

IFMIF 加速器システム設計と技術開発の進展

杉本 昌義^{1,A)}、竹内 浩^{A)}、佐澤 慎吾^{A)}、渡邊 和弘^{A)}、前原 直^{A)}、今井 剛^{A)}、森山 伸一^{A)}、三枝 幹雄^{B)}

^{A)} 日本原子力研究所, ^{B)} 茨城大工学部

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

概要

国際核融合材料照射施設(IFMIF)では125mA CW、40MeVの重陽子リニアックが必要とされ、主要なシステム機器の設計と重要要素技術の開発が、主に欧州と日本の分担により進行中である。設計上の最重要課題であるビームロスの低減化を達成するための高精度のビームダイナミクスシミュレーション・設計手法の改良を進める一方、長時間安定動作を確保するためのイオン源入射器やRFQ、RF窓の基本性能の検証試験タスクが進行中であり、今年度内の報告書完成をめざしている。加速器システム設計並びに要素技術開発の全般的な状況と今後の予定を報告する。

1. はじめに

国際核融合材料照射施設(IFMIF)は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材料の開発を目的とする加速器型強力中性子源計画である^[1]。14MeV相当の中性子を効率よく連続的に発生するため、CWリニアックで加速した10MWの重陽子ビームを液体リチウムに当て、D-Li反応を起こさせる方式をとる。最近、長期にわたる核融合開発を短縮するための加速案が検討されており、材料開発についても、これに対応して従来計画(3段階建設)で定格運転に達するまで12年ほどかかっていたところを半分に圧縮する案(2段階建設)が検討されている。この考えに沿った加速器の基本仕様を表1に示す。

表1: IFMIF 加速器の基本仕様 (計画加速案)

加速イオン / 加速モード	D ⁺ CW	立上げ時 H ₂ ⁺ で調整運転
イオン種 / 電流 / 周波数	40MeV / 125mA / 175 MHz	他のイオン種 / 電流での運転は仕様としない
加速器構成 / 台数	RFQ + DTL 2台	RFQ(0.1 - 5MeV) 第1段階: 1台
最終ビーム形状	幅 20cm 一様 高 5cm(上下に ~1cm テール)	第1段階: 幅~10 cm に絞る
稼働率目標	88%以上	第1段階: 75%

現在、2002年12月までの予定で重要な要素について現存技術の適用可能性を探るための要素技術検証活動(KEP)が実施されている。主な試験タスクは、

低エネルギー部の要素技術として重要なイオン源(ECR vs. フライアウト方式) / LEBTの開発・ビーム計測技術、RFシステム要素(出力管、窓)、RFQモデル試験であり、EUと日本で分担実施されている^[2]。設計関連タスクとしては、DTLや輸送系の設計に加え、ビームロスモデルの確立も重要である。これらのタスクの中で日本の担当する部分について、中間報告^[3]以後の進展を中心に報告する。最後に、次期開発フェーズへの取組みを含む今後の予定について述べる。

2. 加速器システム設計と要素技術開発

2.1 システム設計

入射器の寿命目標1,000時間が達成された場合の加速器システムの各構成要素に要求される信頼度・稼働率を図1に示す。この中で信頼度に対する影響が大きいのは入射器とRFシステムであり、これらについては優先的に実証試験を実施する必要がある。目標達成のために、交換頻度の高いものや複数の台数からなるもの(真空ポンプ等)は、必要相当数のコールド/ホットスペアを保有しておくことが不可欠である。

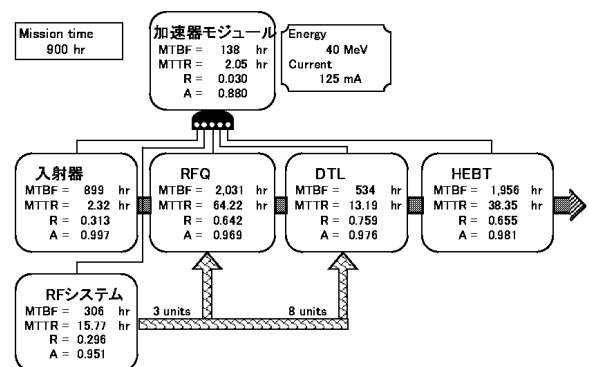


図1: IFMIF 加速器構成要素と信頼度要求

2.2 入射器性能試験

イオン源開発は、表2の基本仕様を個別には満足するものが実現されており、総合的性能を長時

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

間安定して保持できることが求められる。EU では仏サクレーで 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の開発が行われており、ECR 源による 1 ヶ月連続運転に成功している。原研では LEBT を含めた両タイプの相互性能比較を目標に試験中であり、図 2 にフィラメント型のイオン源で原子比の仕様を達成した結果を示す。試験は放射化を避けるため H⁺で行っており、60kV デストスタンドで 137mA が引出されている。スケール則を適用すると 100keV での電流値は 208mAD⁺と予想される。一方、エミッタンス測定値は 0.45 mm mr rms であり、もう一步改良の余地がある。

表 2：IFMIF 用イオン源の基本仕様

加速イオン種	D ⁺	立上げ時 H ₂ ⁺ で調整
イオン種	90%以上	運転 (>ms)
I ⁺ 初電圧	100keV	LEBT 通過率 0.9 ×
電流	155mA	RFQ 通過率 0.9
規格化エミッタンス	0.2 mm mr (rms)	
寿命 (MTBF)	300 時間	当初目標
稼働率目標 (信頼度)	1,000 時間	最終目標
	99.3% (0.572)	MTBF=300 時間
	99.8% (0.845)	同上=1,000 時間

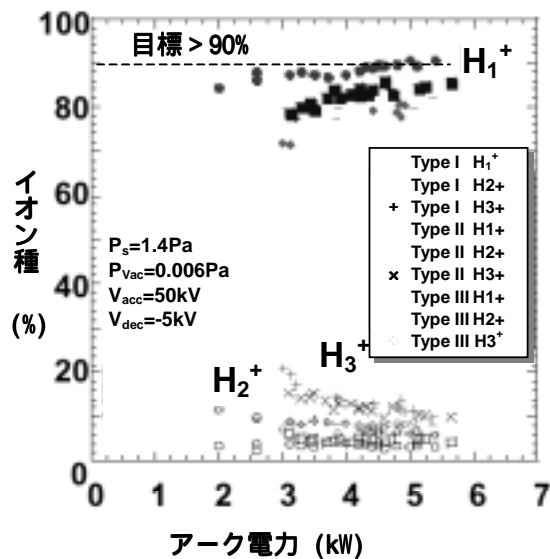


図 2：IFMIF 用イオン源の性能試験結果

2.2 RFQ モデル試験

IFMIF - RFQ は重陽子を 0.1 から 5MeV まで加速することが求められ、全長 8m を超える長尺の RFQ である。最近の高精度ビームダイナミクスシミュレーション計算によると、低ビームロス性能と両立させるため、空洞長は 12m 近くに達する可能性がある。RFQ の長さが及ぼす影響について、円形導波管のモードスペクトルを適用した結果を図 3 に示す。基本ダイポールモード (TE₁₁₀) の周波数は RFQ の形状によ

り大きく異なるが、ここでは実効的な面積が四重極モードの 38% であると仮定した。IFMIF-RFQ では (L/a) が数 10 に達するため、セクションに分割することが不可欠であり、LANL の LEDA での経験 (2m、350MHz) から、IFMIF 用としては 4m 以内とする方向で検討されている。その場合でも (L/a) は ~10 となり、高周波設計では最適なモード分離への配慮が必要である。

175MHz RFQ の高周波電磁場特性については、モックアップモデルによる確認試験タスクが進行中であり、1/4 モデル製作で得た経験をもとに、1/1 モデルの製作を行っている。1m セクションを複数個製作し、空洞長の違いによる特性の系統的評価を実施する予定である。

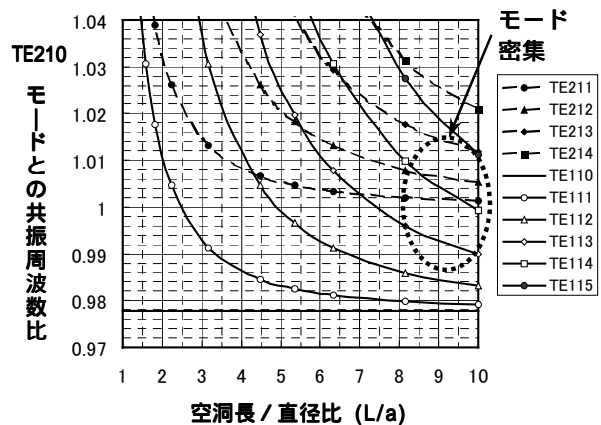


図 3：円形導波管 TE モードスペクトル (110 モード周波数を RFQ 評価用に調整)

2.3 DTL

DTL については、RFQ からのビームを受取る第 1 タンクの設計が重要であり、安定ビーム加速を実現するため、組込み四重極電磁石の製作・整列・冷却法、ステムやポストカップラーの設置方式、加速電場勾配の与え方等に加え、ビームマッチングをどのように行うかが焦点となる。概念設計では、接続エネルギーが 8MeV であったことから、RFQ 出口付近のセルと初段 DTL タンクの数個のドリフトチューブを用いたマッチング法を想定したが、この方法は電流変動に対する自由度に欠けるため、プロトタイプ試験をめざした一連の設計の結果、現在、RFQ-DTL 間に中間ビーム輸送部を設ける案が有力となっている。中間輸送部は、初段 DTL の縦・横方向ビームエンベロープを整合させるための四重極磁石とバンチャーから構成され、TRACE3D によって得られた初期パラメータをもとに、粒子トラッキングコードを用いて高次の効果を評価する手法を用いる。

DTL については CW 運転による除熱及び冷却水温度による周波数同調の性能確認も重要であるが、当初予定した試験タスクに代り、計算コードによる評価精度の向上に目標を切替えている。

2.4 RF システム

現在、ターレス社のダイアクロードが 200MHz で 1MW CW を達成しており、去る 6 月には、EU の IFMIF 試験タスクの一環として、100 時間運転に成功した。これにより、IFMIF 用 175MHz 出力管の供給に見通しが立ち、今後、積算 1,000 時間運転実績をめざす予定である。

日本の開発タスクとしては、RF 窓の試験を予定しており、最大 (DTL 用) 600kW 耐電力のための試作機の設計を行っている。RFQ 用の RF 窓は、約 1/2 の耐電力でよいが、ドライブポートの空間的制約から、WX77D でフィードする必要があり、供給側の WX203D と同軸変換で接続する。窓材はアルミナで十分であり、実際の試作機としては RFQ 用の小型のものを直管でつくる。窓形状は(1)円筒形で供給側同軸管内導体とドライブ側外導体とを接合、(2)コーン形で供給側同軸管の内外導体間を接合、(3)ディスク形で(2)と同様に接合、の 3 種が候補となるが、熱応力計算の結果から、DTL 用にはコーン形、RFQ 用はディスク形で対応できる。

2.5 ビーム輸送 / その他

IFMIF の高エネルギービーム輸送系 (図 4) に要求される機能は、

- (1) DTL からのビームをビーム輸送の収束モードに整合させる、
- (2) 最終ベンドへの直線部へアクロマチックにビームを平行移動する、
- (3) 八重極磁石や十二重極磁石を用いて、ターゲットにおけるビームサイズが横 20cm、高 5cm、かつ一様分布となるよう拡大する、
- (4) 最終ベンドで 10 度偏向しターゲット部へ導くであり、それぞれ、ビーム条件の変動に対応した対策が必要とされる。Li ターゲット入射時エネルギー分散を大きくし熱発生ピークを抑えるため概念設計で採用されたエネルギー分散空洞は不要と判断した。一方、ビームエネルギー幅の増大を抑制するための RF 空洞 (モメンタムコパクタ) の必要性については、系の信頼性の面から使用しない方が望ましいが、今後の詳細な比較検討が必要である。

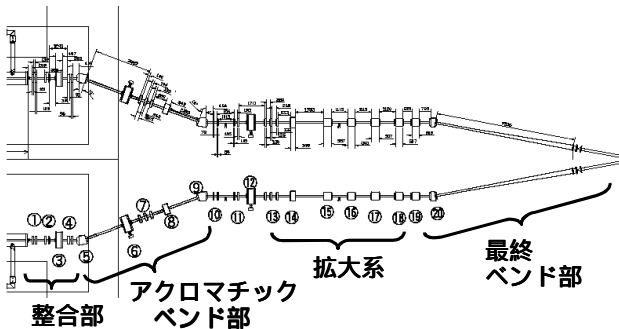


図 4 IFMIF 高エネルギービーム輸送系レイアウト

3. 今後のスケジュール

現在、実施中の要素技術開発期間の終了後、次期開発フェーズである「工学実証・工学設計活動 (EVEDA)」を開始すべく国際的に協議中である。現案では、2003 年をフェーズ移行のための調整年とし、2004 年からの 5 年間で予定している。EVEDA の特徴として、(1)中央設計チームの設立、(2)主要サブシステムごとの技術実証試験の実施があげられ、建設判断のための基本的な工学設計データをまとめることが要求される。現在の IFMIF 活動の国際協力は IEA の核融合材料研究開発のための協定に基づいており、EVEDA における研究開発の展開に即した新しい体制と法的なフレームワークを整備することが必要との認識である。図 5 に全体スケジュール案を示す。EVEDA における実証試験目標は、IFMIF の最大の特徴である連続で長期間の照射試験を行うために必要な、安定性・信頼性・安全性の検証が特に重要である。そのため、もっともクリティカルな技術と目される RFQ の連続動作試験が中心となる予定である。

なお、建設については 5 年間の EVEDA 終了と同時にその判断が可能となるよう、EVEDA 活動に併行して国際協議がスタートすることを期待している。

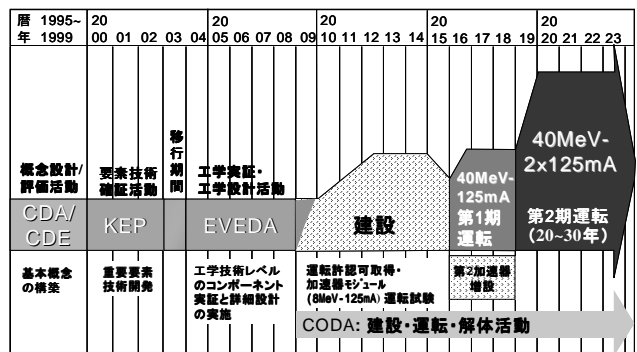


図 5 IFMIF の開発・建設・運転スケジュール

4. まとめ

IFMIF 活動は現在、KEP の最終年度にはいっており、日本の分担する加速器系の主なタスクである入射器試験、RFQ モックアップ試験、RF 窓試作試験を中心に設計の詳細化を実施中であり、ほぼ予定された成果を得る見込みである。次年度以降は RFQ を主軸にしたシステムの技術を実証するため 2004 年頃をめどに EVP に移行する計画である。

参考文献

- [1] IFMIF-CDA Team, IFMIF 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] IFMIF International Team, IFMIF-Key Element Technology Phase Interim Report, JAERI-Tech 2002-022, March 2002.