

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 4月 2日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540310

研究課題名（和文） 高磁場高応答キッカー電磁石システムの開発

研究課題名（英文） Development of high-field and fast-response kicker magnet system

研究代表者

中村 英滋（NAKAMURA EIJI）

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・研究機関講師

研究者番号：70311131

研究成果の概要（和文）： 磁性体の飽和現象を利用して、キッカー電磁石の磁場性能の改善に関する開発を実施しました。高応答特性としては100 ns の立上り時間で0.12 テスラを、強磁場特性としては0.9 μ s の立上り時間で0.68 テスラを、従来技法の1/10 サイズのコンパクトな電磁石で達成しました。特に、強磁場に関しては更なる飛躍的性能向上の可能性が見出され、小型試験器により1.33 テスラの磁束密度を確認しております。

研究成果の概要（英文）： Magnetic field performance of a kicker magnet system has been improved by using field saturation of magnetic materials. Magnetic flux densities of 0.12 T in 100 ns and 0.68 T in 0.9 μ s have been achieved. The size of kicker magnets can be reduced to 1/10 of traditional magnets by this technique. In addition, the result of magnetic flux density of 1.33 T was also obtained for a small proto-type magnet in 0.9 μ s.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
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

1. 研究開始当初の背景

近年、素粒子物理実験分野で発展してきた高エネルギー粒子線加速器が、医学、ナノ材料開発等産業分野へ大きな規模で応用展開されつつあります。この展開においては粒子線加速器のコンパクト化が必須であり、TTPS、FFAG、AIA 等加速器の小型化に関して様々な試みがなされ、主要構成要素である強磁場偏向電磁石や加速装置の開発に成果が出始め

ております。他方、粒子線の入出射等粒子線制御に関しては検討が進んでいないのが実状であり、入出射での粒子線損失及びこれに起因する放射化の影響が現実的な面での大きな問題となって残っております。これは従来手法の限界として立ち阻んでいる問題でもあり、10年近く陽子シンクロトロン陽子線安定供給及びビーム強度向上研究業務に携わってきた経験及びビーム物理の観点か

ら致し方ない事と感じておりました。しかしながら、上記業務と同時に加速器工学の立場からキッカー電磁石システムの運用・維持・開発にも従事し、2006年に、本研究課題の基本原則となる革新的な発想に至る事ができました。

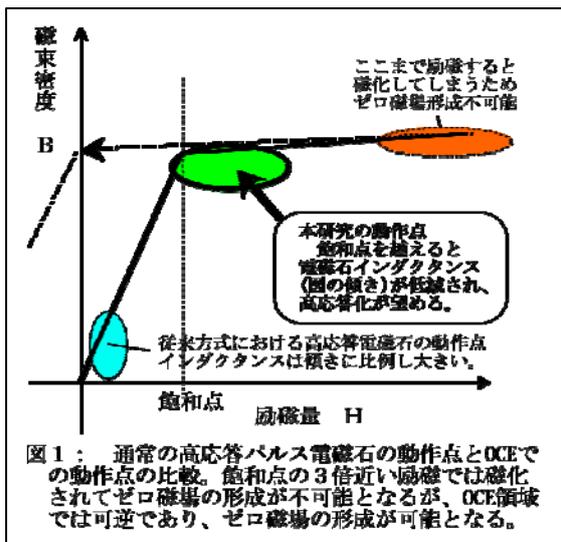
2. 研究の目的

磁性体の飽和現象を過渡応答領域に取り込み、磁場の早い立ち上がり時間達成を目的とします(図1)。キッカー電磁石としては、安定したフラットトップを有することが重要であると同時に、ゼロ磁場の形成も必須となります。磁性体の過飽和による磁化は回避する必要がありますが、この点に配慮しつつ早い立ち上がり時間で強磁場を発生させることを目的とします。粒子線加速器を視野に入れ、下記3項目を主題として取り組みます。

(1) 本研究で提唱する手法を用い、従来手法の3倍に相当する0.3テスラ以上のキッカー電磁石システムを設計・製作し、原理実証試験を実施します。磁性体の高周波特性としては数MHzまで調査されているが、単発パルス過渡現象に対して同等に扱えるかをこの結果から検証します。

(2) 高応答領域(100 ns以下の立ち上がり時間)を目指した実証器の作成及び検証試験。

(3) 加速器ビーム強度を向上させる為の高繰返し化に関する問題点の現地検証(1 Hz ~ 1 KHz)。繰返しを上げると磁性体への注入電力が大きくなり、磁化しないと考えられる領域でも磁化する可能性があります。この限界を磁性体サンプルにより実際に確認します。

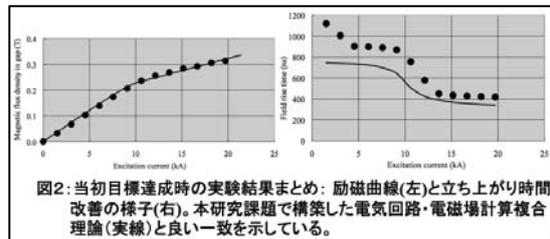


3. 研究の方法

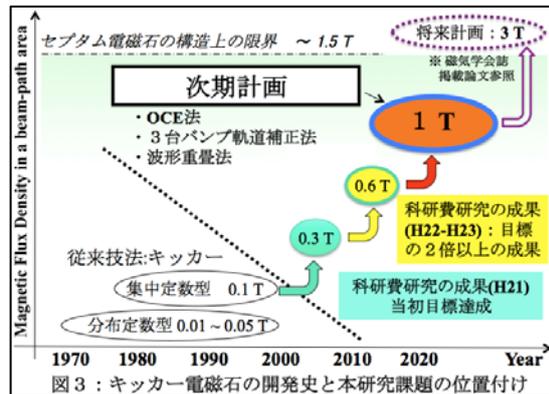
実用可能な電磁石を設計基準とした原理実証機を製作し、励磁試験を実施します。ピックアップコイルを用いて磁場を計測し、性能を評価します。電磁石コイルに流す電流をCTで、コイル両端に印加される電圧を高圧プローブで計測し、高周波・パルス伝送理論において矛盾がない事を確認しつつ、本技術の有用性を検証します。

4. 研究成果

本研究の数値目標を全て達成することができ(図2)、基盤技術としての初期的な実証と多くの成果を挙げる事ができました。



(1) 磁束密度に関しては従来技法の6倍(本研究目標の2倍)以上の性能向上を達成致しました(図3)。この点に関しては、更なる向上の可能性があり、小規模試験において従来技法の10倍以上となる1.33テスラの高出力も確認できております。本研究課題で副産的に生まれた技術と組み合わせる事で、従来技法の30倍となるテスラ級出力の可能性も見出しました。このように、飛躍的性能向上の可能性が未だ多く残されております。



(2) 高応答特性に関しては、従来の電磁石の1/10程度のコンパクトな電磁石で、従来技法を越える0.12テスラの磁束密度を100 nsの立ち上がり時間で達成することができました(図3)。

(3) 高繰返し性能に関しても目標値での安定動作確認が実施でき、基盤技術としての有用性が検証されました。一連の成果は、後述の雑誌論文等に掲載しております。

(4) 副産的成果

上述の当初目標及び成果に加えて、副産的な新たな技術もいくつか考案されました。これらの技術を組み合わせることで、更なる飛躍的性能向上の可能性も見出しております(下表を参照)。

研究成果分類	概要	成果公表 査読付論文・特許等 (論文発表年月日、特許番号)
基本原理	0.8T/0.9ka, 高磁束(27/0.12ka(ほぼ毎時目標)の達成	特許第454312号 NIM-A 612 (2009) p.50-55
基本設計	0.8T/0.9ka を達成 (当初目標の5倍以上、従来法の6倍)	<< NIM-A 640 (2011) p.29 >>
基礎的性質向上	1/10, 1/4ka(当初目標の3倍以上) 3.0, 12/1.0ka(当初目標達成)	<< NIM-A 665 (2012) p.19 >>
応用1	1.0T/0.9ka を達成 (当初目標の4倍以上、従来法の1.3倍)	NIM-A 618 (2010) p.27-29 << NIM-A 618 (2010) p.22 >>
応用2	マルチターンコイル電磁石	<< NIM-A 640 (2011) p.29-37 >>
応用3	セプタム電磁石	<< NIM-A 640 (2011) p.29 >>
応用4	入射粒子線全体の電荷化	(特許第2010-077819号)
応用5	多極・非線形磁石への応用と多極化	JPSJ 35 (2011) p.18-101
応用6	デジタルインテグレーションによる高性能化への設計	(特許第2009-150007号)
応用7	遠隔経路制御による非線形磁石中核磁石とセプタム電磁石システムの開発と実証	NIM-A 665 (2012) p.19-24
応用8	磁束の拡大による磁石とセプタム電磁石	(遠隔経路と磁石制御)
応用9	磁石・空間制御の両方を同時に制御するための装置の作成	<< NIM-A 618 (2010) p.22 >>
評価基準の作成	セプタムシステム制御	<< NIM-A 624 (2010) p.584 >>
従来技術駆動系1	セプタムシステム制御	<< NIM-A 640 (2011) p.29 >>
従来技術駆動系2	磁石分周自動制御機構の構築	(特許第2010-077820号)
駆動系1	磁石内の電流の効率的な制御	<< NIM-A 612 (2009) p.50 >>
駆動系2	粒子線加速管に関する磁石の出力特性	NIM-A 624 (2010) p.584-589
駆動系3	セプタムシステム制御	特許第460799号
駆動系4	セプタムシステム制御	<< NIM-A 640 (2011) p.29 >>
駆動系5	磁石駆動制御方法 (遠隔経路システム電磁石用)	(特許第2010-150008号)
駆動系6	円形加速器における高磁束加速の多極化	<< NIM-A 624 (2010) p.584 >>
駆動系7	円形加速器電磁石による粒子線入射制御の構築	(特許第2010-077820号)
駆動系8	磁石の出力特性を利用した遠隔経路制御機構構築	<< NIM-A 618 (2010) p.22 >>
駆動系9	磁石制御、性能向上により高磁束・高電圧・高安定性を実現	(学術論文執筆中)

表： 研究成果一覧

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6件)

- ① Eiji Nakamura, Fast-rise high-field kicker magnet operating in saturation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment、査読有、Volume 612、2009、50-55。
- ② Eiji Nakamura, Fast-rise high-field

multi-turn coil kicker magnet operating in saturation region、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment、査読有、Volume 618、2010、22-29。

- ③ Eiji Nakamura, Masakazu Takayama, Shin Yabukami, Electric field contributions of fast beam injection and ejection systems for particle accelerators、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment、査読有、Volume 624、2010、554-559。
- ④ Eiji Nakamura, Masakazu Takayama, Shin Yabukami, Fast beam injection and ejection method using a short-pulsed septum magnet for hadron accelerators、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment、査読有、Volume 640、2011、29-37。
- ⑤ Eiji Nakamura, Masakazu Takayama, Shin Yabukami, Tomofumi Ichinomiya, Sho Nakamura, Development of fast-rise and high-field kicker magnet system for particle accelerators、Journal of the Magnetic Society of Japan、査読有、Volume 35、2011、96-101。
- ⑥ Eiji Nakamura, Yuya Sakai, Izumi Sakai, Masakazu Takayama, Shin Yabukami, Yoshihiro Ishi, Tomonori Uesugi, Tsukasa Nakamura, Yoshiaki Nakao, Shigeru Inagaki, A new fast-rise kicker magnet system by a waveform correction method using auxiliary magnets and a three bump orbit correction method、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment、査読有、Volume 665、2012、19-24。

[学会発表] (計1件)

- ① Eiji Nakamura, Masakazu Takayama, Shin Yabukami, Tomofumi Ichinomiya, Sho Nakamura, Development of fast-rise and high-field kicker magnet system for particle accelerators、in: Proceedings of the 34th Annual Conference on MAGNETICS in Japan、Tsukuba International Conference Center、Tsukuba、Ibaraki、Japan、Sep. 4-7、2010、pp.311。

[その他]
ホームページ等
<http://www-accps.kek.jp/staff/eijinaka/h21kakenC/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 英滋 (NAKAMURA EIJI)
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・研究機関講師
研究者番号：70311131

(2) 研究分担者： (計5名)

明本 光生 (AKEMOTO MITSUO)
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・准教授
(H21)

研究者番号：40175815

大木 俊征 (OKI TSHIYUKI)
筑波大学・研究基盤総合センター・研究員
研究者番号：60415049

(H21)

高山 正和 (TAKAYAMA MASAKAZU)
秋田県立大学・システム技術学部・准教授
研究者番号：20236368

(H22～H23)

藪上 信 (YABUKAMI SHIN)
東北学院大学・工学部・教授
研究者番号：00302232

(H22～H23)

酒井 泉 (SAKAI IZUMI)
福井大学・工学研究科・教授
研究者番号：30141972

(H23)

(3) 連携研究者

(なし)