

国際共同プロジェクト IFMIF 原型加速器 (LIPAc) の開発 DEVELOPMENT OF IFMIF PROTOTYPE ACCELERATOR IN INTERNATIONAL PROJECT

春日井敦^{#A)}, 赤木智哉^{A)}, 蛭沢貴^{A)}, 平田洋介^{A)}, 近藤恵太郎^{A)}, 前原直^{A)},
坂本慶司^{A)}, 新屋貴浩^{A)}, 杉本昌義^{A)}, ナスター ホアン^{B)}, カラ フィリップ^{C)},
ジッコ エルベ^{C)}, ハイディングー ローランド^{C)}, フィリップス ガイ^{C)}

Atsushi Kasugai^{#A)}, Tomoya Akagi^{A)}, Takashi Ebisawa^{A)}, Yosuke Hirata^{A)}, Keitaro Kondo^{A)},
Sunao Maebara^{A)}, Keishi Sakamoto^{A)}, Takahiro Shinya^{A)}, Masayoshi Sugimoto^{A)},
Juan Knaster^{B)}, Philippe Cara^{C)}, Herve Dzitko^{C)}, Roland Heidinger^{C)}, Guy Phillips^{C)}

^{A)} Rokkasho Fusion Institute, QST

^{B)} IFMIF/EVEDA Project Team

^{C)} Fusion for Energy (F4E)

Abstract

The IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) project aiming at material tests for a future fusion DEMO reactor is under the Engineering Validation and Engineering Design Activities (EVEDA) phase in the Broader Approach (BA) Agreement of fusion program between Japan and EU. As the accelerator activity, the installation and commissioning of the Linear IFMIF Prototype Accelerator (LIPAc) is at the stage of demonstration of the feasibility of the low energy section of an IFMIF deuteron accelerator up to 9 MeV with a beam current of 125 mA in CW. The installation and the RF conditioning of RFQ for LIPAc with 8 coaxial power lines and RF power system have just started at Rokkasho, Japan. After the RF conditioning of RFQ, the beam commissioning of injector, RFQ, MEBT, D-Plate and LPBD up to 5MeV-125mA-0.1% duty cycle will be started from the beginning of 2018.

1. はじめに

日本の核融合エネルギー実用化に向けた研究開発は国際プロジェクトである国際熱核融合実験炉(ITER)計画を中心に進められている。ITER では核融合エネルギーの科学的・技術的実現性を実証し、その後、発電実証をするための核融合原型炉を各国の判断で建設することになるであろう。核融合原型炉の炉心では1億℃以上の重水素(D)と三重水素(T)の超高温プラズマの核融合反応によって、14 MeV という非常に高いエネルギーの中性子が連続的に発生する。したがって、核融合エネルギーの実現には、14 MeV の高エネルギー中性子に耐えられる材料の開発が乗り越えるべき工学的な課題の1つである。その材料開発のため、14 MeV の中性子を連続的に発生できる核融合中性子源の開発が重要である。Figure 1 に日本の核融合研究開発戦略を示す。ITER と並行して行われる材料開発の見通しが原型炉の建設判断となる。

核融合中性子源の候補として、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(International Fusion Materials Irradiation Facility, IFMIF)が、国際協力の下、20 年以上前から検討が進められてきた。d-Li 中性子源は重陽子のエネルギーを 40 MeV 付近にすることで、核融合反応で発生する 14 MeV の中性子スペクトルを模擬できる。そのため加速器としては、100 mA を超える大電流の重陽子を 40 MeV まで定常的に加速させることが重要な技術課題となる。

ITER の建設地が国際協議の末、フランスのサン・ポール・レ・デュランス市に決定された見返りとして、日本と欧州が等分の貢献を行い、量子科学技術研究開発機構(QST)の那珂核融合研究所(茨城県)と六ヶ所核融合研究所(青森県)に核融合関連施設を作り研究開発を行う事業、幅広いアプローチ(BA)活動が2007年から開始された。その事業の一つであるIFMIFの工学実証・工学設計活動(Engineering Validation and Engineering Design Activities, EVEDA)は、IFMIF の工学設計・主要機器の設計・製作・試験を行い、IFMIF の建設判断に必要な技術実証を行うことが最大のミッションである[1]。IFMIF/EVEDA 事業の最大の課題が大電流重陽子加速器の原理実証である。IFMIF 原型加速器の原理検証では、加速器本体の設計・製作が欧州主導で行われ、六ヶ所核融合研究所においてQSTが主体となって原型加速器の据付・調整・コミッショニングが実施されている。

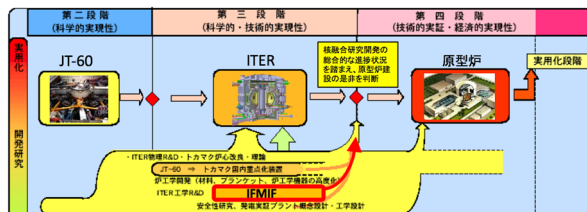


Figure 1: Roadmap to fusion reactor with IFMIF.

[#] kasugai.atsushi@qst.go.jp

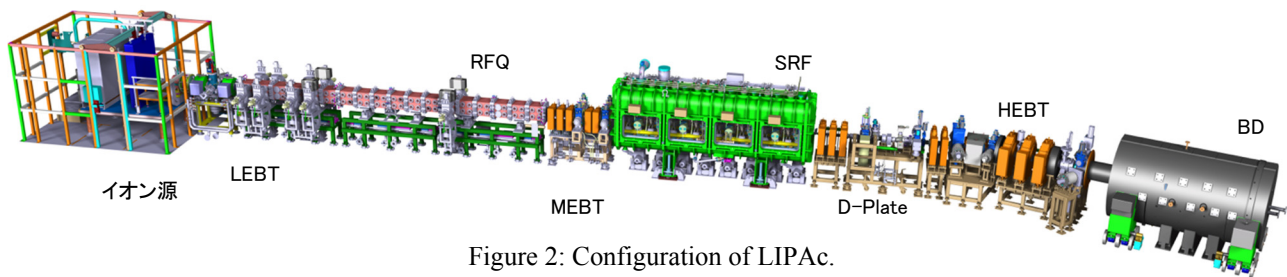


Figure 2: Configuration of LIPAc.

2. LIPAc 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) - 超伝導加速器 (SRF) - ビーム診断系 (D-Plate) - 高エネルギービーム輸送系 (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ある (Figure 2)。IFMIF 加速器の設計が、ビームライン 2 本及び各ラインで 4 段の超伝導加速器を用いて 40 MeV-合計 250 mA の重陽子ビームを連続運転する設計であるのに対し、LIPAc は 1 本のビームライン、初段の超伝導加速器 1 台のみで 9 MeV-125 mA の重陽子ビームを連続運転する設計となっている。IFMIF 加速器の成否の鍵を握るのは、空間電荷によるビーム発散力が高い低エネルギー部の大電流加速実証である。そのため、RFQ までの 5 MeV 以下の低エネルギー部については、IFMIF 加速器と LIPAc は同じ構成としている。

LIPAc の大きな特徴は、欧州と同じ負担割合での国際協力を行っているため、調達取り決めに日欧で締結しその取り決めに応じて設計・製作・試験を進めるというものである。Table 1 にそのリストを示す。ハッチの部分に日本の担当である。大まかには加速器施設のインフラ整備と統合及びコミッショニングは日本中心で行い、各機器の設計製作は欧州中心で実施していることである。さらに欧州内での取り決めにより、加速器を構成する各機器の製作・調達は、フランス原子力・代替エネルギー庁 (CEA) サクレ研究所、イタリア国立核物理学研究所 (INFN) レニャーロ研究所、スペインエネルギー環境技術センター (CIEMAT) の 3 機関が主に担当し、Fusion for Energy (F4E) という欧州の実施機関が欧州側の各研究所を取りまとめている。これまでに欧州の各研究機関において、LIPAc の設計・製作が行われてきており、現在六ヶ所核融合研究所において組立・調整・ビーム試験を段階的に実施している。

2007 年に協定が発効され、LIPAc は当初 6 年間の計画であったが、機器製作の遅れから 10 年間 (2017 年 5 月終了) に延長され、さらに 2017 年 4 月の政府間協議において 2020 年 3 月までプロジェクトの延長が決まった。欧州調達機器のうち入射器までの 100 keV の静電加速 (フェーズ A) については、すでに完了し 2016 年の加速器学会で報告をした [2]。2017 年には 5MeV までの RFQ による加速と MEBT によるビーム輸送 (フェーズ B) までは機器調達が完了し、加速器室の正規位置に据え付けられ RFQ の RF コンディショニングが開始された。現在製

Table 1: List of Procurement Arrangement of LIPAc

番号	調達取り決め名称
AF01	原型加速器の横断的活動
AF02	加速器プロトタイプ入射器の供給
AF03-JA/EU	加速器プロトタイプ高周波四重極加速器 (RFQ) と RF カブラの供給
AF04	加速器プロトタイプ超伝導 RF リニアックの供給
AF05	中間エネルギービーム輸送ライン (MEBT) の供給
AF06	加速器プロトタイプ高周波電源の供給
AF07	原型加速器の高エネルギービーム輸送ライン及びビームダンプの供給
AF08-JA/EU	加速器監視制御システムの供給
AF09	計測設備
AF10-JA/EU	据付、検査、始動及び試運転
AF11	開発試験棟の供給
AF12	冷凍設備
AF13	加速器プロトタイプ通常設備の供給

作途中にあるものは、9 MeV までの加速に必要な SRF、HEBT、BD のサブシステム (フェーズ C) のみである。これらは 2018 年に六ヶ所核融合研究所に搬入され、順次据え付け及び組み立てが開始される予定である。

3. サブシステムの開発状況

3.1 イオン源+LEBT (入射器)

2012 年 11 月にフランス CEA サクレ研究所における性能確認試験 (重陽子ビーム 100 keV / 140 mA) に合格し、六ヶ所核融合研究所に初めて搬入された機器である。入射器は、マイクロ波 (ECR) イオン源と低エネルギービーム輸送系 (LEBT) から構成され、140 mA の重水素イオンビームを 100 keV のエネルギーで引き出し、所定のビーム品質で RFQ に入射する。

2014 年 3 月から六ヶ所での据付を開始し 2014 年 11 月から六ヶ所での陽子ビームによる実証試験、2015 年 7 月から障防法に基づく放射線発生施設として認可を受け重陽子の加速試験を開始した [3]。従来の加速器用イオン源と比べて、大電流の重水素イオンビームを低エミッタンス、高プロトン比のもとで定常的に生成することが要求され、核融合材料試験用の中性子源施設として高稼働率、高信頼性、長寿命であることが要求される。現在までのところ、エネルギー 100 keV、ビーム電流 140 mA、CW、エミッタンス $0.3 \text{ } \mu\text{m} \cdot \text{mrad}$ 以下の重陽子ビームを個別ではあるが安定に生成することに成功し、フェーズ A でのマイルストーンを達成した。現在はビームシミュレーションと

実験の比較のためイオン源単体での試験を実施中であり、今後加速電極の調整等を経てRFQと組み合わせたビームコミッショニングを開始する予定である。

3.2 高周波四重極加速器(RFQ)

2016年2月に製作を担当したイタリア INFN レニャーロ研究所から日本に空輸され、精密なアラインメントを行い一体化された。9.8 m と長尺の RFQ は 3 分割されたスーパーモジュールからなり、それぞれが独立した調整用架台に乗せられている。18 個の高周波空洞モジュールから構成され、六ヶ所に搬入されてから初めて全数を一体化し、真空試験及び両側エンドプレート部を含む RFQ 単体におけるビーズを用いた電界分布測定とダミーチューナを用いた周波数調整等が実施された。周波数は 175MHz である。Figure 3 は一体化した RFQ 本体である。この状態から、イオンポンプ、クライオポンプ、RF カプラの接続、2016 年 12 月に RFQ 全体のベーキングを実施し、真空系、冷却水系、高周波系、電気系、計測系を整備し、2017 年 7 月より RFQ に RF パワーを入射する予備的な RF コンディショニングを開始した。

RF カプラについては日本側の担当であったが、RFQ への据付までに実機の RF システムを用いた大電力試験が間に合わなかったため、欧州が準備した RF カプラ 8 式を RFQ に取り付け試験を開始した。フェーズ C の CW 運転では日本が製作した長パルス動作に適した RF カプラに交換する予定である。



Figure 3: RFQ of LIPAc.

3.3 高周波源システム(RF system)

高周波源システムは、2014 年から屋外変圧器、配電盤等が調達を担当するスペイン CIEMAT から順次六ヶ所サイトに搬入され、据付けが進められた。高周波のモジュールの内訳は、それぞれ 175 MHz の CW モジュールであり、RFQ 用として、Figure 4 に示すように、200 kW の 4 極管ユニットが 8 ライン、SRF 用として 105 kW の 4 極管ユニットが 8 ライン、MEBT のバンチャー用として 16 kW の固体増幅器 2 基である。SRF 用の RF モジュールの一部は CEA サクレ研究所で実施中の SRF の大電力試験に供しているので六ヶ所に搬入できていないが、RFQ 用と MEBT 用モジュール、冷却系、大電力伝送系はすでに整備が完了した。欧州機器の部品の不具合等もあり据付完了までには相当な労力を要したが、2017 年 7 月に RFQ の高周波源の試験が全て完了し、RFQ への入力が可能な状況になった。並行して 9 インチの同軸導波管 8 ライン分を RF モジュールから RFQ の RF カプラまで接続した。

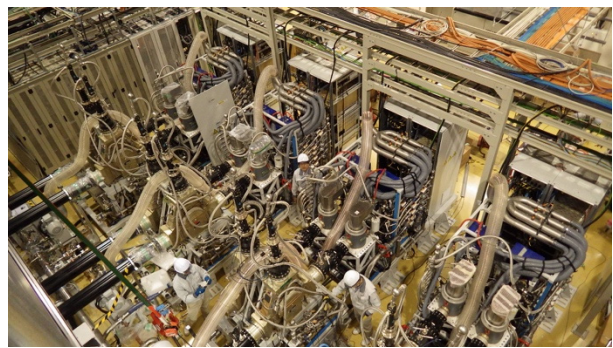


Figure 4: RF system.

3.4 中エネルギービーム輸送系(MEBT)

中エネルギービーム輸送系(MEBT)は、RFQ と超伝導ライナックの間に設置され、RFQ により 5MeV まで加速されたビームを最適なビーム品質で SRF ライナックに入力する役割を持つ。5 つの四重極コイル、2 つのバンチャー、4 軸で調整可能な 2 組のスクレーパーからなる。バンチャーは 5 つのギャップを持つ IH 型共振器が採用された。RFQ と SRF の位置は非常に近いので、適切な真空度を確保するため、2 つのバンチャーには 3 つのターボ分子ポンプと 1 つのイオンポンプが取り付けられている(Figure 5 の左端の機器)。MEBT は CIEMAT の担当である。

3.5 ビーム診断系(D-Plate)

ビーム診断系は D-Plate と呼ばれ、加速されたビームの電流モニター、エミッタンス計測も兼ねたビームプロファイルモニター、バンチ長計測系、ビーム損失モニター等からなる。RFQ のコミッショニング段階では、一時的に MEBT の後段に設置されるが、SRF を含む最終ビームコミッショニング段階では SRF の後段に位置する HEBT の中に組み込まれる。MEBT 及び D-Plate 本体は 2016 年 4 月に六ヶ所サイトに搬入され、RFQ の後段に設置された(Figure 5 の中央の機器)。D-Plate の主担当は CIEMAT であるが、一部の計測機器の製作は CEA サクレ研究所が担当した。

3.6 Low Power Beam Dump(LPBD)

LPBD はフェーズ B 用の 5MeV/デューティ 0.1%までの重陽子ビームを最終的に受け止める小型のビームダンプであり、ビームが当たる内部のコーンはアルミニウムで作られ、外側をボロンが含まれるポリエチレンシールドで覆われた構造になっている。製作は INFN レニャーロ研究所が担当し、2017 年 5 月に搬入された。すでに放射化の評価はされており、RFQ の試験終了後、SRF を接続するときは不要となり、放射化物として保管される(Figure 5 の右端の機器)。

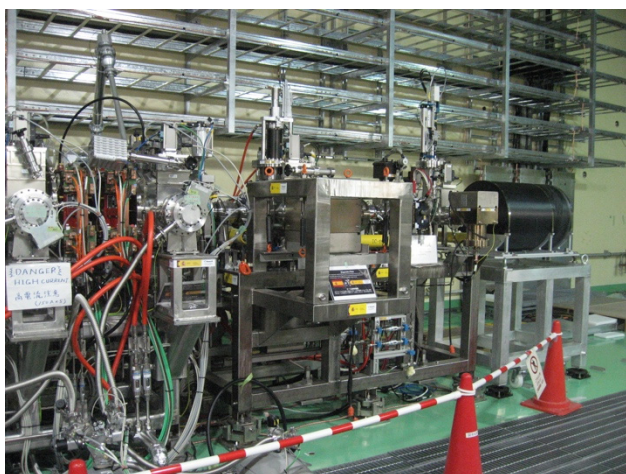


Figure 5: MEBT, D-Plate and LPBD.

であり、CIEMAT で製作試験されたのち、CEA サクレ研究所で洗浄及びチェックされたのちに六ヶ所に輸送される。これらの超伝導加速器のコンポーネントは六ヶ所サイト内に設置するクリーンルームにてクライオモジュールとして一体化し、組み上げる予定である。

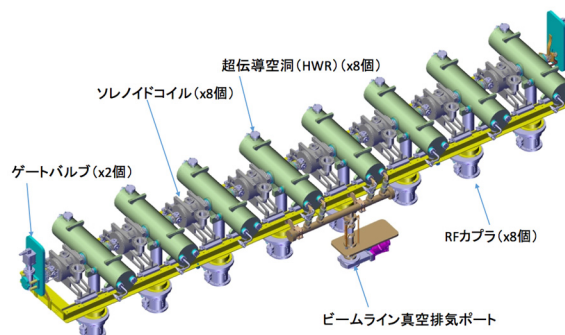


Figure 6: Cold mass in SRF linac cryostat.

3.7 クライオプラント

SRF の超伝導空洞は液体ヘリウムにて 4K まで冷却されるため、設備として液体ヘリウム製造装置(クライオプラント)が LIPAc には必要である。クライオプラントは、CEA サクレ研究所が担当であり、2016 年 4 月にコールドボックス、圧縮機、油分離器がフランスのエアリキド社から搬入されたのに引き続き、デュワー、ガスヘリウムバッファタンク、MCTL(液体ヘリウム供給ライン)、液体窒素タンク(日本担当)等が 2016 年度 10 月から順次設置された。クライオプラント及び SRF は共にヘリウムガスの閉ループとして高圧ガス保安法の冷凍保安規則に基づいて県知事の許認可となる。一日当たりの冷凍能力は 110 冷凍トン、圧縮機の定格出力は 132 kW である。2017 年 2 月に据付が完了し、その後約 3 ヶ月かけコミッショニングが行われ、受入試験の仕様に定められた、圧縮機、デュワー、冷凍機、クライオラインの真空性能、冷却性能を確認した。

3.8 超伝導加速器(SRF Linac)

超伝導加速器は、ニオブでできた 8 個の超伝導空洞(HWR)、8 個の超伝導ソレノイドコイル等から構成され、液体ヘリウムで 4 K まで冷却される。これらの機器は Figure 6 に示すように独立したレールの上に乗っており、約 2 m x 2 m x 6 m のクライオスタットの中に熱遮蔽された状態で格納される。8 基の超伝導空洞により 5 MeV から 9MeV まで加速される。ニオブで製作された超伝導加速空洞は、高圧ガス保安法に基づく圧力容器として特別な認可が必要であり、高圧ガス保安協会に特認申請を行い 2016 年 3 月に冷凍保安規則による認可を受けた。現在は CEA サクレ研究所において超伝導空洞の大電力試験やクリーニングを実施中であり、プロトタイプ空洞に続き 8 式の実機空洞を製作中である。その他クライオスタット、磁気シールド、熱シールド、配管類は CEA サクレ研究所でほぼ調達が完了し、これらは 2017 年度中に六ヶ所へ搬入される予定である。一方、ソレノイドコイル、電流リード、RF カプラはスペイン CIEMAT の担当

3.9 高エネルギービーム輸送系(HEBT)

高エネルギービーム輸送系(HEBT)は、SRF から出た 9MeV-125mA の重陽子ビームを、最終段のビームダンプ(BD)まで導く役割を担う。8 式の四重極コイルとベンディングコイルからなる。その機能は以下の条件を満たすように設計される。

- (1) ハンズオンメンテナンスを行うため 1 W/m 以下のビーム損失に抑えること。そのためにはビームハローの発生を制御する必要がある。
- (2) BD 表面の熱負荷を 200 W/cm² 以下にするため、ビームを広げること。また対称なビーム形状とすること。
- (3) 上流側の加速器に与える放射線の影響を抑えるためビーム軌道を曲げること。
- (4) ビーム診断するための機器を入れる十分なスペースを確保すること。
- (5) ビームダンプでの安全性を確保するため多少の不正磁場に対して低感度であること。

HEBT は現在 CIEMAT で製作中であり、四重極コイルやベンディングコイルがすでに製作され、2018 年 5 月ごろ六ヶ所に搬入予定である。

3.10 ビームダンプ(BD)

ビームダンプ(BD)の最大の目的は、9 MeV-125 mA の定常的な重陽子ビームを安全に処理することである。ビームパワーは 1.12 MW になる。放射線防護の観点から以下の要件が必要とされる。

- (1) 加速器室の放射線量を規定値以下にすること。
- (2) 運転停止時にはメンテナンスのため人が近づけるようにすること。
- (3) ビームダンプの高放射化部分は試験終了時には解体され保管される必要がある。

これらの条件のため、ビームを受け止める部分は銅を材料とするカートリッジ方式とし、外側のシールドはポリエチレン及び鉛で構成される。BD はスペインの CIEMAT

の担当であり、2018年5月ごろHEBTと一緒に六ヶ所に搬入される予定である。

4. 据付及び統合試験状況

4.1 RFQのRFコンディショニング

RFQ、MEBT、D-Plate、RFシステム、LPBDは2016年から本格的に据付調整が開始され、2017年7月までに全ての機器が加速器室の所定の位置に据え付けられた。まずは175 MHz-200 kW-CWのRFシステム8系統の調整試験が個別に実施された。引き続きRFQへのパワー入力調整試験が7月より開始された。Figure 7に示すRFQは真空排気装置や冷却系、高周波入射系が全て取り付けられている。高周波入力系は片側4系統ずつ対象な位置に接続している。太く黒い管が同軸導波管である。最初は1系統のみのRF入射を低パワーから実施し、初期データとして175 MHz、15マイクロ秒のパルス幅、繰り返し2 Hz、入射電力3.5 kWが得られた(Figure 8)。初期入射の結果、空洞からの反射電力、RFQ内部の真空度変化などのRFパワー入射に対するRFQからのレスポンスが得られた。2系統以上の同期入射では、White Rabbitと呼ばれるナノ秒精度で制御するタイミング分配ネットワーク技術を用いたマスタースレーブ同期入射に成功している。8系統の高周波同期入射試験を行ったのち、10月より本格的なRFQのRFコンディショニングを24時間体制で約3ヶ月間実施する予定である。



Figure 7: RF conditioning of RFQ.

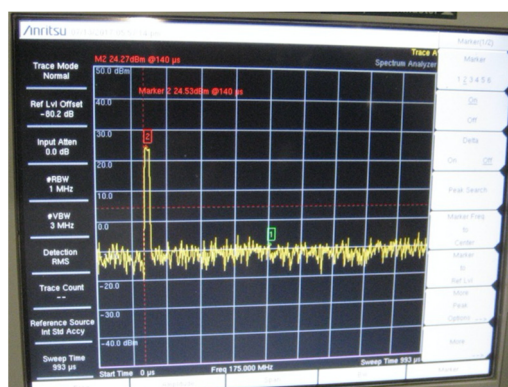


Figure 8: First injection of RF power to RFQ.

4.2 RFQのビームコミッショニング

5 MeV-125 mAの加速試験を0.1%のデューティで実証するフェーズBの試験のための準備を並行して進め、イオン源の加速電極の最適化の後、加速器コンポーネントのビームラインを全て接続する。RFQのRFコンディショニングが完了したのちに、2018年1月よりビームコミッショニングを実施する予定である。RFQに入射する重陽子ビームのクオリティがRFQのビームコミッショニングの成否のカギを握るため、イオン源の加速電極のアライメントやエミッタンスの調整を慎重に行っているところである。

4.3 今後の計画

RFQのビームコミッショニングと並行して、六ヶ所サイトの別の建屋に設置するクリーンルームにおいて2018年10月ごろからSRF(クライオモジュール)を組上げた後、HEBT、BD、SRFの全てのサブシステムを加速器のビームラインに接続し、プロジェクトの最終ミッションである重陽子を用いた統合ビーム試験9 MeV-125 mAを実施する予定である。日欧の国際協力に基づくこのBA活動は2017年4月に開催された日欧政府間の国際協議により、2020年3月末まで延長が認められた(Figure 9)。現在の計画ではビーム統合試験に充てる期間が不十分なため、BA活動の終了後5年間はプロジェクトの枠組みを変えて、長パルス動作の実証と高信頼性の実証に向けたR&Dを行うことを日欧で協議している。その後、LIPAcを六ヶ所核融合研究所における核融合材料照射施設として発展させるべく、加速エネルギーの40 MeVまでの増強、液体リチウムターゲット製作、照射設備、ホットセル等を整備することで、14 MeVの中性子を発生させる先進核融合中性子源(A-FNS)として完成を目指したい。

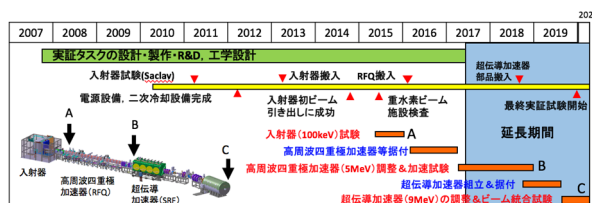


Figure 9: Schedule of LIPAc project.

参考文献

- [1] J. Knaster *et al.*, "Overview of the IFMIF/EVEDA Project", Nucl. Fusion 57 (2017) 102016 (25pp).
- [2] A. Kasugai *et al.*, "IFMIF/EVEDA 原型加速器の現状", Proceedings of the 13th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan.
- [3] Y. Okumura *et al.*, "Operation and commissioning of IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility) LIPAc injector", Rev. Sci. Instrum. 87, 02A739 (2016).

IFMIF/EVEDAプロジェクトを計画当初より牽引し、近年は事業チームの副事業長としてIFMIF原型加速器の進展に大きな貢献をされてきた奥村義和氏が、任期途中の志半ばで2017年3月に永眠された。心からご冥福をお祈りしたい。