

C-band プリバンチャーの設計・製作 DEVELOPMENT OF A C-BAND PREBUNCHER

山本昌志^{*A)}、金田健一^{A)}、中西康介^{A)}、菅野浩一^{A)}、田辺英二^{A)}、境武志^{B)}

Masashi Yamamoto^{*A)}, Kenichi Kaneta^{A)}, Kosuke Nakanishi^{A)}, Koichi Kanno^{A)}, Eiji Tanabe^{A)}, Takeshi Sakai^{B)},

^{A)}AET, Inc.

^{B)}LEBRA, Institute of Quantum Science of Nihon University

Abstract

We have developed a C-band prebuncher used for electron linear accelerator cooled to cryogenic temperatures for generating coherent X-rays. This is operated by RF power of about 1 [kW] and frequency of 5712 [MHz]. Since the resonant cavity of the prebuncher is small, it is difficult to apply the usual loop coupling. In order to avoid this problem, an iris coupling structure with waveguide was adopted. By accurate 3D-RF simulation and careful manufacture, the prebuncher which satisfies the specifications was completed. A Q value of 94 [%] of the design value and a coupling(β) of 5.27 were obtained by low power RF measurements. This paper explains its design and manufacture.

1. はじめに

株式会社トヤマ殿の資金で開発が進められているクライオ電子リニアック小型コヒーレント X 線発生装置^[1]の開発プロジェクトの一環として、日本大学とともに、ダブルリエントラント型の C バンドプリバンチャーの設計・製作を行った。このプリバンチャーは、100 [kV] の電子銃からのビームをバンチャーの手前でバンチングするもので、安定に動作することが重要である。筆者のこれまで経験から、ロング RF のプリバンチャーを安定に動作させることは、簡単なことではないを知っている。通常使われるループカップラーでは、放電が起きやすい。それを避けるために、アリス結合型のプリバンチャーの開発を行った。その設計と製作について報告する。

2. 設計

2.1 基本パラメーターと構造

Table 1 に、C バンドプリバンチャーの設計パラメーターを示す。周波数は C-バンドの 5712 [MHz] である。導波管と空洞とのカップリングは、大きめの $\beta = 5$ とした。このことにより、運転周波数や空洞の共振周波数の変化に対して、空洞電圧や位相の変化の割合が小さくなる。従って、空洞の安定化が期待できる。その一方で、リターンロスが増加するが、それは大きな問題ではない。 $\beta = 5$ でのリターンロスは 3.52 [dB] で、入力電力の 44 [%] が反射電力となる。したがって、空洞の壁消費電力の倍の RF 電力を供給することになる。壁消費電力は少ないので、これは全く問題がない。RF の壁損失を表す Q_0 は、計算値の 80 [%] 以上を仕様とした。

プリバンチャーは、同軸線路とループカップリングを用いて、空洞と結合する構造が一般的である。しかし、C-バンドでこれを実現するには機械構造的に無理がある。サイズが小さいため、ループカップラー製作に困難が予想される。また、狭い部分にこの構造を無理に押し込むと、放電の可能性が高くなる。そのようなことから、空洞と伝送線路の結合は導波管を用いたアイリスカップリングを採用した。プリバンチャーの RF 電力は

同軸ケーブルで供給されるので、N 型コネクターの同軸導波管変換器が必要になる。この設計・製造はそれほど難しくないので、不安のあるループカップラーを採用する理由はない。

Table 1: The Design Value of the Prebuncher

Frequency	f_0 [MHz]	5712 \pm 2
Coupling	β	4 – 8 Target: 5
Q value	Q_0	6800
RF power	P [kW]	> 1
Cavity type		Double reentrant
Coupling method		Iris coupling

Figure 1 に、同軸導波管変換器を除いたプリバンチャーの断面図を示す。RF の入力には N 型コネクタ決められているので、RF フランジに同軸導波管変換器を取り付けなくてはならない。導波管の高さを低くして、導波管のステップ構造を省くこともできるが、同時に製作したバンチャー加速管^[2]と同じ治具を使うために、導波管部は同一形状とした。プリバンチャーに引き続くバンチャー加速管と外径などを同一にしたため、空洞のサイズに比べプリバンチャーの外形が大きくなっている。

発熱はほとんど無いので冷却水の役割は除熱ではなく、周波数の制御を担う。共振周波数の変化は 94 [kHz/°C] であるため、かなり広い周波数範囲で調整が可能である。

2.2 3D-RF シミュレーション

この C-バンドプリバンチャーを RF の観点から見ると、(1) 同軸導波管変換器、(2) ステップ導波管、(3) 共振空洞から構成される。これらの機器の寸法は、以下に示すとおりそれぞれ独立に CST-Studio^[3] を用いた 3D-RF シミュレーションにより決められた。

同軸導波管器 これは、N 型コネクタ (京セラ:N-R) から導波管 WRI-48(47.55 mm \times 22.15 mm) に変換するものである。N 型コネクタもプリバンチャーに接続されるフランジ側は DESY フランジを使い真空タイトな構造となっている。

*yamamoto@accuthera.com

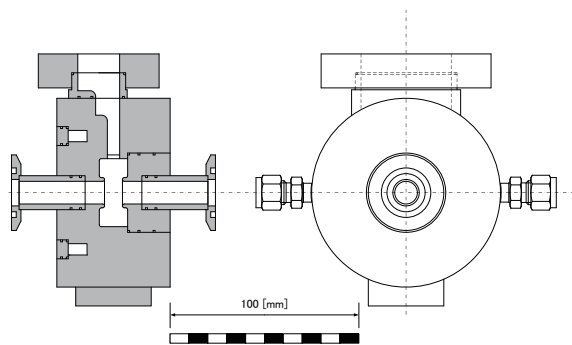


Figure 1: Structure of the prebuncher.

この同軸導波管変換器の寸法は、反射波が最小になるように、CST-Studioのシミュレーションで決められた。Figure 2は、最適化された形状での電場分布である。これを見て分かるように、主に電氣的なカップリングである。RF電力が1[kW]の時の最大電場は、882[kV/m]である。

実際の製作では、同軸の中心導体から伸びている棒の長さを変化させることにより、VSWRの微調整を行った。このような構造のため、調整は容易である。

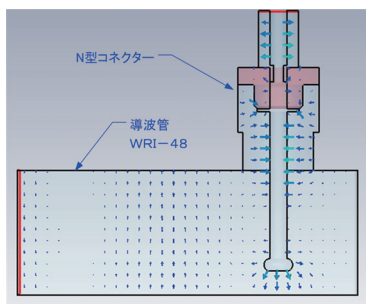


Figure 2: The electric field of the coaxial waveguide converter calculated by CST-Studio.

ステップ導波管 製作のことを考えると、空洞の結合アイリス部での導波管WRI-48の導波管高さ22.15mmは高すぎる。冷却水チャンネルや空洞の蓋に干渉する。そこで、導波管の高さを22.15[mm]から、機械的に適当な高さである6[mm]に低くする変換器が必要になる。一般的にはテーパ導波管が使われるが、その場合 $\lambda_g/2$ のテーパ長が必要になり、導波管が長くなってしまふ。そこで、我々は変換部の長さが $\lambda_g/4$ とテーパの半分になるステップ導波管を採用した。テーパ導波管と比較したステップ導波管の S_{11} 特性の計算結果を、Figure 3に示す。この図から、ステップ導波管の方が良好なRF特性が得ることが分かる。

共振空洞 空洞部の寸法計算で重要なことは、共振周波数を5712[MHz]に調整することと、カップリング β を5にすることである。この計算にも、CST-Studioを用いた。そのときの計算メッシュの様子をFigure 4に示す。四面体メッシュを用い、メッシュサイズは15-20[steps/wavelength]で計算を行った。予め、メッシュ

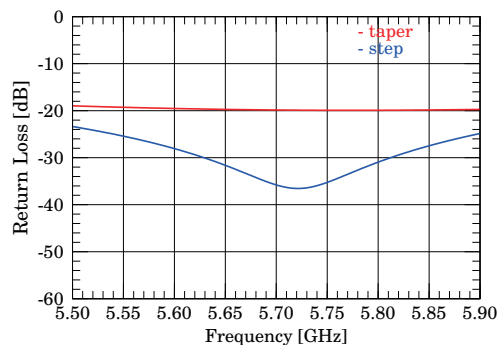


Figure 3: The reflection characteristic of a step waveguide (blue line) and a taper waveguide (red line).

サイズと共振周波数、計算時間の関係を調べ、共振周波数の計算誤差が10[MHz]以内に収まるメッシュサイズを選択した。

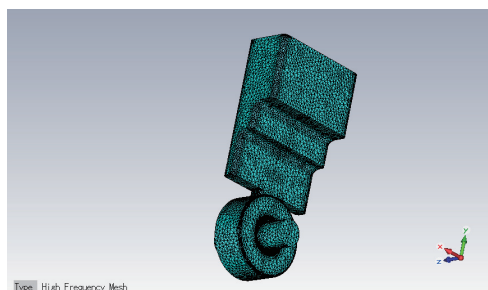


Figure 4: The calculation mesh of CST-Studio.

計算は、壁損失 Q_0 を求めることから始めた。固有値計算モードでの計算の結果、 $Q_0 = 8500$ であることが分かった。実機の Q_0 は、この計算の90[%]とすると、設計の外部 Q (Q_{ext}) = $0.9 \times 8500/5.0 = 1530$ となる。次に、この外部 Q になるようにカップリングアイリスの寸法を調整する。そのときの計算結果をFigure 5に示す。この図から、アイリス幅は12.59[mm]と決められた。その後、空洞直径を調整し、共振周波数が5712[MHz]の寸法を求めた。

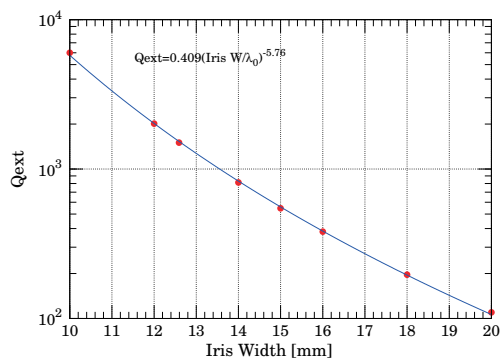


Figure 5: Relation between the external Q and the iris width by CST-Studio.

3. 製作

同軸導波管変換器の主な部品は、SUS316を削りだし製作した。VSWRを最小にするために、接合前に変換器の中心導体の長さを調整した。RF調整後、本体部とN型コネクタを溶接し完成させた。

空洞部は超精密旋盤により加工を行った。その際、空洞のギャップ間隔を変えることにより、周波数調整を行った。その一方、測定された外部Qは計算と一致していたため、カップリング(β)の調整は行わなかった。カップリングの計算はCST-Studioでは必要十分な精度が得られる。

周波数調整後、二段階のロウ付けにより各部品を接合した。その後、Heリーク試験でリークが無いこと確認し、製作は完了した。Figure 6に完成した加速管の写真を示す。一部ロウ材が流れているものの、きれいに仕上がっている。

その一方で、フランジのサイズが大きく、機器のバランスが悪い。ここは溶接構造の薄く小さいフランジを採用すべきであったと考えている。

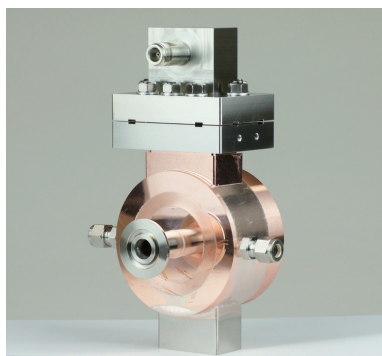


Figure 6: The photograph of the completed prebuncher.

4. 完成後のRF測定結果

同軸導波管変換器を接続した状態でHeリーク試験を行い、リークが無いことを確認した後、RF測定を行った。そのRF測定では、N型コネクタをポート1として、 S_{11} 反射特性の値から、各種のRFパラメーターを計算した。空洞の共振角振動数 ω_0 、壁損失のQ値が Q_0 、カップリング β の場合、周波数に依存した $|S_{11}|$ [dB]は、次式で表すことができる。Figure 7の赤丸で示した測定結果をこれらの式でフィッティングすることにより、プリバンチャーの各種パラメーターが得られる。

$$Z(\omega) = \frac{i\beta(\omega/\omega_0)^2}{Q_0[1 - (\omega/\omega_0)^2 + i/Q_0(\omega/\omega_0)^2]} \quad (1)$$

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z(\omega) - 1}{Z(\omega) + 1} \quad (2)$$

$$|S_{11}(\omega)| = 20 \log_{10} [|\Gamma(\omega)|] + offset \quad (3)$$

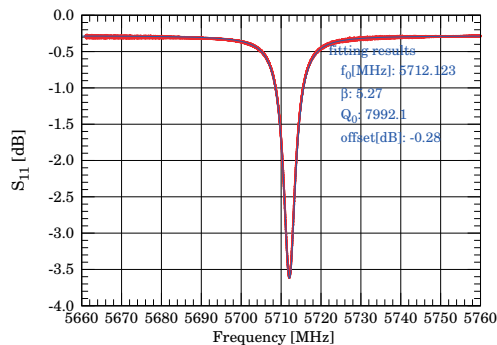


Figure 7: S_{11} characteristics of the completed prebuncher. Red points are the measurement result, blue line is the fitting result.

Table 2に、フィッティングにより得られたプリバンチャーのRFパラメーターを示す。共振周波数が設計に比べて少し高いが、これは問題にならない。なぜならば、これによるリターンロスの増加はほんの僅かである。Q値および結合度も当初の設計で想定した誤差範囲内である。測定で得られた外部Qは1516で、設計値の1530とほとんど一致している。これらのことから、設計(3D-RF計算)と周波数調整加工、製作は良好であったことが分かる。

Table 2: RF Measurement Results of Completed C-band Prebuncher.

Frequency	5712.8 [MHz]	Vac, 32 [°C]
Q_0	7992	94 [%] of calculation value
Coupling(β)	5.27	

5. まとめ

Cバンドのダブルリエントラント型のプリバンチャーの場合、空洞のサイズが小さいことから、ループカップラー構造にすると、製作に困難が生じるとされる。さらに、ループカップラーでの放電の可能性もある。これらを避けるために、アイリス結合型のプリバンチャーの設計・製作を行った。注意深い3D-RF計算の後、超精密加工とロウ付けを経て完成した。完成したプリバンチャーのQ値(Q_0)は計算値の94[%]で十分良好であった。外部Qはほぼ計算通りであった。今後は、加速器にRFを投入しビーム加速試験を実施する予定である。

参考文献

- [1] I.Sato, et al., "DEVELOPMENT OF COMPACT ERL BASED ON ELECTRON-CRYO-LINAC FOR MEDICAL CARE", Proceedings of Particle Accelerator Society Meeting 2009, JAEA, Tokai.
- [2] K.Kaneta, et al., "C-band バンチャー加速管の設計・製作", This conference.
- [3] CST Computer Simulation Technology, <http://www.cst.com/>