

国際核融合材料照射施設(IFMIF)の加速器技術実証計画

杉本 昌義^{1,A)}、竹内 浩^{A)}

^{A)} 日本原子力研究所

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

IEA 協力の下、日米欧露の参加で実施中の国際核融合材料照射施設 (IFMIF) 活動では、実証試験機による加速器開発の 2004 年開始に向け、実施内容の調整作業が始まっている。125mACW 重陽子リニアックの建設判断を可能とする技術を実証するための、入射器から初段 DTL までを含む試験装置、並びに必要とされる実証試験計画の具体案を示す。

1. はじめに

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) は 1995 年に開始された加速器型強力中性子源計画であり、特に D-T 核融合炉で問題となる 14MeV 中性子環境下で十分な耐性と低放射化性を併せ持つ素材の開発を目的としている¹⁾。中性子発生には D-Li 反応を用いる 1980 年代の FMIT 計画、1990 年代前半の ESNIT 計画と同様の方式を採用する。1999 年まで実施した概念設計において決定された主な仕様を表 1 に、施設の主要部の概観を図 1 に示す。

表 1 : IFMIF 加速器の基本仕様

| | | |
|------------------|-------------------------|--|
| 加速イオン／ 加速モード | D ⁺ CW | 立上げ時 H ₂ ⁺ で 調整運転 |
| エネルギー／電流／ 周波数 | 40MeV/125mA/ 175 MHz | 32MeV 運転可 第 1 段階:50mA |
| 加速器台数 | 2 台 | 第 1,2 段階は 1 |
| 最終のビーム形状 | 幅 20cm 高 5cm | 一様矩形分布、 高さ方向テール ~1cm |
| 稼働率目標 | 88%以上 | |

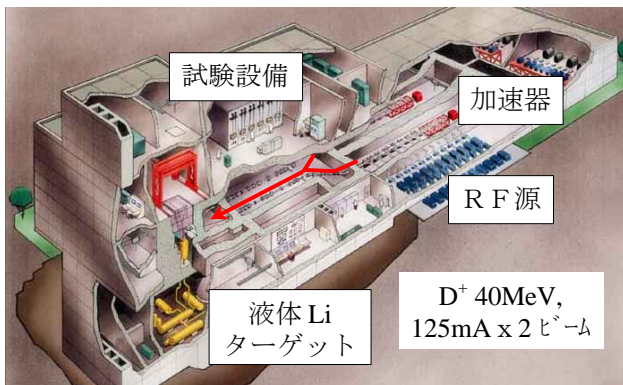


図 1 : IFMIF 主施設の概観

現在、重要な要素について現存技術の適用可能性を探るため、2002 年 12 月までの予定で要素技術確認フェーズ (KEP) が実施されており、加速器技術としてはイオン源 (ECR vs. フリメント方式) / LEBT (magnetic vs. electro-static 方式) の開発、RF システム要素 (出力管、窓)、ドリフトチューブ除熱構造等が計画・実施されている²⁾。これを引き継ぐ形で、2003 年以降は、加速装置としてのシステム技術を実証する目的で実証試験機 (プロトタイプ) の共同開発 (技術実証フェーズ、EVP) へと移行する方針である。図 2 に建設判断までの暫定的なスケジュールを示す。

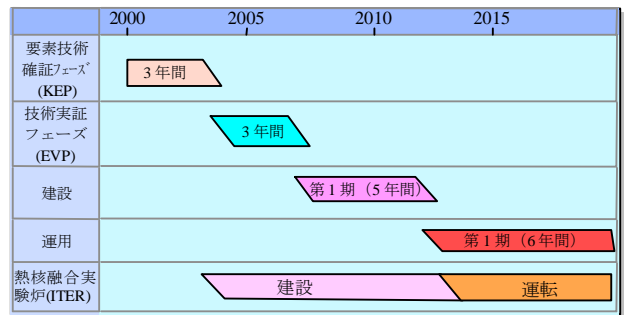


図 2 : IFMIF の開発スケジュール (費用額は未確定)

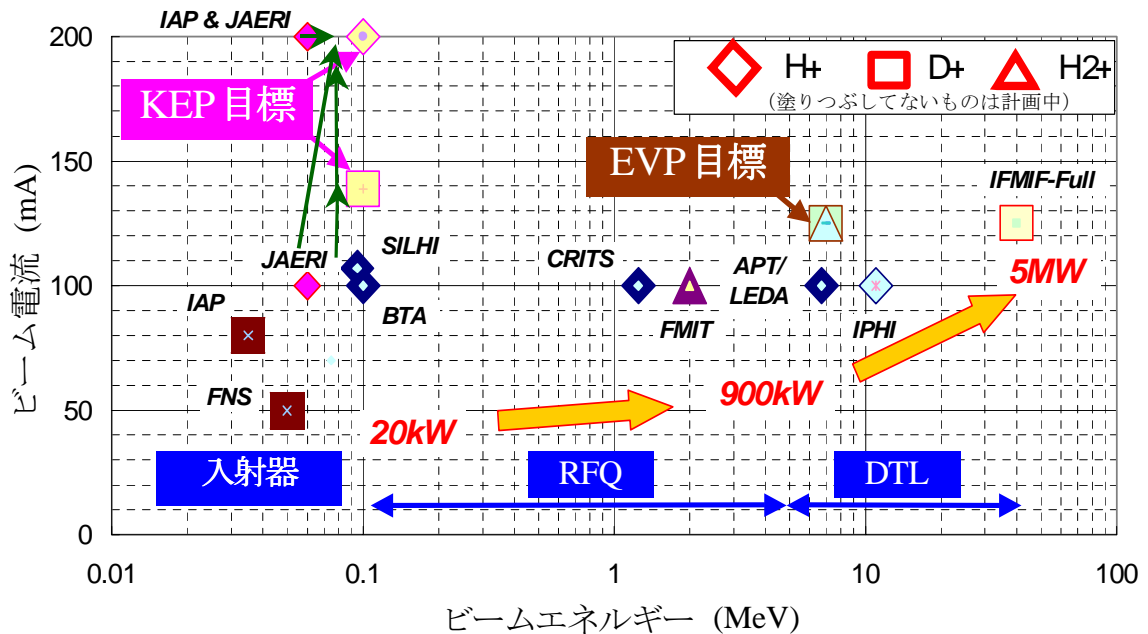
2. 技術実証の課題

EVP の活動内容は大きく、装置開発とシステム設計とに分けられ、図 1 にある主要な設備：加速器、RF 源、Li ターゲット、試験設備、並びに共通設備を分担で、それぞれに最適な方法に則り、実施される。加速器の中心課題は、

1. IFMIF 加速器の構成要素の中で技術的な実証をもっとも早くにおこなうべき部分について実機レベルの性能を出し得る実証装置を製作し運転試験を行い、必要なデータを取得する。
2. 上記の実証装置の製作に合わせて、各要素の詳細な工学設計を実施するとともに、技術実証を行わない要素も包含した加速器全系の総合設計を行う。

の 2 点であり、最終案の合意に至るまで、特に、実証装置の適正規模の設定が論点となるとみられる。図 2 に示すように開発期間は 3~4 年であり、順調な開始には現在、参照設計に残っている設計オプションの絞り込み、及び、各要素の詳細設計の進捗が鍵と

¹⁾ E-mail: sugimoto@ifmif.tokai.jaeri.go.jp



IAP：フランクフルト大（ドイツ）
 JAERI：IFMIF-KEP イオン源開発（原研）
 FNS：Fusion Neutron Source（原研）
 BTA：Basic Technology Accelerator（原研）
 SILHI：サクレー（フランス）
 APT/LEDA、CRITS：ロスアラモス（米国）
 FMIT：Fusion Materials Irradiation Test Facility（米国）
 IPHI：サクレー（フランス）

図3：IFMIF 加速器の開発ステップ

なる。また機器要素を分担して製作・据付することを基本方針としており、実施内容の十分な検討もさることながら、国際協力による実施の体制づくりも極めて重要である点が特徴的である。

3. 技術実証装置の概要

実証装置規模を決める上で指針となるのは、技術現状の認識と限られた開発期間内での実現可能性である。図3に示すように、陽子については、CW 加速を含めかなりの知見が蓄積されつつあるが、重陽子については依然として経験が不足している。従って、開発ステップとしては、できればD+、あるいはその代替としてH2+ビームによる実証を中心とすることが重要と考えている。D+加速では、放射化の危険性を下げるため最大エネルギーの抑制やパルス化運転による対応策が必要であり、その場合でも、最小限の放射線遮蔽を備えた施設を用意できることが開発の前提条件となる。図4に要素を必要最小限に抑えた構成例を示す。

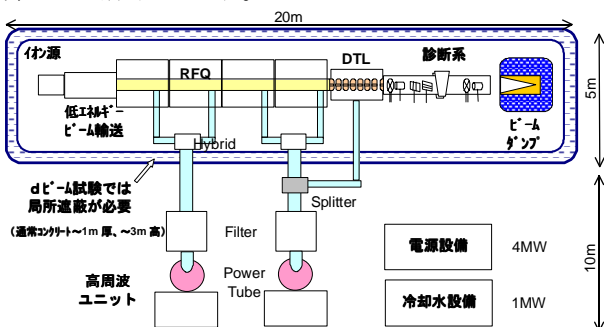


図4：IFMIF 加速器実証装置案

3.1 入射器

イオン源に関しては、KEP 活動の中で要求仕様（100keV、155mAD+相当、規格化 rms エミッタンス 2π mm mrad）をほぼ満たす性能のものが実現される見通しであり、総合性能を保持しつつ300-1000時間の寿命を確保することが今後の課題である。現在、仏サクレーでECR源、独フランクフルト大でフィラメント方式マルチカスプ源、原研でLEBTを含めた両タイプの相互性能比較を実施中であり、EVPのための仕様統一に向けた動きが進んでいる。また、原子比やノイズの改善にXe等の微量ガス添加が効果的であることがわかってきており、要求性能（D+90%以上、電流ノイズ1%以下）を超える性能を実現できる可能性が高い。

3.2 RFQ

KEPの段階ではRFQ開発は断片的であり、175MHzのコードモデル試験程度に留まる見通しである。基本的に実証装置は実機と同一仕様とする方針であるため、現存するCW-RFQのAPT/LEDAや製作中のIPHI-RFQの知見を基に製作仕様の細部を固める作業が急務となる。1999年の低コスト設計仕様ではRFQの出力エネルギーを概念設計基本仕様の8MeVから5MeVに下げたものの、依然、全長は8mを超える長尺のRFQであり、低ビームロス性能との両立のため、空洞・電極構造設計の一層の充実、並びにRFシステムと一体化した設計が不可欠である。また、175MHzで125mAD+加速というのは、過去の経験則からいうと、限界点に近く、余裕がない可能性が

ある。IFMIF はビームの輝度は必要としない装置であるので、周波数をやや低め (140~150MHz) に設定するというオプションが常に存在し得る。設定された電場強度仕様の下で十分な通過率と加速後ビーム性能を達成できるかがプロトタイプにおいて確認すべき最大の目標といえる。

3.3 DTL

DTL も、KEP 段階ではドリフトチューブの構造のみが扱われ、本格的な開発は EVP が端緒となる。RFQ と比べると技術的には成熟度が高いものの、こと初段階部に関しては、RFQ とのマッチング (横方向における Q 磁石の強度設定、縦方向における電場勾配のランプ) に絡んで多くの技術的問題が複合して現れるため、EVP において実証すべき最重要項目のひとつである。

但し、DTL プロトタイプの規模に関しては、実機にも使用できるフル性能仕様を有したのものから、ホット試験モデル的なものまで非常に多様な選択肢が考えられる。図 4 には、DTL によるビーム加速 (~7MeV) を低デューティのパルス運転による基本性能確認のレベルに限定した例を示しており、(擬似) CW 運転を行うのであれば、RF 源を別システムで用意する必要がある。その場合、DTL 以外の要素の仕様 (ユートリティー、ダンプ、診断系等) にも影響があるため、全体の装置規模が増大する。

3.4 RF システム

現在、トムソン社のダイアクロードが 200MHz で 1MW CW を達成しており、KEP で数 100 時間超の運転実績を積上げることが予定している。EVP では、加速周波数 175MHz への設計変更とシステムモジュールとして組上げることが中心課題となる。RF システムとしては、サーキュレータなしの方式を採用する予定であり、コントロール性能の検証が不可欠である。ビーム試験においては、RF システム制御の検証が最重要課題となる。これには、空洞のチューニング制御も関わってくる。

なお、理想的には、RF テストスタンドを別途用意し、プロトタイプ試験と併行して寿命試験が継続されることが望まれる。

3.5 ビーム診断系

本項目にはビーム計測とデータ収集・処理に加え制御システムのプロトタイピング及びビームダンプが含まれる。計測系は実機において主流となる非接触型のものを開発するため、従来方式との十分な相互比較、較正を行う。特にビームトリップ信号を発生するセンサーの特性を押さえ信頼性を高める方策を確立することに重点が置かれる。

制御システムは制御規模こそ実機の十分の 1 程度であるが、対象としては本質的な要素がすべてはいつているため、そのまま実機の制御システムとなり得るものを開発する必要がある。

IFMIF では Li ターゲットを除くと、全ビーム電力を受止める固定式のビームダンプというものはなく、ビーム調整段階で移動式のダンプが使われる。プロトタイプ用のビームダンプは実機における、移動式ビームダンプの実証装置を兼ねており、従って可搬性を重視した設計が要求される。

3.6 実証装置に含まれない要素の設計

プロトタイプとして直接の対象ではないが、DTL の後段部や、HEBT 系の要素技術もいくつか開発要素が残されている。もっとも大きな問題はビームロスによる放射化であり、中性子発生量を抑えるための高 Z 材料 (金等) によるビーム照射面のライニングや、耐放射線性材料の使用、保守時の遮蔽のとり方等の設計をつめる必要がある。また、HEBT では Li ターゲット表面に幅 20cm x 高さ 5cm の矩形一様分布のビームフットプリントを生成することが要求されており、ビーム実証試験の結果を考慮しつつ、より現実的な条件下で、多極磁場の組合せによるビーム拡大系の設計を行う必要がある。

4. 実証試験の進め方

IFMIF は連続で長期間の照射試験を行う装置であるため、安定性、信頼性、安全性が特に重要である。

- そのため、連続運転試験の積み重ねに加え、
- (1) 多種多様な異常・故障モードの洗い出し、
 - (2) 装置のスタートアップ及びシャットダウン手順の確立、
 - (3) 装置の保守方法の確立、
- といった観点での試験計画の策定が重要である。

開発期間が 3 年の場合、装置の製作・据付に併行して、可能な限り、順次、部分試験を積上げていく必要があり、総合試験は最後の 3 ヶ月程度に集中するスケジュールとなる。場合によっては、建設準備の期間に試験を延長実施できるような機動性も備えた実施体制であることが望まれる。

5. まとめ

IFMIF 活動は現在の KEP を引き継ぎ、システムとしての技術を実証するため 2004 年頃をめどに EVP に移行する方向で進めている。プロトタイプ加速器は 7MeV 規模を考えており実機仕様の RFQ を中心とする総合ビーム試験を行い建設に必要な技術・経験の効率的な蓄積をはかりたいと考えている。

参考文献

- [1] IFMIF-CDA Team, IFMIF - International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design Activity Final Report, ENEA Frascati Report, RT/ERG/FUS/96/11 (1996); IFMIF Conceptual Design Evaluation Report, Ed. A.Moeslang, FZKA 6199, Jan. 1999.
- [2] M. Sugimoto, M. Kinsho, and H. Takeuchi. "Concept of Staged approach for International Fusion Materials Irradiation Facility", Proceedings of the 2001 Linear Accelerator Conference, URL: <http://www.slac.stanford.edu/econf/C000821/TUE16.shtml>