

話 題

企業における加速器研究 —FFAG 加速器の技術開発—

石 禎浩*

Accelerator Research and Development at Industries

Yoshihiro ISHI*

1. はじめに

企業において加速器関連の案件は研究用加速器のコンポーネントである電磁石・加速空洞等から始まり大型プロジェクトのサブシステム、さらには粒子線治療装置全体システムに及ぶ。本稿では京都大学原子炉実験所から委託を受けたエネルギー可変型 FFAG 加速器技術開発を例に企業における加速器研究の一部を紹介したい。この研究は電源開発促進対策特別会計法に基づく受託事業として京都大学が文部科学省から「FFAG 加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」をテーマとして委託研究されているが、当社は再委託として「FFAG 加速器技術開発」を担当している。2002 年度から 2006 年度までの 5 年間のプログラムで、今年度が最終年度となり、加速器系のコミッションを春に実施し、既設の京都大学臨界集合体実験装置 (KUCA) にビームを導入し入射中性子エネルギー依存の核特性を調べることにより加速器駆動型未臨界炉 (Accelerator Driven Sub-critical Reactor system 以下 ADSR) の成立性評価を行う計画である。

2. ADSR の加速器としての FFAG

ADSR の加速器として、本研究では FFAG (Fixed Field Alternating Gradient) を採用した。FFAG が大河千弘氏により最初に提案されたのは 40 年以上前に遡るが¹⁾、加速空洞の周波数帯域の制限やリング直線部の空間的制限のため、実用化には困難が伴った。FFAG 実用化のための加速空洞に関する決定的な技術革新が 90 年代半ばに、当時東大原子核研究所の所属であった森教授らによってなされた²⁾。高透磁率の

磁性体を装荷することにより、広帯域の特性と高い加速電圧を持つ加速空洞の実現が可能となり、FFAG が現実のものとなった。

ADSR 用の加速器として要求される特性として、ビーム強度が高いこと、消費電力に対するビームパワーが高いこと、安定した装置運転が可能であることが挙げられる。FFAG は固定磁場であるため、繰返しが通常のシンクロトロンに比べて 1~2 桁上がり極めて高いビーム強度が得られる加速器であり、固定磁場であることにより将来超伝導化が可能となるため、消費電力を抑制することが可能である。更に、加速にはアクティブなフィードバックが不要であるため、安定な運転が可能である。これらの理由により FFAG は ADSR の加速器として適した特性を持つものと考えられる。

3. 加速器システムパラメーター

本研究の設計作業は加速器複合系パラメーターの最適化から始まった。社内の自主開発は別として、研究用の加速器システム開発を極めて初期の段階から関与させてもらえる例は企業としてはまれである。今回の開発は入射用加速器・主リングの加速器の方式・取り合いエネルギー等の基本的なパラメーターの最適化から関与できた。企業における加速器研究として極めて意義深いものであると認識している。当初入射用加速器にサイクロトロンを想定していたが、後段の FFAG シンクロトロンがパルス運転となるため、ピーク電流の低いサイクロトロンでは、入射時のマルチターン回数が増えすぎてしまう等の問題点があった。そこで、高いピーク電流が得られ、しかも入射時の空間電荷効果を抑制できる加速方式として入射器には誘導

* 三菱電機株式会社電力システム製作所 Mitsubishi Electric Corporation, Energy System Center
(E-mail: Ishi.Yoshihiro@ak.MitsubishiElectric.co.jp)

表 1 加速器複合系仕様

	イオンベータ	ブースター	主リング
E_{inj}	100 keV	2.5 MeV	20 MeV
E_{ext}	2.5 MeV	20 MeV	150 MeV
P_{ext}/P_{inj}	5.00	2.84	2.83
k	2	2.45	7.5
セル数	8	8	12
R_{inj}	0.60 m	1.17 m	4.54 m
R_{ext}	0.99 m	1.65 m	5.12 m

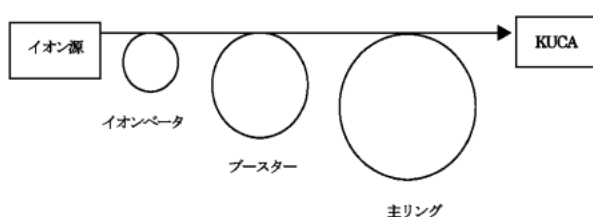


図 1 システム構成

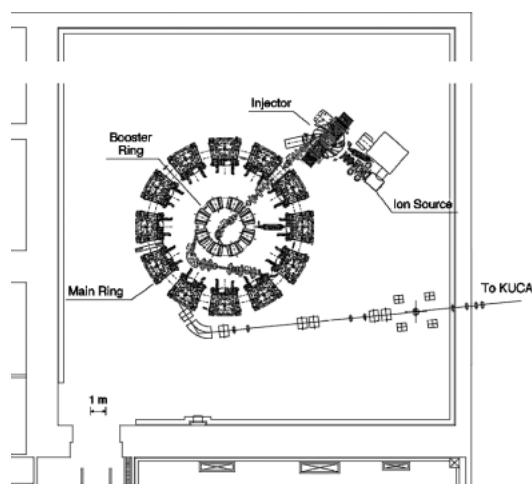


図 2 加速器複合系レイアウト

加速方式を採用した。

主リングには KEK で先行開発が進められていた 150 MeV FFAG シンクロトロンと同様の 12 セルからなる FFAG シンクロトロンを採用した。誘導加速では最大エネルギーは加速コアの断面積で制限されてしまうため、システム全体のバランスから、誘導加速の入射器（以下イオンベータ）と主リングの間にブースター FFAG シンクロトロンを設けることにした。これでリングが 3 台となり、それらの収束系はすべて FFAG という構成となった。加速器複合系の各リ

ングの仕様とシステム構成をそれぞれ表 1 および図 1 に示す。

KUCA が設置されている建屋に隣接して、イオンベータ・リサーチラボと呼ばれる加速器複合系を設置する建屋が新規に建設された。加速器複合系のレイアウトを図 2 に示す。繰返しは関西圏ということで（商用周波数はあまり関係ないという意見もあったが）120 Hz とした。今回の目的である KUCA における炉物理の実験に用いるためのビーム強度は数 nA 程度あれば十分であるが、将来 ADSR 実用化の検証のため、最終段のリングからはビーム $1 \mu A$ 級のビームが取り出せる様に各リングのパラメータを設定した。

4. 加速器基本設計

これまで、当社ではシンクロトロンのシステム設計を経験してきたが、FFAG は初めての経験である（おそらく FFAG をラティス設計から実施したメーカーは 2002 年当時そう多くはなかったと思われる）。そのため、システム設計に先立ち、ビーム設計ツールの開発から始めなくてはならなかった。設計ツールの検証には注意を払い、社内で異なる下記の 3 つのトラッキング手法を用いて閉軌道・チューンの振る舞い等に関するクロスチェックを行った。

- ① Off mid-plane を含む TOSCA の 3 次元磁場を用いた 4 次の Runge-Kutta 法によるもの
- ② mid-plane のみの TOSCA 3 次元磁場を用いた 6 次の Runge-Kutta 法によるもの
- ③ TOSCA 3 次元磁場からベクトルポテンシャルを算出しシンプレクティック積分法を用いたもの

その結果、有意な差は認められなかった。さらに KEK で FFAG の設計に用いられていたコードにより同じ TOSCA 磁場のデータを用いて同様の計算してもらい、その計算結果の良い一致が得られたため、ある程度の自信を持って、その先のラティス設計を進められた。

入射から取出しまでのチューンが不変であるためには FFAG の主電磁石における磁場は下記の半径依存性が必要である。

$$\frac{B(r)}{B(r_0)} = \left(\frac{r}{r_0}\right)^k \quad (1)$$

また、主リングからのビームエネルギーを可変にするためには、3 段構成リングのうち少なくとも 1 つのリングについては、磁場勾配を可変とする必要がある。当初はブースターに磁場勾配を可変にする機能を設ける計画であったが、詳細な設計検討を進めていく過程

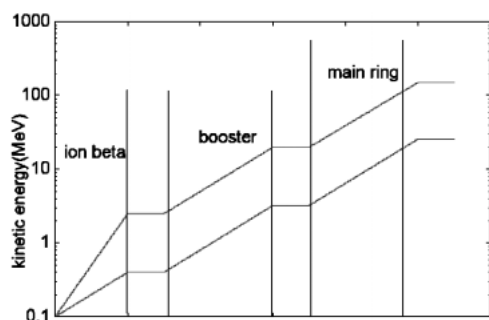


図3 各リングでの加速エネルギー

で、初段のリングであるイオンベータにこの機能を持たせた方がシステム全体の消費電力低減・コスト低減が図れることが判明した。このためオンベータのk値を可変とすることで、最終段のリングである主リングからのビームのエネルギーを可変とすることとする。図3に各リングでの加速エネルギー範囲を示す。

イオンベータでは平坦磁極に複数のコイルを設置し(マルチコイル方式)、電流を変化させることによりk値の変更を行う。一方、ブースター・主リングについてはk値を固定とし、全体の磁場を調整することで入射-取出しエネルギーを調整する。

4.1 イオンベータ

イオン源はマルチカスプ型の H^+ イオン源を採用し、100 keVで引き出す。イオンベータでは、100 keVから2.5 MeVまでの加速を行う。また、大強度ビームを実現するためには、1回あたりの加速粒子数を多くする必要があるが、100 keVという低エネルギーでの空間電荷効果がビーム強度を制限する要因となる。このため、イオンベータでは誘導加速による連続入射方式を採用した。また、リング全体の小型化とビーム入射・取出しを容易に行うため直線部の比率を高くするためスパイラル磁極方式を採用する。この平坦磁極・マルチコイル方式、誘導加速方式及びスパイラル磁極方式は陽子FFAG加速器では世界初の試みである。TOSCAによって計算された磁場分布を用いて、ビームトラッキングを実施し、チューンを計算した結果を図4のチューンダイアグラムに示す。

誘導加速には珪素鋼板のコアを用いる。コアは主要な加速部分に対する電圧を発生させるための主コアとビーム取出し時に取出し効率を上げるため更に電圧を上昇させるための副コアとからなり、主コアおよび副コアの厚みはそれぞれ0.35 mmおよび0.05 mmである。図5に加速電圧のパターンを示す。同図で、横軸は時間、縦軸は加速電圧を表し、ビーム入射時は2 kV、主要加速部分は3 kVの電圧を主コアにより発生

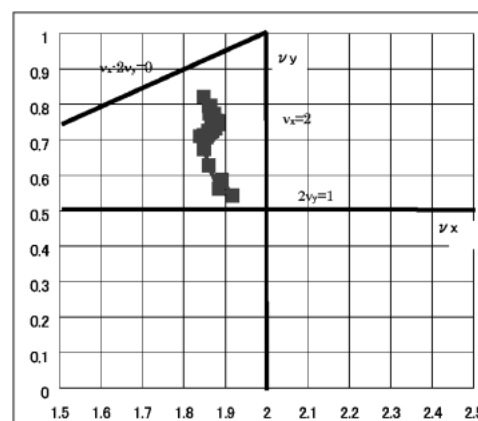


図4 イオンベータのチューンダイアグラム上の動作点

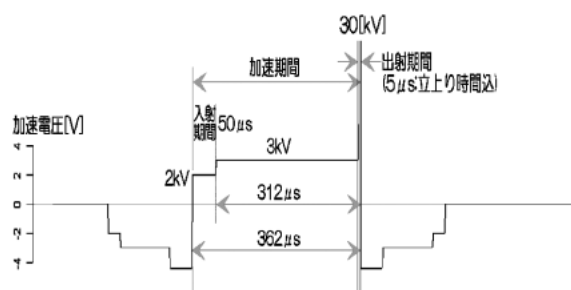


図5 誘導加速の電圧パターン

させ、ビーム取出し時の $5 \mu s$ では副コアにより30 kVまで電圧を上昇させる。これにより、取出し効率をあげると同時にビームのパルス長を圧縮して、後段のシンクロトロンに入射時間を短くすることが可能となる。

4.2 ブースター

入射用加速器ブースターリングでは2.5 MeVから20 MeVまでの加速を行う。(1)式のFFAG磁場の実現方法は磁極面を曲面とする方式を用いる。基本ラティスはKEKで2000年に原理実証されたPoP-FFAGシンクロトロン³⁾と同様のDFDトリプレット8セル構造とした。ビーム入射から取出しまでのチューンの変化を図6のチューンダイアグラムに示す。

4.3 主リング

主リングの基本仕様はKEK 150 MeV FFAGシンクロトロンとはほぼ同等とした。主電磁石には、F磁極部分のリターンヨークの無いヨークフリー型の電磁石を採用している。このタイプの電磁石は取出しがF磁極部分から行える利点がある反面、直線部への漏れ磁場が大きく、このための対策が必要となったが、幸いKEKでのビーム実験での経験を設計に反映することができた。入射から取出しまでのチューンの変動を

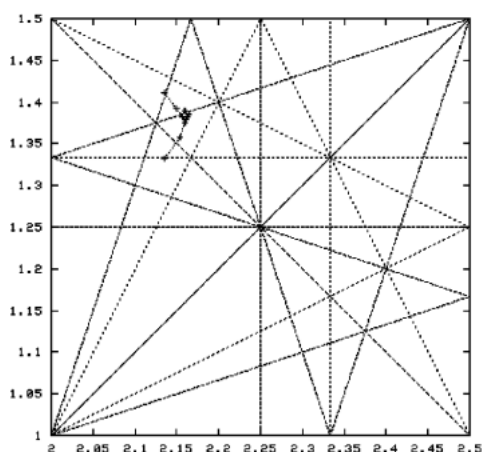


図6 ブースターのチェーンダイアグラム上の動作点

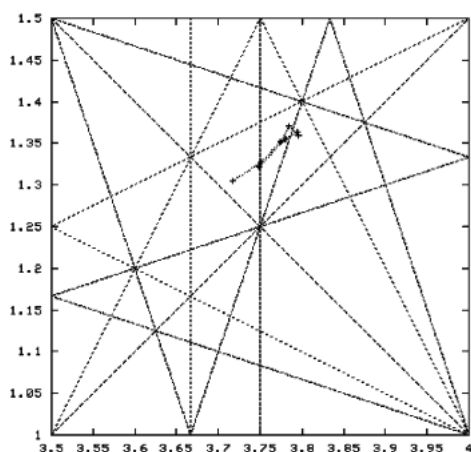


図7 主リングのチェーンダイアグラム上の動作点

抑制するために直線部に面する磁極（D 磁極）に補正磁極を設け、チェーン変動を図7に示す通り、水平垂直両方向とも $\Delta v = \pm 0.1$ 程度とすることができた。

5. 制御系設計

ビームコミッショニング後の加速器の運転保守は京大スタッフが主体となるため、設計初期の段階から京大の教員及び技術職員の方々と打合せ、仕様決めを行った。京大側にはシステムの運用を考慮した制御システムの作りこみを担当いただき、三菱側は電磁石等の機器単体の制御部分を担当した。

機器制御は信頼性・簡略化の観点から基本的に PLC を用いて行うこととした。PLC に指令を送る上位側のインターフェイスには市販のパッケージソフトウェア LABView を用いた。制御計算機は Windows の PC を用い、LAN を経由して制御室から制御する。また、必要に応じて構内限定の無線 LAN を経由

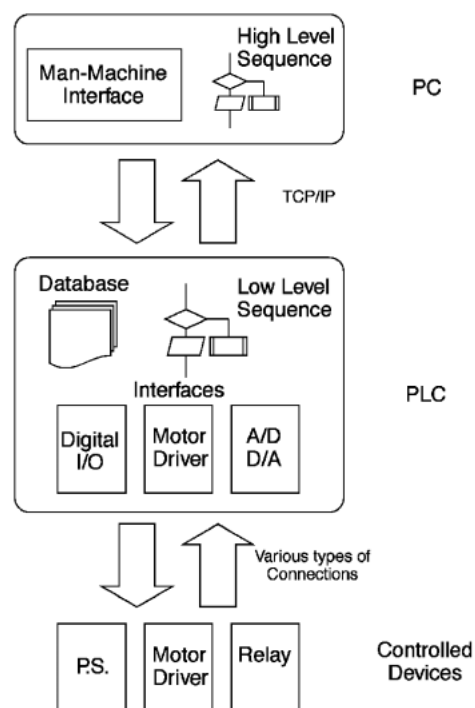


図8 FFAG 制御システム構成図

して加速器本体室からでもノート型の PC を用いて電源やモニターの制御が可能となっており、制御系全体は極めて軽い操作性が実感できる構成となっている。

図8に制御システムの構成図を示す。

ブースターから主リングへの入射の際に RF の周波数と位相を合わせなければならない。そのため、2チャンネルの DSP を用いて、2つの RF システムをブースター取出しのタイミングと主リング入射のタイミングで周波数と位相が一致するような RF パターンをあらかじめプログラムすることができる Tektronics 社の任意関数発生器を用いることとなった。

6. 機器の設計及び製作

これまで、当社は各研究機関・大学などに加速器のコンポーネントを収めてきている。また、兵庫県殿、静岡県殿向けに粒子線治療装置として加速器システムを納入した実績があるが、FFAG 加速器のシステムは全く初めての試みである。通常のシンクロトロン設計においても、ビーム設計と機器設計のフェイズは完全には分離できないが、機能分離型の電磁石では、設計段階からある程度は機器単体の設計は独立に進められる。一方、FFAG はビーム設計と機器設計が密接に絡み合い、真空チャンバー・入射電磁石等の機器設計がビーム設計に頻りにフィードバックがかかることとなり、ビーム設計と機器設計は当初想定した

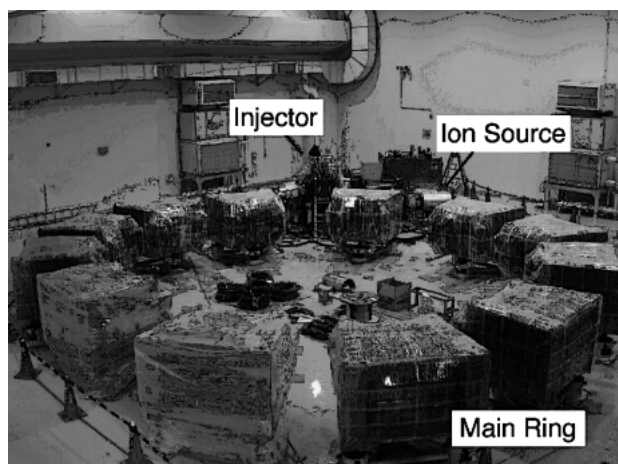


図9 京大原子炉実験所イノベーションラボラトリーに建設中のFFAG加速器システム

よりもかなりの長期戦となった。

もっとも苦労した部分はイオンベータである。トリムコイル、真空チェンバー、加速コア、入射および取出し用の電極が狭い空間に配置されるため、組立図の作成は3次元CADを駆使して機器の干渉をチェックしながら行った。

イオンベータのリング全体は現地でのアラインメントを簡素化するため、電磁石及びそのギャップに収まる真空チェンバーを工場で架台上で組立て、半円分を1単位として2分割して輸送搬入された。誘導加速コアは電磁石とは別に輸送され、現地にて一体化した。リングの一方の半円はあらかじめ入射機器との整合をとりアラインメントしておき、加速コアをそれにあわせて据付け、最後に取出し側の半円を架台ごとレールに乗せてスライドさせて一円とした。

ブースターは比較的素直なリングではあるが、直線部のスペースは短く、これに入射・取出し電磁石および電極等を配置しなければならない。入射にはバンプ電磁石、静電セプタム、セプタム電磁石を用い、取出しには伝送線型キッカー電磁石、セプタム電磁石を用いる。これらすべての入射・取出し機器は真空中の設置となり熱負荷が問題となるこのため、セプタム電磁石は入射取出しともにパルス電磁石とした。120 Hzの繰返しはパルス運転でも熱的に厳しく、コイルだけでなく鉄心も冷却の必要がある。

主リングでは直線部に磁性体を設置すると、漏れ磁場が吸収され、CODソースとなる。直線部に配置する入射取出しのキッカー電磁石には空芯タイプのコイルを用いることでこの問題を解決した。図9に建設中のFFAG加速器複合系の写真を示す。

おわりに

本研究は未臨界炉駆動用の加速器複合系をシステムパラメーターの決定から機器設計・製作・試験・ビーム調整を含むものであり、世界初の試みもいくつか含む開発要素の多いプロジェクトである。一企業が担当する計画としては若干欲張りすぎた感もあるが、十分過ぎるほどやりがいのある仕事である。委託研究ではあるが、各部の仕様決定と工程進捗確認のため京大と当社の間で定例打合せを行っている。有益なご意見を頂いている京都大学の井上先生、森先生、谷垣先生を始め諸先生方に感謝いたします。また、本プロジェクトのリーダーとして計画全体の推進にご尽力いただいている三島先生、そして絶えず激励して下さっている原子炉実験所所長代谷先生に感謝いたします。

装置引渡し後のメンテナンスを京大スタッフで行うことを想定し、制御系に限らず全体の設計・製作段階からの積極的な関与を京大側から申し出ただけことは感謝すると同時に製作側も大変励まされた。三菱電機の工場内で行われた電磁石の磁場測定他試験やイオン源とその後段のビーム輸送系の調整にも京大の若手研究者のご協力いただいた。また、主リング設計・製作にあたっては有益なアドバイスとともに磁場計算・トラッキングのクロスチェックをしていただいたKEKのFFAGグループの方々に感謝いたします。

この拙文が本誌に掲載される頃には、京大原子炉実験所において加速器複合系のビームコミッショニングが進められているはずである。幸いなことに、京大からは制御系の設計・製作を進めてこられた強力なスタッフとともに、KEKでのFFAGシンクロトロンのコミッショニングに携わってこられた若手研究者も京大でのコミッショニングに加わってくださることになっており、経験不足な当社にとっては心強い次第である。ビームコミッショニングの実際の結果については、別の機会に紹介させていただきたい。

なお、本報告は、電源開発促進対策特別会計法に基づく文部科学省からの受託事業として、京都大学が実施した平成16年度「FFAG加速器を用いた加速器駆動未臨界炉に関する技術開発」の成果の一部である。

参考文献

- 1) T. Ohkawa, Proc. of annual meeting of JPS (1953).
- 2) Y. Mori et al., "A New Type of RF Cavity for High Intensity Proton Synchrotron Using High Permeability magnetic Alloy", EPAC 1998, p. 299.
- 3) M. Aiba et al., "Development of a FFAG Proton Synchrotron", Proceedings of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 581.