

2. キッカー電磁石の開発

2.1 要求性能

採用したビーム取り出し方法は、1組の取り出しキッカー電磁石と取り出しセプタム電磁石による速い取り出し法である。本加速器のセプタム電磁石の壁の厚さは3 mm であり、取り出しエネルギーでのビームサイズは10 mm である。したがって、セプタム電磁石の位置で要求されるビームセパレーションは13 mm 以上であり、キッカー電磁石のキック量がこの条件を満足することが求められている。

また、本加速器の取り出しエネルギーでのビームの周回周期は250 ns であり、ビームのバンチ長は100 ns である。周回ビームに影響を及ぼさずに取り出しビームだけにキッカー電磁石の磁場を作用させるためには、キッカー電磁石の電流の立ち上がり時間150 ns 以下、電流平坦部100 ns 以上という性能が望まれる。

2.2 基本設計

150 MeV FFAG 加速器は、磁極間が広く、加速器直線部が短い円形加速器であり、加速器直線部において約400 gaussの漏れ磁場が存在する。そのため、磁性体を用いた新たな機器の加速器直線部への設置は、閉軌道の歪みの原因となる。閉軌道の歪みを避けるため、電磁石は空芯コイルによる構成とした。一般に磁性体を用いずに空芯コイルのみで構成された電磁石は、磁場強度が小さく、またインダクタンスが高くなるため電流の立ち上がりが遅くなる。磁場強度、電流立ち上がり時間ともに要求を満足するよう設計研究を行い、4ターン巻きのコイルをビーム進行方向に三分割し、並列に接続する基本構造とした。開発したキッカー電磁石の写真を図2に示す。

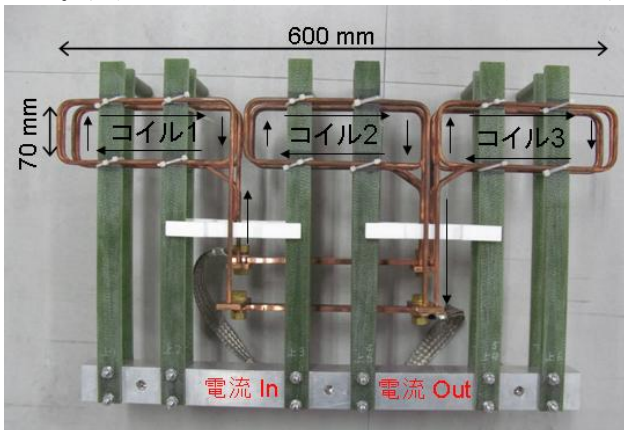


図2：開発したキッカー電磁石の概観

要求されるキック量を満たすために、キッカー電磁石の各コイルに流す電流量を1700 A、全体では5100 A と設計した。キッカー電磁石に付加する最大電圧は、空気中の放電限界を考慮し40 kV とした。三次元磁場計算コード TOSCA を用いたキッカー磁場分布を取り込んだビームシミュレーションにより、

設計値において、取り出しビームはセプタム電磁石の壁より2.5 mm 以上離れた位置を通過することを確認した。

一方、キッカー電磁石の電流立ち上がり時間150 ns 以下を達成するための条件として、設計値よりインダクタンスに1 μH 以下という要請が導かれる。ネットワークアナライザを用いてインダクタンスの測定を行った結果、今回製作したキッカー電磁石のインダクタンスは0.95 μH であり、三分割の並列方式により要求性能を満たす電磁石が実現できたことを確認した。

2.3 磁場測定

開発した電磁石の磁場性能を評価するために、磁場測定を行った。設計に用いた計算磁場分布と製作したキッカー電磁石の実測磁場分布を比較することを目的とし、20.0 A の直流電源を用いて励磁し測定を行った。測定結果の一例として、キッカー電磁石コイル中心軸上の計算磁場分布と測定磁場分布を図3に示す。

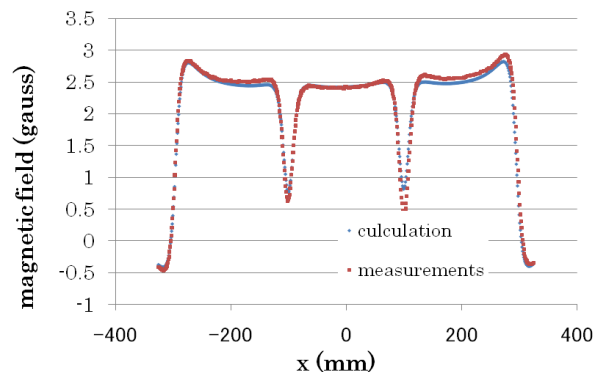


図3：測定磁場分布と計算磁場分布

実測したキッカー電磁石の磁場分布を用いてビームのキック量を評価した結果、計算磁場分布を用いた評価値と1.50%以内の精度で一致した。この結果から、計算磁場分布を用いたセプタム電磁石位置におけるビームセパレーションのシミュレーション結果の磁場分布に起因する不確定さは電流値5100 A において0.2 mm 以内と評価される。

3. キッカー電磁石電源の開発

3.1 基本設計

2章で示したようにキッカー電磁石に付加する最大電圧は40 kV であり、供給電流量は5100 A である。また、立ち上がり時間150 ns 以下、電流平坦部100 ns 以上のパルス電流の供給が望まれる。以上の要求を満たすように電源回路の設計を行った。

キッカー電磁石に供給される電力は PFN 回路によって作られる。高速スイッチング部は、サイラトロン (E2V 社製; CX1175) によって構成されている。パルス電流の反射波を抑えるためのダイオード部は、HDB7.5 を直列に10個連結したものを並列に10個並べて構成している。パルスモジュールの概

観を図4に示す。



図4：パルスモジュール概観

3.2 出力電流試験

製作した電源をキッカー電磁石に接続し、CT (Pearson 社製；MODEL110A)を用いてパルス出力電流の測定を行った。パルス部の充電電圧 41.5 kV 時の出力電流試験で得られた電流波形を図5に示す。

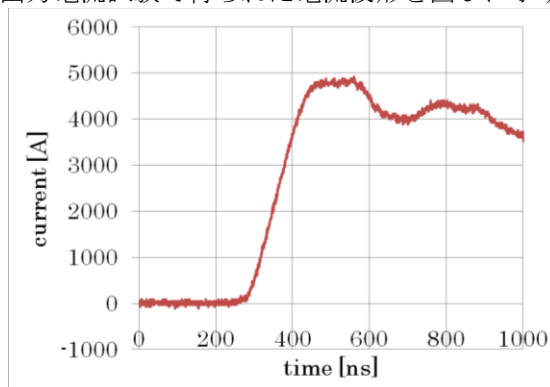


図5：キッカー電磁石の出力電流波形

ここで、電流の立ち上がり時間を電流最大値の5%から96%に到達するまでの時間、電流平坦部を電流最大値の96%以上を保持する時間と定義すると、キッカー電磁石の電流立ち上がり時間は160 ns、電流平坦部は140 ns となることが分かった。電流立ち上がり時間が設計目標値150 nsより遅くなった原因として、キッカー電磁石の電流導入部のインダクタンスが大きく、負荷側の要求性能である1 μHを超えたためと考えられる

4. ビーム取り出しシミュレーション

製作したキッカー電磁石の計算磁場分布及び電源の出力電流波形を用いてビーム取り出しシミュレーションを行った。3.2章の出力電流波形より、電流立ち上がり始めから150 ns後のキッカー電磁石の電流値は、4400 Aであり、その後250 ns後まで単調に増加する。したがって、取り出しビームはキッカー電磁石の電流値が4400~4900 kAのときに蹴りだされる。ビームサイズを KEK での実測値である

10 mm とし、キッカー電磁石の電流値 4400 A~4900 A の間において数値計算を行った。

キッカー電磁石の電流値が 4400 A、4900 A で蹴りだされる取り出しビームのセプタム電磁石入り口での r - r' 空間上のエンベロップを図6に示す。条件が最も厳しいキッカー電磁石出力電流値 4400 A のとき、電磁石入り口において周回ビーム端と取り出しビーム端の最近接距離は3.8 mmであり、2.3章で評価したキッカー磁場による不確定さを考慮に入れてもセプタム壁(壁厚3 mm)でビームを損失せずにビームを取り出せるという結果を得た。

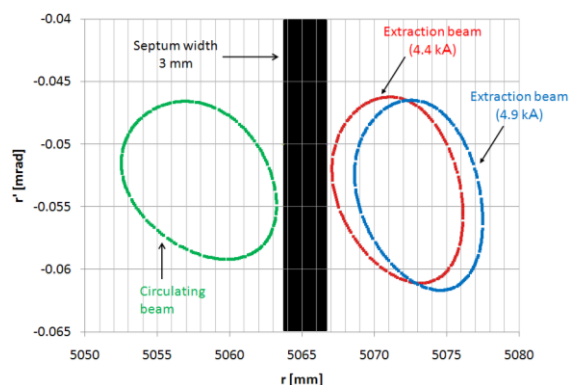


図6：セプタム電磁石入り口での r - r' プロット

5. 結論

150 MeV FFAG 加速器のビーム取り出し効率の向上を目的として新たに開発したビーム取り出しキッカー電磁石及び電源の試験を行い、電流の立ち上がり時間(5-96%)は160 nsであり、150 nsに対し約10 ns 遅いことが分かった。実測出力電流波形を用いた取り出し計算の結果、条件は厳しいが100%のビームが取り出し可能であることが分かった。

安定かつ確実に100%のビームを取り出すためには電流立ち上がり時間を早くする必要がある。今回の試験においては浮遊インダクタンスへの対処を行っていないため、改善の余地は十分残されている。今後、キッカー電磁石及び電流導入部のインダクタンスを下げるよう改良し、電流立ち上がり時間の短縮を図る。改良が済み次第、150 MeV FFAG 加速器に設置し、ビーム取り出し実験を行う予定である。

参考文献

- [1] K. R. Symon, et al., "Fixed-Field Alternating-Gradient Particle Accelerators", Physical Review, Vol.103, No.6, 1837, (1956)
- [2] Y. Yonemura, et al., "Development of RF acceleration system for 150 MeV FFAG accelerator", NIM, A 576, 294-300, (2007)
- [3] M. Aiba, et al., "Beam extraction of 150 MeV FFAG", Proceedings of EPAC 06