

[P 30–6]

## PIC Simulation on Klystron with Multistage Depressed Collector

K. Masuda, K. Yoshikawa, M. Ohnishi, Y. Yamamoto and M. Sobajima

Institute of Advanced Energy, Kyoto University  
Uji, Kyoto 611, Japan

### ABSTRACT

Design of a multistage depressed collector for a 1.2MW L-band CW klystron was accomplished by use of numerical simulations. To obtain information on spent electrons (i.e. input condition for collector design), a klystron simulation code was newly developed.

Design of collector geometry was successfully accomplished to provide high overall efficiencies of around 70%, while making the power loss caused by secondary electron emission quite low. This is very encouraging compared with 60.5% of the conventional klystron without a depressed collector.

### エネルギー回収コレクター付きクライストロンの粒子シミュレーション

#### 1. はじめに

近年、核融合プラズマ加熱や放射性廃棄物消滅処理に代表される大出力 CW クライストロンの工業利用化に伴い、その高効率化が重要な課題となっている。クライストロンの効率を高める最も有効な手段は使用済み電子ビームエネルギーの回収である (Fig.1)。クライストロンにおける使用済みビームエネルギー回収についてはこれまでに小出力 CW クライストロンでの解析・実験が報告されているが<sup>1)</sup>、大出力の場合には使用済みビームのエネルギー広がりが高く、高効率エネルギー回収が困難になる。また、コレクター電極表面での熱負荷の問題も顕著になるため、より精度の高い解析・設計が必要となる。

動作周波数 1.25GHz の 1MW 級 CW クライストロン (Table 1) について、クライストロン内およびエネルギー回収電極部での粒子シミュレーションを行った。

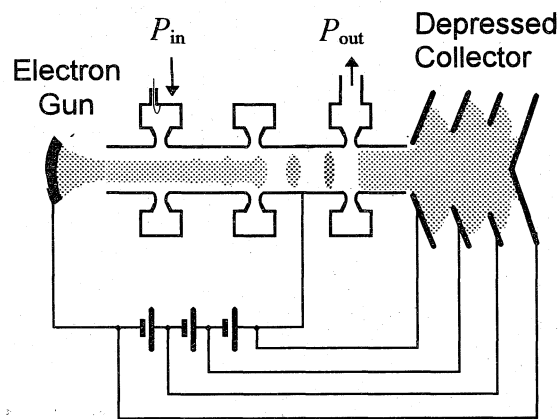


FIGURE 1. Schematic diagram of klystron with multistage depressed collector.

TABLE 1. Brief Characteristics of CW klystron.

Operating Frequency	1250	MHz
Output Power	> 1.2	MW
Number of Cavities	6	
Beam Voltage	90.0	kV
Beam Current	24.3	A
Beam Perveance	0.9	$\mu\text{V}^{3/2}/\text{A}$

#### 2. 数値解析モデル

##### 2. 1. 電子・電磁波相互作用部

エネルギー回収効率は回収電極部へのビーム入射条件に強く依存するため、高効率エネルギー回収電極を設計するためには入射電子の位置および速度分布を精度良く求める必要がある。そこで、クライストロン内における電子・高周波相互作用シミュレーションを行い、回収電極部への入射ビーム条件を同定した。

シミュレーションは、既存のクライストロン設計用コード (FCI コード<sup>2)</sup>) を参考にして、新たに複雑な形状の境界により精度良く対応できる有限要素法を用い、時間発展を追う軸対称二次元・速度三次元の粒子コード<sup>3)</sup>を作成して行った。

##### 2. 2. エネルギー回収部

エネルギー回収部は、軸対称二次元・速度三次元の定常問題として取り扱った。

電子・電磁波相互作用部のシミュレーション結果で得られた電子の位置・速度を入射条件として、エネルギー回収コレクタ設計用粒子コード<sup>4)</sup>を用いてシミュレーションを行った。

### 3. 解析結果

#### 3. 1. 電子・電磁波相互作用解析結果

クライストロンの電子・電磁波相互作用部シミュレーション例を Fig.2 に示す。飽和出力は 1.32MW, 効率 60.5%と計算された。これらの値は実験値と相対誤差 5%以内と良好に一致しており<sup>5)</sup>, 新たに作成したシミュレーションコードの妥当性が示された。

使用済み電子ビームのエネルギー分布を Fig.3 に示す。高周波出力が大きくなるにしたがって, エネルギー分布は広くなり, 飽和出力時には最大エネルギーは 170keV に達していることが分かった。

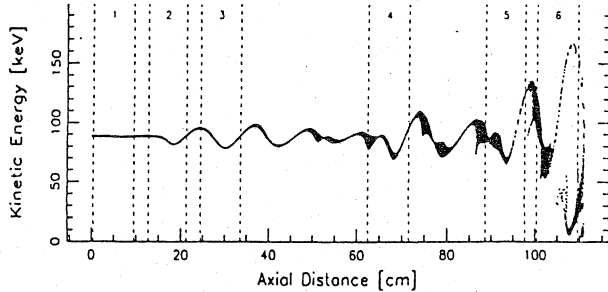


FIGURE 2. Kinetic energy along the drift tube. The dashed lines show the positions of RF-cavities.

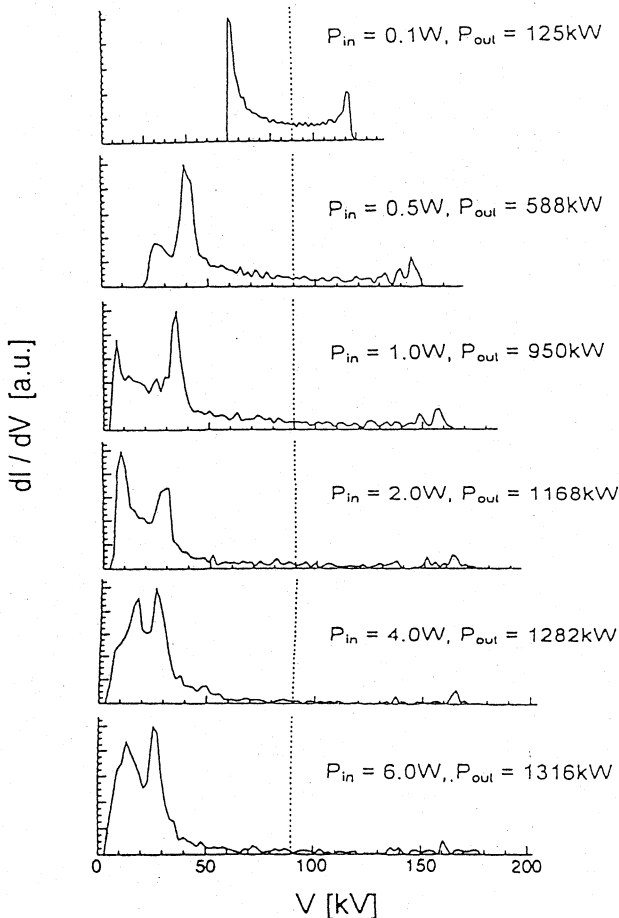


FIGURE 3. Energy distribution of spent electron beam for various drive powers. The dashed line indicates cathode voltage (90kV).

#### 3. 2. 理論最大回収エネルギーの評価

$N$  段コレクターで回収される理論最大電力  $P_c$  は次式で与えられる。

$$P_c = \sum_{n=1}^N V_n \{I(V_{n+1}) - I(V_n)\} \quad (1)$$

ここに,  $I(V)$  は使用済みビームのエネルギー分布,  $V_n$  は  $n$  番目の電極の電位,  $V_{N+1} = \infty$  である。また,

$$\frac{\partial P_c}{\partial V_n} = 0 \quad (n=1,2,\dots,N-1) \quad (2)$$

$$V_N = V_{\text{cathode}} \quad (3)$$

を解くことにより,  $P_c$  を最大 ( $P_{c,\text{max}}$ ) にする最適電位が決定される。ただし(3)式の制約条件は, エネルギー回収用電源を簡便化するために最終段の電極電位を電子銃のカソード電位に等しく選ぶこと (Fig.1 参照) を意味する。また,  $n$  段目の回収電極への熱負荷  $P_{h,n}$  は

$$P_{h,n} = \int_{V_n}^{V_{n+1}} (V - V_n) \frac{dI}{dV} dV \quad (4)$$

で計算される。

Fig.3 に得られたエネルギー分布について, 理論

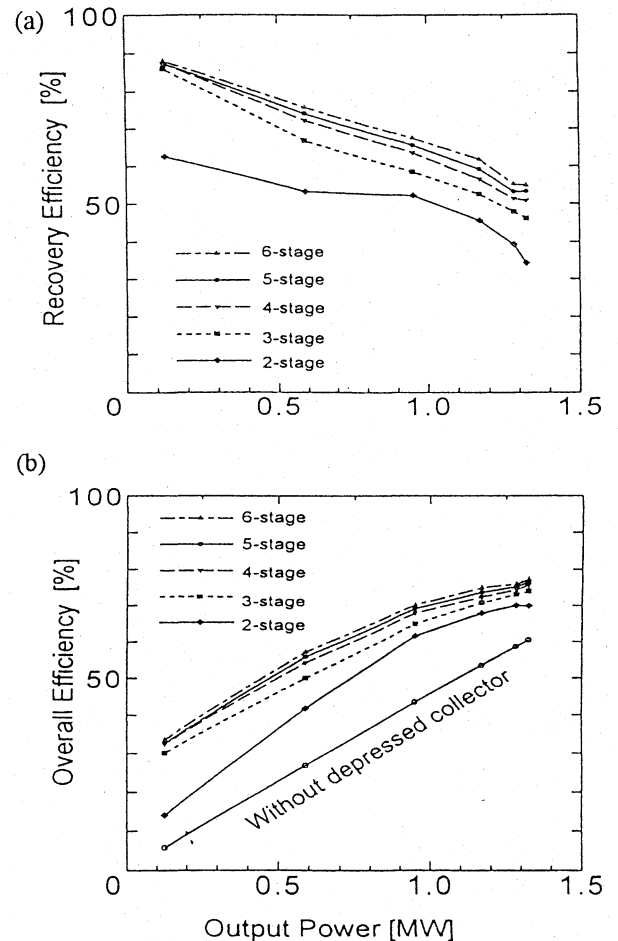


FIGURE 4. Theoretical limits on energy recovery with multistage depressed collector; (a) maximum collector efficiency and (b) maximum overall efficiency with optimized electrode potentials.

最大回収電力を計算した。Fig.4(a)に理論最大回収効率を、Fig.4(b)に総合効率を示す。高周波出力が大きくなるにつれて、エネルギー広がりが大きくなるため回収効率は低くなるものの、総合効率は高くなることが分かった。また、5段コレクターを用いれば理論的には75%を越える総合効率が得られることが分かった。電極への熱負荷は、5段コレクターの場合には最終段電極で最大71.9kWとなる。

### 3. 3. エネルギー回収コレクター設計

まず、電極電位は18kV刻みの5段で固定として、コレクター形状のみを最適化した (Fig.5)。その結果、回収効率35.8%、総合効率70.5%が得られ、(1)式から計算される理論効率73.9%に近い効率が得られており、コレクター形状はほぼ理想的に最適化されていることが分かる。また、各電極の上流側から放出された二次電子が1段上流側の電極に回収されると仮定して (Fi.6 参照)、二次電子放出による損失を考慮した場合でも総合効率は69.3% (二次電子放出係数 $\delta=1$ ) となり、エネルギー回収コレ

クターの無い場合の効率60.5%と比べて飛躍的に効率が向上することが示された。

次に、さらに効率を向上させる目的で、同一の電極形状に(2)式で与えられる最適電位を与え、シミュレーションを行ったが、回収効率・総合効率はむしろ低くなった。エネルギー回収解析の結果をTable 2 にまとめる。

今後、最適電位に対してコレクター形状を最適化することにより、さらなる効率の向上が期待できる。

### REFERENCES

1. E. W. McCune, IEEE IEDM(1987), pp. 157-159
2. T. Shintake, KEK 90-3, 1990
3. K. Masuda et al., Proc. of the 7<sup>th</sup> Intl. Symp. on Advanced Nuclear Energy Res., March, 1996
4. Y. Yamamoto et al., Proc. of 12<sup>th</sup> Symp. on Fusion Engineering, IEEE(1987), pp.1222-1226
5. K. Hirano, Private communication.

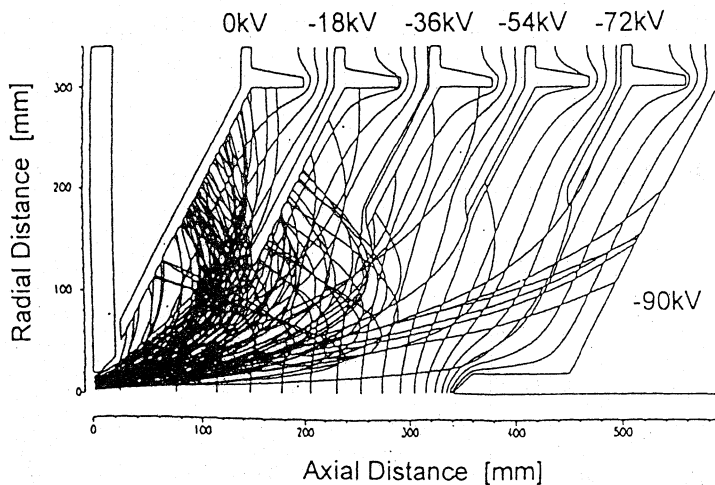


FIGURE 5. Electron trajectories and equipotential lines in multistage depressed collector

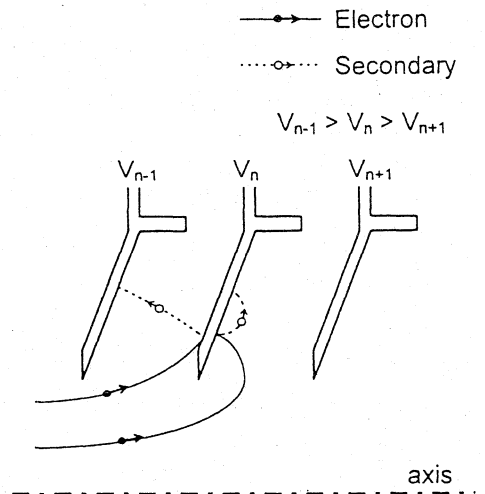


FIGURE 6. Adverse effect of secondary electron emission.

TABLE 2. Simulation results on overall efficiency.

Potentials of Collector Electrodes	Theoretical Limit [%]	Simulation Results [%]	
		$\delta = 0.0$	$\delta = 1.0$
(a) -18, -36, -54, -72, -90 kV	73.9	70.5	69.3
(b) -10, -20, -30, -60, -90 kV (Optimized Potentials)	77.3	67.4	67.3
Without Depressed Collector	60.5	-	-