

会議報告

## FFAG 2016 会議報告

上杉 智教\*・石 禎浩\*

Report on FFAG Workshop 2016

Tomonori UESUGI\* and Yoshihiro ISHI\*

### 1. はじめに

国際ワークショップ FFAG 2016 に参加した。このワークショップは、近年の FFAG (Fixed-Field Alternating Gradient) 加速器の発展を受けて、2000 年より継続的に年一回開催されており、扱うテーマはビームダイナミクス、ハードウェア、計算機コード、さらに物理、医療、原子力、産業への応用など、多岐にわたる。

近年では、Cyclotron conference にあわせて近場の会場で開催されることが多く、また会議に先立って学生を対象としたスクールが行われるこ

とが定番となっている。

2016 年は 9 月 6 日から 9 日にかけてロンドンインペリアル大学において開催され、総勢 31 名の参加者がのべ 33 の発表をした。また、会期中にはラザフォード研究所 (RAL) の加速器施設の見学ツアーが行われた。

### 2. 会議報告

会議はカレッジ中庭にそびえ立つクイーンズタワーのそばにあるスケムプトンビルディングという建物で行われた。参加人数が少ないため、コンパクトなレクチャールームでのセッションであった



写真 1 インペリアル大学内クイーンズタワー前にて集合写真

\* 京都大学原子炉実験所 Kyoto University Research Reactor Institute  
(E-mail: ishi@rri.kyoto-u.ac.jp)

が、それも功を奏して活発な議論がなされた。例年のことながら、トークの途中でも質問やコメントが飛び交い、しばしば白熱したバトルとなることもあった。

## 2.1 稼働施設の現状報告

通例として、最初のセッションは稼働中のFFAG 加速器施設の現状報告から始められる。現在稼働中のFFAG 加速器施設は、京都大学原子炉実験所に設置されたADS (加速器駆動システム) 基礎実験をはじめとしたビーム利用施設と九州大学伊都キャンパスに設置された多目的ビーム利用施設の2施設であり、どちらも最大エネルギー150 MeVの陽子シンクロトロンである。今回のワークショップでは九大がスケジュールの都合により(原子力学会のホスト)不参加であったため、京大原子炉からの報告のみとなり、ビーム強度増強に向けたビームスタディーの結果報告と昨年発生した入射器(RFQ)トラブルの報告がなされた。稼働しているマシンが少ないため、ビームスタディーの結果は参加者にとって興味深く、ディスカッションが長引き、なかなか終わらせてもらえない。興味の対象は主に加速途中のビームロスの原因とチューン変動の関係であった。

## 2.2 将来計画

FFAG を用いる可能性のある大規模施設の具体的な将来計画として、現在CERNおよびBNLでそれぞれ推進されているLHeCおよびeRHIC<sup>1)</sup>があげられる(図1)。これらは、陽子またはイオンビームと電子の衝突型加速器で、どちらも電子ビームを加速するためにERLを用いる提案がなされている。ERLはアーク部でエネルギーの異なるビームを同じ角度だけ偏向させる必要があり、FFAGのラティスはこのような目的に都合がよい(図2)<sup>2)</sup>。

また、eRHICに向けたERLの加速器テスト施設CBETA(The Cornell-BNL FFAG-ERL Test Accelerator)建設の計画がコーネル大学・BNL共同で進められている。この加速器が建設されれば、世界初のFFAGラティスを用いたERLとなる。これらの施設に関連する発表は6件におよんだ。

## 2.3 ビーム物理関連

ビーム物理のセッションでは、速い共鳴横断による振幅増大、FFAGのスケーリング係数の非対称によるチューンへの影響、荷電変換入射に伴う



写真2 会場入口でも白熱した議論が交わされた

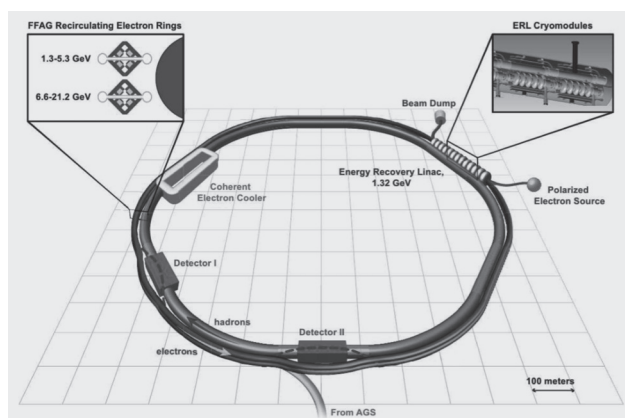


図1 FFAGラティスとERLを用いたeRHICの概観

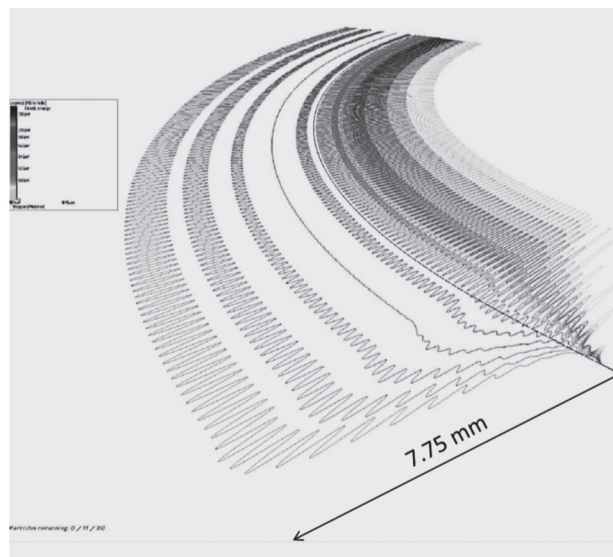


図2 eRHICでアーク部の異なるエネルギーのビームが直線部でマージされる様子

エミッタンス増大、空間電荷効果などについて、主にトラッキングを用いた成果報告がなされた。また、機能結合磁石のFRINGEフィールドの取扱いなど、トラッキング自体についても報告がみら



れた。さらに、Paul Trap を用いた共鳴横断の実験結果も紹介された。同様の trap が RAL にて開発中である (図 3)<sup>3)</sup>。

## 2.4 要素技術開発

FFAG のメインマグネットは DC 磁場で運転される。そのため、永久磁石で収束系を作ることができる。BNL の S. Brooks 氏らによる Halbach 型の永久磁石による FFAG 電磁石の開発の報告は興味深かった。この電磁石は CBETA と同じ、20 ~ 80 MeV という 4 倍のエネルギー範囲をカバーする non-scaling FFAG ビームライン用として研究開発されている。一般化された Halbach 構造を用いることにより、non-scaling のみならず、scaling FFAG の磁場分布も実現できるようである (図 4)<sup>4)</sup>。また、鉄のワイヤーシムを用いることにより、磁場精度を  $1 \times 10^{-4}$  まで高めることが可能となる。面白いことに Magnet holder は 3D プリンターで製作されている。

## 2.5 医療応用

がん治療用の加速器として FFAG を用いた応用に関して、陽子リング 1 件 (S. Tygier), ヘリウムリング 2 件 (J. Taylor, C. Johnstone), 陽子/炭素ガントリー 1 件 (D. Trbojevic) のいずれも feasibility study の報告があった。陽子リングについては、治療のほかに陽子画像診断 (pCT) も視野に入れ、350 MeV をターゲットにしている。常伝導電磁石を用いたレーストラック型で周長は約 70 m となる。

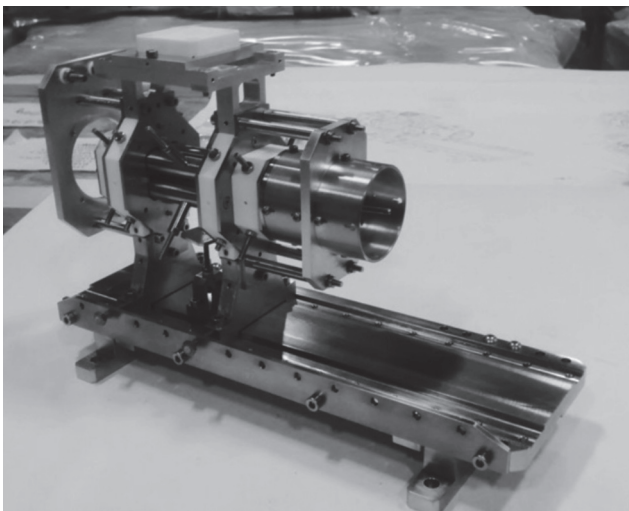


図 3 RAL にて開発中の IBEX-Trap

ヘリウムビームは下記のような利点がある。

1. 陽子に比べ、よりシャープなブラッグピークが得られ、かつ散乱が少ない。
2. 炭素ビームでは治療に必要なエネルギーが 400 MeV/u であるのに対し、ヘリウムの場合は 250 MeV/u でよい。
3. 炭素ビームに比べ、フラグメンテーションの影響が少ない。

ヘリウムリングの場合もイメージングを視野に入れ 330 MeV/u をターゲットにリングの設計がなされている。2 件の設計例とも 2 リングによるシステム構成となっている。

ガントリーに関しては、永久磁石や超伝導電磁石を用いた様々な挑戦的な設計が紹介された。例として、炭素ビーム 200 MeV/u から 400 MeV/u の範囲で磁場を変えずに輸送できるガントリーの設計例を図 5 に示す<sup>5)</sup>。

## 2.6 セミナー

二日目の午後は、バスで片道 2 時間ほどの RAL (ラザフォード研究所) へ移動し、ISIS の施設見学と森義治氏によるセミナーが行われた。

セミナーでは、前半は FFAG の歴史、特徴、最近の発展や成果などがわかりやすく紹介され、後

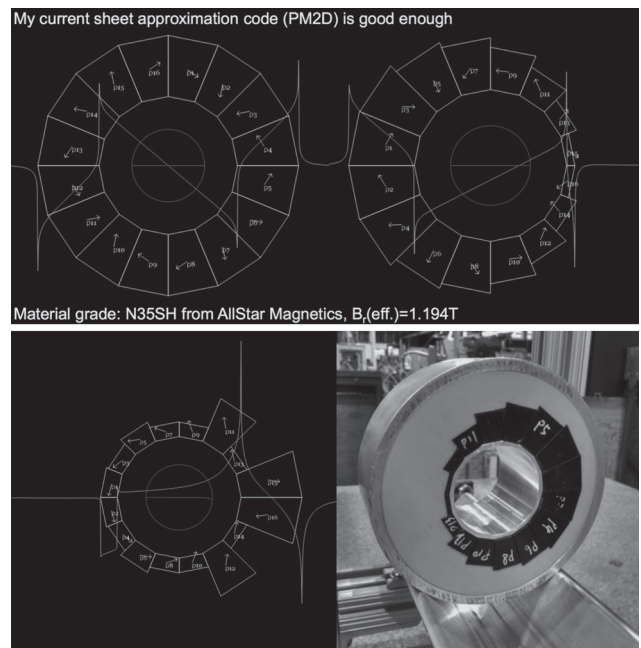


図 4 一般化された Halbach 構造：左上・右上・左下はそれぞれ QM・non-scaling FFAG・scaling FFAG に対する磁場計算、右下はシムなしのモデル磁石

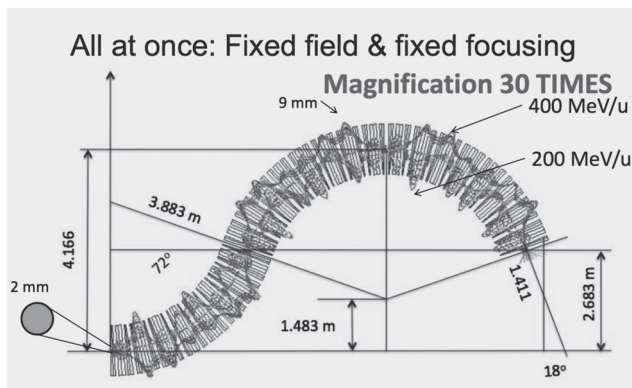


図5 200 ~ 400 MeV/u のビームを輸送可能なガントリーの設計例



写真3 レセプションではポーランド風バーベキューが振る舞われた。後ろに見えるドームは王立芸術大学のロイヤルアルバートホール

半では FFAG の新地平として、大量の二次粒子を生成する Multiplex ERIT (Energy Recovery Internal Target) 方式の加速器デザインが紹介された。

### 3. おわりに

FFAG 国際ワークショップは 16 年間継続的に毎年開催されている。開催場所は日本, 北米, ヨーロッパ (英国を含む) の 3 箇所を順番に割り当てることになっており, 次回 2017 年は米国コーネル大学の予定である。CBETA 計画の進捗が楽しみである。

なお, 今回の発表資料はワークショップの

Web ページ<sup>6)</sup>にて閲覧可能であるので, 興味のある読者をご覧ください。

### 参考文献

- 1) FFAG 2016 発表資料 “Beam dynamics studies in FFAG-arc based eRHIC ERL”, F. Meot.
- 2) FFAG 2016 発表資料 “New NS-FFAG applications in ERL in Cornell, eRHIC, and LHC”, D. Trbojevic.
- 3) FFAG 2016 発表資料 “IBEX Paul Trap studies”, S. Sheehy.
- 4) FFAG 2016 発表資料 “Halbach-type Magnets for a Non-Scaling FFAG Arc”, S. Brooks.
- 5) FFAG 2016 発表資料 “FFAG Gantries”, D. Trbojevic.
- 6) <http://indico.cern.ch/event/543264/timetable/#all>