

J-PARC 3GeV RCS 出射用キッカシステム

中村英滋^{A,C)}、神谷潤一郎^{A)}、高柳智弘^{A)}、島田太平^{A)}、鈴木寛光^{A)}、川久保忠通^{A,C)}、
志垣賢太^{B)}、村杉茂^{C)}、田澤七郎^{C)}、

^{A)} 日本原子力研究所東海研究所 〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22

^{B)} 広島大学大学院 〒739-8526 東広島市鏡山 1-3-1

^{C)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

概要

大強度陽子加速器の 3GeV シンクロトロン加速器ビーム出射キッカ電磁石システムに関して、パルス源、電磁石の R&D と量産機的设计に関して報告する。高速出射のため、積分磁界の立上り時間は 300ns 以下、フラットトップ 0.9 μ s 以上を必要とする。また、大口径かつ高速性能を維持するため、3KA/30KV のパルス電流(励磁電流は倍の 6KA)で励磁する必要があり、特性インピーダンスを合わせた分布定数型の磁石となる。また、高電圧となるため磁石本体は真空環境下で動作させる形となる。

1 序

現在建設中の大強度陽子加速器研究施設(J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex) [1] は、イオン源(前段加速器)、線形加速器、3GeV 高繰返しシンクロトロン加速器(RCS: Rapid Cycling Synchrotron)、50GeV シンクロトロン加速器(MR: Main Ring) の4つの加速器に大別され、3GeV-RCS はキッカ電磁石システムを用いた1ターン出射を行う。3GeV-RCS は、1 MW の大強度ビーム加速と kW オーダーの低ビーム損失を目標としており、ビーム自身の空間電荷効果によるビーム損失等を回避するため横方向エミッタンスの大きなビームを想定している。このため、RCS 全ての電磁石は大口径となり、本キッカ電磁石も H280mm x V146~190mm という世界的にも希なギャップ寸法となっている。これに伴い、磁石本体の大型化による強度・構造設計の難点、ギャップ出入口の磁界分布による多極不正磁界の影響などが問題となり、特に、キッカ電磁石には立上り時間への影響も無視できなくなる。

2 出射ラインと要求性能

図1に出射ラインの概略を示す。出射キッカは8台で構成され、それぞれ 2mrad 前後の蹴り角を必要とする。メカニカルアパーチャとしては、入射ビームに対して 486 π mm mrad、出射ビームに対しては、324 π mm mrad(コア 81 π mm mrad)を確保しなければならない。

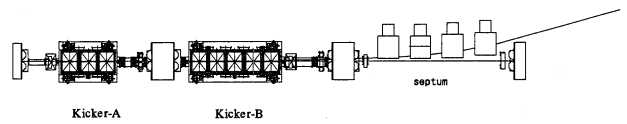


図1: 3GeV RCS 出射ビームライン

3 ハードウェアの設計

3.1 経緯

本キッカシステムの設計は、3GeV 陽子シンクロトロン設計の原点でもある GEMINI 計画とともに進められ、後続 1990 年代の JHP-, JHF- 3GeV 検討会がベースになっている [2]。その後、日本原子力研究所(原研)/高エネルギー加速器研究機構(KEK)の協同計画の一環として加速器統合計画(大強度陽子加速器建設計画)が本格的にスタートし、3GeV リングの加速ハーモニクスが h=4 から h=2 へ変更された直後の 2000 年に、本キッカの設計をほぼ確定させた。その後、3GeV の周長 10/9 倍化などリングとしての大きな変更はあったが、キッカに関しては大きな変更はしていない [1]。低ビーム損失に対するビームハローの問題が大きく、JHF 以降、磁石のアパーチャ設計目標値も徐々に大きくなってきたがリングコリメーターの設計値を $\epsilon_{H,V} = 324\pi$ mm mrad に決定したことで、その後のビームハローも考慮して、 $\epsilon_{H,V} = 486\pi$ mm mrad がキッカ電磁石の最終設計基準となった。

3.2 設計指針

設計に入るにあたって、下記の3点を基準とした。

- (1) メンテナンスフリー・長寿命化
- (2) 低コスト化
- (3) 電源の簡素化

特に(1)が問題であり、以下の設計方針の基礎となっている。冒頭に記述したとおり、電源から電磁石

まで高電圧対応である必要がある。磁石に関しては構造設計で決まるためほぼ問題は無いが、電源側では消耗部品がある。その最たる物が、主回路スイッチング装置として用いるサイラトロンである。今日、半導体デバイスの開発が進んでおりいくつかのキッカシステムに組み込まれてきているが、本キッカの高電圧・大電流の営業運転を目指した性能仕様を發揮できるまでには至っていない[3]。これに対して、サイラトロンの長期使用を想定し、ジッタに対するタイムマージンをとる方向で設計することにした。これも含めて電源側の問題もいくつかあるため、極力磁石側に手を入れ、電源側の負担を軽減するスタンスとした。

3.3 電磁石と電源の概要検討

高速大電流キッカシステムとしての選択肢としては、次の組み合わせが代表的である。

- ・ 電源
 - スイッチング：カソード接地、カソードフォロワ
 - 充電方式：DC、共振、コマンドチャージ
 - 波形成型：P FN、P FL
- ・ 磁石
 - 方式：集中定数型、分布定数(ライン)型
 - 形状：C型、窓枠型、双子型
 - 環境：大気、真空環境下

前述の設計指針に従い、高速性能を維持するため、カソードフォロワ型で同軸ケーブルを用いたP FLを基本とする電源と、分布定数終端短絡双子型電磁石の組み合わせに決定した。この組み合わせに最も近い、KEK-PS-FX キッカシステム(1999年インストール)[4, 5]を実機設計ベースとしている。特性インピーダンスに関しては、励磁電流が最大 8KA 必要であるため、12.5Ωから10Ωに変更した。充電器の選定に関しては、DC充電が最も安定だが高繰返しでは無効電力が大き過ぎ、共振(急速)充電に関してはコスト面で大きな問題となったため、中間的なコマンドチャージによる定電流充電の採用に至った。

立上り時間に対するタイムシェアリングは、表1の通りである。

表1：立上り時間の配分
上段：旧リング、下段：現状

FY2000 ring					
Bunch (RF)		Kicker Rise			
Regular	mar	Current	Field	It	oth
	gin	Rise	Filling	ter	EFE
248 (82deg.)	40	80	120	20	37
288			257		
Total		545 ns			

10/9 expanded ring					
Bunch (RF)		Kicker Rise			
Regular	mar	Current	Field	It	oth
	gin	Rise	Filling	ter	EFE
260 (78deg.)	40	80	120	20	40
300			300		40
Total		600 ns			

*EFE" means an end field effect

4 R & D

本キッカシステムに関する代表的なR & Dを報告する。性能に関しては、本会別件にて報告する。

4.1 波形成型器：PFL

高速性能を維持するため、波形成型器として、高耐圧同軸ケーブルを用いる。低コスト化の目的と特性インピーダンス 10Ωという値及び並列本数削減目的から 20Ω インピーダンスケーブルを2並列とすることにした。本来、高速キッカの場合、伝送特性を優先するが、設計指針により耐圧特性を優先しφ30.0/18.2とした。試作線に対し72KV 25pps連続通電試験を行い、絶縁破壊が無いことを確認して採用に至った。なお、伝送線も同じ形である。

4.2 先行機

性能確認を行うため、実機仕様の先行機を製作した。キッカシステム全体の等価回路を図2に、主要パラメーターを表1に示す。詳細は、本会別件にて報告する[6]。

表2：先行機主要パラメーター

A4判	余白
電源	矩形パルス源
P FL電圧	64KV (最大 80KV)
特性インピーダンス	10 Ω
サイラトロン	CX1193C
電流立上り時間	〜 50 ns
磁石	双子・分布定数
ギャップ	H280, V166, L705
外寸	H800, V900, L705
磁性体(ferrite)	PE14

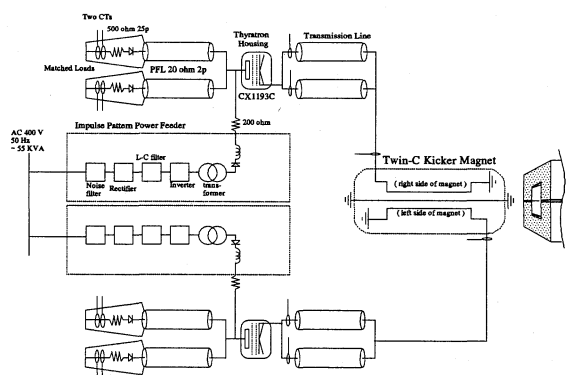


図2：キッカシステム概略等価回路

4.3 磁石搬送試験

キッカ電磁石先行機は図3に示す通り、構造が複雑であるのと、なにより、フェライトが脆弱であるため搬送時の微弱な衝撃や振動による破損・欠損が非常に懸念される。特に量産機の製造は、原研東海サイトから 300 Km 程度離れているため、大きな問題であった。このような長距離搬送の問題を確認する目的でキッカ電磁石先行機の搬送試験を行った。エアサスペンション車により、KEK つくば-(東大通り、野田線)-桜土浦 IC-ひたちなか IC-(R245)-原研東海のルートで約 80 Km の搬送を行った結果、mm オーダーの小欠損が見つかった以外は問題無かった。その際、容器表面に取り付けた加速度計の測定結果を図4に示す。このデータから、搬送時よりも積載・荷下時のクレーン操作時の衝撃が大きいことがわかった。

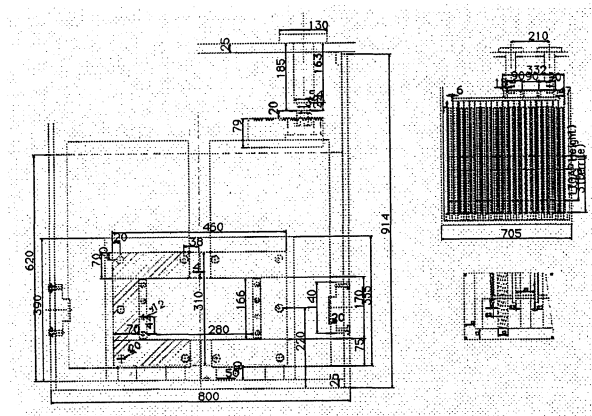


図3 : キッカ電磁石先行機

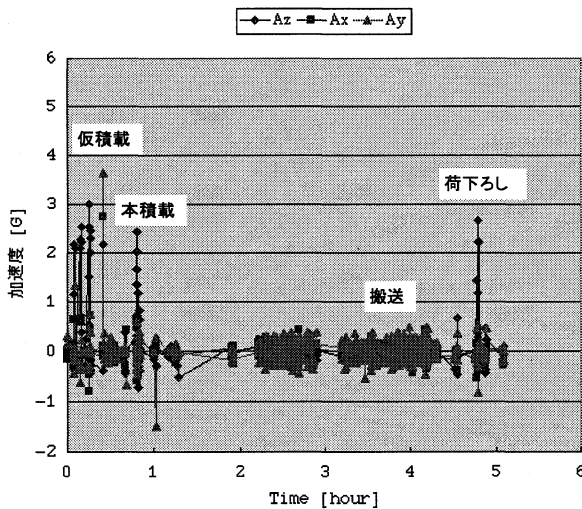


図4 : 搬送時の加速度計測結果

5 まとめ

大強度陽子加速器 3GeV 出射キッカ電磁石システムに関してのR & D及び量産機設計に関する報告である。

参考文献

- [1] JAERI/KEK Joint Project Team, "Accelerator Technical Design Report for J-PARC," KEK Report 2002-13; JAERI-Tech 2003-044, March 2003.
- [2] JHF Project Office, H. Katagiri, *et al.*, "JHF Accelerator Design Report," KEK Report 97-16, Mar. 1998.
- [3] K. Takata, S. Tazawa and Y. Kimura, "Full Aperture Kicker Magnets for KEK Proton Synchrotron," KEK Preprint KEK-76-21, March 1977, written in Japanese.
- [4] 中村英滋、佐藤皓、村杉茂、川久保忠通, "Stacked Si-Thyristor Trial to μ sec-PFL switching," ASN-441, March 21 2002, Circular in KEK-PS, written in Japanese.
- [5] KEK 高エネルギー加速器セミナー OH0 '96 = 大型ハドロン計画の大強度陽子加速器 = 川久保忠通 "速い取り出し," Aug. 1996, written in Japanese.
- [6] 神谷ほか, "J-PARC 3GeV 出射キッカ用電磁石," 本会.