

# 大強度低エネルギービーム輸送系のためのビーム中性化シミュレーション

## SIMULATION OF BEAM NEUTRALIZATION FOR HIGH INTENSITY LOW ENERGY BEAM TRANSPORT

佐古貴行<sup>#, A, B)</sup>, 大崎一哉<sup>A)</sup>, 毎田充宏<sup>A)</sup>, 浅野史朗<sup>A)</sup>, 平田洋介<sup>B)</sup>, 春日井敦<sup>B)</sup>

Takayuki Sako<sup>#, A, B)</sup>, Kazuya Osaki<sup>A)</sup>, Mitsuhiko Maida<sup>A)</sup>, Shiro Asano<sup>A)</sup>, Yosuke Hirata<sup>B)</sup>, Atsushi Kasugai<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Energy Systems & Solutions

<sup>B)</sup> National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) /Rokkasho

### Abstract

Commissioning of an injector for IFMIF/EVEDA (International Fusion Materials Irradiation Facility/ Engineering Verification and Engineering Activities) Linear Prototype Accelerator (LIPAc) has started [1]. LIPAc accelerates 125 mA deuteron beam for 9 MeV. The space charge effect becomes critical for the high-intensity beam especially at the low energy beam transport between an ion source and a radio frequency quadrupole linac, however, conventional beam transport code could not deal the space charge relaxation effect using gas. In this study, the space charge relaxation model was added to the beam transport code “Warp” [2], which includes beam interactions with krypton gas.

### 1. はじめに

核融合エネルギー開発として国際熱核融合実験炉 ITER における核燃焼プラズマの工学的実証が準備中である。それと並行して、安定的な電気出力を商業規模で実証する原型炉建設に向けた炉設計/炉工学開発が進められている。原型炉では真空容器内壁の平均中性子壁負荷を  $1\text{MW}/\text{m}^2$  と想定している。この大強度中性子照射に耐え得る材料の開発・検証の施設が必要である。プラズマの燃焼実証を主目的とする ITER では必要な中性子量を得られない。そこで核融合反応で生成される中性子照射を模擬するため国際核融合材料照射施設 IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility) の検討が進められている。IFMIF では重陽子-リチウム核反応を用いた加速器中性子源により  $20\text{dpa}/\text{年}$  以上の高い中性子束を実現する。

現在、量子科学技術研究開発機構において IFMIF/EVEDA (Engineering Validation and Engineering Design Activities: 国際核融合材料照射施設の工学実証・工学設計活動) の原型加速器 LIPAc (Linear Prototype Accelerator) の開発・ビーム試験が進められている。

本稿では本加速器のような大電流ビーム輸送において課題となる空間電荷効果およびその中性化のシミュレーション技法について報告する。

### 2. 大電流ビームの課題

イオン源で生成されたビームは Fig. 1 に示す低エネルギービーム輸送系 LEBT で整形された後に初段加速器である高周波四重極線形加速器 RFQ に入射・加速される。140mA 定常運転の大強度ビームを入射するため、ビーム自身の自己電場による空間電荷効果でビームが散逸して生じる周辺機器の熱損傷や放射化が大きな課題である。RFQ は製造後の調整要素が少なく、ビームの

制御は LEBT に強く依存する。そこで、大強度ビームの散逸を防ぐため、Kr ガス導入によるビーム中性化が LEBT でのビーム制御技術として導入されている。しかしながら、一般的なビーム軌道解析コードにはビーム中性化計算機能がなく、定量的検証は困難であった。

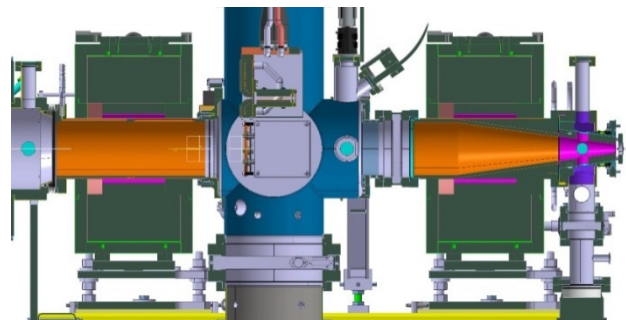


Figure 1: A schematic of the LIPAc LEBT.

### 3. “Warp”による LIPAc LEBT の再現

ビーム軌道解析コード“Warp”をベースに中性ガスとの反応を模擬したコードを開発した。米国ローレンスバークレー/ローレンス・リバモア研究所で大電流ビームを前提として開発された“Warp”は以下の特徴を持つ。

- ・オープンソースであり、自由度が高い。
- ・“Python”スクリプトをインプットとして用いることで本体ソースの変更なしにユーザー独自の処理を追加可能。
- ・重イオン核融合用に開発されており、高密度プラズマ・大電流ビーム輸送に適している。

上記の特徴から本研究においてはビーム軌道解析コードのベースとして“Warp”を採用した。

“Warp”によるビーム輸送のテストとして LIPAc LEBT (Fig. 1) を再現し、ガス反応なしの標準機能によるビーム輸送計算を実施した。Figure 2 にビーム軌道図、

<sup>#</sup> takayuki1.sako@toshiba.co.jp

Fig. 3 に RFQ 入射位置での実空間および位相区間上のビームの分布を示す。LIPAc LEBT のビーム収束要素は 2 個のソレノイドコイルで構成されており、輸送効率の解析結果は 100%と LIPAc LEBT の再現がなされている。

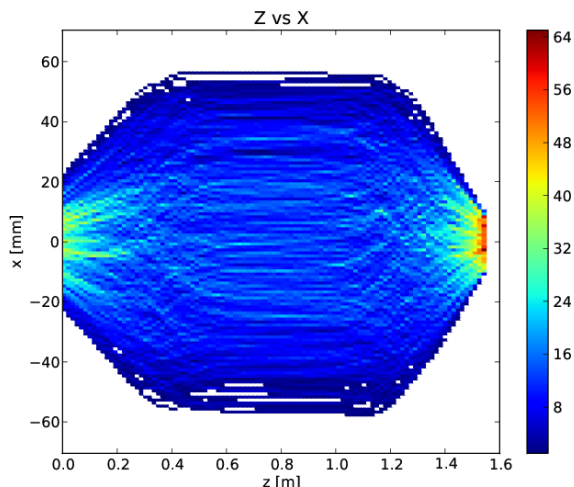


Figure 2: Beam trajectory of the LIPAc LEBT by “Warp”.

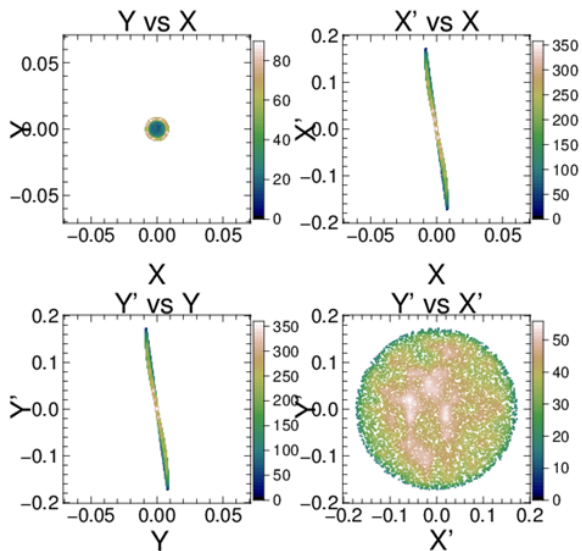


Figure 3: Beam distribution of the LIPAc LEBT by “Warp”.

#### 4. ガス注入によるビーム中性化の模擬

ガスとの反応によるビーム中性化は以下のようなプロセスで再現できると考えられる。

1. ビームとガスの反応により電子・イオンが生成

本論文に掲載の商品の名称は、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

2. ビーム・残留ガスイオン・浮遊電子の挙動解析
3. 上記を考慮してビームの空間電荷を再計算
4. ビーム輸送計算

今回、1.の再現のファースト・ステップとしてビームとガスとの反応・粒子のロストを模擬した。“Warp”では微小時間ステップ毎に粒子を移動させ、電場分布を逐次更新することでビーム軌道を再現する。解析の各処理に介入して独自のルーチンを付加することでガス反応の再現が実現できる。他コードに見られない自由度を利用して、Fig. 4 に示すように通常のフローに中性ガスとの反応プロセスを介入させた。本プロセスでは反応断面積ベースでビーム-ガス衝突を確率的に判定し、非弾性散乱を模擬することで中性化を再現した。ビームとガスの衝突確率 $P$ は粒子数密度 $n$ 、反応断面積 $\sigma$ 、超粒子ウェイト $w$ 、粒子の速度 $v$ 、1 ステップ時間 $dt$ を用いて Eq.(1)で表せる。重陽子-Kr 反応の実験データが不足しており再現が困難であるが、既知の陽子-Kr 反応データ[3]で近似して再現した。本方式によりガスとの反応でビームのロスが再現されることを確認した。

$$P = n\sigma w v dt \quad (1)$$

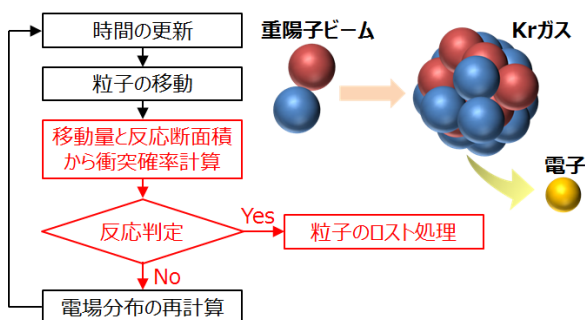


Figure 4: Flowchart of the developed code.

#### 5. まとめ

核融合原型炉の実現を目指して大強度加速器中性子源の検証が進行している。今回、実験データ評価や将来の加速器設計に不可欠となる大強度ビームの中性化計算が可能なビーム解析コードの開発を開始した。ガス反応によるビーム中性化の再現の第一段階としてビーム・ガス衝突反応の再現に成功した。本プロセスを起点として付随する諸反応を連鎖的に計算できる自由度を有している。今後、ビーム衝突後に生成される電子雲の挙動の模擬等さらに高度化を進め、原型加速器の実験データとの比較検証を行っていく。

#### 参考文献

- [1] A. Kasugai *et al.*, "国際共同プロジェクト IFMIF 原型加速器 (LIPAc) の開発", Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [2] A. Friedman *et al.*, IEEE Trans. Plasma Sci. vol. 42, no. 5, 2014, p. 1321.
- [3] W. Mero *et al.*, J.Phys.B35 L187, 2002.