

S-band 80 MW マルチビームパルスクライストロンの開発

DEVELOPMENT OF S-BAND 80 MW MULTI-BEAM PULSED KLYSTRON

夏井 拓也[#], 松本 修二, 松本 利広, 三浦 孝子, Wang Shengchang, 福田 茂樹

Takuya Natsui, Shuji Matsumoto, Toshihiro Matsumoto, Takako Miura, Shengchang Wang, Shigeki Fukuda

KEK

Abstract

In recent years, energy saving has been required for accelerators. Since klystron is a device that is expected to greatly improve efficiency in accelerator devices, its efficiency improvement studies have been conducted around the world. KEK e⁺/- injector also has about 60 klystrons which are conventional types and not so high efficiency. The klystron spec is an S-band 50 MW pulsed klystron. Therefore, we are developing a new high-efficiency klystron to replace these. The target output RF power is 80 MW, and efficiency is 73%. We have started the design of multi-beam klystron (MBK) and expect to achieve higher efficiency.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射器では、S-band 50 MW のパルスクライストロンが約 60 台稼働している[1]。クライストロンには 5 μsec、310 kV のパルス電圧が印加され 4 μsec のパルス RF が出力される。このクライストロンは 30 年ほど前に開発されたもので、その効率は 45%程度と現在ではとても高効率とは言えない[2]。昨今の電力価格の高騰からもクライストロンの高効率化が望まれている。そこで、我々は現在のクライストロンの置き換えを狙って新しく高効率クライストロンの開発を行っている。これは、モジュレータは変えずパルストランスとクライストロンだけを置き換える計画である。

目標 RF パワーを 80 MW、目標効率を 73%に設定して Multi beam klystron (MBK) の設計を行なっている。L-band のロングパルスの MBK[3]は実用が進んできているが、大電力パルス S-band 帯域での MBK の開発は世界的にも珍しく今後のクライストロン開発にも貢献できると考えている。

ここでは主に、電子銃の設計について報告したい。

2. 基本スペック

現在 KEK 電子陽電子入射器で使用しているモジュレータは PFN タイプであり、基本的には同じ仕様のものが約 60 台稼働している。このモジュレータのパルス出力パワーは 110 MW であるため、このパワーを基準に電子銃のパラメータを決めた。電圧とビーム数を決めると電子銃あたりのパービアンスが決まる。そこからクライストロンの効率 η の経験式[4]

$$\eta = 0.78 - 0.16 \times 10^6 \times K \quad (1)$$

K : Perveance [A/V^{3/2}]

を使い予想効率を算出してパラメータを決めた。

クライストロンの目標 RF 出力 80 MW と定めているので、目標効率は 73% となっている。この効率を達成するために図1のような電子銃電圧とビーム数による効率のグラフを作り計画を立てた。一般的にクライストロンでは、パービアンスが決めれば先の効率の式から効率が決まる

が、MBK の場合は電子銃1つあたりのパービアンスから計算される。すなわち、ビーム数が増えれば増えるほど合計電流は同じでも1電子銃あたりの電流が下がるので、パービアンスが下がり効率が上がるということになる。また、今の場合、モジュレータパワーが決まっているので、電圧を決めれば合計電流も決まる。そして、ビーム数を選べば1電子銃あたりのパービアンスが決まるので予想効率が計算できる。このような計算を行って作ったのが図1の効率のグラフである。このグラフからビーム数 8 で 250 kV か 300 kV が 73%程度の効率に近いと言う結果になっている。

最終的には電子銃電圧 300 kV に決定した。また、カソード電流密度は 6 A/cm² と決めて、カソード半径と全体の大きさを決めた。ドリフトチューブの半径は 2856 MHz の RF のカットオフの 1/4 以下にしている。このようにして決まった電子銃関係のパラメータを表1に示す。結局は現在のクライストロンの電子銃電圧 310 kV とほとんど変わらなくなるが、クライストロン全体が大きくなるので、絶縁トランスとその絶縁油タンクは完全に作り変える計画である。

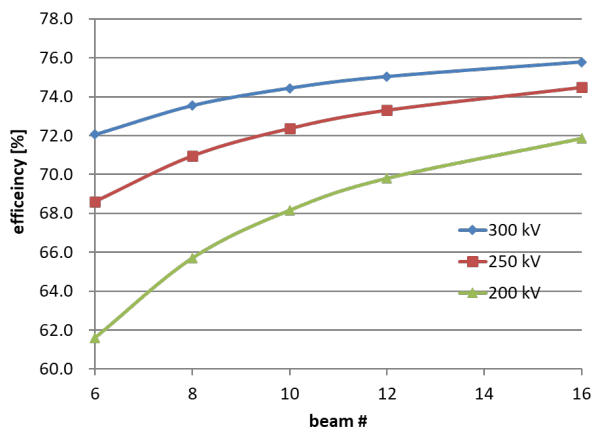


Figure 1: Expected efficiency by beam number with 110 MW modulator power.

[#] takuya.natsui@kek.jp

Table 1: Gun Parameters

電子銃パラメータ	
電圧	300 kV
合計電流	366.4 A
ビーム数	8
電流	45.8 A
パービアンス	0.28 $\mu\text{A}/\text{V}^{3/2}$
予想効率	73.5%
カソード電流密度	6 A/cm^2
カソード半径	15.6 mm
カソード並びの半径	65 mm
空洞ビームパイプ半径	7.5 mm

3. 電子銃設計

3.1 MBK のマグネットについて

熱電子銃のビーム集束にはソレノイド磁場を用いることが一般的であり、クライストロンでもソレノイド磁場が用いられる。一般的にはビーム進行方向 z を向いた磁場の強さを変化させてビーム集束を調整するが、MBK では z 方向の磁場が変化するような磁場を作る事はできない。これは、ソレノイドの中心に対してオフセットした位置にビームを通すため、 z 方向磁場が変化すると r 方向の磁場が生じ、それがビームに対しては横方向のキックを与えてしまうからである。このことから基本的には MBK の中では一様磁場しか使うことができない。磁場の大きさを変えたい場合はその間にポールピースを設けてその前後で磁場を変えてやらなければいけない。ポールピースにビームホールを開けると、ビーム軸にほぼ対称な横方向磁場が発生してビームにキックを与えなくなる。MBK の場合はカソード面にも弱い一様磁場を与えている。図2に計算に使った磁場計算の結果を示す。

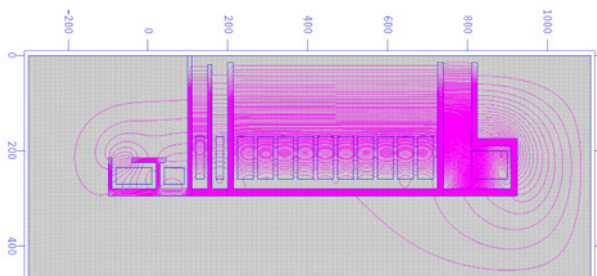


Figure 2: 2D magnet calculation.

3.2 2次元設計

まずは、1ビームの場合を考えて2次元の熱電子銃設計を行った。表1の通りにカソード半径 15.6 mm とし 300 kV で 45.8 A になるようにアノード距離を調整し、マッチング磁場を調整することで 1000 Gs の一様磁場の中で 7.5 mm のビームパイプに十分収まるビームとなる用に設計した。1000 Gs の一定磁場のドリフト空間に空洞が配置される予定である。適度なビームサイズでリップルが極力なくなるように直前の磁場の大きさを調整している。2次元計算の結果を図3に示す。

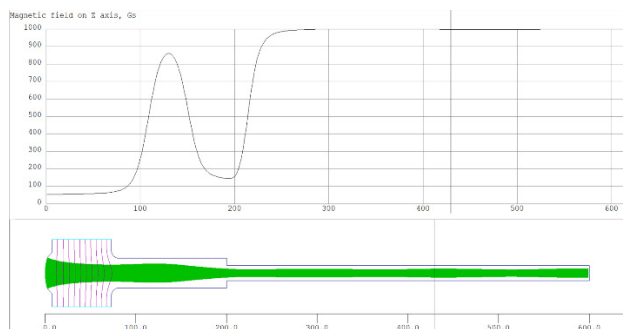


Figure 3: DGUN simulation result (upper: magnetic field, lower: beam orbit).

3.3 3次元設計

基本的には2次元で設計したカソードと電極形状を半径 65 mm の円周上に8個配置すれば2次元の結果と同じ結果を得られるはずであった。しかし、実際に計算してみると、8本のビームが互いに作る磁場で干渉し合って中心に向かって集束してしまうということがわかった。図4に実際のシミュレーション結果を示すが、1ビームの場合は問題ない形状でも 8ビームの場合は明らかにビーム全体が中心に向かってしまい。ビームダクトに当たってしまう。これは、ビーム電流が大きくかつクライストロンの大きさが相対的に小さくなるパルス S-band klystron 特有の問題だと思われる。この相互干渉磁場はクライストロン全体に渡って存在するかのように思われるが、我々が扱っているパルス幅は数 MHz の時間領域なのでビームパイプに囲まれた部分は表皮効果により磁場は侵入できない。したがってこの効果を考えなければいけない空間はアノードとカソードの間のみとなる。

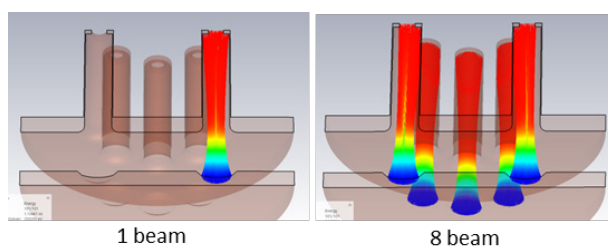


Figure 4: 3D beam simulation. In the 8 beams case, a focused magnetic field occurs.

幸いなことに、このビーム相互作用による磁場は図5に示すように簡単に計算できる。図5ではあえて 7本のビームによる磁場のみを計算している。本来は座標 (65, 0) の位置にもビームがあるので、今はこのビームが他から受ける磁場を知りたいので、そのビームが作る磁場を計算していない。このビーム位置での磁場の強さとビームの速度から簡単にキック量は把握できる。そこで、我々は電極形状を工夫することにより電場によってこの効果を打ち消す方法を取った。解析的にビームが受けるキック量を計算して、それを相殺する電場を作り出す電極形状も設計することができた。これによりドリフトチューブ内に正常な軌道で電子ビームを入射できるようになった。この電場の効果と外部集束磁場の効果を入れたビームシ

ミュレーションの結果を図6に示す。

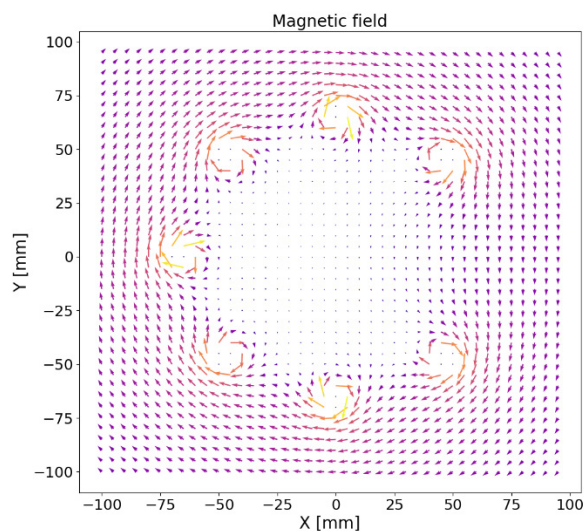


Figure 5: Interaction magnetic field from other 7 beams.

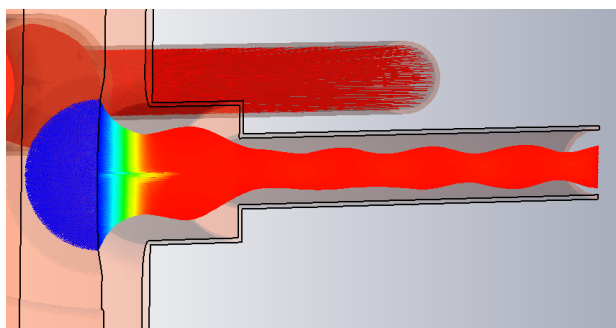


Figure 6: The beam with interaction magnetic field and cancel electric field.

4. まとめ

KEK 入射器では現在のクライストロンの置き換えを狙って目標効率 73% の高効率の MBK の開発を始めている。電子銃の基本パラメータを決めてビームシミュレーションを始めているが、ビームの相互作用が問題となることが分かってきた。この効果を定量的に評価して影響を無くす電極形状の計算も進めている。

空洞設計も同時に進めており、基本的には 73% 程度の効率を達成できそうであるというところまでは計算が進んできている。しかしながら、まだ、形状が理想的な状態を仮定して、機械設計も含めた現実的な設計はこれからの課題である。

High power pulse S-band MBK の開発は世界的にも珍しく、ビーム相互作用など特有の問題も分かってきた。電子銃、空洞ともに基本的な設計が固まりつつあるので今後はより実用的な設計、計算を進めていく予定である。

参考文献

- [1] T. Natsui *et al.*, “KEK e⁺/e⁻ injector linac”, Proc. 65th ICFA Adv. Beam Dyn. Workshop High Luminosity Circular e⁺ e⁻ Colliders in Frascati, Italy, Sep. 2022, pp.251-255.
- [2] S. Fukuda *et al.*, “Development of the B-factory linac 50-MW pulse klystron”, Proceedings of the 1994 International Linac Conference, Tsukuba, Japan, pp.427-429.
- [3] A. Yano *et al.*, “The TOSHIBA E3736 multi-beam klystron”, Proceedings of LINAC 2004, Lübeck, Germany, pp.706-708.
- [4] Y. H. Chin, “Design and performance of L-band and S-band multi beam klystrons”, Proceedings of LINAC08, Victoria, BC, Canada, pp.369-373.