

## STATUS REPORT ON JAERI-AVF CYCLOTRON SYSTEM

T. Nara<sup>A)</sup>, T. Agematsu<sup>A)</sup>, I. Ishibori<sup>A)</sup>, S. Kurashima<sup>A)</sup>, K. Yoshida<sup>A)</sup>,  
M. Fukuda<sup>A)</sup>, S. Okumura<sup>A)</sup>, N. Miyawaki<sup>A)</sup>, Y. Nakamura<sup>A)</sup>

<sup>A)</sup>Advanced Radiation Technology Center, JAERI

1233 Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma, 370-1291, JAPAN

K. Akaiwa<sup>B)</sup>, To. Yoshida<sup>B)</sup>, S. Ishiro<sup>B)</sup>, Y. Arakawa<sup>B)</sup>, Tu. Yoshida<sup>B)</sup>, S. Kanou<sup>B)</sup>, A. Ihara<sup>B)</sup>, K. Takano<sup>B)</sup>  
<sup>B)</sup>Beam Operation Service, Co., Ltd.

### Abstract

The JAERI-AVF cyclotron system has been smoothly operated since the first beam extraction in March 1991. The annual operation time is an average of 3200 hours through recent ten years.

The cyclotron system needs frequent alterations of operation conditions, because many kinds of ion species are required for the research in materials science and biotechnology and because the beam time is within several hours.

In order to form the micro-beam with a beam spot size of 1 $\mu$ m in diameter a flat-top acceleration system, and a new cyclotron centre region, have been developed.

## 原研AVFサイクロトロン装置の現状報告

### 1. はじめに

原研AVFサイクロトロン装置は、これまで13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。近年では、フラットトップ加速システム導入、鋸歯状波型ビームバンチャーの追加、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い、マイクロビーム形成実験を精力的に実施している。また一方ではこの間、TMP回転翼の破損や冷却系機器からの漏水、機器コントロール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を継続している。



図1 原研AVFサイクロトロン装置

### 2. 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(図1)は、1991年3月のファーストビームの引き出し[1]以来、順調な運転が継続されている。サイクロトロン装置の利用運

転は、月曜日の朝から金曜日夕方までの週単位の昼夜連続運転を基本としている。実験利用は、年間を3期に分割した形態となっており、2004年度における利用比率は、およそ37:38:25となっている。

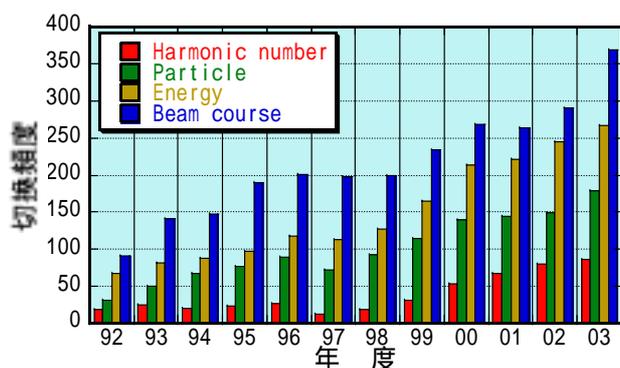


図2 切換回数の推移

#### 2.1 運転利用状況

2003年度の運転・利用等については、これまでと同様、ほぼ順調な運転が継続された。年間での加速モード、イオン種、エネルギー、ビームコースの変更回数はこれまで年々増加傾向を示していたが、特に昨年度では図2のように飛躍的な増加を示した[2]。それぞれの切換頻度については、加速モード変更は87回、イオン種変更が179回、エネルギー変更が267回、ビームコース変更が369回となっており、我々は“世界で最も多忙なサイクロトロン装置”を自認している。ここ10年間の平均年間運転時間は

3,200hrを超えており、今年5月中旬にはファーストビームの引き出し以降の積算運転時間が40,000時間に達した。

### 3. 技術開発ならびに装置改造等

#### 3.1 マイクロビーム形成のためのビーム調整

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 ( $E'/E$ ) を、従来の0.1%から  $2 \times 10^{-4}$  以下に向上させる必要がある。このため、基本波に第5高調波を重畳したフラットトップ加速システムを用いて、エネルギー利得を均一化してイオンを加速する必要があり、すでに重畳した状態でのビーム加速に成功している[3]。また、1ターン目のビーム軌道位置とビーム位相の間に有意な相関関係が生じるように中心領域の改造[4]も実施した。さらにビーム位相幅を制限した状態ではサイクロトロンからのビーム強度が激減してしまうため、鋸歯状波型ビームバンチャーを開発し高効率に時間的に圧縮することで必要なビーム強度を得た。これらの技術開発やビーム調整を精力的に実施することで、サイクロトロンからのビームを、従来の、0.1%のエネルギー幅が生じていたマルチターン引き出し状態からシングルターン引き出しを達成し、マイクロビーム形成可能なエネルギー幅に向上させる目的を得た。

#### 3.2 ビームエネルギー計測技術の開発

サイクロトロンのビームエネルギーは、ビーム電流を最優先にした最適化のため、予定通りの値(公称値)とは必ずしも一致していない。核反応実験等においては精度1%以内のエネルギー絶対値が要求されている。このため、飛行時間法(TOF法)を用いたビームエネルギー計測技術の開発を行い、その計測システムを既に完成させている。今回さらに、短時間でかつ簡便にビームエネルギーを計測するため、磁場分布補正による分析電磁石でのエネルギー高精度測定法を考案した[5]。結果を、図3に示す。補正前は、分析電磁石の測定値( $E'$ )はTOF法の測定値( $E$ )より、1~2%低めとなっていたが、補正後は1%程度高めで収まっており、全体のばらつきも $\pm 1%$ から $\pm 0.5%$ と、小さくなった。

#### 3.3 ビームエネルギー幅計測技術の開発

既存の分析電磁石を用いて、高精度のビームエネルギー幅計測システムを開発した[5]。これは分析電磁石の上流側にマイクロスリット、下流側にも同様のマイクロスリット、アルミナモニタ、微少ビーム強度モニタを設置して、上流のスリットでオブジェクトサイズを制御するとともに、分析電磁石通過後のエネルギー分散したイメージサイズをマイクロスリットと微少ビーム強度モニタで測定するシステムである。

フラットトップ加速ビームを用いて、ビームエネルギー幅計測テストを実施した。両マイクロスリットギャップ1mmで、下流側マイクロスリット位置を

走査しながら透過ビーム強度分布を計測した結果、分解能は0.1%以下であることを確認した。

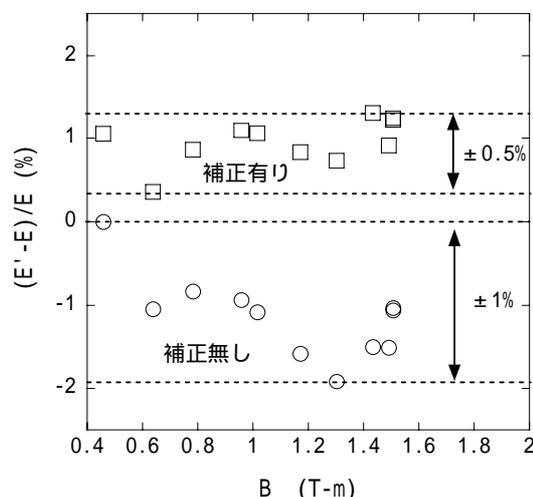


図3 分析電磁石でのエネルギー測定値に対する補正効果 (B: 磁場、 $r$ : 軌道半径(1m))

### 4. 点検保守整備・修理等

#### 4.1 イオン源の開発

原研AVFサイクロトロン装置には、主に $H^+$ ,  $D^+$ 生成用のMulti-cusp型イオン源、重イオン生成用のECRイオン源(OCTOPUS)および、金属イオン生成用のHECRイオン源の3台のイオン源が設置されている。これらイオン源から引き出されるビームは時間的に不安定であり、発熱やコイル電源の変動がその原因と考えられている。そこで全ての磁石を永久磁石で構成し、ビーム強度の高安定を目指したコンパクトなECRイオン源を開発し、現在試運転を実施している[6]。

#### 4.2 電源室空調・換気装置の改造

これまで電源盤からの高温排熱はそのまま室内に放散させていたため、電源室の室温が上昇し、電源類の不安定性を招く深刻な問題を引き起こしていた。このため、各電源盤の排気口近傍まで電源室換気空調用のダクトを延長し、高温の排気を室内にほとんど漏出しない構造に改造した。その結果、発熱量の大きな運転条件では約10%の室温上昇抑制効果が認められた。

#### 4.3 TMP回転翼の破損

加速器運転前の点検時に、ビームトランスポート系のTMP(600L/s)が異常停止しているのを発見した。内部観察を行ったところ94年6月にも発生した回転翼の破損が認められた。今回については幸いにも回転翼上部にある保護用メッシュ(3mm)に損傷はなく、大きな破損物はビームラインには飛散してい

なかった。TMPの真空フランジ用ボルトの大部分が緩んでいて簡単に手で回せる状態にあったことや、架台取り付けボルトも同様であったことから、異常振動がボルト緩みを増幅しTMP回転翼の破損に繋がったものと判断した。このためTMPの据え付け架台を剛性の高いものに交換して振動発生要因を除去するとともに、振動を絶縁するためビームラインとTMP間にベローズを挿入する等、真空排気機器の振動対策も実施した。

#### 4.4 シーケンサートラブル

軽イオンの高強度ビームを輸送中、ビームライン近傍にある真空機器の制御が不能となるトラブルが続発した。調査の結果、真空制御用シーケンサの異常が原因であり、再立ち上げでは復帰せず、制御プログラムの再インストールを行うことで正常に復旧することが分かった。この原因は、シーケンサの放射線照射に伴うソフトウェアの発生と予測された。また、TMPコントロールユニットおよびビームスキャナー電源等もビーム輸送中に停止するという現象も起きているが、これらは電源の一時的なOFF操作により正常に動作した。今後何らかの放射線対策（遮蔽、移設etc.）を強化する計画である。

### 5. 新ビーム開発

中心領域の改造にともないこれまで蓄積されているサイクロトロン運転パラメータを変更することが必要となった。このため、今までに加速されたほぼすべてのイオン種を対象に順次、マシンタイムの終了後ならびに休日等を利用して加速・ビームテストを継続的に実施し、新たに最適化した運転パラメータを作成することで実験利用執行に万全を期した。

また、ほぼ毎週月曜日には、ポジトロン放出核種 ( $^{52}\text{Fe}$ )生成の実験利用で、100MeV,  $^4\text{He}^{2+}$  (H=1) を供給してきた。しかしながら、RI生成量には大差がないこと、実験利用頻度の高い加速モード2に移行することで、変更回数を削減できること。ビームエネルギーが低下することで機器放射化や、放射線に伴うソフトウェア出現確率の低減にも繋がること、等の理由から新たに80MeV,  $^4\text{He}^{2+}$ の新ビーム開発を行った。このほか、核融合炉材料構成材料の放射化断面積測定の要望に応え、41MeV,  $^2\text{D}^+$ も新ビーム開発した。表1に原研AVFサイクロトロン装置で加速された合計66種類のイオン種一覧を示す。

表1 原研AVFサイクロトロン装置で加速されたイオン種

Ion species	Energy (MeV)	Beam (eμA)	Text (%)	Tail (%)	Ion species	Energy (MeV)	Beam (eμA)	Text (%)	Tail (%)
$\text{H}^+$	10	12	80	27	$^{16}\text{O}^{8+}$	430	0.005	M/Q=2	
	20	11.5	89	25	$^{20}\text{Ne}^{10+}$	75	1.5	M/Q=5	6.6
$\text{H}^+$	30	6.2	78	22	$^{20}\text{Ne}^{8+}$	125	0.01	M/Q=4	
	45	30	79	14	$^{20}\text{Ne}^{6+}$	120	1.6	53	18
	50	5	64	14	$^{20}\text{Ne}^{6+}$	200	0.80	Scaling	10
	55	5	63	14	$^{20}\text{Ne}^{7+}$	260	9.8	70	22
	60	5	68	22	$^{20}\text{Ne}^{8+}$	270	0.28	Scaling	14
	65	7	78	12	$^{20}\text{Ne}^{8+}$	350	1.5	63	26
	70	5	42	12	$^{20}\text{Ne}^{10+}$	540	10cps	M/Q=2	
	80	4.4	72	13	$^{22}\text{Ne}^{6+}$	165	0.007	M/Q=4	
	90	10	48	7.7	$^{36}\text{Ar}^{8+}$	195	2.5	73	13
	10	11	29	3.7	$^{36}\text{Ar}^{10+}$	195	0.1	43	1.2
$\text{D}^+$	20	5.6	80	16	$^{36}\text{Ar}^{18+}$	970	10cps	M/Q=2	
	25	15	88	31	$^{40}\text{Ar}^{8+}$	150	2.4	M/Q=5	6.2
	35	40	76	23		175	3.0	73	15
	41	3.4	80	16	$^{40}\text{Ar}^{10+}$	250	0.2	M/Q=4	
$\text{D}^+$	50	20	49	9.7	$^{40}\text{Ar}^{11+}$	330	0.7	86	22
$^3\text{He}^{2+}$	60	8.2	68	18	$^{40}\text{Ar}^{13+}$	460	0.045	76	24
$^4\text{He}^+$	25	3.6	M/Q=4	13	$^{40}\text{Ca}^{9+}$	200	2.0	61	11
	20	5.5	69	12	$^{56}\text{Fe}^{11+}$	200	1.4	M/Q=5	16
$^4\text{He}^{2+}$	30	10	42	10	$^{56}\text{Fe}^{15+}$	400	0.59	66	28
	50	20	86	22	$^{58}\text{Ni}^{15+}$	390	0.012	M/Q=4	
	75	6	81	7.5	$^{82}\text{Kr}^{20+}$	490	10cps	M/Q=4	
	80	6	65	9.2	$^{84}\text{Kr}^{17+}$	320	0.08	M/Q=5	5.0
$^4\text{He}^{2+}$	100	10	32	10	$^{84}\text{Kr}^{18+}$	400	0.04	60	2
	108	1.6	M/Q=2		$^{84}\text{Kr}^{20+}$	520	0.06	75	22
$^{12}\text{C}^{3+}$	75	2.0	M/Q=4		$^{84}\text{Kr}^{21+}$	525	0.0032	M/Q=4	
$^{12}\text{C}^{5+}$	220	1.0	77	22	$^{102}\text{Ru}^{18+}$	320	0.013	50	3.9
$^{12}\text{C}^{6+}$	320	0.037	M/Q=2		$^{129}\text{Xe}^{23+}$	450	0.2	72	14
$^{14}\text{N}^{3+}$	67	4	43	10	$^{197}\text{Au}^{31+}$	500	0.038	49	3.8
$^{15}\text{N}^{3+}$	56	0.70	M/Q=5	5.0	M/Q = 2, 4 and 5: Cocktail beams				
$^{16}\text{O}^{4+}$	100	5	M/Q=4	22	Color notation H=1 H=2 H=3				
$^{16}\text{O}^{5+}$	100	4	34	21	Text: サイクロトロン引き出し直後のFCでの電流との比。				
$^{16}\text{O}^{6+}$	160	1.9	58	21	Tail: サイクロトロンに入射する電流に対するサイクロトロン引き出し直後のFCでの電流との比。				
$^{16}\text{O}^{7+}$	225	1.0	82	13					
	335	0.1	41	6					

### 参考文献

- [1] K. Arakawa, et al., Proceedings of the 13th International Conference on Cyclotrons and their Applications, Vancouver, Canada, pp 119(1992)
- [2] 中村義輝、奈良孝幸、上松敬、石堀郁夫、他：第13回TIARA 研究発表会予稿集、pp32-33 (2004)
- [3] 倉島俊、福田光宏、宮脇信正、奥村進、他：第1回加速器学会報告集、(2004)
- [4] 宮脇信正、福田光宏、倉島俊、奥村進、他：第14回加速器科学研究発表会報告集、pp404-406 (2003)
- [5] 奥村進、福田光宏、倉島俊、宮脇信正、他：第13回TIARA 研究発表会予稿集、pp117-118 (2004)
- [6] 吉田健一、奈良孝幸、齋藤勇一、横田渉：第1回加速器学会報告集、(2004)