

## C-bandバンチャー加速管の設計・製作 DEVELOPMENT OF A RELIABLE C-BAND ACCELERATOR

金田 健一<sup>\*A)</sup>, 中西 康介<sup>A)</sup>, 山本 昌志<sup>A)</sup>, 菅野 浩一<sup>A)</sup>, 田辺 英二<sup>A)</sup>, 境 武志<sup>B)</sup>  
Kenichi Kaneta<sup>\*A)</sup>, Kousuke Nakanishi<sup>A)</sup>, Masashi Yamamoto<sup>A)</sup>, Koichi Kanno<sup>A)</sup>, Eiji Tanabe<sup>A)</sup>, Takeshi Sakai<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup>AET, Inc.

2-7-6 Kurigi Asao-ku, Kawasaki City, Kanagawa, 215-0033, Japan

<sup>B)</sup>LEBRA, Nihon University

Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274-8501, Japan

### Abstract

A C-band buncher-accelerator was designed at a request of Nihon University. The design was a challenging task since the accelerator's injection part was short and also the waveguide (WG) should have been made as short as possible due to a solenoid coil outside of the accelerator. 3D EM simulation and 2D/3D RF simulations were performed in order to overcome those design limitations. With the accurate simulations, high quality was achieved while reducing the number of processes.

### 1. はじめに

株式会社トヤマの資金で行っているクライオ電子リニアック式小型コヒーレント X 線発生装置開発プロジェクトの一環として、日本大学からの依頼を受け、進行波型の C バンドバンチャー加速管の設計・製作を行った (Figure 1).

バンチャー加速管は RF 入力カプラーの空洞長が短いため、機械的制約が多く製作上の問題が発生しやすい。さらに、このバンチャー加速管の外側にはソレノイドコイルを設置するため、導波管は極力短くする必要がある。前者の問題は、導波管の接合方法を単純化することにより、機械的な干渉を減らすことで解決した。後者の課題に対しては、通常用いられるテーパー導波管より短くインピーダンス整合が取れる導波管を採用することで、径方向に伸びる導波管を短縮化した。この場合、電場強度が高くなることが懸念されたが、テーパー導波管に比べて電場強度が大きく変わらないことがシミュレーションより得られた。カプラーセルの加速電場の非対称性は、カップリングアイリスの反対側を三日月型に加工することで解消した。

これらのカプラーやレギュラーセルの RF 設計は、モデル空洞を製作することなく、すべて二次元/三次元の RF シミュレーションのみで行った。加工後に測定された RF 特性は、ほぼ計算通りであったため、最終加工工程で微小な周波数のチューニングのみを実施した。高精度の RF シミュレーションを実施したことで、製作工程が短縮するとともに、信頼性の高い加速管ができたと考えている。

本論文では、この C バンドバンチャー加速管の設計と製作、測定結果について報告する。

### 2. C バンドバンチャー加速管の設計

#### 2.1 仕様

基本仕様を Table 1 に示す。さらに計算値の 90% 以上の Q 値となることも仕様に入る。

Table 1: Specifications of C-band Accelerator

Frequency	5712±0.4MHz
Peak power	5MW
Operation mode	2 $\pi$ /3
Cavity No.	Coupler Cavities × 2 Regular Cavities × 13
Waveguide	WRI-48 (WRJ-5)
Flange	Advanced DESY

#### 2.2 基本設計

バンチャー加速管の基本的な形状は General Particle Tracer (GPT)<sup>[1]</sup> の粒子シミュレーションにて決定した。その計算は日本大学で行われ、その形状が仕様として与えられている。具体的な形状は、以下の通りである。

- カプラーセルを含めて、加速セル数は 15 個。
- RF の位相速度  $\beta$  を決める計算形状は、Figure 2 の通り。
- ディスクのボア径 ( $2a$ ) は、 $\phi 12$  [mm] で一定。入出力ビームパイプも同一寸法。
- ディスク厚さ ( $t$ ) は、3 [mm] で一定。

プリバンチャー、バンチャー部のビーム軌道計算結果をバンチャー加速管とヘルムホルツコイルの概形図と合わせて Figure 3 に示す。プリバンチャー入口からバンチャー出口までのビーム径の変化を表している。この結果からボア径 ( $2a = \phi 12$ ) はサイズの的に問題ないことが分かる。ヘルムホルツコイル部分の磁場データは GPT に取り込み計算を行った。コイルはそれぞれ 4250AT, 3825AT, 3825AT と仮定した。

Figure 4 では、バンチャー内の電子ビームの位相分布を示す。縦軸の  $0^\circ$  が最大加速電場であるクレスト位相となる。

\* kaneta@aetjapan.com

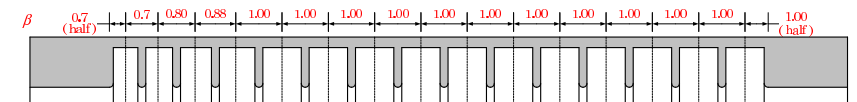


Figure 2: Model figure from NIHON University.

Table 2: EM Simulation Results of Waveguides

	Input taper WG	Output taper WG	Input step WG	Output step WG
Waveguide length [mm]	28.5	30	12.95	14.45
Return loss [dB]	19.9	33.0	36.4	57.2
Maximum electric field [MV/m]	6.2	4.5	6.2	4.6

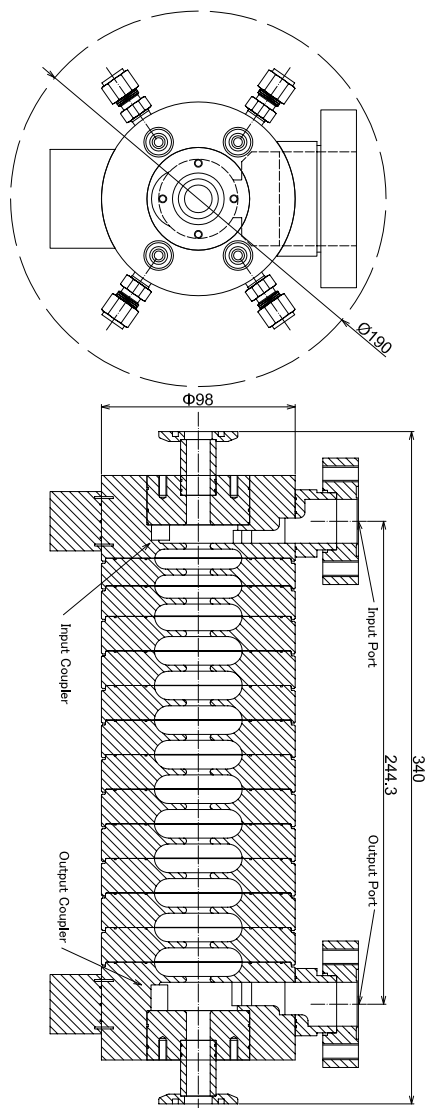


Figure 1: Outline of C-band accelerator.

### 2.3 ステップ導波管の設計

通常カプラーセルへの RF 入出力は  $\lambda/2$  テーパー導波管が用いられる。しかし、この場合、導波管長が長くなってしまったため、加速管の径方向のサイズが大き

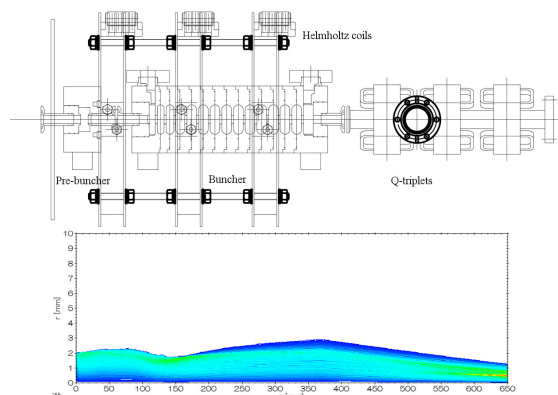


Figure 3: Beam size distribution along longitudinal direction. Currents of Helmholtz coils are 4250AT, 3825AT, 3825AT, respectively.

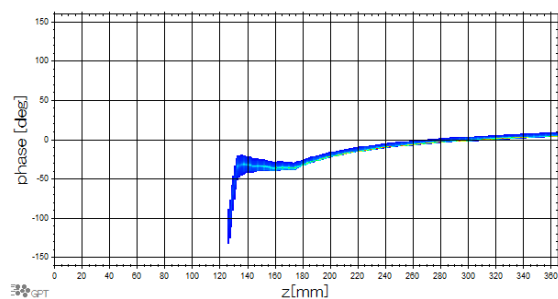


Figure 4: Phase distribution of electron beam. 0 degree consists with the crest phase for acceleration.

くなる。そこで、 $\lambda/4$  ステップ導波管を採用することで導波管長を短縮化した。EM シミュレーションの結果を Table 2, Figure 5 に示す。ステップ導波管の帯域はテーパー導波管に比べて狭くなるが、加速管は狭帯域で使用するため問題とならない。

ステップ導波管は接触面を曲面にして加速管外周部にロウ付した。加速管にはロウ付のための掘りこみ加工が不必要となり、導波管と加速管との機械的な干渉を減らすことが可能となる。荷重をかけながら曲面をロウ付することでリークが起こらないことが分かった。

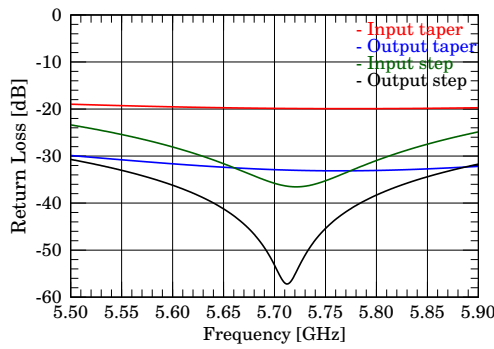


Figure 5: Simulation results of return loss for each waveguide.

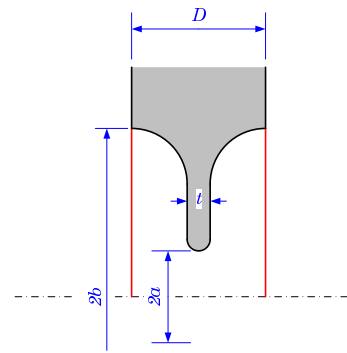


Figure 6: Model figure of symmetrical cells.

## 2.4 レギュラーセルの設計

レギュラーセルの形状を Figure 6 に示す. 実機は計算形状 (Figure 2) から, 加速空洞を曲面にすることで Q 値の向上を図っている.

レギュラーセルは軸対称であるため, SUPERFISH<sup>[2]</sup> のような二次元計算コードが使用できる. SUPERFISH で決定したレギュラーセル形状を Table 3 に示す. しかし, SUPERFISH は境界条件として位相差を設定することができない. そこで他の二次元計算コードを使い計算する<sup>[3]</sup>(Natsui コード). このコードは二次要素を使い計算精度も良く周期的境界条件の設定も可能である. 今回のシミュレーションでは, 十分な精度で SUPERFISH の計算結果と一致することも確認できた.

周波数  $f$  とセル毎の周波数シフト  $\theta$  の分散関係式は,

$$f = f_a \sqrt{1 - \kappa \cos \theta} \quad (1)$$

と近似できる<sup>[4]</sup>. ここで  $f_a$  は  $\pi/2$  モードの周波数,  $\kappa$  はカップリングを表す. 二次元シミュレーション結果を分散関係式にフィッティングすることで  $f_a$  と  $\kappa$  を求めることができる<sup>1</sup>. Figure 7 にシミュレーションで求めた各セルの分散関係とフィッティング結果を示す.

次に  $\beta$  の異なる空洞についての計算を行った. 製作した加速管は入射部付近で  $\beta$  が変わっていくため, Figure 6 の様にディスク面に対して鏡面対称とならず, 非対称になってしまう. しかし, SUPERFISH ではこの非対称問題の計算が容易ではなく, Natsui コードを用いて計算した. 計算した非対称セルの分散関係を Figure 8 に示す.

より精度の高い加速管を設計する上でこの非対称セルの計算は極めて重要である. 今回は計算精度の良いコードを用いてバンチャー部の設計を容易に行うことができた.

<sup>1</sup>この  $f_a$  と  $\kappa$  を求めることがカプラーセルを設計する上で非常に重要となる.

Table 3: Design Table for Symmetrical Cells

$\beta$	t[mm]	2a [mm]	2b [mm]	D [mm]
0.70	3	12	43.9834	12.2464
0.80	3	12	44.1038	13.9959
0.88	3	12	44.2310	15.3955
1.00	3	12	44.4526	17.4949

## 2.5 カプラーセルの設計

**2.5.1 三日月カットによる電場の均一化** アイリスによって電力を供給するカプラーセルの加速電場はビーム軸上で均一にならない. これはカプラー内の電場がアイリス側に引っ張られるためである. そこで, カップリングアイリスの対岸側を三日月型に削ることでこの問題を解消する. 三日月型の加工は Figure 9 のようにする.

シミュレーションで電場分布が均一であることを評価することは難しいため, 磁場強度零の点がビーム軸と一致するように調整を行った (Figure 10, 11).

**2.5.2 Kyhl 法による寸法の決定** カプラーセルの位相差と共振周波数にも分散関係が成り立っており, 壁損失がない場合の分散関係式は,

$$\theta = 2 \arctan \left[ \frac{2Q_{ext}(\omega_0 - \omega)}{\omega} \right] \quad (2)$$

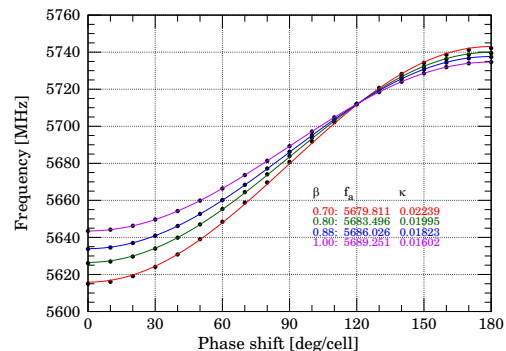


Figure 7: Dispersion relations of symmetrical cells.

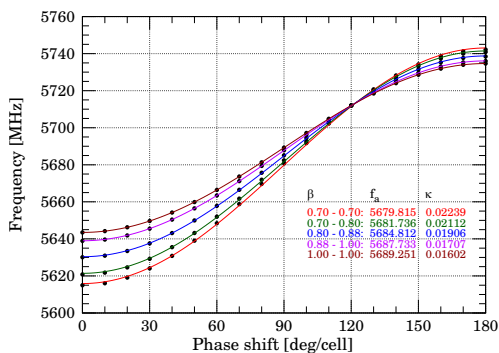


Figure 8: Dispersion relations of asymmetrical cells.

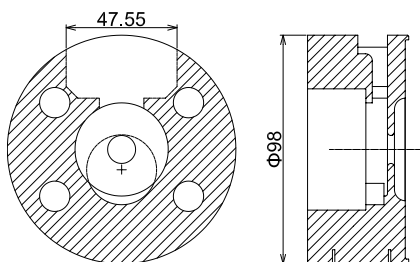


Figure 9: Outline of coupler cell.

となる [5]. ここで  $\omega_0$  は共振角周波数を表し,  $\omega_0 = 2\pi f_{av} = \pi(f_{2\pi/3} + f_a)$  である.  $f_{2\pi/3}$  は  $2\pi/3$  モードの動作周波数を表し, 5712 [MHz] となる. また,  $2\pi/3$  モードの進行波型加速管のカプラーセルにおける外部  $Q$  とカップリングには下記の関係で近似が成り立つ [4].

$$Q_{ext} = \frac{4 - 2\kappa}{\sqrt{3}\kappa} \quad (3)$$

ただし, カップリングは両側の共振空洞の結合部でのポインティングベクトルと密接に関係するため, 結合面での左側の空洞の電磁界と右側の空洞の電磁界を乗じた(ベクトル積)面積分がカプラーセルのカップリングとなる. 入力カプラーセル側のようにディスクごとにカップリングが変わる場合は注意が必要となる. 二つのセル間

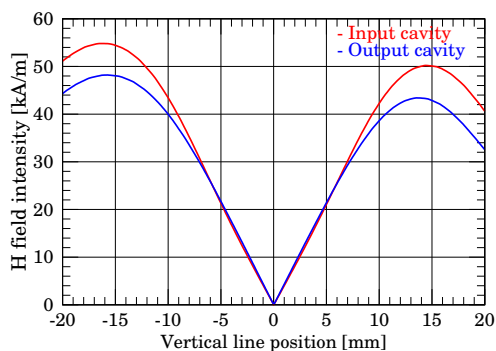


Figure 10: H field distribution of coupler cells. Beam axis crosses vertical line at position = 0mm.

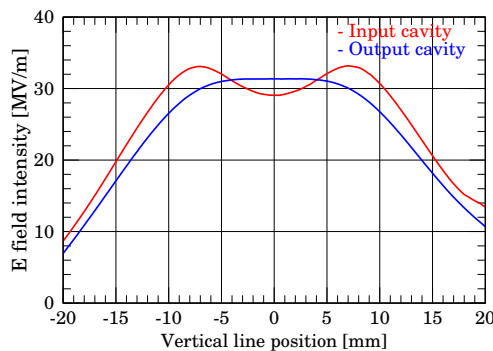


Figure 11: E field distribution of coupler cells. Beam axis crosses vertical line at position = 0mm.

のカップリング  $\kappa_{12}$  は次の式から求めることができる.

$$\kappa_{12} = \sqrt{\kappa_1 \kappa_2} \quad (4)$$

ここで,  $\kappa_1$  と  $\kappa_2$  はそれぞれのセルが周期構造と仮定し, 分散関係から得られるカップリングである.

カプラーセルの設計には, 三次元シミュレーター (MW STUDIO<sup>[6]</sup>) を用いた. カプラーセルの設計手順は下記のようになる.

1. 隣り合うレギュラーセルの  $\kappa$  にマッチするようにカプラーセル形状を決める.
2. カプラー内電場分布が均一になるように三日月形状を決める.
3. 第一セルと第二セルをディチューンして反射波特性 ( $S_{11}$ ) の計算を行い位相差が  $2\pi/3$  となるようにアイリス径とセル径と三日月形状を調整する.

3. の調整は「Kyhl の方法」と呼ばれる [7]. 正しく設計されたカプラーセルの位相差は Figure 12 の形で測定できる.

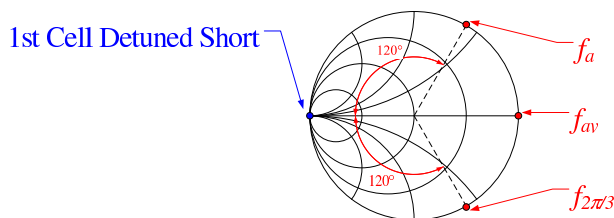


Figure 12: Admittance chart for Kyhl method.

### 3. チューニング

一体型口付の前に各セルの精度を電気測定で確認した. 電気測定の様子を Figure 13 に示す. また, 各セルの最終調整削り幅を Table 4 に示す. 削り代として, カプラーセルは 200 [ $\mu\text{m}$ ], レギュラーセルは 20 [ $\mu\text{m}$ ] をあらかじめ残して設計した. カプラーセルの削り代が多いのは 2D シミュレーションに比べて 3D シミュレーションの精度が落ちるためである. チューニングで削っ



Table 4: Cells Diameter, Cutting Stocks and Tuning Results

	Input coupler	Output coupler	$\beta=0.70$	$\beta=0.80$	$\beta=0.88$	$\beta=1.00$
Cell diameter [mm]	39.972	39.417	44.02	44.141	44.319	44.422
Extra material shaved off [ $\mu\text{m}$ ]	200	200	20	20	20	20
Amount of shaved off [ $\mu\text{m}$ ]	191	191	14	13	15	14

た量は削り代として用意した量になっていることがこの表から分かる。つまりシミュレーションの精度が非常に良かったと言える。

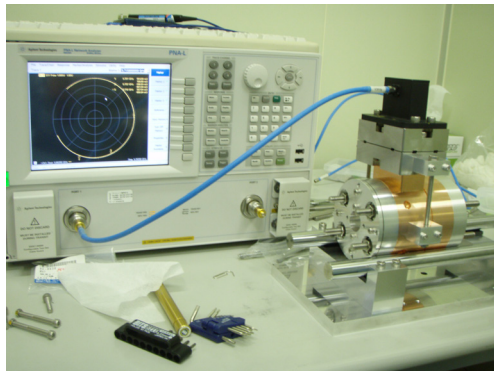


Figure 13: Measurement circumstance of each cell before brazing.

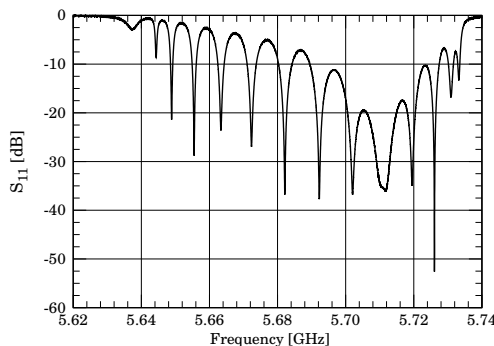


Figure 14: Measured input return loss ( $S_{11}$ ) for C-band accelerator.

#### 4. 最終測定

低電力試験結果を Figure 14 に示す。VSWR は中心周波数で 1.03 であった(真空換算後)。またこの時の挿入損失は 0.93 [dB] となった。計算による挿入損失量は 0.88 [dB] であることから、Q 値で換算すると計算値の 94.8% という結果が得られる。

次に、ビード測定<sup>[8]</sup>を行ったのでその結果を Figure 15, 16 に示す。この結果から運転周波数 5712.39 [MHz] (真空換算後) の時、位相が  $2\pi/3$  モードで回り、累積位相は  $3.58^\circ$  となることが分かった。

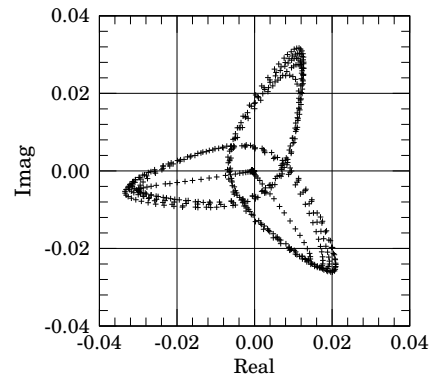


Figure 15: Bead measurement result. Each point relates to each bead position on beam axis (0.5 [mm] gap).

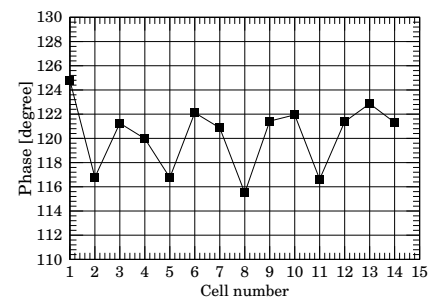


Figure 16: Phase differences between dwell points in bead measurement.

#### 5. まとめ

高精度のシミュレーションを実施することで工数を減らし短納期で信頼性の高い加速管の設計・製作が可能となった。曲面ロウ付を実施したが、真空漏れ等の問題が発生しなかった。今後この手法でより機械設計の汎用性が上がるものと確信する。また、ステップ導波管による RF 入出力は狭帯域であるものの、加速管には適しており径方向のサイズを縮小化することに貢献できる。今後の課題としてカップラセルの削り代を減らすことでより短時間でチューニングを終えたい。

#### 参考文献

- [1] Pulsar Physics, <http://www.pulsar.nl/index.htm>.
- [2] J. H. Billen and L. M. Young, "POISSON SUPERFISH", LA-UR-96-1834, 1996.
- [3] T. Natsui, "高周波電磁場解析のための 2 次要素を使った有限要素法の研究", 秋田工業高等専門学校専攻科特別研究論文, March, 2005.
- [4] T. Higo, "ディスクロード型加速構造のカップラーマッチ

ングに関する簡単な等価回路解析”, 高エネルギー加速器  
研究機構, JLC-note No.47, 1993.

- [5] M. Yamamoto, ”導波管と加速空洞との外部 Q の計算方法”,  
EM-09032A unofficial document in AET, 2009.
- [6] CST AG., <https://www.cst.com>.
- [7] E. Westbrook, “ MICROWVE IMPEDANCE MATCHING  
OF FEED WAVEGUIDES TO THE DISK-LOADED AC-  
CELERATOR STRUCTURE OPERATING IN THE  $2\pi/3$   
MODE ”, SLAC-TN-63-103, 1963.
- [8] T. Higo, “Xバンド 60 cm 加速管の RF 特性測定とカップラー  
マッチング”, 高エネルギー加速器研究機構, GLCX-012,  
2005.