

KEK-DA における SI-Thyristor Matrix Array により駆動される 静電入射キッカーと入射後のビームダイナミクスについて

SI-THYRISTOR MATRIX ARRAY DRIVEN ELECTROSTATIC INJECTION KICKER FOR THE KEK DIGITAL ACCELERATOR AND BEAM DYNAMICS ANALYSIS OF INJECTION

小林寛^{#, A, B)}, Liu Xingung^{B, C)}, 川久保忠通^{B)}, 安達利一^{B, D)}

Hiroshi Kobayashi^{#, A, C)}, Liu Xingung^{B, C)}, Tadamichi Kawakubo^{C)}, Toshikazu Adachi^{C, D)}

^{A)}Tokyo City University, Setagaya, Tokyo, Japan

^{B)} High Energy Accelerator Research Organization/Accelerator Laboratory (KEK), Tsukuba, Japan

^{C)} Tokyo Institute of Technology, Nagatsuda, Japan

^{D)} The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), Hayama, Japan

Abstract

For heavy ion beam injection into the KEK digital accelerator (DA) ring, the electrostatic (ES) kicker is used. A voltage of 20 kV is put across the electrostatic electrodes before injection so as to deflect the injected beam on the ring orbit. The ES-Kicker excitation circuit where a coaxial cable is charged to the required voltage by a resonant charging power supply and discharged just after beam injection. The SI-Thyristor Matrix Array (SI-Thy MA) as a discharging device has been developed to replace the conventional thyatron. The SI-Thy MA has proved to be quite useful to get rid of inherent and headache issues associated with thyatron's use. Recently it has turned out that ringing in a voltage pulse of 3.5 μsec , which that is originated from its longer switching time than that of the thyatron, affects on beam injection dynamics, resulting in micro bunch formation. However, we know that this effect is overcome by choosing optimized timing for discharging. In order to understand this phenomenon from an academic interest, a computer simulation code taking into account of longitudinal space-charge effects has been developed. Here, comparisons of the experimental results obtained for various parameters with the computer simulation are discussed.

1. はじめに

KEK-DA リング¹⁾への重イオンビーム入射には、静電入射キッカー (ES-キッカー)²⁾が使用される。入射を行う前に 20 kV の高圧を予め ES-キッカーの高圧電極に印加し、そこをビームが通過する際にリングの水平軌道方向に偏向をうける。図 1 に示すように、ES-キッカーの高圧電極は同軸ケーブルに繋がっている。同軸ケーブルは共振充電電源から必要な電圧が印加される。また、ビームの入射後すぐに高圧をオフにする必要がある、これは入射キッカー領域に進入してきた際、リングの水平方向への偏向を防ぐためである。A/Q = 4 のイオン種の場合、入射エネルギー時の DA リング 1 周に要する時間は 12 μsec であり、この時間内に ES-キッカー領域内の電場をゼロにする必要がある。この放電に使用するスイッチとしてパワー半導体である Si-Thyristor を使用した SI-Thyristor Matrix Array (SI-Thy MA) が開発され、従来のスイッチであるサイラトロン³⁾に置き換わった。

図 2 に見られるように、Si-Thy MA のスイッチオン後、サイラトロン使用時よりも長いリングングが発生する事が確認された。しかし、このリングングは約 3.5 μsec で収まり、入射エネルギー時の DA リ

ング 1 周に要する時間が最も短い A/Q = 1 のイオン種でも 6 μsec を要するので、DA の平常運転時には問題無く使用できることが確認された。

開発された SI-Thy MA は、動作特性の解析や長時間連続運転試験を経て、サイラトロンの完全な代用として日常的に使用されている。しかしながら、意図的に前述のリングング部分を入射後のビームに被さるような入射実験を行った結果、ES-キッカーの入口と出口にはビームの進行軸方向にも電場が発生しており、周回するビームダイナミクスに影響を与え、マイクロバッチの形成に繋がる事が判明した。その物理モデルを図 3 に示す。ここでは、ビームの加速や閉じ込めを行わないフリーランでの実験のみに限定して議論する。

リングング電圧は時間的に振動し、その周期は約 550 nsec であった。また、ES-キッカー領域は約 1 m であり、1 つの粒子がその領域を通過するために必要なトランジットタイム τ は約 330 nsec である。これよりその影響が顕著に現れることが予想できる。そこで、この現象を理解するために縦方向のビームダイナミクスを把握する手段として、Mathematica を使用した空間電荷効果を含むシミュレーションプログラムを開発した。

今回は図 4 に示す位置を観測点としている。図中の ϕ と E はその位置に於ける粒子の位相とエネルギーを表している。

khiroshi@post.kek.jp

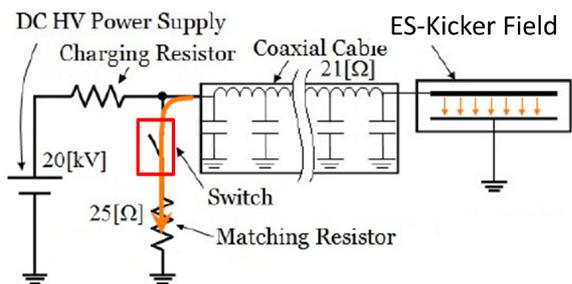


Figure 1: The ES-Kicker driver system.

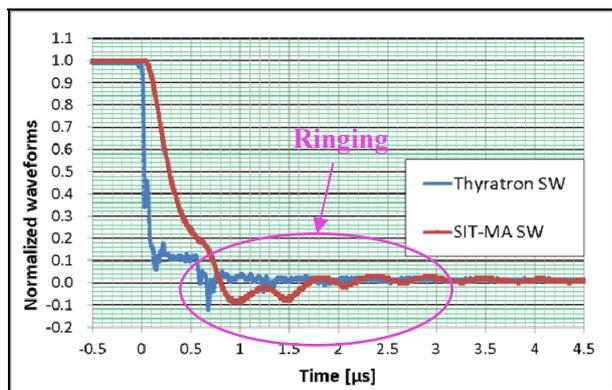


Figure 2: ES-Kicker voltage waveforms for Both Switches.

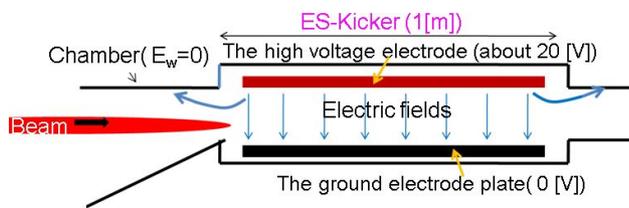


Figure 3: Analytical model for the injection kicker.

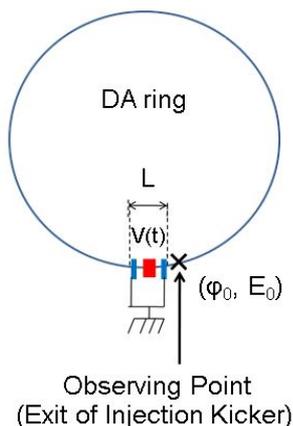


Figure 4: Analytic model for interaction, where the dynamical parameters (ϕ , E) of macro-particles are picked up at the observing point.

2. 粒子シミュレーションプログラム

まずは入射実験結果を基に、入射したビームの初期条件を作製する。粒子が持つ最大運動量分散 $(\Delta p/p)_{\max}$ は入射実験結果より予め把握している。シミュレーションに仮定するマクロ粒子数は 1 万個とした。図 5 と図 6 に仮定する粒子の初期分布を示す。但し横軸は粒子がリングを一周する時間 (位相で 360 度) に対応する。

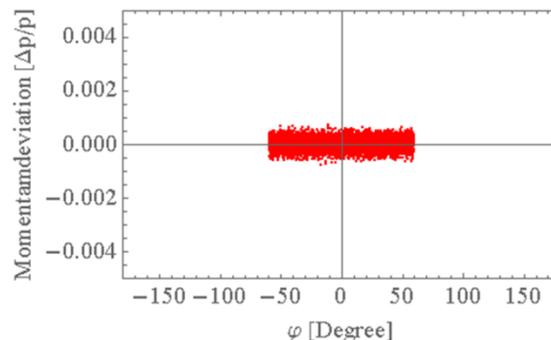


Figure 5: Phase plot of macro-particles assumed as the injected particles.

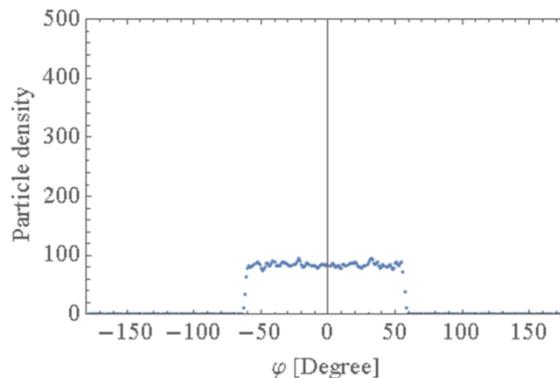


Figure 6: Particle density of the macro-particles along the phase.

セプト残留電圧 V は、実測値を基に減衰する Sin 関数で疑似的に再現したものを仮定した。ES-キッカー領域を通過する間に付与されるエネルギーは、式 (1) で表される。

$$\Delta E = Qe[V(t+\tau) - V(t)] \quad (1)$$

ここで τ は粒子のキッカー領域通過に要するトランジットタイムである。前述の初期条件に ES-キッカー内で発生しているリングング電圧の影響を付与した結果を図 7 と図 8 に示す。図 8 になにも変化がないように思えるが、これは粒子のエネルギーが変化した直後の結果であり、線密度に影響はまだ現れない。何も外力が働かない状況では、マクロ粒子は位相空間上を単純に(2)式に従って変化していく。

$$\phi_{n+1} = \left\{ \phi_n + 2\pi\eta \cdot \frac{\Delta p}{p} \right\} \quad (\eta < 0) \quad (2)$$

n は周回数に対応する。実際、この仮定の元に得られたシミュレーション結果を図 9 に示す。ここでマイクロバンチ構造の生成と消滅がクリアーに見取れる。

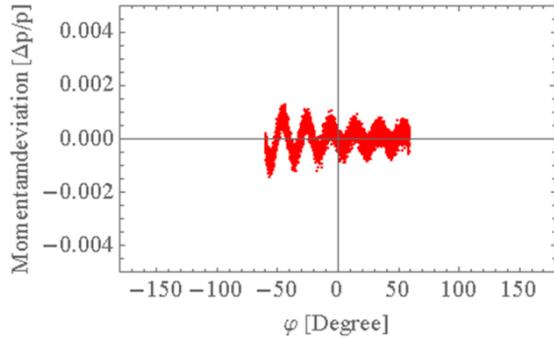


Figure 7: Phase plot of the macro-particles just after passing the ES-kicker region (simulation).

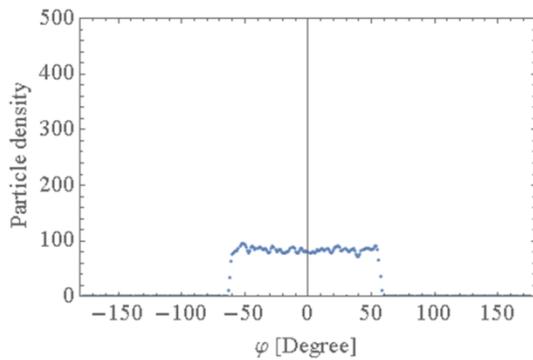


Figure 8: Particle density along the phase axis (simulation)

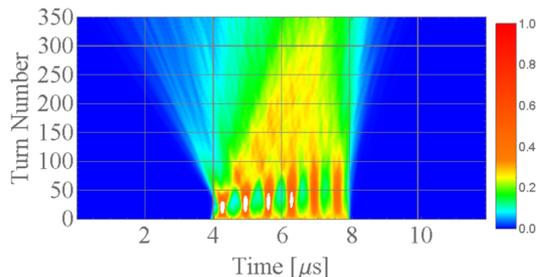


Figure 9: Projection of the line density on time axes (revolution time and turn number).

実際の加速器で粒子が全く外乱も無く周回する事はあり得ない。ビーム電流が大きい場合、又は周回速度が遅い場合などビーム自身の空間電荷効果が無視できない事は分かっている。一方、真空容器等のビームが直接電磁場を経由して相互作用する効果、即ち、ウエーク場の影響もある。この論文ではこの中で、先ず空間電荷効果に着目し、その影響を評価

する目的で、ビーム自身を作る縦軸方向の電場をシミュレーションコードに取り込んだ。

式 (3) は縦方向の電場を表す式である。

$$E_s = -\frac{g_0}{4\pi\epsilon_0\gamma^2} \cdot \frac{d\lambda}{ds} \quad (3)$$

ここで g_0 は真空容器の平均的幾何学的係数、 ϵ_0 は真空の誘電率、 γ は粒子の相対論的ガンマであり、ほぼ 1 である。 λ は線電流密度。 E_s は粒子の線密度の変化により刻々と変化するが、1 ターンでの粒子分布の変化を小さい (言い換えると着目する粒子のビームバンチ内での相対的移動が小さい) と云う仮定の下に、このシミュレーションコードでは 1 周で受ける空間電荷効果電圧を図 4 の観測点でまとめて付与することになっている。

$$E_{n+1} = E_n + QeC_0 \cdot E_s \quad (4)$$

Q はイオンの価数、 C_0 はリング周長で 37.7 [m] である。

3. 実験とシミュレーション結果の比較

先ず以下の入射条件での実験結果を図 10,11 に示す。

ビーム電流	40, 100 μ A
ビーム幅	4 μ s
A/Q	4
v/c	0.01

横軸は DA のリング周長を理想粒子の周回時間であり、縦軸は粒子のターン数を表している。線電流密度を色で表現している。赤くなるほど粒子密度が高いことを表している。4 μ sec の入射ビームバンチの中に、マイクロバンチ構造が見られる。ビーム頭部ほどマイクロバンチ構造がはっきりと表れており、後尾に行くに従いマイクロバンチ構造が不鮮明に見える。これは、リング電圧の減衰、或いは図 7 に見られる様な位相空間内での粒子分布のモジュレーションの大きさに依存していると理解できる。マイクロバンチの数はターン数を追うごとに見掛け上減少し、約 150 ターン近傍で消滅している。

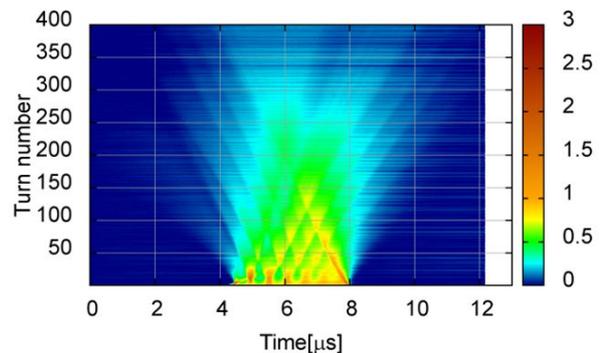


Figure 10: Temporal evolution of the injected bunch for 40 μ A (experiment).

一方、より高いビーム強度（100 μA ）での実験結果は 40 $[\mu\text{A}]$ のケースと比較し、より強いマイクロバンチ構造の生成と速い消滅を示した。

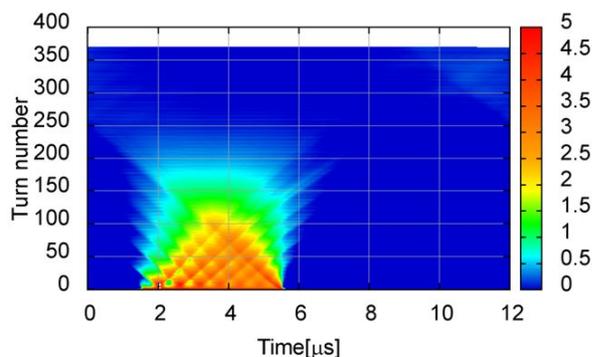


Figure 11: Temporal evolution of the injected bunch for 100 μA (experiment).

この速い消滅は 2D 時間平面での拡散速度の差（マイクロバンチ構造内部での運動量分散の違い）で説明できる。概ね最大の運動量分散は以下が読み取れる。

$$\left(\frac{\Delta p}{p} \right)_{\text{max}} = \begin{cases} 0.1 [\%] \text{ for } 40 [\mu\text{A}] \\ 0.2 [\%] \text{ for } 100 [\mu\text{A}] \end{cases}$$

この差はビーム電流の違いに原因を求める以外にはない。

一方、前節に示した空間電荷効果を見逃したシミュレーション結果（図 9）でもマイクロバンチ構造の生成・消滅は確認されており、この点ではシミュレーション結果は実験結果を再現したと言える。少なくともマイクロバンチ構造の生成は、入射キッカー電圧の残留成分が直接のきっかけであったと結論できる。更に、空間電荷効果を考慮したシミュレーション結果を図 12, 13 に示す。

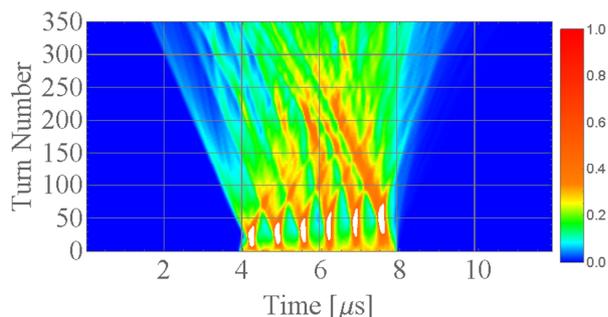


Figure 12: Temporal evolution of the injected bunch for 40 μA (simulation with space-charge effects).

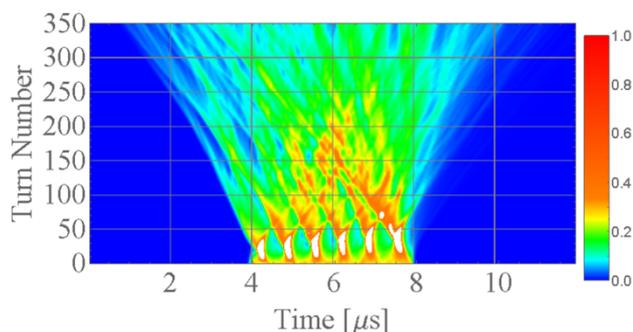


Figure 13: Temporal evolution of the injected bunch for 100 μA (simulation with space-charge effects).

この結果をみると、拡散時間とビーム強度の相関はあるが、定量的に実験結果を説明するものではない。即ち、マイクロバンチの成長に伴う運動量分散の増大の原因を内部的な空間電荷効果だけで説明できるものではない事を示唆している。

4. 結論

低エネルギーイオンビームの円形リングでの周回時に縦方向空間電荷効果の影響を評価した。まだ実験事実を完全には説明出来ていないが、今後取り組むべき、考慮すべき素過程などが明らかになりつつある。このアカデミックな研究課題に取り組むきっかけとなったパワー半導体スイッチング素子デバイス SI-Thy MA の動作自身は何の問題もなく、この種のスイッチとして高信頼性を持って動作している。近い将来において、加速器に使用されている全てのサイクロロンが半導体 MA に置き換わる時代がそこまで来ていると言って良いだろう^[4]。

参考文献

- [1] T. Iwashita et al., “KEK Digital Accelerator”, Phys. Rev. ST-AB 14, 071301 (2011).
- [2] T. Adachi and T. Kawakubo, “Electrostatic Injection Kicker for KEK-DA”, Phys. Rev. ST-AB 16, 053501 (2013).
- [3] H. Kobayashi, T. Kawakubo, and A. Tokuchi, 5th Euro-Asian Pulsed Power Conference, Kumamoto, Japan OB1-2 (2014).
- [4] Private communications with K. Takayama and K. Okamura.