

機関番号：82118
 研究種目：若手研究 (B)
 研究期間：2009～2010
 課題番号：21740159
 研究課題名 (和文) キッカー電磁石システムにおける完全整合型高速励磁方式の開発研究
 研究課題名 (英文) Development of a novel fast magnetic kicker system:
 the bridged-T network lumped kicker
 研究代表者
 大木 俊征 (OKI TOSHIYUKI)
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教
 研究者番号：60415049

研究成果の概要 (和文)：本研究は、近年注目を浴びている小型円形加速器の実現に必要な不可欠な、ビーム入出射用パルス電磁石システムに関する開発研究である。研究代表者が発案した「完全整合型高速励磁方式」の性能を更に向上させるために、シミュレーション計算に基づいてパルス平坦化による応答特性向上の研究を行い、最適化の方法を見出した。その内容の一部を国内特許として出願している。

研究成果の概要 (英文)：The aim of this study is to develop a novel fast magnetic kicker system: the bridged-T network lumped kicker, which is a key device to make a synchrotron compact. Simulation studies were performed, so that the pulse response is improved. A patent on a part of this scheme has been applied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010 年度	1,400,000	420,000	1,820,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子／原子核／宇宙線／宇宙物理

キーワード：加速器、パルス電磁石、ビーム入出射、医療用小型加速器、ミュオンリング、インピーダンス整合

1. 研究開始当初の背景

近年、がん治療用小型重イオンシンクロトロンやミュオン冷却用小型蓄積リングなどの実現を目指して、円形加速器の小型化に期待が高まっている。これまでに、高磁場偏向電磁石や高勾配加速空洞など、各構成要素の研究が行われており、一定の成果が上がっている。しかしビーム入出射装置に対する要請は厳しく、従来の方式を用いる限りそれを克服することは困難であり、小型化の主要な障壁となっていた。

一般に、円形加速器にビームを入出射するためには、高速でパルスの励磁されるキッ

カー電磁石が用いられる。このキッカー電磁石には、高速励磁応答特性に加えて、パルス電源との間で反射が起きないようにインピーダンス整合特性が要求される。このため、複雑な構造を持つ分布定数型キッカー電磁石が、これまでの半世紀にわたって世界中の大型円形加速器に広く適用されてきた。しかし、放電故障や、高精度な部品加工が必要になるなど、その複雑な構造に由来する多くの問題があった。

そこで研究代表者は、整合要素と集中定数型電磁石とを用いて、高周波分野でよく用いられる T 架橋型回路網を構成すれば、複雑な

構造にしなくても、原理的には完全なインピーダンス整合を実現しながら、分布定数型と同程度に高速な応答が期待できると考え、それを適用した「完全整合型高速励磁方式」を提案し、これまでにモデルシステムを構築して実証試験を行い、期待通りの性能が得られることを確認している。

2. 研究の目的

「完全整合型高速励磁方式」では、従来の分布定数型で用いられるような複雑な構造によってインピーダンス整合機能を持たせるのではなく、磁性体コアとブスバーから構成される単純な集中定数電磁石を用い、反射が起こらないようにT架橋型四端子回路網の構成とする。

T架橋型四端子回路網は、真空管増幅器の入力整合回路などとして知られており、入力インピーダンスを周波数によらず一定にすることができる。特に、負荷としてインダクタンスである電磁石を適用すると、その周波数応答関数は低域通過網型となり、その遮断周波数から、分布定数型と同程度の高速励磁が期待できる。

すなわち、図1に示すような構成にしておけば、なんら複雑な構造なしに、原理的に完全なインピーダンス整合を実現しながら、高速励磁が期待でき、分布定数型の問題を一気に解決し、小型円形加速器のビーム入出射システムに必要な厳しい要請を満たすことができる。

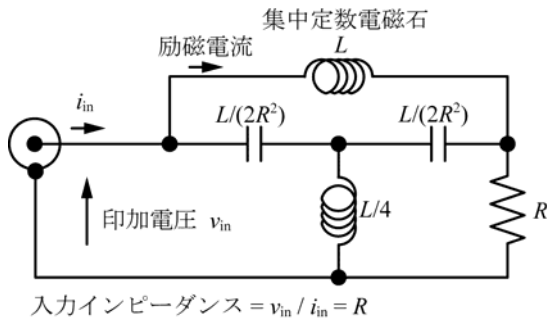


図1：完全整合型高速励磁方式。インダクタンス L の集中定数電磁石をT架橋型四端子回路網の構成にする。

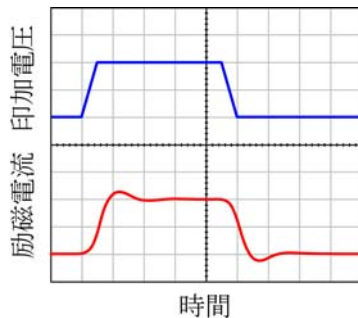


図2：完全整合型高速励磁方式のパルス応答。

さて、周波数応答関数は低域通過網型である述べたが、その遮断周波数近傍でピーク構造を持ち、したがって図2に示すように、印過電圧に対する励磁電流のパルス応答がオーバーシュートしてしまう。

このオーバーシュートは、完全整合の特性と引き換えに、原理的に生じるものである。電子シンクロトロンのようにビームバンチ長が短く、必要な磁場がパルス形状である場合には、このオーバーシュートはなんら問題にならない。その様な例として、完全整合型高速励磁方式でパルス波形を発生させた時のシミュレーション結果を図3に示す。比較のため、集中定数型電磁石を用いた場合の結果も共に示す。集中定数方式ではインピーダンス整合がとれていないので、パルス電源と電磁石との間にあるパルス伝送ケーブルで反射波が往復していることがわかる。一方、完全整合型高速励磁方式では、そうした反射波が見られず、また、前述のオーバーシュートは問題にならないことがわかる。

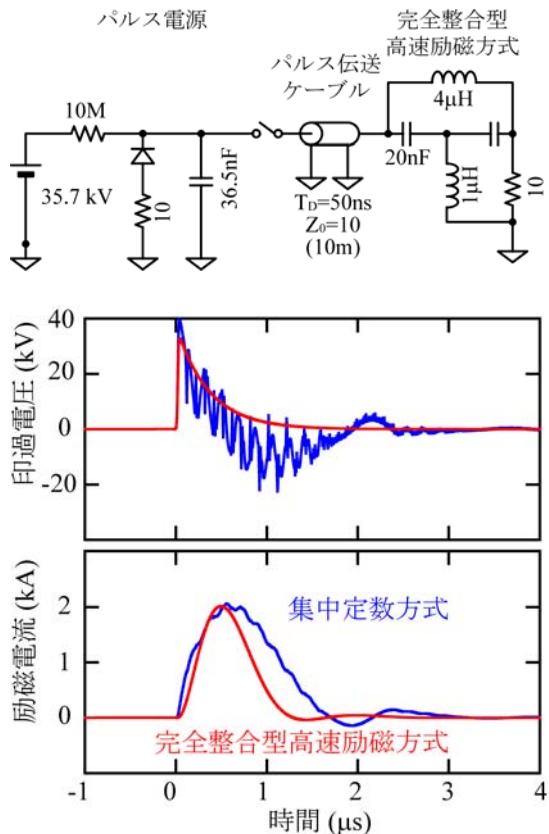


図3：パルス波形を発生させた時のシミュレーション結果。

しかし、陽子や重イオンシンクロトロンではビームバンチが長く、平坦部のある台形のパルス磁場が要求される。その場合、このオーバーシュートによる不要な磁場によって、ビーム損失を引き起こしてしまう。

そこで本研究では、シミュレーション計算に基づいてパルス平坦化による応答特性向上の研究を行い、最適化の方法を見つけることを目指した。

3. 研究の方法

いくつか考えられる回路構成についてシミュレーション計算を行い、次の手法を見出した。すなわち図4に示すように、完全整合型高速励磁方式での抵抗部出力の一部を、調整回路を経て出力し、特性インピーダンスの整ったパルス伝送線で補正電磁石に給電する。調整回路はパイ型に配置した抵抗素子で構成し、その入力インピーダンスを特性インピーダンスに等しくしておく。パルス伝送線の長さは、補正電磁石に生じさせる磁場をどれだけ遅延させるかに応じて定める。このような構成にしておくと、主電磁石のオーバーシュートが補正電磁石によって補正され、平坦化された合成磁場を得ることができる。

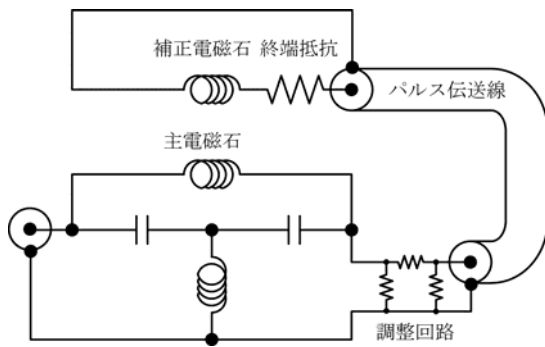


図4：完全整合型高速励磁方式。インダクタンス L の集中定数電磁石を T 架橋型四端子回路網の構成にする。

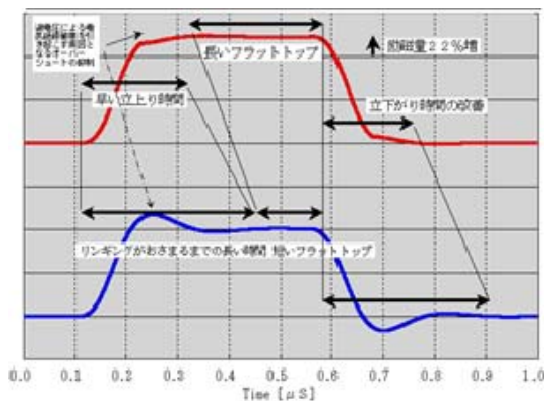


図5：励磁波形の比較。補正電磁石と組み合わせるとオーバーシュートが低減されて、早い立ち上がりとし長い平坦部を形成できる。(上)。完全整合型高速励磁方式での励磁波形 (下)。

この手法を適用したシミュレーション計算結果の一例として、特性インピーダンスが $10\ \Omega$ 、主電磁石のインダクタンスが $1\ \mu\text{H}$ の場合について、完全整合型高速励磁の磁場波形と比較したものを図5に示す。オーバーシュートが低減され、早い立ち上がりとし長い平坦部を形成できていることがわかる。

4. 研究成果

分布定数型励磁方式に代表される従来の方式では、磁性体コアをビーム軸方向に分割し、電極板で挟み込む構造によって、インピーダンス整合を実現しようとしている。しかしコアを分割できる個数は、電極板間の耐電圧限界距離によって制限されており、特に直線部の短い小型円形加速器では、十分な個数に分割できず、有限の遮断周波数が生じ、それ以下の帯域に限りしか整合は取れず、反射を引き起こし、定在波による破壊故障を引き起こすことになる。実際に起きた事例として故障報告書 (KEK-PS internal Failure Report (FR-334), Nov. 11, 2001.) では、60週の稼働時間の間に全使用本数のうち23%の同軸ケーブルが中間部で絶縁破壊する故障が生じ、その故障復旧には一本あたり平均で70分の交換作業が高所・重労働・油悪環境の中で行われたとある。

完全整合型高速励磁方式は、従来の方式での多くの課題を解決する新しい方式であるが、その唯一の課題は励磁電流のパルス応答がオーバーシュートすることであった。これは原理的に生じるものであって、電子シンクロトロンのように必要な磁場がパルス形状である場合には問題とならない。しかし、陽子や重イオンシンクロトロンのように平坦部のある台形のパルス磁場が要求される場合には、このオーバーシュートがビーム損失を引き起こしてしまうため、如何にこれを解決するかが課題であった。

本研究で見出した最適化の手法によって、これまで提案してきた完全整合型高速励磁方式のパルス応答特性が向上し、その適用範囲をさらに広げて発展させることができた。すなわち、単純な構造でありながら、原理的に完全な整合を実現し、高速な励磁ができ、放電故障の原因となる電極板も不要であり、低コストで設計できるといった多くの特徴を有するため、円形加速器を大幅に小型化するような将来技術のひとつとなる、ブレークスルー技術となりうることを期待できる。また、反射による絶縁破壊などの放射線作業を伴う故障を極力低減できるので、高い運転効率が期待される素粒子原子核実験用の大型加速器にこれを適用することで、信頼性の高い装置が実現できると期待できる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

Toshiyuki Oki, "The bridged-T network lumped kicker: A novel fast magnetic kicker system for a compact synchrotron," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Vol. 607, pp. 489-497, (2009). (査読有)

[学会発表] (計 2 件)

大木俊征、「完全整合型キッカー電磁石システムの開発研究」、第 6 回日本加速器学会年会、日本原子力研究開発機構、2009 年 8 月 6 日。

Toshiyuki OKI, "A New Concept of a Fast Magnetic Kicker System: Bridged-T Network Lumped Kicker," The 23rd Particle Accelerator Conference (PAC09), Vancouver, Canada, May 4-9, 2009.

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

名称：長時間出力型高速励磁型電磁石システム

発明者：中村英滋、大木俊征

権利者：高エネルギー加速器研究機構

種類：特許

出願番号：特願 2009-150087

公開番号：特開 2011-9008

出願年月日：平成 21 年 6 月 24 日

国内外の別：国内

○取得状況 (計 1 件)

名称：高速励磁装置及び円形加速器

発明者：大木俊征、板橋隆久、久野良孝

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特許第 4674367 号

取得年月日：平成 23 年 2 月 4 日

国内外の別：国内および国外 (PCT 出願)

国内出願番号：特願 2008-549211

国際出願番号：PCT/JP2007/063338

国際公開番号：WO/2008/072394

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大木 俊征 (OKI TOSHIYUKI)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・助教

研究者番号：60415049