2022年秋の大会

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)

（4）RFQ および RF 源

(4) RFQ and RF Source

*近藤 恵太郎[1]，LIPAc ユニット[1-6]

[1]QST，[2]IFMIF/EVEDA Project Team，[3]F4E，[4]CIEMAT，[5]CEA，[6]INFN

LIPAc では入射器で生成し 100 keV まで加速した重陽子ビームを、高周波四重極加速器（RFQ）により 5 MeV まで加速する。本 RFQ は、動作周波数 175MHz の 4 ベーン型で、イタリア INFN レニャーロ研が設計・製作したもので、全長 9.8 m と世界最長である。大電流 125 mA の重陽子定常（CW）ビームを放射化を抑えながら加速するために、低エネルギー部での加速とバンチングを丁寧に行い、高エネルギー部でのビーム損失を極力抑えるように設計され、極めて高い工作精度で製作されている[1, 2]。この RFQ は 12 個のモジュールからなる高周波空洞であるが、壁損失は重陽子加速時の定格ベーン間最大電圧 132 kV で 560 kW、ビーム負荷は定格電流 125 mA で 625 kW にも達する。合計 1.2 MW 以上の大電力の高周波は、計 8 台の高周波カプラーと同軸導波管によって入射する、世界唯一の設計であり、位相と振幅の厳密な同期制御が必要となる。このため、フルデジタル制御の LLRF（Low Level RF）を用い、マスターースレーブ方式の同期とフィードバック／フィードフォワード制御を行っている。高周波電力を供給する RF 源システムは、スペイン CIEMAT 研により調達された。四極管で 2 段増幅を行い、各カプラー1 系統あたり最大 200 kW、CW を出力する[3]。RFQ は 2016 年から六ヶ所研において据付調整が開始され、RFQ 空洞の RF コンディショニングを 2017 年 10 月から開始した。これまで RF 源の不安定性や 8 系統同期入射に起因する様々な問題に直面し、四極管やダミーロードの破損、RF カプラーの過熱による真空リーク・同真空窓の破損などのトラブルを経験した。これらの問題を解決し、また RF 源の様々な改良を実施した結果、安定性が大きく向上し、現在では効率的に RF コンディショニングを進めることが可能となった。2019 年夏までには重陽子ビーム加速に必要な定格電圧 132 kV でパルス長 5 ms での RF 入射が可能となった。また、2021 年末には、105 kV で CW での RF 入射を達成した。現在も定格電圧における CW 入射に向けた試験を継続中である。RFQ によるビーム加速試験は、RF コンディショニングの進展と共に、段階的に実施してきた。2018 年 6 月に陽子ビーム、2019 年 3 月に重陽子ビームの加速に初めて成功し、2019 年 7 月にはピーク電流 125 mA、パルス幅 1 ms の重陽子ビームの加速に世界で初めて成功し、プロジェクトの初期目標の 1 つを達成した [4]。その後、さらにパルス幅を伸長するため、CW ビームを受けることができる大電力ビームダンプと RFQ を接続するビーム輸送系が整備された。2021 年 7 月に初めて加速した重陽子ビームを大電力ビームダンプに入射することに成功し、同年末までにパルスビームを用いた特性評価試験を完了した。今後、RF コンディショニングの進捗を見ながら、RFQ による長パルスビームの加速試験を実施する計画となっている。

[1] A. Pisent et al., “IFMIF-EVEDA RFQ Design”, Proc. of EPAC08, Genoa, Italy (2008).

[2] E. Fagotti et al., “Installation and Low Power Test of IFMIF-EVEDA RFQ at Rokkasho Site”, Proceedings of IPAC2017, Copenhagen, Denmark, THPIK032 (2017).

[3] M. Weber et al., “Functional Overview of the RF Power System for the LIPAc RFQ”, IEEE Transactions on Plasma Science, 49, 9, 2987 – 2996 (2021).

[4] K. Kondo et al., “Validation of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) in Rokkasho”, Fusion Engineering and Design, 153, 111503 (2020).

*Keitaro Kondo[1], on behalf of LIPAc Unit[1-6]

[1]QST, [2]IFMIF/EVEDA Project Team, [3]F4E, [4]CIEMAT, [5]CEA, [6]INFN