

氏名	秦 はるひ
授与した学位	博士
専攻分野の名称	工学
学位授与番号	博甲第5545号
学位授与の日付	平成29年 3月24日
学位授与の要件	自然科学研究科 産業創成工学専攻 (学位規則第4条第1項該当)
学位論文の題目	ガンマ線スペクトルデータを用いたウラン廃棄物ドラム缶の迅速な分類への機械学習法の適用性に関する研究
論文審査委員	准教授 佐藤治夫 教授 鈴木和彦 教授 五福明夫 教授 柳瀬眞一郎

## 学位論文内容の要旨

原子力施設の操業および廃止措置における放射性廃棄物の処理計画の策定や放射性廃棄物処分場での確認などにおいて、放射性核種の種類と総量（放射能インベントリ）の情報が非常に重要となる。把握すべき放射性核種には、ガンマ線による非破壊測定が困難な核種（難測定核種）が存在している。ガンマ線測定が容易である核種（Key 核種）の放射能濃度より難測定核種を推定するスケーリングファクター（Scaling Factor: SF）法が構築された。SF法は、Key 核種と難測定核種の間に関連関係が見られる廃棄物グループに適用されるため、廃棄物グループの分類が重要となる。

本論文で取り扱うウラン廃棄物は、天然ウラン（Natural Uranium: NU）や回収ウラン（Reprocessed Uranium: RU）など放射性核種の濃度組成（核種組成）が異なった物質が同じサイクルを通る。そのため、発生履歴だけでなく、ガンマ線スペクトルデータから得られる核種組成のグループデータを付与することで SF 法での放射能インベントリ評価の精度向上が期待される。ウラン廃棄物は、我が国において現在 200L ドラム缶換算で 11 万本以上保管されており、2050 年頃までにさらに約 25 万本発生すると見込まれている。廃棄物の分類は非破壊測定で得られたガンマ線スペクトルデータに基づいて行われる。スペクトルデータに基づいて人が分類する場合、境界領域にあるデータは、分類根拠が曖昧となり、結果が一律にならないことがあるため、明確な分類根拠が求められている。機械学習を用いれば、グループに特徴的な量を統計的かつ自動的に抽出し、分類根拠を数値化して瞬時に分類できる利点がある。本論文では、NaI (TI) シンチレーション検出器による非破壊測定で得られた低解像度ガンマ線スペクトルデータに、サポートベクターマシン（Support Vector Machine: SVM）とランダムフォレスト（Random Forest: RF）を用いて、ウラン廃棄物の分類への適用性について検討した。

まず、SVM を用いた NU と RU への分類では、内容物が同等で核種組成が異なるウラン廃棄物ドラム缶 967 点について 12 点を訓練データとして分類モデルを作成し、残りの 955 点に適用した。その結果、全て正しく NU と RU の廃棄物に分類することができ、SVM が適用可能であることを確認した。

次に、同様の分類に対して RF の適用を検討した。ウラン廃棄物ドラム缶 954 点について 300 点を訓練データとしてスペクトルデータの前処理方法が異なる 6 種類のデータセットに対して RF を実行し、最適な前処理方法を求めた。残りの 654 点で正答率を算出した結果、SVM に比べて訓練データ数が 186 点と多く必要となるものの、RF でも NU と RU の廃棄物への分類が可能であることを確認した。

最後に、NU、RU およびラジウム（Ra）が含まれる廃棄物について、SVM と RF の分類性能を評価した。両方法とも Ra が微量に含まれる場合、NU と Ra の誤分類が多く、SVM は分類モデルの性質からチャンネルシフトの影響を受けやすいことが判明した。一方、RF はチャンネルシフトに対しても安定して分類することができるものの、誤分類の解決が今後の課題となった。

両手法ともスペクトルデータにおけるチャンネルと計数値情報のみで分類することができ、分類モデルが構築できれば、分類速度はドラム缶 1000 本当たり数秒程度であり、大量の廃棄物に対して有用である。

## 論文審査結果の要旨

本論文では、機械学習法を用いて、原子力施設の操業・廃止における設備・建屋の解体に伴い発生する放射性廃棄物の迅速な分類をおこなうことを検討する。具体的には、2050年頃までに200Lドラム缶換算で36万本以上発生すると見込まれるウラン廃棄物について、NaIシンチレーション検出器による非破壊測定で得られる $\gamma$ 線スペクトルデータに、サポートベクターマシン(Support Vector Machine: SVM)とランダムフォレスト(Random Forest: RF)を適用し、核種組成が異なる天然ウラン(Natural Uranium: NU)と回収ウラン(Reprocessed Uranium: RU)の廃棄物への分類法を提案した。

まず、内容物が同等で核種組成が異なるウラン廃棄物ドラム缶の $\gamma$ 線スペクトルデータをNUとRUの廃棄物に分類する方法についてSVMの適用を検討した。ウラン廃棄物ドラム缶967点のうち12点を訓練データとしてSVMの分類モデルを構築し、残りの955本について構築したモデルで分類した結果、全て正しくNUとRUの廃棄物に分類され、SVMが適用可能であることを確認した。

次に、同様の分類についてRFの適用を検討した。ウラン廃棄物ドラム缶954点のうち300点を訓練データとし前処理方法が異なる6種類のデータセットに対してRFを実行した。残りの654点で正答率を算出した結果、訓練データが186点以上の時、計数値の対数を取り、前後の差分を取る前処理方法で全てが正しく分類でき、NUとRUへの廃棄物の分類に適用できることを確認した。

さらに、NU、RUおよびラジウム(Ra)が含まれる廃棄物への分類について、両解析方法の適用を検討した。その結果、Raが微量に含まれる場合、両方法ともNUとRaに誤分類が発生しやすく、SVMは本質的にチャンネルシフトの影響を受けやすいことも判明した。一方、RFはチャンネルシフトがあった場合でも安定して分類できるものの、NUとRaの誤分類の解決が課題となった。

最後に、これらの手法は、SVMから得られる決定値やRFから得られる多数決の値などの明確な数値的根拠を以ってNUとRUの廃棄物へ分類できることを示した。また、両方法ともスペクトルデータにおけるチャンネルと計数値情報のみで分類することができ、分類モデルが構築できれば、分類速度は市販のPCでドラム缶1000本当たり数秒程度と短時間であり、大量の廃棄物に対して有用である。

以上より、本論文では、 $\gamma$ 線スペクトルデータに対して機械学習法を適用し、ウラン廃棄物を分類するための解析手法について、特筆すべき成果を挙げており、博士(工学)の学位に値すると認める。