

話題 (小型加速器)

1 大学の 1 研究室における加速器開発研究雑感

〈3 度原理実証機になった東工大重イオン RFQ 線形加速器の巻 —1992~2008—〉

服部 俊幸*

Essay of Accelerator R&D in a Small Laboratory of a University
 〈Study of three POP accelerators using heavy ion RFQ linac of
 Tokyo Institute of Technology —1992-2008—〉

Toshiyuki HATTORI*

1. 高加速率重イオン RFQ 線形加速器 —1992~1995—

今回の表題にあるように、1992 年に研究開発を始めた高加速率重イオン RFQ 線形加速器は、東京工業大学 (東工大) に初めて建設された RFQ 線形加速器である。これは 1992 年から 2008 年のあいだ、A. 高加速率重イオン RFQ 線形加速器、B. レーザイオン源を使った直接プラズマ入射法による高強度加速の RFQ 線形加速器、C. 線形加速器型加速器質量分析という、3 つの研究で原理実証機として活躍した。今回の巻では、この加速器を中心にお話する。

1.1 重イオン RFQ 線形加速器に至るまで

1990 年前後に吹き荒れた原子核関連研究所の改組・統廃合の荒波を受け、東京工業大学原子炉工学研究所も改組をおこなったが、「量子エネルギー工学研究所」という新名称は時期的に少し早すぎて、当時の文部省の認めるところとならずに、引き続き「原子炉工学研究所」として残った。そして改組に関連して重イオンビーム加速のための予算が認められ、以前より稼働していたペレット静電加速器の重イオン加速グレードアップのほかに、本研究室でも重イオン加速器を開発できることになった。

しかし、重イオン加速器といっても、どういう特徴を持たせるかが悩みどころであり、色々と検討した。日本初の RFQ 線形加速器の開発は、東京大学原子核研究所 (東大核研) における LITL プロジェクトであ

り、これには筆者も参加し、東芝が実機製作を担当したものの、それ以後は他社が製造実績をあげていた。そんなことで東芝も再チャレンジしてはどうかと、以前の「実用型材料照射用大型 IH 線形加速器の巻」や「電子加速器リッジトロンの巻」に登場した東芝の佐藤君と話し、高強度高加速率重イオン RFQ 線形加速器の開発に着手した。

1.2 東工大重イオン RFQ 線形加速器の特徴

1.2.1 RFQ 線形加速器の基本設計

当時の小栗助手と修士課程学生だった岡村君とともに色々考えた。そして、重イオン慣性核融合 (HIF) の基礎研究が可能で、出射エネルギーは 300 keV/u 程度、電荷対質量比 A/q については、当時の我が国の RFQ 線形加速器では LITL が 7 という大きな値を持っていたため、これよりも大きくすることを考えた。ビーム電流は HIF の必要量の数分の 1 でよいが、ドイツ GSI 研究所の Muller らによる HIF 用線形加速器 (5 mA) を上回るように考えた。また、高強度酸素ビームの応用として、Si ウェハに SiO_2 を生成する半導体製造プロセスも考え、最終的に A/q は 16 とした。これは、多価 ECR イオン源の利用によりウランビームまでも十分加速可能な性能である。そして全長は 4 m 程度とした。

1.2.2 重イオン RFQ 線形加速器の粒子軌道計算

加速率をよくしたいので、ベインパラメータは放射線医学総合研究所の山田さん、東大核研の徳田さんの協力を得て、GENRFQ プログラムを用いて検討し

* 東京工業大学原子炉工学研究所 Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology
 (E-mail: thattori@nr.titech.ac.jp)

た。そして、加速透過率 90%、加速電流 8~9 mA を目標とし、PARMTEQ を用いてビーム軌道計算をおこない、 B (収束力) と Δrf のパラメータサーチによって最高透過率が得られる値を求めた。しかし、 $A/q = 16$ を実現するためには、どうしても運転周波数を 80 MHz 以下にしないと加速できないことがわかってきた。また、加速率と加速透過率を上げるには、高周波のパルス運転で、加速電圧もキルパトリック限界の 2.2 倍にする必要があった。最終的に、粒子軌道のトレランス係数は 1.1 倍のぎりぎりにして、やっと 200 keV/u まで加速できる設計ができた。この計算結果を携えて、岡村君はカナダのオタワで開催された 1992 年の Linac Conference で発表した。

1.2.3 高次モード電場成分を含む PARMTEQ 解析

当時の 3 次元加工技術により 4 m の RFQ 線形加速器を製作すると、約 8 千万円の製作費が必要になることがわかった。その大部分はベインの 3 次元加工によるものなので、東芝の佐藤君と相談して、総形バイトを製作して 2 次元加工することにした。しかし、ベイン入射側の Radial Matcher 部分は径が大きいため、1 種類の総形バイトでは大きな誤差が出るので、入射側だけは 3 次元加工とし、誤差が減ってきたら図 1 のような総形バイトによる 2 次元加工に移行することにした。

この総形バイトを機械加工に取り入れることは我々のオリジナルでなく、すでに RFQ 線形加速器の本家の米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) で考えられていた。そして、そのとき発生する高次モード電場が、3 次元解析による係数として、Crandall のレポートにおいてテーブル化されていたため、これ幸いと、その数値を使わせてもらった。

しかし次の段階として、RFQ の軌道計算プログラ



図 1 ベイン加工用総形バイト

ムに高次モード電場を入れることが必要になり、GENRFQ の開発者の 1 人である徳田さんに頼んで、高次モード成分をインパルス近似で計算する PARMTEQ-H を作ってもらった。そのプログラムで計算をやりなおすと、90% の加速透過率をもつデザインが、40% 台にまで下がってしまった。そしてまた、加速率をよくするため放電なしで電圧がかけられるように、電極の半径をベインの平均半径 r_0 より小さい $0.75 r_0$ に縮めたところ、さらに高次モードの電場が発生した。

これらの高次モードを 13 次まで入れて PARMTEQ-H で軌道計算をおこない、HIF 用 RFQ 線形加速器に必要なといわれる 300 keV/u の加速エネルギーに向けて、可能な限り近付けようとしたが、200 keV/u で 4 m を超えるベイン設計しかできなかった。そこで、色々な研究所や大学に頼み込んで全長短縮化の計算をしてもらったが、場合によっては 4 m どころか 5 m 近くになってしまうケースもあるなど困難であった。

1.2.4 加速率向上のためのさらなる挑戦

しかしそれでも 300 keV/u を諦めきれず、少しでも加速エネルギーを近付けるための工夫として、Gentle Buncher (GENRFQ では Gentle Buncher は Prebuncher, Buncher, Booster Section で構成されており、ここでは Booster Section であるが GB としておく) が終わり、加速位相が -30° となり加速領域に入ってしばらくした後、加速率をあげるため、加速位相を -30° から -0° の方向に向かって変えてみた。その結果、加速位相を -20° までは上げることはできるが、 -18° 程度にするとセパトリティクスからこぼれてしまうことがわかった。

この重イオン RFQ 線形加速器は、全長 4.4 m で 3 タンクにより構成される。GB が終わり加速領域になるのは第 2 タンクであり、そこからすぐに -20° に向かって位相を上げ始めれば加速率はよくなるはずであるが、このアイデアはまだ世界的におこなわれておらず、我々は躊躇した。そこで、第 2 タンク内は位相を -30° に保ち、第 3 タンクに入ってから位相を変える方法をとった。仮にこの試みが失敗しても、第 3 タンクのベインを再製作すれば良いと言う安全策があった。そのため加速エネルギーは 219 keV/u が精一杯であった。第 2 タンクから上げ始めれば 230~240 keV/u も可能であったが、それでも RFQ 線形加速器の加速ゲインとしては世界最高の 0.8 MV/m を実現する設計ができた。

以上のことから東工大重イオン RFQ 線形加速器の

表1 TIT-RFQの主要パラメータ

Input energy (keV/amu)	5
Output energy (keV/amu)	214
Max. acceleration particles (A/Q)	16
Vane length (cm)	422
Total number of cells	273
Minimum bore radius (cm)	0.294
Margin of bore radius	1.10
Maximum modulation	2.052
Characteristic bore radius (cm)	0.466
Curvature radius of vane-tip	1.0
Focusing strength	3.4
Maximum defocusing strength Δ	-0.05
Synchronous phase (degree)	-90, -30, -20
Transmission (%) A/Q=16	
0 mA input	91.8
10 mA input	68.4

パラメータを表1の様に決定した。そして製作に取りかかった。

1.3 東北大川渡セミナーハウスでのリニアック技術研究会

RFQ線形加速器の製作話に入る前に、1985年に東北大で開催された川渡セミナーハウスでのリニアック技術研究会について少しお話しする。この研究会には、筆者と学生の佐藤君、林君、鈴木君、密本君とで参加した（各学生は東芝、三菱電機、日本原子力研究開発機構、住友重機械工業で現在活躍中である）。

このとき、日大のレーストラック・マイクロトロングループから、Disk and Washer空洞の研究をおこなっている博士課程学生の竹田君が参加していた。その当時、大学で線形加速器の開発研究を行う学生がいるのは東工大と日大ぐらいであり、川渡セミナーハウスの1つのコテージの片側を東工大が、反対側を日大が使って合宿していた。学生が若いのは当然として、筆者もまだ30代で、日大の早川さんも田中さんも若く、若者集団のコテージであった。真ん中に談話室があり、酒を飲み交わしながら、加速器やその物理、技術のことも含めて、楽しい会話が弾んだ3日間であった。

東工大重イオンRFQ線形加速器を製作するにあたって、京浜事業所の佐藤君とともに、同社に入社していた竹田君が参加することになった。このため最初の頃は本研究室でおこなっていたRFQ加速空洞のSuperfish計算を、それ以後は大船に乗った気持ちで竹田君に任せてしまった。

1.4 1/2モデルの製作と高周波特性の測定

RFQ線形加速器の電極構造は、旧東大核研の2台と同じく4ベイン型とした。加速空洞に擬TE₂₁₀モードを励振させるため、空洞端部が調整可能な鉄製の1/2スケールモデルを、千葉にある東芝の外注先メーカーで製作した。1/2スケールでも2mを超える相当に大きなものだった。後にこのモデルは銅メッキを施したが、試しにメッキ前の高周波測定を指示すると、共振周波数が測定できないと竹田君が言ってきた。さっそく筆者と岡村君で鶴見線海芝浦駅近くにあった東芝の実験室に出かけ、モデル空洞を色々覗いてみた結果、4つのベインの先端間隔がアンバランスになっていて、TE₂₁₀モードが励振されていないのではないかと考えられた。

そこで各ベインのアライメントをやり直すために、ベイン間のギャップ測定をおこなうことを決め、簡易測定としてキャリパーを購入し測定した。また精度を上げるために、ロッドゲージのセットを原子炉研工作室の宮林さんに頼んで買ってもらった。これを東芝に持って行って、ロッドゲージを幾つかコロソと落としながら、岡村君と2人でギャップ測定をした。測定データからベインで区切られた4つのクアドラントのアンバランスを、1/2モデルの全長2.2mに沿って調整し、予定の周波数を励振することができた。しかし共振周波数が安定せず、Q値も低く、とても電場分布が測定出来そうもなかった。このため予定通りに銅メッキをおこなってから、再測定をおこなうことになった。銅に比べて表面が鉄であると高周波損失が増大し、極端にQ値が低下することをまさに知った思いがした。その後は順調に進み、モデルテストを必要としていた空洞端部の容量調整も上手くできた。ベイン間電圧も等電圧分布にすることに成功し、モデルテストを終了して実機製作に取りかかった。

1.5 実機製作と電場測定

RFQ線形加速器の粒子シミュレーションにしたがって、ベインの2次元数値制御(NC)加工も佐藤君や竹田君の努力で順調に進んだ。銅メッキ工程は、大阪にあるクロムメッキを主力とする会社でおこなった。しかしこれが見た目にも「ガサガサ」の銅メッキであり、やり直しを指示した。

東芝によるアライメントの終了後、摂動法で電圧分布測定を開始した。空洞両端には銅製の親フランジがあり、そのベイン端部付近に、4個ずつの銅製キャパシティブ・チューナーが付いた構造にしていた。これらを可動構造とせず、少しずつ削りながら電場分布を測定していった。川崎にある職人兼社長の片桐さんに

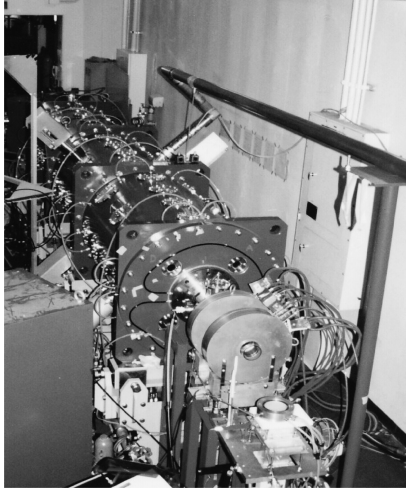


図2 東工大重イオン RFQ 線形加速器

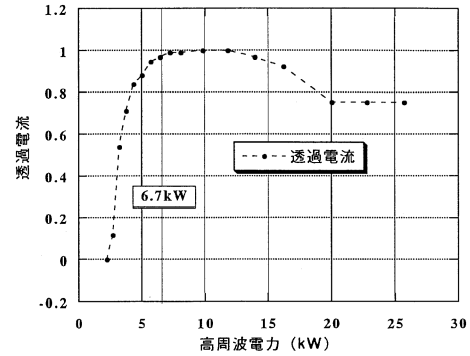
1日に1回、8個のチューナを削ってもらい、2週間近く通い詰めて長さを決定した。電場分布はデザイン値よりも、前後で3~5%程度低下していたが、8個のキャパシティブ・チューナが5mm以下に近付くので安全性を考え、また PARMTEQ による再計算で十分加速することが確かめられたので、OKとした。共振周波数もこのため1%程度上昇した。イオン源をセットして完成した RFQ 線形加速器を図2に示す。

1.6 イオン源テスト

入射イオンはこのために製作していた永久磁石型単ミラー ECR イオン源で、2.45 GHz を CW で供給した。このイオン源は以前の巻で書いた、シューベルト君の線形加速器のイオン源として使用し、また後に半導体用重イオン注入機として開発した IHQ 型線形加速器のイオン源として活躍した。マイクロ波電源として電子レンジのマグネトロンを流用したこともあったが、パワーが大きすぎて各種の問題が発生したので、現在は使用していない。

この ECR イオン源の引きだし電圧は最大やっと 20 kV であったが、中間引出電極を追加して 30 kV が印加できた。この線形加速器の入射エネルギーが 5 keV /u であるので、 $A/q=6$ まで、例えば C^{2+} まで加速できることになる。最初の加速テストは $A/q=4$ の He^+ で、加速特性試験をおこなったが、重イオン線形加速器として nA オーダーのビーム電流ではあったが C^{2+} も加速し、名前倒れにならないようにした。

O^+ 加速のためには高圧ターミナルを製作して 80 kV で加速する必要がある。この高圧ターミナルを製作して、 $A/q=14$ の N^+ を加速したのが、以前の巻で書いた電子加速器リッジトロンで博士号をとった林

図3 高周波投入電力に対する He^+ ビームの加速強度

崎君の修士論文である。ビームはイオン源から直接入射されるので、RFQ 線形加速器の直前にビーム引出電圧の 80% 程度の 60~80 kV が印加可能な大きなアインツェル・レンズを配置した。そしてこのアインツェル・レンズの直後に 2 軸測定のエミッタンスモニターをセットし、入射ビームのエミッタンスも測定した。

1.7 加速テスト

RFQ 線形加速器の電場分布が決定するのを待って、入射側にイオン源、収束レンズ系、エミッタンスモニターを、出射側に 90 度分析磁石によるビーム分析系をセットした。また、RFQ 線形加速器本体は、前半部を 520 L/s、後半部を 160 L/s の 2 台のポンプで排気した。RFQ 加速空洞の 2 回目のメッキは思っていたよりも状態がよく、しばらくすると 10^{-6} ~ 10^{-7} Torr に達するようになった。

イオン源は非力であったが、 He^+ を $20 \mu A$ 程度まで、それほど問題なく加速することができた。図3が高周波投入電力に対する He^+ の加速強度である。ノーマルなベイン電圧には 6.7 kW で到達しており、この結果をドリフト・チューブ型線形加速器に使われるシャントインピーダンス Z_{eff} に換算すると、約 26 $M\Omega/m$ となった。またこの小型 ECR イオン源で数十 nA の C^{2+} ビームを発生させて加速した。

1.8 エネルギー分析

加速出射ビーム（加速されなかったビームも含む）の運動量分布と電荷分布も測定できるように、四重極磁石を含まない、分析磁石だけの分析系をデザインした。すなわち、RFQ 線形加速器の水平収束点を焦点として分析系を設計し、水平方向の像点にスリットとファラデーカップを置き、運動量分析をおこなった。

磁石の垂直ギャップが狭くてすむように、垂直の収束点は水平方向収束点の少し下流にある。そのためスリットとファラデーカップ位置では少し収束してい

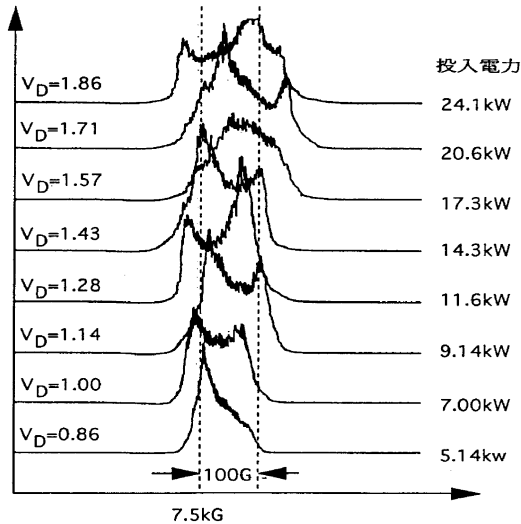


図4 加速された He^+ ビームの運動量スペクトル

ないが、分解能に関係ないので、縦長スリットにして対応した。図4に高周波電力を変えながら測定した加速 He^+ の運動量スペクトルを示す。1山になったり、3山になったり、きれいにシンクロトン振動がスペクトルとして示されている。

1.9 幻の飛び級博士誕生

1993年9月頃から大車輪で加速テストと解析、考察をおこない、それから3ヶ月後の11月末に、岡村君は博士課程2年で博士論文を完成させてしまった。修士課程からこのRFQ線形加速器の設計を始めているので、加速器本体、入射系、出射分析系をデザイン、製作運転までを約3年間でおこなったことになる。ちなみに彼は東工大の出身で、4年生のときから筆者の研究室におり、卒業論文、修士論文、博士論文のすべてを加速器でまとめている。

さて、その当時はすでに東工大で飛び級卒業制度が始まってから2~3年過ぎており、数学、物理、化学などの理学系で飛び級博士が卒業していた。そこで、岡村君にも同制度を適用することを考えたが、なかなか理解が得られず上手くいかなかった。その当時、東工大の高分子を除いた工学系ではまだ飛び級博士の前例がなく、「最初の栗を捨ててしまった」ことは後に知った。幻の飛び級博士となってしまった。

1.10 高強度ビームを使った実験研究

完成したRFQ線形加速器からのビームを使った実験は紙面もないので簡単に述べるが、2つの博士論文になる研究であった。

その1つが富沢君(現SPRING-8)による、イオン励起原子レーザーの研究である。ミュンヘン工科大のUlrich等が始めたイオン励起レーザーを参考に、東

工大重イオンRFQ線形加速器による800 keV、1.5 mAの高強度 He^+ ビームを利用して、Ar-Kr、…の原子レーザー発振を試みた。エネルギーが低いので、レーザーセルと加速器間の真空差動排気系が非常に大きくなった。一方、ミュンヘン工科大は大型タンデムからの100 MeV、0.1 mAのSビームであった。

ミュンヘン工科大で発振したのを知って、状況調査とルーマニアで製作していた線形加速器の進捗確認のため1週間派遣したが、1ヶ月ほど帰って来なかった。当時、ミュンヘン工科大には理系学生がおらず、富澤君は博士課程に進むとミュンヘンに留学した。ミュンヘン工科大は東工大と協定校だったので休学にはならなかったが、富沢君は釣られてしまったようなものである。しかし、ミュンヘン工科大でよい実験データが得られ、東工大で博士号を得て卒業した。彼の武勇伝はまた何時かお話ししたい。

その2は笹君(現筑波大)がおこなった、高強度 He イオンによる重イオン慣性核融合のターゲット加熱の基礎研究である。ドイツGSI研のJacoby達によるMAXILACの45 keV/u、Xeビーム実験を参考に、東工大重イオンRFQ線形加速器を利用して、1気圧の He 、 Ne 、… Xe を封入したガスターゲットに高強度イオンビームを照射して、その密度、加熱温度、衝撃波の密度変化などを研究した。彼は219 keV/u、1.6 mAの He^+ を 1.1 mm^2 の領域に収束することに成功し、上記の条件で、衝撃波の重ね合わせによりプラズマ温度が約1 eVに達することを、ストリークカメラやレーザとその部品等を用いて測定し、世界初のかなり完璧な研究をおこなった。そしてその研究成果で博士号を取得して卒業した。

2. レーザイオン源を使った直接プラズマ入射法によるRFQ大強度加速の原理実証—2001~2003—

2001~2003年にかけては、レーザイオン源と東工大重イオンRFQ線形加速器を使った、直接プラズマ入射法による大強度ビーム加速の原理実証をおこなったのでお話しする。

それは、東工大を卒業して理研にいた岡村君から、理研の CO_2 レーザーを使ってレーザーイオン源を作り、東工大RFQ線形加速器で加速テストをしないかと連絡があったことから始まった。そして筆者は、だいたい前に1995年のイオン源の国際会議のプロシーディングに載っていた、CERNのRFQ線形加速器を使ったレーザーイオン源による加速テストの論文を読んだとき、面白いなと思っていたことを思い出した。さ

っそく2人で論文を探して読み直すと、通常はRFQ線形加速器の入射エネルギー相当の電圧をイオン源に与え、ビーム輸送系を通じて入射・加速するが、この高出力パルスCO₂レーザーではイオン源に電圧を与えなくても加速できたデータが載っていた。レーザーパワーが高いことから、レーザーアブレーションで発生するプラズマが非常にホットで、すでに入射速度に達しているためと推察された。しかしいずれにせよ、イオン源から200~300 mA以上のビームを入射しても、RFQ線形加速器では10 mA程度しか加速できないという状況であった。

そこで我々は入射部のビーム輸送系でビームが減衰していると思い、これをなくしてしまうことを考えた。イオン化ターゲットをレーザーがヒットしてアブレーションが発生し、イオン、電子、中性粒子混合した中性レーザープラズマがターゲット面から垂直に出射する。電圧を印加したイオン源を出射する部分までは、大強度イオンの空間電荷効果は強く働かない。そして出た途端に大きく作用するものの、RFQ線形加速器の入射電極が待ち構えており、ビームが広がる前に高周波電圧によって収束加速するのが直接プラズマ入射法(Direct Plasma Injection Scheme (DPIS))である。これを東工大重イオンRFQ線形加速器により原理実証することを、1回の打ち合わせで決定した。

2.1 直接プラズマ入射法(DPIS)の実証

RFQ線形加速器の入射系チャンバーを改造し、レーザーイオン源のテストベンチは理研の実験室で組み立て、基礎データを取った後に東工大に搬入した。これらは岡村君と東京大学大学院の博士課程学生であった竹内君が担当した。竹内君は学部と修士課程のときにレーザー実験を経験していたので、彼の技術が非常に役立った。DPISシステムの全装置をセット後(図5)、パルス幅100 ns、出力8 JのCO₂レーザーを使ってテスト実験をおこなった。理研におけるイオン源のテストではC⁴⁺が最大強度であったので、 $A/q=12/4=3$ を加速することにして、RFQ線形加速器の加速パラメータを設定した。

最初の加速テストは竹内君と筆者でおこない、RFQ直後の同軸型ファラデーカップでビーム電流量を測定した。その結果はデザイン値の1.3 mAよりも遙かに高く、ビームパンチの効果もあって20数mAを示した(図6)。詳しく評価すると実際は10 mA程度であったが、驚く結果であった。提案者の岡村君も最初はこのデータを信じなかった。

1980年代から世界中で利用されており、実際に我々も利用した、RFQ線形加速器のためのビーム軌道

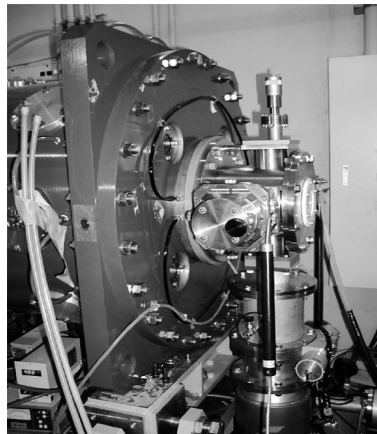


図5 DPISシステムをセットした東工大重イオンRFQ線形加速器

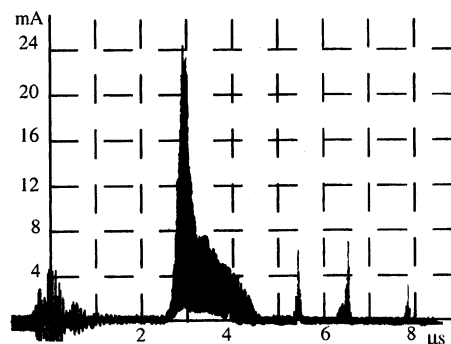


図6 C⁴⁺イオンの加速電流パルス波形

計算ソフトウェア PARMTEQ で計算し、その結果をもとに製作した装置の最大加速電流値はデザイン値の筈である。もっとも、それ以下でしか加速できないものも沢山あり、入射ビームのエミッタンスが悪いなどと言いつけているのが一般的である。ましてやデザイン値よりも多く加速できた例は一件もない。それが出たのでした。

その少し前に学生の岡田君(現高エネ研)の修士論文として、空間電荷効果の現れるビームで加速実験をおこなっていた。これは ECR イオン源から 2.5 mA 以上の He⁺ イオンを発生させ、RFQ 線形加速器に入射して加速するものであったが、デザイン値の 1.7 mA 以上は加速できなかった。彼が RFQ 入射エミッタンスを分析し、イオン源からのビームのエミッタンスが空間電荷効果により楕円からフィラメンテーションしていることがわかった。入射ビーム電流や加速電圧を変えても、決して 1.7 mA 以上が加速されることはなく、その経験から PARMTEQ ソフトが優れていることを知っていた。

筆者は DPIS が新しい現象であると思った。そして本当に C^{4+} を加速しているか確認するために、分析磁石による価数分析、エネルギー分析、入射エネルギーの変化、加速電力の変化などの実験結果を分析し、最終的に C^{4+} を 9.3 mA 以上加速しているとの結論に達した。何か新しい現象が起きていると直感した。

これらのことを国内外の研究会で発表した。誰も興味を持たないだけでなく、現象を理解しなかった。ちなみに筆者は、DPIS 法は発明ではなく、発見だと思っている。そこで PARMTEQ の開発者の 1 人である Jameson さんに依頼して、この実験事実を説明してもらった。最初は我々のデータを理解できなかったようであったが、次第に納得したようである。すなわち、計算では極端条件の粒子は切り落とすようになっているため、大強度短パルスのレーザーイオン源からのイオン価数が混合した極端に小さなエミッタンスのビームに対しては対応できていないということであった。そして後日、時間ドメインで書かれた新しいソフト pteq-HI を持って来日した。我々の実験データ等を入力することで、「君たちの実験では 26 mA 加速できた筈だ」と示唆された。

竹内君は東工大 RFQ-IH 型線形加速器で測定したデータの解析とレーザーイオン源の特性データを成果とし、この DPIS 加速を論文にして博士を取得して卒業していった。

2.2 重イオン 100 mA テスト RFQ 線形加速器

DPIS の有効性を世界に発信するために、当時の重イオンの線形加速器による最大加速電流は 10 mA 程度だったので、10 倍の 100 mA を加速する RFQ 線形加速器を考えた。100 mA テスト機はパルス運転で OK なので、フランクフルト大学が開発した 4 ロッド $0-\pi$ モード型、いわゆる Schempp 型をフランクフルト大学に製作してもらい、 C^{4+} イオンを 60 mA 加速することに成功した。このことは別の巻で報告したい。

3. 線形加速器型加速器質量分析の原理実証 —2004~2008—

指導教員の退職により、北陸先端科学技術大学院大学の修士課程を終え、2003 年 4 月に博士課程から筆者の研究室に入学してきた上田君は、分析技術に非常に興味を持っていた。彼とともに博士論文の研究テーマを考えたが、最初は PIXE 元素分析などを検討していた。

2003 年 5 月になると、東大核研時代の同僚であった国立歴史民俗博物館の今村教授と、同館の春成教授

が、弥生時代の始まりが従来の説より約 500 年早く紀元前 1000 年だったと新聞発表した。これは北九州の初期の弥生時代の土器に付着している、ススや土器内部の穀物のオコゲなどの炭素をはぎ取って、それを静電加速器により加速器質量分析 (AMS) で測定した結果を根拠としている。切り倒されて長時間経たかもしれない遺跡出土の木製品でなく、穀物の炭素より分析したもので、また九州や韓国も含んだ測定で、かなり自信を持って発表したものと思われた。こんなこともあって我々は AMS に非常に興味を持ち、最終的に AMS に辿り着いた。

上田君とは、「 ^{14}C 以外の AMS 用核種はないものか？」と AMS 関連の研究会にも何度か参加してみたが、他の数種類の放射性同位元素による AMS 分析があるくらいで、しかもそれらは既に自分達がアイソトープ表のなかで検討したものばかりであった。主な発表は応用分析に関するものが大部分であり、いかにして感度や精度を高めるかという内容ばかりで、新しい AMS の話はなかった。

しかしそのなかで、とくに ^{14}C の分析は 10^{-15} 以上の測定感度を十分にもっていることを知った。すなわち、mg 程度の試料でも十分に分析できるのである。本来の分析法として AMS において重要なのは、加速器によりエネルギーを上げることで、1 粒子ごとにカウントして元素の分析感度を上げることである。そして、例外はあるとしても、ほぼ全ての元素で等しく 10^{-15} の測定感度が実現可能である。

ちなみに 2008 年 3 月の退職記念講演会で知ったが、その後、今村さんは大きな科研費を得て全国各地の弥生遺跡の土器に付着した炭素の AMS 分析をおこない、弥生、稲作伝来の年代測定をしていた。日本の弥生時代の始まりと稲作の伝来は、中国の戦国時代の戦乱期に日本移住との説よりも、殷末の混乱期に朝鮮、華南からの民族移動のほうが、話のスジとしてはよいように思われる。この様な AMS について理研の中川さんや筑波大の笹君とも話していたがそのままになってしまった。

3.1 永久磁石型 ECR 重イオン源

その頃、東工大重イオン RFQ 線形加速器において加速実績があったのは、 H^+ 、 H^{2+} 、 He^+ と非常に微量の C^{2+} と N^+ だけだった。このため、重イオン RFQ 線形加速器に ECR イオン源を搭載して Xe あたりまでの重イオン加速を考えていた。そして東大 CNS の大城さんと共同で、10 GHz の ECR イオン源を立ち上げたりしていると、2002 年の NEDO プロジェクトに、永久磁石 ECR (PM-ECR) 重イオン源の開発が

採択された。

それより前に放医研の村松君との共同研究で製作したPM-ECR重イオン源はかなりの成功を収め、村松君は加速器学会賞などを受賞した。そのプラズマチェンバーは直径50mmだったので、最大磁場によるECR周波数は10GHzであったが、常伝導コイルタイプと遜色のない性能をもっていた。しかし、10GHz以上を実現するには、永久磁石の性能アップか、内部に鉄を入れるしかないことが、村松君の磁場計算によりわかっていた。

そこで、このプロジェクトでは12~18GHzのECR周波数をめざして、修士課程学生の長江君に磁場計算をしてもらった。プラズマチェンバーは直径50mmに固定して、非常に大きい永久磁石リング(ミラー磁場発生用変形リングも考えられるが単純なリングとした)まで計算したが、15GHzが最大であった。これを基本設計として、トーキンマシナリーに製作してもらった。常伝導型と同じになるようにプラズマチェンバーを長くしたため、ミラー磁石の間に逆転磁場が必要なく、永久磁石が少なくて済んだ。そして、このPM-ECR重イオン源と常伝導型ECRイオン源の性能を比較することを考えていた。

1号機としてミラー磁石間に逆転磁場永久磁石を入れ小型化したECRイオン源が完成したので、90°分析磁石にセットした。新しく購入した8~18GHz可変で250WのCPI製のマイクロ波電源を使用してテストをおこなった。マイクロ波を投入すると、すぐにプラズマは灯るが、1~2価ばかりで多価が生成されなかった。そこで分析磁石の0°方向からガラス窓越しにプラズマを覗くと、非常に明るいプラズマが見えた。一般的なECR多価イオン源以上に明るいプラズマが、引き出し電極上流のプラズマ電極ホルのすぐ上流で光っているように見えた。プラズマチェンバー内に鉄を挿入しているため、急激にミラー磁場が立ち上がっているが、銅製の間ホール板の厚さではプラズマチェンバー内に第三ECR磁場が出来てしまうことから、プラズマが灯ってしまう。したがって、第二ECRゾーンでせっかくできた多価イオンが低価数になってしまうと推察した。

そこで2号機では、銅製の間ホール板の厚さを10mm厚くして製作した(単にセットする銅板を厚くしただけであるが)。その結果、明るいプラズマは灯らなくなり、多価イオンが普通に出るようになった。村松君のPM-ECR重イオン源と同じであるが、入力マイクロ波が10GHzに比較して、12~13GHzと高い分だけ、多価の比率の高いイオンが得られた

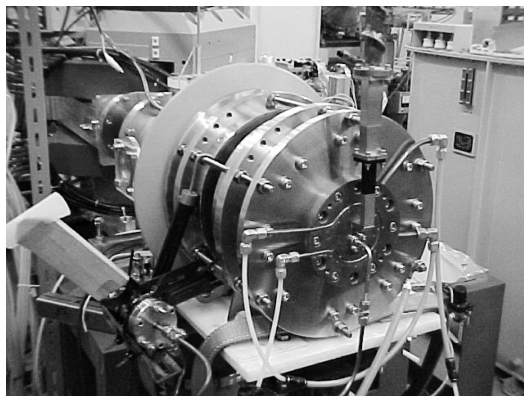


図7 永久磁石 ECR イオン源の写真

が、引き出しのコンダクタンスが増えたためにビーム強度は少し落ちたように思えた。逆バイアス・ディスクに電圧を印加しても、放医研のPM-ECRイオン源と同じく10~20%は増加したが、それほど効果はなかった。しかし、これは後に述べる線形加速器質量分析では固体試料ホルダーに換装され、スッパター型固体試料イオン源になった。図7にPM-ECR重イオン源を示す。

なお、PM-ECRイオン源の第一、第二ECRゾーンにマイクロ波が達する前に、永久磁石の逆転磁場による2つのECR磁場があるためプラズマが灯ってしまい、マイクロ波電力がロスされる。リング型永久磁石の根元に鉄リングを付けると磁束が短絡してECR磁場より下がることを磁場シミュレーションで見つけ、結果的に入射マイクロ波は逆転ECR磁場に吸収されることなく、高真空であれば100W未満でも多価がよく出せるようになったため、長江君と特許出願もおこなった。

3.2 線形加速器型質量分析(L-AMS)

AMSは、加速器によって検出可能なエネルギーを与えた粒子を、個々にカウントすることによって分析をおこなう技術である。これは主に放射性同位体(RI)分析において、なかでも ^{14}C を用いた年代測定方法は多くの分野で利用されており、 $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ の同位対比で 10^{-15} まで測定可能である。また、AMSはタンデム型加速器を用いたタイプが普及しているが、PM-ECRイオン源が開発されたことで、線形加速器を用いたAMSが大学研究室の規模でも容易に構築できるようになった。この線形加速器型AMSで博士論文を書いた上田君がこのAMSをLinac AMS(L-AMS)と命名した。

AMSは高い分析能力を持つため、微量元素分析への適用が検討されているが、未知試料を測定する場合

は、イオン化効率の把握が困難である。この研究中に、理研の中川さん達が常伝導型 ECR イオン源からの多価イオンを、理研の重イオン線形加速器で加速して質量分析をおこなったのを加速器学会で知り、中川さんはやはりやっていたのかと思った。国際誌を探すと米国アルゴンヌ国立研究所 (ANL) が常伝導型 ECR イオン源からの多価イオンを超伝導線形加速器に入射して、ウラン近傍の RI の質量分析を試みていたが、それ以外では L-AMS は行われていなかった。

常伝導コイルによる ECR イオン源は、100 kW 以上の電力と冷却系を必要とし、数十 kV の高圧ステーションも不可欠であり、理研や ANL は加速器も含めて非常に大型のため、それほど簡単な話にはならず、L-AMS の実現は容易ではない。PM-ECR イオン源は冷却水が不要であり、電力も数 kW で十分である。そこで実際に L-AMS を開発し、これを微量元素分析で実証することにした。

L-AMS の特徴は加速電圧を変えることで質量対電荷比 A/q を掃引することができること、そして粒子のエネルギー E_T から質量数を特定することができるということの 2 つである。すなわち、RFQ 線形加速器の出射粒子の核子当たりのエネルギー E_0 と質量数 A との積 $E_0 \times A = E_T$ から、任意の A/q に加速電圧を合わせることで特定の元素を検出することができる。

3.3 行きがけの駄賃でおこなった実験

PM-ECR イオン源の高圧ターミナル搭載用部品、ターミナル本体、その他部品の製作が終わり、2004 年末から組み立てを開始した。しかしまだ RFQ 線形加速器の入・出射系が完成していなかったのと、基礎データを取るために、イオン源単独での多価イオン分析テストを行った。図 8 に多価炭素およびクラスターイオンのエネルギーロス測定装置の配置図と写真を示す。

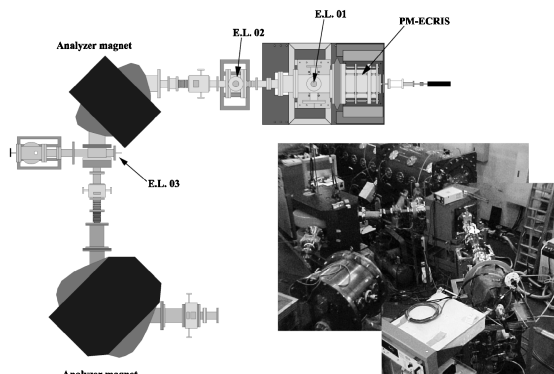


図 8 多価炭素及びクラスターイオンのエネルギーロス測定装置

す。

これまで筆者の研究室では、 C_{60} フラーレンのイオン化と 100 kV 加速により、最も薄い $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ の炭素薄膜によるエネルギーロス実験をおこない、 C_{60} や $C_2, C_3 \sim C_{21}$ までのエネルギーロスについて非常に興味深いデータを発見していた。すなわち、 C_2 のロスが単原子 C イオンに対して非常に小さいこと、また C のロスが一般的なデータベースである SRIM データに対し非常に大きいことである。また、多価の C^{2+}, C^{3+}, C^{4+} になると、クーロンロスによるエネルギーロスが大きいのではないかと考えていた。

これらと同じ実験を別方法で検証するのにちょうどよい装置がこの分析系であったので、ほぼ同じ測定をおこなった。測定は同じであるが、炭素クラスターの生成法は逆であり、それまでは C_{60} のフラグメンテーションから炭素クラスターを作っていたのに対して、PM-ECR イオン源でイオン化ガスを変えることで、 C_1, C_2 から C_{10} イオンを生成し、同じエネルギーに加速して、それぞれのイオンのエネルギーロスを検出した。

その結果ファラデーカップで電流を測っているのに、発生電流の少ないイオンではデータが取れなかったが、C に対して C_2 のロスが非常に小さいのは変わらず、やはり興味あるデータがとれた。そのうちに、RFQ 線形加速器の入出射系ができたので、この実験装置を上田君と分解し、予定どおりに配置し直して、線形加速器型質量分析 (L-AMS) を完成させた。

3.4 L-AMS の原理実証実験

3.4.1 L-AMS の構成

L-AMS の装置レイアウトを図 9 に示す。L-AMS は PM-ECR イオン源、アインツェルレンズ (EL)、粒子数減衰用メッシュ、第一分析磁石、ファラデーカップ (FC)、RFQ 線形加速器、第二分析磁石、半導

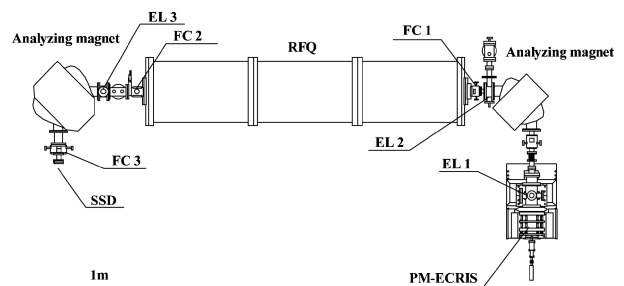


図 9 L-AMS の装置レイアウト (右側から高圧ターミナル上の PM-ECR イオン源、粒子数減衰用メッシュ、第一分析磁石、RFQ 線形加速器、左側で加速イオンの第二分析磁石、スリットと SSD)

体検出器 (SSD) から構成される。

3.4.2 高圧ターミナルとイオン源の分析系

C^{4+} の 2 MeV/u 加速 APF-IH 線形加速器に使っていた分析電磁石をすずかけ台キャンパスから持ってきて、PM-ECR イオン源のイオン分析に使用した。高圧ターミナル上のイオン源から 10 kV でイオンを引き出し、さらに A/q に合わせて RFQ 線形加速器への入射エネルギーを 5 keV/u になるようにターミナルに電圧を印加する方式をとった。分析系は分析磁石を除いて静電収束とした。RFQ 線形加速器に 5 keV/u で入射する必要があるため、分析磁石の二重収束を使い、アインシュテル・レンズを弱くして入射する方法にした。引き出しイオンの分析は、高圧ターミナル上のアインシュテル・レンズで収束して焦点を作り、分析出口直後の同レンズを強くして収束し分析する光学系とした。高圧ターミナルにセットした PM-ECR イオン源、分析・入射系および RFQ 線形加速器の前半部を図 10 に示す。

PM-ECR イオン源はミラー磁場および閉じこめ磁場の発生に電源を必要としないため、絶縁架上への設置が容易である。また、イオン源内で ECR 共鳴により発生した、高温プラズマで全元素から多価イオンを生成が可能である。ECR プラズマは電子エネルギーが高いため元素差によるイオン化量の変化は比較的少なく分析には好都合であるが、全く差がないわけではない。測定試料のイオン化は、固体試料をイオン源上流部から導入、直接プラズマに接触させることで

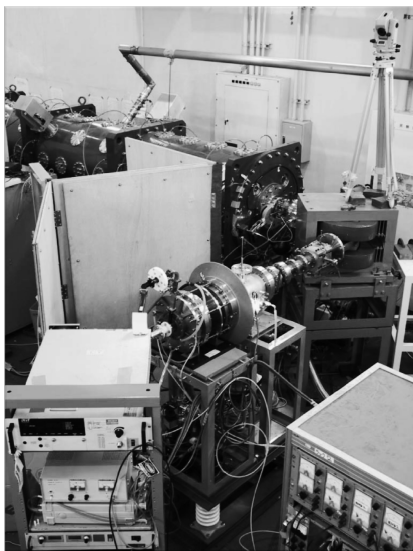


図10 L-AMS の高圧ターミナル上の PM-ECR イオン源と第一分析磁石、RFQ への入射系及び RFQ 線形加速器の一部の写真

おこなった。もしくは、Ta で作成したオープンに試料となる粉末を詰め、プラズマから少し離れた場所で試料をガス化させておこなった。イオン源はマイクロ波周波数 12.8 GHz で連続運転をおこなった。

3.4.3 質量数決定方法と直接的測定法

空気と Ne と Ar 等の混合気体をイオン源に導入すると、プラズマによって多価イオンとなる。これを 10 kV の電位差で引き出す。このなかから仮に A/q = 4 の粒子 ($^{12}C^{3+}$, $^{16}O^{4+}$) を測定する場合、これらの粒子は 20 kV まで前段加速された後に第一分析磁石で弁別され、RFQ 線形加速器に入射される。加速イオンの測定は第二分析磁石で粒子を再び弁別した後に、SSD でエネルギー分析をおこなった。A/q = 4~6 を選んで加速したときの、SSD のエネルギーグラフを図 11 に示す。

加速された粒子は 219 keV/u のエネルギーを持つため、 ^{12}C および ^{16}O のエネルギーは各々約 2.628 MeV と 3.504 MeV になる。このことを使って、検量線の作成には大気および希ガス (Ne, Ar, Kr) を試料に用いた (図 12)。劣化前の SSD は、質量数 12~40 までチャンネル数との間に線形性をもつが、 ^{84}Kr は SSD のエネルギー欠損によって、直線から少し外れたチャンネルで検出された。分析方法として、RFQ 線形加速器に入射した A/q の同じ粒子のみを測定するのが直接的分析法である。電流調整として、第二分

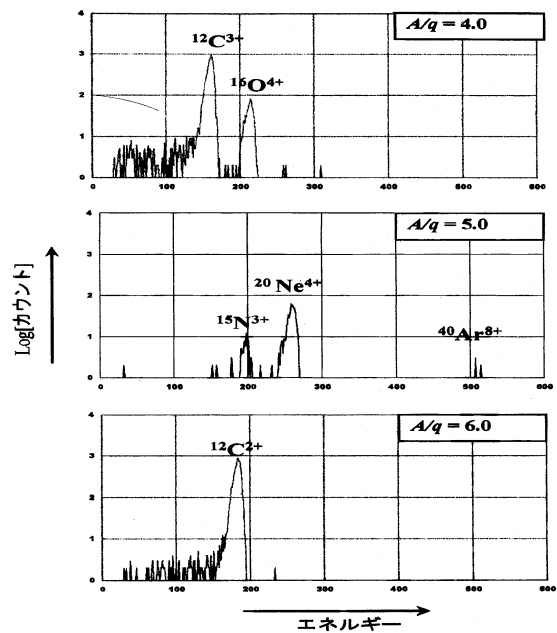


図11 A/q=4~6 で選別後の加速粒子 (横軸はマルチチャンネルアナライザーのチャンネル数 (エネルギーに対応)、縦軸は規格化粒子数)

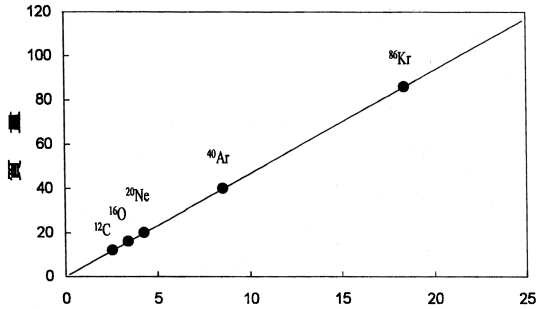


図12 検量線（粒子のエネルギーと質量数の関係）図が小さいのではほぼ直線に見える

析磁石で分析後、第3FCの電流値でチェックする。

電流値が1 pA以下であればメッシュを挿入し、SSDの検出粒子数が30 count/sになるようにメッシュ数を調整し、SSDによるエネルギースペクトル測定をおこなった。非常に感度は良いが、全てが手動の場合は非常に煩雑になるので、同時に近傍のA/qの測定が可能な方法を考えた。

3.4.4 間接的測定方法

線形加速器は入射速度とA/qを満たした粒子を加速するが、実際は入射アクセプトランスに幅があるため、入射エネルギーとA/qの近い粒子も共に加速する。このため、第二分析磁石の磁場を変えることで、直接入射に選択したA/q値近傍の粒子も測定できる。測定時間の大幅短縮が可能になり、周辺粒子の検索も容易になる。しかし、この分析方法を近傍粒子の定量分析に利用するには補正が必要となる。現段階では入射電圧と入射磁場のずれについて検証した。

入射電圧はA/q=4と6で検証した結果、ガウス分布により補正できることが判明した。入射磁場のずれはA/q=6で検証した結果、規格化を行うことで入射粒子数の増減にかかわらずほぼ同じ比率となった。このことからフォクト関数で補正が可能である。間接的分析方法で得られた結果はメッシュおよび入射電圧、入射磁場によって生じる粒子の減衰を補正することで直接的分析方法と同様に定量分析に利用できる。

試料にはあらかじめPIXE分析をおこなった古代エジプトのファイアンス（未焼結ガラス）を用い、Taオープンに詰めた。直接的測定法と間接的測定法の比較を図13に示す。カーボンフォイルを第2分析磁石の前に挿入して、軽イオンと重イオンを分離する方法も又有効である。

3.4.5 定量分析

L-AMSの定量分析ではデータ校正に事前分析の結果が必要で、非破壊分析が可能な荷電粒子蛍光X線

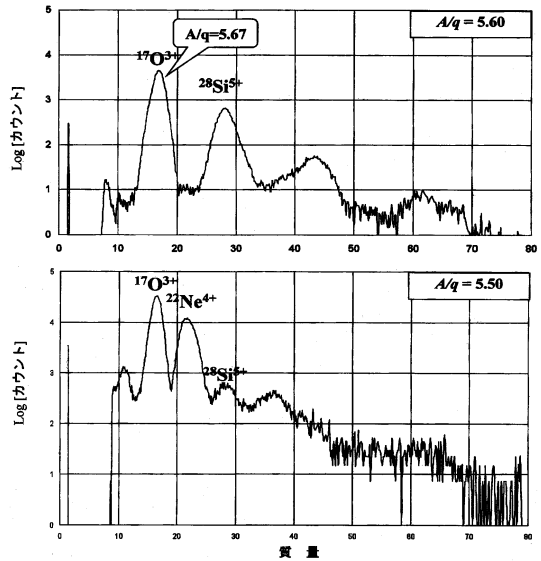


図13 A/q=5.6入射して第二分析磁石でA/q=5.6の直接的分析法が上図、A/q=5.5の間接的分析法が下図である。だいたいA/q=0.1の変化があったとき、ピークの状態が大きく変動しこの場合A/q=5.5の²²Ne⁴⁺が表れる。

(PIXE)分析により、試料中に含まれる元素の相対比および濃度(ppm-ppb)の測定を事前におこなう。今回のPIXE分析は、バンデグラフ型静電加速器からの約2 MeVのプロトンを試料に照射し、発生する特性X線を検出した。イオン化効率の校正と定量分析は、PIXE分析の結果を反映しておこなった。そのためL-AMSではppb以下の定量分析が十分可能になる。

3.5 研究論文のこと

上田君の博士論文研究テーマとしておこなわれたL-AMS研究の成果は、欧州応用加速器技術会議(ECAART)で発表をおこない、論文原稿も提出したが、理解できない、実験データがないなどの理由により受理されなかった。またAMS国際会議でも発表したが、L-AMSの内容がよくわからないということで、論文査読者が次々交替し、同じことを何度も質問され、答えている間に時間切れになり、こちらも最終的には受理されなかった。国内のAMS学会で発表しても、この新しいL-AMSの特徴を理解してもらえなかった。

線形加速器は粒子速度の弁別器であり、出射イオンの速度は全て同じである。すなわち核子当りのエネルギーE₀は一定である。質量数はA=E_T/E₀で表現でき、完全に比例し、エネルギーをSSDで測定(粒子エネルギーE_T)すれば、即、質量がでてくる質量分析器であることを理解してもらえない故の質問であっ

た。上田君が最初の頃、出射粒子のエネルギーが質量数 A に比例し、全ての質量数が直ちにわかるという L-AMS の特徴を、丁寧に説明する努力を怠っていたこともあったと思う。しかしどちらも受理してもらえず、学術誌論文にはならなかった。

東工大の博士論文審査では、少なくとも2~3編の査読付き論文の実績が必要とされる。そこで、各種分析器を取り扱う質量分析学会系の論文誌に投稿した。すると質量分析系の専門用語に関する数多くの訂正要求があったものの、最終的に受理してくれた。それまで2年間の査読者とのやりとりは何だったのかと思

った。新しい分野での論文投稿に注意を払わなければならないことは、これまでも何度かあったが、また「新しい栗を捨ててしまった」。

3.6 ま と め

この L-AMS では、 ^{14}C などの長寿命 RI の量を測定だけではなく、独立した全ての元素を分析できる。すなわち、全元素の微量元素分析に応用可能であり、しかも最初に述べたように 10^{-15} 以上の感度を十分にもつ、現在考えられる最高感度の分析方法である。10~20 年後には L-AMS が微量元素分析の最高感度装置として使用されていることを期待する。