

審査の結果の要旨

氏名 三宅 泰斗

加速器質量分析（AMS = Accelerator Mass Spectrometry）は、静電加速器を組み込んだ質量分析計であり、イオンを加速して得られるエネルギーを利用して、同位体分析等で、極めて高い存在比感度（abundance sensitivity）を持つ。そのため、通常の質量分析法では検出不可能な痕跡的核種、また放射線計測の手法でも検出が難しい長半減期同位体などの検出・測定において威力を示す。このような、存在度の極めて小さい長半減期放射性同位体は、自然界では、宇宙線による核反応、天然のアクチノイド等の自発核分裂によって生成するが、その生成源・プロセスが限定的かつ明確であるため、過去の自然現象を記録するアーカイブとして、また環境中の物質動態のトレーサーとして、重要な役割を果たす。一方、原子力は人為的に連鎖核反応を引き起こし、制御して利用するものであり、多くの種類の放射性核種が多量に生成する。その中でも長半減期放射性核種は長いタイムスケールにおける環境影響を評価するために重要である。さらに、福島第一原子力発電所事故のように、人間の制御を逸脱した事象に対しては、事象そのものの解析や事後の影響評価、将来予測など、様々な局面で貴重な情報を持っている。

このような長半減期放射性核種の検出において、加速器質量分析では、イオン化された被分析核種を核子当たり MeV 程度のエネルギーにまで加速することにより、物質との相互作用の情報を取り出すことを可能として、同重体イオン等の干渉を抑制している。しかしこの原理は、原子核の電荷に依存する相互作用を利用していることから、基本的に、質量数が大きくなると、同重体どうしの原子核の電荷の差が相対的に小さくなり、抑制能力が落ちる。同重体抑制能力を改善すれば、重要核種の検出感度が向上し、上述の様々な領域において研究を大きく進めることが可能であろう。

近年、新しい同重体抑制手法としてレーザー光脱離法が提案されている。これは、原子の電子親和力に着目した方法である。すなわち、検出対象同位体の電子親和力が、妨害同重体の電子親和力より大きい場合、両者の中間のエネルギーをもつレーザー光を照射した場合、電子親和力の小さいもののみ、選択的に中性化され、後段の分析器で容易に取り除くことを可能とするものである。この方法は、原理は実証されているものの、実際の加速器質量分析システムには実装されていない。そこで本研究では、実装を前提としたレーザー光脱離システムの設計を行い、テストベンチを製作することを目的とした。

本論文は、6章より構成される。

第1章では、研究の背景を述べている。加速器質量分析の技術的概要、検出感度の限界、また、応用研究の拡がりや展望を述べた上で、本研究の目的が述べられている。

第2章は、福島第一原子力発電所周辺土壌中の塩素 36 の測定について割かれている。塩素 36 は事故に伴って環境中に漏洩する可能性があり、その検出や分布は環境影響評価上、重要である。しかし、測定が困難であり、これまで福島では事故起源の塩素 36 を検出した報告は

ない。本研究では、加速器質量分析における従来技術（イオンと物質の相互作用）により土壌中の塩素 36 の検出に成功した。しかし、同重体である硫黄 36 の妨害により、その感度・精度は十分であるとはいえず、詳細な環境影響評価には至らなかった。本章では、新しい同重体抑制技術導入の必要性が端的な例として示された。

第 3 章で、レーザー光脱離法の中心部となる、負イオン減速チャンバーの設計・製作が行われている。レーザー光脱離法において、同重体抑制能力を高めるためには、レーザーとイオンとの相互作用時間を大きくする必要がある。そのために、イオン源から引き出されたイオンビームを減速する。その際拡がろうとするビーム束を、高周波四重極によりトラップする設計である。さらに、四重極内空間に、He ガスを導入することにより、衝突冷却の原理も取り入れ、十分な相互作用時間を確保する設計とした。ガスを制御するため、必然的に差動排気構造を取り入れることになり、ビーム経路上に複数のアパーチャが導入される。これらのアパーチャのビーム透過率 (transmission) を維持するため、減速管の後段および加速管の前段にレンズ効果を生ずる電極を挿入した。設計に際しては、イオン光学系ソフトウェア SIMION を用いて、イオンビームの挙動を詳細にシミュレートし、構造を最適化した。以上により、ビーム透過率が 100% に近い負イオン減速チャンバーを設計した。塩素 36 分析に関しては、同重体硫黄 36 は 1/200 以下に抑制されると計算された。この設計に基づき、実際に負イオン減速チャンバーが製作された。

第 4 章は、負イオン減速チャンバーを評価するためのテストベンチビームラインの構築について説明されている。このテストベンチでは、製作した負イオン減速チャンバーを実装するとともに、負イオン源および電磁石による質量分析系、ビーム評価のためのファラデーカップなどを実装した。また、イオン源からの引き出し、および減速チャンバーでの精密な減速制御のため、電位構成を慎重に設計・構築した。

第 5 章は、負イオンビームを使って、透過率を評価し、第 3 章における設計の妥当性を検証した。まず、He ガス導入のための差動排気について、想定通りの真空度の差を確認した。また、減速チャンバー内の高周波四重極に導入するイオン速度を徐々に落として行く（減速度を高めて行く）と、透過率は次第に落ちて行くものの、単調ではなく、複数のピークが認められた。この現象は、減速に伴い、ビーム束の節の位置が変化することにより、電極構造のジオメトリの影響で生じることが、シミュレーションでも明らかになった。さらに、減速した状態でも、独自に導入した電極によりアインツェルレンズを構成することにより、ビーム透過率が回復することが実験的にも確かめられた。以上により、負イオン減速チャンバーの設計の妥当性が実験的にも確かめられた。

第 6 章は結論である。

まとめると、本研究では、レーザー光脱離法の実装を前提とした負イオン減速チャンバーを設計し、実際に製作し、かつ実験的にその妥当性が確かめられた。設計の過程では、イオンビームを実際に制御するために必要な物理的素過程を詳細に吟味した。また、実験による検証では、負イオンの減速に関する新たな知見も得られた。この成果は新しい同重体抑制手法である高性能レーザー光脱離実装加速器質量分析の実現への重要な進展であり、原子力工学に資するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。