

話 題

IFMIF 加速器のプロトタイプ建設の意義と目標課題

杉本 昌義^{*1*2}・パスカル ギャラン^{*1*3}・クリストフ ベルマール^{*1*3}
 設楽 弘之^{*1*2}・木村 晴行^{*2}・鈴木 寛光^{*2}・大平 茂^{*2}・奥村 義和^{*2}
 アルバン モニエ^{*3}・アルベルト ファッコ^{*4}・アンヘル イバラ^{*5}

Values of Construction of IFMIF Accelerator Prototype and Targeted Issues

Masayoshi SUGIMOTO^{*1*2}, Pascal GARIN^{*1*3}, Christophe VERMARE^{*1*3}, Hiroyuki SHIDARA^{*1*2},
 Haruyuki KIMURA^{*2}, Hiromitsu SUZUKI^{*2}, Shigeru O'HIRA^{*2}, Yoshikazu OKUMURA^{*2},
 Alban MOSNIER^{*3}, Alberto FACCO^{*4} and Angel IBARRA^{*5}

Abstract

International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) is an accelerator-based neutron irradiation facility dedicated for development of fusion materials. Engineering Validation and Engineering Design Activities (EVEDA) phase of IFMIF project has been initiated in June 2007 and a prototype of the IFMIF accelerator Deuteron is under construction in Rokkasho, Aomori. The target of the prototype is 9 MeV-125 mA CW beam operation, which is full scale prototyping up to the first tank of superconducting linac section. In this report, the major technical specifications and issues of this extremely high-power machine are overviewed and expected results through operation in future are summarized.

1. はじめに

IFMIF とは国際核融合材料照射施設 (International Fusion Materials Irradiation Facility) の略称であり、核融合エネルギー開発において重要な役割を持つ構造材や機能材など各種材料の開発のために、できるだけ実環境を模擬した中性子照射場を提供する目的で設計開発が進められている。その基本概念は、国際エネルギー機関 (IEA) の国際協力の枠組で実施された概念設計活動において日欧米露の協力によってまとめられた Comprehensive Design Report (CDR)^{1,2)} に述べられており、2003 年頃までの活動状況を把握することができる。また、我が国の核融合開発における位置づけとしては、「核融合エネルギーの実用化に向けたロードマップ³⁾」に重要なステップとして 2030 年代に原型炉 (DEMO) の実現が想定されており、IFMIF は核融合実験炉 ITER の建設・運転やブランケット工学開発に並行して進めるべきものとされている (図

1)。この点は欧州と認識を共有しており、2007 年 6 月より開始された幅広いアプローチ (BA) 活動という核融合開発に関する日欧協力事業のひとつとして、IFMIF の工学実証工学設計活動 (Engineering Validation and Engineering Design Activities, EVEDA) が実施されることになった。EVEDA では、幾つかの主要なシステム要素のプロトタイプを製作し性能実証試験を行なうとともに、将来の IFMIF 建設判断に供するための工学設計書及び建設・運転・廃棄 (Construction, Operation, and Decommissioning Activities, CODA) にわたる事業計画案を完成させることが目的である (図 2)。加速器プロトタイプのスケジュールは 4 章で詳解するが、運転実証内容についてまだ細部が固まっていないところがあり、今後の議論により変わってくるとみられる。

IFMIF に必要な材料照射用の中性子場は最大 10^{18} 個/m² 秒というこれまでにない強力なものであり、DT 核融合に特有の 14 MeV 中性子による影響をより

*1 IFMIF/EVEDA 事業チーム IFMIF/EVEDA Project Team
 (E-mail: masayoshi.sugimoto@ifmif.org)

*2 日本原子力研究開発機構 核融合研究開発部門 Fusion Research and Development Directorate, JAEA

*3 フランス CEA Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives

*4 イタリア INFN/LNL Laboratori Nazionali di Legnaro, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

*5 スペイン CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas

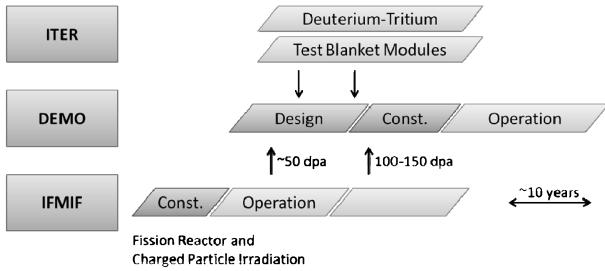


図 1 核融合エネルギー開発における ITER, DEMO, IFMIF の相互関連

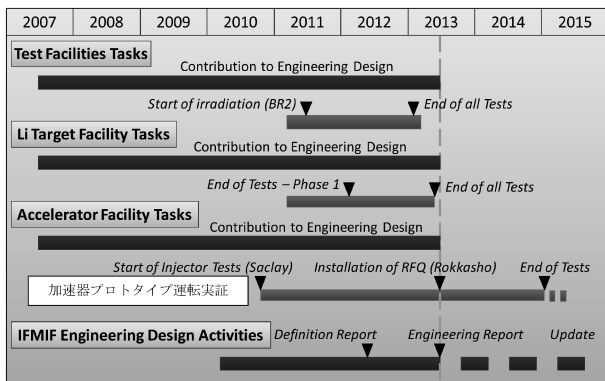


図 2 IFMIF/EVEDA の全体スケジュール（加速器プロトタイプの運転期間は今後の計画調整による）

正確に評価するためには、高速炉を含む核分裂炉やスポーレーション源とは異なる中性子エネルギー分布を持つことが不可欠である⁴⁾。また、照射材の材料試験におけるデータの精度を高めようとすると、ある程度の大きさを持った試験片を複数個、照射条件を厳しく制御しながら照射することが必要となり、 10^{18} 個/m²秒の中性子場の照射容積が最低でも 500 cm³ 確保されなければならない。このため、幾つかのオプションから、大電流の重陽子ビーム (40 MeV/250 mA) を一様な密度分布に拡大 (幅 20 cm, 高 5 cm の矩形) し、ビームが突き抜けけない十分な厚さの液体リチウムに打ちこみ、⁷Li(d, np)⁷Li 反応などで発生する連続エネルギースペクトルの中性子を利用する d-Li 加速器型中性子源の概念が採用された⁵⁾。同時に、IFMIF 以外の手段によって材料開発が可能かどうか検討されたが、個別の材料特性を調べるために原子炉などの低エネルギー中性子照射やイオンビーム照射を活用することは重要ではあるものの、ライセンシングの観点から、材料としての交換寿命期間に至るまでの特性変化の予測を可能とする IFMIF 照射データを代替するものではないという認識である。

IFMIF の詳細な仕様と全体構成を 2 章で紹介し、

EVEDA における加速器開発の要である加速器プロトタイプの概要を 3 章で述べる。プロトタイプは青森県六ヶ所村の日本原子力研究開発機構のサイトに建設されることが決定している。その機器構成はほぼ固まり、試験建屋が竣工し、一部の機器の製作に着手している段階であるが、実機設計に反映すべき実証試験データの詳細な取得計画については未定である。現在想定される建設・運転スケジュールを 4 章で、加速器開発としての技術課題を 5 章で述べる。なお、EVEDA 開始までの状況は参考文献 6) を参考にされたい。

2. IFMIF とは

2.1 IFMIF の要求仕様

IFMIF の基本的な要求仕様は概念設計書 (CDR) から変わっておらず、照射場強度と容積については、「 9×10^{17} n/m²s (中性子負荷換算 2 MW/m²) 以上の容積を 500 cm³ 以上、 4.5×10^{16} n/m²s 以上の容積が 6,000 cm³ 以上」である。前者は主に、ブランケット第一壁構造材の耐久性を、後者は照射中の材料挙動 (クリープ疲労, トリチウム放出などの「その場試験」) を調べることが目的である。試験片の大きさは標準よりだいぶ小さいものを用いるが、位置による照射量の変化が出ないように、照射場強度勾配をゲージ内 10% 程度以下に抑えることが求められる。また、照射が間欠的であると μ 秒程度の休止でも損傷が回復する恐れがあるため、準連続のビームである必要がある。照射試験の温度範囲は、構造材候補の低放射化フェライト/マルテンサイト鋼が 300~500°C (ODS 鋼 750°C まで)、V 合金が 400~800°C、SiC/SiC 複合材が 1,100°C 以下、W 合金が 650~1,200°C とする。ブランケットを構成する機能材 (トリチウム増殖材, 中性子増倍材, コーティング材) は 300~1,100°C (照射後試験用, その場試験の上限温度は 3 種類について、それぞれ 1,100, 1,000, 900°C) とする。積算中性子照射量は構造材が 10 MW a/m² 以上、機能材は 2~5 MW a/m² までとする。照射試験の対象となる材料としては、ほかにセラミクス絶縁材, 真空窓材, RF 窓材, 超伝導コイル材などがあるが、照射量は 0.5 MW a/m² 程度まででよい。これらの照射を実現する試験マトリクスの策定は材料開発者の課題であるが、7 年間で 10 MW a/m² の照射を達成できるよう、施設の稼働率は 70% 以上が要求されている。

2.2 IFMIF の全体構成

IFMIF において、ビーム加速から照射場をつくるまでの基本要素を図 3 に示す。加速器の主要要素は、

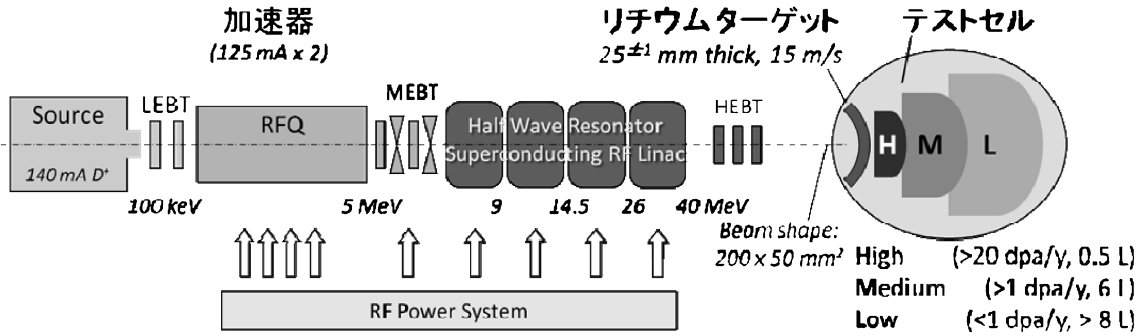


図3 IFMIFの主な構成要素：加速器系，リチウムターゲット系（液体金属ループ），試験設備系（テストセルやその他のホットセル）

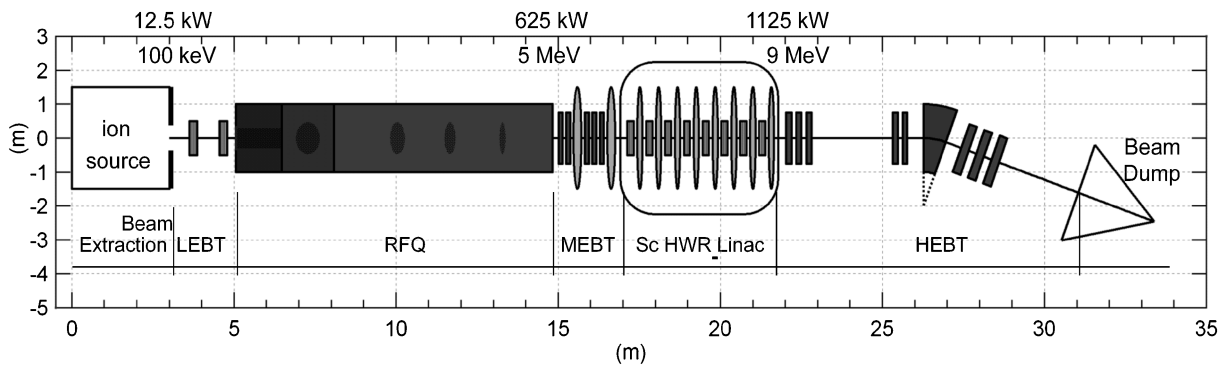


図4 加速器プロトタイプの機器構成：9 MeV/125 mA の D+ を CW 加速

上流側から，100 keV のイオン源（Source），低エネルギービーム輸送（LEBT），5 MeV の高周波四重極（RFQ）リニアック，中間エネルギービーム輸送（MEBT），最大 40 MeV の超伝導 RF リニアック，高エネルギービーム輸送（HEBT）である．加速器 1 基あたり 40 MeV/125 mA の重陽子（D⁺）ビームを供給し，リチウムターゲットの表面で 2 基の加速器から独立に輸送されてくるビームを合流する．ターゲット表面（横幅 260 mm）でのビーム形状は水平方向が 200 mm にほぼ一様で左右のテールは不可（中心を ±1 mm 以内に保ちつつ幅が最大 220 mm まで拡大することは許容するが，許容範囲外では $0.5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$），垂直方向は 50 mm の一様平坦部に上下それぞれ 10 mm のテールを持たせることが要求される．RFQ，超伝導空洞，及び MEBT のバンチャー空洞の運転周波数はすべて 175 MHz とする．リチウムターゲットは照射試験が行なわれるテストセルと呼ばれる空間内に設置され，ビーム窓は使用せず（表面真空度 10^{-3} Pa，ビーム輸送系の 10^{-4} Pa から差動排気），25 mm 厚の液体金属リチウムの高速ジェット流（15 m/s）を吹き出しその内部でビームを完全停止させる．定常状態で 10 MW に達する入熱のほぼ全量がリ

チウム流により，ターゲット下部のクエンチタンクと呼ばれるバッファ部に運び去られる設計である．このターゲット部を除く他の部分は Na 冷却の高速炉で培った液体金属ループ技術が応用されている．テストセル内には必要な試験片の種類と照射温度を定めた試験モジュールが設置され，数ヶ月単位での照射が繰り返される．高（High）—中間（Medium）—低（Low）中性子束領域に分けられた照射容積に，照射実験のタイプにより異なる複数の照射モジュールが設置される．照射後試験のための関連施設は図では省略されている．

3. IFMIF 加速器プロトタイプの概要

3.1 プロトタイプの機器構成

加速器プロトタイプは IFMIF 実機の低エネルギー部そのままの構成であり，イオン源—LEBT—RFQ—MEBT—超伝導リニアック（4 台のクライオモジュールのうちの最初の 1 台）から構成される（図 4）．HEBT は 20 度偏向磁石によりエネルギー分析を行ないつつ，加速器の機器がビームダンプから逆流する中性子を直接見込まないようにしている．加速器直後の 3 連 Q 磁石と偏向磁石直前の 2 連 Q 磁石との間にはビーム計測システムを設置できるようドリフト空間が

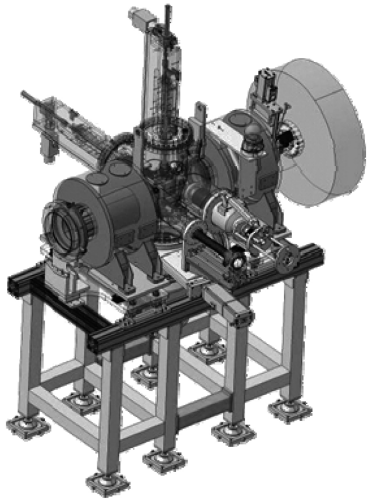


図5 入射器 LEBT (2台のソレノイドの中央にビーム診断部を設置, 右端は RFQ 空洞に接続されている)

設けられている.

3.2 入射器

イオン源からは, 100 keV/140 mA の D+ が連続ビームで引出され, 1 対のソレノイド磁石からなる低エネルギービーム輸送 (LEBT) によって高周波四重極 (RFQ) リニアックに整合をとって入射する (図 5). 4 段電極構造で, ビーム引出し孔直径 12 mm. ビームの規格化エミッタンス $0.25 \pi \text{ mm mr}$ 以下が要求される. 長時間運転時の保守性・寿命延長の観点で ECR 型のイオン源を用いるが, 既存の類似タイプの試験結果はビーム組成比が D+ : D2+ : D3+ = 80 : 15 : 5 という結果であり, 全ビーム電流としては 175 mA が必要である. 全長 2 m の LEBT 内のビーム輸送には希ガス (クリプトン $4 \times 10^{-3} \text{ Pa}$) を混入させ, 電荷中和により空間電荷影響を抑制する方式が採用さ

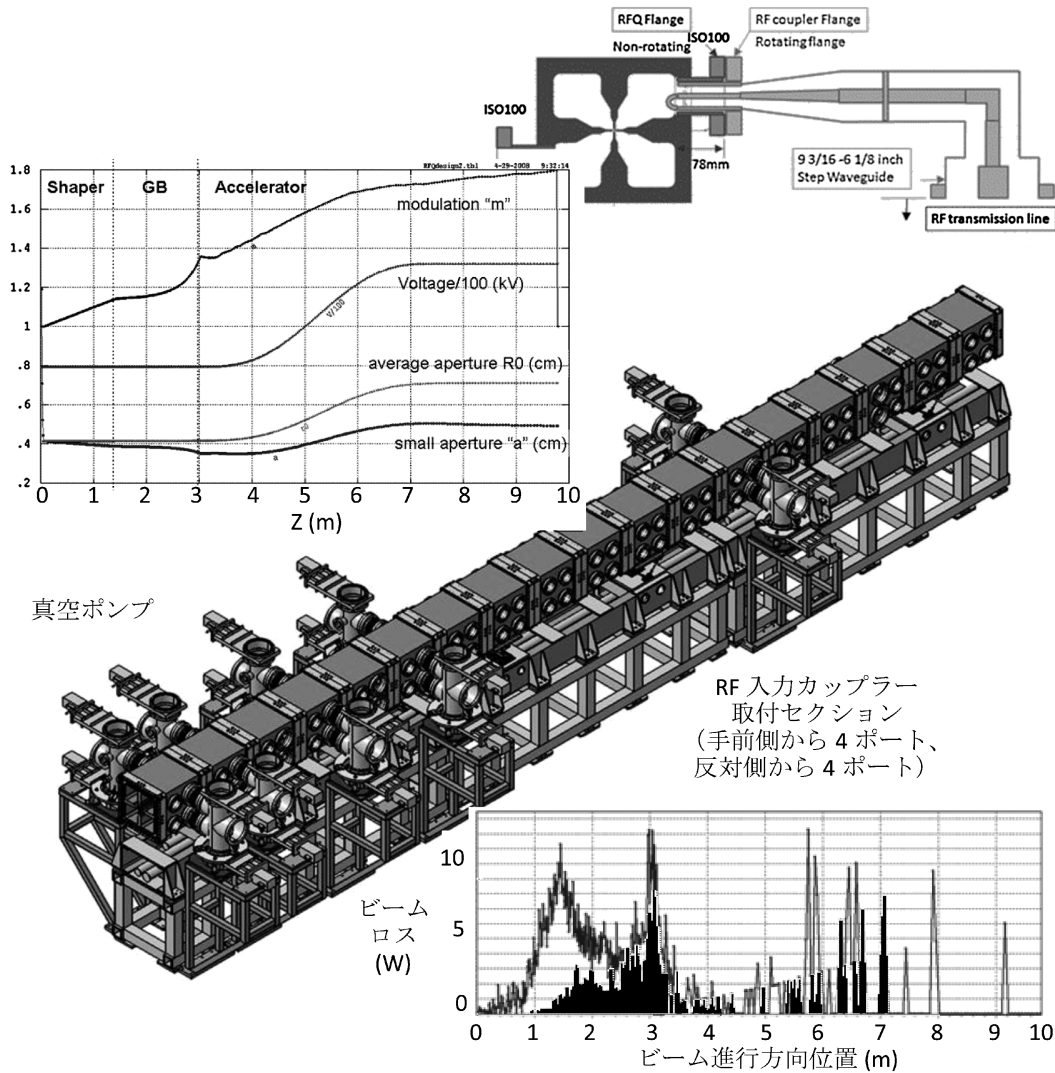


図6 RFQ の全体図(中央), 設計パラメータの RFQ 長さ方向依存性(左上), 高周波カップラー(右上), ビームロスシミュレーション(右下, ヒストグラムは設計値どおりの場合, 折線グラフは設計値からの誤差を見込んだ場合)

れており, RFQ 入射直前に電子トラップを設置することで, 収束しながらのビーム入射に対応している.

3.3 RFQ

RFQ は 4 vane 型の空洞が真空構造体を兼ねる一体方式であり, 接合にはロウ付けを用いる (図 6). 特徴は, ベーン間電圧が前半 4 m の 80 kV から 3 m の遷移部を経て後半 3 m の 130 kV に増加させることにより全長の短縮 (9.8 m) を図った設計である. ビームロスの評価では設計どおりの状態であれば 98% の通過率が見込まれ, 誤差が生じた場合でも 94% が確保できる結果となった. RFQ の所要 RF 電力は最大 1.28 MW と見込まれ, RFQ 用の RF カップラーは 200 kW 対応のものを 8 機使用する. ループカップリング方式で RF 伝送系の 9-3/16 インチ同軸管から 6-1/8 インチにステップ変換後, セラミクス真空窓を介して ISO100 で取り合う.

3.4 MEBT

RFQ から出たビームは次の超伝導リニアックに整合するよう MEBT でビーム条件を調整する. 図 7 に示すように, Q ダブルレット—バンチャー—Q トリプレット—バンチャーという構成が提案されており, Q 磁石性能は最大 25 T/m, アパーチャー径 50 mm, ステアリング機能組込. バンチャー空洞は有効ギャップ電圧が 350 kV, ギャップ部を含む全長 35 cm 以下の要求

に対し 3 ギャップ型 4 分の 1 波長空洞が提案されている. また不要なビーム (ハロー成分) を制限するため, コリメータを導入する予定である.

3.5 超伝導リニアック

CDR の基本仕様は常温のドリフトチューブリニアック (DTL) であったが, 最近の超伝導空洞技術の進展と熟成を考慮し, 超伝導リニアックに仕様変更した. これにより, IFMIF 加速器の全長が 10 m 短縮され, 6 MW の RF 電力が節減できる. DTL に比べ, 製作精度・誤差による影響が限定的であることがメリットとして挙げられる. 設計仕様は加速電場が 4.5 MV/m, アパーチャー径が 40~48 mm, 収束磁場強度 $B_z \Delta L$ が 1 Tm, 有効長が 30 cm, アラインメント精度は空洞で ± 2 mm, ソレノイドで ± 1 mm. プロトタイプとして 4 台のクライオスタットの最初のタンク (全長 5 m, 図 8) を製作する. タンク内の 8 個の半波長型空洞は $\beta = 0.094$, 周波数チューニング範囲が ± 50 kHz (capacitive), $Q_{ex} = 6.3 \times 10^4$ とする. 超伝導ソレノイドの仕様は B_z が 6 T, もれ磁場が空洞のフランジ位置で < 20 mT であり, 内部にビーム位置モニタとビーム軌道補正ステアリングコイルを組み込んだ構造となる.

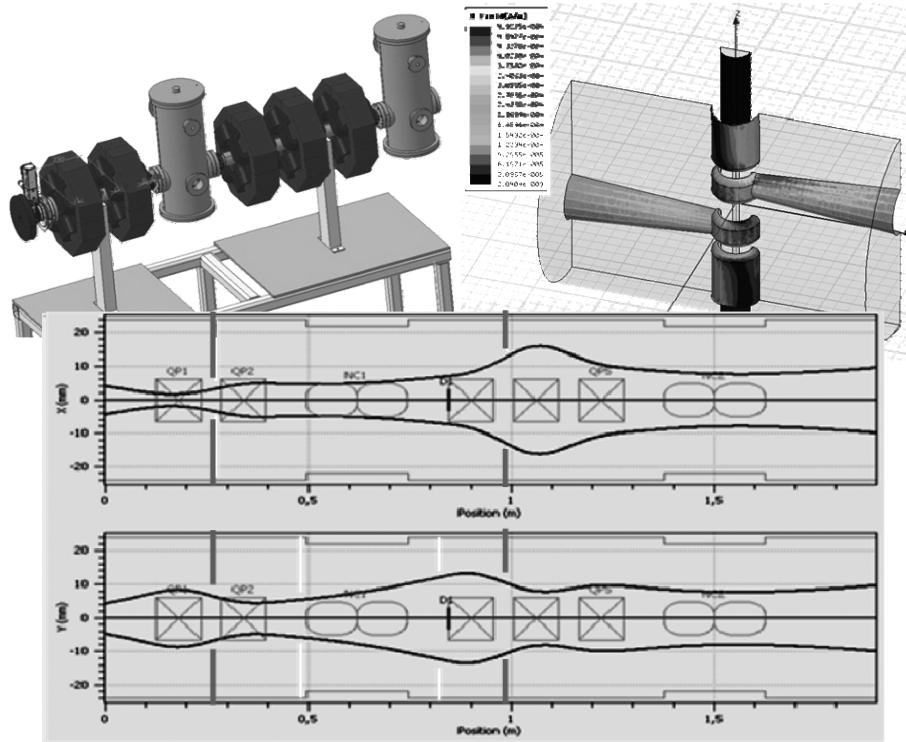


図 7 MEBT の外観 (左上), バンチャー空洞の内部構造 (右上), ビームエンベロープの設計シミュレーション (下)

3.6 高周波源

プロトタイプのCWフルパワー運転に対応するため、RFQについては、220 kW システムを8式、MEBTのバンチャー空洞2台用に105 kWを2式、超伝導リニアック用に105 kWを8式準備する。最終出力が異なるものの、各ユニットは同一構造となるようにし、直流電源も同一仕様で製作、105 kWユニットは2つをまとめて供給する設計である。高周波の安定度要求は振幅/位相について $\pm 1\% / \pm 1^\circ$ 。また、合計台数が多いので、2台をまとめて1つのプラットフォームにのせる構成をとる。調整用にパルスモード運転が必要であり、繰り返し1~10 Hzで、100 μ s からCWまでパルス長が可変であることが要求される。

3.7 HEBT・ビームダンプ

超伝導リニアックの出口からビームダンプの間を結ぶHEBTは、Qトリプレット—診断系セクション—Qダブルレット—20°ベンド—Qトリプレットという構成をとる(図9)。基本的な要求項目は、2.5 mの診断系セクションへビームを規定の条件で通すこと、ビームダンプにはビーム径を拡大させて打ち込み熱発生密度を規定以下に収めることである。図9には明示され

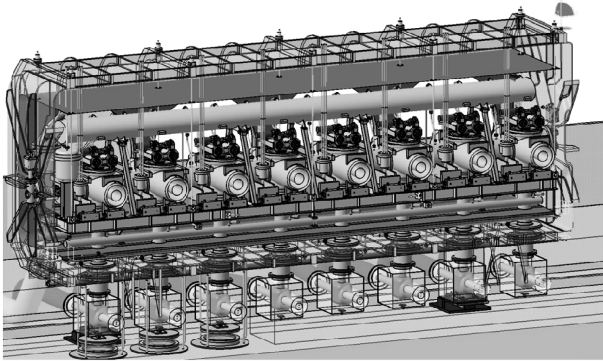


図8 超伝導リニアックの内部構造

ていないが、ビームダンプで発生する中性子を加速器側にできるだけ逆流させないよう隔離する局所遮蔽が必要であり、最下流のQ磁石の直後に設置する見込みである。

ビームダンプ本体は、開き角5度、全長2.5 mのCu製コーンであり、ビーム入熱最大1.125 MWに対応できるように先端部から水冷が行なわれる。ダンプで発生する高エネルギー中性子を熱化する為、さらに直径1 mの水遮蔽タンクでコーン部を被う構造である。

3.8 制御系・診断系

制御系は以下の6つの要素で構成される。(1)中央制御(CCS)、(2)LAN、(3)人的防護(PPS)、(4)機器防護(MPS)、(5)タイミング系(TS)、(6)各主要機器ごとのローカル制御。また、マン・マシン・インターフェースと各種サーバーを置く第1層、EPICSベースで構成するVMEシステムやPLCフロントエンドからなる第2層、個別デバイス並びにそれらを集合的に制御する第3層という階層構造をとる。これらの考えはJ-PARC制御系などで既に実現されているものであるが、本プロトタイプの特徴である欧州各国からの調達となる機器の組上げにうまく適応させることが必要である。

診断系は加速器コミッショニングを成功に導く鍵となるものであり、リニアックのチューニングなどもビーム計測やビームロス計測を通じてビーム特性を正確に把握しつつ行なうことが重要である。診断にはCWビームのための非接触(非破壊)型のもの、調整用に低デューティーで試験する場合の接触型のものがある。非接触型のは、ビーム位置モニタ、間接的計測(残留ガス発光等)によるプロファイルモニタ、電流トランスフォーマー、ビームロスモニタ、Q磁石強度とビームプロファイル変化計測によるエミッタンスモニタなどを準備している。接触型のものとしては、2次電子放出グリッドを用いたプロファイルモ

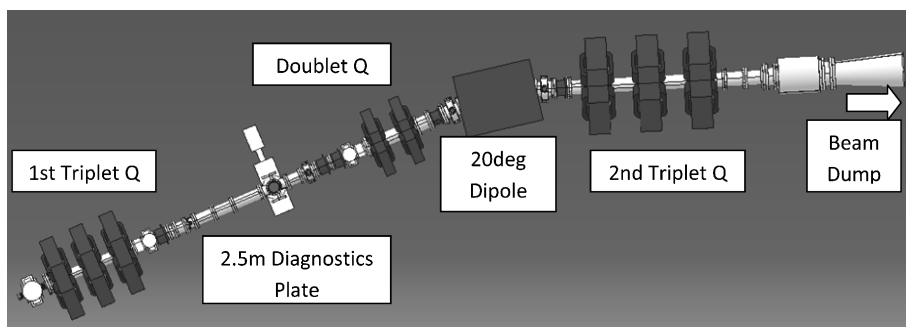


図9 HEBTの外観

ニタやスリットを用いたエミッタンス/エネルギー測定を考えている。

3.9 プロトタイプ試験施設

プロトタイプの実証試験は青森県六ヶ所村の国際核融合エネルギー研究センター（青森研究開発センターの敷地）に建設された（2010年3月竣工，図10）IFMIF/EVEDA 開発試験棟で実施される。加速器本体とビームダンプは1.5 m厚のコンクリート遮蔽で覆われた加速器室（41.5 m×8 m×高7 m）に収める（図11）。

4. プロトタイプの目指すもの

プロトタイプ要素機器の製作は，イオン源・LEBTと超伝導リニアック（空洞，クライオスタット，冷凍機設備），診断系，及びRF源のテトロードがCEA（フランス），RF源（伝送系，サーキュレータ，ダミーロード），MEBT，HEBT・ビームダンプ，及び超伝導リニアック中のソレノイドがCIEMAT（スペイン），RFQがINFN（イタリア），RF源（電源）をSCK-CEN（ベルギー），RFQ用RFカップラーをJAEAが分担する。制御系については中央制御をJAEAが，各機器のローカル制御はそれぞれの担当機関が製作する。



IFMIF/EVEDA 開発試験棟（2009年9月撮影）
（58m×37m×高11m、延床面積2,020m²）

図10 六ヶ所に建設されたプロトタイプ試験用施設

製作した機器は，一旦各研究機関で受入検査を実施した後，一部は欧州での仮組上げのためにテストスタンドへと移送し，残りを六ヶ所サイトに移送する。テストスタンドでの組上げ試験が完了した後はこれらの機器も六ヶ所へ移送される。入射器は2011年にサクレで組上げ試験（陽子ビーム引出し試験を含む）を実施し，2012年前半に六ヶ所へ移送，同年後半にはコミッショニングに入る。それまでに必要な補機設備をJAEAが準備する。また，重陽子ビーム引出し試験のためには放射線発生施設としての許認可申請を済ませる必要がある。入射器関連のコミッショニングは約半年を想定しており，それと同時期にRFQ用高周波源ユニットも順次移送されてくる予定である。RFQについては，一部のセクションのみサクレのテストスタンドにてハイパワー試験を行なう予定である。そのため，JAEAは高周波カップラーを2台サクレに移送し，単体でのハイパワー試験とRFQセグメントの試験に供する。これらの試験は2012年いっぱいかかる予定であり，その後，2013年後半からのRFQコミッショニングのため，ほかのセグメント共々六ヶ所へ移送される。RFQ並びにMEBTのコミッショニング期間も約半年を想定している。超伝導リニアックについては，サクレのテストスタンドで組上げ試験（4K冷却含む）を2012年前半まで実施し，2014年からのコミッショニングに備え，六ヶ所への移送を行なう。HEBT，ビームダンプの移送時期も重要であり，RFQコミッショニングで重陽子加速を行なう場合，低デューティーとはいえどもビームダンプが必要となるとみられる。ビームダンプの据付には入射器側の遮蔽扉ではなくビームダンプ側の加速器室搬入口を使う必要がある。気密性保持のため，この搬入口は使用後密閉することになる。上記のような入組んだ据付とコミッショニングの時期をうまく調整することができるかどうか，当初予定通り試験を完了できるかの分岐点となるであろう。

プロトタイプ最終目標はIFMIF加速器に要求さ

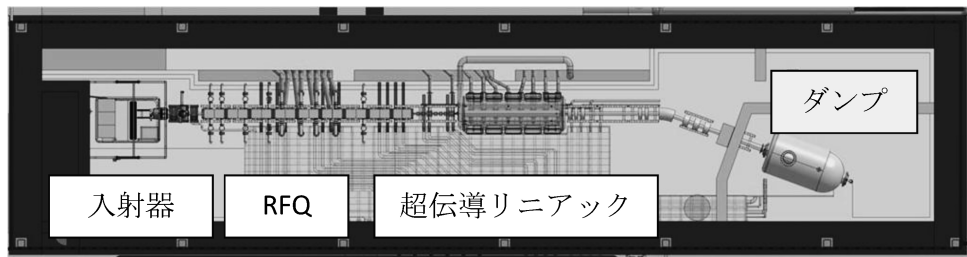


図11 加速器室平面図

れるビーム特性仕様（安定度を含む）が実現できる見通しを得ることである。IFMIF のような大電流ビーム加速においては、低エネルギー部のビーム特性が重要で、かつ実現が困難な部分でもあるというのが通説であることから、IFMIF 加速器の実現にはプロトタイプの技術に超伝導リニアックの後段部と 40 MeV 用の HEBT の技術を追加すればよいだけである。従って加速器要素の技術的リスクの大半はプロトタイプ試験で培った経験により大幅に軽減できることが期待できる。

もちろんプロトタイプ試験だけでは十分でない点も残る。HEBT の技術課題であるリチウムターゲット上に実現すべきビームフットプリント条件(20 cm 幅, 5 cm 高, 一様性, テール部)の実証試験は基本技術も含め EVEDA では行なわない。また、ビーム試験の実施期間に限られていることから長期間にわたる安定性や機器の故障率評価はできない。すなわち、加速器の稼働率評価にかなりの不確かさが残ることになる。加速器だけの課題ではないが、リチウムターゲットにビームを入射した場合の加速器系への影響と対応についても実証に基づく評価は不可能である。これらの問題は、インターフェースを含む加速器システムモデルが構築され、プロトタイプ試験並びに計算機シミュレーションにより、そのシステム挙動が検証・解明されることで解決されていくと考える。その意味で、プロトタイプ試験で何を検証するのかということに常に立ち戻る態度が大切であると思われる。

5. プロトタイプの開発試験における技術課題

プロトタイプに関連した課題として、次の分類に従って考察する。(1)設計課題、(2)製作課題、(3)据付・調整・運転課題、(4)工学設計への反映。

設計上の課題としてまず指摘されるのは、ビームダイナミクス解析と機器設計との連携である。通常、ある機構原理（仮定）に基づいて開発された計算コードにより設計パラメータを予測決定し、それを再現する機器設計がなされる。この場合、設計の手法そのものが検証の対象となる点で過去の事実の蓄積に基づく一般的な工学設計と同列に扱うことはできない。設計仕様にもあいまいさがあるので、仕様を満たす設計であるということだけで完了せず、要求仕様の見直しを継続することが必要である。

設計仕様を実現するための製作上の課題としては許容誤差の適切な設定の難しさがある。設計課題との関連で、仕様値の許容誤差もあいまいさが残るためであ

る。単純に過去の類似の製作例を参照することになりがちであるが、少なくともその根拠について明示的に記録しておくことが必要と思われる。具体例としては、RFQ のベーン加工やブレイジング精度、超伝導リニアック内の 4K 機器のアラインメント精度、HEBT ビーム整形多極磁場精度などが挙げられる。

据付調整及び運転上の課題は作業チームの技術力構築にあると考える。個々の能力というよりはチーム全体としての総合力が必要となり、十分な計画性と同時に事態の変化に対応できる柔軟性も備えるべきである。運転においても、設計～製作課題で指摘した仕様そのもののあいまいさへの考慮が必要であり、達成しようとする試験項目がそれまでの一連の試験結果を踏まえた上で、改めてどんな意味を持つかを常に検証しながら進んでいくのがよいと思われる。

プロトタイプ試験と工学設計との間は、もっと具体的な関連付けが可能である。入射器の基本性能は陽子ビーム試験においてほぼ推定可能であり、比較的早めに工学設計に移行できると予測する。ただし、IFMIF 加速器では故障時の修理回復時間の短縮化も重要な課題であり、その観点での、設計思想の再確認が必須である。RFQ は重陽子ビーム試験の結果を待たないと真の性能評価ができないという点で実質的な工学設計への移行は遅くなるとみられ、設計モデルの成熟度の面からも、移行困難な機器要素のひとつといえる。超伝導リニアックは本質的にトレランスの大きな系という点でプロトタイプが成功すれば、比較的容易に工学設計へ展開可能である。むしろ、年々進歩している分野であるため、現在採用した設計思想をそのまま実機に適用してよいかどうか迷うかもしれない。高周波源は 175 MHz のテロード系であり、必然的に修理交換作業が発生してくると予想される。保守交換において最適なシステム構成となるよう工学設計に移行しなければならない。ビーム輸送系・制御系はある程度成熟した技術領域であるが、前者はビームロスへの十分な対策とビーム整形技術、後者は診断系・安全防护系との緊密な連携の実現に関して、工学設計ではもう一歩前進する必要がある。ビーム診断系は非接触型モニタについて長期間運転の観点から、より高品質のものを提案し続ける必要があり、おそらく IFMIF そのものが動き出しても継続的に開発が行なわれると思われる。

6. まとめ

IFMIF 加速器のプロトタイプは 9 MeV-125 mA CW の重陽子ビーム加速の実現を目指し、現在各要素

機器の設計製作にとりかかっており、2012年ごろから各機器が六ヶ所の試験サイトに搬入される。入射器試験は2012年後半に始まる予定であり、大電流ビーム加速の試験がスタートする。一方、放射線安全の観点から、重陽子ビーム加速をどの程度まで実現しつつ次段階に進めるかが問題であり、入射器の100 keVレベルでもD-D反応中性子が大量に発生する危険性がある。ビーム試験においては、ビームロスを最小限に抑える努力を怠らないようにしなければならない。大電流ビームの運転期間はどうしても限定的になるので、どのような試験をどんな目的で行なうかという選択が大切である。最終的にIFMIF加速器実機の性能実現の見通しが得られれば、本プロトタイプの実機は達成したと言えるであろう。

謝辞

本報告の技術概要のベースとさせていただいたのは、2010年5月26日京都国際会議場で開催されたIPAC10のサテライト会合「IFMIF/EVEDA Satellite Meeting」での発表資料である。著者らは多くの直接タスクを実施した担当者各位に改めて感謝の意を表したい。また、その機会を与えていただいた京都大野田教授並びにIPAC10実行委員の方々に改めて厚

く御礼申し上げたい。

参考文献

- 1) IFMIF International Team, “IFMIF Comprehensive Design Report”, IEA (2004). 資料の入手先
http://www.iaea.org/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_PartA.pdf,
http://www.iaea.org/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_PartB.pdf
- 2) 松井他, 小特集「国際核融合材料照射施設 (IFMIF) の設計と開発の現状」, *J. Plasma Fusion Res.* **82**, 3 (2006).
- 3) 核融合エネルギーフォーラム ITER・BA 技術推進委員会報告書「核融合エネルギー実用化に向けたロードマップと技術戦略」(2008年6月), 掲載 URL (ダウンロード可能):
<http://www.naka.jaea.go.jp/fusion-energy-forum/>
- 4) D. G. Doran et al., Damage parameters for candidate fusion materials irradiation test facilities, *J. Nucl. Materials* **174**, 125 (1990). D. G. Doran et al., Neutronics comparison of d-Li and t-H₂O neutron sources, *J. Nucl. Materials* **218**, 27 (1994).
- 5) K. Ehrlich et al. (Ed.), Proceedings of the IEA-Workshop on Intense Neutron Sources, Karlsruhe, September 21-23, 1992, KfK-Reports 5295, May 1994.
- 6) 杉本, 加速器と社会. 「核融合材料照射施設用加速器開発の課題」, *J. Particle Accelerator Society of Japan*, Vol. 3, No. 2, 196 (2006).