

大電力クライストロンの開発(2) ーパルスモードの開発ー

1998年6月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-chō, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-Ken, 311-13, Japan

© 動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 1998

大電力クライストロンの開発 (2)
－ パルスモードの開発 －

平野耕一郎*、江本隆*、王元林**、佐藤勇***、谷賢*

要旨

開発中の大電流CW電子線形加速器では、10MeVの電子線を加速するために周波数1.249135(GHz)、強度1.2(MW)、出力電力効率65%の大電力RF(Radio Frequency:高周波)を連続波(以下、「CW」と言う。)で発生させることが必要とされている。そのため、平成8年度までにCWクライストロンを製作し、最大出力電力1040kWを連続的に発生できるクライストロンの開発に成功した。将来的にビームエネルギーを30MeVに増強すれば、加速器を利用した試験研究の適用範囲を広げることが可能であるが、そのためには、クライストロンの出力電力を現状の約4倍に高める必要がある。

本報告書では、CWモードにおける性能を損なわせることなく、パルスモード(ビーム電圧147kV、ピーク電力4.2MW、パルス幅100 μ sec、繰り返し50pps)で動作できるクライストロンを開発するための評価・検討を行った。その結果、電子銃部の開発、ピーク電力4.2MWに耐える出力窓の開発及び反射体を利用した出力空洞 Q 値を変化させる方法の開発を行うとともに、高周波出力試験(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%が得られた。また、この試験条件で、反射体を置いた設計位置で最大出力電力が得られ、逆行電子による出力電力の不安定現象は観測されなかった。今後は、出力効率の向上を図るため反射体を用いた出力空洞の Q 値の最適化を行う予定である。

* 大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室

**大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室客員研究員
(中国 南京大学物理系 副教授)

***大洗工学センター基盤技術開発部先進技術開発室客員研究員
(日本大学原子力研究所教授)

Development of High Power Klystron (2)
— Development of Pulse-mode Operation—

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

Abstract

A high power klystron has been developed as the RF source of the high power CW electron linac (10MeV, 100mA , 1.249135GHz). CW power of 1.2MW and efficiencies over 65% at a beam voltage 85kV were the design goal. Klystrons have been manufactured until 1997. The klystron has achieved CW RF output power of 1040kW and beam voltage of 83kV at present. The power required for future applications is about four times the maximum power with CW-mode operation to accelerate electron beam at energy of 30MeV. We have redesigned the klystron, which is able to drive peak power 4.2MW with pulse-mode operation (100 μ sec pulse width, 50 pps) without decreasing efficiency with CW operation.

As peak power of 4.2MW at a beam voltage 147kV is required for pulse-mode operation, we have developed the electric gun, the RF window which endures peak power 4.2MW and 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 in present. The unstable phenomenon of the power due to backward electrons hasn't been observed in the design condition.

We have succeeded in the development of the klystron so as to be able to drive both CW mode and short pulse mode. The output cavity Q ℓ made effective use of two obstacles will be optimized by simulation codes to improve efficiency.

* Frontier Technology Section, Advanced Technology Division,OEC.

** Frontier Technology Section, Advanced Technology Division,OEC.

Visiting Scientist from Nanjing University.

***Atomic Energy Research Institute, Nihon University.

目次

1. はじめに	1
2. パルス化のための開発項目	2
3. クライストロンのパルス化設計	3
3.1 電子銃	3
3.2 出力窓	3
3.3 出力空洞部	4
4. 出力窓のレゾナントリング試験	6
4.1 試験体系	6
4.2 パルス試験	6
5. 高周波出力試験	7
5.1 試験体系	7
5.2 高周波出力試験	7
6. 考察	9
7. まとめ	10
8. 謝辞	11
9. 参考文献	12
付録.A	13

表リスト

表1.1 クライストロン基本仕様 14

図リスト

図2.1 クライストロン概略構造及び動作原理図 15

図3.1 パルスモードの電子ビーム軌道計算結果 16

図3.2 ロング窓の断面構造図 17

図3.3 窓内部最大電界分布図 18

図3.4 Q_e 値が最小となる反射体設置位置を求める計算体系 19

図3.5 反射体位置とギャップ間電界との関係 20

図3.6 ロング窓のセラミックスパワロスに無関係な
反射体設置位置を求める計算体系 21

図3.7 反射体位置と窓のパワロスとの関係 22

図3.8 出力空洞から反射体までの構成図 23

図3.9 クライストロン外形図
(クライストロンNo.2、クライストロンNo.3) 24

図4.1 窓試験体系図 25

図4.2 還流電力とロング窓のセラミックス表面温度の関係 26

図5.1 パルスモードの試験体系 27

図5.2 出力電力の波形測定における反射体設置位置 28

図5.3 クライストロンNo.2の出力電力の波形測定結果 29

図5.4 クライストロンNo.3の出力電力の測定結果 30

図6.1 ビーム電圧147kVでの Q_e 値に対する出力電力特性 31

図6.2 Q_e 値=31の場合の逆行電子の様子 32

付録リスト

付録A. 反射体のVSWRと出力空洞 Q_e 値との関係 13

1. はじめに

大電流CW電子線形加速器開発の一環として、クライストロンから出力される高周波電力(以下、「出力電力」と言う)1.2MWを連続的に、かつ、65%の高効率で得られる大電力クライストロンの開発を進めている。この開発として平成2年度からショートパルスクライストロンの試作、平成3年度に試作クライストロンの製作を行い、CWモードにおいて出力電力330kW、出力効率31%が得られた。平成4年度に一般的な出力窓よりも円筒部の長さが長い出力窓(以下、「ロング窓」と言う)の設計及び製作を行い、レゾナントリングを用いて耐電力試験を実施し、窓単体で1.7MW(CW)に耐えることを確認した。平成6年度にロング窓と耐電力の低い試作クライストロンの窓とを交換する改造を行った。この改造したクライストロン(以下、「改造クライストロン」と言う。)⁽¹⁾では最大出力電力885kW(CW)、出力効率47%が得られた。平成7年度にはビームのリップルの低減化を行ったクライストロンを製作し、最大出力電力782kW(CW)、出力効率57%が得られた。平成8年度に製作したクライストロンでは、最大出力電力1040kW(CW)、出力効率57.5%を達成した。

将来的にビームエネルギーを30MeVに増強すれば、加速器を利用した試験研究の適用範囲を広げることができる。そのためのRF源として、現状のクライストロンの出力電力を4.2MW以上に増加させる必要がある。一般的にクライストロンはビーム電圧が低く平均出力電力が大きいCW用クライストロンと、ビーム電圧が高く平均出力電力が小さいパルス用クライストロンとに大別される。これらはそれぞれの動作電圧で最高効率が得られるように設計されているため、動作電圧以外の条件では出力電力が減少する。クライストロン電源の電力容量の範囲内でビームのパルス化を行い、パルストランスを使用してビーム電圧を昇圧すれば、出力電力増強に必要なパルス電圧を得ることができる。しかし、CW用として設計されたクライストロンに現状より高い電圧を印加させるだけでは、パルスモードで必要な出力電力を得ることはできない。そこで、1台でCWモード及びパルスモードの両方を動作することができ、パルスモードのビーム電圧でも50%以上の高効率で4.2MW以上の大電力を出力できるクライストロンを開発することを目的とする。

今回は、クライストロン開発の中でパルスモードの開発について報告する。

2. パルス化のための開発項目

クライストロンのCWモードにおける開発目標は1.2MWの出力電力を連続的に65%の効率で出力することである。パルスモードの開発目標はCWの開発目標条件を損なわせることなく、4.2MWの出力電力を50%以上の効率で出力させるところにある。パルスモードの基本仕様を表1.1に示す。

クライストロンの動作原理を図2.1に示す。入力空洞で速度変調された電子ビームが高周波空洞のギャップに発生した高周波電界と相互作用して密度変調される。高周波空洞間のドリフト管を通過する間に電子ビームの集群が行われる。最も集群の高まった電子ビームが出力空洞部のギャップで誘起された高周波電界によって減速され、電子ビームから失われた電力が高周波電力として出力空洞部から出力される。高周波電力はSバンド導波管を通り、出力窓を透過して出力される。

出力空洞部及び電子ビームの形状が出力効率に最も影響を与えるため、これらに関する最適化が必要である。このための開発項目として以下の点が挙げられる。

(1) 電子銃

パルスモードにおける最大ビーム電圧を印加した際に、放電が発生しないような電極形状になっていることが必要である。

CWモード及びパルスモードの両方で電子ビームがリップルせずに、ドリフト管壁に当たることなくコレクタまで通過することが必要である。

(2) 出力窓

クライストロン管内の超高真空と管外の大気とが出力窓部のセラミックスによって仕切られ、高周波が窓を透過するときに誘電損失による熱が発生する。パルスモードではセラミックス表面上で発生する2次電子による沿面放電や2つの導体間で発生する2次電子のセラミックスへの繰り返し衝撃（マルチパクタリング）⁽²⁾による発熱が問題である。これらの発熱要因を低減できる窓形状の検討が必要である。

(3) 出力空洞部

出力効率が最大になるような出力空洞の Q 値はCWモードとパルスモードでは異なる。出力空洞の形状を変えずに、 Q 値だけを変化させてパルスモードにおいても最大効率が得られるようにする必要がある。

3. クライストロンのパルス化設計

3. 1 電子銃

本電子銃はCWモード及びパルスモードの両方で使用できる特徴がある。

そのために、アノードモジュレーション型を採用し、ボディーアノード間に印加されるアノード電圧を可変できるようにした。アノード電圧を可変することによって、カソードから引き出される電流の調整、及び、ビームのパルス化を行わせることができる。

本電子銃では直径70mmのディスペンサーカソードを採用することで、 $1.5\text{A}/\text{cm}^2$ の高電流密度動作のパルスモード運転を可能とした。さらに、パルスモードの印加電圧はCWモードより高いため、電極間の最大電界強度を運転実績のある値($83\text{kV}/\text{cm}$)以下になるように電極の形状を決定した。

電子は引き出される電圧によって、その軌道が異なるため、各電圧条件で磁場の最適調整を行う必要がある。集束コイルから電子銃に染み出す磁場が最大になるように電子銃と集束コイルの間にある磁場シールド用ガンポールピース直径を工作上最大限大きくした。さらに、電子銃側のガンポールピース上に補助コイル(以下、「バックアップコイル」と言う)を設け、逆磁場を作り出すことによって電子銃への染み出し磁場を調節できるようにした。これにより、電子銃から高周波相互作用部へ入射するビーム軌道を調整し、最適なトランスポートができるようにした。パルスモードにおける電子銃からコレクタまでの電子軌道計算は電子軌道計算コード(EGUN)⁽³⁾を使用して評価を行い、ドリフト管壁に当たることなく通過することを確認した。この計算結果を図3.1に示す。

3. 2 出力窓

3. 2. 1 窓の基本構造

クライストロンに採用した出力窓はピルボックス型と呼ばれる円筒形の出力窓である。セラミックスの外周部は薄い銅板にロー付けされ、その銅板はステンレス製円筒部に接合されている。銅板とステンレス製円筒部の間には冷却水路が設けられ、セラミックスを外周部から冷却できる構造になっている。試作クライストロンに採用した一般に用いられるピルボックス型出力窓(以下、「スタンダード窓」と言う)は、円筒部の長さが管内波長の1/4であるが、一方、ロング窓は円筒部の長さが管内波長と等しい設計としている。ロング窓の断面構造図を図3.2に示す。窓の材質は大電力での使用となるCWモードでも耐えられるよう、厚さ6.6mmの熱伝導率の高いベリリアを採用した。

3. 2. 2 窓の設計

CWモードでの発熱原因は、セラミックスの誘電損失が主である。パルスモードの場合にはRFの平均電力が低く誘電損失による発熱は少ないが、セラミック表面上の電界が強いので2次電子による沿面放電や2次電子のセラミックスへの繰り返し衝撃による発熱でセラミックスの一部が溶解して破損する場合がある。スタンダード窓とロング窓の電磁界を比較するため3次元電磁界解析コードMAFIA⁽⁴⁾によって計算を行った。これらの電界のx成分、y成分及びz成分の分布を図3.3に示す。x成分及びy成分電界はセラミックスの発熱に寄与し、セラミック面に垂直なz成分

電界はマルチパクタリングの発生に寄与する。この図から窓のシリンダ部を長くすることでロング窓のセラミックス上の x 成分電界はスタンダード窓の3/4倍に低減されていることが分かり、パワーロスは、スタンダード窓の1/2倍となる。また、電界の z 成分が低いロング窓はマルチパクタリングの発生もスタンダード窓より低く抑えられることが期待できる。また、マルチパクタリングの発生を抑える工夫としてセラミックス表面からの2次電子放出割合を低くするために、TiN薄膜をセラミックス両面にコーティングを施した。

3.3 出力空洞部

高周波相互作用部は入力空洞、4個の中間空洞及び出力空洞で構成され、これらの空洞は約1mの間に配置されている。加速器の性能評価をCWモードで行うため、CWモードにおける出力効率が最大となるように2次元のFCIコード⁽⁵⁾(Field Charge Interaction Code)を用いて高周波相互作用部の設計⁽¹⁾を行った。その結果、CWモードのビーム電圧90kVに対して出力空洞の $Q\ell$ 値が50の場合に最高出力効率70%が得られた。ビーム電圧に対する $Q\ell$ 値が高過ぎると空洞ギャップの電界が強くなるため、電子銃側へ逆行する電子(以下、「逆行電子」という)が多くなり、出力電力が不安定になる。逆行電子の発生を判断するために必要な電子の位相情報を1次元のDMSコード⁽⁶⁾(Disk Model Simulation Code)で解析を行い、出力空洞の $Q\ell$ 値をパラメータとして、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条件を求めた。この結果、逆行電子がほとんど現れない条件で最高効率を得られる場合は、 $Q\ell$ 値22.5で出力効率51%であった。パルスモードで同じ出力効率を得るためには空洞を変形させることなくCWモードの $Q\ell$ 値を減少させる必要がある。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で、 $Q\ell$ 値を変化させることができる。出力空洞のギャップにおける電界が最小となる位置に $VSWR=\rho$ の反射体を設置すると、出力空洞の $Q\ell$ 値を $1/\rho$ 倍にすることができる(付録A参照)。このとき、反射体と出力空洞間に定在波が立つため、窓のセラミックスの位置によっては電界が高くなる場合がある。この影響を抑えるために、窓を定在波の節の位置に設置し、定在波の影響が無いようにする必要がある。

反射体の設置位置を決めるための具体的な計算方法を以下に示す。

まず、出力空洞のギャップにおける電界が最小となるような反射体とギャップの位置関係を求めた。計算体系は出力空洞に付いたSバンド導波管の先に反射体を取り付けた体系である。この体系を図3.4に、その特徴を以下に示す。

- ①Sバンド導波管を付けた出力空洞の $Q\ell$ 値の実測値は57であった。
- ②反射体が設置位置からずれると $Q\ell$ 値が増大するので、 $Q\ell$ 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、 $Q\ell$ 値を最小で1/3倍の19とすることができる。
- ③ビームが通るドリフト管を同軸構造として、ドリフト管側から励振させ、進行波を出力空洞を通して反射体側へ透過させた。

また、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の位置における電界を計算した。反射体の位置によってインピーダンスが変わるため透過電力が変化する。このため、反射体の出力側の導波管内の最大電界で、

ギャップ間の電界を規格化して比較を行った。図3.5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、Sバンド導波管端部から反射体までの距離が193mmの時にギャップ間電界が最小になることがわかった。

次に、反射体と窓の位置関係を求める。計算体系はロング窓と反射体を接続した体系であり、この体系を図3.6に示す。ロング窓の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部におけるパワロス計算した。図3.7に反射体位置と窓のパワロスとの関係を示す。この結果、反射体が無い場合のパワロスと同じになるような反射体の位置は、セラミックス中心部から427mmであることがわかった。つまり、反射体によって反射波が発生しても、この位置ではセラミックスのパワロスは変化しないと判断される。

出力空洞から反射体までの構成を図3.8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コーナ管とロング窓を挿入する必要がある。そこで、Eコーナ管とロング窓の位相長の合計が $n\pi$ となるよう寸法を求め、これらを挿入してもギャップ間電界が最小となるようにした。まず、ロング窓単体の位相長の測定結果からロング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ロング窓端部とを接続するフランジの位置は、反射体の位置からロング窓のセラミックス中心部までの距離427mmの間にあり、ロング窓の位相長 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位置である。図3.8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2台のクライストロンを大電流電子線加速器の機器として製作した。今回製作したクライストロンNO.2及びクライストロンNO.3の外形図を図3.9に示す。

4. 出力窓のレゾナントリング試験

4. 1 試験体系

レゾナントリングの長さは、管内波長の整数倍となるように設定され、レゾナントリング内部で還流するRF電力(以下、「還流電力」という)を共振させることで、還流電力を投入電力の40倍に増幅させることができる。この増幅作用を利用することにより窓試験に必要な4MW以上のRF電力を作り出すことができる。レゾナントリングを使用した窓試験体系を図4.1に示す。シグナルジェネレータの基本周波数を調整することで、還流電力の位相調整を行い、レゾナントリング内の共振を得た。また、3本のスタブチューナを調節することにより、レゾナントリング内で発生した反射波を打ち消した。下記項目を考慮し、試験体系を構成した。

- ①方向性結合器を用いて還流部内の進行波と反射波の一部を取り出し、オシロスコープで測定し、検波電圧からRF電力を推定した。
- ②レゾナントリングを排気速度500(l/sec)のイオンポンプで排気するとともに、さらに、窓付近の真空度を低めるために、窓を挟む2個のEコーナに取り付けた排気速度100(l/sec)のイオンポンプで排気し、レゾナントリング内の真空度を 10^{-7} (torr)以下に到達させた。
- ③窓の表面が観測できるように2個のEコーナにのぞき窓を取り付けた。上流側のぞき窓に赤外線温度測定装置を設置し、また、下流側にはビデオカメラを設置して窓の表面状態の観測を行った。
- ④セラミックスの周囲の冷却水の流量を10(l/m)とした。

4. 2 パルス試験

本パルス試験では、ロング窓構造における電子衝撃の起こる様子を調査することを目的として実施し、試験条件は、繰り返し50pps、パルス幅2msec (デューティ10%) 及びパルス幅4msec (デューティ20%) とした。図4.2に還流電力とセラミックス表面温度測定結果を示す。4MWまでは電子衝撃による発光は観測されなかったが、4.25MWを越えると窓表面周辺部に寿命数分程度の青白い発光現象が生じ、4.5MWではセラミックス表面温度の変化率が上昇した。このことによって、電子衝撃の発生は4.25MWまで低く抑えられることが分かった。

5. 高周波出力試験

5. 1 試験体系

パルスモードの試験体系を図5.1に示す。パルス電源は2極管用の電源を使用し、クライストロンのビーム電圧とアノード電圧に同電位が印加される構造となっている。主な構成要素はクライストロン、集束コイル、ソケット、クライストロン電源、導波管、ダミーロード、励振器等である。

励振器から10W程度の高周波電力がクライストロンへ入力されると、4MW以上の出力電力がロング窓を通過して出力される。この出力電力はEコーナー管や方向性結合器等の導波管を通りダミーロードまで導かれ、ダミーロード内の冷却水に熱交換される。また、ロング窓、導波管及びクライストロンのコレクタ自身も水冷却されている。

5. 2 高周波出力試験

計算によって求めたアイリスの位置を基準位置とし、アイリスの位置を基準位置から±30mmに移して出力電力の波形を測定した。反射体設置位置を図5.2に示す。パービアンズとは、空間電荷制限されたカソード電流がビーム電圧の3/2乗に比例する乗数のことであり、このパービアンズが一定になる条件でビーム電圧に対する出力電力の測定を行った。

5. 2. 1 出力電力の波形測定

クライストロンNo.2について出力電力の波形の測定を行った。

ビーム電圧とアノード電圧とが等電位の場合のパービアンズは $1.2\mu p$ であり、この時の試験条件は、パルス幅 $3\mu sec$ 、繰返400pps、ビーム電圧135kV、カソード電流58.8Aである。以下に示す3ケースの入出力電力の波形を測定し、その結果を図5.3に示す。

(1) ケース1(反射体の位置が設計値の場合)

ビーム電圧135kVの時、3Wの入力電力で飽和出力に達し、ピーク出力電力3.7MWが安定して得られた。また、ビーム電圧150kV、カソード電流68.8Aに増加させた時、ピーク出力電力の最高値4.55MW、出力効率44%が得られた。この時、出力電力がロング窓のレゾナントリング試験での最高値に達したため、これ以上の出力上昇を中止した。

(2) ケース2(反射体の位置が窓側へ30mmの場合)

出力電力3.1MW時、パルス波形の後半部に3.4MHzの周期を持ったのこぎり状の不安定現象が生じた。これは、出力空胴付近で逆行電子が発生したのが原因である。

パルスの立ち上がり急な条件ほど発生するサイドバンドの周波数成分が広く、振幅が大きくなる。逆行電子はこの周波数成分を持って戻るため、Q値の高い中間空胴を通った場合、逆行電子が小信号であっても中間空胴の共振周波数成分が特に増幅される。第2空胴のQ値は3000と高く、その共振周波数1252.5MHzは基本周波数に近いので、パルスの繰返し周波数の高調波成分のサイドバンドをもった逆行電子によって、Q値の高い第2空胴が励振され、その共振周波数が強調されることに

よって離調周波数3.4MHzが出力波形上に現れている。

(3)ケース3(反射体の位置がダミーロード側へ30mmの場合)

パルス幅 $3\mu\text{sec}$ 、出力電力2.4MWのパルス波形が $4.3\mu\text{sec}$ に伸びたり、伸びなかったりする不安定現象が生じた。

カソード方向へ逆行する電子ビームは、その速度が遅いため入力空洞まで戻るのが数 μsec を必要とする場合もある。この入力空洞まで戻る逆行電子によって入力空洞が励振されるために、入力電力がなくてもビーム電流が加速されていればRFが出力される。

5. 2. 2 出力電力効率の測定

クライストロンNo.3について、以下に示す出力電力効率の測定を行った。

ビーム電圧147kVの時にパービアンスが $1.0\mu\text{p}$ となるように、ビーム電圧とアノード電圧の間に定電圧電源を挿入して電位差をつけた。

集束コイルはNo.1からNo.5まで5分割しており、そのうちNo.5コイルを出力空洞付近に設置している。出力空洞付近のビーム径が大きいほど出力電力効率が高くなるため、No.5コイルの電流だけを10Aとして出力空洞付近の磁場を弱め、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、カソード電流56.5A、集束コイル(No.1~No.4)電流17.5A、集束コイル(No.5)電流10A、バックリングコイル電流3.4Aの時、ピーク出力電力3.55MW、出力電力効率42%が得られた。この結果を図5.4に示す。

6. 考察

レゾナントリング試験において、ロング窓は目標値である出力電力4.2MWを問題なく透過できることを確認した。

このロング窓を取り付けたクライストロンを用いた高周波出力試験を実施した結果、反射体の位置が基準位置からずれた条件では、逆行電子によるパルス不安定現象が観測されたが、基準位置では逆行電子は観測されず、クライストロンの最大出力が得られた。これより、計算で求めた反射体の位置の妥当性が確認された。

量子工学試験施設内のクライストロン電源の仕様は最大ビーム電圧147kV、最大カソード電流56.5Aの時に出力電力4.2MW、出力効率50%である。しかし、同条件における出力試験の結果は出力電力3.55MW、出力効率42%となり、仕様値より低い結果となった。そこで、出力効率を向上させるために、出力空洞の $Q\ell$ 値について検討した。その検討結果を以下に述べる。

エネルギー回収型クライストロンを設計するため、京都大学エネルギー理工学研究所との共同研究で平成8年度までにクライストロン2次元解析コードの(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。これまで、事業団のクライストロンのCWモード、テレビ放送用CWクライストロン(1AV56)、スタンフォード大学のパルスクライストロン(XK-5)について、KUFCIコードの検証計算を行った。その結果、飽和出力電力の測定値に対して-4.9~6.9%の誤差で一致することが分かった。また、入出力特性も良く一致しており、KUFCIコードは実機を精度良く再現できることを確認した。

まず、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6.1に示す。 $Q\ell$ 値19の条件で計算した結果、出力電力3.82MWとなり、出力電力の測定値である3.55MWと計算誤差範囲内で一致した。この計算結果からも反射体の位置はほぼ設計通りの位置にあると考えられる。つぎに、電子の空間・速度分布を精度良く計算できるコードの特徴を利用し、クライストロン内部における逆行電子の様子を調べ、不安定現象を起こさずに最大出力電力が得られる $Q\ell$ 値を求めた。 $Q\ell$ 値31の場合について、定常状態におけるビーム中心軸上のビームエネルギー分布を図6.2に示す。図中の数字は6個の空洞の位置を示しており、入力空洞は図中の1の領域である。また、RFの1周期を64等分した時間ステップである。この図から、入力空洞内に存在する電子が時間の経過と共に逆行している様子が分かる。出力電力の最大値は図6.1から $Q\ell$ 値31の時に得られるが、 $Q\ell$ 値29以上では電子銃側へ逆行する電子の割合が増加している。このため、出力電力に不安定現象が発生すると考えられる。 $Q\ell$ 値が23~27では電子が出力空洞付近で再加速されコレクタへ向かっており、出力電力の不安定現象の発生には影響しないと考えられる。よって、出力電力の不安定現象が発生しない最大出力電力が得られる $Q\ell$ 値は27となる。CWモードの $Q\ell$ 値が57の場合、VSWR=2.11の反射体を使用すればパルスモードにおける $Q\ell$ 値を27とすることができる。 $Q\ell$ 値27の時の出力電力の計算値は4.54MWであるので、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。

7. まとめ

- (1) レゾナントリングを用いた試験を行った結果、ロング窓単体ではマルチパクタリング等の異常放電が発生することなく、パルスモードの仕様条件である出力電力4.2MWを透過できることが分かった。
- (2) MAFIAを用いて出力空洞の Q 値を低減できる反射体及び出力導波管部の設計を行い、反射体及びロング窓を有するクライストロンの製作を行った。反射体をロング窓上部に設置してクライストロンの高周波出力試験を実施した結果、反射体の設計位置において最大出力電力が安定的に得られた。これにより、計算による反射体位置の設計の妥当性が確認された。
- (3) 量子工学試験施設内のクライストロン電源の仕様である最大ビーム電圧147kV、最大カソード電流56.5Aの条件で出力試験を実施した結果、出力電力3.55MW、出力効率41.5%となった。
- (4) 逆行電子の状況が計算できるKUFCIを利用し、出力電力の向上について考察した結果、逆行電子による出力電力不安定現象が発生せずに、4.2MW以上の最大出力電力が得られる条件は、出力空洞の Q 値27であることが分かった。

今後、 Q 値を27とするような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。

8. 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。

9. 参考文献

- (1) 平野耕一郎他、"大電力クライストロンの開発(1) - 試作クライストロンの改造 -"、PNC TN9410 96-071、1996年3月
- (2) 齊藤芳男、"高周波放電と表面"、高エネルギー加速器セミナーOHO'90、高エネルギー加速器科学奨励会
- (3) W.B.Herrmansfelt, "EGUN-AN ELECTRON OPTICS AND GUN DESIGN PROGRAM", SLAC(1988)
- (4) T.Weiland、"Maxwell's Grid Equations"、FREQUENZ、vol.44、P9、1990
- (5) T.Shintake, "HIGH POWER KLYSTRON SIMULATIONS USING FCI - FIELD CHARGE INTERACTION CODE", KEK Report(1990)
- (6) H.Yonezawa, Y.Okazaki, "A ONE DIMENSIONAL DISK MODEL SIMULATION FOR KLYSTRON DESIGN", SLAC-TN-84-5(1984)
- (7) K.Masuda,"Development of Numerical Simulation Codes and Application to Klystron Efficiency Enhancement", Institute of Advanced Energy Kyoto University, 1997.

付録A. 反射体のVSWRと出力空洞 Q_l 値との関係

Q_l (loaded Q) と結合係数 βa は次式の関係にある。

$$\text{internal } Q : Q_{in} = \omega W / P_{in}$$

$$\text{external } Q : Q_e = \omega W / P_e$$

$$Q_l = Q_{in} / (1 + \beta a)$$

$$\beta a = Q_{in} / Q_e = P_e / P_{in}$$

キャパティからみたCWモードの結合係数 βa_1 およびVSWR=3の反射体を置いた場合のパルスモードの結合係数 βa_2 とインピーダンスの関係は次式で表される。

$$\beta a_1 = Z_{cw} / Z_c$$

$$\beta a_2 = Z / Z_c = Z / Z_{cw} \cdot Z_{cw} / Z_c$$

ここで、 $\beta a > 1$ 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。(マイクロ波工学、中島将光、森北出版、P89)

$$Z_{cw} / Z_{pulse} = 1 / \rho = 1/3$$

ビームから見たインピーダンスは次式で表される。

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

$$= (3 + j \tan \beta L) / (1 + j 3 \tan \beta L)$$

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

βa_2 が最大となるのは、

$$(Z / Z_{cw})_{\max} = 3$$

つまり、 βa_1 の電圧定在波比倍となる時である。

$$\beta a_2 \max = 3 \beta a_1$$

CWモードの出力空洞の $Q_{l\text{cw}}$ 値とパルスモードの出力空洞の $Q_{l\text{pulse}}$ と関係を求める。

$$Q_{l\text{cw}} = Q_{in} / (1 + \beta a_1) \doteq Q_{in} / \beta a_1$$

$$Q_{l\text{pulse}} = Q_{in} / (1 + \beta a_2) \doteq Q_{in} / \beta a_2 = Q_{l\text{cw}} \beta a_1 / (3 \beta a_1) \\ = Q_{l\text{cw}} / 3$$

よって、VSWR=3の反射体を使用して得られるパルスモードの $Q_{l\text{pulse}}$ 値はCWモードの $Q_{l\text{cw}}$ 値の最小で1/3倍となる。

表1.1 クライストロン基本仕様

運転モード	CWモード	パルスモード
動作周波数	1.249135GHz	1.249135GHz
出力電力	1.2MW	4.1MW
最大出力電力効率	65%	50%
ビーム電圧	90kV	147kV
カソード電流	25A	56.5A
ビーム電力	1.86MW	8.3MW
励振電力	12W	15W
パルス幅	-	100μsec
繰返	-	50pps

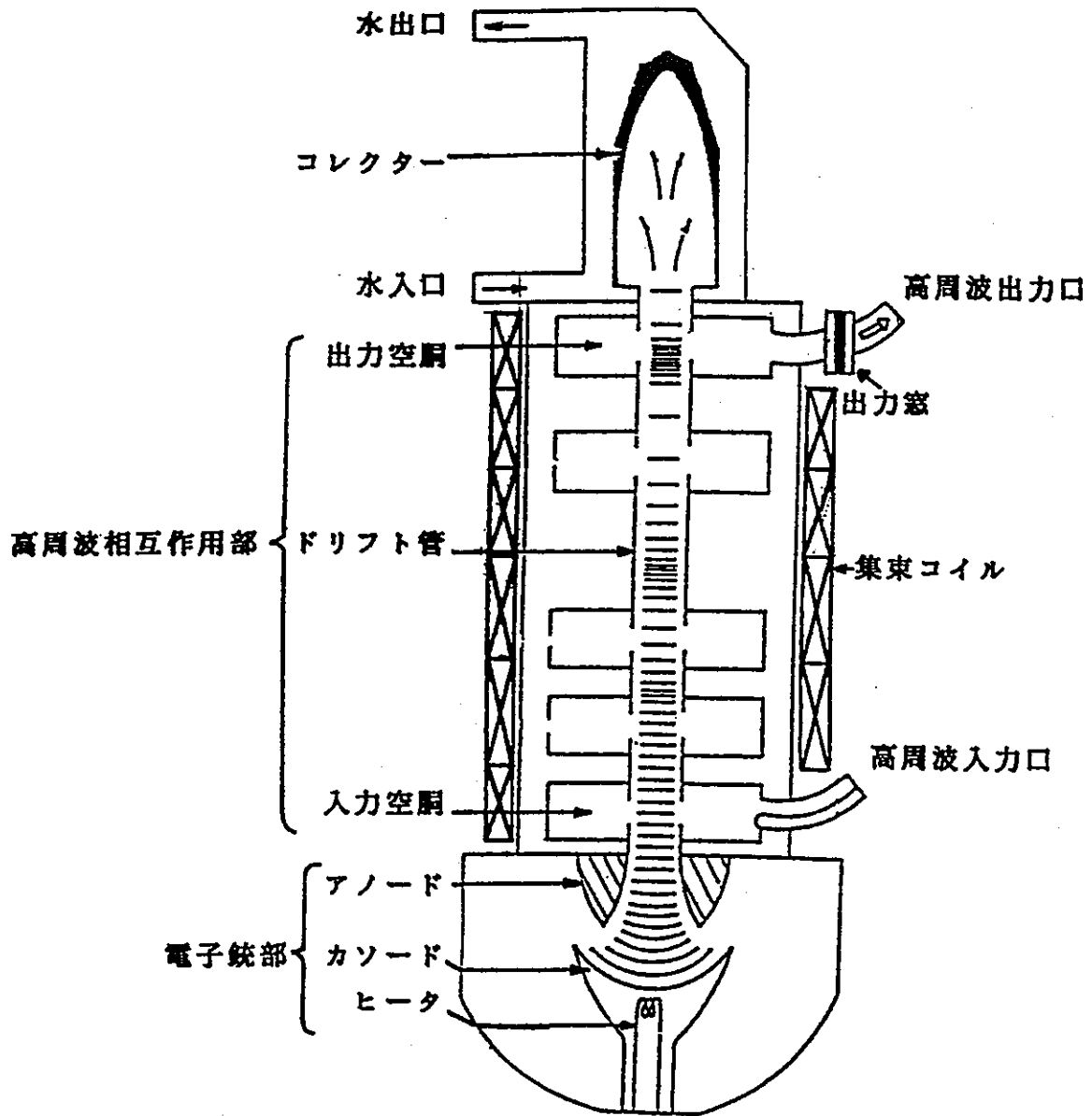


図2.1 クライストロン概略構造及び動作原理

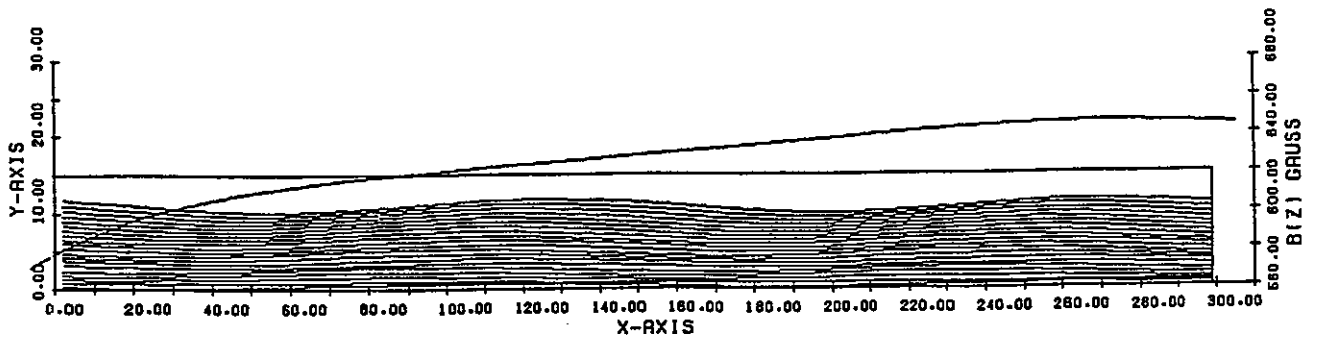
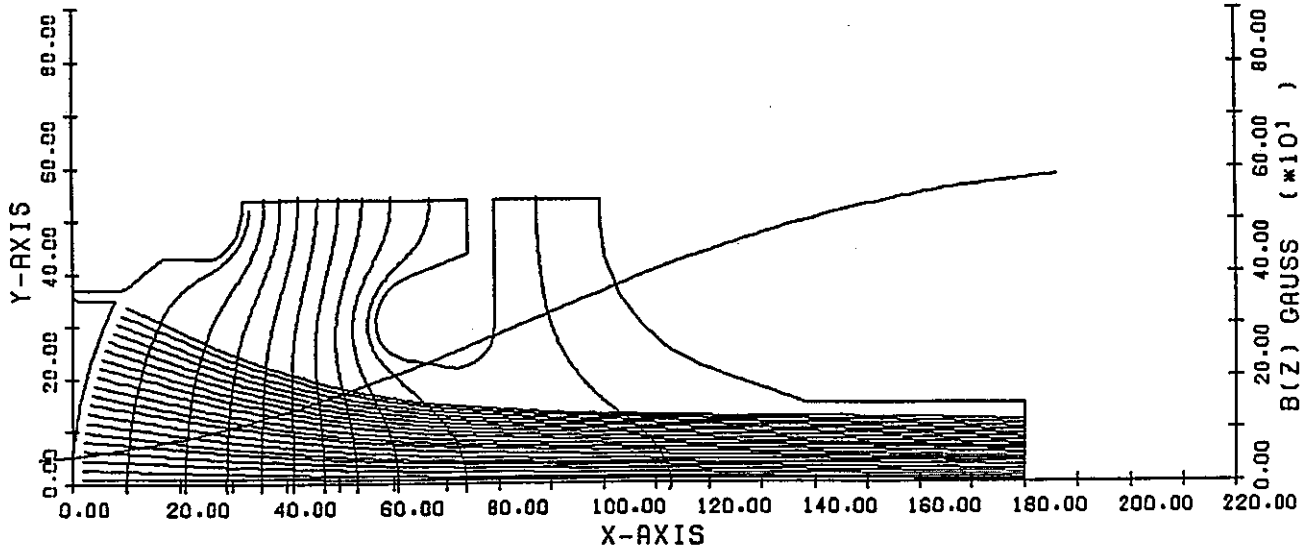


図3.1 パルスモードの電子ビーム軌道計算結果

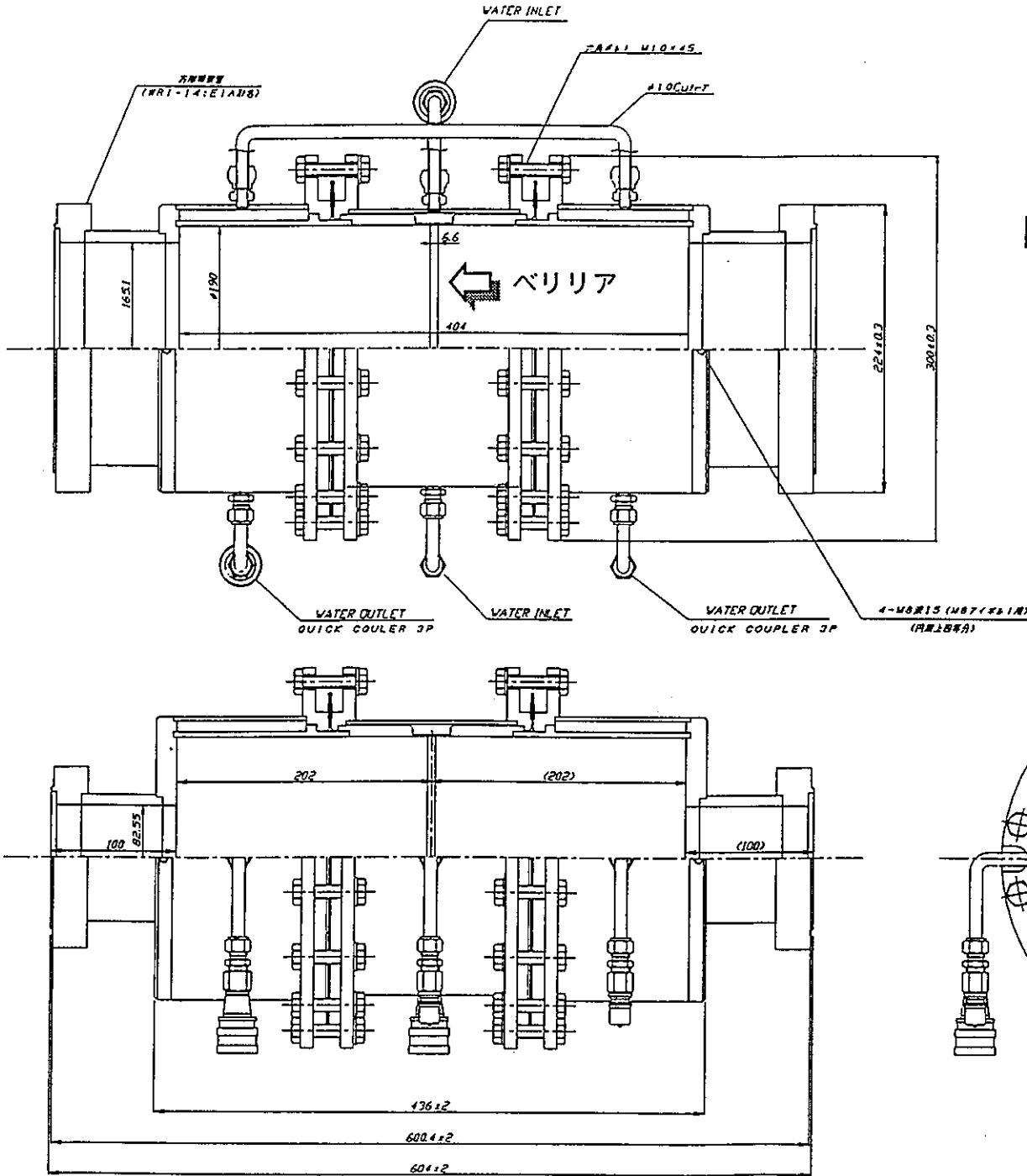
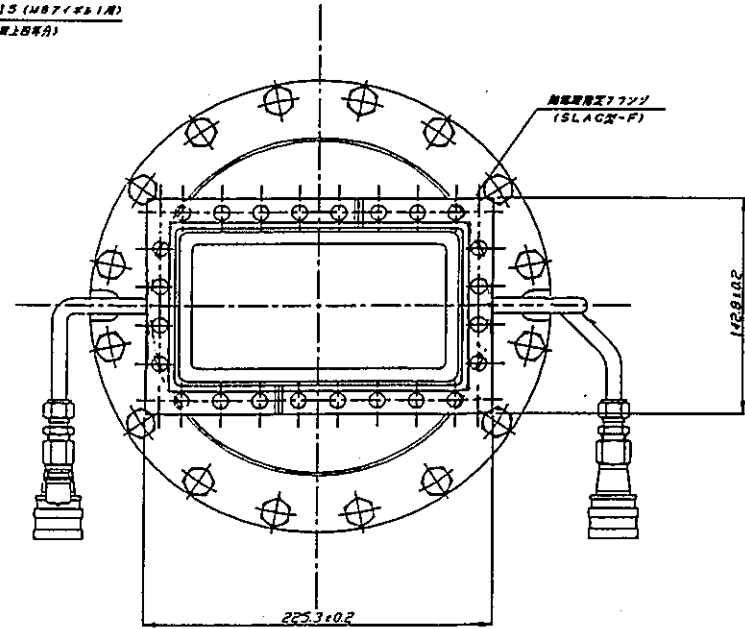


図3.2 ロング窓の断面構造図



方形導波管の最大電界で規格化した
窓内部の最大電界 (arb.)

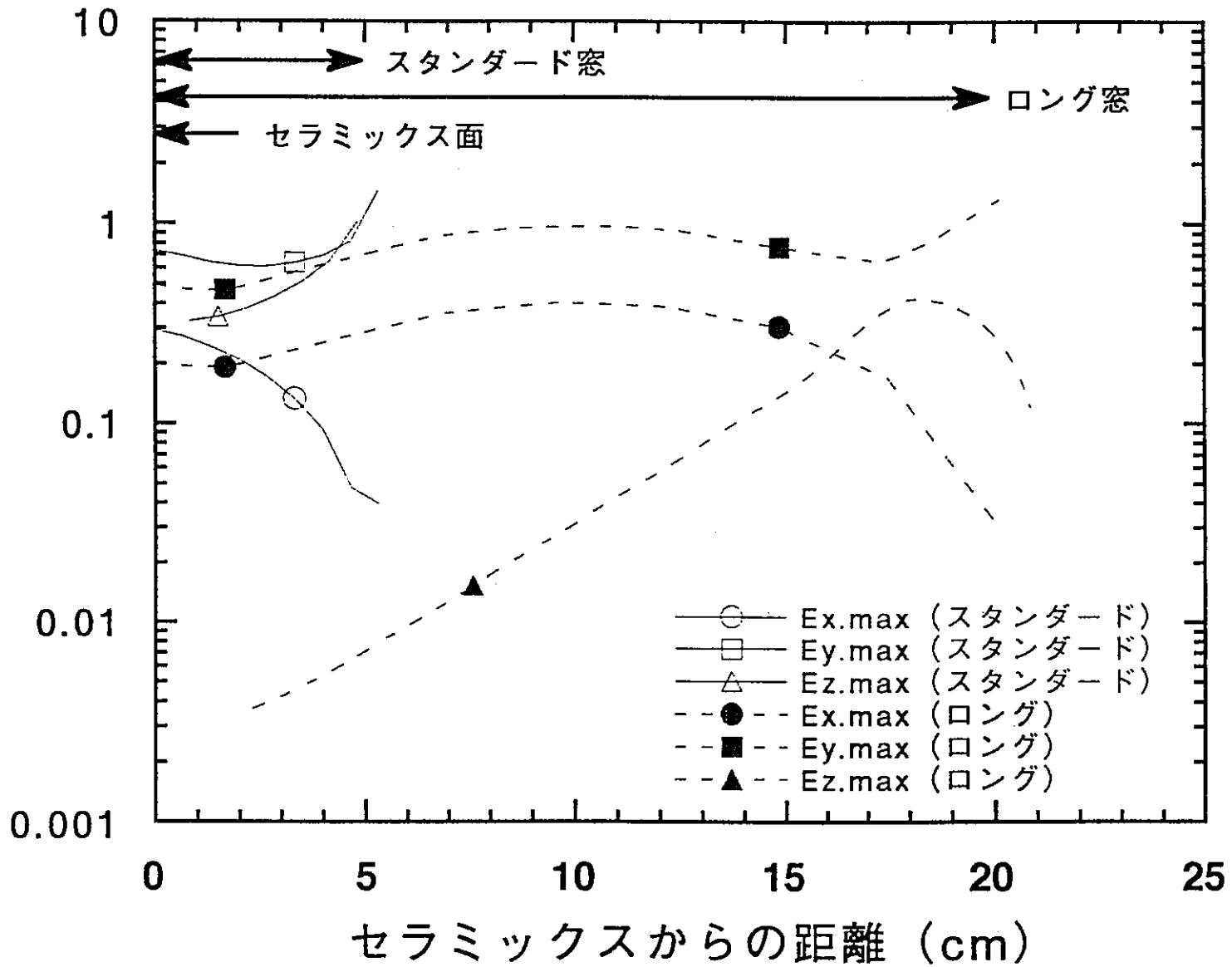


図3.3 窓内部最大電界分布図

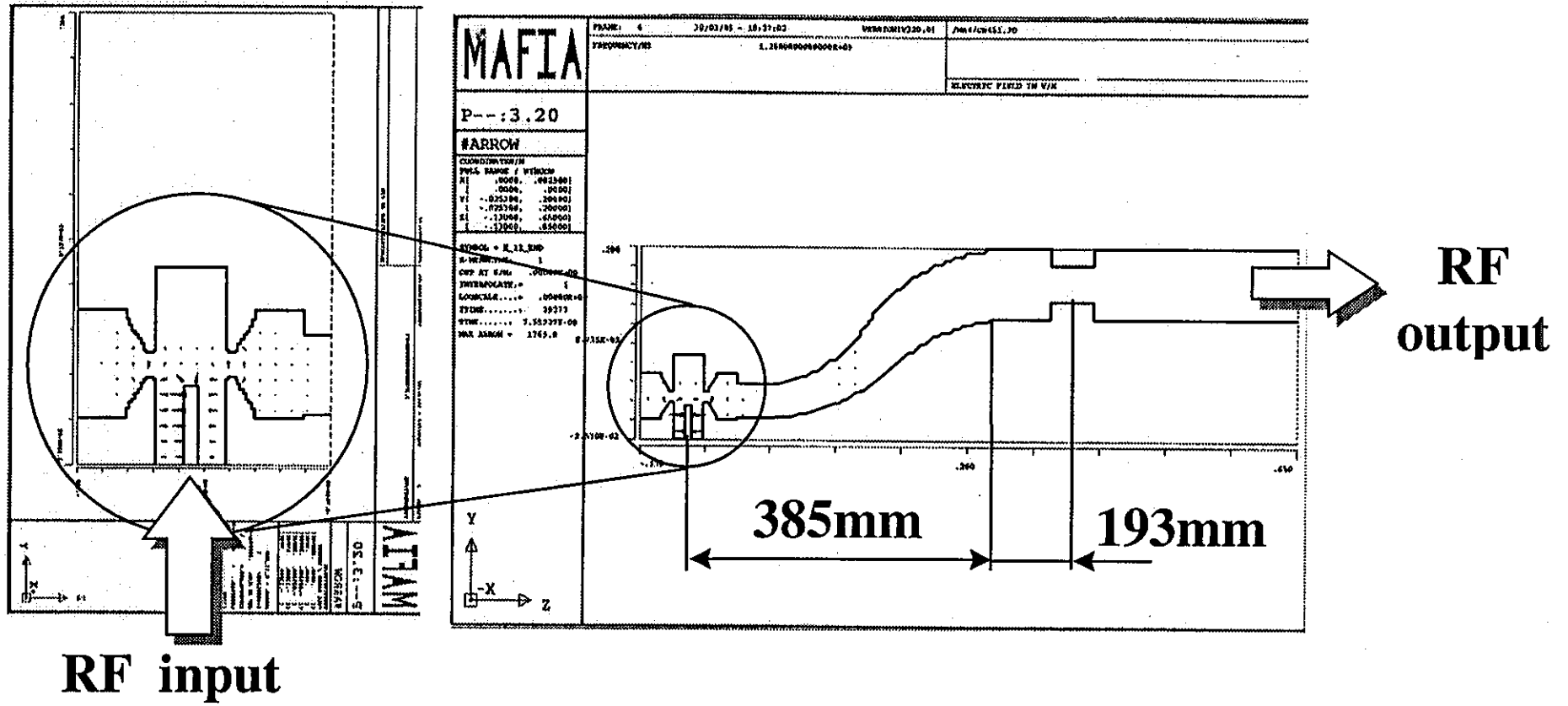


図3.4 Q_e 値が最小となる反射体設置位置を求める計算体系

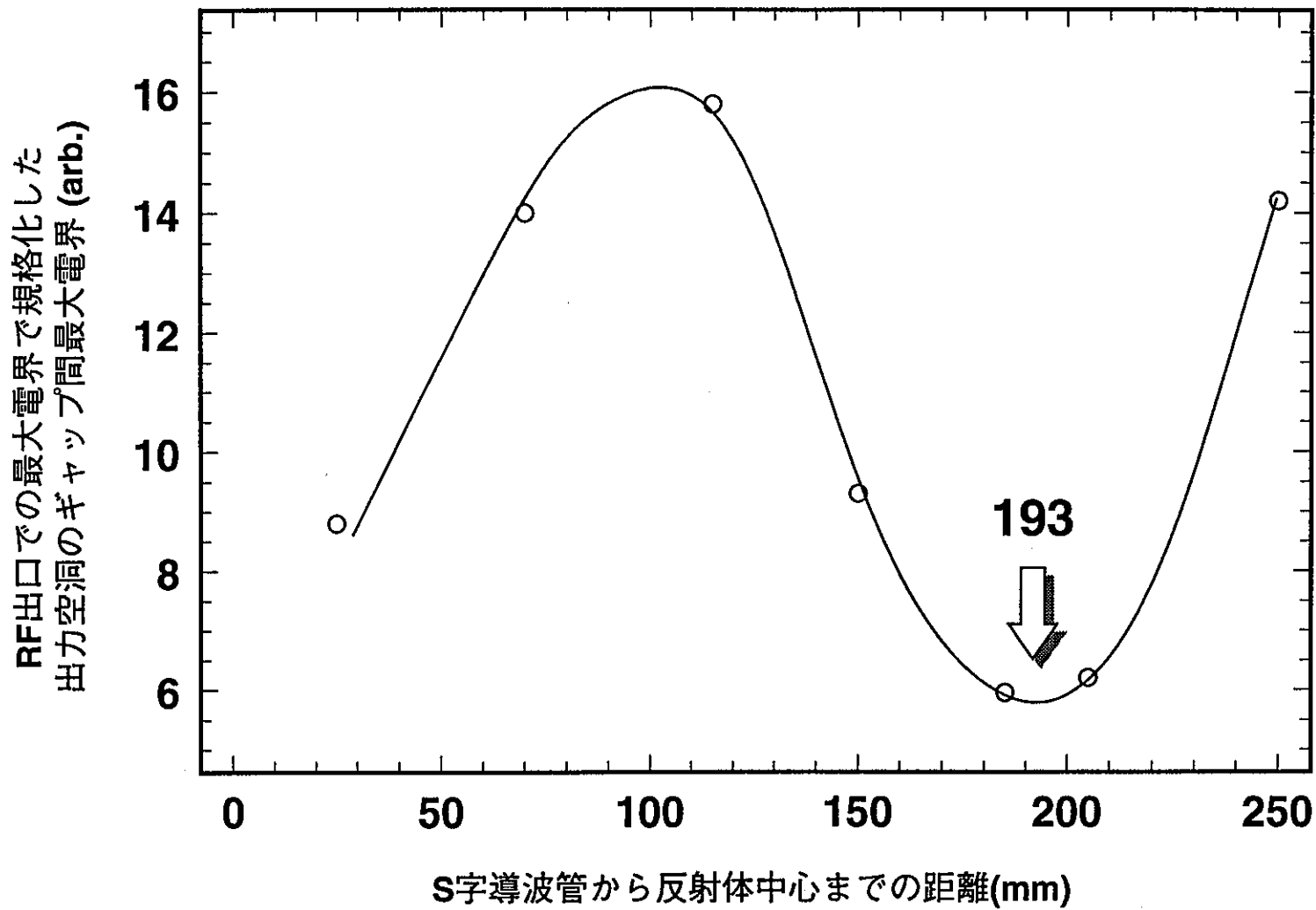


図3.5 反射体位置とギャップ間電界との関係

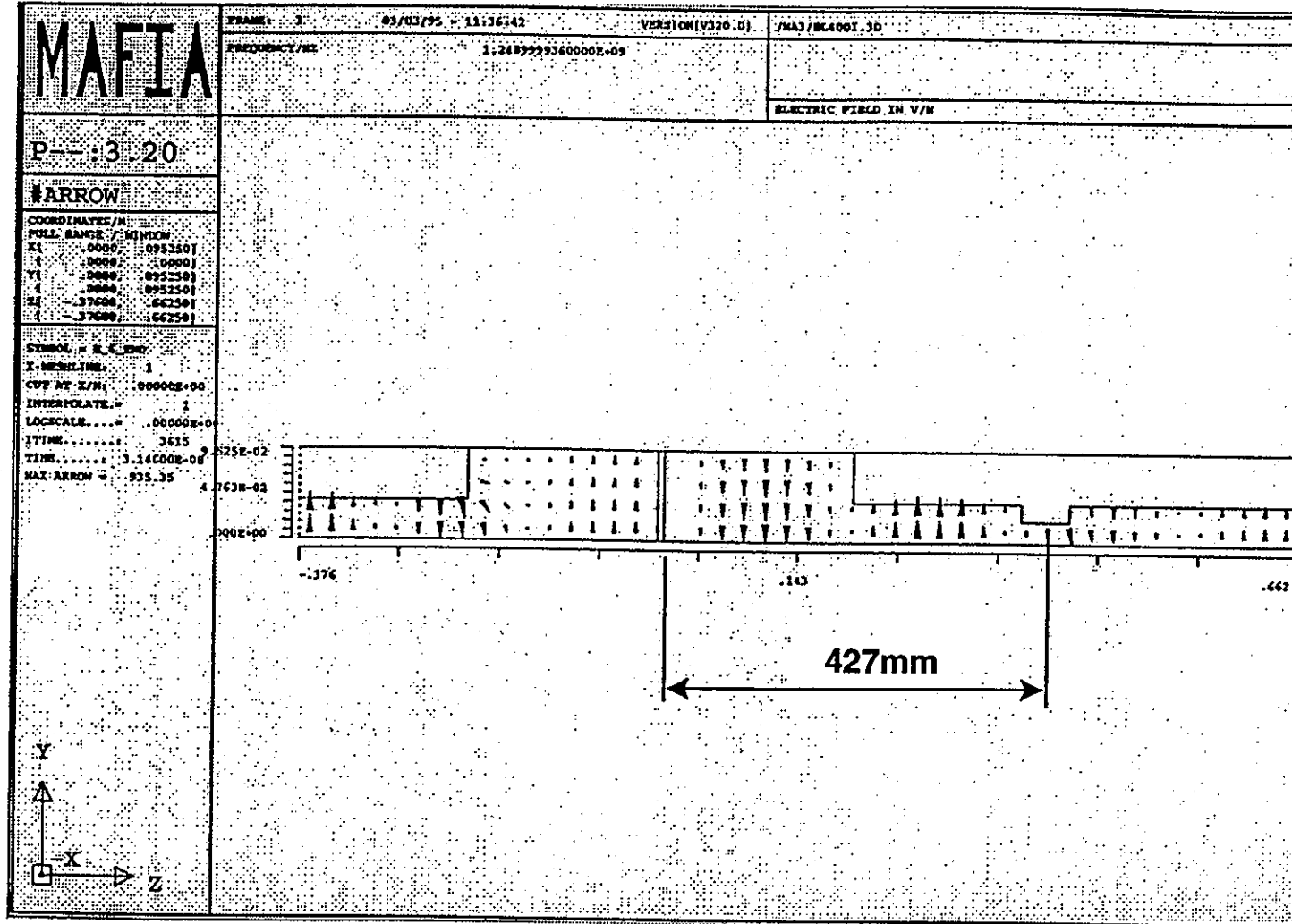


図3.6 ロング窓のセラミックスパワロスに無関係な反射体設置位置を求める計算体系

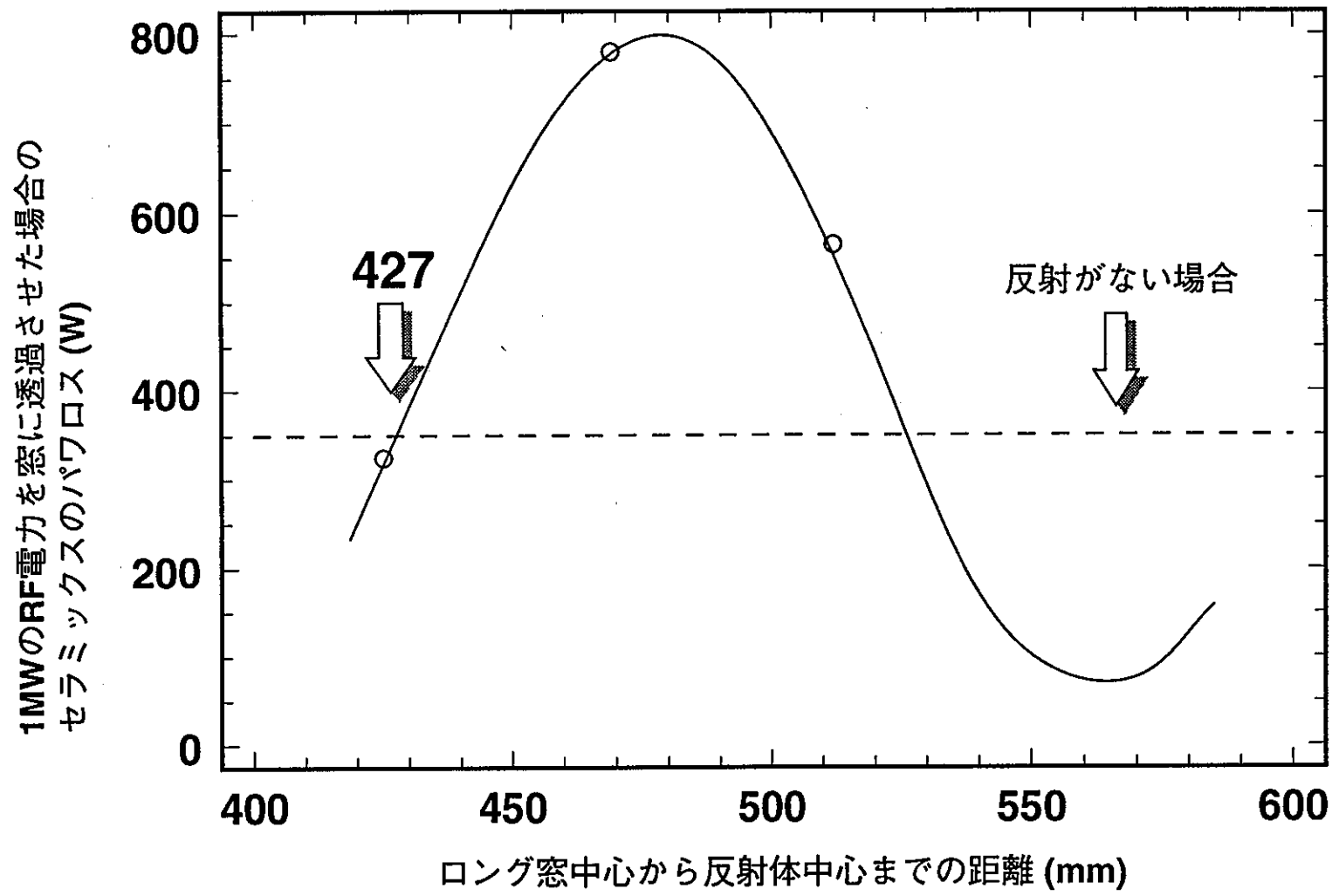


図3.7 反射体位置と窓のパワロスとの関係

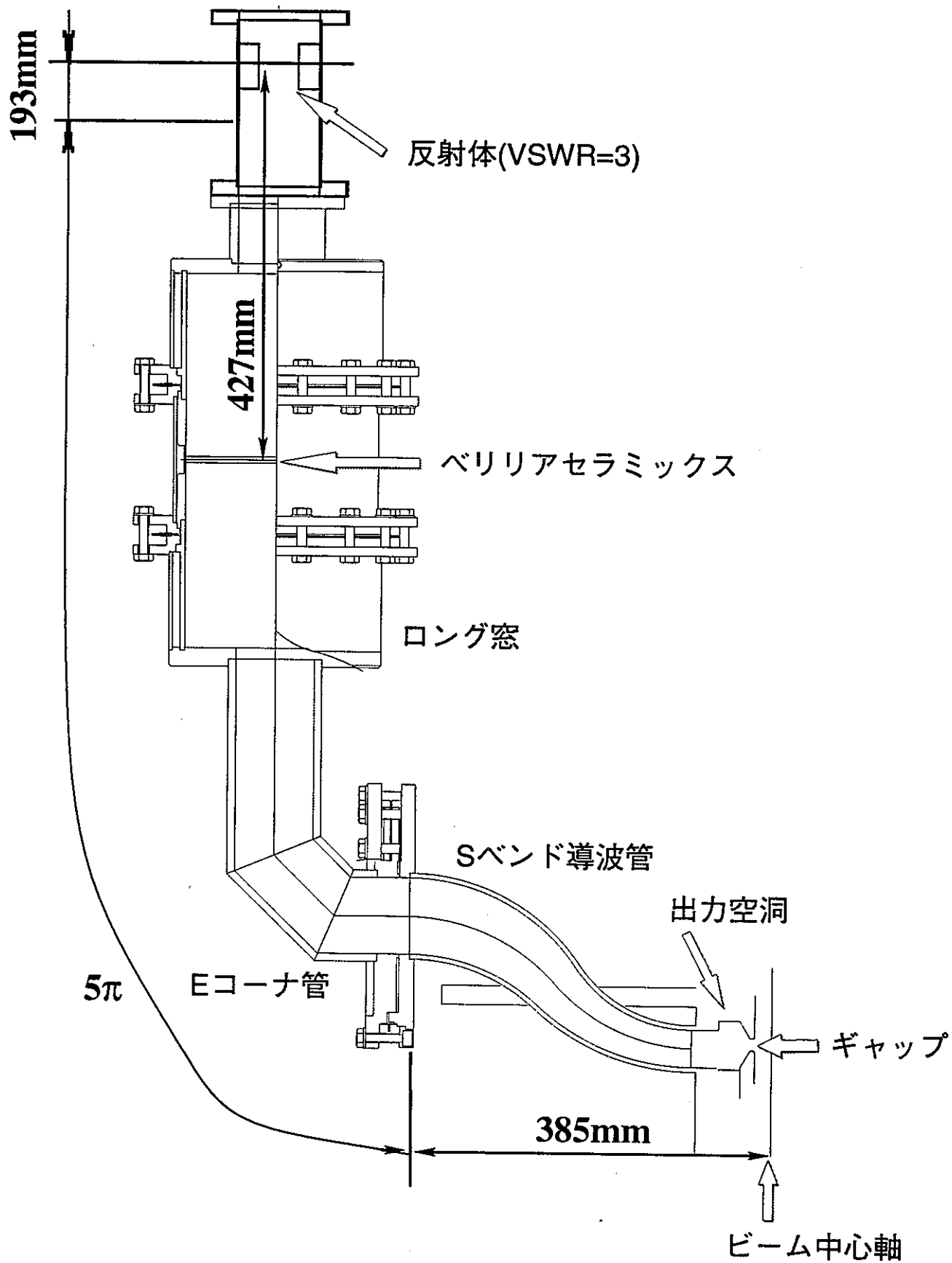


図3.8 出力空洞から反射体までの構成図

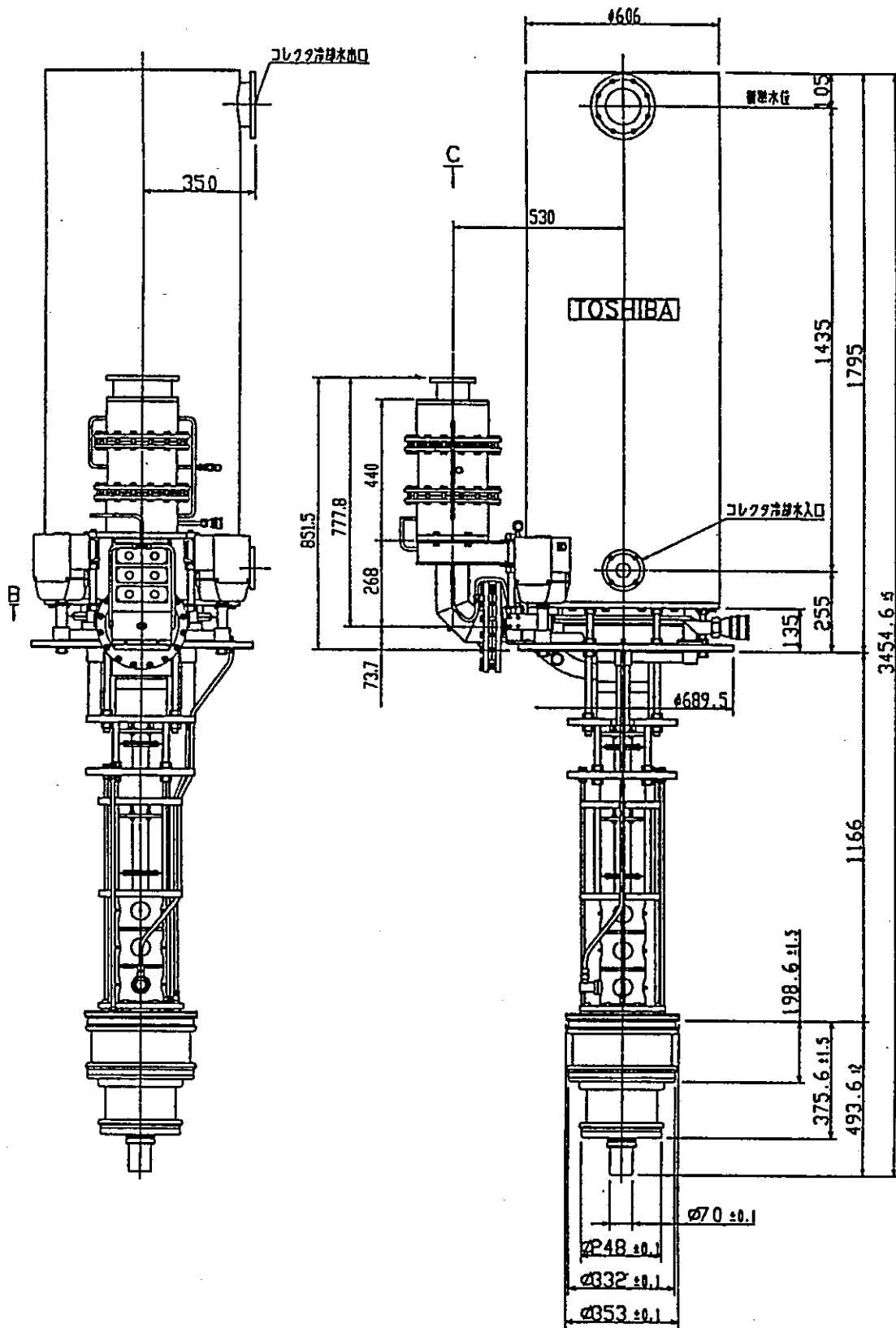


図3.9 クライストロン外形図
(クライストロンNo.2、クライストロンNo.3)

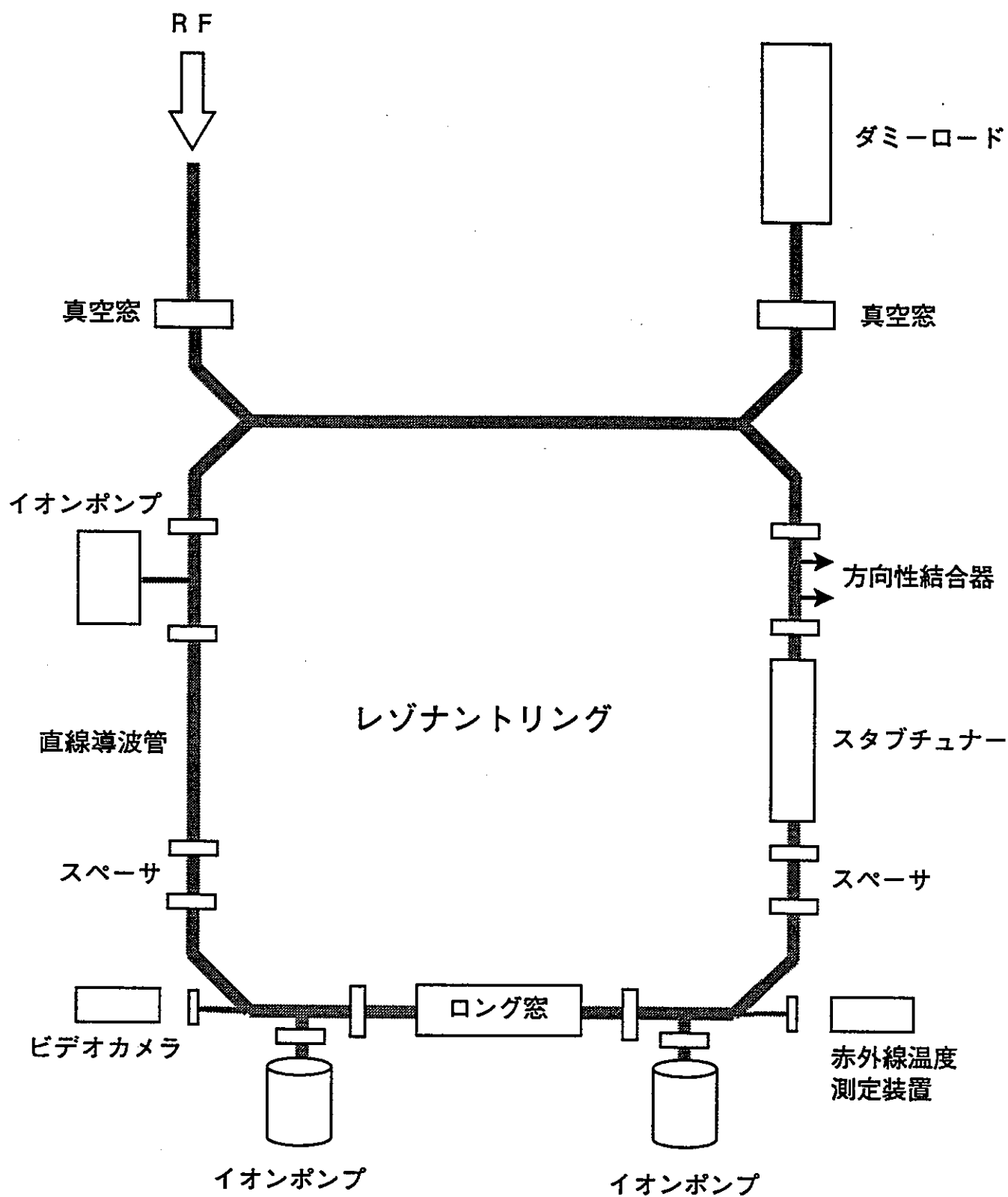


図4.1 窓試験体系図

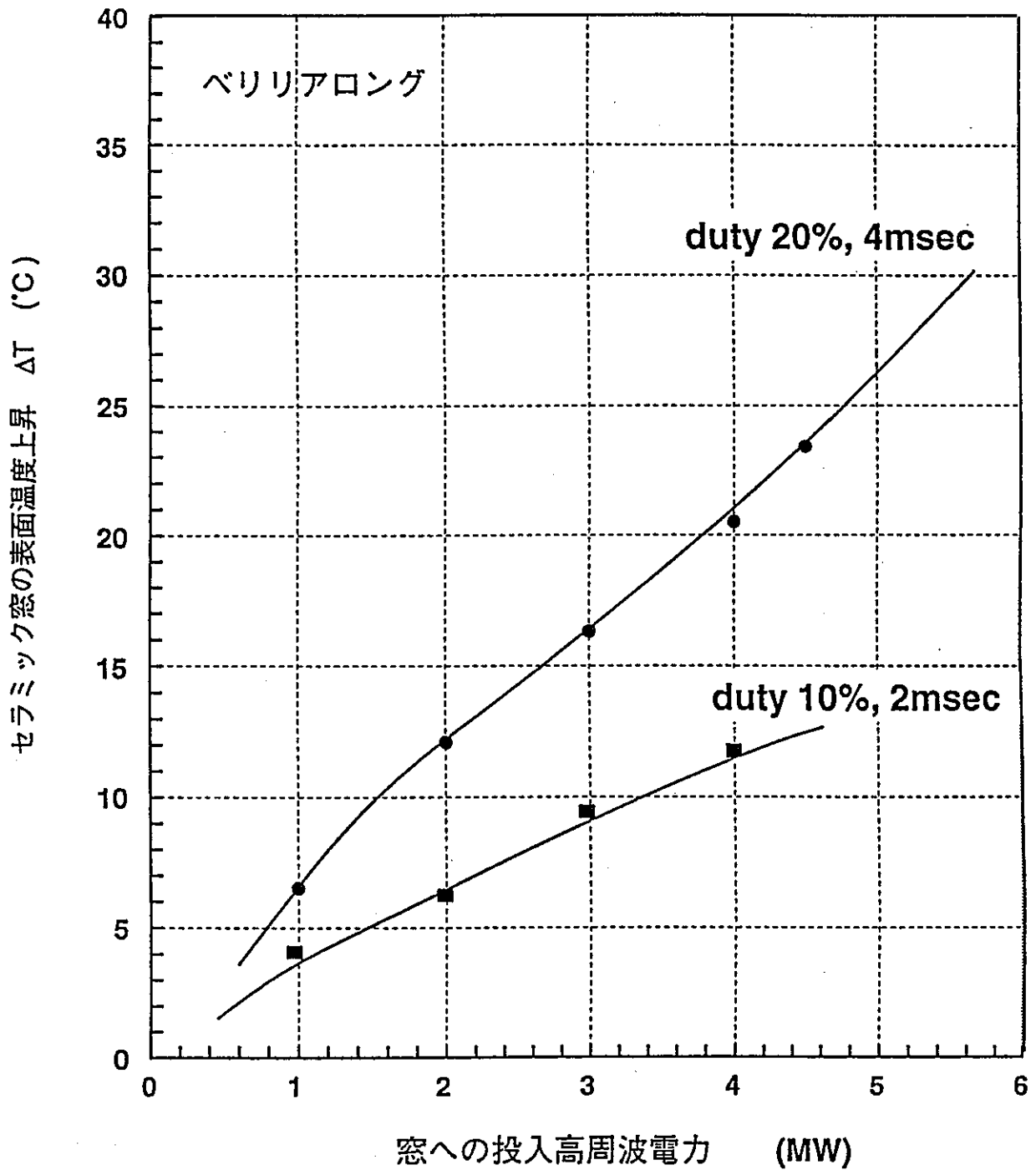


図4.2 還流電力とロング窓のセラミックス表面温度との関係

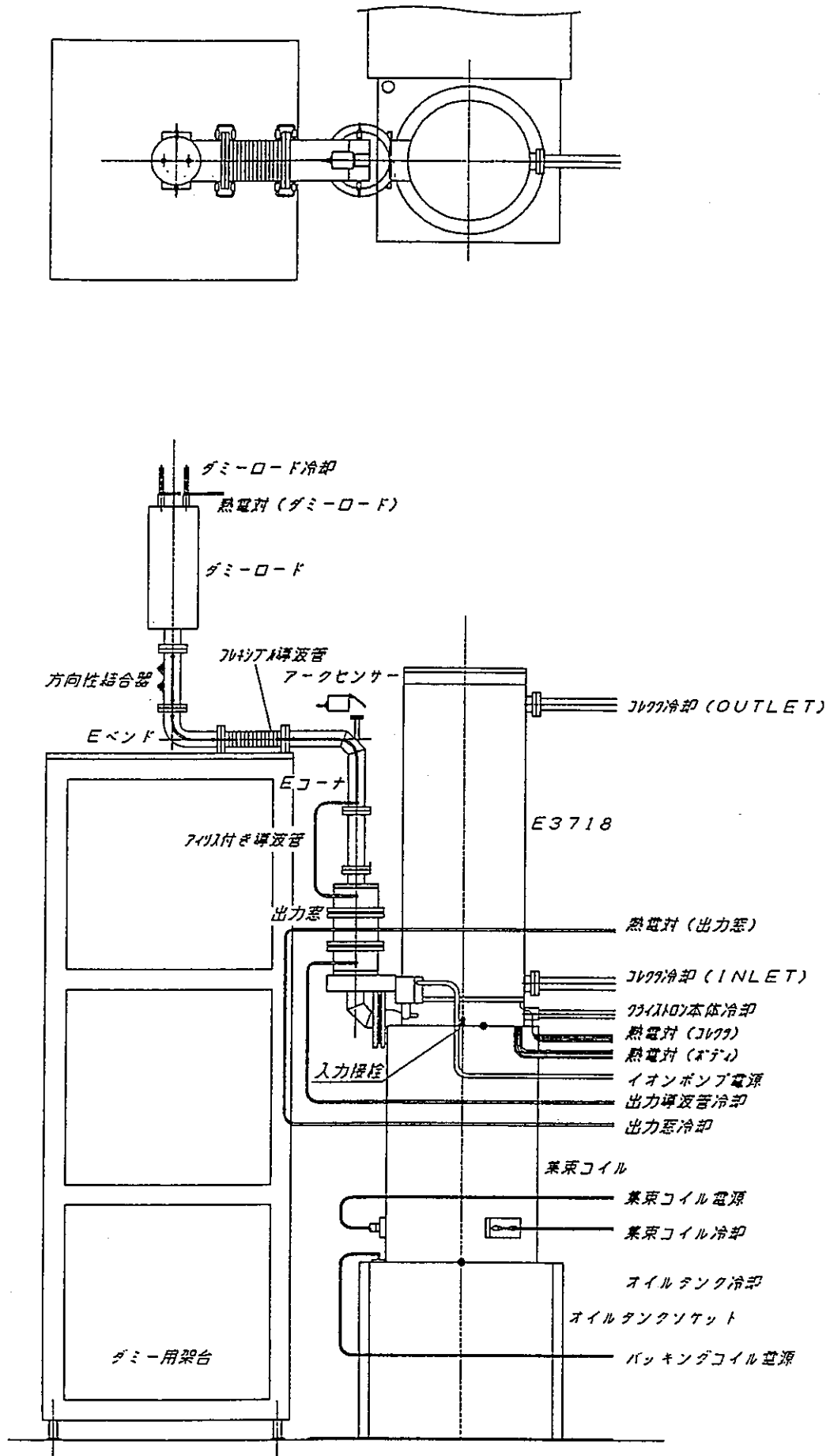


図5.1 パルスモードの試験体系

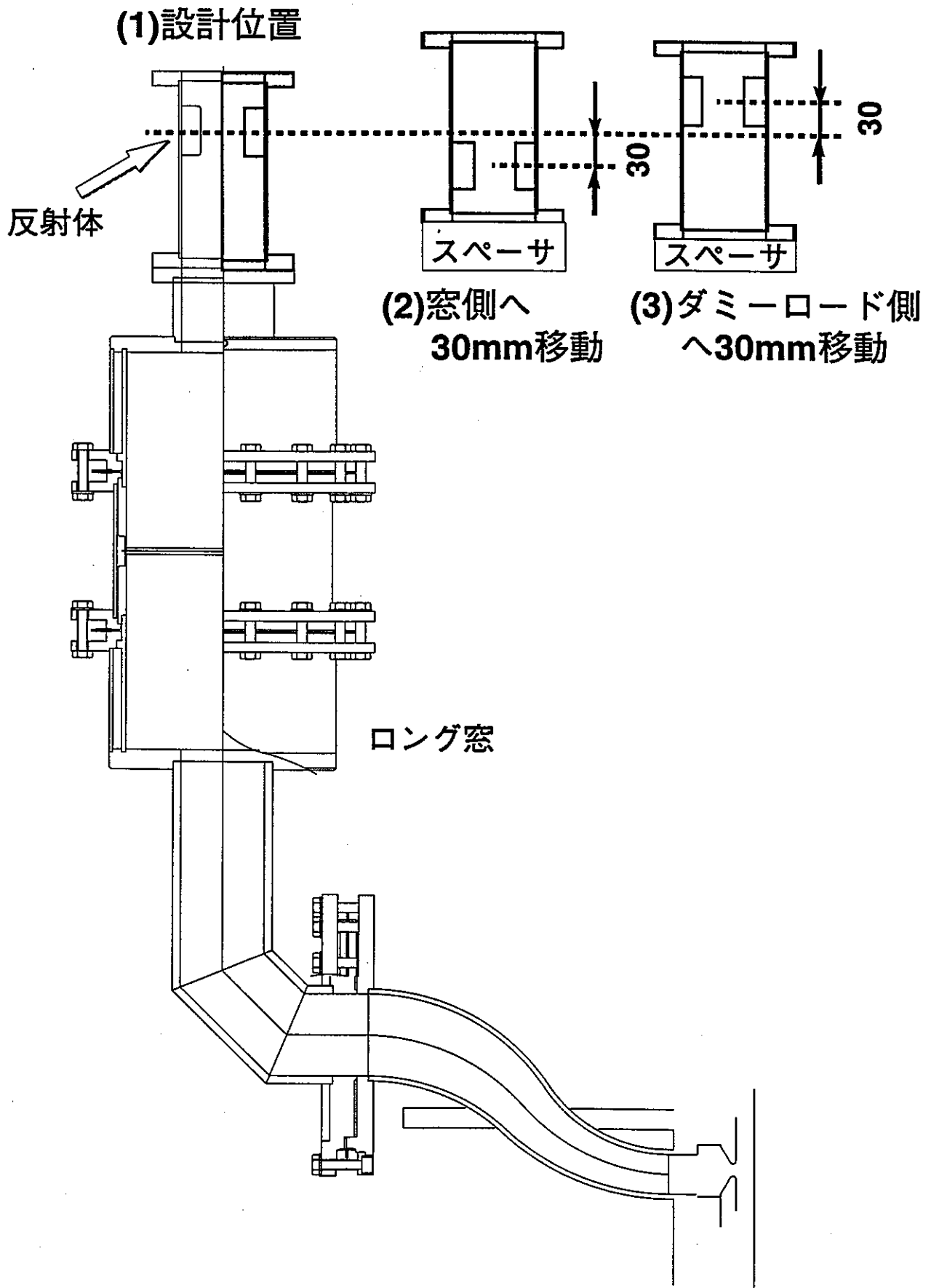


図5.2 出力電力の波形測定における反射体設置位置

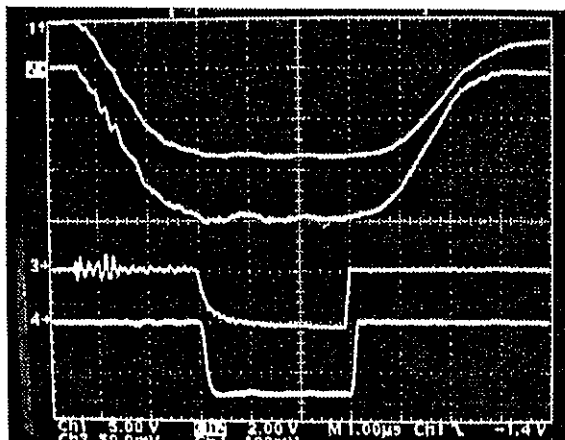
試験条件

ビーム電圧(Ch1)、135 kV
 カソード電流(Ch2)、58.8 A
 パルス幅、3 μ sec
 繰返、400pps
 集束コイル電流No.1-4、17 A
 集束コイル電流No.5、12 A
 補助コイル電流、5.0 A

(1)設計位置

励振電力(Ch3)、8W
 出力電力(Ch4)、3.7MW

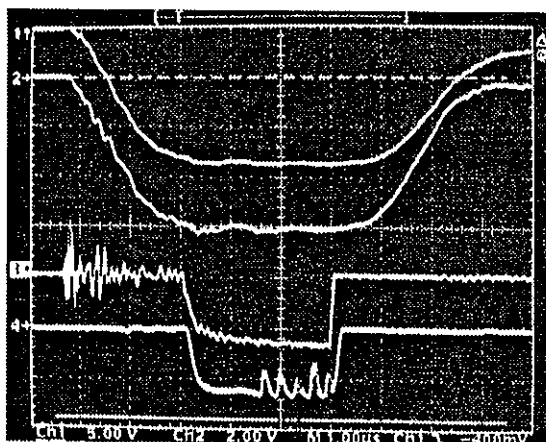
(1)



(2)窓側へ30mm移動した位置

励振電力(Ch3)、3.5W
 出力電力(Ch4)、3.1MW

(2)



(3)ダミーロード側へ30mm移動した位置

励振電力(Ch3)、2.2W
 出力電力(Ch4)、2.4MW

(3)

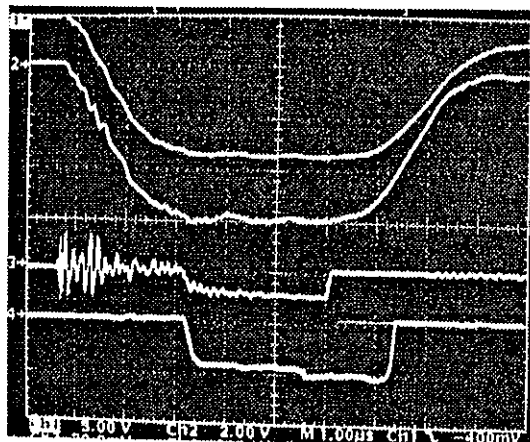


図5.3 クライストロンNo.2の出力電力の波形測定結果

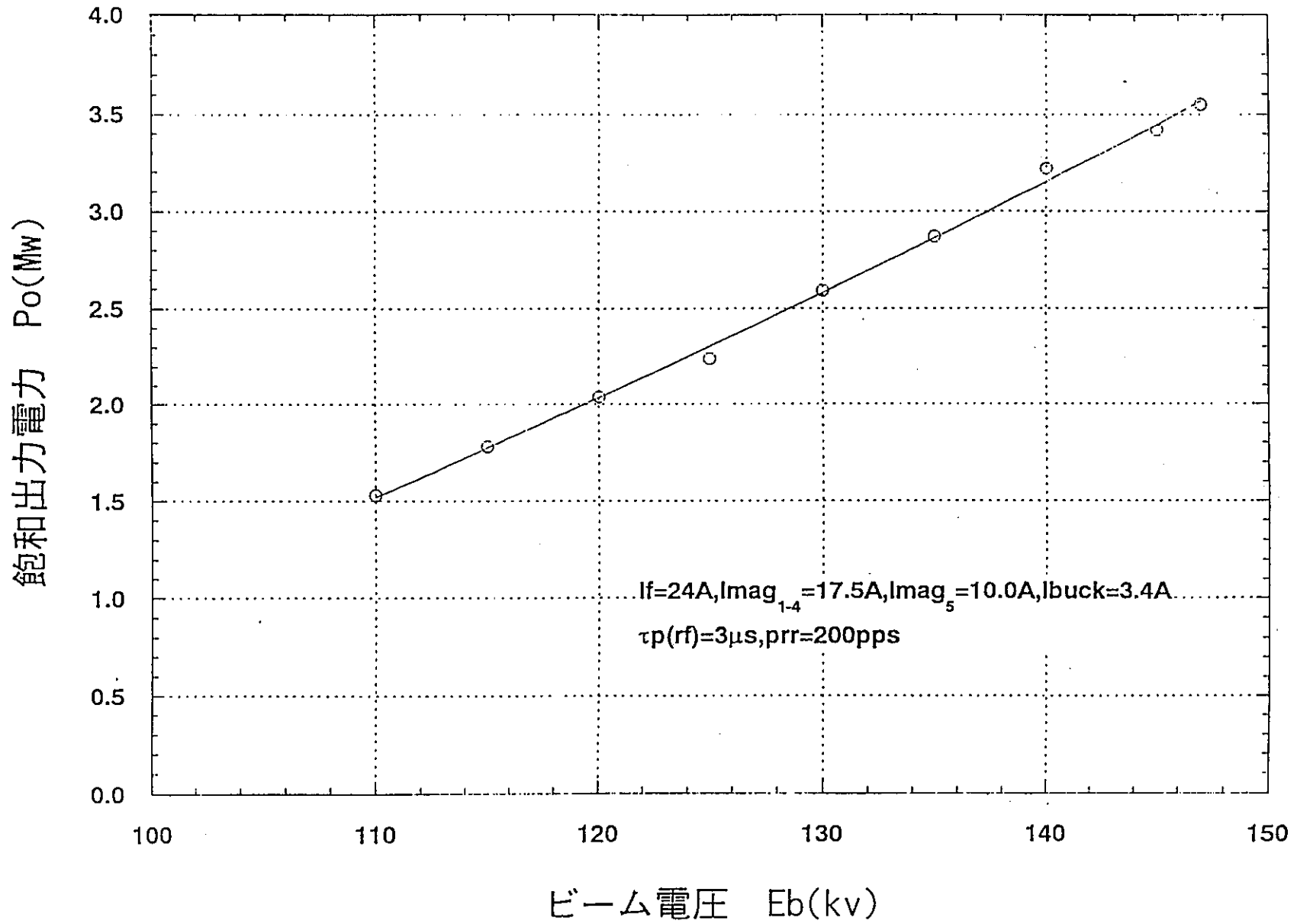


図5.4 クライストロンNo.3の出力電力の測定結果

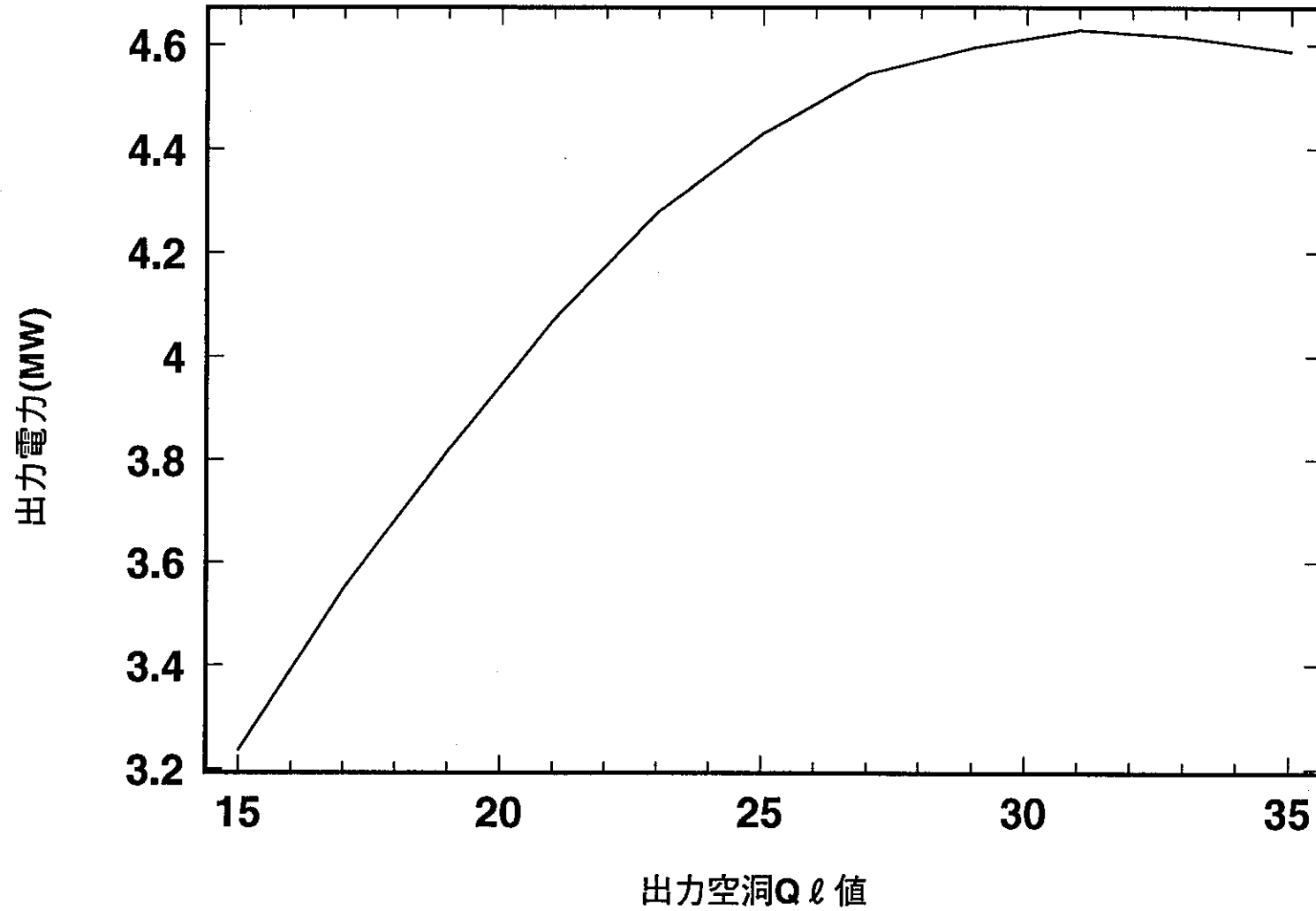
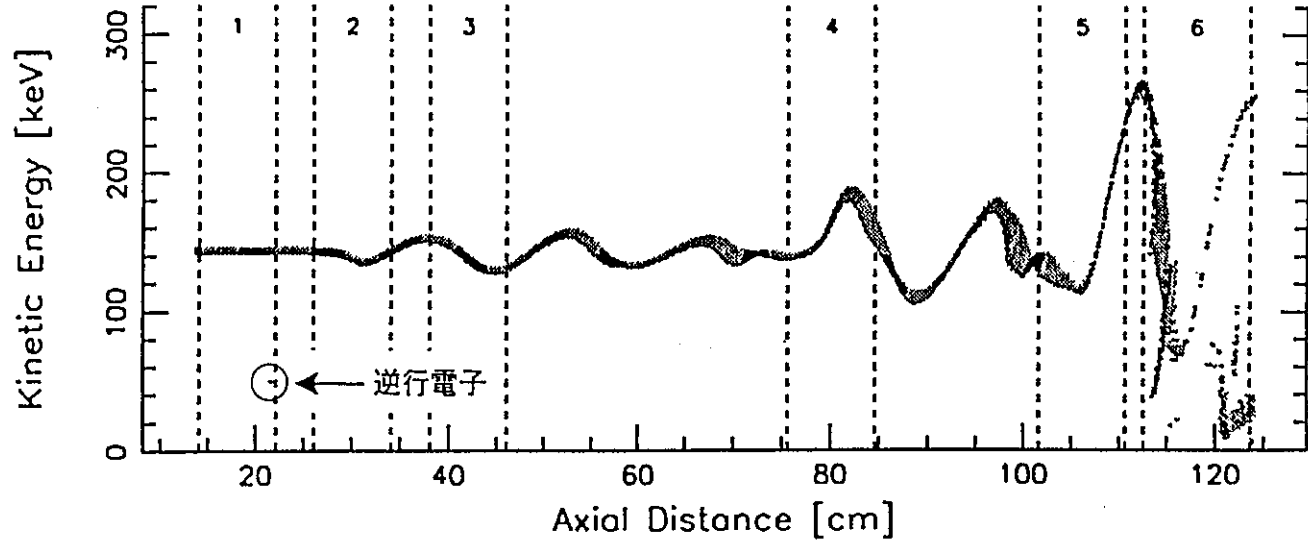


図6.1 ビーム電圧147kVでのQ値に対する出力電力特性

Phase
4 / 64 (2π rad)



Phase
28 / 64 (2π rad)

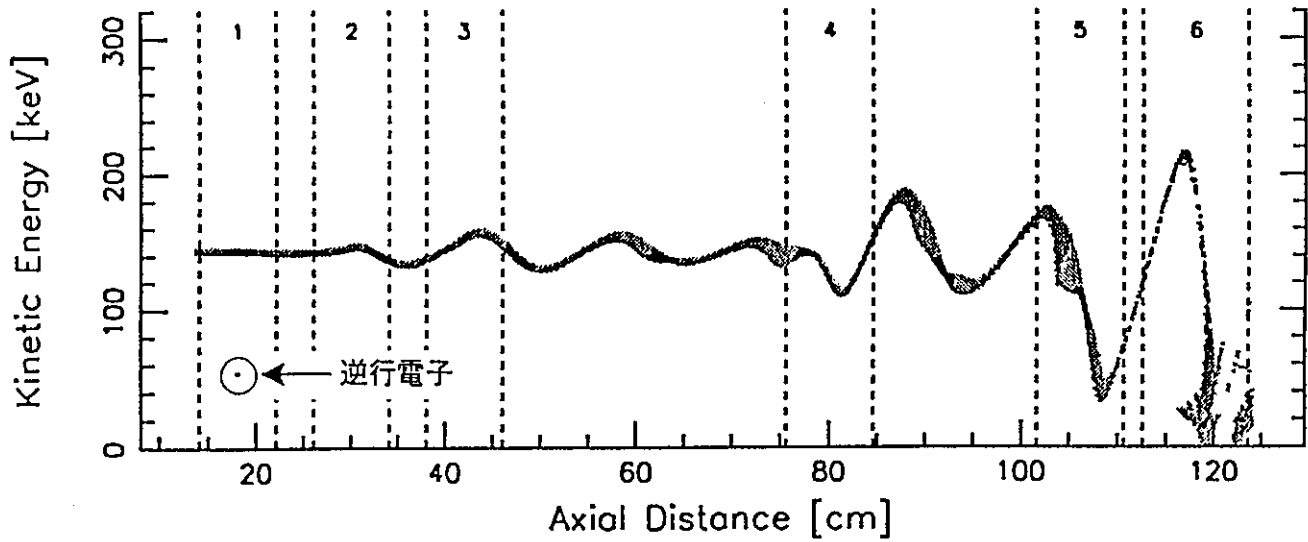


図6.2 Q l 値=31の場合の逆行電子の様子