

原子燃料再処理工場遠隔保守技術の開発

Development of Remote Maintenance Technology for Nuclear Fuel Reprocessing Plants

核分裂生成物を含む使用済み燃料の再処理を行なう原子燃料再処理工場では、施設そのものが高放射線場にあることと機器自体の表面が放射性物質により汚染されていることなどから、プロセス機器の故障は施設稼働率を大幅に低下させることに直結する。このために、これまで種々の遠隔保守技術の開発が行なわれてきたが、今回、動力炉・核燃料開発事業団東海再処理工場の使用済み燃料溶解槽の補修、及び関連する数種の遠隔点検装置の開発に従事する機会を得た。特に溶解槽の補修では放射線環境条件、補修対象の制約条件などを考慮した高度の遠隔操作性をもつ耐放射線性点検・補修装置が必要となり、6種類から構成される溶解槽補修ロボットを開発した。開発のかぎは耐高放射線性部品及び材料の選択使用、構造の小型化と全遠隔操作性の実現であった。この種の全遠隔保守装置は世界的に見ても類がなく、今後、再処理施設だけでなく特殊な環境下での保守・点検・補修作業などに広く適用可能なものと考えている。

河原 暲* Akira Kawahara
 杉山 千** Sen Sugiyama
 斎藤正之* Masayuki Saitō
 川村博信* Hironobu Kawamura
 杉山 栄*** Sakae Sugiyama
 山出 毅* Atsushi Yamade

1 緒言

我が国では動力炉・核燃料開発事業団が東海事業所で使用済み燃料の再処理工場を操業しており貴重な経験が得られている。使用済み燃料や高レベル放射性物質を取り扱う再処理工場のセル(遮へい構造体で囲まれた部屋)は、運転中、定期点検中を問わず、通常の状態ではセル内への人の接近が不可能であるところに特徴がある。このため、セル内のプロセス用機器類には、その耐用期間中の故障、補修などによって施設の利用率を大幅に低下させる事態が生じないように高度の信頼性が要求されている。一方では、いったん故障が発生するとその点検・補修作業時に、作業員の放射線被ばく線量を増大させる可能性もある。このため、「遠隔保守技術」の開発に大きな期待が寄せられている。

日立製作所では原子力発電所での作業員の被ばく線量低減を目的として多くの遠隔自動機器を開発してきた。現在、遠隔保守技術を採用した再処理工場の設計、研究とともに、直接保守を前提とした動力炉・核燃料開発事業団東海再処理工場などに適用可能な遠隔保守技術の開発を進めている。直接保守を前提とした再処理工場用として、溶解槽の遠隔補修装置を同事業団の指導のもとに開発した。また、セル内点検装置、小口径内の点検装置、詰まり除去装置などについても同様に同事業団の指導のもとに試作開発を行なってきた。以下、再処理工場での遠隔保守技術の必要性、要求される機能、及びそれらを反映した溶解槽補修装置、セル内点検装置についてその開発概要を述べる。

2 再処理工場の保守方法の概要

現在、世界的に見て実用化されている再処理技術は使用済み燃料を硝酸で溶解し、有用なウランとプルトニウムを溶媒に抽出するピューレックス方式である。このため再処理工場の機器類は、高放射線の場にさらされ、かつ硝酸溶液と接するという厳しい条件下で使用されるものである。

このような再処理工場の機器の保守に関し、最も重要なこ

とは、保守を行なう作業員の被ばく線量低減と保守作業時間の短縮による施設稼働率の向上である。世界の再処理工場の保守方式をこのような点で分類すると、表1に示すように数種の考え方になる。1950年代には米国で軍用にクレーンキャニオン法が開発実用化され、1960年代には直接保守セル法と遠隔保守セル法が開発された。また、1970年代以降では遠隔保守キャニオン法も開発されつつある。これらは大きく分類すると遠隔保守法と直接保守法に分けることができる。

遠隔保守法では、点検機能、補修機能、補修部の検査機能などを備えた遠隔自動機器並びにマニピュレータのような操作機能及びインセルクレーンのようなセル内での輸送機能を備えていることが要求される。

3 溶解槽の遠隔補修装置^{1)~4)}

動力炉・核燃料開発事業団東海再処理工場の溶解槽は、昭和57年4月に2基のうち1基の溶解槽(R11)にピンホールが発見され、更に昭和58年2月には残りの溶解槽(R10)にもピンホールが発見された。

溶解部は図1に示すように内径約270mm、長さ約6mの円筒状であることから、従来のロボット技術では対応できず、今回新たに小型で高放射線に対応でき、かつ高信頼性の遠隔補修ロボットの開発が必要となった。

溶解槽の遠隔補修を実現するための課題は、溶解槽構成材料に適合する補修溶接技術の開発と、実際に補修を実行する補修ロボットの開発にあった。補修溶接法は事前の研究によりティグ溶接機による溶接とした。

補修ロボットは、各作業ごとにペリスコープ、研磨装置、溶接装置、染料浸透試験装置、空中・水中兼用テレビジョン装置及び超音波探傷試験装置の6種類を開発した。

図2にロボットを用いた補修システムの概念図を示す。

各ロボットは、セル内に据え付けるロボット本体とセル外の操作区域から遠隔制御する制御装置、操作盤などで構成さ

* 日立製作所日立工場 ** 日立設備エンジニアリング株式会社 *** 日立製作所エネルギー研究所

表1 再処理工場の保守方法 保守方法としては、クレーンキャニオン法、直接保守セル法、遠隔保守セル法、遠隔保守キャニオン法が開発されている。

分類	内 容	実 績
1 クレーンキャニオン法	(1) 1940年代半ばから1950年代半ばにかけて米国で軍用として開発されたものである。 (2) キャニオン(超大型セル:幅10~20m, 高さ10~20m, 長さ200~300m)内にプロセス機器をモジュール化して組み込んだラック型システムであることが特徴である。 (3) セル内クレーンを用いてラック単位で交換(保守)する。 (4) このため、高精度の遠隔配管継手が必要であること、セルとラック間の取合い寸法が非常に厳しいこと、予備ラックが多数必要になることなどからコスト高となることが短所である。	(米) サバンナリバー (米) ハンフォードピュレーックス
2 直接保守セル法	(1) 1960~1970年代に、施設の建設費低減を目標とした小型セル用として採用された方法である。 (2) 作業員が直接保守を実施する。 (3) 作業員が直接セル内に入るため、これに伴う除染作業などに時間と労力がかかりすぎるのが欠点である。	(米) ウェストバレイ (米) アイダホケミカル (英) ウィンズケール (フランス) ラ・アーグ (西ドイツ) カールスルーエ (ベルギー) モル (日本) 動力炉・核燃料開発事業団東海事業所
3 遠隔保守セル法	(1) 1960~1970年代に下記遠隔操作機器を用いた中型セル用として採用された方法である。 (a) Power Manipulator (b) In-cell Crane (c) Mechanical Master-slave Manipulator など (2) これら遠隔操作機器の開発及びこの採用により遠隔保守方法を採用したセルの中型化(幅5~10m, 高さ5~10m, 長さ5~10m)が可能となった。 (3) 壁埋込みマニピュレータなどのように、構造上の制約、遠隔操作機器の性能上の制約などで、完全遠隔操作による保守のレベルまでには至らない。 (4) 現在、本方式の有用性を実証中である。	(米) ANL-WEST (アイダホ) (日本) 動力炉・核燃料開発事業団大洗研究センター (日本) 日本核燃料開発
4 遠隔保守キャニオン法	(1) 1970年以降計画された保守方法であり、下記のように高機能遠隔操作機器を採用することにより、ラック内機器のセル内保守点検(現位置補修)を可能とすることを特徴とする。 (a) Bilateral Master-slave Manipulator (b) 双腕型マニピュレータ (2) 本方式により、予備ラック、予備部品などの大幅低減、更にラックのコンパクト化からセルのコンパクト化も可能となり、施設のコスト低減が可能になる。	(米) ORRN (米) ハンフォード研究所 (西ドイツ) 350t 再処理工場 (日本) 動力炉・核燃料開発事業団固化P.P及びリサイクルP.P

注: 略語説明 P.P パイロットプラント

れ、ロボット本体と制御装置は、遮へい壁を貫通するケーブルペネトレーションを通して、ケーブル、ホース類で接続される。ロボット本体は、溶解部内部を対象位置まで降下して作業を行なうヘッド部と、ヘッド部を昇降させ、かつ昇降時のケーブル処理を行なう昇降装置から構成される。ヘッド部には、スプリング又はエアシリンダ方式の可動つめがあり、円筒状の溶解部内面につめを押し付けてヘッド部を固定する。固定後、各ヘッドは溶解部内部で回転し、またある範囲での上下移動により補修を行なう。

これらのロボットはモックアップ試験を実施して、実補修を行なう前にその信頼性を十分に確認した。

表2に各ロボットの使用目的と特徴を、図3に遠隔自動溶接装置を示す。

溶解槽の遠隔補修作業は、昭和58年11月中旬に無事終了し

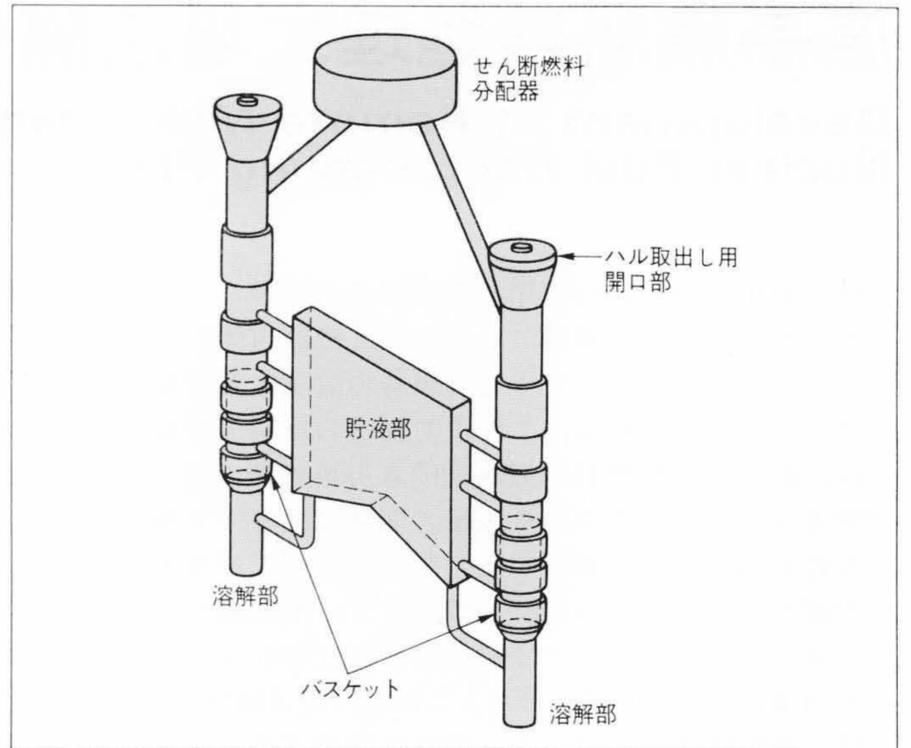


図1 溶解槽 本図は溶解槽全体を示したものである。ハル取出し用開口部から遠隔検査補修ロボットを内部に挿入することができる。溶解槽はR10, R11の2基がある。

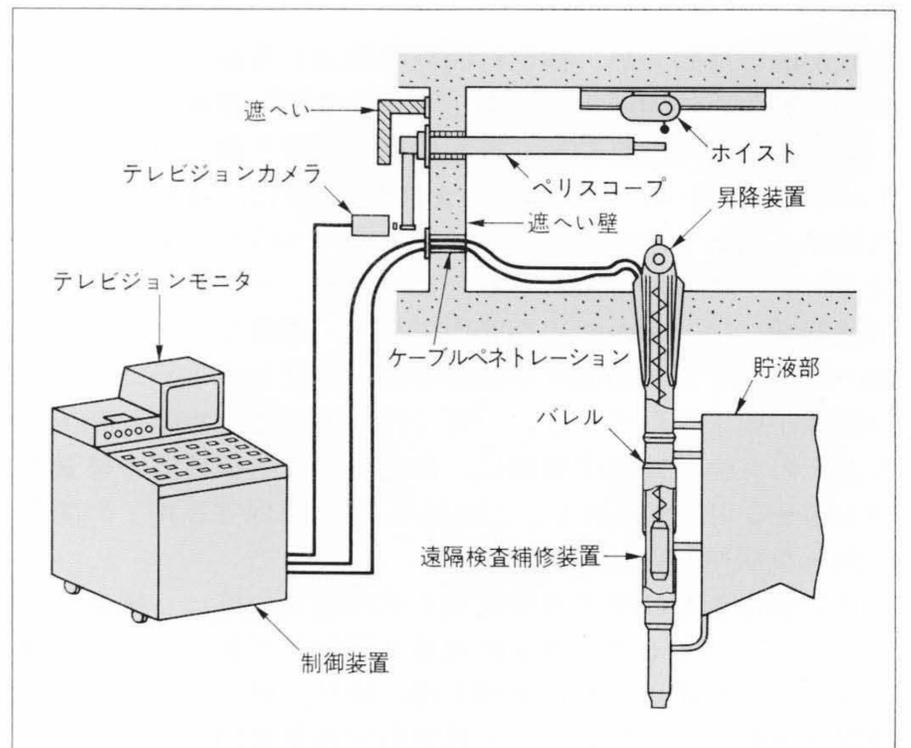


図2 溶解槽の補修システム 遠隔検査・補修ロボットヘッド部は、内径約270mm、長さ約6mの内部を遠隔操作により自在に移動して、検査・補修作業を実施する。

た。補修作業終了後の溶解槽を用いて試験運転を行ない種々の検査を実施したが、溶解槽に異常は認められず、今回の補修が健全なものであることが実証された。

4 セル内遠隔点検装置の開発

動力炉・核燃料開発事業団東海再処理工場の高放射性セルは、生体保護及び耐震性を考慮し、コンクリート製の壁で囲まれており、わずかに小開口部(インタベンションチューブ、遮へいプラグなど)が設けられているだけである。このため、セル内機器及びドリフトレイを遠隔的に観察点検するために、下記の特徴をもつ装置の開発が必要となった。

- (1) 耐放射線性に優れていること。
- (2) 高度な移動機能をもっていること。
- (3) 安全性(セル内機器配管を損傷しないこと)が確保されて

表2 ロボットの使用目的と特徴
 ロボット開発では、(1)耐放射線性、(2)セル内クレーンなどの既設設備機能、(3)セル内への搬入・搬出制約条件などに対して、遠隔操作機構、動力・信号伝達機構などを開発し、ロボットの小型・多機能化を実現した。

ロボット名称	使用目的	特徴
1. ペリスコープ	(1) 欠陥部の観察 (2) 作業の監視	(1) 鏡及びレンズ系で構成され、溶解部内面を肉眼で観察。 (2) 写真撮影可。テレビジョンカメラ取付け可。
2. 研磨装置	溶解部内面の研磨	(1) と石はマニピュレータにより交換。 (2) 研磨状況はペリスコープにより観察可。
3. 溶接装置	欠陥部の補修溶接	(1) 自動ティグ溶接 (2) 溶接状況は内蔵のテレビジョンカメラにより観察可。 (3) 溶接データのグラフィック表示及び記録の保管が可能。 (4) タングステン電極の交換が可能。
4. 液体浸透探傷試験装置	溶接部表面の欠陥検出	(1) 浸透液の塗布、水洗浄、乾燥、現像処理を行なう。 (2) 探傷液は、ボトルごとマニピュレータにより交換。 (3) 試験部の観察は、ペリスコープによる。
5. 空中・水中兼用テレビジョン	(1) 漏えい試験時の気泡発生状況の観察 (2) 溶解部内面の観察	(1) 耐放射線型白黒テレビジョンカメラ (2) 倍率3段階切換え可能。 (3) 空中及び水中で使用可能。
6. 超音波探傷試験装置	(1) 板厚測定 (2) 内面形状測定、欠陥検出など	(1) 垂直及び斜角4方向の探傷機能あり。 (2) 水浸法により探傷。 (3) 探傷結果はAスコープ、Bスコープ及びCスコープにより表示。

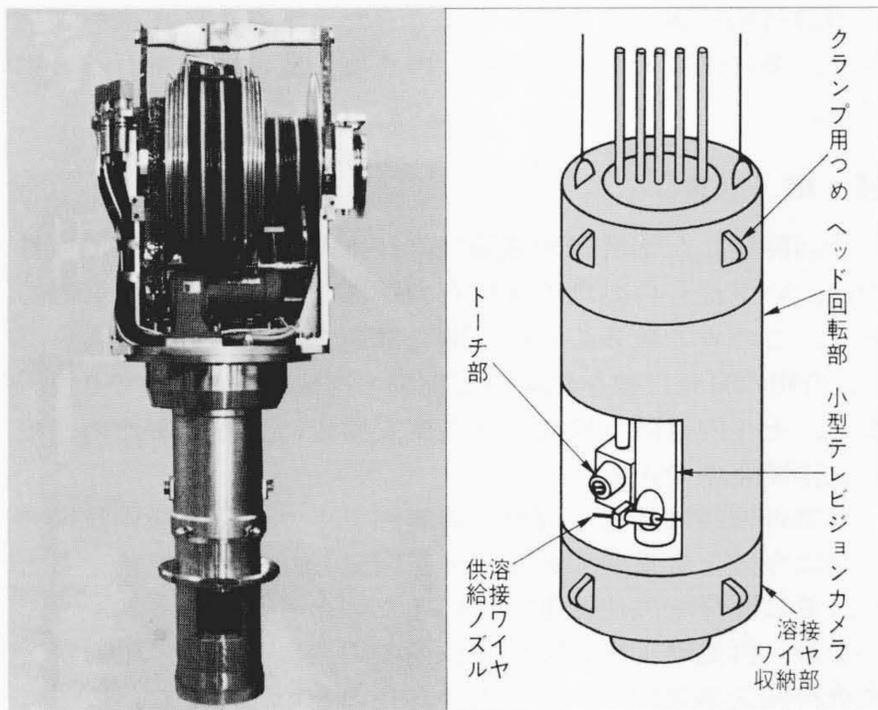


図3 遠隔自動溶接装置の全体外観 (a)図に本溶接装置の外観を、(b)図に溶接ヘッドの概要を示す。上部は電気ケーブル、空気、水用ホースなどの巻取り用ドラムと溶接ヘッド昇降ワイヤ巻取りドラムで構成される。溶接ヘッドは、下部の保護円筒内部に収納されている。

- いること。
- (4) 除染が簡単にできること。
- (5) 小型・軽量であること。

ここでは、インタベンションチューブをもつセル用に開発された床面走行型点検装置、及び溶解セル用点検装置について説明する。

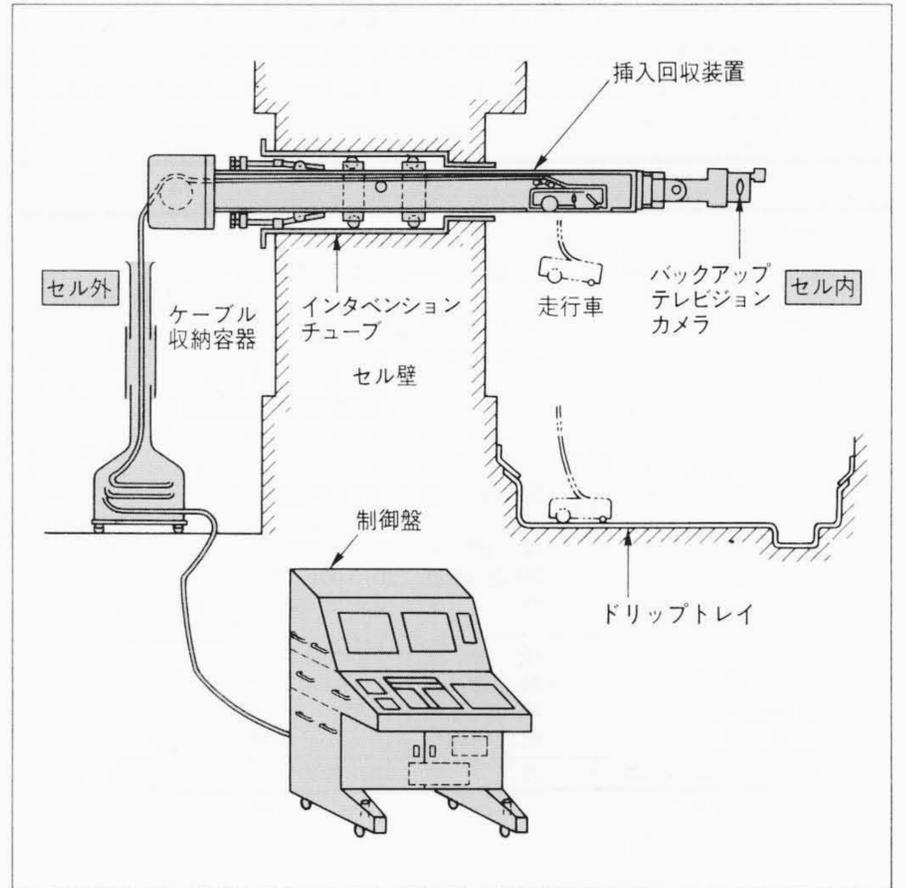


図4 床面走行型点検装置(試作機)概要図 本図は、この装置全体の概要を示したものである。装置は走行車、走行車を監視するバックアップカメラ、これらをセル内に挿入回収するとともにケーブル処理を行なう挿入回収装置、及び制御盤から構成される。

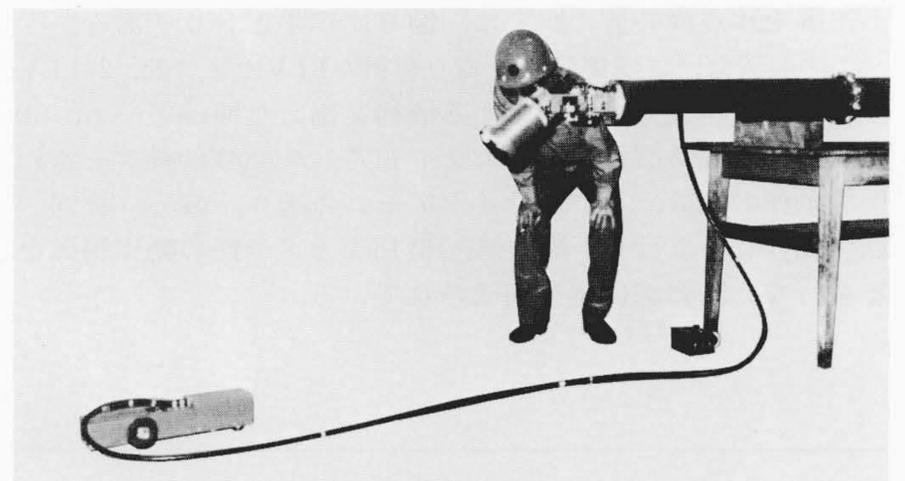


図5 床面走行型点検装置(試作機) ドリフトレイ上を移動する走行車及びその状況などを監視するバックアップカメラの作動状態を示す。

(1) 床面走行型点検装置 (FLORA)⁵⁾

FLORAは、インタベンションチューブを使用し、セル内障害物などが少なく走行車をセル床内に降ろすことのできるセル内の点検装置である。

FLORAとしての第1ステップである試作機の概要は、図4に示すとおりである。図5にFLORA(試作機)を示す。

この試作機は、(1)ドリフトレイ上を移動する走行車、(2)走行車の状況などを監視するバックアップカメラ、(3)インタベンションチューブを通し、これらをセル内に挿入回収するとともにケーブル処理を行なう挿入回収装置、及び(4)セル外でこれらを制御する制御盤、によって構成されている。

この装置は、まず、走行車及びバックアップカメラを収納した挿入回収装置をインタベンションチューブに挿入し、バックアップカメラで監視しながら走行車をドリフトレイ上に降ろし、次に走行車を制御盤から遠隔的に操作し、溶接線に沿って移動させ小型ITV(工業用テレビジョン)により溶接線を観察点検することができる。表3にその仕様を示す。

表3 床面走行型点検装置(試作機)の主な仕様 FLORAは、ドリフトレイ上を移動する走行車、走行車の状況などを監視するバックアップカメラ、及びこれらをセル内に挿入・回収するとともにケーブル処理を行なう挿入回収装置から構成される。

名 称	仕 様
1. 走 行 車	本 体 駆 動 方 式 : 車 輪 駆 動 方 式 (前輪キャスター, 後輪駆動) 走 行 速 度 : 約0~40m/s無段変速 テレビジョンカメラ 撮 像 管 : $\frac{2}{3}$ inニュービコン (静電収束電磁偏向) 解 像 度 : 500本(中心部) 映 像 色 彩 : 白黒 耐放射線性: $10^3(r)R$ (集積線量) 放 射 線 測 定 器 検 出 器 : GMプローブ 測 定 範 囲 : 0~100R/H 外 形 : 奥行約18mm, 長さ約90mm
2. バックアップ テレビジョンカメラ	撮 像 管 : $\frac{2}{3}$ inニュービコン 解 像 度 : 500本(中心部) 映 像 色 彩 : 白黒 耐放射線性: $10^3(r)R$ (集積線量)
3. 挿入回収装置	方 式 : 単一管方式(手動挿入回収)

(2) 溶解セル点検装置

溶解セル点検装置は、濃縮ウラン溶解セルのインタベンションチューブを利用し、セル内奥へアームを挿入した後ITVカラーカメラ付きの先端を垂直方向に伸ばし、ITVカラーカメラにより、セル内部を観察点検するものである。

溶解セル点検装置の概要は、図6に示すとおりである。

この装置は、(1) 観察装置を取り付けたITVカメラ部、(2) ITVカメラ部を垂直方向に伸縮する機構を備えた伸縮アーム、(3) 先端部にふ仰機構を備えたスライドアーム、(4) 伸縮アームの伸縮動作の制御、及びスライドアームの送り、偏心、旋回、起伏動作などを行なう操作部、(5) ITVカメラ部の動作制御などを行なう制御部により構成されている。

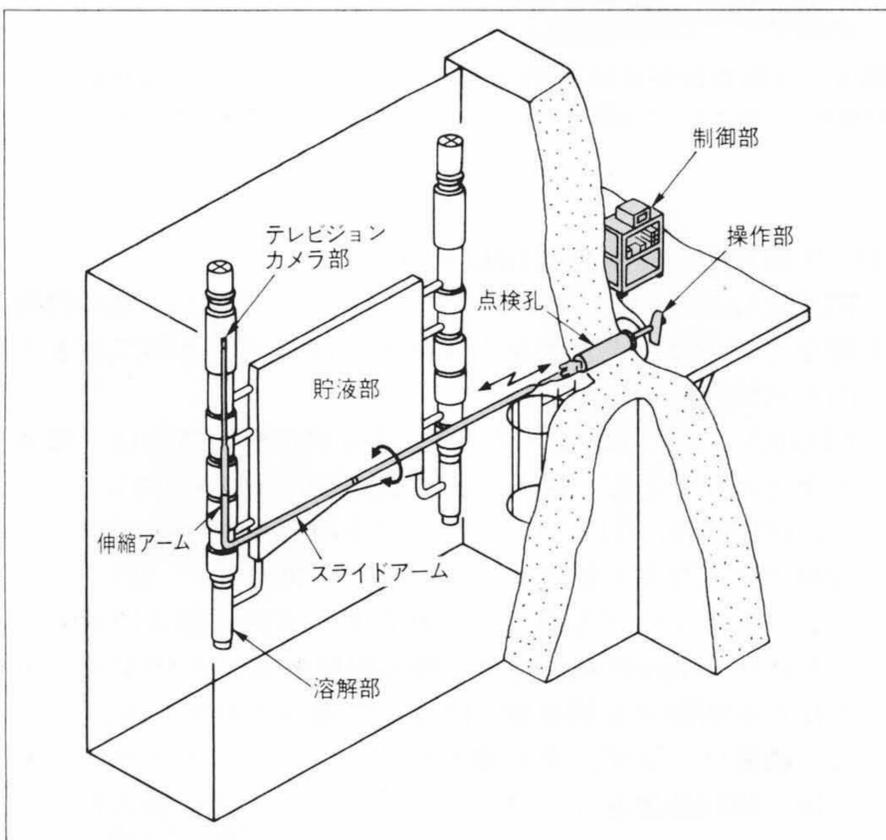


図6 溶解セル点検装置の概要図 本装置は、テレビジョンカメラ部、垂直方向に伸縮する伸縮アーム、ふ仰機構をもつスライドアーム、伸縮アーム・スライドアームを操作する操作部及びテレビジョンカメラの動作制御などを行なう制御部から構成される。

表4 溶解セル点検装置の主な仕様 溶解セル点検装置は工業用テレビジョンカメラ部、伸縮機構を備えた伸縮アーム、ふ仰機構を備えたスライドアーム、これらアームの送り、偏心、旋回、起伏を行なう操作部及び制御部から構成される。

名 称	仕 様
1. テレビジョンカメラ部	撮 像 管 : $\frac{2}{3}$ in型(カラー) 水平解像度: 約400本(中心部) 旋 回 機 能 : 旋回角約360°(電動機駆動) ふ 仰 機 能 : ふ仰角約90°(電動機駆動)
2. 伸 縮 ア ー ム	材 質 : CFRPパイプ(4段) 伸 縮 機 構 : テレスコピックチューブ式 伸 縮 範 囲 : 長さ約900~2,500mm (エア及びワイヤにより操作)
3. スライドアーム	材 質 : 1段目CFRPパイプ, 2段目, 3段目SUSパイプ 分 解 ・ 組 立 : 3 段 締 結 式 旋 回 機 能 : 旋回角30°(手動操作) 起 伏 機 能 : 起伏角2.5°(手動操作) 偏 心 機 能 : 偏心範囲 ±25mm(手動操作)
4. 操 作 部	スライドアーム及び伸縮アームの操作
5. 制 御 部	テレビジョンカメラ制御部

この装置は、操作部のガイドパイプ(スライドアーム用ガイドローラ付きパイプ)をインタベンションチューブに固定し、ITVカメラ部、伸縮アーム、スライドアームをガイドパイプに沿わせセル内に挿入される。次にスライドアームを支持し、スライドアームの送り、偏心、旋回、起伏などのアームコントロールにより先端部を移動させ、伸縮アームを手動ハンドルによって立ち上げる。その後、伸縮アームを伸ばしITVカラーカメラによりセル内を観察点検することができる。表4にその仕様を示す。

本装置を使用して動力炉・核燃料開発事業団東海再処理工場の溶解槽外観の健全性が確認できた。現在この技術を発展させ、多自由度・多関節型セル内点検装置の開発を行なっている。

5 結 言

今回開発した溶解槽の遠隔補修技術及びセル内遠隔点検技術は、いずれも再処理工場特有の特殊環境に対応したものであり、この点で数多くの技術開発課題を抱えたものであったが、当初の開発目標を比較的短期間で達成することができた。また、セル内遠隔点検技術は高度な要求にこたえるため、更に試作開発中である。

再処理施設に特有な高放射線雰囲気下での遠隔操作技術の開発は今後とも重要であり、今回開発した上記の技術をもとに、更に開発を加速推進していきたいと考えている。

なお、再処理工場遠隔保守技術の開発に当たり、動力炉・核燃料開発事業団殿から多大な御指導をいただいた。ここに深く感謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) 船矢, 外: 日本原子力学会 昭和60年年会, 要旨集H5 1985
- 2) 山内, 外: 日本原子力学会 昭和60年年会, 要旨集H6 1985
- 3) 石川, 外: 日本プラントメンテナンス協会 プラントエンジニア 1984 Vol. 16, 1984
- 4) T. Yamanouchi, et al.: Development of Remote System Technology for Inspection and Repair of the Leaked Dissolvers in Tokai Plant, Oct. 2-5, 1984, IAEA/OECD, Harwell (UK), IAEA-SR-103
- 5) 鶴巻, 外: 日本原子力学会 昭和59年秋の分科会 要旨集 G 18 1984