

γ線照射と部分放電計測による 絶縁物中のボイド検出の試み

Trial of Void Detection in Electrical Insulation by γ Ray Irradiation
and Partial Discharge Measurement

長尾雅行^{*1}
Masayuki Nagao
水野幸男^{*2}
Yukio Mizuno
小崎正光^{*1}
Masamitsu Kosaki
佐藤 亘^{*3}
Wataru Satoh

In the insulation diagnosis, it is very important to detect the voids in insulators. In this study, a new void detection method is proposed, which consists of the measurement of partial discharge characteristics and γ ray irradiation.

When power frequency voltage was applied to the samples including a void, swarming pulsive microdischarge (SPMD) ratio was increased by γ ray irradiation. In the case of very low frequency voltage application, partial discharges become smaller and their number increases by γ ray irradiation. These changes of partial discharge characteristics under the low frequency voltage application are easy to be detected by the conventional partial discharge detection method. These phenomena can be interpreted by increased initial electron due to γ ray irradiation and the influence of the preceding discharges on the next one.

When we take notice of the above change of partial discharge characteristics caused by γ ray irradiation, there is high possibility to establish a new detection method of voids in insulators using partial discharge measurements under low frequency voltage application and γ ray irradiation.

1 まえがき

高電圧機器の電気絶縁物中や絶縁物と導体の境界に存在するボイド内部で発生する部分放電による絶縁物の劣化は、機器の寿命を決定する大きな要因のひとつである。従って、ボイドの位置や大きさを検出することは機器の絶縁劣化診断を行う上で非常に重要である。特に近年の電力機器の小型化・大容量化に伴い、絶縁材料が高電圧下で使用されることが多くなってきており、部分放電による機器絶縁の劣化診断法の確立が急務となっている。これまでに、部分放電特性や放電パルス波形、部分放電諸量の統計量の経時変化などによる絶縁劣化検出が試みられている^{(1)~(6)}。

これとは別に、放射線の電離作用を利用して、ボイド内部の電離を促進し、人為的に初期電子を供給することができれば、部分放電開始電圧・消滅電圧の低下など部分放電特性の変化が予想される。放射線をナロービームにして、スキャンしながら高電圧機器の絶縁部に照射した時の部分放電特性を測定することによって、絶縁体内のボイドの位置や大きさを検出することができれば、有力な絶縁劣化診断の一手法となる。また、この場合、放射線を照射しない場合に比べて低い電圧で放電が発生すること、および絶縁劣化が進んでいない初期の段階でもボイドの検出が可能なることから、電力機器の完成試験などへの適用も期待できる。

この観点から、X線照射時のボイド試料の部分放電特

性に関する研究がなされ、放電開始電圧の低下や放電電荷量の小さい放電の発生頻度増加が報告されている⁽⁷⁾。しかしながら、透過力が強く、かつ線源が小型軽量で電源不要などの特徴を持ち現場適用性が高い γ 線を照射した場合の部分放電特性、あるいは絶縁劣化診断の観点からの研究はほとんどなされていないのが現状である。

本論文では、 γ 線照射時の部分放電計測による絶縁体中のボイド検出法を確立するための基礎研究として、内部部分放電試験における標準的試料であるCIGRE Method II電極系試料を用いて、比較的低強度の γ 線源照射時の部分放電特性を測定して γ 線照射の影響を調べるとともに、 γ 線ナロービームを用いたボイド検出法の実用化の可能性について検討した結果について報告する。

2 商用周波電圧印加時の部分放電特性に及ぼす γ 線照射の影響

2.1 試料および実験方法

供試試料として図1に示すCIGRE Method II電極系試料を用いた。試料板としては、部分放電による板表面の劣化により部分放電特性が時間的に変化することを低減するために1 mmの厚さのガラス(パイレックス)板を用い、密閉型試料とするために試料板周囲をエポキシ接着剤でシールした。試料板と平板電極の間にポリイミドフィルムにより作製したドーナツ状スペーサを置くことによ

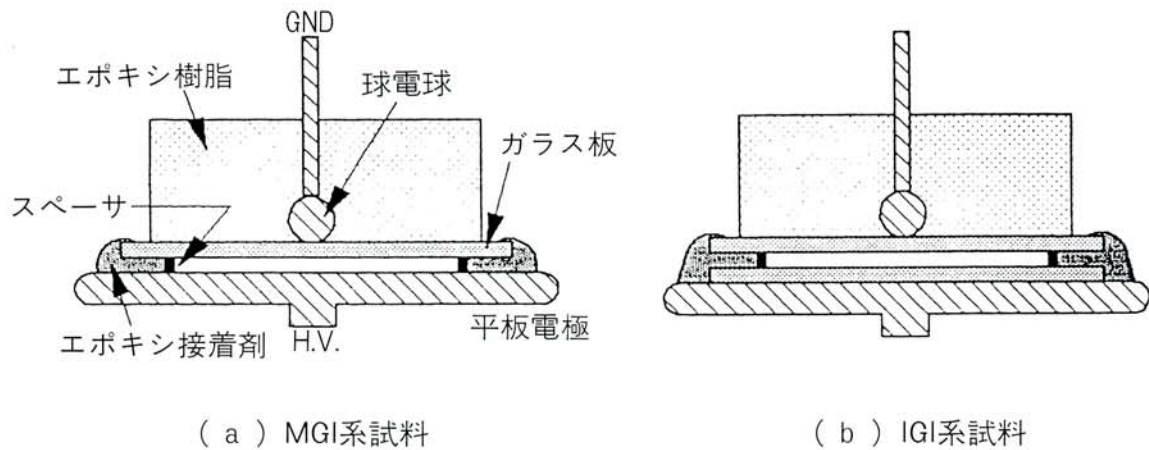


図1/CIGRE Method II型電極系試料
Fig.1/Specimens with CIGRE Method II electrode system

りボイドを構成した。その高さは0.125mm、体積は約120 mm³である。高電圧電極となる平板電極側から金属-空気-絶縁体という系をもつ試料(MGI系試料：図1 (a))、および試料板を2枚用いて、絶縁体-空気-絶縁体という系をもつ試料(IGI系試料：図1 (b))の2種類を実験に供した。試料沿面のフラッシュオーバーを防ぐために、試料を動粘度10cStの室温のシリコン油(信越化学製KF-96)中に浸漬して高電圧を印加した。

γ 線照射を行うときは試料端から約30mm離れた空気中に線源を設置した。 γ 線源には241Amのステンレス密封線源を用いた。241Amから放出される γ 線のエネルギーは59.5 keVである。また、実験に用いた γ 線源の強度は0.1mCi (3.7MBq)と100mCi (3.7GBq)である。

60Hz、電圧上昇率1 kVrms/sの交流電圧を試料に印加し、部分放電開始電圧を同調式部分放電検出器CD-5を用いて測定した。その後、20kVrmsに電圧を保持した後、

1 kVrms/sの下降率で印加電圧を下降させ部分放電消滅電圧を測定した。いずれも4回の測定値の平均をとり、部分放電開始電圧(V_i)、部分放電消滅電圧(V_e)とした。ここで、 γ 線照射を行うときには強度100mCiの γ 線源のみを用いて実験を行った。

ついで、60Hzの交流電圧20kVrmsを試料の平板電極に印加した状態で、 γ 線照射時と未照射時について、部分放電解析システム(CAPDAS：次節参照)を用いて部分放電特性を測定した。

2.2 部分放電解析システム (CAPDAS)

実験で使用した部分放電解析システム(CAPDAS)の構成図を図2に示す。従来から部分放電検出に使用されている電流パルス法と、試料を含む4つの静電容量で構

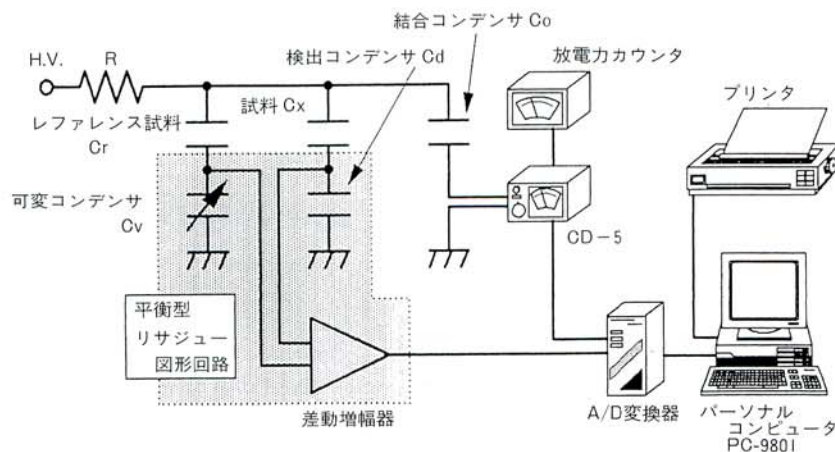


図2/部分放電解析システム(CAPDAS)の構成図
Fig.2/Computer-aided partial discharge analyzing system (CAPDAS)

成されたブリッジにより高感度に部分放電を検出することができる平衡ブリッジ法（リサージュ法）の二種類の部分放電検出法を用いることにより、近年問題となっている群小部分放電の定量的解析が可能である点に特徴がある。

パルス法による部分放電検出器としては同調式部分放電測定器（日本計測器製CD-5）を使用している。実際の測定においては放電電荷量の大きな放電と小さな放電が同時に発生するため、減衰器を調整して使用する。減衰比が大きくなるにつれて最小検出放電電荷は大きくなり、放電電荷量の小さな放電の検出が困難となる。また出力パルスの半値幅が約15～60μsであることから、放電発生頻度が高くなると放電パルスの重なりによる測定誤差も生ずる可能性がある。これに対し、ブリッジ法では平衡ブリッジ回路により部分放電電荷量をパルス電流の積分波形として検出するため、放電電荷量の小さな放電も計測することができ、放電電流パルスが重なっても問題とはならない。ところがブリッジ法においては、個々の部分放電パルスを分離して計測することは困難である。

従来、放電電荷量の小さい部分放電は、絶縁体の劣化に大きな影響を与えないという考え方もあり、全ての放電電荷量を積分した形で測定してしまうブリッジ法は部分放電計測にはあまり適用されず、個々の放電パルスを分離することが可能なパルス法が用いられてきた。しかし、近年放電電荷量が小さく放電発生頻度が非常に高い群小部分放電の存在が確認され、また群小部分放電が発生している間も絶縁体の劣化が進行し、絶縁破壊に至ることが指摘されていることから、ブリッジ法によるデータも重要な情報を提供すると考えられる。

電流パルス法と平衡ブリッジ法（リサージュ法）の二種類の放電検出法を併用することにより、群小部分放電の定量的解析が可能となる。本研究で使用したCAPDASは、両方式による部分放電検出信号を同時に測定することができるので、両者を解析して得られる部分放電特性諸量を比較すれば、パルス法で検出する事が困難である群小部分放電についても定量的評価を行うことが可能となる。パルス法、ブリッジ法で検出された総放電電荷量をもとに、放電の群小化の割合を定量的に表わす量として、放電群小率を次式のように定義した。

$$\text{放電群小率} = \frac{Q_L - Q_P}{Q_L} \times 100 (\%)$$

すなわち、放電群小率とはブリッジ法で検出される放電電荷量 (Q_L) からパルス法で検出される放電電荷量 (Q_P) を差し引き、それに対するブリッジ法で検出される放電電荷量 (Q_L) の比をとった値であり、パルス法による検出感度以下の放電電荷量が全体の放電電荷量に占める割合を示している。

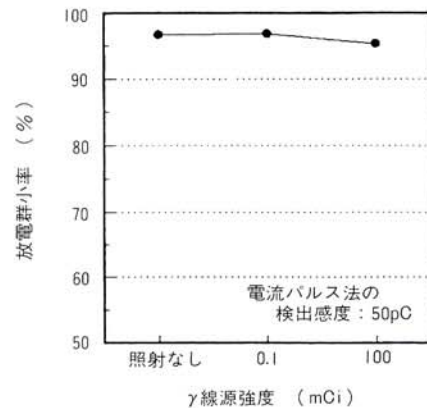
2.3 実験結果および検討

空気中において測定した部分放電開始電圧 (V_i)、部分放電消滅電圧 (V_e) に及ぼすγ線照射の影響に関する実験結果を表1に示す。表には同一の実験を3回繰り返して行った結果を示してあるが、γ線照射時の部分放電開始電圧、部分放電消滅電圧は未照射時に比べて低い値となっていることがわかる。これは、γ線照射による放電の初期電子の増加により説明することができる。しかし、試料をシリコン油に浸漬した場合には、シリコン油によるγ線の散乱もあり部分放電開始電圧、部分放電消滅電圧におけるγ線照射の顕著な影響は認められなかった。

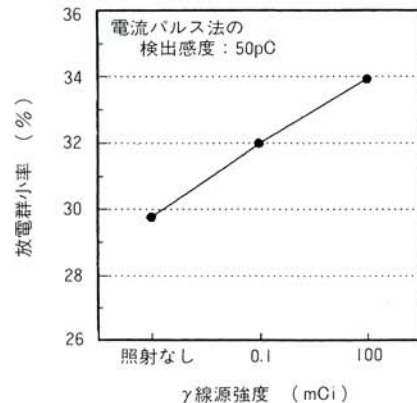
表1/部分放電開始電圧、部分放電消滅電圧に及ぼすγ線照射の影響

Tab.1/Influence of γ ray irradiation on partial discharge inception voltage and extinction voltage

開始電圧V _i [kVrms]		消滅電圧V _e [kVrms]	
照射なし	照射あり	照射なし	照射あり
2.86	2.56	2.86	2.44
2.81	2.51	2.80	2.48
2.89	2.45	2.78	2.44



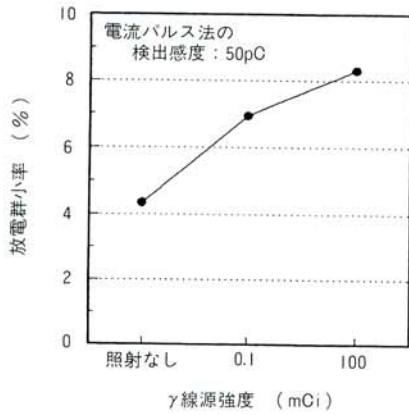
(a) 正の放電に対する放電群小率



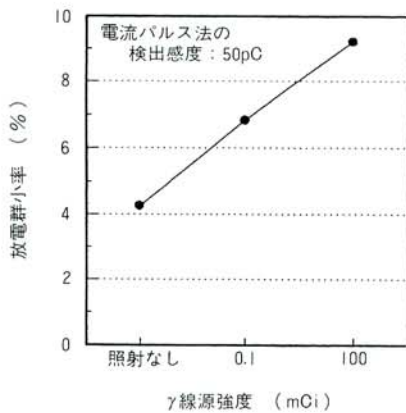
(b) 負の放電に対する放電群小率

図3/γ線源強度に対する放電群小率の変化 (MGI系試料)

Fig.3/Change of SPMD ratio due to intensity of γ ray source (Specimen with Metal-Gap-Insulator system)



(a) 正の放電に対する放電群小率



(b) 負の放電に対する放電群小率

図4/γ線源強度に対する放電群小率の変化(IGI系試料)
Fig.4/Change of SPMD ratio due to intensity of γ ray source
(Specimen with Insulator-Gap-Insulator system)

CAPDASを用いてシリコン油中で20kVrmsを印加して測定した、γ線源強度に対するMGI系試料、IGI系試料の放電群小率（パルス法の検出感度：50pC）をそれぞれ図3、図4に示す。γ線照射により放電群小率が上昇していることから、検出感度50pC以下の小さな放電がより多く発生していることがわかる。γ線照射により、ボイドの内部や周辺で電離が起り、部分放電が発生するために必要な初期電子が多数供給され、放電の統計遅れが減少して放電電荷量が小さくなるためと考えることができる。

また、電流パルス法による計測から得られるφ（位相角）-q（放電電荷量）-N（放電個数）分布においては、γ線照射は放電発生位相角にも影響を与え、未照射時に比べて放電がより早い位相角で発生することが多くの試料において認められた。このことも、γ線照射による放電の初期電子の増加により放電の統計遅れが減少していることを考えれば理解できる。

以上のように、γ線照射により放電群小率が変化することを利用すれば、ボイド検出が実現できる可能性がある。そこで、次節においてγ線をコリメータでナロービームに絞って照射し、ボイド検出の可能性についてさらに検討を行った。

3 γ線ナロービーム照射によるボイド検出の試み

3.1 試料および実験方法

供試試料は図1(b)に示したCIGRE Method-II電極のIGI系試料である。γ線源は前節と同じものを使用した。線源をコリメータの中に入れ、ナロービームにするようにした。照射孔の直径は約1mmである。照射位置を5mm間隔で変えながらスキャンし、CAPDASを用いて部分放電特性を測定した。この測定を試料の水平方向、垂直方向の2種類のスキャンについて行った。

3.2 実験結果および検討

試料の水平方向および垂直方向のスキャンによる放電群小率（パルス法の検出感度：10pC）の変化を図5および図6に示す。測定は、水平方向、垂直方向の順に行っている。両図において、γ線をボイドの位置に照射した時には放電群小率が明らかに上昇していることが認められる。すなわち、放電群小率というパラメータに注目すれば、絶縁体中のボイドの検出が可能であることが示唆される。

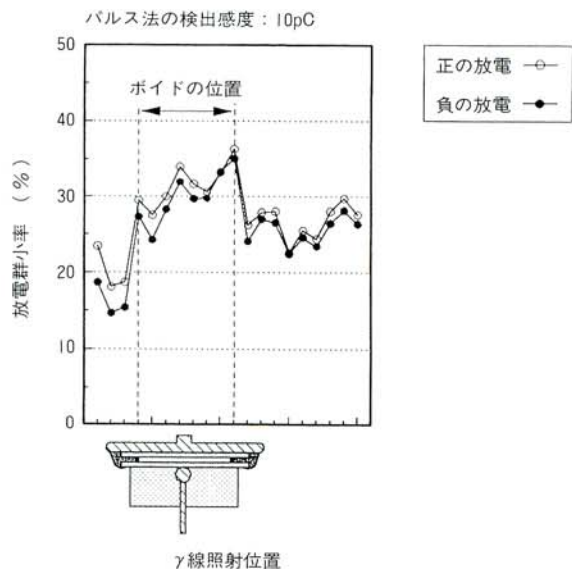


図5/γ線照射位置と放電群小率の変化 (I)

Fig.5/Change of SPMD ratio due to scanning of γ ray source(I)
(Horizontal direction)

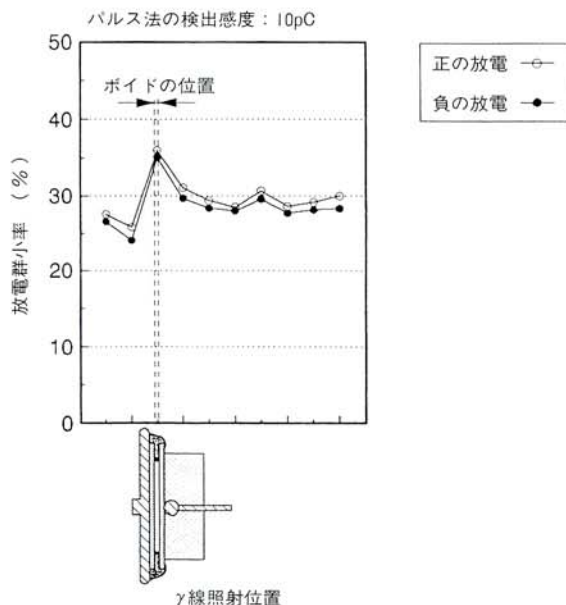


図6/γ線照射位置と放電群小率の変化 (II)
Fig.6/Change of SPMD ratio due to scanning of γ ray source(II)
(Vertical direction)

以上のようにγ線の照射により部分放電特性に変化が現われることが認められたが、その変化はあまり大きなものではなかった。これは、商用周波電圧の印加においては個々の放電と放電の間隔が小さいため、直前の放電によって生成された電子やイオンが次に起こる放電に影響を与え、γ線照射による放電の初期電子の増加の効果が相対的に弱められているためと考えられる。そこで、個々の放電間隔が長くなる低周波高電圧を印加することにより、部分放電特性に対するγ線照射効果をより明瞭にすることを目的に次節の実験を行った。

4 低周波電圧印加時の部分放電特性に及ぼすγ線照射の影響

4.1 試料および実験方法

試料として図1(a)に示したCIGRE Method-II電極のMGI系試料を、γ線源には100mCi (3.7GBq)の強度をもつ²⁴¹Amのみを用いた。γ線源は試料端から約30mmの位置に設置した。γ線の散乱を極力抑えるため、空気中においてピーク値が5,6,7kVで周波数が0.1Hzの交流電圧を試料に印加し、部分放電特性に及ぼすγ線照射の影響を調べた。

なお、本実験のように低周波電圧印加時には群小部分放電は発生しにくく個々の放電間隔も長いので、電流パルス法による測定のみを行い、同調式部分放電検出器(CD-5)の出力信号をペンレコーダ(National製 VP-6227A)により記録した。

4.2 実験結果および検討

5,6,7kVmax印加時の5周期当たりの放電個数と放電電荷量の関係をそれぞれ図7, 図8, 図9に示す。また、印加電圧と5周期当たりの総放電個数の関係を図10に示す。

γ線未照射時に1000pC以上にまで分布していた放電電荷量が、γ線照射時には700pC以下になり放電電荷量が小さくなっていることがわかる。また、放電個数は印加電圧の増加に伴って増加し、γ線照射時には放電個数が未照射時の2~4倍に増加することがわかる。

γ線照射により比較的小さい電荷量の放電が増加する現象は、2節で述べたように商用周波電圧印加時にも観測されており、γ線の電離効果によりボイド内部に初期電子が多数供給されたことが原因であると考えられる。

しかしながら、商用周波印加時には部分放電検出器の感度(10pC程度)以下の放電発生個数がγ線照射により増加したのに対し、低周波電圧の場合には数百pC程度の放電の発生個数の増加が認められた。この現象は、低周波電圧を印加すると放電と次の放電との発生間隔が長くなるため、前の放電が次の放電に及ぼす影響が小さくなり、群小部分放電が起こりにくくなることと関係している。すなわち、γ線照射による初期電子の供給は時間的に変動する統計的な現象であり、放電と放電の間隔が長くなるほどその間にγ線の電離により初期電子が発生する確率は増加する。商用周波電圧印加時は群小部分放電が発生し易いことからわかるように個々の放電間隔が短いので、γ線の電離効果により初期電子が発生する時間間隔が放電の時間間隔より長くなり、全ての放電に対しては照射の影響が現れずに一部の放電だけが群小部分放電となるものと考えられる。これに対して、低周波電圧印加時には放電発生間隔が長くなり、その間にγ線照射による初期電子が必ず出現するようになり、ほとんど全ての放電に照射の影響が現れるものと考えられる。

以上述べたように、低周波電圧印加時には、γ線照射の影響がほぼ全ての放電に対して現れ、その影響を測定の簡単な電流パルス法ではっきりと観測できる。さらに、近年は低周波電源装置が小形軽量化され、可搬型となっていることも現場におけるボイド検出の利点となり得る。これに対し、商用周波電圧印加時にはγ線照射の効果が放電電荷量の小さい放電のみに認められるため、パルス法だけではなくブリッジ法を併用して放電群小率を用いて評価をしなければならない。ブリッジ法では、平衡をとる作業にある程度の時間を要し、迅速なボイド検出を行うという観点からは望ましくない。従って、γ線照射と部分放電計測による絶縁体中のボイド検出を簡単に、迅速に行うためには低周波電圧を印加することが望ましいと考えられ、計測システムを充実させるなど今後さらに検討を進める予定である。

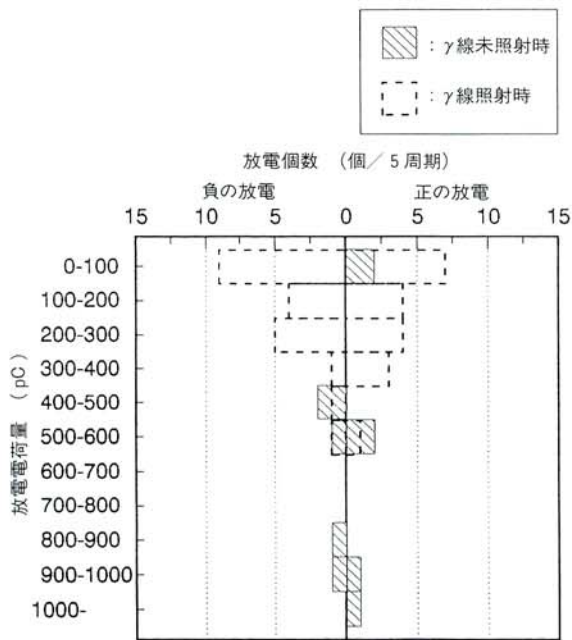


図7/γ線照射による部分放電特性の変化(5kVrms印加時)
Fig.7/Change of partial discharge characteristics at 5kVrms due to γ ray irradiation

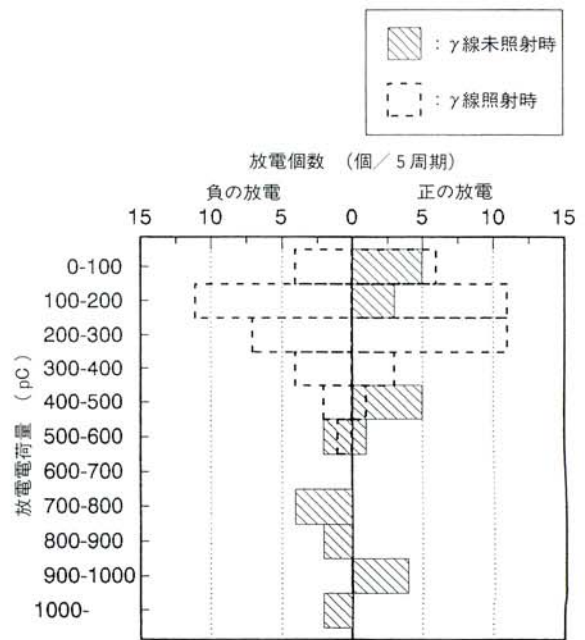


図8/γ線照射による部分放電特性の変化(6kVrms印加時)
Fig.8/Change of partial discharge characteristics at 6kVrms due to γ ray irradiation

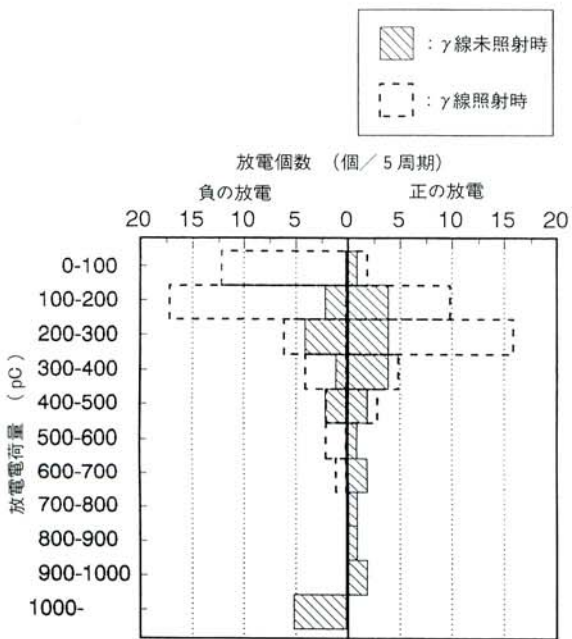


図9/γ線照射による部分放電特性の変化(7kVrms印加時)
Fig.9/Change of partial discharge characteristics at 7kVrms due to γ ray irradiation

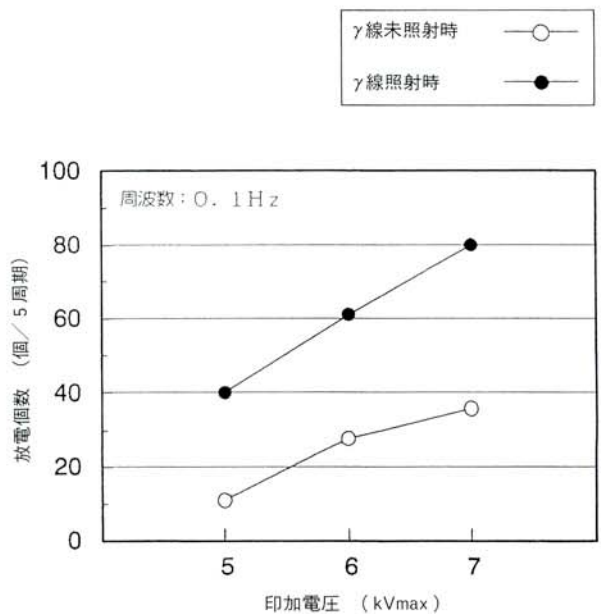


図10/γ線照射による総放電個数—印加電圧特性の変化
Fig.10/Change of total partial discharge number vs. applied voltage characteristics due to γ ray irradiation

5 あとがき

γ線照射と部分放電計測を組み合わせることにより絶縁体中のボイドを検出する手法を開発するため、人為的に作製したボイドを含む試料を用いてγ線照射時の部分放電計測などの基礎的実験を実施した。得られた結果を列挙する。

- (1) 商用周波電圧印加時にγ線を照射すると、部分放電開始・消滅電圧は未照射時に比べて若干低下する。また、部分放電検出器の感度以下の放電電荷量の小さい放電の発生個数が増加する。γ線照射によりボイド中に初期電子が供給されるためと考えられる。
- (2) 商用周波電圧を印加しγ線をナロービームにしてスキャンした場合、パルス法とブリッジ法を併用した部分放電解析システムで得られる放電群小率の変化によりボイドの位置を推定できる。
- (3) 低周波電圧を印加した場合には、放電電荷量数百pCの放電にγ線照射の影響が顕著に現れる。低周波電圧印加の場合は商用周波電圧印加の場合に比べγ線照射の影響が大きく現れるため、パルス法のみによる部分放電計測でγ線照射の効果を評価できる。
- (4) 装置の大きさや計測の感度などの現場適用性を考慮すると、γ線照射と低周波高電圧印加による部分放電計測を組み合わせる方式が望ましいと考えられる。

参考文献

- (1) T.Okamoto & T.Tanaka: "Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement System", IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-21 (1986) 1015
- (2) 北村, 平林: 「エポキシ樹脂における内部部分放電の経時変化」電気学会論文誌, 103-A (昭58) 507
- (3) S.Gulski and F.H.Kreuger: "Computer-aided Recognition of Discharge Sources", IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-27 (1986) 82
- (4) 石田, 他: 「群小部分放電の解析を目的とした部分放電解析システムの開発と新部分放電パラメータの提案」電気学会論文誌, 112-A (平4) 768
- (5) 石田, 他: 「内部部分放電試料の群小部分放電特性とその発生要因」電気学会論文誌, 113-A (平5) 43
- (6) Y.Mizuno et.al.: "Temporal Evolution of Partial Discharge in Voids and Electrical Trees", 8th International Symposium on High Voltage Engineering, 60.03 (1993)
- (7) J.M.Braun et.al.: "Modulation of Partial Discharge Activity in GIS Insulators by X-ray Irradiation", IEEE Trans. on Electrical Insulation, EI-26 (1991) 460

最近公告された愛知出願

実用新案

公告番号	名 称	考 案 者	共同出願人
5-70	シートペーパー自動供給便座	山下 直治 野々村勝巳	東陶機器(株)
5-5771	地上設置形電気機器の冷却装置	鈴木 務 永田 徹 太田 博視	
5-12172	被塗装物の搬送装置	奥村 顕治 三谷 健治	
5-12542	電磁弁	横山 武弘 安藤 幸彦	東陶機器(株)
5-12677	蓄熱電気暖房器	新美 正明 杉本 立央	
5-16876	ブラシレス直流電動機の回転子位置検出装置	太田 久義 渡辺 誠	アイチーエマン ン電機(株)

公告番号	名 称	考 案 者	共同出願人
5-19419	衛生洗浄装置のノズル	横山 武弘 法月仙一郎	東陶機器(株)
5-25694	破碎装置付混合機	安藤 忍	
5-29065	加湿装置付混合機	新美 正明	愛知電機商事(株)
5-29271	衛生洗浄装置	横山 武弘 平野 修一	東陶機器(株)
5-33586	衛生洗浄装置	横山 武弘 平塚 保博	東陶機器(株)
5-37607	地上設置型変圧器装置の低圧分岐盤	鈴木 務	中部電力(株) 株高岳製作所
5-38829	液添加装置付混合機	新美 正明	愛知電機商事(株)
5-43459	タツプ選択器の固定接点装置	坂下 昭男	
5-47477	サイリスタバルブの動作表示装置	佐藤 徹	