

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2011～2013

課題番号：23240082

研究課題名(和文)次世代ガン治療用炭素線ドライバーの実証

研究課題名(英文) Demonstration of the next generation of cancer therapy driver

研究代表者

高山 健 (Takayama, Ken)

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・特別教授

研究者番号：20163321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,000,000円、(間接経費) 11,400,000円

研究成果の概要(和文)：次世代ガン治療用炭素線ドライバーの実証のためには完全電離炭素イオンを生成するイオン源が不可欠である。このため、レーザーアブレーションイオン源の開発を行った。Nd-YAGレーザー光をグラファイト標的に照射し、発生する価数1から6までのイオンを生成し、それを分離することによって6価のイオンを取り出す装置の開発に成功した。このイオン源は200 kVの高圧プラットホーム内にマウントされ、下流に位置する低エネルギービームトランスポートライン、デジタル加速器リングに伝送され、誘導加速をされるシナリオに沿って、完全電離炭素イオンを受け入れ、加速するシナリオの実証のために、重イオン加速の実証試験がなされた。

研究成果の概要(英文)：It was necessary to develop an fully stripped carbon ion source in order to realize the next generation of carbon therapy, where C-6+ delivered from the ion source are directly injected into an circular accelerator ring and quickly accelerated up to an desired energy. A laser ablation ion source has been successfully demonstrated with a sufficient ion beam quality in a collaboration between KEK and RIKEN BNL-branch. The KEK digital accelerator has been examined as a model accelerator ring to realize the next generation of carbon therapy driver, which does not require any injector system, such as an RFQ, ion linac, and carbon stripper. Tuning of the low energy beam transport, injection system, and ring magnet excitation, and induction acceleration system has been demonstrated from various aspects. All results have been published in refereed papers and presented at domestic and international conferences. Five master students have earned their thesis through the related activities.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学、医用システム

キーワード：炭素線 次世代がん治療 レーザーアブレーションイオン源 完全電離 デジタル加速器 誘導加速
炭素線がん治療

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初、小型誘導加速シンクロトロン (KEK デジタル加速器) が漸く稼働を開始しようとしていた。誘導加速シンクロトロンでの加速周波数 (イオンの周回周波数と同義である) の変化に関するダイナミックレンジは数メガヘルツ以下には制限がないと云う特長から、原理的には低速の重イオンを加速器リングに入射し、高エネルギーまで加速できる事が分かっていた。この特長を社会にインパクトのある形で応用することが研究代表者を中心に検討が進められていた。

放射線医学総合研究所の炭素線がん治療の開始から 20 年が経過し、今や、企業が中心となって小型・普及タイプなる炭素線ドライバーが国内数か所で建設稼働を開始する状況であった。これらの技術は固定されるものではない。歴史を振り返るならば、重イオン加速器本体と周辺機器の進化は今後も継続することは容易に想像できる。実際、世界の加速器研究施設では次世代のがん治療用粒子線ドライバーの開発研究が進行している。日本の独自技術を用いたブレークスルーが待たれている状況にあった。これは今でも変りはない。

2. 研究の目的

現在普及している炭素線ガン治療用のドライバーは上流から (1) ECR イオン源、(2) RFQ、(3) 線形加速器、(4) 電子剥離用炭素薄膜、(5) シンクロトロンからなる加速器複合体の構成を取るのが一般的である。本研究では (2) - (4) を排除し、イオン源と最終段コンポーネントの加速器リングから成る次世代がん治療用炭素線ドライバーの原理実証を目的とした。建設コスト・運転コストが縮減できるのは自明である。

3. 研究の方法

上記の (4) を排除する事から、イオン源では完全電離炭素イオン (C-6+) の生成が不可欠である。CO₂ をワーキングガスにした高磁場 ECR イオン源では完全電離酸素イオンの混入が避けられないと云う理由で、グラフィト標的のレーザーアブレーションイオン源の開発を最優先課題とした。共同研究者のそれまでの経験を反映させ、ナノ及びサブナノ秒パルス長の Nd-YAG レーザーで駆動するレーザーイオン源開発に着手することにした。

加速器リングに受け入れられるイオンビームの仕様には一定の制約があり、イオンビームのクオリティーを詳細に把握する事を次の課題とした。

一方、10Hz での fast cycling 運転を仮定する加速器リングに同期してのイオンビームの入射を満足させるために、グラフィト標的レーザー照射面の連続的な更新、真空中レーザー用ミラー、レンズの炭素スパッタリングからの保護等の機械的動作の保障といった工学上の開発課題があった。

加えて、イオン源からリングまでの伝送、入射、加速、取り出しに関する課題があった。低速入射に伴う特徴的な空間電荷効果、リング電磁石の残留磁場に起因する閉軌道の歪み、低速周回に伴う軌道上の自由電子捕獲に伴うビームロス等の個々の加速器物理上の課題の解明を順次行いながら、A/Q=2 (A: 質量数、Q: 電価数) の完全電離イオンのケースに向けた試験的加速器運転を続けられた。

4. 研究成果

(1) レーザーアブレーションイオン源

先ず、レーザー照射用の真空仕様の照射ボックスの製作を行った。常にフレッシュなレーザー照射面を維持する様に、x-y 2 軸方向に連続的なグラフィト標的の自動的移動機構、イオンを観測しながらレーザースポット位置を外部から制御出来る機構を実証した。これまでのレーザーイオン源の研究の結果を考慮して、1J/pulse 以下のエネルギー強度を前提に、市販のナノ秒とサブナノ秒パルス長の Nd-YAG レーザーを準備した。グラフィト標的からの炭素イオン価数スペクトラム、運動量分布、イオン電流と言った基本パラメーターを測定した。十分な強度の完全電離炭素イオンを得るにはナノ秒パルス長のレーザーは不可欠である事が判明した。得られたビームパラメーターは完全電離炭素イオン強度 10⁹/pulse、パルス長 1 - 2 マイクロ秒、運動量拡がり 10% 以下であった。これらのイオンビームパラメーターはデジタル加速器で受け入れられる事が評価された。文献 11、学会発表 41、宗本尚也「東工大 H26 修士論文」で詳しく論じられた。

(2) デジタル加速器本体

本研究期間 3 年を掛けて、低エネルギービームトランスポートのイオンビーム伝搬、静電入射手法、誘導加速制御、取り出し手法の実験が重ねられた。相対的に大きな A/Q イオンの試験的加速実例から外挿して、完全電離炭素線の加速は可能であることが分かった。詳細は論文 12 他に詳しい。

(3) 今後

正味の研究実施期間 2 年と 9 カ月、配分された研究費のみで、現デジタル加速器で完全電離炭素線を加速実証まで持って行く事は出来なかった。しかし、研究は継続しているので、早い時期に加速実証の公式発表を行えるであろう。

但し、デジタル加速器が旧 500 MeV ブースターであった事による制約から、理想的な次世代がん治療用炭素線ドライバーにはならない事も 4 - 2 の研究の中で明らかになった。理想的には超高真空仕様で、誘導加速セルを配置する場所は運動量分散関数をゼロにした専用のリングが必要である事も判明した。その様なデジタル加速器の設計がインド工科大学での計画とリンクして開始されている。発表 15 参照。

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 12 件)

1. K.Takayama, T.Adachi, K.Okamura, A.Takagi *et al.*, "Induction Acceleration of Heavy Ions in the KEK Digital Accelerator: Demonstration of a Fast-Cycling Induction Synchrotron", *Phys. Rev. ST-AB* **17**, 010101(1)-(6) (2014). (査読あり)
2. N.Munemoto, K.Takayama, M.Okamura et al., "Development of the C6+ laser ablation ion source for the KEK digital accelerator", *Rev. Sci. Instr.* **85**, 02B922-012B925 (2014) (査読あり)
3. T.Adachi and T.Kawakubo, "Electrostatic Injection Kicker for the KEK Digital Accelerator", *Phys. Rev. ST-AB* **16**, 053501-13 (2013) (査読あり)
4. K.Takayama, "Induction Accelerators", *J. Plasma Fusion Research* **89**, 102-109 (2013) (査読あり)
5. Leo Kwee Wah, T.Adachi, K.Takayama et al., "Einzel Lens Chopper and Behavior of the Chopped Beam in the KEK Digital Accelerator", *Phys. Rev. ST-AB* **16**, 043502-13 (2013) (査読あり)
6. K.Takahashi, K.Horioka, K.Takayama et al., "Plasma Transport in Periodic Magnetic Field by Permanent Ring Magnets", *Plasma and Fusion Research* **8**, 126005 (1-3) (2012) (査読あり)
7. K. Kondo, M. Okamura et al., "Laser ion source with solenoid for Brookhaven National Laboratory-electron beam ion source", *Rev. Sci. Instrum.* **83**, 02B319-21 (2012). (査読あり)
8. M. Okamura et al., "Laser ion source with a double pulse laser system", *Rev. Sci. Instrum* **83**, 02B308-10 (2012). (査読あり)
9. 高山 健, 岡村勝也, "デジタル加速器と次世代高繰り返しスイッチング電源", 電気学会論文誌 A 132, 13-16 (2012). (査読あり)
10. K.Ise, K.Okamura, K.Takayama et al., "Development of a Megahertz High Voltage Switching Pulse Modulator Using a SiC-JFET for an Induction Synchrotron", *Plasma Science, IEEE Trans.* **39**, 730-736 (2011). (査読あり)
11. T.Adachi, K.Takayama et al., "A Solid-state Marx generator driven Einzel lens chopper", *Rev. of Sci. Instrum.* **82**, 083305-11 (2011). (査読あり)
12. T.Iwashita, K.Takayama, T.Adachi, K.Okamura, Y.Arakida, A.Takagi et al., "KEK Digital Accelerator", *Physical Review ST-AB* **14**, 071301-20 (2011). (査読あり)

(学会発表)(計 41 件)

1. 宗本尚也, "KEK デジタル加速器のためのレーザーアブレーションイオン源による高電離炭素イオン生成実験とその解析", 2014 春 日本物理学会, 2014 年 3 月 27 日 - 3 月 30 日, 神奈川 東海大
2. 高山 健, "KEK デジタル加速器での多種イオン加速器の可能性と放射線物理学その他への応用", 2014 春 日本物理学会, 2014 年 3 月 27 日 - 3 月 30 日, 神奈川 東海大 (招待講演)
3. K.Takayama, "Applications of Hadron Accelerators", India Accelerator School, 2014 年 3 月 25 日 - 3 月 26 日, India Mumbai (招待講演)
4. 高山 健, "KEK デジタル加速器を用いた星間模擬実験", 宇宙における生命研究分野プロジェクト研究会, 2014 年 2 月 3 日, つくば 筑波大
5. 高山 健, "KEK デジタル加速器(小型誘導加速シンクロトロン)が提供する模擬宇宙線とアストロバイオロジー", 「自然界における生体分子キラリティー起源」研究会, 2013 年 11 月 16 日, 岡崎 分子科学研究所
6. 高山 健, "高速イオン用誘導加速シンクロトロン(デジタル加速器の開発)", 2013 秋 日本応用物理学会, 2013 年 9 月 16 日 - 9 月 20 日, 京都 同志社大 (招待講演)
7. T.Yoshimoto., "Heavy ion beam acceleration from very low energy in KEK digital accelerator", ECAART-11, 2013 年 9 月 8 日 - 9 月 13 日, Belgium Namur
8. K.Takayama, "KEK Digital Accelerator and Space Science and Technology on the Ground", ECAART-11, 2013 年 9 月 8 日 - 9 月 13 日, Belgium Namur
9. N. Munemoto, "Development of the C6+ laser ablation ion source for the KEK digital accelerator", Int. Conf. on Ion Sources '13, 2013 年 9 月 9 日 - 9 月 13 日, 幕張
10. 高山 健, "クラスターイオンのため誘導加速マイクロトロン", 第 10 回日本加速器学会, 2013 年 8 月 3 日 - 8 月 5 日, 名古屋
11. 由元 崇, "KEK デジタル加速器におけるイオン源からの直接入射ビームの加速", 第 10 回日本加速器学会, 2013 年 8 月 3 日 - 8 月 5 日, 名古屋
12. 劉星光, "KEK-DA LEBT 残留磁場影響下における完全電離イオンビーム", 第 10 回日本加速器学会, 2013 年 8 月 3 日 - 8 月 5 日, 名古屋
13. 高山 健, "KEK デジタル加速器の現状と Heavy Ion Beam Factory 構想", 電気学会・量子ビームによるナノバイオサイエンス技術調査専門委員会, 2013 年 7 月 11 日, つくば KEK (招待講演)
14. K.Takayama, "KEK Digital Accelerators and Applications of Heavy Ion Beams",

- Asian Forum for Accelerators and Detectors 2013, 2013年2月25日 - 2月26日, Russia Nobosibirsk (招待講演)
15. K.Takayama, "Heavy Ion Beam Factory for Material Science based on the KEK Digital Accelerator", 8th Int. Symp. on Swift Heavy Ions in Matter, 2012年10月24日 - 10月27日, Kyoto (招待講演)
 16. K.Takayama, "The Einzel Lens Longitudinal Chopper", Int. Conf. on Electron Cyclotron Resonance Ion Source, 2012年9月24日 - 9月27日, Australia Sydney
 17. T.Yoshimoto, "Heavy Ion Beam Acceleration in the KEK Digital Accelerator: Induction Acceleration from 200 keV to a Few Tens of MeV", 19th Int. Sympo. on Heavy Ion Inertial Fusion, 2012年8月12日 - 8月17日, US Berkeley
 18. K.Takayama, "KEK Digital Accelerator and Latest Switching Device R&D", 19th Int. Sympo. on Heavy Ion Inertial Fusion, 2012年8月12日 - 8月17日, US Berkeley (招待講演)
 19. K.Takahashi, "Effect of Solenoid Magnetic Fields on Drift Laser Plasma", 22nd Int. Conf. on Application of Accelerators in Research and Industry, 2012年8月5日 - 8月10日, US Fort Worth
 20. 新井輝夫, "Longitudinal Ion Beam Chopper on Einzel lens for the KEK Digital Accelerator", 第9回加速器学会, 2012年8月8日 - 8月11日, 大阪大学
 21. 門倉英一, "PLC based Control System for the KEK Digital Accelerator", 第9回加速器学会, 2012年8月8日 - 8月11日, 大阪大学
 22. 茨田優次, "Full Predictive Control of Induction Acceleration in the KEK Digital Accelerator", 第9回加速器学会, 2012年8月8日 - 8月11日, 大阪大学
 23. Liu Xingguang, "Longitudinal Beam Motion in the KEK Digital Accelerator: Tracking Simulation and Experimental Results", Heavy Ion Accelerator Technology 2012, 2012年6月18日 - 6月22日, US Chicago
 24. K.Takayama, "KEK Digital Accelerator and Recent Beam Commissioning Result", Heavy Ion Accelerator Technology 2012, 2012年6月18日 - 6月22日, US Chicago
 25. K.Okamura, "A Compact Switching Power Supply utilizing SiC-JFET for the Digital Accelerator", Int. Particle Accelerator Conference 2012, 2012年5月20日 - 5月25日, US New Orleans
 26. K.Takayama, "KEK Digital Accelerator and Its Applications", 1st Asian Forum for Accelerators and Detectors, 2012年2月6日 - 7日, インド、カルカッタ (招待講演)
 27. K.Takayama, "All-ions Accelerators", School for Accelerator Technology and Applications, 2012年1月30日 - 2月3日, India Mumbai (招待講演)
 28. K.Okamura, "The Next Generation of Pulse Power devices for Induction Accelerators", 3rd International Workshop on Recent progress in Induction Accelerators, 2011年10月17日 - 21日, 中国、成都
 29. Liu Xingguang, "Simulation Analysis of Barrier Bucket Trapped Ion Bunch Squeezing Experiment", 3rd International Workshop on Recent progress in Induction Accelerators, 2011年10月17日 - 21日, 中国、成都
 30. S.Harada, "Control System for Induction Acceleration in the KEK Digital Accelerator using the FPGA", 3rd International Workshop on Recent progress in Induction Accelerators, 2011年10月17日 - 21日, 中国、成都
 31. T.Arai, "A Slid-state Marx Generator driven Einzel Lens Chopper for the KEK Digital Accelerator", 3rd International Workshop on Recent progress in Induction Accelerators, 2011年10月17日 - 21日, 中国、成都
 32. K.Takayama, "Beam Commissioning in the KEK Digital Accelerator", 3rd International Workshop on Recent progress in Induction Accelerators, 2011年10月17日 - 21日, 中国、成都 (招待講演)
 33. T.Iwashita, "Beam Commissioning of the KEK Digital Accelerator", 13th US-Japan Workshop on Heavy Ion Fusion and High Energy Density Physics, 2011年10月12日 - 14日, 大阪大学 (大阪府 (招待講演))
 34. 岩下大器, "KEK デジタル加速器ビームコミッションング", 日本物理学会 2011 秋季大会, 2011年9月16日 - 19日, 弘前大学 (青森県)
 35. M.Okamura, "Laser Ion Source", 14th International Conference on Ion Source, 2011年9月12日 - 16日, Italy, Giardini Naxos (招待講演)
 36. K.W.Leo, "A Permanent Magnet ECRIS with a Slid-State Marx Generator Driven Chopper for the KEK Digital Accelerator", 14th International Conference on Ion Source, 2011年9月12日 - 16日, Italy, Giardini Naxos
 37. K.Okamura, "CHARACTERIZATION OF SIC JFET IN NOVEL PACKAGING FOR 1 MHZ OPERATION", The 2011 International Conference on Silicon Carbide and Related Materials (ICSCRM 2011), 2011年9月12日 - 16日, USA, Cleveland
 38. K.Okamura, "Novel Switching Power

Supply utilizing SiC-JFET and Its Potential for the Digital Accelerator”, 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), 2011年9月4日 - 9日, Spain San Sebastian

39. T.Adachi, “Solid-State Marx Generator Driven Einzel Lens Chopper”, 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), 2011年9月4日 - 9日, Spain San Sebastian
40. K.Takayama, “KEK Digital Accelerators and Its Beam Commissioning”, 2nd International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), 2011年9月4日 - 9日, Spain San Sebastian
41. 岩下大器, KEKデジタル加速器運転開始, 8回日本加速器学会年会, 2011年8月1日 - 3日, つくば国際会議場(茨城県)

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
Digital Accelerator Project
[Http://www-accps.kek.jp/Superbunch](http://www-accps.kek.jp/Superbunch)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高山 健 (TAKAYAMA Ken)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・特別教授
研究者番号：20163321
(平成26年度より特別教授)

(2) 研究分担者

岡村 昌宏 (OKAMURA Masahiro)

独立行政法人理化学研究所・実験研究グループ・研究員

研究者番号：80332245

(3) 連携研究者

安達 利一 (ADACHI Toshikazu)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・教授
研究者番号：80141977
(H25年度より教授)

荒木田 是夫 (ARAKIDA Yoshio)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・機関講師
研究者番号：00113415
(H24年度より機関講師)

高木 昭 (TKAGI Akira)
高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設・講師
研究者番号：10100819

松村 明 (MATSUMURA Akira)
筑波大学・人間総合科学研究科・教授
研究者番号：90241819

堀岡 一彦 (HORIOKA Kazuhiko)
東京工業大学・総合理工学研究科・教授
研究者番号：10126328

岡村 勝也 (OKAMURA Katsuya)
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：50415048