

JAERI-Tech

99-012



JP9950110



短纖維を充填したポリテトラフルオロエチレン  
の放射線架橋

1999年2月

大島明博・宇田川昂・森田洋右

日本原子力研究所  
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、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。  
入手の問合せは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 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。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

---

©Japan Atomic Energy Research Institute, 1999

---

編集兼発行 日本原子力研究所

短纖維を充填したポリテトラフルオロエチレンの放射線架橋

日本原子力研究所高崎研究所材料開発部  
大島 明博\*・宇田川 邑・森田 洋右

(1999年1月26日受理)

高分子複合材料のマトリクスとして評価するため、ガラス纖維および炭素纖維の短纖維を充填したポリテトラフルオロエチレン（P T F E）の放射線架橋を検討した。 P T F E は 330°C ~ 350°C で無酸素雰囲気下において放射線照射すると架橋するが、纖維の存在が架橋反応を妨害することではなく、同じ効率で架橋することがわかった。架橋した P T F E は纖維との界面で接着性はないが、 P T F E のモルフォロジーが変化することで、纖維の補強効果が現れることがわかった。

Radiation-Induced Crosslinking of Short Fiber-filled Polytetrafluoroethylene(PTFE)

Akihiro OSHIMA \* , Akira UDAGAWA and Yousuke MORITA

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

(Received January 26, 1999)

The radiation-induced crosslinking of PTFE mixed with short fibers as glass or carbon fibers was studied for processing the composite materials. The crosslinking behaviors did not change by mixing of the fiber under the irradiation condition in oxygen-free atmosphere at temperature of 330°C ~ 350°C.

The effect of reinforcement by the fibers in the fabricated composite materials was supposed to be a morphological change of PTFE because an adhesion between PTFE and the fibers was hardly observed in the composite materials.

Keywords : PTFE, Fiber, Crosslinking, Radiation, Mechanical Properties, Thermal Properties,  
SEM

---

\* Post-Doctoral Fellow

## 目 次

1.はじめに.....	1
2.実験方法.....	2
2.1 試料.....	2
2.2 照射方法.....	2
2.3 測定方法.....	3
3.結果と考察.....	4
4.結論.....	6
謝辞.....	6
参考文献.....	7

## Contents

1. Introduction.....	1
2. Experimental.....	2
2.1 Materials.....	2
2.2 Irradiation.....	2
2.3 Measurements.....	3
3. Result and Discussion.....	4
4. Conclusion.....	6
Acknowledgements.....	6
References.....	7

This is a blank page.

## 1. はじめに

ポリテトラフルオロエチレン(PTFE)は耐熱性、耐薬品性が必要とされる様々な工業分野で利用されているが、ガラス繊維や炭素繊維などとの接着性が低いこと、溶融粘度が 380°C の高温でも 10<sup>11</sup>P と高いことなどから<sup>1)</sup>、繊維強化樹脂(FRP)としての利用はない。現状では、軸受け等の耐摩耗性能を要求される部品や耐クリープ特性を要求される部品に、ガラス繊維や炭素繊維等の短繊維を PTFE 樹脂の粉末に混合し焼成した材料が用いられているのみである<sup>2)</sup>。

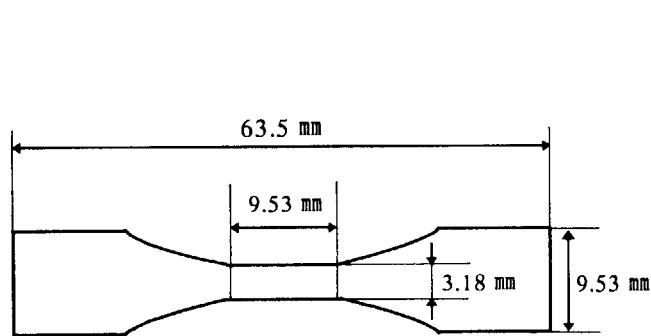
一方、PTFE は放射線で容易に分解するという欠点があるため<sup>3,4)</sup>、原子力産業や航空宇宙産業のような先端科学技術分野での利用が制限されていた。しかし、著者らの研究により<sup>5-11)</sup>、PTFE は結晶融点直上の 330°C ~ 350°C、無酸素雰囲気下での放射線照射により架橋し<sup>5-12)</sup>、放射線環境下で使用可能な透明な材料に改質できることが明らかになった<sup>7-11)</sup>。その他、放射線架橋した PTFE は力学特性、光学特性、耐クリープ特性や耐摩耗特性などが改善される<sup>10,11)</sup>。本研究は、これらの特性改善に着目し、放射線環境下で使用可能なフッ素系複合材料を開発するため、ガラス短繊維および炭素短繊維を充填した PTFE をそれぞれ無酸素雰囲気の高温下において放射線照射を行い、その力学特性に及ぼす放射線架橋の影響について検討を行った。本報告は、その第 1 報として、市販されているガラス繊維および炭素繊維の短繊維を充填した PTFE の放射線架橋を検討し、連続長繊維強化複合材料の開発にあたっての問題点を探った。

## 2. 実験方法

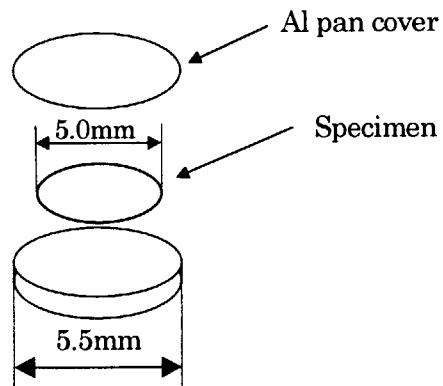
### 2.1 試料

マトリクスとなる PTFE には、懸濁重合により得られた粉体状 PTFE(G163: 旭 ICI フロロポリマーズ株式会社製)を用い、これに 20wt%のガラス短纖維および 10wt%の炭素短纖維をそれぞれ混合したものを焼結して、厚さ 0.5mm に成形加工したシート(10m × 11cm)を試験試料とした。この試料の纖維の分散状態を超音波顕微鏡写真で示すと Fig.1 のようになっている。比較試料として、粉体状 PTFE(G163)を焼結し、厚さ 0.5mm に成形加工した PTFE シート(10m × 11cm)を用いた。

上記シートを長さ 30cm × 幅 8cm の大きさに切り、照射試料とした。力学特性は引張試験により調べたが、試験片は照射後のシートから Fig.2 に示すようなダンベル状(ASTM D-1822L)に切り出した。DSC を用いた熱分析では、Fig.3 のような円板状に切り抜いた試料( $20.0\text{mg} \pm 0.5\text{mg}$ )を使用した。



**Fig.2 Dumbbell shape specimen;  
type ASTM D-1822L.**



**Fig.3 Specimen for DSC.**

### 2.2 照射方法

電子線照射は、日本原子力研究所高崎研究所 1 号加速器(コッククロフトウォルトン型電子加速器)を用い、加速電圧は 2MV、電流は 0.1 ~ 1.0mA で行った。

高温下での電子線照射は Fig.4 に示す照射容器を用いて実施した<sup>13)</sup>。電子線照射時の装置の写真を Fig.5 に示す。また、照射試料は Fig.6 の試料支持台上(電子加速器のビーム窓下 30 cm の位置)に設置した。

電子線の線量測定は、CTA フィルム線量計(富士写真フィルム製 : FTR-125)を用いて室温で照射し、280nm での吸光度の変化から線量を求めた<sup>14,15)</sup>。加速電圧 2MV、電流 0.5mA で 100 秒間照射を行ったときの線量測定の結果、線量率は 0.6kGy/s であった。

纖維を充填した PTFE を照射容器内の試料支持台上に置き、照射容器内を真空ポンプで  $10^{-1}\text{Pa}$

まで脱気した後、不活性ガスであるアルゴンガスに置換した。照射は、一定量のアルゴンガスを流通させながら、室温(25°C)ならびにPTFEの結晶融点以上の340°C±5°Cに加熱した状態で最大5MGyまで行った。

また、PTFE単体の比較試料も同様の方法で照射した。

## 2.3 測定方法

PTFEの力学特性の測定は、引張試験機(INSTRON 製：4302型)を用いて室温で行った。引張速度(Cross Head Speed)は20mm/min、このときのチャック間距離は22mmとした。得られた応力-歪曲線(Stress-Strain Curve : S-Sカーブ)から破断伸び、引張強度、降伏点強度およびヤング率を求めた。それぞれの値は10個の試験片の測定値の平均とした。

熱分析は走査型示差熱量計(DSC; PERKIN-ELMER 製 DSC-7)を用いて行い、50°C～400°Cの範囲で昇温および降温測定を行い、融解温度(T<sub>m</sub>)、結晶化温度(T<sub>c</sub>)および結晶化熱量(ΔH<sub>c</sub> : J/g)を測定した。DSCの昇温および降温速度は20°C/minとした。T<sub>m</sub>およびT<sub>c</sub>は、それぞれのDSC曲線のピーク温度とした。ΔH<sub>c</sub>はDSCの結晶化曲線からベースラインを差し引きその面積(熱量)を計算で求め、そのときの試料の質量で割って規格化した。また、結晶化度(X)は、次式(1)より求めた。

$$X = \left( \frac{\Delta H_m}{\Delta H_{m^0}} \right) \times 100 \% \quad \dots \dots \quad (1)$$

ここで、ΔH<sub>m</sub>は、DSC測定による融解曲線から求められる融解熱量(cal/g)であり、ΔH<sub>m<sup>0</sup></sub>は、完全にPTFEが結晶化したときの値(14.6cal/g)である<sup>16)</sup>。

引張試験後の試験片の破断面を電子顕微鏡(SEM)で観察し、繊維とマトリクス樹脂との接合状態についても調べた。

### 3. 結果と考察

PTFE の  $T_m$  および  $T_c$  は放射線架橋により低温側に移動し、これに伴い  $\Delta H_c$  は低下する。著者は、すでに PTFE の架橋度をこれらの値から簡便に評価できることを明らかにした<sup>11)</sup>。ここでは同じ手法に基づいて、繊維を充填した PTFE の架橋効率を調べた。Fig.7 は各試料の  $T_m$  と線量、および Fig.8 は  $T_c$  と線量の関係を示す。これらの図では繊維を充填しない場合と併せて、室温および 340°C で照射した結果を比較して示した。同様に、Fig.9 および Fig.10 に、それぞれ  $\Delta H_c$  および結晶化度と線量の関係を示す。340°C で照射した場合、線量に対する  $T_m$ ,  $T_c$ ,  $\Delta H_c$  および結晶化度の変化は、繊維の有無に関係なくほぼ同一の挙動を示している。すなわち、繊維の種類および含有量に関係なく PTFE の  $T_m$  と  $T_c$  は線量の増加とともに低下し、さらに、 $\Delta H_c$  や結晶化度も小さくなることから、PTFE の非晶化が起きていることが示唆される。また、これらの結果から、繊維を充填しても PTFE の放射線架橋反応に影響はないことがわかる。一方、室温照射の場合、線量の増加に対する  $T_m$ ,  $T_c$  に変化はなく、 $\Delta H_c$  と結晶化度が増加する。これは PTFE の非晶領域で切断された低分子量の分子鎖が再配列して結晶化するためと解釈される<sup>17), 18)</sup>。

Table.1 に未照射時の試料の引張特性を示す。PTFE の引張強度は、繊維を充填することにより約 60% 低下し、同様に破断伸びは約 20% 低下することがわかる。また、低下率は繊維の種類や充填率によって大きな差は認められないが、炭素繊維を充填した PTFE の方が低下率はやや小さい。これらの引張強度特性は、大気中 340°C で 1 時間熱処理しても変化しないことを確かめた。アルゴンガス雰囲気の下で 340°C、ならびに室温で電子線照射した繊維充填 PTFE の線量に対する引張強度特性を Fig.11～Fig.13 に示す。

Table.1 Elongation at break and tensile strength of non-irradiated specimen.

	PTFE	GF-PTFE	CF-PTFE
Elongation(%)	400±10	320±10	335±10
Tensile strength(MPa)	55±4	18.8±2.5	21.3±2.5

GF-PTFE: glass fiber-filled PTFE, CF-PTFE: carbon fiber-filled PTFE.

PTFE 単体を 340°C で照射して架橋させた場合の破断伸びは、500kGy の照射でも 250% 以上を保持する<sup>11)</sup>。しかし、繊維充填 PTFE を 340°C で照射した場合、その伸びは低下し、50kGy 照射で 10% 程度になった。これは、マトリクス樹脂の伸びがランダムに分散した繊維によって妨げられるためと考えられる。すなわち、PTFE が架橋することによって繊維の投錨効果が現れることを示唆している。Fig.11 に示すように、340°C で照射した場合、ガラス繊維充填 PTFE の引張強度は、1MGy 程度で初期値(未架橋)を上回ることがわかる。また、炭素繊維充填 PTFE では、線量を増大させても初期値を超えることはないが、低線量域で一度低下した後 2MGy を頂点に引張強度が回復する。一方、室温照射では、引張強度は線量とともに低下するのみであった。Fig.12 に示す降伏点強度は、340°C で照射した場合、線量とともに増加した。未照射時の降伏点強度は、繊維の充填率の少ない方がわずかに高い。しかし、340°C で照射した場合、繊維の充填率の高いガラス繊維充填 PTFE の方が、炭

素繊維充填 PTFE よりも高くなっている。ヤング率の線量に対する依存性は Fig.13 に示すように、降伏点強度とよく似た挙動を示している。以上の結果から、繊維充填 PTFE の引張強度特性は線量とともに増加し、500kGy 照射で 2 倍以上になることがわかった。一方、室温照射の場合、降伏点強度およびヤング率は、いずれも線量とともに低下した。これは PTFE 分子鎖の切断が起き、引張強度特性を低下させているためである。

未照射では繊維を充填していない PTFE の方が、繊維充填 PTFE よりも引張強度、降伏点強度は優れている。しかし、高温での放射線架橋処理を行うことで、繊維の充填率の高い方が引張強度特性は向上することから、架橋することによって繊維の補強効果が現れてくることがわかる。

引張強度特性に関して、代表的な値を Table.2 にまとめた。また、比較のために PTFE 単体の場合も測定した。繊維を充填して架橋処理を行った PTFE は、降伏点強度およびヤング率が架橋処理を行っていない場合に比べて約 3 倍向上している。また、PTFE を架橋した試料と繊維を充填して架橋した試料を比較した場合、降伏点強度の値については大差ないが、ヤング率は 2 倍以上に向上していることがわかる。

Table.2 Change of mechanical properties for fiber filled PTFE by radiation crosslinking.

	Non-irradiation			Irradiation to 0.5MGy			Irradiation to 1MGy		
	PTFE	GF- PTFE	CF- PTFE	RX- 0.5M	RX- 0.5MGF	RX- 0.5MCF	RX-1M	RX- 1MGF	RX- 1MCF
Yield strength (MPa)	12.5	5.5	6.0	18.9	16.0	14.4	22.1	18.9	15.6
Modulus (MPa)	144.0	185.7	226.7	208.0	590.0	501.9	252.0	560.0	421.2

GF: glass fiber-filled, CF: carbon fiber-filled, RX: radiation crosslinking.

Fig.14 は、引張試験後、試験片の破断面を SEM により撮影したものである。試料はガラス繊維および炭素繊維を充填した未照射の PTFE(写真(a), (c))と、これを 0.5MGy(500kGy)照射して架橋処理を行った PTFE(写真(b), (d))である。未照射の架橋していない繊維充填 PTFE では、繊維と PTFE との界面での物理的・化学的な接着性はほとんどないことがわかる。また、PTFE に対して架橋処理を行っても、繊維と PTFE との界面の変化はほとんどみられないが、架橋処理前後で PTFE のモルフォロジー的な変化が起きていることが観察される。すなわち、未照射試料の写真((a),(c))では、マトリクスである PTFE はフレーク状のものが集積したように見えるが、架橋することによって PTFE は均質な連続層に変化している。この PTFE のモルフォロジーの変化は、DSC による熱分析、X 線回折による結晶構造解析などからもすでに観察されている<sup>11)</sup>。

以上のことから、PTFE にガラス短纖維や炭素短纖維を充填して架橋処理を行うことによって補強効果が現れ、引張強度特性が向上する。これは主にマトリクス樹脂のモルフォロジー的な変化に起因すると考えられる。換言すれば、強化纖維とマトリクス樹脂との接着性がほとんどなくとも、マトリクスである PTFE のモルフォロジーが架橋によって均質で粘りのある連続層に改質されることにより纖維の補強効果が現れ、その結果、纖維を充填した架橋 PTFE の引張強度特性が向上したと考えられる。

#### 4. 結 論

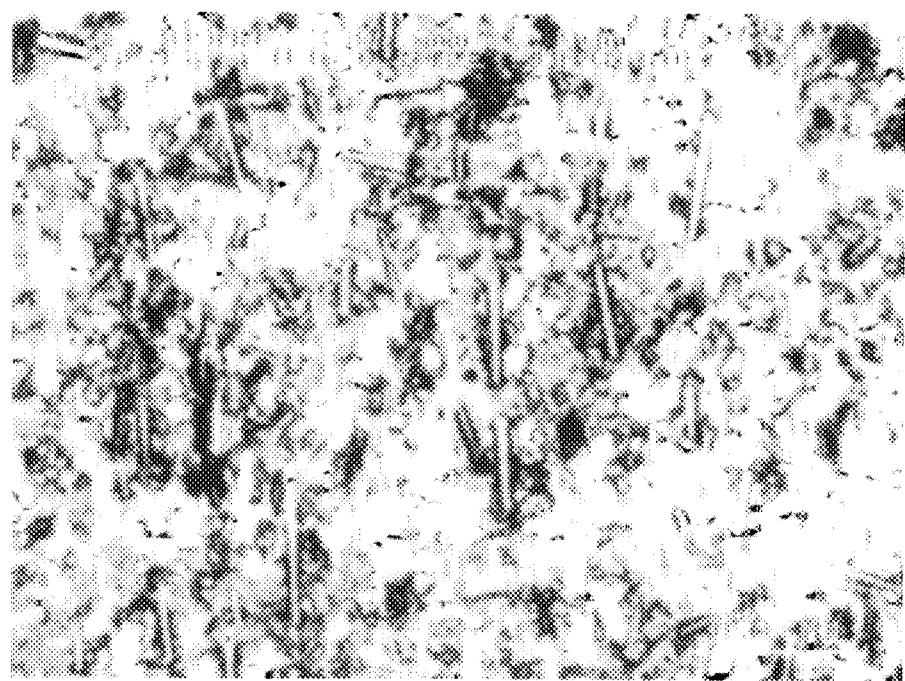
マトリクスである PTFE 単独の場合と同様に、ガラス繊維や炭素繊維の短繊維を充填した PTFE においても、無酸素雰囲気の高温下での放射線照射により、架橋が進行することが明らかになった。また、繊維を充填し架橋させた PTFE 複合材の引張強度特性に関しては、降伏点強度およびヤング率が未架橋の PTFE 複合材に比べ 3 倍以上に向上した。PTFE のみ架橋させた場合と比較しても、ヤング率は 2 倍以上に向上した。高温放射線照射による架橋処理を行った場合、繊維の充填率の多い方が力学特性の向上は顕著になり、明確に繊維の補強効果が現れる。今後、ガラス繊維や炭素繊維の連続長繊維を使ったフッ素系先端複合材料を開発する上でも高温放射線架橋法は、強度特性を向上させる有効な手段になると考えられる。しかし、放射線照射による繊維と PTFE との界面における物理的・化学的な接着性の改善は放射線照射によるもう一つの効果として期待されたが、この効果は認められなかった。したがって、フッ素系樹脂特有の優れた特性を損なわず、強化繊維の補強効果を十分発現するフッ素系先端複合材料を開発するためには、放射線架橋を阻害せずに繊維と PTFE との相溶性や接着性を改善することが最大の課題と考えられる。

#### 謝 辞

本研究を進めるにあたり、東京大学名誉教授 田畠米穂先生並びに材料開発部瀬口忠男部長の貴重な御助言と御教示を賜った。ここに謹んで感謝の意を表します。また、実験に用いた試料は、旭 ICI フロロポリマーズ株式会社から提供されたものであり、関係者各位に感謝します。技術開発課 伊藤洋氏には電子顕微鏡写真を撮影して頂いた。また、照射施設管理課 春山保幸氏、(財)放射線利用振興協会 山田力造氏、山口敏行氏には電子線照射に際し御協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

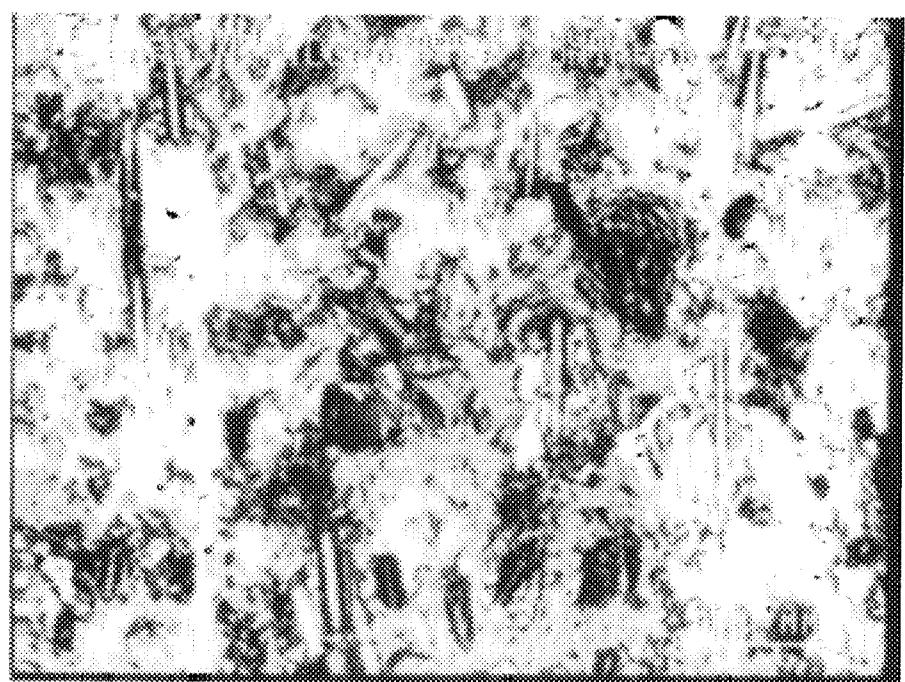
## 参考文献

- 1) A. Nishioka and M. Watanabe, J. Polym. Sci., **24**, 298(1957).
- 2) 旭 ICI フロロポリマーズ株式会社 フルオル製品カタログ.
- 3) A. Charlesby, Nucleonics, **12**, 18(1954).
- 4) M. Dole, in *The radiation chemistry of Macromolecules II* edited by M. Dole, Chap.9, pp.167-178, Academic Press (1973).
- 5) Y. Tabata "Solid State Reactions in Radiation Chemistry", Taniguchi Conf., pp118-120, June, 1992, Sapporo, JAPAN (1992).
- 6) A. Oshima, Y. Tabata, H. Kudoh and T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., **45**, 269 (1995).
- 7) 大島明博, 放射線化学, No.62, 47(1996).
- 8) Y. Tabata, A. Oshima, K. Takashika and T. Seguchi, Radiat. Phys. Chem., **48**, 563(1996).
- 9) A. Oshima, S. Ikeda, T. Seguchi and Y. Tabata, Radiat. Phys. Chem., **49**, 279(1997).
- 10) A. Oshima, S. Ikeda, T. Seguchi and Y. Tabata, J. Adv. Sci., **9**, 60(1997),.
- 11) 大島明博, 東海大学博士論文(1997).
- 12) J. Sun, Y. Zhang, X. Zhong and X. Zhu, Radiat. Phys. Chem. **44**, 655 (1994).
- 13) 春山保幸, 大島明博, 池田重利, 須永博美, 滝沢春喜, 瀬口忠男, JAERI-Tech 95-003 (1995).
- 14) 田中隆一, 三友昭市, 須永博美, 松田公司, 田村直幸, JAERI-M 82-033(1982).
- 15) R. Tanaka, S. Mitomo and N. Tamura, Int. J. Appl. Radiat. Isot., **35**, 875 (1984).
- 16) P. L. McGeer and H. C. Duus, J. Chem. Phys., **20**, 1813 (1952).
- 17) D. E. Kline and J. A. Sauer, J. Polym. Sci., **A1**, 1621 (1963).
- 18) 土家満明, 山本格治, 応用物理, **34**, 424 (1965).



(a) Surface of glass fiber-filled PTFE

0.1mm  
↔



(b) Surface of carbon fiber-filled PTFE

0.1mm  
↔

Fig.1 Acoustic microscopic images of fiber-filled PTFE. F=400MHz;  
(a) Glass fiber-filled PTFE and (b) Carbon fiber-filled PTFE.

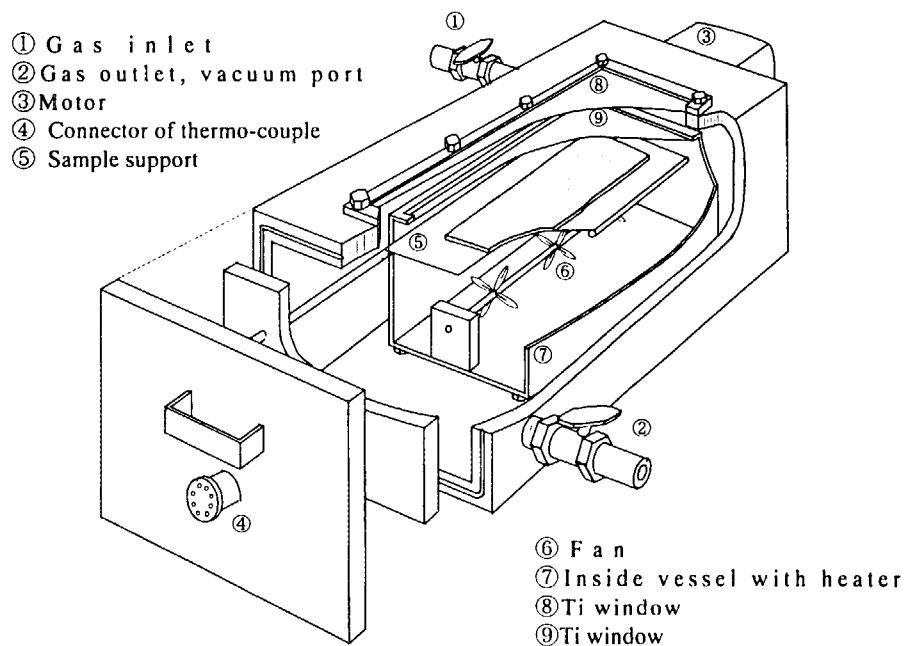


Fig.4 Bird's-eye view of the irradiation vessel.

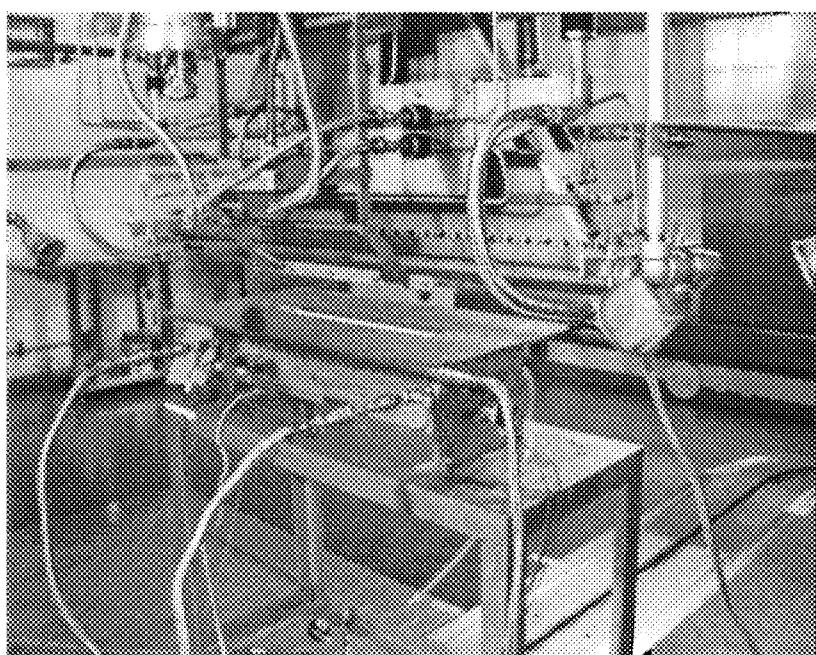


Fig.5 A photograph of the irradiation vessel.

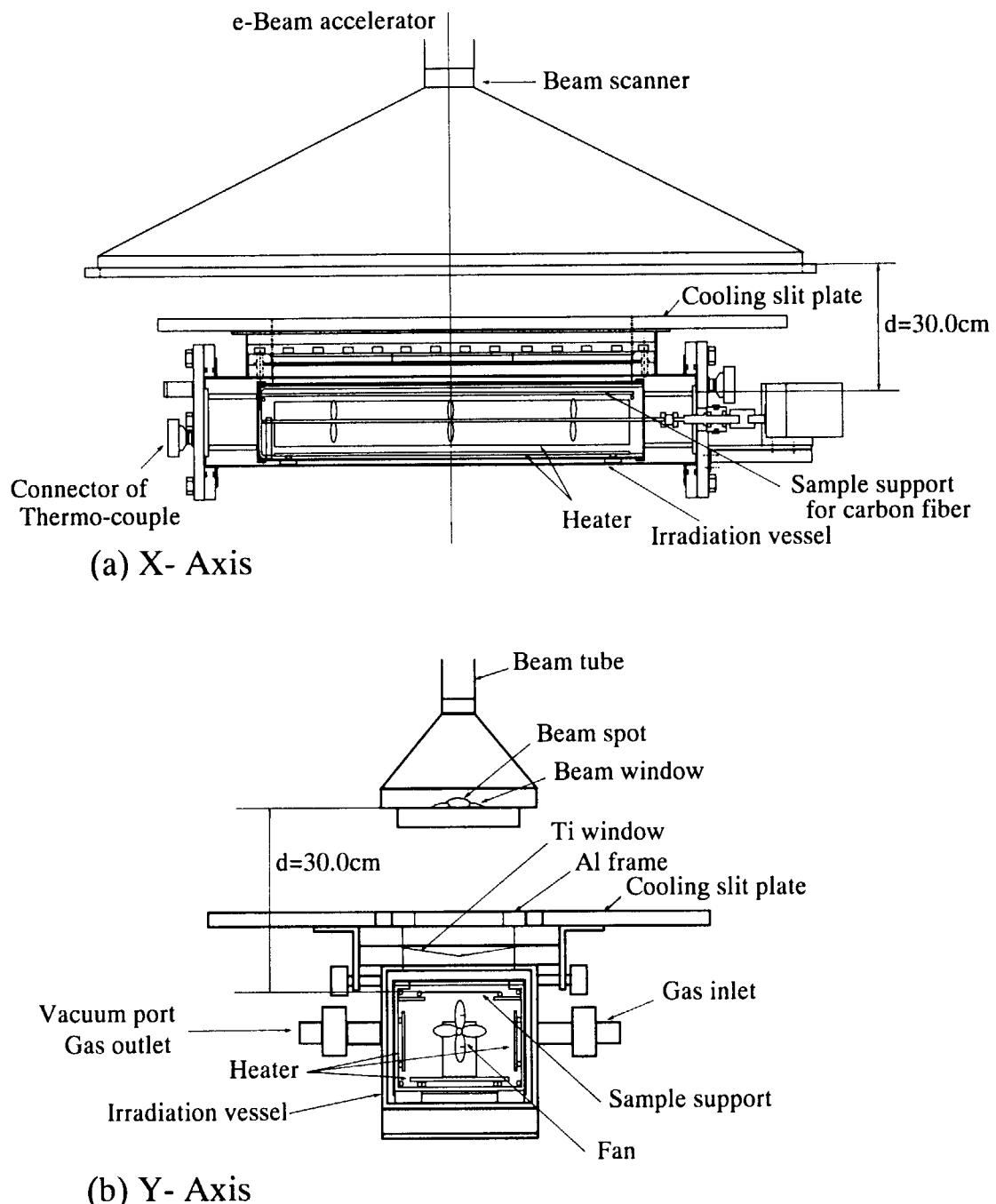


Fig.6 Arrangement of the irradiation vessel with an electron beam accelerator.

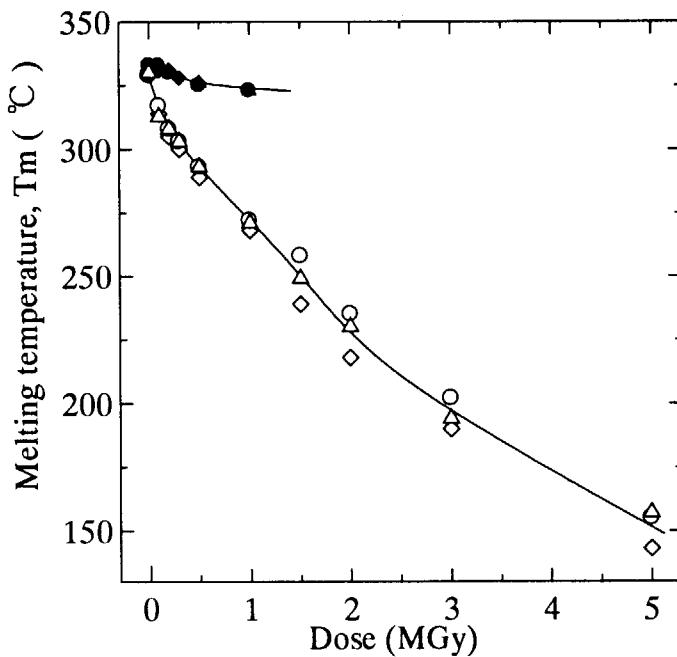


Fig.7 Relationship between melting temperature and dose for fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere. ◇: Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ◆: Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT, △: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ▲: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT, ○: PTFE irradiated at 340°C and ●: PTFE irradiated at RT.

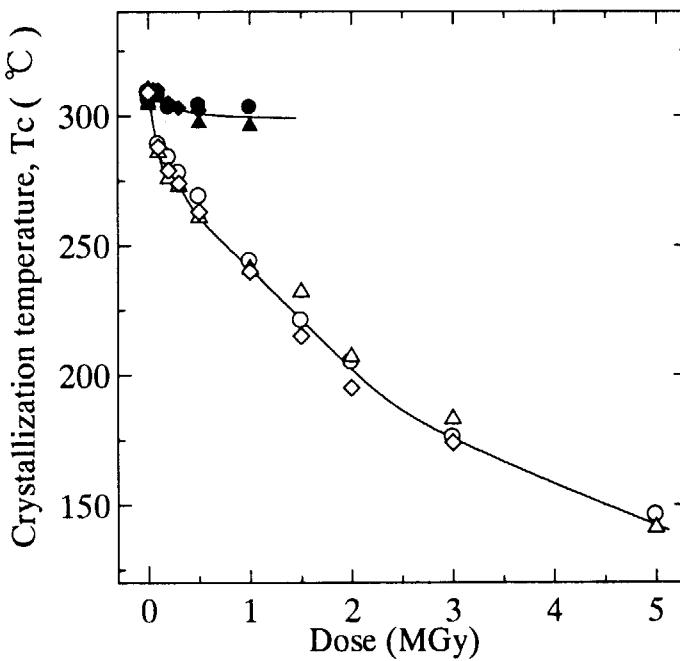


Fig.8 Relationship between crystallization temperature and dose for fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere. ◇: Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ◆: Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT, △: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C and ▲: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT, ○: PTFE irradiated at 340°C and ●: PTFE irradiated at RT.

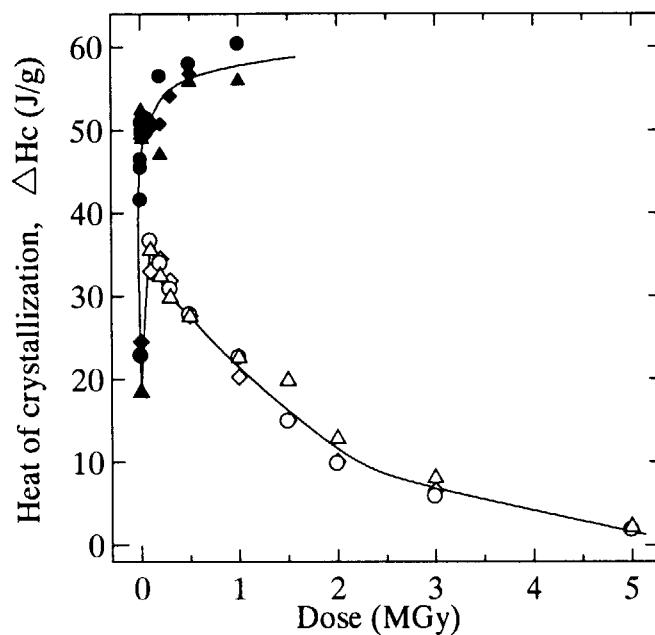


Fig.9 Relationship between heat of crystallization and dose for fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere. ◇: Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ◆: Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT, △: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ▲: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT, ○: PTFE irradiated at 340°C, and ●: PTFE irradiated at RT.

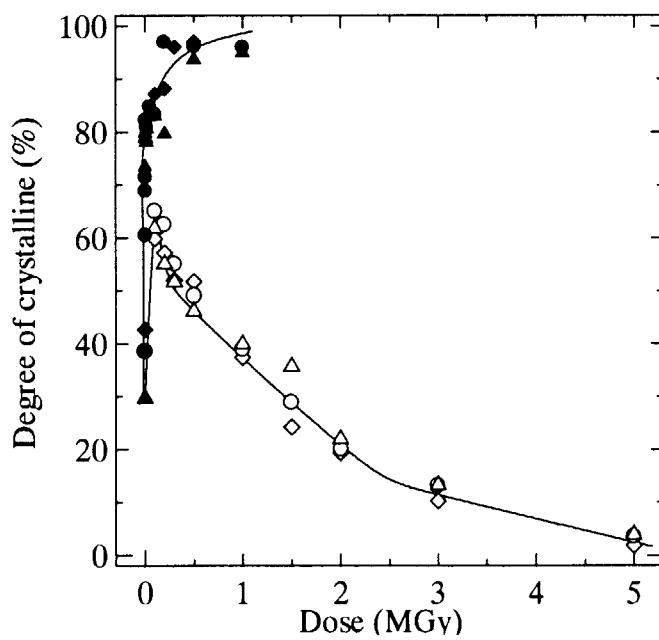


Fig.10 Relationship between degree of crystalline and dose for fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere. ◇: Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ◆: Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT, △: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ▲: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT, ○:PTFE irradiated at 340°C and ●:PTFE irradiated at RT.

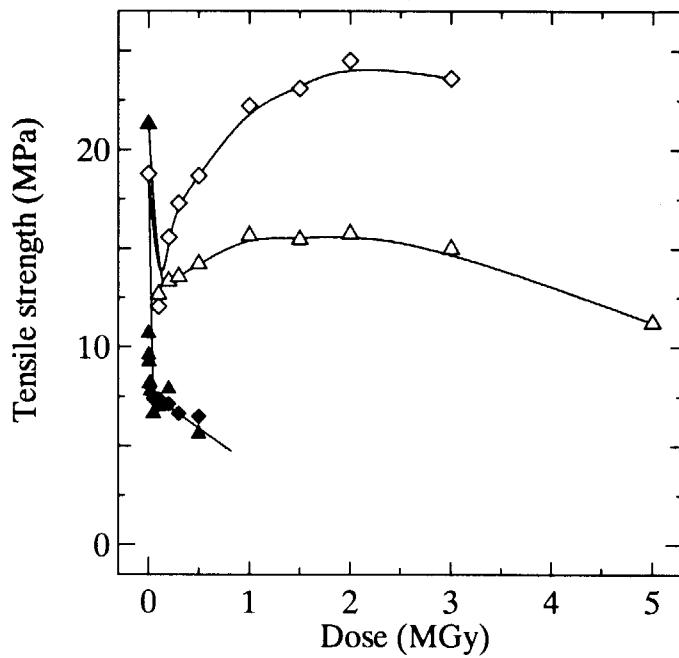


Fig.11 Tensile strength of fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere as a function of dose. ◇:Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ◆:Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT, △: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C and ▲: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT.

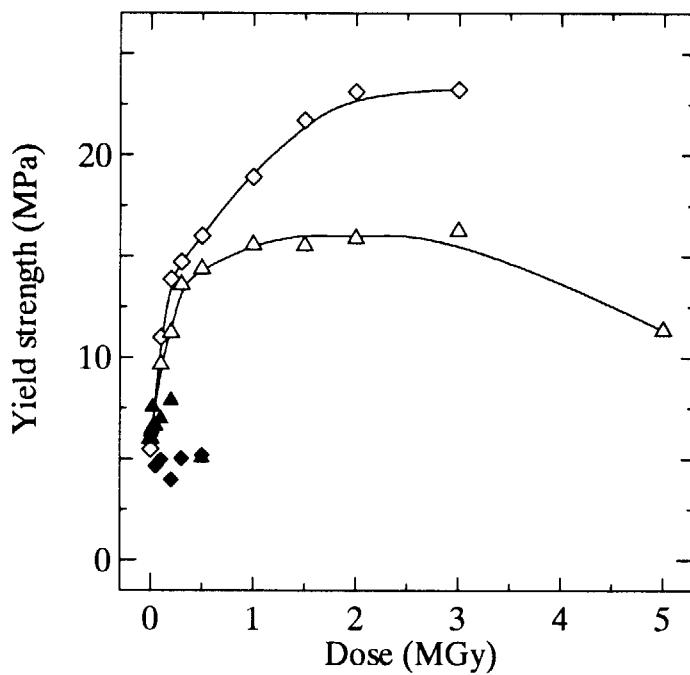


Fig.12 Yield strength of fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere as a function of dose. ◇:Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C, ◆:Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT, △: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C and ▲: Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT.

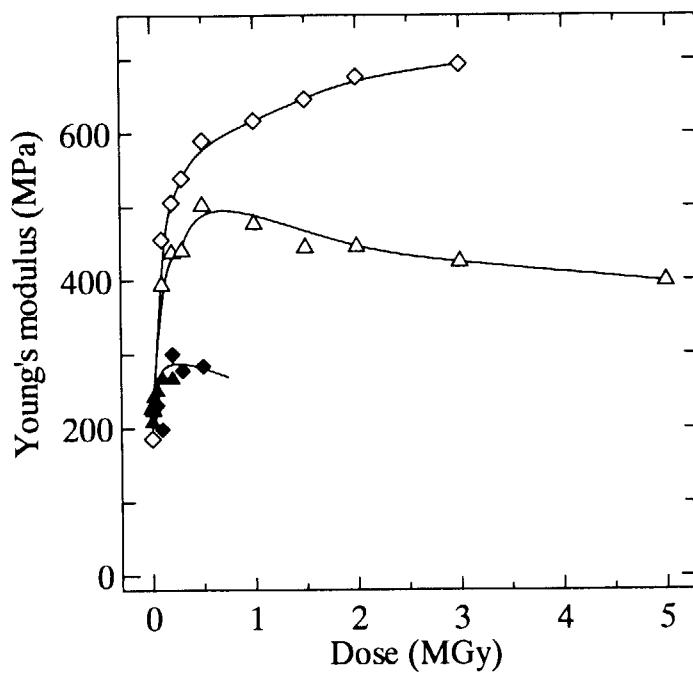


Fig.13 Young' modulus of fiber-filled PTFE irradiated under oxygen-free atmosphere as a function of dose.  $\diamond$ :Glass fiber-filled PTFE irradiated at 340°C,  $\blacklozenge$ :Glass fiber-filled PTFE irradiated at RT,  $\triangle$ : Carbon fiber-filled PTFE irradiated at 340°C and  $\blacktriangle$ : Carbon fiber-filled PTFE irradiated at RT.

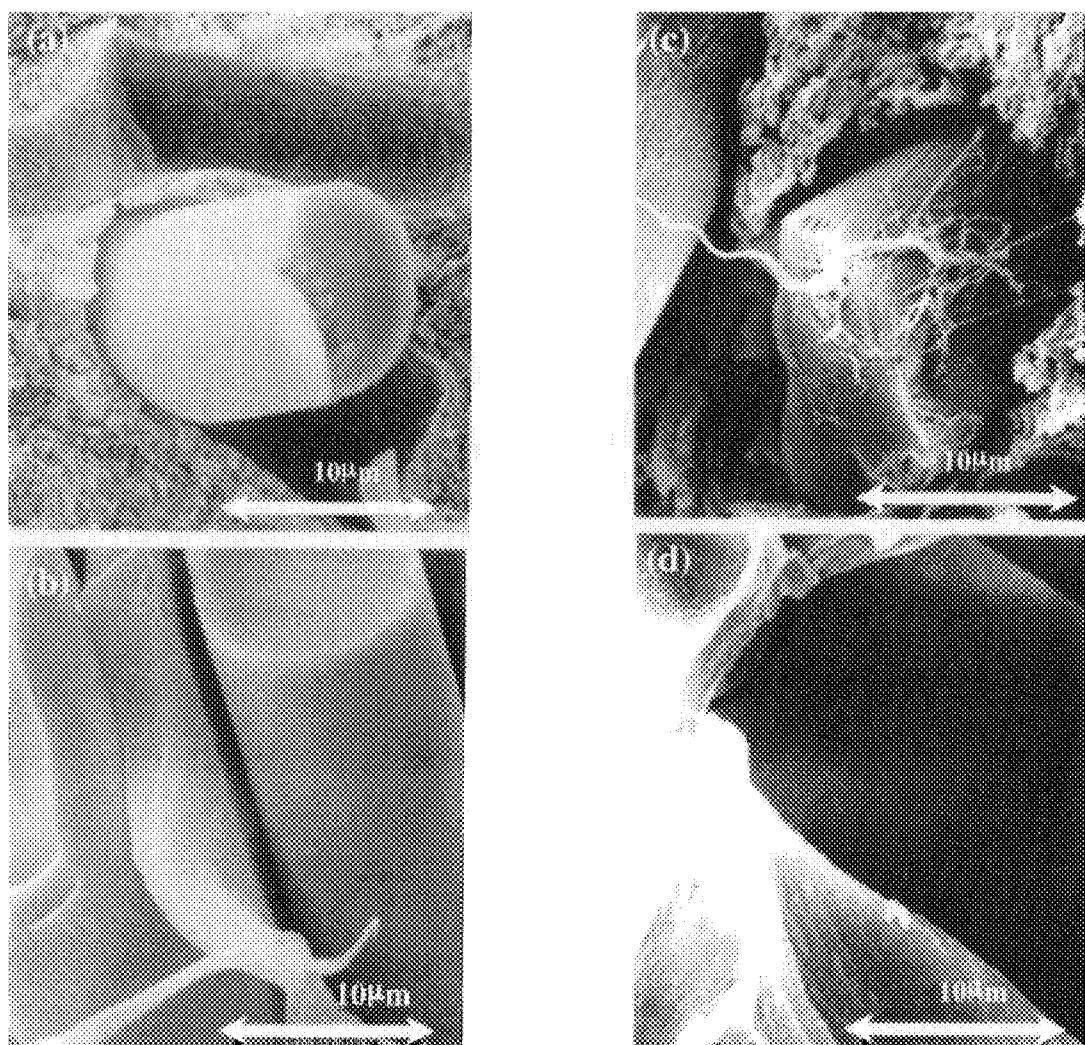


Fig.14 SEM Photographs of fiber-filled PTFE; (a) Glass fiber-filled PTFE, (b) Glass fiber-filled crosslinked PTFE(0.5MGy irradiation), (c) Carbon fiber-filled PTFE & (d) Carbon fiber-filled crosslinked PTFE(0.5MGy irradiation).

This is a blank page.

# 国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	$s^{-1}$
力	ニュートン	N	$m \cdot kg/s^2$
圧力、応力	パスカル	Pa	$N/m^2$
エネルギー、仕事、熱量	ジュール	J	$N \cdot m$
功率、放射束	ワット	W	$J/s$
電気量、電荷	クーロン	C	$A \cdot s$
電位、電圧、起電力	ボルト	V	$W/A$
静電容量	ファラード	F	$C/V$
電気抵抗	オーム	$\Omega$	$V/A$
コンダクタンス	ジーメンス	S	$A/V$
磁束	ウェーバ	Wb	$V \cdot s$
磁束密度	テスラ	T	$Wb/m^2$
インダクタンス	ヘンリー	H	$Wb/A$
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束度	ルーメン	lm	$cd \cdot sr$
照度	ルクス	lx	$lm/m^2$
放射能	ベクレル	Bq	$s^{-1}$
吸収線量	グレイ	Gy	$J/kg$
線量当量	シーベルト	Sv	$J/kg$

表2 SIと併用される単位

名称	記号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ', "
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
$10^{18}$	エクサ	E
$10^{15}$	ペタ	P
$10^{12}$	テラ	T
$10^9$	ギガ	G
$10^6$	メガ	M
$10^3$	キロ	k
$10^2$	ヘクト	h
$10^1$	デカ	da
$10^{-1}$	デシ	d
$10^{-2}$	センチ	c
$10^{-3}$	ミリ	m
$10^{-6}$	マイクロ	μ
$10^{-9}$	ナノ	n
$10^{-12}$	ピコ	p
$10^{-15}$	フェムト	f
$10^{-18}$	アト	a

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名称	記号
オングストローム	Å
バーン	b
バルル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

(注)

1. 表1~5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 表4には海里、ノット、アール、ヘクトールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。

3. barは、JISでは流体の圧力を表す場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。

4. EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

## 換算表

力	N(=10 <sup>5</sup> dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.4822	0.453592	1	

粘度 1 Pa·s(N·s/m<sup>2</sup>) = 10 P(ポアズ)(g/(cm·s))

動粘度 1 m<sup>2</sup>/s = 10<sup>4</sup>St(ストークス)(cm<sup>2</sup>/s)

圧力	MPa(=10 bar)	kgf/cm <sup>2</sup>	atm	mmHg(Torr)	lbf/in <sup>2</sup> (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 <sup>3</sup>	145.038
0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233	
0.101325	1.03323	1	760	14.6959	
$1.33322 \times 10^{-4}$	$1.35951 \times 10^{-3}$	$1.31579 \times 10^{-3}$	1	$1.93368 \times 10^{-2}$	
$6.89476 \times 10^{-3}$	$7.03070 \times 10^{-2}$	$6.80460 \times 10^{-2}$	51.7149	1	

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 <sup>7</sup> erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)
1	0.101972	$2.77778 \times 10^{-7}$	0.238889	$9.47813 \times 10^{-4}$	0.737562	$6.24150 \times 10^{18}$	$= 4.184 \text{ J} \text{ (熱化学)}$	
9.80665	1	$2.72407 \times 10^{-6}$	2.34270	$9.29487 \times 10^{-3}$	7.23301	$6.12082 \times 10^{19}$	$= 4.1855 \text{ J} \text{ (15 } ^\circ\text{C)}$	
$3.6 \times 10^6$	$3.67098 \times 10^5$	1	$8.59999 \times 10^5$	3412.13	$2.65522 \times 10^6$	$2.24694 \times 10^{25}$	$= 4.1868 \text{ J} \text{ (国際蒸気表)}$	
4.18605	0.426858	$1.16279 \times 10^{-6}$	1	$3.96759 \times 10^{-3}$	3.08747	$2.61272 \times 10^{19}$	仕事率 1 PS(仮馬力)	
1055.06	107.586	$2.93072 \times 10^{-4}$	252.042	1	778.172	$6.58515 \times 10^{21}$	$= 75 \text{ kgf} \cdot \text{m/s}$	
1.35582	0.138255	$3.76616 \times 10^{-7}$	0.323890	$1.28506 \times 10^{-3}$	1	$8.46233 \times 10^{18}$	$= 735.499 \text{ W}$	
$1.60218 \times 10^{-19}$	$1.63377 \times 10^{-20}$	$4.45050 \times 10^{-26}$	$3.82743 \times 10^{-20}$	$1.51857 \times 10^{-22}$	$1.18171 \times 10^{-19}$	1		

放射能	Bq	Ci	吸収線量	Gy	rad
1	$2.70270 \times 10^{-11}$	1	1	100	
$3.7 \times 10^{10}$	1		0.01	1	

照射線量	C/kg	R
1	3876	
$2.58 \times 10^{-4}$	1	

線量当量	Sv	rem
1	100	
0.01	1	

(86年12月26日現在)

短纖維を充填したポリテトラフルオロエチレンの放射線架橋