×13 m×10 m の試験架台に、実機大のモックアップ体として、小回転プラグ模擬体、案内スリーブ模擬体および UCS 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、実機の案内スリーブの下部は設計上、内径φ1,070 mm の円形状を有するが、案内スリーブ模擬体の下部については、その製作公差や据付時に歪み等が生じた可能性を考慮し、長径φ1,070 mm、短径φ1,065 mm の楕円形状として、UCS 試験体と案内スリーブ模擬体のギャップの一部が小さくなるようにした。また、UCS 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および重心を模擬するように調整した。フルモックアップ試験のうち、揚重設備に関連して実施した「ジャッキアップ機能確認試験」および「引抜/挿入性確認試験」等の概要および結果を以下に示す。

1. ジャッキアップ機能確認試験

ジャッキアップ治具について一連の操作を実施し、当該治具の運用に関わるパラメータ(ストロークおよび引抜速度他)の設定に関わるデータを取得するとともに、荷重および水平度を許容値内に制限しつつ、0~1,000 mm 位置までのジャッキアップ作業を確実に実施できる見通しを得た。また、旧 UCS ジャッキアップ試験後に実施する O リング回収作業に資するため、実機と同様に、ビニルバッグを介して O リングを回収するトレーニング等を実施した。

2. 引抜/挿入性確認試験

引抜/挿入性確認試験時における機器の挙動や配置等の

Fig. 11 Argon gas flow in vinyl bag

Fig. 12 Typical scene in full mock-up test

確認状況を Fig. 12 に示す。ここでは、UCS 試験体を上部から視認し、引抜および挿入時に生じる UCS 試験体の振れ等を確認しつつ、ワイヤジャッキ治具に関わ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、引抜速度および油圧)の設定に関わるデータを取得するとともに、荷重および水平度を許容値内に制限しつつ、収納作業(1,000～11,426 mm)および挿入作業(11,426～0 mm)を確実に実施できる見通しを得た。また、フルモックアップ試験の準備作業では、ドアバルブやキャスク等の大型重量物を UCS 直上の所定の位置に設置するための手順を検証するとともに、これらの設置に伴う仮設ピット蓋の撓み等の計測により、実機作業においてキャスク等の真直度を確保し、不要な偏心等を防止するために必要なデータを取得した。

3. 作業要領の策定に資するデータの取得等

フルモックアップ試験では、ボルトの取り外しや取り付けまでを網羅した一連の作業を実施することで、機材の設置位置取合い、設置手順、ハンドリング方法等を明確化し、作業要領の策定に資するデータを取得するとともに、作業員の習熟度向上を図った。

VI. UCS 交換作業

旧 UCS ジャッキアップ試験を 2014 年 5 月 7 日に実施し、5 月 22 日に旧 UCS を引抜・収納した。また、MARICO-2 試料部を回収した後、11 月 20～21 日に新 UCS を装荷し、12 月 17 日に後片付けを含めたすべての作業を完了した。主な作業条件および作業結果を以下に示す。

1. プラント状態

UCS 交換作業時のプラント状態を以下に示す。なお、旧 UCS を引き抜くことで、通常のカバーガスバウンダリが開放され、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を構成していることから、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-9540 mm

(2) カバーガス圧力 : 110～140 Pa^{*1}

^{*1}: 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(最終調整値))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

(6) 廃ガス処理系 : 運転

(7) 1 次補助冷却系 : 停止

2. 旧 UCS ジャッキアップ・収納／新 UCS 挿入作業

旧 UCS ジャッキアップ試験を 2014 年 5 月 7 日 10:30～16:20 に実施⁶⁾し、旧 UCS を 1,000 mm 位置とした後、5 月 22 日 11:00 より旧 UCS 収納作業を開始し、13:58 に 11,426 mm 位置(上限位置)として旧 UCS をキャスクに収納した。また、新 UCS 挿入作業を 11 月 20 日 10:35 より開始し、翌 21 日 2:15 に新 UCS の着座(0 mm 位置)を完了した。旧 UCS ジャッキアップ・収納／新 UCS 挿入作業に関わる主な結果を以下に示す。

(1) 旧 UCS ジャッキアップ試験

旧 UCS ジャッキアップ試験では、ナトリウムせん断抵抗の有無および挙動を確認するため、まずは、手動操作にて、旧 UCS を 0～2 mm 位置までジャッキアップした、その際の荷重測定結果を Fig. 13 に示す。旧 UCS は原子炉カバーガスのバウンダリを構成する機器であり、旧 UCS のジャッキアップは、計画外に旧 UCS が揚重され、当該バウンダリが開放されることがないように、旧 UCS 設計重量である 16.5 トンを下回る約 15 トンの引抜荷重を負荷した状態より開始した。なお、ジャッキアップ速度は約 2 mm/h とした。約 0.75 mm 位置までは引抜荷重が上昇したものの、当該位置以降は約 16.8 トンで推移しており、ナトリウムせん断抵抗の発生は確認されなかった。ただし、旧 UCS 側面にはナトリウムの付着が確認された。旧 UCS 側面のナトリウム付着状況を Fig. 14 に示す。当該ナトリウムを回収し分析した結果から、これらは約 97.4 wt% の金属ナトリウムで構成されること、また、目視および触感から、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)を有すると推定されることを確認した。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、また、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、案内スリーブとの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。なお、当該分析では、付着ナトリウムに含まれる Na-22 の濃度が 5.6 Bq/g であることを確認した。Na-22 は、安定同位体である Na-23 の (n, 2n) 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 次冷却材中の Na-22 濃度とおおむね一致する。この結果より、当該付着ナトリウムが、1986 年以前(約 28 年以上前)に堆積したものであること、また、これ以降においては、ナトリウムの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。

2~1,000 mm 位置ジャッキアップ時の荷重測定結果を Fig. 15 に示す。なお、これは、干渉等により発生した荷重を精度よく検知するため、荷重計をゼロリセット(旧 UCS 等の自重をキャンセルアウト)したデータとなっている。また、適宜、荷重均等化措置(ネジジャッキの単独動作による水平度調整)を実施し、ネジジャッキの同時動作のズレにより生じる偏荷重を是正した。Fig. 15 に示すように、約 750 mm 位置において、旧 UCS と案内スリーブに干渉等が生じたが、ジャッキアップ治具における高精度な水平度管理および荷重管理が有効に機能し、旧 UCS と案内スリーブの干渉等をこの 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、水平方向位置調整用押しボルトにより、引抜位置を干渉等を回避する方向に約 0.7 mm スライド(Fig. 9 参照)させることで干渉等を回避できており、当該手順が妥当であったことが確認できた。旧 UCS ジャッキアップ試験では、最終的に、旧 UCS を 1,000 mm 位置までジャッキアップし、次のステップである旧 UCS 収納作業を問題なく実施できる見通しを得た。なお、旧 UCS ジャッキアップ試験は、Fig. 15 に示したように、最終的に、旧 UCS と案内スリーブの接触に起因する抵抗(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 1 トン増加した状態で終了している。

(2) 旧 UCS 収納作業および新 UCS 挿入作業

旧 UCS 収納作業および新 UCS 挿入作業における荷重測定結果を Fig. 16 に示す。旧 UCS 収納作業における初期の総荷重は約 18.1 トンであったが、引抜作業継続中に、旧 UCS と案内スリーブの接触に起因する抵抗(もしくは、蒸着ナトリウムに起因する抵抗)が減少し、約 4,250 mm 位置から上限位置である 11,426 mm 位置まで、

総荷重は約 17.3 トンでおおむね安定して推移し、引抜操作を問題なく完了させることができた。なお、約 4,250 mm 位置以降の引抜操作において、総荷重に若干の変動が生じている。約 4,250 mm 位置以降の引抜操作において、引抜速度を変更したことに伴って、ワイヤを掴み替えた際に生じる荷重バランス(水平度)の変化が大きくなったことが、当該変動の原因と推定される。

一方、新 UCS 挿入作業にあつては、Fig. 16 に示すように、総荷重は約 16.6 トンでおおむね安定に推移した。約 4,472 mm 位置において、新 UCS 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および荷重管理が、ガイドローラーと相まって有効に機能し、新 UCS 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(Fig. 9 参照)させることで、干渉等を回避できており、当該手順が妥当であったことが確認できた。新 UCS の着座時に使用する拘束治具の概要を Fig. 17 に示す。新 UCS の着座・据付に当たっては、新 UCS を計画した位置に対して ± 1.02 mm の精度で据え付けることが要求されており、新 UCS の着座に当たっては、新 UCS フランジボルト孔にガイドボルトの先端が挿入されたことを確認した後、Fig. 17 に示すように、当該ボルト孔とガイドボルトとのギャップに拘束治具を設置することとした。当該拘束治具は、上述した要求精度を満足させるため、新 UCS の据付精度を $\pm$ 約 0.77 mm (実測値)に制限できるものとしている。新 UCS 着座・据付後、新 UCS 据付精度を確認した結果、新 UCS が、計画した位置に対して、最大 $0.35 \text{ mm} \pm 0.1 \text{ mm}$ の誤差で据え付けられたことを確認できた。

3. カバーガスバウンダリ管理

UCS 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 で制御した。また、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により、高温のカバーガスの上昇を抑制し、ビニルバッグ温度をおおむね 60℃ 以下で管理することで、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。なお、ビニルバッグ内側に設置した防護板については、特に、旧 UCS 収納作業時において、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、冷却用アルゴンガスの流路形成の観点では、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抑制することが旧 UCS 収納作業等において確認できたことから、輻射熱に関わる対応を必要としない新 UCS 挿入作業においては防護板を不要としている。

Fig. 13 Load behavior in existing damaged UCS jack-up from 0 mm to 2 mm

Fig. 14 Analysis result of sodium deposition on existing damaged UCS

Fig. 15 Load behavior in existing damaged UCS jack-up from 2 mm to 1,000 mm

4. 放射線管理

UCS 交換作業時の作業環境線量率測定結果の一例として、旧 UCS 収納作業時のエリアモニタ指示値を Fig. 18 に示す。旧 UCS は、長年に渡る使用により放射化し、高い表面線量率を有するため、仮設ピット蓋、ドアバルブや

Fig. 16 Load behaviour during existing damaged UCS retrieval and new UCS insertion

Fig. 17 Tools for UCS positioning

Fig. 18 Dose rate monitoring result during existing damaged UCS retrieval

キャスクに適切な遮蔽厚さを確保し、作業環境線量率を低減した。仮設ピット蓋は、鉄 100 mm + コンクリート 600 mm 相当の遮蔽機能を有している。また、キャスク (旧 UCS 用) およびドアバルブについては、原子炉容器内の線量率測定⁷⁾に基づき評価した旧 UCS の表面線量率を

Fig. 19 Observation of bottom face of existing damaged UCS/guide sleeve

用いて、キャスク表面線量率が1 mSv/hを十分に下回るよう遮蔽厚さ(最大: 270 mm 以上)を決定している。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を超過するケースが確認されたものの、作業エリアである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、最大約5 μ Sv/hであり、適切な遮蔽対策を講じることで被ばく低減を図ることができた。なお、UCS交換作業における個人最大被ばく線量は約0.13 mSv、総線量は約1.1人・mSvであった。

5. その他

(1) 原子炉容器内観察作業

旧 UCS 下面および案内スリーブの観察結果を Fig. 19 に示す⁸⁾。当該観察作業は、旧 UCS 引抜作業の最終段階において、耐放射線カメラを用いて実施されたものであり、ここでは、旧 UCS 下面の状況が、2008 年に観察した結果⁹⁾と一致し、旧 UCS 引抜作業において、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により、旧 UCS 引抜作業において、案内スリーブに有意な変形等はなく、新 UCS 装荷作業への移行に問題がないことを確認した。

(2) 旧 UCS 用 O リングの経年劣化調査

旧 UCS 用 O リング(材質: エチレンプロピレングム (EPDM)/ 貝数: 2 本(内側および外側))については、プラント状態等から、シール機能は問題ない状態であったことを確認しているものの、30 年以上の期間、カバーガスバウンダリとして使用した 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、断面観察および硬度測定による経年劣化調査を実施した。外観および断面を観察した結果を Fig. 20 に示す。Fig. 20 に示すように、O リ

Fig. 20 Visual inspection results of the O-ring surface and cross section

ング表面にシール機能を阻害する有害な摩耗痕や圧縮痕等がないこと、また、O リングには、O リング溝(幅 12 mm・深さ 8 mm)に模した形状に圧縮影響歪が生じている(圧縮永久歪は一般的なシール寿命である 80%を超過)ものの、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。さらに、硬度測定により、O リングの硬度は Hs 81~85 となり、使用初期(Hs 70 $\pm$ 5)と比較して大きくなっているものの、ゴム弾性を喪失していないことが確認されており、経年劣化調査においても、旧 UCS 用 O リングは必要なシール機能を有すると評価できた。

VII. 結 論

高放射線・高温環境の SFR における原子炉容器内補修(観察を含む)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 UCS の交換は、仏国ラプソティの運転初期に実施された例¹⁰⁾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・開発した機材や手順を、フルモックアップ試験を経て実機に適用し、UCS 交換作業を成功裏に終了させることができた。また、フルモックアップ試験を作業トレーニングの場として有効に活用することで、適切な遮蔽対策と相まって約 4,000 人・日以上作業員が従事した中で、作業員の被ばくを個人最大被ばく線量で約 0.13 mSv、総線量で約 1.1 人・mSv と極めて低く管理することができた。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の完遂により蓄積された経験および知見は、「常陽」のみならず SFR における原子炉容器内観察・補修技術開発に大きく資するものである。

— 参考文献 —

- 1) T. Kobayashi, "Development of inspection and repair techniques in reactor vessel of fast reactor — Endeavour to retrieve damaged components in the experimental fast reactor Joyo —," *Nihon-Genshiryoku-Gakkai Shi (J. At.*

- Energy Soc. Jpn.*), **54**, 664-666 (2012), [in Japanese].
- 2) M. Takamatsu, T. Ashida, T. Kobayashi *et al.*, "Restoration work for obstacle and upper core structure in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo (2)," *Proc. FR13*, Paris, France, Mar. 4-7, 2013 (2013).
 - 3) M. Takamatsu, T. Kobayashi, A. Nagai, *Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast Reactor Joyo —Development of Repair Techniques for UCS Replacement of Joyo—*, JAEA-Technology 2012-020, Japan Atomic Energy Agency (2012), [in Japanese].
 - 4) H. Ito, M. Takamatsu, H. Kawahara *et al.*, *Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast Reactor Joyo —Development of Repair Techniques for UCS Replacement of Joyo (II)—*, JAEA-Technology 2014-024, Japan Atomic Energy Agency (2014), [in Japanese].
 - 5) H. Ushiki, E. Okuda, N. Suzuki *et al.*, "Replacement of upper Core structure in experimental fast reactor Joyo —(2) Development of cover gas recycling system with precise pressure control—," *Proc. ICAPP 2015*, Nice, France, May 3-6, 2015 (2015).
 - 6) H. Ito, N. Suzuki, T. Kobayashi *et al.*, "Replacement of upper core structure in experimental fast reactor Joyo —(1) Existing damaged upper core structure jack-up test—," *Proc. ICAPP 2015*, Nice, France, May 3-6, 2015 (2015).
 - 7) H. Ito, S. Maeda, H. Naito *et al.*, *Measurement and Analysis of In-Vessel Component Activation and Gamma Dose Rate Distribution in Joyo*, JAEA-Technology 2010-049, Japan Atomic Energy Agency (2011), [in Japanese].
 - 8) E. Okuda, J. Sasaki, N. Suzuki *et al.*, "Replacement of upper core structure in experimental fast reactor Joyo —(3) Development of in-vessel observation techniques for UCS replacement—," *Proc. ICAPP 2015*, Nice, France, May 3-6, 2015 (2015).
 - 9) M. Takamatsu, K. Imaizumi, A. Nagai *et al.*, "Development of observation techniques in reactor vessel of experimental fast reactor Joyo," *J. Power Energy Syst*, **4**[1], 113-125 (2010).
 - 10) 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), pp413-422, [in French].
-