

DEVELOPMENT OF C-BAND MULTI BEAM SUB-BOOSTER KLYSTRON

Mitsuhiro Yoshida^{1,A)}, Shigeki Fukuda^{A)}, Vladimir E. Teryaev^{B)}

^{A)} High Energy Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, JAPAN, 305-0801

^{B)} BINP SB RAS

Novosibirsk, RUSSIA, 630090

Abstract

A C-band small multi beam klystron (MBK) has been under development. It is designed for the sub-booster klystron which is required to drive multiple 50 MW C-band klystrons for the SuperKEKB injector upgrade plan. The target output power is 150 kW at the applied voltage of 25 kV which is suitable for the existing pulse modulator for the S-band sub-booster klystron. At this operating condition, the designed micro-perveances of the total and the each beamlet are 2.0 and 0.25 respectively.

Cバンドマルチビームサブブースタークライストロンの開発

1. はじめに

KEKB ファクトリーのルミノシティは世界最高の $1.7 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$ を記録したが、さらに1桁から2桁高いルミノシティを目指した SuperKEKB が計画されている。KEKB は異なるエネルギーの2リング衝突型加速器であり、8GeV の HER リングと 3.5GeV の LER リングで構成されており、HER に電子、LER に陽電子を蓄積しており、入射器はこれらに直接入射を行っている^[1]。しかし SuperKEKB 計画^[2]への改造の際、陽電子ビームの劣化の原因となっている電子雲の影響を少なくするため、現在の陽電子と電子の蓄積リングを入れ替え、陽電子を HER リングに蓄積する事が検討されている。もしこのエネルギースイッチが必要になると、入射ライナックについても陽電子の加速エネルギーを 3.5GeV から 8GeV に増強する事が必要となる。そのために、現在使用されている Sバンドの加速ユニットの代わりに Cバンドの RF 源と加速構造を用いて加速電界を現在の2倍に増やすための R&D を行って来た^[3]。この Cバンドユニットに必要な大電力クライストロンや加速管等の開発はおよそ完了したが、大電力クライストロンを駆動するための中電力励振系の開発が必要である。

この中電力の励振系のための、Cバンド (5712MHz) の 100kW 級のサブブースタークライストロンの開発を行っている。このクライストロンは 50MW の Cバンドクライストロン 16 台を駆動するよう設計されており、既存の 25kV/8A パルス電源を利用するよう設計を行った。この電源電圧では、シングルビームではパービアンスは $2.0 \mu\text{P}$ となってしまう、効率がかなり下がってしまう。そこで、8ビームのマルチビーム方式を採用し、ビームの1本当たりの電流を 1A、パービアンスは $0.25 \mu\text{P}$ と

している。多ビームを採用し、ここまでパービアンスを下げる事で界浸流を採用し、マルチビームクライストロンで通常難しい磁気回路の設計を容易にする事ができた。

2. 設計の概要

クライストロンで期待される効率を一般的な実験結果で得られた $0.8 - 0.2 \mu\text{P}$ と仮定した場合、印加電圧と出力高周波電力は以下のような関係を満たす。

$$\mu\text{P}(0.8 - 0.2 \mu\text{P}) = P_{\text{out}} / V_k^{2.5} \times 10^6$$

図1は出力高周波電力を 150 kW と固定した条件で、印加電圧を変化させた場合の、マイクロパービアンス (μP) と期待される効率を示している。

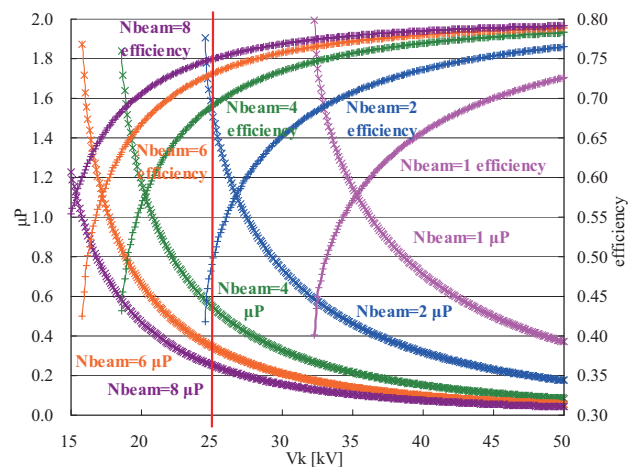


図1：出力高周波電力を 150 kW に固定した場合の、印加電圧に対するマイクロパービアンスと期待される効率

¹ E-mail: Mitsuhiro.yoshida@kek.jp

既存の S バンド 80kW サブブースタークライストロン用のパルス電源を、新しく開発する C バンドクライストロンにも使用する事を検討している。このパルス電源の運転電圧は 25kV である。図 1 から、150kW の出力電力を得るためには、印加電圧が 25kV では最低でも 4 本のビーム本数が必要である事が分かる。表 1 にビーム本数を変化させた場合のクライストロンのパラメーターを示した。

通常のマルチビームクライストロンを製造する際の一歩の難しさは、ビームパイプの中心が軸の中心からオフセットしているため、収束型の電子銃を用いた場合磁場を垂直にするための鉄プレートを埋め込み、磁気回路を構成する必要がある事である。このような難しさを軽減するため、今回のクライストロンの設計においては界浸流を選択する事とした。カソードでのビームローディングを $5A/cm^2$ に抑えつつ、ビーム径や、全ビーム電流を考慮して、ビーム本数として 8 本を選択した。

表 1 : ビーム本数によるクライストロンのパラメーター

Parameter	Value				
Frequency (MHz)	5712	5712	5712	5712	5712
Output Power (kW)	80	150	150	150	150
Beam Voltage (kV)	25	25	25	25	25
Beam Current (A)	7.88	6.11	2.17	1.37	1.00
μP per beamlet	1.98	1.55	0.55	0.35	0.25
Efficiency (%)	40.4	49.1	69.0	73.1	74.9
Number of Beams	1	2	4	6	8
Cathode Loading (A/cm^2)	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Cathode Area (cm^2)	1.572	1.224	0.432	0.276	0.204

3. 電子銃

図 2 は DGUN^[4]により計算して決定した電子銃のビーム軌道である。界浸流を選択したため、ビーム径には周期的な変化ができてしまうが、900 ガウスの磁場でビームパイプ径に比べて十分に抑える事ができた。カソードのビームローディングは $5A/cm^2$ であり、このようなパルスクライストロンでは十分に長い寿命が期待できる。

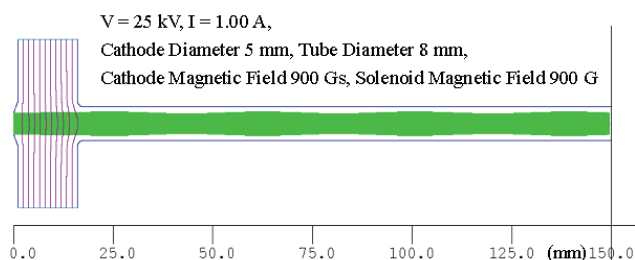


図 2 : 電子銃のビーム軌道

4. 磁場設計

図 3 (左) は POISSON を用いて計算した磁場分布である。電子銃として界浸流を用いたため、カソー

ド部まで一様な磁場を得る必要がある。そのため通常よりソレノイド磁石をカソードより下側まで配置し、さらに一様な磁場となるようモンテカルロ法により、それぞれのソレノイド磁石の巻数を最適化した。結果として図 3 (右) のようにカソード部での動径方向の磁場を数ガウス以下に抑える事ができた。

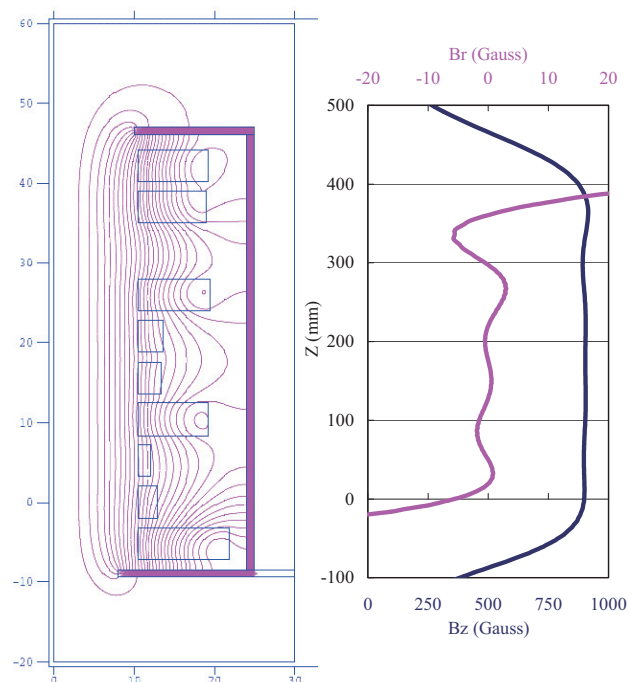


図 3 : POISSON を用いて計算した磁場分布(左)とビームパイプ中心位置での磁場(右)

5. 空洞

設計したクライストロンは 6 空洞から成り、それぞれの空洞は 8 本のビームに対して共通の空洞となっている。空洞自体は 3 次元形状となってしまうが、シミュレーションの簡略化のため、3 次元の固有モード解析によって得られた R/Q, Q, 離調などが等価になる 1 次元や、軸対称のモデルを用意し、空洞の最適化設計を行った。図 4 は 1 次元のディスクモデルシミュレーションの結果を示したものである。この 1 次元シミュレーションにより離調や、空洞位置の最適化を行い、入力 5 W で 60% の効率が得られるという計算結果となった。効率がこのパービアンズでの理想的な場合より下がってしまっているのは、界浸流を選択したため、収束型の電子銃を用いる場合に比べてビームパイプ径が大きくなってしまったためである。しかし効率 60% でも 120kW 出力が得られるはずであり、C バンドシステムにおける大電力クライストロンの駆動には十分である。1 次元のシミュレーションで得られた空洞配置に基づいて、軸対称 2.5 次元の Particle-In-Cell シミュレーションを行い、出力空洞の導波管への結合度や R/Q の最適化を行った。これらの空洞最適化の結果を考慮して、3 次元の電磁波計算を行い、形状を決定した。図 5 (右) は中間空洞及び出力空洞の 3 次元形状である。

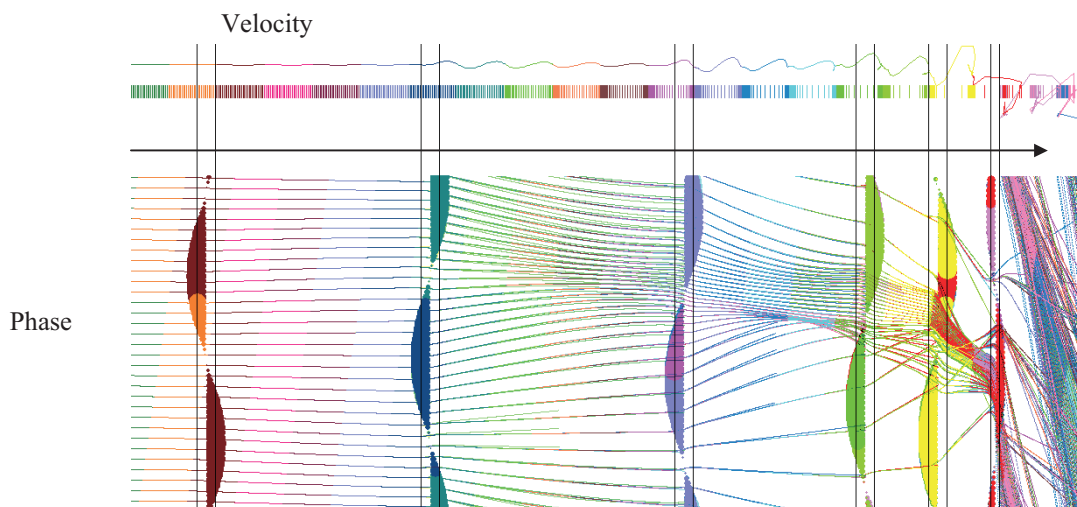


図4：1次元のディスクモデルシミュレーションの結果

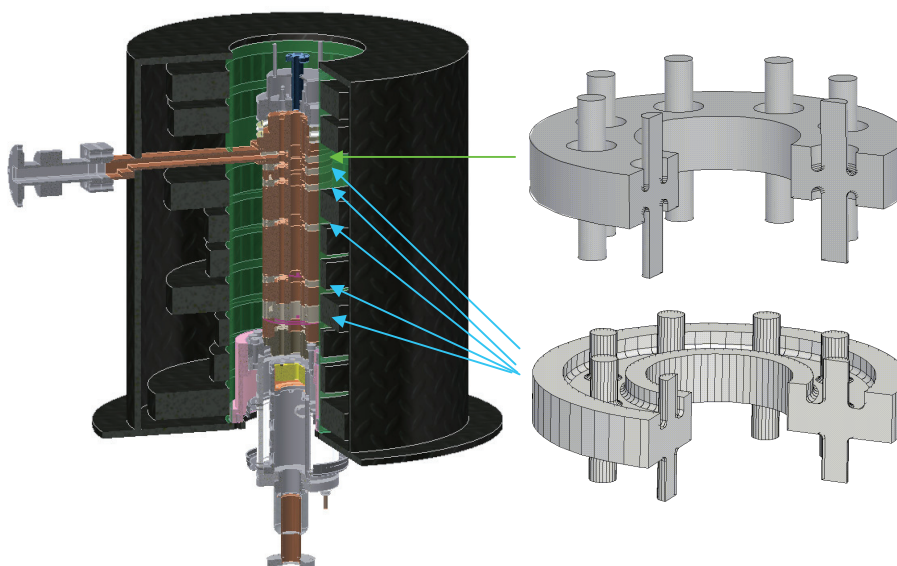


図5：中間空洞及び出力空洞の3次元形状

6. 機械設計

図5(左)は3次元 CAD を用いたクライストロン
の機械設計である。8ビームのカソードとしては、
東芝製の一体型ヒーターのカソードを用いる事と
した。またマルチビームクライストロンではビーム
パイプが中心からオフセットしているため、電子の
透過の確認が必要であるため、クライストロンを
製造する前に、ビームテスト管を製造して、まず
は電子の透過率を測定する。図6は製造したビ
ームテスト管であり、これから透過率の測定を
行う予定である。電子の透過が確認でき次第、
フランジ部より上を空洞に交換して、高周波
特性の試験を行う。

7. まとめ

SuperKEKB 用の C バンドサブブースター
クライストロン設計を行い、現在製造を行って
いる。クラ

イストロンは8本のマルチビームを採用して
いる。ビームテスト管でビームの透過率を
確認後、空洞を取り付け、高周波特性の
試験を行う予定である。今後は、この
クライストロンの設計を応用して、ILC
計画用の低電圧 L バンドマルチビーム
クライストロンの製造を行う事も検討
している。

参考文献

- [1] I. Sato, et al., "Design Report on PF Injector Linac Upgrade for KEKB" (in Japanese), KEK Report 95-18, March 1996.
- [2] J. W. Flanagan, Y. Ohnishi, et al., "Letter of Intent for KEK Super B Factory", Part III: Accelerator Design, KEK Report 04-4.
- [3] S. Michizono, et al., "KEKB Injector Linac and Upgrade for SuperKEKB", Proceedings of LINAC'04, Lübeck, Germany, August 2004, p. 549.
- [4] A. Larionov, K. Ouglekov, "D-GUN for Simulation of Intensive Axial symmetric Electron Beam".