# X バンド高周波電子銃のカップラー設計

徳永千恵子<sup>1,A)</sup>、山本 昌志<sup>B)</sup>、石田大典<sup>A)</sup>、松尾 健一<sup>A)</sup>、山本 顕義<sup>A)</sup>、栄 久晴<sup>A)</sup> 今井 貴之<sup>C)</sup>、深澤 篤<sup>C)</sup>、上坂 充<sup>C)</sup>、土橋 克広<sup>D)</sup>、山田 聰<sup>D)</sup>、肥後 寿泰<sup>E)</sup>、浦川 順治<sup>E)</sup>

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

<sup>B)</sup>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
<sup>C)</sup>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
<sup>D)</sup>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
<sup>E)</sup>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 TE<sub>10</sub>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 TE<sub>10</sub> 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。

表1:Xバン	、局周波電子銃の目標と	ニーム仕様
--------	-------------	-------

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



集束磁

矩形導波管

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

<sup>1</sup> 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<sub>10</sub> 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<sub>10</sub>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<sub>110</sub>、 TE<sub>210</sub>) 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<sup>[2]</sup>。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  $\beta$  から  $Q_{\text{ext}}$  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  $\beta$  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  $\beta$  は  $\frac{dV}{L^2} = 0$  の点である。

$$V = \frac{2\sqrt{\beta}}{1+\beta} \left(\sqrt{PR_s} - \frac{R_s}{1+\beta}I\right)$$
(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  $R_{s}(シャントインピーダンス)=2.17M\Omega、加速$  $電荷量は最大 60pc/bunch であることから、<math>\beta$ =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 ー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。



#### 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 27<sup>th</sup> 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.pd
- [3] K.Matsuo et al., "X バンド高周波電子銃の開発",Proceedings of the 28<sup>th</sup> Linear Accelerator Meeting in Japan,Tokai, July30 August 1,