放射線利用紹介

量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所 IFMIF/EVEDA 原型加速器の開発施設の紹介

国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所 春日井 敦*

1 IFMIF/EVEDA プロジェクトについて

核融合エネルギーの研究開発は,日欧米露中韓印の7極が参加する国際熱核融合実験炉(ITER)計画を中心に進められています.ITERでは核融合エネルギーの科学的・技術的実現性の実証を目指すものの,実際に発電を行う核融合原型炉を実現するためには,いくつかのハードルがあります.その1つが重水素(D)と三重水素(T)による核融合反応で発生する14 MeVという高いエネルギーを持った中性子にさらされる構造物の材料開発です.

DTの核融合反応で発生する中性子環境を模擬す るため、重陽子–リチウム(d–Li)核反応による加速 器駆動型中性子源である国際核融合材料照射施設 (IFMIF)(International Fusion Materials Irradiation Facility)の検討がこれまで国際協力の下進められてきま した. IFMIF は 125 mA という大電流の重陽子ビーム ライン 2 つを 40 MeV まで加速し、連続的に液体リチ ウムに入射することで 20 dpa/年以上の高い中性子束 を発生させ、核融合材料の中性子照射を目指していま す(Fig. 1)¹⁾.

ITER 計画を補完する活動として日欧の国際共同事 業である核融合分野における幅広いアプローチ(BA) 活動の一つとして, IFMIFの工学実証・工学設計活動 EVEDA (Engineering Validation and Engineering Design Activities) が 2007 年から開始されました.量子科学 技術研究開発機構(QST)はこのプロジェクトの日本 の実施機関として文部科学省から指定を受け,青森県

放射線化学 第106号(2018)

六ヶ所村に設置した六ヶ所核融合研究所(国際核融合 エネルギー研究センター)において欧州との共同事業 として IFMIF 原型加速器の建設・調整・コミッショニ ングが実施されています.

2 六ヶ所核融合研究所について

2007 年から始まった国際プロジェクトにともない, 当初日本原子力研究開発機構(原子力機構)が実施機 関となり,国際核融合エネルギー研究センターを青森 県六ヶ所村に設立しました.原野を切り開いて整備さ れた約 130,000 m²の敷地に,IFMIF 原型加速器の施 設(IFMIF/EVEDA開発試験棟)の他,燃焼プラズマや 次世代核融合炉設計に必要なスパコンを収めるための 核融合計算機シミュレーションセンター,ITER 実験 施設と高速ネットワークで結び ITER の実験やデータ 解析に遠隔で参加できる ITER 遠隔実験センター,ト リチウムを扱うことのできる設備や核融合材料,発電 ブランケットなど原型炉技術に関する R&D を行う施 設等による複合施設として 2010 年に整備されました (Fig. 2).

その後 2016 年 4 月に組織改編により,核融合エネ ルギー研究開発部門は原子力機構から分離され,放射 線医学総合研究所と統合し,量子科学技術研究開発機 構となって再出発しました.引き続き六ヶ所核融合研 究所として国際プロジェクトの推進を継続し,核融合 エネルギーの実現を目指した国際的な研究開発拠点と して,多くの研究者を受け入れています.

3 IFMIF 原型加速器の概要

この IFMIF 原型加速器は、LIPAc (Linear IFMIF Prototype Accelerator) と呼ばれ、重水素イオン源(入射 器) –高周波四重極加速器 (RFQ) –中エネルギービー ム輸送系 (MEBT) –超伝導線形加速器 (SRF ライナッ ク) –ビーム診断系 (D-Plate) –高エネルギービーム輸

Introduction to Facility of IFMIF/EVEDA Prototype Accelerator at Rokkasho Fusion Institute in QST

Atsushi KASUGAI^{*} (Rokkasho Fusion Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST)),

^{〒039-3212} 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駮字表舘 2-166 TEL: 0175-71-6675, E-mail: kasugai.atsushi@qst.go.jp



Figure 1. A schematic of the IFMIF facility.



Figure 2. Rokkasho Fusion Institution of QST.

送系(HEBT) -ビームダンプ(BD)から構成された 全長約 36 m の大電流重陽子線形加速器です(Fig. 3) ²⁾. IFMIF の加速器セクションの設計が,ビームライ ン 2 本でそれぞれ 4 段の超伝導加速器を用いて合計 250 mA の重陽子ビームを 40 MeV まで連続加速する 仕様(Fig. 1)であるのに対し,LIPAcは1本のビームラ イン,初段の超伝導線形加速器1台で9 MeV-125 mA の重陽子ビームを連続運転する仕様になっています. 大電流の連続ビームを加速するためには,空間電荷に よるビーム発散力が大きい低エネルギー部の実証が不 可欠であり,そのため,RFQ までの低エネルギー部に ついては,IFMIF の加速器セクションと全く同じ構成 となっています.

LIPAcの大きな特徴は,加速器を構成する各機器の 製作を欧州および日本の研究機関がそれぞれ担当し, 六ヶ所核融合研究所において加速器として1つに組 み上げるという調達取決めに基づいた国際協力である 点です.日本はホスト国であることから主に建家や受 電設備,組み立てなどのインフラ整備を担当し,加速 器本体では RFQ の一部である RF 結合部の調達,全体の制御系を担当しています.これまでに欧州の研 究機関において,加速器機器の R&D および製作が行 われ,現在六ヶ所核融合研究所において欧州で製作 した機器を組立て,調整し,ビーム試験を段階的に実 施しています.第一段階は入射器(イオン源および低 エネルギービーム輸送系(LEBT))のみの100 keVの 重陽子ビームを出力することであり,フランス原子 力・代替エネルギー庁サクレー研究所(CEA Saclay) が開発した入射器を六ヶ所サイトに2014年に移設し, 100 keV-140 mAの重陽子ビームを 0.15 πmm-mrad の 低エミッタンスで発生させ,その目標性能実証を完了 しました

第二段階としては、5 MeV までの RFQ によるビー ム加速です. LIPAc の RFQ は 9.8 m と世界で最も長 く、2016 年にイタリア国立核物理学研究所(INFN) レニャーロ研究所から 3 分割された状態で搬入され、 レーザートラッカーを用いた空洞の精密な組み上げ、 空洞共振器のチューナーの調整、RF 結合器の取り付 け、真空排気系の取り付け、ベーキング、ケーブル配 線、冷却水配管を完了し、2017 年には入射器と接続を 完了しました。

また MEBT, D-Plate は 2016 年にスペインエネル ギー環境技術センター (CIEMAT) から搬入され, 整 備が進められ, 四重極コイルの調整, バンチャーのコ ンディショニング, ビーム診断機器の調整を 2017 年-2018 年にかけて完了しました. ビームを最終的に受 け止めるための小型のビームダンプが INFN より搬入 され, 上流のイオン源から最下流のビームダンプまで ビームラインの真空がゲートバルブ制御システムを経 て接続されました.

一方,高周波システムはスペイン CIEMAT の担当であり、LLRF システムを含め、RFQ 用の 175 MHz の



Figure 3. Configuration of LIPAc. Published with permission of IFMIF/EVEDA.



Figure 4. Configuration of LIPAc for 5 MeV acceleration and the equipped sub-systems.

200 kW-CW の大電力増幅管(4 極管)8 系統,SRF 用 の 100 kW-CW 大電力増幅管(4 極管)8 系統,MEBT バンチャー用の16 kW 固体増幅器2系統が完了しま した.同時にシステムの冷却水系,高周波電力伝送系 も接続し,加速器の試験準備が完了しました.EPICS ネットワークとタイミングシステムは中央制御担当の QST によって提供されています.個々の系統の高周 波出力は,RF 結合器を介して RFQ 空洞に注入されま す.第二段階の試験に必要なサブシステムの整備状況 を Fig. 4 に示します.

最終段階は、SRF ライナック、HEBT、大電力ビーム ダンプの接続と、最終目標である9 MeV-125 mA-CW の重陽子ビームの発生です。SRF ライナックのうち、 ニオブ製の半波長空洞8 式やクライオスタットなどは CEA サクレー研究所の担当、ソレノイドコイルや電流 リードはスペイン CIEMAT の担当で、これらの機器 は 2018 年に六ヶ所核融合研究所に部品として搬入さ れ、六ヶ所核融合研究所の建屋内に設置するクリーン



Figure 5. Configuration of LIPAc in first H⁺ beam acceleration.

ルーム内で組み立てが行われたのち,加速器のビーム ラインに組み込みます.HEBT,大電力ビームダンプ はスペイン CIEMAT の担当で,現在製作が進められ, 2018 年の秋には加速器室に搬入される予定です.な お,SRF ライナックの冷却に必要な液体へリウムの液 化供給装置については CEA サクレー研究所の調達の 下 2017 年に完成し,青森県の認可を受けました.

4 六ヶ所サイトにおける試験状況と今後の予定

入射器は 2013 年より欧州から六ヶ所サイトに輸送, 据付が進められ, 2014 年に陽子によるビーム試験を開 始しました. 陽子ビームでの加速器のコミッショニン グを進めた後, 2015 年に放射線障害防止法に基づく 放射線管理区域を設定し初めて重陽子ビーム生成に成 功しました. また重陽子ビーム生成による中性子発生 を確認し, これまでにエミッタンス測定中に(エミッ タンスメータの表面はタングステン)4.7×10⁹ n/s の 中性子発生を確認しています.その後,LEBT の2つ のソレノイドコイルの電流値を最適化し,加速管の 電極を最適化するなどにより,エミッタンスの最適条 件を見出し,原型加速器のマイルストーンである重陽 子ビームで,100 keV,140 mA, CW,エミッタンス 0.3 πmm-mrad 以下を達成しました³⁾.また,RFQ へ の入射を模擬した位置でのビームエミッタンス等の測 定を実施し、入射器として要求されているパラメータの最適化を実施しました.

第2段階の最初のステップは、RFQ 空洞の RF コン ディショニングです. コンディショニングでは, 低い デューティサイクルで非常に低い電力から高周波電力 を徐々に空洞に入れ、最終的には重陽子加速を可能に するために必要な設計電界レベルまで段階的に高周波 電力を増加させることを試みました. RFQ 空洞への 最初の高周波電力の入射は、2017年7月に成功しまし た.8系統の独立した高周波入射を単一のRFO 空洞に 同時に同期させた状態で入射する技術的課題がありま した.この技術は完全にデジタル化された LLRF(低 電力高周波制御ユニット)によって実現されています. 8系統の同期入射の後,本格的に 24 時間の RF コン ディショニングが開始されました. RF コンディショ ニングのマイルストーンの1つは、重陽子ビームを加 速するのに必要なベーン間電圧 132 kV の目標値を超 えることであり、マルチパクタリング放電などの状況 を乗り越え, RFO 空洞の最大ベーン電圧は 143 kV に 達しました. RFQ ビームコミッショニングは, 重水素 ビームによる不必要な放射化を回避するため、まずは 水素ビームを用いて調整されました。この場合のRFQ に入射する水素ビームエネルギーは, 重水素ビームと 比べ半分の 50 keV となります.



Figure 6. Beam pulse signal measured by AC-CTs and LPBD when $I_{ext} = 10$ mA. Published with permission of IFMIF/EVEDA.

LIPAc のビーム加速試験の構成(写真と平面図)を Figure 5 に示します. Figure 6 に示すように、初めて の水素ビーム加速は、ビーム電流10mA程度を目標に ビーム調整され、300マイクロ秒のパルス幅で加速試 験が行われました。2018年6月に初めての水素ビーム のRFQ への入射を実施し、ビームラインの各部に取り 付けた電流検出器の測定結果から RFO の通過電流が ほぼ 100% であることを確認し、また加速された水素 ビームがビームダンプに衝突した時に発生するガンマ 線のエネルギー計測,および計測装置 (D-Plate) に取り 付けた BPM (Beam Position Monitor) を用いたビーム の飛行時間測定の結果から, RFQ による加速後の水素 ビームのエネルギーが約2.5 MeV であることを確認し ました4). 今後は, 計測装置の調整を実施し, 水素ビー ムの定格である 65 mA までの加速実証とさまざまな ビーム計測を行うとともに、さらに 5 MeV-125 mA を 目指した RFQ の RF コンディショニングと重水素ビー ムの加速実証をデューティ 0.1% で行う予定です.

RFQ のコミッショニングと並行して,HEBT,大型 ビームダンプが六ヶ所サイトに搬入され,最終的な設 置位置にレーザートラッカーを用いて精密に配置され ました.また,六ヶ所サイトに建設したクリーンルー ムの中で超伝導加速器を組み上げた後,全ての加速 器機器をビームラインに接続し,最終段階であるプロ ジェクトのミッションの,重陽子を用いた統合ビーム 試験9 MeV-125 mA を目指した試験を 2020 年 3 月末 までに実施します.加えて現在,日欧でその後の共同 研究の進め方を議論しており,2020年以降も2025年 3月までは引き続き,加速器の運転条件の最適化や限 界性能を見極める信頼性試験を行うように日欧で協議 しています。

量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所で は、IFMIF/EVEDA プロジェクトで得られた原型加速 器とターゲットである液体リチウムループの知見を基 に、核融合材料開発だけでなく中性子を利用した RI 製 造/製薬や産業応用を可能とする我が国独自の核融合 中性子源 A-FNS 計画の検討⁵⁾を進めており、今後、国 内の幅広い分野の専門家と連携をとりながら、A-FNS の実現を目指したいと考えています.

〈参考文献〉

- J. Knaster, A. Moeslang, T. Muroga, Nat. Phys., 12 (2016) 424.
- A. Kasugai, T. Akagi, T. Ebisawa, Y. Hirata, R. Ichimiya, K. Kondo, S. Maebara, K. Sakamoto, T. Shinya, M. Sugimoto, J. Kaster, P. Cara, H. Dzitko, R. Hidinger, G. Phillips, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2017) 85.
- Y. Okumura, R. Gobin, J. Knaster, R. Heidinger, J.-M. Ayala, B. Bolzon, P. Cara, N. Chauvin, S. Chel, D. Gex, F. Harrault, R. Ichimiya, A. Ihara, Y. Ikeda, A. Kasugai, T. Kikuchi, T. Kitano, M. Komata, K. Kondo, S. Maebara, A. Marqueta, S. O' Hira, M. Perez, G. Phillips, G. Pruneri, K. Sakamoto, F. Scantamburlo, F. Senée, K. Shinto, M. Sugimoto, H. Takahashi, H. Usami, M. Valette, Rev. Sci. Instrum., 87 (2016) 02A739.
- K. Kondo, T. Akagi, R. Ichimiya, T. Ebisawa, A. Kasugai, K. Sakamoto, T. Shinya, M. Sugimoto, Y. Hirata, S. Maebara, E. Fagotti, G. Pruneri, F. Scantamburlo, D. Jimenez, I. Podadera, M. Weber, B. Bolzon, P. Cara, J. Knaster, H. Dzitko, D. Gex, R. Heidinger, A. Jokinen, A. Marqueta, I. Moya, G. Phillips, Proceedings of the 14th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2018) 7.
- 5) A. Kasugai, K. Kasuya, H. Kobayashi, H. Kondo, S. Kwon, M. Nakamura, K. Ochiai, M. Ohta, M. Oy-aidzu, C. Park, S. Sato, M. Teduka, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, (2018) 110.