

話 題

京都大学工学研究科のマイクロイオンビーム加速器

伊藤 秋男*

Micro-Ion Beam Accelerator at QSEC of Kyoto University

Akio ITOH*

Abstract

Brief introduction is given of the new accelerator installed this March at the Quantum Science and Engineering Center (QSEC) of Kyoto University. The tandem type accelerator (6SDH-2, NEC, USA) has the maximum terminal voltage of 2 MV and is capable of delivering energies of $2(q+1)$ [MeV] for ions with charge state q . Chief specification of the machine and the aim of research & education are described. Historical role of the accelerator laboratory of QSEC and the budget strategy network of universities are also introduced.

1. はじめに

京都大学大学院工学研究科の加速器施設に本年3月に新設された重イオン加速器について概説する。本誌¹⁾(2008年)に記載のように工学研究科附属量子理工学教育研究センター・原子核工学専攻の加速器実験施設(宇治キャンパス, 放射実験室)には複数機の粒子加速器があり, 学内共同利用装置として教育・研究の両面で長年にわたり実績をあげてきている。設置年度順に並べると, 重イオン核物性実験装置(2.5 MV バンドグラフ型重イオン加速器および2 MV バンドグラフ型電子加速器, 1969年), 金属イオン物性試験装置(250 kV シングルエンド, 1978年)およびイオンビーム分析実験装置(1.7 MV タンデム型, 1988年)であり, ほぼ10年毎に新設されてきた。このうち, 2.5 MV 重イオンバンドと1.7 MV タンデム型が現在の主要な共同利用装置であり, 年間稼働時間は7000時間を超えている。今回の新型加速器は1978年に設置された金属イオン物性試験装置の更新で, 2009年度補正予算と「京都大学重点事業アクションプラン2006-2009」により予算措置されたものである。

以下では, 新型装置の主な仕様と利用目的について記述する。併せて長年に亘り粒子線衝突研究の施設である放射実験室の紹介と, 加速器のような大型設備を

抱えつつ装置維持費の獲得に苦慮している大学研究者間の連絡会議について紹介する。

2. 新加速器の主な特徴

導入した装置は京都大学では通称「マイクロイオンビーム解析実験装置」と呼び, 米国 NEC (National Electrostatics Corporation) 社製の2 MV タンデム型イオン加速器(6SDH-2型ペレトロン加速器)である。同じ型のはルーブル美術館を筆頭に世界に5台稼働しているが我が国では本装置が初めての導入となる。ペレトロン機自体(主に5SDH型)は日本でも複数の大学に以前から有り定評のある加速器と云える。実験室に設置された本装置の概観写真を図1に, 全体の配置概略を図2に示す。装置の大きさは全長15.2 m, 幅2.6 mである。

イオン源は通常のタンデム型加速器のように2種類あり, 主にHe専用のRF荷電変換型軽イオン源とLi以上の重元素用Csスパッター型イオン源である。図3にイオン源部・加速管入射部の写真を示す。RFイオン源では, 100 MHzの高周波RFにより作られた約5 keVのHe⁺イオンをルビジウム蒸気セルを通し, 荷電変換(電子捕獲)衝突により負イオンに変換した後に30 kVで前段加速をする。得られる負イオン電流はHe⁻で約3 μAである。Csスパッターイオン源では, Cs蒸気中に設置されたアイオナイザーコ

* 京都大学大学院工学研究科原子核工学専攻 Department of Nuclear Engineering, Kyoto University
工学研究科附属量子理工学教育研究センター Quantum Science and Engineering Center, Kyoto University
(E-mail: itoh@nucleng.kyoto-u.ac.jp)



図1 マイクロオンビーム解析実験装置の外観

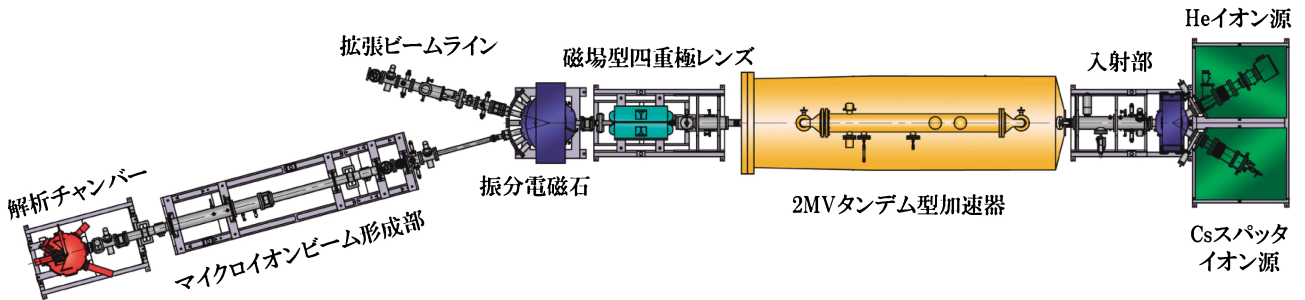


図2 マイクロイオンビーム解析実験装置の概略図

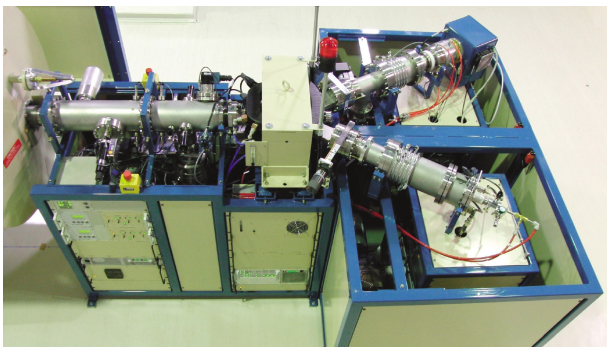


図3 イオン源部と入射部振分電磁石. 荷電変換型軽イオン源 (右上), Csスパッターイオン源 (右下)

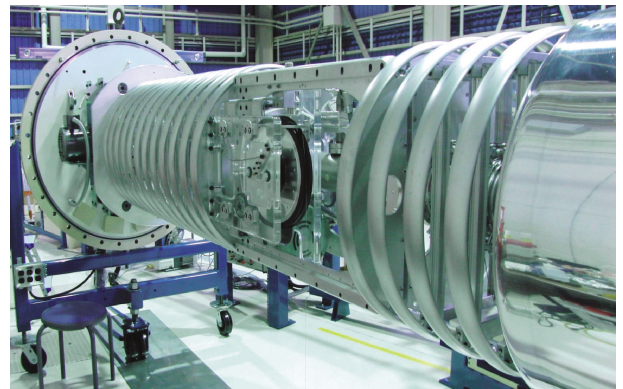


図4 タンク内部. 絶縁ガスは5.5気圧のSF₆

イルの表面電離によって作られたCs⁺イオンによるスパッタリングを利用したもので、目的とする元素を含む陰極からスパッタされた中性粒子が表面から飛び出す際に陰極表面に付着したCs層で電子付着により負イオンに変わり、それを30 kVで前段加速するものである。イオン電流はC⁻やSi⁻で約150 μ A, Cu⁻

で40 μ A, 等である。前段加速された負イオンは \pm 30度の振分電磁石でイオン選別され、アインツェルレンズ, XYステアラーなどで絞り込んでから加速管に入射する。

ターミナル電圧(最大2.2 MV)のチャージングは2本のペレットチェーン方式で、300 μ A程度の大き

なチャージ電流が取れるため数分間で所定の高電圧に昇圧することができる。ベルト方式と異なりペレットチェーンは金属と絶縁ナイロンからできているため埃やゴミなどが発生しない。そのためターミナル電圧の安定性は良く電圧リップルを 200 V rms 以下に抑えることができる。加速部タンク内部の写真を図 4 に示す。絶縁ガスは 0.55 MPa の SF6 を用いている（回収装置あり）。加速管にイオンが衝突して生成する二次電子や残留ガスのイオン化等に起因する X 線の発生を抑制するために加速管に沿って永久磁石が並べられている。また高電圧ターミナル部にある荷電変換ガスカナルは直径約 5 mm、長さ 46 cm のサイズで窒素ガスにより負から正イオンへ荷電変換している。ターミナル電圧を V [MV] とすると、価数 q の加速エネルギーは $(q+1)V$ [MeV] となり、実用上は 10 MeV 程度のイオンエネルギーとなる。加速後のイオンは空冷式の磁気四重極二連レンズで集束させ振分電磁石に入り、それぞれのビームラインに導かれる。四重極レンズの磁場勾配は約 10.0 [T/m] でイオンビームを振分電磁石後のエネルギー制御スリット部に集束させる。集束できるビームの条件は、 $ME/q^2 < 150$ 、である。ビームラインポートは中央ラインを入れて ± 15 度の間隔で全部で 7 本用意されている。今年度は 2 本からスタートし継続的に整備して行く予定である。

ビーム電流はイオン種によって異なるがどの元素に対しても数 μA 以上の強度があり、汎用性の高い He イオンについては 2 μA を得ることができる。

本装置の特徴のひとつはサイズ可変のマイクロイオンビームを取り出せることで、振分電磁石から出たイオンビームを全部で 4 連の四重極静電レンズで絞る方法が取られている。対物アパーチャに対し 20 : 1 の集束率を持ち、ビームサイズは汎用的に 20 μm ~ 2 mm の範囲で可変、ビーム強度を多少とも犠牲にした場合は 10 μm 程度まで絞ることができる。これまでの経験から少しの工夫を凝らすことでサブミクロンサイズのビームを取り出せることが解っているので追々この機能も追加する予定である。

エンドステーション（解析チャンバー）とその内部の写真を図 5、図 6 に示す。チャンバーの材質はアルミニウムで大きさは内径 43 cm、高さ 20 cm である。ここでは汎用的な元素分析法を行うことができ、ラザフォード後方散乱法（RBS）、粒子線誘起 X 線分光法（PIXE）、粒子線誘起 γ 線分光法（PIGE）、反跳原子検出法（ERDA）、核反応検出法（NRA）用にそれぞれ専用の検出器が配置されている。なお、荷電

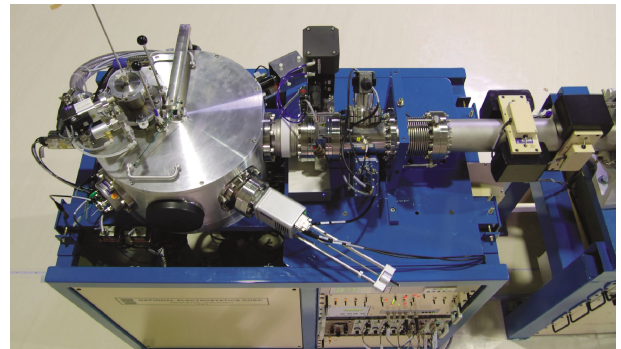


図 5 エンドステーション（解析チャンバー）

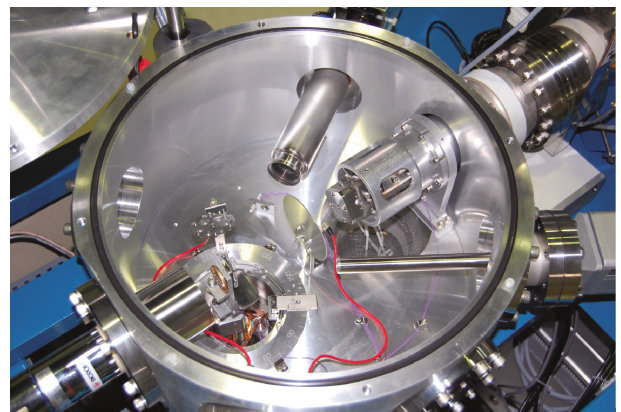


図 6 チャンバー内部

粒子検出器は Si 半導体検出器、 γ 線用は NaI(Tl) シンチレーション、X 線用には Si(Li) 検出器である。チャンバー全体は電氣的に浮いておりファラディカップとして入射イオン電流をモニターすることができる。図 6 の右側太めのポートはマイクロビーム用の 4 連目の四重極静電レンズである。

分析試料台ゴニオメータは 5 軸（XYZ $\theta\phi$ ）可動で全てコンピュータ制御（手動も可）となっている。また、RBS と ERDA 用のデータ解析ソフトはコーネル大学で開発された汎用性の高い RUMP プログラムを、PIXE 用には GUPIX プログラムを用いている。特徴のひとつとして RBS と PIXE の同時測定を行うことができる。このような同時測定により、より精度の高い定性定量分析を行うことができる。

3. 主な用途

工学研究科・放射実験室には既に 3 つの粒子加速器が設置されており学内ユーザーを中心にマシンタイム制による教育研究活動を常時行っている。研究内容も多様化しつつあり既存設備では充分に対応出来ない

のが現状で、今回の新機導入の影響は大きいものがある。本装置の主要な利用目的は、学術研究の新展開、学生教育・若手研究者の育成、および共同利用の促進である。

研究の側面) 従来の分析・注入等を中心とした材料開発・素材キャラクタリゼーションの高性能化の他に、衝突素過程の解明を重視した医工融合的な新研究テーマの立ち上げが考えられる。例えば最近隆盛となりつつある粒子線がん治療では高エネルギー(数百 MeV/核子)の陽子ビームや炭素ビームなどが用いられるが、がん組織を破壊するブラッグピーク領域で何が起きているのかについては正確に理解されているわけではない。原子炉から取り出した中性子の核反応($n + B \rightarrow He + Li$)を利用した硼素中性子捕捉療法(BNCT)においてもがん組織を殺す主役であるはずの He や Li の挙動に注目されたことは殆ど無かったと思われる。更には、放射線治療の主流である γ 線や X 線照射治療においても光電効果やコンプトン効果によって生じる二次電子の挙動についても同様である。生体に及ぼす放射線効果の理解には、時間スケールの長い生物学的効果のみならずアト秒～ナノ秒の極く短時間で発現する物理的・化学的プロセスの理解も重要である。より高度で精度の良い治療技術を確立してゆくためには、一次過程であるこれら高速荷電粒子の衝突反応過程を正確に理解することが必要不可欠であると思われる。前号の記事¹⁾で紹介したように、筆者の研究室ではこのモチベーションの下に液体試料やアミノ酸分子などを標的とした衝突研究を行っている²⁻⁵⁾。ここでは最近の研究成果の一例として、高速陽子線に対して測定された液体の水の阻止能を図7に示す⁴⁾。実線や点線の曲線はデータベースとして

SRIM⁶⁾やICRP⁷⁾が推奨している値である。実験値の中で□と△は固体の水に対するもので、○(0.3~2.0 MeVの範囲)が我々の測定値である。結論としてはこれらの推奨値は1 MeV以下では実際の値に近いが、それ以上のエネルギー領域では10%程実際の液体の値より大きく見積もられていることが解った。僅か10%の違いではあるが、治療計画の基になっているシミュレーション計算で使うデータとしては信頼性に欠けていると指摘することができる。

この例のような生体試料に関わる基礎研究は本装置から得られるマイクロイオンビームを用いることでより一層発展させることができ、関連分野研究者との共同研究の道が開けるものと期待される。前述のように現状では約10 μm が最小ビーム径であり、サブミクロンを目指した技術開発も併行して行う必要がある。電磁レンズ方式の採用は高額になるため大学内の研究にはそぐわない。より安価で学生諸氏も扱えるような方法、例えば円錐状のキャピラリーなどを用いた技術開発もそのひとつである。その他、既存加速器に無い特色を活かした基礎研究、応用研究を広く展開する計画である。

教育の側面) 粒子加速器を研究手段とする分野では量子ビームという言葉がようやく定着した感がある。我々は更に従来の放射線という単語が意味する範疇を超えて広い分野に対応できるものとして、量子放射線という表現も使っている。粒子ビーム利用の研究分野は今や基礎・応用ともに広範囲の分野に広がっており、研究者が意識するしないに関わらず「原子スケールでの粒子ビーム照射効果」の理解は重要なものとなっている。新鮮で先駆的な研究テーマも多数想定され、そのようなテーマの下に学部・修士・博士の学位研究を進めることは当該分野の若手研究者・技術者を育成する上で極めて効果的と思われる。特に医工を初めとする分野融合的な先端研究を通して次代を開拓するアイデアや技術が生みだされるであろうし、我が国では不足している研究型医学物理士等の人材育成を図ることができる。京都大学工学研究科では博士課程前後期連携プログラムとして幾つかの融合工学コースを平成20年度より開設している。原子核工学専攻はその中の「先端医学量子物理領域」に参画し粒子加速器をベースとする医学物理研究者の育成に取り組んでいる。マイクロサイズに絞った MeV エネルギーイオンの細胞照射効果など、マイクロイオンビームを教育カリキュラムの中で積極的に活用する予定である。

共同利用の側面) 工学研究科加速器の重要な使命のひとつは共同利用の促進である。過去10年程のユー

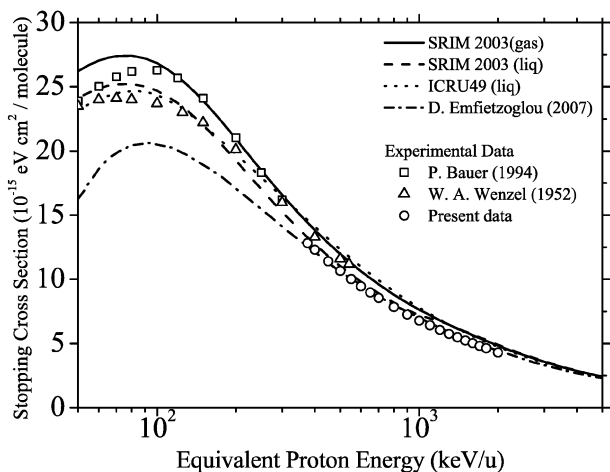


図7 水素に対する水の阻止能

ザーは主として工学系分野に限られてきたが、マイクロビーム機能が要求される分野（生物系等）や非破壊極微量元素分析機能が重要な分野（材料、考古学等）の要請にも対応可能となるため、これまで以上に広範な分野の研究者を取り込むことが見込まれる。

4. 大学加速器施設における設備維持

ここでは、加速器等の大型設備を維持している大学研究者のおかれている現状について触れる。まず、加速器施設である工学研究科放射実験室は原子力分野の教育研究の実験施設として設立されたもので、2台のバンデグラフ（イオン・電子）加速器は原子力が隆盛期にあった1967年に特別設備費（概算要求）として予算化されている。MeV エネルギーイオンビームによる原子衝突研究はその頃世界的な黎明期にあり、我が国で最初に研究に着手した大学のひとつに位置づけられる。両加速器は導入直後から学内共同利用装置に供され、以後年間7000~8000時間の稼働率で今日に至っている。図8に重イオン核物性実験装置（重イオンバンデ）と1988年導入のタンデトロンの稼働時間の推移を示す。重イオンバンデは老朽化もあり最近の稼働率は約6000時間となっている。いずれの装置も国からの維持費は既に無く、1999年設立の量子理工学教育研究センターの運営費交付金の一部を充当しているのが実状である。

一方、2004年の法人化後の京都大学では「京都大学重点事業アクションプラン2006-2009」を策定し教育研究上必要な様々な事業を実施してきた。その中の研究推進事業のひとつに「大型研究設備の充実」があり、概ね1億円以上の大型共同利用設備を対象として予算措置を行ってきた。本加速器はこの事業で先ず採択され、同時に概算要求も行った結果、2009年度国立大学法人施設整備補助金として予算化されたも

のである。

しかしながらこのようなケースは全国的には希で、現有装置の維持費確保については加速器等を保有する大学関係者の共通の悩みとなっている。この現実を少しでも打破する事を目的に、東北大学・石井慶造教授が中心となって原子力関連の実験施設を持つ全国の大学の関係者連絡会が立ち上がっている。参画している大学は北海道大学から九州大学までの12大学である。ここでの大型設備とは、原子炉、加速器、コバルト60照射施設、RI実験施設などで、原子力・放射線利用施設の活性化のための戦略を検討している。各大学の施設利用の現状と教育研究上の成果等を共通に認識し、その上立って先端研究・技術開発の展望について議論を重ね、国への予算要求を行うことを目的として活動を行っている。

5. おわりに

以上、概略ではあるが京大宇治キャンパスに新設されたマイクロイオンビーム加速器について紹介した。国家的プロジェクトとして進んでいるJ-PARC等の大型加速器設備に比較して、物性研究の道具としてのMeV級加速器に対する国からの援助は今後益々厳しくなるものと思われる。今回新たな加速器を導入できたことを大きなステップとして当該分野の発展に貢献していきたい。

最後に本稿を纏めるにあたりご協力を頂きました高木郁二教授、土田秀次准教授、ならびに伯東株式会社高橋俊介氏に感謝したい。

参考文献

- 1) 伊藤秋男, 土田秀次, 「京都大学重イオン加速器とMeVイオン衝突研究」, 加速器, 5(3), p. 218-226 (2008).
- 2) A. Itoh, et al., "Energy Loss of Swift Protons in Water and Ethanol", Nucl. Instr. and Meth. B, 245, p. 76 (2006).
- 3) M. Shimizu, et al., "Stopping Cross Sections of Liquid Water for MeV Energy Protons", Nucl. Instr. and Meth. B, 267, p. 2667 (2009).
- 4) M. Shimizu, et al., "Stopping Cross Sections of Liquid Water for 0.3-2.0 MeV Protons", Vacuum, 84, p. 1002 (2010).
- 5) M. Kaneda, et al., "Positive and Negative Cluster Ions from Liquid Ethanol by Fast Ion Bombardment", J. Chem. Phys., 132, 144502 (2010).
- 6) J. Ziegler, <http://www.srim.org;2008>
- 7) "stopping powers and Ranges for Protons and Alpha Particles", in ICRP Report 49, (1993).

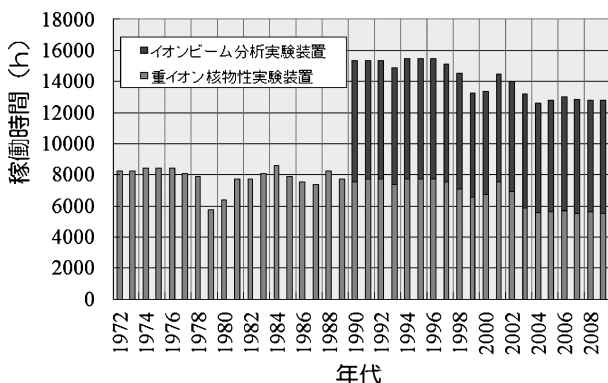


図8 工学研究科放射実験室加速器の稼働時間推移