

# BEAM DYNAMICS ANALYSIS IN EXTREME PULSE COMPRESSION USING ELECTRON BEAM COMPACT SIMULATOR

Takashi Kikuchi <sup>#A)</sup>, Kazuhiko Horioka <sup>B)</sup>, Toru Sasaki <sup>A)</sup>, Nob. Harada <sup>A)</sup>

<sup>A)</sup> Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology,  
1603-1 Kamitomioka, Nagaoka, Niigata 940-2188, Japan

<sup>B)</sup> Department of Energy Sciences, Tokyo Institute of Technology,  
4259 Nagatsuda, Midori-ku, Yokohama, 226-8503

## Abstract

In a final stage of an accelerator system for heavy ion inertial fusion (HIF), extreme bunch compression is required for effective pellet implosion. In this study, we investigate beam dynamics for the extreme bunch compression in the final stage of HIF accelerator complex. The results indicate that high current-low temperature condition in comparisons with current status of experimental compact simulator is necessary to create the space charge dominated beam.

## 小型電子ビーム装置による極端ビームパルス圧縮のためのビーム動力学数値シミュレーション

### 1. はじめに

重イオン慣性核融合の実現のためには、大電流の重イオンビームを効率良く生成し安定輸送する技術が必要となる。重イオン慣性核融合のための粒子加速器の最終集束段近辺では、高電圧を高繰り返しで印加できる誘導加速モジュールを用いたビーム圧縮装置を用いてパルス圧縮を行う。重イオンビームによる実験では大規模な粒子加速器が必要となるため、電子ビームを用いて小型の模擬実験装置を構築し、ビーム進行方向圧縮操作に対するビームの挙動を検討している<sup>[1-2]</sup>。

本研究では、パルス圧縮の限界を目指し、圧縮過程のビームダイナミクスについて、実験パラメータに合わせた理論的・数値的アプローチにより検討を行っている。

### 2. 進行方向エンベロープ方程式による空間電荷効果が支配的な条件の見積もり

ビーム進行方向のエンベロープ方程式<sup>[3]</sup>は次のように表される。

$$z_m'' + k_z z_m - \frac{K_L}{z_m^2} - \frac{\varepsilon_{zz}^2}{z_m^3} = 0 \quad (1)$$

ここで、 $k_z$  は進行方向の外部集束を表す係数、 $K_L$  は進行方向パービアンス、 $z_m$  は電子バンチ長の半分、 $\varepsilon_{zz}$  は進行方向エミッタンスである。左辺第3項が空間電荷効果による反発力、第4項がエミッタンスに依存する熱的な散逸力を示す。

式(1)より、空間電荷効果とエミッタンスによる反発力の比を求めると、次の条件で空間電荷効果が支配的なビームとなる。

$$\frac{K_L z_m}{\varepsilon_{zz}^2} = \frac{3egI_{b0}\tau_{b0}}{40\pi\varepsilon_0 z_m k_B T_L} \geq 1 \quad (2)$$

ここで、 $e$  は素電荷、 $g$  はビームの幾何学的形状因子、 $I_{b0}$  は初期ビーム電流、 $\tau_{b0}$  は初期パルス時間幅、 $\varepsilon_0$  は真空の誘電率、 $k_B T_L$  は進行方向温度である。実験条件<sup>[1-2]</sup>に合わせると、 $I_{b0}=100\ \mu\text{A}$ 、 $\tau_{b0}=100\ \text{ns}$ 、 $g=2$  となる。電子バンチの初期長さの半分  $z_{m0}$  で規格化したバンチ長をパルス圧縮比とし、式(2)を計算した結果を図1に示す。実験条件において  $k_B T_L=1\text{eV}$  程度とすると、式(2)の条件を満たすためには少なくとも57.8倍のビームパルス圧縮を行い、パルス幅を1.73 ns程度まで縮める必要があると見積もられる。

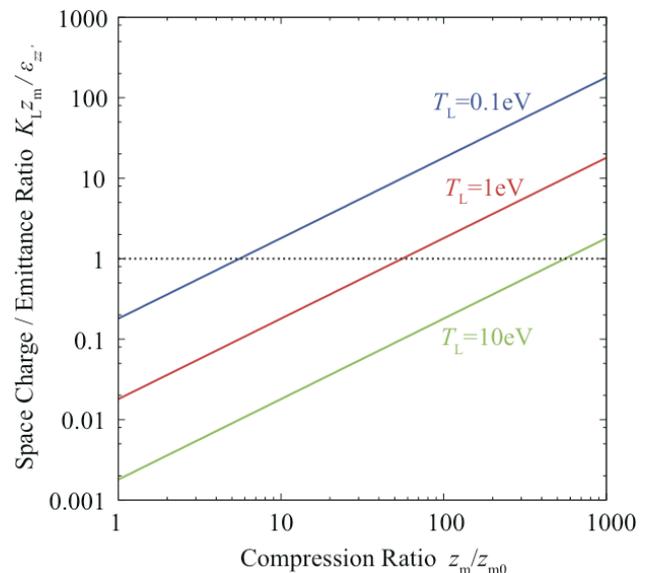


図1：パルス圧縮比に対する空間電荷効果と進行方向エミッタンスによる反発力の比

<sup>#</sup> tkikuchi@vos.nagaokaut.ac.jp

### 3. 多粒子シミュレーションによるパルス圧縮の検討

#### 3.1 計算モデル

ビーム動力学シミュレーションのために、1次元の静電粒子コードを用いた<sup>[4]</sup>。進行方向（ $z$ 方向）の自己電場  $E_z$  については、以下の近似式を用いる<sup>[3]</sup>。ここで、 $\lambda$ は線電荷密度である。

$$E_z = -\frac{g}{4\pi\epsilon_0} \frac{d\lambda}{dz} \quad (3)$$

図2に示すように、各パルス電圧発生モジュールから供給される電圧波形が重畳され、加速ギャップにビームを圧縮するための電圧が発生する。電子銃から熱電子放出された電子バンチは加速ギャップでパルス圧縮電圧を与えられ、ソレノイド磁場（0.03 T）によって半径方向に閉じ込められながら、進行方向に短くなる。

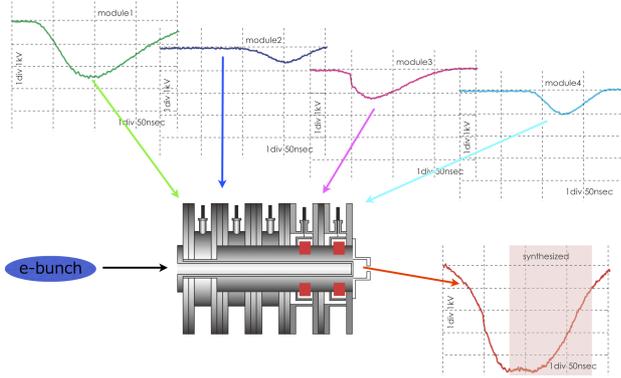


図2：ビームパルス圧縮のための電圧パルス重畳による誘導電圧発生

パルス圧縮のために誘導電圧モジュールから重畳して印加される電圧は時間  $t$  で変化する、以下の式で与えられる。

$$V_g(t) = \frac{m_e}{2e \left( \sqrt{\frac{m_e}{2eV_0}} + \frac{T-t}{L} \right)^2} - V_0 \quad (4)$$

ここで、 $m_e$ は電子1個の質量、 $V_0$ は電子銃の引き出し電圧に一致させて2.8 kV、 $T$ は印加電圧パルス幅であり初期ビームパルス幅と同じ100 ns、 $L$ はビーム輸送距離で2 mである。式(4)で与えられる電圧パルスの印加に従って、電子銃から引き出された電子バンチは先頭で大きく減速され、後端は減速されない。このため、輸送ラインを通過する間にビームのパルス圧縮が実現される。

電子銃から放出される電子は次の熱速度を与える式によって初期速度に分布を持つと仮定した。

$$v_{th} = \sqrt{\frac{k_B T_L}{m_e}} \quad (5)$$

#### 3.2 初期ビーム電流値依存性

図3に粒子シミュレーションにより得られたビーム電流波形を示す。初期ビーム電流値を変えて計算を行い、各々の初期ビーム電流値を1として、パルス圧縮後の電流波形を規格化している。式(4)で与えられる印加電圧波形によって、ビームパルスが圧縮されていることが分かる。実験結果では最大圧縮率は6.7倍程度となっている<sup>[1-2]</sup>。

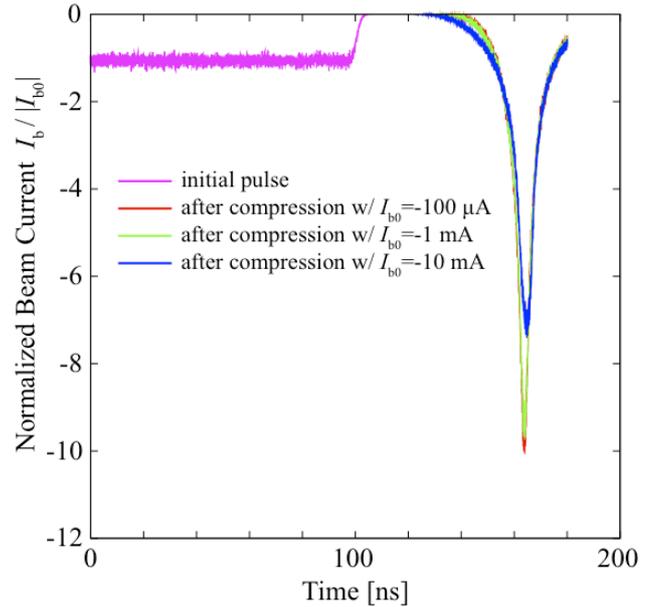


図3：初期ビーム電流を変化させた場合の粒子シミュレーションによるビーム電流波形の計算結果

実験と同様に初期ビーム電流を100  $\mu$ Aとした場合と10倍の1 mAとした場合では、パルス圧縮後のパルス波形および最大圧縮率はほぼ同じとなった。これまでの研究結果<sup>[5]</sup>から、実験条件のビーム電流値ではほぼ熱的な効果によりビームパルス圧縮が妨げられていることが分かっている。一方で、初期ビーム電流値を実験条件に対して100倍の10 mAとして計算を行った場合は、パルス圧縮率が大きく低下していることが分かる。この結果は、式(2)で予想される空間電荷効果が支配的となる条件とも矛盾しない。このため、今回の電子ビーム実験装置で空間電荷効果が支配的な挙動を示すパルス圧縮を行うためには、初期のビーム電流値を現状の10~100倍程度向上させる必要があることが分かる。

#### 3.3 加速ギャップ長依存性

パルス圧縮のための速度変調を与える加速ギャップの長さを変化させた場合の計算を行った。実験装置では加速ギャップ長は15 mmである。式(4)で設定される速度変調電圧は加速ギャップを無限に短くと仮定して設計されている。純粋に加速ギャップ長

の変化の影響だけを観察するために、空間電荷効果無しで初期ビーム温度が 0 eV の条件で計算を行った。図 4 に計算結果を示す。

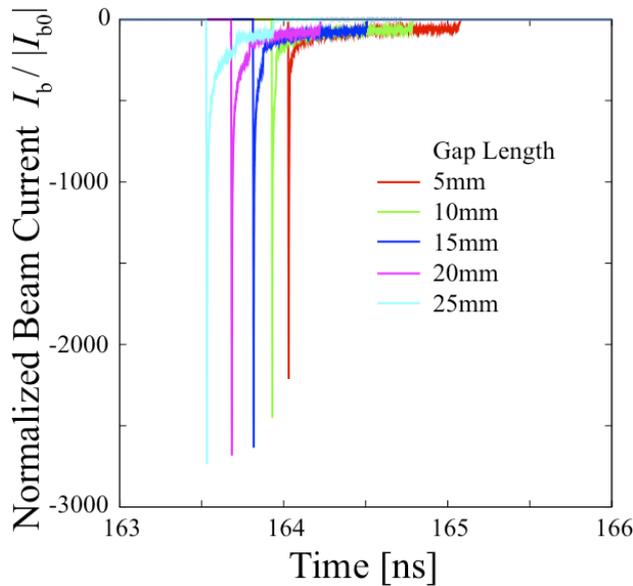


図 4 : 加速ギャップ長を変えた場合の輸送端での到達ビーム電流波形

図 4 から、温度や空間電荷効果の影響だけでなく、極端なビームパルス圧縮をする上でギャップ長も考慮すべき要因になることが分かる。これは粒子がギャップを通過後に受け取るエネルギー  $eV_p$  が

$$eV_p = e \int_{z_1}^{z_2} \frac{V_g(t)}{d} dz = e \int_{t_1}^{t_2} \frac{v_p(t) V_g(t)}{d} dt \quad (6)$$

となるからである。ここで、 $d$  は加速ギャップ長、 $z_1$  と  $z_2$  はそれぞれ加速ギャップの入口と出口の位置、 $t_1$  と  $t_2$  はそれぞれ加速ギャップ入口へ到達した時刻と出口へ到達した時刻、 $v_p$  は粒子速度である。

式(6)で表される通り、電子ビームが加速ギャップを通過中に印加電圧が変化するため、ギャップ長を無限に短いと仮定した設計値である式(4)から与えられる速度変調電圧とずれが生じてしまう。

#### 4. まとめ

重イオン慣性核融合で必要とされるビームパルス圧縮過程を理解するため、電子ビームによる模擬実験装置を構築し、パルス圧縮の限界を調査するため、理論的・数値的なアプローチによってビーム動力学の検討を行った。

進行方向エンベロープ方程式から導出した理論的な見積もりから、現状の実験装置では空間電荷効果が支配的なビームを形成するために 57.8 倍以上のパルス圧縮が必要であることが予想された。

数値シミュレーションの結果から、圧縮過程における空間電荷効果の影響を実験的に観察するためには、現状のビーム電流値の 100 倍程度が必要である

と考えられる。また、加速ギャップ長も考慮に入れて速度変調電圧波形を設計する必要があることが分かった。

#### 参考文献

- [1] 富井正和, 菊池崇志, 中島充夫, 堀岡一彦, "荷電粒子ビームのパンチングに伴うエミッタンス成長", 日本物理学会 2010 年秋季大会, 23aQJ-4
- [2] K. Horioka, *et al.*, "Beam Dynamics Studies in High-Flux Ion Injectors and During Longitudinal Bunch Compression for High Power Ion Acceleration", 18th International Symposium on Heavy Ion Inertial Fusion (HIF2010), Darmstadt, August-September 2010, TUS-0404
- [3] M. Reiser, Theory and Design of Charged Particle Beams (Wiley, 1994)
- [4] R.W. Hockney and J.W. Eastwood, Computer Simulation using Particles (IOP publishing, 1988)
- [5] A. Namprom, T. Wiboonphon, T. Sasaki, T. Kikuchi, and Nob. Harada, "Numerical Study for Electron Beam Dynamics in Compact Simulator for Heavy Ion Inertial Fusion", 3rd Euro-Asian Pulsed Power Conference / 18th International Conference on High-Power Particle Beams EAPPC-BEAMS 2010, Jeju, Korea, October 10-14, 2010, MoB3-5, p.108