

評価の詳細

研究開発課題名（研究機関名）：

セル内遠隔設備の開発

(独立行政法人日本原子力研究開発機構)

機関名：独立行政法人日本原子力研究開発機構

代表者氏名：滑川卓志

機関名：国立大学法人筑波大学

代表者氏名：山海嘉之

研究期間及び予算額：平成18年度～平成21年度（4年計画） 1,249,917千円

平成18年度 231,616千円

平成19年度 515,481千円

平成20年度 308,136千円

平成21年度 194,684千円

項目	内容
1. 目的・目標	<p>FBR サイクル実用化研究 (FaCT) における燃料は従来のMOX燃料の千倍の放射線量を有するため、燃料製造はセル内の遠隔製造となる。燃料製造施設に採用するセル内遠隔設備の成立性を見通すため、代表的なセル内設備の開発を行う。セル内遠隔製造設備に要求される基本機能は、</p> <ul style="list-style-type: none"> ① プロセスの実行（加工・計測等要求仕様の実現） ② 自動運転（設備内物流・設備間物流の確保、自動運転制御） ③ 遠隔保守（モジュール化設備、遠隔ハンドリング設備） <p>に大別される。このうち、①のプロセスの実行及び②の自動運転は、現在の原子力機構のMOX燃料の製造現場で使用しているグローブボックスの設備を利用できるため、代表設備として燃料粉末とペレット成型体を取扱う成型設備を対象とし、グローブボックス用の設備に③の遠隔保守機能を付加する開発を実施する。</p> <p>また、より精密なプロセス機能が要求される特殊なセル内設備の代表として、ペレット検査設備及び粉末分析設備について、①②③の機能を有する設備を開発する。なお、放射線影響への配慮については達成目標外であるが、設備構造に影響するものについては開発上の配慮を実施することとした。</p> <p>全体計画と各研究開発課題の到達目標は以下の通り。</p> <p>(1)ペレット成型設備のセル内遠隔保守対応モジュールの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ①ペレット成型設備モジュールの概念設計 ②遠隔保守システムの構築 <p>達成目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 保守対象部品の遠隔交換が可能な部品構成（モジュール）による遠隔保守補修対応のペレット成型設備を開発する。 - 装置内仕掛かり粉末及び成型体を飛散させることなく閉じ込めまたは回収できるシステムとする。 - 工程セル内での各モジュールの交換作業は6時間以下を目標とする。 - モジュール側と遠隔ハンドリング設備との取り合い部の開発にあ

	<p>たつては、共通構造のコネクターバンク等、原則として汎用性を持たせ、他の工程設備との共用を図れる構造とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> - 上記を実現することで遠隔ハンドリング設備と整合した最適な組合せシステムとする。 <p>(2)セル内遠隔ハンドリング設備の開発</p> <p>①遠隔保守マニプレータ・システムの開発</p> <p>②遠隔保守ロボットアーム・システムの開発</p> <p>達成目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> - モジュール交換装置及びモジュール分解・除染作業が可能な遠隔ハンドリング設備を開発する。 - 工程内移送中のペレット転倒を保守対象に含め、修復は10分以下を目標とするハンドリング設備の開発 <p>(3)ペレット検査技術の開発</p> <p>①検査システムの概念設計</p> <p>②試験装置性能の確認試験</p> <p>達成目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 処理能力：ペレットの外観検査（欠け、割れ）、寸法検査、密度測定（重量測定）を、1日70,000個全数検査（測定は原則1系列とする。） - ペレット1個あたりの重量の測定精度 ±5mg - 外観検査として、φ0.1mm程度の小さな空孔（欠け）を除外できること。幅0.1mm以上の割れが識別できること。 - 寸法検査として、ペレットの軸方向5点、径方向5点の寸法の測定精度が±0.01mm以内 - 設置位置での微調整を要さない自動位置決め、自動調整が可能なこと。 - セル内モジュール交換が可能なこと。また、搬送不良が生じた場合、搬送ペレットを排除できること。 <p>(4)TRU燃料粉末の分析技術の開発</p> <p>①インライン分析装置の開発</p> <p>達成目標：</p> <ul style="list-style-type: none"> - 含水率測定、粒度分布測定、粉末流動性測定、粉末の排出までの一連のインライン分析を30分以内に処理 - 粉末の含水率の測定精度±0.1% - 粉末の粒径差の分解能が20%以内 - 粉末の流動性の測定精度が±5以内（Carrの流動性指数換算） - 遠隔操作によるモジュール交換が可能であること。 - 測定後の資料は全量を工程に戻すこと。 <p>②O/M比測定装置の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> - O/M比測定装置の処理能力として、オフライン測定で3時間程度 - O/M比±0.005（目標）
--	--

<p>2. 研究成果</p> <ul style="list-style-type: none"> • 成果 • 副次的な成果 • 論文、特許等 • 	<p>【研究開発項目1】</p> <p>(1)ペレット成型設備のセル内遠隔保守対応モジュールの開発</p> <p>①ペレット成型設備モジュールの概念設計</p> <ul style="list-style-type: none"> • グローブボックス用のペレット成型設備から遠隔交換の保守対象となる約70の保守項目（部品の損耗、設備内物流異常、定常保守等）を抽出し、保守するために交換する機器のまとまり（モジュール）をセル内条件に配慮して決定し、37のモジュールからなるペレット成型設備の概念設計図書及び交換手順書を作成した。 • モジュールは下記の性能を有するものとした。 <ul style="list-style-type: none"> - セル内ハンドリング設備（クレーンを含む）を用いペレット成型設備の全てをモジュールとして分割できる。 - モジュールの種類は、小モジュール（注）27、複合モジュール（注）10で構成する。（注：小モジュールはモジュール自体が単独で、より小さなモジュールを包含しないもの。複合モジュールとは、構成要素に小モジュールを包含したモジュール。） - モジュールの着脱に係る機能を確保するための固定のボルト、位置決めのための機構、クレーンフック等の吊金具、電気コネクタ、流体カプラ類を共通構造としたため、他のセル内設備にも共通的に適用できる。 - 仕掛かり粉末の閉じ込めおよび成型体の回収ができる。例えば、仕掛かり粉末が存在する粉末供給複合モジュールは前後の切離弁で閉じ込める。仕掛かり粉末及び成型体（以下、ペレットという）が存在する成型機（フード部）小モジュールは、当該モジュールを囲む覆い（フード）により閉じ込め、一部の開放箇所には閉塞板を取り付ける。 - センサーの方式変等を実施し、1年以上の耐放射線性を有する。 <p>②遠隔保守システムの構築</p> <ul style="list-style-type: none"> • 下記の確認により、セル内設備の遠隔保守システムの概念（工程セル内のモジュール交換→保守セル内の遠隔除染→グローブボックス内の手作業による部品の交換）の成立性があることを確認した。 <ul style="list-style-type: none"> - 【研究開発課題2】に示す遠隔保守マニプレータ・システムにおけるマニプレータ・アーム（以下、PMという）の操作範囲の検討により、全てのモジュールの着脱機構位置にPMの手先部がアクセス可能であることを、概念設計図上で確認した。 - ペレット成型設備の代表的な部分を試作したモジュールと【研究開発課題2】に示すPM、マン・マシン・インターフェース（以下、MMIという）技術及び自律制御技術を組み合わせたモックアップ試験の結果から、ペレット成形設備を構成する各モジュールの交換時間を推定し、目標の時間6時間以内が満足されること（最長のもので約5時間33分）を確認した。 - 保守セル内のモジュール分解・除染に用いる遠隔ハンドリング設備としては、機械式マスタ・スレーブマニプレータ（手動）を使用することとした。分解・除染の対象となる代表的モジュールとして、もっとも精密な作業が求められる成型機（フード部）小モジュールの金型部（ダイ・パンチ）について分解・取外し可能なことを、機械式マスタ・スレーブマニプレータ（手動）の試験にて確認した。
--	---

【研究開発項目 2】

(2)セル内遠隔ハンドリング設備の開発

工程セル内のモジュール交換装置として遠隔保守マニプレータ・システム、転倒ペレット修復用の遠隔保守ロボットアーム・システム、及び、操作者の遠隔操作作業の負担を軽減するため、これらに付加する MMI 技術と自律制御技術を開発した。

①遠隔保守マニプレータ・システムの開発

- ・遠隔保守マニプレータ・システム（PM と遠隔保守移動装置で構成）を開発した。これに、以下を付加した。
 - MMI 技術として、操作者の負荷の少ない操縦端の開発。また、操縦者への現場情報の伝え方として、保守対象部位と PM の設計情報を CG 化した作業環境をレーザ・レンジ・ファインダーで位置補正し分りやすく表示する機能。加えて、PM の動きをリアルタイムに表示する機能。
 - 自律制御としては、次の通り。(1)遠隔保守マニプレータ・アームに着脱式力センサを付加する方式として、モジュール着脱作業においてオペレータにより無理に大きな力を加えるような指示を与えた場合でもシステムが自律的に判断し、過大な力を加えることを防止できる制御システム。(2)筑波大のスーツ方式の操縦端を発展させ、オペレータの操作時の筋電位を読み取って、操縦端に力の支援としてフィードバックすることで遠隔操作作業の負担を軽減するシステム。(3)マニプレータの手先を指示した目的地付近まで自動で移動できる機能。
- ・試作したモジュールと PM、MMI 技術、自律制御技術を組み合わせた試験を実施し、作業時間・作業負荷にかかわる評価を行い、以下の結果を得た。
 - 筋電位フィードバック付きスーツ方式による操縦は、操作者へのフィードバックの調整・慣れ等の手間がかかるが、精神的負荷が少なく操作時間が短い点で一番優れている。
 - 一方、筋電位フィードバック無しのスーツ方式による操縦は、3Dマウス方式による操縦に比べ身体的負荷が大きい。
 - これらのことから PM は、具備すべき機能として操作者の精神的な負担軽減を優先し、自律制御機能を組み合わせたスーツ方式をベースとする。さらに、3D マウスのような操縦者の個人差の少ない操作方式をバックアップとして組み合わせたシステムが適切であると評価した。

②遠隔保守ロボットアーム・システムの開発

- ・転倒ペレット修復用ハンドリング設備として遠隔保守ロボットアーム・システムを開発した。ペレットを掴むロボットアーム（操縦は、自律機能付きのスーツ方式の操縦端）と、転倒ペレットを事前に整列させ、また、把持したペレットを直立させる転倒ペレット修復支援装置（操縦はパソコンによるプログラム制御）で構成した。
- ・製作したペレット搬送複合モジュール上に設計上想定される最大数（8 個）のペレットが転倒した状態で修復試験を行い、約 5 分で修復できることを確認した。

【研究開発項目 3】

(3)ペレット検査技術の開発

①検査システムの概念設計

- ・1日70,000個を検査するための量産性を考慮して、外観検査及び寸法検査に画像解析、重量測定装置にスロープ移送方式の電子天秤を用いたペレット検査システムの概念設計図書を作成した。
- ・モジュールは下記の性能を有するものとした。
 - 各検出部をモジュール構造とし、それぞれ自動位置決めにより着脱できる。
 - 検出部へ遮へい体を配置し、1年以上の耐放射線性を有する。

②試験装置性能の確認試験

- ・ペレット検査システムの試験装置を製作し、ステンレス製模擬ペレット400個をセットして自動運転で検査を行った。その結果、連続する200個通過時間（重量計モジュールは2系列同時計測の構成のため、1系列分の処理時間で評価する。）が230秒であった。70,000個のペレットの正味の検査時間は22.4時間となる。この間に供給皿の交換が175回発生するため、皿交換に伴う待ち時間は1回当たり32秒以内にする必要がある。供給系、回収系とも2系統化し常に新規供給皿、新規回収皿を待機させるシステム構成とすることで、供給、回収の待ち時間を作らず連続検査が可能な構造とした。
- ・外観検査の欠けは、 $\phi 0.1\text{mm}$ 未満の空孔部を含めて検出した上で、その一つ一つの大きさが予め設定したしきい値を超えるものを欠け面積として集計する機能を有する。幅 0.1mm 以上(0.13mm)および 0.1mm 以下の割れを模擬したステンレス製模擬ペレットを用い、幅 0.1mm 以上の割れを検出できることを確認した。
- ・側面欠けの合否判定基準を5%に設定し、5%の側面欠けを有するステンレス製模擬ペレットの側面部の外観検査を行い、これを不合格品と判定できることを確認した。端面欠けの合否判定基準を25%に設定し、25%の端面欠けを有するステンレス製模擬ペレットの端面部の外観測定を行い、これを不合格品と判定できることを確認した。割れの判定基準として、幅 0.1mm 以上の割れと周方向 $2/3$ の割れのステンレス製模擬ペレットを用いた外観測定を実施し、不合格品として判定できることを確認した。
- ・寸法検査は、測定値の期待値 $\pm 1\sigma$ がマイクロメータによる測定値 $\pm 0.01\text{mm}$ 以内となり開発要件を満足する結果が得られた。なお、内径寸法測定精度については、端面画像解析として測定されていることから外径寸法測定と同様な精度が得られていると考える。
- ・ステンレス製模擬ペレットを用いて重量測定の精度を確認する試験を実施したが、繰り返し測定においてバラツキとズレが認められた。天秤のサンプリング頻度を上げることにより、測定精度が満足する結果が得られた。
- ・検出部モジュールが遠隔で着脱できることを確認した。
- ・検査モジュールを遠隔で取り外すことにより、ペレット搬送ラインにロボットアーム等の遠隔ハンドリング設備がアクセスできる構造とし、搬送不良ペレットを排除できる構造とした。

【研究開発項目4】

(4)TRU燃料粉末の分析技術の開発

①インライン分析装置の開発

- ・含水率、粒度分布及び粉末流動性のセル内インライン分析装置の概念設計を行った。
 - モジュール着脱機構を持つ概念設計図書を作成した。
 - インライン分析装置は、工程配管から供給される粉末試料を本装置に取り入れ、各分析装置へ粉末試料を分配及びバイパスした後、分析終了後の試料を工程配管へ排出・返送する装置である。装置内物流は、粉末試料を受入れる試料供給装置、内部モジュールへの粉末試料を分配及びバイパスするディスクサンプラ（縮分器）及び配管で構成する設備とした。
 - 本装置は12個のモジュールから構成されており、遠隔化対応のための遠隔操作ボルト、吊具、コネクタ及びカプラを装備し、マニピレータまたはクレーン作業での着脱が行える機構を有する。
 - 放射線影響については、考察を行った。
- ・試験装置を製作し、模擬物質を用いた試験により分析性能を下記のとおり確認した。
 - 1バッチあたり2.5kgの試料について、一連のインライン分析が、目標の分析時間30分以内に対し約14分で完了し、目標の分析時間を満足していることを確認した。
 - 装置上部に試料を投入すれば全量が下部から回収できる構造であるが、試験の結果、装置内滞留が生じた。試料の投入毎の滞留量は次第に減少し、2.5kg/バッチの投入13回でほぼ飽和状態となり、累積で最大約600g蓄積されると推定した。装置内で試料を分配するためのディスクサンプラ（2箇所）での滞留量はその大半を占めており、その原因と対策について以下のとおり考察した。
 - ・現在のディスクサンプラを使用する場合の改良策： ディスクサンプラは、斜度を持った分配用ディスク表面を試料粉末が流れる出る機構となっているため、現状の重力移送だけでは粉末が滞留しやすい。このため、1) 分配用ディスク表面を電解研磨処理で滑らかにすることで、粉末を滞留し難くする。2) ディスクサンプラ外面にノッカやバイブレーション機構を取り付け、滞留を防止する。3) ディスクサンプラ内部にエアーパージ機能をもたせることにより、滞留を防止する。
 - ・分配機構を変更する改良策： ディスクサンプラの代わりに、試料の通過ラインと測定ラインに粉末流を単純に切り替える切替弁を採用する。
 - 模擬物質として選択した3組のMo粉末から10回の試料採取で測定した含水率の平均値は1.83%~1.97%、標準偏差が0.03%から0.06%であった。また、赤外線水分計を用いた含水率の測定は検量線により算出するが、模擬試料を乾燥重量法で測定して作成する検量線データに0.2%程度のバラツキが生じているため、これが精度に不確かさを与えている。このバラツキの原因は、乾燥重量法では模擬試料の真の含水率を押さえきれていないためと考える。ただし、実燃料の検量線を得る手法としてMOXペレット製品の品質分析で用いられている手法（例えば、カール・フィッシャー法、JIS K0113-2005）の適用ができるので、本質的な課題ではないと判断した。

- 粒度分布測定装置の粒度分布の分解能については、得られる粒度分布のヒストグラムの区間幅が 20%未満であることから、20%異なる粒径を異なる区間に属するものとして分解できる。
- Mo 造粒粉の模擬粉末を用いた試験を実施し、粉末流動性指数の測定精度が、目標精度（Carr の流動性指数を±5）を達成していることを確認した。
- 各測定器モジュールのモジュール交換作業後における試料取扱は、特段の調整作業なく実施できることを確認した。

②O/M比測定装置の開発

- ・熱天秤方式のO/M比測定装置の概念設計図書を作成した。
- ・O/M比測定装置の試験装置を製作し、試料の自動ハンドリング機能を確認した。
- ・ハンドリング試験から試料の熱天秤への装着までの所要時間を5分（試験結果から）、1000℃への昇温・保持に120分（原子力機構の経験等から）、降温に20分（試験結果から）、試料取出し時間を5分と見積もり、一連の操作を2時間30分と推定し、目標の3時間程度の処理時間を満足することを確認した。
- ・熱天秤の1000℃までの昇温試験により、重量測定値のドリフトがO/M比の目標精度に影響を与えないことを確認した。
- ・遠隔ハンドリングを模擬した試験により、遠隔保守性を確認した。

【事業全体】を通して

- ・FBR サイクル実用化研究（FaCT）におけるセル内遠隔設備の成立性を見通すため、ペレット成型設備を代表的な設備として選定し、設備のモジュール化とそれをハンドリング設備の開発を実施した。
- ・モジュールとハンドリング設備を試作し、これを組み合わせたモックアップ試験を実施することで、モジュール交換作業が目標とする時間内に交換できることを確認した。また、装置内のMOX原料や仕掛かり品を遠隔で取り除ける設計とし、FaCTにおけるセル内遠隔保守システム（工程セル内のモジュール交換→保守セル内の遠隔除染→グローブボックス内の手作業による部品の交換）の成立性があることを確認した。
- ・ハンドリング設備として、操縦者を支援する機能を有するロボットアームと遠隔保守の現場環境を分かりやすく表示する組み合わせ、操縦者の負荷の少ないマニプレータを開発した。また、ペレットの転倒等の設備内の物流異常に対応する小型のロボットアームを開発した。
- ・より精密な機能が要求される特殊なセル内設備の代表として、ペレット検査設備及び粉末分析設備について、セル内遠隔設備の具備すべき基本機能（プロセスの実行、自動運転、遠隔保守）を有する装置開発を実施した。模擬試料を用いた試験等により、目標とするプロセス性能と自動運転が達成できることを確認した。さらに、これらの装置においてもペレット成型設備において確認したモジュール構造とハンドリング設備の組み合わせが適用できることを確認した。
- ・以上の開発において、当初、放射線影響については考察のみで開発対象外としていたが、装置構造上に影響を与えるものについては、耐放射線性に配慮した開発とした。

	<p>【得られた成果の外部発表】</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 原子力システム研究開発事業公募報告会ポスター発表及び資料集；科学技術振興機構主催（2008年1月22日） 2) 原子力 eye、Vol. 54 No. 5(2008) 3) 原子力システム研究開発事業公募報告会ポスター発表及び資料集；科学技術振興機構主催（2009年1月28日） 4) JAEA-Evaluation-2009-003, 高速増殖炉サイクル実用化研究開発（FaCTプロジェクト）-フェーズI 中間とりまとめ-、日本原子力研究開発機構（2009） 5) “Handling Technology of Low Decontaminated TRU Fuel for the Simplified Pelletizing Method Fuel Fabrication System”, FR09, Kyoto, Japan（2009）
<p>3. 事後評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 研究開発の成果 ・ 技術の卓越性 ・ 成果の発展性 	<p>【研究開発の成果】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 各研究開発項目において設定した目標に対し、所定の成果を上げた。 ・ FaCTにおける燃料製造においては、遠隔保守方式の採用は不可欠なものと思われる。本事業において、モジュール化による遠隔保守技術の実現性に道筋を付けた。 ・ 今後、実際の燃料製造設備等の実証の場を確保し試験を重ねて、各工程、設備個々の信頼性向上に取り組んでほしい。 <p>【技術の卓越性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 遠隔保守を実現するための概念を構築し、これを具現化するために必要な要素を抽出し、その中から実現の難易度が高い事項を中心的課題として選定し、その上でそれらを開発・検証をするアプローチは、システムティックであり優れている。 ・ 全自動の燃料検査装置は、燃料製造施設における効率化(経済性向上)への効果が大きいことから、今後も、近年著しい発展が見られるロボット及び関連する制御技術の幅広い技術サーベイと一層優れた技術の開発に取り組み、MOX 燃料製造施設のみならず、ウラン燃料製造施設への展開をも含め早期の実用化を期待する。 <p>【成果の発展性】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ FaCTにおける燃料製造機器の遠隔保守技術に関する発展に相当の寄与があったと認められる。 ・ ペレット検査技術開発における転倒ペレット修復操作についての技術的成立性が確認されており、今後、画像認識や人工知能を取り込むことで全自動化も期待されることから、更なる発展が見込まれる。 ・ 自律制御機能付加スーツ方式による遠隔保守・操作、人間の通常動作とのギャップを解消することにより更なる改良・高度化を見込むことができ、人間の接近性が確保できない分野への応用（拡張）も比較的容易になされると思われることから、発展性も期待される。
<p>4. その他</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ セル内遠隔技術については、関連する再処理技術の研究開発状況を踏まえて進めていく必要がある。具体的には晶析法、MA回収技術、MA含有低除染ペレットの照射試験等があるので、これらの開発状況、実用化見通しとの整合性を念頭に進めてほしい。 ・ 本開発は、保守をする立場から何時間以下でモジュール交換作業が

	<p>終了したとか何分以下で転倒ペレットを修復できたかなどの目標値を作りそれを達成の根拠にしているが、本当の評価は、計測値で客観的に判定できるというようなものではなく、燃料製造設備のトラブル発生時に、とにかく今持ち合わせの機材で確実に保守・補修が出来るか否かということであり、そのことが一番大事なことである。</p>
--	--