

平成 21 年 5 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19740142

研究課題名 (和文) 完全整合回路を用いたキッカー電磁石システムの研究

研究課題名 (英文) Experimental study on a novel fast magnetic kicker system:
the bridged-T network lumped kicker

研究代表者

大木 俊征 (OKI TOSHIYUKI)

筑波大学・研究基盤総合センター・研究員

研究者番号：60415049

研究成果の概要：円形加速器にビームを入射するためには、高速でパルス的に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が従来から適用されてきたが、その構造に由来する多くの問題があった。そこで本研究では、新しい方式を提案し、モデルシステムを構築して試験を行い、結果期待通りの性能を得た。本方式は、円形加速器を小型化するためのブレイクスルー技術のひとつに成り得ることが期待できる。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,000,000	0	2,000,000
2008 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,200,000	360,000	3,560,000

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、ビーム入射、がん治療小型シンクロトロン、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

素粒子物理学は、これまで、シンクロトロンに代表される円形加速器の性能向上によって牽引されてきた。現在でも、高エネルギー化、あるいは、高輝度大強度化に向けて、加速器構成要素の研究開発が進められている。その一方で、円形加速器の用途はますます広がっており、加速器の大幅な小型化が望まれている。例えば、ミュオンコライダー

のためのビーム蓄積・冷却リングとしての利用、がん治療器としての医療利用、小型放射光発生装置としての利用等が検討されており、ミュオンが短寿命であることや、あるいは、治療施設への設置スペースが限られていることから、従来の巨大円形加速器をそのまま適用することができず、このため、円形加速器の小型化が近年の加速器研究における一大潮流となっている。(加速器技術に関

する先端動向調査、文部科学省科学技術政策研究所科学技術動向研究センター、NISTEP REPORT No.67 2001年 6月)

円形加速器を小型化するためには、偏向電磁石の磁場強度を高めてリング曲率半径を小さくし、高加速勾配の空洞を適用して直線部の長さを短くする必要があり、それぞれの要素開発が進められ、一定の成果を挙げている。しかしながら、入出射装置であるキッカー電磁石システムに対する要請は非常に厳しく、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、こうした小型円形加速器の実現には至っていない。

さて、リング直線部に設置されたキッカー電磁石は、ビームを加速器リングに入射、あるいは、リングから取り出すために用いられ、パルスの励磁されるが、その励磁立ち上がり時間は、バンチと呼ばれる塊となって加速器リングを周回するビームの時間構造で定まる。(図1)例えばビームをリングから取り出す場合には、あるビームバンチがキッカー電磁石を通過した直後にキッカー電磁石の励磁を開始し、そのビームバンチがキッカー電磁石に帰ってくる前に、その励磁を完了し、所定の磁場を発生できるようにしておく必要がある。もし励磁が高速でなく、バンチの先頭あるいは最後尾に与えるキッカー磁場が弱ければ、バンチのその部分に設計した偏向角が得られず、取り出しラインからビームが逸れてしまう。

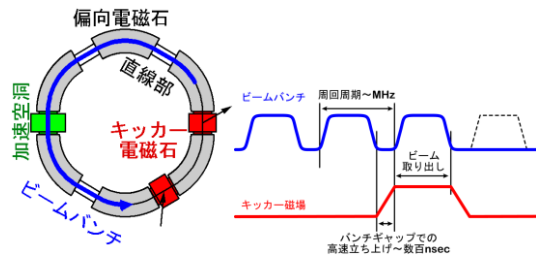
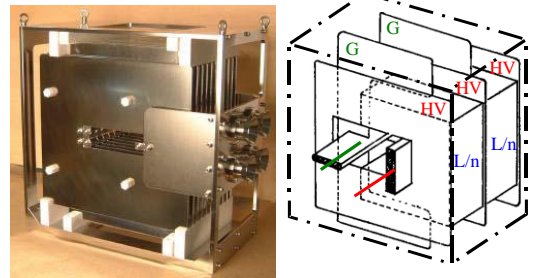


図1：円形加速器とキッカー磁場。

したがって、キッカー電磁石には、一般に次のような性能が要求される：1) 高速な励磁立ち上がりを実現され、数十から数百 nsec と非常に短い時間で所定の磁場が発生できること。2) そうした速いパルス励磁にもかかわらず、パルス波形の歪や不整磁場、破壊故障などを引き起こす反射波が生じないように、負荷である電磁石とパルス電源との間で、インピーダンスの整合が実現されていること。3) 接地されるリング直線部の長さには制限があるので、それに収まること。

大型の円形加速器では、これらの要請を満たすために、キッカー電磁石は分布定数型の構造となっている。(図2)すなわち、ビーム軸方向に沿って磁性体コアを複数個に分

割し、それらを電極板で挟み込む構造にすることによって伝送線回路を形成し、ビームを偏向する機能と、パルス励磁による反射を免れるためのインピーダンス整合機能とを実現している。



高圧電極板(HV)
接地電極板(G)
磁性体コア(n分割)
真空容器(- - -)

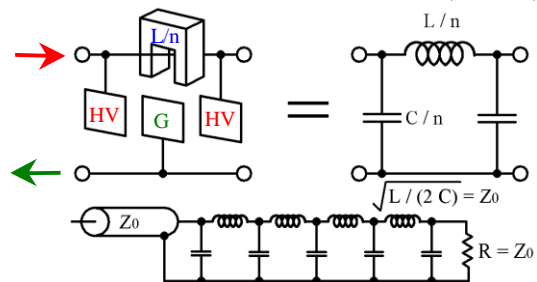


図2：分布定数型キッカー電磁石。

しかし、こうした従来の方式を小型円形加速器に適用することは難しい。なぜなら、分布定数型では、次のように、構造に起因する問題があるからである。まず、電極板には典型的に数十 kV の高電圧励磁パルスが印加されるが、その電極板で磁性体を挟む複雑な構造なので、電極板間の放電が懸念される。そうした放電を免れるために、電磁石全体を真空容器に納める必要がある。その真空容器には高度に設計されたパルス導入コネクタが必要となる。フェライトなどの磁性体で構成される電磁石コアからはアウトガスが生じ、ビームの軌道に悪影響を及ぼす。整合を取るために、電磁石コアをビーム軸方向に分割して電極板でサンドイッチしてゆくといった複雑な構造としたわけだが、分割できる個数は電極板間の放電限界距離で制限されており、有限の遮断周波数が存在する。特に直線部が短い小型円形加速器では、十分な個数に分割できず、遮断周波数以上の周波数帯(典型的には数 MHz 以上)ではインピーダンス整合が原理的に実現できず、反射によって励磁パルス波形がひずみ、あるいは機器破壊が起こりうる。

こうした分布定数型キッカー電磁石の他には、単純な磁性体コアとコイルから構成される集中定数型の電磁石に、終端抵抗を取り付け、あるいは静電容量と組み合わせ、一応の整合を持たせようとしたものもある。しか

しながらこうした方法では、高速な応答が期待できないばかりか、整合がまったく不十分であるため、強い反射が励磁パルス後方に表れる。特に、多数回円形加速器にビームを入射するための入射用キッカー電磁石システムには、すでに周回しているビームバンチの軌道を変調してしまうので、こうした方法は不適切である。

そこで本研究では、こうした問題点を同時にすべて克服することのできる、他に例の無い高速励磁方式として、「完全整合回路を用いたキッカー電磁石システム」を提案した。

2. 研究の目的

本研究で提案する「完全整合回路を用いたキッカー電磁石システム」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、単純な磁性体コアとコイルから構成される集中定数電磁石を用い、反射が起らないように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、この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と考えた。

そこで本研究では、このモデルシステムを開発・試験することにより、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の確立を目指した。

3. 研究の方法

(1) モデルシステムを構築して実証試験を行った。試験は、典型的なキッカー電磁石と同程度の口径、長さ、インダクタンスを持つフェライト電磁石コアを、T架橋型四端子回路網の構成にして行った。

(2) 図3に示すT架橋型四端子回路網の入力インピーダンス (z_{in}) は、 $z_s = z_k/4$, $z_p = 2R^2/z_k$ (完全整合条件) のとき、 $z_{in} = R$ となり、周波数によらず一定の入力インピーダンスが実現できる。

すなわち、 z_k をインダクタンス L のキッ

カー電磁石、 R を終端抵抗とすると、静電容量が $L/(2R^2)$ のコンデンサーを z_p とし、インダクタンスが $L/4$ のコイルを z_s とし、それぞれ接続すれば、完全整合が実現できる。

この回路構成の場合には、低域通過網型の周波数特性となる。また入力パルス電圧に対する応答として、キッカー電磁石励磁電流の立ち上がり時間は、およそ $1.21L/R$ で表せ、分布定数型と同程度の高速励磁特性が期待できる。

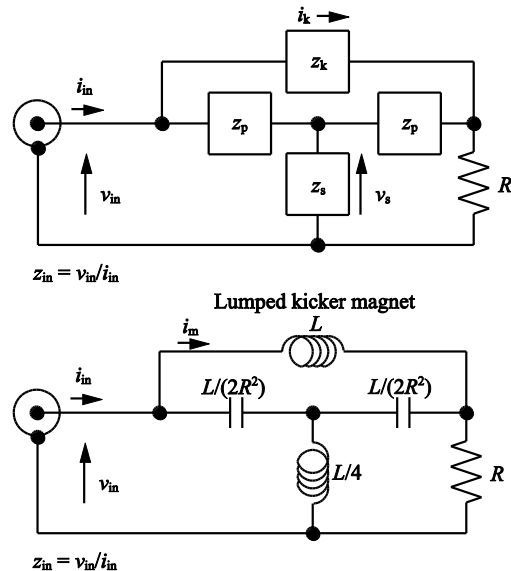


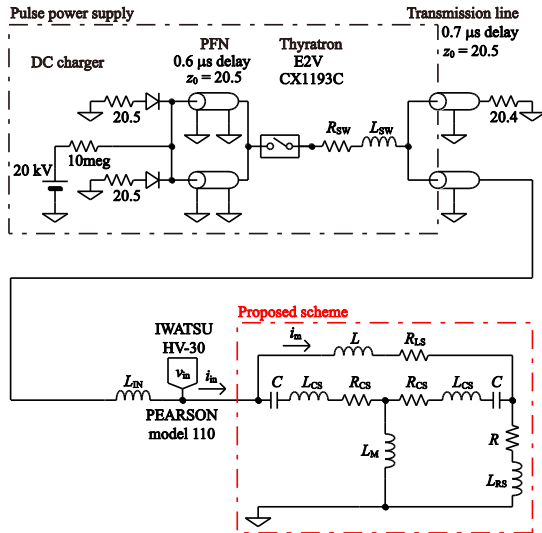
図3：T架橋型四端子回路網（上）と、 z_k をインダクタンス L のキッカー電磁石とした場合（下）。

(3) 実証試験のセットアップは、図4のとおりである。負荷には、典型的なキッカー電磁石と同程度のインダクタンス $L = 1.4\mu\text{H}$ を持つフェライト電磁石コア（口径 140 mm (W)×55 mm (H)、長さ 400 mm）を利用し、これにセラミックコンデンサ (1.67 nF) と空芯インダクタ (0.36 μH) および終端抵抗 (19.4 Ω) を組み合わせてT架橋型四端子回路網の構成とした。このように、整合要素はデザインと若干異なっているが、今回は微調整を行わなかった。こうして構成したキッカー電磁石を図5に示す。励磁パルス電源は、

波高 10 kV、幅 1.2 μsec 程度のパルスを出力した。その出力パルスの立ち上がり時間は、あらかじめ負荷に抵抗を使用して測定したところ、52nsecであった。

電磁石入力部の入力電圧と入力電流を測定するために、1000:1 高圧プローブ (IWATSU HV-30) と電流トランス (PEARSON model 110) をそれぞれ使用した。また磁場の測定には、サーチコイル (長さ 600mm、幅 10mm) を使い、その出力電圧を時間積分して積分磁場を得た。入力インピーダンスの測定には、ADVANTEST R3765CG ネットワークアナライザを用いた。

(4) パルス応答試験の結果とネットワークアナライザで測定した入力インピーダンスをそれぞれ図6、7に示す。立ち上がり時間は、133nsec と期待通り高速であった。パルス後方には、浮遊の誘導成分を原因とする若干の反射が見られるものの、十分小さくなっている。入力インピーダンスの周波数依存度は十分小さく、よく整合されていることがわかる。



Magnet core	
Gap height (mm)	55
Gap width (mm)	140
Core length (mm)	400
Inductance L (μH)	1.40 (1.40)
Matching elements	
Terminator resistance R (Ω)	20.5 (19.4)
Matching capacitance C (nF)	1.67 (1.67)
Matching inductance L_M (μH)	0.35 (0.36)
Parasitic components	
R_{LS} (Ω)	(0.2)
L_{RS} (μH)	(0.1)
L_{CS} (μH)	(0.05)
R_{CS} (Ω)	(0.6)
L_{IN} (μH)	(0.5)
R_{SW} (Ω)	[1.4]
L_{SW} (μH)	[0.8]
Input pulse	
Input voltage (kV)	10 (9.3)
Input current (kA)	0.5 (0.48)
Ramping time (ns)	50 (52)
Magnetic field	
Field rise time (ns)	132 (133)
Field flat top (μs)	1.2
Field strength (mT)	14.4
Kick strength (mTm)	5

図4：実証試験でのセットアップ（上）とパラメーター表（下）。表中の数値は設計値で、（）内は測定値、[]内は推定値。



図5：キッカー電磁石。

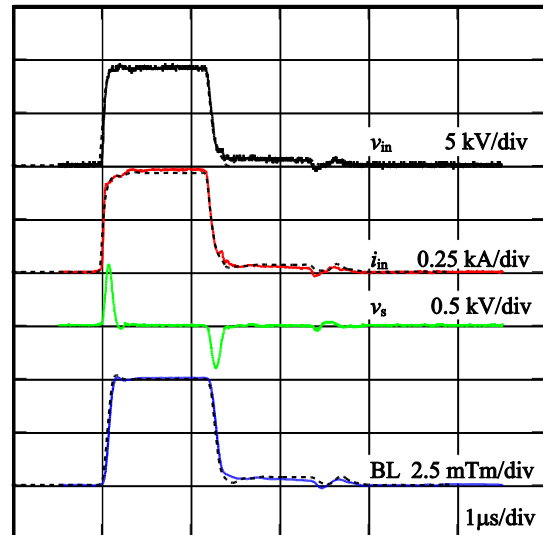


図6：パルス応答試験の結果。上から入力電圧、入力電流、サーチコイル出力電圧、および、積分磁場。点線は計算値。

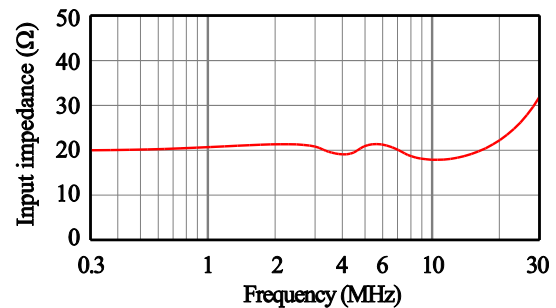


図7：入力インピーダンスの測定結果

4. 研究成果

円形加速器の一種であるシンクロトロン
の用途は近年広がっており、特に、高度医療
が期待される日米欧では、がん治療用の陽
子・重イオンシンクロトロンの建設に期待が
高まっている。例えば、日本国内では、既に
10 箇所の施設が稼働しており、国内外で 11
箇所の建設計画がある。こうした施設のさら
なる普及には、設置スペースや建設コストの
観点から、シンクロトロンの小型化が切望さ
れている。ところが、小型シンクロトロンを
実現するための検討課題の中でも、特に、ビ
ーム入射装置であるキッカー電磁石システ
ムに対する要請は厳しく、分布定数型に代
表される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、その実現には至っ
ていない。

本研究で実証した方式は、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、ブレイクスルー技術となりうること
が期待できる。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)

- ① Toshiyuki OKI, "The bridged-T network lumped kicker: A novel fast magnetic kicker system for a compact synchrotron," accepted as is for publication on Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, (2009). (査読有)

[学会発表] (計 1 件)

- ② 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：高速励磁装置

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

出願番号：特願 2006-334739

出願年月日：平成 18 年 12 月 12 日

国内外の別：国内および国外 (PCT 出願)

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)

筑波大学・研究基盤総合センター・研究員

研究者番号： 60415049