

## 理研 AVF サイクロトロン運転の現状報告

### STATUS REPORT OF THE OPERATION OF THE RIKEN AVF CYCLOTRON

小高 康照<sup>#, A)</sup>, 石川 盛<sup>A)</sup>, 小林 清志<sup>A)</sup>, 小山 亮<sup>A)</sup>, 柴田 順翔<sup>A)</sup>, 月居 憲俊<sup>A)</sup>, 仲村 武志<sup>A)</sup>, 西田 稔<sup>A)</sup>,  
西村 誠<sup>A)</sup>, 濱仲 誠<sup>A)</sup>, 福澤 聖児<sup>A)</sup>, 矢富 一慎<sup>A)</sup>, 坂本 成彦<sup>B)</sup>, 内山 暁仁<sup>B)</sup>, 奥野 広樹<sup>B)</sup>,  
影山 正<sup>B)</sup>, 加瀬 昌之<sup>B)</sup>, 上垣外 修一<sup>B)</sup>, 熊谷 桂子<sup>B)</sup>, 込山 美咲<sup>B)</sup>, 須田 健嗣<sup>B)</sup>, 中川 孝秀<sup>B)</sup>,  
長瀬 誠<sup>B)</sup>, 長友 傑<sup>B)</sup>, 福西 暢尚<sup>B)</sup>, 藤巻 正樹<sup>B)</sup>, 真家 武士<sup>B)</sup>, 山田 一成<sup>B)</sup>, 渡邊 環<sup>B)</sup>, 渡邊 裕<sup>B)</sup>,  
山家 捷一<sup>C)</sup>, 大城 幸光<sup>C)</sup>

Yasuteru Kotaka<sup>#, A)</sup>, Shigeru Ishikawa<sup>A)</sup>, Kiyoshi Kobayashi<sup>A)</sup>, Ryo Koyama<sup>A)</sup>, Junsho Shibata<sup>A)</sup>,  
Noritoshi Tsukiori<sup>A)</sup>, Takeshi Nakamura<sup>A)</sup>, Minoru Nishida<sup>A)</sup>, Makoto Nishimura<sup>A)</sup>, Makoto Hamanaka<sup>A)</sup>,  
Seiji Fukuzawa<sup>A)</sup>, Kazuyoshi Yadomi<sup>A)</sup>, Naruhiko Sakamoto<sup>B)</sup>, Akito Uchiyama<sup>B)</sup>, Hiroki Okuno<sup>B)</sup>,  
Tadashi Kageyama<sup>B)</sup>, Masayuki Kase<sup>B)</sup>, Osamu Kamigatio<sup>B)</sup>, Keiko Kumagai<sup>B)</sup>, Misaki Komiyama<sup>B)</sup>,  
Kenji Suda<sup>B)</sup>, Takahide Nakagawa<sup>B)</sup>, Makoto Nagase<sup>B)</sup>, Takashi Nagatomo<sup>B)</sup>, Nobuhisa Fukunishi<sup>B)</sup>,  
Masaki Fujimaki<sup>B)</sup>, Takeshi Maie<sup>B)</sup>, Kazunari Yamada<sup>B)</sup>, Tamaki Watanabe<sup>B)</sup>, Yutaka Watanabe<sup>B)</sup>,  
Shoichi Yamaka<sup>C)</sup>, Yukimitsu Oshiro<sup>C)</sup>

<sup>A)</sup> SHI ACCELERATOR SERVICE Ltd., <sup>B)</sup> RIKEN Nishina Center, <sup>C)</sup> CNS, the University of Tokyo

#### Abstract

Since RIKEN AVF cyclotron was commissioned in 1989, it has been operated not only as an injector for the RIKEN ring cyclotron but also as an independent supplier of low energy ion beams. In this report, we describe both the operational status and the improvement work for increasing accelerating ability of AVF cyclotron performed during August 2013-July 2014.

#### 1. はじめに

理研 AVF サイクロトロン (AVF) は 1989 年に理研リングサイクロトロン (RRC) の入射器として建設され 25 年間稼働し続けている。一方、単独の加速器として実験施設へのビーム供給も 1991 年から開始された。以下、前者を AVF-RRC、後者を AVF 単独と呼ぶ。

AVF-RRC で加速されたビームは理研仁科記念棟内の旧理研加速器研究施設 (RARF) に供給されてきた。2006 年前半までは AVF-RRC が主であったが、2006 年末からはウランビームなどの加速のため理研重イオン線形加速器 (RILAC) を RRC の入射器とした RI ビームファクトリー (RIBF) が開始された。それに伴い、RIBF と並行して実施される AVF 単独の割合が増加していった。2009 年 4 月からは AVF-RRC を前段加速器とした超伝導リングサイクロトロン (SRC) による軽イオン加速 (AVF-RRC-SRC) が開始され、RIBF 実験施設に供給されるようになった。

ここでは 2013 年 8 月から 2014 年 7 月までの AVF 運転状況を報告する。

#### 2. 加速実績

AVF は K 値 70MeV を有し、加速高周波の周波数帯域が 11.4 から 24MHz の共振器を用いてハーモニック数 2 で加速する。これらの性能と加速電圧の周波数特性による制限、イオン源で生成されるビームの比電荷から、原子核の質量数と価数に対して加速可能なエネルギーが決まる。AVF の加速実績を原子核の質量数と核子当たりのエネルギーの関係図

(Fig. 1)に示す。図中にはこれまでの加速実績のあるビームが全てプロットされている。先に述べた性能から決まる核子当たりのエネルギーをほぼ網羅しており、質量数で見ると陽子 (A/Z=1) から

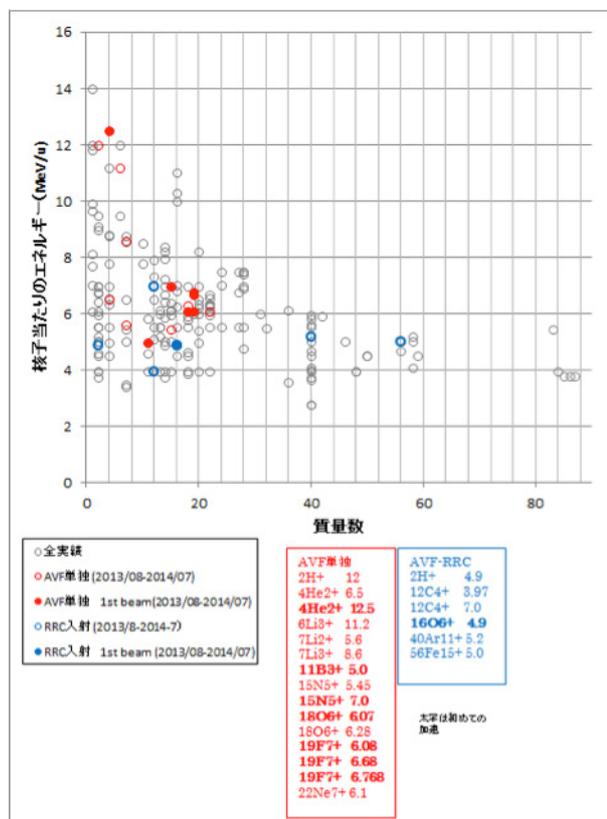


Figure 1: Energy-Mass map of AVF.

# ykotaka@riken.jp

$^{87}\text{Rb}(A/Z=4.35)$ まで、核子当たりのエネルギーで見ると 3.41 から 14MeV/u まで加速できている。2013 年 8 月から 2014 年 7 月までに加速したものに赤と青の色をつけてある。青は AVF-RRC、赤は AVF 単独を示し、中を塗った○は、今回初めて加速したものである。

対象期間の AVF-RRC(Fig. 1 中の青丸)は、6 種類のビーム(Fig. 1 の青枠内参照)を加速し、質量数では 2 から 56、核子当たりのエネルギーが 3.97 から 7.0MeV/u の範囲に分布している。初めて加速したビームは 1 種類(Fig. 1 の青枠内の太字)であった。

AVF 単独(Fig. 1 の赤丸)は、15 種類のビーム(Fig. 1 の赤枠内参照)を加速し、質量数では 2 から 22、核子当たりのエネルギーでは 5.0 から 12.5MeV/u の範囲に分布している。初めて加速したビームは 7 種類(Fig. 1 の赤枠内太字)であった。

### 3. 運転時間

AVF の運転時間を調整時間、供給時間、調整・供給中に発生した故障対応時間に分け、さらに供給時間を Fig. 2 で示す実験コースで分けて報告する。

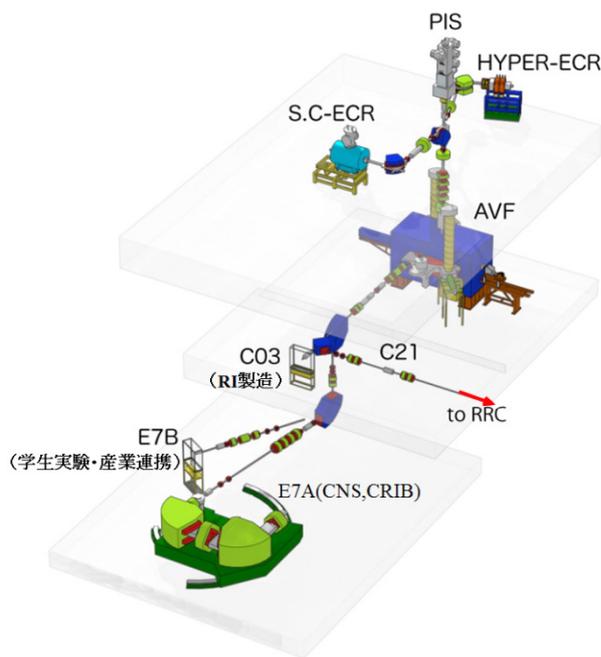


Figure 2: External view of AVF cyclotron with ion sources and BT lines.

AVF-RRC と AVF-RRC-SRC の場合、AVF から取り出されたビームは C21 コースに曲げられて RRC へ送られる。AVF 単独の場合は取り出されたビームが次の 3 つのコースに送られる。そのまま直進したところにある C03 コース(RI 製造)、鉛直下方向に曲げられ再度水平方向に曲げられる E7A コース (CNS CRIB<sup>[1]</sup>)、そして、E7A と同じ水平面にある E7B コース(学生実験、産業連携)。

Fig. 3a に AVF-RRC(RRC 供給)、AVF-RRC-SRC

(RIBF 供給) の場合、Fig. 3b に AVF 単独の場合の運転時間を示す。データ期間は、2006 年 8 月から 2014 年 7 月までとし、1 年毎で示す。両図の横軸は、その前年の 8 月からその年の 7 月までの期間を表している<sup>[2][3][4][5][6][7][8]</sup>。

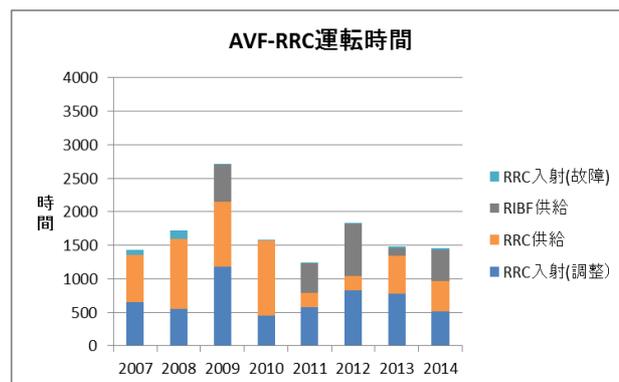


Figure 3a: Machine time of AVF-RRC/AVF-RRC-SRC.

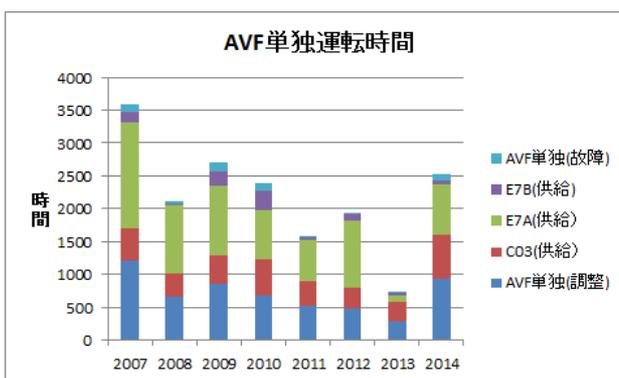


Figure 3b: Machine time of AVF alone.

2014 年の AVF-RRC の調整時間 (青) は 519.0 時間、故障対応時間(水色)は 27.3 時間で、RARE, RIBF への供給時間は各々 452.4 時間(橙)、454.8 時間(灰色)であった。ここ数年は 1500 時間程度で運転している。

2014 年の AVF 単独の調整時間 (青) は 943.6 時間、故障対応時間(水色)は 105.9 時間であり、また C03、E7A、E7B への供給時間は各々 658.2 時間(赤)、765.3 時間(緑)、55.6 時間(紫)であった。2014 年の運転時間は、2010 年程度に回復し、C03 の供給時間が増加している。尚、故障により中止または延期となったユーザーサービスはなかった。

### 4. 故障・不具合

故障・不具合は調整及び供給時間の両方に起こった事を対象としている。故障・不具合の割合は AVF-RRC で 1.9%、AVF 単独で 4.3%、全合計時間に対する両者の合計の割合は 3.5%であった。故障・不具合による停止時間が 3 時間以上のものを時間の多い順に Table 1 にまとめる。

故障対応時間として最も多いのはイオン源(Table 1 ①,⑤,⑩)で、特に生成が難しい  $^6\text{Li}^{3+}$  (11.2MeV/u)

Table 1: Contents, Time, Group, Date of Trouble  
The number on the end of left is arranged in order of time to recover from trouble.

	故障・不具合内容	復旧時間	分類	日付
①	HyperECR プラズマチェンバー確認	18.2	イオン源	2014/5/20 14:10
②	RF2トランジスタアンプ故障	12.2	RF	2013/8/30 9:00
③	真空悪化(CP温度30K超える)	9.2	真空	2014/2/12 8:45
④	RF2真空管交換	9.0	RF	2014/2/27 9:00
⑤	Hyper Li試料確認し補充	8.8	イオン源	2014/5/17 10:35
⑥	RF2 不安定につき調査	6.5	RF	2013/8/1 13:00
⑦	冷却水ポンプ漏電トリップ	4.9	冷却	2013/10/7 16:59
⑧	サイクリングエラー(設定値されない)	4.8	制御	2013/7/31 9:20
⑨	デフレクター暗電流大。クリーニング	4.5	入取	2013/8/30 16:00
⑩	Hyper Li試料確認 補充 調整	3.9	イオン源	2014/5/20 9:07
⑪	RF2 plate電流,transistor amp不安定	3.7	RF	2013/7/31 14:30
⑫	SCECRノイズ 電源落ちる	3.7	イオン源	2013/9/1 16:15
⑬	デフレクター暗電流大。クリーニング	3.0	入取	2014/7/18 16:30

加速時に起こった。

${}^6\text{Li}^{3+}$ イオンビームは、坩堝に入れた金属 Li を ECR プラズマで加熱し、その蒸気をイオン化して生成される。この Li 蒸気量の制御は容易ではないが、現在は坩堝の位置、Li 蒸気の噴出口の数、径の最適化が進み、制御できるようになってきている<sup>[9]</sup>。

不具合は Li 試料の消費率(35mg/h)が実績(13mg/h)より高かったことにある。このため 2014 年 5 月 17 日に Li の補充とイオン源、AVF 調整に 8.8 時間 (Table 1⑤)を要した。また 5 月 20 日には Li 補充、イオン源、AVF 調整に 3.9 時間 (Table 1 ⑩)かかったが、ビームは要求強度に達せず、この 1 時間後にプラズマチェンバー内の確認、清掃、復旧(11.4 時間)、イオン調整等(6.8 時間)で、合計 18.2 時間 (Table 1 ①)を費やした。

この①の時間がかかった理由は試料がプラズマチェンバー内に積層した事にある。これはホットライナー (試料を再蒸発させるためにプラズマチェンバー内に挿入した金属の筒) の固定ネジが溶け、ホットライナーが冷却されたプラズマチェンバーに触れ、Li が再蒸発されずに残ったためと考えられる。さらに坩堝が積層した Li に固着していた。

この積層原因は、AVF 取出ビームをモニターにしてイオン源を調整する事にある。A/Z が 2 の  ${}^6\text{Li}^{3+}$ イオンビームはイオン源ではなく AVF で分析するからである。そして AVF 取出ビーム強度を維持する際は、イオン源の引出電流を指標にしながらいオン源を調整する。この時、イオン源パラメーターを調整し、引出電流が適当な値になったとしても AVF の取出ビームは増えないことがある。この際、Li 蒸気量を過度に増やし、蒸気が適量を超え、Li の 1、2 価のイオン量を増やし、3 価のイオン量が減少したと考えられる。こうなると AVF 取出ビーム量は減るので、ビーム量を増やすために、さらにイオン源を調整する。この結果 Li 蒸気量は増加し、試料の積層が起こったと考える。これに加えてライナーに残った多量の Li 試料の再蒸発により、さらに 3 価の生成が抑制されたと考える。

この対策として、イオン源内で  ${}^6\text{Li}^{3+}$ イオンの存在量を直接測定する方法は有効である。現在、イオン源から取り出されるイオンビーム強度は、プラズマ

チェンバー内のプラズマ光の分光によって価数ごとに励起光を捕らえた光強度と比例することが分かっている<sup>[10]</sup>。この実用化によりプラズマ内で、Li の価数ごとの分析ができ、 ${}^6\text{Li}^{3+}$ イオン調整の最適化の指標が得られ、試料積層の問題が緩和されると期待する。

高周波系 (Table 1 ②, ④, ⑥, ⑪) は No1 (RF1) と No2 (RF2) の 2 台のうち、今回は全て RF2 で起こった。高周波電圧が不安定になる時があり、同時にプレート電流が過電流となり高周波が OFF になる症状であった。トランジスタアンプ、真空管、コンペンセータ駆動系と様々に調べ、RF1 に比較して自動同調装置 ON 時のコンペンセータの動きが大きかったことが分かった。この調査のために合計 31.4 時間を費やした。アンプのパラメーターの調整により、症状はある程度緩和された。2014 年 4 月に漏水のためコンペンセータの位置検出用ポテンシオメータに水がかかっているのを見つけた。漏水はコンペンセータの駆動軸を固定しているネジが緩んだために起きた。ネジを増し締めすることにより漏水は止まった。そしてポテンシオメータを交換すると RF2 の電圧不安定は収まった。結局は、このポテンシオメータの不具合が原因であった事が分かった。

真空 (Table 1③) は 9.8 時間を費やしている。AVF の真空漏れは 2009 年から継続的に起こっている<sup>[4]</sup>。メインコイルに通電して磁場をかけることにより真空漏れが止まり、決定的に真空悪化にはいたらない程度であった。その後の真空漏れの調査により加速箱の下側と磁極の間の真空シールに漏れが見つかったため、その O リングの交換を 2011 年 7 月に行った<sup>[6]</sup>。一時的には真空が改善したが、再び真空漏れが起こったため調査を行った。2012 年 3 月にはトリムコイルのフィードスルーからの真空漏れを発見し、ナットの増し締めにより漏れは止まった<sup>[7]</sup>。しかし、2013 年 2 月に真空悪化が再発したため調査すると、高周波系 RF1、RF2 の共振器の絶縁碍子の真空シールからの漏れを発見した。この時は RF2 のみ O リングの交換をした<sup>[8]</sup>。RF1 の真空漏れは微量であり、今後のメンテナンス期間に回す事にした。これらにより真空は  $1 \times 10^{-5} \text{Pa}$  程度に改善した。しかし 2014 年 2 月 12 日に運転開始しようとしたところクライオポンプの温度が 30K に上がっているのを見つけた。クライオポンプを停止し、温度を常温まで上げ、再度起動した。真空引きが完了するまで 9.25 時間かかった。やはり磁場をかけることで真空が維持できる状態であった。そして、現在もその状態が継続している。

## 5. 改良

イオン源から AVF への入射効率を上げ、また取出効率を上げる事を目的とし、診断系の改良を進めている。2011 年 9 月から入射、12 月からは取出ビームのエミッタンス測定を開始した。既存の単スリット駆動機器を使用し、スリットを通り抜けたビームの角度をプロファイルモニターで測る方法を採用した。また同時期にビームビューワを入射ビー

ムトランスポートラインに設置し、ビューワに映ったビームの画像を解析し、ビーム形状を分析する。

入射についてはエミッタンスデータとビューワデータを用い、取出についてはエミッタンスデータのみを用いて分析することになった。測定を進めていくうちに2つの改良すべき点考えた。一つには入射エミッタンス測定は単スリットを2mm 間隔で200mm 動かす必要があり、既存の駆動機器では15分ほどかかり、測定時間が長いこと。もう一つは、入射 BT にはソレノイドコイルがあり、水平方向(位置を  $x$ , 角度を  $x'$  とする)と鉛直方向(位置を  $y$ , 角度を  $y'$  とする)が混ざるため、輸送行列は4次元( $x, x', y, y'$ )となることである。既存のエミッタンス測定では水平と鉛直は独立に測定されるので両者の混じりはわからない。様々な方法があると思うが、4次元の同時測定の必要性及び測定時間の短縮を考えた結果、ペッパーポットエミッタンス測定方法<sup>[11]</sup>を進めることにした。

ペッパーポットは既存の1/10アッテネータを使用した。これは直径0.357mmの円形の穴が1mm間隔に並んでいる。これに2mm間隔に直径1mmの穴を開けたマスクをかぶせ、直径0.357mmの円形の穴が2mm間隔に空いたペッパーポットにした(Fig. 4)



Figure 4: Left: 1/10 attenuator(each distance of hole is 1mm), right: mask(each distance of hole is 2mm).

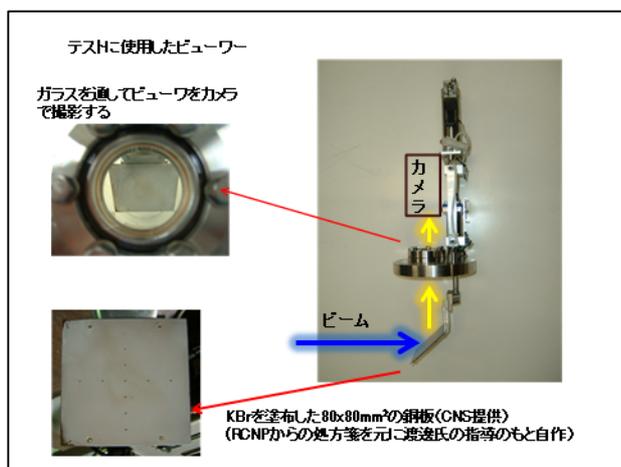


Figure 5: Screen system.

ペッパーポットを通ったビームを映すスクリーンは臭化カリウム(KBr)を塗布した銅板を使用した(Fig. 5左下の写真)。これを Fig. 5の右側の写真に示した

駆動機器に取り付ける。スクリーンはビームに対して45度傾けてあり、駆動機器のフランジに取り付けた窓(Fig. 5左上写真)から見えるようになっている。この窓を通して画像を取得する。

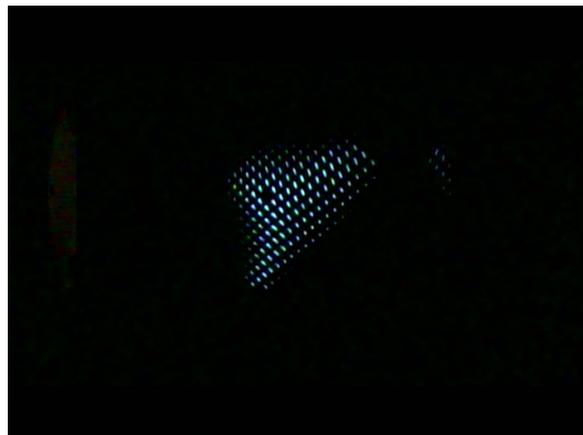


Figure 6: Image of pepper pot.

これらのペッパーポット、スクリーンの組み合わせ機器を用いてテストした。HyperECR から10kVで取り出した陽子95μAをペッパーポットに通して得た画像を Fig. 6に示す。ペッパーポットとスクリーン間距離は65mmにして照射したところ、ペッパーポットの像が良く分離した。各穴の像の形状は、円では無く様々な構造を持つことも分かる。

この Fig. 6の画像を処理して、ペッパーポットとスクリーンのアライメントを取り、さらに上流のプロファイルモニターと比較したところ、ある程度的一致を見た。そこで水平、鉛直エミッタンスを求めたものを Fig. 7に示す。

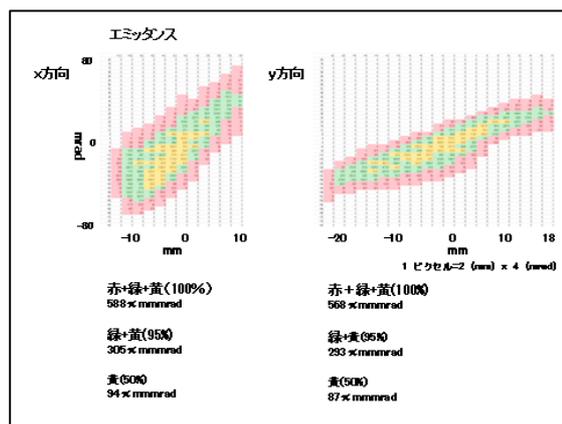


Figure 7: Left: horizontal emittance, right: vertical emittance.

エミッタンスの図は赤で囲まれた部分が100%、緑が95%、黄が50%を示しており、単位はmm·mradである。水平方向エミッタンスは100%が588、95%が305、50%が94、鉛直方向は100%が568、95%が293、50%が87であった。今後の課題は信頼性の向上、測定から処理までの自動化を進めていく

予定である。

次に入射効率の評価法も見直すことにした。これまで、AVF の直上にあるファラデーカップ (FC\_I36 ) のビーム電流値に対する「AVF に入射してから 1.5 周目にあるラジアルプローブ」のビーム電流の比を取っていた。この場合、入射バンチャーの効果、インフレクターの効果、加速電圧、位相スリットによる影響が含まれる。インフレクター単体の通過効率を得るため、インフレクターでビームを止め、そこに当たったビーム電流値を測定し、FC\_I36 との比をとることにした。この時、インフレクターにかける高電圧電源と電流計との切り替えをする必要がある。そこで遠隔操作できる切り替え装置を使用し、容易に測定できるようにした。今後はインフレクターでのビーム電流値の信頼性の評価を行う予定である。

## 6. まとめ

2013 年 8 月から 2014 年 7 月までの理研 AVF サイクロトロン の 運 転 状 況 について 報告 した。故障による停止時間の割合は低くはないが、おおむねユーザーの要求を満たすことができた。 ${}^6\text{Li}^{3+}$  の加速に不具合はあるが、対策方法も見えてきた。真空悪化問題については調査を進めて復旧していく。そしてビーム量の増強のため新たな診断系の導入を進めている。

## 参考文献

- [1] Y.Yangisawa et al., Nucl.Instrum.Meth. A539 (2005) 74-83
- [2] Y.Kotaka et al., Proceedings of the 4th PASJ Meeting in Japan, WP11(2007)
- [3] M.Nishida et al., Proceedings of the 5th PASJ Meeting in Japan, WP056(2008)
- [4] S.Fukuzawa et al., Proceedings of the 6th PASJ Meeting in Japan, TPOPA19(2009)
- [5] H.Imao et al., Proceedings of the 7th PASJ Meeting in Japan, FSRP20(2010)
- [6] H.Imao et al., Proceedings of the 8th PASJ Meeting in Japan, MOPS006(2011)
- [7] J.Shibata et al., Proceedings of the 9th PASJ Meeting in Japan, WEPS003(2012)
- [8] N.Tsukiori et al., Proceedings of the 10th PASJ Meeting in Japan, SUP013(2013)
- [9] Production of beams from solid materials at CNS ECR ion source, Y.Ohshiro et al., Review of Scientific Instruments, 85 (2014) 02A912.
- [10] Plasma spectroscopy of metal ions for Hyper-ECR ion source, H.Muto et al., Review of Scientific Instruments, 85 (2014) 02A905.
- [11] T.Hoffmann et al., Proc. 9th BIW 2000, Cambridge, USA, PP.432-439