

大電力クライストロンの開発 (3)

— クライストロンNo.2の開発 —
(研究報告書)

2000年8月



核燃料サイクル開発機構
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
2000

大電力クライストロンの開発 (3)
—クライストロン No.2 の開発—
(研究報告書)

平野耕一郎*、王元林**、佐藤勇***

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。これまで、1.7MW の耐電力を有するロング窓を開発し、試作クライストロンの耐電力の低い窓と交換する改造 (以下、「改造クライストロン」と言う。) 後、高周波出力試験を実施してビーム電圧 85kV、出力効率 47% で最大出力電力 885kW(CW) が得られた。目標を達成させるためには、出力電力の更なる高効率化が必要とされている。

本報告書では、出力効率を高めるため、空洞の離調周波数、電子ビーム軌道及び高周波相互作用部の最適化を行ったクライストロン No.2 について、高周波出力試験を実施し、今後の大電力化に向けた設計方針の検討を行った。その結果、高周波出力試験 (ビーム電圧 80kV、カソード電流 20.4A) において出力電力 782kW、出力効率 56.5% が得られ、出力効率を高めることができた。

今後、これらの検討結果を踏まえて、クライストロン No.3 の製作に反映させる必要がある。

-
- * 大洗工学センターシステム技術開発部ビーム利用技術開発 Gr.
 - ** 大洗工学センターシステム技術開発部ビーム利用技術開発 Gr. 客員研究員
(中国 南京大学物理系 副教授)
 - *** 大洗工学センターシステム技術開発部ビーム利用技術開発 Gr. 客員研究員
(日本大学原子力研究所教授)

Development of High Power Klystron (3)

— Development of Klystron No.2 —

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

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. We developed a long pill-box type beryllia window (long pill-box window) withstood the RF power of 1.7MW(CW) and replaced the standard pill-box window of the prototype klystron with long pill-box window. The high power RF test was carried out with the converted klystron. This klystron has achieved CW RF power of 885kW and efficiency of 47% at beam voltage of 85kV.

This paper describes key points of the designs to achieve the RF power over 1.2MW and results of the high power RF test of the second klystron, which has been optimized by simulation codes to improve better efficiency. The second klystron has achieved the maximum efficiency of 56.5% with CW output power of 782kW at a beam voltage of 80kV and a cathode current of 20.4A in present. The third klystron will be manufactured to reflect results of this test.

*Beam Technology Development Group, System Engineering Technology Division, OEC, JNC.

** Beam Technology Development Group, Visiting Scientist from Nanjing University.

*** Atomic Energy Research Institute, Nihon University.

目次

1.	はじめに	1
2.	クライストロンNo.2の製作	2
2.1	高効率化のための改良点	2
3.	高周波出力試験	4
3.1	試験体系	4
3.2	CW試験	4
3.2.1	集束磁場の最適化	4
3.2.2	出力効率測定	5
3.2.3	窓温度上昇測定	5
4.	考察	6
4.1	出力効率	6
4.2	窓温度上昇	6
4.2.1	出力空洞から飛来してくる電子	7
4.2.2	赤外線温度計による温度測定誤差	9
4.2.3	導波管の熱変形による反射波の増加	10
4.2.4	マルチパクタリング	10
4.2.5	セラミックの誘電損失	11
5.	まとめ	12
6.	謝辞	13
7.	参考文献	14

表リスト

表 2.1	クライストロン基本仕様	15
表 4.1	TiN蒸着前後のアルミナの $\tan \delta$ 測定	16

図リスト

図 1.1	試作クライストロン及びクライストロンNo 2の全体図	17
図 2.1	高周波相互作用部概略構造	18
図 2.2	集束コイルの概略図	19
図 3.1	改造クライストロンの試験体系	20
図 3.2	バックリングコイル電流に対する出力効率	21
図 3.3	集束コイルのNo 5コイル電流に対する出力効率	22
図 3.4	ビーム電圧に対する出力電力特性	23
図 3.5	ビーム電圧に対する出力効率特性	24
図 3.6	CW及びパルス動作によるビーム電圧に対する出力効率特性	25
図 3.7	ロング窓温度上昇特性	26
図 4.1	出力導波管変色部分及び熱電対取付位置	27
図 4.2	No 5コイル電流に対する出力導波管温度特性 (ロングパルスモード)	28
図 4.3	No 5コイル電流に対する出力導波管温度特性 (CWモード)	29
図 4.4	高周波出力試験時の温度条件を再現した窓温度測定体系図	30
図 4.5	Eコーナーの温度上昇が窓表面温度の測定に与える影響	31
図 4.6	改造クライストロンを用いたスタンダード窓温度上昇測定試験体系図	32
図 4.7	スタンダード窓及びロング窓の窓温度上昇特性	33
図 4.8	空洞共振器	34
付録A	窓材誘電損失率の測定	35

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CW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。まず、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 $15\mu\text{sec}$ 、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。次に、平成3年度にクライストロンを試作し(以下、「試作クライストロン」と言う。)、CWモードにおいて出力電力330kW、出力効率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、出力効率46%が得られた。平成4年度には、ベリリアロング窓(以下、「ロング窓」と言う。)の設計及び製作を行い、この窓の窓耐電力試験⁽¹⁾を実施し、1.7MW(CW)に耐えることを確認した。さらに、平成6年度にこのロング窓と耐電力の低い試作クライストロンのスタンダード窓とを交換する改造を実施、改造クライストロン⁽²⁾⁽³⁾の出力試験を行った結果、ビーム電圧85kVで最大出力電力885KW(CW)、出力効率47%が得られた。この出力試験で、ロング窓のセラミックスの表面温度が異常に上昇することなく、大電力の高周波をクライストロンから出力させることができた。また、出力空洞部形状、電子ビーム軌道及び高周波相互作用部の最適化を行い、クライストロンの出力効率を向上させる検討を行った結果、目標出力電力1.2MWを連続的に出力できる見通しが得られた。

本報告書では、これらの検討結果を反映させたクライストロンNo.2を製作し、その出力試験結果について報告する。クライストロンNo.2の出力効率を向上させる検討内容について、その正当性を確認することを本報告書の第1の目的とした。また、クライストロンNo.2の出力試験において、出力窓部の温度上昇が改造クライストロンの出力窓の温度上昇より1.5倍増加する問題が発生したが、この窓温度上昇の発生原因を調査することを第2の目的とした。試作クライストロン及びクライストロンNo.2の全体図については図1.1に示す通りである。

2. クライストロン No.2 の製作

2. 1 高効率化のための改良点

改造クライストロンの出力試験の結果から、出力効率を向上させる改良点⁽³⁾を以下に示す。また、出力空洞付近のビーム径が出力効率に大きく影響することから、出力空洞付近の磁場を調整して、集束磁場の最適化を行う必要がある。

(1) 高周波相互作用部の最適化

2次元の FCI コード(Field Charge Interaction Code)を用いて最大出力効率が得られる出力空洞の Q 値、第 4 空洞及び第 5 空洞の離調周波数を求めた。高周波相互作用部の概略構造を図 2.1 に示し、その空洞条件を表 2.1 に示す。

この結果、出力空洞の Q 値が 50、第 4 空洞及び第 5 空洞の離調周波数が 30MHz とした場合に最大効率 70%が得られた。Q 値が 50 と 60 の場合では、出力効率の差はほとんどなかった。また、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。

現状の出力空洞はコールドモデルを製作して、Q 値が 60 となるように空洞の形状が決められている。Q 値 50 に空洞形状を変更するには時間的に困難であるため、もし、変更した場合には、クライストロン No.2 の製作工程が遅れ、加速器の入射部試験が実施できない可能性があった。一方、改造クライストロンの出力試験においては、逆行電子が原因となる不安定現象は観測されなかったため、出力空洞の形状は変更せず、第 4 空洞及び第 5 空洞の離調周波数だけを 30MHz に変更した。なお、クライストロン No.2 の出力空洞の Q 値は詳細には 59.3 であった。

(2) 電子ビーム軌道の最適化

電子ビームは、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。このため、出力空洞付近のビームがリップルする割合が大きくなると出力効率が低下する。そこで、図 2.1 に示す高周波相互作用部と電子銃の間にあるガンポールピースの穴径を 190mm から 202mm に大きくして、集束コイルからの侵入磁界を増加させた。また、集束磁界調整用のコイル(以下、「バックングコイル」と言う)⁽³⁾の電流量を調整して、侵入磁界の強度を調

整した。これらの条件を電子軌道計算コードで解析した結果、リップルの割合が少なくなることを確認した。これにより、出力効率の向上が期待される。

(3) 集束磁場の最適化

集束コイルは図 2.2 に示すように 5 分割されている。出力空洞付近の No.5 コイルだけを独立させ、出力空洞付近の集束磁場だけを弱めた。これにより、出力空洞のギャップにビーム近づき、ビームと電界との相互作用が強められることによって出力効率の向上が期待できる。

3. 高周波出力試験

3. 1 試験体系

試験は製作メーカーの工場内のクライストロン電源及び冷却設備を使用して行った。クライストロン No.2 の高周波出力試験体系を図 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。

10W 程度の高周波電力が励振器から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 以上の電力に増幅され、ロング窓を通して出力される。この出力電力は E コーナ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。

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(l/min) と冷却水の温度上昇から水に負荷された熱量を算出し、導波管におけるパワーロスを加えて、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表面の温度上昇を以下のよう

に測定した。

3. 2. 1 集束磁場の最適化

ビーム電圧 75kV、カソード電流 18.5A、集束コイル電流 12A の条件で、バックリングコイル電流を変化させ、出力効率を測定した。図 3.2 に示すようにバックリングコイル電流が小さくなるほど出力が上昇した。1.32A 以下では、効率は 2% 程度高くなったが、ビームがボディ部に当たり、クライストロンボディの冷却水温度が上昇した。そこで、バックリングコイル電流を 1.4A に設定して試験を行った。

次に、集束コイルの No.1~No.4 コイルの電流を 12A とし、出力空洞付近にある No.5 コイルの電流だけを変化させて出力効率を測定した。この結果を図 3.3 に示す。クライストロン内の真空度が悪化せず、最大出力効率が得られる

No.5 コイルの電流は 8.5A であった。出力空洞付近の磁場を弱めてビーム径を広げると出力効率が增加することが確認された。

3. 2. 2 出力効率測定

ビーム電圧 80kV、カソード電流 20.4A、集束コイル電流 12A、バックグコイル 1.4A の場合、図 3.4 に示すように最大出力電力 822kW、出力効率 50.4% が得られた。

次に、3.2.1 項で最大出力効率が得られた集束コイル及びバックグコイルの電流の条件 (No.5 コイル電流 8.5A、バックグコイル電流 1.4A) を設定し、No.1~No.4 コイル電流を 11.5A から 12.5A の範囲内で変化させて出力効率を測定した。その結果、ビーム電圧 75kV、No.1~No.4 コイル電流 12.3A の条件で、図 3.4 及び図 3.5 に示すように出力電力 782kW、最大出力効率 56.5% が得られた。

また、ビーム電圧 80kV 以上については、パルス幅 $16\mu\text{sec}$ 、繰返し 200pps の RF パルスを使用して出力効率を測定した。その結果、図 3.6 に示すように出力効率はビーム電圧 85kV で頭打ちになり、60%以上の出力効率が得られることが分かった。

3. 2. 3 窓温度上昇測定

ロング窓上部に接続した E コーナの覗き窓に赤外線温度計を設置し、窓のセラミックス表面の中心部温度を観測した。セラミックス表面の温度上昇は赤外線温度計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。出力電力に対するロング窓の温度上昇の関係を図 3.7 に示す。

最大出力電力 782kW の時にセラミックス表面の温度上昇は 48.6°C となった。この温度上昇は改造クライストロンの 1.5 倍となった。温度上昇の原因が不明であり、熱による窓の破壊を防ぐため、これ以上の試験を中止した。

4. 考察

4.1 出力効率

CW 試験では、ビーム電圧 80kV、集束コイル電流が一定の条件で、改造クライストロンとクライストロン No.2 の出力効率の最大値を比較すると、図 3.5 に示すようにクライストロン No.2 の出力効率が 4%程度向上した。これは、ビームのリップルを低減させた効果によるものと考えられる。さらに、出力空洞付近の磁場を調整することによって、クライストロン No.2 の最大出力効率 56.5%が得られ、改造クライストロンの最大出力効率 46.6%に対して、出力効率を約 10%も向上させることができた。しかし、窓の異常発熱のため、ビーム電圧を 80kV 以上増加させることができなかった。そこで、パルス動作を使用して窓温度を低下させ、80kV 以上の出力効率を得られた。図 3.6 に示す最大出力効率は FCI コードによる計算結果より 10%程度低いが、コードの誤差は 10%程度あるため、ほぼ最大の出力電力が得られていると推測される。今後、空洞の側面に付いているデンプリングで空洞の離調周波数を微調整して、出力試験を再度実施し、最大の出力効率を得られるかどうかを確認する必要がある。

4.2 窓温度上昇

クライストロン No.2 は改造クライストロンと同じ仕様のロング窓を使用しているが、図 3.7 に示すようにクライストロン No.2 の窓温度上昇は改造クライストロンの窓温度上昇の約 1.5 倍高くなった。また、レゾナントリングを用いて行った窓耐電力試験における窓単体の温度上昇の約 2 倍、設計値の約 3 倍高くなった。出力窓のセラミックスが発熱する原因は誘電損失を含め以下に示す項目による原因が考えられる。

- (1) 出力空洞から飛来してくる電子
- (2) 赤外線温度計による温度測定誤差
- (3) 導波管の熱変形による反射波の増加マルチパクタリング⁽⁴⁾
- (4) セラミックスの誘電損失

そこで、これらの項目について、窓温度が上昇する原因を調査した。

4. 2. 1 出力空洞から飛来してくる電子

出力空洞の付近にはエネルギーの低い電子ビームが存在しているため、出力空洞から直接見える位置に窓がある場合は、窓のセラミックスへ衝突する電子によって窓の温度が上昇する可能性がある。このため、クライストロン No.2 の出力窓はE コーナで垂直方向に曲げ、出力空洞から窓のセラミックスが直接見えない位置に設置している。

高周波出力試験後、クライストロン本体を集束コイルから引き抜いた時、出力導波管の出力空洞側下部に半径 10cm 程度の発熱が原因と推測される変色及び変形がみられた。図 4.1 に示す変色は、変色部付近の導波管の冷却能力が不足していたことに加え、電子線による局所的な温度上昇によって発生したと考えられる。発熱に起因した電子が窓まで到達し、2 次電子による沿面放電やセラミックスへの繰返し衝撃（マルチパクタリング）の火種になっている可能性が考えられる。そこで、出力空洞から出力導波管の方へ飛来してきた電子が窓へ与える影響を調べるため、次の試験を行った。

(1) 磁場による窓表面温度の変化

高周波が出力されている状態で、イオンポンプの磁石を窓及びE コーナ部に近付けて、出力電力値及び窓表面温度を観測した。エネルギーの低い電子が窓へ飛来するためであれば、窓の手前に強力な磁石を近付けることによって、電子の軌道が変化し、窓の表面温度が変化するはずである。しかし、磁石の磁場によって、窓の表面温度は変化しなかった。

(2) 出力空洞部を発熱させた電子による窓表面温度の変化

出力空洞部を発熱させた電子の発生原因及びその電子の窓への影響を調べるため、図 4.1 に示す出力空洞、出力導波管の変色部及びE コーナに熱電対を取り付け、集束コイルの No.5 コイル電流を 12.3A~8.5A の範囲で変化させ、窓表面温度及び3 個所の温度を測定した。

量子工学試験施設のクライストロン電源はロングパルスモード（ビーム電圧 90kV、ビーム電流 25A、パルス 4msec、繰返し 50pps）及びCWモード（ビーム電圧 65kV、ビーム電流 13.5A、CW）での運転が可能である。このクライストロン電源を使用し、以下に示す試験を行った。

(a) ロングパルスモード

最大出力電力が得られるビーム電圧 90kV において、低デューティ（パルス幅 4msec、繰返し 1 pps）の条件で、出力空洞付近の集束磁場を変化させ、ビーム径を変化させた時の各部の温度を測定した。この時、ピーク出力電力 1MW が一定になるようにビーム電流を調節した。その結果、図 4.2 に示すように窓表面及び変色した出力導波管等の温度は変化しなかった。

(b) CW モード

ビーム電圧 65kV の場合、出力電力が小さくなるため、CWモードで試験した。ビーム電流 7A、出力電力 75kW の条件で、ロングパルスモードと同様に各部の温度を測定した。その結果、図 4.3 に示すように窓表面温度の変化はなかったが、変色した出力導波管付近の温度が No.5 コイル電流 8.5A～9A の時に 100℃程度になった。

CWモードのビーム電圧 65kV のビームパービアンズ⁽³⁾ は $0.4 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ であり、ロングパルスモードのビーム電圧 90kV のビームパービアンズは $0.9 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ である。ビーム電圧 90kV、ビームパービアンズ $0.9 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ の条件で電子起動解析を行い、最適設計されたため、ビーム電圧が低く、かつ、ビームパービアンズが低い状態では、ビームがリップルする割合は大きくなる。このため、ビーム電圧が低い時に、出力空洞の集束磁場を弱め過ぎた状態で高周波出力試験を行ったために、ビームが出力空洞のノーズに当たり、ノーズで反射された電子が出力導波管へ来たと考えられる。変色部付近の導波管の冷却能力が不足していたことに加え、ノーズで反射された電子によって局所的な温度上昇が発生したと考えられる。また、CWモード試験時に窓表面の温度上昇が観測されなかったことから、出力導波管を発熱させた電子が引き金になって、窓の温度上昇を引き起こすようなマルチパクタリングは発生しなかったと考えられる。

ロングパルスモード試験の時にCWモード試験と同様な出力導波管の温度上昇が発生していたとすると、ロングパルスモード試験ではCWモード試験の出力導波管温度上昇ためデューティ倍に相当する 3℃程度上昇するはずであるが、ビーム電圧 90kV の時の出力導波管温度は変化しなかった。ビームパービアンズ $0.9 \mu\text{A}/\text{V}^{1.5}$ の設計条件では、出力空洞からの電子の飛来及び出力導波管の発熱はなかったと考えられる。

4. 2. 2 赤外線温度計による温度測定誤差

クライストロンの出力窓の表面温度は E コーナに付いている直径 2cm、長さ 10cm の円筒形の覗き窓を通して、赤外線温度計から 1 m 離れた状態で測定された。赤外線温度計による測定値は、ヒーターで加熱したベリリアセラミックス板の表面温度を熱電対で測定した値と一致するように較正されているため、赤外線温度計の測定誤差は熱電対の有する誤差と同程度の 1℃である。しかしながら、冷却不足により E コーナやフレキシブル導波管等が発熱したため、赤外線温度計による測定値は周囲温度に影響され、実際の窓の発熱による温度が測定されていなかった可能性がある。そこで、高周波出力試験時の温度条件を再現して、窓温度を赤外線温度計で測定し、E コーナの温度上昇が窓表面温度の測定に与える影響を調べた。

窓耐電力試験に用いたスタンダード窓を用いて、高周波出力試験時の窓温度測定体系とほぼ同じような図 4.4 に示す体系を構成した。まず、スタンダード窓に冷却水を流した状態で、窓冷却水入口温度 T_b が 27℃で一定になっていることを確認した。この状態では、セラミックスの温度は窓冷却水入口温度とほぼ同じであり、27℃で一定であると考えられる。そこで、E コーナ部にリボンヒータを巻き付け、E コーナ部を加熱しながら、図 4.5 に示すように窓表面温度と T_b との差を比較した。その結果、E コーナ部の温度と窓の温度との温度差が約 60℃になると、窓の温度は実際の温度より 5℃以上高く測定されるが、30℃程度の範囲内では、窓温度は 1℃程度の誤差であることがわかった。

次に、改造クライストロンの出力電力 800kW の窓温度 61℃を再現し、E コーナ部温度が窓温度に与える影響を調べた。冷却水を止めた状態でスタンダード窓外周部をリボンヒータで加熱し、セラミックスの温度が出力電力 800kW の窓温度とほぼ同じになるように窓冷却水入口温度 T_b を 57.3℃で保持させた。この状態で、E コーナ部を 27℃から出力電力 800kW の時の E コーナ部温度 63℃になるまで加熱し、図 4.5 に示すように窓表面温度と T_b とを比較した。その結果、窓温度が外周部より高い場合には、測定誤差範囲内で測定できることがわかった。

R F が無い状態で高周波出力試験時の窓温度測定を再現した結果、E コーナ部の温度と窓の温度との温度差が 30℃程度の範囲内では、1℃程度の誤差で窓温度を測定できることがわかった。

4. 2. 3 導波管の熱変形による反射波の増加

高周波出力試験体系内のフレキシブル導波管が冷却不足により発熱したが、ファンにより空気冷却を行ったところ窓温度の低下が見られた。このことから、フレキシブル導波管の熱変形によって発生した反射波が窓温度上昇に影響していたと考えられる。

改造クライストロンの高周波出力試験について、クライストロン No.2 と同様な試験体系で行った結果、改造クライストロンの窓温度上昇は窓耐電力試験時に測定したロング窓単体の温度上昇の 1.5 倍になった。また、窓耐電力試験で用いたスタンダード窓を図 4.6 に示す改造クライストロンの試験体系内に組み込み、スタンダード窓の温度上昇を測定した。その結果、図 4.7 に示すように高周波出力試験体系内のスタンダード窓の温度上昇は窓耐電力試験時の窓温度上昇の 1.5 倍になった。窓耐電力試験及び高周波試験体系に用いた窓が同じであったにもかかわらず、窓の温度が高周波出力試験体系内の方が高かったことから、試験体系内の反射波が窓温度上昇に影響していたと考えられる。

出力電力 700kW の時の反射波は測定の結果、11kW であるため、導波管内の電界は反射波が無い場合の最大 1.13 倍になる。窓部のパワーロスと電界の自乗に比例し、窓温度上昇に比例することから、窓温度上昇は最大で約 1.3 倍になると考えられる。導波管温度の上昇による反射波の増加に伴い、窓温度上昇は 1.3 倍以上増加した可能性がある。

4. 2. 4 マルチパクタリング

ロング窓は、マルチパクタリングを引き起こすセラミックス面に対し、垂直な電場が小さくなるように設計されており、また、真空中におけるセラミックスからの 2 次電子放出係数の低減のためセラミックスの両面に膜厚 60 Å の TiN がコーティングされている。窓耐電力試験において、このロング窓に 1.7MW の RF 電力を負荷させても、マルチパクタリング等の放電現象及びロング窓温度の異常上昇は観測されなかった。クライストロン No.2 には窓耐電力試験で用いたロング窓と同仕様の窓が使用されており、また、4.2.1 項に示したロング窓への電子の飛来が無いことから、マルチパクタリングによる窓温度上昇は発生していないと考えられる。

4. 2. 5 セラミックスの誘電損失

クライストロン No.2 のロング窓は TiN を膜厚 60 Å で蒸着させた改造クライストロンのロング窓と同じ仕様にした。しかし、蒸着過程において、高エネルギー加速器研究機構の出力窓と同じ条件で蒸着されたため、クライストロン No.2 のロング窓の膜厚は 100 Å となった。ロング窓のセラミックスは直径 196mm と大きいので、TiN の蒸着条件⁽⁵⁾が窓の誘電損失を増加させる一因となっている可能性があると考えられる。そこで、蒸着方法について調査した。

まず、セラミックスに蒸着された TiN の膜厚が誘電損失に与える影響を調べるため、内径 185mm の空洞共振器を製作して以下に示す方法⁽⁶⁾で直径が大きなセラミックスの誘電正接 $\tan \delta$ を求めた。図 4.8 に空洞共振器を示す。クライストロン窓に使用されているベリリアは高価なため、ベリリアと同程度の $\tan \delta$ を有する安価な 3 枚のアルミナを用いた。厚さ 6.6mm、直径 190mm のアルミナを円筒形の空洞で挿み込み、空洞共振器内の TE01 モードの Q 値を測定することによって $\tan \delta$ ⁽⁶⁾ を求めた。3 枚のアルミナのうち 1 枚をリファレンスとして使い、2 枚のアルミナの片面それぞれに膜厚 100 Å 及び 60 Å の TiN を蒸着した。蒸着前後の各アルミナの $\tan \delta$ を求めた結果、60 Å の場合の $\tan \delta$ は蒸着前後で変化しなかったが、100 Å の場合の $\tan \delta$ は蒸着後に 2 割程度増加した。測定結果を表 4.1 に示す。

蒸着膜の製作では、1 回で蒸着できる範囲は直径数 cm、広い面に蒸着する場合には蒸着する場所を変えながら行う必要がある。このため、見た目では分からないが、蒸着むらが表面に生じる。また、蒸着膜が厚くなるほど窓表面での導電性が良くなるため、パワーロスが大きくなると考えられる。クライストロン No.2 のロング窓は両面に 100 Å の TiN がコーティングされているため、TiN コーティングによるパワーロスは片面の場合の倍程度になる。クライストロン No.2 の出力窓のパワーロスは改造クライストロンより 4 割程度高くなるため、クライストロン No.2 の窓温度上昇も改造クライストロンより 1.4 倍程度高くなる可能性がある。

4.2.1 項～4.2.5 項までの結果から、クライストロン No.2 の出力窓の温度上昇が改造クライストロンより 1.5 倍ほど高くなったのは、TiN の膜厚の増加に伴う窓の誘電損失の増加が主な原因であると考えられる。これに加え、直径の大きなベリリアの $\tan \delta$ の固体差及び試験体系内で発生した反射波等によって、窓温度が上昇したと考えられる。

5. まとめ

クライストロン No.2 を製作し、集束コイル磁場の調整を行い、出力効率を向上させた。また、出力導波管にビームが当たったことによる変色が見られたが、ビーム電圧が低い状態で出力空洞付近の集束磁場を弱めたことで、出力空洞のノーズで反射されたビームが出力導波管を発熱させたと考えられる。窓温度上昇が改造クライストロンの場合と比較して、1.5 倍程度高くなったが、これは出力導波管を発熱させた出力空洞からくる電子ではなく、TiN の膜厚の増加に伴う窓の誘電損失の増加、直径が大きなベリリアの $\tan \delta$ の固体差及び試験体系内での反射波の増加が原因であると考えられる。

今後、ロング窓の真空側だけに膜厚 60 Å の TiN を蒸着させ、窓の誘電損失を最小限にしたクライストロン No.3 を考える必要がある。また、クライストロン No.3 の高周波出力試験を実施する際に、空洞の側壁を変形させることができるデインプリング位置を変化させ、離調周波数を微調整することによって最大出力効率が得られる条件を求める予定である。また、出力電力の増加に伴い導波管の発熱が増大するため、試験体系内での反射波が増加しないような工夫が必要である。

6. 謝辞

高エネルギー加速器研究機構の道園真一郎助手、山口誠也助手にはセラミックスの誘電損失測定に関して貴重な助言を頂きました。

7. 参考文献

- (1) K.Hirano et al, "Development of a High Power 1.2MW CW L-band Klystron", PAC95, Vol.2, pp.1539-1541, 1995.
- (2) K.Hirano et al, "Development of a High Power 1.2MW CW L-band Klystron", the third workshop on pulsed RF sources for linear colliders (RF96), pp.133-140, April 1997.
- (3) 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
- (4) 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
- (5) 道園真一郎,"高周波窓の破壊とTiN薄膜コーティングによる抑止に関する研究", 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士論文, 1992
- (6) 小林禧夫,"TE₁₁₁モード円筒空洞共振器法による誘電体平板材料の複素誘電率測定", 信学技報(1988) MW88-69.

表2.1 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	
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	-	800μsec
繰返	-	50pps
第4、第5空洞周波数	1.2801GHz	
第3空洞周波数	1.3181GHz	
第2空洞周波数	1.2525GHz	
入力空洞周波数	1.2481GHz	

表4.1 TiN蒸着前後のアルミナの $\tan \delta$ 測定

アルミナ	No.1		No.2		No.3	
TiN蒸着	蒸着前	60Å片面 蒸着後	蒸着前	100Å片面 蒸着後	蒸着前	蒸着後
	リファレンス					
TE ₀₁₁ モードの 共振周波数 (GHz)	3.1842	3.1842	3.1852	3.1851	3.1854	3.1854
Q値	18000	18000	18000	17000	17000	17200
ϵr	9.58	9.58	9.53	9.53	9.58	9.52
$\tan \delta (\times 10^{-4})$	2.49	2.49	2.48	2.75	2.74	2.74

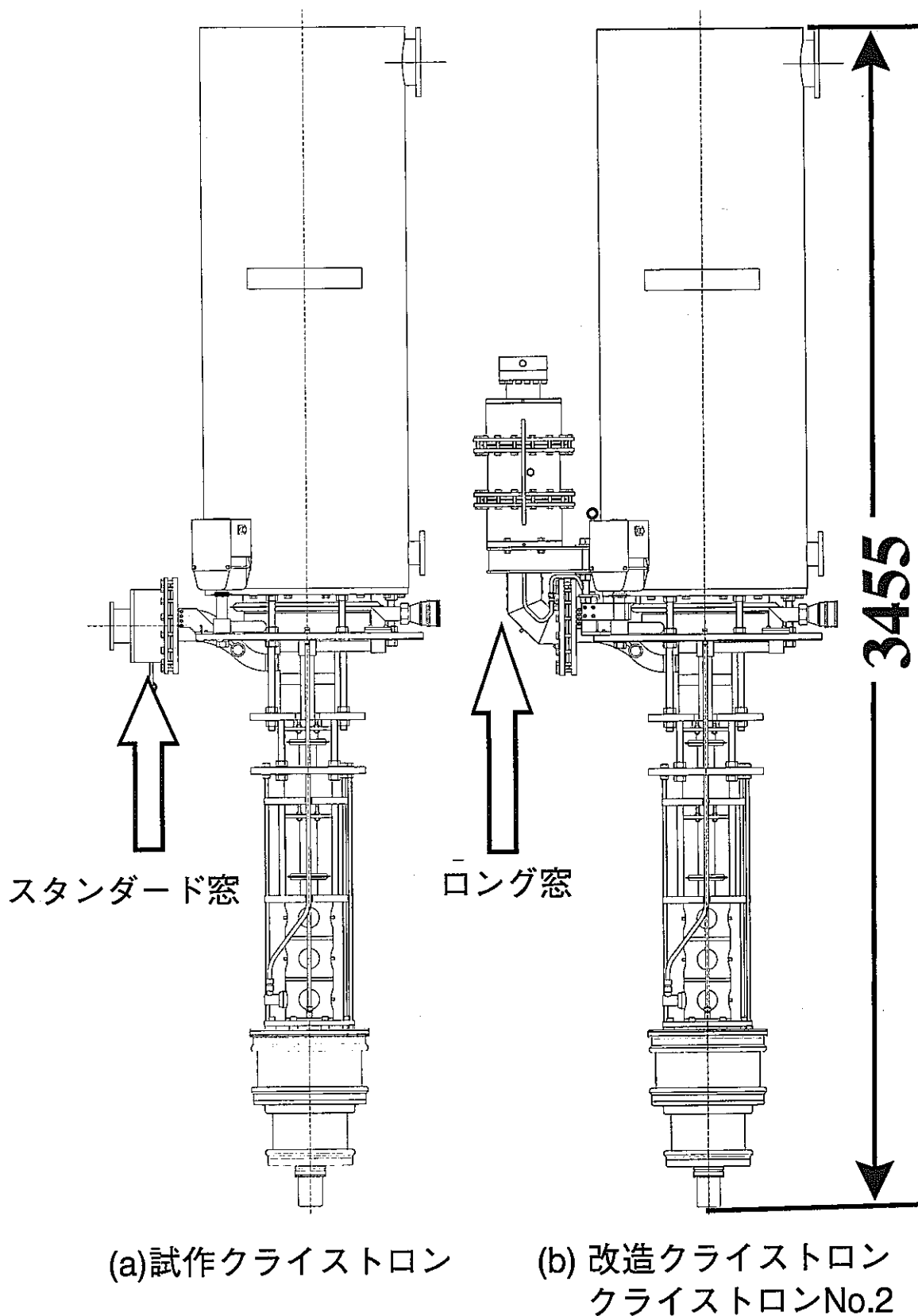


図1.1 試作クライストロン及び
クライストロンNo2の全体図

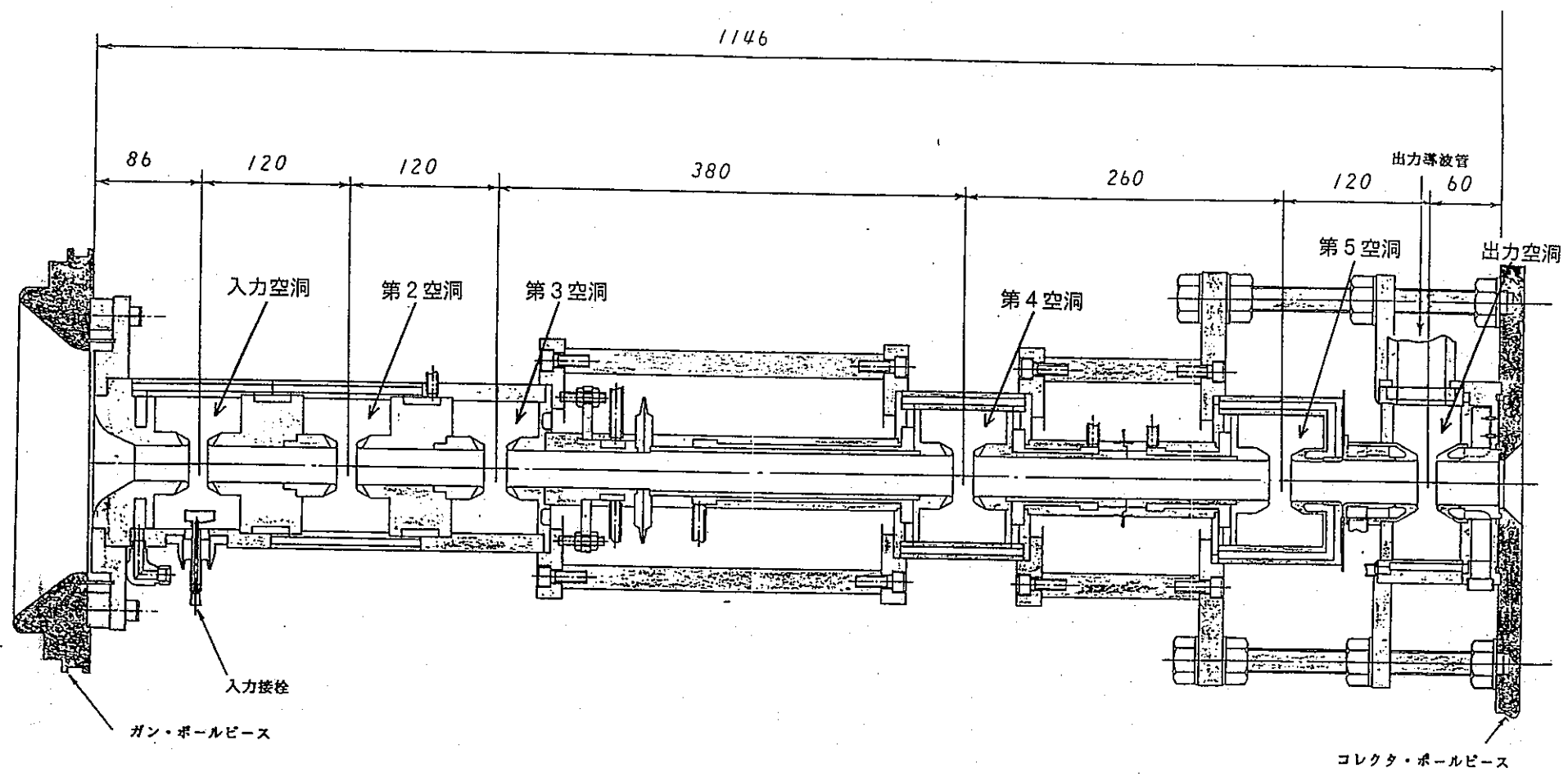


図2. 1 高周波相互作用部概略構造
(高周波相互作用部横断面図)

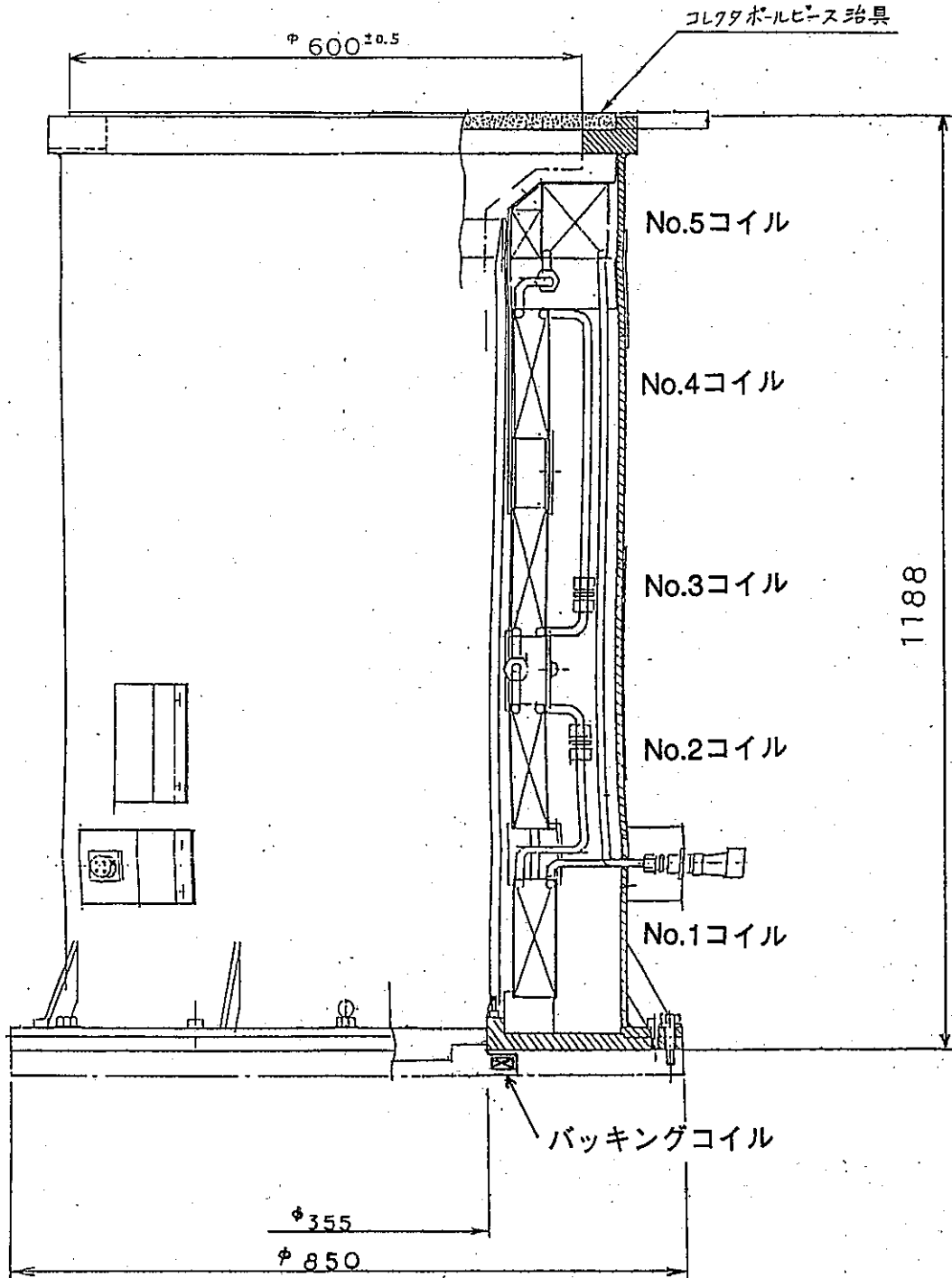


図 2. 2 集束コイルの概略図

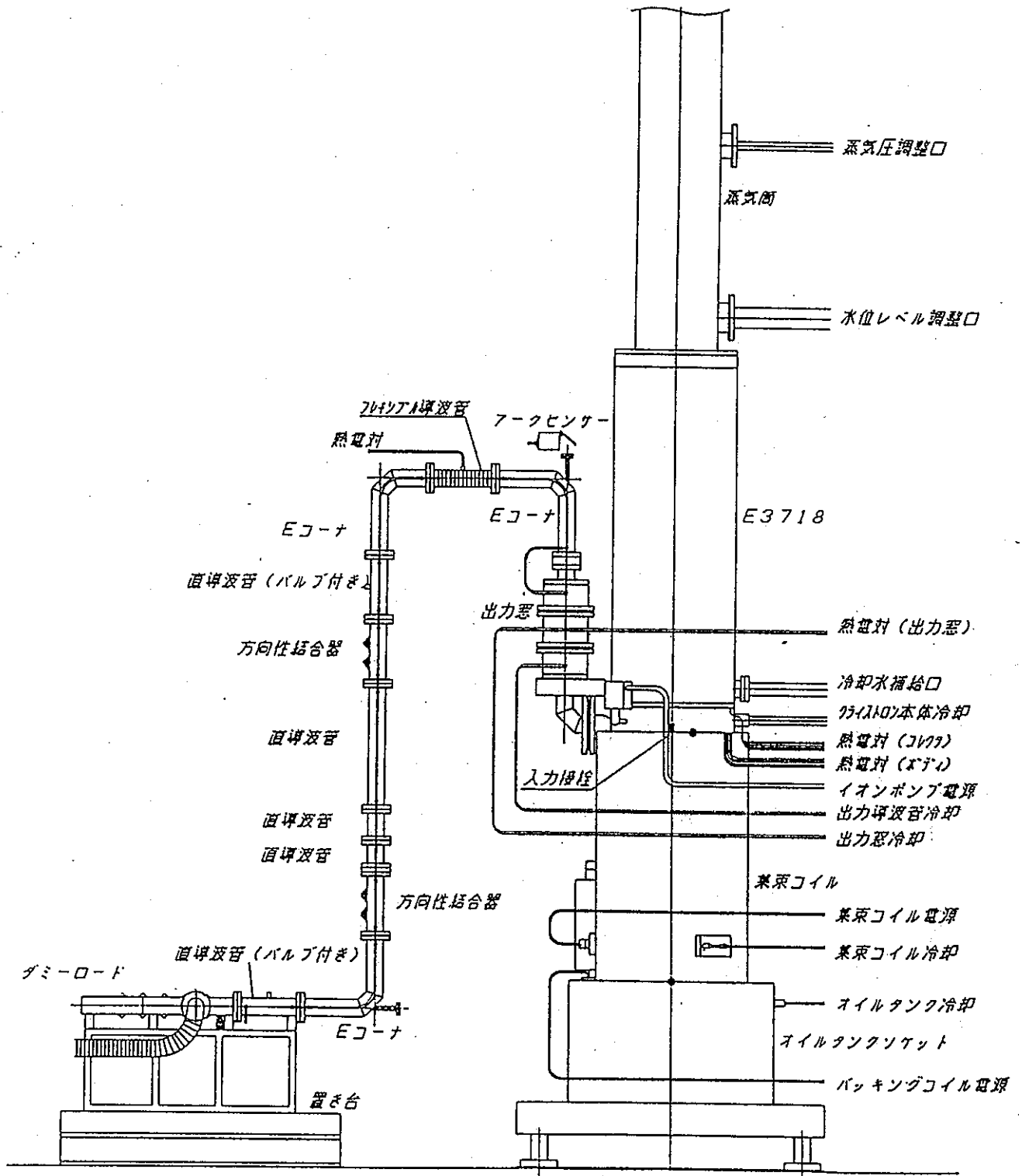


図3.1 改造クライストロンの試験体系

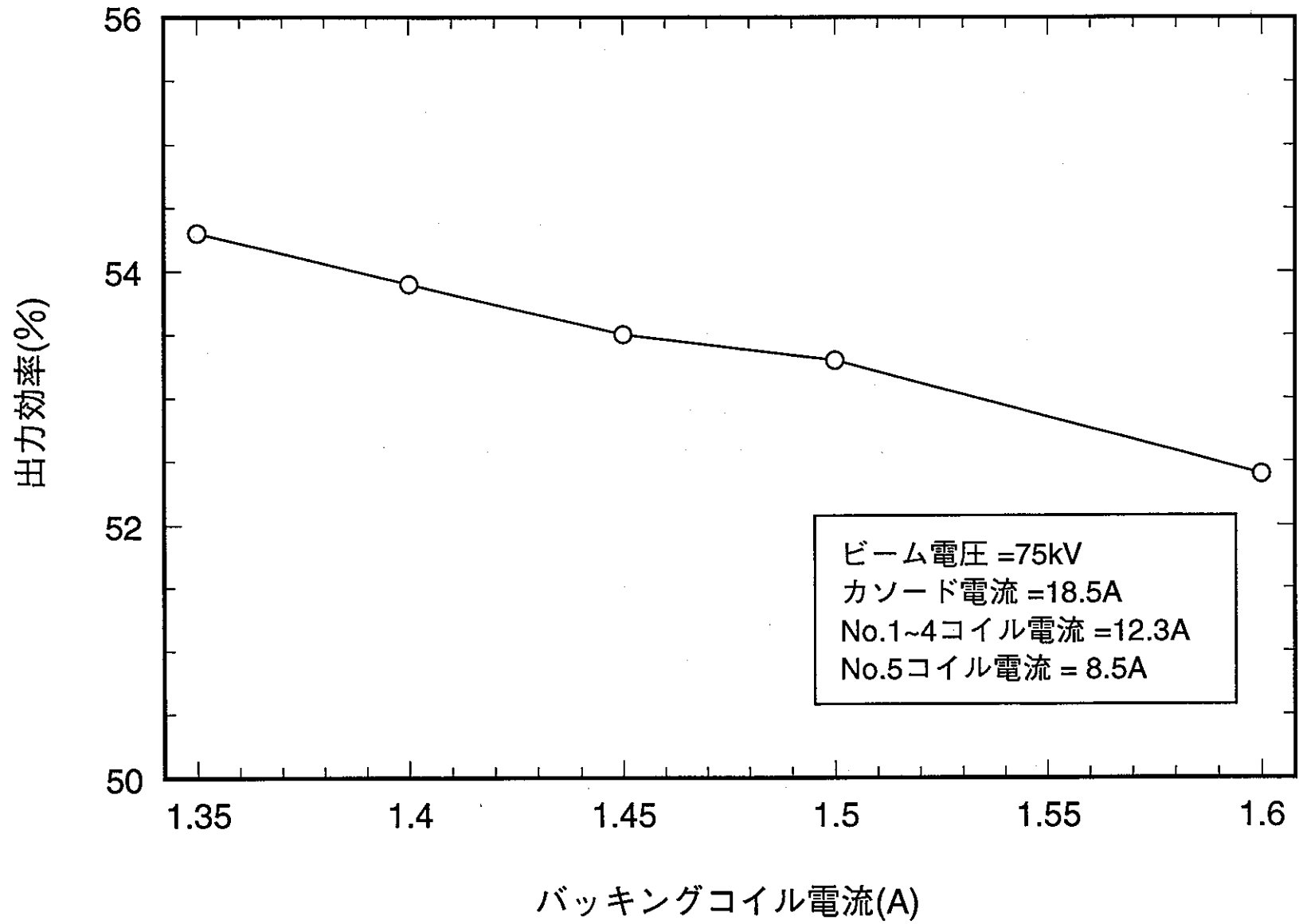


図3.2 バックリングコイル電流に対する出力効率

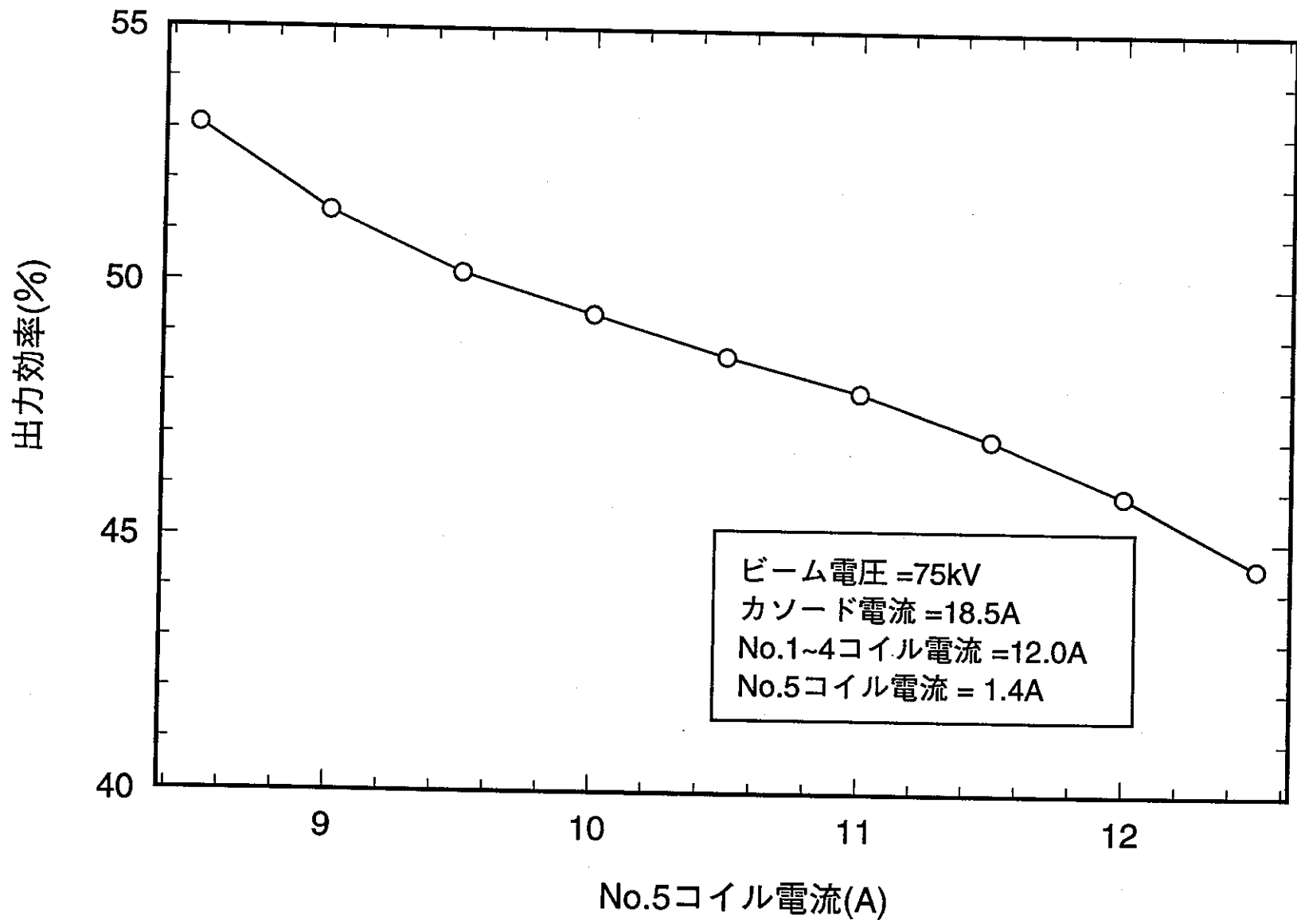


図3.3 集束コイルのNo.5コイル電流に対する出力効率

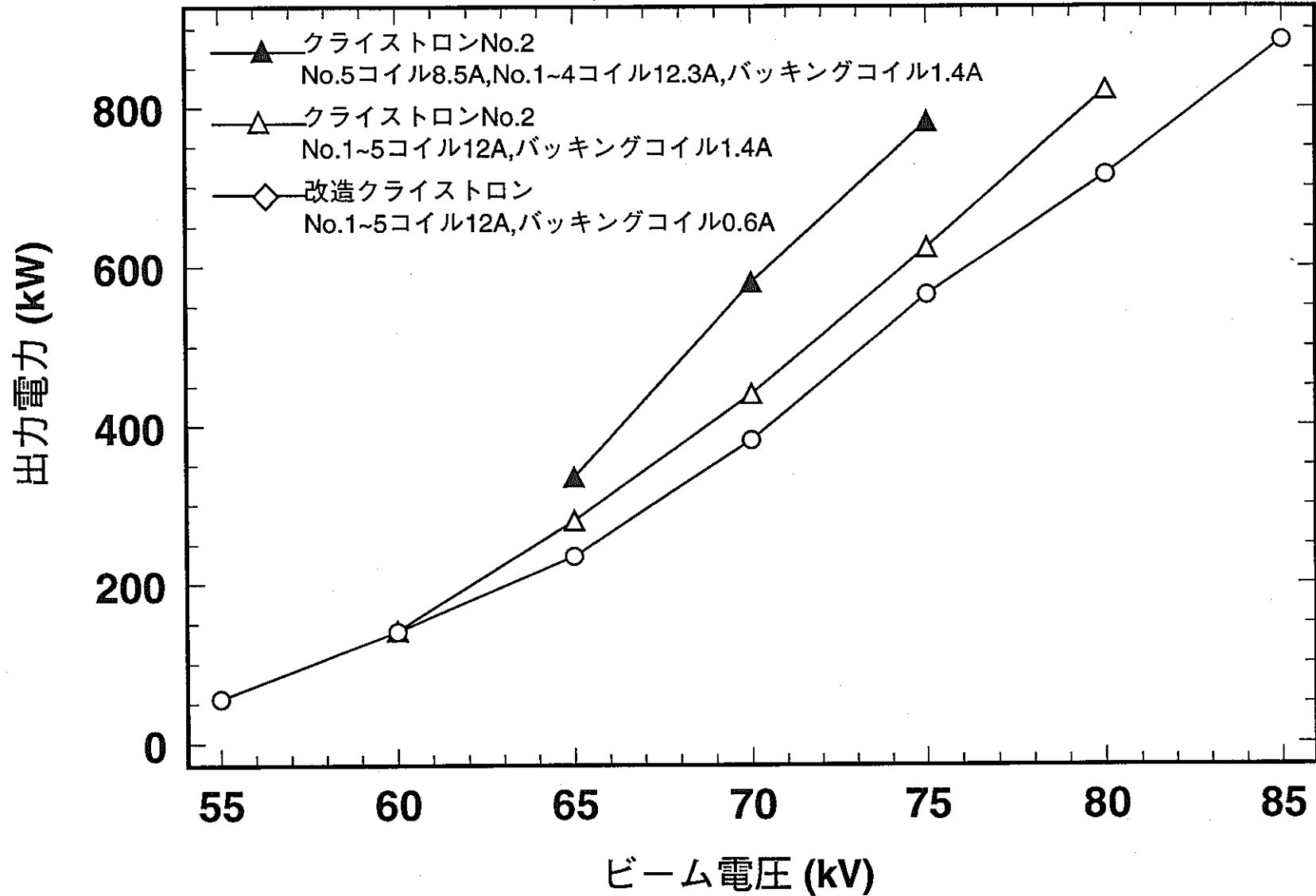


図3.4 ビーム電圧に対する出力電力特性
(ビームパービアンス $0.9 \mu AV^{-3/2}$)

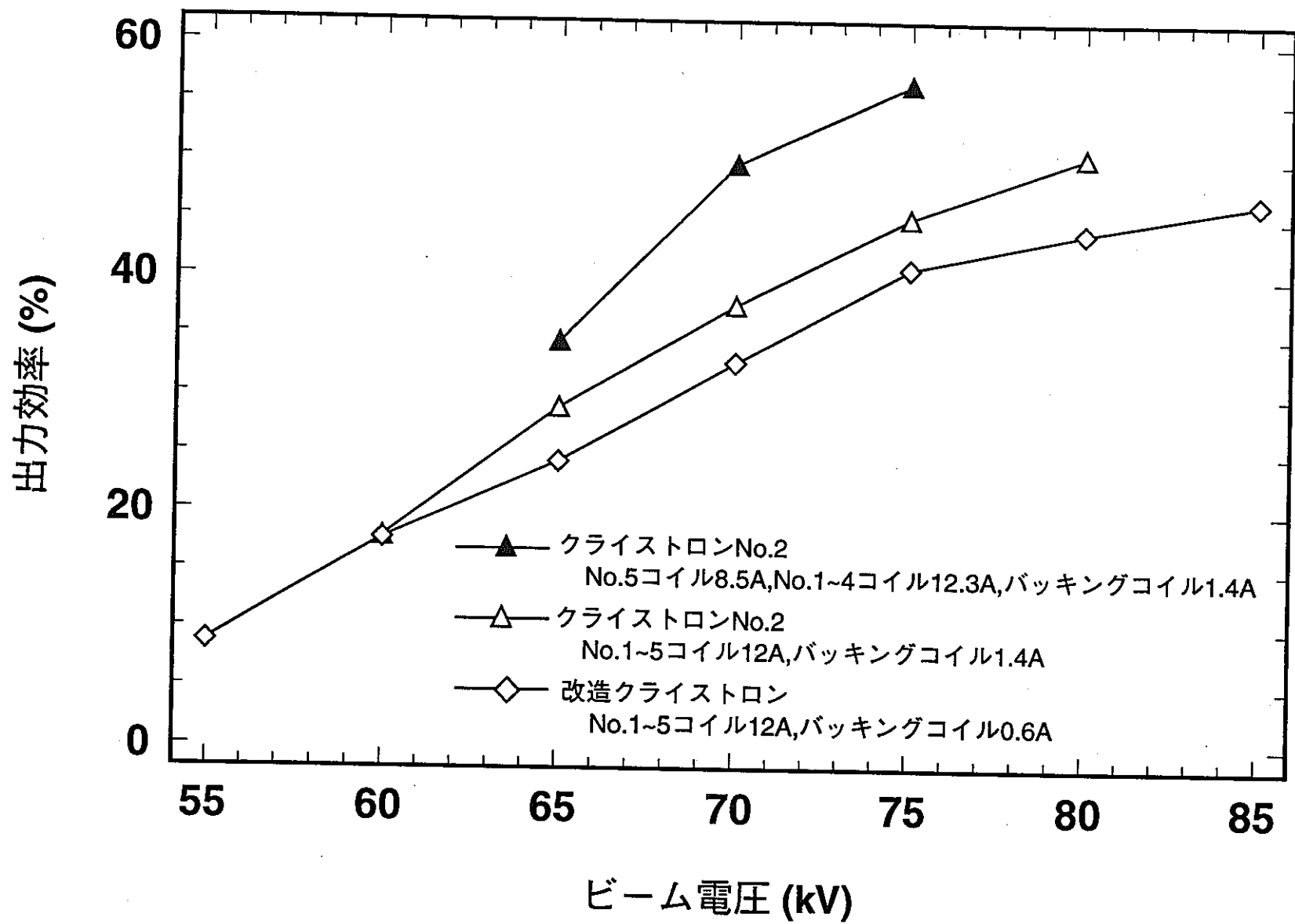


図3.5 ビーム電圧に対する出力効率特性
(ビームパービアンス $0.9 \mu A V^{-3/2}$)

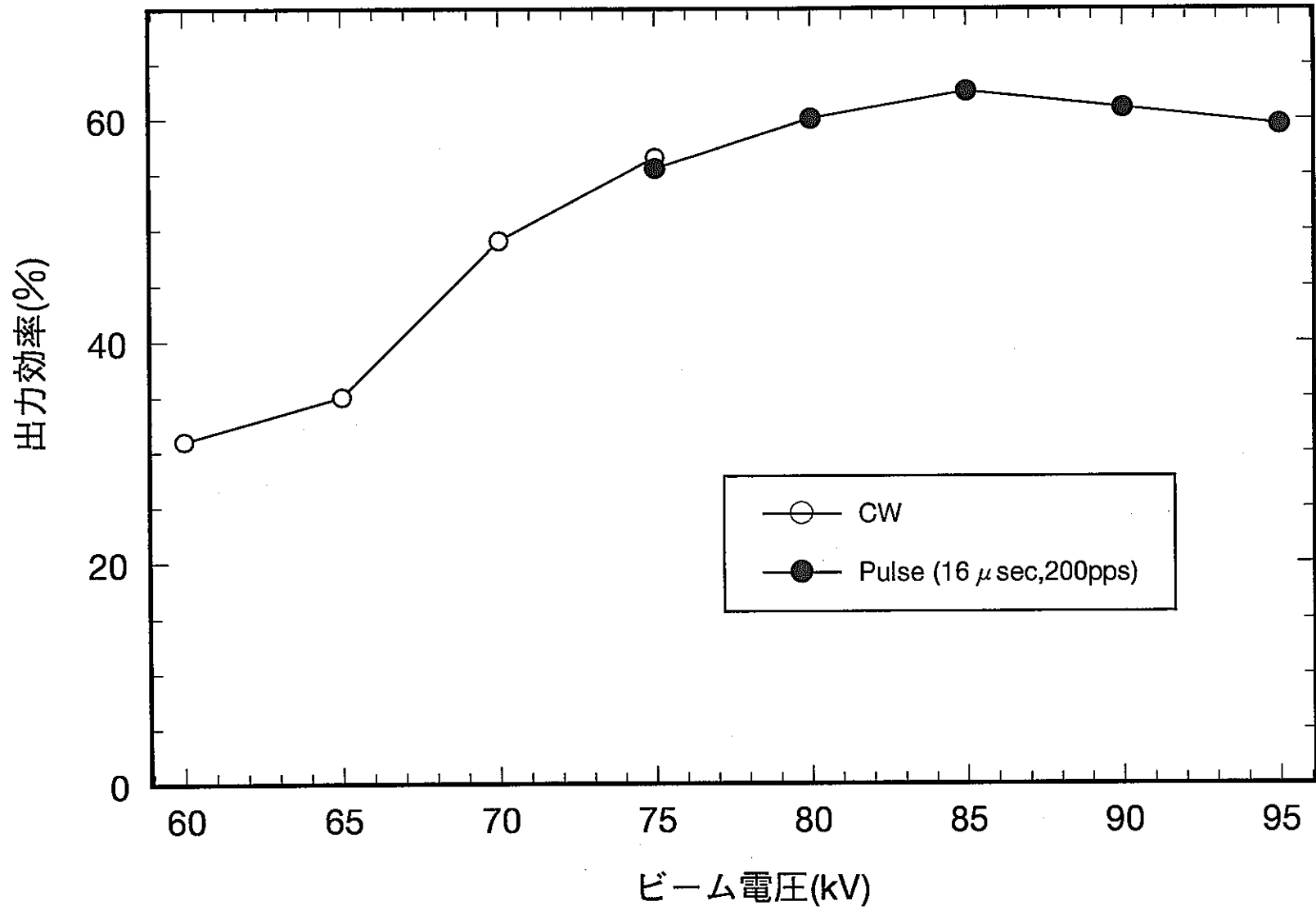


図3.6 CW及びパルス動作によるビーム電圧に対する出力効率特性
(No.1~4コイル電流12.3A, No.5コイル電流 8.5A)

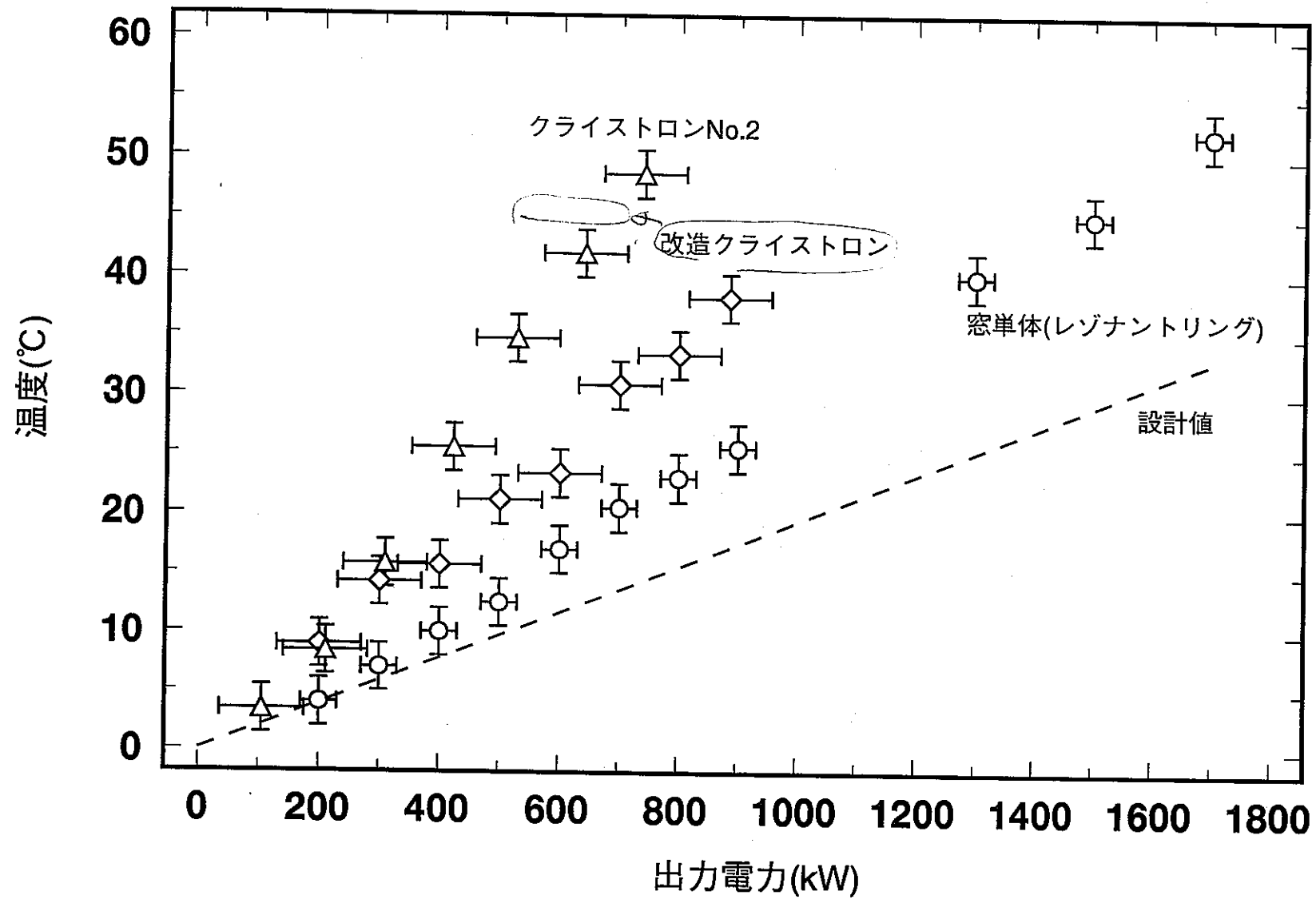
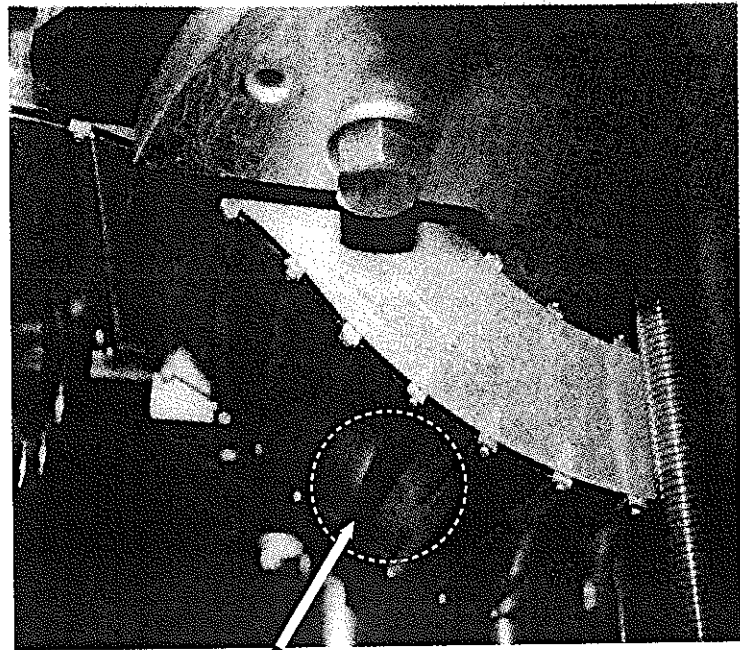
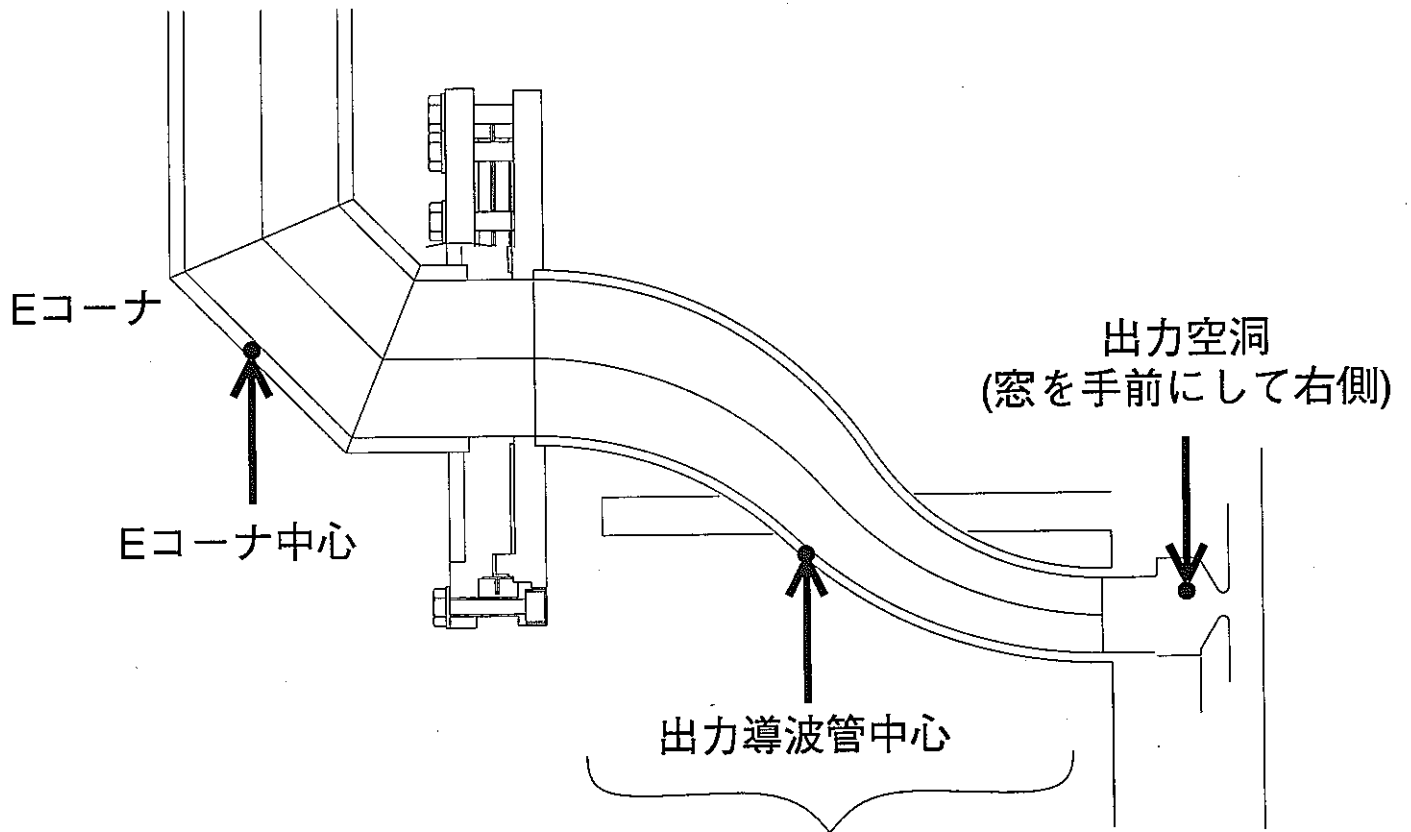


図3.7 ロング窓温度上昇特性



半径10cmの変色部

図4.1 出力導波管変色部分及び熱電対取付位置

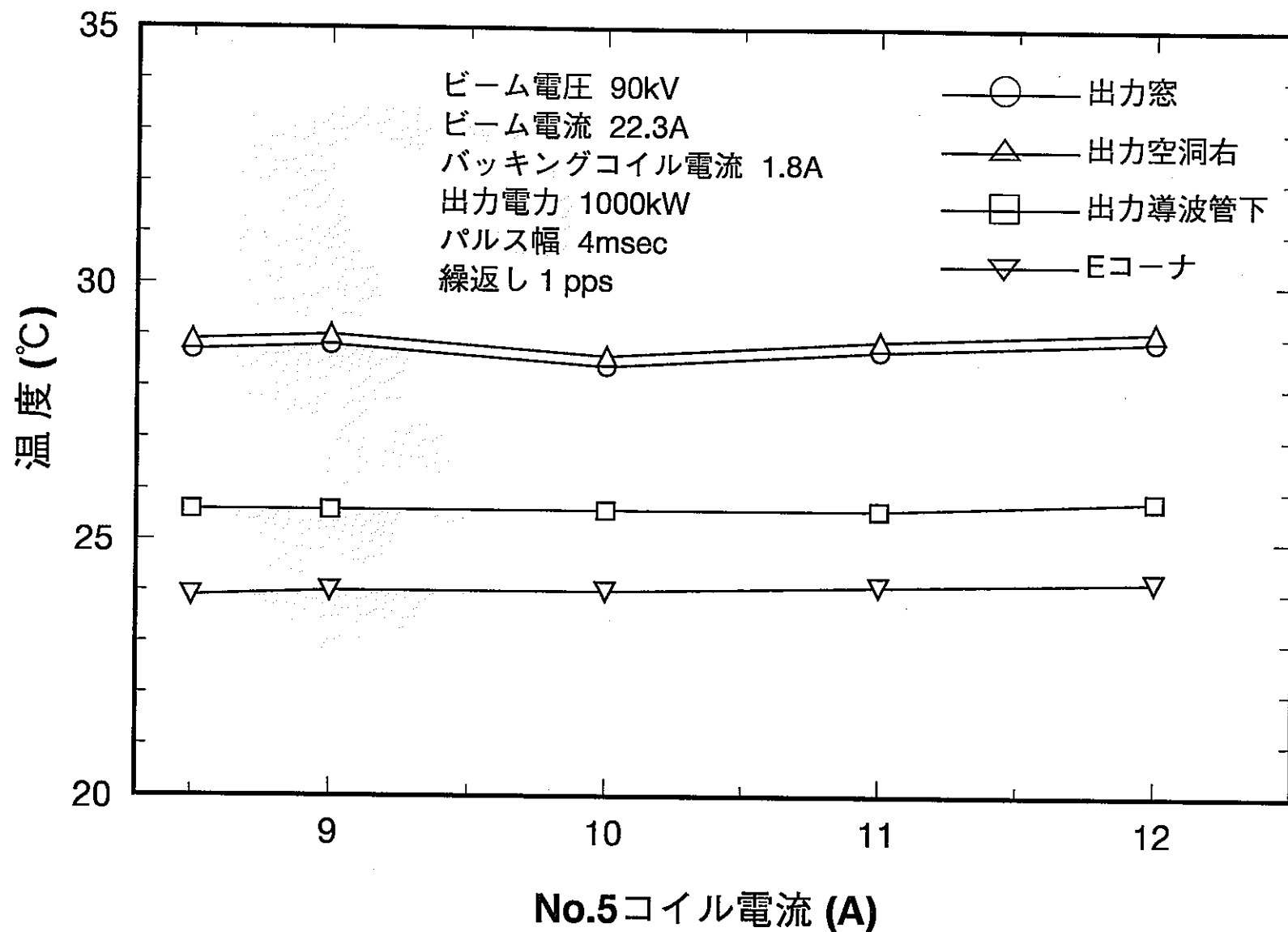


図4.2 No.5コイル電流に対する出力導波管温度特性 (ロングパルスモード)

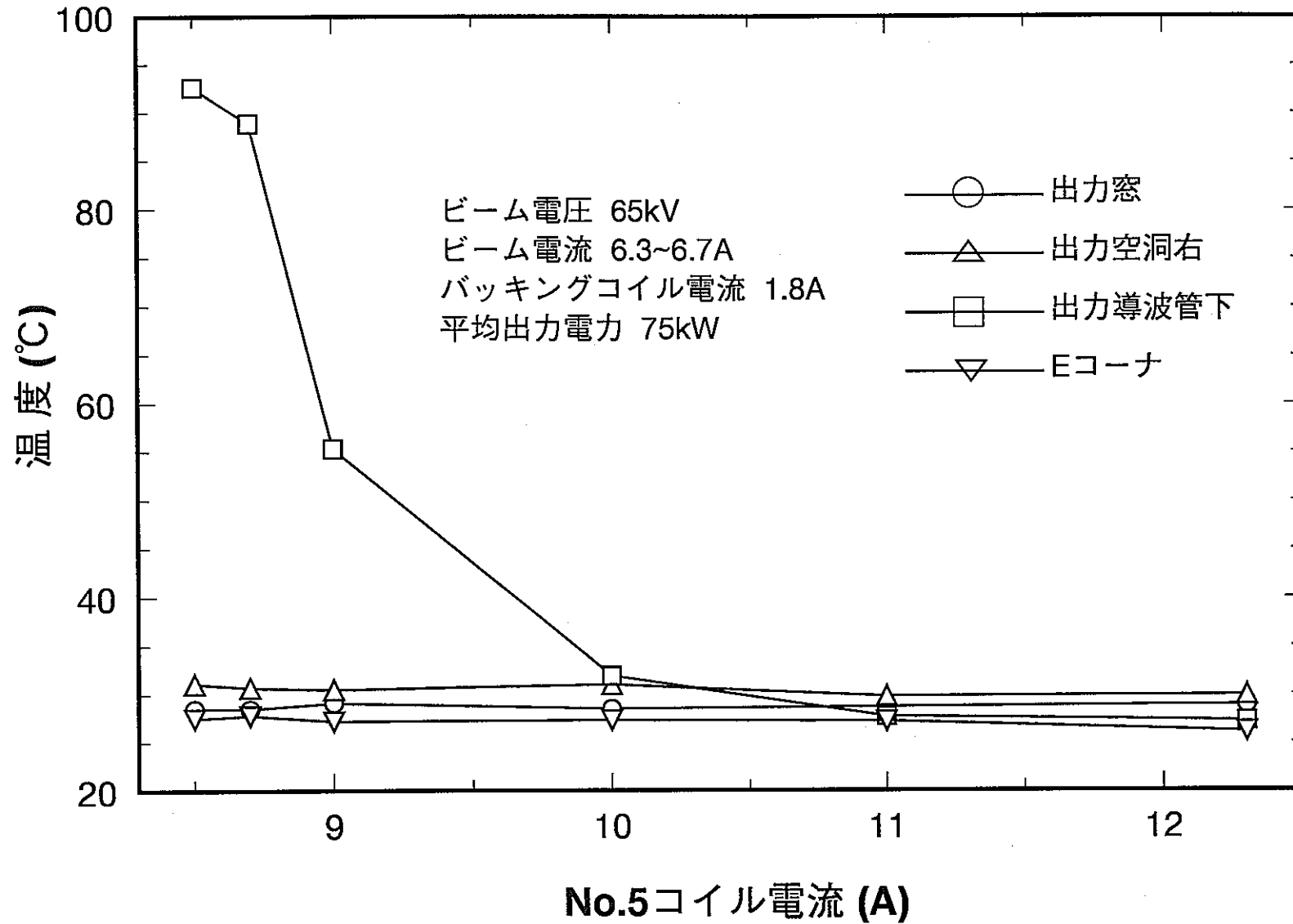


図4.3 No.5コイル電流に対する出力導波管温度特性 (CWモード)

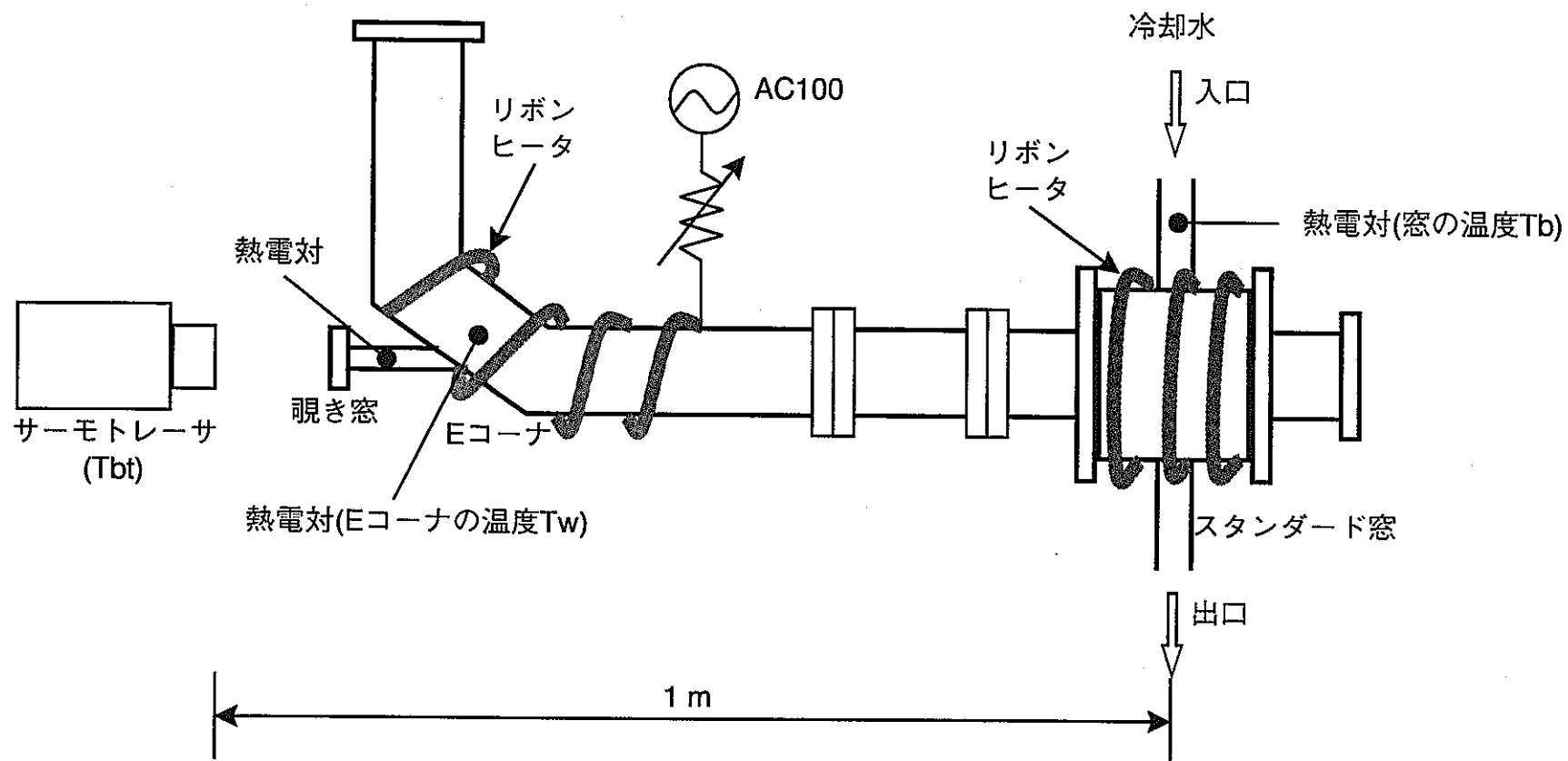


図4.4 高周波出力試験時の温度条件を再現した窓温度測定体系図

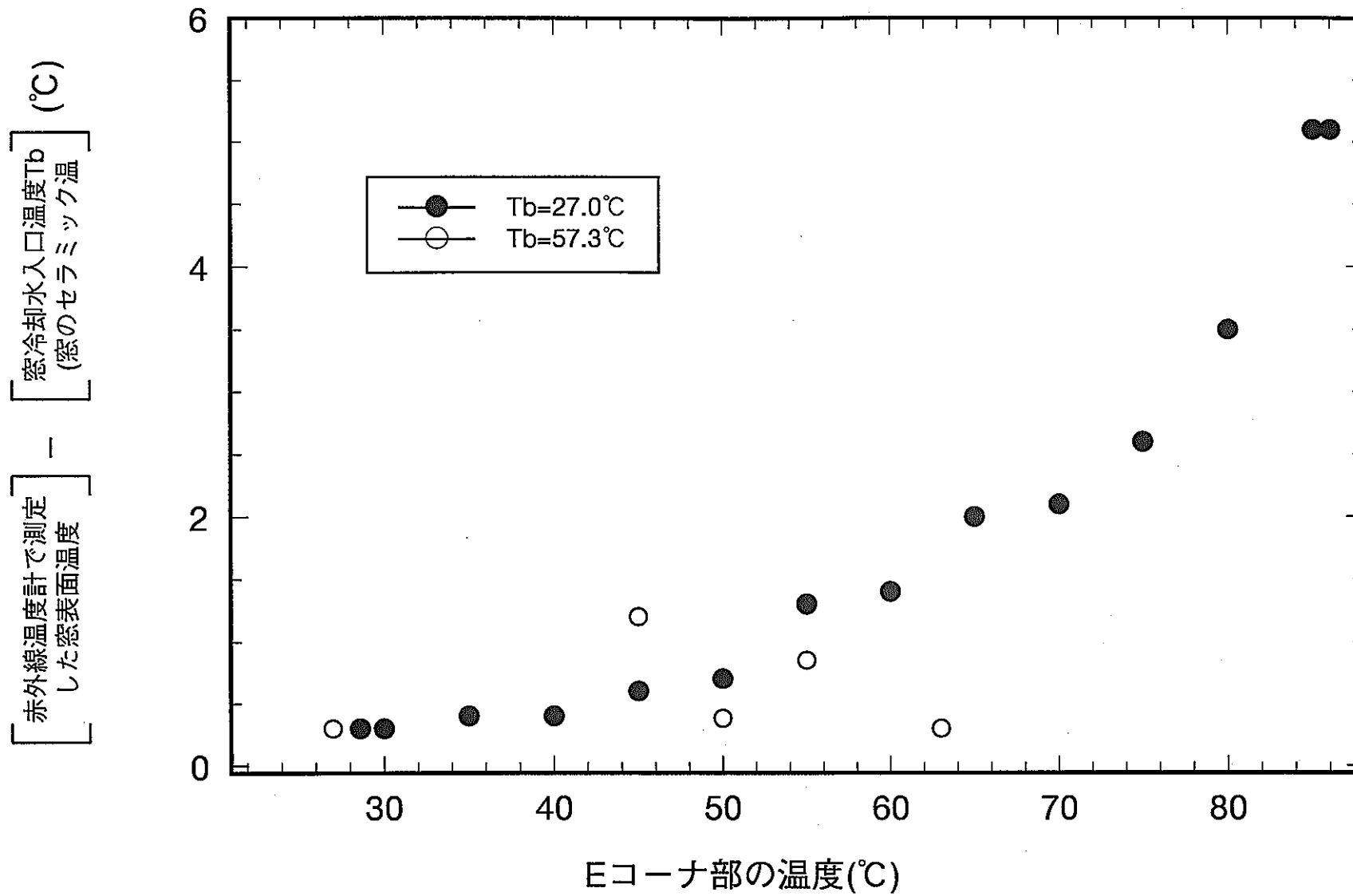


図4.5 Eコーナーの温度上昇が窓表面温度の測定に与える影響

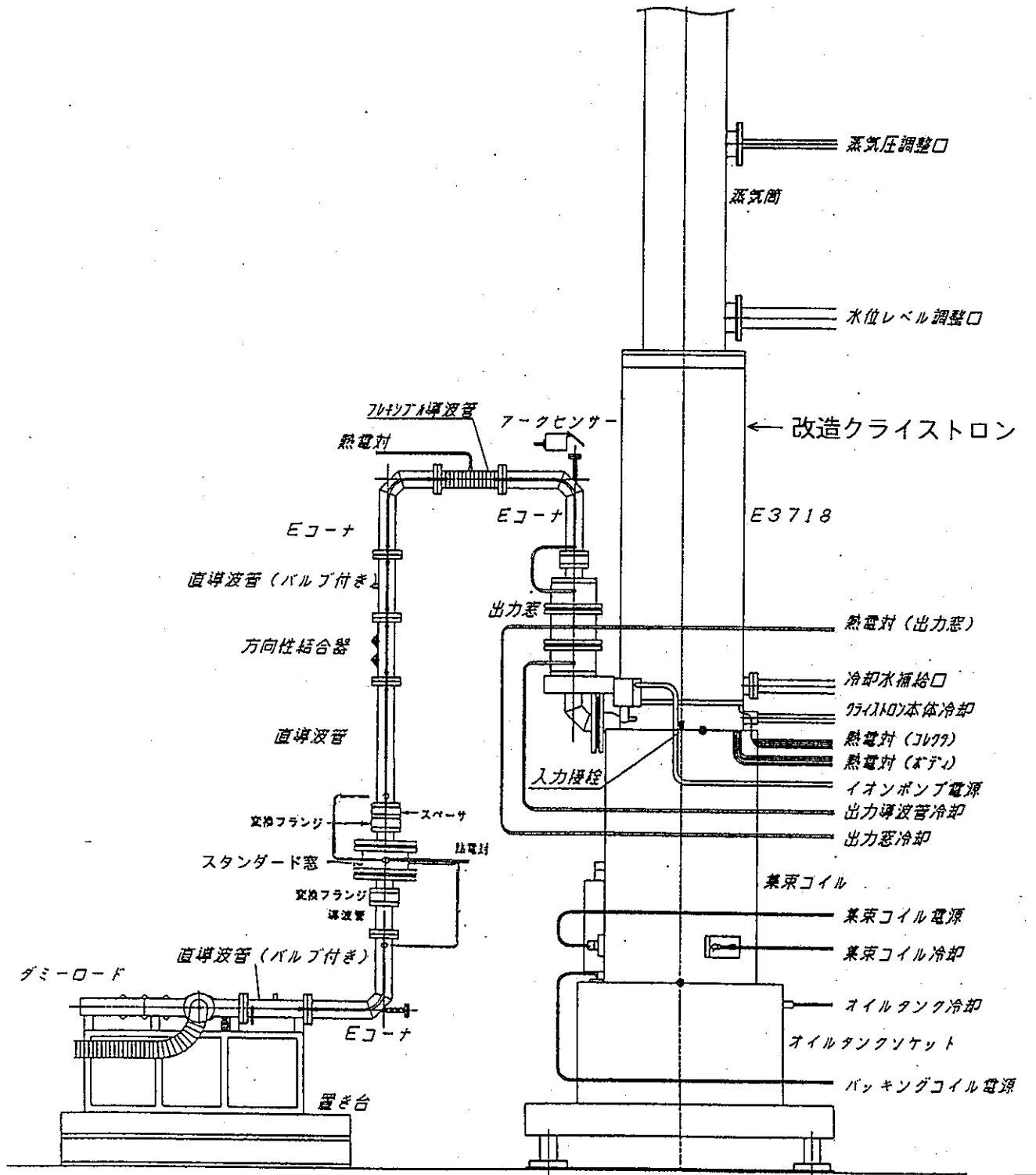


図4.6 改造クライストロンを用いたスタンダード窓
温度上昇測定試験体系図

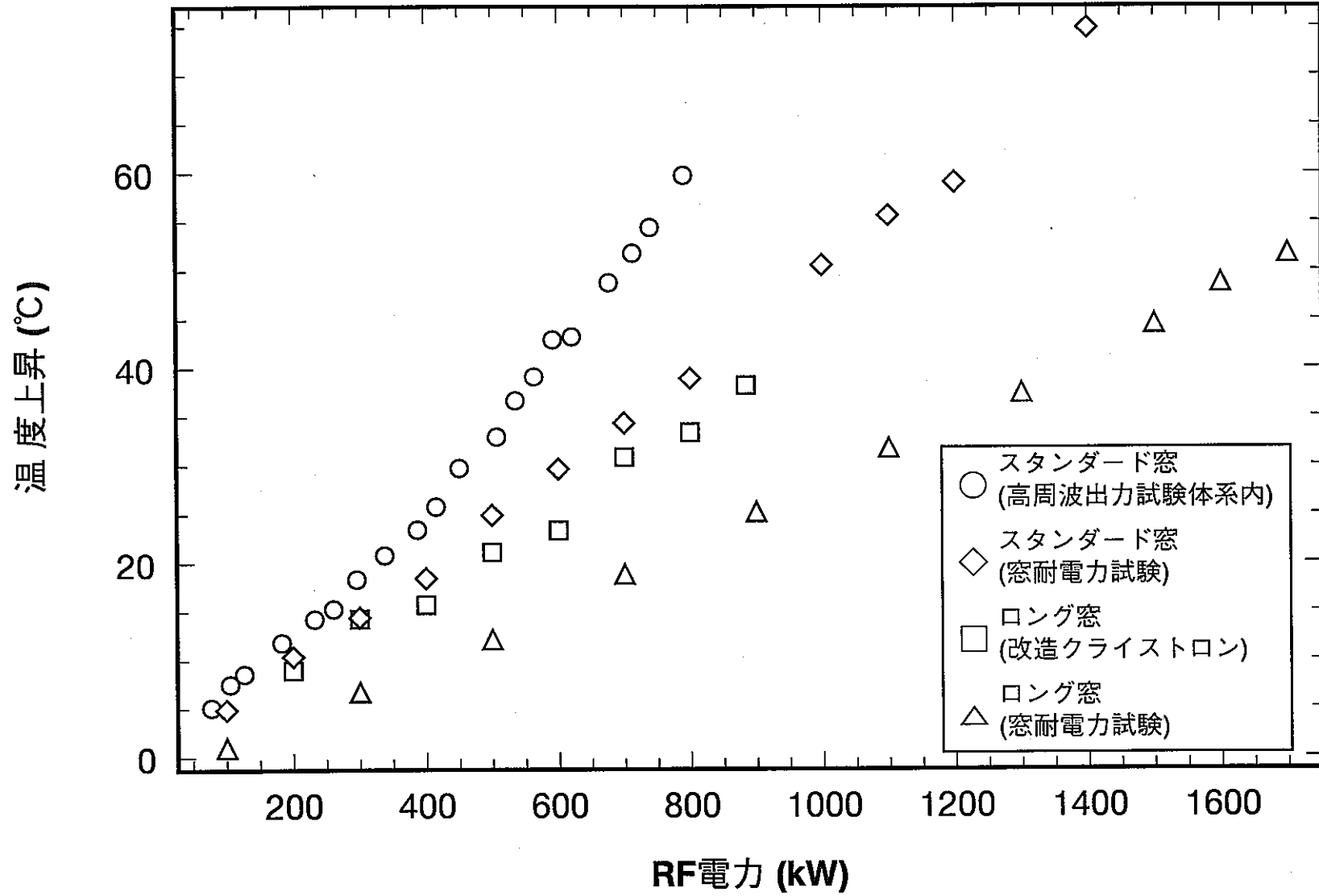


図4.7 スタンダード窓及びロング窓の窓温度上昇特性

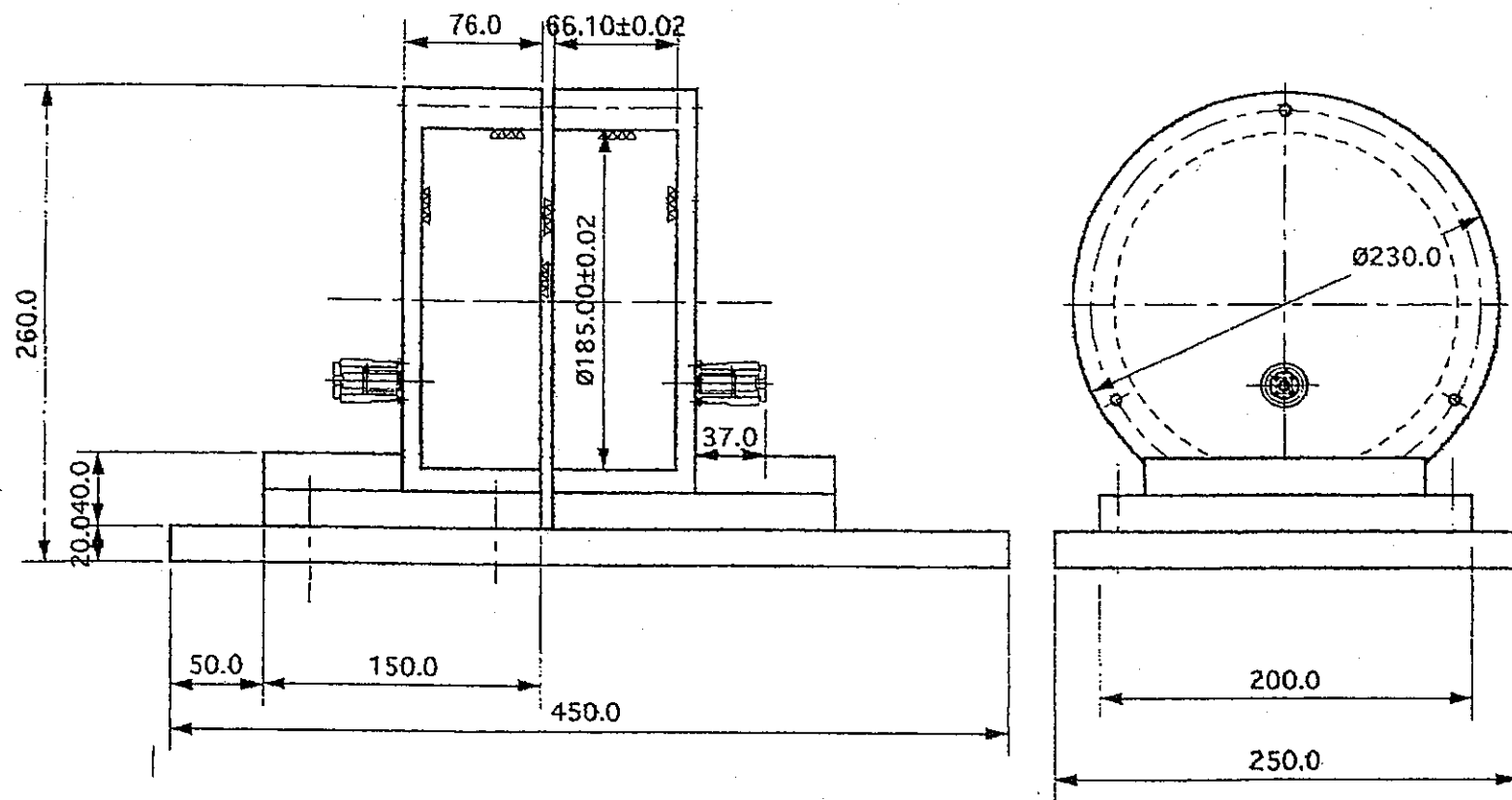


图4.8 空洞共振器

付録A

○窓材誘電損失率の測定

空洞共振器の構造を図1に示す。直径D、長さHの導体円筒空洞を中央で切断しその間に厚さL、直径d、比誘電率 ϵ_s 、比透磁率 $\mu_s=1$ なるセラミックス平板試料を挟んで構成される。この空洞共振器を利用して共振周波数及び無負荷Qを測定し(1)及び(2)式よりセラミックスの試料縁端部の導体損失(縁端効果)を無視して $\tan\delta$ を求める。ここで、実際のセラミックス板上にたつモードは TE_{11} であるが、空洞共振器を利用したセラミックス試料の非破壊測定では空洞部に挟まれたセラミックスの部分からRFが漏れるため $\tan\delta$ の測定値の誤差が大きくなる。この場合、10%程度の誤差が見込まれる。そこで、高精度の測定を行うには TE_{01} を利用する。このモードでは試料縁端部の導体損を高精度に計算できるため精度の高い $\tan\delta$ の測定ができる。しかし、 TM_{11} モードは TE_{01} モードと縮退しているので TE_{01} モードのQ値の測定に悪影響を与える。そこで、 TM_{11} モードのEz成分の最大値位置に低損失低誘電体板を装加する事により TM_{11} モードの共振周波数だけを下げ TE_{01} モードは影響を与えずに測定を行う。こうして求められた $\tan\delta$ に縁端効果の補正を行い $\tan\delta$ の正しい値を求める。

$$\epsilon_r = \left(\frac{C}{\pi L f_0} \right)^2 \left\{ X^2 - Y^2 \left(\frac{L}{2M} \right)^2 \right\} + 1 \quad (1)$$

$$X \tan X = LY \cot Y / (2M)$$

$$Y = M(K_0^2 - K_r^2)^{1/2} = jY'$$

$$K_0 = \omega / C = 2\pi f_0 / C$$

$$K_r = j'_{mn} / R$$

L: セラミックスの厚さ=6.6(mm)

D=2R: 空洞内径=185(mm)

M: 空洞の深さ-L/2=66.1(mm)

f_0 : 共振周波数

j'_{mn} : 第1ベッセル関数 $J_0'(j'_{mn})=0$ の第1番目の根

TE_{01} モードは $j'_{01}=3.8317$

$$\tan \delta = A/Q_u - R_s B \quad (2)$$

$$A = 1 + W_1/W_2$$

$$B = P_c / (\omega R_s W_1)$$

$$R_s = (\omega \mu_0 / 2 \sigma)$$

$$\sigma = \frac{4 \pi f_0 Q_u^2 \{ j'_{01}{}^2 + 2 \pi^2 (D/2H)^3 \}^2}{\mu C^2 \{ j'_{01}{}^2 + (\pi D/2H)^2 \}^3}$$

$$W_1 = \frac{\pi}{8} \epsilon_0 \epsilon_r \omega^2 \mu_0^2 j'_{01}{}^2 L J_0(j'_{01}) \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X} \right)$$

$$W_2 = \frac{\pi}{4} \epsilon_0 \omega^2 \mu_0^2 j'_{01}{}^2 M J_0(j'_{01}) \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y} \right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y}$$

$$P_c = \frac{\pi}{8} R_s j'_{01}{}^2 J_0(j'_{01}) \left[\frac{j'_{01}{}^2 L}{2R_3} \left\{ \left(1 + \frac{\sin 2X}{2X} \right) + \frac{2M}{L} \left(1 - \frac{\sin 2Y}{2Y} \right) \frac{\cos^2 X}{\sin^2 Y} \right\} \frac{Y^2 \cos^2 X}{X^2 \sin^2 Y} \right]$$

R_s : 導体空胴の表面荒さも考慮した実効表面抵抗 (Ω)

P_c : 導体による損失

σ : 実効導電率 (S/m)

Q_u : TE₀₁モードの無負荷Q

W_1 : セラミック内部の電界の蓄積エネルギー

W_2 : 空胴内部の電界の蓄積エネルギー

ϵ_0 : 真空の誘電率 = $10^7 / (4 \pi C^2)$ (F/m)

μ_0 : 真空の透磁率 = $4 \pi \cdot 10^{-7}$ (H/m)

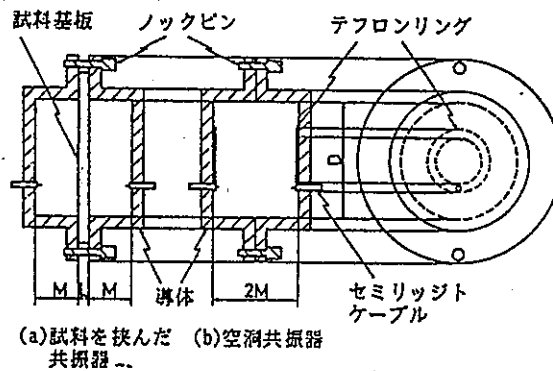


図1 非破壊測定用共振器

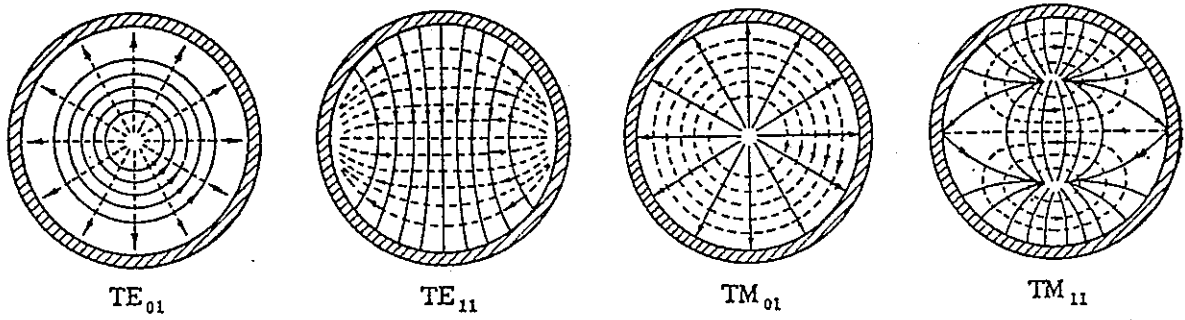
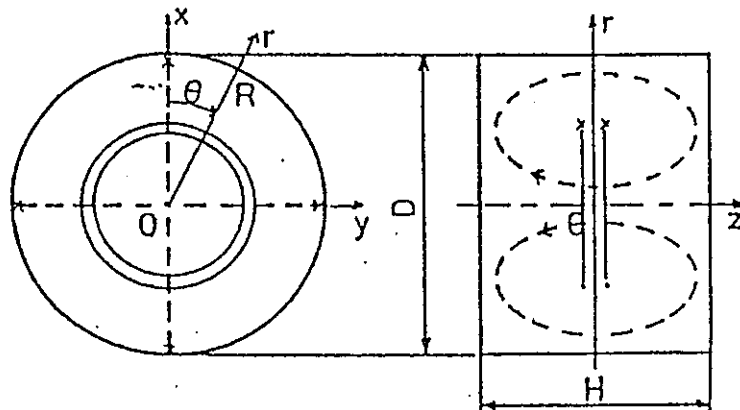
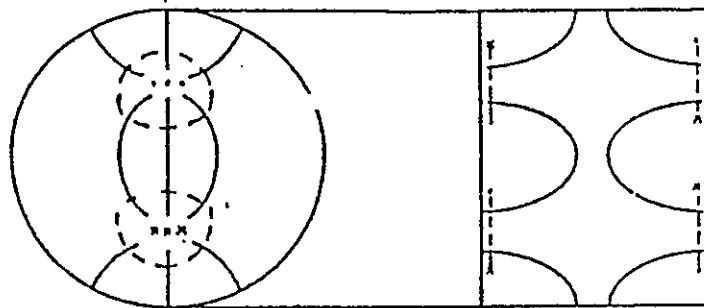


図2 円形導波管のモード



(a) TE_{011} モードの電磁界分布.



(b) TM_{111} モードの電磁界分布.

図3 円筒空洞共振器の電磁界分布