

令和元年6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：2015～2018

課題番号：15K13494

研究課題名(和文) プラズマ航跡場によるクリーン小型ビームダンプの研究開発

研究課題名(英文) R&D of clean compact beam-dump based on plasma wake-field

研究代表者

佐伯 学行 (SAEKI, TAKAYUKI)

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

研究者番号：70282506

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：加速器で生成・加速された荷電粒子ビームは、素粒子・原子核物理学や物質・生命科学等の基礎科学から産業・医療利用に至るまで広範囲に利用されている。荷電粒子ビームは使用後にビームダンプ装置に入射され、核反応を伴う過程を経て熱エネルギーとして廃棄されるが放射化が伴う欠点がある。本研究では、適切に調整したガス・チェンバーにレーザーと荷電粒子ビームを同時に入射することで発生するプラズマ航跡場によって、荷電粒子ビームをプラズマに変換して放射化を最小限に抑制して廃棄する研究を進めた。シミュレーション計算の結果、仮定した入射荷電粒子ビームに対して適切なガス・チェンバーとレーザーの条件を見出すことに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

加速器で生成・加速された荷電粒子ビームは、素粒子・原子核物理学や物質・生命科学等の基礎科学から産業・医療利用に至るまで広範囲に利用されている。荷電粒子ビームは使用後にビームダンプ装置に入射され、核反応を伴う過程を経て熱エネルギーとして廃棄されるが、放射化が伴うという欠点がある。本研究では、適切に調整したガス・チェンバーにレーザーと荷電粒子ビームを同時に入射することで発生するプラズマ航跡場によって、荷電粒子ビームをプラズマに変換して放射化を最小限に抑制して廃棄する方法をシミュレーション計算で明らかにした。今後、荷電粒子ビームを利用する全ての施設において、放射化の問題を回避できる可能性が拓けた。

研究成果の概要(英文)：Electric-charged particle beams that are generated and accelerated by particle accelerators are utilized by fundamental science and industrial/medical applications ranging widely from elementary-particle/nuclear physics, material development and to biology. The utilized particle-beams are dumped through the nuclear reactions into the final heat energy, but with some radioactivity. This is a problem and defective aspect of current beam-dump system. We studies the new method of clean and compact beam-dump where beam is injected into an appropriate gas-chamber with laser and the generated plasma wake-field transfers the beam energy to plasma energy with minimum radioactivity. We successfully found appropriate conditions of gas-chamber and laser for assumed particle-beams to be transferred into plasma energy by simulation calculation.

研究分野：物理学、粒子加速器、レーザー、プラズマ

キーワード：ビームダンプ 荷電粒子ビーム 加速器 プラズマ航跡場 ILC レーザー 物理学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

粒子加速器で加速された荷電粒子ビームは、素粒子・原子核物理学や物質・生命科学等の基礎科学から産業・医療利用に至るまで広範囲に利用されている。従来の加速器施設では、使用後の荷電粒子ビームはビーム・ダンプ装置に入射され、核反応を伴う過程を経て熱エネルギーに変換されて廃棄される。このビーム・ダンプ装置は、ビーム・エネルギーが高くなれば少なからず放射化されるため遮蔽が必要であり、放射化した冷却水や部材などは適切かつ安全に管理をして最終的に放射化物として廃棄する必要がある。このため、荷電粒子ビームを利用する全ての施設においてビーム・ダンプ装置は細心の注意で運営する必要があり、また同時に、高額のコストが発生する。このような状況の中、近年、プラズマ物理学が急速に進展しつつあり、適当なガス・チェンバー、荷電粒子ビーム、レーザー等を組み合わせることで、従来よりも格段に小型の装置で荷電粒子ビームを加速や減速できることが明らかになってきた。また、この反応過程は、核反応ではなく電磁気反応であるため、原理的にほとんど放射化物が発生しないと考えられる。このような状況において、2010年に田島(Univ. of California at Irvine)とA.W.Chao(SLAC)は、荷電粒子ビームのパンチ形状とそれを入射するガス密度を最適化することによって、ビーム・エネルギーをプラズマ航跡場に高効率で変換して熱エネルギーとして廃棄し、放射化物の生成を抑制できることを解析計算(数学的な近似式)によって示し、さらにこれを特許化した。本研究では上記の田島氏とA.W.Chan氏を協力研究員として招き、荷電粒子ビームをレーザーと共にガス・チェンバーに入射してプラズマ航跡場を発生させ荷電粒子ビームを減速させる原理に基づいて、小型かつクリーンなビーム・ダンプ装置を実現するための研究開発を行うこととした。この新しい原理に基づくビーム・ダンプ装置は、大型の高エネルギー加速器から産業用・医療用加速器に至るまで、幅広い応用が期待できる。また、近年、国際リニアコライダー(International Linear Collider, ILC)計画を日本に誘致しようという動きがあり、研究代表者である佐伯が参加するILC研究チームにおいて、ILCでプラズマ・ビーム・ダンプ装置が使えるか検討していた。ILCは、電子ビーム(125 - 250 GeV)と陽電子ビーム(125 - 250 GeV)を衝突させて、電子と陽電子の衝突点で宇宙の初期に近い状態を発生させることができる物理学の巨大実験施設である。そのビーム・ダンプ装置では数MWのエネルギーを廃棄するが、ILCは次世代の巨大科学実験施設であることから、できるかぎり環境負荷を低減した設計とすることが望ましいとされていた。

2. 研究の目的

加速器で加速された荷電粒子ビームは、素粒子・原子核物理学や物質・生命科学等の基礎科学から産業・医療利用に至るまで広範囲に利用されている。従来の加速器施設では、使用後の荷電粒子ビームはビーム・ダンプ装置に入射され、熱エネルギーに変換されて廃棄される。このビーム・ダンプ装置は、ビーム・エネルギーが高くなれば少なからず放射化されるため、遮蔽が必要であり、冷却水やその部材は、最終的に放射化物として廃棄する必要がある。本研究では、荷電粒子ビームをガス・チェンバーに入射してプラズマ航跡場を発生させ、核反応ではなく電磁気反応でビームを減速して放射化を最小限に抑制することができる新しいビーム・ダンプ装置を開発することを目的とした。この技術は、大型の高エネルギー加速器から産業用・医療用加速器に至るまで、幅広い応用が期待できる。

3. 研究の方法

荷電粒子ビームのエネルギーをプラズマ航跡場に変換するアイデアを発案した田島氏、A. W. Chao氏達の研究グループと、日本における加速器装置の研究の中心となるKEKの研究グループが、新しいビームダンプ装置の原理実証を目指したコラボレーションを結成する。田島氏達のグループは、適切な条件のガス・チェンバーに荷電粒子ビームを入射することで、プラズマ航跡場が発生することを解析的な近似式で示した。新しく開始する田島氏達とKEKの研究グループのコラボレーションでは、実際の荷電粒子ビームとガス・チェンバーを想定したパラメータを使い、プラズマ航跡場によるビーム減速をシミュレーション計算によって確かめる。これらのシミュレーション計算により、ビーム減速に最適なビーム形状やガス・チェンバーの濃度・圧力のパラメータ探索を行う。可能であれば、KEKにおいて荷電粒子ビームの減速実証実験のための装置の概念設計を行い、その実証実験をKEKにて行う。

4. 研究成果

平成27(2015)年度の研究成果:

ILCのビーム・ダンプ装置をプラズマ減速で実現できるかの検討を行った。ILCでは、高いルミノシティを得るために、電子パンチと陽電子パンチのサイズを絞り込んで衝突させるため、衝突後は2つのパンチが拡散する。このため、衝突後のパンチ形状の詳細なシミュレーション

計算を行うことを検討した。しかし、この課題においては、まず高いエネルギーの電子（陽電子）ビームがビーム・ダンプとして現実的な距離において、プラズマ航跡場の効果によって減速されることをシミュレーションで示すことが最も重要と判断し、ビーム衝突によるビーム拡散の研究は次年度以降に行う方針とした。このため、ILCにおける衝突前のビームパンチ形状に近い形を仮定し、プラズマ航跡場によるビーム減速が行われるかをシミュレーションで計算した。具体的には、長さ方向（X）のシグマ=300 μm、断面方向（r）のシグマ=50 μm、ビームのエネルギー=250 GeV、エネルギーの広がりを0.1%と仮定して、プラズマ密度=(3×10^{21} /立方 m)のプラズマ内にビームを入射した場合のプラズマ航跡場によるビーム減速を3mの長さに亘って詳細なシミュレーションで計算した。その結果、3mにおけるプラズマ航跡場の減速により、ビームは15%のエネルギーを失うことが確認できた。このシミュレーション計算の結果は、2015年10月に行われた海外国際会議 IZEST Workshop @ CERN “Outlook on Wake Field Acceleration: The Next Frontier” で研究代表者の佐伯により報告・発表された。このシミュレーション計算をさらに進めるためには、計算機能力の向上が重要である。このため、KEKの計算機センターを利用すると同時に、専用ワークステーションを購入して計算機能力の向上を続けた。

平成 28（2016）年度の研究成果：

平成 28 年度は、シミュレーション計算をさらに進めて 3m 以降のビームのシミュレーションを行うため、KEK の計算機センターを利用すると同時に、既に購入した専用ワークステーションを利用して計算機能力の向上を行った。しかし、これまでシミュレーション計算を行っていた University of California at Irvine の研究協力者のスタッフが転職のために当研究を続けることができなくなってしまった。同大学の学生がシミュレーション計算を行うこととなったが、シミュレーションに不慣れなために大きな進展が得られなかった。ビームの全エネルギーの減速計算が行われていないため、プラズマガスチェンバーの最適化などは未着手の状況となった。研究の結果は、2016 年 10 月に行われた海外国際会議 eeFACT2016 @ Cockcroft Institute at Daresbury Laboratory, UK で研究協力者の Alex Chao により報告・発表された。また、2016 年 11 月に行われた海外国際会議 IEEE @ Strasbourg, France で研究代表者の佐伯により報告・発表された。

平成 29（2017）年度の研究成果：

平成 29 年度は、新しくシミュレーション計算を行うことができる人材の確保に努めた。まず、海外研究協力者である Denis Perret-Gallix 氏にシミュレーション計算のスキルを獲得してもらい、計算を再開することとした。幸い、University of California at Irvine の前任者から全面的にバックアップを受けて、Denis Perret-Gallix 氏がこれまでの計算を再現することができた。このため、3m 以上のプラズマ航跡について計算を続行していく目処が立った。また、国内のプラズマ物理の著名な研究者である神門正城氏が当研究に参加することとなり、神門氏の協力の元、計算を行うことができる新しい人材の確保に努めた。ビームの全エネルギーの減速計算が行われていないため、プラズマガスチェンバーの最適化などは未着手の状況となった。これまでの研究の結果は、2017 年 10 月に行われた海外国際会議 LCWS2017, 23-27 Oct. 2017 in Strasbourg/France で研究協力者の Denis Perret-Gallix 氏により報告・発表された。また、2017 年 11 月に行われた海外国際会議 4th WS ESS at Research Infrastructures, ELI-NP, Magurele, 23-24 Nov. 2017 で代表者である佐伯が研究成果について報告・発表を行った。

平成 30（2018）年度の研究成果：

平成 30 年には Denis Perret-Gallix 氏が神門氏の助言を得て、電子ビームに加えて陽電子ビームのプラズマ減速のシミュレーションを実施した。5 月 28 日-6 月 2 日に福岡で開催された ALCWS2018 会議において、その成果を発表し、beam energy 250 MeV, beam part $6.5 \times 10^{**8}$, bunch length 7.5 μm, bunch radius 20 μm のビームに対して 12 cm で 100 MeV (40%) まで減速できることを示した。しかし 40% まで減速した後で減速が飽和するため、レーザーで field を誘起する active mode での減速について考察を行い、21 cm でほぼ 100% の減速が可能であることを示した。その後、この方法を 250 GeV のビームに適用してシミュレーションを継続した。しかし 6 月末に Perret-Gallix 氏が突然死去するという不幸に見舞われ、再び研究が中断した。これに対して神門氏の共同研究者である James 甲賀氏がシミュレーションを引き継ぎ発展させることになった。甲賀氏は、独自のアイデアで 127 GeV の電子ビームをレーザーと衝突させるシミュレーションを実施し、電子のエネルギーを約半分まで減速し、それをプラズマでさらに減速する方法を考案した。この結果は、10 月 22 日-26 日に米国の Texas 大学で開催された LCWS2018 会議にて報告された。さらに ILC の設計において、既存のビーム・ダンプ装置の前段にプラズマ減速ビーム・ダンプ装置を設置してプラズマ減速実験を行うことを検討し、その結果を 7 月 5 日（開催場所：京都大学）と 11 月 3 日（開催場所：KEK）に開催された「ILC の多角的活用を考える会」にて佐伯と甲賀氏がそれぞれ報告した。これら一連のシミュレーションの実施は、KEK に設置した専用ワークステーションで行うと同時に、神門氏と甲賀氏が所属する量子研究機構(QST)のコンピューターでも行い、相互にデータの交換を行う方法を確立した。

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0件)

〔学会発表〕(計 7件)

発表者名: Takayuki Saeki

発表標題: Study on the recovery of the beam energy of International Linear Collider (ILC) by plasma wake-field deceleration

会議名: IZEST WS at CERN: “Outlook on wake field acceleration: The next frontier”(招待講演)(国際学会)

発表年月: 2015年10月

発表者名: Alex W. Chao

発表標題: Study on the International Linear Collider Beam Dump by Plasma Wake-Field Deceleration

会議名: eeFACT2017(招待講演)(国際学会)

発表年月: 2016年10月

発表者名: Takayuki Saeki

発表標題: Study on the International Linear Collider Beam Dump by Plasma Wake-Field Deceleration

会議名: 2016 IEEE NSS/MIC Conference(招待講演)(国際学会)

発表年月: 2016年11月

発表者名: Denis Perret-Gallix

発表標題: For a Global Initiative Toward Green Colliders

会議名: The 2017 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS2017)(国際学会)

発表年月: 2017年10月

発表者名: Takayuki Saeki

発表標題: Challenge for the Efficient and Sustainable Design of ILC

会議名: 4th Workshop Energy for Sustainable Science at Research Infrastructures(招待講演)(国際学会)

発表年月: 2017年11月

発表者名: Denis Perret-Gallix

発表標題: Green ILC: Plasma Wakefield and Beam Dump

会議名: Asian Linear Collider Workshop (ALCW) 2018(国際学会)

発表年月: 2018年5月

発表者名: James Koga

発表標題: Study on Laser and Plasma Beam Dump for IL

会議名: 2018 International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS18)(国際学会)

発表年月: 2018年10月

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

出願年:

国内外の別:

取得状況(計 0件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

Green ILC
<http://green-ilc.in2p3.fr/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者 無し

(2)研究協力者

研究協力者氏名：田島 俊樹

ローマ字氏名：(TAJIMA Toshiki)

Rostoker Chair Professorship, University of California at Irvine, CA 92697:

Guest Professor, Ludwig Maximilian University, Am Coulombwall 1

85748 Garching, Germany: KEK 客員教授.

www.physics.uci.edu/people/toshiki-tajima

研究協力者氏名：Alex W. Chao

ローマ字氏名：(Alex W. CHAO)

Professor, SLAC National Accelerator Center, Stanford University, Stanford,
California 94309, USA.

研究協力者氏名：Denis Perret-Gallix

ローマ字氏名：(Denis PERRET-GALLIX)

Professor, IN2P3/CNRS, France: CERN 客員教授: KEK 客員教授.

2018年6月に死去。

研究協力者氏名：神門 正城

ローマ字氏名：(KANDO Masaki)

量子科学技術研究開発機構

研究協力者氏名：James Koga

ローマ字氏名：(James KOGA)

量子科学技術研究開発機構

研究協力者氏名：横谷 馨

ローマ字氏名：(YOKOYA Kaoru)

高エネルギー加速器研究機構

研究協力者氏名：藤本 順平

ローマ字氏名：(FUJIMOTO Junpei)

高エネルギー加速器研究機構

研究協力者氏名：早野 仁司

ローマ字氏名：(HAYANO Hitoshi)

高エネルギー加速器研究機構

研究協力者氏名：奥木 敏行

ローマ字氏名：(OKUGI Toshiyuki)

高エネルギー加速器研究機構

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。