

[12P-35]

SIMULATION STUDY OF X-BAND KLYSTRON XB72K #9

Shuji Matsumoto and Yong Ho Chin
 Accelerator Laboratory, KEK, High Energy Accelerator Research Organization,
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801 Japan

Abstract Multi-purpose PIC code, MAGIC, has been employed for the simulation and design studies of X-band pulse klystrons developed at KEK. Among these works, the simulation work on XB72K #9, the 9th prototype of the series of solenoid focusing tubes, XB72K, is reported. The results of the high power test agree with the simulation in good accuracy.

Xバンドクライストロン Xb72K#9 のシミュレーション

はじめに

1997 年以来、われわれは、Xバンドクライストロンの動作解析や設計を、プラズマ物理用 PIC (Particle-in-Cell) コード MAGIC[1]により行っている[2]。この汎用コードは、ユーザーが設定した境界条件と初期条件下での荷電ビームと電磁場の運動方程式を直接、時間上の逐次積分により解いてゆく。コードには、金属面からの電子放出モデルも用意されているので、それを利用すれば電子銃のシミュレーションもできる[3]。カソードから発生した電子流は、クライストロン中の空洞を通過して変調をうけ、次第にパンチ化されてゆくが、このコードを使った変調過程のシミュレーションには、空洞の形状(境界条件)が与えられていればよい。変調の過程が定常状態になるまでの計算時間が許容できるならば、空洞の等価回路モデルによる取り扱いには特に必要ない。要は、このコードで、電子銃からコレクターまでの全クライストロンの動作シミュレーションが可能である[3,4,5]。

従来、Xバンドクライストロン中のビーム運動シミュレーションにたいしては、主として、ディスクモデルに基づく二次元コードを使用していた。しかし、進行波型出力空洞をもつクライストロンの出力パワーの計算結果は、試験結果との食い違いがみられた。その原因として、二次元コードでは、ビームの径方向の運動が入らない(無限に大きい収束磁場の場合に相当)ため、十分な計算精度が保証されていないこと考えられる。より正確な動作解析には、径方向の運動をとり入れた二次元計算が不可欠であることは間違いない。この仕事をわれわれは MAGIC コードで行っている。われわれの Xバンドクライストロンの構造は、収束磁場もふくめて、おおむね軸対称であるので、ほとんどの部分はその対称性を仮定した二次元計算で間に合う。入力および出力空洞がその例外(入出力用ポートのため、形状が軸対称でない)だが、基本的な動作条件下では、それらの空洞にも軸対称モードが励起されるので、ビームからみた空洞の効果はやはり軸対称となる。

この部分については、以下で説明するような適当な処理をして、二次元計算に乗るようにした。計算時間の観点からもこのほうが有利であるし、試験結果との比較からは、基本動作の解析には、この手法で十分な計算精度が確保されていることがわかった。

球について

KEK では XB72K なる一連の Xバンドクライストロンのプロトタイプを開発してきた[6]。ここで取り上げる 9 号機は、1997 年度から 1998 年度にかけて設計、製作、試験運転されたものである。設計仕様値を表 1 にあげる。

動作周波数	11.424GHz
出力パワー	120MW
カソード電圧	550kV
パルス長	800ns
繰り返し	150pps
効率	47%
利得	53dB-56dB
パービアンス	1.2 μ

表 1 Xb72K の設計仕様

形状は図 1 参照。ソレノイド収束磁場の最大値は約 7kG である。この球は、入力空洞の他、二つのゲイン空洞と一つのパンチング空洞をもつ。RF 電圧低減化のため、出力空洞はいわゆる進行波型(4セル、 $\pi/2$ モード)である。

シミュレーションについて

使用したバージョンは、March 1999。コードにある二種類のフィルターのうち、ゲイン部とドリフト・パンチング部は、High_Q と名づけられた減衰効果の小さい方を使用した。電子銃部はもう片方の Biased なる、減衰のおおきなものを使用した(この領域では、ビームは DC なので)。出力空洞部は、

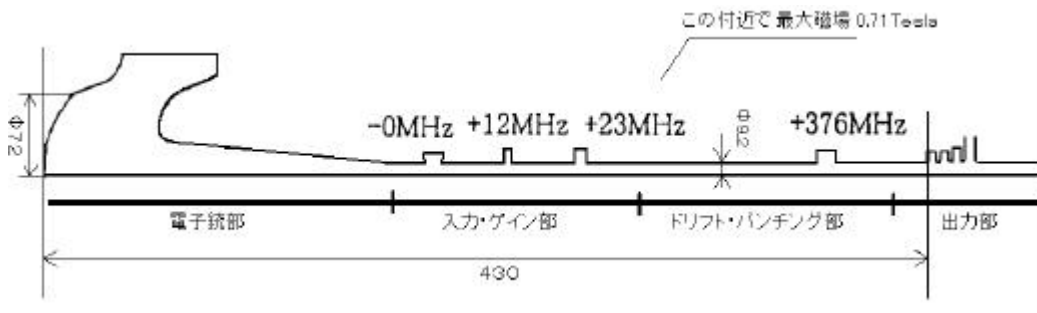


図1 球の概略

もともと Q_{loaded} が小さいので、フィルターなしで計算した。時間ステップは RF 周期の 360 分の 1 (RF 位相 1 度ごと)。空間メッシュは、おおむね 0.2 から 0.3mm 程度である。粒子数は、時間 1 ステップあたりカソード表面から 10 数個のマクロパーティクルが生成される設定にした。必要な計算時間は、一次元計算コードと比較すると、やはり膨大になる。参考までに、われわれの場合では、全体通して 12 時間程度である (800MHzCPU)。

以下に、われわれのシミュレーション手法の要点をあげておく。

1) 適当な長さの部分に分けて計算する。

まず、われわれはクライストロン全体を図 1 にあるように、四つの領域に分けた。上流から、電子銃部、入力空洞とゲイン空洞をふくむ領域、ドリフトとバンチング空洞を含む領域、そして最後が出力空洞部 (コレクター入り口付近まで) である。実は、計算機メモリーの関係上、こうした領域分割をして、計算する以外ないのだが、通常の運転条件下では、クライストロンの下流側から上流へのビームや電磁場の流れはないはずなので、このような分割計算をしてもよい。上流の領域から順次計算してゆくことになるわけだが、上流側の計算結果 (下流側との境界を越えて流れてゆく、上流側からのビームと電磁場) が下流側へ受け渡されてゆく。

2) 入力空洞にたいするポート近似[7]。

入力空洞に投入されるマイクロ波のパワー P_{in} と入力空洞のギャップ電圧 V (ノーズコーン間の RF 電圧) は

$$V = r\sqrt{P_{\text{in}}} \quad (1)$$

と関係づけられる。係数 r は、空洞とビームに双方に依存する。シミュレーションでは、ノーズコーン間に RF 電圧を外場として与える。その電位分布は、空の空洞 (ビームなし。入力ポートもなくよい。) に、基本モード (TM01) が励起された状態でのものと同じ。

3) 出力空洞ポートの軸対称等価モデル[7]。

出力空洞の最終セルには、パワーを取り出すために二つの矩形導波管が取り付けられている。バンチしたビームによって、最終セル中に立つ電磁場 (TM01 様モード。軸対称。) の一部が、カップラー孔を通過し、導波管中を伝播してゆく。この軸対称モードへのカップラーによる透過 (吸収) 散乱効果は、セル外周辺に装荷された軸対称抵抗体で等価的に表現可能である (図 2) もとものとのカップラーでの吸収散乱過程は、散乱波の振幅と位相の 2 個のパラメータで特徴づけられる。一方、装荷される抵抗体は、導電率と内外径の、都合三変数をもつ。つまり、形状が決められたカップラーと等価な電気的特性をもつ三変数の組み合わせは、唯一ではない (周波数が固定されている場合)。適当な組み合わせを選ぶことで、出力空洞部が二次元計算に乗せられる。出力パワーは、抵抗体で消費されるパワーとして知ることができる (図中の面 S 上のポインティング・ベクトルで)。

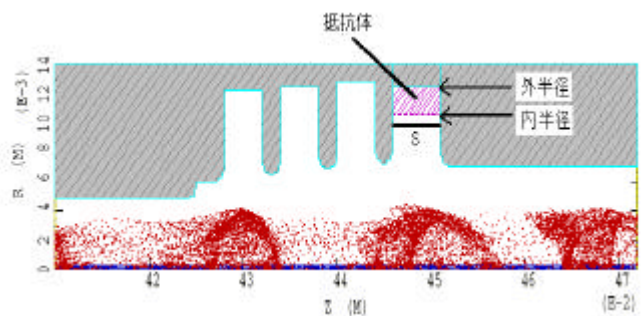


図2 出力空洞部

実機試験結果との比較

実機の高出力試験は 1998 年 4 月から 7 月までと一年後 1999 年の 6 月に行われた。この間に、テストスタンドのモジュレータの改造がおこなわれ、その短い出力パルス幅 (フラットトップ 500 ナノ秒) が、長いパルス幅 (同 1.5 マイクロ秒) へ引き上げられた。

テストスタンドでの球の出力パワー測定は、クリスタル検波器で測定を基本とし、長いパルス時では、

水温測定もあわせておこなった。(元来、XB72K シリーズの RF 仕様は、800 ナノ秒であったが、モジュレータ改造後、9 号機は 1.5 マイクロ秒での出力試験も行なわれた。)

図3に各カソード電圧時の 200 ナノ秒および 1.5 マイクロ秒 RF パルス幅での飽和出力の測定結果と、シミュレーション結果を示す。カソード電圧の低い方ですこしずれが見られるが、おおむね計算結果は実験の結果を再現していると考えられる。

入出力特性の計算結果と試験結果の比較例を図4にあたえた。われわれの入力空胴では、式(1)のが 19.2k (300W 入力で 2.4kV)であり、この校正値を使って、シミュレーション結果をプロットしてみた。入出力特性の試験結果の傾向を再現しているものの、値自体には、両者に系統的なずれがみられる。

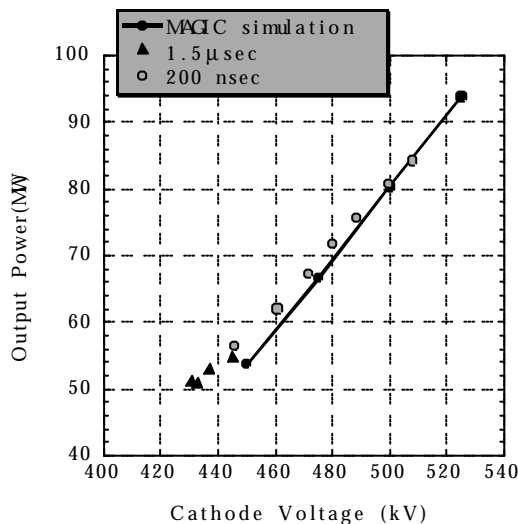


図3 飽和パワーの比較

シミュレーション結果と実機測定結果の違いについて、まず、実機のパービアンスが、設計値よりもすこし大きかったことがあげられる(カソード熱膨張による効果)。現時点でのシミュレーションには、まだこの効果を取り入れていない(電子銃は設計通りの形状を仮定している)。

クリスタルによるパワー測定の系統誤差について、長いパルス時のクリスタルの結果と水温の結果とは、だいたい3~4%の範囲で一致していることから、まずはこの程度の誤差を念頭におくべきである。カソード電圧測定の誤差の程度は、いまのところ1%程度であろうと考えている。C-dividerの分割比は、低電圧パルスで校正を行った。校正値測定時、400ボルトの印可に対して、C-dividerの出力電圧は約40ミリボルトになる。その測定誤差が1%程度であろうと考えている。

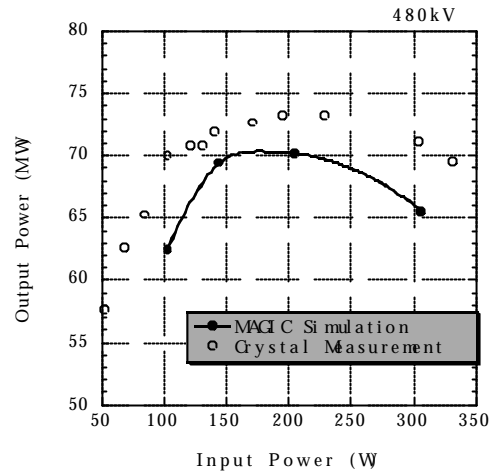


図4 入出力特性の比較例。カソード電圧は480kV。

プロット中のパワー測定値データは、高周波窓の損失1%、出力空胴から測定器系までの導波管損失2%を補正してある。

まとめ

MAGIC コードをつかった計算機シミュレーションは、本稿で紹介したような実機のデータとの比較検討の経験を通じて確立してきた。出力パワーの試験結果の再現はおおむね成功していると考えられる。今後、周波数特性のシミュレーションにも手をつけてみたい。9号機の実機試験について、もう少し高いカソード電圧での長いパルス下の測定結果が出れば、精度の改善に役立つ。MAGIC コードでの計算は、かなりの計算時間を必要とするので、メッシュ大きさ、時間ステップ、領域分割の最適化もおりにふれて考慮すべきである。

謝辞

道園真一郎、筒井裕士、福田茂樹、明本光生、徳本修一、V.Teryaev、高田耕治の各氏と JLCX バンドグループ各氏に感謝します。

参考文献

- [1] <http://www.mrcwdc.com/magic/homepage.htm>. Mission Research Corporation.
- [2] Y.H.Chin, et al, "The 120MW X-Band Klystron Development at KEK", Proc. EPAC98, Stockholm, 1998.
- [3] S.Michizono et al. "ELECTRON GUN SIMULATION USING MAGIC", Proc. LINAC98, Chicago, 1998.
- [4] S.Matsumoto et al., "Simulation study of the bunching section of X-band klystrons", *ibid.*
- [5] H.Tsutsui et al., "X-band klystron output cavity simulation", *ibid.*
- [6] JLC Design Study, KEK Report 97-1, April 1997.
- [7] H.Tsutsui, PhD Thesis, Graduate University for Advanced Studies, 1999.