ロボット制御技術を用いた廃棄物中放射性核種分析の自動前処理システムの開発

（受託者）国立研究開発法人　日本原子力研究開発機構
（研究代表者）大澤崇人 物質科学研究センター
（再委託先）国立大学法人東京工業大学

（研究期間）平成２８年度～３０年度

1.研究の背景とねらい

東京電力福島第一原子力発電所（以下、福島第一原子力発電所）の廃炉に際しては多量の廃棄物が発生することが自明である。発生する廃棄物は通常の原子炉の場合と異なり、1～4 号機の全ての廃棄物が放射性核種によって汚染されている。よって、廃止措置に際して分析しなければならない試料量は膨大であり、少なくとも数百人体制の人員が必要であるが、それだけの人員の確保は極めて難しい。単純に分析技術を有した人員を集めることが困難であるだけでなく、分析の前処理段階でかなりの被ばくが予測されるため、長期間の作業を行えば職業被ばく限度に達してしまう可能性が高い。さらにはこのような過酷な作業を原発近傍で行う仕事を分析技能者が職業として選択しない可能性も高い。予算に関する問題も重大で、数百人もの人員を雇うためには人件費だけで年間 10 億円以上必要である。この問題を解決するために分析の簡略化、たとえばこれまで液体シンチレーションカウンタ（LSC）を用いていた分析を誘導結合プラズマ質量分析（ICP-MS）に置き換えることなどが検討されており、成功が期待されているが手法の確立には相当な困難が予測される。またたとえ分析を簡素化できたとしても、試料を酸分解やアルカリ融解によって溶液化する作業は必須であり、湿式分離も依然として必要であるため、必要人員として少なくとも 200 人は必要である。

一方、研究代表者らは環境試料中の Sr-90 分析における分離作業をロボット制御技術などを用いて自動化するシステムを開発してきた(1)。海産物や農作物に含まれる Sr-90 の分析には複雑な分離作業が必要であるが、これまで人間が行ってきた作業をロボット制御技術や画像認識などを用いることによって自動化することに成功した。例えば、灰化した試料に酸化剤を添加して加熱し有機物を除去する作業では、これまで人間が常に試料を見張り、突沸させないように注意しながら酸化剤を加えていた。しかし我々はこの作業を画像認識を用いることでビーカー内の液面の状態を検知し、突沸を防ぎつつ適宜酸化剤を加えるように自動化した。さらに pH 調整、沈殿濾過、イオン交換といった複雑な過程をも自動化させることに成功した。

本研究では、これまでに開発した自動化技術をさらに発展・進化させることで、福島第一原子力発電所の廃止措置に伴って発生する大量の廃棄物の分析に応用することを目指す。これまでに開発した分離システムと本研究で取り組む廃棄物分析との大きな差は、まず試料の性質である。有機物主体の環境試料に対し、廃止措置で発生する廃棄物の大部分はコンクリートを主体としたガレキであるため、本研究ではコンクリートを対象とする。そのため、環境試料の分析では酸化剤を使って不要な有機物を分解除去していたが、本研究ではコンクリートの溶解が必要となる。本研究の課題は 2 つある。すなわち①粉末コンクリート試料を自動で分解する処理法の開発と、②前処理から湿式分離までを全て一貫して自動化するシステムの技術開発、の 2 つである。

本研究では Se-79 などの揮発性の高い物質の分析に必要なアルカリ融解を用いる前処理と、マイクロ波酸分解の自動化技術を新たに完成させる。これにより、燃焼ガス捕集の手順が必要とな

る 3 核種（^{3}H、^{14}C、^{129}I）以外の全ての核種を分離・分析することが可能な要素技術が揃うことになる。また我々がこれまでに開発したシステムでは、加熱酸分解・吸引濾過・イオン交換のそれぞれが独立したシステムとなっており、それらの連携は自動化されてはいない。完全な自動化を実現するためには各要素技術を連結して動作する技術を新たに開発する必要性がある。

本研究では、廃棄物の前処理において試料の粉砕・ふるい分けは対象外とし、粉末状になったコンクリート試料を放射性核種分析に供する試料として分離する工程の自動化を範囲とする。その理由は、現状でコンクリート片などの廃棄物から粉末試料を回収する方法が確定していないためである。また本研究で対象とする核種は Se-79 とする。その理由は、これまでに開発した自動 Sr-90 分析システムで獲得した要素技術と、本研究で開発する自動化の要素技術とを組み合わせることで、燃焼・ガス捕集が必要な 3 核種以外の核種の分析前処理に必要な要素技術が出揃うためである。

2. これまでの研究成果

本研究では 5 つの研究実施項目を設定しているが、内 4 つの実施項目に関してこれまでの研究成果を以下に述べる。

(1) 自動アルカリ融解システムの開発

本項目ではアルカリ融解の作業を自動化するシステムの開発を進めている。アルカリ融解を自動化するためには多関節ロボットでマッフル炉を開閉し、試料と水酸化ナトリウムを入れたニッケル坩堝に蓋を被せ、坩堝を掴んで炉内に導入し、マッフル炉の温度を制御して試料を反応させ、反応後に炉の扉を開け坩堝を取り出す、という一連の操作が必要である。そのためマッフル炉の温度制御とロボットの動作を連動させる必要であり、炉は外部制御できなければならない。そこで、炉に設置された R 熱電対の温度を読み取りながら加熱温度を外部制御するシステムを LabVIEW で開発した。独自の PID アルゴリズムを用いることで、熱容量の大きいマッフル炉を２℃未満の高い精度で制御可能となり、ロボットの動作と連動させることもプログラム的に可能となった。

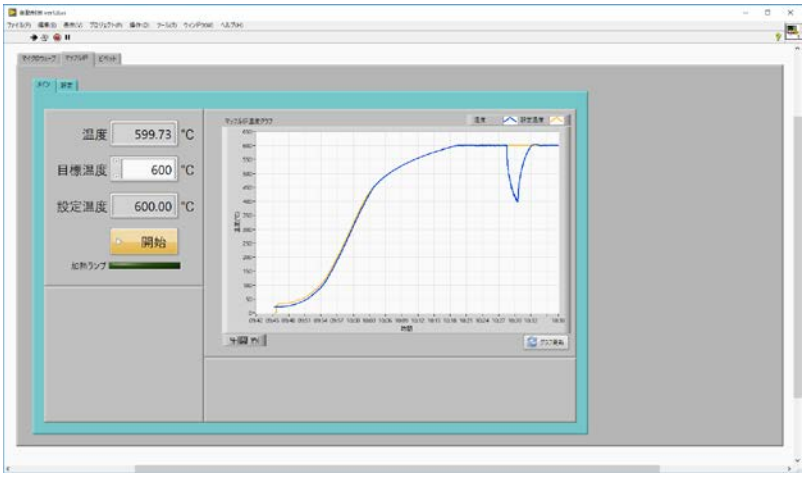

図 1: LabVIEW で開発したマッフル炉の外部制御プログラム。画面は 600℃まで加熱した後に扉の開閉を行った際の温度プロファイルを示している。青が測定温度、橙が設定温度である。高い精度を実現し、ロボットとの連動動作も可能になった。

(2) 自動マイクロ波加熱酸分解システムの開発

粉末試料のマイクロ波加熱酸分解を自動化するシステムの開発を進めている。マイクロ波加熱酸分解を自動で行うためにはマイクロ波加熱酸分解装置(TOPwave)の扉のロックを解除した後ロボットで扉を開き、試料と酸を入れたテフロン製ベッセルに内蓋を被せた後に外蓋で封じ、ベッ

セルを掴んで TOPwave に導入して扉を閉め、酸分解反応後に扉を開けてベッセルを取り出す、と

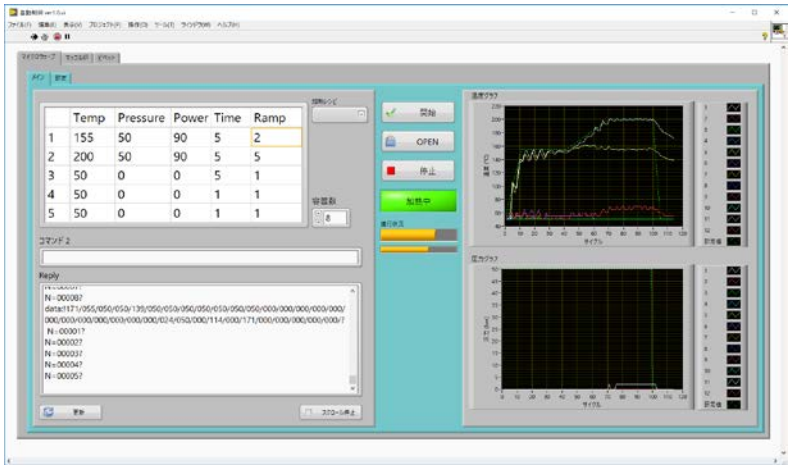

図 2: LabVIEW で開発したマイクロ波加熱酸分解装置(TOPwave)の外部制御プログラム。任意の加熱レシピを自由選択することができ、各ベッセルの温度と圧力をグラフ表示することもできる。外部制御システムによって TOPwave とロボットとの連動動作が可能になった。

いう一連の操作が必要である。よって自動化には TOPwave の動作とロボットの動作を連動させる必要であるため、TOPwave は外部制御できなければならない。そこで TOPwave と付属コントローラ間の RS232C 通信を解析することでコマンドリストを作成し、コントローラの機能を LabVIEW で代替させて外部制御するシステムを開発した。外部制御プログラムによって外部から扉のロック解除ができ、任意の加熱レシピを指定することができる。これにより TOPwave と多関節ロボットの操作とを連動させることが可能になった。

(3)前処理残渣の物性研究

試料の酸分解で溶け残りが生じるとこれによる測定誤差が生じてしまう。よって、酸分解残渣の物性研究を行うことで分解残渣の分解方法を最適化すると同時に、どうしても溶け切らない場合の測定データの補正方法を検討する必要がある。そこで日本原子力研究開発機構から東京工業大学に提供されたコンクリート試料の塩酸分解残渣を使って研磨試料を作製し、これに対して電子顕微鏡および EDS による観察と元素分析を行うことで基礎的な物性情報を調べた。さらに放射光施設での元素分析を行うことで更なる物性情報を得るべく解析を続けている。

(4)自動分解分離ロボットの開発

分析を行うためにはアルカリ融解やマイクロ波酸分解によって得られた前処理後試料から当該元素を湿式分離する必要がある。この湿式分離を自動化するために、走行軸付きの多関節ロボット 2 台を設置し、これを制御するプログラムの開発とロボットのティーチング等を進めている。ロボットは走行軸によって 2 基のドラフト間を自由に往来することが可能であり、容器などを持ち運べる。ロボットの制御に LabVIEW 用の三菱ロボットライブラリーを利用することで、イーサネットを経由して LabVIEW から直接ロボットを制御可能とした。走行軸はサーボアンプを RS422 によって制御することでサーボモータを制御することが可能とした。また、各種溶液を分注するためには通常送液ポンプを用いるが、溶液ごとにポンプが必要となるためシステムが煩雑かつ高額になる。そこで現在、ロボットが使用できる自動マイクロピペットを開発中であり、使用量の少ない溶液は全てマイクロピペットを用いて分注することとした。導入した 2 台のステッピングモータを外部から制御することで、任意の液量を分注可能であるだけでなく、チップの排出も自動化出来る構造である。モーションコントローラとモータドライバを使ってモータを精密に駆動

させることができ、ドライバとピペット本体を LAN ケーブルで接続できる機構を採用した。世界初のロボットハンド用自動マイクロピペットである。

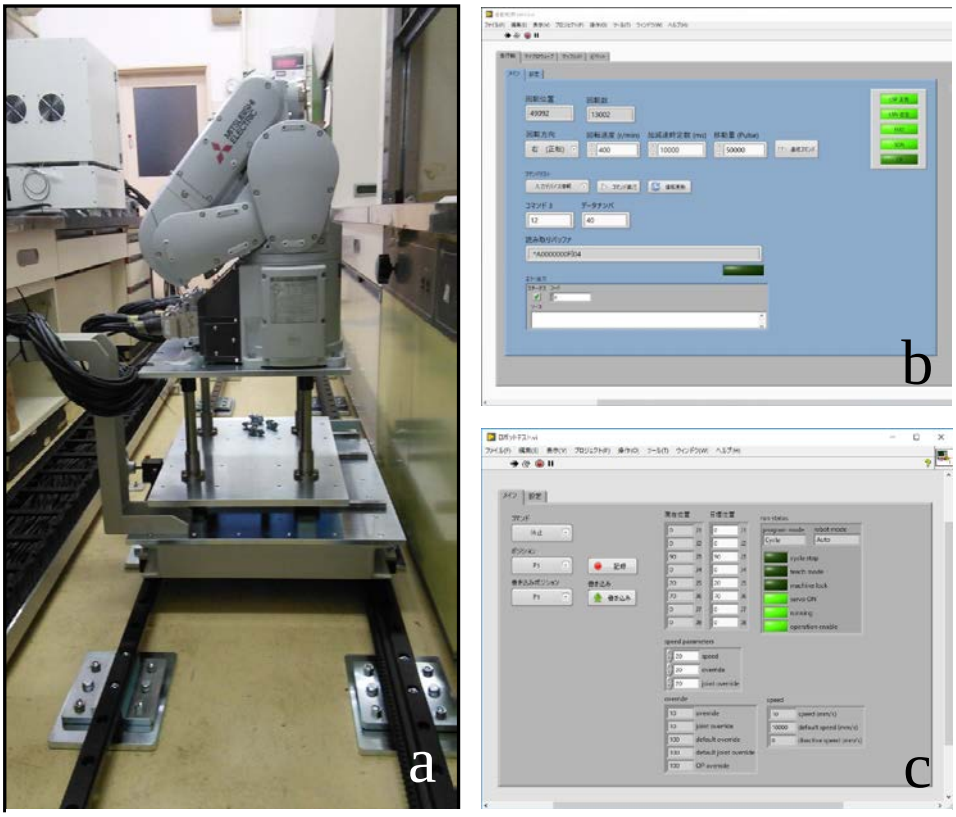

図 3: 走行軸付き多関節ロボット(a)、走行軸制御用基本プログラム(b)、ロボット制御用基本プログラム(c)

3. 今後の研究（継続課題の場合）

今後、開発中のロボットハンドを完成させることで、ロボットが容器を掴んで操作可能とし、逐次ロボットに動きを記憶させていく予定である。またマッフル炉、マイクロ波加熱酸分解装置、自動マイクロピペット、走行軸、そして多関節ロボットを統合的に制御するプログラムの開発をすすめることで、一連の操作を切れ目なく行うことが出来るようなシステムの開発を進めていく。

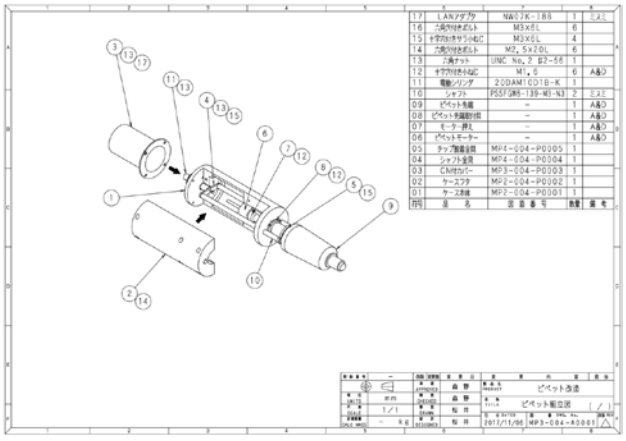

図 4: 開発中の自動マイクロピペット

4. 参考文献

(1) 野島健大、藤田博喜、永岡美佳、大澤崇人、横山裕也、小野洋伸, “環境試料中ストロンチウム-90 分析用自動化システムの開発” Proceedings of the 16th Workshop on Environmental Radioactivity, p. 111 (2016)