

大強度低エネルギー重陽子ビームのための中性化解析

ANALYSIS OF NEUTRALIZATION FOR HIGH INTENSITY LOW ENERGY DEUTERON BEAM

佐古貴行^{#, A, B}, 大崎一哉^A, 毎田充宏^A, 下崎義人^B, 平田洋介^B, 春日井敦^B

Takayuki Sako^{#, A, B}, Kazuya Osaki^A, Mitsuhiro Maida^A, Yoshito Shimosaki^B, Yosuke Hirata^B, Atsushi Kasugai^B

^A) Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation

^B) National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST) /Rokkasho

Abstract

Commissioning of the LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) is ongoing at the QST Rokkasho Fusion Institute [1]. It is planned that the injector generates 140 mA CW Deuteron beam of 100keV. In general, lower energy and higher intensity beam causes a larger emittance growth because of the increasing space charge effect, which results in the lower beam transportation. In order to compensate the space charge effects, Kr gas is planned to be injected to the Low Energy Beam Transport at the LIPAc. But, beam transport codes generally could not deal with the space charge relaxation effect by the gas. In this study, the function to include the space charge neutralization by the reaction of the neutral gas has been developed based on the beam transport code “Warp” [2].

1. はじめに

量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所において 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 IFMIF Prototype Accelerator) のビーム試験が進められている。LIPAc は核燃焼プラズマの工学的実証を担う国際熱核融合実験炉 ITER では不可能な大強度中性子照射場を形成し、原型炉建設判断に必要な不可欠な材料開発・検証のための加速器中性子源の試験機である。その目的のため、イオン源から初段の加速器においては 100 keV - 140mA 定常運転の大強度重陽子ビームを輸送する予定である。

一般に低エネルギーかつ大電流の領域では空間電荷効果が著しく、大電流のビーム輸送が困難となる。そこでビームラインに Kr ガスなどを導入することで空間電荷効果を緩和し、高効率でビーム輸送を行うことが計画されている。

本稿ではこのような低エネルギー大電流領域における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緩和のために導入されるガス反応によるビーム中性化の解析法について報告する。

2. 大電流ビームの中性化と解析手法

LIPAc において、イオン源で生成・加速された重陽子ビームは低エネルギービーム輸送系 (LEBT) で整形され、初段加速器である高周波四重極線形加速器 (RFQ) に入射される。140mA 定常運転の大強度かつイオン源直後の 100keV の低エネルギーのビームを輸送するため、空間電荷効果の影響が大きい。強度ビームの散逸を防ぐため、Kr ガス導入によるビームの中性化により空間電荷効果の緩和が計画されている。

一方、“GPT”[3]などの一般的なビーム軌道解析コー

ドにはビームの中性化の直接の計算機能がなく、緩和効果の評価手法を構築する必要があった。今回、自由度の高い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するためのコードの開発を開始した。これまでの開発で中性化反応の模擬のため反応断面積ベースのビーム・ガス反応モデルを組み込み、粒子の損失判定について検証した[4]。

今回、本モデルをさらに発展させ、重陽子ビームと残留ガスイオンおよび電子の同時解析手法を構築した。

Figure 1 に解析のステップを示す。時間の更新に伴う粒子の移動後、ビーム・ガス衝突を反応断面積と粒子の移動量から確率的に判定し、非弾性散乱を模擬した。模擬した反応は Eq. 1 に示す重陽子ビームとビームライン中の中性ガスとして Kr ガスが反応し、Kr¹⁺イオンと電子が生成されるプロセスである。

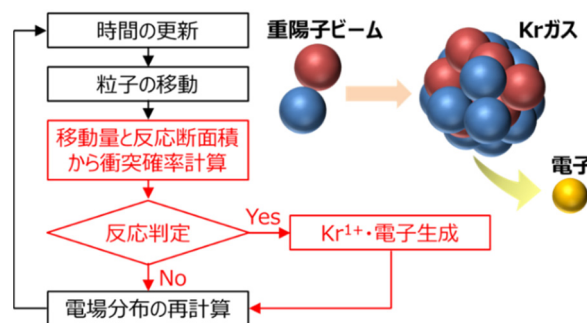


Figure 1: Flowchart of the gas reaction.

反応断面積は既知の陽子-Kr 反応データ[5]で近似して再現した。基礎的な解析手法の確立・検証のため、生成イオンは Kr¹⁺イオンに限定し、2 価以上のイオン生成や、電子の再結合等の過程を考慮していない。本粒子生成プロセスにより動的に解析対象の粒子数を変化させ、ビームに加えて、Kr¹⁺イオンと電子の分布を考慮した電場分布を逐次更新し、粒子をトラッキングした。

takayuki1.sako@toshiba.co.jp

3. 解析結果

Figure 2 (a)に解析結果として LIPAc LEBT における 141mA 100keV 重陽子ビームのトラッキング結果を示す。図中左端のイオン源出口から図中右端の RFQ 入口までのビーム輸送系を再現している。ビームラインは主な光学要素として Fig. 2 (a)赤枠で示す二つのソレノイドコイルで構成されており、重陽子ビームを RFQ に入射可能なサイズへと収束する。さらに、 Kr^{1+} イオン・電子の分布を Fig. 2 (b)(c)に示す。ビームの進展に伴いこれら二次粒子が生成された様子を表している。

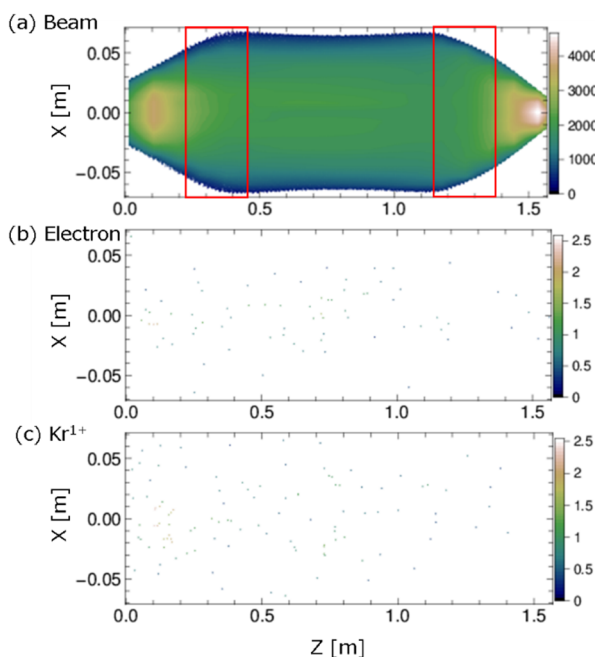


Figure 2: Beam trajectory of the LIPAc LEBT by “Warp”.

解析コードは質量・エネルギーの異なるビーム・ガス起因のイオン・電子をそれぞれ異なる計算ステップで同時解析できる構造である。Figure 3 にビームを 10 タイムステップ、電子を 1 タイムステップ毎に更新した場合の z 軸上の位置を示す。各粒子が異なるタイムステップで位置を更新している様子を表している。さらに電子の発生位置がビームの位置に連動していることが示される。

ガス反応の生成電子個数を調査した。Figure 4 にビームライン中の生成電子個数のガス密度に対する依存性を示す。ここで予測値は反応断面積とガス密度から予測した結果である。解析値は“Warp”のビームトラッキングの結果によるビームライン中の電子個数の解析結果であり、予測値より低い傾向を示した。予測値は単純な電子の生成個数であるが、解析値では生成された電子が壁面との衝突で損失する過程が含まれており、低い傾向を示すと考えられる。

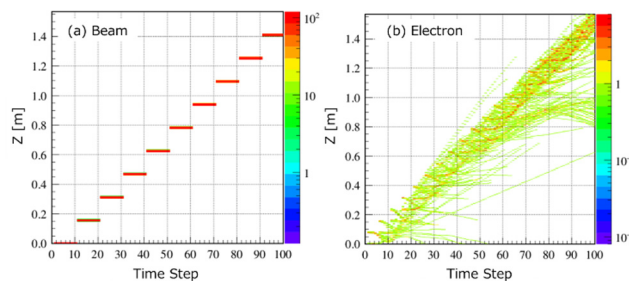


Figure 3: Correlation of dependency of gas density and number of electrons.

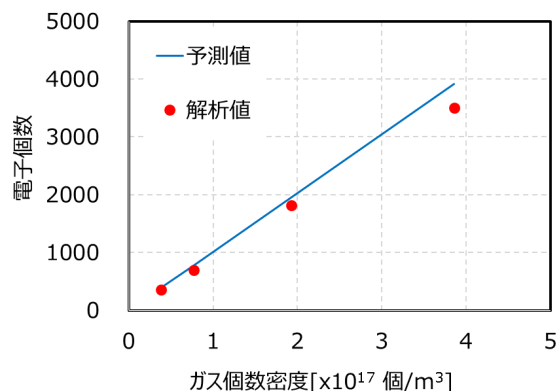


Figure 4: Dependency of gas density and number of electrons.

4. まとめ

低エネルギー大強度ビーム輸送の解析上の課題であるビームの中性化解析が可能なコードの開発を開始した。ガス反応によるビーム中性化を反応断面積ベースのモデルで構築し、粒子毎の異なるタイムステップでの同時解析時の挙動を LIPAc をモデルに確認した。さらに生成された電子個数についてガス密度への依存性を確認した。今後、真空容器内壁での二次的な粒子生成等の模擬等さらなる高度化を進め、原型加速器の実験データとの比較検証、また、将来の大強度加速器へ活用していく予定である。

参考文献

- [1] K. Kondo *et al.*, "IFMIF/EVEDA 原型加速器の RFQ ビームコミッションング", Proceedings of the 15th 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] M.J. de Loos, *et al.*, Proc. 5th Eur. Part. Acc. Conf. (1996).
- [4] T. Sako *et al.*, "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", Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [5] W. Mero *et al.*, J.Phys.B35 L187, 2002.