

J-PARC 物質・生命科学実験施設向け機器の完成

特集
1

児玉 健光 (こだま たけみつ)

1 まえがき

茨城県東海村にある独立行政法人日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構という）東海研究開発センター原子力科学研究所に建設中の大強度陽子加速器施設（J-PARC）は、世界最高クラスの大強度陽子ビームをターゲットに当てて、そこから発生する中性子やその他の二次粒子（中間子、ニュートリノ、ミュオンなど）を利用して、生命科学や物質科学、原子核・素粒子、宇宙物理やエネルギー研究など、さまざまな分野の研究を行う研究施設である。完成イメージを図1に示す。

物質・生命科学実験施設を構成する各設備は原子力機構の設計によるもので、設備ごとに製作設計から据付けまでが競争入札により発注された。ターゲットおよび周辺の減速材配管等は過酷な陽子および中性子照射により高度に放射化され、半年から数年の間隔で交換が必要になる。富士電機はこれに関する設備のうち、水銀ターゲットの設置・移動を行うターゲット台車、減速材配管等を交換する反射体等遠隔操作装置、交換後の水銀ターゲット容器や減速材配管などを保管する放射化機器保管設備の3設備の設計、製作、据付け調整までを受注した。

これらの設備はいずれも遠隔による取扱いと設備間の高

い取扱い精度が要求される。富士電機がこれまで培ってきた遠隔ハンドリング技術を生かし、遠隔操作に適した機器設計、連携する設備間取合い条件の設定、総合組合せ試験および据付け調整を2002年から2007年にかけて実施した。

本稿ではこれら3設備の概要および設計、製作、試験について紹介する。

2 設備の概要

ここで紹介するターゲット台車、反射体等遠隔操作装置および放射化機器保管設備の3設備の概略図を図2に示す。

2.1 ターゲット台車

ターゲット台車は、大強度陽子加速器からのビームを衝突させて核破砕反応により中性子を発生させる水銀ターゲット容器を先端に取り付けた構造となっている。この状態で走行し、水銀ターゲット容器を運転位置と遠隔交換する位置の間を移動させる。運転時のターゲット容器の位置は中性子性能に大きく影響するため、ヘリウムバッセル容器内に配置された反射体と減速材との間に正確に位置決めして挿入できることが要求される。これに加え、ヘリウム

図1 J-PARC 全景 (完成イメージ)

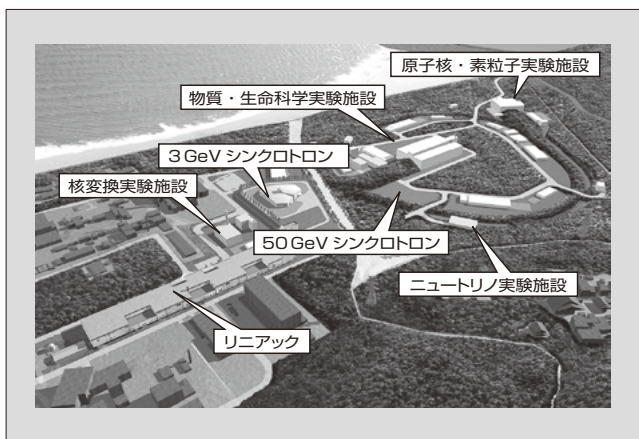
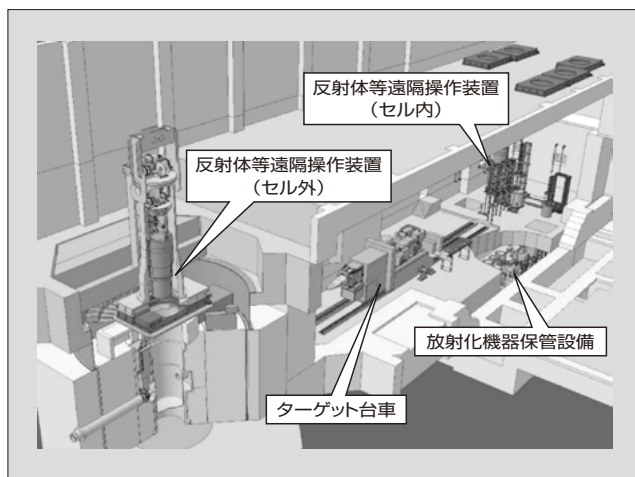


図2 3設備の概略図



児玉 健光

「ふげん」「もんじゅ」、HTTR、原子炉廃止措置、J-PARCなどの開発設計に従事。現在、富士電機システムズ株式会社発電プラント事業本部原子力統括部設計部担当部長。

ベッセル内での核破碎反応部からの放射線遮へいを行う機能、およびヘリウムベッセルのフランジ面とのシール状態を維持するための押付け力 300 kN の反力を支える機能が要求される。

ターゲット容器を含めた台車全体の大きさは全長約 14 m、高さ約 4 m、質量は大量の遮へい体を設置することから約 300 t となる。走行機能はラックアンドピニオン方式で駆動力を得て、専用の軌道上をリニアローラウェイで走行する方式である。前進・後退の停止制度は±1 mm 以下である。台車後部には水銀をターゲット容器内に循環させる水銀循環設備、タンク、配管などを搭載してる。

2.2 反射体等遠隔操作装置

反射体等遠隔操作装置は、ターゲット容器と陽子が衝突するヘリウムベッセル内部に設置される反射体や減速材、およびヘリウムベッセルと陽子ビームラインの境界となる陽子ビーム窓などをプラグに取り付いた状態で取り出し、減速材、陽子ビーム窓など構成部品の交換を遠隔操作で行う装置である。これらの取扱い対象機器は高度に放射化しているため、遮へい体付きの移送カスクに収容して、構成部品の交換作業を行うホットセル内に移送する。

ホットセル内には反射体内部プラグ・外部プラグおよび陽子ビーム窓交換プラグを保持して向きを精度よく変える容器受け台、減速材配管や陽子ビーム窓を遠隔操作で取付・取外をする減速材等交換装置が設置される。さらにホットセル天井外側の 5 か所のハッチには直径 1.9 m の通過口を開閉する床上遮へい体がそれぞれ独立して設置される。

2.3 放射化機器保管設備

放射化機器保管設備は、反射体等遠隔操作装置で各プラグから取り外した減速材配管や陽子ビーム窓を減容化するためにその場で切断する切断装置や、ホットセル下にある放射化機器保管室に設置される放射化機器を一時保管することを主目的とした保管設備、およびターゲット台車で水銀ターゲット容器交換作業時の補助作業を行うターゲット容器交換台車など、放射化機器の取扱いに関連した種々の装置で構成される。

切断装置はハサミ方式で、主に直径 90 mm の多重配管を切断する能力が求められる。保管設備は保管専用のピツ

トや架構類を装備する。ターゲット容器交換台車は、ターゲット台車先端の取付け部に位置合わせを行い、水銀ターゲット容器の保持および受渡し・受取りを行う。

3 装置の設計

3.1 ターゲット台車

ターゲット台車は、図 3 に示すようにホットセル内に設置されて、ヘリウムベッセル内での核破碎反応による放射線を遮へいする大量の遮へい体ブロックを搭載する。遮へい体ブロックは、インセルクレーンにより組立・解体ができるよう、1 体当たり 20 t 以下に収まる大きさとし、上下のピンで位置合せして積み上げる構造とした。

建家の遮へい壁には、ヘリウムベッセルに向かって水銀ターゲット容器を取り付けたターゲット台車が進入するための矩形（くけい）の貫通部が設けられているが、ホットセル側に対する遮へいを確実にするため、遮へい体と貫通部との隙間（すきま）は 20 mm 以内に抑える必要がある。双方の製作誤差を考慮したうえで、幅 2.6 m × 高さ 4.0 m の開口部で 4.5 m の挿入長さにわたってこの隙間を保持するため、積み上げる遮へい体ブロック全体の外形をあらかじめ小さめに作り、建家側の仕上がり寸法に応じて、遮へい体ブロック全面に外形寸法調整用の板状遮へい体を貼り付けて最終形状に仕上げる方法をとって、要求される隙間精度を達成した。

水銀ターゲット容器は放射線損傷により半年ごとの交換が必要であり、ターゲット台車にはフランジ部をボルトによって固定する構造としている。水銀循環設備からの 2 本の配管との接続は、ターゲット台車先端内部の取付け部にパワーマニプレータの先端工具を挿入し、ターゲット容器に装備している接続機構を遠隔操作する。水銀ターゲット容器フランジのボルト結合部やパワーマニプレータの挿入部密封フランジのボルト結合部は、頻繁なねじ込み操作が行われることから、ターゲット台車側ねじ穴の損傷を考慮して、交換可能な埋込みねじ金具構造とした。

このほかに、走行駆動装置や水銀配管結合部、動力・計装用配線結合部など、メンテナンスや交換が必要な部品は、すべてパワーマニプレータ、マスタースレーブマニプレータおよびクレーンを用いて遠隔操作で取外し・取付けができる構造としている。

3.2 反射体等遠隔操作装置

反射体等遠隔操作装置はホットセル外機器とホットセル内機器に大別される。ホットセル外でヘリウムベッセルから反射体プラグやビーム上前方の陽子ビーム窓交換プラグを取り出すための移送カスクを図 4 に示す。

移送カスクは内径 1.9 m、高さ 11 m の円筒構造物で、胴体下部には厚さ 290 mm の遮へい体を全周に配置し、最も重い反射体プラグ（質量 36 t）を収容した状態で総質量は 130 t に達する。移送カスクはグリッパと昇降装置を装備し、各プラグを吊り入れて収容した状態で天井クレー

図 3 ターゲット台車

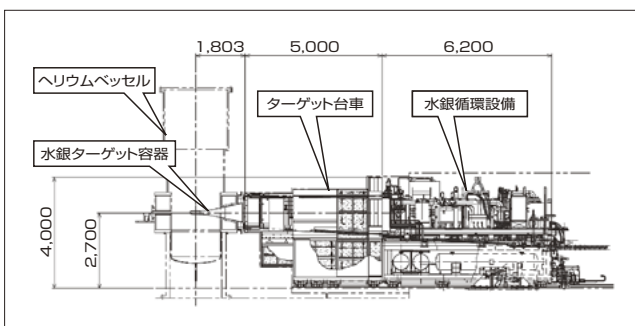
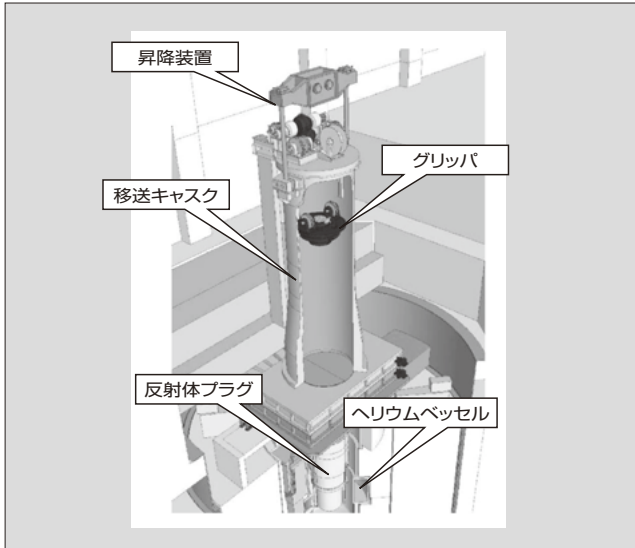


図4 移送キャスクと取扱い対象物



ンによりホットセル上の所定の床上遮へい体通過口まで移動し、ホットセル内に吊り降ろす。

グリッパは、内部と外部との二重円筒形状が組み合わされた構造の反射体プラグの内外両プラグまたは内部プラグのみをつかみ分けられる旋回型の爪を持ち、放射化機器保管設備の最も深い所まで到達できる35mの昇降ストロークを備えている。

ホットセル内には図5に示すように、内部プラグ受け台、外部プラグ受け台が配置され、吊り降ろされてきた各プラグを搭載し、プラグに固定されている減速材配管、または陽子ビーム窓を減速材等交換装置での交換作業に適した必要方位に正確に旋回して位置合わせを行う。

減速材等交換装置は全体を前後左右に移動する機能と、減速材配管等取扱い用のアダプタと取り合う結合機構を昇降・旋回させる機能を持ち、パワーマニプレータと連携して取外・取付作業を行う。速材配管等を取り付ける際には、所定の位置に確実にはめ込んだことを映像により確認するとともに、過大な力が作用しないよう荷重センサを取り付けて押付け力を制御する。

取り外した減速材配管および陽子ビーム窓は、隣接する放射化機器保管設備の切断装置に受け渡す。

これら一連の操作は、遮へい窓からの目視とホットセル内の壁、床およびインセルクレーン、パワーマニプレータに取り付けられた耐放射線性カメラにより確認して、ホットセル外の運転操作盤から行う。

3.3 放射化機器保管設備

切断装置はハサミ状の機械式切断装置で、切断しながら対象物を上下に送り出して切断位置を変えるために、切断機を2基の把持機と組み合わせて配置している。これら把持・切断機の向きを切断作業位置と減速材等交換装置との受渡し位置の2か所に位置を変えるため、装置全体を旋回動作させる機能を持つ。

切断するハサミは、図6に示すように外側から抱え込む

図5 ホットセル内機器の構成

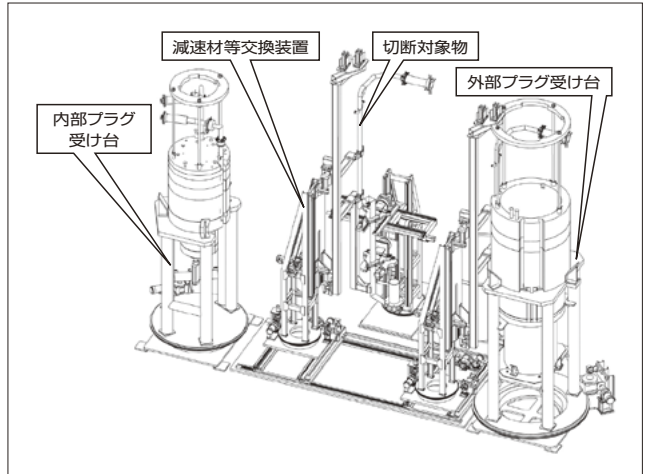
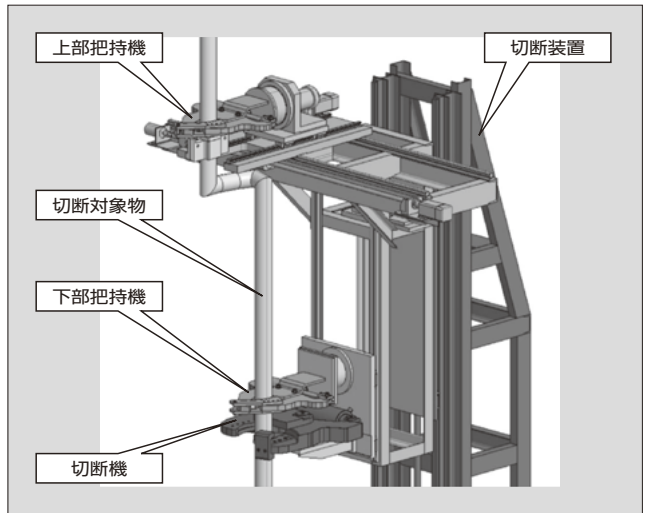


図6 切断装置



ように内側に絞って切り込んでいく動作方式であり、切断対象物がハサミの外に逃げないようにした。取り扱う切断対象物の太さは64～100mmの広い範囲を対象としているので、把持する機構も切断ハサミと同様に内側に絞って挟み込む方式として、形状・寸法に関係なく内側の所定の位置で固定できるようにした。

保管設備は、水銀ターゲット容器、反射体プラグ、陽子ビーム窓交換プラグ、ミュオンターゲットプラグなど、多くの種類の放射化機器を保管する架構類で構成される。これら保管対象物や放射化機器保管設備室内の移動式架構は、いずれもインセルクレーンの吊り具だけで取扱いができるよう、対象物側のハンドリング部の形状をそれに適した形状に合わせて統一した。

ターゲット容器交換台車は放射化機器保管設備室上階のホットセル内で、水銀ターゲット容器交換作業の際にターゲット台車の前方に配置され、水銀ターゲット容器を受け取る姿勢でパワーマニプレータによるボルト緩め作業の終了を待つ。取り外した水銀ターゲット容器を受け取った後は、新しい水銀ターゲット容器を受け取って、取外し前と同様の姿勢に移り、パワーマニプレータによる取付け作業

の間これを保持する。

4 工場試験

上述の3設備は、工場試験にて模擬取扱い対象物を使用して、それぞれの性能確認試験を実施した。ここでは、特に各設備が他設備と連携して動作する試験項目について、実際の状態に設備同士を配置し、連携した運転動作を行って所定の性能を発揮することを確認した内容、および切断装置の切断能力を確認した試験を中心に紹介する。

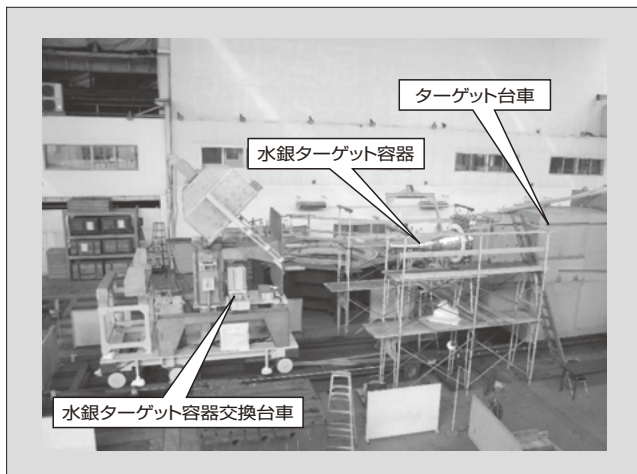
4.1 ターゲット台車の工場総合組合せ試験

ターゲット台車は、施設内では複数の会社が個別に受注して製作した水銀ターゲット容器および水銀循環設備が組み合わされて運転する。現地への搬入に先立ち、それぞれの製作を担当する各社の工場試験工程を調整し、富士電機川崎工場に集めて組合せ状態を作り上げ、連携した性能を確認するための工場総合組合せ試験を行った。

運転に入ると半年に一度の頻度で行われる水銀ターゲット容器の遠隔取付け・取外し操作性確認は、組み合わせて使用する放射化機器保管設備のターゲット容器交換台車を図7のように設置して、実際の要領、手順で遠隔操作を模擬した作業を行い、それぞれが十分に機能を果たすことが確認できた。この一連の作業を行って取り付けた状態での水銀ターゲット容器とターゲット台車の結合部シール性能は、十分なものであることが確認できた。

一方、施設内に固定して設置されるヘリウムベッセルとの間でも水銀ターゲット容器は密着してシール状態を維持する。この場合、シール性能を発揮するためにシール材には300kNの押付け力が必要であり、ターゲット台車はこのシールのための反力を支える機能が要求され、付属レール設備には台車全体を押さえる固定装置が装備されている。工場総合組合せ試験では、試験レール上に模擬ヘリウムベッセルフランジを強固に取り付け、ターゲット台車の前進動作、シール機構による押付け力発生、ターゲット台車のシール部反力支持までの一連の動作を行い、それぞれが

図7 ターゲット台車の工場総合組合せ試験



要求される性能を発揮することを確認した。

4.2 減速材等交換装置と切断装置の連携

反射体等遠隔操作装置の減速材等交換装置と放射化機器保管設備の切断装置はホットセル内で隣接して配置され、減速材等交換装置で取り外した減速材配管および陽子ビーム窓はその場で切断装置に受け渡される。

工場試験では各装置ごとの単体性能試験を行うとともに、図8のように両装置を現地据付状態と同じ位置関係に据え付けて、模擬切断対象物を使用して実際に連携動作が円滑に行われることの確認と、その際の各機器の位置決めデータ、動作性能データを取得した。

4.3 切断装置の切断能力確認試験

切断装置はハサミ部分に専用の切断刃を取り付けて、減速材配管類を1m程度の長さの短く切断する。切断刃の交換頻度のデータを取得するため、実際の運用計画に基づいて試験体を製作し切断試験を実施した。

試験体は半年ごとに交換されるミュオンターゲット、2年ごとに交換される陽子ビーム窓、そして6年に一度の交換が計画される減速材配管を模擬した切断試験体を6年分

図8 減速材等交換装置と切断装置の試験

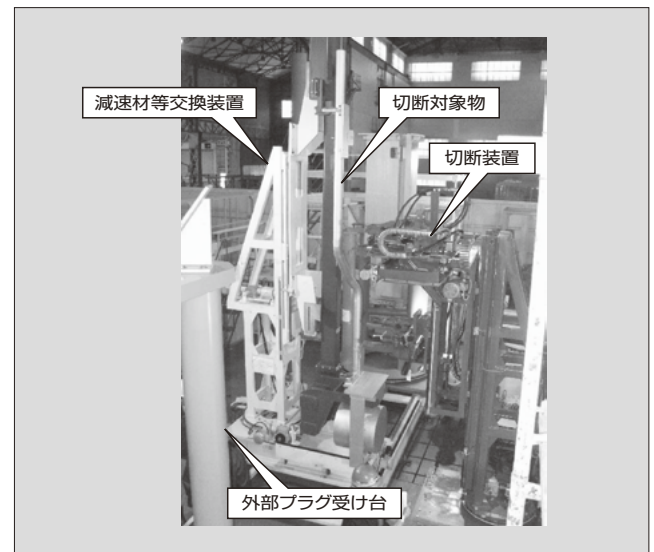
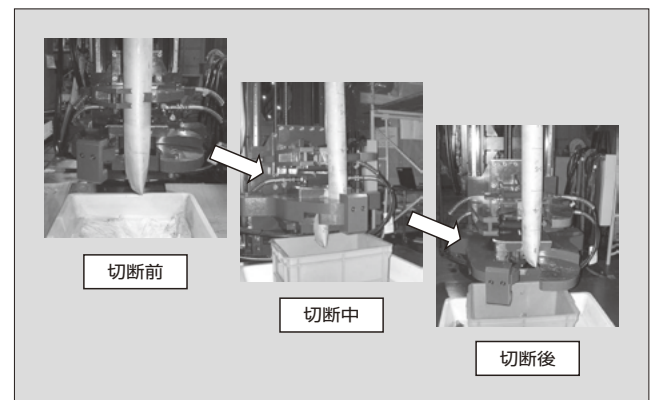


図9 切断能力確認試験



作り、1個の切断刃について刃先部分に異常が見られるまでを目処（めど）に切断を続けた。

切断回数は49回に及んだが、切断刃には欠け、割れなどの異常が発生することなく、6年分として用意したすべての試験体を切断することができた。この結果、これらを切断対象とする切断刃には十分な耐久性があることが実証された。

切断試験の様子を図9に示す。

5 現地据付け・組合せ試験

5.1 ターゲット台車

ターゲット台車は、ヘリウムベッセル内に装着されている反射体と減速材の間に長さ約1.8mの水銀ターゲット容器を先端部で上下左右のずれ5mm以内で挿入していかなければならない。この調節は、ターゲット台車を現地レール上に据え付けた後、別途据付け済みのヘリウムベッセル

図10 現地据付完成後のターゲット台車

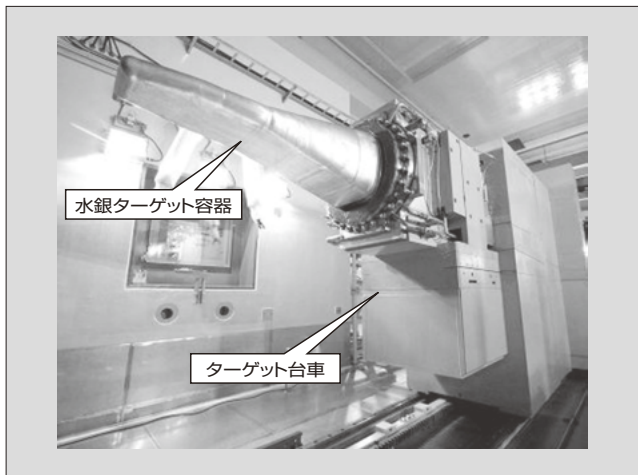
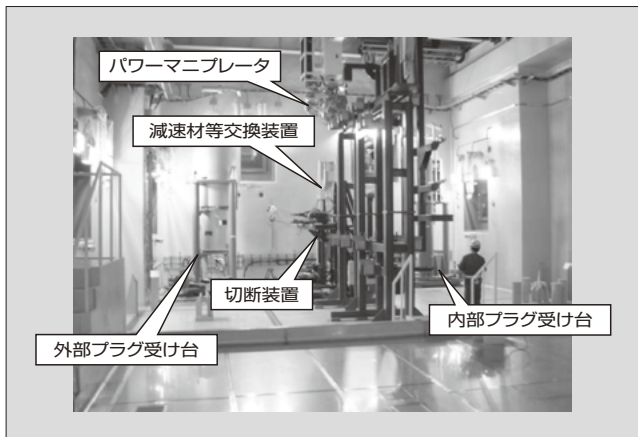


図11 ホットセル内機器の現地据付状態



を基準として、寸法測定、ジャッキアップおよびライナ挿入による位置調整を繰り返す作業となる。この方法は工場組立試験の過程から検討・準備しており、手順どおりの作業で目標精度内に設定することができた。しかし、対象部位は直接確認することのできない狭隘（きょうあい）部となるため、水銀ターゲット容器の表面に厚さ2.3mmのテープ型接触センサを貼り付けて、周辺に接触することがないことを確かめながら慎重に挿入することにより、最終的に取合上の問題がないことを確認していった。図10に現地据付完成後のターゲット台車を示す。

5.2 反射体等遠隔操作装置・放射化機器保管設備

反射体等遠隔操作装置および放射化機器保管設備のホットセル内機器は、前述の工場試験での配置状態を再現するようにそれぞれの据付けを完了させた。図11に据付け状態を示す。

すべての機器を据え付けてからの組合せ試験では、ホットセル外の移送キャスクをヘリウムベッセル上方に実際に据え付けて、実物の反射体プラグ、陽子ビーム窓交換プラグなどを取り出し、放射化機器保管設備への一時保管場所への吊り降し、ホットセル内機器への受渡しを行い、所定の位置決め精度、昇降ストロークがあることを確認した。

ホットセル内では、減速材配管や陽子ビーム窓を各プラグ受け台、減速材等交換装置とホットセル内設備であるインセルクレーン、パワーマニプレータとの連携操作により、計画どおりホットセル外からの目視および監視カメラ映像と運転信号に基づき、遠隔運転操作によって取外し・取付けができることを確認した。

6 あとがき

設計、製作を行ったJ-PARC 物質・生命科学実験施設向け機器は、いずれも遠隔による運転操作、メンテナンス性が要求されるものである。構造的にも動作的にも他設備が多く関連してくるので、工場試験段階、現地据付試験段階で連携した試験を行って、それぞれの設計、性能が施設全体として充足していることを確認してきた。

最後にターゲット台車、反射体等遠隔操作装置および放射化機器保管設備の設計、製作、試験にあたり、多大なるご指導をいただいた独立行政法人日本原子力研究開発機構の関係各位に対し、深く感謝する次第である。

参考文献

- (1) 加藤崇, J-PARC 物質・生命科学実験施設における1MWパルス中性子源, FAPIG, no.173, 2006-7, p.9-15.



*本誌に記載されている会社名および製品名は、それぞれの会社が所有する
商標または登録商標である場合があります。