

## 話 題

## 京都大学原子炉実験所における FFAG 加速器の開発

森 義治\*

## Development of FFAG Accelerators at KURRI

Yoshiharu MORI\*

## 1. はじめに

京都大学原子炉実験所 (KURRI: Kyoto University Research Reactor Institute) では、文部科学省の「革新的原子力技術開発研究」プロジェクトの委託研究として2002年度より「加速器駆動未臨界原子炉 (ADSR: Accelerator Driven Sub-critical Reactor) の基礎研究を進めている。そこでは、可変エネルギー固定磁場強集束加速器 (FFAG: Fixed Field Alternating Gradient Accelerator) を開発し、加速された陽子ビームを原子炉実験所に設置されている臨界集合体 (KUCA: Kyoto University Critical Assemblies) に導き、ADSR の基礎研究を行う。2008年度の8-9月期にFFAGとKUCAを結合してADSRの基礎実験を行う予定である。

一方、将来の硼素中性子捕獲療法 (BNCT: Boron Neutron Capture Therapy) のための、FFAGを用いた病院設置可能な高強度小型中性子源の開発が、2005-2007の3カ年計画で進行している。これは、NEDO (新エネルギー研究開発機構) のプロジェクト「次世代DDS型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業」の一環として受託研究として行われているものである。

本稿では、これらプロジェクトの概要、特にADSR基礎研究の紹介とそこに用いられる可変エネルギーFFAG加速器ならびにBNCT用FFAG小型中性子源の開発研究の現状について紹介する。

## 2. ADSR プロジェクトの概要とFFAG加速器の開発

ADSRは、加速器からの高エネルギー陽子ビームを重金属標的に当てることで発生した中性子をモデ

レータにより減速し、未臨界原子炉での核分裂反応を用いてエネルギー増幅を行うシステムである。未臨界体系であるので原子炉としての安全性が高く、また、超長寿命核 (Minor Actinido 等) 廃棄物の短寿命化にも役に立つと期待されている<sup>1)</sup>。

京都大学原子炉実験所でのADSRプロジェクトでは、既設のKUCAを用いてADSRの基礎的研究を行う事を目的としている。図1は、KURRIでのADSRプロジェクトの構成を示す。図の背景写真はそれぞれの装置が配置された建物である。

ADSRプロジェクトには多くの研究課題があるが、たとえばADSRでの中性子増幅率は、図2に示すように臨界度係数 ( $k_{\text{eff}}$ ) によって大きく異なる<sup>2)</sup>。加速器ビームによる中性子スペクトルは原子炉のものとは異なる。図3は中性子の spectrum index (1 eV以下のエネルギーの中性子束が全体の中性子束に占める割合) に対する臨界度係数の違いを、計算値と14 MeV中性子からの実験値との比であらわしたものである。燃料体系としてウランのみの場合とトリウムを混合した場合のそれぞれを示している<sup>3)</sup>。このような比較を、広範囲のエネルギー領域の陽子ビームによりつくられる中性子束に対して、基礎データとして取得することは将来のADSR実現において重要である。

ADSRプロジェクトのためのFFAG加速器は3段階のカスケードリング構成となっている。各リングは、そのビーム集束方式の基本的な原理としてすべてFFAG方式を用いている。

FFAG加速器には大きく分けて二つの方式がある。ひとつは、1953年に大河千弘によって発明された scaling FFAG とよばれるものであり、いまひとつは no-scaling FFAG である。

scaling FFAG では、加速されるビームのベータ

\* 京都大学原子炉実験所 KURRI  
(E-mail: yoshiharu.mori@kek.jp)

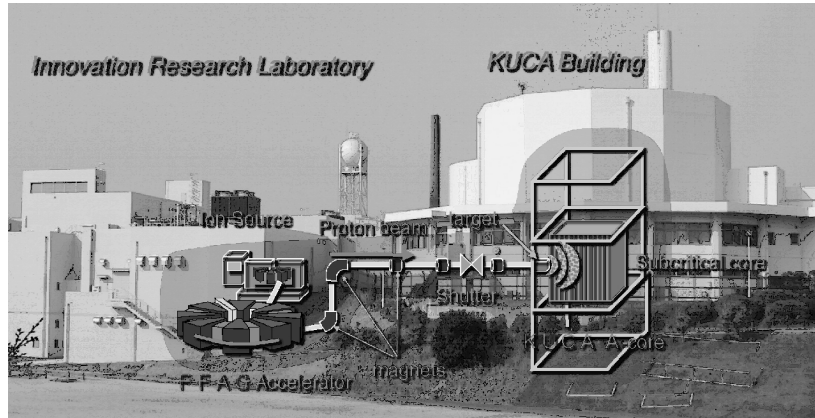


図1 KURRIでのADSRプロジェクト

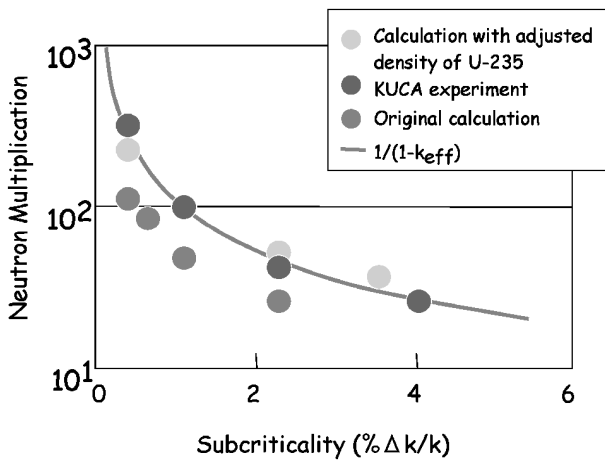


図2 未臨界度に対する中性子増倍

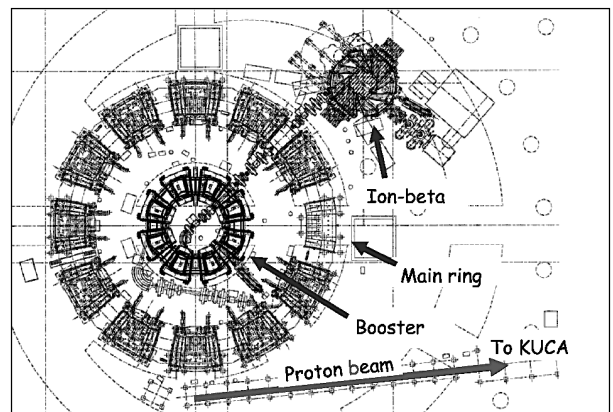


図4 ADSRプロジェクトのためのFFAG加速器構成

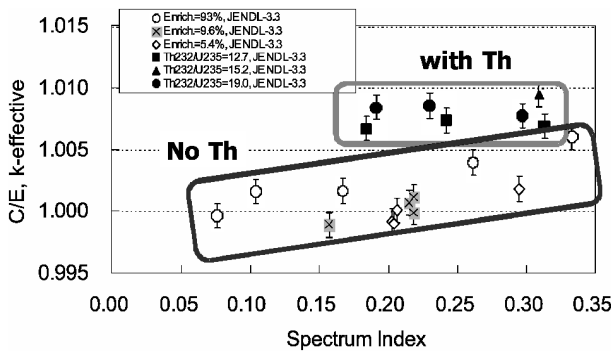


図3 中性子スペクトルに対する実効臨界係数  
(縦軸: 14 MeV 中性子実験値に対する計算値,  
横軸: 1 eV 以下の中性子が全体に占める割合)

ロンチューンがエネルギーによらず常に一定である。すなわち、いわゆる零色収差 (Zero Chromaticity) のビーム集束系が必要とされる。これを実現するためには、ビームパラメーター (軌道曲率, ベータ関数等)

がビーム運動量にスケールして相似性を保つ必要がある。このためには、軌道を偏向・集束させる磁場分布は、加速器中心からの軌道半径  $r$  に対して  $r^k$  の依存性をもつ必要がある。ここで  $k$  は幾何学的磁場係数 (Geometrical Field Index) とよばれる。これからわかるように scaling FFAG では、ビームから見た磁場分布には多くの非線形成分が含まれる。

一方、non-scaling FFAG は基本的には線形磁場要素 (すなわち 2 極及び 4 極磁場) のみで構成される。したがって色収差は零ではない。ビーム加速とともにベータロンチューンは変化するので、素早い加速でベータロン共鳴によるビーム損失を避ける必要がある。

KURRI での FFAG 加速器は、3 リングともすべて scaling FFAG である。図 4 には、加速器の構成を示す。また、図 5 は装置全体写真である。加速器建設は研究再委託により三菱電機㈱が請け負ったものである。この加速器システムの概要については本加速器学会誌 Vol. 3 No. 2 (2006 年 7 月) にすでに石氏により

紹介されているので詳細はそちらを参照されたい。

最初のリングはイオンペータとよばれ、磁場形状はスパイラル型である。第2、第3リングはそれぞれブースター、主リングとよばれ、これらの磁場形状はラジアル型である。イオンペータは、イオン源から100 keVで入射された陽子ビームを最大2.5 MeVまで加速する。ブースターはさらに20 MeVまで加速し、最終リングの主リングでは最高150 MeVまで加速する。おのおの加速器の主なパラメータを表1に示す。ビーム強度については、ADSR 実験では KUCA へのビーム輸送における放射線遮蔽を考慮して、実験が可能なレベルである1 nAに制限している。ただ、将来のビーム強度増強の余地を残しておくために、最大加速繰り返し数については120 Hzが可能とし、また、負水素イオンを用いた荷電交換入射により、主リングについては平均ビーム強度として1  $\mu$ Aが十分可能となるアクセプタンスをもつように設計されている。

イオンペータは8個のスパイラル型電磁石からなる。それぞれの電磁石の磁極表面には、幾何学的磁場係数(k値)を変えることができるように32本の表面コイルが配置されており、各々のコイルに流す電流

を変換することで、0.3-2.5 MeVの範囲でエネルギーを変えることができる。ブースター、主リングは、イオンペータからのエネルギーに応じて磁場強度を変えることにより、そのエネルギーを30-150 MeVの範囲で変えることができる。

ビーム加速は、イオンペータでは誘導加速方式、ブースター及び主リングでは高周波加速方式により行う。最大ビーム繰り返し数(repetition rate)は120 Hzまで可能としているが、予算的な制約のため現在は60 Hzで運転されている。

イオンペータの誘導加速方式では加速用磁性体として軟鉄薄板を用いている。電源はIGBTによるスイッチング電源を8台用いている。図6には、典型的な加速電圧パターンを示す。

ブースター及び主リングは軟磁性体合金を用いた広帯域高周波空洞(MA cavity)を用いて加速する。周波数可変範囲はそれぞれ1-4 MHz程度である。加速電圧としては、60 Hz運転では2.5-3 kVを発生させる。それぞれの高周波増幅器は4極電子管(4CW30000)2本用いたプッシュプル方式により50 kWの出力を得ている。

ビームコミッショニングとビームスタディ

(1) 入射器(イオンペータ)

入射器(イオンペータ)のビームコミッショニング



図5 FFAG 加速器全体

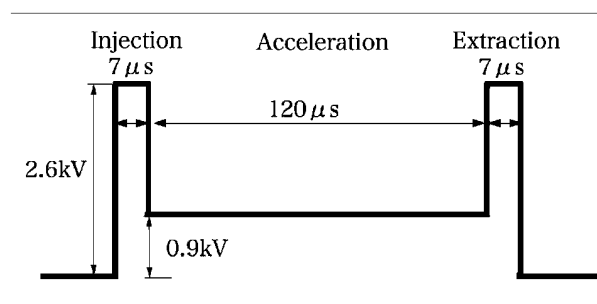


図6 入射器(イオンペータ)誘導加速電圧波形

表1 ADSR プロジェクトのための FFAG 加速器各リングの基本パラメータ

	Injector	Booster	Main Ring
Focusing	Spiral, 8 cell	Radial, 8 cell	Radial, 12 cell
Acceleration	Induction	RF	RF
Field index, k	2.5	4.5	7.5
Kinetic energy	100 keV~2.5 MeV (Max)	2.5 MeV~20 MeV (Max)	20 MeV~150 MeV (Max)
Pext/Pinj	5.00 (Max)	2.84	2.83
Average radius	0.70 m~0.99 m	1.42 m~1.71 m	4.54 m~5.12 m

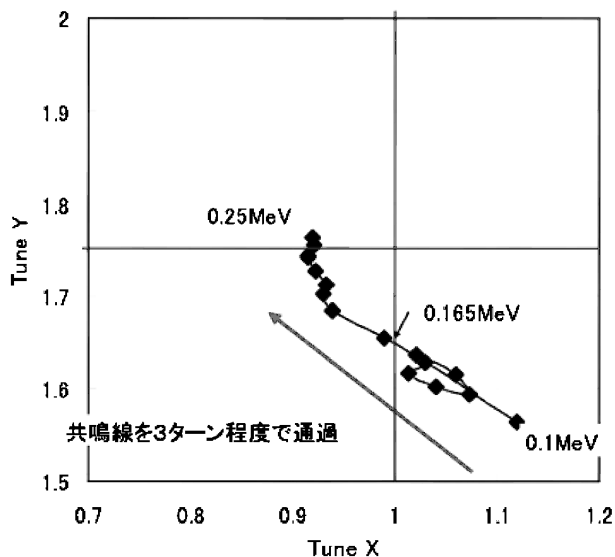


図7 入射器（イオンベータ）における  $k=0$  加速でのベータトロンチューンの変化

は 2005 年の年末から 2006 年の 1 月にかけて行われた。また、この際ビームエネルギーの可変性も確認された。イオンベータは基本的には scaling FFAG であるのでベータトロンチューンは加速において変わらないはずであるが、実際には磁石端部の漏れ磁場の違いによりわずかに変化する。特に、 $k=0$  での運転においては、水平方向のベータトロンチューンが、ビーム軌道半径  $r=765$  mm のところで整数共鳴 ( $\nu_x=1$ ) を上から下に通過する。図 7 には TOSCA 磁場計算より求めた水平、垂直のベータトロンチューン値を示す。実際の加速では、この共鳴通過においても 50% 以上のビームは生き残って最後まで加速される。これは  $k=0$  の場合には、ビーム入射から取り出しまでのビーム周回数は 100 ターン程度であり、すばやくこの整数共鳴をビームが通過するためである。これはあたかも non-scaling FFAG でのビーム加速と同様のことが行われていることを意味する。共鳴を通過したあとのビームは、ビーム周回周波数と同じ強いコヒーレント振動が残っていることがプローブ測定により観測されている (図 8)。これは、リング型加速器で整数共鳴横切りをした好例である。共鳴通過時におけるビームの振る舞いについての実験的研究の場を与えることにもなっており、大変興味深いとともに今後の詳細な研究が待たれるところである。

(2) プースター

プースターのビームコミッションングは、2006 年の 6 月に始まりビーム入射調整後数日でビーム加速に成功した。ビームの水平・垂直両方向のベータトロン

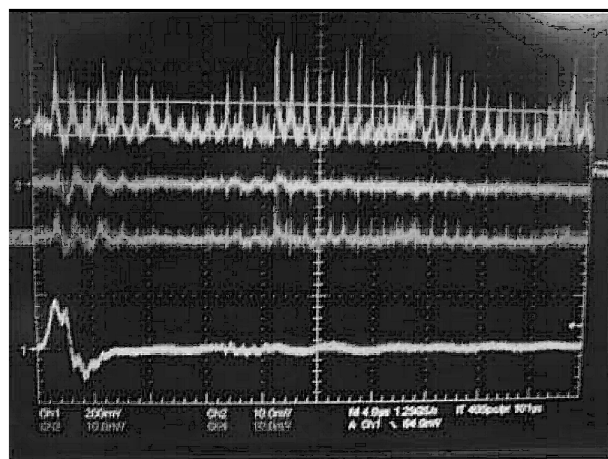


図 8 入射器（イオンベータ）での  $\nu_x=1$  通過時のビームの半径方向コヒーレント振動

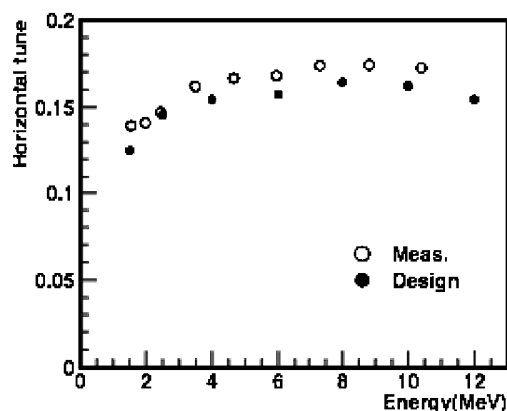


図 9 プースターにおけるビーム加速にともなう水平方向ベータトロンチューンの変化 (黒丸：設計値, 白丸：測定値)

ンチューンが測定され、それぞれ設計値と良い一致を示している。図 9 には、水平方向のベータトロンチューンについて測定値と設計値を示す。図のベータトロンチューンは整数部を除いた端数を示す。また、図 10 は、加速開始から終了までの水平・垂直両方向のベータトロンチューンの変化を示す。このときのビーム加速は入射 1.2 MeV から取り出し 12 MeV で行った。

プースターは radial 型で、DFDtriplet lattice であるので、F、D 磁石の各々の強さを変えることで垂直方向のベータトロンチューンを大きく変えることができる。これにより、ビーム損失をもたらすベータトロン共鳴をわざと通過させてビームの振る舞いを調べることができる。プースターの場合には高次の共鳴通過に注目すると、 $\nu_x+3\nu_y=6$  の共鳴線を通る際に、図 11 に示すように、ビーム損失が生じることが

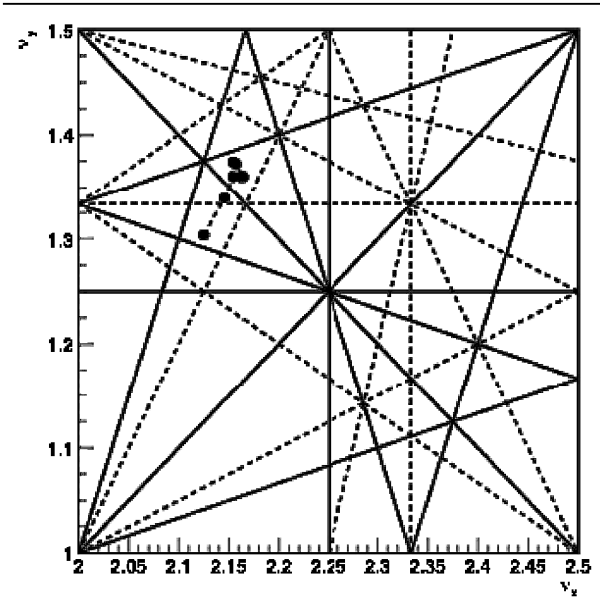


図10 ブースターにおけるビーム加速にともなうベータトロンチェーンの変化

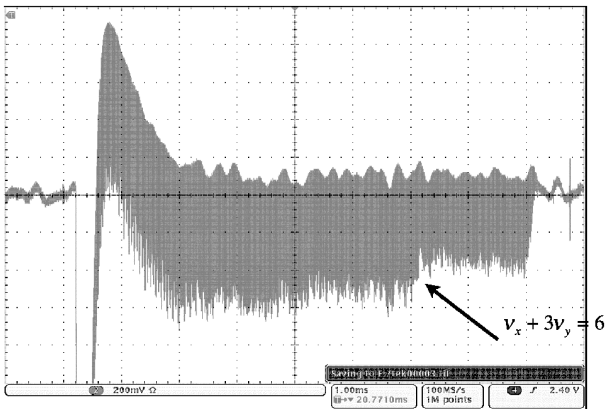


図11 ブースターにおけるビーム強度（非線形共鳴横切りによるビーム損失が見える）

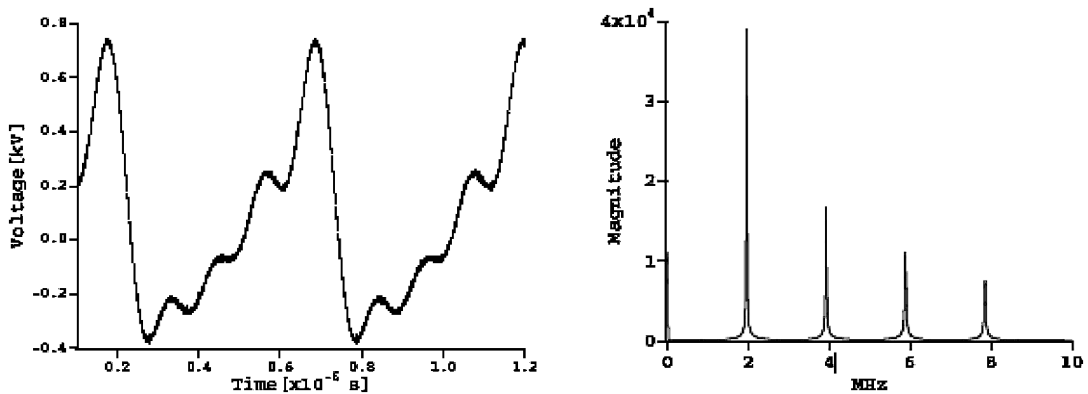


図12 ブースターにおける位相回転ビーム捕獲のための鋸歯状高周波波形（4次までの高調波を含む）

わかった。

高次共鳴の場合には、共鳴の強さと共鳴通過の速度にしたがってビームエミッタンス増大が変化し、それらによりビーム損失の程度も変わる。ビームダイナミック上の観点から、また、具体的な応用として non-scaling FFAG での共鳴通過の問題とあわせて注目され、現在研究が進展している<sup>4)</sup>。ブースターの場合についても今後の研究課題である。

ブースターにおけるもうひとつの話題は、ビーム入射において、進行方向位相空間における位相回転を用いて素早く効率良いビーム捕獲を実現したことである。ブースターは加速線り返し 60 Hz（将来は 120 Hz）の rapid cycling の加速器である。一方、入射ビームは誘導加速の入射器（イオンベータ）からの連続ビームである。通常のシンクロトロンでは“断熱捕獲”により連続ビームを高周波バケツに捕獲するのが一般であり、効率よいビーム捕獲のためにはそのプロセスに時間を要する。しかしながらブースターのような高加速線り返しリングではビーム捕獲に時間をかけることはできない。加速時間が短くなるとともに必要な高周波加速電圧が増大するからである。位相回転は 1/4 シンクロトロン振動の短時間にビーム進行方向の位相空間内で加速バケツ形状に適応したビーム回転を行い、これによりビーム捕獲時間を短縮化できる技術である。

理想的な位相回転を行うには、線形な高周波バケツが必要である。実際には基本波に加えて、高次（2次、3次等）の高調波成分を混ぜることで近似的にこれを実現する。ブースターでは高周波加速空洞に MA 空洞を用いており、その広帯域特性を利用して高調波成分を基本波に加えて、鋸歯状の電圧波形をもった高周波加速電圧を得た。図 12 は 4 次までの高調波により実際に実現された鋸歯状の加速電圧波形である。図

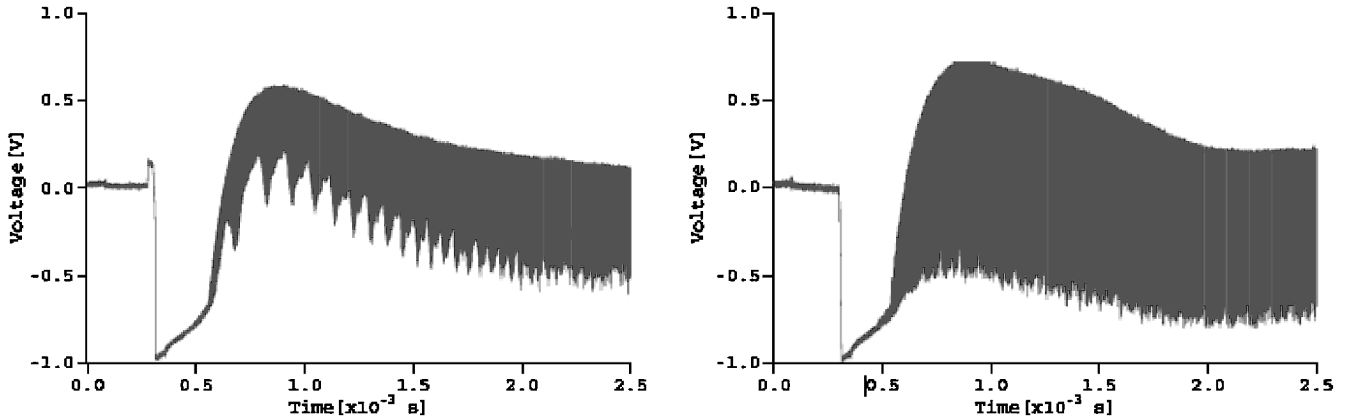


図13 ブースターにおけるビーム捕獲課程でのビームパンチ・エンベロップ (左：断熱捕獲，右：位相回転捕獲)

13は、ブースターでの断熱捕獲と位相回転捕獲のそれぞれの場合の典型的なビームパンチエンベロップ波形の実測値である。断熱捕獲の場合には捕獲時間が十分でなく加速バケツとのマッチングが悪いために、大きな4極振動が見られる。一方、位相回転捕獲では高周波バケツとのマッチングが良いために、殆ど4極振動を生じずにビームが加速バケツに捕獲・加速されていく様子がよくわかる<sup>5)</sup>。この手法により効率良くビーム捕獲と加速が実現されている。

(3) 主リング

主リングのビームコミッションは、2006年の10月から始まった。しかしながらビーム入射に大きな問題があり、安定的なビーム周回を得たのは2007年の12月になってからであった。実に1年余に渉って悪戦苦闘の日々が続いた。この間、いくつかのアクシデント（たとえば集中豪雨による加速器室への浸水等）に見舞われるという不運な事態も重なった。ビーム入射の最大の問題点は、入射セプタム電磁石を支える架台が鉄製であったためにビーム面の磁場の対称性がくずれ、それにより大きな水平磁場成分がビーム周回軌道に発生したことにある。図14には、この架台により引き起こされた非対称磁場分布（計算値）を示す。ビームが周回する際にこの予想しない磁場により垂直方向に大きくキックされ、ビーム周回が大きく阻害された。

この主リングは、高エネルギー加速器研究機構(KEK)ですでに加速試験に成功したものと基本的に同じ設計である<sup>6)</sup>。したがって、このリングについては十分な知見をもっていると思っていたのであるが見事に落とし穴があった。KEKでは、問題となった入射セプタム電磁石は真空容器内に設置していたので、このような非対称磁場をつくる鉄製架台は存在していなかった。一方、今回のものではコストの厳しさもあ

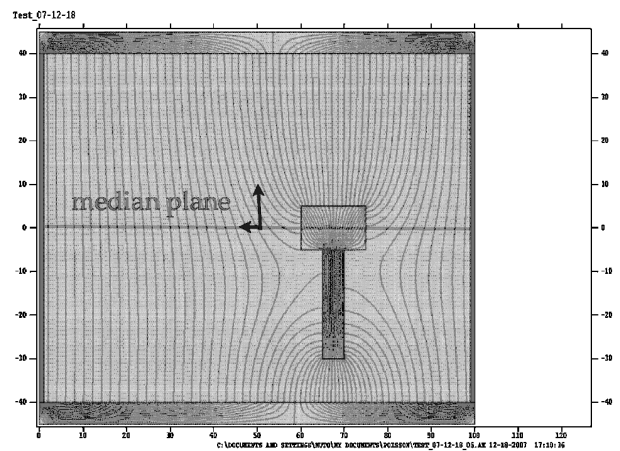


図14 主リング入射セプタム電磁石の鉄製架台によって生じた磁場の非対称歪み

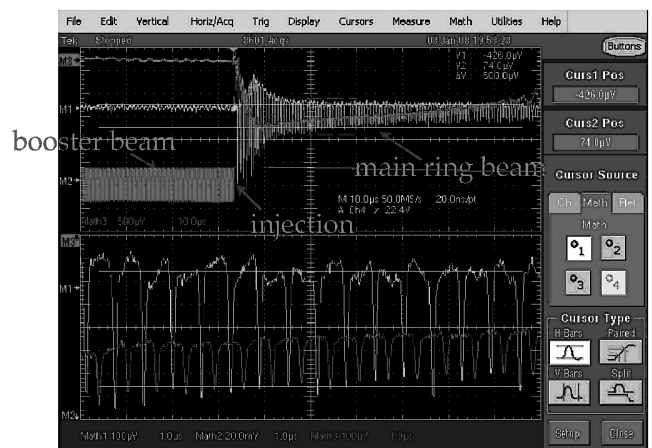


図15 主リングにおけるビーム周回

り真空外に設置したことでこのような事態を招いた。この問題が解決した（架台はSUS製に変更した）後は、すぐにビーム周回（図15参照）に成功し、初期段階であるがビーム加速も実現し、現在、最高エネルギーまでの加速ならびにビーム取り出しを実現すべ

く努力している。今後もこのような見落としがないように注意深く作業を進めていく必要があるが、今回の経験から学んだ点は、研究用加速器は同じ方式といえども研究目的・条件（コスト、設置場所等）の違いにより個々に細かいところで異なり、それらが大きな影響を与えるという、いわばものづくりでは当然の事であった。

### 3. 加速器中性子源（FFAG-ERIT）の開発

癌治療の一つである硼素中性子捕獲療法は、近年硼素含有薬剤の進展とともに注目集めている治療法である。その原理は、図 16 に示すように、癌組織に硼素 ( $^{10}\text{B}$ ) を Drag Delivery (薬剤輸送) に集め、熱中性子との捕獲核反応により作られたエネルギーの高い (2 MeV 程度) ヘリウム原子核 (飛程: 数 10 ミクロン) で、癌を細胞レベルで死滅させることによる (図 16 参照<sup>7)</sup>)。細胞レベルで効果的に癌組織に硼素を集中させることができるならば、細胞選択に正常細胞と区別して癌組織を叩くことのできる治療法である。

この療法では、硼素を癌組織に効率良く運び、滞在させる薬剤の開発が極めて重要である。それと同時に、将来病院内治療を目指すためには高強度の小型加速器中性子源が必要となる。NEDO プロジェクト「次世代 DDS 型悪性腫瘍治療システムの研究開発事業」は、これら両者の開発を目指したものである。

病院設置を目指す BNCT 用中性子源として加速器中性子源に要求される条件としては、次のような項目が考えられる。

1. 治療場での熱・熱外中性子束として  $1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  以上が得られること。これにより 1 時間程度の照射時間による治療が可能となる。

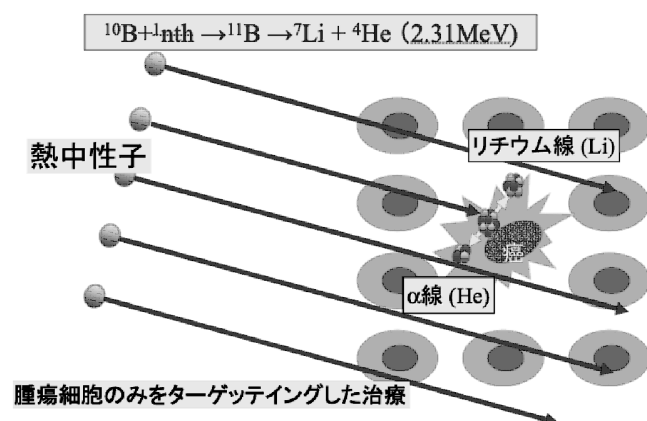


図 16 硼素中性子捕獲療法 (BNCT) の原理 (筑波大学 松村教授提供)

2. 小型であること。設置面積として 100 平米程度。
3. 運転・維持が容易であること。
4. 放射能発生が少なくかつ放射線遮蔽が容易であること。
5. 低コストであること。

こうした条件から加速器中性子源としては、低エネルギー (10 MeV 程度あるいはそれ以下) の陽子・重陽子ビームと Li, Be 等の軽核との核反応を利用するものとなる。高エネルギーの陽子ビームを用いると中性子発生効率が増すが、放射性物質の生成もそれに伴い増えるために、それらの処理・放射線防護に負担が生ずる。

$1 \times 10^9 \text{ n/cm}^2/\text{s}$  の熱・熱外中性子束を得ようとする、中性子発生標的では毎秒約  $3 \times 10^{13} \sim 10^{14} \text{ n/s}$  の中性子を発生させねばならない。10 MeV のエネルギーの陽子ビームと  $^9\text{Be}$  を標的に用いた場合には、中性子生成全断面積は約 500 mb 程度であるので陽子ビーム電流としては、3~10 mA が必要となる。既存加速器技術の点からみると、このビーム電流は大きなハードルである。また、中性子標的もその熱負荷は数 10 kW と大きく、放射線損傷も問題となる。

こうした困難を克服する方法として、我々は陽子貯蔵リング内に設置した内部標的により中性子を発生する方法を提案した<sup>8)</sup>。これが、FFAG-ERIT (ERIT: Emittance/energy Recovery Internal Target) とよばれるものである。

図 17 には ERIT 方式の概念図を示す。10 MeV 程

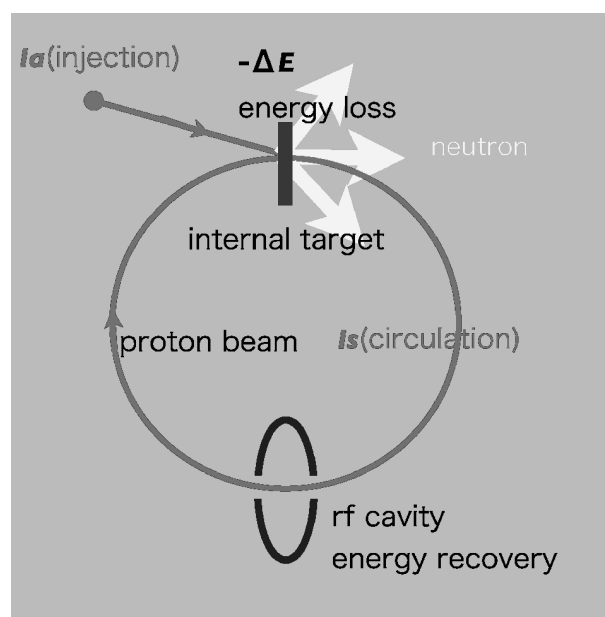


図 17 ERIT (Emittance/energy Recovery Internal Target) の概念図

度のエネルギーの陽子の貯蔵リング内に、薄い（厚さ 5~10  $\mu\text{m}$  程度）の Be 箔（中性子生成標的）を置く．陽子ビームがこの Be 箔を通過するたびに中性子を発生する．一方、Be 箔で失われる陽子のエネルギーはリング内の別の場所に設置した高周波空洞により再加速され回復される．

実際には、Be 原子核との Rutherford 多重散乱による横方向ビームエミッタンス増大、およびストラグリングによるエネルギー広がり起因する進行方向ビームエミッタンス増大の効果を考慮しなければならない．横方向については、このエネルギー領域の陽子では阻止能がエネルギー増加とともに急速に低下するので、いわゆる“イオン化冷却”効果<sup>9)</sup>によりエミッタンス増大は緩和される．一方、進行方向については冷却ではなく加熱となるので、リングとしては極めて大きなエネルギーアクセプタンスを持たねばならない．通常の線形集束要素の貯蔵リングでは、その色収差のために大きな運動量広がりをもつビームを貯蔵することは難しい．Scaling FFAG は“零色収差”であるので、原理的に極めて大きな運動量広がり（数 10%）をもつビームの貯蔵が可能である．ERIT は scaling FFAG を用いることで現実的な 2 次粒子発生装置となるのである．

図 18 は、横方向および進行方向のエミッタンスの増大の計算例である．これらからわかるように横方向についてはイオン化冷却効果によりエミッタンス増大が抑えられているが、進行方向については一方的に広がっていくことがわかる．

ERIT リング内での陽子の周回数は Be 箔の厚みに

よって変わるが、おおよそ 500~1000 ターン程度と見積もられている．したがって、入射器からの平均ビーム強度として 50~100  $\mu\text{A}$  程度であれば、必要とされる中性子強度が得られると考えられている．

図 19 に、KURRI で現在開発中の FFAG-ERIT 中性子源の構成を示す．FFAG リングへの入射器としては、RFQ+DTL のリニアックを用いる．これにより 11 MeV まで負水素イオンビームを加速する．負水素イオンを用いるのは FFAG リングへのビーム入射において荷電変換入射を行うためである．FFAG リングは radial 型で FDF ラティスとする．これにより直線部で水平・垂直双方とも最小ベーター関数となりイオン化冷却の効率を高めることができる．

エネルギーを回復させるための高周波空洞は直径約 2 m で長さ 40 cm で、約 20 MHz で最大 200 kV の高

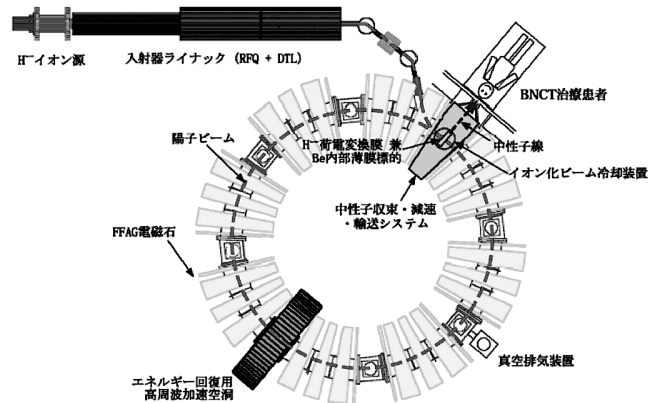
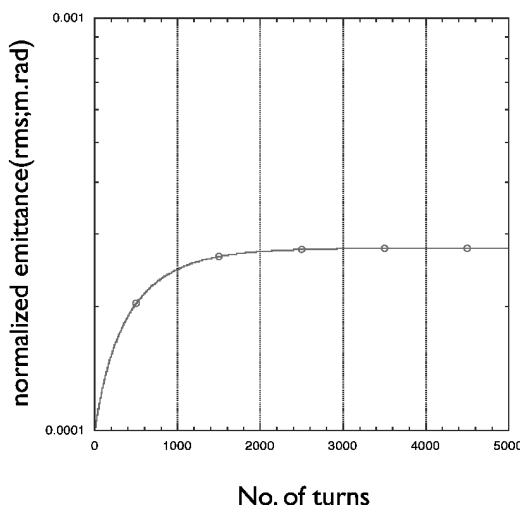
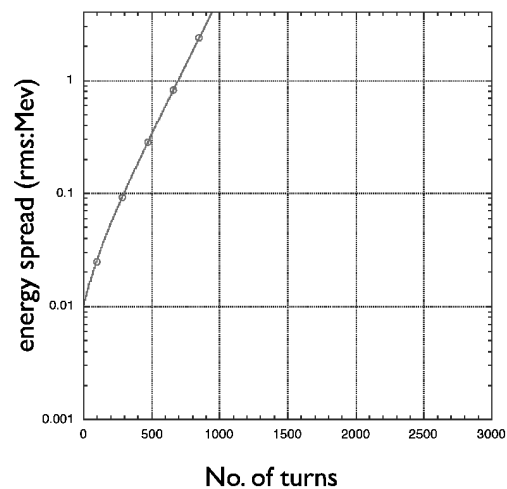


図19 FFAG-ERIT の装置構成



(a) transverse



(b) longitudinal

図18 ERIT におけるビーム周回数に対する横方向 エミッタンス増大(a), および縦方向エネルギー広がり(b)



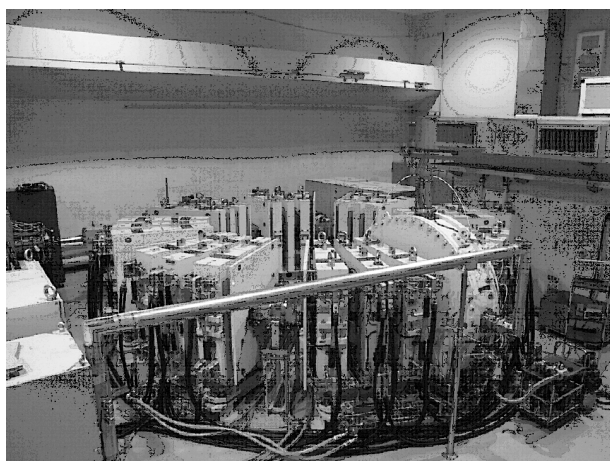


図20 FFAG-ERIT の陽子貯蔵リング

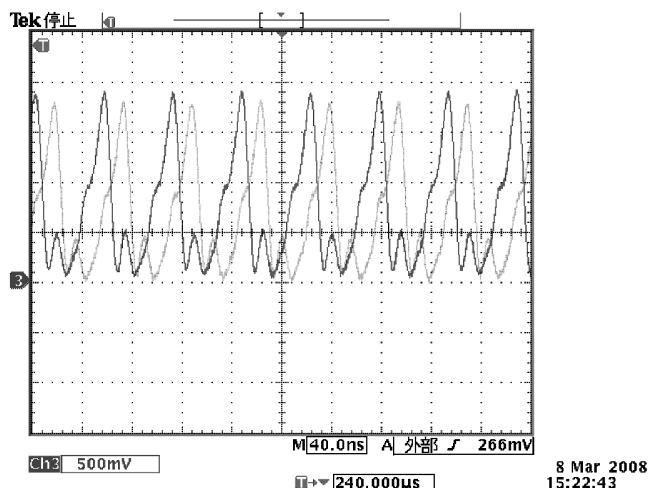


図22 FFAG-ERIT でのビームバンチ波形測定値

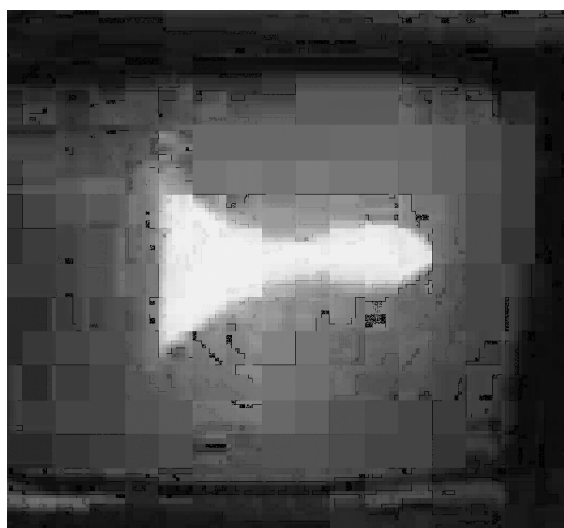


図21 FFAG-ERIT リング入射ビームの蛍光板像

あるが、必要とされる最大貯蔵ビーム強度と周回数がほぼ得られている。

#### 4. ま と め

京都大学原子炉実験所で開発中の FFAG 加速器 (ADSR プロジェクトおよび BNCT 用中性子源) についてその概要と現状について述べた。それぞれのプロジェクトにおいて加速器の開発を最終段階までもっていくには、まだまだ越えなければならない課題が多くある。これまでも、数多くの方々のご協力を得てようやくここまで来たのであるが、今後もこれまでも増してご支援をお願いすると同時に、加速器学会員の皆様、特に若い方々に FFAG という古くて新しい加速器に興味を持っていただければと思う。最後に本稿をまとめるにあたってご協力戴いた京都大学原子炉実験所の関係者の方々ならびに研究組合 FFAG-DDS 研究開発機構の皆様にご感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) K. Mishima et al., *Journal of Nucl. Scie. and Tech.*, **44** (3), pp. 499-503 (2007).
- 2) T. Misawa et al., Proc. of GLOBAL2005, Tsukuba (2005).
- 3) H. Unesaki et al., Proc. of PHYSOR2004, Chicago (2004).
- 4) M. Aiba et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, **9**, p. 084001 (2006).
- 5) A. Osanai et al., to be published in the Proc. of FFAG07, Osaka (2007).
- 6) H. Horii, *ibid.* in ref. (5).
- 7) A. Matsumura, private communication.
- 8) Y. Mori, *Nucl. Instr. Meth., PRS*, **A563**, pp. 591-595 (2006).
- 9) D. Neuffer, *Particle Accelerators*, **14**, p. 75 (1983).

周波電圧を発生する。これにより Be 箔でのエネルギー損失 (最大 70 keV 程度) を回復させる。

Be 箔は中性子発生標的であると同時に、入射器からの負水素イオンを荷電変換させる機能ももっている。Be からは前方に最大 9 MeV 近い中性子が発生するが、これは次の直線部に置かれた鉄によりダンプされる。BNCT に用いる中性子 (エネルギー約 1 MeV) の大部分はビームと垂直方向の周囲に置かれたモデレータにより減速され熱・熱外中性子として取り出される。

装置はすでに完成しており、リング部の写真を図 20 に示す。また、すでにビーム入射及び標的と高周波空洞を用いたエネルギー回復によるビーム周回に成功している。図 21 は標的部の入射ビームを蛍光板でみたものである。また、図 22 は周回しているビームのバンチ波形である。まだ、preliminary な結果では