

## STATUS OF CENTER FOR ACCELERATOR AND BEAM APPLIED SCIENCE OF KYUSHU UNIVERSITY

Nobuo Ikeda<sup>1,A)</sup>, Yujiro Yonemura<sup>A)</sup>, Hidehiko Arima<sup>A)</sup>, Kenji Ishibashi<sup>A)</sup>, Tetsuo Noro<sup>B)</sup>, Genichiro Wakabayashi<sup>A)</sup>,  
Takashi Teranishi<sup>B)</sup>, Tomotsugu Wakasa<sup>B)</sup>, Hidenobu Takase<sup>A)</sup>, Shunsuke Mochizuki<sup>A)</sup>, Takashi Matsunaga<sup>A)</sup>,  
Tatsuya Fujinaka<sup>C)</sup>, Tomoki Suetake<sup>A)</sup>, Norio Daijo<sup>A)</sup>, Tadashi Korenaga<sup>A)</sup>, Tadahiko Hasuo<sup>A)</sup>, Akira Takagi<sup>D)</sup>,  
Hisayoshi Nakayama<sup>D)</sup>, Sadayoshi Fukumoto<sup>D)</sup>, Yoshitaka Kimura<sup>D)</sup>, Yoshiharu Mori<sup>E)</sup>, Takio Tomimasu<sup>F)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Applied Quantum Physics and Nuclear Engineering, Kyushu University

744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 810-0395

<sup>B)</sup> Department of Physics, Kyushu University

6-10-1 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581

<sup>C)</sup> Department of Energy Science and Engineering, Kyushu University

744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 810-0395

<sup>D)</sup> High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

<sup>E)</sup> Research Reactor Institute, Kyoto University

2-1010 Asashiro-nishi, Kumatori, Osaka, 590-0494

<sup>F)</sup> SAGA Light Source

8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005

### Abstract

The first stage building of a new accelerator facility of Center for Accelerator and Beam Applied Science has been built on Ito Campus of Kyushu University. The 150 MeV FFAG accelerator has been transferred from KEK to Ito Campus as a main accelerator of the facility. Beam commissioning of the injector cyclotron has successfully been performed in October 2008. The reconstruction of the 150 MeV FFAG is now in progress and the beam commissioning is about to be started. A tandem accelerator is planned to be introduced as a new injector for the FFAG.

## 九州大学FFAG加速器施設の整備状況

### 1. はじめに

九州大学では、KEKより移設した150 MeV FFAG加速器を主加速器とする、加速器・ビーム応用科学センター施設を伊都キャンパスに建設中である<sup>[1]</sup>。本施設の建設計画は以下のように伊都キャンパスへの移転スケジュールに合わせて立てられている。まず工学系の移転に合わせて平成19年度に本施設の第1期建屋を建設し、さらに平成26年に予定されている理学系の移転に合わせて第2期建屋を建設することにより、2段階で本格的な加速器共同利用施設とする計画である。

同施設第1期の建設及びFFAG加速器の移設については前回の学会で報告したので<sup>[2]</sup>、本論文では前回の学会報告後の施設の整備の状況、FFAG加速器の要素開発、今後の加速器及び施設整備計画について主に記述する。

### 2. 施設整備の経緯

新施設第1期建屋は、FFAG加速器移設に合わせ平成20年3月半ばまでに完成させる予定のもと、平成19年8月に建設が始められた。しかし建設に遅れが生じ、加速器電磁石は平成20年3月に無事本体室に搬入できたものの、電源室等の施工はこの時点では間に合わず、KEKより移送した電源類及び非放射化周辺部品の多くは第2期建屋建設予定地に新たに建てた仮設倉庫に一時的に保管せざるを得なかった。電源室等の施工、外環工事は最終的には約4ヶ月遅れ、平成20年年7月にまで建屋の引渡しが行われなかった。

建屋引渡しを受けた直後より、満を持して、仮設倉庫から電源室への電源移設、FFAG電磁石ベースプレートの補修、加速器アライメントの準備作業等、加速器整備に向けた作業を開始した。加速器は2年足らずKEKのテントハウスに保管されていたため、まず補修が必要か否か点検を行う必要があると

<sup>1</sup> E-mail: nikeda@nucl.kyushu-u.ac.jp

判断した。FFAGについては外見検査に留め、入射器として150 MeV FFAGとともに譲渡いただいたベビーサイクロトロン（ベビーサイクロトロン）のビームコミッショニングを当面の最優先項目とすることとした。FFAG電磁石はベースプレートおよび電磁石架台脚にかなりの錆が認められ、ベースプレート補修を平成20年8月に行い、サイクロトロン（サイクロトロン）のビームコミッショニング終了後に脚の補修を行うこととした。幸いなことに、FFAG電磁石本体には大きな補修の必要性は認められなかった。

同年9月にサイクロトロン（サイクロトロン）の製造元である（株）日本製鋼所、及び（株）太田エレクトロニクスとサイクロトロン（サイクロトロン）の内部点検を行い、大きな支障はないことを確認した（図1）。いくつかの微細な補修の後、仮配置、仮配線のもと（図2）、翌10月に両社とともにビーム加速試験を実施し、ビームの加速・取り出しを確認した。RFを繰り返し100 Hz、duty 20%で運転したとき、3 MeVから10 MeVまでの加速・取り出し効率は30%であり、サイクロトロン（サイクロトロン）から引き出されたビームの平均強度は1  $\mu$ Aであった。これはKEKでの使用時のパフォーマンスを再現するものである。



図1：入射サイクロトロン内部点検



図2：サイクロトロン仮配置・仮配線

サイクロトロン（サイクロトロン）制御系の整備等の後、平成20年1月より、FFAG電磁石（FFAG電磁石）架台脚の補修、ベースプレート（ベースプレート）取り付け、電磁石（電磁石）の粗据え置きを順次実施した。また、電源室（電源室）、加速器制御室（加速器制御室）と加速器本体室（加速器本体室）を結ぶ地下ピット（地下ピット）内の本格配線（本格配線）を実施した。現在、加速器（加速器）アラインメント（アラインメント）のための基準点（基準点）を床（床）に設置する作業を進めており、間もなく0.2 mm（0.2 mm）の精度（精度）を目指したFFAG電磁石（FFAG電磁石）詳細据付（詳細据付）作業に入る予定である。

### 3. 加速器要素の開発

FFAG加速器（FFAG加速器）は、KEK（KEK）において繰り返し100 Hz（100 Hz）での加速（加速）に成功後、平成18年5月（平成18年5月）より平成20年3月（平成20年3月）までKEK（KEK）のテントハウス（テントハウス）に保管（保管）され、九州大学（九州大学）への移設（移設）後は未だ再組上げ（再組上げ）の途上（途上）であるため、全系（全系）としては3年（3年）余り（余り）稼働（稼働）はしていない。しかしながら、加速器（加速器）開発研究（開発研究）を留め（留め）てはならず、KEK（KEK）の大学等（大学等）連携（連携）支援事業（支援事業）の支援（支援）を得、要素開発（要素開発）を積極的に進（進）めている。主な開発要素（主な開発要素）は、高効率（高効率）冷却システム（冷却システム）を備えた加速空洞（加速空洞）、取り出し（取り出し）効率100%（100%）の実現（実現）のためのビーム（ビーム）取り出しキッカー（取り出しキッカー）、及び大口（大口）径（径）非破壊型（非破壊型）ビーム（ビーム）モニター（モニター）の3つ（3つ）である。加速空洞（加速空洞）開発（開発）については前回の学会（前回の学会）にて報告（報告）している（報告）ので<sup>[3]</sup>、ここでは後者（後者）2つ（2つ）について簡単に紹介（紹介）する。

#### 3.1 ビーム取り出しキッカーの開発

先述（先述）の通り（通り）、FFAG加速器（FFAG加速器）はKEK（KEK）においてビーム（ビーム）の加速（加速）・取り出し（取り出し）に成功（成功）しているが、実現（実現）されている取り出し（取り出し）効率は約90%（約90%）であり、FFAG加速器（FFAG加速器）の特長（特長）である大強度（大強度）ビーム（ビーム）の実現（実現）の際（際）、10%（10%）のビーム（ビーム）損失（損失）が放射線（放射線）管理（管理）上（上）問題（問題）となる（なる）可能性（可能性）が高い。

ビーム（ビーム）の損失（損失）はキッカー（キッカー）電磁石（電磁石）励磁（励磁）の立ち上がり（立ち上がり）時間（時間）が遅い（遅い）ことに起因（起因）している（している）ことがわかって（わかって）いる。そこで、図3（図3）に示す（示す）ように、キッカー（キッカー）電磁石（電磁石）を3分割（3分割）し、並列（並列）に電流（電流）を流す（流す）ことによりインダクタンス（インダクタンス）を下げ（下げ）、早い立ち上がり（早い立ち上がり）を実現（実現）するキッカー（キッカー）電磁石（電磁石）を新たに設計（設計）、製作（製作）した。また、1台（1台）の電源（電源）を用いる（用いる）と3倍（3倍）の供給電流（供給電流）が必要（必要）になる（なる）ことを受け、新たに電源（電源）を設計（設計）、製作（製作）した。電磁石（電磁石）の試験（試験）、電源（電源）のダミー（ダミー）試験（試験）を実施（実施）し、それらの結果（結果）を取り入れたシミュレーション（シミュレーション）により、取り出し（取り出し）効率100%（100%）が達成（達成）できる（できる）という結果（結果）を得（得）ている。



図3：新たに開発したビーム取出しキッカー電磁石

### 3.2 大口径非破壊型ビームモニター

FFAG加速器では加速粒子の軌道は平均半径4.47 mmから5.20 mまで変化する。そのため、ビームモニターはビーム軌道半径領域を一度にカバーする0.73 m以上の口径を持つことが望ましい。

現在、図4(a)に示すように5つの三角電極板で構成されるビームモニターを想定し、基礎試験を進めている。単純に考えれば、三角電極板3つの角が集まる領域は分解能が悪くなると懸念される。そこで図4(b)に示す試験機を製作し、銅線を用いた模擬ビームテストを行った。その結果、電極板間をビームが通らない領域でも電圧が誘起されることにより、問題とした領域でもビーム位置を問題なく同定できることがわかった。この結果に基づき、実機の製作に取り掛かっているところである。

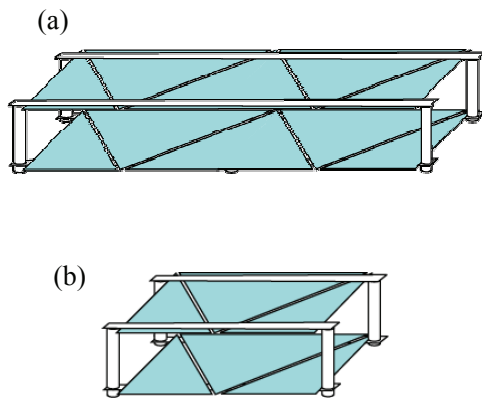


図4：ビームモニター実機(a)及び試験機(b)のデザイン

## 4. 入射器としてのタンデム加速器の利用の検討

当面、移設したサイクロトロンを入射器として用い、FFAG加速器開発研究ならびにビームを用いた基礎研究を進める予定であるが、ビームの大強度化、加速ビーム種の拡大を考えると、新たな入射器の導入が不可欠である。重イオン入射器としては、理学研究院移転に合わせ導入予定の小型タンデム加速器を用いる計画である。

タンデム加速器を陽子入射器としても利用することを想定すると、FFAG加速器での陽子出射エネルギーはタンデム加速器のターミナル電圧の12.5倍であり、150 MeV陽子を得るには6 MV以上のターミナル電圧が必要である。また、タンデム加速器は直流加速器であるため、大ビーム電流をFFAG加速器で得るには、高ピーク電流パルスイオン源の開発とタンデム加速器のパルス運転開発が必要不可欠である。

重イオン加速の場合、FFAG加速器における加速パラメータは陽子12 MeV入射相当で表1に示す通りであり、重イオン加速に合わせたRf周波数帯域での運転を行う必要がある。また、タンデム加速器から取り出されたビームをFFAG加速器に入射する際に荷電変換を行う必要があり、タンデム加速器ターミナルでの荷電変換を含め、2度電荷の選択を行うこととなる。<sup>10</sup>Bから<sup>79</sup>Brまでタンデム加速器で加速される代表的な核種について、ターミナル電圧をパラメータとし、FFAG加速器で得られる重イオンビームのエネルギー及びcharge fractionの積を図5に示した。この評価では、FFAGの磁場は陽子9 MeV~12 MeV相当であるという制限を入れて評価している。この図から明らかのように、軽重イオンについては、陽子と同様、6 MV以上のターミナル電圧の実現が望ましい。

表1：FFAG加速パラメータ

FFAG	陽子	重イオン ( ${}^A X^{q+}$ )
E/A (MeV/u)	12 → 150	$12 \left(\frac{q}{A}\right)^2 \rightarrow 160 \left(\frac{q}{A}\right)^2$
周回 (MHz)	1.6 - 4.6	$1.6 \left(\frac{q}{A}\right) - 5.7 \left(\frac{q}{A}\right)$
繰り返し (HZ)	100	100

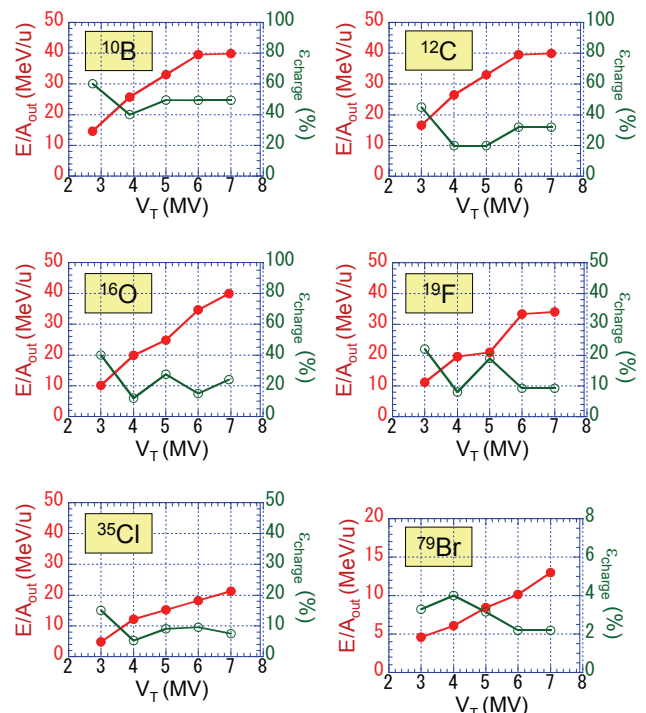


図5：タンデム+FFAG加速で得られる重イオンビームのエネルギーとcharge fraction

## 5. 今後の整備計画

第1期建屋は加速器本体室がメインであり、ビーム利用実験室の設置は平成26年に予定されている理学系のキャンパス移転に合わせた第2期建屋建設を待たねばならない。図6に施設の全体計画図を示す。

しかしながら照射実験や基礎開発実験等、この環境で出来る限りの研究を推進し、また九州地区のユーザーの要望に出来る限り応え、第2期以降の発展につなげていきたいと考えている。もちろん、本格的加速器施設に相応しい加速器へとFFAG加速器を開発していくことが研究の重要な柱の一つとなる。

## 参考文献

- [1] 池田伸夫, その他, “九州大学FFAG加速器施設の建設”, 加速器 **5**, No.4, 310-317, 2008.
- [2] 池田伸夫, その他, “九州大学加速器・ビーム応用科学センターの現状”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Higashihiroshima, Japan, Aug. 6-8, 2008, URL: [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj5\\_lam33/contents/PDF/WO/WO10.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/WO/WO10.pdf).
- [3] 高瀬英伸, その他, “九州大学FFAG加速器の加速空洞の開発”, Proceedings of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, and the 33rd Linear Accelerator Meeting in Japan, Higashihiroshima, Japan, Aug. 6-8, 2008, URL: [http://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj5\\_lam33/contents/PDF/WP/WP059.pdf](http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/WP/WP059.pdf).



図6：九州大学加速器・ビーム応用科学センター全体計画図