On Limitations and Improvements of Klystron Design Code "JPNDISK"

Tomoyuki NISHIKAWA and Toshio ONODERA
Kumamoto Institute of Technology ,Department of Electronic Engineering
4-22-1 Ikeda,Kumamoto,860

ABSTRACT

Klystron design code named JPNDISK, which have been made in the development of a 150MW S-band klystron, can predict performances of S-band klystrons and X-band medium output klystron quickly and exactly, but overstimates those of SL3 and SL4 which are under development in SLAC. In the paper, comparisons on existing klystrons between measurements and the calculations by JPNDISK are shown, and effects of inprovements that expand some restrictions of JPNDISK to parameters concerning NDISK,NSTEP and numbers of zeros of bessel function are also described.

クライストロン設計コード"JPNDISK"の限界と改良

1.はじめに

次世代リニヤコライダ用マイクロ波源の現実的な候補としてSバンドの2~4倍の周波数で100MW以上の尖頭出力のパルスクライストロンが有力である。従来この種のクライストロン設計コードにはSバンドで150MWクライストロンの日米共同開発に際して、日本の技術者によって作成されたJPNDISKが有名である[1]。

しかしSバンドの3~4倍の周波数(Xバンド)で100MWの目標出力のクライストロンを開発しているSLACの技術者によると、JPNDISKはXバンド100MW級のクライストロンの能率.利得を過大評価する傾向があると言われている。更にCONDORと呼ばれる解析コードによる計算値が実験値とよく一致するとして、国内でもこの種の解析コードが開発されている[2]。

JPNDISKは1次元ディスクモデルで電子ビームを近似し、入力空胴間隙から出力空胴間隙までの全作用空間でのディスクの運動をtime-stepping法を用いてクライストロンの一つの動作点を1分程度で計算する設計コードである。本論文はSLACの技術者の言うJPNDISKの不一致について計算し、その限界を明確にし、更に1次元モデルの範囲内で改良を試みたものである。

表1 既存クライストロンの特性表

Tube name		SLAC XK-5	SLAC 5045	SLAC 150MW	MELCO 9004	SLAC SL-3	SLAC SL-4 XC1	SLAC SL-4 XC2
電力密度	Pf^2[GWGHz^2]	0.29	0.55	1.22	0.41	1.62	8.61	9.46
動作条件	Freq[MHz]	2856	2856	2856	9300	8586	11424	11424
	Vbeam[KV]	265	350	475	151	340	440	440
	Ibeam[A]	286	414	629	64.5	159	511	525
	Perveance	2.10	2.00	1.92	1.10	0.80	1.75	1.80
実験値	Pout.m[MW]	36.0	67.0	150	4.7	22.0	66.0	72.5
	η m[%]	47.0	46.2	50.2	48.2	40.7	29.4	31.4
	Gain.m[dB]	50	53	57	59.7	46.2	?	53.3
計算値	Pout.c[MW]	37.7	72.8	137.6	4.67	32.1	100.1	130.6
	η c[%]	49.8	50.2	46.1	48.0	59.3	44.5	56.6
	Gain.c[dB]	55.8	58.6	58.4	59.6	55.1	60.0	61.1

2.JPNDISKの限界

実験データのある既存クライストロン7本の特性を表1に示す。7本中3本はSバンドで、残り4本がXバンドである。表中の実験値は全て公表された文献より収集したもので、計算値は実験値を得た動作条件でJPNDISKによりRF入力を変化して最大出力の点を求めたものである。ただし、ここで使用したJPNDISKはVERSION D8.0である。図1は表1のデータを横軸に電力密度pf^2を取り、縦軸に効率の実験値と計算値を取って図示したものである。図1より明らかなように電力密度pf^2が1[GW-GHz^2]より小さい所ではよく一致するのに、その反対側では両者は不一致を示す。特にMELCO9004は計算と実験が非常によく一致し、この不一致が単に周波数が高いことに起因するものでないことを示している。

3.JPNDISKの改善

まず、従来のJPNDISKでは空間電荷力の計算式[3]*に於いてBessel関数の零点J(0)=0の数をl=1,10コで計算を行なっており、この計算精度を上げる意味で100コまでの零点の値を計算し、その値を用いることにより計算精度の向上を図ることとした。

$$F_1(\Phi-\Phi')=\sum_{L=1}^{\infty}\left[\frac{J\left(\frac{\mu_1 b'}{a}\right)}{\mu_1 J_1 \mu_1}\right]^2 c^{-\frac{\mu_1|\Phi-\Phi'|}{\gamma a}}$$

表2はBessel関数の零点が10コの場合と100コの場合との比較であるが、ここで用いた3つのクライストロンの能率及び出力の計算においてはBessel関数の零点増加による計算結果の違いは殆ど現われないためBessel関数の零点は10コのままで問題ないことがわかる。

次にNDISKの制限であったMax50という枠を拡大してMax=256まで扱えるよう改良を加え、そこでNDISK数を3,6,12,24,48,96,192と変化させた結果が図2である。NDISKの数が24までは値にばらつきが見られるが、それ以上では、値に変化は見られない。計算時間はNDISK数に比例して増加するので、NDISK＞50 の計算は必要としない。

RF1サイクル当りの積分ステップ数としてNSTEPがある。このNSTEPの制限であったMax50を拡大してMax=200まで扱えるようにした。そこで今度はNSTEP数を30,60,90,120,150,200と変化させ、その計算結果を図3にグラフ化した。多少凹凸は見られるが、ほぼX軸に水平に伸びている。NSTEPの増加による効率の変化に規則的なものは見られなかった。

表2 Bessel関数の零点増加に伴う能率および出力の計算結果

	Besselの零点の数	EFFICIENCY (KINETIC)[%]	EFFICIENCY (ELECTRIC)[%]	OUTPUT POWER[WATT]
50MW SINGLE GAP	10	0.554	0.534	77373400
	100	0.554	0.534	77373400
SLAC 150MW 2PI DISK	10	0.437	0.452	135165088
	100	0.437	0.456	136375312
SLAC SL4 XC-2 24DISK	10	0.593	0.585	135026064
	100	0.593	0.584	134974144

4.結論

(1)既存の高出力クライストロンの効率に関してJPNDISKによる計算値と実験値を比較すると、電力密度pf^2が1[GW-GHz^2]以上で両者が一致しなくなる。

(2)Bessel関数の零点は10コ、NDISKは24,NSTEPは30で必要且つ十分である。

(3)今後の課題として、出力空胴での反転電子の取り扱い,及び3次元コードの開発が考えられる。

参考文献

[1] G.T.Konrad et al,"Development of a 150MW S-band Klystron",Progress Report No.12 (1985),PP.21-26

[2] T.shintake,"High-power Klystron Simulations using FCI-Field Charge Interaction Code" KEK-Report(1990)

[3] P.J.Tallerico,"Design Considerations for the High-Power Multicavity Klystron",IEEE Trans.on ED,vol.ED-18,No.6(1971),PP.374-382

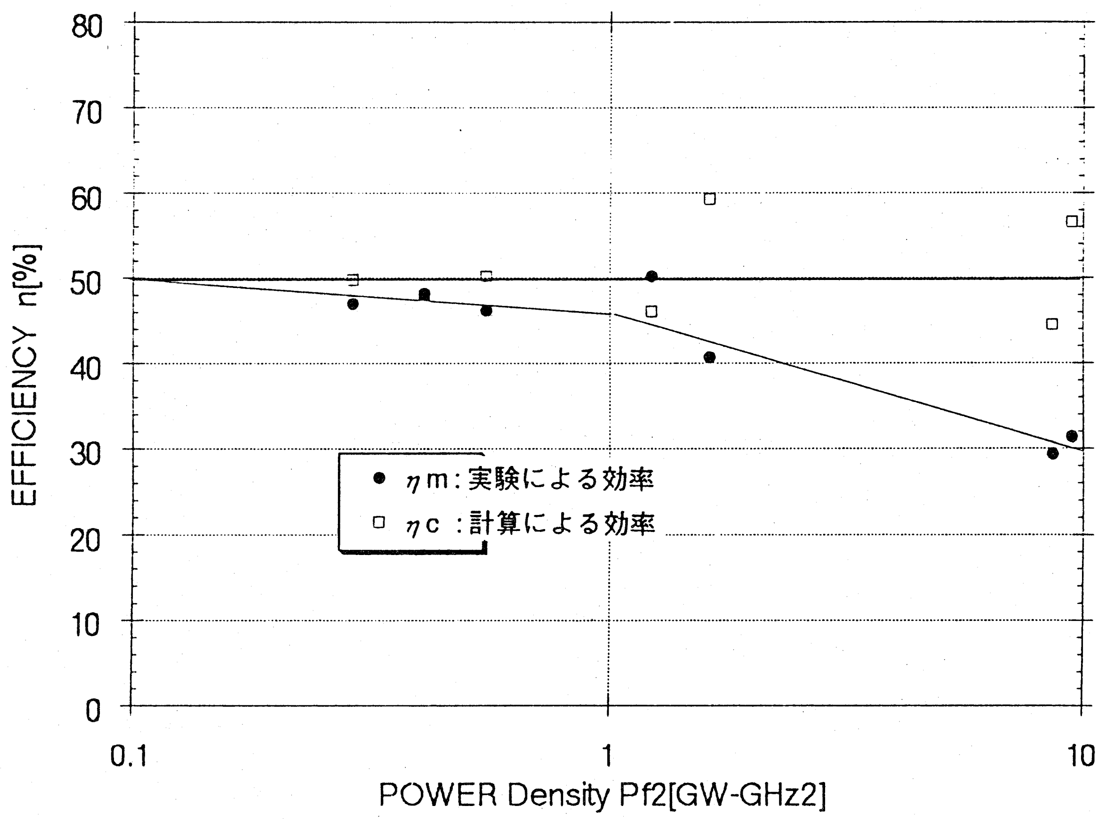

図1　効率の計算値と実験値

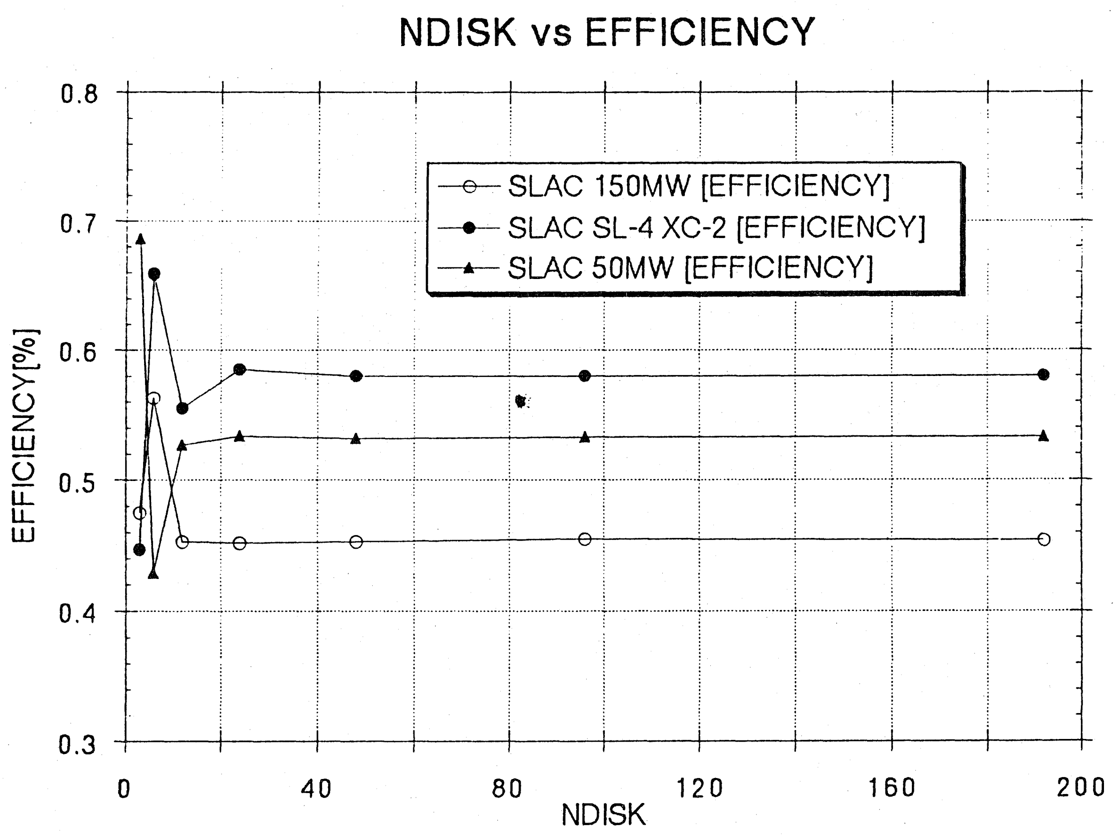

図２　NDISKと効率の計算値

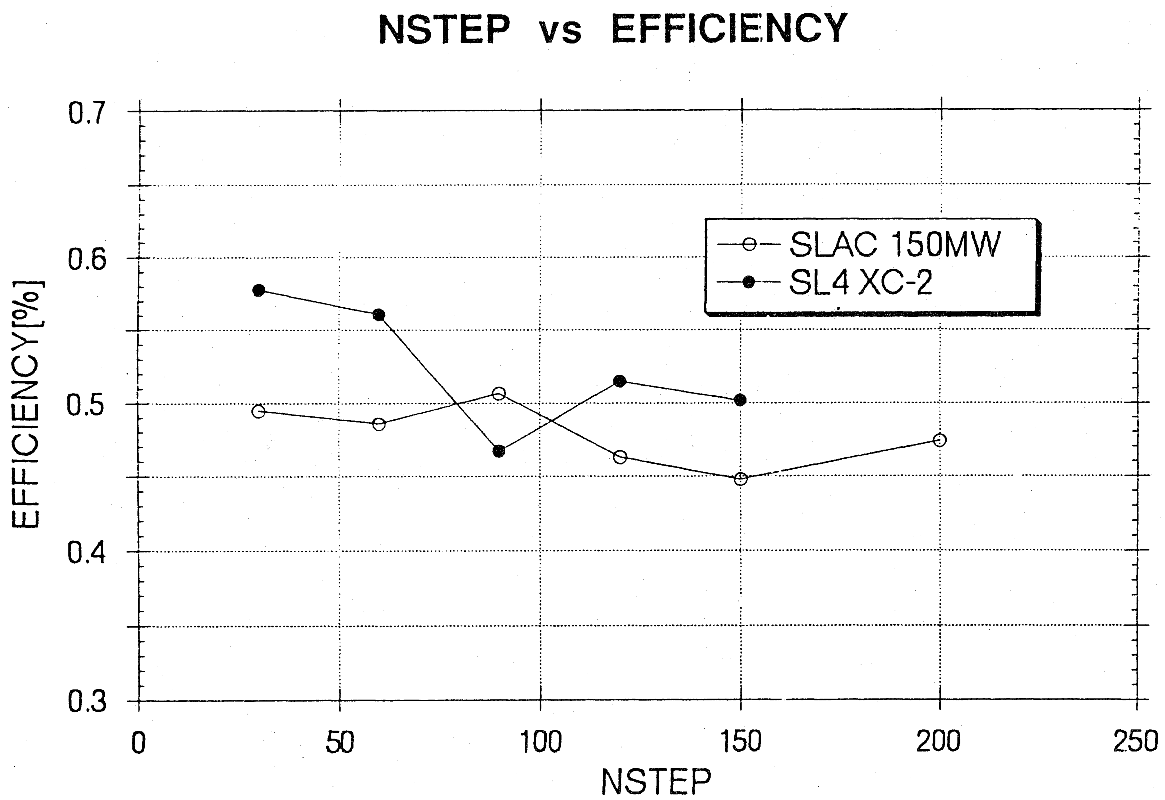

図３　NSTEPと効率の計算値