

## Injection/Injection Beam Dump Kicker Magnet Systems for MR of J-PARC

Eiji Nakamura, Yoshihisa Shirakabe, Shigeru Murasugi  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Injection and injection beam dump kicker magnet systems for MR of J-PARC are described here. Those systems are investigated now and will be installed in this year.

### J-PARC MR 入射系キッカー電磁石システム

#### 1. はじめに

現在茨城県東海村で建設中の大強度陽子加速器施設(J-PARC)<sup>1</sup>は、線形加速器と、3GeV RCS、50GeV MRのシンクロトロン加速器が主たる構成加速器となっている。RCS及びMRの粒子線入出射の半数は高速入出射を採用している為、多くのキッカー電磁石システムが導入され、計画も含めて下記6種類となった。

- 1) RCS 出射キッカ (仮称: REK)
- 2) MR 入射キッカー (MIK)
- 3) MR 入射ダンプキッカー (MDK)
- 4) MR 速い取り出しキッカー (MFK)
- 5) MR 速い取り出し補助キッカー (MAK)
- 6) RCS DC出射キッカ (RDK)

これらのデザインはKEK12GeV-PSの全キッカーと同型の分布定数型電磁石<sup>[1,2]</sup>をベースとしているが、RCS、MRの設計方針を考慮し、多岐に検討を行った。基本的には、GEMINI計画<sup>[3]</sup>、前身のJHP/JHF<sup>[4,5]</sup>からの検討・試行実験と、KEK12GeV-PSでの実動状況を反映させた。要求される立上り時間は遅い部類に属し、性能のみの観点から言えば現行のシステムより高い性能を出せる設計は十分可能であり、その候補は少なくない。100nsを切る要求の場合は光速に近いレベルになり限界があるが、MIK以外は300ns以上の余裕がある為単機技術としては問題にならずコストをかければ達成し得るものが殆どである。しかし、統合計画<sup>[6]</sup>としてスタートした段階で、加速器レベルでの設計方針により、単機性能を追及せず全体方針に沿う事に重きを置いた物が殆どとなった。

キッカーはコスト高との「印象」が強い為、速い立上りを達成するだけでなく要求以上の無駄を減らす事が重視された。故、立上り時間の要求上限だけでなく下限もありその幅が非常に狭く、設計段階での個々の選定・決断が非常に難しかった。ビーム輸送系の機器ではあるが、非励磁状態においては周回ビームと相互作用を起こす為、リングデバイスとしての取扱も必要である。その為、加速器に用いられる殆どの技術を必要とする。キッカーは高速性能優先機が多く短パルスで電力的には非常に小さな物であったが、J-PARCにおいては最大10KW出力に到達する物もあり、徐熱・冷却系の整備も必要であり、電

力機器としての概念も必要となった。個別にはさほど特殊な技術ではない<sup>[7]</sup>が、総合システムとしては低くないレベルになり、R&D等は特化する部分が多い。又、大強度ビームに起因する大きな問題もある。

本論では、入射系キッカー電磁石システム(MIK, MDK)の実機に関する紹介と関連する現状技術を記す。

#### 2. 入射系キッカー電磁石システム

電磁石口径は概ね W130mmxH98mmxL750mm。MR運転開始日(day-one)では130nsバンチの入射であり、470ns、4,670nsの立上り時間と730nsのフラットトップを形成すればよい。750KWビーム出力時には[300ns,900ns/900ns]が必要である。MIKに関しては高速化を優先させ終端整合型としているが、立上り時間に余裕がある為終端短絡全反射利用磁場増増型の可能性がある。この場合、ダイオード、各端末部等の誘導的反射が不正磁場として生じる。サージ保護との競合はあるが、高速ダイオード等の開発により、現行では5%程度となり、3台中1台を磁場増強型にする。図1、2は磁場波形と水平方向分布であり、目標を達成している。MIKに関しては、左右の励磁電流を20%変更した結果(緑太線)も示している。

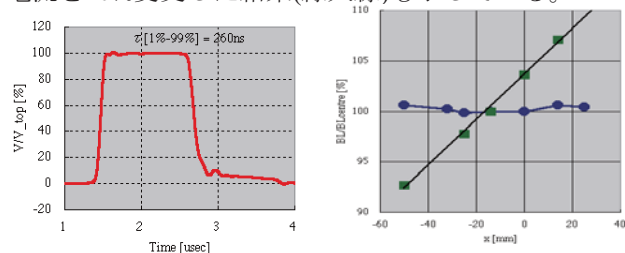


図1: MIKの磁場波形(左図)と分布(右図)。

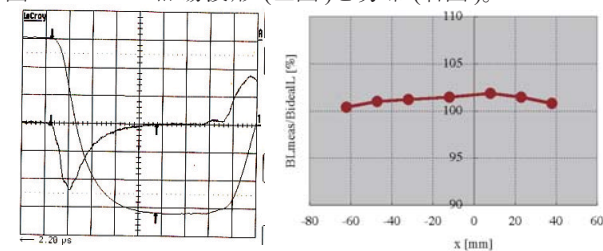


図2: MDKの磁場波形と水平分布。左中央が誘導電圧で他方が磁場波形(横軸[0.2μs/div.])。右図縦軸は励磁電流から算出した理想磁場で規格化した測定値。

<sup>1</sup> <http://j-parc.jp/>

### 3. J-PARC のキッカーの基本設計概念

入射系キッカーの設計概念を他のキッカー [8-13] とともに紹介する。精度1%が目標であるが、既存手法の原理的境界でもあり、出力の自由度や将来的な裕度をもたせる方針に変更した。起因するビーム損失が顕著になった場合、小型の補正電磁石を設置する。装置主要部改造の危険性より安定動作を目指した方針である。関連する特化技術を有する ISIS、CERN-PS, SPS&LEP等の海外状況も反映している [14]。

#### 3.1 REK

W280xH170xL600という大口径且つ300nsという中程度の磁場立上り時間が要求である [15]。励磁電流は6.5KA2Pであり最大出力は10KW近くなる。JHP時には125nsの要求があり、高速大電流パルスの生成も難しかった為分布定数型を採用した。立上り時間許容幅の拡大に伴い、磁場倍増型に展開した。10Ω系で構築されておりキッカーとしては低いインピーダンス系に属する為、構成要素の中に0.1Ω程度の微細要素が入った場合でもそれが直接分布に影響して1%近い不均一を引き起こす。これを回避する為、C型電磁石を2つ合わせ、各々独立電源で励磁し出力バランスをかえることで水平分布をある程度まで維持する方式を選択した。メインスイッチは定格の1.5倍の耐圧設定でCX1193Cを選択した。充電器に関してはDC充電、共振充電等を検討したが、R&D及びコストの観点から、IGBTによるコマンド充電を採用した。波形成型には特性を重視し高耐圧同軸線30.0/18.2を採用した。維持保守方針に従い、当該線はパルス透過特性より耐圧を優先した。電源主回路の電気絶縁に関しては、冷却も兼ねて、低粘度のシリコン油を用いた。引火点が比較的高く指定可燃物としての扱いが可能で特殊消火施設は不要であるが、1台当りIKLの使用に及ぶ為管理には配慮が必要である。フロリナート等他の絶縁油は環境面での方針を優先させて候補から除外した。電源は最も簡素化されたカソードフォロワでのシンプルラインである。出力が大きい為、キッカーとしては異例ではあるが、2次水冷系を必要とする。総台数は実質16台になるが、これは1台動作不良を起こしてもビーム損失が軽減されるように、台数を増やしてリスクを下げた。

#### 3.2 MIK

MR-upgrade検討に伴い最も高速性能を要した物である。現時点でのupgrade方針は、近隣のQ電磁石の口径を拡げて入射ライン全体での裕度を確保する事になった為、MIKの負担は減少した。基本設計は、REKとほぼ同じである。本機も安定動作を最優先さ

せ、将来的な改良の自由度を残す為、シンプルな構成となっている。台数リスクはビームパワーが小さいことから考慮せず、3(+補助1台)としている。

#### 3.3 MDK

MRで唯一の集中定数型であり、電磁石のコンパクト化を優先させた。電源はKEK12GeV-PS MR FXキッカー電源を2並列で励磁する形に相当する。インピーダンスが6.5Ωとかなり低くなるが立上り時間が緩やかでよい為問題はおきていない。並列動作時の異常点呼時に関しても特に問題ない。加速器内のビーム制御の為、システム数は減らした形となる。

#### 3.4 FXK

J-PARCで最も仕様が緩やかで誰にでも理解でき簡単に動かせ改良等の自由度を上げた基本設計とした。唯一、両極性出力という白壁の発案が特徴的である。電磁石はMDKと同様、集中定数型であった。ヘッドセル等幾つかの手法で検討を行い、キッカーに致命的なリングングを出さない範囲で見通しをたてていた。量産段階で電磁石入力電圧の低減という安全面の理由のみにより分布定数型に変更になった。メインスイッチは、民間への普及拡大と安定供給を最優先としIGBTを採用した。高電圧仕様のサイラトロン調達は難しく、将来的に供給が絶たれる可能性がある。性能だけをみればSIサイリスタ [16-21]等の有利な素子はある。波形成型は同軸ケーブルを想定していた。純水タンク型や磁気圧縮法の登用等も検討したが維持保守の簡素化の為候補から外した。寸法制限だけの合意が得られず固定素子PFNとなった。本来ISISのキッカー等と同様、コンデンサによる波形調節機構式であるべきだが、量産段階でインダクタ調整機構を採用した。ソレノイド中に金属を挿入し渦電流で実効値を調整する機構でありモジュレータ等での用途が多い。渦電流による手法はACとしての発想が主であり片極矩形パルス時との効果比は2倍の差が生じる為、誤設計の危険性が大きい。他にもAC的に改造されており、2006年12月段階では図3青太線の様に電源出力時点で既に5%近いリングングを出す形となっていた。上述のAC的改造や各部のインピーダンス管理構造及びPFN折返し部のL/2構造化等基本的部分の排除に原因がありその当然の結果とみなせる。更に固定素子遅延回路を挿入する案も浮上しており、高速性能を落とし且つコスト・寸法制限面でも問題がある。このような状態で励磁しても目標到達は極めて困難であるが、ヘッドセルにより図3緑細線の様に簡単にある程度の低減は可能である。この様な簡単な改良の余地を残す為、パ

ルス伝送線の並列数を4とした。システムの簡素化の為基本設計時にパルストランスは無かったが、電磁石ギャップに静電界を発生しビームへ不正電場を生じると耐圧劣化を懸念し変更した。ある程度のdroopをもたせ、パルス伝送線やPFN、電磁石の立上り等による鈍化と相殺し高速化を維持する設計である。この設計方針を逸脱するとリングを発生させてしまい、キッカーとしての運用ができなくなる。

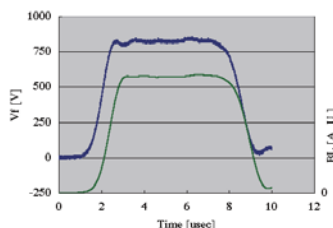


図3：電源出力波形(青太線)とヘッドセル改善磁場波形

### 3.5 MAK

MRは30GeV加速で開始するが、50GeVと比して大きなビームサイズで出射する為、キッカーだけは増強が必要であり、それが本MAKである。主機FXKに対して、1.35倍以上の磁束密度(励磁電流11~16KA)、1.35倍以上のL負荷であり、非常に厳しい要求である。大電流(18KA)励磁試験等特化するR&Dを実施し、実機はサイクロトロンCX1725及びMIK電源の転用をベースとした基本設計を行った。が、特化し過ぎた為、ライン全体の再設計を含めて保留としている。

### 3.6 RDK

RCS入射ビームを即座に出射する為に検討された。バンチが長くなる為、出射キッカーにディレイをかけて重畳励磁する方法と低磁場DC小電磁石の導入が検討された<sup>[22]</sup>。技術的には特筆する点はない。

## 4. 議論

単体の性能追及より周辺との協調性を重視しており、その一部を前章に記した。単機としての開発は多岐に及んでおりJ-PARCに関してはその選択に制限はない。一方、ビームの安定供給や損失低減の為には総合的な判断力が必須である。キッカーはビームカップリングインピーダンス<sup>[23]</sup>も高く加速効率を落とす原因の1つであり、キッカーが無い事が理想的には望まれる。故、関連する特化技術が無い方が加速器全体としては良い設計となり、技術継承を絶つことが賢明とされる評価もあり、真空管等アナログデバイス離れも後押しし、現状レベルの低下は一線を越えているのは否めない。故、特殊技術や総合力を養う為の育成手段を残していない。キッカーは唯一高速性能を追及する機器であり、矩形磁場且つ粒子にエネルギーを与えない為「効率」という観点では最も劣悪であり、逆にそれを追及せねばならない。ACとパルスの差が最も顕著に出るものであり、外見上似たような一般的な概念を間違った形で導入し、不適切な評価方法を用いる傾向が多くみられ、一部のAC的特性は改善されてもパルスとしては使え

ず、又、システム全体としては特性を大きく落とすような方向性が多く、更にはそのような状態を理解する環境がなくなりつつある。この傾向は総合力の欠如に起因している。初心者でも理解できる形で技術を残す事、育成環境を再構築する事、又、指導者そのものの意識改革を促す事が最大の責務とを感じる。

### 謝辞

本論は10年以上に渡る集大成となっており、その時々によくの方々に御協力戴きました。特に、全体方針において森義治氏、ライン設計で富沢正人氏、野田文章氏、励磁電源で田澤七郎氏、志垣賢太氏、電磁石は酒井泉氏、島田太平氏、鈴木寛光氏、真空系で齊藤芳男氏、久保富夫氏、佐藤吉博氏、電子回路・制御で中川秀利氏、石田忠治氏、荒川大氏、荒木田是夫氏、特殊電磁石で高須ゆう子氏、評価試験環境等施設保守にあたられてきた旧KEK12GeV-PS加速器スタッフの皆様、更に、日本原子力研究所(現JAEA)との共同で川久保忠通氏を中心とした入出射電磁石グループ各位には研究所を越えた有り難い協力を戴きました。プロジェクト推進室方々も含め、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

### 参考文献・参考資料

- [1] Takata, Koji, *et al.*, KEK-76-21.
- [2] T. Kawakubo, *et al.*, APAC98, KEK Preprint 98-1.
- [3] GEMINI Design Study Report, KEK Progress Report 86-4.
- [4] KEK Report 97-16, 99-5.
- [5] KEK Report 2002-13 and JAERI-Tech 2003-44.
- [6] KEK Report 99-4, JHF-99-3 and JAERI-Tech 99-056.
- [7] KEK内部報告書<sup>2</sup>: ASN-401, 418, 421-422, 427, 431, 441, 450, 455, 458, 468, 475-477, 479, 481, 492-496, SR-435, 466, 477, 499, 524-525, 530-532, 568-569, 578, FR-287, 342, 361, OB-157, 159, MR-305, 309, 313.
- [8] Y. Shirakabe, *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol.14, No.2, June 2004, pp425-428.
- [9] Y. Shirakabe, *et al.*, Proc. of the 9th EPAC, Lucerne, Switzerland, July 5-9, 2004, pp1333-1335.
- [10] Michael J. Barnes, *et al.*, IEEE Trans. on Appl. Supercon., Vol.14, No.2, June 2004, pp465-468.
- [11] I. Sakai, *et al.*, Proc. of the 9th EPAC, Lucerne, Switzerland, July 5-9, 2004, pp1339-1341.
- [12] Takao Oogoe, *et al.*, The 2nd Annual Meeting of PAS of Japan and the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, Japan, July 20-22, 2005.
- [13] M. Tomizawa, *et al.*, ID: 2157 - TUPAN052, PAC2007.
- [14] 家入正治, 科研費成果報告書 10041129.
- [15] 中村英滋他, 14th SAST, 1P035, Nov. 2003.
- [16] 中村英滋他, [招待講演:SSID-03-5] 第16回Siデバイスシンポジウム, 13<sup>th</sup> June 2003.
- [17] 佐藤皓他: 14th SAST, 1P018, Nov. 2003.
- [18] W. Jiang, *et al.*, Proc. of the IEEE, Vol.92, No.7, JULY 2004.
- [19] Sato, H., *et al.*, Proc. PAC2003, pp1165.
- [20] H. Sato, *et al.*, RPIA 2002, Oct. 29-31, 2002.
- [21] 中村英滋他: 13th SAST 9P32, OCT. 29, 2001.
- [22] 野田文章 (私信)。
- [23] Takeshi Toyama, *et al.*, ID:1128 - TUBX03, ICFA HB2006.

<sup>2</sup> <http://www-accps.kek.jp/AllOK/kek-staff/>