

分置

# 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—

1996年3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。

〒311-13 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

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-machi, 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) 1995

## 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—

平野耕一郎\*、江本隆\*、王元林\*\*、榎本收志\*\*\*、佐藤勇\*\*\*\*

### 要旨

[目的] 開発中の大電力CW電子線形加速器では、電子線加速のための周波数1.249135(GHz)、強度1.2(MW)の大電力RF(Radio Frequency:高周波)が必要となり、これを発生させるためのクライストロンの開発も進めている。この開発では、平成3年度にCWモードにおいて出力電力330kW、パルスモード(パルス幅50msec、繰り返し1sec)においてピーク出力電力780kWで動作するクライストロンの開発を行った。平成4年度にロング窓の設計及び製作を行い、この窓の耐電力試験を実施し、1.7MW(CW)に耐えることを確認した。今回はこれに続いて、試作クライストロンの出力窓をロング窓と交換し、高出力試験を実施して窓の耐電力を再度確認し、今後の大電力化に向けた設計方針を検討する目的で試験を行った。

[方法] 耐電力試験を実施したロング窓と試作クライストロンの出力窓とを交換し、改造したクライストロンの高周波出力試験を実施した。改造クライストロンの出力効率とロング窓上昇温度を測定した。

[結果] 改造クライストロンはビーム電圧85kV、出力効率46%で最大出力電力885kW(CW)が得られた。また、この時のロング窓上昇温度は36°Cであった。出力効率の向上を図るため、高周波相互作用部及び電子軌道の再検討を行った。検討結果を反映した条件で出力効率の計算を精度の高いコードを使用して行った結果、出力効率70%が得られることが分かった。

[結論] 改造クライストロンのロング窓は目標出力電力に十分耐えられることができた。現状の出力効率は低いが出力効率の向上を図ることによって、目標とする大電力を達成する見通しが得られた。今後は、再検討結果を反映したクライストロンを製作し出力試験を行う予定である。

\* 大洗工学センター技術開発部先進技術開発室

\*\* 大洗工学センター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)

\*\*\* 大洗工学センター技術開発部先進技術開発室客員研究員

(高エネルギー物理学研究所助教授)

\*\*\*\* 大洗工学センター技術開発部先進技術開発室客員研究員

(高エネルギー物理学研究所教授)

## Development of High Power Klystron (1)

K.hirano\*,T.emoto\*,Y.L.Wang\*\*,Y.Enomoto\*\*\*,I.Sato\*\*\*

### Abstract

(Objectives) A high power klystron that generates 1.2 MW radio frequency at 1.249135GHz is required for the high power CW electron linac development. The first prototype klystron was limited RF output of 330kW with CW-mode operation and 780kW with pulse-mode operation (50 msec pulse width, 1 pps) because the window temperature reached near the critical point of destruction by thermal stress. A long pill-box type beryllia window (long pill-box window) was designed and measured using a resonant ring in high power experiment. The long pill-box window withstood the RF output of 1.7MW(CW), that has been verified by the high power experiment.

(Method) The standard pill-box prototype klystron was replaced with the long pill-box window. The high power test was carried out with the converted klystron. We measured maximum CW RF output power and observed the surface temperature rise of the ceramic window in the long pill-box.

(Results) The temperature increase was 36 degrees with the long pill-box window when the klystron has achieved CW RF output power of 885kW, efficiency of 46%, and beam voltage of 85kV in present. The klystron has been optimized by simulation codes to improve better efficiency. The calculation shows the maximum efficiency is 70% using optimum parameters.

(Conclusions) It was shown that the long pill-box window converted klystron had maximum transmission power that was fully satisfied with specifications of the high power klystron. The klystron with these results will be manufactured and the high power test will be carried out in 1997.

\* Frontier Technology Section, Technology Development Division,OEC.

\*\* Frontier Technology Section, Technology Development Division,OEC.

Visiting Scientist from Nanjing University.

\*\*\* National Laboratory for High Energy Physics.

## 目次

1. はじめに	1
2. 改造クライストロン	2
2. 1 開発項目及び改良点	2
2. 2 改造クライストロン	2
3. 高周波出力試験	4
3. 1 試験体系	4
3. 2 CW出力試験	4
3. 2. 1 出力効率	4
3. 2. 2 ロング窓セラミックスの温度上昇	5
4. 考察	6
4. 1 改造クライストロンのロング窓耐電力の評価	6
4. 2 出力電力の高効率化検討	6
5. まとめ	8
6. 謝辞	9
7. 参考文献	10

## 表リスト

表1 クライストロンの基本仕様

## 図リスト

- 図2.1 クライストロンの動作原理図
- 図2.2 ロング窓の断面構造図
- 図2.3 試作クライストロンのスタンダード窓部
- 図2.4 改造クライストロンのロング窓部
- 図2.5 改造クライストロン全体図
- 図3.1 改造クライストロンの試験体系
- 図3.2 ソケット天盤部のバッキングコイル
- 図3.3 バッキングコイルの電流の変化に対する出力効率（ビーム電圧80kV）
- 図3.4 ビーム電圧に対する出力効率
- 図3.5 RF電力に対するロング窓のセラミックス表面の上昇温度
- 図4.1 Sバンド導波管
- 図4.2 改造クライストロンの電子銃部及びドリフト管部の電子軌道解析
- 図4.3 第4空洞及び第5空洞の離調周波数の変化に対する出力効率
- 図4.4 出力空洞のQ値の変化に対する出力効率(離調周波数を30MHz)
- 図4.5 ドリフト管軸上の電子のエネルギー分布

## 1. はじめに

大電力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を連続波(以下、「CW」と言う。)で、かつ、高効率で得られるLバンドクライストロンの開発を進めている。クライストロン開発の課題としては大きく分けて大電力化と高効率化の2つある。平成2年度にショートパルスクライストロンを試作し、ショートパルス(パルス幅 $15\mu$ sec、繰り返し100pps)で動作特性試験を行い、ピーク出力電力1.2MW、効率63%が得られた。平成3年度には試作クライストロンを試作し、CWモードにおいて出力電力330kW、効率31%、パルスモード(パルス幅50msec、繰り返し1pps)でピーク出力電力780kW、効率46%が得られた。平成4年度にペリリアロング窓の設計及び製作を行い、この窓の耐電力試験を実施し、1.7MW(CW)に耐えることを確認した。ここでは、平成6年度に行ったクライストロンの大電力化のための出力窓部の改造についての報告を行う。

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、RFがこのセラミックスを透過するとセラミックスの誘電損失による熱が発生する。この熱応力によるセラミックスの破壊はクライストロンの致命的な故障となるため、耐電力の高い窓の開発を行うことがクライストロンの大電力化につながる。そこで、目標出力電力に耐え得るロング窓を開発した。この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。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。)のロング窓の耐電力を評価することを第1の目的とした。また、この試験結果を基に、クライストロンの高効率化のための検討を行うことを第2の目的とした。

## 2. 改造クライストロン

### 2. 1 開発項目及び改良点

クライストロンの開発目標は1.2MWのRF電力を連続的に65%の効率で出力することである。この目標を達成するためのクライストロンの開発項目として以下の点が挙げられる。クライストロンの基本仕様を表1に示す。

#### 1) 開発項目

##### ①出力電力の向上

窓の発熱には誘電損失による発熱の他に高周波が窓を透過するときに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（マルチバクタリング）<sup>(1)</sup>による発熱がある。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。

##### ②出力効率の向上

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団が行われる。最も集団の高まつ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。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。

#### 2) 改良点

ロング窓は熱伝導率の高いベリリアを窓材として採用し、窓部における電界が従来の出力窓であるスタンダード窓よりも低いので誘電損失による発熱を低減できる特徴がある。このロング窓はレゾナントリングを使用した耐電力試験において1.7MW(CW)の電力に耐えることを確認した。ロング窓の断面構造図を図2.2に示す。スタンダード窓を出力窓に採用した試作クライストロンの出力電力は、窓の発熱のため330kW(CW)に制限されている。そこで、試作クライストロンのスタンダード窓と耐電力試験を行ったロング窓とを交換する改造を行った。

これによって、今回は上記開発項目の内、出力電力の向上が図られる。

### 2. 2 改造クライストロン

ロング窓はセラミックス外周の円筒部が方形導波管のついた円筒部によって両側から挟まれた形状になっている。これらの円筒部は冷却構造を有し、3分割できる構造になっている。今回の改造に際し、図2.2に示す点線で囲んだ一部分を取り外した。試作クライストロンのスタンダード窓部を図2.3に示す。スタンダード窓部は円形フランジで固定されているので、図に示す窓部を取り外した。片側が円形フランジ、もう片側がロング窓の円筒部の一部となっている導波管をクライストロンの円形フランジに接続し、さらに、先程の分割したロング窓を接続した。この接続図を図2.4に示し、改造クライストロンを図2.5に示す。クライストロン全体をロー付けす

る際に直径約1.6mの真空容器を被せるため、ロング窓を導波管で曲げて真空容器と干渉しないように接続した。このため、ロング窓は出力空洞部を直視ししないような位置にある。

窓を交換する際、真空が破られ電子銃のカソードが空気にさらされる。これによって、カソードから電子が放出される割合が低下するため、電子銃の交換も行った。

### 3. 高周波出力試験

#### 3. 1 試験体系

試験はメーカ工場のクライストロン電源及び冷却設備を使用して行った。改造クライストロンの試験体系を図3.1に示す。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、クライストロン内の電子ビームと相互作用を起し、1MW以上の電力がロング窓を通って出力される。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吸収される。ロング窓及び導波管等は水冷却され、クライストロンの電子ビームが当たるコレクタは蒸気冷却されている。

改造クライストロンのロング窓の耐電力を調べるためにCW試験を実施した。

#### 3. 2 CW試験

出力電力 $P_0$ の $1/10^7$ の電力を方向性結合器から取り出し、電力の相対値をパワーメータで測定した。ダミーロードの冷却水量 $1000 \text{ l/min}$ と冷却水上昇温度から水に負荷された熱量を算出し、導波管におけるパワロスを加えて、出力電力の絶対値を求めた。パワーメータの相対値と出力電力の絶対値を比較してパワーメータの指示値の較正を行った。出力効率が最大になるように集束磁界の調整を行った後に、ロング窓のセラミックスの温度上昇を以下のように測定した。

#### 3. 2. 1 出力効率

集束磁界調整用のコイル(以下、「バッキングコイル」と言う)は集束コイルから電子銃付近へ浸入してくる磁界分布を調整するために、図3.2に示すようなソケット天盤部に設けられている。バッキングコイルは集束コイルの軸方向の磁界と極性を反対にして集束コイルの磁界を弱める方向に取り付けられている。この磁界を調節することによって、電子銃から高周波相互作用部に入射する電子ビーム形状を容易に変化させることができる。ビーム電圧80kVにおけるバッキングコイルの電流の変化に対する出力効率を図3.3に示す。バッキングコイルの電流が大きくなるほど出力効率は7%程度高くなったが、0.7A以上ではビームがボディ部に当たるようになりクライストロン内部の真空が悪くなつた。そこで、バッキングコイル電流を0.6Aに設定し、ビームがボディ部へ当たらず最大効率が得られる条件で試験を行つた。空間電荷制限されたカソード電流はアノード電圧の $3/2$ 乗に比例する。また、この比例定数はガンバービアンス<sup>(2)</sup>と呼ばれ電子銃の電極形状によって決まる。しかし、クライストロンパービアンスはカソード電流の大きさによって任意に変えられる。そこで、クライストロンパービアンスが一定になる条件でビーム電圧に対する出力効率の比較を行つた。この結果を図3.4に示す。

$$\eta = P_0 / V_b / I_k$$

$\eta$ : 出力効率、 $P_0$ : 出力電力、 $V_b$ : ビーム電圧、 $I_k$ : カソード電流

$$P_{\text{gun}} = I_k / V_a^{1.5}$$

$P_{\text{gun}}$ : ガンパービアンス、 $V_a$ : アノード電圧

$$P_{\text{kly}} = I_k / V_b^{1.5}$$

$P_{\text{kly}}$ : クライストロンパービアンス

改造前のクライストロンの出力効率は窓への熱負荷の少ないパルス試験(ピーム幅50msec、繰り返し1pps)で測定した。この結果を図3.4に示し、バッキングコイルを使用しなかった改造前の出力効率とバッキングコイルに0.6A流した場合の改造後の出力効率とをパービアンスが同じ条件で比較した。改造前後で5%程度の出力効率の差が生じているが、これは図3.3に示したバッキングコイル電流0.6Aを加えた場合の出力効率の増加に対応するものである。よって、電子銃の交換の改造による出力効率の変化は生じていないといえる。

改造クライストロンのCW試験で最大出力効率が47%となった時、目標出力電力1.2MWに達する前にコレクタへ負荷される電力が設計限界である1MWに達した。このため、これ以上の出力上昇を中止した。

### 3. 2. 2 ロング窓セラミックスの温度上昇

ロング窓のセラミックスの周囲は水冷却されているので、セラミックスの中心部分と外周部の温度との間に温度勾配が生じる。この温度勾配が急になり、熱応力がセラミックスの強度を上回るとセラミックスが破壊される。温度差が80°Cの時の熱応力はセラミックスの強度の1/2以下であることが計算で求められている。材質の違いや誘電体損失以外による発熱が考えられるので、余裕を見て80°Cをセラミックスが破壊されない最大の温度差とした。

ロング窓上部に接続したEコーナののぞき窓に赤外線温度測定装置を設置し、窓表面の中心部の温度を観測した。窓表面の上昇温度は赤外線温度測定装置で測定した表面温度から冷却水入口温度を差し引くことによって求めた。ロング窓のセラミックと同種類のセラミックスの表面に熱電対を付け、板状電熱器で暖めた。また、赤外線温度測定装置でも測定した。熱電対の測定温度と赤外線温度測定装置の測定温度とを比較し、赤外線温度測定装置の値が熱電対の値と一致するように放射率を設定して赤外線温度測定装置の較正を行った。

出力電力に対するセラミックス表面の上昇温度の関係を図3.5に示す。最大出力電力885kWの時に窓表面の温度上昇は36°Cとなった。

## 4. 考察

### 4. 1 改造クライストロンのロング窓耐電力の評価

最大出力電力885kWの時の36°Cという窓上昇温度は設計値80°Cの半分以下であり、セラミックスの強度に十分余裕があることがわかる。図3.5より出力電力1.2MWにおける窓上昇温度は50°C程度と推測され、このときの窓の強度にも余裕があるので、窓の異常発熱が無ければ1.2MWの出力電力に耐えられるといえる。

耐電力試験におけるレゾナントリング内のRF電力に対するロング窓のセラミックス上昇温度を図3.5に示す。この耐電力試験によるロング窓上昇温度と改造クライストロンのロング窓上昇温度を比較すると、誤差以上の有為な差が生じた。両方の試験で用いた窓は同じであるため、材質の違いによる温度差では無い。窓自体の原因で発熱する他にクライストロンに窓を付けることによって発熱する原因があると考えられる。レゾナントリングの中には窓の温度上昇の引きがねとなる電子は無かったが、クライストロンの場合には電子ビームが存在する。クライストロン内の電子が何らかの原因となっている可能性もあるが、現在のところ温度上昇の原因は特定出来ていない。

### 4. 2 出力電力の高効率化検討

改造クライストロンの出力電力は改造前の約2.7倍に増加でき、出力窓の温度上昇も1.2MWまで耐えられることが確認できた。しかし、出力効率が47%と低くコレクタ負荷の制限を受けているので、1.2MWを連続的に出力できない状態である。そこで、出力効率化を高めるために、出力空洞部の形状、電子ビーム軌道、高周波相互作用部に関する検討を行った。

#### (1)出力空洞部の形状の最適化

出力電力は出力空洞から図2.4に示すようなSペンド導波管を通り出力される。改  
造クライストロンのSペンド導波管は構造が複雑であり、定在波比を最小にするよう  
な設計が困難であった。今回初めて3次元電磁界解析コードMAFIA<sup>(3)</sup>を用いて改造  
クライストロンのSペンド導波管の電磁界計算を行った結果、その定在波比は1.4で  
あった。このようにSペンド導波管のマッチングが悪かったので出力空洞の共振周波  
数が大きくなれたため、空洞壁を変形させる他にギャップ間隔も変えないと共振周  
波数を設計値に合わせることができなかった。ギャップ間隔が設計値通りにな  
っていなかったことが効率低下の一因と考えられる。そこで、Sペンド導波管が集束コイル  
やコレクタ等の外部構造物と干渉せずに、その定在波比が最小になるような形状  
をMAFIAで求めた。この結果を図4.1に示す。計算で求めたSペンド導波管を採用す  
ることによって、設計値通りの形状をした出力空洞をクライストロンに適用できる。  
る。

#### (2)電子ビーム軌道の最適化

ドリフト管においてビーム半径が大きくなったり小さくなったりするようなリップルの割合が大きいと効率は低下する。集束コイルから電子銃の方へ浸入する磁界<sup>(2)</sup>がこのような電子ビームの不安定性に大きく影響する。この磁界の最適化を行うことによってリップルの少ない安定したビームを作りだす必要がある。電子軌道計

道解析を行った。最大効率が得られたバックキングコイル電流0.6Aの場合の電子ビームのリップル量は±13.4%であった。そこで、集束コイルと電子銃の間にあるガンポールピースの穴径を大きくして集束コイルからの浸入磁界を大きくし、バックキングコイルの電流量で調整できる範囲を広げた。ガンポールピースの穴径を202mmとし、バックキングコイルの電流を1.4Aにした場合、電子ビームのリップル量を±6.6%にすることができた。計算結果を図4.2に示す。このリップル量の軽減によって効率の向上が期待できる。

### (3)高周波相互作用部の最適化

改造クライストロンでは高周波動作時の電子集群の解析は1次元のDMSコード<sup>(5)</sup>(Disk Model Simulation Code)を用いて行った。DMSコードでは電子ビームの広がり、ビームの空洞間隔との相互作用も平均値に置き換えているので、計算精度は低下する。そこで、より計算精度の高い2次元のFCIコード<sup>(6)</sup>(Field Charge Interaction Code)を用いて最大効率が得られる高周波相互作用部の条件を求めた。FCIコードでは電子ビームの集群の中心付近における電子ビーム自身の空間電荷で反発して径方向に広がることや中心と周辺の電子と空洞の相互作用が異なることなども考慮されている。

出力空洞の電子集群に最も影響を与える第4空洞及び第5空洞の離調周波数を変化させて出力効率の計算を行った。この計算結果を図4.3に示す。離調周波数が20MHzの時に効率曲線に歪みが生じたのは離調周波数が小さいために第5空洞で一気にビームを集めすぎて、その空間電荷効果によりビームが反発し逆行電子が発生したためである。現状設計は35MHzであるが、30MHzにすると効率が3%程度向上することがわかる。

離調周波数を30MHzとして出力空洞のQ値を変化させて出力効率の計算を行った。この計算結果を図4.4に示す。Q値が50と60の場合には出力効率にほとんど差はなかったが、Q値が40の場合に効率が5%低下した。次に、Q値が50と60の場合の電子のエネルギー分布を比較した。ドリフト管軸上の電子のエネルギー分布を図4.5に示す。逆行電子を表す電子がQ値60の場合にみられたが、Q値50の場合にはなかった。逆行電子は出力電力の不安定性を生じさせるため、逆行電子が発生しないような設計にしなければならない。

以上より、Q値50、離調周波数30MHzの場合に最高効率70%が得られると考えられる。

## 5.まとめ

改造クライストロンのロング窓の耐電力を調べるためにCW試験を実施した。改造クライストロンはビーム電圧85kV、出力効率46%で最大出力電力885KW(CW)が得られた。また、この時のロング窓上昇温度は36°Cであった。出力電力1.2MWにおける窓上昇温度は50°C程度と推測され、窓の異常発熱が無ければ1.2MWの出力電力に耐えられると考えられる。

コレクタへ負荷される電力の制限のために885kW以上の出力電力を出力するには出力効率の向上を図る必要性が生じた。そこで、出力空洞部の形状、電子ビーム軌道、高周波相互作用部に関する検討を行った。これらの改善を施すことにより出力効率を高めることができ、最高出力効率70%が得られる見通しが得られた。

今後、これらの結果を反映させたクライストロンを製作し試験する予定である。

## 6. 謝辞

高エネルギー物理学研究所の福田茂樹先生には試験及び結果について貴重な助言をいただきました。計算に協力していただいたNESIの加藤裕子さんに感謝します。

## 7. 参考文献

- (1) 斎藤芳男、"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
- (2) 桜庭一郎"電子管工学"、森北出版、P81
- (3) T.Weiland、"Maxwell's Grid Equations"、FREQUENZ、vol.44、P9、1990
- (4) W.B.Herrmansfelt, "EGUN-AN ELECTRON OPTICS AND GUN DESIGN  
PROGRAM", SLAC(1988)
- (5) H.Yonezawa, Y.Okazaki, "A ONE DIMENSIONAL DISK MODEL SIMULATION  
FOR KLYSTRON DESIGN", SLAC-TN-84-5(1984)
- (6) T.Shintake, "HIGH POWER KLYSTRON SIMULATIONS USING FCI - FIELD  
CHARGE INTERACTION CODE", KEK Report(1990)

表1. クライストロンのCWモードにおける基本仕様

項目	CWモード
動作周波数	1.249135GHz
目標出力電力	1.2MW
目標効率	65%
ビーム電圧	90kV
カソード電流	25A
ビーム電力	1.86MW
コレクタ最大負荷電力	1MW
入力電力	12W
飽和電力利得	50dB
ヒータ電圧	12V
ヒータ電流	24A

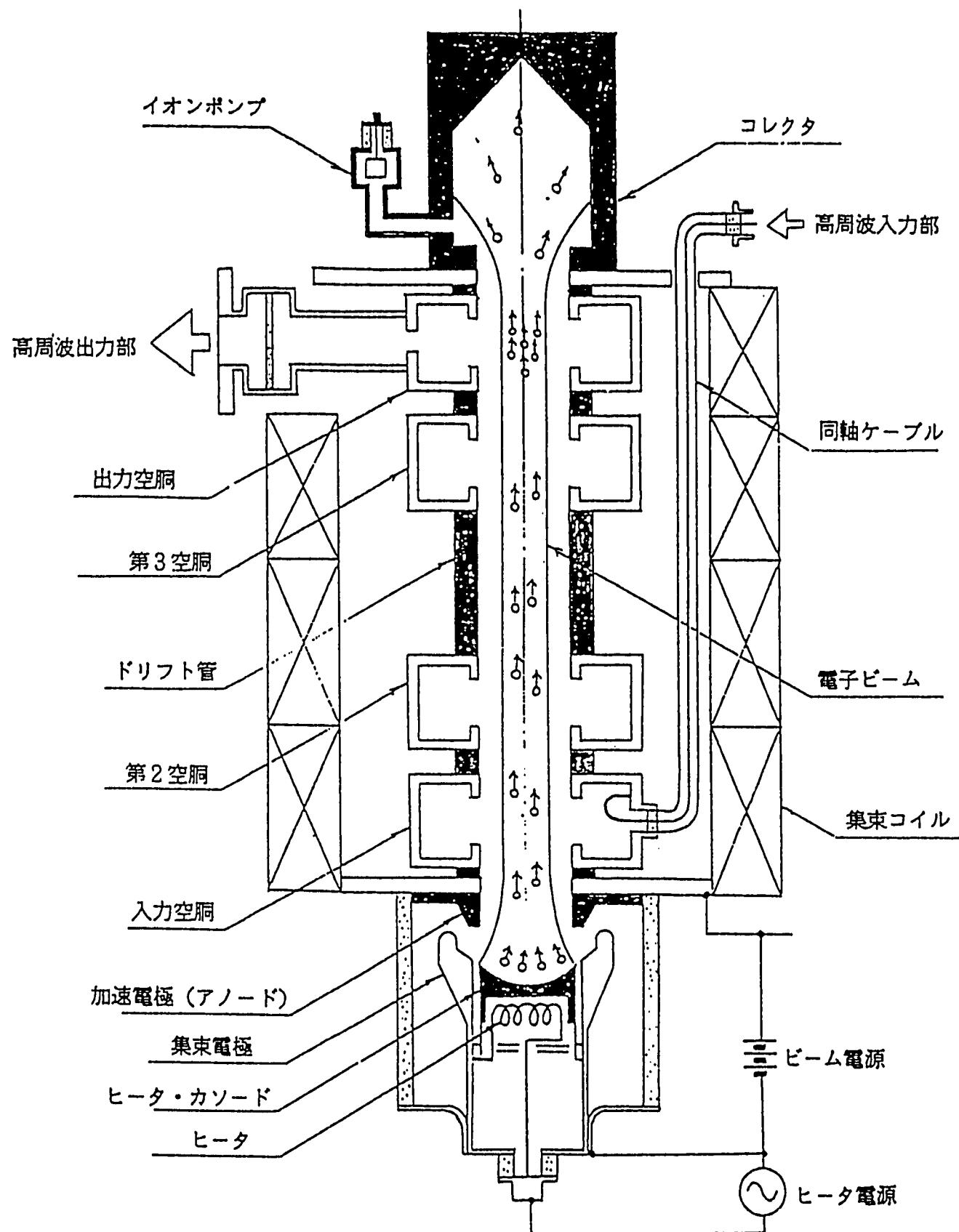


図2.1 クライストロンの動作原理図

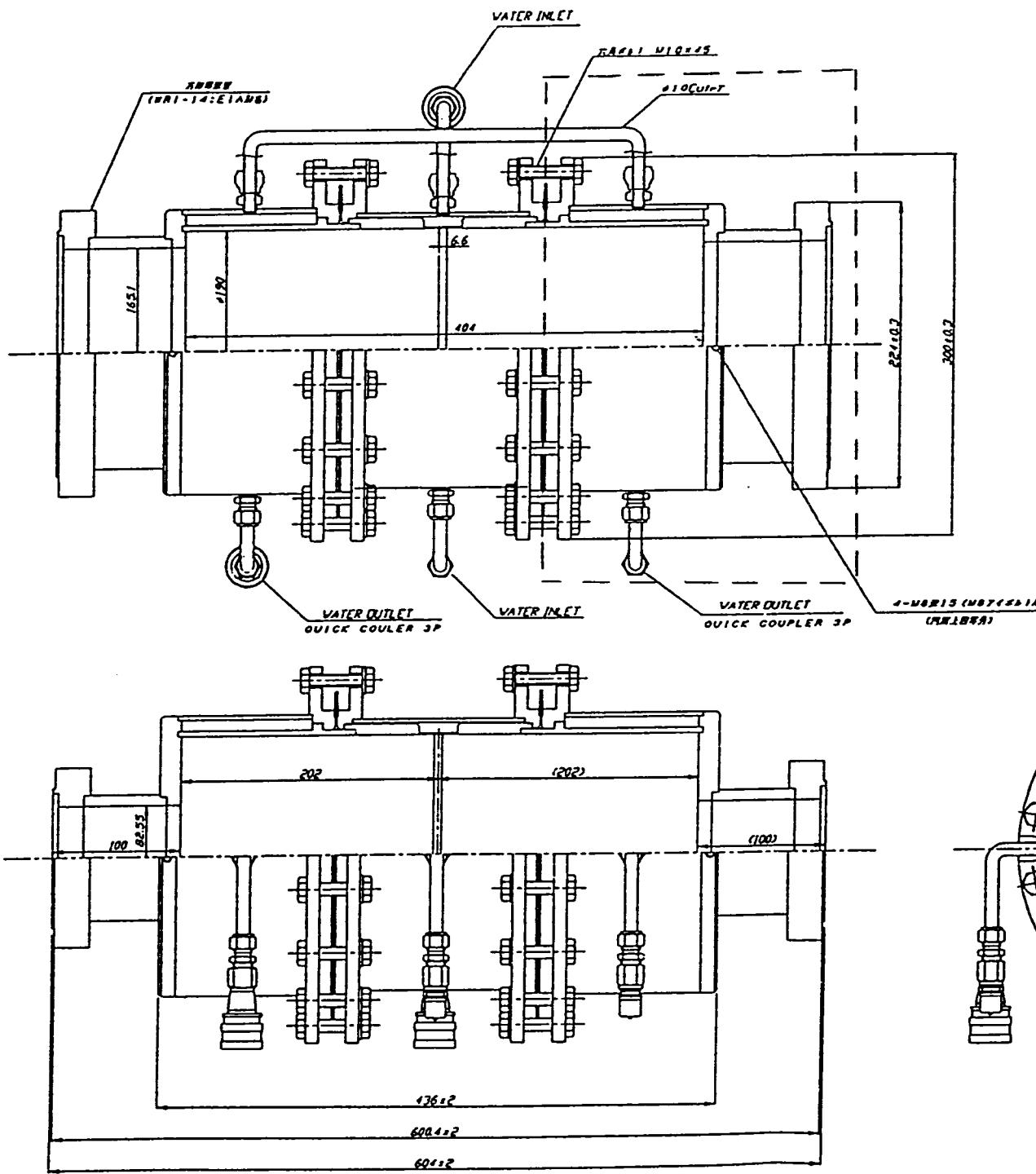
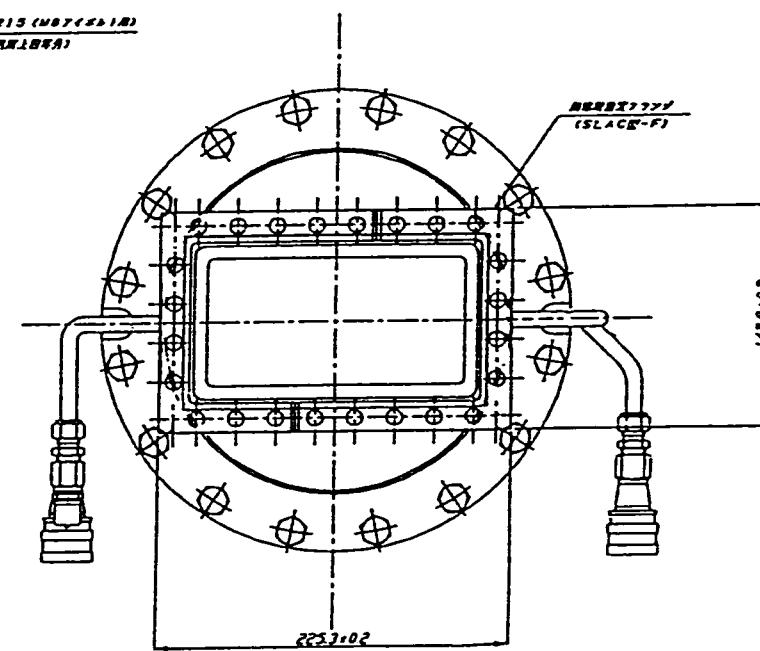


図2.2 ロング窓の断面構造図



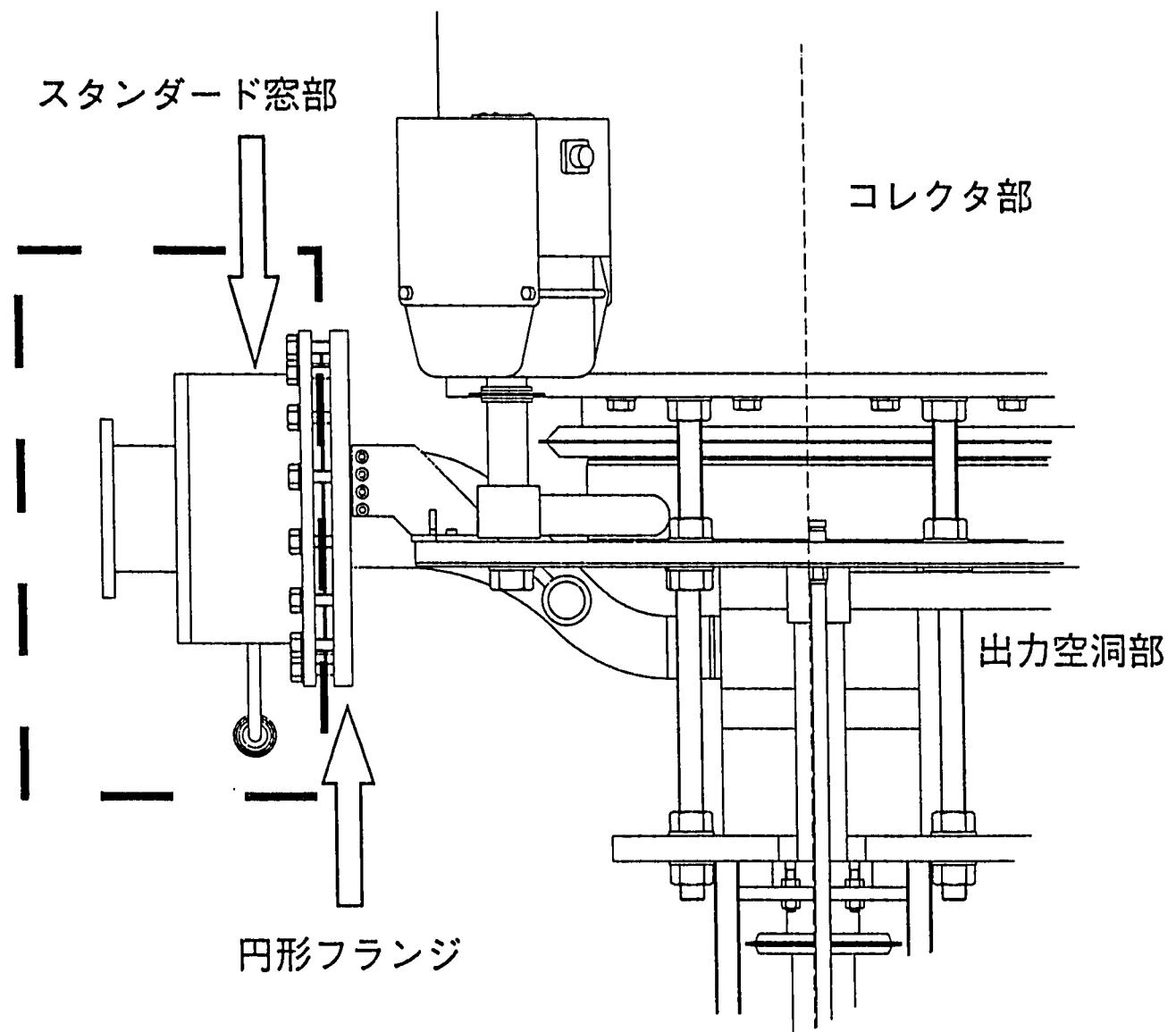


図2.3 試作クリストロンのスタンダード窓部

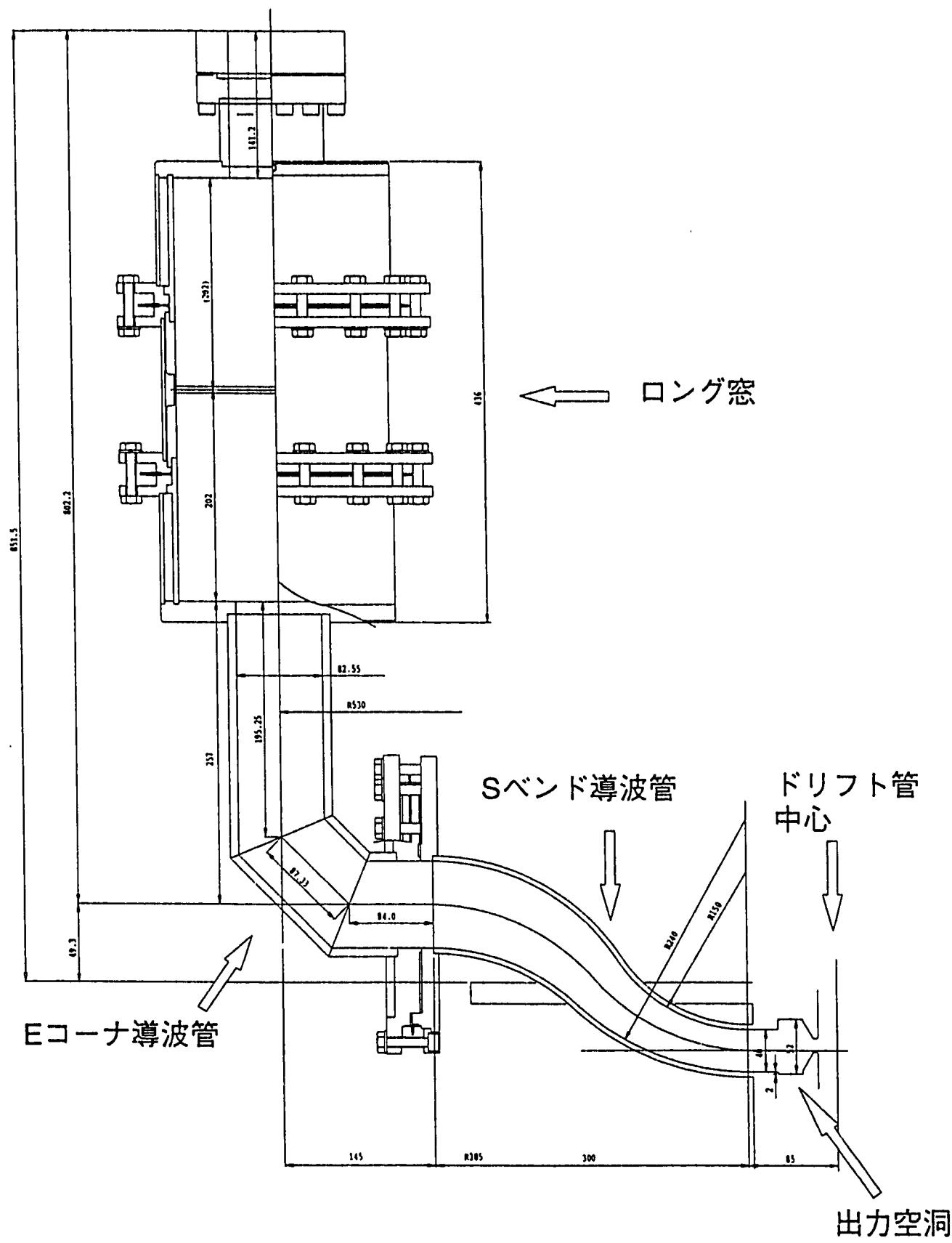


図2.4 改造クライストロンのロング窓部

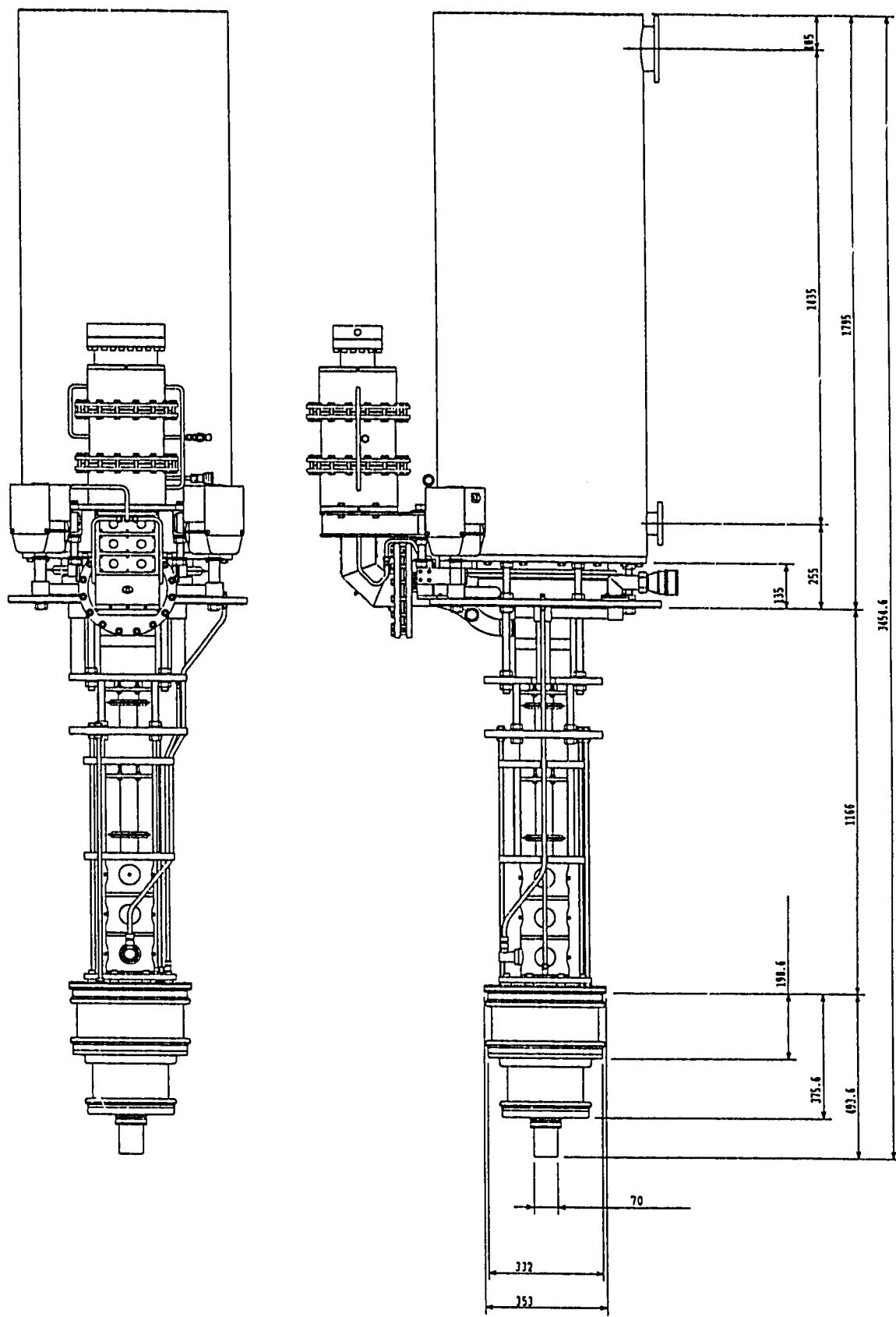


図2.5 改造クリストロン全体図

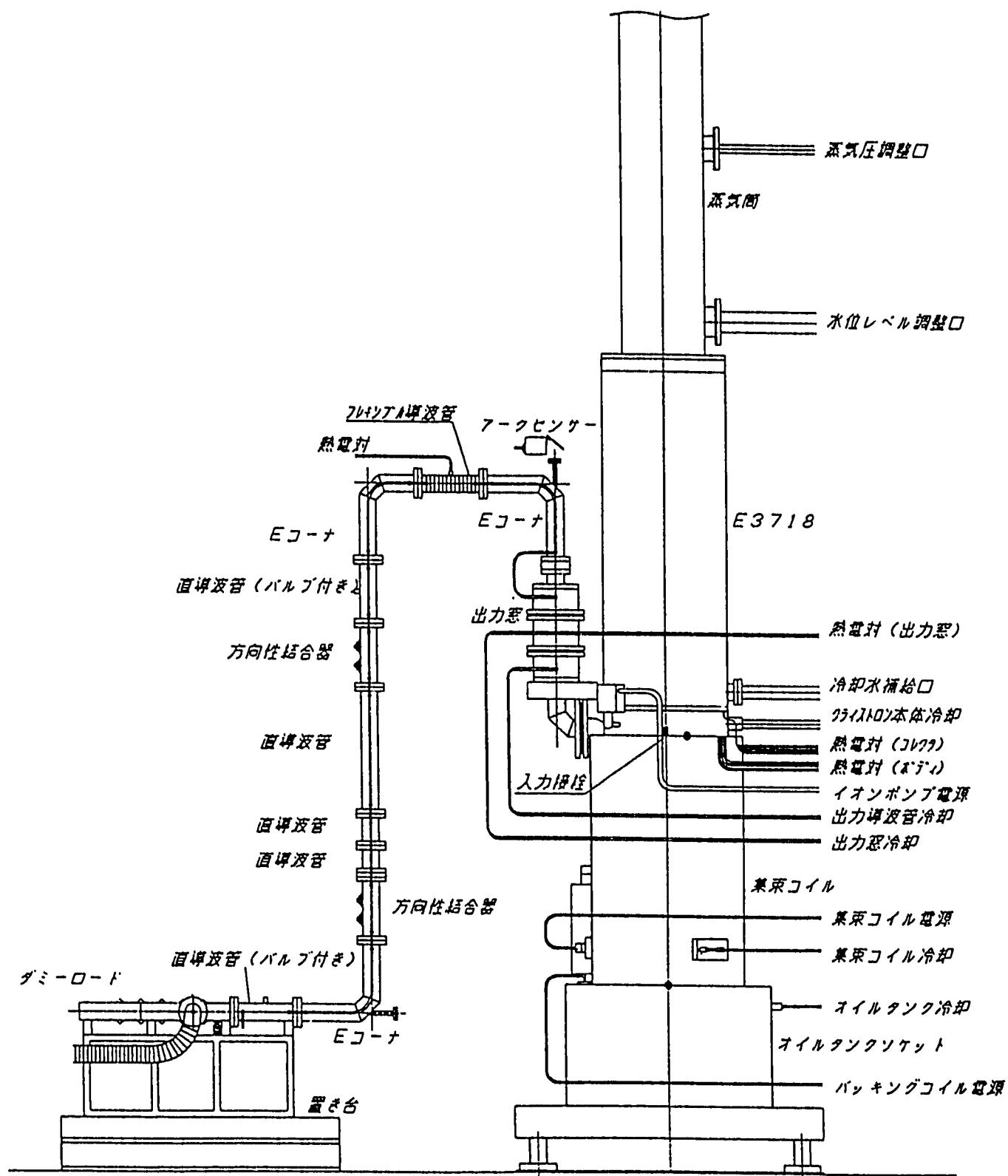


図3.1 改造クライストロンの試験体系

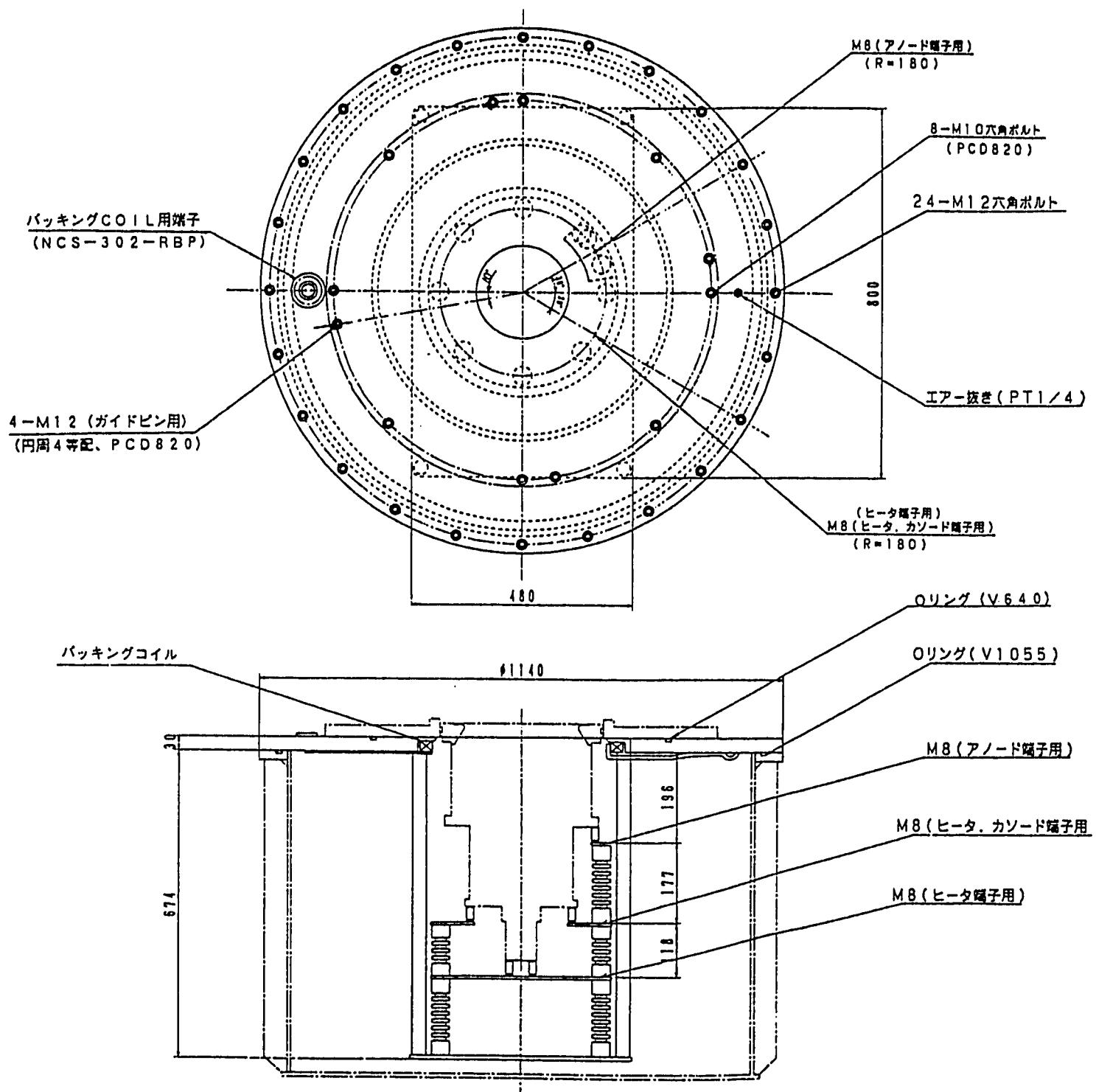


図3.2 ソケット天盤部のパッキングコイル

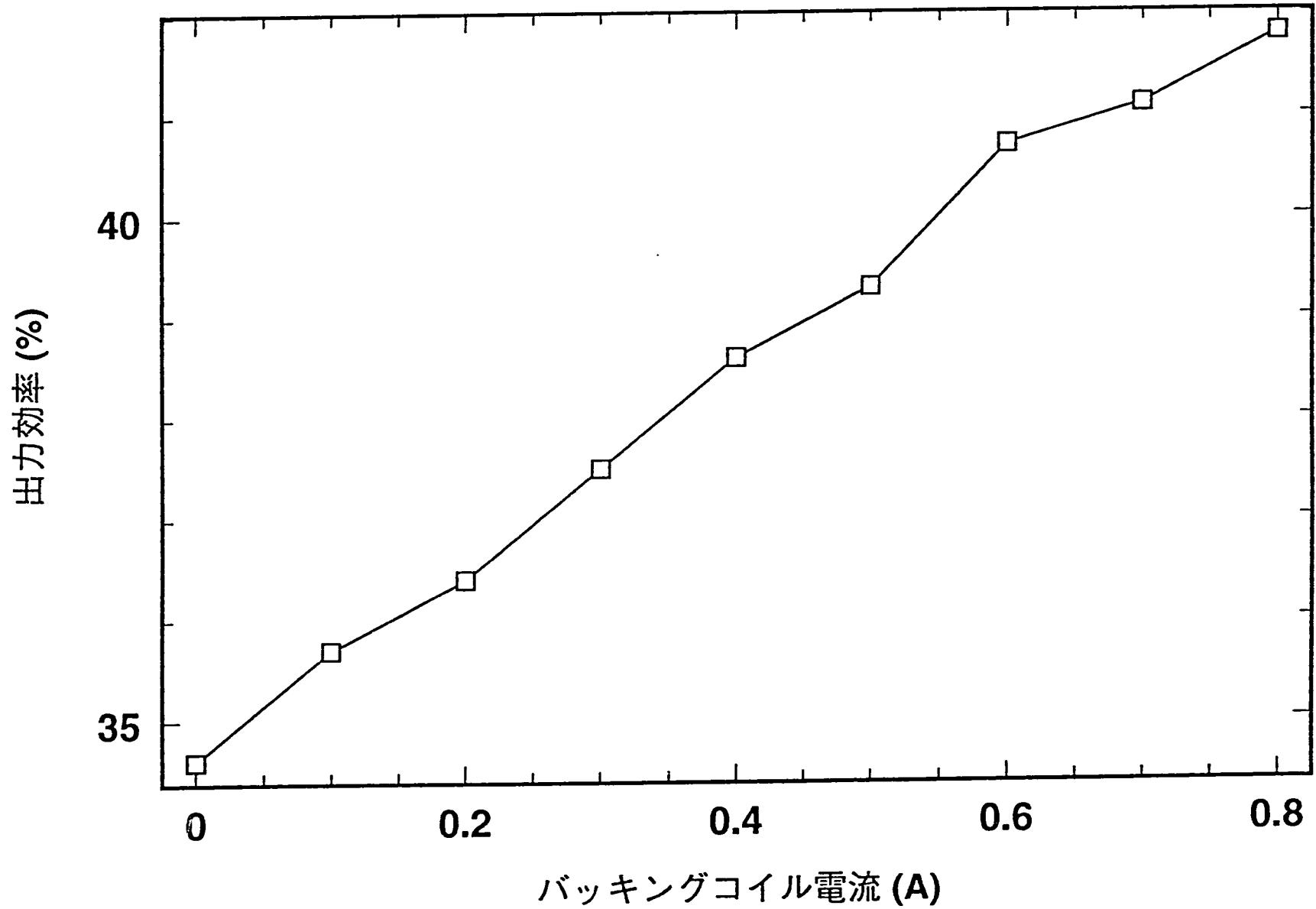


図3.3 バッキングコイル電流の変化に対する出力効率特性  
(ビーム電圧80kV)

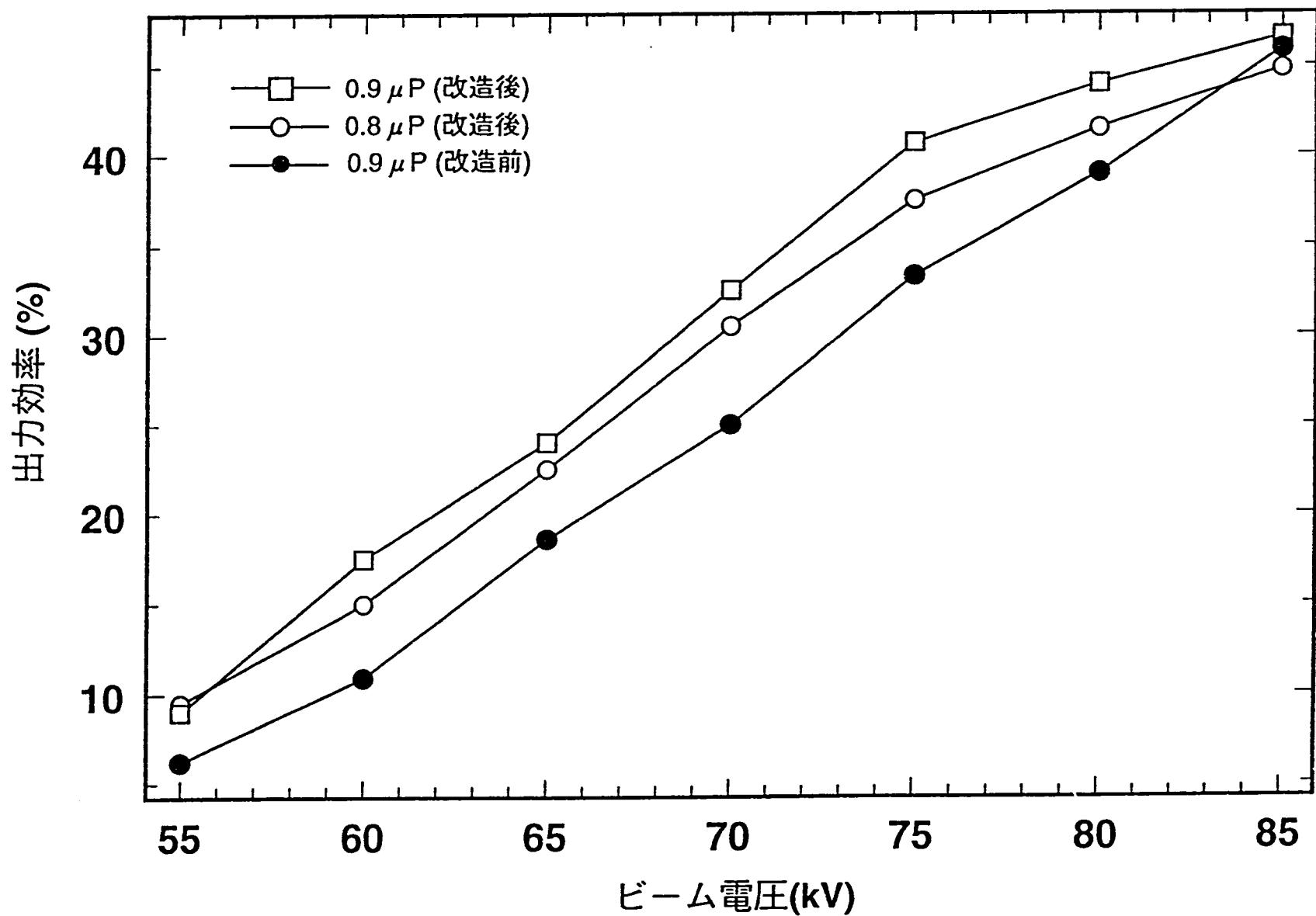


図3.4 ビーム電圧に対する出力効率特性

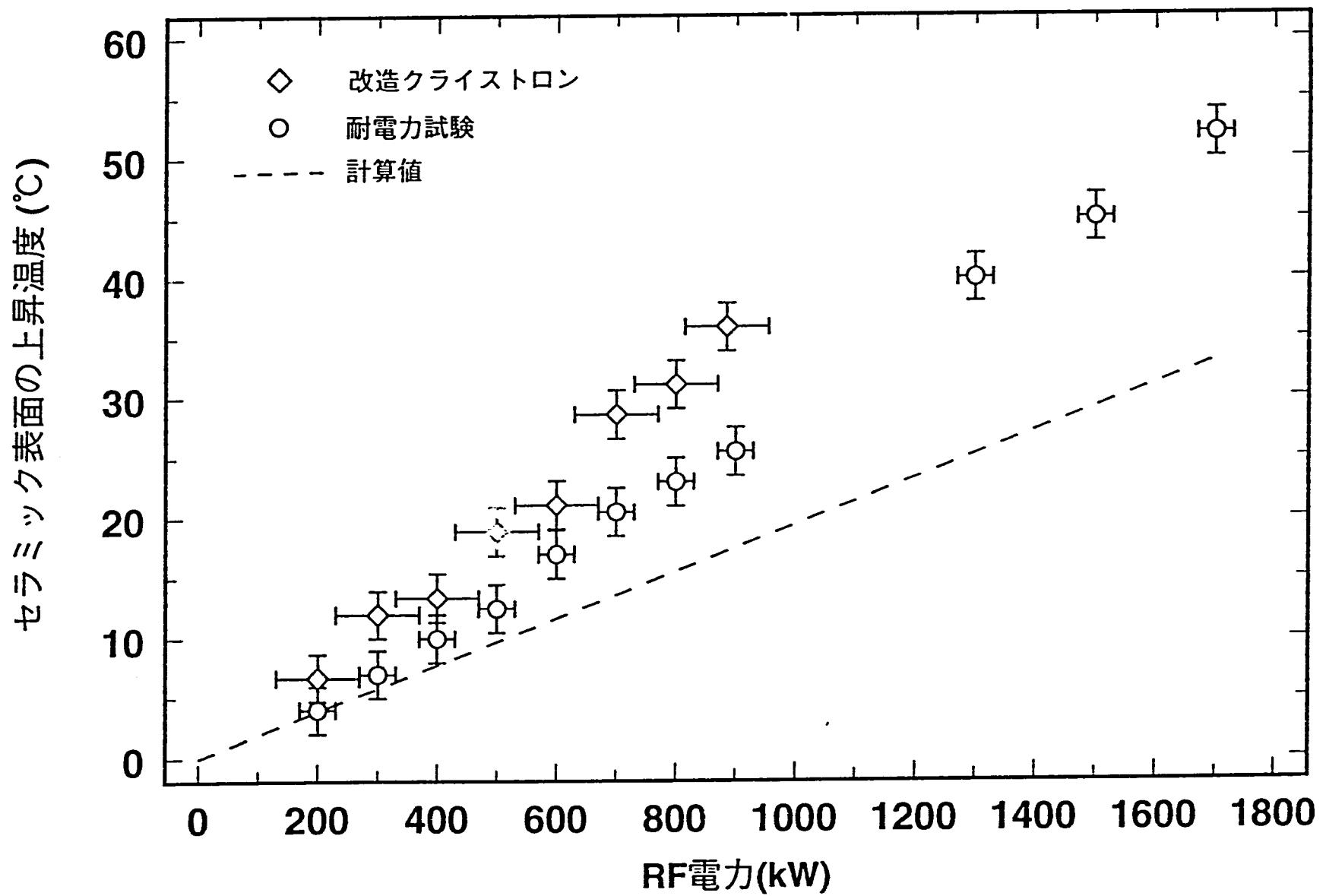
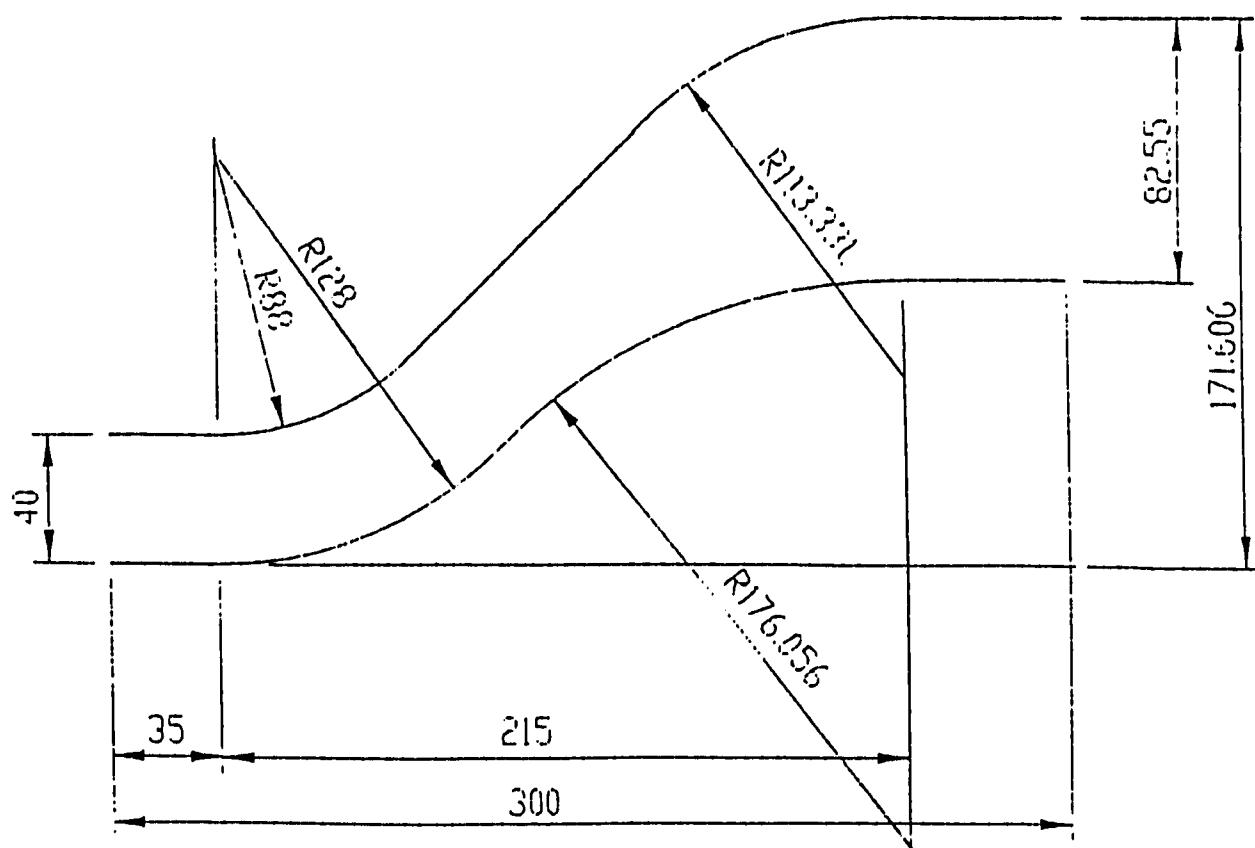


図3.5 RF電力に対するロング窓のセラミックス表面の上昇温度



Sバンド導波管(現状設計、VSWR=1.4)

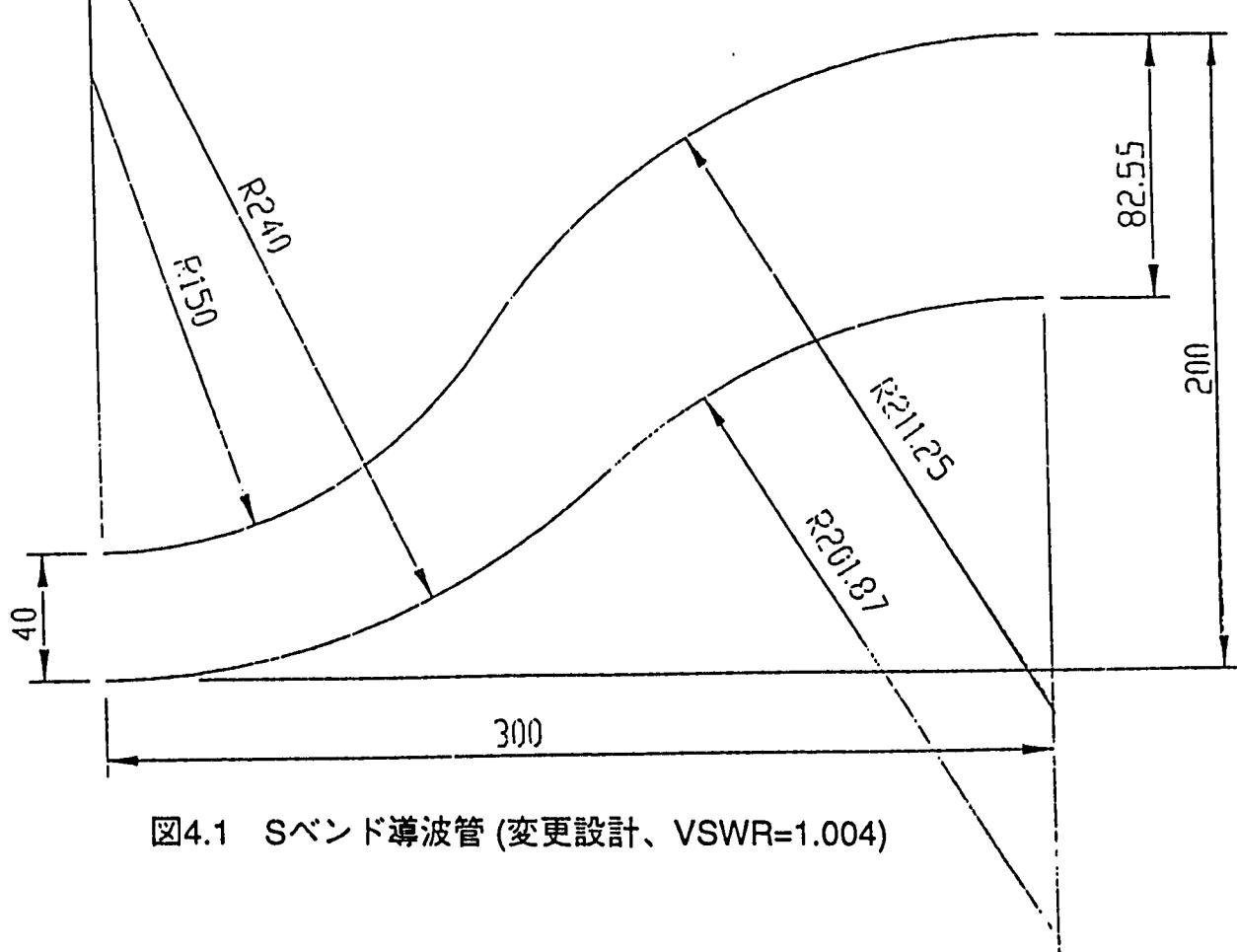
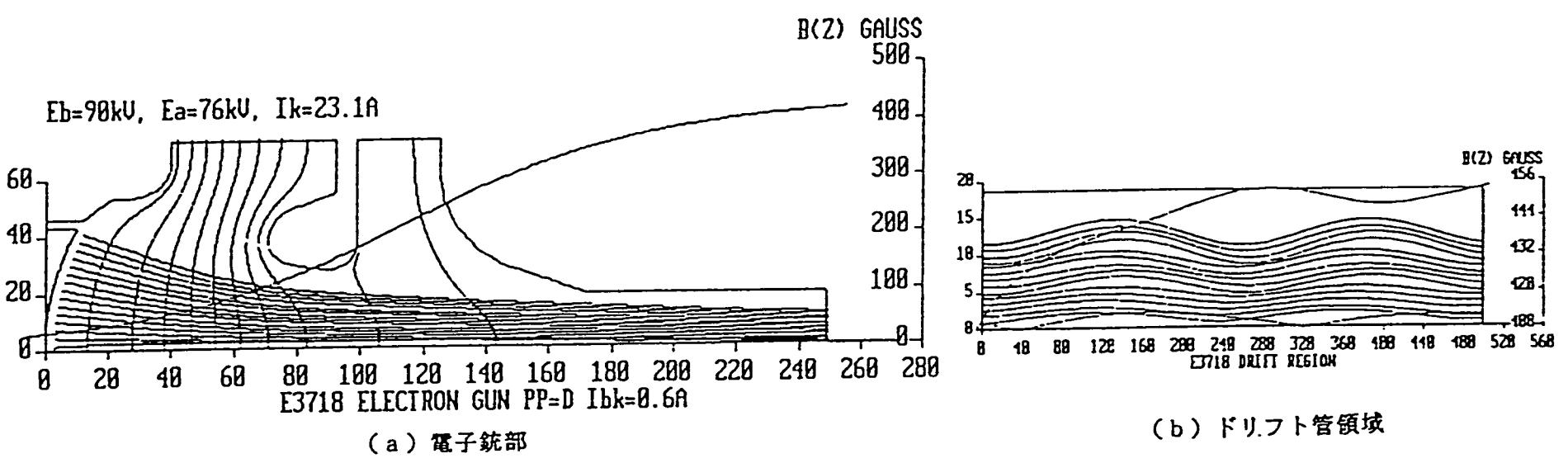
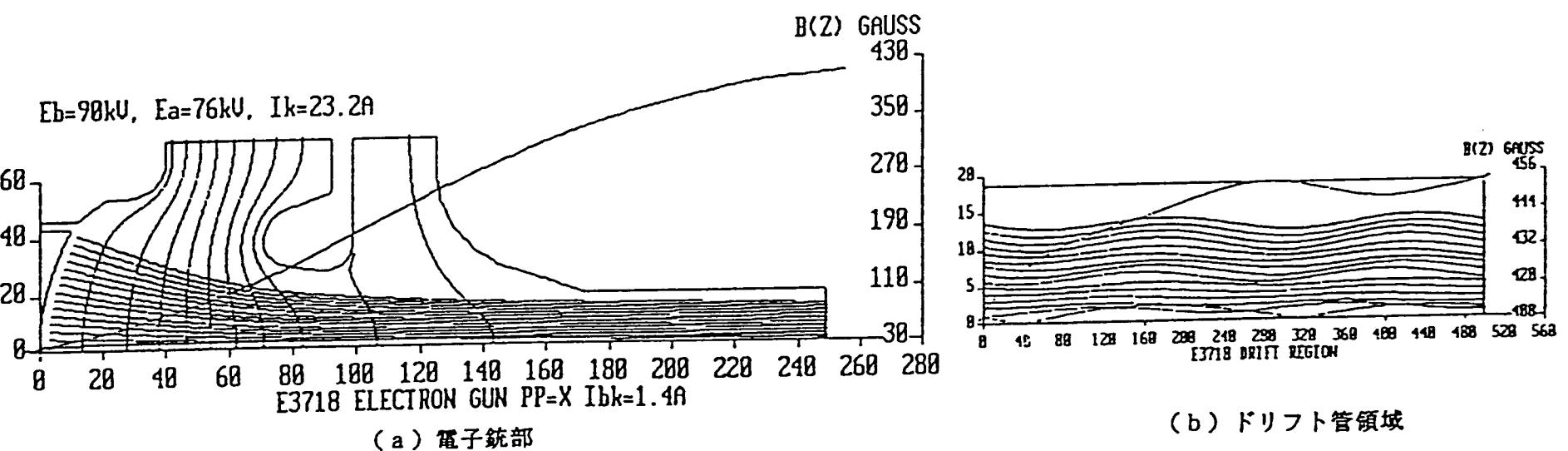


図4.1 Sバンド導波管(変更設計、VSWR=1.004)



電子ビーム軌道計算結果（現状設計、ガンポールピース穴径  $\phi 162\text{mm}$ ）



電子ビーム軌道計算結果（設計変更、ガンポールピース穴径  $\phi 202\text{mm}$ ）

図4.2 改造クライストロンの電子銃部及びドリフト管部の電子軌道解析

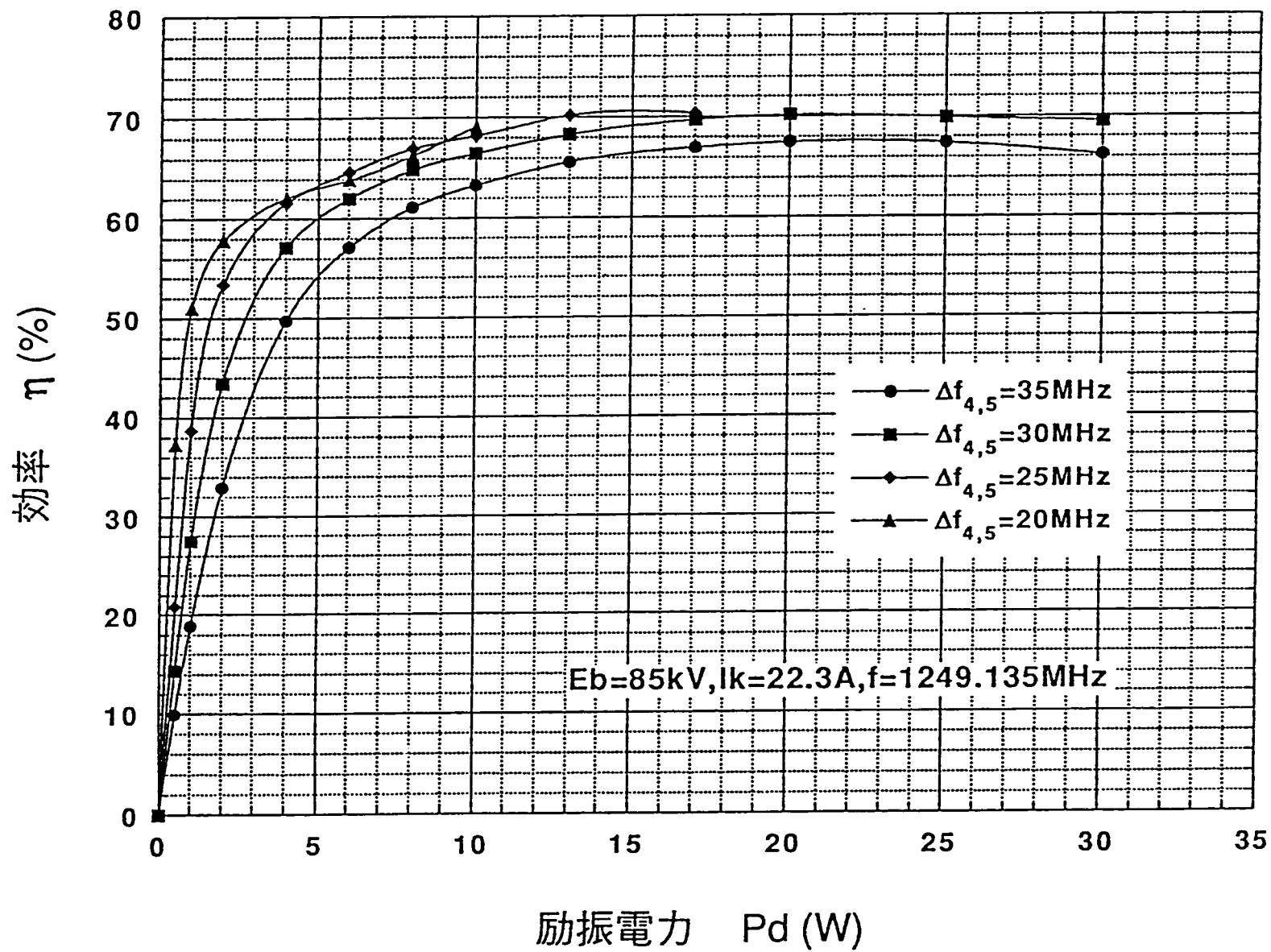


図4.3 第4空洞及び第5空洞の離調周波数の変化に対する出力効率の変化  
(Q値=60)

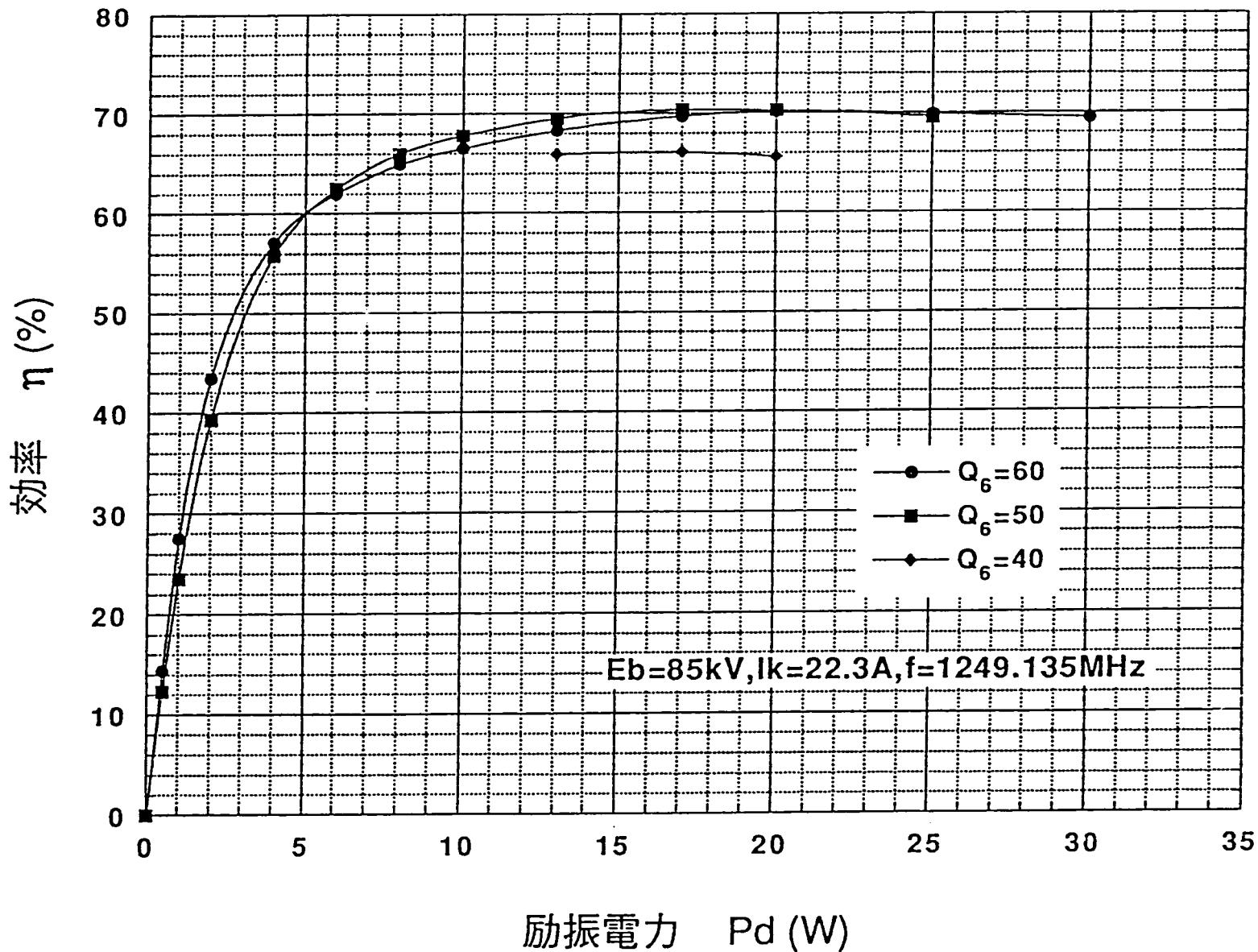
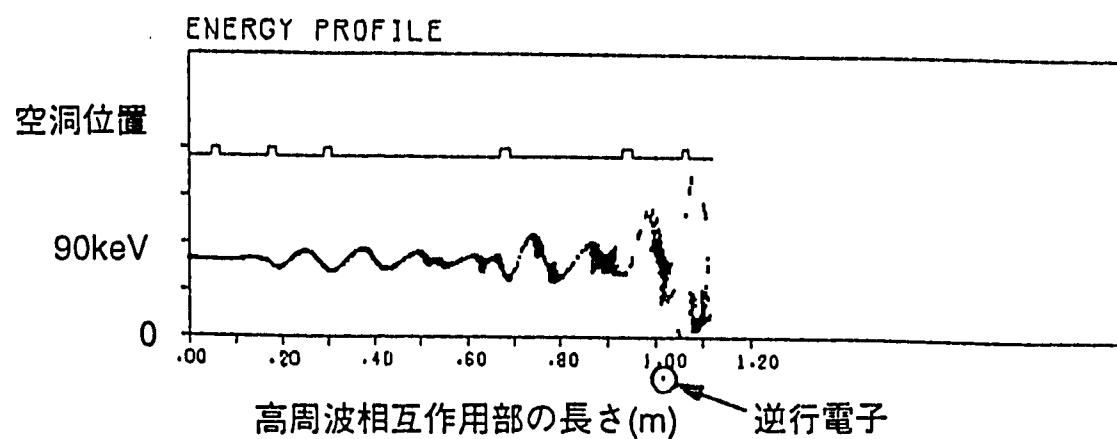


図4.4 出力空洞のQ値の変化に対する出力効率の変化  
(第4空洞及び第5空洞の離調周波数=30MHz)

出力空洞Q値=60



出力空洞Q値=50

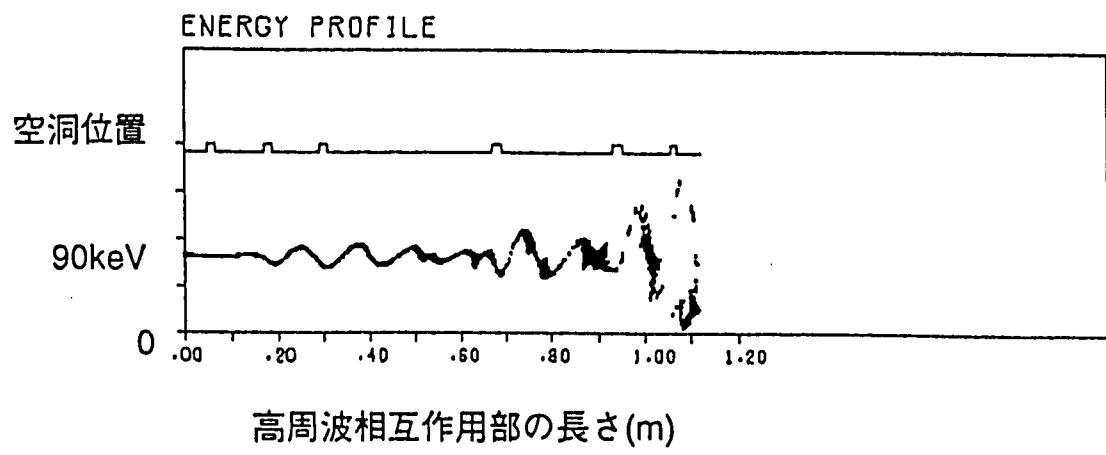


図4.5 ドリフト管中心軸上の電子のエネルギー分布  
(第4空洞及び第5空洞の離調周波数= 30MHz)