

JAERI - M

88-182

JT-60LHRFのエージング

1988年10月

池田 佳隆・本田 正男・横倉 賢治・恒岡まさき
関 正美・前原 直・沢畠 正之・佐藤 稔
加藤 次男*・今井 剛・坂本 慶司・上原 和也

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合せは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費領布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

J T - 6 0 L H R F の エ ー ジ ン グ

日本原子力研究所那珂研究所 J T - 6 0 試験部

池田 佳隆・本田 正男・横倉 賢治・恒岡まさき
関 正美・前原 直・沢畠 正之・佐藤 稔
加藤次男^{*}・今井 剛⁺・坂本慶司⁺⁺・上原和也

(1988 年 9 月 1 日受理)

J T - 6 0 の L H R F 実験においては、高周波放電をランチャー内で起こさずに、安定に大電力をプラズマに入射することが要求される。このためには、ランチャー製作段階において放電防止対策を施すとともに、ランチャーに破損を与えないで徐々に入射電力を高める、エージング作業の最適化が重要である。

本報告は、J T - 6 0 L H R F のランチャーにおける高周波放電の原因とその抑制方法について述べるとともに、入射電力 11 MW (ピーク値) までのエージング作業についても報告する。

那珂研究所 : 〒 311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山 801-1

+ 臨界プラズマ研究部

++ 核融合研究部

* 日本電気 (株)

RF Conditioning of LHRF Launcher on JT-60

Yoshitaka IKEDA, Masao HONDA, Kenji YOKOKURA
Masaki TSUNEOKA, Masami SEKI, Sunao MAEBARA
Masayuki SAWAHATA, Minoru SATOU, Tsuguo KATO^{*}
Tsuyoshi IMAI⁺, Keishi SAKAMOTO⁺⁺ and Kazuya UEHARA

Department of JT-60 Facility
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-gun, Naka-machi, Ibaraki-ken

(Received September 1, 1988)

High power injection into plasmas without RF breakdown in a launcher is necessary for LHRF experiment on JT-60. It is very important to adopt operation for breakdown protection in the course of fabrication of the launcher and to optimize aging procedure to increase injected RF power without any damage caused to the launcher.

This report discusses the cause of the breakdown in the launcher and the countermeasure to suppress it and summarizes the RF conditioning procedure to inject RF power up to 11MW (peaked value) on JT-60 LHRF system.

Keywords: RF Breakdown, Launcher, LHRF, JT-60, Aging Procedure,
RF Conditioning

+ Department of Large Tokamak Research

++ Department of Thermonuclear Fusion Research

* NEC Corp.

目 次

1	まえがき	1
2	JT-60 LHRF ランチャー	2
3	放電要因	5
3.1	溶接等の突起	5
3.2	脱ガスによるガス放電	5
3.3	接触不良による放電	6
3.4	マルチパクタ放電	6
3.5	磁場と高周波との相互作用	7
3.6	真空窓の放電	7
3.7	先端部の放電	8
4	位相設定	22
5	エージング	24
5.1	監視項目	24
5.1.1	放電時の反射電力異常	24
5.1.2	窓の放電	25
5.1.3	真 空 度	26
5.1.4	温度測定	26
5.1.5	ランチャー先端部	26
5.2	エージングのパターン	26
5.2.1	真空エージング	26
5.2.2	TDC エージング	27
5.2.3	プラズマエージング	28
6	エージングのマニュアル	42
6.1	装置の機能チェック、設定状態の確認	42
6.2	真空エージングの設定	43
6.3	TDC エージングの設定	44
6.4	プラズマエージングの設定	44
6.5	異常時の処置	45
6.6	そ の 他	46
7	今後の方針	47
謝	辞	48
参考文 献		48

Contents

1.	Introduction	1
2.	JT-60 LHRF Launcher	2
3.	Mechanism of RF Breakdown	5
3.1	Projection at Welded Point	5
3.2	Gaseous Breakdown due to Outgassing	5
3.3	Breakdown due to the Fault Contact	6
3.4	Multipactor Discharge	6
3.5	Mutual Effect of RF and Magnetic Field	7
3.6	Breakdown at the Vacuum Window	7
3.7	Breakdown at the Grill Mouth	8
4.	Phase Setting	22
5.	Conditioning	24
5.1	Observation Item	24
5.1.1	Reflection Alarm due to the Breakdown	24
5.1.2	Vacuum Window	25
5.1.3	Pressure	26
5.1.4	Temperature	26
5.1.5	Grill Mouth	26
5.2	Conditioning Type	26
5.2.1	Vacuum Conditioning	26
5.2.2	TDC Conditioning	27
5.2.3	Plasma Conditioning	28
6.	Conditioning Manual	42
6.1	System Check	42
6.2	Parameter Setting for Vacuum Conditioning	43
6.3	Parameter Setting for TDC Conditioning	44
6.4	Parameter Setting for Plasma Conditioning	44
6.5	Measure for Alarm	45
6.6	The Others	46
7.	Future Plan	47
	Acknowledgements	48
	References	48

1. まえがき

JT-60 LH加熱装置では、大電力高周波を位相制御型アレイ構造のアンテナよりプラズマに入射する（以下このアンテナをランチャーと呼ぶ）。このランチャーで最も重要なことは、ランチャー内で高周波放電を起こさずに安定にランチャーから高周波を放射するとともに、ランチャー先端部での各導波管位相差が正確に設定されることである。

ランチャー内で発生する高周波放電には、製作上に起因するものと、物理的現象に起因するものがあるが、いずれにせよ十分な対策処理を行った後、LHRF実験を進める必要がある。また、位相設定の問題については、従来の中型トカマクのような導波管総数の少ない場合（4～16本）には、その作業は比較的容易であったが、JT-60では、1ランチャー当たり32本の導波管であり、注意深く位相設定を行う必要がある。

ここでは、現在までのJT-60 LH RFのランチャーエージング作業（位相設定も含む）をまとめたものであり、今後のエージング作業の指針とするものである。

2. JT-60LHRF ランチャー

JT-60のLHRFのランチャーは、導波管をトロイダル方向及び、ボロイダル方向にそれぞれ8本及び、4本づつ並べた位相制御型アレイランチャーであり、3ユニットのランチャーにより10MW以上の電力をプラズマに入射しLHRF実験を行うことを目的としている。3ユニット中、2ユニットは加熱用であり、1ユニットは電流駆動用である^[1]。図1及び図2に各々のランチャー先端部鳥かん図を示す。

さて、LHRFにおいては、トロイダル方向に進行する高速電子速度に応じた、位相速度を有する波をランチャーから放射することにより、電流駆動や電子加熱を行う。この原理は、海岸で行うサーフィンと同じであり、沖から岸に向かう波の速度（LHRFの位相速度）と同じ速度のサーフィンボード（高速電子）のみが、沖から岸へ走行できる。プラズマ中では、この高速電子がトロイダル方向の1方向にトーラスを周回し、電流を生成する（LHRFによる電流駆動）。したがって、高速電子の速度に応じた位相速度を、ランチャーから放射するためには、電子速度に対応したピッチで、トロイダル方向に周期的に波を放射すればよい。すなわち、ランチャー先端部の導波管間ピッチを電子速度に合わせるものである。これが、位相制御型アレイのランチャーである。例として図3に、導波管間の位相差を90°に設定した場合の高速電子のトロイダル方向の動きを示す。①のt=0では、第一番目の導波管の電界方向と電子の走行方向が一致する。②のt=1/4T後では（T：周期）、①の電子が第2番目の導波管まで走行し、この第2番目の導波管の電界方向と一致する。③のt=2/4T後、および④のt=3/4T後も同様に高速電子は絶えず高周波により一方向に加速される。したがって、この例では、高周波の1/4周期と、導波管のピッチを走る時間とが一致する速度の電子が電流を生成する。電流を担う電子速度をどの程度にするかについては、波のプラズマへの透過や、高速電子の衝突問題等があり、まだ完全には解明されていないが、JT-60では、V_{th}=0.5~0.6 C（C；光速 3×10^8 m/s）の高速電子を駆動するようなランチャーの設計を行っている。

以上のことから、電流駆動を効率よく行うためには、ランチャー先端部での位相設定を正確に行うことが不可欠であることが理解される。

通常このようなランチャーに大電力を通す際には、高周波による表面加熱等により壁からの脱ガス現象を起こしランチャー内真空度が上昇し、ランチャー内で高周波放電が発生する。また、製作時に溶接箇所等の突起を残すと、その箇所で電界集中を起こし放電の引金になる。さらに、ランチャー導波管内の高周波の周期と、導波管内の電子の走行周期が一致することによるマルチパクタ放電等が発生する危険性がある。これらの放電が発生すると、ランチャー先端部での位相が乱れ電流駆動ができなくなる他に、大放電が起きるとランチャーそのものを破損する危険がある。

これらの放電を避けるためには、製作段階において放電対策を行うとともに、小電力から除々に電力を増加しつつ、脱ガス等を行うエージング作業が必要である。JT-60のLH加熱装置（ランチャー及び保護装置等）は、これらの放電防止対策を施すとともに、エージングを効率よく行

えるよう設計されている。

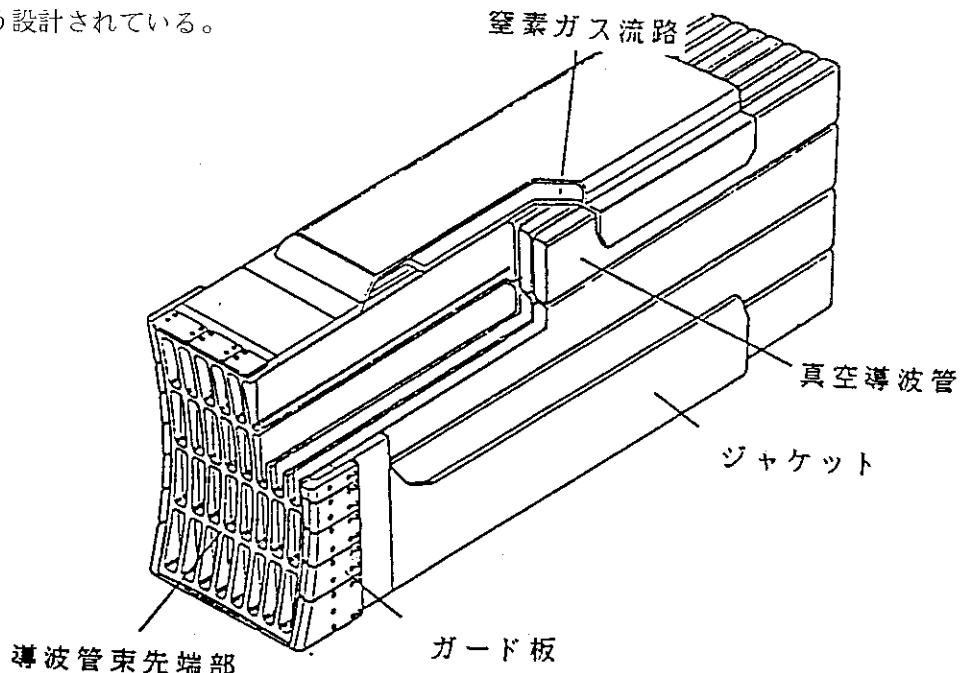


図1 ランチャー先端部鳥かん図（加熱用）

トロイダル方向に8本、ボロイダル方向に4本、計32本の導波管束のアレイ構造を有している。先端部の導波管寸法は、 115×29 mmである。

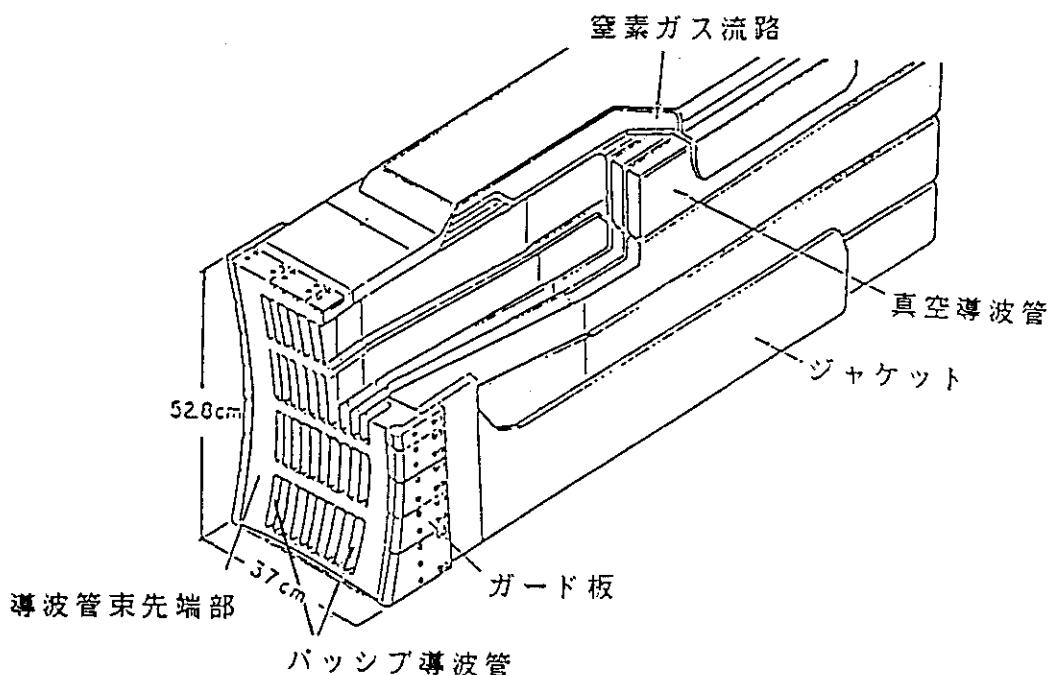


図2 ランチャー先端部鳥かん図（電流駆動用）

トロイダル方向に8本、ボロイダル方向に4本、計32本の導波管束の他、トロイダル方向の両端に1本ずつパッシブ導波管が取り付いたアレイ構造を有している。先端部の導波管寸法は、 115×16 mmである。

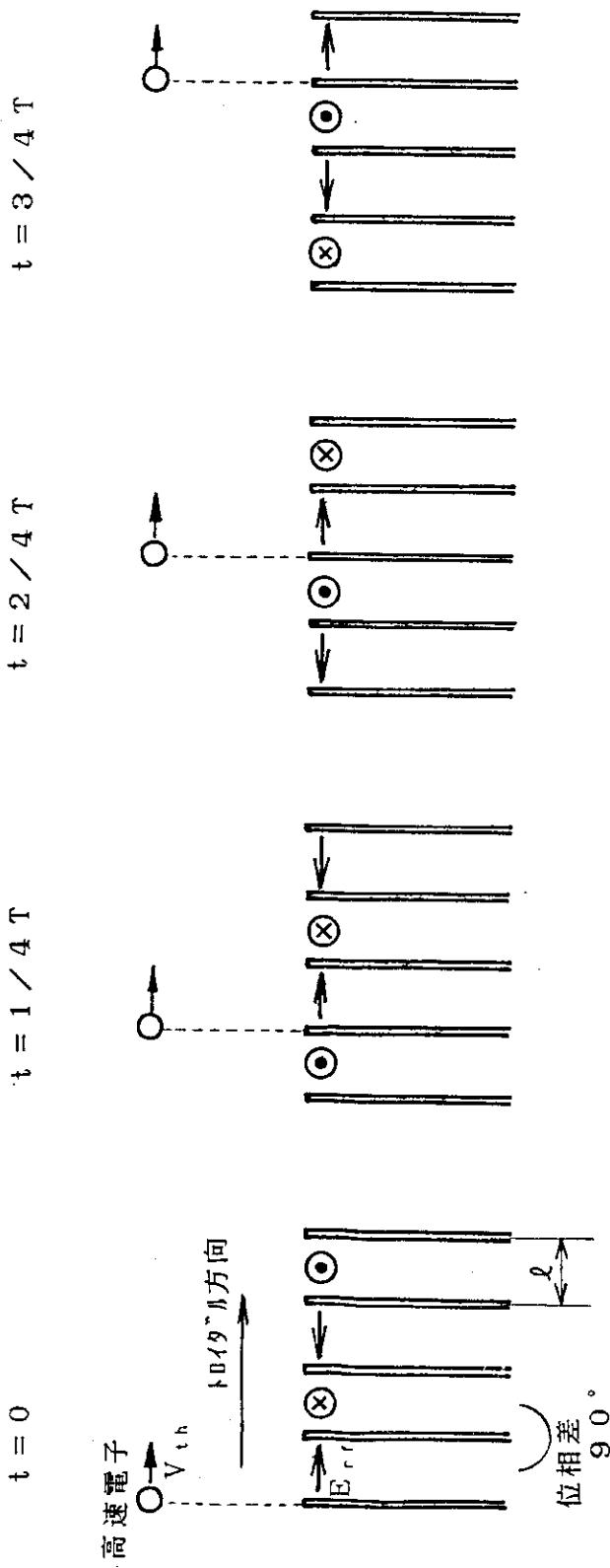


図3 LHRFの電流駆動（電子加熱）機構
この図の様にトロイダル方向に隣合った導波管の位相差が 90° の場合、
 $V_{th} = 1/4 \cdot T$ なる速度を有する電子が、絶えず RFにより加速される。
ここで T は高周波期、 E_{rf} は高周波電界、 ℓ は導波管間隔である。

3. 放電要因

ランチャーでの主な放電要因は、以下のものがあげられる。

- 溶接等の突起による電界集中
- 導波管表面の脱ガスによるガス放電
- 導波管フランジ面での接触不良による放電
- マルチパクタ放電
- 磁場と高周波との相互作用
- 真空窓の放電
- 先端部の放電

本項では、R & Dでの実験結果と、JT-60 ランチャーでの放電防止対策を述べる。

3.1 溶接等の突起

JT-60 LHRF ランチャーの長さは、真空導波管として1本あたり8～10mもあり、かつ脱ガスを速やかに取り除くため、図4に示すようにマニホールド内の各導波管には直径28 mmの排気孔が20個程度取り付けられている。この各々の排気孔には、電気特性改善用にスペーサが溶接されている。さらに、マニホールド内導波管は、直管とベンド管の溶接組み合せから成る。R & D の段階で、このような溶接での不良箇所があると、高周波入射とともに点光し（電界が集中し、局所加熱する），それが引金となって放電することが明かとなっている。このため製作段階で溶接に伴う突起は極力小さく、かつ滑らかにしてある。エージングとしては、小さな放電を繰り返しながら、このような突起を取り除く必要がある。

3.2 脱ガスによるガス放電

真空導波管に大電力を伝送すると、導波管表面は高周波により加熱され、表面に付着していたガスが脱離する。脱ガス量はそれまでの真空的な脱ガス処理の履歴によるが、脱ガスによる真空中度上昇が大きいと、ガスによる高周波放電が発生する。図5に試験装置における伝送電力試験の際に得られたエージング過程の、真空導波管の真空中度上昇、入射、透過電力の波形を示す。この試験での真空中度は、導波管に直接接続されたマスフィルターの全圧により測定されたもので、測定系の時定数は数msである。入射電力は約50 kWであり、エージング初期には入射開始から徐々に真空中度が増加し、反射電力の急増（ヒゲ）と透過電力の現象とともに真空中度が急増している。そして同時に、放電光が観察されている。これがショットを重ねることにより、真空中度上昇の勾配が下がり、RF入射中においても真空中度の上昇値が頭打ちとなり、放電が発生しなくなっていることが分かる。したがって、エージングにより、導波管壁から脱ガスを行うことにより放電が抑制できる。さて、水素ガスによる高周波放電の発生する真空中度の電力依存性は、以下の式で与

えられる^[2]。

$$P \cdot b = 0.9 \cdot x^{1/6} \cdot \exp(1.9 \cdot f^{0.44} / x^{0.22}) / f^{1/3}$$

ここで、 P は真空度 (Pa), b は導波管のトロイダル方向の内寸法 (cm), x は電力密度 (kW/cm²), f は周波数 (GHz) である。JT-60でのパラメータの真空度と、電力との相関を図6に示す。

効率よくエージングを進めるには、ランチャーの脱ガスを行うとともに、この脱離したガスを速やかに取り除き、導波管内真空度を低いレベルに保つ必要がある。JT-60のランチャーでは、図7に示すように、高周波入射に伴う脱ガスをマニホールドでの膨張による希釈効果とクライオポンプによる排気により、高周波入射時のガス圧上昇を抑制している。

3.3 接触不良による放電

JT-60 LHRF ランチャーは、波の位相速度を決める先端部（導波管束）と、各導波管の真空封じを行い脱ガスを取り除くマニホールド部とをボルトにより分離できる構造となっている。これは、導波管束のみの交換でLHRF実験目的に対応できるようにするためにある。したがって、導波管束とマニホールド部との接合面では、（高温ベーキング後においても）高周波接続と真空封じの2つの機能をもたせる必要がある。また、ランチャー導波管と真空窓とのシール部も同様な構造である。

色々なR & Dの結果、真空封じは、フランジ全体を金属Oリングで行い、高周波接続は、高温においても弾性を保持するインコネルのバネガスケット（図8）を各導波管間に挿入することで行っている。

3.4 マルチパクタ放電

導波管中の高周波の半周期と、導波管壁から放出した電子が対向面に衝突するまでの走行時間が一致するとともに、電子が衝突した際に電子が新たに1個以上生成すると（2次電子放出率が1以上）、真空度のいかんにかかわらず放電が発生する。これが通常のマルチパクタ放電である。図9にこの発生機構を示す。マルチパクタ放電の発生電界強度 E_{mp} (V/cm)は、概略以下で与えられる^[3]。

$$E_{mp} \sim 2 \times 10^3 \cdot f^2 \cdot b$$

ここで、 f は周波数 (GHz), b は導波管のトロイダル方向の内寸法である。JT-60のパラメータでは、発生するしきい値は、約1.5～9MW/導波管であり、実際の最大入射電力が250kW/導波管であることから、通常は起きないものと考えられる。

3.5 磁場と高周波との相互作用

ポロイダル磁場の漏洩により、ランチャーには導波管の電界方向にたいして垂直磁場が印加される。この磁場強度が周波数の電子サイクロトロン共鳴磁場（2GHzで0.071T）であれば、電子は高周波からエネルギーを得て、壁に衝突するまでラーマ半径を大きくしていく。このため、真空中度の悪い導波管内での、電子の滞在時間が長くなると、ガスを電離しながら電子を增幅し電子サイクロトロン（ECR）放電が発生する。このECR放電をさけるには、壁の脱ガスを十分行うと共に、共鳴領域の真空中度を 10^{-3} Pa以下にする必要がある。JT-60ランチャーでは、差動排気によりECR放電を抑制している。

一方、印加磁場がECR磁場の半分の場合には、電子は高周波の半周期で、再び同じ壁に衝突する。これが単極マルチパクタ放電であり、3.4節の通常のマルチパクタ放電と同様、2次電子放出率が1以上でこの放電が発生する^[4]。図10にこの放電機構を示す。JT-60ランチャーでは、高周波損失を低減するため、導波管としてはSUS 316に20μm以上のCuメッキを施している。一般に2次電子放出率は、表面状態により変わるが、Cuメッキの2次電子放出率は、図11に示すように、ベーキング後さらに表面をエッチングし無垢のCu面において、1次電子の入射エネルギーが300eV以上で1以上となる^{[5],[6]}。JT-60のパラメーターでは、図12に示すように入射電力が約100kWで、1次電子の入射エネルギーが300eVとなり、この放電が発生する。このためランチャーの共鳴領域には、2次電子放出率が1前後（図13）の炭素被膜を1μm程度施している。さらに、放電監視用として、図14に示すように、この共鳴領域には熱電対を設け温度測定を行っている。

3.6 真空窓の放電

ランチャーはプラズマ（真空）に高周波を放射するため、クライストロンからの伝送導波管を真空中封じする必要がある。真空中封じ用窓としては、真空を封じる他、高周波特性も要求され、通常 $1/2 \lambda_g$ (λ_g :管内波長) の厚みのセラミックを矩型導波管にメタライズした共鳴型窓か、円形セラミックと円形及び、矩型導波管を組合せたピルボックス型窓が用いられる。JT-60では、使用帯域が1.74～2.23GHzと広く、かつ、1MWクライストロンの開発試験において実績のある、ピルボックス型窓を使用している。

今までのR&Dの結果から、セラミック窓でも真空中度に係わらず、セラミックの帶電と2次電子放出率が1以上のため、マルチパクタ的な放電が発生しやすいことが明かとなっている。この放電も炭素コーティングや、同じく2次電子放出率の低いTiNコーティングにより抑制できる。図15に真空中のマルチパクタ的放電による温度上昇率の入射電力依存を示す^[7]。なにもコーティングせずかつエージングを行わないと、~70kW程度から放電が開始するが、コーティングを行った場合には、入射電力が~400kW程度までは上昇がセラミック自体の誘電体損失による温度上昇レベルに抑制されている（放電が抑制されている）。このため、JT-60の真空中窓では、2次電子放出率の低いTiNコーティングをC系のランチャーに施してある。

一方、ベース真空中度が悪いと窓近傍でガス放電が発生する。窓近傍の電界分布は円形導波管と

矩形導波管との不連続点による電界集中部があるため、3.2節で示した単純な矩形導波管のガス放電の真空度のしきい値よりも高真空中で放電が発生する。またベース真空度を悪くすると、伝搬されてきた高周波は真空窓を透過した直後にガスを電離するため、放電は窓近傍で発生する。この放電では図16に示すように入射電力のかなりの割合が放電で消費される。このため窓の温度上昇はマルチパクタ的放電よりもさらに急激で、入射電力が190 kW、0.5秒で真空度が 5×10^{-2} Pa (CH_4)において25°C以上も上がった。この際窓近傍の吸収電力は約75 kJであり、この放電により窓が破損した。

JT-60では、このガス放電による破損から窓を守ることが最も重要なことであり、このため個々の窓では、放電光を監視しており、放電光を検知すると同時にRFを遮断し($\sim 2\text{ms}$)、窓を放電から保護している。なお、放電光の強度から、マルチパクタ的放電($\sim 0.1\text{ルクス}$)とガス放電(数~数+ルクス)を識別できる。

3.7 先端部の放電

位相差をつけられた高周波はランチャー内の真空導波管を伝搬し、導波管束からプラズマに放射される。したがって、この先端部及び周辺では、個々の導波管から放射した電力が組合さり、局所的な電力集中を起こす危険性がある。さらに、この箇所には、プラズマ及び中性ガスが存在している。このような環境下での高周波放電の物理は未解明であるが、ランチャーとして最も放電の危険性が高い部分である。製作上では、先端部において角を丸め滑らかな形状にするとともに、図17に示すようにC系のランチャーでは、パッシブ導波管を設けることにより、ランチャー端でのトロイダル方向の対称性の乱れによる電界の乱れを少なくし、端部に過度の電界集中を少なくする構造を有している。

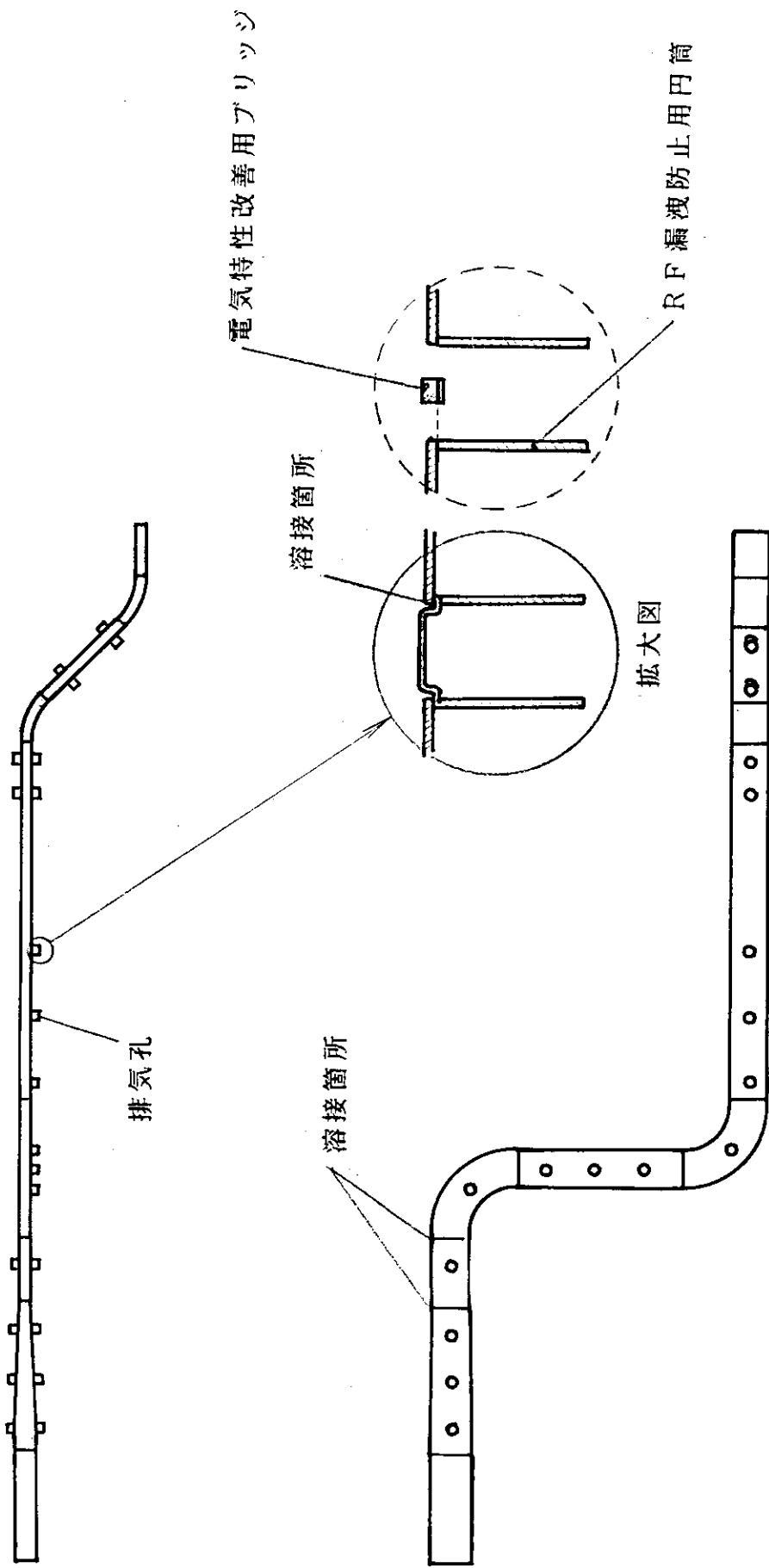


図4 マニホールド内導波管の溶接箇所
マニホールド内導波管は、直線及びベンドの導波管の溶接による組合せの他、
真空排気のための孔が多数あていている。

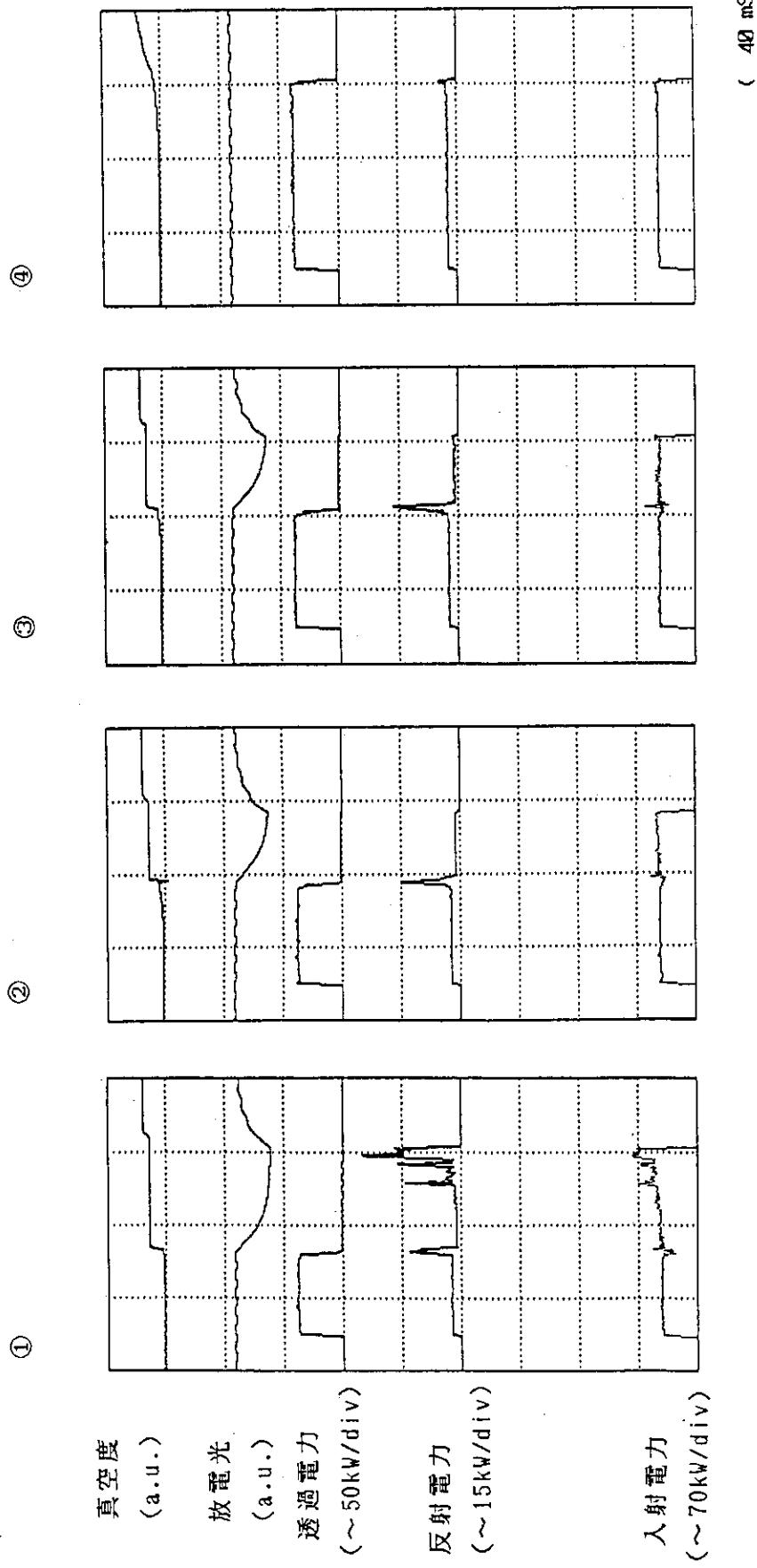


図 5 真空導波管のエージング経過 (①→②→③→④)

図中、上から真空度、放電光、透過電力、反射電力、入射電力である。
放電開始前にすでに真空度上昇が起きており、これが放電の引金になっていると考えられる。

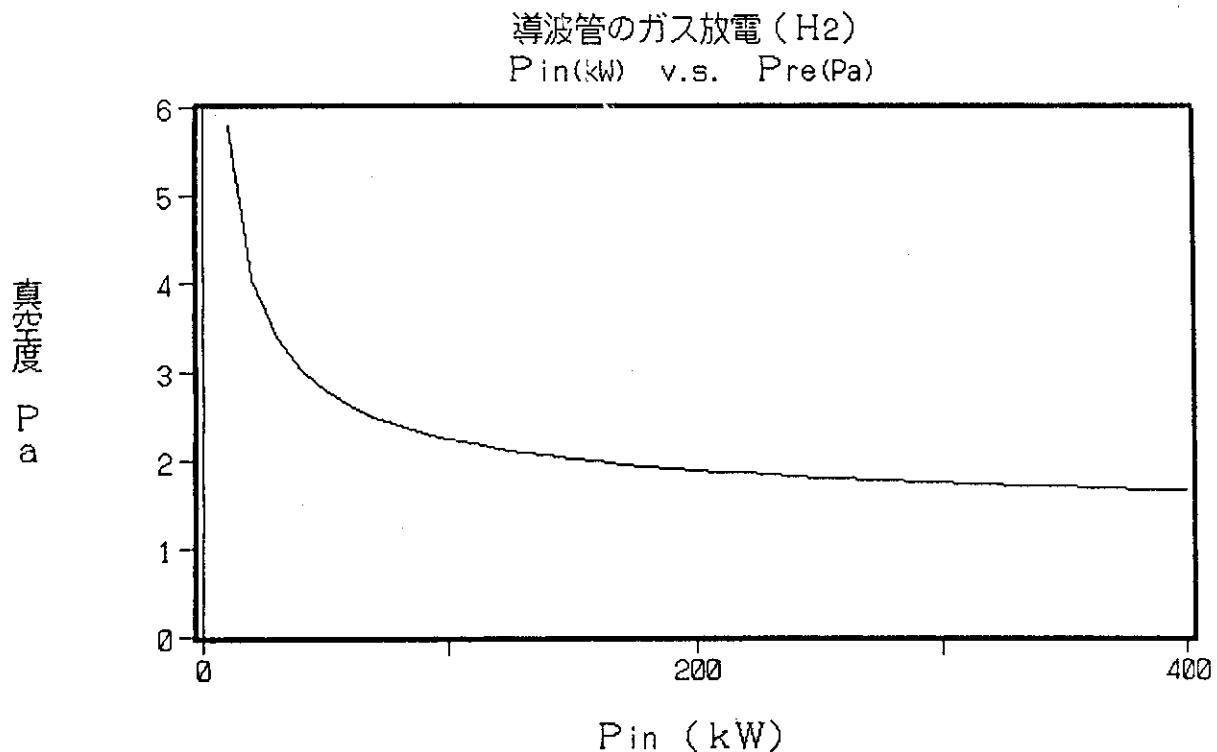


図 6 JT - 60 の LHRF ランチャーにおける、入射電力に対する水素ガスのガス放電を発生する真空度。

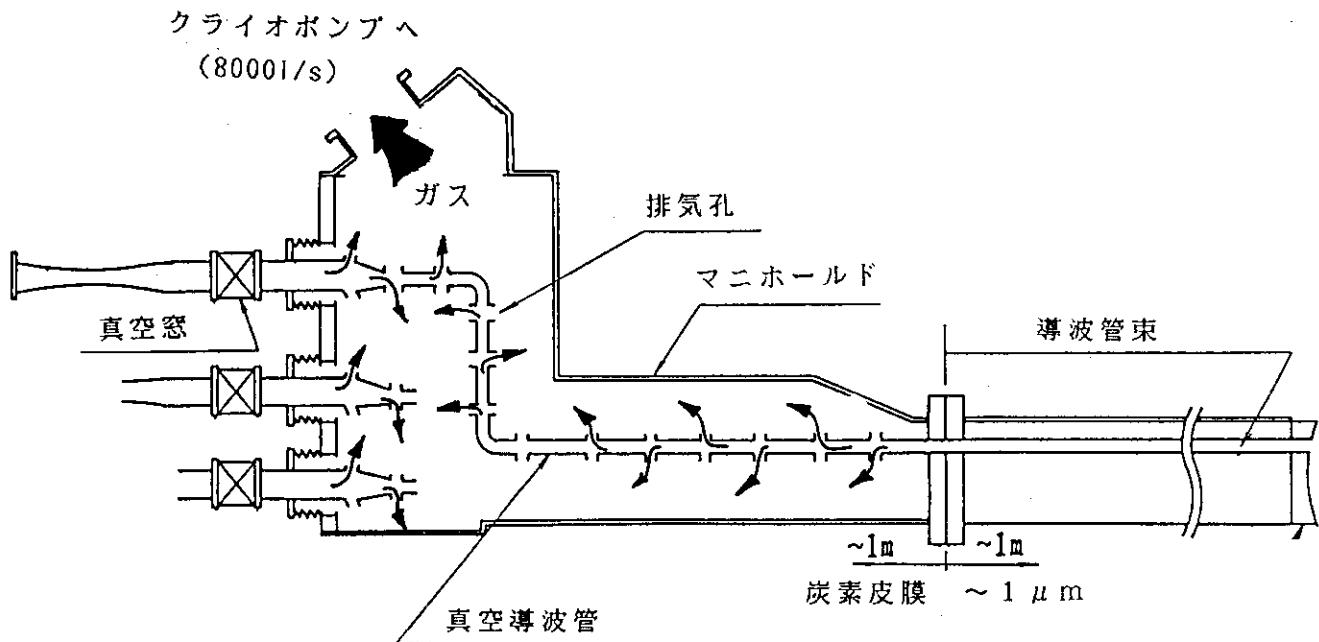
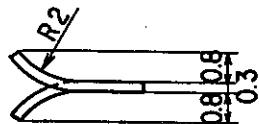


図 7 JT - 60 の LHRF ランチャーにおける、真空導波管のガスの流れ。

真空導波管から脱離したガスは、導波管排気孔を通りマニホールドへ流れ込む。さらにこのガスは、真空排気系のクライオポンプにより吸収される。



A~ 詳細

注記

1) X印ハ管板ニ取付時、スポット溶接部ヲ示ス。

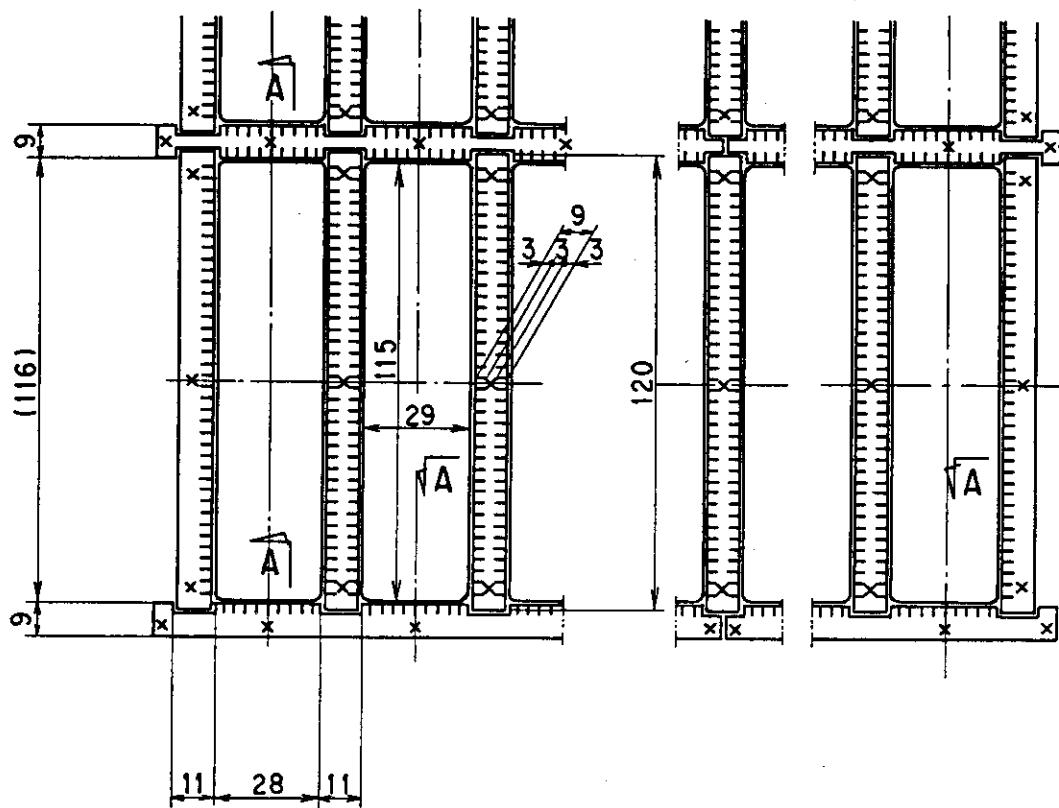


図8 インコネルガスケット

真空導波管間の高周波接続を行うもので、板厚 0.3 mm のインコネルを交互に折り曲げた板バネ形状を有する。この板バネの部分が高温ベーピング後も確実に両面を高周波的に接続する。

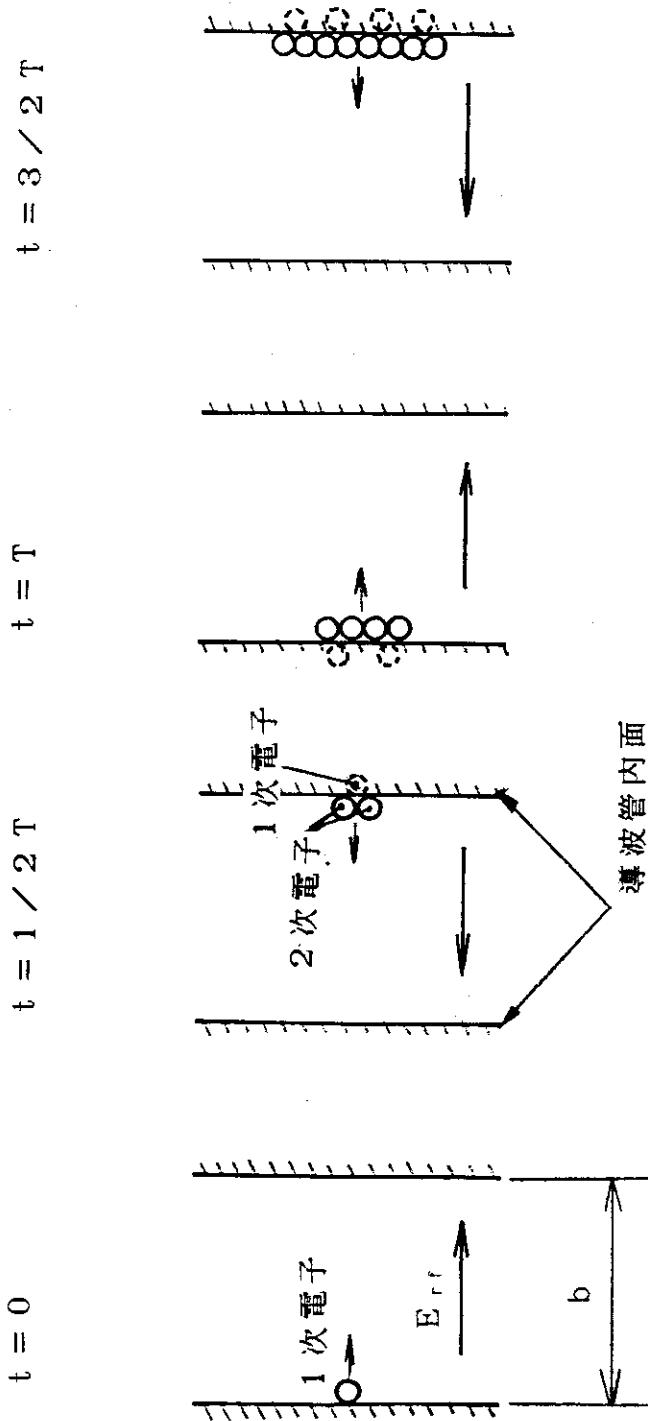


図9 真空導波管内のマルチパクタ放電の発生機構
電子の導波管内幅(b)走行時間が $1 / 2 T$ (T :高周波周期)であり, かつ
導波管内面での2次電子放出率(1個の電子が壁に衝突した際に発
生する2次電子数)が1以上であれば, 放電が起きる。

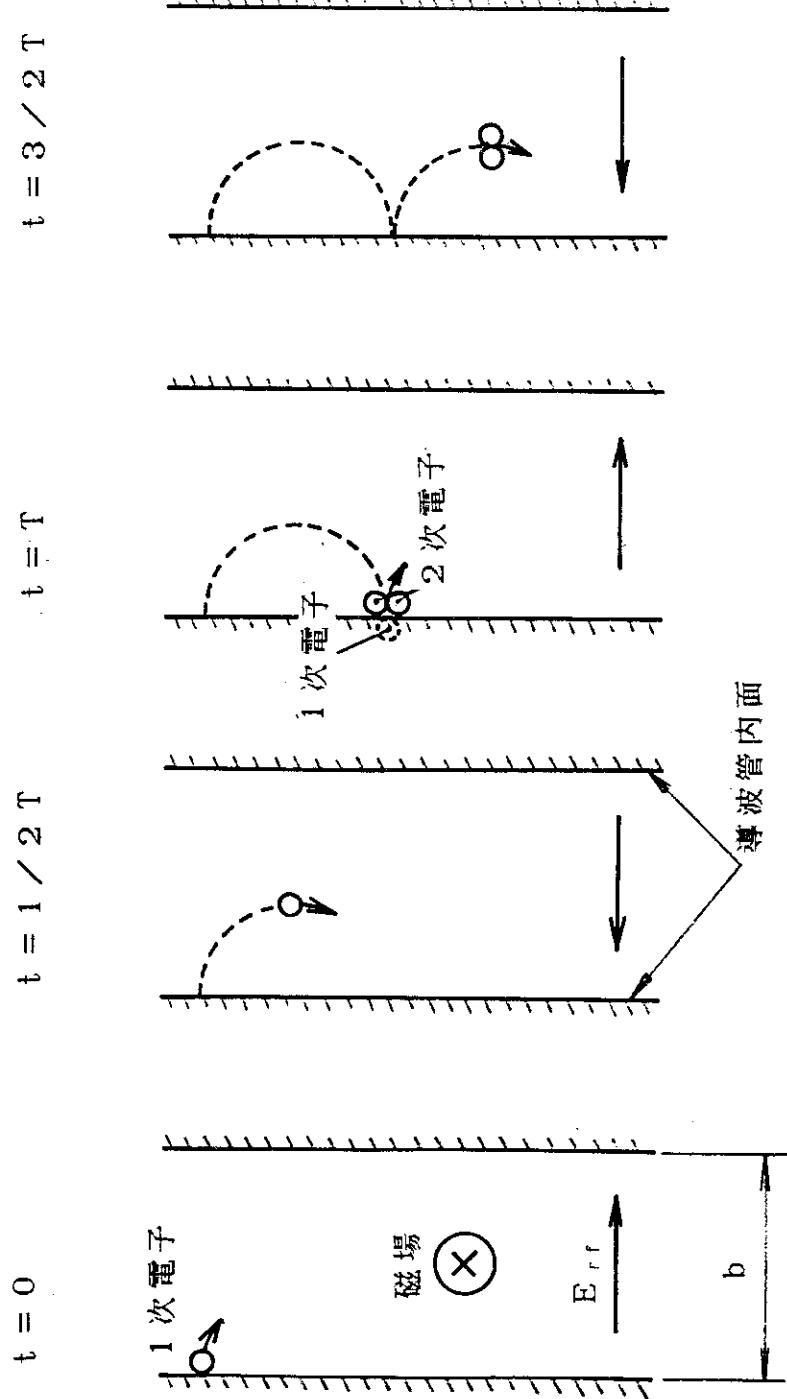


図 10 真空導波管内の単極マルチパクタ放電の発生機構

真空導波管の高周波電界に垂直方向に、電子サイクロトロン磁場の
1 / 2 の強度の磁場が印加すると、壁かわ飛び出した電子は 1 周期
ごとに再び壁に戻ってくる。このため、壁の 2 次電子放出率が 1 以
上であれば、放電が発生する。

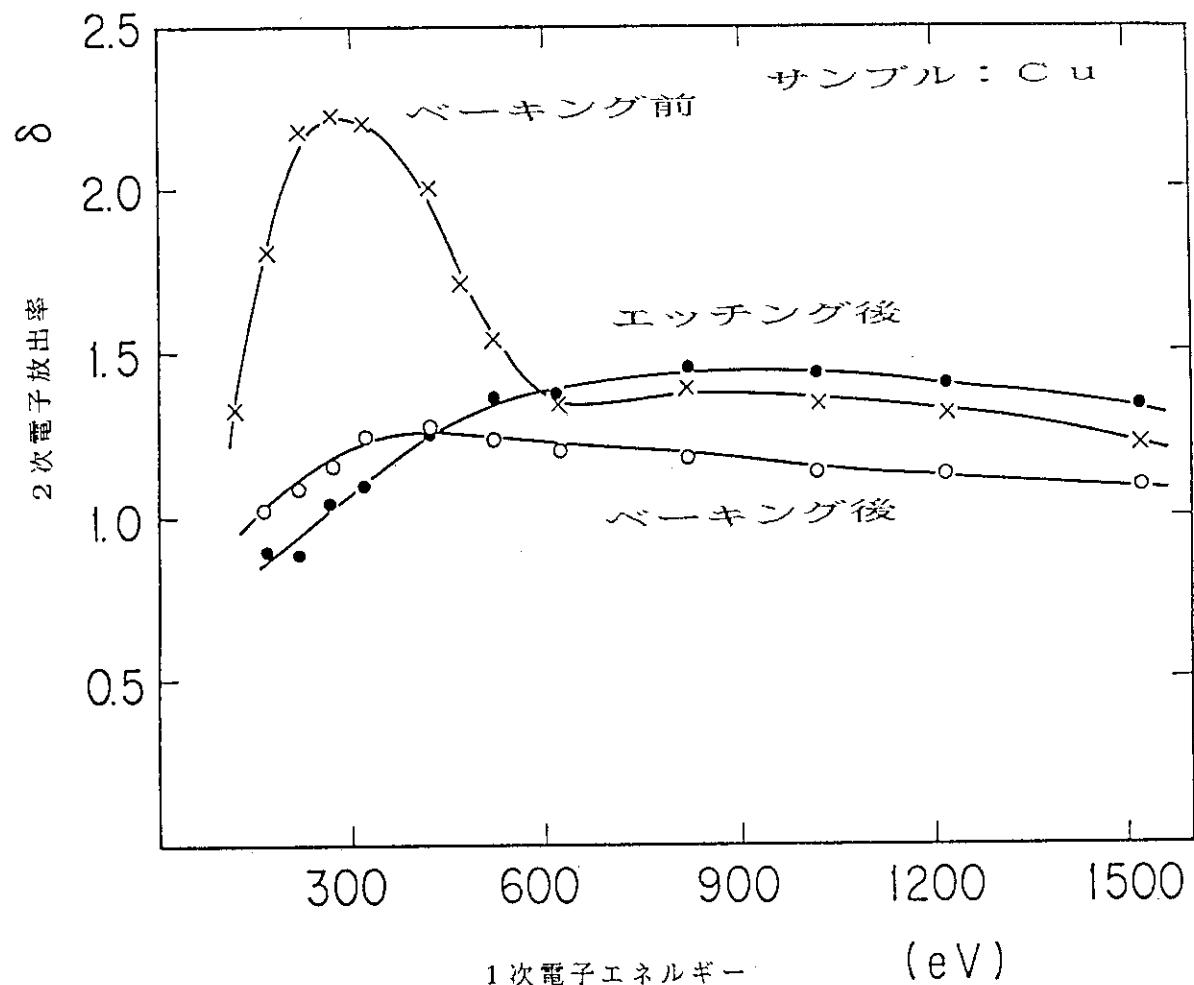


図 11 Cu メッキの 2 次電子放出率

1 次電子エネルギーに対する 2 次電子放出率を示す。ここで X, ○ は、
400 °C ベーキング前後のデータであり、● は、ベーキング後さらにア
ルゴンビームで表面をエッチングし、表面の酸化膜を取り除き Cu を
表面に出した状態のデータである。したがって、Cu メッキでは、エ
ッティングが進んでも 2 次電子放出率は、1 次電子エネルギーが 300 eV
程度以上で 1 を越える。

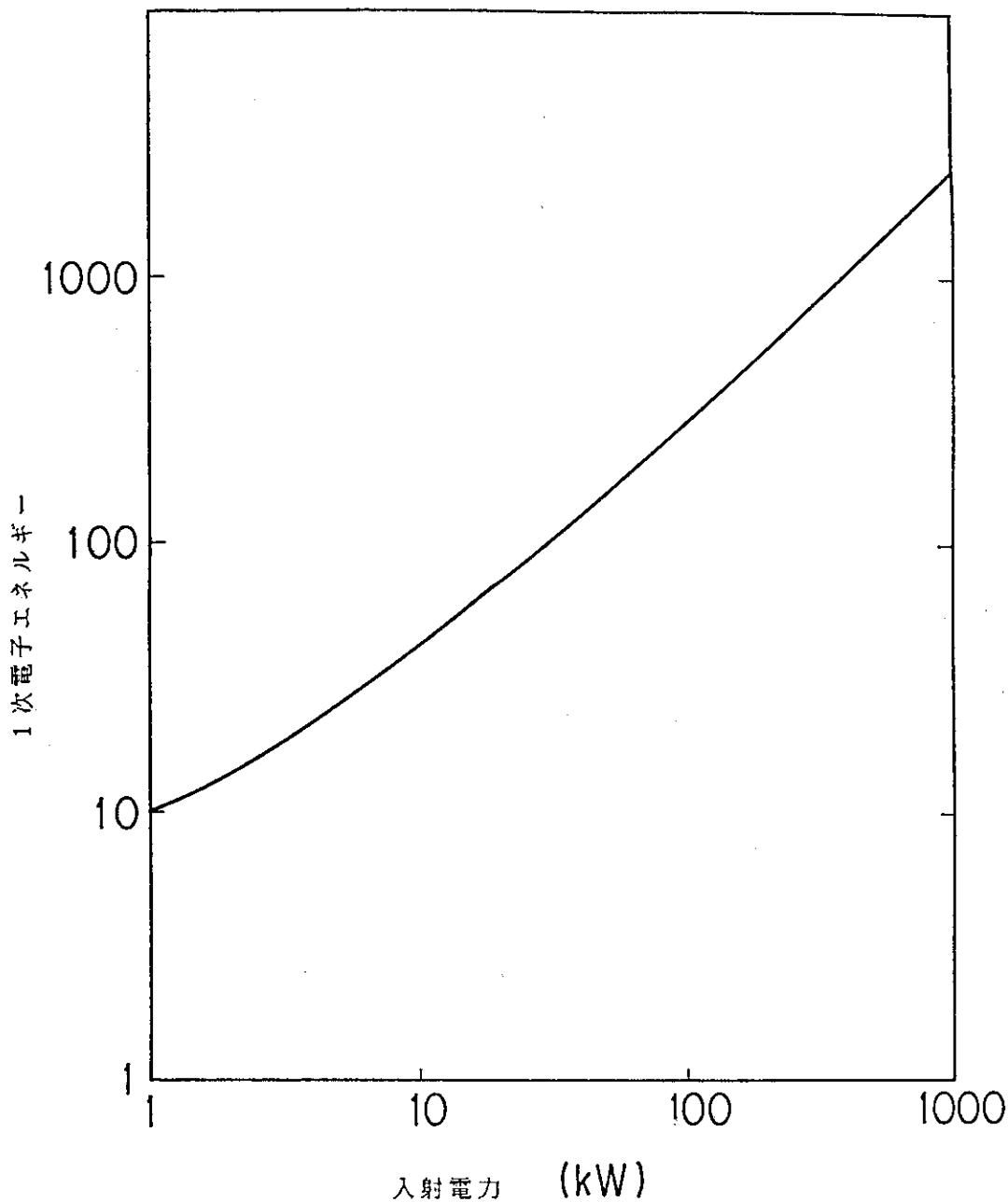


図 12 JT-60 の LHRF ランチャーでの入射電力と 1 次電子エネルギー
JT-60 のパラメータによる、導波管の入射電力に対する 1 次電子エネルギーを示す。単極マルチパクタ放電が発生するのは、図 11 において 300 eV 以上であることより、導波管 1 本当りの入射電力が 100 kW 以上になると Cu メッキの導波管では、単極マルチパクタ放電が発生する。

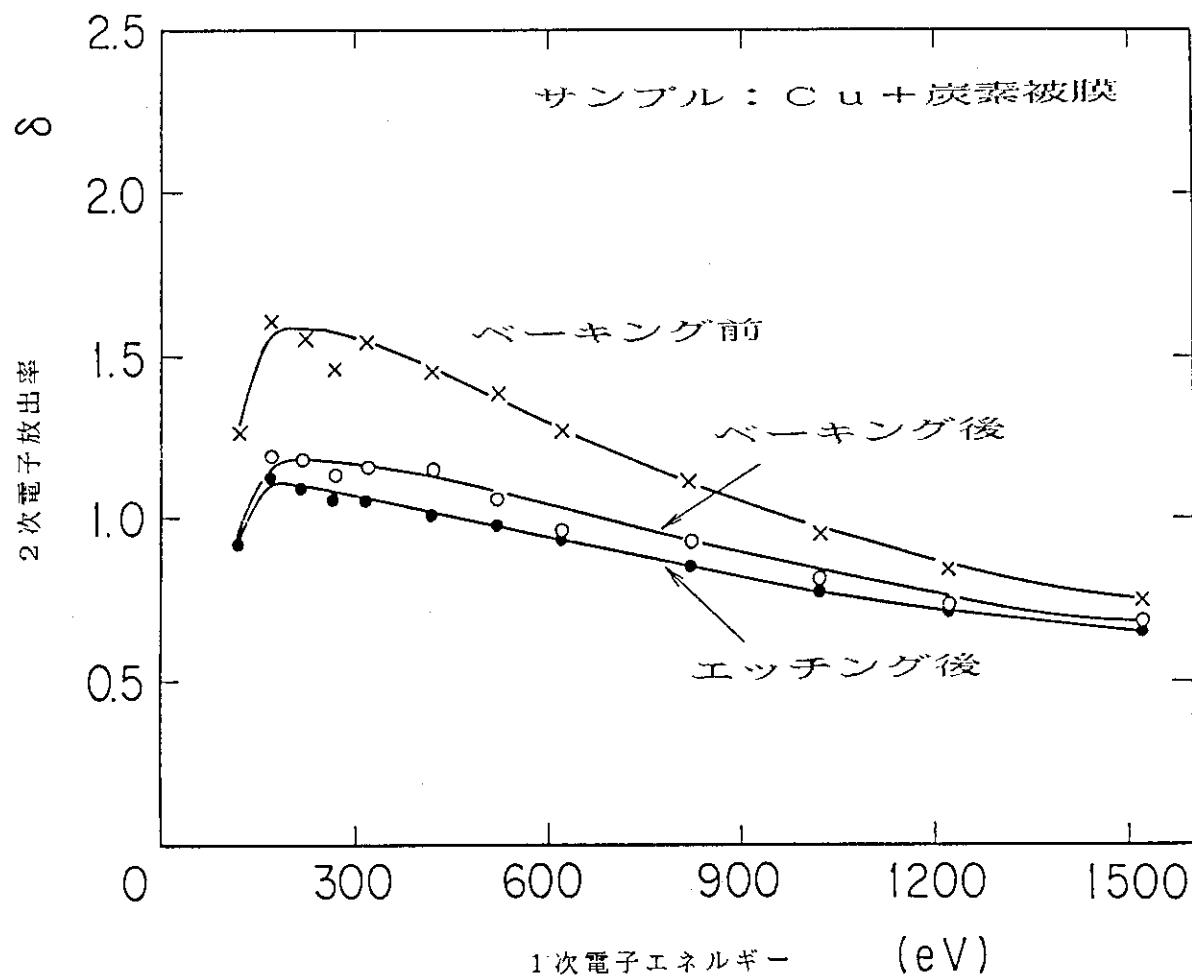


図 13 炭素皮膜の2次電子放出率

図 11 と同様ベーキング前後およびアルゴンエッティング後のデータである。2次電子放出率はほぼ 1 程度、あるいは 1 以下である。

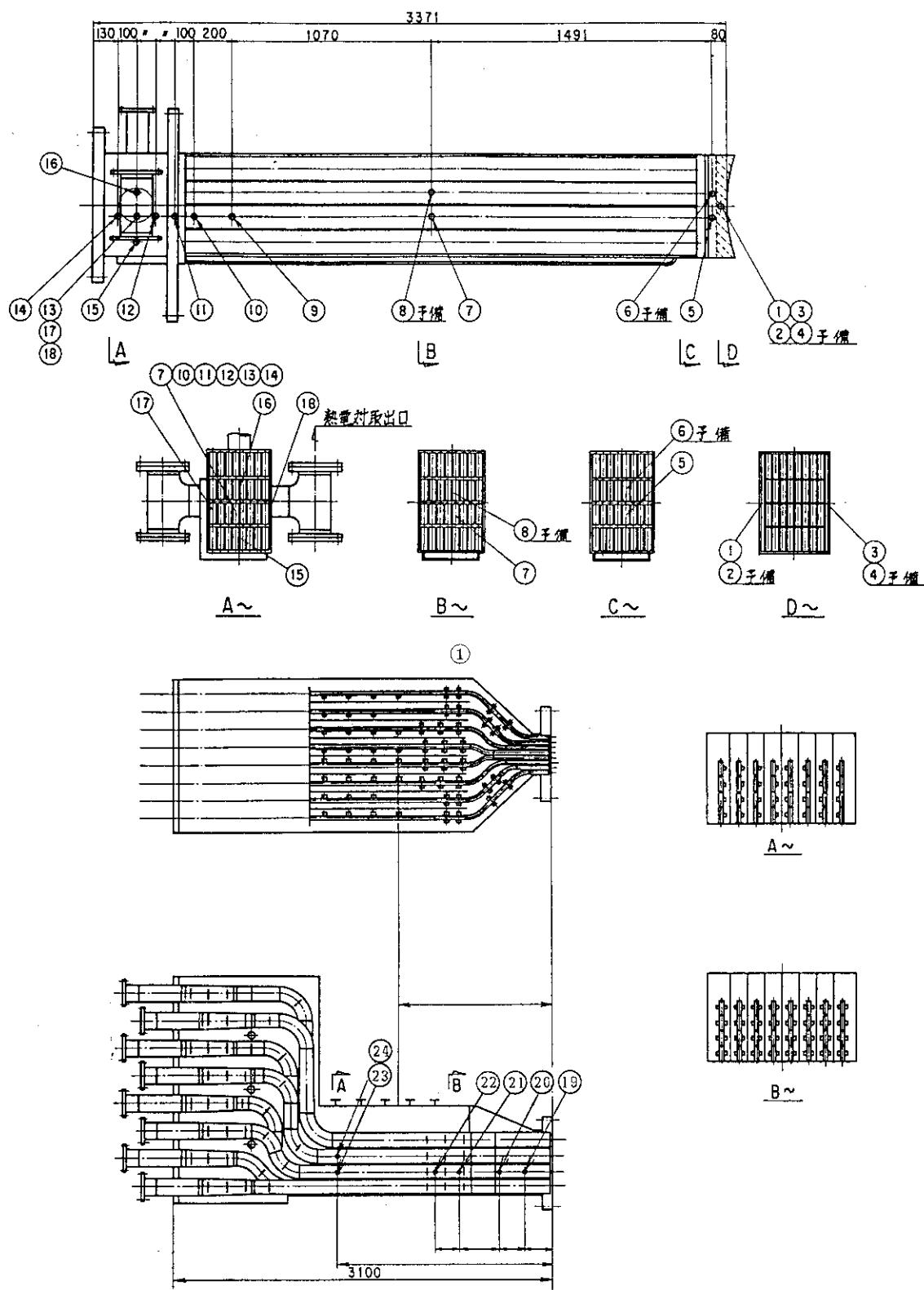


図 14 ランチャー温度監視点 (①: 導波管束部, ②: マニホールド部)

単極マルチパクタ放電の危険性のある部分は、導波管束とマニホールド部のつなぎ部分の前後 1 m 程度である。そのためこの部分には導波管に沿って集中的に熱電対を配置してある。また導波管束先端部には、プラズマからの熱負荷を監視するため熱電対が取り付けられている。

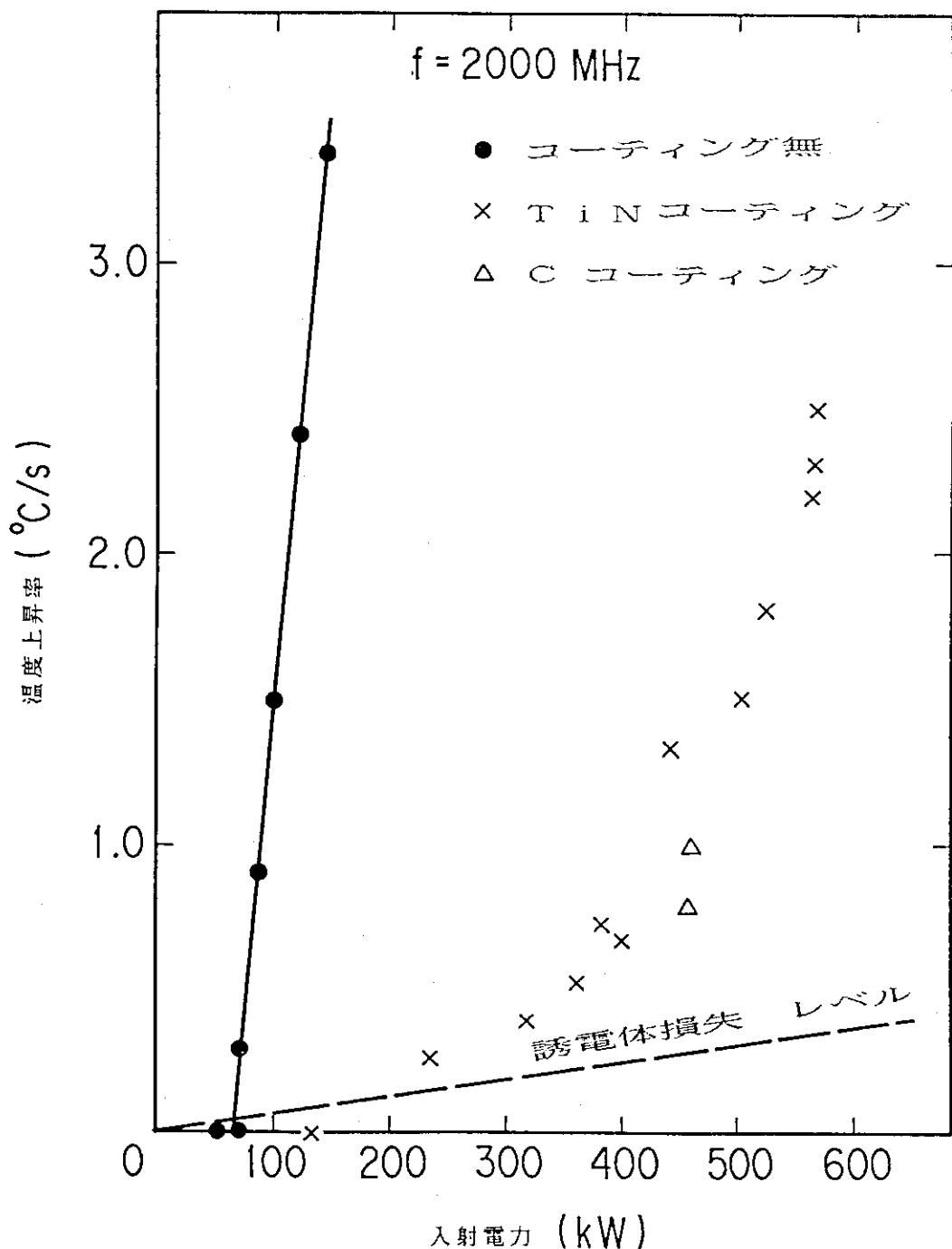


図 15 真空窓のマルチパクタ的放電によるセラミック部分の温度上昇率
入射電力にたいする真空窓の温度上昇率を示す。波線はセラミック自
体の高周波誘電体損失によるものである（放電のない場合の温度上昇）。
●は何もコーティングしていない、かつエージングを行っていない場合
の放電による温度上昇率である。一方、TiNコーティング（×）や炭
素コーティング（△）により、放電は入射電力～400 kW程度まで抑
制できる。

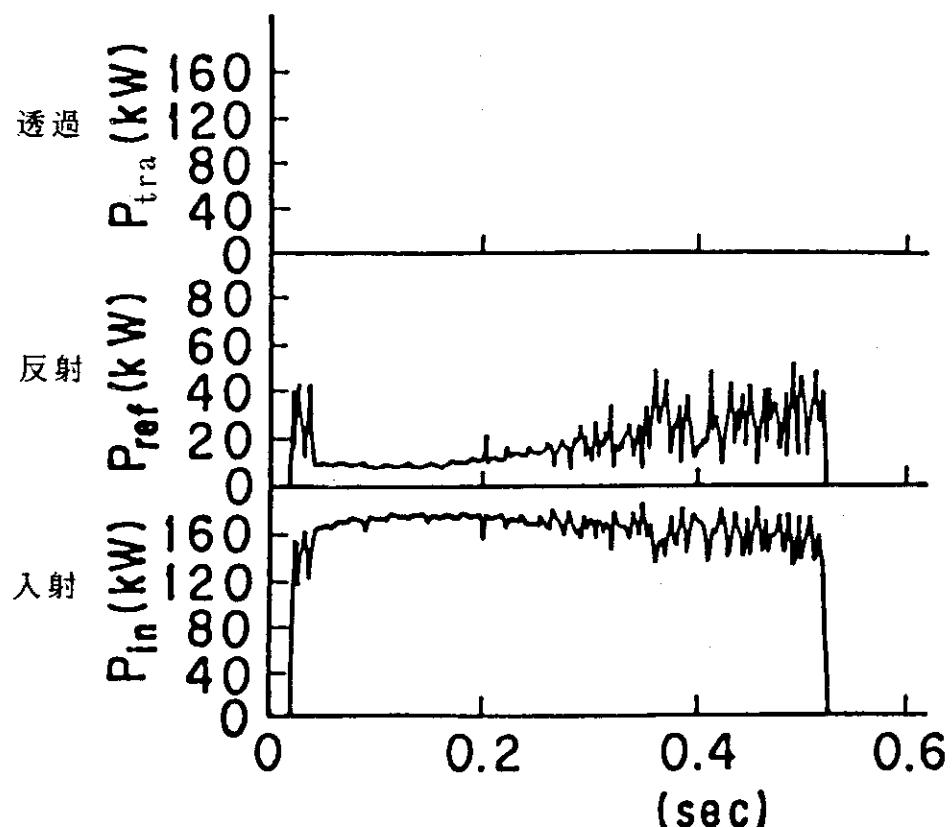


図 16 真空窓でのガス放電

図中は、上から透過、反射、入射電力波形であり、この場合の真空中度は 5×10^{-2} Pa (CH_4) である。入射した電力はほとんど窓近傍で消費され、電力は透過しない。

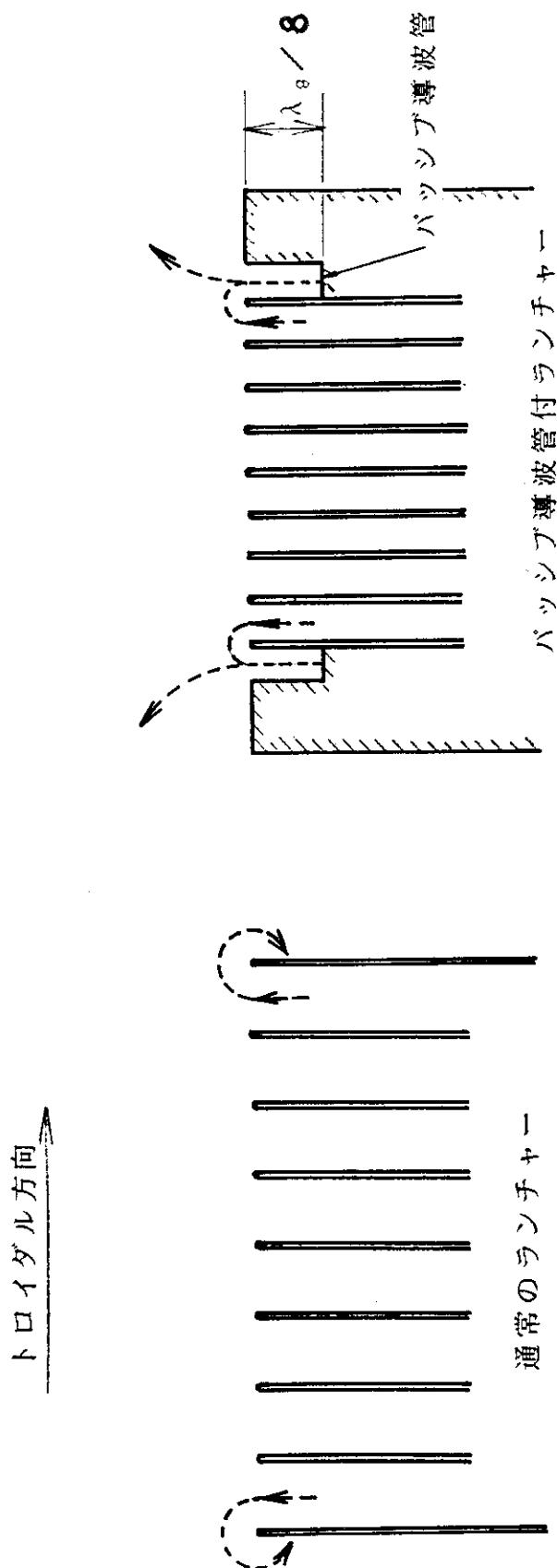


図 17 パッシブシップ導波管

通常のランチャー導波管東先端のトロイダル方向の両端に導波管間位相差の $1/2$ の長さを有する短絡板付き導波管のことである。JT-60では、図2で示したように電流駆動用ランチャーで用いている。この場合、パッシブシップ導波管の長さは、 $\lambda_q / 8$ (λ_q : 管内波長) であり、隣の導波管から回り込んできた波が短絡板で反射され、ランチャー前面で隣の導波管と 90° の位相差を持った波を放射できる。これにより、実効的な導波管本数を増し放射スペクトルをシャープにするとともにランチャー端の不連続の影響を少なくできる。

4. 位相設定

ランチャーに大電力を入射する前に、ランチャー先端部の位相設定を正確に評価する必要がある。JT-60 ランチャーでは、1 ランチャー当り導波管総数が32本であり、かつランチャー先端から位相計測箇所までの長さは、真空導波管、真空窓及び同軸ケーブル等を介し、30～40 mである。2 GHz では、導波管の 1 cm の機械長の差が 20° 前後にもなり、位相計測を構成している個々の部品の幾何学的寸法から全体の位相を推定すると誤差が大きくなる。

このため、JT-60 では位相計測を行いながら、真空中へトロイダル方向に隣合った2列（ボロイダル方向には4本ごと、従って、計8本）に高周波を通し、その個々の導波管の反射率についてする、隣合った位相差の依存性により、測定した位相を校正した。すなわち、真空入射の場合、位相差が “ 0° ” の時、反射が最小となり、 “ 180° ” の時、反射が最大になることから、位相設定を確かめることができる。この方法による設定精度は、図18に示すように電気測定用ランチャーで確認試験を行った結果から $\pm 8^\circ$ 程度と考えられる。

ボロイダル方向の位相評価についても上記と同様に行える。ただし、ランチャーからの波の放射スペクトルに対して、トロイダル方向の位相設定に比べ、ボロイダル方向の位相設定精度の重要性は低く、またボロイダル方向の位相設定は、機械的に動く半固定移相器のため位相評価に大幅な時間を必要とするため、現時点ではランチャー製作時のデータをもとに設定している。このため現在の設定精度は、約 $\pm 15^\circ$ であるが、ボロイダル方向の位相差をこの誤差範囲内で (90° , 0° , 0° , -90°) と設定することにより、クライストロンへの反射電力を通常の 30 kW 以下に抑えることに成功している。（次節のエージングで述べる）。

隣合う列の位相差に対する反射パワー依存性

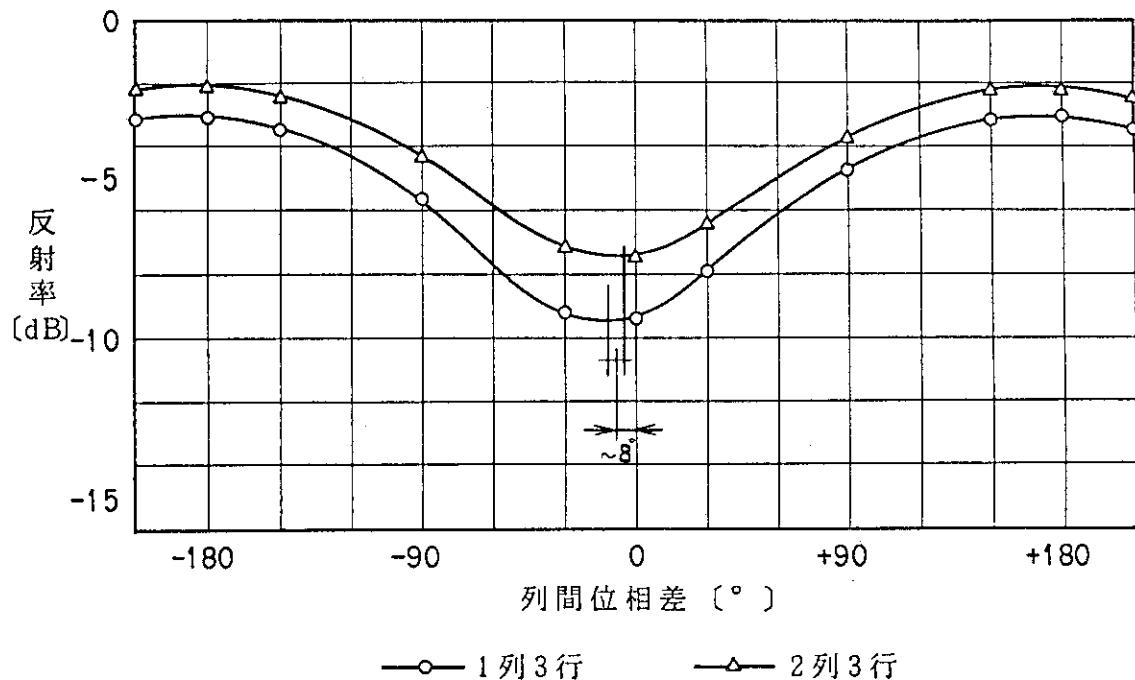


図 18 位相の測定

トロイダル方向に隣合った導波管においては、その位相差が“ 0° ”の時最も反射が少なく、逆に“ 180° ”の時に反射が最大となる。この図は、横軸に2本の導波管間の位相差、縦軸に各々の導波管での反射率を示す。ランチャー端の効果等で2本とも同じ反射特性を示さないが、ほぼ両導波管での反射率の最小点の中点が、ほぼ位相差の 0° の点である（この図の例では、 -8° であり、また平均の誤差は約 $\pm 8^\circ$ である）。

5. エージング

エージングは、前述したように、ランチャー内で放電を起こさずに安定に大電力をプラズマに入射するための作業である。このエージングの進み具合を評価するものは、高周波入射時における、反射波の乱れ（進行波は、電力一定制御のため一定出力），真空中度上昇，発光，温度上昇などである。また、エージングとしては、真空入射，TDC入射，プラズマ入射の3つのパターンに分類できる。

真空エージングの場合には、プラズマが無い状態で高周波を入射するものであり、真空導波管部の突起除去や脱ガス、真空窓のエージングを行うことができる。しかし、入射された高周波の吸収体が存在しないため、真空容器外へ高周波が漏洩し、大電力を入射すると JT-60 の各設備において高周波による誤動作や破損を発生する危険がある。このため、真空エージングの最大入射電力、パルス幅を制限する必要がある。一方 TDC プラズマを用いた TDC エージングは、真空エージングと異なり高周波を吸収するプラズマが存在する。このため、真空容器外への高周波漏洩は少なく、JT-60 の各設備の誤動作等による入射電力の制限が無い。また、ランチャー先端部をプラズマ環境下でエージングできる。さらに、ショットの繰り返し周期が早く、プラズマディスラプション等のシーケン遮断が無いため、高周波をプラズマに入射している時間を、通常のプラズマを用いたプラズマエージングの値に比べ、長くできる利点がある。

プラズマエージングは、真空エージング、TDCエージングを行った後、最終的にLHRF実験条件プラズマに大電力の高周波を安定に入射するためのものである。このため、JT-60 でのプラズマショット中に、高周波放電を起こさない範囲で長パルス、大電力の高周波をランチャーに通すように入射条件を決定する必要があるとともに、ランチャーからプラズマへの高周波の結合特性が高くなるようランチャーブラズマ間距離等の条件を最適化する必要がある。

ここでは、JT-60 ランチャーのエージング時における監視項目と、真空エージング、TDCエージング、プラズマエージングについて各々の基本的な方針及び現在までに得られた結果について述べる。

5.1 監視項目

5.1.1 放電時の反射電力異常

JT-60 LH 加熱装置では、通常放電が無い場合にクライストロンへ反射電力がこないよう、図19に示すようにポロイダル方向の位相設定を，“ $90^\circ, 0^\circ, 0^\circ, -90^\circ$ ”としている。このことは、クライストロン出力の分配回路であるマジック T の 2 分配後の導波管間において、ランチャー先端までの往復で 180° の位相差をつけるためであり、放電が無い場合にはランチャー先端からの反射波の電力、位相共に、ポロイダル方向で同程度であり、ランチャーからの反射波をマジック T の不整合ダミーに導くことができる。一方、ランチャー内の放電発生時には、反射電力及び位相が乱れ、マジック T で反射波の合成条件が崩れるため大きな電力がクライストロンに戻ってくる。

したがって、このクライストロンへの反射電力を検出することにより、ランチャー内の放電発生を知ることができる。この放電検出方法の長所は、3.6節の図16に示した真空窓のガス放電のような反射電力が大幅に増加しないような放電も、反射位相の乱れから検出できる点である。この方法により放電を検知しRFを遮断する反射電力検出保護システムが『反射異常3』であり、クライストロンへの反射電力値を測定し、その値から放電を検出し、ランチャー及びクライストロンを保護する。この保護システムが反射異常を検知すると、約100ms間、RFは遮断され、その後再びRFが入射されるというノッティング機能を有している。さらに中央操作卓から、検出レベルを“30, 50, 110, 150kW”的4つの値に設定できる（ここで最大検出レベルである150kWは、1MWクライストロンの最大許容反射電力値である）。したがって、この検知レベルの設定を大放電にならないように、かつ突起等を除去できる程度の放電を持続できる値にすれば、シーケンスを止めることなく小放電を繰り返しながら、徐々にパルス幅を伸ばし最終的に設定パルス幅までのエージングを行なうことができる。図20に反射検知レベルを約30kWにした際の真空エージングの様子を示す。この場合反射異常3が有効に働き12ショットで反射波形の乱れが無くなり（ランチャー内での放電が抑制され）エージングが終了している。

また同様な反射電力検知システムが32本の導波管個々に取り付けられている。これは、一定時間の反射率の急変よりRFを遮断するもの（『反射異常1』）と、反射率を測定し一定以上になるとRFを遮断するもの（『反射異常2』）である。『反射異常1』は、プラズマとの結合率の変化による緩やかな反射率の変化は無視し、放電の急激な反射率の変化のみを検出するものであり、『反射異常2』は、プラズマとの結合率の悪化や放電による反射率の増加を検出するものであり、放電からランチャーを保護するとともに、導波管内に大きな定在波比を立てないようにし、事前に放電を防止するものである。この二つの保護システムは『反射異常3』と同様に10msのノッティング機能を有する他、ノッティング後の再入射の時、入射電力を低減できる機能も有している（低減レベル機能）。ただし、現時点では、32本の導波管の検波器（入反64個）の1個の不良が生じても全体の信頼性が低下するため、誤動作が頻発し定常的には使用していない。また、現在までの動作時の結果から、ノッティング休止時間が10msでは図21に示すように一旦発生した放電を遮断できない。これは、1本の導波管排気孔の排気速度（0.4 m³/s）と導波管体積（0.115 × 0.029 × 8m³）から得られる排気時定数が約70msであり、放電時のガスが導波管から十分引ききらいためと考えられる。これらのことから、現在検波器の信頼性向上のために計測系の見直しを行うとともに、ノッティングの休止時間を100msに延ばす改造中であり、この改造後に反射異常1, 2のエージングに対して有効性の評価を行い、これらの反射異常検出システムの最適化を行う予定である。

5.1.2 窓の放電

エージング中最も重要な問題は、真空窓での放電である。窓の大放電は、RFのシーケンスを停止しエージング効率を低下させるばかりか、真空封じを行っているセラミックを破損しJT-60そのものの真空破壊を起こす危険性を有している。このため、真空窓の放電光の計測システムはエージングを行う上で最も重要な監視項目の1つである。現在のところ、マルチパクタ的放電は観測されておらず、ガス放電が頻発しているが、放電光の計測システムにより放電発生後数ms

で R F が遮断されており、真空窓は放電の損傷から保護されている。

5.1.3 真空度

ランチャーに高周波を通すと、導波管表面がジュール損失により発熱し、表面に吸着していたガスが脱離するため、ランチャー内真空度が上昇する。この真空度上昇が大きいと前述したように、ランチャー内でガス放電を起こす恐れがある。したがって、エージングを行いながら、吸着していたガス量をガス放電を起こさない範囲で取り除く必要がある。このため、高周波入射時の真空度を測定することは、エージングによる脱ガスの進行状況を判断する上で最も重要である。ランチャーの真空計は、マニホールドに取り付けられており、高周波入射時のガスの流れは、導波管及び真空窓から脱離し、導波管排気孔を介してマニホールドに導かれ、そしてクライオポンプに吸収される。現時点では、マニホールドに取り付けられた真空計の時定数も遅いため（800 ms），繰り返し周期の早い真空エージングでの高周波入射時の急速な真空度上昇の測定には適していない。そのため現在 log レンジ出力の高速応答の真空計に変更し、ショットごとに脱ガスの経験（エージング経験）がかわるシステムに改造中である。

なお、マスフィルターについても真空度測定と同様にエージングの進み具合を評価することができるよう設計しており、現在、真空エージングにおける脱ガス種の分析中である。

5.1.4 溫度測定

ランチャーの温度測定は、ランチャー先端部の左右ガード板及び導波管の進行方向について、熱電対により行っている。ガード板の熱電対はプラズマからの熱負荷を、導波管の熱電対は、高周波損失や単極マルチパクタ放電発生を調べるためにある。ただし、導波管の母材であるsus 316 の熱伝導度が低いため、ショット中に異常を検知することはできず、数ショット後に放電の発生を認知できる。なお、今まで際だった温度上昇は観測されておらず、単極マルチパクタ放電等は起きていないと思われる。

5.1.5 ランチャー先端部

ランチャー先端部での放電を確認するには、先端部をモニター監視する必要がある。従来は、計測設備により電流駆動用ランチャーの先端部をモニターできたが、現在は、真空容器改造に伴い監視装置が撤去されており先端部の監視できない。今後新たに監視装置を増設し、各ユニットのランチャー先端部を監視することが必要である。

5.2 エージングのパターン

5.2.1 真空エージング

真空エージングは、初めに 1 列（1 クライストロンごと、4 導波管）ずつ行い、各列の、脱ガス、突起除去等を最初に終了させる。その後列数を増していく、先端部をエージングする。当初パルス幅は、放電が発生しても、その損傷が軽微になるよう 20 ~ 50 ms から始め、反射波形が乱れなくなったら順次入射電力をあげる。クライストロンの飽和電力までエージングが進めば、

パルス幅を順次のはす。真空エージングでは負荷がないため、位相差によってランチャーから大きな反射が帰ってくる。しかし、前述したポロイダル方向に位相差を付けることにより、クライストロンに反射電力が帰ってこない、サーチュレーターの役割を果たすことができる。

現在までの真空エージングでは、真空度上昇による真空窓でのガス放電が頻発している。このガス放電が発生すると、マニホールド真空度は 10^{-5} Pa から 10^{-4} Pa 程度上昇する。図21に真空エージング中に真空窓で発生した放電時の、放電光、クライストロンへの反射電力波形及びクライストロン出力電力波形を示す。図中、窓で放電が発生する前に反射電力波形が乱れているのがわかる。したがって、放電がランチャーの別の箇所で発生し、その時発生したプラズマ及びガスが導波管を伝わって真空窓に達し、大放電を起こしているものと考えられる。

この、窓の放電に先立つ放電の開始位置については、隣合った2列ずつ真空エージングにおいて、2列間の位相差を制御し、ランチャーの電界強度の位置を変化させ、その位置に対する放電頻度を調べることにより、放電位置を推定した。すなわち、位相差を 180° にすれば、ランチャー先端からの反射率が大きくなり、ランチャー内部での電界強度を高くできるのに対し、位相差を 0° にすれば、逆にランチャー先端からでの反射が小さくなり、ランチャー先端部において電界強度を高くできる（図18参照）。図22に示すように、1本づつのエージングでは、800 kWまで放電が発生しないが、2本づつ、位相差 $\Delta\phi = 180^\circ$ のエージングでは、500 kWで放電が起きる。さらに位相差 $\Delta\phi = 0^\circ$ でエージングを行うと300 kWで放電が発生する。したがって、先端部の電界が高くなる位相差 0° の場合に、最も低い電力で放電が発生したことから、放電は先端部で開始したものと推定した。

さて、真空エージングは、入射された高周波の吸収体が存在しないため、JT-60の壁で減衰した高周波は、各ポートの絶縁フランジから再び JT-60 真空容器外へ放射される。現在までのところ、NBIの冷却水流量計のインターロックの高周波による誤動作が、真空エージングの最大電力、パルス幅を制限しており、ユニット当たりの総クライストロン出力 $1\text{MW} \times 1\text{s}$ または、 $\sim 1\text{MJ}$ 程度が誤動作を起こさない目安である。現在NBIにおいて誤動作対策中であり、今後、他設備に損傷を与えないことを確認しながら、真空エージングの電力上限値を徐々に上げ、真空エージングを効率よく実効する必要がある。

5.2.2 TDC エージング

TDC エージングでは、真空エージングと異なり高周波を吸収するプラズマが存在する。このため、真空容器外への高周波漏洩は少なく、他設備の誤動作を引き起こさず入射電力を制限されない。また、ランチャー先端部をプラズマ環境下でエージングできる。さらに、ショットの繰り返し周期が約5秒であり、RFパルス幅を考慮すると、実効入射時間率は約 $1/100$ 程度である。この値は次に述べるプラズマエージングの値に比べ、実質かなり大きい（プラズマエージングでパルス幅3秒、4ショット / 1時間とすると、 $1/300$ ）。しかしながら、プラズマのパルス幅は 50 ~ 80 ms 程度であり電流値も数 + kA のため、高周波を入射すると、TDC プラズマ自体が大きく変化する。このため、TDC プラズマでのエージングでは、プラズマ密度（実際にはガスパフ量）、プラズマ位置等をショットごとの高周波の入り具合いを確認しながら最適にする必要がある。また、RF 設備としてもプラズマが不安定のためランチャー内の放電が発生しなくとも、反射率が

不安定になる。そのため、反射異常3の保護設定を真空エージングと比べ緩める必要がある。

さらに、TDCエージングでは、入射波形に変調を加えることにより、大放電を避けながらエージングを進めることができる。これは、図23に示すように励振増幅系のオシレータにファンクションジェネレータで外部AM変調し、三角波形（立ち上げ波形）を作ると共に、ピンモジュレータを別のファンクションジェネレータにより矩形波で駆動することにより、パルス幅を数 μ sに分割できる。前者はRF入射直後の放電を避けるものであり、後者は、発生した放電を数 μ sごとに遮断し大放電に拡大しないようにするものである。基本的にTDCエージングは、プラズマエージングを行えない場合の補助手段であるが、図24に示すようにTDCエージングによりプラズマエージングを大幅に省力化できている^[8]。

5.2.3 プラズマエージング

プラズマエージングは、エージングの本来の目標であり、プラズマに安定に大電力を入射することである。このためには、ランチャー内の放電を抑制する他、ランチャーとプラズマとの結合特性を最適化する（ランチャーの反射率を下げる）必要がある。

(1) 結合特性

ランチャーとプラズマは、基本的に各々高周波回路のアンテナと負荷である。したがって、ランチャー先端部のインピーダンスとプラズマのインピーダンス（この場合、周辺プラズマのインピーダンス）の差から、ランチャーでの反射が生ずる。すなわち、電力反射率を Γ^2 、ランチャーのインピーダンスを Z_L 、プラズマのインピーダンスを Z_p とすると、

$$\Gamma^2 = | (1 - Z_p / Z_L) / (1 + Z_p / Z_L) |^2$$

で与えられる。実際のランチャーから放射される波は、図25に示すように位相速度に幅があり、 I' はこの位相速度の関数である。したがって、検波される反射電力はこの位相速度にわたって積分することにより得られる。

プラズマのインピーダンスはプラズマ端でのプラズマ密度及び密度勾配の関数である。JT-60では、ランチャーとプラズマ間距離を調節し、最小反射率になる位置を見いだしている。

現在までの水平ダイバータプラズマの場合では、図26に示すようにランチャー先端-セパラトリック間が約2cmで約15%の最小値を示している^[8]。今後下ダイバータプラズマになり、この値がどうなるか注意が必要である。

(2) エージング

プラズマエージングにおける基本方針は、1ショットのプラズマ中に極力長時間RFを入射し、エージングの効率を高めることである。すなわち、放電時にはRF遮断及びノッチングを有効に使用し、シーケンス遮断を行わないことである（シーケンスが遮断すると、そのプラズマショットにはもはやRFは入射できない）。RF遮断もしくは、ノッチング機能を有するのは、『反射異常1、2及び3』の保護システムであり、シーケンスを遮断するのは真空窓の放電（発光）、クライストロン管内放電（出力窓電光、クローバ動作等）、異常発振（クライストロンの自己発振）等のRF装置の破損の危険性の高いものである。クライストロン管内放電に関しては、その発生にたいする反射電力、反射位相依存性の十分な評価を行っていないため、現時点では実際に

クライストロン単体での耐反射電力試験により、健全性を確認した反射電力値 150 kW を設定値として用いている。今後は、このデータを高速移相器を使い収集することにより、クライストロンの使用条件を明かにする必要がある。なお、異常発振は現在まで観測されていない。

さて、現在のプラズマエージングでは、ポロイダル方向に位相をつけ、通常クライストロンへの反射を低い値にしている（30 kW程度）。このため、クライストロン管内放電よりもランチャー真空窓のガス放電のほうが、シーケンスを遮断する頻度が多い。プラズマエージングの場合も真空エージングと同様、窓放電は先端部の放電が引金となって発生している。図27に真空窓の放電光と、その導波管ラインの入反射波形を示す。この場合反射波形が乱れて約94 ms 後に窓でガス放電が発生している。また、放電の途中10 ms のRF遮断があるが、真空エージングと同様このRF休止時間では、放電を停止できていない。このショットでは、『反射異常3』の検知レベルが150 kWであり、窓の放電を抑制できなかった例であるが、この検知レベルを厳しく設定し、一旦起きた放電を100 ms のRF休止時間により抑制することが、今後のエージングを効率良く行うために必要である。また、5.1.1項に述べたように、現在『反射異常1, 2』のノッチング動作時の休止時間を、100 ms に延ばすように改造中であり、どの反射異常検知システムが最もエージングに有効か、明かにする必要がある。

さて、図28に示すように今までA, B系の加熱用ランチャーでは、約350ショット、C系の電流駆動用ランチャーでは、約500ショットのプラズマエージングを行い、A, B系で約3.3～3.7 MW, C系では約4 MW、また3ユニット合計11MWの最大入射電力を得ている。これらの値は図29に示すように従来のLH RF実験領域を大幅に上回っており、また同じく図30に示すようにC系では、導波管当りの電力密度が従来のスケーリングを上回っている。これらの最大入射電力値は、現時点でショットを増すことによりさらに改善しており、今後さらに伸びると予想される。

一方、ランチャー内の放電を抑制しても、大電力を急に入射したり、逆に急に遮断すると、プラズマが不安定になる場合がある。これは、前プラズマショットの消滅後のガスがランチャーに付着し、RFにより再脱離してランチャー内真空度を悪化するためや、高周波によりプラズマが急激に変化するためであると考えられる。現時点では経験的に100 ms 程度の立ち上げ、立ち下げ時間とすることで、RF入射時、遮断時にプラズマが不安定になることを回避している。

なお、LH RF実験終了後、JT-60真空容器内からランチャーの目視点検において、ランチャー先端部に高周波放電の痕跡が認められるとともに、炭素皮膜が見られた。これは、JT-60真空容器の第一壁材である炭素が蒸着したものと考えられる（厚みは、目視判断で数 μm 程度）。したがって、エージングを行うことにより、ランチャー先端部で炭素皮膜を生成し、これにより先端部の2次電子放出率を下げ、放電を抑制する可能性がある（単純なマルチパクタ放電は起きないが、2次電子放出率を下げるることにより、電子の増倍機構を抑制するため、放電は発生しないくなる）。

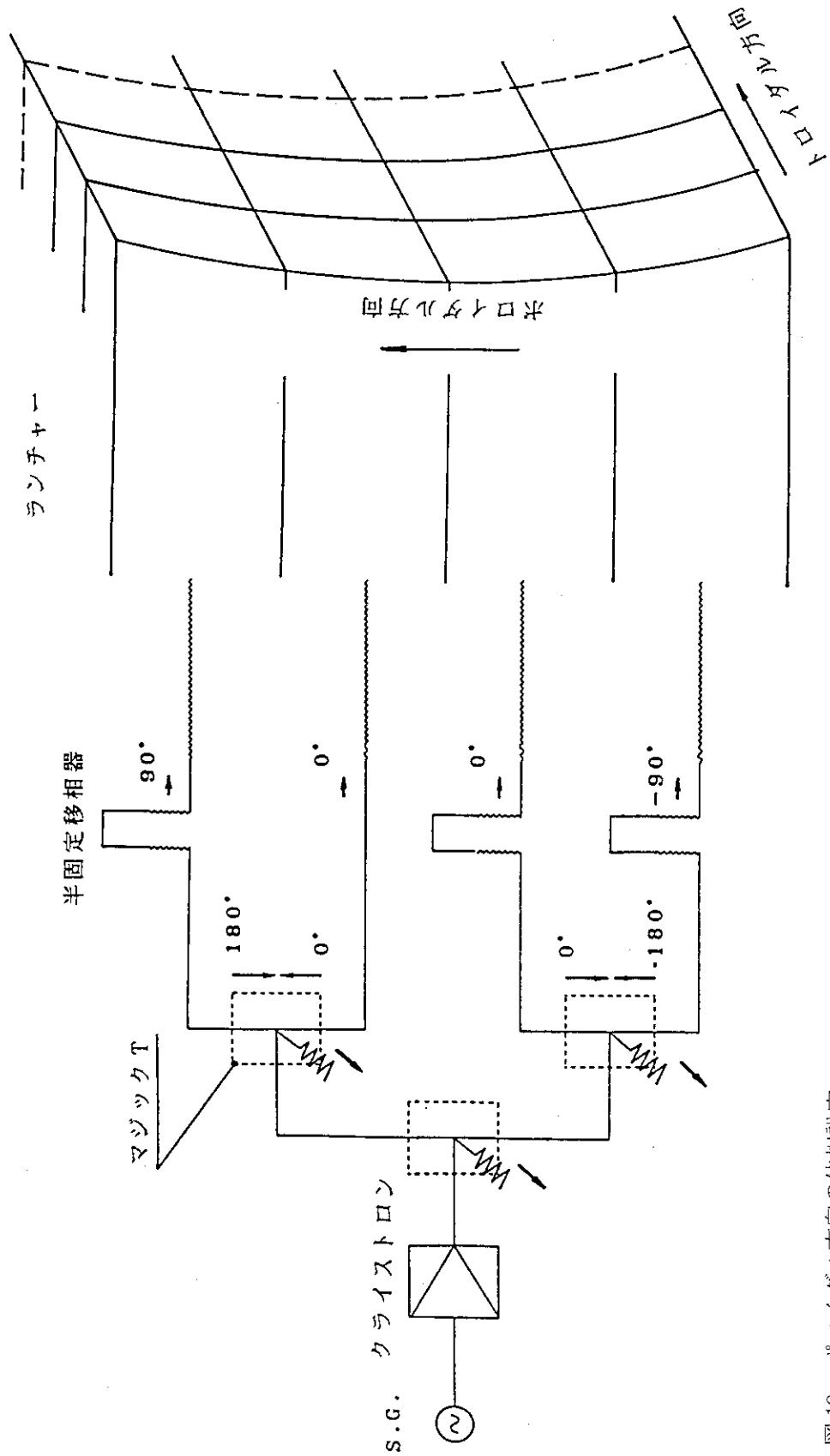


図19 ポロイダル方向の位相設定

クライストロンから増幅された大電力高周波は3個のマジックTにより4分配し、ランチャーでのポロイダル方向の導波管の電力を給電する。ランチャー先端部からの反射電力、反射位相はポロイダル方向ではほぼ同じ値であるから、各伝送導波管の半固定移相器で進行波位相に“ 90° ， 0° ， 0° ， -90° ”と位相差を付けると、ランチャーからの反射位相は“ 180° ， 0° ， 0° ， -180° ”となりマジックTにおいて反射電力はダミーに吸収され、クライストロンへは戻らない。したがって、ランチャーからの反射が大きい場合も、クライストロンを安定に使用できる。また、4本のうち1本でも放電が発生すると、反射位相のダミーへの合成条件が崩れるため、大きな反射電力がクライストロンへ帰つてくる。このためクライストロンへの反射電力を検知することにより放電を検知できる。

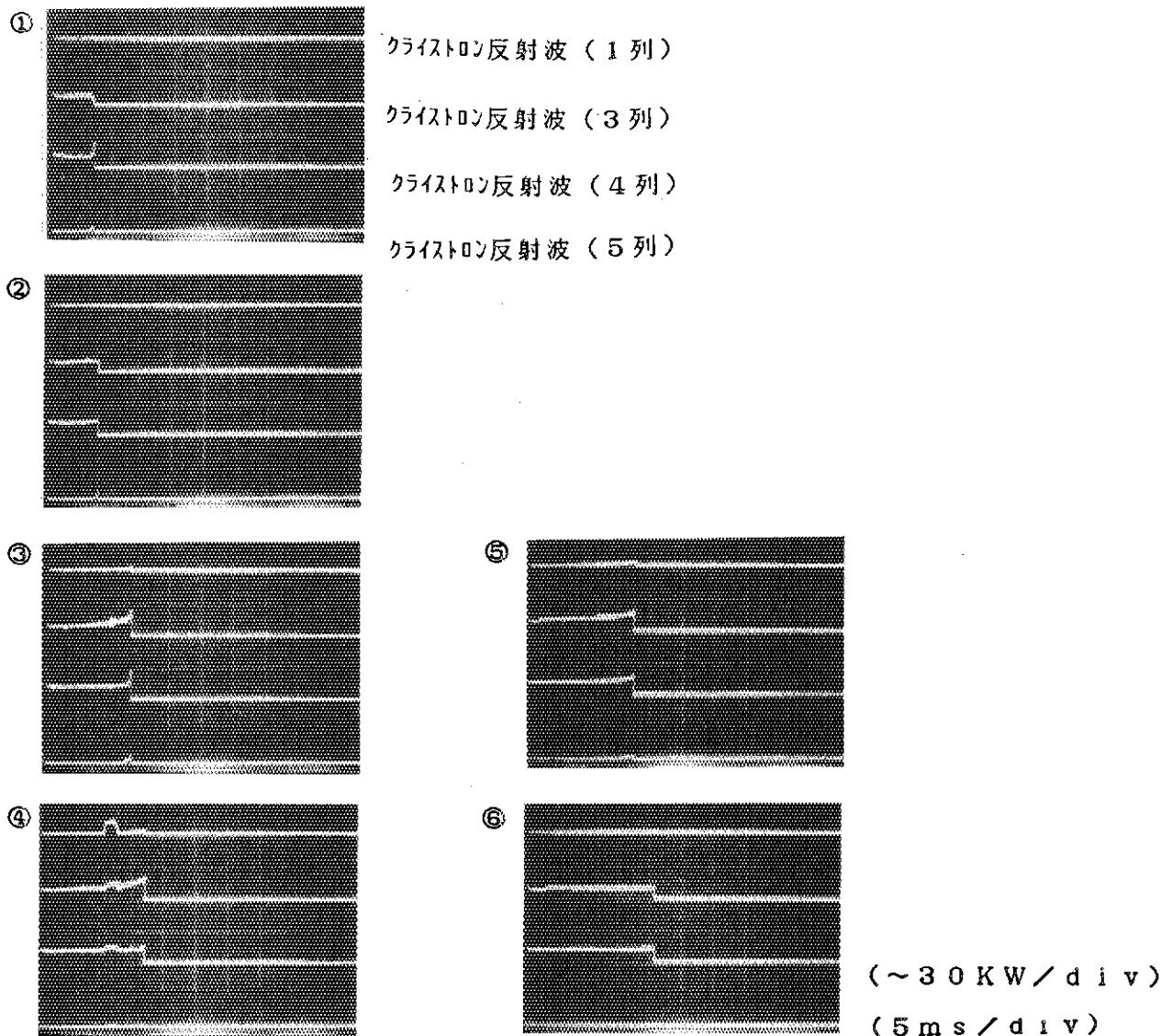


図 20 JT-60 ランチャーでの良好な真空エージング例

この図は、2, 3列の2本のクライストロン（8本導波管）を使用した真空エージングの際の1, 3, 4, 5列のクライストロンへの反射波形である。クライストロン出力は、約920 kW, 設定パルス幅は20 msであり、2ショットごとの変化を示す。この場合、反射異常3の検知レベルを30 kWとしており、放電が拡大する前にRFを遮断している。ショットごとにRFが遮断される時間が伸びて行き、12ショット目で設定パルス時間の20 msまで、正常にRFが入射された、すなわちこのレベル（電力、パルス幅）でのエージングが終了した。

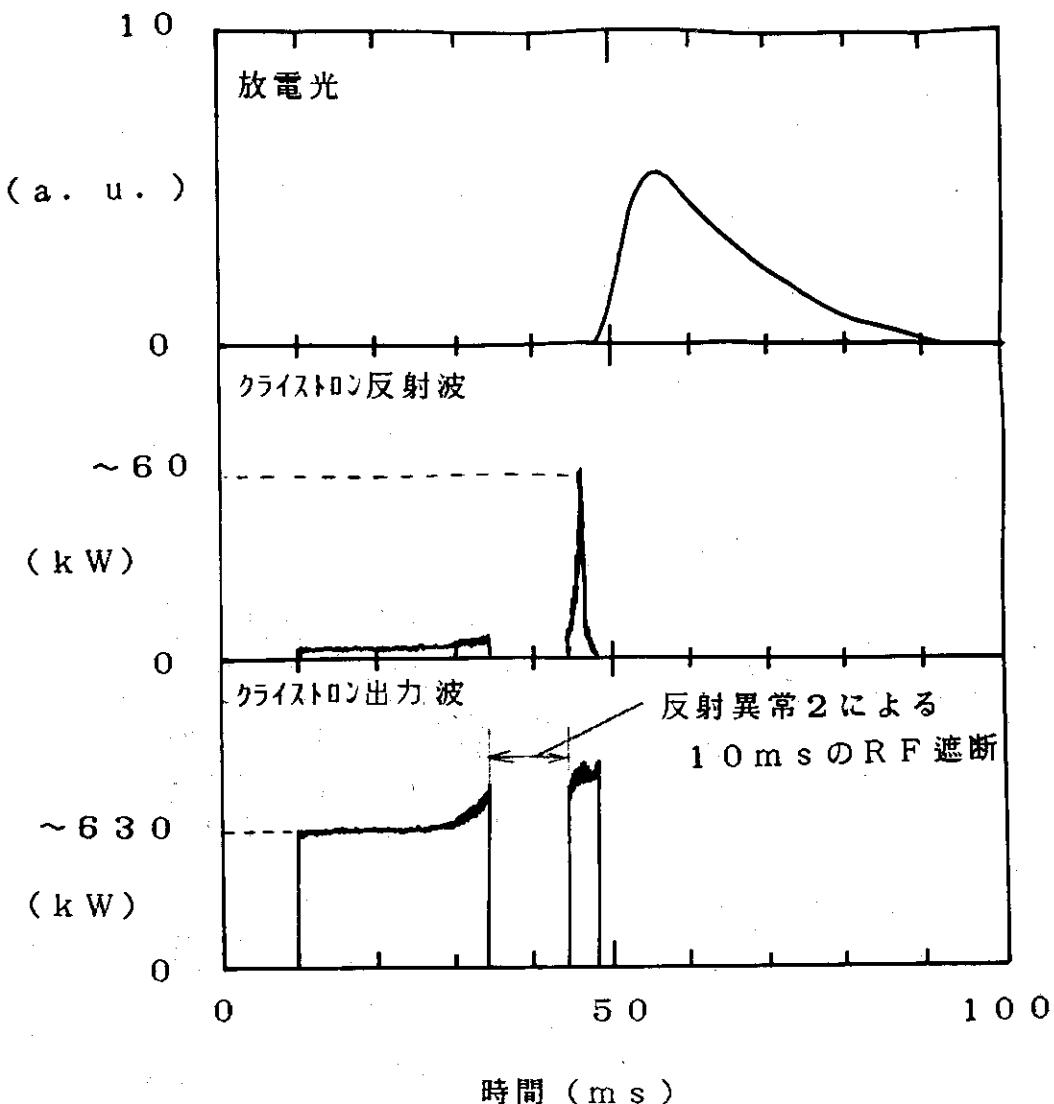


図21 JT-60 ランチャーでの真空窓のガス放電（真空エージング）

JT-60 ランチャーの真空エージング時、クライストロン出力が約 630 kW において発生した、真空窓のガス放電。図中、上から真空窓の放電光、クライストロン反射波形、出力波形を示す。反射異常 2 により、RF 入射約 23 ms で一旦 RF が遮断し、10 ms 休止後再び RF が入射されている（反射異常 2 のノッティング機能）。一方、クライストロンの反射、出力波形は、この RF 休止以前から少しづつ乱れが直っていない。最終的に急激な反射波の乱れの直後に真空窓で放電が始まり、この放電検知により RF 及びシーケンスが遮断された。この放電光度は数百ルクスであり、ガス放電のものであり、RF 遮断後もセラミック蛍光により光っている。なお、反射異常 2, 3 の設定は各々 50%, ~100 kW である。

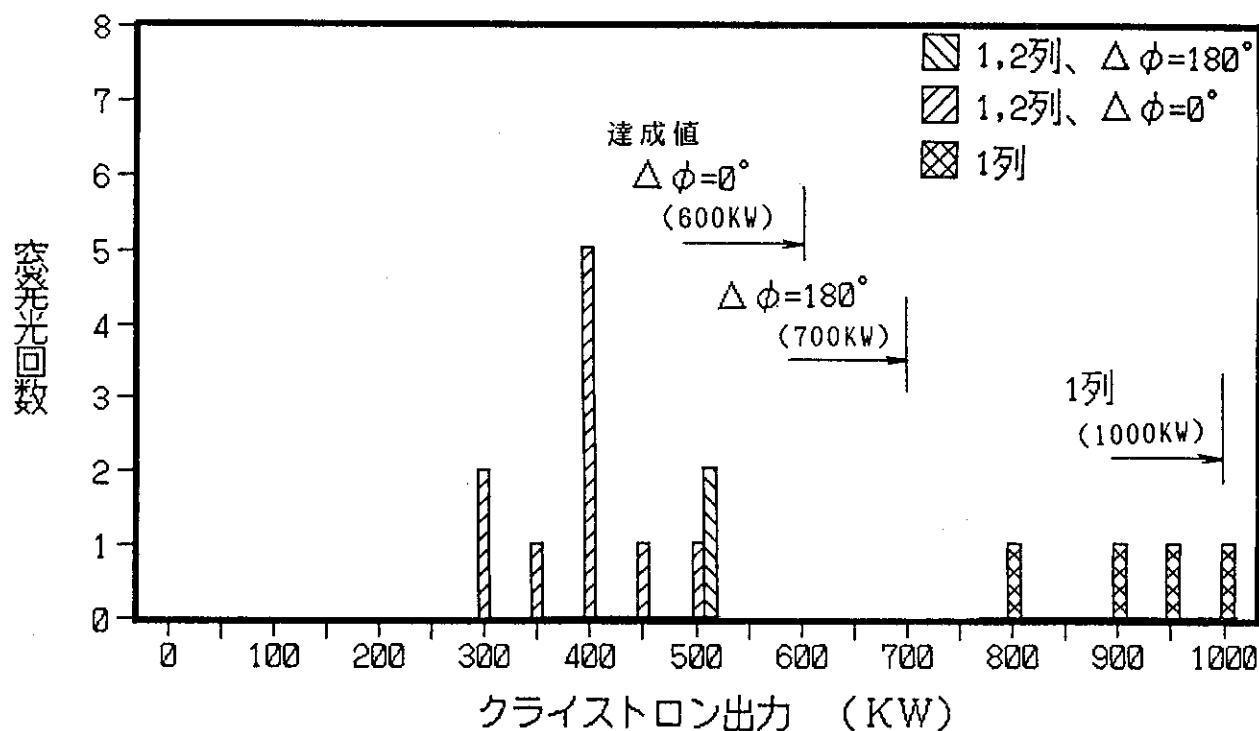


図 22 真空窓放電頻度の位相差依存

真空エージング過程中の真空窓放電頻度を示す。最初に1列のみで、クライストロン出力1MWまでのエージングを行い、800kW以上の電力レベルで4回、真空窓での放電が発生した。また2列のみでは、クライストロン出力1MWまでのエージングで真空窓の放電は発生しなかった。次に1及び2列の2本のクライストロンを用いて、位相差を 180° としクライストロン出力700kW(合計出力1.4MW)までのエージングを行った。この際の真空窓の放電は、クライストロン出力500kWレベルで2回のみであった。最後に位相差を 0° とし、クライストロン出力600kWレベル(合計出力1.2MW)までのエージングを行ったところ、真空窓での放電が300kWレベルから頻発した。

なお、ランチャー反射率は、位相差 0° 及び 180° の場合それぞれ～60%，～15%である。

T D C エージング

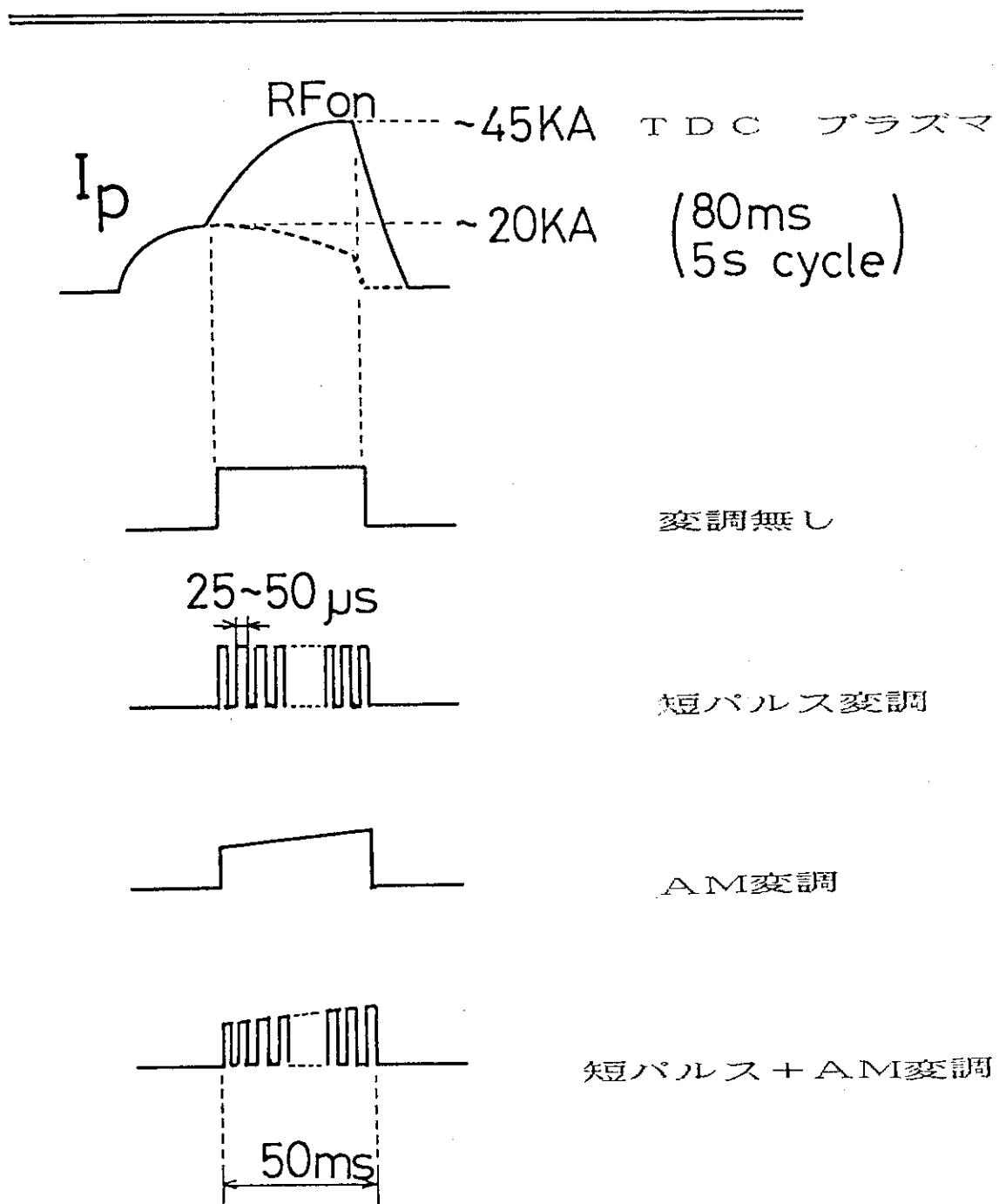


図 23 T D C プラズマと入射波形の変調

TDC エージングのパルス幅は TDC プラズマにより決まり、約 $50\text{--}80\text{ ms}$ である。また繰り返し周期は、クライストロン用電源により決まり 5 s 程度である。LHRF を入射すると、プラズマ自体大きく変化し、電流が約 20 kA から約 45 kA に変化する。

さて、RF の入射波形は、ピンモジュレータを用い RF パルスを数 μs にショッピングするピン変調と、電力をゆっくり立ち上げる AM 变調、さらにこの両者を組合せることにより、大放電を避けながら効率良くエージングを進めることができる。

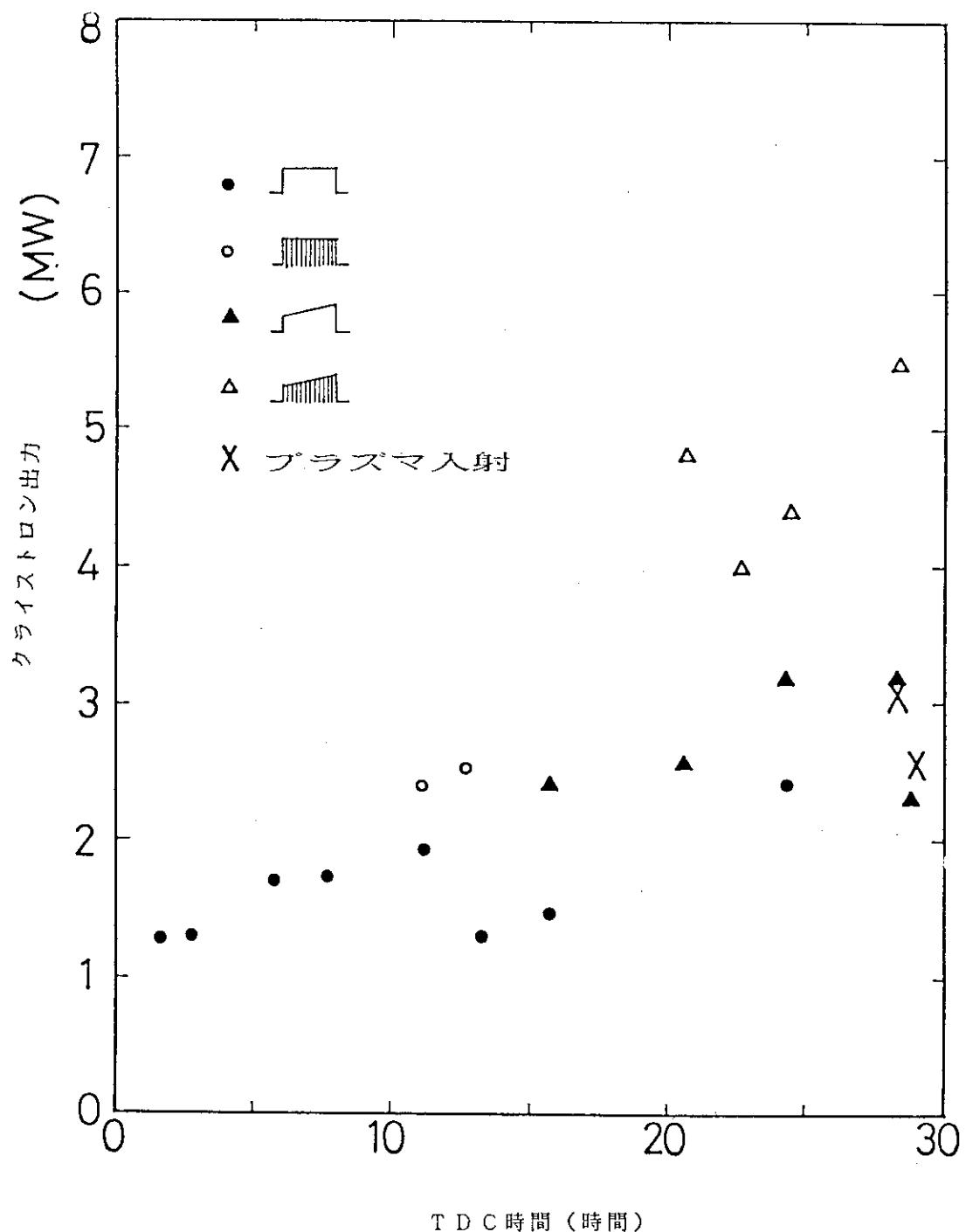


図24 TDCエージングの効果

TDCエージングの時間に対するクライストロンの出力の上がり方を示す（ランチャーへの入射電力は、クライストロン出力の約65%）。図中、●は変調がない場合、○はピン変調を行った場合、▲はAM変調を行った場合、△はピンとAM変調とを組合せた場合である。また、×はTDCエージング終了後の最初のプラズマエージングで達成した値であり、ほぼTDCエージングのAM変調で達成した値と同じである。

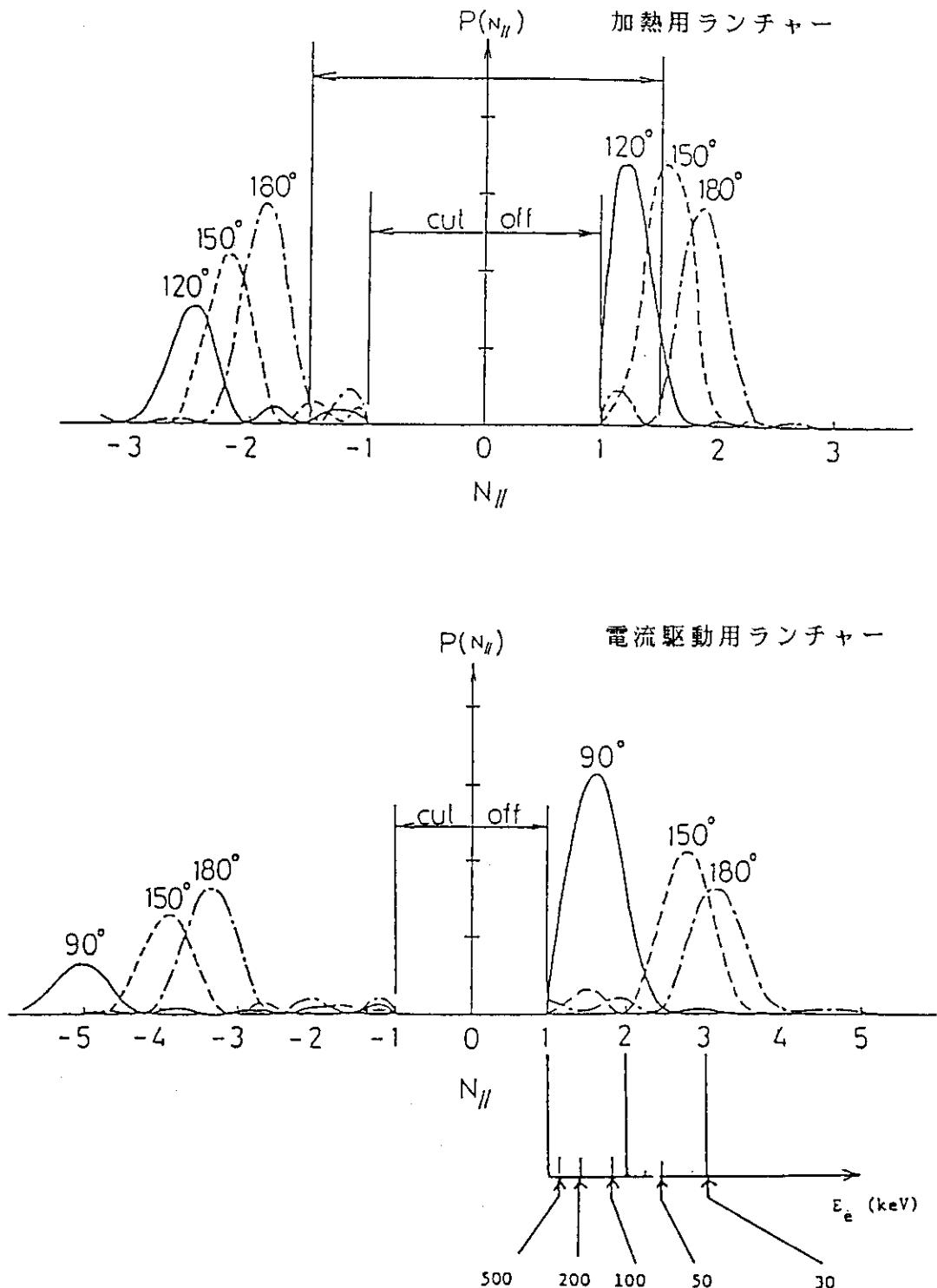


図 25 ランチャーの放射スペクトル

ランチャーから放射する波は、色々の位相速度の成分を有している。位相速度に対する放射エネルギーを放射スペクトルと呼び、図に示す。ここで、横軸の N_{\parallel} は光速度 (C) を磁場方向の位相速度 (V_0) で割ったものであり ($N_{\parallel} = C/V_0$)、その値に対応する電子エネルギーを図中下に示す。なお、 $-1 < N_{\parallel} < 1$ の成分は、位相速度が光速度を越えるためカットオフとなり、ランチャーから放射されない。図 3 で示したように、ランチャーの放射スペクトルは、トロイダル方向の導波管ピッチと位相差で与えられる（上図は加熱用ランチャー、下図は電流駆動用ランチャーの放射スペクトルである）。

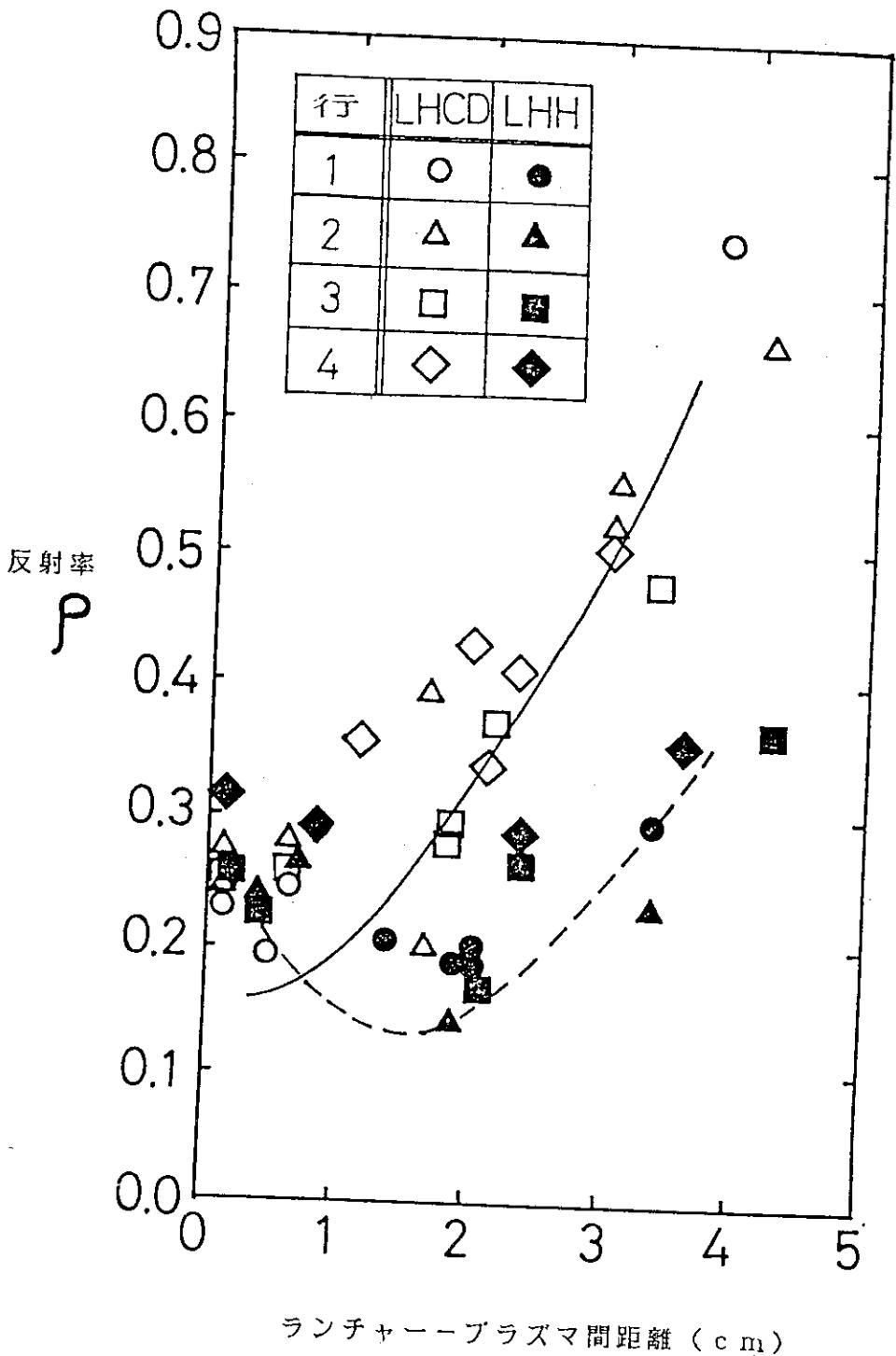


図 26 ランチャーの反射率（プラズマ入射時）

ランチャーの反射率は、プラズマの密度、密度勾配により変化する。このためランチャーブラズマ（セパラトリックス）間距離（△1）を変えることにより、反射率を最小にできる。この図は、△1に対するランチャーの反射率を示したものである。白印は電流駆動用ランチャー、黒印は加熱用ランチャーのデータであり、○△□◇は、各行での値である（ランチャーの導波管がポロイダル方向に4本あり、このポロイダル方向で△1が違うため、4つのデータが1ランチャーで得られる）。なお、図中の実線、波線は電流駆動用ランチャー、加熱用ランチャーでの理論値である。

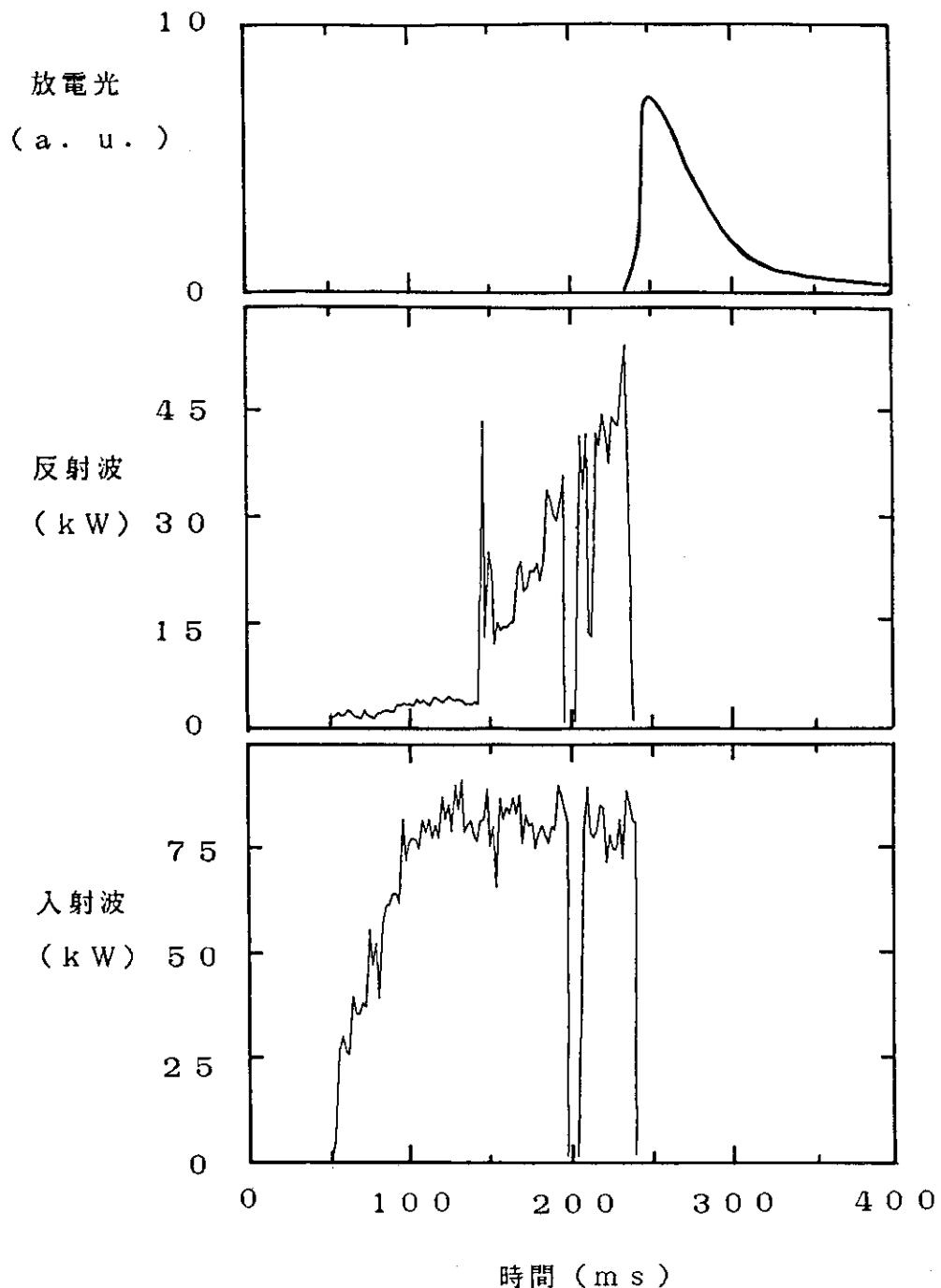


図27 JT-60 ランチャーでの真空窓のガス放電（プラズマエージング）

プラズマショット E 5245 で発生した真空窓のガス放電。図中、上から、真空窓の放電光、放電発生した導波管の反射波形、入射波形である。RF入射開始後、約140 ms から反射波形が乱れはじめ、途中一旦反射異常 1 による 10 ms の RF遮断にもかかわらず、この乱れは増加し、RF入射開始 240 ms 後に反射波が急減し真空窓の放電（放電強度化ら、ガス放電）が発生、それによる RF 及びシーケンス遮断が起きている。図 21 の真空エージング時に発生した場合と同じく、10 ms の RF 休止では、ランチャーで発生した放電を止めることができないことが解る。この放電がランチャー先端部から走ってきたとすると、放電伝搬速度は、約 1500 m/s である（なお、プラズマエージングの場合、真空導波管中に ECR 共鳴領域があり、このようなガス放電が導波管内に発生すると ECR 放電が発生している可能性もある）。

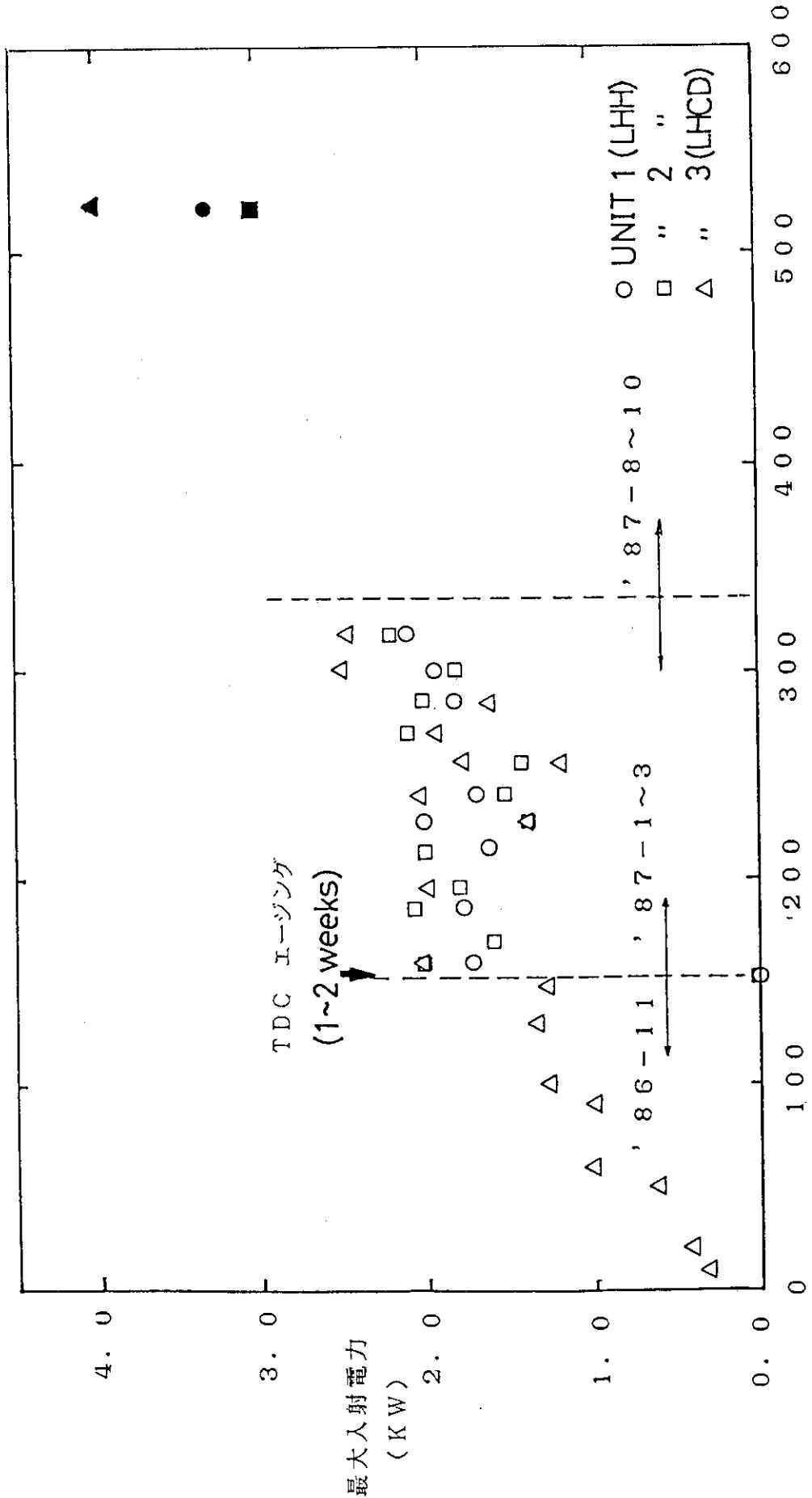


図 28 各ランチャーのエーティング履歴
ランチャーのプラズマエーティングは、C系の電流駆動用ランチラーを優先して行い、現在までA、B系（加熱用）は約350ショット、C系は約500ショットのプラズマ入射を行っている。また、'87年1月には2週間のTDCエージングを行い、A、B系では最初から2MW程度のプラズマ入射に成功している。現在まで最大入射電力は、ショットを重ねる毎に上昇している。

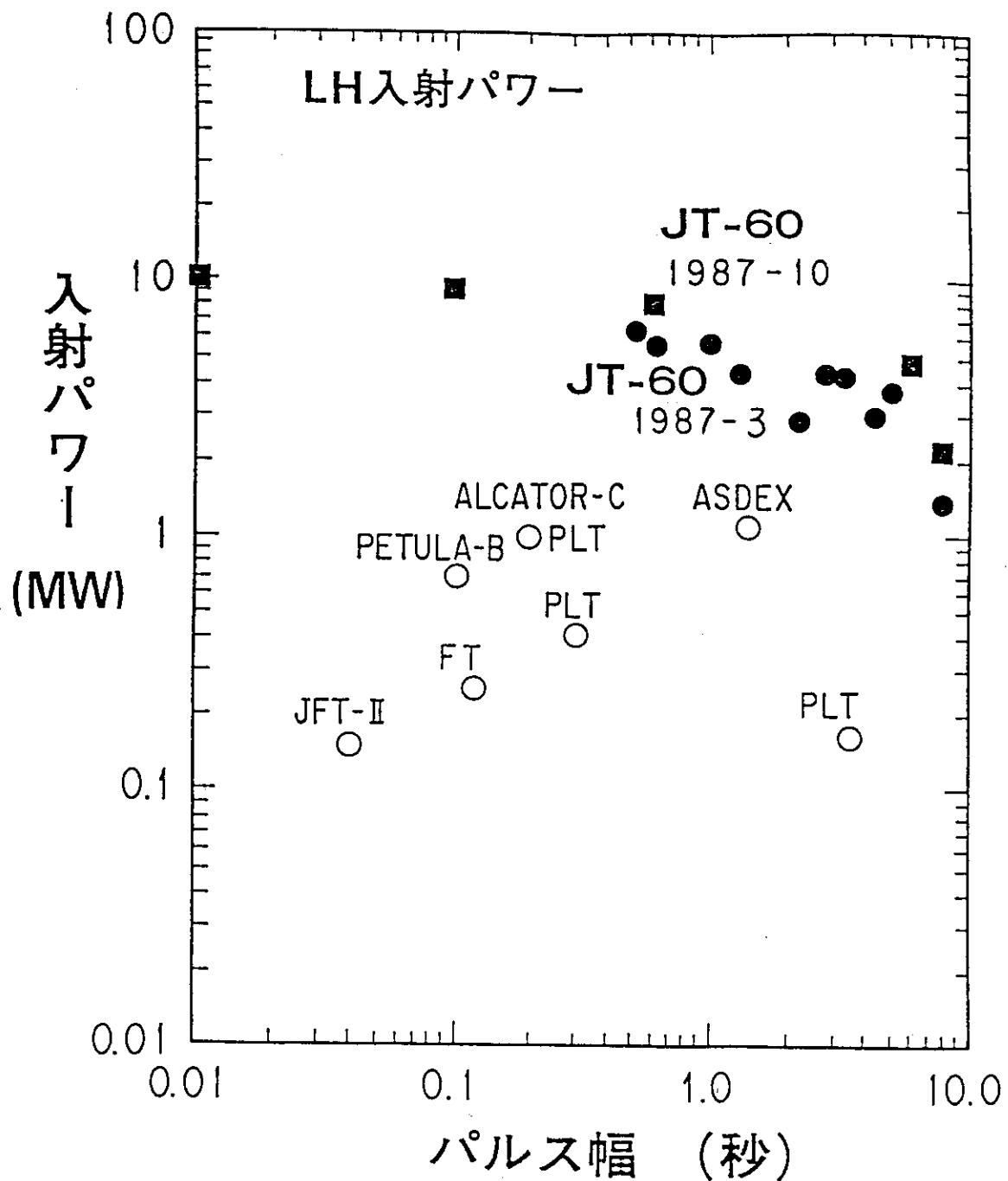


図 29 LHRF の入射電力、パルス幅の実験領域

現在までの色々なトカマク装置のLHRFの最大入射電力と
パルス幅を示す。他の実験領域と1桁以上大きいことが解る。

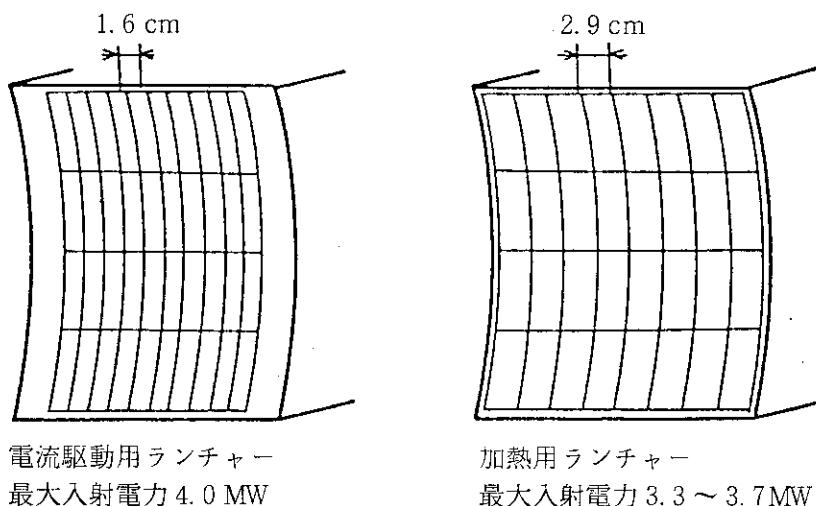
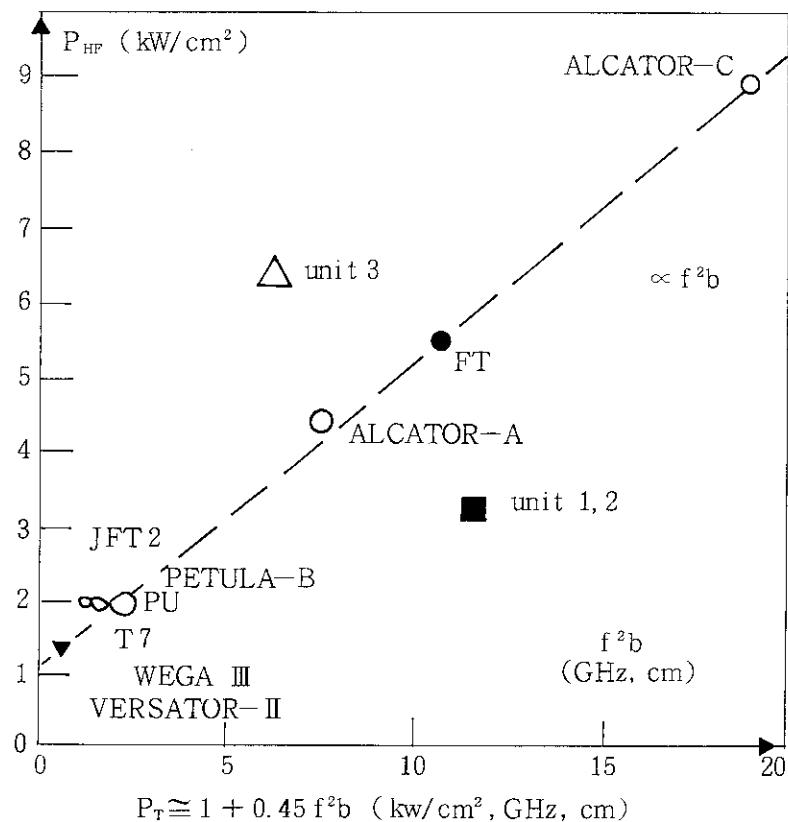


図30 ランチャーの入射電力密度

今までの色々なトカマク装置のLHRTランチャーでの最大入射電力密度（最大入射電力 / 導波管束断面積）を示す。JT-60では、C系（ユニット3）において、従来の値を大きく上回っており、A,B系（ユニット1,2）においても、徐々に値が上昇している。このA,B系とC系の差がどこからくるのか（エージング時間、導波管幅、パッシブ導波管等）現在まだよくわからていず、今後放電箇所の識別、ランチャー端の効果等の定量評価を行う必要がある。

6. エージングのマニュアル

これまで述べたように、LHRF実験では正確に位相設定し、かつランチャーでの放電を抑制すると共にプラズマとの結合特性を高めることが必要である。これらの基本事項と、JT-60のLHRF加熱装置の性能を考慮すると次のようなエージング方法を今後とるべきであると考えられる。

6.1 装置の機能チェック、設定状態の確認

基本的には、下記(1)はエージング開始時、(2)は実験サイクル開始時(3)～(6)は、毎朝の開始前点検時に行うものとする。

(1) 検波器の正常動作（ショットサーマリの確認）

組合せ列	(1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)
入射電力	100 kW / 1列 × 8
パルス幅	2 s
サンプリング時間	2 ms
設定位相	トロイダル 180°
収集データ	ショットサーマリ

(2) 位相設定（隣合った2列ごとによる、反射率にたいする位相差のデータ収集）

組合せ列	(1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (6, 7), (7, 8)
入射電力	100 kW / 1列 × 2
パルス幅	2 s
サンプリング時間	2 ms
設定位相	540° / 2 s (1ショット中で位相が0°となる点が2点あるようにプレプログラムをつくる)
収集データ	各列の隣合った導波管の反射率、進行波位相

(3) 真空窓の放電保護システム（結合系アーク計測系の動作確認）

チェック場所	增幅室（結合系アーク計測盤、現場盤）
方法	計測盤のチェックランプによる動作確認 現場盤のインターロックランプ点灯

(4) ポロイダル方向の位相設定（半固定移相器の位置確認）

チェック場所	增幅室（伝送系装置制御盤）
方法	設定値 (90, 0, 0, -90)度の目視確認

(5) 反射異常 1, 2 の設定

チェック場所 増幅室（伝送系装置制御盤）
 方法 設定値の目視確認（スナップスイッチ）

(6) 反射異常 3 の設定

チェック場所 増幅室（大電力増幅系装置制御盤）
 方法 設定値の目視確認（アナログダイアル）
 sw 1 : 30 kW
 sw 2 : 50 kW
 sw 3 : 100 kW
 sw 4 : 150 kW

6.2 真空エージングの設定

エージングは、最初パルス幅を短くし、徐々に入射電力を上げ、次にパルス幅を伸ばし再び入射電力を上げる。

(1) 1列エージング

使用列	1列ごと
入射電力	100kW / 1列から 50kWずつ, 1MW / 1列まで
パルス幅	20ms, 100ms, 500ms, 1s, 2s
反射異常 3	30または50kW
収集データ	真空度, クライストロン出力電力（ペンレコーダ） クライストロン反射波形（オシロ）
記録	設定値（電力, パルス幅, 反射異常）, 警報（アーク, クローバ等）, 最高入射電力

(2) 2列エージング

使用列	(1, 2), (2, 3), (3, 4), (4, 5), (5, 6), (6, 7), (7, 8)
入射電力	100kW / 1列から 50kWずつ, 1MW / 1列まで
パルス幅	20ms, 100ms, 500ms, 1s
位相設定	180° と 0°
反射異常 3	30または50kW
収集データ	真空度, クライストロン出力電力（ペンレコーダ） クライストロン反射波形（オシロ）
記録	設定値（電力, パルス幅, 位相, 反射異常） 警報（アーク, クローバ等）, 最高入射電力

(3) 8列エージング

使用列	全列
入射電力	100kW / 1列から 50kWずつ, 0.3 (1.0) MW / 1列まで

パルス幅	20ms, 50ms, 100ms まで
位相設定	180° と 0°
反射異常 3	30 または 50 kW
収集データ	真空度, クライストロン出力電力 (ペンレコーダ) クライストロン反射波形 (オシロ)
記録	設定値 (電力, パルス幅, 位相, 反射異常) 警報 (アーク, クローバ等), 最高入射電力

当面は, 0.3 MW, 安全を確認しながら徐々に上限を 1 MW迄上げる予定。

6.3 TDC エージングの設定

使用列	全列
入射電力	100 kW / 1 列から 50 kW ずつ, 1 MW / 1 列まで
パルス幅	50 ms
位相設定	180°(A, B 系), 90°(C 系)
反射異常 3	100 または 150 kW
外部変調	AM 変調による立ち上げ波形
収集データ	真空度, クライストロン出力電力 (ペンレコーダ) クライストロン反射波形 (オシロ) TDC プラズマ電流波形 (オシロ)
記録	設定値 (電力, パルス幅, 位相, 変調, 反射異常) 警報 (アーク, クローバ等), 最高入射電力

6.4 プラズマエージングの設定

使用列	全列
プレプログラム	R F の立ち上げ, 立ち下げ時間を 100ms 以上とする
反射異常 3	100 または 150 kW
収集データ	真空度, クライストロン出力電力 (ペンレコーダ) クライストロン反射波形 (オシロ) プラズマ電流波形 (オシロ) ショットサーマリ, ランチャー入反射波形 (各ユニット, ユニット合計)
記録	設定値 (電力, パルス幅, 位相, 変調, 反射異常) 警報 (アーク, クローバ等) 最高入射電力及び反射率の履歴

6.5 異常時の処置

エージング時には、色々な異常が発生するが、ここでは基本的に故障の場合は除き、R F遮断時とシーケンス遮断時の場合について述べる。

(1) R F遮断

R F遮断は、シーケンス遮断時にも起きるが、ランチャー内の放電を検知しながらエージングを進める反射異常1, 2及び3により発生する。したがって、本質的な意味では異常事態ではない。しかし、ショット中にR F遮断が頻発する場合には、反射異常の設定ミスや、故障の可能性がある。このような場合には、設定条件の確認を行うとともに、入射電力を下げてR F遮断が治まるかどうか、検波器の故障がないかどうかを確認すること。

(2) シーケンス遮断

シーケンス遮断は、ランチャー真空窓のガス放電、クライストロン管内放電及び全系からのインターロックにより発生する。

① 真空窓のガス放電

ランチャー真空窓のガス放電は、窓近傍の真空度が悪化したために発生する。現在までこの真空度悪化は、ランチャーの別な部分（先端部）で発生した放電が真空導波管を伝わって生じたものと考えられる。したがって、この放電が発生したさいには、真空度上昇及びその後の真空引き (1×10^{-4} Pa以下) の確認を行うと共に、プラズマエージング時に発生した場合、次のプラズマショット前に、20ms程度の真空エージングを行い導波管内表面に付着したガスを取り除くことが望ましい。また、基本的には、『反射異常1, 2及び3』の保護システムの設定を調整し、放電が窓に至らないようR Fを遮断する必要がある。

② クライストロン管内放電

クライストロン管内放電は、ランチャーからの反射波によって引き起こされる場合と、クライストロン自体の自爆がある。どちらの場合もクライストロンに損傷を与える危険性があるため、この管内放電は極力避けると共に、発生時には、クライストロン真空度に異常が無いことを確認する必要がある。

管内放電に対するランチャーからの反射波の特性については、今後のデータ収集が必要であるが、進行波と反射波による定在波の腹（最も電界強度の強い点）の部分を、クライストロン管内の放電の危険箇所（一般には、出力窓）から離すことにより、管内放電を回避できる。したがって、反射電力が大きくても、クライストロンでの進行波と反射波の位相差を変え、管内放電を抑制することができる。この機能を有するのが高速移相器であり、今後クライストロン管内放電がランチャーからの反射波により頻発するようであれば、高速移相器を使用する必要がある。また、ランチャー放電による瞬間的な反射波による場合でも、高速移相器の初期値を変えて、管内放電を回避できる。ただし、現在は、ポロイダル方向の位相設定によりクライストロンへの反射電力は通常低いレベル（30kW）であり、またランチャー放電時には、前項①と同様、『反射異常1, 2, 3』の設定を調整し、クライストロン管内放電に至らないようR Fを遮断すべきである。

クライストロン自体の自爆は、DC電圧印加時もしくはR F出力時に発生する。現在最も問題になっているのは、カソード材がヒータにより蒸発し、アノード等に付着し、DC耐電圧を劣化

する問題である。現時点では、この耐電圧劣化はクライストロンを不使用にし、改めて耐圧処理を行わない限り回復しない。アノード電圧を68kVに下げてかつ、同一クライストロンで連続5回程度クローバ動作が頻発すれば、そのクライストロンを不使用にしエージングを再開すること。また、不使用となるクライストロンの本数が3本以上になれば、そのユニットを全体を不使用とし、クライストロンの耐圧処理を行うことが妥当である。

なお、RFを出力しない時間にカソード材の蒸発を避けるため、1時間以上のRF休止時間が発生する場合には、ヒータ電源を切る方がよい。

なお、クライストロンの耐圧劣化の問題は、カソード材の最適化、クローバ動作時の管内消費電力の最適化（クライストロンの保護抵抗の最適化）、ヒータ電源の間欠印加等の改造、改良等を行うことにより徐々に解決できるものと考える。

6.6 その他

ランチャーのエージングは、今まで精力的に行われてきたが、エージング時間の制限のため、装置の機能を十分にチェックできず、そのため各機能がエージングを効率良く行えるように装置の機能を最大限に活用していない。特に、『反射異常1，2』については、検波器の信頼性確立に時間がかかり、またノッティング休止時間が10msであったため放電を止められず、このため十分な最適設定条件が明かとなっていない。しかし、改造終了後には、『反射異常1，2』を有効に使うことにより、エージング時間やエージング作業自体を大幅に短縮、簡素化できるものと期待できる。

さらに、ランチャーに取り付けられている、RFセンサーの信号はランチャーから放射したRF強度を示すものであるから、ランチャー内の放電の有無の判断材料になるとともに、LHRF実験における、パラメトリック崩壊波の検出に不可欠であり、RFセンサーのデータの信頼性向上及び収集は今後重要になってくると考えられる。

7. 今後の方針

エージングを、実施しなくても所定の電力を入射できるランチャーを作ること、またたとえ実施するとしても自動的にエージングができるシステムにすることが、LHRF実験及び運転に必要である。

現在のランチャーに対しては製作上の改良は困難であり、したがって、自動エージング方法の確立を目指し今後エージング作業を進める必要である。このためには、現在の JT-60 LH 加熱装置の持っている機能を十分に活用することが不可欠である。ここで、今までのエージング経験のキーポイントを整理する。

- | | |
|-----------------|--|
| ① ポロイダル位相設定 | ランチャーでの反射電力が大きい場合でも大電力エージングが可能。また、ランチャー内の放電検知も容易。 |
| ② 反射異常 3 | 検知レベルを最適に選ぶことによりシーケンス遮断を起こさないでエージングが可能。 |
| ③ 真空度の監視 | 時定数に問題があるが、エージングの効果を評価するパラメータとなりうる。 |
| ④ 放電発生時の R F 遮断 | 導波管内の放電をとめるには、10ms の R F 休止時間では短かすぎる。導波管内の真空度回復に 100ms 以上必要。 |
| ⑤ 真空窓の放電 | 放電光の検知により、確実に窓の放電を最小限にとどめることができ。 |
| ⑥ プラズマ入射時の注意事項 | R F の立ち上げ、立ち下げ時間を 100ms 以上にし、プラズマが不安定になるのを回避することが必要。 |

今後に残された課題としては、以下の項目が挙げられる。

- | | |
|-------------|------------------------------|
| ① 反射異常 1, 2 | 今後のデータ収集が必要。 |
| ② 高速移相器 | クライストロンの反射波にたいする動作特性のデータが必要。 |
| ③ クライストロン | 今後の改良、改善が必要。 |
| ④ ホットスポット | 今後のプラズマ条件の最適化が必要。 |

これらの結果及び今後に残された事項を克服すれば、シーケンスを遮断せずに R F を入射しつづけるので、次の様なシナリオで自動エージングが可能になると思われる。

- | | |
|--------------------|---|
| ① 真空, TDC
エージング | 『反射異常 1, 2, 3』のいずれかで、速やかに放電検知、R F 遮断そしてノッチングにより正常入射時間が少しづつ延びるまた、AM変調により、立ち上げ波形にすることにより、正常入射時間が延びるにつれて、入射電力も増加する。この間窓の放電、クライストロン管内放電を起こさなければ、自動エージングとなる。 |
| | さらに、真空度上昇のショット間の減少率をモニターし、減少率が一定になるとともに、その際の真空度が十分低ければ、自動的に入射電力を上げるような自動エージングも考えられる。 |

② プラズマエーディング

真空, TDCエーディングと同様, 『反射異常1, 2, 3』により放電検知, RF遮断そしてノッティングにより, 1プラズマショット中に長時間RFを入射できる。とくに, 反射異常1, 2の低減機能(ノッティング後, 入射電力を自動的に低減する)を使うことにより, 設定入射電力を高い値にしておき, 放電を起こしながら入射電力が下げれば, その時のランチャーのエーディング完了状態に, 自動的に入射電力が設定される。

また, プラズマのRFによる不安定現象のプリカーサを見つけ, それによるRFパラメータのフィードバック制御も今後の大電力入射エーディングには必要である(RFパラメータのプラズマパラメータからのフィードバックは, LHRF実験の点でも重要項目の1つである)。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり, 有益な御意見, 御協力を載いた太田充 JT-60 第3試験室長及び第3試験室の諸子, さらに永島孝加熱工学第2研究室長及び研究室の諸子に深く感謝致します。また, 御指導, 御鞭撻していただきました飯島勉 JT-60 試験部長, 田中祐二同次長, 白形弘文 JT-60 第1試験室長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) T. Nagashima et al. : Fusion Engineering and Design, 5, p. 101 (1987).
- (2) H. Tonon et al. : Proc. 4 th Joint Varenna Grenoble Int. Symp. on Heating of Toroidal Plasmas, Vol. 2, p. 1227, Rome, Italy (Mar., 1984).
- (3) 玉河元: 電気学会雑誌, 76, p. 1167 (1956).
- (4) K. Sakamoto et al. : IEEE Trans. Plasma Sci., Vol PS-14, p. 548 (1986).
- (5) 池田佳隆他: JAERI-M 85-131 (1985).
- (6) 広木成治他: 真空, 30, p. 14 (1987).
- (7) Y. Ikeda et al. : to be published in Plasma Sci.
- (8) Y. Ikeda et al. : 7th APS Topical Conf. on Applications of Radio Frequency Power to Plasmas, Kissimmee, Florida, USA (May, 1987).

② プラズマエーディング

真空, TDCエーディングと同様, 『反射異常1, 2, 3』により放電検知, RF遮断そしてノッティングにより, 1プラズマショット中に長時間RFを入射できる。とくに, 反射異常1, 2の低減機能(ノッティング後, 入射電力を自動的に低減する)を使うことにより, 設定入射電力を高い値にしておき, 放電を起こしながら入射電力が下げれば, その時のランチャーのエーディング完了状態に, 自動的に入射電力が設定される。

また, プラズマのRFによる不安定現象のプリカーサを見つけ, それによるRFパラメータのフィードバック制御も今後の大電力入射エーディングには必要である(RFパラメータのプラズマパラメータからのフィードバックは, LHRF実験の点でも重要項目の一つである)。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり, 有益な御意見, 御協力を載いた太田充 JT-60 第3試験室長及び第3試験室の諸子, さらに永島孝加熱工学第2研究室長及び研究室の諸子に深く感謝致します。また, 御指導, 御鞭撻していただきました飯島勉 JT-60 試験部長, 田中祐二同次長, 白形弘文 JT-60 第1試験室長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) T. Nagashima et al. : Fusion Engineering and Design, 5, p. 101 (1987).
- (2) H. Tonon et al. : Proc. 4 th Joint Varenna Grenoble Int. Symp. on Heating of Toroidal Plasmas, Vol. 2, p. 1227, Rome, Italy (Mar., 1984).
- (3) 玉河元: 電気学会雑誌, 76, p. 1167 (1956).
- (4) K. Sakamoto et al. : IEEE Trans. Plasma Sci., Vol PS-14, p. 548 (1986).
- (5) 池田佳隆他: JAERI-M 85-131 (1985).
- (6) 広木成治他: 真空, 30, p. 14 (1987).
- (7) Y. Ikeda et al. : to be published in Plasma Sci.
- (8) Y. Ikeda et al. : 7th APS Topical Conf. on Applications of Radio Frequency Power to Plasmas, Kissimmee, Florida, USA (May, 1987).

② プラズマエーディング

真空, TDCエーディングと同様, 『反射異常1, 2, 3』により放電検知, RF遮断そしてノッティングにより, 1プラズマショット中に長時間RFを入射できる。とくに, 反射異常1, 2の低減機能(ノッティング後, 入射電力を自動的に低減する)を使うことにより, 設定入射電力を高い値にしておき, 放電を起こしながら入射電力が下げれば, その時のランチャーのエーディング完了状態に, 自動的に入射電力が設定される。

また, プラズマのRFによる不安定現象のプリカーサを見つけ, それによるRFパラメータのフィードバック制御も今後の大電力入射エーディングには必要である(RFパラメータのプラズマパラメータからのフィードバックは, LHRF実験の点でも重要項目の一つである)。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり, 有益な御意見, 御協力を載いた太田充 JT-60 第3試験室長及び第3試験室の諸子, さらに永島孝加熱工学第2研究室長及び研究室の諸子に深く感謝致します。また, 御指導, 御鞭撻していただきました飯島勉 JT-60 試験部長, 田中祐二同次長, 白形弘文 JT-60 第1試験室長に深く感謝致します。

参 考 文 献

- (1) T. Nagashima et al. : Fusion Engineering and Design, 5, p. 101 (1987).
- (2) H. Tonon et al. : Proc. 4 th Joint Varenna Grenoble Int. Symp. on Heating of Toroidal Plasmas, Vol. 2, p. 1227, Rome, Italy (Mar., 1984).
- (3) 玉河元: 電気学会雑誌, 76, p. 1167 (1956).
- (4) K. Sakamoto et al. : IEEE Trans. Plasma Sci., Vol PS-14, p. 548 (1986).
- (5) 池田佳隆他: JAERI-M 85-131 (1985).
- (6) 広木成治他: 真空, 30, p. 14 (1987).
- (7) Y. Ikeda et al. : to be published in Plasma Sci.
- (8) Y. Ikeda et al. : 7th APS Topical Conf. on Applications of Radio Frequency Power to Plasmas, Kissimmee, Florida, USA (May, 1987).