高エネルギーイオンビーム分析装置の開発*

Development of a High Energy Ion-beam Analyzer

藤田 広之** 小西 郁夫** 小河 潔**
林 茂樹** 浅利 正敏***
Hiroyuki FUJITA, Ikuo KONISHI, Kiyoshi OGAWA,
Shigeki HAYASHI, Masatoshi ASARI

Key words: ion beam, high energy, analysis, RBS, ERDA, PIXE, tandem accelerator, high voltage

1. はじめに

近年、物質の表面を観測、解析する表面科学分野の分析技術は、飛躍的に進歩し、半導体、各種結晶、新材料などの研究開発に大いに寄与した。その中でも、高エネルギーイオンビームを用いると、非破壊で特徴のある種々の分析を行うことが可能であり、次の3つの分析法がよく利用される。RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry) は、試料の深さ方向の組成や構造を分析することができ、ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) は、試料中の水素濃度分布を定量性よく求めることが可能である¹⁾。また PIXE (Particle Induced X-ray Emission) では微量の試料に対して高感度に元素分析が可能となっている²⁾。しかし、高エネルギーイオンビームの発生に必要となる加速器は、大型であり、放射線発生装置となるため、専用の建屋や特殊な設備を必要とし、しかも運転やメンテナンスが容易でなかったため、専用のオペレータが必要であっ

た。そのためこれらの分析法は、大学など一部の施設で利用される以外は広く普及した分析法ではなかった。今回、小型で取扱いの容易な“IBA-9900”を開発し、高エネルギーイオンビーム分析を通常の実験室で手軽に利用することが可能となった³⁾⁴⁾。

一般にこのような分析には、ビームの質が良く、エネルギーが連続可変でき、正の直流高電圧を利用する静電加速器が用いられる。その中でも特に負イオンを入射して加速し、荷電変換した後もう一度加速を行うタンデム方式がよく利用される。この方式は、高電圧部にイオン源を設置するシングルエンド方式に比べて、イオン源や分析部をアース電位付近に設置できるため、小型でメンテナンスが容易になる等の特徴をもっている。IBA-9900においてもターミナル電圧1MVのタンデム方式を採用しており、RBS, ERDA, PIXEの測定に充分な2MeVのH⁺、3MeVのHe²⁺を発生することができる。

本稿ではIBA-9900の開発コンセプトや、技術課題などを述べた後、入射部、加速部など各部について説明する。

2. IBA-9900の開発

図1にIBA-9900の本体部とコンソールの写真を、図2に装置構成を示す。また表1にIBA-9900の仕様を示す。本体部は負イオンを発生する入射部、高エネルギーまで加速する加速部、分析を行う分析部から構成されている。制御部は、コンソールデスクと、2台のコンピュータおよびコントロールユニットから構成されている。

IBA-9900は、どこでも手軽に利用できる装置を目指して

- (1) 本体部の大きさを1m×4mと小型にする。
- (2) 容易に運転できる。
- (3) 放射線発生装置に該当しない装置にする(機器表面で0.6μSv/h以下)。
- (4) 容易にメンテナンスができる。

小西 郁夫

1980年大阪大学原子力工学科修士課程修了。(株)島津製作所けいはんな研究所主任研究員

小河 潔

1987年京都大学電子工学科修士課程修了。(株)島津製作所けいはんな研究所主任

林 茂樹

1982年京都大学工業化学科博士課程修了、工学博士。(株)島津製作所けいはんな研究所係長

浅利 正敏

1977年京都大学原子核工学科博士課程修了、工学博士。(株)島津製作所中央研究所主幹研究員

* 原稿受付 平成7年5月29日、1994年度(第14回)精密工学会技術賞受賞業績

** (株)島津製作所けいはんな研究所(京都府相楽郡精華町光台3-9)

*** (株)島津製作所中央研究所(京都市中京区西ノ京桑原町1)

藤田 広之

1981年大阪大学工学部電気工学科修士課程修了。島津製作所入社後、サイクロトロン、IBAなど高エネルギーイオンビームを用いる装置の開発に従事。特に高周波系、高電圧発生部を担当、けいはんな研究所主任

図1 IBA-9900

という4点を開発コンセプトとした。そのための技術課題としては、

- (1) コンパクトでかつメンテナンスをできるだけ減らした入射部。
- (2) メンテナンスフリーでかつ小型な高電圧発生装置。
- (3) コンピュータを用いた操作性のよい分析部と制御部。

の実現などがあった。以下入射部、加速部、分析部、制御部の順にこれらの技術課題を踏まえ、各部の説明を行う。

2.1 入射部

入射部は、まず正イオンを発生し、タンデム加速に必要な負イオンを荷電変換によって生成する方式とした。

Hあるいは、Heの正イオンの生成には、構造が簡単で長寿命という点を重視し、高周波イオン源を採用した。このイオン源では、ガラス製の放電管内に H_2 またはHeガスを流し、放電管の外側に設けた螺旋状のコイルにより高周波(約40 MHz, 約60 W)を導入して誘導プラズマを発生させる。高周波イオン源は、フィラメントがないため、通常1年以上メンテナンスは不要である。そしてこのイオン源全体に約10 kVの引出し電圧を印加して、引出しチャンネルから H^+ あるいは、 He^+ をアース側に引き出す。引き出されたイオンビームは、静電Qレンズで荷電変換セルの中央に焦点を結ぶように集束される。このセル内に、アルカリ金属蒸気を充満させて、正イオンを通過させると、そのときに起こる電子移行反応によって負イオンを生成することができる。アルカリ金属としては、Li, Na, Csなどが用いられる。本装置では安全性を重視し、変換効率は最大ではないが比較的取扱いの容易なLiを用いた。

入射部でメンテナンス上、最も問題となるのは、この荷電変換セルである。これの開発では、(1) 消耗するLiの補給方法、(2) Liの飛散の防止、(3) Li飛散によるスリットの閉塞、などの問題があった。

(1) に関しては、簡単に開閉できる補給口を設け、粒状

表1 IBA-9900の仕様

ビームエネルギー	
He^{2+}	0.9~3.0 MeV
He^+	0.6~2.0 MeV
H^+	0.6~2.0 MeV
電圧安定度	± 500 V
真空排気系	ターボ分子ポンプ 4台
本体部寸法	4 m(L)×1 m(W)×1.9 m(H)
測定系	
検出器	SSB検出器 2台 Si(Li)検出器
サンプルステージ	3軸ゴニオメータ
所要電源	単相 100 V, 50 または 60 Hz, 12 A 3相 200 V, 50 または 60 Hz, 15 A

図2 IBA-9900の構成

にしたLiを準備し、補給を容易にした。また冷却時のLiの凝固時間をモニタしてLiの残量を推定するようにしている。

(2) に関しては、ビームが必要でない時にLiの飛散を防止するためのシャット機構や複数個のスリット、飛散したLiを受ける外部ケースなどを設け、Liの飛散による電極等への付着を最小限にしている。

(3) に関しては、(2)で設けたスリットにLiが付着し、ビーム孔をふさぐという問題が生じた。スリット部の温度を考慮した上で、付着した液体状のLiがスリットから排除される形状とし、この問題を解決した。その結果、通常約150時間の連続運転を可能とした。

この変換セルを通過したビームの中には、加速に必要な負イオンのほか、正イオンや中性粒子なども存在している。これらの中から必要なイオンを選択するのに、通常は電磁石が使用されるが、スペースが大きくなり、ビームラインが長くなってしまふ。そのため本装置では、静電偏向を用い、ビームラインの短縮化を図った。静電偏向の場合、質量分離ができないため $^1H^-$ と $^2H^-$ の選別が問題となるが、 H_2^+ イオンから H^- を生成することにより、 $^1H^-$ と $^2H^-$ が異なったエネルギーとなり、分離を行うことができる。以上のようにしてコンパクトでメンテナンスの必要性の少ない入射部を実現した。

2.2 加速部

加速部に入射された負イオンは、ターミナルまで加速管内を加速され、 N_2 , Ar などのガスとの衝突により、電子を奪われて正イオンになり、再度加速される。加速管、ガス変換セルを含むターミナル部、高電圧発生装置は加速タンク内に収納され、高電圧絶縁のため絶縁ガスの SF_6 を 7×10^5 Pa (7 kgf/cm²) 程度充てんされる。このため加速部のメンテナンスは大がかりな作業となる。これを避けるため、可動部を極力なくし、小型でかつ信頼性が高い構造にする必要がある。そのため、イオンの衝突による制動 X 線発生量を電極構造の工夫により抑えた、一体成形による信頼性の高い加速管を開発した。また、新しいタイプの小型な高電圧発生装置を開発し、これを加速管の下部から取り付けるようにして、横から取り付けるタイプに比べて、加速部の占有面積を小さくした。以下高電圧発生装置について詳述する。

一般的に直流高電圧発生の方法としては、以下の 2 種類の方法がある。

- (1) 電荷を機械的に高電圧ターミナルに運び上げる方法
- (2) 交流を整流平滑して直流高電圧を発生する方法

(1) として代表的なものは、絶縁ベルトをモータで回して電荷をターミナルに運び上げるバンデグラフ型であるが、可動部分があるため振動を伴い、機械部品の摩耗のため、定期的な部品交換が必要となる。(2) には、ダイオードとコンデンサを多数組み合わせるコッククロフト型やシュンケル型等の高圧整流回路があり、可動部分がないためメンテナンスフリーとなる。

よく利用されるコッククロフト回路の場合、出力電圧を上げるため、ダイオードとコンデンサとで構成される回路の段数を増すと、リップル電圧が増加する。またコッククロフト回路の励振電圧を大きくすると、使用するダイオードやコンデンサの耐電圧を高くする必要があり、装置が大型になり、励振電力も大きくなってしまふ。IBA-9900 では分析に使用されるビーム電流は高々 50 nA であり、高電圧発生装置は、約 100 μ A の出力で充分である。このような小型で小電流出力に適した従来にない新しい直流高電圧発生方式として、図 3 (a) に示す「多段絶縁変圧器型」を考案した。この方式では、絶縁トランスを中心に構成されたユニットを 8 段積み重ねることにより 1000 kV を発生させる。

図 3 (b) はユニットの構成図である。フェライトコアに 1 次コイル、送電コイル、および 2 個の 2 次コイルを取り付け、絶縁トランスを構成している。それぞれの 2 次コイルにはコッククロフト回路が 2 組ずつ接続されており、こ

図 3 高電圧発生装置の構成

図 4 高電圧発生ユニット

れらをすべて直列に接続することにより、1つのユニットで最大 160 kV を発生する。この方式では絶縁トランスは、上のユニットに電力伝送を行うと同時に、電圧を上げてコッククロフト回路を励振する。

図 4 はこのユニットの写真を示す。絶縁トランスを絶縁材の支柱により中央に固定し、周囲に 2 組ずつのコッククロフト回路を設けている。これらの回路やコイル等の部品は、電位を考慮し、絶縁スペースを確保するように配置されている。またコイル、コッククロフト回路など部品単体でも高耐電圧化を行い、目標性能を達成した。

8 段のユニットから構成される高電圧発生装置への入力電圧と出力電圧との関係を図 5 に示す。絶縁トランスにより昇圧を行えるため、約 430 Vrms という低電圧入力で 1000 kV の出力が得られている。またこのときの消費電力はトランスによる電力伝送を行っているため、200 VA 程度であり、kW クラスの電力が必要な他の方式に比べてかなり少なくなっている。その結果トランジスタを使用した励振電源を非常に小さくすることができ、小型でメンテナンスフリーな加速部が実現できた。また、真空系の省電力化とあわせて装置全体の全空冷方式が可能となり、装置の設置やメンテナンスも容易となった。

2.3 分析部、制御部

分析部は、加速したイオンビームを、静電 Q レンズに

図5 高電圧発生装置の入出力特性

1: CCD カメラ, 2: I/F コンバータ, 3: カウンタボード, 4: SSB, Si(Li), 5: プリアンプ, 6: アンプ, 7: マルチチャンネルアナライザ, 8: コンピュータボード

図6 測定システム

より集束し、マグネットを用いて必要なイオンのみを選択分離して、分析チャンバに導くというオーソドックスな方式を採用している。しかし Q レンズとマグネットの直結など細かな改良によりビームラインの短縮化を図った。分析チャンバはユーザが最もよくアクセスする部分のため、その操作性が重要であり、開発に当たっては、小型化と操作性のバランスを考慮して設計を行った。

図6に測定システムを示す。分析チャンバには、3軸ゴニオメータのサンプルステージ、RBS, ERDA 測定用の2個の粒子検出器(SSB: Silicon Surface Barrier detector)とEDX-PIXE 測定用の X 線検出器(Si(Li))が設置されている。サンプルステージ上の試料は CCD カメラによりモニタでき、サンプルとビームの照射位置の確認ができるようになっている。2個のSSBの検出角度は、チャンバ外部から、ビーム入射角に対して3°おきに設定することが可能であり、測定により検出器を容易に最適位置へセットすることができる。また Si(Li) と試料の距離は、30~150 mm の間で調整でき、測定感度の調整が可能である。

IBA-9900 では容易に運転できるように、スペースに余

裕を持たせたコンソール上に装置の運転と測定、分析を行う独立した2台のコンピュータ(パーソナルコンピュータとワークステーション)を設けており、それらですべての操作が行えるようになっている。

測定系を除く装置の運転は、コンピュータ内部に静電 Q の電圧などの運転パラメータを保管し、通常の操作はグラフィック画面から START や STOP 等のメニュー選択をするだけで可能となるなど、容易になっている。またいったん起動すれば、ほとんど操作を行う必要はないが、コンピュータによる監視と本体に設けたシーケンサにより、装置の安全性は二重に確保されている。CRT 画面上には、イオン種やターミナル電圧等の運転パラメータが表示されており、一目で運転状況を把握することができる。さらに真空度、Li の温度等は自動的に記録されており、運転記録や故障診断に利用できるようになっている。

測定解析はワークステーションで行い、ゴニオステージの操作や RBS, ERDA 等の各種測定をマルチウインドウ上で簡単に実行でき、RBS, ERDA 解析ソフトにより、シミュレーションを行い、データの解析を同時に容易に行うことが可能となっている。

3. おわりに

高エネルギーイオンを用いて RBS, ERDA, PIXE 分析を容易に行うことができる高エネルギーイオンビーム分析装置 IBA-9900 を開発した。この装置は

- (1) 本体部の大きさが 1 m × 4 m と小型である。
- (2) コンピュータにより容易に運転できる。
- (3) 放射線発生装置に該当しない装置である(機器表面で 0.6 μ Sv/h 以下)。
- (4) 容易にメンテナンスができる。

という特徴を持ち、従来大型の加速器によって行われていた高エネルギーイオンビーム分析を容易に利用できるようにした。

謝 辞

本装置の開発にあたり多大な助言を頂きました京都大学名誉教授・故向坂正勝先生に本装置の完成をここに謹んでご報告するとともに、本装置の完成に協力頂きました多くの方々に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Wei-Kan Chu, J. W. Mayer and M.-A. Nicolet: Backscattering Spectrometry, Academic Press, New York, N. Y., (1978).
- 2) S. A. E. Johansson and J. L. Campbell: PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis, John Wiley & Sons, Great Britain, (1988).
- 3) 小西郁夫ほか: 高エネルギーイオンビーム分析装置の開発, 島津評論, **49**, 4, (1992) 209.
- 4) I. Konishi et al.: High Energy Ion Beam Analyzer System IBA-9900, Int. J. Japan Soc. Prec. Eng., **29**, 1, (1995) 5.