

小型電子ビーム模擬装置による重イオン慣性核融合のための 最終段パルス圧縮のビーム動力学研究

STUDY ON BEAM DYNAMICS DURING FINAL PULSE COMPRESSION FOR HEAVY ION INERTIAL FUSION USING COMPACT ELECTRON BEAM SIMULATOR

菊池 崇志^{#,A)}, 曾我 之泰^{B)}, 朴 英樹^{B)}, 堀岡 一彦^{C)}, 酒井 泰雄^{C)},
佐藤 知拓^{A)}, 高橋 一匡^{A)}, 佐々木 徹^{A)}, 阿蘇 司^{A)}, 原田 信弘^{A)}
Takashi Kikuchi^{#,A)}, Yukihiro Soga^{B)}, Hideki Park^{B)}, Kazuhiko Horioka^{C)}, Yasuo Sakai^{C)},
Tomohiro Sato^{A)}, Kazumasa Takahashi^{A)}, Toru Sasaki^{A)}, Tsukasa Aso^{A)}, Nob. Harada^{A)}

^{A)} Nagaoka University of Technology

^{B)} Kanazawa University

^{C)} Tokyo Institute of Technology

Abstract

In a final stage of an accelerator system for heavy ion beam driven inertial confinement fusion, extreme bunch compression is required for effective pellet implosion. Although, the beam dynamics is key issue, the experimental study is difficult for the construction cost of heavy ion beam device. In this study, we introduce compact simulators by electron bunch to investigate the beam dynamics for the extreme bunch compression in the final stage of heavy ion fusion accelerator complex.

1. はじめに

重イオン慣性核融合で必要とされる大電流の重イオンビームを生成するため、エネルギードライバー最終段で急激な進行方向ビームパルス圧縮が要求される^[1]。進行方向のパルス圧縮によって、重イオンビームはエミッタンスが支配的な領域から空間電荷効果が支配的な領域へ移行する。このため、急激なパルス圧縮過程でビームのエミッタンスが大きく増加することが予想される。エミッタンスの増加は寝燃料標的へのビーム集束を妨げる要因となるため、最終集束系の設計のためには精度良くエミッタンスの増加や粒子軌道を予測する必要がある。しかし一方で、空間電荷効果が強く影響するビーム領域は、動力学が強い相関を持つ多体問題となるため、理論的に予想することが困難である。また、重イオン慣性核融合の最終段パルス圧縮のためには長距離の線形加速器が必要となるため、実機サイズの実験的な研究は実施が難しい。このため、電子ビームによる小型の模擬装置を用いた実験と数値シミュレーションによる解析の両輪で、重イオン慣性核融合のための最終段パルス圧縮のビーム動力学研究を行っている。

2. 誘導電圧発生モジュールを用いた小型シミュレータ

Figure 1 に、東京工業大学の誘導電圧発生モジュールを用いた、小型の電子ビーム実験装置^[2,3]を示す。



Figure 1: Experimental apparatus for bunch compression by induction modulator in Tokyo Institute of Technology.

5つの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、この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。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 で変化し、以下の式で与えられる。

$$V_g(t) = \frac{m_e}{2e \left(\sqrt{\frac{m_e}{2eV_0} + \frac{T-t}{L}} \right)^2} - V_0 \quad (1)$$

ここで、 m_e は電子1個の質量、 V_0 は電子銃の引き

[#] tkikuchi@vos.nagaokaut.ac.jp

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 1.92 m である。式(1)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。

ビーム進行方向のエンベロープ方程式^[4]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。

$$\frac{K_{\parallel} z_m}{\epsilon_{\parallel}^2} = \frac{3egI_{b0}}{20\pi\epsilon_0 v_z k_B T_{\parallel}} \frac{z_{m0}}{z_m} > 1 \quad (2)$$

ここで、 K_{\parallel} は進行方向パービアンス、 z_m は電子バンチ半分長さ (z_{m0} は初期値)、 ϵ_{\parallel} は進行方向エミッタンス、 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、 ϵ_0 は真空の誘電率、 $k_B T_{\parallel}$ は進行方向温度、 v_z は進行方向の重心速度である。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。

また、ビームの半径方向に対しては、エンベロープ方程式より、次のような条件となる。

$$\frac{K_{\perp} r_b^2}{\epsilon_{\perp}^2} = \frac{eI_{b0}}{8\pi\epsilon_0 v_z k_B T_{\perp}} \frac{z_{m0}}{z_m} > 1 \quad (3)$$

ここで、 K_{\perp} は進行方向パービアンス、 r_b は電子バンチの半径、 ϵ_{\perp} は進行方向エミッタンス、 $k_B T_{\perp}$ は進行方向温度である。

実験条件^[2,3]に合わせて、 $I_{b0} = 100 \mu\text{A}$ 、初期パルス時間幅 $\tau_{b0} = 100 \text{ ns}$ 、 $g=2$ 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 Figure 2 に、式(3)を計算した結果を Figure 3 に示す。実験条件において $k_B T_{\parallel} = k_B T_{\perp} = 1 \text{ eV}$ 程度とすると、式(2)、(3)の条件を満たすためには 50~60 倍のビームパルス圧縮を行う必要があると見積もられる。

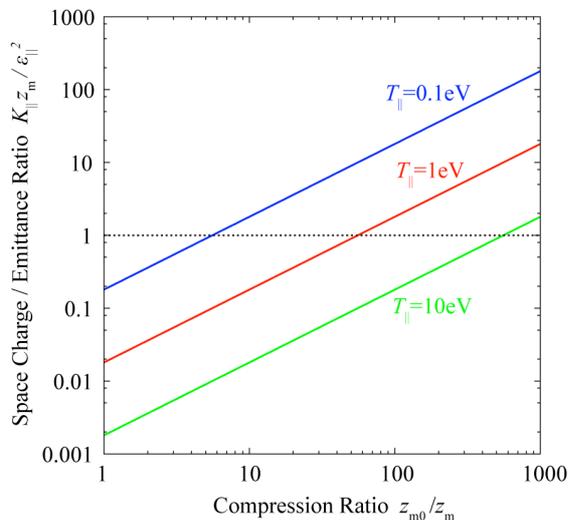


Figure 2: Space charge / emittance ratio as a function of compression ratio z_{m0} / z_m (longitudinal direction).

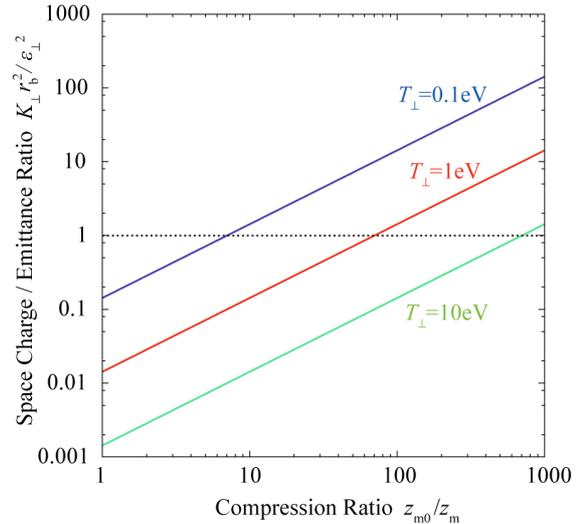


Figure 3: Space charge / emittance ratio as a function of compression ratio z_{m0} / z_m (transverse direction).

本研究で目的としている空間電荷効果が支配的なビームを模擬できる状況を作り出すためには、より初期温度が低くかつ電流値が高い電子バンチを引き出すことが重要であることがわかる。

3. 電子プラズマ実験装置を応用した小型シミュレータ

軸方向の一様磁場と軸両端の静電ポテンシャルによって、真空円筒容器内に電子群を閉じ込める装置が Penning Trap であり、さらに軸方向に電子群を排出し、電子密度分布を測定できる機能を備えたものが Malmberg-Penning Trap である。Figure 4 および Figure 5 は、金沢大学の Malmberg-Penning Trap 実験装置^[5]である。



Figure 4: Experimental apparatus by Malmberg-Penning trap for bunch compression in Kanazawa University.

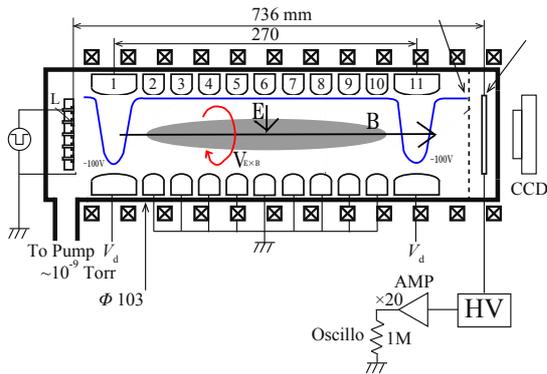


Figure 5: Schematic view of confinement in Malmberg-Penning trap device.

系の軸対称性から電磁角運動量が強い保存量となり、電子群は長時間にわたって容器内に閉じ込められる。本装置でも、磁場強度 0.1 T で 30 秒の閉じ込めを確認している。

電子群は、操作性の良好な複数の陰極から様々な初期配位で生成できる。長時間閉じ込めの特長を利用して、電子群導入直後の極端な非平衡状態から、早い時間に進展する渦ダイナミクス、クーロン衝突によるモノトニックな粒子分布への緩和過程、背景中性粒子による角運動量喪失による散逸過程等、様々な時間スケールによる物理現象を詳細に追跡することが可能である。

Malmberg-Penning Trap 中の緩和した電子群に対して、外部から閉じ込めポテンシャルを操作することにより、ビーム圧縮現象を模擬することを試みている。具体的には、径方向・軸方向の 2 種類の分布圧縮が可能である。

径方向の分布圧縮は、閉じ込めリング電極をアンテナとして方位角方向に回転する電場を重畳し、電子群に電磁角運動量を注入することにより実現する。

軸方向圧縮は、閉じ込め領域の接地されたリング電極の一部に負電圧を印加し、閉じ込め領域を軸方向に縮めることにより行う。電子群圧縮過程において、径方向密度分布、軸方向エネルギー分布、波動分散特性の時間発展を計測することが可能である。

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、理論的・数値的なアプローチ^[6]も含め多角的にビーム動力学の検討を行っている。重イオンの加速器システムを構築するのは容易ではなく、特に重イオン慣性核融合で必要となるビーム電流は kA クラスとなるため、実験施設を作るのは困難である。本研究で進めている電子バンチを利用した模擬実験装置では、質量／電荷比などのパラメータを完全に模擬することはできないが、本質である空間電荷効果が支配的になるようなビームパラメータ領域の検討が、大学の研究室レベルのスペースで実施可能であると期待できる。

参考文献

- [1] 堀岡 他：「重イオン慣性核融合のためのエネルギードライバー開発の進展」, プラズマ・核融合学会誌, 小特集, 第 89 巻第 2 号 (2013 年 2 月)
- [2] A. Nakayama et al., "Longitudinal Bunch Compression Study with Induction Voltage Modulator", Inertial Fusion Sciences and Applications 2011, accepted by EPJ Web of Conferences.
- [3] Y. Sakai, et al., "A scaled experiment to study dynamics during longitudinal compression of intense charged particle beams", in press by Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A (Available online 3 June 2013).
- [4] M. Reiser, Theory and Design of Charged Particle Beams (Wiley, 1994)
- [5] Y. Soga, et al., Phys. Plasmas 13, 052105 (2006)
- [6] T. Kikuchi et al., "Beam dynamics analysis in pulse compression using electron beam compact simulator for Heavy Ion Fusion", Inertial Fusion Sciences and Applications 2011, to be published by EPJ Web Conf.