

# 大電流CW電子線形加速器の要素開発 (IV)

— 加速管、クライストロン窓大電力RF試験速報 —

1993年1月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

この資料は、動燃事業団の開発業務を進めるため、特に限られた関係者だけに開示するものです。ついては複製、転載、引用等を行わないよう、また第三者への開示又は内容漏洩がないよう管理して下さい。また今回の開示目的以外のことには使用しないよう特に注意して下さい。

本資料についての問合せは下記に願います。

〒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  
技術開発部・技術管理室

大電流CW電子線形加速器の要素開発(Ⅳ)  
-加速管、クライストロン窓大電力RF試験速報-

遠山伸一<sup>\*</sup>、江本隆<sup>\*</sup>、平野耕一郎<sup>\*</sup>、尾下博教<sup>\*</sup>、野村昌弘<sup>\*</sup>、武井早憲<sup>\*</sup>、  
高橋伸友<sup>\*</sup>、佐久間実<sup>\*</sup>、王元林<sup>\*\*</sup>、姫野嘉昭<sup>\*</sup>

要 旨

〔背景〕 開発中の大強度CW電子線形加速器では、既存の加速器より数桁電流値の高い電子ビームを加速する。このため主要機器の加速管、クライストロンなどの設計研究及び試作を行ってきた。今回は、電子ビームは用いないが、大電力RFでこれらの試作機器の性能評価試験を行った。

〔目的〕 試作還流型加速管の大電力RF試験を行って設計の妥当性を検証する。また、新たな課題が見つければその対策について考察する。クライストロンについては、昨年試験で課題となっているRF出力窓であるセラミック窓の改良設計及び試作を行い、改良効果は大電力RFを用いて検証する。

〔方法〕 既に試作したクライストロンを大電力RF源として、クライストロン、加速管及びクライストロン用RF出力窓のための試験体系を構築し、それらを用いて大電力RF試験を行った。なお、試験はクライストロンを運転できる高圧電源が存在する高エネルギー物理学研究所で行った。

〔結果〕 加速管では、放電や過度の熱変形を起こすことなく、ほぼ最終開発目標の800kWまでのRF電力が安定に印加でき、ほぼビーム無負荷での目的を達成した。ただし、今回使用した移相器の過度の電力減衰のための異常発熱が発生した。クライストロン出力窓については、窓付近の形状最適化設計による試作品の大電力RF試験を行い、開発目標以上の最大で1.7MWの、Lバンドでは世界最高級の大電力に耐える窓の開発に成功した。

〔結論〕 還流部加速管は付属の移相器を除いて大電力RFの印加に成功し、設計の妥当性が確認された。クライストロン出力窓は、改良設計に成功し、開発課題を解決できた。移相器は今後改良を行う。

---

\* 大洗工学センター、技術開発部、フロンティア技術開発室

\*\*大洗工学センター、技術開発部、フロンティア技術開発室客員研究員

(中国 南京大学物理系 副教授)

The Key Development of High Power CW Electron Linac (IV)  
- Preliminary Result of High Power Experiment for a Traveling Wave  
Resonant Ring and Klystron Output Windows-

S. Toyama, T. Emoto\*, K. Hirano\*, H. Oshita\*, M. Nomura\*, H. Takei\*,  
N. Takahashi\*, M. Sakuma\*, Y. L. Wang\*\* and Y. Himeno\*

ABSTRACT

[Background]

Development of a CW electron linac which can accelerate a few order higher beam current is under development in PNC. So far, design of main components: accelerating tube and a klystron has been carried out. This time high power RF experiment of the developed components was carried out without electron beam.

[Objective]

An experiment with high power RF was carrying out in order to validate the design of the components. In regard to ceramic windows for the klystron, improvement of its design was found necessary in accordance with the experiment in last year. Therefore the design was improved, and high power RF experiment was carried out for test window manufactured based on the improved design.

[Method]

The test system for a accelerating tube and klystron windows was constructed and high power RF experiment was carried out using this system where the trial klystron was used as high power RF source. The experiment was carried out in National Laboratory for High Energy Physics (KEK) in Tukuba where the high voltage DC power supply is available.

[Result]

The traveling wave resonant ring was successfully driven with 800 kW RF power which is around the final goal in the case of no beam loading. The unexpected thermal dissipation was observed at the phase shifter of the resonant ring because of its high RF attenuation. The klystron windows that have the optimized design dimension could transmit the 1.7 MW RF power which is strongest over the world in L-band.

[Conclusion]

The validity of the design of traveling wave resonant ring and klystron windows was demonstrated by high power RF loading experiment. But, the phase shifter needs more improvement to make it possible to use under hundreds of high power RF.

---

\* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division, Oarai Engineering Center(OEC)

\*\* Frontier Technology Development Section, Technology Development Division, Oarai Engineering Center(OEC)

Visiting Scientist from Nanjing University

## 目 次

1. はじめに	-----	1
2. 大電力RF試験の概要	-----	2
3. 大電力RF試験の結果	-----	3
3. 1 クライストロン出力確認	-----	3
3. 2 進行波還流型加速管	-----	3
3. 3 クライストロン窓	-----	5
4. まとめ	-----	8
5. 謝辞	-----	8
参考文献	-----	9

## 表リスト

表 1	加速器基本仕様	-----	1 0
表 2	還流型加速管仕様	-----	1 0
表 3	クライストロン仕様	-----	1 1
表 4	大電力試験実施スケジュール	-----	1 2
表 5	大気系導波管仕様	-----	1 3
表 6	大電力ゲミナート仕様	-----	1 3
表 7	試作ビルボックス窓寸法	-----	1 4
表 8	試作窓の設計値及び測定値	-----	1 4

## 図リスト

図 1	加速ユニットにおけるRFの伝播	-----	1 5
図 2	クライストロン出力測定試験体系	-----	1 6
図 3	加速管試験体系	-----	1 7
図 4	クライストロン出力窓試験体系	-----	1 8
図 5	大気系導波管系	-----	1 9
図 6 a	大電力ダミーロード外観	-----	2 1
図 6 b	大電力ダミーロード寸法図	-----	2 1
図 7	クライストロンレーバ'ルコントロールシステム	-----	2 3
図 8	大気系導波管のVSWR周波数依存性	-----	2 4
図 9 a	出力電力に対する出力窓の温度上昇	-----	2 4
図 9 b	ビーム電圧に対する効率特性	-----	2 4
図 1 0	加速管エージング進行状態	-----	2 5
図 1 1	レゾナントリング移相器の温度上昇	-----	2 6
図 1 2	レゾナントリング移相器の構成	-----	2 7
図 1 3	取り出された移相器スタブ A とフィンガ'ストリップ	-----	2 7
図 1 4	加速管エージング結果	-----	2 9
図 1 5	RF出力に対する加速管の温度上昇	-----	3 0
図 1 6	RF出力に対する共鳴周波数の変化	-----	3 0
図 1 7	還流系電力の周波数依存性 (その 1)	-----	3 1
図 1 8	還流系電力の周波数依存性 (その 2)	-----	3 1
図 1 9	スタブチューン調整による増幅率、反射係数の変化	-----	3 2

図 2 0	試作したクライストロン出力窓図	-----	3 3
図 2 1	窓試験体系セットアップ図	-----	3 4
図 2 2	試作クライストロンのセラミック窓温度上昇	-----	3 5
図 2 3	1.7MWでのクライストロン窓温度上昇	-----	3 7
図 2 4	亀裂が生じたアルミの試作クライストロン窓	-----	3 7
図 2 5	スタブ・RF周波数変化に対するクライストロン窓温度上昇	-----	3 9
図 2 6	クライストロン出力窓パルスレージング結果	-----	4 0



## 1. はじめに

大洗工学センターでは核変換技術開発の一環として既存の加速器よりも2桁高い電子ビームを加速するために、表1に示す仕様または開発目標を持つ大電力CW電子線形加速器（以下本ライナックと呼ぶ）の要素開発<sup>1,2)</sup>を行っている。このようないわゆる大強度のライナックは、過去の開発事例がないので、動燃ではその要素機器の設計研究を行い、その結果に基づき加速管とクライストロンの試作を行い、その低電力RFによる性能試験を行ってきた。具体的には、平成2年度に大電力CW試作クライストロンを製作し、平成3年度は進行波還流型加速管の試作と今回の大電力RF試験に向けた準備を進めてきた。

大電力RF試験は、これらに続くもので、大電力投入時のRF特性のみならず発熱による寸法変化によるRF特性の変化など、低電力では発生しない新たな問題の発生が予想されるため、そのような問題の有無の把握とビーム試験に必要な対策を考察するため行った。即ち、低電力RF試験では15dB<sub>m</sub>程度（32mW）のRFを用いるが、本ライナックでは図1に示すように、加速ユニットの一つのレゾナントリングには200kW（デューティファクタ20%）のRFが投入され、進行波加速管では増幅されて800kWに達するため、この電力値に近い状態での試験が必要である。クライストロンについては、1.2MW（CW）のRFが出力されるため、これまでの開発で課題となっていたセラミック製RF出力窓の過度な発熱防止のための改良設計が必要であったため、これを大電力RF試験によって進める必要がある。

試験には大出力高圧直流電源が必要であり、このような設備は現在高エネルギー物理学研究所にしかないため、同所に大電力RF試験用の体系を構築して行った。

## 2. 大電力RF試験の概要

本ライナックの還流型加速管、クライストロンの仕様を表2、3にまとめて示す。これらの試作品に対しては、これまでの低電力試験によって、加速管についてはQ値・ $M^2$ （電力増幅率）等の目標値を得、クライストロンについてはバービアンズ・目標効率・電力利得等の特性を把握している<sup>3)</sup>。

今回の試験はこれらに続くもので、その経過を表4に、経過の概略を以下に示す。

テスト試験体系の構築	91年11月～92年2月	
クライストロンのI-ジック・調整	92年 3月～5月中旬	(実働20日程度)
加速管試験体系の構築・調整	6月	(実働10日程度)
加速管試験 (I-ジック含む)	7月～8月中旬	(実働20日程度)
フェーズシフト除去工事	9月下旬	(実働 3日程度)
加速管試験継続	10月～11月	(実働10日程度)
クライストロン窓試験試験体系の構築	12月上旬	(実働 3日程度)
クライストロン窓試験	12月上旬～下旬	(実働20日程度)

試験に当たっては、図2～図4に示したクライストロン出力測定用、加速管試験用、クライストロン出力窓試験用それぞれの試験体系を準備し、それらを順次入れ替えて試験に使用した。大電力RF試験試験の項目を以下に示す。

### ①加速管

- エージング (管内電力200kW以上)
- 電力増幅率、チューニング特性 (移相器・スタブチューナ)、共振周波数、管内反射等のRF特性 (管内電力200kW以上) Q値、位相長
- 熱負荷特性の把握

### ②クライストロン窓

- 試作セラミック出力窓の耐電力試験 (1.2MW以上)

ここで、開発の最終段階では、加速管の還流部には定格で200kWのRFが投入でき、レゾナントリングではこれが蓄積されて増幅されCWで800kWに達する必要があるため、試験の投入電力は可能な限り上昇させ、CWのためのデータを取得することとした。今回の冷却系の設計値は本ライナックのデューティファクタに合わせて、管内電力200kWでの熱設計になっている。試作セラミック出力窓についてはクライストロン飽和出力定格が1.2MWであるので、1.5MW程度を目安として、窓材が破壊または破壊の兆候が現れるまでRF印加電力を段階的に上昇さ

せることとした。

### 3. 大電力RF試験の結果

#### 3.1 クライストロン出力確認

大電力RF試験のRF発生源として使用する試作クライストロンの出力確認試験を、前年度のメーカ工場試験に引き続いて行った。結果から、工場試験と同様に300kWまでのRF出力の上昇の可能なことを確認した。尚この時の出力は、導波管に取り付けた方向性結合器によって出力の一部を分岐させ、RFをパワーメータで測定することで決定した。ここで、方向性結合器とパワーメータの組み合わせでは相対的な測定しか出来ない。よってその校正が必要となるが、これには図2で示すように、ダミーロードを用いて行った。ここでは、出力搬送用の導波管系の末端に取り付けたダミーロードにクライストロンからの出力RFをほぼ全て水に吸収させて、水温上昇幅から吸収した電力の絶対値を求め、パワーメータ系の校正を行った。校正から、パワーメータの測定誤差は2%以下であった。なお、大電力RF試験に用いた大気仕様導波管系、ダミーロード、及び試験時にクライストロンの運転に用いたコントロールシステムをそれぞれ図5～7に、大気系導波管系、及びダミーロードのRF仕様を表5、6に示す。大気系導波管の1249MHzでのVSWR（電圧定在波比）は、図8に示すように試験体系の組立後で1.17であり、設計値より高かったが、これは組立の精度に由来するものと推測した。

測定結果を図9 a及び図9 bに示す。図9 aには今回の試験結果を「平成4年度の試験結果」として示し、比較のために前年度のメーカ工場試験で得た結果を「平成3年度の試験結果」として示した。図の横軸に示したRF出力が約330kW以上では、セラミック製の出力窓が設計上は過度な温度上昇幅に近い50℃を越したため、昨年と同様、それ以上の出力上昇は行わなかった。一方、クライストロンの効率については、図9 bに見られるように、今回はエージングが進んだためか、前年度よりも若干向上した。

#### 3.2 進行波還流型加速管

図3に示した加速管の試験体系では、図の上方にクライストロンがあり、そこからのRFが大気系導波管を経て加速管を含む還流系に供給できるようRF回路を組み込んだ。

試験はエージングを行いながらRF出力を上昇させた。ここでエージングと

は、加速管内部の電界強度を徐々に上げながら、加速管を強電界に耐えるようにする目的で行う。試作した加速管の内面はダイヤモンドバイトによる鏡面仕上げがなされているが、表面には微細な凹凸が残っており、これに大電力RFを印加するとこれらの凸凹や傷からの放電により表面が平滑化される。実際のエージングでは、その初期のRF電力数Wの段階で、まず内表面の吸着ガスが放出された。次いで、10kW程度から弱い放電が生じ始めたが、これは20~30分程度で消えたため、消えるタイミングを待って、数10kWずつRF電力を上げて行った。

図10に、例として加速管内を20kWまでのRFでエージングした時の試験体系各部から得た測定データを示す。図中の記号Aで示した箇所は、一次的な放電によって管内真空度の低下が起こった時を示す。このような放電は途中何回も起こったが、この場合は図でも明らかのようにクライストロン出力に瞬間的な正のスパイクが現れた。このスパイクは、インピーダンス不整合により、RF電力がクライストロンに向かって反射したためと推定している。

試験中は、管内電力を35kWまで上昇させた時に、還流系に設置した図3の左側に示した移相器に異常発熱が生じた。移相器は3台の移相器ユニットA、B、Cから成り、異常発熱を起こした移相器Aとそうでない移相器Cの駆動棒付け根の温度変化を図11に示す。移相器は冷却水で約40℃に温度制御されていたが、移相器ユニットAは還流系内部のRF電力が30kWを越すと急峻な温度上昇を示している。移相器に過度な温度上昇があると、電力の上昇は危険なため、それ以降の試験は、移相器の設置箇所を直管の導波管と置き換えて行った。

なお、取り除いた移相器の検査等から、異常発熱の原因は、移相器のスタブとシリンダー間の短絡導体（フィンガストリップ）の電磁的接触不良であることが判明した。図12及び13に移相器の構成図及び取り出した移相器ユニットAブランジャ下部のスタブとフィンガストリップを示す。ブランジャ先端の銅色のスタブ根元部及び、フィンガストリップ右側に変色が見られ、接触不良で表面が焼損している。

直線導波管に交換した後は、管内電力を4日かけて上昇させ、放電や過度な熱変形すること無く、最高で800kWまでのRFを印加させることに成功した。なお、RF電力上昇の際の加速管の管内電力に対する加速管の外表面温度変化を図14に示す。図で×点は還流型加速管のRF減衰から求めた計算値であり、実測と良く一致している。レゾナントリングの設計や運転に当たっては、RF電力や温度上昇に対する周波数や移相の変化を把握することが重要で、その測定結果を図15及び16に示す。測定データの最小二乗フィットから次の値が得られた。

1. RF電力当たりの周波数変化	-50.1kHz/100kW
2. RF電力当たりの温度変化	2.1℃/100kW
3. 温度当たりの周波数変化	-23.4kHz/℃

特に、3.については低電力試験で冷却水温度を変化させて測定した周波数変化値 $-25.3\text{kHz}/^\circ\text{C}$ とほぼ一致している。このように、今回の試験に用いたレギュレー部の加速管（電子銃から遠く離れている速度が光速に近い電子ビームを加速する加速管）の、ビームローディング時に対応する熱負荷状態（90kW）での貴重なデータを得た。

この他に、クライストロンの出力RF周波数を変えることで還流系内のRF周波数を変化させた時の試験も行った。図17と図18に、周波数を1247.436MHzから1248.436MHzに変化させながらスタブチューナを調整し、管内のRFの順方向RFと逆方向RFや、還流系の電力増幅率 $M$ を測定した結果を示す。図17及び18とも、電界増幅率はほぼ3.0であったが、図18では逆方向電力が増加している。逆方向還流電力は $M$ の減少と加速に寄与しない管内定在波エネルギーの増大の原因となるので、 $\Gamma$ （反射係数）が0.01以下になるように調整する必要がある。スタブチューナの調整による還流部 $M$ 、 $\Gamma$ の変化を図19に示す。ほぼ設計解析で意図した増幅率を得ることができたが、スタブチューナ自身の電気長変化により最適値を求めるのに時間を要し、またVSWR極小値がいくつかあったため、スタブチューナ調節方法の改善が必要である。

これらの結果から、前年度に試作した加速管は、還流系への投入RF電力200kW（20%デューティファクタ）まで、増幅後の加速管の管内電力では最高800kWまでは問題無く使用できることが実証でき、本ライナックへの仕様についても基本的に問題がないことが分かった。ただし、移相器で異常発熱が生じたために、チョーク部の設計変更など今後の改良が必要なことも明かとなった。

### 3.3 クライストロン窓

試験のために図20に示すような窓を製作した。このような窓は、その形状の類似性からピルボックス窓と呼ばれている。各窓はセラミックの材質と共にセラミックを固定するピルボックスの寸法を変化させてある。これらの電気特性を表7に示す。表7で、No.1の「ベリリアショート窓」とは、クライストロンの試作品に既に取り付けてあるものと同一材料・同一構造で、低いRF電力の透過でも過度な温度上昇を起こしたものである。この窓は他との比較試験のために製作した。No.2、No.3の「アルミナロング窓」と「ベリリアロング窓」とは、ピルボックス全長をこれまでの約2倍に製作し、セラミックをRFが透過する際にセラミックス付近に誘起される電界強度を進行方向で7/10、進行方向に垂直方向で1/10以下に減少させて、セラミック内の発熱量を抑制するために製作したものである。これらのセラミック窓の設計目標値、解析コードによる電気設計値及び試験での測定値を表8に示す。解析コードにはHFSSコードを用いた。表8から、設計値と測定値の一致は測定精度を考慮すると良好

で、設計目標値とほぼ一致している。アルミナロング窓のVSWRは他より高いが、これは表8に示されるように、アルミナ窓が販売品規格のため円筒部内径が他より大きく、最適化されていないことが要因と推測される。

これらのセラミック窓に対する試験では、先に述べた還流型加速管試験に用いた試験装置である図3の中の加速管を取り除いて、これをセラミック窓と置き換えて図4及び21のような体系を用いた。試験中は、赤外線温度計とビデオカメラで試験対象であるセラミック窓をモニタした。

試験はCW耐電力試験とパルス耐電力試験の2種類を行った。

まずCW耐電力試験の結果をセラミック窓を透過させたRF電力に対するセラミック窓の温度上昇幅で図22に示す。ベリリアロング窓に対しては、CWエージングや1MW以上での5~20%パルスエージングを併用し行った結果、目標を越える1.7MWまでのCWのRF印加に成功した。最大のRFを印加した時のセラミック窓の温度上昇幅は、図から明らかのように、たかだか48℃であり、マルチバクタリング（RF周期に同調し2次電子増幅が雪崩的に増大する現象）による発光も観測されず、窓の破壊も生じなかった。ただし、透過RF電力が800kW以上となると、セラミック表面からの点状の発光が認められ、1MWではそのよう発光部分の局所温度は赤外線温度計では96℃の温度上昇を観測した。この点状発光はセラミック自体の発熱ではなかったため、過度な熱応力は生じてはいないと判断して、RF電力の上昇を継続した。図23に1.7MWのRFを透過させた時に赤外線カメラで撮影したセラミック窓の表面温度分布を示す。点在する輝点は小さな埃の発熱によるものと推定された。

ベリリアショート窓は500kW付近からRF印加とともにセラミック表面から弱いマルチバクタリングと思われる青白い発光現象がみられた。発光は数分で消えたが、RFはセラミックの全体温度が安定する15分程度の間隔をおいて上昇させた。ベリリアショート窓は1.4MWまでのRF印加に成功した。

アルミナロング窓は460kWまでのRF印加を行ったが、温度上昇幅が139℃と最も大きく、500kWで窓の破壊に至った。図24に割れたアルミナロング窓を示す。亀裂はTE<sub>10</sub>モードの電界方向に走っており、セラミック表面に生じた過度の温度分布による熱応力で破壊されたことを示唆している。このような温度上昇の原因は、他の窓よりも高いVSWRにより、試験体系の窓セラミック位置の電界強度が大きくなったためと推定される。図25にベリリアロング窓での、RF周波数を変更しながらスタブチューナを調節した際のクライストロン出力窓の温度上昇特性を示す。このようなVSWRと窓温度上昇の関係は他の窓試験でも観測されている。よってクライストロン出力部では窓の性能を維持するため、できるだけ反射の小さい立体回路を形成する必要がある。

次のパルス耐電力試験は、ベリリアロング窓だけを使用し、2ms、4msパルスモードの繰り返し50Hzで4.5MWのRF出力まで行った。結果を図26に示す。RFのデューティファクタは10%と20%であるが、4MWまではマルチバクタリングは

観測されなかった。ただし、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が生じ、4.5MWではセラミックの表面の温度変化率の上昇が生じた。

上に述べたCW耐電力試験及びパルス耐電力試験から、CWモードでは最高1.7MW（ベリリアロング窓）まで、またパルスモードではデューティファクタ10%と20%で最高4.5MWまでRF電力の透過に耐え、本ライナックに使用可能なセラミック窓の開発に成功したことになる。

#### 4. まとめ

加速管に対しては、放電や過度な熱変形を生じることなく、ほぼ開発の最終目標の最高800kWまでの大電力RFの印加に成功した。また、ビームローディング時の加速管熱負荷領域での共鳴周波数・位相変化の電力・温度に対する変化率が、大電力RFを用いて実験的に得られた。温度特性は低電力試験のデータにほぼ一致することが分かった。ただし、レゾナントリングの還流系に設置した移相器が30kW以上で異常発熱を生じたことから、今後その改良設計を進める予定である。

クライストロンのRF出力窓であるセラミックス窓については、改良設計及びその効果を確認する試験などによって、重度のマルチパクタリングが無く、CWモードでは1.7MWまでの、パルスモードではデューティファクタ10、20%の時に4.5MWまでのRF電力の透過に耐える窓構造の開発に成功した。

#### 5. 謝 辞

本試験は文部省高エネルギー物理学研究所（KEK）の協力無しには遂行できませんでした。本試験に全般的な御指導を頂いた佐藤勇入射器系主幹に深く感謝します。また、クライストロンの御指導と試験場所を提供して下さい、設備利用の御指導を頂いた高田耕治トリスタン加速器研究系主幹、絵図栄二教授、加速管の製作・試験の御指導を頂いた榎本収志助教授、冷却系の御指導をして頂いた中西弘助教授、高圧電源、クライストロンコントロールシステムの御指導をして頂いた小野正明助教授、吉本伸一助手、窓試験に対して御指導を頂いた福田茂樹助教授に深く感謝します。



参考文献

- 1) 遠山, 等, 「大強度CW電子線形加速器の要素開発」,  
PNC TN8410 91-048 (1992).
- 2) Y.L. Wang, *et al.*, "DESIGN OF A CW HIGH BEAM POWER ELECTRON LINAC,"  
PNC TN9410 92-039 (1992).
- 3) 平野, 等, 「大強度CW電子線形加速器の要素開発(Ⅱ) - 試作クライスト  
ロンの動作特性試験 -」  
PNC TN9410 92-220 (1992).

表1 加速器基本仕様

エネルギー	(MeV)	10
エネルギー分散	(%)	$5 \times 10^{-3}$
最大ビーム電流	(mA)	100
平均ビーム電流	(mA)	20
パルス幅	(ms)	4
繰り返し数	(Hz)	50
デューティー	(%)	20
平均ビーム出力	(kW)	200
-----		
加速周波数	(MHz)	1249.135
マイクロ波波長	(cm)	24.0
加速モード		$2\pi/3$
加速管の本数		8
加速ユニット数		2
クライストロン数		2
クライストロン出力	(MW)	1.0
加速器の全長	(m)	16.0

表2 還流型加速管仕様

加速方式		進行波還流型
位相量/空洞		$2\pi/3$
空洞数/加速管		15
加速管の長さ	(m)	1.2
Q値		20000
ビーム電流	(mA)	100 (ピーク)
シャント抵抗	(MΩ/m)	35
電力増幅率		9 (ビーム無負荷時)
		4 (ビーム負荷時)
最大加速電界	(MV/m)	1.4 (CW運転)
		2.0 (パルス運転)

表3 クライストロン仕様

制御方式		アノード変調型
動作周波数	(MHz)	1249.135
飽和出力	(MW)	1.2
ビーム電圧	(kV)	90
ビーム電流	(A)	25
パービアンス	( $AV^{-3/2}$ )	$1 \times 10^{-6}$
空洞数		6
最大コレクター損失	(MW)	0.8
コレクター冷却方式		蒸発冷却
コレクター供給流量	(l/m)	50
目標効率	(%)	65
電力利得	(dB)	50
ヒーター加熱電力	(W)	250
-----		
パルス運転パラメータ		
-----		
飽和出力	(MW)	4.1
ビーム電圧	(kV)	147
パルス幅	( $\mu S$ )	800
繰り返し周波数	(Hz)	50
デューティファクター	(%)	4.0

表4 大電力試験実施スケジュール

1993/1 完了

年月	91/11~12	92/1~2	3~4	5~6	7~8	9~10	11~12	93 /1
試験準備	11/5~22 □			6/1~6/4 □	6/29~7/1 □			
建家	動力線・端子盤据付			加速管据付	加速管試験用鉛シールド据付			
冷却系工事		1/16~24 □		6/22~25 □	7/6~8/5 □		11/30~12/3 □	
		クriston試験用冷却系設置		加速管冷却系据付	加速管試験用インターロック・冷却系動作確認		クriston窓試験体系据付	1/6~23 □
RF系工事	11/12~14 □	1/8~10 □		6/1~25 □			11/4~5 □	撤去 PNCへ
	ソケット・集束コイル・クriston設置	大気系導波管・タミロト設置		加速管テストベンチ設置・真空引き			加速管フェーズシフト直管へ交換	
大電力試験								
準備試験		1/27~3/3 □	3/4~5/28 □		7/9~8/21 □	9/23~25 □		
		RF回路系・インターロック動作確認	クriston DCI-ジック調整・RF-ジック		加速管調整・低電力試験	クriston窓低電力試験		
本試験						8/26~8/28 □	9/9~11/29 □	12/4~29 □
						加速管RF-ジック	加速管RF-ジック継続・RF特性試験	クriston窓耐電力試験

表5 大気系導波管仕様

RF周波数	1249.135±5MHz	導波管内雰囲気	大気
導波管寸法	165.1×82.55mm	導波管耐電力	0.6MW
肉圧	0.7mm (鍛銅)		
加圧	0.1kg/cm <sup>2</sup> 最大	VSWR (3ｽﾀｯﾌﾞ無し)	1.17
導波管水冷	3l/min.	VSWR (3ｽﾀｯﾌﾞ有り)	1.13

表6 大電力ダミーロード仕様

周波数	1249MHz±10MHz
電力	600KW (CW) 最大
VSWR	1.15以下 (設計値)
	1.03~1.04 (実測値)
導波管規格	WR-650
フランジ形状	CRP-650F (角)
材質	SUS304 導波管内無酸素銅メッキ
導波管内ガス圧	0.5kg/cm <sup>2</sup> (SF6使用時)
出力測定方式	水負荷方式 (セラミックブロック式)
隔壁セラミック	アルミナ 19.8mm厚
流量	400 l/min.
水質	純水または市水
水圧	8kg/cm <sup>2</sup> 最大
水温	約20℃入水温
入水出水取口	PT-2 1/2 (オス)

表7 試作ビルボックス窓寸法

No.	窓材	ビルボックス全長 L(mm)	円筒部長 A(mm)	円筒部内径 $\phi$ (mm)	窓材厚さ D(mm)	スペーサ寸法 (mm)
1	ベリリア	293.0	106	190.5	6.6	1.97
2	アルミナ	595.1	412	193.7	6.6	0
3	ベリリア	595.0	402	190.5	6.6	12.73

表8 試作窓の設計値及び測定値

	設計値	HFSS		測定値	
	VSWR	VSWR	位相長 (°)	VSWR	位相長 (°)
ベリリアショート窓	1.0002	1.02	417	1.04	462.1
アルミナロング窓	1.2962	1.37	706	1.30	777.8
ベリリアロング窓	1.0010	1.07	720	1.03	751.6

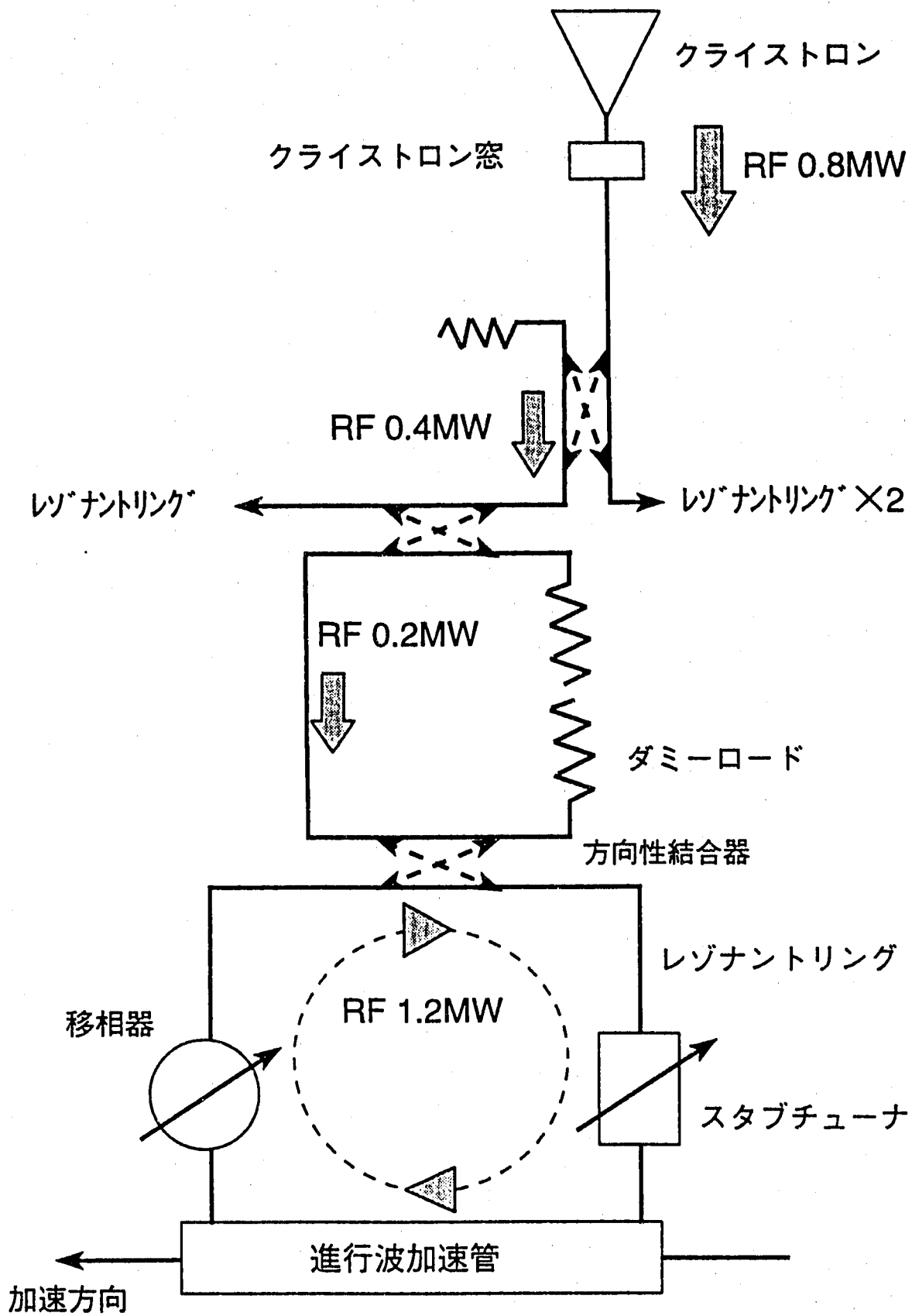


図1 加速ユニットにおけるRFの伝播

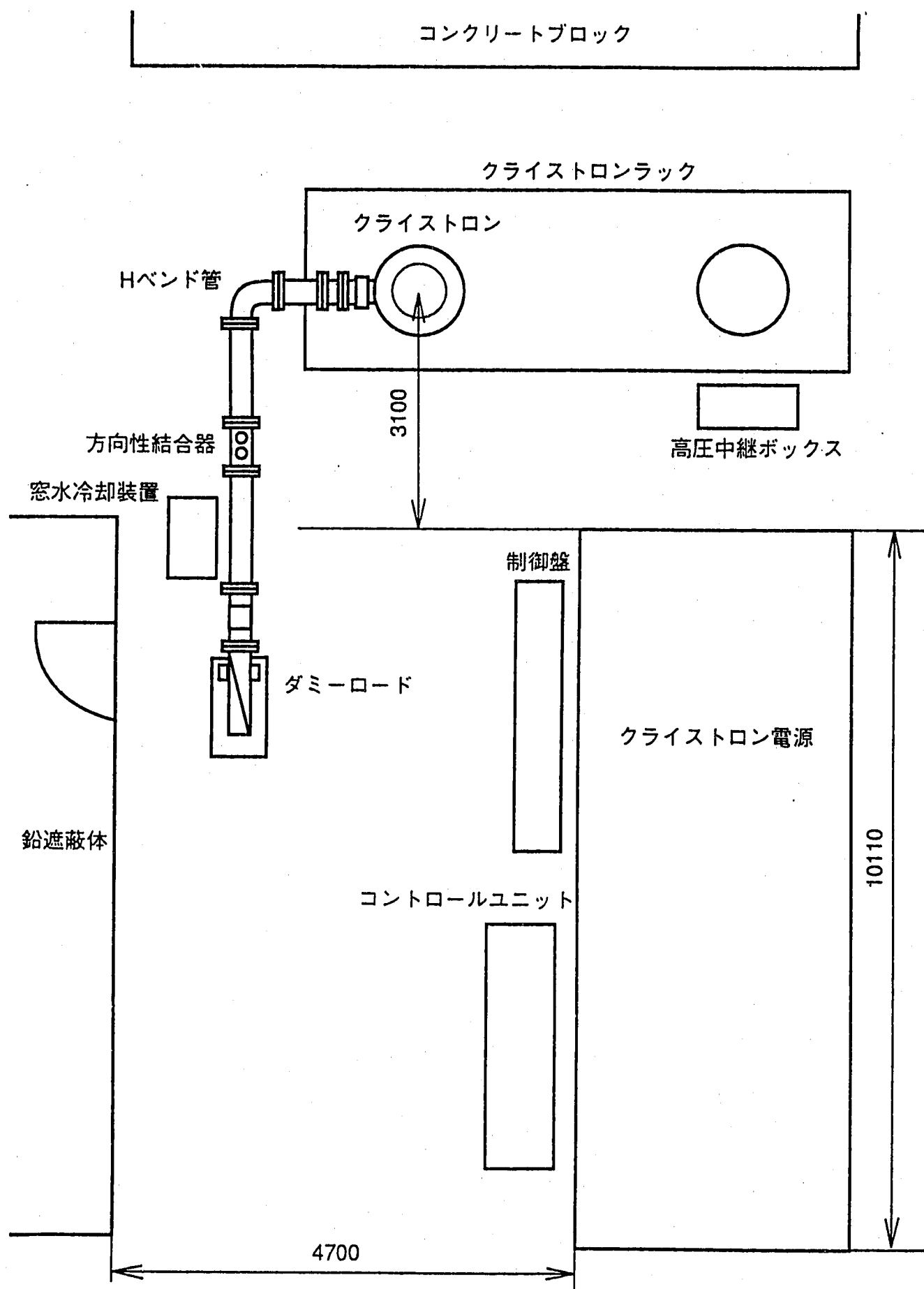


図2 クライストロン出力測定試験体系



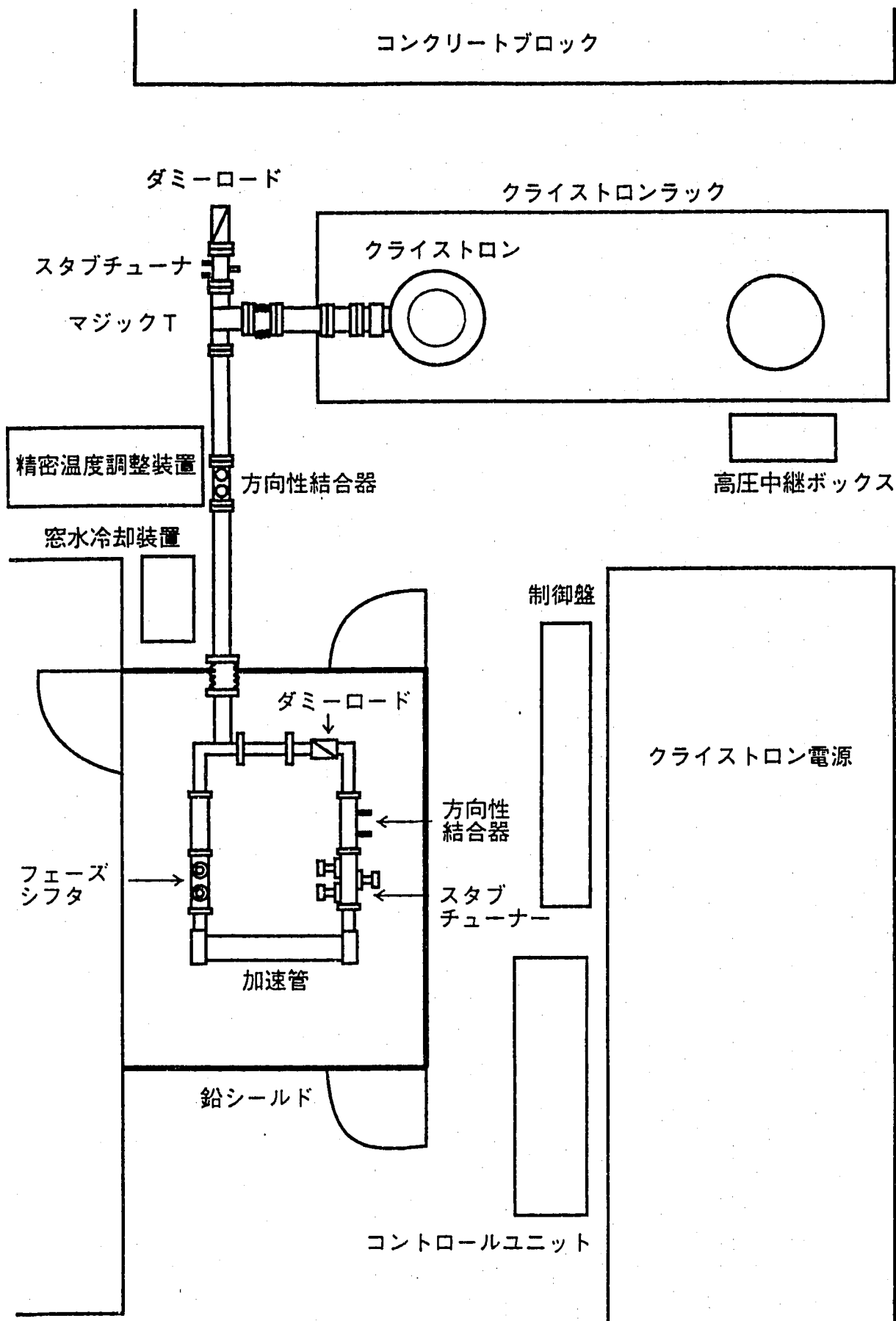


図3 加速管試験体系

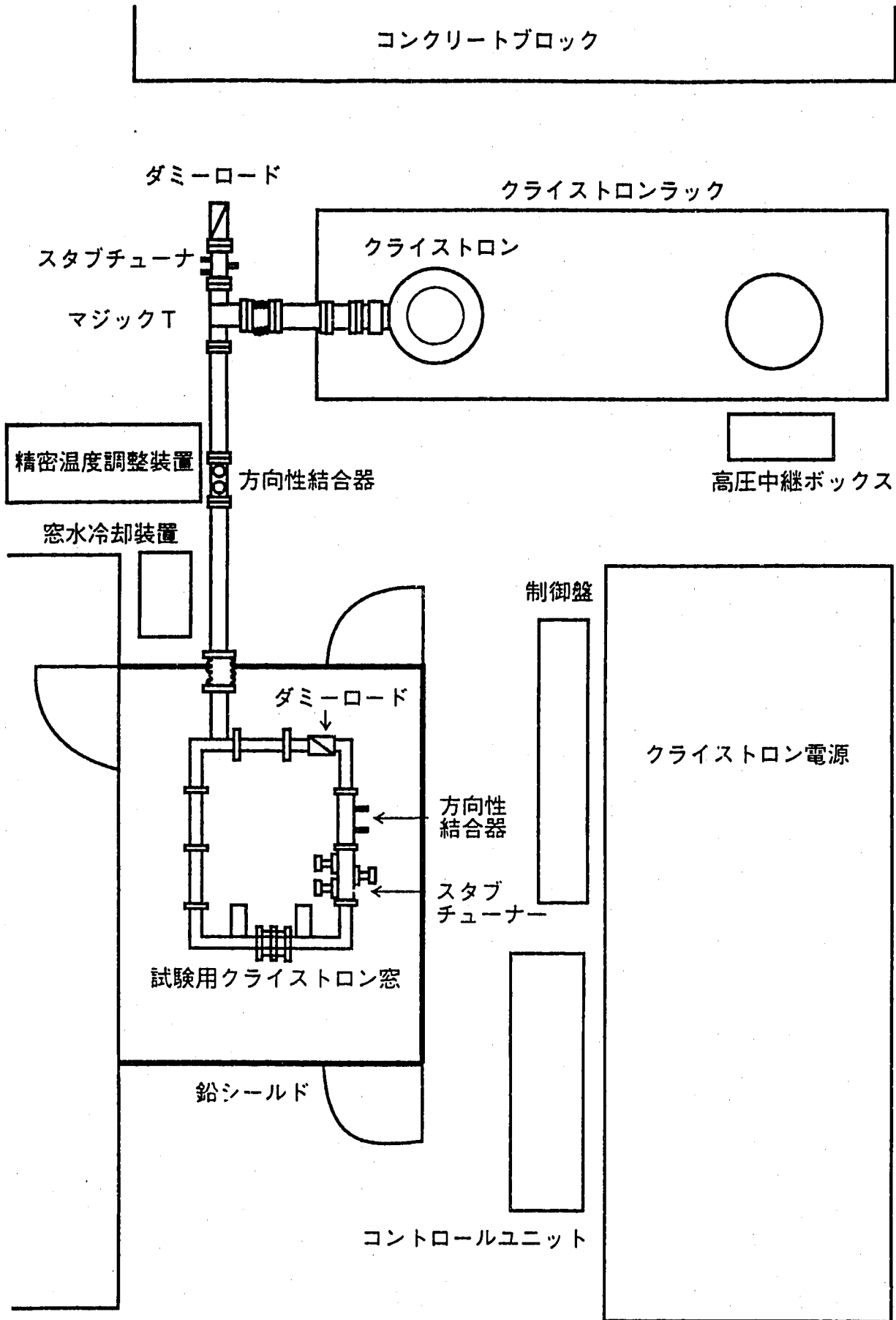


図4 クライストロン出力窓試験体系



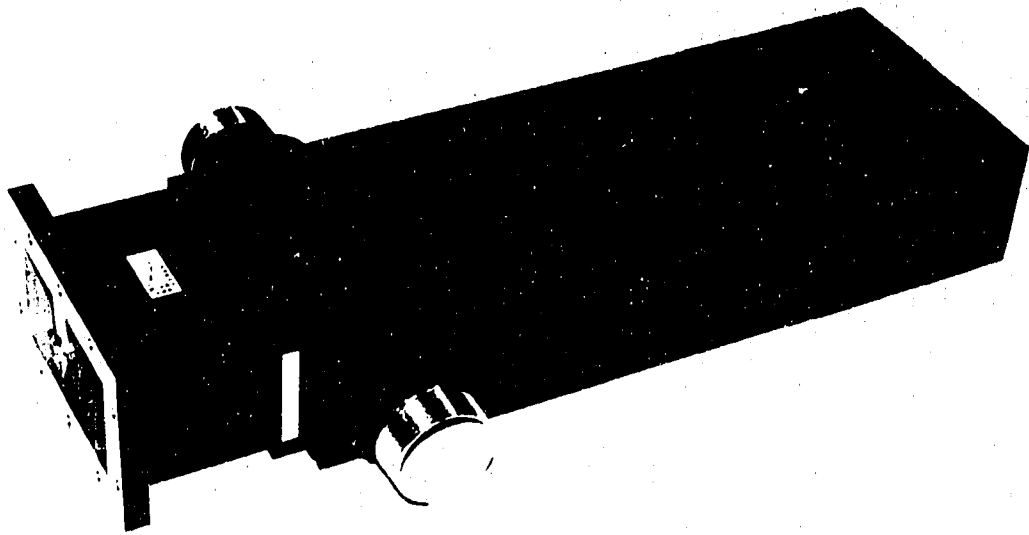


図 6 a 大電力ダミーロード外観

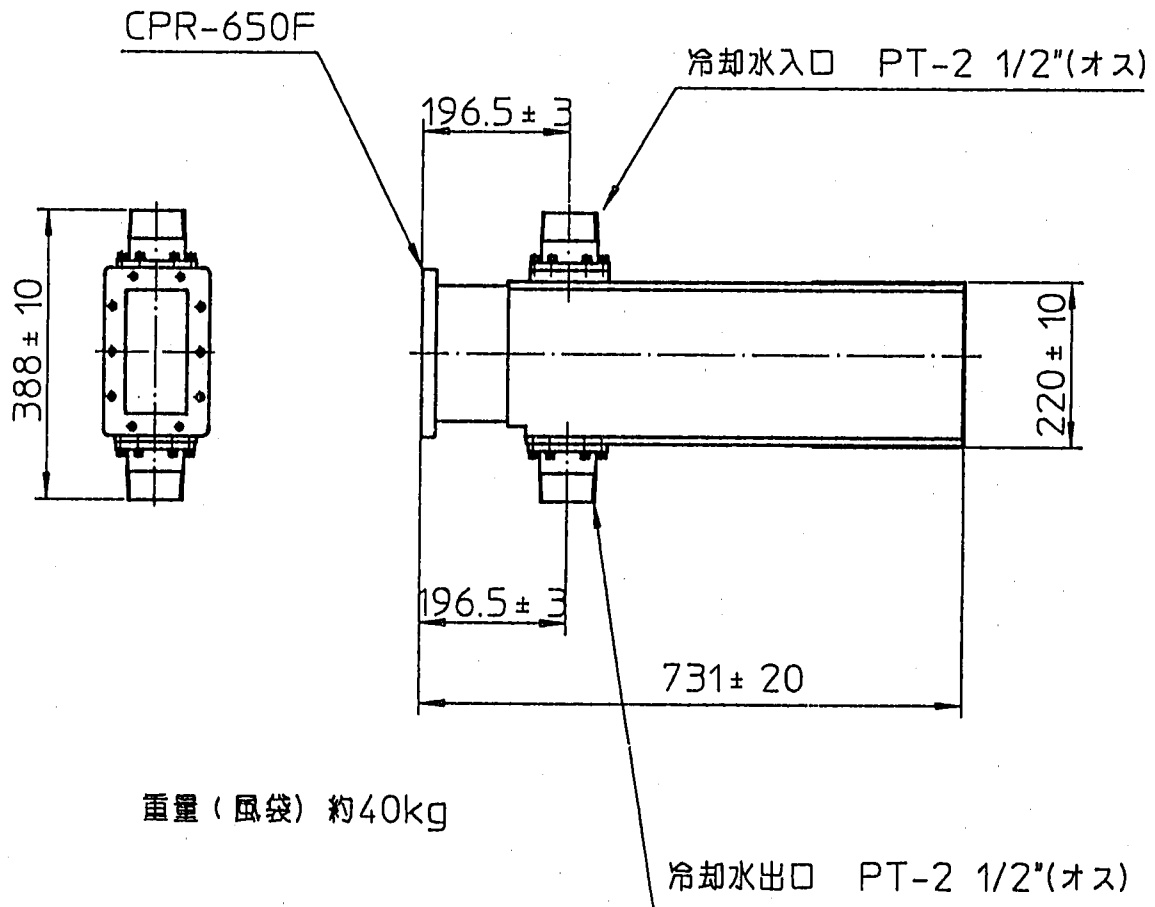


図 6 b 大電力ダミーロード寸法図

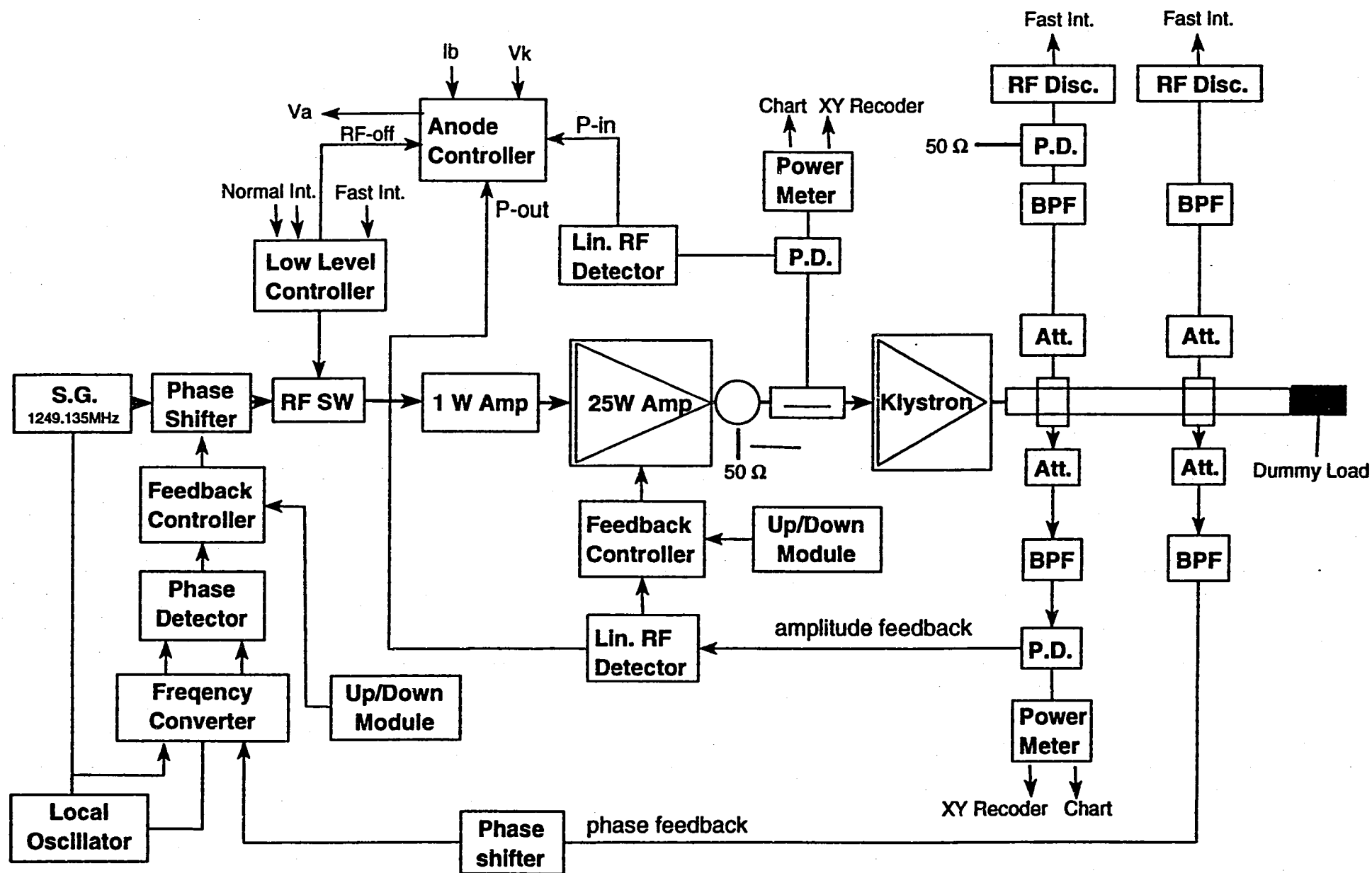


図7 クライストロンローレベルコントロールシステム

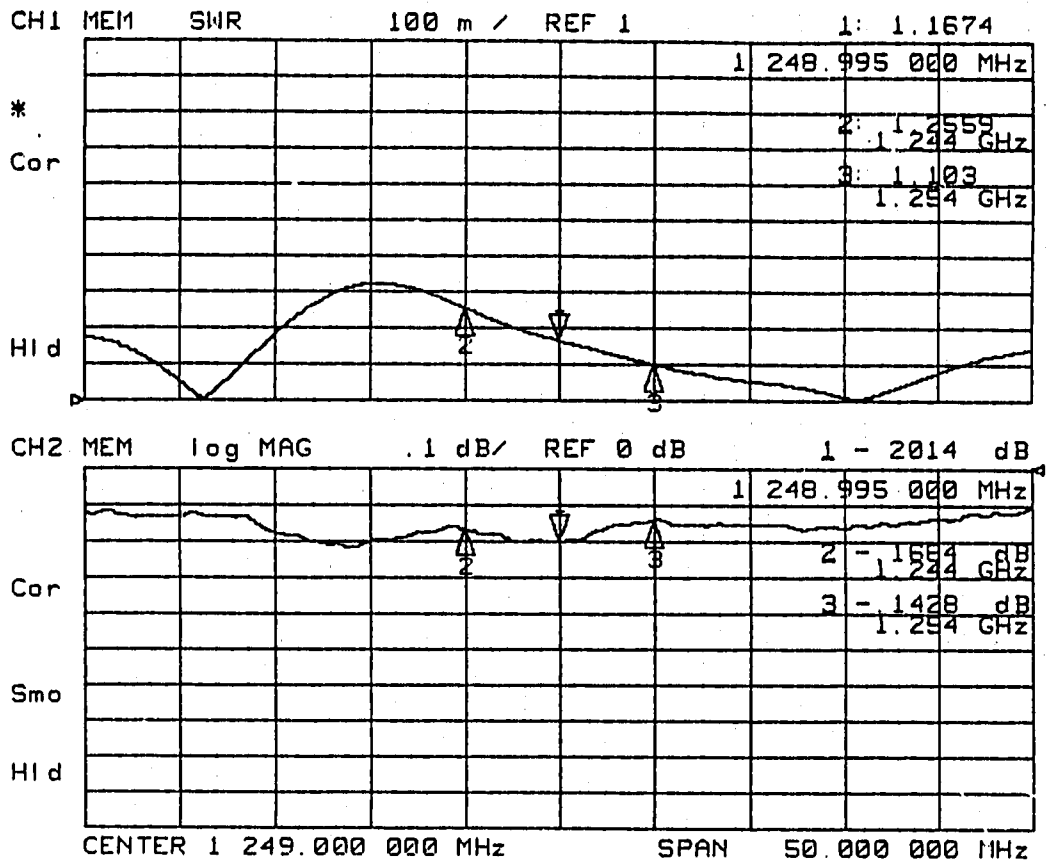


図8 大気系導波管のVSWR周波数依存性

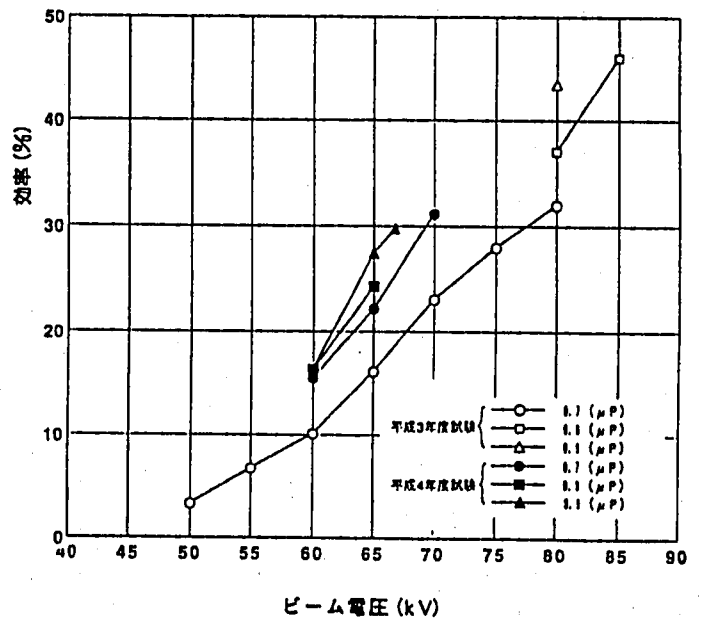
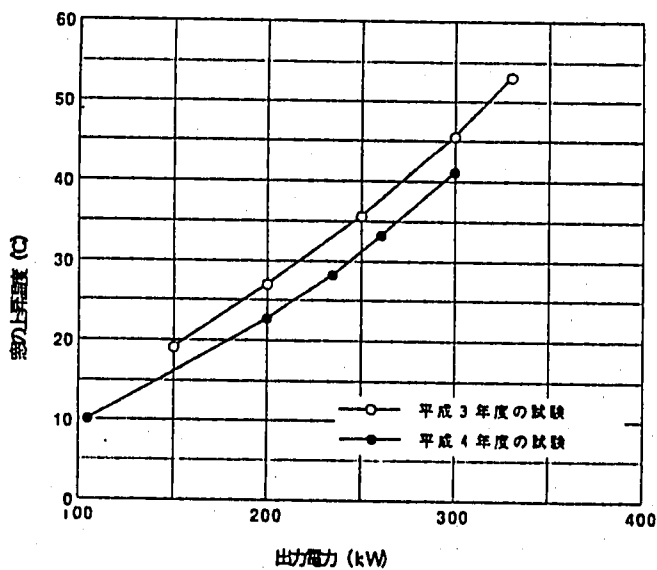


図9 a 出力電力に対する出力窓の温度上昇

図9 b ビーム電圧に対する効率特性

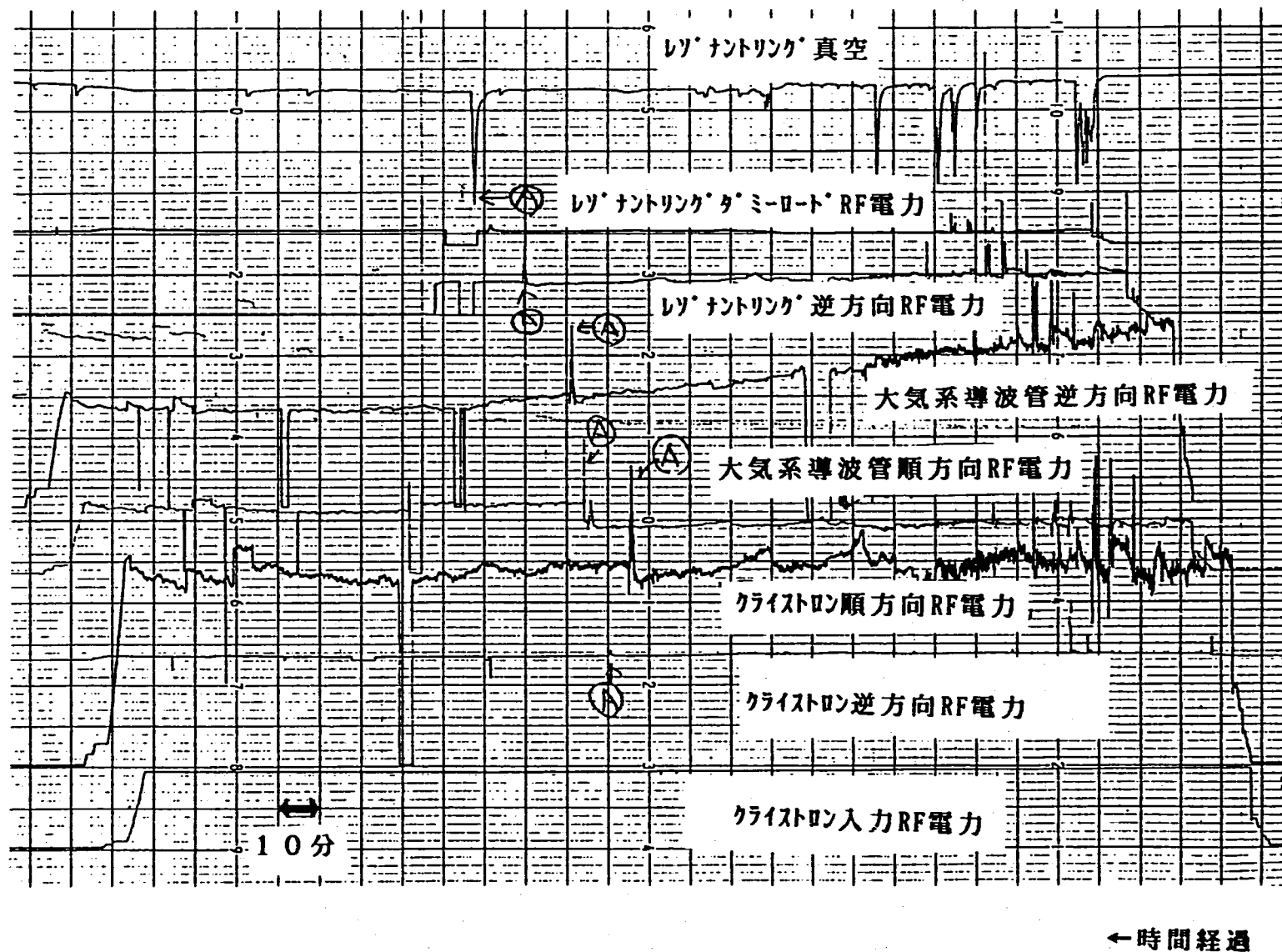


図10 加速管エージング進行状態

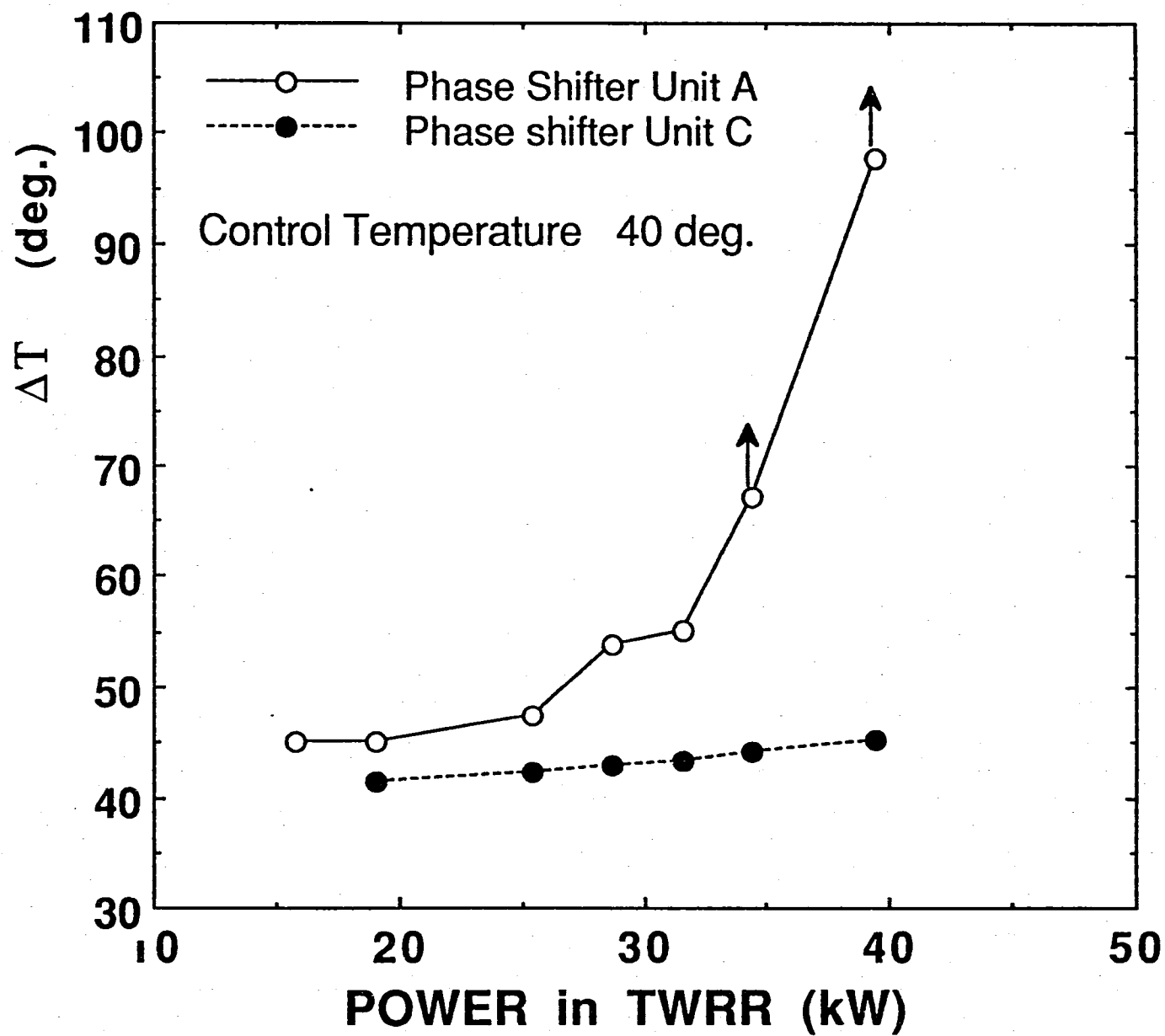


図11 レゾナントリング移相器の温度上昇



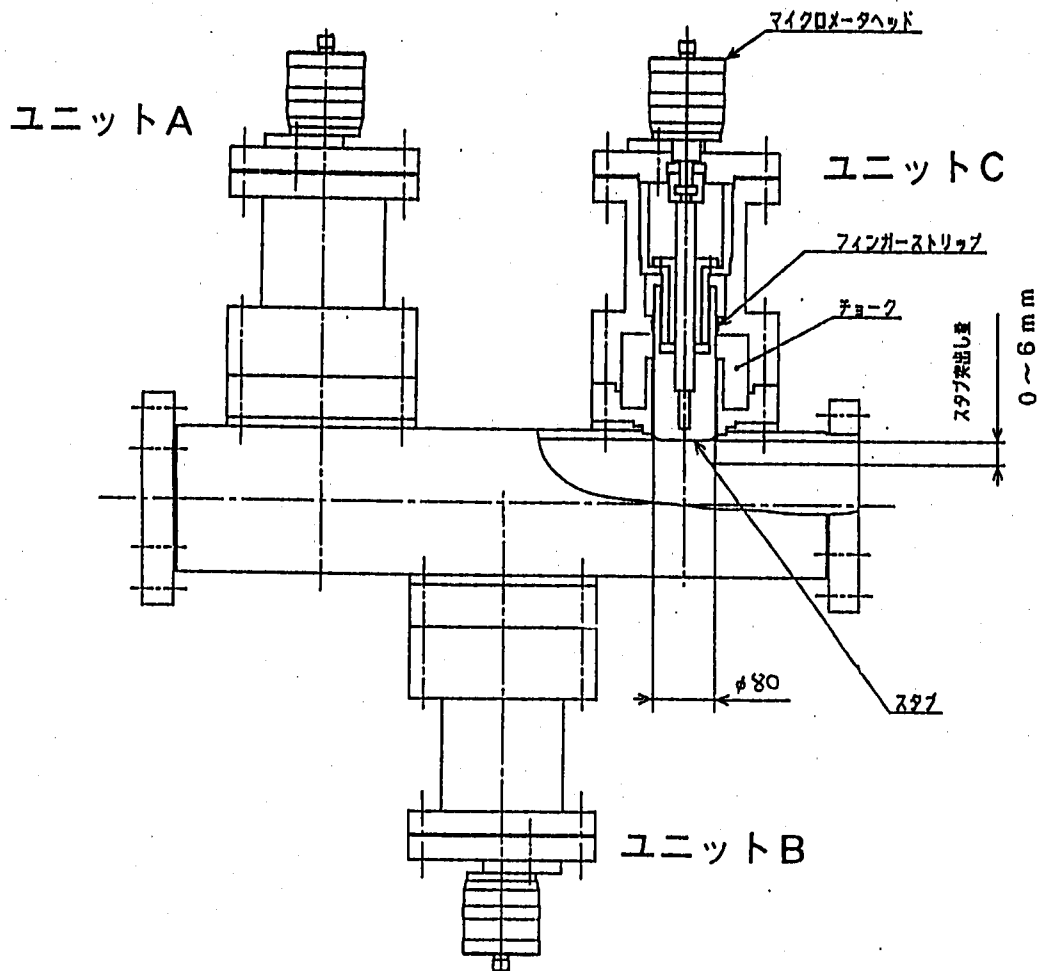


図12 レゾナントリング移相器の構成

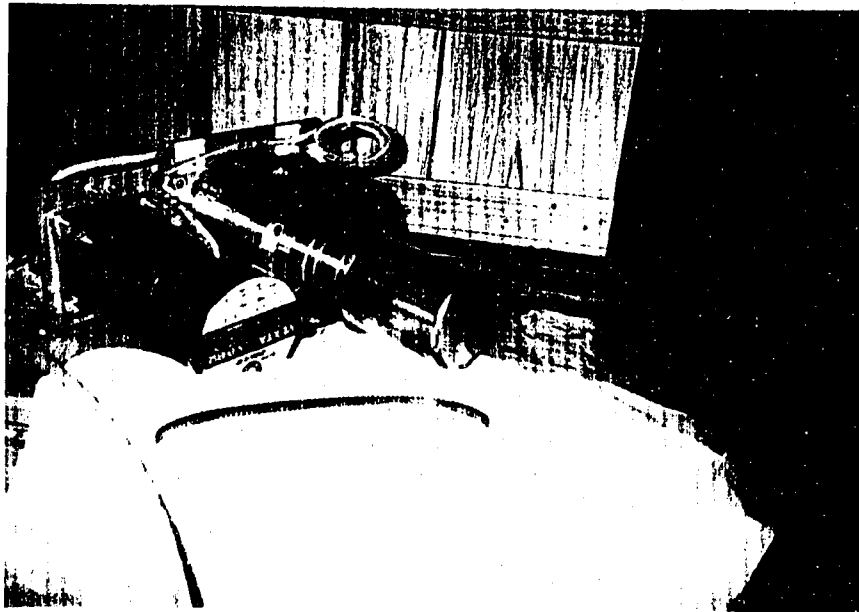


図13 取り出された移相器スタブAとフィンガーストリップ

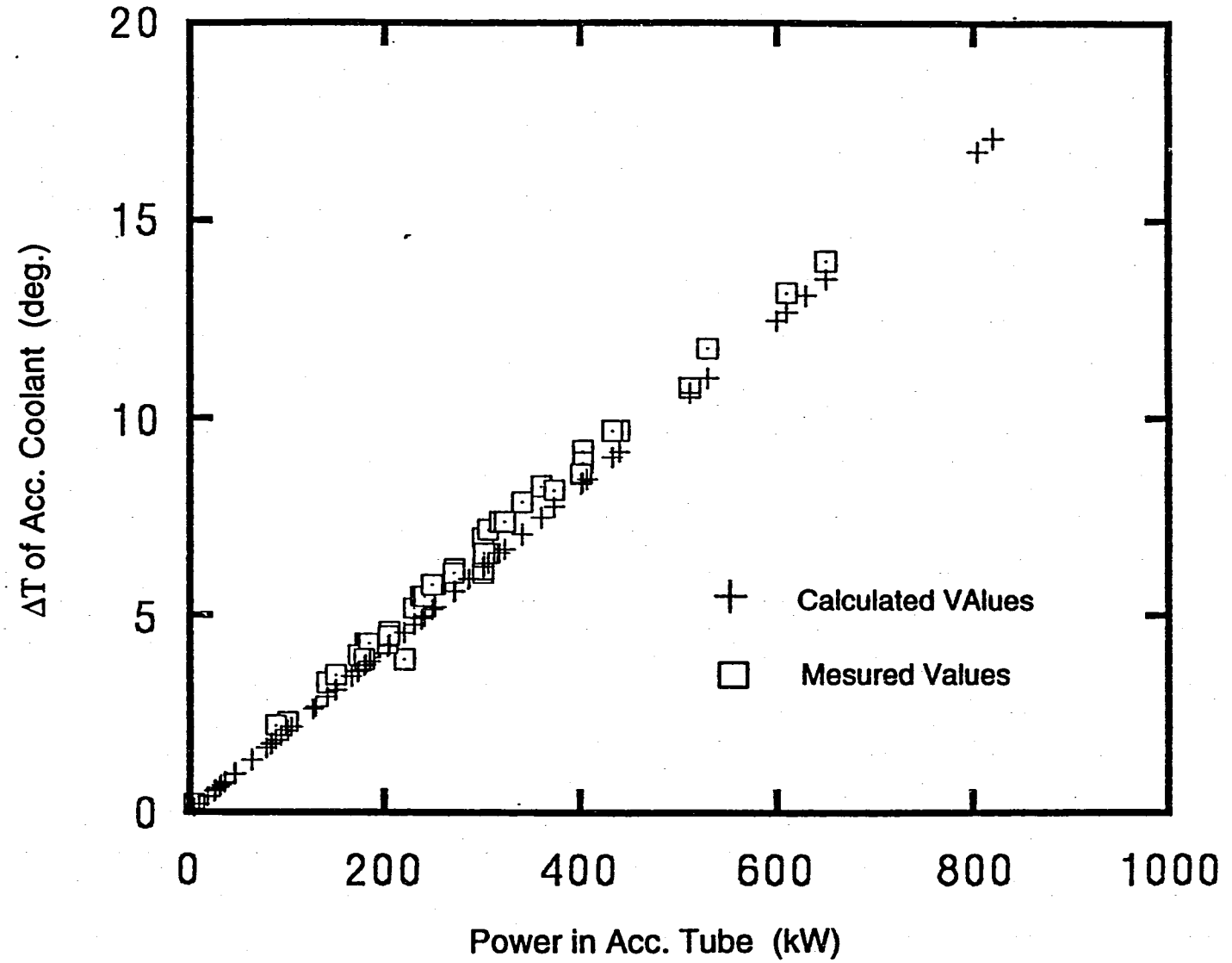


図14 加速管エージング結果

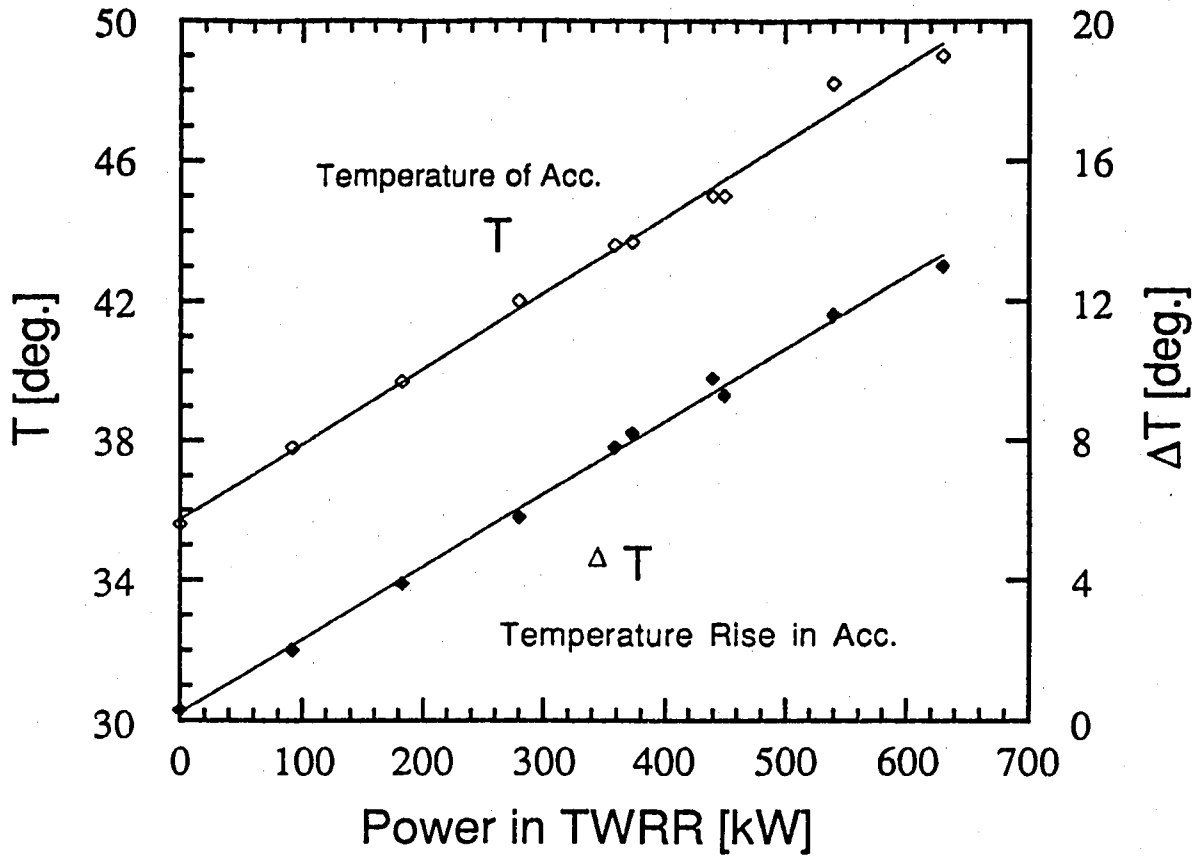


図15 RF出力に対する加速管の温度上昇

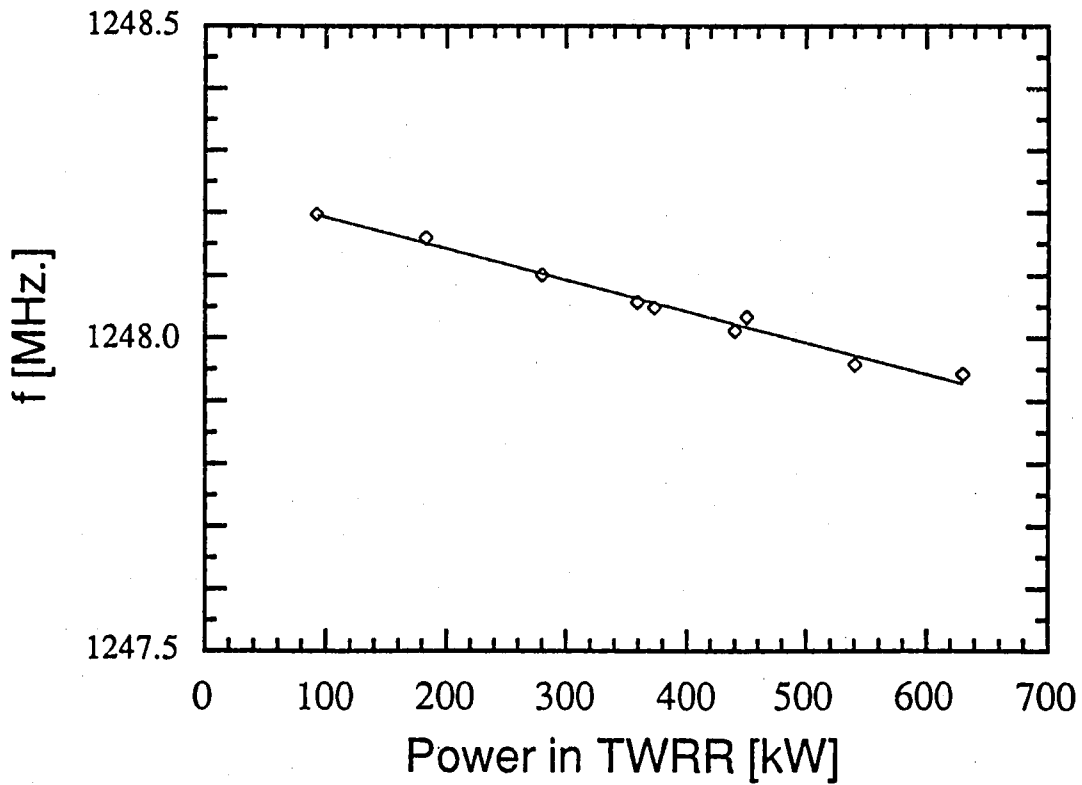


図16 RF出力に対する共鳴周波数の変化

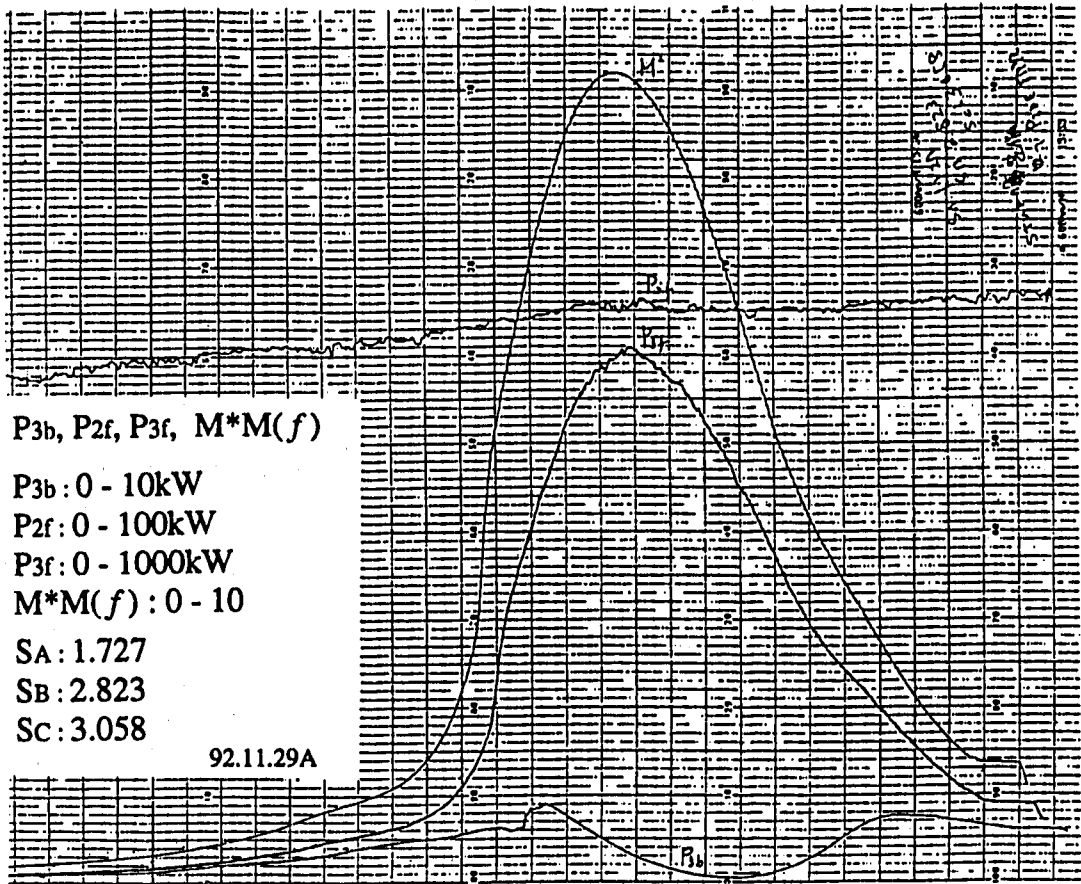


図17 還流系電力の周波数依存性 (その1)

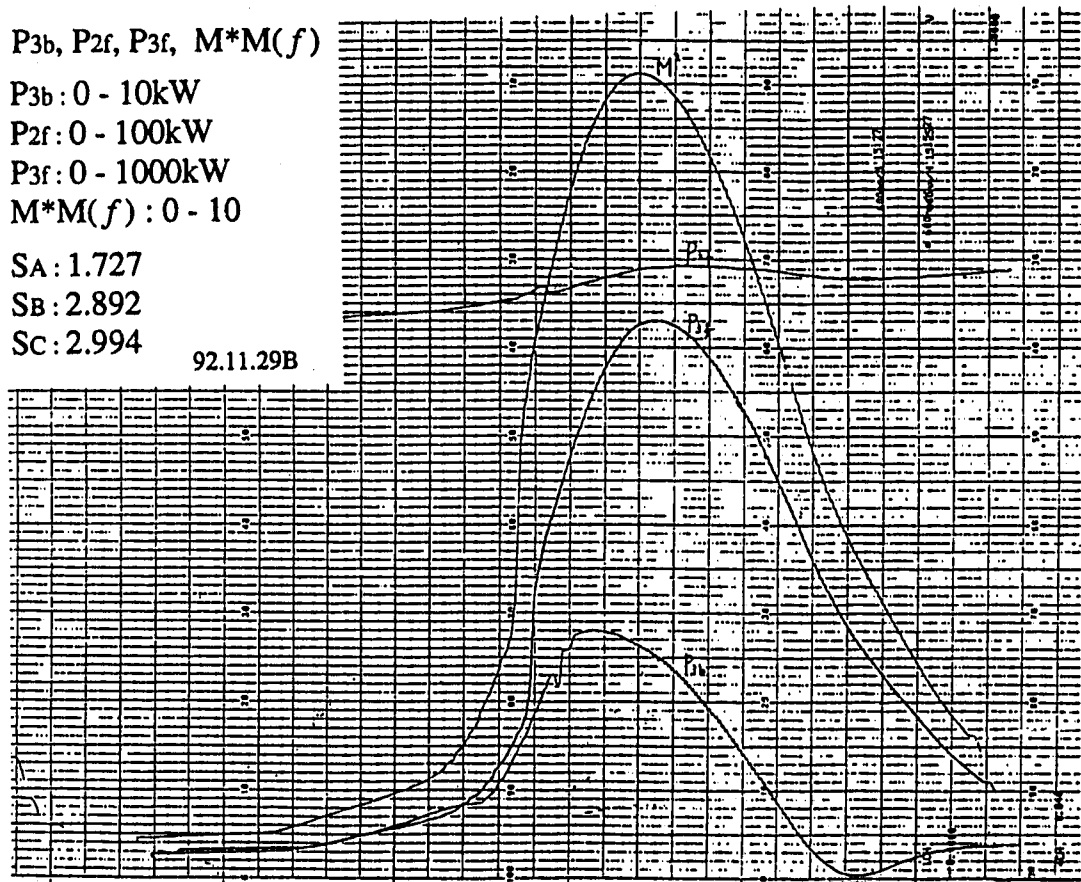


図18 還流系電力の周波数依存性 (その2)

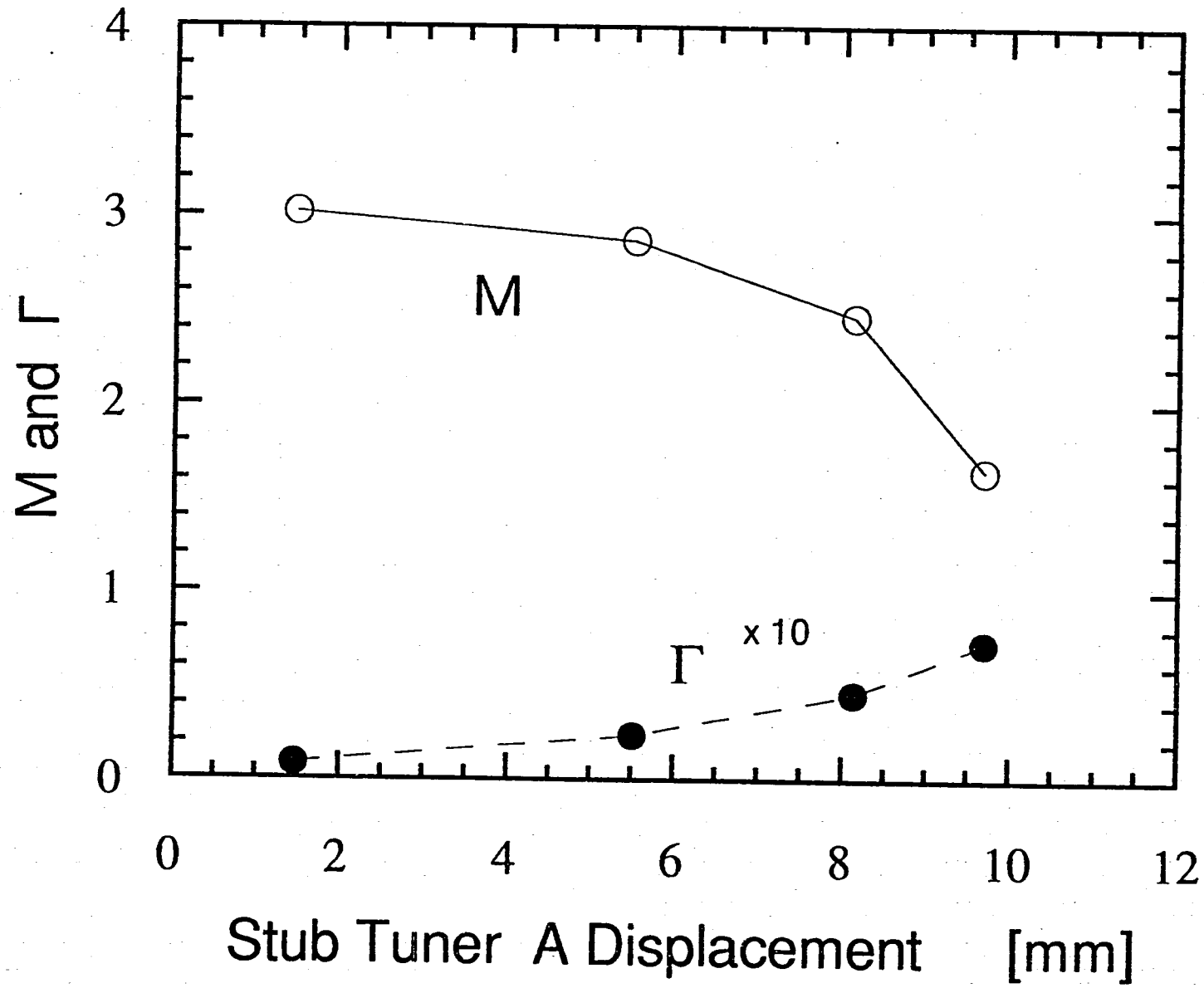
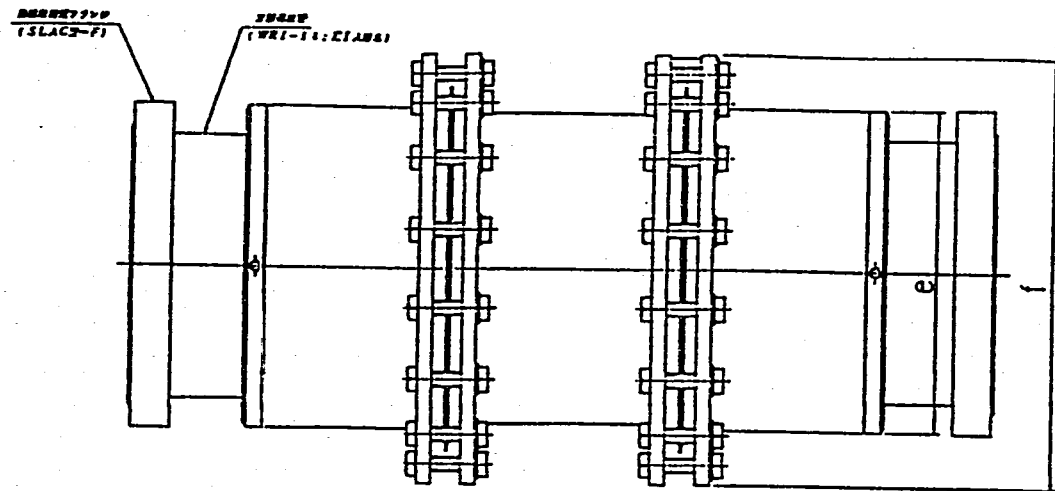
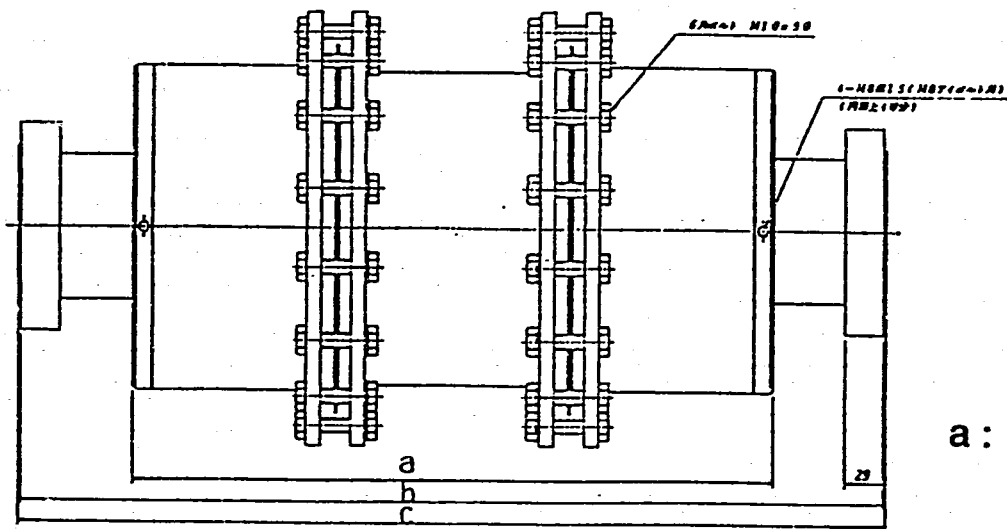


図 19 スタブチューナ調整による増幅率、反射係数の変化



上面図



側面図

a: ピルボックス長

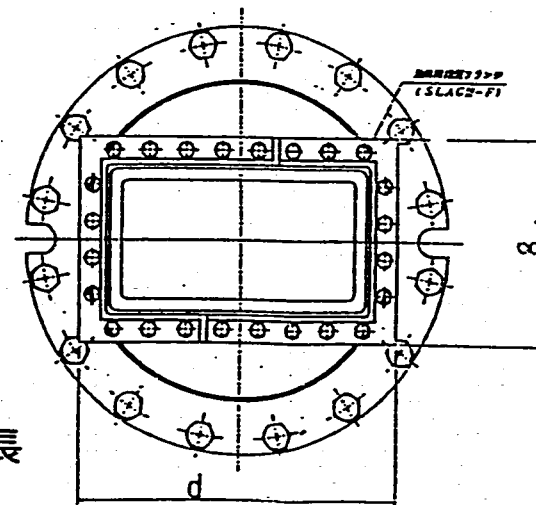


図20 試作したクライストロン出力窓図

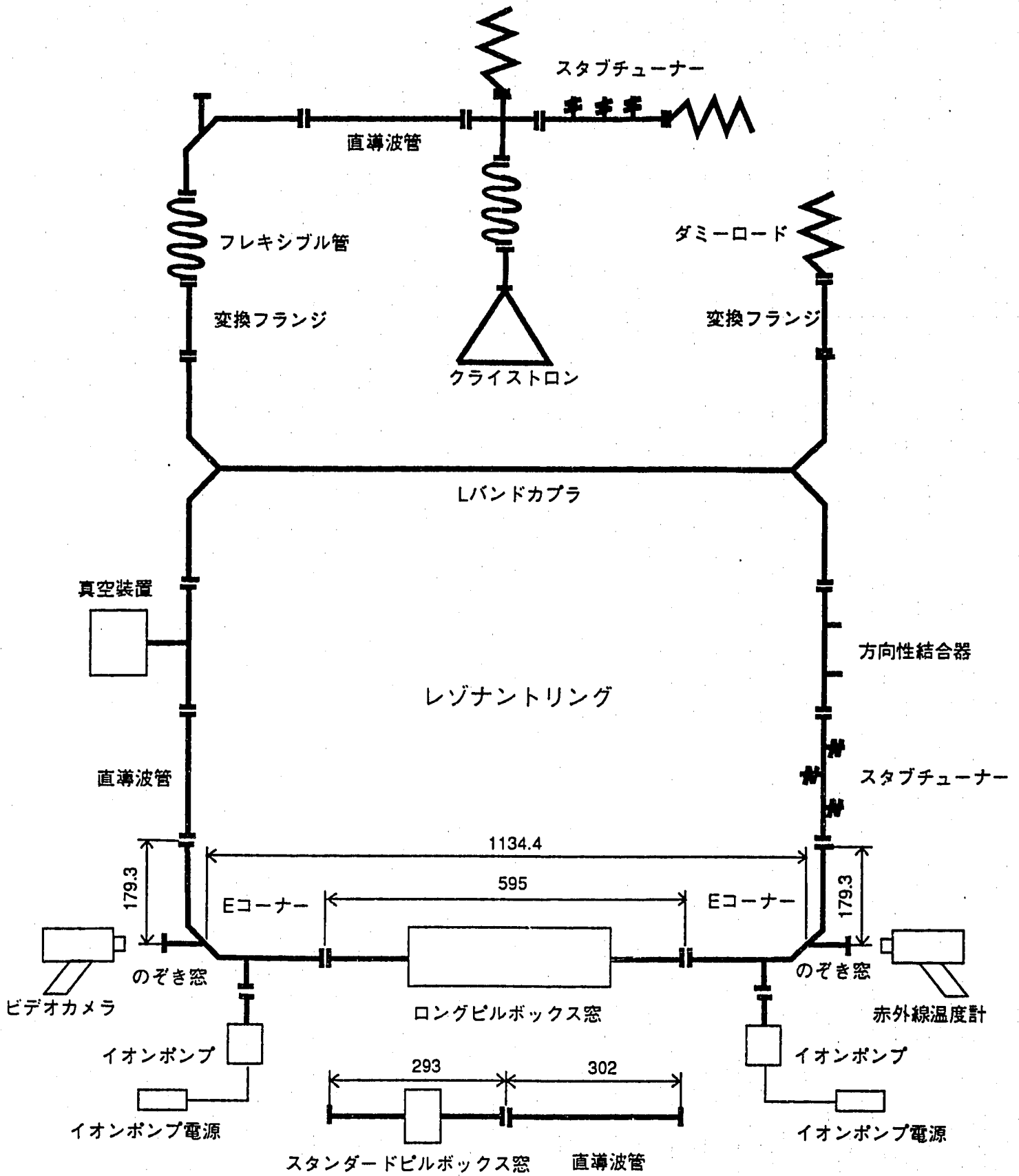


図 21 窓試験体系セットアップ図

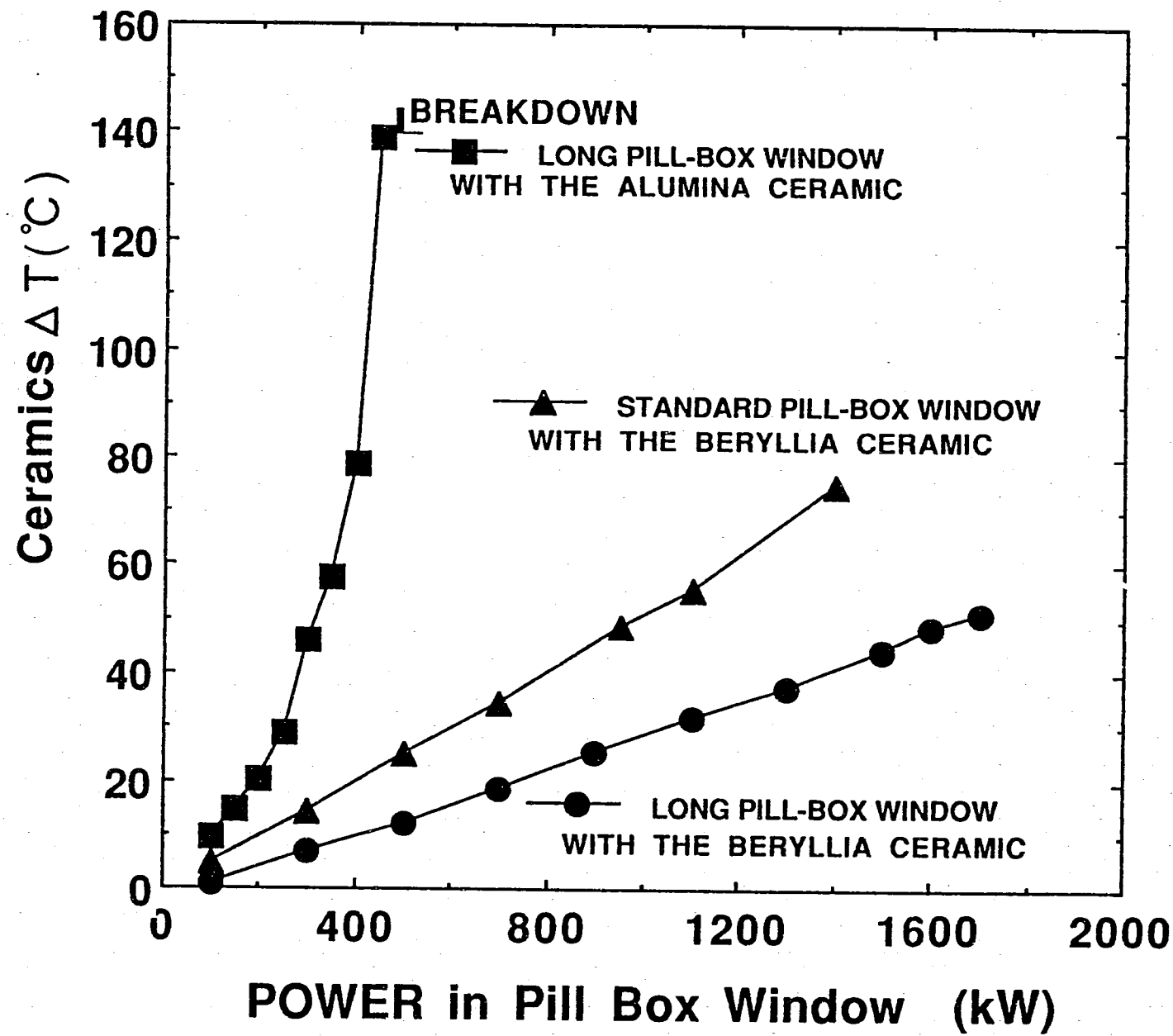


図22 試作クライストロンのセラミック窓温度上昇



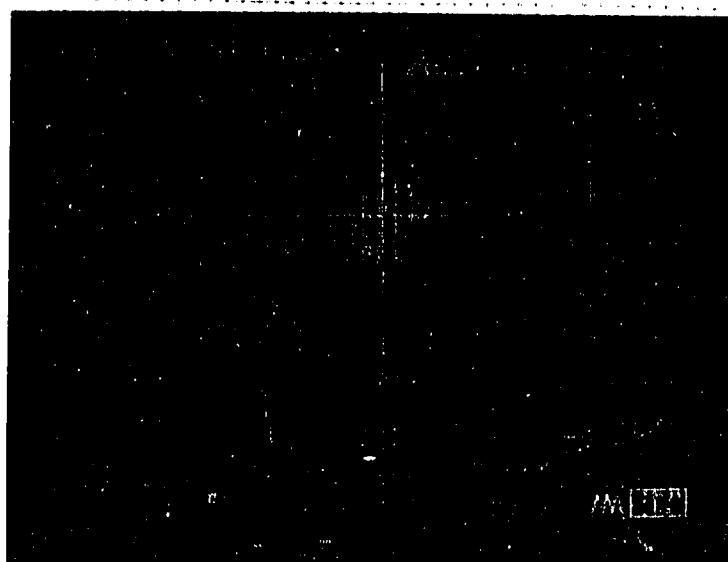


図23 1.7MWでのクライストロン窓温度上昇

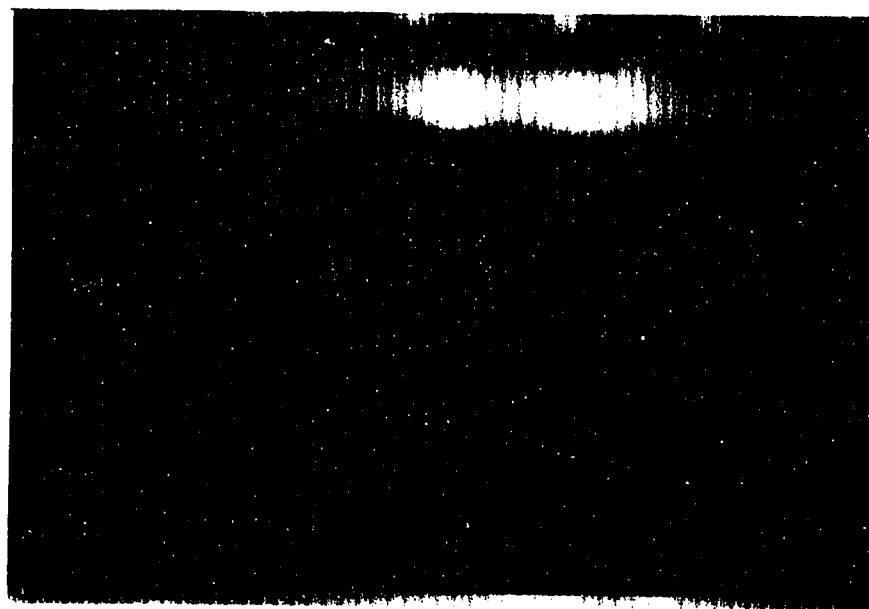


図24 亀裂が生じたアルミナのクライストロン窓

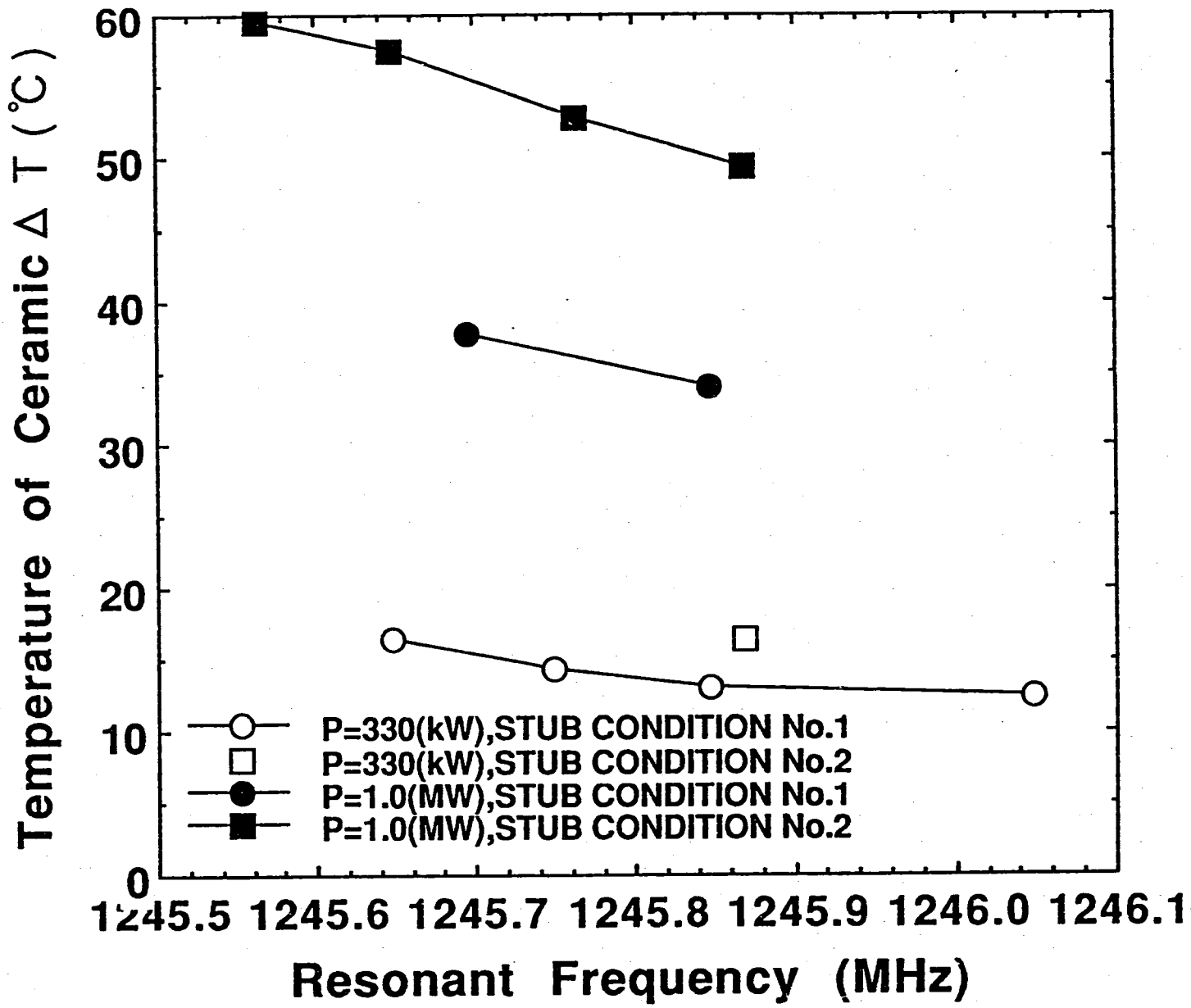


図25 スタブ.RF周波数変化に対するクライストロン窓温度上昇

Temperature  $\Delta T$  ( $^{\circ}\text{C}$ )

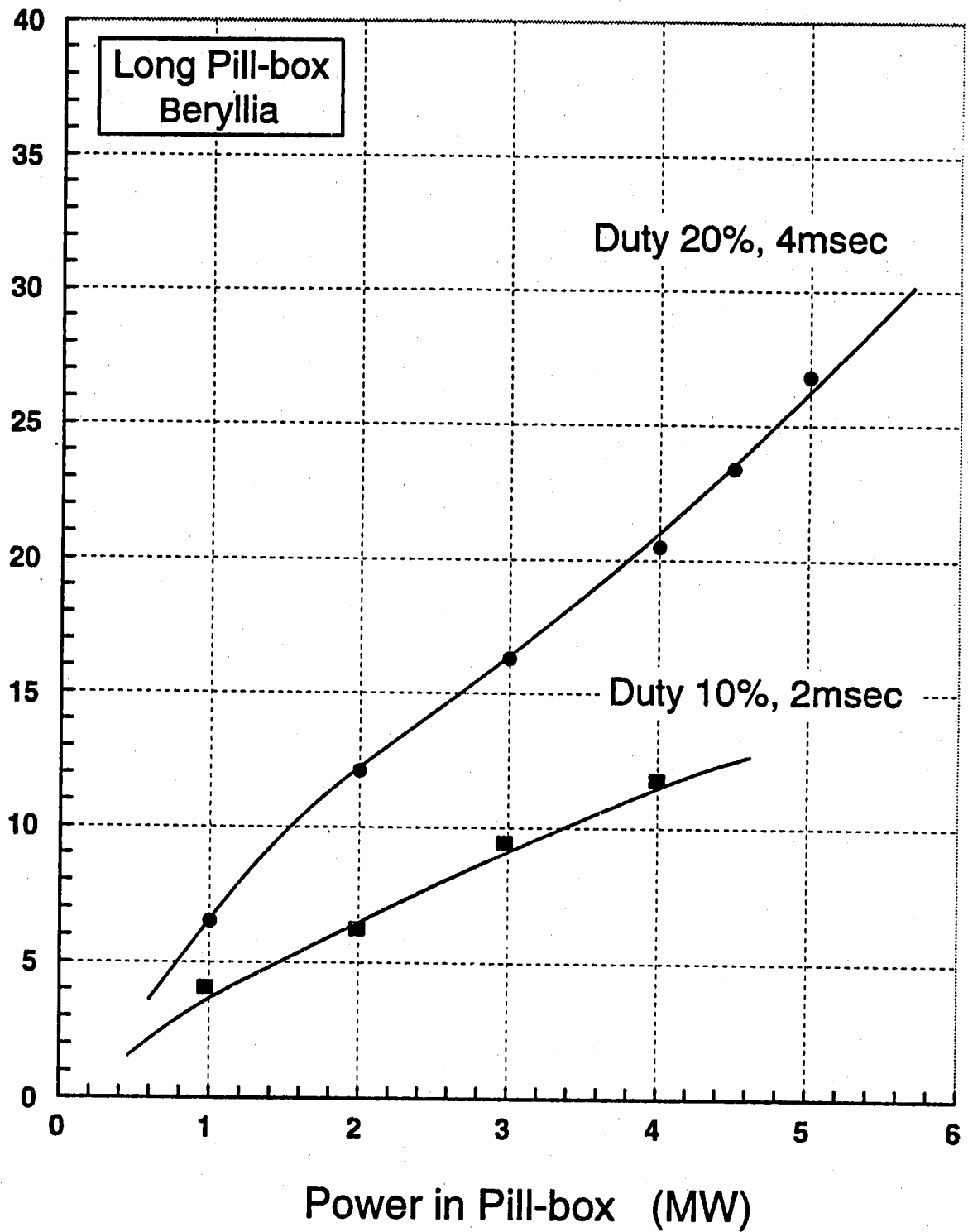


図 26 クライストロン出力窓パルスエージング結果