

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25286089

研究課題名(和文) テスラ級超強磁場高応答キッカーシステムの開発と省電力高効率粒子線入出射法の実現

研究課題名(英文) Development of Tesla kicker system and improvement of beam quality

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：テスラ級キッカーシステムに関して、電磁石原型機を製作し、性能評価試験を実施した。その結果、目標以上の1.3T/0.9 μ sを達成した。実際の高エネルギー粒子との相互作用を確認するべく、高エネルギー加速器にインストールし、100 MeV 陽子の軌道制御を試みた。その結果、想定通りの軌道変位が確認でき、原理実証完了と判断した。磁石構造を変え、飽和条件と非飽和条件での比較も行い、飽和条件での早い立ち上がり、フラットトップの形成も確認できた。これらを基盤とした広範囲な応用の検討も行い、高エネルギー粒子科学だけでなく、育種や、医学利用への展開も拓けたため、それぞれ新たに研究をスタートさせる予定である。

研究成果の概要(英文)：A prototype magnet of the Tesla kicker system has been assembled in order to prove the possibility of high-field and fast-rise pulsed magnets by using non-linear characteristics. The magnetic field density of 1.3 T has been observed with a rise time of 0.9 micro seconds. It succeeded in the attempt to control the orbit of 100 MeV proton beams. Various applications of the technology have been discussed, and we will start some new projects for the breeding of plants, the application for medical uses, and so on.

研究分野：高エネルギー粒子科学

キーワード：粒子線加速器 パルス電磁石 飽和 テスラ 高電圧 非線形 大電流 荷電粒子

1. 研究開始当初の背景

近年、基礎物理研究分野で発展し7TeVという高エネルギー粒子線や1MWという大強度ビームを可能とする新たなエネルギーフロンティアを開拓しつつある粒子線加速器技術が、医学、ナノ材料開発等産業分野へも大きな規模で応用展開されつつある。加速器のコンパクト化・汎用化に関しても、TTPS(テーブルトップ陽子シンクロトロン)、FFAG(固定磁場強収束型)加速器、AIA(全種イオン加速器)など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いる。他方、粒子線の入出射等粒子線制御に関する開発が未だ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して残っている。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年余り高エネルギー陽子シンクロトロン加速器での陽子線安定供給及びビーム強度向上、J-PARC(大強度陽子加速器施設)建設、新型加速器開発の研究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いた。しかしながら、それらの業務と同時に、加速器工学の立場から、入出射の重要な機器の1つであるキッカー電磁石システムの運用・維持・開発にも従事し、2006年に革新的な発想に至る事ができた。この発想は磁性体の非線形特性を利用した手法であり、パルス電磁石の応答特性及び磁場強度特性の飛躍的向上へと導くものである。これを原理化し、2009年から科学研究費補助金の助成を受け、基盤技術開発の位置付けとしてその原理実証を目的とし、当初目標以上の達成と副産的技術の創成及び応用展開等多くの成果を得た。

この基本原理をもとに、波形補正機構を付与し、3台バンプ軌道制御法を応用する事で更なる性能向上の可能性も見出しており、従来技法の10倍以上(前身基盤研究(C)の目標の更に3倍以上)となる1テスラを越えるキッカーシステムの可能性も現実的なものとなってきた。キッカー電磁石とは μs 程度以下の非常に短い時間内のみ安定したフラットトップを有する磁場を発生させ、他の時間帯ではゼロ磁場を形成する電磁石の総称である。光に近い速度で移動する粒子の軌道制御のために重要なデバイスであり、世界の多くの粒子線入出射等選択的制御に用いられている。早い立ち上がり時間を達成するため、線形素子利用に基づく従来技法においては、磁場発生領域を減じインダクタンス(L)を下げる手法や高インピーダンス(Z_0)化、または、分布定数型を用いてきた。しかしながら、時間tに対する磁束表現形式でのパルス伝送方程式 $2V_f = d\Phi/dt + (Z_0/L)\Phi$ が

示す通り、線形系では、応答特性($d\Phi/dt$)と磁束量(Φ)が競合してしまう。電気絶縁破壊の回避は絶対条件であり励磁パルス電圧 V_f の高電圧化も実用上の上限がある。従来技法では0.1テスラという低出力が限界であり、これを補うための大電力セプタムシステムが必須であった。セプタムは漏れ磁場対策のため、構造上、1.5テスラ前後が実用的限界である。本研究課題では磁性体の飽和現象を利用して実効的インダクタンスを低減させ、高応答条件においても低インピーダンス化を可能とし、大電流強磁場励磁を目指す。目標とするテスラ級キッカー電磁石が実現した場合、セプタムシステムの負担の軽減もしくはキッカー単独での制御も可能となり、省電力化はもとより機器設置の省スペース化、ひいては加速器本体のコンパクト化、更なるエネルギーフロンティア開拓への一助としても期待できる。通常の強磁場電磁石特有の発熱・温度の過剰上昇問題に対する特殊強制冷却設備、電磁力振動の繰り返しによる機械的損壊を防止する機構や、超伝導等の特化技術も短パルス励磁の場合は不要となる。高電圧特有の電気絶縁破壊の対策も、電磁石構造がシンプルとなるため簡便な手法で済み、一般にも取り扱い易い粒子線制御システムともなり得る。京都大学の加速器や、強磁場・超強磁場研究の先端を行く東大物性研からの協力も戴き、多くの研究機関の協力を戴ける体制が整い、上述の手法を基盤技術として確立するべく、本研究課題の立案と応募に至った。

2. 研究の目的

粒子線加速器での検証実験を視野に入れ、下記4項目を主題として取り組む。

- (1) 本研究で提唱する手法を用い、従来技法の10倍に相当する1テスラ以上のキッカー電磁石システムを設計・製作し、磁場計測により性能評価試験を実施し、有用性を検証する。
- (2) 実働加速器へインストールし、高エネルギー粒子ビーム制御実験を実施し有用性を検証する。
- (3) 実働加速器でのビーム入出射効率改善とビーム入出射機器全体の省電力化を目指す。
- (4) 研究推進過程で得られた知見をもとに、本技術の広範囲への応用の可能性を調査する。

3. 研究の方法

前記研究目的(1)、(2)を達成するための主たる方法は、原理実証器の設計・製作・性能評価試験及び高エネルギー粒子制御実験の実施である。(3)に関しては、使用電力量の

比較で実施する。(4) に関しては、セミナーやシンポジウムを開催し、様々な研究分野との情報収集とそれらの共有をはかり、展開していく。

4. 研究成果

各項目に関して、研究の成果をここにまとめる。

～研究計画に関して～

当初、4か年の計画であったが、予定していたビーム実験が、加速器の長期重故障により期間内に実施できなくなった。このため、研究期間を1年延長している。

～(1)テスラキッカーの試作～

電磁石に関する性能向上の基本原理は自身の基盤研究(C)で確立したものを基盤として用いた。空隙高約10mmの試作器を製作し、立ち上がり時間0.9 μ s、最大磁束密度1.3テスラを達成した。

～(2) 高エネルギー粒子制御試験～

上述の通り、京都大学原子炉実験所のFFAG加速器から供給される100MeV陽子線を用いて、原理実証実験を行った。磁石長0.23m、磁束密度0.5Tの電磁石をインストールし、陽子軌道制御実験を試みた。その結果が、下図となる。想定通り、磁石下流0.5mの位置で、約5cmの軌道制御に成功した。この軌道変位は想定通りであり、実証完了と判断した。飽和条件と非飽和条件での差も確認できており、有為なフラットトップの形成も確認できた。



図： 100MeV陽子軌道制御実験結果：キッカー非励磁（左図）と励磁（右図）時の軌道変位量は約5cmであり、想定通りの結果が得られた。

～(3)省電力化の可能性～

前記の結果に伴い、セプタムフリーでの粒子線制御が可能となった。これにより、大幅な省電力化が可能となった。勿論、Slow extractionを始め、セプタムシステムが重要な役割を果たすのは明白であり、それを否定する提案ではない。

～(4) 応用展開に関して～

高エネルギー粒子科学における基礎研究及び応用研究は、様々な技術が必要であり、検討項目も多岐にわたる。平行して推進した科研費26610074と連携し、セミナー、インフォーマルミーティング、シンポジウムを主催し連携枠を拡大していく毎に、理工系のみならず、社会学の観点からの情報提供を戴く等、人文系も含め、異分野交流は必須であると感じた。大型プロジェクトのみならず、小型でも広域な研究においては、研究を支えるあらゆる職種の力が必要となり、コアチームのみならず、そういった支援者の生活基盤作りを、ひとつの街づくりレベルで取り組んでいく必要があると再認識した。加えて、理工系研究者の減少も重要な問題である。今後は、年齢（若手だけでなく高齢者も含め幅広く）や学位を問わず、広く携わっていける指導方法の構築や研究環境の刷新が必要と感じた。

技術的な観点からの応用展開としては、育種応用への取組みを開始した。また、医学利用の観点から、ハイパーサーミアへの矩形繰り返し磁場の応用も検討し、新たな研究プロジェクトとして推進することになった。

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7件）

- ① Eiji Nakamura, Developments on Next-Generation Beam Handling of High-Energy Particles by using Non-linear Characteristics, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Special Issue 2 (2016) pp.1-6.
- ② Hikaru Sato, Saving Energy and Uninterruptible Power System for Large Scale Research Facility, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Special Issue 2 (2016) pp.7-12.
- ③ Eiji Nakamura, New Approach for Designing of High-Energy Circular Particle Accelerators, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Special Issue 2 (2016) pp.13-17.
- ④ Masakazu Takayama, Koichi Kindo, Akira Matsuo, Koshi Kawaguchi and Eiji Nakamura, Impulse Strong Mirror Field for High-Energy Particle Handlings, International Journal of Advanced Applied Physics Research,

査読有, Special Issue 2 (2016)
pp. 18-23.

- ⑤ Yuko Nakamura, Meson Acceleration and Handling, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Special Issue 2 (2016) pp. 24-28.
- ⑥ Eiji Nakamura, Transverse Dynamics for Super-Rapid Acceleration in Circular High-Energy Particle Accelerators, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Vol. 2, No. 2 (2015) pp. 1-6.
- ⑦ Eiji Nakamura, Tomohiko Asai, Jun'ichi Sekiguchi, Izumi Sakai, Shin Yabukami, Yuta Sasaki, Yusuke Sawaki, Tatsuya Date, Jun Kudo, Tomofumi Ichinomiya, Sho Nakamura, Toshiki Takahashi, Yusuke Bannai, Yoshihiro Ishi, Tomonori Uesugi, Masakazu Takayama, Takeshi Tomomura, Yuma Daikoku, Shou Hashimoto, Haruhisa Koguchi, Shigeru Inagaki, Koichi kindo, Tsukasa Nakamura and Yuko Nakamura, Conceptual Design of Rapid Circular Particle Accelerator using High-Gradient Resonant Cavities with Fixed Frequency, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Vol. 2, No. 1 (2015) pp. 8-18.

[学会発表] (計 13 件)

- ① Eiji Nakamura, Opening talk of the scientific research symposium on middle range energy production: power supply systems on demand by pulsed operation for nuclear fusion, following conventional fusion methods and using fundamental methods promoted rapidly in this decade, Symposium S-7 in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27th 2015.
- ② Hikaru Sato, Eiji Nakamura, Requirements of compact pulsed nuclear fusion reactors for middle energy production, Symposium S-7 in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27th 2015.

- ③ Eiji Nakamura, Opening talk of the informal meeting IF9 on middle range energy production: power supply systems on demand by pulsed operation for nuclear fusion, following conventional fusion methods and using fundamental methods promoted rapidly in this decade, Informal meeting IX in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 26th 2015.
- ④ Shigeru Inagaki, Recent progress on Nuclear Fusion Research Projects and Demands for Compact Reactor, Symposium S-7 in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27th 2015.
- ⑤ Yasuhiko Kondo, Haruhisa Koguchi, The Future Problem of the Power System Operation under the Trend of Electricity Demand, Symposium S-7 in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27th 2015.
- ⑥ Tomohiko Asai, Hiroshi Gota, Current state of high-beta fusion reactor core, Symposium S-7 in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27th 2015.
- ⑦ Izumi Sakai, Discussion on electricity supplies obtained from the experience at the Fukushima Nuclear Power Plant, Symposium S-7 in the 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27th 2015.
- ⑧ Eiji Nakamura, Koichi Kindo, Akira Matsuo, Koushi Kawaguchi, Izumi Sakai, Shin Yabukami, Masakazu Takayama, Yoshihiro Ishi, Tomonori Uesugi, Tomohiko Asai, Jun'ichi Sekiguchi, Tadafumi Matsumoto, Takahiro Edo, Haruhisa Koguchi, Tsukasa Nakamura, Fumio Yoshinari, Yuko Nakamura,

Shigeru Inagaki, High-energy particle handling by using 50T class pulsed magnets, The 32nd annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 25th 2015.

⑨ Eiji Nakamura, Opening talk: Recent circumstances on electricity in Japan and developments for special fundamental techniques, 1st seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20th 2014.

⑩ Shigeru Inagaki, Recent status of plasma science and nuclear fusion research, 1st seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20th 2014.

⑪ Izumi Sakai, Development of nuclear fission reactors by using accelerator driven system (ADS) and progress of thorium reactor, 1st seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20th 2014.

⑫ Tomohiko Asai, Progress of FRC research and its applications to μ CF, 1st seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20th 2014.

⑬ Eiji Nakamura, Future compact fusion reactors using advanced techniques promoted rapidly in this decade, 10th academic meeting combined with nuclear fusion and energy production, International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan, June 19th 2014.

[図書] (計 0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他] (なし)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 英滋 (NAKAMURA, Eiji)
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

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

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

石 禎浩 (ISHI, Yoshihiro)
京都大学・原子炉実験所・准教授
研究者番号： 00525834

上杉 智教 (UESUGI, Tomonori)
京都大学・原子炉実験所・助教
研究者番号： 80392215

浅井 朋彦 (ASAI, Tomohiko)
日本大学・理工学部・准教授
研究者番号： 00386004

小口 治久 (KOGUCHI, Haruhisa)
産業技術総合研究所・主任研究員
研究者番号： 20356976

(3) 連携研究者

金道 浩一 (KINDO, Koichi)
東京大学・物性研究所・教授
研究者番号： 20205058

稲垣 滋 (INAGAKI, Shigeru)
九州大学・応用力学研究所・教授
研究者番号： 60300729

(4) 研究協力者

酒井 泉 (SAKAI, Izumi)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究
施設・ダイヤモンドフェロー

佐藤 皓 (SATO, Hikaru)
高エネルギー加速器研究機構・名誉教授

中村 ゆう子 (NAKAMURA, Yuko)
日本大学・理工学部・非常勤講師

中村 直司 (NAKAMURA, Naoji)
石巻専修大学・理工学部・研究補助員