

話題

IFMIF 原型加速器の現状

坂本 慶司*・杉本 昌義*・近藤 恵太郎*・春日井 敦*

Present Status of IFMIF Prototype Accelerator

Keishi SAKAMOTO*, Masayoshi SUGIMOTO*, Keitaro KONDO* and Atsushi KASUGAI*

Abstract

The development of linear IFMIF prototype accelerator is underway with international collaboration between EU and Japan. The RFQ was installed in 2016 and first hydrogen beam was accelerated in July 2018. The beam current was increased up to the nominal value (~60 mA), and the first D-beam acceleration was done in March 2019. At present, the D beam experiment is continued aiming 125 mA at 5 MeV using a beam dump for short pulse mode (1 ms pulse, 0.1% duty cycle). In parallel, the assembling of the SRF linac which will be installed at the downstream of the RFQ linac is underway. The CW beam dump was already installed. The activities for CW operation will be started in 2020.

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(以下 QST 六ヶ所研)では、核融合研究の一環として、IFMIF 原型加速器 (Linear IFMIF Prototype Accelerator, 以下 LIPAc) と呼ばれる 9 MeV, 125 mA の重陽子の連続加速の技術的実証を目的とした大電流加速器の研究開発を日欧協力で行っている。その背景は、次のとおりである。核融合炉実現における大きな技術的課題は、トリチウムと重陽子との核融合反応で生成する高速中性子による核融合炉構造材料の結晶格子中の構成原子のはじき出しや核変換、組織変化による特性変化などである。加えて、核融合炉では、主に $^{56}\text{Fe}(n, \alpha)^{53}\text{Cr}$ 反応を介して約 10 appm/dpa の生成比でヘリウムが材料中に生成される(核分裂炉において、この比は 0.3 appm/dpa で反応の閾値は 3.7 MeV である。ここで、dpa: displacements per atom は物質中の原子あたりの平均はじき出し回数, appm: atom parts per million)。ヘリウムの蓄積は、一定濃度を越えると機械的特性に影響が現れる可能性が懸念されている。原型炉を目指した核融合炉材料の研究開発、規格化を行うためには、核融合炉と同等のエネルギー、フルエンスの中性子照射が可能な試験施設が必要となる。そのため、核融合用中性子源開発の技術実証を目標として、2007 年より開始された日欧の共同事業である“幅広いアプローチ活動 (BA 活動)”の一環として、IFMIF/EVEDA (IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility 国際核融合材料照射施設, EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activities 工学実証・工学設計活動) 事業が開始された^{1,2)}。図1に IFMIF の概念図を示す。重陽子加速器 2 基を有し、それぞれの加速器は、100 keV まで加速する静電加速器、100 keV から 5 MeV まで加速する高周波四重極加速器 (RFQ)、さらに 5 MeV から 40 MeV まで加速する 4 基の超伝導線形加速器 (SRF) から構成され、加速された 40 MeV の重陽子ビームは液体リチウムターゲットに照射され、ここで中性子が発生する。この想定されるスペクトルを図2に示す²⁾。核融合原型炉 (DEMO) で想定されるものと同等の中性子スペクトルが得られることがわかる。この下流に試験材料を置き、照射実験を行う。目標とする重陽子ビーム電流は各々 125 mA, 2 基合計で 250 mA であり、照射されるビーム電力は合計 10 MW と極めて大電力の

エネルギー、フルエンスの中性子照射が可能な試験施設が必要となる。そのため、核融合用中性子源開発の技術実証を目標として、2007 年より開始された日欧の共同事業である“幅広いアプローチ活動 (BA 活動)”の一環として、IFMIF/EVEDA (IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility 国際核融合材料照射施設, EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activities 工学実証・工学設計活動) 事業が開始された^{1,2)}。図1に IFMIF の概念図を示す。重陽子加速器 2 基を有し、それぞれの加速器は、100 keV まで加速する静電加速器、100 keV から 5 MeV まで加速する高周波四重極加速器 (RFQ)、さらに 5 MeV から 40 MeV まで加速する 4 基の超伝導線形加速器 (SRF) から構成され、加速された 40 MeV の重陽子ビームは液体リチウムターゲットに照射され、ここで中性子が発生する。この想定されるスペクトルを図2に示す²⁾。核融合原型炉 (DEMO) で想定されるものと同等の中性子スペクトルが得られることがわかる。この下流に試験材料を置き、照射実験を行う。目標とする重陽子ビーム電流は各々 125 mA, 2 基合計で 250 mA であり、照射されるビーム電力は合計 10 MW と極めて大電力の

* 量子科学技術研究開発機構六ヶ所核融合研究所 National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology Rokkasho Fusion Institute

(Keishi Sakamoto E-mail: sakamoto.keishi@qst.go.jp)

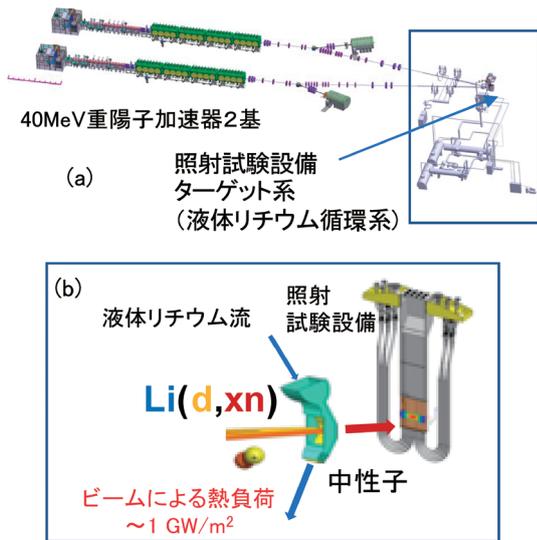


図1 IFMIF の概念図。
 (a) 40 MeV 重陽子加速器2基と液体リチウム循環系で構成されるターゲット系と試験材料の中性子照射系で構成される。
 (b) ターゲット系の液体金属流に40 MeVの重陽子ビーム(125 mA×2ビームライン)が衝突し、中性子フラックス $\sim 10^{17}$ n/sが発生し、後方に置かれた試験用材料に照射される(中性子照射系)。

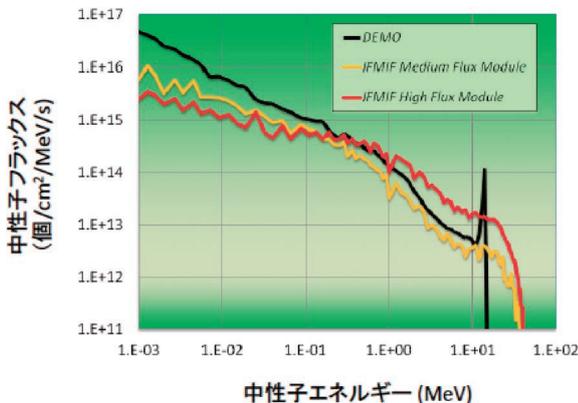


図2 核融合原型炉(DEMO)で想定される中性子エネルギースペクトル(黒)とIFMIFで得られるスペクトル(高フラックス部:赤, 中フラックス部:黄)。

加速器となる。IFMIFは最終的な核融合材料照射施設であるが、現状の加速器技術の達成パラメータからの技術ギャップが大きい。そのため、IFMIF/EVEDA活動の一環として、青森県六ヶ所村のQST六ヶ所核融合研究所にLIPAcを段階的に建設中である。ここで、LIPAcは、入射器、RFQ及びIFMIF用超伝導加速器4基のうちの初段1基までを製作するものである。LIPAcの最終加速エネルギーは9 MeVとなるが、IFMIFの4基の超伝導加速器は類似の構造をしているため1基のみで

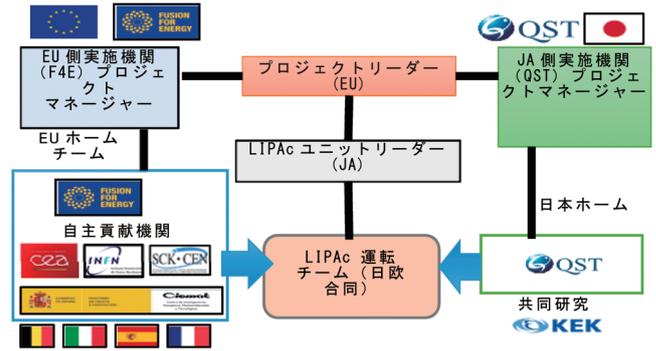


図3 IFMIF/EVEDAプロジェクトの組織図。

基本的技術は十分実証可能であるという技術的判断に基づく。なお、LIPAcは、すでに完成した入射器・RFQについては、順次、陽子・重陽子ビームの加速特性試験を進めている。また、中性子を発生させるリチウムターゲットの実寸大モックアップについては、茨城県大洗町の日本原子力研究開発機構(JAEA)大洗研究所内において建設され(液体リチウムターゲットの横幅はIFMIFの1/3)、運転実証とともに要素技術開発が行われ、その実証試験が2014年10月に完了した³⁾。ここでは、主にLIPAcの現在の活動状況を記述する。

2. LIPAcの構成と体制

LIPAcは、BA活動の一環として、IFMIF/EVEDA国際共同事業チーム、日本実施機関(QST)、欧州実施機関(核融合エネルギーのための事業体、Fusion for Energy: F4E)の協力の下、その製作、据付、調整、試験が行われている⁴⁻⁶⁾。図3のように、基本的に事業チーム、日欧チームから構成され、日本チームはQST六ヶ所核融合研究所内に組織されている。LIPAcのコミッショニングは、日欧共同の運転チームが中心となっている。EUチームはドイツ(ミュンヘン郊外のガルヒング)に拠点のあるF4Eガルヒングが欧州内の自主貢献機関を統括している。自主貢献機関は、主にCEAサクレ(フランス)、INFNレニャーロ(イタリア)、CIEMAT(スペイン)などであり、主な加速器機器の開発・調達に当たる。事業チームはQST六ヶ所研に常駐し、調整業務を行う。事業チームは日欧メンバーで構成され、事業長は欧州から派遣される。現在P. Cara氏が務め3代目となる(ちなみに、BA活動の他の2つのプロジェクトであるJT-60SA, IFERCの事業長は

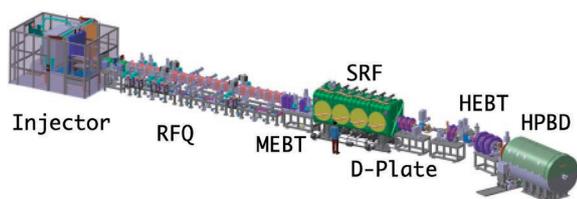


図4 IFMIF 原型加速器の概念図.

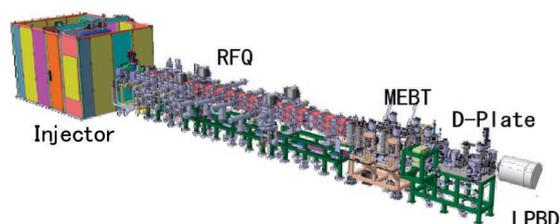


図5 LPBD (低電力ビームダンプ) を用いた低デューティ RFQ 加速実験系.

日本人である)。2007年にプロジェクトが始まってから、具体的体制づくり・作業分担協議、原型加速器のR&D、インターフェース協議を行うとともに六ヶ所のサイト整備を行った後、実際の機器製作、製作拠点からの輸送、据付・調整、試験を日欧共同で行ってきた。このため、QST六ヶ所核融合研究所には、多くの欧州研究者、技術者が常駐している。図4に、LIPAcの構成を示す。入射器、SRFおよびクライオプラント等はCEA、RFQはINFN、200 kW/175 MHz高周波源8基(RFQ用)、105 kW/175 MHz高周波源8基(SRF用)、大電力ビームダンプ、中エネルギービームエネルギー輸送系(MEBT)及び高エネルギービーム輸送系(HEBT)はCIEMATが調達している。ビーム計測器はCEA、CIEMAT、INFNが分担して調達し、計測プレートへのインテグレーションをCIEMATが担当した。日本は、中央制御系、高周波入射ケーブル、建屋などのインフラ設備を製作した。超伝導加速器を除く主要機器の据付がほぼ完了したため、コミッショニング、実験、機器の維持管理を中心とした実務体制を構築し、日本人の統合チームリーダーの下、日欧共同チームで進めている。

3. LIPAcの開発の現状

図5は、現在低電力ビームダンプを用いて行っている低デューティ(0.1%)の実験系であり、RFQの後段にMEBT、計測プレートが置かれ、重陽子ビームを用いた短パルス調整試験が進んでいる。RFQには両側に4本ずつの導波管に接続されたRFケーブルが取り付けられ、合計8箇所から175 MHzの高周波電力が導入される。

3.1 入射器⁷⁻⁹⁾

入射器は、2.45 GHz/1.2 kWの電子サイクロトロン共鳴(ECR)を利用した高周波イオン源で、プラズマ源から中間引き出し電極、接地電極で形成される静電場で重陽子が引き出され、加速され

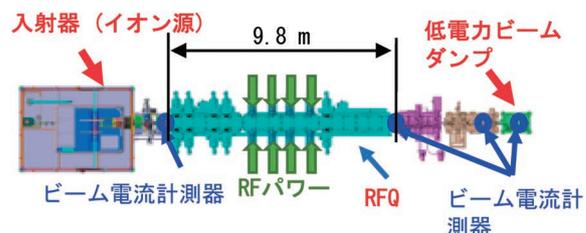


図6 入射器からLEPT, RFQ出口までのビーム輸送シミュレーションの結果.

る。また、下流からの電子の逆流を防ぐリペラ電極を有する。加速されたビームは、2つのソレノイドコイルと計測ポートを有する低エネルギービーム輸送系(LEPT)、ハロー部分をカットするコーン型ダウンテーパー、2次電子抑制電極を介してRFQ入口(口径12 mm)まで伝送される。図6に入射器からLEPT, RFQまでのビームシミュレーションの結果を示す。ビームパラメータは、引出し電極電圧、LEPT中の2台のソレノイドコイル磁場などで調整される。LEPTのポートから、エミッタンスメータが挿入可能で、ビームの位置と運動量の位相空間内の広がりを表すエミッタンスが測定される。入射器を用いた陽子加速実験が2014年末に開始され、最初の重陽子ビームの加速試験が2015年7月に行われた。これまでに、RFQの入り口位置に対応するダウンテーパー出口部において、加速電圧100 kVで電流140 mAが得られている。また、エミッタンスを測定し

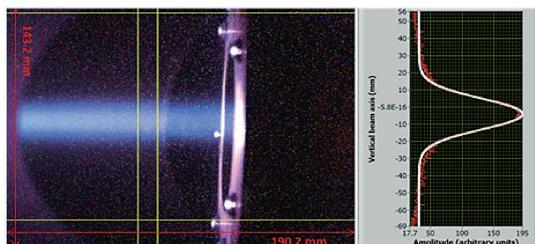


図7 CCDカメラで撮影された入射器から放出された重陽子ビーム(左)と垂直断面の発光強度分布(右).



図8 チューナーやカプラ等を取り付け前のRFQ.

た結果、重陽子ビーム140 mAにおいて、目標の $0.25 \pi \text{ mrad}$ を上回る $\sim 0.2 \pi \text{ mrad}$ が得られている。なお、ビームダンプ等に捕捉された重陽子に重陽子ビームが衝突することによりD-D反応の中性子も観測された。

図7に、CCDカメラで撮影された入射器から放出された重陽子ビームの写真と、ビーム断面に沿った発光強度分布を示す。このときのプラズマ電極からの引き出し穴径は8 mmである。

3.2 高周波四重極線形加速器 (RFQ)^{10,11)}

図8は、チューナーやカプラなどの取り付け前のRFQの写真である。長さ9.8 mの世界最長のRFQである。18個のモジュールが軸方向に接続されている。図9はRFQの断面図を示す。4ベーン(vane)タイプのRFQであり、励起モードはTE210である。側面に多数のポートが設けられ、そのうち108個のポートにチューナーが取り付けられ内部の電界分布調整が行われた。8基の大電力高周波源(175 MHz, 最大各200 kW)からRFQまで8本の導波管を介して、8つのポートから合計1 MW以上の高周波が入射される(最大1.6 MWまでの入力が可能)。最大表面電界は25.2 MV/mである。

また、真空排気用クライオポンプ、イオンポンプがそれぞれ10台、4台設けられ、内部が高真空に保たれる。

図10はビーズ試験で得られたRFQの軸方向の電界プロファイルである。設計値と実測値が非常に良い一致が得られた。測定で求められたRFQのQ値は約13,000である。実際の長パルス運転時には、冷却水の温度制御により共振周波数の調整が行われる設計となっている(約10 kHz/°C)。

図11は8系統のRFQ用RFシステムの写真で、加速器室に隣接する電源室に設置されている。各

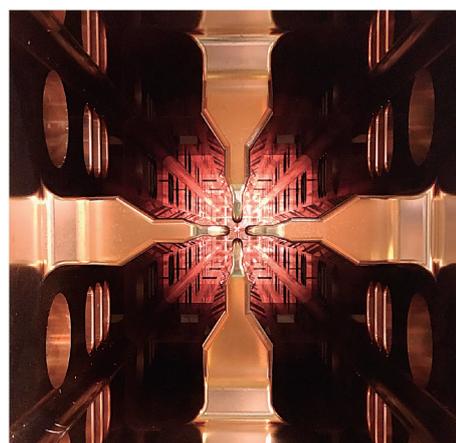


図9 RFQの断面写真。4ベーンで励起モードはTE210である。

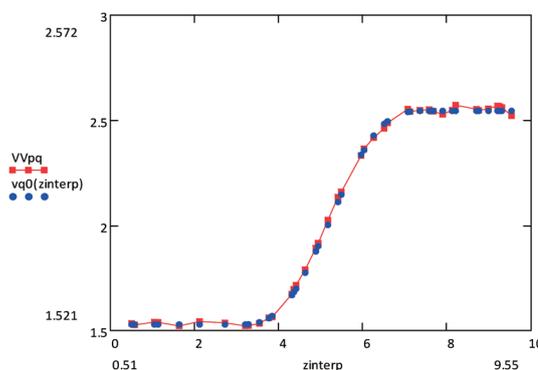


図10 ビーズ試験で得られたRFQの軸方向の電界。計算(●)と計測値(線)は良い一致を示している。

RFチェーンでは、LLRFによって生成されたRF信号は、プリドライバ(半導体式)、ドライバ(4極管, TH561)、最終段アンプ(4極管, TH781)の3つのアンプで増幅される。8つのチェーンに配置された4台のLLRFは、White Rabbitによって自律的に同期する。基準となる10 MHzクロックがWhite Rabbitに供給される。フィードバックシステムを使用して、PIループに基づいて、7つのスレーブRFチェーンからの順方向電力がマスターRFチェーンからのRF電力基準に追従し、マスターのチェーンと各スレーブのチェーン間

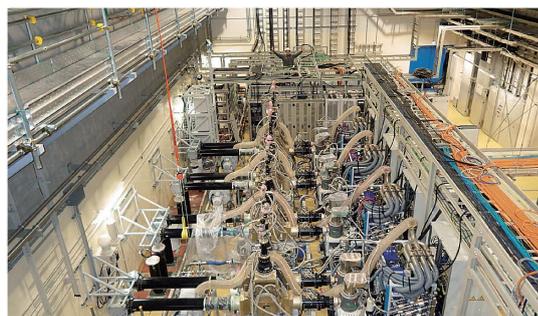


図11 電源室に置かれたRFQ用高周波増幅システム.

の相対位相が調整される。出力は、大電力サーキュレータを経て、同軸導波管で加速器室まで引き回される。ダミーロードを用いた出力試験では、8つの独立したRF源すべてが、設計どおりにCWで200 kWのフルパワーでの動作を実証した。2018年初めには、短パルス(30マイクロ秒)ながら、RFQのコンディショニングで、所定のRFQ内電圧132 kVを上回る144 kVの電力入射が得られた。コンディショニングの進展の様子を図12に示す。各国で製作された機器を日本で組み立て統合調整したため、多くの想定外のトラブルも発生したが、日欧協調の下、回復作業を進め、現在では300マイクロ秒のパルス長まで到達した。なお、高周波電力の立ち上がり立ち下がりには、急激な電力変化に伴う反射電力の増大を避けるため、数十マイクロ秒程度のランプを伴った立ち上げ・立ち下げ制御が低電力RF(LLRF)で行われる。2018年6月に最初の陽子ビーム加速が行われ、50 keVの入射ビームが2.5 MeVまで加速されたことが飛行時間法(Time of flight)により確認された(陽子の質量は重陽子の1/2であるため、加速エネルギーも半分となる)。これまで、設計値である約60 mAのビーム加速が行われ、最大96%の伝送効率を得られている。また、パルス長は4 msまでの試験が行われた。2019年3月から、本来の加速粒子である重陽子ビーム加速実験が開始された。現在、低電力ビームダンプを用い、低デューティ、短パルス(300マイクロ秒)ながら目標の125 mA, 5 MeVの重陽子加速を目指して調整試験を進めている。

3.3 超伝導加速器(SRF)¹²⁾

RFQの後段には、SRFが設置され、5 MeVまで加速された重陽子ビームがさらに9 MeVまで

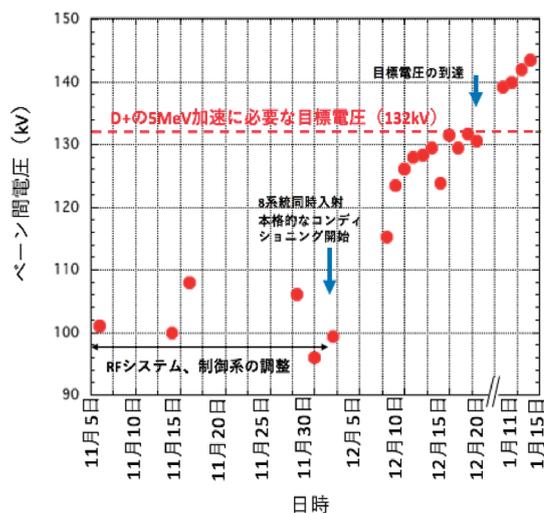


図12 RFQのコンディショニング履歴.

加速される。図13に、SRFの内部構造を示す。SRF内には、8基の超伝導加速空洞共振器(半波長空洞共振器)が直列に並べられ、それぞれに175 MHzの最大100 kWレベルの高周波が供給される。空洞の概念図を図14に示す。外部構造体で液体ヘリウムを貯める槽はチタン製、内部の高周波閉じ込め部はニオブ製、これらを接続するフランジはニオブチタン製である。溶接で一体化される構造であり「冷凍保安規則関係例示基準・18. 冷媒設備に係る容器に対する基準の適用」の申請対象となるため、製作にあたっては、高圧ガス保安協会へ申請書を提出し、その認可を得ている。

加速空洞の共振器のQ値は、 $>5 \times 10^8$ レベルの非常に大きな値を有する。CEAで行われたモックアップ試験により、所定の高周波電界4.5 MV/mが印加できることを確認した¹³⁾。共振器の共振周波数は、空洞共振器のビームポートフランジ間を機械的に圧縮する機構を設け、これにより調整する。具体的には、129 kHz/mmで、最大0.3 mm以内の変位で調整される。それぞれの空洞共振器の間には、最大磁場6Tのソレノイドコイルが置かれ、ビームの発散を防いでいる。図15のようにSRF用断熱真空容器、超伝導加速空洞はすでに完成しており、六ヶ所研のクリーンルームにおいてその組み立てが行われている。SRFに液体ヘリウムを供給するためのクライオプラントの設置及び試運転は完了し、青森県の完成検査に合格している(このクラスのクライオプラ

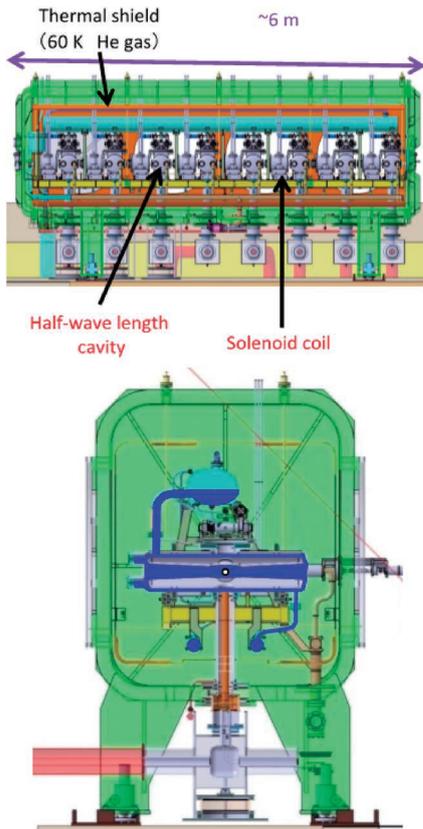


図13 超伝導線形加速器 (SRF) のビーム進行軸に沿った側断面図(上)とビームに垂直な方向の側断面図(下)。

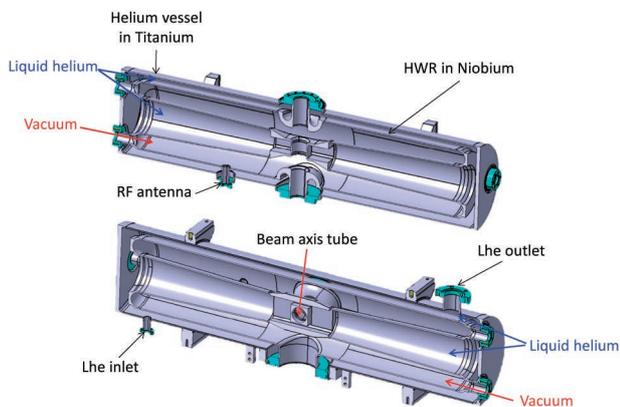


図14 空洞共振器の概念図 (1/2 波長共振器)。

ントは青森県では初めての例となった)。SRF 用 RF 源の構成は RFQ の RF システムとほぼ同様であり、使用する4極管も同一仕様であるが、それぞれの RF ラインの最大電力が RFQ が 200 kW であるのに対し、SRF は 105 kW のため、電源容量や冷却性能は約半分となっている。

3.4 中間エネルギービーム輸送系 (MEBT)¹⁴⁾

図16にMEBTの概念図、図17にMEBTの写



図15 (上)超伝導線形加速器の真空容器、(下)超伝導空洞共振器。

真を示す。MEBTは5つの四重極磁石 (Q-Mag)、2つのバンチャー (re-buncher resonant cavity)、2つのビームスクレーパーで構成され、175 MHz 高周波でビームパルスを圧縮整形し、次のSRFに伝送する役割を果たす。Q-MagでSRFへの入射ビーム特性が最適化されるとともに、ビーム位置モニター、ステアリング磁石でビーム軸が調整される。2台のバンチャー用RF源は、16 kWのソリッドステートタイプ2基から構成される。現在、RFQビーム実験と合わせて、バンチャーの調整を行っている。

3.5 計測プレート (D-Plate)¹⁵⁾

図18にD-Plateの平面図と計測器、図19にD-Plateの写真を示す。計測プレート (Diagnostics Plate; D-Plate) は、最終的にはSRFの下流に配置されるが、現在は、MEBTの下流に設置され、RFQのビーム特性診断が行われる。D-Plateには多くのビーム診断系が組み込まれている。具体的には、AC, DC電流トランス (CT)、イオン化プロファイルモニター (IPM)、蛍光プロファイルモニター (FPM)、2次電子測定型電流分布モニターグリッド (SEMGrid)、ビーム損失モニター (BLoM)、ビーム位置モニター (BPM) などにより、電流、位相、ビーム位置、ビーム分布、平均エネルギー測定、エミッタンス測定、ビームロス、エネルギー広がりなどの測定が行われる。

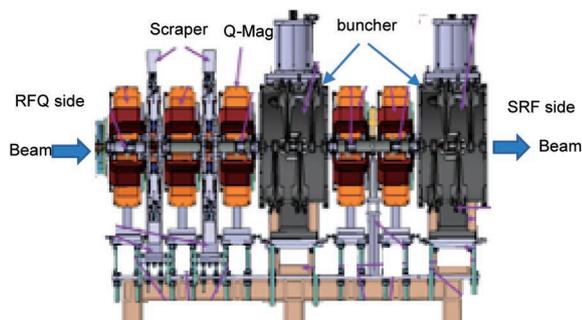


図16 中間エネルギー輸送系 (MEBT) の側断面図.



図17 中間エネルギー輸送系 (MEBT) の写真.

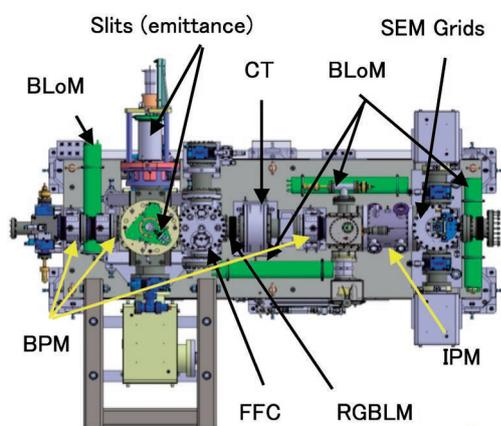


図18 計測プレート (D-plate) の上面図.



図19 計測プレート (D-plate) の写真.

3.6 高エネルギービーム輸送系 (HEBT) と大電力ビームダンプ (HPBD)¹⁶⁾

SRFで9 MeV (125 mA, 約1.1 MW)まで加速された重陽子ビームは、HEBTを経て、HPBDに輸送されダンプされる。D-Plateより下流は、図20のとおり、HEBTの2連の4重極コイル、中性子ストリーミングのSRFへの逆流を防ぐためのビーム軌道を20度曲げるダイポール電磁石、3連の4重極電磁石で構成されている。HPBDの入り口には、鉛シャッターが設けられ、不使用時には閉じられ、放射化したHPBDからの γ 線の放出を防ぐ構造となっている。ビームダンプの中央部分は、 3.5° 、長さ2.5 m、幅5 mmの角度を持つ銅の円錐形であり、この部分は、銅コーンとそれと同心のステンレス容器との間に形成されたチャンネルを通してその外面を流れる水によって冷却される。IFMIF原型加速器は中性子を発生させる装置ではないものの、9 MeVの大電流重陽子ビームを受けるHPBDでは構造材の(d,n)反応などにより中性子が発生するとともに放射化による γ 線対策が必要となる。そのため、銅コーンの周辺は、中性子および γ 線遮蔽のため、ポリエチレン、鉄製の容器で囲まれている(図21)。

図22に9 MeV, 125 mA 重陽子ビームの連続運転を行った際の中性子線量の計算例を示す。中性子の後方散乱が見られるが、HEBTでビームを曲げた効果に加え、ポリエチレン製逆流中性子シールドを用いることにより、加速器への中性子の逆流や、加速器室内の中性子散乱、加速器室外での線量上昇は最小限に抑えられている¹⁷⁾。



図20 高エネルギービーム輸送系 (HEBT) の写真.

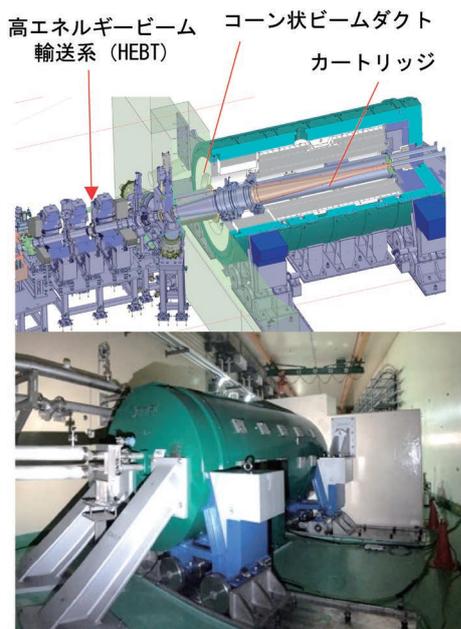


図21 大電力ビームダンプ (HPBD) の概念図(上)とその写真(下). 9 MeV, 125 mA の重陽子ビームの連続入射が可能な設計となっている.

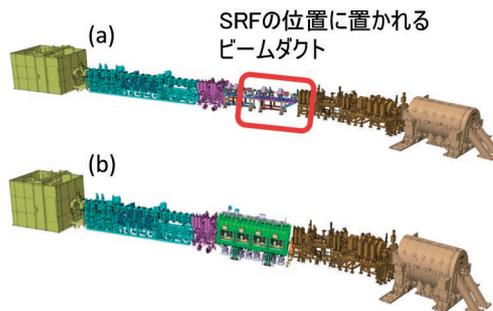


図23 長パルス実験系.
(a)SRF の位置にビーム輸送系を置き, RFQ の長パルス実験を行う系. RFQ とビームダンプのコンディショニングを先行させる.
(b)SRF を設置した最終系.

して借用する予定である. 並行して, SRF の組み立てを進め, RFQ の長パルス試験が完了する予定の2020年度後半より SRF を据付け (図23 (b)) 冷却試験, RF コンディショニングを含む調整試験ののち, LIPAc 最終形状での4.5 MeV 大電力陽子ビーム実験を経て9 MeV/125 mA 重陽子ビームの連続加速を目標に試験を進める計画である.

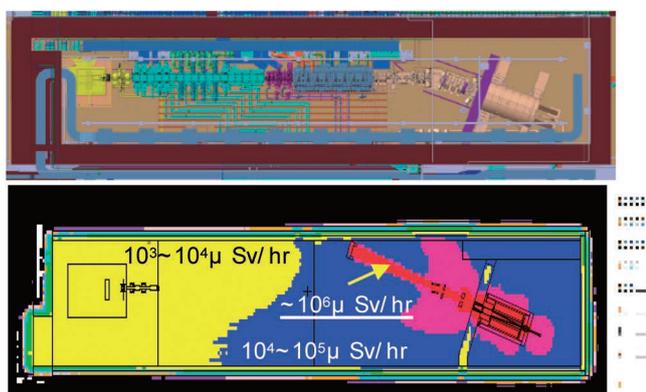


図22 LIPAc の配置図 (上図) と9 MeV, 125 mA 重陽子ビームの連続運転を行った際の中性子線量の計算例 (下図). 図中, 右端に置かれた大電力ビームダンプから中性子束が上流に逆流するが, 加速器のビームラインからは外れている様子がわかる.

4. 今後の展開

先述のとおり, LIPAc は, 現在は低電力ビームダンプを用い, 低デューティサイクル (0.1%) の条件で, RFQ の重陽子ビーム加速実験を行っている. 2019年度の後半は, 図23 (a) のとおり, 低電力ビームダンプを外してHEBT, HPBD をビームダクトで接続し, RFQ の長パルス実験を開始する予定である. ここで, ビームダクト部の4重極電磁石とその電源は, KEK より共同研究の一環と

5. おわりに

2007年に始まったIFMIF-EVEDAプロジェクトも, 様々な困難を乗り越えてLIPAcが形になり, 日欧共同チームによる本格的試験が行われるフェーズになり, 大電流重陽子ビーム加速に関するデータも出始めている. 日欧が対等な立場で進める国際共同の大型プロジェクトは前例がなく, 当初は多くの問題が発生した. 公用語は英語で, 文書も全て英語で書かれるため, 国内プロジェクトと異なり欧州とコミュニケーションの取れる一部の人材に業務が集中しがちになること, 異なる予算システムや会計年度, 輸出入管理, 欧州製機器のメンテナンスの複雑さ, 考え方の違いなどにより問題が生じたが, 時間の経過と経験の蓄積とともに相互理解も深まっていき, 毎日のように生じる問題にも前向きなコミュニケーションで解決を図るなど, 現在では良好な国際チームが出来上がっている. 青森県や六ヶ所村の支援もあり, 欧州からの常駐者は青森生活を楽んでいる様子である. 家族連れで長期滞在する家庭の子供は, 六ヶ所村の国際学校で学んでいる. 今後の大電流の重陽子ビームの連続加速実験フェーズに向け, 多くの困難も予想されるが, 国際協調をさらに深

めて乗り越えて行く所存である。

また、QSTでは、IFMIF/EVEDAの成果をベースに、核融合用中性子源を開発する国内計画、いわゆるA-FNS計画を進めている。これは、原型炉開発に向けたアクションプランの一つであり、原型炉開発の一環として、炉材料の候補材である低放射化フェライト鋼の20 dpa照射データ、ブランケット及びダイバータ機能材料の初期照射データ、ブランケットのトリチウム挙動評価技術の検証、計測・制御機器材料の耐照射性評価を2035年頃の取得を目標とする核融合中性子源であり、2020年頃の第1回中間C&Rで概念設計の完了、工学設計を経て、2025年頃の第2回中間C&Rに基づき建設開始判断が行われ、材料照射データ取得計画の作成を行うこととされている。QSTでは、青森県六ヶ所村に建設することを想定し、核融合材料開発だけにとどまらず、中性子の医療・産業利用も視野に入れた先進的な核融合中性子源の設計検討を行っている。A-FNSの基本構成はIFMIFと同じであるが、20 dpaの照射目標であるため、ビームラインはIFMIFの2本に対し、A-FNSは1本で構成される。

最後に、これらの活動はQSTを中心に進めているが、今後は国内機関や産業界との連携がますます重要と考えている。これまでにも、KEKからは共同研究を通じ、多くの支援を受けている。今後、さらに輪を広げ、本プロジェクトへの参加を歓迎するとともに、日本における大電流加速器、大強度中性子源の開発を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 木村晴行, 他: プラズマ核融合学会誌 **86**(4), 223 (2010).
- 2) IFMIF International Team, JAERI-Tech 2002-02 (2002).
- 3) H. Kondo, T. Kanemura, T. Furukawa, Y. Hirakawa, E. Wakai and J. Knaster: Nucl. Fusion **57**, 066008 (2017).
- 4) J. Knaster, P. Garin, H. Matsumoto, Y. Okumura, M. Sugimoto, F. Arbeiter, P. Cara, S. Chel, A. Facco, P. Favuzza, T. Furukawa, R. Heidinger, A. Ibarra, T. Kanemura, A. Kasugai, H. Kondo, V. Massaut, J. Molla, G. Micciche, S. O'hira, K. Sakamoto, T. Yokomine and E. Wakai: Nucl. Fusion **57**, 102016 (2017).
- 5) M. Sugimoto et al.: Proc. 27th IAEA Fusion Energy Conf., Gandhinagar, India (2018).
- 6) K. Kondo, J. M. Ayala, B. Bolzon, P. Cara, H. Dzitko, T. Ebisawa, E. Fagotti, D. Gex, R. Heidinger, Y. Hirata, R. Ichimiya, Y. Ikeda, D. Jimenez, A. Jokinen, A. Kasugai, T. Kikuchi, J. Knaster, M. Komata, S. Maebara, A. Marqueta, I. Moya, S. Nishimura, S. O'hira, Y. Okumura, M. Perez, G. Phillips, I. Podadera, G. Pruneri, K. Sakamoto, F. Scantamburlo, T. Shinya, M. Sugimoto and M. Weber: Nucl. Mat. Energy **15**, 195 (2018).
- 7) R. Gobin et al.: "Final design of the IFMIF injector at CEA/Saclay," Proc. 4th Int. Particle Acc. Conf., Shanghai, China (2013).
- 8) T. Akagi et al.: "Characterization of the input beam to RFQ of the Linear IFMIF Prototype Accelerator," Proc. 30th Symp. on Fusion Technology, Sicily, Italy (2018).
- 9) N. Chauvin and T. Akagi et al.: "Deuteron beam commissioning of the linear IFMIF prototype accelerator ion source and LEPT," Proc. 27th IAEA Fusion Energy Conf., Gandhinagar, India (2018).
- 10) E. Fagotti et al.: "Beam commissioning of the IFMIF EVEDA very high power RFQ," Proc. 9th Int. Particle Acc. Conf., Vancouver, Canada (2018).
- 11) T. Shinya, E. Fagotti, M. Weber, L. Antoniazzi, T. Akagi, L. Bellan, D. Bortolato, T. Ebisawa, F. Grespan, Y. Hirata, R. Ichimiya, K. Kasugai, K. Kondo, T. Kitano, I. Kirpichev, P. Mereu, P. Mendez, C. de la Morena, S. Maebara, M. Montis, A. Palmieri, A. Pisent, G. Pruneri, D. Regidor, K. Sakamoto, F. Scantamburlo, M. Sugimoto, P. Cara, D. Gex, R. Heidinger, A. Jokinen, A. Marqueta, I. Moya and J. Knaster: Nucl. Mat. Energy **15**, 143 (2018).
- 12) N. Bazin et al.: "Status of the IFMIF LIPAc SRF linac," Proceedings of SRF2017, Lanzhou, China, 74 (2017).
- 13) O. Piquet et al.: "First result of the IFMIF/EVEDA-SATHoRI tests," Proceedings of SRF2017, Lanzhou, China, 262 (2017).
- 14) I. Podadera et al.: "Manufacturing, assembly and tests of the LIPAc Medium Energy Beam Transport line (MEBT)," Proc. 28th Linear Acc. Conf., East Lansing, USA (2016).
- 15) J. Marroncle et al.: "IFMIF-LIPAc Diagnostics and the challenges," Proc. of IBIC2012, WECC01, Tsukuba, Japan (2012).
- 16) B. Brañas, F. Arranz, O. Nomen, D. Iglesias, F. Ogando, M. Parro, J. Castellanos, J. Mollá, C. Oliver, D. Rapisarda and P. Sauvan: Fusion Eng. Des. **127**, 127 (2018).
- 17) K. Kondo and B. Brañas et al.: "Radiation shielding requirements for the full power operation of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) at Rokkasho," Fusion Eng. Des., in press.