

JAERI - M  
88-197

高分子絶縁材料の $\gamma$ 線と電子線の  
照射効果の比較

1988年10月

春山 保幸・森田 洋右・瀬口 忠男・田中 隆一  
金沢 孝夫・四本 圭一・吉田 健三

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 山田軽印刷所

## 高分子絶縁材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果の比較

日本原子力研究所高崎研究所開発部

春山保幸・森田洋右・瀬口忠男・田中隆一

金沢孝夫・四本圭一・吉田健三

(1988年9月10日受理)

原子炉や大出力加速器照射施設等の放射線環境下で、絶縁材、潤滑材、シール材等として多くの有機高分子材料が使用されている。これらの材料は $\gamma$ 線、X線、電子線、中性子線などが混合した放射線にさらされ、機械的、電気的特性が低下していく。高分子材料の耐放射線性の評価にあたってはこれら材料の線質による照射劣化の相違を十分に把握する必要がある。

高分子材料の劣化に対する $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較するために、7種類の高分子絶縁材料、ポリエチレン(PE)、ポリプロピレン(PP)、シリコンゴム(SiR)、天然ゴム(NR)、フッ素ゴム(FR)、エチレン酢酸ビニル共重合体(EVA)、ブチルゴム(IIR)を選び、真空中室温で $^{60}\text{Co}$ - $\gamma$ 線と電子線で照射した。線量測定は $\gamma$ 線では電離箱を用い、電子線ではCTA線量計を使用して、各高分子絶縁材料に対する吸収線量を求めた。照射後、高分子の劣化は分解ガス発生量、ゲル分率および膨潤比の測定、引張試験の3種類の方法で行った。

その結果、引張試験やゲル分率および膨潤比の比較では、EVAを除いた6種類の高分子は照射効果は同一と見なせることが分った。しかし、分解ガス発生量で比較すると、 $\gamma$ 線照射の方が電子線照射より若干大きいという結果となった。EVAの劣化は $\gamma$ 線と電子線とで多少異なっており、 $\gamma$ 線照射の方が引張試験で劣化が大きくなっていた。

Comparison of Gamma-ray and Electron Beam Induced  
Degradation of Polymer Insulating Materials

Yasuyuki HARUYAMA, Yohsuke MORITA, Tadao SEGUCHI  
Ryuichi TANAKA, Takao KANAZAWA, Keiichi YOTSUMOTO  
and Kenzo YOSHIDA

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

(Received September 10, 1988)

In the radiation environments of nuclear reactors and high power particle accelerators, large amounts of organic polymer materials are used as electric insulator, lubricant, sealant, etc. The mechanical and electrical properties of these materials are gradually degraded by the exposure of mixed radiation of gamma-rays, X-rays, electrons and neutrons. For the precise evaluation of radiation resistance, it is necessary to understand the degradation behavior of polymer materials by various kinds of radiations.

For the comparison of gamma-rays and electron beam induced degradation, seven polymer materials, polyethylene (PE), polypropylene (PP), silicone rubber (SiR), natural rubber (NR), fluorine rubber (FR), ethylene-vinylacetate copolymer (EVA) and isobutylene-isoprene rubber (IIR) were irradiated with Co-60 gamma-rays and 2MeV electron beam under vacuum at room temperature. Exposure rate of gamma-rays and absorbed dose of electron beam were measured by use of an ionization chamber and CTA film dosimeter, respectively. Degradation of irradiated materials was estimated by the measurement of gas evolution, gel fraction and swelling ratio, and tensile properties.

Six polymers except EVA showed almost the same degradation behavior for gamma-rays and electron beam through the gel fraction and swelling ratio measurements and the tensile tests, whereas gas evolution was slightly accelerated by gamma-ray irradiation. EVA showed a different

degradation behavior for gamma-rays and electron beams; larger decreases of the tensile properties were observed for the samples irradiated with gamma-rays.

Keywords : Irradiation Effect, Polymer Insulating Materials, Degradation, Co-60 Gamma-rays, Electron Beam, Gas Evolution, Tensile Test, Gel Fraction and Swelling Ratio

## 目 次

1. 緒 言 .....	1
2. $\gamma$ 線と電子線の線量測定 .....	1
2.1 はじめに .....	1
2.2 実 験 .....	2
2.2.1 照射条件および照射容器 .....	2
2.2.2 線量計 .....	2
2.3 線量測定結果 .....	3
2.3.1 深部吸収線量分布の測定 .....	3
2.3.2 線量率の測定 .....	4
2.4 照射による高分子材料の温度上昇 .....	4
2.4.1 実験方法 .....	4
2.4.2 高分子材料の温度上昇 .....	5
2.5 まとめ .....	5
3. 高分子絶縁材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果の比較 .....	6
3.1 はじめに .....	6
3.2 照射試料 .....	6
3.3 照射方法および条件 .....	6
3.4 測 定 .....	7
3.4.1 分解ガス発生量の測定 .....	7
3.4.2 引張試験 .....	7
3.4.3 ゲル分率および膨潤比の測定 .....	7
3.5 高分子絶縁材料の照射効果の比較 .....	7
3.5.1 高分子絶縁材料の吸収線量 .....	7
3.5.2 分解ガス発生量による比較 .....	8
3.5.3 引張試験による比較 .....	8
3.5.4 ゲル分率および膨潤比による比較 .....	9
3.6 まとめ .....	9
4. 結 言 .....	10
謝 辞 .....	10
参考文献 .....	11

## Contents

1. Introduction .....	1
2. Dosimetry of $\gamma$ -ray and electron beam .....	1
2.1 Introduction .....	1
2.2 Experiments .....	2
2.2.1 Irradiation condition and irradiation vessel .....	2
2.2.2 Dosimeters .....	2
2.3 Results of dose measurement .....	3
2.3.1 Measurement of depth-dose distribution .....	3
2.3.2 Measurement of dose rate .....	4
2.4 Temperature rise in polymer materials by irradiation .....	4
2.4.1 Experiments .....	4
2.4.2 Temperature rise of polymer materials .....	5
2.5 Conclusion .....	5
3. Comparison of radiation effect of $\gamma$ -ray and electron beam on polymer insulating materials .....	6
3.1 Introduction .....	6
3.2 Irradiation sample .....	6
3.3 Irradiation method and condition .....	6
3.4 Measurement .....	7
3.4.1 Measurement of gas evolution .....	7
3.4.2 Tensile test .....	7
3.4.3 Measurements of gel fraction and swelling ratio .....	7
3.5 Comparison of radiation effects on polymeric insulating materials .....	7
3.5.1 Absorbed dose in polymer .....	7
3.5.2 Comparison of gas evolution .....	8
3.5.3 Comparison of tensile test .....	8
3.5.4 Comparison of gel fraction and swelling ratio .....	9
3.6 Conclusion .....	9
4. Summary .....	10
Acknowledgement .....	10
References .....	11

# 1. 緒 言

近年、種々の高分子材料が原子力発電所や大型の照射施設などで使用されるようになってきた。これらの施設における照射環境は単一の放射線による照射ではなく、 $\gamma$ 線、電子線、中性子線などの混合照射場であることが多い。このような環境下での高分子材料の耐放射線性を評価する場合、これらの線質の違いによる照射効果について十分な検討をしておく必要がある。

これまでに有機材料の耐放射線性の研究は多数報告されているが、その多くは $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線か、あるいは加速器による電子線照射で行われている。また、原子炉で照射した研究もあるが、この場合にはその原子炉固有の広いエネルギー分布を持つ中性子線、 $\gamma$ 線、 $\beta$ 線の混合照射である。

有機材料に対する $\gamma$ 線と電子線の照射効果は基本的には同じであるとされている。それは $\gamma$ 線と物質との相互作用は、光電効果、コンプトン効果を経て最終的には電子と物質との作用になるからである。しかしながら、実用の材料について、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線、電子線および原子炉照射による照射効果を相互に比較した実験は非常に少ない<sup>1)</sup>。放射線の種類が異なると、有機材料に対する吸収線量の評価および線量率、照射雰囲気、温度などの照射条件を同一に設定することが容易でないこと、また材料劣化を精度よく測定する適当な方法が少ないことなどの理由で相互比較の実験があまり行われなかったものと考えられる。

本研究では放射線環境で電線絶縁材料としてよく使用される高分子材料を選び、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線と加速器による電子線(2 MeV)による照射効果を正確に比較することを試みた。

## 2. $\gamma$ 線と電子線の線量測定

### 2.1 はじめに

高分子材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較するに際して、まず初めに、線量測定を正確に行う必要がある。よく知られているように、 $\gamma$ 線は物質透過性が非常に大きく、一方電子線は $\gamma$ 線に比べ透過性は小さい。ステンレス製やガラス製照射容器内の高分子材料をこれらの放射線で照射し、高分子材料の吸収線量を正確に求めるには、 $\gamma$ 線照射では電子平衡や後方散乱の影響を、電子線ではこれらの効果の他に深部吸収線量分布を求めなければならない。

本章では、照射実験に用いた照射容器内における高分子材料の線量を、電離箱、CTA(三酢酸セルロース)フィルム線量計を使用して測定した結果について述べる。



## 1. 緒 言

近年、種々の高分子材料が原子力発電所や大型の照射施設などで使用されるようになってきた。これらの施設における照射環境は単一の放射線による照射ではなく、 $\gamma$ 線、電子線、中性子線などの混合照射場であることが多い。このような環境下での高分子材料の耐放射線性を評価する場合、これらの線質の違いによる照射効果について十分な検討をしておく必要がある。

これまでに有機材料の耐放射線性の研究は多数報告されているが、その多くは $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線か、あるいは加速器による電子線照射で行われている。また、原子炉で照射した研究もあるが、この場合にはその原子炉固有の広いエネルギー分布を持つ中性子線、 $\gamma$ 線、 $\beta$ 線の混合照射である。

有機材料に対する $\gamma$ 線と電子線の照射効果は基本的には同じであるとされている。それは $\gamma$ 線と物質との相互作用は、光電効果、コンプトン効果を経て最終的には電子と物質との作用になるからである。しかしながら、実用の材料について、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線、電子線および原子炉照射による照射効果を相互に比較した実験は非常に少ない<sup>1)</sup>。放射線の種類が異なると、有機材料に対する吸収線量の評価および線量率、照射雰囲気、温度などの照射条件を同一に設定することが容易でないこと、また材料劣化を精度よく測定する適当な方法が少ないことなどの理由で相互比較の実験があまり行われなかったものと考えられる。

本研究では放射線環境で電線絶縁材料としてよく使用される高分子材料を選び、 $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ 線と加速器による電子線(2 MeV)による照射効果を正確に比較することを試みた。

## 2. $\gamma$ 線と電子線の線量測定

### 2.1 はじめに

高分子材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較するに際して、まず初めに、線量測定を正確に行う必要がある。よく知られているように、 $\gamma$ 線は物質透過性が非常に大きく、一方電子線は $\gamma$ 線に比べ透過性は小さい。ステンレス製やガラス製照射容器内の高分子材料をこれらの放射線で照射し、高分子材料の吸収線量を正確に求めるには、 $\gamma$ 線照射では電子平衡や後方散乱の影響を、電子線ではこれらの効果の他に深部吸収線量分布を求めなければならない。

本章では、照射実験に用いた照射容器内における高分子材料の線量を、電離箱、CTA(三酢酸セルロース)フィルム線量計を使用して測定した結果について述べる。

## 2.2 実験

### 2.2.1 照射条件および照射容器

#### (1) 線源および照射条件

高分子絶縁材料の $\gamma$ 線照射は、日本原子力研究所高崎研究所コバルト第2棟第6照射室( $^{60}\text{Co}$ 板状線源  $8.5 \text{ p B q}$  ( $230 \text{ kCi}$ ))で、照射線量率  $258 \text{ Ckg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ( $1 \text{ MR/h}$ )の位置で行った。また、低線量率照射の場合には同所内のR I棟コバルト第1照射室(同筒状線源  $37 \text{ TBq}$  ( $1 \text{ kCi}$ ))で、照射線量率  $2.58 \text{ Ckg}^{-1} \text{ h}^{-1}$  ( $10 \text{ kR/h}$ )で行った。

電子線照射は同所1号加速器(コッククロフト・ワルトン型、定格出力  $2 \text{ MV}$ ,  $30 \text{ mA}$ ,  $60 \text{ kW}$ , 日新ハイボルテージ社製)<sup>2)</sup>を使用し、加速器照射窓から試料面までの距離を  $30 \text{ cm}$ の位置に固定し、静止照射を行った。照射条件は、 $2.0 \text{ MV}$ ,  $0.1 \text{ mA}$ , 走査幅  $120 \text{ cm}$ で行った。

#### (2) 照射容器

$\gamma$ 線は透過力が大きいので、照射容器の材質や板厚などの影響は少ないが、散乱線および2次電子線の影響を考慮する必要がある。一方、電子線の場合は透過力が小さいので、照射容器の入射窓の材質や箔厚などにより減衰の程度が大きく変わってくる。

照射容器として、 $\gamma$ 線では Fig. 1 に示すガラスアンプル(ガラス厚  $1 \text{ mm}$ )および Fig. 2 に示すステンレス製真空照射容器(SUS 304, 壁厚  $3 \text{ mm}$ , 以下、 $\gamma$ 線照射容器と略す)を用い、電子線では $\gamma$ 線と同様のガラスアンプルおよび電子線照射用に製作した Fig. 3 に示す真鍮製真空照射容器(以下、電子線照射容器と略す)を用いた。電子線照射容器は、入射窓に厚さ  $50 \mu\text{m}$ のチタン箔を使用し、電子線の損失を極力少なくするようにした。また、照射による発熱を防止するため容器壁を水で冷却できる構造とした。

### 2.2.2 線量計

線量測定は、電離箱およびCTA線量計を用いて行った。これらの線量計の概略を Table 1 に示す。

#### (1) 電離箱

電離箱<sup>3)</sup>は $\gamma$ 線照射線量率を測定する線量計であり、 $\gamma$ 線照射容器内の照射線量率の基準測定には、電子技術総合研究所より校正定数の与えられた電離箱を用いた<sup>4)</sup>。試料の取り出し口の寸法が広い $\gamma$ 線照射容器では、電離容積  $0.3 \text{ cc}$ の平行平板型電離箱を使用し、ガラスアンプルの照射容器では口径が  $25 \text{ mm}$ と狭いため電離容積  $0.6 \text{ cc}$ の指頭型電離箱を使用した。

照射線量率( $\dot{X}$ )は、電離箱の測定電流値から次式により求めた。なお、次式は電離箱の空気に対する平均質量阻止能比、質量エネルギー吸収係数等の補正係数と、電子技術総合研究所より与えられた校正定数を基にして簡略化したものである。

$$\dot{X} = 7.71 \times 10^9 \times K \times I \quad (\text{Ckg}^{-1} \text{ h}^{-1}) \quad [\text{平行平板型}]$$

$$(\quad = 2.99 \times 10^{13} \times K \times I \quad (\text{R/h}))$$

$$\dot{X} = 4.62 \times 10^9 \times K \times I \quad (\text{Ckg}^{-1} \text{ h}^{-1}) \quad [\text{指頭型}]$$

$$(\quad = 1.79 \times 10^{13} \times K \times I \quad (\text{R/h}))$$

$$K = \frac{273.15 + T}{273.15} \times \frac{1013.25}{P}$$

ここでKは照射室の室温T(°C)および気圧P(mb)の補正值、Iは測定電流(A)である。平行平板型電離箱の場合は+、-各150V、指頭型では同様に300Vの印加電圧で測定した時の電流の絶対値の平均を用いた。

## (2) CTA線量計

CTA線量計(富士写真フィルム製FTR-125)<sup>5)</sup>は電子線の吸収線量の測定用に開発されたものであり、測定範囲(10kGy~150kGy)が広いこと、測定方法が確立されていること、取扱いが容易であることなどの特徴がある。このフィルム線量計を電子線の線量測定および、 $\gamma$ 線と電子線の深部吸収線量分布の測定に使用した。

CTA線量計では、分光光度計で測定した吸光度の変化から次式により吸収線量(Dc)を求めた<sup>5)</sup>。

$$Dc = \frac{(A_2 - A_1)}{K} \times \frac{0.125}{t} \times f \times 10 \text{ (kGy)}$$

ここでA<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>は照射前・後の吸光度、tはCTAフィルムの厚さ(mm)、Kは校正定数(0.063)、fは照射直後から吸光度測定までの経過時間による補正係数である。

なお、上式において校正定数(K)は、 $\gamma$ 線の場合空气中照射では線量率依存性があるが、真空中照射では電子線照射と同一の値である。また、CTA線量計は<sup>60</sup>Co  $\gamma$ 線に対しては電離箱とフリッケ線量計、電子線に対してはビーム電流測定法とカロリメトリーを用いて線量校正されている<sup>6)</sup>。

## 2.3 線量測定結果

### 2.3.1 深部吸収線量分布の測定

高分子材料の吸収線量を正確に評価するには、照射試料の内部方向の線量分布、すなわち深部吸収線量分布を測定する必要がある。ガラスアンプル、 $\gamma$ 線照射容器、電子線照射容器内にFig. 4、Fig. 5およびFig. 6に示すように、ポリエチレン板(1mm厚)に挟んだCTA線量計を置き、各照射容器内の深部吸収線量分布を測定した。この結果をFig. 7およびFig. 8に示す。

Fig. 7の $\gamma$ 線照射容器内の深部線量分布は、表面より0.3~0.8g/cm<sup>2</sup>まではほぼ均一な分布が得られた。しかし、さらに深いところでは容器後方の3mm厚のステンレス板からの後方散乱によって高い線量を示した。このことから、後述する高分子材料の $\gamma$ 線照射時には、照射試料の前後にポリエチレンまたはポリメチルメタクリレートの照射試料と分子構造のほぼ等価な厚さ3mmの高分子材料を置いて、深さ方向で線量が均一(電子平衡状態)となるようにした。

Fig. 8のチタン箔の入射窓を持つ電子線照射容器内では、表面から0.3g/cm<sup>2</sup>付近に線量分布のピークがあり、最大飛程は約1g/cm<sup>2</sup>である。これに対しガラスアンプルでは、ガラスの厚さ(1mm)によって電子は大きなエネルギー損失を受け、深部吸収線量分布はピークを示さず表面

から単調に減少し、最大飛程も低下した。従って電子線で高分子材料を照射する場合、後述するように深部吸収線量分布の測定結果を基にして、各試料の吸収線量を求めなければならない。

なお、電子線照射では後方散乱の影響を除くため、電子線照射容器内の底部およびガラスアンプルの下に3mm厚のポリエチレンの板をあらかじめ置いて照射した。

### 2.3.2 線量率の測定

$\gamma$ 線および電子線照射時の各照射容器内の線量率の測定結果をTable 2に示す。 $\gamma$ 線照射は電離箱により求めた照射線量率、電子線照射はCTA線量計の吸収線量率で表わした。 $\gamma$ 線照射では後方散乱を除けば容器内の線量分布はほぼ一定とみなせることから、照射容器中心部での測定値を照射容器内の線量率とした。電子線照射ではCTA線量計による深部吸収線量分布と試料の密度を基にして、厚さ1mmのCTAの吸収線量を求め、これを容器内の線量率とした。ガラスアンプル容器の場合は、300、500、1000、1500秒照射後のCTA吸収線量の平均値を用い、電子線照射容器の場合は600秒照射して線量率を決定した。

その結果、 $\gamma$ 線照射では空気中に比べ照射線量率がガラスアンプル内では1%、 $\gamma$ 線照射容器内では8%減衰した。一方、電子線照射では吸収線量率がガラスアンプル内では33%、電子線照射容器内では29%減少することが確かめられた。電子線照射においてガラスアンプル内の線量率の方が低くなるのは、後述する深部吸収線量分布から明らかのように、電子線照射容器の入射窓の50 $\mu$ m厚のチタン箔よりもガラスアンプルの1mm厚のガラスの方が、散乱および吸収により電子線エネルギーを減衰させる効果が大きいことによる。

$\gamma$ 線と電子線の高分子材料における照射効果を比較するには、出来る限り両者の照射条件、特に線量率が同一であることが望ましい。しかし、本実験に使用した電子加速器の電子流制御範囲の下限値は0.1mAであり、表2に示すように電子線の方が $\gamma$ 線よりも約50倍大きい線量率となった。このため、後述する高分子材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果の比較実験では、真空中照射の場合、高分子材料中で酸素の拡散の影響による線量率効果が現れるため、全て真空中で照射を行った。しかし、真空中においても線量率依存性があるか否かを検討するため、 $^{60}\text{Co}$  $\gamma$ 線で線量率が2.58 Ckg $^{-1}$ h $^{-1}$  (10 $^4$  R/h)の照射を行い、線量率の違いによる照射効果の差異を調べた。

## 2.4 照射による高分子材料の温度上昇

高分子材料は一般に熱伝導率が小さく、従って高線量率照射や真空中照射では、照射試料の温度上昇が問題となる。 $\gamma$ 線と電子線照射において照射による試料温度の上昇する割合が異なる場合は、照射劣化を評価する際に温度による効果も考慮しなければならない。このため、後述する高分子材料の照射実験と同様の照射条件にて、 $\gamma$ 線照射と電子線照射に伴う高分子材料の温度上昇をあらかじめ測定した。

### 2.4.1 実験方法

高分子絶縁材料として、ポリエチレン(PE)およびエチレン酢酸ビニル共重合体(EVA)を用いて、温度上昇の測定を行った。 $\gamma$ 線照射時の温度上昇の測定のために、熱電対をPEおよ

びEVAの各シート状試料の間に挟み込み、プレス成形機で加熱成形した。試料の厚さは1mmで熱電対は中央に位置している。

熱電対を埋め込んだ試料を、ガラスサンプル (Fig. 1),  $\gamma$ 線照射容器 (Fig. 2) および電子線照射容器 (Fig. 3) に入れ、真空ポンプ (ロータリー式) で排気しながら $\gamma$ 線照射および電子線照射を行い、照射前および照射中の試料の温度変化を記録した。

なお、照射効果の実験と同じ条件にするため、 $\gamma$ 線照射では前後に厚さ3mmのPE板を置いて照射を行い、電子線照射では後方散乱電子による影響を出来る限り低くするため、照射容器の底部およびガラスサンプルの下に厚さ3mmのPE板を置き照射を行った。照射台および照射容器は水冷却を行った。

#### 2.4.2 高分子材料の温度上昇

$\gamma$ 線照射時における試料温度上昇の測定結果をFig. 9に示す。ガラスサンプルでの照射による平衡時の試料温度は約30°Cであった。また、 $\gamma$ 線照射容器中では温度は上昇したが、最大35°Cであった。図中、照射前における両照射容器の温度指示が若干異なっているが、これは照射室内の照明および空調により、小さなガラスサンプル内では照射する前に照射室内温度と平衡に達したためである。また、照射中16~17時間で温度が上昇しているが、これは外気温度の上昇の影響であることが室温測定の結果から推定される。

電子線照射時における試料温度上昇の測定結果をFig. 10に示す。電子線照射容器内のPE試料を除いて、他の3種類の試料については40°C前後で、ほぼ一致した値を示した。照射容器内のPEは50°C近くまで上昇したが、この場合は、試料台に固定しておいたPE試料が浮き上がり、容器床面からの冷却が不完全になったものと思われる。

以上の測定結果から温度上昇は $\gamma$ 線照射では30~35°C、電子線照射では約40°Cであり、照射時の温度効果は特に考慮する必要はないことが分かった。

## 2.5 まとめ

高分子材料における $\gamma$ 線と電子線の照射効果の比較を行うため、各々の照射に用いた容器内での線量測定を行った。 $\gamma$ 線照射ではステンレス製の $\gamma$ 線照射容器壁からの後方散乱の影響が大きく、一方電子線照射では、チタン箔窓の電子線照射容器よりもガラスサンプルの方が遮蔽効果が大きいことが分かった。

以上の結果、次章での各高分子材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較するために必要な線量測定ができた。

高分子材料の真空中における照射で、材料の照射による温度上昇が考えられる。この検討を行ったところ、 $\gamma$ 線照射では30~35°C、電子線照射では40°C (水冷有) となり、照射時の試料の温度上昇はほとんど考慮する必要のないことが分かった。

### 3. 高分子絶縁材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果の比較

#### 3.1 はじめに

化学構造の異なる代表的な7種類の高分子材料について、 $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較した。 $\gamma$ 線については前章で求めた照射容器内の照射線量率および高分子材料の構成元素組成比から、各高分子材料の吸収線量率を求めた。この吸収線量を基に、各高分子材料の $\gamma$ 線と電子線の照射効果を、分解ガス発生量、引張試験による破断伸びと強度の変化、放射線架橋・分解に起因するゲル分率および膨潤比の測定によって比較検討した。

#### 3.2 照射試料

ポリエチレン (PE; 宇部興産, C-400) は添加物を加えずにそのまま, ポリプロピレン (PP; 宇部興産, J 802 H), シリコンゴム (SiR; 信越化学, KE 552 B), 天然ゴム (NR; マレーシアサイムダービー社, SMR-5 L), フッ素ゴム (FR; デュボン社, バイトン A), エチレン酢酸ビニル共重合体 (EVA; 三井, デュボンポリケミカル社, エバフレックス-260), ブチルゴム (IIR; 日本ブチル社, 11 R-268) は電線絶縁材料として用いる場合の実用配合組成物を用いた。それぞれの試料は厚さ 1mm のシートに成形して用いた。

#### 3.3 照射方法および条件

高分子材料の照射は、線量率効果の原因となる試料内への酸素の拡散による酸化反応を防ぐため、 $\gamma$ 線照射および電子線照射はともに、全て真空中で行った。試料の照射方法は、前述した線量測定の場合と同様である。

放射線照射による分解ガス発生を測定するための照射では、ガラスアンプル中に試料を入れ、1 Pa 以下の真空中に脱気した後、溶封したものを照射した。前節の深部吸収線量分布の測定で述べたように、各々の放射線の透過性を考慮して、 $\gamma$ 線照射ではガラスアンプル内にシート状試料を3枚、電子線照射では1枚入れた。また、後方散乱線等の影響を除くため、 $\gamma$ 線照射ではガラスアンプルの外側両面に、電子線照射ではガラスアンプルの下面に各 3mm の PE 板を置き、所定の線量率で照射した。

引張試験およびゲル分率、膨潤比の測定用試料の照射では、 $\gamma$ 線および電子線ともにそれぞれ専用の金属製照射容器を用いた。 $\gamma$ 線の場合はシート試料 (厚さ 1mm) 3枚を重ねて、この試料両面をガラスアンプル照射と同様に 3mm 厚の PE 板で挟んで、照射容器中央部に置いて所定の線量率で照射した。電子線の場合は照射容器内に厚さ 1mm のシート照射試料を電子線の走査方向に 3枚平面状に並べ、さらに試料の下に PE 板を置いて照射した。なお、 $\gamma$ 線および電子線の照射中、容器内の真空を保つために真空ポンプで常時脱気した。また、電子線照射容器は水で冷

却しながら照射を行った。

### 3.4 測定

#### 3.4.1 分解ガス発生量の測定<sup>7)</sup>

照射後のガラスアンプルを真空ラインに取り付け、圧力計（バラトロン計）により各高分子試料の照射によって生成した全ガス量を測定した。また、ガスクロマトグラフィー（日立製 163 型および柳本製 GCG-550 T 型）により、発生ガス成分の各々のガス量を測定した。

#### 3.4.2 引張試験

照射したシート試料から JIS-4 号ダンベル試験片を打ち抜き、引張試験機（INSTRON 4301 型）で破断時の伸びと強度を測定した。チャックの間隔は 25 mm、引張速度は 20 cm/min とした。

#### 3.4.3 ゲル分率および膨潤比の測定

照射後所定重量の試料（W1）をキシレン溶媒の沸点（138°C）で 48 時間抽出した。抽出後 24 時間放冷し、溶媒に膨潤した状態の試料重量（W2）を測定した。その後、乾燥させゲル化した試料の重量（W3）を測定した。ゲル分率および膨潤比は次式によって求めた。

$$\text{ゲル分率} = \frac{W_3}{W_1} \times 100 (\%)$$

$$\text{膨潤比} = \frac{W_2}{W_3}$$

### 3.5 高分子絶縁材料の照射効果の比較

#### 3.5.1 高分子絶縁材料の吸収線量

$\gamma$  線における各高分子材料の吸収線量率は、電離箱で求められた照射線量率に、Table 3 に示す空気に対する各試料の質量エネルギー吸収係数の比を乗じることによって次式により求めた。質量エネルギー吸収係数は、実配合の高分子材料中の無機充填剤やその他の添加剤も含めた元素重量組成比を基にして算出した。

$$\dot{D}_m = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_a} \times 0.873 \times \frac{\dot{X}}{100} \quad (\text{Gy/h})$$

ここで  $\dot{D}_m$  は各物質の吸収線量率、 $\dot{X}$  は照射線量率 (R/h)、 $(\mu_{en}/\rho)_m$  と  $(\mu_{en}/\rho)_a$  は各物質および空気の質量エネルギー吸収係数 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ) である。258  $\text{Ckg}^{-1}\text{h}^{-1}$  (1 MR/h) の照射線量率での各高分子材料の  $\gamma$  線吸収線量率を Table 4 に示す。

電子線における各高分子材料の吸収線量率はCTA線量計の深部吸収線量分布を基にして、各試料の密度の違いや厚さを補正して求めた平均線量率( $\dot{D}_c$ )に、Table 5に示した各試料とCTA線量計の質量衝突阻止能の比を乗じることによって求めた。質量衝突阻止能は、各試料の元素重量組成および密度効果等の補正係数を基にして算出した<sup>8)9)</sup>。

$$\dot{D}_m = \dot{D}_c \times \frac{S_m}{S_c} \quad (\text{Gy}/100 \text{ s})$$

ここで $\dot{D}_m$ は各物質の吸収線量率、 $\dot{D}_c$ はCTA線量計の吸収線量率 (Gy/100 s)、 $S_m$ と $S_c$ は各物質およびCTAの質量衝突阻止能 (MeV・cm<sup>2</sup>/g)である。

電子線照射100秒当りの各高分子材料の吸収線量をTable 4に示す。電子線の場合、深部線量分布の違いによりガラスサンプル内と電子線照射容器内とでの吸収線量が異なる。以下の高分子材料の吸収線量はTable 4の $\gamma$ 線および電子線の吸収線量率に照射時間を乗じて求めた。

### 3.5.2 分解ガス発生量による比較

すでに述べたように、照射による高分子材料からのガス発生量は、照射効果を比較するうえでは最も精度の高い方法である。

Table 4に示したように、照射容器としてガラスサンプルを用いてPEを $\gamma$ 線で258 Ckg<sup>-1</sup>(1 MR)照射した時の吸収線量は10.21 kGyであり、電子線で100秒照射した時は12.94 kGyである。この時の照射PEの各ガス発生量の測定結果をTable 6に示した。さらにポリマー1g、吸収線量1Gy当りに換算したガス発生量をTable 7に示す。100～400 kGyの範囲では、単位重量・線量当りのガス発生量は、 $\gamma$ 線照射の方が電子線照射に比べ多かった。しかし、この差( $\gamma$ 線と電子線照射の $V_n$ の比)は各線量で異なっているが、平均すると10%程度の差であった。SiRおよびPPについての結果をTable 8に示す。いずれも $\gamma$ 線照射の方が若干多い傾向にあり、照射によるガス発生量の比較から、上記の3種類の高分子材料については、 $\gamma$ 線照射の方が電子線照射よりもガス発生量が多いという結果が得られた。

前述したように $\gamma$ 線照射と電子線照射で線量率が50倍異なるため、線量率の違いによる照射効果の差異が考えられる。そこで、 $\gamma$ 線照射の場合について258 Ckg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>(10<sup>6</sup>R/h)と2.58 Ckg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>(10<sup>4</sup>R/h)の線量率における照射効果の相違を確かめた。その結果Table 9に示すようにPPにおけるガス発生量は同じであったが、SiRでは2.58 Ckg<sup>-1</sup>h<sup>-1</sup>の低線量率照射の方が若干多く、PEでは逆に少ない結果となった。これらの事実から、真空中室温の $\gamma$ 線照射では100倍程度の線量率による照射効果の差はないものと考えられる。上述の $\gamma$ 線照射と電子線照射の比較実験では少し差が認められたが、 $\gamma$ 線照射が約10 kGy/h、電子線照射が約500 kGy/hであり、線量率にさほど大きな差がないこと、また照射雰囲気の温度等の差異や実験誤差を考慮すると、高分子材料の照射効果の差は極めて小さいものと考えられる。

### 3.5.3 引張試験による比較

7種類のポリマーPE, PP, SiR, NR, FR, EVA, IIR試料に $\gamma$ 線および電子線照射した後の引張試験の結果をFig. 11～17に示す。



真空中照射のため、これらの高分子材料に起こる反応は主に架橋反応であり、伸びは照射とともに低下し、引張強度は一般に一旦増加した後低下する傾向を示す。EVAを除き $\gamma$ 線照射と電子線照射とで、伸びおよび引張強度の変化はほとんど同じであった。Fig.16に示すようにEVAのみ500~800 kGyの線量範囲において $\gamma$ 線の方が電子線照射に比べ伸びの低下が25~60%程度多かった。

EVAはその共重合組成にもよるが軟化温度が通常40°C以下の物が多く、照射中のわずかな温度上昇によって軟化温度に達する。軟化温度の前後で高分子主鎖や側鎖の分子運動は大きく異なるため、架橋反応の生成量に大きな影響を与える。このことから、 $\gamma$ 線と電子線のわずかな温度差が照射効果に差異をもたらしたと考えられるが、この点に関しては更に検討する必要がある。

以上の結果から、EVAを除き他のPE, PP, SiR, NR, FR, IIRの6種類の試料については、 $\gamma$ 線および電子線照射後の引張特性はほぼ同じ結果となり、 $\gamma$ 線と電子線照射との間に照射効果の差は認められなかった。

#### 3.5.4 ゲル分率および膨潤比による比較

PE, SiR, NR, FR, EVAの照射後のゲル分率および膨潤比の結果をFig.18~22に示す。

EVAを除いた他の材料では、 $\gamma$ 線および電子線のいずれの照射においてもゲル分率および膨潤比の変化は同じであった。これに対しEVAでは、 $\gamma$ 線照射と電子線照射とでは差異が認められた。真空中照射では前述したように、照射に従い架橋反応が進行するのでゲル分率は増加し、膨潤比は低下する。このことから、EVAでは $\gamma$ 線照射の方が電子線照射に比べて、より照射効果が大きいと考えられる。これは先の伸びの結果とも対応している。

以上の結果、EVAを除き他のPE, SiR, NR, FRについて $\gamma$ 線照射と電子線照射は、実験範囲でゲル分率および膨潤比ともに同様の結果となり、 $\gamma$ 線と電子線の照射効果に差異は認められなかった。

### 3.6 まとめ

照射試料に対する $\gamma$ 線と電子線の吸収線量を正確に評価した後、高分子材料に対する $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較した。

その結果、分解ガス発生量で照射効果を比較すると、3種類の材料においては $\gamma$ 線照射の方が電子線照射より若干大きいという結果となった。しかし、高分子材料の実用的な物性である引張試験やゲル分率、膨潤比ではEVAを除き $\gamma$ 線と電子線の照射効果は同一と見なせることが分かった。

## 4. 結 言

主に、電線絶縁材料として使用される7種類の高分子材料について、線量測定に十分な考慮を払いつつ $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較した。 $^{60}\text{Co}$ 線と加速器の電子線とでは線量率が大きく異なるので、照射効果の比較は試料内への酸素の拡散を考慮しなくてよい真空中照射で行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 加速器による電子線照射は $^{60}\text{Co}$ 線照射に比べて線量率が50倍高いが、電子線照射時の試料内部の温度上昇は電子線照射容器を冷却することにより、 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 電子線照射容器を冷却することにより、 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 電子線照射の方が高い程度に押えることが出来た。
- (2) 単位重量・吸収線量当りの発生ガス量による照射効果の比較では、 $100\sim 400\text{ kGy}$ の線量範囲で $\gamma$ 線照射の方が電子線照射に比べて数%多かったが、有意の差があるか否かは確認できなかった。
- (3) 引張試験による比較では、伸びおよび強度とも $\gamma$ 線照射と電子線照射による違いはほとんど認められなかった。ただし、EVAのみ $500\sim 800\text{ kGy}$ の線量範囲で $\gamma$ 線照射の方が電子線照射に比べ伸びの低下が $25\sim 60\%$ 大きかった。
- (4) ゲル分率および膨潤比による比較においても、 $\gamma$ 線照射と電子線照射による違いはほとんど認められなかった。しかし、EVAのみ引張試験と同様に $\gamma$ 線照射と電子線照射に差異が認められた。

以上の結果から、EVAを除いたPE, PP, SiR, NR, FRでは $\gamma$ 線照射と電子線照射とで照射効果に差異は認められない。照射効果の違いが現れたEVAについては今後さらに検討する必要がある。

## 謝 辞

本実験で使用した、高分子試料を提供して頂いた柳生秀樹氏(日立電線(株))に深く感謝します。本研究に対し、助言と励ましを頂いた当研究所田村幸開発部長に感謝します。分解ガス測定では技術開発課荒川和夫主査に、照射実験と線量測定では照射施設課金子広久氏に援助をして頂き、厚くお礼申し上げます。

## 4. 結 言

主に、電線絶縁材料として使用される7種類の高分子材料について、線量測定に十分な考慮を払いつつ $\gamma$ 線と電子線の照射効果を比較した。 $^{60}\text{Co}$ 線と加速器の電子線とでは線量率が大きく異なるので、照射効果の比較は試料内への酸素の拡散を考慮しなくてよい真空中照射で行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) 加速器による電子線照射は $^{60}\text{Co}$ 線照射に比べて線量率が50倍高いが、電子線照射時の試料内部の温度上昇は電子線照射容器を冷却することにより、 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 電子線照射容器を冷却することにより、 $5\sim 10^\circ\text{C}$ 電子線照射の方が高い程度に押えることが出来た。
- (2) 単位重量・吸収線量当りの発生ガス量による照射効果の比較では、 $100\sim 400\text{ kGy}$ の線量範囲で $\gamma$ 線照射の方が電子線照射に比べて数%多かったが、有意の差があるか否かは確認できなかった。
- (3) 引張試験による比較では、伸びおよび強度とも $\gamma$ 線照射と電子線照射による違いはほとんど認められなかった。ただし、EVAのみ $500\sim 800\text{ kGy}$ の線量範囲で $\gamma$ 線照射の方が電子線照射に比べ伸びの低下が $25\sim 60\%$ 大きかった。
- (4) ゲル分率および膨潤比による比較においても、 $\gamma$ 線照射と電子線照射による違いはほとんど認められなかった。しかし、EVAのみ引張試験と同様に $\gamma$ 線照射と電子線照射に差異が認められた。

以上の結果から、EVAを除いたPE, PP, SiR, NR, FRでは $\gamma$ 線照射と電子線照射とで照射効果に差異は認められない。照射効果の違いが現れたEVAについては今後さらに検討する必要がある。

## 謝 辞

本実験で使用した、高分子試料を提供して頂いた柳生秀樹氏(日立電線(株))に深く感謝します。本研究に対し、助言と励ましを頂いた当研究所田村幸開発部長に感謝します。分解ガス測定では技術開発課荒川和夫主査に、照射実験と線量測定では照射施設課金子広久氏に援助をして頂き、厚くお礼申し上げます。

## 参 考 文 献

- 1) W. H. Buckalew, F. J. Wyant, J. Chenion, F. Carlin, G. Gaussens, P. Le Tutour and M. Le Meur, US/French Joint Research Program, Regarding the Behavior of Polymer Base Materials, Subjected to Beta Radiation, Vol. 2 : Phase-2a Screening Tests, NUREG/CR-4530/2 of 4, SAND86-0366, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, September 1987
- 2) 金沢孝夫, 春山保幸, 宇野定則, 四本圭一, 田中隆一, 鷲野正光, 吉田健三; JAERI-M 86-005 (1986) “高崎研1号加速器(デュアルビーム型, 2 Mev, 60 kW)の電子線出力特性”
- 3) R. Tanaka, H. Kaneko, N. Tamura, High-Dose Dosimetry, Proc. Symp., International Atomic Energy Agency, Vienna, (1985), P 203
- 4) 田中隆一, 河合視己人, 田島訓, 田村直幸, 加藤朗, 山地磐, 直井次郎, 森内和之; JAERI-M 6346 (1975) “電離箱による $\gamma$ 線大線量率測定相互比較および問題点の検討”
- 5) 田中隆一, 三友昭市, 須永博美, 松田光司, 田村直幸; JAERI-M 82-033 (1982) “CTA線量計マニュアル”
- 6) 田中隆一, 四本圭一, 田島訓, 河合視己人, 水橋清, 景山英一; JAERI-M 5608 (1974) “ $\gamma$ 線, 電子線に対するCTAフィルム線量計の線量校正”
- 7) K. Arakawa, T. Seguchi, Y. Watanabe and N. Hayakawa, J. Polym. Sci., Polym. Chem. Ed., VOL. 20, 2681 (1982)
- 8) NSRDS-NBS 29, “Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients, and Energy Absorption Coefficients From 10keV to 100 GeV”
- 9) S. M. Seltzer and M. J. Berger, NBS IR 82-2550  
S. M. Seltzer and M. J. Berger, Int. J. Radiat. Isot., Vol. 33, 1189 (1982)

Table 1 Dosimeters

	Dosimeter	Type	Measurement
$\gamma$ -ray	Ionization chamber	Parallel-plate type (JTC-6) Cylindrical-cavity type (No.148)	Current (Electrometer)
Electron beam	CTA dosimeter	FTR-125 <sup>*</sup> )	Optical absorbance (Spectrophotometer)

\* ) Fuji Photo Film CO.LTD.

Table 2 Dosimetry in the vessel

Radiation source	Dosimetric quantity	Air	Glass ampoule	Metallic vessel
<sup>60</sup> Co $\gamma$ -rays (8.51 PBq)	Exposure rate	213.88 C/kg ( $8.29 \times 10^5$ R/h)	211.82 C/kg ( $8.21 \times 10^5$ R/h)	197.63 C/kg ( $7.66 \times 10^5$ R/h)
Electron beam (2MV, 0.1mA)	Absorbed dose rate in CTA	$1.73 \times 10^2$ Gy/s ( $6.23 \times 10^7$ rad/h)	$1.16 \times 10^2$ Gy/s ( $4.18 \times 10^7$ rad/h)	$1.23 \times 10^2$ Gy/s ( $4.43 \times 10^7$ rad/h)

Table 3 Mass energy absorption coefficients for  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray and weight fractions of atomic components of polymers

Element		Z	Symbol	Weight <sup>*)</sup>	$\mu_{en}/\rho$	Dry Air	CTA	PE Poly-ethylene	PP Poly-propylene	SIR Silicone rubber	NR Natural rubber	FR Fluorine rubber	EVA Ethylene-vinyl acetate copolymer	IIR Isobutylene-isoprene rubber
1	H	1.007978	0.05307	5.86	14.37	14.37	5.71	7.85	0.84	12.17	8.55			
6	C	12.01115	0.02665	49.49	85.63	85.63	22.67	56.26	36.22	77.25	56.07			
7	N	14.0067	0.02665	75.5										
8	O	15.9994	0.02664	23.2	42.40	42.40	31.09	17.53	4.93	10.58	17.96			
9	F	18.9984	0.02523						51.45					
12	Mg	24.312	0.02624											
14	Si	28.086	0.02648				40.53	8.85						
15	P	30.9738	0.02571			2.25								
16	S	32.064	0.02649											
18	Ar	39.948	0.02390	1.3					1.25					
30	Zn	65.37	0.02445							2.51				
$\mu_{en}/\rho$ (**)		( $\text{cm}^2/\text{g}$ )		0.02661	0.02817	0.03045	0.02809	0.02875	0.02611	0.02987	0.02902			

\*) Ref. 8)      \*\*) Mass energy absorption coefficients for  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray (1.25MeV)

Table 4 Absorbed dose - exposure of polymers

	PE	PP	SiR	NR	FR	EVA	IIR
$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -ray (kGy/C $\cdot$ kg $^{-1}$ )	10.21	10.21	9.42	9.64	8.75	10.02	9.73
Electron beam A*) (kGy/100s)	12.94	13.01	11.55				
	B**)	13.20	13.16	12.17	14.48	11.68	13.15

\*) A:Glass ampoule

\*\*) B:Metallic vessel

Sample: 1mm thickness

$$\dot{D}_m = \frac{(\mu_{en}/\rho)_m}{(\mu_{en}/\rho)_a} \cdot 8.73 \times 10^{-3} \cdot \frac{\dot{X}}{2.58 \times 10^{-4}} \cdot f_b \text{ (Gy/h)}$$

 $\dot{D}_m$  : Absorbed dose rate in a material (Gy/h) $(\mu_{en}/\rho)_m$  : Mass energy-absorption coefficient in a material (cm $^2$ /g) $(\mu_{en}/\rho)_a$  : Mass energy-absorption coefficient in air (cm $^2$ /g) $\dot{X}$  : Exposure rate (C/kg $\cdot$ h) $f_b$  : Correction factor for back-scattering (=1.022)

$$D_m = \frac{S_m}{S_c} \cdot D_c$$

 $D_m$  : Absorbed dose in a material (Gy) $D_c$  : Absorbed dose in CTA dosimeter (Gy) $S_m$  : Mass collision stopping power in a material (MeV $\cdot$ cm $^2$ /g) $S_c$  : Mass collision stopping power in CTA (MeV $\cdot$ cm $^2$ /g)Table 5 Mass collision stopping power for electrons in polymers<sup>(8) 9)</sup>

Energy (MeV)	Mass collision stopping power (MeV $\cdot$ cm $^2$ /g)							
	CTA	PE	PP	SiR	NR	FR	EVA	IIR
0.1	3.892	4.384	4.393	3.729	3.944	3.482	4.267	3.997
0.3	2.229	2.497	2.502	2.147	2.259	2.003	2.433	2.289
0.5	1.924	2.148	2.152	1.862	1.953	1.733	2.093	1.977
1.0	1.751	1.938	1.942	1.716	1.787	1.586	1.887	1.808
1.5	1.730	1.908	1.911	1.706	1.770	1.572	1.856	1.790
2.0	1.736	1.910	1.914	1.719	1.779	1.580	1.858	1.799

Table 6 Gas evolution from polyethylene by  $\gamma$ -ray and electron beam irradiation

Irradiation source	Absorbed dose (kGy)	Total evolution (torr)	CH <sub>4</sub>		C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		H <sub>2</sub>	
			(torr)	(%)	(torr)	(%)	(torr)	(%)
$\gamma$	95.2	11.8	0.018	0.15	0.246	2.08	11.5	97.8
		11.8	0.024	0.20	0.233	1.98	11.5	97.8
		11.8	0.028	0.24	0.253	2.14	11.5	97.6
$\gamma$	190.5	23.7	0.057	0.24	0.317	1.34	23.4	98.4
		23.7	0.061	0.26	0.450	1.90	23.2	97.8
		23.7	0.066	0.28	0.628	2.65	23.0	97.1
$\gamma$	285.7	34.3	0.064	0.19	0.560	1.63	33.6	98.2
		34.5	0.072	0.21	0.624	1.81	33.8	98.0
		34.5	0.080	0.23	0.586	1.70	33.8	98.1
$\gamma$	381.0	42.6	0.081	0.19	0.763	1.79	41.7	98.0
		42.5	0.087	0.20	0.696	1.64	41.7	98.2
e	103.5	8.6	0.024	0.28	0.215	2.50	8.4	97.2
		8.6	0.026	0.30	0.233	2.70	8.4	97.0
e	207.0	19.7	0.036	0.18	0.389	1.97	19.3	97.9
		19.8	0.030	0.15	0.421	2.12	19.4	97.7
		19.8	0.043	0.22	0.420	2.12	19.4	97.7
e	310.5	25.9	0.057	0.22	0.527	2.04	25.3	97.7
		25.9	0.062	0.24	0.494	1.91	25.3	97.9
e	414.0	33.4	0.044	0.13	0.563	1.68	32.8	98.2
		33.6	0.078	0.23	0.591	1.76	33.0	98.0
		33.7	0.087	0.26	0.639	1.90	32.9	97.8



Table 7 Comparison of gas evolution from polyethylene by  $\gamma$ -ray and electron beam irradiation

	$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -rays (238.13 C/kg·h)			Electron beam (12.94 kGy/100 s)				
Sample weight (g)	3.1650	3.1670	3.1512	3.0432	2.3364	2.3464	2.1933	2.2870
Irradiation Time	10 h	20 h	30 h	40 h	800 s	1,600 s	2,400 s	3,200 s
Dose (kGy)	94.2	188.4	282.5	376.7	103.5	207.0	310.5	414.0
Total Evolution (mol)	1.19E-4	2.29E-4	3.41E-4	4.23E-4	8.01E-5	1.85E-4	2.39E-4	3.11E-4
Vn* (mol/g·Gy) $\times 10^{-10}$	3.99	3.84	3.83	3.69	3.31	3.81	3.51	3.28
$\gamma/e$ ratio of Vn	1.20	1.00	1.09	1.12	--	--	--	--

\* Vn ; Amount of normalized gas evolution

Table 8 Comparison of gas evolution from silicone and polypropylene by  $\gamma$ -ray and electron beam irradiations

	Silicone rubber		Polypropylene	
	$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -ray	Electron beam	$^{60}\text{Co}$ $\gamma$ -ray	Electron beam
Sample weight (g)	9.032	8.548	3.245	3.245
Irradiation Time	10 h	40 h	800 s	3,200 s
Dose (kGy)	84.4	337.7	92.4	369.6
Total Evolution (mol)	9.88E-5	3.43E-4	3.72E-5	1.43E-4
Vn (mol/g·Gy) $\times 10^{-10}$	1.32	1.21	1.24	1.19
$\gamma/e$ ratio of Vn	1.04	1.00	--	--
			5.900	5.701
			20 h	40 h
			183.0	365.9
			3.41E-4	5.83E-4
			3.16	2.80
			1.09	1.05
			2.085	2.070
			1,600 s	3,200 s
			208.2	416.3
			1.26E-4	2.28E-4
			2.89	2.65
			--	--

Table 9 Comparison of gas evolution from polyethylene, polypropylene and silicone by high and low dose rate  $\gamma$ -ray irradiations

	Polyethylene		Polypropylene		Silicone rubber			
	A	B	A	B	A	B		
Sample weight (g)	3.165	8.036	3.167	8.293	9.032	14.122	8.593	14.098
Exposure rate (C/kg·h)	238.13	2.93	238.13	2.91	231.17	2.93	231.17	2.91
Irradiation Time (h)	10	1000	20	2000	10	1000	20	2000
Dose (kGy)	94.2	116.1	188.4	230.6	91.5	116.1	84.4	107.1
Total Evolution (mol)	1.19E-4	3.66E-4	2.29E-4	6.94E-4	1.75E-4	2.23E-4	3.41E-4	4.29E-4
Vn (mol/g·Gy) × 10 <sup>-10</sup>	3.991	3.919	3.838	3.630	3.388	3.351	3.155	3.197
B/A ratio of Vn	--	0.98	--	0.95	--	0.99	--	1.01

A : <sup>60</sup>Co No.6 Irradiation room ; <sup>60</sup>Co source 8.51 PBq (230kCi)  
 B : RI <sup>60</sup>Co No.1 Irradiation room ; <sup>60</sup>Co source 37 TBq (1kCi)

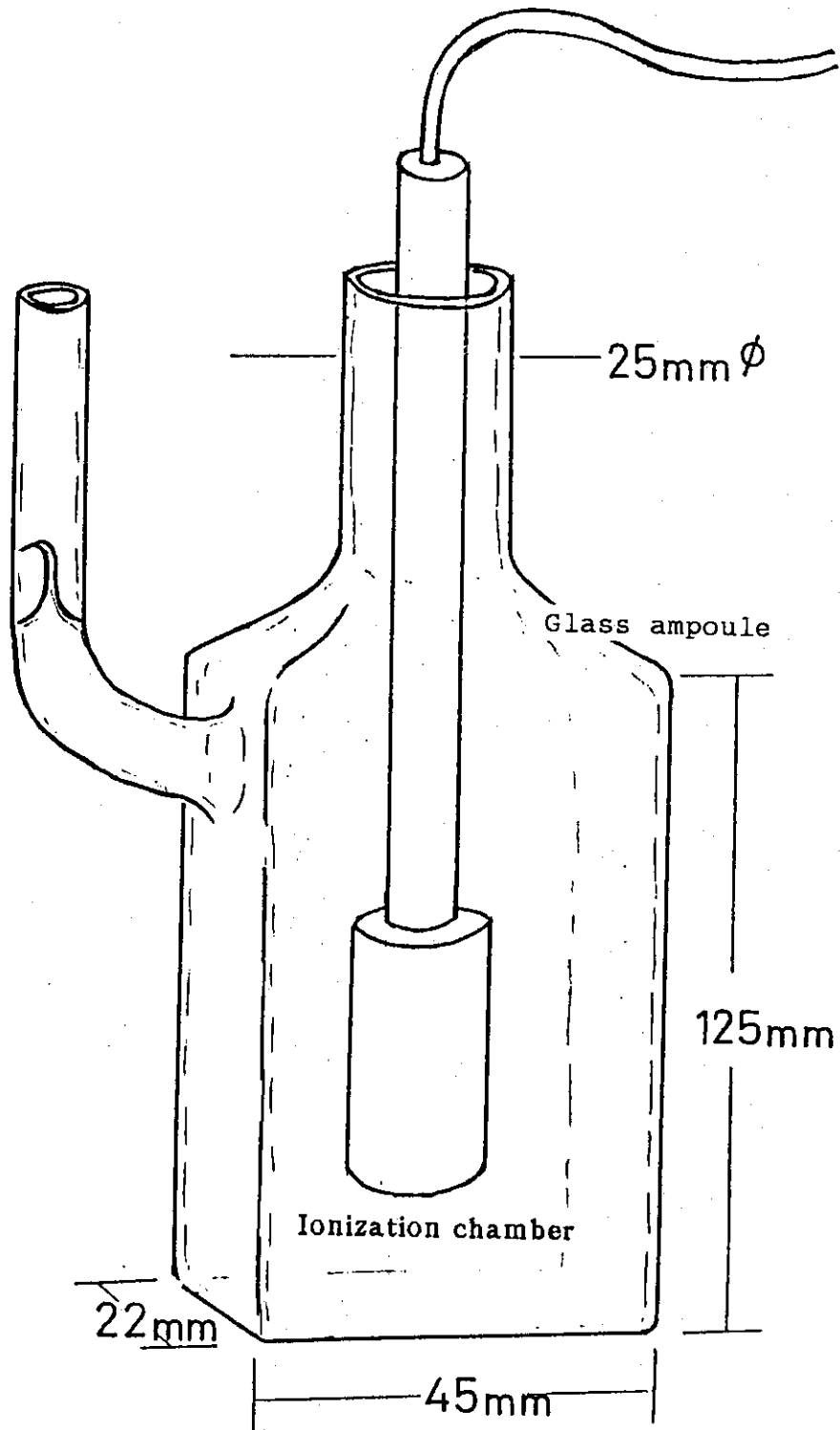


Fig. 1 Dose measurement in glass ampoule by  $\gamma$ -ray and electron irradiation under vacuum.

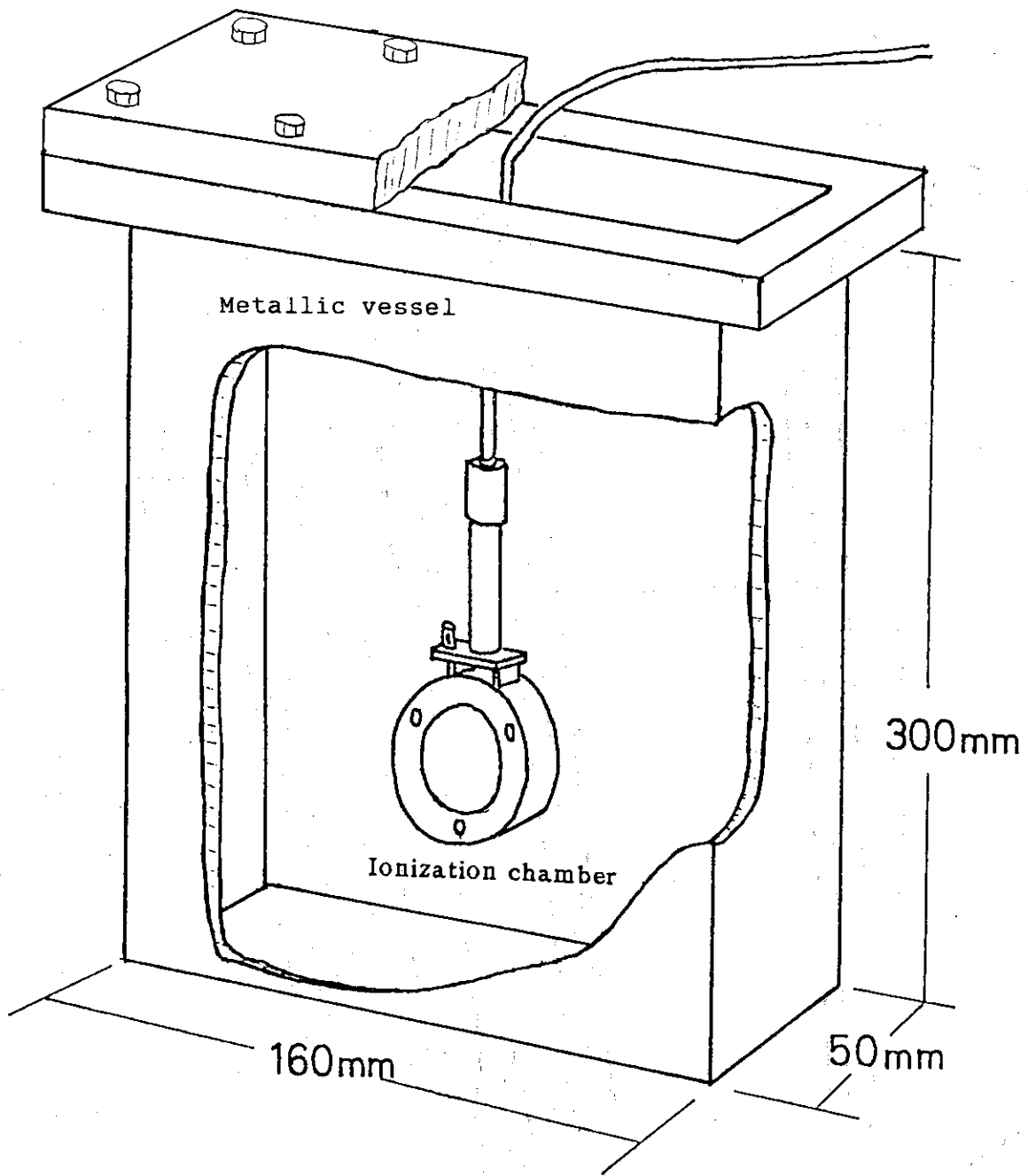


Fig. 2 Dose measurement in  $\gamma$ -ray irradiation vessel (Metal)

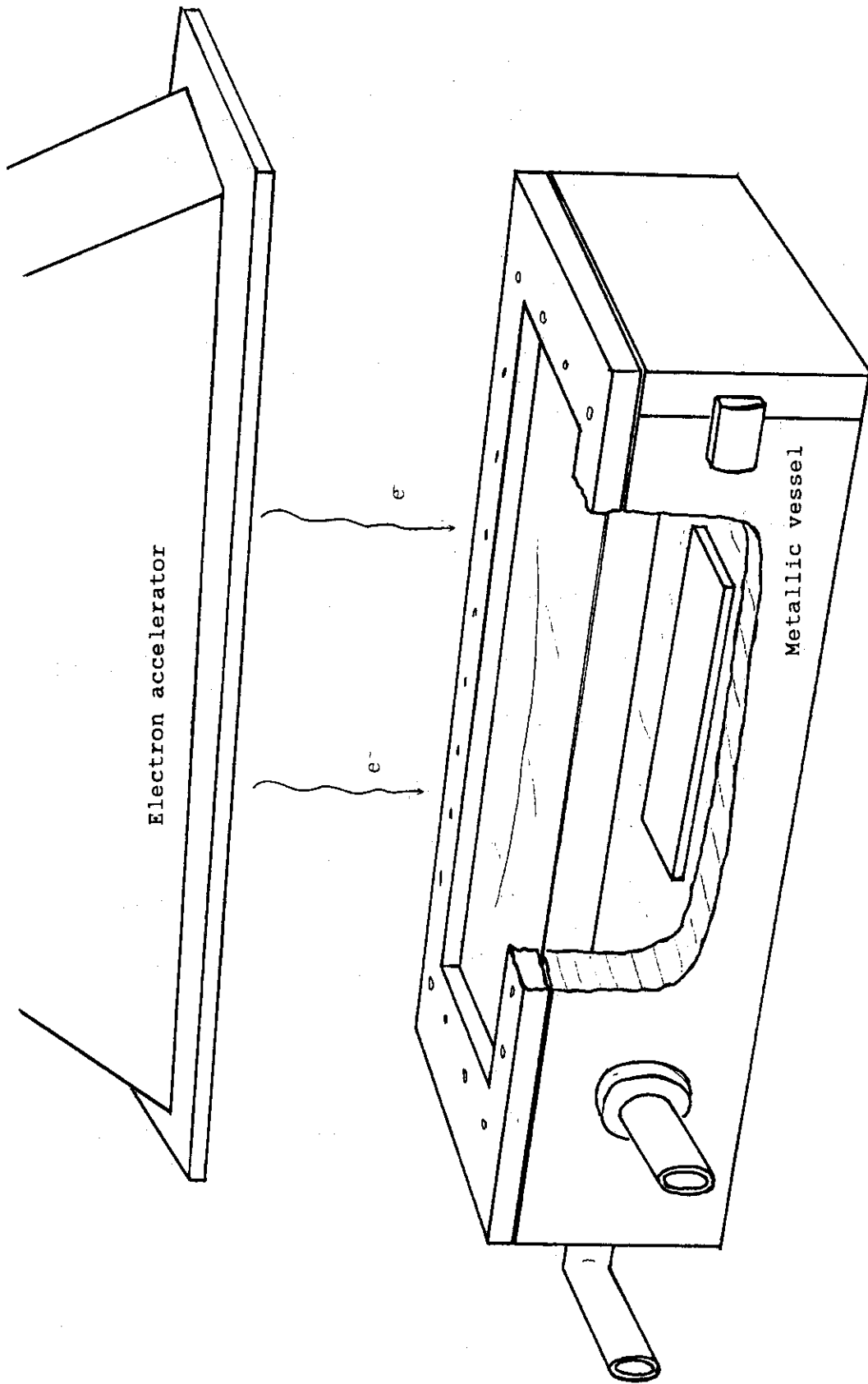


Fig. 3 Dose measurement in electron beam irradiation vessel (Metal)

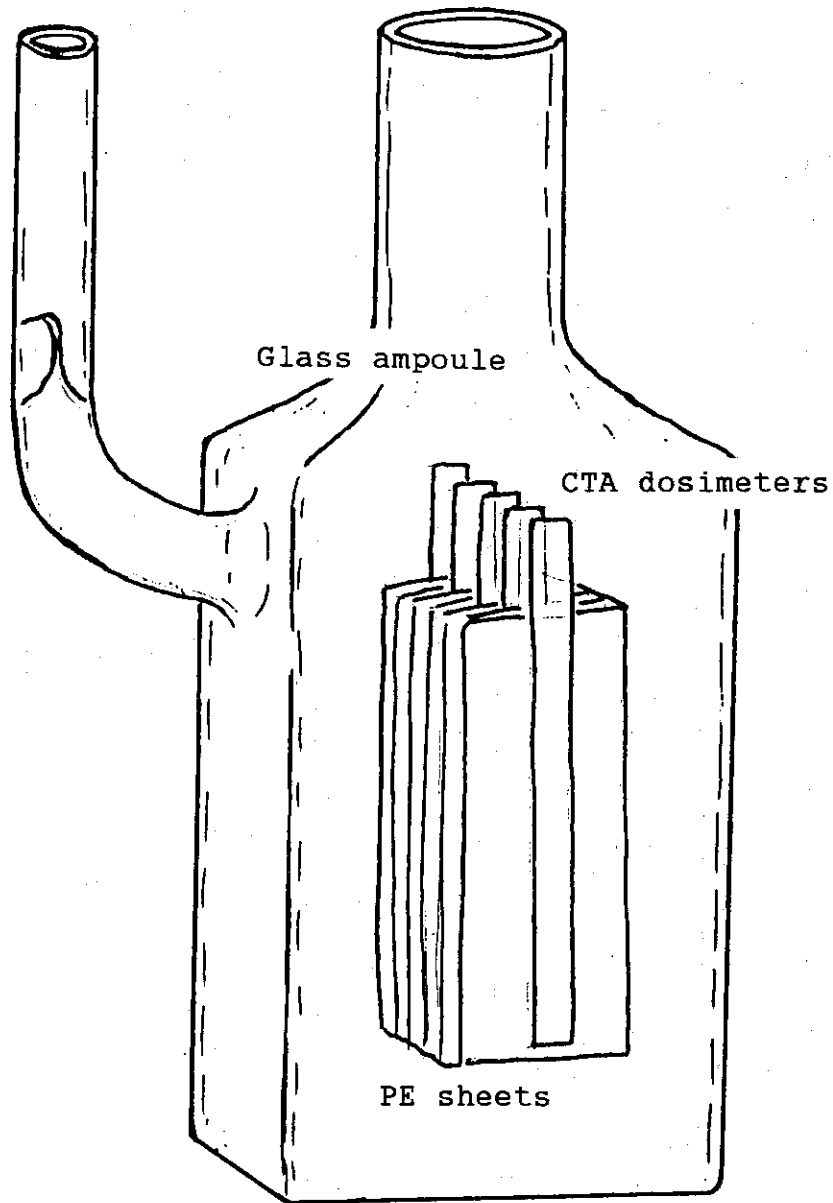


Fig. 4 Depth dose distribution in CTA dosimeter by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray irradiation

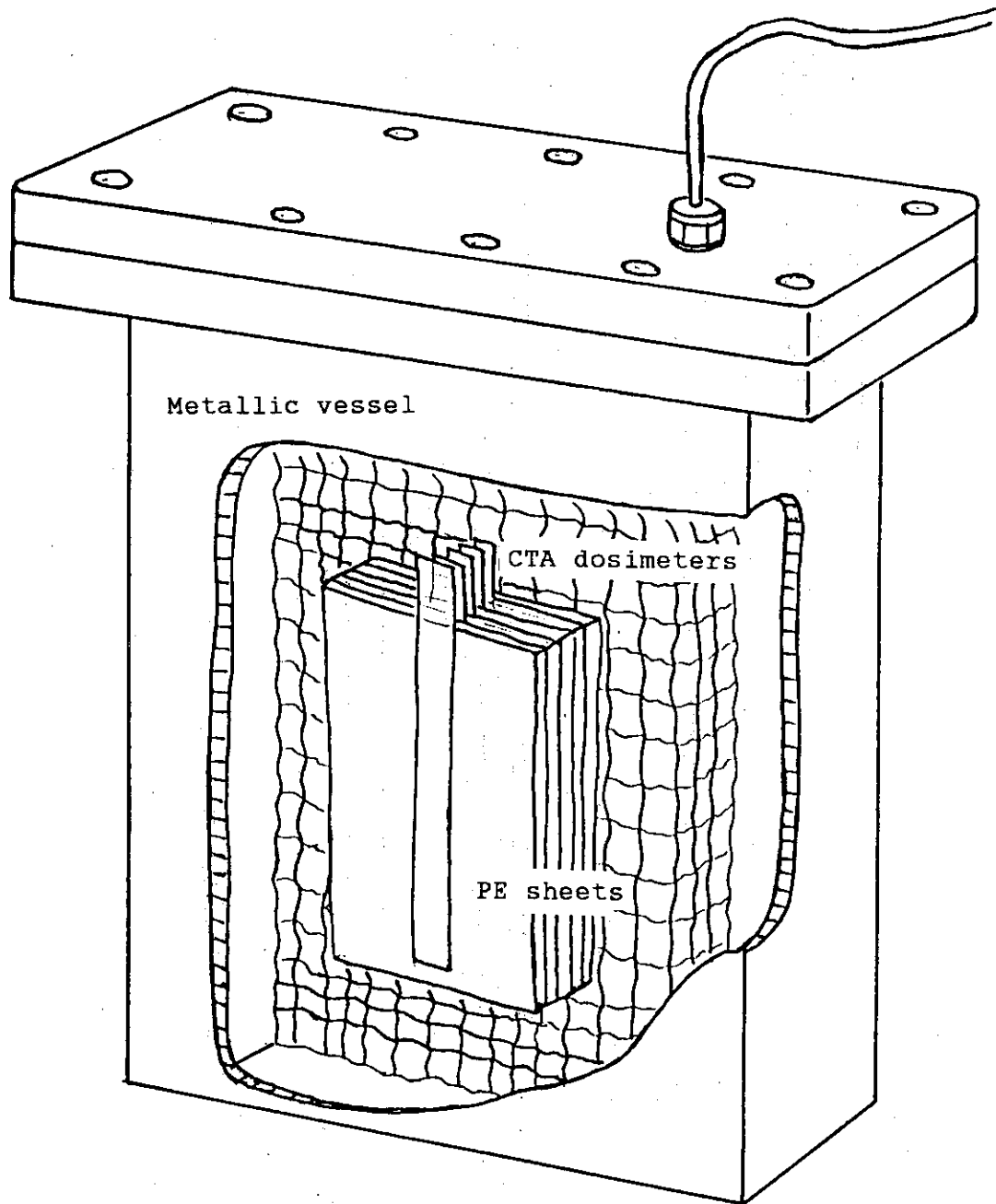


Fig. 5 Depth dose distribution in CTA dosimeter by electron beam irradiation

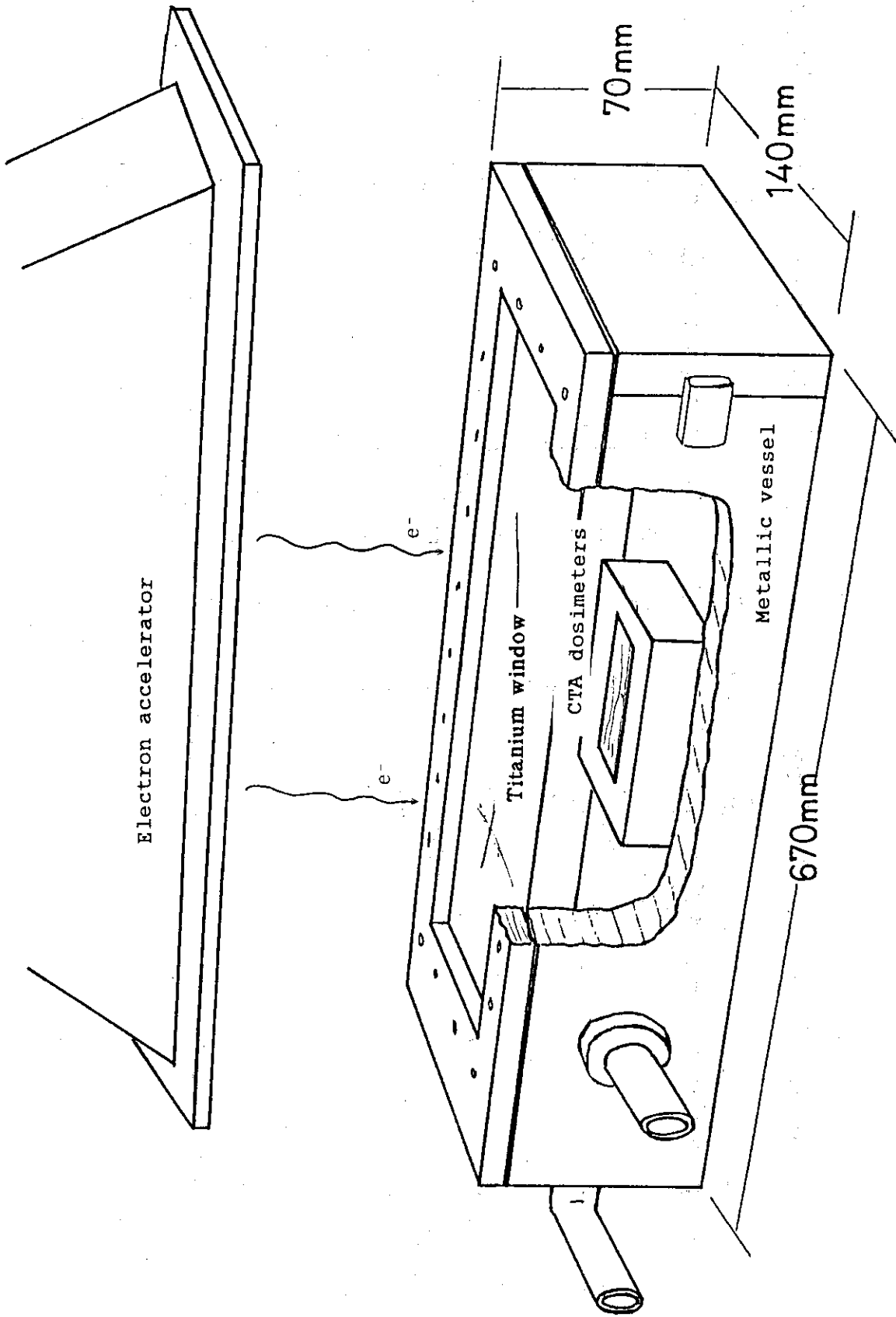


Fig. 6 CTA dosimetry in glass ampoule



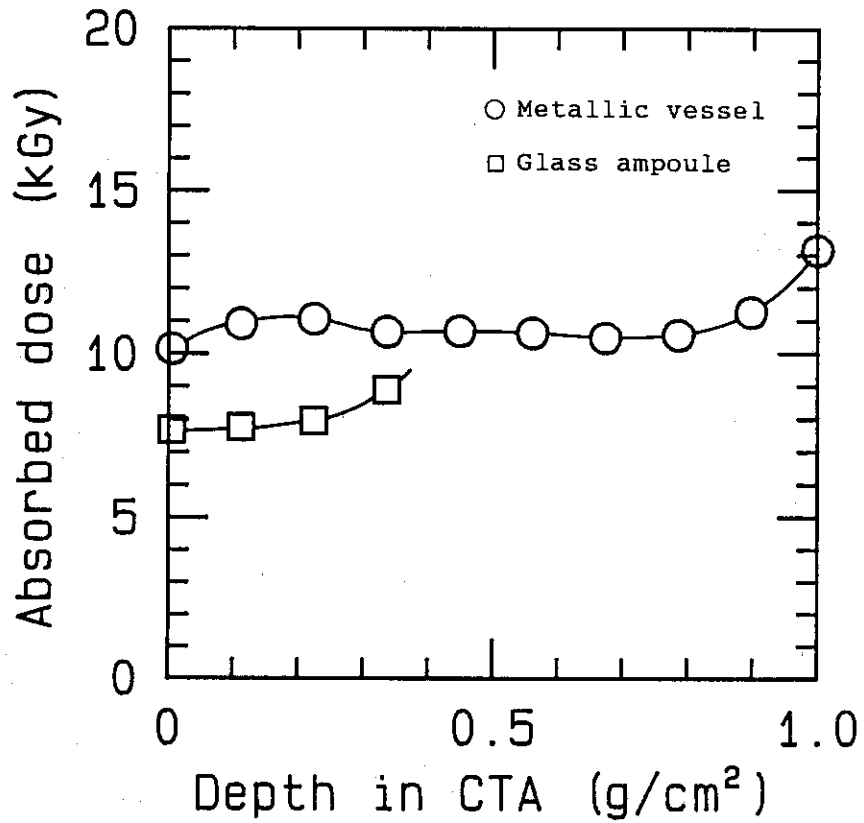


Fig. 7 CTA dosimetry in  $\gamma$ -ray irradiation vessel (Metal)

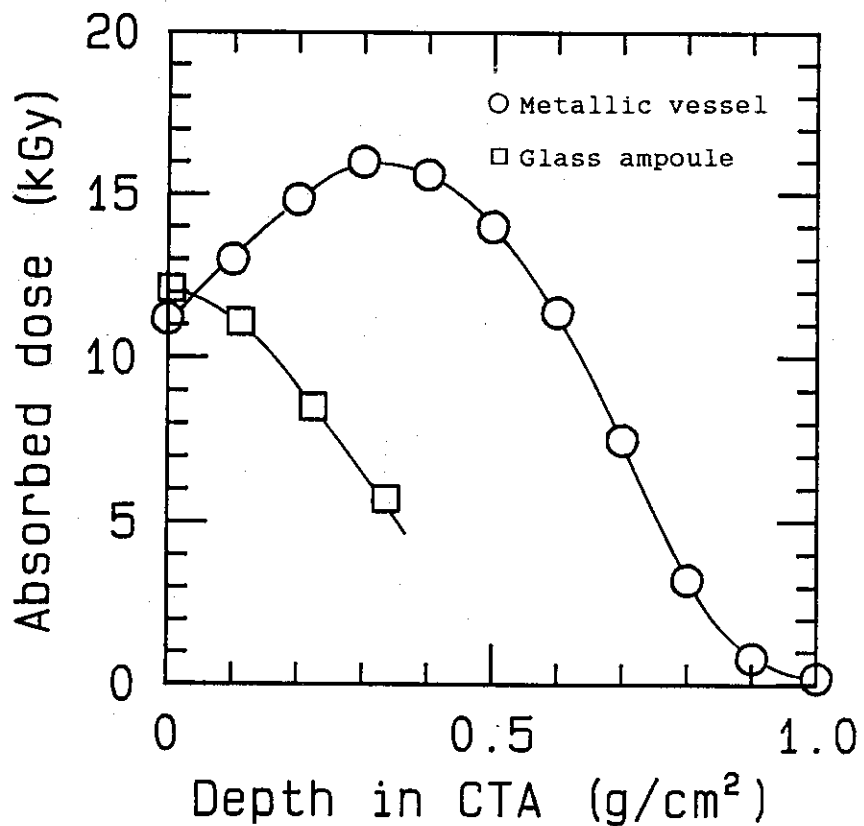


Fig. 8 CTA dosimetry in Electron beam irradiation vessel (Metal)

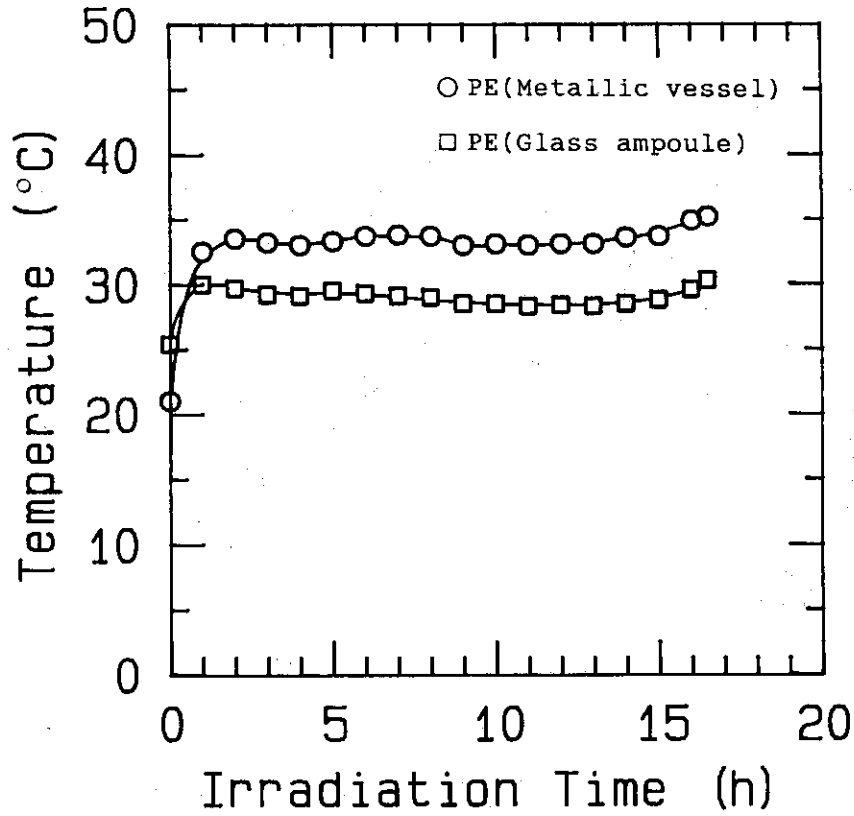


Fig. 9 Temperature of polymer sample in vessel during  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray irradiation

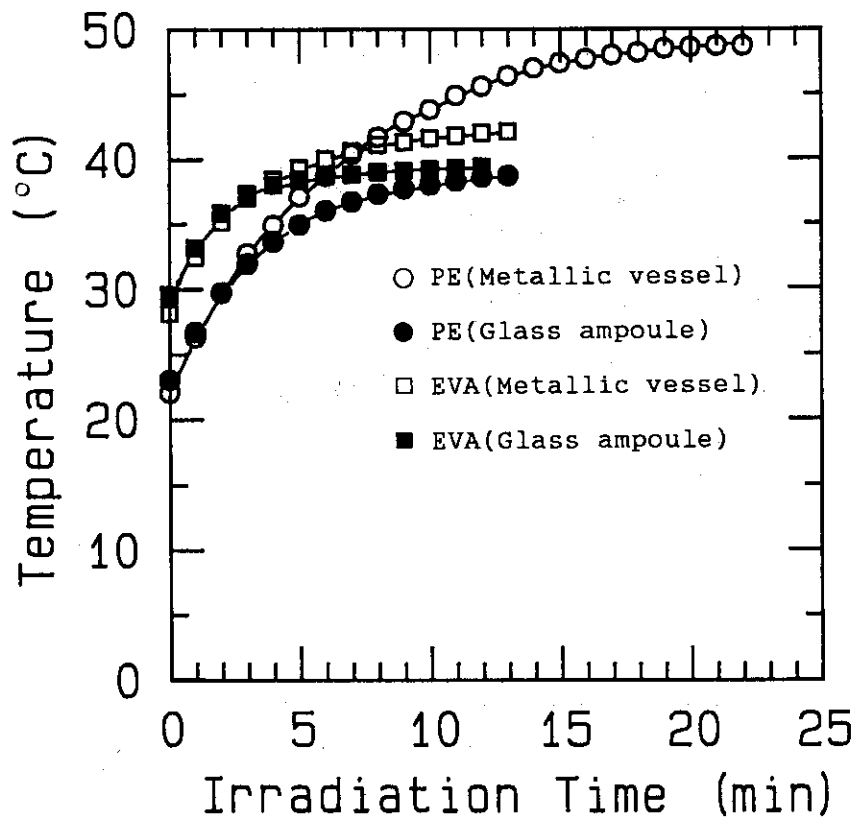


Fig. 10 Temperature of polymer sample in vessel during electron beam irradiation

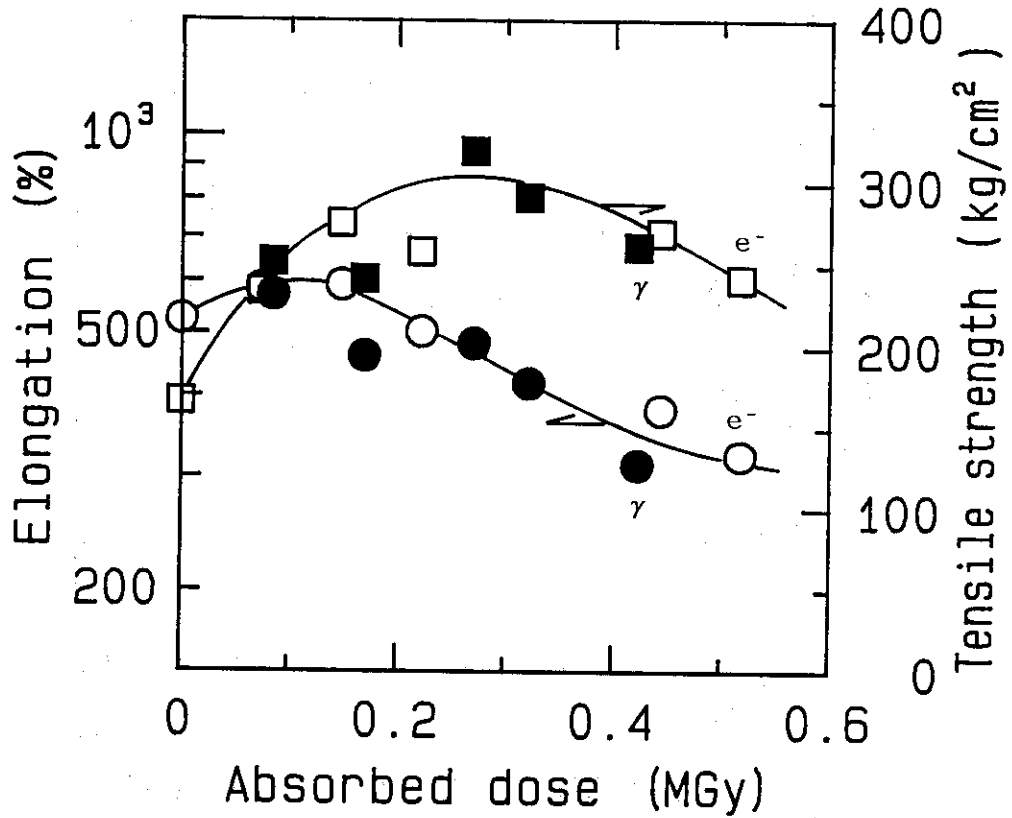


Fig. 11 Elongation and tensile strength at break of polyethylene by <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

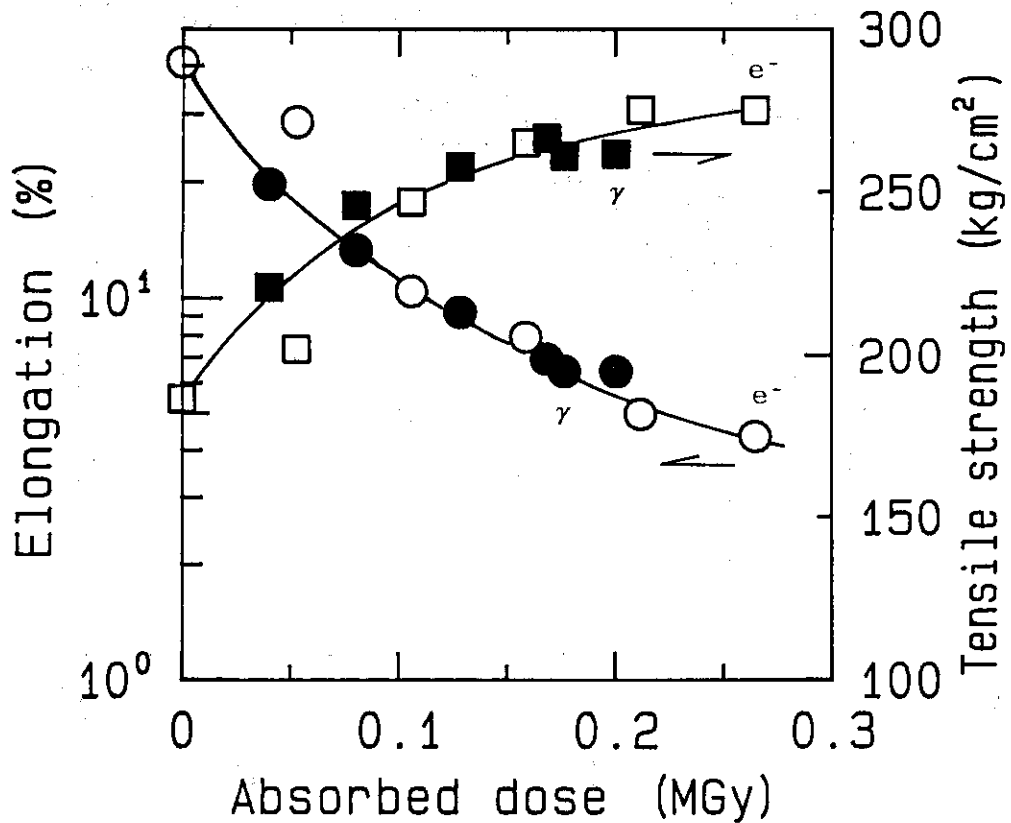


Fig. 12 Elongation and tensile strength at break of polypropylene by <sup>60</sup>Co  $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

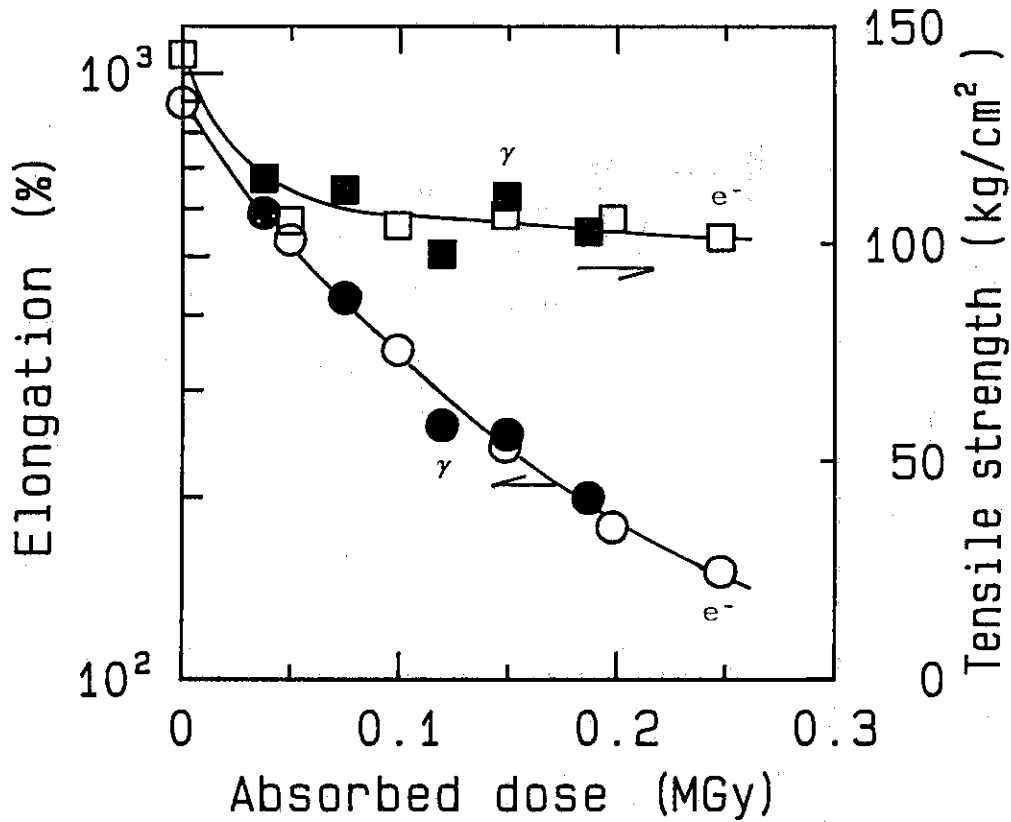


Fig. 13 Elongation and tensile strength at break of silicone rubber by <sup>60</sup>Co γ-ray or electron beam irradiation

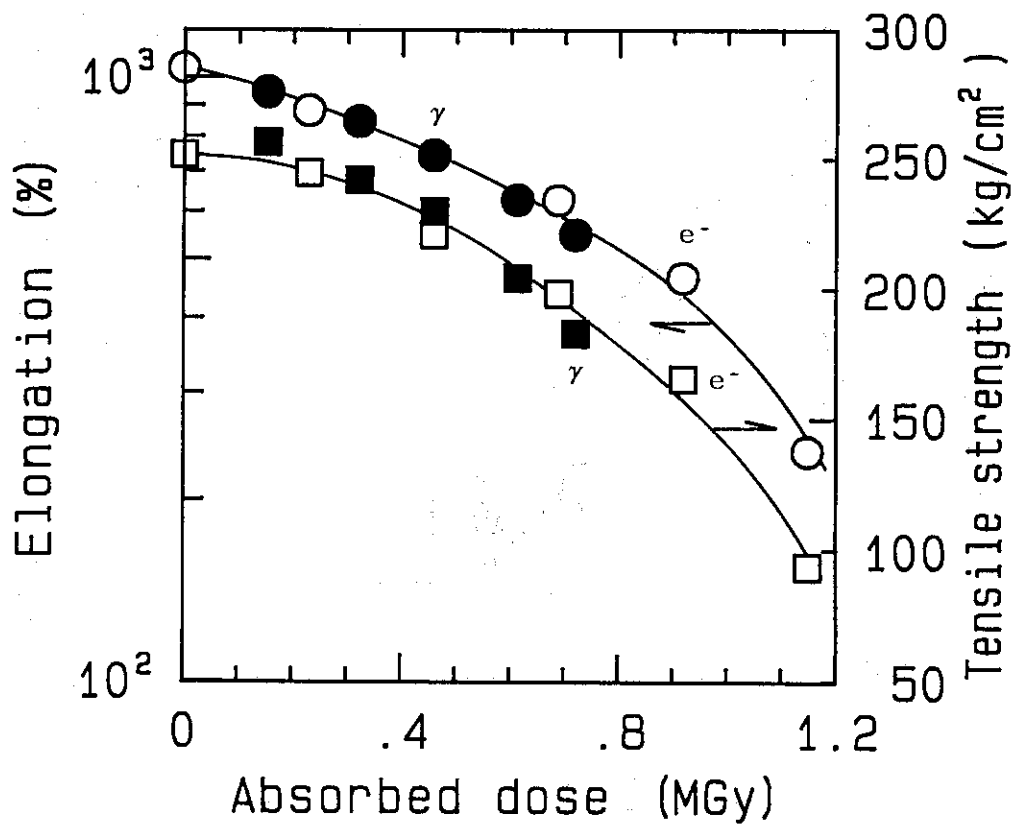


Fig. 14 Elongation and tensile strength at break of natural rubber by <sup>60</sup>Co γ-ray or electron beam irradiation

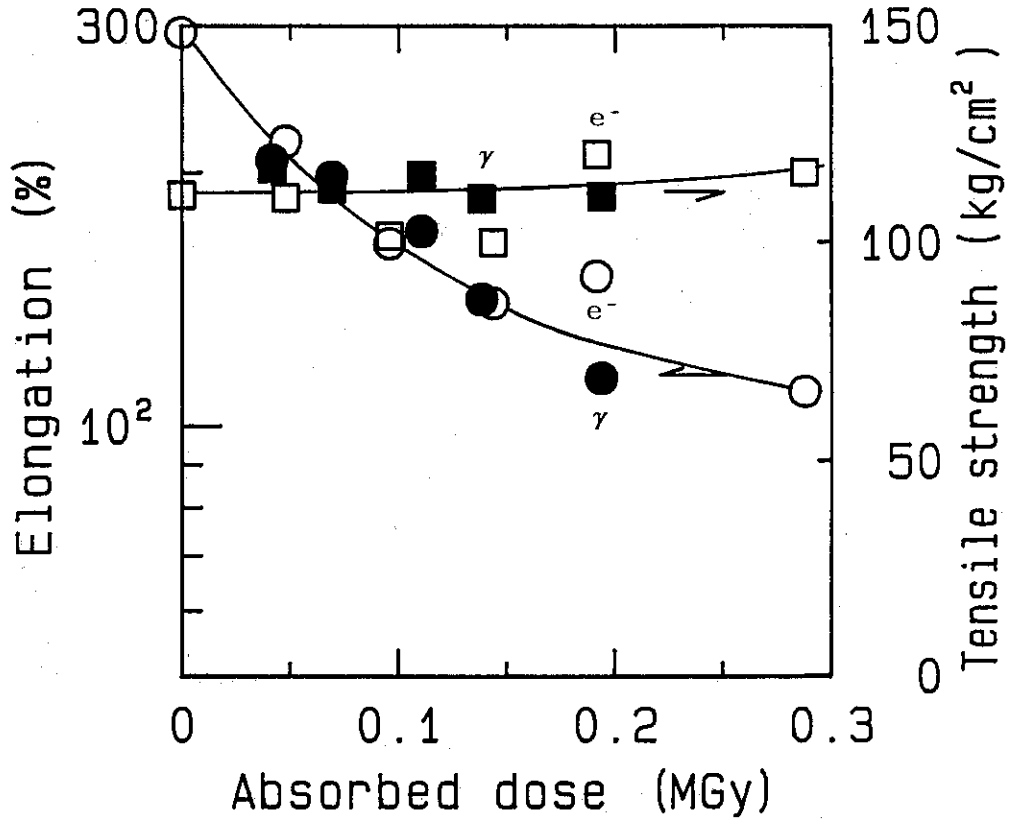


Fig. 15 Elongation and tensile strength at break of fluorine rubber by <sup>60</sup>Co γ-ray or electron beam irradiation

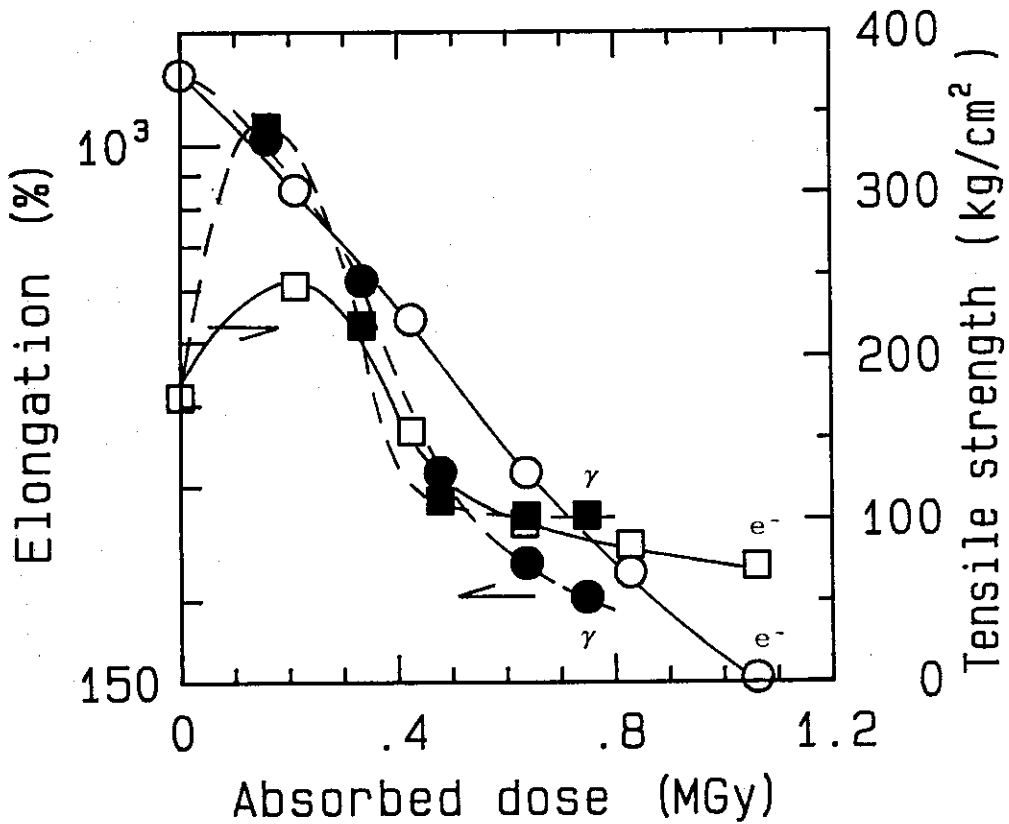


Fig. 16 Elongation and tensile strength at break of ethylene-vinyl acetate copolymer by <sup>60</sup>Co γ-ray or electron beam irradiation

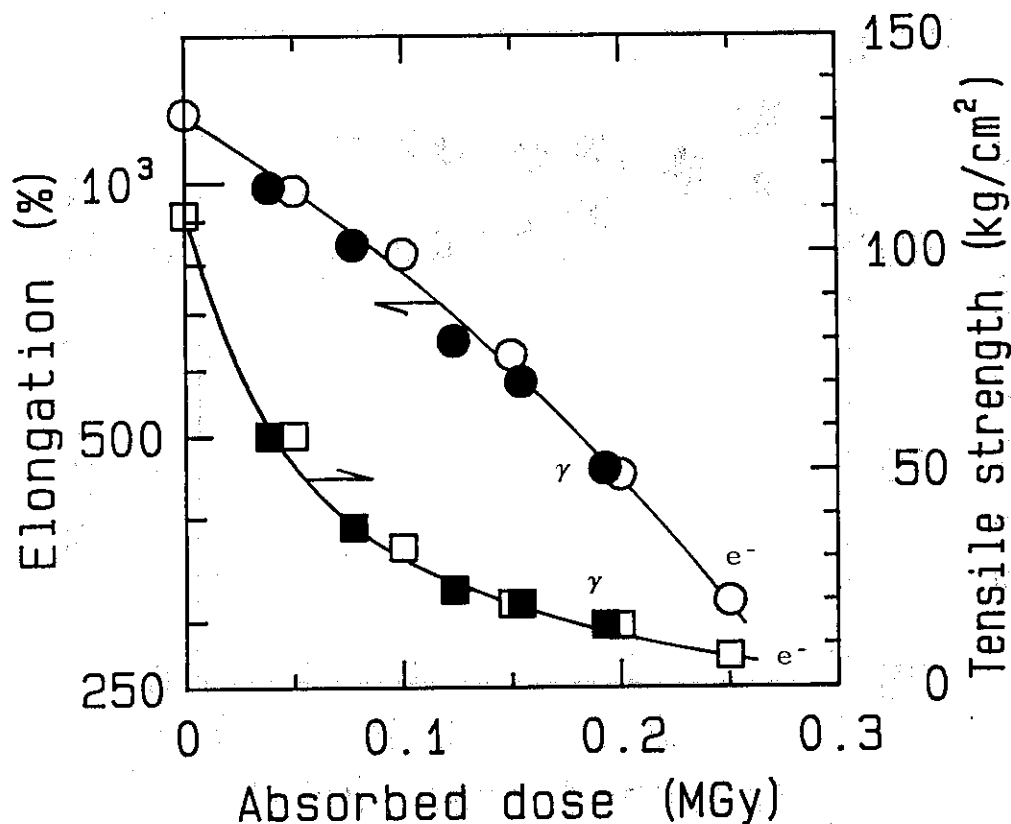


Fig. 17 Elongation and tensile strength at break of isobutylene-isoprene rubber (butyl rubber) by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

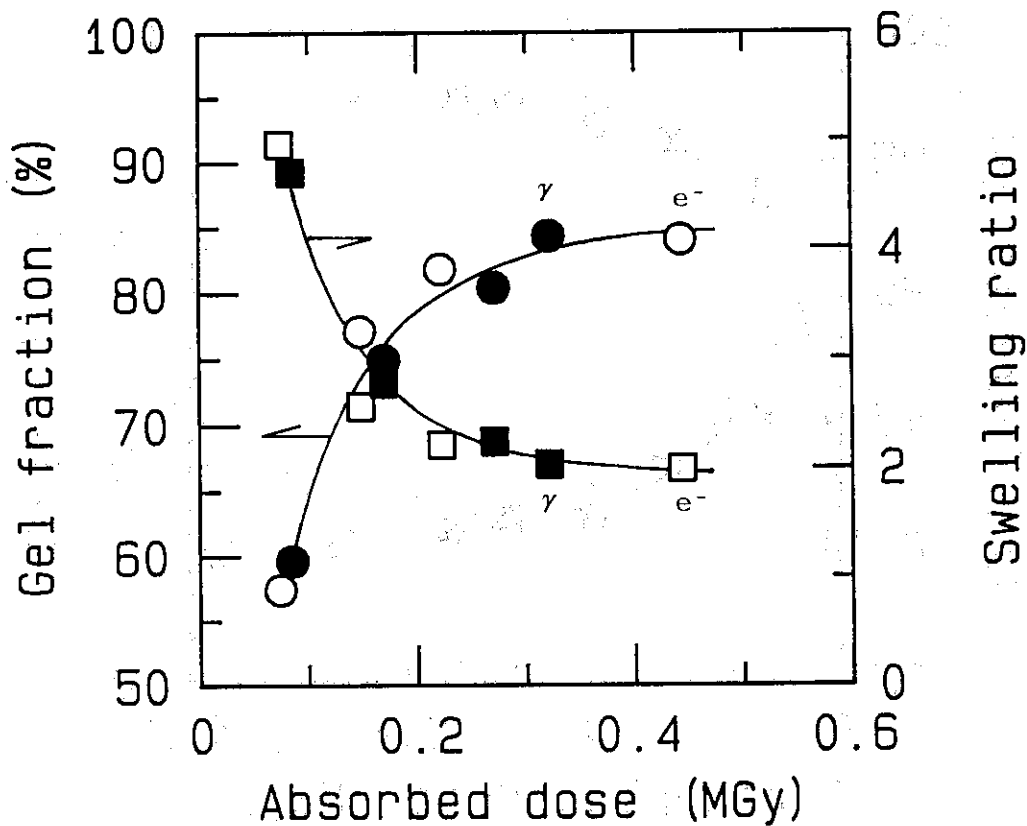


Fig. 18 Gel fraction and swelling ratio of polyethylene by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

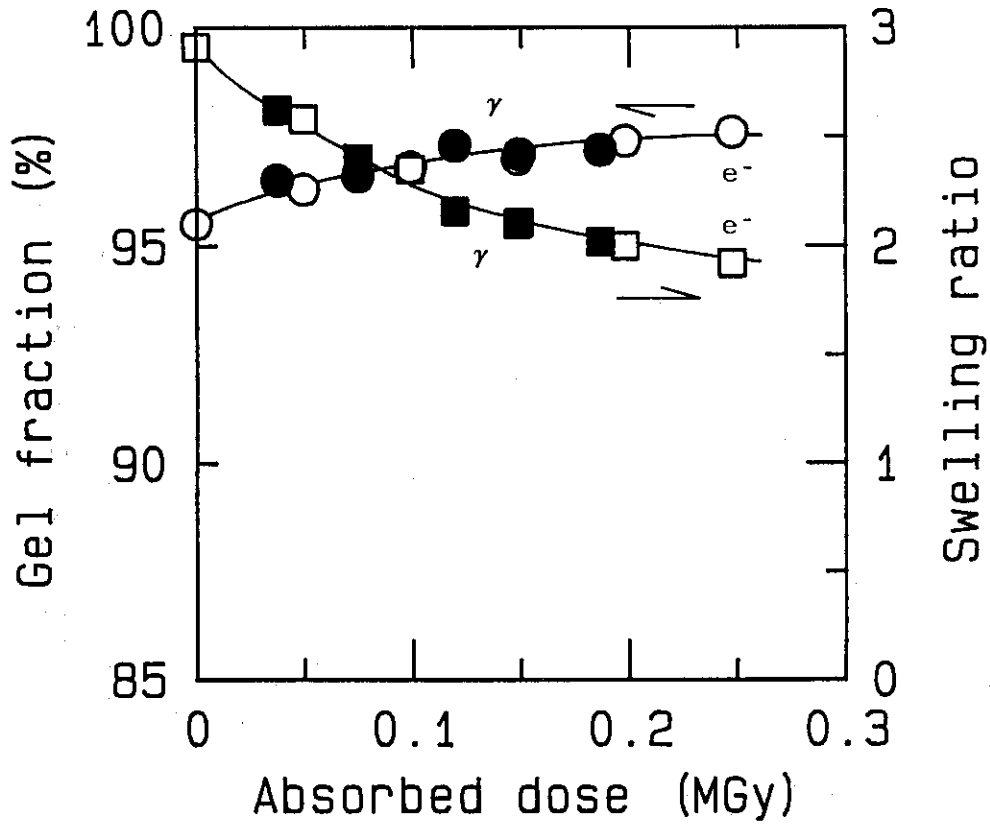


Fig. 19 Gel fraction and swelling ratio of silicone rubber by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

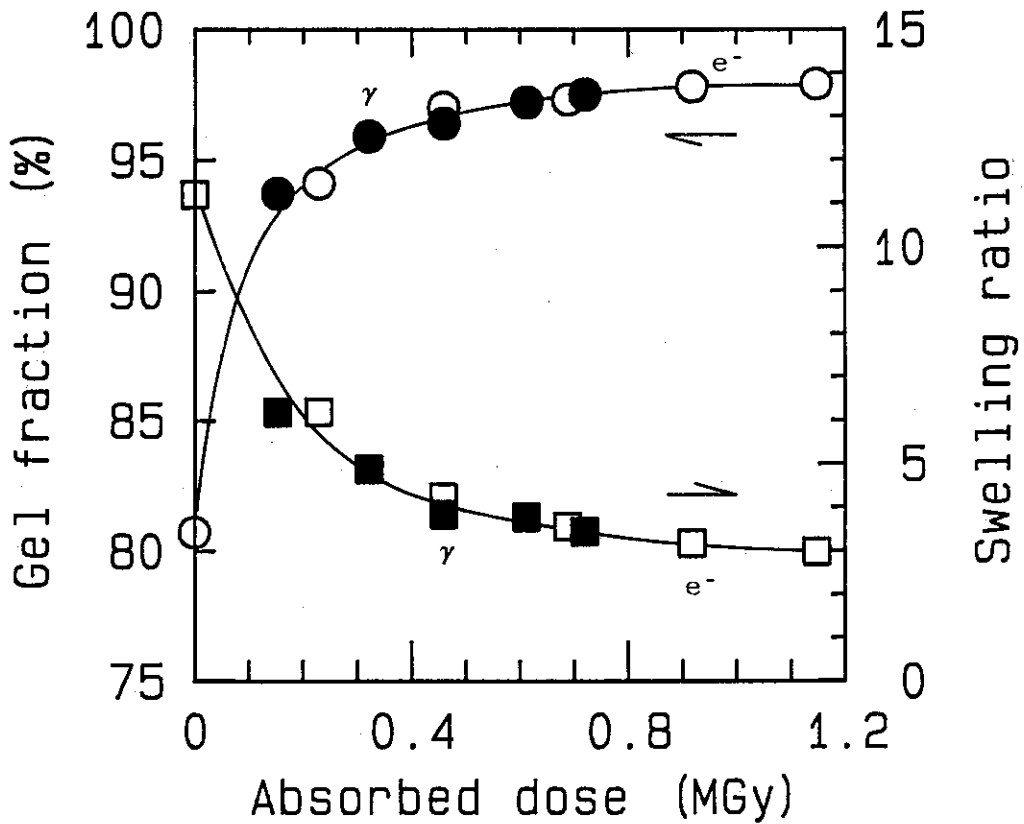


Fig. 20 Gel fraction and swelling ratio of natural rubber by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

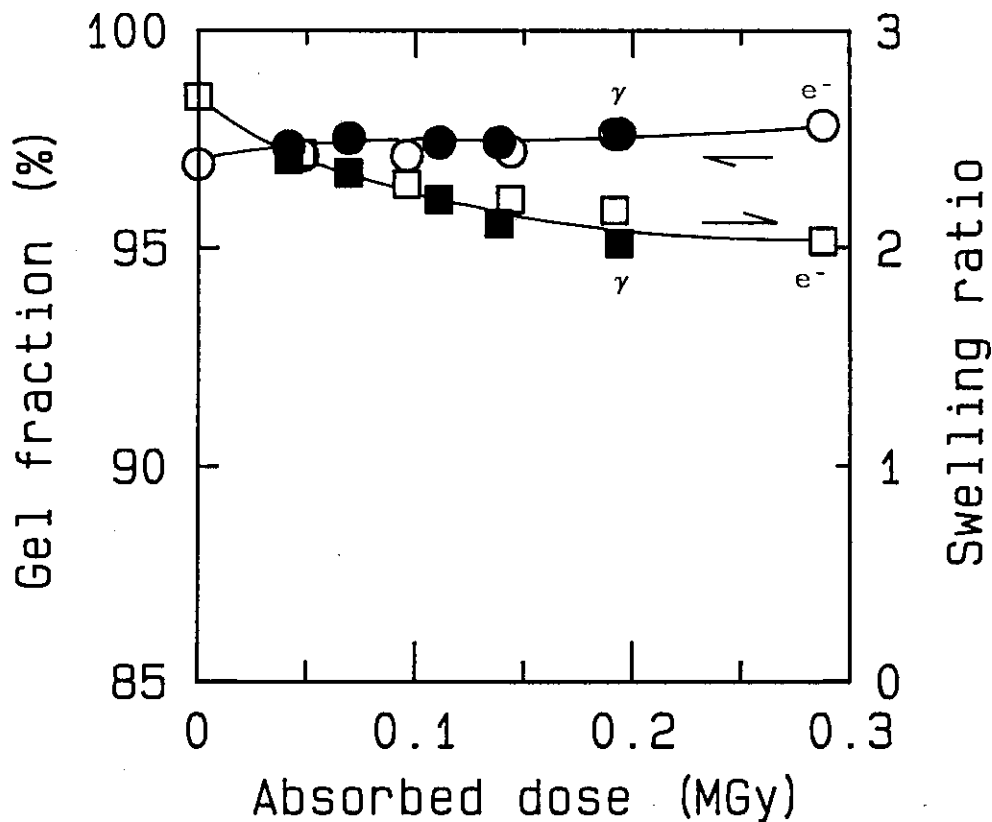


Fig. 21 Gel fraction and swelling ratio of fluorine rubber by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray or electron beam irradiation

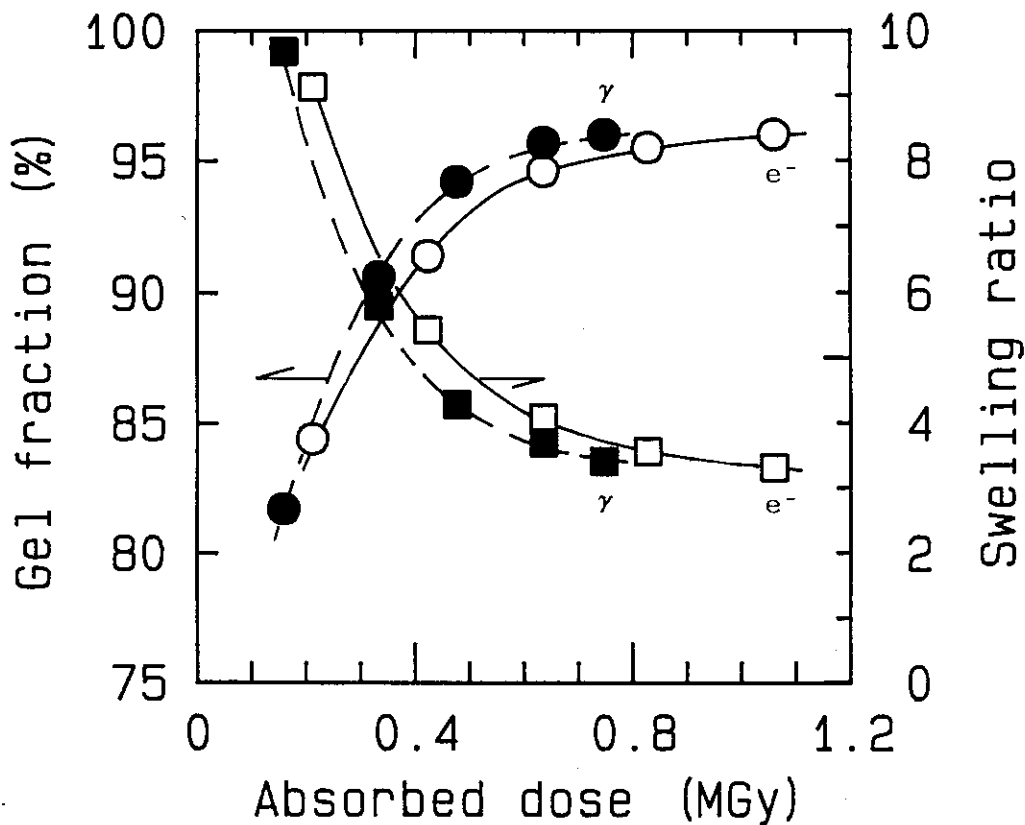


Fig. 22 Gel fraction and swelling ratio of ethylene-vinyl acetate copolymer by  $^{60}\text{Co}$   $\gamma$ -ray or electron beam irradiation