

[F17p10]

Development of the High Power Klystron with CW Mode and Short Pulse Mode

K. Hirano, T. Emoto, Y. L. Wang, I. Sato*

PNC, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation
4002 Narita, Oarai-machi, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

*Atomic Energy Research Institute, Nihon University (Guest Researcher to PNC)
Narashinodai 7-24-1, Funabashi 274, Chiba-ken, Japan

パルスモード兼用大電力CWクライストロンの開発

ABSTRACT

The klystron has achieved CW RF output power of 1040kW and beam voltage of 83kV at present. Peak power of 4.2MW at a beam voltage 147kV is required for pulse-mode operation (100 μ sec pulse width, 50 pps). We have developed the way of reducing apparently the output cavity Q_{ℓ} optimized for CW-mode operation. The output cavity Q_{ℓ} was decreased by two obstacles located on the long window. The klystron has achieved the maximum peak power, which was 3.55MW with efficiency of 42% at a beam voltage 147kV at present.

1. はじめに

大電流CW電子線形加速器開発の一環として、大電力クライストロンの開発⁽¹⁾を進めてきた。これまでに、CWモードでは、ビーム電圧83kVで最大出力電力1040kW、出力電力効率58%の大電力CWクライストロンを開発した。今後は加速器のビームエネルギーを増強する等も視野に入れたビーム利用の計画を立案する必要がある。そこで、パルス幅100 μ secのショートパルスモードでビーム電圧を147kVに高め、反射体を利用して出力空洞 Q_{ℓ} 値 (loaded Q)を変化させ、クライストロンのピーク出力電力を現在の4倍以上に高める検討を行った。ショートパルスモードでは、これまでに、ビーム電圧147kV、カソード電流56.5Aにおいて最大出力電力3.55MW、出力電力効率42%が得られている。本論文では、CWモードにおける性能を損なわせることなく、ショートパルスモードで4MW以上のピーク出力電力を得るためのクライストロンの開発について報告する。

2. 反射体及び出力導波管部の設計

クライストロンの開発目標としては、CWモードで、ビーム電圧90kVで出力電力1.2MW、ショートパルスモードでは、ビーム電圧147kV、カソード電流56.5A、パルス幅100 μ sec、繰り返し50ppsで4.2MW以上とした。

(1) 反射体のVSWRと出力空洞 Q_{ℓ} 値との関係

高周波相互作用部はCWモードにおける出力効率を最大となるよう、設計が行われている。このため、CWモードよりビーム電圧が高いショートパルスモードでは、ビーム電圧に対する出力空洞の Q_{ℓ} 値が高過ぎるため、出力電力が低くなる。また、電子が電子銃側へ逆行する(以下、「逆行電子」と言

う)ため、出力電力が不安定になる。

そこで、出力窓側に反射体を設置して出力空洞側からみたインピーダンスを変えることにより、 Q_{ℓ} 値を変化させ、ショートパルスモードにおける出力電力効率を向上させる。

キャビティからみたCWモードの結合係数 β_{a1} 及びVSWR= ρ の反射体を置いた場合のパルスモードの結合係数 β_{a2} とインピーダンスとの関係は(1)式及び(2)式で表される。

$$\beta_{a1} = Z_{cw}/Z_c \quad (1)$$

$$\beta_{a2} = Z/Z_c = Z/Z_{cw} \cdot Z_{cw}/Z_c \quad (2)$$

ここで、 $\beta_{a1} > 1$ の時、電圧定在波が最小となるインピーダンスは電圧定在波比 ρ の逆数に一致する。

$$Z_{cw}/Z_{pulse} = 1/\rho$$

ビームから見たインピーダンスは(3)式である。

$$Z/Z_{cw} = (\rho + j \tan \beta L) / (1 + j \rho \tan \beta L) \quad (3)$$

$$\text{位相定数 } \beta = 2\pi / \lambda_g, \lambda_g = 0.349439$$

β_{a2} の最大値は(4)式である。

$$\beta_{a2max} = \rho \beta_{a1} \quad (4)$$

CWモードの出力空洞の $Q_{\ell cw}$ 値とパルスモードの出力空洞の $Q_{\ell pulse}$ との関係は(5)式で表される。

$$Q_{\ell cw} = Q_{in} / (1 + \beta_{a1}) \doteq Q_{in} / \beta_{a1}$$

$$Q_{\ell pulse} = Q_{in} / (1 + \beta_{a2max})$$

$$\doteq Q_{in} / \beta_{a2max} = Q_{\ell cw} / \rho \quad (5)$$

よって、VSWR= ρ の反射体を使用すると、CWモードの $Q_{\ell cw}$ 値を最小で $1/\rho$ 倍にできる。

(2) Q_{ℓ} 値を最小にする反射体位置

DMSコード(Disk Model Simulation Code)で解析を行い、ショートパルスモードのビーム電圧147kVで最高出力効率を得られる出力空洞 Q_{ℓ} 値を求めた。この結果、逆行電子がほとんど現れない条件では、 Q_{ℓ} 値22.5で最高出力効率51%が得られた。

Sバンド導波管を付けた出力空洞の Q_l 値の実測値は57であった。反射体が設置位置からずれると Q_l 値が増大するため、 Q_l 値が目標値より多少低くなるように $VSWR=3$ の反射体を採用した。この場合、 Q_l 値を最小で1/3倍の19とすることができた。

この反射体によって出力空洞のギャップにおける電界が最小となる反射体の位置を求める。出力空洞に付いたSバンド導波管の先に反射体を取り付けた計算体系を図1に示す。計算条件として、ビームが通るドリフト管を同軸構造とし、進行波をドリフト管側から出力空洞を通して反射体側へ出力させるとともに、Sバンド導波管端部から反射体までの位置を変化させて、出力空洞のギャップにおける電界をMAFIAで計算した。反射体出力側の導波管内の最大電界で、ギャップ間電界を規格化した。図2に反射体位置とギャップ間電界との関係を示す。この結果、ギャップ間電界が最小、つまり、 Q_l 値が最小になる反射体の位置はSバンド導波管端部から193mmの位置であることがわかった。

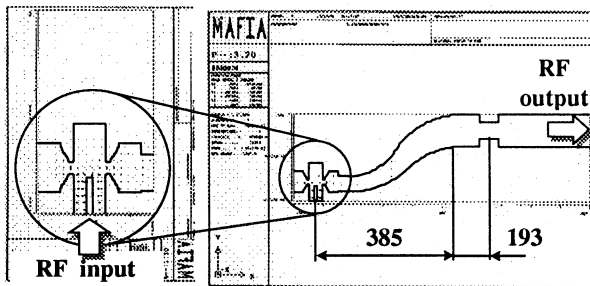


図1. Q_l 値を最小にする反射体位置計算体系

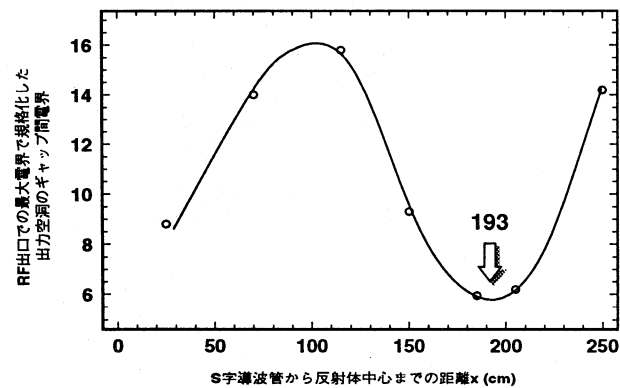


図2. 反射体位置とギャップ間電界との関係

(3) 反射体と出力窓の位置関係

反射体と出力空洞間に定在波が立つため、セラミックス窓における電界が高くなるように反射体の位置を決める必要がある。出力窓と反射体を接続した計算体系を図3に示す。セラミックス中心部から反射体までの位置を変化させ、1MWのRFを透過させた場合のセラミックスのパワーロスを計算した。反射体位置とセラミックスのパワーロスとの関係を図4に示す。点線が示す反射が無い場合のパワーロスと同じになる反射体の位置は、セラミックス中心部から427mmの位置であることがわかった。

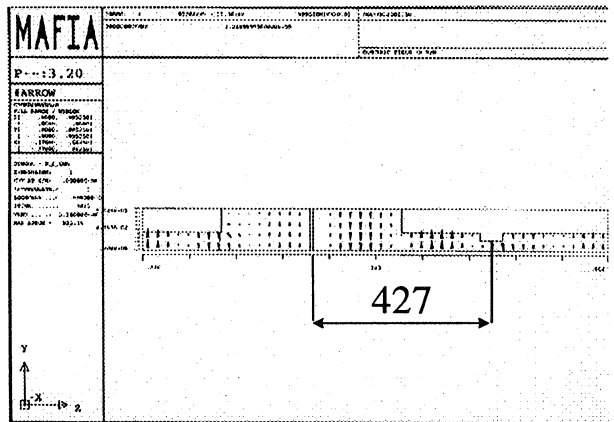


図3. 反射体と出力窓の位置を求める計算体系

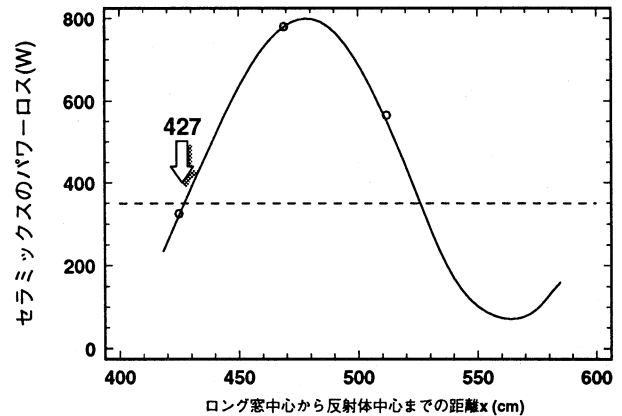


図4. 反射体位置とセラミックパワーロスとの関係

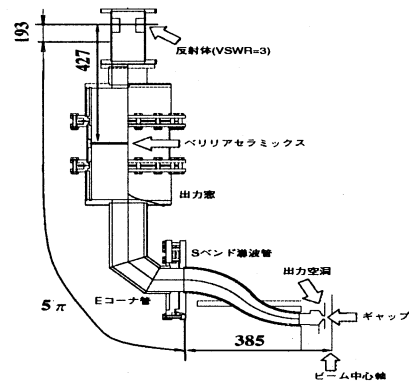


図5. 出力空洞から反射体までの構成

(4) 出力空洞から反射体までの構成

出力空洞から反射体までの構成を図5に示す。出力空洞に接続されたSバンド導波管端部から反射体までの間にEコーナ管と出力窓が接続されている。まず、出力窓単体の位相長の測定結果から、出力窓の両端のフランジ間の位相長が 3π となるように寸法を決めた。ただし、反射体を含む導波管と出力窓端部とを接続するフランジの位置は、反射体の位置から出力窓のセラミックス中心部までの距離427mmの間にあり、出力窓の位相長 3π を確保できる位置とした。次に、Eコーナ管の寸法をMAFIAを用いて

計算し、Eコーナ管の位相長が 2π となるように寸法を決めた。この結果、Sバンド導波管端部から $5\pi + 193\text{mm}$ の位置に反射体を設置すればよいことが分かった。この反射体の位置はギャップ間電界が最小となり、かつ、窓への定在波の影響が無いような位置である。図5に反射体の位置を示す。上記に示す反射体の設計を反映させたクライストロンを2台(クライストロンNo.2及びクライストロンNo.3)製作した。

3. 出力電力の波形測定

計算によって求めた反射体の位置を基準位置とし、クライストロンNo.2の出力電力の波形を測定した。また、スペーサを用いて反射体の位置を基準位置から $\pm 30\text{mm}$ に移動させて同様に測定した。入出力電力の波形を図6に示す。試験条件は、パルス幅 $3\mu\text{sec}$ 、繰返し 400Hz 、ビーム電圧 135kV (ch1)、カソード電流 58.8A (ch2)、パービアンス $1.2\mu\text{p}$ である。

(1)反射体の位置が設計値の場合

ピーク出力電力 3.7MW が安定して得られた。

(2)反射体の位置が窓側へ 30mm の場合

出力電力 3.1MW のパルス波形の後半部にのこぎり状の不安定現象が生じた。Q値の高い第2空洞が逆行電子によって励振され、その共振周波数が強調されたために第2空洞の離調周波数 3.4MHz に対応した不安定現象が現れたと考えられる。

(3)反射体の位置がダミーロード側へ 30mm の場合

パルス幅 $3\mu\text{sec}$ の出力電力波形が $4.3\mu\text{sec}$ に伸びる不安定現象が生じた。入力空洞が逆行電子によって励振されたために、入力電力がなくてもビーム電流があるところでRFが出力されたと考えられる。

4. 出力電力効率の測定

クライストロンNo.3の出力電力効率を測定した。5分割された集束コイルのうち、出力空洞付近に設置されているNo.5コイルの磁場を弱め、真空度が悪化しない程度にビーム径を広げた。この結果、ビーム電圧 147kV 、パービアンス $1.0\mu\text{p}$ で、ピーク出力電力 3.55MW 、出力電力効率 42% が得られた。

5. 出力空洞の $Q\ell$ 値の最適化

京都大学エネルギー理工学研究所との共同研究でクライストロン2次元解析コード(KUFCI)の開発を行った。このコードは電子銃からコレクタまでの電子軌道解析を行うことができ、クライストロン内の電子・電磁波相互作用を解析してコレクタへ入射する電子の空間・速度分布を精度良く計算できる特徴を有する。また、CWモードの飽和出力電力の測定値に対して 2% の誤差で一致し、また、入出力特性も良く一致する計算結果が得られている。

そこで、パルスモードの 147kV のビーム電圧で出力空洞の $Q\ell$ 値を変化させて出力電力を求めた。その結果を図7に示す。 $Q\ell$ 値19の条件で計算した結果、出力電力 3.82MW となった。この計算結果からも反射体はほぼ設計通りの位置にあると考えられる。逆行電子による不安定現象が発生しない最大出力電力は 4.54MW であり、この時の $Q\ell$ 値は27であった。よって、CWモードの $Q\ell$ 値が57の場合、 $\text{VSWR}=2.11$ の反射体を使用すればパルスモードの $Q\ell$ 値を27にすることができ、計算精度を考慮しても 4.2MW 以上の出力電力が得られると考えられる。

6. まとめ

MAFIAを用いて出力空洞の $Q\ell$ 値を低減させる反射体の設計を行った。反射体の設計位置において出力電力を安定して得られたので、計算の妥当性を確認することができた。ビーム電圧 147kV で目標とする 4.2MW 以上の出力電力が得られる見通しがたった。今後、 $\text{VSWR}=2.11$ の反射体を製作し、パルスモードの出力試験を実施する予定である。

7. 謝辞

コード開発及び計算に協力して頂いた京都大学エネルギー理工学研究所の吉川潔教授、大西正視教授、山本靖助教授、増田開助手に感謝致します。

8. 参考文献

1)K.Hirano *et al.* : Proceedings of 21th Linear Accelerator Meeting in Japan, P311 (1996)

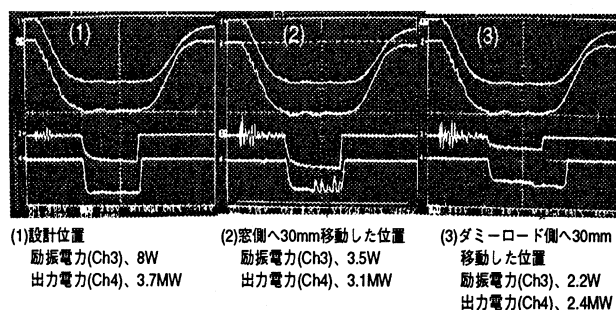


図6. クライストロンNo.2の出力電力波形測定

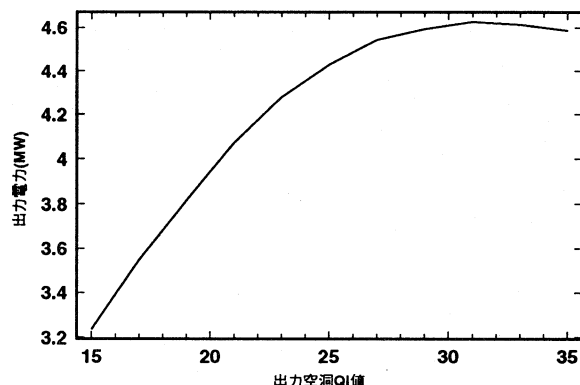


図7. ビーム電圧 147kV での $Q\ell$ 値に対する出力電力