

FFAG 加速器の開発

高エネルギー加速器研究機構

森 義治

1. はじめに

加速器の利用は、原子核・素粒子物理学の分野にとどまらず、物質・エネルギー科学、医学・生命科学さらには環境科学等様々な方面で展開されようとしているが、ここに提案するFFAG加速器は、そのいずれにおいても有用な汎用加速器である。ここでは、汎用性の要件として、効率、サイズ、コスト、運転の容易さ、フレキシビリティを考慮した。FFAGとは、Fixed Field Alternating Gradientの頭文字で、その名が示すように一定磁場でかつ強集束な光学系を有する。原理は大河千弘により1953年に世界で最初に提案されたが、技術的困難により今日まで実用的な加速器として成立していなかった。しかしながら我々のグループは、科学研究費補助金による開発研究によりこれらの困難を克服し、平成12年6月に、世界で最初の陽子ビーム加速のFFAG加速器を原理実証した。さらに、平成13年度より科研費「学術創成研究」により150MeVのエネルギーまで陽子を加速するFFAG加速器の実用機実証モデルの開発を行っている。そこでは150MeV陽子FFAG加速器に必要な機器の開発を進め、加速器システムとして完成させる。それとともに、この150MeV FFAG 加速器からビームを取り出し、そのビームを用いて、数ある応用分野のうち特に、医療（陽子ビームによる癌治療と診断）、環境保全・浄化（高強度電子・X線ビームによる殺菌）への応用を目指した開発研究と、さらには超小型FFAG加速器にむけての開発研究を主たる目的として行う。これらの応用は、従来の加速器では極めて困難な技術であり、FFAG加速器により始めて実用化可能と考えられるものである。

さきに述べた汎用性の条件として挙げられる、5つの項目について、FFAG以前のどんな種類の加速器も全てを満たすことはなかった。例えばサイクロトロンについて言えば、比較的サイズは小さく運転の容易さはあるがフレキシビリティ（ここでは取り出されるビームのエネルギーやパルスの時間構造）に欠ける。それ以前に、そもそも容易に相対論的エネルギー領域に加速される電子は、等時性が崩れサイクロトロンでは加速出来ない。シンクロトロン、特に陽子シンクロトロンは、フレキシビリティと言う側面を持つ一方、運動量増加に対応するための磁場の増加とそれに追従する高周波周波数の制御と言う面で、運転の容易さはサイクロトロンに比べればはるかに複雑である。リニアックの最大の欠点は運転効率の悪さであ

り、また、陽子リニアックに限ればコストも他の加速器に比べ割高である。FFAGはどうであろうか。円形加速器でしかも固定磁場であることにより、運転効率は加速器に比べて高い。サイズとコストは、ほぼサイクロトロンと同程度と考えられる。固定磁場であることと、高周波の制御が磁場と独立していることにより、運転の容易さはサイクロトロン並みである。最後に、取り出しエネルギーやパルスの時間構造のフレキシビリティはシンクロトロンと同様に持つことが出来る。さらに、シンクロトロンと同様に電子、陽子等の粒子種類によらずに加速できることも、サイクロトロンにはない大きな特徴の一つである。

2. FFAG 加速器の原理とPOP-FFAG 加速器による原理実証

代表的な円形加速器にはサイクロトロンとシンクロトロンがある。サイクロトロンでは等時性を保つ必要から、ビーム進行方向の集束安定性が原理的に存在しない。すなわち大強度ビームにおける空間電荷力によるビーム発散に対応することが難しくなる。また、ビームエネルギーが高くなるにつれ、ビーム軌道のターンセパレーションが小さくなり、ビームの取り出しが難しくなる。一方、シンクロトロンはビームの集束力を強くでき、大強度ビームの空間電荷発散力を抑えるうえでビーム運動学的には原理的に優れている。ただし、通常のシンクロトロンは同一軌道上で粒子を加速する。そのため磁場の強さを時間的にエネルギーとともに変える必要があり、ビーム加速はパルス運転となる。磁場を時間的に変化させなければならぬので、デューティファクターは小さい。通常のシンクロトロンでは、繰り返し50Hz程度が上限であり、ピークのビーム電流は大きくても、平均電流に直すとせいぜい数100mAが限度である。

シンクロトロン加速原理を使い、かつ、磁場が時間的に変化しないですむような加速方式があれば、必要な高周波加速電圧は増えるが速い繰り返しが可能となる。このような加速器が、実は40年以上も前に提案されていた。いわゆる固定磁場強集束型(Fixed Field Alternating Gradient)のシンクロトロンである。

FFAGシンクロトロンでは、磁場は一定（静磁場）である。したがって、加速の繰り返しは加速電圧が十分で高周波の変調の速さが許せば、通常のシンクロトロンに比べ、非常に速い数100Hzから1kHzという高繰り返し加速も可能である。これにより、

加速器駆動未臨界炉で必要とされるビーム強度を得られると期待される。また、原理的にシンクロトロン加速であるので進行方向のビーム集束も存在し、空間電荷発散力にも強い加速器である。ただし、軌道半径がエネルギーとともに大きくなるので、加速空洞の口径もそれに見合った大きなものが必要となる。つまり、粒子を加速する高周波加速装置は高い加速電圧と広い周波数変調範囲と変調速度を持っている必要がある。

シンクロトロンでは、従来フェライトを共振インダクタンスとする加速空洞が使われてきた。しかしながら、このフェライト型空洞では、(1)高速周波数変調が困難、(2)高加速電界を得ることが困難、(3)大きさに制限がある、などの問題点があるためにFFAG用としては不向きである。電子加速の小型モデル器が1960年代に開発されたのみで、陽子ビームを加速するFFAGシンクロトロンがこれまで造られたことがない一つの理由である。一方、近年急速に開発が進んだ高透磁率を有した薄膜型の高透磁率金属磁性体(Magnetic Alloy: FINEMET, METGLAS等)は高電力高周波特性に優れており、これを磁性体コアに用いた高勾配加速空洞が高エネルギー加速器研究機構(KEK)で開発された。この加速空洞ではフェライト型に比して周波数帯域が極めて広く、また、一桁以上高い高周波電圧を得ることができる。また、テープ形状であるので原理的に大きさやコアの形状に制限はない。従って、これをFFAGシンクロトロンの加速空洞として用いるならば、上記の問題は一挙に解決し、FFAGシンクロトロン方式の円形加速器の可能性が開けることになる。

FFAGシンクロトロンでは加速によるビーム運動量の増大とともにビーム軌道長がスケールする。またビームの安定性のために、横方向の集束力については、ベータatron振動数がエネルギーによらず一定となる、いわゆる“zero chromaticity (零色収差)”がビーム軌道設計において必要条件である。この条件を満たす磁場分布は次のような形状をとる。

$$B(r, \theta) = B_0 (r/r_0)^k \{ 1 + f \cos[N\theta - N \tan \zeta \ln(r/r_0)] \}$$

ここで、kはgeometric field indexとよばれる。B0は半径r0での磁場強度、fはフラッターファクター、Nはセクターの数、zは動径ベクトルとスパイラル曲線のなす角である。磁場分布のazimuth角依存性が半径rに依らない場合をradial-sector型とよび、スパイラル形状を取る場合をspiral-sector型とよぶ。磁場中の荷電粒子の運動を考えると、中心力を与え

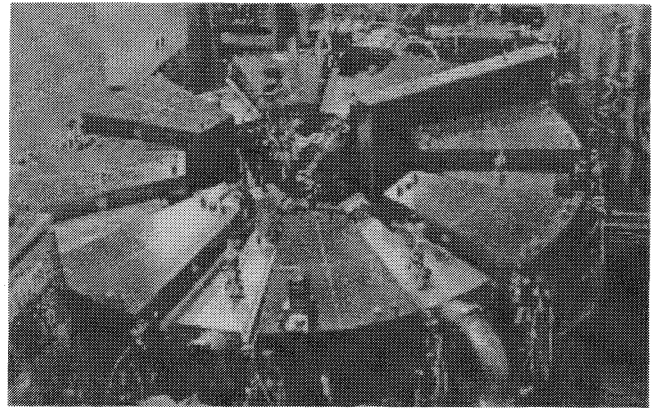


図1 POP-FFAG 加速器の全体図

るような磁場の向きの場合、水平方向には強い集束力が、垂直方向には発散力がはたらく。したがって、Courant-Snyder-Livingstonの発見した強集束原理(AG focusing: Alternating Gradient)を応用するには、磁場の向きを正負逆向きに並べてリングを構成すれば良いことになる。これが、まさに大河の発明であった。強集束を実現する磁場の配位は、集束、発散を交互に置くsingletラティス(FODO)、あるいは発散-集束-発散を組み合わせたtripletラティス等がある。実際のリングでは、直線部を長く取ってそこに高周波加速装置、ビーム入出射装置、ビームモニター等をおきたいので、tripletが便利である。

陽子を加速するFFAG陽子シンクロトロンはすでに述べたように、(1)磁場形状が複雑で設計が困難、(2)広帯域(周波数変化幅が大きい)、高加速勾配の高周波加速空洞が必要、といった問題から現在まで実現されていなかった。しかし最近になって(1)に関しては3次元磁場計算コードの登場によりFFAGの電磁石の設計がかなりの信頼性をもって可能となり、(2)に関しては高透磁率金属磁性体(Magnetic Alloy: FINEMET, METGLAS等)を用いた加速空洞の開発により高勾配で広帯域な加速空洞が可能になった。そこで我々は、陽子を500keVまで加速するモデルであるPoP(Proof of Principle)-FFAGシンクロトロンの開発を行った。このPoP-FFAGの目的は、FFAG方式による陽子加速の原理検証であり、また高繰り返しを実証するために速い加速を実現することである。また、PoP-FFAGシンクロトロンの開発を通してFFAGシンクロトロンの設計手法を確立することも目的の一つである。PoP-FFAGシンクロトロンは1999年からKEKで建設が始まり2000年に世界で初めてFFAG方式による陽子の加速に成功し、当初の目的をほぼ達成することができた。

表1 PoP-FFAG陽子シンクロトロンの基本パラメーター。

集束系	triplet radial sector
セクター数	8
磁場インデックス	2.5
エネルギー	50 keV to 500 keV
繰り返し	1 kHz
磁場強度 (内側 - 外側)	
	0.14 \pm 0.32 T (集束磁石)
	0.04 \pm 0.13 T (発散磁石)
軌道半径	0.81 \pm 1.14 m
ベータトロンチューン	2.17 \pm 2.22
	(水平方向)
	1.24 \pm 1.26
	(垂直方向)
高周波周波数	0.61 \pm 1.38 MHz
高周波電圧	15kV

通常のシンクロトロンにおいて、電磁石の磁場変動の可能な繰り返しは 50Hz 程度と遅く、加速の繰り返しは電磁石の繰り返しの限度に制限されている。一方、FFAGシンクロトロンでは電磁石磁場は固定であるため、繰り返しの速さは高周波加速空洞の加速周波数の繰り返しによってのみ決まる。これにより 1kHz 程度の繰り返しの速い加速が可能になり、平均ビーム電流をあげることができるようになる。また、磁場変動がないということから、加速空洞等に対するフィードバック制御が不要になるため、加速器の運転は非常に簡単になる。このような FFAGシンクロトロンの固定磁場による利点を検証するため、PoP-FFAG でのビーム加速の実験を行った。

PoP-FFAG シンクロトロンは、1ms で陽子を 50keV から 500keV まで加速することができるように設計されており、この陽子の速い加速を実証することは PoP-FFAG の大きな目的の一つである。図 2 はビームを加速したときの BPM で測定したバンチビームの

波形信号で、(a) は内側電極で測定したビーム波形、(b) は外側電極で測定したビーム波形を示している。周回ビームが加速するに従い、軌道は外側に移動するため、内側電極の信号強度は減少し、外側電極の信号強度は増加する様子が観測された。この 2 つの波形信号からビームの位置を求めた結果が (c) である。各点が測定から得られた周回ごとのビームの位置を、実線が高周波空洞の加速パターンから予想されるビーム軌道の変化を示している。加速に伴うビーム軌道の変化はほぼ計算通りであり、1ms という非常に速い時間で加速してもビームを取りこぼすことなく加速できていることが分かる。

FFAGシンクロトロンの磁場は時間的に変化しないが、サイクロトロンとは異なりビーム進行方向の集束力を持つため、ビームはシンクロトロン振動を行う。高周波空洞の同期位相からずれた位置にビームが入射した場合、ビームはこの同期位相の周りを振動しつつ周回する。したがって、シンクロトロン振動はベータトロン振動とは異なりビームの周回信号の位相の変調 (FM) として観測される。図 3 はその時のシンクロトロン振動数の測定値と計算値の比較である。測定値は計算値をほぼ再現しており、PoP-FFAGシンクロトロンが設計通りの加速を行えることが確認できた

3 150MeV FFAG 加速器の開発

FFAG 加速器は、マイクロ秒の寿命しか持たないミュオンや不安定原子核ビームを加速し高エネルギー物理学、原子核物理学、物性物理学への応用が開かれる一方で、医学や産業界に必要とされる粒子ビームを生み出すという意味で、汎用性豊かな加速器である。したがって、FFAG 加速器による汎用性を持つ加速器の実証を主眼として平成 13 年度より 5 年計画で 150MeV-FFAG 加速器の開発を始めている。表 1 は 150MeV-FFAG 加速器の基本パラメーターである。また、図 4 は 150MeV-FFAG 加速器の配置図である。

本研究は、大きく 2 つの研究段階に分けることが可能である。一言であらわせば、第一段階は、150 MeV FFAG 加速器の設計、開発、そしてその結果として加速器システムを作り上げること。そして第二段階は、製作した FFAG 加速器からビームを取り出し、それが持つ全く新しいビームの性質 (高い繰り返し、可変エネルギーなど) を最大限に活用して、医学利用の理想型であるスポットスキニング技術を原理実証することにある。また、150MeV FFAG 加速器システムの発展として高強度電子 FFAG の開発も第二段階に含まれる。

当初の年度別の具体的研究内容に示したように、150MeV FFAG 加速器のシステムを完成させる第

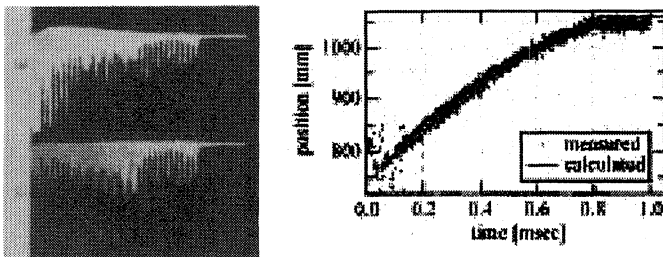


図 2 PoP-FFAG シンクロトロンでのビーム加速。(a) は BPM の外側電極からのバンチ信号、(b) は内側電極からのバンチ信号。(c) はこれらの信号からビーム位置を各加速時間で求めたものである。これらからわかるようにビームが周回を重ねるにつれ外側に移動していることがわかる。

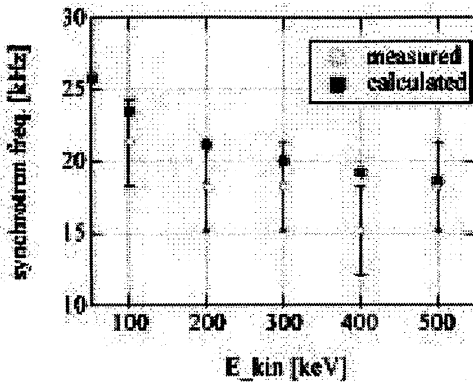


図3 PoP-FFAGシンクロトロンでのシンクロトロン振動数の測定値と計算値の比較。

一段階は、平成13年度、14年度の2年間に終わるように計画し、予定通りのビーム試験を達成した。図5は装置本体の写真である。また、図6には加速器を始めて陽子ビームが周回した際の測定ビーム信号である。平成15年度はビーム加速・取り出しと加速器運転の最適化を行い、平成16年度からのビームを用いた研究(スポットスキャンニング)を始める予定である。

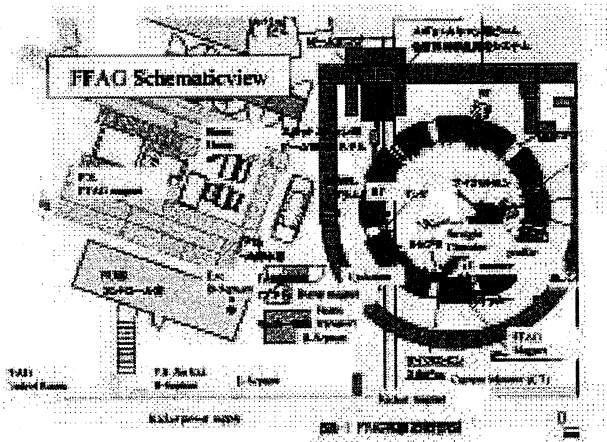


図4 150MeV-FFAG 加速器の配置図

このような加速器全体としての成功を導くために、構成する各機器の開発が2年間にわたり個別に行

150MeV FFAG main parameters

No. of sectors	12
Field Index(k -value)	7.5
Energy	12MeV - 150MeV
Repetition rate	250Hz
Max. Magnetic field	
Focus mag.	1.63 Tesla
Defocus mag.	0.13 Tesla
Closed orbit radius	4.4m - 5.3m
Betatron tune	
Horizontal	3.8
Vertical	2.2
rf frequency	1.5 - 4.6MHz

表1 150MeV-FFAG 加速器の基本パラメータ

われた。

(1) 新型FFAG電磁石の製作と磁場測定: トリプレット光学系を実現する今回のFFAG主電磁石は、正方向磁場と逆方向磁場のフラックスを結合させることにより、おのおののリターンヨークを排する構造となっている。このアイデアは全く新しいものであり、これに基づいて製作された電磁石の詳細な磁場測定を行い計算通りの性能が得られていることを確認した。図7に新型FFAG電磁石の写真を示す。

(2) 高周波加速空洞の開発: 既にPoP (Proof of Principle) FFAGにおいてナノ結晶軟磁性体合金(MA)をコアに用いた加速空洞を実証したが、150MeV FFAGでは加速によるビーム軌道の変位がPoPに比べ約倍近くありコアの開口部もそれに応じて0.8m近くになる。また、コアの形状も通常のシンクロトロンで用いられているような円形ではなく横長の開口部を持つレーストラック形となる。MAを用い、しかも全く新しい形状、大型サイズの高周波加速空洞により、所定の加速電圧が得られることを実証した。図8に高周波加速空洞の全体及び使用されているコアの写真を示す。

(3) ビーム入射の詳細設計: この加速器は、前段のサイクロトロンから10-12MeVの陽子を入射する。入射ラインから軌道を曲げるための磁場および電場セパタム、またビームの多重ターン入射を可能にする磁場

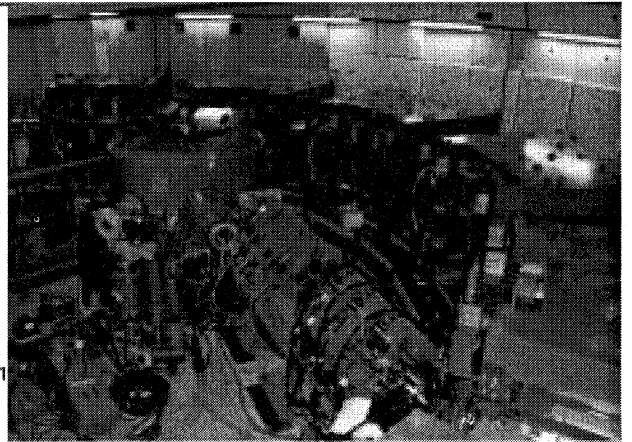
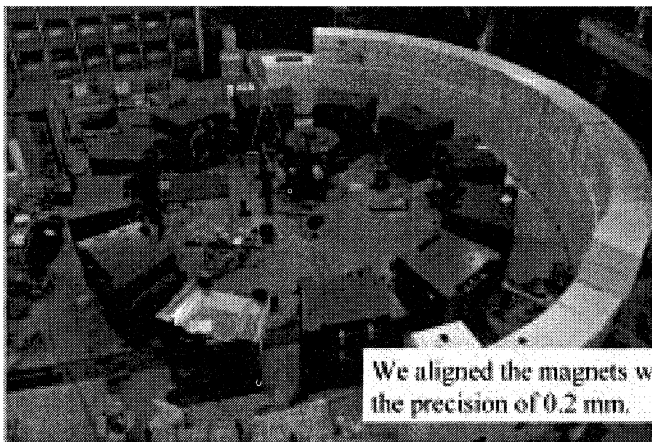


図5 150MeV-FFAG 加速器の電磁石アラインメント作業と設置が完了した写真。

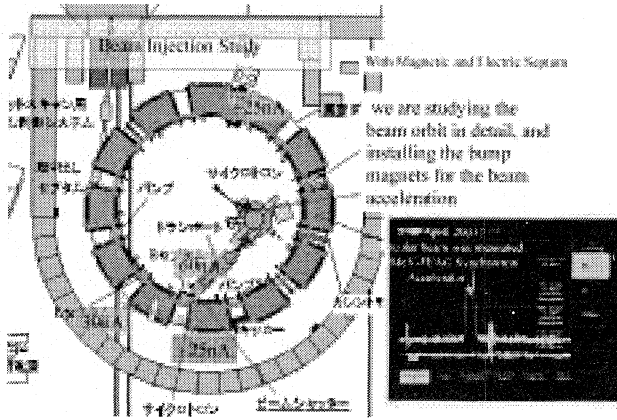


図6 陽子ビームが周回した際の測定ビーム信号

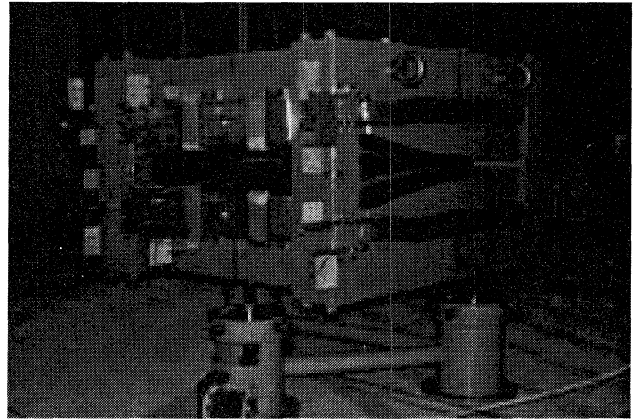


図7 新型電磁石

バンプの詳細設計が行われた。特に、主電磁石による磁場の入射軌道に対する影響が、はじめに予想されていたよりも大きなことが判明し、それに対処すべく入射機器の改善が、ビームを用いて行われた。

(4) ビームモニターの開発: 特にビームコミッション初期の段階で、ビームの位置とそのプロファイル、強度を測る目的で、非破壊形のビーム位置モニター、破壊形のワイヤーモニターを開発した。このFFAG加速器では水平方向の開口が1m近くあり、その全領域に渡ってビームの位置を正確に知るためのビーム位置モニターは、電極の形状を最適化するなど、ビームコミッションと平行して改善が図られた。

4 まとめ

FFAG 加速器は、高繰り返しが可能であり、ほかの加速器に比べシステムが単純であるが為に、どんなビーム種(陽子、電子、重粒子など)でも加速でき、また様々な応用が考えられる汎用加速器である。具体的には、(1) 効率、(2) サイズ、(3) コスト、(4) 運転の容易さ、(5) フレキシビリティという5つの

要因で、従来の加速器に比べ大きな進展が期待された。サイズと言う点では、入射器であるサイクロトロンを含め、全てが直径約10mのリングの中におさまっている。運転の容易さは、通常のシンクロトロンと異なり複雑なフェードバック系が不要であり、全てが高周波の周波数変化パターンで決まるために、一度高周波バケツに捕獲された粒子は最大エネルギーまで容易に加速される。同様に、フレキシビリティの点でも、パルスごとのエネルギー変化、繰り返し周波数の変化等、全てがローレベルの高周波の制御により思うがままに追従する。サイクロトロンやシンクロトロンと言う従来の加速器と同様なエネルギーレベルの実用的なFFAG 加速器が実現に向かって大きく前進したことは、加速器を用いた様々な応用面にとって格段な進展が今後期待される。

本稿はFFAG加速器開発研究グループの協力のもとにまとめられたものである。関係各位に感謝いたします。

RF system

Large Magnetic Alloy (FIBENET) Cavity	
Number of core	4 pieces
Outer (inner) size	1700x950mm(960x230mm)
Core thickness	25mm
RF frequency	1.5 - 4.6 MHz
RF voltage	9kV
RF output	55kW
Power density	1W/cm ²
Cooling water	70 L/min



図8 高周波空洞の全体及び使用されているコアの写真

