

Longitudinal Ion Beam Chopper on Einzel Lens for KEK Digital Accelerator

Teruo Arai¹, Toshikazu Adachi^{1,2}, Leo Kwee Wah², Ken Takayama^{1,2,3}, Akira Tokuchi^{1,4}

¹KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

²The Graduate University for Advanced Studies, Hayama, Kanagawa, Japan

³Tokyo Institute of Technology, Nagatsuda, Kanagawa, Japan

⁴Pulse Power Japan Lab., Kusatsu, Shiga, Japan

KEK デジタル加速器用 Einzel レンズ縦軸方向ビームチョッパー

Abstract

In the pulse mode ECR operation, it takes a time duration of msec to achieve a saturation in the plasma density. An injection pulse length of 5 μsec in the KEK digital accelerator is expected, because it has a revolution time period of 12 μsec for a low energy ion, where one turn injection is employed. A beam chopper is required. A longitudinal chopper called "Einzel lens chopper" has been newly developed for this purpose. The function of chopping is implemented in the Einzel lens that is placed right after the ion source for beam optics matching downstream. The longitudinal chopper is realized by controlling the Einzel lens middle-electrode potential to gate the ion beam stream. Marx Generator is used to generate a negative high voltage pulse which is added to the positive high voltage for blocking an ion beam. All devices are installed near the ion source and just upstream the post-acceleration of 190 kV. X-ray, secondary electrons or out gassing can be minimized. These features are big advantage. Finite time periods of rising/falling of the chopper pulse voltage induces a large momentum deviation in the chopped pulse head/tail. Fortunately, its size is largely reduced due to the post-acceleration then the chopper is being operated very stably in beam commissioning.

1. 緒言

KEK 旧 500MeV ブースターリングを改装して、RF 加速装置を誘導加速装置に置き換え、誘導加速シンクロトロン[1, 2]として動作するデジタル加速器[3, 4]が運転を開始した[5, 6] (図 1 参照)。

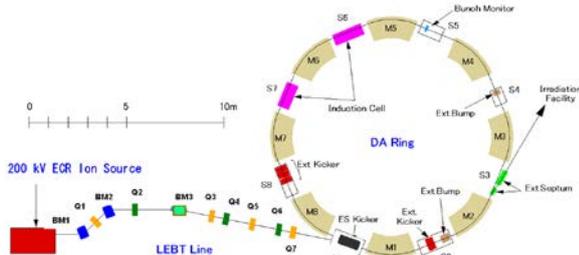


図 1 : デジタル加速器の概略

イオン源はパルスモードで動作する永久磁石 x-band ECR イオン源である[6]。取り出し電圧 10 kV で引き出されたイオンは 190 kV の後段加速を受け、電荷数・運動量選別磁石で選別される。Low Energy Beam Transport (LEBT)を経由して、デジタル加速器リングに入射される。入射には静電キッカーが用いられる。入射前に 20 kV まで印加されたキッカー電圧は入射したビームパルスが 1 ターンして戻って来るまでにアース電圧に降圧される。有限な falling 時間を考慮して入射されるビームパルス長は 5 μsec に決められた。

パルスモード ECR 方式の特性として、プラズマの成長に msec オーダーの時間を必要とする。この

事情からビームチョッパーが必須となる。

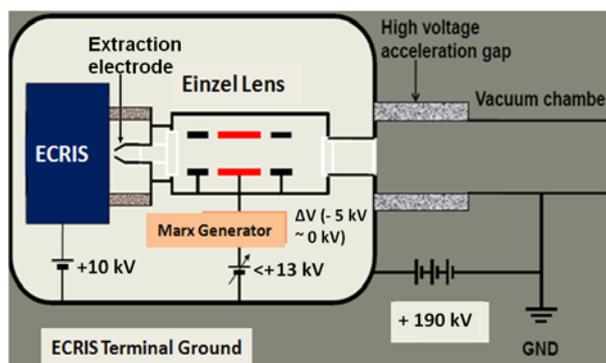


図 2 : イオン源構成の概略

ビームチョッパーとして通常の横方向ではなく、縦方向 (ビーム軸方向) にチョップする方法が考案された。ECR イオン源と 200 kV 加速管の間に置かれた横方向マッチング用 Einzel レンズにこの機能を担わせた (図 2 参照)。製作されたチョッパーとその動作特性については論文[7]に詳しいが、ここではそのアウトラインを紹介する。

収束用として不可欠な Einzel レンズとの共用でチョッパーヘッドは不要になり、コストの大幅減につながる。又、最小エネルギーでビームハンドリングを行う事により X 線や二次電子エネルギーが小さくアウトガスも低く抑えられる等のメリットが強調される。

2. Einzel レンズと Longitudinal Gating のアイデア

Einzel レンズは、イオン源引き出し電極の直下に置かれる 3 個の円筒状の電極で、中間電極を正電圧に印加し、前後の電極はアース電位である。中心から外れたイオンは電極ギャップを通過する際に中心からの距離依存性を持った発散と収束の力を順次受け、結果的に収束される。通常下流 LEBT との matching 最適化の条件から中間電極の電位は決められる。

この中間電極の電位を ECR イオン源からの引き出し電圧ないし、それより大きな電圧に維持すると下流域へのイオン流をブロックできることは容易に想像できる。即ち、この中間電極電位の制御によってイオン流のコントロールが可能になる筈である。これを longitudinal gating と呼ぼう。この中間電極電位を変化させた場合のイオンの動きについてシミュレーションした結果を図 3 に示す。

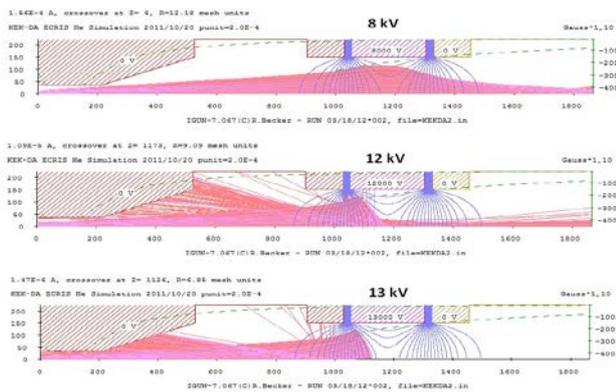


図 3 : Einzel Lens 域の IGUN シミュレーション

13 kV でイオン流が完全にブロックされる事が示された。この予想に沿い、ヘリウムと窒素の 1 価イオンを用いた実験が行われた。イオン源下流に置いたファラデーカップによりイオン電流を測定したところ、13 kV を超えたところでイオン電流はゼロになり、イオンビームが完全にブロックできることが確認された (図 4 参照)。

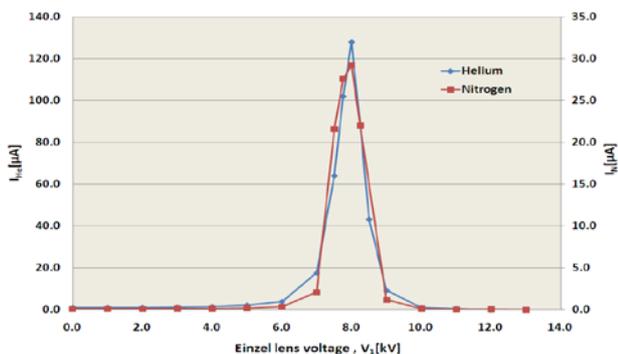


図 4 : イオン電流の中間電極電位依存性

この Longitudinal gating を μs オーダーで行えば、結果としてそれがここで求めるチョッパーとなる。即ち、中間電極電位を、通常は完全にイオン流をブロック出来る電位に保持し、イオンが必要な時間幅のみ横方向収束に必要な電位 (今回のケースでは 8 kV) まで落としてやれば良い。この目的のために次節で解説する負電圧の矩形パルスを生成する Marx Generator を製作した。

3. MOSFET Marx Generator

Einzel レンズ中間電極には、高压電源から供給されるブロック電圧がコンデンサにチャージされた形で印加され、そのコンデンサとグラウンド間に 4 段構成の Marx Generator が接続される。各段のコンデンサには負極性の高压が供給され、常時並列充電されている。各スイッチ (MOSFET) を同時にオンすることで直列放電させ、ブロック電圧に重畳される。MOSFET のオン抵抗と等価に設定されたスイッチを仮定し、図 5 (上) に示した等価回路のシミュレーションを行った。

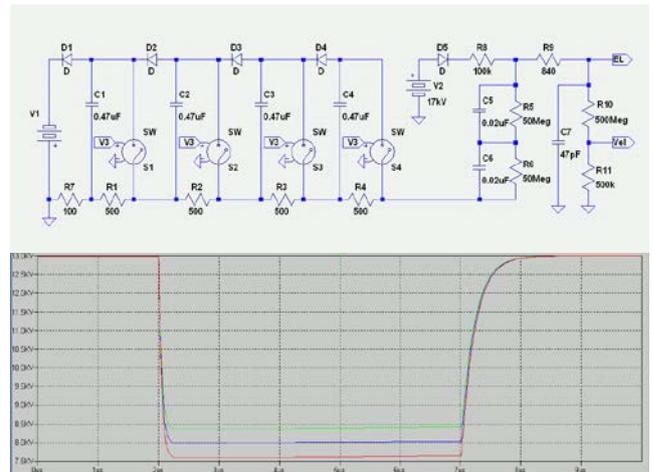


図 5 : 重畳電圧のシミュレーション結果

波形の立下り立ち上がりおよび平坦度ともに十分な特性が予想された。製作された Marx Generator はコンデンサバンクと耐圧 4 kV、電流パルス最大 3 A の MOSFET が 3 並列接続等を中心に組み立てられ、それを 4 段直列に構成されている。

4. 電圧重畳波形とビームチョッパー

これらの装置一式をイオン源下流に組み込んだ後、電気特性およびビームチョップ性能について検証した。電気的には、シミュレーション回路にも含まれている抵抗分圧回路を用いて観測された。結果を図 6 に示す。波形の形状及び平坦度ともにシミュレーション結果と良く一致しており、概ね想定どおりの特性が得られた。

一方、チョップされたビーム電流は 190 kV の post-acceleration を経て分析磁石下流 2.5 m に置かれ

たファラデーカップで測定された。実験では 5 msec 長のイオン源からのパルス（図 7 参照）の異なるタイミングでチョップされた。イオンビーム電流パルス波形を図 8 に示す。

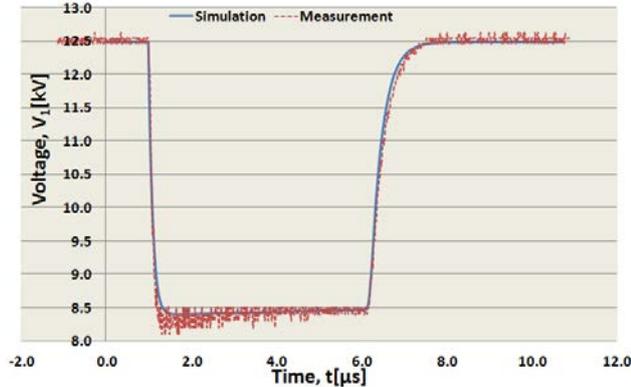
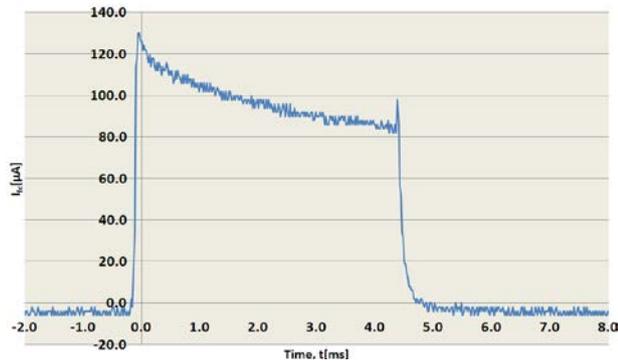


図 6 : Marx Generator 重畳電圧の実測結果
CH2 : 各スイッチへのトリガー波形、CH1 : 直列放電された-5 kV をブロック電圧である+12.5 kV に重畳した中間電極電圧波形。

5 msec He¹⁺ Ion Beam



After TWT Amp Trigger (sec)

図 7 : パルスモード運転の ECR イオン源（繰り返し 10 Hz、5 msec 幅、700W のマイクロ波を導入）から引き出されたイオンビーム電流

5 μsec He¹⁺ Chopped Beam

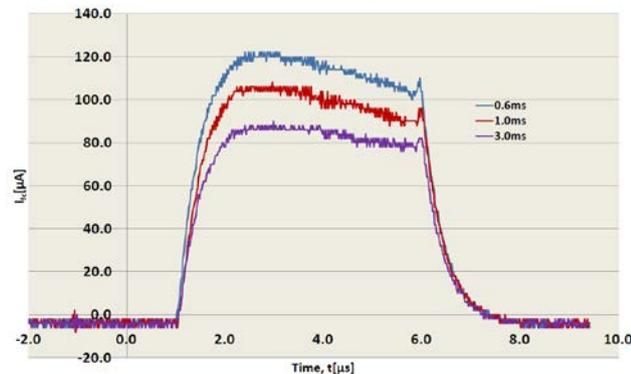


図 8 : マイクロ波を増幅する TWT アンプのトリガー信号から 0.6、1、3 msec 後に Marx Generator をトリガーしたビームチョップ波形

図 8 の波形の立ち上がり立ち下りのなまりは、ファラデーカップ測定系の回路定数（浮遊容量、同軸ケーブル長等からなる）に起因するものである。ファラデーカップ測定系を通して得られた信号から逆問題の解として入力ビーム信号が求められる。一方、チョッパー電圧の波形（図 6）とビーム電圧とファラデーカップで補足出来る電流との直接的関係を示す特性曲線（図 4）から有限なアパーチャーを持ったファラデーカップまで到達しえるビーム電流波形が得られる。これらを比較したものが図 9 である。これらは詳細な解析で判明した[8,9]。

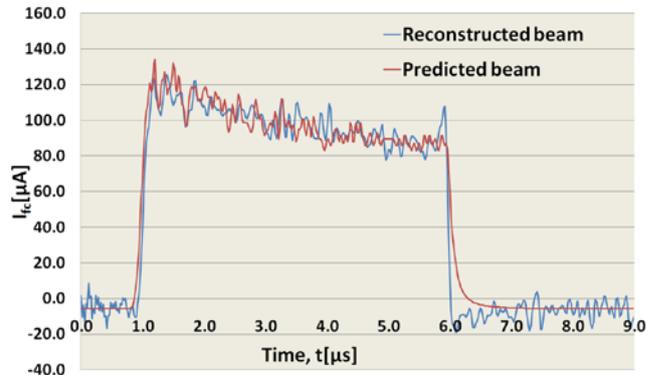


図 9 : 逆問題の解として得られたビーム波形（青）、特性曲線とチョッパーパルス電圧の時間変動を考慮して求められる予測ビーム電流波形（赤）

5. チョッパー電圧パルスの遷移時間と運動量空間広がりへの影響

チョッパー電圧パルスは完全な矩形波形ではない。有限な時間で立ち上がり、立ち下がる。この時間を遷移領域時間と呼ぼう。チョッパー領域を通過するイオンの所謂トランジェント時間はチョッパー電圧パルス幅（5 μsec）に比較して短い、立ち上がり、立ち下り時間に比較すると長い。この結果、遷移領域時間帯にチョッパー域を通過するイオンはチョッパー領域通過後にエネルギー収支が 0 にならない。チョッパー通過に関する詳細なビームシミュレーションにより、チョップされたイオンビームの運動量空間での広がりが入りが求められた[8,9]。図 10 にそれを示す。チョップされたパルスの Head と Tail に大きなモジュレーションが発生している事が分かる。横方向のチョッパーの場合には横方向位相空間にこの種のサイド効果が認められるが、縦方向チョッパーの場合は縦方向にこの効果が表れる。完全な矩形のチョッパー電圧波形は望めたいので、これは普遍的縦方向チョッパー特性といえる。

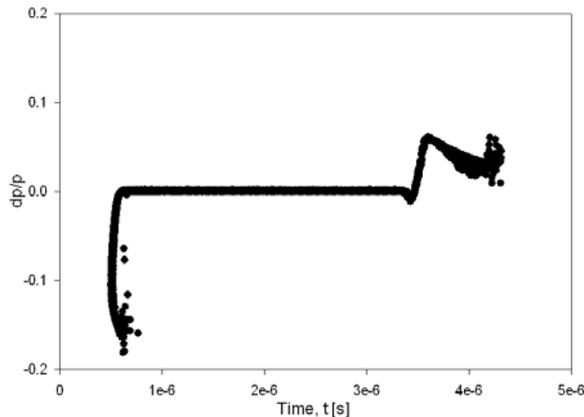


図 10：チョッパー通過後の位相空間($t, \Delta p/p$)でのイオンの拡がり

幸い、この運動量空間のモジュレーションは後段加速前に発生する。定電圧の後段加速により、このモジュレーションは大幅に緩和され、KEK-DA への入射段階では実際上問題にならないレベルまで下がる。

5. まとめ

MOSFET Marx Generator 駆動 Einzel レンズチョッパーの利点と特徴は以下の様に纏められる。

- 低エネルギー段階でのビーム処理のため付随する弊害が軽微
- チョップされたパルスの Head と Tail に対応するチョッパーパルス電圧の立ち上がり・立下り時間帯にチョップされる粒子には運動量拡がりが生じる
- 専用のチョッパーヘッドは不要
- 特別な高圧制御の部品を必要としない。
- 結果的に同目的の横方向チョッパーと比較してそのコストは十分の一程度である

今後の研究開発の課題は；

- 電圧波形の切れと平坦度の改善
- ECR イオン源以外のレーザーアブレーションイオン源等の他イオン源との組み合わせ実証

現在このチョッパーは安定にデジタル加速器へビームを供給している[10]。

謝辞

江偉華教授（長岡技科大）がパワー半導体利用の Marx Generator の情報をもたらした。高木昭氏（KEK）には Marx Generator の負極性高圧をコンデンサ経由で重畳する方法に関して多くの協力を頂いた。一連の研究は科学研究費基盤研究（A）（23240082）によってサポートされた。

参考文献

[1] K. Takayama, Y. Arakida, T. Dixit, T. Iwashita, T. Kono, E. Nakamura, K. Otsuka, Y. Shimosaki, K. Torikai,

M. Wake, “Experimental Demonstration of the Induction Synchrotron” *Phys. Rev. Lett.* **98**, 054801-4 (2007).

[2] K. Takayama and R. Briggs “Induction Accelerators” (Eds.) (Springer, 2010).

[3] K. Takayama, Y. Arakida, T. Iwashita, Y. Shimosaki, T. Dixit, and K. Torikai, “All-ion accelerators: An injector-free synchrotron” *J. of Appl. Phys.* **101**, 063304-8 (2007) Patent No. 3896420, PCT/JP2006/308502 (2006).

[4] T. Iwashita, T. Adachi, K. Takayama, 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, K. W. Leo, and M. Wake, “KEK Digital Accelerator” *Phys. Rev. ST-AB* **14**, 071301 (2011).

[5] T. Iwashita *et al.* “KEK デジタル加速器の運転開始” 第 8 回加速器学会 TULH04 (2011).

[6] Leo Kwee Wah, K. Takayama, T. Arai, K. Okazaki, A. Takagi, T. Adachi, K. Koyama, M. Wake and Y. Arakida, “Permanent Magnet ECRIS for the KEK Digital Accelerator” *19th International Workshop on ECR Ion Sources*, August 23-26, 2010 Grenoble, France, TUPOT15 (2010).

[7] T. Adachi, T. Arai, K. W. Leo, K. Takayama, and A. Tokuchi, “A solid-state Marx generator driven Einzel lens chopper” *Rev. Sci. Inst.* **82**, 083305 (2011).

[8] Leo Kwee Wah, “Ion Beam Handling by an Einzel lens chopper for the KEK digital accelerator” Ph. D Thesis, The Graduate University for Advanced Studies

[9] Leo Kwee Wah, T. Adachi, T. Arai, and T. Takayama, “Einzel Lens Chopper and Behavior of the Chopped beam in the KEK Digital Accelerator” submitted to *Phys. Rev. ST-AB* (2012).

[10] K. Takayama *et al.*, “KEK Digital Accelerator and Recent Beam Commissioning Result” Proceedings of HIAT 2012, TUC02 (2012).