

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) リニアック高周波システムの挙動解析

杉本 昌義^{A)}、前原 直^{A)}、森山 伸一^{A)}、今井 剛^{A)}、竹内 浩^{A)}

^{A)} 日本原子力研究所 那珂研究所 〒311-0193 茨城県那珂郡那珂町向山 801-1

概要

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) では 40MeV、125mA cw の重陽子ビームを必要とし、基本仕様として周波数 175MHz の常伝導 RF リニアックが採用されている。RF システムは、1 MW 出力モジュールを基本単位として、内 3 基を 5MeV-RFQ に、残り 10 基を 10 台の分割 DTL タンクそれぞれに供給する構成である。照射源として要求される連続安定なビーム加速の実現には、負荷変動等の擾乱に即応できる RF 系の実現が重要な課題である。IFMIF 加速器系の RF システム設計仕様をもとに構成した RF システムダイナミクスモデルの挙動解析結果について述べる。

1 はじめに

国際核融合材料照射施設 (IFMIF) は D-T 核融合炉を実現する上で必須の、14MeV 中性子環境下で十分な耐性と低放射毒性を有する材料の開発を目的として IEA 国際協力の下で活動中の加速器型強力中性子源計画である^{1,2)}。必要な中性子照射場環境 (14MeV 相当中性子束 10^{14} n/cm²/sec の照射容積が 500cm³ 以上、パルス源は不可) を効率的に発生するため、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衝突させる方式をとる。図 1 に施設全体の概念図を示す。2000-2002 年にかけて、重要要素技術の確証を目的とする一連の試験タスクが実施された結果³⁾、表 1 に示す加速器基本仕様が合意されている。

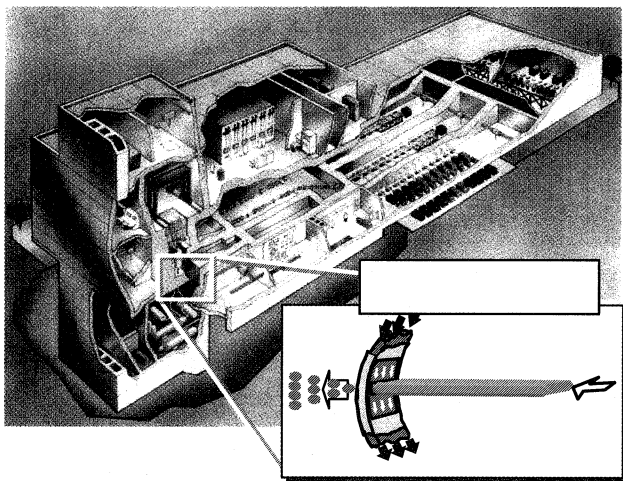


図 1 : IFMIF 施設の概観

欧州が実施したダイアクロード(200MHz、1MW)による千時間試験の成功等、タスクの成果により、RF システム設計の根幹に関する課題が大きく進展した。RF システムの設計概要と RF システム挙動を評価するためのシステムモデルの構成、その予備的な解析結果を以下に述べる。

表 1 : IFMIF 加速器の基本仕様

項目	仕様
加速イオン	D ⁺ ; H ₂ ⁺ (*2)
デューティ	100% (CW); >1%(1ms / 10Hz) (*)
出力エネルギー/電流	40 MeV / 125 mA/module (D ⁺) 40 MeV / ~100 mA/module (H ₂ ⁺)(*)
加速モジュール	Injector; RFQ (0.1~5 MeV); Matching Section; DTL (5~40MeV); HEBT
加速器構成	同一構成モジュール 2 基で構成
ビーム性能	<ul style="list-style-type: none"> 規格化エミッタンス 0.4x10⁻⁶ π m rad (横方向) 0.8x10⁻⁶ π m rad (縦方向) ビームフットプリント 水平方向 20cm; 垂直方向 5cm; フラットトップ分布
稼働率	>88% (計画運転時間内)

*) スタートアップ時のみ

2 RF システム構成の概要

高周波リニアックとしての IFMIF 加速器システム構成は、周波数 175MHz の重陽子加速専用 RFQ とアルバレ型 DTL の組合せが基本である。IFMIF の建設開始が今から 6 年ほど先になることを考慮し、将来的に技術進展を見越した代替案がある (超伝導リニアック等) もの、全空洞で一定の周波数を使用する点は変わらない。

表 2 : IFMIF 加速器 1 台当りの所要 RF 電力

項目	所要電力
RFQ 空洞壁損(12.4m, Ep=0.9Kp)	1 MW
DTL 空洞壁損(10 タンク, Ep=1.3Kp)	2.3 MW
バンチャー空洞(マッチングセクション)	0.1 MW
ビーム電力(40MeV, 125mA)	5 MW

表 2 に示すように、ビーム電力負荷部分が大きいため、加速器 1 式あたりの総所要 RF 電力 ~8.4MW はどの方式でも、そう大きな差はないと考えられる。RF システムの建設・運用コストを考慮すると、なるべく少ない RF 源モジュール台数で供給することが望ましい。現状では、最終段増幅管の最有力候補であるダイアクロード (TH628) の最大出力 (1 MW CW @200 MHz)、伝送損失や制御マージン、デレーティング等を考慮し、RFQ と DTL に 13 台 (35% の余裕) を割り当てる設計が採用されている。マッチングセクション部のバンチャー 2 台には、140kW RF 源モジュールから分配、供給する。

1 MW 出力 RF 源モジュールのブロック図を図 2 に示す。最終段増幅器の候補である 175MHz 用ダイアクロードは、前述のように 200MHz/1MW での積算 1,047 時間試験が成

功しており（停止回数 18 回/14 時間～稼働率 98.7%が得られた）、これを 175MHz へ変換することについては大きな技術課題はないと考えられる。一方、中間段には高出力の固体素子増幅器を採用することが推奨される。従来型の中間段増幅管と比ベコストの面で問題が残るものの、現在の技術水準で、~40kW 出力の実現は問題がない(図 3 にその構成例を示す)。

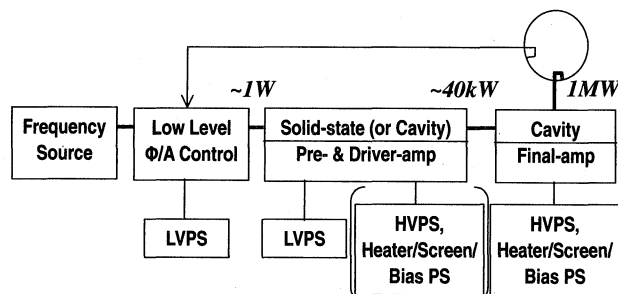


図 2 : IFMIF 加速器用 RF システムのための 1 MW-RF 源モジュール

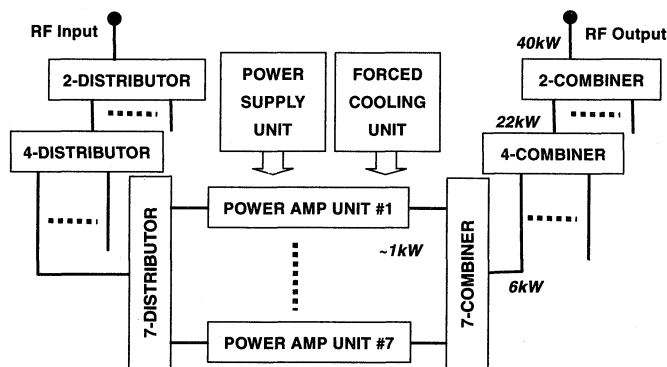


図 3 : IFMIF 加速器用 RF システムのための 固体素子型 40kW 中間段 RF 増幅モジュール構成

また、RF システムの不具合をもたらす大きな要素である高周波窓については、RFQ 用 250kW、DTL 用 500kW の耐電力が要求されるが、設計計算によると既存のディスクタイプの冷却水路付きアルミ窓をベースにしたもので十分であることがわかった^[3]。今後、ドライブループと一体化した設計を実施し、最適形状を決めていく作業を予定している^[4]。

高周波伝送系に関しては、サーキュレータを採用するかどうか問題となるが、175MHz 用はサイズが大きくなること、システム信頼性を低下させる要因のひとつとなることから、現在、使用しない方向で考えられている。また、1 MW CW 電力伝送用には同軸管が使用されるが、当初の概念設計では、空冷式により、最大で、直径 19 インチまでのものが採用されていた。伝送ラインは遮蔽壁を通過して加速器室に入るため、加速空洞で発生する放射線のストリーミングを減少させる上で、水冷式により WX-240D に変更することになる。

3 RF システム挙動シミュレーション

IFMIF 加速器に要求される高い稼働率を達成するには、故障による修理頻度・期間の短縮が必要であり、より信頼性の向上に心がけた設計が求められる。また、制御マージンの設定量に応じ、モジュール台数とその分配方式を含むシステム設計の比較検討が必要である。そのためには、設計においてシステム挙動を把握し、問題点を予め評価できるシミュレーション手法の活用が重要となる。

IFMIF 加速器の RF システム挙動を評価するため、初めに等価回路に基いたシステムモデルを構築する。モデルパラメータは、基本設計仕様から典型的な値を推定して与える。制御法は、フィードバックとフィードフォワードを組み合わせる。制御対象は、加速電場の位相・振幅（あるいはそれと等価な I/Q ）、及び、冷却水による周波数同調を考慮する。誤差変動要因として、運転時に予想されるビーム負荷変動、各種電源電圧、各種センサーの計測誤差を考慮する。

3.1 等価回路

IFMIF-RFQ の場合を例にとると、結合空洞タイプの RFQ であり、3 つの RF セグメントから構成される。各セグメント当り 1 台の RF 源モジュールから、平均 600kW の RF 電力が 4 分割され、4 ヶ所から、ループ結合によって供給される。文献^[5]にない、基本モードに加え近接する 2 つのダイポールモードへの結合を考慮すると、1 セグメントに対し、4 ドライブポート/3 モードの等価回路が構築できる(図 4)。ビーム負荷、制御用信号との結合も同様に扱う。空洞のダイナミクスは、通常の RLC 共振回路で表現される。他の空洞（マッチングセクションのバンチャー空洞、DTL タンク空洞）についても、それぞれ、類似の等価回路が構成できる。

実際には、3 つの RF セグメント間にも結合が生じるが、簡単のため、ここではそれを無視して調べていくことにする。また、RFQ に沿ってバンチが形成されていくので、ビーム負荷の結合は場所に（ビームダイナミクス）依存するが、これも、代表値で代用することにする。

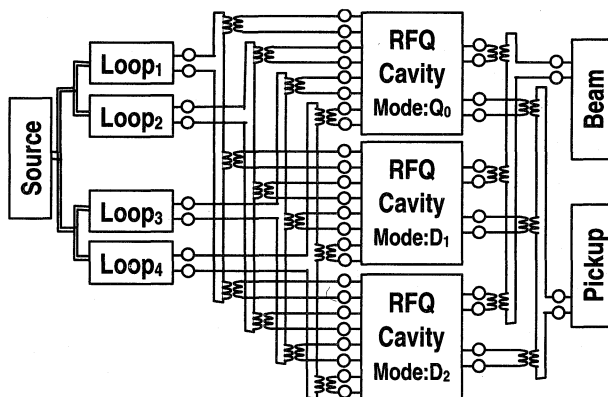


図 4 : IFMIF-RFQ の高周波系ー加速空洞ービームを統合したシステムの等価回路モデル (Source: 高周波源, Loop: RF 結合アンテナ, Beam: 加速ビーム, Pickup: 計測用ループアンテナ, Mode: 空洞内電磁場モード [Q_0 : TE_{210} , D_1 : TE_{111} , D_2 : TE_{112}])

3.2 モデルパラメータ

システム挙動評価のため、各構成要素のS行列表現を用い、周波数ドメインで解析する。高周波増幅部は電圧制御の電流源で代替し、増幅管出力空洞回路を付加する。伝送線には分岐が入る(RFQでは2段階)。加速空洞特性はSuperfishの計算結果を元に推定する。ドライブループ結合は調整パラメータとして扱う。定常状態において、理想的な電場が形成されるよう全てが調整済みである場合には、表3に示すようなパラメータセットが推定(仮定)できる。

表3: IFMIF-RFQ RF システムのモデルパラメータ

パラメータ	仕様
特性インピーダンス	50 Ω
ビーム電流	0.14 A
共鳴周波数	TE210: 175 MHz TE110: 172 MHz TE111: 177 MHz
空洞壁損失	850 kW
ビーム負荷	610 kW
等価抵抗	86.5Ω
Q値	11,600 (Superfish x0.8)
運転周波数	175 MHz ($\Delta f/f=4 \times 10^{-4}$)
入力結合(変圧比)	1 (各モードとも)
ビーム結合(変圧比)	500 (Q_0), 50 (D_1, D_2)

図4のモニターループ(pick up)信号は、制御用であり、オープンループ挙動への影響は無視できる。制御においては、時間遅れとモード混入の問題に対処する必要がある。

3.3 解析結果

ソース入力から加速空洞出力電圧(ピックアップで計測される)に至るオープンループ周波数特性の結果を図5に示す。RF源の電力分割が均等に行われ、4つのドライブループの特性が完全に一致している場合、1ドライブループの特性と本質的に同じものとなるはずであるが、実際の運転では、製作精度や擾乱によるばらつきが混入するため、相互干渉が引き起こされる。

ビーム結合の有無は基本モードへのビーム負荷という形で大きな特性変化をもたらす。ビームの中心軸がずれた場合は、ダイポールモードへの結合が増えるため、やはり特性は変化してしまう。ビーム加速を安定化させるには、各ドライブループの特性の均一化制御とビーム重心の正確な制御が基本要件であることがわかる。

3.4 今後の課題

上記の予備的な解析では、特性を与えるパラメータすべてが十分な根拠を持っているというわけではないため、現在進めているコールドモデル試験を今後、さらに進展させ、実機的设计・製作の前にあらかじめその特性を把握しておくことが重要と考える。特に、RFQに用いられる結合型空洞では、セクション間にある結合板を介する各モードの

結合とビームが介在する結合との影響が複合した、より複雑なモデルによる解析が要求される。

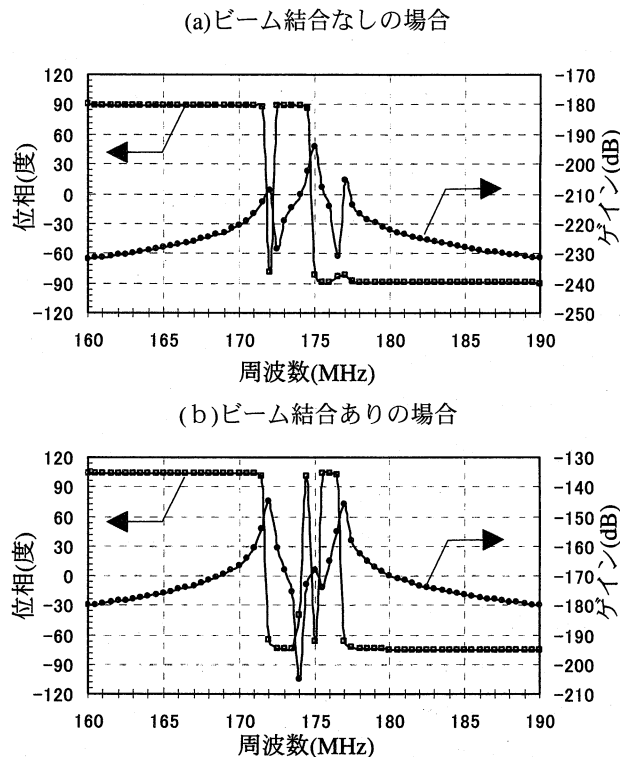


図5: 高周波源出口から加速空洞ギャップ電圧(ピックアップ)までの開放ループ周波数特性

4 まとめ

IFMIFのRFシステムは、既存技術の延長線での問題解決により、対応が可能である。ただし、実際の運転においては、高い安定度・信頼度が要求されるため、各個別要素の性能仕様設定には十分な注意を払う必要がある。そのため、あらかじめ、システム挙動を予測する手法が用意されていることが必要である。今回用いた手法をさらに拡張し、パラメータ感度の影響解析、耐ノイズ性、トランジェント解析等を進め、設計基準の確立をはかる予定である。

参考文献

- [1] IFMIF-CDA Team, "IFMIF Conceptual Design Activity Final Report", ENEA Frascati, RT/ERG/FUS/96/11 (1996);
- [2] A. Moeslang (Ed.), "IFMIF Conceptual Design Evaluation Report", FZKA 6199, Jan. 1999;
- [3] IFMIF International Team, "IFMIF Key Element Technology Phase Report", JAERI-Tech 2003-005, March 2003.
- [4] 前原 他, "IFMIF 加速器用 RFQ のためのループアンテナを用いた多重 RF 入力結合系の特性", 第 28 回リニアック技術研究会予稿集.
- [5] B.R. Cheo and S.P. Jachim, IEEE Trans. Electron Devices, 38, 2264 (1991).