

JAERI-M
8360

γ 線照射下におけるポロイダル磁場
コイルの沿面放電特性
(臨界プラズマ試験装置設計報告・72)

1979年8月

安東	俊郎	・田中	隆一	・平尾	敏雄
田村	直幸	・大久保	実	・飯島	勉
家田	正之*	・長尾	雅行*	・安芸	文武**
佐藤	隆徳**	・後藤	和夫*	・渡辺	隆**

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、お申しこしてください。

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.

γ 線照射下におけるポロイダル磁場コイルの沿面放電特性

(臨界プラズマ試験装置設計報告・72)

日本原子力研究所東海研究所大型トカマク開発部

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場⁺

安東 俊郎・田中 隆⁺・平尾 敏雄⁺

田村 直幸⁺・大久保 実・飯島 勉

家田 正之^{*}・長尾 雅行^{*}・安芸 文武^{**}

佐藤 隆徳^{***}・後藤 和夫^{**}・渡辺 隆^{**}

(1979年7月9日受理)

JT-60の逃走電子放電において発生する硬X線にポロイダル磁場コイルが照射された場合に対して、コイル接続部における照射下の沿面閃絡電圧などの放電特性を実験により確認した。実験では⁶⁰Co- γ 線を使用し、ポロイダル磁場コイルを模擬した試料に商用周波交流電圧(50Hz)を引加した。その結果、照射下(1×10^6 R/h)の沿面閃絡電圧(FOV)は非照射下と比較して同等もしくはやや高くなるということがわかり、この程度の線量率ではコイル沿面閃絡に悪影響を及ぼさないことが確認された。

また、これと同時に球ギャップの火花放電電圧および円筒(ポリテトラフルオルエチレン(PTFE)棒)試料の沿面閃絡電圧などの測定も照射下で行われた。その結果球ギャップでの放電電圧の低下などの興味あるデータが得られた。さらに線量率が高い場合の球ギャップおよびPTFE棒試料のFOV測定結果についても簡単に示されている。

* 名古屋大学工学部

** 日立製作所日立工場

*** 日立製作所日立研究所

Flashover Characteristics of Poloidal Field Coils
under Gamma-ray Irradiation

Toshiro ANDO, Ryuichi TANAKA[†], Toshio HIRAO[†], Naoyuki TAMURA[†],
Minoru OHKUBO, Tsutomu IJIMA, Masayuki IEDA^{*}, Masayuki NAGAO^{*},
Fumitake AKI^{**}, Takanori SATO^{***}, Kazuo GOTO^{**}, Takashi WATANABE^{**}

Division of Large Tokamak Development, Tokai Research Establishment
and Pilot Scale Research Station, Takasaki Radiation Chemistry
Research Establishment[†], JAERI.

(Received July 9, 1979)

Flashover voltage (FOV) and other parameters which characterize the creeping discharge were measured under intense ^{60}Co γ -ray irradiation in order to examine creeping discharge characteristics of the connecting part of the poloidal field coils of JT-60 when exposed to hard X-rays produced on runaway discharges. Alternating current voltage (50 Hz) was applied to the model coils. Results showed that FOV at an exposure rate of 1×10^6 R/h is the same as or slightly higher than that under non-irradiation; at this exposure rate, the coil insulation is not affected.

FOV of sphere gap and along cylindrical bar samples were measured under the same irradiation. The value decreased for the sphere gap. FOV results at extremely high exposure rates of X-rays for these samples are also described briefly.

KEYWORD : Tokamak, Runaway Discharges, Hard X-rays, Poloidal Field Coils, Electrical Insulation, High Voltage, Flashover, Gamma-ray Irradiation, Creeping Discharge, Corona Pulse, Ionization Current, Sphere Gap, Polytetrafluoroethylene bar.

* Nagoya Univ.

** Hitachi Works of Hitachi Ltd.

*** Hitachi Research Laboratory of Hitachi Ltd.

目 次

1. まえがき	1
2. 実機と実験条件の比較	2
2.1 ポロイダル磁場コイル接続部の絶縁構成	2
2.2 コイルに発生する電圧	2
2.3 逃走電子放電で発生する硬X線	3
2.4 実験条件の設定と実機条件との比較	4
3. 実験装置および実験方法	10
3.1 試料および電極構成	10
3.1.1 試料	10
3.1.2 試料調整	10
3.1.3 電極構成	10
3.2 装置および方法	10
3.2.1 実験方法	10
3.2.2 実験装置の配置	11
3.2.3 試料の設置状態	11
3.2.4 実験装置の仕様	11
3.2.5 実験パラメータと追加実験項目	11
3.3 コロナパルスおよび電流波形観測法	12
3.3.1 目的	12
3.3.2 電極構成	12
3.3.3 予備試験	12
3.3.4 印加電圧の限界	12
3.4 γ 線照射	13
3.4.1 γ 線源および照射法	13
3.4.2 照射線量率の測定	13
3.4.3 照射室内の温度および湿度の測定	13
3.4.4 非照射下における照射室内外の環境線量率測定	13
4. 実験結果	26
4.1 模擬コイルの沿面放電特性	26
4.1.1 コロナパルス(最大放電電荷量)	27
4.1.2 低周波電流	27
4.1.3 沿面閃絡電圧(FOV)	27
4.1.4 電極間の直流抵抗	28
4.1.5 体積抵抗	28

4.2	標準球ギャップおよびポリテトラフルオルエチレン (PTFE) 棒試料の放電	
	特性	28
4.2.1	標準球ギャップのFOV	29
4.2.2	PTFE棒試料の沿面放電特性	29
5.	超高線量率における球ギャップおよびPTFE棒試料の放電特性	55
5.1	目的	55
5.2	実験方法	55
5.3	実験結果	55
6.	検 討	58
6.1	FOVに関する検討	58
6.1.1	模擬コイルのFOVに関する従来の実験式との比較	58
6.1.2	球ギャップおよびPTFE棒試料のFOVに関する検討	58
6.2	コロナパルスおよび低周波電流に関する検討	59
6.2.1	照射下, 非照射下における低周波電流に関する検討	59
6.2.2	電極近傍電界と沿面放電特性との関連	59
6.3	直流抵抗減少の原因の確認実験および検討	61
6.3.1	目的および実験方法	61
6.3.2	実験条件	61
6.3.3	実験結果およびまとめ	61
6.4	実機条件と実験条件の差違に関する比較試験および検討	61
6.4.1	実機電圧波形のFOVおよび接続部絶縁模擬試料のFOVの測定	61
6.4.2	磁界による影響	62
7.	ま と め	72
	謝 辞	73
	参考文献	74
	付録 模擬コイルの測定データシート	75

Contents

1. Introduction.....	1
2. Comparison of experimental condition with actual machine	2
2.1 Connecting part insulation of the poloidal field coils.....	2
2.2 Voltages produced in the coils	2
2.3 Hard X-rays produced in the coils	3
2.4 Experimental condition and comparison with actual machine.....	4
3. Experimental apparatus and procedure	10
3.1 Samples and electrode	10
3.1.1 Samples	10
3.1.2 Adjustment of samples	10
3.1.3 Electrode	10
3.2 Apparatus and procedure	10
3.2.1 Procedure	10
3.2.2 Arrangement of apparatus.....	11
3.2.3 Set-up of samples.....	11
3.2.4 Specifications of apparatus	11
3.2.5 Parameters and additional experiment.....	11
3.3 Observation method of waveform of corona pulse and alternating leak current	12
3.3.1 Purpose	12
3.3.2 Electrode.....	12
3.3.3 Preliminary test.....	12
3.3.4 Limit of applied voltage	12
3.4 Gamma-ray irradiation	13
3.4.1 Gamma-ray source and irradiation method	13
3.4.2 Measurement of exposure rate.....	13
3.4.3 Measurement of temperature and humidity in the irradiation room.....	13
3.4.4 Measurement of background dose rate inside and outside of the irradiation room	13
4. Experimental results	26
4.1 Creeping discharge characteristics of model coils	26
4.1.1 Corona pulse (Maximum electric charge)	27
4.1.2 Alternating leak current	27
4.1.3 Flashover voltage.....	27
4.1.4 Direct current (DC) resistance between electrodes.....	28
4.1.5 Insulation resistance	28

4.2 Discharge characteristics of standard sphere gap and polytetrafluoroethylene (PTFE) bar	28
4.2.1 FOV of standard sphere gap	29
4.2.2 Creeping discharge characteristics of PTFE bar.....	29
5. Discharge characteristics of sphere gap and PTFE bar at extremely high exposure rate.....	55
5.1 Purpose	55
5.2 Procedure.....	55
5.3 Results	55
6. Consideration	58
6.1 FOV	58
6.1.1 Model coil	58
6.1.2 Sphere gap and PTFE bar	58
6.2 Corona pulse and alternating leak current.....	59
6.2.1 Alternating leak current.....	59
6.2.2 Relationship between electric field near the electrode and creeping discharge characteristics	59
6.3 Experiment related to DC resistance reduction and consideration	61
6.3.1 Purpose and procedure	61
6.3.2 Experimental condition	61
6.3.3 Results.....	61
6.4 Related experiment and consideration	61
6.4.1 FOV with actual voltage waveform and FOV of the connecting part insulation model	61
6.4.2 Effect of magnetic field	62
7. Summary.....	72
Acknowledgement.....	73
References	74
Appendix Data sheet of model coils	75

1. ま え が き

JT-60のポロイダル磁場コイルには、組立用の接続部があり、この部分の絶縁は狭い空間での現地作業となるため、絶縁性能は通常部に比べると劣ることが予想される。またコイルはトーラス全周で18ヶ所の支持をとることから、接続部の絶縁継目に近接してアース電位を持った金属支持体が位置することになる。したがって、絶縁継目と支持体との間の沿面閃絡が重要な問題となり、これを起こさないよう十分配慮して設計しなければならない。

一方、プラズマの条件によっては逃走電子が発生し、壁に衝突することによって硬X線を生じるが、JT-60の予想では線量率が高く、エネルギーも大きくなっている。

そこでこのような硬X線の照射下では、接続部の沿面閃絡電圧が低下することはないかという事が考慮され、コイルの設計上問題となる。またこれまでの研究例ではこのような条件下の実験はなされていないようであり、放電現象研究の立場から見ても非常に興味ある問題と思われる。

そこで、X線照射下における沿面閃絡電圧がどのようになるかを実験により確認した。ここではその結果について報告する。

なお、本研究では昭和52年5月に開かれた、JT-60のコイル絶縁に関する検討会に於ける審議に基づき、高崎研究所の ^{60}Co - γ 線照射施設を利用して、名古屋大学、高崎研開発試験場、日立製作所および東海研大型トカマク開発部の共同研究として実施されたものである。

以下次章では、コイル接続部の絶縁構成、発生電圧、逃走電子モードについてさらに具体的に述べ、実機と実験条件の対応について比較している。3章では具体的な実験方法および装置について示し、4章でその結果、6章において実験結果に対する検討を行っている。また5章は名大で実施された特殊条件下であるが、さらに高線量率照射の場合の実験結果が示されている。

2. 実機と実験条件の比較

2.1 ポロイダル磁場コイル接続部の絶縁構成

JT-60のポロイダル磁場コイル⁽¹⁾は、Fig. 2.1に示すようにトロイダル磁場コイルの内側に設置され、多数のリング状コイルのブロックから構成されている。これらのコイルは、トロイダル磁場コイルと鎖交するため、組立のための接続部を必要とする。

Fig. 2.2は接続部の絶縁構成を示す。接続部には現地における制限された作業条件下での導体接続作業、絶縁施行が要求され、絶縁の面での弱点部と考えられる。周囲にある他のポロイダル磁場コイルや真空容器等による空間的制約のため、十分なテーピング作業が不可能な部分があり、そこは絶縁物のケースを挿入する。またコイルに作用する電磁力を支持するためにトラス全周に18ヶ所の金属性の支持体が取付けられるので、このためコロナ防止対策がとられる。これには、(1) 低抵抗材料でコイル全面を覆う方法と、(2) 絶縁継目の部分には高抵抗材料を使用する方法とがあるが、(2)の方が継目の部分に対しては電界に対する負担が少ないので接続部に関しては(2)の方法を採用する予定である。

また接続部近傍に位置する支持体をFRPで製作するかもしくは金属体表面をFRPで覆うようにすれば、沿面距離を長くすることができ、接続部の沿面閃絡特性が改善されると考えられるが、現段階では信頼性などの技術的な問題がある。

絶縁の継目とコイル支持体との位置関係に関しては、設計ではできるかぎり沿面距離を長くとるようにすることが望ましいが、コイルの支持を全周で18ヶ所とること、また垂直方向電磁力による曲げ応力軽減のために補強サポートを取付けることが考えられるので、絶縁継目の真上にアース電位の部分が存在するという場合も考えられるとして設計を進めている。そのため、継目のFRPケースと通常部の絶縁端部を長いテーパー状にし、沿面距離を長くする構造となっている。このテーパーの長さは最大約300 mmまで考えられている。

以上のように絶縁継目部については十分な絶縁処理を行うことができず、かつ支持体が近接するため、絶縁継目と支持体間の沿面閃絡が起らないよう設計することが必要である。しかも、一度閃絡が生じるとコイル電源のエネルギーが非常に大きいため、アークによる絶縁物または導体の熔融を引起し、コイルの破壊に到る可能性が考えられるので、閃絡が絶対に起らないようにしなければならない。さらに、沿面放電特性が表面状態、環境条件によって非常に左右されやすいことを考えると、実機においては実験棟内の環境条件の管理に十分留意しなければならない。

2.2 コイルに発生する電圧

Fig. 2.3はポロイダル磁場コイルの通電パターンおよび発生する電圧を示し、最下欄にはプラズマ電流の時間変化が示されている。発生電圧が最大のもは空心変流器コイルであり、そ

の値は25 kVで、オーバーシュート分20~30%がこれに重畳される。図ではプラズマ3段立上げの場合を示し、0.1秒の間に3回パルス電圧が発生する。電圧の立上りは1ms程度となっている。その他のポロイダル磁場コイルの場合もプラズマ立上げ時に大きな電圧が生じるが、空心変流器コイルに比べて大きさは小さくなっている。またコイルによってはプラズマの急速消滅時により大きな電圧が発生するものもある。Table 2.1に、プラズマ立上げ時のコイル電圧と発生する時間を示す。⁽²⁾

2.3 逃走電子放電で発生する硬X線

一方、プラズマの条件によってはいわゆる逃走電子モードの放電になることがあり、逃走電子についてはかなりの報告がなされている。⁽³⁾⁽⁴⁾この高エネルギーの逃走電子がリミタに衝突すると硬X線が発生する。JT-60の予想では逃走電子のパラメータをTable 2.2のように定めている。⁽⁵⁾⁽⁶⁾この評価は磁気リミタ板に逃走電子がすべて衝突し、板から10cm離れた場所における制動輻射X線の強度、線量率を示すものであり、またそのときプラズマ電流がすべて逃走電子によって運ばれると仮定している。⁽⁵⁾したがってかなり安全側の評価であると考えられる。しかし逃走電子のエネルギーについては、プラズマの小半径の2乗に比例するとした比例則を用いて、これまでに得られているデータを外挿すると、JT-60では30~40MeVに達する可能性もある。⁽⁴⁾

ここでもし逃走電子モードになった場合には、ガス入射等の方法によりプラズマを正常に戻す処置を行うことができるので、⁽⁷⁾逃走電子放電が持続することは避けられると考えられるが、逃走電子挙動に関する研究はJT-60の実験テーマの一つであり、⁽⁸⁾必ずしも逃走電子モードを停止してしまわないと考えるおかげにならない。

以上のことを総合してポロイダル磁場コイル接続部の絶縁に関して、逃走電子モード時に発生する硬X線の影響についてまとめると以下となる。

- (1) コイルにはプラズマ立上げ時および急速消滅時に大きな電圧が生じ、空心変流器コイルに最大25 kV(立上り1ms, プラズマ立上げ時)が生じる。
- (2) プラズマの条件によっては逃走電子モードになり、硬X線が生じる。その線量率は 3×10^7 R/h, エネルギーは10 MeVと評価されている。コイル絶縁材はこれに曝されることになる。

したがって、コイルに高い電圧を生じると同時に、高線量率の硬X線に照射される場合に、沿面閃絡電圧が変化するのではないかとこの可能性が考えられる。このことは設計上重要な問題であり、実験による確認を行った。

またX線の積算量は10年間で 2×10^8 Rと定められている。エポキシマイカ系の材料の特性が $10^8 \sim 10^9$ Rの領域で急激に低下するデータがあるため、⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾照射劣化の観点からの検討もまた必要である。本報告書ではこれについては述べられていない。照射劣化に関する試験については、別途実施されている。

さらにポロイダル磁場コイルは、コイル自身およびプラズマが作るポロイダル磁場(最大2 T程度)下におかれる他に、トロイダル磁場(最大10 T)⁽²⁾下におかれる。このような磁場下

で沿面放電がどうなるのかについても興味ある問題であり、設計上重要である。この点については6章の検討の中で考察されている。

その他に、JT-60では逃走電子からの硬X線と構造材との相互作用などにより中性子が発生する。その量はリミタ材のモリブデンからのもので、1ショットあたり 2.7×10^{12} nであり、JT-60では中性子による照射劣化の影響は小さいと考えられる。

2.4 実験条件の設定と実機条件との比較

以上のように、本実験はプラズマの逃走電子モード時に生じる硬X線照射下におけるポロイダル磁場コイル接続部の沿面放電特性を把握し、設計データに供することを目的として実施したものである。以下に実験条件の設定、実機との比較および実験方法の概略について記す。

実験条件の設定は、逃走電子の発生数、エネルギーがプラズマのパラメータによって大きく変わり、評価が難しい点を考慮し安全側に立った評価に基づいて決定した。また実験は装置、施設等から決まる条件の範囲内で行うこととし、実機条件と相異なる点については追加実験による確認などにより検討した。照射線源に高崎研究所の ^{60}Co - γ 線照射施設の150kCiの板状線源を利用し、 1×10^6 R/hの照射線量率の場に接続部模擬コイルをセットした状態で、コイルに50Hz交流電圧を印加し、徐々に電圧を上昇させて測定を行った。

実験条件と実機条件を比較しまとめると以下となる。

- (1) 電圧波形 (実機: パルス電圧, 立上り1ms; 実験: 50Hz 交流)
- (2) 線量率 (実機: 3×10^7 R/h; 実験: 1×10^6 R/h)
- (3) X線エネルギー (実機: 最大10MeVの制動放射X線で広いエネルギースペクトルをもつ; 実験: 1,173MeVと1,332MeV, ^{60}Co - γ 線)
- (4) 電極状態 (実機: Fig.2.2を参照; 実験: 金属箔を貼付ける)
- (5) 磁界 (実機: ポロイダル磁場 最大2T程度, トロイダル磁場 最大10T; 実験: 考察のみ行い特に実施せず)

沿面距離、絶縁厚さは実機条件を模擬した。

(1)については、非照射下において実機電圧波形とAC電圧を模擬コイルに印加し相互比較した。

(2)については、実機で予想される条件を満たしていないので、さらに線量率が増加した場合にどうなるかを確認する必要がある。これに関しては5章に名古屋大学フェバトロン(707型)装置を使用した実験結果について述べる。

(3)については、線質(LET)の違いが問題となるが、この程度のエネルギー差異に対してはその影響は無視できると考えられる。

(4)については、実機では裸の電極が空間に露出することはなく、絶縁をラップさせることになるが、今回の実験では絶縁材周囲に金属箔電極を巻いた試料を用いて、照射の有無による沿面放電特性の比較を行い、もし閃絡電圧が大きく変わるようなことがあれば、実機の絶縁構成に近い試料を用いて実験を行うこととした。また、非照射下において金属箔電極試料と実機に近い電極試料とにおけるAC電圧による閃絡電圧を比較した。

実験では各電圧レベルにおいてコロナパルスおよび低周波電流の波形を観測し、電圧を上昇させて閃絡電圧を測定したが、その他に電極間の直流抵抗、体積抵抗、長時間照射後の試料の閃絡電圧、さらに基礎的なデータとして球ギャップおよびポリテトラフルオロエチレン(PTFE)棒試料の放電特性を調べた。また、表面抵抗についてはさらに追加実験を行った。

最後に付録として測定データシートを付けた。

Table 2.1 プラズマ電流立上げ時における各コイルに発生する電圧とその時間

コイル	最大電圧 ¹⁾	時間 ²⁾	備考
OH	25 kV	~1, 40, 70 ms	3段立上げ
V	8~10	数 ms	3段立上げ
H	0.17	—	
Q	case I	0.7	~10 ms
	case II	-2	~10 ms
M	case I'	-0.72	~5 ms
	case II'	1.72	~2 ms

- (注) 1) オーバーシュート電圧分が重量される。
 2) プラズマ電流励起開始からの時間を示す。
 3) QコイルとMコイルには通電モードが2種類ある。

Qコイル { 電流一定パターン……case I
 { 電流立下げパターン……case II
 Mコイル { 電流一定パターン……case I'
 { プラズマと同期して立上げるパターン……case II'

Table 2.2 JT-60における逃走電子による硬X線パラメータ

パラメータ	数値
プラズマ電流	2.7 MA
放電時間	5 sec (10 sec)
逃走電子のエネルギー	最大 10 MeV
X線のエネルギー	最大 10 MeV
1ショットあたりのX線の照射線量	1×10^5 R/shot
照射線量率	$\sim 3 \times 10^7$ * R/h
逃走電子モード発生回数	5×10^3 回
装置の寿命での全X線照射線量	2×10^6 R
装置の定格運転回数	5×10^4 回

* 1ショットあたりの照射線量 1×10^5 R/shot は 10 sec 放電の場合と考えて算出した値である。

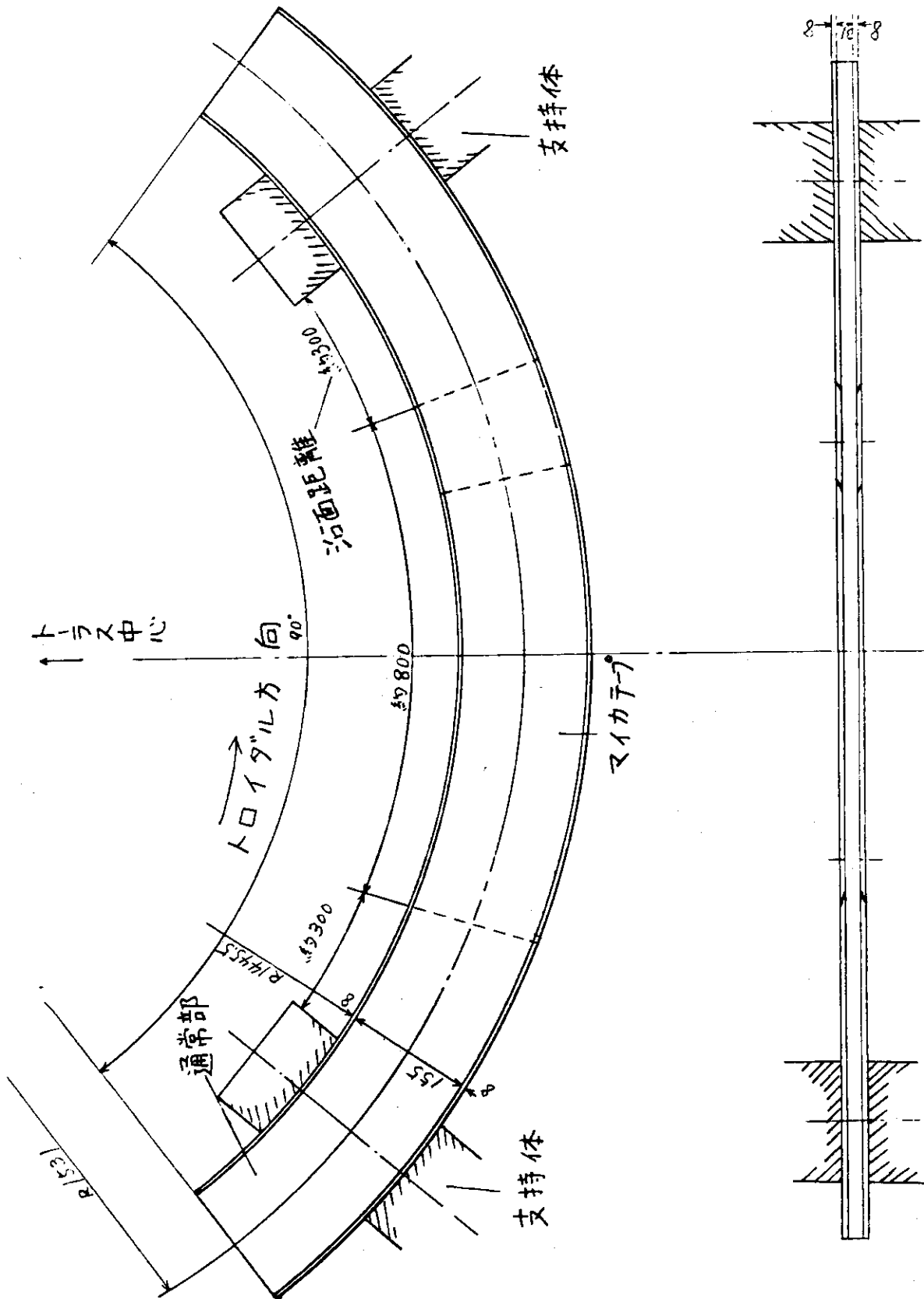


Fig. 2.2 ポロイダル磁場コイル接続部

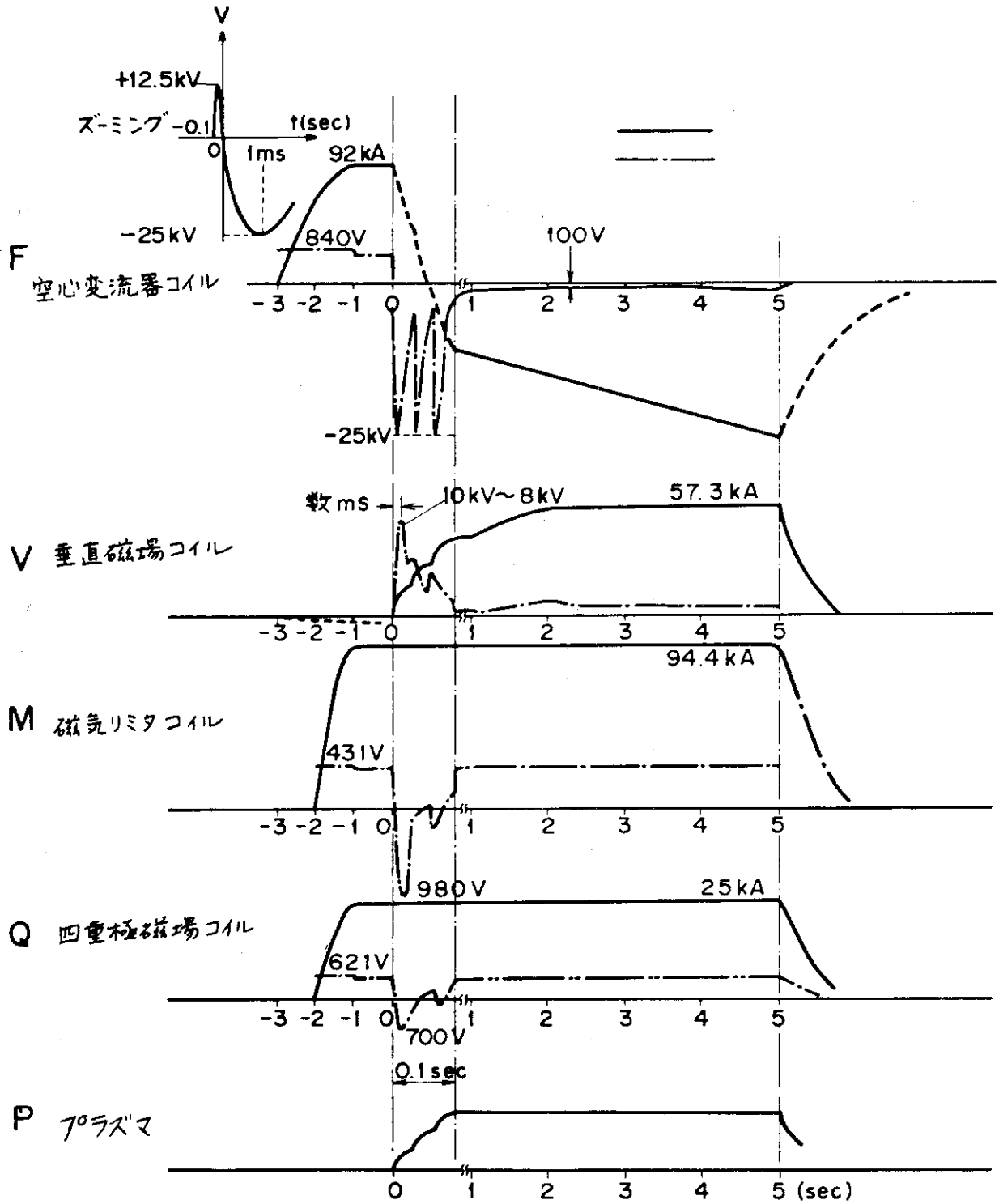


Fig. 23 ポロイダル磁場コイルの運転モード

3. 実験装置および実験方法

3.1 試料および電極構成

3.1.1 試料

試料形状および寸法を Fig. 3.1 に示す。試料はポロイダル磁場コイル形状を模擬した。導体の寸法は実機の断面の縦横比がほぼ等しくなるよう考慮し、絶縁材料とその厚さは実機と同一とした。

導体材料は JIS-H3140-1977 に規定される C-1100-BB-O 銅ブスバーを使用した。絶縁材料は日立化成工業(株)製のエポキシセミキュアガラス裏打ち集成マイカテープおよびエポキシセミキュアガラステープをそれぞれハーフラップ17回巻、4回巻し(絶縁厚さ8mmのとき)、130°C、15時間相当の加熱を行い製作した。

模擬コイルの個数、絶縁厚さ、 γ 線の照射線量率などをまとめて Table 3.1 に示す。表に示す 1N0~1N18 は絶縁厚さ8mmの試料において沿面距離100, 200, 300mmとし、照射下(1×10^6 R/h)と非照射下(0 R/h)の場合について実験を実施した。2N1~2N6は絶縁厚さが沿面閃絡に及ぼす影響を試験するもので、絶縁厚さ4mmの試料を用いて沿面距離200mm、線量率 1×10^6 , 0 R/hの場合について実施した。また3N1~3N3はコイルが多重並列の状態での沿面閃絡について試験するもので、沿面距離200mm、線量率 1×10^6 R/hの場合についてのみ実施した。

3.1.2 試料調整

試料は絶縁層表面を清浄にするため、アセトンを浸みこませた白布で2回拭き取り、温度27~28°C、湿度RH55~58%下に保管したものをを使用した。

3.1.3 電極構成

Fig. 3.2 に電極構成を示す。電極は試料に金属箔(アルミ)を巻いたものとした。これは実機接続部の電極状態ではコイル導体が空間に露出することがないことを考えると、実験条件は実機よりも厳しくなっている。

3.2 装置および方法

3.2.1 実験方法

Fig. 3.3 に実験回路を示す。 γ 線照射には高崎研究所コバルト2棟照射施設の第6照射室を使用し、照射室内に試料を設置し試験用変圧器、誘導電圧調整器、操作盤および波形観測装置は照射室外に設置した。

実験は ^{60}Co - γ 線を定常的に照射している状態で交流電圧を印加し、Fig. 3.4に示す各電圧

レベルにおいてコロナパルス（今回は最大放電電荷量を測定した）、低周波電流を測定するとともに、電圧上昇中における沿面閃絡電圧（FOV）を測定した。Fig. 3.4に電圧上昇法を示す。昇圧速度は1 kV/secとした。また照射下と非照射下での雰囲気条件の差異の影響を最小限にするため照射下と非照射下の実験を各試料について交互にくり返した。さらに試料を一度閃絡させた場合には再度使用しないことを原則とし、履歴の影響が入らないようにした。

非照射下の実験では各電圧レベルにおける放電状態および閃絡状態の写真を撮影した。

3.2.2 実験装置の配置

試験装置の全体配置をFig. 3.5に示す。試料からのリード線は照射室のコンクリート壁（1.2 m）を貫通するスリーブを通して引出した。高電圧リード線を通すスリーブ（内径100 mmφ）の内壁は導体であるため、ブッシング表面にコロナ防止策を施した。高電圧側リード線の構造をFig. 3.6に示す。

3.2.3 試料の設置状態

照射室内照射台上での試料設置状態をFig. 3.7に示す。試料は板状線源（1800×300 mm）と平行に設置し、約 10^6 R/hの照射線量率が試料面上で出来るだけ均一に保てるように位置合せをした。照射台上および線源保護板の表面を絶縁シート（ポリイミドフィルム）で蔽い、その上に2個の絶縁ブロックを介して試料を設置することによって他部への沿面閃絡を防止した。

また、3段重ね試料の設置状態もこれに準じた。

3.2.4 実験装置の仕様

試験用変圧器の仕様をTable 3.2に示す。また誘導電圧調整器の仕様をTable 3.3に示す。試験用変圧器の容量はγ線による大きな電離電流が流れることを予想して選定した。

波形観測法については、あらかじめ具体的観測法についての検討を行い、Fig. 3.8に示す方法を用いた。3.3にその検討について記述する。

3.2.5 実験パラメータと追加実験項目

実験パラメータを整理すると以下のようになる。

- ① 印加電圧 0～50 kV, 昇圧速度 1 kV/sec
 - ② 照射線量率 0および 1×10^6 R/h
- 線源および照射条件については3.4に記す。
- ③ 沿面距離 100, 200, 300 mm
 - ④ 測定量 コロナパルス（最大放電電荷量）、低周波電流
閃絡電圧（FOV）

上記の沿面閃絡実験の他に、以下の測定および実験を行った。

- (a) 照射下と非照射下における電極間の直流抵抗
- (b) 照射下と非照射下における絶縁材体積抵抗

- (c) 低線量率での直流抵抗
- (d) 1×10^6 R/h \times 26 時間照射後試料の F O V, 直流抵抗
- (e) コロナ発生以下の電圧における低周波電流

その他に、上記実験回路を用いて基礎データを得るために、球ギャップおよび P T F E 棒試料によって照射下、非照射下の放電電圧の確認を行った。

また、実験条件と実機条件の差を比較するために実施した試験について 6.4.1 に示す。

3.3 コロナパルスおよび電流波形観測法

3.3.1 目的

硬 X 線雰囲気中でポロイダル磁場コイル絶縁の沿面閃絡試験を行うに際し、コロナパルスと電流波形を同時に観測する具体的方法を検討する。

3.3.2 電極構成

Fig. 3.9 a) に示す電極設置の方法が実機条件と合致する。測定の対象は図に示す高圧電極 B とアース電極 C 間のコロナパルスと、高圧電極 B (接続部の中心導体が露出している状態を模擬) とアース電極 C 間の電流波形の測定である。なおコロナは B, C 間では、背面電極 A の影響で、ほとんど C の端で出るが、このコロナは A, C 間を流れ B, C 間にはほとんど出ない。したがってコロナは A, C 間のものを観測する。

コロナパルスと低周波電流を同時に観測するため、電極のとり方を b) のように変更する。a) と b) は電界的には全く同一であり、等価が成立する。C と A 間のコロナパルス電流 i_1 と、C と B 間の電流 i_2 の波形を観測する。交流で試験するので、コロナ発生的にみても a) と b) は等価である。

3.3.3 予備試験

(1) 実験回路

Fig. 3.8 のような回路により検討を行った。シンクロスコープは 1 台の 2 端子を用いた。

(2) 実験結果

予備試験として手持ちの絶縁厚さ 6.9 mm, 周長約 200mm のマイカ絶縁コイルを供試し、間隔 $\ell=100$ mm でコロナパルス波形および低周波電流波形を観測した。

Fig. 3.10 にコロナパルス波形の例を、Fig. 3.11 には低周波電流波形の観測例を示す。

Fig. 3.12 は最大放電電荷量の電圧特性を示す。負極性コロナと正極性コロナは、トリガーレベルを変更することにより分けて観測できる。

Fig. 3.13 は低周波電流の電圧特性を示す。電圧上昇につれて電流波形に歪みが生じ (コロナによる), 正極性電流と負極性電流に差がでてくる。

3.3.4 印加電圧の限界

電流波形の観測を行う電圧に関しては次の問題点がある。

- ① 沿面閃絡電圧は雰囲気および履歴により非常に影響を受けやすく、沿面閃絡の直前まで印加すると観測中に閃絡がおこる可能性が多分にある。
- ② 閃絡がおきたときにシンクロスコープを保護する方法として、バイパスフィルターの検出抵抗と並列に放電管を入れる方法があるが、その保護能力は100%を期待できない。(Fig. 3.9においては45 kVで閃絡した。)

以上のことから印加電圧としては、予想される平均閃絡電圧の50%までが限界であると考えられる。従って4 kVから20 kVの間で波形観測を行うこととした。

3.4 γ 線照射

3.4.1 γ 線源および照射法

γ 線源には150 kCiの板状線源(縦30 cm, 横180 cm)を用いた。線源はペンシル型カプセル14本を1ユニットとする線源ケース(300×220 cm)8枚によって構成されている。非照射時には線源は水面下4 mの格納されており、照射は昇降装置によって線源を照射室内の所定の位置に上昇させて行われた。1回の照射試験における線源側の試料面の照射線量率と時間との関係をFig. 3.14に示す。線源の上昇および下降時間はともに約3分であり、正味の照射時間は1回あたり10~30分であった。

3.4.2 照射線量率の測定

試料をFig. 3.7のように設置した状態でのコイル表面(表と裏)の照射線量率分布の測定はコバルトガラス線量計(DC-315)⁽¹⁰⁾を用いて行った。測定のための照射においてはFig. 3.15に示す各点にコバルトガラス(40×15×1.5 mm)を2枚ずつ貼付け、線源側の面(A面)については10分間、反対側(B面)については20分間の照射を行った。照射後のコバルトガラスの黒化度測定は島津デジタルダブルビーム分光光度計(UV-21A)を用いて行い、各点の照射線量率を求めた。測定結果をTable 3.4に示す。A面は約 10^6 R/hであり、ヨコ方向、タテ方向とも線量率は均一である。B面の線量率はコイルの銅による吸収が大きいため、A面の半分以下の値を示した。

3.4.3 照射室内の温度および湿度の測定

照射室内の温度と湿度が実験結果に与える影響を最小限にするため、両者とも出来るかぎり一定の条件を保つ必要がある。しかし照射室内では温度と湿度の厳密な制御が難しいため、実験期間中(8月8日~8月10日)の照射室内の温度と湿度の監視のみをするにとどめた。湿度測定には毛髪自記湿度計(いすず製作所製)を用いた。監視した結果をFig. 3.16に示す。温度は27~30°C, 湿度は55~63%の範囲にあり、ほぼ一定の雰囲気条件とみなすことができた。

3.4.4 非照射下における照射室内外の環境線量率測定

非照射下における球ギャップの放電電圧の測定においては放電電圧のばらつきは環境線量率

に依存する。これに関連して今回の実験条件では線源格納時の照射室内の線量率が室外の通常
 の環境下とは異なる可能性があるため、照射室内外におけるバックグラウンドの線量率測定を
 行った。測定には γ 線シンチサーベイメータ (Aloka TCS-121C) を用いた。その結果線
 源格納時の照射室内および室外の線量率はそれぞれ $3.5 \sim 4.5 \mu\text{R}/\text{h}$ 、 $5.7 \mu\text{R}/\text{h}$ となり、顕著
 な差はないことがわかった。

Table 3.1 模擬コイル試料一覧表

コイルNo.	コイルの 絶縁厚 (mm)	電極構成	沿面距離 ℓ (mm)	照射条件 (R/h)	備 考
1N0 , 1N3 , 1N5	8	Fig. 3.2	100	0	1. $\ell=50$ について も検討 2. 表面抵抗, 体積抵 抗も測定
1N2 , 1N4 , 1N6				10^6	
1N7 , 1N9 , 1N11			200	0	
1N8 , 1N10, 1N12				10^6	
1N13, 1N15, 1N17			300	0	
1N14, 1N16, 1N18				10^6	
2N1 , 2N3 , 2N5	4		200	0	照射線量をかえた場 合も検討
2N2 , 2N4 , 2N6				10^6	
3N1 , 3N2 , 3N3	8	Fig. 3.2	200	10^6	3段重ね

Table 3.2 試験用変圧器使用

試験用変圧器使用	
形 式	屋内用油入自冷式
定 格	(1) 单相 50Hz (2) 1次電圧：440V 2次電圧：150kV (3) 1次容量：20kVA 2次容量：20kVA (4) 時間定格：30分間
重 量	約1500kg

Table 3.3 誘導電圧調整器仕様

誘導電圧調整器仕様	
形 式	SIB-1
定 格	(1) 单相 50Hz (2) 1次電圧：220V 2次電圧：0~440V (3) 容量：20kVA
重 量	約755kg

Table 3.4 線量率分布測定結果

測 定 位 置										
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
線量率 (R/h)	1.043	1.030	1.058	1.018	1.022	0.9956	0.9826	0.4464	0.4660	0.4710
	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$	$\times 10^6$

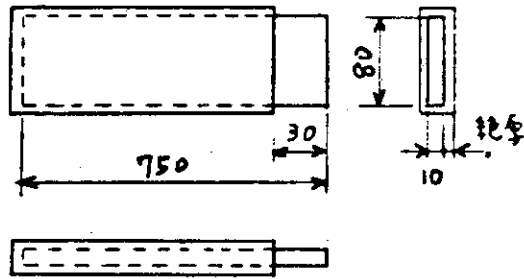


Fig. 3.1 模擬コイル試料の形状寸法

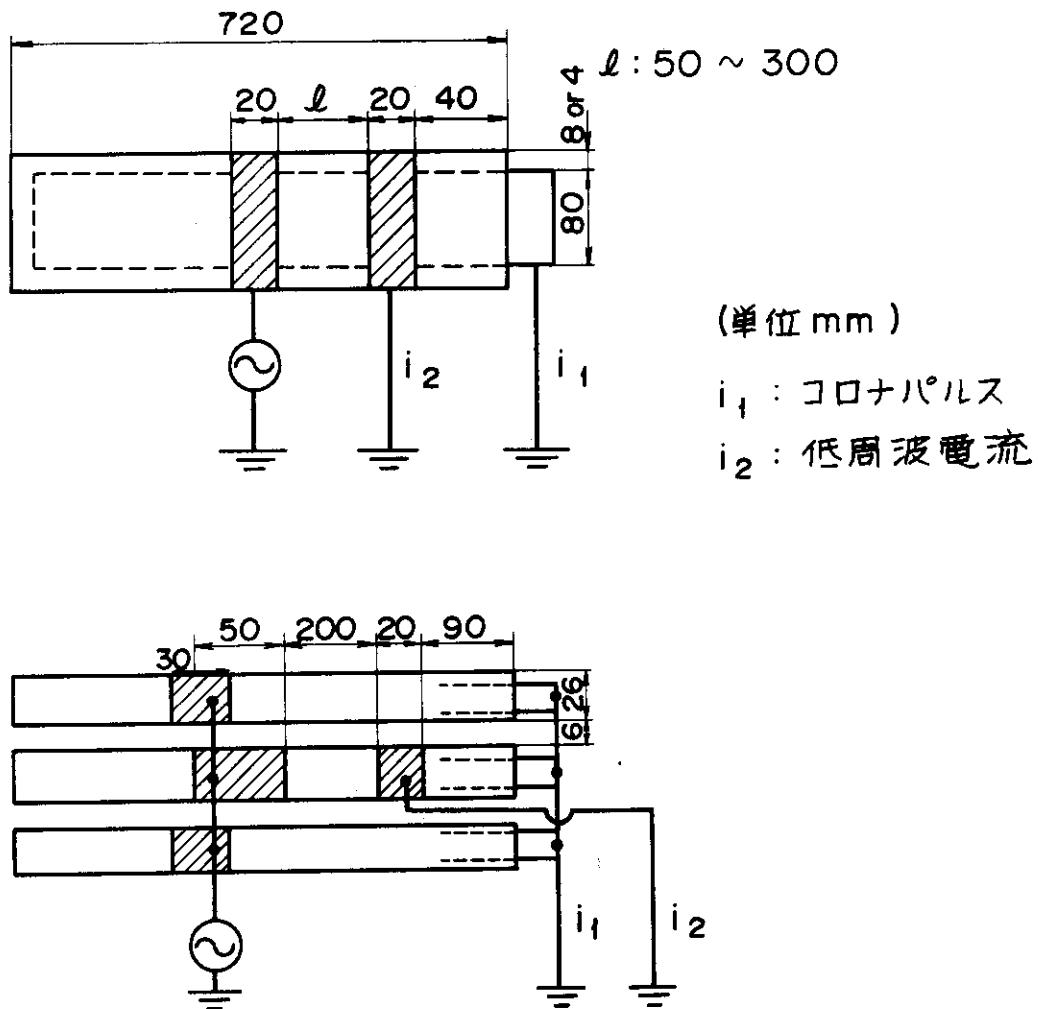


Fig. 3.2 模擬コイルの電極構成 斜線部は電極を示す

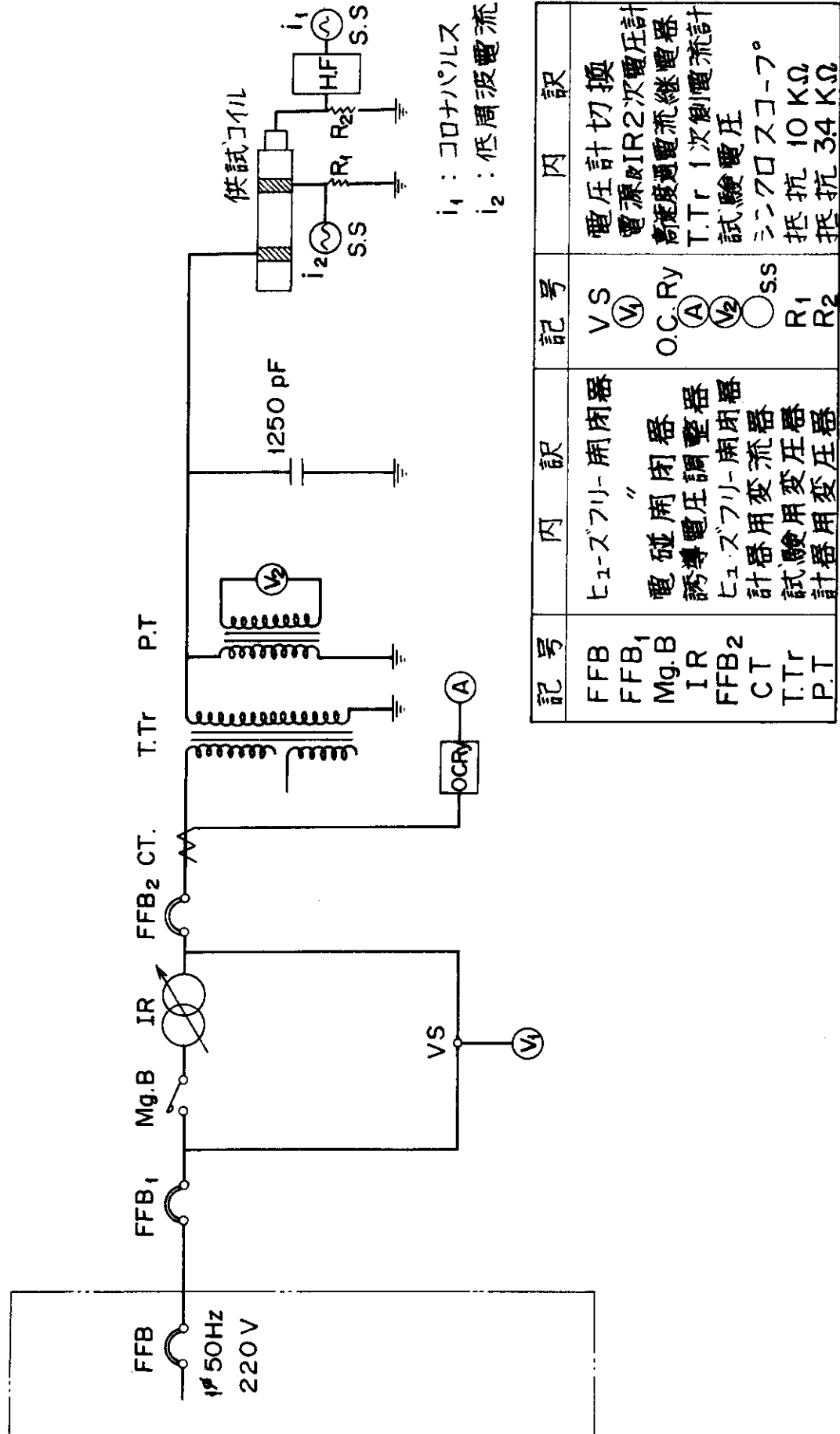


Fig. 3.3 実験回路

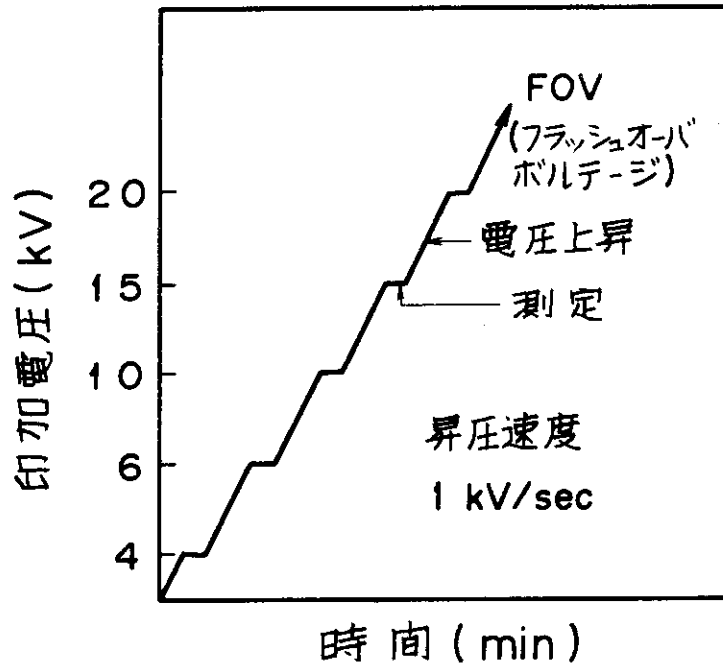


Fig. 3.4 電圧上昇法

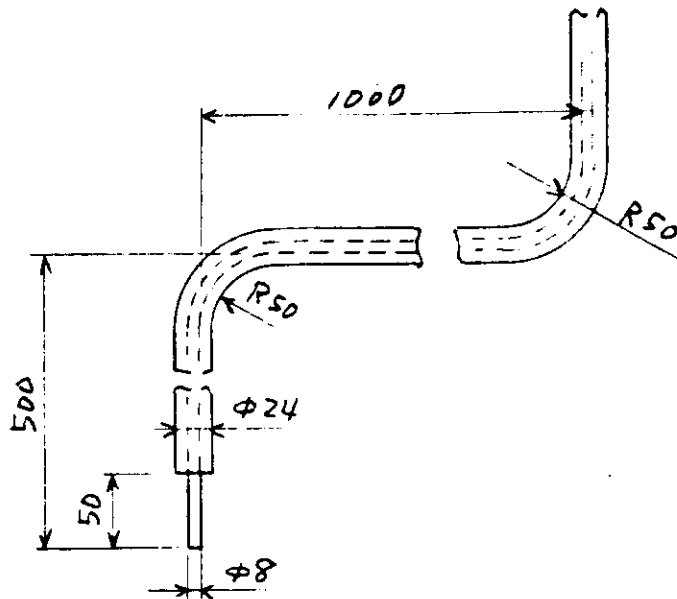


Fig. 3.6 コンクリート壁貫通リード線 (高電圧側)

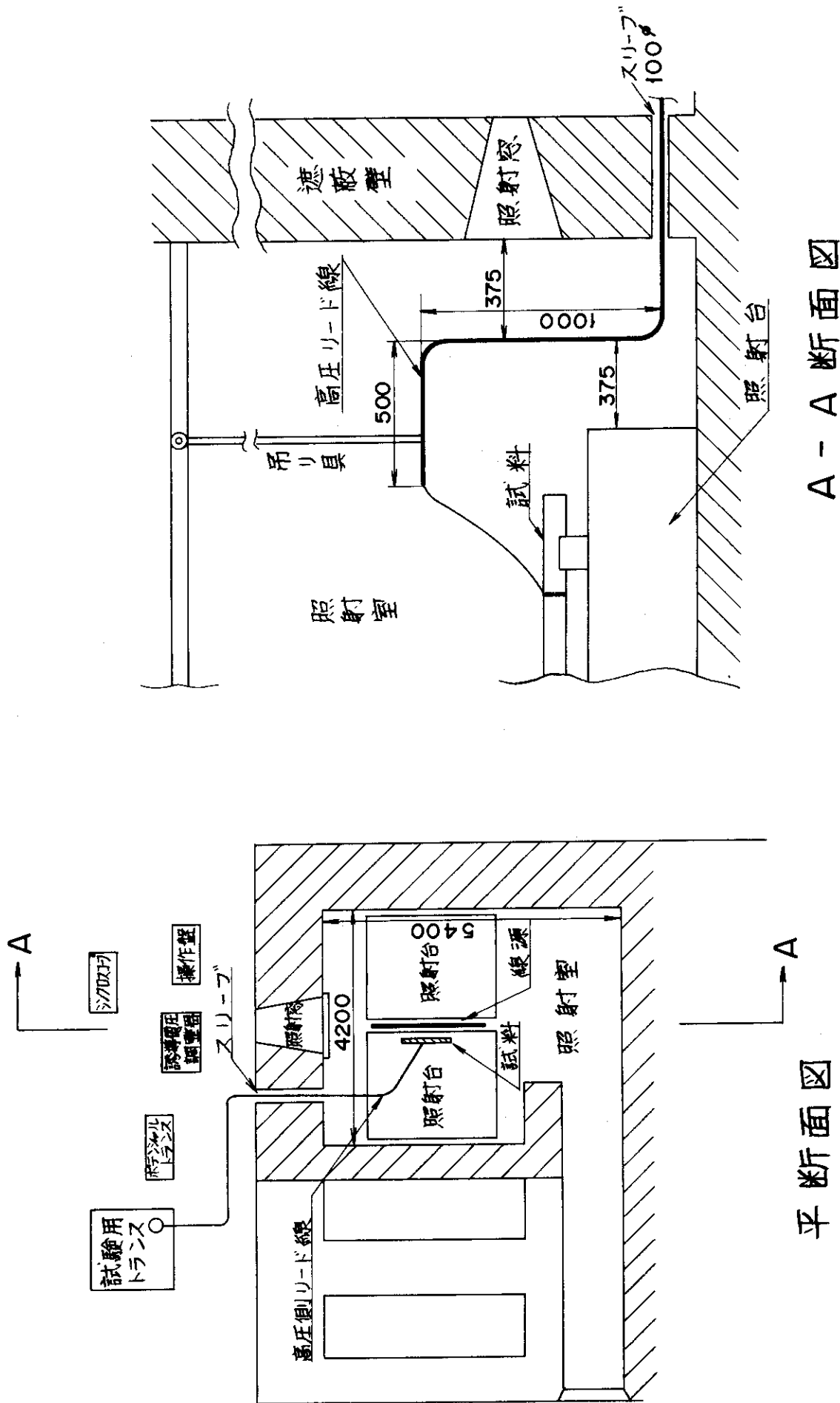


Fig. 3.5 試験装置の配置

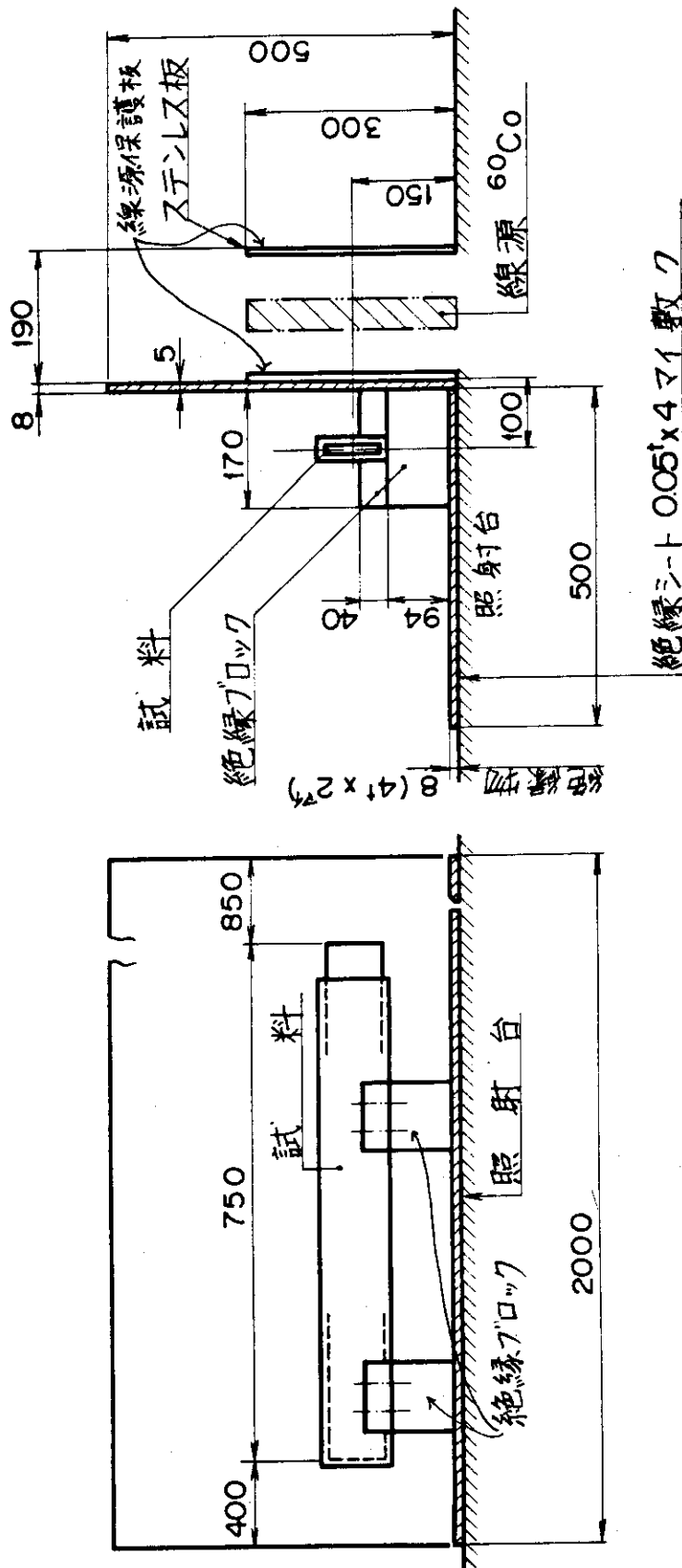
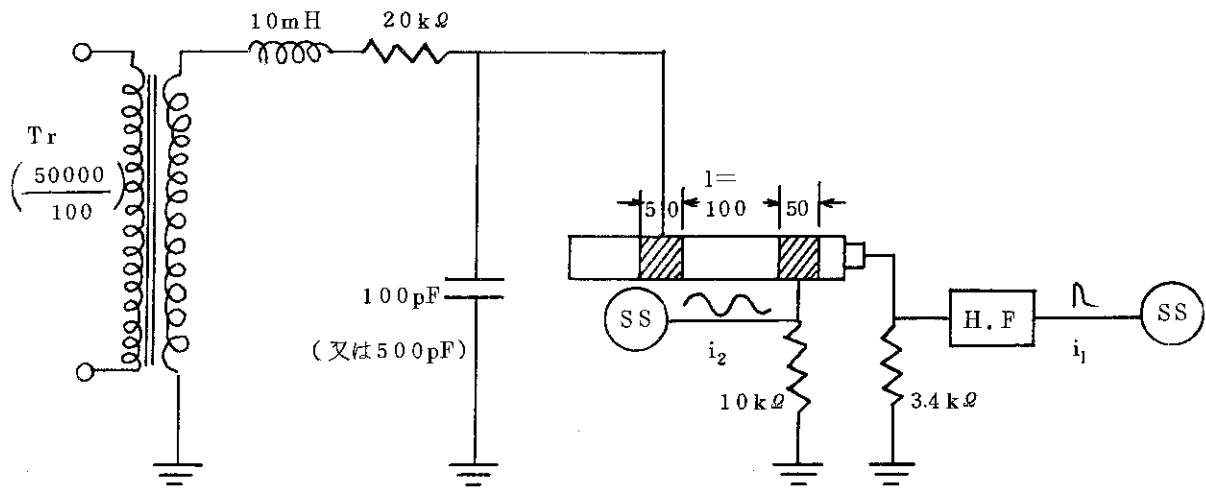


Fig. 3.7 照射室内の試料の設置状態



注) 供試コイル：発電機コイル（絶厚 6.9 mm）
 H.F：ハイパスフィルター
 SS：シンクロスコープ（日立 V-500）1台

Fig. 3.8 波形観測法検討のための実験回路

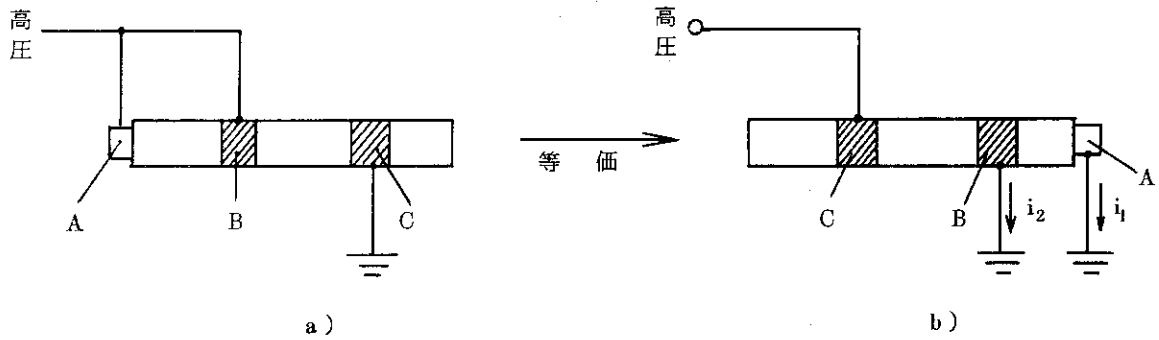
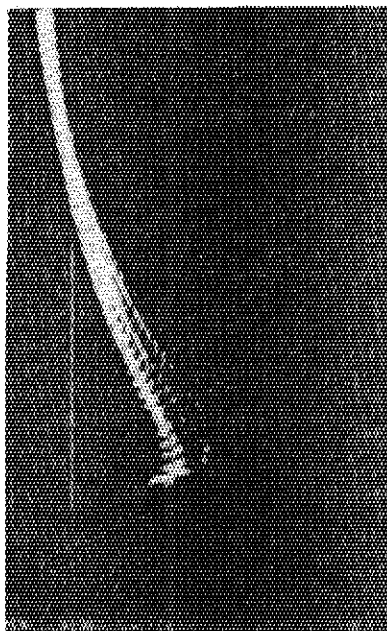
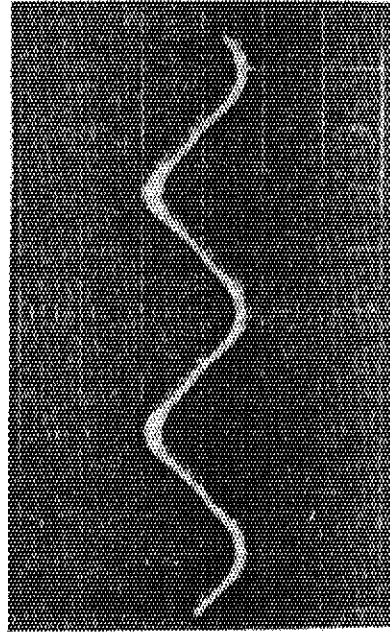


Fig. 3.9 電極のとり方



($0.2\mu\text{S}/\text{div}$, $0.01\text{V}/\text{div}$, 10kV)
(シャッター速度 1sec)

Fig. 3.10 コロナパルス波形



($5\text{ms}/\text{div}$, $0.2\text{V}/\text{div}$, 10kV)
(シャッター速度 $1/15\text{sec}$, 単掃引)

Fig. 3.11 低周波電流波形

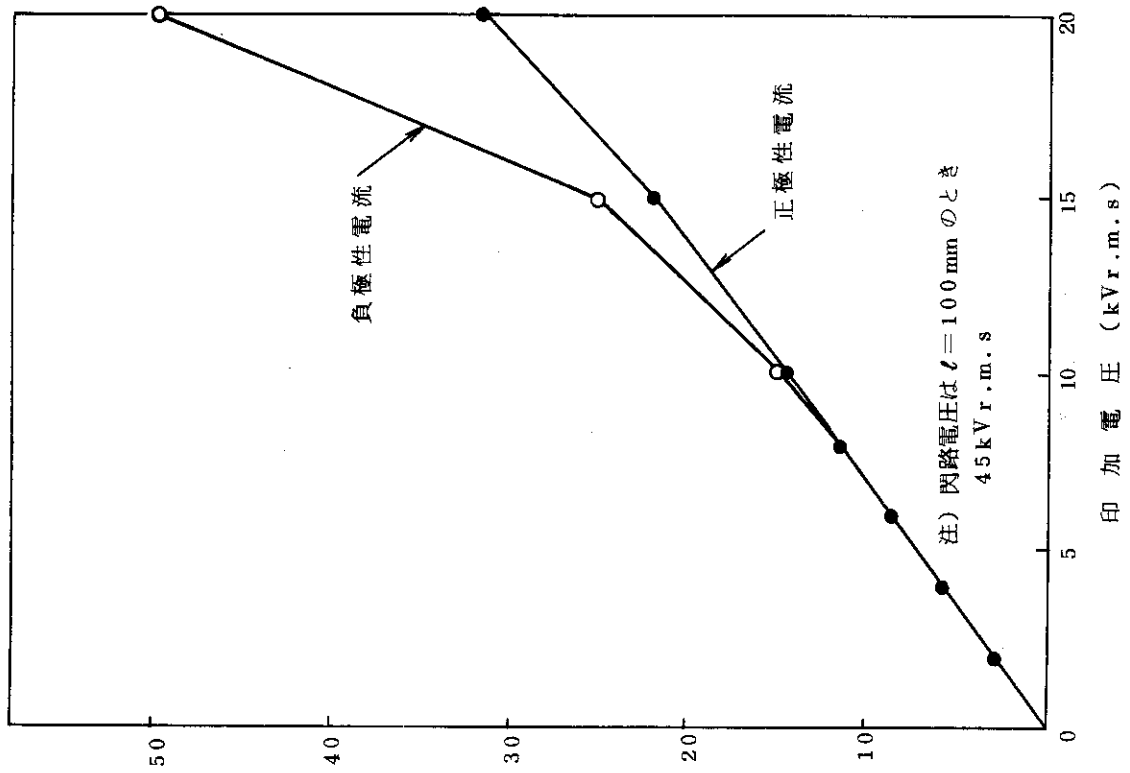


Fig. 3.13 低周波電流特性

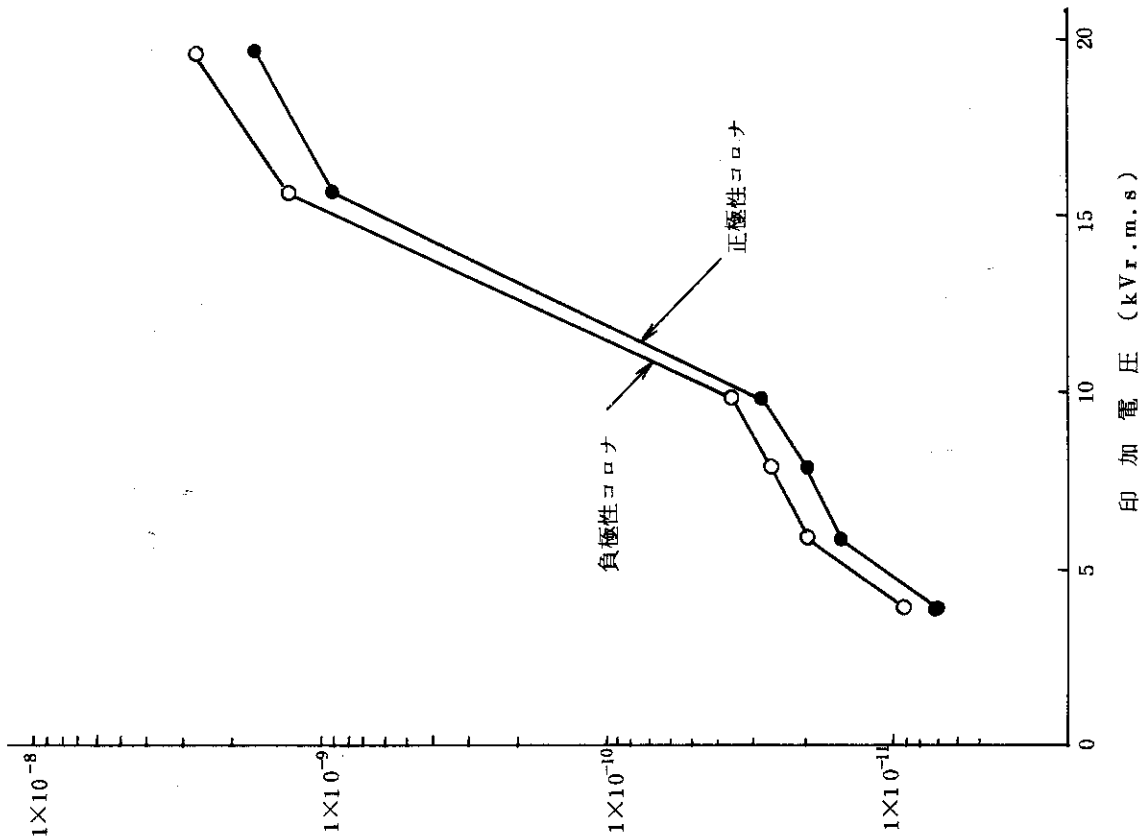


Fig. 3.12 コロナ特性

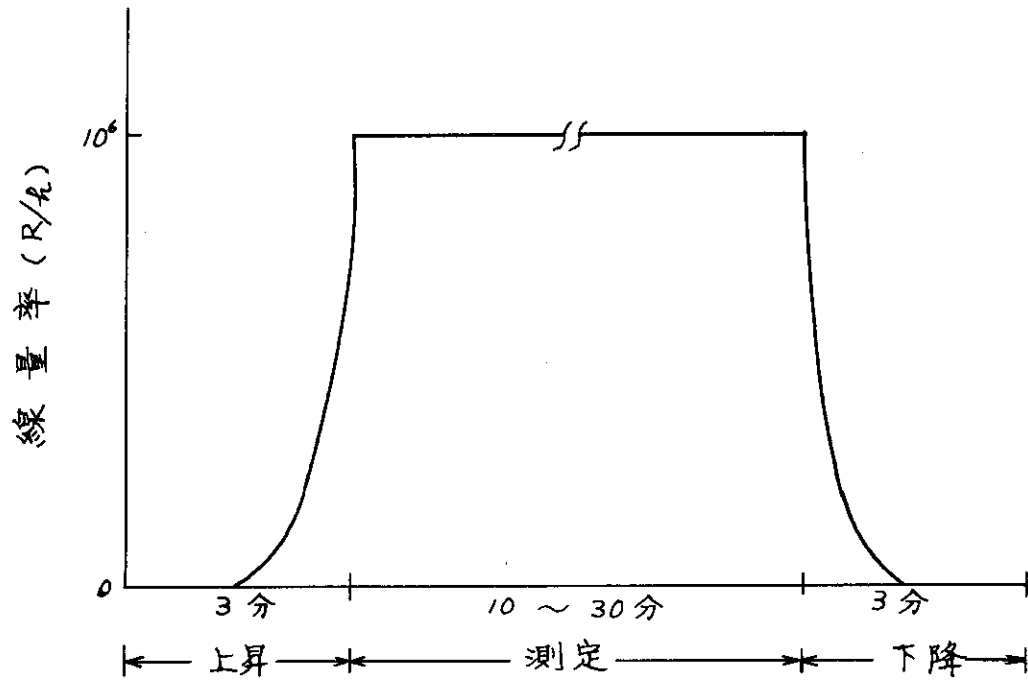


Fig. 3.14 照射線量率と時間との関係

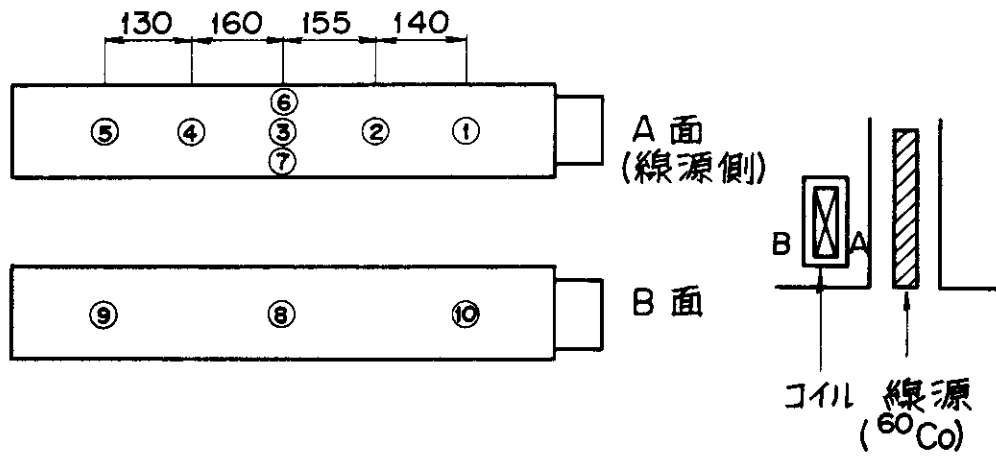


Fig. 3.15 照射線量率測定点

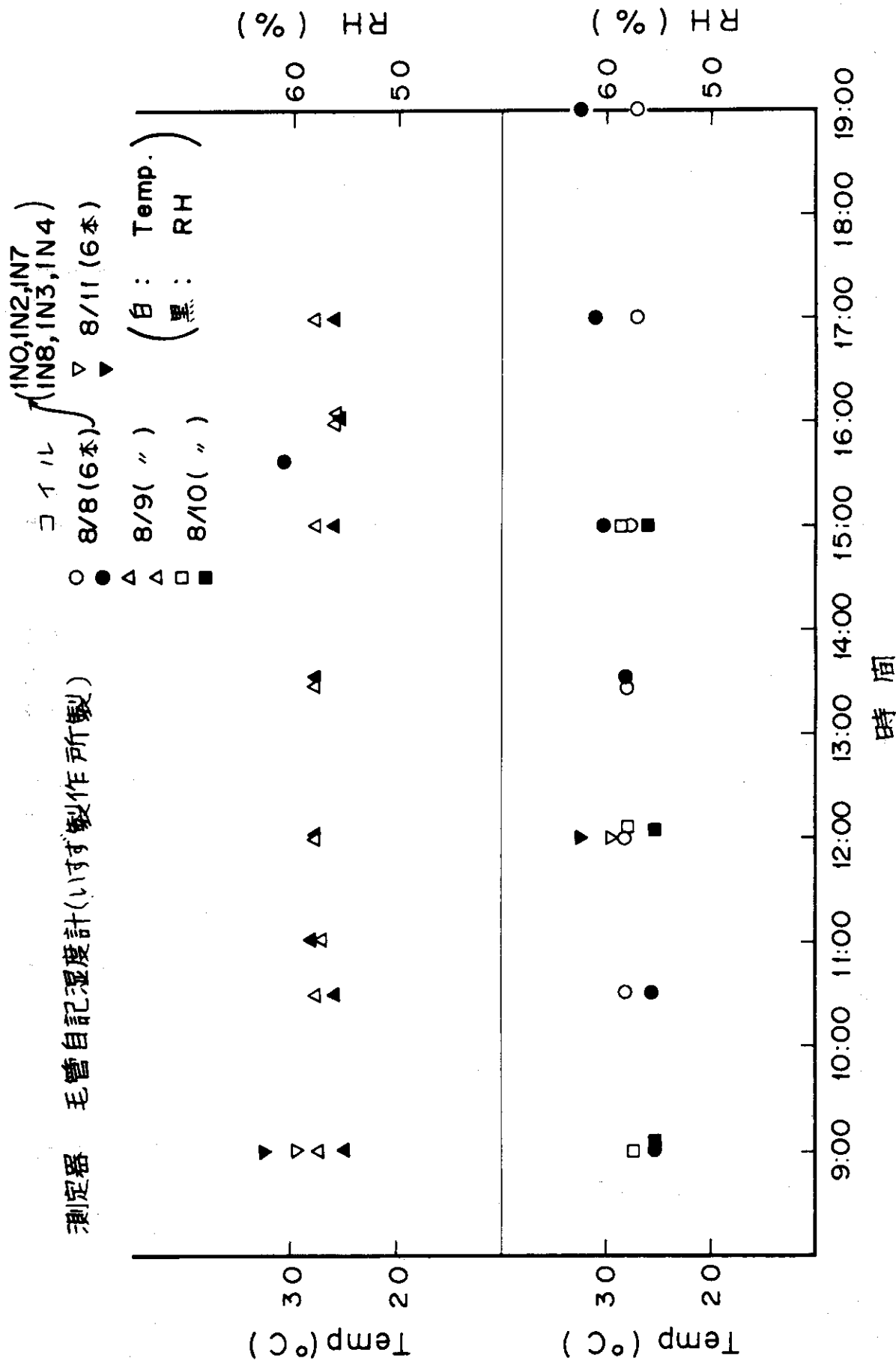


Fig. 3.16 照射室内の温度と湿度の時間変化

4. 実験結果^(*)

4.1 模擬コイルの沿面放電特性

4.1.1 コロナパルス（最大放電電荷量）

Fig. 4.1~Fig. 4.6 にコロナパルスの電圧特性を示す。実験で行ったすべての試料についてのデータが示されている。照射下と非照射下に対して、各々正極性パルス、負極性パルスを示している。また測定した最大放電電荷量は1サイクル当り1個以上安定して出るコロナについて最大のものを見たものである。

Fig. 4.7は最大放電電荷量を沿面距離に対してプロットした図である。

またFig. 4.8は最大放電電荷量を絶縁厚さに対してプロットしたものである。

これらの図から、照射下と非照射下のコロナパルス特性を比較すると以下のようになる。

- (1) 低電圧域では最大放電電荷量は、照射下では非照射下よりも小さく、高電圧域ではそれが同程度となる。
- (2) 低電圧域では照射下の曲線の勾配が非照射下の場合とやや異なる。
- (3) 照射下の正極性パルスは20 kV 付近では非照射下の正極性パルスとほぼ同程度となるが、一方照射下の負極性パルスは非照射下の負極性パルスよりも小さいように見える。ただし低電圧域でのそれらの比、非照射下の負極性パルス/照射下の負極性パルスは十数倍あるのに対して20 kV 近くではそれらが3倍程度となる。
- (4) 最大放電電荷量は沿面距離によってあまり変わらない。図では電圧6 kV の場合だけが示されているが、この傾向は他の電圧レベルにおいても同様である。ただし4 kV ではデータのばらつきが大きくなっている。
- (5) 非照射下、照射下ともに正極性パルスが負極性パルスより大きく、沿面距離が変わっても同じ傾向になっている。
- (6) 絶縁厚さ4 mmの方が絶縁厚さ8 mmの場合より、最大放電電荷量は大きい。図には6 kV の場合だけが示されているが4~20 kV の範囲で同じ傾向を示す。
- (7) 絶縁厚さ4 mmの場合も絶縁厚さ8 mmの場合と同様に照射下における正極性および負極性パルスが、非照射下のそれらよりも小さい。
- (8) 絶縁厚さ4 mmの場合、絶縁厚さ8 mmの場合よりも低い電圧で照射下の正極性パルスが非照射下の正極性パルスに近くなるように思われる。また20 kV 近くでは非照射下の正極性パルスと照射下の正極性パルスに差がなくなるように思われる。

模擬コイルの照射下、非照射下におけるコロナパルスを比較して上記(1)~(8)の結果が得られたが、この中で照射が沿面放電にどのような影響を与えるかという観点からみて特徴的なのは(1)であろう。

(*)全測定データシートを付属資料として末尾に添付する。

模擬コイルの沿面閃絡は不平等電界中におけるストリーマ破壊である。測定された最大放電電荷量はこのストリーマの伸びの長さに関連していると考えられる。

コロナパルスに対する上の結果(1)は、後述の低周波電流特性、FOV特性等をも考慮した上で物理的説明がなされるのであろうが、一つの推測として照射による静電界の緩和効果によるためという見方もある。また照射による初期電子供給ということから、放電の統計的時間遅れが小さくなるため、これがコロナパルスに対して影響を及ぼすことが考えられる。

したがって照射による静電界の緩和が起こるのか、またコロナが発生し始める電圧がどうなるのかということが問題となるが、一つには今回の実験は高線量率 γ 線照射下でのFOVの変動を確認することが第1の目的であること、また実機コイル形状を模擬した試料を用いて実験を行っているため、実際のコイルでどうなるかという点については適しているが照射の影響を解析するという立場からは難しくなると考えられる。この点については球ギャップ、PTFE棒の実験が一般的である。

また上の結果(3)、(5)は、不平等電界における負極性パルスの一般的な特徴を示すものであり、(7)は絶縁厚さが小さいほど静電容量が大きいので、ストリーマがよく伸びることによると解釈される。

4.1.2 低周波電流

Fig. 4.9~4.14 に低周波電流の電圧特性を示す。実験で行ったすべての試料についてのデータが示されている。照射下と非照射下に対して各々正極性電流、負極性電流が示されている。

Fig. 4.15は低周波電流を沿面距離に対してプロットしたものを示す。

Fig. 4.16は低周波電流を絶縁厚さに対してプロットしたものである。

これらの図より、照射下と非照射下における低周波電流を比較し、以下の特徴がうかがえる。

- (1) 低周波電流は、4~20 kVの範囲で照射下では3~4倍大きくなる。
- (2) 照射下では正極性電流と負極性電流にかなりの差が認められる。一方非照射下ではそれらが同程度である。
- (3) 沿面距離が小さい方が低周波電流は大きい。
- (4) 絶縁厚さによって低周波電流は変わっていない。

ここで測定された照射下での低周波電流が沿面を流れるものか、それとも空気中の電離電流なのかについて明らかにすること、また照射下での低周波電流の成分を確認することは沿面閃絡に対する低周波電流の影響について議論するうえで必要である。これについての検討が6に示されている。

Fig. 4.17にコロナパルスと低周波電流の写真、Fig. 4.18にコロナパルスの発生状況を示す。Fig. 4.17では低周波電流に歪みが認められる。(6.2において検討)

4.1.3 沿面閃絡電圧(FOV)

Fig. 4.19に模擬コイルの全試料について、FOVの測定結果を沿面距離に対してプロットしたものが示されている。図中の実線は各データの平均値を結んだ線である。

またFig. 4.20はコイルを長時間照射した後測定したFOVを照射時間に対してプロットし

た図である。この場合照射中の絶縁材表面温度は、Fig.4.21に示す位置に感温素子を貼付け測定した結果では約50°Cであった。

Fig.4.22はFOVの写真を示している。いずれも非照射下で撮影したものである。

これらの図より、模擬コイルの照射下および非照射下におけるFOVを比較すると以下のようになる。

- (1) 模擬コイルの照射下のFOVは、沿面距離50~300mmの範囲で、非照射下と同程度またはむしろ高くなる傾向が認められる。
- (2) 絶縁厚さ4mmの場合も絶縁厚さ8mmと同様に、照射下の方がFOVはやや高い。また絶縁厚さ8mmと4mmでは、4mmの方がFOVは低くなる。
- (3) 3本平行コイルの場合のFOVは1本の場合と変わらない。
- (4) 長時間照射後(10⁶R/h×26h)のFOVについては、照射以前と変わらずFOVの低下は認められない。

上の結果が示すように、模擬コイルのFOVは本実験条件における照射下で少なくとも低下することはないという重要な事実が確認された。照射下でむしろFOVが高くなるという結果に対する説明として、照射による電界緩和という観点から議論がなされるであろう。

4.1.4 電極間の直流抵抗

Fig.4.23に模擬コイルの直流電圧-電流特性を示す。図中2N2試料は26h×10⁶R/hの照射後の測定結果である。非照射試料2N2および2N3は、日立研究所に於て再測定した結果である。線量率の変化は試料と線源間の距離を変えて調整した。測定値は1分値を示す。

Table4.1は直流抵抗の値を照射線量率に対して示している。Table4.2は長時間照射の照射歴と直流抵抗の関係を示す。

図より照射下の直流電圧-電流特性についての測定結果は以下となる。

- (1) 電圧1kV、沿面距離10mmでは、1×10⁶R/hの照射下でみると非照射下に比べて5桁ほど電流が大きい。
- (2) 照射下の電流は電圧にほぼ比例している。

4.1.5 体積抵抗

Table4.3およびFig.4.24に体積抵抗測定結果を示す。抵抗値は1分値を示す。Fig.4.25は体積抵抗測定のための電極を示す。測定結果によると照射下では非照射下より3桁ほど体積抵抗の低下が認められるが、6.3節に示すように照射下の場合は空気中の電離電流を測定しているものと考えられる。

4.2 標準球ギャップおよびポリテトラフルオールエチレン(PTFE)棒試料の放電特性

模擬コイルの照射下沿面閃絡試験に対する基礎データを得るため、簡単な電極配置によって照射下の放電電圧の変動を確認した。実験装置は電源、測定器などコイル絶縁試験と同一のものである。球対球ギャップの火花放電電圧およびPTFE棒試料沿面放電電圧の測定のため、

Fig.4.26に示す電極系を使用した。(なお、沿面放電に関してはガラス管(内部に電解液充てん)試料を準備したが、都合により実験できなかった)

4.2.1 標準球ギャップの放電特性

Table4.4に標準球ギャップの放電電圧の全測定値を示す。

Fig.4.27に放電電圧をギャップ長に対してプロットしたものを示す。照射線量率は 4×10^5 R/hである。印加電圧はAC, 電圧上昇率は 750 V/sec である。非照射下のFOVの値は標準データ⁽¹¹⁾と比較的良好一致している。

Table4.5, Fig.4.28は球ギャップ間の空気の直流抵抗測定値を示す。測定値はすぐに定常値に達し、ヒステリシス現象は認められなかった。ギャップ長 $l=5 \text{ mm}$ の場合は3分値を示し、 $l=1 \text{ mm}$ の場合は1分値である。

これらの球ギャップに関する測定の結果として以下のことが得られた。

- (1) 照射下(4×10^5 R/h)ではFOVはわずかに低下する。
- (2) 照射下(4×10^5 R/h)ではFOVの測定値のばらつきが小さくなる。
- (3) ギャップ間の直流抵抗は、測定したギャップ間隙では変わらない。

球ギャップの場合は完全な平等電界中の放電破壊であることを考えると、(1)や(2)に対しては照射による統計的時間遅れの減少による影響が要因として大きいと解釈される。また(3)はこの程度のギャップ長の変化では空間の実効電離容積が殆ど変化しないことによるものと考えられる。なお、球ギャップについては次章で、さらに線量率が増加した場合の実験結果が示されている。

4.2.2 PTFE棒試料の沿面放電特性

Table4.6に沿面放電電圧の測定値を示す。試料はテフロン丸棒($\phi 15 \text{ mm}$)で、これにアルミ箔電極を取付け、AC電圧を印加し、電圧上昇率は 750 V/sec とした。照射線量率は 4×10^5 R/hである。

Fig.4.29に沿面放電電圧を電極間距離に対してプロットした図を示す。

結果として以下のことが得られた。

- (1) 沿面の距離 10 mm , 18 mm では、照射下(4×10^5 R/h)と非照射下のFOVはほぼ等しい。
- (2) FOVは沿面距離に対して直線的に増加している。
- (3) FOVのばらつきは照射下と非照射下で変わっていない。

なお、PTFE棒についても次章で、さらに線量率が増加した場合の実験結果が示されている。

Table 4.1 直流抵抗と照射線量率の関係

コイルNo. 電極間 線量率 直流電圧	2 N 3 (照射歴なしのコイル)					
	0		8.55 × 10 ³ R/h		1 × 10 ⁶ R/h	
	ℓ = 10 mm	ℓ = 200 mm	ℓ = 10 mm	ℓ = 200 mm	ℓ = 10 mm	ℓ = 200 mm
1000V	> 2.0 × 10 ⁶ MΩ	> 2.0 × 10 ⁶ MΩ	5.7 × 10 ³ MΩ	2.3 × 10 ⁴ MΩ	2.9 × 10 ² MΩ	8.0 × 10 ² MΩ
500V	> 1.0 × 10 ⁶ "	> 1.0 × 10 ⁶ "	4.3 × 10 ³ "	2.2 × 10 ⁴ "	2.5 × 10 ² "	7.0 × 10 ² "
250V	—	—	3.4 × 10 ³ "	2.3 × 10 ⁴ "	2.2 × 10 ² "	6.3 × 10 ² "
100V	—	—	2.8 × 10 ³ "	3.0 × 10 ⁴ "	1.9 × 10 ² "	5.5 × 10 ² "

(注) 線量率変化は線源からの距離を変えて行った。測定値は1分値を示す。

Table 4.2 直流抵抗の長時間照射による影響

コイルNo. 照射歴 測定条件 電極間 直流電圧	2 N 3		2 N 2			
	なし		2.6時間照射 (10 ⁶ R/h)			
	非照射下		照射下		非照射下	
	ℓ = 10 mm	ℓ = 200 mm	ℓ = 10 mm	ℓ = 200 mm	ℓ = 10 mm	ℓ = 200 mm
1000V	> 2.0 × 10 ⁶ MΩ (1.5 × 10 ⁸ ")	> 2.0 × 10 ⁶ MΩ	2.9 × 10 ² MΩ	7.2 × 10 ² MΩ	> 2.0 × 10 ⁶ MΩ (4.0 × 10 ⁷ ")	> 2.0 × 10 ⁶ MΩ
500V	> 1.0 × 10 ⁶ MΩ	> 1.0 × 10 ⁶ MΩ	2.4 × 10 ² MΩ	6.8 × 10 ² MΩ	> 1.0 × 10 ⁶ MΩ	> 1.0 × 10 ⁶ MΩ
250V	—	—	2.1 × 10 ² MΩ	6.0 × 10 ² MΩ	—	—
100V	—	—	1.8 × 10 ² MΩ	5.2 × 10 ² MΩ	—	—

(注) () 内数値は日研で再測定結果を示す。測定値は1分値を示す。

Table 4.3 体積抵抗測定結果

コイルNo. 照射歴 測定条件 直流電圧	2N5, (2N3)		2N6, (2N2)	
	なし		26時間照射 (10 ⁶ R/h)	
	照射下	非照射下	照射下	非照射下
1000V	4.1×10 ³ MΩ *	1.5×10 ⁶ MΩ	2.5×10 ³ MΩ	5.0×10 ⁵ MΩ
500V	4.1×10 ³ "	>1.0×10 ⁶ "	2.1×10 ³ "	>1.0×10 ⁶ "
250V	3.8×10 ³ "	—	1.8×10 ³ "	>5.0×10 ⁵ "
100V	3.2×10 ³ "	—	1.4×10 ³ "	>2.0×10 ⁵ "

* 抵抗は1分値を示す。

Table 4.4 球ギャップの放電電圧測定結果

l (mm)	非照射 (1mR/h)				照射 (4.0×10 ⁵ R/h)				(1.0×10 ⁴ R/h)	
	5	10	15	18	5	10	15	18	5	15
放電電圧 (r. w. s) (kV)	13.6	23.3	34.5	39.6	12.2	21.8	29.9	34.9	12.2	31.9
	13.1	23.8	33.1	38.6	12.3	21.9	30.0	34.8	12.3	31.7
	13.1	23.8	32.6	38.6	12.2	21.9	30.0	34.9	12.3	31.7
	12.8	23.3	32.7	38.7	12.2	21.9	29.7	34.8	12.3	31.7
	13.2	23.5	33.3	37.4	12.2	21.9	29.7	34.9	12.2	31.8
	12.6	23.8	34.0	38.9	12.2					
	13.0	23.1	32.6	38.9						
	13.3		32.5	38.3						
	12.7		32.4	38.5						
	13.0			38.7						
測定値 (平均)	13.04	23.51	33.08	38.62	12.22	21.88	29.86	34.86	12.26	31.76
// (標準偏差)	0.30	0.29	0.73	0.55	0.04	0.04	0.15	0.05	0.05	0.09
気温 (°C)	27.5	27.3	27.5	27.8	27.5	27.3	27.5	27.8	28.0	28.0
気圧 (mb)	1011.4	1011.4	1012.8	1012.5	1011.4	1011.4	1011.8	1011.5	1011.5	1011.5
較正值 (平均)	19.46	35.04	49.22	57.62	18.23	32.60	44.44	52.01	18.35	47.54
// (標準偏差)	0.43	0.42	1.06	0.80	0.06	0.06	0.22	0.07	0.07	0.13

$$\text{較正值} = \text{測定値} \times \sqrt{2 \div \delta}, \quad \delta = \frac{293 \times P}{(273 + T) \times 1013} \quad (T \text{ } ^\circ\text{C}, P \text{ mb})$$

Table 4.5 球ギャップ間の空気の直流抵抗

ℓ (mm)		1		5	
線量率		1.0×10^4	4×10^5	1.0×10^4	4×10^5
印加電圧	1000V	$2.8 \times 10^9 \Omega$ ($3.57 \times 10^{-7} \text{A}$)	2.4×10^8 ($4.17 \times 10^{-6} \text{A}$)	$2.7 \times 10^9 \Omega$ ($3.77 \times 10^{-7} \text{A}$)	$2.8 \times 10^8 \Omega$ ($3.57 \times 10^{-6} \text{A}$)
	500	2.2×10^9 ($2.27 \times 10^{-7} \text{A}$)	2.0×10^8 ($2.50 \times 10^{-6} \text{A}$)	2.1×10^9 ($2.38 \times 10^{-7} \text{A}$)	2.0×10^8 ($2.50 \times 10^{-6} \text{A}$)
	250	1.7×10^9 ($1.47 \times 10^{-7} \text{A}$)	1.7×10^8 ($1.47 \times 10^{-6} \text{A}$)	1.7×10^9 ($1.47 \times 10^{-7} \text{A}$)	1.7×10^8 ($1.47 \times 10^{-6} \text{A}$)
	100	1.35×10^9 ($7.41 \times 10^{-8} \text{A}$)	1.5×10^8 ($6.67 \times 10^{-6} \text{A}$)	1.3×10^9 ($7.69 \times 10^{-8} \text{A}$)	1.5×10^8 ($6.67 \times 10^{-7} \text{A}$)

()内は電流値。

$4 \times 10^5 \text{ R/h}$		$\ell = 1 \text{ mm}$	
		電圧上昇時	電圧下降時
絶縁抵抗 (M Ω)	1000V	2.4×10^2	—
	500V	2.0×10^2	2.0×10^2
	250V	1.7×10^2	1.7×10^2
	100V	1.5×10^2	1.5×10^2
電流 (A)	1000V	4.2×10^{-6}	—
	500V	2.5×10^{-6}	2.5×10^{-6}
	250V	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}
	100V	6.7×10^{-7}	6.7×10^{-7}

(電圧上昇時と下降時の比較)

Table 4.6 テフロン棒試料の沿面放電電圧測定結果

l (mm)	10		18		40
線量率 (R/h)	0	4×10^5	0	4×10^5	0
沿面放電 電圧 (r.m.s) (kV)	9.0	9.3	1 3.5	1 4.5	3 2.2
	9.0	9.4	1 3.5	1 3.8	3 6.2
	9.0	9.4	1 3.7	1 4.1	2 7.8
	9.2	9.3	1 4.1	1 3.6	2 7.9
	9.2	9.4	1 3.8	1 3.7	2 8.3
	9.0	9.4	1 3.7	1 3.5	2 8.8
	8.8	9.4	1 3.8	1 3.6	2 8.9
	9.1	9.5	1 3.8	1 3.7	2 7.5
	9.1	9.4	1 3.8	1 3.6	2 6.4
	9.0	9.5	1 4.0	1 3.7	2 7.7
			1 4.1	1 3.7	2 8.3
			1 3.9	1 3.7	3 3.7
					2 9.5
					2 9.2
				2 8.3	
平均値 (ピーク値) <>内はr.m.s	1 2.78<9.04>	1 3.29<9.4>	1 9.53<13.81>	1 9.47<13.77>	4 1.55<29.38>
標準偏差 //	0.17<0.12>	0.09<0.07>	0.28< 0.20>	0.39< 0.27>	3.73< 2.63>
気温, 湿度	2 8.2 °C, 6 4%		2 8.7 °C, 6 4%		
気圧	1 0 1 1.5mb		1 0 1 1.5mb		

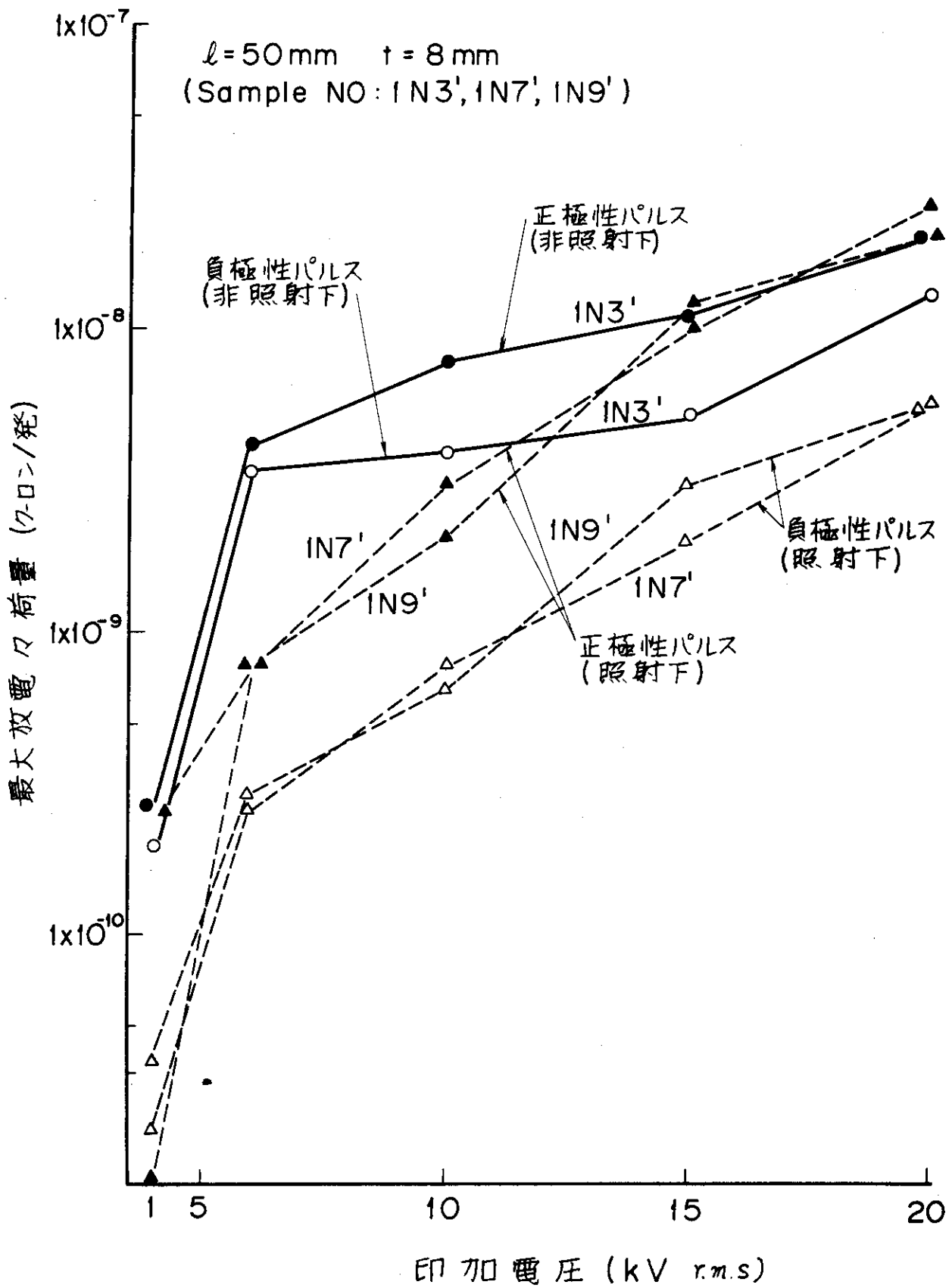


Fig. 4.1 コロナパルスの電圧特性 ($\ell = 50 \text{ mm}$, $t = 8 \text{ mm}$)

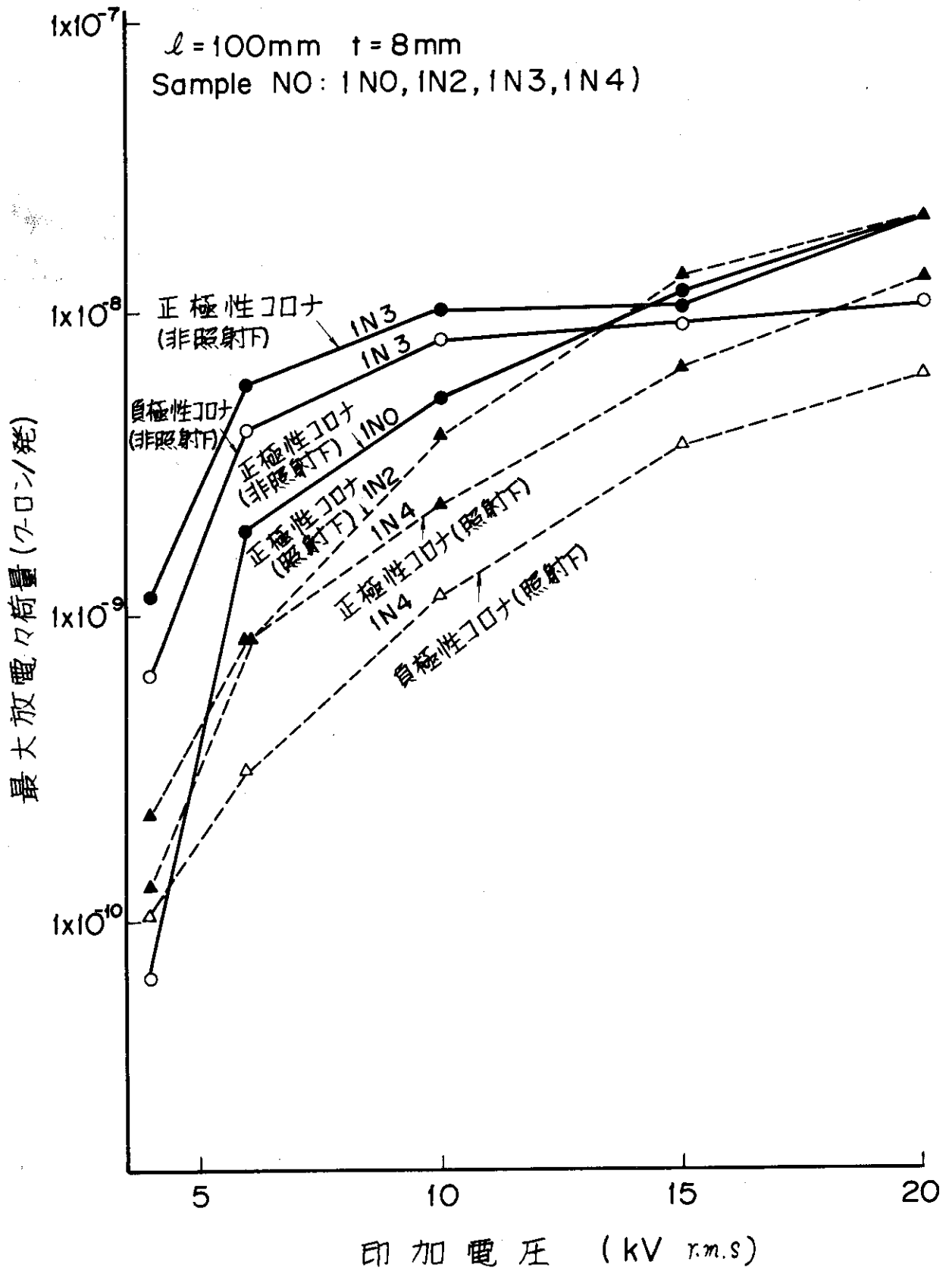


Fig. 4.2 コロナパルスの電圧特性 ($l=100\text{mm}$, $t=8\text{mm}$)

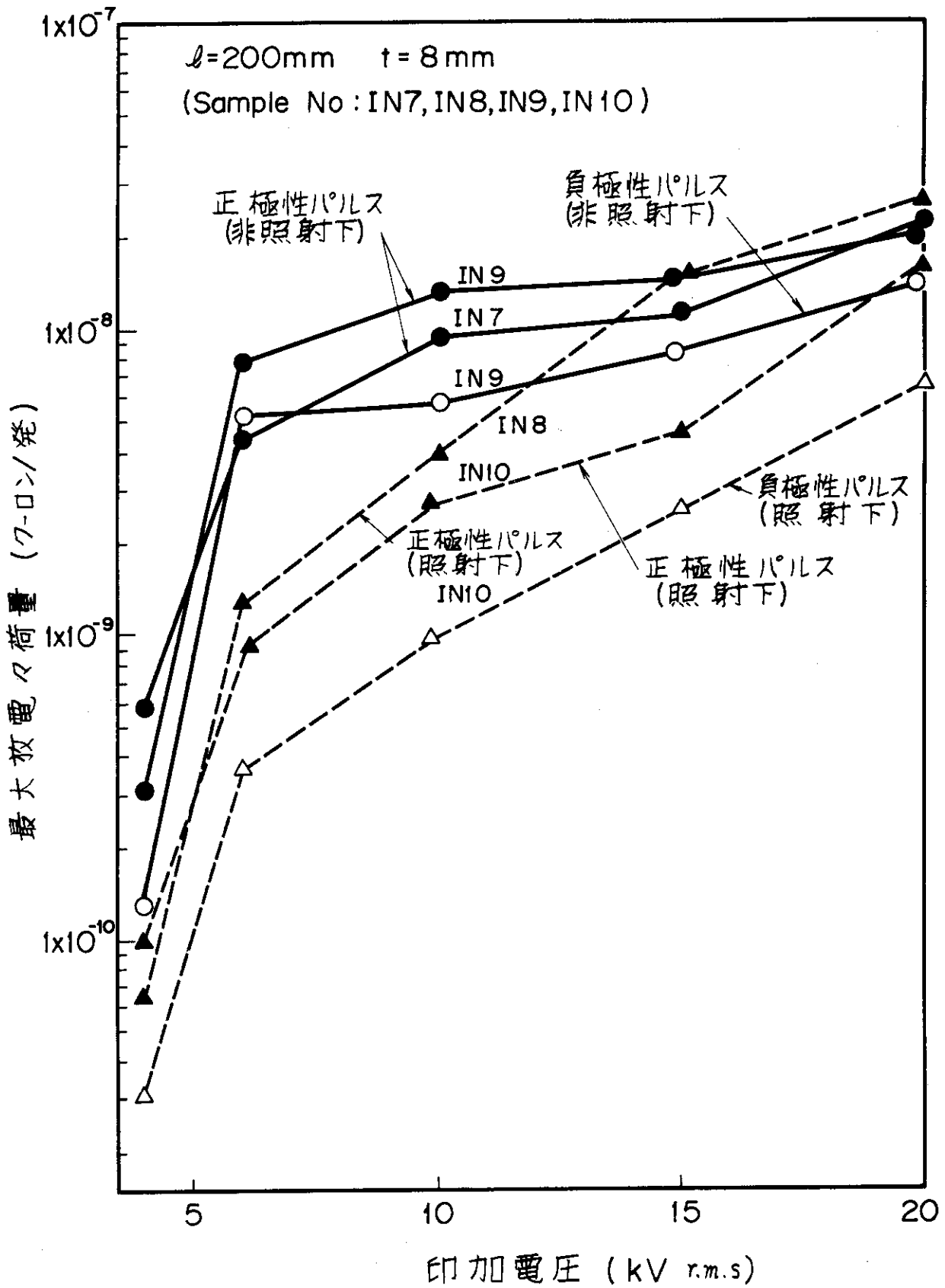


Fig. 4.3 コロナパルスの電圧特性 ($l=200\text{mm}$, $t=8\text{mm}$)

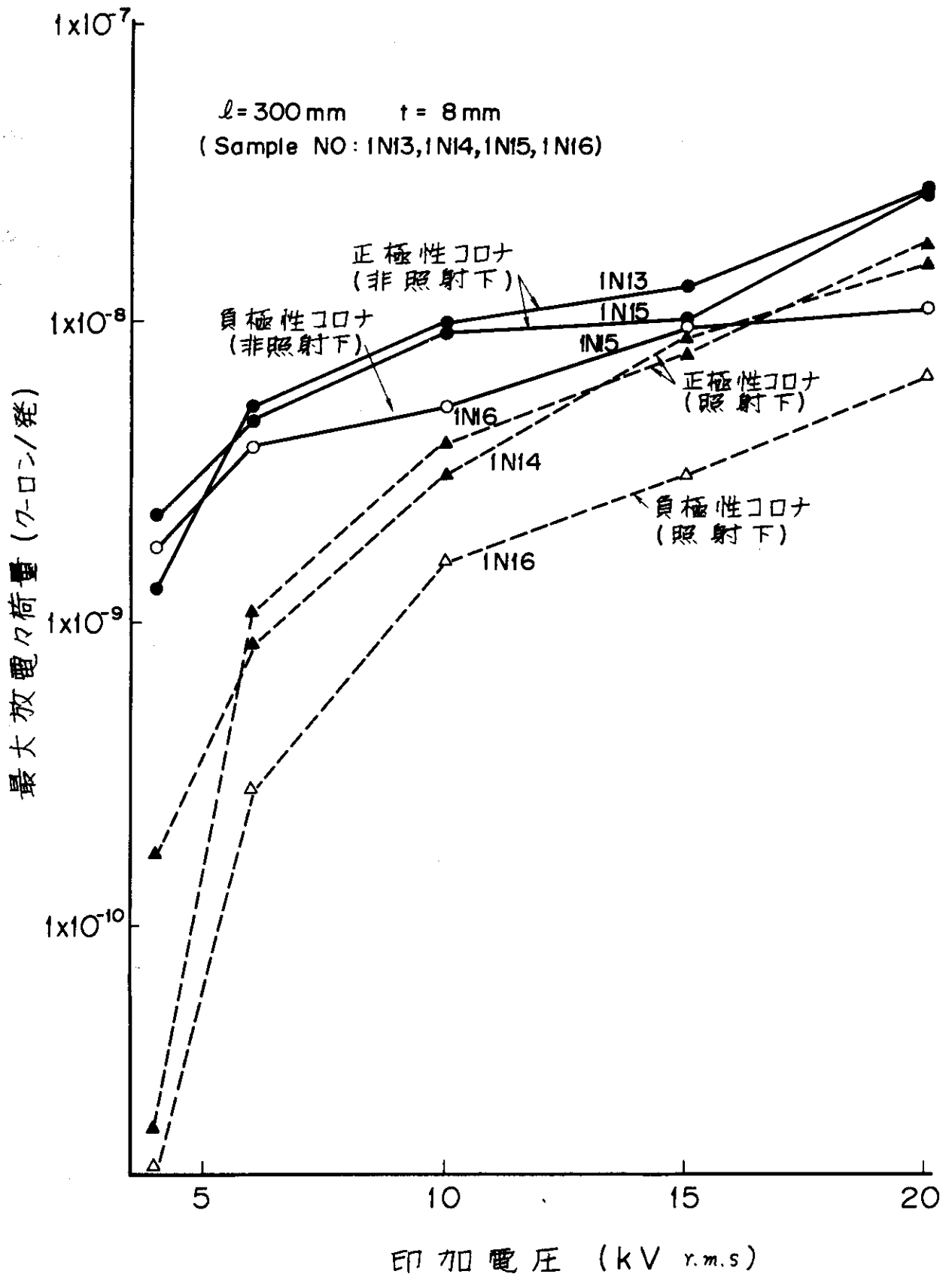


Fig. 4.4 コロナパルスの電圧特性 ($\ell = 300 \text{ mm}$, $t = 8 \text{ mm}$)

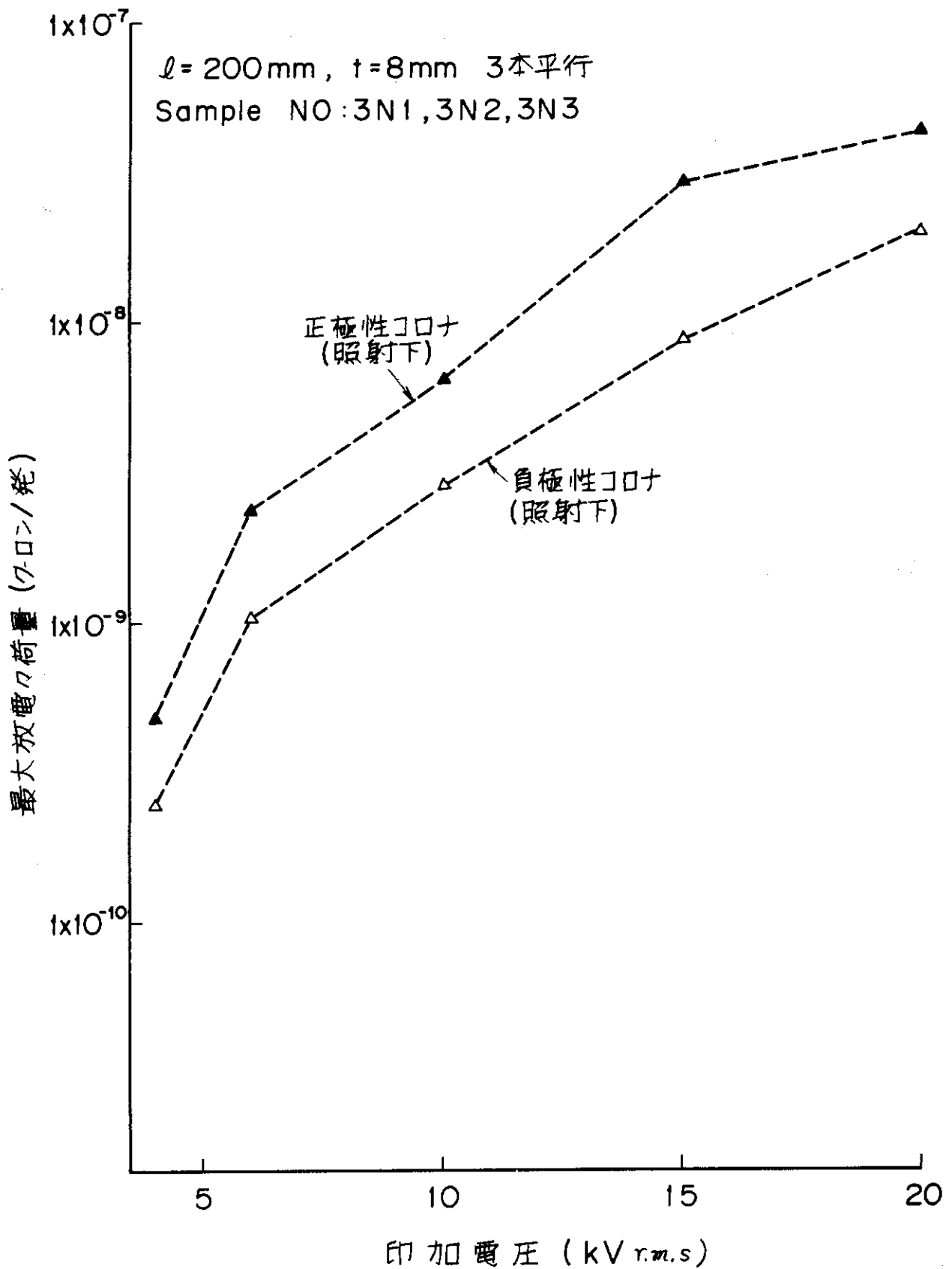


Fig. 4.5 コロナパルスの電圧特性 ($l = 200 \text{ mm}$, $t = 8 \text{ mm}$, 3本平行)

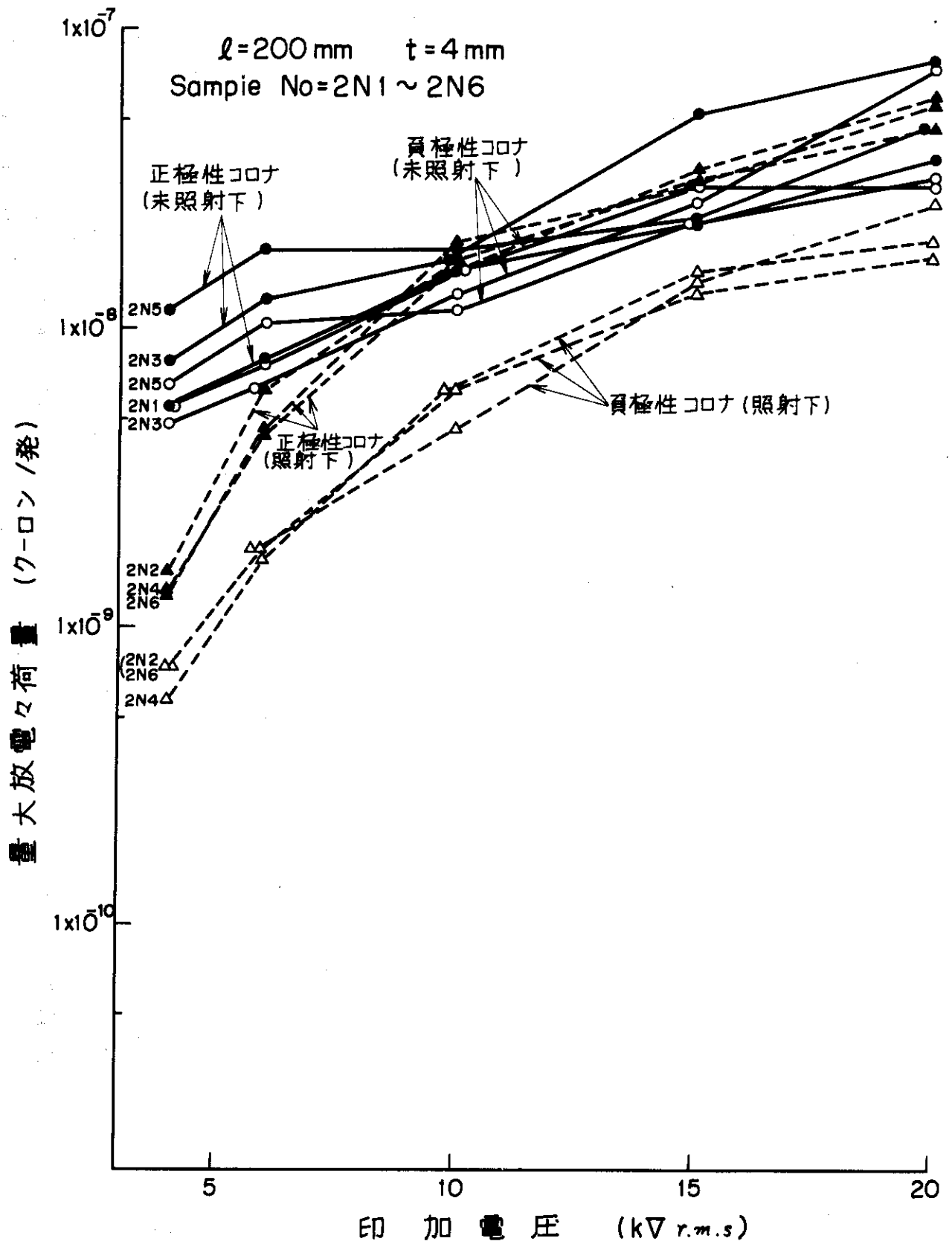


Fig. 4.6 コロナパルスの電圧特性 ($\ell=200\text{ mm}$, $t=4\text{ mm}$)

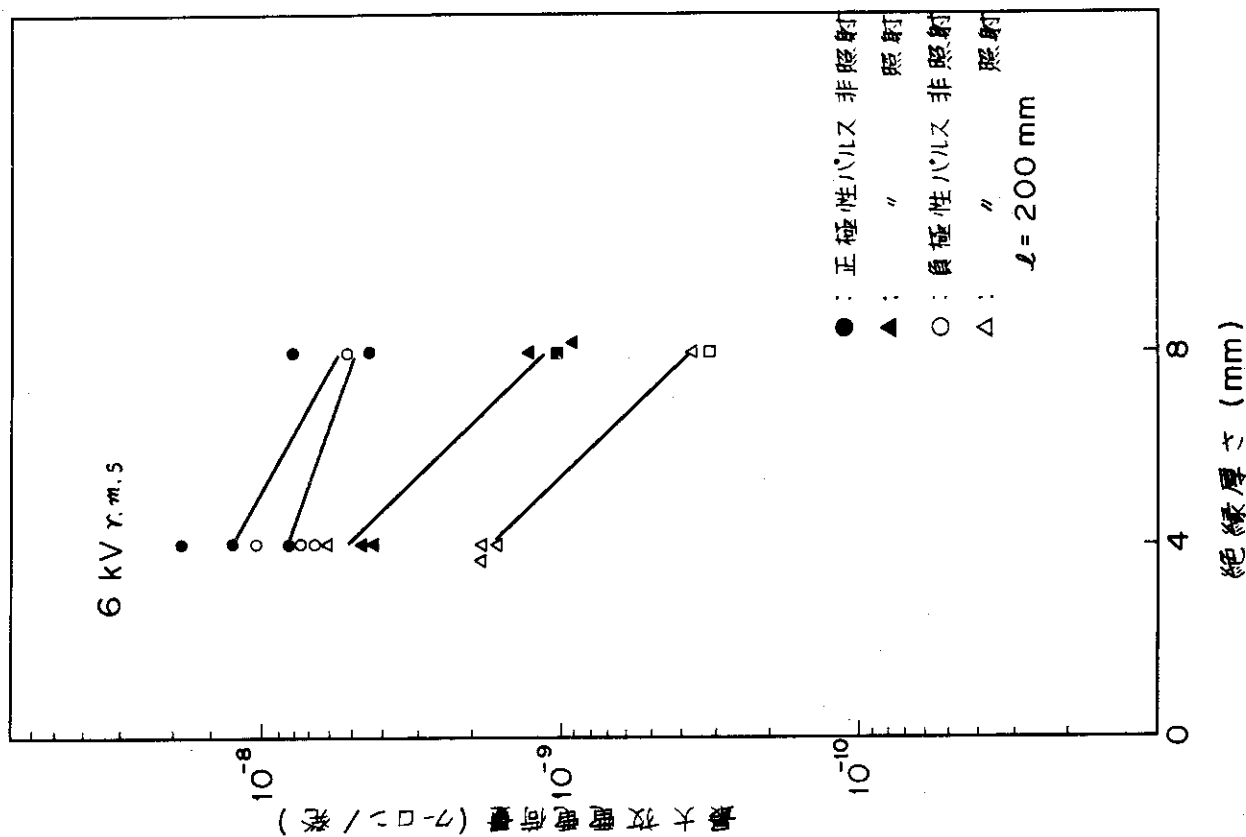


Fig. 4.8 コロナパルスと絶縁厚さの関係 ($V=6 \text{ kV}$, $\phi=200 \text{ mm}$)

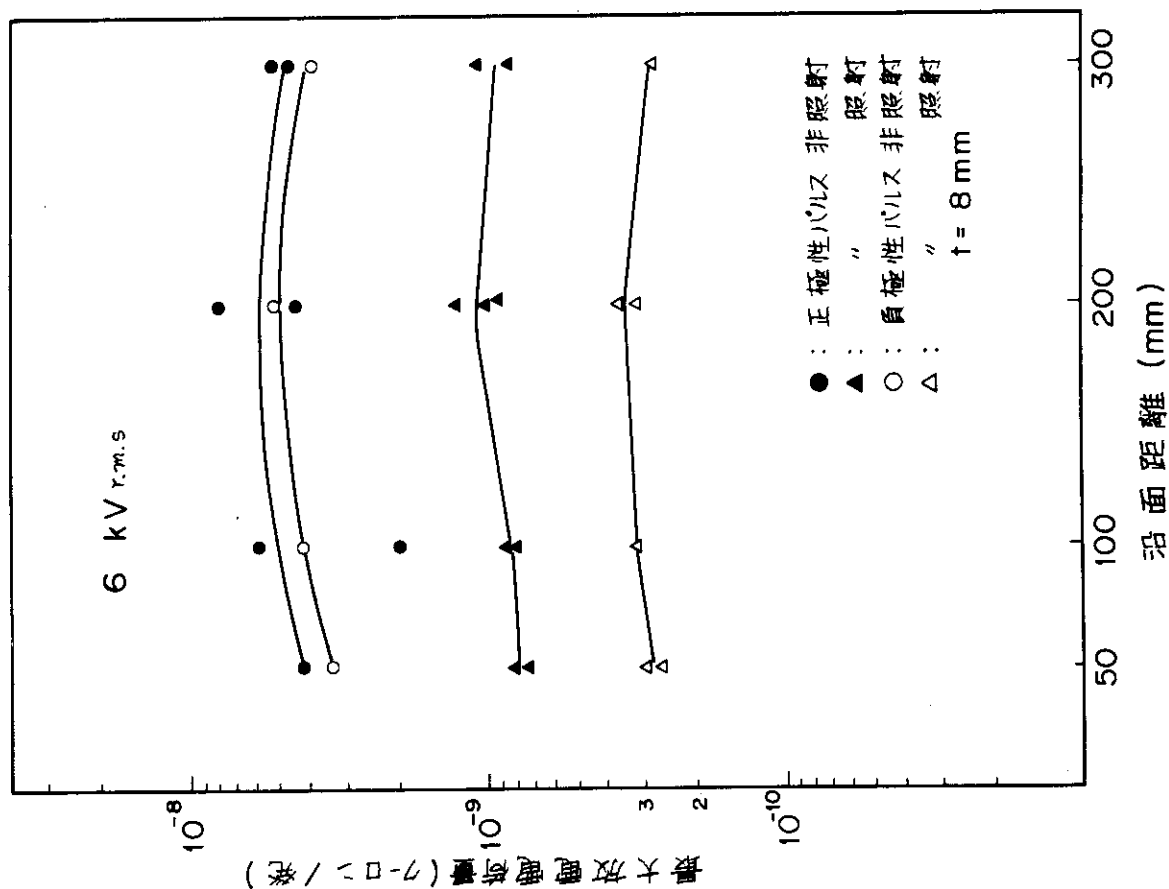


Fig. 4.7 コロナパルスと沿面距離の関係 ($V=6 \text{ kV}$, $t=8 \text{ mm}$)

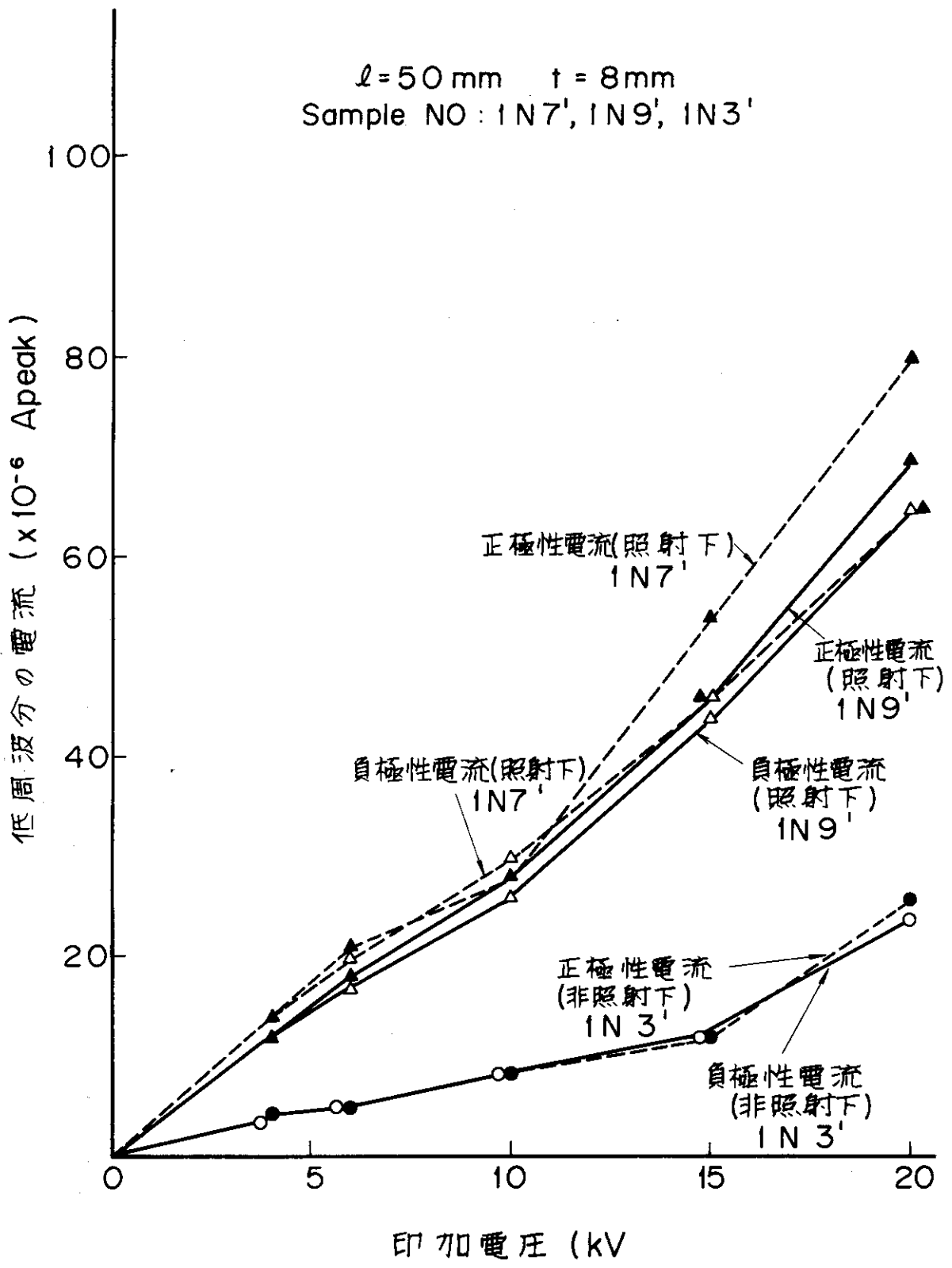


Fig. 4.9 低周波電流の電圧特性 ($l = 50 \text{ mm}$, $t = 8 \text{ mm}$)

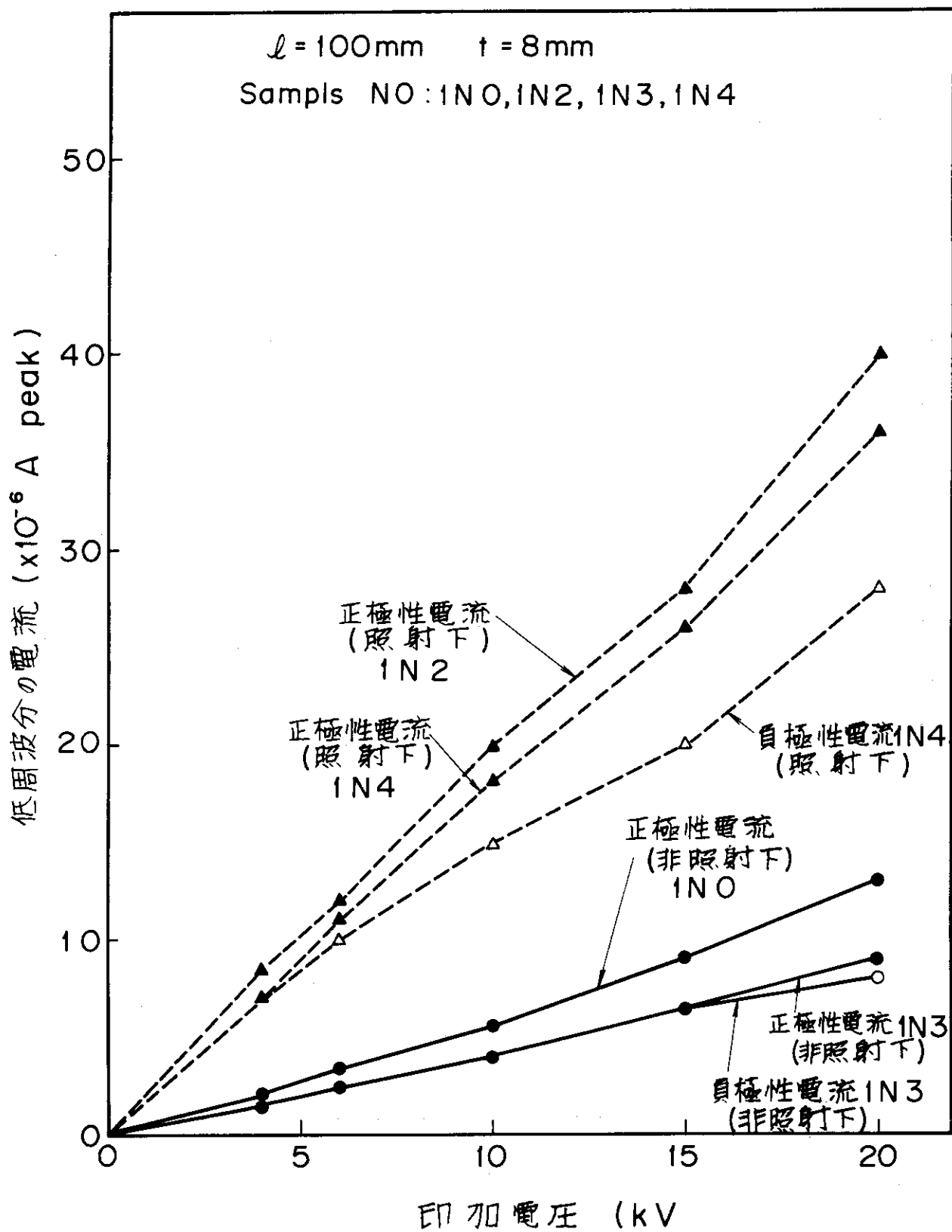


Fig. 4.10 低周波電流の電圧特性 ($l = 100\text{mm}$, $t = 8\text{mm}$)

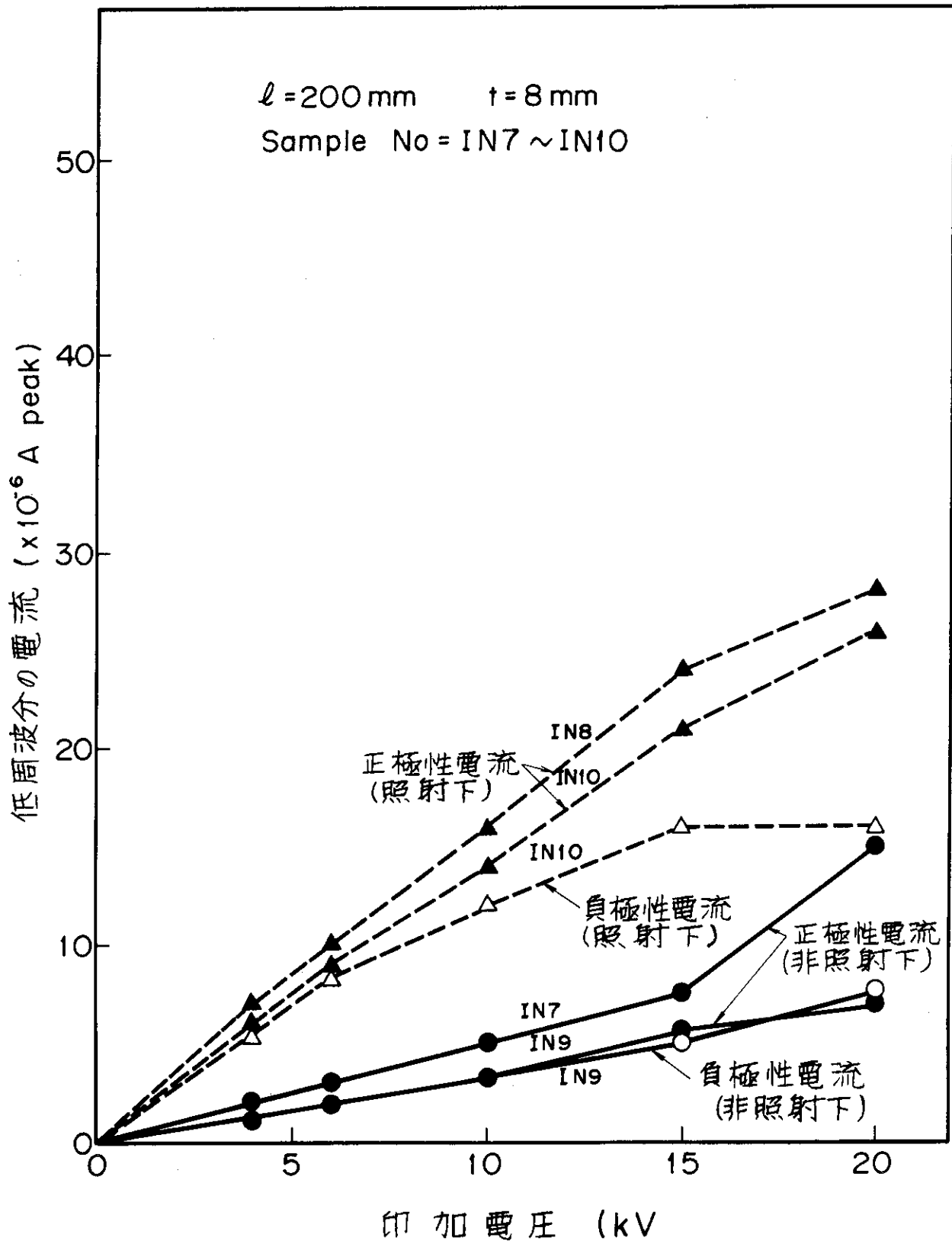


Fig. 4.11 低周波電流の電圧特性 ($l = 200 \text{ mm}$, $t = 8 \text{ mm}$)

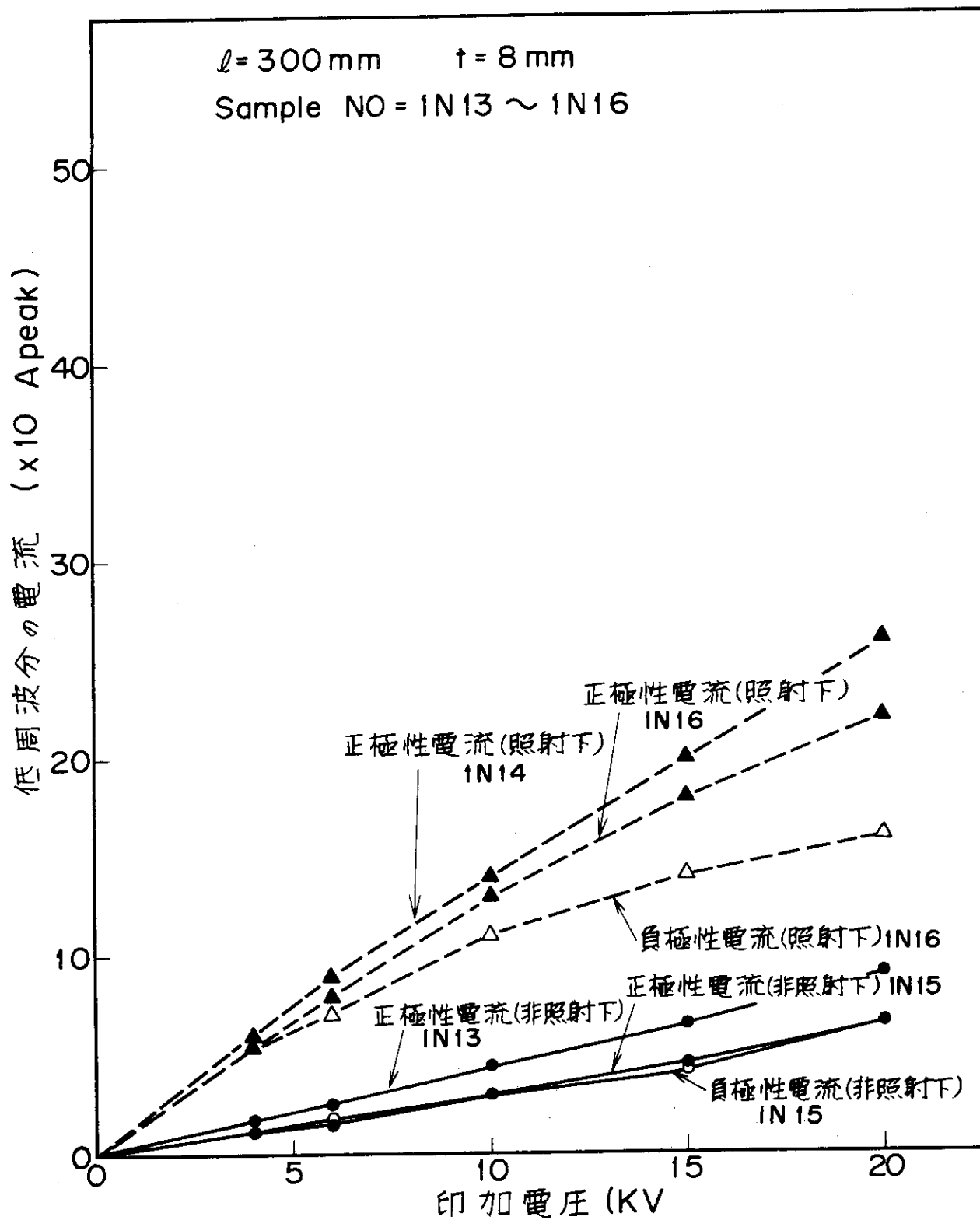


Fig. 4.12 低周波電流の電圧特性 ($l = 300 \text{ mm}$, $t = 8 \text{ mm}$)

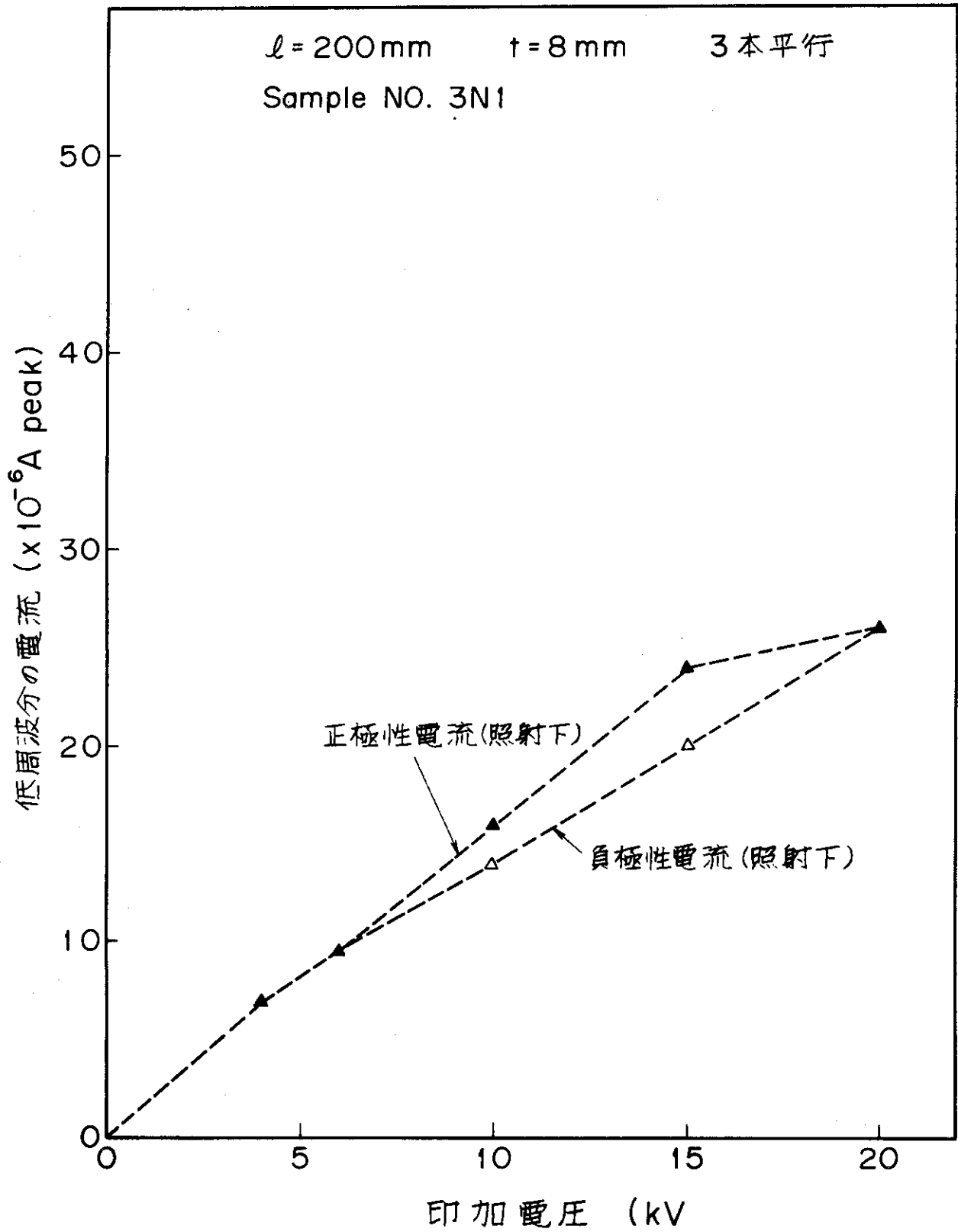


Fig. 4.13 低周波電流の電圧特性 ($l=200\text{mm}$, $t=8\text{mm}$, 3本平行)

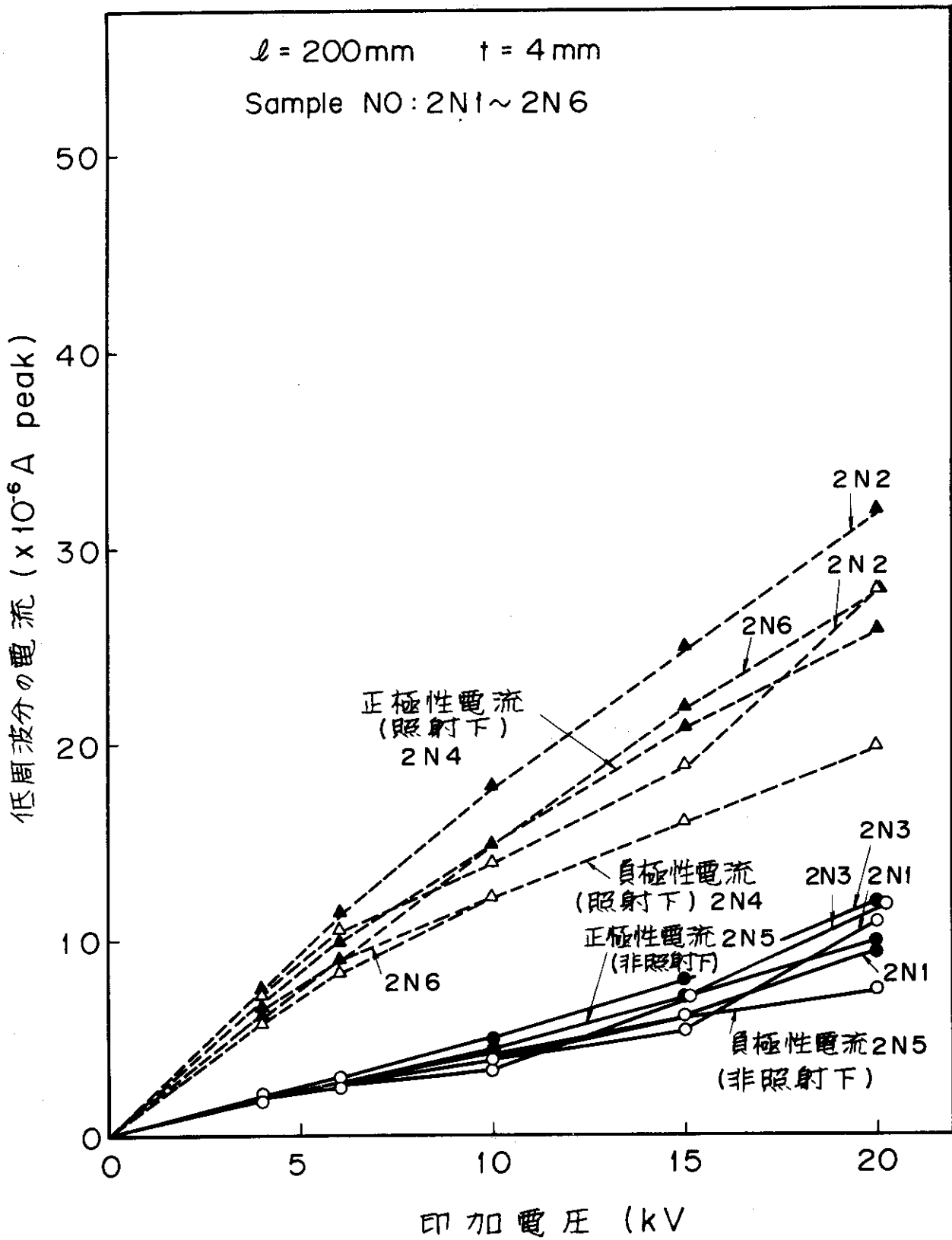


Fig. 4.14 低周波電流の電圧特性 ($l=200\text{mm}$, $t=4\text{mm}$)

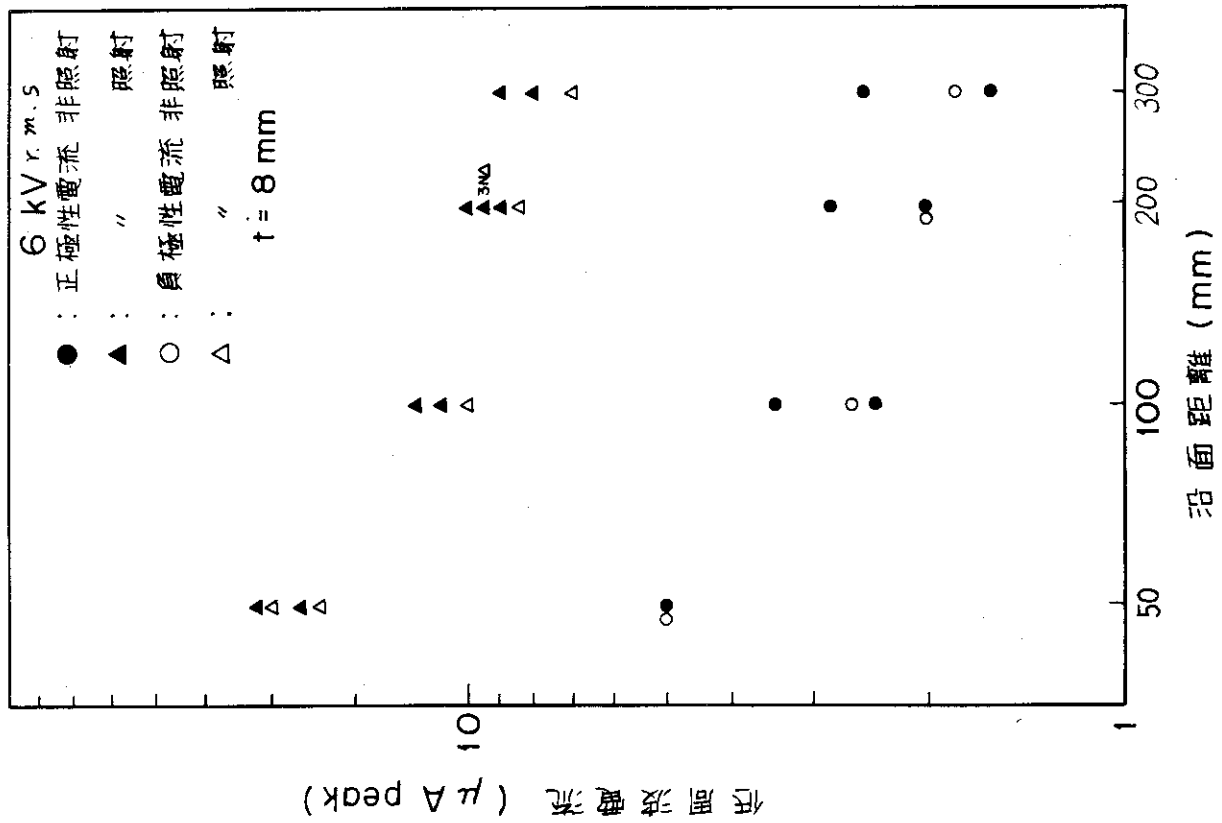


Fig. 4.15 低周波電流と沿面距離の関係 (V = 6 kV, t = 8 mm)

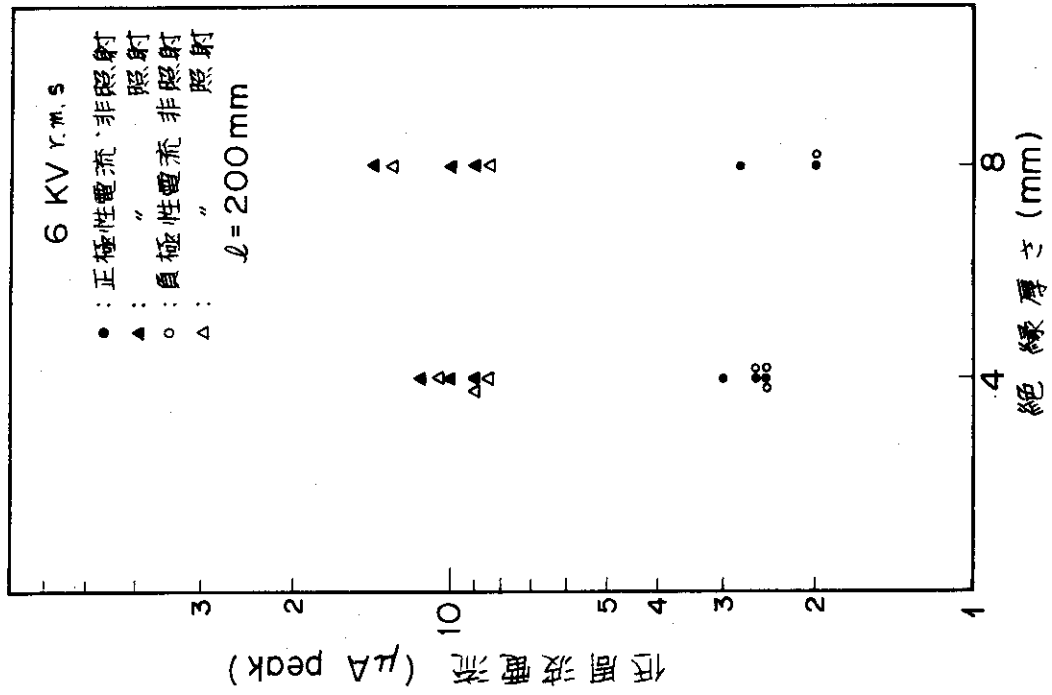
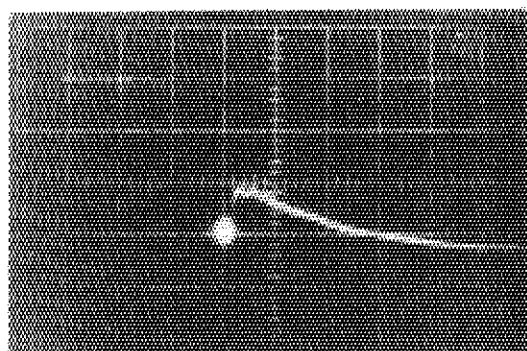
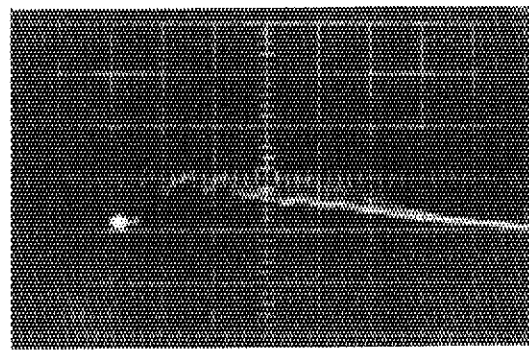


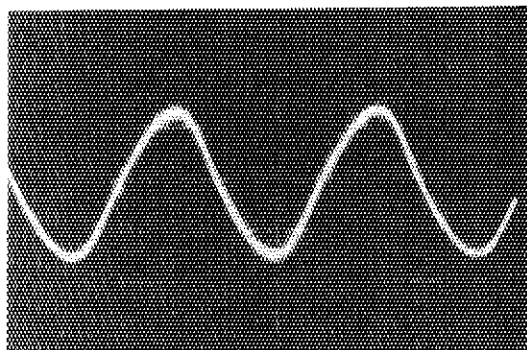
Fig. 4.16 低周波電流と絶縁厚さの関係 (V = 6 kV, l = 200 mm)



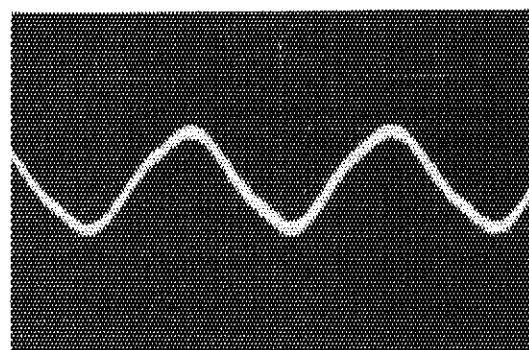
(a)
4 kV
0.2 V/div



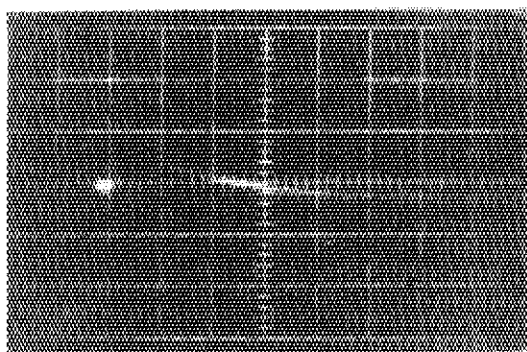
(a')
4 kV
0.05 V/div



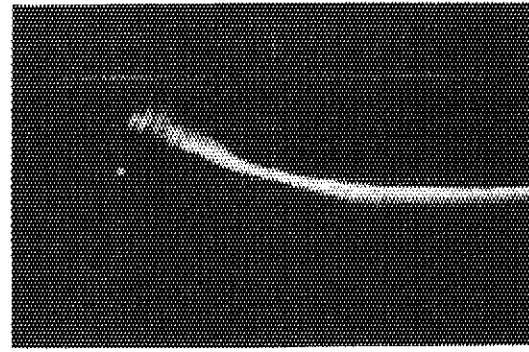
(b)
0.02 V/div



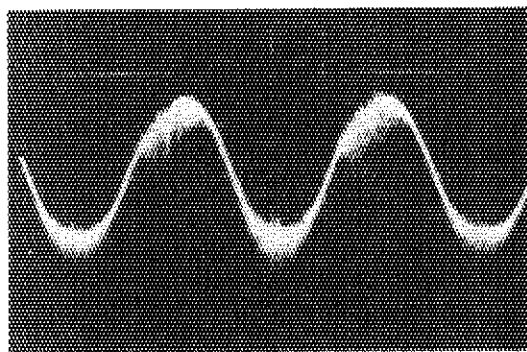
(b')
0.05 V/div



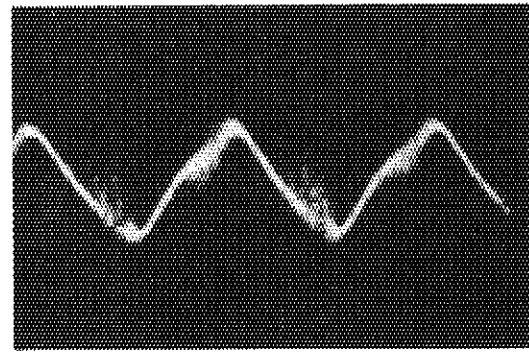
(c)
20 kV
10 V/div



(c')
20 kV
10 V/div



(d)
0.1 V/div

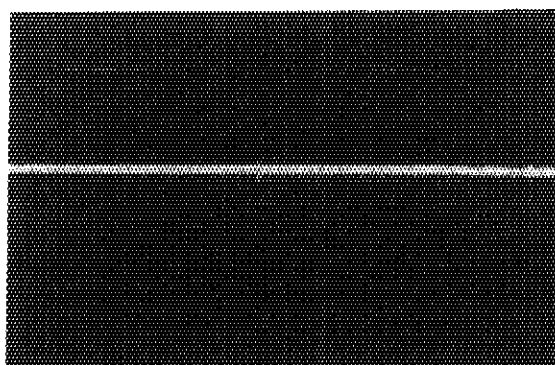


(d')
0.2 V/div

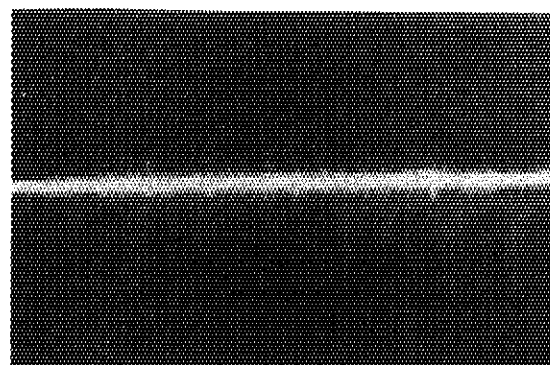
照射下 (コイル 1N8)

非照射下 (コイル 1N7)

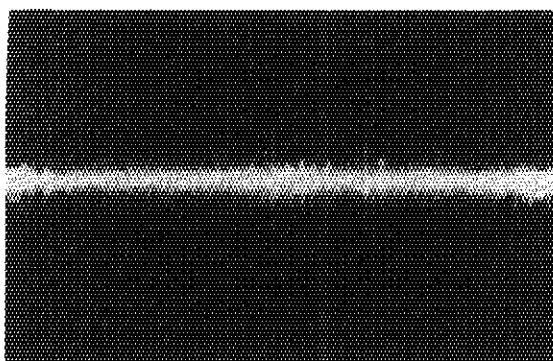
Fig. 4.17 コロナパルスと低周波電流の写真 (電圧は r.m.s 値を示す。コロナパルス : (a), (a'), (c), (c'), 低周波電流 : (b), (b'), (d), (d'))



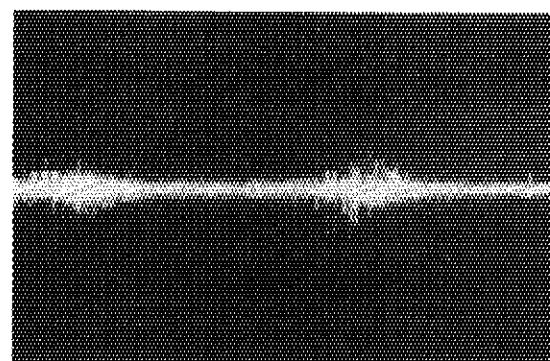
4 kV
0.01V/div
2ms/div



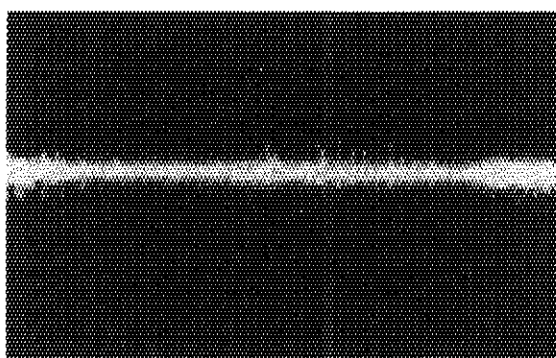
4 kV
0.01V/div
2ms/div



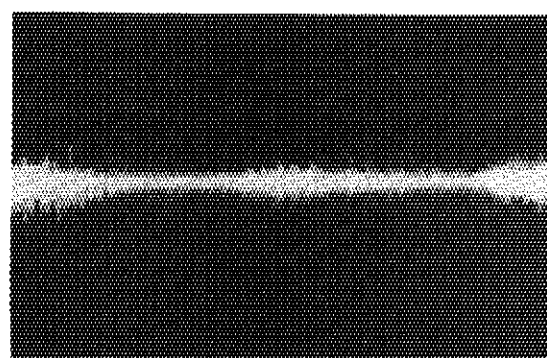
10 kV
1V/div
2mS/div



10 kV
0.02V/div
2mS/div



20kV
5v/div
2ms/div



20kV
2v/div
2ms/div

非照射下 (コイル 1N9)

照射下 (コイル 1N10)

Fig. 4.18 コロナパルスの発生状況 (電圧は r.m.s 値を示す)

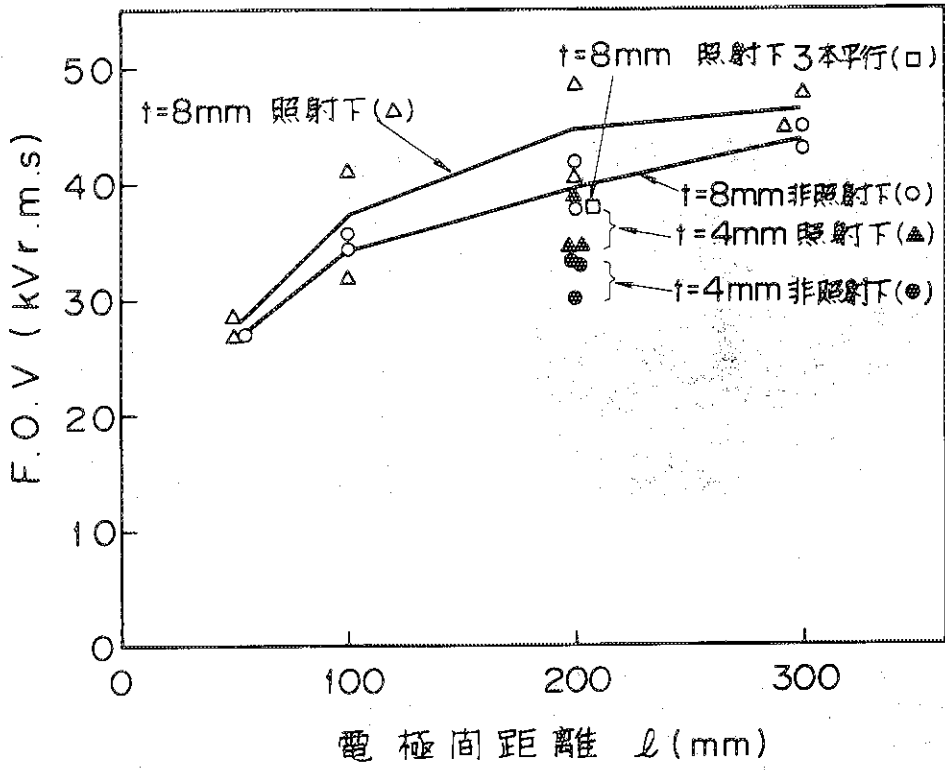


Fig. 4.19 沿面閃絡電圧 (FOV) 特性

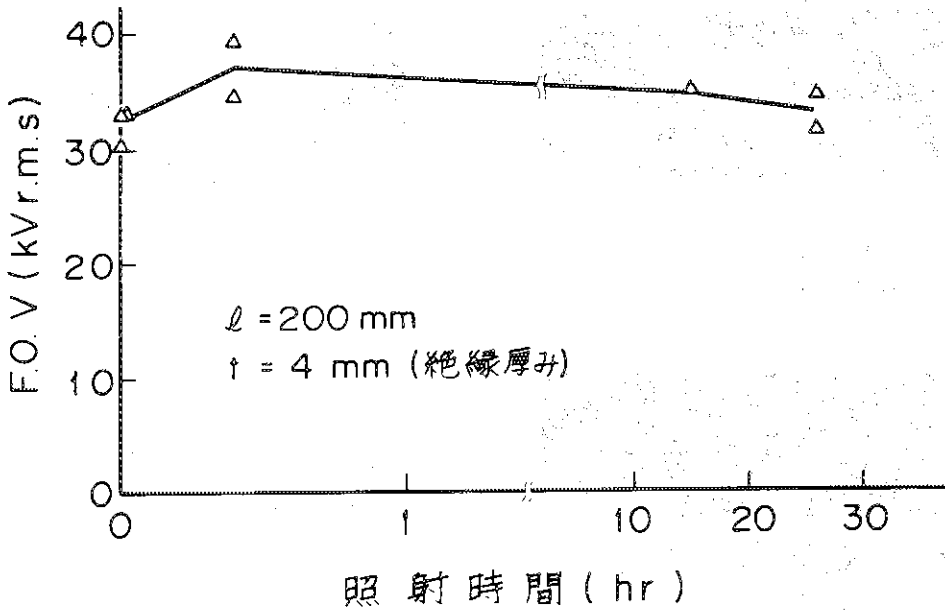


Fig. 4.20 FOVと照射時間の関係

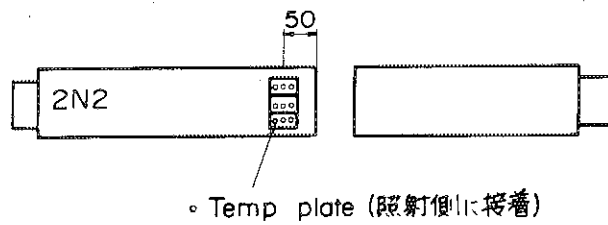
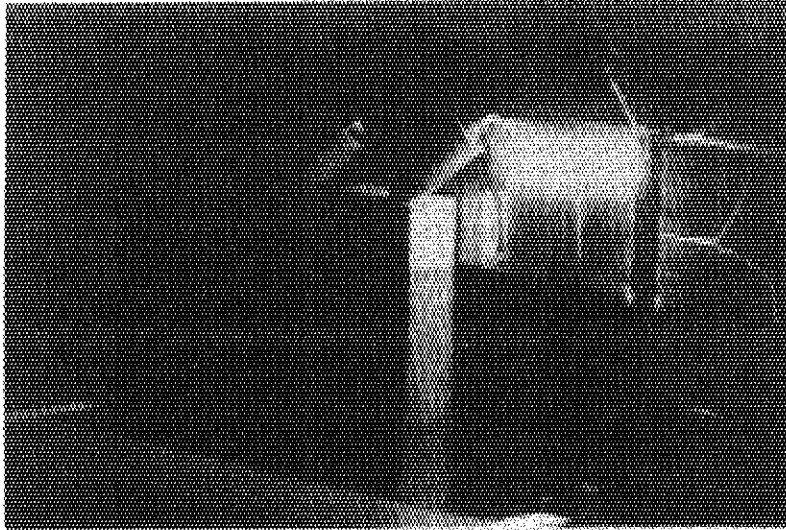


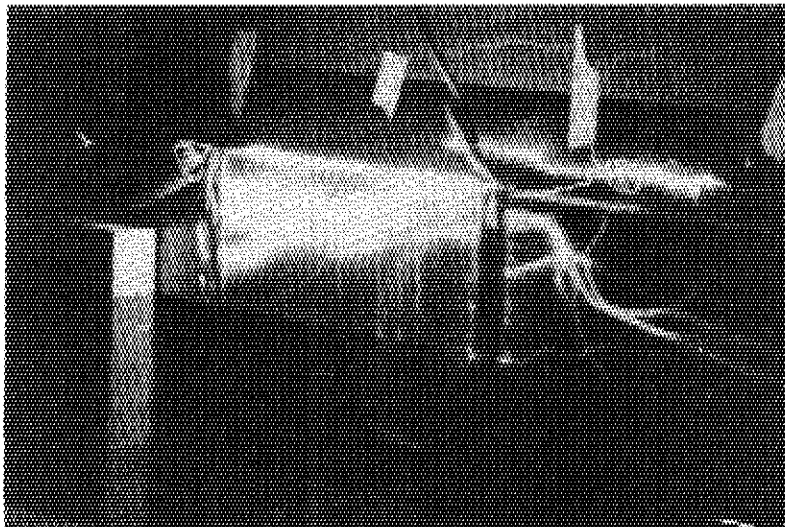
Fig. 4.21 照射中の絶縁材温度の測定



1N3

$l = 100 \text{ mm}$

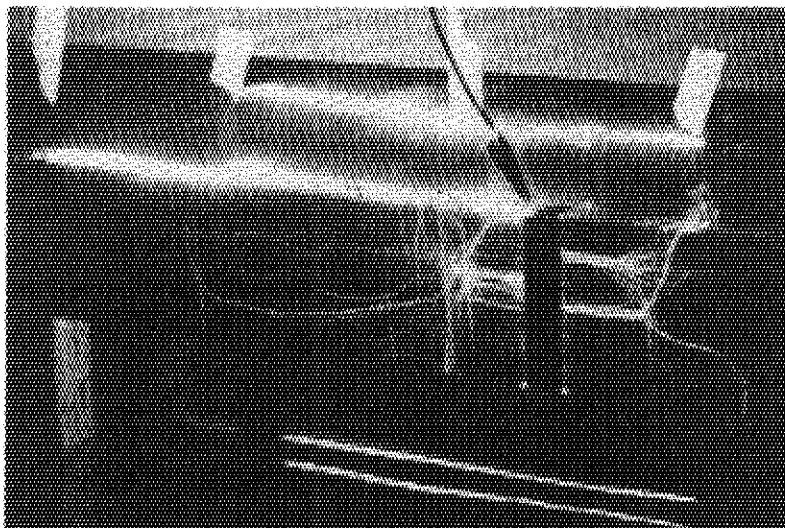
$FoV = 34.3 \text{ kV r.m.s}$



1N9

$l = 200 \text{ mm}$

$FoV = 40.5 \text{ kV r.m.s}$



1N15

$l = 300 \text{ mm}$

$FoV = 44.5 \text{ kV r.m.s}$

Fig. 4.22 FOVの写真(非照射下のみ)

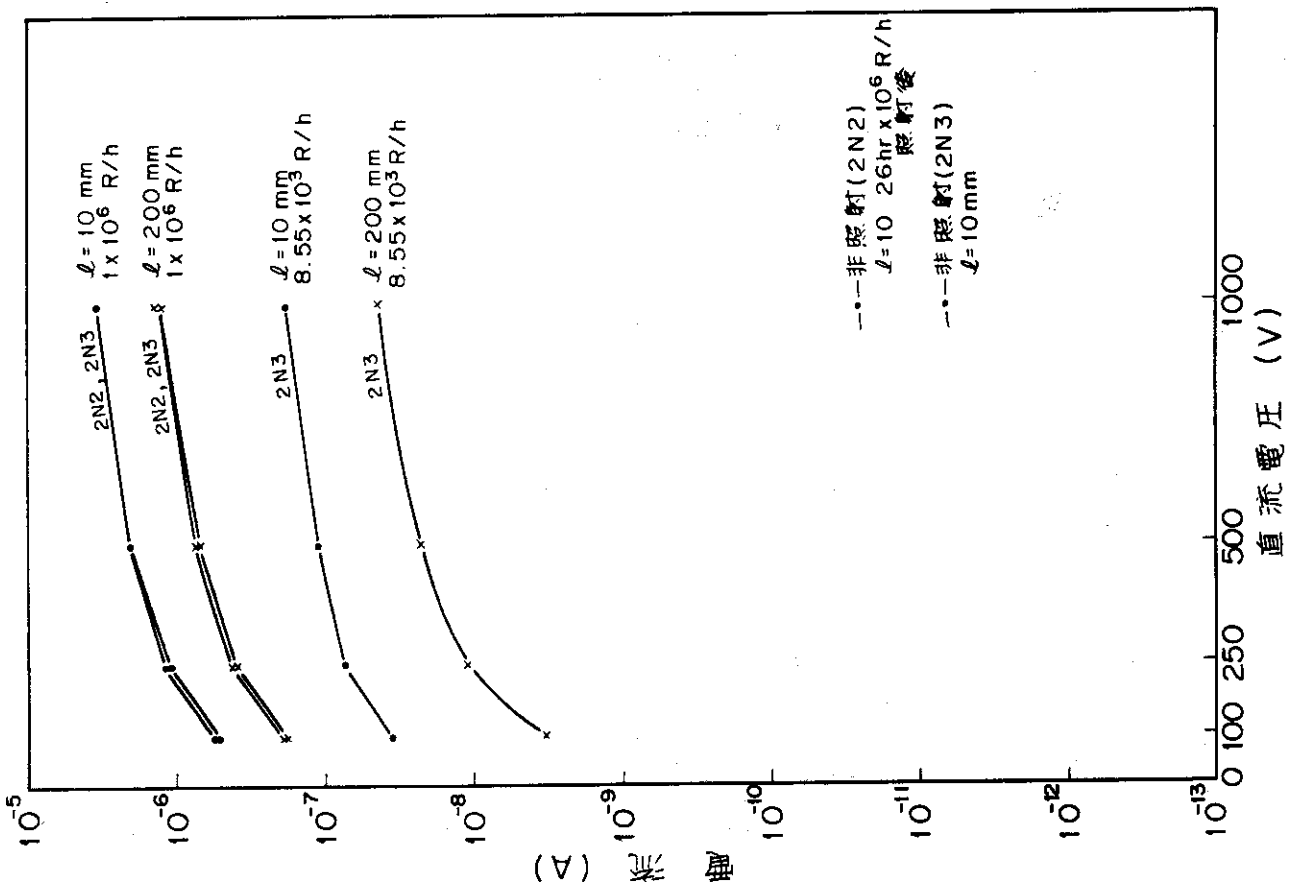


Fig. 4.23 模擬コイルの直流電圧—電流特性

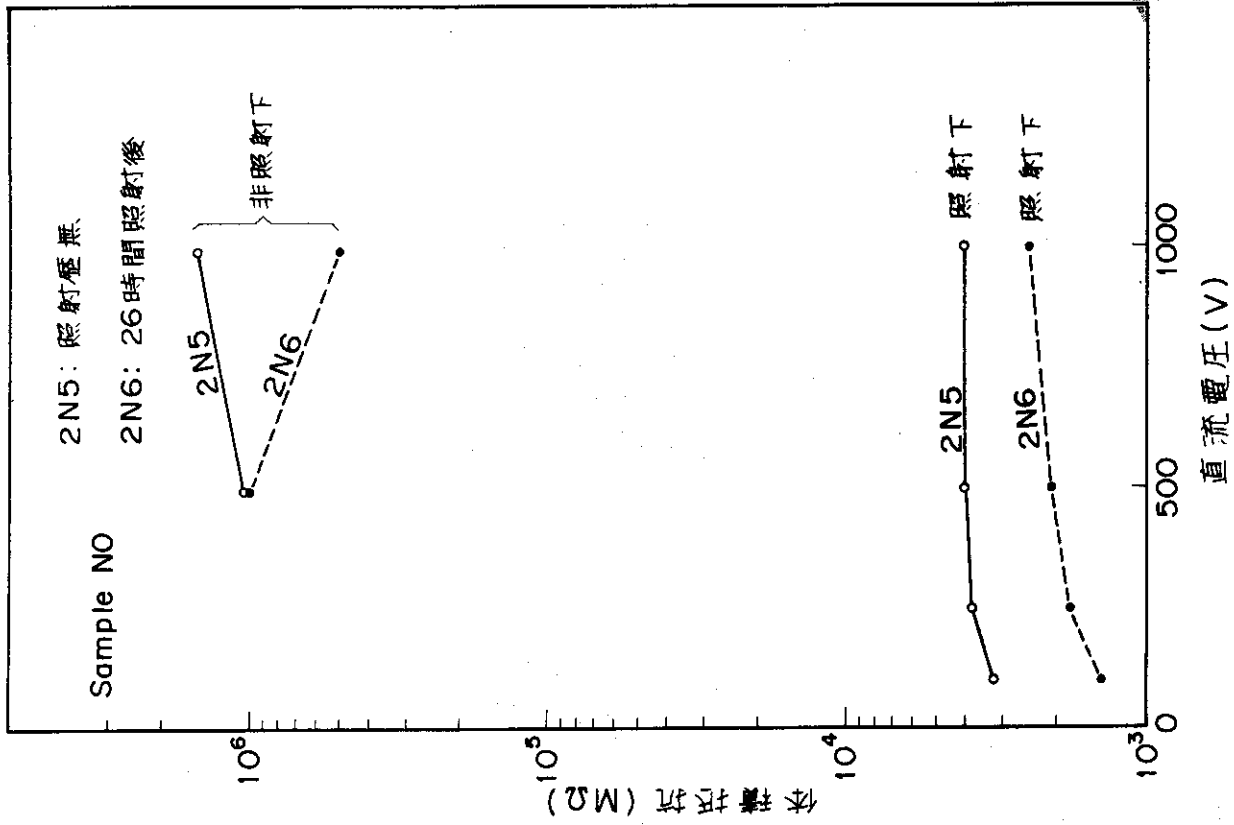


Fig. 4.24 模擬コイルの体積抵抗

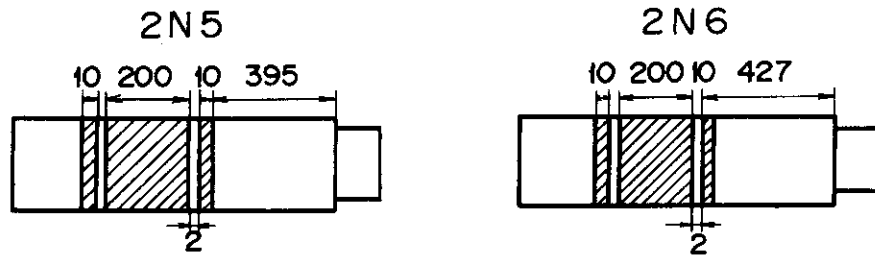
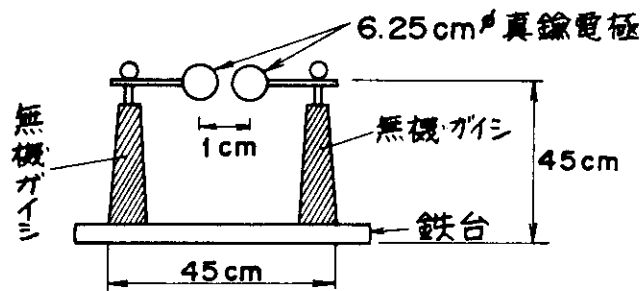


Fig. 4.25 体積抵抗測定のための電極取材

a) 球対球ギャップの火花放電圧の測定用電極系



b) 沿面放電測定用モデル電極系

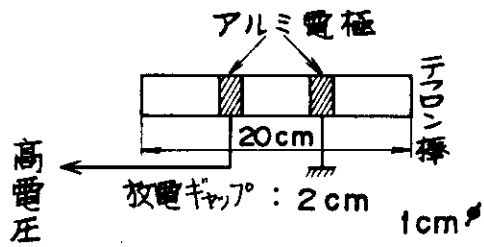


Fig. 4.26 球ギャップおよびテフロン棒試料の電極系

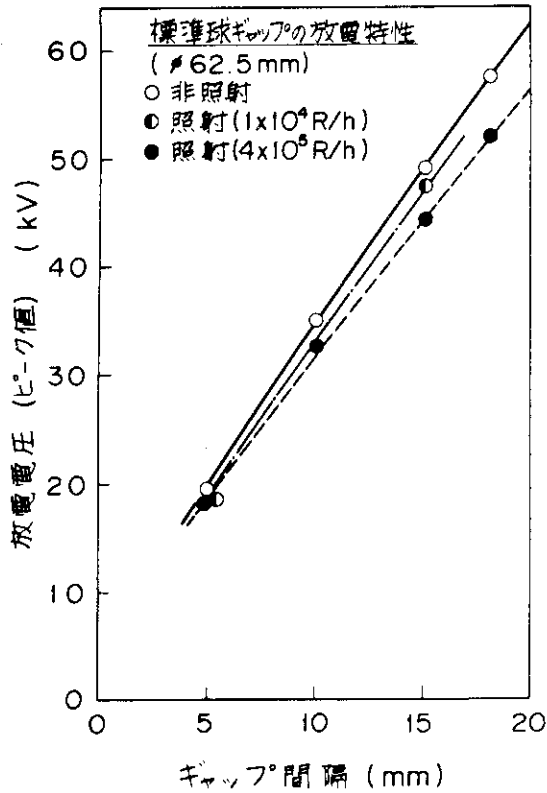


Fig. 4.27 球ギャップの放電特性

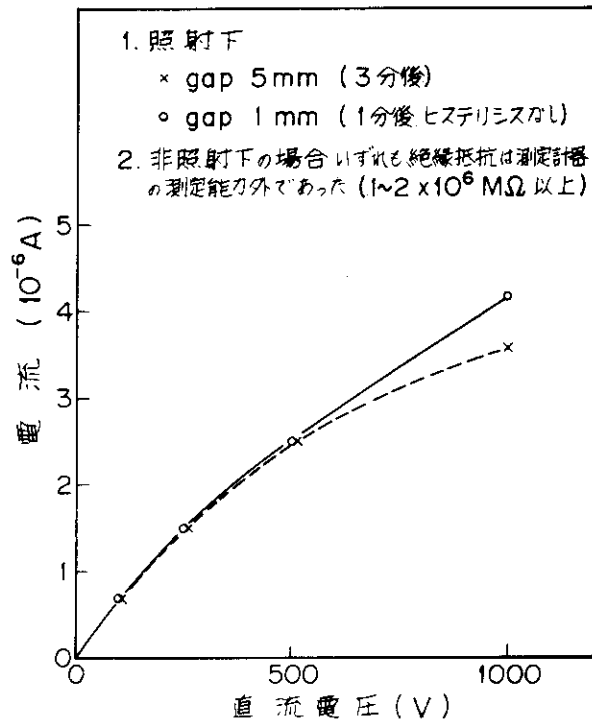


Fig. 4.28 球ギャップ間空気の直流抵抗

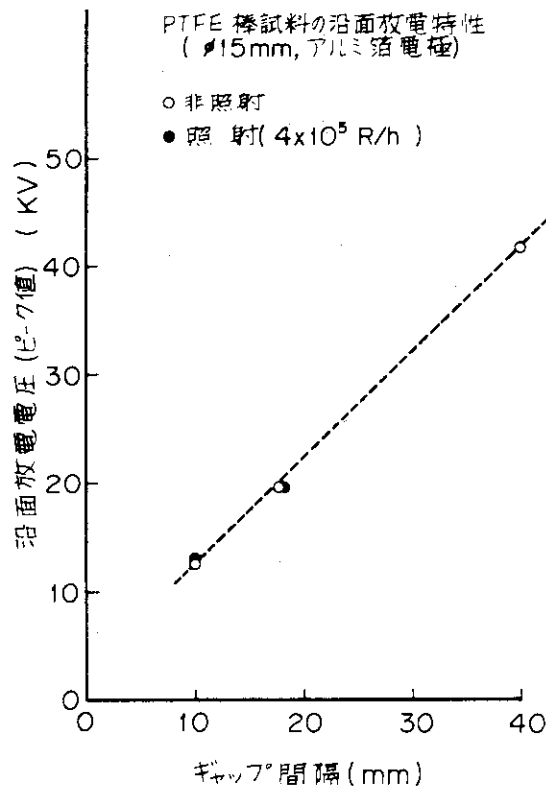


Fig. 4.29 テフロン棒試料の沿面放電特性

5. 超高線量率における球ギャップおよびPTFE棒試料の放電特性

5.1 目的

高崎研において実施した ^{60}Co - γ 線照射線量率 $1 \times 10^6 \text{ R/h}$ に比較して、より高線量率のX線照射下における火花放電電圧および沿面放電特性を把握する。

5.2 実験方法

実験は標準球ギャップ($\phi 6.25 \text{ mm}$)およびPTFE棒($\phi 1.5 \text{ mm}$, アルミ箔電極)に、直流電圧を印加した。X線源はFebetron 707 (Table 5.1 参照)を用いた。実験方法としては、まず電極間に直流電圧を印加しておき、それにパルス状(17 sec)高線量率X線を照射し、放電発生の有無を電圧および放電光の観察により調べた。実験回路をFig. 5.1に示す。

5.3 実験結果

球ギャップの火花放電電圧をTable 5.2(a)に示す。

PTFE試料の沿面放電電圧をTable 5.2(b)に示す。

Fig. 5.2 に球ギャップおよびPTFE試料の放電電圧を電極間距離に対してプロットした図を示す。

これらの結果より以下の結論が得られた。

- (1) 球ギャップの場合、火花電圧の大幅な低下($1.8 \times 10^{13} \text{ R/h}$ で 0 R/h の約70%の値となる)が認められた。
- (2) テフロン試料の場合、ギャップ長が小さいと沿面放電電圧の低下($1.8 \times 10^{13} \text{ R/h}$ で 0 R/h の約80%の値)が認められたが、ギャップ長が大きいと照射による変化は小さい。ここでギャップ長が大きい場合、コロナの発生が認められることから、テフロン試料における結果にはコロナの関与が考えられる。

なお、ここで示した線量率は公称値である。

Table 5.1 Febetron 707のX線出力特性(磁場2000 gauss)

最大光子エネルギー	2 MeV
X線パルス持続時間(半値巾)	17 ns
ターゲットから0.1インチの位置における線量	1500 R
ターゲットから0.1インチの位置におけるピーク線量率	10^{11} R/sec
3 mにおける公称線量	40 ± 10 mR
(Model 545C tube, 35KV charging)	
3 mにおける最大磁場(4000 gauss)における公称線量	60 ± 5 mR
(Model 545C tube, 35KV charging)	

Table 5.2 球ギャップおよびテフロン試料の放電電圧

a. 球ギャップの火花放電電圧 (×:照射時に放電せず ○:放電)

線量率 ギャップ長	0 R/h	1.8×10^{13} R/h (100R, 20vsec)	1.8×10^{12} R/h (10R, 20vsec)	1.8×10^{11} R/h (1R, 20vsec)
5 mm	17.3 KV ($\sigma \div 0$)	12.5 KV (×) 12.6 (○)	14.7 KV (×) 15.0 (○)	15.2 KV (×) 15.4 (○)
10 mm	32.2 KV ($\sigma \div 0$)	22.5 KV (×) 22.8 (○)	27.4 KV (×) 27.6 (○)	29.6 KV (×) 30.0 (○)

(気圧 約1000 mb, 気温 約10℃)(上記結果は較正值)

b. テフロン試料の沿面放電電圧

線量率 ギャップ長	0 R/h	1.8×10^{13} R/h (100R, 20vsec)	1.8×10^{12} R/h (10R, 20vsec)	1.8×10^{11} R/h (1R, 20vsec)
10 mm	14.53 KV (n=24, $\sigma=0.37$)	11.2 KV (×) 11.45 (○)	11.5 KV (×) 11.65 (○)	12.4 KV (×) 12.6
18 mm	18.57 KV (n=21, $\sigma=0.23$)	17.9 KV (×) 18.2 (○)	/	/

γ線(高崎原研)による結果—Table 4.4およびTable 4.6

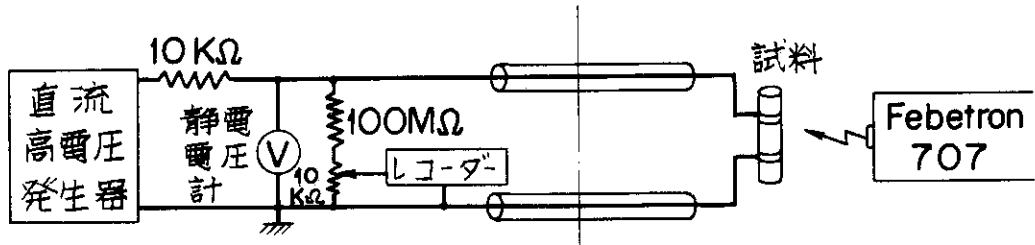


Fig. 5.1 実験回路

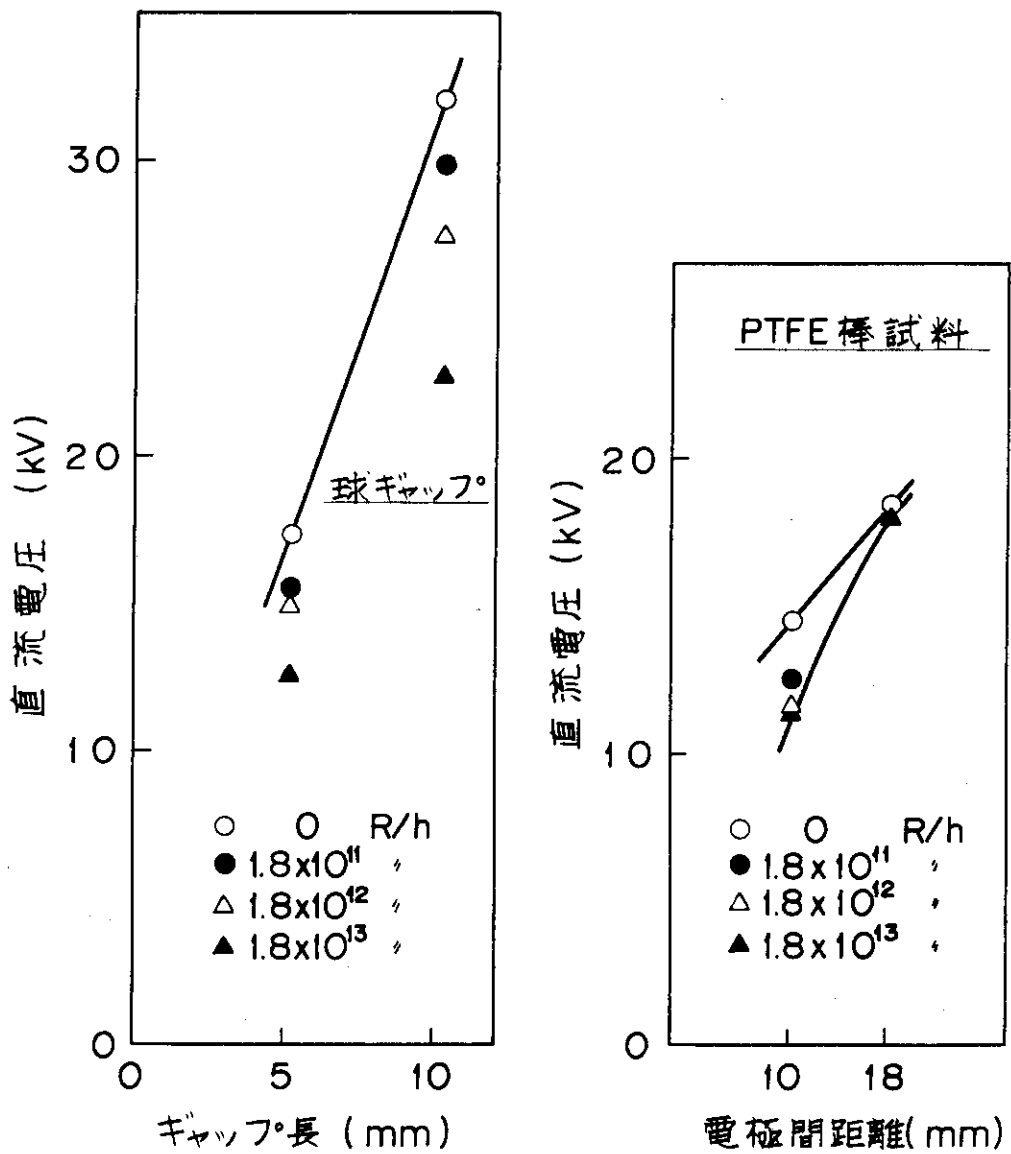


Fig. 5.2 球ギャップおよびテフロン棒試料の放電特性

6. 検 討

実験結果に関するいくつかの実験と検討について以下に示す。

6.1 FOVに関する検討

6.1.1 模擬コイルのFOVに関する従来の実験式との比較

従来に沿面放電に関する実験式（背後電極がある場合）⁽¹²⁾では、

$$FOV = K_b \cdot C^{-\frac{3}{8}} \cdot \ell^{\frac{1}{4}}$$

ℓ : ギャップ長

C : 固有容量

K_b : 定 数

または

$$FOV = K'_b \cdot C^{-\frac{3}{8}} \cdot \ell^{0.35}$$

である。ここで

$$C \propto t^{-1} \quad t : \text{絶縁厚さ}$$

を考慮して

$$FOV \propto \ell^{\frac{1}{4}} \text{ または } \ell^{0.35}$$

$$FOV \propto t^{\frac{3}{8}}$$

である。

Fig. 6.1 は、今回の実験結果を両対数グラフにプロットしたものである。図より非照射下、照射下ともに従来タイプの依存性で説明できることがわかる。

6.1.2 球ギャップおよびPTFE棒試料のFOVに関する検討

実機絶縁システムおよび模擬コイルの沿面放電は電界集中を伴う不平等電界下の現象で、一般に閃絡に至る以前に、沿面ストリーマの発生という局部破壊が存在する。これら現象の解析および考察に供するべく、全路破壊以前にコロナが存在しない平等電界下の球ギャップ放電と模擬コイルと類似したPTFE棒上の沿面放電に及ぼす照射効果について調べた。コロナを経由して閃絡するPTFE棒沿面閃絡特性は $4 \times 10^5 \text{ R/h}$ の照射に対して基本的な特徴は模擬コイルのそれらと変化しない。すなわち閃絡以前に存在する沿面ストリーマによる空間電荷の生成は、放射線照射による電離性キャリアの供給によって顕著な変化をうけず、照射による電界変歪の程度はそれ程効果を与えてないことが推定される。

平等電界下の球ギャップ放電は全路破壊以前に局部破壊は存在せず、照射効果は i) 初期電

子の供給, ii) 電離係数, α , iii) 空間電離電流による静電界の変歪などに影響すると考えられる。i) については放電空間と陰極よりの電子供給の増加が期待される。実験結果は 4×10^5 R/h で FOV の僅かな減少および測定値のバラツキが減少を示しており, これらを考慮すると初期電子供給の増大に伴う統計時間遅れの減少が主要な要因として考えられる。

しかし, Febetron 707 による 10^{13} R/h の高線量率の照射は, 直流閃絡電圧を約 70% の値に低下する。この低下は統計時間遅れでは理解できず, 電離係数 α の増加および空間電離電流による陰極前面電界の変歪が考慮される。後者の原因が大きいと正イオンの電界下の移動のために照射後, 放電開始までの時間遅れが観測されるものと考えられるが, 現在, 検討中であり, どちらが主要な要因であるかは今後の実験によって明かにしたい。PTFE 棒 FOV に対する高線量照射効果に対しては, 短ギャップでの結果は球ギャップのそれに類似し, 平等電界に近いこと, また長ギャップの結果は, 局部コロナが存在し, この効果が大きいことを考慮することにより理解出来る。

6.2 コロナパルスおよび低周波電流に関する検討

6.2.1 照射下, 非照射下における低周波電流に関する検討

Fig. 6.2 は低周波電流成分を知るために, 非照射下の電流波形と電圧波形をとらえるものである。これより, 電流と電圧間の位相差は約 90° あることから, 非照射下の低周波電流は主としてコイル電極間の静電容量による充電々流と言える。照射下においてはこの種の実験は行っていないが, Fig. 4.14 と Fig. 4.23 から求めた電流値 ($\ell = 200$ mm で 1 kV の電流値はいずれも約 1.3×10^{-6} A になる) がほぼ一致することから, 照射下の低周波電流は直流抵抗分による電流と言える。また, Fig. 6.3 において, 印加電圧が 15~20 kV になると電流のピーク点の位相が印加電圧のピーク点側に近づいていることがわかる。このことは, 非照射下において印加電圧が高くなるとコイルの表面抵抗に電界非線形性が現われることを意味し, Fig. 4.17 (b'), (c') で見られる低周波電流波形の変歪はこれによるものであろう。

6.2.2 電極近傍電界と沿面放電特性との関連

ここに示されていることは, 模擬コイルの沿面を簡単な C と R の等価回路で置き換えて高電圧電極近傍の電界(ここでいう電界とは, ストリーマの影響を受けない電圧レベルにおいて物理的意味を持ち, ストリーマが激しく発生している状態ではストリーマ先端の電界が支配的となるといふ事から考えると, 第1近似的な量と考えられる)を沿面距離, 静電容量などのいくつかのパラメータによって表わし, 沿面閃絡に対するこれらのパラメータの影響, 沿面閃絡特性の無次元化された物理量による表示についての概略の検討である。

また照射下の沿面閃絡現象を説明する物理モデルを考察することが課題であろう。

Fig. 6.3 に等価回路モデルを示す。有限長さ ℓ の RC 回路で, 他端が短絡とすれば, 沿面方向 (x 方向) の電圧の変化は次式で示される⁽¹³⁾。

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = CR \frac{\partial v}{\partial t} \dots\dots\dots(1)$$

ここで、C：単位長さあたりの絶縁材静電容量

R：単位長さあたり沿層方向の抵抗

v：電位

x：沿面の方向

t：時間

ここで見通しを良くするため、ステップ状の電圧 V_0 が印加された場合における、 $x = 0$ (高電圧側電極)での電位勾配の過渡変化を考える。初期条件、境界条件は以下である。

$$\left. \begin{array}{l} t \geq 0, \quad x = 0 \quad \text{で} \quad v = V_0 \\ t \geq 0, \quad x = \ell \quad \text{で} \quad v = 0 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

$x = 0$ における電位勾配は次式で与えられる。

$$\frac{\partial v}{\partial x}_{x=0} = \frac{V_0}{\ell} \left\{ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\left(\frac{n\pi}{\ell}\right)^2 \frac{t}{RC}\right) \right\} \dots\dots\dots (3)$$

この式を見ると、電極部の電界は印加電圧 V_0 と沿面距離 ℓ の比、 V_0/ℓ および $(t/\ell^2 RC)$ というパラメータによって表わされる。

ここで実験結果との対応を考える。(3)式より、RCが大きい程電極近傍の電界が大きくなる。また沿面距離 ℓ については、 ℓ が増加すると V_0/ℓ は小さくなるが、括弧内の第2項は大きくなるので電極部の電界はそれほど減少しないと考えられる。実験の結果では ℓ を増加させると FOV も増加するが、しだいに増加率は減少する。これは上の式から予想されることと傾向が一致する。また、最大放電電荷量が電極部電界に比例する量である(第1近似的な意味で)と考えると、実験結果で沿面距離によって最大放電電荷量がそれほど変わっていないことも対応がとれている。絶縁厚さを変えた場合、4 mm では 8 mm より C が 2 倍大きいので、(3)式における C の依存性よりやはり傾向が一致する。

さて(3)式の型から見て、左辺の $\frac{\partial v}{\partial x}_{x=0}$ を一定として考えれば、印加電圧 V_0 (これは FOV と見ることができる) と ℓ の比： FOV/ℓ と無次元パラメータ $t/\ell^2 RC$ (ここで t は交流周波数 ω またはパルス電圧の立上り時間に対応した時間尺度とみる) という 2 つの物理量で整理すれば、種々の ℓ, R, C, ω の組合せに対してある一つの関係が得られるのではないかと推測される。

いま時間のファクター t を除外しておき、また C が絶縁厚さに反比例するので C のかわりとして絶縁厚さ(ここでは h とする)の逆数を取り、R は絶縁厚さと無関係であると考えれば、 FOV/ℓ は h/ℓ^2 によって関係づけられる。

実験の結果をこの方法により片対数グラフにプロットしたものを Fig. 6.4 に示す。これからわかるように、以上の考察はストリーマの開始電圧近傍の電圧範囲で妥当と考えられるモデルに基づくものであり、ストリーマを經由して閃絡が生じるものでは正しくないが、大きなバラツキは認められない。またより妥当なモデルを設定して解析すれば厳密な議論ができると思われる。

6.3 直流抵抗減少の原因の確認実験および検討

6.3.1 目的および実験方法

模擬コイルを用いた γ 線照射実験において電極間の直流抵抗が、非照射下と比較して低下する現象が観察されたが、その原因を把握するため、模擬試料による照射下での直流電圧-電流特性をさらに詳しく調べた。

ポロイダル磁場コイル通常試料に対する模擬試料には簡単のためポリメチルメタクリレート単体を使用し、特に表面漏洩の影響の有無を調べるため、通常の試料と中央部分を分断した試料を用意した。それぞれの形状および電極配置をFig. 6.7に示す。

6.3.2 実験試料

照射条件は沿面閃絡実験とほぼ同一になるように配置した。線源側の試料面の照射線量率は 1.02MR/h 、その裏面では 0.69MR/h であった。裏面の照射線量率が高い理由は模擬試料の内部には比重の大きな導体部分(銅)がないためである。

電極間隔は通常試料および分断試料とも $10, 100, 200, 300\text{mm}$ とした。分断試料の場合は試料の間隔を $2, 20, 40\text{mm}$ と変えることにより、試料間隔の空気容積の影響の有無を調べた。電極間には $0\sim 3\text{kV}$ の直流電圧を印加した。直流電圧発生源にはJohn Fluke 415 Bを使用し、直流電流測定にはKeithley 616を使用した。

実験は気圧 758.4mmHg 、温度 28°C 、湿度 $55\sim 60\%$ の大気条件下で行った。

6.3.3 実験結果およびまとめ

通常試料に対する照射下での直流電圧と電流との関係をFig. 6.8に示す。通常試料の場合の上記の関係において照射下と非照射下との比較結果をFig. 6.9に示す。電極間隔一定($\ell=200\text{mm}$)条件下での通常試料と分断試料との間の電圧-電流特性の比較をFig. 6.10に示す。また試料間隔一定($D=20\text{mm}$)条件下での通常試料と分断試料との間の上記特性の比較をFig. 6.11に示す。

以上の実験結果をまとめると次の通りになる。

- (1) 通常試料と分断試料の電圧-電流特性の差異はほとんど見られない。この結果、照射下での電極間の直流抵抗の低下は、コロナ発生電圧以下では、ほとんど空気中の電離電流に起因することがかった。
- (2) 本実験における照射下の電流は非照射下における表面漏洩電流の $10^3\sim 10^4$ 倍の値をもつ。この倍率は4.1.4の模擬試料に対する実験結果(10^5 倍)よりも少ない。
- (3) 通常試料に対する照射下での電圧-電流特性は、4.1.4の測定結果をほぼ再現している。

6.4 実機条件と実験条件の差違に関する比較試験および検討

6.4.1 実機電圧波形のFOVおよび接続部絶縁模擬試料のFOVの測定

4.における実験条件は印加電圧がAC、空間に露出した電極となっているため、① 実機波

形によるFOVの測定, ② 接続部絶縁模擬試料のFOVの測定を行い, 比較検討した。

試料をFig.6.10に示す。コイルの絶縁材料, 形状は高崎研コバルト照射施設における実験で使用したものと同一とした。①に対してはA試料を使用した。B試料は電極間のコイル面にポリエチレンテープを巻回し, その外側をエポキシ仕上げワニス塗りこんだガラステープを巻回したものであり, ②の検討に使用した。

実験法は実機の電圧波形がFig.6.11に示される波形であることから, ①についてはFig.6.12に示すように立ち上がり約1 msecと0.1 msecの開閉サージを用いた。③については50 Hz ACを用いた。

結果を以下に示す。Fig.6.13にFOVの測定結果を示し, Fig.6.14に閃絡時の電圧波形を示す。これらより次のことがわかる。

(1) 電圧波形によるFOVの序列は

1 msec開閉サージ > 0.1 msec開閉サージ > AC となる。1 msecの開閉サージはACよりも約1.6倍FOVが大きい。

(2) B試料のFOVはA試料よりも大きくなり, 約1.2倍である。

(3) 閃絡はいずれも波頭付近で生じる。

従ってACで評価しておけば最も安全側になるということ, 何らかの絶縁物が沿面にあるとFOVは向上することが確認された。

6.4.2 磁界による影響

磁場下における空気の絶縁破壊に関する報告として, Wehrli⁽¹⁵⁾, Valle⁽¹⁶⁾, Somerville⁽¹⁷⁾, Haefer⁽¹⁸⁾, BlevinとHaydon⁽¹⁹⁾ およびBhiday⁽²⁰⁾がある。(Fig.6.15~Fig.6.18を参照)これらの例をみるとパッシェン曲線の最小値の左側では, 磁界によってFOVが低下し右側では上昇する。この理由は, 電界と直交する磁界によって電子の軌道が変化し, 実効的な電極間距離が増加することに起因するものとして考えられる(Fig.6.19)。また電界に平行な磁界は, 1気圧の空気のFOVに関しては影響を及ぼさないと考えられる。したがって, ポロイダル磁場コイルの場合磁界が沿面の閃絡に対して大きい影響を及ぼすことはないと思われる。

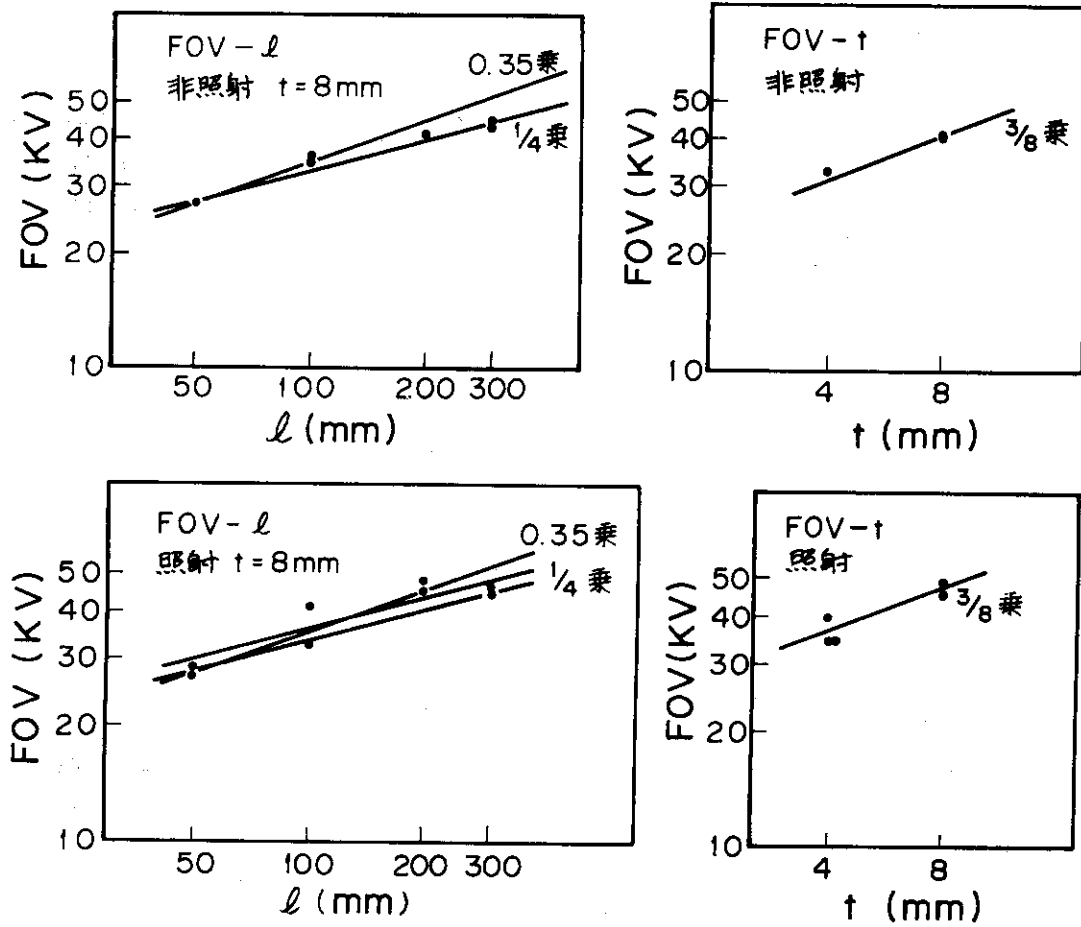


Fig. 6.1 模擬コイルFOVの沿面距離および絶縁厚さに対する依存性
(l : 沿面距離, t : 絶縁厚さ)

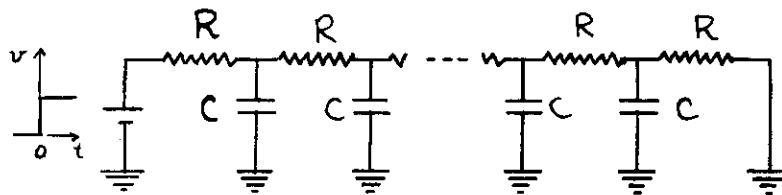
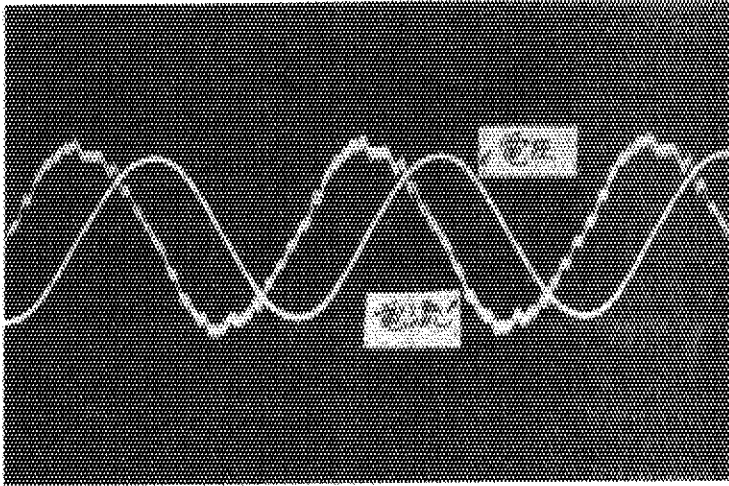
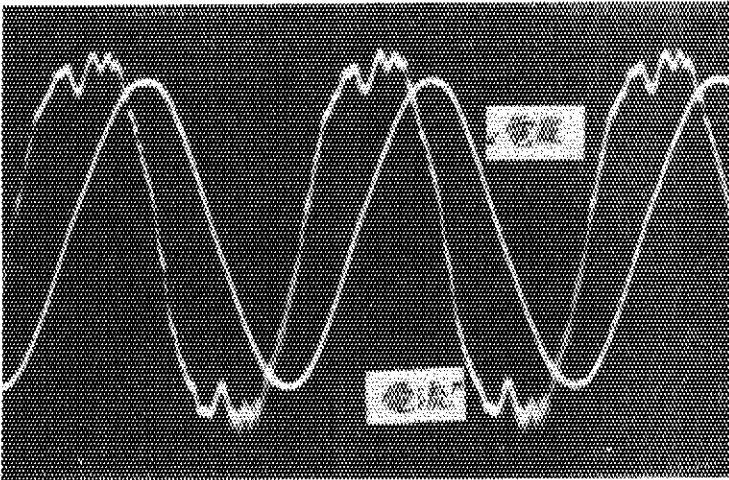


Fig. 6.2 沿面の等価回路のモデル



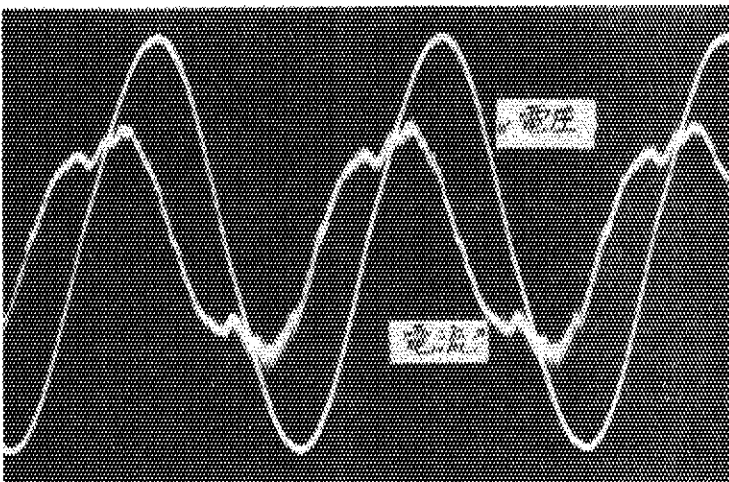
電圧電流波形印加電圧：4 kV

- (a) 電 圧：5 kVp/div
- 電 流：0.01 v/div



a + 15 kV

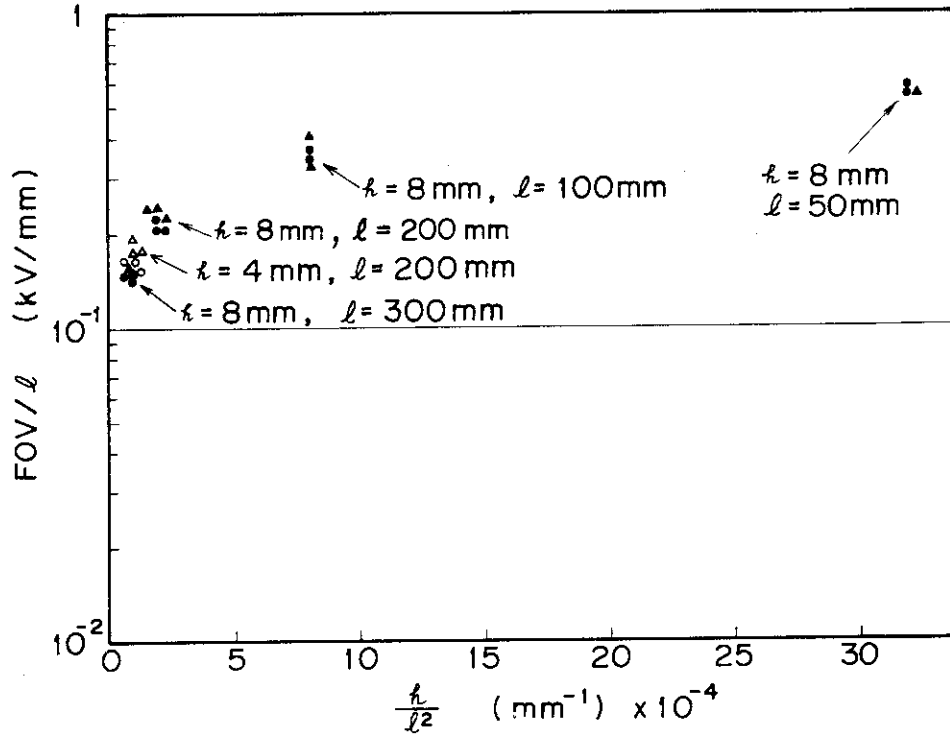
- (b) 電 圧：10 kVp/div
- 電 流：0.02 v/div



at 20 kV

- (c) 電 圧：10 kVp/div
- 電 流：0.05 v/div

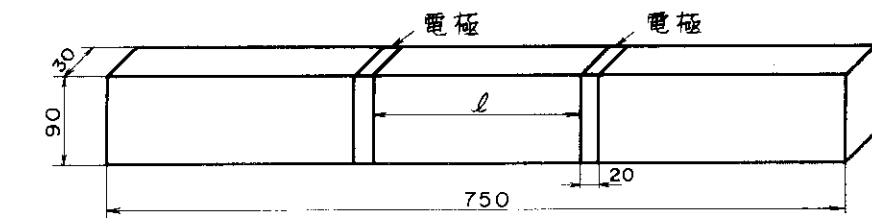
Fig. 6.3 低周波分電圧電流波形



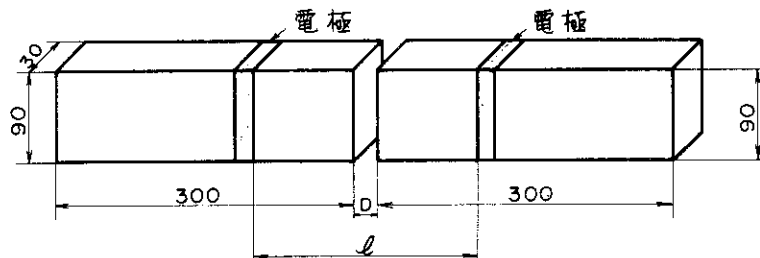
FOV : Flash over voltage
 l : Creepage distance
 h : Insulation thickness

△△ 照射下
 ○○ 非照射下

Fig. 6.4 FOV/l と h/l² の関係



通常試料



分断試料

* 試料材質 PMMA
 電極 アルミニウム箔

Fig. 6.5 分断試料および通常試料

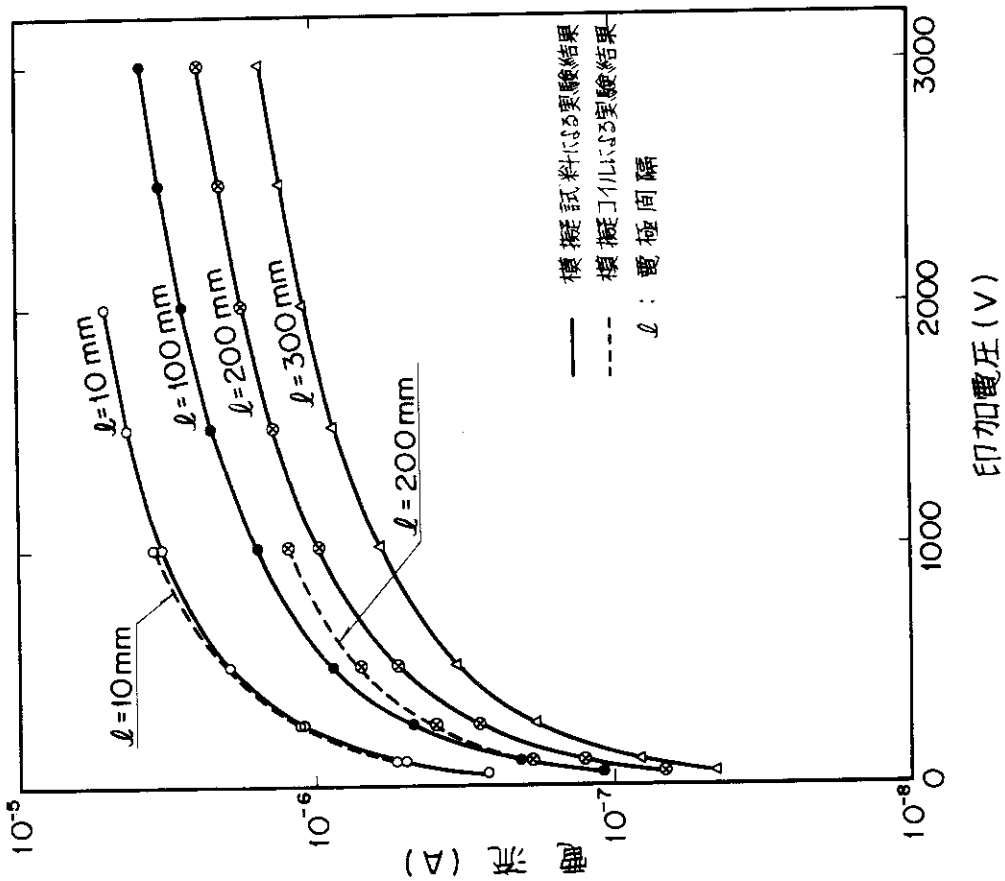


Fig. 6.6 通常試料に対する V_+-I 特性 (放射線下, 10^6 R/h)

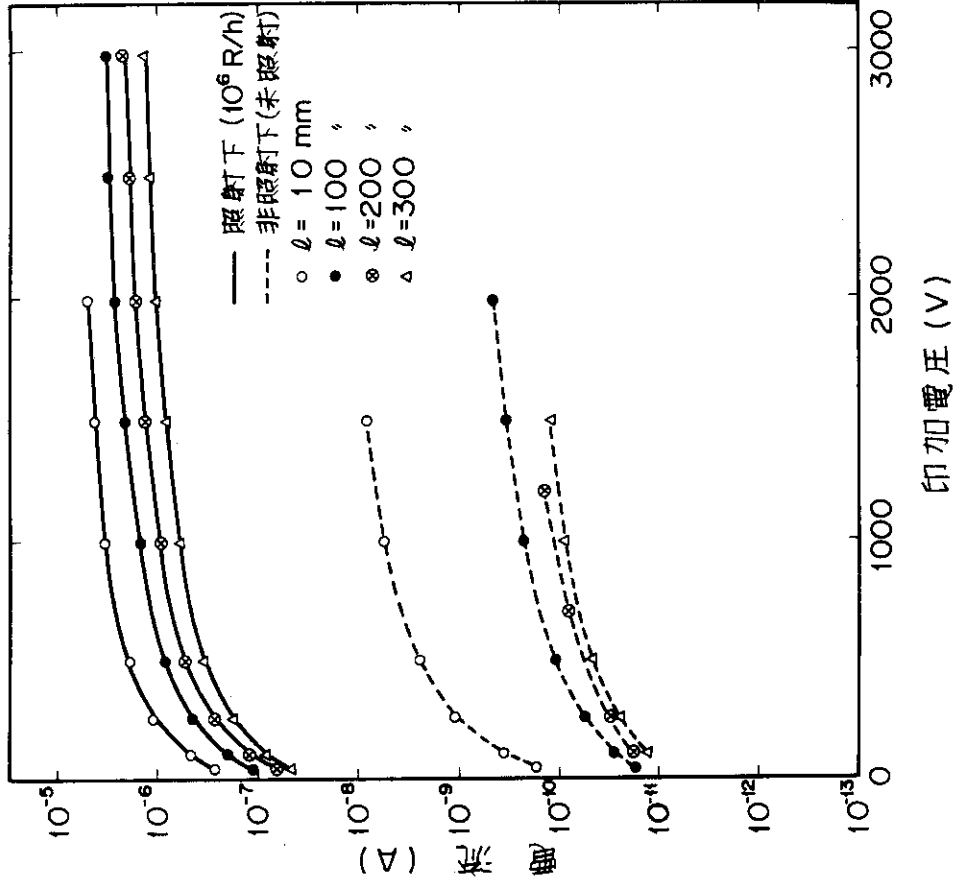


Fig. 6.7 通常試料に対する V_+-I 特性
— 放射線下と非放射線下の比較 —

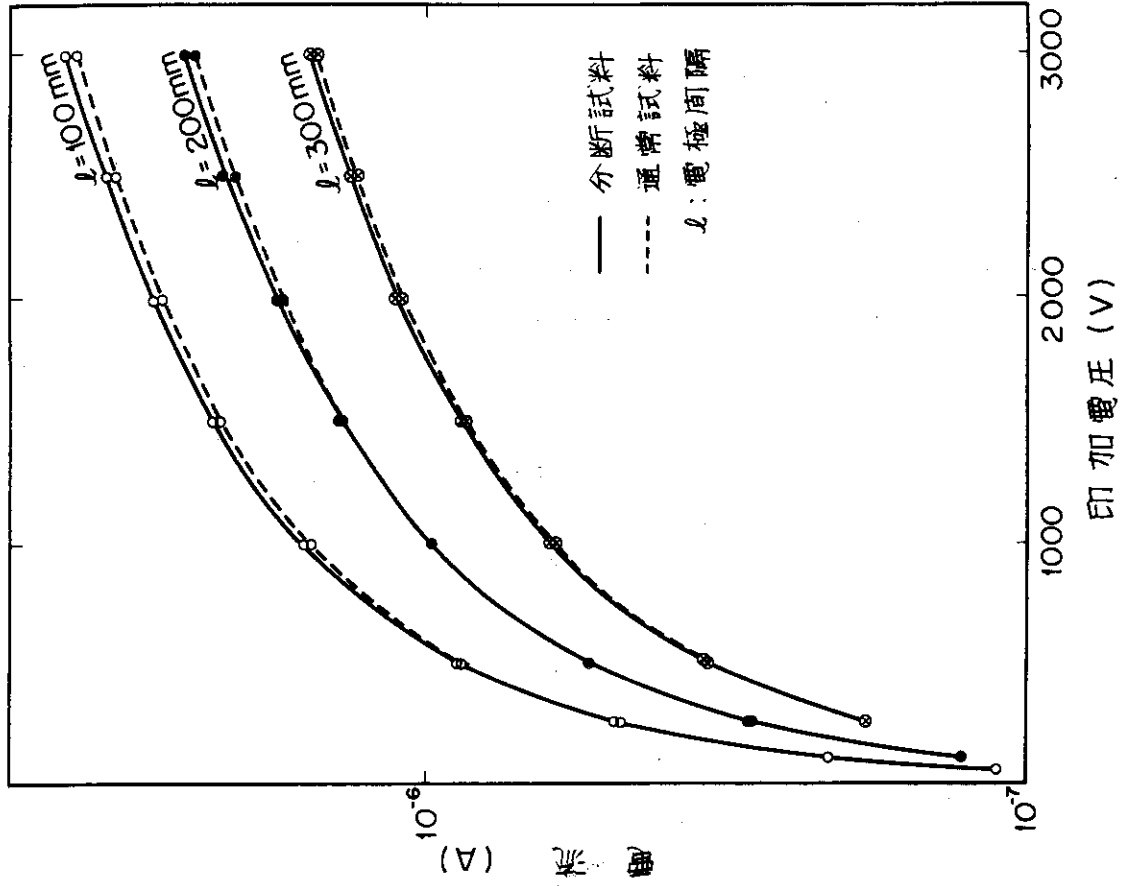


Fig. 6.9 通常試料と分断試料との特性比較 ($D=2.0\text{mm}$)

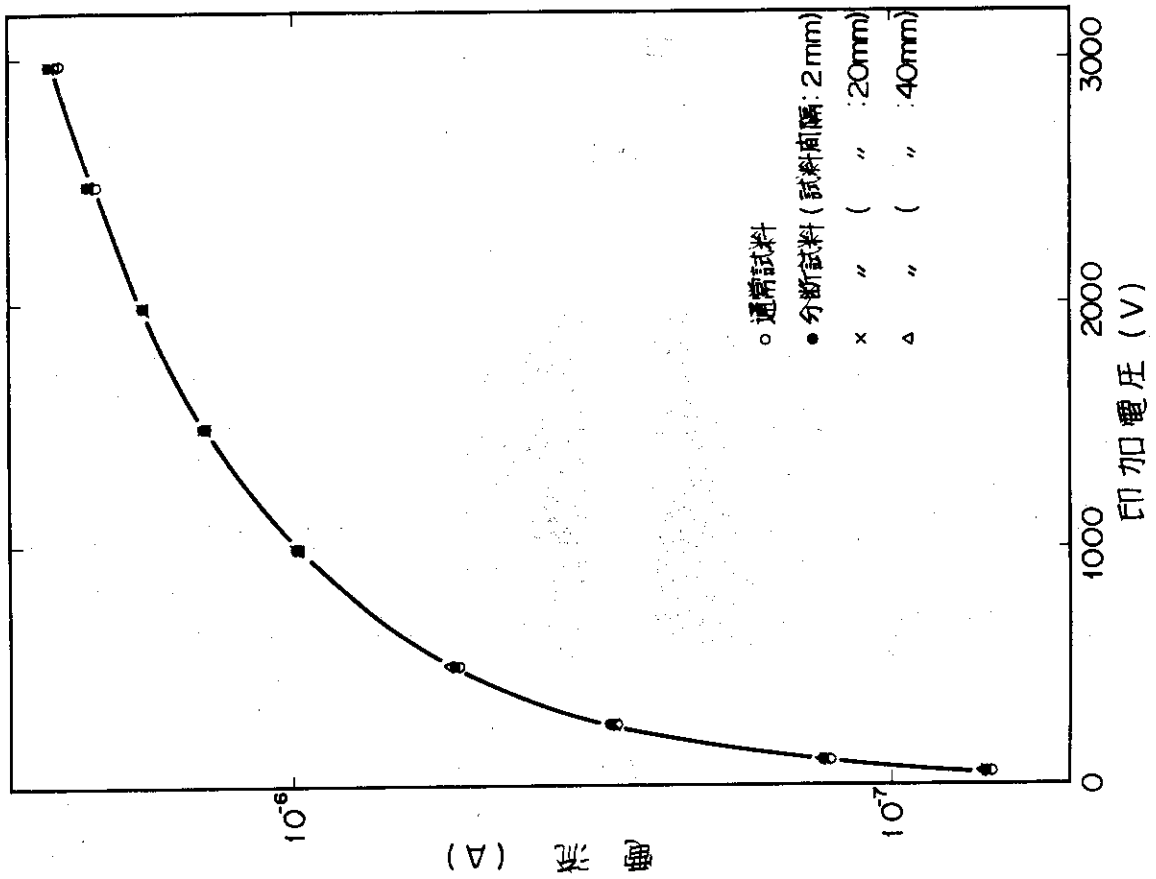


Fig. 6.8 通常試料と分断試料との特性比較 ($l=200\text{mm}$)

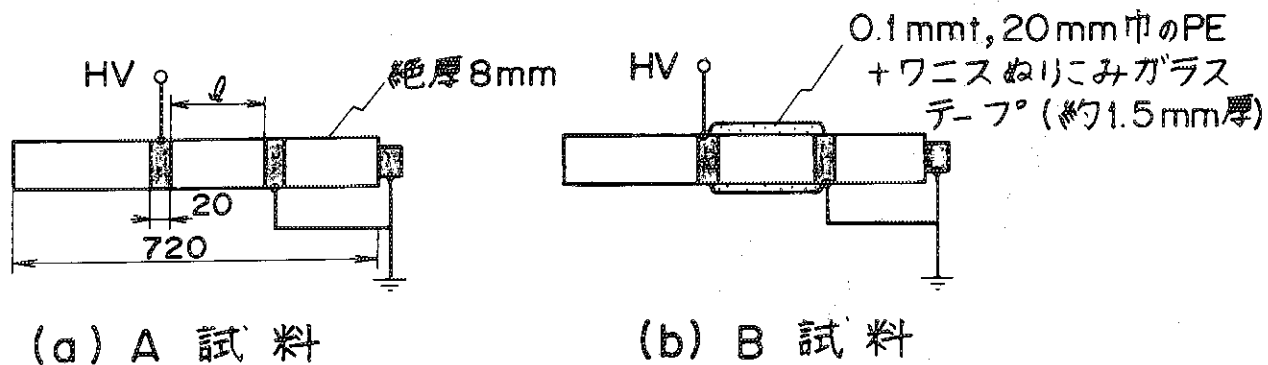


Fig. 6.10 試料

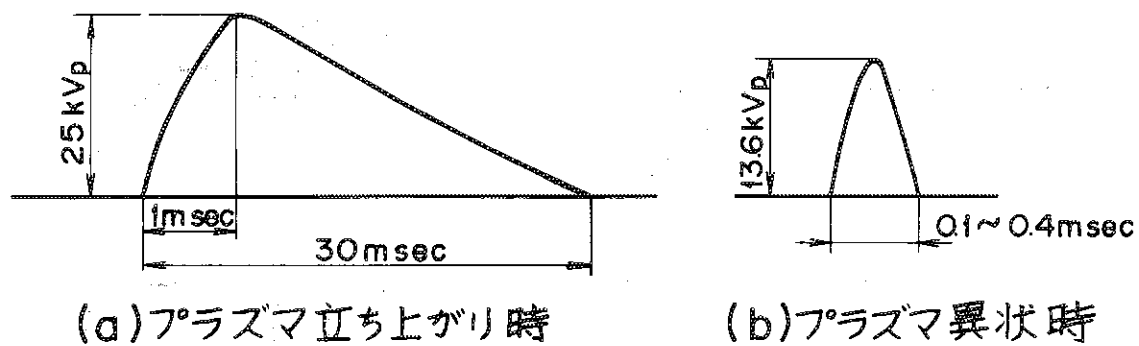


Fig. 6.11 実機運転時の電圧波形

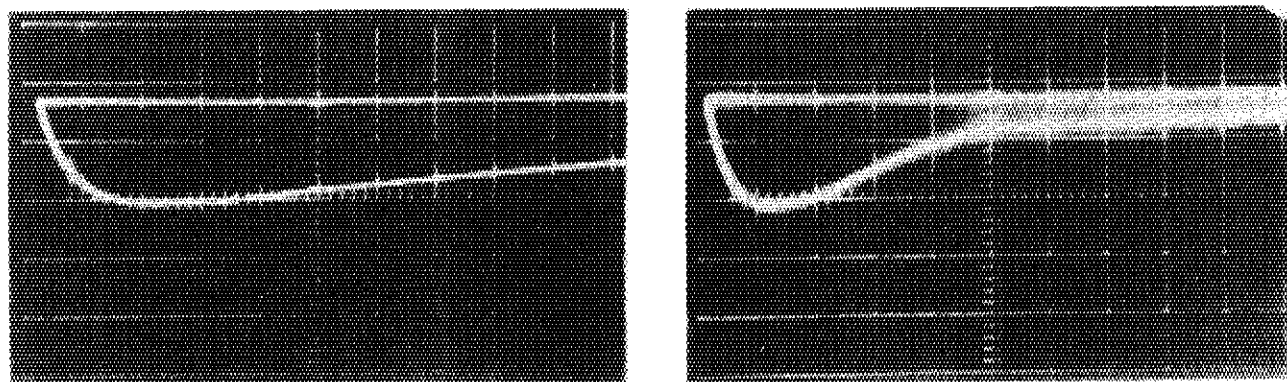


Fig. 6.12 開閉サージの電圧波形

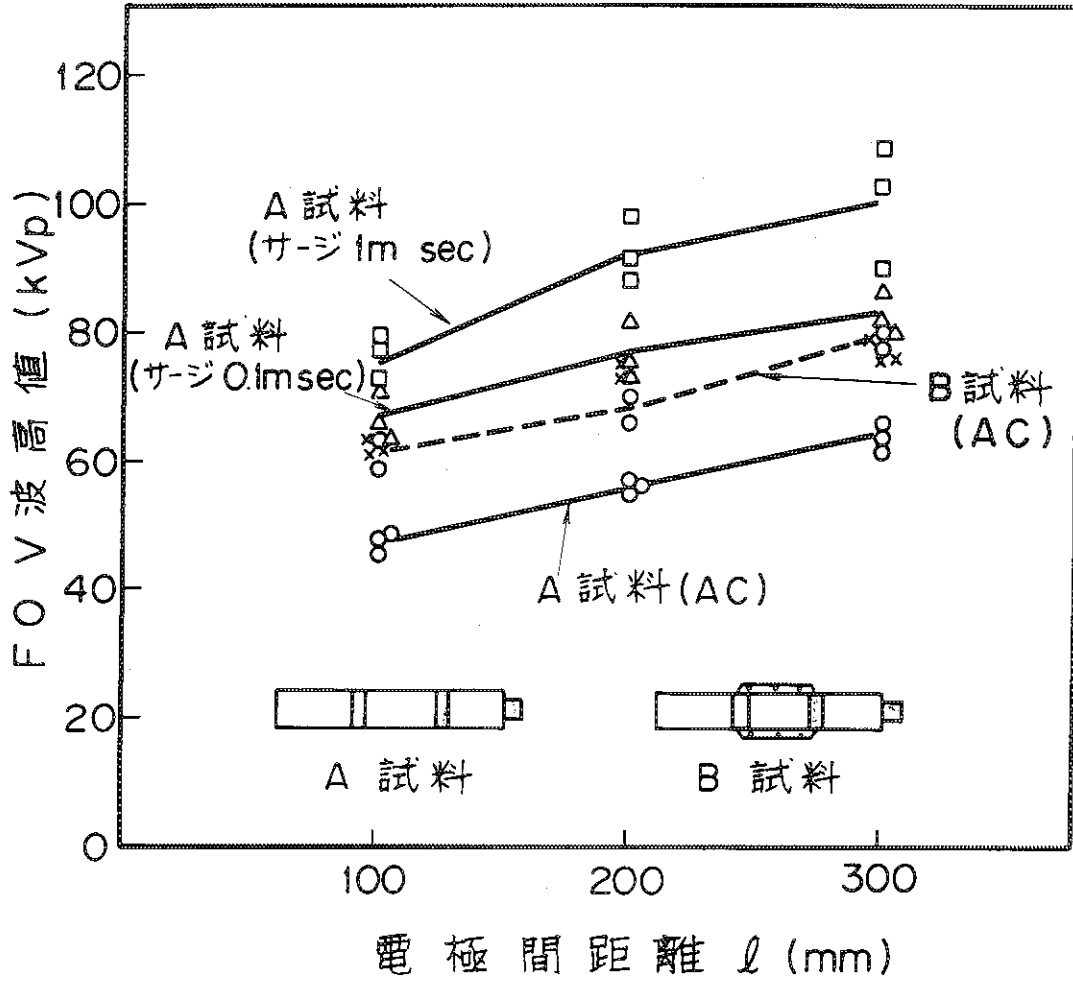
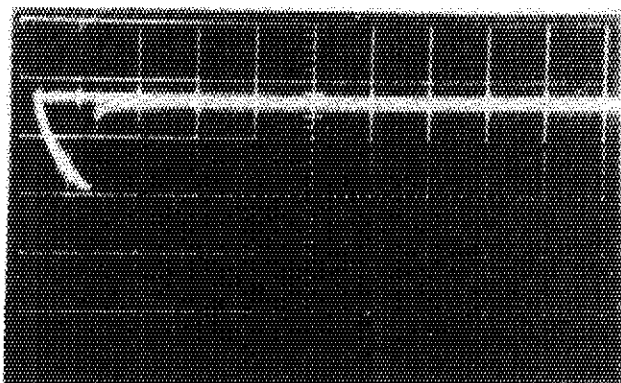
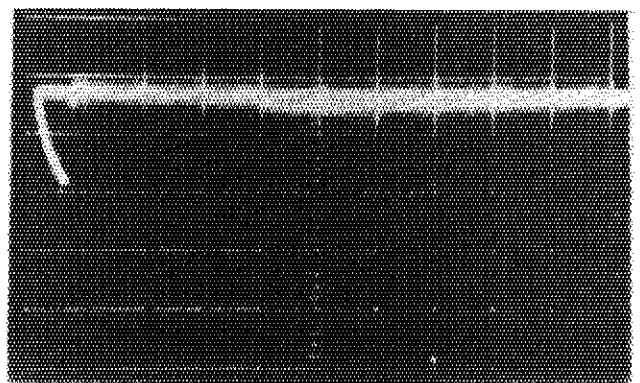


Fig. 6.13 FOV測定結果



(0.1msec/div, 44kV/div)
(b) 立ち上がり 0.1msec の開閉サージ



(1 msec/div, 44kV/div)
(c) 立ち上がり 1msec の開閉サージ

開閉サージによるフラッシュオーバー時の電圧波形

Fig. 6.14 開閉サージによるフラッシュオーバー時の電圧波形

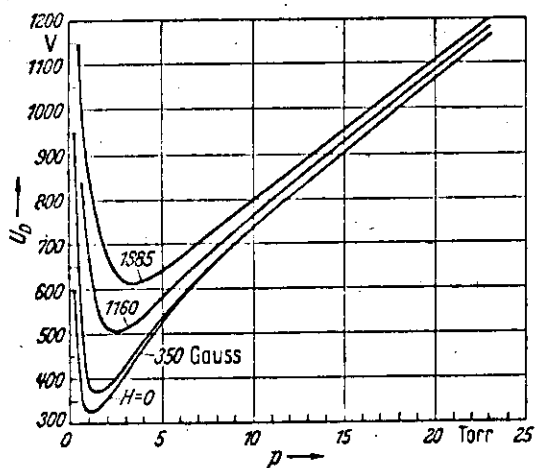


Fig. 6.15 空気の破壊電圧の圧力依存性に及ぼす磁界の影響⁽²¹⁾

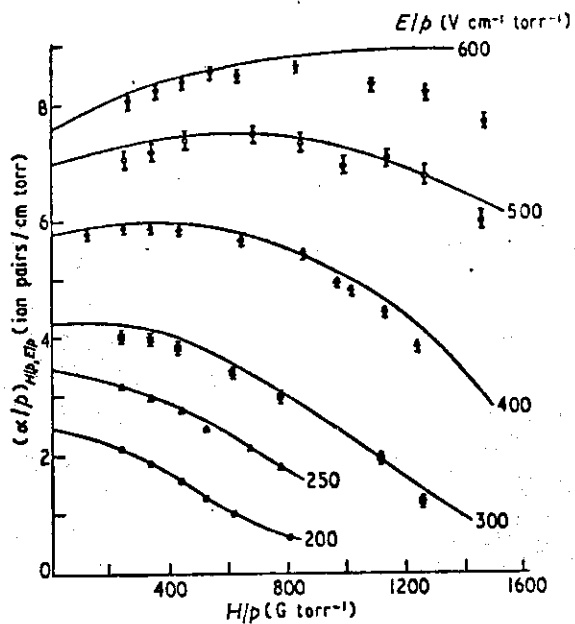


Fig. 6.16 (磁界の強さ/圧力)に対する(電離係数/圧力)の変化⁽²⁰⁾

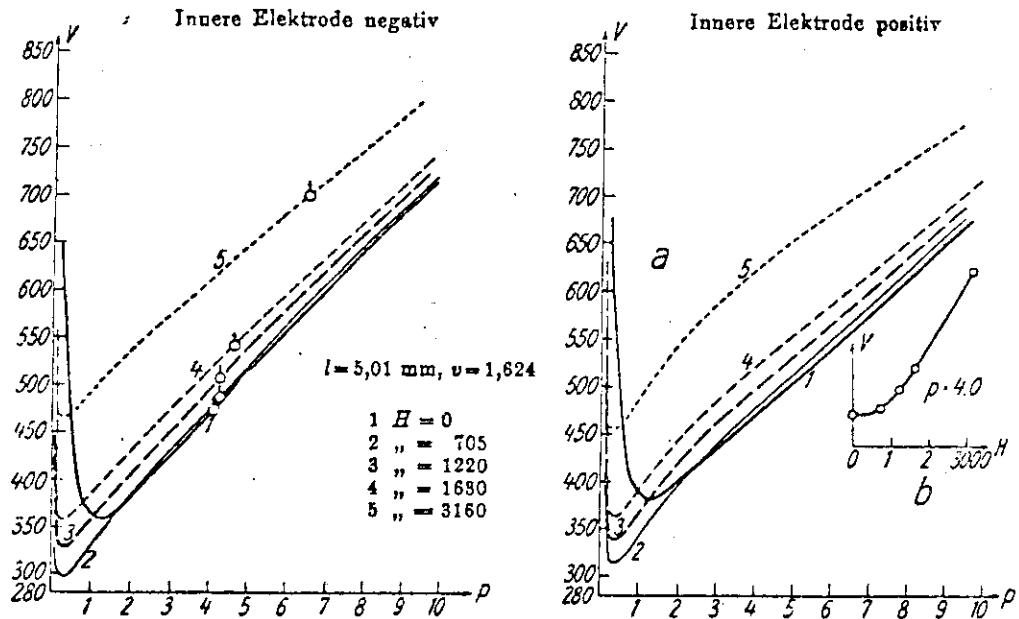


Fig. 6.17 空気の破壊電圧の圧力依存性に及ぼす磁界の影響⁽¹⁵⁾

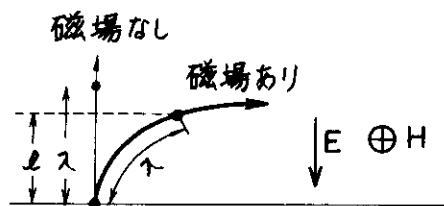


Fig. 6.18 電界と直角方向の磁界下での電子の軌道変化

7. ま と め

J T - 6 0 の逃走電子放電時に生ずる高線量率硬 X 線照射下におけるポロイダル磁場コイルの沿面放電特性を実験により確認し、以下の結果を得た。

1. 線量率 $1 \times 10^6 \text{ R/h}$ の $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線照射下で模擬コイルに 50 Hz AC 電圧を印加した場合
 - (1) 照射下の沿面閃絡電圧 (FOV) は照射を行わない場合と比較して低下することはなく、むしろやや高めとなる。
 - (2) 照射下のコロナパルス (最大放電電荷量) は、非照射下と比較して、低電圧域で小さく高電圧域で同程度となる。
 - (3) 照射下の低周波電流は非照射下に比べて $3 \sim 4$ 倍大きくなる。
 - (4) 照射下の直流抵抗は 5 桁程度小さくなる。これは空気中の電離電流が支配的であることを実験により確認した。
 - (5) 照射下の FOV の沿面距離、絶縁厚さに対する依存性は従来の経験式と合う。
2. 球ギャップおよび PTFE 棒の場合
 - 2-1 線量率 $4 \times 10^5 \text{ R/h}$ の $^{60}\text{Co}-\gamma$ 線照射下で 50 Hz AC 電圧を印加した場合
 - (1) 球ギャップの FOV は照射下で小さくなり、非照射下の 90% 程度となる。また測定値のばらつきが小さくなる。
 - (2) テフロン棒の FOV は照射下と非照射下で同程度であり、バラツキも変わらない。
 - 2-2 超高線量率の場合 (DC 電圧を印加した状態で $1.8 \times 10^{11} \sim 1.8 \times 10^{13} \text{ R/h}$ の 2 MeV 電子線による 17 nsec パルス X 線を照射した場合)
 - (1) 球ギャップの FOV は大幅な低下 ($1.8 \times 10^{13} \text{ R/h}$ で約 70% になる) が認められた。
 - (2) PTFE 試料の場合、電極間距離が小さい (10 mm) と FOV の低下 ($1.8 \times 10^{13} \text{ R/h}$ で約 80% になる) が認められたが、電極間距離が大きい (18 mm) と照射による変化は小さい。
3. 実機と実験条件の比較
 - (1) 実機電圧波形 (立上り 1 msec 開閉サージ) の FOV は AC の 1.6 倍程度大きくなる。
 - (2) 接続部模擬 (沿面が露出しない) 試料の FOV は、露出する場合の 1.2 倍程度大きくなる。
 - (3) 磁界の影響については、沿面の電界方向と垂直方向の磁界は沿面の実効的距離を増加する効果を有し、コイルの場合気圧と沿面距離の積が大きいので FOV は上昇すると考えられる。

なお、沿面閃絡に対する X 線照射の影響と並行して、X 線照射自体が絶縁物中に高い内部電

界を誘起する可能性があることが明らかになり、実機のポロイダル磁場コイルに対してこの可能性をさらに詳しく検討する必要性が生じた。

高エネルギー電子線を固体絶縁物に照射すると、照射電流密度が高い場合、絶縁物が放電破壊を起すことはよく知られている。一方X, γ 線の場合は非荷電粒子であるため、一次的にはこうした現象は起らないが、コンプトン電子や光電子の発生を吸収の非平衡性によって、二次的に過剰電荷が蓄積し内部電界が高まる。 γ 線用の遮蔽ガラスの放電破壊はその典型的な実例と言える。ポロイダル磁場コイルの絶縁物は遮蔽ガラスよりも十分薄いので内部の過剰電荷は漏洩し易いが、絶縁物の表面近傍や導体との界面近傍の電子非平衡領域では過剰電荷の蓄積量が大きいので、それによって誘起される内部電界は無視できないと考えられる。

しかしX, γ 線に照射された絶縁物中の電荷蓄積については実験データ、理論データはほとんど皆無であり、現状では実機コイルの場合について定量的な評価はできない。したがって実機において想定されているX線エネルギーや線量率に近い条件において照射実験を行い、電荷蓄積の評価を行う必要がある。

今後の問題点、検討事項

○ X, γ 線照射下におけるコイル絶縁物中の電荷蓄積効果

また、ここに得られた実験結果に対する物理的な説明と関連して検討すべきいくつかの問題がでてきたと考えられる。項目だけ示すと以下となる。

- 照射下の沿面閃絡の物理的モデル（模擬コイルのように電界の不平等性が大きい場合とテフロン試料のように不平等性が小さい場合について）
- 照射下の球ギャップ間放電の物理的モデル
- 模擬コイルの場合、照射による電界の緩和効果があるのか、ある場合にはFOVとかコロナパルスとの定量的関係はどうか。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始御支援していただいた磯康彦大型トカマク開発部部長、吉川允二JT-60計画室室長に深く感謝致します。終始有益な御意見、御指導をいただいた太田充JT-60第2開発室本体開発グループリーダーに深く感謝致します。また検討会に参加していただき貴重な御意見をいただいたJT-60第1開発室電源グループ嶋田隆一氏、活発なコメントをいただいたJT-60第2開発室の各位に対し深く感謝致します。さらに高崎研究所コバルト照射施設および名古屋大学フェバトロン装置の使用に対して関係各位に深く感謝致します。

界を誘起する可能性があることが明らかになり、実機のポロイダル磁場コイルに対してこの可能性をさらに詳しく検討する必要性が生じた。

高エネルギー電子線を固体絶縁物に照射すると、照射電流密度が高い場合、絶縁物が放電破壊を起すことはよく知られている。一方X、 γ 線の場合は非荷電粒子であるため、一次的にはこうした現象は起らないが、コンプトン電子や光電子の発生を吸収の非平衡性によって、二次的に過剰電荷が蓄積し内部電界が高まる。 γ 線用の遮蔽ガラスの放電破壊はその典型的な実例と言える。ポロイダル磁場コイルの絶縁物は遮蔽ガラスよりも十分薄いので内部の過剰電荷は漏洩し易いが、絶縁物の表面近傍や導体との界面近傍の電子非平衡領域では過剰電荷の蓄積量が大きいので、それによって誘起される内部電界は無視できないと考えられる。

しかしX、 γ 線に照射された絶縁物中の電荷蓄積については実験データ、理論データはほとんど皆無であり、現状では実機コイルの場合について定量的な評価はできない。したがって実機において想定されているX線エネルギーや線量率に近い条件において照射実験を行い、電荷蓄積の評価を行う必要がある。

今後の問題点、検討事項

○ X、 γ 線照射下におけるコイル絶縁物中の電荷蓄積効果

また、ここに得られた実験結果に対する物理的な説明と関連して検討すべきいくつかの問題がでてきたと考えられる。項目だけ示すと以下となる。

○ 照射下の沿面閃絡の物理的モデル（模擬コイルのように電界の不平等性が大きい場合とテフロン試料のように不平等性が小さい場合について）

○ 照射下の球ギャップ間放電の物理的モデル

○ 模擬コイルの場合、照射による電界の緩和効果があるのか、ある場合にはFOVとかコロナパルスとの定量的関係はどうか。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始御支援していただいた磯康彦大型トカマク開発部部長、吉川允二JT-60計画室室長に深く感謝致します。終始有益な御意見、御指導をいただいた太田充JT-60第2開発室本体開発グループリーダーに深く感謝致します。また検討会に参加していただき貴重な御意見をいただいたJT-60第1開発室電源グループ嶋田隆一氏、活発なコメントをいただいたJT-60第2開発室の各位に対し深く感謝致します。さらに高崎研究所コバルト照射施設および名古屋大学フェパトロン装置の使用に対して関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- (1) 日本原子力研究所：核融合研究開発室の現状（1978）
- (2) 大型トカマク開発部 JT-60 開発室：臨界プラズマ試験装置詳細設計（1977）内部資料
- (3) たとえば Strachan, J.D., Meservey, E.B., et al. : "Photo-neutron production in the PLT tokamak", *Nuclear Fusion* 17 1 (1977)
- (4) Strachan, J.D. and Stodiek, W. : "Observations of runaway electrons in PLT 400 kA ohmic heated discharges", in *Status of ohmic heating in PLT*, PPPL, 7 & 8 Sep. 1977.
- (5) 相川裕史, 太田充, 森田守人, 鈴木康夫：臨界プラズマ試験装置 (JT-60) における逃走電子による硬 X 線の評価 (1975) 内部資料
- (6) 相川裕史, 竜福広, 平岡徹：臨界プラズマ試験装置 (JT-60) における逃走電子による放射線の評価 (1977) 内部資料
- (7) 児玉幸三：私信
- (8) JT-60 第 1 および第 2 開発室：臨界プラズマ試験装置の実験計画 (第 1 次案) (1978) 内部資料
- (9) 電気学会：絶縁材料照射専門委員会報告 (応用編), 電気学会技術報告 (I 部) 第 79 号 (昭 42)
- (10) 大型トカマク開発部 JT-60 開発室：臨界プラズマ試験装置用ポロイダル系コイルの開発総合報告書 (昭 51) 内部資料
- (11) 中村義輝, 田中隆一：JAERI-M 5976 (1975)
- (12) 電気学会：電気工学ハンドブック, 10 編 (1978)
- (13) 電気学会：放電ハンドブック (改訂新版) (昭 48)
- (14) 電気学会：過渡現象論
- (15) Wehrli, M. : *Ann. d. Phys.* 69, 285-314 (1922)
- (16) Valle, G. : *Nuovo Ciments.* 7, 174-189 (1950)
- (17) Somerville, J.M. : *Proc. Phys. Soc.* B65, 620-629 (1952)
- (18) Haefer, R. : *Acta Phys. Austriaca*, 7, 52-90 (1953)
- (19) Blevin, H.A. & Haydon, S.C. : *Aust. J. Phys.*, 11, 18-34 (1958)
- (20) Bhidag, M.K., et al. : *J. Phys. D*, 3, 943-950 (1970)
- (21) Ganger, B. : "Der elektrische Durchschlay von Gasen" (Springer-Verlay) P. 198 (1953)

附録 模擬コイルの測定データシート

8/8

PFC 耐放射線線性試験データ

($\frac{12}{0.28}$)

回路定数 $K=42.8$

コイル NO.	電極 距離 (cm)	線率(R/A)	印加 電圧 (kV)	コロナパルス		時間		写真 NO.	低周波分電流 (ピーク値)		内絡 電圧 (kV)	コイル 誘電 容量 (pF)	
				正電圧負 ΔV (V)	Q_{max} (C)	開始時間 (μ s)	終了時間 (μ s)		正電圧負 V (V)	電流 I (A)			写真 NO.
IN0 100 0		●	4	0.5x0.1	6.5x10 ⁻¹¹	0.70	3.30	9.00	11.30	1	1.1x0.02	2.2x10 ⁻⁶	2
			6	1.5x1	1.95x10 ⁻⁹	0.70	4.40	10.30	14.00		1.7x0.02	3.4x10 ⁻⁶	
			10	2.0x2	5.2x10 ⁻⁹	14.25	15.00	15.30	15.90		1.1x0.05	5.5x10 ⁻⁶	35.5 kV
			15	1.8x5	1.17x10 ⁻⁸	15.50	16.55	16.05	17.10		1.8x0.05	9x10 ⁻⁶	
			20	1.6x10	2.08x10 ⁻⁸	17.25	20.15	25.05	25.55	3	1.3x0.1	1.3x10 ⁻⁵	
IN2 100 10 ⁶ ▲		▲	4	2x0.05	1.3x10 ⁻¹⁰	70	2.30	10.35	12.40	5	1.7x0.05	8.5x10 ⁻⁶	4
			6	1.3x0.5	8.45x10 ⁻¹⁰	20	1.40	11.40	12.40		2.4x0.05	1.2x10 ⁻⁵	
			10	1.5x2	3.9x10 ⁻⁹	14.20	14.25	14.55	14.57		1.0x0.2	2x10 ⁻⁵	32.2 kV
			15	2.0x5	1.3x10 ⁻⁸	15.07	15.50	15.15	15.56		1.4x0.2	2.8x10 ⁻⁵	
			20	1.5x10	1.95x10 ⁻⁸	16.15	19.15	22.50	23.17	7	2.0x0.2	4x10 ⁻⁵	
IN7 200 0 ●		●	4	2.2x0.2	5.72x10 ⁻¹⁰	0	2.05	3.50	7.00	9	1.0x0.02	2x10 ⁻⁶	10
			6	1.7x2	4.42x10 ⁻⁹	7.4	8.54	8.00	9.05		1.4x0.02	2.8x10 ⁻⁶	
			10	1.4x5	9.1x10 ⁻⁹	9.17	9.30	10.05	10.15		1.0x0.05	5x10 ⁻⁶	41.3 kV
			15	1.7x5	1.11x10 ⁻⁸	10.24	11.40	10.35	11.50		1.5x0.05	7.5x10 ⁻⁶	
			20	1.7x10	2.21x10 ⁻⁸	11.55	12.05	17.43	20.15	11	1.5x0.1	1.5x10 ⁻⁵	
IN8 200 10 ⁶ ▲		▲	4	1.0x0.05	6.5x10 ⁻¹¹	0.70	2.55	4.25	5.35	13	1.4x0.05	7x10 ⁻⁶	14
			6	2.0x0.5	1.3x10 ⁻⁹	0.70	2.35	5.70	6.55		2.0x0.05	1x10 ⁻⁵	
			10	1.5x2.0	3.9x10 ⁻⁹	6.07	7.25	8.02	8.07		1.6x0.1	1.6x10 ⁻⁵	45.2 kV
			15	2.2x5	1.43x10 ⁻⁸	8.17	9.05	8.20	9.05		1.2x0.2	2.4x10 ⁻⁵	
			20	2.0x10	2.6x10 ⁻⁸	9.30	12.45	15.30	17.28	15	1.4x0.2	2.8x10 ⁻⁵	
IN13 300 0 ●		●	4	2.0x0.5	1.3x10 ⁻⁹	0.70	1.15	2.20	5.12	17	0.9x0.02	1.8x10 ⁻⁶	18
			6	2.0x2	5.2x10 ⁻⁹	5.25	7.40	6.30	7.45		0.5x0.05	2.5x10 ⁻⁶	
			10	1.5x5	9.75x10 ⁻⁹	7.54	8.10	8.50	8.57		0.9x0.05	4.5x10 ⁻⁶	43.1 kV
			15	2.0x5	1.3x10 ⁻⁸	9.06	9.57	9.17	10.05		1.3x0.05	6.5x10 ⁻⁶	
			20	2.1x10	2.73x10 ⁻⁸	10.12	12.40	14.50	16.05	19	0.9x0.1	9x10 ⁻⁶	

5:30

6:40

6:50

7:04

8/9 ①

PFC 耐放射線性試験データ

回路定数 K =

コイル N.O.	電極 距離 (cm)	線量率 (RA)	印加 電圧 (kV)	正電圧負		時間		コロナパルス		写真		低周波分電流 (ピーク値)			内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量 (pF)	
				ΔV (V)	Q_{max} (pC)	開始時間 (ms)	終了時間 (ms)	幅 (ms)	高さ (V)	NO.	V (V)	I (A)	写真 NO.				
IN14	300	10 ⁶	4	1.3 x 0.1	1.69 x 10 ⁻¹⁰	0.05	1.40	4.30	21	1.2 x 0.05	6 x 10 ⁻⁶	22				14'49	
			6	1.3 x 0.5	8.45 x 10 ⁻¹⁰	4.45	5.45	4.50	5.48		1.8 x 0.05	9 x 10 ⁻⁶					(17-00)
			10	2.4 x 5.0	3.12 x 10 ⁻⁹	5.56	6.04	6.43	6.48		1.4 x 0.1	1.4 x 10 ⁻⁵					17'10 MP
			15	1.4 x 5.0	9.1 x 10 ⁻⁹	6.56	7.44	7.00	7.55		2.0 x 0.1	2 x 10 ⁻⁵					17'57
			20	2.4 x 5	1.56 x 10 ⁻⁸	8.01	10.10	13.15	14.34	23	1.3 x 0.2	2.6 x 10 ⁻⁵	24				45.0 kV
			4	1.8 x 0.5	1.17 x 10 ⁻⁹	1.15	1.10	3.20	3.55		1.6 x 0.01	1.6 x 10 ⁻⁶					45.0 kV
IN3	100	0	6	2.2 x 2	5.72 x 10 ⁻⁹	4.05	6.05	5.25	6.15		1.2 x 0.02	2.4 x 10 ⁻⁶					
			7.10	1.6 x 1.0	1.6 x 10 ⁻⁸	6.25	6.53	7.20	7.35		0.8 x 0.05	4 x 10 ⁻⁶				34.3 kV	
			15	1.6 x 5	1.04 x 10 ⁻⁸	7.40	10.33	8.32	12.50		1.3 x 0.05	6.5 x 10 ⁻⁶					
			20	1.5 x 1.0	1.95 x 10 ⁻⁸	13.00	13.25	14.55	15.35		0.9 x 0.1	9 x 10 ⁻⁶					
			4	1.0 x 0.5	6.5 x 10 ⁻¹⁰	1.40	3.40	3.40			1.5 x 0.01	1.5 x 10 ⁻⁶					
			6	1.6 x 2	4.16 x 10 ⁻⁹	6.15	6.35				1.3 x 0.02	2.4 x 10 ⁻⁶					
IN4	100	10 ⁶	7.10	1.7 x 2	8 x 10 ⁻¹⁰	6.15	7.30	7.30		0.8 x 0.05	4 x 10 ⁻⁶						
			15	1.4 x 5	9.1 x 10 ⁻⁹	11.01	9.60			1.3 x 0.05	6.5 x 10 ⁻⁶						
			20	0.8 x 1.0	1.04 x 10 ⁻⁹	3.40	3.40	3.40	3.40		0.8 x 0.1	8 x 10 ⁻⁶					
			4	1.7 x 0.1	2.21 x 10 ⁻¹⁰	0.05	1.01	2.10	2.27		1.4 x 0.05	7 x 10 ⁻⁶					
			6	1.3 x 0.5	8.45 x 10 ⁻¹⁰	2.35	3.32	2.45	3.58		2.1 x 0.05	1.1 x 10 ⁻⁵					
			10	1.8 x 1	2.34 x 10 ⁻⁹	4.10	4.37	5.50	6.06		1.8 x 0.1	1.8 x 10 ⁻⁵					41.0 kV
			15	1.0 x 5	6.5 x 10 ⁻⁹	6.12	7.25	6.30	7.52		2.6 x 0.1	2.6 x 10 ⁻⁵					
			20	2.0 x 5	1.3 x 10 ⁻⁸	7.59	8.05	9.00	9.45		1.8 x 0.2	3.6 x 10 ⁻⁵					
			4	1.6 x 0.05	1.04 x 10 ⁻¹⁰	1.22	2.20				1.4 x 0.05	7 x 10 ⁻⁶					
			6	1.2 x 0.2	3.12 x 10 ⁻¹⁰	3.55	2.50				2.0 x 0.05	1 x 10 ⁻⁵					
			10	1.8 x 0.5	1.17 x 10 ⁻⁹	4.58	6.01				1.5 x 0.1	1.5 x 10 ⁻⁵					
			15	1.4 x 2	3.64 x 10 ⁻⁹	7.45	6.30				2.0 x 0.1	2 x 10 ⁻⁵					
20	2.4 x 2	6.24 x 10 ⁻⁹	8.25	9.10				1.4 x 0.2	2.8 x 10 ⁻⁵								

8/8 ↑ ↓ 9/9

8/9②

PFC 耐放射線性試験データ

回路定数 K =

コイル NO.	電極 距離 (cm)	線量率 (R/h)	電圧 (kV)	正電圧負		時間		写真 NO.	低周波分電流 (ピーク値)			内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量 (pF)		
				ΔV (V)	Q_{max} (C)	開始時間 (分)	終了時間 (分)		正電圧 V (V)	電流 I (A)	写真 No.				
IN9	200	0 +	4	1.2 x 0.2	3.1×10^{-10}	7:05	8:30	8:55		1.3 x 0.01	1.3×10^{-6}	25	5:10		
			6	1.2 x 5	7.8×10^{-9}	9:05	10:32	9:30	11:37		0.4 x 0.05	2×10^{-6}			V
			10	2.0 x 5	1.3×10^{-8}	11:43	12:05	17:40	17:59		1.7 x 0.02	3.4×10^{-6}	26	15:45	40.5 kV
			15	2.1 x 5	1.4×10^{-8}	18:08	19:20	18:20	19:30		1.1 x 0.05	5.5×10^{-6}			
			20	1.6 x 10	2.1×10^{-8}	19:57	20:15	25:40	26:32		1.4 x 0.05	7×10^{-6}	27	17:15	
			4	1.0 x 0.1	1.3×10^{-10}			4:20	8:40		1.1 x 0.01	1.1×10^{-6}			
		-	6	2.0 x 2	5.2×10^{-9}		11:20	10:05		0.4 x 0.05	2×10^{-6}				
			10	2.2 x 2	5.7×10^{-9}	6:08	13:15	17:33		1.6 x 0.02	3.2×10^{-6}				
			15	1.3 x 5	8.5×10^{-9}		19:45	18:27		1.0 x 0.05	5×10^{-6}				
			20	1.1 x 10	1.4×10^{-8}		20:35	23:50		1.5 x 0.05	7.5×10^{-6}				
			4	1.5 x 0.05	9.8×10^{-11}	6:00	3:25	4:38	4:35		1.2 x 0.05	6×10^{-6}	28	1:40	1770
			6	1.4 x 0.5	9.1×10^{-10}	5:01	6:05	5:04	6:27		1.8 x 0.05	9×10^{-6}			
IN10	200	10 ⁶ +	10	2.1 x 1	2.7×10^{-9}	6:35	6:44	15:02	15:15	1.4 x 0.1	1.4×10^{-5}	29	12:30	29'13'25	
			15	1.4 x 5	9.1×10^{-9}	15:22	16:35	13:35	17:00	2.1 x 0.1	2.1×10^{-5}			30'	
			20	2.4 x 5	1.6×10^{-8}	17:08	17:10	29:30	31:07	1.3 x 0.2	2.6×10^{-5}	30	19:45	30'25'10	
			4	1.2 x 0.02	3.1×10^{-11}		3:45	4:32		1.1 x 0.05	5.5×10^{-6}				
			6	1.4 x 0.2	3.6×10^{-10}		6:25	5:17		1.7 x 0.05	8.5×10^{-6}				
			10	1.5 x 0.5	9.8×10^{-10}		6:55	14:08		1.2 x 0.1	1.2×10^{-5}				
		-	15	1.0 x 2	2.6×10^{-9}		16:50	5:40		1.6 x 0.1	1.6×10^{-5}				
			20	1.0 x 5	6.5×10^{-9}		17:55	29:40		0.8 x 0.2	1.6×10^{-5}				

8/9 (3)

PFC 耐放射線性試験データ

回路定数 K =

コイル No.	電極 距離 (cm)	線容量 (RA)	印加 電圧 (kV)	正電圧負		時間		写真 No.	低周波分電流 (ピーク値)				写真 No.	内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量 (pF)
				ΔV (V)	Q_{max} (C)	開始時間	終了時間		V (V)	I (A)	電流	電流			
IN15	300	0	4	1.8 x 1	2.3×10^{-9}	0'00	2'30	3'40	3'58	1.1 x 0.01	1.1×10^{-6}				
				1.8 x 2	4.7×10^{-9}	4'05	5'39	4'15	5'57	0.8 x 0.02	1.6×10^{-6}				
				1.4 x 5	9.1×10^{-9}	6'07	6'35	7'42	8'02	0.6 x 0.05	3×10^{-6}				44.5KV
				1.6 x 5	1.0×10^{-8}	8'15	9'20	8'20	9'41	0.9 x 0.05	4.5×10^{-6}				
				2.0 x 10	2.6×10^{-8}	9'45	10'07	11'15	11'34	1.3 x 0.05	6.5×10^{-6}				
				1.4 x 1	1.8×10^{-9}		2'45	3'55		1.0 x 0.01	1×10^{-6}				
IN16	300	10 ⁶	4	1.5 x 2	3.9×10^{-9}		5'33	4'32		0.9 x 0.02	1.8×10^{-6}				
				2.0 x 2	5.2×10^{-9}		6'10	8'00		0.55 x 0.05	2.8×10^{-6}				
				1.5 x 5	9.8×10^{-9}		9'33	8'25		0.8 x 0.05	4×10^{-6}				
				1.7 x 5	1.1×10^{-8}		10'20	11'20		1.3 x 0.05	6.5×10^{-6}				
				0.8 x 0.02	2.1×10^{-11}	-10	2'10	3'45	3'58	1.1 x 0.05	5.5×10^{-6}				
				1.7 x 0.5	1.1×10^{-9}	4'05	5'06	4'15	5'50	1.6 x 0.05	8×10^{-6}				
IN16	300	10 ⁶	6	1.6 x 2	4.0×10^{-9}	5'59	6'06	7'22	7'30	1.3 x 0.1	1.3×10^{-5}	10K	2.7 x 7	46.8KV	
				3.0 x 2	7.8×10^{-9}	7'40	8'50	7'47	9'10	1.8 x 0.1	1.8×10^{-5}		(12'02)		
				2.7 x 5	1.8×10^{-8}	9'15	9'35	10'15	12'00	1.1 x 0.2	2.2×10^{-5}				
				0.8 x 0.01	1.0×10^{-11}		2'35	3'50		1.1 x 0.05	5.5×10^{-6}				
				1.1 x 0.2	2.9×10^{-10}		5'49	4'18		1.4 x 0.05	7×10^{-6}				
				2.5 x 0.5	1.6×10^{-9}		6'30	7'29		1.1 x 0.1	1.1×10^{-5}				2.0 x 0.2 (12'40)
			10	1.2 x 2	3.1×10^{-9}		9'07	8'02		1.4 x 0.1	1.4×10^{-5}				
				1.0 x 5	6.5×10^{-9}		9'45	10'30		0.8 x 0.2	1.6×10^{-5}				
				4											
				6											
				15											
				20											

8/9 ④

PFC 耐放射線性試験データ

回路定数 K=

コイル NO.	電極 距離 (cm)	線量率(R/h)	照射 公称	照射 時間	印加 電圧 (kV)		正電圧負		Qmax(2σ)		時間		正電圧負		低周波分電流 (ピーク値)		内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量(pF)				
					ΔV (V)	Qmax(2σ)	開始時間	終了時間	上昇 時間	下降 時間	V (V)	I (A)	写真 NO.	写真 NO.	写真 NO.	写真 NO.						
1N0	200	10 ⁶	V: OFF 1hr 正 照射 後	4	0'00	0'50	1.4 × 0.1	1.8 × 10 ⁻¹⁰	0'50	1'35	2'07	1.9 × 0.05	9.5 × 10 ⁻⁶									
				6	2'15	3'25	2'25	3'44	1.4 × 0.1	1.4 × 10 ⁻⁵												
				10	3'53	4'10	5'12	5'24	2.1 × 1	2.7 × 10 ⁻⁹												
				15	5'33	7'00	5'40	7'42	1.3 × 5	8.5 × 10 ⁻⁹												
				20	7'56	8'15	10'45	11'20	2.2 × 5	1.4 × 10 ⁻⁸												
			負	4		1'15	1.2 × 0.05	9.8 × 10 ⁻¹¹				1.7 × 0.05	8.5 × 10 ⁻⁶									
				6		3'37	2'35	1.6 × 0.2	4.2 × 10 ⁻¹⁰				1.3 × 0.1	1.3 × 10 ⁻⁵								
				10		4'32	5'20	1.4 × 0.5	9.1 × 10 ⁻¹⁰				0.9 × 0.2	1.8 × 10 ⁻⁵								
				15		7'35	5'49	0.7 × 1	9.1 × 10 ⁻¹⁰				1.2 × 0.2	2.4 × 10 ⁻⁵								
				20		9'45	10'56	2.2 × 0.5	1.4 × 10 ⁻⁹				1.6 × 0.2	3.2 × 10 ⁻⁵								
2N1 (4t)	200	0	正	4	0'00	7'10	2.1 × 1	2.7 × 10 ⁻⁹	0'00	8'15	8'28	0.9 × 0.02	1.8 × 10 ⁻⁶	31	5'10				33'' AC 成分 (34'20)			
				6	8'35	10'00	8'49	10'20	1.5 × 2	3.9 × 10 ⁻⁹				1.3 × 0.02	2.6 × 10 ⁻⁶							
				10	10'25	10'35	23'15	23'27	1.2 × 5	7.8 × 10 ⁻⁹				0.9 × 0.05	4.5 × 10 ⁻⁶	32	(15'10) 32' (16'05) 32' (21'15)					
				15	23'30	24'50	23'45	25'20	1.7 × 5	1.1 × 10 ⁻⁸				1.2 × 0.05	6.0 × 10 ⁻⁶							
				20	25'27	25'50	31'07	35'48	1.4 × 10	1.8 × 10 ⁻⁸				1.2 × 0.1	1.2 × 10 ⁻⁵	33	(29'05) 33' (30'05)					
			負	4		7'30	2.1 × 1	2.7 × 10 ⁻⁹		8'20		0.9 × 0.02	1.8 × 10 ⁻⁶						11 国目 FO 12 国目動作 13 国目動作 14 国目動作			
				6		10'12	8'53	1.3 × 2	3.4 × 10 ⁻⁹				1.3 × 0.02	2.6 × 10 ⁻⁶								
				10		16'45	23'25	1.2 × 5	7.8 × 10 ⁻⁹				0.8 × 0.05	4.0 × 10 ⁻⁶								
				15		25'13	23'50	2.3 × 5	1.5 × 10 ⁻⁸				1.1 × 0.05	5.5 × 10 ⁻⁶								
				20		35'57	31'45	1.0 × 10	1.3 × 10 ⁻⁸				1.1 × 0.1	1.1 × 10 ⁻⁵								

8/9 ⑤

PFC 耐放射線性試験データ

回路定数 K =

コイル N.O. (4本)	電極 距離 (cm)	電極 N.O.	線量率 (R/h)		印加 電圧 (kV)	正電圧負		時間		写真 NO.	低周波分電流 (ピコ値)			写真 NO.	内絡 電圧 (kV)	コイル 容量 (pF)			
			公称	実測		ΔV (V)	Q_{max} (C)	開始 時間	終了 時間		V (V)	I (nA)	電流 値						
2N2 (4本)	200	10 ⁶	正	4	1.2 × 0.5	7.8 × 10 ⁻¹⁰	0'10	0'15	0'55	4'45	5'03	1.5 × 0.05	7.5 × 10 ⁻⁶	34	3'00		36" (2330)		
				6	1.2 × 2	3.1 × 10 ⁻⁹	5'14	6'15	5'19	6'37	2.3 × 0.05	1.15 × 10 ⁻⁵						1777L ↓ 21日目	
				10	1.3 × 5	8.5 × 10 ⁻⁹	6'49	6'55	13'55	13'44	1.8 × 0.1	1.8 × 10 ⁻⁵	35	(9'20)	35 (1/30)		39.2 kV		
				15	1.2 × 10	1.6 × 10 ⁻⁸	13'51	15'20	14'20	15'32	2.5 × 0.1	2.5 × 10 ⁻⁵							
				20	1.8 × 10	2.3 × 10 ⁻⁸	16'00	16'17	24'55	25'01	1.6 × 0.2	3.2 × 10 ⁻⁵	36	(20'05)	36 (2/110)				39.2 kV
				4	1.4 × 0.2	3.6 × 10 ⁻¹⁰			1'09	5'02		1.4 × 0.05	7 × 10 ⁻⁶						
2N3 (4本)	200	0	負	6	1.4 × 0.5	9.1 × 10 ⁻¹⁰			6'34	5'24		2.1 × 0.05	1.05 × 10 ⁻⁵						
				10	1.2 × 2	3.1 × 10 ⁻⁹			7'07	13'40		1.4 × 0.1	1.4 × 10 ⁻⁵						
				15	1.0 × 5	6.5 × 10 ⁻⁹			15'45	14'35		1.9 × 0.1	1.9 × 10 ⁻⁵						
				20	1.3 × 5	8.5 × 10 ⁻⁹			17'35	25'10		1.4 × 0.2	2.8 × 10 ⁻⁵						
				4	1.5 × 2	3.9 × 10 ⁻⁹	0'00	0'10	1'10	2'07	2'25	1.1 × 0.02	2.2 × 10 ⁻⁶						
				6	2.4 × 2	6.2 × 10 ⁻⁹	2'30	4'00	2'50	4'11		0.6 × 0.05	3.0 × 10 ⁻⁶					33.2 kV	
2N3 (4本)	200	0	正	10	1.3 × 5	8.5 × 10 ⁻⁹	4'20	4'34	5'15	5'21		1.0 × 0.05	5.0 × 10 ⁻⁶						
				15	2.0 × 10	2.6 × 10 ⁻⁸	5'28	6'43	5'40	7'09	0.8 × 0.1	8.0 × 10 ⁻⁶							
				20	3.0 × 10	3.9 × 10 ⁻⁸	7'14	7'35	8'20	9'00	1.2 × 0.1	1.2 × 10 ⁻⁵							
				4	1.8 × 1	2.3 × 10 ⁻⁹			1'25	2'16		1.0 × 0.02	2.0 × 10 ⁻⁶						?(1.8×2)
				6	1.2 × 2	3.1 × 10 ⁻⁹			4'10	2'55		0.5 × 0.05	2.5 × 10 ⁻⁶						
				10	1.0 × 5	6.5 × 10 ⁻⁹			4'35	5'17		0.9 × 0.05	4.5 × 10 ⁻⁶						
2N3 (4本)	200	0	負	15	1.0 × 10	1.3 × 10 ⁻⁸			7'00	5'45		0.7 × 0.1	7.0 × 10 ⁻⁶						
				20	2.8 × 10	3.6 × 10 ⁻⁸			7'44	8'25		1.2 × 0.1	1.2 × 10 ⁻⁵						
				4															
				6															
				10															
				15															
20																			

8/9 ⑥

PFC 耐放射線性 試験条件

回路定数 K=

コイル N.O.	電極 距離 (cm)	線量率 (R/h)		切加 電圧 (kV)	コロナパルス			低周波分電流 (ピーク値)			内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量 (pF)				
		公称	実測		正電圧負	負電圧	正電圧負	負電圧	正電圧負	負電圧			正電圧負	負電圧		
					ΔV (V)	Q_{max} (pC)	間隔 (μs)	周波数 (Hz)	電圧 (V)	電流 (A)	電圧 (V)	電流 (A)	電圧 (V)	電流 (A)		
2N4 (4t)	200	10 ⁶	正	4	2.6X0.2	6.8X10 ¹⁰	0.01	0.52	1.55	2.05	1.4X0.05	7X10 ⁻⁶				
				6	1.7X1	2.2X10 ⁹	2.10	3.24	2.33	3.51	2.0X0.05	1X10 ⁻⁶				
				10	1.2X5	7.8X10 ⁹	4.00	4.07	5.20	5.40	1.5X0.1	1.5X10 ⁻⁵			34.5 kV	
				15	2.6X5	1.7X10 ⁸	5.48	6.40	5.55	7.00	2.1X0.1	2.1X10 ⁻⁵				
				20	2.3X10	3.0X10 ⁸	7.10	7.19	8.28	9.21	1.3X0.2	2.6X10 ⁻⁵				
				4	1.1X0.2	2.9X10 ¹⁰		1.01	2.01		1.2X0.05	6X10 ⁻⁶				
				6	1.3X0.5	8.5X10 ¹⁰		3.34	2.40		1.7X0.05	8.5X10 ⁻⁶				
				10	1.2X2	3.1X10 ⁹		4.40	5.35		1.2X0.1	1.2X10 ⁻⁵				
				15	1.2X5	7.8X10 ⁹		6.57	6.01		1.6X0.1	1.6X10 ⁻⁵				
				20	1.5X5	9.8X10 ⁹		7.40	8.45		1.0X0.2	2.0X10 ⁻⁵				
2N5 (4t)	200	0	正	4	2.2X2	5.7X10 ⁹	0.05	1.05	2.35	2.43	0.9X0.02	1.8X10 ⁻⁶				
				6	1.4X5	9.1X10 ⁹	2.50	4.10	3.05	5.39	0.5X0.05	2.5X10 ⁻⁶			33.0 kV	
				10	1.4X5	9.1X10 ⁹	5.46	6.00	7.12	7.29	0.9X0.05	4.5X10 ⁻⁶				
				15	1.8X5	1.2X10 ⁸	7.35	9.00	7.55	9.23	1.4X0.05	7X10 ⁻⁶				
				20	1.8X10	2.3X10 ⁸	9.28	9.54	11.35	8.40	1.0X0.1	1X10 ⁻⁵				
				4	2.5X1	3.3X10 ⁹		1.45	2.42		0.9X0.02	1.8X10 ⁻⁶			1.5X1 (4'10) 補	
				6	2X2	5.2X10 ⁹		4.50	3.20		0.5X0.05	2.5X10 ⁻⁶				
				10	2.2X2	5.7X10 ⁹		6.19	7.26		0.8X0.05	4X10 ⁻⁶				
				15	1.7X5	1.1X10 ⁸		9.15	8.05		1.2X0.05	6X10 ⁻⁶				
				20	1.2X10	1.6X10 ⁸		10.29	11.45		1.0X0.1	1X10 ⁻⁵				
				4												
				6												
				10												
				15												
				20												

8/9 ⑦

PFC 耐放射線性 試験データ

回路定数 K =

コイル NO.	電極 距離 (cm)	線容量(R/A) 公称	印加 電圧 (kV)	正電圧負		負		コ口ナパルマ		低周波令電流 (ピーク値)		写真 NO.	内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量(pF)	
				ΔV (V)	Q_{max} (C)	周波数 (Hz)	時間 (sec)	V (V)	I (A)	V (V)	I (A)				
Zn6 (4t)	200	10^6	4	1.0 X 0.5	6.5×10^{10}	0.02	0.40	1.35	1.42	1.3 X 0.05	6.5×10^6				
			6	1.8 X 1	2.34×10^9	1.52	3.00	2.05	3.10	1.9 X 0.05	9×10^6				
			10	1.5 X 5	9.75×10^9	3.21	3.30	4.33	4.55	1.5 X 0.1	1.5×10^5			34.6 kV	
			15	2.3 X 5	1.5×10^8	5.02	6.07	5.15	6.25	2.2 X 0.1	2.2×10^5				
			20	2.1 X 10	2.73×10^8	6.32	6.40	7.47		1.4 X 0.2	2.8×10^5				
IN3 50 0			4	1.4 X 0.2	2.8×10^{10}		0.59	1.40		1.2 X 0.05	6×10^6				
			6	1.4 X 0.5	9.1×10^{10}		3.08	2.09		1.8 X 0.05	9×10^6				
			10	1.6 X 1	2.08×10^9		3.52	4.50		1.2 X 0.1	1.2×10^5				
			15	1.1 X 5	7.15×10^9		6.17	5.24		1.6 X 0.1	1.6×10^5				
			20	2.0 X 5	1.3×10^8		7.04	7.57		1.0 X 0.2	2×10^5				
			4	2.0 X 0.1	2.6×10^{10}	0.10	0.50	1.55		1.8 X 0.02	3.6×10^6				
			6	1.6 X 2	4.16×10^9		3.30	2.30		1.0 X 0.05	5×10^6				
			10	3.0 X 2	7.8×10^9		4.10	5.10		1.7 X 0.05	8.5×10^6			27.0 kV	
			15	1.0 X 5	1.04×10^8		7.20	6.00		1.2 X 0.1	1.2×10^5				
			20	1.5 X 10	1.95×10^8		8.40	10.20		1.3 X 0.2	2.6×10^5				
			4	1.5 X 0.1	1.95×10^{10}		1.20	2.05		1.7 X 0.02	3.4×10^6				
			6	1.3 X 2	3.38×10^9		3.50	2.50		1.0 X 0.05	5×10^6				
			10	1.5 X 2	3.9×10^9		4.25	5.30		1.7 X 0.05	8.5×10^6				
			15	2.0 X 2	5.2×10^9		6.40	6.15		1.2 X 0.1	1.2×10^5				
			20	1.0 X 10	1.3×10^8		9.00	10.40		1.2 X 0.2	2.4×10^5				
4															
6															
10															
15															
20															

8/9 ⑧

PFC 耐放射線線性試験用電子器

回路定数表

コイル NO.	電極 距離 (cm)	線容量(R/A)		印加 電圧 (kV)	正負荷		時間		写真 NO.	低周波分電流 (E-p値)			写真 NO.	内絡 電圧 (kV)	コイル 静電 容量(pF)		
		公称	実測		AV (V)	Qmax (pF)	照射 時間 (分)	測定 時間 (分)		V (V)	I (A)						
1N7'	50	10 ⁶	-	4	0.5X0.02	1.3X10 ⁻¹¹	0.02	1'05	2'05	2'21	1.4X0.1	1.4X10 ⁻⁵					
				6	1.2X0.5	7.8X10 ⁻¹⁰	0.07	2'27	3'20	3'40	2.1X0.1	2.1X10 ⁻⁵					
				10	2.4X1	3.1X10 ⁻⁹	3'08	4'00	4'50	4'58	1.4X0.2	2.8X10 ⁻⁵			27.0kV		
				15	1.6X5	1.0X10 ⁻⁸	5'07	6'20	5'08	6'45	2.7X0.2	5.4X10 ⁻⁵					
				20	2.0X10	2.6X10 ⁻⁸	6'52	7'00	8'08	8'50	1.6X0.5	8.0X10 ⁻⁵					
				4	0.9X0.02	2.3X10 ⁻¹¹		1'23	2'10		1.4X0.1	1.4X10 ⁻⁵					
				6	1.0X0.2	2.6X10 ⁻¹⁰		3'35	2'40		2.0X0.1	2.0X10 ⁻⁵					
				10	1.2X0.5	7.8X10 ⁻¹⁰		4'15	4'57		1.5X0.2	3.0X10 ⁻⁵					
				15	1.5X1	2.0X10 ⁻⁹		6'40	5'21		2.3X0.2	4.6X10 ⁻⁵					
				20	2.1X2	5.5X10 ⁻⁹		7'26	8'14		1.3X0.5	6.5X10 ⁻⁵					
1N9'	50	10 ⁶	-	4	2.0X0.1	2.6X10 ⁻¹⁰	0.02	1'06	2'54	2'59	1.2X0.1	1.2X10 ⁻⁵					
				6	1.2X0.5	7.8X10 ⁻¹⁰	0.05	3'11	4'07	3'18	4'23	1.8X0.1	1.8X10 ⁻⁵				
				10	1.6X1	2.1X10 ⁻⁹	4'30	4'40	5'20	5'33	1.4X0.2	2.8X10 ⁻⁵			28.5kV		
				15	1.8X5	1.2X10 ⁻⁸	5'42	5'54	5'43	7'00	2.3X0.2	4.6X10 ⁻⁵					
				20	1.6X10	2.1X10 ⁻⁸	7'12	7'22	8'11	9'06	1.4X0.5	7.0X10 ⁻⁵					
				4	1.5X0.02	3.9X10 ⁻¹¹		1'45	2'57		1.2X0.1	1.2X10 ⁻⁵					
				6	1.1X0.2	2.9X10 ⁻¹⁰		4'20	3'23		1.7X0.1	1.7X10 ⁻⁵					
				10	1.0X0.5	6.5X10 ⁻¹⁰		4'51	5'28		1.3X0.2	2.6X10 ⁻⁵					
				15	1.2X2	3.1X10 ⁻⁹		6'57	5'53		2.2X0.2	4.4X10 ⁻⁵					
				20	2.2X2	5.7X10 ⁻⁹		7'40	8'17		1.3X0.5	6.5X10 ⁻⁵					

8/9 ④

PFC 耐放射線性試験データ

回路定数 $K=43 \times 30 \times 10^{-12} = 13 \times 10^{-10}$

コイル NO.	電極 距離 (cm)	線量率(R/h)	照射 電圧 (kV)	正負負		時間		写真 NO.	低周波分電流 (p-p値)				写真 NO.	内絡 電圧 (kV)	コイル 容量 (pF)				
				ΔV (V)	Q_{max} (C)	照射 時間	照射 回数		V (V)	I (A)									
3N1-3 (8 ⁵ ×3)	200 mm	10 ⁶	4	1.6×0.1	2.08×10^{-10}	4.40 0.00	0.57	1.52	203		1.4×0.05	7×10^{-6}							
			6	1.6×0.5	1.04×10^{-9}	2.10	3.37	2.15	3.59		1.7×0.05	9.5×10^{-6}							
			10	2.2×1	2.86×10^{-9}	4.05	4.15	5.06	5.35		1.6×0.1	1.6×10^{-5}						38.0 kV	
			15	2.0×5	1.3×10^{-8}	5.44	6.57	5.49	7.12		1.2×0.2	2.4×10^{-5}							
			20	1.5×10	1.95×10^{-8}	7.24	7.35	8.23	9.31		1.3×0.2	2.6×10^{-5}							
			4	1.7×0.05	1.1×10^{-10}		1.20	1.57				1.3×0.05	6.5×10^{-6}						
			6	1.8×0.2	4.68×10^{-10}		3.48	2.20		1.4×0.05	9.5×10^{-6}								
			10	2.0×0.5	1.3×10^{-9}		4.25	5.25		1.4×0.1	1.4×10^{-5}								
			15	1.5×2	3.9×10^{-9}		7.10	5.57		1.0×0.2	2.0×10^{-5}								
			20	1.4×5	9.1×10^{-9}		7.50	8.37		1.3×0.2	2.6×10^{-5}								