

## A new AMS with RFQ LINAC for trace elements

Shintaro Ueda<sup>1</sup>, Toshiyuki Hattori<sup>1,2</sup>, Katunori Kawasaki<sup>3</sup>,  
Noriyosu Hayashizaki<sup>1</sup>, Toshiki Hata<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology, Japan

<sup>2</sup>Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology, Japan

<sup>3</sup>Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Japan

### Abstract

Accelerator Mass Spectrometry (AMS) is able to measure abundance ratio of the radioisotope, and measurable limit is about  $1 \times 10^{-15}$  (ppq). Measurable limit is very excellent comparison with other analyzers for trace element. Therefore we have studied a new AMS for trace element. Our system is combined LINAC with a multivalent ion source. The features of new system are following: trace elemental analyses by detect energy of particles, and miniaturization of the system. We are going to report a condition of study.

## RFQを用いた微量元素用AMSの研究

### 1. はじめに

AMSは<sup>14</sup>C (自然界における同位体比; 約 $1.2 \times 10^{-10}$  %) の半減期を利用した年代測定に用いられる分析システムとして知られている。年代測定では<sup>14</sup>Cの存在率を求めることにより5~6万年前までの測定が可能とされている。これは10半減期を経た<sup>14</sup>Cの測定が行われていることになり、10半減期を経た<sup>14</sup>Cの個数は1/1000に減少するため、実際の測定は $10^{-15}$  (ppq) レベルまで行われている。

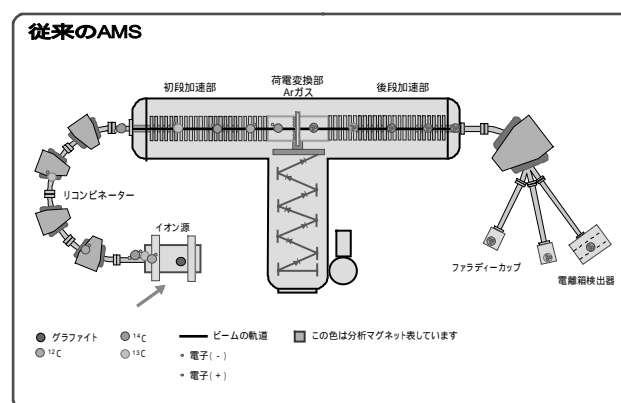
一般的な微量元素の一手法として Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)がある。この分析法では $10^{-12}$  (ppt) レベルまでの測定可能とされているが、pptレベルの検出は数種類の元素に限られる<sup>[1]</sup>。これに対し現在のAMSはICP-MS以上の高い分解能を持っている反面、システムが大規模であり、同位体分析以外には利用できないといった欠点を有している。そのため我々は微量元素分析用AMSの開発とシステムの小型化を検討している。今回はその研究状況について報告する。

### 2. 従来のAMS

従来のAMSシステムは主に静電型のタンデム加速器とイオン源から成り立っている<sup>[2]</sup>。このシステムを用いた分析では<sup>14</sup>Cによる年代測定がよく知られており、その測定は以下のようにして行われる (図1)。

様々な前処理を経てグラファイト化された試料は、イオン源内でマイナスイオン化される。その粒子はリコンビネーターと呼ばれる分析マグネットによりある程度の粒子選別が行われ、タンデム型静電加速器に入射される。加速された粒子は質量ごとに分析マグネットで分離され、ファラデーカップ、もしくはガスカウンターによって検出される。年代測定は

検出された<sup>12</sup>C, <sup>13</sup>C, <sup>14</sup>Cの比から算出される。



### 3. 新型AMSの概要

#### 3.1 LINAC Energy & Mass Spectrometry (LENS)

我々の計画しているLENSは線型加速器と多価イオン源とから成り立っている (図2)。

このシステムは、微量元素分析を目的としており、加速された各粒子のエネルギーを検出することでppqレベルの測定が可能である。

線型加速器は対電価質量比の等しい粒子を加速するため、重い元素を加速するには多価を生成する必要がある。そのためこのシステムには多価イオン源が必須となる。またLENSはイオン源の性能を向上させることで加速器の電力を下げ、加速器自体を小さくすることも可能になる。これによりLENSのシステムはコンパクトになる。

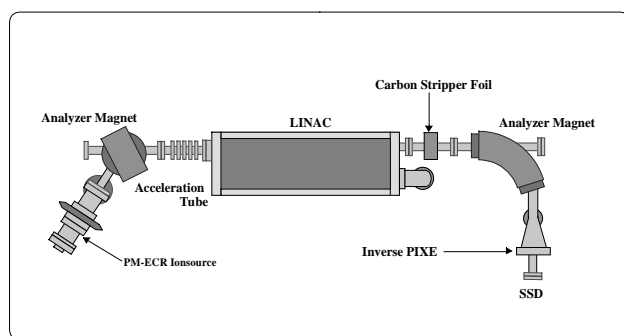


図2. 微量元素分析用AMSシステム

### 3.2 固体試料の直接導入

液体試料と固体試料とを考えた場合、液体試料を用いるには表1に示したような問題点がある。しかし測定装置の性質上、一般的には液体試料による分析が普及している。

しかしLENSでは、対象試料の多価イオンが生成されればよいため、固体試料を直接プラズマに接触させ、昇華する方法を採用した。

この方法を採用することで、調製過程のクロスコンタミネーションを低減し、溶解困難な試料の測定も容易になり、試料の調製時間も短縮できる。

表1. 液体試料の問題点<sup>[3]</sup>

誤差の原因	要因
クロスコンタミネーション	大気, 試薬, 溶媒
元素の損失	揮発 容器への吸着 容器との反応
不完全な分解	溶解性, 錯形成, 生成物の安定性 不動体の影響

### 3.3 Inverse PIXE分析

通常のPIXE分析はプロトンなどの重イオンを試料に照射し、試料から発生した二次電子を検出する手法である。これに対してInverse PIXE分析はビーム化した試料をターゲットに照射した際に放出された二次電子を検出する手法である。この手法はAMS法に比べて感度は落ちるが、測定結果の判断が難しい場合には有効とされている<sup>[4]</sup>。

LENSでは粒子の検出にSSDを用いている。そのため、我々はSSDの検出部をターゲットとしたInverse PIXEを検討している。Inverse PIXEから得られたデータは、SSDから得られたデータのチェックもしくは補正に利用できるのではないかと考えている。

### 3.4 データの補正

LENSの性能は、永久磁石型ECRイオン源の多価生成効率に依存するところが大きい。しかしECRイオン源は運動状態によって多価生成効率が異なるため、あらかじめ試料の状態をPIXE分析（検出範囲はppmレベル）で調べておき、LENSから得られたデータの補正に用いる。また測定試料と一緒に基準物質を昇華することによっても補正を行う。

### 3.5 測定方法

測定試料はイオン源の後部から固体もしくは粉末の状態ではイオン源内に導入され、生成された多価イオンは分析マグネットによりある程度対電価質量比の等しい粒子に分離された後、加速器に入射される。線形型加速器によって加速された粒子は質量ごとにエネルギーの大きさが異なるため、粒子の検出はSSDによって行われる。

## 4. 基礎研究用 LENS

LENSの研究には、TIT-RFQ型線形加速器と永久磁石型ECRイオン源（PM-ECRイオン源）とを用いた。

RFQは将来置き換えを考えている小型なIH線型加速器（全長約1.1m）と同様に対電価質量比の等しい粒子を加速することができるため選択した。IH線型加速器はタンデムに比べて小型化が可能であるため、本研究室では小型線型加速器の開発と研究も行われている。

永久磁石型ECRイオン源は、ミラー磁場の発生にコイルを必要とせず、取り扱いも容易で設置場所の選択肢も増えるといった点から選択した。

以下にTIT-RFQとPM-ECRイオン源のパラメータを示す（表1, 2）。

めに導入用ロッドの改良を行っている。その他、試料を変えて固体試料導入法の実験も行っている。

表2 . TIT-RFQ型線形加速器のパラメーター

パラメーター	値
対電荷質量比	1/16
運転周波数	80 MHz
入射エネルギー	5 keV/amu
出射エネルギー	214 keV/amu
全 長	4.5 m

表3 . PM-ECRイオン源のパラメーター

パラメーター	値
材 質	Nd-Fe-B
プラズマチャンバー表面の磁場	9.2 kG
マイクロ波電源	12-16 GHz
投入電力	250 W
全 長	341 mm

## 8 . 研究状況

### 8.1. 前段入射システムの設計・製作

RFQ線形加速器の入射エネルギーが 5 keV/amu であるためイオン源を50 kVに昇圧する必要があり、RFQの入射口とイオン源の高さ揃える必要必要性もあったことから、前段入射システムの設計と製作を行った。

### 8.2 固体試料の昇華実験

PM-ECRイオン源と分析マグネットを組み合わせた質量分析装置を用い、銅試料の昇華実験を行った。実験では銅の炎色反応によってプラズマが青紫色から緑色に変化する様子を観察したが、銅イオンのスペクトルは得られなかった。しかし実験後、イオン源のチャンバーを確認すると、チャンバー内に銅が薄く均一に壁着していたことから、銅はプラズマにより昇華されていたと考えられる。

現在はイオン源内へ試料を0.1m/minで導入するた

### 8.3 LENSの研究・製作

イオン源による固体試料の昇華実験と並行して、LENSの研究と製作を行っている。現在はRFQ型線形加速器周辺のスペースを確保し、前段入射システムの設置を行っている。以降はRFQに入射システムを接続し、微量元素分析のテストを混合ガスで行う予定である。

## 9 . まとめ

我々は従来のAMSの性能を生かした新しい分析装置の研究を行っている。この分析装置LENSの目的は、加速された粒子のエネルギーを検出することにより微量元素分析をppq レベルまで行うことにある。現在はPM-ECRイオン源を用いた固体試料の昇華実験を進めながら、LENSの製作も並行して行っている。

## 参考文献

- [1] 久保田正明 監訳, 誘導結合プラズマ質量分析法, 化学工業日報社, 東京, 2000, pp. 20-21.
- [2] C.Tuniz, J.R.Bird, D.Fink et.al. (Eds.), Accelerator mass spectrometry, CRC Press, New York, 1998, pp. 4-10.
- [3] 原口紘丞, 寺前紀夫, 古田直紀ら訳, 微量元素分析の実際, 丸善, 東京, 1995, pp. 153-154.
- [4] H.Artigalás, M.F.Barthe, J.Gomez et.al., Nucl.Instr.and Meth. B79 (1993) 617-619.