

# 核燃料再処理工場溶解槽の遠隔補修ロボット

## Remote Repair Robots for Dissolvers in Nuclear Fuel Reprocessing Plants

原子力施設では、作業者の被ばく低減化、作業時間の短縮化、施設の稼働率向上を目的に、これまで種々の遠隔保守、点検装置の技術開発が進められている。今回、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所再処理工場の使用済み燃料溶解槽に発生したピンホール状の欠陥を検査、補修する機会を得たが、放射線環境条件、補修対象などの制約条件が極限状態であり、従来のロボット技術では対応不可能であった。このため今回新しく内径約270mm、長さ約6mの内部を、全遠隔操作作業可能な、耐高放射線性補修ロボットを開発した。補修ロボットは、ペリスコープ反射鏡装置、水中・空中兼用テレビジョン装置、研磨装置、溶接装置、液体浸透探傷試験装置及び超音波探傷試験装置の6種類から構成される。開発のかぎは、耐高放射線性部品及び材料の選定使用、機構の超小型化及び全遠隔操作性の実現であった。この種のロボットは世界的に類がなく、各国の注目を集めている。今後、原子力施設だけでなく特殊環境下での遠隔保守、点検に広く適用可能である。

杉山 千\*      *Sen Sugiyama*  
 広瀬保男\*\*    *Yasuo Hirose*  
 川村博信\*    *Hironobu Kawamura*  
 湊 昭\*\*\*     *Akira Minato*  
 尾崎典彦\*\*\*\* *Norihiko Ozaki*

### 1 緒 言

現在、我が国では動力炉・核燃料開発事業団東海事業所再処理工場で、唯一の使用済み燃料の再処理が実施されている。再処理工場の溶解槽については、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、また、昭和58年2月には残りの溶解槽(R10)でもピンホールが発見された。溶解槽は使用済み燃料を約5cm片に切断し、それを硝酸で溶かす装置であるが、溶解を促進するために硝酸の入った溶解部は蒸気で加熱される。このため、硝酸と高温の特殊環境で溶接部分に腐食が起こり、ピンホールが発生したと考えられる。

このピンホールにより、我が国の再処理工場の運転は停止することになったが、核燃料サイクル上、使用済み燃料の再処理は不可欠であり、早急にピンホール部を補修して溶解槽を復旧するとともに、再処理技術の研究を継続することが必要となった。

しかし、溶解槽は使用済み燃料を処理することから、高い放射線の雰囲気であり、かつ図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、今回新たに高放射線下での遠隔補修ロボ

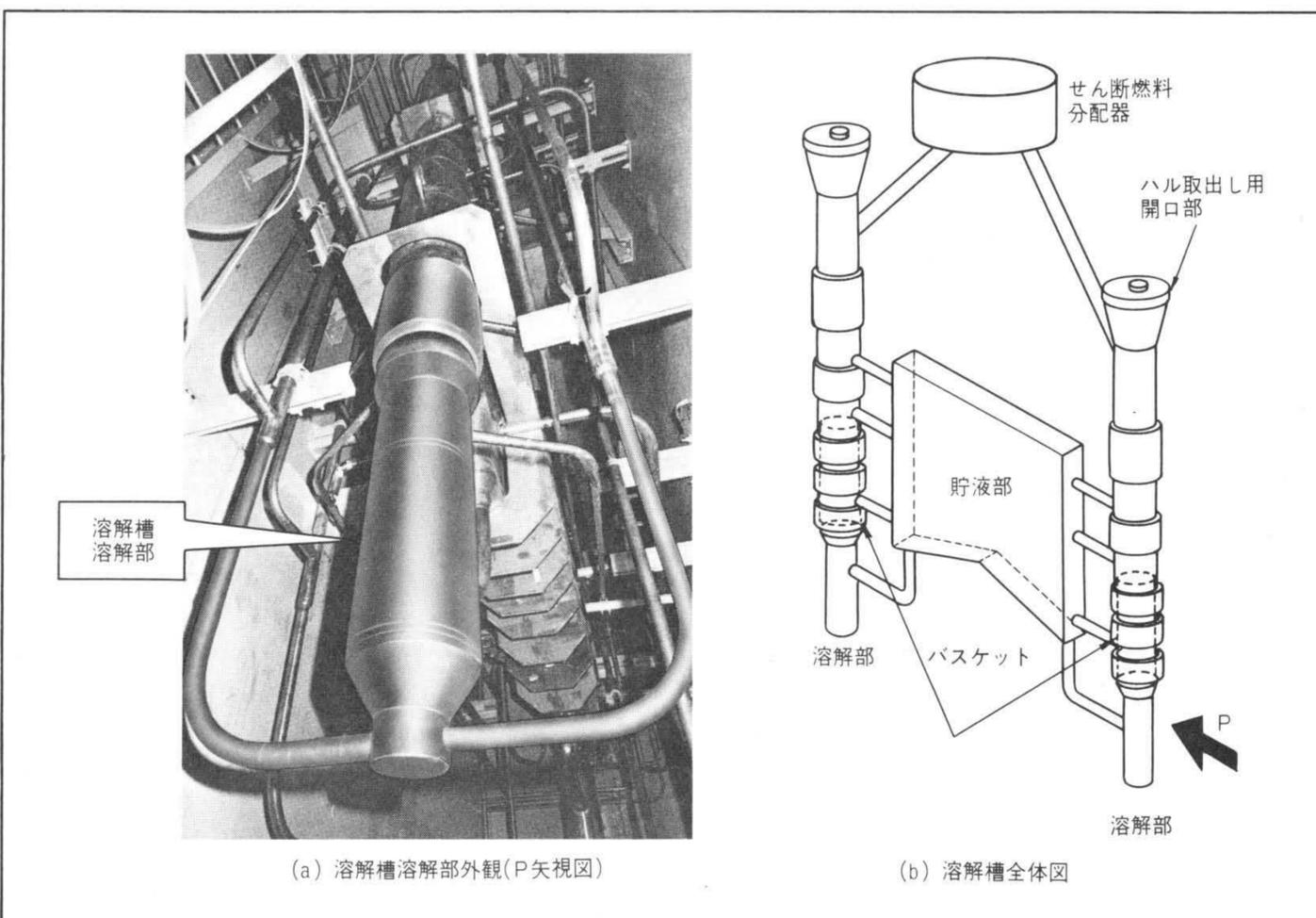


図1 溶解槽 (a)図は溶解槽溶解部外観を、(b)図は溶解槽全体を示したものである。ハル取出し用開口部から遠隔検査補修ロボットを内部に挿入させることができる。溶解槽はR10、R11の2基がある。

\* 日立製作所日立工場    \*\* 日立製作所日立工場 工学博士    \*\*\* 日立製作所日立研究所    \*\*\*\* 日立製作所エネルギー研究所 工学博士

ットを開発し、実際の溶解槽の修理を実施することとなった。以下、溶解槽の補修技術開発項目と開発ロボットについて述べる。

## 2 溶解槽の遠隔補修技術開発

溶解槽の遠隔補修を実現するための重要課題は、溶解槽構成材料に適合する補修溶接法の開発と、補修を実行する作業ロボットの開発にある。遠隔補修技術開発の要点を以下に述べる。

### 2.1 補修溶接法の開発

溶解槽の構成材料はフランス製の高級ステンレス鋼(25%Cr-20%Ni-0.5%Nb)であり、高濃度沸騰硝酸に対する耐食性は実用材料中ほぼ最高のものであるが、一般のステンレス鋼に比べると、特に溶接施工時に慎重さが要求される材料である。

補修溶接は、材料の溶接性、耐食性に関する特性を詳細に調査し、種々の溶接法を比較検討した結果、表面を浅く研磨した後、その上にティグ(TIG)溶接法により溶接ビードを重ね、耐食密封層を形成させる方法を採用することとした。本方法の特長は、溶接割れ防止とともに、溶接による熱影響を抑えるという観点から、溶接時の入熱量を少なくし、補修が溶解槽へ与える影響を極力少なくした点にある。

この方法を用いて補修溶接を行なう際の詳細な溶接条件、施工要領、手順などは、溶解槽と同材質の試料を用いて入念な確認試験を繰り返し実施し、最適化を図った。また試験結果から、本方法により欠陥を完全に密着、密封できること、及び密封層が十分な耐食性をもっていることを確認した。

### 2.2 補修ロボットの開発

補修ロボットの開発では、高レベルγ線量下での耐久性、遠隔操作性、高信頼性、検査・補修装置の小型化が重要である。

これらを以下に示す技術開発により達成し、実際の検査・補修に適用した。

#### (1) 高レベルγ線量下での耐久性

今回の溶解槽内は、再処理工場の中でも放射線のいちばん高い箇所であり、1時間当たりの放射線強度は、千数百レントゲンといわれ、このような高放射線量下では、高性能ICを使用できない。また通常の電線の被覆材も劣化し、ガラスのレンズも曇ってすぐ見えなくなるため使用できない。このため、これまでのロボットの常識が通用しない極限条件が存在するので、例えば、テレビジョンカメラには超高純度の水晶レンズを採用するなど、特に耐放射線部材及び機構の開発には工夫を凝らし、各種研究開発により、このような高放射線量下でも耐えられるような耐放射線の高い装置を開発した。

#### (2) 遠隔操作

今回の装置は、直接マニュアルオペレーションができないため、すべて遠隔操作となったが、この場合特に、

- (a) 搬入・据付の容易性
- (b) 実際の検査・補修の容易性
- (c) 消耗部品交換などのメンテナンス性

を考慮することが重要であった。

#### (a) 搬入・据付の容易性

装置は、まず人間の立入り可能区域で運転架台に積み込まれ、以降は遠隔で据え付けられる。据付までには、装置の積替えと、反転作業を遠隔で操作することが必要である。このため、装置つり上げ、積替え、反転などの作業はすべ

て設備保守用の既設マニピュレータで確実に実施されるように遠隔用治具を準備した。

#### (b) 溶解槽検査・補修作業の容易性

実際の検査・補修は、テレビジョンカメラ、ペリスコープなどを用いて操作区域側から遠隔操作で監視し、容易に作業できるように考慮した。このため、今回開発したロボットは、内部を観察するペリスコープ、溶接前の内面研磨用の遠隔研磨装置、遠隔自動溶接装置、溶接部が完全かどうかを調べる遠隔液体浸透探傷試験装置と遠隔超音波探傷試験装置、修理後の発泡試験時に内面を観察する空中・水中兼用テレビジョンの6種とし、検査・補修作業の多機能化を図った。

#### (c) 消耗部品交換などのメンテナンス性

実際の検査・補修により消耗する部品及び寿命の短い部品については、遠隔操作でメンテナンスを行なう必要がある。

今回開発した補修ロボットについては、例えば照明ランプ、研磨用砥石などの消耗部品をマニピュレータを使用して容易に交換できるようにした。

#### (3) 高信頼性

実際の溶解槽検査・補修場所は、高レベル汚染域であるため、補修ロボットの取出し、保守は困難である。このため、補修ロボットは高信頼性をもっている必要がある。開発に当たっては、高放射線に耐えられる部品を使用するとともに、実際の遠隔作業を模擬した実規模モックアップ装置によるモックアップ試験を繰り返し行ない、補修ロボットの動作性能の高信頼性を立証することとした。

#### (4) 小型化

補修ロボットは、溶解槽セル内への装置の搬入、移動及びセル内での保管が可能であり、かつ内径約270mm、床下約6mの溶解槽漏えい部を検査・補修可能なものとするため、小型化する必要があった。特に、このような溶解槽内部の限られたスペースで、自在に移動でき、検査・補修の高度な作業ができるロボットは現存せず、装置の小型化設計は開発のキーポイントであったが、自在ケーブルの処理機構の開発、各ロボットヘッドの小型化設計により対応可能とした。

## 3 溶解槽補修ロボット

溶解槽の補修・検査の作業フローは、種々検討の結果、図2に示すフローとした。

補修ロボットは、作業フローに対応して、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3にロボットを用いた補修システムの概念図を示す。

本システムでは、セル内の作業はすべて遠隔操作で行なう。すなわち、溶解槽上部に位置する溶解槽装荷セルを経由して、補修ロボットを溶解部の内面から欠陥位置に接近させ、補修作業を行なう。ロボットのセル内への搬入、移動、据付、ケーブル類の接続などの操作は、クレーン、マニピュレータなどの既設の遠隔操作機器を用いて行なう。また、検査・補修作業は、ペリスコープ又はロボットに内蔵したテレビジョンカメラで監視しながら行なう。

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れ、ロボット本体と制御装置などは、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、溶解部内を対象位置まで下降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

工程	目的	使用ロボット
内面外観観察	欠陥近傍状況の確認	ペリスコープ
研 磨	溶接のための下地処理	研磨装置 ペリスコープ
内面外観観察	欠陥の位置、形状調査	ペリスコープ
溶 接	欠陥部の肉盛溶接	溶接装置
内面外観観察	補修部の表面観察	ペリスコープ
PT(染料浸透試験)	補修部の表面検査	PT装置 ペリスコープ
UT(超音波探傷試験)	補修部の調査	UT装置
発泡試験	貫通の消滅確認	水中・空中兼用 テレビジョン
試験溶解	補修の確認	—

図2 溶解槽の補修・検査作業フロー 溶解槽内面観察には、高放射線によるICなどの劣化があるため、寿命の点でカラーテレビジョンを使用することができない。このため、ペリスコープ(潜望鏡)を用いた。研磨装置、PT装置は、ペリスコープと組み合わせて使用される。

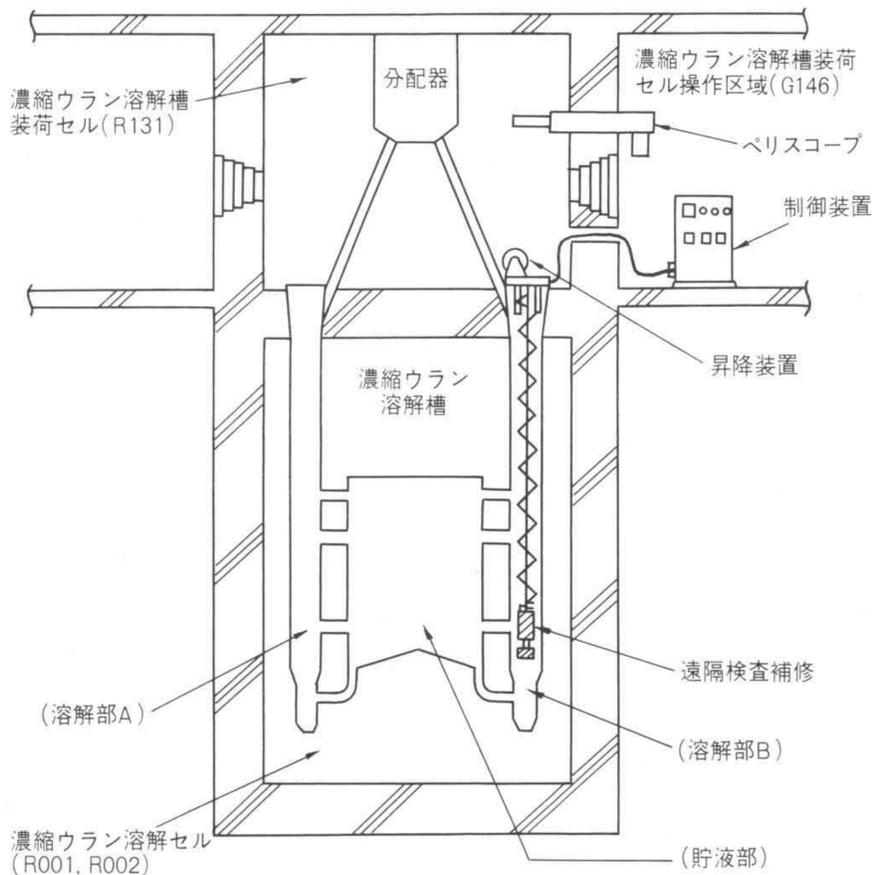


図3 溶解槽の補修システム 遠隔検査・補修ロボットヘッド部は、内径約270mm、長さ約6mの内部を遠隔操作により自在に移動して、検査・補修作業を実施する。

時のケーブル処理を行なう昇降装置で構成される。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で回転し、またある範囲での上下移動が行なえる。

表1に各ロボットの使用目的と特徴を、図4に遠隔自動溶接装置を示す。溶接装置は、自動溶接機能をもつティグ溶接機で、あらかじめ溶接条件を設定しておけば、図5に示す自

表1 ロボットの使用目的と特徴 ロボットの開発では、(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
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。
研磨装置	溶解部内面の研磨	1.砥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。
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。
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。
空中・水中兼用テレビジョン	1.漏洩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。
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、Cスコープにより表示。

動溶接シーケンスにより、溶接の開始から終了までの複雑な過程をすべて自動的に行なうことができる機構とした。

製作を完了した各ロボットは、溶解槽、遮へい壁、クレーン、マニピュレータなどの実設備を模擬した試験施設(モックアップ試験施設)を用いて各ロボットの機能、性能及び遠隔操作性を確認した。

このモックアップ試験を通じて、各ロボットの耐久性、安定性についても十分な信頼がおけることを確認した。

#### 4 溶解槽の補修結果

溶解槽の遠隔補修作業は、多くの新しい技術分野を含んでいたにもかかわらず、昭和58年11月中旬、溶解槽の補修を無事終了した。

補修作業終了後、12月初めから溶解槽を用いて試験運転を行なった。試験運転では、使用済み燃料の溶解を行ない、種々の検査を実施したが、溶解槽に異常は認められず、今回の補修溶接が健全なものであることが立証された。

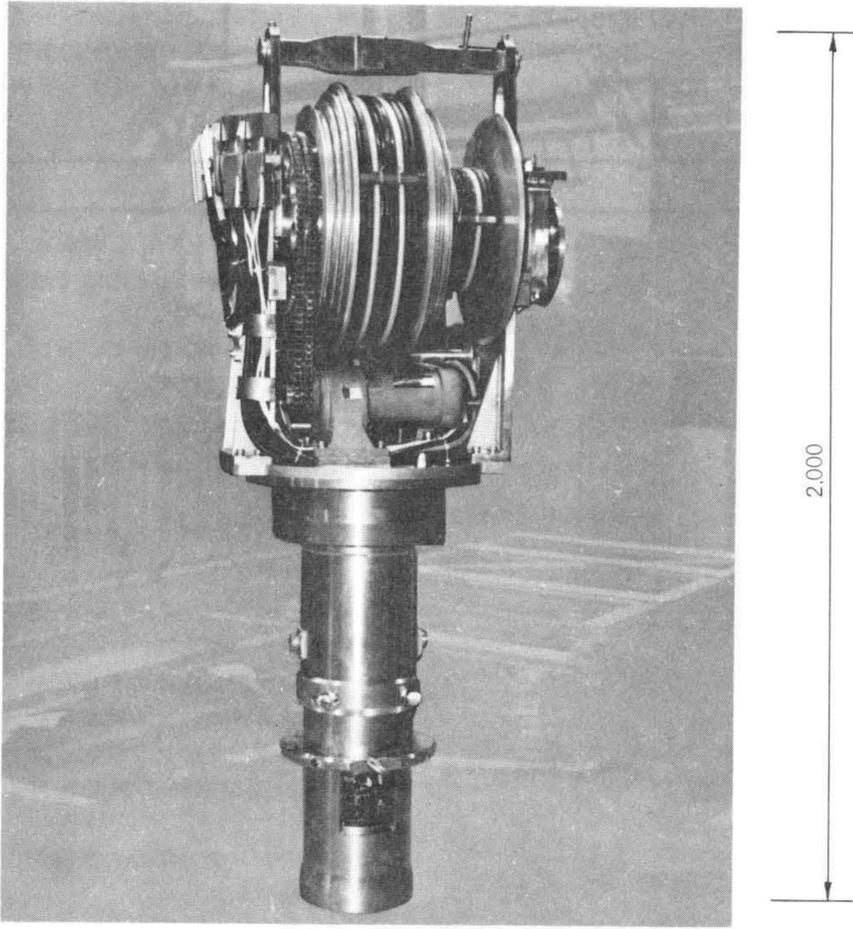


図4 遠隔自動溶接装置の全体外観 上部は電気ケーブル、空気・水用ホースなどの巻取り用ドラムと溶接ヘッド昇降用ワイヤの巻取りドラムで構成される。溶接ヘッドは下部の保護円筒内部に収納されている。

### 5 結 言

再処理工程で最も放射能が高く、かつ主要工程用機器である溶解槽の補修に関し、多くの新技術開発項目を含んでいたにもかかわらず、遠隔補修ロボットの開発により、今回無事補修を終了することができた。

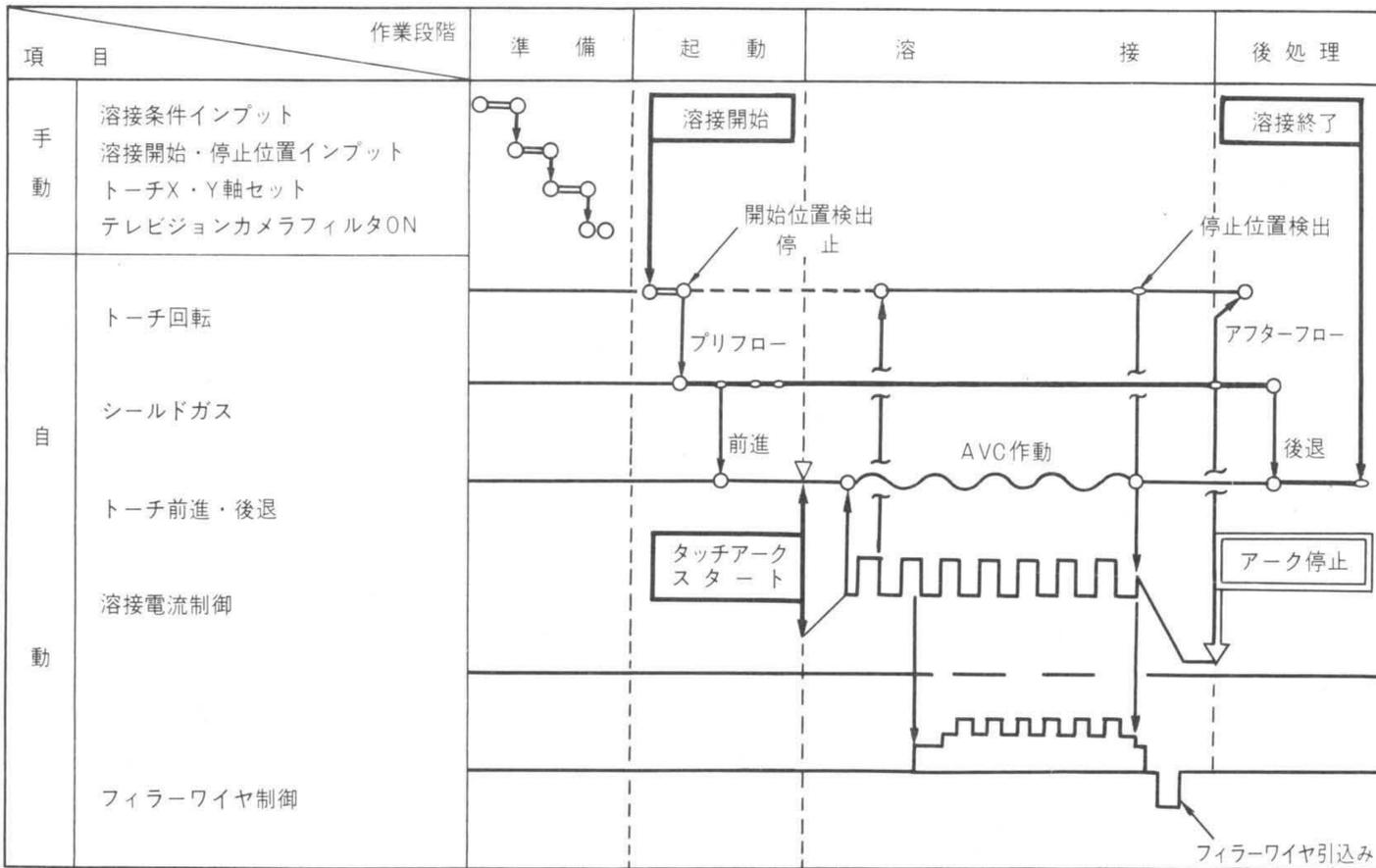
過去、世界の再処理工場で溶解槽、蒸発缶などの腐食による漏えい発生は報告されているが、据付け状態のまま本体を修理した例はまだなく、ロボットを用いて補修を実施したのは今回が初めての試みである。本ロボットによる補修技術は、今後、高放射線下での作業に伴う被ばく量の低減化、省力化、補修作業期間の短縮による設備稼働率の向上、検査の充実による施設の安全性と信頼性の向上、廃棄物発生量の低減などの点から期待される効果は大きい。

原子力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重要であり、今回開発した技術をもとに、今後共、ニーズにこたえられるよう開発を推進したいと考える。

再処理溶解槽の補修ロボット開発に当たり、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) 石川, 外: 核燃料再処理工場・溶解槽の遠隔補修, プラントエンジニア, 1984, 5, p.57~61(昭59-5)



注: 略語説明 AVC(Automatic Voltage Control)

図5 自動溶接シーケンス 溶接条件をインプット後スタートボタンを押すと、自動的に溶接位置を確認し、溶接終了までの一連の作業を行なう。