

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 ACCELERATION OF DIRECTLY-INJECTED BEAM

FROM THE ION SOURCE TO THE KEK DIGITAL ACCELERATOR

由元崇^{#, A, B)}, 茨田優次^{B, C)}, 新井輝夫^{B)}, 劉星光^{A, B)}, Leo Kwee Wah^{B, D)}, 安達利一^{B, D)},
川久保忠通^{B)}, 門倉英一^{B)}, 岡村勝也^{B, D)}, 高山健^{A, B, D)}, 岡田喜仁^{E)}, 浅尾博之^{E)}
Takashi Yoshimoto^{#, A, B)}, Masatsugu Barata^{B, C)}, Teruo Arai^{B)}, Liu Xingguang^{A, B)}, Leo Kwee Wah^{B, D)},
Toshikazu Adachi^{B, D)}, Tadamichi Kawakubo^{B)}, Eiichi Kadokura^{B)}, Katsuya Okamura^{B, D)},
Ken Takayama^{A, B, D)}, Yoshihito Okada^{E)}, Hiroyuki Asao^{E)}
^{A)} Tokyo Institute of Technology, Department of Energy
^{B)} High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
^{C)} Tokyo City University
^{D)} The Graduate University for Advanced Studies
^{E)} NEC Network and Sensor Systems

Abstract

The KEK digital accelerator is an induction-acceleration synchrotron. It accelerates beam using induction acceleration cells which are one-to-one pulse transformers. One advantage of this type of accelerator is that it enables to accelerate beams over a broad range of revolution frequency from 0 to 1MHz. This means that it is not only possible to inject beams directly from an ion source to the final main ring without a pre-accelerator to accelerate them up to high energy, but also to accelerate all ion species from proton to gold ion in the same synchrotron ring. Induction acceleration cells are driven by ON/OFF operation of gate circuit in switching power supplies. Gate signals, which are previously programmed so as to give required acceleration voltages uniquely determined from magnetic ramping pattern, are generated in the FPGA and sent to the gate trigger module. Here it is essential to adjust timing of the gate signals to the actual magnetic field, and we have developed a method to find the precise timing information directly from the beam motions. Using this method, we have succeeded to accelerate the ion beam (mass to charge ratio $A/Q = 4$) in the frequency range from 82 kHz to 1.02 MHz. In this paper, we report the detail of this result.

1. KEK デジタル加速器について

KEK デジタル加速器は旧 500MeV ブースターシンクロトロンを改装して作られた誘導加速シンクロトロンの小型実証機である[1]。Fig. 1 にその外観を、Table 1 に machine parameters を示す。

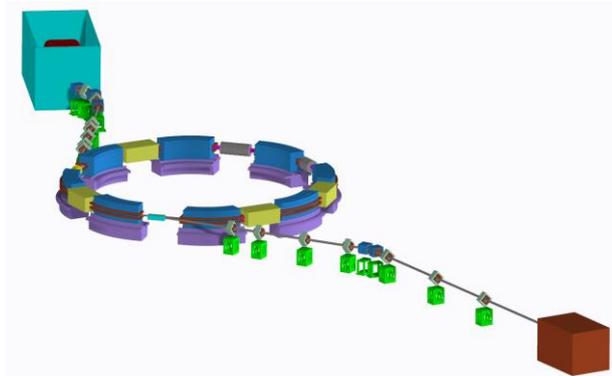


Figure 1: The Overview of the KEK digital accelerator.

Table 1: Machine parameters

Parameter	Symbol	Value
Circumference	C_0	37.7 m
Bending radius	ρ	3.3 m
Maximum B	B_{max}	0.84 Tesla
Bet. tune in x/y	Q_x/Q_y	2.17 / 2.30
Transition energy	γ_T	2.25
Energy (Inj.)/nucleon	E_{inj}	200 keV(Q/A)

この加速器では既存の高周波加速ではなく誘導加速をもちいることで、より柔軟な加速・ビーム操作技術を実現できると考えられている。その主要技術として以下の三つが挙げられる。

・全イオン加速技術[2]

誘導加速シンクロトロンでは、0~1MHz までの動作周波数を持つ高速な半導体スイッチング技術を用いることにより、広範なビーム周回周波数に対応することが可能である。それにより、さまざまな質量電価数比に対応することが可能であり、水素イオンから金イオンまでのあらゆるイオン種を加速することができる。原理的にはイオン源からの直接入射ビー

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

ムを相対論的な速度まで、大型の入射器を用いずにこの誘導加速器 1 台で実現可能である。ここではこの技術を全イオン加速技術と呼ぶ。

- ・スーパーバンチ技術[3]

誘導加速技術では、長大な加速領域を実現可能であることから、一度に加速できるビーム量を大幅に増強できることが示唆されている。

- ・その他のビームハンドリング技術

バンチの圧縮・結合・分離技術などの他に、円形加速器のトランジションエネルギー領域を閉じ込め電圧無しに、長いビームを保持したまま通過する究極のトランジションエネルギー通過技術[4]などが存在する。

本論文では実証した全イオン加速技術に焦点をあてて報告する。

まず Fig. 2 に示すように誘導加速セルは 1 対 1 のパルストランスで構成されており、一次側の電流が流れることにより、トランスの磁性体が励磁され、二次側に誘導加速電圧が発生する仕組みになっている。一次側の電流は DC 充電器から常時充電されているスイッチング電源(SPS、Switching Power Supply)のコンデンサーバンクから供給される。スイッチング電源はフルブリッジ構成のスイッチング回路その物である。パワー半導体スイッチのゲート信号は加速器制御室に置かれた高速制御装置である FPGA(Field-programmable gate array)によって生成される。

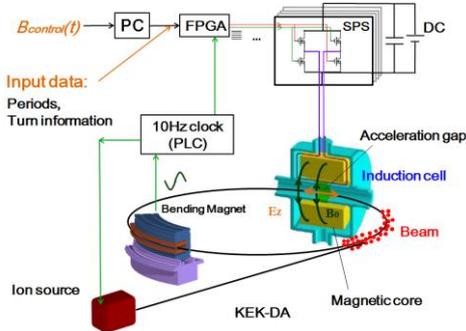


Figure 2: The schematic view of the induction acceleration system.

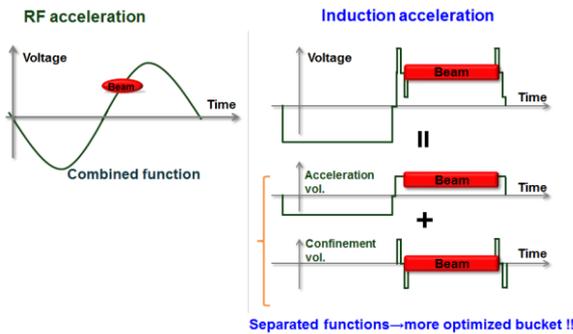


Figure 3: Schematic view of Induction acceleration with the comparison with RF acceleration.

加速システムとしては、Feed forward 制御を採用している。まず、誘導加速セルの加速電圧の ON/OFF は SPS 内のゲート信号によって制御されるが、その信号は予めプログラムされた FPGA から送られる。FPGA プログラムとイオン源の動作開始クロックは磁石の共振磁場と同期した 10Hz クロックを PLC(Programmable Logic Controller)で生成して用いる。また、リング偏向磁場の立ち上がりに合わせて、加速電圧・閉じ込め電圧用セルへそれぞれの制御信号を適切なタイミングで送る必要があるが、本制御では、偏向磁場の計測値を直接取り込んでいない。その理由としては低エネルギーで入射しているため、受け入れるリングの偏向磁場(数百ガウス)の値が必然的に小さくならざるを得ず、残留磁場(数十ガウス)による誤差が無視できないからである。そのため、サーチコイル等での磁場計測値を直接使用することができない。そこで PC 内で仮想磁場を数値的に用意し、その磁場の立ち上がりとの対応関係から、理想的な周回周期や、必要な加速電圧、閉じ込め電圧のタイミングをすべて予め計算し、FPGA 内に書き込んでおく。

2. 制御装置内の磁場変数の修正方法

まず入射ビームのエネルギーを固定する。リング入射直後にビームが中心軌道を通るように、実磁場を調整する。この段階で入射エネルギーと実磁場(入射磁場)は一致している。このプロセスの後、PC 内の仮想磁場 $B_{control}(t)$ が実際の偏向磁場 $B_{actual}(t)$ に対応するよう修正する必要がある。

偏向磁場が正弦波だと仮定した場合、取り得る変数は入射磁場 B_{min} 、取り出し磁場 B_{max} 、位相差 δ の 3 変数である。

$$\begin{cases} B_{actual}(t) = \left(\frac{B_{actual_max} + B_{actual_min}}{2} \right) - \left(\frac{B_{actual_max} - B_{actual_min}}{2} \right) \cdot \cos[\omega \cdot t] \\ B_{control}(t) = \left(\frac{B_{control_max} + B_{control_min}}{2} \right) - \left(\frac{B_{control_max} - B_{control_min}}{2} \right) \cdot \cos[\omega \cdot (t + \delta)] \end{cases}$$

偏向磁場に依存する実ビームの周回周期と仮想磁場によってきまる理想的な周回周期を一致させる必要がある。

そこで、まず仮想磁場内の入射磁場 B_{min} を適切な値に設定することから始める。手順としては、Fig. 4 に示すように free-running ビームのモニター信号を仮想磁場から生成する仮想信号(理想周回周期毎に発生するタイミング信号)を用いて Mountain view を作成する。横軸は理想周回周期の内部時間、縦軸は入射からのターン数、奥行き方向の色はビーム強度を表している。左下図ではビームがドリフトしているが、仮想磁場内の B_{min} を調整した結果、ビームの実周回周期と理想周回周期が一致し、ビームはまっすぐ同期しているように見える。この方法により、仮想磁場内の入射磁場 B_{min} を適切に設定で

きる。

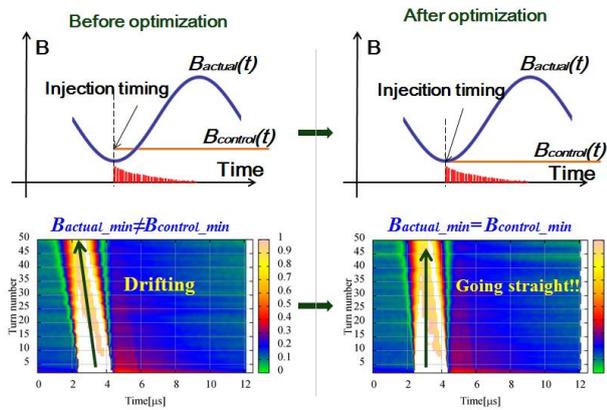


Figure 4: The method to adjust $B_{control}$ in PC to the minimum of ring magnetic field B_{actual} .

次に仮想磁場中の位相差 δ を調整する。方法としては、Fig. 5 の上図に示すように free-running ビームを交流磁場の入射磁場タイミングよりも意図的に前に入射し、その Mountain view および位置モニターを観察することで得られる。Fig. 6 の上図に示すように、本来入射すべき最低磁場を変曲点としてビーム中心が三次関数に沿って移動していることがわかり、それに対応するように位置モニターではビーム重心が二次関数的に振る舞うことがわかる(Fig. 6 下図)。なお、振動現象はベータトロン振動である。この独立した二つの方法により、正確な位相差 δ を決定することができる。

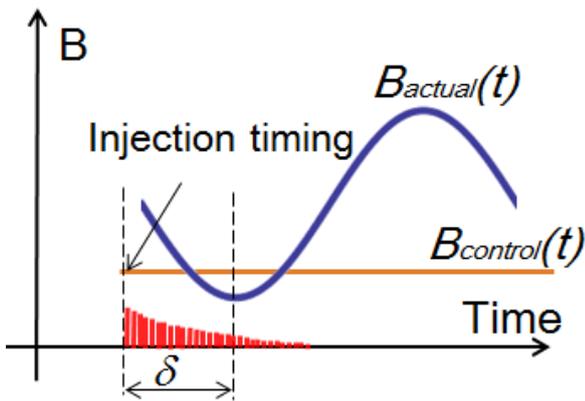


Figure 5: The schematic view of the phase difference measurement.

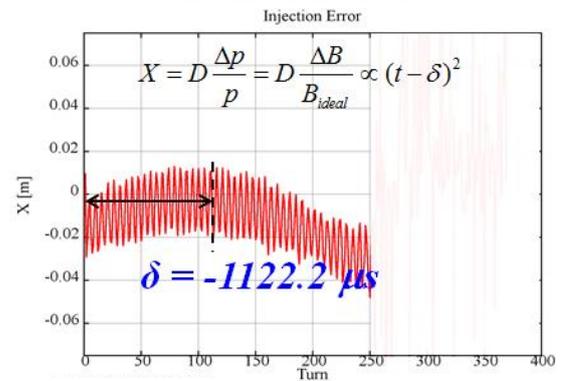
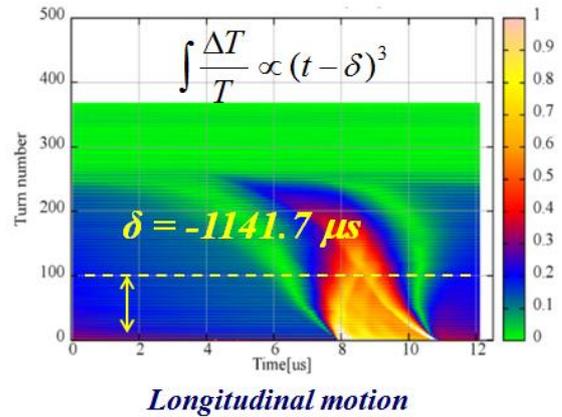


Figure 6: The 2D mountain-view of the ion bunch signal (top) and temporal evolution of the horizontal position measured by the position monitor (bottom).

最後に仮想磁場内の取り出し磁場 $B_{control_max}$ の値はサーチコイルで計測した実取り出し磁場 B_{actual_max} の値を用いる。取り出し磁場の計測値は、相対的に残留磁場の影響が小さくなるため、そのまま採用できる。

3. 閉じ込め・加速方法について

PC 内の仮想磁場が正確に決定された後、それをもとに生成される加速・閉じ込め電圧の発生タイミングが計算可能となる。

・閉じ込め電圧

閉じ込め電圧は PC 内の仮想磁場から計算されたターン毎の理想周回周期を求めたのち、その値を FPGA に書きこむ。FPGA では各ターン毎に定められたタイミングを計算し、閉じ込め電圧を発生する。Fig. 7 に示すように一周期の 1/6 を閉じ込め Bucket 領域として設定している。なお周期は磁場の立ち上がりに対応して、質量電荷比 A/Q が 4 で、入射エネルギーが 200keV の場合、12 μ s から 1 μ s へと急激に変化する。

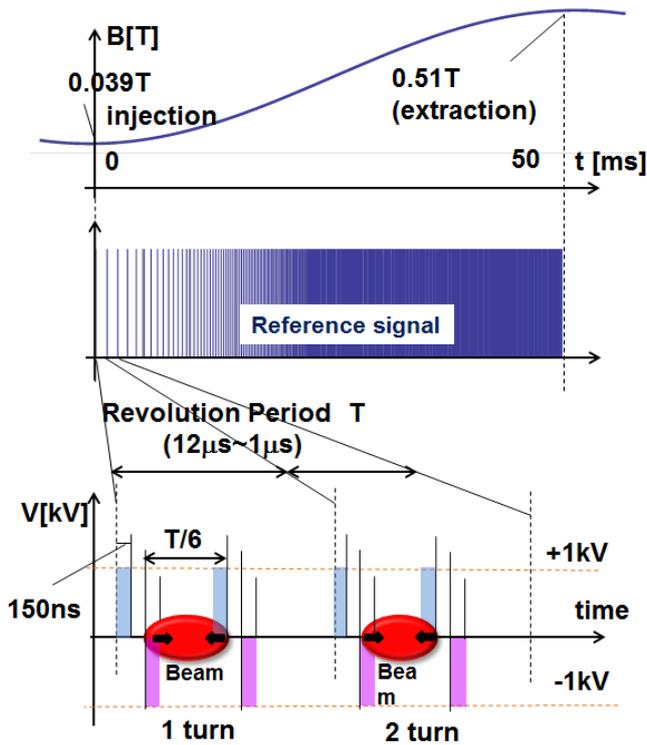


Figure 7: The confinement voltage in every periods.

・ 加速電圧

円形加速器において、1 ターンあたりに必要な加速電圧 $V(t)$ は、

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

と表される。ここで偏向磁石の曲率半径 $\rho : 3.3\text{m}$ 、リング周長 $C_0 : 37.7\text{m}$ 、 $B(t)$ は偏向磁石の磁場である。誘導加速システムでは一定の加速電圧しか発生させることができないため、離散的な加速を行う。あるターンは加速して、別のターンでは加速しない。どのターンに加速するかは、必要加速電圧の入射時からの積算量といままで与えた加速電圧の量の差が一回の加速電圧量 V_0 よりも大きくなるかどうかで判定する。どのターンで加速するかを 0 (加速しない) / 1 (加速する) で表したパルス密度関数 δ を予め PC から FPGA に書き込んでおく。下記に定義式を示す。

$$\delta(N+1) = \begin{cases} 1 & \dots (\sum_{n=1}^{N+1} V(n) - V_0 \sum_{n=1}^N \delta(n) > V_0) \\ 0 & \dots (\sum_{n=1}^{N+1} V(n) - V_0 \sum_{n=1}^N \delta(n) < V_0) \end{cases}$$

また、加速電圧の発生領域はさきの閉じ込め Bucket 領域を覆うように設定する。今回は周期 T の $1/4$ の大きさにした。その様子を Fig. 8 に示す。

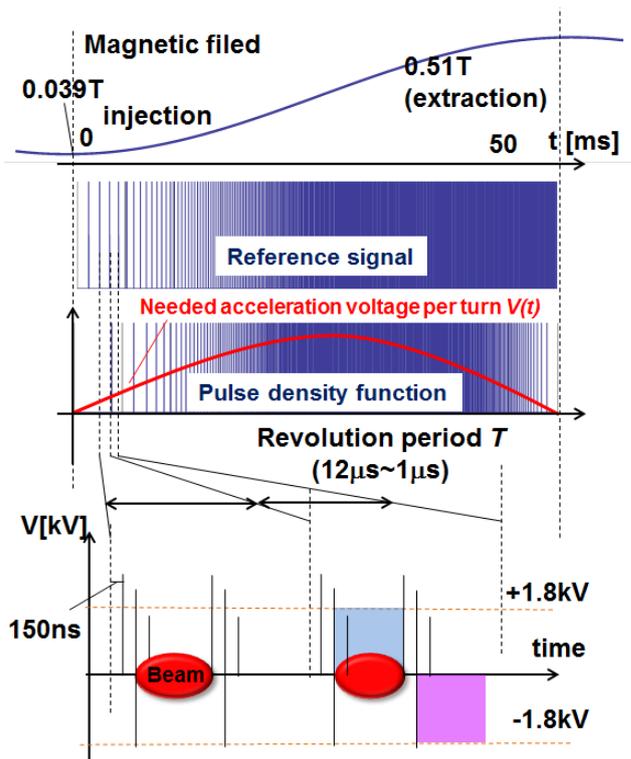


Figure 8: The acceleration voltage pulse pattern and pulse profile.

4. 加速結果と考察

偏向磁場は 0.039T~0.51T の幅を 50msec で変化し、ビームエネルギーは 8[MeV/u] まで加速された (機器調整のために実施されている)。Fig. 9 に加速成功時のビームシグナル(青色)と参照信号(黄色)の全体図を示し、Fig. 10 に加速終了時における拡大図を示す。加速終了後にもビームが生き残っていることがわかる。

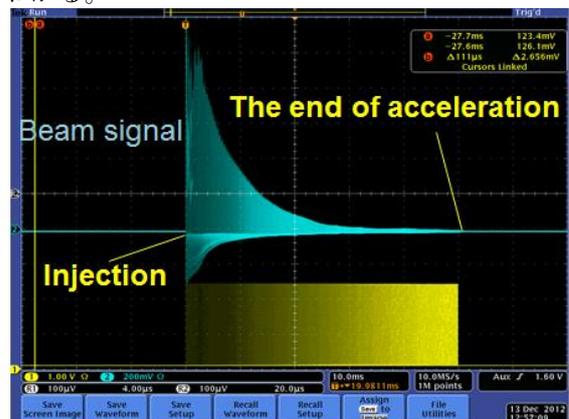


Figure 9: The overview of the bunch signal in whole acceleration scheme.

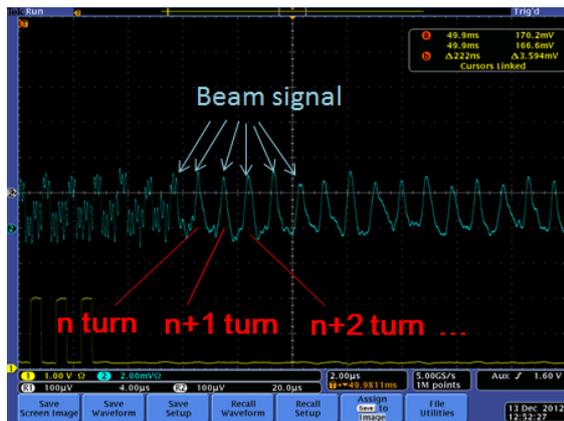


Figure 10: The bunch signal (blue) just after acceleration.

また上記のバンチングナルを、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 として描いた図を Fig. 11 に示す。図の白い部分がビームを表している。

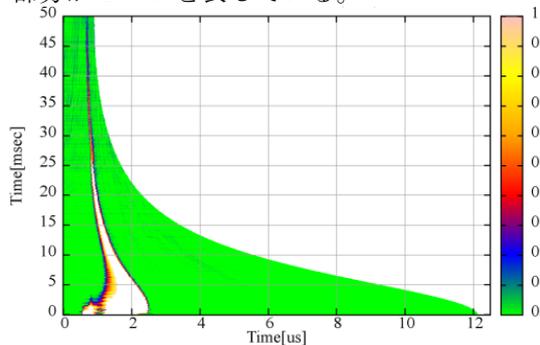


Figure 11: Time-turn plane view of a trapped and accelerated beam signal (experiment).

その時の閉じ込め電圧の様子を Fig. 12 に示す。黄色が正の加速電圧(2kV)、緑色が負の加速電圧(2kV)である。閉じ込め領域が $2\mu\text{s}$ から 200ns に変化していることがわかる。

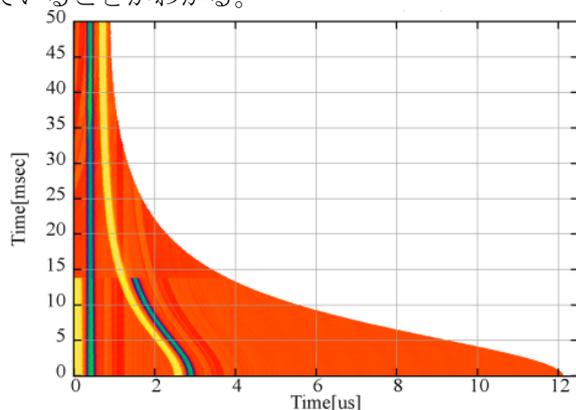


Figure 12: Time-turn plane view of V_{bb} where positive pulse (yellow) and negative pulse (blue) (experiment). The beam bucket with $2\mu\text{s}$ length consists of two confinement voltages.

一方、その時の加速電圧を Fig. 13 に示す。黄色が正の加速電圧(1.6kV)、青色が負の加速電圧(-1.6kV)である。

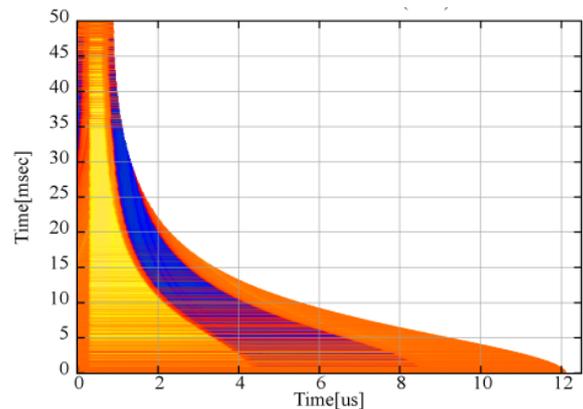


Figure 13: Time-turn plane view of V_{ac} (experiment) where positive pulse (yellow) and negative pulse (blue). The pulse-generation density is weaker in the injection and final stage than the medium stage. This corresponds to the needed acceleration voltage (see Fig. 12).

この Fig. 11~13 を見比べると、ビームが閉じ込め領域にトラップされており、両者を加速電圧が覆っていることがわかる。また、ビームは閉じ込め領域の後ろ側に寄っているが、この原因は実磁場と仮想磁場とのずれに起因するものと考えられる。いずれにせよ、この加速実験から広範な周回周波数領域を一台の誘導加速シンクロトロンを用いて、加速可能であることが示された。

このことから必然的にあらゆるイオン種においても加速可能であると考えられ、全イオン加速技術の原理実証がなされたといえる。まだ機器調整段階であるが、本格稼働の見通しがたったと言える。

謝辞 一連の研究は科学研究費基盤研究(A) (No. 23240082)によってサポートされた。

参考文献

- [1] T.Iwashita, *et al*, "KEK digital accelerator", *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams* **14**, 071301 (2011)
- [2] K. Takayama, Y. Arakida, T. Iwashita, Y. Shimosaki, T. Dixit, K. Torikai, "All-ion accelerators: An injector-free synchrotron" *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS* **101**, 063304 (2007) with Erratum
- [3] K.Takayama, J.Kishiro, M.Sakuda, Y.Shimosaki, and M.Wake, "Superbunch Hadron Colliders", *Phys. Rev. Lett.* **88**, 144801 (2002)
- [4] Y. Shimosaki, K. Takayama and K. Torikai, "Quasiadiabatic, Nonfocusing Transition-Energy Crossing", *Phys.Rev.Lett.* **96**,134801 (2006)