

デジタル加速器における可変誘導電圧を用いた加速システム

ACCELERATION SYSTEM USING TIME-VARIABLE INDUCTION VOLTAGE IN THE KEK DIGITAL ACCELERATOR

由元崇^{#, A, B)}, 劉星光^{A, B)}, 安達利一^{B, C)}, 川久保忠通^{B)}, 小林寛^{C)}, 高野進^{B)}, 門倉 英一^{B)}, 岡村 勝也^{B, C)},
池田 光男^{B)}, 高山 健^{A, B, C, D)}

Takashi Yoshimoto^{#, A, B)}, Liu Xingguang^{A, B)}, Toshikazu Adachi^{B, C)}, Tadamichi Kawakubo^{B)}, Hiroshi Kobayashi^{B, D)},
Susumu Takano^{B)}, Eiichi Kadokura^{B)}, Katsuya Okamura^{B, C)}, Mitsuo Ikeda^{B)}, and Ken Takayama^{A, B, C, D)}

^{A)} Tokyo Institute of Technology

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} The Graduate University for Advanced Studies

^{D)} Tokyo City University

Abstract

KEK digital accelerator is a fast cycling type of induction synchrotron in which a heavy-ion beam can be accelerated by pulse voltages generated in induction cells of a 1-to-1 pulse transformer. One of advantageous features in induction acceleration is that the wide-band acceleration is realized where the heavy ion beam generated in the Electron Cyclotron Resonance Ion Source (ECRIS) embedded in the 200 kV platform can be directly injected into the ring and be quickly accelerated. The on- and off- timings of gate circuits for switching power supplies driving the induction cells are controlled by digital signals of Field-Programmable Gate Array (FPGA). Currently the acceleration scheme employing “accelerating voltage pulse density control”, where a fixed induction acceleration voltage is discretely generated for acceleration, is used. The discrete acceleration at the initial acceleration stage causes serious synchro-beta coupling in the horizontal direction and also induces longitudinal emittance blow-up. To suppress these beam dynamically undesired features, a new induction acceleration system with time-varying induction voltages has been contrived. The differences between both schemes are discussed with some experimental results and particle simulations.

1. はじめに

KEK デジタル加速器^[1]は既存の高周波加速とは異なる誘導加速を導入したシンクロトロンである。Fig. 1 に示すように、1 対 1 のパルストランスである誘導加速セルに発生するパルス電圧を用いて加速する。誘導加速の利点の一つである広帯域加速は、200 kV プラットフォーム上の ECR イオン源で生成された重イオンビームをリングに直接入射・加速を可能にする。

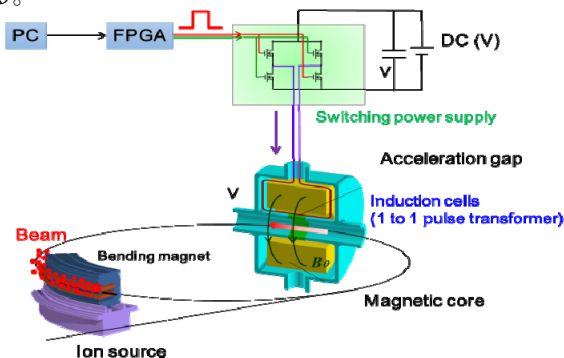


Figure 1: The Overview of the KEK digital accelerator.

誘導加速セルを駆動するスイッチング電源のゲー

ト回路の ON/OFF は FPGA からのデジタル信号によって制御されている。また、それらの信号の発生タイミングは、予め格納されている FPGA メモリ内の情報を適宜呼び出すことによって実現している。

しかしながら、誘導加速セルの設置区間において有限な運動量分散関数($D = 1.4$ [m])が存在し、低エネルギーにおける離散的な加速においては、シンクロベータカップリングによるビーム中心の振動励起が観察されている。その振動を緩和するために、ビームが必要とする加速エネルギーに等しい可変誘導電圧を発生させる誘導加速システムが新たに考案されている。この方式は縦方向のエミッタンス増大も抑制しうる。

本論文では、現状のパルス密度制御による加速方式と可変誘導電圧を用いた加速方式におけるビームの挙動の比較を数値シミュレーションとともに示す。

2. パルス密度制御を用いた加速^[2]

KEK デジタル加速器では、一定の誘導加速電圧を利用したパルス密度制御を現在採用している。そのため、ビーム周回毎に必要な加速電圧

$$V(t) = \rho C_0 \frac{dB(t)}{dt}$$

を等価的に満たすように、離散的に加速電圧を発生

[#] yoshimoto.t.aa@m.titech.ac.jp

させている。ここで偏向磁石の曲率半径 $\rho : 3.3\text{m}$ 、リング周長 $C_0: 37.7\text{m}$ 、 $B(t)$ は偏向磁石の磁束密度である。

また、パルス密度制御における閉じ込め・加速電圧パターンを Fig. 2 に示す。

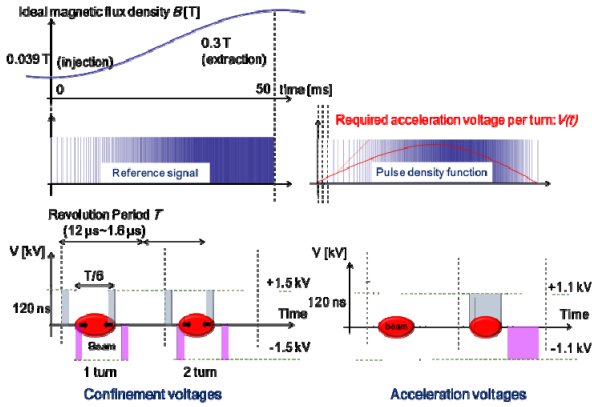


Figure 2: The confinement and acceleration patterns of the pulse density control at the KEK digital accelerator.

この加速方式によって、周回周波数が 10 倍以上変化するような広帯域加速に成功しているが^[3,4]、有限な運動量分散 ($D = 1.4$ [m]) が存在する箇所における離散加速によって水平方向の振動が励起される現象が実験的に観測されている。また、横軸を周回周期の内部時間、縦軸を入射からの経過時間として Mountain view として描いたビーム信号を Fig. 3 (Fig. 7 も同様) に示す。この実験では偏向磁場が 0.039 T ~ 0.3 T の幅を 50 msec で変化し、ビームエネルギーは 2 [MeV/u] まで加速された。(これらは機器調整のために実施されている)

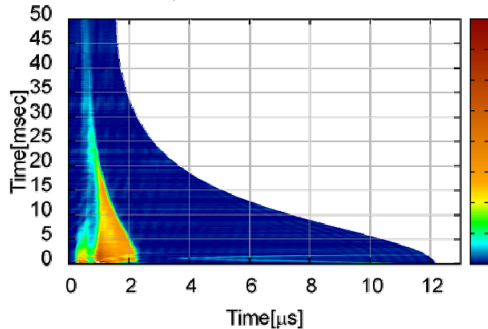


Figure 3: The confinement and acceleration patterns of under the pulse density control at the KEK digital accelerator (experiment).

また Fig. 4 にビーム中心の水平方向における挙動をしめす。離散加速により水平方向に振動が励起していることがわかる。ただし、ビーム信号が微弱なため、30msec 以降のビーム位置情報は精度が著しく低く、意味をなさない。同一条件で進行軸方向の粒子シミュレーションを(詳細は^[5]を参照のこと)おこなった結果を Fig. 5 に示す。横軸は位相、縦軸はビームの運動量拡がり $\frac{dp}{p}$ と閉じ込め・加速電圧を示す。加速初期において、後方に移動したビームが後方の閉じ込め電圧によってエネルギーを補償されている

(Fig. 5 中央図) ことと、縦方向のエミッタンスが次第に増大していることがわかる。ベータートロン運動と結合したシミュレーション結果は別論文^[6]にて紹介している。

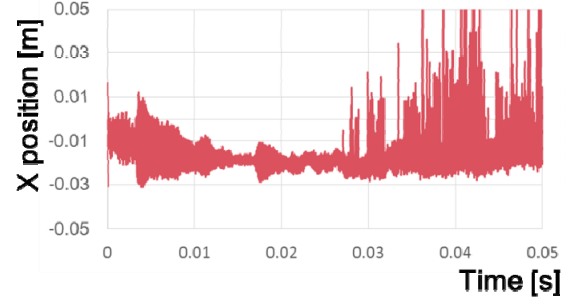


Figure 4: The horizontal position in the pulse density acceleration at the KEK digital accelerator (experiment).

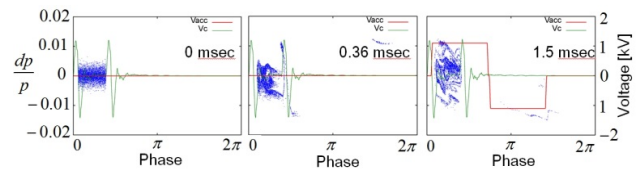


Figure 5: The longitudinal beam motion in the initial acceleration stage under the pulse density control (simulation).

3. 可変誘導電圧を用いた加速

パルス密度加速による振動励起とエミッタンス増大を抑制するために、誘導加速電圧が連続的に変化する可変誘導電圧を用いた加速方式を Fig. 6 に示す。

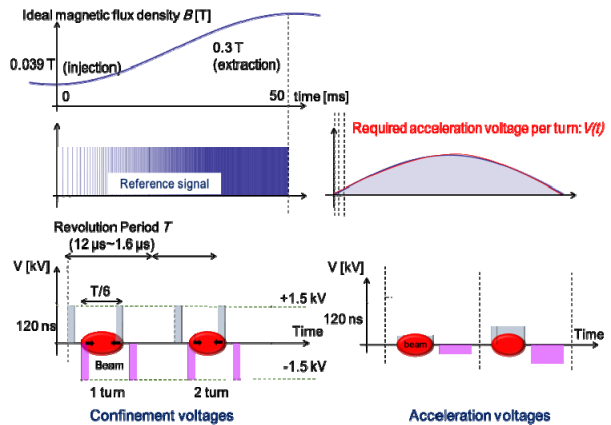


Figure 6: The confinement and acceleration patterns of the time-varying induction acceleration at the KEK digital accelerator.

閉じこめ電圧の発生パターンはパルス密度制御と同じであるが、加速を担う電圧は毎ターン発生させている。また、この方式における粒子シミュレーションの結果を Fig. 7 に、設定した閉じ込め・加速電圧を Fig. 8 に示す。加速電圧に関しては毎ターン発生しているが、電圧の高さが徐々に変化していることがわかる。パルス密度加速で観察された加速初

期におけるビームの後方への移動量が抑制され、結果としてエミッタンスの増大を大幅に抑制していることがわかる(Fig. 7)。

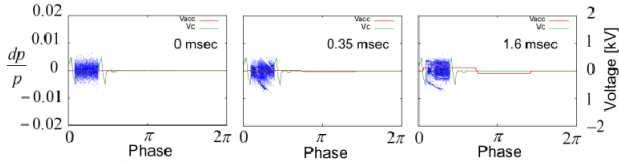


Figure 7: The longitudinal beam motion in the initial acceleration stage under the time-varying induction acceleration (simulation).

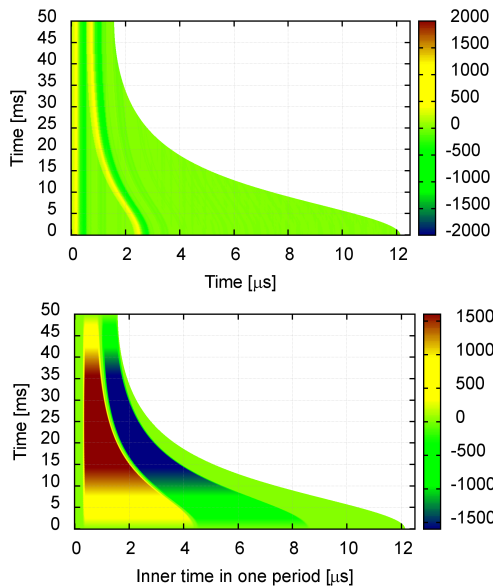


Figure 8: The confinement (top) and acceleration (bottom) patterns of the time-varying induction acceleration at the KEK digital accelerator. The confinement-voltage height is 500V. The acceleration one changes to around 1100V continuously (simulation).

また、加速時における水平方向(青色)と垂直方向(黄色)のビーム振動を Fig. 9 に示す。横軸は加速からの時間、縦軸は理想軌道からの偏差を示す。Fig. 4 と比較すると振動が抑制されていることがわかる。

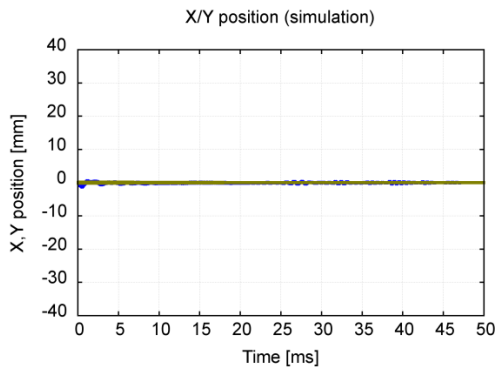


Figure 9: The horizontal (blue) and vertical (yellow) positions in the time-varying acceleration at the KEK digital accelerator (simulation).

4. 結論

誘導加速シンクロトロンにおけるパルス密度制御と可変誘導電圧を用いた加速の比較を実験データとシミュレーションを用いて行った。その結果、後者の場合では前者における加速初期におけるエミッタンスの増大や振動励起を大幅に抑止しうることがわかった。具体的な可変誘導システムとしては、Fig. 1 に示すようなスイッチング電源に供給する電源を現行の定圧電源から DCDC コンバータを経由した可変電源に置き換えることにより実現できると考えている。以降の誘導加速を導入した新しい加速器計画^{[7],[8]}ではこの方式の採用が前提とされている。

参考文献

- [1] T. Iwashita, T. Adachi, K. Takayama, K.W. Leo, T. Arai, Y. Arakida, M. Hashimoto, E. Kadokura, M. Kawai, T. Kawakubo, Tomio Kubo, K. Koyama, H. Nakanishi, K. Okazaki, K. Okamura, H. Someya, A. Takagi, A. Tokuchi, and M. Wake, “KEK digital accelerator”, Phys. Rev. ST-AB 14, 071301 (2011).
- [2] T. Iwashita, Y. Arakida, T. Kono, K. Takayama, T. Dixit, “Intelligent control system for the KEK digital accelerator”, Nucl. Inst. Meth. A 606 111–115 (2009).
- [3] K. Takayama, T. Yoshimoto, M. Barata, L. K. Wah, L. Xingguang, T. Iwashita, S. Harada, T. Adachi, T. Arai, D. Arakawa, H. Asao, E. Kadokura, T. Kawakubo, H. Nakanishi, Y. Okada, K. Okamura, K. Okazaki, A. Takagi, S. Takano and M. Wake, “Induction acceleration of heavy ions in the KEK digital accelerator: Demonstration of a fast-cycling induction synchrotron”, Phys. Rev. ST-AB 17, 010101(2014).
- [4] T. Yoshimoto, M. Barata, T. Arai, X. Liu, K. W. Leo, T. Adachi, T. Kawakubo, E. Kadokura, K. Okamura, K. Takayama, Y. Okada, H. Asao, “ACCELERATION OF DIRECTLY-INJECTED BEAM. FROM THE ION SOURCE TO THE KEK DIGITAL ACCELERATOR”, SAOS05, the 10th conference of Particle Accelerator Society Japan (PASJ), Nagoya, Aug. 3 -5, 2013.
- [5] T. Yoshimoto, M. Hirose, X. Liu, T. Adachi, E. Kadokura, T. Kawakubo, S. Takano, K. Takayama, “WIDEBAND INDUCTION ACCELERATION AND ITS INTRINSIC NATURE IN THE KEK DIGITAL ACCELERATOR”, Nucl. Inst. Meth. A 797, 191–195 (2015).
- [6] T. Monma, K. Takayama, T. Yoshimoto, and X. Liu, “Coherent Synchro-Beta Coupling in the KEK Digital Accelerator”, in this conference.
- [7] K. Takayama, T. Adachi, M. Wake, and K. Okamura, “A Racetrack Shape Fixed Fields Induction Accelerator for Giant Cluster Ions”, Phys. Rev. ST-AB 18, 050101 (2015).
- [8] K. Takayama, T. Adachi, T. Kawakubo, and T. Monma, “A Compact Hadron Driver for Cancer Therapies using Continuous Energy Sweep Scanning”, in this conference.