

PR0068

中性子とミュオンを用いた元素分析法の最前線

○大澤崇人

(日本原子力研究開発機構)

近年、量子ビームを用いた分析手法は大型実験施設の建設と分析手法の高度化によって著しい発展を遂げてきた。量子ビーム科学は各種ビームを生成する工学技術に始まり、素粒子物理学や物性研究に係る広範な技術的展開があるが、本講演では地球化学的に関連性が高い元素分析技術として、即発 γ 線分析とミュオン捕獲特性 X 線分析について、最近の技術的進展について概説する。

即発 γ 線分析は放射化分析の一種であるが、放射化分析と異なり中性子ビームを当てながら分析を行う。試料に中性子を放射すると、試料内の一部の原子核は中性子と核反応を起こし、即座に γ 線を放射する。これを即発 γ 線と呼ぶ。即発 γ 線は中性子以外の粒子を用いた核反応によっても発生するが、即発 γ 線と言えば通常は中性子誘起即発 γ 線を指す。地球化学試料を含む実試料の分析が可能な国内の即発 γ 線装置は、研究炉 JRR-3 に設置された即発 γ 線装置 (PGA) が唯一の装置であり、世界に数台しかない即発 γ 線分析装置の中でも最高の S/N 比を誇る。本装置は建設から既に 30 年が経過しているが、講演者による大規模な改造によって完全自動化が達成されている。ロボティクスと高度な制御技術によって非常に高い分析安定性が達成され、データ生産性は飛躍的に向上した。

即発 γ 線装置には様々な特長があり、試料を非破壊で分析でき、他の分析法では分析が困難な水素やホウ素といった元素を正確に定量できる。ビームは 20×20 mm の大きさに切り出されており、この大きさに収まる試料であれば、バルクの元素濃度を正確に決定できる。固体だけでなく液体も分析可能で、試料の前処理も不要である。こうした特長を踏まえ、小惑星探査機はやぶさ 2 が回収した小惑星リュウグウの石の分析を PGA にて行い、水素を含む各種元素のバルク濃度を決定した。はやぶさ 2 計画では生命の起源を探ることが大きな目標であり、地球の海の起源を知る上で始原的な小惑星中の水素の濃度を決定することは重要である。分析の結果、水素の濃度が CI コンドライトよりかなり低いことが判明した。おそらく CI コンドライトは地球大気に含まれる水蒸気の影響を受けており、リュウグウの分析値が本来の CI コンドライトの元々の組成を示していると考えられる。

次にミュオン捕獲特性 X 線分析について紹介する。ミュオンは素粒子であるレプトンの一種で、電子の 207 倍の質量を持っている。ミュオンは加速器で人工的に生成が可能であり、東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC では、3 GeV まで加速した陽子をグラファイト標的に当てることで生成している。標的からは核破砕反応によって様々な粒子が放出されるが、そのうちパイオンを取り出すと、パイオンは飛行中にミュオンとニュートリノに崩壊するため、ミュオンをビームとして取り出すことが可能である。元

素分析には負の電荷を持つミュオンを利用する。ミュオンが何らかの試料に照射されると、試料中のある深さで停止し、停止した際に原子に捕獲されてミュオン原子を形成する。ミュオンの軌道は電子よりも遥かに原子核に近い。ミュオンは高い主量子数から次第に内殻へ遷移するが、その際にミュオン捕獲特性 X 線を放射する。原理的には電子由来の特性 X 線と同じだが、放射される X 線のエネルギーは 2 桁高いため、試料の深部からでも脱出できる。エネルギー領域としては γ 線に迫るが、原子核由来ではないため X 線である。

ミュオン特性 X 線分析には特徴的な性質が数多くある。ミュオンビームはその運動量に応じて試料の任意の深さに停止させることができるため、ミュオンの運動量を制御することで深度分布が得られる。放出される X 線のエネルギーが十分に高いため、ミリ単位の深さからでも脱出できる。全ての元素に対して満遍なく感度があるため、水素以外の元素であれば検出可能であり、特に炭素、窒素、酸素といった軽元素を非破壊で分析できることは特筆に値する。これは炭素や酸素に対する感度が低い即発 γ 線分析と相補的である。

ミュオン特性 X 線に関する基本的な物理学は半世紀以上前から知られており、原子核の構造を解析する手法として盛んに研究されていたが、それが実試料の分析手法として応用されるようになったのは、J-PARC の建設によって強力なミュオン源が登場した 2010 年以降である。講演者らは 10 年以上に渡って地道な研究開発を行ってきたが、劇的な進歩を遂げたのは、ここ 2 年あまりのことである。軽元素を非破壊で分析できる点が評価され、はやぶさ 2 初期分析チームの枠組で、ミュオン特性 X 線分析によるリュウグウ試料の分析が行われることとなった。しかし、当時は微小試料を分析できるだけの性能が全く達成できておらず、大気遮断雰囲気での分析も未達成だった。装置開発は困難を極めたが、実際の分析が行われる 2 ヶ月前に装置が既定の性能を達成したことで、リュウグウ試料の分析が実行される運びとなった。

初期分析では当初の予定を大幅に上回る 120 mg もの試料が提供されたこともあり、極めて高い S/N 比のスペクトルが得られた。データの解析方法も確立されていなかったが、X 線天文学分野の専門家との協働により、極めて厳密な解析が行われることになった。微小（と考えられていた）小惑星試料の正確な元素分析を達成する、という目標に向けて異分野の研究者たちの英知を結集させることで、リュウグウ試料中の各種元素の濃度を決定することに成功した。その結果、基本的にリュウグウ試料の組成は CI コンドライトと近く、CI と同等の炭素が含まれていることが判明した。一方、CI コンドライトと比較して、明らかに酸素の濃度が低かった。これは CI コンドライト中に水が多いことを意味していると考えられ、PGA の分析結果と整合的である。さらに、CI コンドライト中の一部の二価の鉄が酸化してしまった可能性も示している。

Frontiers of elemental analysis methods using neutrons and muons.

*T. Osawa (Japan Atomic Energy Agency)