

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 10 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610074

研究課題名(和文)10～1000テスラ級パルス強磁場が拓く高エネルギー粒子科学

研究課題名(英文)High-energy particle science by using Megagauss techniques

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：近年の高エネルギー粒子の生成及びその応用に関しては、統計学的手法に基づく研究が主体となっており装置には高安定度が求められているため、制御用電磁石は10テスラ未満のものが殆どであり、更なる高エネルギー化の一つの壁ともなっている。本研究課題では、強磁場・超強磁場の適用の可能性を様々な観点から検討し、高エネルギー粒子生成そのものの原理再構築も含め、飛躍的な高エネルギー粒子科学分野発展の道を拓く指針を構築することを目的とする。理論的観点からのアプローチに加え、50テスラ電磁石試作器の製作と評価試験を完了し、実用化への重要な情報を得た。これらの成果の一部を専門学術誌の特集号に投稿し5編全てが掲載された。

研究成果の概要(英文)：The magnetic flux density of almost conventional magnets, even if using superconducting coils, is less than 10 T to control the motion of high-energy particles, because of the requirements on reliability and stability, especially for the recent experiments based on the use of statistical methods. On the other hand, the fundamental techniques have been promoted rapidly and provided many noble achievements in this decade, for example, the high-power laser, the MegaGauss techniques and so on. The possibilities of the higher magnetic field on high-energy particle handling were investigated in this study project. New scenarios related for high-energy particle science were discussed. The prototype pulsed magnet was assembled to confirm the adjustability to high-energy particle handling, and the formation of a sufficient mirror field with a peak field of 54 T was obtained. The representative achievements in this study project has summarized in the special issue of the academic journal.

研究分野：高エネルギー粒子科学

キーワード：High-energy particle Strong magnetic field Pulsed magnet Particle application Particle accelerator Compact Nuclear Fusion Fundamental experiment

### 1. 研究開始当初の背景

近年、基礎物理研究や核融合研究において粒子線加速器技術が発展し、TeV 級高エネルギー粒子や 1 MW 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。医療、ナノ材料開発等産業分野へも大規模に応用展開されつつあり、TTPS、FFAG、AIA、IS 等様々な新型加速器が開発され成果が出始めている。これらの発展を築いた主たる基盤技術の 1 つに超伝導技術があり、優れた電力効率で安定した電磁場の形成が可能となった。他方、高エネルギー粒子制御にはパルス磁場も重要な役割を担う。超伝導電磁石は、冷却機構や放射線防護のための構造物が必要であり、高エネルギー粒子制御としては 10 T 近傍が実用的限界となる。一方、パルス磁場は、古来より 3,000 T 近い超強磁場を実用的な空間に展開させる事が可能であり、超伝導技術では成し得ない領域の強磁場研究が期待できる。超強磁場技術では爆縮・濃縮型が主たる原理であり、繰り返し使用が難しい。これに対して、国内では東大物性研を筆頭に室内最高 700 T を達成し、非破壊型においても 50 T 級が実用化された。事前に初期検討を行い、当方が別件で助成戴いた科研費研究の成果や、12GeV 陽子加速器での運転・ビーム供給実績、J-PARC 建設経験等、高エネルギー加速・制御に関する実地経験を反映させる事で各項目の可能性を見出した。これにより本格的な研究課題として取り組みたく本研究課題の立案に至った。

### 2. 研究の目的

主に次の 2 項目の観点で本研究を推進する。

[A] 強磁場・超強磁場技術による高エネルギー粒子線の制御可能なパラメーター領域を理論的に探索し、実用研究へ向けた指針を構築する。

[B] パルス強磁場ソレノイドを試作し、性能評価試験(励磁試験等)を実施、その結果から工学的知見を得る。

### 3. 研究の方法

前記[A]に関しては、理論的アプローチで進めた。主に下記 6 項目に関して検討を行い、研究開始前の初見にて提示した可能性を追求し、実現の可能性、今後必要となる基盤技術等の検討を行った。

- (1) 粒子線加速器における粒子線軌道制御
- (2) プラズマ閉じ込め装置のコンパクト化
- (3) 短波長放射光源
- (4) ミュオン源
- (5) 高密度高エネルギー粒子空間形成
- (6) 高エネルギー粒子加速器の小型・汎用化

前記[B]に関しては工学的アプローチを主体とし、10 T 以上の磁場形成を目的としたパルス強磁場ソレノイドを試作し、励磁試験により知見を得る。磁場の空間分布形成検証も視野に、セパレート型のコイル配置とし、

ミラー磁場の形成、強いリークフィールドの活用の可能性等に対する知見を得る。

### 4. 研究成果

理論的アプローチによる検討は、主催セミナー、シンポジウム等の場で公表し、更なる討論を行った。前記細目(1)~(6)に関しては以下の結論を得た。

(1) 適用に関しては、制御対象の荷電粒子の特性(種類、エネルギー等)及び実験環境(施設・設備)に大きく依存する。特に、今日までの高エネルギー粒子実験の礎となる確率論・統計学、及び、量子論に基づいた手法が大多数となっており、膨大な粒子数を必要とすることが殆どなっているため、それらを生成・供給する装置(高エネルギー粒子加速器等)は、高繰り返しビーム出力が必須となる。このスタイルにおいては強磁場展開へも高繰り返し化が求められることとなるが、励磁電源等が比例して大規模化するため、一定の条件から高エネルギー粒子加速器そのもののサイズを越え運用面において合理的な解と成り得なくなる。他方、近年、レーザー電子光技術による原子核(fm)レベルでの計測や、計測器観測精度・制御機器・計算機等が飛躍的に進歩し、現状の確率・統計論的手法をベースとした実験に加え、直接的な手法での実験の可能性が拓けてきた。この場合、高エネルギー粒子の供給は低繰り返しでも可能となり、強磁場技術の適用も合理的且つ有用となる。こういった視点での新たな高エネルギー粒子生成手法の提起も行った。

(2) 現在までの核融合発電に対する基本理念は、世紀レベルでの技術蓄積のもと、プラズマ磁気閉じ込めが主流となり、ITER 建設までに至っている。これは、核反応率の極大値を与える重水素の運動エネルギーが 100keV 弱であることが最も基本となる。このクラスのエネルギーを制御するためには 10 T の強磁場でも m 級の装置サイズが必須であり、超伝導技術の発展により実現の可能性が拓けた。慣性核融合に関しても飛躍的な展開がなされてきたが、装置規模が更に広大になるデメリットが拭えない。加えて、日本の電力生成形態が一極集中で行われている点も重要な条件として加わる。これは、福島原発で起こったような危険事象による影響を低減するため、市街地を避ける安全担保の意味合いも強い。しかしながら、ここ数年大規模に展開されてきた太陽光を初めとする再生可能エネルギーの供給形態は小規模多数分散型になる。核融合発電においても MW 出力小規模装置を多数設けることは有用であるが、上記の通り従来技法では高エネルギー粒子の閉じ込めが不可能であったため検討が停滞していた。強磁場技術は高エネルギー粒子をコンパクトに閉じ込めることが可能であり、近年の電力需給形態の変化もあり、その可能性を拓くものとなり得る。パルスの出力にはなるが、蓄電技術の検討を踏まえ、

新たな電力供給源として成立する可能性を有する事を提示した。

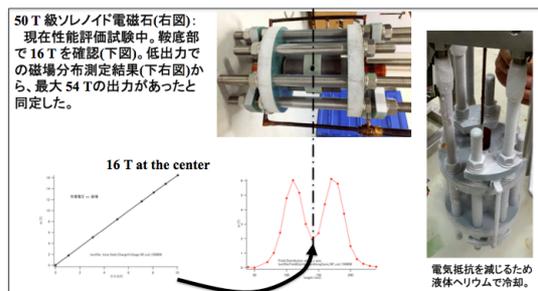
(3) 初見の検討通り、基礎的なパラメーターとしては、レーザー電子光と同等の性能が可能であることを確認した。但し、光源の基本要素となる電子の高エネルギー化が必須であり、ILC もしくは同等の性能(100GeV 級)を発揮する装置の建設及び稼働が待たれる。

(4) ミュオン源としては、国内では J-PARC が実働となっており、阪大のサイクロトロンが続く。いずれにせよ、ミュオン利用環境が数少ないのは明白であり、ミュオン研究・産業応用化を目指す意味でもミュオン源の開発は重要である。難点は 1 次粒子となる高エネルギー陽子・重水素の生成である。重水素にして 1GeV、陽子にして 3GeV が、ミュオン生成のための  $\pi$  中間子生成の最大効率を示すが、大阪大学の成果として 400 MeV 程度のエネルギーでも有為な量の生成が可能であることが示されている。少量であっても実験研究には有用であり、この観点からミュオン源のコンパクト化を検討した。幸い、35 MV/m を展開できる高周波加速が実現されており、これとパルス強磁場を組み合わせることで少周回円形加速器案を提示した。

(5) 強磁場ソレノイドによる閉じ込めと、高周波制御によるエネルギー変調により、高エネルギー粒子場での空間電荷効果を緩和しつつ、高密度化の可能性が見出された。後述の強磁場電磁石原型機から得られた知見を踏まえ、次の研究プロジェクトとして研究を引継ぐ。

(6) 固定周波数の強電界加速装置と、DC 磁場による等時性マイクロトロンの検討を行った。シンクロトロンと比べ周回数が少なく、補正電磁石を設置するスペースも十分あるとの結論に至った。原理実証試験、及び、この実現までを、次の研究プロジェクトに引継ぐ。

工学的アプローチにおいては、ピークで 54 T の磁束密度と、必要なミラー磁場構造を展開できたことを実験的に確認し検証を完了した(下図参照)。



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。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。

## 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, 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. <http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2015.02.01.2>
- ② 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. <http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2015.02.02.1>
- ③ 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. <http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2016.02.01>
- ④ 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.  
<http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2016.02.02>

- ⑤ 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.  
<http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2016.02.03>
- ⑥ 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.  
<http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2016.02.04>
- ⑦ Yuko Nakamura, Meson Acceleration and Handling, International Journal of Advanced Applied Physics Research, 査読有, Special Issue 2 (2016) pp.24-28.  
<http://dx.doi.org/10.15379/2408-977X.2016.02.05>

[学会発表] (計13件)

- ① Eiji Nakamura, Future compact fusion reactors using advanced techniques promoted rapidly in this decade, 10<sup>th</sup> academic meeting combined with nuclear fusion and energy production, International Congress Center, Tsukuba, Ibaraki, Japan, June 19<sup>th</sup> 2014.
- ② Eiji Nakamura, Opening talk: Recent circumstances on electricity in Japan and developments for special fundamental techniques, 1<sup>st</sup> seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20<sup>th</sup> 2014.
- ③ Shigeru Inagaki, Recent status of plasma science and nuclear fusion research, 1<sup>st</sup> seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20<sup>th</sup> 2014.
- ④ Izumi Sakai, Development of nuclear fission reactors by using accelerator driven system (ADS) and progress of thorium reactor, 1<sup>st</sup> seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20<sup>th</sup> 2014.
- ⑤ Tomohiko Asai, Progress of FRC research and its applications to  $\mu$ CF, 1<sup>st</sup> seminar of scientific research program on middle range energy production and high-energy particles for wide uses, Surugadai campus of Nihon University, December 20<sup>th</sup> 2014.
- ⑥ 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 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 25<sup>th</sup> 2015.
- ⑦ 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 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27<sup>th</sup> 2015.
- ⑧ Hikaru Sato, Eiji Nakamura, Requirements of compact pulsed nuclear fusion reactors for middle energy production, Symposium S-7 in the 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27<sup>th</sup> 2015.
- ⑨ 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 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan

Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 26<sup>th</sup> 2015.

- ⑩ Shigeru Inagaki, Recent progress on Nuclear Fusion Research Projects and Demands for Compact Reactor, Symposium S-7 in the 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27<sup>th</sup> 2015.
- ⑪ Yasuhiko Kondo, Haruhisa Koguchi, The Future Problem of the Power System Operation under the Trend of Electricity Demand, Symposium S-7 in the 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27<sup>th</sup> 2015.
- ⑫ Tomohiko Asai, Hiroshi Gota, Current state of high-beta fusion reactor core, Symposium S-7 in the 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27<sup>th</sup> 2015.
- ⑬ Izumi Sakai, Discussion on electricity supplies obtained from the experience at the Fukushima Nuclear Power Plant, Symposium S-7 in the 32<sup>nd</sup> annual meeting of the Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research (JSPF), Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan, November 27<sup>th</sup> 2015.

[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

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

### (3) 連携研究者

稲垣 滋 (INAGAKI, Shigeru)

九州大学・応用力学研究所・教授  
研究者番号： 60300729

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

薮上 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

### (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