

# 電気工学科の高電圧研究設備について

牧 元\*・佐伯節夫\*

## On the New Installations of High Voltage Research in Electrical Engineering Section

Hajime MAKI and Setsuo SAEKI

### Abstract

From the very wide field of high voltage engineering, various urgent problems are presented. The new installations of high voltage research in our laboratory will enable a contribution to be made to practical training and research work. The building consists of two parts, namely a high voltage hall and a measuring room. The impulse voltage generator (600KV, 0.025 $\mu$ F), and the testing transformer (200KV, 35KVA) and their power source etc. are equipped in the hall. The control panel of the impulse voltage generator, synchroscope, and various measuring instruments are mainly arranged in the measuring room.

The practical use of high voltage laboratory is classified two directions.

The one is the training for the students. They master the measuring techniques of high voltage engineering, and observe the demonstration of break down phenomena.

The other is the exploitation in the wide range of high voltage research.

Particularly, the observation of photographs in various discharges, the measuring of corona discharges, the analytical method by field mapping will be the most important themes for the authors in future.

### 1. 緒 言

産業の著しい発展に伴い、電力の需要は、増加の一途をたどっている。大電力の輸送を経済的に行なうため、送電電圧は次第に上昇している。Fig. 1は世界各

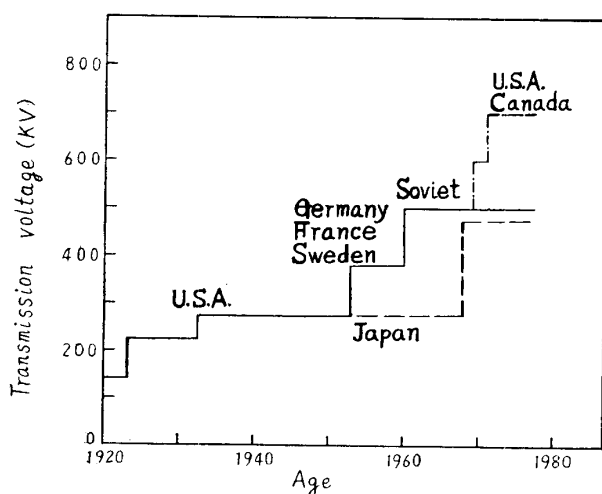


Fig. 1. Transition of transmission voltage in the world.

国の送電電圧の推移を示すものである。日本に於いて、現在最高の287.5KVより、数年中に、500KVの送電線が実現する予定である。かかる高電圧送電の実現には、送電線に起る高電圧現象の解明、送電機器の製造技術の確立が要望されている。従って、わが国の各電力会社、各電機製造会社に於いては、高電圧研究設備に巨額の資本を投じ、多くの研究者、技術者により、高電圧の研究が行なわれている現況である。現在、高電圧の技術を必要とする分野は、電力業界が主体であるが、最近特に発達している放射線機器、電子顕微鏡、X線装置の電源装置の製造に、高電圧の技術は重要視されている。

このような工業界の情勢に応じ、高電圧工学の智識と技術をもった学生を、送り出す大学に於いて、高電圧実験室を設備し、学生の高電圧現象の観察を便にし、卒業研究および教官研究に使用することは有意義である。

各電力会社および電機製造会社の高電圧研究設備は、その目的が、送電設備と送電機器の実現にあるため、それぞれの規模は大きく、衝撃電圧発生装置の最

\* 電気工学教室

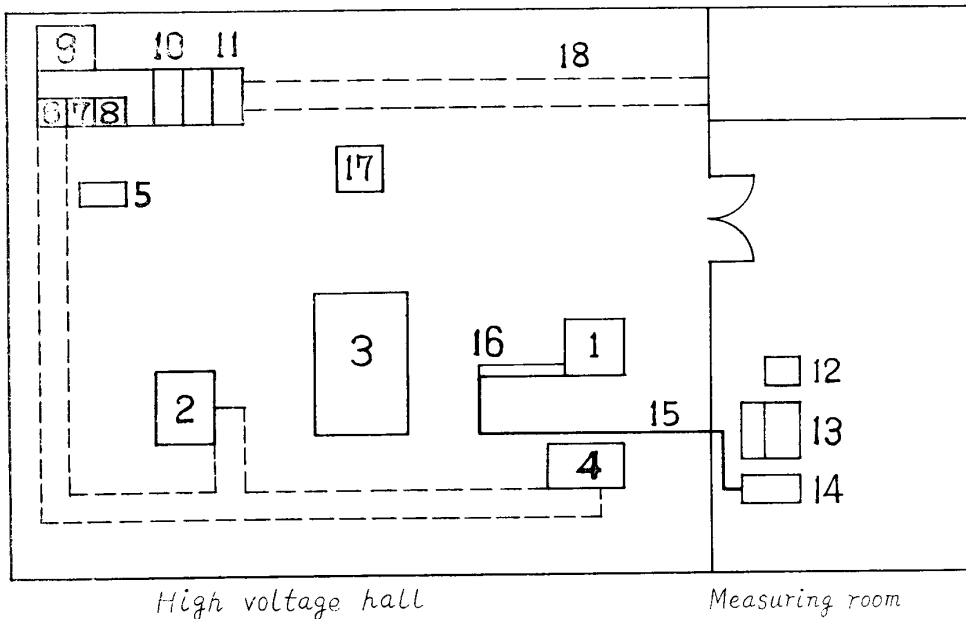
高電圧は、10,000KV~5,000KVにおよび、交流電圧発生装置の最高電圧は、2,000KV~1,000KVに達している。

ここに紹介する本学の設備は、高電圧現象の基礎的研究に使用するのが主目的であるため、比較的小規模である。

2. 高電圧研究設備について

2.1 高電圧発生装置

2.1.1 高電圧研究室の配置 高電圧研究室の建屋は、実験室、測定室、教官研究室より成り、実験室の面積120 m<sup>2</sup>、高さ8 mで、これに隣接して、1階に測定室、2階に教官研究室(面積各 30m<sup>2</sup>)を設ける。機器および測定装置の主な配置を、Fig. 2 に示す。実験室は、特にその周囲を遮蔽接地し、危険防止に留意している。衝撃電圧発生装置の制御およびこれに伴う測定は、測定室より行ない、交流電圧発生装置の制御ならびに関連測定は、実験室内で行なう。



- 1. Impulse voltage generator
- 2. Testing transformer
- 3. Sphere gap
- 4. Charging transformer
- 5. I. V. R. (17.5KVVA)
- 6. Panel
- 7. O. C. B.
- 8. A. C. B.
- 9. 1-φ trnsformer (50 KVA)
- 10. P. O. S.
- 11. D. S.
- 12. I. V. R. (3KVA)
- 13. Control panel
- 14. Synchroscope
- 15. Co-axial cable
- 16. Potential divider
- 17. Coupling condenser
- 18. 0.5m×0.5m pit

Fig. 2. Arrangement of apparatus in high voltage laboratory

2.1.2 衝撃電圧発生装置<sup>1)2)</sup>

(1) 衝撃電圧発生回路 衝撃電圧発生装置の等価回路を、Fig. 3 に示す。いま、放電電流を  $i$  とおき、

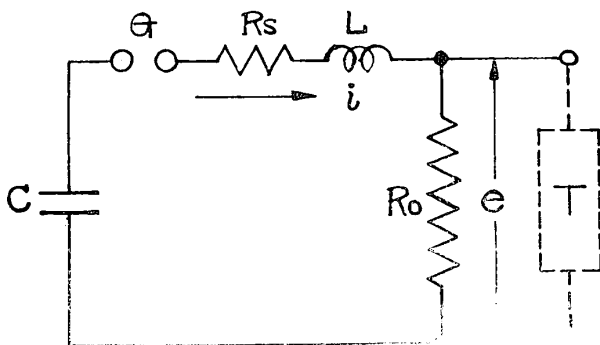


Fig. 3. Equivalent circuit of impulse voltage generator.

$R_0 + R_s = R$  とすると、放電ギャップ  $G$  の火花抵抗を無視して

$$\frac{1}{C} \int idt + Ri + L \frac{di}{dt} = 0$$

初期条件として、 $t=0$  における  $C$  の充電電圧を  $E$ 、 $i=0$  とすれば、 $R_0$  の端子に発生する衝撃電圧  $e$  はつぎのように求められる。

(i)  $R > 2\sqrt{L/C}$  非振動的

$$e = E \frac{\alpha}{\beta} \left\{ \varepsilon^{-(\alpha-\beta)t} - \varepsilon^{-(\alpha+\beta)t} \right\}$$

(ii)  $R = 2\sqrt{L/C}$  臨界状態

$$e = 2E\alpha t \varepsilon^{-\alpha t}$$

(iii)  $R < 2\sqrt{L/C}$  正弦波減衰振動

$$e = E \frac{2\alpha}{\gamma} \varepsilon^{-\alpha t} \cdot \sin \gamma t$$

ただし

$$\alpha = R/2L, \quad \beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

このうち、衝撃電圧発生装置には、(i)の状態が必要であり、波頭長  $T_f$ 、波高値  $e_m$  は、それぞれ

$$T_f = \frac{1}{2\beta} \log \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta}$$

$$e_m = E \frac{\alpha}{\beta} \left\{ \left( \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} \right)^{-(\alpha - \beta)/2} - \left( \frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta} \right)^{-(\alpha + \beta)/2} \right\}$$

で与えられる。

波頭長  $T_f$  の調整は  $L$  により、波尾長  $T_t$  の調整は  $R$  を変化して行なう。供試物は  $R_0$  に並列に接続される故、閃絡時の電流制限と回路の高周波振動抑制のため、直列制動抵抗  $R_s$  を接続する。

(2) 衝撃電圧発生装置<sup>3)</sup> 当研究室に設置した衝撃電

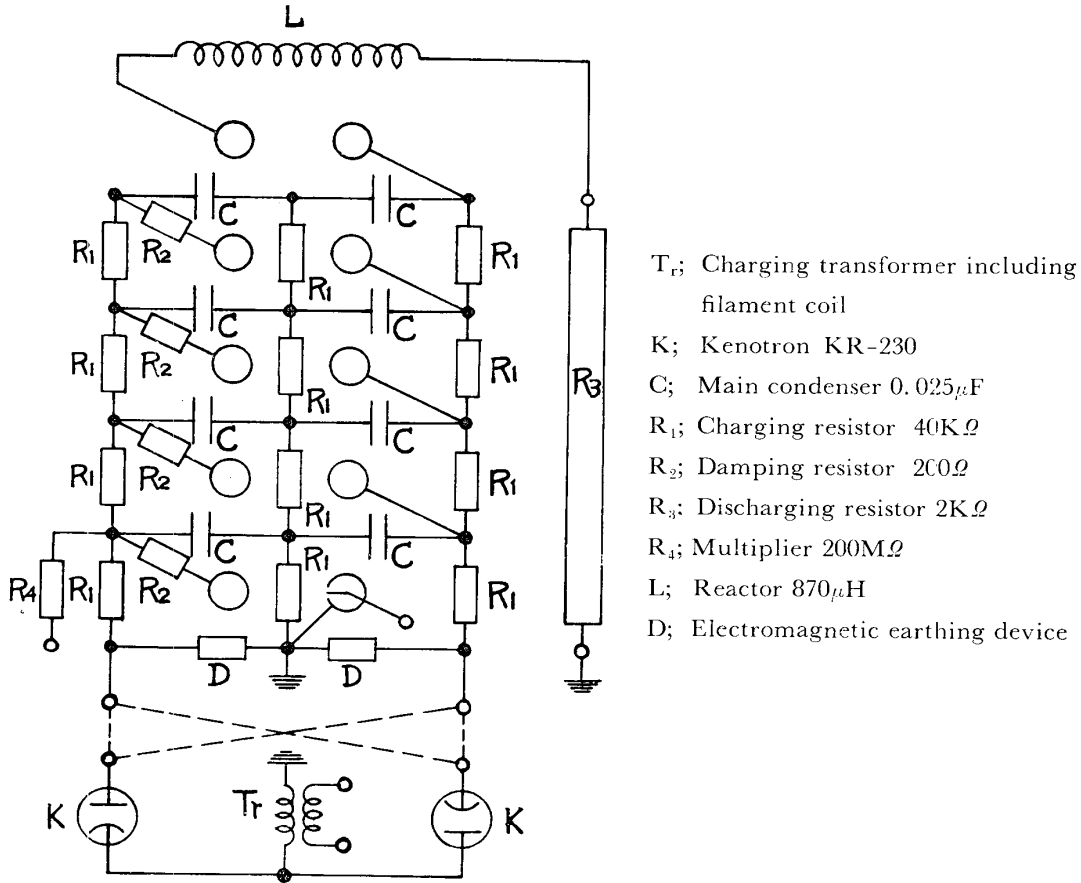


Fig. 4. Skeleton diagram of impulse voltage generator.

圧発生装置の回路を Fig. 4 に示す。Fig. 5 は装置の全容である。衝撃電圧発生用コンデンサについては、発生波形におよぼす残留インダクタンスの影響を小にし、厳しい使用条件に対して絶縁強度の保持をはかることが必要である。本装置使用のコンデンサは、定格容量  $0.2\mu\text{F}$ 、定格電圧 DC 75 KV のシバノールコンデンサで、8 個を 4 段に積み、定格電圧 600 KV、静電容量  $0.025\mu\text{F}$ 、全エネルギー 4.5 KWS とし、効率 0.8 で発生電圧 480 KV である。

充電回路はマルクス回路を使用した倍電圧充電方式で、充電用変圧器は、定格出力 6 KVA、2 次定格電圧 75 KV の単相内鉄形である。整流管はケノトロン KR 230 を使用し、フィラメント加熱用電源は充電用

変圧器内部に組み込んである。充電抵抗は充電時の時定数に関係し、波頭長、波尾長、波高値などに影響するが、本装置においては、アクリル樹脂管を用いた水抵抗  $40\text{K}\Omega$  である。

放電抵抗 (分圧器兼用) は、無誘導金属巻線型  $100\Omega$  20 個、計  $2\text{K}\Omega$  で、制動抵抗も同じく巻線型  $50\Omega$  4 個を使用する。

これらに対しては、残留インダクタンス、電流容量、絶縁耐力などの点より、十分な考慮をばらう必要がある。

火花ギャップ機構は、回転式により、ギャップ長調整を行なう。

始動装置回路を Fig. 6 に示す。始動用衝撃電圧発生

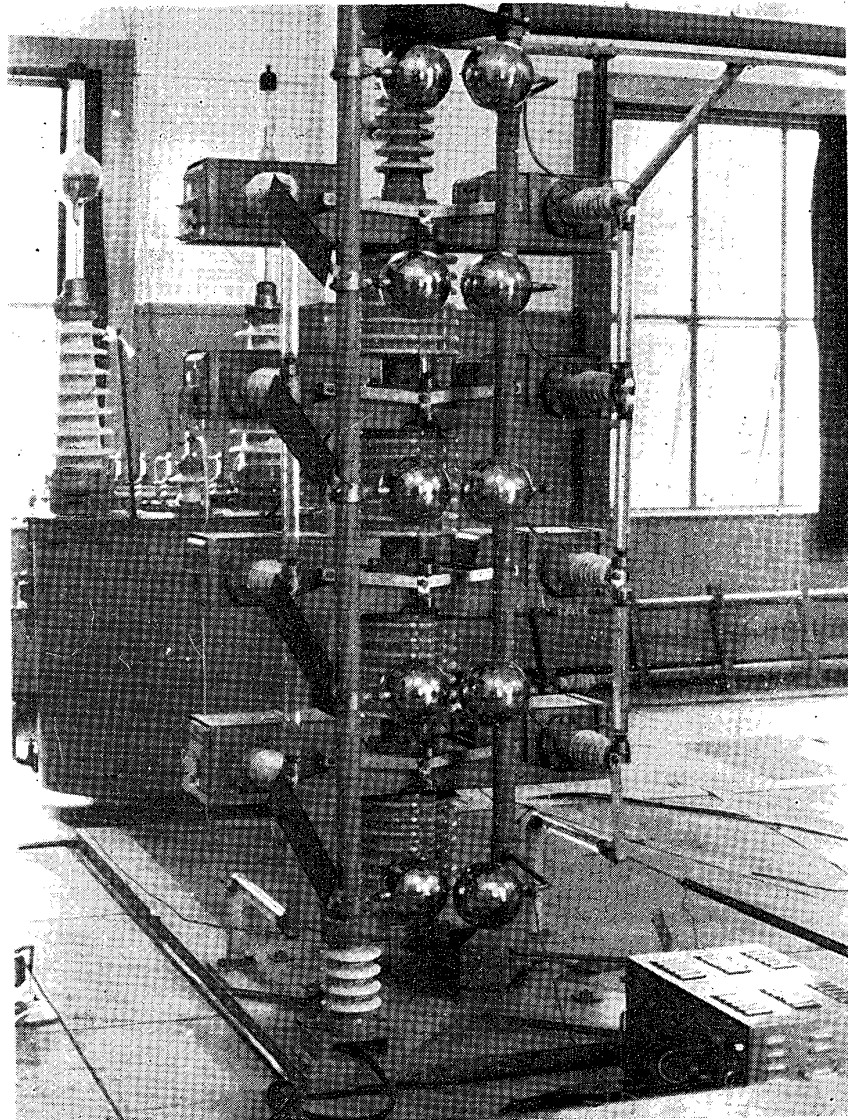


Fig. 5. The 600KV impulse voltage generator.

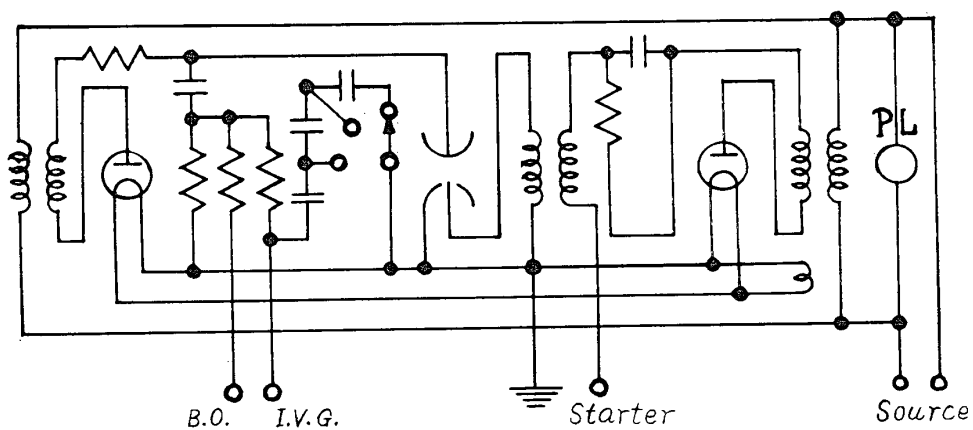


Fig. 6. Circuit diagram of starting device.

装置から送られた始動パルスによって、主衝撃電圧発生装置の始動球電極の放電を誘起する。この際、衝撃電圧発生装置に対する始動入力は、遅延回路によ

て、ブラウン管オシログラフの起動より遅れることになり、現象の捕捉が適確になる。始動装置の制御は制御盤により行ない、ケノトロン（Kotron）のフィラメント

加熱電流の調整は、スライダック (260V-5A) により、コンデンサ充電電流調整は、単相誘導電圧調整器 (3KVA, 220V±220V) によって、いずれも手動操作を行なう。

2.1.3 試験変圧器<sup>4)</sup> 試験用変圧器は、変圧比が大で、2次側に高電圧を発生するため、内部絶縁を考慮すると同時に、高圧側における過渡現象による内部振動の抑制に留意しなければならない。その回路は Fig. 7 のように、一端接地して使用する場合が多い。Fig. 8 に当研究室の試験変圧器の全景を示す。本器は単相油入自冷式内鉄形で、高圧側 200 KV、容量 35 KVA (10分間定格)、その電圧制御は、単相 17.5 KVA 誘導電

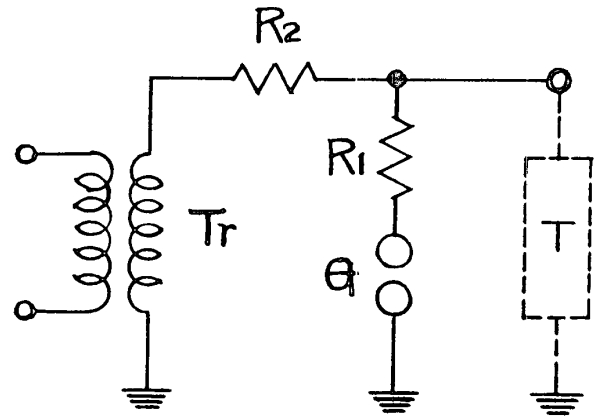


Fig. 7. Circuit diagram of testing transformer.

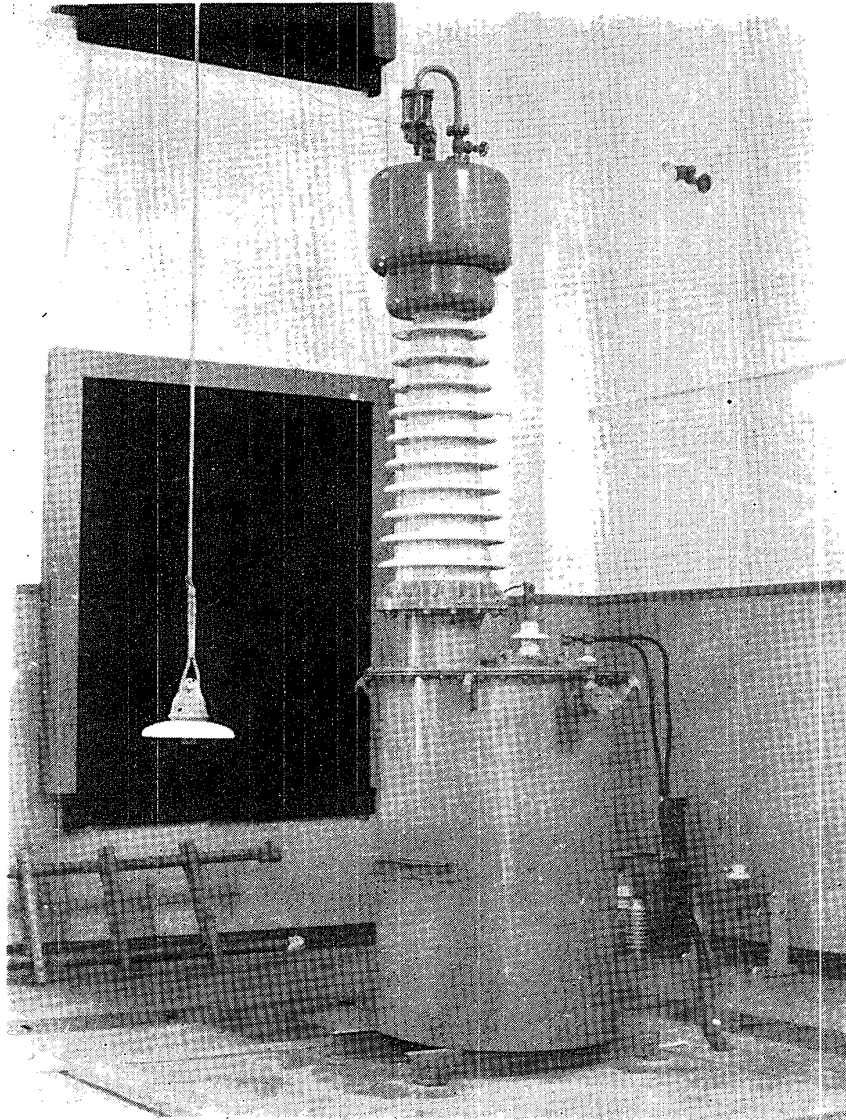


Fig. 8. The 200 KV testing transformer.

圧調整器 (220V±220V) を使用し、手動操作する。Fig. 9 に試験変圧器による懸垂がいしの閃絡を示す。

2.2 測定装置<sup>5)~14)</sup>

高電圧測定に必要な条件としては絶縁ならびに耐電圧を高くすると共に、自己消費および自己加熱を小にとることが要求される。また測定装置の接続によ

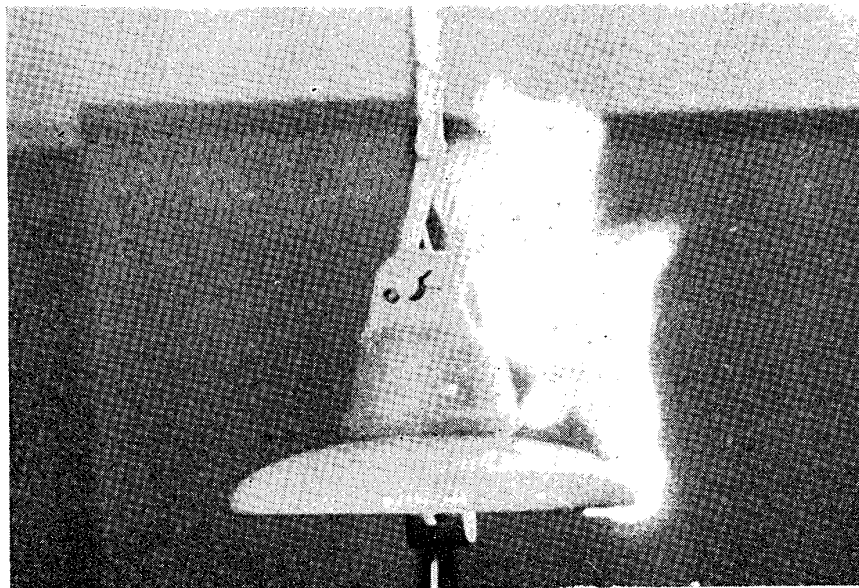


Fig. 9. Flashover of a suspension insulator  
Impressed voltage; 83 K.V.

て、被測定系に乱れを生じないことも重要である。これらに適合するように、測定装置を設けねばならない。

実用される高電圧測定の方法は、多数あるが、筆者らの使用しているものは、球ギャップ、クリドノグラ

フ、シンクロスコープである。球ギャップによる商用周波交流電圧波高値の測定、および衝撃電圧波高値の測定については、JIS C 1001 並びに JEC 107 に規定されている。当実験室に設置した球ギャップは、50cm 球垂直形手動操作式で、Fig. 10 にこれを示す。

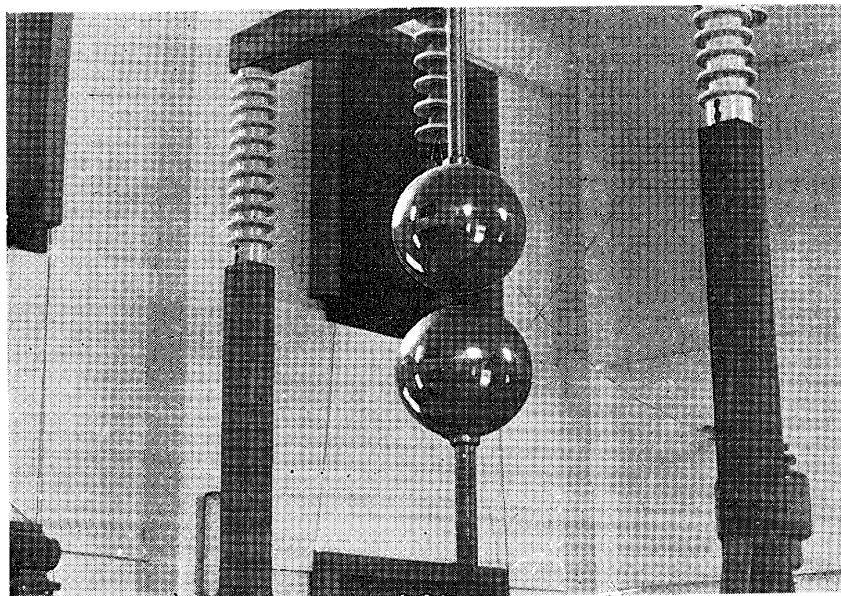


Fig. 10. The 50cm sphere gap.

クリドノグラフは、衝撃電圧波高値の簡易測定に使用する。その構造は、Fig. 11 に示すように、暗箱内で平板電極と砲弾形電極間に、感光材料をはさんだものであり、両電極間に電圧を印加して、感光面上にリヒテンベルグ像を描かせる。この電気映像は、印加した電圧の波高値、極性、波頭峻度などに対して、一定

の関係を有するので、この電気映像の半径の長さより印加電圧の波高値を求めうる。Fig. 12 にリヒテンベルグ像を示す。

陰極線オシログラフは、高速度過渡現象の測定器として欠くことができないが、高電圧測定用としては、特に加速電圧の高い高速度ブラウン管オシログラフを

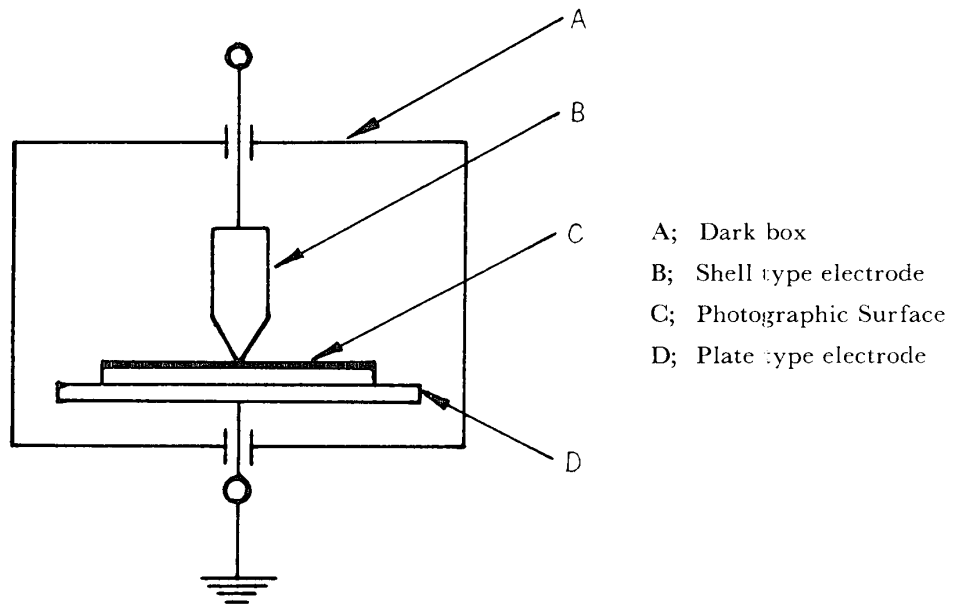
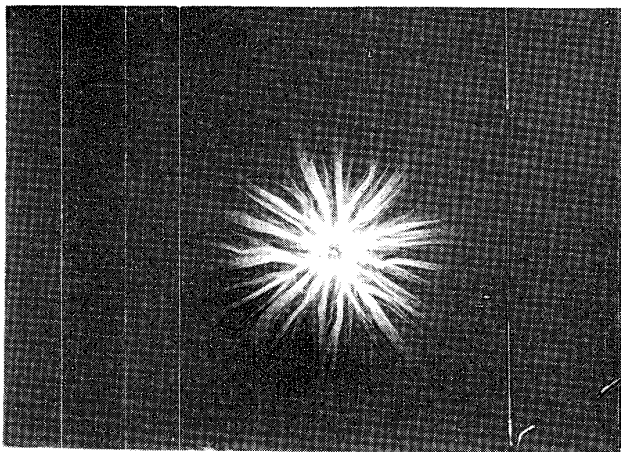
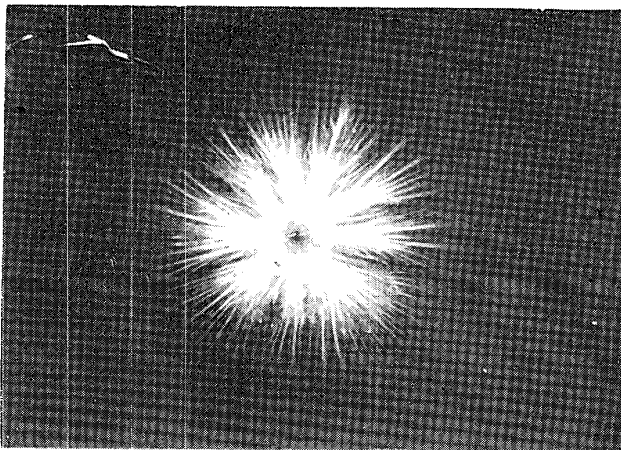


Fig. 11. Klydonograph.



(a) Polarity; positive  
Impulse voltage; 190KV  
Dividing ratio; 1/20



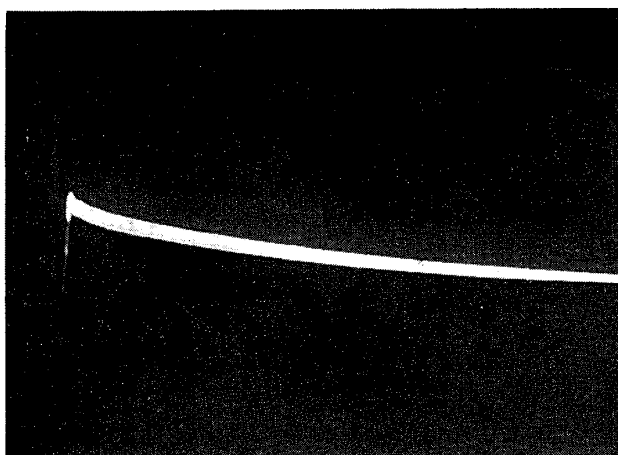
(b) Polarity; negative  
Impulse voltage; 290KV  
Dividing ratio; 1/20

Fig. 12. Lichtenberg figure.

必要とする。高速度の瞬時現象を、単掃引によって、唯一回だけブラウン管上に表示するため、電子流を制御するグリッド制御回路と、起動信号によって、急速に輝点を発生し掃引を開始する時間掃引回路を備えなければならない。シンクロスコープはトリガー掃引が行なわれるため、衝撃波の同期が良好となり、一方掃引速度が早く、同期が安定であるので、このような周波数の高い波形の観測用として、最適であると考えられる。筆者らの使用している SS 5102 二現象シンクロスコープは、周波数帯域 10 MC、単掃引可能であり、現象測定用として十分な能力を有している。しかし、より高い測定精度をうるには、更に周波数帯域の広い、少なくとも 30~50 MC 程度のシンクロスコープが望ましい。メモリスコープもまた特長ある測定器であるが、現在の周波数帯域最高 2 MC をもっては、未だ衝撃波形の記録には不十分といわねばならない。Fig. 13 はシンクロスコープに捕えた衝撃波形である。

ブラウン管オシログラフの入力端子に直接印加できる電圧は、極めて低いので、高電圧現象の測定に当っては、一般に分圧器を必要とする。分圧器としては、抵抗分圧器、容量分圧器、組合せ分圧器があるが、本装置に於いては、金属線無誘導抵抗形分圧器を使用している。

測定回路は、高周波同軸ケーブル RG-9/u (特性インピーダンス  $51 \pm 2 \Omega$ ) を使用し、その末端に、ケーブルの波動インピーダンスに対する整合用無誘導抵抗を付して、誘導ならびに反射振動を防止する。筆者らは特に Fig. 14 に示す対称回路を使用し、誘導と大



Polarity; negative  
 Impulse voltage; 150KV  
 Dividing ratio; 1/12,000  
 Sweep velocity; 10 $\mu$ S/CM  
 Gain; 10V/CM

Fig. 13. Waveform of a impulse voltage.

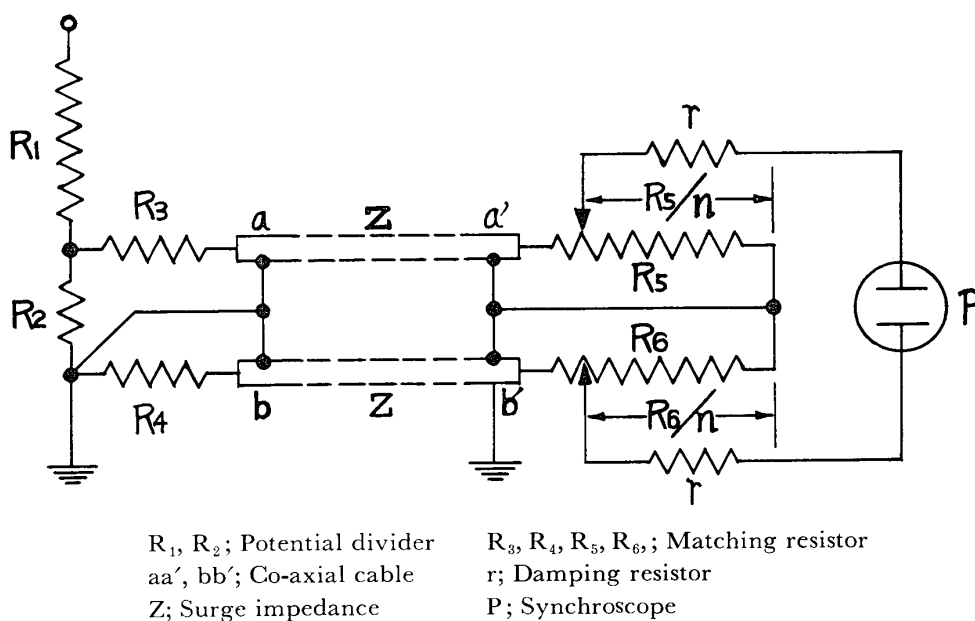


Fig. 14. Symmetrical circuit.

地電位の浮動の影響を防ぐよう努めた。この場合の分圧比は

$$\rho = \frac{1}{n} \frac{R_2 R_5}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_5) + R_1 R_2}$$

により示される。

なお、衝撃電圧波形の捕捉に対するシンクロスコープの効果的な使用法は、まだ十分確立されていないが、この点については、今後検討してゆきたいと考える。

その他、測定計器として EL-3 形静電電圧計、PV 107 A 高圧プローブ付真空管電圧計を使用し、更に付属装置として、小形衝撃電圧発生装置（発生電圧 12KV）、SB-2A 形シェリングブリッジ、TR-3 形高圧用損失角測定器、静電電界模写装置を保有し、高

電圧現象に関連する各種測定を行なっている。

### 3. 研究設備の活用について<sup>15)~22)</sup>

高電圧工学に於ける実験、研究に対する計画を大別して、基礎的な意味での高電圧技術の習得と、より高度な立場での新しい問題に対する研究、開発に分ち得る。前者は主として学生の実験実習に、後者は学生の卒業研究および教官研究を対照として考えられる。これらの中より、現在筆者らが本実験設備活用の一環として、計画し、推進しつつあるものについて述べる。

#### 3.1 基礎技術の習得

(1) 高電圧を使用する研究に対する、入門的な指導を行ない、併せて各種の電気標準規格、試験法の



智識を吸収せしめる。これより、電力工学に於ける、高電圧現象の意義を明確にできる。

- (2) 交流および直流の高電圧、衝撃電圧に対し、既に確立された種々の測定法を習得し、関連する計器、測定器の操作に慣熟せしめると共に、測定値および誤差の処理について体得させる。

- (3) 各種の気体中の絶縁破壊現象の実測。

使用する電圧波形、ガス圧、電極などによる影響を観測させる。

- (4) 交流、直流および衝撃電圧による絶縁破壊現象の比較。

- (5) 同心円筒電極による、交流、直流および衝撃コロナの観測。

- (6) 高電圧下における機器の電圧分布の測定。すなわち、がいし連、ブッシングなどに対する実測。

- (7) 規格に基づく高電圧試験。

電気機器の絶縁劣化検出に使用される各種試験法の比較実験。

### 3.2 応用および開発研究

- (1) 衝撃電圧発生装置の構造上の研究。

絶縁破壊の測定値の散乱に対する研究。

電圧波形のオシログラフ記録装置の研究、特にシンクロスコープによる衝撃波の捕捉記録方法の確立。

- (2) 高電圧下におけるコロナ放電、開閉サージ、絶縁物の絶縁特性の研究。

液体絶縁物中の放電現象、絶縁物の種類によるインパルス・ストリーマの観測。

- (3) 放電現象の高速度撮影による解析。すなわちコロナ放電、アーク放電に対する高速度撮影による現象の捕捉。

- (4) 絶縁物の劣化に関する研究。

- (5) シェリングブリッジおよび高圧用損失角測定器を使用した絶縁物の誘電率測定による絶縁特性診断。

- (6) 電界測定。すなわち、高電圧研究における近似解法として、高圧用機器の電位分布の実験的測定。

なお、付随するものとして、例えば、超高圧送電に伴う技術上の問題としての、電力系統の制御、運用、

計画の新しい手法の確立、自動化に伴うテレメータおよびデータ処理、エネルギー変換工学の開発、超伝導の送電および機器への応用、など山積する電力工学上の問題点に対しては、併設されている模擬送電線、プラズマ・ジェット発生装置等を使用して、有機的に関連研究を進めたいと考える。

## 4. 結 言

当学高電圧実験室は、上記の如く比較的小規模であるが、学生の高電圧現象の実験的学習、高電圧現象の基礎的研究、高電圧技術の習得等多方面に活用したいと考えている。

本高電圧実験室の建設に当っては、前工学部長笠松教授、電気工学科神谷助教授の御指導と御援助を賜った。建物は、地元各産業会社の御厚意による寄付金によって建設した。また建設に関係された、工学部および山口大学本部事務の各位に深謝する次第である。

## 5. 参 考 文 献

- 1) 電気学会：高電圧工学，I，電気学会（1960）p. 13
- 2) 川俣修一郎：電試研報，607，3（1961）
- 3) 中山和人他：東芝レビュー，17，1301，（1962）
- 4) 池田三穂司：高電圧大電流測定法，日刊工業新聞社（1957）p. 39
- 5) 鳳誠三郎・木原登喜夫：高電圧工学，共立出版（1960）p. 103
- 6) 関 英男：シンクロスコープ，日刊工業新聞社（1962）p. 26
- 7) 神保成吉・西野 治：試験技術と特殊測定，電気書院（1956）p. 3・1・20
- 8) 碍子耐アーク性能専門委員会：電気協同研究 17，79（1961）
- 9) G. Helmchen: E.T.Z., A84, 107（1963）
- 10) G. Fröhant: E.T.Z., B15, 80（1963）
- 11) 高梨 貢：オーム，50，44（1963）
- 12) W.G. Standring etc.: P.I.E.E., 110, 1072, 1077, 1082（1963）
- 13) A.L. Dowden: Power, 1963, 76（1963）
- 14) E. Nasser & L. Loeb: J. of Appl. Phys., 34, 3340（1963）
- 15) W. Zaengl: E.T.Z., B14, 553（1962）
- 16) A. Erk & D. Kind: E.T.Z., A84, 99（1963）
- 17) O. Mohr: E.T.Z., A84, 213（1963）
- 18) A. Hochrainer: E.T.Z., A84, 225（1963）
- 19) H. Prinz: E.T.Z., A84, 709（1963）
- 20) H. Prinz & H. Värner: E.T.Z., B15, 501（1963）
- 21) C.H. Gosling: J.I.E.E., 1963, 380（1963）
- 22) M. Olyphant: Insulation 9, No. 2, 35, No. 3, 23, No. 4, 42（1963）