

2MV コッククロフト形直流高压発生装置

The 2 MV Cockcroft D. C. High-Voltage Generator

森 山 昌 和*
Masakazu Moriyama

内 容 梗 概

大電流コッククロフトは、耐圧試験用のみならず粒子加速器としても今後主要な地位を占めるものである。このほどケーブル耐圧試験用として2MVコッククロフトを日立電線株式会社日高工場に納入したが、本器はセレン整流器を使用したコッククロフトとして記録的高圧大電流器である。

本器は500V電源を使用、2MV、30mAの大出力を有し、セレン整流器、抵抗器もすべて窒素ガス封入の密封形として劣化防止に万全を期し、信頼性十分な構造とした。現地組立後、特殊な水抵抗を使用して各種性能試験を実施したが、電圧変動率、脈動率あるいはコロナ防止の問題など、いずれも優秀な成績を取ることができた。

1. 緒 言

直流高電圧発生装置は、各種の耐圧試験用あるいは粒子加速器など、各方面に多くの用途を有しており、これに応じて、高電圧電源としても種々の方式が採用されているが、数MV程度で大電流を得るには、コッククロフト形が有利であり、今後耐圧試験用のみならず、工業的規模における粒子加速器としても主要な地位を占めるものと予想される。

このほど日立製作所において、実用器として有利なセレン整流器方式による記録的高圧大電流器である2MVコッククロフトを製作し、ケーブル耐圧試験用として日立電線株式会社日高工場に納入したので、工業的大形コッククロフトの代表例として、以下その概要を述べる。

2. コッククロフト形直流高压発生装置

2.1 発展の経過

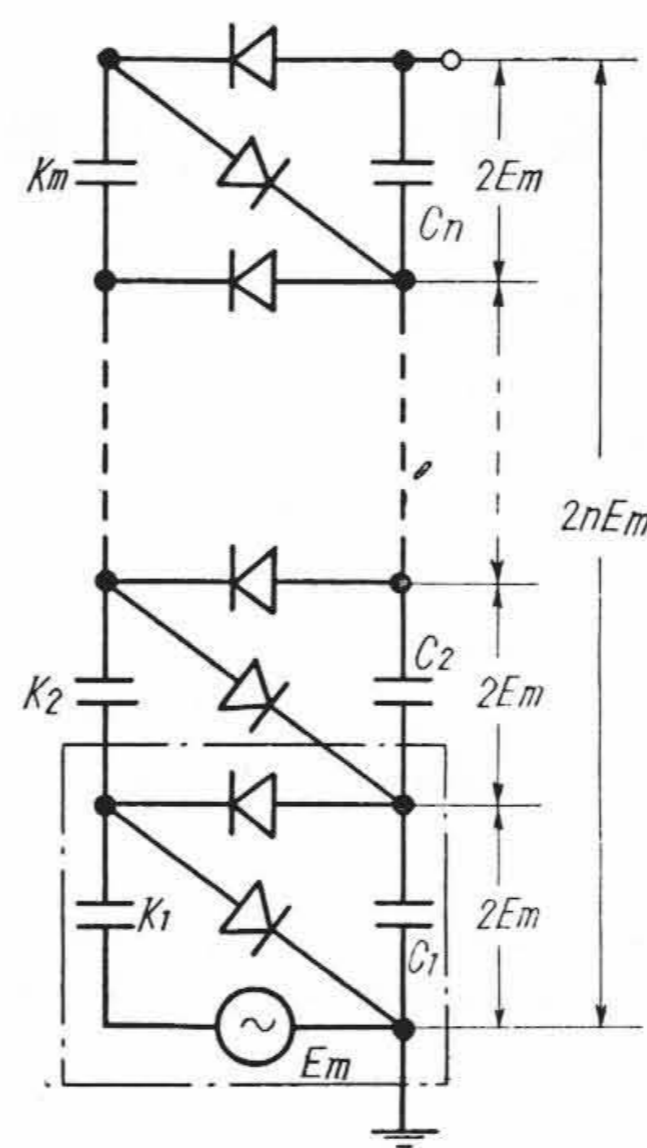
この方式は、すでに1930年にコッククロフトおよびウォルトン両氏により発表されたが、当時は主としてイオン加速用の電源として利用された。すなわち両氏は1932年この方式により400~600kVの高圧を得、プロトンを加速してリチュームに於て、はじめて人工加速粒子による原子核破壊に成功した⁽¹⁾。

その後、イオン加速のみならず、高エネルギーX線発生装置あるいは耐圧試験用電源として多くの用途が開発され、漸次高圧大電流のものが製作されるようになり、現在では、本報告に述べるような2MV、30mAに達する大形器も使用されるようになった。特に近年放射線化学の急速な進歩によって、大電流の電子線照射用の電源として、あるいは大線量の中性子源として、その価値があらためて高く評価されるようになったことは注目すべきことである。

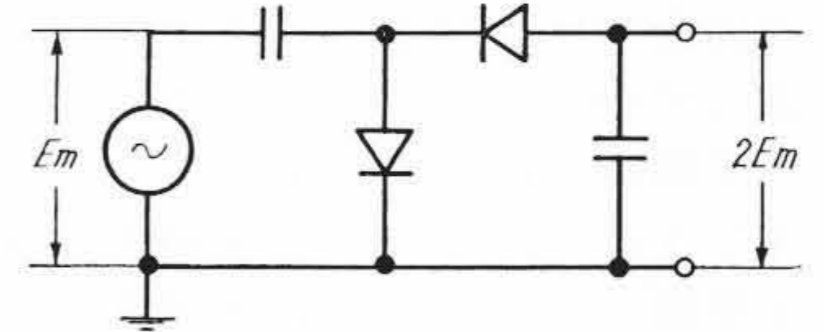
2.2 原 理

この方式における高電圧発生の原理については、巷間多くの解説書がみられるので⁽²⁾、ここにあらためて詳細な説明をつけ加えることはさけるが、本方式は、通常の倍電圧整流回路を多数段積重ねたものと考えるのが最も理解するに容易であろう。

第1図はコッククロフト形高圧発生装置の基本回路、第2図は普通に用いられる倍電圧整流回路である。この両回路の比較、特に第1図中鎖線で囲んだ部分と第2図とをみれば、まったく同一の回路方式であることが明らかである。したがって同様な倍電圧整流回路をさらに多数つけ加えれば、同回路一組当り $2E_m$ (E_m は電源変圧器高压側に誘起する電圧の波高値) ずつの直流電圧が、コンデンサ



第1図
コッククロフト基本回路



第2図 倍電圧整流回路

C_n の組の端子間に得られ、最終段 C_n と大地間には、 $2nE_m$ の直流電圧が得られる(n はコンデンサの段数)。この場合、コンデンサ K 側には、常に波高値 E_m の脈流が重畳する。

2.3 電圧変動率および脈動率

この回路における電圧変動率、脈動率は、使用する整流器の順方向電圧降下とコンデンサ容量および電源周波数によって定まるが、コンデンサによるものは次式によって算出することができる。

$$\text{電圧変動率} = \frac{I}{E f} \sum_{1}^n \left(\frac{n^2}{K_n} + \frac{2n^2 - 2n + 1}{2C_n} \right) \dots\dots (1)$$

$$\text{電圧脈動率} = \frac{I}{2E f} \sum_{1}^n \frac{n}{C_n} \dots\dots (2)$$

ここに E : 直流出力電圧

I : 直流出力電流

f : 電源周波数

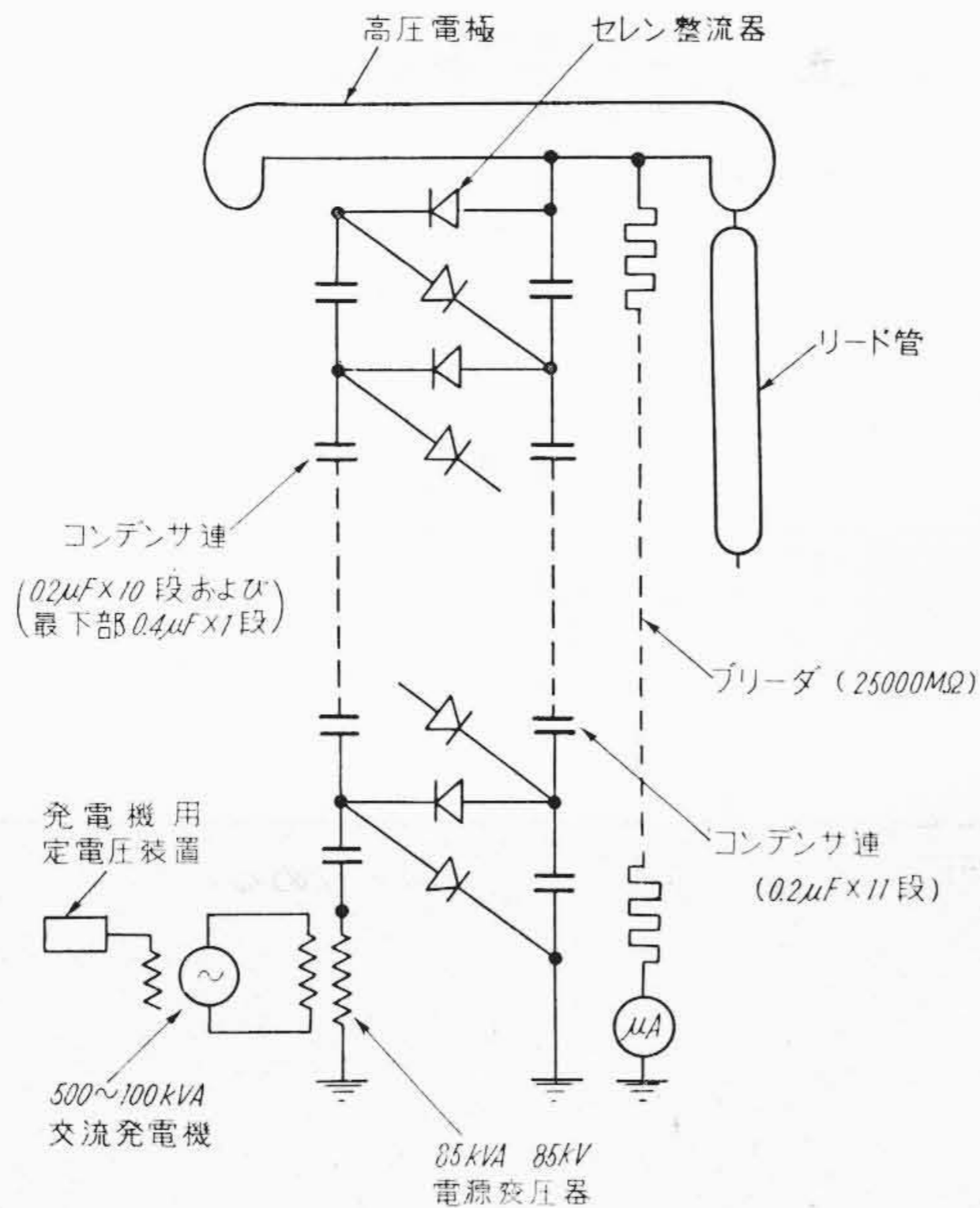
K_n, C_n : コンデンサ容量 (接続位置は第1図のとおり)

n : コンデンサ段数

上式から明らかなように、コンデンサ容量および電源周波数を増加すれば、電圧変動および脈動ともに小さくすることができるが、それぞれの数値の選択に当たっては、使用整流器の周波数特性を考慮に入れた上、経済性などを十分勘案してバランスのとれた値を決定する必要がある。

整流器順方向電圧降下は、通常の整流回路と同様に考えればよいが、コッククロフトにおいては、負荷、コンデンサ容量、周波数によって通流期間が大幅に変化し、一般にかなり鋭い尖頭波電流となるので波高値が大きく、したがって電圧降下の波高値も相当な値となることに留意せねばならない。

* 日立製作所国分工場



第3図 2MVコッククロフト概略結線図

3. 2MV コッククロフトの仕様および構造

3.1 仕様

本2MV器は、先に述べたようにケーブル耐圧試験用であるため高圧端子引出を必要とするので、2MVとゆう高電圧であるにもかかわらず大気圧形とした。主要仕様は下記のとおりである。

定格電圧	2MV
定格電流	30mA
電圧脈動率	0.04%/mA
電圧変動率	0.8%/mA
電源周波数	500~
整流器	セレン整流器
コンデンサ段数	11段

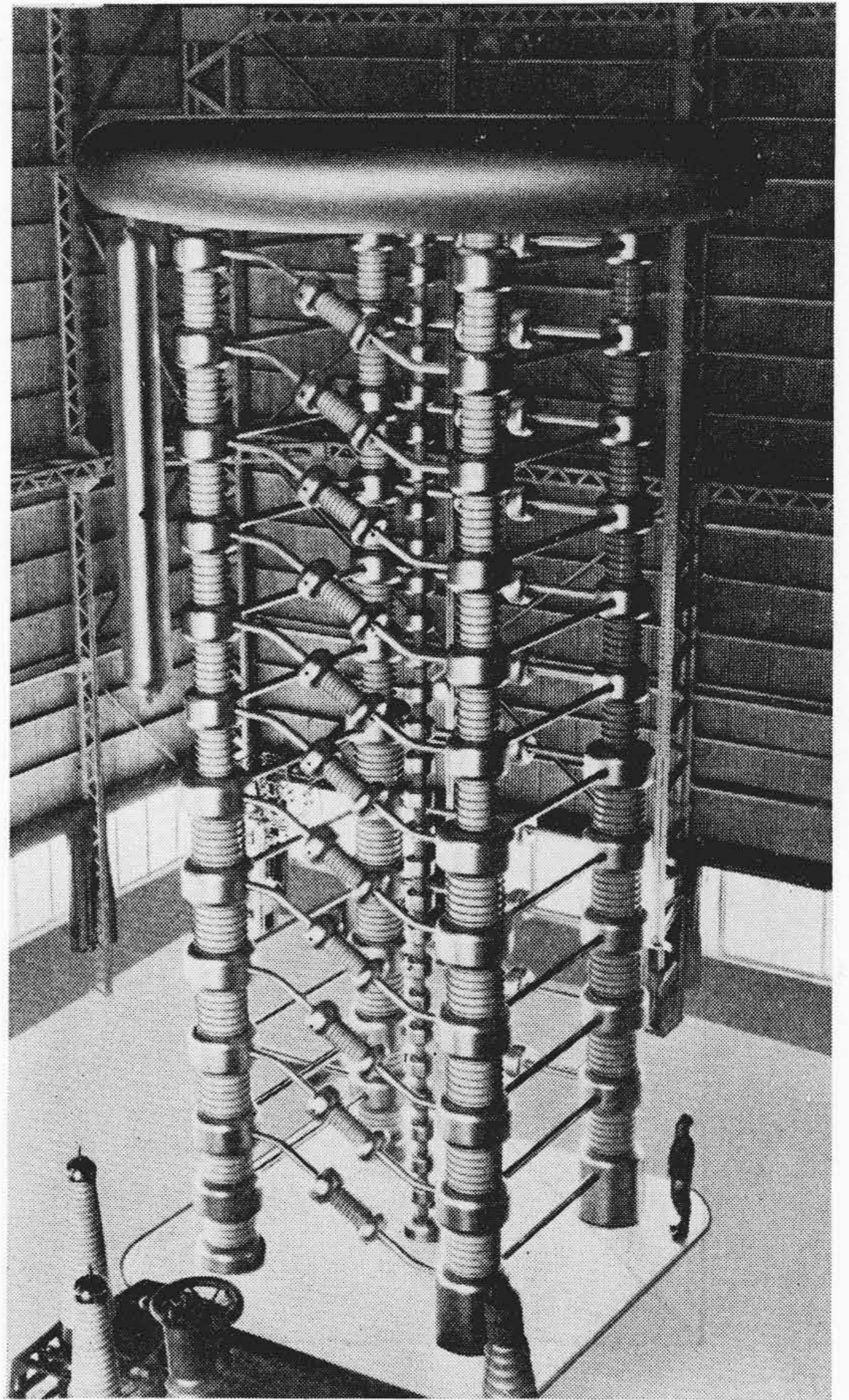
なお、将来加速管そのほかを追加して照射用電子加速を行うことを考慮し、電圧極性は負極性とした。上記性能を満足せしめるのに商用周波数電源を使用すれば、著しく大きなコンデンサを必要とし不利であるため、500~電動発電機を使用している。第3図に全体の概略結線図を示す。

3.2 構造

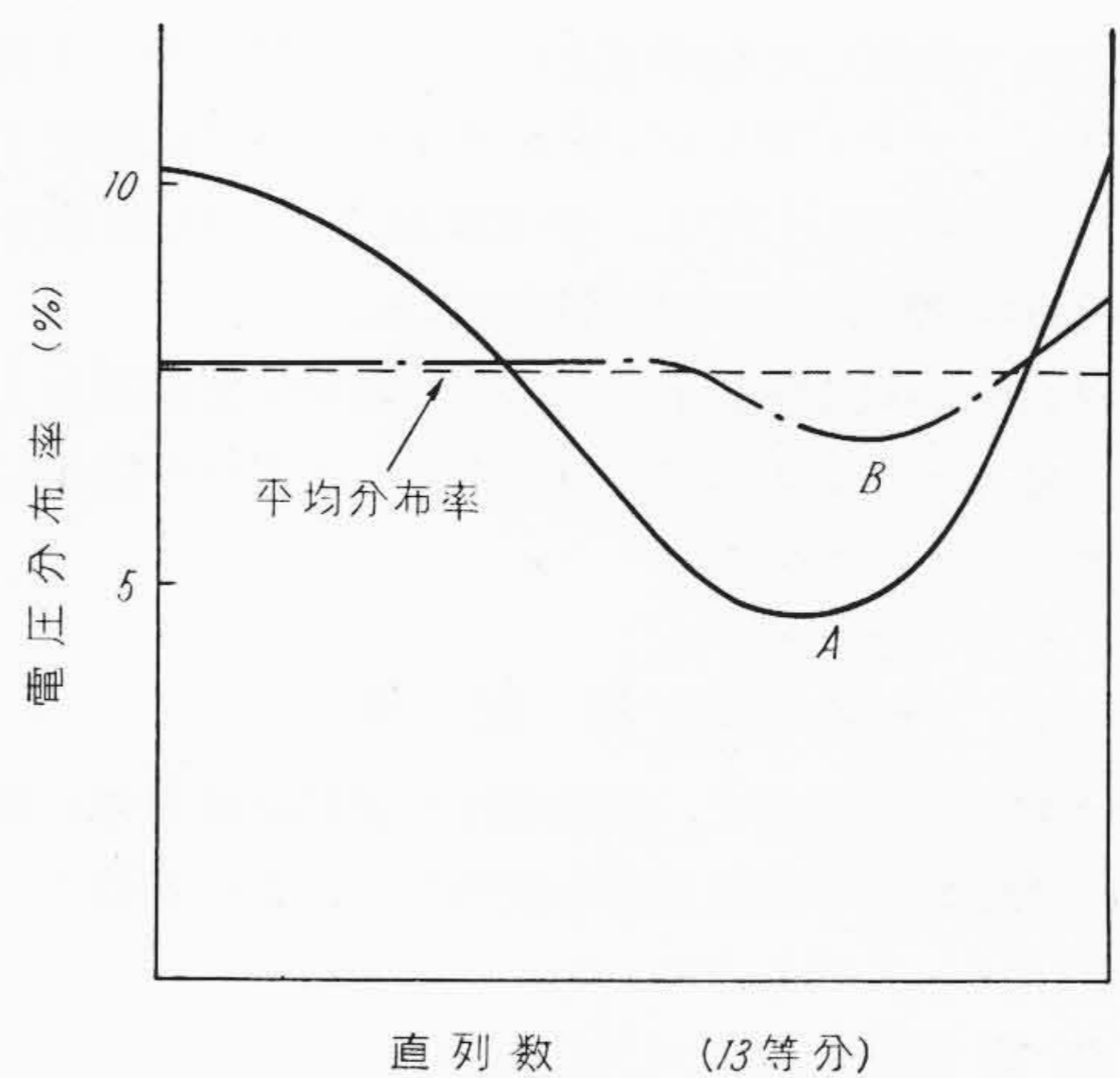
第4図に外観を示したが、コンデンサを収納したがい管4本を支柱として利用し、各段にセレン整流器を取りつけ、最上部にはコロナ防止用シールドおよびリード管、支柱内には電圧測定用高抵抗器が設置されている。

コロナシールドは、直径7,500mmφ、高さ1,000mmの円板状、リード管は、直径560mmφ、長さ5,700mmの円筒状でかなり大形であり、しかも地上14mの高所に設置するので、いずれもアルミ材を使用し、軽量かつ強固な構造とした。重量はそれぞれ1,500kgおよび75kgである。なおリード管は垂直位置からほぼ水平な位置まで任意に角度を変化せしめることができる。

セレン整流器は、ケノトロンと異なりフィラメント加熱用絶縁変圧器が不要なほか、サージ過電圧に対して強いという高電圧整流器として非常にすぐれた長所を有しているが、整流体の構造いかんによつては、電圧分布率が両端で大きくなり⁽³⁾危険であるから、製作に当たってその電圧分布に十分注意しなければならない。第5図は2MV器に使用するために試作した整流体2種の電圧分布測定結果で、BはAに対してかなり均圧されている。2MV器にはこのB形



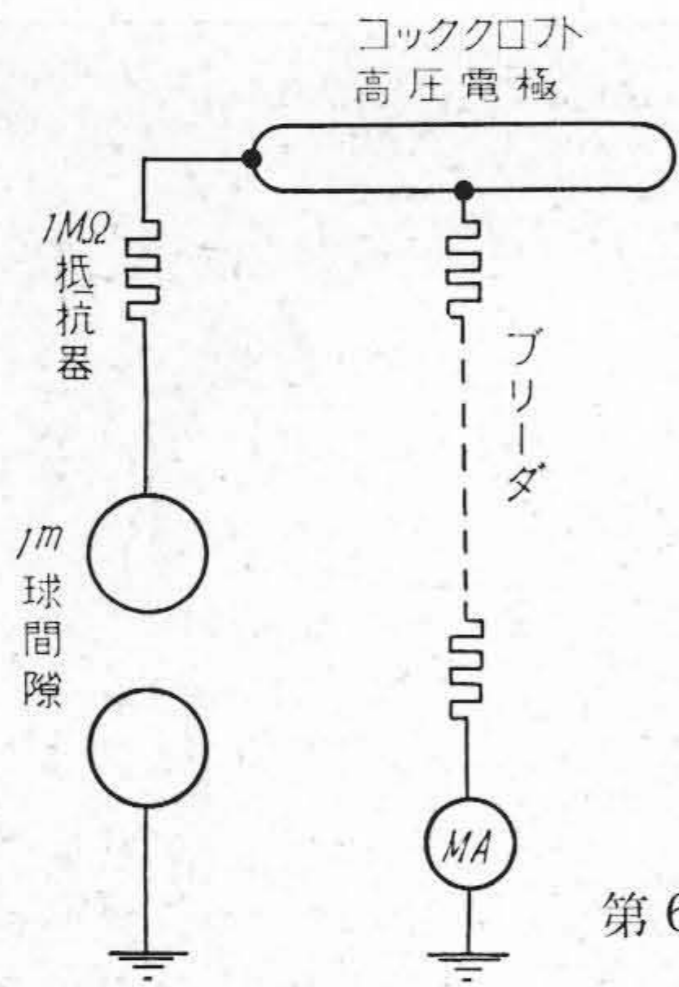
第4図 2MVコッククロフト外観図



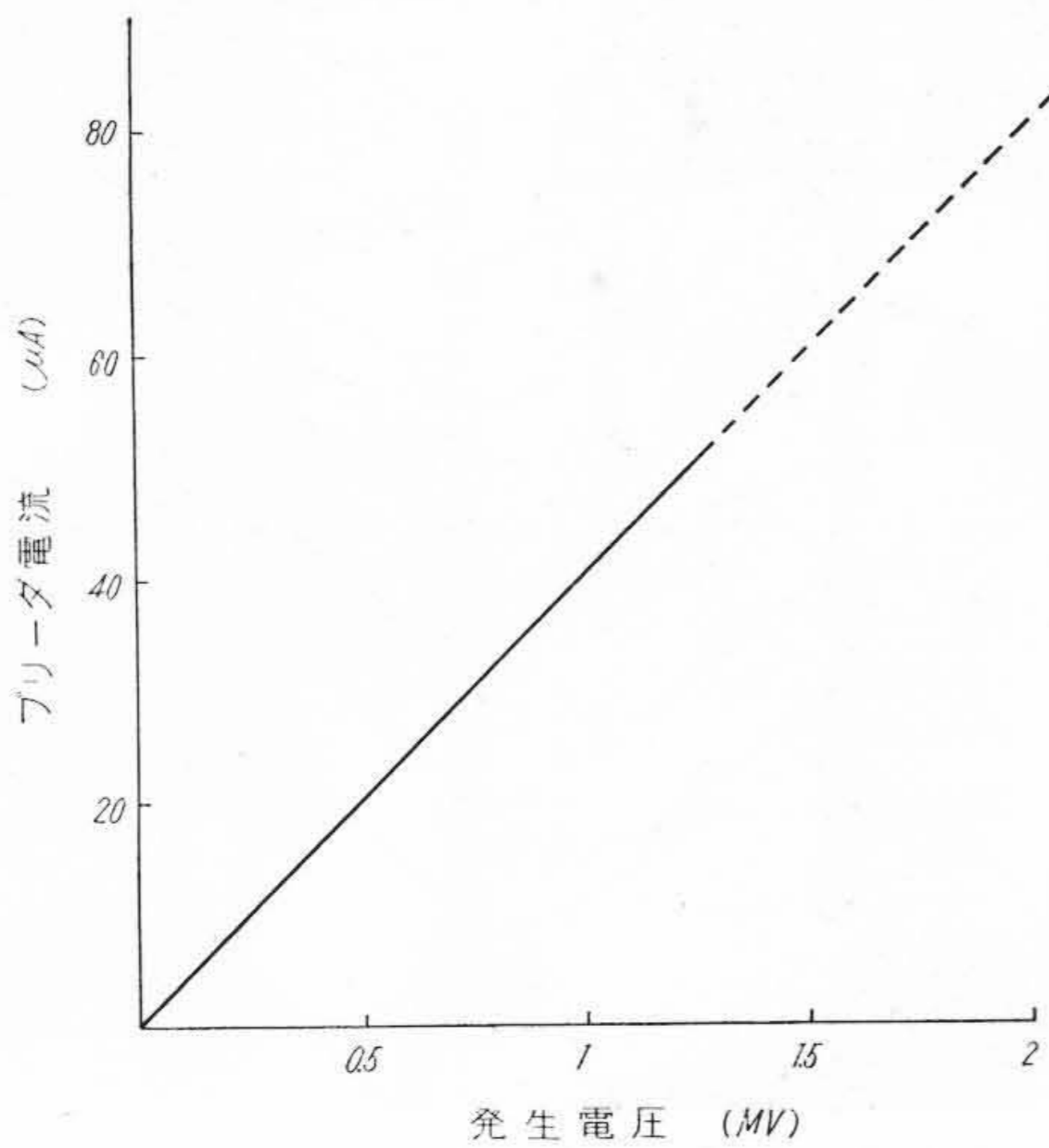
第5図 セレン整流体電圧分布

を使用しているもので、長年月きわめて安定な運転が期待できる。

電圧測定法としては、一般に高抵抗器（以下ブリーダと記す）を高電圧電極と大地間に設置し、これに流れる電流値を電圧値に較正して使用する。このブリーダを、コンデンサ支柱の内部に設置すれば、全体がコンパクトにまとまり、据付け面積を小さくすることができる。このような構造は、直流発生電圧の測定にはなんら差つかえないが、測定回路に、本体充電電流の交流分により誘導電流を生ずるので、脈動率の測定には不適當であり、この誘導分を除去するようブリーダをシールドすることは、各部に高電圧が印加されるので非常に困難である。しかしながら、実際の運転に当たっては、直流発生電圧のみを常時測定すれば十分であり、脈動率は、設置当初に



第6図 電圧校正試験回路



第7図 発生電圧とブリーダ電流の関係

一度適当な方法で測定しておけばよいので、2 MV器では構造上の有利性を重視し、ブリーダをコンデンサ支柱の中央に設置する方式を採用した。ブリーダとしては、約800 MΩの抵抗30個を直列にし、全抵抗25,000 MΩとして使用している。

コンデンサはもちろん密封形であるが、セレン整流器およびブリーダもすべて窒素ガス封入の油浸密封形として劣化を防止し、信頼性十分な構造とした。

4. 試験結果

試験はまず無負荷において、発生電圧や脈動率測定系の校正などを行い、ついで実際に水抵抗負荷を使用して、電圧脈動率、変動率を測定した。

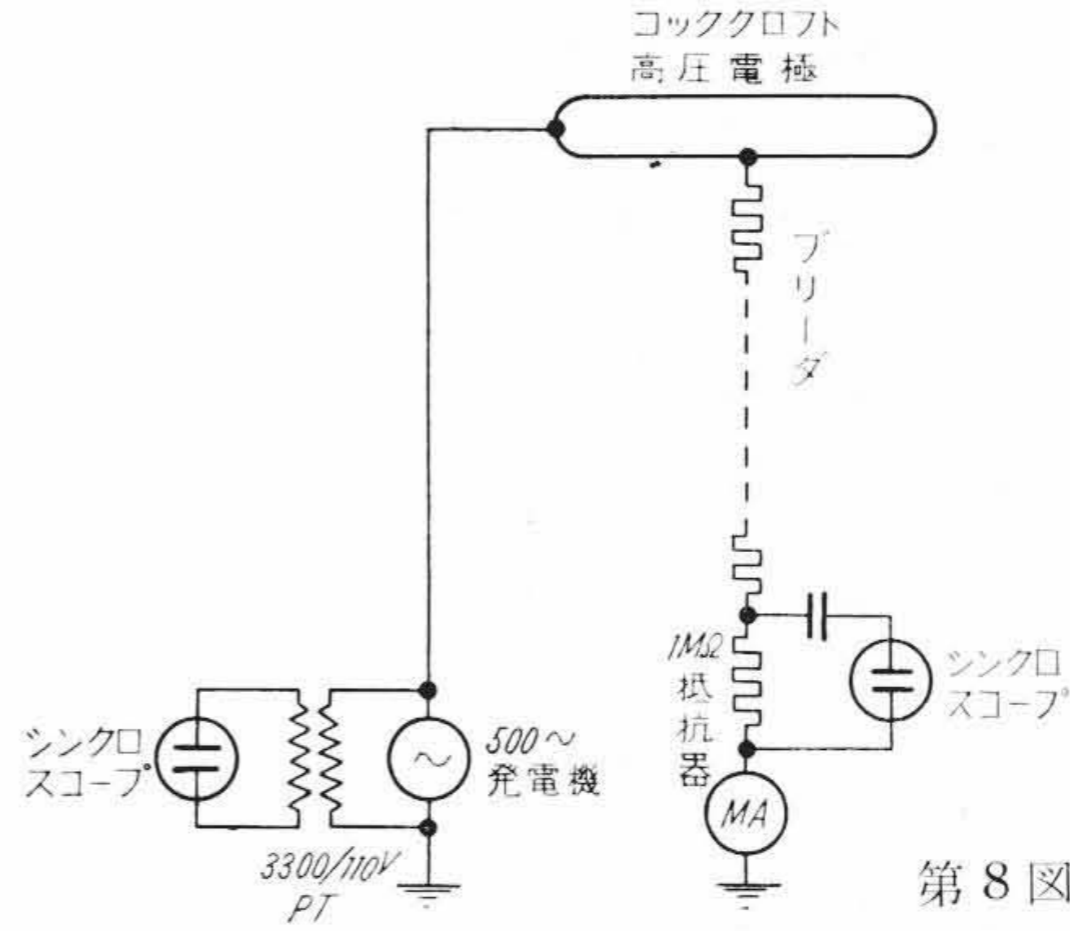
4.1 無負荷試験

4.1.1 発生電圧測定とブリーダの校正

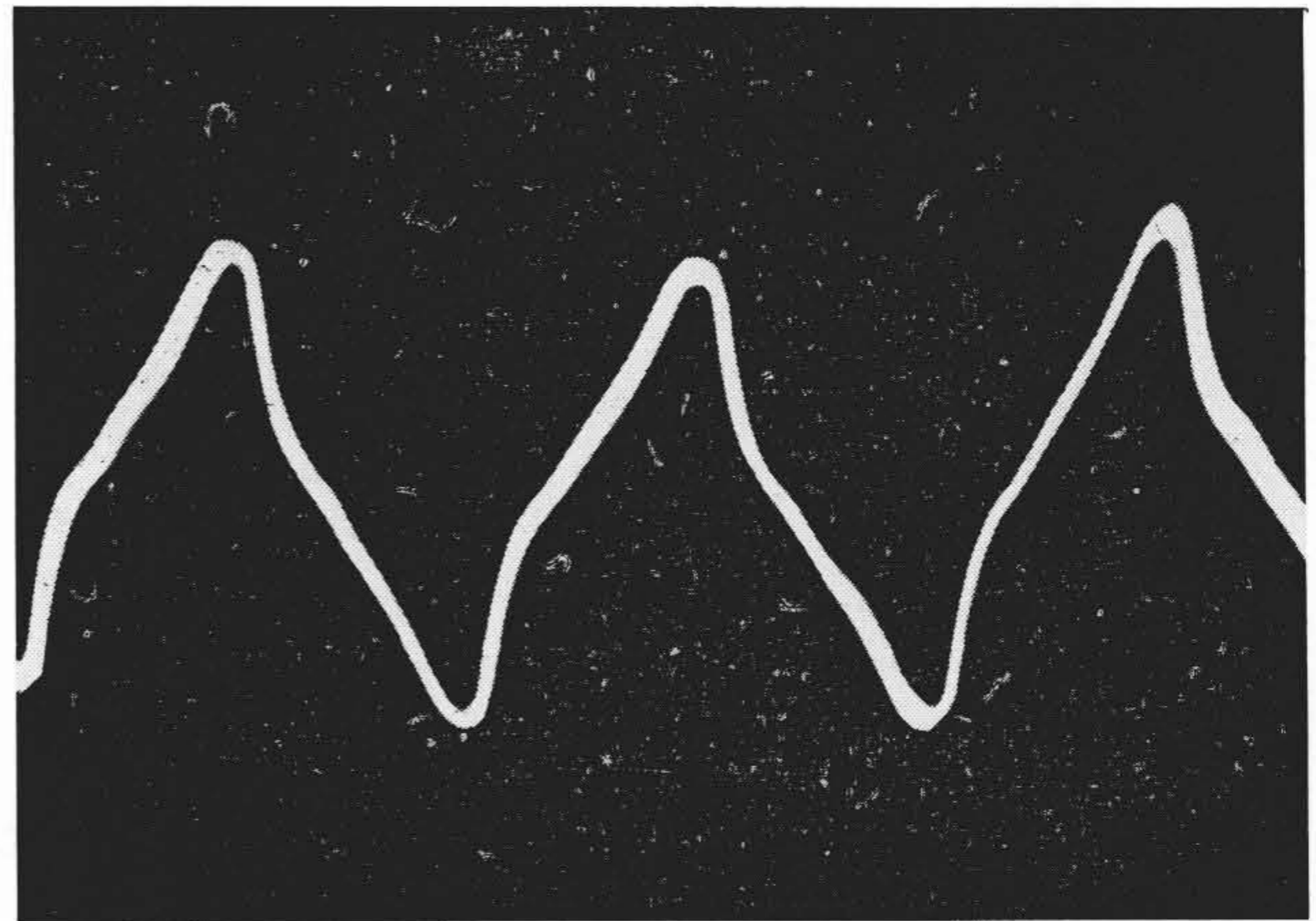
第6図に示す結線により、1 m球間隙を用いてブリーダ電流を直流発生電圧に校正し、以後この電流により発生電圧を測定することとした。第7図はその結果を示しているが、1.3 MVまで9点測定し直線性を確認したので1.3 MV以上では、これを延長して測定することとした。無負荷試験においては、仮にリード管を懸垂がい子で支持したが、この懸垂がい子に若干の可視コロナが認められたほかは本体にはなんらコロナ放電は認められなかった。

4.1.2 電圧脈動率の測定

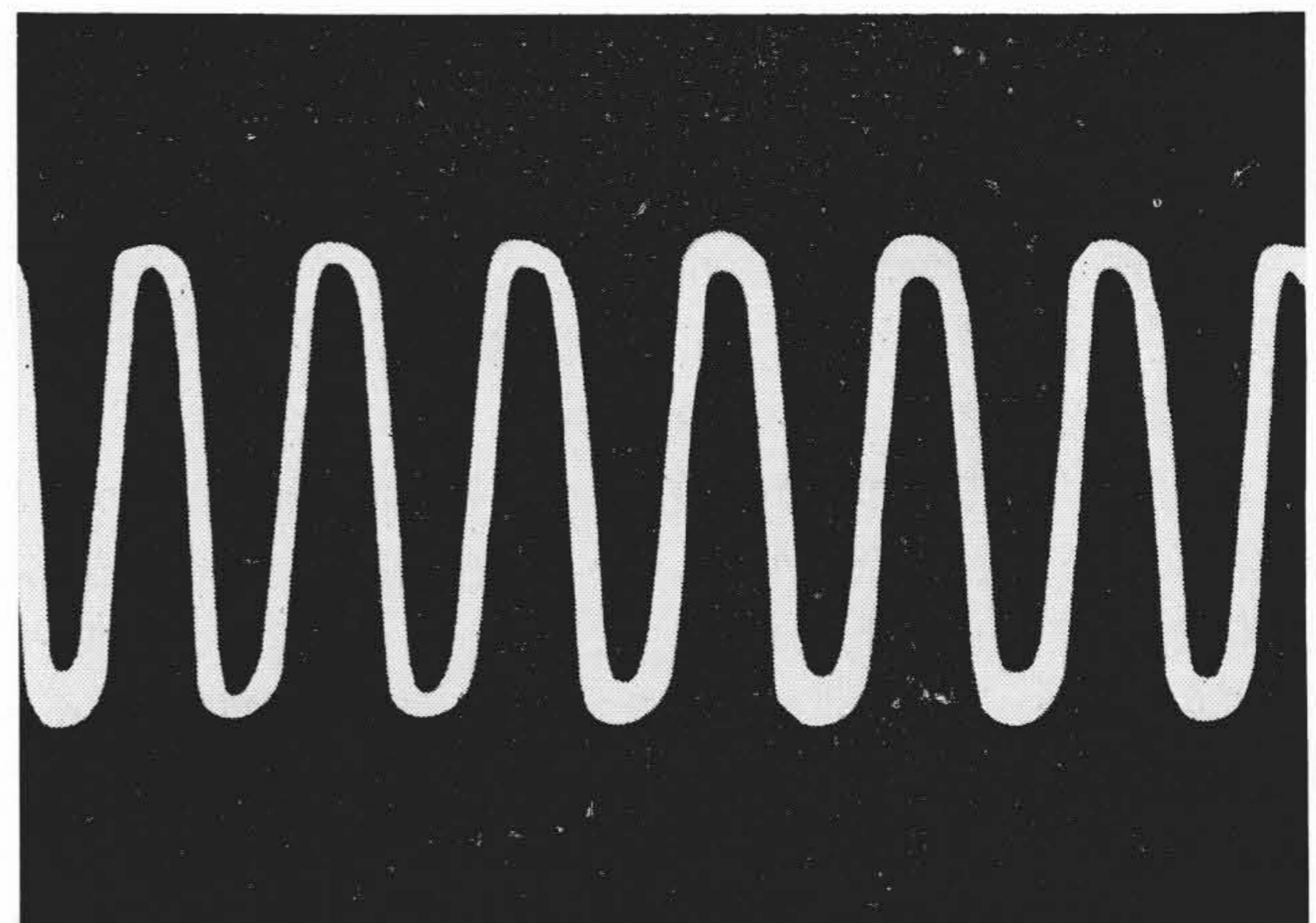
本体組込のブリーダは、前章に述べたように誘導電流の影響を受けるので、電圧脈動率の測定には不適當である。このため、測定の際のみ本体の外部に別個のブリーダを設置し、この接地側に1 MΩの抵抗をそう入し、その端子電圧から高圧電極の脈動率を測定することとした。なお同時に本体組込みの正規のブリーダ



第8図 脈動減衰比測定回路



第9図 脈動電圧波形（無負荷時）



第10図 500V発電機出力電圧波形

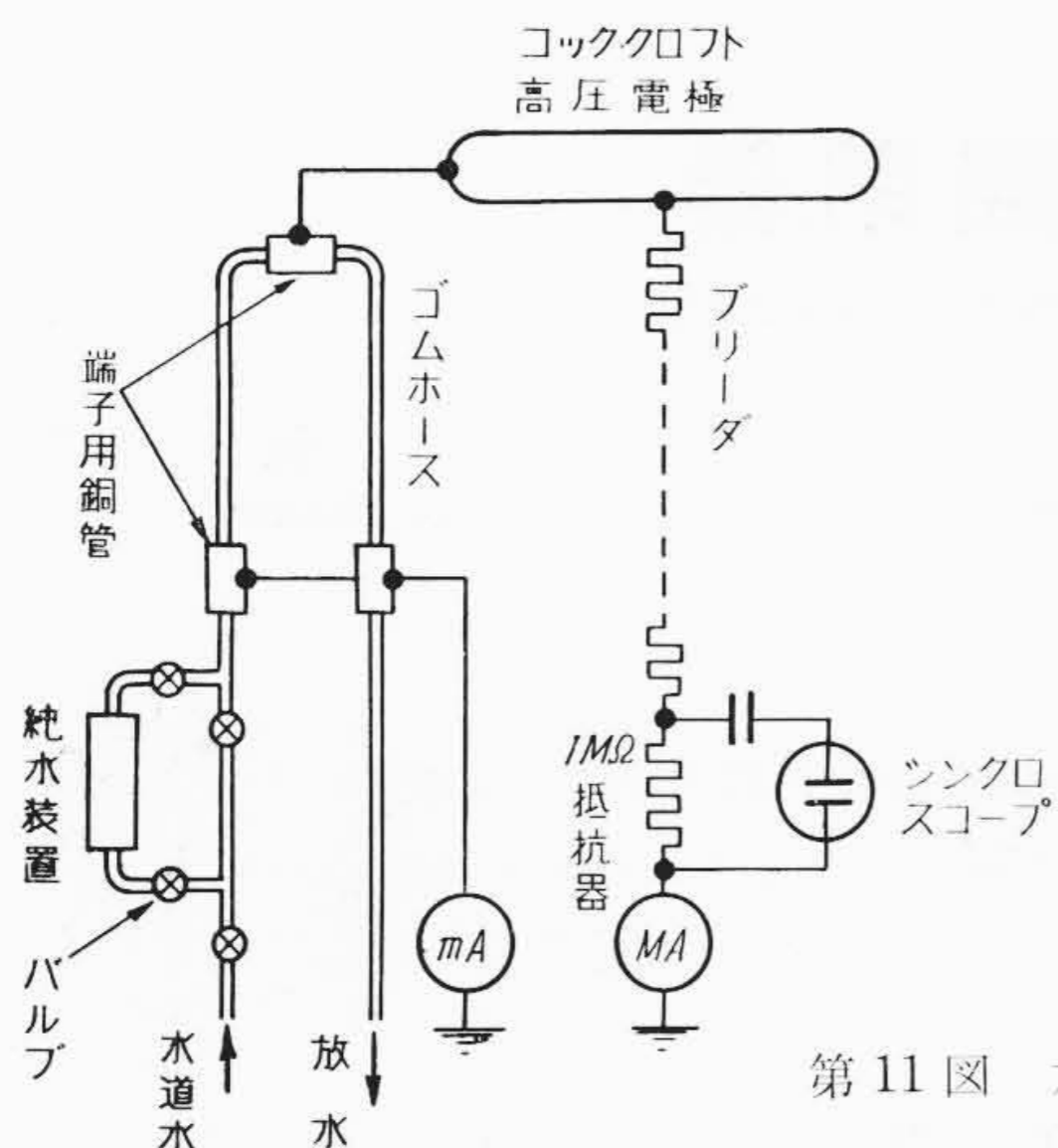
を使用して測定し、両者を比較試験した。以下その測定法について述べる。

(1) 脈動減衰比の測定

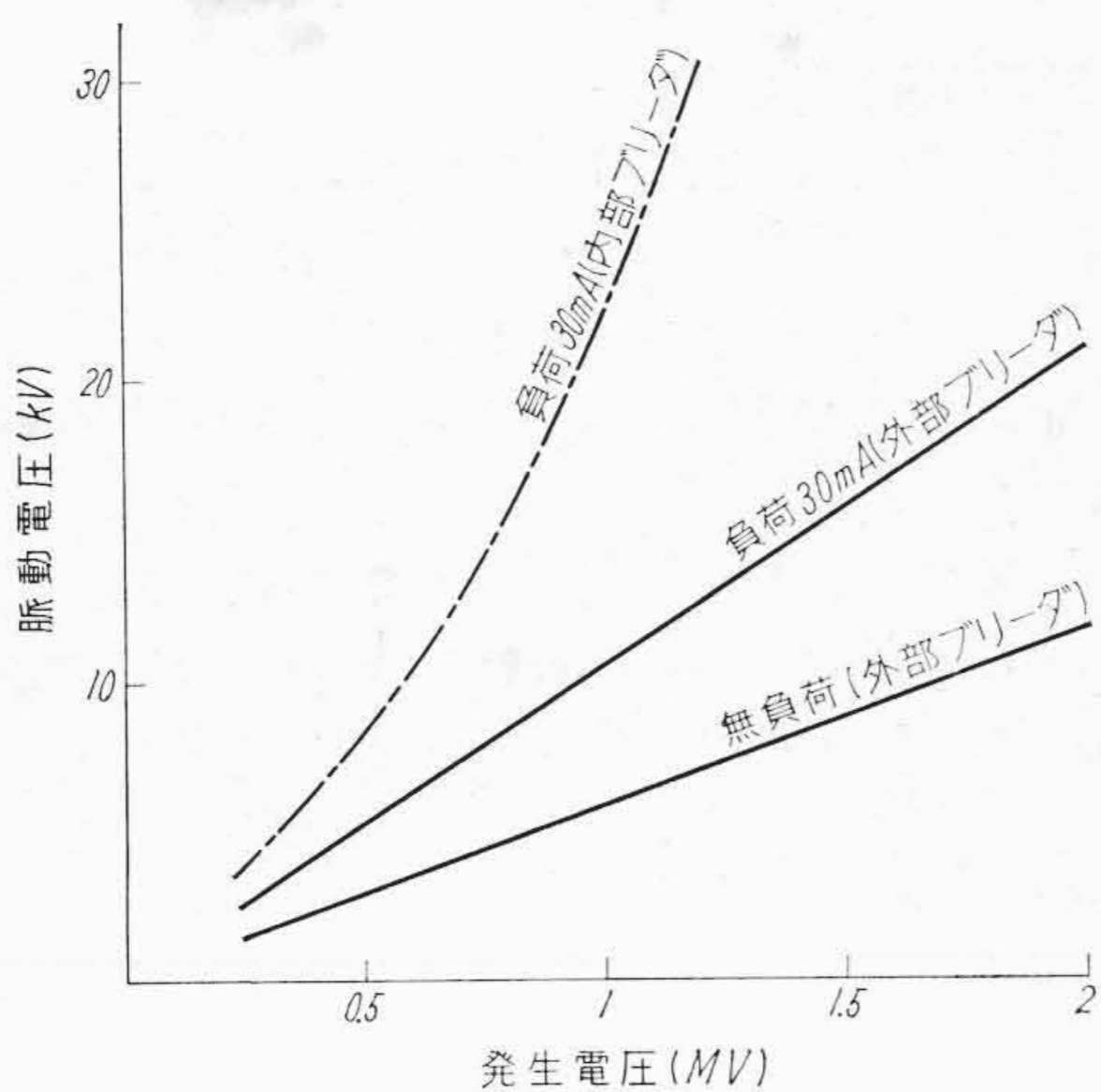
最初に、第8図に示すように500V電源を直接高圧電極に接続し、印加電圧と1 MΩ抵抗の端子電圧(いずれも500V)とをシンクロスコープにより比較測定して、500V脈動電圧に対する測定系の減衰比をもとめた。

(2) 電圧脈動率の測定

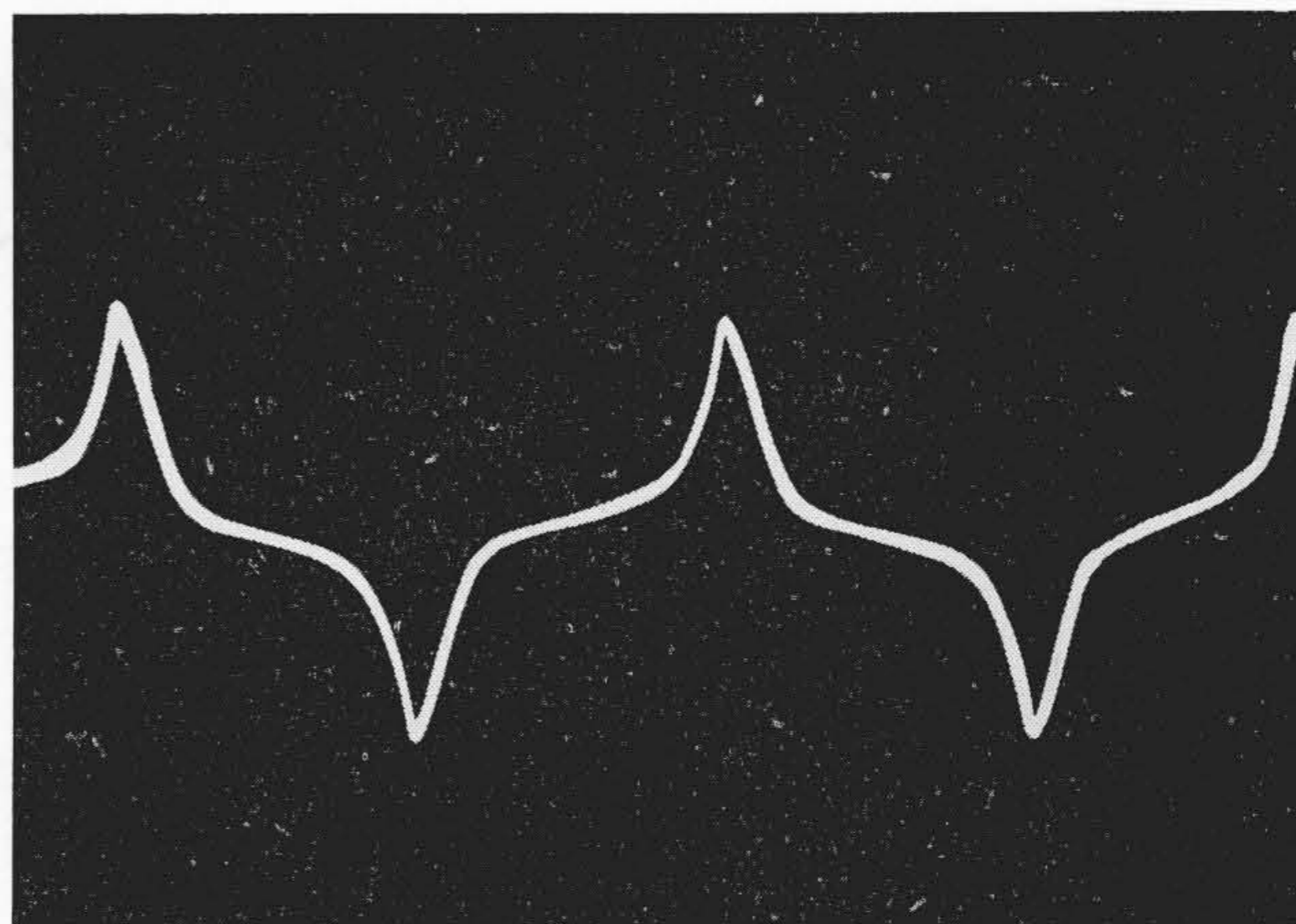
本体を正規の接続とし、無負荷で実際に直流電圧を発生せしめ、前述の1 MΩ抵抗器の端子間に現れる脈動電圧を測定し、これと(1)項の減衰比との積をもって高圧電極の脈動電圧とした。第9図はこのときの脈動電圧波形、第10図は500V発電機電圧波形のオシログラムである。これらの結果を後述負荷試験の結果とまとめて図示したのが第12図である。



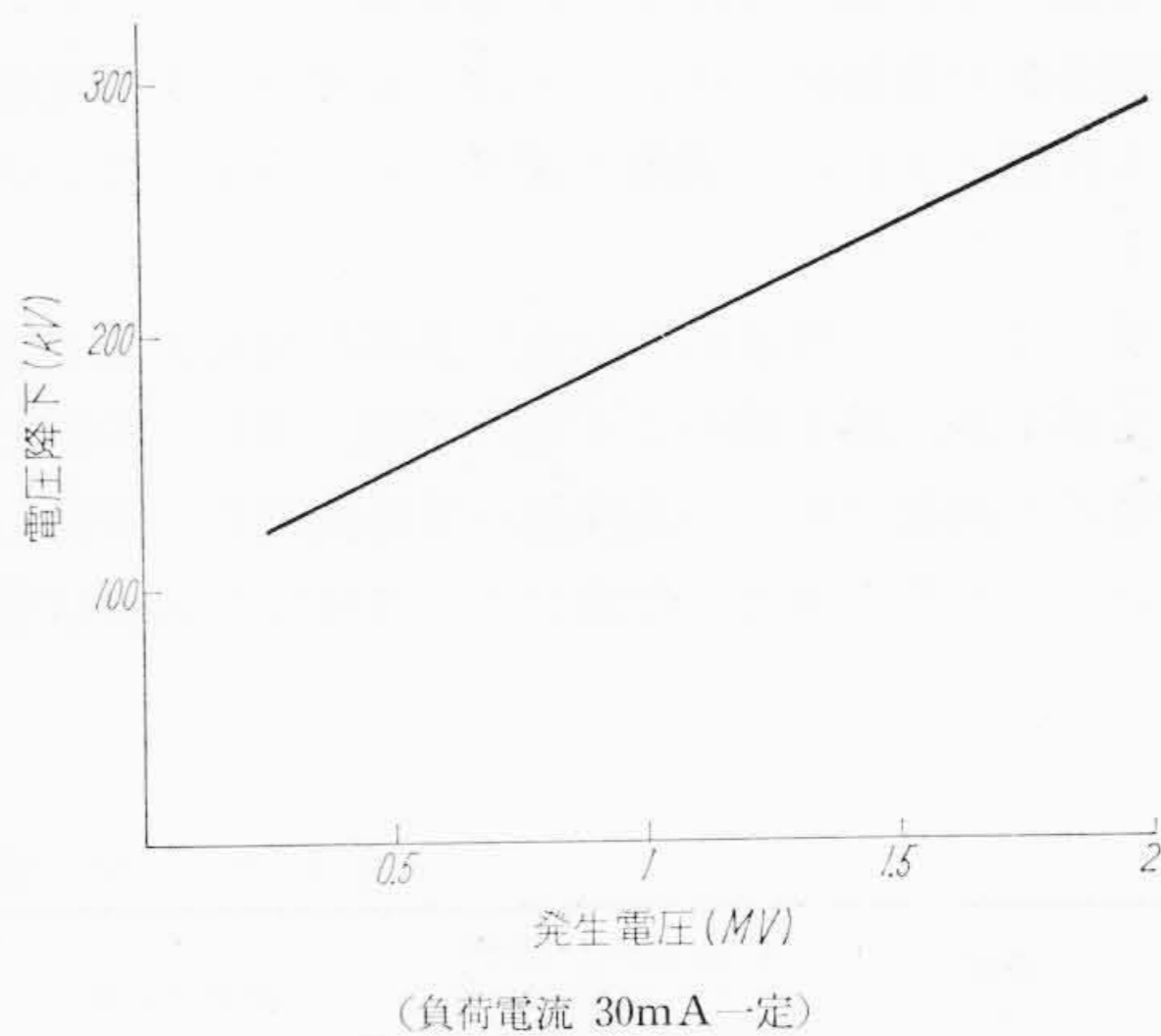
第11図 水抵抗負荷試験回路



第12図 発生電圧と脈動電圧との関係



第13図 脈動電圧波形 (30mA 負荷時)



第14図 発生電圧と電圧変動との関係 (負荷電流 30mA一定)

4.2 負荷試験

4.2.1 水抵抗負荷

負荷として適当な供試ケーブルが得られなかったため、操作に若干の不便はあるが、水抵抗を使用することとした。

第11図に構成の概要を図示したが、高圧電極よりゴムホースをつり下げ、この中に水道水とイオン交換樹脂によって処理した純水とを混合して流し、この抵抗をもって負荷とした。水道水と純水との混合比をバルブによって調整すれば、抵抗値従って負荷電流を加減できる。ゴムホースの電極は銅管を使用した。

4.2.2 試験結果

水抵抗を使用した状態で、無負荷試験に準じ、電圧脈動率および変動率を測定した。

(1) 電圧脈動率

第12図に脈動電圧の実測結果を示したが、図中、実線は測定用の外部ブリーダによるもの、鎖線は本体組込みの内部ブリーダによるものである。内部ブリーダによるものは、前に述べた誘導電流の影響が顕著に現われており、測定値としては、外部ブリーダによるものにとらねばならぬことは当然である。

同一負荷電流において、直流電圧とともに脈動電圧が増加しているが、この原因としては、大地への漏えい電流やコロナ電流の増大によるものと考えられる。しかるに前述のとおり定格電圧までほとんどコロナが認められなかったこと、および脈動電圧の増加がほぼ直線的であることから、この場合は漏えい電流が主因と考えて差つかえない。2 MVにおける脈動電圧は、負荷電流30mAにて21 kV すなわち1.05% (0.035%/mA) で、所定の性能を十分に満足している。なお第13図は2 MV、30mAにおける脈動電圧のオシログラムである。

(2) 電圧変動率

負荷電流を30mA一定として、直流電圧を変化せしめた場合の電圧降下値を第14図に示す。これまたほぼ直線的に変化しているが、2 MV、30mAにおける電圧降下は290 kV、14.5% (0.48%/mA) で保証値の60%に過ぎない。

5. 結 言

セレン整流器を使用したコッククロフトとして、記録的高電圧大電流器である本2 MV器の完成により、

- (1) 高圧セレン整流体の電圧分布は、整流体の構造により大幅に改善されることを実証し得たこと
 - (2) 高電圧部分のコロナシールドに対する貴重なデータが得られたこと
 - (3) ブリーダは配置によってはかなり大きな誘導電流を生じ、脈動率の測定に大きな誤差を伴うことが明らかにされたこと
- などを始め、工業的大出力直流高圧電源製作に関する多くの貴重な資料が得られたが、引続き今後予想される本器種の急速な発展にそなえ、新種半導体の採用、高周波形特に圧力形小形器の開発などについて研究を進める予定である。

終りに、本装置の製作特にその試験に際し、数々のご援助をいただいた日立電線株式会社関係各位に厚くお礼申しあげる。

参 考 文 献

- (1) J. D. Cockcroft & E. T. S. Walton: Proc. Roy. Soc., 136, 619 (1932)
- (2) E. Balcdinger: Handbuck der Physik, Bb XLIX, s.1 (1959)
- (3) 森山, 諫早: 日立評論 40, 937 (昭33-8)