大電力ナノ秒パルス・テクニック

久 保 田 雄 輔

(名古屋大学プラズマ研究所)

(1985年2月22日 受理)

High Power Nanosecond Pulse Techniques

Yusuke Kubota

(Received February 22, 1985)

Abstract

Some coaxial Marx generators and diagnostics were developed to apply to relativistic electron beam experiments. The key points in the developments are to suppress the inductance and noise of the devices. The key points, fabrications, characteristics, and general descriptions for the devices are described in this paper.

1. 序論

ビーム慣性核融合のドライバーとしてレーザー光, 相対論的電子ビーム (REB), 軽イオンビーム, 重イオンビーム等の方式があるが, それらのほとんどは REB 発生の大電力ナノ秒技術を使っている。又, 新分野の研究として REB を使ったレーザー発振, マイクロ波発生, 集団作用によるイオン加速等の研究も最近行われている。そこで, REB を使った各種の基礎研究が手軽に進められるように, REB 発生用の小型短パルス電子ビーム発生器と, その出力特性を測定する事ができる測定器類を開発・研究して来た。

短パルス電子ビーム発生器は, 小型の装置でも瞬間的に大出力の電子ビームを容易に発生する事が出来る反面, 問題点もいくつかある。その一つは, パルスビーム又は高電圧の発生に伴って強力な電氣的雑音が発生し, 発生器内外の機器特に測定系に対して大きな障害を与える事がある。又, そのような装置に於いては, 僅かなインダクタンスの存在に因っても, 出力電圧・電流波形の立上りや下りが悪くなり, 均一なエネルギーのビームを得ることが難しくなる。そのインダクタンスの存在は測定系にも大きな障害を及ぼす。そこでパルス電子ビーム発生器の開発・研究を次の二つの基本的設計方針で行った。① パルス電子ビーム発生器や測定装置を

表皮深さより十分厚い金属容器で完全に囲い電荷の移動を容器内に限定する、② 短パルス装置内のインダクタンス成分は可能な限り減らし寄生振動の発生原因や、ビーム電流の立上りへの悪い影響を除く。その為装置内部の使用部品に低インダクタンスの物を使用し、かつ部品間隔を出来るだけ短縮する。

第2章では電子ビーム発生器用の短パルス高電圧発生器として開発・研究した同軸型マルクスゼネレーターの構成と特性について、又第3章では電子ビーム発生器の出力特性を観測する為に開発・試作した各種の測定器について一般的記述と共にその構造及び特性について述べる。

2. 同軸型マルクスゼネレーターの開発

2. 1 概要

短パルス電子ビームを発生させる場合、マルクスゼネレーターと電子源の間に波形整形回路 (PFN) を取付け、そのインピーダンスを下げる。しかし、PFN の使用は、伝達エネルギー損失を出す事、装置の構造が複雑になること等から出来る丈避けたい。その為、PFN を使わずに電子源を直接駆動する事が出来る内部インダクタンスが小さい ($< 1 \mu\text{H}$) コンパクトな同軸型マルクスゼネレーターを四種類開発し、REB、イオンビーム、極短パルス高電圧発生の実験に、又ビームガイディング、ビーム加速、測定器の開発・研究等に応用した。

内部インダクタンスを小さくし PFN がなくても電圧・電流の立上りを良くする為に、設計に際しては次の基本方針に従った。① 内部インダクタンスの小さいセラミックコンデンサーを使う、② 部品を徹底的に同軸状に配置する、③ 部品間隔を出来るだけ短縮する、④ 部品のエッジは電界が弱くなるように極力曲率半径を大きくする、⑤ 金属の外部導体で完全に装置をカバーする、⑥ スパークギャップは直線上に配置し、各々のギャップの中心には紫外線が通る事が出来るように小穴を開ける等である。

2. 2 装置の構造

同軸型マルクスゼネレーターの原理的構造は一般的マルクスゼネレーターと同じであり、コンデンサー、スパークギャップ、充電抵抗を同軸的に配置したモジュールを積重ね絶縁棒で締付け固定している。そして、それを金属のパイプでカバーし、気密化されているスパークギャップを除いて絶縁油で満たしている。出力特性を測定する為の負荷抵抗と電圧分圧器や電子源はマルクスゼネレーターの出力部に取付けられる。それらの電気回路は二種類あり単純な単極充電方式は 300 kV、600 kV そして 720 kV のものに採用され、電界強度を低くする為の両極充電方式は 2000 kV のものに採用されている。又、マルクスゼネレーターを始動させる為のトリガー回路として 300 kV と 600 kV のものは簡単な一段式、720 kV と 2000 kV はジッター時間を減少させる為二段式のものを備えている。ジッター時間は最適条件で一段式が 50 ns 以内、二段式では 5 ns 以内であった。

図 2. 1 ~ 2. 4 及び表 2. 1 は同軸マルクスゼネレーターの外観と主要なパラメーターを示している。

図 2. 1 300 kV 同軸マルクスゼネレーターの外観

図 2. 3 720 kV 同軸マルクスゼネレーターの外観

図 2. 2 600 kV 同軸マルクスゼネレーターの外観

図 2. 4 2000 kV 同軸マルクスゼネレーターの外観

表 2. 1 同軸型マルクスゼネレーターの主要なパラメーター

	300 MG	600 MG	720 MG	2000 MG
無負荷最大電圧 (kV)	300	600	720	1980
充電電圧 (kV)	30	60	60	± 60
モジュールの 段数 (段)	10	10	12	17
合成容量 (pF)	1200	800	2200	450
使用コンデン サーの数	60	160	624	990
貯蔵エネルギー (J)	54	144	560	900
寸 法 (cm)	40 φ × 170	27 φ × 150	40 φ × 170	60 φ × 300

2. 3 出力特性測定

同軸マルクスゼネレーターに後で述べる ns 応答の硫酸銅式負荷抵抗及び電圧分圧器を出力部に取付けて出力電圧波形を測定した。図2. 5は同軸マルクスゼネレーターの代表的な出力波形として 720 kV のものを負荷抵抗値を R_0 パラメーターにして示している。

図2. 5 負荷抵抗を変化した場合の 720 kV 同軸マルクスゼネレーター
出力電圧波形

又，図2. 6に比較の為に4種類の同軸マルクスゼネレーターの出力電圧波形を示す。これから分るように出力電圧波形は 720 kV と 600 kV のものは矩形に近い波形であるが，300 kV と 2000 kV の場合は高周波のリップルが重複した振動減衰波形である。短パルス電子ビーム源用の電圧波形としては前者のほうが均一エネルギーの電子ビームを発生する事が出来るという点で適している。このように出力波形がマルクスゼネレーターの種類により異なる原因は次節で説明される。

図 2. 6 同軸マルクスゼネレーターの種類による出力電圧波形の違い

2. 4 同軸マルクスゼネレータの出力電圧波形解析

負荷抵抗 R_0 を接続した場合に於けるは同軸マルクスゼネレーターの等価回路は、一般のマルクスゼネレーターと異なって主コンデンサーの容量が小さい割に浮遊容量が大きく、かつインダクタンスが小さいので図 2. 7 のように複雑になる。

図 2. 7 同軸マルクスゼネレーター等価回路

ここで C_c , R_c , L_c , C_s は一段のコンデンサー容量, 抵抗, インダクタンス, そしてモジュールと外部導体との間の浮遊容量。又, R_g , L_g , C_g は各タスパークギャップ間の抵抗, インダクタンス, 浮遊容量。そして, L_o , R_o は負荷回路のインダクタンスと抵抗である。発生電圧 V_o はこの等価回路から得られる連立微分方程式をコンピューターによるルンゲ・クッタ法で計算して求めた。図 2. 8～9 はコンピューターにより求めた浮遊容量 C_s 及び C_g をパラメーターにした出力電圧波形である。

図2. 8 浮遊容量 C_s をパラメーターとした 720 kV 同軸マルクスゼネレーターの電圧波形

図2. 9 浮遊容量 C_g をパラメーターとした 720 kV 同軸マルクスゼネレーターの電圧波形

これらの結果より波形として望ましい矩形状に近い出力電圧波形を得る為にはモジュールと外部導体との間に存在する浮遊容量は大きく、スパークギャップ間に存在する浮遊容量は小さいほど良いことが分った。

2. 5 同軸マルクスゼネレーターについての考察

同軸マルクスゼネレーターを使うと小型で手軽な REB 装置を得る事が出来るので、今までに国内外で20台以上製作され、パルスビーム関連の基礎研究に使用されてきたが、問題点も指摘されているので次にそれを示す。

① セラミックコンデンサーを使用しているので貯蔵エネルギーの大きな同軸マルクスゼネレーターは製作しにくい。これは低出力インピーダンスのものを得る事が難しい事を意味する、② セラミックコンデンサーが定格電圧付近でパンクする事があるが、これはコンデンサーの接続方法に問題があると考えられる、③ 同軸マルクスゼネレーターは浮遊容量が大きいのに主コンデンサーの容量が大きくないので部品配置の仕方により出力電圧波形が大きく影響される等である。

3. 短パルス測定器の開発・研究

3. 1 概要

短パルス電子ビーム発生器を開発・研究する場合、測定系の果たす役割は非常に大きい。それは測定器の出来具合により装置の性能や特性が大きく影響されてしまうからである。又、測定器は開発あるいは製作することが出来ても、その較正が正しく行われなければ、やはり装置から正しい情報を得ることは出来ない。このように正確で信頼のおける測定器の開発・研究は短パルス電子ビーム発生器を開発する場合極めて重要な事である。しかし、いざ測定器の開発や試作を行なうとなると数多くの難しい事が待ち受けている。短パルス領域に於いて共通の問題であるが、測定器にとって内部に存在するインダクタンスはほとんどの場合有害で、測定器のパルス応答性を悪くさせ、寄生振動の原因となる。その為測定器を製作する場合も電子ビーム発生器の場合と同じ低インダクタンスの部品を使い、それを出来るだけ同軸的に配置する配慮が必要である。又、金属のカバーにより静電遮蔽を十分行ない測定器の出力波形上に外部からの雑音が混入しないようにする。この電氣的雑音の抑制に関しては測定器ばかりでなく、同軸ケーブル等の信号伝送系やシンクロスコープ (CRT) 等の観測系についても同様な配慮が必要である。

この章では短パルス電子ビーム発生器の開発・研究に関して必要とされる測定系について一般的な記述をすると共に開発及び試作した測定器について述べる。

3. 2 測定系の一般論及び開発・研究した測定器

短パルス電子ビーム発生器の特性を測定したり、動作状況を観測する測定系には大きく分けて 1) 電圧分圧器、2) ビーム電流測定器、3) ビームエネルギー測定器、4) 信号伝送系及び観測系等がある。

3. 2. 1 電圧分圧器

急峻波である短パルス高電圧を測定する為に使われる電圧分圧器はその種類により次の三種類に分けられる。

a) 容量分圧器 この分圧器は図 3. 1 に示される単純な等価回路で示す如くキャパシタンス C_1 と C_2 の直列回路よりなり、その原理的な分圧比 R_d は次式で表わされる。 $R_d = C_1 / (C_1 + C_2)$ (3. 1)

図 3. 1 容量分圧器の単純化された等価回路

C_1 : 高圧測の容量

C_2 : 低圧測の容量

しかし、実際の容量分圧器の分圧比、及び特性は接続線のインダクタンス、キャパシタの浮遊容量、インダクタンス、漏れ抵抗、観測装置の入力抵抗等の大小により影響を受ける。又、この分圧器は高周波や短パルス領域の電圧を測定する為のもので、被測定波形が低周波やロングパルスになるに従い測定精度は悪くなる。

この分圧器の分圧比は一般に大きな値 (1/1000 ~ 1/10000) で、分圧器内の電力消費がほとんど無いなどの利点があるが、逆に分圧比が大き過ぎ、その較正が難しいという難点がある。その形式の容量分圧器の例を図 3. 2 a) 及び b) に示す。

図3. 2 短パルス電子ビーム発生器の高電圧測定
に使われる容量分圧器の概略図

図3. 3 短パルス電子ビーム発生器の高電
圧測定に使われる容量分圧器の等
価回路 C_1 : 高圧測の容量, C_2 :
低圧測の容量, R_1 : 補正抵抗,
 R_2 : シンクロスコープの終端抵抗
(50 Ω), V_1 : 被測定電圧, V_2 :
分圧器の出力電圧

共に C_1 の容量として内部導体と外部導体の一部に取付けた挿入電極とで形成する容量を使っている。しかし、 C_2 の容量として a) の場合は外部導体と挿入電極とで形成する容量を使っているのに対し、b) の場合は外部から持込んだ容量を使っている。後者の場合の方が C_2 が大容量になるが、貫通コンデンサ等の内部インダクタンスが非常に小さいものを使わないと分圧信号の S/N が悪くなる。この種の容量分圧器の等価回路を図3. 3に示す。この回路から分圧比 R_d を求めると

$$R_d = V_2 / V_1 = R_2 \cdot C_1 \cdot \exp(-t/K) / K \quad (3.2)$$

ここで $K = (R_1 + R_2) \times (C_1 + C_2)$ である。被測定パルス幅を τ とした時 $\tau \ll (R_1 + R_2) \times (C_1 + C_2)$ であれば、3. 2式は次式のように簡単化される。

$$R_d = R_2 \cdot C_1 / \{ (R_1 + R_2) \times (C_1 + C_2) \} \quad (3.3)$$

図3. 4 抵抗式電圧分圧器の等価回路
 R_1 : 高圧測抵抗, R_2 : 低圧測抵抗,
 R_3 : 終端抵抗 (50 Ω)

抵抗分圧器の等価回路は図3. 4に示される。ここで R_1 , R_2 , R_3 は各々分圧器の高圧側、低圧側の抵抗及び CRT の終端抵抗 (50 Ω) である。この回路に於いて分圧比 R_d は次式の如く表わす事が出来る。

$$R_d = R_2 \cdot R_3 / (R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3) \quad (3.4)$$

この種の分圧器は原理的に定常から短パルスに至る高範囲な電圧領域で使うことが出来る。しかし、抵抗値として高い値を使う場合は分圧器内や周辺に存在する浮遊容量に影響されて応答性が悪くなり、低い値を使うと応答性は良くなるが分圧器内の電力消費が大きくなる。

抵抗値の比を変えることにより、分圧比は原理的にはいくらかでも大きくする事が出来るが、高周波や短パルス領域では浮遊容量により分圧比が変化して正しい分圧は得られない。この分圧器は大きく分けて固体抵抗を使うものと液体抵抗を使うものがある。

① 固体式分圧器 固定抵抗を使うものには抵抗体として、グラファイトの粉末をエポキシ樹脂と練り合せて加工成形したソリッド抵抗と、金属の薄膜を使った金属被膜抵抗、それにマンガニン線を巻いたものがある。短パルス用としては前二つが内部インダクタンスが小さい点で使われる。しかし、ソリッド抵抗はマンガニン線のものに比較して、温度変化に対する抵抗値の変化が大きく、かつ電圧依存性を有する。更に、過電流、過電圧に弱い欠点がある。

実際に分圧器を構成する場合、抵圧側の抵抗 R_2 はいくつかの抵抗を使って同軸形に配置し、その部分に於けるインダクタンスを極力小さくする事が重要である。その部分に大きなインダクタンスが存在すると、電圧の立上り部や垂下部など急激に電流が変化する場所で大振幅の高周波振動分が重複する。

② 液体式分圧器 分圧器の抵抗体として主に硫酸銅 ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) やチオ硫酸ナトリウム ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) の水溶液が使われる。この分圧器の構造は絶縁体パイプの両端に高压及び抵圧用の金属の電極を取付け、そのパイプの中に抵抗体の溶液を入れる。その分圧出力は抵圧側の電極に取付けてある小さい第三電極により取出している。

この分圧器の特徴は出力信号に雑音が入り難くてパルス応答性が良い点である。更に、過電圧、過電流に対しても固体抵抗器に比較して格段に強い。しかし、高い抵抗値のものが得にくい、分圧比を余り高くする事が出来ない、抵抗値の経年変化が大きい等の難点もある。

又、パルスでも大電力を分圧器に消費させると水溶液が膨張する為、その分を吸収出来る構造にしないと分圧器が破裂する事がある。この分圧器の分圧比は特殊のものを除いて $1/50 \sim 1/1000$ と余り大きくなく、次段にも二次分圧器を必要とする。この種の分圧器では 1MV 以上のパルス電圧を油中や真空中で測定する事が出来るものも作られている。図 3. 5 は筆者が開発した電圧分圧器と負荷抵抗である。共に硫酸銅溶液を抵抗体として利用していて、 500 kV 程度の出力電圧測定にも応用出来る。

図 3. 5 硫酸銅式電圧分圧器と円盤型負荷抵抗の断面図

A) 外部導体, B) 硫酸銅溶液, C) 絶縁体, D) 絶縁油, E) 分圧出力

図3.6 硫酸銅分圧器のパルス応答波形

図3.7 分圧器の抵抗値 R を変化させた場合に於ける立ち上がり時間 Tr 図3.8 分圧器の抵抗 R を変化させた場合に於ける分圧比 Rd

③ 容量抵抗分圧器 抵抗と容量の並列回路からなり、抵抗分圧器の浮遊容量の影響を補償するために、抵抗に並列に比較的小さい（しかし、浮遊容量よりは大きい）値のコンデンサーを接続したものと、容量分圧器の漏れ抵抗を補償するためコンデンサーに並列に高抵抗を接続したものがある。

この分圧器の特徴は周波数応答性が良いこと、純抵抗式の分圧器に比較すると抵抗値を大きくする事が出来、分圧器内での電力消費を小さくするのに役立つ。

これまでに述べた短パルス電圧測定用分圧器の特徴を表3.1に示す。

第3.1 短パルス電圧測定用分圧器の特徴

分圧器の種類	特徴	
	長所	短所
容量分圧器	- 電力消費がない - 分圧比が大きいため二次分圧器を必要としない - 構造が簡単で小形である	- 雑音が入りやすい - 低インダクタンスのコンデンサーが必要 - 分圧比が大きいため較正が難しい
抵抗分圧器	固体式 - 構造が簡単 - 直流から短パルスまで測定可能	- 大電圧電流に対して抵抗が変わる - 雑音が入り易い - 応答性が余り良くない
	液体式 - 耐電圧、電流特性が優れている - パルス応答性が良い - 雑音の混入が少ない	- 構造が複雑である - 低周波では電気分解の為測定不可 - 抵抗値が経年変化する
抵抗・容量分圧器	- 測定周波数範囲が広い - 抵抗値を大きく出来る	構造がやや複雑

3. 2. 2 電子ビーム電流測定器

ビームの電流値及び波形を測定する為に a) ファラデーカップ, b) ピックアップコイル, c) ログスキーコイル等が使われる。しかし, 原理的に確立されている電流測定器も実際に短パルス電子ビームの電流測定に応用する場合それは非常に難しい。それは高電圧, 大電流, そして短パルスという非常に厳しい条件下で使用するため電磁遮蔽が十分でないと電気的な雑音が信号に混入するからである。それゆえ実際に測定を満足に行なえるような測定器にするには, かなりの手直しや注意深い取付けが必要になる事が多く, 確立されている測定器とはいえ開発的要素の大きいものである。

a) ファラデーカップ

ファラデーカップは図3. 9に示すように電子ビームが流れている場所に置き, そのビームを集め抵抗 R_s を通して流す。その抵抗に生ずる電圧降下 V_o を測定する事により, ビーム電流 I_e を測定する方法であって, ビームを他の目的の為に使う必要がある時は使用出来ない。又, 出力信号を装置から浮かして取出す事が出来ないという点もある。ビームコレクターに電子ビームが当たった時, その面より二次電子が放出されるが, その電子の放出確率は入射電子ビームのエネルギー E_e により変化する。放出される電子ビームのエネルギーはほとんど100 eV以下であるが, 二次電子を抑制しないと正しい電子ビーム電流を測定する事が出来ない。そこで, ビームコレクターには二次電子放出確率の小さいカーボン等を材質として使う。電子ビームが流れた時, 電圧降下を生じさせる抵抗 R_s としては金属被膜抵抗や抵抗率が大きい金属(ステンレスやチタン)被膜が使われる。しかし, 金属被膜抵抗を使う場合は出来るだけ内部インダクタンスが小さくなるように多数の抵抗に分け, それを同軸的に配置する必要がある。

筆者はステンレスの0.1 mmのシートを抵抗体として使った内部インダクタンスが極めて小さく, 2 nsの応答性能を持つファラデーカップを開発・試作した。このファラデーカップの断面図は図3. 10に示す。ビームコレクターはビームが当たった時二次電子が出な

図3. 9 電子ビーム電流測定用ファラデーカップの概略図 A) ビームコレクター, B) 二次電子抑制グリッド, C) バイアス用直流電源

図3. 10 電子ビーム電流測定用ファラデーカップ

- A) ICF フランジ (114 mm ϕ),
- B) ステンレス製容器,
- C) ステンレス箱 (100 μ m),
- D) カーボン製ビームコレクター,
- E) 絶縁用ポリエチレンシート,
- F) 信号出力用同軸コネクタ

いように円錐形の穴を有するカーボンで作られていて、その一端は抵抗体であるステンレスの円筒に接続されている。そのカーボンとステンレスの円筒との隙間はインダクタンスを小さくするために極めて狭くされていて ($< 0.1 \text{ mm}$)、その絶縁は 0.05 mm 厚さのマイラーシートで行っている。この抵抗体の抵抗値は約 $12 \text{ m}\Omega$ で、その両端に生ずる信号電圧は真空気密型の同軸コネクタで外部に取り出される。

このファラデーカップの応答性を測定したのが図3. 11である。ここで、上側はファラデーカップに流すパルス電流波形、そして下側は出力信号波形である。この波形よりこのファラデーカップのパルス応答時間は 2 ns 以下と考えられる。この他、ビーム電流の径方向の密度分布を測定する為に図3. 12に示す小型のファラデーカップを多数マトリックス状に配置した測定器も開発・試作した。

図3. 11 ファラデー・カップのパルス応答 上側の波形：印加したパルス電圧波形 ($H: 5 \text{ ns/div}$, $V: 5 \text{ V/div}$), 下側の波形：ファラデー・カップの出力波形 ($H: 5 \text{ ns/div}$, $V: 5 \text{ mV/div}$)

図3. 12 電子ビームの径方向密度分布測定用マルチファラデーカップ A) $185 \text{ mm } \phi$ 真空フランジ, B) 溶接ベロー, C) 軸方向移動用送りネジ, D) 出力信号用同軸コネクタ, E) ビームコレクター, F) 10 mm ボルト

b) ピックアップコイル ピックアップコイルは図3. 13に示すように電流 I_e の電子ビームが流れる時に発生する磁束 ϕ の時間的変化 $d\phi/dt$ を磁力線に直向するように置かれたコイルで検出し、それを積分してビーム電流波形として観測するものである。この測定器の原理的な等価回路は図3. 14に示す。

図3. 13 ピックアップコイルの概略図
 I_e : 電子ビーム電流, ϕ : 磁束

図3. 14 ピックアップコイルの原理的な等価回路
L: ピックアップコイル検出部のインダクタンス, R) 積分器の抵抗, C) 積分器の容量

ここで, L は検出部のインダクタンス, R 及び C は積分用の抵抗と容量である。検出部コイルの抵抗は積分器の抵抗 R と比較して無視出来るので省略する。この回路中を流れる電流 i についての方程式は次に示される。

$$d\phi/dt = L \cdot di/dt + R \cdot i + (\int i dt)/C \quad (3.5)$$

ここで, ω を磁束 ϕ の最高の周波数成分とする時 $R \gg L \cdot \omega$ そして $t \ll R \cdot C$ とすると, このピックアップコイルの出力電圧 V は次のようになる。

$$V = \int_0^t i dt / C = \phi(t) / (R \cdot C) \quad (3.6)$$

しかるに μ_0 を真空中の透磁率, n 及び A を検出コイルの巻数, 断面積, そして r をビーム電流の中心とコイルの中心の路離とする時, 次式が成立つ。

$$V = \mu_0 \cdot n \cdot A \cdot I_e(t) / (2r \cdot \pi \cdot R \cdot C) \quad (3.7)$$

しかし, この式は電子ビームが軸対称に流れている場合にのみ有効である。又, 実際の測定に際しては CRT の入力抵抗が入るので上式を補正するか使用条件を付ける必要がある。又, ピックアップ・コイルの設置の仕方では感度かなり変化するので電流感度は計算値からではなく, 較正によって求める必要がある。

このピックアップコイルの特徴は構造が簡単で, 手軽にビーム電流の測定に使用することが出来る事, ファラデーカップと異なって電子ビームに影響を与えずに測定する事が出来る点である。しかし, 精度良くビーム電流を測定することが難しい事が難点である。図 3. 15 は内部インダクタンスを出来るだけ小さくするため積分用コンデンサーとして貫通コンデンサーを使い,

それを金属の細いパイプの中に入れて積分器を構成したものを出す。ピックアップコイルは密度分布が必ずしも一定になるとは限らない電子ビームの定量測定には適さず, 定性的な測定やタイミング測定に主に使う。

c) ログスキーコイル

ログスキーコイルは前に述べたピックアップコイルと同じく, 電子ビームが流れる事により発する磁束 ϕ の変化 $d\phi/dt$ をコイルで検出し, それを積分器で積分する事により電子ビーム電流 I_e を測定するものである。しかし, ピックアップコイルと異なってコイルが電子ビームの外側を取巻き, 電子ビームの位置及び電流分布が変化しても電流感度が変わらない。積分器には内部積分方式と外部積分方式があるが, 内部積分方式を使えば MA に至るビーム電流も測定する事が可能である。しかし, 原理的には易しい測定器であるがこれを製作し, 満足な測定が行なえるようにする事は大変難しい。図 3. 16 に内部積分型の原理的等価回路を示す。

図 3. 15 ピックアップコイルの積分器の製作例
A) 入力信号用同軸コネクタ (BNC-RB2), B) 真鍮の外部導体, C) 半田付け用の穴, D) 金属被膜抵抗, E) 貫通コンデンサー, F) 出力信号用同軸コネクタ (BNC-RB2)

図 3. 16 内部積分型ログスキーコイルの等価回路
 L : コイルのインダクタンス分, r : コイルの抵抗分, R : 積分抵抗

ここで、 L 及び r はログスキーコイル検出部のインダクタンス及び抵抗、そして R は積分器の抵抗である。

この場合 $R + r \ll \omega \cdot L$ とすると、この回路の電流 i に関する式が成立つ。

$$d\phi / dt = L \cdot di / dt. \quad (3.8)$$

$$\text{故に } i = \phi / L = (\mu_0 \cdot n \cdot A \cdot I_e / S) / (\mu_0 \cdot n^2 \cdot S) = I_e / n \quad (3.9)$$

ここで、 n 、 A 、 S は各々ログスキーコイルの巻数、断面積、そして平均周長である。故に、測定器の出力電圧は V は次式で表わされる。

$$V = R \cdot i = R \cdot I_e / n \quad (3.10)$$

しかし、実際問題として積分抵抗 R にインダクタンス L_s があると、振幅が $L_s \cdot di / dt$ なる大きな振動分が測定信号上に重複するので、インダクタンスが小さくなるステンレスやチタンの箔を使った同軸構造の抵抗を使う必要がある。又、パルス的大電流が流れる側で測定する場合、静電遮蔽も十分行わないと信号上に雑音が重複してしまう。この静電遮蔽を施す場合コイルの θ 方向に生ずる起電力 $d\phi / dt$ を打ち消さないよう遮蔽にスリットを入れる必要がある。その他、大電流の電子ビームを測定する時ログスキーコイルの出力電圧が部品の耐圧以上になり、絶縁破壊を起こす場合があるので適切な抵抗を選ぶ必要がある。図 3.17 に短パルス電子ビーム電流の測定に使われるログスキー・コイルの一例を示す。

図 3.17 実際の内部積分型ログスキーコイルの構造例 A) コイル, B) 同軸型抵抗, C) 絶縁チューブ, D) 静電遮蔽用電極

3.2.3 ビームエネルギー測定器

エネルギーアナライザーには a) 磁場偏向式, b) アルミ板透過法, c) 飛行時間測定法 (TOF), d) 減速電位法, e) 静電偏向法 (127 度) がある。しかし、REB のビームエネルギーを測定するのに c) ~ e) の方法はエネルギー範囲の点で適当でない。そこで、a) と b) の方法についてのみ述べる。

a) 磁場偏向式ビームエネルギー・アナライザー

このアナライザーは最も一般的に使われるエネルギーアナライザーであって、高エネルギーのものでは GeV に至る電子ビームのエネルギーを測定する事が出来る。

電子の速度, 質量及び回転半径を v, m, r とすると次式が成立つ。

$$m \cdot v^2 / r = e \cdot v \cdot B \quad (3.11)$$

ここで電子のエネルギーを V とすると次式が得られる。

$$r = \sqrt{(2m \cdot V / e)} / B \quad (3.12)$$

この式が磁場偏向式エネルギー・アナライザーの基本的な式である。このアナライザーの偏向角度としては $30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$, そして 180° がビームが収束する点で一般的に使われる。又, ビームのエネルギー分布を同時に測定する事が出来るように沢山のファラデーカップを直線上に配列し, 電子的なスイッチを使いそれらのファラデーカップの信号を同時にシンクープ上に表示する方式もある。

b) アルミ板透過法によるエネルギーアナライザー

この方法は原理的にも構造的にも簡単なエネルギー・アナライザーであるが, 測定精度が余り良くない事と, アルミ板の厚さを適当に選ばなければならない点があるので, 余り定量的な測定には使われず, エネルギーの目安を得るために使われる程度である。

アルミ中の電子の実用飛程 $R (\text{g} / \text{cm}^2)$ は電子の持つエネルギーの値 $E_e (\text{MeV})$ により変化し, 次の式によって得られる。

$E_e > 0.8 \text{ MeV}$ の時

$$R = 0.54 E_e - 0.133 \quad (3.13)$$

$0.8 > E_e > 0.15 \text{ MeV}$ の時

$$R = 0.407 E_e^{1.38} \quad (3.14)$$

これらの式を使って電子ビームのエネルギーを求める。

このアルミ板の厚さをロータリー式に交換する事によりビームのエネルギー分布を測定する事が出来るようにした測定器もある。図 3. 18 は筆者が試作したロータリー式エネルギーアナライザーである。厚さが $0.1 \text{ mm} \sim 3.35 \text{ mm}$ までの異なった 10 種類のアルミ板をステンレスの厚い円盤に取付けて, 外部から回転型導入端子を使って交換出来るようにしている。これにより計算上では $0 \sim 2 \text{ MeV}$ のエネルギーを有する電子ビームのエネルギーを測定する事が出来る。

3. 2. 4 信号伝送系及び観測系

短パルスの電圧や電流を測定する場合, 雑音対策は極めて重要な点である。その雑音対策で重要であると考えられるポイントとして ① 同軸ケーブル等信号伝送系, ② CRT のような観測系, そして ③ 雑音除去の為の遮蔽系が考えられるので, 次にそれらについて記述する。

① 信号伝送系 短パルスの信号を伝送する手段として現在同軸ケーブルと光ファイバーがある。後者は導電性がないので雑音を観測系に持込まないという利点があり, 最近トリガー信号の伝送に使われ始めている。しかし, 短パルス信号用の直線性の良い電気・光変換器が未だ無いことや, X 線によりファイバーが発光する

図3-18 アルミ板交換式（ロータリー式）エネルギーアナライザ A) ファラデーカップ, B) 235 mm ϕ 真空フランジ, C) エネルギー分析用アルミ板, D) ポート番号読取り用窓, E) アルミ板交換用回転導入端子, F) 電子ビーム導入管, G) ポート番号

可能性が有る事から、波形測定用としては未だほとんど使われていない。ほとんどが同軸ケーブルを使って信号を伝送している。しかし、同軸ケーブルも色々な種類がありどれが最適であるかは一概には言えない。

しかし、短パルスの信号の伝送に於いては雑音の混入が極めて大きな問題であるから、それを防ぐ為には同軸ケーブルの外部導体が銅やアルミのチューブで出来ている AF ケーブルやマイクロケーブルが適切である。

これらのケーブルは従来主に使われていた外部導体が銅の編線から出来ているものに比較すると対雑音性がかなり優れている。しかし、余り可撓性が良くないので取扱いに注意する必要がある。この面では従来の方の方が優れている。

② 観測系 同軸ケーブルを伝送して来る短パルスの信号は、CRT（又はトランジェントレコーダー）により観測される。最近では、周波数帯域が 1 GHz でサブナノ秒の立ち上がり時間を持つものや、信号をデジタル化して記憶装置に記録し、任意の時間に再生する事も出来るものも現れていて、短パルスの測定は非常に行ない易くなっている。しかし、反面昔の真空管を使用したもの（Tektronix 519 等）に比較して現在の半導体化された CRT は過電圧入力に弱く、雑音を拾い易いので取扱いには十分気を付ける必要がある。短パルスの信号を扱う CRT の周波数帯域としては 200 MHz（立ち上がり時間は約 1.8 ns）以上が必要である。この帯域の CRT の入力抵抗は大体 50Ω となっていて終端抵抗を付加しなくても、同軸ケーブルの特性インピーダンスと整合するようになっている。しかし、積分器の出力を入力する場合は入力抵抗が 1 M Ω のものを使う必要がある。

③ 雑音の遮蔽系 短パルス電子ビーム発生器に於いて、高電圧短パルスが発生すると一般に測定系の電位はアースに対し大幅に変動し、雑音が測定信号波形に混入する原因となる。これを防ぐにはいくつかの雑音除

去対策を施さねばならないが、それは大きく次の三つに分けられる。それは雑音からの遮蔽、雑音経路の遮断、そして雑音源からの路離の確保である。

これに従って構成した測定系の例を図3. 19に示す。ここで C_1 、 C_2 、 C_3 は各々大地と電子ビーム発生器、シールドルーム、そして CRT 電源との間に存在する浮遊容量である。又、 C_4 は絶縁トランスの一次・二次間に存在する浮遊容量である。

図3. 19 測定信号中に雑音が混入しないようにするための測定系全体の構成

A) 短パルス電子ビーム加速器, B) 測定器, C) シンクロ스코ープ,
D) シールドルーム, E) 絶縁トランス, F) 同軸ケーブル, G) 同軸
ケーブル用シールド管, H) 地面（アース点）

電子ビーム発生器の動作時に発生する雑音が同軸ケーブルや CRT に進入しないよう、それらの回りを銅あるいは鉄等でカバーする。それによりその電位は電子ビーム発生器の外部導体の電位と同じになる。この状態の時 C_2 又は C_3 と C_4 の合成容量が大きいと、シールドケースや CRT を通って雑音電流が流れ、測定信号中に雑音が混入する。その為、 C_2 及び C_4 の値は小さくする必要がある（ C_3 が大きい為）。最近このため雑音カット変圧器等の名称で結合容量（ C_4 ）が小さい（ $< 10 \text{ pF}$ ）絶縁トランスも市販されている。

後 記

大電力ナノ秒パルスの研究は装置におけるインダクタンスと雑音の抑制への戦いと言っても過言ではない。故に、本内容はそれらの点に特に重点を置いた記述となっている。しかし、筆者は最近この分野の研究より離れているので記述が適切でない箇所もあるかもしれない。それらの点は御容赦下さい。