

BEAM COMMISSIONING OF KEK DIGITAL ACCELERATOR

T. Iwashita^{#1}, T. Adachi^{1,2}, T. Arai¹, Y. Arakida^{1,2}, K. Okazaki³, K. Okamura^{1,2}, E. Kadokura¹, M. Kawai¹, T. Kawakubo¹, T. Kubo¹, T. Kubo¹, K. Koyama¹, W. Jian⁴, H. Someya¹, A. Takagi^{1,2}, K. Takayama^{1,2,5}, A. Tokuchi⁶, H. Nakanishi¹, M. Hashimoto¹, S. Harada⁷, L. K. Wah², and M. Wake^{1,2}

¹KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

²Graduate University of Advanced Studies (KEK), Tsukuba, Ibaraki, Japan

³Nippon Advanced Technology Co. Ltd. (NAT), Tokaimura, Ibaraki, Japan

⁴Nagaoka University of Technology, Nagaoka, Niigata, Japan

⁵Tokyo Institute of Technology, Nagatsuda, Kanagawa, Japan

⁶Pulse Power Laboratory, Kusatsu, Shiga 520-0806, Japan

⁷Tokyo City University, Setagaya, Tokyo, Japan

Abstract

KEK Digital Accelerator (KEK-DA) is a renovation of old 500 MeV Booster Synchrotron. The DA is expected to open up new areas of research because it can provide any ion beam from hydrogen to Uranium without an injector. The construction of the accelerator and the low energy beam transport line are finished in the last fiscal year, we have started the beam commissioning of KEK-DA. The first plan of us is to accelerate helium ion produced in ECR ion source. We have developed new type of chopper: Einzel lens chopper which utilize solid state Marx generator. Beam injection, circulation, and confinement experiment with barrier voltage are reported.

KEK デジタル加速器の運転開始

1. イントロダクション

デジタル加速器^[1]は大型の入射器を使用しない誘導加速シンクロトロンである。誘導加速シンクロトロンは 2000 年に KEK の高山・木代により提案^[2]され 2006 年に KEK 12 GeV-PS において原理実証実験が行われた^[3]。図 1 にデジタル加速器の概念図を示す。

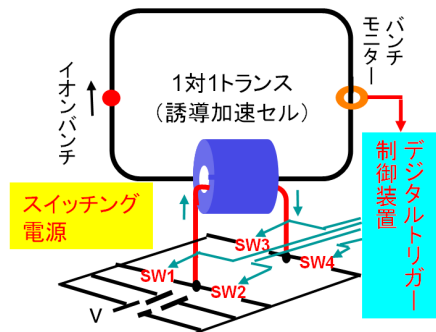


図 1 : デジタル加速器の概念図

ハイパワー半導体をスイッチング素子として用いたスイッチング電源による高電圧パルスで誘導加速セル (1:1 のトランス) を駆動する。誘導加速セルに発生する誘導電圧で二次側を周回する荷電粒子を加速する。従来の高周波シンクロトロンと異なり、空洞の共振周波数や高周波アンプのバンド幅制限か

ら完全に自由なシンクロトロンである。結果として、非常に速度の遅い粒子から光速の粒子までを 1 台で加速でき^[4]、新しいタイプのイオン加速器としてビーム応用が期待されている。

2. KEK デジタル加速器

KEK デジタル加速器 (KEK-DA) では 2006 年に運転を停止した KEK 12 GeV-PS の 500MeV ブースターの RF 加速装置や入射システムを除く部分を再利用している^[5]。建設は終了し、ビームコミッションを開始した。図 2 に KEK デジタル加速器の概略図を示す。上流に ECR イオン源 (後述) を搭載する 200 kV 高圧ターミナルを新たに建設、ビーム輸送ラインは旧 40MeV ビームラインの電磁石およびビームダクトの一部を再利用している。表 1 に KEK-DA のパラメータを示す。

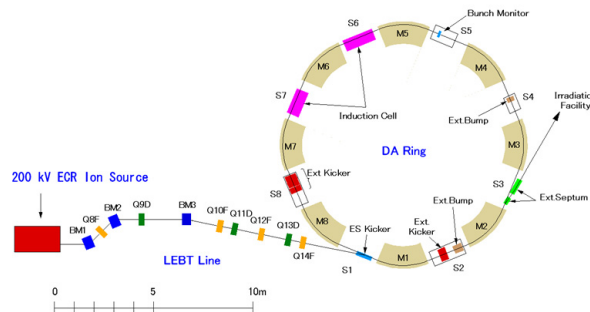


図 2 : KEK-DA 概略図

[#] iwashita@www-accps.kek.jp

表 1 : KEK デジタル加速器パラメータ

周長	37.71 m
曲率半径	3.3 m
磁束密度 (Max/Min)	0.03 / 0.84 T
最大加速電圧/周	3.2 kV
繰り返し	10 Hz
Betatron Tune v_x/v_y	2.1/2.3

3. ECR イオン源

イオン源として、永久磁石方式のパルスモードで動作する引き出し電圧 14 kV、9.4 GHz ECR イオン源を新たに開発した。ECR イオン源は 186 kV に昇圧された高圧ターミナル内部に据え付けられており、ターミナルと外部（接地）を結ぶセラミック加速管でイオンを加速し取り出す。ヘリウム、窒素、酸素、ネオン、アルゴンなどのイオンの取り出しに成功している^[6]。KEK-DA のビームコミッションングでは先ず 1 価のヘリウムイオンの加速が予定されている。図 3 は ECR イオン源からの He^{1+} イオン電流値を、マイクロ波パワーとガス流量をパラメータとしてファラデーカップで測定した結果である。

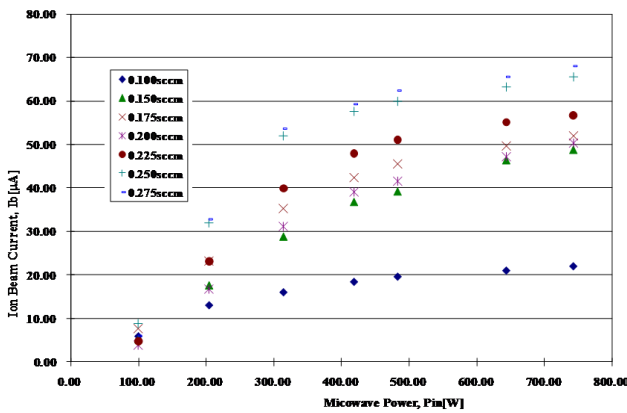


図 3 : ECR イオン源から取り出されたイオン電流

4. Einzel レンズチョッパー

ECR イオン源から取り出されるイオンビームは 5 msec の幅を持つ。これは生成されるプラズマの飽和状態に至るまで msec オーダーの時間を要するため、5 msec のパルス状のマイクロ波を導入していることによる。一方、200 kV で加速され KEK-DA リングに後述する静電キッカーで入射される。ビームの周回周期は約 12 μsec であるので、キッカー電圧は入射後この周回時間の前にオフされる必要がある。従って、入射するビーム幅は 5 μsec が選ばれた。このために必要なビームチョッパーとして、新方式の Einzel レンズチョッパー (EL チョッパー) を開発し実装した^[7]。EL チョッパー方式の利点として、

安価でコンパクトなこと、ビームが 186 kV の post-acceleration を受ける前にチョップするので 2 次電子放出や X 線の発生が抑制される事、outgas が少なく済むことが特長として挙げられる。

図 4 に EL チョッパーの概念図を示す。アイソツェルレンズの中間電極の電位をコントロールすることで下流へのビーム伝搬を制御できる。ゲートとして機能する 17 kV を中間電極に常時印加しておく。ビームの必要なタイミングに 5 μsec 長の -6 kV の矩形パルス電圧を発生し、17 kV に重畳する事によってゲートをオープンしイオンビームの下流への伝搬を可能とする。即ち縦方向チョッパーとして機能する。このパルス電圧ソースとしてパワー半導体を用いた Marx Generator を開発し使用した。

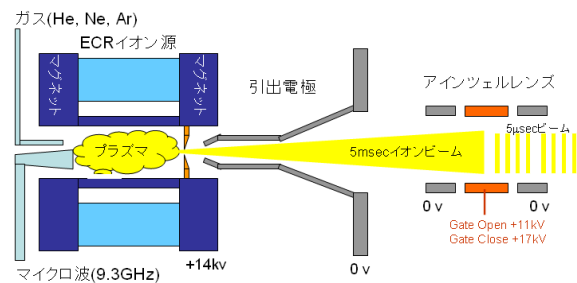


図 4 : 新開発の EL チョッパー。 Einzel レンズ中間電極の電位を変えてビームを on/off する。

IGUN^[8]を用いたシミュレーションは中間電極を +17 kV に維持するとビームを阻止でき、+11 kV に下げると通常の Einzel レンズとしてビームを収束しつつ通過させることができる事を予想した^[7]。図 5 にチョップされたイオンビーム波形を示す。

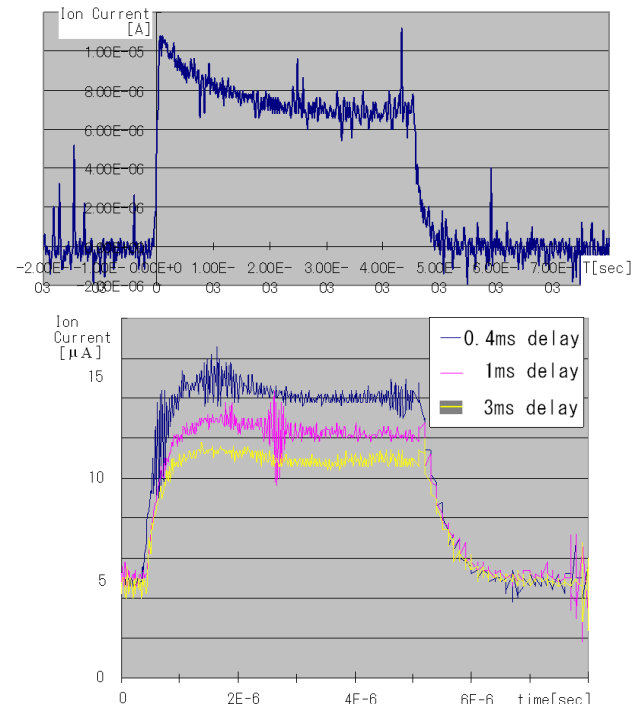


図 5 : イオン源から取り出され post-acceleration を経、分析磁石でイオン選別を受けたあと、ファラデーカップで観測された 5msec 幅のイオンビーム (上) と EL チョッパーで切り出された 5μsec 幅のビーム波形 (下)。

5. 静電入射キッカー

主リングへのイオンビーム入射のために静電キッカーを開発した^[9]。入射時の He^{1+} の周回周期は約 12.2 μs である。キッカー電圧が入射終了後のビーム周回軌道に影響を与えないようにするには入射パルス尾部が入射した後、パルス頭部が 1 周する前にオフにならなければならない。この要求のため、DC 電源から約 100 m 長の 50 Ω 伝送ケーブルを通してキッカーに 20 kV の電圧を印加しておき、入射終了後サイクロトロンを励起して伝送ケーブルの電荷を 50 Ω マッチング抵抗に吸収させる。実際の観測波形を図 6 に示した。

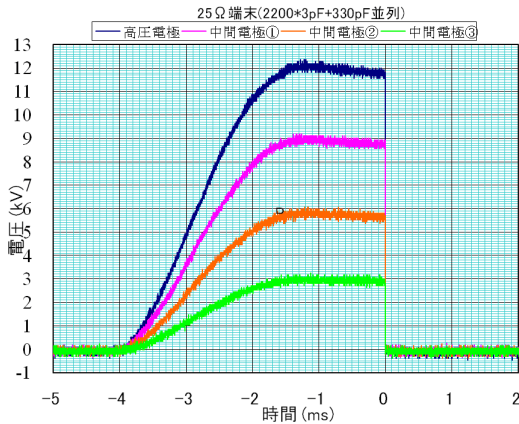


図 6 : KEK-DA リングへのイオン入射用静電キッカーの電圧波形。複数の波形は電場整形用の中間電極の分圧波形である。

6. KEK-DA リングへのビーム入射

KEK-DA リングに入射された He^{1+} ビームをリング内部に設置された静電型バンチモニターで観測した波形を図 7 に示す。図 7 上はリング内に蛍光板を設置し、ビームを光学カメラで確認しつつ入射した際のものである。原理的にビームは一周目しか観測されないが、上流の EL チョッパーのゲート信号からの Time of Flight が約 12μsec であること、チョップされた 5μsec 幅のビームが矩形波の形状を保ったまま入射されていることがはっきりと見て取れる。図 7 下は蛍光板を外し、リングの磁場を一定 (0.038 T) にしたままビームを周回させたもので、約 12.173 μsec 周期でビームが周回し続けていることが確認された。

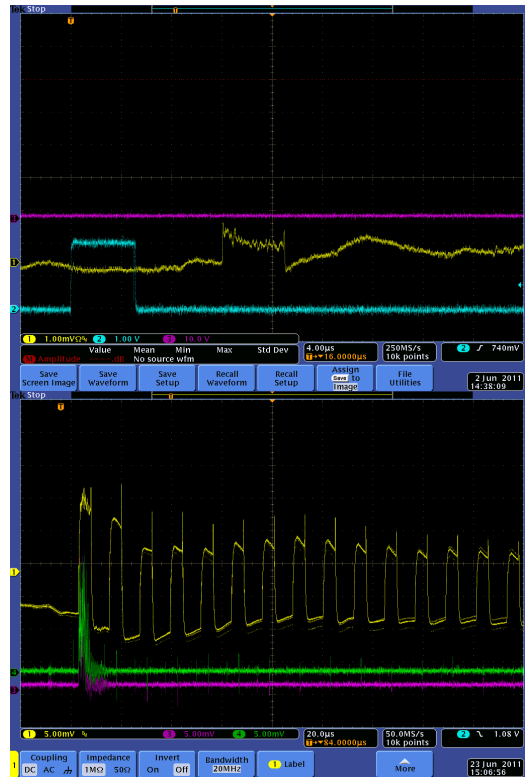


図 7 : KEK-DA に入射された He^{1+} ビームを静電型バンチモニターで観測した波形 (上図中央)。上図の左側にあるパルス波形は Einzel レンズチョッパーのゲート信号である。下は周回するビームを DC 磁場でリング軌道に閉じ込めたまま観測したものの。

7. バリヤー電圧によるビーム閉じ込め

次に誘導加速装置を用いてバリヤー電圧を発生させ、ビームを閉じ込めの実験を行った。ビームを加速しない状態であるため、バリヤー電圧の発生タイミングは前項で測定された 12.173 μsec 周期に固定している。図 8 は入射から 10 msec 後のバンチモニター信号をバリヤー電圧 on/off 時で比較したものである。バリヤー電圧 off 時にははっきり分らない信号が on 時にはバンチ構造を保っていることがわかる。

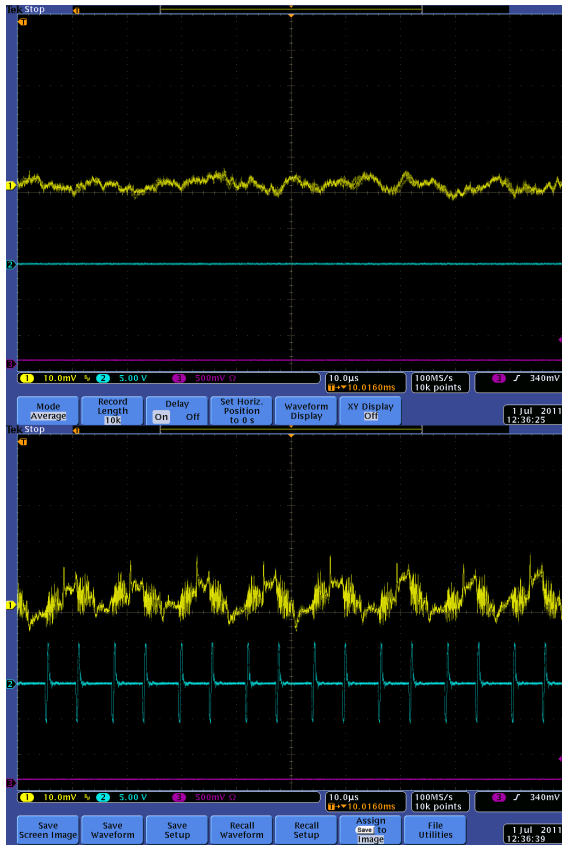


図8：入射から10 μ sec 後のバンチモニター波形。上がバリアー電圧 off、下が電圧 on。

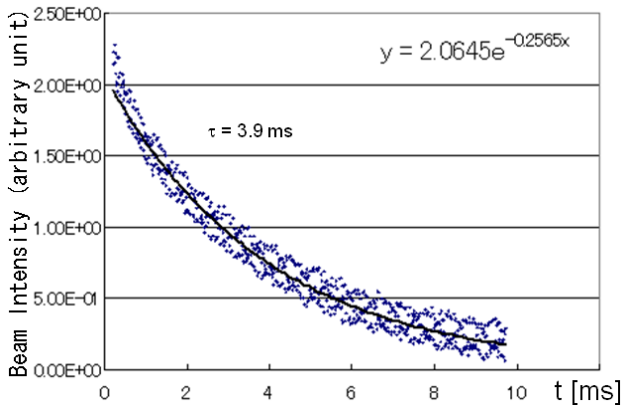


図 9：バンチモニター波形の面積から推定したビーム強度を入射からの時間 (msec) に沿ってプロットしたもの。

図9は life time を表している。入射直後の急峻なビームロス、入射エラーや COD 補正が十分に行われていないがの原因であろうと推測している。その後の時定数は 10^{-8} Torr オーダーの真空度における、 He^{1+} イオンの電子捕獲、脱離による寿命では説明できないので、残留ガスイオンとの衝突によるエミッタンス増大によって決まると考えている。

8. バリアーバケット圧縮実験

バリアー電圧を用いて、ビームバンチを自由にコントロールできることがデジタル加速器の大きな特長の一つである。実際にバリアー電圧の発生タイミングを制御し、バンチを圧縮する実験を行った。実験の概要は図 10 のようなものである。デジタル加速器のバリアー電圧制御は DSP (Digital Signal Processor) で行われているが、我々の用いている Texas Instruments 社製の DSP はタイミングパルスを 8 nsec 刻みでコントロールできる。ビームの周回ごとに 1 カウント (8 nsec) ずつバリアー電圧の間隔を狭くすることでバンチを圧縮しようという実験である。

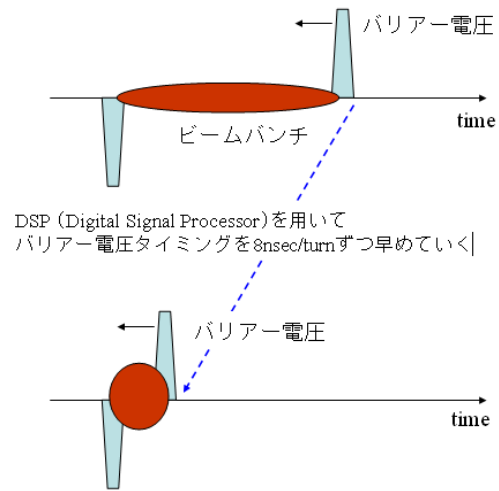


図 10：バンチ圧縮実験の概要。

実験結果を Mountain View にして図 11 に示した。入射時 5 μ sec 幅だったビームが圧縮されていくさまが見て取れる。ビームパルス頭部 (Mountain View の横軸で 1 μ sec 付近) でバリアー電圧により反射された入射時バンチ頭部だった部分がバンチ尾部と交差する様子も鮮明に映し出されている。「バリアー電圧パルス生成のタイミングから決まる運動量から一定のオフセットを持ってイオンバンチが入射され、バリアー電圧で反射されることでこのように見えているであろう」とスペキュレーションが容易に浮かぶ。縦方向の運動をシミュレートするプログラムを用いてこの推論を検証した結果を図 12 に示す。シミュレーションでは momentum spread 0.13 %, momentum off-set 0.13 % を仮定している。

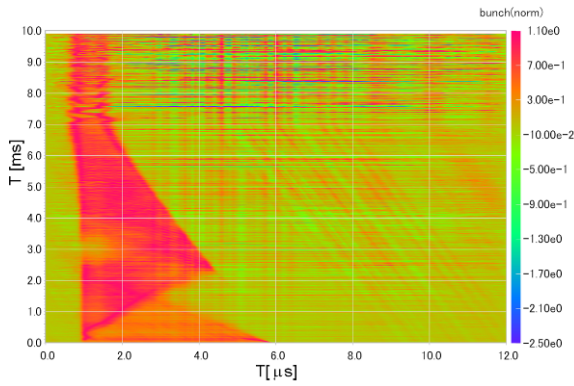


図 11：バリアー電圧を用いてバンチを圧縮した際の Mountain View の射影。縦軸が入射後の時間の進み、横軸が周回時間。周回時間内の粒子分布（色分けして示す）赤い分布の左端がビームパルス頭部、右端が尾部に当たる。頭部と尾部がほぼ直線上に移動し、入射後 1.5 msec で交差している。時間的に上流へ移動して来る正のバリアー電圧パルス部まで移動した頭部（入射時）はバリアーパルスに反射され向きを変えるのが見て取れる。バリアーバケット圧縮実験の間、ビームパルスは完全にバリアー内に閉じ込められているのが分かる。

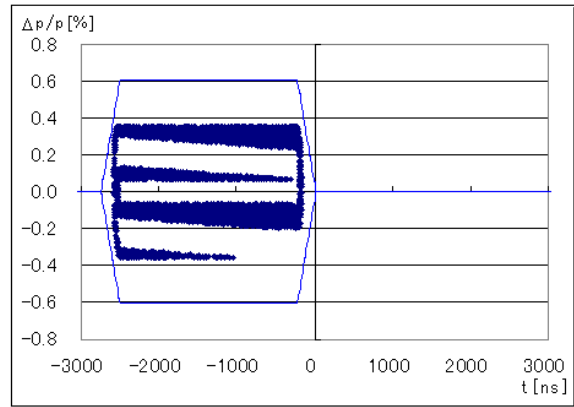


図 12：バリアーバケットを一方方向に圧縮しながらビームを閉じ込める実験をシミュレーションしたものの。入射するビームバンチは理想運動量に対して $\Delta p/p = 0.13\%$ のオフセットを持つと仮定した。

9. まとめ

KEK-DA 計画は加速器の建設を完了し、コミッショニングの段階に移行した。第一段階として 200 kV 高圧ターミナルからの He^{+} イオンビームの取り出し、第二段階として KEK-DA リングまでのビーム輸送、第三段階としてリングへのビーム入射、第四段階としてリング周回およびビーム閉じ込め実験に成功した。今後は引き続きビーム加速、取り出し実験をテストとして行い、放射線施設検査後ビーム応用ラインにビームを供給する予定である。

参考文献

- [1] K.Takayama, Y.Arakida, T.Iwashita, Y.Shimosaki, T.Dixit, K.Torikai, *J. of Appl. Phys.* **101**, p063304-7 (2007). Patent No. 3896420, PCT/JP2006/308502 (2006)
- [2] K.Takayama and J.Kishiro, *Nucl. Inst. Meth. A* **451**, 304 (2000).
- [3] K.Takayama, Y.Arakida, T.Dixit, T.Iwashita, T.Kono, E.Nakamura, K.Otsuka, Y.Shimosaki, K.Torikai, and M.Wake, *Phys. Rev. Lett.*, **98**, p054801-4 (2007), K.Takayama, Chapters 11 and 12 in “Induction Accelerators”, K.Takayama and R.Briggs (Eds.) (Springer, 2010).
- [4] T.Dixit, T.Iwashita, and K.Takayama, *Nucl. Inst. Meth. A* **602** 326 (2009).
- [5] T.Iwashita, T. Adachi, K.Takayama *et al.*, *Phys. Rev. ST Accel. Beams* **14**, 071301 (2011)
- [6] K.W.Leo, T. Adachi, T. Arai, K. Okazaki, and K.Takayama, in *Proceedings in ICIS2011* (2011).
- [7] T. Adachi, T. Arai, K. W. Leo, K. Takayama, and A. Tokuchi, *Rev. Sci. Inst.* (2011) in print.
- [8] R. Becker and W. B. Herrmannsfeldt, “Igun – A program for the simulation of positive ion extraction including magnetic fields”. *Rev. Sci. Inst.*, **63**, 2756 (1992).
- [9] T.Adachi, T.Kawakubo and T.Yoshii, “Injection and Extraction System for the KEK Digital Accelerator” in *Proceedings of IPAC’10, MOPEC050*, 570 (2010).

