

JAERI - M
94-078

SPring-8 線型加速器用壁電流モニタの開発

1994年6月

柳田 謙、山田 浩司、横山 健、鈴木 伸介、堀 利彦
吉川 博、木野 明彦、神 奈直、久場 英、横溝 英明

JAE-RI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公開している研究報告書です。
入手の場合は、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）まで、お申し送りください。なお、このほかに出張法人原子力懇話会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）にて複写による複製頒布をおこなっております。

JAE-RI-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, 1993

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 高野高速印刷

SPRING-8 線型加速器用電流モニタの開発

日本原子力研究所・理化学研究所大型放射光施設計画推進共同チーム

柳田 謙一・山田 浩司・横山 稔・鈴木 伸介・堀 利彦
吉川 博・水野 明彦・榎 泰直・久場 篤・横溝 英明

(1994年3月31日受理)

SPRING-8 線型加速器用の立ち上がりが速く、バンド幅が広く、ダイナミックレンジの大きい電流モニタを開発した。その主な性能は立ち上がり時間 ~ 250 ps、実効インピーダンス 1.4Ω （出力 1.4 V/A）、バンド幅 $18\text{kHz}\sim 2\text{GHz}$ である。パルス幅 40 nsの電子ビームを使用した試験の結果、尖頭電流値 12 A以下では、また真空パイプ中のビーム位置変化 8 mm以下では顕著な実効インピーダンスの変化は現われなかった。コアインダクタンスを仮定したモデルを構築して、実効インピーダンス及びバンド幅等の計算を行ない、測定値と比較した。その結果、一部を除き良く一致した。即ち、このモデルによって電流モニタのメカニズムを説明できることを意味する。

Wall Current Monitor for SPring-8 Linac

Kenichi YANAGIDA, Kouji YAMADA, Minoru YOKOYAMA, Shinsuke SUZUKI
Toshihiko HORI, Hiroshi YOSHIKAWA, Akihiko MIZUNO, Hironao SAKAKI
Atushi KUBA and Hideaki YOKOMIZO

JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team
2-28-8 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received March 31, 1994)

A fast rise time, broad band width and wide dynamic range wall current monitor was developed for SPring-8 Linac. The performances are a rise time of ~ 250 ps, an effective impedance of 1.4Ω (output of $\sim 1.4V/A$) and a bandwidth of $18kHz\sim 2GHz$. From a result of examination using $40ns$ electron beam, a significant change of effective impedance was not observed when a peak current was changed up to $12A$ or when a beam was moved by $8mm$ in a vacuum pipe. A circuit model that includes a core inductor loop was constructed. Using this model effective impedance and band width were calculated and compared to measured ones. They agreed very well except one part. In consequence the mechanism of wall current monitor can be explained by means of this model.

Keywords : Monitor, Wall Current Monitor, SPring-8, Linac, Core, Band Width,
Electron Beam

目 次

1. はじめに	1
2. WCMの構造	1
3. 実効インピーダンス	1
3.1 理想的なWCM	2
3.2 実際のWCM	2
3.3 コア透磁率と z_c の周波数特性	2
4. オフビーム試験	5
4.1 パルス矩形波出力	5
4.2 CW高周波出力	6
4.3 共振周波数およびQ値の測定	6
4.4 Kの解析	7
5. 実ビーム試験	8
5.1 電流依存性	8
5.2 位置依存性	9
5.3 短パルス電流波形	10
5.4 シングルバンチドビームの電流波形	10
6. まとめ	11
謝 辞	11
参考文献	12
付 録	28

Contents

1. Introduction	1
2. Structure of Wall Current Monitor	1
3. Effective Impedance	1
3.1 Ideal Wall Current Monitor	2
3.2 Actual Wall Current Monitor	2
3.3 Relative Permeability and Frequency Spectrum of Z_e	2
4. Off Beam Experiment	5
4.1 Pulse Output	5
4.2 CW RF Output	6
4.3 Measurement of Resonant Frequency and Q	6
4.4 Analysis of K	7
5. On Beam Experiment	8
5.1 Current Dependence	8
5.2 Position Dependence	9
5.3 Short Pulse Beam Observation	10
5.4 Single Pulse Beam Observation	10
6. Conclusion	11
Acknowledgment	11
References	12
Appendix	28

1. はじめに

SPring-8線型加速器では、ストレージリングでのシングルバンチを生成するために、電子銃に於いてパルス幅(全幅)1nsのビームを発生し、加速する。そこでビームの尖頭電流値及びパルス幅(波形)を測定する事は、マシンスタディのみならず通常運転時に於いても必要不可欠なことである。1nsビームを測定するには、電流モニタの立ち上がり時間を300ps以下にする必要がある。更に40nsビームを測定できるように、充分長いドロープ時間(広いバンド幅)を持つことが必要である。

一般に壁電流モニタ(以下WCMと記す)は立ち上がりが速いと報告されているが、ドロープ時間が短いなどの欠点があった[1]。一方、アモルファスコーを用いた立ち上りの速い電流トランス(以下CTと記す)も研究会等で発表されている[2]。SPring-8線型加速器では先ずR&D用のWCM及びCTを製作し、試験した。それらの試験結果を設計に反映させ、実機型試作モデルのWCM及びCTを製作した。両試作モデルを試験した結果、立ち上りの速さとオーバーシュートの小ささという点でWCMが優れていた。更に試作モデルのWCMはR&D用に比べドロープ時間が22倍大きくなり、40nsビームにも充分対応できることを確認した。以上の理由からWCMが短パルス電流モニタとして採用されている。

本論文ではWCMの理論及び製作されたWCMの性能について述べる。2章及び3章ではWCMの構造を説明し、電圧発生メカニズム、実効インピーダンス、バンド幅及びオーバーシュートに就いて述べる。これらの理論はR&D用及び試作モデルの試験データを解析し、構築した。更に4章では模擬電流を用いたオフビーム試験に就いて述べる。オフビーム試験では実効インピーダンス及びバンド幅等が測定され、理論値と比較された。最後に5章では電子入射部[3]を用いた実ビーム試験に就いて述べる。実ビーム試験では試作モデルWCMの電流依存性、位置依存性及び電流出力波形に就いて述べる。電流依存性を確認する理由は、陽電子発生用パルス幅40ns、尖頭電流20Aのビームを測定するためである。

2. WCMの構造

WCMは、真空パイプ、セラミックインサージョンの両端を繋ぐセラミック抵抗体(エレマ抵抗、東海高熱)、ピックアップ、ローディングコア及びシールドケースから成る(図1)。セラミック抵抗体の主な成分はSiCである。ピックアップを除くと、全エレメントはビーム軸に対し同軸構造となる。コアの種類及びサイズ等に応じて2種類のWCMが製作された。一つはR&D用として、平成3年に製作されたもので、フェライトコア(700L, トーキン)を用いる(W-7と記す)。もう一つは、実機型試作モデルとして、平成4年に電子入射部[3]と共に製作されたもので、ファインメットコア(FT-1M, 日立金属)を用いる(W-Fと記す)。700Lは半割りにして、FT-1Mはそのままモニタに組み込んだ。参考までにW-Fの写真を図2に示す。ピックアップは壁電流によってセラミック抵抗体の両端に現れる電圧を検出するが、コアの1ターンコイルとして磁束変化による誘導起電力を検出しているとも言える。そのため、このモニタはWCM及びCT双方の特徴を有する。

3. 実効インピーダンス

図3にWCMの模式的な(シュミレートする)回路を示す。ビーム電流を I_b とし、同方向に壁

電流 I_w が流れるとする。 I_w がセラミック抵抗体を通れる時に電圧が発生する。その電圧はピックアップで検出された後、50 Ω ケーブルで伝送された後オシロスコープ等で観測される。実際の I_w が流れる抵抗部分はセラミック抵抗体とピックアップ（50 Ω ケーブル及び測定器を含む）であり、その合成抵抗を R とする。 R と並列に浮遊容量 C が存在し、高周波（数GHz以上）の I_w は C を通して流れていき、ピックアップには電圧は発生しない（つまり信号が出ない）。 R と C との合成インピーダンスを I_w の負荷インピーダンス Z とする。

3.1 理想的なWCM

若し理想的（完全）なWCMであれば話は簡単で、ビーム電流 I_b と I_w の絶対値が等しく且つ符号が逆になる。即ち出力電圧（ピックアップに発生する電圧） V は I_b と Z の積になる(1)。

$$V = -I_b Z \quad (1)$$

@Ideal Wall Current Monitor

この時コアを含んだインダクタンス L には電流が流れない。なぜなら L に流れ込む電流は $I_b + I_w$ であり、 I_b と I_w が互いに打ち消しあうためである。

3.2 実際のWCM

しかし実際のWCMでは I_b と I_w の差分電流が L を流れることにより、コアに磁束を発生させ、 I_w を生成する起電力を発生させる。 L に流れ込む電流は $I_b + I_w$ であり、 V は $-\omega L(I_b + I_w)$ と表せる。一方、 V は Z と I_w の積であるから以下の関係が成立する。

$$V = I_w Z = -\omega L(I_b + I_w) \quad (2)$$

ここで I_w を消去すると;

$$V = -I_b Z_c \quad (3)$$

$$Z_c = \frac{Z}{\left(1 + \frac{Z}{\omega L}\right)} \quad (4)$$

書き直すと;

$$Z_c = \frac{R}{\left(1 + \frac{R}{\omega L} + j\omega CR\right)} \quad (5)$$

である。ここで Z_c は実効インピーダンスである。

3.3 コア透磁率と Z_c の周波数特性

コアの透磁率が周波数によって変化するためにLも同様に变化する。ここで比透磁率の周波数特性は模型的に(6)のように表せるとする。図4及び図5に700L及びFT-1Mの透磁率(実数部)の周波数特性を示す。図中実線はデータ値であり、点線は(6)に適当な μ_{r0} 及び f_0 を代入したものである。データはメーカーによって測定されたもので、サンプル試料のデータである[4][5]。700Lは周波数が 5.5×10^6 Hz程度までは、比透磁率が700で一定であるがそれ以上では f^{-1} で減衰する。一方FT-1Mは低い周波数領域では比透磁率 7.1×10^4 程度で一定であるが、周波数が 5.0×10^6 Hz以上では f^{-1} で減衰する。

$$\mu_r = 1 + \frac{\mu_{r0}}{1 + \frac{f}{f_0}} \quad (6)$$

表1にコアの(6)を適用した時の μ_{r0} 、 f_0 及び寸法等の仕様を示す。これら μ_{r0} 、 f_0 はサンプル試料のデータであり、使用するコアには多かれ少なかれ特性の個体差が存在する。特に製作工程の複雑なFT-1Mでは個体差が大きいと思われる、 μ_{r0} 及び f_0 が実際のものとは一致していない可能性がある。

表1 コアの特性及び寸法等

Core	700L	FT-1M
μ_{r0}	700	7.1×10^4
f_0 (Hz)	5.5×10^6	5.0×10^6
r (mm)	54.5	61.0
S (cm ²)	1.5	0.7
η	1.0	0.75

Z_c を定式化するために、Lを求める。Lには1ターントロイダルコイルのインダクタンスを適用し、以下のように表せるものとする：

$$L = \mu_r \mu_0 A \quad (7)$$

$$A = \frac{\eta S}{2\pi r} \quad (8)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率、 η は線積率、Sはコアの断面積である。(6)及び(7)を(5)に代入すると：

$$Z_c = \frac{R}{1 + \frac{R(1 + \frac{f}{f_0})}{2\pi f (\mu_{r0} + \frac{f}{f_0} + 1)\mu_0 A} + j2\pi f C R} \quad (9)$$

である。ここで、 $\omega=2\pi f$ とした。 Z_c は周波数領域によって異なる振る舞いをしめす。

a. 低周波数領域

f が f_0 に比べ充分小さい場合、特に $\frac{f}{f_0} \ll \mu_r$ の場合に於いて、 Z_c は周波数に比例して増大する(10)。これは μ_r が一定の領域であり、周波数に従って起電力が大きくなるためである。この領域では Z_c は抵抗的(レジシティブ)である。

$$Z_c = K \frac{f}{f_0} \quad @ \text{Low freq.} \quad (10)$$

$$K = 2\pi f_0 \mu_r \mu_0 A \quad (11)$$

ここで K は抵抗(Ω)の次元を持つ定数で、主にコアの半径及び断面積等に依存する量である。計算で求めた K を表4に示す。

b. フラットトップ領域

μ_r が f^{-1} で減衰する領域即ち $\frac{f}{f_0} \approx \mu_r$ であって、且つ浮遊容量の影響が現われない領域即ち $2\pi fCR \gg 1$ では、周波数に因らない、 Z_c が一定なフラットトップ部分が形成される。 Z_c は抵抗的となり、以下のように表される。

$$Z_c = \frac{R}{1 + \frac{R}{K}} \quad @ \text{Flat Top} \quad (12)$$

ここで $R \rightarrow \infty$ では $Z_c \rightarrow K$ となる。つまり K はコアの電圧発生能力限界値を示すと言える。

c. 高周波数領域

浮遊容量の影響が現われる領域、即ち $2\pi fCR \ll 1$ ではキャパシティブなインピーダンスが小さくなり、結果として $|Z_c|$ は周波数に反比例して小さくなる。

$$Z_c = \frac{1}{j2\pi fC} \quad @ \text{High freq.} \quad (13)$$

d. 下限カットオフ周波数

周波数特性を表すものにフラットトップ部分のバンド幅及びそれに付随するカットオフ周波数(下限及び上限)がある。カットオフ周波数はフラットトップ部分の $|Z_c|$ が半分になる下限及び上限の周波数とする。下限カットオフ周波数 f_L は(9)より、 $\mu_r \gg 1$ のときに近似的に以下のように表わされる。

$$f_L = \frac{f_0}{1 + \frac{K}{R}} \quad (14)$$

Rが大きいとき f_L は f_0 に近づくが、Rが0に近づくとき f_L も0に近づくことになり、バンド幅が広がる。またKが大きいとき f_L が小さくなり、バンド幅が広がる。計算によって求めた f_L を表2及び表3に示す。

e. 上限カットオフ周波数

上限カットオフ周波数 f_H は(9)より以下のようになる。

$$f_H = \frac{\sqrt{3} \left(1 + \frac{R}{K}\right)}{2\pi CR} \quad (15)$$

例えば $C \sim 100\text{pF}$, $K \sim 3.8\Omega$, $R \sim 1.7\Omega$ のとき、 $f_H \sim 2.3\text{GHz}$ になる。しかし浮遊容量Cを測定するのは困難であり、更にピックアップの高周波数特性等不確定要素も多く、 f_H を計算で求めることは不可能に近い。

4. オフビーム試験

W-7及びW-Fのパルス応答性や周波数特性を得るために、オフビーム試験を行なった。W-Fは電子入射部に組み込まれるため、ビームラインに設置される前に試験を行なった。

図6にオフビーム試験のセットアップを示す。WCMの真空パイプ内に導体を通し、電子ビームを模擬する電流を流した。高周波での特性を良くするために、導体と真空パイプの成す特性インピーダンスを 50Ω にした。模擬電流をInputから人力ピックアップから信号を取り出し観測した。Inputとは反対側のTransmission Outputは通常 50Ω で終端しているが、モニタの共振周波数やQ値を求めるときに測定器へ接続した。

模擬電流入力としてパルス矩形波及びCW高周波を用いた。パルス矩形波にはパルスジェネレータ(8131A, HP)を、またCW高周波にはスペクトラムアナライザ(R3361B, ADVANTEST)のトラッキングジェネレータ出力を用いた。WCMからのパルス矩形波出力の観測にはオシロスコープ(HP 54121T)を、またCW高周波出力の観測にはR3361Bを用いた。CW高周波の測定により $|Z_c|$ は得られるが、位相関係は得られない。

f_L やKを求めるために異なる抵抗値のセラミック抵抗体を使用した。抵抗値は $\sim 2\Omega$ 、 6Ω 、 10Ω である。

4.1 パルス矩形波出力

この測定のバリエーションとしては、パルス幅、尖頭電流もしくはRを変えたもの等数多くあるが、ここでは典型的な波形を示す。図7及び図8はパルス幅 2ns で尖頭電流 $\sim 20\text{mA}$ の模擬電流の出力波形である。

図7はW-7の出力電流波形であり、出力は $\sim 1.8\text{V/A}$ ($|Z_c| \sim 1.8\Omega$)である。図中、立上り時直後にオーバーシュートが発生している。オーバーシュートの周波数は $\sim 1.2\text{GHz}$ であった。これはW-7の内部のどこかが共振器となっているためと思われる。

図8はW-Fの出力電流波形であり、出力は $\sim 1.4\text{V/A}$ ($|Z_c| \sim 1.4\Omega$)である。オーバーシュート見られない。

その他多くのバリエーションの出力電流波形の解析を行ない、決定した $|Z_c|_{\text{opt}}$ 、ドロープ時間及び立上り時間を表2及び表3に記す。

4.2 CW高周波出力

CW高周波を用いた測定では、 $|Z_c|$ の周波数特性が得られる。図9及び図10はそれぞれW-7及びW-Fの周波数特性である。コアやピックアップ等の周波数特性で、完全なフラットトップは現われなかった。そこで目視によって最適なフラットトップの $|Z_c|$ を決定した。更にバンド幅を決めるため f_L 及び f_H を決定した。これら $|Z_c|_{\text{opt}}$ 、 f_L 及び f_H を表2及び表3に記す。 f_L に関しては理論値と測定値はほぼ一致している。

図9中1.2GHz付近に小ピークがある。この周波数は図7中のオーバーシュートの周波数に一致する。このピークは抵抗的でなく、インダクティブである。

図10中にも2.0GHz付近に極小ピークがある。このピークはフラットトップの $|Z_c|$ に比べ小さいので、図8では目立ったオーバーシュートは発生しなかった。但し後で示すように、パルス幅の非常に小さな電流が流入した場合にオーバーシュートが発生する(5.4 シングルバンドビームの電流波形参照)。

4.3 共振周波数およびQ値の測定

図11に透過出力の周波数特性(Q曲線)を示す。これらのデータは図6中のTransmission Outputからの信号を観測したものである。透過パワーが最も減衰している周波数が共振周波数である。透過パワーが3dB減衰している部分の周波数幅と共振周波数からQ値が得られる。

図11より $R \sim 2\Omega$ の場合、W-7の共振周波数は1.2GHzでQは2.9である。W-Fの共振周波数は2.0GHzでQは3.0である。 $R \sim 2\Omega$ 以外の結果は表2及び表3に示すが、共振周波数は殆んど $R \sim 2\Omega$ の時と変わらなかった。

セラミック抵抗体及びコアを外した場合の共振周波数測定も行なった。W-7及びW-Fの共振周波数はそれぞれ0.94GHz及び1.3GHzであった。これらの値はセラミック抵抗体がある場合に比べ、W-7では0.78倍でありW-Fでは0.66倍である。簡単なモデル(リエントラント型)をWCMに適用し、セラミック抵抗体及びコアが無い場合(シールドケース空洞)と有る場合(セラミック抵抗体の内側空洞)の周波数比を求める。図12のようなりエントラント空洞のインダクタンス L_c は:

$$L_c = \frac{k\mu_0}{2\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (16)$$

で表される[6]。W-7に於いて、セラミック抵抗体の内側空洞の L_c は $2.2 \times 10^{-9}\text{H}$ でありシールドケース空洞の L_c は $4.3 \times 10^{-9}\text{H}$ である。若しキャパシタンスが同一であると仮定すると、シールドケース

空胴とセラミック抵抗体の内側空胴の共振周波数比は0.72となる。同様にW-Fに於いては0.69倍である。空胴モデルとの差異を考慮すると、上記共振周波数比は一致していると思われる。以上の議論から、WCMの共振空胴的な振る舞い（オーバーシュート等）は、セラミック抵抗体より内側にできている空胴に起因することがわかった。

表2 W-7の特性

R (Ω)	2.11	5.44	8.33
$ Z_c _{\text{Pulse}} (\Omega)$ @ Flat Top	2.0	3.5	5.6
$ Z_c _{\text{RF}} (\Omega)$ @ Flat Top	1.8	4.0	5.3
Calculated f_L (MHz)	0.77	1.6	2.1
f_L (MHz)	0.70	1.6	2.1
f_H (GHz)	1.5	1.5	1.5
Droop (%/10ns)	6.4	15	21
Rise Time (ps)	300	350	400
Resonant Freq. (GHz)	1.2	1.2	1.2
Q-Factor	2.9	2.9	3.0

表3 W-Fの特性

R (Ω)	1.74	5.44	8.33
$ Z_c _{\text{Pulse}} (\Omega)$ @ Flat Top	1.4	3.4	4.3
$ Z_c _{\text{RF}} (\Omega)$ @ Flat Top	1.4	3.8	4.8
Calculated f_L (kHz)	16	29	34
f_L (kHz)	18	31	40
f_H (GHz)	2.0	1.6	1.6
Droop (%/10ns)	0.29	0.40	0.59
Rise Time (ps)	250	600	600
Resonant Freq. (GHz)	2.0	2.0	2.0
Q-Factor	3.0	2.7	2.3

4.4 Kの解析

K, Rとフラットトップの Z_c の関係は(12)である。また、 f_0 , K, Rと f_L の関係は(14)である。つまりフラットトップの Z_c を測定することによりKが、また f_L を測定することによりK及び f_0 が求まる。但し正確なK及び f_0 を求めるには多くのデータ点を必要とする。今回はセラミック抵抗体が3種類のみであり、得られたK及び f_0 の誤差が大きいと思われる。

図13は表2及び表3のRとフラットトップの $|Z_c|_{\text{Pulse}}$, $|Z_c|_{\text{RF}}$ の関係をグラフにしたものである。図中実線はW-7の、点線W-Fの(12)を適用したフィッティング曲線である。フィッティングの結果を表4の K_z に示す。

図14は表2及び表3のRと f_L の関係をグラフにしたものである。図中実線はW-7の、点線W-Fの

(14)を適用したフィッティング曲線である。フィッティングによって f_0 と K を求めた。その結果を表4の K_f 及び f_0 に示す。

表4 測定された K 及び f_0

	W-7	W-F
Calculated $K(\Omega)$	13	3.8
$K_z(\Omega)$	15	10
$K_f(\Omega)$	15	4.3
$f_0(\text{Hz})$	6.0×10^5	5.8×10^4

W-7について、 K は概ね理論値と測定値は一致している。一方、W-Fについては K_z が計算より2倍以上大きい。これは図5からわかるように $f > 1 \times 10^7$ では、 μ_r が(6)式よりも大きくなると思われ、 K_z が大きめに現われたものと思われる。残念ながら10MHz以上では μ_r を測定することは困難なので、確認は出来ない。

f_0 は表1中のものとはほぼ一致した。

5. 実ビーム試験

電子入射部(図15)の実際のビームを使ってW-F ($R=1.74\Omega$)の試験を行なった。

5.1 電流依存性

このWCMは1ターンのCTとして働く。尖頭電流またはパルス幅が大きい場合にはコアが飽和し出力が低下する可能性がある。ここではW-Fの電流依存性(コアの飽和)を試験した。

ビーム尖頭電流 I_b が流れたときでも、コア中に磁束を発生させる電流成分は $I_b + I_w$ である。フラットトップ部の I_b と $I_b + I_w$ の関係は以下のような。

$$I_b + I_w = \frac{I_b}{1 + \frac{K}{R}} \quad (17)$$

(17)に $K=3.8$ 及び $R=1.74$ を代入すると $I_b + I_w = 0.31I_b$ となる。つまりビーム電流 I_b のうち、コアに磁束を発生させる実効的な電流は I_b の0.31倍である。(7)に $I_b + I_w$ を掛けると磁束になり、更に ηS で割ると磁束密度 B になる(18)。

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 A (I_b + I_w)}{\eta S} = \frac{\mu_r \mu_0 (I_b + I_w)}{2\pi} \quad (18)$$

FT-1Mの最大比透磁率周波数積 $\mu_r f_0$ は $3.6 \times 10^9 \text{ Hz}$ である(表1参照)。半径は61mmである。フラットトップ部では $\mu_r \sim \frac{\mu_r f_0}{f}$ であり、最終的に(18)は以下のようなになる。

$$B = 0.311b \frac{f_0 \mu_0 r_0 \mu_0}{2\pi r f} \quad \text{@ Flat Top} \quad (19)$$

飽和磁束密度 1 T とすると、最大電流/周波数の値は $\sim 2.8 \times 10^{-4}$ A/Hz となる。時間領域では最大電流時間積は $\sim 9.3 \times 10^3$ A·s となる。パルス幅 40 ns の時は尖頭電流 ~ 2300 A が飽和電流となり、尖頭電流 20 A 程度では $|Z_c|$ の低下は起こらないと思われる。

実験は図16の様に、電子銃からのパルス幅 40 ns のビームを W-F 及び CT (2100, ピアソン) 両方で観測する。尖頭電流を 100 mA から 16 A まで変化させて、W-F 及び 2100 の出力電流波形を比較する。オシロスコープは SCD5000 (テクトロニクス) のみ用いた。人力の切り替えは手動若しくは同軸切替機で交互に行なった。

2100 の立上り時間は ~ 20 ns である。最大電流時間積は $\sim 5.0 \times 10^3$ A·s で、パルス幅 40 ns のビームでは最大電流は $\sim 1.3 \times 10^5$ A となり電流依存性はないとする。

実験は平成4年10月22日(実験1)及び平成5年11月28日(実験2)の2回行なわれた。実験1では W-F 及び 2100 の出力電流波形をそれぞれプロットへ打ち出し、目視により尖頭電流を決定した。参考までにプロットへ打ち出した W-F の出力電流波形を図17に示す。

実験2では、データを SCD5000 から PC (パーソナルコンピュータ) へ転送し、磁気ディスクへ記録した。参考までに、2100 及び W-F の出力電流波形を図18及び図19に示す。尖頭電流はコンピュータで計算した。Appendix に計算のプログラムを示す。この計算では余波形データ (1024 ch) の内、適当にベースライン (512 ch) を決定する。その後ベースラインからの差分を積分し、電荷量を計算する。その電荷量をパルス幅 (40 ns = 400 ch) で除すると尖頭電流値が求まる。

これらの実験の結果を図20に示す。図20(左)実験1のときは電流が増加するに従って若干 $|Z_c|$ が低下するが実験2では $|Z_c|$ の低下は見られない。この理由は尖頭電流値の決定方法が異なるためと思われる。図18及び図19からわかるように、この測定では尖頭電流によって波形が変化するため、実験1に於いて目視による尖頭電流値決定では曖昧さが残る。そのため、システムティックに $|Z_c|$ が低下したと思われる。以上を考慮して、パルス幅 40 ns (若しくはそれ以下) のビーム電流測定で尖頭電流値によって出力の低下はないと考える。

5.2 位置依存性

今回制作した WCM は W-F 及び W-F 共に対称性を考慮した電圧検出を行っていない。そのため真空パイプ内のビーム電流通過位置によっては出力に変化が生じる可能性がある。オフビーム試験によって確かめることもできるが、今回はパルス幅 40 ns のビームを上下左右に振って W-F の出力変化をみた。

実験のセットアップは 5.1 電流依存性の場合と同様である (図21)。2100 は CT であるので位置依存性はないものと考え、電流値の校正に用いる。電子銃 (カソード)、ステアリング電磁石、ピアソン 2100、W-F 及び蛍光板 (プロファイル) モニタの電子銃からの距離を表5に示す。

測定は平成5年7月27日(実験3)及び平成5年11月26日(実験4)に行なった。各実験条件を表6に示す。

表5 電子銃からの距離 (mm)

電子銃 (カソード)	0
ステアリング電磁石	140
2100	283
W-F	388
蛍光板モニタ	490

表6 位置依存性実験の諸条件

	実験3	実験4
加速電圧(kV)	160	150
尖頭電流(mA)	330→160 (実験中に変化)	~300
蛍光板上での集束回数	3 回目	2 回目
(ヘルムホルツコイル電流)	(8.3A)	(4.8A)
尖頭電流値の決定	目視	コンピュータ

ステアリング電磁石 (STV及びSTH) によりビームを上下左右に振ることができる。励磁電流は-1.0~1.0Aで、最大 $B \cdot l$ 積は48G·cmである。このステアリングによって蛍光上のビームスポットは約8mm動いた。W-Fの位置はウエストではないので、同程度もしくはそれ以上ビーム位置が動いていると考えられる。

結果を図22及び図23に示す。これらは2100で校正したW-Fの $|Z_c|$ である。図22及び図23では測定のばらつきが大きいながら、ある特定方向に出力が変化することはなかった。 $|Z_c|$ が若干大きく現われているのは、2100の立上りが遅いため波形が乱れ出力が小さく測定されたためと思われる。

以上からパルス幅40nsのビームでは位置による出力変化は十分小さく、使用上問題ないと考ええる。

5.3 短パルス電流波形

電子ビームのパルス幅はショートスタブの長さで変えることが出来る[7]。スタブ長が短いとパルス幅が小さくなる。そこでスタブ長を変化させたときのビームの出力電流波形を参考までに図24に示す。図中、スタブ長は生成されるグリッド電圧のパルス幅で記されている。

5.4 シングルバンドビームの電流波形

電子入射部には電子銃直後の他にバンチャー後にもW-Fがある。これはビームのバンチャー透過率等を測定するために設置されている。電子銃に於いて、若し加速周波数の周期(~350ps)より短いパルス幅の電子ビームを発生させると、ある一定の確率で加速周波数(2.856GHz)でのシングルバンドビームが発生する。シングルバンドビームを観測したときのビーム波形を図25及び図26に示す。但し図26は高速型(同軸型)のファラデーカップの出力である。図25では立上り時間は~250psである。一方、図26では立上り時間は~100psであり、この値はケーブルやSCDS5000(帯域DC~4.5GHz)等の測定系の立上り時間と考えられる。よってW-Fの立ち上がり

時間は250psよりやや短いと考えられる。また図25中で、オーバーシュート（リングング）が見られる。その周波数は～2.0GHzである。これは4.3 共振周波数及びQ値の測定の実験周波数に一致する。つまり共振周波数の周期よりも短いパルス幅の電流入力ではオーバーシュートが顕著に現われる。

6. まとめ

WCMはその構造上CT的な振舞を示す。そのため、フラットトップ部の実効インピーダンス

Z_c は $\frac{R}{1+\frac{R}{K}}$ になる。抵抗値Rをいくら大きくしても実効値はK以上にはならない。W-F（実機型試作モデル）の場合、 $R=1.74(\Omega)$ に対し $|Z_c|=1.4(\Omega)$ であった。但し理論では $|Z_c|=1.2(\Omega)$ であり、ほぼ一致しているが、他のRでは測定値が大きく現われた。

バンド幅、特に下限カットオフ周波数 f_0 はコアの特性により決定され $\frac{f_0}{1+\frac{K}{R}}$ である。バンド幅を広くするには f_0 の小さなコアを選び、且つKを大きくする設計を行うとよい。W-Fの場合、理論値16kHzに対して測定値18kHzであり、ほぼ一致している。ちなみにW-Fの上限カットオフ周波数は2.0GHzであった。

オーバーシュートは抵抗体内側空洞の共振によって発生する。共振周波数が充分高い、即ちパルス幅に比べ周期が充分小さい場合オーバーシュート（リングング）は抑制される。これは測定系の高周波特性が悪化し、オーバーシュートを検出できなくなるためである。根本的な解決方法として図27のような構造を提案する。図27ではSiC等で作られたセラミック抵抗体を真空容器として用いる。この構造では共振はなくなり、オーバーシュートは消滅するだろう。またモニタのサイズも小さくなり、浮遊容量が低減し、立上りが速くなると思われる。

電流依存性及び位置依存性を実ビームを用いて測定したが、使用上問題の起きないレベルであることがわかった。

謝辞

コアの周波数特性やその測定法等に就いて日立金属の中島晋氏から情報を頂いた。またセラミックインサージョンと抵抗の共用化に就いて、SLACのF.J.Decker氏の意見を参考にした。ここに両氏に対し感謝の意を述べる。

参考文献

- [1] R.F.Koonz and R.H.Miller, "Nanosecond Electron Beam Generation and Instrumentation at SLAC." IEEE Trans. Nucl. Sci., Vol. NS-22, No.3, June 1975, pp.1350-1353.
- [2] T.Kobayashi, et al., "アモルファスコアを用いたビーム電流モニタの開発 (IV)." Proc. of 17th Linear Acc. Meeting, Sendai, Sept. 1992, pp.210-212.
- [3] S.Suzuki, et al., "Performance of Linac Preinjector for SPring-8." in Proc. of the 9th Symposium on Acc. Sci. and Tech., Tuskuba, Aug. 1993, pp.119-121.
- [4] TOKIN, "Data Sheet of 700L.", private communication.
- [5] HITACHI METALS, "Data Sheet of FT-1M.", private communication.
- [6] M.Puglisi, "Conventional RF Cavity Design." CERN 91-04, 1991, pp. 269-293.
- [7] T.Hori, et al., "SPring-8線型加速器電子銃特性." Proc. of 18th Linear Acc. Meeting, Tukuba, Aug. 1993, pp.64-66.

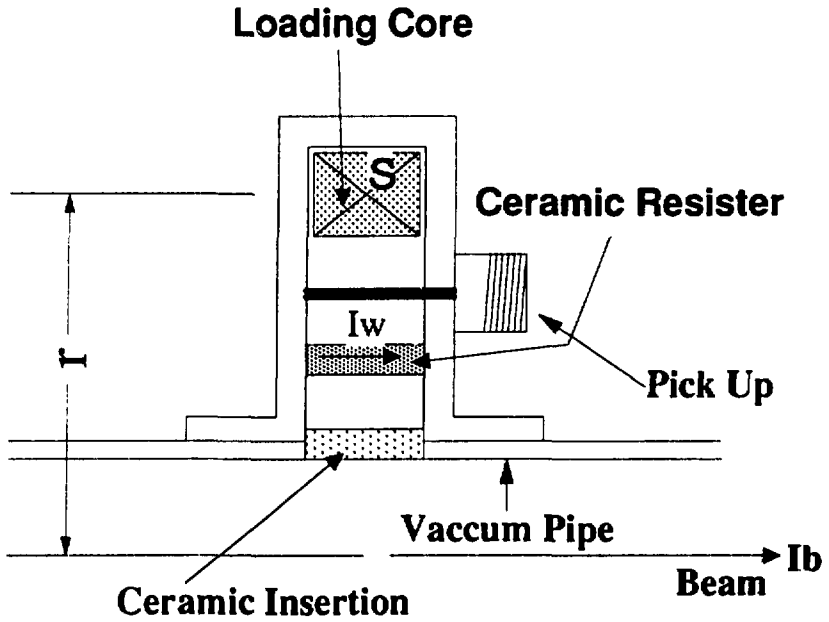


図1 壁電流モニタ構造図。



図2 W-Fの写真。

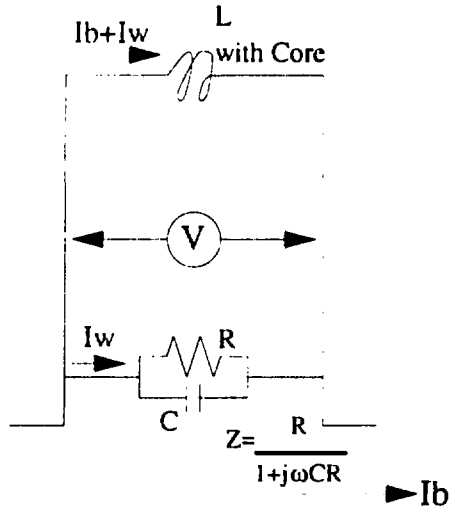


図3 電流モニタの等価回路

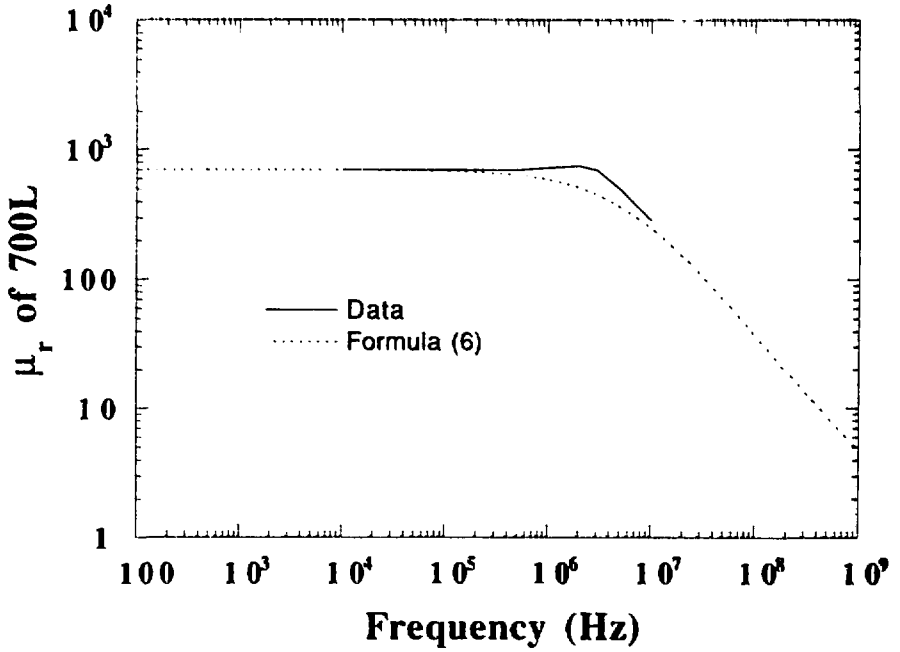


図1 700Lの比透磁率(実数部)周波数特性
 実線はデータ値、点線は(6)である
 ~3.0MHzに共鳴によるピークが見られる

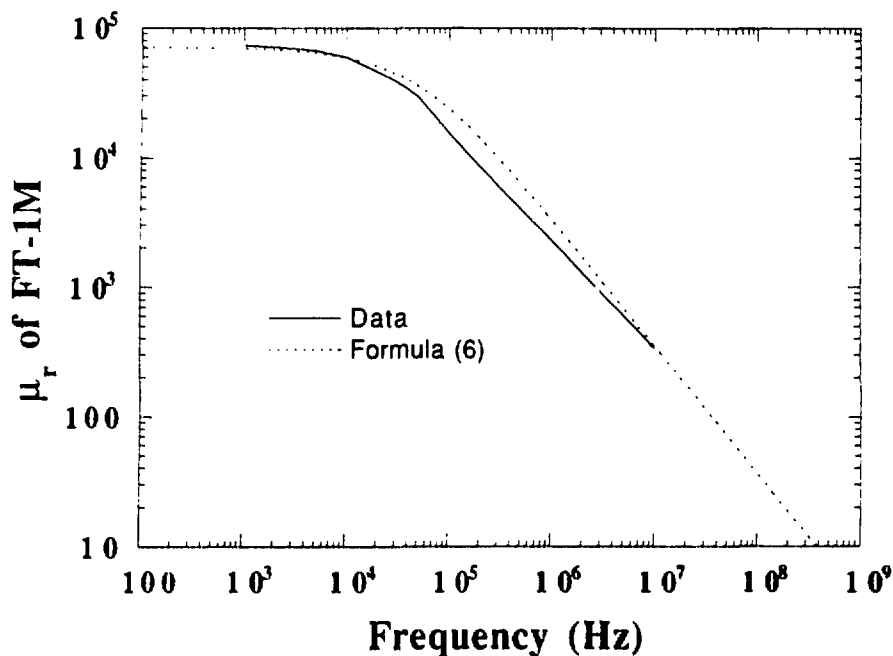


図5 FT-1Mの比透磁率(実数部)周波数特性
 実線はデータ値、点線は(6)である
 $1 \times 10^4 < f < 1 \times 10^7$ では(6)の方が大きい
 $1 \times 10^7 < f$ では(6)の方が小さくなると思われる

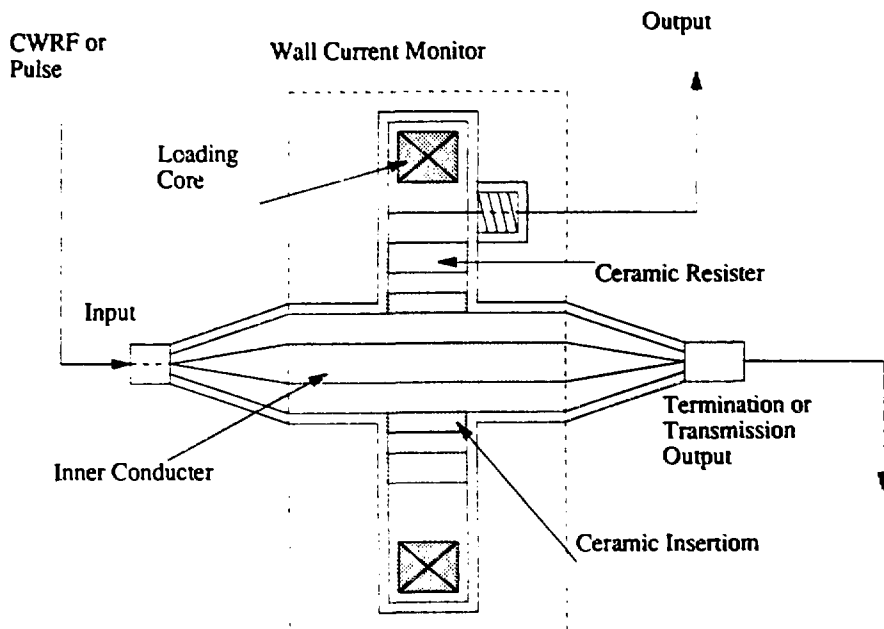


図6 オフビーム試験セットアップ

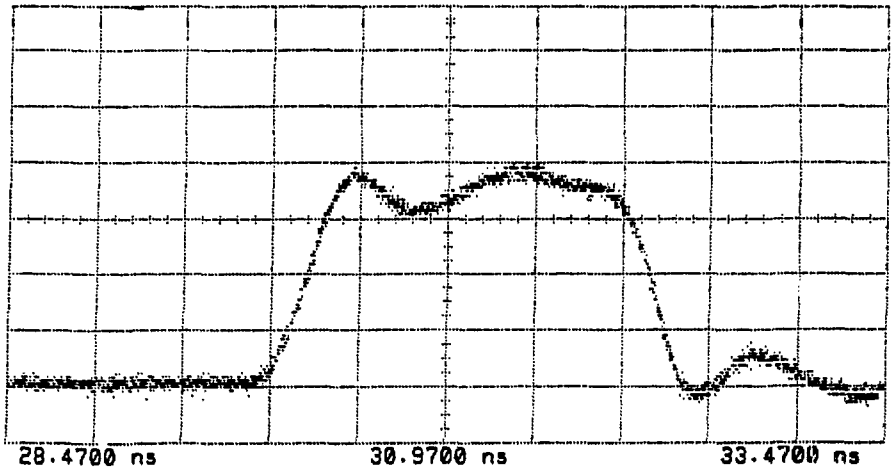


図7 W-70のハルス模擬電流出力波形
横軸500ps/div, 縦軸10mV/div, R=2.11Ω

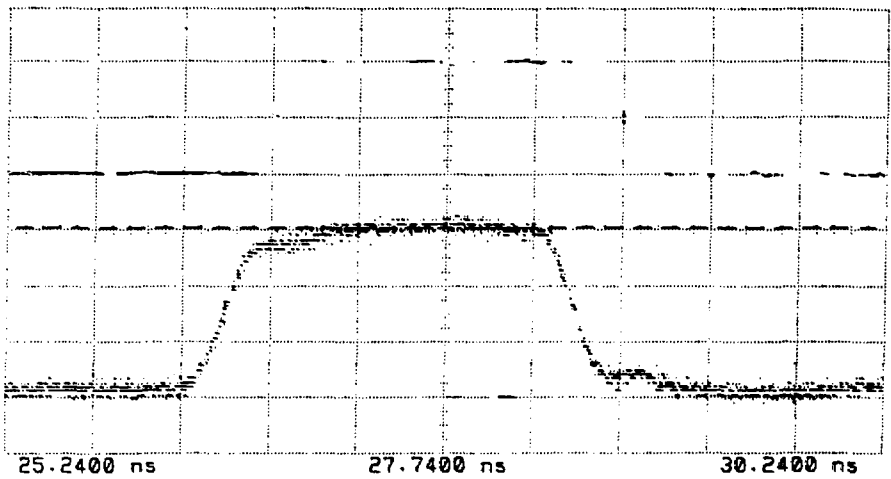


図8 W-Fのハルス模擬電流出力波形
横軸500ps/div, 縦軸10mV/div, R=1.74Ω

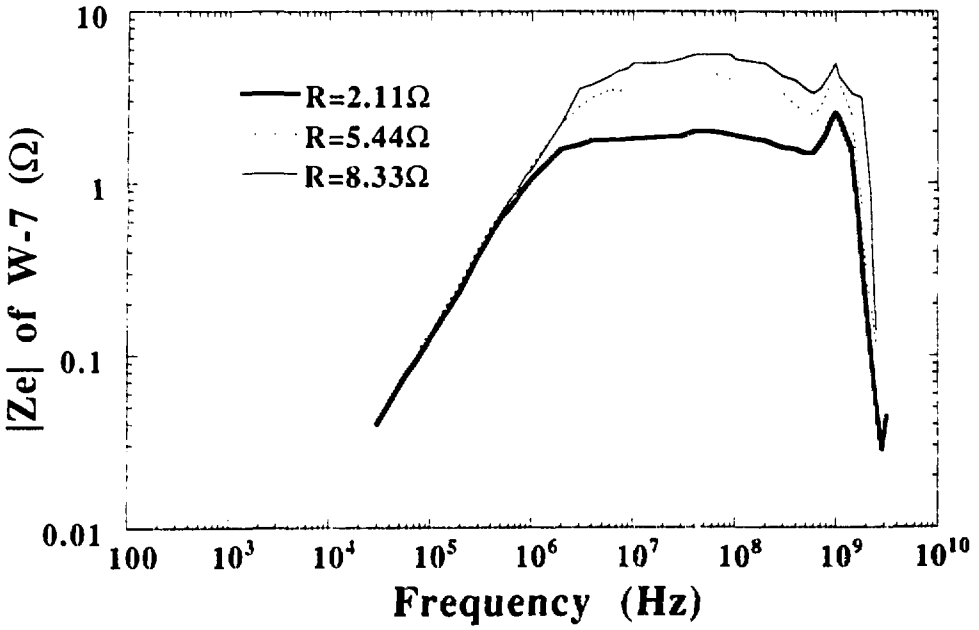


図9 W-7のZe周波数特性

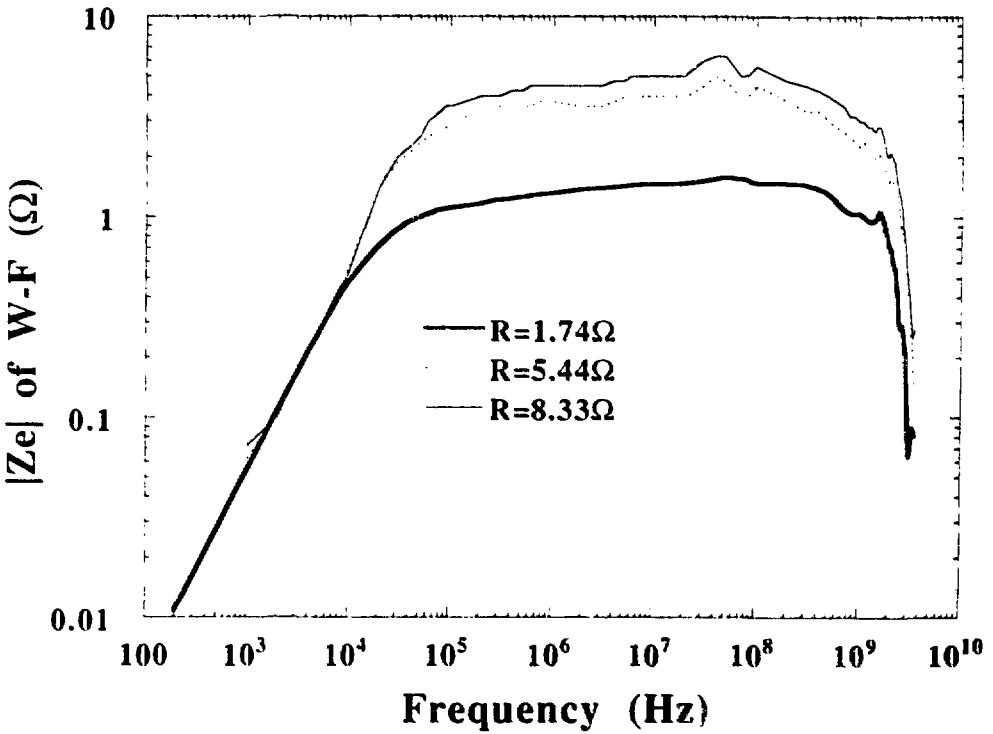


図10 W-FのZe周波数特性

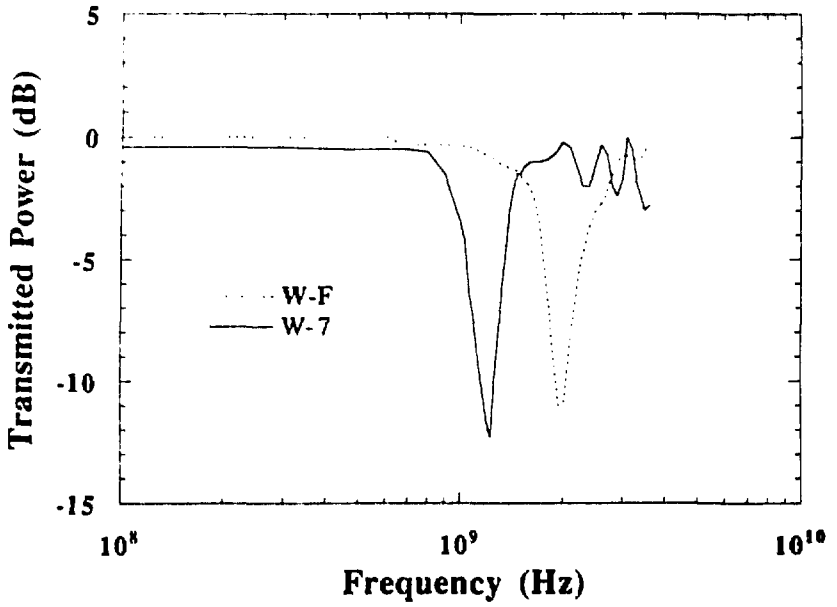


図11 W-7及びW-Fの共振周波数及びQ値の測定
R=2Ωの場合.

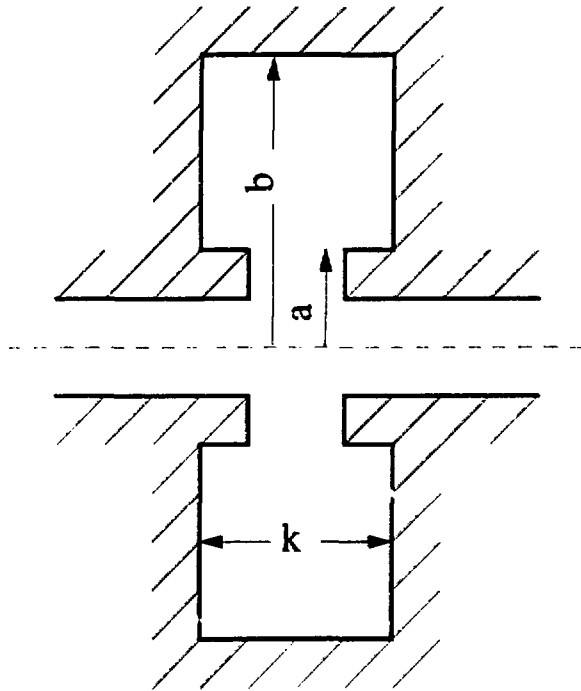


図12 リエントラント型空洞モデル

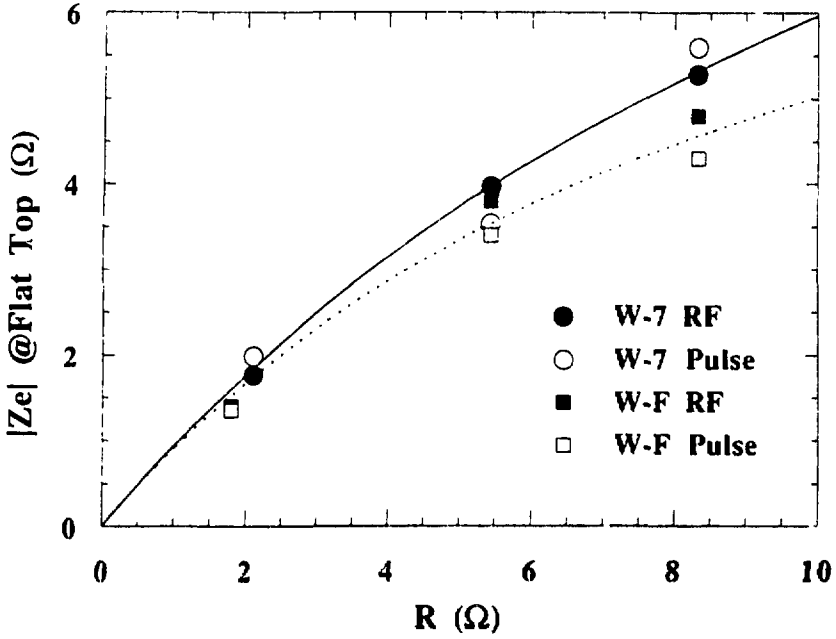


図13 RとフラットトップのZe.
 実線及び点線はW-7及びW-Fの(120)フィッティング曲線.

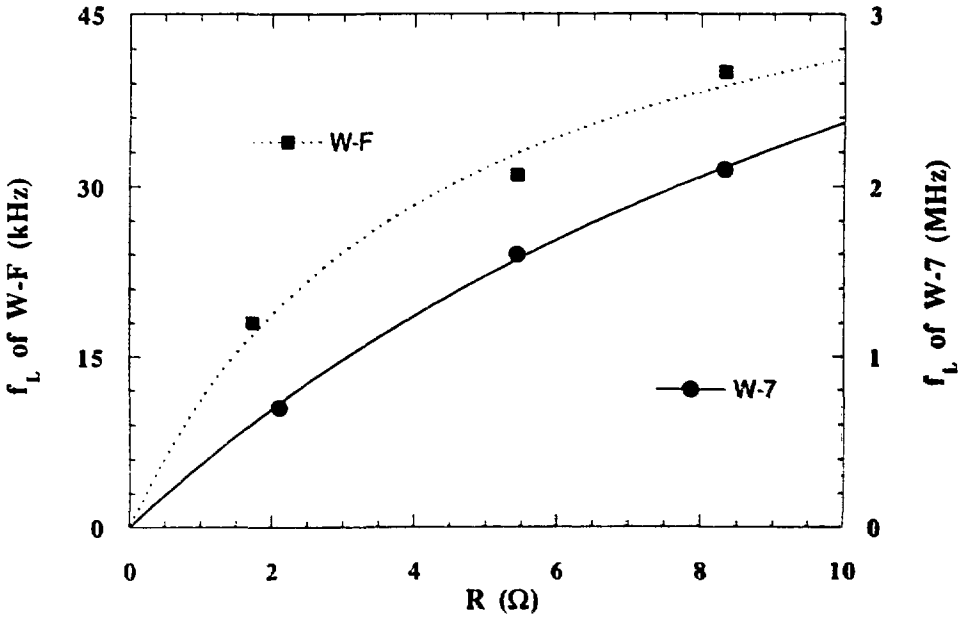


図11 Rとf_L及び14のフィッティング曲線.

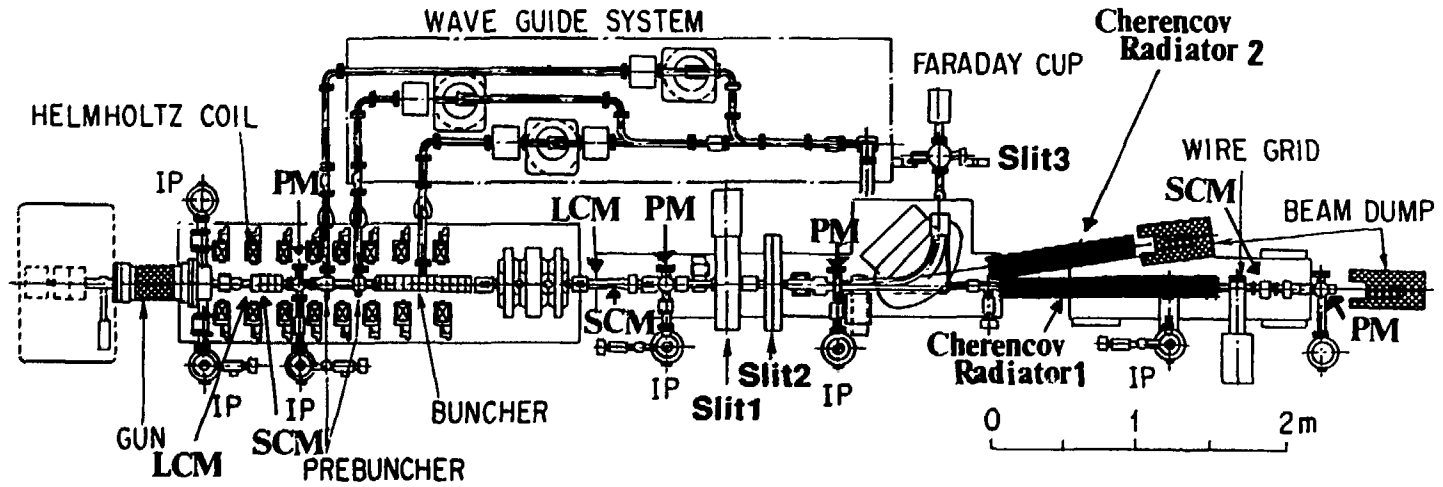
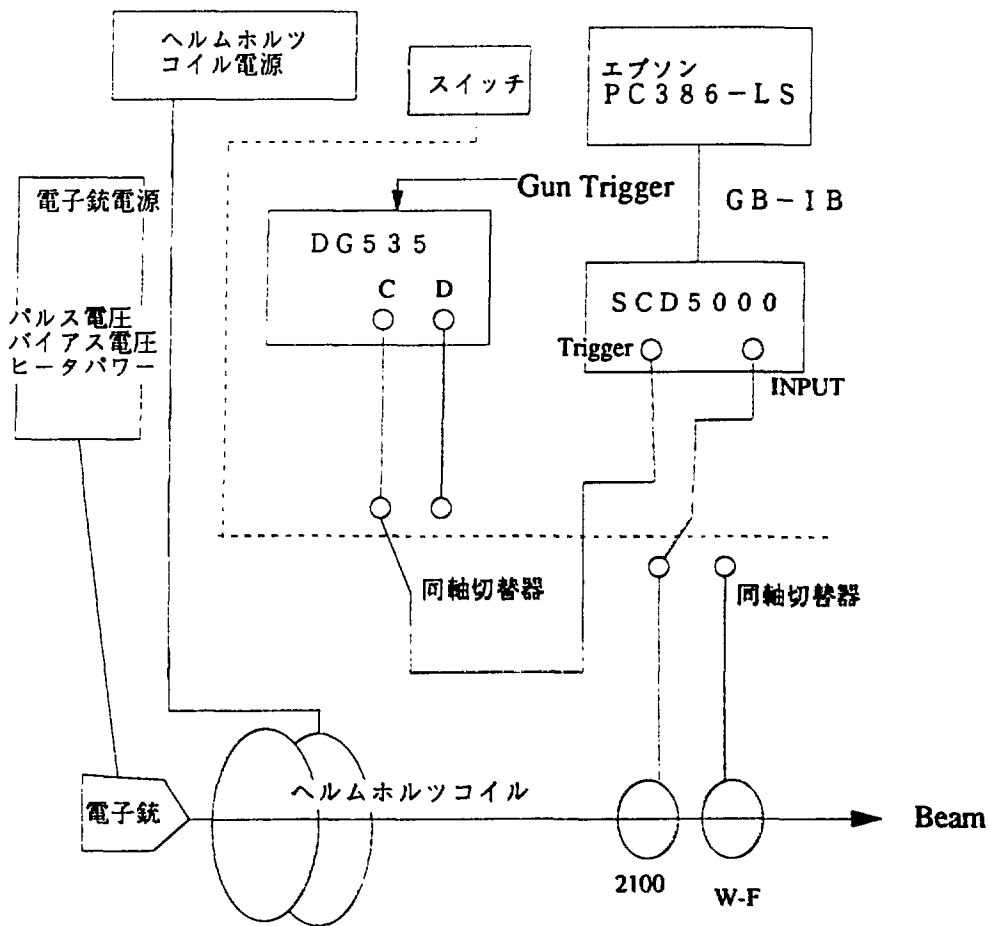


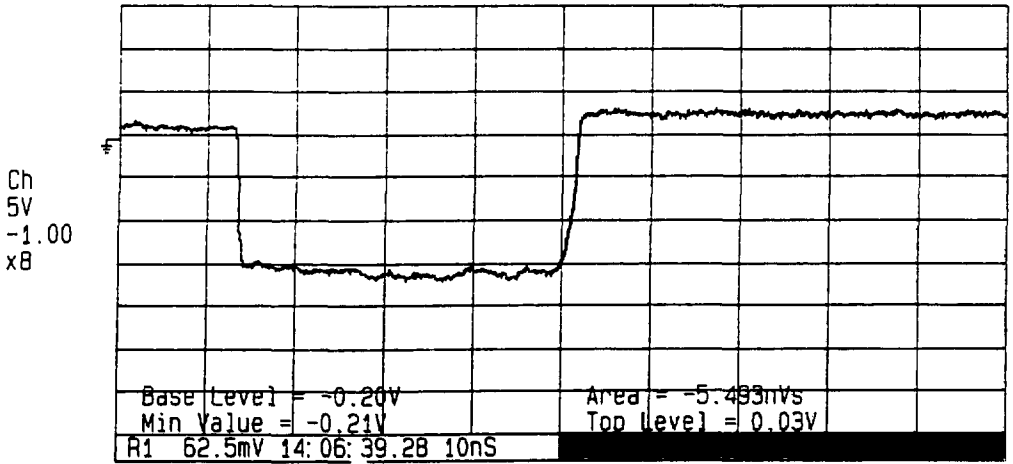
图15 電子入射部機器配置



ビーム条件：40ns
 100,200,300,900mA,1A,2,3,20A、計29点を1往復
 200KV

ファイル書き込み名：CL000～CS200
 Cは電流、Lは2100、SはW-F
 000；10x電流値(A)

図16 電流依存性実験セットアップ。
 (コンピュータで取り組み)



Intrvl=97.752ps
RecLen=1024pt
TrigDly=170pt

図17 W-Fの40nsビーム電流波形。
プロッタへ出力させた。
縦軸62.5mV/div, 横軸10ns/div.

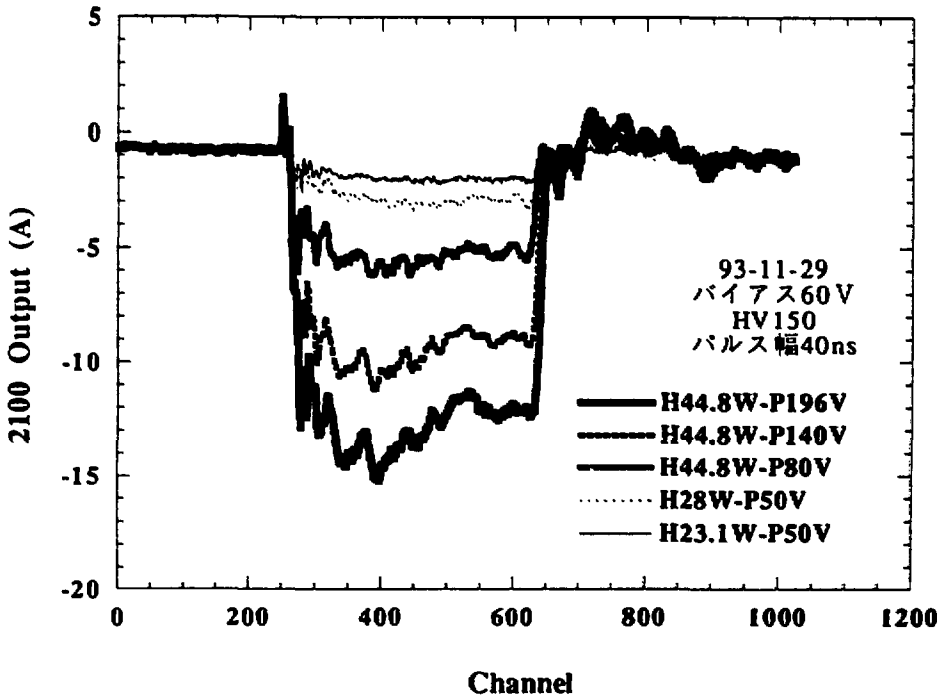


図18 2100の出力電流波形.

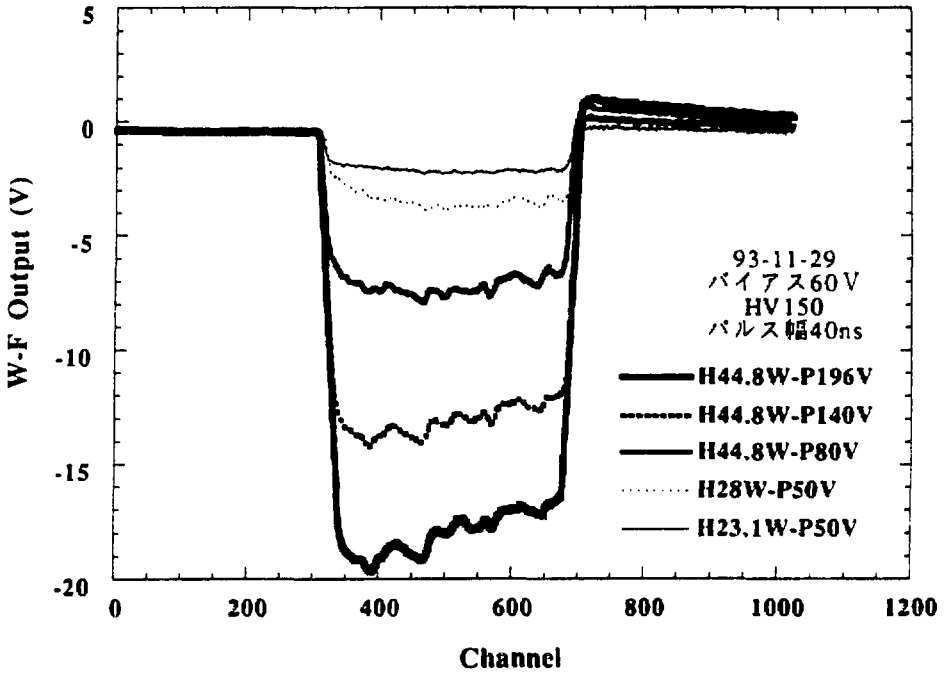


図19 W-Fの出力電流波形

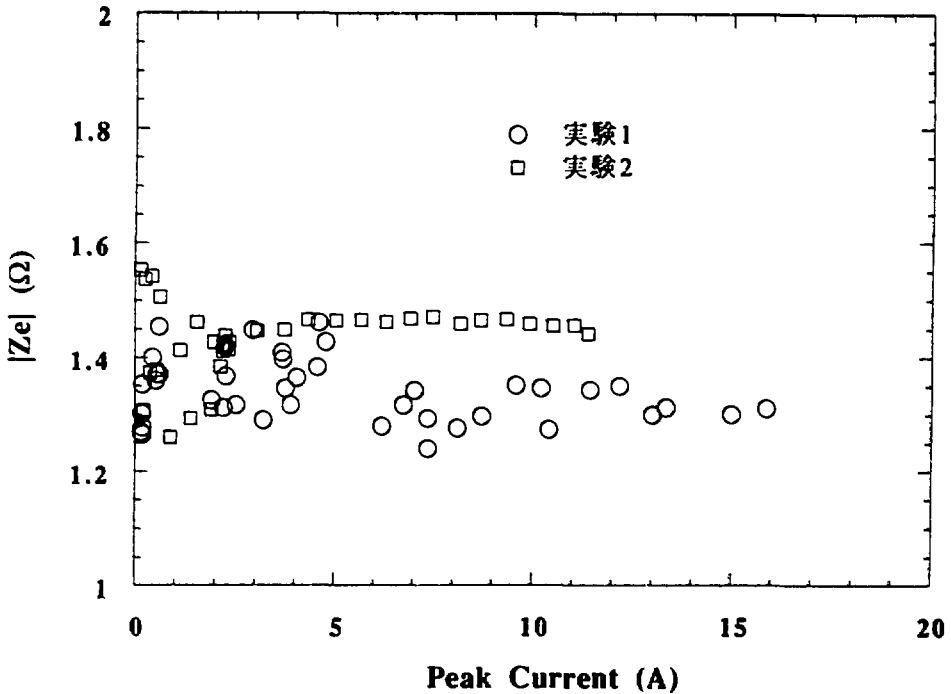
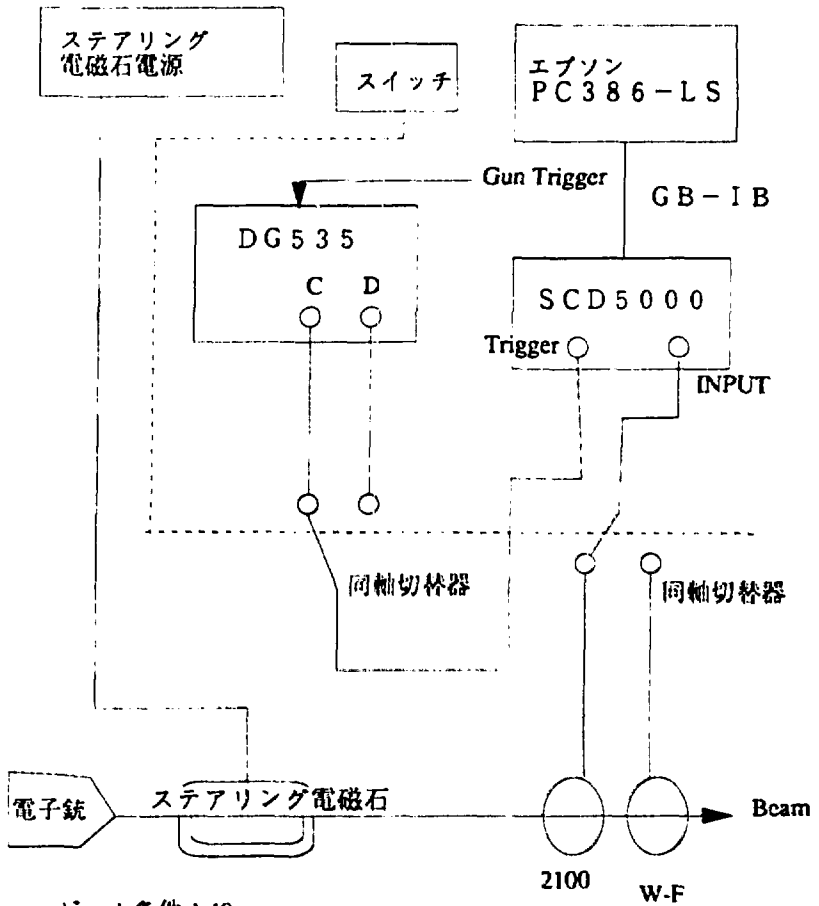


図20 W-Fの Z_e 電流依存性



ビーム条件：40ns
100mA
200KV

ステアリング条件：H, -1~1A, 0.2A刻み, 11点
V, -1~1A, 0.2A刻み, 11点

ファイル書き込み名：L0000~S1010

Lは2100、SはW-F
0000；始め2桁はH電流の順番
後ろ2桁はV電流の順番

図21 ビーム位置依存性実験セットアップ
(コンピュータで取り組み)

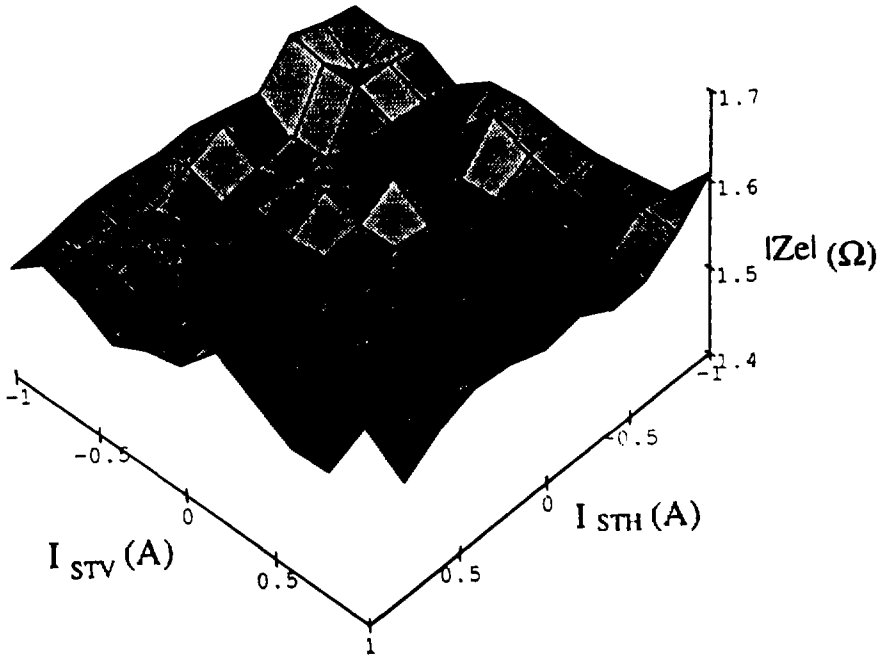


図22 位置依存性 (実験3)

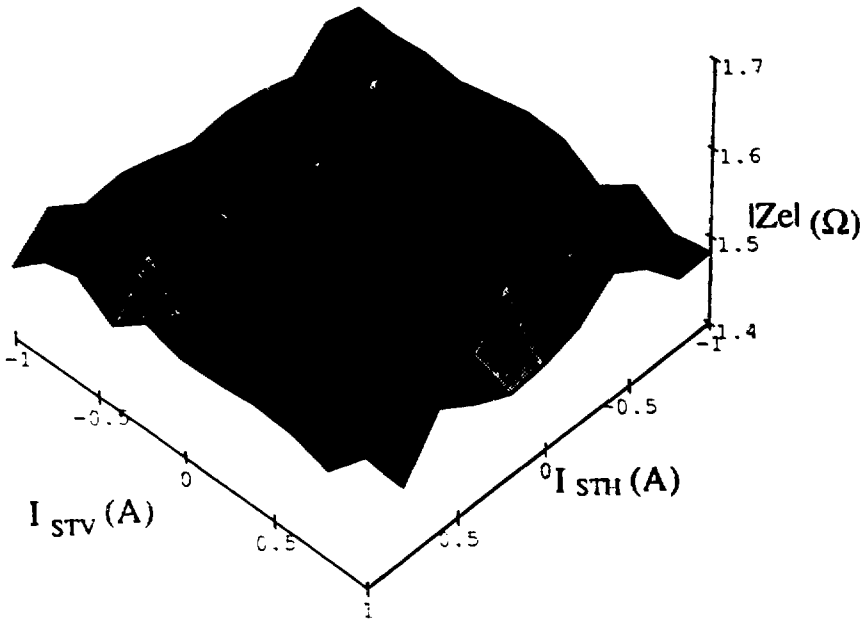


図23 位置依存性 (実験1)

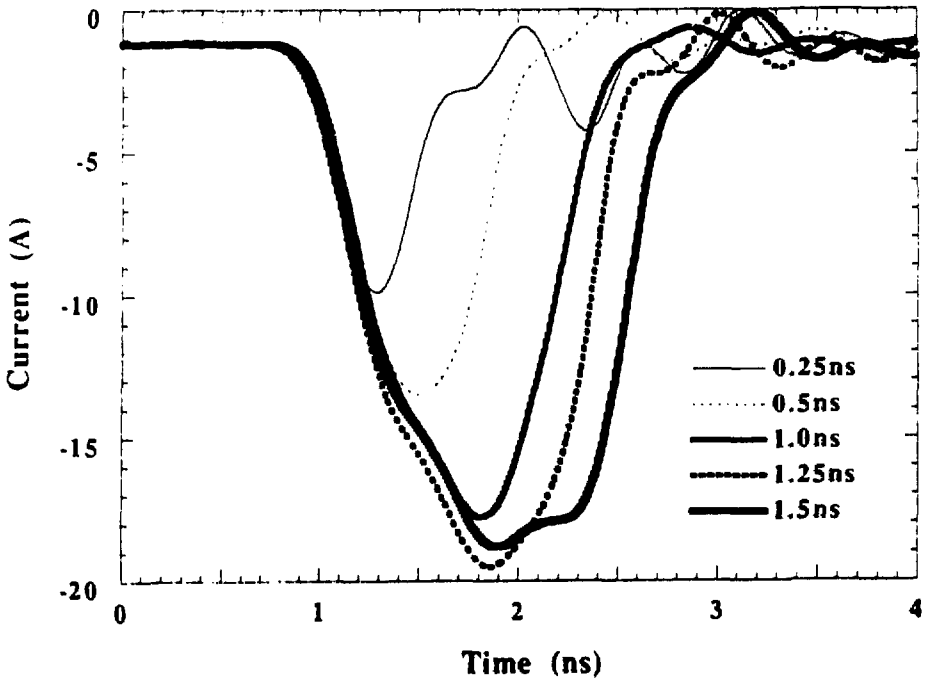
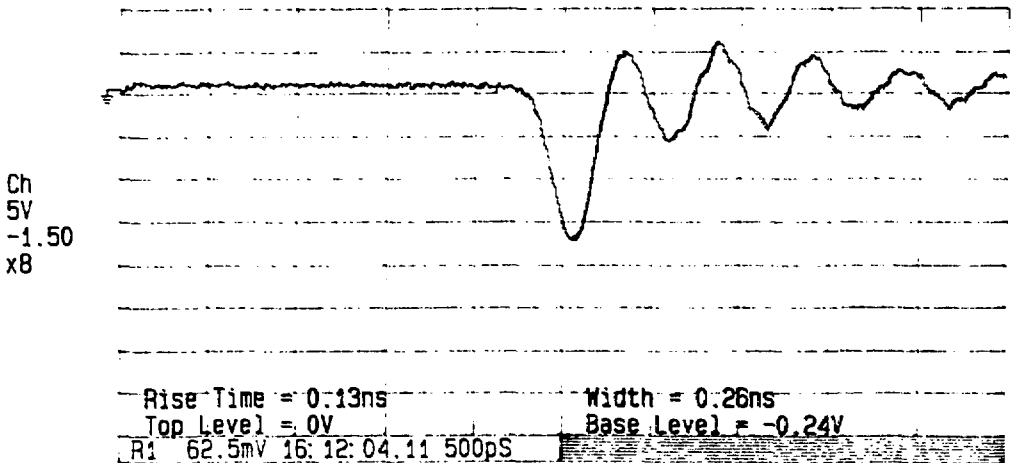


図21 スタブ長を変えたときの電流波形の変化

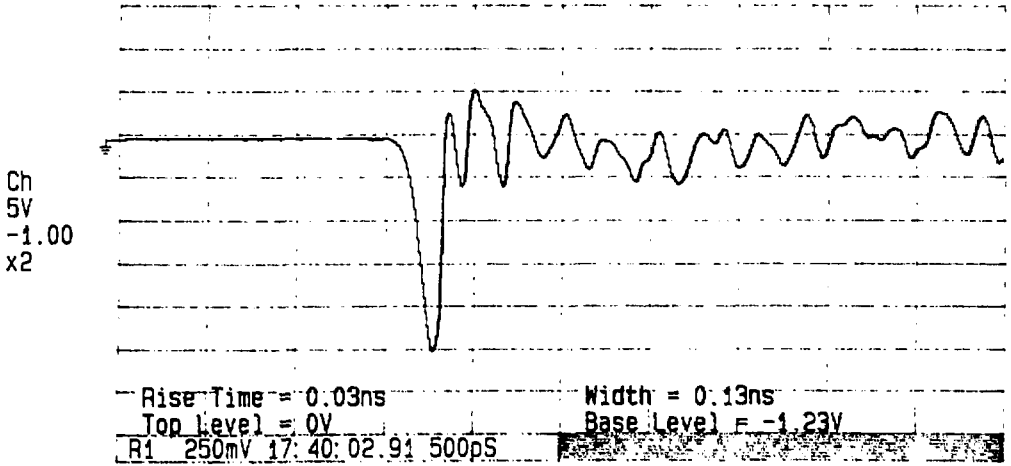
TEK/SCD5000, V81.1, DIG/1.8, DSY/

93-03-10



Intrvl=4.8876ps
 RecLen=1024pt
 TrigDly=240pt

図25 W-Fのシングルパンチトビーム電流波形



Intrvl=4.8876ps
Reclen=1024pt
TrigDly=167pt

図26 高速型(同軸型)ファラデーカップ
のシングルバンドビーム電流波形

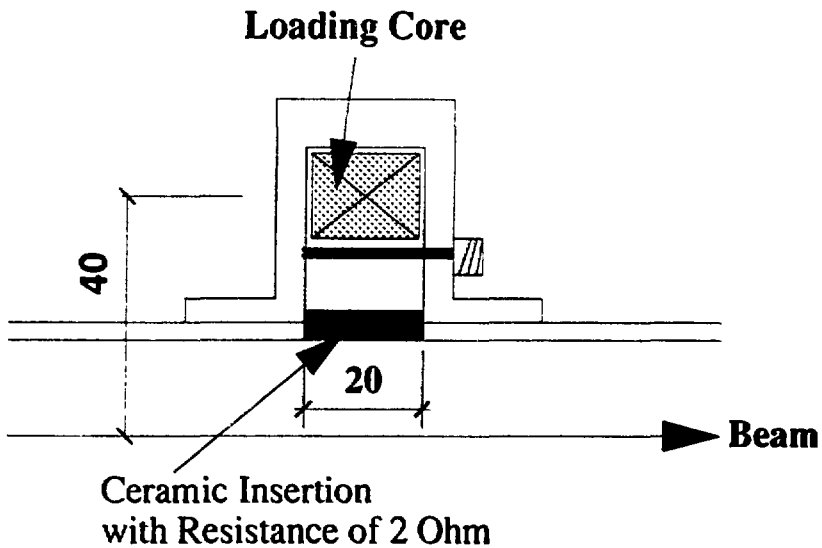


図27 真空容器と抵抗体を共用した壁電流モニター

付録 尖頭電流値計算のプログラム

```

#include <stdio.h>
#include <math.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

/*メインの始まり*/
int main()
{
    static int i,j,jj;
    static double baseline,peakc,okiraku,sekib;
    static double waveform[1024],pc[36];
    char fname[50]="S";
    char addname2[50]="";
    char add2[50]="";
    char fdir1[200]="e:\V";
    char te1[200]="";
    char fname1[200]="";
    char fname2[200]="";
    FILE *fd0; /* file descriptor 0*/
    FILE *fd1; /* file descriptor 1*/

    /*ループの始まり*/
    for(jj=1;jj<37;jj++)
    {
        /*オープン*/
        strcpy(add2,"0");
        if (jj>9) strcpy(add2,"");
        itoa(jj,addname2,10);
        strcpy(fname1,"");
        strcat(fname1,fdir1);
        strcat(fname1,fname);
        strcat(fname1,add2);
        strcat(fname1,addname2);
        strcat(fname1, ".DAT");
        if (NULL==(fd0=fopen(fname1,"rt"))) exit(-1);
        for (i=0;i<8;i++) fscanf(fd0,"%s",te1);
        for (i=0;i<1025;i++) if (EOF==fscanf(fd0,"%lf",&(waveform[i]))) break;
        fclose(fd0);
    }
}

```

```

/*ベースラインの決定*/
    sekib=0.0;
    for(i=0;i<1023;i++)
    {
    for(j=i+1;j<1024;j++)
    {
    if(waveform[i]<waveform[j])
    {
    okiraku=waveform[i];
    waveform[i]=waveform[j];
    waveform[j]=okiraku;
    }
    }
    }
    for(i=0;i<512;i++) sekib+=waveform[i];
    baseline=sekib/512;

/*積分*/
    sekib=0.0;
    for(i=0;i<1024;i++) sekib+=waveform[i]-baseline;
    peakc=sekib/1024.*100/40;
    pc[jj]=peakc;
    printf("%d %f %f\n",jj,baseline,peakc);
}

/*ファイリング*/
    strcat(fname2,fdir1);
    strcat(fname2,"wpeakcur");
    strcat(fname2,".PRM");
    printf("file name2=%s\n",fname2);
    if (NULL==(fd1=fopen(fname2,"wt"))) exit(-1);
    for(j=1;j<37;j++)
    {
    fprintf(fd1,"%d %f\n",j,pc[j]);
    }
    fclose(fd1);
    return (0);
}

```

国際単位系 (SI) と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質	モル	mol
光度	カンテラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱	ジュール	J	N·m
仕事率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クーロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	ファラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光速度	メートル毎秒	lm	cd·sr
照射度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	L, l
トン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

1 eV = 1.60218 × 10⁻¹⁹ J
1 u = 1.66054 × 10⁻²⁷ kg

表4 SIと共に数定的に維持される単位

名称	記号
オンクストロム	Å
ハン	h
バル	bar
ガリ	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

1 Å = 0.1 nm = 10⁻¹⁰ m
1 h = 100 fm = 10⁻¹³ m
1 bar = 0.1 MPa = 10⁵ Pa
1 Gal = 1 cm/s² = 10⁻² m/s²
1 Ci = 3.7 × 10¹⁰ Bq
1 R = 2.58 × 10⁻⁴ C/kg
1 rad = 1 cGy = 10⁻² Gy
1 rem = 1 cSv = 10⁻² Sv

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10 ¹⁸	エクサ	E
10 ¹⁵	ペタ	P
10 ¹²	テラ	T
10 ⁹	ギガ	G
10 ⁶	メガ	M
10 ³	キロ	k
10 ²	ヘクト	h
10 ¹	デカ	da
10 ⁰	センチ	c
10 ⁻¹	ミリ	m
10 ⁻²	マイクロ	μ
10 ⁻³	ナノ	n
10 ⁻⁶	ピコ	p
10 ⁻⁹	フェムト	f
10 ⁻¹⁸	アト	a

(注)

- 表1-5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値による。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは液体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar, barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリに入れている。

換算表

力	N (= 10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
	1	0.101972	0.224809
	9.80665	1	2.20462
	4.44822	0.453592	1

粘度 1 Pa·s (= N·s/m²) = 10 P (ポアズ) (g/(cm·s))

動粘度 1 m²/s = 10⁶ St (ストークス) (cm²/s)

圧	MPa (= 10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg (Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10 1972	9.86923	7.50062 × 10 ⁴	145 038
	0.0980665	1	0.967841	735 559	14 2233
	0.101325	1.03323	1	760	14 6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻⁴	1.31579 × 10 ⁻⁴	1	1.93368 × 10 ⁻⁴
	6.89476 × 10 ⁻⁴	7.03070 × 10 ⁻⁴	6.80460 × 10 ⁻⁴	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J (= 10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal (計量法)	Btu	ft·lbf	eV	1 cal
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁴	0.238849	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸	4.18605 J (熱化学)
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁴	2.34270	9.29487 × 10 ⁻⁴	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁸	4.1855 J (15 °C)
	3.6 × 10 ⁴	3.67098 × 10 ⁴	1	8.59999 × 10 ⁴	3412.13	2.65522 × 10 ⁴	2.24694 × 10 ¹⁶	4.1868 J (国際蒸気表)
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁴	1	3.96759 × 10 ⁻⁴	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁶	仕事率 1 PS (公馬力)
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ¹⁶	75 kgf·m/s
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁴	0.323890	1.28506 × 10 ⁻⁴	1	8.46233 × 10 ¹⁶	735 499 W
	1.60218 × 10 ⁻¹⁹	1.63377 × 10 ⁻²⁰	4.45050 × 10 ⁻²⁴	3.82743 × 10 ⁻²⁰	1.51857 × 10 ⁻²²	1.18171 × 10 ⁻¹⁸	1	

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹
	3.7 × 10 ¹⁰	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58 × 10 ⁻⁴	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1