

原研 TIARA 施設の概要

中村義輝、福田光宏、高田 功、神谷富裕、田島 訓、荒川和夫、西堂雅博、小原祥裕
 日本原子力研究所 高崎研究所 放射線高度利用センター 〒370-1292 群馬県高崎市綿貫町 1233

概要

原研 TIARA(Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Application)は、イオンビーム利用の拠点研究施設として平成5年7月に完成して以来、主として材料科学やバイオ技術研究などの先端研究分野に多種多様なイオン種を提供してきた。TIARA 施設の加速器は、これまで約10年間に渡り順調な運転を継続しており、研究成果の創出に貢献してきている。ここでは、TIARA 施設の概要とそれぞれの加速器の特徴等、さらには代表的な加速器技術の開発や装置整備等についても記述する。

1 TIARA 施設の概要

TIARA 施設は、930 型 AVF サイクロトロン[1],[2]及び3台の静電加速器[3],[4] (タンデム加速器、シングルエンド加速器及びイオン注入器) から成る複合型加速器施設である。これら4基の加速器から提供されるイオン種の加速エネルギー範囲を図1に示す。利用可能なイオン種は、質量数1の陽子から質量数200程度の金やビスマスイオンまでの広範囲に渡っており、それらの加速エネルギーは20 keV~970 MeVと約5桁にも及んでいる。また、これらの加速器装置では、スキャン(拡大照射)ビーム、パルスビーム、カクテルビーム、大気取り出しビーム、デュアル・トリプルビームなどの複合ビーム、 μm サイズの軽・重イオンマイクロビーム、クラスタービーム、等々の多様なビーム利用の形態が可能となっている。

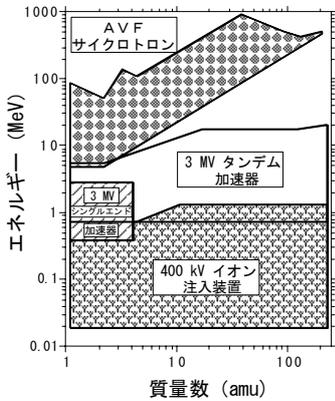


図1：利用可能イオン種の質量数とエネルギーとの相関図。

2 AVF サイクロトロン装置

サイクロトロン装置全体の構成図を図2に示す。イオン源は ECR 型が2台と、軽イオン用の Multi-cusp 1台があり、外部入射方式となっている。入射系にはビーム制御機器として、SUSの多孔薄板で作られているアッテネーター(ビーム減衰率は最大で 10^{-10} 程度)、パルス型のチョッパー、2種類(正弦波型及び鋸歯状波型)のバンチャー等が設置されている。

原研 AVF サイクロトロンは、住友重機械製の930型(K値110)であり、SF型の常電導サイクロトロンとしては世界で最大級のものである。サイクロトロンは、セクター数が4、ディー電極数が2、加速ハーモニック数1、2及び3が可能で、RF共振器には同軸型が採用されている。

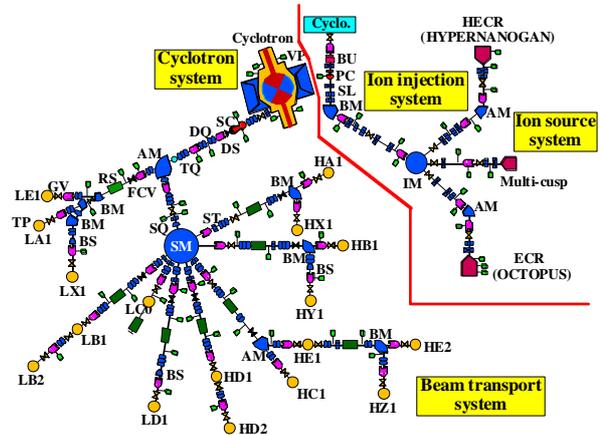


図2：サイクロトロン装置の全体構成。

ビーム輸送系は、水平ビームライン8本、垂直ビームライン4本から構成されており、合計16ヶ所のターゲットポートが準備されている。同様に輸送系には、正弦波型チョッパー、3台の磁場偏向型スキャナー等が配置されており、利用者の実験利用を支援している。

サイクロトロン装置整備における代表的な事項を以下に示す。1999年3月には、HYPERNANOGAN(HECR)が導入され、このためのイオン入射系も付加設置された。設置直後におけるHECRの外観を図3に示す。HECRは主として金属イオンの生成を目的としており、これまでCa, Fe, Ni, Ru及びAuイオンなどの開発を行ってきている。

また同時期に、制御機能の高度化や容量の増大が必要となり、さらに構成機器の交換部品等の入手が困難になってきたこと、などの理由から計算機システム及び制御プログラムを全面的に更新した。図4には更新された制御系の概要を示す。MTC以下の階層構成部分に変更せず、Computer等の上部階層は全て更新された。

これまでに発生した種々の故障等については、1) 1993/12: プラー電極の支持用アルミニウムブラケットの変形・損傷、2) 1994/06: TMP(600 L/s)が破損し、ポンプの回転翼等がビームラインダクトの広範囲に飛散、3) 1996/09: ハーモニック切替作業中に、インフレクターシステム(約350 kg)が約1.7 m落下、4) 1998/03: マグネティックチャンネル入口パッフル部から加速箱内に大量(約50 L)の漏水、6) 2000/09: ECRイオン源のOCTOPUS本体



図3：HYPERNANOGANの外観。

内部全体及び後方診断ステーションの一部に冷却水が浸入、等々が代表的な事例である。

次に装置・技術開発についても、主要数例を以下に示す。

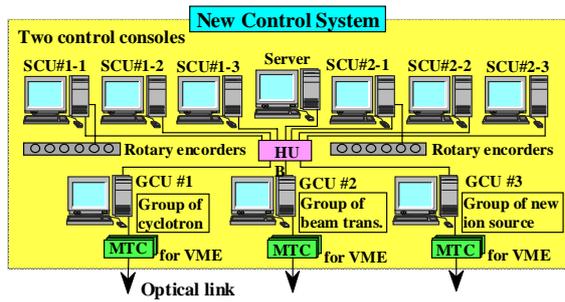


図4：更新したサイクロトロン装置制御系の概要。

宇宙用半導体材料の耐放射線性試験などでは、LET 依存性等の実験が行われる事が多く、イオン種を変更するような一連のデータ取得には数ヶ月を要していた。このため、Cocktail beam 開発が進められ、1996 年には $M/Q=5$ のシリーズ ($^{15}\text{N}^{3+}$, $^{20}\text{Ne}^{4+}$, $^{40}\text{Ar}^{8+}$ 及び $^{84}\text{Kr}^{17+}$) が最初に実用化された。その結果、イオン種の切換が数分で可能となり、実験効率の飛躍的な改善が計られた。また、現在では $M/Q=4$ 及び $M/Q=2$ のシリーズも追加開発されている。

これまで多くのサイクロトロンでは、運転条件に依ってはビーム強度が時間とともに減少し、時々補正磁場を調整するのが通例であった。このビーム減少の原因は、本体電磁石部分の温度変動に起因する磁場変動であることが初めて見出された。1999 年度には、電磁石の温度安定化を目的として、メインコイル用の断熱ジャケット (図5参照) を設置するとともに、分離したトリムコイルの冷却水系統に、独立の高精度温度制御を導入した。その結果、ビーム電流は数 10 後においても約 10% 程度の減少に抑制され、電流安定度の大幅な改善が実現された [5]。



図5：断熱ジャケットの一部 (設置前)

さらに収束型のサイクロトロンマイクロビーム形成の一環として、2001 年度にはフラットトップ加速システムの導入、2003 年度にはビーム位相幅制御の高度化を目的とした中心領域の改造、鋸歯状波型バンチャーの設置等々が実施され、現在ビームテストが進行している。

3 静電加速器

静電加速器群で、最も高いエネルギー範囲を受け持つのが 3 MV のタンデム加速器であり、米国の NEC 製である。また、3 MV のシングルエンド加速器及び 400 kV のイオン注入装置は、それぞれ日新ハイボルテージ製及び日新電機製である。これら 3 台の静電加速器は、ビームの複合利用を主眼にして選定されたものであり、得られるビームエネルギーは、おおよそ 20 keV ~ 20 MeV の範囲となっている。

3 MV タンデム加速器は、3 台の負イオン源を備え、得られる最大エネルギーは、H で 6 MeV、He で 9 MeV、その他の重イオンでは 18 MeV 程度である。昇電圧にはペレットチェーンを用いており、加速電圧は 0.4 ~ 3.0 MV で連続可変となっている。加速器本体は、0.5 MPa の SF₆ が充

填されている横型円筒形圧力タンク中に収納されており、その中央部には荷電変換のためのガスストリッパーが設置されている。また 3 MV シングルエンド加速器は、サブミクロン径のマイクロビーム形成を実現するため、10 ppm の高い電圧安定度を備えた軽イオン専用の加速器であり、電圧の極性変換により電子の加速も可能となっている。昇電圧には対称型のシェンケル回路を採用しており、RF イオン源、加速部、昇圧部等は全て 0.6 MPa 程度の SF₆ を満たした圧力タンク内に設置されている。400 kV のイオン注入装置は、フリーマン型イオン源を搭載しており、軽イオンから重イオンまでの広範なイオンを、最大 400 keV まで加速できる。

次に 3 台の静電加速器及びそれらのビームライン及びターゲットポート等の配置を図6に示す。ビームラインは、それぞれの加速器単独のビームラインと、デュアル (MD1 と MD2 ポート) 及びトリプル (MT1) の複合ビームラインから構成されている。また、第1ターゲット室の TB ラインには、重イオンマイクロビーム装置が、一方第3ターゲット室の SB ラインには、軽イオンマイクロビーム装置がそれぞれ設置されている。

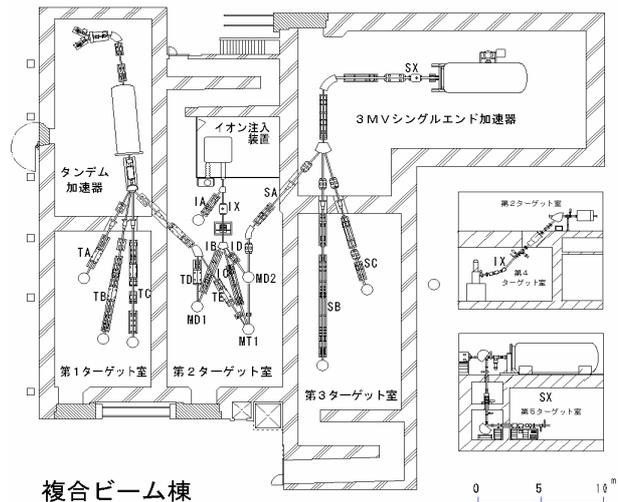


図6：静電加速器及びビームライン配置。

加速器の整備では、ほぼ 1 万時間運転を目的として加速管の交換 (3 台について、1997 年度及び 1998 年度)、イオン注入装置の絶縁碍子更新 (2000 年度) を行った。また 2000 年度には、グラフィックターミナルの故障の頻発や修理の困難さが深刻になってきていたこと、制御系中枢のボードコンピューター部分のサポート体制に懸念が生じたこと、などの理由からタンデム加速器の制御系を更新した。更新した制御系の概要を図7に示す。更新にあたっては、できるだけ汎用品で制御システムを構築し、長期間での維持・管理を可能にするよう配慮した。

またこれまでに発生した主な故障等については、1) 1994/08: タンデム加速器、ペレットチェーン用のプリーク軸に異常摩耗が発生、2) 1997/02: シングルエンド加速器、リップル調整器の電流導入端子部分が異常過熱 3) 1995/11: イオン注入装置、高電圧デッキに電力を供給する絶縁碍子が損傷、等々が挙げられる。

さらに代表的な装置・技術開発等の内容を以下に示す。マイクロビーム形成技術の開発では、前述のように重イオンマイクロビーム装置をタンデム加速器のビームライン

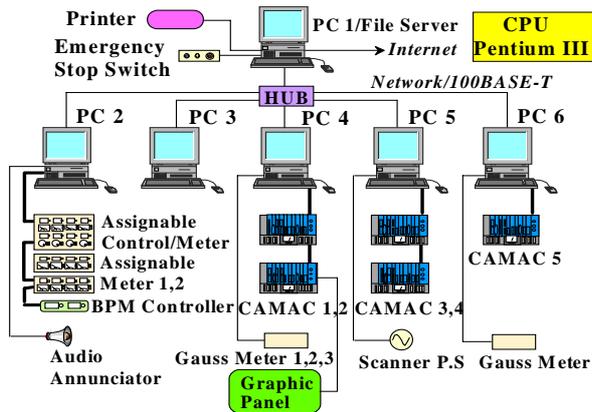


図7：更新されたタンデム加速器制御系の概要

に設置した。ビーム光学系の計算や電磁石磁場解析の結果に基づいて、マイクロスリット、発散制限スリット及び精密Qレンズの最適設計を行った。その結果、1 μm径のマイクロビームを形成するとともに、ビーム照準技術との組み合わせにより、任意の位置へのシングルイオンヒット加工技術も開発した。また、この重イオンマイクロビーム形成技術の展開により、シングルエンド加速器に軽イオンマイクロビーム装置を設計・設置し、最小ビーム径0.25 μmのマイクロビームを達成した[6]。

タンデム加速器で、イオン源及びガスストリッパの運転条件等を最適化することにより、C, Si, Ag, Au など6種類の実用強度のクラスターイオンを開発した[7]。フリーマンイオン源のサポートガスにSF₆を使用して、B, Si, Nb, Mo, Ta等の高融点金属イオンを、高強度で安定に生成する技術を開発した。また、シングルエンド加速器で加速されたプロトンビームを対象に、²⁷Al(p,γ)²⁸Siあるいは²⁴Mg(p,γ)²⁵Alの共鳴核反応を利用して、ビームエネルギー値及びエネルギー幅を正確に測定する方法を開発した。

4 加速器の運転・利用状況

TIARA 施設の実験利用は、年間を3期に分割した形態となっており、実験課題の申請からヒアリング審査・評価等を経て、各実験者に利用時間を割り当てる方式となっている。また利用運転については、サイクロトロン装置は、月曜日朝から金曜日夕方までの週単位の昼夜連続運転が基本となっている。一方静電加速器は、Daily operation が基本であり、08:30~20:00 までのAモード、及び23:00 までのBモード運転の2種類での対応となっている。

サイクロトロン装置の運転時間は、最近10年間では全て3000 h以上を堅持しており、平均年間時間は3216 hとなっている。また、加速器の利用が年々多様化していることから、運転条件の変更頻度が增大しており、これらの状況を図8に示す。加速モード、イオン種、エネルギー及びビームコースの切換頻度は、いずれも年々増加の傾向を示しており、特にビームコースの切換回数は年間約290回以上にも達している。これらの状況は、サイクロトロン装置の実験利用が細分化されていることを示唆するものであるが、反面この事実はいわゆる装置の利用効率が徐々に低下していることを意味しており、将来的な施設運用における懸案事項の一つともなっている。

一方静電加速器3台の年度別運転時間を図9に示す。

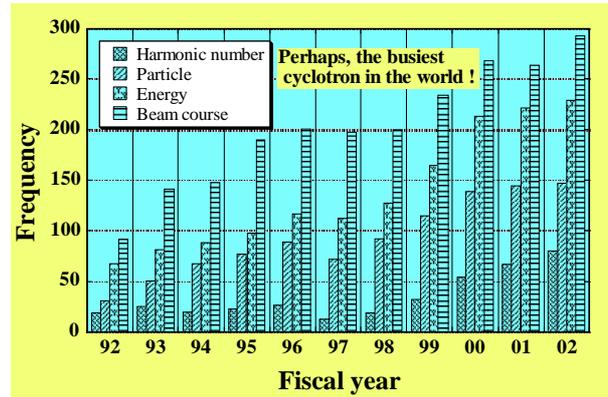


図8：過去11年間における加速モード、イオン種、エネルギー及びビームコースの切換頻度の推移。

1996年度に運転員の増員が行われたことから、23時までの時間外運転が実施され、この時期から運転時間の拡大が計られた。過去6年間における平均年間運転時間は、タンデム加速器、シングルエンド加速器及びイオン注入装置で、それぞれ1986 h、2376 h及び1830 hとなっている。また、デュアル及びトリプルビームの複合照射の割合は、各加速器とも約20%となっているが、徐々にトリプルビーム利用が増加する傾向にある。さらに最近では、大気マイクロPIXE分析技術の開発や各種試料の分析実験等で、軽イオンマイクロビームの利用頻度が増大している。

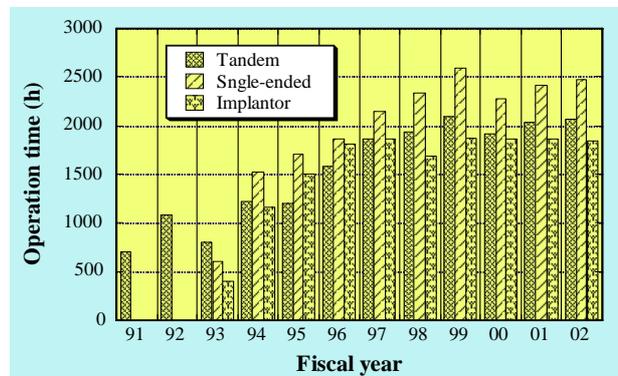


図9：静電加速器3台の年度別運転時間。

参考文献

- [1] Y. Nakamura, T. Nara, T. Agematsu, I. Ishibori, *et al.*, JAERI-Review 2002-035 (TIARA Annual Report 2001) pp. 300-302 (2002)
- [2] 中村 義輝, 奈良 孝幸, 上松 敬, 石堀 郁夫, 他: 第12回 TIARA 研究発表会予稿集, pp33-34 (2003)
- [3] 田島 訓, 高田 功, 水橋 清, 宇野 定則, 他: JAERI-Tech 96-029, 137p (1996)
- [4] 高田 功, 水橋 清, 宇野 定則, 大越 清紀, 他: 第12回 TIARA 研究発表会予稿集, pp35-36 (2003)
- [5] S. Okumura, S. Kurashima, T. Ishimoto, W. Yokota, *et al.*, Proc. 13th Sympo. Accel. Sci. Technol., Suita, Osaka, Japan, pp. 283-285 (2001)
- [6] T. Kamiya, T. Suda and R. Tanaka, Nucl. Instr. and Meth., **B118**, pp. 447-450 (1996)
- [7] Y. Saitoh, K. Mizuhashi and S. Tajima, JAERI-Review 99-025 (TIARA Annual Report 1998), pp. 264-265 (1999)