

Xバンド高周波電子銃のカップラー設計

徳永千恵子^{1,A)}、山本 昌志^{B)}、石田大典^{A)}、松尾 健一^{A)}、山本 顕義^{A)}、柴 久晴^{A)}
 今井 貴之^{C)}、深澤 篤^{C)}、上坂 充^{C)}、土橋 克広^{D)}、山田 聡^{D)}、肥後 寿泰^{E)}、浦川 順治^{E)}

A) 石川島播磨重工業株式会社

〒235-0022 神奈川県横浜市磯子区新中原町1

B) 国立秋田工業高等専門学校

〒011-8511 秋田県秋田市飯島文京町1番1号

C) 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設

〒319-1188 茨城県那珂郡東海村白方白根2-22

D) 放射線医学総合研究所

〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

E) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

概要

小型硬X線源の電子線源として、Xバンド高周波電子銃の開発を行っている。この電子銃は、モードコンバータにより高周波を同軸から加速空洞に導入するカップラー構造となっている。モードコンバータにより矩形導波管のTE₁₀モードを同軸のTEMに変換して、同軸カップラーから空洞にエネルギーを送る。本書では、シミュレーションにより形状を決定したカップラーの設計について述べる。

1. 高周波電子銃の構造

小型硬X線源の電子線源として、高周波電子銃の設計は重要となる。主なビーム仕様を表1に示す。なお、電子銃の入力RFパワーの設計入力電力値は5.4MW、カソード表面電場は150MV/mとなっている。

図1に電周波電子銃の構造図を示す。加速空洞は、3.5空洞で構成され、最終セルに同軸導波管が接続されている。矩形導波管から投入されたTE₁₀モードの高周波は、モードコンバータでTEMモードへ変換されて同軸導波管から加速空洞へ入力される。

この同軸カップラー採用の利点は、電磁場の対称性が良く、空洞外周部に集束磁石の設置が容易な構造になることである。図2に製作したモードコンバータカップラーセルの写真を示す。

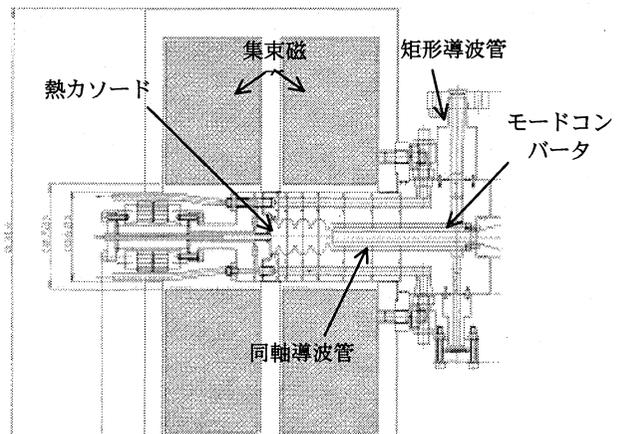


図1. Xバンド高周波電子銃の構造

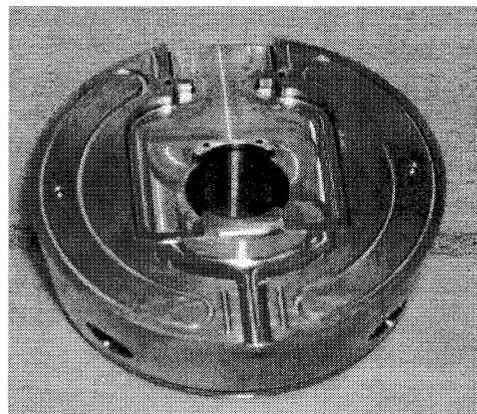


図2. モードコンバータカップラーセル

表1: Xバンド高周波電子銃の目標ビーム仕様

エネルギー	MeV	> 3
規格化エミッタンス(rms)	mm mrad	< 10π
電荷量	pC/bunch	> 20
バンチ長 FWHM	psec	1
パルス長	μsec	1

¹ E-mail: chieko_tokunaga@ihi.co.jp

2. カップラー設計

モードコンバータ、空洞と同軸導波管のカップリングの設計について述べる。

2.1 モードコンバータ

矩形導波管から投入された TE_{10} モードの高周波をTEMモードに変換するモードコンバータの設計は3次元電磁場解析コード(MW-Studio)を用いて行った。

このモードコンバータは、図3に示すようにダブルフィード型で左右のカップリングアイリスから同軸へRFを投入する構造となっていることが特徴である。特に、同軸導波管の径が一定の形状では、Sバンドで使用する場合と比較して、Xバンドでは高次モードのカットオフ周波数が低くなる。そのため、シングルフィード型では TE_{10} モードがTEMモード以外の高次モードに変換されてしまい11.424GHzで同軸へ対称なTEMモードの電磁場を投入する形状が得られなかった。上記の問題を解決するために、今回はダブルフィード型を採用することとした。

この部分の空洞モデルは図4に相当する。カップリングアイリスで Q_{ext} を調整することができる。なお、カップリングアイリスの Q_{ext} (120)は、加速空洞の Q_0 (8740)、 Q_{ext} (5826)と比較して非常に低い値となっている。

図5に各モードの透過および反射特性を示す。11.424GHzではTEMモード以外の高次モード(TE_{110} 、 TE_{210})は透過レベル-15dB以下に抑制されており、反射レベルも-35dB以下となっている。

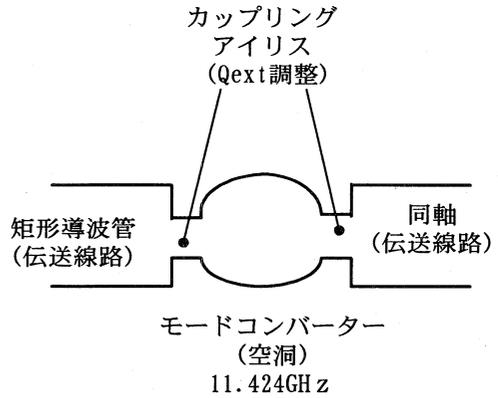


図4. モードコンバータモデル図

図6に11.424GHzでのモードコンバータの電磁場を示す。同軸にTEMモードを発生させるために同軸の左右の空洞で対称な電磁場を発生させる形状となっている。また、表面電流の高い場所は、発熱や放電を引き起こす可能性があるため、角部にRを付けて表面電流値を下げた。

なお、この空洞の電磁場が非対称性になると、ダイポールモードが発生する。特に、磁場が強いカップリングアイリスでの電磁場の対称性は非常に重要となる。透過レベル-15dB以上のダイポールモードを発生させないためには、実際の製作において、1/100mm以下の位置精度が必要となる。

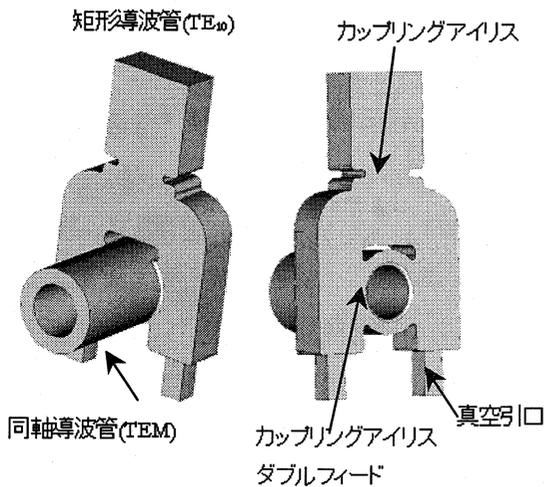


図3. モードコンバータ構造図

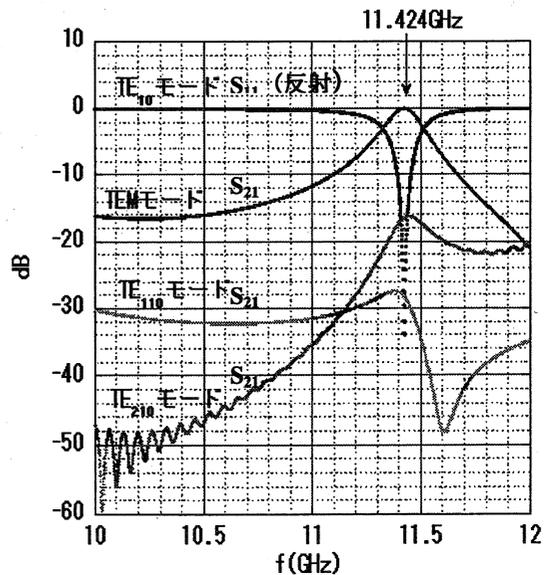


図5. モードコンバータの透過及び反射特性

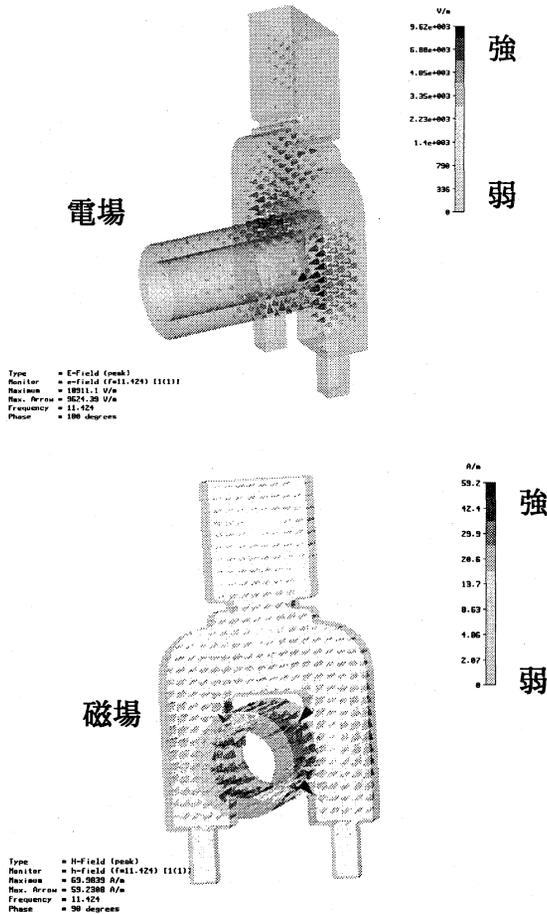


図6. モードコンバータの電磁場

2.2 同軸導波管のカップリング

同軸カップラー部は、SUPERFISH (2次元RF解析コード) を用いて空洞と同軸導波管のカップリングを計算した。

図7にSUPERFISHによる計算例を示す。カップリングは入力するRFに対する反射損失 P_{in} および空洞壁損失 P_{dis} から計算できる^[2]。反射損失は同軸部に挿入した誘電体による損失に相当する。カップリング β はCFISHで得られる P_{in} 、 P_{dis} から算出される。

加速空洞3.5セルの Q_0 値 (8740) とビームローディングを考慮した無負荷状態での最大効率が得られるカップリング β から Q_{ext} を決定した。一般に定在波型加速器の加速電圧は (1) 式より計算できる。ここで β は同軸導波管と加速空洞のカップリング、 I はビーム電流である。最大効率のカップリング β は

$\frac{dV}{d\beta} = 0$ の点である。

$$V = \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} \left(\sqrt{PR_s} - \frac{R_s}{1+\beta} I \right) \quad (1)$$

P (RF入力電力) =6MW、ビームトラッキング計算より得られる R_s (シャントインピーダンス)=2.17M Ω 、加速電荷量は最大60pc/bunchであることから、 $\beta=1.5$ が得られる。これから、加速空洞の Q_{ext} (5826) が算出され、さらに、エンドセル部は蓄積エネルギーが加速空洞全体の1/3.5となることを考慮して $Q_{ext}/3.5$ (1664) となるようにカップリング部の寸法を調整した。

3. まとめ、今後の予定

Xバンド高周波電子銃では同軸モードコンバータを採用した。このモードコンバータはダブルフィード型であることが特徴である。加速空洞、同軸導波管および矩形-同軸モードコンバータの設計、製作、低電力試験を終了し、今後、高電力高周波でのビーム試験を行う予定である。

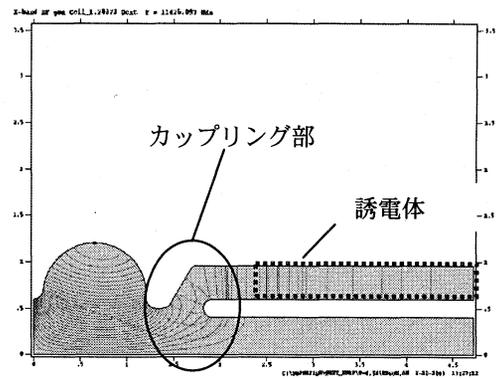


図7. SUPERFISHの計算例

参考文献

- [1] M. Yamamoto et al., “Xバンド熱カソード型RF電子銃の設計検討”, Proceedings of the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, Aug. 7-9, 2002
- [2] S.B. van der Geer, et al., “The General Particle Tracer Code: Design, implementation and application”, URL: <http://alexandria.tue.nl/extra2/200111445.pdf>
- [3] K.Matsuo et al., “Xバンド高周波電子銃の開発”, Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tokai, July30 - August 1,