

高速実験炉“常陽”炉心上部機構交換工事の完遂 — 高速炉 炉内機器交換工法の開発 —

Completion of Experimental Fast Reactor "Joyo"
Upper Core Structure Exchange Construction

- Development of the Fast Reactor Core Internals Exchange Construction Method -



原 正秀*¹
Masahide Hara

田中 淳也*²
Junya Tanaka

岡崎 弘祥*³
Hiroyoshi Okazaki

小谷 健一郎*³
Kenichiro Odani

田村 和弥*³
Kazuya Tamura

寺前 卓真*⁴
Takuma Teramae

(国研)日本原子力研究開発機構 高速実験炉“常陽”において、原子炉容器内での実験装置のトラブルで炉心上部機構が損傷した。これを高放射線(燃料装荷状態)の下で、最大約 160°C の不活性ガスバウンダリを確保しつつ、数mm以下の隙間を通して遠隔で引抜き、新規品と交換するという世界にも前例のない難工事を、事前のリスク検討とフルモックアップによる設計検証及び作業トレーニングを経て無事完遂し、高速炉の炉内機器交換工法の開発に貢献した。

1. はじめに

(国研)日本原子力研究開発機構(以下、“原子力機構”)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、2007年5月に実施された計測線付実験装置(以下、“MARICO-2”)の取り出し作業時にトラブルがあり、装置の一部(以下、“試料部”)が原子炉容器内の燃料貯蔵ラック上で破損・変形したため、一部領域の炉心燃料にアクセス不能となった。また、MARICO-2 試料部との接触により、炉心上部機構⁽¹⁾(以下、“UCS”)の下端部が損傷したことが確認された(図1)⁽¹⁾。

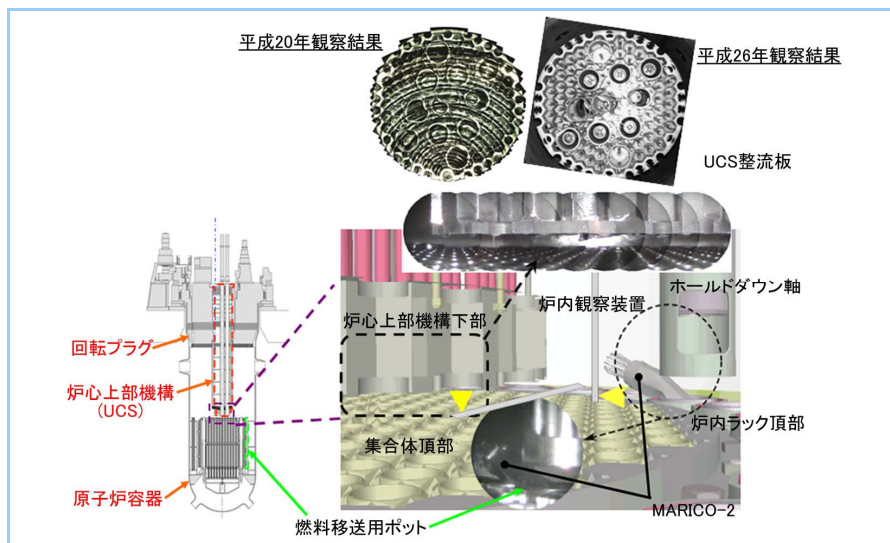


図1 炉内損傷時の状況

炉内観察により MARICO-2 の損傷を、また、UCS 下面観察により、UCS 損傷を確認した。

*1 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部新型炉・原燃サイクル技術部 主席技師

*2 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部建設・保全技術部

*3 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部機器設計部

*4 エネルギー・環境ドメイン原子力事業部原子力工作部

原子力機構では、本トラブルに係る復旧措置として、MARICO-2 試料部を回収し、UCS を新規品に交換することが決定された。三菱重工業(株)は、原子力機構の委託で UCS 交換作業に必要な技術の開発及びその工法の整備に協力し、交換用の UCS 並びに交換作業用機器類の設計・製作を行って、2014 年5月～12 月に UCS の交換作業を実施した。本報は、UCS の交換に係る技術開発及び工法整備の成果について報告するものである。

2. UCS 交換工事の概要

2.1 UCS の概要

“常陽”の原子炉容器、回転プラグ及び UCS の概略構造を図2に示す。原子炉容器は、内径約 3.6m・高さ約 10m の円筒容器構造で、内部に炉内構造物や炉心燃料集合体等が収納されている。また、内部の炉心燃料集合体を冷却するために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、液面上の空間には、カバーガスとして不活性ガス(アルゴンガス)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、このカバーガスのバウンダリとなっている。

回転プラグの一部を構成する UCS は、図2に示すように直径が最大約 1345mm、高さが約 6330mm の円筒形構造物であり、その下端部には、整流板及び炉心燃料集合体出口冷却材温度測定用熱電対を装備する。また、UCS は、胴の外径が上から $\phi 1130\text{mm}$ - $\phi 1010\text{mm}$ - $\phi 1060\text{mm}$ といったように、下部に太径部を持った構造となっている。

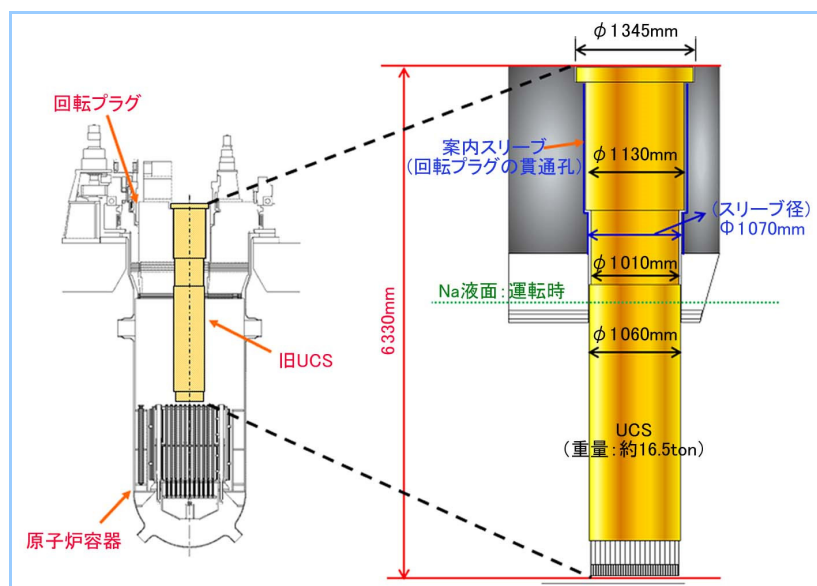


図2 “常陽”の原子炉容器、回転プラグ及び UCS の概略構造

2.2 UCS 交換工事の目的

UCS 交換工事は、燃料交換機能を回復させ、原子炉を正常な運転が可能な状態に復旧することを目的に①破損した旧 UCS を引抜き(旧 UCS 撤去作業)、②UCS と干渉する MARICO-2 試料部を回収し(MARICO-2 回収作業、原子力機構所掌)、③新規製作した UCS を装荷する(新 UCS 据付作業)という手順で実施することとなった。

2.3 UCS 交換工事の制約条件と特殊条件

UCS 交換工事の工法を検討するに当たっては、次に示す制約条件及び特殊条件を考慮し、作業におけるリスクを抽出して、リスクを回避するための作業手順及び作業用治具・装置類の仕様を検討した。

(1) 制約条件

- ①炉内の燃料:炉内に炉心燃料が装荷された状態であるため、放射線への配慮が必要である。

②炉内の液体ナトリウム:炉内に化学的に活性な液体ナトリウムがあるため、不活性ガス雰囲気
の維持、並びに高温対策が必要である。

(2) 特殊条件

①UCSの構造:UCSは交換を想定した構造とはなっておらず、建設から30年以上、一度も引き
抜いた経験がないことから、引抜き時の干渉回避と引抜き力の検討が必要である。

3. 工事完遂に向けた三菱重工の取組み

UCS の交換作業には、大きく分けて、破損した既設 UCS を引抜き、保管用キャスクに収納して
保管場所まで移送する“旧 UCS 撤去作業”と新規に製作した UCS を撤去孔(案内スリーブ)に装
荷する“新 UCS 据付作業”の2つの作業がある。三菱重工は、前述の制約条件と特殊条件を考慮
して、作業手順及び作業用治具・装置類の仕様を検討し、製作した。そして、それらを用いてフル
モックアップ試験にて工法の検証と工事のトレーニングを行い、現地作業に臨んだ。

3.1 工事手順と課題及び対策

UCS 交換工事手順の概略を図3に示す。また、交換工事における主な課題と対策について以
下に示す。

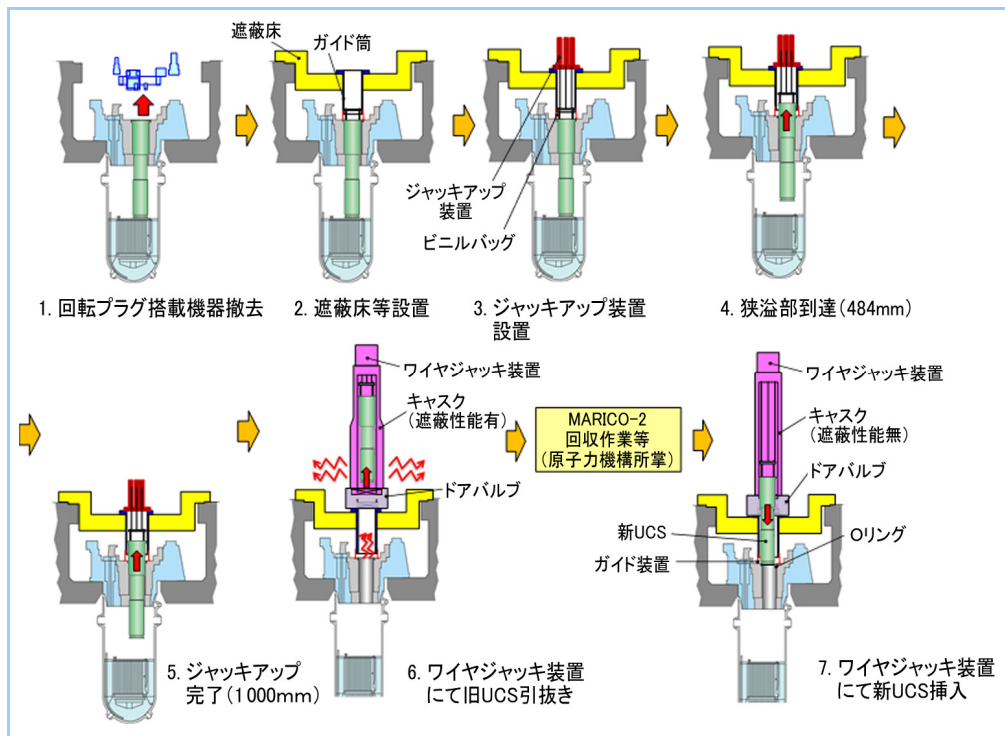


図3 UCS 交換手順の概略

破損した旧UCSをジャッキアップ装置及びワイヤジャッキ装置を用いて引抜き、ワイヤジャッキ装置
を用いて新 UCS を挿入した。

(1) 旧 UCS 撤去作業時の干渉等

“常陽”の UCS は、原子炉容器や回転プラグ等と同様に永久構造物として設計されており、
プラント寿命中の交換を想定した構造とはなっていない。また、これまでに交換した実績もな
い。そのため、旧 UCS 撤去作業を実施するに当たっては、以下のリスクを考慮した。リスクの概
念図を図4に示す。

①旧 UCS と案内スリーブの隙間が、30年以上の使用により、蒸着ナトリウムによって閉塞してい
る場合には、旧 UCS 引抜き時に当該ナトリウムをせん断することによる抵抗が生じる。旧 UCS
が挿入されている案内スリーブは、肉厚 5mm の薄肉構造物であるので、ナトリウムせん断抵
抗が過大となった場合、案内スリーブが変形及び損傷する恐れがある。

②旧 UCS 太径部外径の設計値は $\phi 1060\text{mm}$ であるが、案内スリーブ細径部内径の設計値は $\phi 1070\text{mm}$ であるため、旧 UCS 引抜時の隙間は片側 5mm となる。UCS は、炉内構造物（炉心支持板）の中心軸に合わせて据付け位置を調整されているため、案内スリーブの中心軸からずれて設置されており、隙間に偏りが生じていると考えられる。従って、旧 UCS 引抜時に太径部の傾きが大きい場合、旧 UCS と案内スリーブが干渉もしくは接触することによる抵抗（以下、“干渉抵抗”）が生じる。干渉抵抗が過大になると、旧 UCS に変形や損傷を生じさせる恐れがある。

上の①、②を防止するためには、撤去作業中の旧 UCS の傾き（上面の水平度）及び荷重を監視し、傾き又は荷重が大きくなった際には、インタロックにて停止させる手法が有効である。

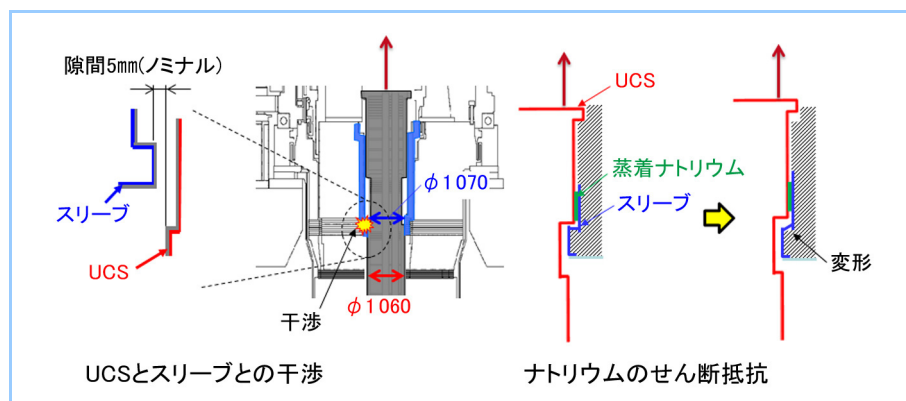


図4 UCS 引抜時のリスクの概念

UCS 引抜時には、ナトリウムのせん断抵抗や干渉による破損のリスクがある。

(2) ビニルバッグ作業方法の確立

新 UCS 据付のためのOリング交換及びそれに付随するOリング溝の清掃作業は、カバーガスバウンダリを確保した状態で目視しながら手作業で行うため、透明なビニルバッグに作業用グローブを取付けたガスバウンダリを採用した。当該作業は、回転プラグ上の非常に狭い場所でビニルバッグ越しに実施する必要がある（図5）。Oリング交換及びOリング溝清掃作業は、フルモックアップ試験での作業検証及びその結果を反映したグローブの配置等の設計変更を経て確立した。

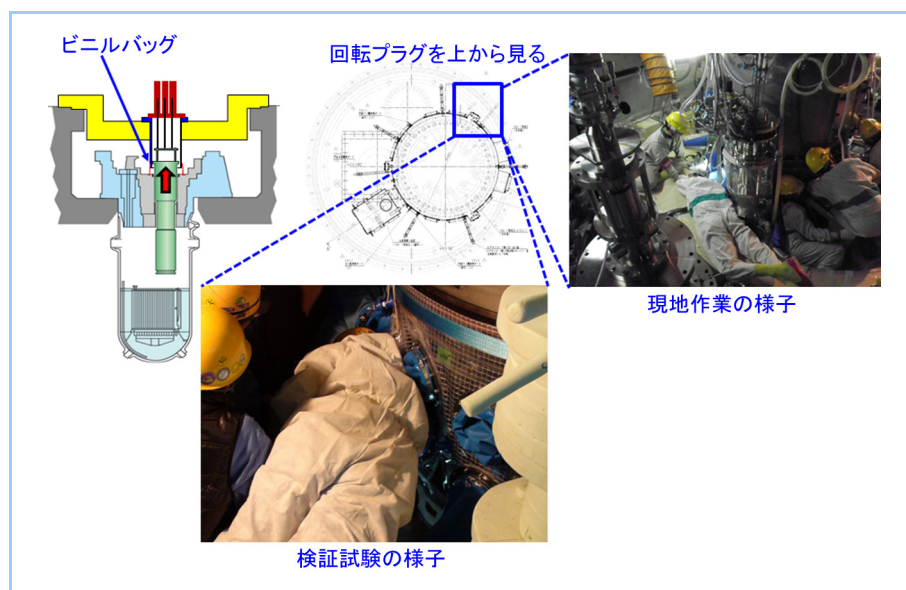


図5 ビニルバッグ越し作業の様子

現地作業環境を忠実に模擬したフルモックアップ試験で作業の課題を洗い出し、改善した結果、無事工事を行うことができた。

(3) 高温カバーガスの上昇

旧 UCS の引抜き作業中から新 UCS 据付完了までの期間中、UCS 案内スリーブが解放されている状態においては、原子炉容器内の高温カバーガスが上昇することになり、回転プラグ上に設定するビニルバッグによるバウンダリの健全性が確保できなくなる。これを防止するため、原子炉を含めたカバーガス循環システムを構築し、アルゴンガスバウンダリの上方から低温のアルゴンガスをダウンブローして、原子炉容器から高温のカバーガスが上昇することを防止することとした。なお、本システムは、原子力機構により計画・準備された(図6)⁽³⁾。

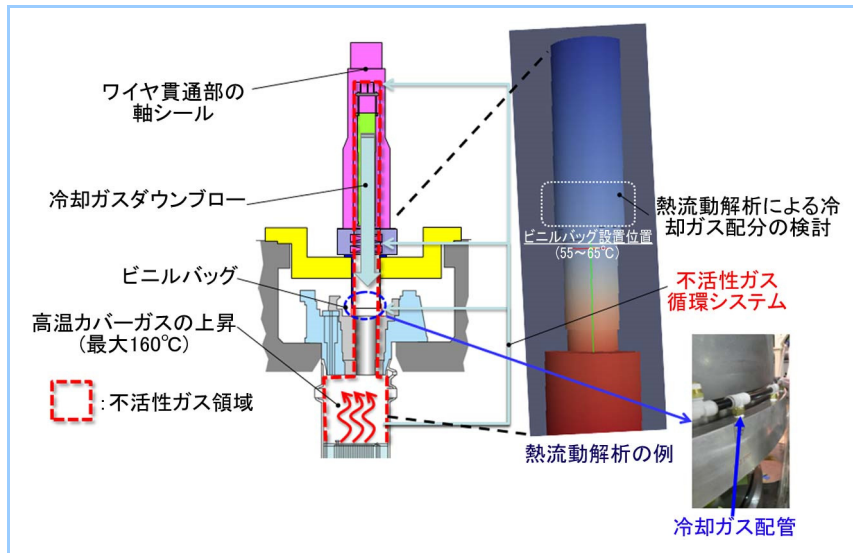


図6 高温カバーガス対策の概念

不活性ガス循環システムを構築し、冷却ガスダウンブローにて高温カバーガスの上昇を抑制した。(原子力機構による)

3.2 フルモックアップ試験

UCS 交換作業では、事前に実機工事に使用する機材と実機大の模擬体を用いたフルモックアップ試験を実施し、作業手順や機器・装置類の運用方法を確認するとともに、得られた結果を作業要領に反映した。フルモックアップ試験では、小回転プラグ、案内スリーブ及び UCS 等の実機寸法の模擬体を約 12m×12m×8m の試験架台に設置して、実機工事の作業状況を模擬した。なお、案内スリーブの模擬体の下部胴については、実機における製作公差や据付時に歪み等が生じている場合を考慮して、UCS 模擬体との隙間の一部が設計値より小さくなるように工夫し、また、UCS 模擬体は、実機の重量及び重心位置を模擬した。

フルモックアップ試験のうち、UCSの撤去・挿入作業のデータ取得のために実施した“ジャッキアップ機能確認試験”及び“引抜・挿入性確認試験”の概要及び結果を以下に示す。

(1) ジャッキアップ機能確認試験

ジャッキアップ装置について設置から撤去までの操作を全て模擬し、ジャッキアップ装置による引抜きに必要なパラメータ(引抜高さ、引抜速度及びそれに対する許容荷重他)の設定データを取得した。これにより、荷重及び水平度を許容値内に保持しながら、着底状態から 1000mm 位置までのジャッキアップ作業を問題なく実施できる見通しを得た。また、実機で行う旧 UCS ジャッキアップ作業後に実施する Oリング回収作業の手順確認と治具類の取り扱い性確認のため、実工事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。

旧 UCS ジャッキアップ試験時及び新 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。このリスクを低減するため、干渉が発生した位置を推測し、それを回避する手順を確立することを目的として模擬体を用いた干渉模擬試験を実施した。干渉模擬試験の結果を図7に示す。ここでは、案内スリーブ模擬体に幅

50mmの干渉板を設置し、0度方位から360度にわたって、UCS模擬体と干渉した時の荷重挙動データを取得した。UCS引抜時に案内スリーブに干渉もしくは接触すると、その位置での抵抗力のために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。旧UCSジャッキアップ試験等では、取得した偏荷重データに基づいて干渉等が発生した位置を算出・推測することとした。図7に示すように、模擬体を直接干渉させた時の偏荷重データは、干渉板を設置した荷重値と概ね一致しており、本手順が有効であることを確認した⁽²⁾。

次に干渉を回避する手順についてであるが、ジャッキアップ装置については、精密な水平度管理を実現するために高い剛性を確保し、旧UCSと一体構造化している。そのため、図8に示すように、ジャッキアップ装置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、ガイド筒を水平直角な2方向にスライドさせることで、旧UCSの偏心を矯正し、旧UCSと案内スリーブの干渉を回避できるようにして、UCS模擬体を1000mm位置まで引抜操作を行い、実機においても同様にして引抜きできることを確認した⁽²⁾。

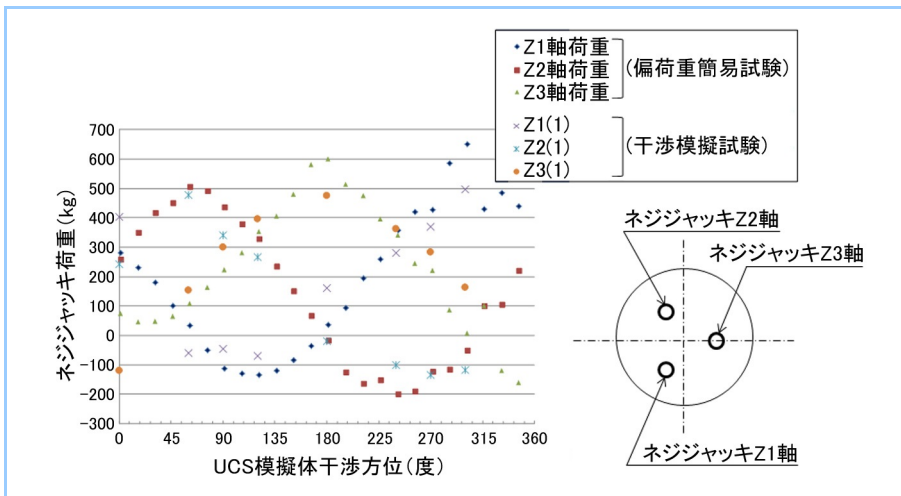


図7 USC 模擬体を用いた干渉模擬試験の結果
モックアップ試験で故意に干渉させ、干渉方位を同定する方法を確立した。

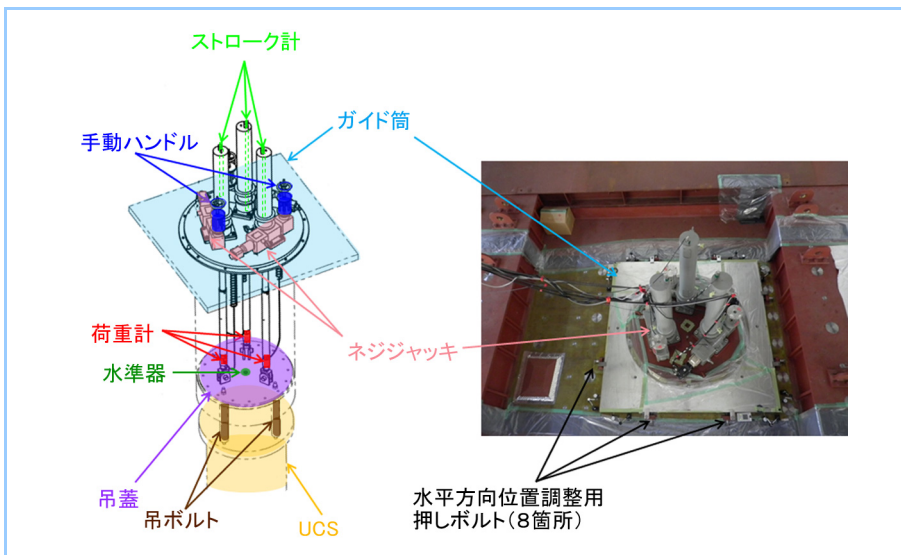


図8 ジャッキアップ装置
ネジジャッキを3台円周上に配置し、各々に荷重計とストローク計を備える。これをガイド筒上に設置して水平方向の調整を可能としている。

(2) 引抜・挿入性確認試験

引抜・挿入性確認試験では、UCS 試験体を上方及び側方から目視し、引抜及び挿入時に生じる UCS 試験体の振れの状況を確認しながら、ワイヤジャッキ装置による旧UCS引抜収納及び新 UCS 挿入作業の操作を全て模擬し、必要なパラメータ(引抜・挿入高さ、引抜・挿入速度及びそれに対する許容荷重他)の設定データを取得した。これにより、荷重及び水平度を許容値内に保持しながら、収納作業(1000mm～約 11400mm)及び挿入作業(約 11400mm～0mm)を問題なく実施できる見通しを得た⁽²⁾。

次に干渉を回避する手段についてであるが、ワイヤジャッキ装置については、柔構造であることから、回転プラグ上面周方向3箇所にて設けたガイド装置により、新 UCS の偏心を矯正し、新 UCS と案内スリーブの干渉を回避できるようにした。

また、引抜・挿入性確認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 と中心軸を合わせた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遮蔽床の撓み(たわみ)等の計測により、実工事におけるキャスク等設置時の鉛直度を確保し、ワイヤジャッキ装置で吊られる UCS と案内スリーブの偏心等を防止するために必要なデータの取得も行った。

上記以外にも、フルモックアップ試験では、ボルトの取外しや取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り、現地作業に臨むことができた。

4. UCS 交換現地作業

前述のフルモックアップ試験結果を踏まえて実施した UCS 交換現地作業の状況を以下に述べる。

4.1 旧 UCS 撤去作業

旧 UCS 撤去作業は、ジャッキアップ装置及びワイヤジャッキ装置における高精度な水平度監視及び荷重管理が有効に機能し、所期の計画どおり作業を完了することができた。

(1) 旧 UCS ジャッキアップ作業

0～2mm 位置では、ナトリウムせん断抵抗の有無とその挙動を確認するため、手動ハンドル操作(ジャッキアップ速度は約 2mm/h)にて旧 UCS をジャッキアップした。その時の荷重測定結果を図9(a)に示す。ジャッキの動作に従って引抜荷重は上昇したが、約 16.8 トンでほぼ一定になっており、ナトリウムせん断に伴う抵抗力は確認されなかった。ただし、1000 mm ジャッキアップ後の観察にて、旧 UCS 上部胴側面には、微粒子が凝集・堆積した多孔質様なナトリウムの付着が確認された⁽²⁾。

2～1000mm 位置では、水平度と荷重制限のインタロックによる自動運転でジャッキアップを行った。この時の荷重測定結果を図9(b)に示す。ここでは、干渉により発生した荷重を判別し易くするため、荷重値は旧 UCS 等の自重をキャンセルして設定したものとなっている。また、ジャッキアップ中は適宜、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、旧 UCS の重心位置と吊中心のズレ等により生じる偏荷重を矯正した。図9(b)に示したように、約 750mm 位置において、旧 UCS と案内スリーブに干渉が発生したことを検知したが、事前に検討した回避手順に従って、ガイド筒水平方向位置調整用押しボルトにより、引抜位置を約 0.7mm 移動することで干渉を回避でき、回避手順が適切であったことを確認した⁽²⁾。旧 UCS ジャッキアップ作業は、当初の計画どおり旧 UCS を 1000mm 位置までジャッキアップし、次の旧 UCS 引抜収納作業を問題なく実施できる見通しを得た。

(2) 旧 UCS 引抜収納作業

ワイヤジャッキ装置による旧 UCS の引抜収納作業は、**図 10**に示すように初期の総荷重は約 18 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と考えられる抵抗が漸減し、約 4000mm 位置から上限位置までは、約 17.3 トンではほぼ安定した状態で引抜収納作業を完了させることができた。旧 UCS を収納した保管用キャスクは、原子炉格納容器から旧廃棄物処理建家まで移送し、保管用追加遮へい体を取り付け、保管状態とした。

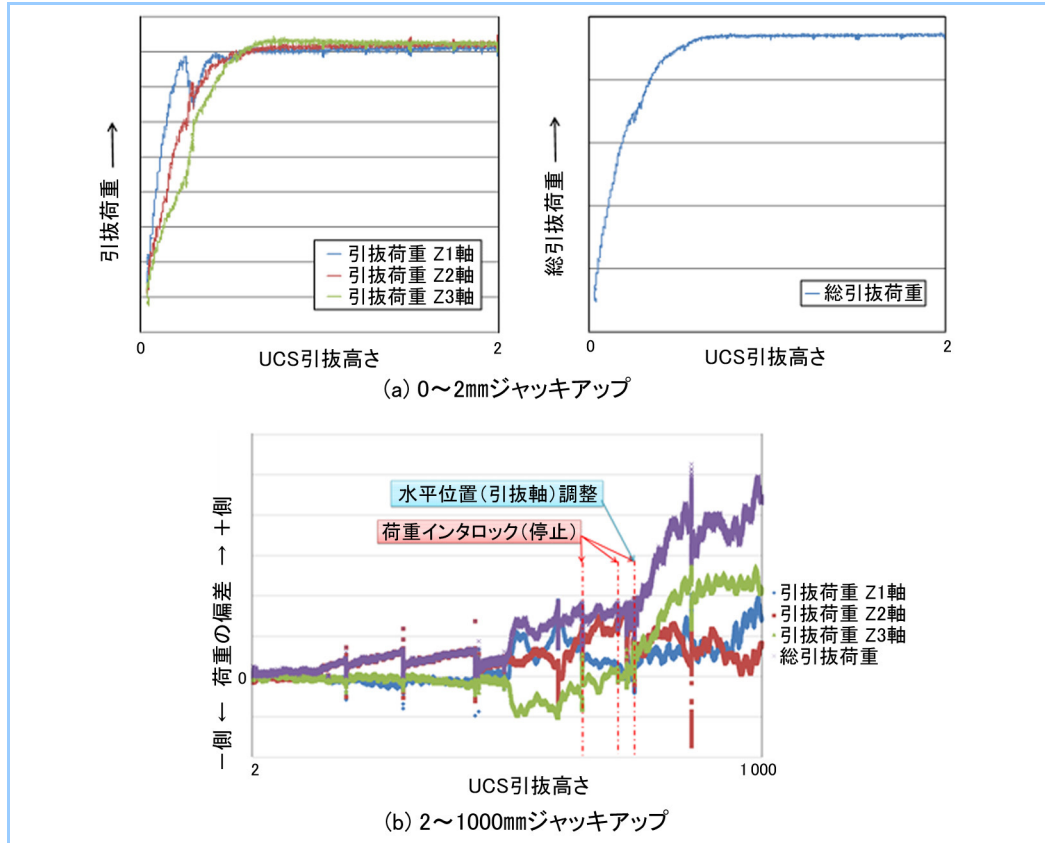


図9 UCS ジャッキアップ時の荷重変動

UCS 引抜時にナトリウムのせん断抵抗は観測されなかった。引抜中の干渉は水平移動によって回避した。

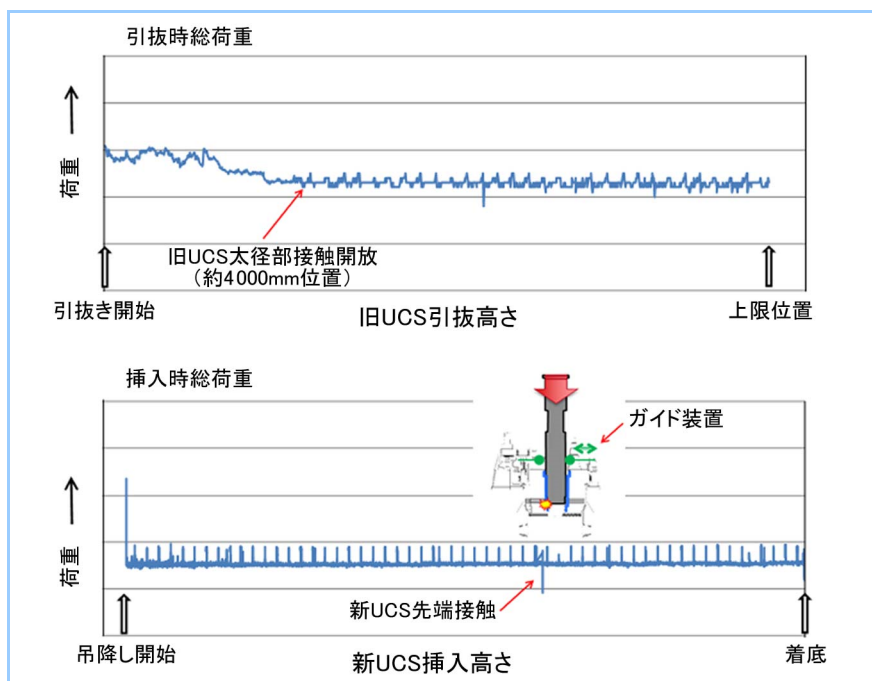


図 10 UCS 引抜時及び挿入時の荷重変動

UCS 引抜時は、案内スリーブ細径部を抜け切るまでは荷重の変動があった。新 UCS 挿入時は先端部の接触時以外は安定した荷重となっていた。

4.2 新 UCS 据付作業

新 UCS 据付作業についても、事前の綿密な作業計画とトレーニングによる手順の習熟により、所期の計画どおり作業を完了することができた。

(1) 新 UCS 用 Oリング設置作業

新 UCS 用 Oリング設置作業は、作業員による手作業で行う必要があったため、案内スリーブ内に仮設遮蔽プラグを挿入した状態で実施した。Oリング溝の清掃及び Oリングの装着は、狭隘な場所でビニルバッグ越しにグローブを使用する作業であったが、フルモックアップ試験における作業トレーニングの結果を反映して確立した治具や手順等により、新 UCS 用 Oリングを Oリング溝へ確実に装着することができた。新 UCS 用 Oリングの装着作業状況を図 5 に示す

(2) 新 UCS 挿入作業

ワイヤジャッキ装置による新 UCS の挿入作業は、図 10 に示すように総荷重は約 16.6 トンではほぼ安定していた。約 4500mm 位置において、新 UCS と案内スリーブに干渉が発生したことを検知したが、フルモックアップ試験で確立した干渉回避手順に基づき、ガイド装置によって挿入位置を約 5mm 水平方向に移動させることで回避することができ、回避手順が適切であったことを確認した。挿入作業中の水平度管理及び荷重管理とガイド装置の機能により、新 UCS の挿入が不能となるような干渉の発生はこの 1 回のみとすることができた⁽²⁾。

また、新 UCS の据付位置は、旧 UCS の据付け位置と新 UCS の製作寸法から計画した位置に対して $\pm 1.02\text{mm}$ の精度であることが要求されていた。新 UCS の着底・据付時には、図 11 に示すように新 UCS フランジボルト穴からガイドボルトの先端が突き出たことを確認した後、そのボルト穴とガイドボルトとの隙間へ所定の寸法に調整した拘束治具を挿入する手順とした。新 UCS の着底・据付後、据付精度を計測した結果、計画した位置に対して最大 $0.35\text{mm} \pm 0.1\text{mm}$ 以内の誤差であることが確認できた⁽²⁾。

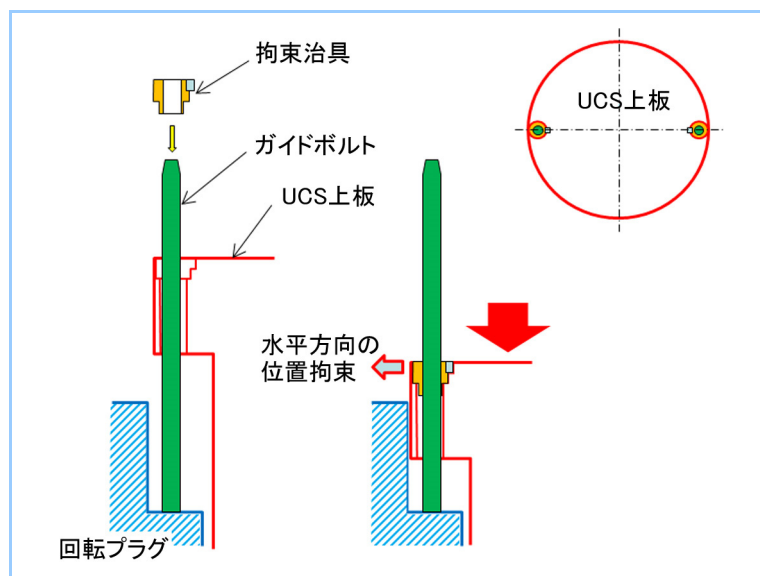


図 11 新 UCS 据付時の位置決め方法

ガイドボルト及び拘束治具を用いて新 UCS を所定の位置に据え付けた。

5. まとめ

Na 冷却型高速炉における原子炉容器内機器保守・補修作業は、高放射線、高温環境かつ不活性ガス密封環境で行う必要があり、軽水炉発電プラントの保守・補修作業とは異なる技術開発が必要となる。今回、「常陽」の炉心上部機構交換では、新しいコンセプトの特殊機材や工法を開発し、実機フルモックアップ装置を製作して技術検証、成立性確認、作業員訓練を慎重に繰り返して交換作業に臨み、初期計画どおり交換を完遂した。この交換で得られた技術、経験、知見は

今後の高速炉における保守・補修技術の進展に大きく資するものとなった。

最後に、炉心上部機構交換作業における、工法検討、機器製作から現地工事における原子力機構、並びに、関係各位のご指導・ご協力に感謝するとともに、今後とも高速炉開発への一層のご理解とご支援をお願いします。

【用語の説明】

炉心上部機構：高速炉の原子炉内構造物の一つであり、制御棒駆動機構を案内・保持する機能及び炉心燃料集合体出口冷却材温度を計測する機能を有する

ガスバウンダリ：目的とするガスを封じ込めるための空間、又はその空間を構成する材料

フルモックアップ：目的とする行為の対象物を全て実寸大の模擬体にて構成した設備

参考文献

- (1) (国研)日本原子力研究開発機構, 高速実験炉「常陽」計測線付実験装置との干渉による回転プラグ燃料交換機能の一部阻害に関する報告書(最終報)について, (2009)
<https://www.jaea.go.jp/02/press2009/p09072201/index.html>
- (2) 伊藤裕道ほか, 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 —, JAEA-Technology, 2016-008
- (3) 宇敷洋ほか, 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 —, JAEA-Technology, 2015-042