

JAERI - M
88-203

放射線遮蔽窓ガラスの耐放射線性の研究(II)
(誘電破壊に関するF36Nガラス組成の検討)

1988年10月

中村 義輝・須永 博美・田中 隆一

JAERI-Mレポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11茨城県那珂郡東海村）あて、お申しこしてください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division
Department of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-
mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印刷 刷 株式会社高野高速印刷

放射線遮蔽窓ガラスの耐放射線性の研究 (II)
(誘電破壊に関する F 3 6 N ガラス組成の検討)

日本原子力研究所高崎研究所開発部
中村 義輝⁺・須永 博美・田中 隆一

(1988年9月21日受理)

ガンマ線照射下での放射線遮蔽窓ガラスの電荷蓄積および着色に関する前報の成果をもとにして、放射線遮蔽窓ガラスとして広く使用されている F 3 6 N ガラスについて、ガンマ線照射後の誘電破壊試験、照射下導電率の測定および電荷蓄積に関する解析などを行った。

その結果、異なるガラス組成について、誘電破壊試験と電荷蓄積に関する解析結果との間には十分な相関関係があること、誘電破壊はガラス試料の非照射下導電率と内部歪の違いにほとんど影響を受けないこと、照射後の熱処理が誘電破壊の抑制に対して効果的であることなどが明らかとなった。

Study of Radiation Resistance on Radiation Shielding Window Glass (II)
(Consideration on Dielectric Breakdown for F36N Glass Composition)

Yoshiteru NAKAMURA⁺, Hiromi SUNAGA and Ryuichi TANAKA

Department of Development
Takasaki Radiation Chemistry Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Watanuki-cho, Takasaki-shi, Gunma-ken

(Received September 21, 1988)

Dielectric breakdown test after gamma-irradiation, measurement of radiation induced electric conductivity, and analysis of charge accumulation during irradiation were carried out for F36N glass which is widely used as a radiation shielding window glass, on the basis of the results of the previous report on charge accumulation and coloration in gamma-ray irradiated shielding glass.

It was found for different composition of the sample glasses that the analyzed results of charge accumulation is adequately correlated with the results of dielectric breakdown test, dielectric breakdown is not influenced by electric conductivity of un-irradiated glasses and internal distortion in the glass, and that heat-treatment after irradiation is effective to control dielectric breakdown.

Keywords: Radiation Shielding Window Glass, Dielectric Breakdown Test, Radiation Induced Conductivity, Charge Accumulation, Charge Leakage, Internal Distortion, Excess Electron, Electric Field Strength, Annealing

+ Office of Advanced Technology Project

目 次

1. はじめに	1
2. ガラス試料	2
3. 誘電破壊試験および放出電荷量測定 of 検討	4
3.1 照射および試験方法	4
3.2 誘電破壊試験	4
3.3 放出電荷量測定 of 検討	6
4. ガラス内部 of 電荷蓄積 of 検討	18
4.1 非照射下導電率 of 測定	18
4.2 照射下導電率 of 測定	18
4.2.1 測定方法	18
4.2.2 測定結果	19
4.3 ガラス試料内 of 線量率分布 of 測定	20
4.4 ガラス試料内温度 of 推定	20
4.5 ガラス試料 of 比誘電率測定	21
4.6 諸定数および電荷蓄積 of 計算	21
5. 電荷蓄積 of 解析結果および考察	28
5.1 ガラスブロック内 of 電荷蓄積	28
5.2 電荷蓄積 of 線量率効果	28
5.3 電荷蓄積 of 温度効果	29
5.4 電荷蓄積 of 熱処理効果	30
6. まとめ	36
謝 辞	36
参考文献	37

Contents

1. Introduction	1
2. Glass Samples	2
3. Dielectric Breakdown Test and Consideration for Discharge Measurement	4
3.1 Irradiation and Test Method	4
3.2 Dielectric Breakdown Test	4
3.3 Consideration of Discharge Measurement	6
4. Study of Charge Accumulation in the Glass	18
4.1 Measurement of Conductivity of Non-Irradiated Glasses	18
4.2 Measurement of Radiation Induced Conductivity	18
4.2.1 Measurement Method	18
4.2.2 Result of Measurement	19
4.3 Measurement of Dose Distribution in Glass Blocks	20
4.4 Estimation of Temperature in the Glass Blocks	20
4.5 Measurement of Specific Dielectric Constant in the Glass Samples	21
4.6 Calculations of Several Physical Constants and Charge Accumulation	21
5. Analytical Results and Discussion of Charge Accumulation	28
5.1 Charge Accumulation in the Glass Block	28
5.2 Dose Rate Effect on Charge Accumulation	28
5.3 Temperature Dependence of Charge Accumulation	29
5.4 Annealing Effect on Charge Accumulation	30
6. Summary	36
Acknowledgement	36
References	37

1. は じ め に

大線量照射施設に設置されている放射線遮蔽窓ガラスは、放射線の照射により誘電破壊を生ずることが、これまで各地の照射施設でいくつか報告されている。^{1) - 9)} われわれはクラウン系ガラスC 2 5 Nおよびフリント系ガラスF 3 6 Nを対象として、誘電破壊とガラスの種類、照射条件などとの相関関係について検討し、すでに前報で報告した。¹⁰⁾

ガラスの誘電破壊については、誘電破壊試験の結果および過剰電荷蓄積についての計算による解析などとの比較検討を行い、いままでの定性的な説明から初めて定量的な取扱いを可能にした。

またこれらの試験結果では、C 2 5 Nガラスについては線量率 1×10^6 R/h以下、 $0 \sim 40^\circ\text{C}$ 程度の室温範囲における通常の使用状態では、誘電破壊は発生しないことが確かめられた。しかしながら実際に放射線遮蔽窓ガラスの主要構成材料となっているF 3 6 Nガラスでは、前述の通常使用条件において誘電破壊が生ずることが分かったため、さらに詳しく耐放射線性を検討することとなった。

今回の試験ではF 3 6 Nガラスの2種類の組成について、耐誘電破壊性に対する導電率依存性および内部歪の影響を明らかにするとともに、ガラスの照射下導電率の測定などをもとにしてガラス内部の電荷蓄積の計算も行い、誘電破壊試験結果ともあわせて比較検討し、耐誘電破壊性の評価を行った。

耐放射線性試験の主要な内容は、以下の3項目である。

- (1) 放射線照射後の誘電破壊試験および放出電荷量測定の検討
- (2) 照射下導電率の測定
- (3) ガラスブロック内部の電荷蓄積量の計算

これらの試験内容、条件、方法等については、前報の試験実施時とできる限り同一とし、実験データの比較・検討が容易に行えるよう配慮した。

2. ガラス試料

照射試験に用いたガラス試料は、鉛入りガラスのF36N(密度3.62)のD組成およびE組成であり、全て日本光学工業(現ニコン) ㈱にて製作された。誘電破壊試験用ガラスブロックは $100 \times 100 \times 100$ mmの立方体であり、6面のうち3面が研磨されている。D組成およびE組成は鉛の含有量はほぼ同じであり、他の構成素材成分の含有量が多少異なるだけである。

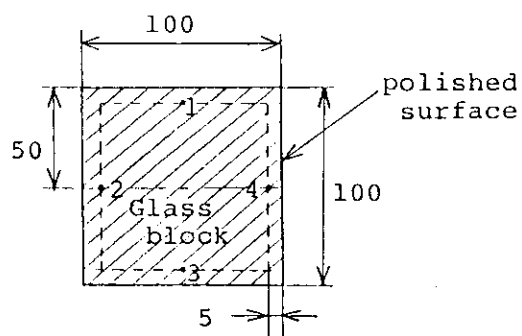
またD組成のガラスについては、ガラスブロックの内部歪の影響を調べるため、D1、D2、D2'、D3の4種類の試料を準備した。測定された内部歪のデータをTable 1に示す。

ガラスブロックの内部歪の大きさは、融解後の熱処理により $2 \sim 700$ nm/10cmの範囲にコントロールされた。歪の測定はガラスブロック表面から5mm内側の位置で行われた。

照射下導電率測定用サンプルとしては、大きさ $97 \times 97 \times 5$ mm³の両面研磨した板状ガラスを用いた。さらにはほぼ同じ大きさ厚さ2mm³の板状試料も用意し、このガラスを比誘電率の測定および非照射下導電率の測定などに用いた。

Table 1 ガラスブロック中の内部歪測定結果

Measurement position Sample No.	Internal distortion (nm / 10 cm)			
	1	2	3	4
D1-1	21	10	10	10
2	13	7	4	8
3	45	7	32	26
4	4	49	2	37
5	3	32	8	35
D2-1	352	348	415	423
2	307	270	337	371
3	339	305	386	405
4	338	315	339	378
5	336	283	311	378
D2'-1	338	294	351	402
2	293	255	299	353
3	346	314	362	396
4	305	263	308	359
5	290	290	335	359
D3-1	520	510	630	665
2	570	508	629	661
3	397	365	427	500
4	390	334	437	510
5	261	245	307	343
E-1	344	277	334	392
2	296	280	307	348
3	275	246	287	330
4	297	250	318	373
5	249	210	247	296
E	352	381	385	338



3. 誘電破壊試験および放出電荷量測定の見討

3.1 照射および試験方法

誘電破壊試験用ガラスブロックの照射は、コバルト第2棟第7照射室(板状線源, 約 140×70 cm, 147 kCi)および第5照射室(板状線源, 約 75×30 cm, 131 kCi)で行った。

照射条件については、照射によるガラスブロックの温度上昇をできる限り抑制するため、ガラス入射面において線量率を 2×10^5 R/hとした。また前報での解析結果から、F36Nガラスについては内部電界は数MR程度のかかなり低い集積照射線量で飽和すると推定されたので、試料の照射時間は 100 hとした。したがって誘電破壊試験における試料については、集積照射線量は全て 20 MRとなった。

第7照射室における実際のガラスブロック照射の様子をPhoto. 1に、また照射台上高さ 15 cmの平面上空間での 2×10^5 R/hの等線量率分布をFig. 1に示す。Photo. 1からも分かるように、棒状線源の配置が左右非対称となっている板状線源を使用しているため、等線量率分布曲線にも若干の歪みがみられる。試料照射中の室温は、照射室台上のガラスブロックの近くに、C-C熱電対をセットして 100 h連続的に測定した。室温とガラスブロック試料中の温度差は前報での測定結果から、照射線量率 2×10^5 R/hでは約 3°C となっており、したがって今回の誘電破壊試験試料の照射ではガラスブロック内部の温度は、夏期で $30 \sim 35^\circ\text{C}$ 、冬期で $13 \sim 29^\circ\text{C}$ 程度と推定される。

ガラスブロックは鉄製の架台上にゴムシート2枚を敷き、その上に約 1 cm程度の間隔で横に並べて照射した。ガンマ線の入射方向は、3つの研磨面のうち相対しない研磨面の側からとし、さらにこの研磨面と相対する試料面に導電塗料を塗布した。この試料の上にアルミニウム箔(20μ 厚)2枚を重ね、これを誘電破壊時の放出電荷量測定のための電極に用いた。

誘電破壊試験装置も前報と同様の装置を使用した。静圧荷重はコンプレッサーからの圧縮空気を得られるが、今回の試験では、調節弁のコントロールによっても直線的な加圧速度パターンが得られなかった。実際の加圧速度の代表的なパターンの一例をFig. 2に示す。加圧開始後1分で約 110 kgに達するが、その後加圧速度は鈍くなり、約 180 kgまで増加するのに $4 \sim 5$ 分程度を要した。

3.2 誘電破壊試験

誘電破壊試験結果の一覧表をTable 2(a)と2(b)に示す。試料の照射時間を 100 h一定とするとともに、照射の中断時間は 20 分以内におさえた。

試験の結果、ガラスブロックは静圧荷重 200 kg以内で、全て誘電破壊した。D組成およびE組成のガラスブロックについていくつかの誘電破壊例をPhoto. 2(a)~5(b)に示す。D組成ではE組成に比較して大きなリヒテンベルグクラック(Lichtenberg crack)が観察され、そのクラックに起因すると考えられる割れが層状に発展し、ブロック外側表面にまで到達している。これは放電時における時間当たりの電荷量が大きいため、ガラス内のクラック部が局所的にジュール加熱されて膨張し、大きな割れに進行したものと推定される。

またD組成ガラスブロックの誘電破壊では、内部歪に差のある4種類の試料に対する放電破壊時のリヒテンベルグクラックには、目視観察ではほとんど差がみられなかった。この実験事実から2~700nm/10cm程度の内部歪については、照射による誘電破壊に対して巨視的なレベルでの影響はないと判断された。

一方E組成のガラスブロックは、D組成よりかなり小規模なリヒテンベルグクラックの発生にとどまった。これらのクラックはD組成のように層状の割れには進展せず、クモの巣状あるいは細いtree状で研磨面からその大きさがよく観察された。これらの現象は後述の導電率測定においても、E組成の方がD組成より非照射下導電率が約40倍高くなっており、電荷が漏洩しやすいことと対応している。

誘電破壊時の静圧荷重については、E組成の方がD組成より大きな値を示している。前掲Table 2(a)に示されているように、夏期の8月~9月に行われた試験のうちのE組成試料数5ケの誘電破壊時荷重の単純平均は約167kgであるが、D組成試料14ケ(熱処理あるいは誘電破壊試験時ミスセッティングのブロックは除く)については136kgであり、約30kg低い値となっている。これらの結果は、誘電破壊規模の大きなガラスの方が静圧荷重の小さな段階で破壊に到達するということであり、内部の電荷蓄積状態をそのまま忠実に反映した現象と解釈することができる。

リヒテンベルグクラックの大きさは、ガラスブロックを黒紙の上に置き、補助照明を付加して肉眼で見えるクラックの大きさの範囲を測定した。クラックは、荷重を加えた研磨面側から見ると正方形平面の辺方向より対角線方向に長く伸びており、深さ方向についてはtree状の幹からの枝分かれは表面より約10~15mmから始まっている。簡単のためにクラックの発生領域は四角柱状であると仮定すると、その平均的な容積はD組成では $9.0 \times 7.0 \times (8.5 - 1.5) = 440 \text{ cm}^3$ 、E組成では $6.0 \times 5.0 \times (7 - 1.5) = 165 \text{ cm}^3$ となり、D組成の方が約3倍の大きさを持つと推定できる。

照射後経過時間が誘電破壊に与える影響については5.4項で詳しく述べるが、室温程度の環境に放置されたF36Nガラスの場合にはFig. 18あるいはFig. 19からも明らかなように、100h程度までは内部の電界強度がほとんど減少しないものと考えられる。また誘電破壊との直接の因果関係は不明であるが、2種類のガラスブロックでは、E組成の方がD組成より全体的にかなり着色が進行していることが観察された。

さらに冬期に行われた誘電破壊試験の結果をTable 2(b)に示したが、夏期での結果[Table 2(a)]と比較すると、D組成およびE組成とも大きな誘電破壊クラックが観測された。特にE組成については、Photo. 3(a)および3(b)とPhoto. 5(a)および5(b)との比較からも明らかなように、リヒテンベルグクラックはクモの巣状から太いtree状に拡大している。これらの結果は、冬期の照射時温度が夏期と比較して平均で約15℃程度低かったことに起因しているものと考えられる。

また今回の試験においては、照射したガラスブロックの熱処理効果の予備的な検討も行った。D組成ガラスブロック2ケについて照射後約80℃で2h程度の熱処理を行ったところ、リヒテンベルグクラックの大きさは夏期の誘電破壊試験でのE組成に発生したクラック程度にまで減少した。さらに試料照射後60℃で5日間熱処理し、その後4日間室温環境に放置しておいたD組成およびE組成ガラスブロック各1ケについては、前述の荷重試験を行っても誘電破壊は発生しなかった。

以上の結果から、F36N放射線遮蔽窓ガラスのような導電率の小さいガラス試料の誘電破壊の抑制については、照射後の熱処理が非常に効果的であることが実験的に確かめられた。なお過剰電荷蓄積の熱処理効果の計算による解析についても、5.4項で詳述する。

3.3 放出電荷量測定の見直し

ガラスブロックの誘電破壊時の放出電荷量^{11), 12)}の測定については、前報において試験的に実施した結果放出電流はパルス幅約100ns, ピーク値10~20A程度の高速度の単一波形であることが分かった。この波形の計測には、プログラマブルディジタイザー7912AD(ソニーテクノロジクス製)を用いたが、今回は従来から行われている放電電流の積分による総電荷量計測の方法を試みた。このため実際のガラスブロックの実験に先立ち、電子線照射されたアクリル(ポリメチルメタクリレート)板を用いて、放出電荷量測定法の検討を行った(Photo. 6参照)。この実験ではFig. 3に示すように、C-R回路を通過した電流波形をウェーブメモリ(菊水, 8711形あるいは8741型, サンプルングタイム1 μ s, 記憶長2kw)を用いて、積分的に測定した。

電子線照射は高崎研2号加速器(ダイナミトロン, IEA 3000-25型)を用いて、電子エネルギー2MeV, 電流1mAで試料の上に50 ϕ あるいは70 ϕ の鉛コリメーターを置き、コンベアを用いた移動照射を行った。

アクリル板試料の大きさは、100 \times 100 \times 16~20¹であり、入射電荷量はコンベアによるビーム窓下一回通過当たりそれぞれ13.9 μ C, 27.3 μ Cと推定された。照射後の放出電荷量の測定結果の例をTable 3のNo.1~5に示す。

以上の放出電荷量の測定に関する検討をもとに、ガラスブロックの誘電破壊時の放出電荷量の測定を試みたが、アクリル板の場合のように電荷量を読み取り得るような信号波形を観測することはできなかった。この原因はアクリル板では負の電流パルスのみが観測されるが、ガラスブロックでは前報に示したように初期での負電流パルスの発生後、それを打ち消すような逆方向の正電流が流れるためであると推論された。

このため積分的な測定法でなく、高速度のストレージオシロスコープ(ソニーテクノロジクス, 464型, 100MHz)を用いたリアルタイム測定を試みた。アクリル板の放出電荷量の測定結果をTable 3のNo.6~10に示す。放電電流のパルス幅は約150~200nsであり、積分電荷量は別報でのプログラマブルディジタイザーを用いて得られた値と等しく、4~5 μ Cであった。

このリアルタイム試験法の再確認のため、静圧破壊試験装置を用いて、同様なアクリル板の放出電荷量の測定も行ったが、ハンマーでケガキ針を打ち込んだ場合と同じ結果が得られた。これらをTable 3のNo.11~13に示す。

これらの検討をもとにして、リアルタイム測定法によるガラスブロックの放出電流の測定を試みたが、前報で得られたような電流波形を得るには到らなかった。この測定実験では放出電荷量レベルの最適設定値を求めるためにより多くの試験用の試料が必要となるが、今回の試験では試料数にも限りがあり結局それを見出すことはできなかった。

以上の結果、電子線照射したアクリル板試料で実施した放出電荷量測定法をそのままガンマ線照射したガラスブロックに適用することはできず、今後さらに検討を加える必要があることが分かった。

Table 2(a) ガラスブロック誘電破壊試験結果一覧表 (夏期)

ガラス ブロック No.	照射日時	照射中 断時間 (分)	照射時温度 (min ~ max) (°C)	放 荷 重 (kg)	電 破 壊 結 果		果 実 の 大 き さ (mm)	照射後テスト までの時間 (分)	備 考
					対角線方向 (mm)	辺方向 (mm)			
E				190	—	—	—	38	放電破壊せず
D				190*	?	?	~85	45	※テスト後シャープペンで軽くたたいた直後に放電 (非研磨面での荷重テストのためと考えられる。)
E-1				156	~30	~25	65	52	
E-2				162	25	25	70	55	
D2-1	8/19:49~	0	27.4~30.3	132	45	35	85	64	
D2-1	8/13:49			115	45	30	82	69	
D2-2				119	45	35	85	86	
D2-2				152	45	35	82	94	
D2-4				126	~45	~35	~82	17	
D3-2				140	45	35	82	25	予備 1面研磨
D2-3	8/9:34~	0	28.4~31.0	117	45	30	85	33	
D1-1	8/12:34			151	45	35	85	61	
D3-1				97*	40~45	35	82	77	※ミスセッティング, 脱荷時に放電する。
D1-2				110	45	35	85	80	
E-3				165	~30	~25	~70	27	
E-4				164	35	25	70	39	
D3-3	8/18:10:15~	10	27.0~32.0	160	45	35	85	50	
D3-4	8/22:14:25			120	45	35	82	86	
D1-3				145	45	35	85	110	
D1-4				110*	40	30	85	205	※電気炉中の昇温テスト(80°C×3h)後に荷重 テスト実施
D2-4				174	~45	~35	~85	18	
D1-5	8/2:10:10~	0	27.0~30.4	143	45	30	82	26	
E-5	8/6:14:10			188	25~30	25	70	36	
D2-3				62*	25	20	70	175	※80°C, 2.2hの熱処理後荷重テスト実施
			荷重平均値	D = 136 (14ヶ)	クラック中心からの範囲				
			"	E = 167 (5ヶ)					

Table 2(b) ガラスブロック誘電破壊試験結果一覧表 (冬期)

ガラス ブロック No.	照射日時	照射 中断時 (分)	照射時 温度 (min ~ max) (°C)	放 荷 (kg)	電 破 壊		結 果	照射後テ ストまで の 時 間 (分)	備 考
					リヒテンベルグ 対角線方向 (mm)	ベグル 辺 方 向 (mm)			
Ea				~120	~40	~30	~80	17	
Eb				87	40	30	80	23	
Ec	1/23 10:01	15	11.2~25.6	117	40	30	80	29	
Da	~1/27 14:16			127	45	35	85	40	
Db				135	45	40	85	60	
Dc				171	48	35	85	69	
E				170	~40	~30	?	21	脱荷時
Ed				185	40	30	~80	33	2回目の加圧で破壊, 1回目185kgまで破壊せず
D3-5	2/11 9:47~	0	9.7~20.1	186	45	35	85	48	脱荷時
Dd	2/15 13:47			69	45	40	85	66	脱荷時
Ee				190	-	-	-	~9日	熱処理 (60°C, 5日), 放電破壊せず
De				190	-	-	-	~9日	" 放電破壊せず
			温度上昇~8:30		クラック中心からの				
			" 下昇~17:30		範囲				

Table 3 PMMA板を用いた放出電荷量の測定

No	照射パス (回)	入射電荷量 (μC)	放出電荷量 (μC)	持続時間	測定までの時間		備考
					測定までの時間 (分)		
1	5	1 3 7	0.0 0 6	~ 0.4 ms	~ 2 0	部分小放電	
2	1 0	1 4 0	0.0 5 9	0.6	3 0	中心部の放電	
3	5	7 0	0.1 7	0.4	2 0	"	
4	1 0	2 7 0	0.3 0	8 0	2 0	"	Termination Attenuator } C=0.1 μF と外し
5	1 0	1 4 0	0.0 1 2	8 0	3 0	部分小放電	"
No.1~5, Wave memory 使用, ハンマーによる衝撃 (8/12)							
6	1 0	1 4 0	5.0	~ 1 5 0 ns	~ 3	中心部の放電, CR boxと外し	
7	1 0	2 7 0	4.2	1 7 0	5	"	"
8	1 0	1 4 0	4.4	1 4 0	3	"	"
9	1 0	2 7 0	0.3 0	1 7 0	5	部分小放電	"
10	1 0	2 7 0	0.3 0	1 6 0	7	"	"
No.6~10, Storage oscillo 使用, ハンマーによる衝撃 (8/25)							
11	5	7 0	3.0	~ 1 5 0 ns	~ 2 0	中心部の放電, CR boxと外し	
12	5	7 0	0.1 6	1 2 5	2 5	部分小放電,	"
13	5	1 3 7	0.3 0	1 8 5	3 0	"	"
No.11~13, Storage oscillo 使用, 荷重装置による加圧 (約 3 0 kg 以内で放電) (2/2)							

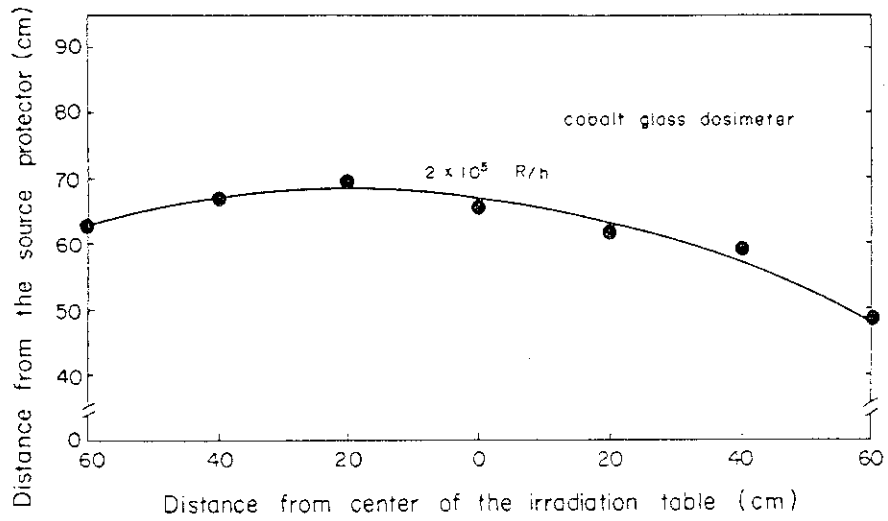


Fig. 1 非対称板状線源による照射台上1.5 cm高さ平面での0.2 MR/hの照射線量率分布

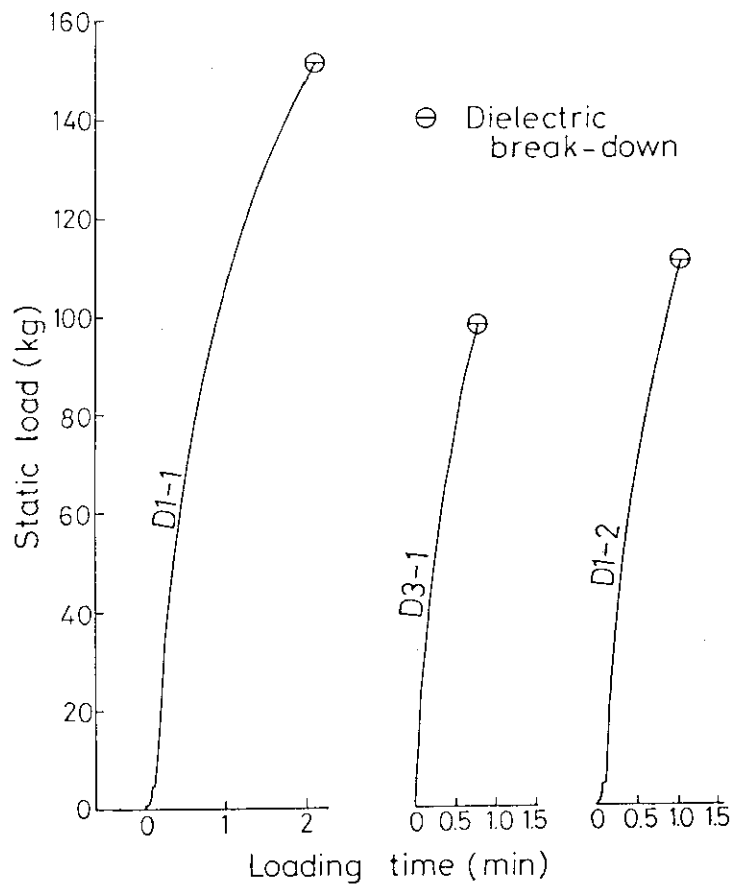


Fig. 2 誘電破壊が発生したときの静圧荷重曲線の代表例

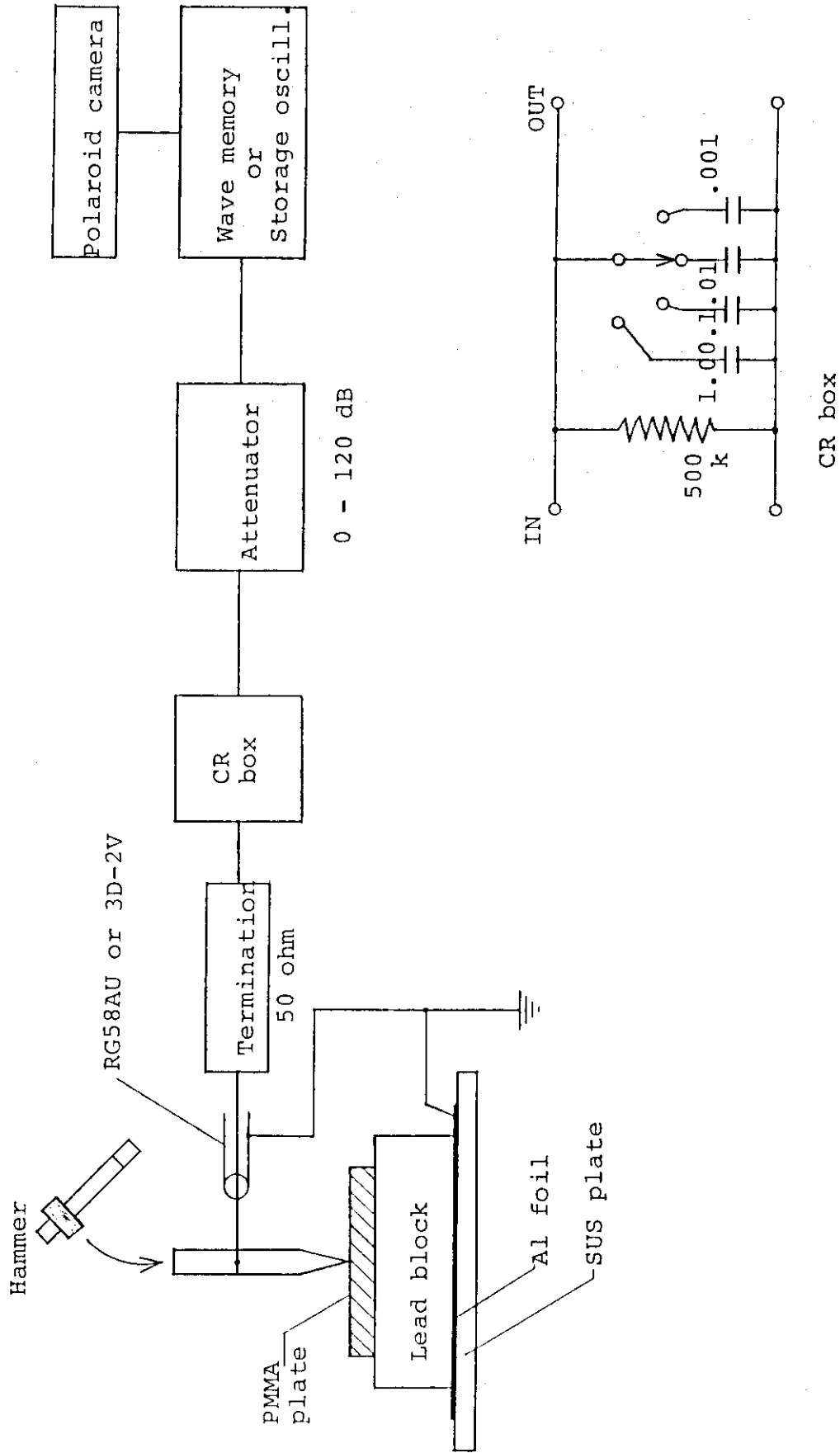


Fig. 3 P MMA 板を用いた放出電荷量測定のプロックダイアグラム

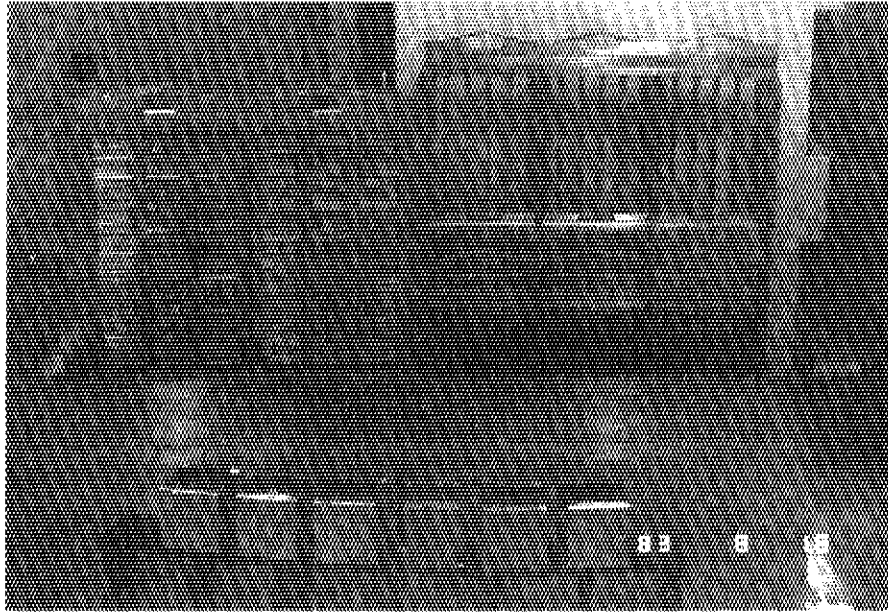


Photo. 1 放射線遮蔽窓ガラスを通して見た非対称板状線源による
ガラスブロック照射の様子

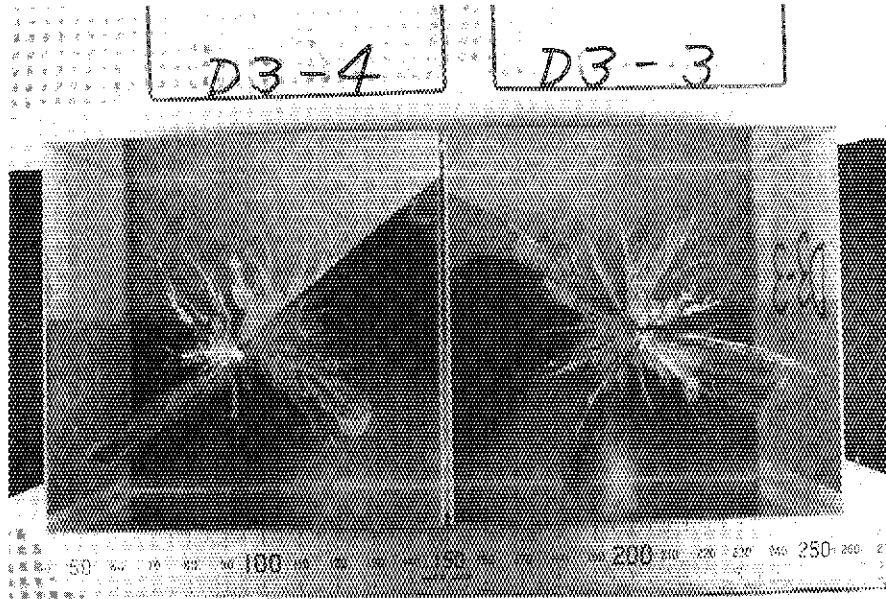


Photo. 2(a) DタイプF 3 6 N ガラスブロックに発生した大規模なりヒテンベルグクラック。(夏期の試験：誘電破壊試験時の荷重点側正面からの写真)

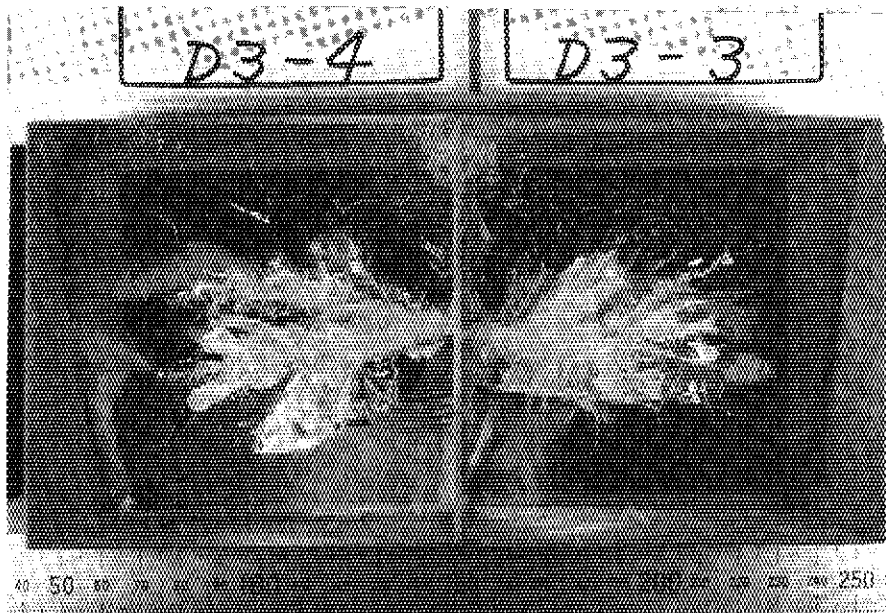


Photo. 2(b) DタイプF 3 6 N ガラスブロックに発生した大規模なりヒテンベルグクラック。(夏期の試験：側面からの写真)

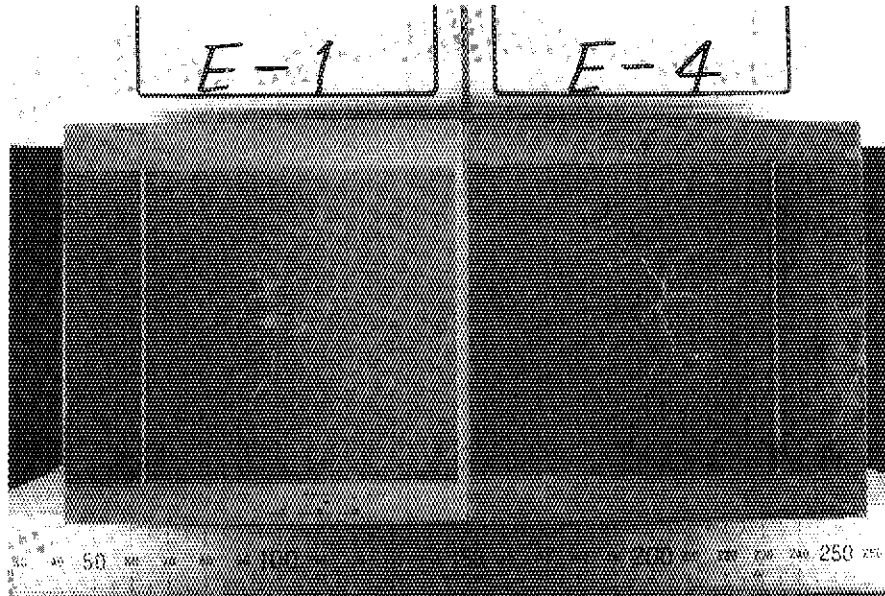


Photo. 3(a) EタイプF 36N ガラスブロックに発生した小規模なりヒテンベルグクラック。(夏期の試験：誘電破壊試験時の荷重点側正面からの写真)

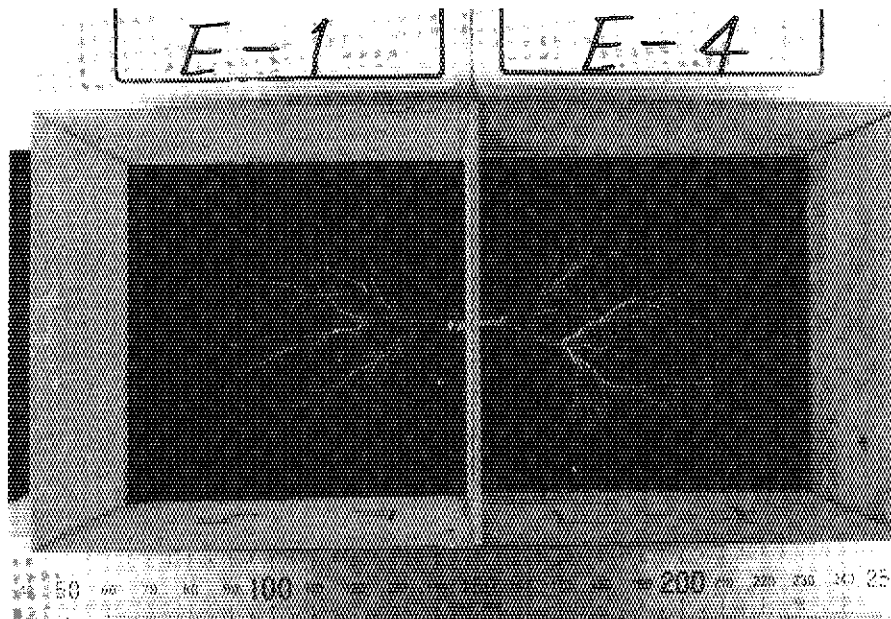


Photo. 3(b) EタイプF 36N ガラスブロックに発生した小規模なりヒテンベルグクラック。(夏期の試料：側面からの写真)

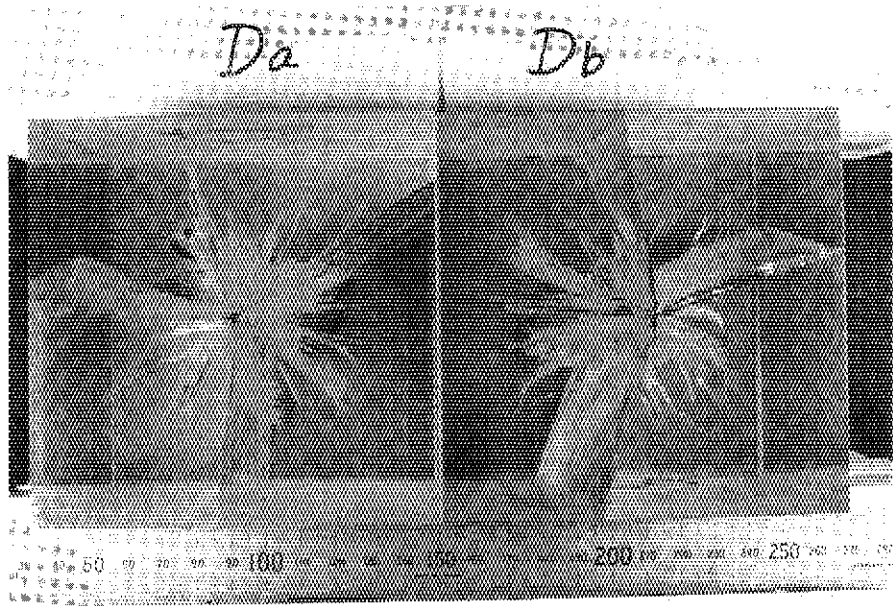


Photo. 4(a) DタイプF 3 6 N ガラスブロックに発生した大規模なりヒテンベルグクラック。(冬期の試験：誘電破壊試験時の荷重点側正面からの写真)

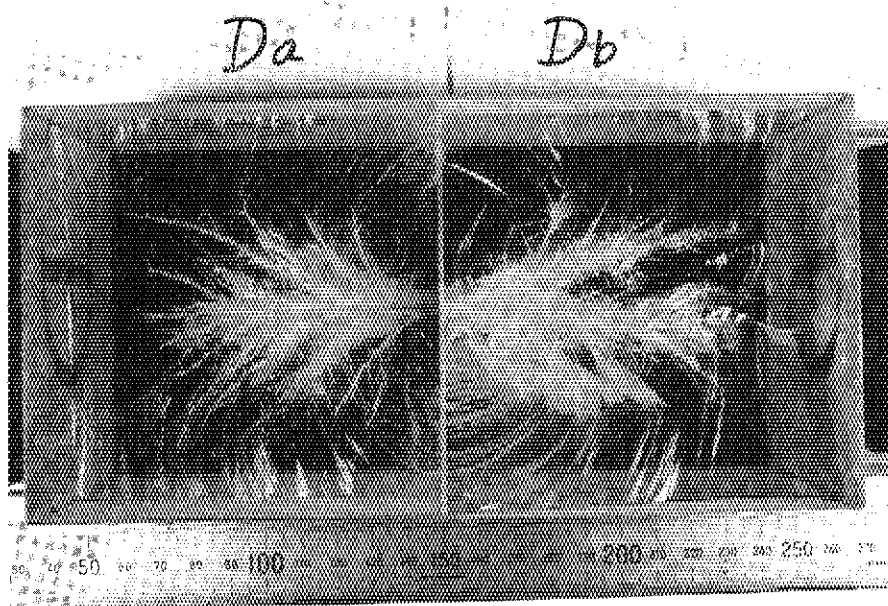


Photo. 4(b) DタイプF 3 6 N ガラスブロックに発生した大規模なりヒテンベルグクラック。(冬期の試験：側面からの写真)

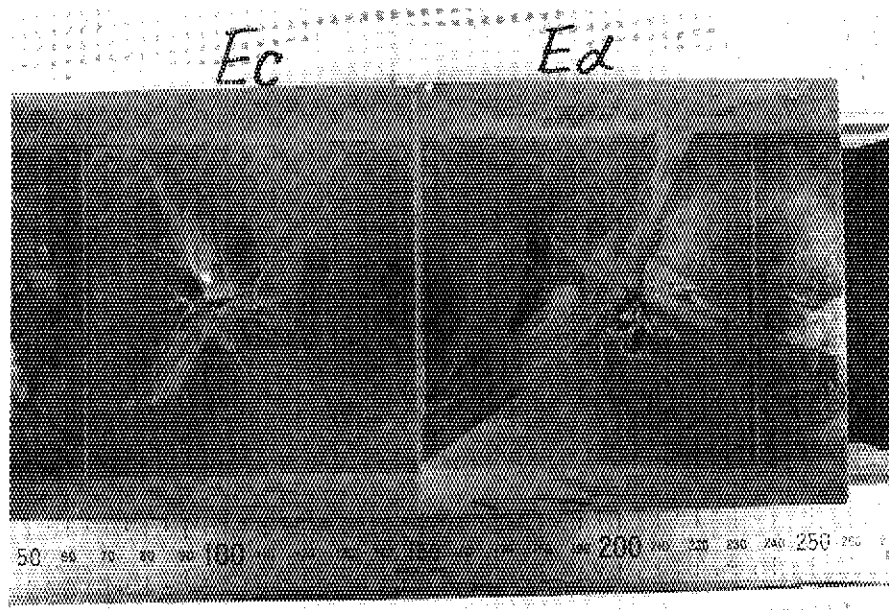


Photo. 5(a) EタイプF 3 6 N ガラスブロックに発生した中規模のリヒテンベルグクラック。(冬期の試験：誘電破壊試験時の荷重点側正面からの写真)

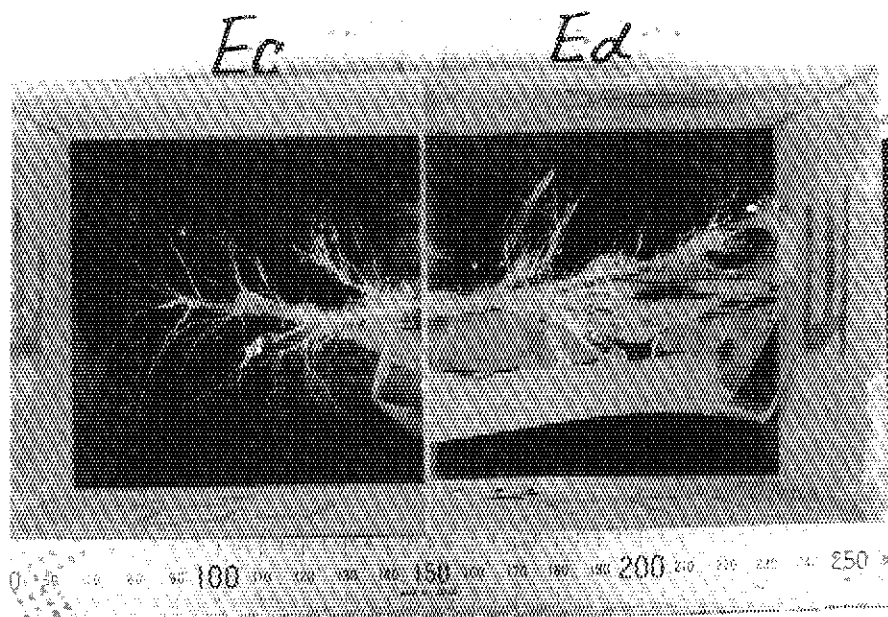


Photo. 5(b) EタイプF 3 6 N ガラスブロックに発生した中規模のリヒテンベルグクラック。(冬期の試験：側面からの写真)

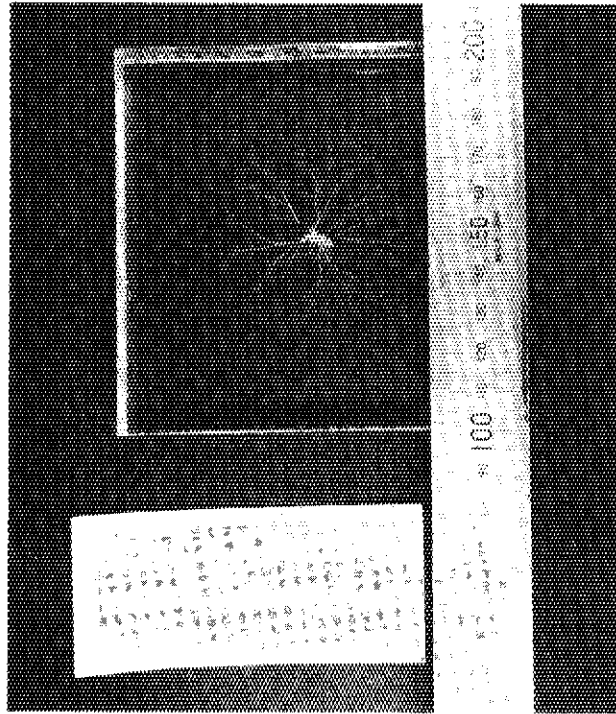


Photo. 6 電子線で照射されたP MMA 板中に発生した小規模なりヒテンベルグクラック

4. ガラス内部の電荷蓄積の検討

コバルト-60ガンマ線のような高エネルギー光子が媒質に入射した場合、2次電子の発生割合は表面を除いた準電子平衡領域では、媒質の深さに依存して単調に減少する。したがって発生電子の平均飛程距離が、1次光子の平均自由行程に比較して十分短いと仮定すると、媒質中のある微小層を考慮した時その層に入射する電子数はその層から離脱する電子より常に多くなり、両者間の電子数の差が過剰電荷として形成される。この場合媒質が放射線遮蔽窓ガラスのような導電率の小さい良好な絶縁体であれば、生成した過剰電子の流れは抑制され、この結果媒質内部に過剰電荷として蓄積されることになる。これら電荷蓄積のメカニズムについてはすでに前報で定量的にも明らかにしたが、今回も同様の考え方にもとづいて検討するとともに、解析の方法も前報に示したものと同一とした。

以下にガラス内部の電荷蓄積の解析で必要となる非照射下導電率の測定、照射下導電率の測定、ガラス試料内の線量率分布および温度、ガラス試料の比誘電率測定、諸定数の算出と計算について順次触れる。

4.1 非照射下導電率の測定

非照射下導電率の測定には、High Resistance Meter, type 4329 (YHP製)を用いた。使用したガラス試料は $100 \times 100 \times 2 \text{ mm}^3$ であり、電極には金を蒸着して使用した。測定温度は $20 \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で変化させ、印加電圧1kVで連続して長時間計測した。しかしながら $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 程度の温度では、 10^5 s 経過後においても試料を流れる電流は一定とならなかった。そこで経過時間 10^5 s までの測定カーブを $10^6 \sim 10^7 \text{ s}$ まで外挿して定常値を求めることとしたが、 20°C と 30°C のカーブについては推定が困難であったので、この温度でのデータは除外した。これらの測定で得られた結果をFig. 4に示す。

今回のE組成ガラスの非照射下導電率 σ_0 は、前報の測定値に比較してやや低い値を示し、若干の温度勾配の差もみられた。一方D組成のガラスはE組成に対して $40 \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で、約 $1/30 \sim 1/40$ の小さな導電率を示した。 σ_0 と絶対温度T(K)の逆数との関係は、片対数プロットで直線であるので、 $\sigma_0 = a \cdot \exp(b \cdot 10^3/T)$ の形(aおよびbはいずれも定数)で表される。

測定で求められたD組成およびE組成の非照射下導電率 σ_0 の値は、次の4.2.2項で全体の導電率 σ の形で一括して表示する。

4.2 照射下導電率の測定

4.2.1 測定方法

前述のように放射線照射に起因するガラスブロック内部の電荷蓄積は、生成される過剰電荷の堆積率とその漏洩率とによって基本的に支配されるものと考えられる。このうち電荷漏洩は主として絶縁物(ガラス)の導電率 σ ($\sigma = \sigma_0 + \sigma_r$, σ_0 :非照射下導電率, σ_r :放射線誘起導電率)に依存する。ここではF36Nガラス照射時の電荷挙動に主眼をおき、照射下における導電率の

測定を行った。

測定の方法は前報に示したものと同様、split Faraday cup 法を用いた。この方法によると平行平板絶縁物の照射領域での平均導電率 σ は、

$$\sigma = \frac{\epsilon}{\tau} \cdot \frac{J_0}{J_0 - J_r(0)} \quad (1)$$

で近似的に表される。ここで

ϵ : 絶縁物の誘電定数

τ : 背面電極電流の減衰曲線（指数関数状）の時定数

J_0 : 入射電流密度

$J_r(0)$: 照射開始時の背面電極電流密度

である。

測定用ガラス試料は、前述のように大きさ 97×97 mm 厚さ 5 mm の正形状の薄板であり、その両面を研磨したものである。導電率測定時にはその両面に導電塗料を塗り、前面には電流測定のためのスズ箔の電極を接着した。測定に使用したステンレス製容器は真空中および加熱下での電流測定が可能な構造となっており、上部蓋には 50ϕ の電子ビーム用コリメーターが付属している。

照射条件は電子エネルギー 1.5 MeV、ビームは電流密度をできるだけ小さくする（Co-60 ガンマ線照射実験による線量領域との整合を計る）ため、走査ビームを用いた。ガラスサンプル表面上の電流密度 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ は、前述の条件のもとで線量率 740 Mrad/h に対応する。出力電流の範囲は、電子ビームコントロールの安定性等を考慮して約 $50 \sim 1000 \mu\text{A}$ としたが、この電流領域は試料面での電流密度で $37 \sim 740 \text{ nA}/\text{cm}^2$ 、平均吸収線量率 $27 \sim 540 \text{ Mrad/h}$ の範囲に相当する。背面電極電流の測定には、電流積分計を用い、その出力をペンレコーダーで記録した。

4.2.2 測定結果

照射下導電率の測定では、線量率依存性および温度依存性を調べた。Fig. 5 には背面電極電流の実測例を示す。この図は温度依存性の測定実験で得られた電流カーブであり、照射温度約 30°C 、時定数 τ の読み値は 1.87 min であるので、導電率は $6.92 \times 10^{-16} \text{ S/cm}$ と換算された。なおこの試料では電子線照射開始後約 2.4 min で内部蓄積電荷の放電が発生した（Photo 7 参照）。

照射下導電率の線量率依存性を Fig. 6 に示す。照射下導電率 σ と線量率 \dot{D} との関係は一般に $\sigma = k \cdot \dot{D}^\Delta$ (k : 定数) により近似され、多くの有機および無機系絶縁物では Δ はほぼ 1.0 に近い値が得られ、したがって D2 ガラスについては、 $\sigma = 5.88 \times 10^{-22} \cdot \dot{D}^{1.0}$ (\dot{D} : rad/h) の経験式が求められた。今回の誘電破壊試験におけるガンマ線の線量率 $2 \times 10^5 \text{ R/h}$ では、F36N ガラスの質量エネルギー吸収係数が $0.0286 \text{ cm}^2/\text{g}$ (空気については $0.0266 \text{ cm}^2/\text{g}$) であることを考慮して、 $\sigma = 1.10 \times 10^{-16} \text{ S/cm}$ となった。また Fig. 6 では $10^5 \sim 10^7 \text{ rad/h}$ 程度の低い線量率領域でも、線量率と導電率との間に直線関係が成立しており、非照射下導電率 σ_0 の影響はほとんど無視できることが分かる。

F36N のガラス組成については、E 組成のガラスが D2 組成に比べて約 1.3 倍の導電率を示しており、これは前述の誘電破壊試験において D 組成の方が誘電破壊の規模が大きいことに対応していると考えられる。しかしながら前報で試験した F36N ガラス試料と比較すると、今回の E 組成の σ 値

はそれの約0.6倍であり若干物性値が変化したとも考えられる。また参考のためにP MMA（三菱樹脂製、クラレックス）の σ 値も示したが、 σ 値はD 2組成の約3.7倍となっている。

次に温度依存性の測定結果をFig. 7に示す。F 3 6 Nガラスの導電率 σ は電子線照射のような高線量率領域においては、非照射下導電率 σ_0 の寄与が小さいので、絶対温度Tの逆数に対して直線状になることが考えられるが、今回の実験結果では明確な直線的傾向を示さなかった。したがって前報の実験データとほぼ同じ温度勾配の直線を仮定して、導電率の近似式を表示することにした。

またD組成のうち、内部歪（熱処理条件）の異なるD 1およびD 3試料についても、導電率測定を行ったが、ほとんど差異はなく導電率は組成には依存するが、内部歪には依存しないことが確かめられた。

以上の結果をもとにして4.1項で得られた非照射下導電率（Fig. 4）と照射下導電率（Fig. 7）から、D組成およびE組成ガラスの導電率 σ_D 、 σ_E は次の式で表される。

$$\sigma_D = 3.69 \times 10^{-3} \exp(-1.152 \times 10^4 / T) + \dot{D}(x) \cdot 1.28 \times 10^{-21} \cdot \exp(-9.38 \times 10^2 / T) \quad (2)$$

$$\sigma_E = 5.47 \exp(-1.272 \times 10^4 / T) + \dot{D}(x) \cdot 1.62 \times 10^{-21} \cdot \exp(-9.38 \times 10^2 / T) \quad (3)$$

ここで $\dot{D}(x)$ は4.3項で後述するように、ガラスブロック試料深さ x (cm)における吸収線量率(rad/h)である。得られた σ_D と σ_E を吸収線量率 $2 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$ rad/hをパラメーターとして示したのがFig. 8である。

今回の照射実験の領域（線量率 2×10^5 R/h、温度 $10 \sim 30$ °C）では、DおよびE組成のガラスとも温度効果はそれほど顕著には現れておらず、導電率はほぼ線量率のみに依存する。しかしながらE組成ガラスでは、 2×10^5 rad/hにおいて約 30 °C以上でしだいに温度効果が大きくなり始め、 50 °C以上では導電率はほとんど温度で支配される傾向となる。一方これに対してD組成ガラスでは約 60 °C以上で温度効果が現れ始めるものの、 80 °Cにおいても導電率の増加は鈍く全体的に温度依存性は小さくなっている。

また今回の誘電破壊実験条件ではD組成とE組成間での導電率の比は、前述のように約1.3倍程度の小さな値であったが、温度 30 °Cでも 2×10^4 rad/h以下の低線量率では、その比が約3.7倍以上にも拡大し大きな温度効果が生じてくる。

4.3 ガラス試料内の線量率分布の測定

ガラスブロック内の試料深さ方向の線量率分布測定は、CTA線量計を用いて行った。ガラスブロックを2ヶ積み重ね、その間にCTAフィルム3本を挿入して20h照射した。フィルムの吸光度測定から求められた線量率分布の結果をFig. 9に示す。線量率分布は図に示すようにきれいな指数関数型の減衰を示し、ガラスブロック前面の線量率を1に規格化した場合、分布の形は最小2乗法による近似から $y = \exp(-0.215 \cdot x)$ で表された。ここで y は相対線量率、 x はガラスブロックの深さ(cm)である。

4.4 ガラス試料内温度の推定

ガラス試料内の温度を直接測定することは困難であるが、前報においてすでに照射線量率に対する

ガラスブロック中と室温との温度差の関係が求められている。このため今回についても両者の温度差は変わらないと仮定し、照射室内温度のみを監視してガラスブロック中の温度を推定することとした。

前掲Table 2(a), 2(b)に示されているように照射室内温度は夏期で $27^{\circ}\text{C} \sim 32^{\circ}\text{C}$ 、冬期で約 $10 \sim 26^{\circ}\text{C}$ であった。したがって前報の実験で求められたガラスブロック内の温度と室温との温度差約 3°C （照射線量率 $2 \times 10^5 \text{ R/h}$ ）を加算した値を、照射中の試料内温度とみなした。

4.5 ガラス試料の比誘電率測定

ガラス試料の比誘電率は、内部電界の絶対値に影響する因子となるのでその測定を行った。測定器はMulti Frequency LCR meter, Model 4275A (YHP製)を用い、Resistivity cell 16008A中にガラス試料をセットした。ガラス試料は 100×100 の大きさであり、厚さ2mmの平板状で両面研磨したものを用い、さらに測定前には両面をよく洗浄した。測定周波数は $10 \text{ k} \sim 10 \text{ MHz}$ としたが、この範囲での試料の静電容量はD組成およびE組成ともほとんど同一であった。

測定の一例をFig. 10に示すが、静電容量は 10 MHz での測定点を除くと $6.6 \sim 6.8 \text{ pF}$ となっている。これらのデータをもとにしてCole-Coleプロットを行い、比誘電率(ϵ_{s0})などを求めた。E組成およびD3組成試料について $\epsilon_{s0} = 7.96$ 、D2組成については $\epsilon_{s0} = 7.86$ と見積られた。

4.6 諸定数および電荷蓄積の計算

電荷蓄積の計算に必要なガラス試料の各種定数の値をTable 4に示す。組成Dと組成Eのガラスについては、構成素材化合物の微量成分の配合が若干異なるものと考えられるが、これは吸収係数などの定数値にはほとんど影響を与えないので、各種定数は前報で用いた値をそのまま使用した。

電荷挙動の計算についても、前報に示した連続方程式およびポアソン方程式により、差分法を用いてFACOM M-200コンピューターによって実行した。ガラスブロック厚 10 cm を 100 分割し、さらに微小計算時間 Δt を最大計算時間の約 $1/10^5$ （例えば最大計算時間 10^8 s の場合には、 $\Delta t = 10^3 \text{ s}$ 程度）にすることにより、CPU timeを2分以内に圧縮した。また電界が飽和に達するのに長時間を要すると予想されたこと、解析方法が差分法であることなどを考慮して、倍精度計算とした。

なお今回は照射後の熱処理効果も多少検討したので、照射時における Δt と試料温度および照射後の経過（アニール）時の Δt と試料温度とは、互いに独立に変化できるように計算プログラムの一部改造を行った。

Table 4 電荷蓄積の解析に必要なF 3 6 N ガラスの定数および係数

Effective atomic number	39.9
Averaged atomic weight	97.3
Mass attenuation coefficient	0.0570 cm ² /g
Mass energy absorption coefficient	0.0285 ₅ cm ² /g
Density	3.6 ₂ g/cm ³
Mean projected range for primary electrons by Co-60 gamma-rays	0.1096 g/cm ²
Mean projected range for secondary electrons by Co-60 gamma-rays	0.03096 g/cm ²
Mean mass attenuation coefficient for secondary scattered gamma-rays of Co-60	0.0797 cm ² /g
Mean mass Compton attenuation coefficient for secondary scattered gamma-rays of Co-60	0.0556 cm ² /g

Static dielectric constant (measured value)	7.86 - 7.96

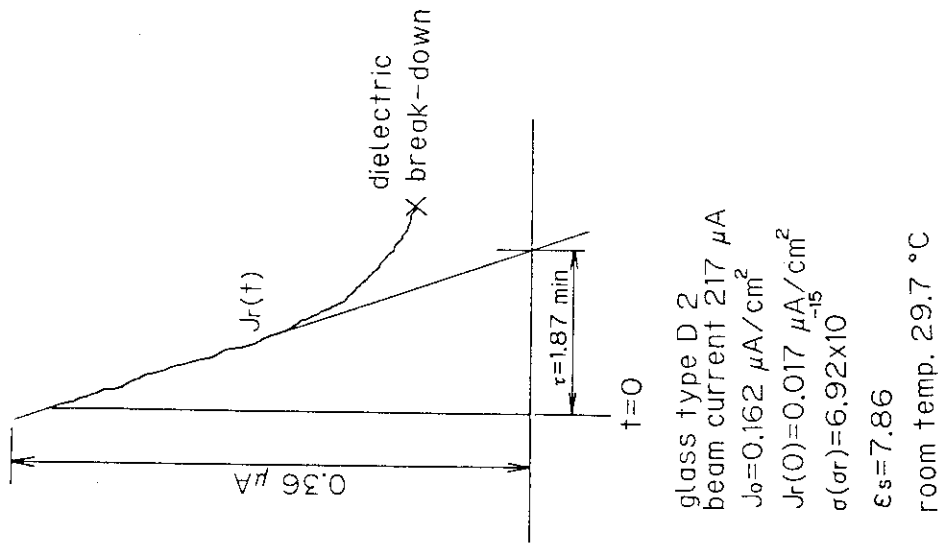


Fig. 5 F 3 6 N (D 2) ガラスからの背面電極電流測定
 の一例 (この測定では測定開始後約 2.3 min で、
 試料中に誘電破壊が発生した)

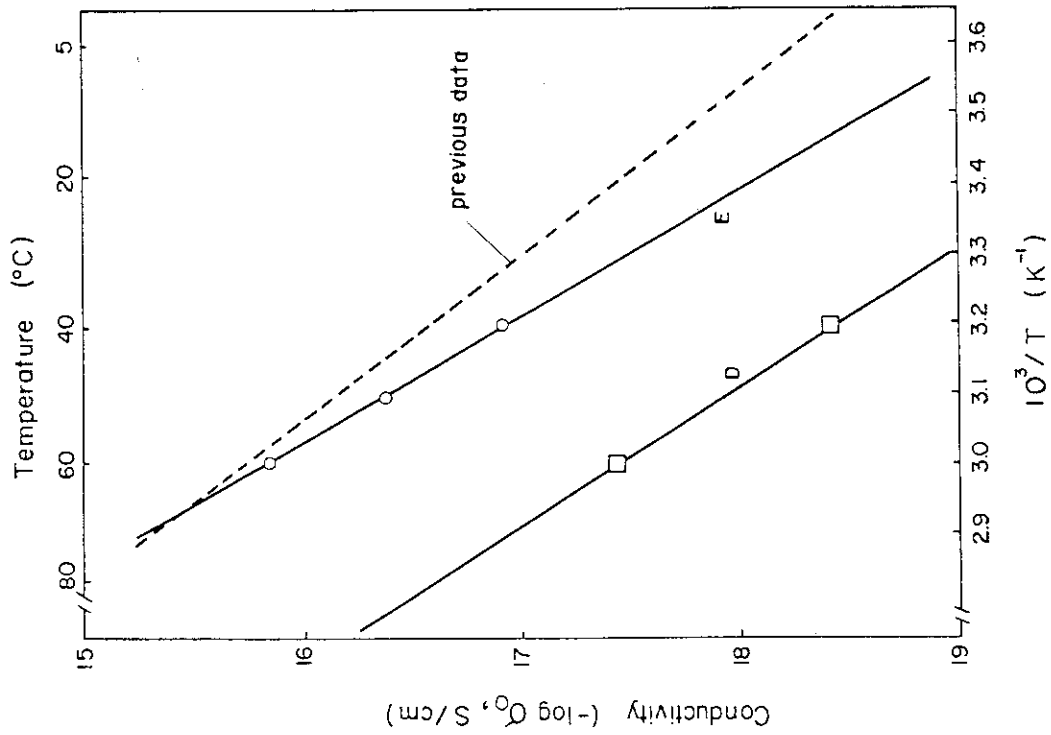


Fig. 4 非照射下導電率 (σ_0) の温度依存性

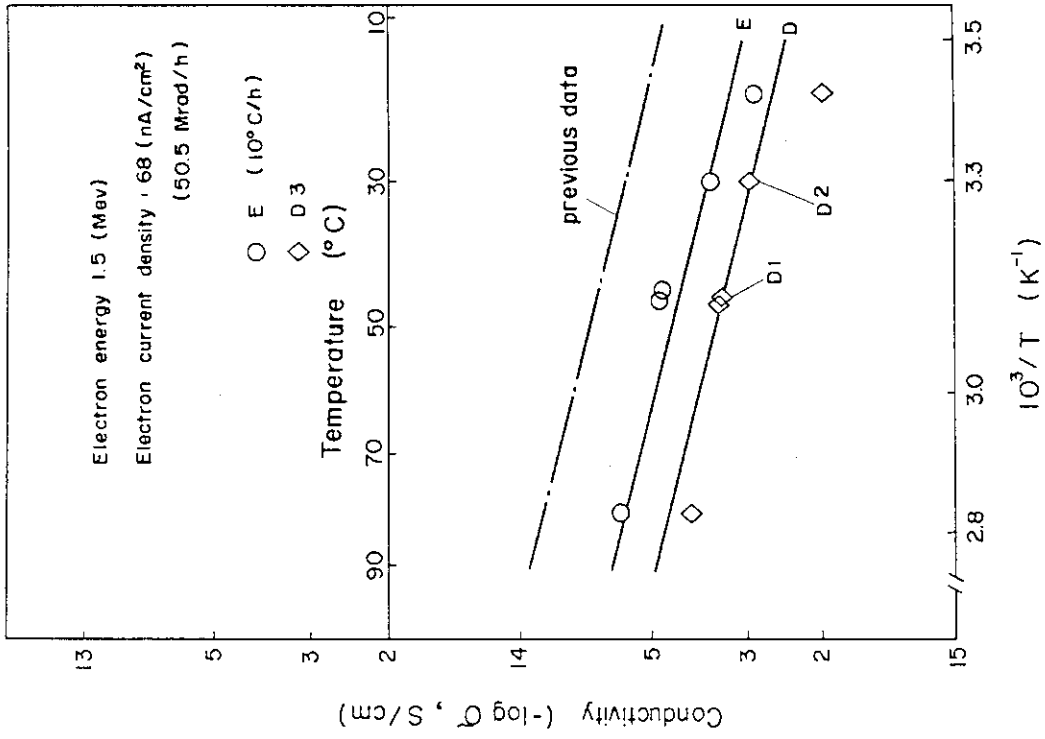


Fig. 7 EおよびDタイプのF36Nガラス導電率の温度依存性 (測定条件: 電子線エネルギー1.5 MeV, 線量率50 Mrad/h)

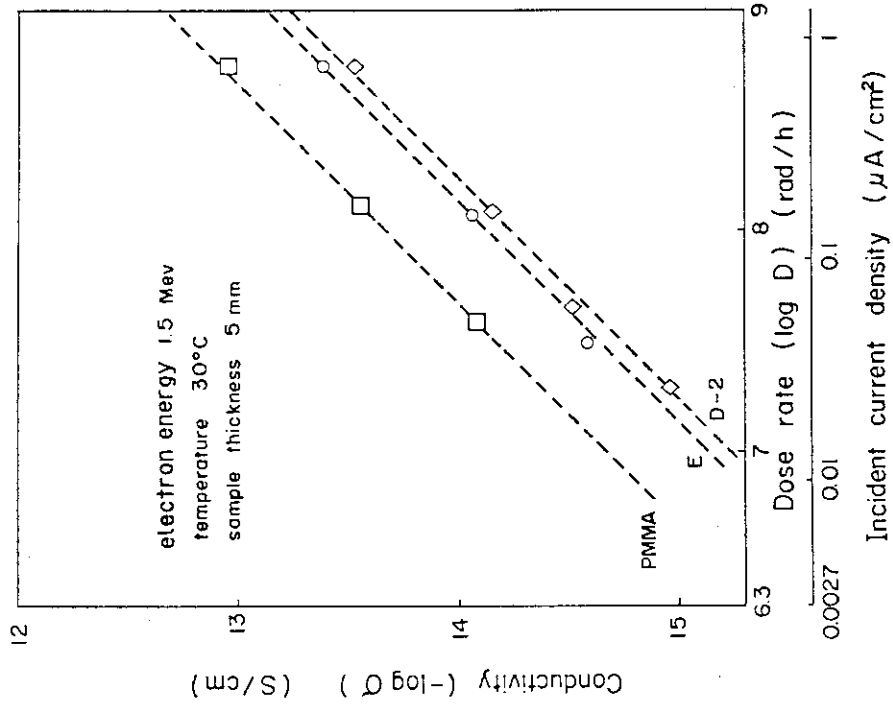


Fig. 6 温度30°CでのPMMAとF36Nガラス導電率の線量率依存性

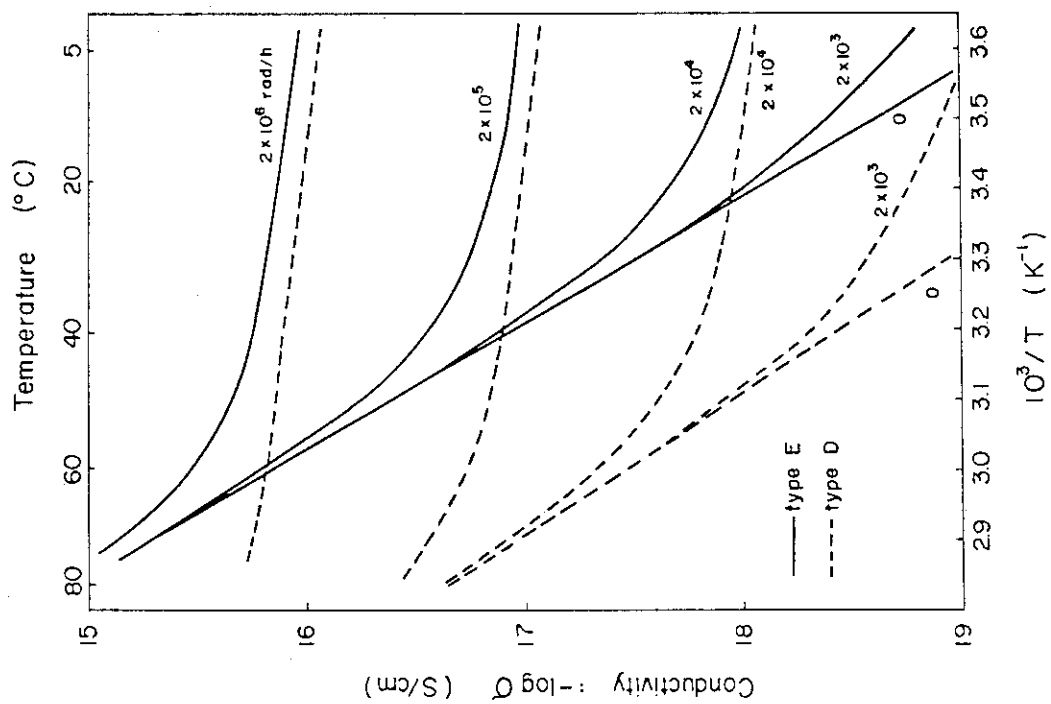


Fig. 8 線量率 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6$ rad/h における F 36 N ガラス導電率の温度依存性

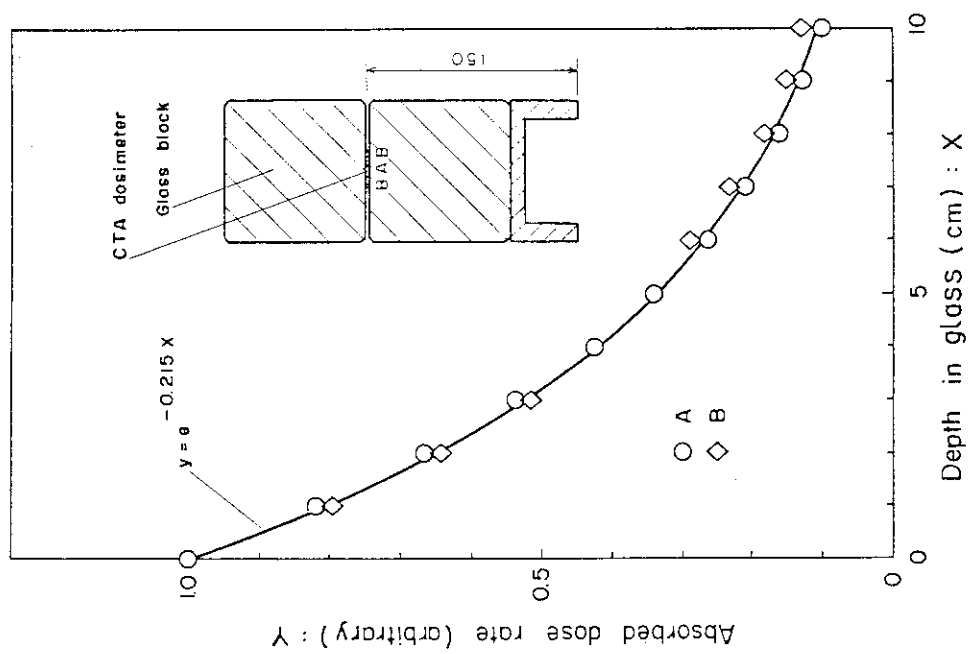


Fig. 9 CTA フィルム線量計による 1.0 cm 厚さの F 36 N ガラスブロック中の相対吸収線量率分布

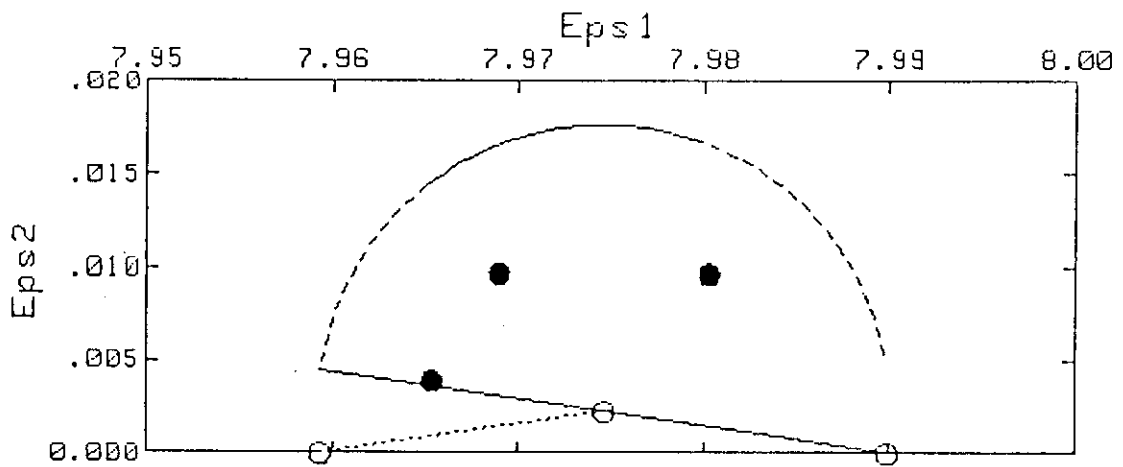
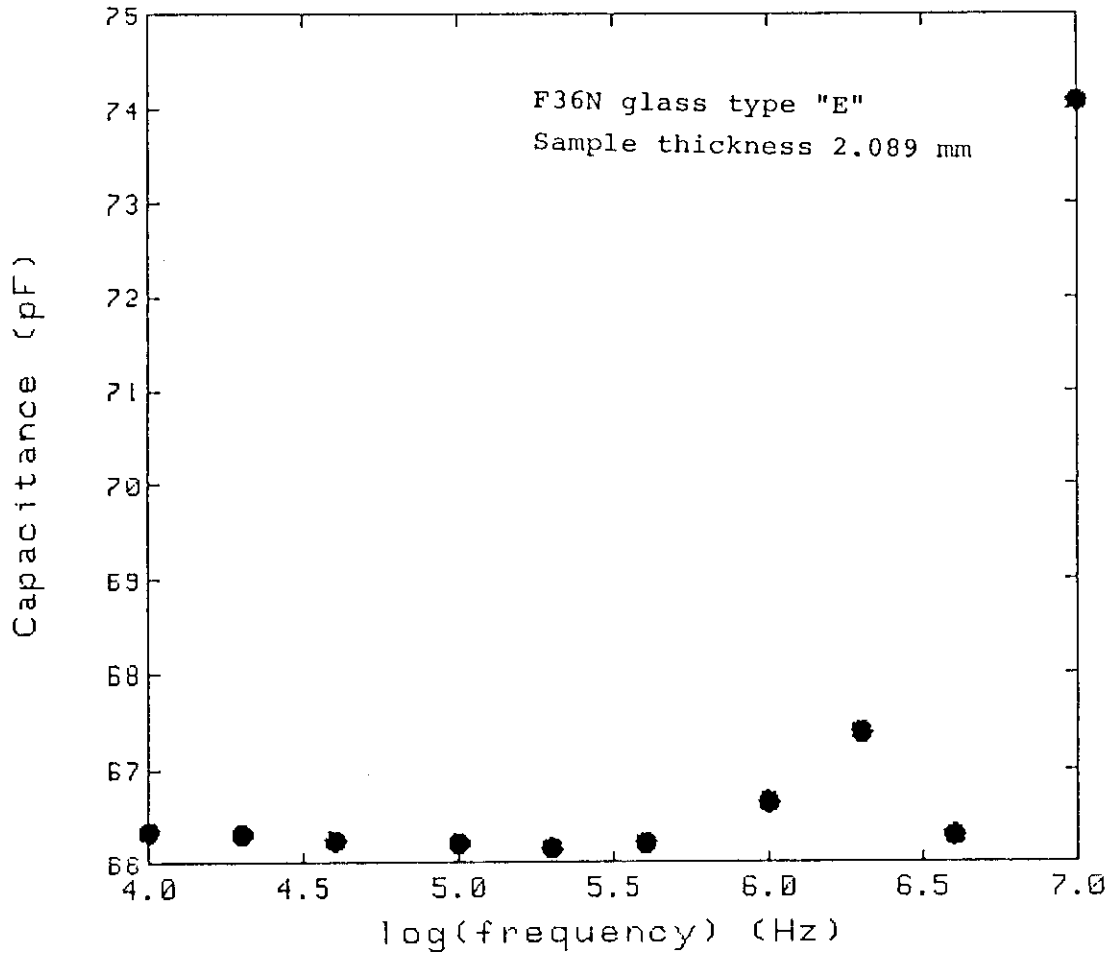


Fig. 10 EタイプF 36N ガラスの静電容量測定とそのCole-Coleプロット



Photo. 7 照射下導電率の測定時に発生したF 3 6 N ガラス板中のリヒテンベルグクラック

5. 電荷蓄積の解析結果および考察

ガラス内部における過剰電荷蓄積の解析^{13)~16)}については、前報と同様の方法を用いた。照射条件のモデル、境界条件、および高電界下でのオーム則の仮定なども同様とした。また今回は照射したガラスブロックの熱処理効果についても、若干の補足計算および検討を行った。

5.1 ガラスブロック内の電荷蓄積

Fig. 1 1にD組成およびE組成ガラスブロック内の電荷蓄積分布の変化を示す。照射線量率（照射方向表面） $2 \times 10^5 \text{ R/h}$ 、照射温度 30°C において、照射時間 $5 \times 10^7 \text{ s}$ （ $\sim 14000 \text{ h}$ ）までの計算を実行した。電荷密度は照射時間とともに増大し、 $1 \times 10^6 \text{ s}$ 程度ではほぼ飽和状態に達している。電荷密度は照射時間が短い間は、ガラスブロック内の線量率分布を反映した形となっているが、照射時間が増加するにつれて、前面よりむしろ背面で高い値を示すようになる。これは前面側では背面側に比較して過剰電荷の発生は多いが、一方で放射線誘起導電率 σ_r も大きいいため漏洩の割合も大きく、相対的に電荷密度が小さくなるものと考えられる。背面の電荷密度が大きくなる傾向は、導電率が低いD組成について顕著である。

ここで前掲Fig. 1 1の結果をもとにして、立方体のガラスブロックにおける飽和過剰電荷密度のバルク全体平均値を求めてみる。過剰電荷密度は、ガラス深さ方向について1次元分布のみを考慮し、平面方向での広がりは一様であると仮定した。その結果、実際に行われた照射試験に近い温度 30°C 、照射線量率 $2 \times 10^5 \text{ R/h}$ の場合、D組成で約 $9.4 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^3$ 、E組成では約 $4.0 \times 10^{-7} \text{ C/cm}^3$ と推定された。したがってこの数値からD組成の方がE組成の約2.4倍の平均電荷密度を有しているものと考えられた。

この結果は前述3.2項におけるD組成とE組成間でのリヒテンベルグクラック発生領域の容積比約2.7倍とほとんど等しくなっている。したがって誘電破壊規模の指標となるリヒテンベルグクラックの発生範囲という巨視的な実験結果と、バルク全体での平均過剰電荷密度という理論的な数値とがほぼ対応していることを示すものであり、興味深い事実と考えられる。

5.2 電荷蓄積の線量率効果

Fig. 1 2とFig. 1 3にはそれぞれD組成とE組成ガラスについて、照射温度 30°C 、照射線量率 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6 \text{ R/h}$ の範囲での、前面および背面の電界値の時間的变化を示す。D組成では線量率3桁の変化によって、飽和電界値の変化は1桁以下の範囲にとどまっているのに対して、E組成では飽和電界値は約2桁の範囲にわたって変化している。この現象は前掲Fig. 8で明らかのように、E組成は照射温度 30°C では約 $2 \times 10^4 \text{ R/h}$ 以下の領域で σ_r の温度効果が支配的であるが、D組成は $2 \times 10^3 \text{ R/h}$ の領域でも σ_r による線量効果の寄与が大きくなっていることから説明できる。

飽和に達するまでの時間は、導電率の高いE組成の方が短いものの、D組成で約 10^6 s （ $\sim 300 \text{ h}$ ）

E 組成で約 3×10^5 s (~ 80 h) となっており、いずれも 2×10^5 R/h で 100 h の実験条件において、内部電界はほぼ飽和に達していることがわかる。

Fig. 14 には、計算によって得られた 2 種類のガラスの飽和電界値の線量率依存性を示す。D 組成の背面側電界強度は 10^3 R/h で約 1 MV/cm の高い値から線量率の増大に伴って徐々にゆるやかに増加し、 10^5 R/h では約 9 MV/cm という大きな飽和値に達している。一方 E 組成では $10^3 \sim 10^7$ R/h の線量率範囲において、電界強度には特に飽和する傾向は現れず、数 10 kV/cm ~ 9 MV/cm 程度まで大きく変化している。しかしながらガラスブロック前面側の電界強度は、2 種類のガラス組成いずれの場合も約 10^5 R/h で平衡になり、それ以上の線量率では一定値となっている。

30°C 、 2×10^5 R/h の実験条件では、前面と背面側の飽和電界値は、D 組成の場合それぞれ 4.0 、 9.0 MV/cm、E 組成の場合同様に 3.0 、 2.4 MV/cm と推定された。

予測されたこれらの飽和電界値は、通常の鉛ガラスの絶縁耐力とされている $50 \sim 200$ kV/cm の範囲をはるかに越えている。また以前に行われた日本光学での直流絶縁耐力の実測値 $260 \sim 290$ kV/mm と比較しても、この値と同等あるいはそれを上回る大きな値となっている。以上の計算結果は、ガラスブロックの誘電破試験結果ともよく対応しており、計算による解析の信頼性が再確認されたものと考えられる。

5.3 電荷蓄積の温度効果

Fig. 15, Fig. 16 に線量率 2×10^5 R/h、照射温度 $5 \sim 40^\circ\text{C}$ における前面および背面の電界の変化を示す。2 種類のガラスについて、導電率の温度変化に対する相対的な照射時間依存性は、ほぼ同様の傾向が現れている。しかしながら E 組成の方が D 組成に比較して、電界の飽和時間がやや短いこと、飽和電界値は低いとその温度依存性が大きいこと、および温度 30°C と 40°C の間で前面と背面の電界値が逆転していること、などの特徴がみられる。

さらにこれら常温付近の温度領域での飽和電界値の様子を Fig. 17 に示す。約 20°C 以上の温度で急激な電界値の減少がみられる E 組成に対して、D 組成での電界値はあまり変化せず、全体として約 3 倍の変動幅にとどまっている。また 2×10^5 R/h の線量率で $0 \sim 50^\circ\text{C}$ の温度範囲では、D 組成の導電率は主として線量率に支配されるが、E 組成に関しては 20°C 以上の領域で、導電率はほぼ温度に依存して変化していることが分かる。これらの現象は、やはり前掲 Fig. 8 に示した導電率の線量率および温度依存性の傾向をそのまま反映したのと考えられる。

ここで導電率の温度依存性と線量率依存性との相互関係に着目すると、E 組成では線量率の低下とともに電界飽和値も顕著に低下するため、線量率 2×10^3 R/h 程度であっても温度 30°C では誘電破壊は発生しないと推測される。しかし温度が 10°C 付近まで低下した場合には、誘電破壊の可能性が考えられる。一方 D 組成では、照射条件 2×10^3 R/h、 30°C でも電界飽和値は 1 MV/cm に達しており、E 組成に比べると低線量率でも誘電破壊が発生しやすい状態と推定される。ただし低線量率での電界飽和値は、非照射下の導電率 σ_0 の寄与が支配的であり、計算値は σ_0 の実測値の信頼性に依存することとなる。

5.4 電荷蓄積の熱処理効果

Fig. 18およびFig. 19には2種類のガラスを $2 \times 10^5 \text{ R/h}$; 30°C で内部電界が飽和に達するまで照射した後、直ちに試料温度を熱処理温度まで上昇させた場合の計算による内部電界減少の様子を示す。

E組成ガラス (Fig. 19参照) では照射後における 80°C , 20minの熱処理により、電界値は初期値の $1/10$ 程度にまで減衰するが、D組成では $1/10$ まで低下するのに約18hを要し、減衰速度は50分の1以下となっている。照射後の電荷漏洩はほとんど非照射下導電率に依存するので、この減衰速度は 80°C における両者の導電率の比3.5に近い値になっているものと考えられる。

しかし熱処理効果の計算では、 30°C での照射終了直後に試料温度が不連続的に熱処理温度まで変化すると仮定しているため、実際の電気炉を用いた実験では、内部の電荷密度の減少は計算での評価よりゆるやかに進行するものと推測される。

ここでFig. 18の計算結果と実際の実験結果との簡単な比較を行ってみる。D組成ガラス2ヶについて約 80°C , 2hの熱処理の結果は、前述のようにリヒテンベルグクラックは発生したが、その大きさおよび範囲は熱処理しないガラスブロックに比べて、かなり縮小した。さらに誘電破壊試験でリヒテンベルグクラックが発生しなかった 60°C , 5日間 ($\sim 4.3 \times 10^5 \text{ s}$) の熱処理後の電界値は、照射直後の飽和値の約 $1/9$ に減衰しているが、 80°C , 2hでは約10%の減衰にとどまっている。このような計算と試験結果との比較によっても、熱処理効果の計算はガラスブロックの電荷漏洩の挙動を矛盾なく説明しているものと考えられる。

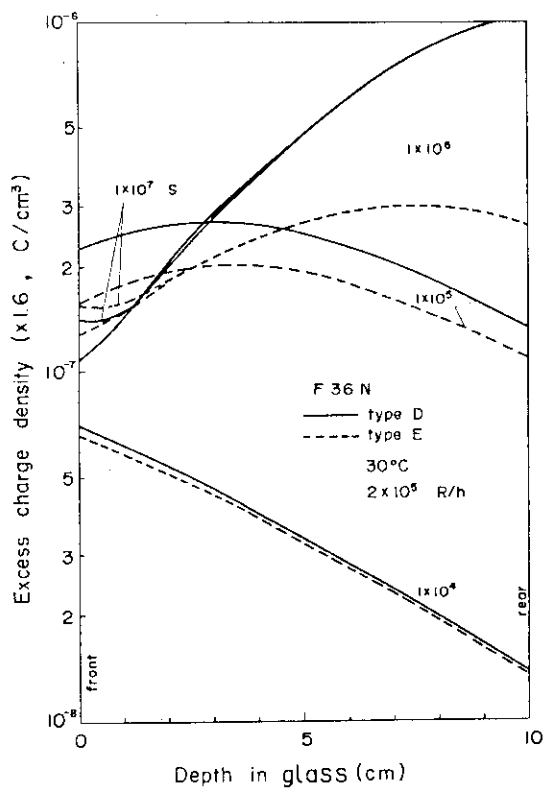


Fig. 11 10 cm厚さのF 36 N ガラスブロック中の過剰電荷密度の分布 (照射線量率 $2 \times 10^5 \text{ R/h}$, 温度 30°C)

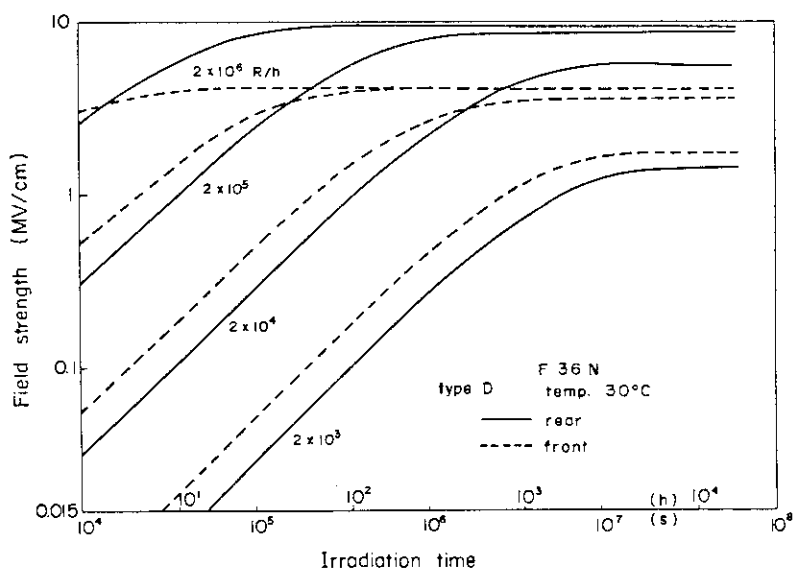


Fig. 12 DタイプF 36 N ガラスにおける照射時間と電界強度との関係 (照射線量率 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6 \text{ R/h}$, 温度 30°C)

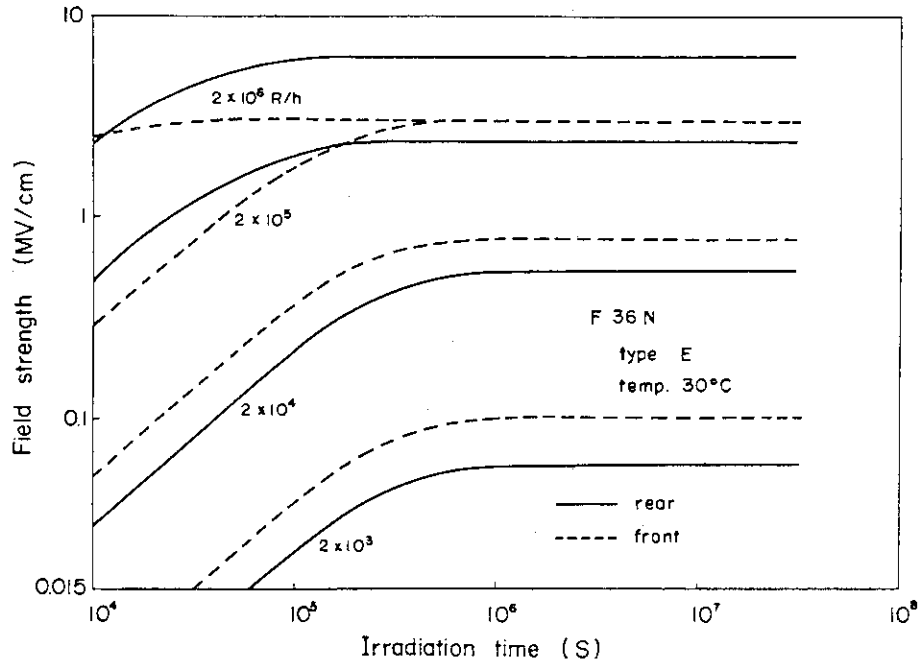


Fig. 13 EタイプF 36 N ガラスにおける照射時間と電界強度との関係
(照射線量率 $2 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6$ R/h, 温度 30°C)

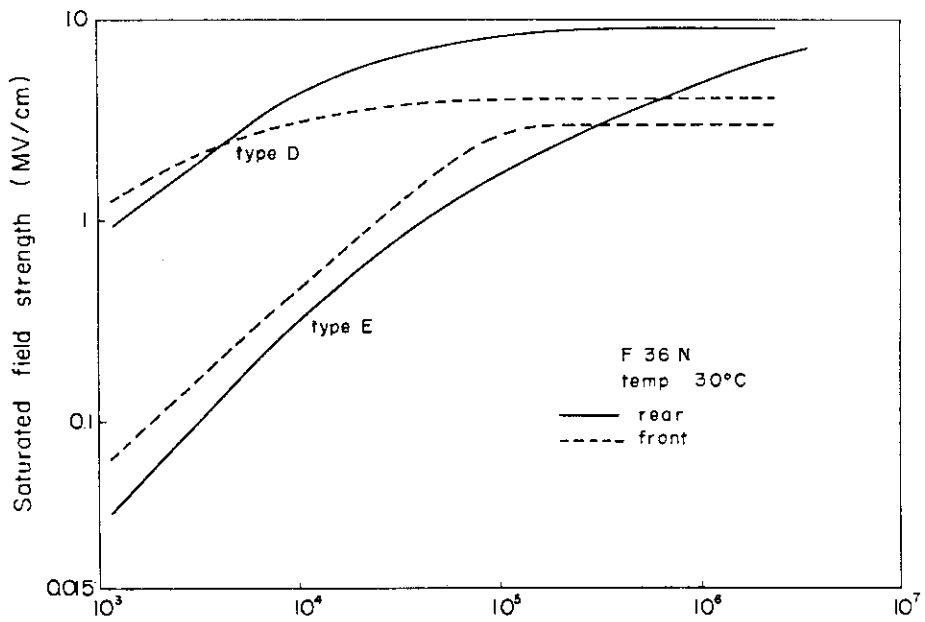


Fig. 14 DおよびEタイプF 36 N ガラスブロック表面での照射線量率と飽和電界強度との関係

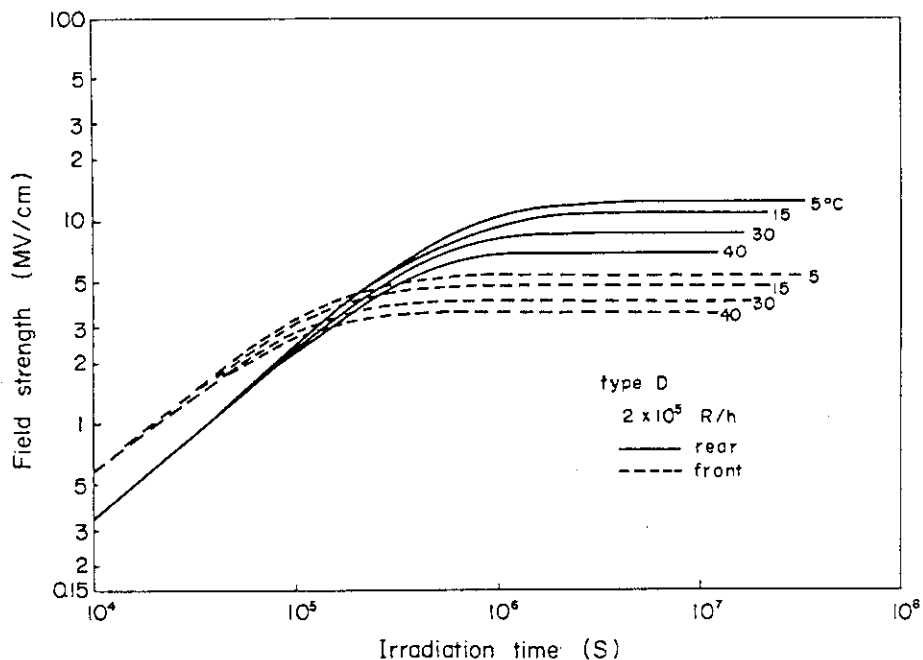


Fig. 15 DタイプF 3 6 N ガラスの照射時間に対する電界強度の変化 (照射線量率 2×10^5 R/h, 照射時間 $10^4 \sim 10^8$ s)

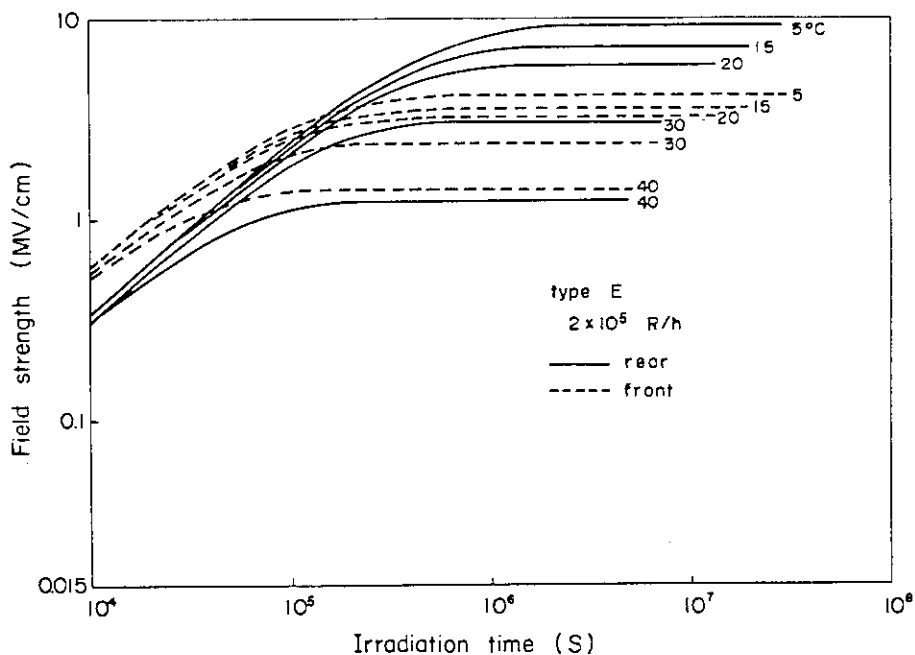


Fig. 16 EタイプF 3 6 N ガラスの照射時間に対する電界強度の変化 (照射線量率 2×10^5 R/h, 照射時間 $10^4 \sim 10^8$ s)

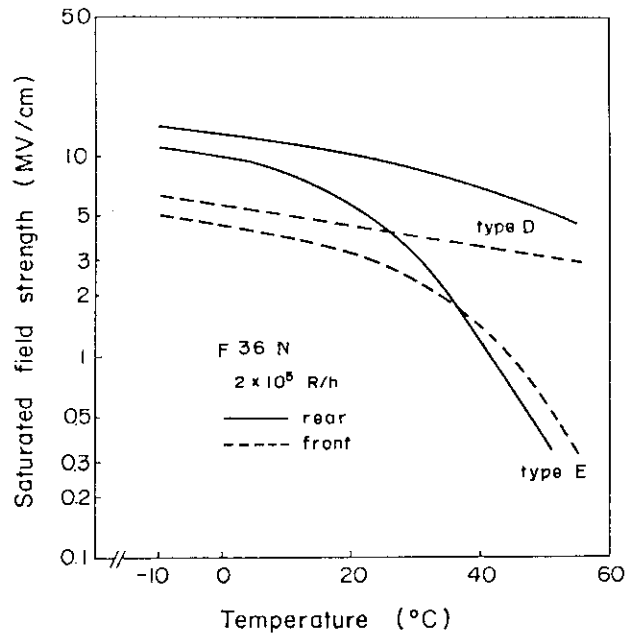


Fig. 17 照射線量率 2×10^5 R/h における飽和電界強度の温度依存性

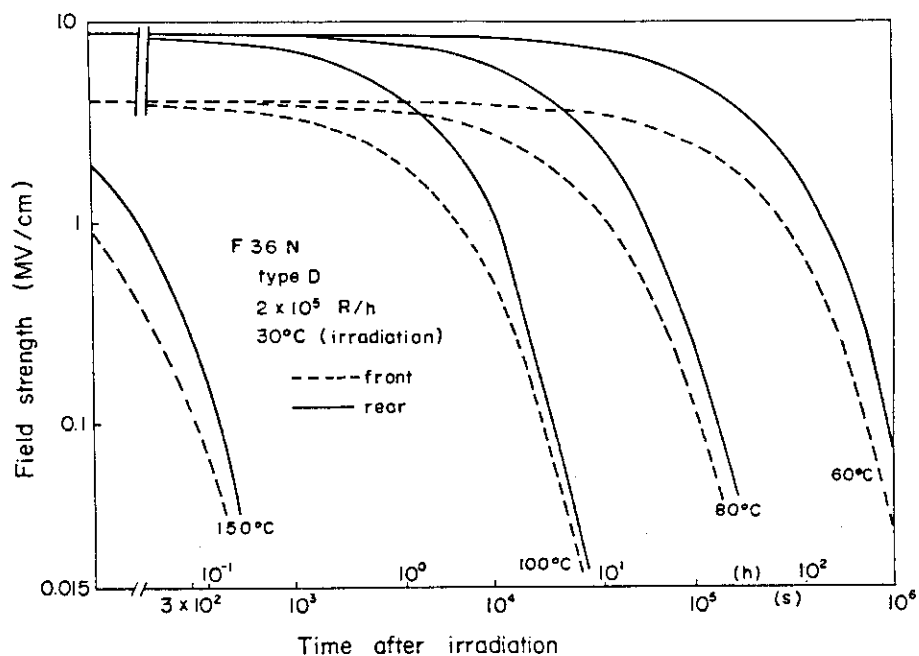


Fig. 18 照射後保存温度を変化した場合のDタイプF 36 N ガラス中の過剰電荷漏洩による電界強度の減少 (30°C, 2×10^5 R/h で 10^6 s 照射後, 飽和電界強度はガラスブロック前面で約 4 MV/cm, 背面で約 9 MV/cm)

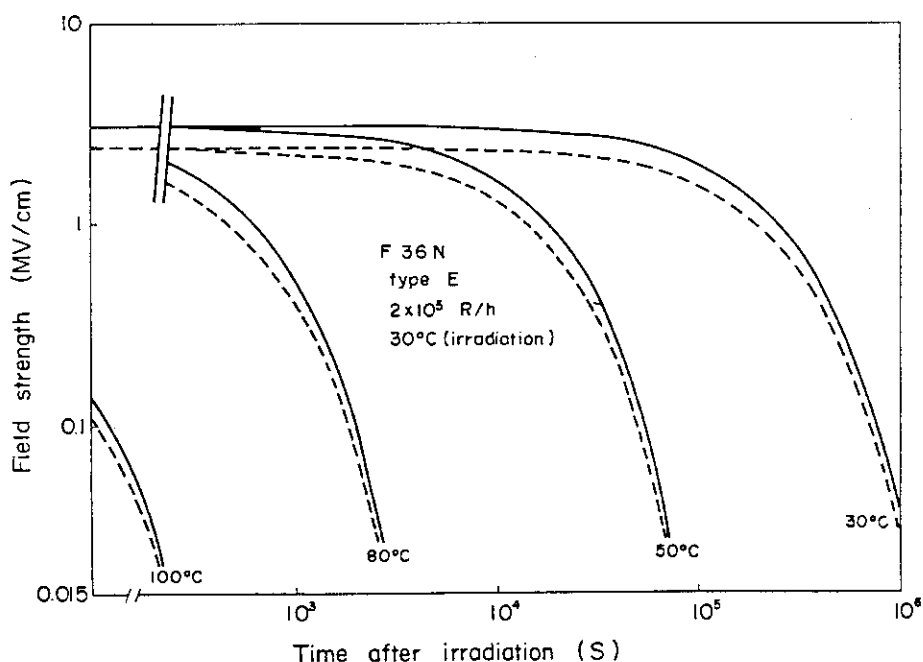


Fig. 19 照射後保存温度を変化した場合のEタイプF 36 N ガラス中の過剰電荷漏洩による電界強度の減少 (30°C, 2×10^5 R/h で 10^6 s 照射後, 飽和電界強度はガラスブロック前面で 2.4 MV/cm, 背面で約 3 MV/cm)

6. ま と め

- (1) D 組成とE 組成のF 3 6 N ガラスブロック試料は、照射線量率 $2 \times 10^5 \text{ R/h}$ 、照射温度 30°C 、照射時間 100 h の条件で照射した後の誘電破壊試験により、すべて放電破壊した。ただし破壊の規模（リヒテンベルグクラック図形）は、D 組成の方がE 組成のそれよりも大きかった。また照射時期についての関係では、冬期の方が夏期よりも大きな破壊を示した。
- (2) D 組成のガラスについて、内部歪が誘電破壊に及ぼす影響を調べたが、 $2 \sim 700 \text{ nm/10 cm}$ 程度での内部歪の異なる試料間では、誘電破壊における外観上の差異は見られなかった。
- (3) Split Faraday cup 法によって測定されたF 3 6 N ガラスの照射下導電率については、D 組成とE 組成との間にほとんど差異は見られなかった。
- (4) 飽和過剰電荷密度のバルク全体平均値は、誘電破壊を行った照射条件において、D 組成ガラスの方がE 組成の約 2.4 倍となった。一方誘電破壊試験でガラスブロック中に発生したりヒテンベルグクラックの目視観察での大きさは、D 組成ガラスがE 組成の約 2.7 倍であり、両者の間に対応関係のあることが示唆された。
- (5) 過剰電荷蓄積によるガラス内部電界の最大値は、電荷蓄積の解析の結果、D 組成で 9 MV/cm 、E 組成で 3 MV/cm と見積られ、いずれも絶縁耐力の限界を越えることが予測された。この計算結果は、D 組成およびE 組成のガラスブロックすべてが、照射試験により誘電破壊した実験結果と明確な相関関係を示している。また観測された破壊の規模についてのE 組成とD 組成との差異および冬期と夏期の照射時期による差異も、電界値の計算結果からよく説明できる。
- (6) 蓄積電荷の漏洩効果についても、 80°C 、 2 h および 60°C 、5 日間の熱処理を行った後の誘電破壊試験の結果は、計算による解析結果とよく対応する。したがって長期間照射された放射線遮蔽窓ガラスの再研磨・加工などに際しては、事前に適切な熱処理を行うことにより、誘電破壊の発生を抑制できる可能性が高いと考えられる。

謝

辞

誘電破壊試験および導電率測定に用いたF 3 6 N ガラス試料の製作、非照射下導電率の測定などにご協力頂いた日本光学工業（現ニコン）(株)刈谷道朗、鈴木正平の両氏に深く謝意を表します。
またガラスの比誘電率測定を行っていただいた高崎研究所の岡田漱平氏に感謝いたします。
さらに本研究についていろいろとご指導して頂いた同研究所の鷲野正光氏に謝意を表します。

6. ま と め

- (1) D 組成とE 組成のF 3 6 N ガラスブロック試料は、照射線量率 $2 \times 10^5 \text{ R/h}$ 、照射温度 30°C 、照射時間 100 h の条件で照射した後の誘電破壊試験により、すべて放電破壊した。ただし破壊の規模（リヒテンベルグクラック図形）は、D 組成の方がE 組成のそれよりも大きかった。また照射時期についての関係では、冬期の方が夏期よりも大きな破壊を示した。
- (2) D 組成のガラスについて、内部歪が誘電破壊に及ぼす影響を調べたが、 $2 \sim 700 \text{ nm/10 cm}$ 程度での内部歪の異なる試料間では、誘電破壊における外観上の差異は見られなかった。
- (3) Split Faraday cup 法によって測定されたF 3 6 N ガラスの照射下導電率については、D 組成とE 組成との間にほとんど差異は見られなかった。
- (4) 飽和過剰電荷密度のバルク全体平均値は、誘電破壊を行った照射条件において、D 組成ガラスの方がE 組成の約 2.4 倍となった。一方誘電破壊試験でガラスブロック中に発生したりヒテンベルグクラックの目視観察での大きさは、D 組成ガラスがE 組成の約 2.7 倍であり、両者の間に対応関係のあることが示唆された。
- (5) 過剰電荷蓄積によるガラス内部電界の最大値は、電荷蓄積の解析の結果、D 組成で 9 MV/cm 、E 組成で 3 MV/cm と見積られ、いずれも絶縁耐力の限界を越えることが予測された。この計算結果は、D 組成およびE 組成のガラスブロックすべてが、照射試験により誘電破壊した実験結果と明確な相関関係を示している。また観測された破壊の規模についてのE 組成とD 組成との差異および冬期と夏期の照射時期による差異も、電界値の計算結果からよく説明できる。
- (6) 蓄積電荷の漏洩効果についても、 80°C 、 2 h および 60°C 、5 日間の熱処理を行った後の誘電破壊試験の結果は、計算による解析結果とよく対応する。したがって長期間照射された放射線遮蔽窓ガラスの再研磨・加工などに際しては、事前に適切な熱処理を行うことにより、誘電破壊の発生を抑制できる可能性が高いと考えられる。

謝 辞

誘電破壊試験および導電率測定に用いたF 3 6 N ガラス試料の製作、非照射下導電率の測定などにご協力頂いた日本光学工業（現ニコン）(株)刈谷道朗、鈴木正平の両氏に深く謝意を表します。またガラスの比誘電率測定を行っていただいた高崎研究所の岡田漱平氏に感謝いたします。さらに本研究についていろいろとご指導して頂いた同研究所の鷺野正光氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Culler V. : Proc. 7th Lab. and Conf., Cleveland, 120 (1959)
- 2) Lamb E. : USAEC Report, ORNL-CF-60-12-13 (1960)
- 3) Furuta J. and Okamoto S. : Annual Report, Radiation Center of Osaka Prefecture, Vol. 2, 70 (1961)
- 4) 第4回日本アイソトープ会議報文集 P. 123 (1961)
- 5) Yamamoto K. and Tsuchiya M. : J. Appl. Phys. 33, 3016 (1962)
- 6) 山本格治 : 応用物理 31, 377 (1962)
- 7) Rizzo F. X. et al., Proc. 11th Hot Lab. Equip., ANS (1963)
- 8) Hardtke F. C. and Ferguson K. R., Proc. 11th Hot Lab. Equip., ANS (1963)
- 9) 山本格治 : Isotope News, p. 7 June (1972)
- 10) 中村義輝, 須永博美, 田中隆一 : JAERI-M 88-094 (1988)
- 11) Gross B. et al., J. Appl. Phys., 44, 2459 (1973)
- 12) Frederickson A. R., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-24, No 6 (1977)
- 13) Gross B., "Electrets", Section 4, 217 (1980)
- 14) 田中隆一, 中村義輝, 須永博美他 : EIM-82-24 (1982)
- 15) 田中隆一 : 放射線 vol. 9, No 3 (1983)
- 16) 田中隆一 : EIM-87-39 (1987)