

核融合工学部会セッション

核融合中性子源用加速器開発 (LIPAc) の現状

Current Status of Accelerator Development for Fusion Neutron Source (LIPAc)

(3) 入射器

(3) Injector

*赤木 智哉¹, LIPAc ユニット¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN

原型加速器 (LIPAc, Linear IFMIF Prototype Accelerator) [1]の入射器は ECR イオン源と低エネルギービーム輸送系 (LEBT) で構成される。CEA-Saclay が設計、製作及び性能確認試験を行った後、QST 六ヶ所研究所に搬入され、2017 年 8 月までに入射器単体での試験 (Phase-A 試験) を完了した。入射器に求められる仕様は、RFQ で 125 mA、CW の重陽子ビーム加速を達成するため、100 keV、140 mA の重陽子ビームを安定に供給することである。それに加えて低エミッタンスビームであることも必要で、これらの要件を同時に満たす運転条件を確立する必要がある。また、ビーム加速試験の初期段階におけるビーム損失による装置の放射化を防ぐため、重陽子ビーム試験を開始する前に予め LIPAc の各機器を調整することができるよう、50 keV、70 mA の陽子ビームを供給することも求められる。2019 年 7 月に完了した Phase-B 試験 (RFQ 実証試験) において、RFQ による 125 mA の重陽子パルスビームの加速 (1 ms、1 Hz) に成功し、低デューティでは、入射器が目標のビーム電流加速を達成できるビーム条件で、重陽子ビームを RFQ に供給できることを実証した[2]。

イオン源のビーム引き出しシステムは 5 枚の電極 (プラズマ電極、中間電極、第一接地電極、リペラー電極、第二接地電極) で構成される。プラズマ電極は、陽子ビーム加速やビーム電流の小さな試験を行う場合に、引き出し口径の小さなものに交換して運転することが可能である。中間電極は印加する高電圧を調整することでビームの発散角を最適化するために使用する。プラズマ電極-中間電極間ギャップはスペーサーを用いて数 mm 程度調整できる。LEBT では 2 つのソレノイド電磁石でビームを収束させつつ、RFQ の入射条件に合うようにビーム輸送する。各ソレノイドには X-Y ステアリング電磁石が組み込まれている。イオン源から引き出されたビームの特性評価については、主に 2 つのソレノイド電磁石の間に設置されたアリソンスキャナー型エミッタンスメータを使用する。また、イオン種の成分比測定のためのドップラーシフト分光計やビームプロファイル観察用のカメラ、空間電荷中和率測定用 4 グリッド分析計も使用できる。

現在は Phase-B+試験 (125 mA 長パルス重陽子ビーム加速試験) の準備のため、入射器の大電流、CW 運転の実証試験を進めている。大電流と低エミッタンス (目標 $0.25 \pi \text{ mm-mrad}$) という要件を満たし、放電頻度が低い安定動作可能な領域を理論的に予測することは一般に困難であるため、引き出し口径の異なる複数のプラズマ電極を予め製作しておき、口径の小さな電極から順次大きな電極に変えながら、総ビーム電流とエミッタンスの関係について実験的に最適な条件を探索してきた。これまでに引き出し口径 $\phi 9$ 、 $\phi 10$ 、 $\phi 11 \text{ mm}$ の電極を用いた入射器長パルス試験を完了しており、 $\phi 11 \text{ mm}$ の電極を使用した試験で総電流 150 mA、重陽子割合 91% (137 mA)、低エミッタンスビームの生成に成功した。また、このビーム条件で約 11 時間の CW 運転を達成した。これにより LIPAc の入射器として CW 運転においても要求性能をほぼ満足することを実証した。さらに、これまで実験的に得られた結果の系統的な分析と経験から、口径 $\phi 12 \text{ mm}$ の電極を用いれば更に低エミッタンスの大電流重陽子ビームを安定的に供給できる見通しを得ることができたため、この電極を用いた試験についても現在進めているところである。既に総電流 160 mA で CW 運転を達成したが、ビーム安定性の改善が必要で、今後も RFQ 長パルス加速試験に向けて最適化を継続する予定である。

[1] H. Dzitko et al., Fusion Eng. Des. 168 (2021) 112621.

[2] T. Akagi et al., Rev. Sci. Instrum. 91 (2020) 023321.

*Tomoya Akagi¹, on behalf of LIPAc Unit¹⁻⁶¹QST, ²IFMIF/EVEDA Project Team, ³F4E, ⁴CIEMAT, ⁵CEA, ⁶INFN