

(参考資料)

1. 件名

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ついて(最終報)

2. 発生日

平成19年11月2日(金)(機能の一部阻害が確認された日)

3. 発生場所

独立行政法人日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター(南地区)
高速実験炉「常陽」 原子炉建家内 (図-1の配置図参照)

4. 原子力施設の名称

高速実験炉「常陽」

5. 発生の状況

5.1 経緯(平成19年11月9日付け19原機(大速)035をもって報告)

高速実験炉「常陽」は、平成19年5月14日にMK-炉心第6'サイクル運転の終了に伴い原子炉を停止し、5月15日から第15回施設定期検査を開始した。

5月28日に回転プラグを操作し、照射試験が終了した計測線付実験装置(以下「MARICO-2」という。図-2参照)を炉心第3列の照射位置(炉心アドレス:3E3)から炉内燃料貯蔵ラック(以下「炉内ラック」という。)R16に移動した後、5月30日にMARICO-2の保持部と試料部の切離作業を行い、6月1日に回転プラグを操作してMARICO-2保持部を照射位置である3E3まで戻した。

その後、6月11日に回転プラグに燃料交換機を取り付け、回転プラグを基準位置で下降させた際に、炉内ラックR16上部に位置している燃料交換機の新ホールドダウン軸に荷重異常が発生した。6月19日に新ホールドダウン軸を点検した結果、新ホールドダウン軸先端部に2箇所の圧痕があることを確認した。

さらに調査を進めるため、炉心の崩壊熱が低下した8月下旬から、ナトリウム液位を集合体頂部以下まで下げ、旧ホールドダウン軸下端、集合体頂部及び炉心上部機構下端周辺を観察した。本観察では、昭和62、63年の炉内観察に使用して放射

線の影響を受けたファイバースコープを使用したため画像が不明瞭であったが、炉内ラック R16 上部に干渉物があることが確認できた。

5.2 炉内観察状況（平成 19 年 11 月 9 日付け 19 原機（大速）035 及び平成 20 年 9 月 1 日付け 20 原機（大速）011 をもって報告）

炉内ラック R16 上部の干渉物に係る状況把握、原因究明等を目的として、以下の炉内観察を実施した。

炉内ラック R16 上部及び炉心上部機構下端周辺等の観察

平成 19 年 10 月 10 日～10 月 31 日

集合体頂部等の観察

平成 19 年 11 月 2 日～11 月 16 日

平成 20 年 2 月 20 日～ 3 月 14 日

炉心上部機構下面の観察

平成 20 年 7 月 8 日～ 7 月 29 日

(1) 観察方法

炉内ラック R16 上部及び炉心上部機構下端周辺等の観察

干渉物の観察及び原子炉容器内の状況把握を目的として、回転プラグに設けられた炉内検査孔(A)、(B)よりファイバースコープを原子炉容器内に挿入し、炉内ラック R16 上部及び炉心上部機構下端周辺等を観察するとともに、炉内検査孔(A)にカメラを据え付け、上方より炉内ラック R16 上の干渉物を観察した（図-3 参照）。

集合体頂部等の観察

集合体頂部及び炉内ラック頂部におけるルースパーツ（脱落部品）損傷等の有無を確認するため、回転プラグの燃料交換機孔、炉内検査孔(A)等にカメラを据え付け、上方より集合体頂部等を観察した（図-4 参照）。

炉心上部機構下面の観察

炉心上部機構下面の状態を詳細に確認することを目的として、炉心上部機構を下面から上方に観察する装置を新規に製作した（図-5 参照）。炉心上部機構下面観察装置は、観察用ファイバースコープを装填した先端屈折部を有し、直径約 110mm の炉内検査孔（B）から原子炉容器内に挿入し、先端屈折部を原子炉

容器内でL字型に折り曲げ、炉心上部機構下面と集合体頂部の間隙（約70mm）に挿入する構造となっている（図-6参照）。

(2) 観察結果

炉内ラック R16 上部及び炉心上部機構下端周辺等の観察

炉内検査孔(A)、(B)からファイバースコープを挿入し、水平方向から炉内ラック R16 上の干渉物を観察した結果を以下に示す。

- ・ 干渉物が六角形状のラッパ管を有し、その先端からケーブル及び配管が出ていることを確認した（図-7の(a)参照）。これより、干渉物は炉内ラック R16 内で切離作業を実施した MARICO-2 の試料部であることが確認できた。
- ・ MARICO-2 試料部の円環状のハンドリングヘッドがラッパ管の継ぎ手部分から外れていること（図-7の(b)参照）。炉内ラック上に突き出ている MARICO-2 試料部の高さが約 90mm であることを確認した（図-7の(c)参照）。

また、炉内検査孔(A)にカメラを据え付け、上方より炉内ラック R16 上の干渉物を観察した結果、炉内ラック R16 から R15 の方向に突き出ているラッパ管部分の長さは約 200mm であることを確認した（図-7の(d)参照）。

集合体頂部等の観察

集合体頂部等の撮影は、回転プラグを操作することで、カメラの位置を各集合体等の直上に調整して行ったが、1回の観察で撮影できる範囲は集合体約1体分に限られることから、集合体頂部等の全体を観察するため、約650回の撮影を実施した。これらの撮影写真を貼り合わせ1枚の画像としたものを図-8に示す。この観察から、集合体頂部等にルースパーツがないこと及び有意な傷等の異常がないことを確認した。

なお、炉心第2列に装荷された集合体1体（図-8の集合体頂部等の観察画像の白抜き部分）については、回転プラグの操作範囲が限定されるため、直上からのカメラによる撮影はできなかったが、ファイバースコープによる水平方向からの観察より、当該位置についてもルースパーツがないことを確認した。

炉心上部機構下面の観察

炉内検査孔(B)から炉心上部機構下面観察装置を原子炉容器内に挿入し、炉

心上部機構下面を観察した結果を以下に示す。

- MARICO-2 試料部のハンドリングヘッドが保持部と接続された状態で、炉心上部機構内の MARICO-2 上部案内管内部に存在し、炉心上部機構が移動した方向（平成 19 年 6 月 1 日に、炉内ラック R16 上での MARICO-2 試料部切離作業終了後、回転プラグを基準位置に戻した際の炉心上部機構の移動方向）の反対側の方向に傾いていることを確認した（図-9 参照）。また、MARICO-2 のハンドリングヘッドと試料部を接続していた固定ピン 6 本は、ハンドリングヘッド部分では確認できなかった。
- 炉心上部機構下面において、整流板及び案内スリーブの変形が概ね炉心上部機構下面と MARICO-2 試料部が接触した領域に沿って生じていることを確認した（図-10 参照）。なお、回転プラグを基準位置に戻した時の移動軌跡から評価した炉心上部機構下面における MARICO-2 試料部と整流板が接触した長さは約 80cm である。
- 集合体出口温度測定用熱電対 115 本のうち、センター孔案内スリーブに隣接した少なくとも 2 本について、相対位置の変位があることを確認した（一例：図-11 参照）。
- 制御棒 No.2 の上部案内管の一部に変形があり、当該制御棒上部案内管に近接した炉心上部機構フランジ下面に擦り跡があることを確認した（図-12 参照）。これらの変形等は、炉心上部機構を移動した際に、MARICO-2 試料部との接触により生じたものである。

5.3 回転プラグの操作不可能範囲（平成 19 年 11 月 9 日付け 19 原機（大速）035 をもって報告）

炉内観察の結果、炉内ラック R16 の上部から R15 にかけて MARICO-2 試料部が突き出ており、その高さが約 90mm であることが判明した。炉心上部機構下面及び新旧ホールドダウン軸下端と集合体頂部の間隙が約 70mm であることから、炉心上部機構または新旧ホールドダウン軸が炉内ラック R16 付近に接近した際に、MARICO-2 試料部と干渉する領域が生じるため、その領域では回転プラグが操作できないことが平成 19 年 11 月 2 日にわかった（図-13 参照）。

炉心上部機構及び新旧ホールドダウン軸が MARICO-2 試料部に干渉しないように

回転プラグを操作した場合、燃料交換機が到達できない範囲は、回転プラグが燃料交換で位置決めする場所 343 箇所（炉心 313 箇所、炉内ラック 30 箇所）のうち、80 箇所（約 24%）である。この範囲を図-14 に示す。

6. 環境への影響等（平成 19 年 11 月 9 日付け 19 原機（大速）035 をもって報告）

平成 19 年 5 月 15 日から原子炉は停止中である。回転プラグの燃料交換機能は一部阻害されているものの、遮へい機能やカバーガスの閉じ込め機能に問題はなく、また、炉心の冷却機能にも問題がないことから、原子炉の安全性は確保されている。

MARICO-2 は、燃料の長寿命化を目的とした被覆管材料等の照射試験を実施するための実験設備であり、核燃料物質は装填されていない。また、原子炉容器内のカバーガスをゲルマニウム半導体検出器で測定した結果、核分裂生成物（キセノン及びクリプトン）は検出されなかったことから、炉心燃料集合体等の破損もなく、本件による環境への影響はない。なお、本件に係る作業員の被ばくはない。

7. 観察結果に基づく影響評価

炉内観察の結果、回転プラグ燃料交換機能の一部阻害及び炉心上部機構の整流板等の変形等が確認された。原子炉の安全性を担保し、「常陽」の運転を再開するためには、干渉物である MARICO-2 試料部を撤去し、回転プラグ燃料交換機能を復旧するとともに、炉心上部機構を交換する必要がある。

また、MARICO-2 試料部及び炉心上部機構下面の観察結果より、固定ピン 6 本以外にルースパーツはない。固定ピン 6 本（材質：SUS316、概略寸法：直径 6mm、長さ 13mm（図-15 参照））をルースパーツとし、原子炉の安全性を評価した結果、以下に示すように、集合体等や冷却系機器に問題が生じないことを確認した。

- ・ ハンドリングヘッドをハンドリングヘッド継手に取り付け、固定ピンをハンドリングヘッド外側より差し込むことで、ハンドリングヘッドはラップ管と接続される。固定ピンはハンドリングヘッド外側で溶接される。図-16 に示すように、ハンドリングヘッドの固定ピン孔が変形し、固定ピンの残存がなく、固定ピンが切断等された形跡はない。そのため、固定ピンは、溶接部分が破損し、脱落したと判断できる。なお、MARICO-2 試料部切離作業を、炉内ラック R16 上部で実施したことを考慮すると、固定ピンの落下位置は炉内ラック R16 近傍または炉心外周槽であると推定される。

- ・ 固定ピンを浮き上がらせるために必要な冷却材上昇速度を、部品重量・形状・最大受圧面積等を考慮し、機械工学便覧に基づく理論式により算出した結果、約 1.0m/s となった。一方、炉内ラック R16 近傍または炉心外周槽の上部（原子炉容器上部プレナム部下部）における冷却材上昇速度は、最大約 0.43m/s である（図-17 参照）。原子炉容器上部プレナム部下部の冷却材上昇速度は、固定ピンを浮き上がらせるために必要な最小冷却材上昇速度を下回っており、固定ピンが原子炉容器プレナム部内を上昇し、原子炉容器出口配管より流出することはなく、冷却系機器に問題が生じないことを確認した。
- ・ 固定ピンが炉内ラックの移送用ポットまたは炉心外周槽に落下した場合、当該位置での冷却材上昇速度は小さい（最大約 0.47m/s：図-17 参照）ため、当該部位に落下した固定ピンが浮き上がることはなく、集合体等に影響はないことを確認した。
- ・ 炉心燃料集合体の上部から、固定ピンが落下することを想定した場合、ハンドリングヘッド開口部の直径は 56mm であり、固定ピンは、炉心燃料集合体上部より落下する可能性があるが、燃料ピン間のギャップは約 2mm（参考：スパイラルワイヤ直径 0.9mm）であり、固定ピンは燃料ピンバンドルの上部に留まるため、炉心燃料集合体の冷却材流量及び温度に影響を与えることはないことを確認した（図-18 参照）。なお、固定ピンが集合体間のギャップに落下することを想定した場合、集合体間のギャップは最大で約 5.2 mm であり、固定ピンの直径（6mm）より小さいため、固定ピンは集合体頂部に留まる。

8. 原因

炉内観察の結果より、炉内ラック R16 の上部から R15 にかけて MARICO-2 試料部が突き出ており、原子炉停止後、炉内ラック R16 において MARICO-2 試料部と保持部の切離作業終了時に、試料部が移送用ポット上部へ引き出され、試料部が突き出した状態で回転プラグを回転させたことで、回転プラグ燃料交換機能の一部障害が発生したことを確認した（図-19 参照）。

上記事象進展より、回転プラグ燃料交換機能の一部障害は、「MARICO-2 試料部切離

不能・試料部突出」及び「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能」によって発生したものである。これら 2 項目の発生要因を特定するにあたり、当日の作業手順等を分析し、検討課題を抽出した結果を図-20 に示す。「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出」に至る要因として、ケーブル等切断不能、試料部切離機構の機能不全、ケーブル等挟み込みが考えられる。また、「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能」に至る要因として、ロードセル不具合、上部案内管シールパッキン部の摩擦力変化が考えられる。

8.1 MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の発生要因について

(1) MARICO-2 試料部切離機構の概要

MARICO-2 試料部切離機構の構造を図-21 に示す。MARICO-2 試料部切離機構は、外側カッタを取り付けたカッタ支え、試料部ハンドリングヘッドを保持するフィンガで構成される。MARICO-2 試料部切離機構は、カッタ支えを下方に移動させ、外側カッタでケーブル等を切断するとともに、カッタ支えによりフィンガを内側方向に押し「閉」とすることで、試料部を切り離す機能を有する（正常時の動作：図-22 参照）。

(2) MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の発生要因分析結果

上述したように「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出」に至る要因として、ケーブル等切断不能（外側カッタでケーブル等を切断し、試料部を確実に切り離すことが不可能）、試料部切離機構の機能不全（カッタ支えによりフィンガを「閉」とし、試料部を確実に切り離すことが不可能）、ケーブル等挟み込み（ケーブル等の切断・試料部の切り離しを実施した後、切断されたケーブル等が内側カッタと外側カッタの隙間に挟み込まれ、試料部が突出）が考えられる。この発生要因を特定するため、以下の検討・評価等を実施した。

- ・ 炉内観察による MARICO-2 試料部・保持部のケーブル等の状態確認
- ・ 炉内観察による MARICO-2 試料部のハンドリングヘッド所在確認
- ・ MARICO-2 試料部切離機構の設計精査

炉内観察（図-7 及び図-9 参照）の結果、MARICO-2 試料部においてケーブル等の切断ができなかったことによるケーブル等の異常な伸びはないこと、保持部のケーブル等切断部においてケーブル等の残存はないことを確認した。これら

により、ケーブル等切断不能は発生していないと判断した。また、炉内観察では、上記に加え、ハンドリングヘッドが保持部と接続された状態で存在していることも確認した(図-9 参照)。これらにより、ケーブル等挟み込みは発生していないと判断した。

MARICO-2 試料部切離機構の設計(試料部切離機能に係る当該機構の構造・寸法の決定及び図面の作成過程)について精査した結果、上述したように、MARICO-2 試料部切離機構には、カッタ支えを下方に移動させ、フィンガを内側方向に押し「閉」とすることで、試料部を切り離す機能が要求されるが、図面寸法(図-23 に示す MARICO-2 試料部切離機構において、フィンガを「閉」とする動作上重要な項目とその寸法)ではカッタ支えによりフィンガを「閉」とし、試料部を確実に切り離すことが不可能(機能不全)であることが判明した(図-24 参照)。また、MARICO-2 試料部切離機構の設計にあたっては、試料部の切り離しが確実に実施できるよう寸法を設定する必要があるが、MARICO-2 では、その寸法が的確に設定されていなかったこと(設計不備)が判明した。炉内観察の結果、ハンドリングヘッドが保持部と接続された状態で存在していることを確認しており、これは本判断が妥当であることを裏付ける。

MARICO-2 の設計・製作を実施したメーカー(現日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社)に、試料部切離機構の設計・製作経緯を調査させた結果、MARICO-2 試料部切離機構は、カッタ支えを下方に移動させ、フィンガを内側方向に押し「閉」とすることで、試料部を確実に切り離すことが不可能(機能不全)であり、また、MARICO-2 試料部切離機構の設計にあたっては、試料部の切り離しが確実に実施できるよう寸法が的確に設定されていなかった(設計不備)との報告があった。さらに、寸法を設定する段階において試料部の切り離しに係る検証作業が実施されていないとの報告があった。

一方で、MARICO-2 の製作作業が終了した時点で、同メーカーは、原子力機構に対して、MARICO-2 は所期の動作により試料部を切り離す機能を有することを報告しており、原子力機構では、過去に同メーカーが設計・製作した計測線付実験装置(以下「MARICO-1」という。)において、試料部の切り離しが実施できたことから、同様の構造である MARICO-2 の試料部切離機能について検証作業を実施しなかった。

また、今回の調査において MARICO-1 についても、試料部切離機構の設計・製作経緯を同メーカーに調査させた結果、当該機構の図面寸法では、カタ支えを下方に移動させ、フィンガを内側方向に押し「閉」とすることにより、試料部を確実に切り離すとの機能要求を満足せず、寸法を設定する段階において試料部の切り離しに係る検証作業が実施されていないとの報告があった。

MARICO-1 の設計・製作にあたっては、事前に概念設計、詳細設計、全体試作及び性能確認試験を同メーカーで実施しており、同メーカーは、概念設計時及び詳細設計時において、原子力機構に対して、MARICO-1 試料部切離機構の寸法等は、過去に「常陽」にて使用し、試料部を切り離すことができた計測線付 C 型照射燃料集合体の実績に基づいて設定したこと、MARICO-1 は所期の動作により試料部を切り離す機能を有することを報告している。このため、全体試作及び性能確認試験においては、主にナトリウム流動特性の把握及びケーブル等の切断機能確認を対象としており、試料部切離機能の確認は対象としていなかった。

さらに、今回の調査において、図-23 に示すフィンガを「閉」とする動作上重要な項目とその寸法のうち、MARICO-1 の「フィンガ高さ」の寸法を変更していたとの報告が同メーカーよりあった。原子力機構が所有する図面のフィンガ高さは 12mm である。しかし、同メーカーの調査では、フィンガ高さはもともと 13mm であったところ MARICO-1 組立時の不具合を回避するため 12mm に変更していることが判った。当時、12 mm にフィンガ高さを減少させた寸法変更は、同メーカーより原子力機構に対して報告がなく、原子力機構では、試料部を切り離すことができた計測線付 C 型照射燃料集合体の実績に基づいて寸法等が設定されていると認識していたことから、MARICO-1 の試料部切離機能について検証作業を実施しなかった。

以上のとおり、MARICO-2 (MARICO-1 を含む) 試料部切離機能に係る的確な設計の実施、及びその検証がなされておらず、試料部切離機構の設計不備・機能不全が生じたことが、「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出」の発生要因である。

8.2 MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能の発生要因について

(1) MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量測定の概要

MARICO-2 試料部の切り離しは、切離作業前後で吊り上げ重量測定を実施し、試料部重量に相当する吊り上げ重量差を確認することで判断している。吊り上げ重量測定の手順を以下に示す(図-25 参照)。

MARICO-2 保持部を 0mm 位置から 300mm 位置まで吊り上げる。

300mm 位置にて、吊り上げ重量が安定したことを確認する。

吊り上げ重量を測定する。

図-26 に MARICO-2 試料部切離前後の吊り上げ重量測定時の吊り上げ重量挙動(イメージ)を示す。吊り上げ重量の成分は、主に試料部・保持部重量、ストロークベローズの反力、摩擦力(摺動抵抗(主に上部案内管シールパッキン部において発生: 図-27 参照): 以下同じ)である。試料部・保持部の吊り上げ操作開始に伴い、試料部・保持部重量及び摩擦力が吊り上げ重量として測定される。吊り上げ操作においては、ストロークベローズが縮むため、その反力が徐々に付加され、吊り上げ重量が増加する。吊り上げ重量測定後、試料部・保持部の吊り下ろし操作開始に伴い、摩擦力の付加方向が逆転するため、吊り上げ重量は急激に減少する。その後の吊り下ろし操作においては、ストロークベローズが伸びていくため、その反力は徐々に低下し、吊り上げ重量が減少する。試料部切離作業後の吊り上げ重量測定においては、試料部重量が付加されないため、切離作業前後で吊り上げ重量差が生じることとなる。

MARICO-2 試料部切離作業前の吊り上げ重量は 325 ~ 340kg、切離作業後の吊り上げ重量は 310 ~ 320kg である。当該作業においては、試料部重量(約 20kg)に相当する吊り上げ重量差が確認できたため、MARICO-2 試料部の切り離しに成功したと判断した(1 回目の測定値は、摩擦力の影響が大きく、妥当な値が得られていないと判断し、当該値を除外した(参考 作業前: 380kg、作業後: 345kg))。

(2) MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能の発生要因分析結果

MARICO-2 試料部が切り離されなかったにもかかわらず、MARICO-2 試料部切離作業前後の吊り上げ重量測定では、試料部重量に相当する吊り上げ重量差が確認された。前述したように「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能」に至る要因として、ロードセル不具合(ロードセルの指示値が不適切であり、

見かけ上の吊り上げ重量差が発生) 上部案内管シールパッキン部の摩擦力変化(上部案内管シールパッキン部の摩擦力が試料部切離作業前後で変化し、見かけ上の吊り上げ重量差が発生)が考えられる。この発生要因を特定するため、以下の検討・評価等を実施した。

- ・ ロードセルの機能確認
- ・ 吊り上げ重量チャートの精査

試料部切離作業前後の吊り上げ重量測定において使用したロードセルについて、340kg(切離作業前吊り上げ重量)及び320kg(切離作業後吊り上げ重量)の負荷(錘)を用いて、炉外で負荷試験を実施した結果、適正な指示値が得られており、ロードセルに不具合・異常がないことを確認した。これより、ロードセル不具合は発生していないと判断した。

吊り上げ重量チャートを精査した結果を以下に示す。

- ・ MARICO-2 試料部切離作業前吊り上げ重量測定における吊り上げ重量チャートの一例を図-28に示す。吊り上げ作業中には、約20kgの吊り上げ重量変動が確認されている。試料部・保持部重量は一定であることを踏まえると、図-28に示すような吊り上げ重量変動は、摩擦力が付加・解放されることで発生したと考えられる。当該吊り上げ重量チャートを分析した結果、切離作業前吊り上げ重量測定時の吊り上げ作業中には、摩擦力の付加・解放が繰り返されているが、切離作業前吊り上げ重量測定時には摩擦力がほとんど解放されていなかったことが確認できた。
- ・ MARICO-2 試料部切離作業後吊り上げ重量測定における吊り上げ重量チャートの一例を図-29に示す。吊り上げ作業中の摩擦力の付加・解放量は、約10kgであり、上述したMARICO-2 試料部切離作業前吊り上げ重量測定時の摩擦力の付加・解放量より小さかった。また、切離作業後吊り上げ重量測定時には摩擦力がほぼ解放された。
- ・ MARICO-2 試料部切離作業前後の吊り上げ重量測定における吊り上げ操作終了(300mm位置到達)時の最大吊り上げ重量(摩擦力を含めた吊り上げ重量のピーク値)の推移を図-30に示す。吊り上げ・吊り下ろし操作の繰り返しにより、外側延長管とシールパッキンの接触面になじみが生じ

たことで、最大吊り上げ重量は、徐々に減少する傾向を示したと考えられる。上記吊り上げ重量チャートの精査においても、試料部切離作業前の吊り上げ操作時の摩擦力（約 20kg）と比較して、切離作業後の摩擦力（約 10kg）は小さくなっており、その結果、切離作業前の吊り上げ重量測定にあっては摩擦力がほとんど解放されなかった、切離作業後の吊り上げ重量測定にあっては摩擦力がほぼ解放されたとの状況に至ったと考えられる。

以上より、MARICO-2 試料部切離作業において、以下の要因が重畳し、切離作業前後で吊り上げ重量差が見かけ上発生したことで、MARICO-2 試料部の切り離しに成功したと判断できる状況に至ったことが、「MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能」の発生要因であることが確認できた。

- ・ 発生していた摩擦力が、MARICO-2 試料部の重量と同レベルであった。
- ・ 切離作業前の吊り上げ重量測定にあっては摩擦力がほとんど解放されなかった。
- ・ 切離作業後の吊り上げ重量測定にあっては摩擦力がほぼ解放された。

8.3 原因究明結果

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障害の発生原因は、MARICO-2 試料部の切り離しになされず、試料部が突き出した状態で回転プラグを回転させたことである。本事象が発生した要因を以下に示す（MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出等に係る要因分析結果：図-31 参照）。

MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の発生要因

- ・ 設計不備による MARICO-2 試料部切離機構の機能不全

MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出の確認不能の発生要因

- ・ 摩擦力の影響により、MARICO-2 試料部切離作業前後で見かけ上の吊り上げ重量差が発生したことで、試料部の切り離しに成功したと判断できる状況に至った。

9. 対策

9.1 再発防止策

(1) 計測線付実験装置の試料部切離不能・試料部突出に係る再発防止策

今後、計測線付実験装置（計測線付C型照射燃料集合体を含む）を使用する場合には、試料部切離不能・試料部突出の再発を防止するため、以下の対策を講じる。

- ・ 炉内ナトリウム中で切離機能が要求される計測線付実験装置について、試料部切離機構の設計見直しを行う。

また、要求機能に対応する的確な設計の実施、及びその検証が実施されていないことが、試料部切離機構の設計不備が発生した要因であることを踏まえ、以下の対策を講じる。なお、炉内ナトリウム中で切離機能が要求される計測線付実験装置以外の装置・設備（制御棒上部案内管、燃料交換機等）については、切離機能に係る要求を満足することを炉外試験等により検証している。

- ・ 炉内ナトリウム中で切離機能が要求される計測線付実験装置の設計の実施時において、シミュレーションや炉外試験等の手段により、切離機能に係る要求を満足することの検証作業を確実に実施する。
- ・ 炉内ナトリウム中で切離機能が要求される計測線付実験装置の設計の実施時において、シミュレーションや炉外試験等の手段により、切離機能に係る要求を満足することが検証されていることの確認を品質保証体系の文書の中で明確化する。

(2) 計測線付実験装置の試料部切離不能・試料部突出の確認不能に係る再発防止対策

計測線付実験装置では試料部重量が小さく、吊り上げ重量差による試料部の切り離しの確認方法の信頼性が低いことが確認されたことを踏まえ、今後、計測線付実験装置を使用する場合には、試料部切離不能・試料部突出の確認不能の再発を防止するため、以下の対策を講じる。

- ・ 炉内ナトリウム中で切離機能が要求される計測線付実験装置について、接触式の切離検知機能や、画像による確認方法を導入する等、試料部切離確認方法を多様化する。

9.2 水平展開

大洗研究開発センター内他施設及び原子力機構内各施設に対して、本事象の内容及び原因と対策を周知し、同種事象の発生防止を図る。

9.3 復旧措置

今後、炉心上部機構の交換、MARICO-2の撤去を実施する。

以 上

図リスト

- 図-1 原子炉施設全体配置図
- 図-2 MARICO-2 概要図
- 図-3 炉内ラック R16 上部及び炉心上部機構下端周辺等の観察概要
- 図-4 集合体頂部等の観察概要
- 図-5 炉心上部機構下面の観察概要
- 図-6 炉心上部機構下面観察装置の原子炉容器内据付状況
- 図-7 炉内ラック R16 上部の MARICO-2 試料部観察画像
- 図-8 集合体頂部等観察画像
- 図-9 MARICO-2 上部案内管・ハンドリングヘッドの観察画像
- 図-10 整流板の観察画像
- 図-11 センター孔案内スリーブ付近の観察画像
- 図-12 制御棒 No.2 上部案内管・案内スリーブ付近の観察画像
- 図-13 回転プラグ操作時の MARICO-2 試料部との干渉状態（例）
- 図-14 MARICO-2 試料部との干渉により燃料交換機が到達できない範囲
- 図-15 固定ピン構造図
- 図-16 固定ピン孔の状況
- 図-17 AQUA による原子炉容器内 2 次元流動解析結果
- 図-18 炉心燃料集合体への固定ピン落下
- 図-19 MARICO-2 試料部切離作業時の事象進展
- 図-20 MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出等に係る検討課題の抽出結果
- 図-21 MARICO-2 試料部切離機構の構造
- 図-22 MARICO-2 試料部切離機構の概要（正常時の動作）
- 図-23 MARICO-2 試料部切離機構におけるフィンガ動作上重要な項目及び寸法
- 図-24 MARICO-2 試料部切離機構設計精査結果
- 図-25 MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量測定の手順
- 図-26 MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量挙動（イメージ）
- 図-27 MARICO-2 における摩擦力発生部位
- 図-28 MARICO-2 試料部切離作業前の吊り上げ重量チャート（一例）
- 図-29 MARICO-2 試料部切離作業後の吊り上げ重量チャート（一例）
- 図-30 吊り上げ操作終了時の最大吊り上げ重量の推移
- 図-31 MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出等に係る要因分析結果

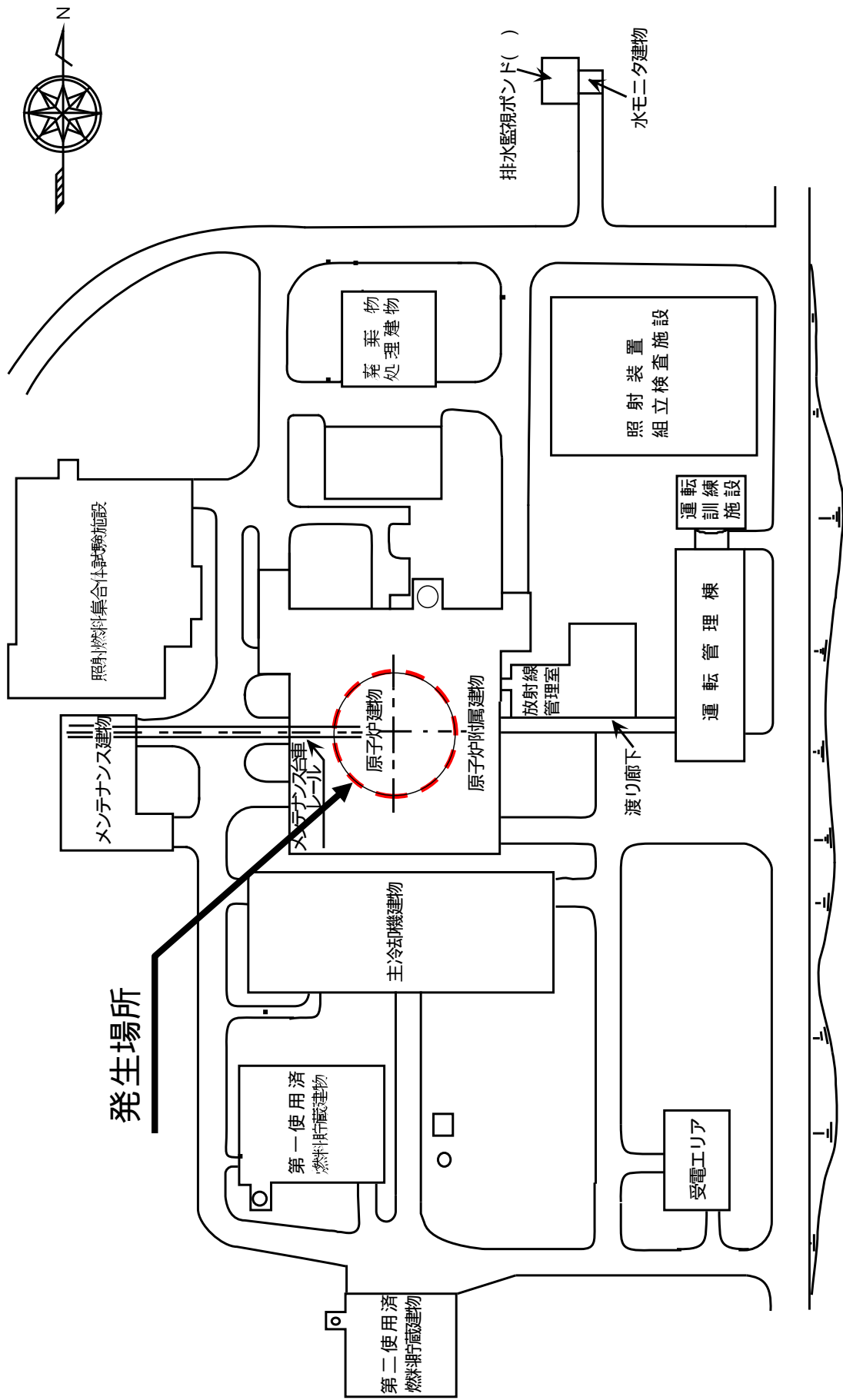
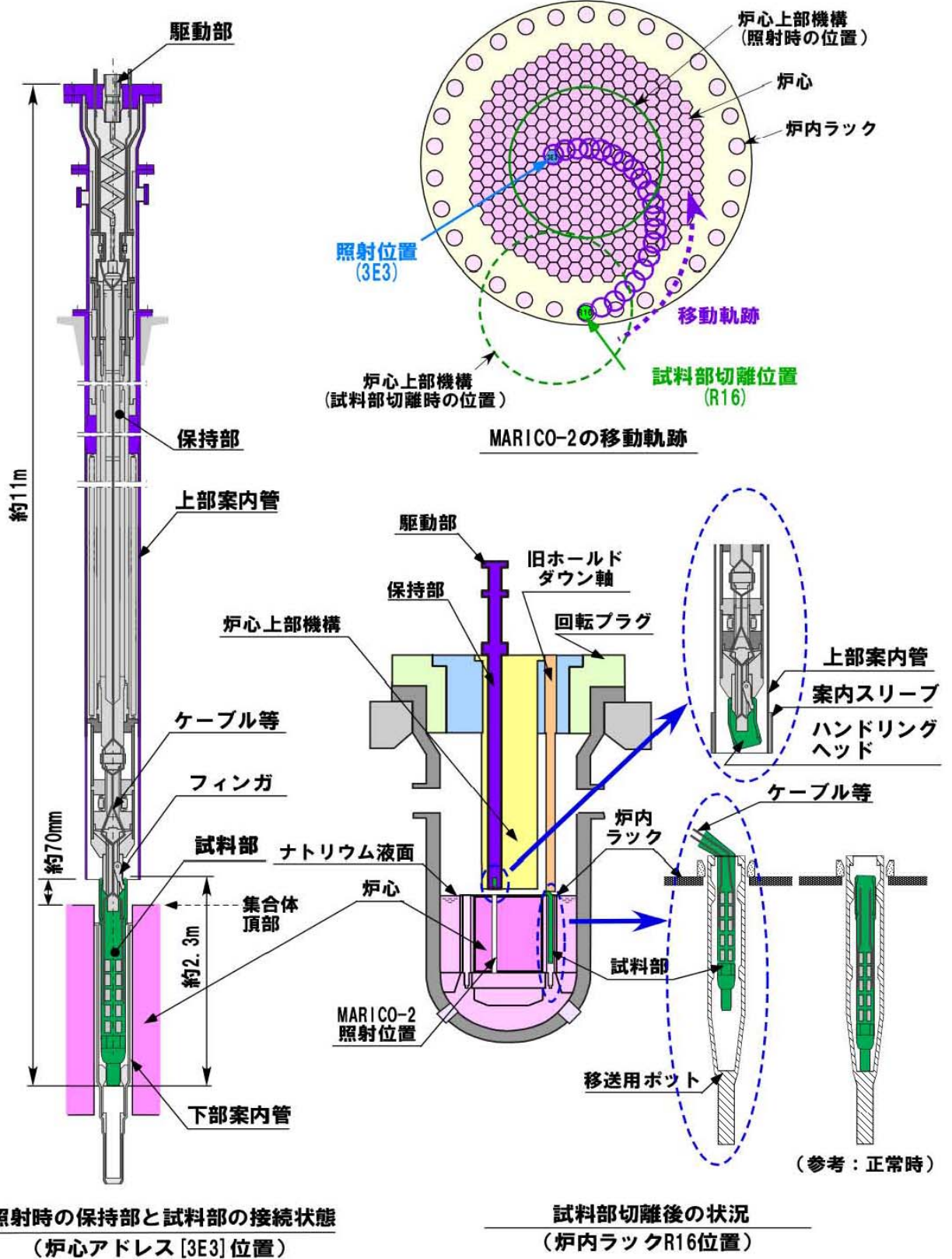


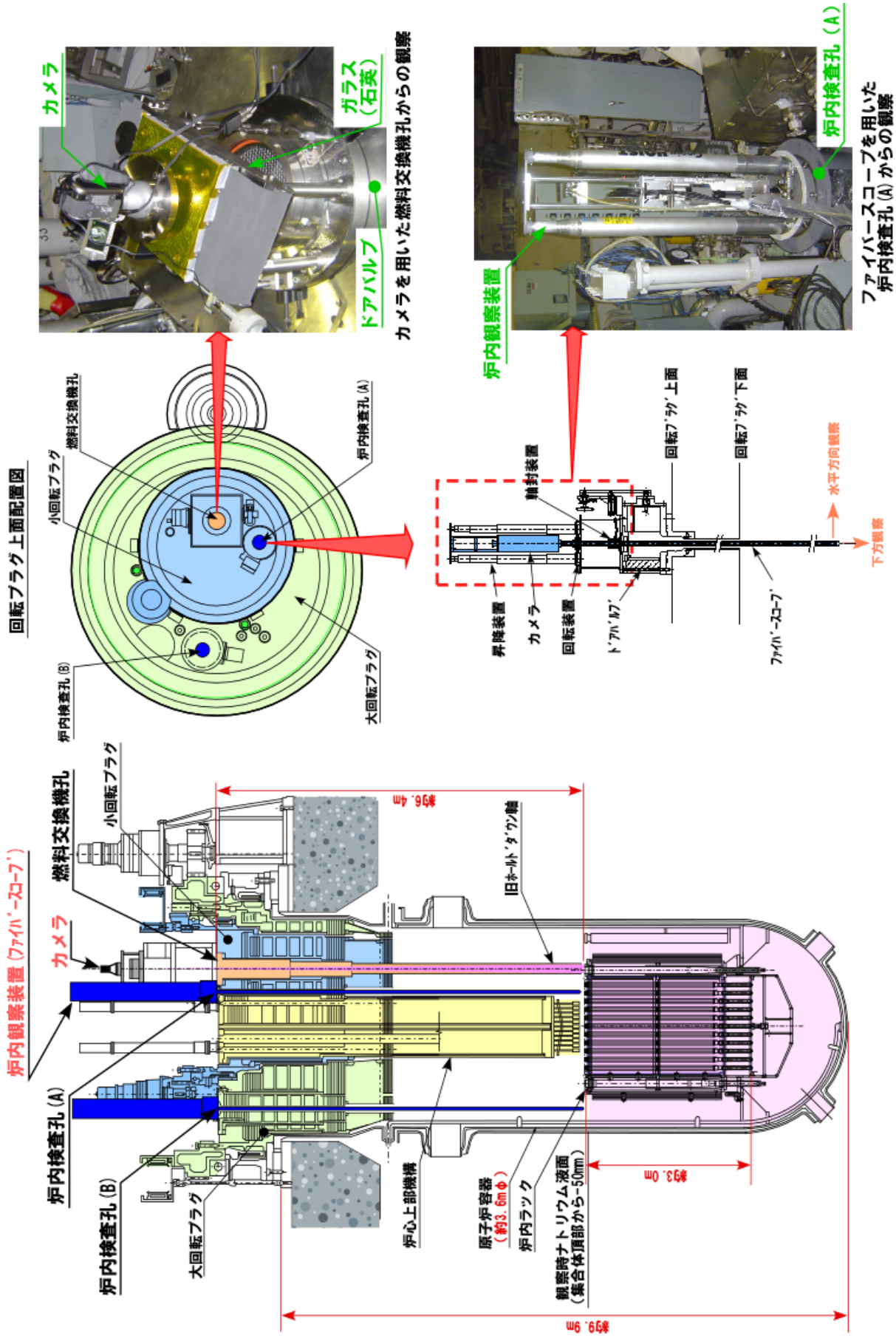
図-1 原子炉施設全体配置図



照射時の保持部と燃料部の接続状態
(炉心アドレス [3E3] 位置)

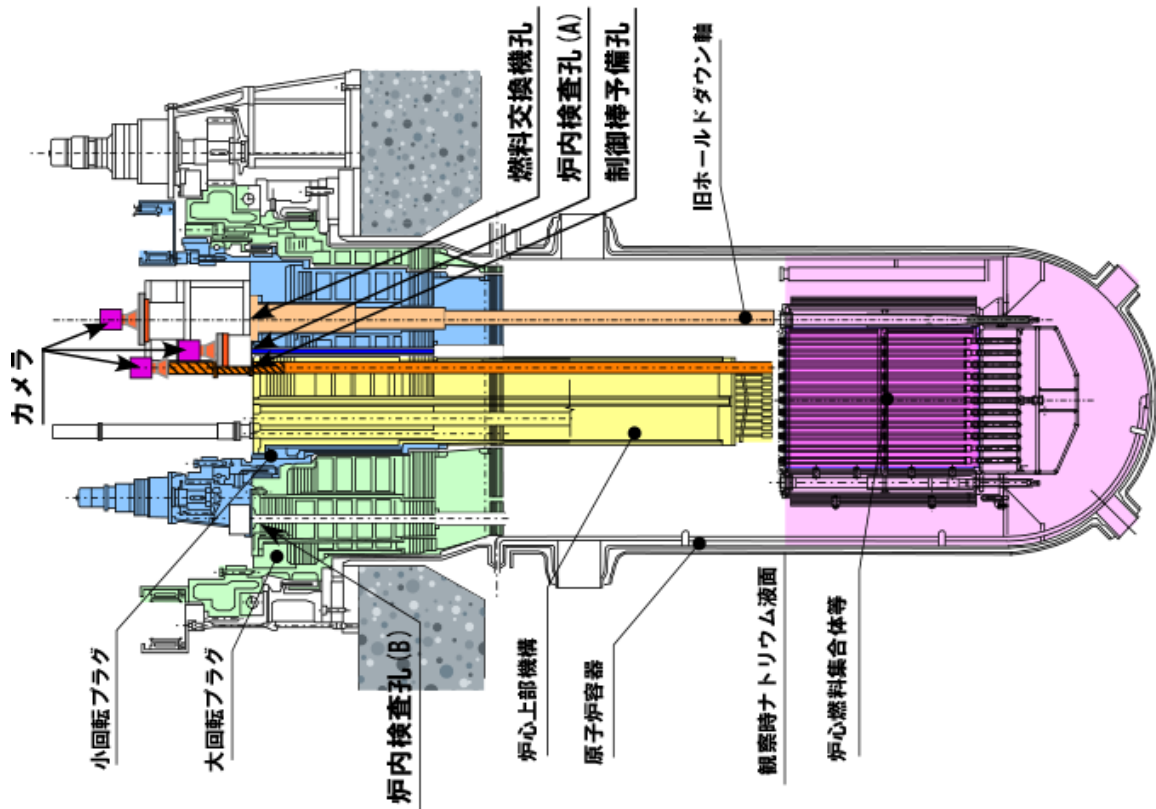
燃料部切離後の状況
(炉内ラックR16位置)

図-2 MARICO-2 概要図

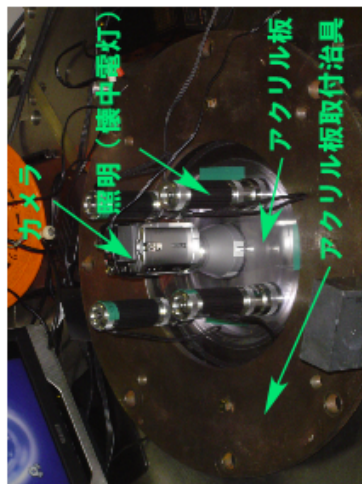


カメラを用いた燃料交換機構孔からの観察

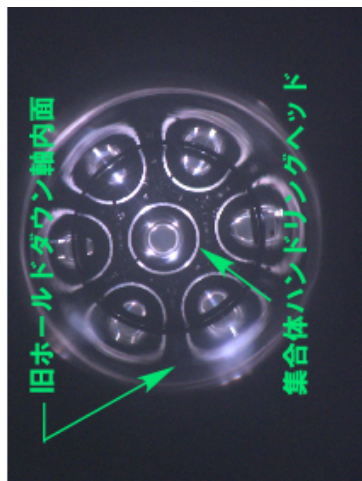
図-3 炉内ラック R16 上部及び炉心上部機構下端周辺等の観察概要



燃料交換機孔・炉内検査孔(A)、制御棒予備孔からの観察

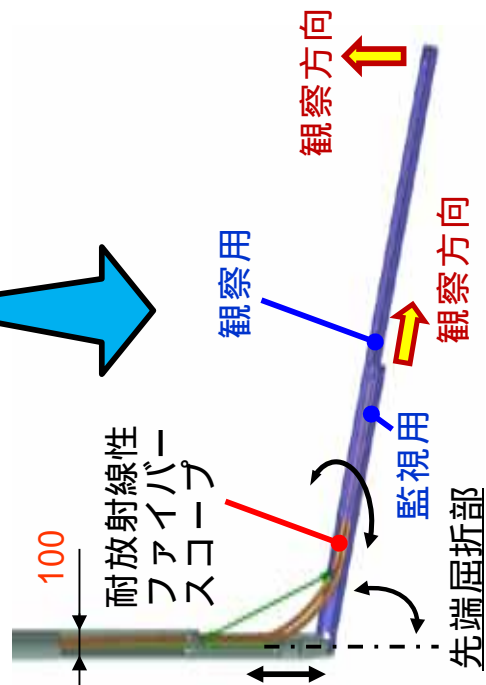
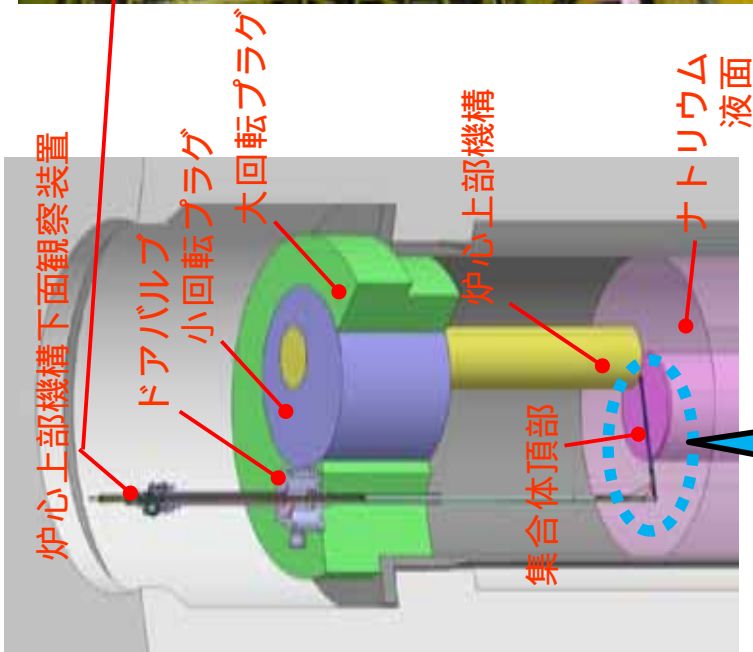
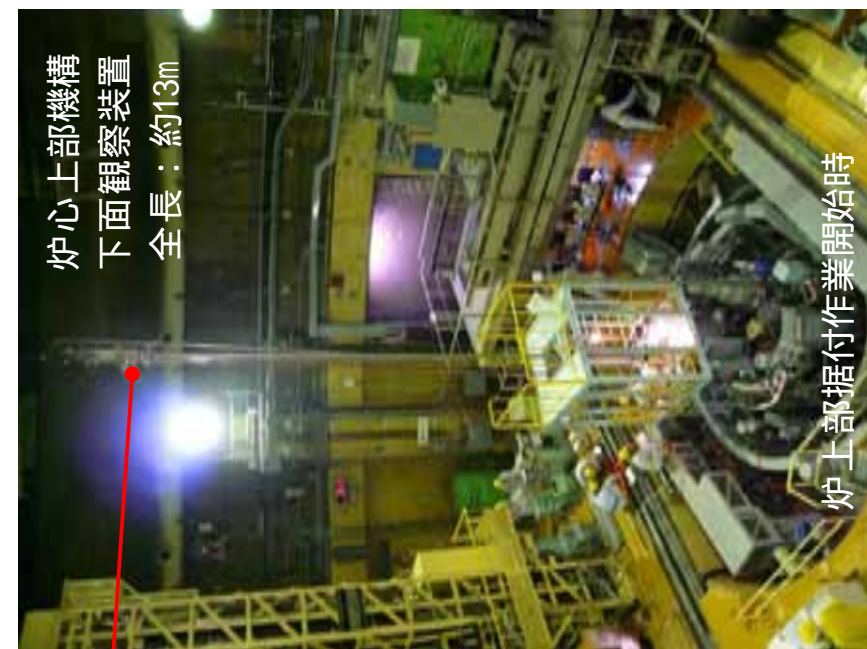


カメラ等設置状態
(一例：燃料交換機孔)



観察画像(炉心アドレス：4A1)
(一例：燃料交換機孔)

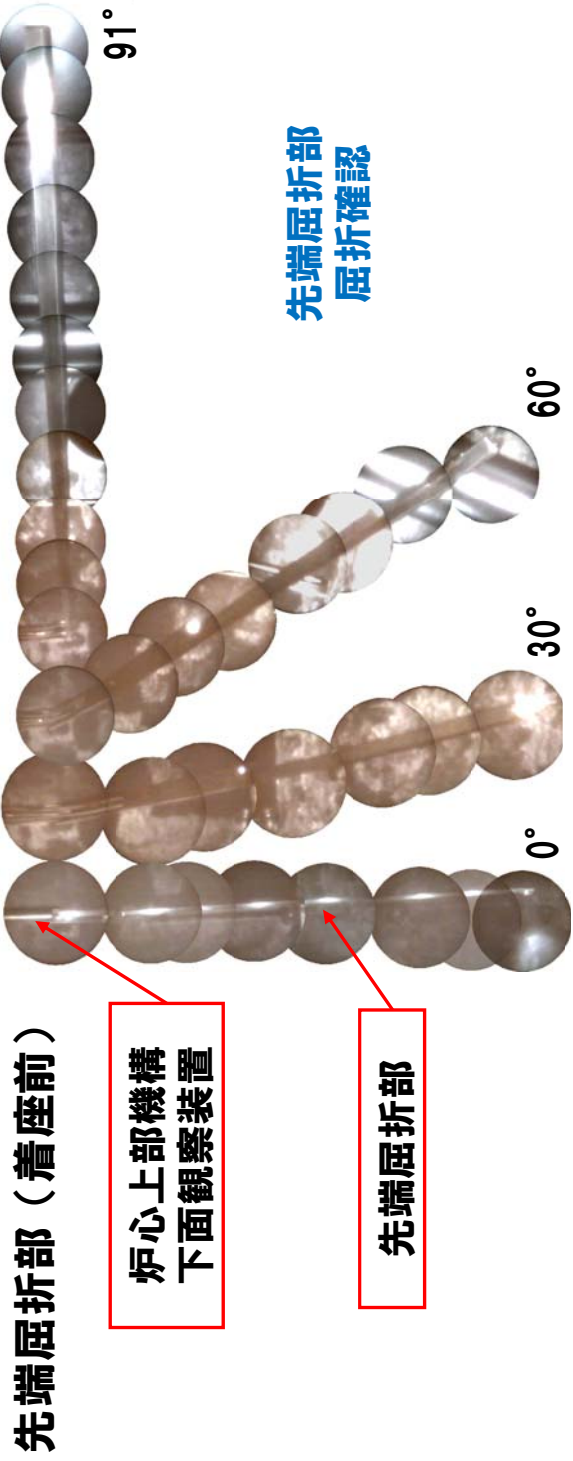
図-4 集合体頂部等の観察概要



ファイバースコープの仕様

種類：耐放射線性石英イメージファイバー
 画素数：30,000
 視野角及び焦点深度
 【監視用】視野角：15°
 焦点深度：100mm ~ 2,000mm
 【観察用】視野角：60°
 焦点深度：30mm ~ 400mm

図-5 炉心上部機構下面の観察概要



先端屈折部 (着座後：炉心上部機構下面と集合体頂部の間に挿入)

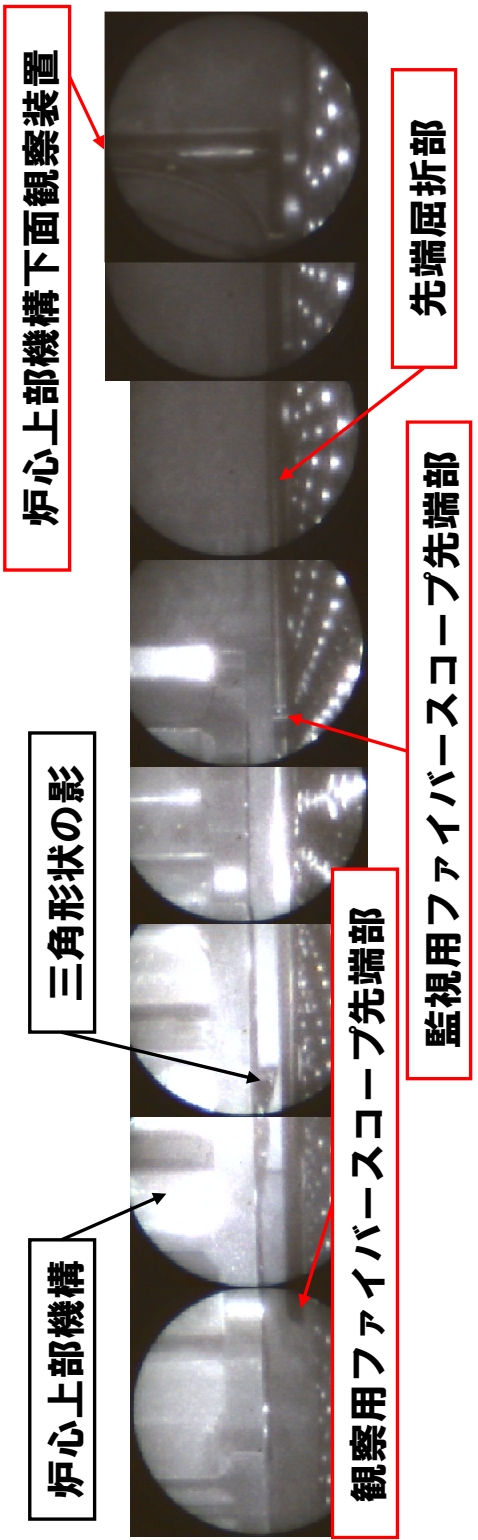


図-6 炉心上部機構下面観察装置の原子炉容器内据付状況

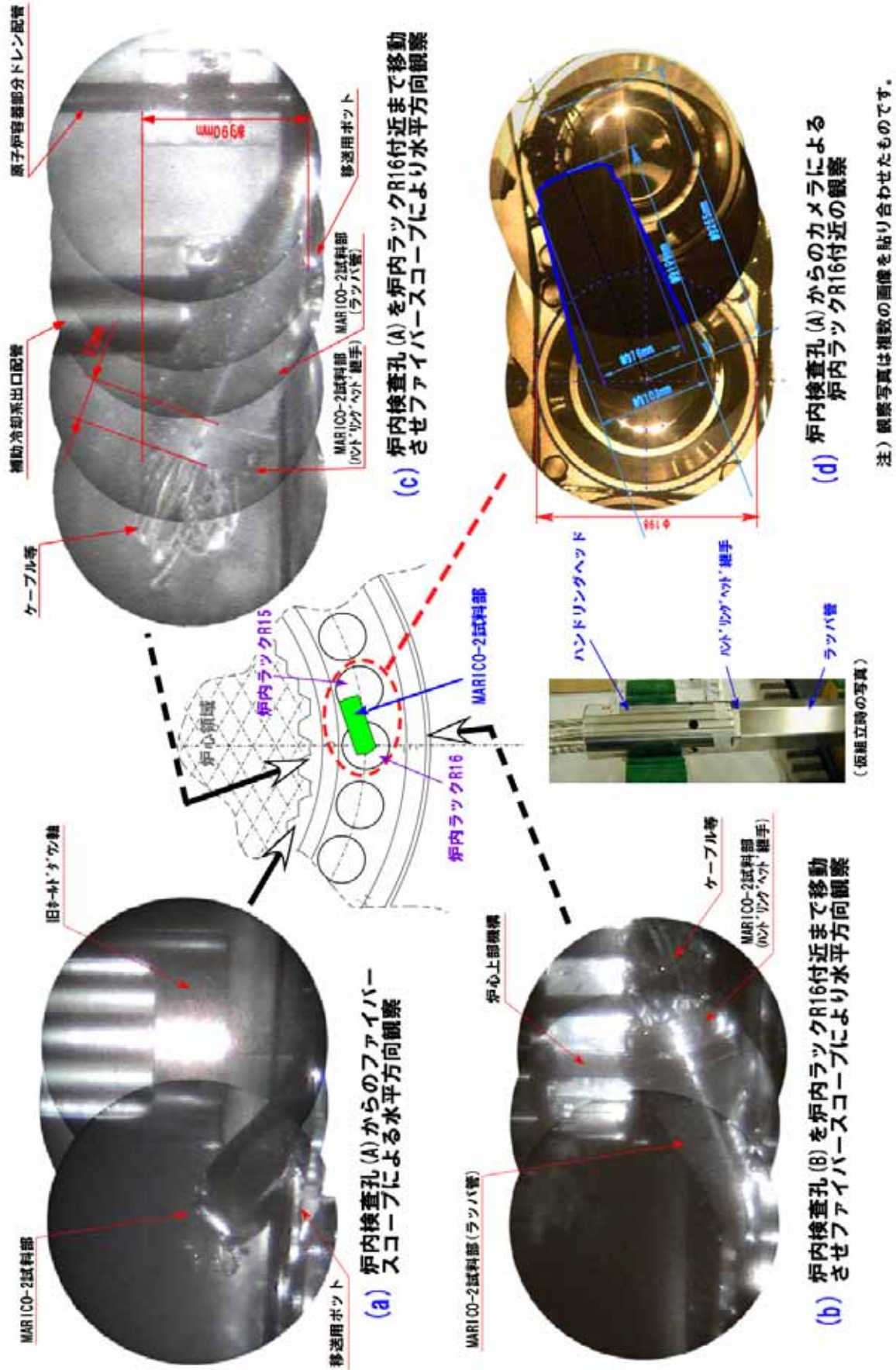
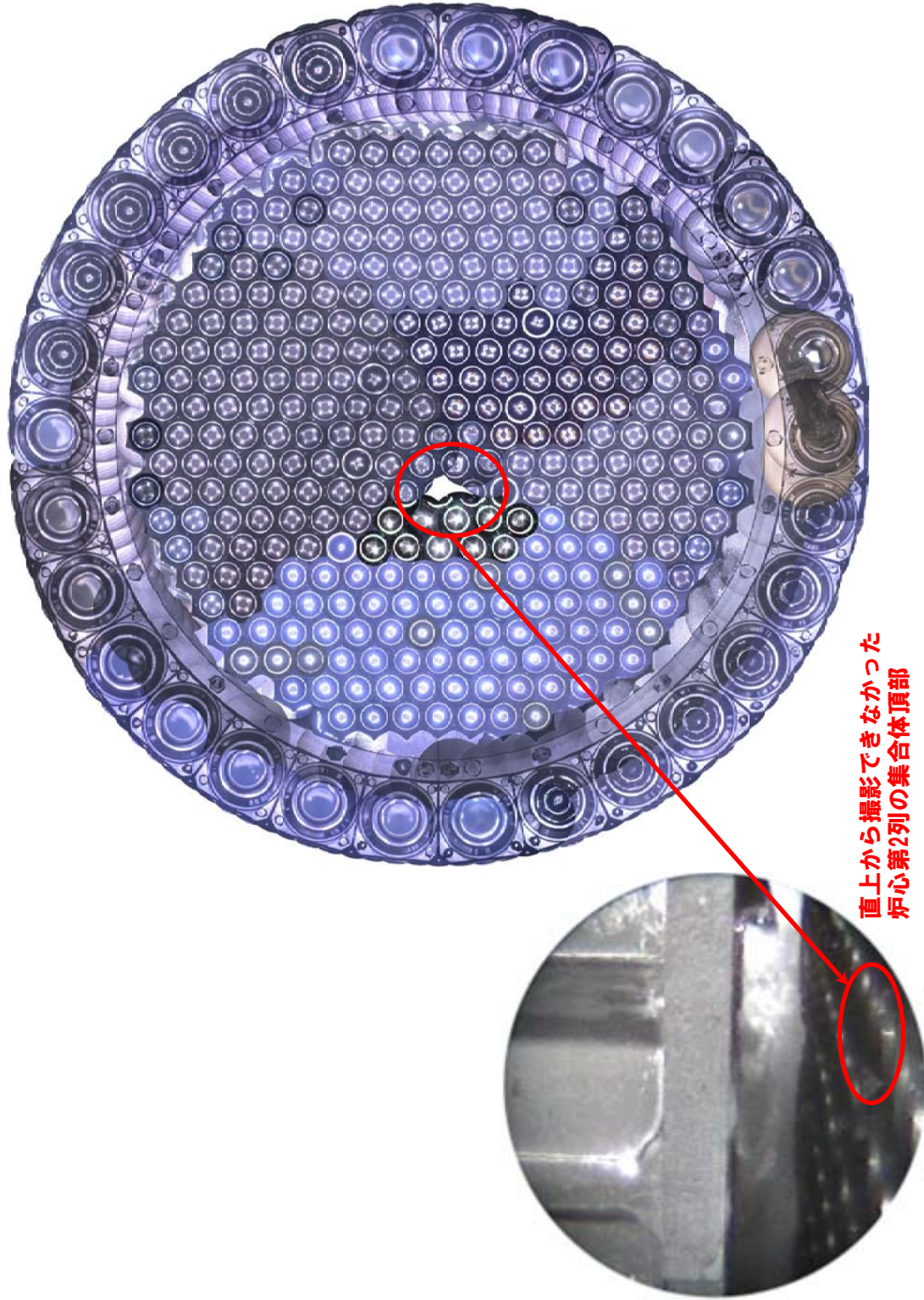


図-7 炉内ラック R16 上部の MARICO-2 試験部観察画像



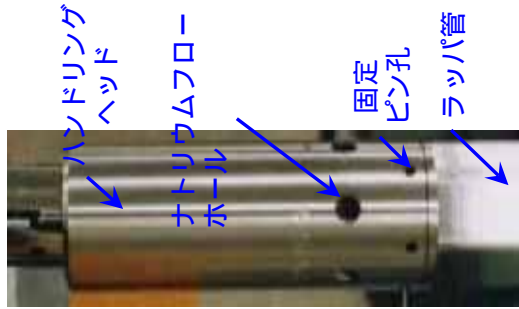
直上から撮影できなかつた
炉心第2列の集合体頂部

炉内検査孔（A）からの観察（平成19年10月10日撮影）

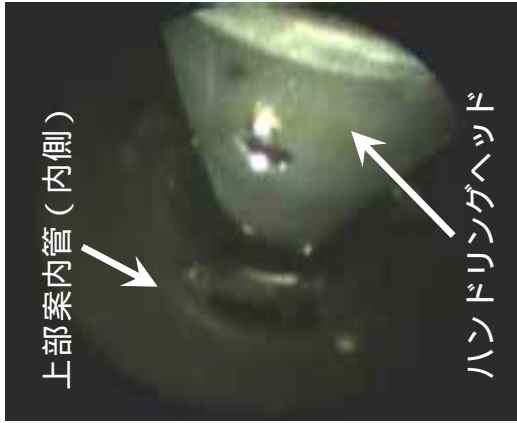
注）写真は複数の画像を貼り合わせたものです。

図-8 集合体頂部等観察画像

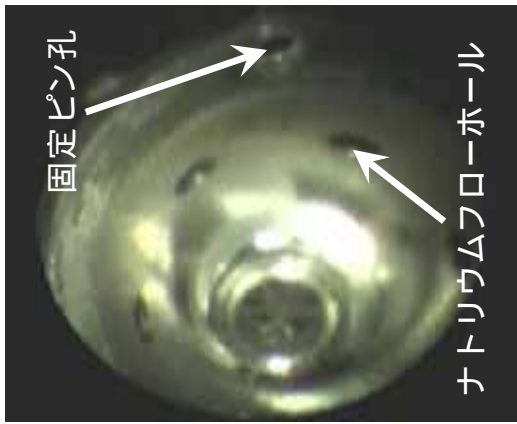
組立時の写真
(MARICO-1)



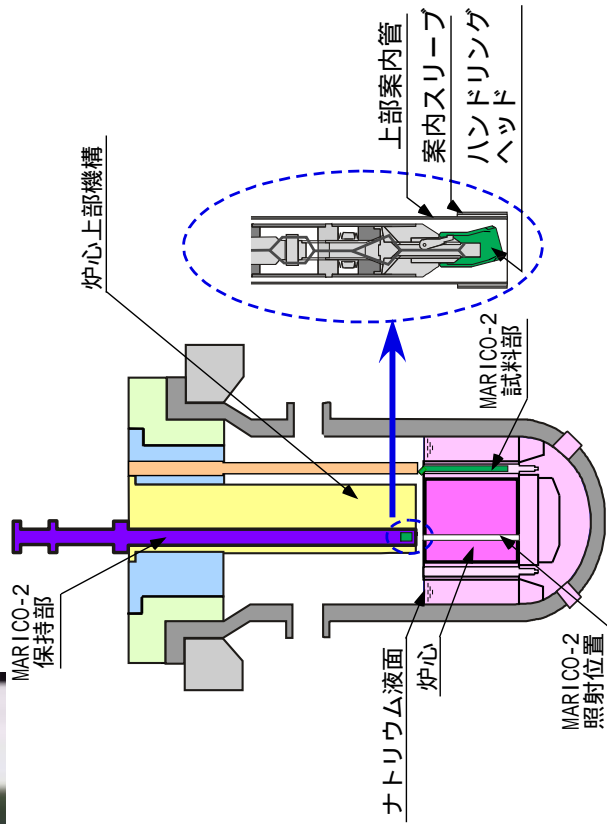
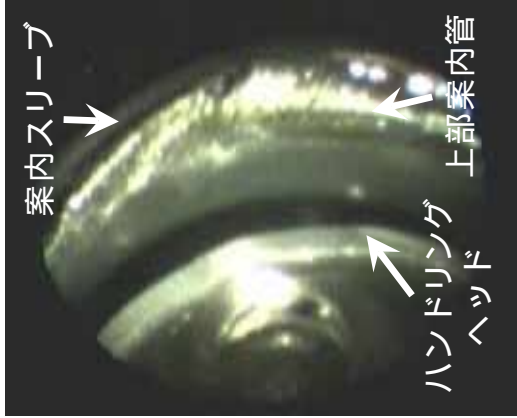
ハンドリングヘッド外側



ハンドリングヘッド内部



上部案内管下端変形部



- 炉心上部機構内のMARICO-2保持部にハンドリングヘッドが接続されていた。
- MARICO-2上部案内管下端に変形があった。
- ハンドリングヘッドと試料部を接続していた固定ピン6本（概略寸法：直径6mm、長さ13mm）は、ハンドリングヘッド部分では確認できなかった。

図-9 MARICO-2 上部案内管・ハンドリングヘッドの観察画像

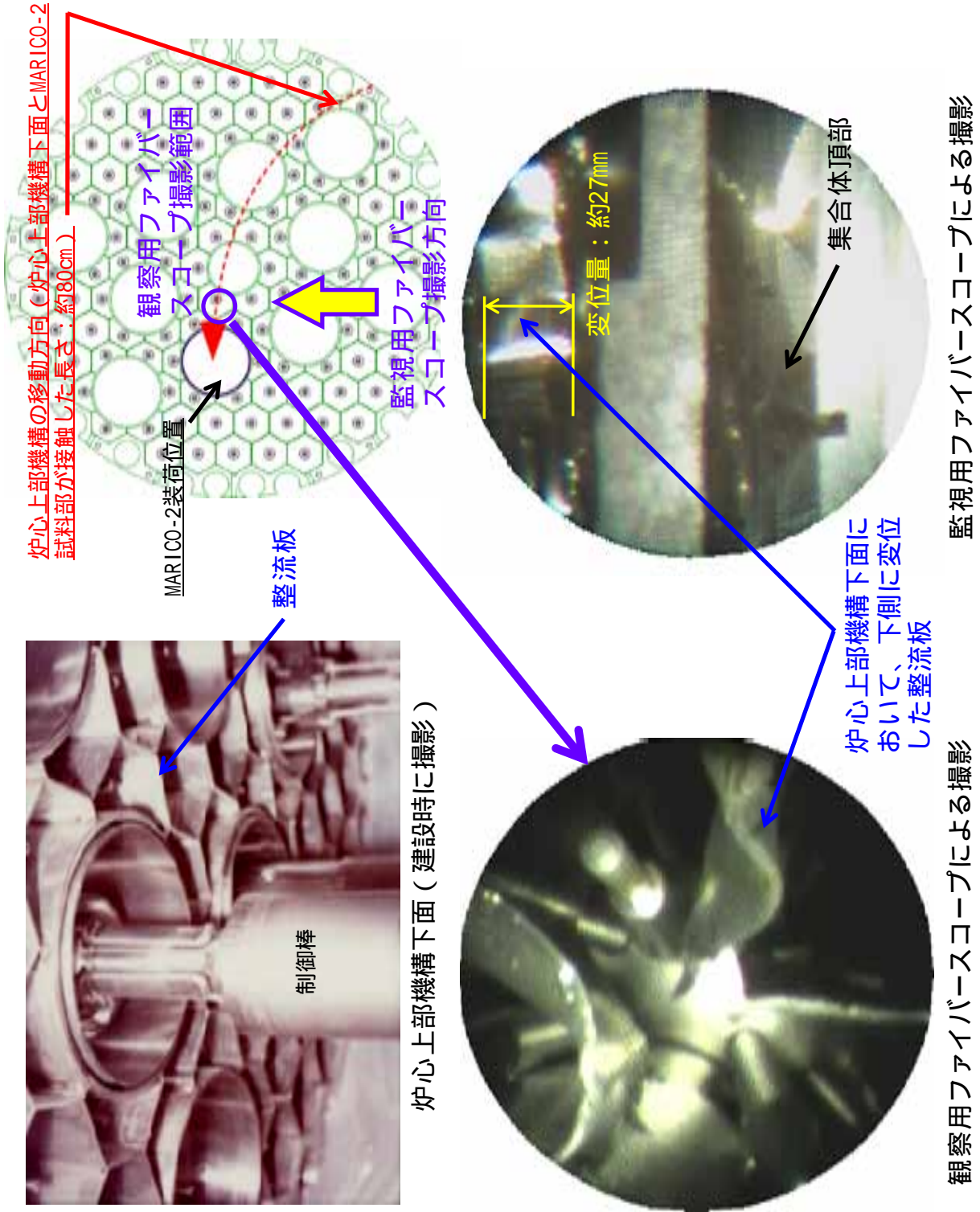


図-10 整流板の観察画像

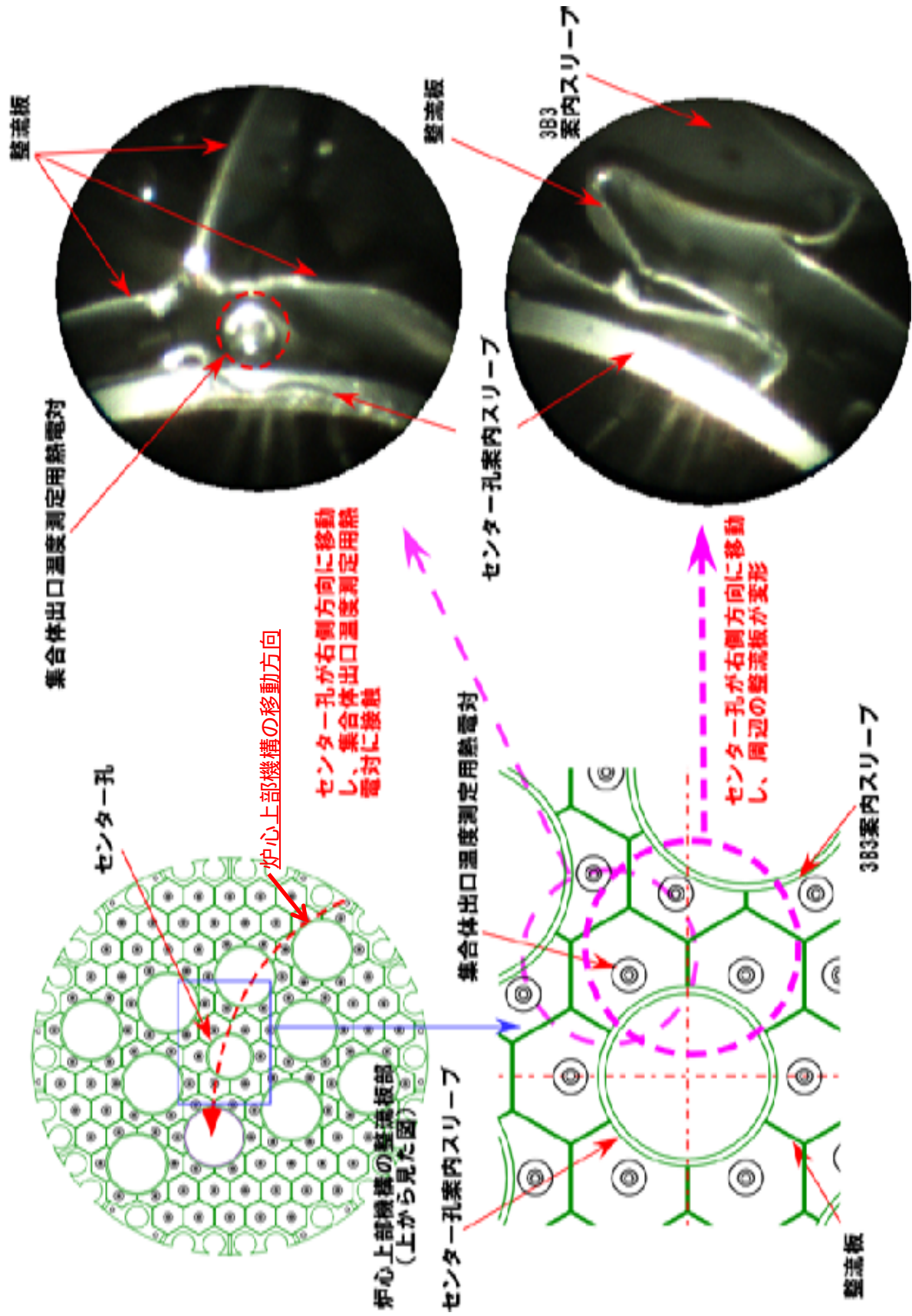


図-11 センター孔案内スリーブ付近の観察画像

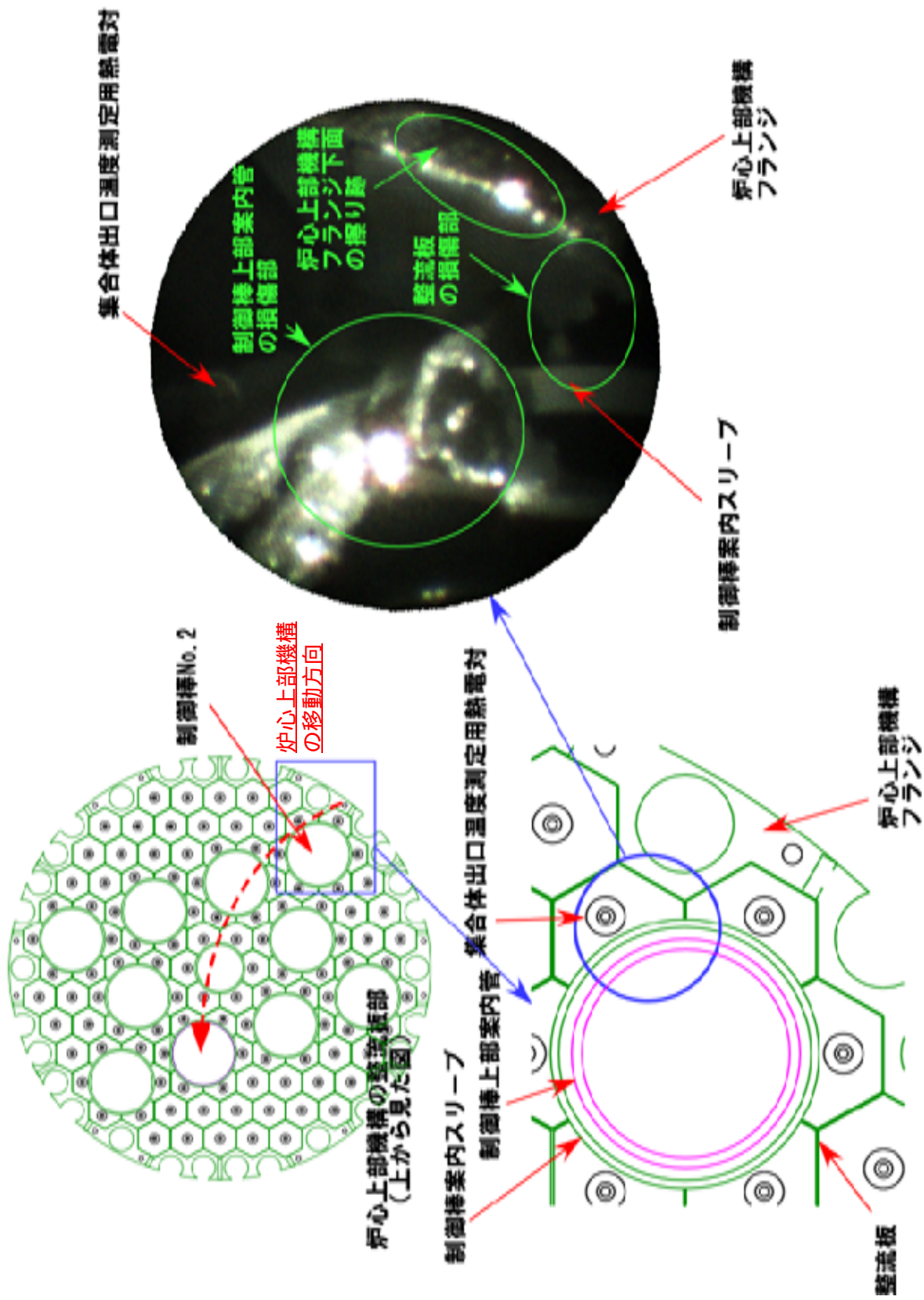


図-12 制御棒 No.2 上部案内管・案内スリーブ付近の観察画像

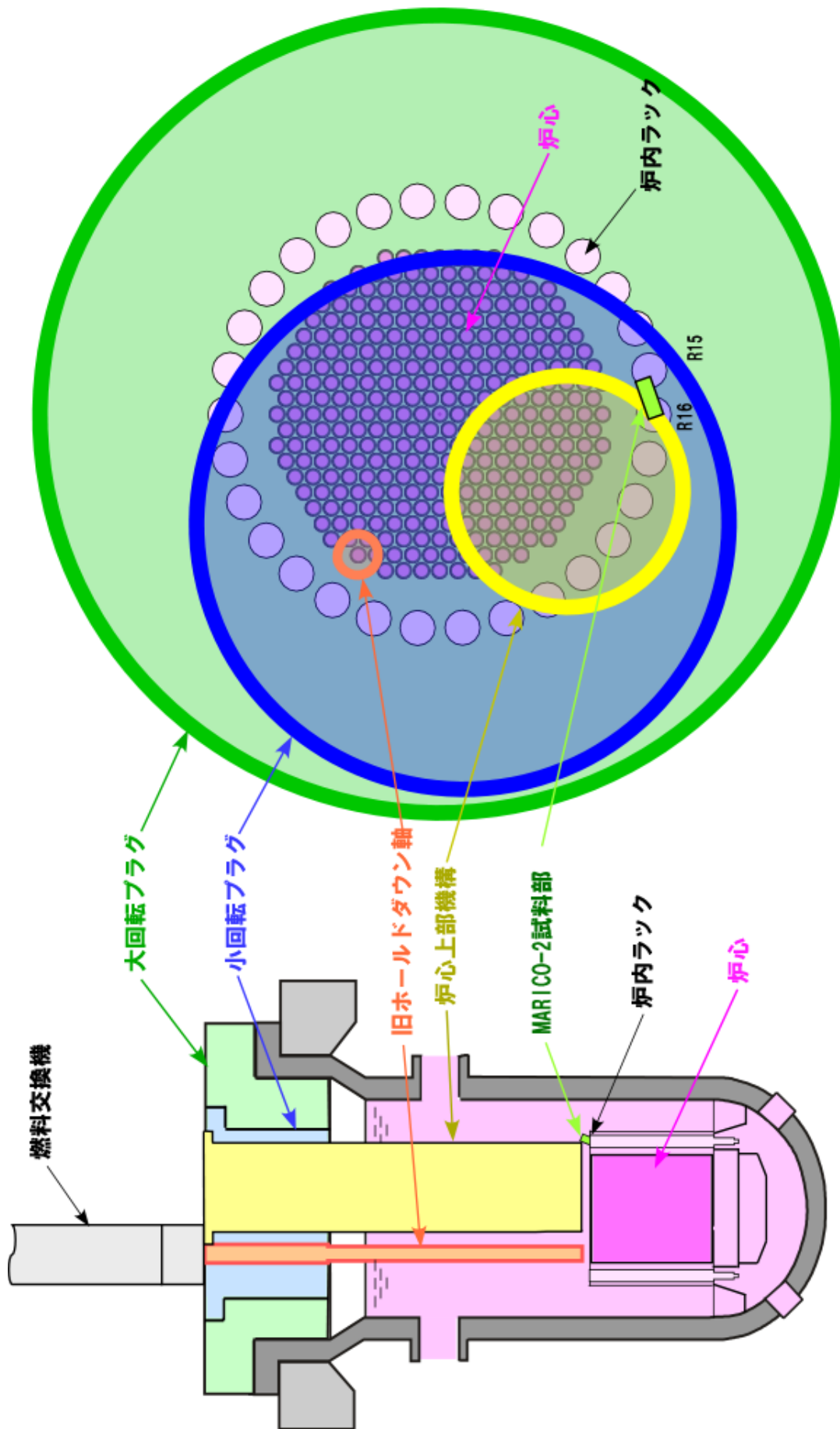


図-13 回転プラグ操作時の MARICO-2 試料部との干渉状態（例）

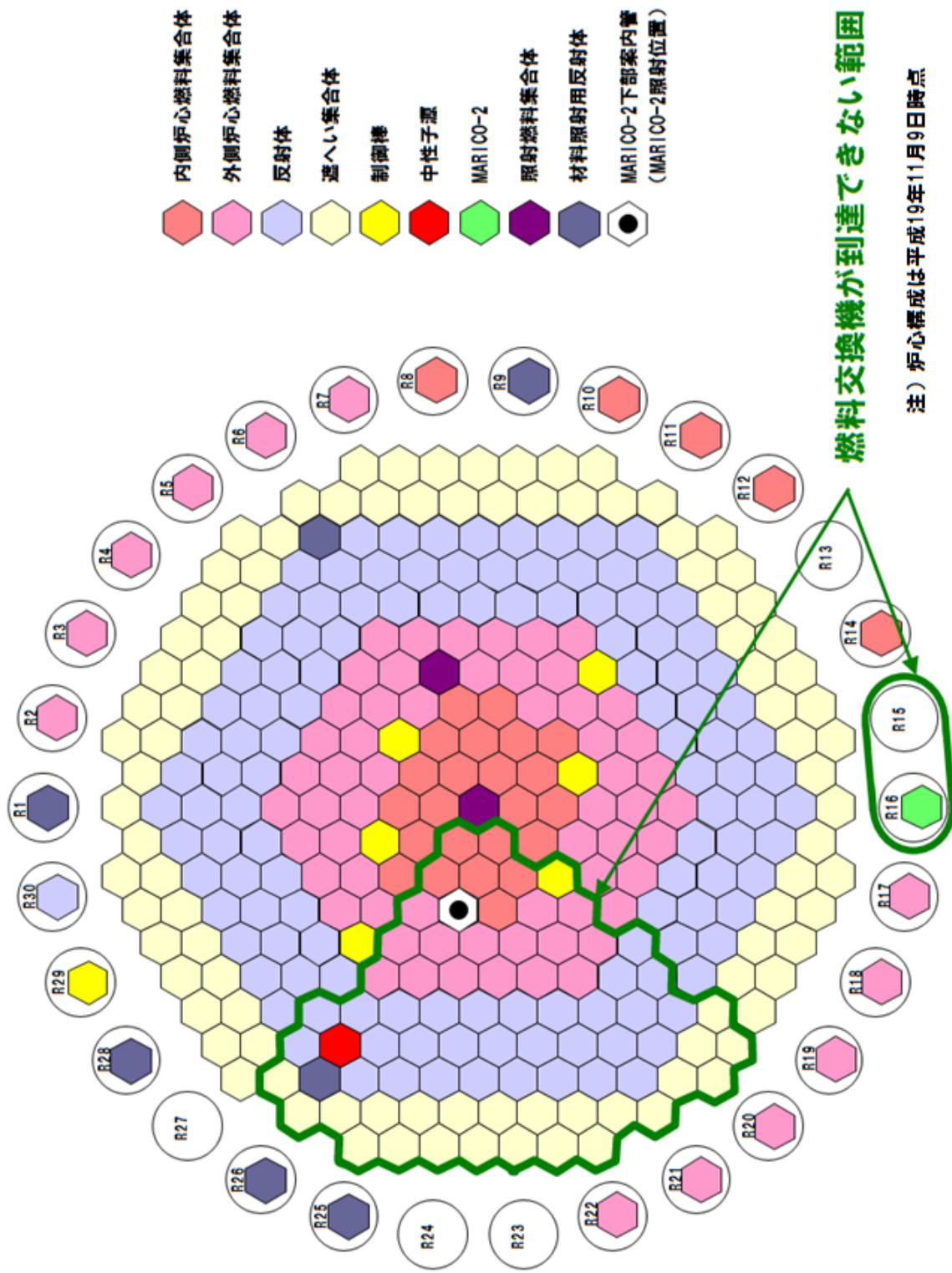
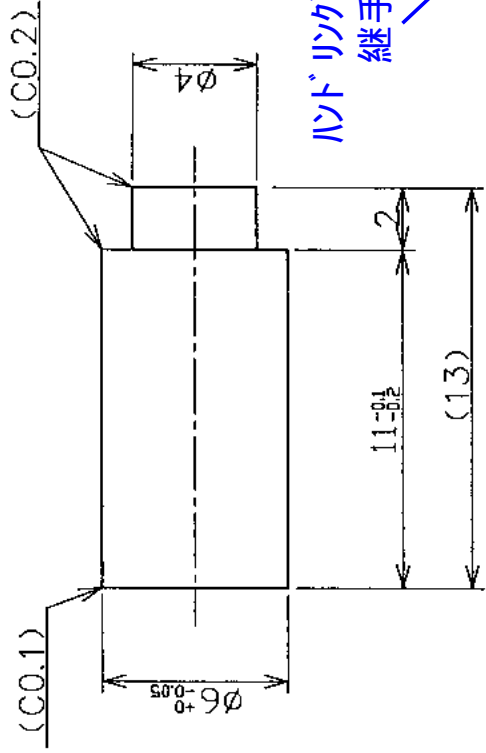
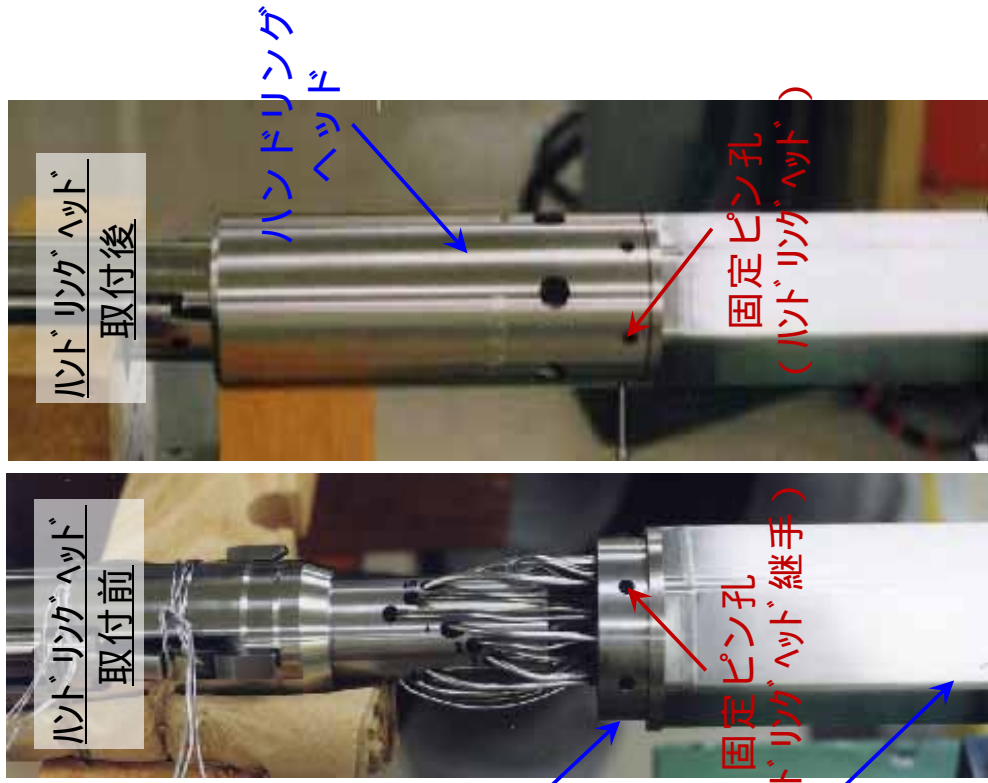


図-14 MARICO-2 試料部との干渉により燃料交換機が到達できない範囲

固定ピン

組立時の写真 (MARICO-1)



ハンドリングヘッド外側より固定ピンを差し込み、ハンドリングヘッド外側（6mm部分）で溶接

図-15 固定ピン構造図

ハンドリングヘッドに固定ピンの残存なし

* 内側：ハンドリングヘッド内側の画像

外側：ハンドリングヘッド外側の画像

脱落した固定ピンの切断等はないと判断

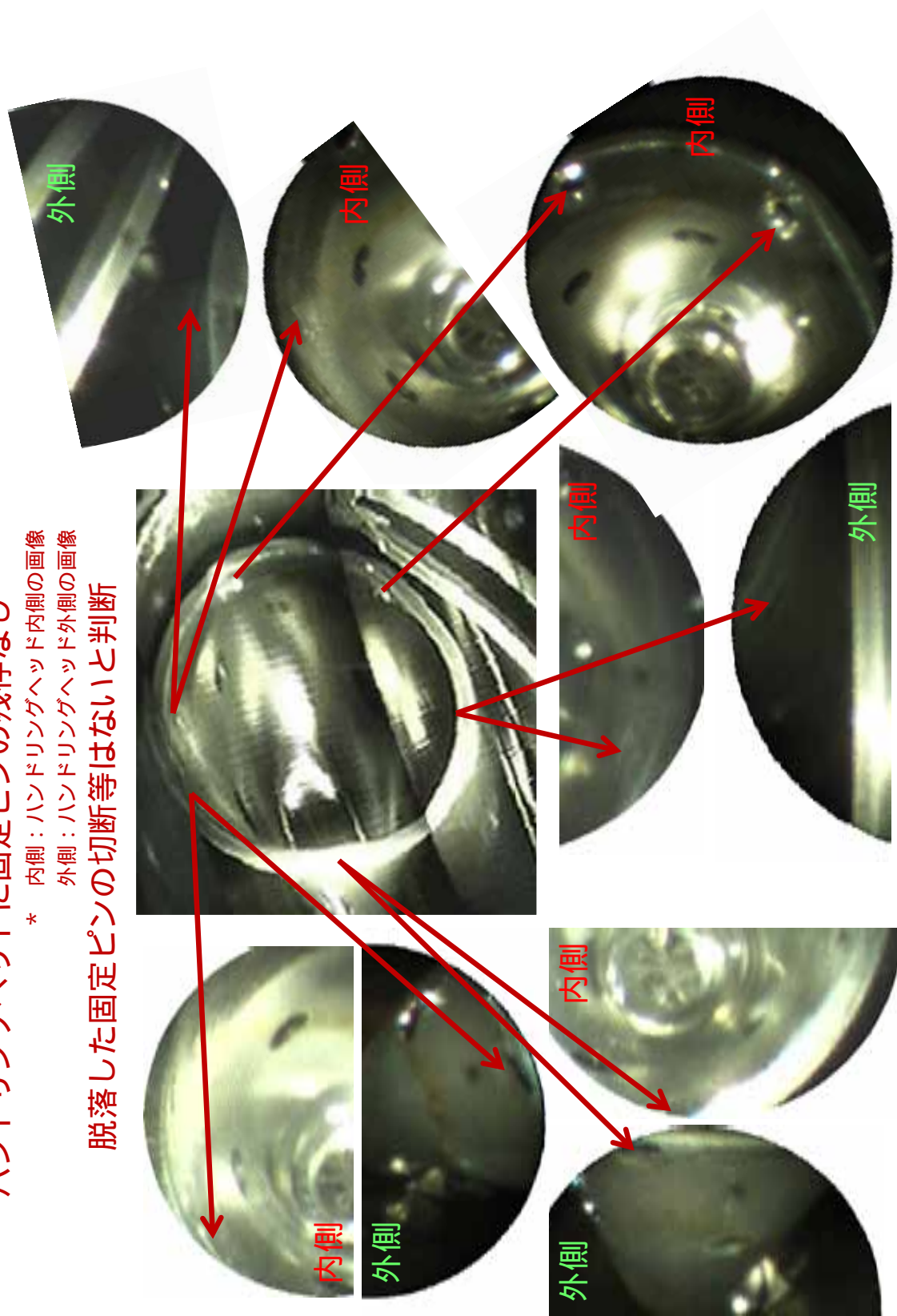
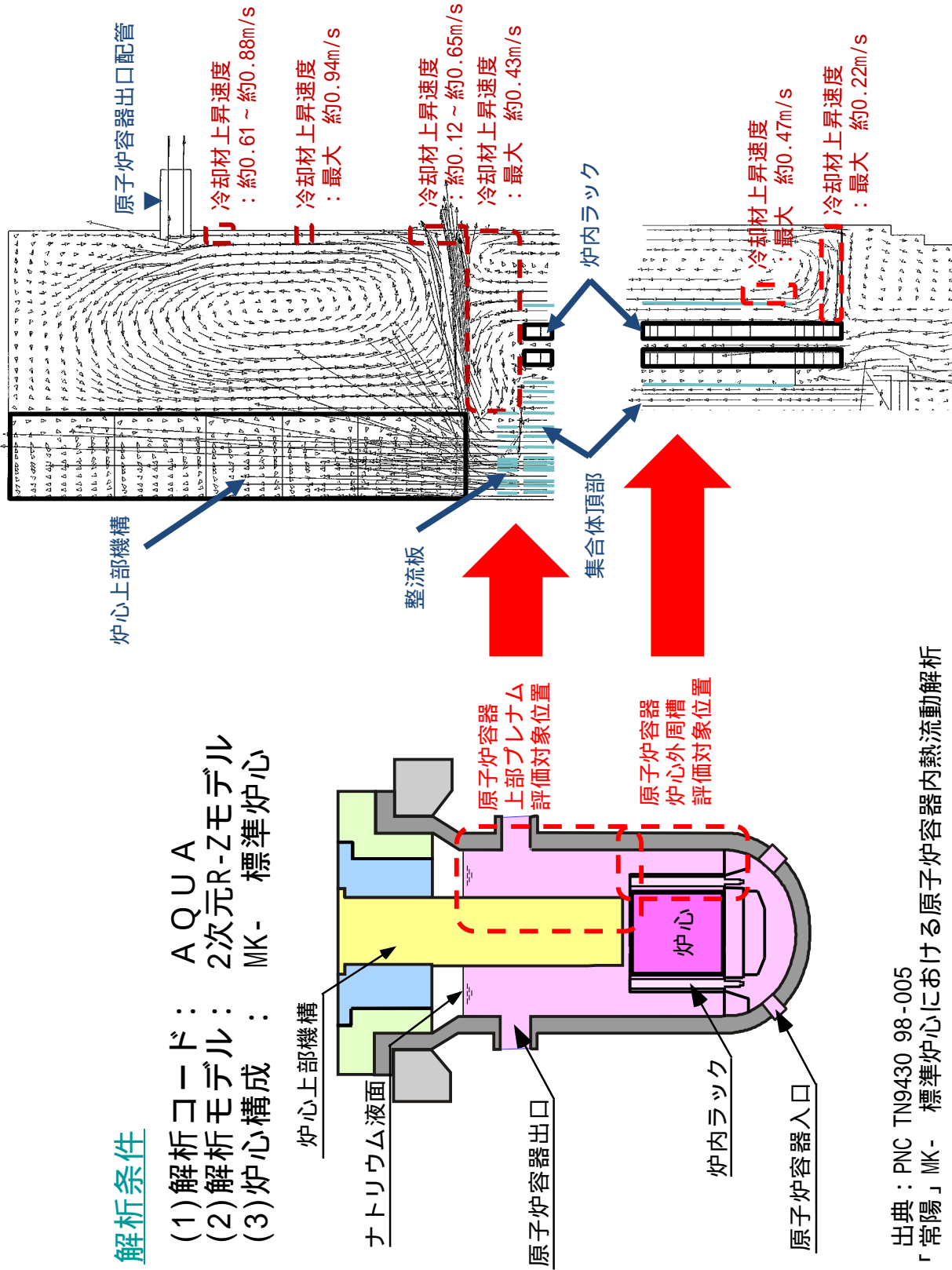


図-16 固定ピン孔の状況

解析条件

- (1) 解析コード： AQUA
- (2) 解析モデル： 2次元R-Zモデル
- (3) 炉心構成： MK-標準炉心



出典：PNC TN9430 98-005
「常陽」MK-標準炉心における原子炉容器内熱流動解析

図-17 AQUA による原子炉容器内 2次元流動解析結果

→ 固定ピンの流入経路

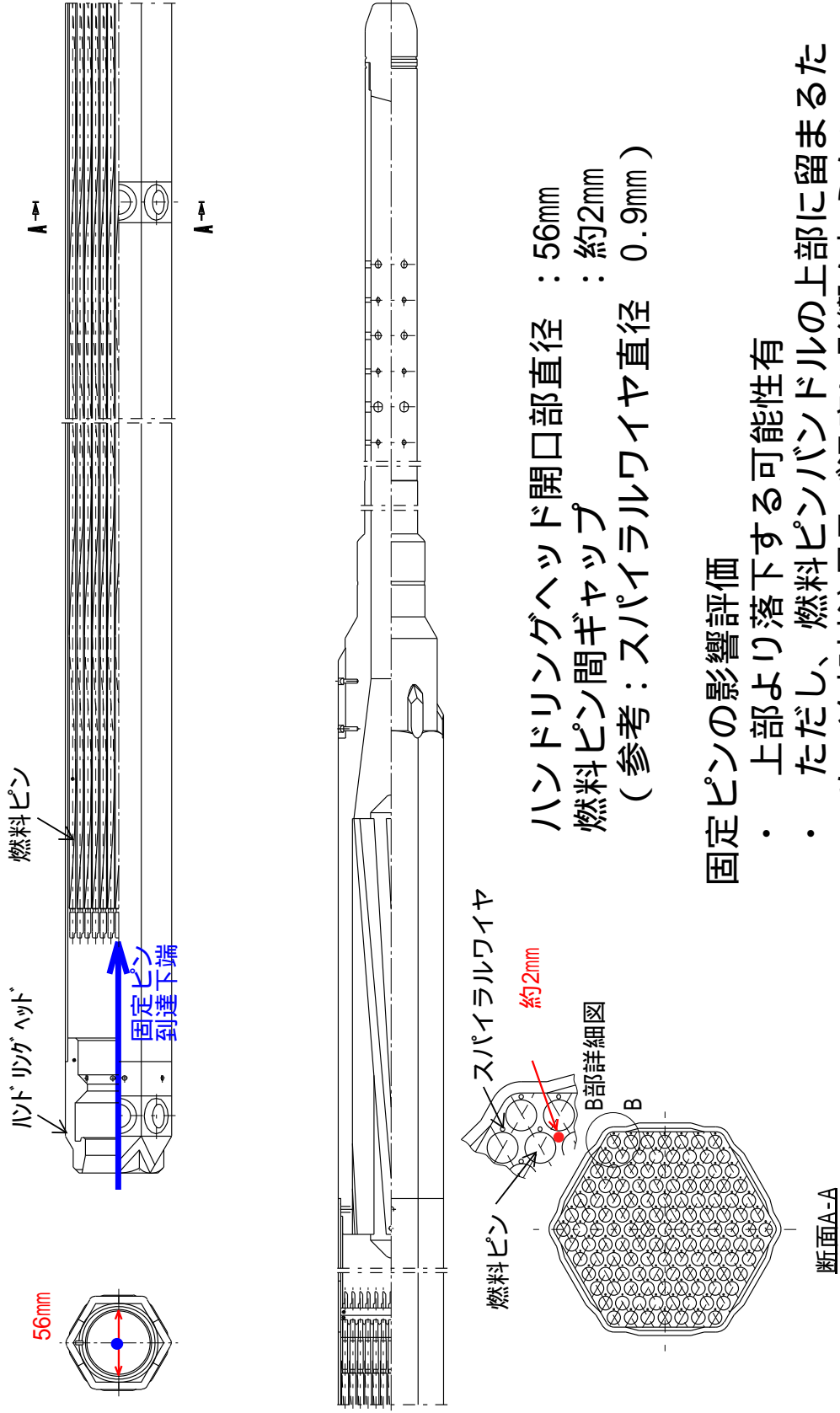
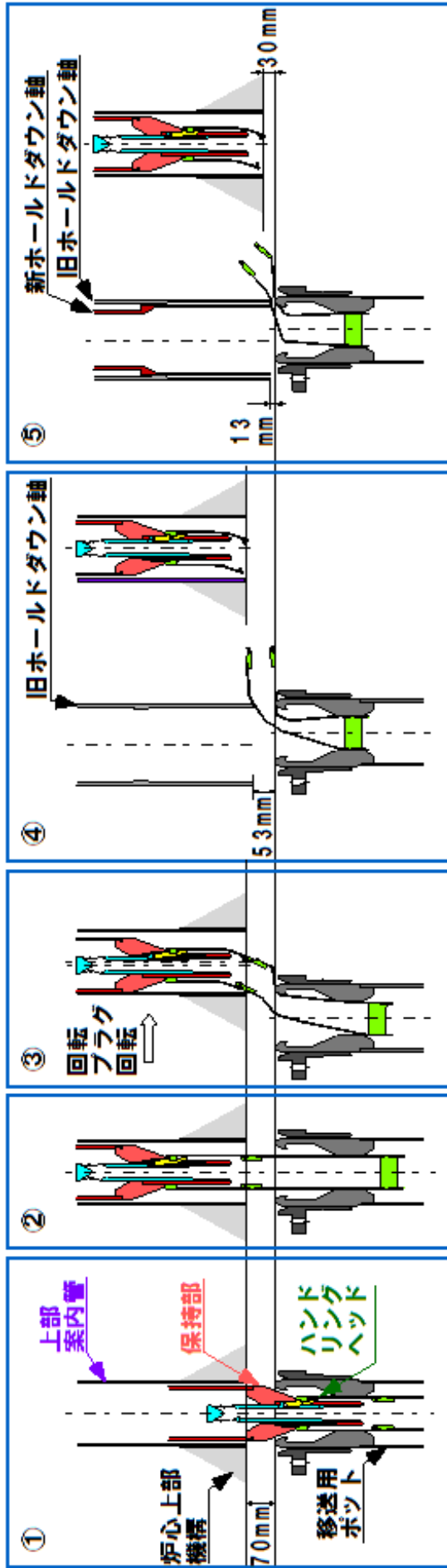


図-18 炉心燃料集合体への固定ピン落下



①② 試料部切離作業終了時に、
試料部が移送用ポット上部へ
引き出される。

③ 回転ブラグの回転
により、吊り上げられ
た試料部の上部が変形
し、ハンドリングヘッド
で切り離れる。

④ 突出・変形した試料部の
上部に、燃料交換機ホル
ドダウン軸が移動する。

⑤ 回転ブラグのジャッキ
ダウンにより、変形し
た試料部と燃料交換機ホル
ドダウン軸が接触する。

図-19 MARICO-2 試料部切離作業時の事象進展

作業の概略

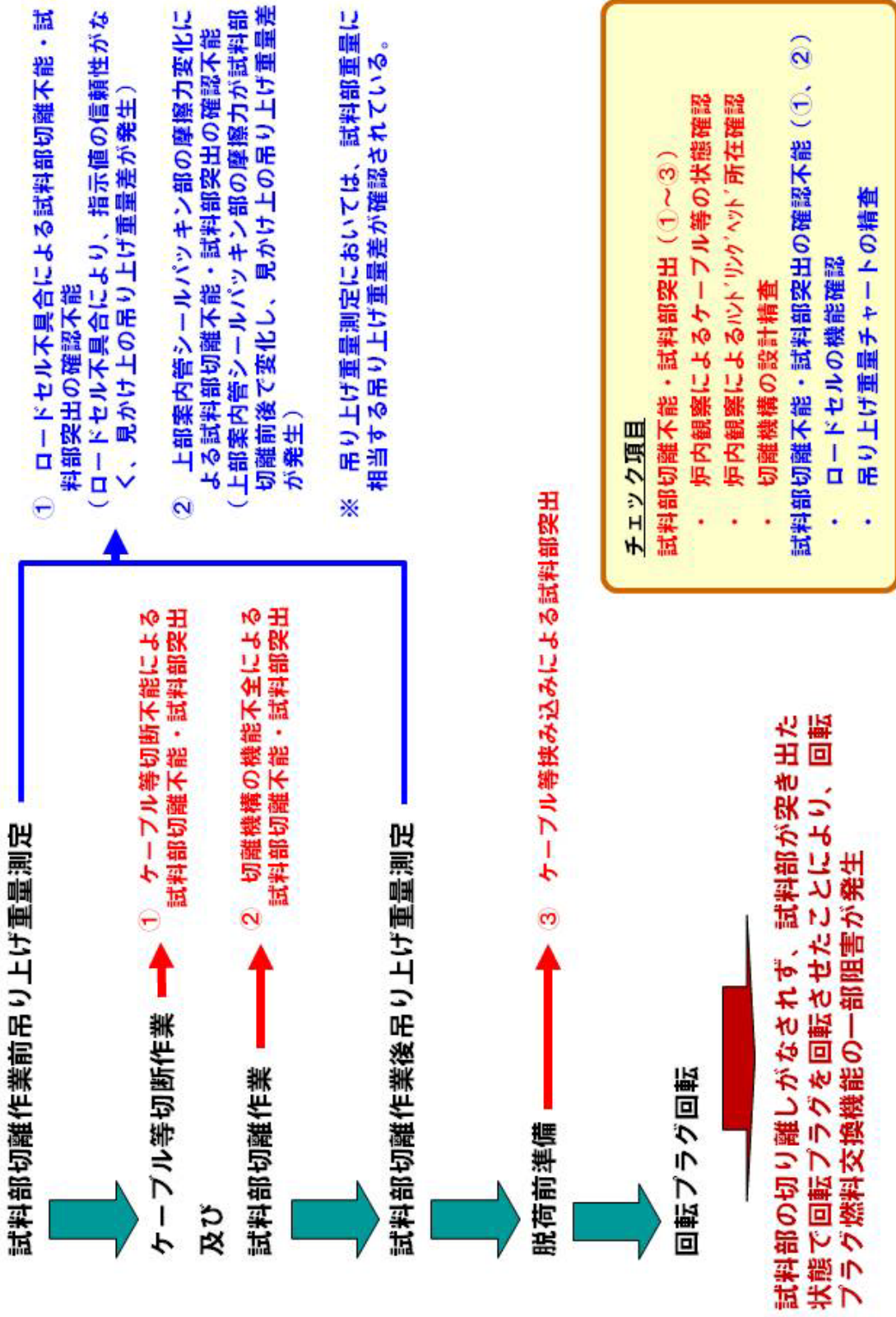


図-20 MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出等に係る検討課題の抽出結果

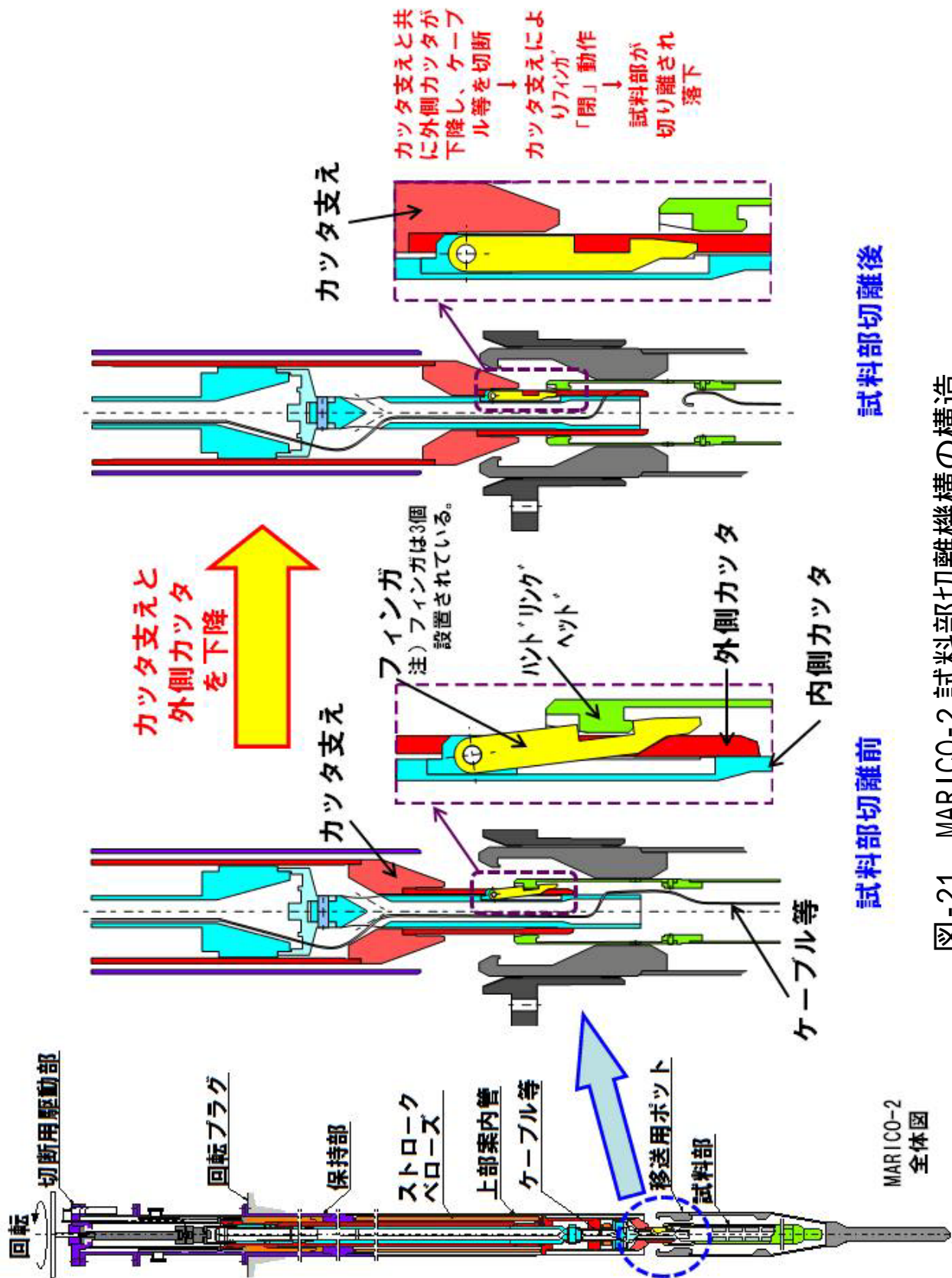


図-21 MARICO-2 試料部切離機構の構造

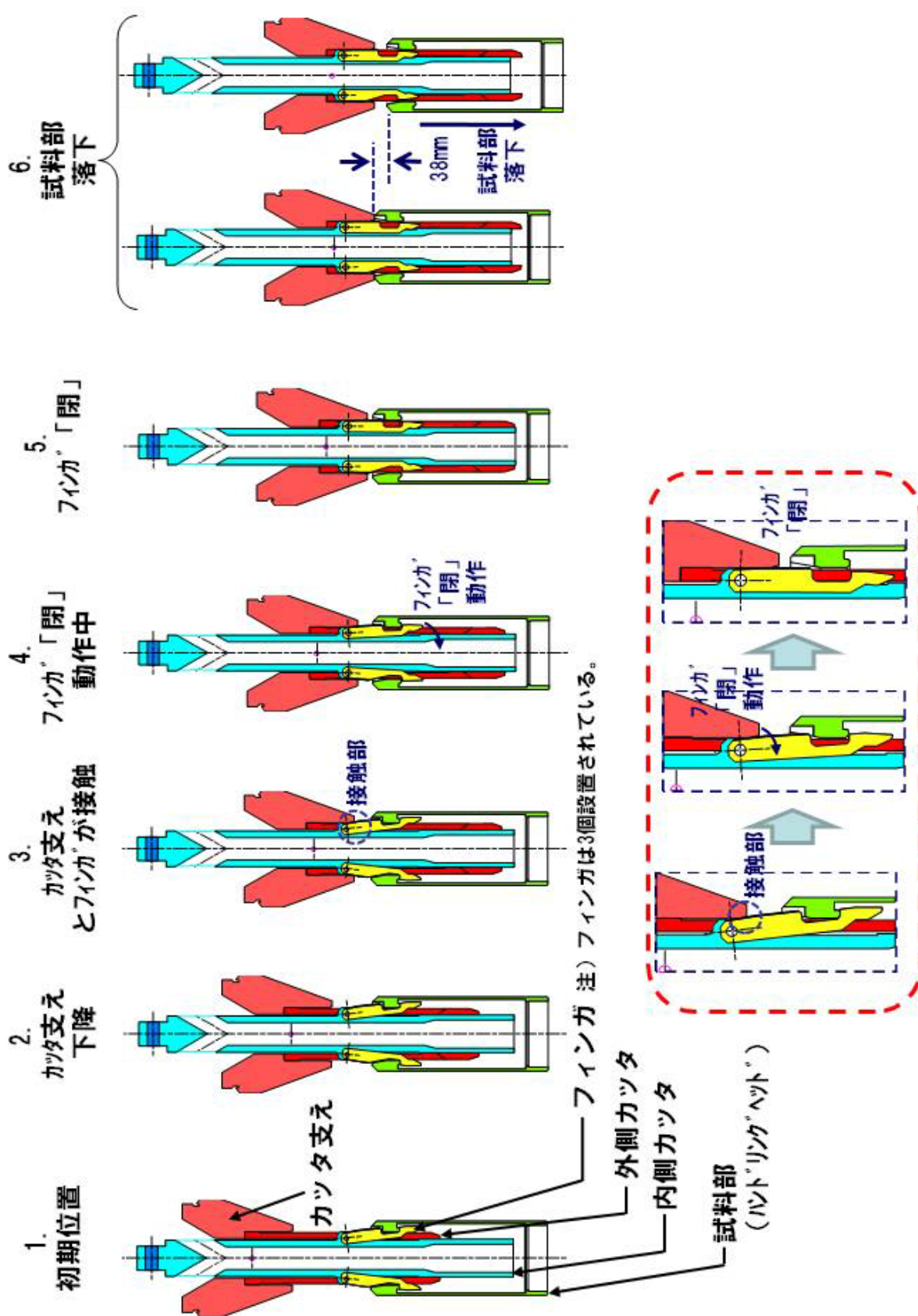


図-22 MARICO-2 試料部切離機構の概要 (正常時の動作)

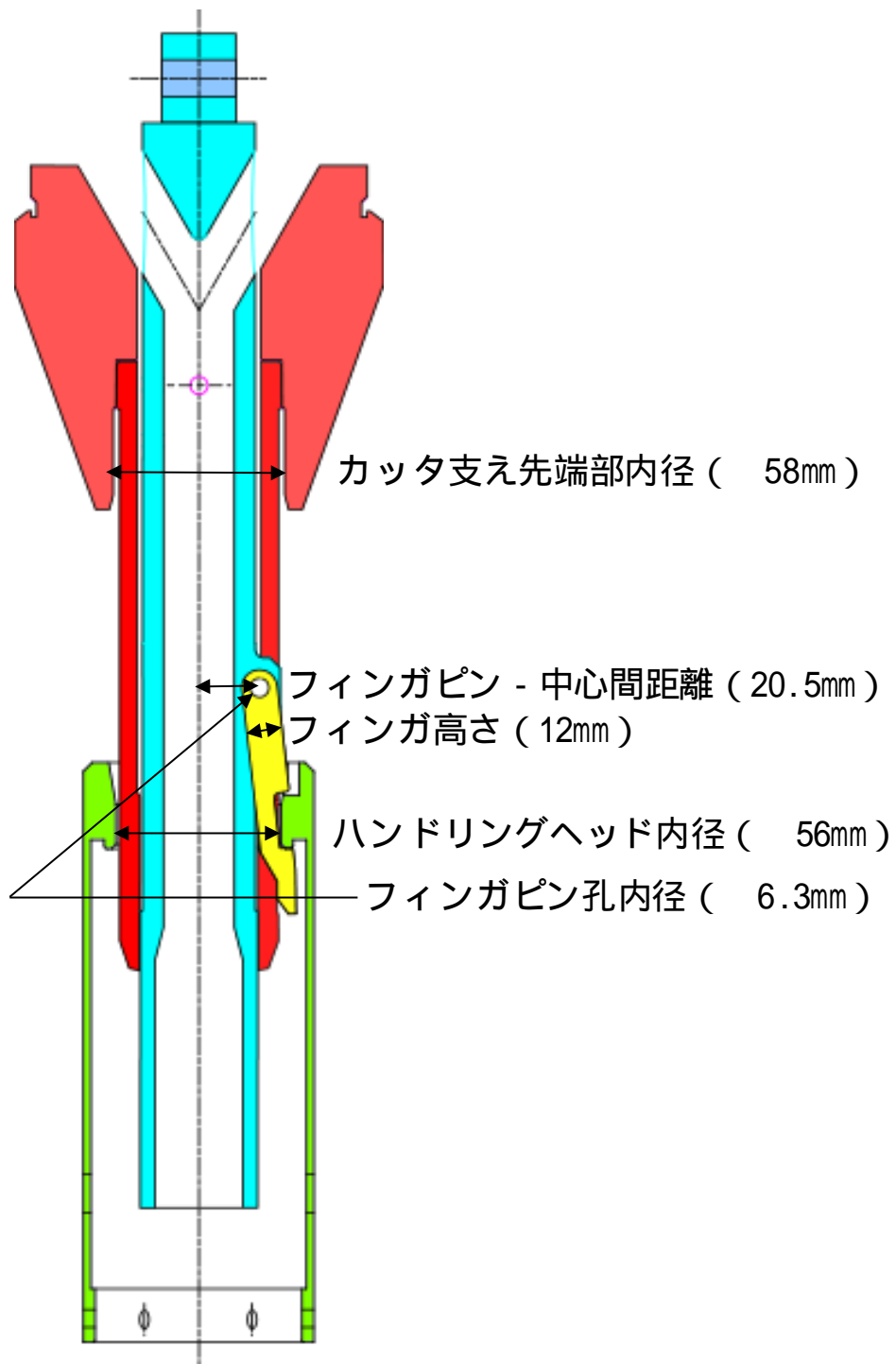


図-23 MARICO-2 試料部切離機構における
 フィンガ動作上重要な項目及び寸法

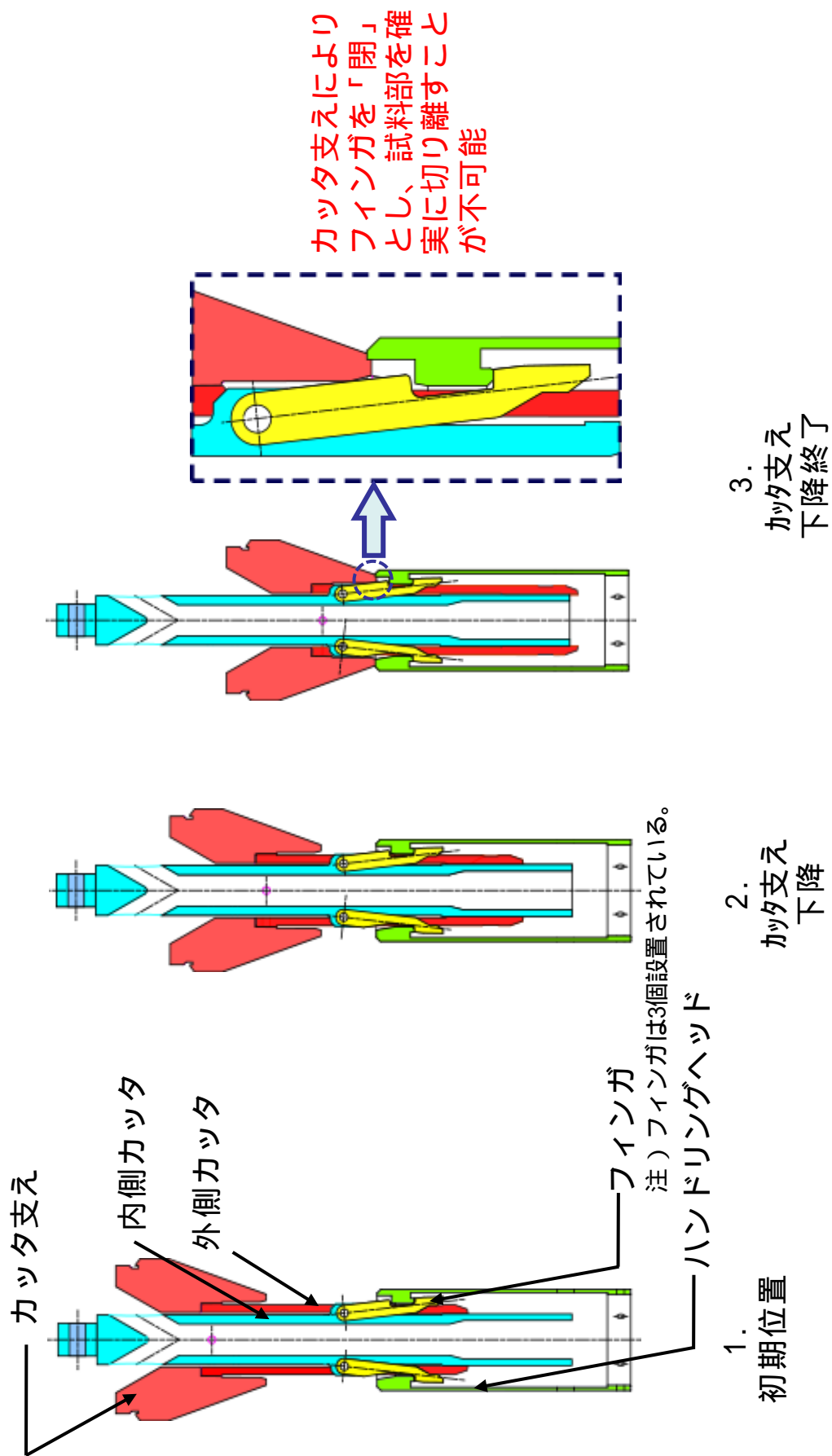


図-24 MARICO-2 試料部切離機構設計精査結果

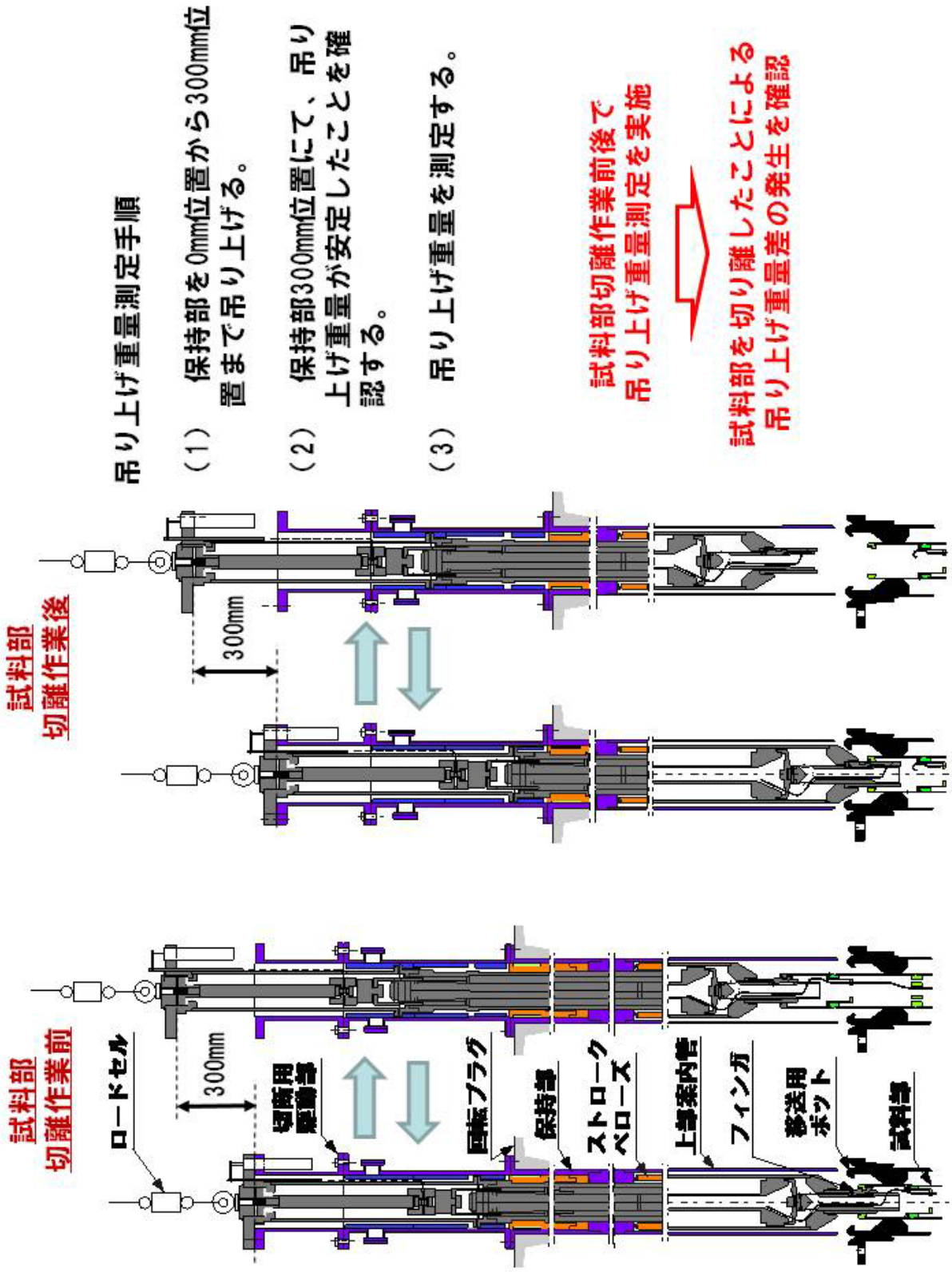
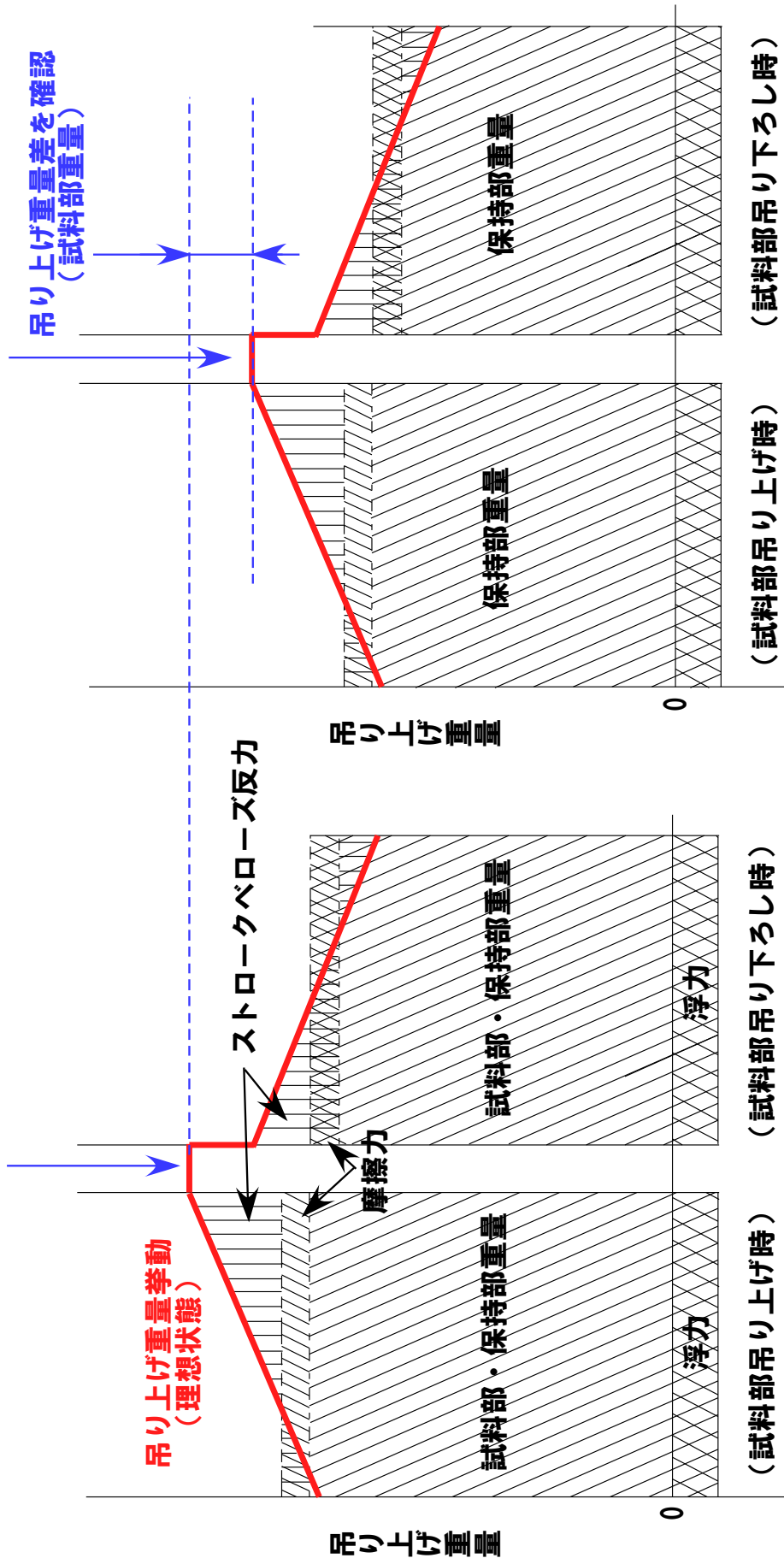


図-25 MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量測定の手順

試料部切離作業前吊り上げ重量測定を実施

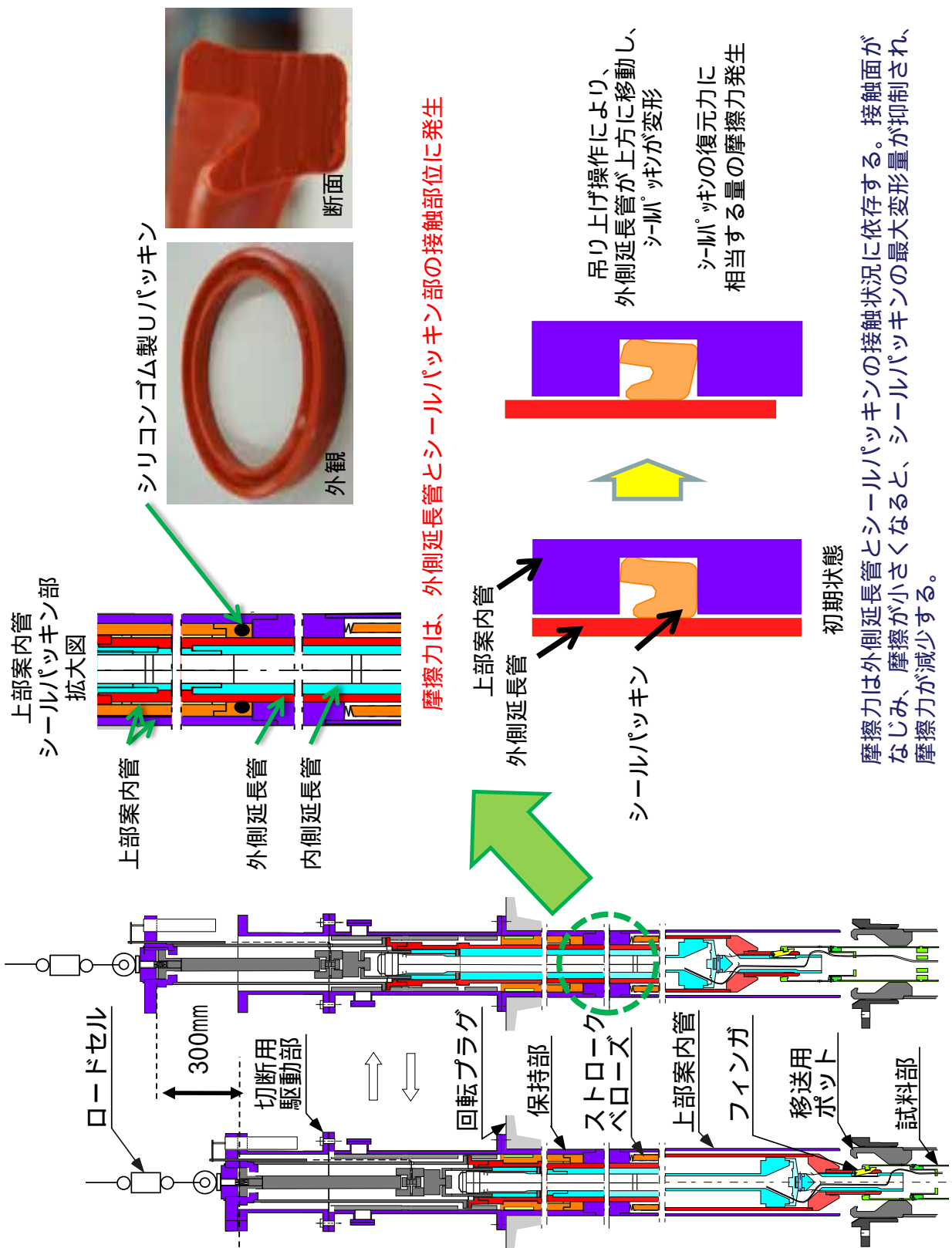
試料部切離作業後吊り上げ重量測定を実施



< 試料部切離作業前 >

< 試料部切離作業後 >

図-26 MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量挙動 (イメージ)



摩擦力は外側延長管とシールパッキンの接触状況に依存する。接触面がなじみ、摩擦が小さくなると、シールパッキンの最大変形量が抑制され、摩擦力が減少する。

図-27 MARICO-2 における摩擦力発生部位

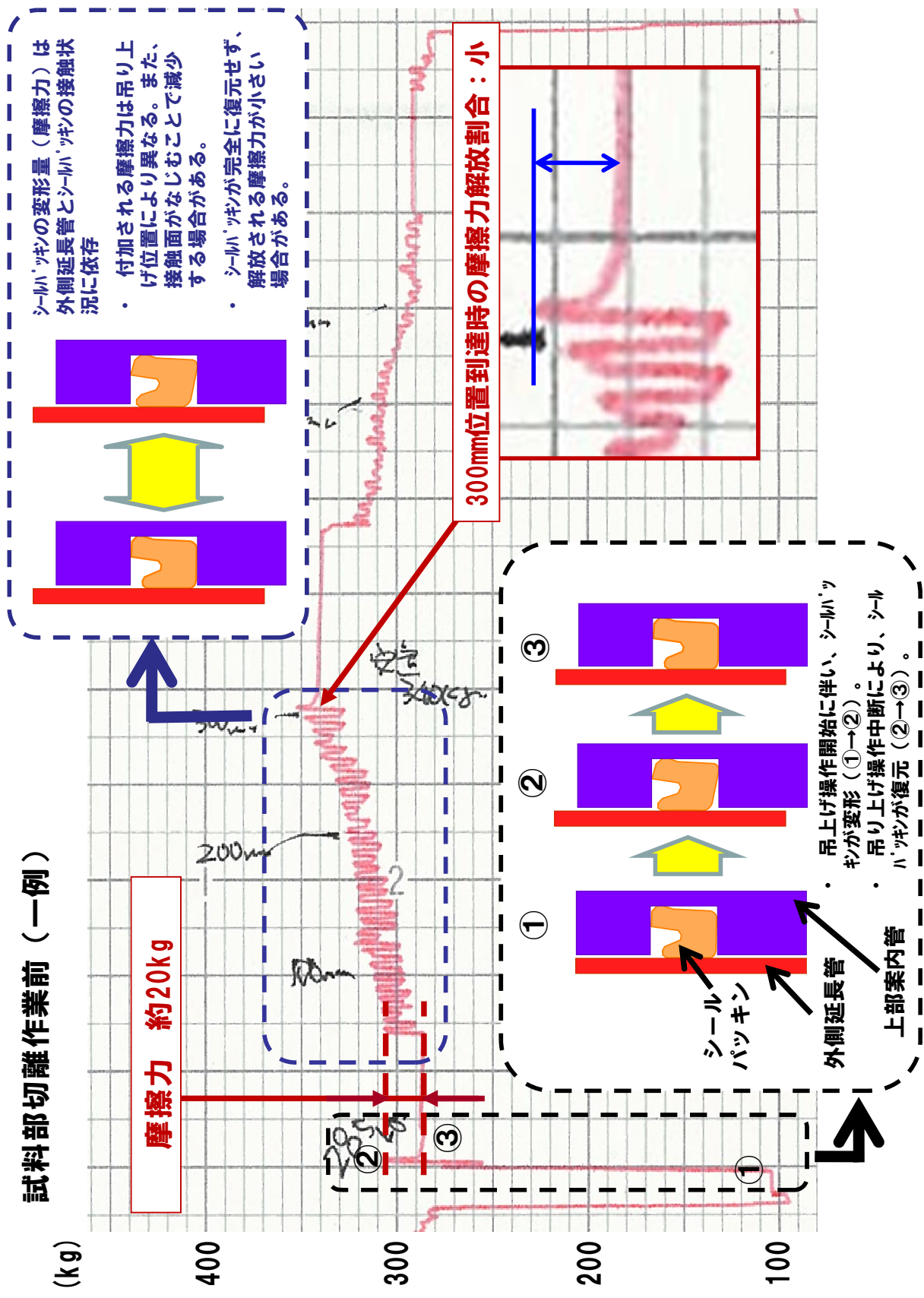


図-28 MARICO-2 試料部切離作業前の吊り上げ重量チャート (一例)

試料部切離作業後（一例）

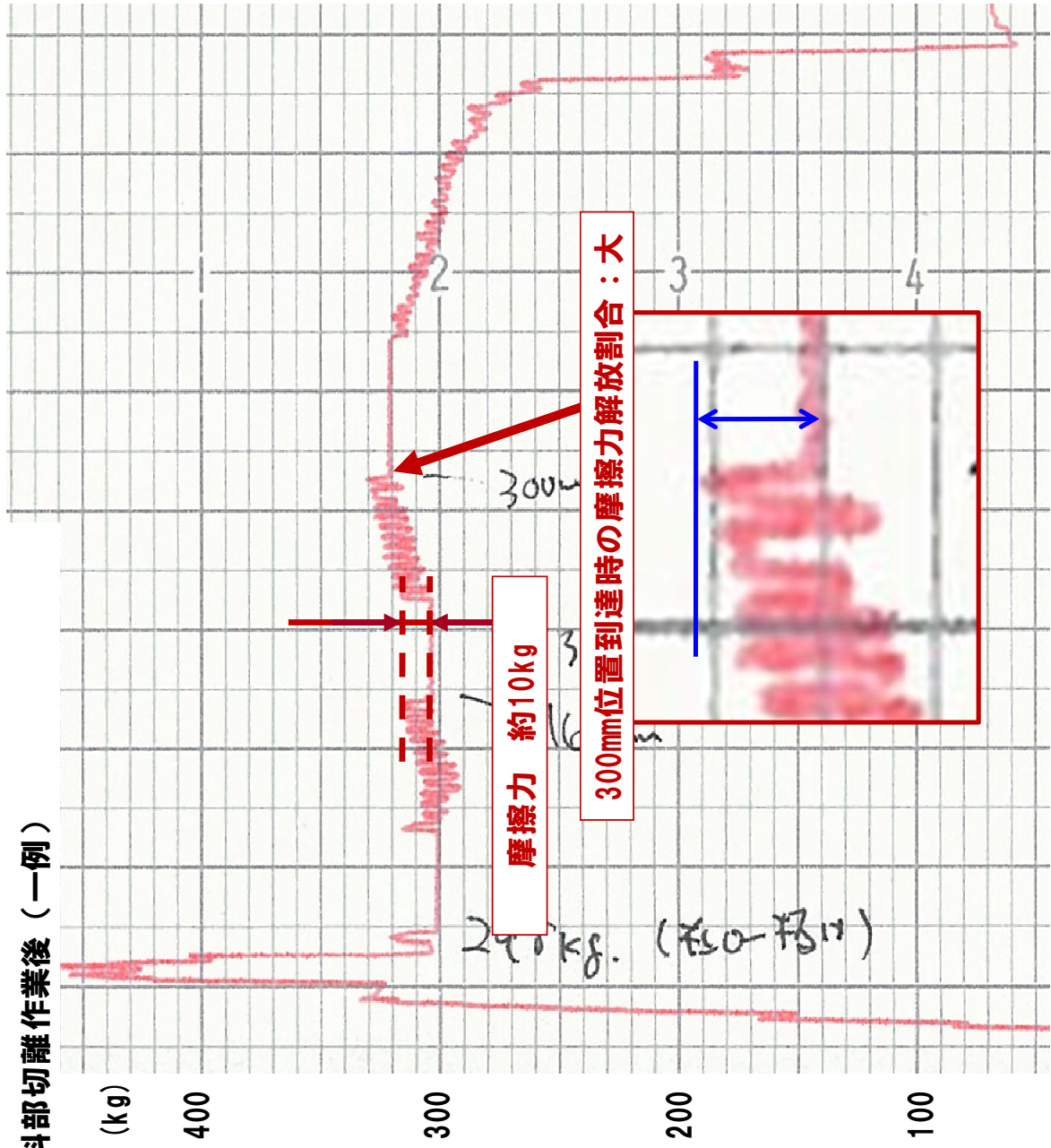


図-29 MARICO-2 試料部切離作業後の吊り上げ重量チャート（一例）

試料部切離作業

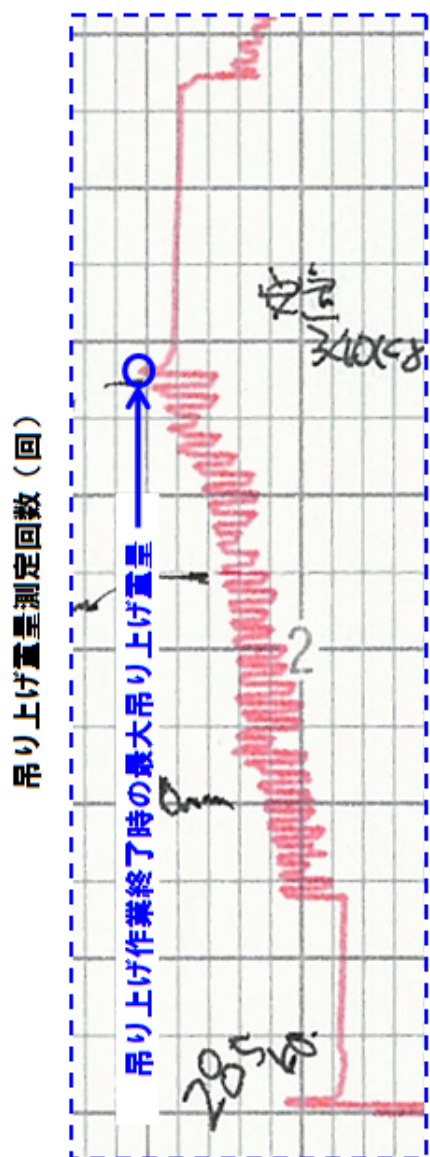
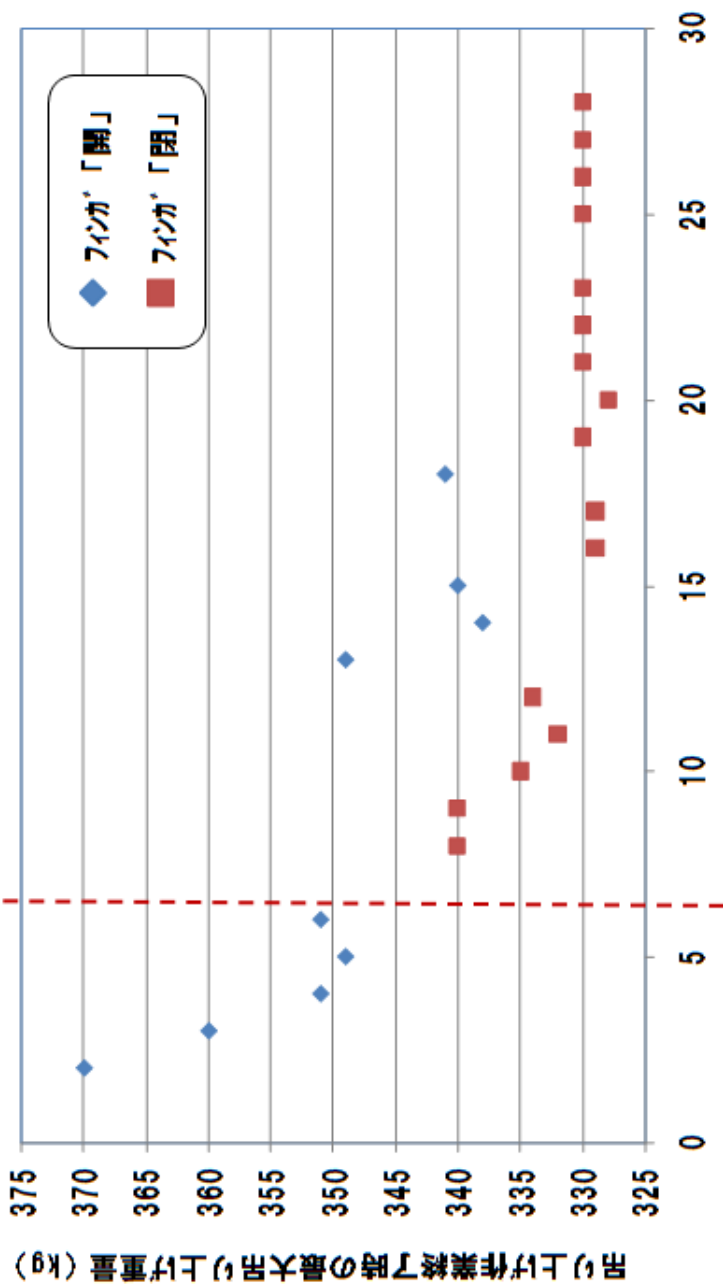


図-30 吊り上げ操作終了時の最大吊り上げ重量の推移


	チェック項目	結果	判定
試料部切離失敗・試料部突出の発生要因			
① ケーブル等切離不能	<ul style="list-style-type: none"> 炉内観察によるケーブル等の状態確認 	<ul style="list-style-type: none"> 試料部においてケーブル等の異常な伸びはない。 保持部のケーブル等切断部においてケーブル等の残存はない。 ⇒ ケーブル等は適切に切断された。  <p>ケーブル等の異常な伸びの発生なし ケーブル等の残存なし</p> <p>試料部(ラツバ管)：図-7参照 ハットリング'ハット'(内面)：図-9参照</p>	無
② 試料部切離機構の機能不全	<ul style="list-style-type: none"> 炉内観察によるハットリング'ハット'所在確認 切離機構の設計精査 	<ul style="list-style-type: none"> 図面寸法では、試料部を確実に切り離すことが不可能である。 ・ハンドリングクヘッドが保持部と接続された状態で存在している。 ⇒ 切離機構の機能不全が発生した。 	有
③ ケーブル等挟み込み	<ul style="list-style-type: none"> 炉内観察によるケーブル等の状態確認 炉内観察によるハットリング'ハット'所在確認 	<ul style="list-style-type: none"> 試料部においてケーブル等の異常な伸びはない。 保持部のケーブル等切断部においてケーブル等の残存はない。 ・ハンドリングクヘッドが保持部と接続された状態で存在している。 ⇒ ケーブル等の挟み込みはなかった。 	無
試料部切離不能・試料部突出の発生要因			
① ロードセル不具合	<ul style="list-style-type: none"> ロードセルの機能確認 	<ul style="list-style-type: none"> ・負荷試験により、妥当な指示値が得られた。 ⇒ ロードセルに不具合・異常はなかった。 	無
② 上部案内管シール'ッキング部の摩擦力変化	<ul style="list-style-type: none"> 吊り上げ重量チャートの精査 	<ul style="list-style-type: none"> ・発生していた摩擦力が、試料部の重量と同レベルであった。 ・切離作業前吊り上げ重量測定にあっては摩擦力がほとんど解放されなかった。一方、切離作業後吊り上げ重量測定にあっては摩擦力がほぼ解放された。 ⇒ 切離作業前後で吊り上げ重量差が見かけ上発生した。 	有

図-31 MARICO-2 試料部切離不能・試料部突出等に係る要因分析結果

参考資料リスト

- 参考資料 1 回転プラグ燃料交換機能の一部障害に係る調査等の経緯
- 参考資料 2 放射線測定結果（主排気筒モニタリング結果）
- 参考資料 3 環境モニタリング結果
- 参考資料 4 炉心上部機構の外観（建設時に撮影）
- 参考資料 5 炉心上部機構下面の観察
- 参考資料 6 炉内観察結果の概況
- 参考資料 7 炉内観察時の作業状況
- 参考資料 8 固定ピンの脱落に係る推定プロセス
- 参考資料 9 固定ピンを浮き上がらせるために必要な最小冷却材上昇速度の算出
- 参考資料 10 最小冷却材上昇速度の温度依存性
- 参考資料 11 AQUA による原子炉容器内 3 次元流動解析結果
- 参考資料 12 集合体等（炉心燃料集合体以外）の上部より
固定ピンが落下した場合の影響
- 参考資料 13 固定ピンが制御棒等の要素バンドル部を一部閉塞した場合の温度評価
- 参考資料 14 固定ピンが制御棒等の要素バンドル部に留まった場合の機械的影響
- 参考資料 15 MARICO-2 試料部切離作業手順
- 参考資料 16 MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量測定結果
- 参考資料 17 MARICO-1 で試料部の切り離しに成功し、MARICO-2 で試料部の切り離し
ができなかった原因



図 1-1 回転プラグ燃料交換機能の一部障害に係る調査等の経緯

放射線測定結果（主排気筒モニタリング結果）

1. 排気モニタの種類

- ┆ 排気口 ダストモニタ : SM-1
- ┆ 排気口 ()ダストモニタ : SM-2
- ┆ 排気口 ダストモニタ : SM-3
- ┆ 排気口 ()ガスモニタ : GM-1
- ┆ 排気口 ガスモニタ : GM-2

2. 排気モニタリング期間

平成 19 年 5 月 29 日～6 月 3 日、6 月 10 日～6 月 13 日

3. 排気モニタリング結果

高速実験炉「常陽」主排気筒における排気口ダスト・ガスモニタ測定値の推移を図 2-1 に示す。この結果、上記モニタリング期間において、測定値は通常の変動幅の範囲内であった。

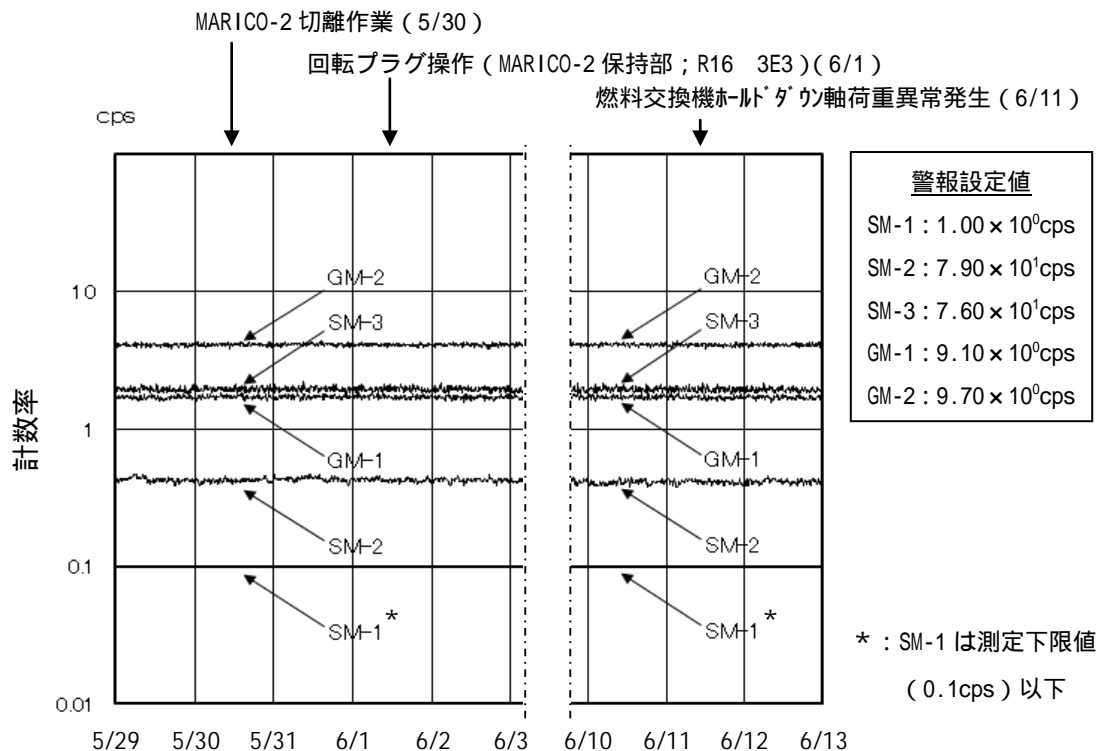


図 2-1 排気口ダスト・ガスモニタ測定値の推移

環境モニタリング結果

1. モニタリング結果の概要

モニタリングポストの測定結果に異常はなかった。

2. モニタリング結果の詳細

周辺監視区域境界付近及び施設近傍のモニタリングポストにおける平成 19 年 5 月 29 日から 6 月 3 日及び 6 月 10 日から 6 月 13 日までの空間線量率の推移を図 3-1 に示す（モニタリングポスト設置地点：図 3-2 参照）。測定結果は、降雨に伴う天然核種の影響による上昇が見られるが、27～47 nGy/h（1 時間平均値）の範囲で通常値と同レベルであった。（茨城県東海地区環境放射線監視委員会の定める平常の変動幅の上限(100 nGy/h)以下）

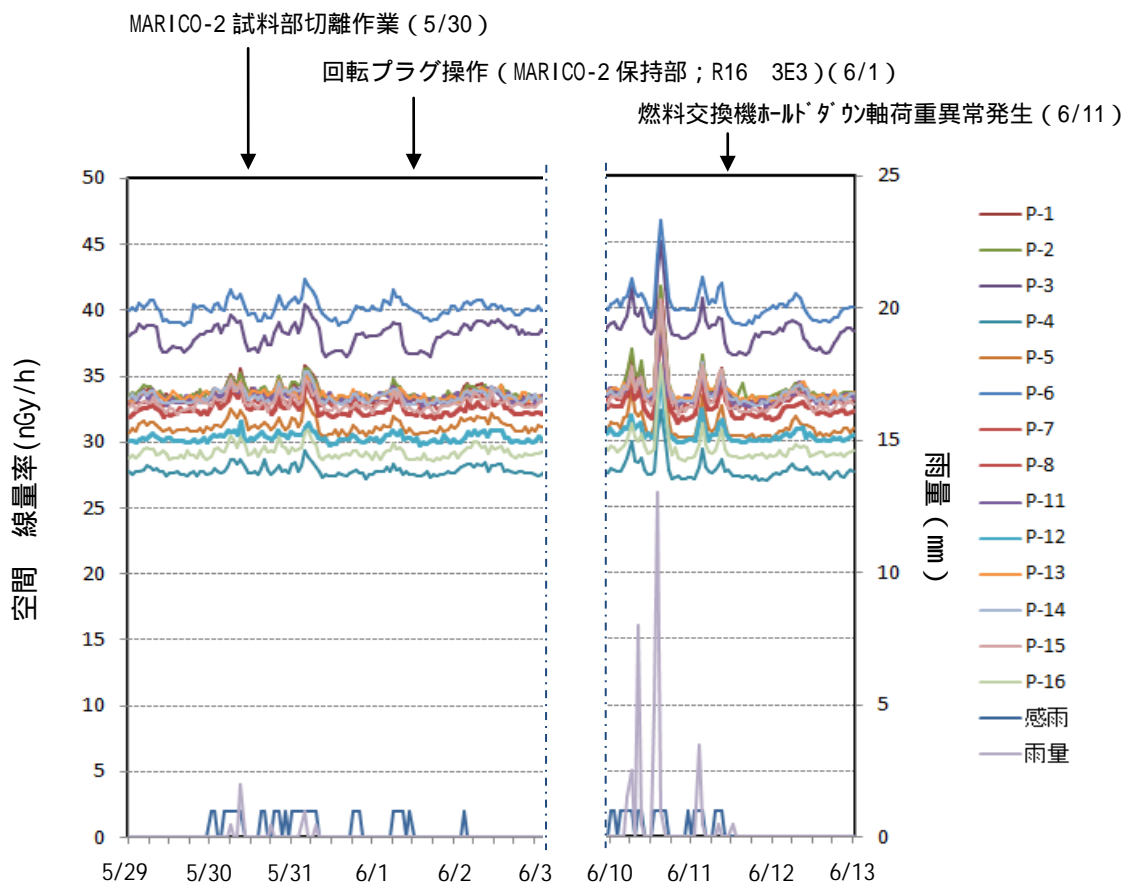


図 3-1 モニタリングポストデータ

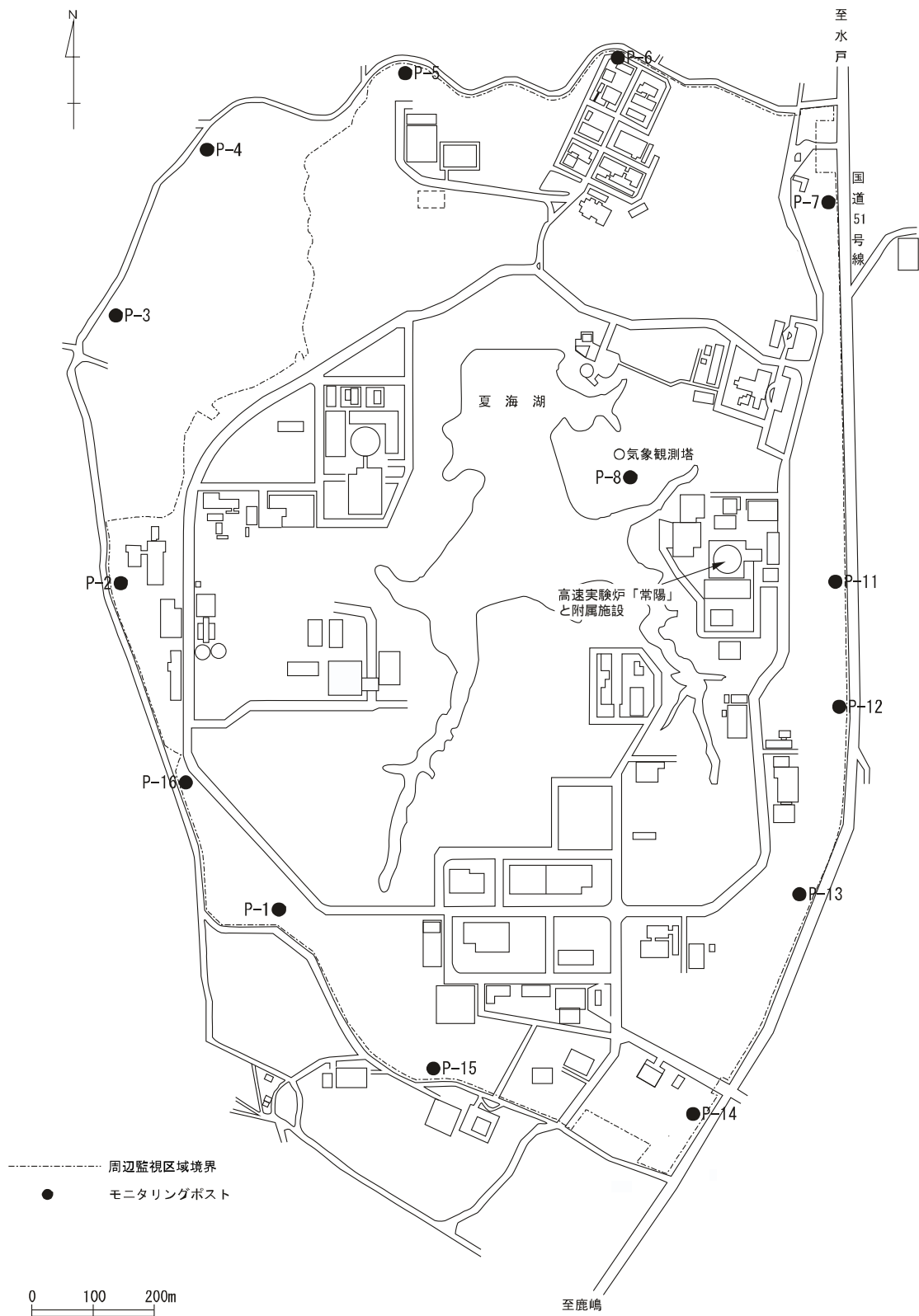
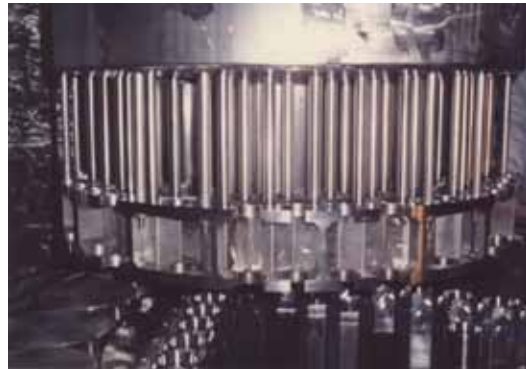


図 3-2 モニタリングポスト設置地点

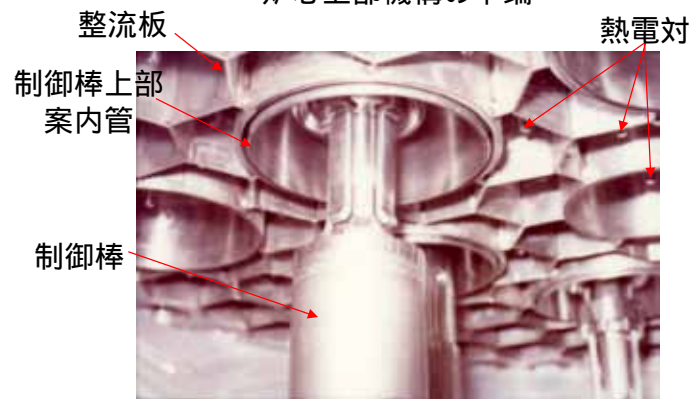
全長：約6.3m
外径：約1.0m



炉心上部機構



炉心上部機構の下端



炉心上部機構の下面



炉心上部機構
の下面（全体）

整流板の厚さ：0.8mm

図 4-1 炉心上部機構の外観（建設時に撮影）

炉心上部機構下面の観察

1. 観察装置

炉心上部機構下面の状態を、三角形の影を含めて詳細に確認することを目的として、炉心上部機構を下面から上方に観察する装置を新規に製作した。炉心上部機構を下面から観察するためには、直径約 110mm の炉内検査孔 (B) から観察装置を原子炉容器内に挿入し、炉心上部機構下面と集合体頂部の間隙 (約 70mm) に観察装置を挿入する必要がある。炉心上部機構下面観察装置は、観察用ファイバースコープを装填した先端屈折部を有し、当該部を原子炉容器内で L 字型に折り曲げ、炉心上部機構下面と集合体頂部の間隙に挿入する構造となっている。また、先端屈折部を挿入する際に障害物等がないことを確認するため、監視用のファイバースコープを有している。

なお、炉心上部機構下面の観察に先立って、炉内設備等に影響を与えることなく、炉心上部機構下面観察装置の屈折操作、炉心上部機構と集合体頂部の間隙への挿入操作を遠隔で行えることを確認するため、炉心上部機構下面と集合体頂部等の模擬体を製作し、炉外動作試験を実施した (図 5-1 参照)。

2. 観察方法

炉心上部機構下面観察装置先端屈折部上面から炉心上部機構下面までの距離が約 40mm と近接しており、1 回の観察で撮影できる範囲が狭いため、直径約 1m の炉心上部機構下面を 57 領域に分割し、それぞれの領域で先端屈折部の位置を調整した上で、回転プラグを操作して炉心上部機構を移動させながら撮影を行った (図 5-2 参照)。原子炉容器内の線等の影響により、観察中にファイバースコープの画質が低下することから、ファイバースコープを交換して観察を 2 回実施した。

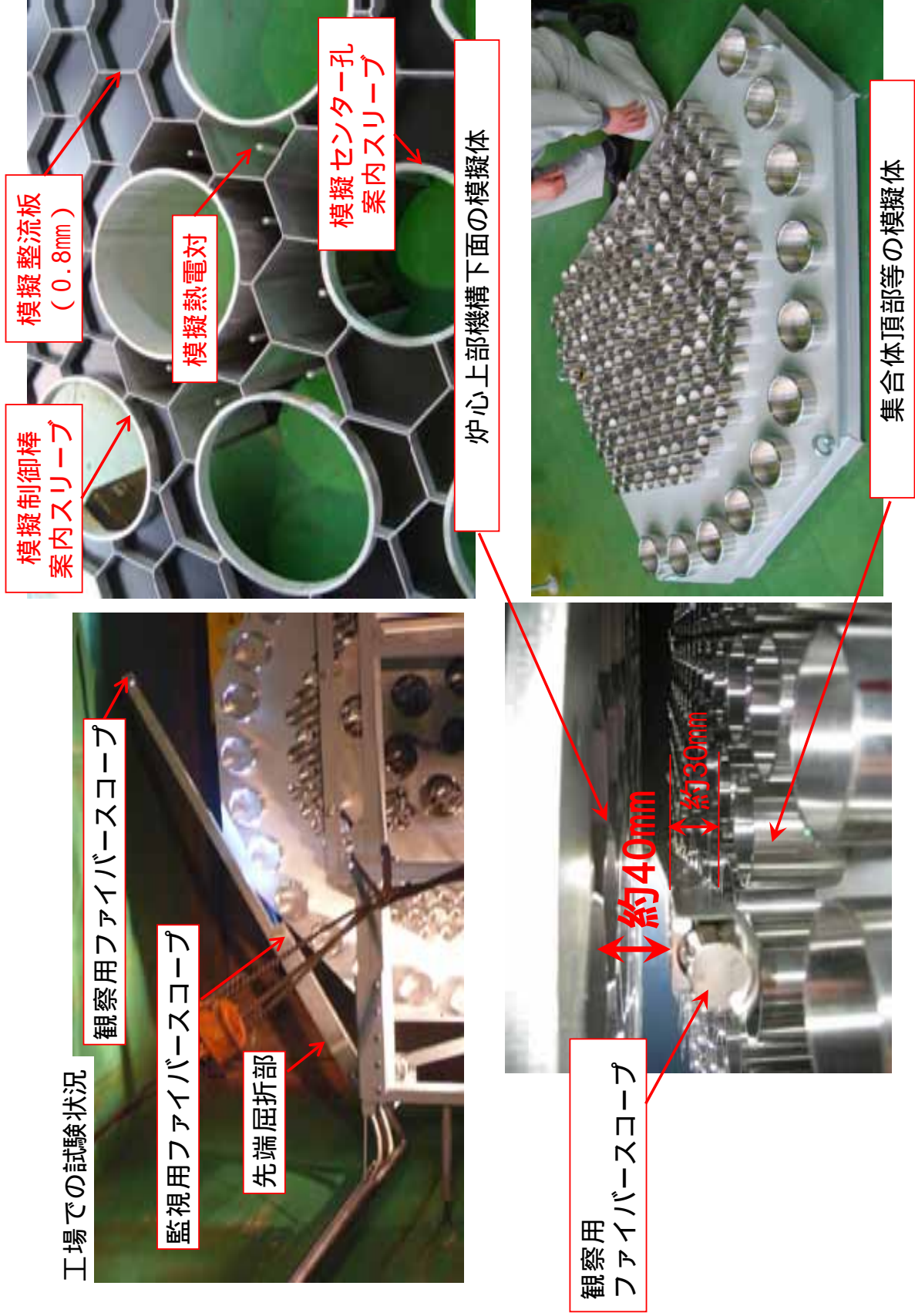


図 5-1 炉心上部機構下面観察模擬試験の状況

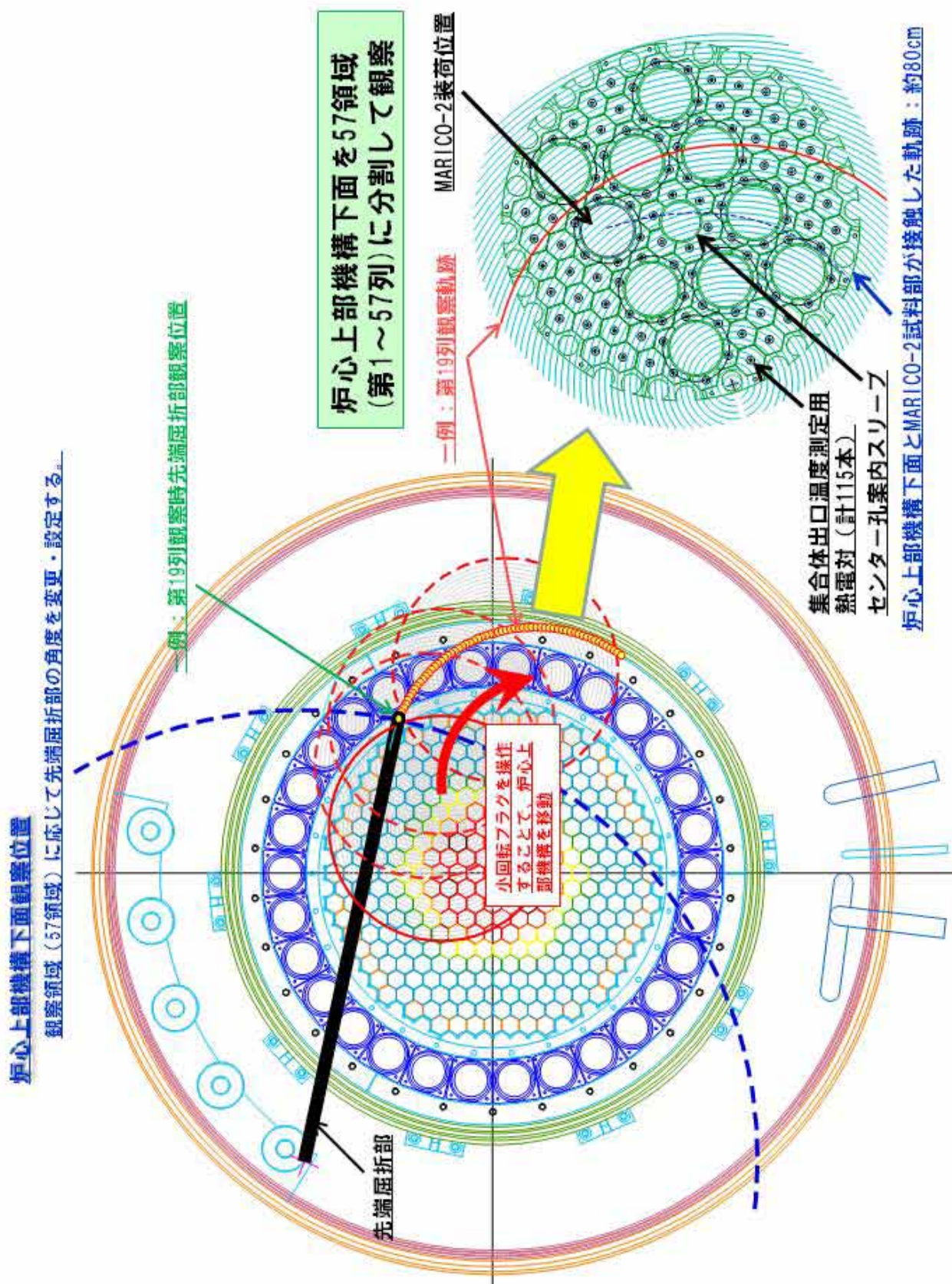


図 5-2 炉心上部機構下面観察方法の概要

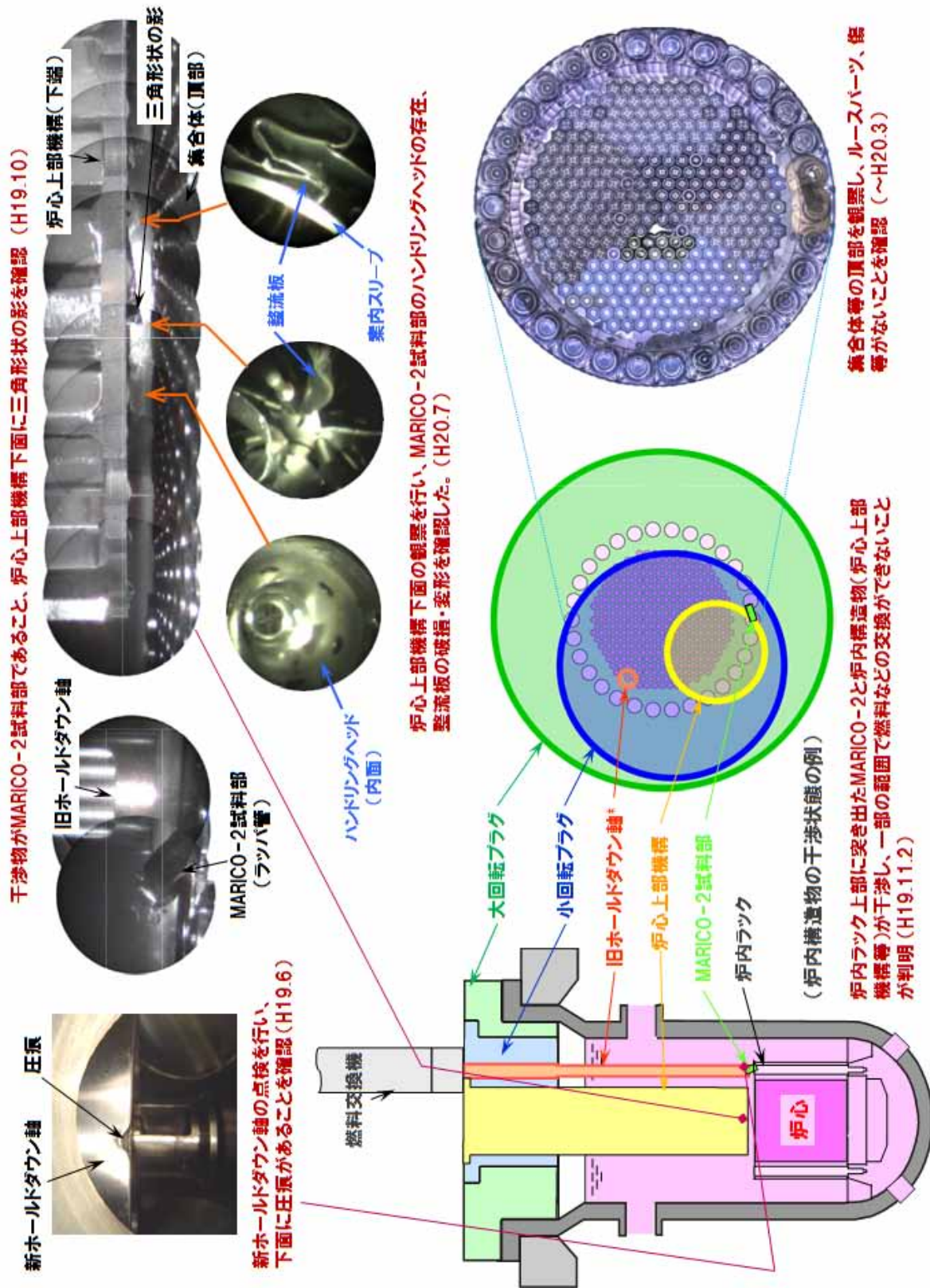


図 6-1 炉内観察結果の概況

炉内観察時の作業状況

1. 炉内観察作業の概要

原子炉容器内の状況を確認するため、以下の炉内観察を実施した。

- 1) 旧ホールドダウン軸下端、集合体頂部及び炉心上部機構下端周辺の観察
平成 19 年 8 月 21 日 ~ 9 月 11 日
- 2) 炉内ラック R16 上部、炉心上部機構下端周辺、集合体頂部等の観察
平成 19 年 10 月 10 日 ~ 11 月 16 日
- 3) 集合体頂部等の観察
平成 20 年 2 月 20 日 ~ 3 月 14 日
- 4) 炉心上部機構下面の観察
平成 20 年 7 月 8 日 ~ 7 月 29 日

2. 作業場所の線量率及び放射線作業被ばく線量実績

- 1) 旧ホールドダウン軸下端、集合体頂部及び炉心上部機構下端周辺の観察

主作業場所の線量率	: 15 μ Sv/h
実績総線量	: 0.06 人・mSv
個人最大実績線量	: 0.03mSv
- 2) 炉内ラック R16 上部、炉心上部機構下端周辺、集合体頂部等の観察

主作業場所の線量率	: 12 μ Sv/h
実績総線量	: 0.03 人・mSv
個人最大実績線量	: 0.03mSv
- 3) 集合体頂部等の観察

主作業場所の線量率	: 40 μ Sv/h
実績総線量	: 0.00 人・mSv
個人最大実績線量	: 0.00mSv
- 4) 炉心上部機構下面の観察

主作業場所の線量率	: 15 μ Sv/h
実績総線量	: 0.00 人・mSv
個人最大実績線量	: 0.00mSv

3. 安全対策

- 1) 炉内観察中は、一時的に一部の場所で高線量率になることが予想されたことから、作業エリアを立入制限区域とし、許可された者以外の入域を制限した。
- 2) 作業中、主作業場所周辺に放射線量率表示計を設置し、作業員に周知するとともに、注意を喚起した。

溶接の目的：固定ピン脱落防止

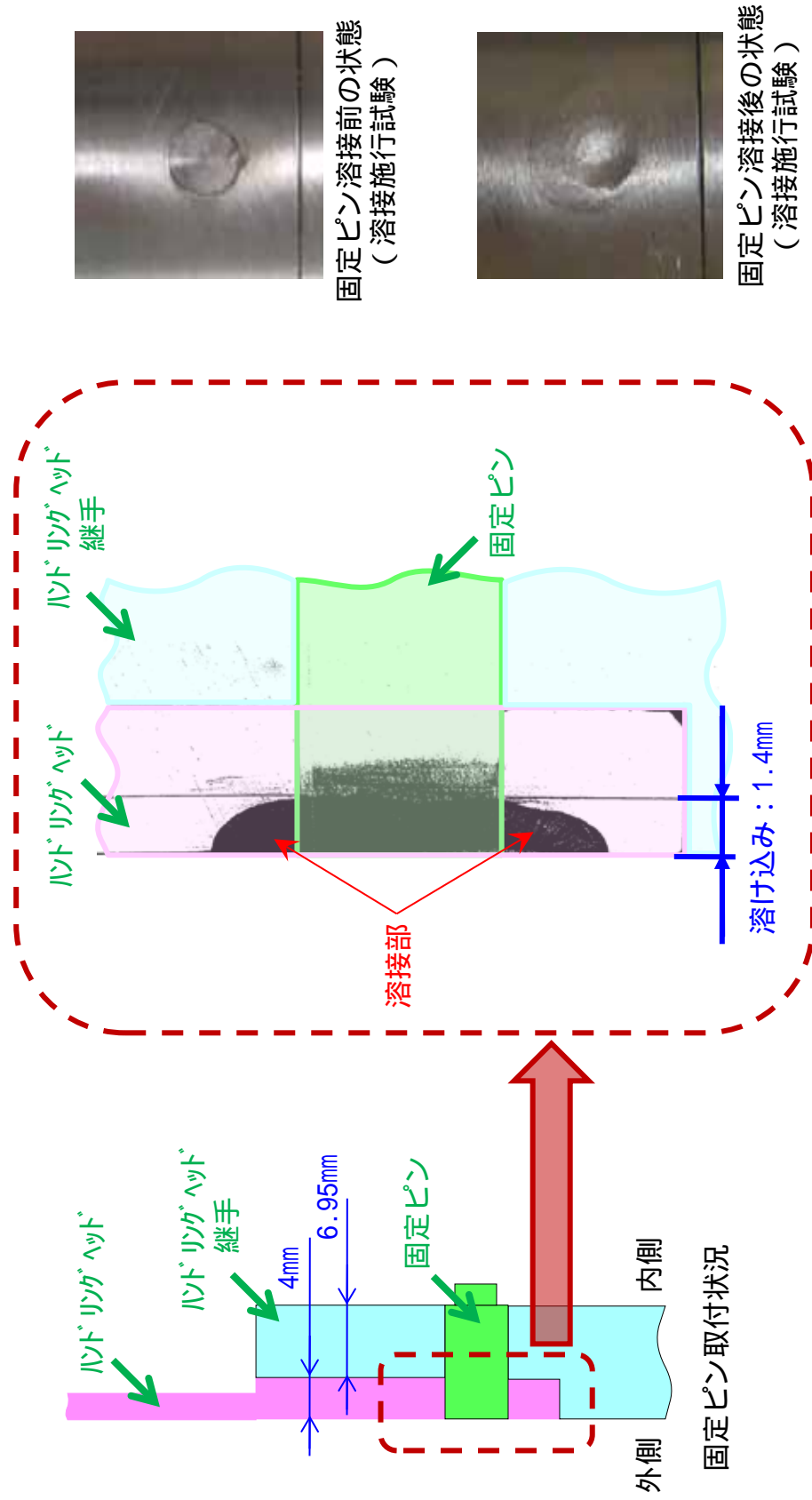
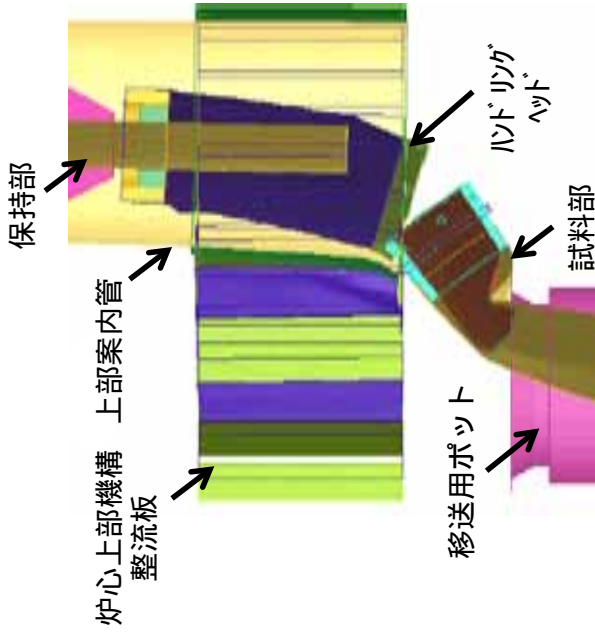
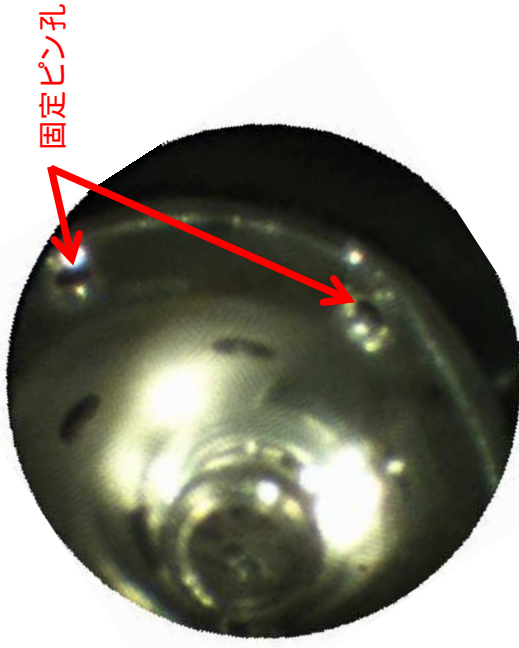


図 8-1 固定ピンの脱落に係る推定プロセス（固定ピンの溶接状態）



ハンドリングヘッド固定ピン孔の状況



ハンドリングヘッド継手固定ピン孔の状況



固定ピン脱落シナリオ：

上記動作により、固定ピン溶接部（ハンドリングヘッド外側表面部）が破損し、固定ピンが脱落

固定ピンが切断していないと判断した理由

- 固定ピンが切断したことを仮定した場合、固定ピン孔は、以下の状況となることと想定される。
- ・ ハンドリングヘッドの固定ピン孔に固定ピンが残存
- ・ （ハンドリングヘッド外側表面部の溶接部により固定ピンが保持される）
- ・ ハンドリングヘッド及びハンドリングヘッド継手の固定ピン孔が変形

炉内観察結果（右上画像参照）

- ・ ハンドリングヘッド及びハンドリングヘッド継手の固定ピン孔に固定ピンの残存なし
- ・ ハンドリングヘッドの固定ピン孔に変形あり
- ・ ハンドリングヘッド継手の固定ピン孔に変形なし

固定ピンが切断した形跡はなく、固定ピン溶接部が破損し、固定ピンが脱落したと判断

図 8-2 固定ピンの脱落に係る推定プロセス（固定ピンの脱落シナリオ）

固定ピンを浮き上がらせるために必要な最小冷却材上昇速度の算出

1. 評価方法

固定ピンを浮き上がらせるために必要な最小冷却材上昇速度()を以下の式により算出し、原子炉容器上部プレナム部の冷却材上昇速度と比較することで、固定ピンが原子炉容器上部プレナム部内を上昇し、原子炉容器出口配管より流出することがないことを確認する。

$$W = \frac{1}{2} C_D r_{Na} S n^2 \quad (\text{出典：機械工学便覧})$$

$$n = \sqrt{\frac{2W}{C_D r_{Na} S}}$$

- n : 最小冷却材上昇速度
 W : 部品重量
 C_D : 抗力係数
 r_{Na} : ナトリウム密度
 S : 部品の最大受圧面積 (投影面積)

2. 最小冷却材上昇速度算出結果

上記 1. に基づき、最小冷却材上昇速度を算出した結果、当該値は、約 1.0m/s となった。なお、計算には、以下に示す入力値を使用した。

- W : 2.33×10^{-2} N
 250 での SUS316 密度 ($7.89 \times 10^3 \text{kg/m}^3$) を用いて算出
 250 でのナトリウム密度を使用し、浮力を考慮

- C_D : 0.685 (出典：機械工学便覧)
 r_{Na} : $8.92 \times 10^2 \text{kg/m}^3$ 250 でのナトリウム密度を使用
 S : $7.46 \times 10^{-5} \text{m}^2$

固定ピンの側面 (最大受圧面) で受圧することを想定
 (参考) 固定ピンの底面で受圧する (最小受圧面積) ことを想定した場合

最小冷却材上昇速度：約 1.5m/s

C_D : 0.762 (出典：機械工学便覧)

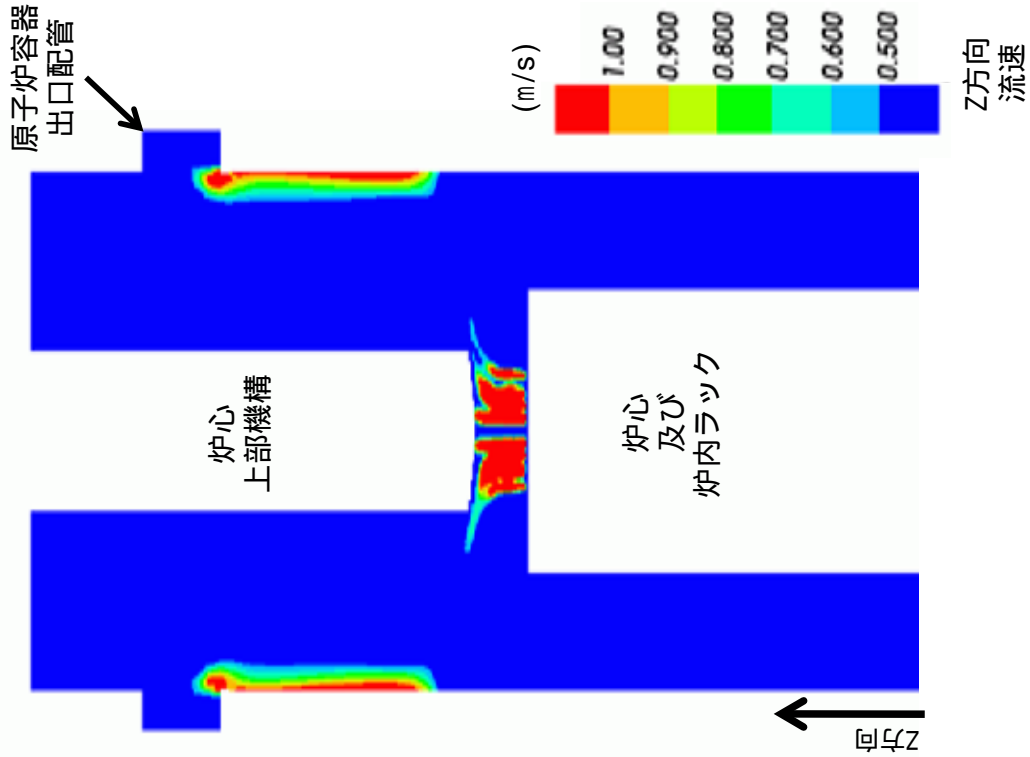
S : $2.85 \times 10^{-5} \text{m}^2$

項目	評価条件及び結果				
	250	300	350	400	500
温度 (°C)					
固定ピン体積 (m ³)	3.40E-07	3.41E-07	3.42E-07	3.43E-07	3.44E-07
SUS316密度 (kg/m ³)	7.89E+03	7.87E+03	7.85E+03	7.84E+03	7.82E+03
固定ピン質量 (kg)	2.68E-03				
浮力 (kg)	3.03E-04	3.00E-04	2.97E-04	2.94E-04	2.90E-04
固定ピン質量-浮力 (kg)	2.38E-03	2.38E-03	2.38E-03	2.39E-03	2.39E-03
重力加速度 (m/s ²)	9.8				
質量 (N) : W	2.33E-02	2.33E-02	2.33E-02	2.34E-02	2.34E-02
抗力係数 : C _D	0.685				
ナトリウム密度 (kg/m ³) : ρ _{Na}	8.92E+02	8.80E+02	8.68E+02	8.56E+02	8.44E+02
受任面積 (m ²) : S	7.46E-05	7.47E-05	7.49E-05	7.50E-05	7.51E-05
最小冷却材上昇速度 (m/s)	1.011	1.018	1.024	1.031	1.038
					1.045

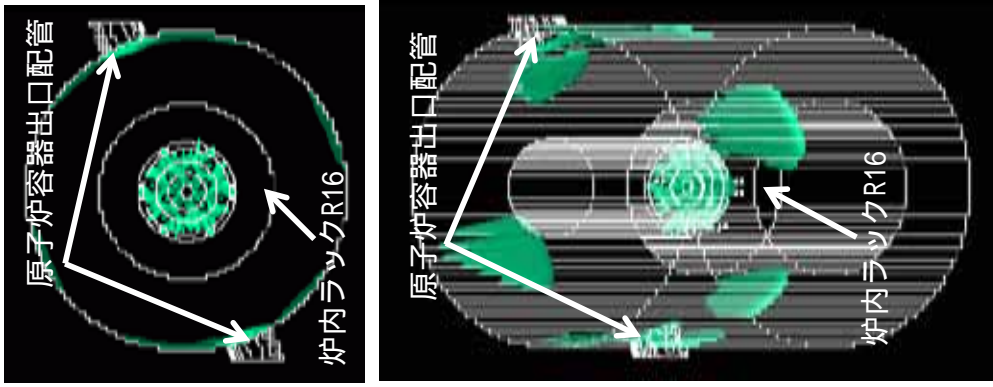
温度上昇による固定ピンの体積膨張を考慮すると、固定ピン (SUS316) 温度、ナトリウム温度を250 とした場合に、最小冷却材上昇速度が最も小さくなる。

図 10-1 最小冷却材上昇速度の温度依存性

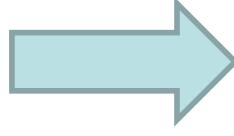
冷却材上昇速度 (Z方向) 分布
 < 一例：垂直断面 >



冷却材上昇速度 (Z方向)
 1.0m/s等値面



- 原子炉容器内で冷却材上昇速度1.0m/s以上となる領域は、炉内ラックR16近傍または炉心外周槽の上部（原子炉容器上部プレナム下部）～原子炉容器出口配管に至る経路において不連続



固定ピンを浮き上がらせたために必要な最小冷却材上昇速度は約1.0m/sであり、固定ピンが原子炉容器プレナム内部を上昇し、原子炉容器出口配管より流出することはなく、冷却系機器に問題が生じることはない

図 11-1 AQUA による原子炉容器内 3 次元流動解析結果

集合体等（炉心燃料集合体以外）の上部より 固定ピンが落下した場合の影響

1. 評価対象

集合体等の上部より固定ピンが落下した場合の影響を評価する必要がある炉心燃料集合体以外の集合体等を以下に示す。

- (1) 制御棒・制御棒下部案内管
- (2) 内側反射体・外側反射体・遮へい集合体

2. 評価結果

(1) 制御棒・制御棒下部案内管（図 12-1、2 参照）

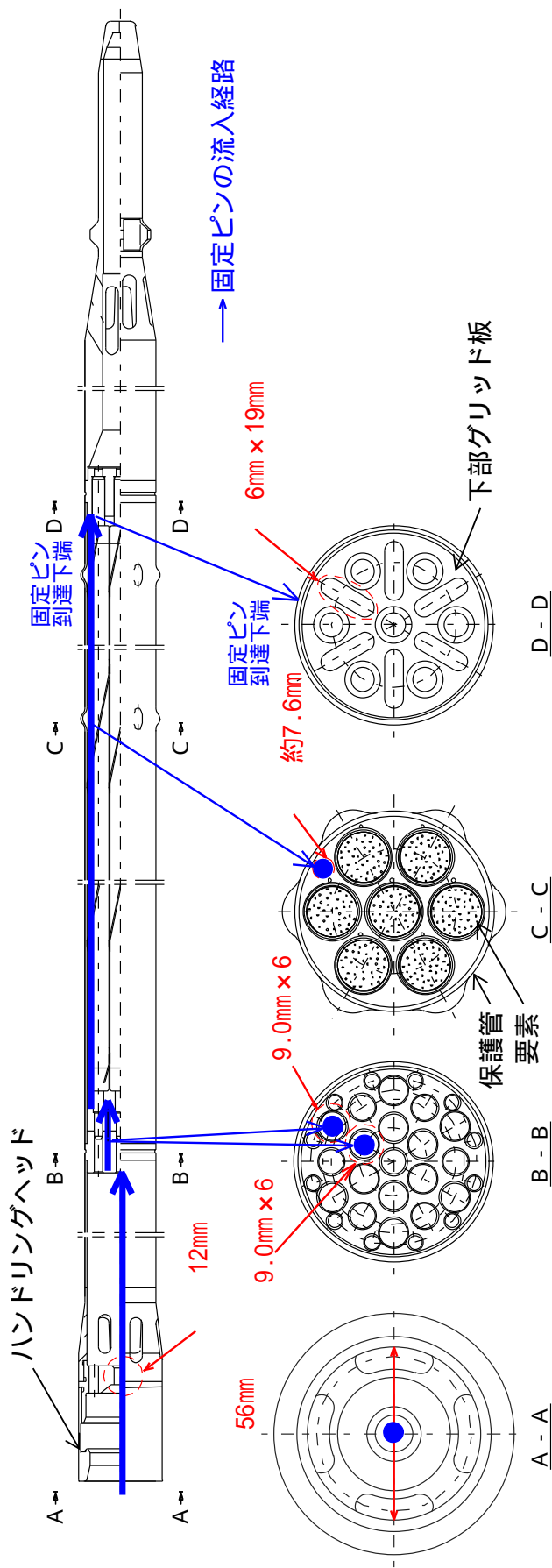
ハンドリングヘッド開口部の直径は 56mm であり、固定ピンが制御棒の上部より落下し、要素と保護管のギャップを一部閉塞する、もしくは、要素と保護管のギャップを通過し下部グリット板上部(スリット幅:6mm)に留まる可能性があるが、制御棒要素の単位面積あたりの発熱量は小さいこと、及び流路面積が大きく、他の流路が確保されることから、固定ピンによるギャップの一部閉塞が、冷却材流量及び温度に影響を与えないことを確認した。

原子炉停止後に、MARICO-2 試料部切離作業を実施しており、制御棒は下部案内管に挿入されている。制御棒と下部案内管上端のギャップは 3.7mm であり、固定ピンが当該ギャップに落下することはない。したがって、固定ピンが制御棒のスクラム特性等に影響を与えないことを確認した。

(2) 内側反射体・外側反射体・遮へい集合体（一例：図 12-3 参照）

ハンドリングヘッド開口部の直径は 56mm であり、固定ピンが内側反射体・外側反射体・遮へい集合体の上部より落下し、要素とラッパ管のギャップを一部閉塞する可能性があるが、これらの集合体の単位面積あたりの発熱量が小さいこと、及び流路面積が大きく、他の流路が確保されることから、固定ピンによるギャップの一部閉塞が、冷却材流量及び温度に影響を与えないことを確認した。

なお、万一、エントランスノズル部に固定ピンが達したとしても、オリフィス部の流速は 8m/s 以上であり、固定ピンが浮き上がる(固定ピンを浮き上がらせるために必要な最小冷却材上昇速度(最小受圧面積を想定): 約 1.5m/s) ため、オリフィスを閉塞させないことを確認した。



ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
 下部グリッド板スリット幅 : 6mm

固定ピンの影響評価


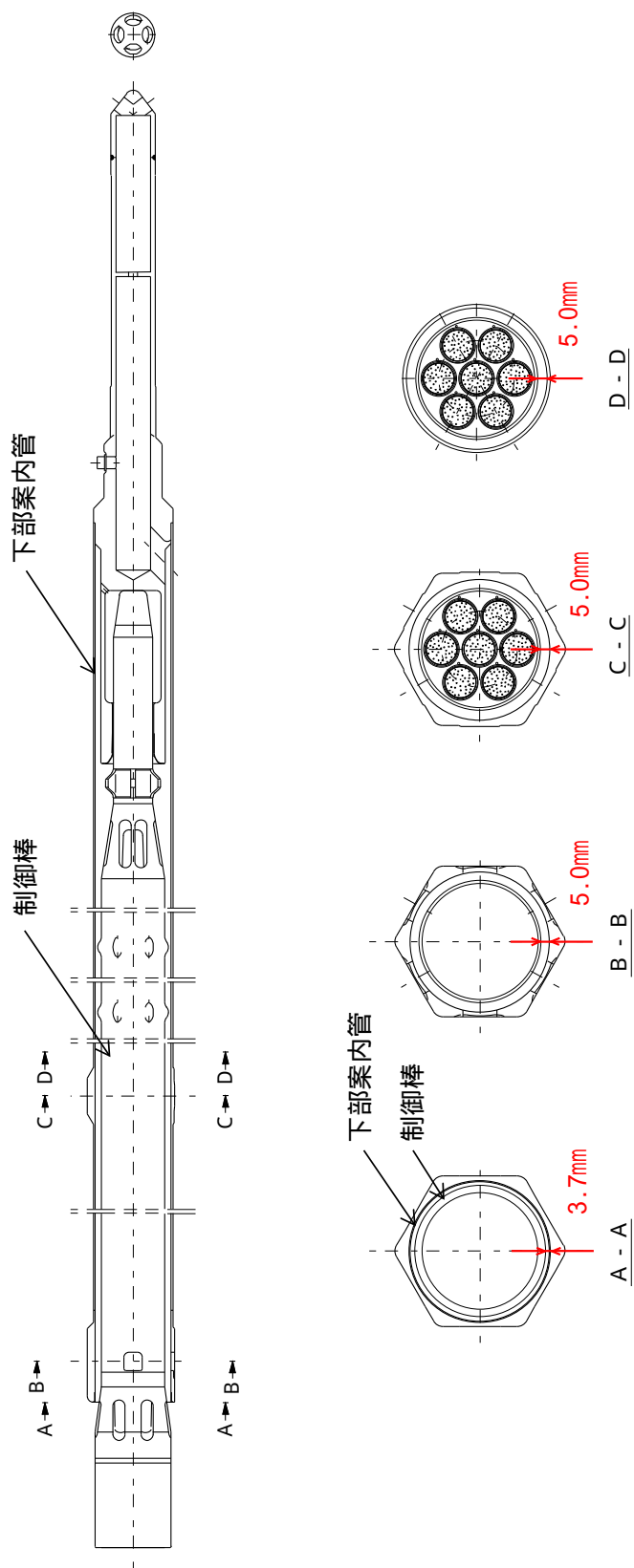
- ・ 上部より落下する可能性あり
- ・ 要素と保護管のギャップの一部を閉塞する可能性あり
 要素の単位面積あたりの発熱量は小さい  冷却材流量及び温度に影響を与えない
- ・ 流路面積が大きく、他の流路が確保される
- ・ 要素と保護管のギャップを通過する可能性あり
- ・ ただし、下部グリッド板上部に留まる

図 12-1 制御棒への固定ピン落下



制御棒と下部案内管のギャップ：3.7mm（下部案内管上端）

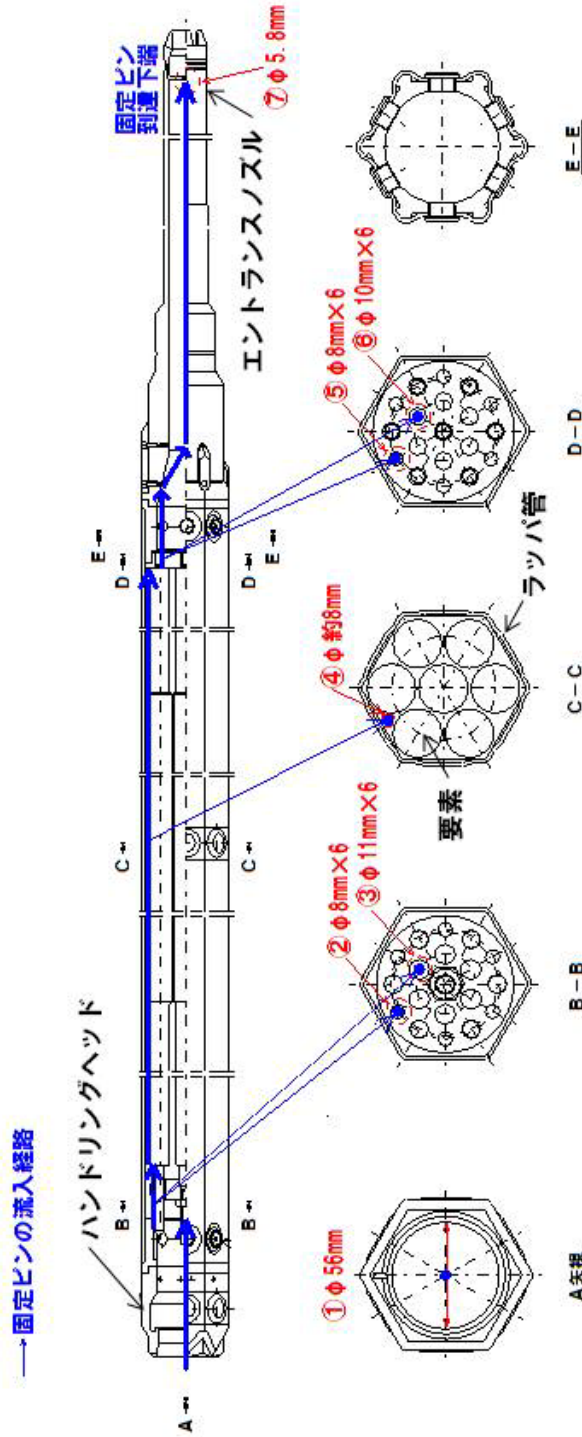
固定ピンの影響評価

- ・ 下部案内管へ落下する可能性なし
- ・ 制御棒のスラム特性等に影響を与えない

図 12-2 制御棒下部案内管への固定ピン落下

- ◆ ハンドリングヘッド開口部直径 : 56mm
- ◆ オリフィス直径 : 5.8mm (内側反射体)
3.9mm (外側反射体)
5.1mm (遮へい集合体)

<一例：内側反射体における固定ピン流入経路>



固定ピンの影響評価

- ・ 上部より落下する可能性あり
- ・ 要素とラツバ管のキャップの一部を閉塞する可能性あり (内側反射体、遮へい集合体)
 - 要素の単位面積あたりの発熱量は小さい (冷却材流量及び温度に影響を与えない)
- ・ 要素とラツバ管のキャップ等を通して、エントランスノズル部に到達する可能性あり
- ・ ただし、オリフィス部流速は8m/s以上であり、オリフィスを閉塞することはない

図 12-3 内側反射体・外側反射体・遮へい集合体への固定ピン落下

固定ピンが制御棒等の要素バンドル部を一部閉塞した場合の温度評価

1. 評価対象

集合体等の上部より固定ピンが落下した場合に、固定ピンが要素バンドル部のギャップの一部を閉塞する可能性があるのは、制御棒、内側反射体、遮へい集合体である。これらの集合体等について、固定ピンが要素バンドル部のギャップの一部を閉塞した場合の温度評価への影響を評価する。

なお、外側反射体の反射体要素は六角形状であり、冷却材が流れる反射体要素支持管の内径は最小でも 14mm であることから、冷却材流路を閉塞させることはない。

2. 制御棒等における温度評価方法

設計及び工事の方法の認可申請書における制御棒、内側反射体、遮へい集合体の温度評価方法を以下に示す。

集合体発熱量と集合体平均流量（必要最低流量）から集合体内冷却材温度上昇量を算出

集合体内冷却材最高温度をラッパ管等の設計温度として設定

3. 固定ピンが要素バンドル部のギャップの一部を閉塞した場合の影響評価

固定ピンによる要素バンドル部のギャップの一部閉塞に伴う圧力損失の増加を考慮した場合、集合体流量の低下量は最大で約-0.04%（制御棒）である。集合体流量の低下量は小さく、温度評価への影響は無視できる。

固定ピンが制御棒等の要素バンドル部に留まった場合の機械的影響

1. 評価対象

集合体等の上部より固定ピンが落下した場合に、固定ピンが要素バンドル部のギャップの一部に留まる可能性があるのは、制御棒、内側反射体、遮へい集合体である。これらの集合体等について、固定ピンが要素バンドル部のギャップの一部に留まった場合の機械的影響を評価する。

2. 評価結果

(1) 固定ピン振動による構造材表面に局所的な傷・摩耗が発生する可能性

固定ピンが要素バンドル部のギャップの一部に留まり振動することで、制御棒、内側反射体、遮へい集合体の構造材表面に局所的な傷・摩耗を生じさせる可能性について検討した。

要素バンドル部のギャップは7mm以上である。また、表面は基本的に平滑であり、要素バンドル部に留まる固定ピン（概略寸法：直径6mm、高さ13mm）を拘束するものはない。したがって、要素バンドル部に留まった固定ピンが振動した場合には、固定ピンは要素バンドル部のギャップを通過し、落下するため、制御棒、内側反射体、遮へい集合体の構造材表面に、固定ピン振動による局所的な傷・摩耗が生じることはない（図14-1参照）。

(2) 構造材表面に局所的な傷・摩耗が発生し、破損に至る場合の影響

制御棒、内側反射体、遮へい集合体の構造材表面に局所的な傷・摩耗が発生し、破損に至る場合を仮想した場合の原子炉の安全性の影響について検討した。以下に示すように、制御棒、内側反射体、遮へい集合体の構造材が破損に至ることを仮想しても、原子炉の安全性に影響はない。

制御棒

「常陽」制御棒には中性子吸収材として B_4C ペレットを使用している。放射性物質の生成は僅かなトリチウムのみであり、制御棒では (n, α) 反応で生成するヘリウムガスを排出するベント型の制御要素をMK-炉心から使用している。このため、被覆管はバウンダリを形成しておらず、 B_4C ペレット保持の「さや」としての機能が期待されているのみであり、その局所的な損傷やクラックの発生が制御棒機能に影響を及ぼすことはない。

また、 B_4C はナトリウムとの化合物を形成せず安定であるため、フランスのフェニックスでは制御要素内に冷却材ナトリウムを導入し、 B_4C ペレットをナ

トリウム中に浸した状態で使用するナトリウムボンド型制御棒を長年使用した実績がある。「常陽」でも MK- 炉心からこのナトリウムボンド型制御棒の使用を開始している。ナトリウムボンド型制御棒の開発を目的に、 B_4C ペレットを 650 のナトリウム中に最大 20,000 時間浸漬した炉外試験を実施しており、重量・体積の減少は非常に小さいことを確認している。また、この試験データをもとに B_4C ペレットスタックの重量・体積減少量 (= ナトリウム中へのホウ素 (B)、炭素 (C) の移行量) を保守的に評価しても、制御棒寿命末期の B_4C ペレット減少量は核設計上の余裕に比べて無視できるほど小さいこと、「常陽」炉寿命までナトリウムボンド型制御棒を継続して使用し続けた場合の冷却材ナトリウム中の不純物増加も小さく許容範囲であることを確認している¹⁾。

1) 曾我他、「常陽」制御棒の高度化 - ナトリウムボンド型制御棒の設計 - JNC TN9400 99-052 (1999)

反射体

反射体の反射体要素はステンレス鋼製の棒又は板の形状であり、これらに大きな傷がついた場合でも、その中性子反射性能に影響はない。

遮へい集合体

遮へい集合体には遮へい材として、制御棒と同様に B_4C ペレットを使用している。遮へい要素は密封型であるが、仮にこれらが破損しても制御棒と同じ理由から、炉心周りの遮へい性能への影響は無視できる。

固定ピン：制御棒、内側反射体、遮へい集合体の要素バンドル部に留まる可能性あり



要素バンドル部のギャップ：7mm以上（表面は基本的に平滑）

固定ピンが振動した場合には、固定ピンは要素バンドル部のギャップを通過し、落下

固定ピンの振動により構造材の摩耗は発生しない

<一例：制御棒>

固定ピンはスパイラルワイヤ部等に留まる可能性あり

ギャップが大きいため、固定ピンに振動等が生じた場合、固定ピンは落下

固定ピンの振動による構造材の摩耗は発生しない

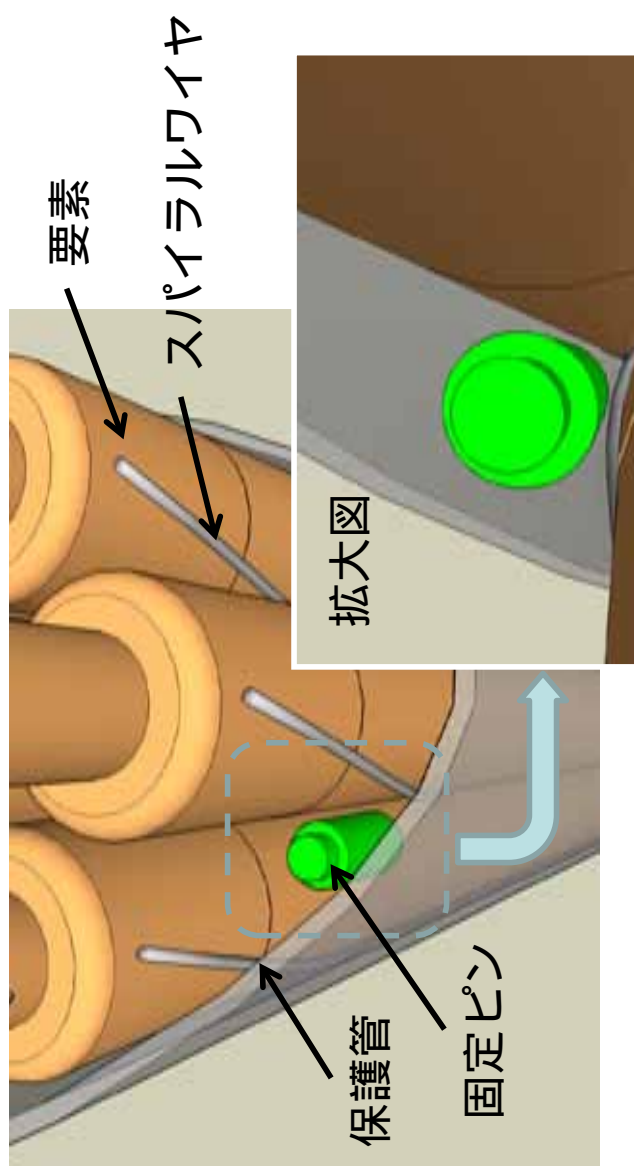


図 14-1 固定ピンの振動による構造材の摩耗発生に係る検討

MARICO-2 試料部切離作業手順

MARICO-2 試料部切離作業手順を以下に示す。

- (1) 回転プラグの回転
 - ・ MARICO-2 を(3E3)から(R-16)へ移動する。
- (2) 切断用駆動部の取り付け、吊り下ろし
 - ・ 炉上部で切断用駆動部を取り付け、吊り下ろす。切断用駆動部吊り下ろしとともに、試料部を R-16 移送用ポットに装填する(図 15-1 手順 1~2 参照)。
- (3) 試料部切離作業前の吊り上げ重量測定
 - ・ 試料部の吊り上げ、吊り下ろしを 6 回実施し、吊り上げ重量を測定する(図 15-1 手順 3 参照)。
- (4) 試料部切離作業
 - ・ 試料部切離機構により、ケーブル・配管を切断するとともに、試料部を切り離す(試料部切離機構フィンガ「閉」)(図 15-1 手順 4~6 参照)。
- (5) 試料部切離作業後の吊り上げ重量測定(その 1)
 - ・ フィンガ「閉」の状態、試料部の吊り上げ、吊り下ろしを 6 回実施し、吊り上げ重量を測定し、試料部の重量に相当する吊り上げ重量差を確認する(図 15-1 手順 7 参照)。
- (6) 試料部切離作業後の吊り上げ重量測定(その 2)
 - ・ フィンガを「開」とし、試料部の吊り上げ、吊り下ろしを 3 回実施し、吊り上げ重量を測定する(図 15-1 手順 8~9 参照)。
- (7) 試料部切離作業後の吊り上げ重量測定(その 3)
 - ・ フィンガを「閉」とし、試料部の吊り上げ、吊り下ろしを 2 回実施し、吊り上げ重量を測定する(図 15-1 手順 10~12 参照)。
- (8) 試料部切離作業後の吊り上げ重量測定(その 4)
 - ・ フィンガを「開」とし、試料部の吊り上げ、吊り下ろしを 1 回実施し、吊り上げ重量を測定する(図 15-1 手順 13~14 参照)。
- (9) 試料部切離作業後の吊り上げ重量測定(その 5)
 - ・ フィンガを「閉」とし、試料部の吊り上げ、吊り下ろしを 10 回実施し、吊り上げ重量を測定する(図 15-1 手順 15~17 参照)。
- (10) 切断用駆動部の取り外し
 - ・ 切断用駆動部を吊り下ろし、外側カッタを切断終了位置(フィンガ「閉」)の状態、切断用駆動部を約 2300mm 吊り上げる(図 15-1 手順 18 参照)。

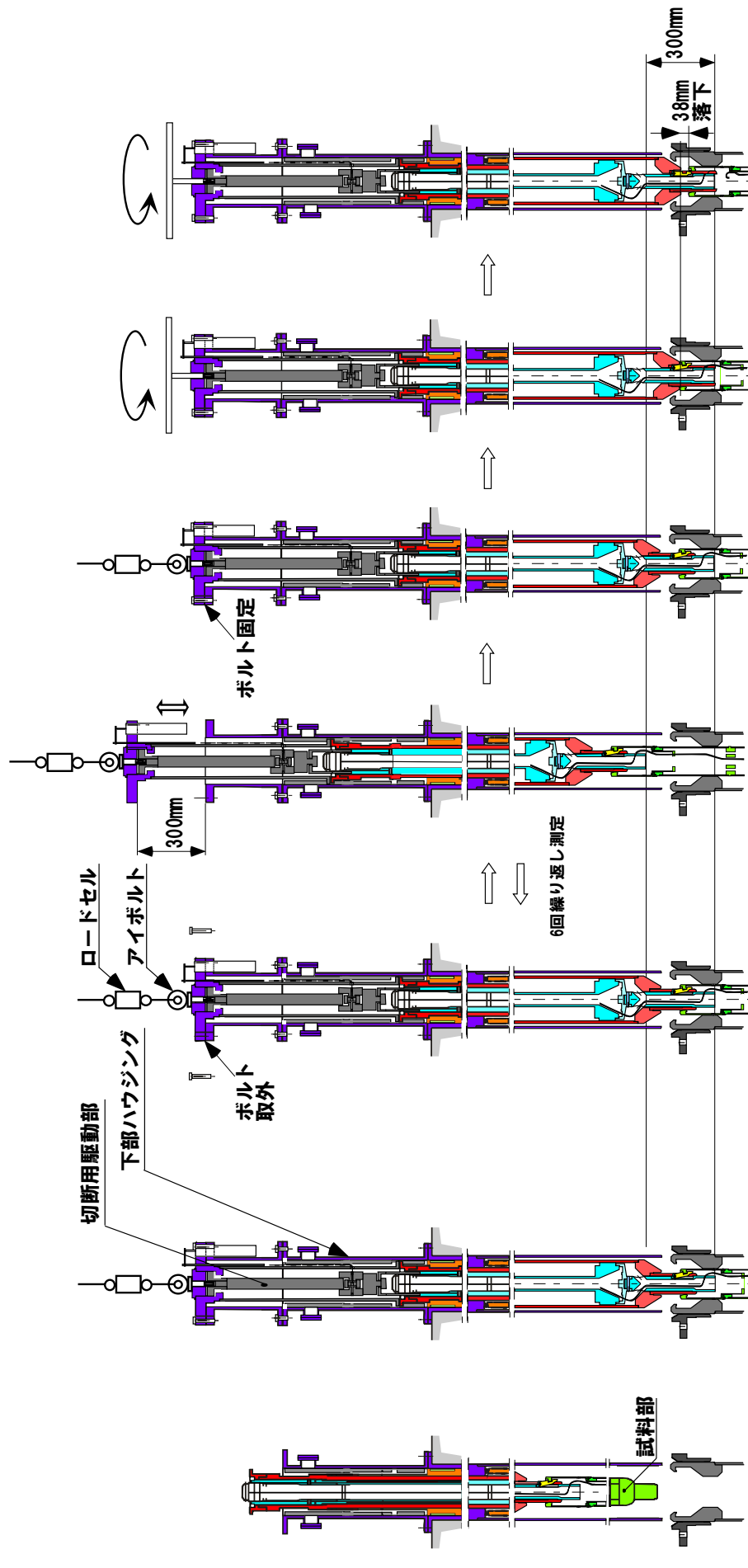
- ・ 吊り上げ後、切断用駆動部を取り外す（図 15-1 手順 19 参照）。

（11）ケーブル切断作業終了

- ・ 保持部を約 2000mm 吊り下ろし、下部ハウジングを撤去し、保持部脱荷用冶具を取り付ける（図 15-1 手順 20～22 参照）。

（12）回転プラグの回転

- ・ MARICO-2 保持部を (R-16) から (3E3)（回転プラグ基準位置）へ移動する。



- 1. 吊り下ろし前
- 2. 吊り下ろし後
- 3. 切断前吊り上げ重量測定
- 4. ケーブル切断前 (フィンガ「開」)
- 5. ケーブル切断後 (試料部落下前) (フィンガ「閉」)
- 6. ケーブル切断後 (試料部落下後) (フィンガ「閉」)

図 15-1 (1/5) MARICO-2 試料部切離作業手順 (正常時)

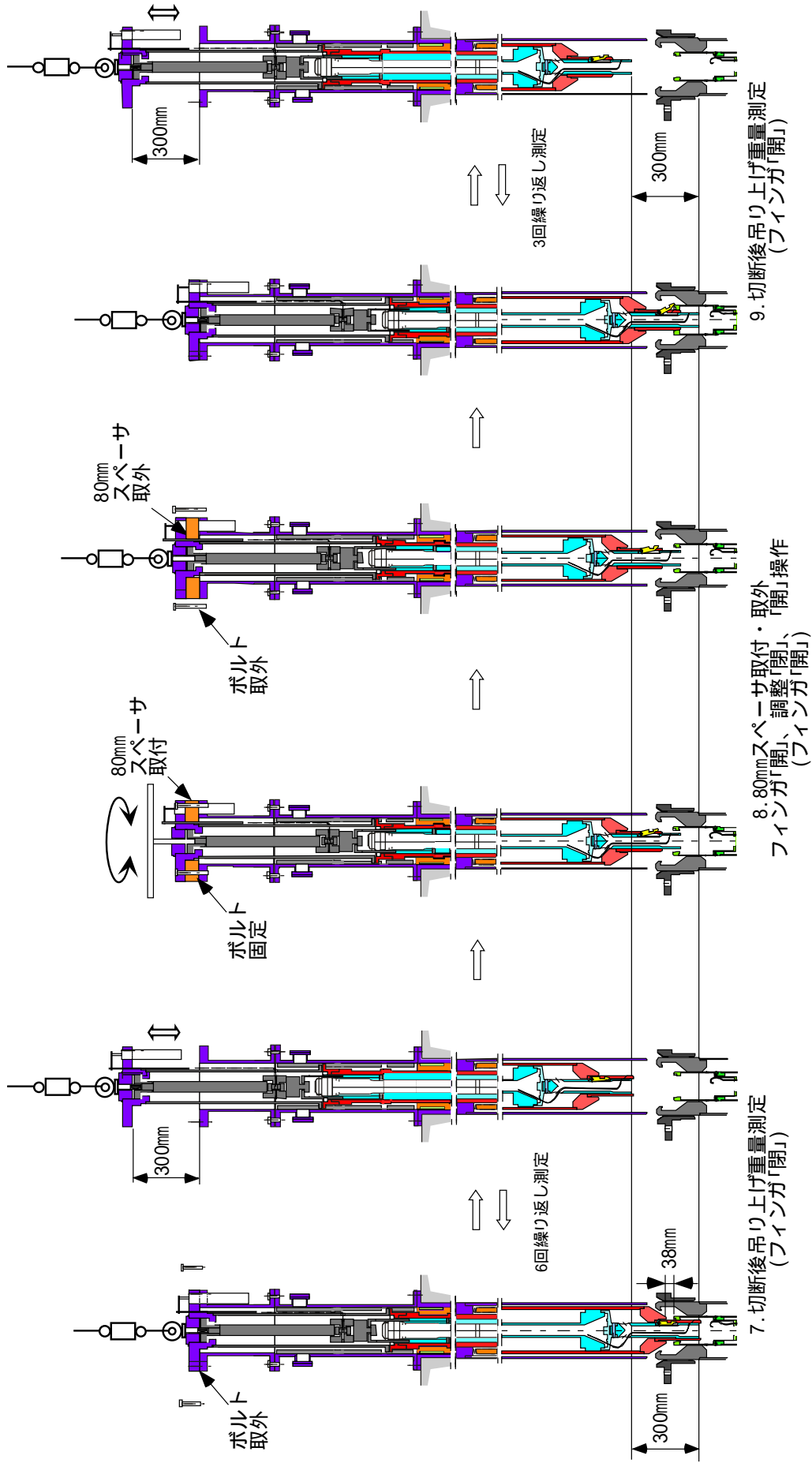


図 15-1 (2/5) MARICO-2 試料部切断作業手順 (正常時)

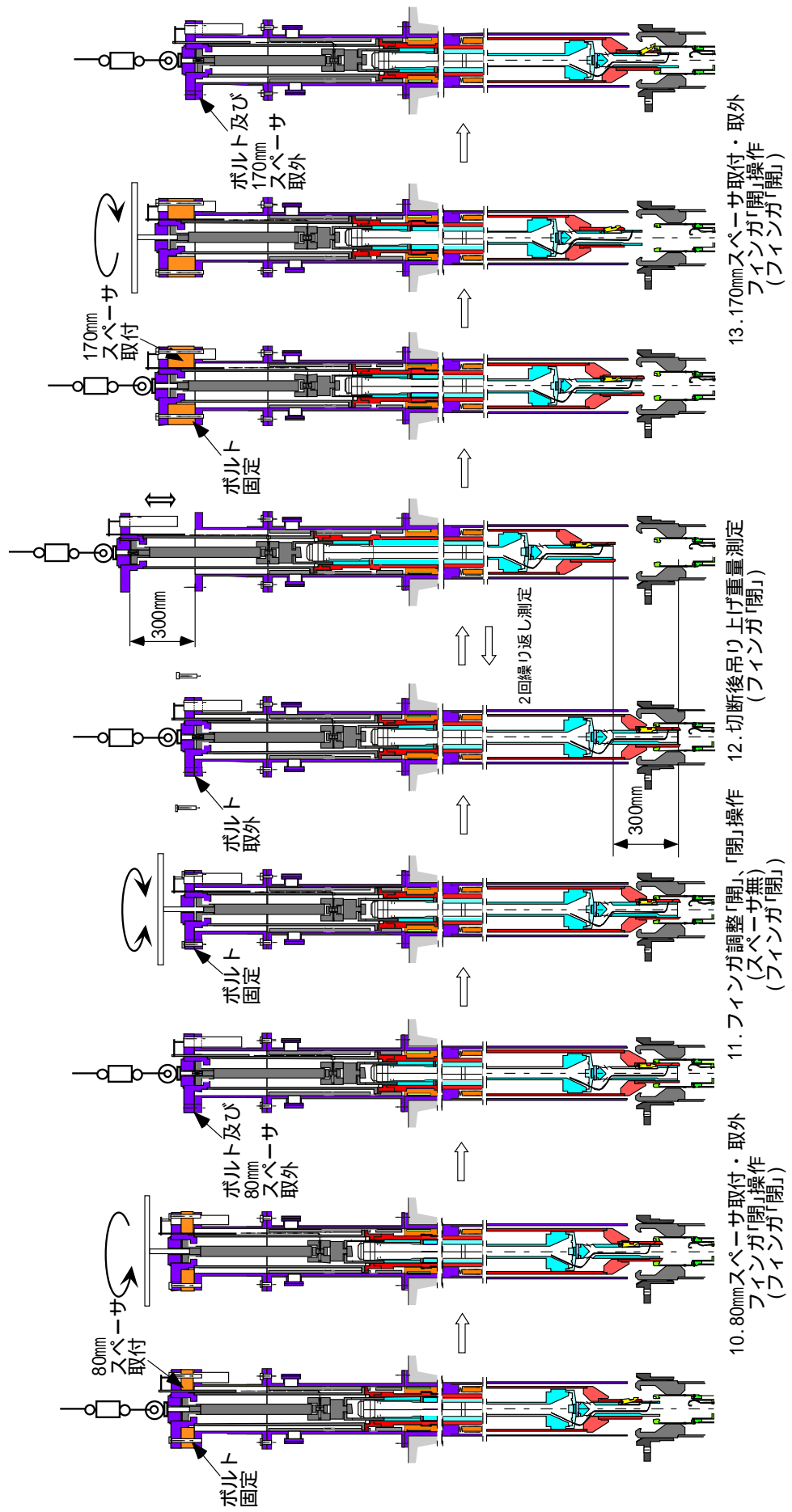


図 15-1 (3/5) MARICO-2 試料部切離作業手順 (正常時)

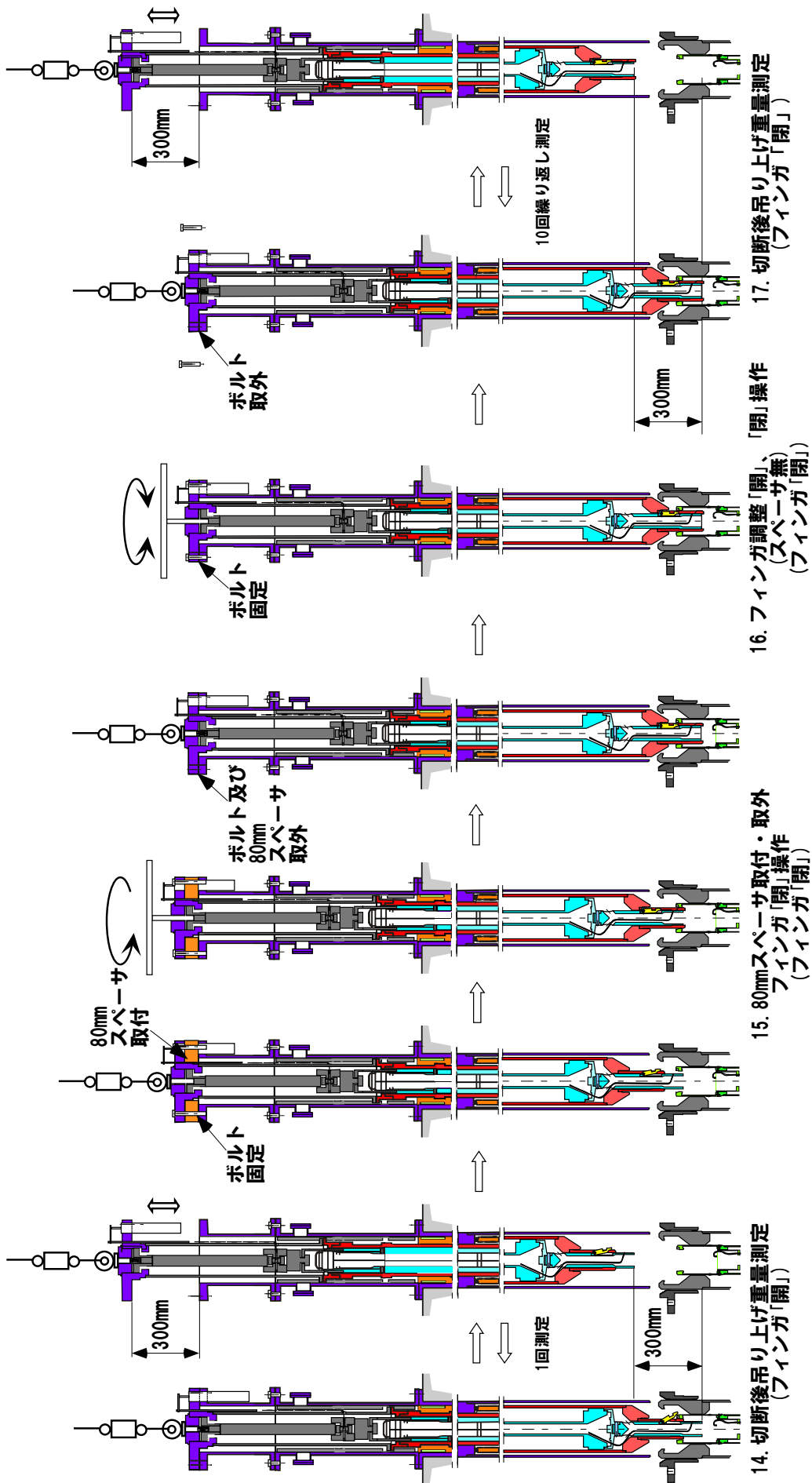


図 15-1 (4/5) MARICO-2 試料部切離作業手順 (正常時)

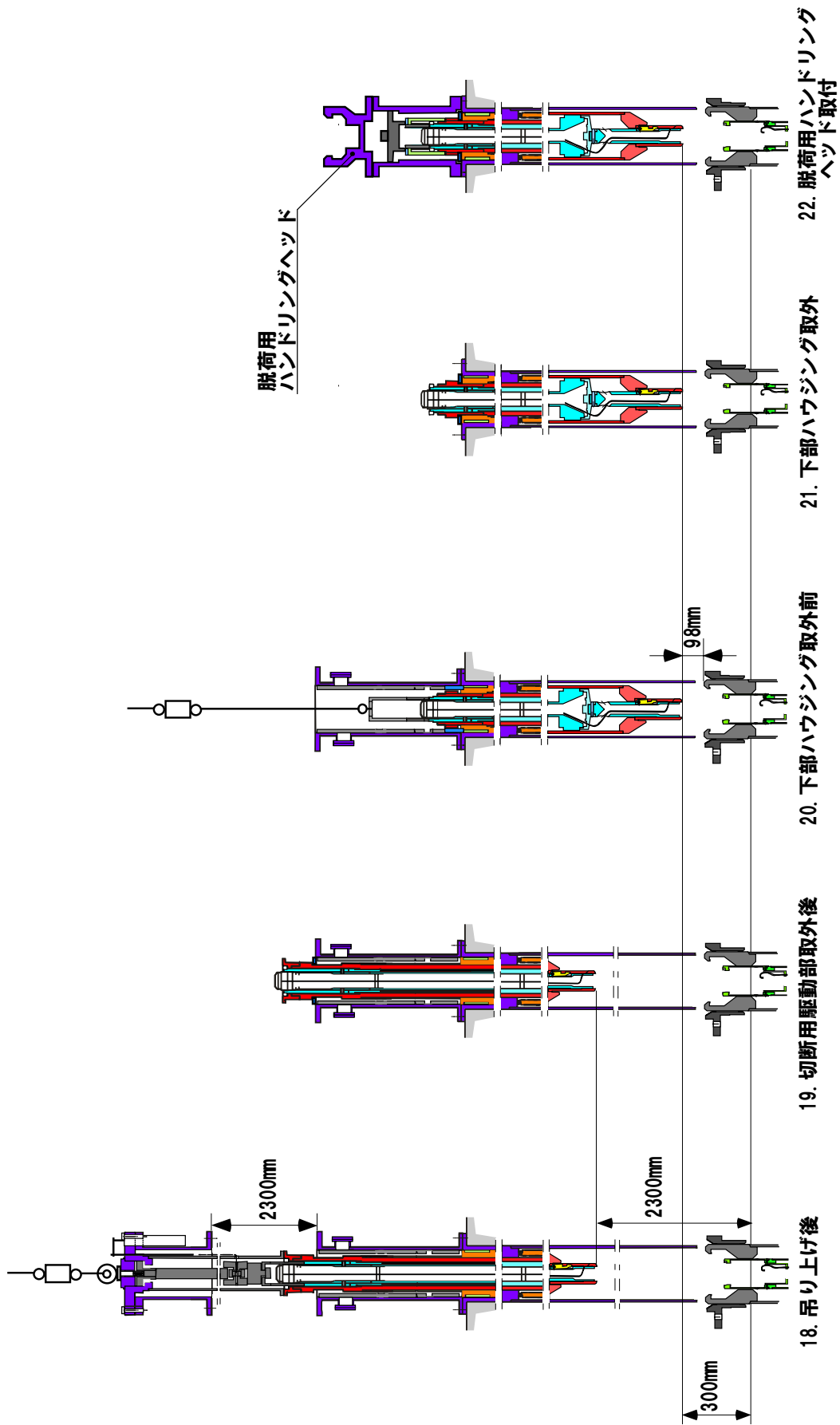


図 15-1 (5/5) MARICO-2 試料部切離作業手順 (正常時)

MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量測定結果

MARICO-2 試料部切離作業前後における吊り上げ重量について整理した結果を表 16-1 に示す。切離作業前吊り上げ重量は 325 ~ 340kg^{*1} (平均 : 335kg)、切離作業後吊り上げ重量は 310 ~ 320kg^{*1} (平均 : 316kg) である。当該作業においては、試料部重量 (約 20kg) に相当する吊り上げ重量差 (平均吊り上げ重量の差 : 19kg) が確認できたため、MARICO-2 試料部の切り離しに成功したと判断した (図 16-1 参照)。

*1 : 1 回目の測定値は、摩擦力の影響が大きく、妥当な値が得られていないと判断し、当該値を除外した (作業前 : 380kg、作業後 : 345kg)。

表 16-1 MARICO-2 試料部切離作業時の吊り上げ重量測定結果

切断	測定 No.		吊り上げ重量 (kg)	切断	測定 No.		吊り上げ重量 (kg)
前	3 [*]		380	後	7 [*]		345
			340				315
			335				315
			325				320
			335				315
			340				310
1 : 300mm 位置での吊り上げ重量を記載 (500mm 位置までの引抜操作を実施)					9 [*]		320
							320
							320
					12 [*]		315
							315
					14 [*]		315
					17 [*]		315
							315
							315
							315
							315
							315 ¹
	320						
	315						
	315						
	315						

* : 参考資料 15 に記載した手順 No.

吊り上げ重量

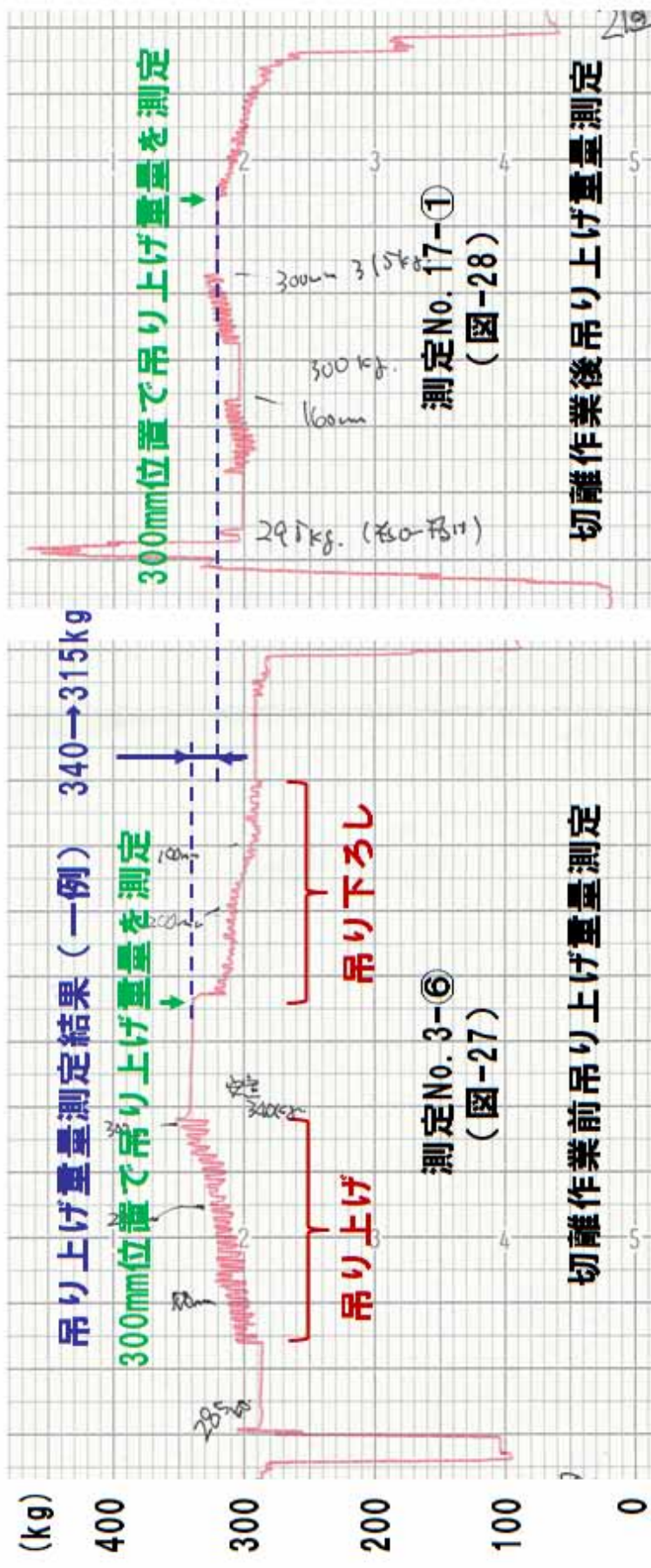


図 16-1 MARICO-2 試料部切離作業時吊り上げ重量測定結果 (一例)

MARICO-1 で試料部の切り離しに成功し、
MARICO-2 で試料部の切り離しができなかった原因

1. MARICO-2 試料部切離機構の設計経緯

高速実験炉「常陽」では、平成6年から平成10年にMARICO-2の前号機であるMARICO-1を使用した経験を有する。MARICO-1においては、試料部の切り離しを正常に実施し、照射試験を終了している。

MARICO-2 試料部切離機構の構造・寸法等は、図面上、MARICO-1 試料部切離機構と基本的に同じとしている。

2. MARICO-1、2 試料部切離機構の主要寸法

MARICO-2 試料部切離機構の主要寸法は、図面上、MARICO-1 試料部切離機構と基本的に同じである。フィンガ動作上重要な項目を以下に示す。図面上、MARICO-1 と MARICO-2 で寸法が異なるのは、フィンガピン孔内径のみである。MARICO-2 では、フィンガの動きを滑らかにするため、当該寸法を 6.0mm から 6.3mm に変更している。

- ・ カッタ支え先端部内径 (58mm)
- ・ フィンガピン - 中心間距離 (20.5mm)
- ・ フィンガ高さ (12mm)
- ・ フィンガピン孔内径 (MARICO-1 : 6.0mm、MARICO-2 : 6.3mm)
- ・ 試料部ハンドリングヘッド内径 (56mm)

なお、MARICO-1 が上記主要寸法で製作された場合、MARICO-1 においても、カッタ支えによりフィンガを「閉」とし、試料部を確実に切り離すことは不可能である。

3. MARICO-1 試料部切離機構の実寸法評価

上述したように、MARICO-1 が図面寸法 (ノミナル) で製作された場合、MARICO-1 においても、カッタ支えによりフィンガを「閉」とし、試料部を確実に切り離すことが不可能である。このため、「常陽」メンテナンス建家水中プールに保管されている MARICO-1 試料部切離機構を水中カメラにより観察した。

3.1 MARICO-1 試料部切離機構の観察

水中カメラによる観察結果より、以下の事実を確認した。

- ・ MARICO-1 を図面寸法 (ノミナル) で製作した場合、取付台座付近のフィンガ上面は、取付台座上面とほぼ同じ位置にあり、観察することが困難であるが、図 17-1 に示すように、MARICO-1 フィンガ上面は、取付台座上面より外

側にあることが確認できた。

- ・ 観察画像に基づき、寸法測定を実施した結果、MARICO-1 フィンガ上面は、取付台座上面より約 1mm 外側にあることが確認できた。また、フィンガ高さは約 12.2mm であることが確認できた。

3.2 観察結果に基づく分析・評価

MARICO-1 試料部切離機構の観察により、MARICO-1 フィンガ上面は、取付台座上面より約 1mm 外側にあることが確認できた。以下に示すように、製作公差が蓄積すると、MARICO-1 フィンガ上面が、取付台座上面より約 1mm 外側となる場合がある。

項目	図面寸法 (ノミナル) (mm)	製作公差 (mm)	実寸法 (mm)	フィンガ上面の 外側への移動量 (mm)
フィンガ高さ	12	±0.3	12.2 (観察画像より評価 1)	0.2 (観察画像より評価)
フィンガピン - 中心間距離	20.5	±0.5	21.0 (推定)	0.5 (推定)
フィンガの ピン孔位置 (フィンガ下面 からの寸法)	6.0	±0.2	5.8 (推定)	0.2 (推定)
合計				0.9 (推定) 2

- 1 観察画像によるフィンガ溝部深さの評価結果 (5.6mm) にフィンガ溝部の高さ (6.6mm : 検査結果) を加算し、フィンガ高さを約 12.2mm と評価
- 2 観察画像による評価結果 (約 1mm) と一致

MARICO-1 では、フィンガ上面が図面寸法 (ノミナル) より外側にあるため、図 17-2 に示すように、カッタ支えを下降させることで、カッタ支えがフィンガと接触し、フィンガが「閉」動作する。フィンガは完全に「閉」とはならない (フィンガのハンドリングヘッドラッチ面端部におけるラッチ幅 : 約 0.3mm) が、以下の動作により、試料部が切り離れたと考えられる (図 17-3 参照)。一方、MARICO-2 にあっては、概ね図面寸法 (ノミナル) で製作されたため、試料部の切り離しができなかった (図 17-3 参照)。なお、これらの寸法はメーカー・事業者における検査もしくは管理の対象となっていない。

フィンガは概ね「閉」となっているため、フィンガのラッチ面はハンドリングヘッドラッチ部下面に対して外側に傾く (フィンガ「開」時にフィンガのラッチ面は、ハンドリングヘッドラッチ部下面に対して水平となる)。

フィンガのラッチ面に付加される試料部重量・カッタ支えによる押し出し荷重

により、フィンガを「閉」とする方向に力が働き、フィンガが「閉」となる。

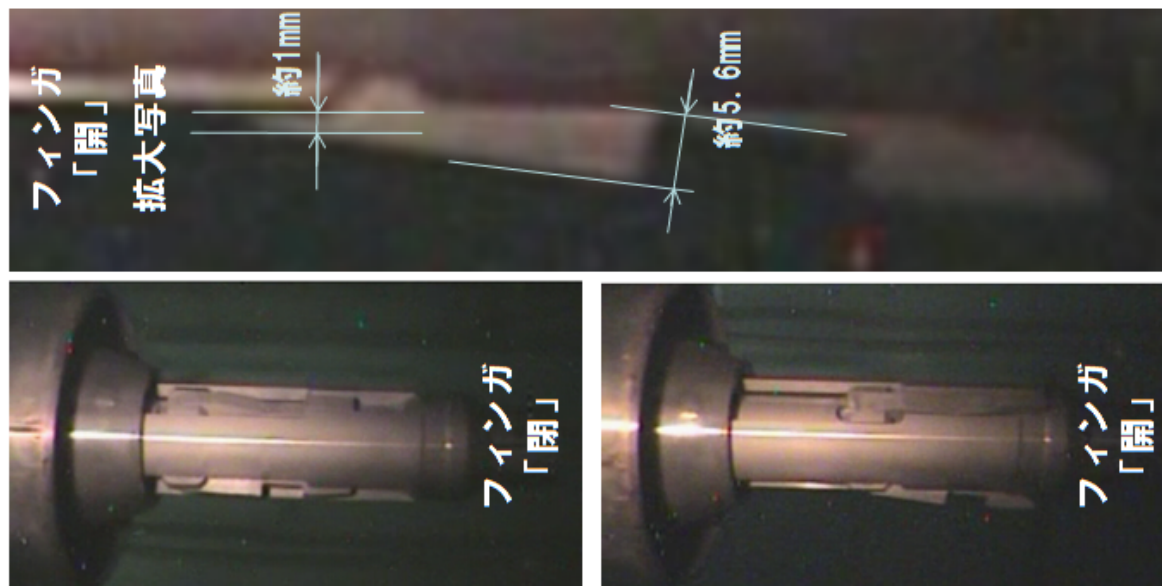
4. まとめ

MARICO-1 で試料部の切り離しに成功し、MARICO-2 で試料部の切り離しができなかった原因に係る調査結果を以下に示す。

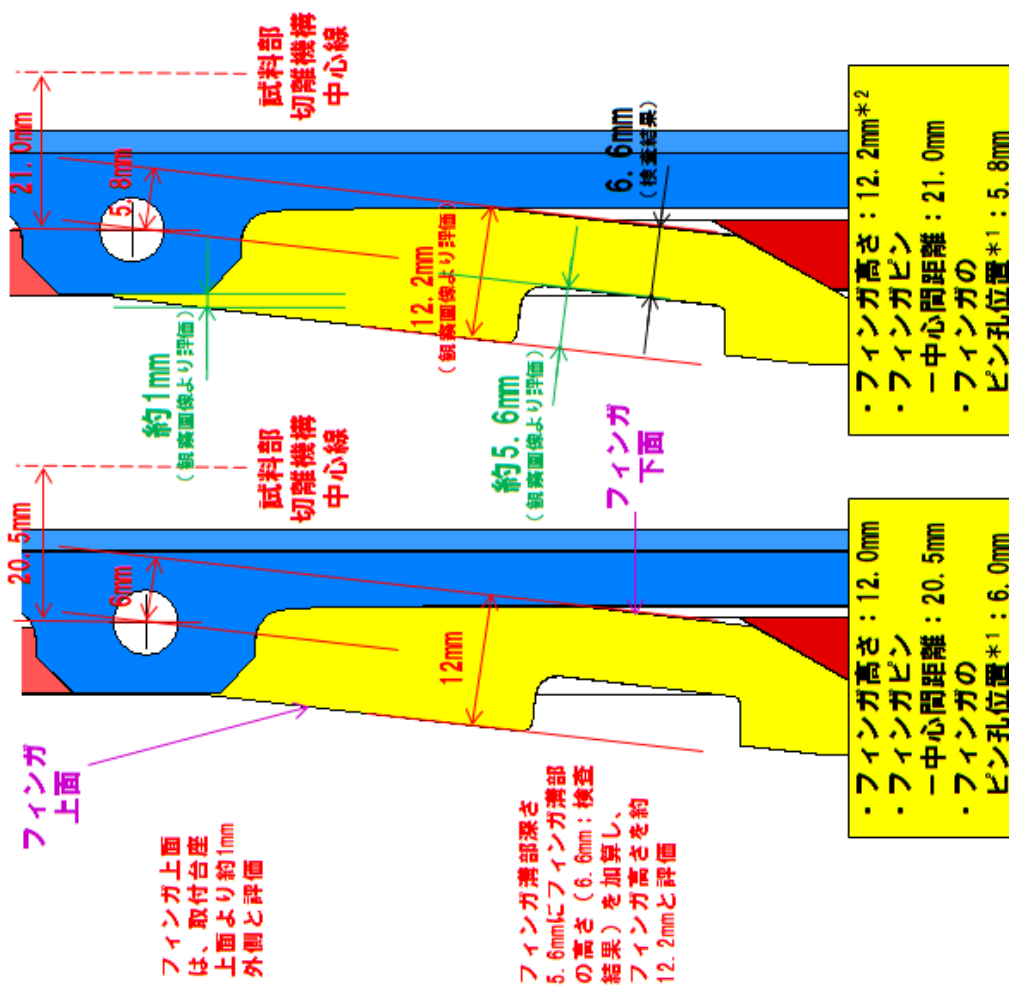
- ・ MARICO-1 及び MARICO-2 は、図面上、カッタ支えによりフィンガを「閉」とし、試料部を確実に切り離すことが不可能である。
- ・ MARICO-1 は製作公差の蓄積により、結果的に試料部の切り離しに成功したものと考えられるが、MARICO-2 は、概ね図面寸法（ノミナル）で製作されたため、試料部の切り離しができなかった。

MARICO-1 と MARICO-2 においては、試料部を切り離す機能が要求されており、その構造等を決定し、図面を作成する（以下、「設計」）際には、製作公差を考慮し、当該機能を満足するよう寸法を設定する必要があるが、MARICO-1 及び MARICO-2 では、試料部切離機能に係る寸法の設定に不備（設計不備）があった。設計から製作を通じて、試料部切離機能に係る検証作業を実施していなかったことが、設計不備を発見できなかった要因である。

MARICO-1フィンガ観察結果



図面寸法
(ノミナル)
の場合



製作公差を
考慮した場合

- ・フィンガ高さ: 12.2mm*2
- ・フィンガピン中心間距離: 21.0mm
- ・フィンガのピン孔位置*1: 5.8mm

- ・フィンガ高さ: 12.0mm
- ・フィンガピン中心間距離: 20.5mm
- ・フィンガのピン孔位置*1: 6.0mm

*1: フィンガ下面からの寸法
*2: 観察画像より評価

図 17-1 MARICO-1 試料部切離機構の観察結果

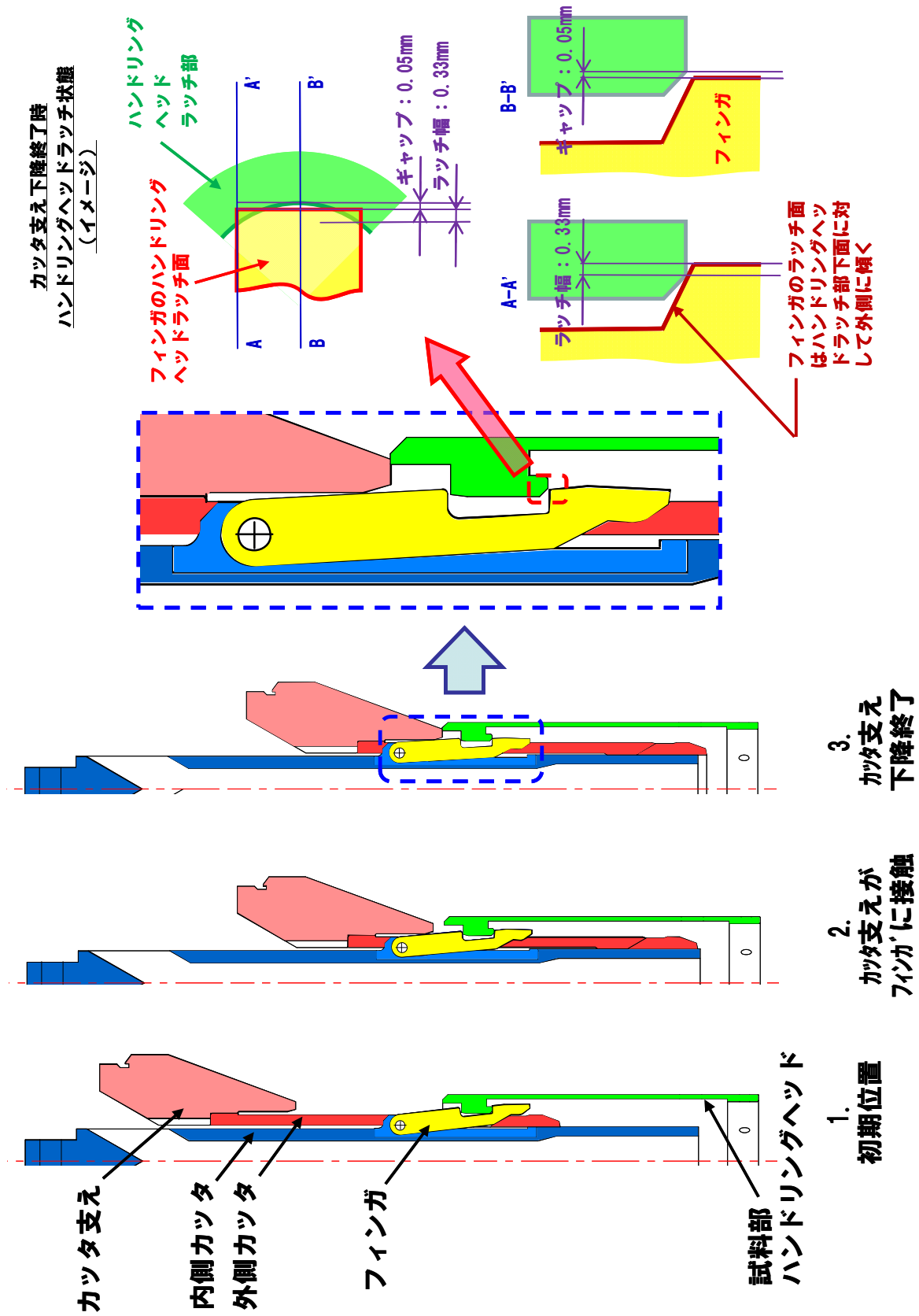
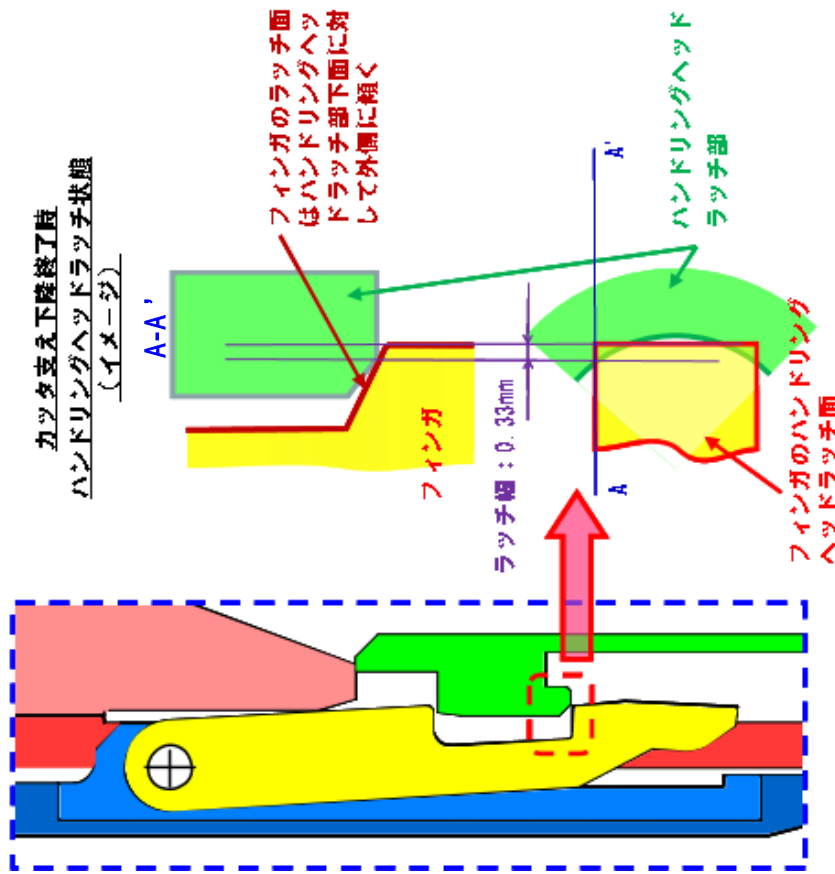


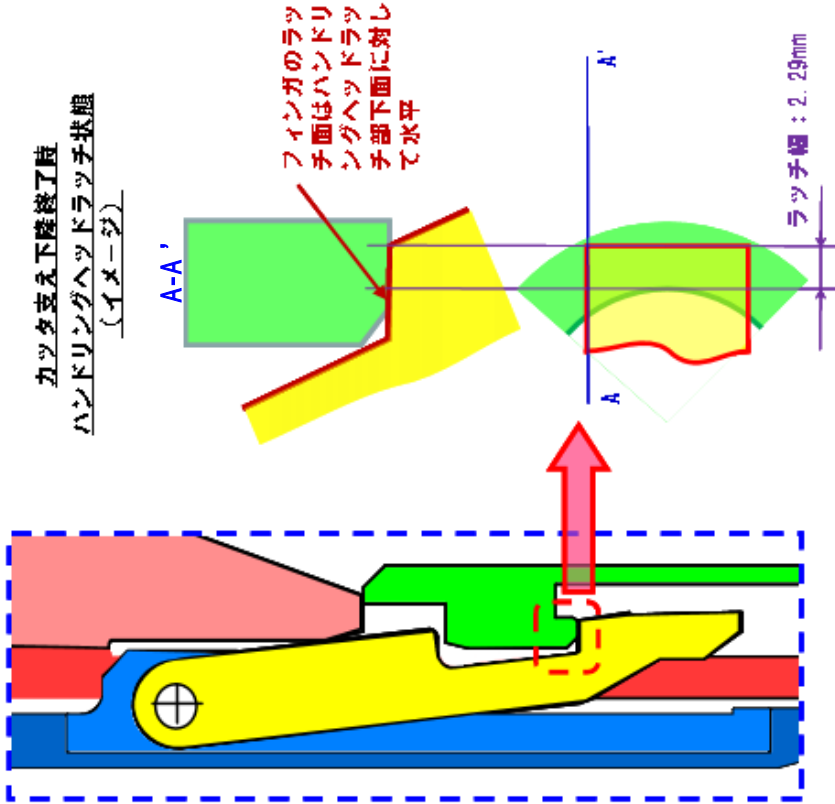
図 17-2 製作公差を考慮した場合のシミュレーション

MARICO-1



- ① フィンガは概ね「閉」となっているため、フィンガのラッチ面はハンドリングヘッドラッチ下部下面に対して外側に傾く。
- ② フィンガのラッチ面に付加される減料部重量・カタ支えによる押し出し荷重により、フィンガを「閉」とする方向に力が働き、フィンガが「閉」となる。

MARICO-2



- ① フィンガは概ね「開」となっているため、フィンガのラッチ面は、ハンドリングヘッドラッチ下部下面に対して水平となる。
- ② ラッチ幅が大きく、かつフィンガのラッチ面は、ハンドリングヘッド下部下面に対して水平であるため、フィンガを「閉」とする方向に力が働く要因がなく、フィンガは「開」とならない。

図 17-3 MARICO-1 と MARICO-2 におけるカタ支え下降終了時のラッチ状態の比較