

原研AVFサイクロトロン装置の現状報告

中村義輝^{A)}、奈良孝幸^{A)}、上松 敬^{A)}、石堀郁夫^{A)}、倉島 俊^{A)}、福田光宏^{A)}、
 奥村 進^{A)}、宮脇信正^{A)}、吉田健一^{A)}、荒川和夫^{A)}、田島 訓^{A)}
 赤岩勝弘^{B)}、吉田敏浩^{B)}、居城 悟^{B)}、松村秋彦^{B)}、荒川芳隆^{B)}、吉田 剛^{B)}、
 狩野 智^{B)}、伊原 彰^{B)}、高野圭介^{B)}

^{A)}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
^{B)} ビームオペレーション(株) 〒370-1207 群馬県高崎市綿貫町 1233

概要

原研 AVF サイクロトロン装置は、これまで 10 年間以上にわたって安定な運転が継続されており、広範な研究分野に多種多様なイオン種を提供している。最近 2 年間では、フラットトップ加速システム導入によるマイクロビーム形成予備試験、偏向機能付きグラジエントコレクターの設計・製作、サイクロトロン中心領域の改造、等々の技術開発や装置改造を行ってきた。また一方ではこの間、マグネティックチャンネルケース部での真空リークや同出口パッフル部での漏水、真空系用シーケンサーの放射線損傷、電源盤内小型補助電源の不良、など様々な故障・不具合等も発生したが、サイクロトロン装置はこれらの困難を克服し、ほぼ計画通りの運転時間を達成している。

1 サイクロトロン装置の運転と利用

原研 AVF サイクロトロン装置[1]-[3]は、1991 年 3 月のファーストビームの引き出し以来、特に深刻な故障等の発生もなく極めて順調な運転が継続され、材料科学やバイ技術などの研究利用分野で、幅広く利用されてきている。またこれまで、イオン源の増強、制御系の全面更新、カクテルビーム加速技術の開発、サイクロトロンビームの高安定化、等々の装置整備や技術開発も併行して進めてきている。

図 1 には利用イオン種の推移を示す。初期には軽イオン(H⁺と D⁺)の割合が全体の 40%であったが、最近数年間では

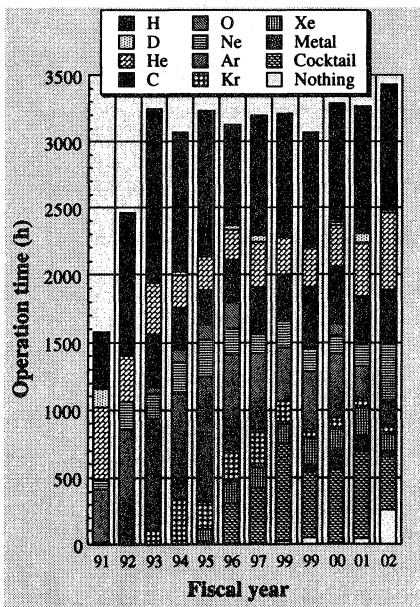


図 1 : 利用イオン種の推移。

はほぼ一定値の 30%に減少している。利用イオン種は、カクテルや Xe イオンが増加する一方、Ar や Kr イオンは減少するなど、新ビーム開発の進展とも関連して、年々分散化の傾向が強まっている。

また運転時間は、1993 年以降では確実に年間 3000 h 以上(平均では 3216 h)を堅持している。特に 2002 年度では運転時間は

これまでで最高の 3433 h に達した。さらに図 2 には、最近 7 年間における計画ビーム調整時間の変化を示す。前述のように運転時間はほぼ一定値を示しているにも拘わらず、調整時間は初期の約 360 h から、バイオ技術関連研究の進展とも相まって、約 2 倍の 700 h にまで急増している。このビーム調整時間には、加速モード、イオン種、エネルギー、ビームコース等の切替・変更

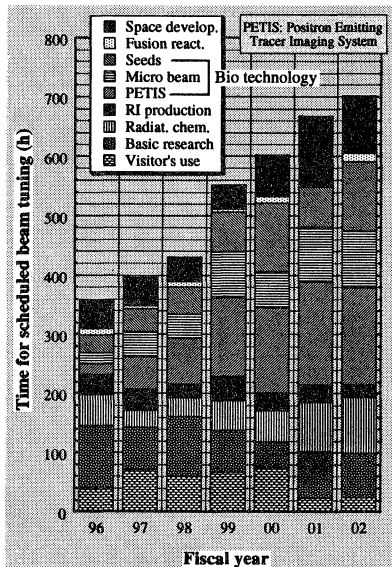


図 2 : 最近 7 年間における計画ビーム調整時間の変化。

に必要な時間が含まれている。これらの結果は、多種多様なイオン種を比較的短時間で、頻りに切り換えて使用する原研 AVF サイクロトロン装置の運転状態を、忠実に反映したものとなっている。ちなみに、前述の 4 種類の変更頻度は、いずれも年々増加の傾向を示しており、このうちビームコースの変更回数は昨年度累計では 290 回にも到達するなど、“世界で最も多忙なサイクロトロン装置”の Catch phrase を実証する実態となっている。

2 技術開発及び装置改造等

2.1 フラットトップ加速システムの現状

サイクロトロンビームを用いた直径 1 μm のマイクロビーム生成のために、2002 年の 3 月にフラットトップ加速 (FT) システムが設置された。この FT システムは、RF の基本高周波に 5 倍高調波を重畳させて、加速電圧波形に平坦部を形成するものであり、共振周波数帯域は 55~110 MHz、最大出力は 3 kW の設計となっている[4]。設置後エージングや試験運転等を行い、実用運転に向けた条件整備を進めてきた結果、Ch 1 及び Ch 2 のいずれでも、1.5 kV 程度の必要な Flat-top 電圧を印加できることが確かめられた。当面のマイクロビーム形成対象イオン種である 260 MeV, ²⁰Ne⁷⁺を用いた予備実験では、パルス型ビームチョッパーで 100 ns 程度にパルス化したビームをサイクロトロンに入射し、FT システム及び位相スリット等の最適

調整により、ほぼシングルターン引き出しに近い状態が実現されている[5],[6]。なお、FT システムの共振空洞は、サイクロトロン共振器の外筒に設置されていたクライオポンプのポートに取付けたため、設置に先立ち 2001 年末にはあらかじめポンプ 2 台 (各 $4 \text{ m}^3/\text{s}$) を移設した。

また、マイクロビーム形成時のサイクロトロンビーム調整では、デフレクター入口におけるビームの周回パターンを正確に観測する必要があるため、先端検出部がタングステン薄板 (厚さ 0.5 mm) か小径グラファイトロッド (直径 0.5 mm) かのいずれかが選択可能な高分解能のデフレクタープローブを製作して、電流検出用タンタルブロック型の既設品と交換・設置した。

2.2 偏向機能付きグラジエントコレクターの設計と製作

サイクロトロン本体からのビーム引き出し軌道と、ビーム輸送系基幹ビームライン軸とが約 2 度整合していないことから、効率的なビーム輸送や精巧なマイクロビーム形成等の観点から、高精度化が必要となっていた。そのため、これまでステアリング電磁石の増設やビームライン全体の移動、さらにはサイクロトロン本体の旋回など、いくつかの案が検討されたが実現していなかった。

これらの現実的な代替案として、励磁コイルを収納して偏向機能を付加した新型のグラジエントコレクター (グラコレ) を設計・製作し、鉄片の構造体で構成されていた既設のグラコレと置換した。本体に装着する前の偏向機能付きグラコレの外観を、図 3 に示す。

なお、この改造に伴って、本体ピット室部分に偏向コイル用電源が必要となり、電気機械室から 3 相 420 V で 150 A 容量の電源を新たに供給した。

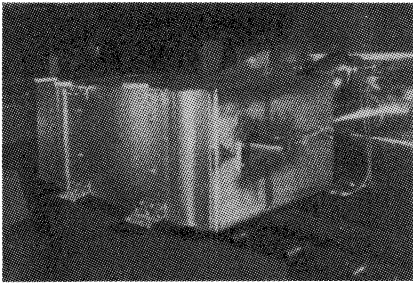


図 3 : 偏向機能付きグラコレ (設置前)

2.3 高安定軽イオン源用分析電磁石及びビームラインの設置

現在軽イオンの生成に用いている Multi-cusp イオン源は、約 13 年間以上の長期間に渡り、すでに約 12000 h 運転されている。この小型イオン源は、永久磁石を利用した Hot filament 型のものであり、水素及び重水素イオンの生成のみに利用されてきた。しかしながら、現在長期間の使用に伴う経年劣化等の進行もあり、生成強度や安定度等の性能低下が問題となっている。このため、新たに高安定軽イオン源を製作して、生成強度や安定度の大幅な改善を図るとともに、既設の ECR イオン源である "OCTOPUS" との併用領域を拡充するなど、高機能化も

合わせて実現する計画を進めている。イオン源本体の設計・製作に先立ち、後続のビームライン及び分析電磁石等を設計・製作し、それらを地階のイオン源テストベンチ室に据え付けた。ビームスリットなど若干の診断機器を組み込んだ設置状態を、図 4 に示す。

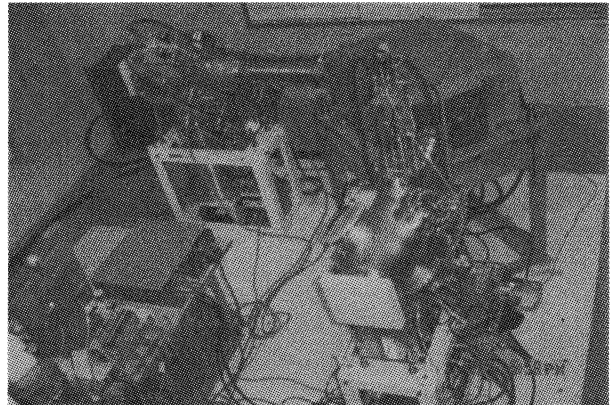


図 4 : 高安定軽イオン源用ビームライン及び分析電磁石

2.4 サイクロトロン中心領域の改造

前述のマイクロビーム形成では、サイクロトロンビームのエネルギー幅 ($\Delta E/E$) を、 2×10^{-4} 程度に向上させる必要があり、位相幅制御の高精度化が必須の要件である。この目的でハーモニック数 $1, 2$ 及び 3 のイオン種における軌道解析を行った結果、特に中心領域にある位相スリット位置の最適化が必要であることが分かった。軌道解析結果では、ハーモニック 1 及び 2 では、位相スリット位置及び先端形状はいずれも小規模な変更で済むが、ハーモニック 3 については中心領域でのビーム引き出しを、現在より 180 度回転した位置にするのが最適であることが分かった。また、中心領域に配置されているインフレクターについても、RF 加熱対策の一環としてシールドケースと電極とを分離するなど、一連の改造を実施した[7]。

3 点検保守整備・修理等

通例の年間スケジュールでは、夏期に定期点検 (改造等含む) 及びビームテスト (4 週間及び 1 週間程度)、秋には電源の定期点検 (1 週間)、 3 月には比較的小規模な改良・手直し等が行われている。表 1 に最近 2 年間に発生し

表 1 : 最近 2 年間で発生した主な故障・不具合等

時期	故障内容	原因・対処等
2001/10	マグネティックチャンネル(MC)シールドケース部に真空リーク発生	70 MeV , H^+ 約 $6 \mu\text{A}$ のビーム衝撃で溶融・穿孔、# 3 号機への置換
2002/04	ビーム不安定状態の継続 (約 2 週間程度)	インフレクター高圧導入部電線の劣化 耐熱電線の交換
2002/05	ステアリング電源の極性切替不能	小型制御用電源の不良 (電圧低下) 同型式の電源合計 64 台の交換
2002/11	RF 主真空管 (4CW5000E) の損傷	中古品の真空管に交換 (応急措置)
2003/01	真空排気系制御シーケンスの異常 (第 1 軽イオン室)	制御用シーケンサーの放射線損傷 Local mode での運転、シーケンサーの交換
2003/02	MC 出口パッフルスリット部での小規模な漏水 (加速箱内)	漏水部を分離して真空引き、応急措置 予備の Mo 製スリットに交換
2003/06	純水冷却系循環ポンプのメカニカルシール冷却部からの冷却水噴出	モーターとポンプ連結部のゴムプッシング劣化による振動増加、予備部品に交換

た主な故障・不具合等の内容を示す。

これらの故障のうち、2001年10月に発生したマグネティックチャンネル (MC) シールドケース部の故障について、以下に簡単に触れる。サイクロトロンは、70 MeV, H⁺ の高強度ビーム (引き出し電流で約 6 μA) で調整運転されていたが、突然本体加速箱の真空圧力が約 1 × 10³ Pa にまで急上昇し、本体が緊急停止した。この故障原因を調査したところ、MC の電流導入部からのヘリウムリークテスト結果から、SUS 製シールドケース部に貫通孔が発生した可能性が示唆された。早速本体を開放した後 MC ケース内溝部分を注意深く観察したところ、ビーム入射側端部に小さな陥没痕の存在が認められ、高強度ビームの衝撃による局所的な溶融発生がその原因と予測された。

これらの発生状況の概要を図5に示す。このビーム衝撃の原因は、MC 入口パッフルスリット "IN" が、正規の位置より約 3~4 mm 内側に配置されていたためであり、その後 # 3号機に置換された際に設置位置を修正した。

4 新ビーム開発等

最近2年間では、偏向機能付きグラコレへの変更及び中心領域の改造が実施された後、いずれも夏のお盆時期を返上して精力的にビームテストが実施され、その後開始された実験利用に備えた。

これまでに原研 AVF サイクロトロンで加速されたイオ

表2：加速イオン種の一覧表。Text はサイクロトロン直後のファラデーカップ (FC) 電流に対する半径 900 mm での電流の比、Tall は同様にサイクロトロン直前の入射系 FC 電流との比を示す。

Ion species	Energy (MeV)	Intensity (μA)	Text (%)	Tall (%)
H ⁺	10	12	80	27
	20	11.5	89	25
	30	6.2	78	22
	45	30	79	14
	50	5	44	14
	55	5	63	14
	60	5	57	22
	65	7	62	12
	70	5	42	12
	80	4.4	72	13
90	10	48	7.7	
D ⁺	10	11	29	3.7
	20	5.6	80	16
	25	15	88	31
	35	40	59	13
	50	20	49	7.2
³ He ²⁺	60	8.2	68	18
⁴ He ⁺	25	3.6	M/Q=4	13
⁴ He ²⁺	20	5.5	69	12
	30	10	42	10
	50	20	62	22
	100	10	32	10
	108	1.6	M/Q=2	
¹² C ³⁺	75	2	M/Q=4	
¹² C ⁵⁺	220	1	77	22
¹² C ⁶⁺	320	0.008	M/Q=2	
¹⁴ N ³⁺	67	4	43	10
¹⁵ N ³⁺	56	0.70	M/Q=5	5.0
¹⁶ O ⁴⁺	100	5	M/Q=4	22
¹⁶ O ⁵⁺	100	4	34	21
¹⁶ O ⁶⁺	160	1.9	58	21
¹⁶ O ⁷⁺	225	1	82	13
¹⁶ O ⁷⁺	335	0.1	41	6
¹⁶ O ⁸⁺	430	0.0045	M/Q=2	
²⁰ Ne ⁴⁺	75	1.5	M/Q=5	6.6
²⁰ Ne ⁵⁺	125	0.01	M/Q=4	
²⁰ Ne ⁶⁺	120	1.6	53	18
²⁰ Ne ⁶⁺	200	0.8	Scaling	10
²⁰ Ne ⁷⁺	260	9.8	70	22
²⁰ Ne ⁷⁺	270	0.28	Scaling	14
²⁰ Ne ⁸⁺	350	1.5	63	23
²⁰ Ne ¹⁰⁺	540	10 ⁻³ cps	M/Q=2	
²² Ne ⁶⁺	165	0.007	M/Q=4	
³⁶ Ar ⁸⁺	195	2.5	73	13
³⁶ Ar ¹⁰⁺	195	0.1	43	1.2
³⁶ Ar ¹⁸⁺	970	10 ⁻³ cps	M/Q=2	
⁴⁰ Ar ⁸⁺	150	2.4	M/Q=5	6.2
⁴⁰ Ar ¹⁷⁺	175	3	73	15
⁴⁰ Ar ¹⁰⁺	250	0.2	M/Q=4	
⁴⁰ Ar ¹¹⁺	330	0.7	86	22
⁴⁰ Ar ¹³⁺	460	0.03	63	24
⁴⁰ Ca ⁹⁺	200	2	61	11
⁵⁶ Fe ¹¹⁺	200	1.4	M/Q=5	16
⁵⁶ Fe ¹⁵⁺	400	0.59	66	28
⁵⁸ Ni ¹⁵⁺	390	0.012	M/Q=4	
⁸² Kr ²⁰⁺	490	10 ⁻³ cps	M/Q=4	
⁸⁴ Kr ¹⁷⁺	320	0.08	M/Q=5	5.0
⁸⁴ Kr ¹⁸⁺	400	0.04	60	2
⁸⁴ Kr ²⁰⁺	520	0.06	72	22
⁸⁴ Kr ²¹⁺	525	0.0032	M/Q=4	
¹⁰² Ru ¹⁸⁺	320	0.013	50	2.7
¹²⁹ Xe ²³⁺	450	0.2	72	11
¹⁹⁷ Au ³¹⁺	500	0.023	49	3
M/Q = 2, 4 and 5 : a series of cocktail beams				
Colored pattern : modified data on previous table				

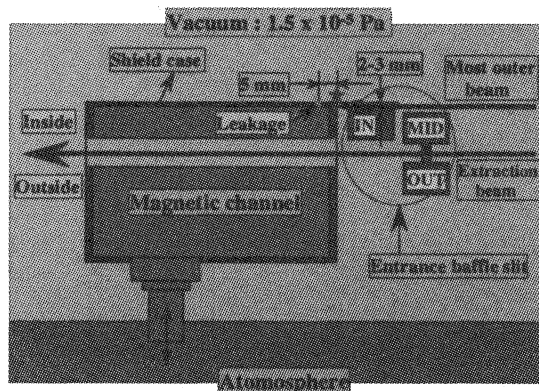


図5：マグネティックチャンネルケース部の真空リーク発生状況概要図。

ン種を表2に示す。ここ数年における代表的な内容では、1) 20 MeV, 30 MeV 及び 80 MeV の H⁺ イオンの3種類について、入念な最適化調整運転を行ってビーム強度を増強した、2) 優先的なマイクロビーム形成対象イオン種である 260 MeV, ²⁰Ne⁷⁺ で、イオン源を OCTOPUS から HECR に切り換えるとともに、設計値パラメーターに基づいた再調整を行い、約 30 倍の飛躍的なビーム強度の増強が図られた、3) 新たに金属イオンの 320 MeV, ¹⁰²Ru¹⁸⁺ 及び 60 MeV, ³He²⁺ (100 MeV, ⁴He²⁺ の代替イオン種) が開発され

た、4) Cocktail beam (M/Q=4) でのシリーズに、⁴He⁺ 及び同位体 ²²Ne⁶⁺ のイオン種が追加された、等々が挙げられる。

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] Y. Nakamura, T. Nara, T. Agematsu, I. Ishibori, *et al.*, Proceedings of International Workshop on Accelerator Operation, Hayama and Tsukuba, Kanagawa and Ibaraki, Japan (2003)

[3] 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)

[4] M. Fukuda, S. Kurashima, S. Okumura, N. Miyawaki, *et al.*, Rev. Sci. Instrum., 74, 2, pp. 2293-2299 (2003)

[5] 倉島 俊, 福田 光宏, 奥村 進, 宮脇 信正, 他: 第12回 TIARA 研究発表会予稿集, pp. 17-18 (2003)

[6] 倉島 俊, 福田 光宏, 宮脇 信正, 奥村 進, 他: 本加速器科学研究発表会予稿集, (2003)

[7] 宮脇 信正, 福田 光宏, 倉島 俊, 奥村 進, 他: 本加速器科学研究発表会予稿集, (2003)