

JAERI-M
9517

X線照射によるポロイダル磁場コイル
絶縁物内の電荷蓄積

1981年6月

田中 隆一・須永 博美・田村 直幸・安東 俊郎
家田 正之*・門谷 建蔵**

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.

X線照射によるポロイダル磁場コイル絶縁物内の電荷蓄積

日本原子力研究所高崎研究所開発試験場

田中 隆一・須永 博美・田村 直幸

安東 俊郎⁺・家田 正之^{*}・門谷 建蔵^{**}

(1981年5月13日受理)

臨界プラズマ試験装置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のコイル絶縁体内の過剰電荷の蓄積挙動を主として計算により推定した。計算は実機条件における絶縁体(エポキシ樹脂)内の吸収線量率分布および過剰電荷堆積率分布の推定ならびに照射下および照射停止後の放射線誘起電気伝導度の測定をもとにして、空間電荷の挙動に関する連続方程式およびポアソン方程式を解いた。その結果最も厳しい条件のもとでは約20回の放電(1回の放電時間5秒)で絶縁体表面の電界強度は5 MV/cmを越え、その電界飽和値は10 MV/cm以上に達することが明らかとなった。また断続照射の繰返しにおける照射停止中の電荷漏洩は電界飽和値にはあまり影響を与えないとみなされた。

以上の結果から、絶縁体表面近傍では局所的な絶縁破壊を起す可能性があるが、不平等電界であるため、破壊は内部に進行しないと推論された。また、照射下におけるX線誘起電流と内部電界との関係についても検討を行った。

+ 東海研究所大型トカマク開発部

* 名古屋大学工学部

** 日立製作所 日立研究所

Charge Accumulation in Insulators of Poloidal
Field Coils Due to X-ray Irradiation

Ryuichi TANAKA, Hiromi SUNAGA, Naoyuki TAMURA,
Toshiro ANDO[†], Masayuki IEDA* and Kenzo KADOTANI**
Pilot Scale Research Station, Takasaki Radiation
Chemistry Research Establishment, JAERI

(Received May 13, 1981)

The behavior of excess charge accumulation in the insulators of the poloidal field coils of the JT-60 (critical plasma facility) when exposed to hard X-rays produced on runaway discharge was estimated mainly by calculations. The continuity and Poisson's simultaneous equations concerning the excess charge were solved based on estimating the distributions of absorbed dose rate and excess charge deposition rate in the insulator (epoxy resin) under the irradiating condition assumed in the JT-60 and on measured radiation induced conductivity in the insulator under and after irradiation. Under the most severe irradiating condition, calculated values of electric field strength at the surface of the insulator exceeds 5 MV/cm after about 20th runaway discharge (duration time : 5 sec per on discharge), and the saturation value exceeds 10 MV/cm. Since the delayed conductivity is very small, the charge leakage for the time interval between discharges influences the saturated value very little. We consider that local dielectric breakdowns may occur near the surface of the insulator, but it does not propagate into deeper region owing to the non-uniform field. The relation between X-ray induced current under irradiation and inner electric field was also examined.

† Division of Large Tokamak Development, Tokai Research Establishment, JAERI.

* Nagoya University, Faculty of Engineering.

** Hitachi Ltd., Hitachi Research Laboratory.

Keywords:

Tokamak, Runway Discharges, Hard X-rays, Poloidal Field Coils, Electrical Insulation, Epoxy Resin, Excess Charge Deposition, Charge Accumulation, Radiation Induced Conductivity, Electric Field Strength, Dose Rate Distribution, Split Faraday Cup, Delayed Conductivity, Dielectric Breakdown, Electronic Equilibrium, X-ray Induced External Current.

目 次

1. まえがき	1
2. X線照射	2
2.1 X線パラメータとコイル絶縁	2
2.2 基本的な仮定条件	2
2.3 電子平衡条件	3
3. 照射下での電荷蓄積	5
3.1 計算法	5
3.2 絶縁物試料	5
3.3 吸収線量率分布	5
3.4 電荷堆積率分布	6
3.5 放射線誘起電導度の測定	7
3.6 計算結果	10
4. 照射後の過剰電荷の挙動	24
4.1 計算法	24
4.2 計算結果	24
5. 過剰電荷と照射下でのX線誘起電流との関係	27
5.1 理論的検討	27
5.2 実験方法	28
5.3 吸収線量率分布の測定結果	29
5.4 誘起電流の測定結果と計算結果との比較検討	29
6. 検討	35
6.1 絶縁破壊の可能性に関する検討	35
6.2 絶縁体の境界条件に関する検討	35
6.3 その他の検討	36
7. むすび	41
謝 辞	41
参考文献	42

Contents

1.	Introduction	1
2.	X-ray irradiation.....	2
2.1	X-ray parameters and coil insulation	2
2.2	Basic assumptions.....	2
2.3	Electronic equilibrium condition	3
3.	Charge accumulation under irradiation.....	5
3.1	Calculation methods	5
3.2	Samples of insulators	5
3.3	Absorbed dose-rate profile	5
3.4	Charge deposition-rate profile	6
3.5	Measurement of radiation induced conductivity	7
3.6	Calculated results	10
4.	The behavior of excess charge after irradiation.....	24
4.1	Calculation methods	24
4.2	Calculated results	24
5.	The relation between excess charge and X-ray induced external current under irradiation	27
5.1	Theoretical consideration	27
5.2	Experimental method	28
5.3	Measured results of absorbed dose-rate profile	29
5.4	Comparison of the measured results and calculated results of X-ray induced current	29
6.	Discussion	35
6.1	Consideration on dielectric breakdown.....	35
6.2	Discussion on the boundary conditions of the insulator	35
6.3	Other discussions	36
7.	Summary	41
	Acknowledgement	41
	References	42

1. ま え が き

固体絶縁物に高エネルギー電子線を照射すると、絶縁体内部に過剰電荷が堆積して内部電荷が増し、絶縁破壊を起すことがあることはよく知られている。一方X、 γ 線の場合は間接電離粒子であるため、直接的にはこうした現象の原因とはならないが、コンプトン電子や光電子の発生と熱化の挙動を通して過剰電荷が堆積する。

臨界プラズマ試験装置JT-60においては、プラズマがある条件下になると逃走電子が発生し、壁に衝突することによって硬X線が生じるが、JT-60の予想では、X線の強度は極めて高く、光子エネルギーも高い。また磁場の影響によって空気中のX線場の電子混在比は十分小さいと考えられる。このようなX線にポロイダル磁場コイルの絶縁体が曝されると、絶縁層(4~8 mm厚)全体が電子非平衡下に置かれるため、絶縁体内部に多量の過剰電荷が蓄積すると予想される。したがって、それによる空間電荷の影響はコイルの絶縁設計上十分考慮すべき問題と考えられる。この問題は誘電体現象の研究の立場および放射線物理の研究の立場から興味深い問題と思われる。

X、 γ 線に照射された絶縁体内の過剰電荷の蓄積現象については1950年代の後半に放射線遮蔽ガラスが γ 線照射によって絶縁破壊を起すことが注目されてから関心もたれるようになった。この問題に関連して、Grossら¹⁾は熱刺激電流測定によって、 γ 線照射されたホウケイ酸ガラス中に電荷が蓄積し、静電効果を示すことを見出した。Murphyら²⁾は空間電荷の堆積分布について調べた結果、⁶⁰Co γ 線に照射された絶縁体の表面近傍では正電荷が溜り、バルク領域ではマイナス電荷が溜ることを見出した。その後、異なった原子番号の物質の界面近傍での電子非平衡による電荷蓄積に関しては、モンテカルロ法などによるエネルギーおよび電荷の堆積率の計算をもとに簡単な定量的解析の試みがなされてきた。^{3~6)}特に絶縁体内部の実効電界の立上りの振舞についてはChadsey³⁾の計算の試みが注目されるが、絶縁体の境界条件は単純化されており、光子エネルギーは1 MeV以下が対象であった。X線照射下における固体絶縁物内部の電荷蓄積挙動を解析するための一般的な取扱いはまだなされていない。

本研究では、高エネルギーX線による高線量率の照射下での過剰電荷の挙動について、従来より厳密な解析計算を試みた。計算においては一次元の照射モデルを仮定し、絶縁体内の吸収線量分布および過剰電荷堆積分布をいくつかのデータをもとにして与えた。内部電界による電荷漏洩を支配する放射線誘起電導度と吸収線量率の関係は実験によって与えた。照射後の電荷挙動についてもdelayed conductivityをもとにした簡単な解析を試みた。また照射下でのX線誘起電流の測定から電界に関する情報を間接的に得るため、X線照射実験も試みた。

なお、本研究は昭和52年5月のJT-60のコイル絶縁に関する検討会における審議に基づき、名古屋大学、日立製作所、東海研究所大型トカマク開発部および高崎研究所開発試験場の共同研究の一環として実施したものであり、本研究に先立って実施された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の研究結果⁷⁾の検討会での問題提起に基づき行ったものである。

2. X線照射

2.1 X線パラメータとコイル絶縁

トカマク装置はプラズマの条件によっては逃走電子放電となることがある。⁸⁾ この場合には真空容器に取付けられている固定リミタに高エネルギー電子が衝突して硬X線が発生する。臨界プラズマ試験装置JT-60⁹⁾では逃走電子による硬X線のパラメータをTable 1のように定めている。逃走電子モードの1回の放電時間は最大5秒であるが、この放電を10分おきに繰返すことが予定されている。電子の最高エネルギーは10MeVであるので、X線の光子エネルギーも同一とみなした。照射線量率は磁気リミタ板から10cmの離れた位置で 3×10^7 R/h が想定されているが、これは安全側の評価と考えられる。

一方JT-60には真空容器の外側および内側にポロイダル磁場コイルが配置されている。ポロイダル磁場コイルはプラズマ立上げ用の変流器コイル、プラズマの平衡を保つための垂直磁場コイルなどから構成される。これらのコイルの中では変流器コイルの発生電圧が最大であり、プラズマ立上げ時に25kVの電圧を生じる。したがってコイルはこの電圧に耐えるように絶縁がなされている。その絶縁構成は変流器コイルの場合では、銅製角型導体にエポキシセミキュアガラス裏打集成マイカテープを巻回した5mm厚の主絶縁およびエポキシセミキュアガラステープを巻回した3mm厚の外装絶縁からなっている。

これらのポロイダル磁場コイルはプラズマに近接しているため、逃走放電時には高線量率の硬X線に曝されると予想される。

2.2 基本的な仮定条件

絶縁体内の過剰電荷の挙動を計算によって推定するため、X線照射条件の一次元モデルをFig. 1のように仮定した。コイル絶縁物(エポキシ樹脂)の厚さは4~8mmとし、均一強度のX線が垂直に入射する。絶縁体の裏側は導体(銅)に接するが、その厚さは二次電子の最大飛程に対応する厚さよりも厚いものとする。

電荷挙動の解析を簡単にするため、次の基本的仮定を置いた。

- 1) 絶縁体の両面は零電位、すなわち short circuit 型の境界条件を仮定した。これは実際の絶縁体表面(被照射面側)は大部分がコロナシールドによって覆われること、および空気と接触する絶縁体表面には照射下において空気中の電離電荷が補給されるため、電位は低く保たれることを考慮した結果である。
- 2) X線場には二次的に発生する電子線は全く混在していない。すなわち絶縁体内の表面近傍の線量率分布および電荷堆積分布に対する混在電子線の影響は無視できると仮定した。この仮定はポロイダル磁場による空気中での二次電子の偏向の影響を最大限に考慮した結果である。

- 3) 銅に近接する絶縁体内の境界近傍では、銅からの二次電子の後方散乱および後方放出によって負の過剰電荷が堆積するが、絶縁体表面近傍での電荷堆積率に比べて小さく、かつこれによる電荷蓄積への影響は内部電界を弱める側に寄与するので、ここでは無視した。また準電子平衡が成立するバルク領域でも、密度はさらに少ないが、負の過剰電荷が堆積する。しかし本条件では絶縁層が薄いので、この影響は無視できると考えた。
- 4) 放射線照射下での平衡状態における放射線誘起電導度に関しては、高電界領域でオーム則が成立しないことが報告されているが、¹⁰⁾ここでは簡単のために、オーム則が成立すると仮定した。

2.3 電子平衡条件

X, γ 線照射による電荷蓄積において最も重要な要因である電子平衡について以下に説明する。

混在電子をほとんど含まないX, γ 線が物質に入射すると、光子線が物質中の単位質量あたりに失うエネルギー E_t および電子が物質に付与する単位質量あたりのエネルギー E_a と物質の深さとの関係はFig. 2のようになる。前方に放出される電子の平均の飛程に相当する深さまでは、二次電子のビルドアップによる E_a は増大していく。一方 E_t はほぼ一定の割合で減少していく。図のA点では、 E_a と E_t の値は等しくなり、B点では E_a は最大となる。B点より深い場所では E_t に対する E_a の比はほとんど一定となる。電子平衡は厳密には両方のエネルギーの量が等しい状態を言うので、光子線の強度減衰が無視できないかぎり、A点のみで成立する。しかし通常はA点より深い場所でも電子平衡が成立するとみなされる。ここでは厳密な立場に立ち、A点より浅い領域を電子非平衡領域、A点より深い領域を準電子平衡領域(相対電子平衡領域¹¹⁾)と定義する。A点の状態は真電子平衡(あるいは絶対電子平衡)と呼ぶ。またB点の深さを電子平衡厚と呼ぶ。

真電子平衡が成立する深さの近傍では電子放出による正孔の生成濃度と二次電子の熱化濃度は等しく、電気的中和によって過剰電荷は生成しないが、表面近傍の電子非平衡領域では正電荷が堆積し、バルク内の準電子平衡領域では負電荷が生じる。しかし、多量の混在電子線を含むX, γ 線の場合、¹²⁾および異なった物質界面近傍の電子非平衡領域の場合³⁾は、これとは異なった現象を示す。

Table 1 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 10MeV
X線のエネルギー	最大 10MeV
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	5×10^8 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 放電の場合と考慮して算出した値である。

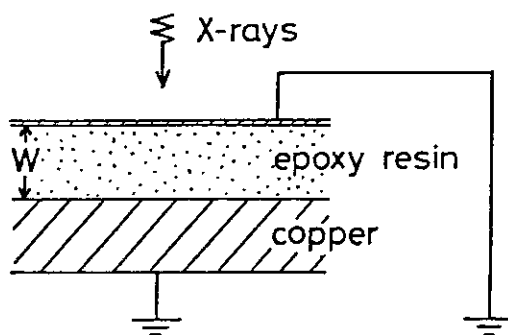


Fig. 1 One-dimensional irradiation model

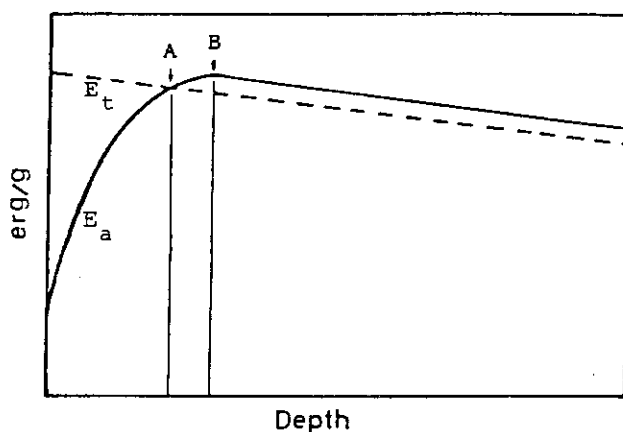


Fig. 2 Electronic equilibrium condition in X-ray irradiated medium. E_t : Photon energy loss per unit mass of the medium. E_a : Deposited electron energy per unit mass of the medium

3. 照射下での電荷蓄積

3.1 計算法

絶縁体内の過剰電荷の挙動は Fig. 1 に示す一次元モデルに対して、連続方程式(1)およびポアソン方程式(2)によって与えられる。¹³⁾

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial t} = eG(x) + \frac{\partial}{\partial x} \{ \sigma_r(x) E(x, t) \} \quad (1)$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial x} = - \frac{1}{\epsilon} Q(x, t) \quad (2)$$

ここで、 x は絶縁体内の深さ (cm)、 t は照射開始後の時間 (s)、 e は電子電荷 (C)、 $Q(x, t)$ は過剰電荷密度 ($C \cdot cm^{-3}$)、 $eG(x)$ は定常照射のもとで高速二次電子の熱化によって形成される過剰電荷堆積率分布 ($C \cdot cm^{-3} \cdot s^{-1}$)、 $\sigma_r(x)$ は平衡状態における放射線誘起電導度 (RIC, $\Omega^{-1} cm^{-1}$)、 $E(x, t)$ は内部電界強度 ($V \cdot cm^{-1}$)、 ϵ は誘電率 ($F \cdot cm^{-1}$) である。 σ_r には非照射下における電導度 σ_0 も含めるべきであるが、高線量率では、 $\sigma_r \gg \sigma_0$ となるので、ここでは σ_0 の寄与は無視した。 σ_r については、一般に経験式(3)が与えられている。

$$\sigma_r(x) = k \dot{D}(x)^\Delta \quad (3)$$

ここで、 $\dot{D}(x)$ は吸収線量率 ($rad \cdot s^{-1}$)、 k 、 Δ は実験的に与えられている定数である。 $\dot{D}(x)$ の分布は内部電界の増大によって時間的に変動することが予測されるが、¹⁴⁾ 簡単のためここではその変動を無視した。(1)および(2)式は数値計算によって解けるが、そのためには、 $G(x)$ 、 $\dot{D}(x)$ の近似式に含まれる定数を与える必要がある。

3.2 絶縁物試料

経験式(3)を実験によって与えるため、対象となる絶縁物試料を用意した。

標準試料としては充填物を含まない酸無水物硬化型ビスフェノール系エポキシ樹脂 (比重 1.25、比誘電率 2.9、体積抵抗率 $10^{16} \Omega \cdot cm$) を用いた。また実際のポロイダル磁場コイル絶縁物としてマイカを充填材とするエポキシ樹脂 (比重 1.78、比誘電率約 4.0) を用いた。

3.3 吸収線量率分布

絶縁体内の吸収線量率分布 $\dot{D}(x)$ は遠隔治療用として与えられている X 線の深部線量分布

のデータ¹⁵⁾をもとにして決定した。Fig. 3に8 MeV 電子による制動放射X線に対する深部線量分布(点線)のうちfield size(照射野)が4×4 cmの場合を示す。混在電子線の影響はfield sizeとともに増大するが、この場合はfield sizeが最小であるので、混在電子線の影響はほとんど無視できる。縦軸は電子平衡厚での吸収線量率 \dot{D}_e でnormalizeした。線量率分布はこの縦軸の目盛では直線状になるので、

$$\dot{D}(x)/\dot{D}_e = 1 - \alpha \exp(-\beta x) \quad (4)$$

により表わせる。ここで α および β は定数である。10 MeV 電子による制動放射X線に対する α の値は8 MeVの場合と同一とみなした。 β の値は、Fig. 3に示すように、二次電子の透過度がエネルギーに近似的に比例するとみなし、実線で示す直線を仮定した。すなわち α の値は0.9(表面の線量率は平衡値の1/10)とし、 β の値は電子エネルギーと線量率分布曲線の勾配との単純な比例関係および比重の違いを考慮して、 3.52 cm^{-1} と決定した。

なお、電子平衡厚での吸収線量率 \dot{D}_e と照射線量率 \dot{X} の間にはエポキシ樹脂の場合、 $\dot{D}_e = 0.94 \dot{X}$ なる関係が成立する。

3.4 電荷堆積率分布

いま均一強度の光子線の平行ビームがFig. 4に示すような紙面に垂直な平面によってAとBに分割された均質媒質を通過するとし、Aから前方に放出された電子によるB内での電荷堆積率分布を $eG_n(x)$ とする。簡単のために媒質内での光子線の減衰を無視すると、後方から送り込まれる電荷量と前方への放出電荷量は等しいため、全体としては過剰電荷は生じない。すなわち $G_n(x)$ は後方から送り込まれる $-G(x)$ によって相殺される。ここでは照射条件はAが取除かれた場合に対応するので、B内には正電荷が $-eG(x)$ の割合で堆積することになる。この正電荷の堆積率分布はAからの放出電子の透過度を $\eta_1(x)$ とすると、

$$G(x) = -G_n(x) = d\eta_1/dt \quad (5)$$

で近似できる。¹⁶⁾ $\eta_1(x)$ はphoto-Compton currentのモンテカルロ計算³⁾から、(4)式内の係数 β と同一の係数をもつ指数関数

$$G(x) = C \exp(-\beta x) \quad (6)$$

により近似できる。定数Cは

$$\int_0^\infty G(x) dx = \frac{C}{\beta} = \dot{N}_\gamma (\epsilon_f - \epsilon_b) = \dot{N}_\gamma \epsilon_{net} \quad (7)$$

を用いて求められる。ここで \dot{N}_γ は光子線束密度($\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)、 ϵ_f 、 ϵ_b はそれぞれ前方および後方への一光子あたりの電子放出率、 ϵ_{net} は前方への正味の電子放出率¹⁷⁾である。以上から $G(x)$ は

$$G(x) = \dot{N}_\gamma \epsilon_{net} \beta \exp(-\beta x) \quad (8)$$

で表わせる。

光子線束密度 \dot{N}_γ と照射線量率 \dot{X} との関係は、

$$\dot{N}_\gamma = \frac{0.59 \times 10^8 \cdot \dot{X}}{\bar{E}_x (\mu_{en}/\rho)} \quad (\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}) \quad (9)$$

により与えられる。ここで \bar{E}_x は X 線の実効エネルギー (MeV), (μ_{en}/ρ) は実効エネルギーにおける X 線の質量エネルギー吸収係数 (cm^2/g) である。

X 線の実効エネルギー \bar{E}_x (10 MeV 電子による制動放射 X 線の場合, 4 ~ 5 MeV) と ϵ_{net} との関係, および $3 \times 10^7 \text{ R/h}$ における \bar{E}_x と $\dot{N}_\gamma \epsilon_{net}$ との関係を Fig. 5 に示す。 $\dot{N}_\gamma \epsilon_{net}$ の値としては $1.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を採用した。以上から実機条件における $G(x)$ の近似式は

$$G(x) = 5.28 \times 10^{11} \exp(-3.52x) \quad (\text{cm}^{-3} \text{s}^{-1}) \quad (10)$$

により表した。

3.5 放射線誘起電導度の測定

3.5.1 測定法

1) γ 線照射下での測定

絶縁体試料に電圧を印加した状態で ^{60}Co γ 線を照射し、電極間に流れる誘起電流を測定することによって放射線誘起電流を求めた。試料には 0.5 mm 厚のマイカ充填エポキシ板 (SGUT-F11, 体積抵抗率 $10^{18} \Omega \text{cm}$ (30°C)) を用い、電極は Au 蒸着によって取付けた。測定条件は、 28°C の試料温度、 $10^5 \sim 10^6 \text{ V/cm}$ の電界範囲、および $10^5 \sim 10^6 \text{ R/h}$ の照射線量率範囲で行った。測定方法は試料への電圧印加から照射開始までの時間を 10 分とし、照射開始から測定するまでの時間を 5 分とした。

2) 電子線照射下での測定 split Faraday cup 法

平衡状態における RIC と線量率との関係は従来から上記の方法がとられてきた。この方法は電流検出感度を高めるため、および厚いゆえに生じる他の放射線誘起効果を防ぐため、試料を十分薄くする必要がある。また X, γ 線では 10^7 rad/h 程度の高線量率を得るのは通常困難である。これらの理由から、ここでは厚い試料のまま測定が可能な電子線照射による split Faraday cup 法¹⁸⁾を試みた。これによって γ 線照射法では得られない高電界、高線量率での σ_r を近似的に求めることが可能となった。

Fig. 6 に split Faraday cup 法の図解を示す。絶縁体の厚さ W は電子飛程 R よりも厚いとし、簡単のために R はすべての電子について一定と仮定する。short circuit 条件下では、入射電流密度 J_0 のもとで、背面電極電流密度 J_r は

$$J_r = J_0 + \sigma_r E + \epsilon \dot{E} \quad (11)$$

によって与えられる。堆積した過剰電荷の面密度を d (C/cm^2) とすると、電界強度 E ($x < R$) は

$$E = -(d/\epsilon)(1-R/W) \quad (12)$$

で与えられるので、電荷保存則

$$\dot{d} = J_0 + \sigma_r E \quad (13)$$

から、 J_r は(14)式により表わせる。

$$J_r = J_0 (R/W) \exp(-t/\tau) \quad (14)$$

ここで τ は時定数であり、背面電極電流密度 $J_r(t)$ の測定から求められる。これを用いると σ_r は

$$\sigma_r = \frac{\epsilon}{\tau} \frac{W}{W-R} \quad (15)$$

の形で表わすことができる。 $J_r(t)$ の実測結果は厳密には指数関数とは一致しない。その理由は(15)式がいくつかの仮定、すなわち

- (1) 電荷堆積率分布は深さのデルタ関数で表わされる。
- (2) 線量率は深さ方向で一定である。すなわち σ_r は深さに依存しない。
- (3) σ_r は E に依存しない(オーム則が成立する)。
- (4) σ_r は照射に伴う物性変化の影響を受けない。また σ_r は照射開始とともに直ちに平衡状態に達すると仮定する。
- (5) 電子の透過距離は照射中一定である。

を含むためであると考えられる。split Faraday cup 法による σ_r の決定法の正確さを問題とする場合はこれらの仮定を十分吟味する必要があるが、 σ_r の近似的導出法としては本法は有効であると考えられる。

時定数 τ の決定法としては Fig. 7 に示す背面電極電流の初期減衰曲線の外挿値 (τ_1) および初期電流値の $1/e$ に対応する経過時間 (τ_2) を求める方法を用いた。

照射条件は、電子エネルギー 3.3MeV、線量率範囲 $10^7 \sim 10^9$ rad/h (電子流密度換算で約 $10n \sim 1\mu A/cm^2$)、試料温度 $18 \sim 20^\circ C$ 、試料の厚さは無充填エポキシでは 18mm、マイカエポキシでは 11.0~12.5mm であった。試料の大きさはいずれも約 $100 \times 100mm$ とし、試料面の照射野は $50mm\phi$ とした。 σ_r の温度依存性を調べるため、 $50\mu m$ 厚のポリエチレンテレフタレートの入射窓をもつ恒温槽に試料を封入し、 $10 \sim 90^\circ C$ の範囲の温度制御を行った。照射による試料の温度上昇の影響はほとんど無視できた。

3.5.2 測定結果

r 線照射による σ_r と吸収線量率との関係を Fig. 8 に示す。測定値は電界値によって異なり、高電界において小さい値を示す。実際の照射下では $10^5 V/cm$ 以上の電界になると考え

られるので、 σ_r の値はさらに小さい値になることが予想される。どちらの電界でも両対数目盛において σ_r と照射線量率との間には明確な直線的関係はないので、これらの結果から、問題としている 3×10^7 rad/h 付近における σ_r を推定するのは難しい。

Fig. 9 (a)~(f)に split Faraday cup 法による電子線照射下における背面電極電流の実測例を示す。(a)のみは無充填エポキシによる典型的な電流パターンであり、(b)~(f)はマイカエポキシによる異なった条件下での実測例である。(e), (f)以外は室温($\sim 18^\circ\text{C}$)での測定結果である。照射停止後の小さな逆向きの電流は試料表面からの電荷漏洩に起因するものであり、これから delayed conductivity を推定できる。このことについては次章で述べる。

これらの電流パターンから得られた時定数 τ は無充填エポキシとマイカエポキシの間で著しく異なる。マイカエポキシでは τ が大きいのみでなく、放電パルスが頻繁に観測された。放電パルス発生頻度は電子流密度が増すとともに増大する傾向をもつ。また照射開始から最初の放電パルス発生までの時間は電子流密度が高くなるほど短くなる傾向がある。

Table 2 に照射した各試料について、最初の放電パルス発生までの照射時間と入射電荷、およびその放電の向きを示す。Fig. 9 において高電流側に出るパルスは入射面側への放電の結果であり、逆方向のパルスは背面側への放電の結果である。放電パルスまでの入射電荷は大部分 $0.2 \sim 0.6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$ の範囲内にある。しかし試料温度 69°C 以上では電荷量は大きくなる傾向がある。放電の向きは入射面側が多い。

Fig. 10 に時定数 τ をもとにして得られた放射線誘起電導度 σ_r と吸収線量率 \dot{D} との関係を示す。マイカエポキシの場合は放電パルスのために τ_2 を得ることができなかったため、 τ_1 のみを求めた。いずれの試料に対しても両対数目盛で直線的関係が得られたが、 σ_r の値についてはマイカエポキシは無充填エポキシの約 $1/5$ の値であり、充填材の有無が電導度に大きな影響をもつことがわかった。線量率依存を示す直線の勾配から得られる Δ は無充填エポキシの場合、 $\Delta(\tau_1) = 0.90$, $\Delta(\tau_2) = 0.97$, マイカエポキシの場合、 $\Delta(\tau_2) = 0.93$ であった。

Fig. 11 に γ 線および電子線を用いた今回の測定結果およびエポキシ樹脂に関する引用データ^{10), 19)}を示す。マイカエポキシについては γ 線を用いた低線量率での測定結果が電子線を用いた高線量率での測定結果に大体連続することを示す。また無充填試料については前田ら¹⁰⁾が与えている Δ の値は今回得た値よりもいくぶん小さいが、高線量率側へ外挿した結果はわれわれの結果とほぼ一致する。

電荷挙動計算のため Δ および k の値を次のように決めた。簡単のために $\Delta = 1$ とし、JT-60で想定されている 3×10^7 R/h で実験結果にフィットするように k の値を定めた。その結果無充填エポキシでは $k = 4.0 \times 10^{-18} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} \text{R}^{-1} \text{s}$, マイカエポキシでは $k = 8.7 \times 10^{-19} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} \text{R}^{-1} \text{s}$ となった。

Fig. 12 は約 10^8 rad/hの線量率における σ_r の温度依存性(アレニウスプロット)を示す。無充填エポキシ、マイカエポキシともに、 $10 \sim 80^\circ\text{C}$ の範囲では σ_r は温度にほとんど依存せず、活性化エネルギーは小さいことがわかった。マイカエポキシでは測定値のバラツキが大きいが、これは背面電極電流値の減衰勾配が非常に小さく、かつ放電パルスが発生するために、初期減衰の勾配の決定が難しいことに因る。ビスフェノール系樹脂を用いた前田ら¹⁰⁾の

結果では70℃以上で σ_r の急増が見られるが、本実験では確認されなかった。

3.6 計算結果

Fig. 13 および Fig. 14 に照射開始5秒後、すなわち1回の逃走電子放電直後における無充填エポキシ内の過剰電荷密度分布、電界強度分布、および電位分布を厚さ4mmおよび8mmの場合についてそれぞれ示す。4mm厚の場合は前面で0.2MV/cmの最高値を示し、背面では約0.1MV/cmの値を示す。8mm厚の場合は前面で0.3MV/cmの最高値を示すが、背面では4mm厚の場合とほぼ同一の値を示す。

Fig. 15 および Fig. 16 に連続の長時間照射を仮定した場合の種々のk値に対する4mm厚試料の前面および背面での電界強度と照射開始後の時間との関係をそれぞれ示す。電界強度は時間とともに飽和して行く。これは電界強度が増すとともに漏洩電流が増大し、電荷の堆積と漏洩は時間とともに平衡状態に達することを意味する。無充填エポキシに対して与えられている $k = 4 \times 10^{-18} \Omega^{-1} \text{cm}^{-1} \text{R}^{-1} \text{s}$ の場合、前面では約400秒で2.6MV/cm、背面では約100秒で0.4MV/cmの飽和値に達する。また照射開始直後の電界強度はkにほとんど依存せず、一定の割合で増加するが、飽和値はkにほぼ反比例する。飽和時間もほぼkに反比例する傾向を示すが、前面よりも背面の方が短い時間で飽和する。

Fig. 17 および Fig. 18 に同じく種々の線量率の値に対する前面および背面での電界強度と照射開始後の時間との関係をそれぞれ示す。照射開始直後では電界値は線量率にほぼ比例する速度で増大するが、飽和値は線量率にはほとんど依存しない。ただし飽和時間は線量率が高いほど短い傾向を示す。また前面よりも背面の方が短い時間で飽和する。

Fig. 19 および Fig. 20 に電界飽和後の500秒照射直後の無充填エポキシ内の過剰電荷密度分布、電界強度分布、および電位分布を厚さ4mmおよび8mmの場合についてそれぞれ示す。5秒後の場合に比べて過剰電荷の前面近傍への偏在傾向が強まり、電界値も前面から1mm以内の浅い領域内で高い値を示す。これは前面近傍の吸収線量率が低く、放射線誘起電導度が小さいことに起因する。

Fig. 21 に連続の長時間照射における4mm厚の試料前面の電界飽和曲線の無充填エポキシとマイカエポキシとの比較結果を示す。マイカエポキシのk値は無充填エポキシの約1/5であるため、電荷漏洩の割合が小さく、約2000秒で12MV/cmの極めて高い電界に達する。しかしこうした高電界のもとでは、絶縁体中の二次電子の挙動自体が高電界の影響によって変化し、それによって逆に電界は緩和されると考えられる¹⁴⁾。

Fig. 22 に電界飽和後(5000秒後)の4mm厚のマイカエポキシ内の過剰電荷密度分布および電界強度分布を示す。背面の飽和電界強度は約2MV/cmである。

Fig. 23 に電子平衡厚に相当する深さでの線量率 \dot{D}_e に対する表面線量率 \dot{D}_s の比が4mm厚の無充填エポキシの前面および背面での電界強度に与える影響を示す。5秒照射時の電界値については前面、背面ともに \dot{D}_e/\dot{D}_s 依存度は小さいが、500秒照射後の飽和電界値については前面での \dot{D}_e/\dot{D}_s 依存度が大きい。この結果はX線場に占める混在電子線の割合が電荷蓄積による影響を大きく左右する要因であることを示す。

Fig. 24 に電界強度に対する絶縁体の厚さの影響を示す。前面での電界値は時間に関係なく、厚くなるとともにゆるやかに増大するが、背面での電界値は厚さに関して逆の傾向を示す。

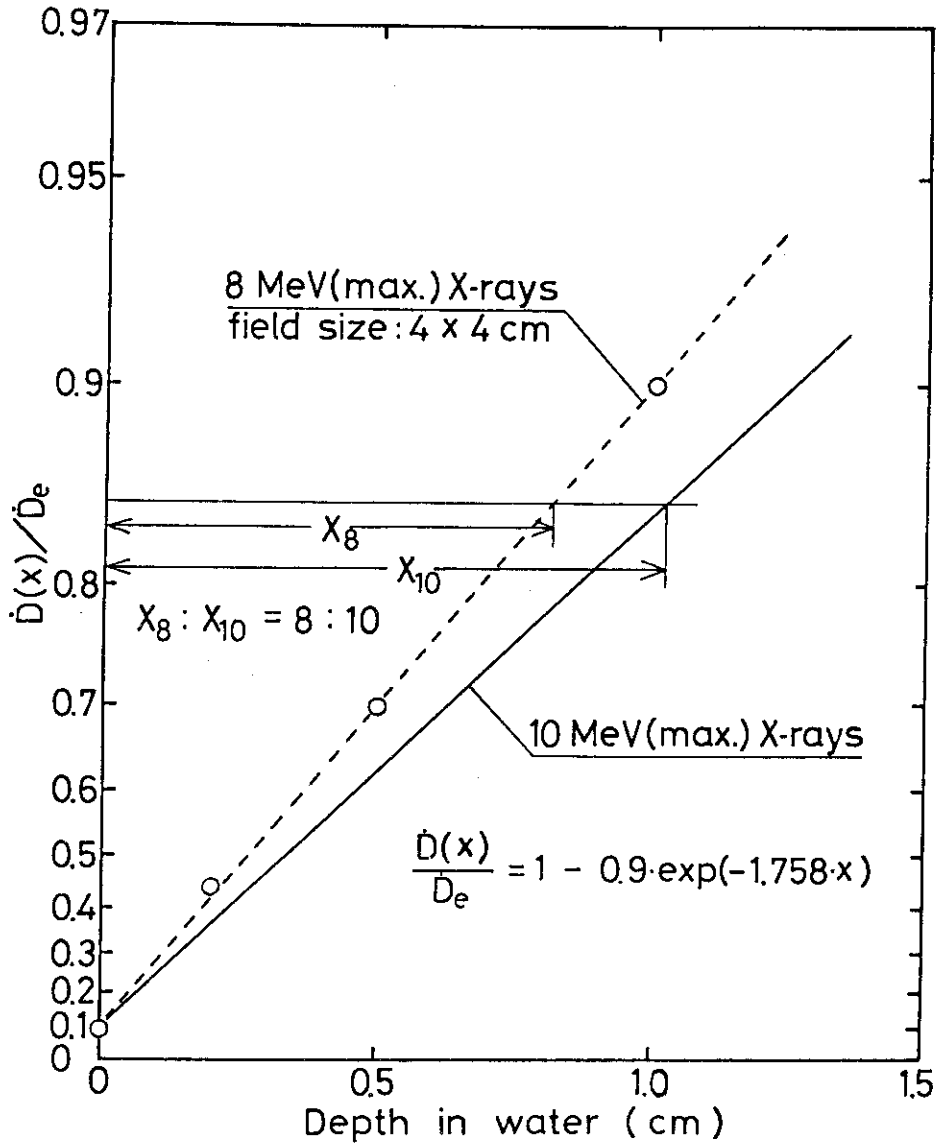


Fig. 3 Depth dose distribution in water exposed to X-rays

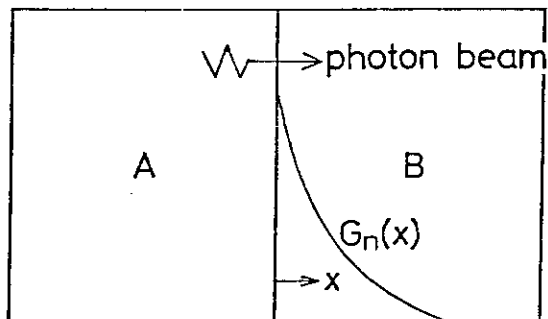


Fig. 4 The charge deposition rate distribution in homogeneous medium due to forward electron emission

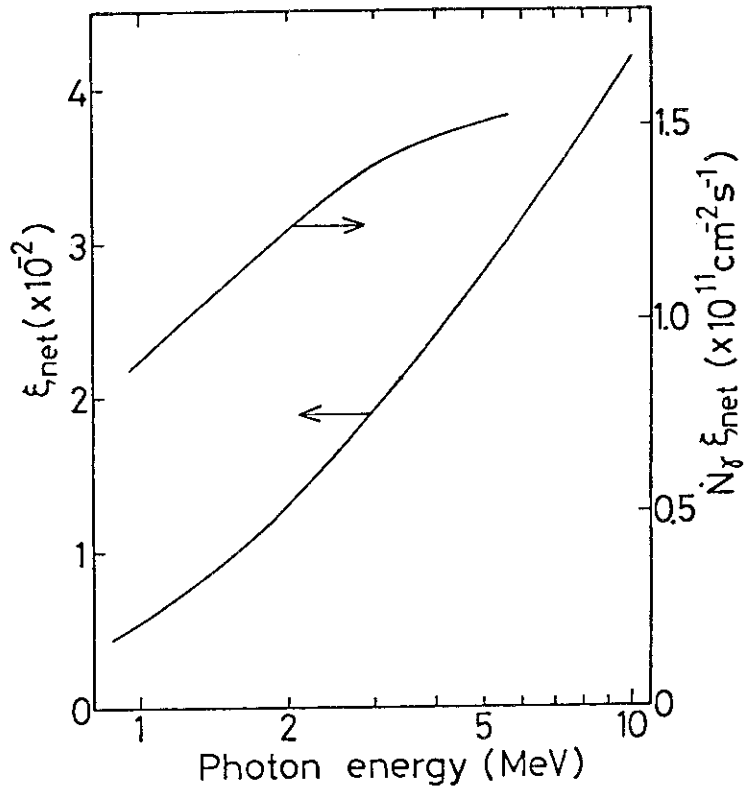


Fig. 5 Photon energy dependence of ξ_{net} and $\dot{N}_\gamma \xi_{net}$ at $3 \times 10^7 \text{ R/h}$

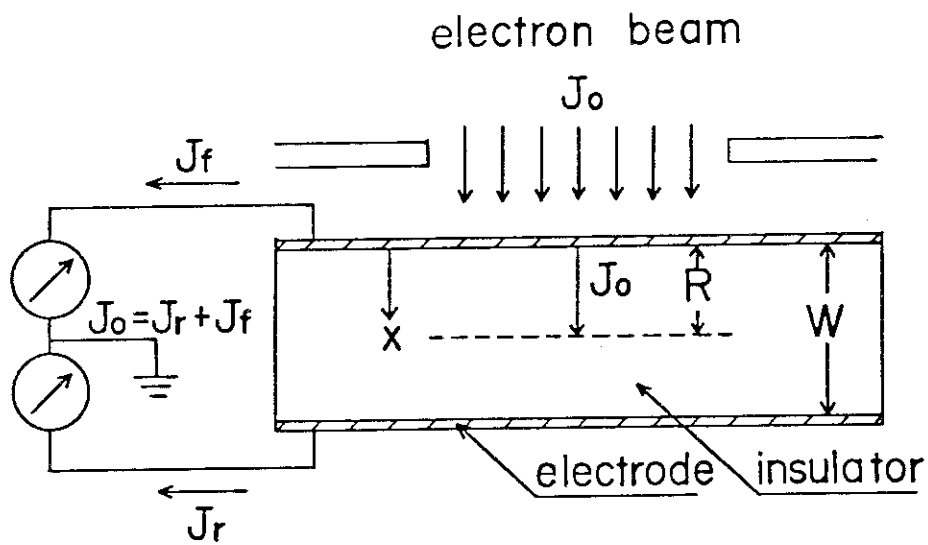


Fig. 6 Split Faraday cup method

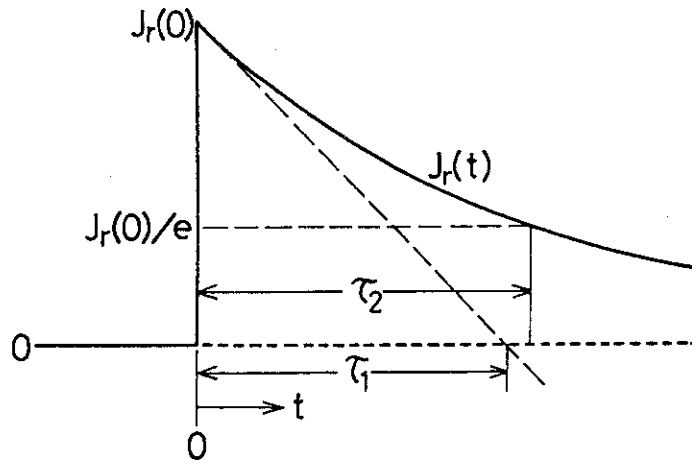


Fig. 7 Determining methods of the time constant τ

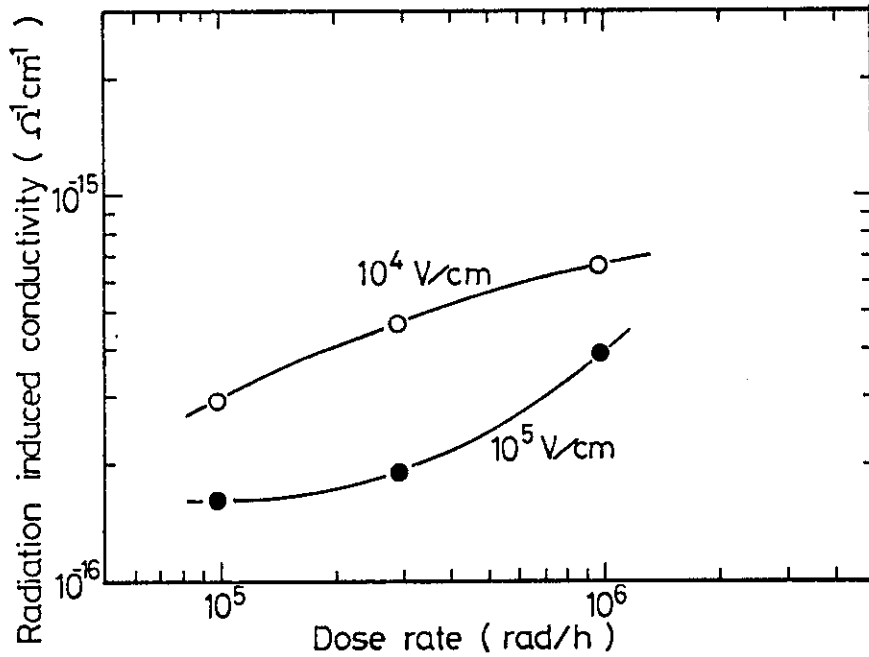


Fig. 8 Dose rate dependence of radiation induced conductivity in mica-epoxy under γ -irradiation

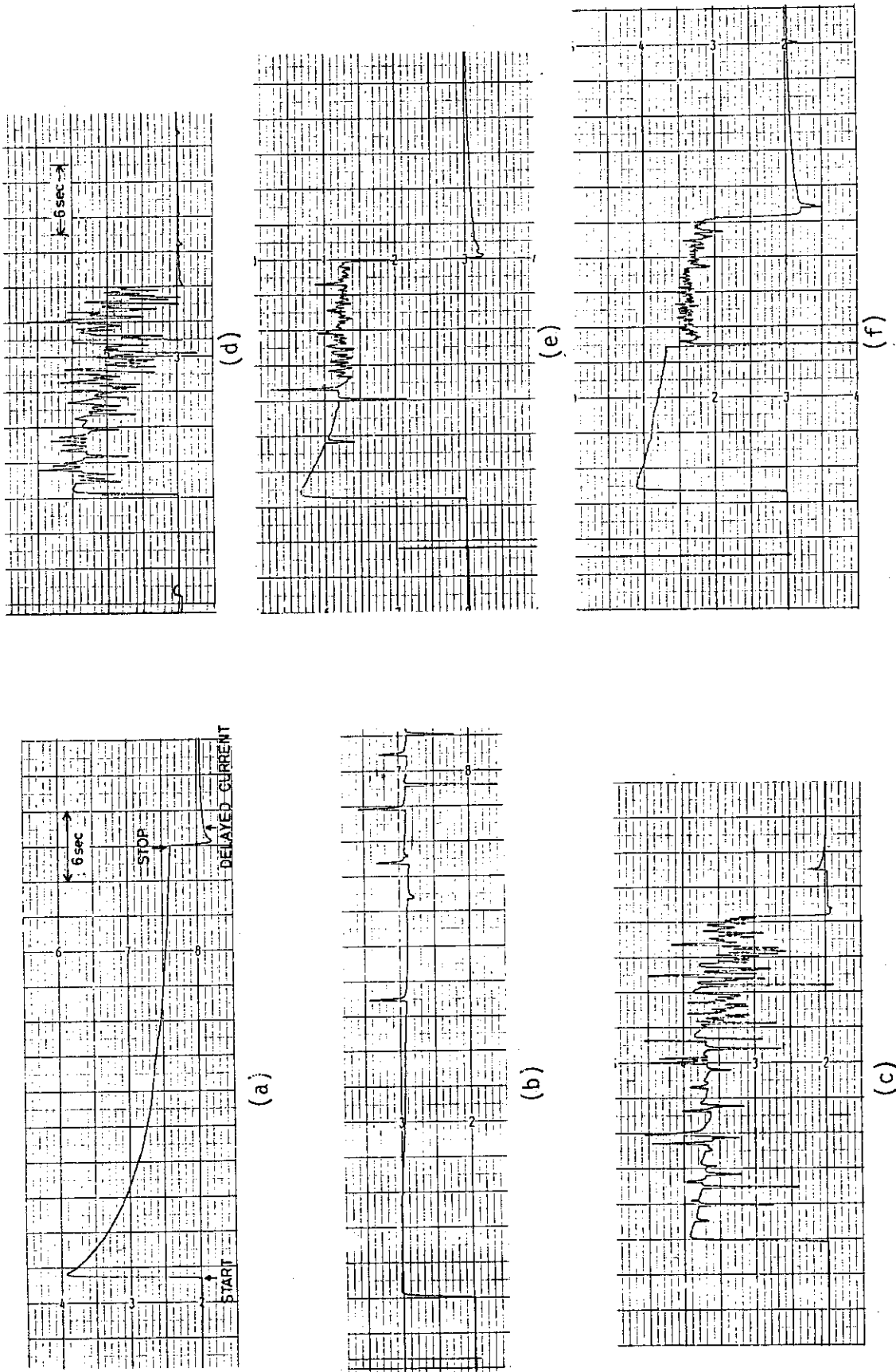


Fig. 9 Measured results of the short circuit currents from rear electrodes under electron irradiation in the split Faraday cup method. (a) non-filled epoxy, $J_0 = 30 \text{ nA/cm}^2$, (b) mica-epoxy, sample No.2, 22 nA/cm^2 , (c) mica-epoxy, sample No.3, 141 nA/cm^2 , (d) mica-epoxy, sample No.8, 325 nA/cm^2 , (e) mica-epoxy, sample No.14, 150 nA/cm^2 , (f) mica-epoxy, sample No.16, 150 nA/cm^2 , 89°C .

Table 2 電子線照射下での放電パルスの観測結果
(マイカエポキシ試料)

試料 番号	電子流密度 (nA/cm ²)	試料温度 (°C)	放電パルス発生 までの時間(sec)	放電パルス発生までの 入射電荷 ($\frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}$)	放電の向き F(前面) R(背面)
1	44	18	6.3	0.28	F
2	22	"	25	0.55	R
3	141	"	1.7	0.24	F
4	200	"	1.8	0.36	F
5	96	"	3.1	0.30	F
6	230	"	2.5	0.58	F
7	355	"	0.9	0.32	R
8	325	"	1.0	0.33	F
9	96	"	5.0	0.48	F
10	150	17	3.7	0.56	R
11	"	34	2.1	0.31	F
12	"	49	1.3	0.20	F
13	"	"	1.4	0.21	F
14	"	69	4.7	0.71	F
15	"	89	3.2	0.48	R
16	"	"	12.3	1.85	F

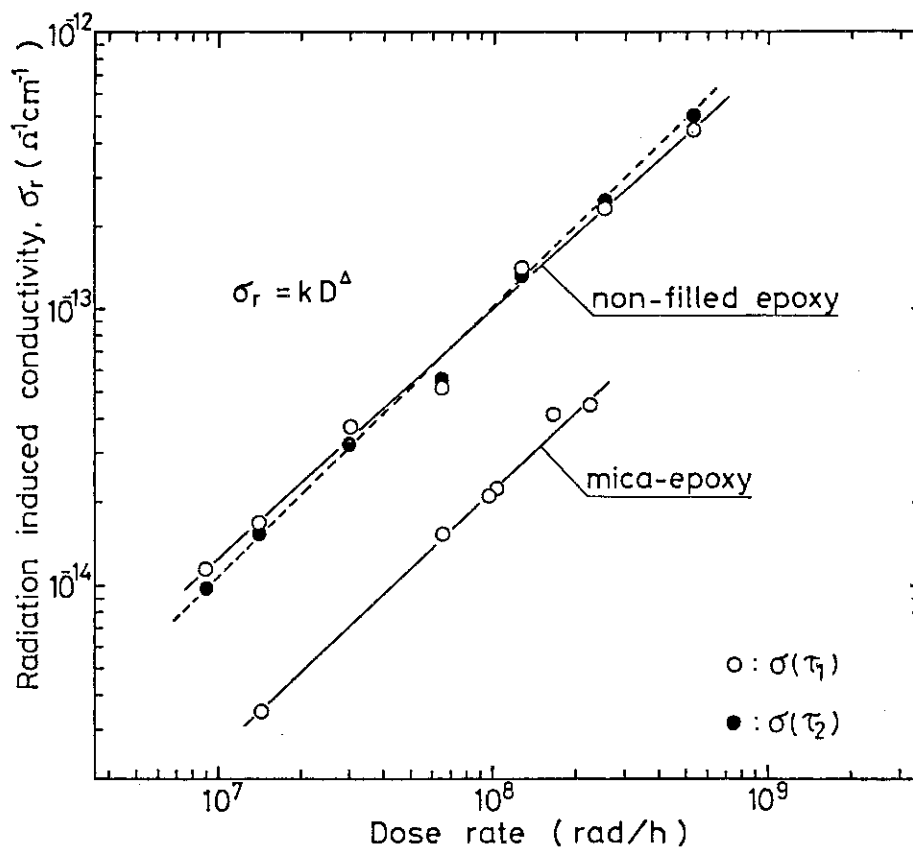


Fig. 10 Dose rate dependence of radiation induced conductivity in epoxy resins obtained with the split Faraday cup method

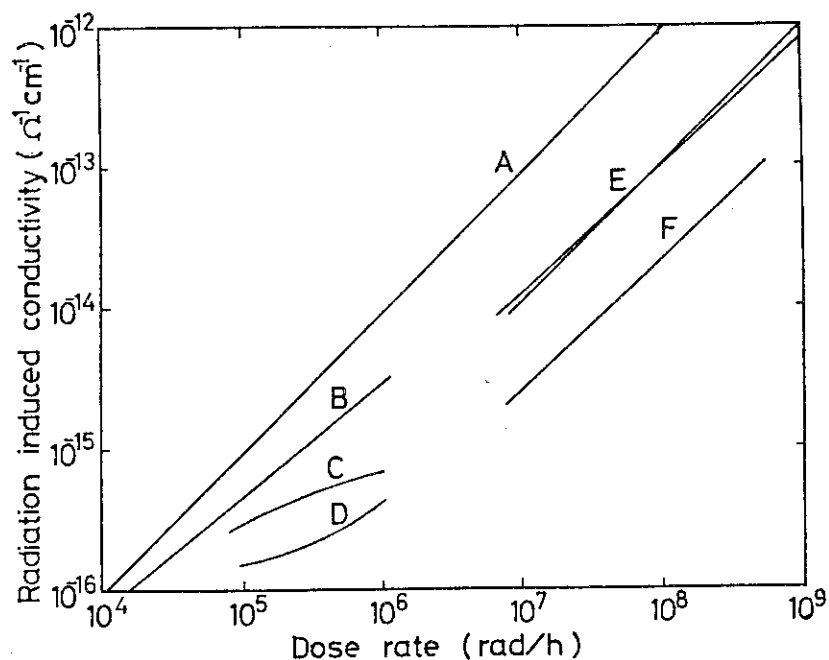


Fig. 11 Comparison of measured results of radiation induced conductivity in epoxy resins
 A: Harrison et al., ($38\sim 60^\circ\text{C}$)¹⁹⁾, B: 前田, 中北 (25°C)¹⁰⁾
 C: mica-epoxy (γ -ray irradiation, 28°C , 3.3×10^4 V/cm), D: mica-epoxy (γ -ray irradiation, 28°C , 105 V/cm), E: non-filled epoxy (split Faraday cup method, 20°C), F: mica-epoxy (split Faraday cup method, 20°C).

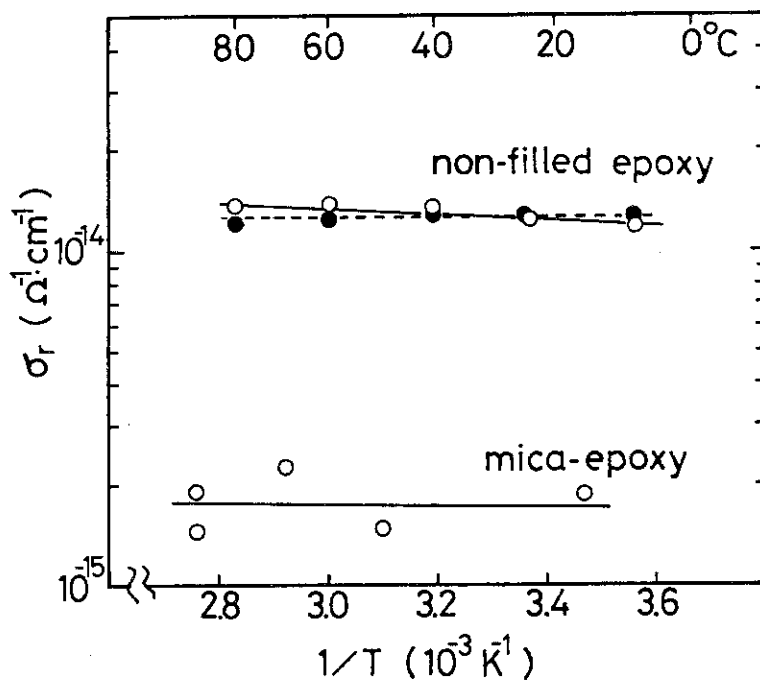


Fig. 12 Temperature dependence of radiation induced conductivity in epoxy resins (10^8 rad/h)

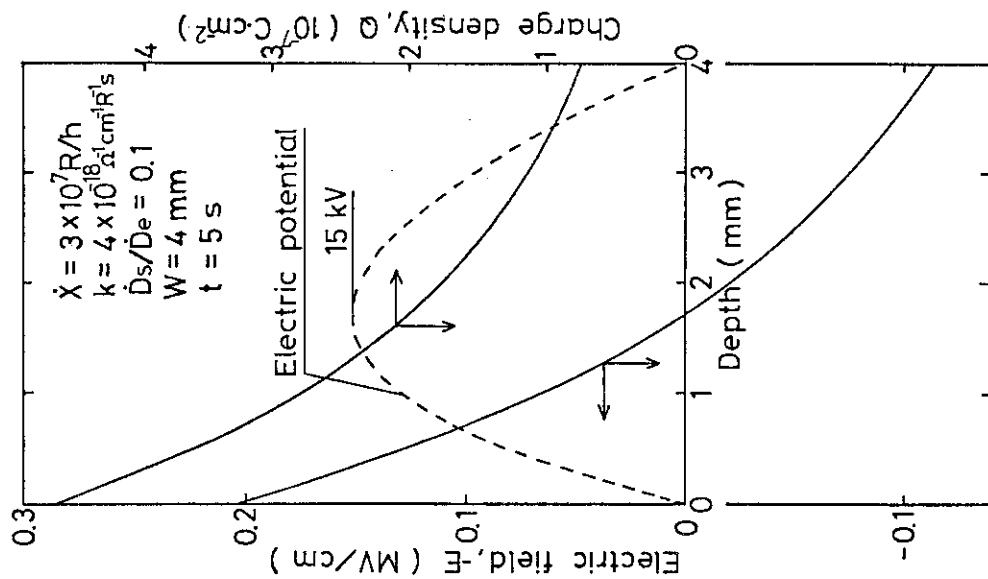


Fig. 13 Profiles of excess charge density, electric field strength and electric potential in non-filled epoxy of 4mm thick immediately after 5 second irradiation.

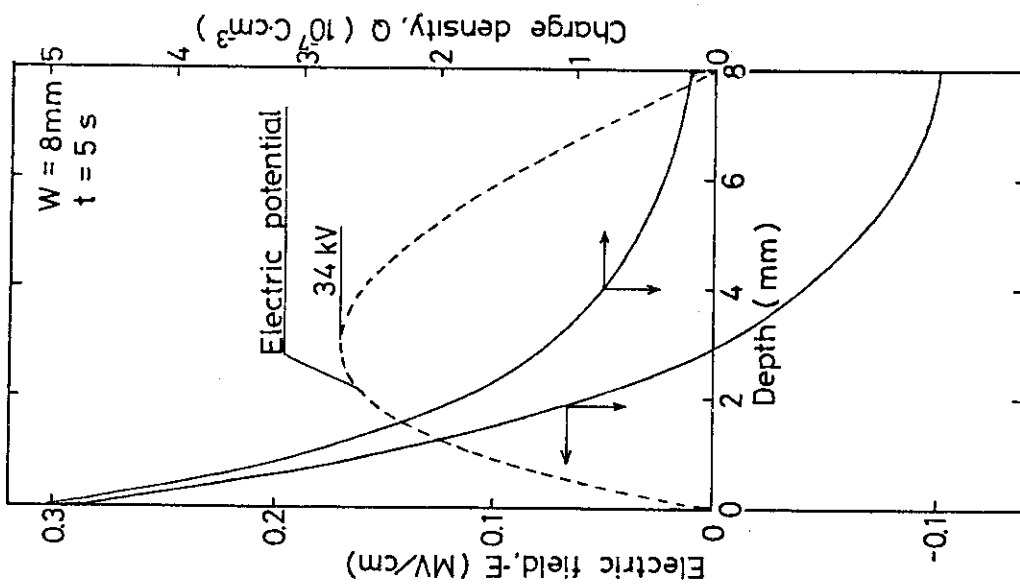


Fig. 14 Profiles of excess charge density, electric field strength and electric potential in non-filled epoxy of 5mm thick immediately after 5 second irradiation

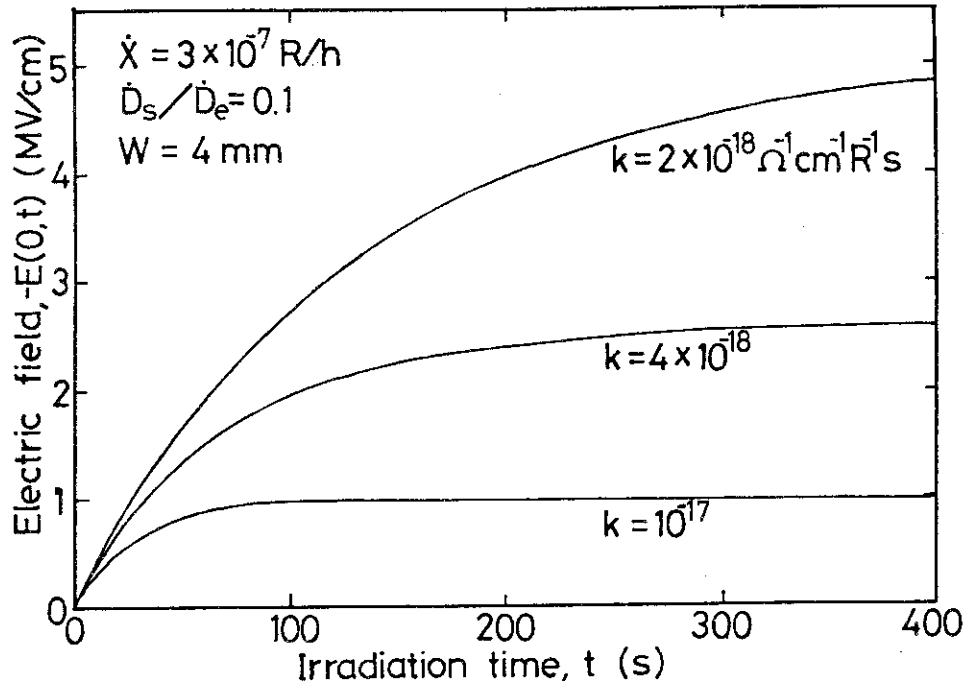


Fig. 15 Increases of electric field strength at the front face of non-filled epoxy of 4mm thick under continuous irradiation in different k-values

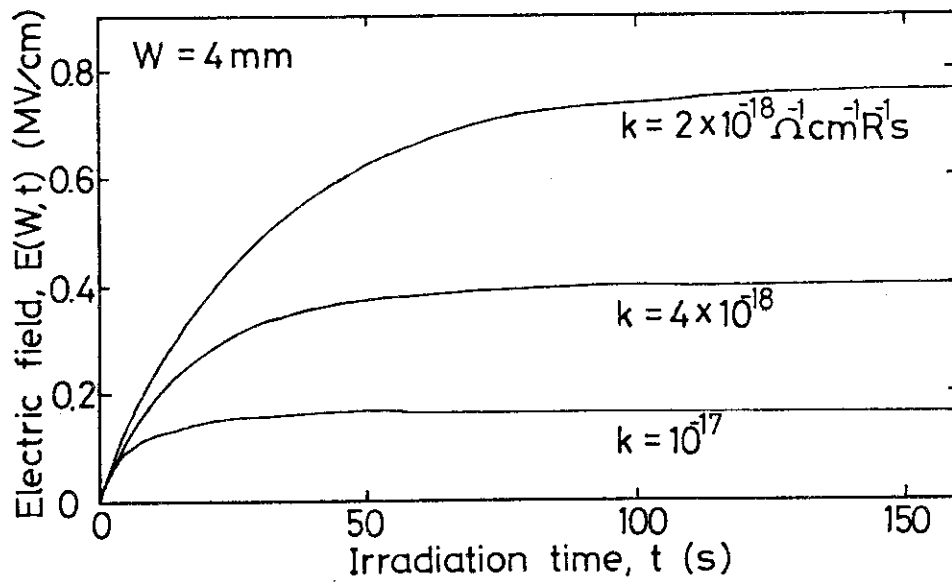


Fig. 16 Increases of electric field strength at the rear face of non-filled epoxy of 4mm thick under continuous irradiation in different k-values

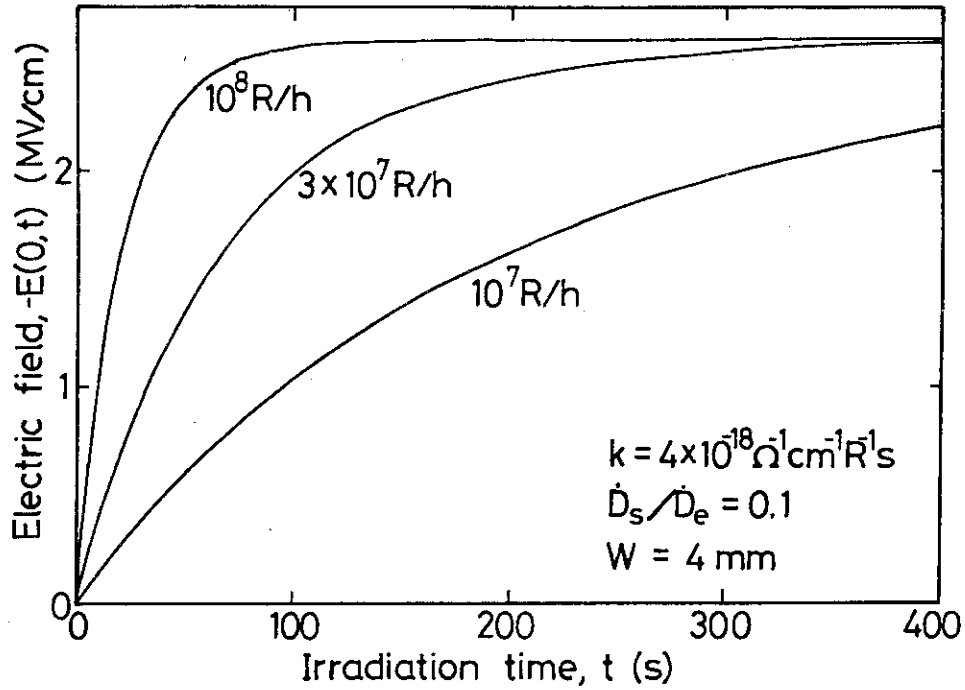


Fig. 17 Increases of electric field strength at the front face of non-filled epoxy of 4mm thick under continuous irradiation at different exposure rates.

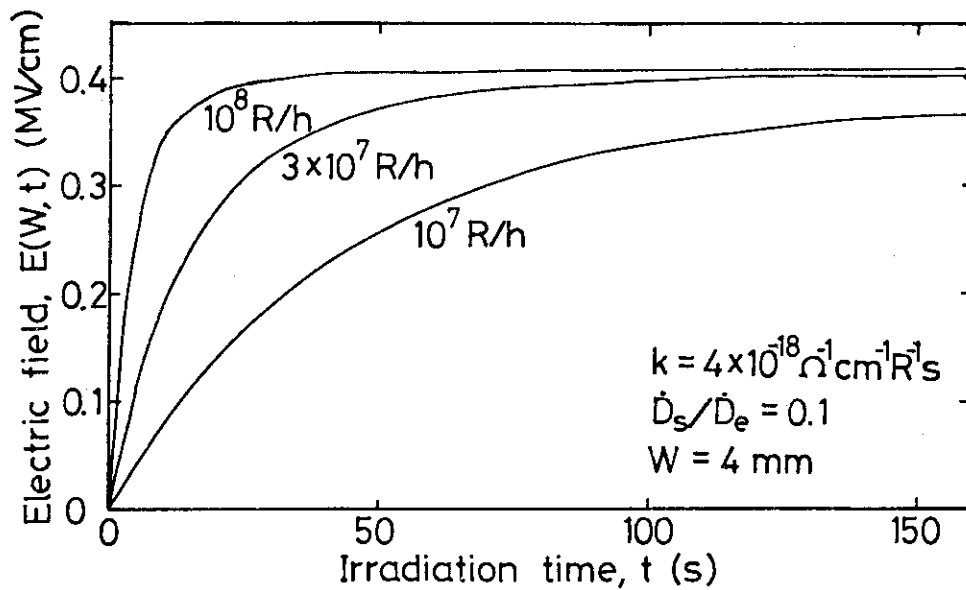


Fig. 18 Increases of electric field strength at the rear face of non-filled epoxy of 4mm thick under continuous irradiation at different exposure rates

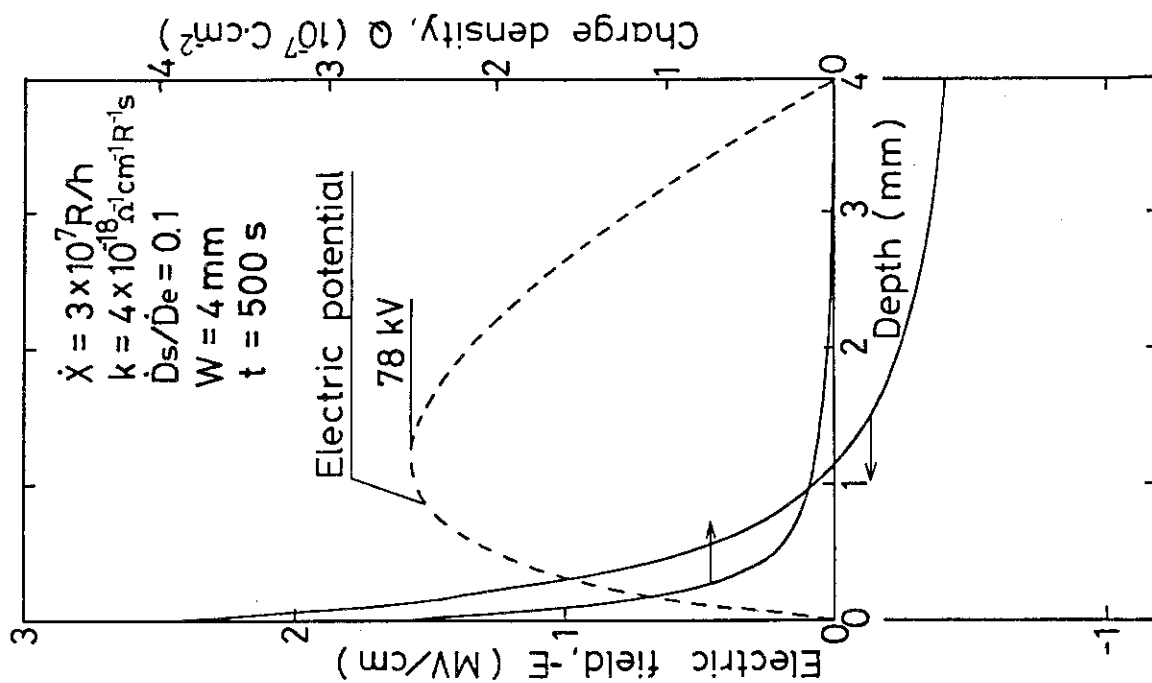


Fig. 19 Profiles of excess charge density, electric field strength and electric potential in non-filled epoxy of 4mm thick after 500 seconds continuous irradiation

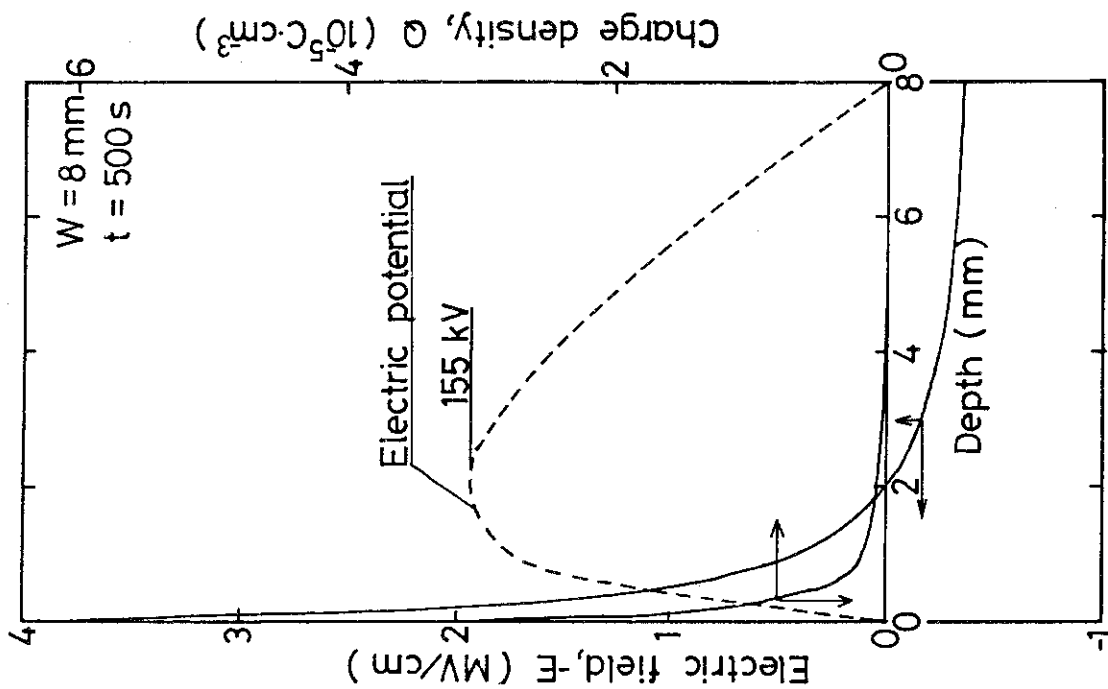


Fig. 20 Profiles of excess charge density, electric field strength and electric potential in non-filled epoxy of 8mm thick after 500 seconds continuous irradiation

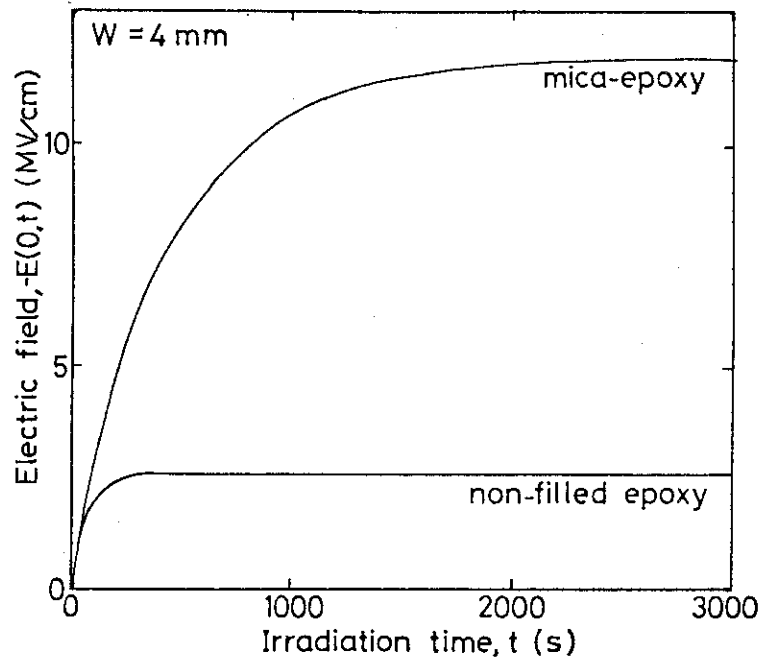


Fig. 21 Comparison of the saturation curves of electric field strength the at the front face of non-filled epoxy and mica-epoxy under continuous irradiation

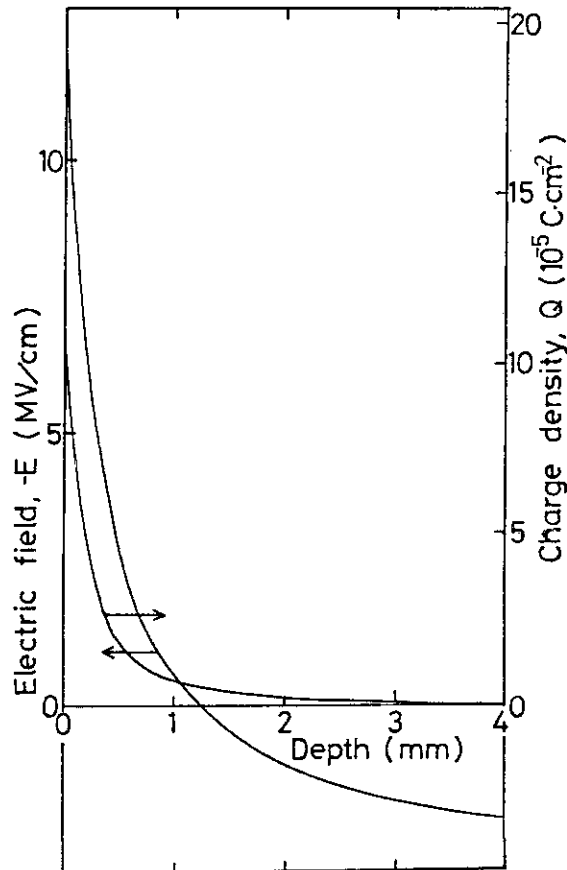


Fig. 22 Profiles of excess charge density, electric field strength in mica-epoxy of 4mm thick after saturation of electric field ($\dot{X} = 3.0 \times 10^7 \text{ R/h}$, $k = 4 \times 10^{-18} \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1} \text{ R}^{-1} \text{ s}$, $\dot{D}_s / \dot{D}_e = 0.1$, $t = 5000 \text{ s}$)

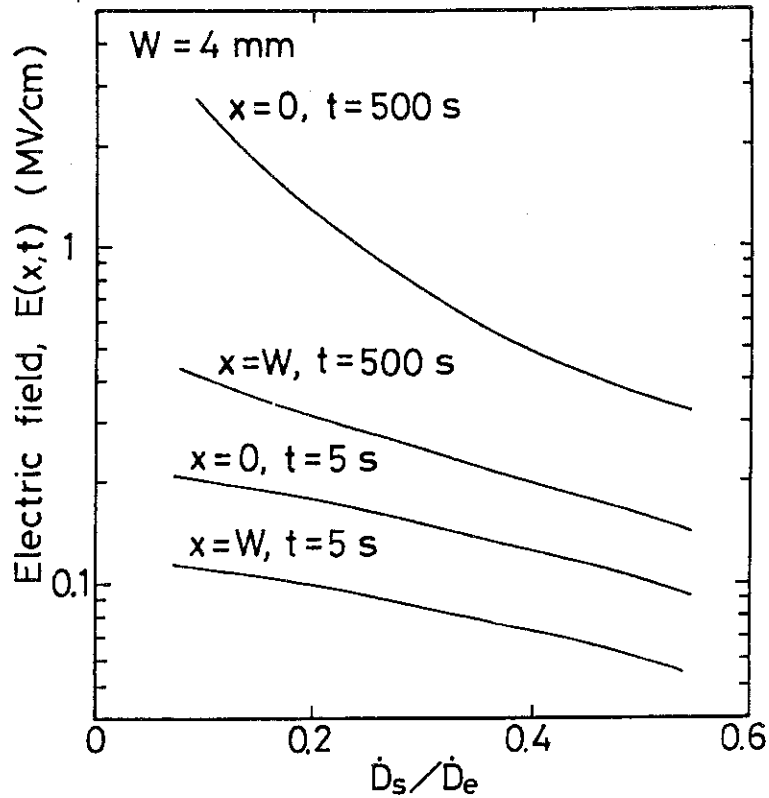


Fig. 23 The influence of the value of \dot{D}_s / \dot{D}_e on electric field strength in non-filled epoxy of 4mm thick

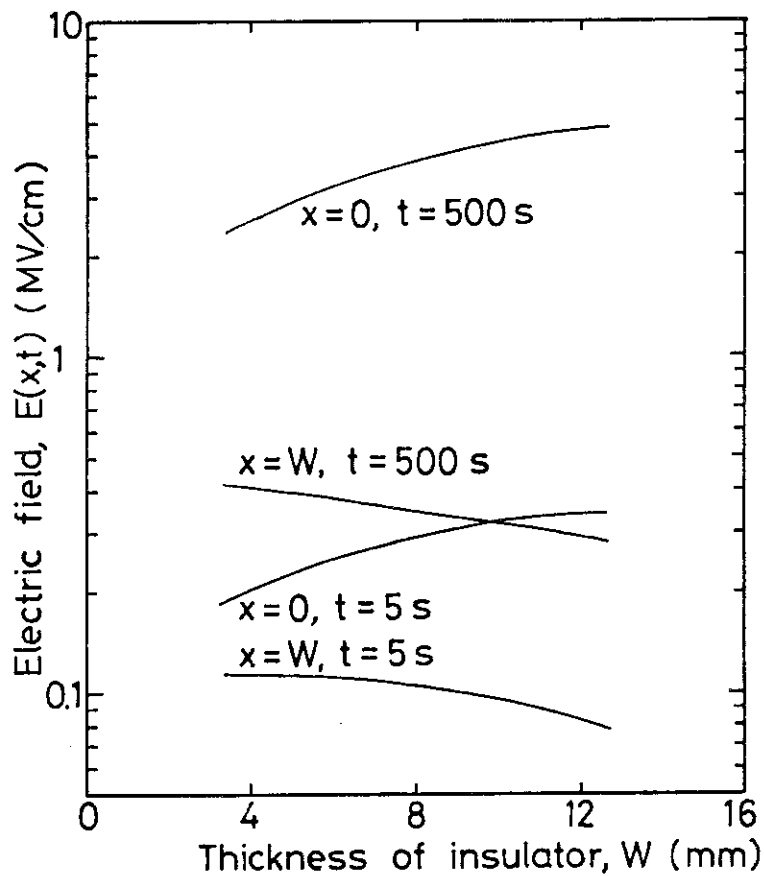


Fig. 24 The influence of thickness of insulator on electric field strength in non-filled epoxy of 4mm thick

4. 照射後の過剰電荷の挙動

4.1 計算法

照射後の絶縁体内の過剰電荷の挙動は delayed conductivity σ_d に支配されるが、 σ_r と σ_d との関係は照射停止直後の電導度の急激な減少部分を除いては、Fowler²⁰⁾ によって

$$\sigma_d = a \sigma_r (1 + bt') \quad (16)$$

なる表現が与えられている。ここで a 、 b は定数 ($a < 1$) であり、 t' は照射停止後の時間である。 t' が十分大きいところでは、 σ_d の減衰は双曲線関数型から指数関数型に変わっていくことを Fowler²⁰⁾ は述べているが、本計算では16式が成立すると仮定した。

定数 a 、 b は Fig. 6 に示す split Faraday cup 法による照射停止後の背面電極電流測定によって求めた。測定結果の実例は Fig. 9 (a) に示されている。十分長い時間照射した後の背面電極電流密度 $J(t')$ は short circuit 条件のもとでは、Gross¹⁸⁾ によって

$$J(t') = -a(R/W) J_0 (1 + bt')^{-(1+a/b\tau)} \quad (17)$$

なる表現が理論的に与えられる。

$J(t')$ の実測結果は t' が小さい範囲では、17式に示した双曲線関数型の減衰をほぼ満足したので、これをもとに定数の値を決定した。定数 a については無充填エポキシの場合 $a \approx 1$ が得られたが、この値はポリエチレン、¹³⁾ テフロン、¹⁸⁾ および同種のビスフェノール系エポキシ樹脂に対して得られている値²¹⁾ よりも著しく小さい。定数 b については実験値が試料間で大きなばらつきを示したが、 $b = 0.5 \sim 2 \text{ s}^{-1}$ を得た。

過剰電荷挙動の計算は(1)式において $G(x, t) = 0$ とし、 σ_r を σ_d に置き換えることにより行った。

4.2 計算結果

Fig. 25 に無充填エポキシの場合について一回目の放電(5秒間照射)直後およびそれから10分経過後の電界強度および過剰電荷密度の分布の計算結果を示す。定数 b については $b = 1 \text{ s}^{-1}$ とした。これから照射後の電荷漏洩の影響は非常に小さいことがわかった。

Fig. 26 に同じく無充填エポキシについて、5秒および500秒照射した後の前面および背面における電界値の時間的変動をそれぞれ示す。電界値は照射時間にほとんど関係なく、照射後10分間の減衰量の割合は表面で2%以下、背面で5%である。時間とともに減衰速度は低下するので、1時間経過しても減衰率はあまり変らない。 $b = 0.5 \text{ s}^{-1}$ とすると、減衰速度は2倍になるが、それが電界値そのものに与える影響は小さい。過剰電荷密度については、前面と背面と異なった変動の傾向を示す。

実際に用いるマイカエポキシの場合は、Fig. 9 に示すように背面電極電流測定において放

電パルスが発生するために、*delayed conductivity* に関して信頼し得る情報を得ることが困難であったが、無充填エポキシよりもむしろ蓄積電荷の漏洩速度は小さいものと推定される。

以上の結果は、5秒間の逃走電子放電の繰返しの間に設けられる時間間隔が過剰電荷の漏洩にはほとんど寄与しないことを示す。したがって放電の繰返しによる電界強度のビルドアップは長時間の定常的な連続照射の場合とあまり変わらないとみなせる。

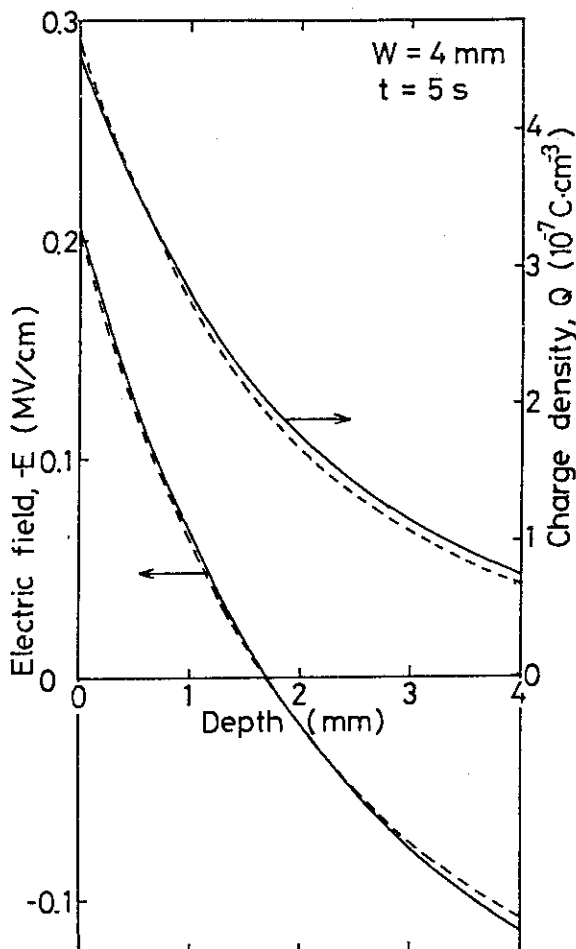


Fig. 25 The influence of cessation of irradiation on profiles of excess charge density and electric field strength in non-filled epoxy of 4mm thick after 5 second irradiation ($a=0.1$, $b=1 \text{ s}^{-1}$). solid line; immediate after irradiation, broken line; 10 minute after irradiation

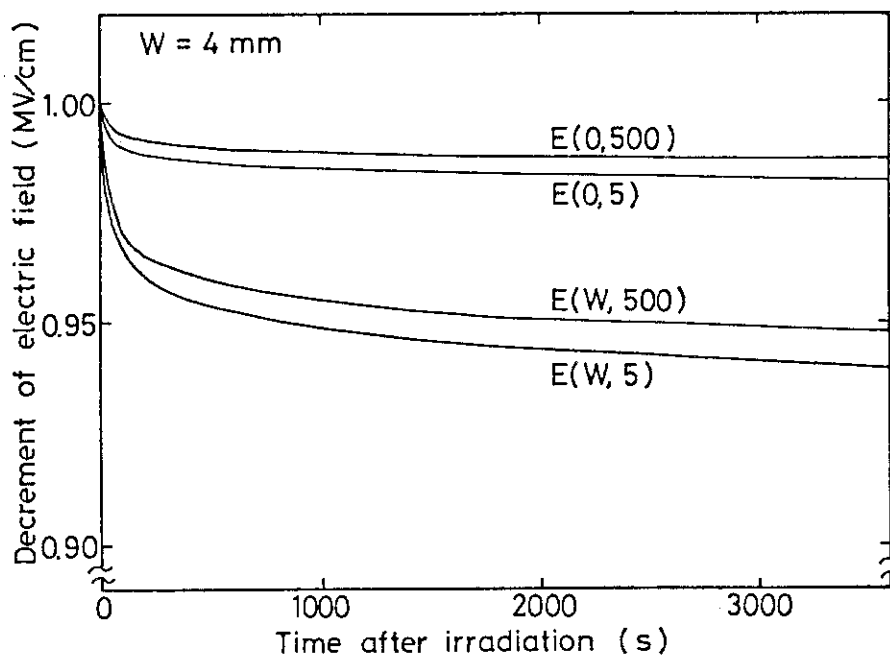


Fig. 26 Decreases of electric field strength at the front and rear face of non-filled epoxy of 4mm thick after 5 and 500 seconds irradiations

5. 過剰電荷と照射下でのX線誘起電流との関係

絶縁体内の電界強度を直接的に測定することは非常に困難である。しかし照射下でのX線誘起電流の測定によって電界強度に関する情報を間接的に得ることは可能である。ここでは照射下における絶縁体の外部電流と電界強度との関係を理論的に導くことを試みるとともに、実際のX線照射下で外部電流を測定し、計算結果と比較した結果について述べる。

5.1 理論的検討

Fig. 27 にX線照射下での絶縁体試料からの外部電流を測定するための一次元的なモデルを示す。測定対象の試料(厚さ W)のX線入射面については電子非平衡条件(a)と前方絶縁体をもつ電子平衡条件(b)の二つの場合を示した。 W の厚さは電子平衡厚以上の値とする。試料の背面については、(a)、(b)とも電子平衡条件を満たすための後方絶縁体を置いた。絶縁体からの外部電流は前面および背面の電極から検出する。絶縁体の間に電界が発生し、電極にイオン電荷が流れ込むことを防ぐため、すべての絶縁層の両面は零電位とする。外部電流検出用の負荷抵抗による試料電極の電位降下は無視できるとした。

(b)の試料内は2.3で述べたように、厳密には準電子平衡が成立し、少量の割合で負電荷が堆積するが、ここでは電子非平衡条件下での堆積率に比べて無視できると仮定する。

電子平衡条件および電子非平衡条件における試料内の電流密度をそれぞれ $J_e(x, t)$ 、 $J_n(x, t)$ とすると、過剰電荷の寄与分は

$$J_t(x, t) = J_n(x, t) - J_e(x, t) \quad (18)$$

により表わせる。 $J_t(x, t)$ は理論的には

$$J_t(x, t) = J(x) + \sigma_r(x)E(x, t) + \epsilon \dot{E}(x, t) \quad (19)$$

により与えられる。 $J(x)$ は試料内の過剰電荷に起因する入射電流密度であり、

$$J(x) = \int_x^W G(x) dx \quad (20)$$

により与えられる。

実測可能な外部電流密度は過剰電荷に起因する前面電極電流密度 $J_{tf}(t)$ および背面電極電流密度 $J_{tr}(t)$ であり、それぞれ電子非平衡条件と電子平衡条件における外部電流の差として与えられる。すなわち $J_{tf}(t) = J_{nf}(t) - J_{ef}(t)$ 、 $J_{tr}(t) = J_{nr}(t) - J_{er}(t)$ となる。

一次元の系では $\partial J_t(x, t) / \partial x = 0$ が成立するので、 $J_{tr}(t)$ は(19)式を用いると、

$$\begin{aligned} J_{tr}(t) &= J(0) + \sigma_r(0)E(0, t) + \epsilon \dot{E}(0, t) \\ &= J(W) + \sigma_r(W)E(W, t) + \epsilon \dot{E}(W, t) \end{aligned} \quad (21)$$

により表わせる。 $J(0)$ については

$$J(0) = J_{tr}(t) + J_{tf}(t) \quad (22)$$

なる関係が成立し、(20)式から $J(W)=0$ であるので、過剰電荷に起因する両電極からの外部電流密度はそれぞれ

$$\begin{aligned} J_{tf}(t) &= -(\sigma_r(0)E(0,t) + \epsilon \dot{E}(0,t)) \\ J_{tr}(t) &= \sigma_r(W)E(W,t) + \epsilon \dot{E}(W,t) \end{aligned} \quad (23)$$

となる。以上から前面および背面の電界飽和値は、 $\dot{E}(0, t_\infty) = \dot{E}(W, t_\infty) = 0$ を用いると、

$$\begin{aligned} E(0, t_\infty) &= -J_{tf}(t_\infty) / \sigma_r(0) \\ E(W, t_\infty) &= J_{tr}(t_\infty) / \sigma_r(W) \end{aligned} \quad (24)$$

となる。すなわち前面および背面の電界飽和値はそれぞれの面での放射線誘起電導度に対する過剰電荷に起因する外部電流密度の飽和値の比として表わすことができる。

5.2 実験方法

X線照射下での外部電流測定のためのX線照射方法をFig. 28に示す。電子線源には高崎研究所の2号加速器(ダイナミロン)からの3.3 MeV電子線を使用し、X線変換には水冷式のステンレス製ターゲット(全体の厚さ2.4mm)を使用した。X線に混在する電子線(ターゲットおよび空気中で発生)が試料に入射し、電子非平衡度が弱まるのを出来るかぎり防ぐため、磁極間隔120mm、磁極面積100×100mm、ターゲットと試料間に最大約 10^3 gaussの磁場を与えるような電磁石を設け、混在電子線を偏向させた。電子ビームの電流は7 mAとし、ビーム窓面上で17 cm幅にわたってビーム走査を行った。

試料内の線量率分布測定にはアルミニウムを蒸着した0.05 mmのポリエチレンテレフタレートを高圧電極とする外挿型平行平板型電離箱(Fig. 29)を用いた。 10^7 R/hの高照射線量率下でもイオン再結合をほとんど無視できるようにするため、電極間隔を2 mm、印加電圧を1000 Vとした。エポキシ樹脂内の深部線量率分布は高圧電極にポリエチレン吸収体を重ね、その厚さと電離電流との関係をもとにして推定した。試料面上の線量率分布はClear-PMMA線量計を用いて測定し、その均一性を確認した。

試料には無充填の酸無水硬化型ビスフェノール系エポキシ樹脂を用い、厚さは線量率分布測定の結果をもとにして5 mmとした。集電極の形状は50×50 mmの矩形および30 mmφの円形とし、その外縁に約1 mmの絶縁間隙を隔てて保護電極を設けた。

測定法はFig. 27に示すように、前面電極電流および背面電極電流を電子平衡下および電子非平衡下で測定した。照射下での実測電流には、電流検出用のリード線を通して余分の電流(ステム電流)が流れ込むが、この電流寄与は電子平衡下と電子非平衡下ではほとんど同一と考えられるので、両条件の差としての過剰電荷形成に起因する電流密度 $J_{tf}(t)$ 、 $J_{tr}(t)$

への影響は無視できる。

電流密度の計算に必要な $J(0)$ は(22)式を用いて実験的に求めた。

5.3 吸収線量率分布の測定結果

Fig. 30 に電子平衡下での線量率に対する表面線量率の比 \dot{D}_s/\dot{D}_e と混在電子線偏向用電磁石の励磁電流との関係を示す。励磁電流が増すに従って混在電子の入射量が減少するため \dot{D}_s は低下する。最大励磁電流 (1.28A) では $\dot{D}_s/\dot{D}_e = 0.45$ が得られた。

Fig. 31 に最大励磁電流のもとで得られたポリエチレン媒質中の相対的な深部線量率分布を示す。この曲線をもとにしてエポキシ樹脂内の $\dot{D}(x)/\dot{D}_e$ に対する近似式

$$\dot{D}(x)/\dot{D}_e = 1 - 0.55 e^{-0.89x} \quad (25)$$

を得た。 \dot{D}_e としては最大約 10^7 rad/h まで得ることができた。試料面内の線量率の均一度は 50×50 mm の広さにわたって約 5% であった。

Fig. 32 に混在電子線を含まない ^{60}Co γ 線が垂直に入射した場合のカーボン、アルミニウム内の深部線量率分布のモンテカルロ法による計算例²²⁾を示す。この分布では \dot{D}_s/\dot{D}_e は約 0.1 であるが、この値は高エネルギー X 線照射に対して仮定した値と同一である。実験値が 0.1 に比べて相当高い値を示した理由は、混在電子線の方が広い角度分布をもつため、磁場によって試料への入射を完全に防ぐことができなかつたこと、斜入射の影響および低エネルギー X 線の吸収効果などによると考えられる。

5.4 誘起電流の測定結果と計算結果との比較検討

Fig. 33 にそれぞれ前面電極電流密度および背面電極電流密度の時間的挙動についての実験結果と計算結果を示す。実験は 5×10^6 R/h の照射線量率および $J(0) = 1.44 \times 10^{-9}$ A/cm² で行った。計算は実験と同一条件を仮定して行い、(23)式から両電流密度を得た。

前面および背面ともに実験値は計算値とほぼ一致しているが、照射開始後の時間に伴う増減の傾向は実験と計算では異なる。また両方とも時間的な変動幅は小さい。前面電極電流密度はわずかに減少の傾向を示すが、その減少分に相当する量が背面電極電流密度の場合には増加となって現われる。実験値および計算値とも約 200 秒で一定値に達するが、計算値の場合、これは電界の飽和に対応する。

両電流密度の時間的変動が小さい理由は、計算結果から明らかなように、照射後の変位電流成分 $\epsilon \dot{E}$ の減少が伝導電流成分 $\sigma_r E$ の増大によって補われているためである。このことは過剰電荷の形成に伴う電界強度の増大は外部電流の変動に小さな影響しか与えないことを示す。したがって外部電流の変動のみから電界強度を推定することは難しいと考えられる。しかし電界飽和後の外部電流が伝導電流のみによるものと考えれば、(24)式が成立するので、放射線誘起電導度が与えられれば、電界飽和値のみについては求めることができる。電界が飽和する時間については、今回の実験からは外部電流が一定値になる時間にほぼ対応しているようにみえる。

外部電流の時間的振舞が実験と計算で異なる原因については不明である。 J_{tr} の時間的な増大傾向は k および β にはあまり依存しないが、 \dot{D}_s/\dot{D}_e が増すにともなって J_{tr} の増大傾向は弱まる。しかし J_{tr} の減少傾向はそれによって説明できない。おそらくここでは考慮されていない電流測定における実験上の要因の影響あるいは2.2における仮定(3)および4)に問題があるように思われる。

Fig. 34 に実験条件に合わせて計算した電界飽和後の5mm厚の無充填試料中の過剰電荷密度分布および電界強度分布の計算結果を示す。電界飽和値は表面で0.35 MV/cm、背面で0.06 MV/cm であり、実機の照射条件のもとで得られた計算値よりはるかに小さい。これは \dot{D}_s/\dot{D}_e が大きいことおよび光子エネルギーが小さいことによるものである。

Fig. 35 に前面電極電流密度および背面電極電流密度と照射線量率との関係を示す。測定値はいずれも照射開始10秒後のものである。これから両電流密度が線量率に比例することが確認された。また測定値のバラツキは試料間ではほとんど見られなかった。

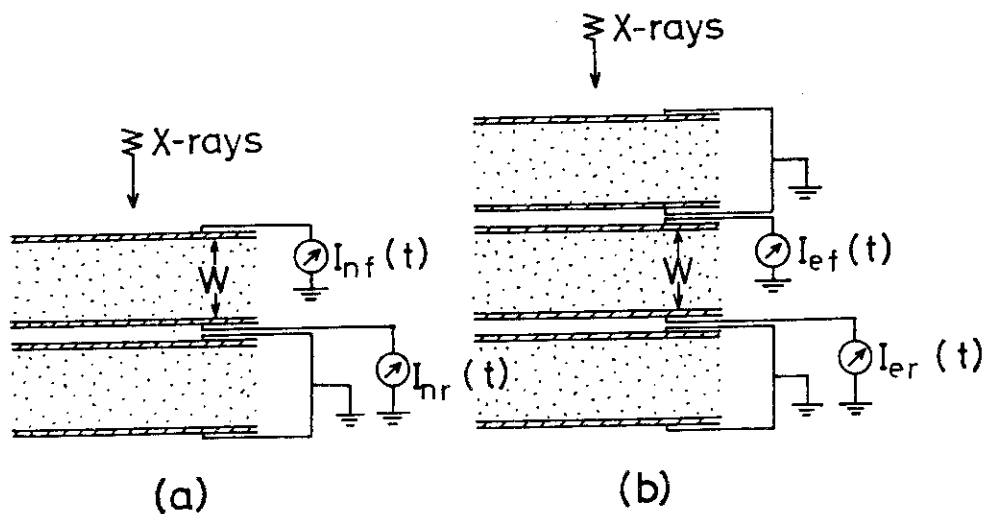


Fig. 27 One dimensional model for the measurement of external current from insulator under X-ray irradiation. (a) electronic non-equilibrium condition, (b) electronic equilibrium condition

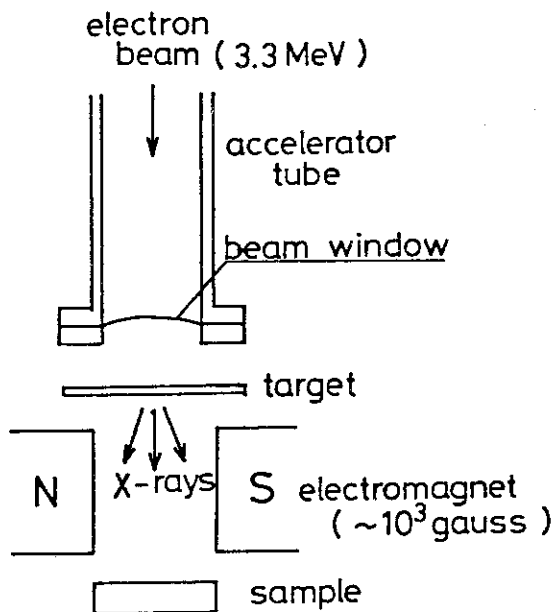


Fig. 28 Irradiation method of X-rays for measurement of external current

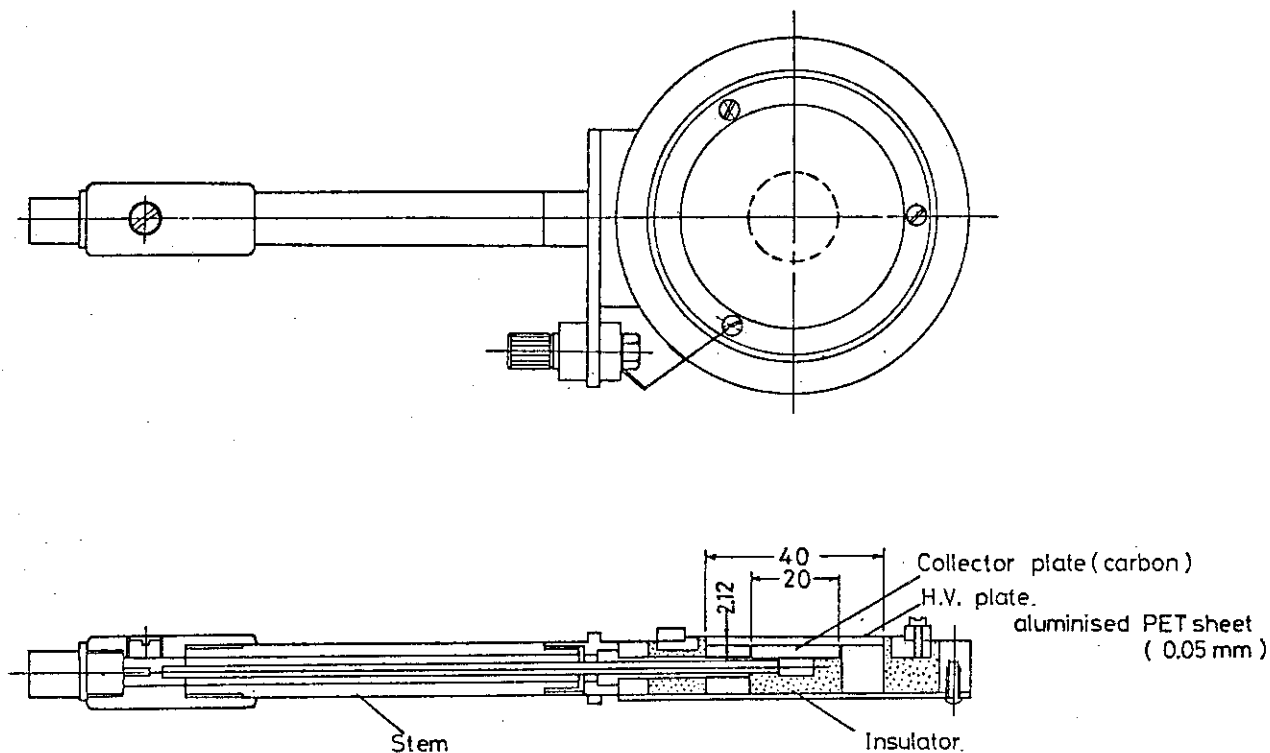


Fig. 29 Extraportion ionization chamber

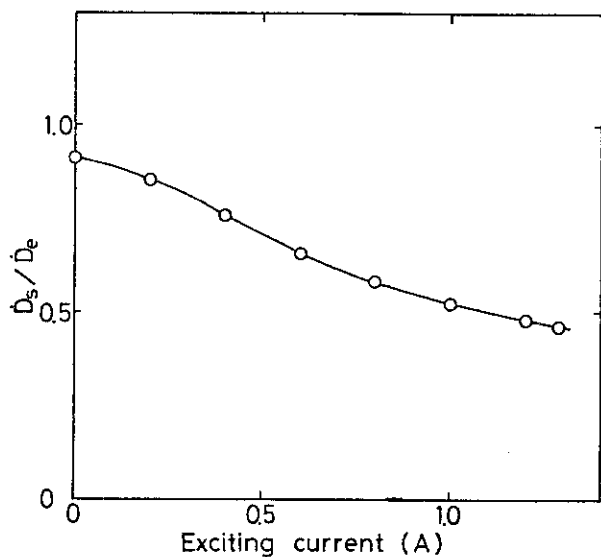


Fig. 30 The relation between the value of \dot{D}_s/\dot{D}_e and exciting current of the electromagnet

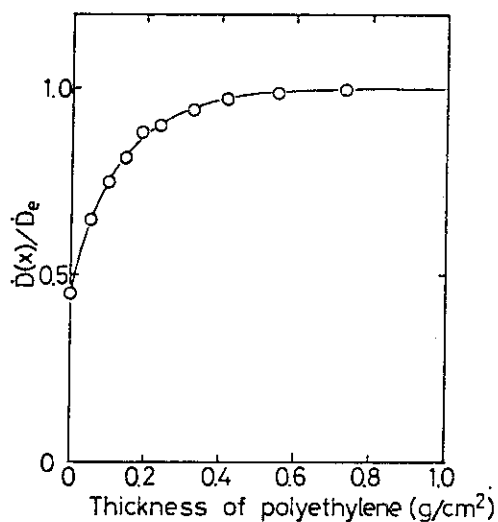


Fig. 31 Relative dose rate profile in polyethylene exposed to X-rays (3.3 MeV max.) at the maximum exciting current (1.25A)

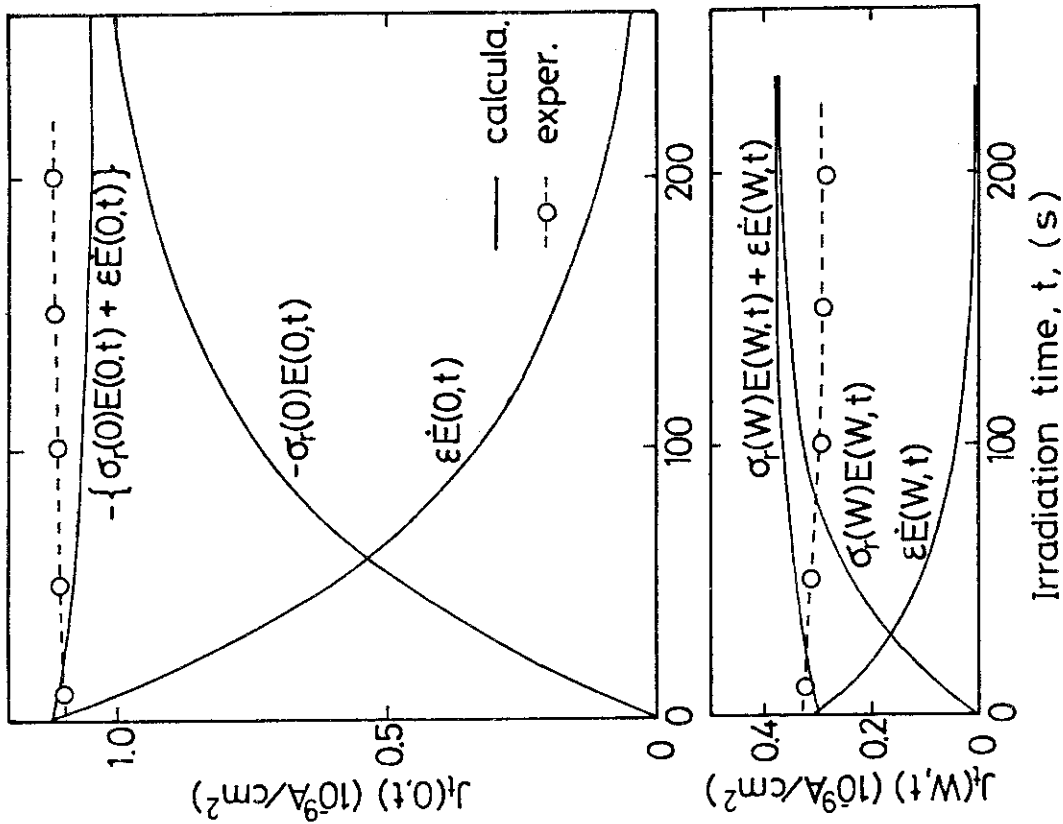


Fig. 33 Comparison of experimental and calculated results of the external current densities from the front and rear electrodes ($\dot{X}=5 \times 10^6$ R/h, $J(0)=1.44 \times 10^{-9}$ A/cm²)

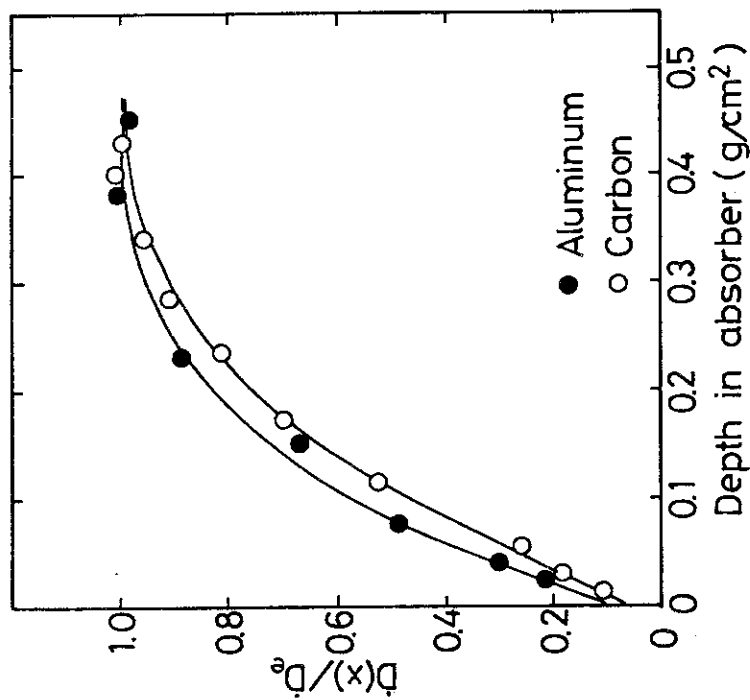


Fig. 32 Relative dose rate profiles in carbon and aluminum exposed to ⁶⁰Co γ rays without electron contamination. It was calculated by the Monte Carlo method.²²⁾

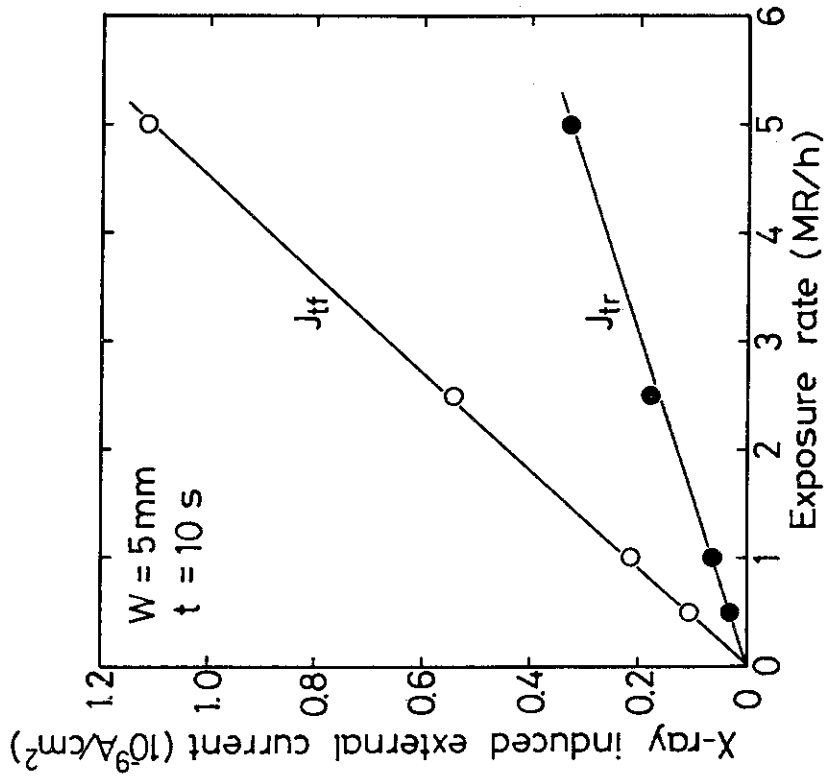


Fig. 35 Exposure rate dependence of X-ray induced external current density from the front and rear electrodes (W=5mm, t=10sec)

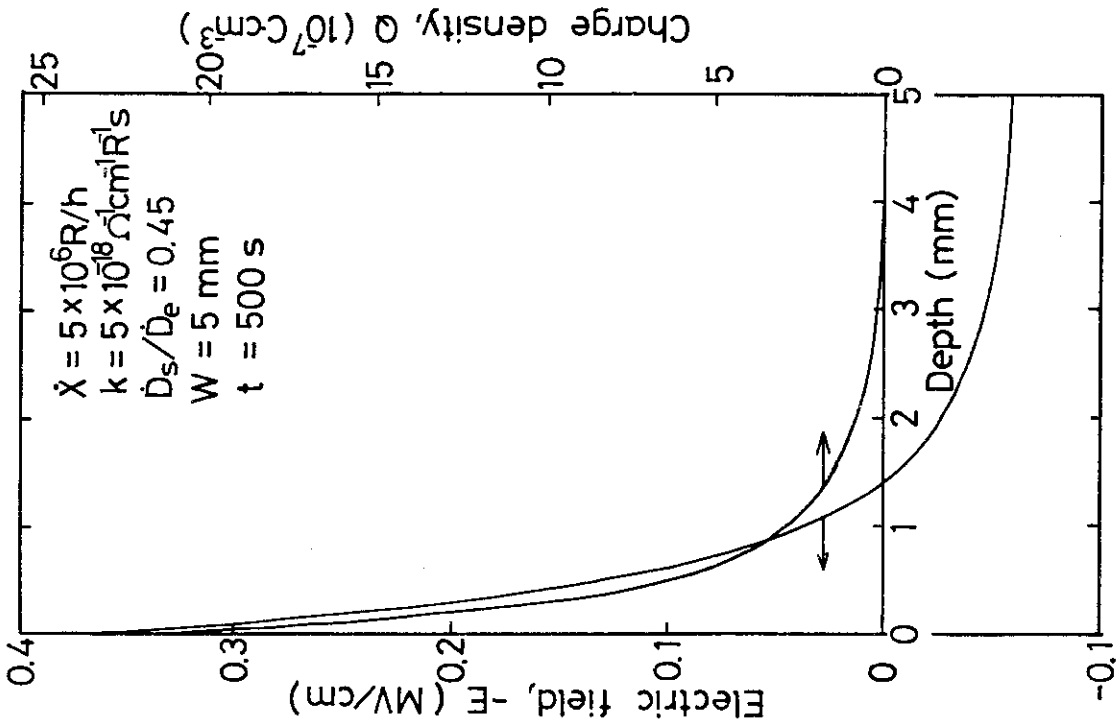


Fig. 34 Calculated profiles of excess charge density and electric field strength in non-filled epoxy of 5mm thick after saturation of electric field. ($\dot{X}=5 \times 10^6 \text{ R/h}$, $\dot{D}_s / \dot{D}_e = 0.45$)

6. 検 討

6.1 絶縁破壊の可能性に関する検討

以上の結果、照射停止時間中の電荷漏洩の影響を無視できるとすると、表面の電界強度はマイカエポキシの場合、20回の放電で 5 MV/cm に達し、その飽和値は 10 MV/cm 以上に達することがわかった。エポキシ樹脂の絶縁破壊の強さは $5\sim 10\text{ MV/cm}$ と考えられるので、本計算の仮定条件のもとでは、局所的な絶縁破壊を起すと考えられる。しかし 5 MV/cm 以上の電界値を示す絶縁層の厚さは表面から 0.4 mm 以内であり、それ以上の深さでは小さい値を示すので、こうした不平等電界のもとでは破壊は深部に進行していかないと推定される。

マイカエポキシを用いた split Faraday cup 法による背面電極電流測定で観測された部分放電現象については詳細は明らかでないが、これによって電界の緩和が考えられる。このことは Fig. 9 の電子線照射下での背面電極電流測定において放電パルス発生後、電流の減少傾向が弱まる現象が見られることから予想される。しかし部分放電による材料の劣化の可能性も考えられるので、今後部分放電現象についてはさらに追究する必要がある。

放電パルスとして観測される部分放電が照射開始後最初に発生するときの電界強度を知るため、エポキシ内部の電界強度の計算を試みた。計算に必要な過剰電荷堆積率 $G(x, t)$ はポリスチレンに対する電子透過度の実験結果をもとにして与えた。線量率分布 $\dot{D}(x, t)$ は CTA 線量計の測定結果¹⁴⁾をもとにして与えた。照射条件は電子エネルギー 3.25 MeV 、入射電子流密度は 150 nA/cm^2 、試料の厚さ 12 mm とした。絶縁体中の電子透過度は照射中変動しないと仮定した。

Fig. 36 に照射を開始してから2秒後(入射電荷密度 $0.3\text{ }\mu\text{C/cm}^2$)、5秒後および10秒後のマイカエポキシ内部の電界強度分布および過剰電荷密度分布の計算結果を示す。表面と背面の電界強度はほぼ同一の値を示す。放電パルス発生に関する Table 1 の結果から、室温付近では、照射開始後約2秒で放電パルスが発生しており、その時の電界強度の計算値は約 0.5 MV/cm である。この値は通常絶縁物に電圧を印加した状態で観測される部分放電の開始電界よりもかなり高い。

6.2 絶縁体の境界条件に関する検討

X線照射下における絶縁体表面(前面)の電位は2.2で述べた通り零電位に近いと考えられる。しかし絶縁体が真空の場に置かれる場合を想定すると、short circuit 条件は成立しない。open circuit 条件 ($V(W, t) = 0$, $J_f = 0$) を仮定すると、 $E(0, t) = 0$ となるが、この境界条件のもとで無充填エポキシ内の電界強度と電位を測定した結果を short circuit 条件の場合と対比して Fig. 37, Fig. 38 および Fig. 39 に示す。

背面における電界は立上りが早く、照射開始5秒後には約 0.3 MV/cm となり、short

circuit 条件の場合の 2.5 倍の値を示す。しかし飽和電界値はその 2 倍弱に低下する。蓄積する過剰電荷密度については open circuit 条件の方が小さいことが確かめられている。以上から、open circuit 条件の場合は short circuit 条件の場合とは逆に背面での電界強度の増大が問題となる。

一方照射停止期間中については、絶縁体表面が空気に接する場合でも、空気中のイオン電荷の補給が止まるため、コロナシールドがないとすると、表面電位の上昇の可能性がある。照射停止によって short circuit 条件が open circuit 条件に変わると仮定すると、無充填エポキシ内の電界分布は Fig. 40 に示すようになる。5 秒間照射の場合は open circuit 条件への変化によって背面での電界値は約 3 倍 (0.32 MV/cm) となる。500 秒照射の場合は 7.5 倍 (3 MV/cm) となり、表面の電位は 1 MV に達する。しかし実際にはコロナシールドがない場合でも、空気の絶縁破壊の強さは小さいので、絶縁体に接する空気の放電によってイオン電荷が供給されるため、open circuit 条件は成立せず、表面電位は低く保たれると考えられる。

6.3 その他の検討

上記の他以下のような検討を行った。

- (1) \dot{D}_s / \dot{D}_e は絶縁体表面近傍の電界強度を大きく左右するパラメータであるが、個々の照射条件によって異なり、予測が難しい。 ^{60}Co γ 線の場合には 1 より大きい値をもつこともある¹²⁾。本計算では 0.1 を仮定したが、実際には混在電子線、斜入射の影響などによりこれより大きな値をもつと推定される。したがって本計算の結果は電界値の上限を与えると考えられる。
- (2) 放射線誘起電導度 σ_r の高電界領域における電界依存性の問題は照射下での電荷挙動の解明にとって基本的に重要な問題であるが、この現象についてはあまり調べられてはいない。前田ら¹⁰⁾ はビスフェノール A 系エポキシ樹脂の場合、 10^4 V/cm 以上は σ_r は電界とともに増加する傾向があることを見出している。しかし、Fig. 8 のマイカエポキシに関する結果はこれとはむしろ逆の傾向を示す。また σ_r は照射履歴の影響を受けることも一般的に見出されている。今回はこれらの要因を無視したが、より正確な電荷挙動解明のためには、これらの現象を十分考慮する必要がある。split Faraday cup 法を用いて得られた σ_r はこうした現象に起因する σ_r の時間的変動を全体として包含した平均な値を与えると考えられる。
- (3) 照射停止期間中の電荷漏洩の取扱いに関しては、Fowler の荒い近似を適用したが、エポキシ樹脂の σ_d は非常に小さいため、この近似の有効性の確認はできなかった。 σ_d の大きい物質に対してその適用性を調べる必要がある。また σ_d の温度依存性についても明らかにする必要がある。
- (4) 飽和電界強度は平衡状態における放射線誘起電導度にはほぼ比例し、線量率には依存しないことが示された。これは放射線誘起電導度が線量率に比例すると仮定したことによるものと考えられる。しかし一般的には(3)式における線量率依存次数 Δ は 1 以下の値をもつもの

で、 Δ の影響について今後明らかにする必要がある。また光子エネルギーは過剰電荷堆積率およびその分布を通して内部電界に影響を与えるので、エネルギー依存性についても今後明らかにする必要がある。

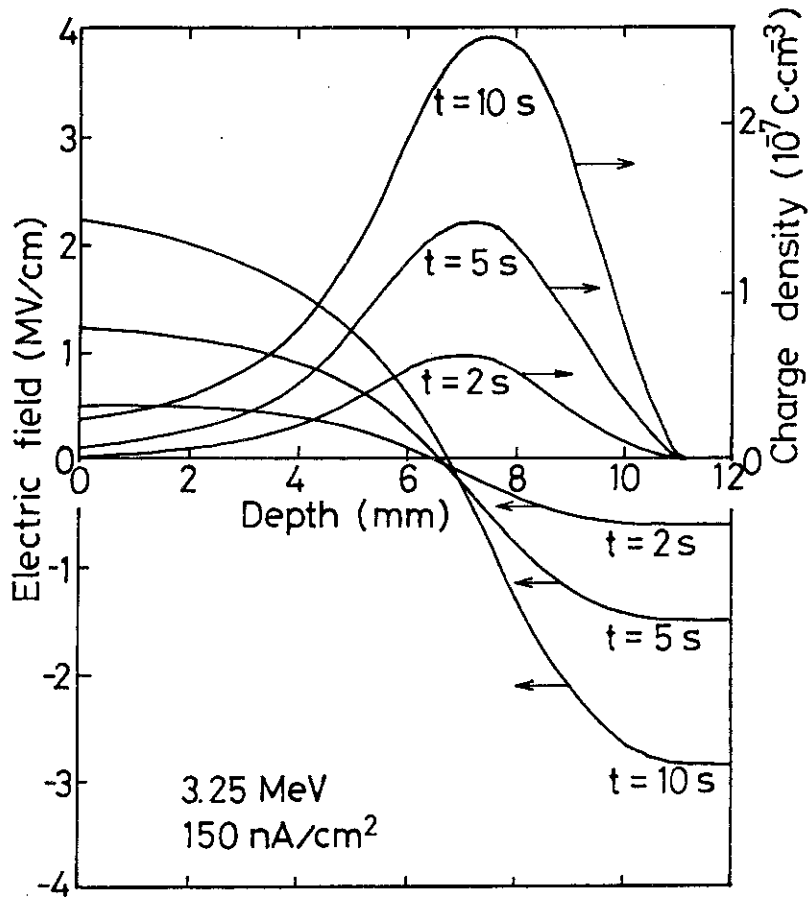


Fig. 36 Calculated profiles of excess charge density and electric field strength in mica-epoxy of 12mm thick exposed to 3.25 MeV electron beam ($J_0=150\text{nA}/\text{cm}^2$)

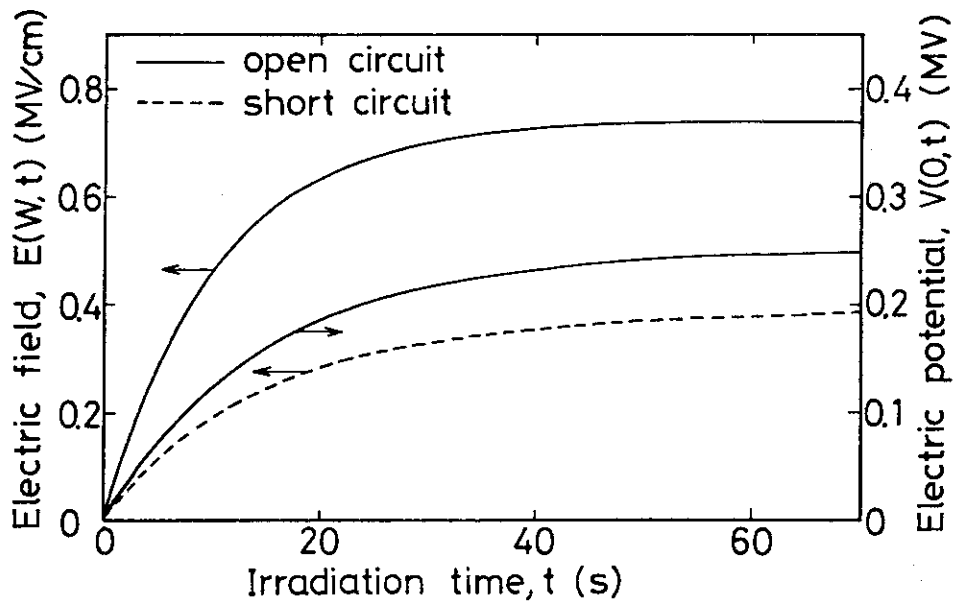


Fig. 37 Increases of electric field strength and electric potential at the rear face of non-filled epoxy of 4mm thick under continuous irradiation in open circuit condition

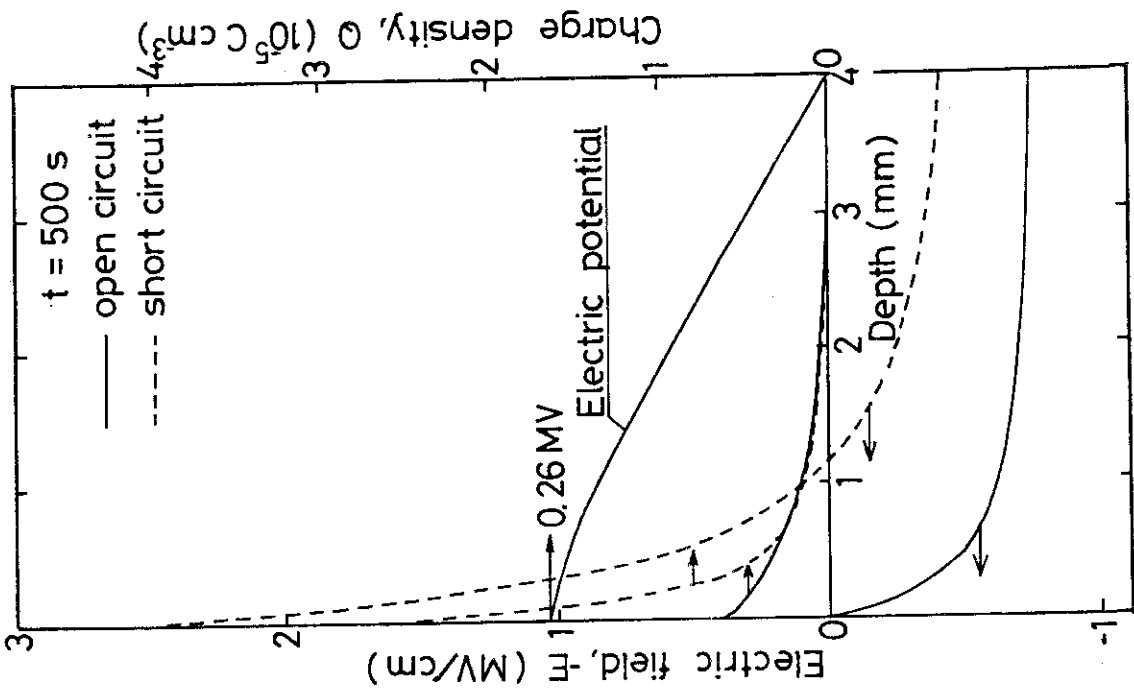


Fig. 39 Profiles of excess charge density, electron field strength and electric field strength in non-filled epoxy of 4mm thick after 500 second continuous irradiation

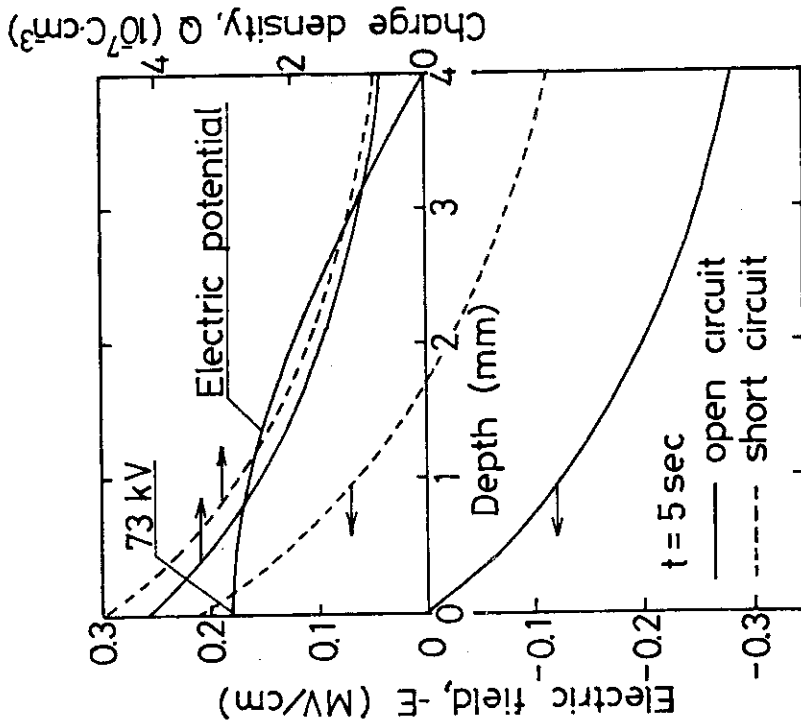


Fig. 38 Profiles of excess charge density, electron field strength and electric field strength in non-filled epoxy of 4mm thick after 5 seconds irradiation in open circuit condition

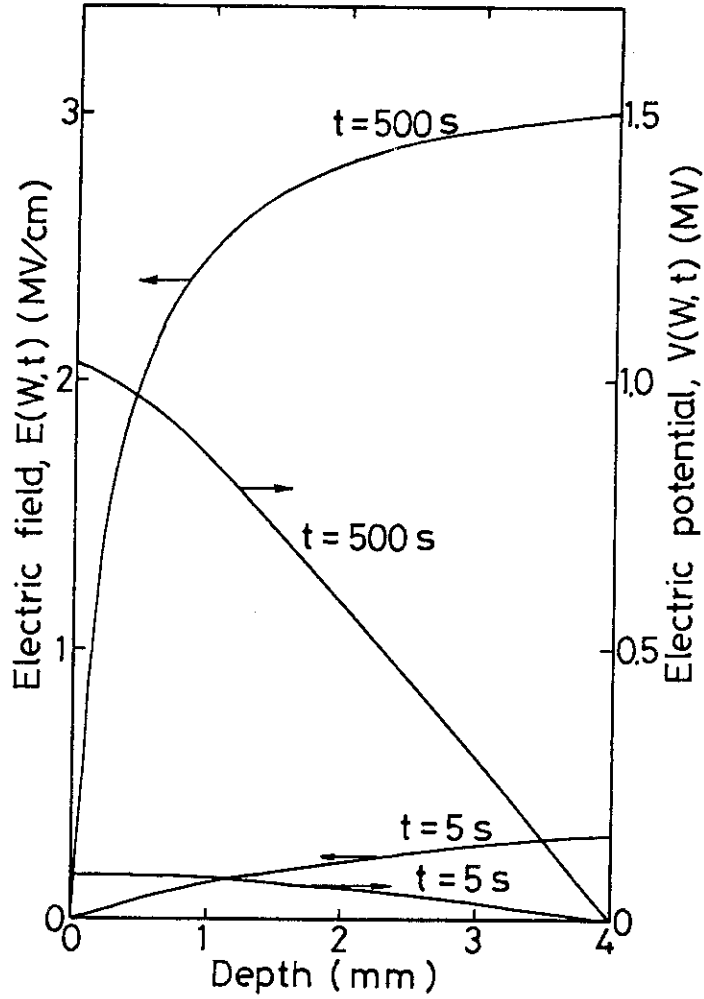


Fig. 40 Profiles of electric field strength and electric potential at the rear face of non-filled epoxy of 4mm thick after irradiation, assuming that the boundary condition is changed from short circuit to open circuit after the cessation of continuous irradiation

7. む す び

本研究によって電子線照射下のみでなく、X線照射下においても絶縁体内の過剰電荷蓄積によって表面近傍に絶縁破壊が生じる可能性が具体例としてはじめて明らかになった。また計算の結果を通して、電子混在比の少ないX線場に置かれた絶縁体内部には被照射面近傍に偏った空間電荷が形成され、それによる電界は放射線誘起電導度、電子非平衡度、光子エネルギー、線量率および絶縁体の厚さに依存することが明らかになった。特に本計算結果が高い電界値を与えた最大の理由は、エポキシ樹脂の平衡状態における放射線誘起電導度と *delayed conductivity* が他の絶縁物に比較して小さいこと、すなわち照射下での絶縁抵抗性がよいことにあるが、この結果は高放射線場の絶縁設計に対して重要な示唆を与えると考えられる。

本報告では計算を簡単にするため、多くの単純な仮定と荒い近似を用いた。照射された絶縁体内の空間電荷の挙動をさらに正確に知るためには、放射線によって誘起された電氣的効果に関する基礎的な研究の一層の蓄積が今後必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始有益な御意見をいただいた飯島勉 JT-60 第1開発室長に深く感謝致します。また放射線誘起電導度の測定に協力していただいた照射施設課学生研究生 望月清次氏(早稲田大学博士課程)に感謝致します。また試料の作製など御協力いただいた日立製作所の担当の方々に謝意を表します。

7. む す び

本研究によって電子線照射下のみでなく、X線照射下においても絶縁体内の過剰電荷蓄積によって表面近傍に絶縁破壊が生じる可能性が具体例としてはじめて明らかになった。また計算の結果を通して、電子混在比の少ないX線場に置かれた絶縁体内部には被照射面近傍に偏った空間電荷が形成され、それによる電界は放射線誘起電導度、電子非平衡度、光子エネルギー、線量率および絶縁体の厚さに依存することが明らかになった。特に本計算結果が高い電界値を与えた最大の理由は、エポキシ樹脂の平衡状態における放射線誘起電導度と *delayed conductivity* が他の絶縁物に比較して小さいこと、すなわち照射下での絶縁抵抗性がよいことにあるが、この結果は高放射線場の絶縁設計に対して重要な示唆を与えると考えられる。

本報告では計算を簡単にするため、多くの単純な仮定と荒い近似を用いた。照射された絶縁体内の空間電荷の挙動をさらに正確に知るためには、放射線によって誘起された電気的效果に関する基礎的な研究の一層の蓄積が今後必要である。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始有益な御意見をいただいた飯島勉 JT-60 第1開発室長に深く感謝致します。また放射線誘起電導度の測定に協力していただいた照射施設課学生研究生 望月清次氏(早稲田大学博士課程院)に感謝致します。また試料の作製など御協力いただいた日立製作所の担当の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) B.Gross : Phys. Rev. 110, 337 (1958)
- 2) P.V.Murphy and B.Gross: J.Appl.Phys. 35, 171 (1964)
- 3) W.L.Chadsey : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-21, 235 (1974)
- 4) S.Kronenberg, et al. : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-21 243(1974)
- 5) R.Frederikson : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-22, 2556(1975)
- 6) F.C.Kooi and M.Kusnezov : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-20,
No 6, 97 (1973)
- 7) 安東, 田中, 平尾, 田村, 大久保, 飯島, 家田, 長尾, 安芸, 佐藤, 後藤, 渡辺 :
JAERI-M 8360 (1979)
- 8) J.D.Strachan, E.B.Meservey, et al. : Nucl. Fusion 17 1 (1977)
- 9) 日本原子力研究所: 核融合研究開発の現状(1979)
- 10) 前田, 中北: 電学誌 A 98, 503 (昭53-10)
- 11) G.N.Whyte : Principles of Radiation Dosimetry, John Wiley & Sons,
Inc., New York, (1959)
- 12) 田中, 金子, 田村: 第17回理工学における同位元素研究発表会要旨集, p.60(1980)
- 13) S.Matsuoka, H.Sunaga, R.Tanaka, M.Hagiwara and K. Araki : IEEE
Trans. Nucl. Sci. NS-23, 1447(1976)
- 14) R.Tanaka, H.Sunaga and N.Tamura : IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-26,
4670(1979)
- 15) The Scientific Sub-Committee of the Hospital physicists'
Association : Brit. J. Radiology, Supplement No 10 (1961)
- 16) 岡部, 多幡, 中井: 応用物理 45, 2 (1976)
- 17) T.A.Dellin and C.J.MacCallum : SCR-PR-720086(1972)
- 18) B.Gross, G.M.Sessler, and J.E. West : J.Appl. Phys. 45,
2841 (1974)
- 19) S.E.Harrison, F.N.Coppage and A.S.Snyder : IEEE Trans. Nucl.
Sci. NS-10, 118 (1963)
- 20) J.Fowler : Proc. Roy. Soc. (London) A 236, 464(1956)
- 21) 前田, 伊藤, 中北: 電気学会絶縁材料研究会資料 EIM-76-68 (1976)
- 22) Fujioka, Master thesis, Nagoya Univ. (1975)