

IFMIF 加速器用空洞結合型 RFQ の形状設計

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

^{A)} 茨城大学大学院理工学研究科電気電子工学専攻

〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1

^{B)} 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

国際核融合材料照射施設(IFMIF)の概念設計では125mAのCW重陽子ビーム加速の為に前段加速として175MHz RFQの採用が計画されている。IFMIF 加速器関連の要素技術開発の一つとしてRFQモックアップによる低電力高周波特性試験を行う為に、第一ステップとして高周波設計を行った。今回は、RFQの基本的なパーツである中央部とエンドプレート部についてSUPERFISHとMAFIAを用いた電磁界解析を行い、共振周波数を得る為の形状を求めた。

1. はじめに

核融合炉材料を開発する際に必要な高速中性子照射試験施設を建設する為、IFMIFの建設計画が検討されている。IFMIFでは最大250mA、40MeVの重陽子ビームを連続的に液体金属リチウムに衝突させ、重陽子-リチウム(D-Li)ストリッピング反応を利用して14MeVの高速中性子束(2MW/m²~10¹⁸n/m²s~20dpa/y)を模擬できる世界で初めての施設である¹⁾。このIFMIFで用いられる加速器は、イオン源、高周波四重極リニアック(RFQ)、ドリフトチューブリニアック(DTL)等で構成される(図1)。

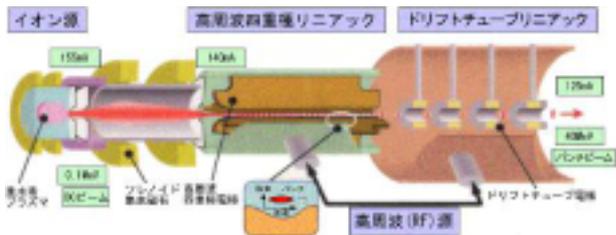


図1: IFMIF 加速器系の構成図

RFQの設計条件は入射エネルギー0.1MeV、140mA、出力エネルギー5MeV、125mAであり、特徴は大電流の連続運転である。出口エネルギーが5MeVであり、最大電場を1.7~1.8キルパトリックとすると全長が約12m必要となる。RFQの軸方向長が長くなった場合、軸方向の不要モードの励起が懸念される。この為LEDA-RFQ²⁾で試された空洞結合型を採用し、長さ数メートルのRFQモジュールに空洞結合板を介して連結していく必要がある。

要素技術確証フェーズ(Key Elements Technology Phase: KEP)における目標は、必要とされる電場安定性(~1%)を満たす為の基本技術手法である。この為第一ステップとして175MHzのRFQを試作し、1mWレベルの低電力高周波による共振周波数の計測、高周波電力のバランス及び不要モード計測等を行い、解析結果と比較する。また第二ステップとして、実際にRFQベーン先端部にテーパ(エンドプレート入口)やモジュレーション(加速部)を施し、低電力高周波による測定結果と解析結果の比較を計画している。

今回の解析では、まず二次元電磁界解析コードであるSUPERFISHによる共振周波数を得るRFQの断面構造を求め、三次元電磁界解析コードMAFIAにより中央部、エンドプレート部の幾何学的構造の解析を行った。

2. RFQの電磁界解析

解析対象としたRFQの基本的な構造及び機能について図2に示す。

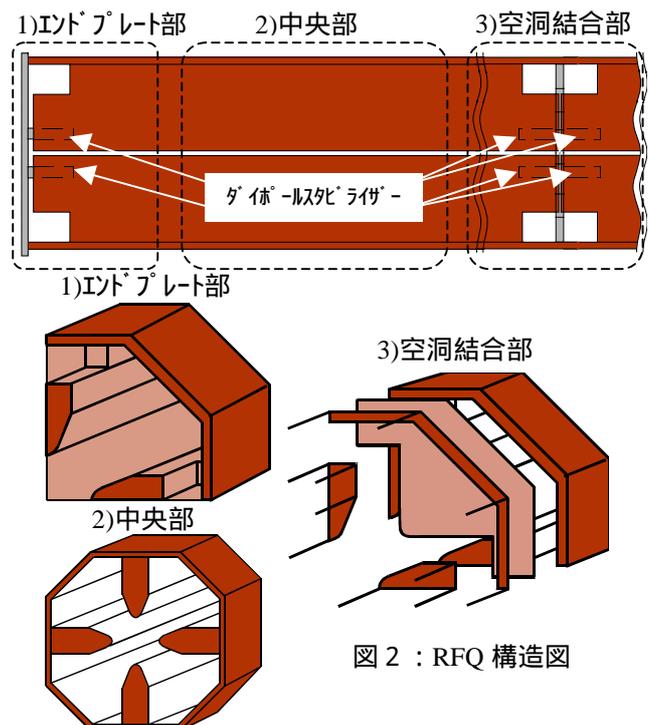


図2: RFQ 構造図

¹⁾ E-mail: sazawa@popx.tokai.jaeri.or.jp

RFQ は、中央部(図 2 -2)に示すように上下左右ベーンがあり、ベーン先端部の中央にビームが伝送加速される。

エンドプレート部(図 2 -1)は、RFQ とエンドプレート間にギャップがあり、さらにベーンにはアンダーカットを設け、共振周波数を調整している。

空洞結合部(図 2 -3)では、薄いプレートとアンダーカット部を持つ RFQ 及びスタビライザーから構成され、軸方向の不要モードを基本運転モード(TE₂₁₀)から分離し、静電的に結合させる機能を持つ。

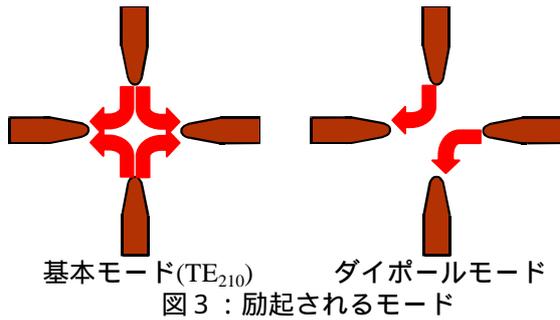


図 3 : 励起されるモード

IFMIF 用 RFQ は、入射器から発生された直流ビームの重陽子を、収束と加速を同時に行いながらバンチングさせる事ができる加速器である。その時に必要なモードは、TE₂₁₀ モード(図 3 左)であるが、このモード付近に発生する不要なモード(ダイポールモード(図 3 右)、軸方向の TE_{21n} モード)が存在する。このダイポールモードと軸方向の不要モードを分離する事が必要である。また、本来ベーン先端にうねりを入れる事でビームを加速する事ができるが、低電力高周波特性試験において共振周波数の励起を確認する為に、ベーン先端にうねりを入れず解析を行った。

2.1 RFQ 断面構造解析

SUPERFISH による解析で、イオンビームが加速されるボア直径は 8mm、ベーン先端部の半径を 4mm と固定した。また今回の目的が低電力による高周波特性を評価する事でありベーン先端部材料の交換の必要性が無い事と製作の簡便さからベーン先端部から直線テーパ構造とした。テーパ部分の傾きは共振周波数(175MHz)とダイポールモードを可能な限り分離す為に 10 度の傾斜を採用したが、30 度の傾斜と比べ 1MHz 程度しか改善されなかった。ベーンの直線部分の幅は 50mm であり、冷却パイプを挿入して実際の熱問題を解決できる寸法である。共振周波数に大きく依存する主たる幾何学的寸法は、図 4 に示す A 寸法であり、共振周波数が 175MHz 付近となる A=59mm を選択し、B の部分にチューナーを挿入して共振周波数を調整する。

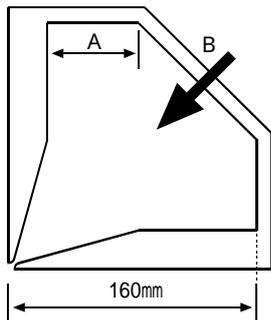


図 4 : RFQ1/4 断面

図 4 の幾何学的構造における SUPERFISH による解析結果は、基本モード共振周波数 175.251MHz、ダイポールモード共振周波数 171.106MHz となり、Q 値及び r/Q 値はそれぞれ約 12000 と約 1060 の解析結果が得られた。この幾何学的構造寸法を用いて三次元電磁界解析コード MAFIA により中央部及びエンドプレート部の電磁界解析を行った。

2.2 RFQ の長さによる影響

RFQ の軸方向の長さによって、共振周波数は次のように変化する。

$$(\omega_0 / c)^2 = (\omega(z) / c)^2 + (p\pi / L)^2$$

(z) : P 次の高次モード共振周波数

ω_0 : 基本モード周波数

L : RFQ の長さ

c : 光の速度

SUPERFISH によって求められた形状を用いて MAFIA で解析して、中央部の両端において磁場が断面に対して垂直になるような境界条件を与えて軸方向長を変化させた場合、運転モードの共振周波数(175MHz)が 0.09MHz/m の割合で減少することが分かった。また図 5 の軸長さに対する共振周波数の関係

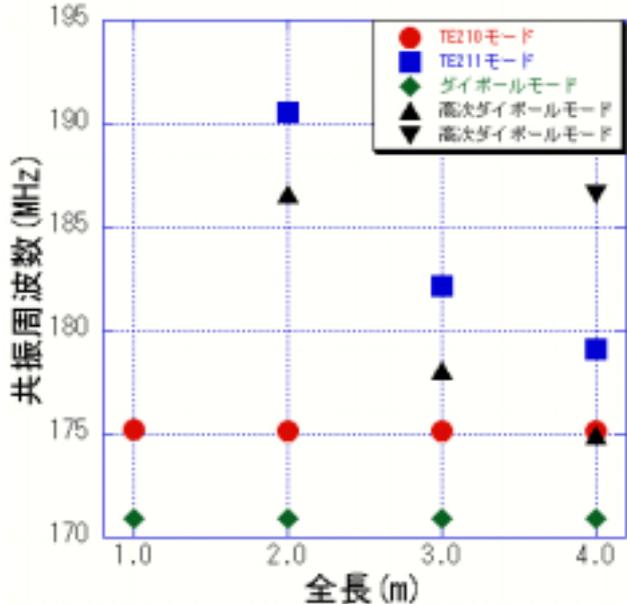


図 5 : 中央部の解析結果

を示すように L=3.0m では 170.906MHz、178.068MHz、182.160MHz、また L=4.0m では 170.928MHz、174.965MHz、179.130MHz と運転モード共振周波数に近接してくる事が分かった。これらの不要モードのうち、ダイポールモードについてはダイポールスタビライザーを用いる事で高周波システムのバンド幅の外に不要モードを移動させる事が可能であり、RFQ モジュール長として L=4.0m を選択しても、不要モードによる影響は避けられると考えられる。RFQ モジュール長の限界は、低電力による高周波特性試験(パワーバランス、共振周波数測定)の結果より

判断する予定である。

2.3 RFQ エンドプレートの解析

エンドプレートにおける電磁界解析を行う為に RFQ の長さ(L=0.25m)を固定し、図 2-1 でアンダーカットが無い側(中央部と同じ構造)では、磁場が断面に対して垂直になるような境界条件を与えた。

エンドプレート近傍では、エンドプレートとベーン間に生じる電磁界の乱れによりボア径内の電界強度が影響を受ける。この為、最初に RFQ とエンドプレート間にギャップを設け(図 7(a))、ギャップ長に対するボア径中心軸上における電界強度の軸方向長における変化を調べた(図 6)。ギャップ長 z=4 cm 以上で電界強度の乱れがエンドプレートから離れた飽和電界強度の 10% 以下に抑制できた。また図 7 (b)に示すようにギャップ長と同じギャップを RFQ ベーンにアンダーカット部を設けることにより、飽和電界強度の 5% 以下に抑制できた(図 8)。但し、エンドプレートとベーンの間隔を離す事で、重陽子を入射する入口前で広がってしまい、ベーンに当たる可能性が高くなる。その為には、エンドプレート部付近のベーン先端部の形状を入射しやすい形状にする加工が必要であるが、電界強度を多少落として設計する必要もある。

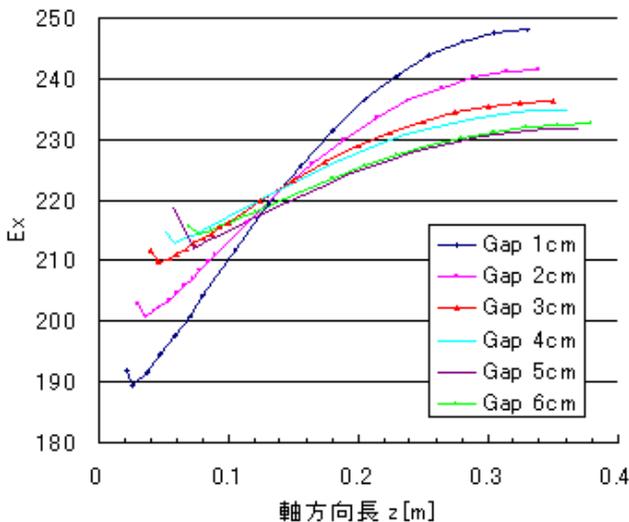
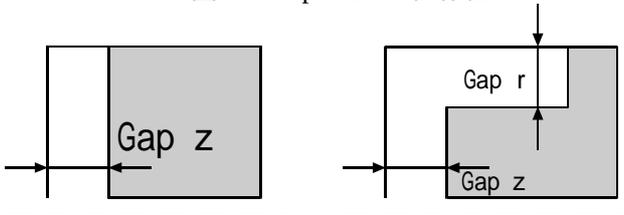


図 6 : Gap z の Ex 依存性



(a)アンダーカット無 (b)アンダーカット有
図 7 : エンドプレート部構造図

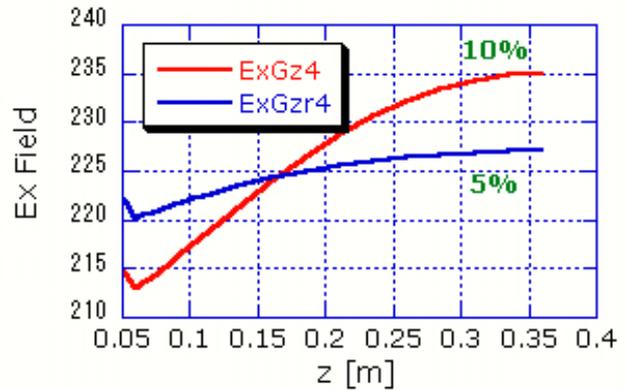


図 8 : z=4cm の電界強度分布

3. まとめ

二次元電磁界解析コード SUPERFISH により、175MHz の RFQ の設計を行い、概略寸法として 320 × 320mm の大きさとなり、ダイポールモードとの共振周波数の差が 4MHz 程度である事が判明した。また三次元電磁界解析コード MAFIA による電磁界解析では、RFQ の軸方向長さ(L=1.0 ~ 4.0m)に対して単位長さ当たり 0.09MHz/m の割合で共振周波数が低くなり、L=4.0m では基本モードの共振周波数 175MHz の ±5MHz 範囲内において 170.928MHz、174.965MHz、179.130MHz となる不要モードが近接することが判明した。またエンドプレート部の設計では、エンドプレートによる中心電界強度の変位を 5% 以内に抑えられることが判明した。

今回の解析結果では、RFQ の軸方向長 L=4.0m に対して高周波源としては、不要モードのうち、ダイポールモードについてはダイポールスタビライザーを用いる事で高周波システムのバンド幅の外に不要モードを移動させる事が可能であり、RFQ モジュール長として L=4.0m を選択しても、不要モードによる影響は避けられると考えられ、高周波特性上問題無い見通しを得た。今後、さらに L>4.0m においてエンドプレート部や空洞結合部にダイポールスタビライザーを挿入した場合の最適化設計と L=4.0m の RFQ における低電力による高周波特性評価を行う予定である。

参考文献

- [1] IFMIF-CDA Team, (Ed.M.Martone), "IFMIF International Fusion Materials Irradiation Facility Conceptual Design, Final Report" ENEA Frascati Report, December, 1996
- [2] L.M.Young, "HIGH POWER OPERATIONS OF LEDA", Linac 2000 Conference, Monterey, August 21-25, 2000, <http://linac2000.slac.stanford.edu>