

核融合材料照射施設用加速器開発の課題

杉本 昌義*

Issues of Accelerator Development for Fusion Materials Irradiation Facility

Masayoshi SUGIMOTO*

Abstract

The International Fusion Materials Irradiation Facility is an accelerator-based high-energy intense neutron source for materials development towards DEMO fusion reactor. The IFMIF accelerator system is required to provide a cw deuteron beam of 40 MeV-250 mA with an extremely high availability, 88%. The key concept for achieving these requirements is an operational stability and some essential features of key components were verified in these years. To complete the engineering design for the decision of future construction, a prototypic low-energy part up to ~10 MeV will be built in the next phase under the European-Japan collaboration.

1. IFMIF プロジェクトについて

核融合エネルギーの実現は、核分裂エネルギーを利用する原子炉に比べて燃料資源の偏在がなく環境負荷への影響も小さいことから、将来のエネルギー源として囑望されており、それに向けた一歩として国際核融合実験炉 (ITER)¹⁾の建設がまもなく開始されようとしている。その主な目的は D-T (重水素-3 重水素) 核融合反応の燃焼プラズマの保持、並びに、核融合炉として成立するための炉工学技術のインテグレーションに関する試験を行うことにある。しかしながら、核融合エネルギー開発戦略において次段階の装置と位置付けられる DEMO (原型炉)に進むためには、核融合反応によって生じる強力な中性子 (いわゆる 14 MeV 中性子) の照射に耐える材料の実証が別途必要となる。とりわけ最大中性子束の場所に置かれるのがブランケット第一壁と呼ばれるものであり、中性子強度を「壁負荷」という単位で表すと 10~20 MW 年/m²、結晶中の原子弾き出し回数にして 100~200 dpa (鉄換算) (dpa: displacement per atom) といった厳しい環境下で使用される。実は、このレベルの中性子照射損傷は、高速炉などでも実現することができるのであるが、中性子エネルギーが低過ぎて材料中の核変換生成物の影響については調べることができない。とく

に、数 MeV を超す中性子は材料中に水素・ヘリウムといったガス状生成物を多く発生するため、その量と照射損傷量の比 (とりわけ He 生成 appm/dpa という量) (appm: atom part per million) が材料特性の変化に重要な影響を及ぼすことが分かっている。つまり、He 生成 appm/dpa というパラメータを核融合炉に一致させることが核融合材料の模擬照射試験を成立させるための要件であり、それには、材料の使用環境に応じて中性子エネルギースペクトルをチューニングできるようなものが最適であるとの結論に達する。D-T 反応そのものを用いる中性子照射も考えられるが、核融合炉自体が存在しない段階では加速器 (例えば数百 keV-数 A) を用いる必要があり、その熱負荷に耐えるターゲットの課題が解決できず、実現に至っていない。そこで、類似の中性子照射場をつくる方法として考えたのが液体金属に重陽子ビームを打ち込み、ストリッピング反応で中性子を発生するやりかたである。ターゲットとしては、中性子収量と液体金属特性 (融点、沸点、蒸気圧等) との兼ね合いからリチウム (Li) が選択され、14 MeV 相当のエネルギースペクトルを得るため、重陽子ビームは 30~40 MeV とするのが適切である。こうした基本概念は 1980 年代前半に技術開発が行われた FMIT プロジェクト²⁾で確立され、現在の IFMIF プロジェクト³⁾へとつなが

* 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, Japan Atomic Energy Agency
(E-mail: sugimoto.masayoshi@jaea.go.jp)

表 1 IFMIF の基本仕様

中性子束/容積	2 MW/m ² 以上の容積 500 cm ³ , 0.1 MW/m ² の容積 6000 cm ³ (1 MW/m ² ~ 4.5 × 10 ¹⁷ n/m ² s)
中性子束勾配	試験片ゲージサイズにわたり 10% 以下
施設稼働率	70% 以上
照射時間構造	準連続であること (照射損傷過程の回復緩和時間より短い休止 ~ μs)
照射温度/照射損傷量	250–600°C (鉄鋼材料, V 合金), 600–1100°C (SiC/SiC 複合材, 高融点金属)/150 dpa
ビーム/ターゲット	重陽子ビーム, 40 MeV–250 mA/液体リチウム (窓無し自由表面流 ~ 幅 26 cm, 厚 2.5 cm, 流速 15 m/s)

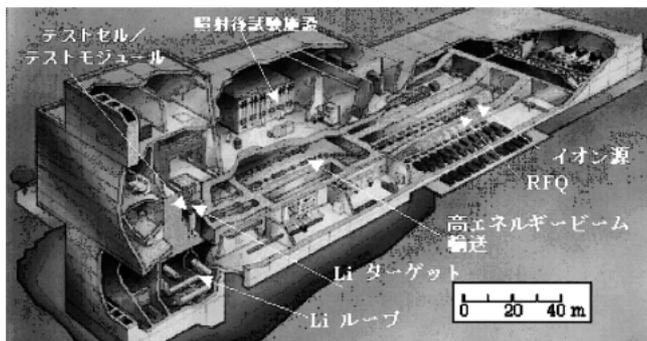


図 1 IFMIF 本体施設の概観 (1階に重陽子リニアック 2 式と高周波源を配置。水平面でビームを輸送, ターゲットでひとつに重ね合わせる。地階に液体リチウム系, 2階に照射試験片を扱うホットラボを配置。)

る系譜となっている。表 1 に IFMIF の概略仕様を示す。40 MeV–250 mA (10 MW) の仕様はミニサイズの各種試験片を用いて DEMO 相当の照射量を 5 年程度で実現するための必要ボリュームである 500 cm³ を実現するための必要条件である。図 1 に概念設計に基づいて描いた施設の概観を示す。

2. 低エネルギー CW 重陽子リニアック

IFMIF 用加速器に要求される性能を表 2 に示す。全系稼働率 70% (他のシステム要素の稼働率並びに施設の保守点検時間を割引いた加速器システムとしての稼働率目標は 88%) を達成するため, 1 台当り 125 mA の加速性能を有する CW 高周波リニアック 2 式で構成する。図 2 に加速器系全体レイアウト, 図 3 に 125 mA 加速ユニットを示す。各加速ユニットは (1) 入射器, (2) 175 MHz 高周波四重極加速器 (RFQ), (3) 175 MHz ドリフトチューブ型線形加速器 (DTL), (4) 高エネルギービーム輸送系 (HEBT) および (5) 高周波電力システムから構成される。入射器から, 95 keV/140 mA の重陽子ビームを引出し, RFQ で 5

MeV まで, さらに DTL で 40 MeV まで加速, HEBT により Li ターゲットへ導く。ターゲット上には幅 20 cm × 高さ 5 cm の一様矩形分布のビームフットプリントを形成することが求められる。

3. 加速器開発の現状と課題

IFMIF 用加速器の最大の特徴は, 大量のビームを CW で長期間安定に加速することであり, 長寿命化・高安定化を目指した入射器や CW-RFQ/DTL の開発, さらに, それらを駆動する 1 MW 級 RF 源には高い信頼性が要求される。そのため, いくつかの要素に関する技術確証試験が実施され⁴⁾, 入射器では, 1,000 時間以上の長寿命が可能な ECR 型イオン源によるビーム引出し実験を行い, H⁺ イオン 95 keV–96 mA で 744 時間連続運転を実証し, D⁺ 入射器として ECR 源の採用が決定された。RF 源の高信頼化に関しては, 200 MHz, 1 MW–CW のダイアクロードによる 1,000 時間以上の運転実績 (稼働率 98.7%) を達成した。IFMIF 用としては出力空洞周波数を 175 MHz に変更する必要があるが, 実用への見通しが得られた。

表 3 に加速器システムの主な技術課題とこれまでの開発成果を示す。イオン源試験は, 仏サクレー, 独フランクフルト大, 及び原子力機構で実施され, 要求仕様にはほぼ合致するものが得られている。特に, サクレーでは連続運転で稼働率 95% を実現, 放射化を抑えるため 2 ms パルスではあるが重陽子ビーム電流 130 mA を達成した。プロトン比改善については, アーク方式イオン源を用いた試験で, Xe ガスを 0.8 Pa 程度加え電子温度を下げることで, 低アーク電力でのプロトン比とノイズが低減するとの結果を得た。また, サクレーの結果では D⁺ 引出しにすると, D⁺/D₂⁺/D₃⁺ = 96.9/3.1/0.0 という非常によい原子比を得た。ECR 方式とアーク方式の比較試験が原子力機構で行われ, 幾分エミッタンスが劣る面もあるが, 総合

表2 IFMIF 用加速器の設計緒元

加速ビーム種	平常運転 D ⁺ ; ビーム試験時 H ₂ ⁺ (放射化低減対策のため)
ビーム特性 (ターゲットでの)	40 MeV (ブラッグピークでの局所発熱抑制のため±0.5 MeV 程度の幅を持たせる), 125 mA, ビーム分布~幅 20 cm, 高 5 cm 一様, デューティ: CW (調整・起動時~ms 程度のパルスモード可) 稼働率: 88% 以上
保守方法	ハンズオン
設計寿命	30 年
入射器	ECR イオン源, 磁場収束式低エネルギービーム輸送 規格化 rms エミッタンス: 0.2 πmm mrad 寿命: 1000 時間以上
RFQ	周波数: 175 MHz, 4 ベーン型一体構造, 共振結合方式 (3 セグメント) 入出力エネルギー: 95 keV/5 MeV, 通過率 90% 以上 規格化 rms エミッタンス: 横 0.4 πmm mrad, 縦 0.8 πmm mrad
DTL	周波数: 175 MHz, アルバレ型, ポストカップラーつき 規格化 rms エミッタンス: 横 0.4 πmm mrad, 縦 0.8 πmm mrad
高周波源	175 MHz/1 MW CW 出力モジュールから構成. RFQ に 2 式, DTL に 10 式. マッチングセクションの空洞用に 50 kW CW モジュール 2 式.

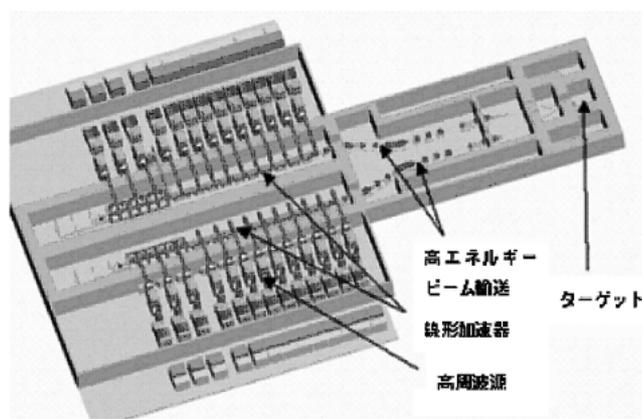


図2 IFMIF 加速器系全体のレイアウト

評価として ECR 方式の採用となった。

イオン源から RFQ の間の低エネルギービーム輸送 (LEBT) では, 空間電荷による発散を抑制する方式として, 磁場収束と電場収束が提案されたが, 後者の場合, 電流変動によって LEBT 通過後のエミッタンスが大きく劣化することが分かり, IFMIF 用には磁場収束方式 (標準的な 2 ソレノイド磁石配置) を選択した。空間電荷中和の試験結果によると LEBT の上流側ではビーム径にはほとんど依存せず, 97% 強が中和される。このときの残留ガスは H₂ がほとんどを占める (5 mPa)。これに 7~10 mPa の Ar ガスを加えると中和率は 98% を超すことが分かった。LEBT 下流側での同様な計測では, Ar 添加により, 89% から 98% に増えた。ソレノイド磁場のオン/オ

フで様子が変わることから電子のミラー磁場トラップが効いているらしいこと, 周囲からの電子生成がないと期待したほどの中和率に達しないことも分かっている。中和の速さは, 残留ガス圧に依り 2.3~10 μ秒程度である。これにはイオン源の立上がり時間も含まれるので応答の周波数下限は 20~200 kHz とみられる。

IFMIF 用 RFQ は, 4 ベーン型が採用されている。加速周波数は 175 MHz となっているが, 125 mA 重陽子加速という観点では, 上限に近い値であり, CW 常伝導加速としては高めの 1.7~1.8 キルパトリックを採用することになる。電流余裕だけからは, 周波数を低めに設定するのもよいが, DTL/HEBT でのビーム挙動を考慮すると, エミッタンスを低く抑えることも重要との判断が影響している。ビームダイナミクス計算から, RFQ 全長は 12.5 m 程度になるため, LANL の LEDA 開発で実績のある Resonant Coupled 方式⁵⁾が採用された。コールドモデルによるモード分離の測定から, 全体を 3 分割し RF セグメント長を 4 m 強とした。RFQ 製作時の誤差 (セル毎にランダムに寸法が変動するとして) がビームに及ぼす影響を評価した結果から, 50 μm 以内に抑えれば, 大きな影響はないとの結論を得た。

RFQ から DTL へのビームの受け渡しに際して, 高周波電場による収束から DT の Q 磁石による磁場収束への整合を最適に調整できるように, マッチングセクション (MS) として, F-D-F 四重極磁石系 (50~70 T/m) とバンチャー空洞 (150~160 kV) 2 個を導入する。初期の設計では, RFQ の出口部セル及

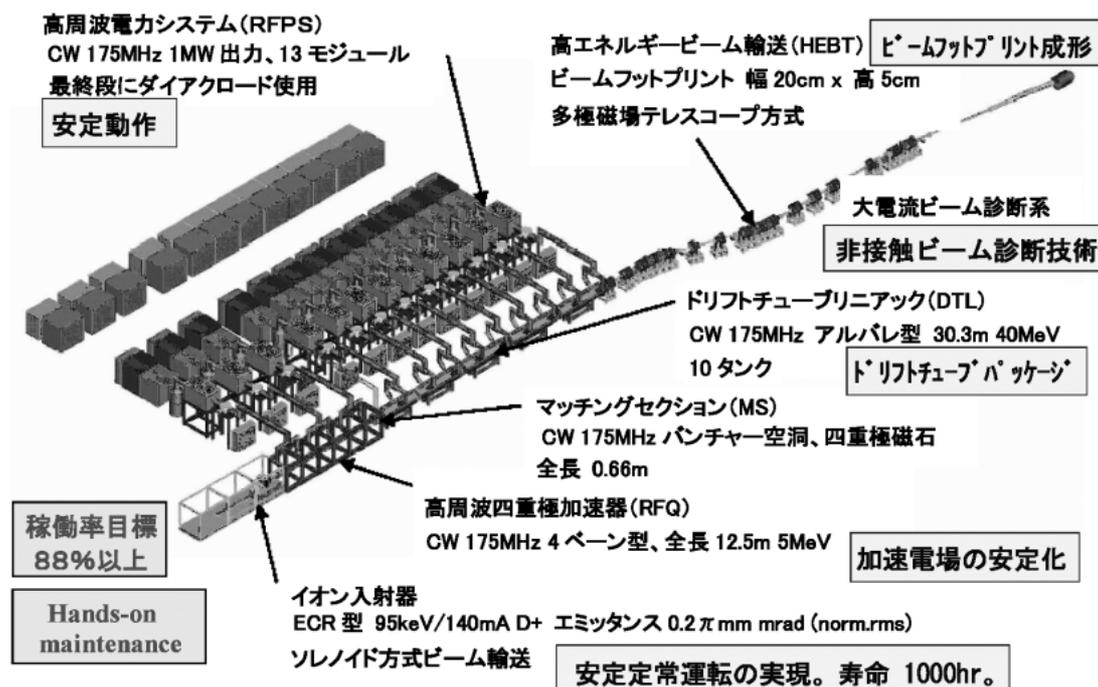


図3 IFMIF 125 mA 加速ユニット (RFQ に接続する高周波モジュールは 2 式に変更予定)

表3 IFMIF 加速器要素技術の課題と開発成果

要素技術課題	開発成果
長寿命イオン源	ECR 型イオン源採用を決定, ECR イオン源により稼働率 95% 以上の定常運転を実証, D ⁺ イオン 100 keV-130 mA を実証
CW 高周波源	高周波源の 1,047 時間運転を実証 (稼働率: 98.7%), 175 MHz/500 kW-CW 高周波窓を試作し, 0.1% 以下の低反射率を達成
CW RFQ	ビーム軌道解析により低ビームロスの実現可能性を検証, RFQ モックアップモジュールを試作し, 空洞結合方式 RFQ の RF セグメント長を 4 m とした
CW DTL	第 1 ドリフトチューブの熱除去性能を計算で確認
HEBT	低ビームロスでターゲット入射に必要な矩形ビームへの成形を可能とする設計を実施
非接触型ビーム診断	分光法を併用したビームサイズ計測を検証

び第 1 DTL の最初の DT を組み合わせることで, MS に相当する機能を実現するという考えもあるが, ビーム条件の変化に対しより柔軟な対応ができるよう, MS として独立させた。

主加速部は基本仕様がアルバレ型 DTL であり, 代替案として, 超伝導リニアックが考えられている。過去に 100 mA を超す CW ビームを長期間安定に運転した事例はないため, 特に, 各部の除熱の問題, 発熱に伴う変形やデチューンの影響, 冷却水温度制御によるチューニングの実証など工学的に解決すべき課題は多い。重陽子ビーム加速ということから, ビームロスを最小限に抑制するのが最大の目標である。20~30

年間の連続運転を経て, なおハンズオンで保守可能な状態に保つものとする, 要求されるビームロス数は数 nA/m 以下となる。もっと現実的な保守手順を想定しても 50 nA/m 以下にはしたい。ピーク電界を 1.3 Kp, ボア径 2.5 cm とした設計では, 全長は 30 m 程度となる。空洞の RF 損失が 2 MW 程度, ビーム電力 4.4 MW と合わせた所要 RF 電力 6.2 MW を 10 分割したタンクに供給する案が標準である。DTL の熱設計のうち, 最も厳しい条件となるのは最初の DT の伝熱のチョークとなる場所である。製作性の検証については 350 MHz の陽子リニアック開発プロジェクトと併せて進められたため, 175 MHz での実証は

今後の課題となるが、基本的に製作上の困難はないとの判断である。

DTL の代替案として有力視されているのが超伝導リニアック (SCL) である。IFMIF は 40 MeV までの加速なので、高エネルギー加速器とはまた別の意味での長所：(1)十分なアパーチャ係数をとった設計とすることが可能、(2)極低温で動作させるため温度変動に起因する擾乱が低減といった点が着目される。十分な原理実証がなされ、工学的に利用可能なレベルまで開発が進んだ場合、SCL を採用する十分な根拠が出てくると考える。現在の SCL タイプの候補は H 型 (CH, Crossbar H₂₁₀ モード) であり、DTL と同様に 1 MW-RF 源を利用できる。現在、モデル空洞を製作し、クライオスタットでの性能試験に入るところであり今後の動向が期待される。

高エネルギービーム輸送 (HEBT) の技術課題は、できるだけ小さいビームライン要素でターゲット上の一様ビーム分布を実現するかにある。輸送系の最終ベンドより下流側は大量の中性子が逆流してくるため、放射化レベルが高くなり、遠隔保守が必要であろう。ビーム分布の整形には高次多極磁場を用いる。八極磁石のもつ 3 次の磁場依存性を利用してビームの裾部分を折り畳んで平滑化するというのが基本原理である。これを水平・垂直の 2 方向に適用するのはなかなか困難であり、ラスターキャン方式を併用する考えも検討している。

RF システムは、安定運転の実現において重要であるという点で、また、建設・運転コストの多くを占める箇所として、大きな役割を占める。加速周波数 175 MHz においてはテトロード系の RF 源が利用でき、1 MW CW 主力の性能が出ているダイアクロードを第 1 候補とする。1000 時間の 1 MW 出力運転試験では、平均稼働率 98.7% を達成した (目標 99.5%)。今後は、175 MHz システムへ改造し、空洞負荷の状態での試験へと進む必要がある。

RF ドライブはループ型が採用され、伝送系には同軸管を使用する。RF システム要素の中で異常発生の原因として考えられるのが RF 窓での放電等によるリークである。RF 窓材自体は通常のアルミナセラミクスで十分であり、構造的に熱変形や放電事象に対する耐久性を有することを実証試験することが必要であるが、シミュレーション計算では、既存のモデルをほぼそのまま適用できるとの感触である。

IFMIF に特有のビーム診断技術としては、非接触でのビーム形状計測が挙げられる。これまでの要素技術開発ではイオン源までのビームしか利用できなかった

ため、低エネルギー用の診断が主となっており、ビームによる残留ガスの発光を分光計測する手法で、分子イオンの混在する場合でも、ビームサイズを正確に測ることができる。

4. プロトタイプ開発

IFMIF の建設・運転実現に向けた次期フェーズとして工学実証・工学設計活動 (EVEDA) が計画されている。そこでは、建設へ円滑な移行を考慮しつつ、総合的な IFMIF プラントの最終設計や加速器系の詳細予備設計などの工学設計、及び、これらの詳細設計に基づく原型コンポーネントの製作による製作プロセスの開発と IFMIF 運転上クリティカルとなる長時間耐久性などの性能実証の実施に重点を置く予定である。

現在、工学実証・工学設計活動 (EVEDA) は欧州・日本の国際協力枠組みの下で、6 年間の実施を考えている。一方、実機の建設・運転・廃止活動 (CODA) は、別の国際協定下で実施することが想定されており、DEMO 炉設計のタイミングに合わせられるよう、約 7 年間ほどで建設・運転調整を完了、早期に定格運転を開始し、20 年間 (必要ならさらに 10 年間) の照射試験を実施する計画である。EVEDA では発注に着手できるレベルまでの工学設計に加え、各サブシステムの工学実証を実施するため、ホスト国に共同チームを、他の各国にホームチームを設けることを想定している。

加速器関連の工学実証試験で着目すべき点は、フル性能を有するプロトタイプ試験機 (入射器, RFQ, MS, DTL 第 1 タンク, RF 源, ビームダンプ) の設計・製作を日欧が分担して実施し、それらの組合せ総合ビーム試験を日本国内で実施する予定であることである。各コンポーネントはコールド試験を終了後、ビーム試験サイトに搬送し、順次、組立調整試験を行い、最後の 1 年間で連続運転並びに重陽子ビーム試験にあてる。性能等は実機相当のものであるため、可能なものについては、実機建設時に再利用することを考えている。

5. ま と め

核融合エネルギーを実現するには厳しい照射環境に耐える材料を開発することが必要であり、そのための照射試験施設が適切なタイミングで建設されなければならない。そのような施設を構成する各サブシステムの設計においては、既存の技術から容易に見通せる範囲の要求仕様とすることを基本とすべきである。

加速器システムについては、CW で長期間安定に動作することが求められることから、周波数を 175 MHz 単一としたこと、要素技術としては、ECR 型イオン源、4 ベーン型 RFQ、アルバレ型 DTL、1 MW 級の高周波出力管、多重極磁場によるビーム一様化、を主オプションとして選択したことに影響が現れている。これまでの要素技術開発の結果から、基本仕様を基に工学設計に移行できる見通しが得られており、近く、日欧協力による工学実証・工学設計活動の段階（6 年間）に入る予定である。DEMO 炉に向けた材料開発にかなりの期間が必要である点を考慮すると、低エネルギー部のプロトタイプ的设计・製作を行いながら、工学的課題をしっかりとフォローするという方針となっている。国際協力においては、必ずしも我が国の希望通りの開発計画・作業分担とならない点があるが、プロトタイプの建設・運転は日本の国内で実施される見込みであり、各方面の技術的協力と支援を願う次第である。

参考文献

- 1) ITER に関する web サイト
<http://www.naka.jaea.go.jp/ITER/index.html>
- 2) D. Liska, M. D. Machalek, FMIF-THE FUSION MATERIALS IRRADIATION TEST FACILITY, IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 1304 (1981).
- 3) IFMIF International Team, IFMIF COMPREHENSIVE DESIGN REPORT, (2004)
http://www.iea.org/Textbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_PartA.pdf
http://www.iea.org/Textbase/techno/technologies/fusion/IFMIF-CDR_PartB.pdf
- 4) IFMIF International Team, Ed. by H. Nakamura et al., IFMIF-KEP INTERNATIONAL FUSION MATERIALS IRRADIATION FACILITY KEY ELEMENT TECHNOLOGY PHASE REPORT, JAERI-Tech 2003-005, Mar. 2003.
- 5) L. Young, SEGMENT RESONANTLY COUPLED RADIO-FREQUENCY QUADRUPOLE (RFQ), Proc. PAC 1993, Washington D.C.