

JAERI-M

6 5 7 7

JFT-2におけるライナー壁への
エネルギー損失の測定

1976年6月

佐藤 忠*・平山俊雄・前野勝樹・藤沢 登

日 本 原 子 力 研 究 所
Japan Atomic Energy Research Institute

この報告書は、日本原子力研究所が JAERI-M レポートとして、不定期に刊行している研究報告書です。入手、複製などのお問い合わせは、日本原子力研究所技術情報部（茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしください。

JAERI-M reports, issued irregularly, describe the results of research works carried out in JAERI. Inquiries about the availability of reports and their reproduction should be addressed to Division of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, Japan.

JFT-2におけるライナ-壁へのエネルギー損失の測定

日本原子力研究所東海研究所核融合研究部

佐藤 忠*・平山俊雄・前野勝樹・藤沢 登

(1976年5月17日受理)

シリコンサーミスタと焦電効果素子を使用して、荷電交換された高速中性粒子および放射によるプラズマエネルギーの損失、すなわちプラズマが壁に放出するエネルギーの測定が可能となった。測定の結果、平均電子密度一定の条件では、プラズマ電流が増加するに従い、プラズマへの入力エネルギーに対する壁への損失の割合は低下する傾向にある。また、プラズマへの入力エネルギーに対する壁への損失の割合は放電条件に依存し、20%~100%に達している。

* 外来研究員： 日立製作所 日立研究所

Measurements of Plasma Energy Losses to the Wall in JFT-2

Tadashi SATO*, Toshio HIRAYAMA, Masaki MAENO,
and Noboru FUJISAWA

Division of Thermonuclear Fusion Research, Tokai, JAERI

(Received May 17, 1976)

With a silicon thermister and a pyroelectric device measurements are made of the energy losses associated with radiation and charge-exchange of fast neutrals in the JFT-2 device.

The ratio of energy losses to the wall to the input energy into the plasma decreases with increasing plasma current, when the average electron density is kept constant. The measured wall loss amounts to 20 to 100 % of the input energy depending on discharge conditions.

* On leave from Hitachi Laboratory, Hitachi, Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 測定方法	2
2.1 シリコンサーミスタボロメータの性能	2
2.2 焦電効果素子の性能	2
2.3 測定位置および測定方法	2
3. 測定結果および結果の検討	3
3.1 放電洗浄効果と壁に放出される損失の関係	3
3.2 壁に放出される損失の時間的変化を考慮した測定	3
4. おわりに	4
5. 参考文献	4

1. ま え が き

1) 動機と目的

プラズマより放出されるエネルギーを測定し、プラズマに注入されたエネルギーとの収支を明確にすることは、プラズマの基本的な測定として重要である。また、プラズマより放出されるエネルギーは、エネルギー閉じ込め時間に直接関係している量であるので、エネルギー閉じ込め時間を規定している要因を直接測定し、評価する事ができる点も重要である。

トカマク型プラズマ発生装置において、プラズマのエネルギー損失の機構として、次の3種類が基本的なものである。

- (1) 放射損失
- (2) 荷電交換された高速中性粒子による損失
- (3) 荷電粒子の拡散と熱伝導による損失

(1)と(2)の損失は、プラズマの周囲に一樣に放出され、最終的にはライナー壁に吸収される。(3)は主として、リミッターにより吸収される。

この報告では、(1)と(2)の損失を、ライナー壁に設置したボロメータにより測定した結果についてまとめたものである。(3)については、エネルギーが局部に集中すること、時間的分解能を得る事が困難であること、リミッターがプラズマによりスパッターされること等により、測定上の工夫が必要であるので、今後に残された問題として検討して行く予定である。

2) 研究経過

ボロメータを利用して、プラズマの放射損失と高速中性粒子による損失を測定する試みは、ソ連・米国等において古くから行われている。^{1) 2) 3)} ボロメータとして、ソ連では金属あるいは半導体の蒸着膜の使用例が報告されている。^{1) 2)} 米国のATCグループは、フレーク状のシリコン半導体を使用した例を報告している。⁴⁾ 蒸着膜は経年変化しやすいこと、低抗値が不安定であること等を予想し、当初はフレーク状のシリコン半導体を試作して使用した。しかし、シリコン半導体は、プラズマ光に感じて低抗が変化するため、半導体を遮光する必要がある、各種の遮光を行ったが、測定に影響を与えない程度まで遮光を行うことは困難であった。

OR MAKグループで、強誘電体の焦電効果を利用した素子をボロメータとして使用しているとの情報があり、⁵⁾ 当所においても、焦電効果を利用した素子を使用することによって、プラズマの放射損失と高速中性粒子による損失が測定可能となった。焦電効果を利用した素子の較正は、シリコン半導体の結果と比較して行った。

2. 測定方法

2.1 シリコンサーミスタボロメータの性能

試作したシリコンサーミスタの構成と性能を図1と表1に示す。ただし、表1の時間分解能については、シリコンサーミスタが光に感じるため、測定が困難であり、計算値¹⁾を使用した。

熱容量の測定は、後の焦電効果素子の校正にも必要であるため、精度のよい測定方法を工夫した。基本的には、パルス電圧を印加して、シリコンサーミスタにジュール加熱を行い、そのときの低抗値変化を測定する方法である。測定回路を図2に示した。測定結果の一例を図3に示す。図4は、ジュール加熱の入力エネルギーと、シリコンサーミスタの出力の関係をプロットしたものである。入力エネルギーの変化は、電圧パルスの中を変えることにより行っている。入力エネルギーの少ない部分で、測定値が大きくなっているのは、測定系の過渡現象の影響である。入力エネルギーの大きな部分で、測定値が小さくなるのは、パルス印加時間が長くなるために、素子の温度が低下する影響がでるためである。

試作したシリコンサーミスタの熱容量を、上記の方法で測定した結果を表2に示した。

図1のシリコンサーミスタでは、プラズマ光に感じてしまうので、遮光する必要がある。遮光する方法として、図5(a)の構成でシリコンサーミスタを試作したが、表2に示すように感度が1/10以下に低下した。感度の低下を防ぐために、図5(b)の構成で試作したが、低抗値の不安定なものが出来やすく、リード線の引き出し部分で光を感じてしまう欠点があり、失敗した。

プラズマ光が消滅した段階で、シリコンサーミスタは測定可能となるので、試作したシリコンサーミスタで放電の1ショットあたりの放射損失及び高速中性粒子損失の和が測定できるようになった。

2.2 焦電効果素子の性能

強誘電体の自発分極は、温度により変化する(焦電効果)。その変化分を外部回路に流れる電流として取り出すことにより、強誘電体素子の温度変化すなわち強誘電体素子の吸収した熱エネルギーの変化分を測定することができる。^{7) 8)}

焦電効果素子による測定回路を図6に示す。焦電効果素子の時間分解能は、電気的なものと熱的なものの2種類が考えられる。電気的なものは、素子の容量と負荷低抗できまる時定数である。熱的なものは、素子の厚さと熱伝達率できまる。⁸⁾周波数の低い領域の応答特性は、素子の冷却の時定数で決定される。表3に各種の時定数を示す。JFT-2の放電維持時間は50msから500ms程度であるので、表3の時定数で周波数特性は充分であるが、更に言えば、冷却の時定数が数倍大きくなる事が望ましい。

2.3 測定位置および測定方法

測定には、シリコンサーミスタと焦電効果素子を使用した。図7に測定器を取りつけた位置を示す。図7において、シリコンサーミスタの熱容量が正確に測定されているので、シリコンサーミスタの出力から、焦電効果素子の出力の校正をすることができる。校正方法については、

図8で説明した。図9は、較正を行った時のシリコンサーミスタの出力波形と、焦電効果素子の出力(積分器出力)の1例である。図10は、較正を行うために取ったデータをプロットしたもので、本来一直線に乗るはずのものである。バラッキの原因として、硬X線が焦電効果素子の増巾器の出力を増加させる影響、プラズマの発生と消滅までの位置の変動等が考えられる。図10で、直線は較正に使用し、破線はバラッキによる誤差の範囲を決めるために使用した。

シリコンサーミスタの出力からプラズマの壁面への損失(放射損失と高速中性粒子による損失の和)の決定は、次の仮定¹⁾⁴⁾のもとで行った。

- (1) シリコンサーミスタの表面($Al_2O_3 - Al$)の損失の吸収は、ライナー壁の損失の吸収と同じく、吸収率は1.0である。
 - (2) 損失は、円柱対称で一様に生じており、トロイダル効果は無視する。
- 上記の仮定のもとで、実験に使用した焦電効果素子の較正結果を表4に示す。

3. 測定結果および結果の検討

3.1 放電洗浄効果と壁に放出される損失の関係

放電洗浄効果の実験において、プラズマに注入されるジュールエネルギーが一定の条件で、放電ショット数に対する放射損失(含高速中性粒子損失)の変化を図11に示した。測定は図7のシリコンサーミスタを使用した。図11において、放射損失が低下するに従い、プラズマの電子温度が上昇して行き、1000ショットを越えた時点で、ほぼ定常状態に達していることがわかる。

3.2 壁に放出されるエネルギーの時間的変化を考慮した測定

壁に放出されるエネルギーが時間的に変化する様子は、図7の焦電効果素子を使用することにより、測定が可能となった。

図12に測定の一例を示す。同図では、ほぼ同じ入力エネルギーに対し、壁への損失が2倍違う例である。また、JFT-2のプラズマでは、壁にくる全損失のうち、放電の初期に $1/2 \sim 1/3$ が、末期に $1/3 \sim 1/5$ 程度が消費されていることがわかる。

図13は、電子密度を一定に保って、プラズマ電流が最大になった時点での入力パワーに対する壁への損失の割合をプロットしたもので、プラズマ電流が増加するに従い壁に放出される損失の割合が低下する傾向にある。これは、ORMAKグループによる結果と同じである。⁵⁾

図14は、壁にくる損失と1ターン電圧およびプラズマ電流の相互のスパイク振動が相関がある事を示しており、今後の振動現象の研究に焦電効果素子が有効であるものと考えられる。

図8で説明した。図9は、較正を行った時のシリコンサーミスタの出力波形と、焦電効果素子の出力(積分器出力)の1例である。図10は、較正を行うために取ったデータをプロットしたもので、本来一直線に乗るはずのものである。バラッキの原因として、硬X線が焦電効果素子の増巾器の出力を増加させる影響、プラズマの発生と消滅までの位置の変動等が考えられる。図10で、直線は較正に使用し、破線はバラッキによる誤差の範囲を決めるために使用した。

シリコンサーミスタの出力からプラズマの壁面への損失(放射損失と高速中性粒子による損失の和)の決定は、次の仮定^{1),4)}のもとで行った。

(1) シリコンサーミスタの表面($\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{Al}$)の損失の吸収は、ライナー壁の損失の吸収と同じく、吸収率は1.0である。

(2) 損失は、円柱対称で一様に生じており、トロイダル効果は無視する。

上記の仮定のもとで、実験に使用した焦電効果素子の較正結果を表4に示す。

3. 測定結果および結果の検討

3.1 放電洗浄効果と壁に放出される損失の関係

放電洗浄効果の実験において、プラズマに注入されるジュールエネルギーが一定の条件で、放電ショット数に対する放射損失(含高速中性粒子損失)の変化を図11に示した。測定は図7のシリコンサーミスタを使用した。図11において、放射損失が低下するに従い、プラズマの電子温度が上昇して行き、1000ショットを越えた時点で、ほぼ定常状態に達していることがわかる。

3.2 壁に放出されるエネルギーの時間的変化を考慮した測定

壁に放出されるエネルギーが時間的に変化する様子は、図7の焦電効果素子を使用することにより、測定が可能となった。

図12に測定の一例を示す。同図では、ほぼ同じ入力エネルギーに対し、壁への損失が2倍違う例である。また、JFT-2のプラズマでは、壁にくる全損失のうち、放電の初期に $1/2 \sim 1/3$ が、末期に $1/3 \sim 1/5$ 程度が消費されていることがわかる。

図13は、電子密度を一定に保って、プラズマ電流が最大になった時点での入力パワーに対する壁への損失の割合をプロットしたもので、プラズマ電流が増加するに従い壁に放出される損失の割合が低下する傾向にある。これは、ORMAKグループによる結果と同じである。⁵⁾

図14は、壁にくる損失と1ターン電圧およびプラズマ電流の相互のスパイク振動が相関がある事を示しており、今後の振動現象の研究に焦電効果素子が有効であるものと考えられる。

4. お わ り に

(1) シリコンサーミスタを試作し、放電のショットあたりの壁への損失を、一般的な仮定のもとで、求めた。

(2) 焦電効果素子を使用することにより、壁に来る損失の時間的な変化を測定した。それによると、壁への全損失のうち、放電の初期に $1/2 \sim 1/3$ が、末期に $1/3 \sim 1/5$ 程度が消費されている。電流が最大になった時点での、入力エネルギーに対する壁に来る損失の割合は、バラツキがあり、20%~100%程度に達している。プラズマ電流が増加するに従い、入力エネルギーに対する壁への損失の割合は低下する。

今後に残された問題として、

- (1) リミッターで消費される損失の測定をする。
- (2) 放射損失の分布を測定する。
- (3) 紫外領域での焦電効果素子の校正を行う。
- (4) プラズマの不安定性と放射損失との関係を明かにする。

最後に、この報告をまとめるにあたり、JFT-2グループに属し、このような実験の機会を与えていただいた森核融合研究部長、田中プラズマ実験室長に深謝します。また実際に研究を行う上で、援助いただいた田島研究員・前田研究員および松下技研(株)山香部長に深謝します。

5. 参 考 文 献

- 1) L. L. Gorelik : Soviet Physics - Technical Physics 9, 386 (1964)
- 2) L. L. Gorelik and V. V. Sinityn : ibid
- 3) H. J. Karr, et al : The Physics of Fluids 4, 424 (1961)
- 4) H. Hsuan, et al : MATT 1098 (Jan., 1975)
- 5) Private Communication (ORMAK Group)
- 6) Private Communication (TFR Group)
- 7) 山香 : 応用物理 第41巻, 1972
- 8) 山香 : 応用物理 第43巻, 1974

4. お わ り に

(1) シリコンサーミスタを試作し、放電のショットあたりの壁への損失を、一般的な仮定のもとで、求めた。

(2) 焦電効果素子を使用することにより、壁に来る損失の時間的な変化を測定した。それによると、壁への全損失のうち、放電の初期に $1/2 \sim 1/3$ が、末期に $1/3 \sim 1/5$ 程度が消費されている。電流が最大になった時点での、入力エネルギーに対する壁に来る損失の割合は、バラツキがあり、20%~100%程度に達している。プラズマ電流が増加するに従い、入力エネルギーに対する壁への損失の割合は低下する。

今後に残された問題として、

- (1) リミッターで消費される損失の測定をする。
- (2) 放射損失の分布を測定する。
- (3) 紫外領域での焦電効果素子の校正を行う。
- (4) プラズマの不安定性と放射損失との関係を明かにする。

最後に、この報告をまとめるにあたり、JFT-2グループに属し、このような実験の機会を与えていただいた森核融合研究部長、田中プラズマ実験室長に深謝します。また実際に研究を行う上で、援助いただいた田島研究員・前田研究員および松下技研(株)山香部長に深謝します。

5. 参 考 文 献

- 1) L. L. Gorelik : Soviet Physics - Technical Physics 9, 386 (1964)
- 2) L. L. Gorelik and V. V. Sinityn : ibid
- 3) H. J. Karr, et al : The Physics of Fluids 4, 424 (1961)
- 4) H. Hsuan, et al : MATT 1098 (Jan., 1975)
- 5) Private Communication (ORMAK Group)
- 6) Private Communication (TFR Group)
- 7) 山香 : 応用物理 第41巻, 1972
- 8) 山香 : 応用物理 第43巻, 1974

表1 シリコンサーミスタの時定数

Resolving Time (ms)	0.022 [*]
Decay Time (s)	5 ~ 15 ^{**}

* calculated value

** measured value

表2 シリコンサーミスタの感度

No.	Sensitivity $10^{-3} \text{J} / \frac{\Delta R}{R} \%$
1	2.36
2	24.1
3	2.79
3'	19.4
4	0.507
5	3.20
5'	45.0

3' and 5': Al foil is attached

表3 焦電効果素子の時定数

Electric Resolving Time (ms)	0.4 [*]
Thermal Resolving Time (ms)	0.1 ^{**}
Thermal Decay Time (s)	1.5 ^{***}

* CR at Fig.6

** calculated value

*** measured value

表4 焦電効果素子の感度

Device Sensitivity	30.6 $\mu\text{w/mV}$ [*]
Sensitivity for Total Loss to Wall	422 w/mV

* Effect of Viewing Angle is neglected

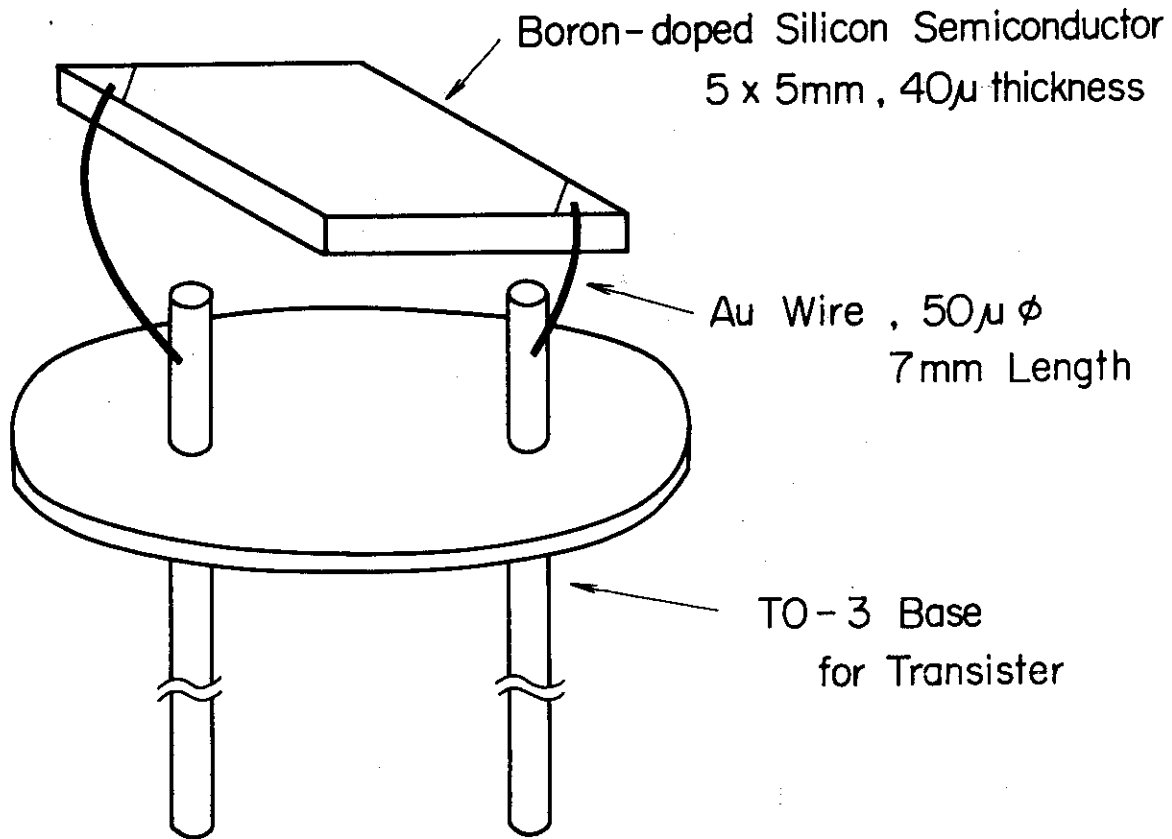


図1 シリコンサーミスタの構造

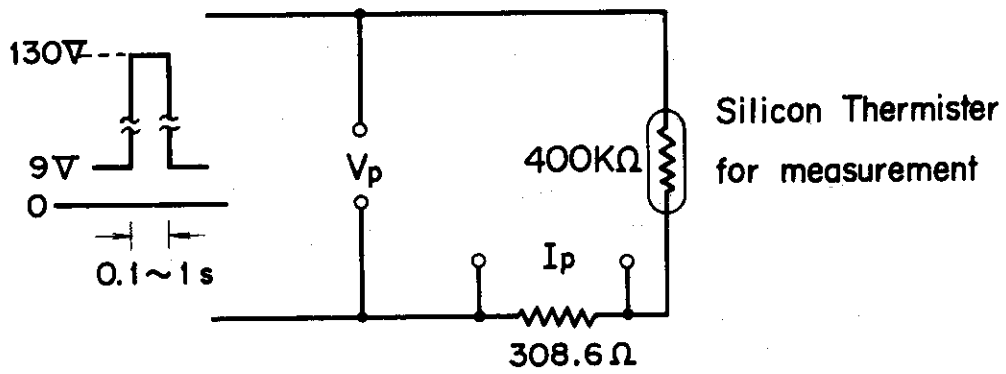
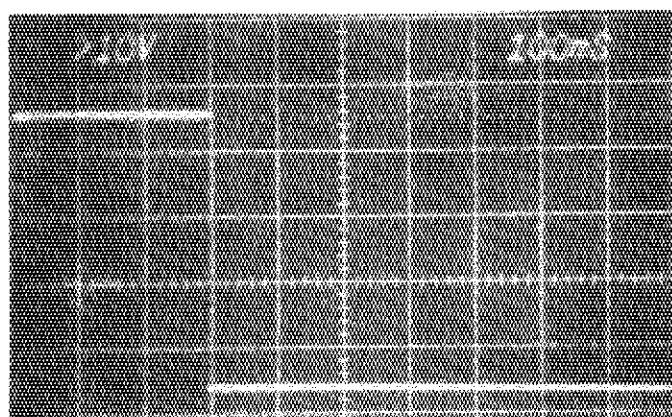
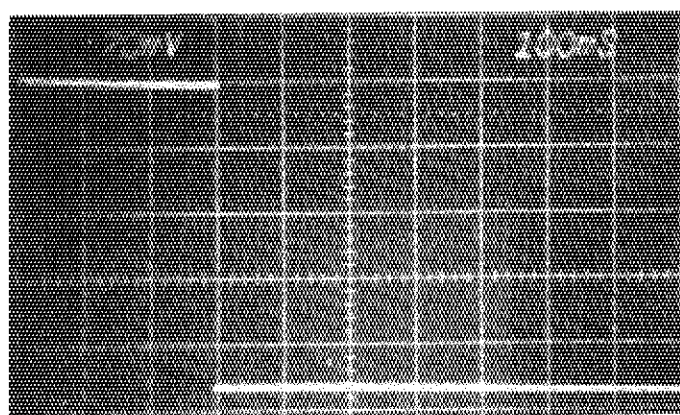


図2 熱容量測定回路

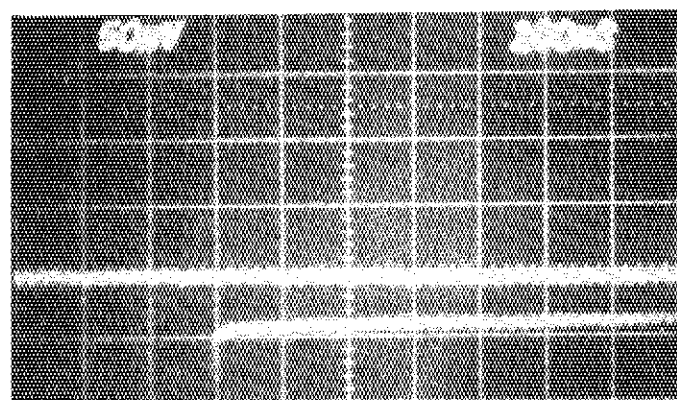


27.8 V/div

(a) V_p



(b) I_p



(c) ΔI

図3 熱容量測定波形

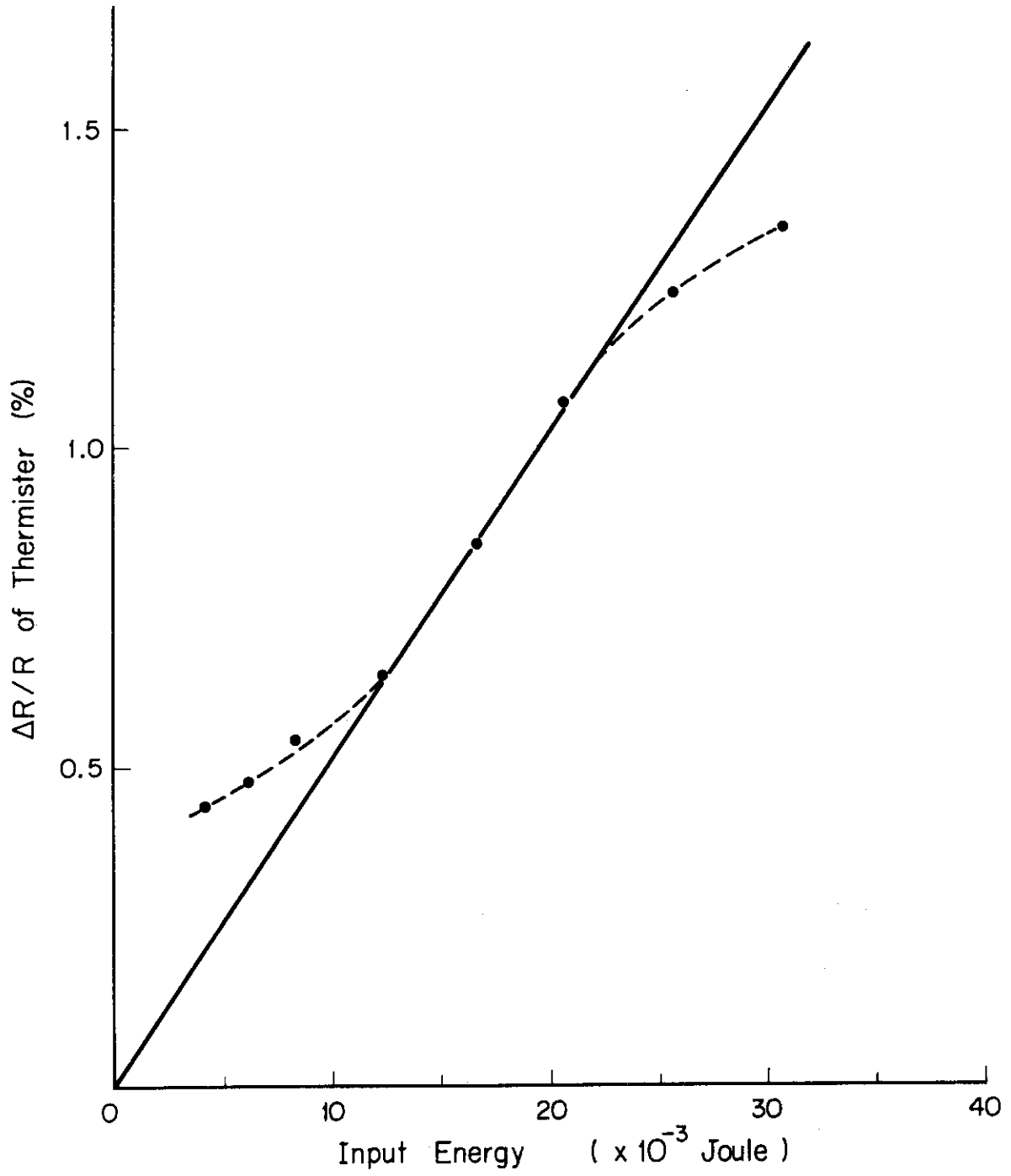
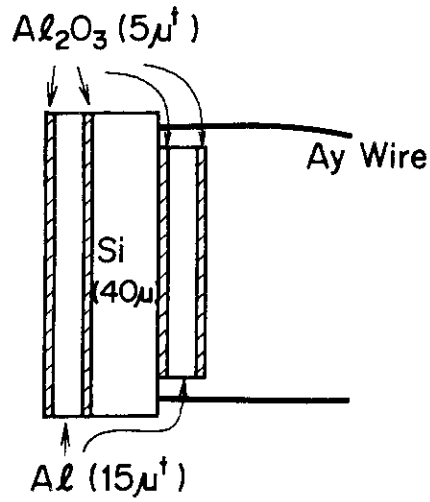
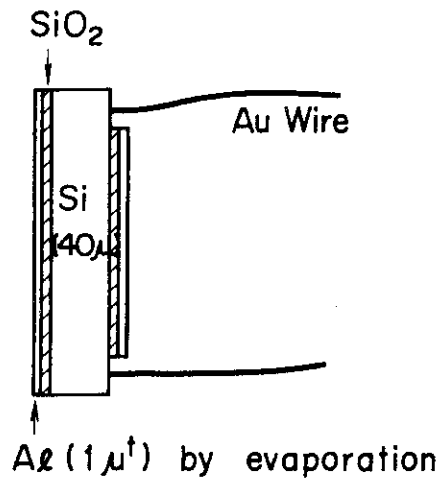


図4 入力エネルギーと低抗変化の関係



(a) Thermister with oxidized Al foil



(b) Thermister with evaporated Al

図5 改良したサーミスタの構造

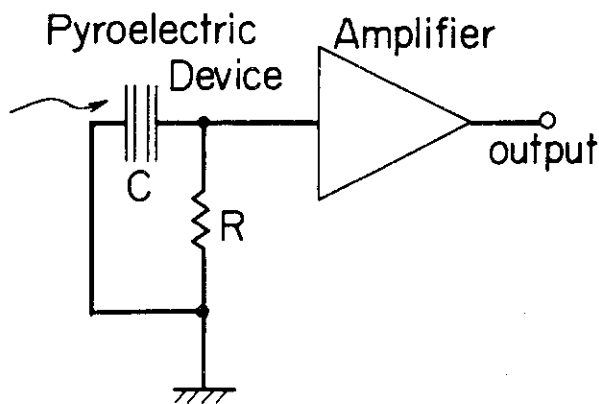


図6 焦電効果素子測定回路

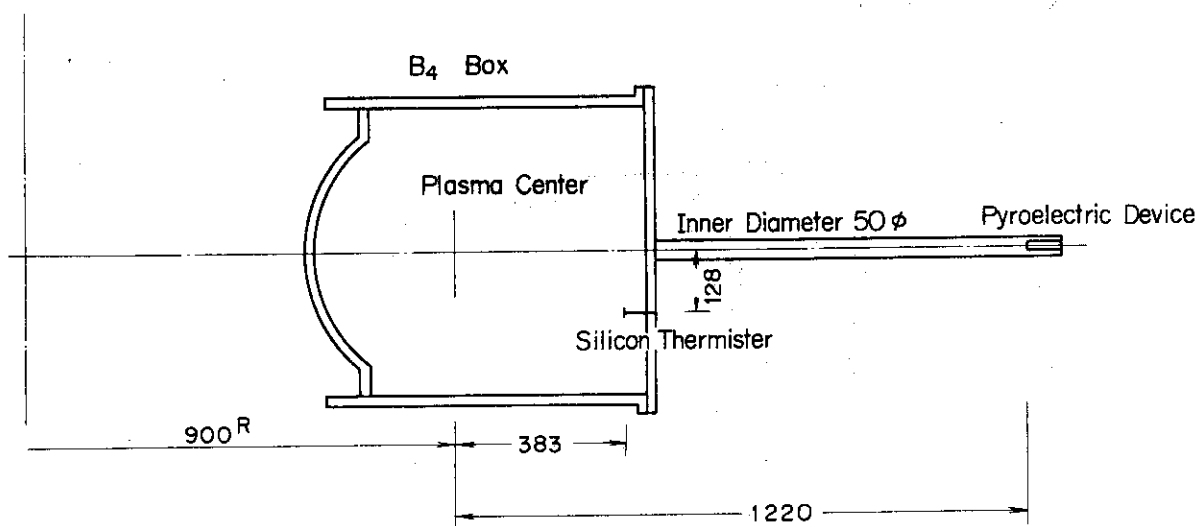


図7 ボロメータの測定位置

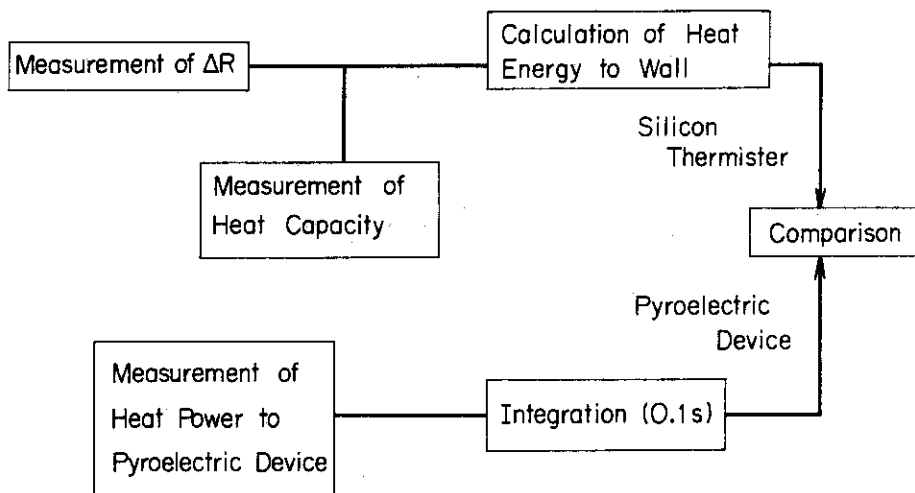


図8 焦電効果素子の校正方法

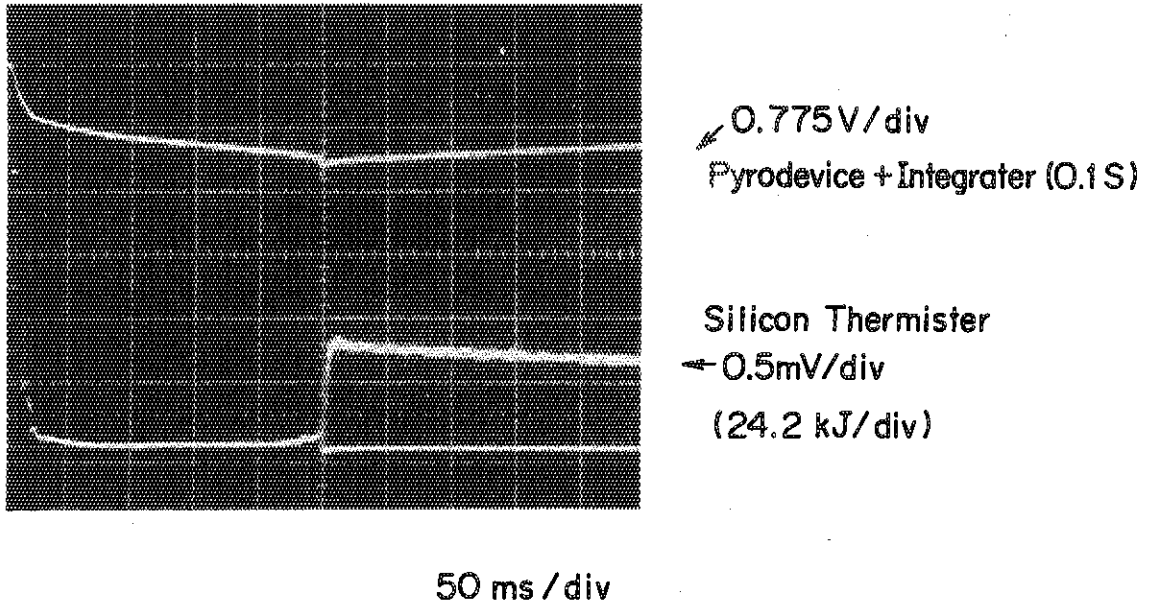


図9 シリコンサーミスタと焦電効果素子の出力の比較

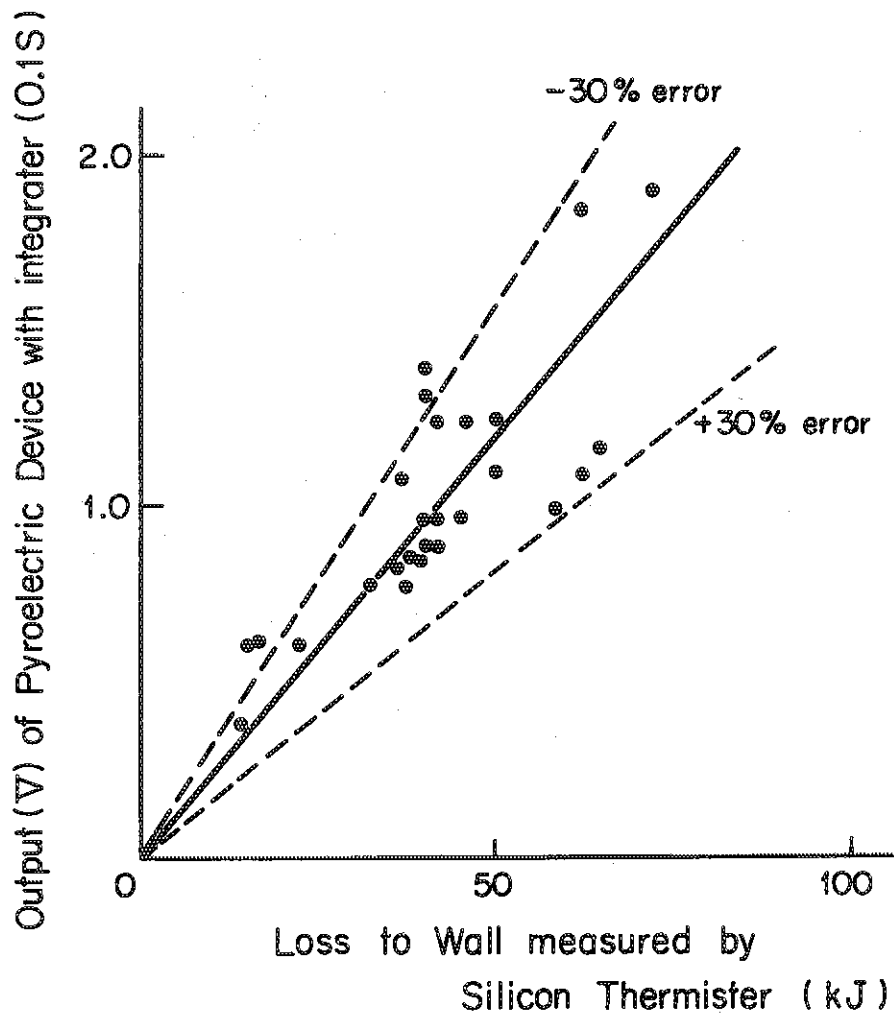


図10 焦電効果素子の校正直線

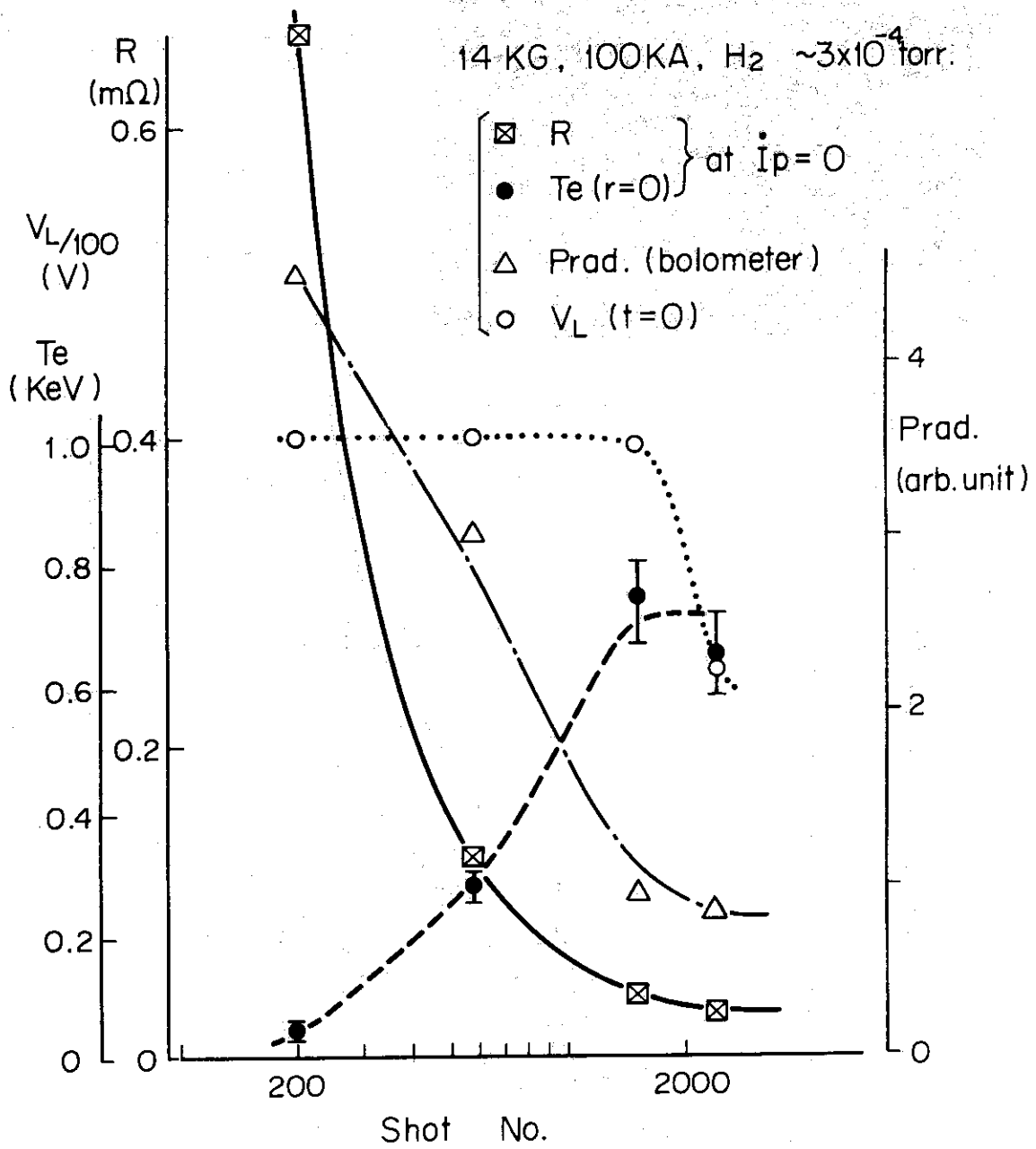
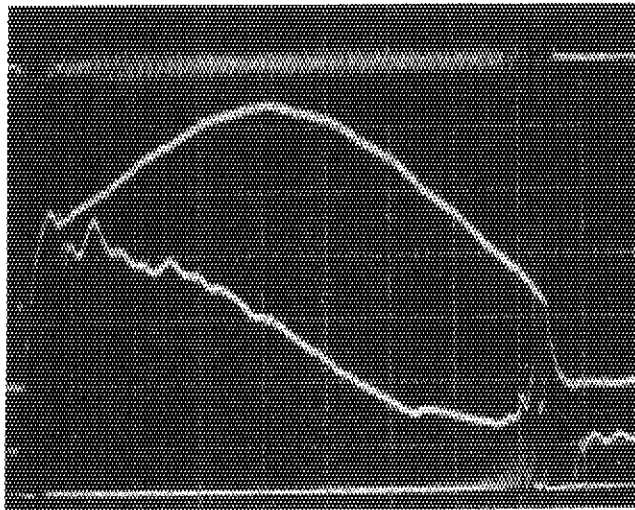


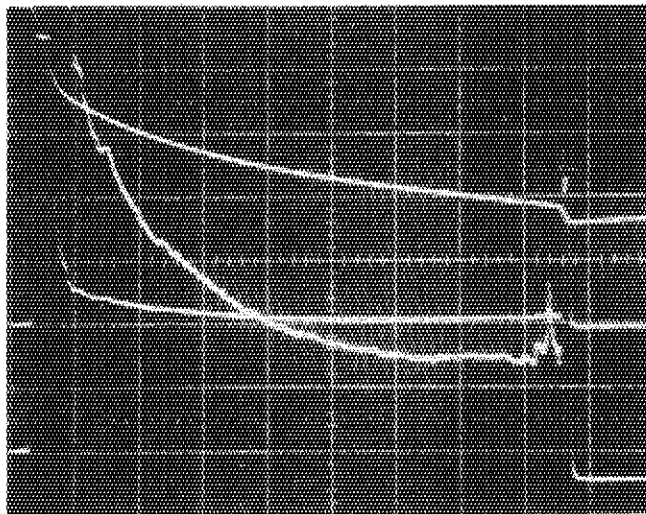
図11 放電洗浄回数とボロメータ出力の関係



I_p 27kA/div

V_{loop} 1V/div

(a1) I_p, V_{loop} 20ms/div



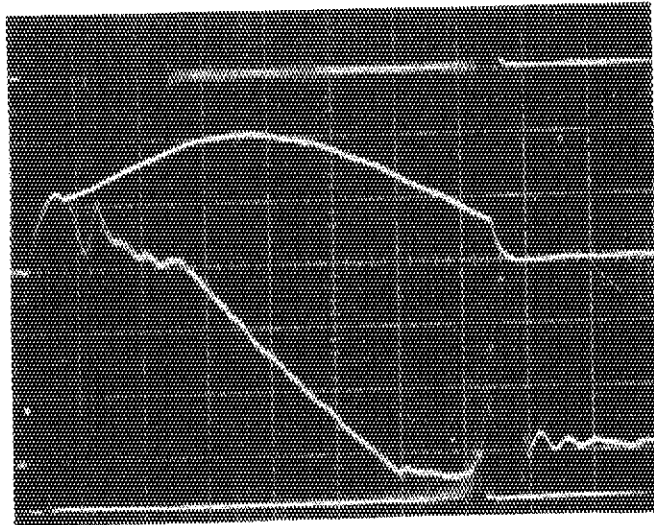
Energy to Wall
16.3 kJ/div
(0.39V/div)

(2V/div)
} Power to Wall
84.4 KW/div
(0.2V/div)

20ms/div

(a2) Output of Pyroelectric Device

図 12 焦電効果素子の出力波形の例 (a)

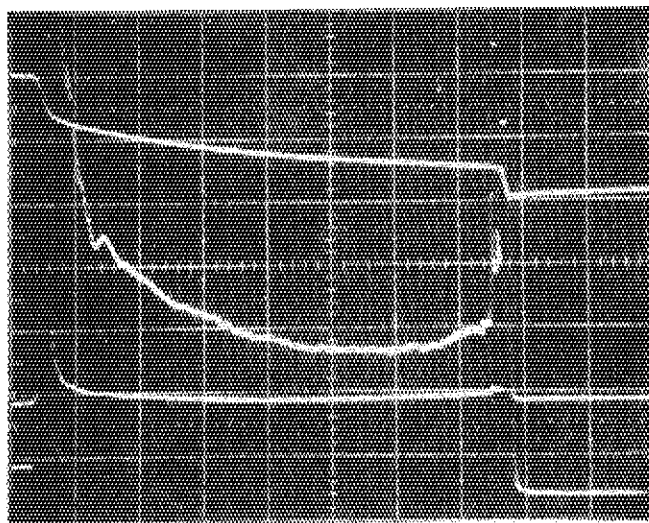


I_p 68 kA/div

V_{loop} 1V/div

20ms/div

(b1) I_p , V_{loop}



Energy to Wall

16.3 kJ/div

(0.39 V/div)

(2V/div)

Power to Wall

42.2 KW/div

(0.1 V/div)

20ms/div

(b2) Output of Pyroelectric Device

図 12 焦電効果素子の出力波形の例 (b)

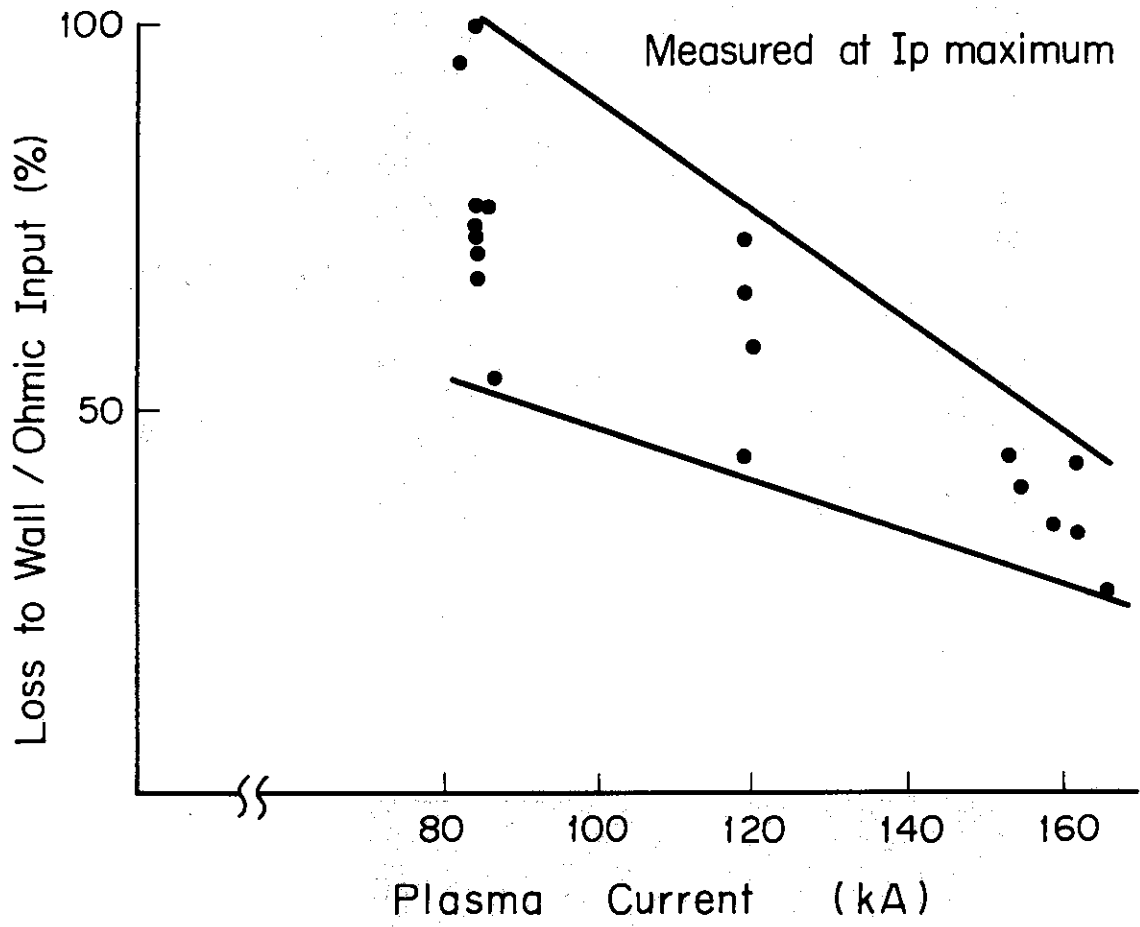
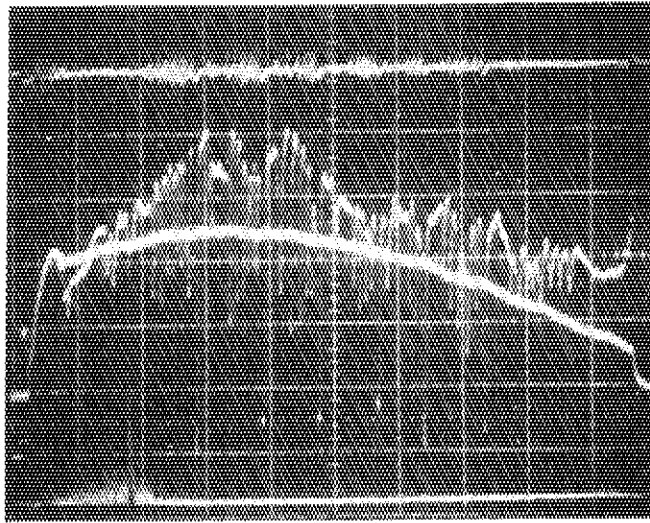


図 13 プラズマ電流と、プラズマ入力エネルギーの壁への損失の割合の関係



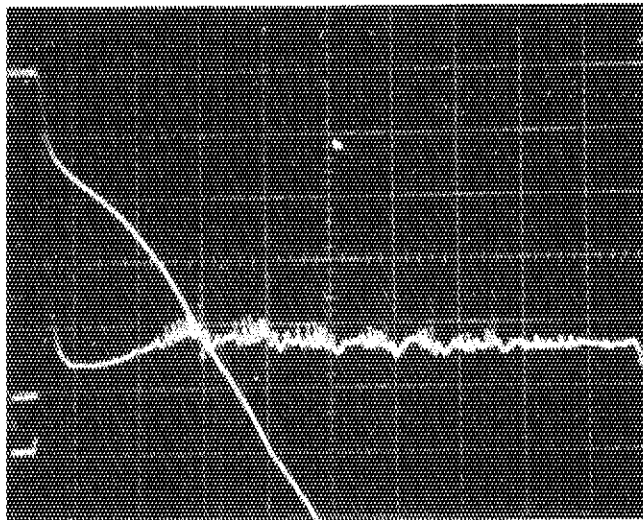
\tilde{B}_θ

V_{loop} 1V/div

I_p 27 kA/div

20 ms/div

(a) I_p , V_{loop}



2V/div

20 ms/div

(b) Oscillation of Power to Wall

図14 V_L と壁に来る損失との比較