

機関番号：82118

研究種目：基盤研究（S）

研究期間：2008～2010

課題番号：20224005

研究課題名（和文） 誘導加速方式によるデジタル加速器の実現

研究課題名（英文） Digital Accelerator based on the Induction Acceleration Method

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・教授

研究者番号：20163321

研究成果の概要（和文）：旧 KEK 500MeV Booster リングを改装し、誘導加速方式を導入した KEK デジタル加速器（入射器を使用しない高い繰り返し誘導加速シンクロトロン）を実現した。100・A の He<sup>1+</sup>イオンビームを入射エネルギー200 keV から 12 MeV までの加速に成功した。自主開発した永久磁石 ECR イオン源に新たに Einzel lens chopper と呼ばれる世界で初めて実現した低エネルギー動作の縦方向 Chopper を設け、1 ターン入射に適切な長さに切りだしたイオンビームをデジタル加速器に入射し、閉じ込め専用の誘導加速セルに発生させるバリアーパルス電圧でビームを進行軸方向に捕捉し、加速専用の誘導加速セルに発生させるパルス電圧で加速した。磁場のランプをクロックとして FPGA を用いた完全予測制御による加速方式を実現した。

研究成果の概要（英文）：The KEK digital accelerator, which is a small scale induction synchrotron no employing any injector, has been realized, introducing the induction acceleration system into the reformed KEK 500 MeV Booster synchrotron. A He-1+ beam has been accelerated from the injection energy of 200 keV to 12 MeV by induction acceleration. A permanent magnet x-band ECR ion source followed by an Einzel lens chopper capable of delivering various ion beams with a rectangular pulse profile of a desired pulse length was constructed. The ion beam is injected into the ring and captured by a pair of barrier voltage pulses and accelerated with pulse voltage pulses. These pulses are generated in induction acceleration cells. The operation of the induction acceleration system was fully maneuvered by the digital control system based on a FPGA.

交付決定額

（金額単位：円）

|        | 直接経費        | 間接経費       | 合計          |
|--------|-------------|------------|-------------|
| 2008年度 | 67,900,000  | 20,370,000 | 88,270,000  |
| 2009年度 | 54,000,000  | 16,200,000 | 70,200,000  |
| 2010年度 | 44,800,000  | 13,440,000 | 58,240,000  |
| 総計     | 166,700,000 | 50,010,000 | 216,710,000 |

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：誘導加速、デジタル加速器、チョッパー、ECR イオン源、誘導加速シンクロトロン

## 1. 研究開始当初の背景

平成15年度から平成19年度まで実施された学術創成研究費「誘導加速サイクロトロンの実証」の中で KEK12GeVPS を用いて、誘導加速サイクロトロンが実証されていた。

この概念をもっと小さい重イオン用加速器に適用した全種イオン加速器のアイデアが既に特許を取得していた。KEK のハドロン科学の研究拠点が J-PARC に移動したことから、KEK 50MeV Booster Ring が完全に free-hand

で使用できる状況にあった。既に開発されていた誘導加速システムを 12GeV PS からそれへの入射器であった Booster へ移設するのは比較的容易であった。先の学術創成研究開発のマンパワーがまだ残されていた。

## 2. 研究の目的

KEK で発明された「全てのイオンを入射器なしに必要なエネルギーまで加速できる世界で最初の小型誘導加速シンクロトロン」を実現する。

## 3. 研究の方法

既存の KEK 500 MeV Booster Synchrotron をデジタル加速器の本体として、再利用する。チョッパー付きの永久磁石 ECR イオン源を新たに開発した。静電入射キッカーを開発した。取り出しセプト電磁石の真空容器を新たに開発。誘導加速一式を 12 GeV PS から移設した。DSP に代わる FPGA をベースにしたデジタル制御システムを構築した。

## 4. 研究成果

(1)He から Ar までのイオンを供給できるイオン源の自主開発に成功した。

(2)パルスモード動作のイオンビームを更に時間的に矩形形状に切り出すための半導体でスイッチングする Marx Generator 駆動の Einzel Lens Chopper を世界で初めて実現した。運転開始から 1 年以上に亘って安定して稼働している。

(3)He<sup>+</sup>ビーム用いて加速試験を行い、誘導加速に成功した。又、バリアー電圧発生を駆動するスイッチング電源スイッチング素子のデジタルゲート動作のみで行う自在なビームバンチのハンドリングを実証した。

## 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 8 件)

1. T. Iwashita, T. Adachi, Y. Arakida, K. Okamura, K. Takayama, M. Wake et al., “KEK Digital Accelerator”, Physical Review ST-AB, 14, 071301-20 (2011). 査読有
2. T. Adachi, K. Takayama et al., “A Solid-state Marx Generator driven Einzel Lens Chopper”, Rev. of Sci. Instrum. 82, 083305-11 (2011). 査読有
3. K. Ise, K. Okamura, K. Takayama, M. Wake 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). 査読有

4. 堀岡一彦、佐々木徹、高山 健、長谷川純一, “ルスパワー技術による Warm Dense Matter 実験”, プラズマ・核融合学会誌 86, 269-281 (2010) 査読有
5. T. Iwashita, K. Takayama et al., “Intelligent Control System for the KEK Digital Accelerator”, Nuclear Instru. and Meth. in Physics Research A 606, 111-115 (2009). 査読有
6. K. Takayama, “Radioisotope Ion Beam Production in KEK Digital Accelerator”, Nuclear Instru. and Meth. in Physics Research A 606, 69-74 (2009). 査読有
7. T. Dixit, K. Takayama et al., “Induction Acceleration Scenario from an Extremely Low Energy in the KEK All-ion Accelerator”, Nuclear Instru. and Meth A602, 326-336 (2009). 査読有
8. 高山 健, “誘導加速シンクロトロン方式によるデジタル加速器の医療応用”, 原子力eye Vol.55, No1, 30-34 (2009). 査読有

[学会発表] (計 28 件)

1. 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) .
2. K. Takayama, “KEK Digital Accelerators and Its Beam Commissioning”, 2<sup>nd</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), 2011 年 9 月 4 日-9 日, San Sebastian, Spain.
3. T. Adachi, “Solid-State Marx Generator Driven Einzel Lens Chopper”, 2<sup>nd</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), 2011 年 9 月 4 日-9 日, San Sebastian, Spain.
4. K. Okamura, “Novel Switching Power Supply utilizing SiC-JFET and Its Potential for the Digital Accelerator”, 2<sup>nd</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC2011), 2011 年 9 月 4 日-9 日, San Sebastian, Spain.
5. 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, Cleveland, USA.

6. K.W.Leo, "A Permanent Magnet ECRIS with a Slid-State Marx Generator Driven Chopper for the KEK Digital Accelerator", 14<sup>th</sup> International Conference on Ion Source, 2011年9月12日-16日, Giardini Naxos, Italy
  7. 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) .
  8. K.Takayama, "Induction Sector Cyclotron for Cluster Ions", Cyclotrons 2010 September 6-10, 2010, Lanzhou, China
  9. Leo Kwee Wah, A.Adachi, K.Takayama *et al.*, "Permanent Magnet ECRIS for the KEK Digital Accelerator", ECRIS 2010, August 23-26, 2010, Grenoble, France.
  10. T.Iwashita, "Recent status of KEK digital accelerator", 第7回日本加速器学会年会, August 4-6, 2010, 姫路市 (兵庫県) .
  11. T.Adachi, "Injection and extraction system for the KEK digital accelerator", IPAC10, May 23-28, 2010, 京都市
  12. T.Iwashita, "Induction acceleration system for KEK digital accelerator", IPAC10, May 23-28, 2010, 京都市.
  13. K.Takayama, "KEK digital accelerator for material and biological sciences", IPAC10, May 23-28, 2010, 京都市.
  14. K.Takayama, "Ion Source and low energy beam transport for KEK digital accelerator", May 23-28, 2010, 京都市
  15. K.Okamura, "Novel switching power supply for a digital accelerator", 2010 IPMHVC, May 23-27, 2010 Atlanta, USA
  16. 田仲 泰, "半導体スイッチを用いた誘導加速シンクロトロン用高繰り返しパルスパワー発生装置の開発", 電気学会 パルスパワー研究会, Feb 22, 2010, 東京工業大学 (東京都)
  17. 安達利一, "KEK デジタル加速器によるRIビーム加速", 不安定核ビームを用いた核分光研究会, December 23-24, 2009, 大阪大学
  18. K.Takayama, "KEK Digital Accelerator and its Applications", Joint Asian Accelerator Workshop 2009, December 22-23, 2009, Beijing, China.
  19. T.Iwashita, "The Control System for Induction Acceleration in the KEK Digital Accelerator", ICALEPCS2009, October 12-16, 2009, 神戸.
  20. 高山 健, "誘導加速方式を用いたデジタル加速器の開発と物質・生命科学への応用", 39回放射線科学研究会, July 17, 2009, 大阪.
  21. 岩下 大器, "第11回応用加速器関連技術シンポジウム ARTA2009", June 12-13, 2009, 東京工業大学
  22. K.Takayama, "KEK Digital Accelerator for Material Science and Other", IUMRS-ICA2008, 9-10 December, 2008, 名古屋.
  23. T.Iwashita, "Intelligent Control System of the KEK Digital Accelerator", International Workshop on Heavy Ion Fusion 2008 (HIF2008), 4-8 August, 2008, Tokyo.
  24. K.Takayama, "Radioisotope Ion Beam Production in KEK Digital Accelerator", International Workshop on Heavy Ion Fusion 2008 (HIF2008), 4-8 August, 2008, Tokyo.
  25. H.Suzuki, "ECR Ion Source for the KEK All-ion Accelerator", European Particle Accelerator Conference 2008 (EPAC2008), 23-27 June, 2008, Genoa, Italy.
  26. T.Dixit, "Digital Acceleration Scheme of the KEK All-ion Accelerator", EPAC2008, 23-27 June, 2008, Genoa, Italy.
  27. K.Takayama, "Beam Dynamical Issues of the KEK All-ion Accelerator", EPAC2008, 23-27 June, 2008, Genoa, Italy.
- [図書] (計1件)
1. K.Takayama and R.J.Briggs, Induction Accelerators, Springer October, 2010.
- [産業財産権]  
○出願状況 (計1件)
- 名称: 誘導加速セクターサイクロトロン  
発明者: 高山 健  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-271007  
出願年月日: 平成 21 年 11 月 30 日  
国内外の別: 国内
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www-accps.kek.jp/Superbunch/>

## 6. 研究組織

### (1) 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・教授  
研究者番号：20163321

### (2) 研究分担者

安達 利一 (ADACHI TOSHIKAZU)  
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：80141977

荒木田 是夫 (ARAKIDA YOSHIO)  
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：00113415

和気 正芳 (WAKE MASAYOSHI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器科学支援センター・シニアフェロー  
研究者番号：90100916

川合 将義 (KAWAI MASAYOSHI)  
大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・名誉教授  
研究者番号：10311127

岡村 勝也 (OKAMURA KATSUYA)  
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：50415048

(H21～)

高木 昭 (TAKAGI AKIRA)  
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・講師  
研究者番号：10100819

(H21～)

村杉 茂 (MURASUGI SHIGERU)  
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・技師補  
研究者番号：20450364

(H21～)

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

(H21～H22：連携研究者)