



JAEA-Review
2008-012

高放射線環境で使用される機器・材料類の
耐放射線特性データ集

Collection of Radiation Resistant Characteristics Reports for Instruments and
Materials in High Dose Rate Environment

(編) 草野 譲一
(Ed.) Joichi KUSANO

J-PARC センター
加速器ディビジョン
Accelerator Division
J-PARC Center

March 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Review

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター*では実費による複写頒布を行っ
ております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920

© Japan Atomic Energy Agency, 2008

高放射線環境で使用される機器・材料類の耐放射線特性データ集

日本原子力研究開発機構 J-PARC センター 加速器ディビジョン

(編) 草野 譲一

(2008 年 1 月 18 日受理)

本資料は大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の各施設で使用が予想される各種材料・機器等の耐放射線特性について、これまでに公表されている特性試験報告を用途・材料別に分類してとりまとめたものである。J-PARC 加速器はビーム出力 1MW と従来加速器の 10 倍以上のビーム強度を扱うため、必然的に発生するロスビームが引き起こす材料の放射線損傷の影響に関し、広い範囲の機器について検討を必要とされている。その使用予定材料、機器の耐放射線特性は施設稼働後の各装置の寿命・交換時期の評価、さらには保守作業に於ける作業員の放射線被曝予測評価に極めて重要である。本資料の作成作業は J-PARC における高放射線環境に予定される機器の信頼性を調査する意味から、これまでに公表されている各種材料・機器の耐放射線特性についての収集と第一次編集を (財) 放射線利用振興協会に依頼し、第二次編集を J-PARC センター加速器ディビジョンが担当しまとめたものである。

Collection of Radiation Resistant Characteristics Reports for Instruments and
Materials in High Dose Rate Environment

(Ed.) Joichi KUSANO

Accelerator Division
J-PARC Center
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received January 18, 2008)

This document presents the collected official reports of radiation irradiation study for the candidate materials to be used in high dose rate environment as J-PARC facility. The effect of radiation damage by loss-beam or secondary particle beam of the accelerators influences the performance and the reliability of various instruments. The knowledge on the radiation resistivity of the materials is important to estimate the life of the equipments, the maintenance interval and dose evaluation for the personnel at the maintenance period. The radiation damage consists with mechanical property, electrical property and gas-evolution property.

Keywords: Radiation, Accelerator, Material, Irradiation, High Dose Rate

目 次

はじめに	.....	1
1. ケーブル・ワイヤ・コネクタ (18報告)	.....	7
2. 光ファイバー・光学材料 (26報告)	.....	29
3. 半導体デバイス (9報告)	.....	57
4. 各種機器・部品類 (25報告)	.....	73
謝辞	.....	104

Contents

Introduction	.....	1
1. Cable, Wire and Connector (18 Reports)	.....	7
2. Optical fiber and Optical device (26 Reports)	.....	29
3. Semiconductor devices (9 Reports)	.....	57
4. Components (25 Reports)	.....	73
Acknowledgment	.....	104

データ集一覧 (1/3)

1. ケーブル・ワイヤ・コネクタ	.....	7
Cable/Connector-1 ノンハロゲン化非延焼性電線／原子力発電所用	.....	8
Cable/Connector-2 ポリエーテルエーテルケトン (PEEK) 被覆電線／核融合炉用	.....	9
Cable/Connector-3 窒化珪素 (SiN) 織物使用ケーブル／電力ケーブル	.....	10
Cable/Connector-4 ポリイミド&PEEK 絶縁同軸ケーブル／信号ケーブル	.....	11
Cable/Connector-5 各種ワニス絶縁ワイヤ／エナメル線	.....	12
Cable/Connector-6 ポリイミド、ポリアミドイミドワニス絶縁ワイヤ／エナメル線	.....	14
Cable/Connector-7 PBI 絶縁超電導ワイヤ／超電導コイル	.....	16
Cable/Connector-8 セラミック絶縁ワイヤ(S/a) /ステーターコイル	.....	17
Cable/Connector-9 セラミック絶縁ワイヤ(S/b) /センサーコイル	.....	17
Cable/Connector-10 ポリイミド絶縁ワイヤ(H/a-1) /同アウトガス処理品(H/a-2)	.....	19
Cable/Connector-11 セラミック / ポリイミドハイブリッド 絶縁ワイヤ(H/b-1) /同アウト ガス処理品(H/b-2)	.....	19
Cable/Connector-12 セラミック絶縁パワーケーブル／ ACサーボモータ用	.....	21
Cable/Connector-13 セラミック絶縁信号ケーブル／ ACサーボモータ用	.....	21
Cable/Connector-14 セラミック絶縁熱電対ケーブル／ ACサーボモータ用	.....	23
Cable/Connector-15 絶縁材料に全芳香族系ポリイミド及びPEEK を用いたコネクタ	.....	24
Cable/Connector-16 $YB_2Cu_3O_{7-x}$ (高温超電導体材料)	.....	25
Cable/Connector-17 $Bi_2Sr_2CaCu_2O_x$ (高温超電導体材料)	.....	26
Cable/Connector-18 YBaCuO薄膜 : $T_c=83\sim 87\text{ K}$	.....	27
2. 光ファイバー・光学材料	.....	29
Fiber-1 フッ素ドープ SiO_2 ガラス	.....	30
Fiber-2 ①コア純 SiO_2 、クラッド SiO_2 -F(4wt%)、②コア SiO_2 +OH 800ppm、 クラッド SiO_2 -F(4wt%)、③コア SiO_2 + F 1.6wt%、クラッド SiO_2 -F (5.6wt%)	.....	31
Fiber-3 ①コア純 SiO_2 、クラッド SiO_2 -F(4wt%)、②コア SiO_2 +OH 800ppm、 クラッド SiO_2 -F(4wt%)、③コア SiO_2 + F 1.6wt%、クラッド SiO_2 -F (5.6wt%)	.....	32
Fiber-4 窒素ドープ SiO_2 、純 SiO_2 クラッド、 コア/クラッドの屈折率の差 $\Delta n=0.011$	.....	33
Fiber-5 SiO_2 コア光ファイバ ; F (OH content 120ppm, F doped (0.35%))、 H3 standard fiber (OH content 900ppm) 、 H1 (OH content 900ppm、水素処理24h) 、 H2 (OH content 900ppm 、水素処理 120h) 、 C1、C2(OH doped、OH content 1800ppm)	.....	34

データ集一覧 (2/3)

Fiber-6	SiO ₂ コア光ファイバ ; F fiber(OH content 10ppm, F doped (0.35%))、H fiber (OH content 10ppm, 水素処理) 、OH fiber(OH content 500ppm)	.....	36
Fiber-7	低OH、高OH含有SiO ₂ コアファイバ (フッ素ドープクラッド) 及びフッ素ドープファイバ	.....	37
Fiber-8	SiO ₂ コアファイバ (OH- & Cl free) 、OH 800ppm ファイバ、フッ素ドープファイバーなど	.....	38
Fiber-9	フッ素ドープSiO ₂ ファイバ (コアに1.6%、クラッドに5.6%)	.....	40
Fiber-10	純シリコン+不純物P(n-type) or B(p-type) (Pを $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ドープをN2E15と表記)	.....	42
Fiber-11	SUS304 に CrN, Pt, Alをコートした反射鏡	.....	43
Fiber-12	光学ガラス	.....	44
Fiber-13	KU-1 石英窓材 (1)	.....	46
Fiber-14	KU-1 石英窓材 (2)	.....	47
Fiber-15	光学レンズ用反射防止コーティングフィルム	.....	48
Fiber-16	ハロゲンランプ	.....	49
Fiber-17	OH ドープイメージファイバ	.....	50
Fiber-18	フッ素ドープイメージファイバ	.....	51
Fiber-19	照射下同時水素ガス処理イメージファイバ	.....	52
CCD-1	CCDカメラシステム	.....	53
CCD-2	CCDカメラシステム (改良型カメラコントロールユニット(CCU)付き)	.....	55
3. 半導体デバイス		.....	57
SEU-1	バイポーラメモリー素子 32kb, 16kb, 7kb	.....	58
SEU-2	各種DRAM (Dynamic Random Access Memory) 4Mb~16Mb	.....	59
SEU-3	各種SRAM (Static Random Access Memory)	.....	60
SEU-4	各種SRAM (Static Random Access Memory)	.....	61
SEU-5	256kbit SRAM (Static Random Access Memory)	.....	62
SEU-6	64kbit SRAM(Static Random Access Memory)	.....	63
SEU-7	64kbit SRAM, 4Mbit Dram (Static Random Access Memory)、1Mbit EEPROM, 4Mbit Flash memory	.....	64
SEU-8	64kbit SRAM, 4Mbit Dram, (Static Random Access Memory)、1Mbit EEPROM,4Mbit Flash memory	.....	66
Total Dose-1	マイクロプロセッサ(MPU、DSP)、ゲートアレイ(G/A)、フィールドプログラマブル・ゲートアレイ(FPGA)、メモリ	.....	67

データ集一覧 (3/3)

4. 各種機器・部品類	.....	73
Compo-1 市販潤滑油	.....	74
Compo-2 芳香族系潤滑油	.....	76
Compo-3 耐放射線性グリース	.....	78
Compo-4 Nd-Fe-B 焼結磁石	.....	79
Compo-5 炭素繊維強化複合材料(CFRP)	.....	80
Compo-6 ACサーボモータ	.....	82
Compo-7 ACサーボモータ	.....	83
Compo-8 ACサーボモータ	.....	84
Compo-9 インダクションモータ	.....	85
Compo-10 熱可塑性ポリイミドリテーナーを使用ボールベアリング(Type A)	.....	86
Compo-11 熱硬化型ポリイミドリテーナーを使用ボールベアリング(Type B)	.....	87
Compo-12 PEEK リテーナー使用をボールベアリング(Type C)	.....	88
Compo-13 自己潤滑合金リテーナーを使用ボールベアリング(Type D)	.....	89
Compo-14 SS310 焼結合金リテーナーを使用ボールベアリング(Type E)	.....	90
Compo-15 セラミックスボールを使用したボールベアリング(Type F)	.....	91
Compo-16 減速ギヤボックス (Harmonic Drive™)	.....	92
Compo-17 ポテンシオメーター (Wirewound type)	.....	93
Compo-18 ポテンシオメーター (Magnet resistive type)	.....	94
Compo-19 差動トランス (LVDT)	.....	95
Compo-20 シンクロナスレゾルバー	.....	96
Compo-21 光ファイバ使用ロータリーエンコーダ	.....	97
Compo-22 ストレインゲージ (Foil type)	.....	98
Compo-23 ストレインゲージ (Capsule type)	.....	99
Compo-24 エラストマー (EP-ゴム、ウレタン) / ガスケット	.....	100
Compo-25 ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)	.....	101

はじめに

原子力機構・高エネルギー加速器研究機構が共同して開発を進めている大強度陽子加速器（J-PARC）の安全でかつ安定的運転を遂行するためには、使用される材料及びそれを組み合わせられて作られた機器・部品類の大強度放射線場での耐久性の確保が重要である。全て単体として高い耐放射線特性を有する材料・素材で機器・部品を構成することが望ましいが、現実の機器・部品を設計・製作する場合には、その要求性能から耐放射線特性の面に問題がある材料も使用せざるを得ない場合も多々あることが予想される。安全で安定な運転を確保するためには、機器・部品の構成材料の耐放射線性に関する知見を深め材料を選択し設計するのは当然のことであり、その機器・部品類の放射線場での寿命を正確に把握して、適宜交換することが必要である。

このような背景に立ち、使用材料のうち、最も耐放射線性が低いと思われる高分子系材料をはじめとする有機材料の耐放射線性に関して「高分子系材料の耐放射線特性とデータ集」（JAERI-Data/Code 2003-015(2003)）にまとめた。順序を考慮すると、金属材料、セラミックスなど無機材料についてのデータの収集・分類とデータ集の作成という段階を踏むのが順当かも知れない。しかし金属、セラミック材料は有機材料に比べて桁が違うほど放射線に安定であることを勘案して、今回は機器・部品の放射線場における耐久性を調査しデータ集を作成することとした。

調査は、INISにより検索した学術論文誌、ITER 工学 R&D タスクの日本チームの実験結果をまとめた JAERI-TECH 99-3 (1999)、絶縁材料研究会電気学会研究会資料などのソースからデータを収集し、大強度陽子加速器用機器・部品の設計上でも有用と思われるものを選択して抄録した。

1. 放射線場で使用する機器部品類の耐久性向上への歴史的経過

放射線場で使用される機器・部品類の耐久性と耐久性の向上に関しては商業用原子力発電が開始されてはじめて、現実の問題となった。それまでも応力腐食割れ(SCC)は知られていたが、中性子照射の影響が加わると照射誘起応力腐食割れ (IASCC) が起こることなどが最初の例と思われる。次いで炉蒸気発生器の細管の疲労破損が話題となった。これらは、材料の検討・開発や残留応力を減らすための設計・施工などで解決されている。耐久性は材料そのものだけに左右されるのではないことが分かる。

1979年のスリーマイル島（TMI）原子力発電所2号炉での事故は、主給水ポンプが停止して蒸気発生器への給水が止まり、補助ポンプを運転しようとしたが、出口弁が誤って閉じたままになっていたため役に立たなかったと言う「冷却材喪失事故(LOCA)」に当たるものであった。これを契機に、ポンプ、モータ、バルブなどの耐久性向上の研究開発が活発になった。

同時に原子炉の寿命末期に LOCA が起きてもポンプ・モータ類の動力ケーブル及び信号ケーブルが健全であることを念頭に置いた電線・ケーブル類の LOCA 模擬試験法の開発とこれを用いた原子炉用の電線ケーブルの試験、ならびに得られた結果を参照した耐放射線性材料の開発が行われてきた。

1986 年にチェルノブイリ原発で暴走事故が発生し、原子炉とその建屋は一瞬のうちに破壊されると言う大事故が起こった。この事故の鎮圧に当たっては、人は近づけないので遠隔操作で行う以外方法は無かったが、当時の遠隔操縦装置の未熟さが露呈された。中でも、眼となり神経となる半導体デバイスや光ファイバ・光学材料の放射線に対する極めて低い耐性が鮮明に浮かび上がった。これらの不幸な事故を通して原子炉用の機器類に関する耐久性向上試験研究が本格化していった。

これと前後して、原子炉関連では A 型炉（アドバンス炉；新型の加圧水型原子炉）の開発ではポンプやモータの小型化と高耐久性化が必要であり研究開発が進められ、高速増殖炉開発では耐熱・耐放射線性被覆材料やメカニカルスナッチ用の潤滑剤の開発行われた。これらの成果を踏まえて、宇宙開発用及び熱核融合炉用の材料試験と機器・部品類の大線量照射下での耐久性試験が行われている。

2. 原子力発電炉用機器・部品の開発状況

表 1 に「原子力発電所運転管理年報（平成 12 年度版）」¹に報告されている商業用原子力発電が開始されてから 1999 年までの法律対象トラブルが発生した機器と件数を示す。

表 1. 1999 年までの法律対象トラブルの件数
(全件数 568 件の内 300 件抜粋)

分類	BWE	PWR	GCR
蒸気発生器	3	112	6
ポンプ	35	9	1
モータ	8	4	0
弁	41	26	6
配管	49	22	2
発電機	6	4	3
変圧器	4	3	0
遮断機	3	1	0
制御装置	29	13	1
電源装置	15	4	1
ペネトレーション	0	1	0

配管系のトラブルが最も多く、弁、ポンプと続く。弁、ポンプ、モータがどのような放射線環境で使用されているかの記載はなく放射線が主要因であるかどうかはこの表からは分からない。

また、表 2 に同資料に記載されているトラブル等の発生原因を示す。

表 2. トラブル等の原因 (全件数 568 件)

分 類	BWE	PWR	GCR
設計不良	39	28	14
製作不良	55	89	5
施工不良	28	17	6
保守不良	84	27	3
運転不良	6	7	1
管理不良	37	69	3
外部要因	10	2	0
自然劣化	1	2	1
その他	12	5	3
調査中	3	1	0

BWR ; 沸騰水型、PWR ; 加圧水型、GCR ; ガス冷却型原子炉

製作不良、管理不良が多い。この表からも、放射線場で使用されたためかどうかはどうかがい知ることにはできないが、通常運転時に BWR 格納容器内で使用されている電気機器やケーブルが受けるγ線々量率と中性子束は最大で 0.5Gy/h、 10^9 n/m²/s 程度、PWR の場合では 1Gy/h、 10^{11} n/m²/s 程度と報告されている²。核融合炉環境や大強度陽子加速器環境に比べて放射能レベルは低く、高耐久化方策が施された軽水炉用の機器・部品類をそのまま利用できるとは思えないが、一旦事故が起こると極めて重大な結果になるため、慎重な開発が行われてきており、開発の基のなった考え方と材料・素材は十分参照に値すると考えられる。

昭和 60 年度に発足し ANERI (技術研究組合 原子力用次世代機器開発研究所) は平成 11 年度までに原子力機器メーカー、材料メーカーなど延べ 32 社参加の下に電力会社とフイージビリティ調査を行い、1-ポンプ、2-制御棒駆動装置、3-電気計装品、4-タービン、5-配管、6-浄化装置、7-タンク、8-焼却炉、9-弁、10-炉内構造物、11-電熱機器、12-圧力容器など確証試験を含む 101 件の材料開発と試験を行った。この成果は CD-ROM として入手することができる³。

3. 耐放射線性機器に関する基本的な考え方

放射線場で使用される機器類の耐久性は、その機器類に使用されている部品のうち最も耐放射線性が低い素材の寿命で一義的に決まってしまう。有機材料の耐放射線性は金属やセラミックスのそれに比べてが一桁以上低いのが一般的である。したがって、電動の機器類では絶縁材料やグリースなどの潤滑剤がその機器の耐久性を決定することになる。

本データ集では調査した結果を、1. ケーブル・ワイヤ・コネクタ、2. 光ファイバ・光学材料、3. 半導体デバイス及び 4. 各種機器類の項目に分類し、個々のジャンルについての代表的なデータを掲載した。

3. 1 ケーブル・ワイヤ・コネクタ

ターミナルのように可とう性が必要でなければ、セラミックスが使用できるし、可とう性が必要であれば有機材料を使用せざるを得なくなる。電線の絶縁に使用する高分子でもポリテトラフルオロエチレン(PTFE、テフロン)のように数 kGy の照射で使用できなくなる材料から、放射線酸化反応が起こらなければ、数 100 MGy まで使用できるポリイミド系高分子までである。それぞれの高分子の可とう性を含めた力学的性質や電氣的性質を参照して材料選択をすることが肝要である。“ポリイミドは耐放射線性が高い”ことが一人歩きしているが、その分子構造により耐放射線性は異なるし、熱可塑性ポリイミドでは結晶しているか非晶なのかで耐放射線性が異なるし、使用限界温度の変わることに留意することが必要である。個々の素材に関するデータは「JAERI-Data/Code 2003-015(2003)」が参照できる。

3. 2 光ファイバ・光学素子

光ファイバは制御信号、データの送受信には欠くことができない素子になっている。赤外域の伝送ロスが少ないファイバが実用化された時点では、放射線照射下では伝送ロスが極めて多くなるばかりか、数 10kGy の積算線量で回復ができない損傷を受けるなど放射線場では使えない素子であったが、現在では高放射線場で実用的に使用できる素子に成長している。イメージファイバの耐放射線性も高くなってきており、場の強さにもよるが、放射線場でも十分使用に耐える。

目視しながらの遠隔操縦には監視テレビカメラが必要であるが、CCD(電荷結合素子)は放射線に敏感に振る舞うという弱点を持っている。イメージオルシコンなどの撮像管のほうが寿命は長い、製作しているメーカーはほとんど無いのが現状で、何回かミラーに反射させ放射線レベルの低いところに設置した CCD カメラで観測する方法が取られている。ミラーやレンズの耐放射線性について続いて検討する必要がある。

3. 3 半導体デバイス

トライアックが実用化されスライダックに取って変わった当時、 γ 線照射室内で使用すると短い時間で壊れてしまった経験がある。まだ大規模の集積回路を用いた計算機も無い時代であったが、宇宙開発が本格化した頃から、シングルイベント、トータルドーズ効果が問題となり現在では、地上の大電力施設における中性子などの宇宙線によるシングルイベントが重大な問題となっている。

半導体デバイスに関しては、宇宙開発事業団(現宇宙航空開発機構)を中心に太陽電池の耐久性評価とメモリやマイクロプロセッサのシングルイベントの二本柱として研究が続けられている。ここでは、制御機器やデータ取得・転送系で重要と思われる後者についてのレビューデータを収集するとともに、民生用デバイスについて検討された結果をまとめた。

3. 4 機器・部品類

機器・部品類は複数の素材がそれぞれの役目を持って使用された複合体であり、その放射

線場での耐久性は最も耐放射線性の低い材料に支配される。従って、構成部品の素材が何であるか、その素材がどの程度の放射線に耐えるかを知った上で耐久性試験がなされなければ意味がない。このような観点に立ち、系統的に行われた研究はほとんど無かったと言って過言ではない。その中で、国際熱核融合実験炉 ITER で使用することを念頭に置き、しかもその構成素材をきちんと把握しつつ行われている ITER 工学 R&D タスクにおいて日本チームが進めてきた遠隔保守装置用機器・部品に関する試験研究は卓越した成果である。大強度陽子加速器環境で使用される機器・部品は環境温度こそ違うが、中性子を含む大線量照射を受ける。従って、この研究で得られた成果を参照することは有意義であると考えられる。

モータのような回転機器では潤滑の低下が致命的であるので、潤滑剤を最初に取り上げた。耐放射線性グリースを用いた場合にもグリースの硬化あるいは軟化・流動化が致命傷になっている例も見られた。しかし、自己潤滑合金を用いた場合に比べて耐放射線性グリースを用いた方が耐久性が高いという結果も見受けられた。放射線硬化するグリースと軟化するグリースの組み合わせなどの検討も必要かもしれない。

おわりに

宇宙開発用の半導体デバイスなどは使用数量も少なく、製造者が耐放射線性までのデータを収集することは経済的理由でできないことが多い。宇宙機器に搭載する半導体デバイスの試験は宇宙開発事業団が主になって行い、その照射技術の開発は加速器を所有している原研が要請を受けて行ったので、公表されたデータが多い。原子炉用の電線材料や宇宙機器用の高分子系材料についての耐放射線性データも同じ理由で公表されている。

軽水炉用の機器・部品についても相当量の放射線場における耐久性試験結果があると思われるが、その破損状況や改良点は刊行物にはならず、実験者・開発者のもとで埋もれている可能性がある。大強度加速器環境は軽水炉環境とは違うが、軽水炉環境機器・部品の耐久性に関する情報が参照できると大強度陽子加速器用の機器・部品の選択にとっても有効と思われる。データの発掘方法の検討が必要と思われる。

本調査で取り上げた核融合炉環境用機器・部品は、ロボットなど遠隔操作機器を対象としているため、サーボモータやポテンシオメータなどが多く、ターボポンプやゲートバルブなど真空機器についての試験結果は残念ながら無い。現在、放射線場での耐久性試験が行われており、その成果が期待される。

引用文献

1. 原子力発電所運転管理年報、(社)火力原子力発電技術協会、p. 166(2000).
2. 軽水炉改良技術確証試験等委託費（硬度軽水炉技術開発等<インスペクションフリー設備開発確証試験>）に関する調査報告書、p68、(財)高分子素材センター(1989).
3. http://www.iri.or.jp/aneri_db.htm#00

This is a blank page.

1. ケーブル・ワイヤ・コネクタ

各機器類への電力配給、信号の授受を担当するケーブル、ワイヤ、コネクタの耐放射線性の高低は、各個の装置健全性を左右するばかりでなく、多くの装置が有機的に結びついているシステム全体の安定的かつ安全な運転の死命を制するものである。本データ集の最初の項目としてケーブル・ワイヤ・コネクタを取り上げた。

これらは、導体と絶縁体、結束テープなどから構成されているもので、基本的には高い耐放射線性を有する絶縁体を用いることで高い耐放射線性が実現されると思われる。しかしながら、可とう性が要求される場所、そうでない場所では違った材料を使用する必要があり、また使用環境温度が異なれば材料選択に制限も課せられる。

動力ケーブル、モータ巻き線用ワイヤ、信号ケーブルではその構造も製作方法も異なる。ここでは、原子力用に開発され実績もある非ハロゲン（ノンハロゲン）動力ケーブル、高耐放射線性を目指して設計されたケーブル、モータなどに使用されるいわゆるエナメル線、実際の機器に使用されている電線・ケーブル類の代表的な耐環境性を収集し、抄録した。

データシート No Cable/Connector-1

出典：“原子力発電所用低発煙ノンハロゲンケーブルとその特性”

電気学会研究会資料 絶縁材料研究会 EIM-88-141(1988).

種類／用途	ノンハロゲン化非延焼性電線／原子力発電所用
目的	原子力施設用の発煙の少ない耐放射線性電線の開発
製作者／開発履歴	タツタ電線(株)／新規開発(試作)
形状／性能等	NH-LE(Ⅱ)電線:14.5 mm φ／導体(7/1.0mm)、絶縁体(1mm);NH-XLPO、介在物;難燃フェノール径繊維、シース;NH-PO。 NH-LA(Ⅱ)電線:シースがNH-ARに変更されたのみ。
使用材料・その他	NH-XLPO;オレフィン系エラストマー(架橋)+Mg(OH) ₂ 、NH-PO;EEA(非架橋)+Mg(OH) ₂ 、NH-AR;アクリル系エラストマー+Al(OH) ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 10kGy/h、室温、 空气中 、積算線量;2 MGy
測定	熱劣化(121℃×168h)、LOCA試験後、絶縁抵抗、耐電圧(3.2kV×5min)、絶縁体・シースの引張り強度・伸び
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・開発品はハロゲン系難燃電線と同等に使用できる。 ・燃焼時の発煙が非常に少ない。 ・耐熱蒸気性の高いオレフィンポリマーの開発が望まれる。

試料	絶縁抵抗	耐電圧	破壊電圧	絶縁体		シース		
				引張り強度	伸び	引張り強度	伸び	
(試験条件)	(MΩKm)		(kV)	(kg/cm ²)	(%)	(kg/cm ²)	(%)	
NH-LE(Ⅱ)	オリジナル	3200	良	33	1.2	610	1.3	680
	老化後	2800	良	33	1.0	580	1.2	600
	γ線照射	2200	良	28	1.0	230	1.1	190
	LOCA後	1300	良	33	0.9	220	1.0	80
NH-LA(Ⅱ)	オリジナル	2800	良	33	1.1	560	1.1	520
	老化後	2300	良	38	0.9	470	0.9	530
	γ線照射	2000	良	33	0.9	190	0.8	240
	LOCA後	900	良	18	0.9	140	1.2	220
FR-CV(Ⅱ) (現用品)	オリジナル	7500	良	38	1.4	590	1.7	310
	老化後	8000	良	38	1.3	620	1.9	250
	γ線照射	3500	良	38	1.0	140	2.0	150
	LOCA後	3400	良	33	0.9	170	1.7	190

データシート No Cable/Connector-2

出典：“極低温用硬度耐放射線性PEEK電線について”

電気学会研究会資料 絶縁材料研究会 EIM-88-130(1988).

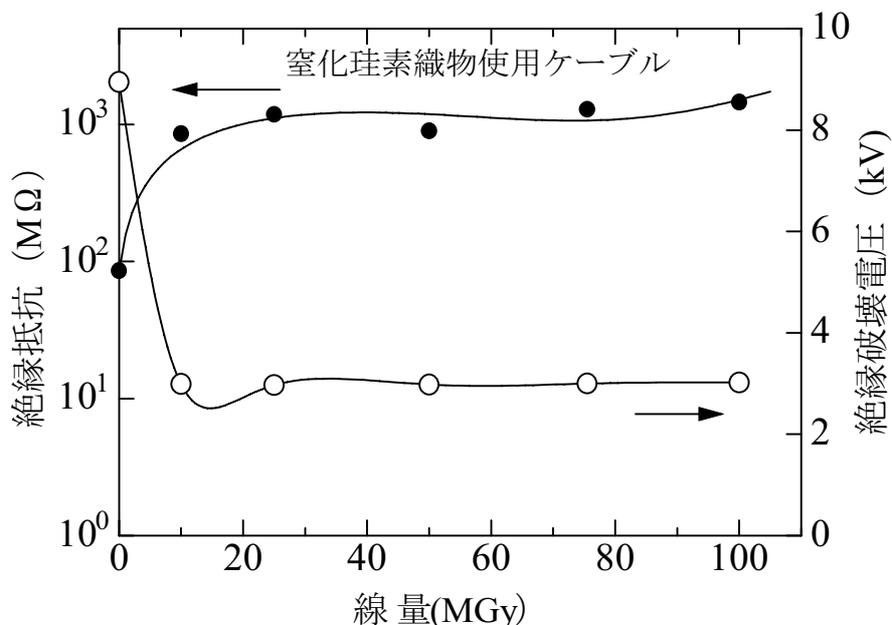
種類／用途	ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)被覆電線／核融合炉用
目的	核融合炉マグネットのタップ、各種信号リード線の開発
製作者／開発履歴	三菱電線工業(株)／新規開発(試作)
形状／性能等	要求性能: -269～30℃に耐えること。 1×10^{-4} (RT)～ 1×10^{-6} (-269℃) torrの高真空で使用できること。耐放射線性; 3×10^7 Gy。 24kV×1分×10回、6.6kV×110時間以上に耐えること。
使用材料・その他	被覆材料;PEEK(厚さの異なる絶縁体+ジャケットの2層被覆)、導体;0.26 mmφ×37本銀メッキ Cu 撚り線。
照射条件	^{60}Co γ線 20kGy/h、室温、 空気中 、積算線量;10 MGy
測定	24kV×1分×10回及び6.6kV荷電における破壊時間、耐放射線性試験
評価	・2mm ² の導体の場合、0.8mm+0.2mmの2層被覆が最適。 ・10MGy照射後も初期特性値をほぼ維持していた。

極低温用PEEK電線照射結果						
線量 (MGy)	破壊電圧(kV)		引張り試験結果			
	常温	液体窒素	絶縁体		ジャケット	
			強度(kg/cm ²)	伸び(%)	強度(kg/cm ²)	伸び(%)
初期	51～53	>44*	8.4	85	10.2	140
2	50	>44*	8.4	87	10.2	142
3	50	>44*	8.5	90	9.1	138
5	54	>44*	8.3	85	9.2	116
8	52	>44*	7.0	63	8.0	105
10	50～53	>44*	6.5	50	7.5	80
* 端末部で破損						

データシート No Cable/Connector-3

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 232(1999).

種類/用途	窒化珪素(SiN)織物使用ケーブル/電力ケーブル
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	日立電線(株)/新規開発
形状/性能等	13.2 mm φ × 300 mm、2芯/2.64 mm φ Niメッキ Cu × 2、絶縁体; (内側から外側へ)ポリイミドテープ、ガラス・マイカテープ、SiNテープ、ガラス繊維織物、ガラステープ、SUS織物、絶縁抵抗 ≥ 10M Ω (AC 400V)。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1 × 10 ⁶ R/h、250°C、N ₂ ガス中、積算線量; 100 MGy
測定	照射後の絶縁破壊電圧(BDV)及び絶縁抵抗
評価	許容線量; 100 MGy以上 ・ 10 MGyの照射により、絶縁抵抗が上昇したにもかかわらず、BDVは 9 kV から3 kV に低下。理由は分からず。 ・ それ以降、絶縁破壊電圧(BDV)及び絶縁抵抗変化なし。

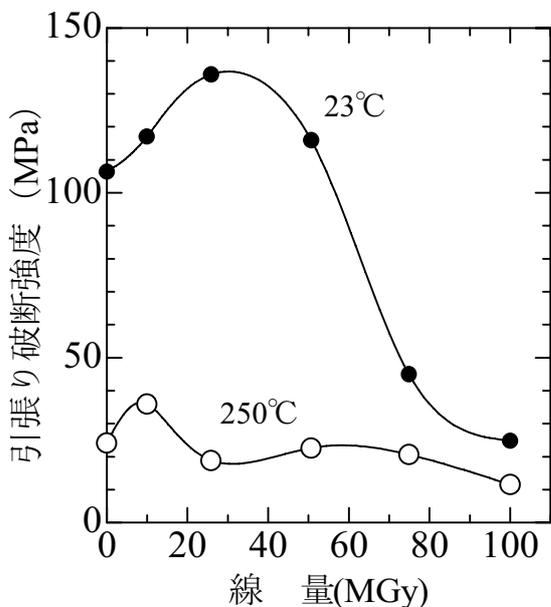


窒化珪素織物使用ケーブルの絶縁抵抗と絶縁破壊電圧(BDV)の線量依存性

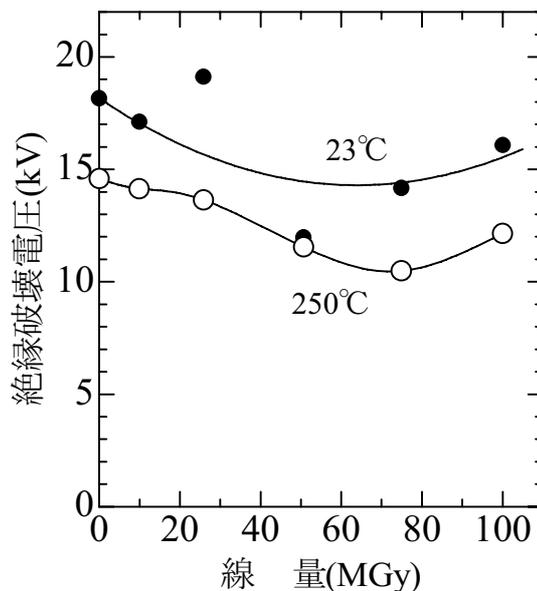
データシート No Cable/Connector-4

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 236(1999).

種類/用途	ポリイミド & PEEK 絶縁同軸ケーブル/信号ケーブル
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	昭和電線電纜(株)/新規開発
形状/性能等	1 mm φ、1芯/0.16 mm φ Niメッキ Cu × 2、絶縁体 ; ポリイミ(第1層)、SS織物(シールド)、PEEK(ジャケット)、絶縁破壊電圧(BDV) ≥ 10 kV、ジャケット材料の引張り強度 ≥ 50 MPa。
使用材料・その他	Niメッキ Cu、ポリイミド、PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)
照射条件	⁶⁰ Co γ線 2 × 10 ⁶ R/h、250°C、N ₂ ガス中、積算線量; 100 MGy
測定	照射後の絶縁破壊電圧(BDV)及び引張り強度
評価	許容線量; 100 MGy以上 ・BDVは線量とともに低下するが、実用上問題ない。 ・20 MGy までの照射でやや引張り強度が増加し、その後徐々に低下。



ジャケット絶縁材 PEEK の引張り強度の線量依存性(室温及び250°C測定)



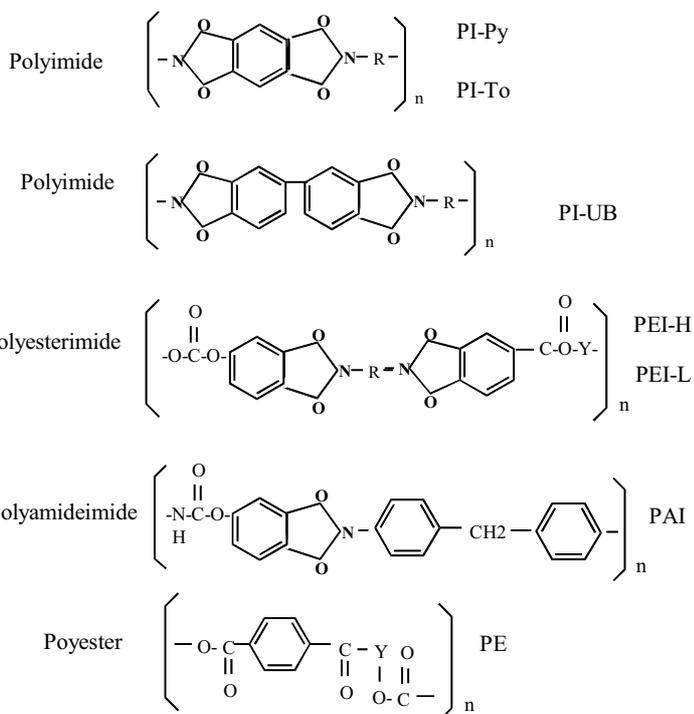
絶縁破壊電圧の線量依存性(室温及び250°C測定)

データシート No Cable/Connector-5

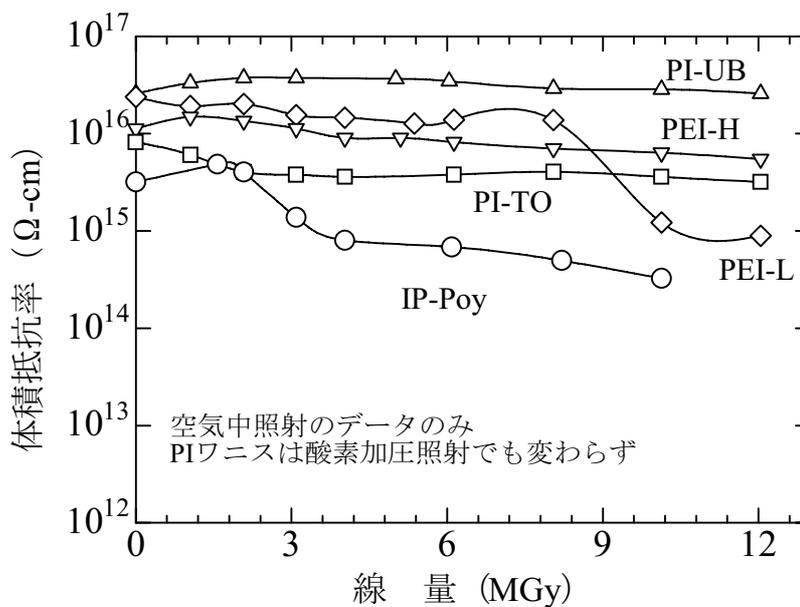
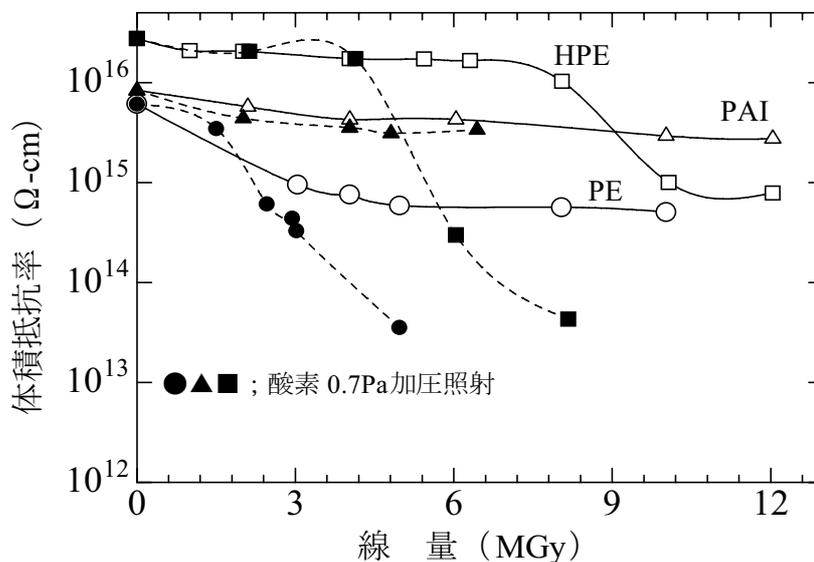
出典; “絶縁ワニスの耐放射線性”

電気学会研究会資料 絶縁材料研究会 EIM-84-129(1984).

種類/用途	各種ワニス絶縁ワイヤ/エナメル線
目的	低線量率原子炉環境での各種ワニスの耐放射線評価
製作者/開発履歴	日立電線(株)/試作品
形状/性能等	エナメル線: 導体; 1 mm φ Cu、被覆層厚さ: 平均 38 μm。 ワニス薄膜: アルミ板状で硬化させた後、剥がして薄膜を形成 (平均厚さ; 40 μm)。
使用材料・その他	Cu、ポリイミド(PI-Py, PI-To, PI-UB)、ポリエステルイミド(PEI-H, PEI-L)、ポリアミドイミド(PAI)、ポリエステル(PE)、ヒダントイン変成ポリエステル(HPE)。
照射条件	⁶⁰ Co γ線空气中・10kGy/h、酸素0.7MPa・5kGy/h、共に・室温
測定	照射後の体積抵抗率、交流破壊電圧、ゲル分率、柔軟性など
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ポリイミドワニスが高い耐放射線性を示した。 ・酸素加圧下の耐放射線性: PE<HPE, PAI, PEI-L<PEI<<PI。 ・PIワニスの内でもPI-UBが高い耐放射線性と耐熱性を示した。



Cable/Connector-5(続き)
各種ワニス絶縁ワイヤ/エナメル線



ワニス	線量(MGy)	
	空气中(10kGy/h)照射	酸素0.7MPa加圧照射
HPE	8	8
PAI	5	4
PEI-L	10	8
PEI-H	12	10
PI系ワニス	12MGy照射でも表面状態変わらず	

データシート No Cable/Connector-6

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR)

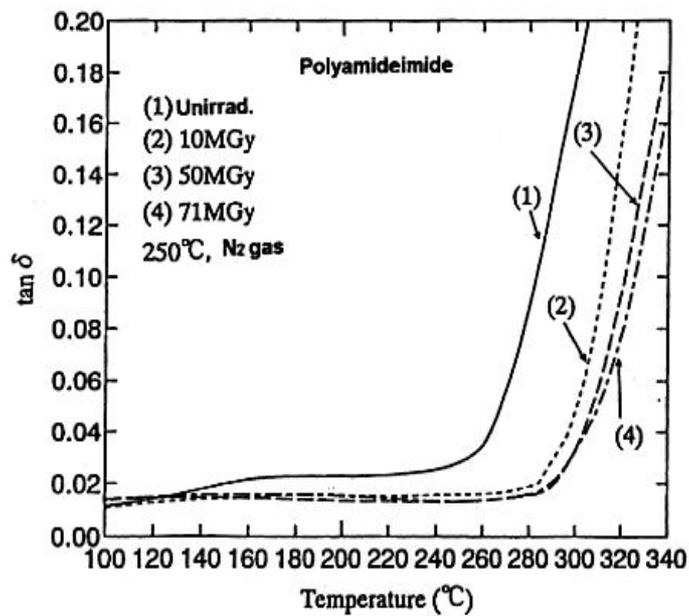
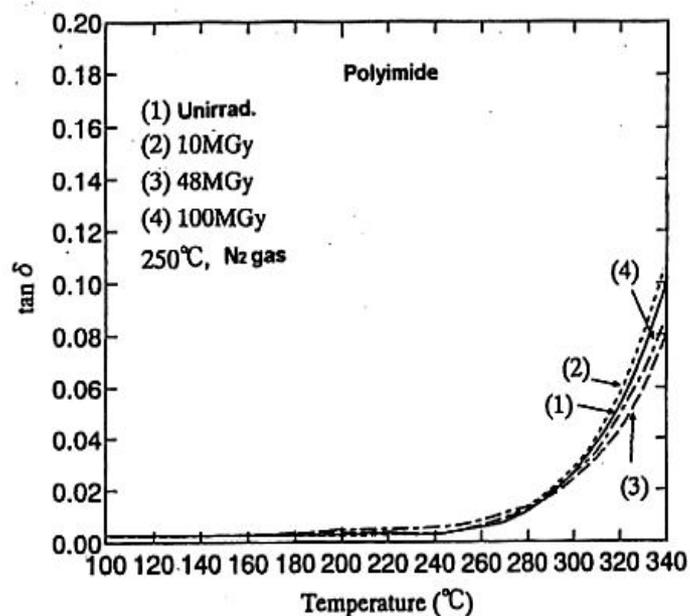
IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 250(1999).

種類／用途	ポリイミド、ポリアミドイミドワニス絶縁ワイヤ／エナメル線
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	東京特殊電線(TOTOKU)(株)／改良品
形状／性能等	ポリイミドワニスワイヤ / 0.5 mm φ Ni メッキ Cu、絶縁体; ポリイミド、絶縁膜厚さ: 25μm。 ポリアミドイミドワニスワイヤ: 0.5 mm φ Ni メッキ Cu、絶縁体; ポリアミドイミド、絶縁膜厚さ: 25、63μm。
使用材料・その他	Ni メッキ Cu、ポリイミド、ポリアミドイミド
照射条件	⁶⁰ Co γ線 2×10 ⁶ R/h、250°C、N ₂ ガス中、積算線量; 100 MGy
測定	照射後のBDV、破断伸び、柔軟性、誘電損失、ガラス転移温度
評価	許容線量(酸化反応が起こらない条件での耐放射線性); ポリアミドイミド 被覆; 30 MGy、 ポリイミド被覆; 100 MGy。

窒素ガス雰囲気、250°Cでγ線照射後のポリイミドワニス及びポリアミドイミドワニス絶縁ワイヤの性質変化

絶縁膜 素材	絶縁膜 厚さ(μm)	線量(MGy)	BD.V(kV)	柔軟性		ガラス転移 温度(°C)
				1d	2d	
ポリイミド	25	0	11.53	0	0	296
		10	10.25	0	0	295
		28	7.73	0	0	300
		48	7.79	0	0	301
		71	8.06	0	0	303
		100	12.95	5	0	291
ポリアミド イミド	25	0	11.98	0	0	263
		10	19.59	0	0	292
		30	11.70	0	0	306
		50	12.88	1	0	297
		71	9.64	4	0	298
	63	0	13.47	0	0	264
		10	19.99	0	0	292
		30	19.96	0	0	304
		50	19.00	0	0	306
		71	17.45	3	0	309

Cable/Connector-6 (続き)
 ポリイミド、ポリアミドイミドワニス絶縁ワイヤ

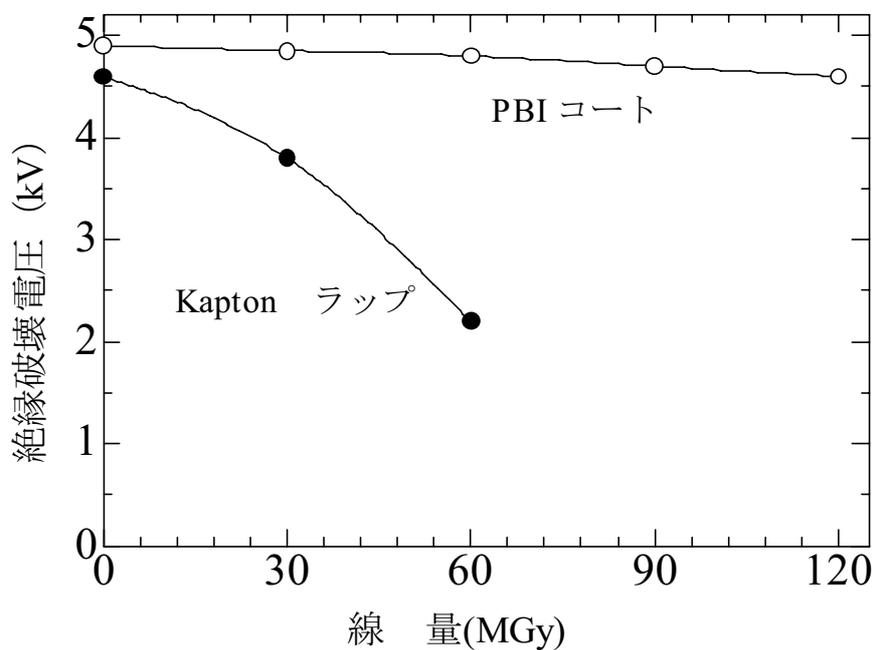


ポリイミド、ポリアミドイミドワニス絶縁ワイヤの照射後の誘電損失の温度依存性の変化(測定周波数は不明)。線量増大と共に高温側にシフトする傾向。

データシート No Cable/Connector-7

出典; “Poly(benzimidazole) as insulator for superconductors” Cryogenics, 35, 795(1995).

種類／用途	PBI 絶縁超電導ワイヤ／超電導コイル
目的	超電導スーパーコライダー用マグネット開発データ取得
製作者／開発履歴	住友電装(株)／新規開発品
形状／性能等	0.710 mm ϕ / 0.645 mm ϕ Cu、フィラメント径: 4.9 μ m、絶縁体; ポリベンズイミダゾール(BPI)。
使用材料・その他	Cu、PBI。
照射条件	電子線(2MeV、5kGy/s)、空气中、積算線量; 120 MGy
測定	照射後の絶縁破壊電圧(BDV)、PBIのシートの曲げ試験
評価	許容線量; 120 MGy以上。 ・BDVは線量と共にやや低下。 ・曲げ強度は線量と共に漸増(放射線架橋による)。



データシート No Cable/Connector-8&9

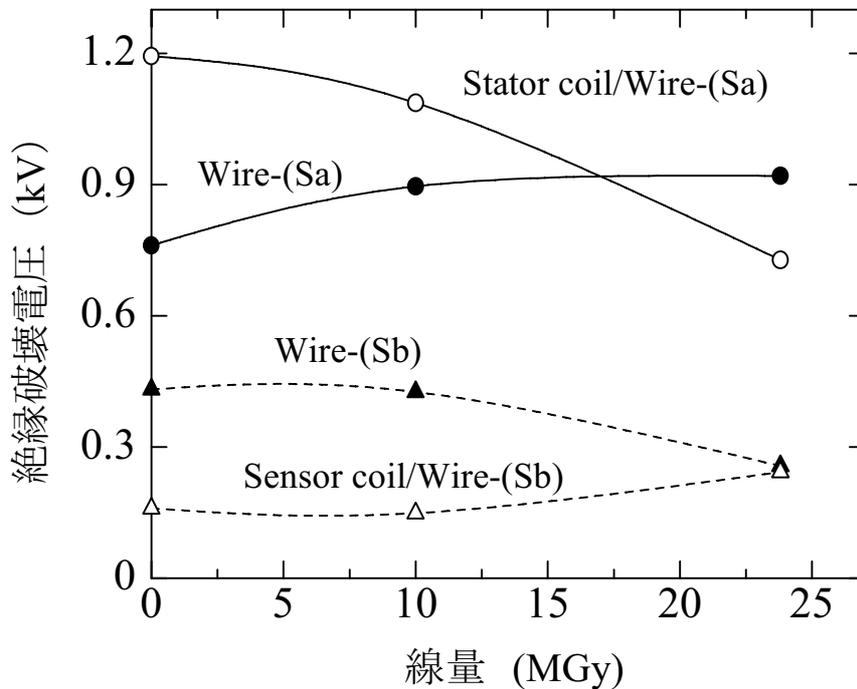
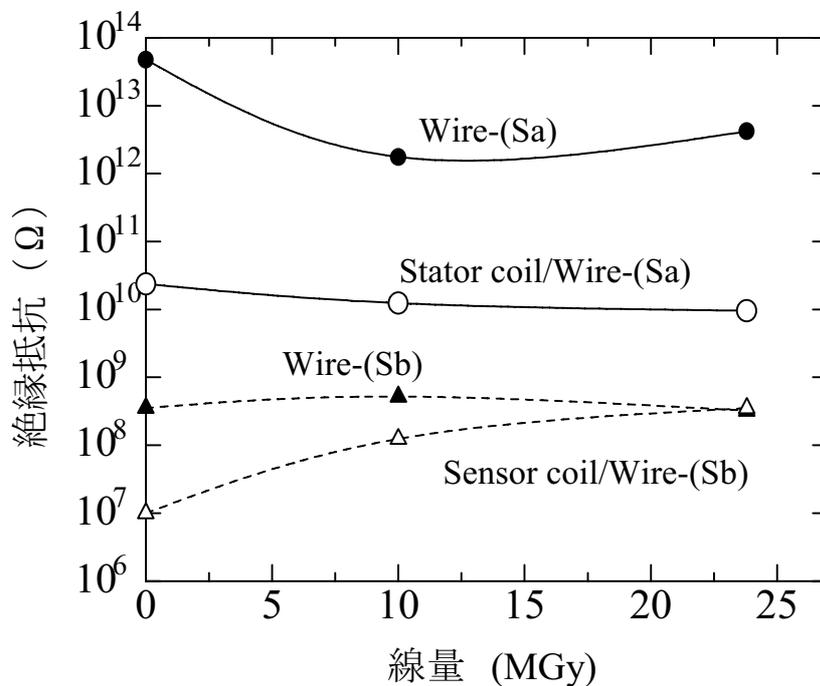
出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR)

IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 239(1999).

種類／用途	セラミック絶縁ワイヤ(S/a)／ステーターコイル
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	住友電気工業(株)／新規開発
形状／性能等	ワイヤ(S/a):外径;0.792mm /0.592 mm ϕ Niメッキ Cu、絶縁体;SiO ₂ 、絶縁破壊電圧(BDV);100~500V、引張り強度;20~30 MPa、臨界曲げ径;10~30 mm。 模擬ステータ(S/a):60 × 62 × 20 mm ³ /コア;パーマロイ、70 ターン、バインダー;無機物。
照射条件	⁶⁰ Co γ 線 1.5 × 10 ⁶ R/h、250°C、N ₂ ガス中、積算線量;47.7 MGy
測定	照射後の絶縁性、BDV、柔軟性など
評価	許容線量;47.7 MGy以上。 ・絶縁性、BDV共に変化しないが、柔軟性がやや低下。 ・模擬ステータコイルでは絶縁性は変化しないが、BDVは照射開始と共に徐々に低下。

種類／用途	セラミック絶縁ワイヤ(S/b)／センサーコイル
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	住友電気工業(株)／新規開発
形状／性能等	ワイヤ(S/b):外径;0.212mm /0.169 mm ϕ Niメッキ Cu、絶縁体;SiO ₂ 、絶縁破壊電圧(BDV);100~500V、引張り強度;20~30 MPa、臨界曲げ径;4 mm。 模擬ステータ(S/b):5 × 5 × 10 mm ³ /コア;パーマロイ、30 ターン、バインダー;無機物。
照射条件	⁶⁰ Co γ 線 1.5 × 10 ⁶ R/h、250°C、N ₂ ガス中、積算線量;47.7 MGy
測定	照射後の絶縁性、BDV、柔軟性など
評価	許容線量;47.7 MGy以上。 ・絶縁性は変化しないが、10 MGyの照射で BDVはわずかに低下。 ・10 MGy 照射で柔軟性が急激に増加。 ・模擬ステータコイルでは絶縁性とBDVがわずかに上昇。

No Cable/Connector-8&9(続き)
 セラミック絶縁ワイヤ(S/a) /ステーターコイル
 セラミック絶縁ワイヤ(S/b) /ステーターコイル



データシート No Cable/Connector-10&11

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, (1999).

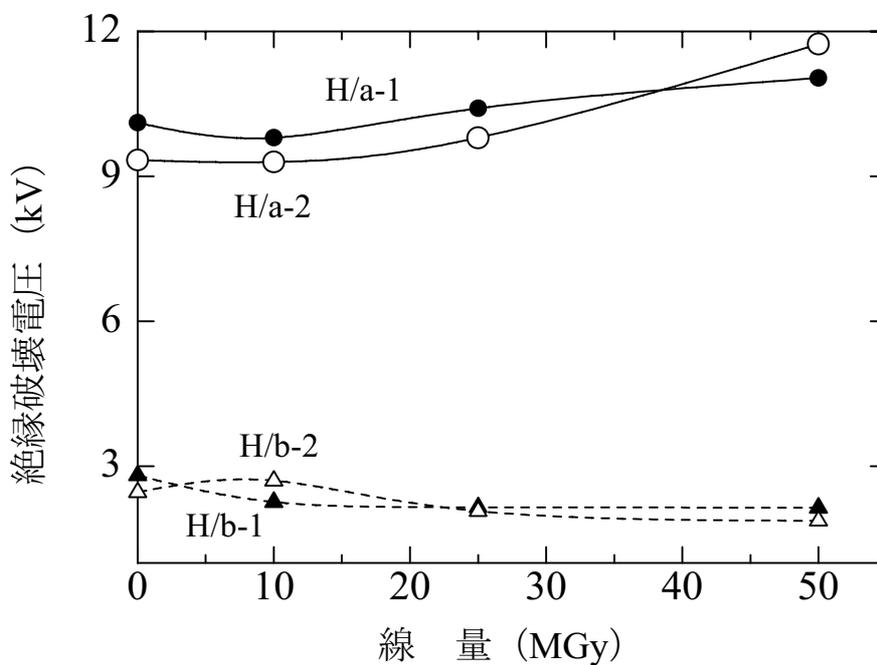
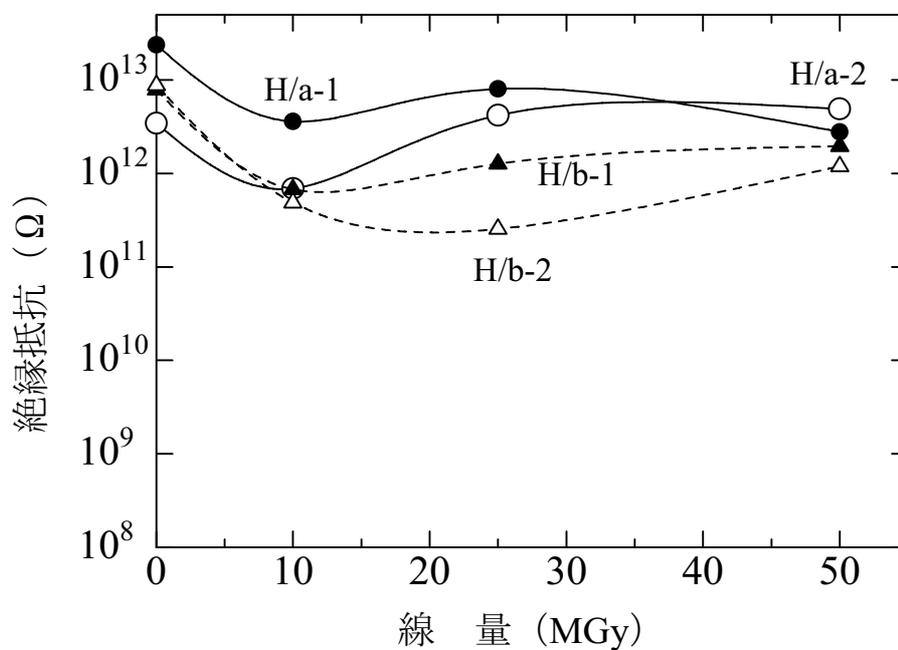
種類	ポリイミド絶縁ワイヤ(H/a-1) / 同アウトガス処理品(H/a-2)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者 / 開発履歴	日立電線(株) / 改良品
形状 / 性能等	ワイヤ(H/a-1) : / 0.593 mm φ Ni メッキ OFC、絶縁体; ポリイミド、絶縁抵抗; 10^{13} Ω、絶縁破壊電圧(BDV); 10kV、極限曲率; 1d(自己径)。 ワイヤ(H/a-2) : H/a-1 を300°C 2hr の条件でアウトガス処理 / 絶縁抵抗; 10^{12} Ω、絶縁破壊電圧(BDV); 9kV、極限曲率; 1d(自己径)。
使用材料・その他	Ni メッキ Cu、ポリイミド。
照射条件	^{60}Co γ線 1.5×10^6 R/h、250°C、 N_2 ガス中、積算線量; 47.7 MGy
測定	照射後の絶縁抵抗、BDV、破断伸び、柔軟性
評価	許容線量; 47.7 MGy以上。両ワイヤとも同等な結果であった。 ・絶縁性、BDV共に変化がなく、伸び、柔軟性も変化なし。

種類・用途	セラミック / ポリイミドハイブリッド絶縁ワイヤ(H/b-1) / 同アウトガス処理品(H/b-2)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者 / 開発履歴	日立電線(株) / 新規開発品
形状 / 性能等	ワイヤ(H/b-1) : / 0.593 mm φ Ni メッキ OFC、絶縁体; 第1層 Al_2O_3 、第2層 ポリイミド、絶縁抵抗; 9×10^{12} Ω、絶縁破壊電圧(BDV); 3kV、極限曲率; 1~3d。 ワイヤ(H/b-2) : H/a-1 を300°C 2hr の条件でアウトガス処理 / 絶縁抵抗; 8×10^{12} Ω、絶縁破壊電圧(BDV); 2.5kV、極限曲率; 1~3d。
使用材料・その他	Ni メッキ Cu、ポリイミド。
照射条件	^{60}Co γ線 1.5×10^6 R/h、250°C、 N_2 ガス中、積算線量; 47.7 MGy
測定	照射後の絶縁抵抗、BDV、破断伸び、柔軟性
評価	許容線量; 47.7 MGy以上。両ワイヤとも同等な結果であった。 ・絶縁性、BDV共に変化しないが、25MGy以上で伸び、柔軟性が低下。

Cable/Connector-10 & 11 (続き)

ポリイミド絶縁ワイヤ(H/a-1) / 同アウトガス処理品(H/a-2)

セラミック / ポリイミドハイブリッド 絶縁ワイヤ(H/b-1) / 同アウトガス処理品(H/b-2)



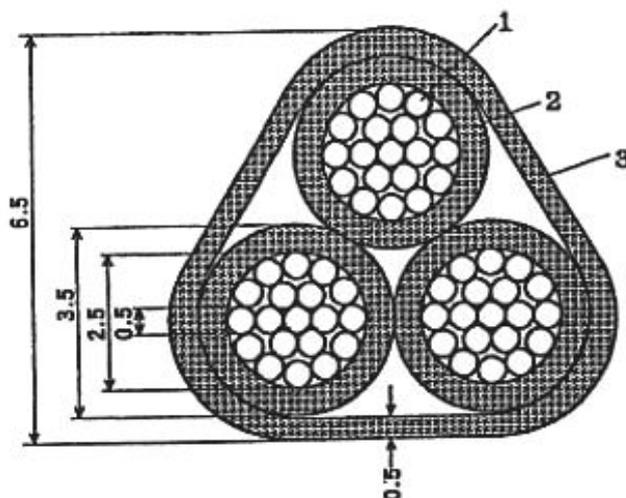
データシート No Cable/Connector-12& 13

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 225(1999).

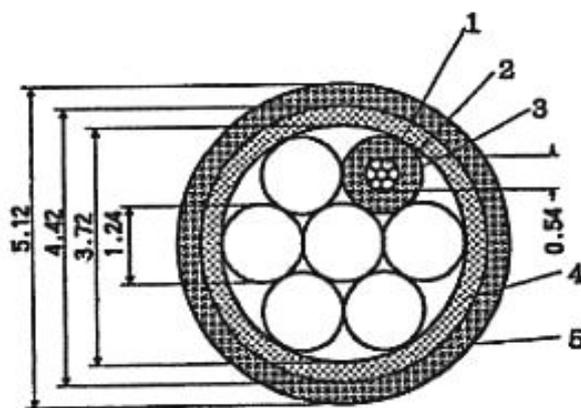
種類／用途	セラミック絶縁パワーケーブル／ ACサーボモータ用
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	住友電工(株)／新規開発
形状／性能等	6.5 mm ϕ × 6m l、3芯／導体・絶縁体 ;NiメッキOFC・Al ₂ O ₃ (ワイヤ及びジャケット)、絶縁破壊電圧:200~1000V、許容限界曲率:5~30 mm、(ケーブル構成は次ページ参照)。
使用材料・その他	NiメッキOFC、セラミック(Al ₂ O ₃)。
照射条件	⁶⁰ Co γ 線 7 × 10 ⁵ R/h、室温、 空気中 、積算線量;75 MGy
測定	ACサーボモータの耐放射線性試験に実地に使用
評価	許容線量;75 MGy以上 <ul style="list-style-type: none"> ・ 75 MGyの照射後、電気特性の変化なし。 ・ ケーブルターミナルの取り外しが難しくなった。 ・ コネクタとケーブル間の柔軟性が損なわれた。

種類・用途	セラミック絶縁信号ケーブル／ ACサーボモータ用
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	住友電工(株)／新規開発
形状／性能等	5.15 mm ϕ × 6m l、7芯／導体・絶縁体 ;NiメッキOFC・Al ₂ O ₃ (ワイヤー及びジャケット)、絶縁破壊電圧:200~1000V、許容限界曲率:5~30 mm、(ケーブル構成は次ページ参照)。
使用材料・その他	NiメッキOFC、セラミック(Al ₂ O ₃)。
照射条件	⁶⁰ Co γ 線 7 × 10 ⁵ R/h、室温、 空気中 、積算線量;75 MGy
測定	ACサーボモータの耐放射線性試験に実地に使用。
評価	許容線量;75 MGy以上 <ul style="list-style-type: none"> ・ 75 MGyの照射後、電気特性の変化なし。 ・ ケーブルターミナルの取り外しが難しくなった。 ・ コネクタとケーブル間の柔軟性が損なわれた。

Cable/Connector-12 & 13 (続き)
 ACサーボモータ用セラミック絶縁ケーブル構成



ACサーボモータ用セラミック絶縁パワーケーブル
 1; 導体 (Ni coated OFC), 2; 導体間絶縁 (Al_2O_3 織物)、
 3; ジャケット (Al_2O_3 織物)

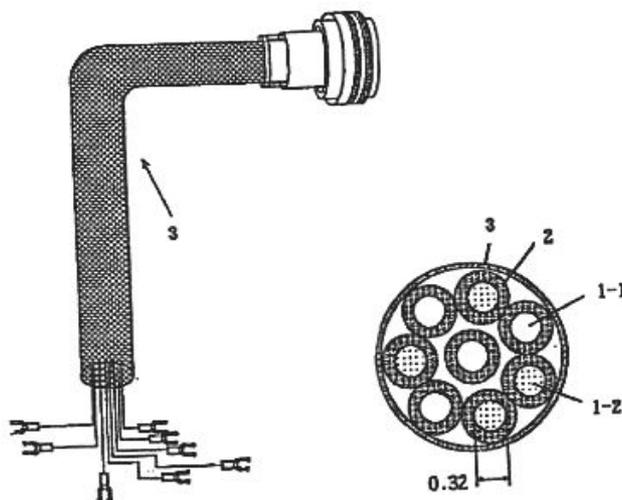


ACサーボモータ用セラミック絶縁信号ケーブル
 1; 導体 (Ni coated OFC), 2; 絶縁シート (Al_2O_3 織物)、
 4; シールド (SS織物)、5; ジャケット (Al_2O_3 織物)

データシート No Cable/Connector-14

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 230(1999).

種類/用途	セラミック絶縁熱電対ケーブル/ ACサーボモータ用
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	住友電工(株)/新規開発
形状/性能等	6.5 mm φ × 6m l、8芯/0.32 mm φクロメル×4+ 0.32 mm φアロメル×4、絶縁体 ; Al ₂ O ₃ (ワイヤ及びジャケット)、絶縁破壊電圧: 200~1000V、許容限界曲率: 5~30 mm
使用材料・その他	アロメル/クロメル、セラミック(Al ₂ O ₃)。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 7 × 10 ⁵ R/h、室温、 空気中 、積算線量; 75 MGy
測定	ACサーボモータの耐放射線性試験に実地に使用
評価	許容線量; 75 MGy以上 ・ 75 MGyの照射後、電気特性の変化なし。 ・ ケーブルターミナルの取り外しが難しくなった。 ・ コネクタとケーブル間の柔軟性が損なわれた。



セラミック絶縁/熱電対ケーブル

1-1; Chromel, 1-2; Alumel 素線、2; 線間絶縁 (Al₂O₃織物)、3; ジャケット (Al₂O₃織物)

データシート No Cable/Connector-15

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR)

IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 257 (1999).

種類	絶縁材料に全芳香族系ポリイミド及びPEEK を用いたコネクタ
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	日立電線(株)／改良品
形状／性能等	9ピンコネクタ 絶縁材料:UPILEX-S(宇部興産)、AURAM(三井化学)、VESPEL(デュポン)、PEEK(三井化学)
使用材料・その他	使用金属材料については記述なし。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.5×10 ⁶ R/h、250°C、N ₂ ガス中、積算線量;100 MGy
測定	照射後の絶縁抵抗
評価	許容線量;100 MGy以上。 ・100 MGy の照射後も電気特性に変化なし。 ・ただし、100 MGy 以上の許容線量は酸素が無い条件での値。

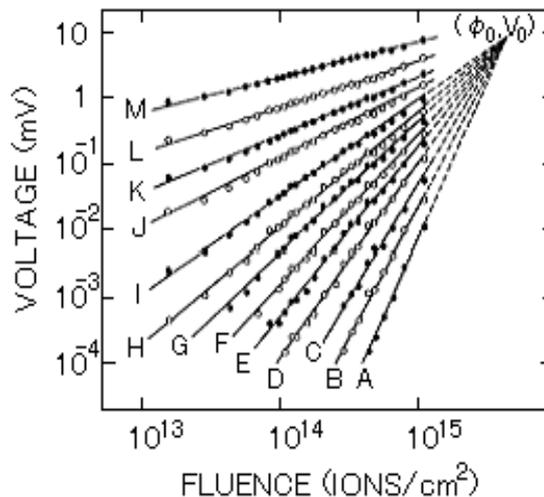
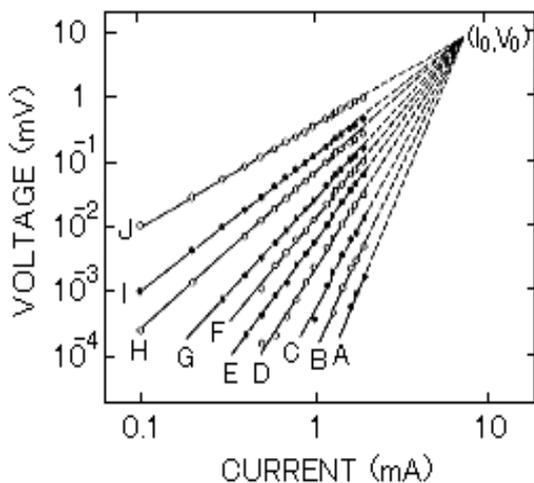
窒素ガス雰囲気、250°Cでγ線照射後の全芳香族系高分子絶縁9ピンコネクタの電気特性変化

絶縁材料	線量	ピン間絶縁抵抗 (Ω)	2200V耐電圧 (1分間)
UPILEX-S	Unirrad.	3.9 × 10 ¹²	合格
	51MGy	1.4 × 10 ¹³	合格
	100 MGy	5.5 × 10 ¹³	合格
PEEK	Unirrad.	6.1 × 10 ¹²	合格
	51MGy	3.1 × 10 ¹³	合格
	100 MGy	1.0 × 10 ¹⁴	合格
AURAM	Unirrad.	2.4 × 10 ¹²	合格
	51MGy	2.0 × 10 ¹³	合格
	100 MGy	4.9 × 10 ¹³	合格
VESPEL	Unirrad.	6.5 × 10 ¹¹	合格
	51MGy	1.2 × 10 ¹³	合格
	100 MGy	3.5 × 10 ¹³	合格

データシート No Cable/Connector-16

出典; “Effect of High-Energy Ion Irradiation on Current-Voltage Characteristics in the Oxide Superconductor $YB_2Cu_3O_{7-x}$ ” Jap. J. Appl. Phys., 29, 1810(1990)

対象材料	$YB_2Cu_3O_{7-x}$
用途/目的	超電導磁石/電導現象劣化メカニズムの解明
製作者(調製法)	Y-, Ba-, Cu-nitrate 化学量論混合溶液からドライアップ → 950 °C・15時間焼成。
形状	焼結したディスクから切り出した $10 \times 1 \times 0.1 \text{ mm}^3$ 試験片。
照射条件	120 MeV ^{16}O 77.3K
測定	I-V 特性(通常)の4端子法、測定電流0.1-10 mA)、 V vs. fluence 共に77.3K で測定
評価	電圧 \propto 電流 a の関係が認められた。照射量の増大に伴い、aは1に近づいた。照射により弱結合部分が生じた結果と解釈された。



(A)before irradiation, (B) $2.96 \times 10^{13}/\text{cm}^2$,
(C) $5.89 \times 10^{13}/\text{cm}^2$, (D) $9.89 \times 10^{13}/\text{cm}^2$,
(E) $1.60 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, (F) $2.14 \times 10^{14}/\text{cm}^2$,
(G) $3.01 \times 10^{14}/\text{cm}^2$, (H) $5.00 \times 10^{14}/\text{cm}^2$,
(I) $6.78 \times 10^{14}/\text{cm}^2$ and (J) $1.14 \times 10^{15}/\text{cm}^2$.
The data are plotted only for $I < 2 \text{ mA}$

(A)0.1mA, (B)0.2mA, (C)0.3mA, (D)0.5mA,
(E)0.7mA, (F)0.9mA, (G)1.2mA, (H)1.5mA, (I)2.0mA,
(J)3.0mA, (K)4.0mA, (L)6.0mA and (M)10.0mA

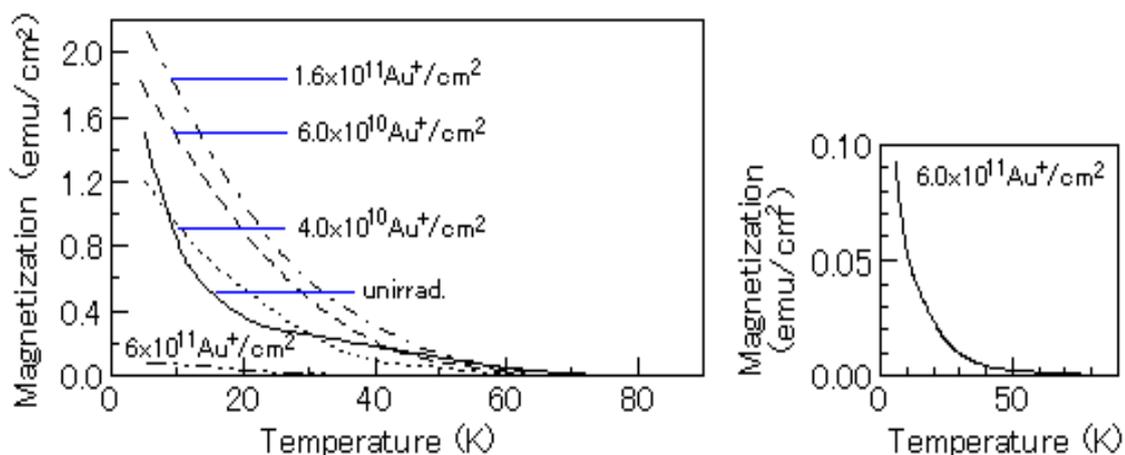
$$\ln(V/V_0) = -1.06 \times \ln(\Phi/\Phi_0) \times \ln(I/I_0)$$

$$I_0=7.7\text{mA}, V_0=7.9\text{mV}, \Phi_0=4.8 \times 10^{15}/\text{cm}^2$$

データシート No Cable/Connector-17

出典; “Effects of 230 MeV Au¹⁴⁺ irradiation on Bi₂Sr₂CaCu₂O_x” Surface & Coating Technology 84 (1996) pp. 348-352

対象材料	Bi ₂ Sr ₂ CaCu ₂ O _x
用途／目的	超電導磁／石磁束のピン止め機構と臨界電流密度との相関性の解明
製作者(調製法)	Grain-oriented Bi2212 by the bland method.
形状	テープから切り出した 0.35×1×0.25 cm ³ 試験片。
照射条件	230 MeV Au ¹⁴⁺ および120 MeV O ⁷⁺ at 80K
測定	①T _c (84 K)以上で試料に1テスラの磁場を加え、5 Kに冷却後磁場を取り除き、試料の残留磁化の温度変化の測定。 ②ヒステリシスループの測定による臨界電流密度(J _c)の測定。
評価	磁化の時間緩和の測定から、Au ¹⁴⁺ 照射によって生成される円柱状欠陥の導入により磁束の熱運動が2次元から3次元に変化することを明らかにした。



①の方法で得られた結果(上図): 残留磁化は、 1.6×10^{11} Au⁺/cm²の照射量まで照射量の増加に伴って増加し、円柱状欠陥が強いピン止めとなって磁束を捕獲している。

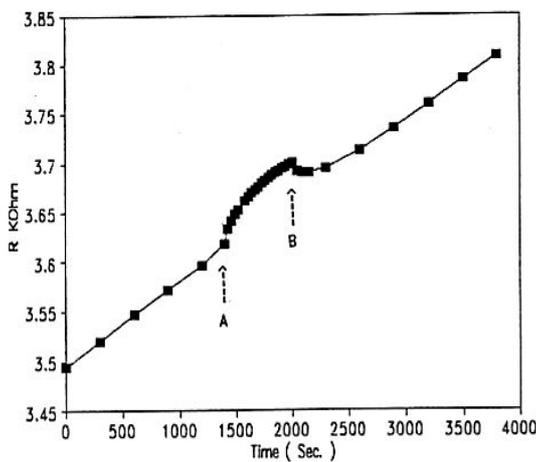
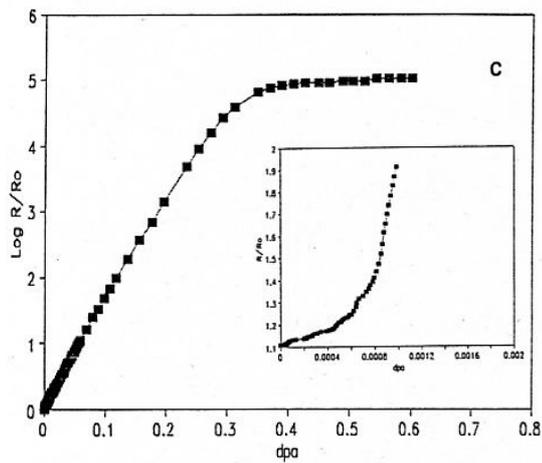
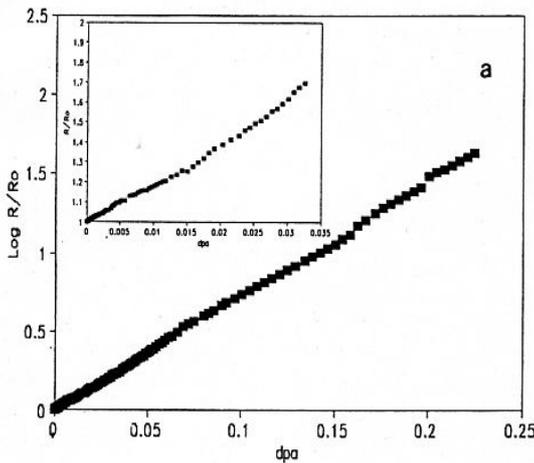
②の方法で得られた結果: 1.6×10^{11} Au⁺/cm²の照射量までJ_cの増加が観測され、 6.0×10^{11} Au⁺/cm²の照射量ではJ_cが照射前に比べて減少(上図の結果と一致)。

⇒ 6.0×10^{11} Au⁺/cm²の照射量では試料の約15%が非晶質領域となり、J_cの減少は超伝導体積の減少と関連付けられる。

データシート No Cable/Connector-18

出典; “Fluorine and hydrogen ion irradiation in YBaCuO superconductor” Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., B62, 74(1991)

対象材料	YBaCuO薄膜: Tc=83~87K、
用途/目的	超電導磁石/照射損傷のパラメータとして、デフェクト生成・密度の高感度診断プローブとしての検討
製作者(調製法)	SrTiO ₃ 上にマグネトロンスパッタで作成
形状	厚さ: 800~3000 Å、3×1mm ³
照射条件	220 keV H, C, F 13mmをφにスキャン、75 nA/cm ²
測定	電気抵抗、X線回折、SEM
評価	抵抗 vs. dpa はイオンの電子/核エネルギーロスの比で決まる。ビームオフすると速やかに抵抗が増大する。



上図: H(a)とFイオン(c)を照射したときの室温電気抵抗のdpa (TRIMコードで計算) 依存性

Hイオンでは直線的、Fイオンでは指数的の増大し0.4dpa程度でプラトー(Cも同じ)。

下図: A(0.2dpaの線量)でHイオン照射ストップ、Bで照射再開。照射休止でデフェクトの易動度が増えたためと解釈。

This is a blank page.

2. 光ファイバー・光学材料

大容量信号伝達の主役となるであろう光ファイバの放射線場における耐性について調査した。一般環境用途に開発された赤外領域光ファイバは放射線場では光透過度が低下してしまったり、積算線量と共に性能低下を起こすトータルドーズ効果のために放射線には脆弱な材料の印象が強かった。放射線環境で使用することを目的として、ファイバーの組成、不純物、製造条件等と関連づけて研究開発が進められ、その結果、純粋石英ガラスをコアに用いることによって 10^6 Gyを超える放射線照射に耐えるファイバーが実現された。

最近では、原子炉や核融合炉の炉心での信号伝送やファイバ自体をセンサーに使用する試みが行われ、極めて高い放射線レベルでの利用を指向した研究開発が行われている。

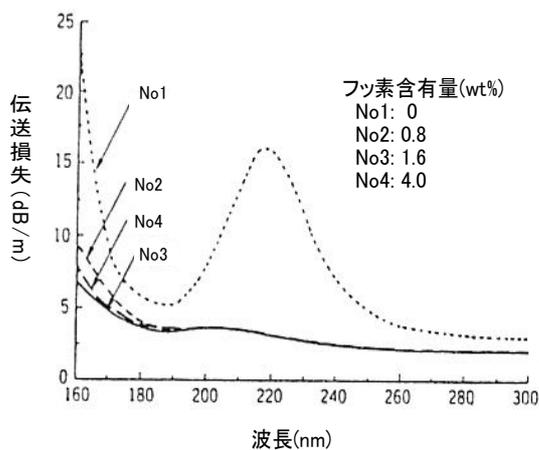
CCDは撮像管に比べて放射線照射に敏感であり、放射線レベルの高い場所や装置の映像信号は何らかの方法で伝送する必要がある。イメージファイバや反射材などの光学材料の放射線耐性も重要である。

この項では、開発過程でのファイバの組成と耐放射線性、現実の光ファイバの耐放射線性、その他の光学材料・素子についての実験結果をまとめる。

データシート No Fiber-1

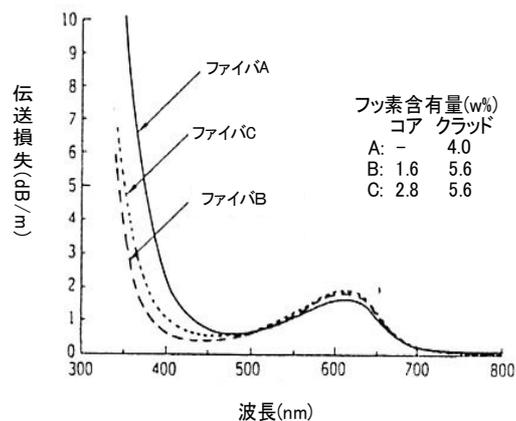
出典;“耐放射線光ファイバーの開発” JAERI-Conf 95-002, pp.28-31.

対象材料	フッ素ドープSiO ₂ ガラス
用途/目的	フッ素ドーパント添加による放射線劣化回復特性評価
製作者(調製法)	試作品(明記なし)。
形状	母材及びファイバー(寸法等明記なし)。
照射条件	γ-rays; 1.8 × 10 ⁶ Gy, 2.5 × 10 ⁶ Gy
測定	母材: 照射後一ヶ月後160nm~300nmでの光伝送損失 ファイバー: 照射後7日後に300nm~800nmでの光伝送損失
評価	フッ素添加により、母材; 215nm付近の吸収がなくなる。 ファイバー; 500nmより短波長側回復効果大きい。



照射後一ヶ月経過したときの母材の伝送特性

フッ素添加で 215nm 付近の E' センター (≡ Si·) 吸収がなくなる。



照射後6日経過後のフッ素添加ファイバ伝送特性

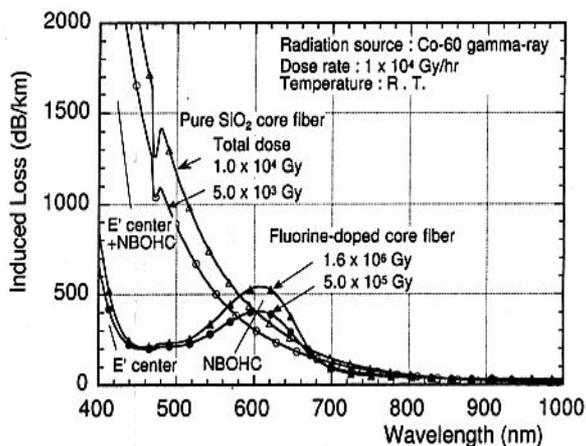
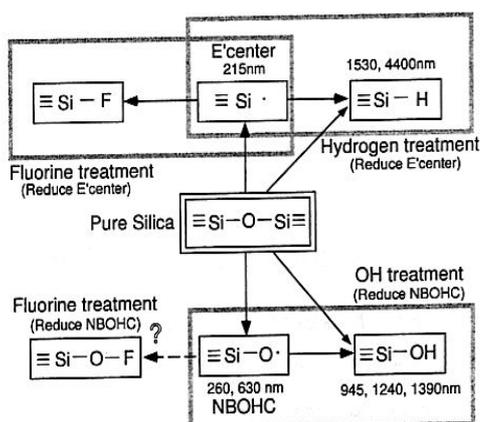
610~620nmの非架橋酸素正孔センター (NBOHC, Non Bonding Oxygen Hole Centers (≡ Si-O·)) による減衰は改善されないが、500nmより短波長で明らかな回復効果。

データシート No Fiber-2

出典; “Behavior of optical fibers under heavy irradiation” Fusion Engineering and Design

41, 201(1998).

対象材料	①コア純SiO ₂ 、クラッドSiO ₂ -F(4wt%)、②コアSiO ₂ +OH 800ppm、クラッドSiO ₂ -F(4wt%)、③コアSiO ₂ + F 1.6wt%、クラッドSiO ₂ -F (5.6wt%)
用途/目的	大線量原子炉照射による各種ファイバの耐放射線性評価
製作者(調製法)	記述なし
形状	コア 200 μm、クラッド 250 μm、長さ 1m
照射条件	γ線 1 × 10 ⁴ Gy/h、室温
測定	吸収スペクトル
評価	ドーパントとしてのフッ素はE'センターの生成をブロックする。



- ファイバの耐放射線性向上策
- ・E'センターの削減
 - ・NBOHC(非架橋酸素正孔センター) 吸収の削減

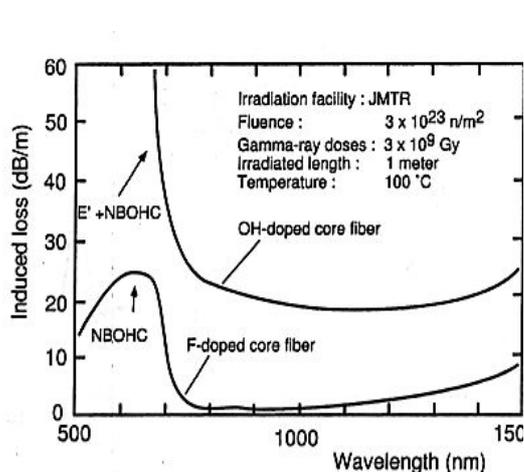
γ線照射により、紫外から可視領域で伝送損失が起こるが、フッ素ドーパファイバは純SiO₂コアファイバに比べてE'センターの生成が少ない。

データシート No Fiber-3

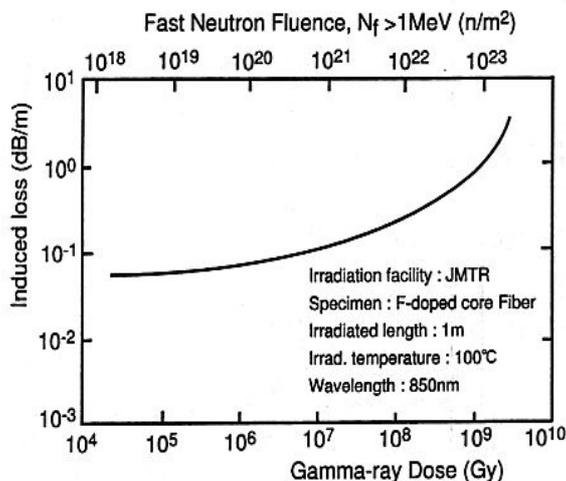
出典;“Behavior of optical fibers under heavy irradiation” Fusion Engineering and Design

41, 201(1998).

対象材料	①コア純SiO ₂ 、クラッドSiO ₂ -F(4wt%)、②コアSiO ₂ +OH 800ppm、クラッドSiO ₂ -F(4wt%)、③コアSiO ₂ + F 1.6wt%、クラッドSiO ₂ -F (5.6wt%)
用途/目的	大線量原子炉照射による各種ファイバの耐放射線性評価
製作者(調製法)	記述なし。
形状	コア 200μm、クラッド 250μm、長さ 1m。
照射条件	JMTR γ線5×10 ⁹ Gy、高速中性子2.0×10 ²⁴ n/m ² 、300~700K (高速中性子;4×10 ¹⁷ n/m ² s)
測定	吸収スペクトル及び単色光(850nm)伝送損失のその場測定
評価	OHドープはE'センターとNBOHCの吸収を増加させた。コアにフッ素をドープすることにより、著しく耐放射線性を高めることができる。



OHドープファイバでは中性子照射により、E'センターとNBOHCの吸収が増加した。

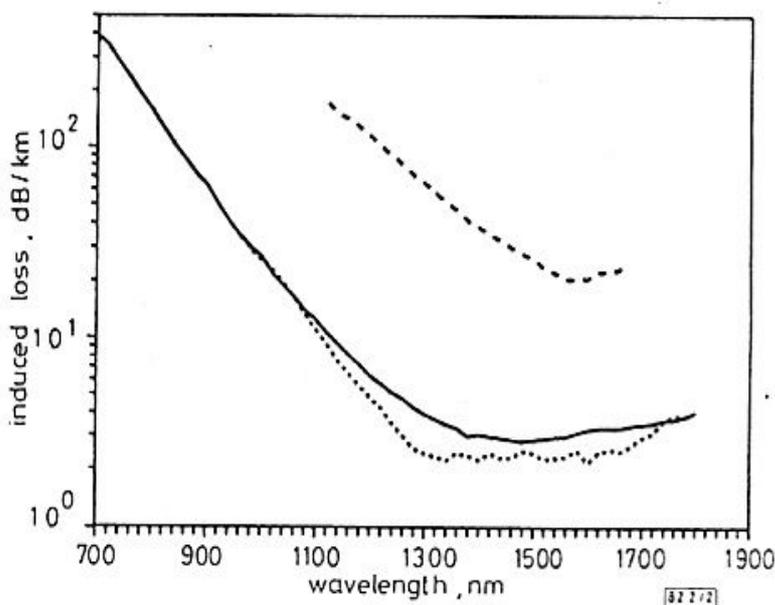


850nm単色光の損失増加特性。コアにフッ素をドープすることで、著しく耐放射線性が向上。

データシート No Fiber-4

出典; “Nitrogen doped silica core fibers: A new type of radiation-resistant fiber”
ELECTRONICS LETTERS, 31, 1490(1995).

対象材料	窒素ドーピングSiO ₂ 、純SiO ₂ クラッド、コア／クラッドの屈折率の差Δn=0.011
用途／目的	新耐放射線性光ファイバの開発
製作者(調製法)	SiCl ₄ 、O ₂ 、N ₂ を用いた水素フリー減圧プラズマCVD(SPCVD)。
形状	コア径 30μm。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 8.8 Gy/h、10 Gy/h 10kGyまで
測定	伝送損失スペクトル
評価	SPCVDで作られたファイバはMCVD (modified CVD)で作った同じ構成のファイバと同等の伝送損失であるが、Δnが大きい分、曲げに対する損失増は少ない。



γ線10kGy照射した3種類のファイバの伝送損失の波長依存性

--- fiber 1: MCVD法で作ったシングルモード Ge-ドーピングSiO₂コア/Fドーピング SiO₂クラッド、Ge3.2mol%、F 1 atm%、OH~0.2 ppm、Δn = 0.008

... fiber 2: MCVD法で作ったシングルモード 純SiO₂コア/Fドーピング SiO₂クラッド、F 1 atm%、OH~0.5 ppm、Δn = 0.0041

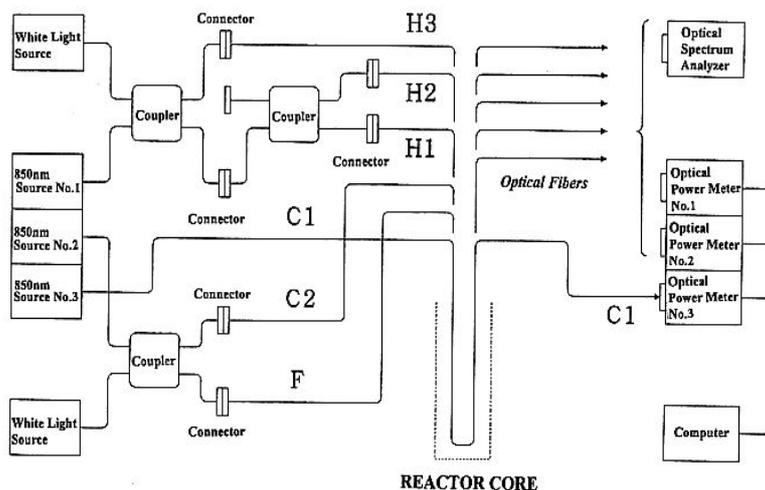
fiber 3: SPCVD法で作った窒素ドーピング SiO₂コアファイバ、Δn = 0.011

データシート No Fiber-5

出典; “Growth of optical transmission loss 850 nm in silica core optical fiber during fission

reactor irradiation” J. Nucl. Mater., 253, 180(1998).

対象材料	SiO ₂ コア光ファイバ; F (OH content 120ppm, F doped (0.35%)), H3 standard fiber (OH content 900ppm)、H1 (OH content 900ppm、水素処理24h)、H2 (OH content 900ppm、水素処理120h)、C1、C2(OH doped、OH content 1800ppm)
用途/目的	耐放射線性ファイバの開発と計測への応用の検討 — 中性子 + γ線による各種ファイバの光透過損失測定 —
製作者(調製法)	記述なし。
形状	コア径 250μm、クラッド径 250μm、長さ46m、発光部分0.5m (炉心部)。
照射条件	全中性子 $6.0 \times 10^{23} + 2.5 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ 、γ線 $5.7 \times 10^9 \text{ Gy}$ (高速中性子 $3.2 \times 10^{17} \text{ n/cm}^2\text{s}$ 、熱中性子 $1.3 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2\text{s}$ 、γ線 $3 \times 10^3 \text{ Gy/h}$ 、527時間)、at $400 \pm 10 \text{ K}$
測定	850nmにおける伝送損失
評価	OHをドーブしたファイバは放射線硬化 (Radiation hardening) を起こした。900ppmのOHをドーブすると蓄積される損失 (accumulated loss) の増加が抑制された。

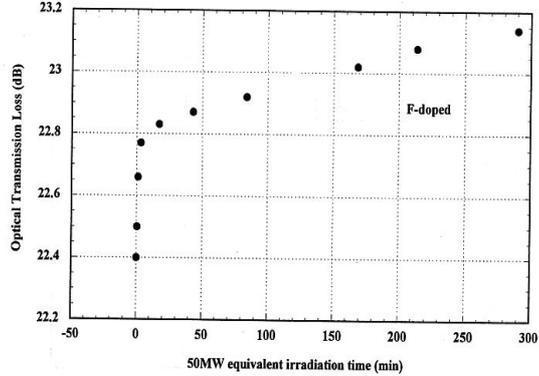
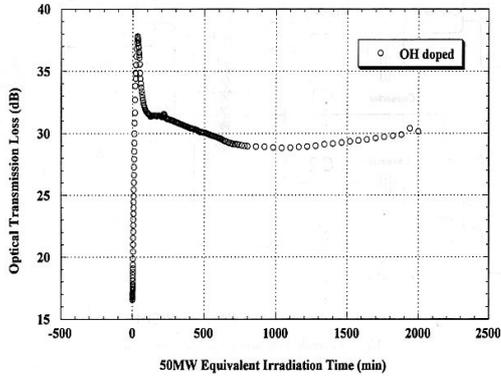


照射・測定スキーム

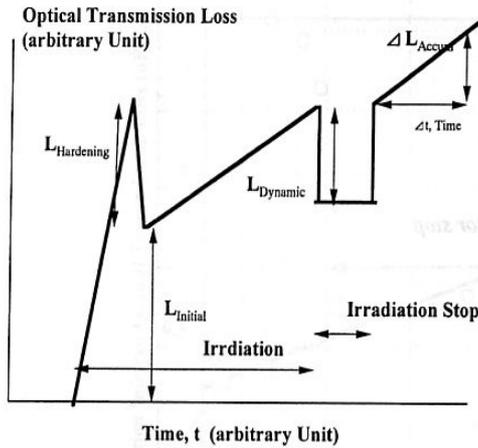
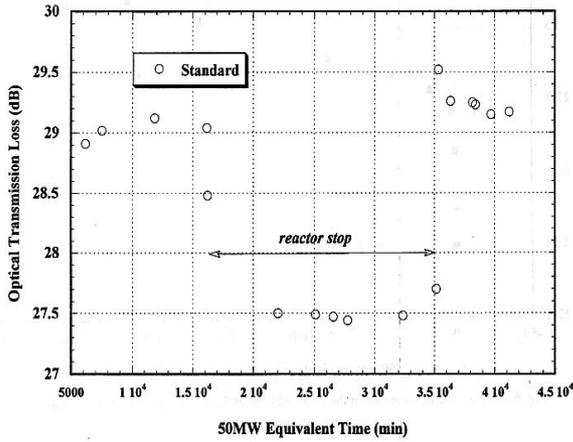
C1ファイバの光透過損失は常時測定、他のファイバについては、必要に応じて手動測定。結果は次ページ

データシート No Fiber-5(続き)

H3 standard fiber (OH content 900ppm)、H1 (OH content 900ppm、水素処理24h)、
H2 (OH content 900ppm、水素処理120h)、C1、C2(OH doped、OH content 1800ppm)



OHDドーブは照射直後の立ち上がり(放射線硬化)が大。スタンダードではわずかに観測されるが、フッ素ドーブでは見られない。



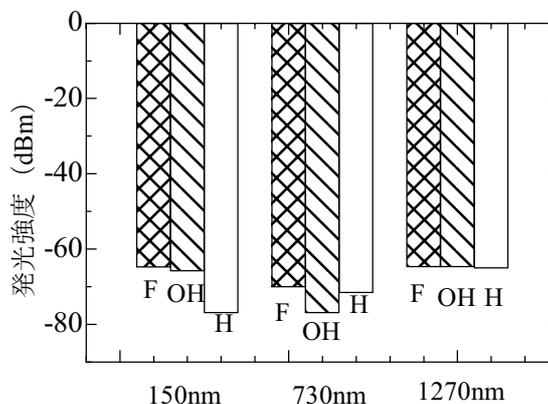
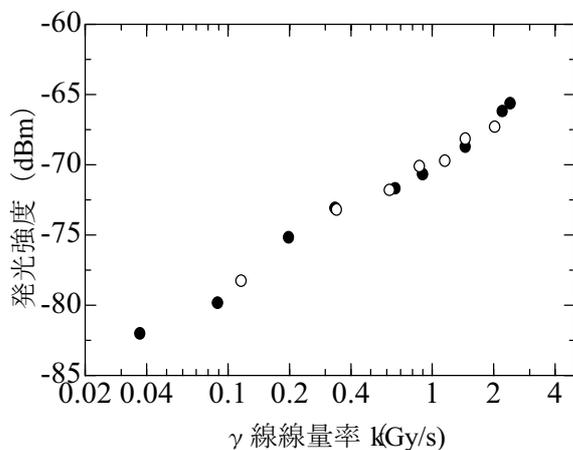
照射を休止→再開したときのOHDドーブファイバの挙動(左)と全課程の模式図(右)。

原子炉照射による各種ファイバーの光透過損失					
Fiber	Linear loss(dB/m)		Initial loss (dB/m)	Hardening (dB/m)	Dynamic loss (dB/m)
	per fast neutron fluence (10 ²⁴ n/cm ²)	per electronic excitation (10 ¹⁰ Gy)			
F-doped	11.70	12.30	0.8	-	0.8
Standard	2.33	2.46	3.2	1.8	3.2
OH-doped	43.33	45.62	26.0	18.0	6.0

データシート No Fiber-6

出典;“Optical properties in fibers during irradiation in a fission reactor” J. Nucl. Meter., 255, 324(1995).

対象材料	SiO ₂ コア光ファイバ; F fiber(OH content 10ppm, F doped (0.35%)), H fiber (OH content 10ppm, 水素処理)、OH fiber(OH content 500ppm)
用途/目的	原子炉照射(中性子+γ線)による観測される光信号の同定
製作者(調製法)	記述なし
形状	コア径 全て0.25mm、長さ40m、発光部分20m(内炉心部約1m)
照射条件	実験1: F & OH fiber γ線3.3TGy、高速中性子 1.6×10^{19} n/cm ² 360K (高速中性子; 8.8×10^{18} n/cm ² s, γ線; 1.9×10^3 Gy/s)。 実験2: OH, H & F fiber γ線4.3TGy、高速中性子 1.06×10^{20} n/cm ² 460K (1.6×10^{20} n/cm ² s, 2.3×10^3 Gy/s)
測定	0.35~1.85 μmにおけるスペクトル測定
評価	いずれのファイバでも1.27μm(第1発光), 0.7-1.7 μm(第2発光)、及び0.45 μm(第3発光)の発光がみられ、第2発光はチェレンコフ放射、第1発光はγ線によるシリカコアからの発光と同定できた。第3発光は不明。



実験条件1(○)と実験条件2(●)における第1発光の強度のγ線々量率依存性。

実験条件2では実験条件1に比べて、加熱レートは20%、中性子フラックスは6倍高いのに関わらず、発光強度は線量率のみに依存
⇒ γ線によるシリカからの発光

実験条件2の定常状態(50MW,460K)で照射中の各種ファイバーの発光強度。

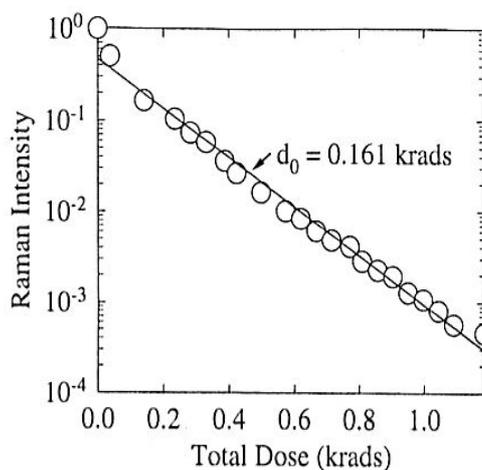
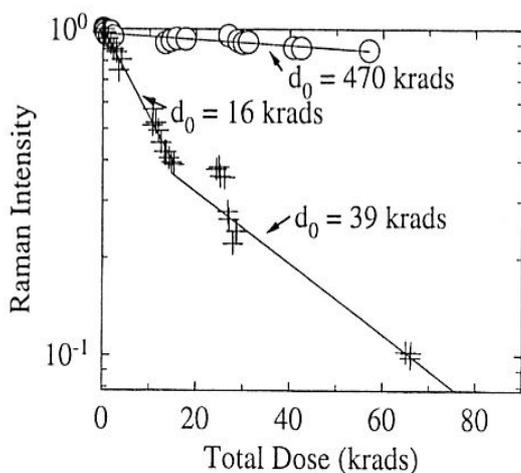
各種ファイバーで永久的放射線損傷が違っても関わらず強度に大きな変化なし

⇒ シリカマトリックスの電子励起発光

データシート No Fiber-7

出典; “Comparison of in situ ionizing radiation effects on Raman and photoluminescence intensity of high and low OH silica, and fluoride core fibers” J. Appl. Phys., 77, 5524(1995).

対象材料	低OH、高OH含有SiO ₂ コアファイバ(フッ素ドープレッド)及びフッ素ドープレッドファイバ
用途/目的	化学センサ用ファイバとしての適用性の検討
品名	①Polymicro FIP200222024 Low OH (<2ppm)、②Polymicro FIP200222024 High OH (1200ppm)、③NRL fluoride
形状	①Core/Clad/Buffer = 200/220/240(μm) 51m、 ②、 = 200/220/240(μm) 50m ③ = 83/204/-(μm) 20m。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.60 Gy/h (In situ), 5.0Gy/h・0.8kGy(photo anneal)
測定	Raman、 photoluminescence (514.5nm Ar ionレーザー励起)
評価	高濃度OHシリカファイバは照射後もラマン発光強度の低下が少なく化学ファイバとして最も優れる。フッ素ドープレッドファイバは照射により発光強度が大きく低下する。放射線センサとして有用。



Low OH silica (+)とHigh OH silica (O)ファイバのγ線々量に対するラマン強度。

d と d₀は減衰を $A \exp(d/d_0)$ で表したときの積算線量及び線量基準の減衰定数。

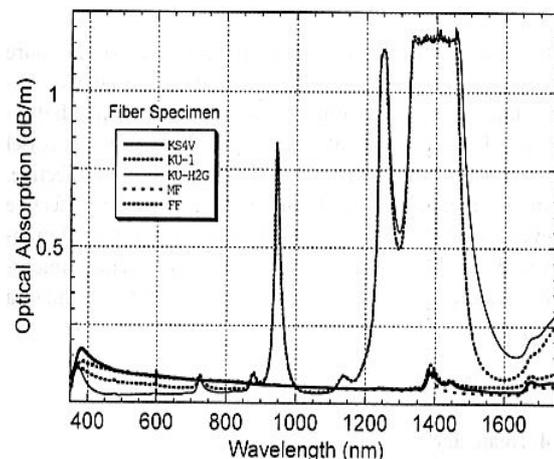
フッ素ドープレッドファイバについての同様な結果。極めて d₀ が小さい。

データシート No Fiber-8

出典; “Round-robin irradiation test of radiation resistant optical fibers for ITER diagnostic application” J. Nucl. Mater, 307-311, 1277(2002).

対象材料	SiO ₂ コアファイバ(OH- & Cl free)、OH 800ppm ファイバ、フッ素ドープファイバーなど、(詳細は下記参照)
用途/目的	ITERのペリスコープなどの光学システムに対する多種類のファイバーの日本、ロシア、EUによるラウンドロビン試験(本報告は日本で得られた日本とロシア製ファイバーに関する成果)
製作者(調製法)	下記参照。
形状	コア 200 μm、クラッド 250μm
照射条件	⁶⁰ Co γ線 (3.3 Gy/s)、JMTR (高速中性子 2.4 × 10 ¹⁷ n/m ² s、熱中性子 1.9 × 10 ¹⁸ n/m ² s、γ線 1.4 kGy)
測定	光学吸収スペクトル
評価	開発されたファイバはリモートハンドリングやITERの“out-of-vessel”での診断には使用できるが、“in-vessel”の可視光域での診断にはさらに開発が必要である。

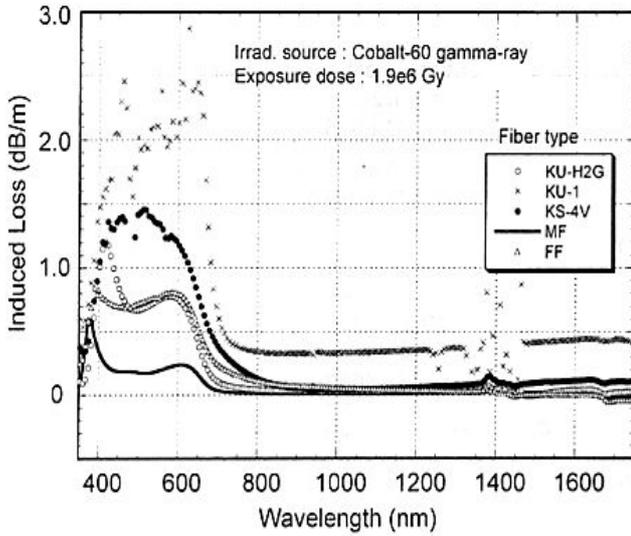
ファイバーの詳細			
Team	Fiber type	Supplier	Remarks
RF	KS-4V	FORC	Pure silica core, OH- and Cl-free
	KU-1	FORC	Original, OH: 800 ppm
	KU-H2G	FORC	Improved, hydrogen treated, OH: 800 ppm
JA	FF	Fujikura Ltd.	Fluorine-doped silica core, OH-free
	MF	Mitsubishi	Fluorine-doped silica core, OH-free
		Cable	
RF: Russian Federation			
JA: Japan			



未照射のファイバ 5種類の光吸収スペクトル

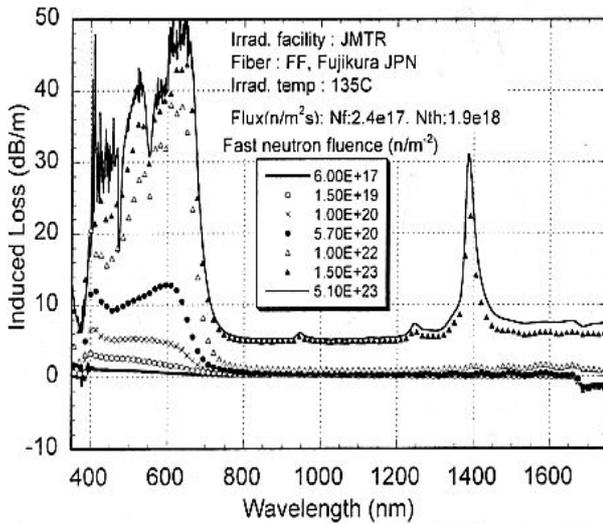
可視領域の吸収を低減させるためにOHをドープしたKU-1, KU-H2G では940, 1240, 1390nmに強い吸収があるが、OHを含まないKS-4V, FF, MFはこの領域の吸収はない。(次ページに続く)

Fiber-8 ラウンドロビン続き



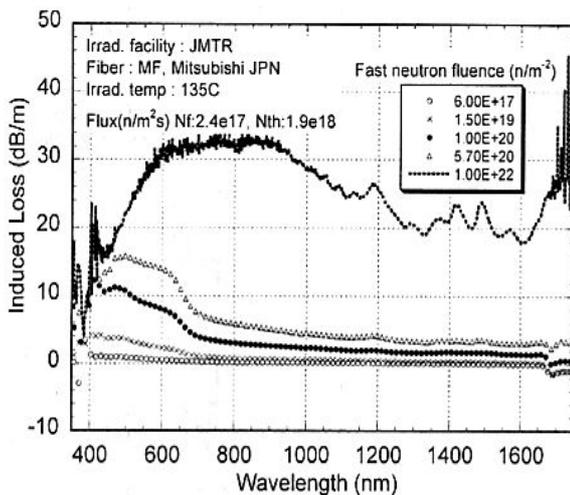
γ線を 1.9×10^6 Gy照射後の各種ファイバの光吸収スペクトル。

600~650nmにNBOHCによる吸収が現れる。この領域の伝送損失は、KS-4V(30dB/20m), KU-1(>50), KU-H2G(16), FF(18), MF(5)であった。



原子炉照射後のFFファイバの光吸収スペクトル。

5.7×10^{20} n/m²までの極めて高い耐放射線性を示すが、 5.1×10^{23} n/m²では40dB/mの損失となる。KS-4V, KU-H2Gも同様な高い耐放射線性を示した。



原子炉照射後のMFファイバの光吸収スペクトル。

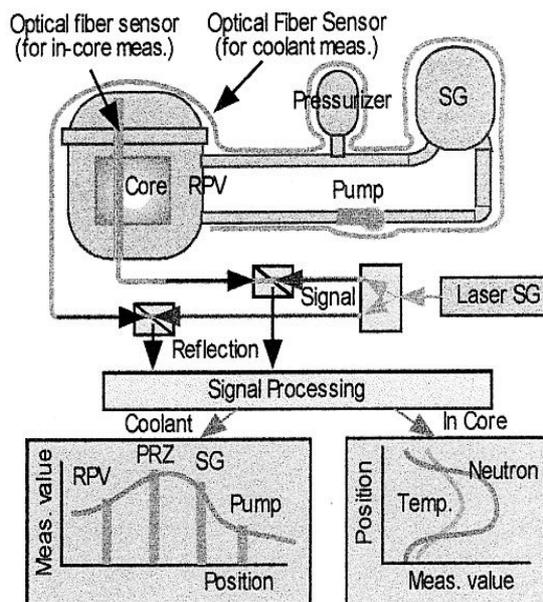
5.7×10^{20} n/m²までの極めて高い耐放射線性を示すが、それ以上の照射で極端に光透過性が失われた。これまでも、高濃度フッ素ドープした場合に見られた現象。

データシート No Fiber-9

出典：“光技術を利用した原子炉計装システム” 日本機械学会 [No-00-11] 第7回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集[2000-10-31, 11-1, 東京]

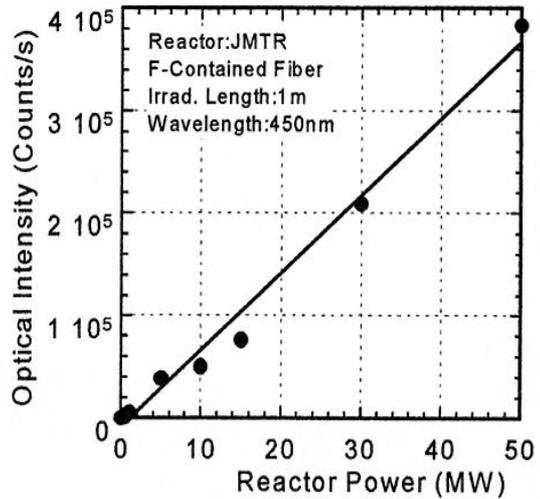
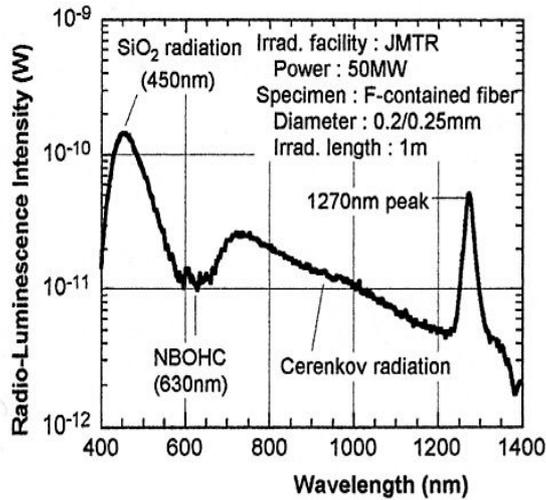
HEA/NCS Workshop on “Core Monitoring for Commercial Reactors Improvements in Systems and Methods” (CoMoCoRe’99), Oct. 4-5 1999, Stockholm, Sweden.

対象材料	フッ素ドープSiO ₂ ファイバ(コアに1.6%、クラッドに5.6%)
用途／目的	原子炉計装ファイバとしての適用性の検討
製作者(調製法)	記述なし
形状	コア200μm、クラッド250μm、炉心部照射長1m
照射条件	JMTR Power 50 MW(高速中性子 $1.5 \times 10^{18}n/m^2s$ 、熱中性子 $3.6 \times 10^{18}n/m^2s$ 、 γ 線 $5.0 \times 10^3G/s$)
測定	誘起発光強度、Al ₂ O ₃ の熱放射光のファイバによる計測(温度)。
評価	光による原子炉計装システムの構築は一次系のシステムのスリム化と信頼性向上に貢献する可能性が示唆された。



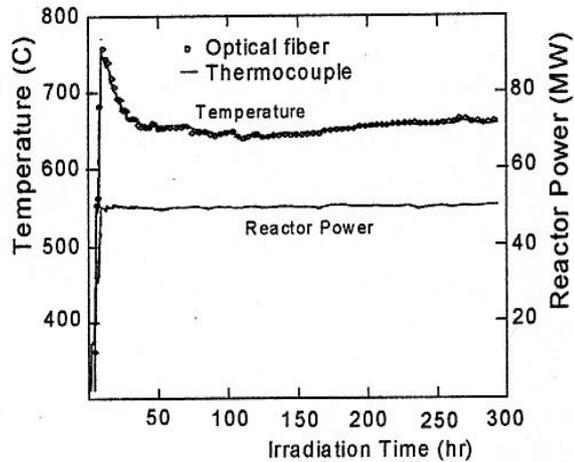
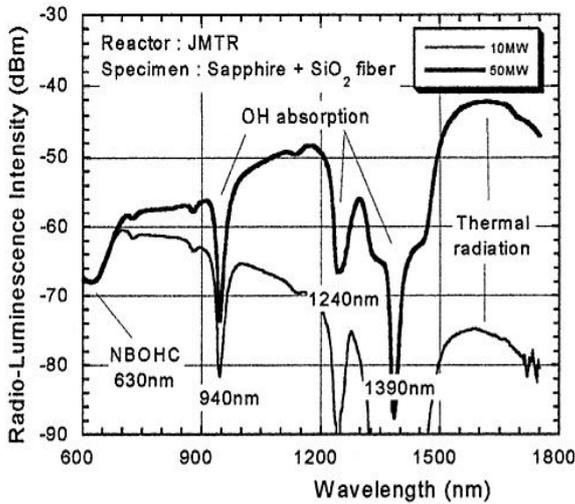
光ファイバを用いた原子炉計装技術の概念図
 中性子束密度、温度、圧力、放射線レベル等の計測の多重計測が可能になる
 (具体例は次ページ)

Fiber-9 光技術を利用した原子炉計装システム(続き)



SiO₂コアファイバの原子炉中での励起発光; 470nm、1270nm にピークを持つ発光と700~1400nmのチェレンコフ発光

470nmにピークを持つ発光 vs. 原子炉パワーの関係 ⇒ SiO₂ の格子結合に関わる発光で高温下での計測ができる



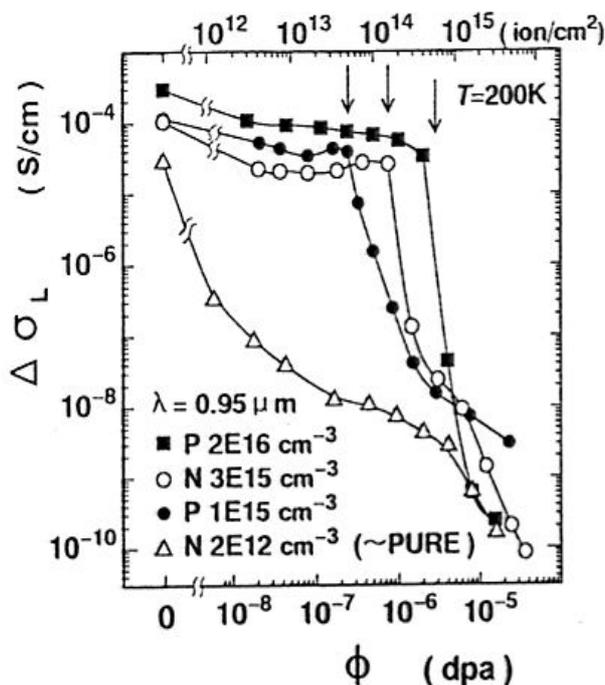
ファイバ先端に超小型のAl₂O₃を装着して、炉内の強力なγ線加熱(γ-heat)を観測して、炉内温度と出力のデータが得られる。OHドーパコアファイバ使用したため 940, 1240, 1390nmの吸収がある。

300時間の連続炉心温度計測の結果。照射初期の温度低下は、小型センサにより燃料の局部温度を正確に捉えていると解釈。

データシート No Fiber-10

出典; “Radiation-resistant photoconductivity of doped silicon under 17MeV proton Bombardment” J. Nucl. Mater., 233-237, 1244 (1996).

対象材料	純シリコン+不純物P(n-type) or B(p-type) (Pを $2 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$ ドープをN2E15と表記)
用途/目的	核融合プラズマ診断用素子としての不純物添加Siの検討
製作者(調製法)	シリコンウエハから切り出し。
形状	$3 \times 4 \times 0.5 \text{mm}^3$ (抵抗測定用電極付き)。
照射条件	17 MeV 陽子 40 nA/cm ²
測定	0.5~2 μm ($5 \times 10^{14} \text{photons/cm}^2\text{s}$ at 0.95 μm)に単色化した光による光電導度(PC)測定。PC測定中は照射を止める。
評価	n型及びp型Siは両者とも明瞭な二段階の依存性を示すこと、及び臨界線量が不純物濃度と相関を持つことが分かった。

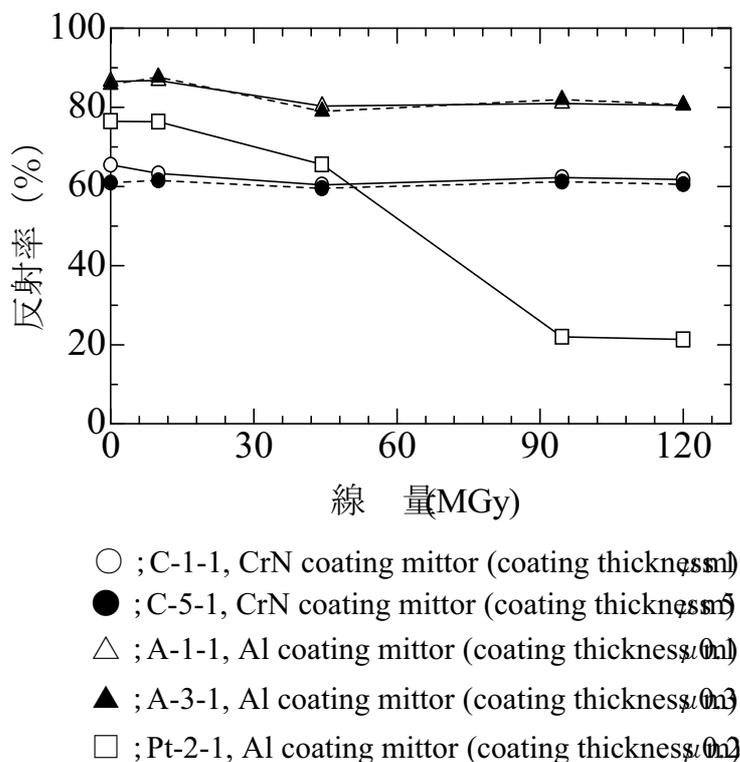


電導度上昇($\Delta\sigma$)と陽子数(下横軸はTRIMコードで計算したdpa)の関係。全ての曲線に矢印で示したキंक点(Critical fluence σ_c)が認められ、不純物をドーピングすると σ_c は大きくなり、放射線劣化が減る。不純物添加材は、約千倍程度の照射線量まで、その光感度を維持している。

データシート No Fiber-11

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 183(1999).

対象材料	SS304に CrN, Pt, Alをコートした反射鏡
目的	核融合プラズマ診断用光学素子としての検討
製作者／開発履歴	Japan Vacuum Metallurgy Co.／新規開発品
形状／性能等	サイズ: 50×50×2 t mm ³ 、 メッキ厚さ-反射率／CrN: 1μm-62.2 %、3μm-61.5 %、5μm-60.9 %、Al: 0.1μm-87.4 %、0.3μm-86.6 %、Pt: 0.2μm-76.8 %。
使用材料・その他	CrN, Pt, Al, SS304。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.5×10 ⁶ Gy/h、室温、 空気中 、積算線量; 120 MGy
測定	反射率、表面状態観察。
評価	CrN: 120MGyまで反射率と表面状態は不変。表面平滑性に及ぼすSS材料仕上げが難しい(他も同様)。 Al: 120MGyまで反射率不変。低線量域から表面浸食が開始。 Pt: 50 MGyから反射率が低下しはじめる。



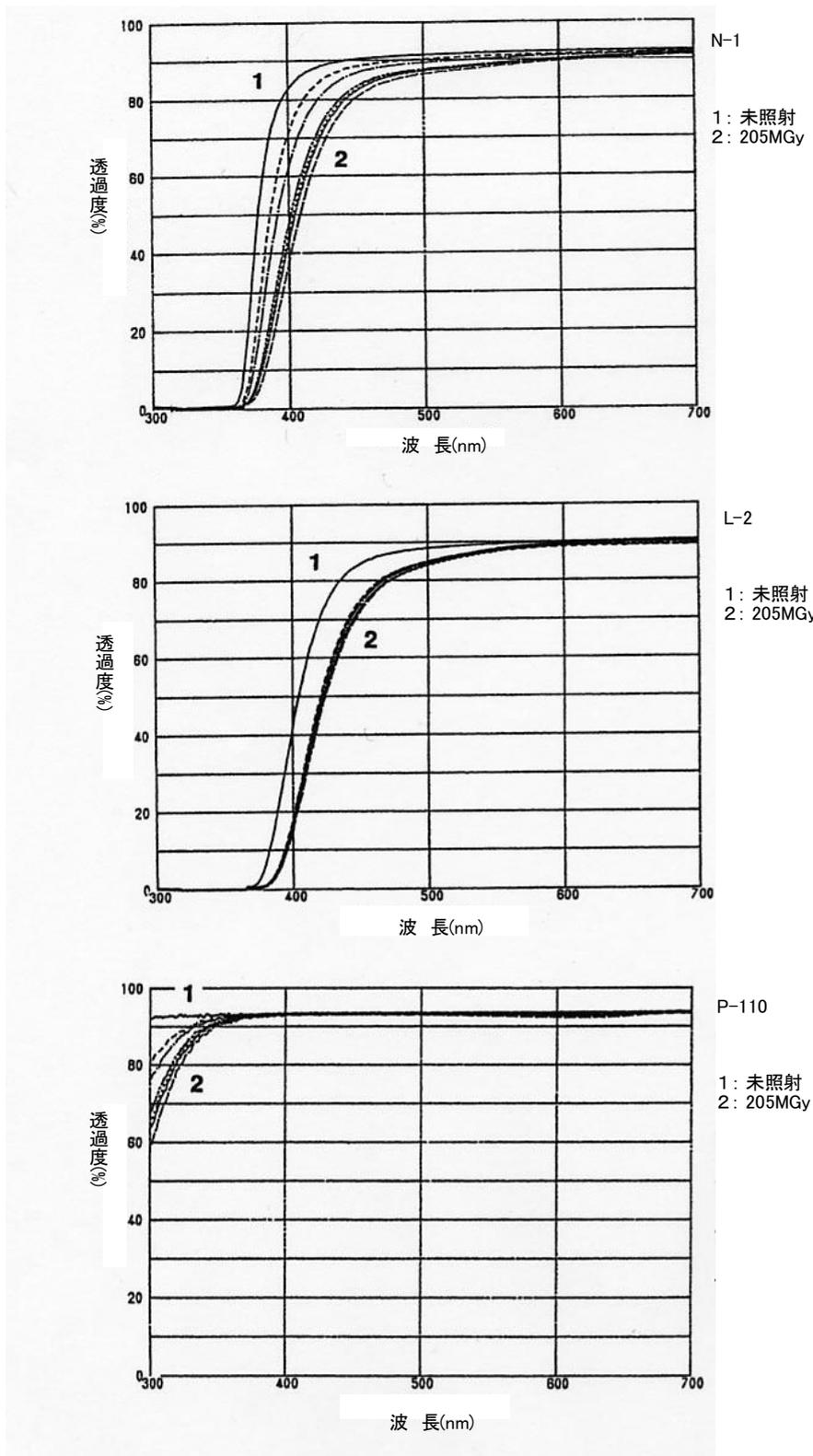
データシート No Fiber- 12

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 189(1999).

対象材料	光学ガラス
目的	核融合プラズマ診断用光学素子としての検討
製作者／開発履歴	Japan Vacuum Metallurgy Co.／市販製品
形状／性能等	サイズ: 30 × 15 × 10 t mm ³ 、 CeO ₂ 含有アルキルバリウムガラス(N-1): 比重;2.65、屈折率(Na-D線); 1.52、熱膨張係数; 98 × 10 ⁻⁷ /°C。 CeO ₂ 含有鉛ガラス(L-2): 比重;3.36、屈折率(Na-D線); 1.60、熱膨張係数; 112 × 10 ⁻⁷ /°C。 合成石英(P-110): 比重;2.20、屈折率(Na-D線); 1.46、熱膨張係数; 5.5 × 10 ⁻⁷ /°C。
使用材料・その他	N-1: SiO ₂ -BaO-R ₂ O-CeO ₂ (CeO ₂ 1.8wt%) R; Na, K L-2: SiO ₂ -PbO-R ₂ O-CeO ₂ (CeO ₂ 1.5wt%) P-110: SiO ₂ 、OH含量; 300ppm
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1 × 10 ⁶ Gy/h、室温、 空気中 、積算線量; 205 MGy
測定	光透過率、着色。
評価	許容線量; 205 MGy以上 N-1: 204 MGy照射後、波長 550nmでの透過率が 3.5% 低下したが、着色は認められない。 L-2: 204 MGy照射後、波長 550nmでの透過率が 2.5% 低下したが、着色は認められない。 P-110: 204 MGy照射後、波長 550nmでの透過率低下が認められず、また着色は認められない。

結果は次ページ

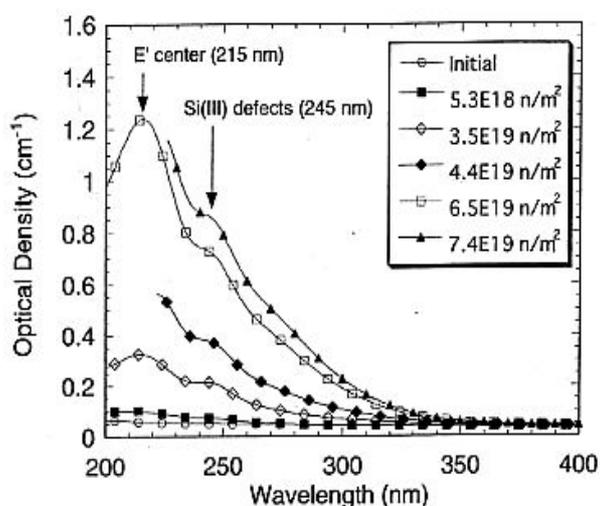
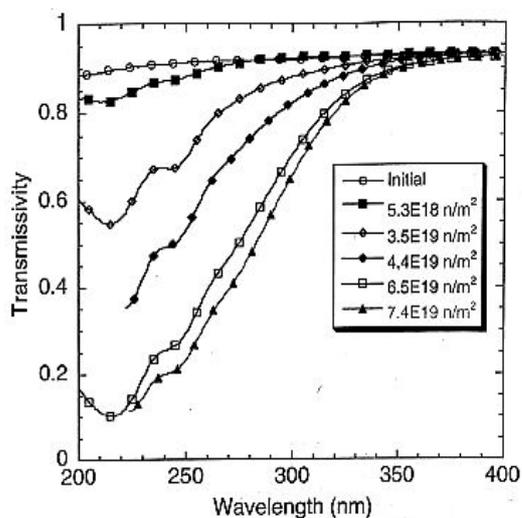
Fiber- 12(続き)
 CeO₂含有アルキルバリウムガラス(N-1)
 CeO₂含有鉛ガラス(L-2)
 合成石英(P-110)



データシート No Fiber-13

出典; “RADIATION EFFECTS ON PLASMA DIAGNOSTIC COMPONENTS(II)”
 JAERI-Research 2002-007, 5(2002).

対象材料	KU-1 石英窓材
目的	核融合プラズマ診断用光学素子としての検討 / 14 MeV 中性子照射による紫外光の吸収
品名 / 内容	UK-1 / 耐放射線性溶融石英
形状 / 性能等	サイズ: 16mm ϕ \times 8 t mm ³ OH 含量; 800 ppm
照射条件	高速中性子、FNS(Fusion Neutron Source)、 7.4×10^{19} n/m ² (γ 線の割合5%以下)、室温、空气中
測定	D ₂ UV光入射による200~400nmにおける吸収スペクトル測定。
評価	波長300nmより長波長域ではITERでのスペクトロスコピーに使用可能。250nm以下の領域では 5×10^{18} n/m ² まで。

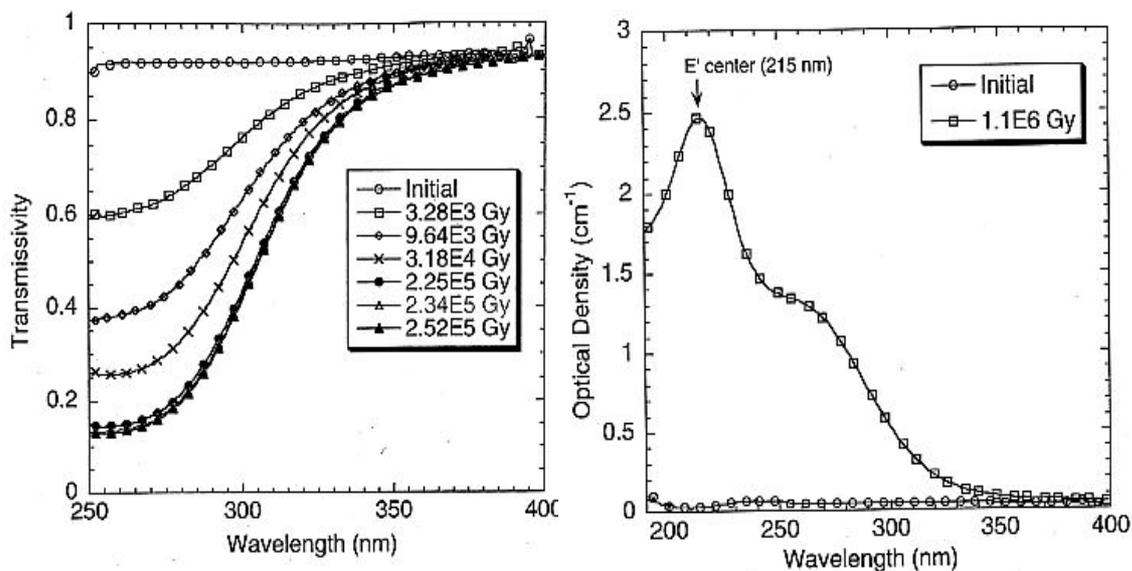


215nm付近の E' センター;
 (≡ Si \cdot) の吸収

データシート No Fiber-14

出典;“RADIATION EFFECTS ON PLASMA DIAGNOSTIC COMPONENTS(Ⅱ)”
 JAERI-Research 2002-007, 12(2002).

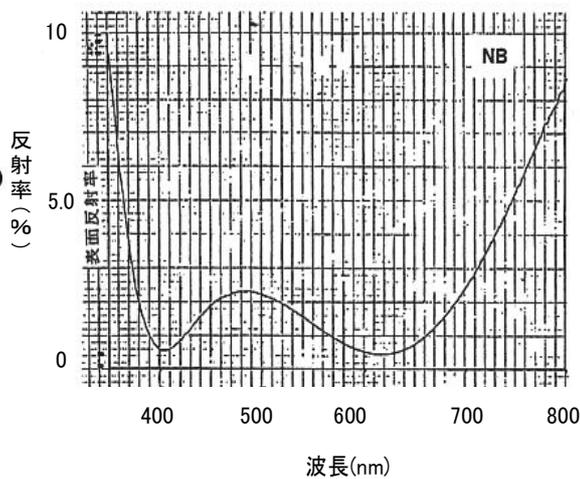
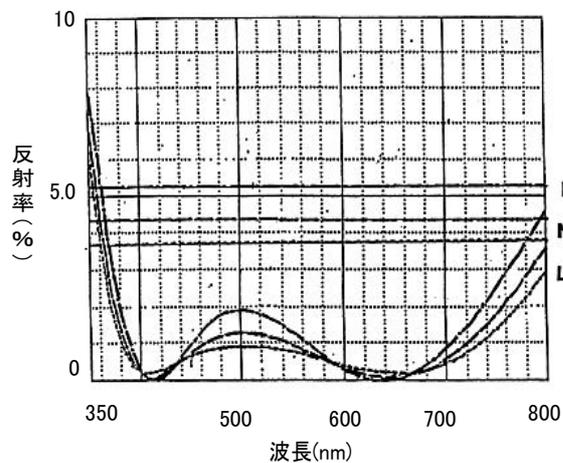
対象材料	KU-1 石英窓材
目的	核融合プラズマ診断用光学素子としての検討/14 MeV 中性子照射による紫外光の吸収
品名/内容	UK-1/耐放射線性溶融石英
形状/性能等	サイズ:16mm φ × 8 t mm ³ OH 含量;800 ppm
照射条件	⁶⁰ Co γ線、1.33 × 10 ⁶ R/h (1.16 × 10 ⁴ Gy)、室温、空气中
測定	D ₂ UV光入射による200~400nmにおける吸収スペクトル測定。
評価	2.5 × 10 ⁵ Gy まで、UV域で ITERでのスペクトロスコープに使用可能。300nm以下の領域では 1 × 10 ⁴ Gyまで。



データシート No Fiber- 15

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 196(1999).

対象材料	光学レンズ用反射防止コーティングフィルム
目的	核融合プラズマ診断用光学材料としての検討
製作者／開発履歴	ミノルタ(株)／新規開発品
形状／性能等	3層コーティング(SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃) 試料構造:アルキルバリウムガラス、鉛ガラス、合成石英上(50 mm φ × 10 mm t)にコート、膜厚: SiO ₂ -85nm、TiO ₂ -119nm、Al ₂ O ₃ -77nm。
使用材料・その他	SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.55 × 10 ⁶ Gy/h、室温、 空气中 、積算線量; 11.3 MGy
測定	表面反射率、表面状態観察。
評価	許容線量; 11.3 MGy以上 ・全て11.3 MGyまで表面反射率と表面状態は不変。

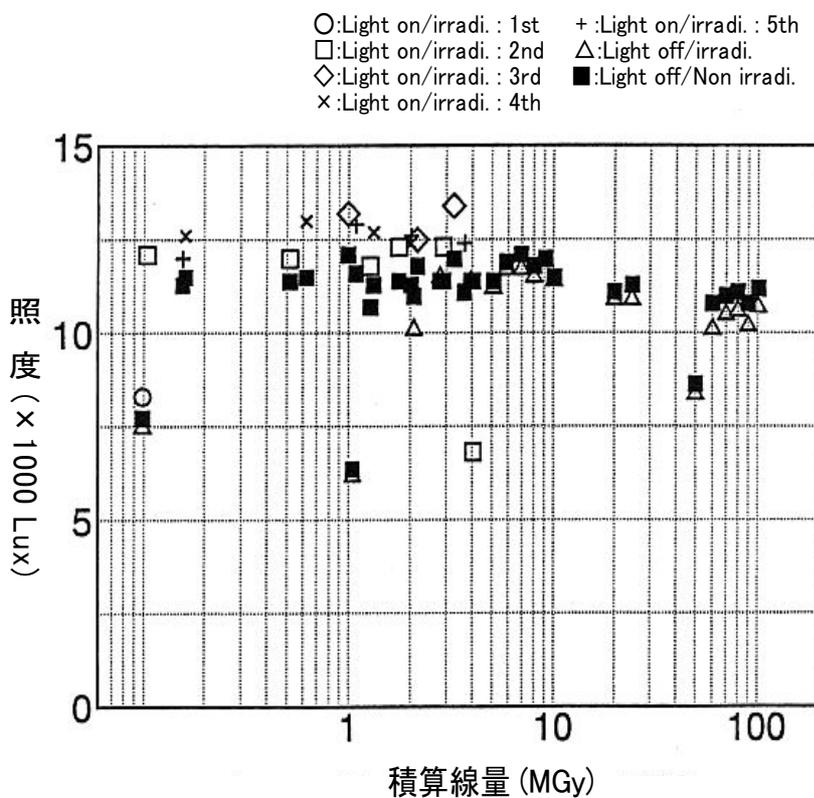


左: 3種類のコーティング膜の表面反射率の波頭依存性、
右: 11.3MGy照射後のNB膜の結果

データシート No Fiber- 16

出典：“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 199(1999).

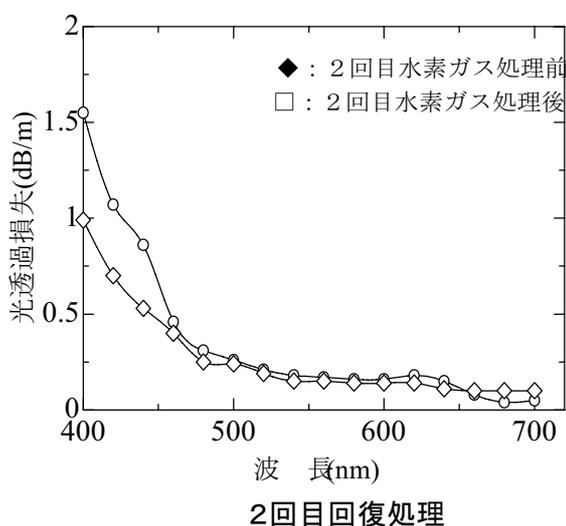
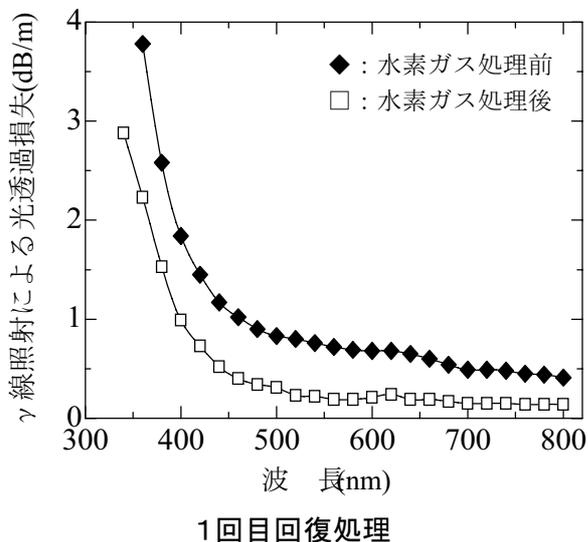
対象材料	ハロゲンランプ
目的	核融合プラズマ診断用光源としての検討
製作者／開発履歴	東芝ライテック(株)／市販品
形状／性能等	型式:JP100V500W2F バルブ;つや消し仕上げ石英、ターミナル;セラミック、 100V、500W、輝度;11000lm、公称寿命;500hr。
使用材料・その他	石英、セラミック。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.06 × 10 ⁶ Gy/h、室温、 空气中 、積算線量;100 MGy
測定	Case1:照射中on、Case1:照射中off、Case3:照射なしoff。 輝度、表面状態観察。
評価	許容線量;公称寿命どおり



データシート No Fiber- 17

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 203(1999).

対象材料	OH ドープイメージファイバ
目的	核融合プラズマ診断用画像伝送素子としての検討
製作者／開発履歴	Fijikura Co /市販品
形状／性能等	耐放射線性型 OH ドープイメージファイバ(13mm φ,12m) コア数;20000、OH含量;800ppm、フィールド角;30°C、アイピース;CCDカメラ。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 9.3×10 ⁵ Gy/h、室温、 空気中 、積算線量;28.3 MGy
測定	観察能力;①照射中(照射終了直後)、②画像劣化回復処理(28.3MGy照射後に水素ガス中、200°C、24hr 処理及び28.3+8.52MGy照射後、同条件で48hr 処理)。
評価	許容線量;3.1 MGy ・観察能力と分解能の線量限界;それぞれ12 MGy、3.1 MGy ・1回目の処理により波長 400 nm での放射線損傷が1db回復。 ・2回目の処理では効果が少なかった。



データシート No Fiber- 18

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER (INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 209(1999).

対象材料	フッ素ドープイメージファイバ
目的	核融合プラズマ診断用画像伝送素子としての検討
製作者／開発履歴	三菱電線工業(株)／市販品
形状／性能等	耐放射線性型 フッ素ドープイメージファイバ(8mm φ,12m) コア数;20000、OH含量;800ppm、フィールド角;30℃、アイピース; CCDカメラ。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 4.95 × 10 ⁵ Gy/h、室温、 空気中 、積算線量;3.4 MGy
測定	観察能力;照射中(照射終了直後)、プレコート膜はぎ取り後の観察。
評価	許容線量;3 MGy ・観察能力と分解能の線量限界;共に3.1 MGy ・3.4MGyの照射でプレコート膜の損傷により、ファイバを通しての観察は不能となった。

イメージ変化、プレコーティング損傷模様、損傷後のファイバの様子は標記文献 p210～212 を参照してください

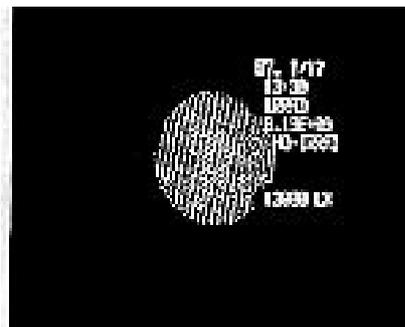
データシート No Fiber-19

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 214(1999).

対象材料	照射下同時水素ガス処理イメージファイバ
目的	核融合プラズマ診断用画像伝送素子としての検討
製作者／開発履歴	Fujikura Co. / 新規開発品
形状／装置構成	塩素フリー、OH含有合成石英ファイバ(0.5mm φ,10m) コア数;500、アイピース;CCDカメラ。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.46 × 10 ⁶ Gy/h、室温、水素ガス中。 水素処理:ファイバをSUSチューブ入れ、0.1~0.2MPaの水素ガスを 20cc/min の流速で流通させながら照射。 積算線量;100 MGy。
測定	照射中におけるハロゲンランプ光の透過光の観測、照度測定。
評価	許容線量;100 MGy ・同時水素処理は極めて有効。 ・処理をしないときは0.01MGyで透過光を観測できなくなった。 ・センター付近で徐々に暗くなったが、水素流通課で照射を止めると回復した。



水素気流中
80MGy照射後

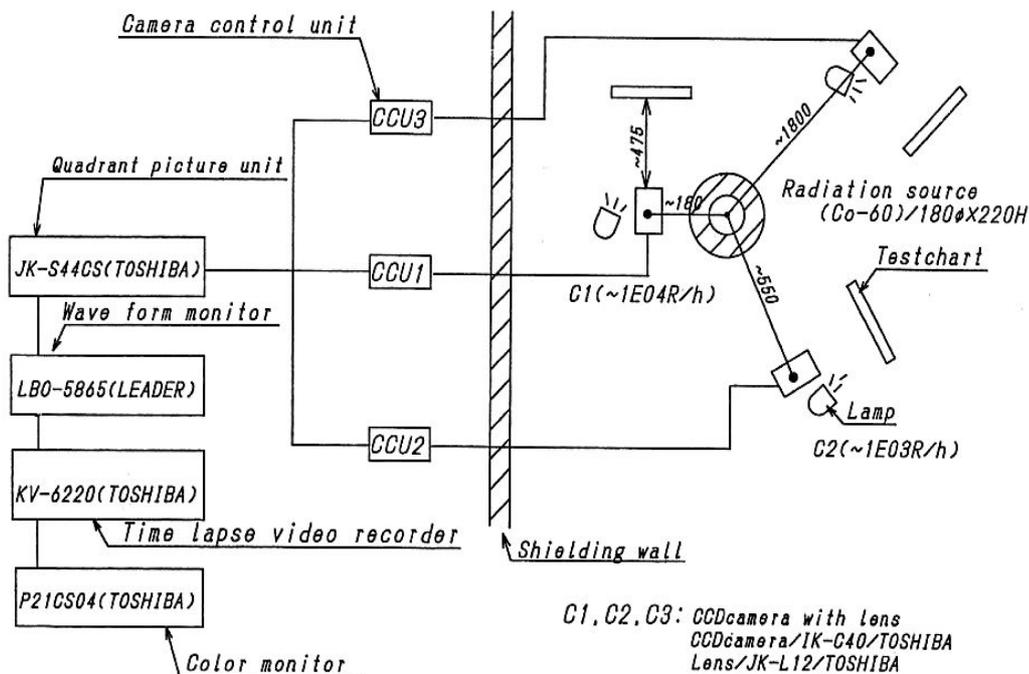


80MGy照射後
水素気流で20日間放置

データシート No CCD-1

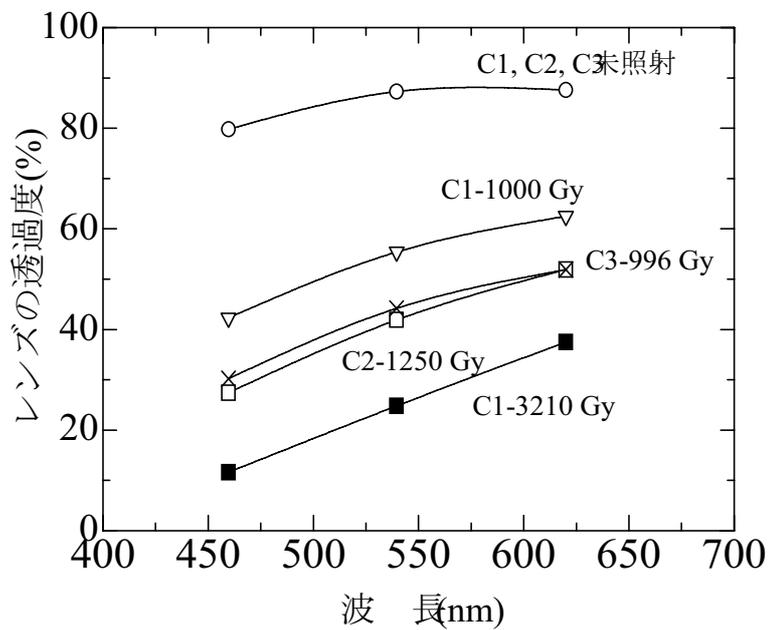
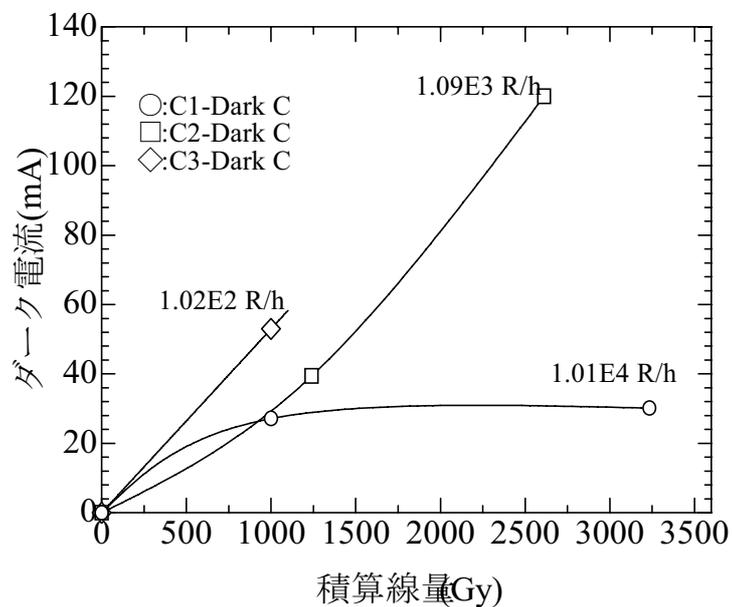
出典：“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3,160(1999).

対象機器	CCDカメラシステム
目的	核融合実験炉用耐放射線性遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	(株)東芝／市販品(IK-C40)
形状／性能等	CCD: 1/2 inch ccd image sensor、分解能: 460 TV lines (horizontal) × 350 TV lines (vertical)
使用材料・その他	レンズ; JK-L12(標準型)
照射条件	^{60}Co γ 線 1×10^4 、 1×10^3 、 1×10^2 R/h、室温、空气中、積算線量; 0.0032MGy
測定	イメージ観察。レンズの透過度。カメラヘッドの電気特性変化
評価	許容線量; 0.0015~0.002 MGy ・ 2kGyの照射で急激に感度が減衰。 ・ ダークカレントの変化は線量率に依存、低線量率ほど線量当たりの劣化が大きい。



CCDカメラ照射実験配置図

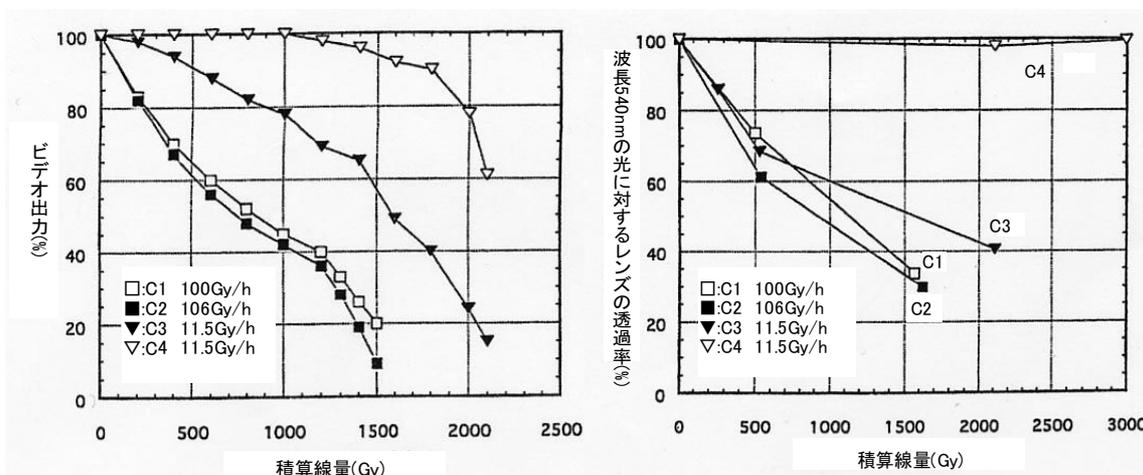
No CCD-1 CCDカメラシステム(続き)



データシート No CCD-2

出典; “HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3,164(1999).

対象機器	CCDカメラシステム(改良型カメラコントロールユニット(CCU)付き)
目的	核融合実験炉用耐放射線性遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)東芝/改良品(IK-C40)
形状/性能等	CCD:1/2 inch ccd image sensor、分解能:460 TV lines (horizontal) × 350 TV lines (vertical)。
使用材料・その他	レンズ; 耐放射線性仕様。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1 × 10 ⁴ 、1 × 10 ³ R/h、室温、空气中、積算線量; 0.003 MGy
測定	イメージ観察。レンズの透過度。カメラヘッドの電気特性変化
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・改良型 CCU の効果大。 ・改良型 CCU により耐性が1.5 kGyから3k Gyに増大。



Camera	仕様	CCU	レンズ	線量率(R/h)
C1	IK-C40, 1/2 inch, color	modified	JK-L12	1 × 10 ⁴
C2	''	''	''	1.06 × 10 ⁴
C3	''	''	''	1.55 × 10 ³
C4	''	''	耐放射線型	1.55 × 10 ³

This is a blank page.

3. 半導体デバイス

集積回路の微細化・高集積化とともに、高機能化が進み加速器施設内でも機器類のコントロールやデータ処理に欠かせないものになっている。これらのデバイスは宇宙用電子部品としての観点からその耐放射線性の研究が進められていたところである。宇宙用といっても特別なカスタムICの作製を行うのはわずかで、民生用部品の中で耐放射線性の優れたものを使用することが経済上望ましく、如何に評価を正しく行うかが主要課題である。

半導体デバイスの放射線照射効果には、①放射線が通過したときにその電場変化のために起こるソフトエラーやラッチアップなどのシングルイベントと②永久的な損傷として残るトータルドーズ効果に大別される。シングルイベントは、電源を切り再立ち上げにより復帰する。

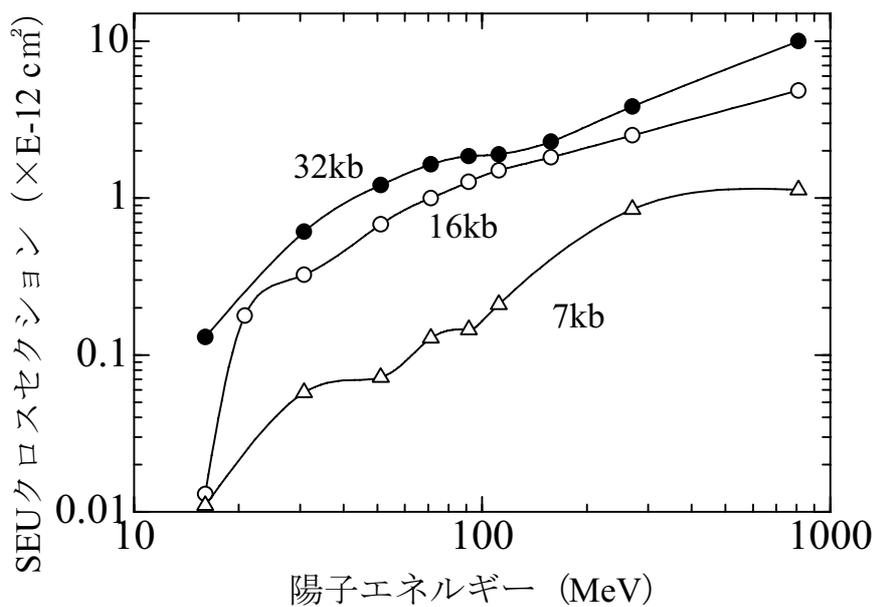
これまで、電子、陽子、鉄などの重イオンなど宇宙放射線によるソフトエラーが重点的に検討されてきたが、高エネルギー中性子とSi原子核との核反応による生じる二次イオンによるシングルイベントが問題となってきた。陽子加速器環境では中性子による効果が重要と思われる。ここでは中性子が関係するシングルイベントアップセット(SEU)、SEUとLETの関係及び宇宙で使用可能な代表的な半導体デバイスのトータルドーズ効果を収録した。

民生用の半導体デバイスは、処理速度やその他の性能は日進月歩し、あたかも生鮮食品と同じといわれている。しかしながら、宇宙機器に使用していたり大型施設で使われている半導体デバイスはおいそれと交換できるものではない。この分野では新たに導入する時点では、最新の性能で耐放射線性に優れているものであっても、保守部品として確保しておくことも重要である。

データシート No SEU-1

出典 ; “Accelerated testing for Cosmic Soft-Error Rate” IBM J. Res. Develop., 40, 51(1996).

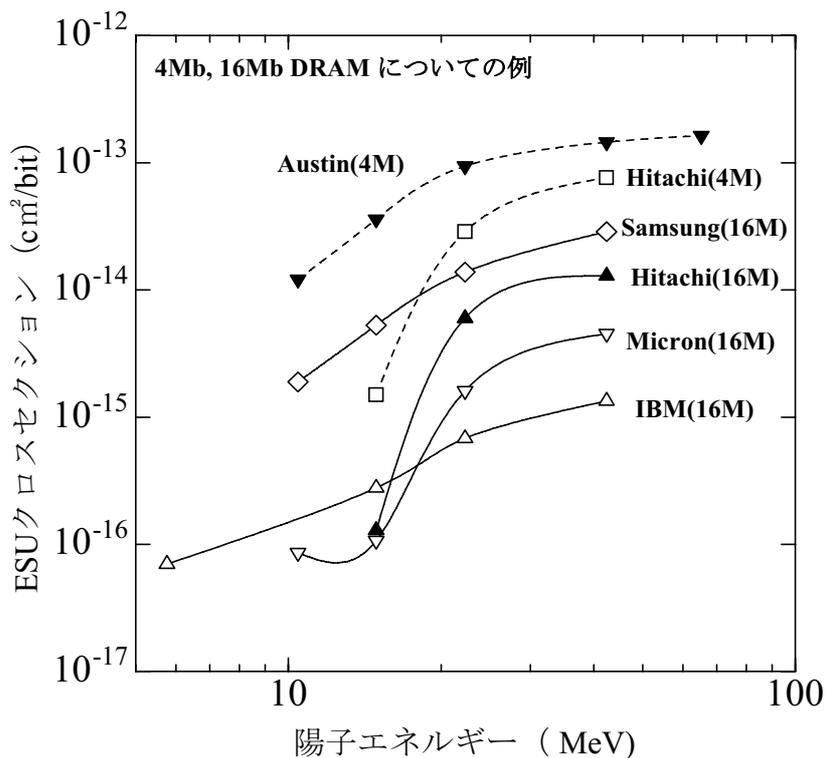
対象デバイス	バイポーラメモリー素子 32kb, 16kb, 7kb
実験目的	陽子による中性子照射効果の模擬(自由中性子は半減期10分で崩壊し陽子を発生)
製作者	IBM
形状	実装デバイス。
照射条件	陽子 20~900MeV
測定	SEU(シングルイベントアップセット) 断面積
評価	陽子のエネルギーに対し比例に近い関係。 7kbと16kbのデータ間で1桁、16kbと32kbの間では2倍程度の隔たり。



データシート No SEU-2

出典; “The SEU Figure of Merit and Proton Upset Rate Calculation”, IEEE Transactions on Nuclear Science, 45, 2550(1998).

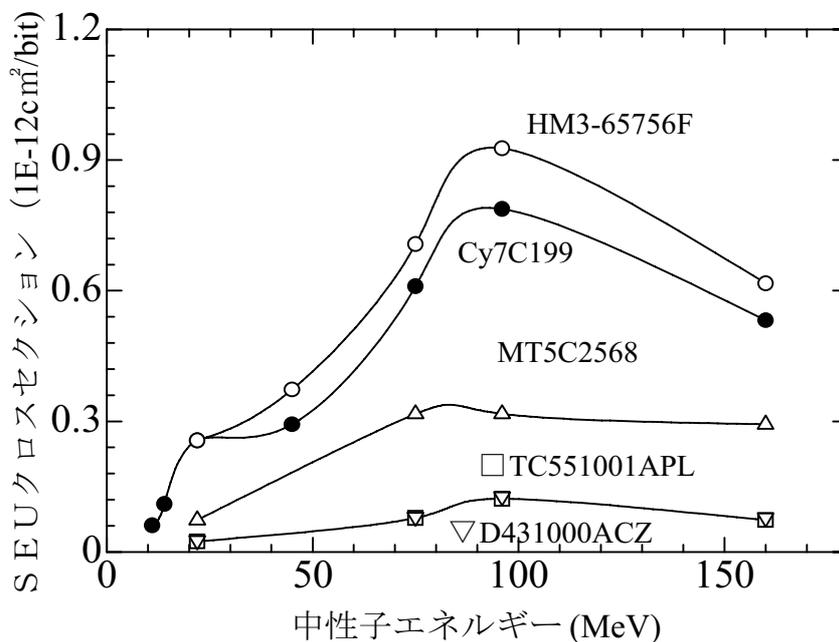
対象デバイス	各種DRAM (Dynamic Random Access Memory) 4Mb~16Mb
実験目的	陽子による中性子照射効果の模擬(自由中性子は半減期10分で崩壊し陽子を発生)
製作者	日立、IBM、Micron、Samsung、Austin、東芝、SONY、三菱
形状	実装デバイス
照射条件	陽子 5~120MeV
測定	SEU(シングルイベントアップセット) 断面積
評価	陽子のエネルギーに対し数十MeV以上で飽和傾向。 デバイスによって3桁程度の幅がある。



データシート No SEU-3

出典; “Energy Resolved Neutron SEU Measurement from 22 to 160 MeV”,
IEEE Transactions on Nuclear Science, 46, 1427(1998).

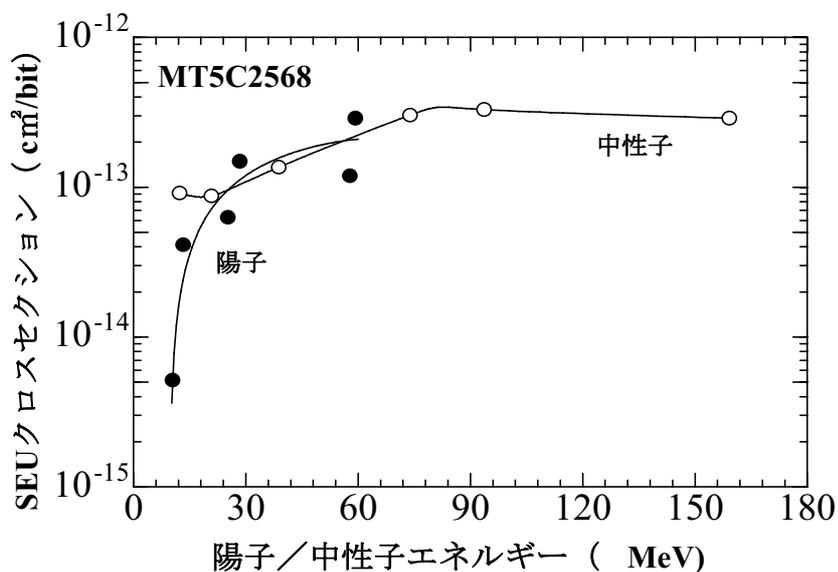
対象デバイス	各種SRAM (Static Random Access Memory)
実験目的	宇宙中性子照射効果の地上試験
製作者	Matra-Harris, Cypress, Micron, NEC, 東芝。
品名	Cy7C199(Cypress) : 32kb × 8、HM3-65756F(Matра-Harris) : 32kb × 8、Cy7C1009 (Cypress) : 128kb × 8、MT5C2568(Micron) : 32kb × 8、TC551001APL(Toshiba) : 128kb × 8、D431000ACZ(NEC) : 128kb × 8
照射条件	中性子 11~160MeV
測定	SEU(シングルイベントアップセット) 断面積
評価	中性子エネルギーに対し30~70MeV以上で飽和する傾向。 Cy7C199については陽子照射実験も行っているが、中性子照射の方が3倍近い影響があることが報告されている。



データシート No SEU-4

出典; “Extensions of Burst Generation Rate Method for Proton/Neutron-Induced Single Event Effects” IEEE Transactions on Nuclear Science, 45,2904(1998).

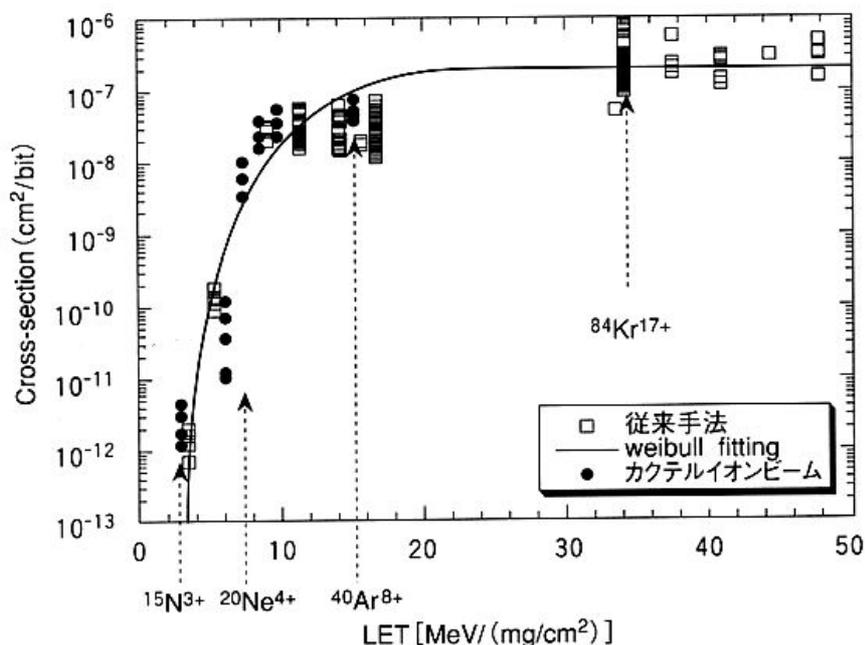
対象デバイス	各種SRAM (Static Random Access Memory)
実験目的	中性子と陽子照射によるソフトエラー率の比較
製作者	Micron、東芝。
品名	MT5C2568(Micron) : 32kb × 8、TC551001APL(Toshiba) : 128kb × 8
照射条件	陽子 10~100 MeV、中性子 12~160 MeV
測定	SEU(シングルイベントアップセット) 断面積
評価	図示したケースでは中性子によるSEUを陽子照射で模擬できることを示しているが、中性子の方が影響が高めに出ることがある。



データシート No SEU-5

出典; “SEU Testing using Cocktail Ion Beam” Proc. of the 3rd Int. Workshop on Radiation Effect on Semiconductor Device for Space Application, Takasaki, pp.154(1998).

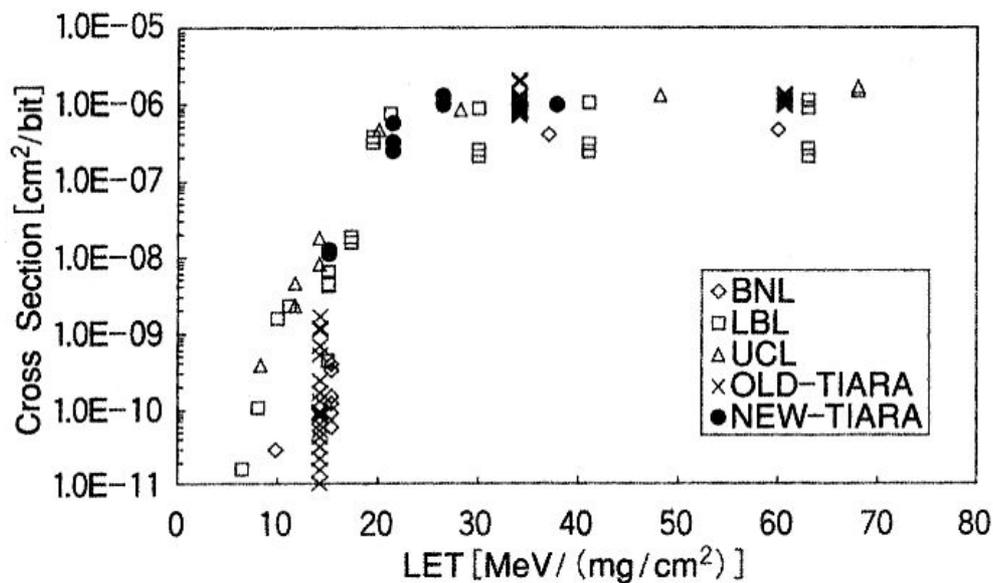
対象デバイス	256kbit SRAM (Static Random Access Memory)
実験目的	カクテルビームを用いたSEUのLET依存性の測定
製作者	記載なし。
形状(性能)	SRAM: 256kbit。
照射条件	TIARA M/Q(質量数/荷電数) = 5 カクテルビーム; $^{15}\text{N}^{3+}$ (56MeV)、 $^{20}\text{Ne}^{4+}$ (75MeV)、 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (150MeV)、 $^{84}\text{Kr}^{17+}$ (322MeV)。
測定	SEU(シングルイベントアップセット) 断面積
評価	イオン源を切り替え、LETの異なるイオンを加速する単一イオン法に比べて、短時間にイオン種(LET)を切り替えることができわめて効率的評価が可能。



データシート No SEU-6

出典: “宇宙用半導体デバイスについて—この10年の歩み—”、
放射線と産業 No 92, pp. 9(2001).

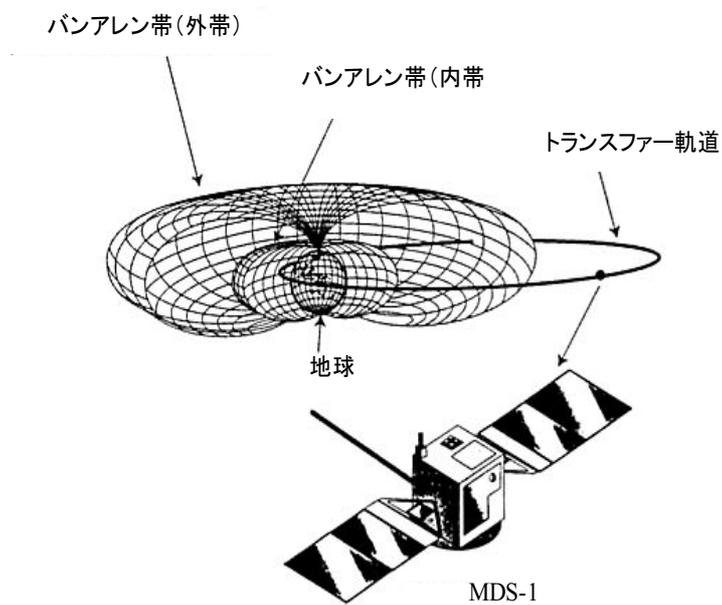
対象デバイス	64kbit SRAM(Static Random Access Memory)
実験目的	SEUのLET依存性のラウンドロビン試験
製作者	記載なし。
形状	SRAM: 64kbit
照射条件	$^{15}\text{N}^{3+}$ (56MeV)、 $^{20}\text{Ne}^{4+}$ (75MeV)、 $^{40}\text{Ar}^{8+}$ (150MeV)、 $^{56}\text{Fe}^{15+}$ (400MeV)、 $^{84}\text{Kr}^{17+}$ (322MeV)、 $^{129}\text{Xe}^{23+}$ (450MeV)
測定	SEU(シングルイベントアップセット) 断面積
評価	NBL、LBLなど他機関の照射施設で取得されたデータは良く一致。



データシート No SEU-7

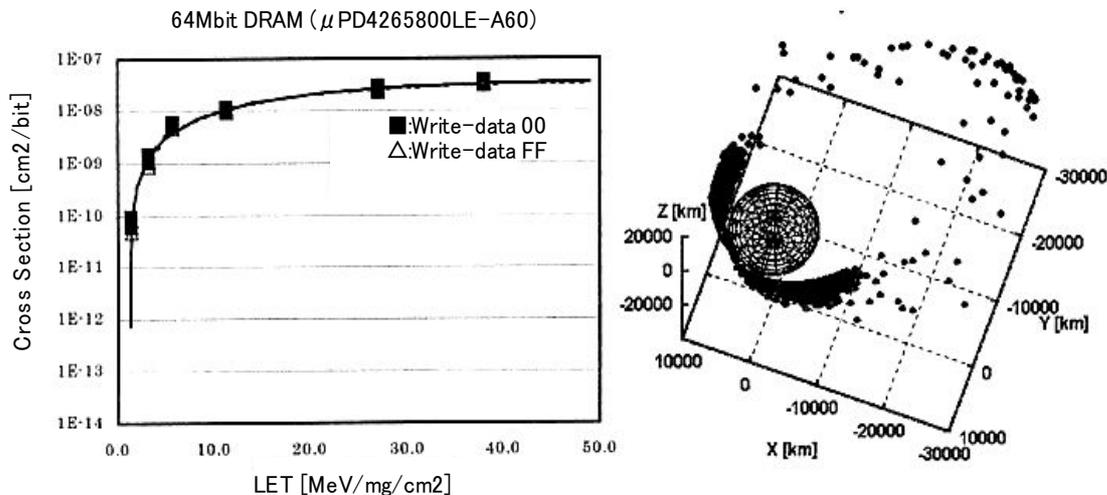
出典; “Evaluation Results of COTS on MDS-1 (Tsubasa) Verification Ground Test Validity by Flight Test” Proc.of The 5th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, pp.27(2002).

対象デバイス	64kbit SRAM, 4Mbit Dram (Static Random Access Memory)、1Mbit EEPROM, 4Mbit Flash memory
実験目的	コンポネント実証衛星 MSD-1 を用いた民生用半導体部品実験装置 (CSD; Commercial Semiconductor Devices) 地上SEU及びSEL試験結果との整合性の検証。
製作者	NEC、東芝、日立、Actel。
形状	実装品
照射条件	宇宙; MSD-1によるバンアレン帯を横切る起動(下図) 地上; TIARA(JAERI)加速器施設を使用した陽子及び重イオン。
測定	SEU 断面積(他に太陽電池についても実施)。
評価	宇宙実験と地上実験の間に良い整合性が得られた。



バンアレン帯の内帯と外帯を通過する周期10時間45分で周回軌道

No SEU-7 MSD-1 を用いた民生用半導体部品実験装置の試験(続き)



実験結果の例
 左;地上試験でのSEU発生確率のLET依存性
 右;軌道上でのSEU発生位置

SEU発生頻度と地上試験による予測値の比較

品 種	試料数	SEU発生頻度[回/day](軌道上)	SEU発生頻度[回/day](地上予測)
64Mbit DRAM (Type1)	2	24.2(S/N #1), 26.3(S/N #2)	35.8 (Proton), 2.1 (Heavy ion)
64Mbit DRAM (Type2)	2	6.8(S/N #1), 4.3(S/N #2)	4.6 (Proton), 0.2 (Heavy ion)
4Mbit SRAM (Type1)	2	4.4(S/N #1), 1.0(S/N #2)	3.1 (Proton), 3.5E-2 (Heavy ion)
4Mbit SRAM (Type2)	2	0.08(S/N #1), 0.17(S/N #2)	0.8 (Proton), 5.6E-3 (Heavy ion)
1Mbit EEPROM	2	0	< 1E-3 (Heavy ion)
4Mbit Flash memory	2	0	< 1E-3 (Heavy ion)
FPGA	2	0	< 1E-3 (Heavy ion)

データシート No SEU-8

出典; “Proton Irradiation Testing of Commercial Semiconductor Memories for MDS-1 project” Proc.of The 5th International Workshop on Radiation Effects on Semiconductor Devices for Space Application, pp.31(2002).10.5

対象デバイス	64kbit SRAM, 4Mbit Dram, (Static Random Access Memory) 1Mbit EEPROM, 4Mbit Flash memory
実験目的	7種類の民生用メモリのSEUに及ぼす陽子エネルギー依存性を調べ、既測定の高イオン照射効果との違いを明確にする。
製作者	NEC、東芝、日立、Actel
形状	実装品
照射条件	TIARA (JAERI)、Crocker Nuclear Lab.、Harvard Cyclotron Lab.での陽子照射、10~150 MeV、室温。
測定	SEU 断面積(他にSELについても実施)。
評価	陽子とシリコンとの核反応がSEUの原因。高イオンに対して低いLET閾値を持つメモリほど実軌道上の陽子の影響を受けやすい。

SEUの陽子エネルギー依存性(参考データ:高イオンによるSEU)							
デバイス	品名	メーカー	陽子の結果			高イオンの結果(参考)	
			Data written	C.S(sat) [cm ² /bit]	E _p th [MeV]	C.S(sat) [cm ² /bit]	LET _{th} [MeVcm ² /mg]
4Mbit SRAM	μPD434008LE-25	NEC	00	2.23E-14	14.3	2.92E-09	1.23
			FF	3.55E-14	13.8	6.14E-09	1.23
64Mbit DRAM	TC55400FTL-85	東芝	00	4.18E-15	10.9	1.67E-08	4.75
			FF	5.32E-15	11.9	1.91E-09	4.60
1Mbit EEPROM	μPD4265800LE-A60	NEC	00	1.73E-14	15.8	3.06E-08	2.15
			FF	1.59E-14	15.8	3.53E-08	1.84
4Mbit Flash memory	HM5165805ATT-6	日立	00	no SEU	>148.8	1.14E-12	1.69
			FF	4.02E-15	11.4	3.43E-08	3.99
PFGA	HN58C1001FPI-15	日立	00	no SEU	>148.8	no SEU	>63.1
			FF	no SEU	>148.8	no SEU	>63.1
PFGA	TC58F401F-10	東芝	00	no SEU	>148.8	-	<11.5
			FF	no SEU	>148.8	-	11.5-26.1
			S/00	-	-	1.96E-07	11.3
			F/00	-	-	2.25E-06	3.12
PFGA	A14100A-RQ208C	Actel	C/00	-	-	5.6E-07	18.6-27.6
			C/FF	-	-	5.7E-08	27.6-32.8
			C.S(sat): 飽和クロスセクション				
			E _p th: 閾陽子エネルギー				
			LET _{th} : 閾 LET				

データシート No Total Dose-1

出典：宇宙用耐放射線性素子の需要及び技術動向仕様書(2001年度日本原子力研究所委託業務成果報告書) 高信頼性部品株式会社、2002年3月

対象デバイス	マイクロプロセッサ(MPU、DSP)、ゲートアレイ(G/A)、フィールドプログラマブル・ゲートアレイ(FPGA)、メモリ
主な用途	宇宙用
製作者	NEC東芝スペースシステム(日)、NEC(日)、HIREC(日)、Honeywell(米)、Intersil(米)、UTMC(米)、ACTEL(米)、TEMIC(仏)、DYNEX(英)、ATMEL(欧)等
形状	実装デバイス
照射条件	γ線、イオン
測定	TID (Total Ionizing Dose) 耐性、SEL (Single Event Latch up) 耐性

宇宙用に適用可能な国内外の
マイクロプロセッサ、
ゲートアレイ、メモリのTID, SELを
次ページ以降に掲載する

品質レベルの内訳

Class 1	NASDA PPL(Preferred Parts List) NASDA QPL(Qualified Parts List)
Class K	米軍規格(MIL-PRF-38534)
Class V	同上準拠(MIL-PRF-38535)
Class S	日本規格(MIL-M-38510)

MIL: Military

データシート No Total Dose-1-2

マイクロプロセッサ(MPU、DSP)				
品名	6bitMPU (NASDA 38510/91501XZR)			
メーカー	NEC東芝スペースシステム(日)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
124pin CQFP	Class1	1	5	-40~85
品名	CMOS32bitMPU (NASDA 38510/92101XZ)			
メーカー	NEC(日)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
132pin CQFP	Class1	0.1	16	-20~85
品名	64bitMPU (NASDA R4901-IDFR, -IDFPR)			
メーカー	HIREC(日)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
304pin CQFP(放射線)	Class1	1	25	-40~85
品名	16bitMPU			
メーカー	Honeywell(5962H9684701QYC, 5962H9684702QYC)(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
200pin QFP (MCM)	Class Q	10	20	-55~125
品名	16bit CMOS MPU (5962R9572201QXC)(米)			
メーカー	Intersil(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
42pin FP	Class Q	1	5	-35~125
品名	16bit CMOS MPU (5962R9572201VXC)			
メーカー	Intersil(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
42pin FP	Class V	1	5	-35~125
品名	16bit MPU (5962R9858301QXA, 5962R9858301QXC)			
メーカー	Intersil(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
68pin QFP	Class Q	1	20	-55~125
品名	16bit MPU (5962R9858301VXA, 5962R9858301VXC)			
メーカー	UTMC(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
68pin QFP	Class V	1	20	-55~125
品名	32bit MPU (Mongoose)			
メーカー	Synoba(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
256pin QFP	Class V	1	10MHz/15MHz	-55~125
品名	32bit MPU (RAD750)			
メーカー	BAE(米)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
開発中	Class V	2	150	-55~125

データシート No Total Dose-1-3

マイクロプロセッサ(続き)

品名	32bit floating point DSP (TSC21020F-20MB)			
メーカー	TEMIC(仏)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
256pin QFP	EPPL LEVEL I	1	20	-55~125
品名	32bit floating point DSP (5962-9953901QXC)			
メーカー	TEMIC(仏)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
256pin QFP	Class Q	1	20	-55~125
品名	32bit floating point DSP (5962-9953901VXC)			
メーカー	TEMIC(仏)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
256pin QFP	Class V	NA	20	-55~125
品名	32bit MPU			
メーカー	TEMIC(仏)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
256pin QFP	Class V	3	35	-55~125
品名	16bit MPU (SOS構造)			
メーカー	DYNEX(英)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
64pin QFP	Class S	3	16	-55~125
品名	16bit MPU (SOS構造)			
メーカー	DYNEX(英)			
パッケージ	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	動作周波数(MHz)	動作温度範囲(°C)
64pin QFP	Class S	3	20MHz/25MHz	-55~125

データシート No Total Dose-1-4

ゲートアレイ(G/A)					
品名	100k gate CMOS GateArray				
メーカー	NEC(日)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
100k gate	5.0V	Class S	1	Cf-252で発生せず	-40~85
品名	1M gate CMOS GateArray				
メーカー	NEC(日)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
1M gate	3.3V(I/O 5V耐圧)	Class S	1	36[MeV/(mg/cm ²)]以上	-40~85
品名	UT0.6uCRH/SRH				
メーカー	UTMC(米)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
1M gate	5.0V/3.3V	Class Q	3	不明	-40~85
品名	UT0.25uCRH				
メーカー	UTMC(米)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
3.5M gate	5.0V/3.3V	Class Q	3	不明	-40~85
品名	MH1RT				
メーカー	ATMEL(欧)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
1.6M gate	3.3V/2.5V	Class Q	2	不明	-55~125
品名	MG2RTP				
メーカー	ATMEL(欧)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
350k gate	5.0V/3.0V	Class Q	3	不明	-55~125
フィールドプログラマブル・ゲートアレイ(FPGA)					
品名	RT54SX family FPGA(0.35umCMOS)				
メーカー	ACTEL(米)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
32k gate	3.3V	Class B以上	1	不明	-55~125
品名	RH1280 family FPGA				
メーカー	ACTEL(米)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
8k gate	5.0V	Class V	3	Immune	-55~125
品名	RT54SX-S family FPGA(0.25umCMOS)				
メーカー	ACTEL(米)				
ゲート数	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
72k gate	5.0V/3.3V/2.5V	Class B	1	Immune	-55~125

データシート No Total Dose-1-5

メモリ					
品名	UT7Q512				
メーカー	UTMC(米)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
512K×8 SRAM	5.0V	Class T,Q相当	3	100 [MeV/(mg/cm ²)]以上	-55~125
品名	UT8Q512K32				
メーカー	UTMC(米)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
16Mbit SRAM (MCM:512K×8bitの SRAMを4個搭載)	3.3V	Class T,Q	0.5	80 [MeV/(mg/cm ²)]以上	-55~125
品名	UT28F256 LV PROM				
メーカー	UTMC(米)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
32K×8bit PROM	3.3V	Class T,Q相当	10	128 [MeV/(mg/cm ²)]以上	-55~125
品名	UT28F256 PROM				
メーカー	UTMC(米)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
32K×8bit PROM	3.3V	Class V,Q	10	immune	-55~125
品名	M65609E				
メーカー	ATMEL(欧)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
128K×8 SRAM	3.3V	Class V	2	immune	-55~125
品名	T60142E(0.25umCMOS)				
メーカー	ATMEL(欧)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
512K×8 SRAM	3.3V	ESA SCC 9000	2	immune	-55~125
品名	M672061F				
メーカー	ATMEL(欧)				
容量	電源電圧	品質レベル	TID耐性(kGy(Si))	SEL耐性	動作温度範囲(°C)
16×9Parallel FIFO	0.3~7.0V	Class Q,V	-	-	-55~125

This is a blank page.

4. 各種機器・部品類

放射線場で使用される機器類の耐久性は、そこで使用されている耐放射線性が最も低い部品の素材の寿命で一義的に決まってしまう。一般的に、有機材料は金属やセラミックスに比べて耐放射線性が一桁あるいはそれ以上低い。したがって、電動機器類では絶縁材料やグリースなどの潤滑剤がその機器の耐久性を決定することになる。

電気的な絶縁に関しては、ターミナルのような可とう性が必要でなければ、セラミックスが使用できるし、可とう性必要であれば有機材料を使用せざるを得なくなる。電線の絶縁に使用する高分子でもポリテトラフルオロエチレン（PTFE、テフロン）のように数 10 kGy の照射で使用できなくなる材料から、放射線酸化反応が起こらなければ、数 100 MGy まで使用できるポリイミド系高分子まである。それぞれの高分子の可とう性を含めた力学的性質や電氣的性質を参照して材料選択をすることが肝要である。また、耐放射線性が低い材料を使用せざるを得ないときには、交換がし易い構造にするなどの考慮も必要がある。

高分子系材料、金属材料、セラミックスなど個々の材料に関する耐放射線性や耐環境性の研究は非常に多く、データも豊富であるが、こと機器・部品に関する放射線場における耐久性を系統的に調べた研究はほとんど無かったと言って過言ではない。その中で、国際熱核融合実験炉 ITER で使用するを念頭に置き、しかもその構成素材をきちんと把握しつつ行われている ITER 工学 R&D タスクにおいて日本チームが進めてきた遠隔保守装置用機器・部品に関する試験研究は卓越した成果である。この成果を中心に、大強度陽子加速器でも有用と思われるものを選択してまとめる。

データシート No Compo-1

出典;“市販潤滑油の耐放射線性” 日本原子力学会誌、25, 217(1983).

対象機器	市販潤滑油
目的	放射線場で使用するのに適した潤滑油の選択データの取得
製作者	各社市販品
使用材料・その他	石油系潤滑油及び合成潤滑油15種類。化学名、名称、分子量及び粘度は下表。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1 × 10 ⁴ Gy/h、室温、 真空中 (ガラスアンプル中)、 空气中及び酸素中 (酸素吹き込み)。
測定	JIS規格にしたがった比重、粘度、全酸価(Total Acid Number, TAN)、引火点、色測定。
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ほとんどの油は真空中、空气中、酸素中照射で粘度上昇。 ・エステル系及び PCTFEを除いたフッ素系潤滑油は真空中、空气中照射でも全酸価が増大。 ・炭化水素油は他の極性基を持つ油より耐放射線性が高い。 ・芳香族成分を有する油は照射による着色が著しい。

化学名	名称	分子量	粘度(cSt)
Liquid paraffin P-80	LP-80	330	14.8
Liquid paraffin P-350	LP-350	400	66.3
Parffinic neutral oil N-350	N-350	400	73.0
Parffinic neutral oil N-500	N-500	450	93.5
Poly-α-olefin	PAO	560	17.3
Di-2-ethylhexyl sebacate	DOS	426	11.4
Di-2-ethylhexyl adipate	DOA	370	7.6
Pentaerythritol ester	PET	640	43.0
Tricresyl phosphate	TCP	368	21.7
Trioctyl phosphate	TOP	434	7.7
Poly propylene glycol	PPG	3000	123.0
Di-methyl silicone	DMSi	1400	77.7
Polychlorotrifluoroethylene	PCTFE	900	49.7
Trifluoropropyl metyl polysiloxiane	TFPM	-	150.0
Perfluoropolyether	PFPE	3000	82.2

Compo-1
市販潤滑油の耐放射線性(続き)

γ線を1MGy照射したときの各種市販潤滑剤の粘度及び全酸化の変化						
名 称	粘度 η / η_0			Total acid number (mg KOH/g)		
	Vac.	Air	Oxygen	Vac.	Air	Oxygen
LP-80	1.09	1.11	1018.00	0.00	0.07	3.44
LP-350	1.14	1.14	1.30	0.00	0.06	3.64
N-350	1.08	1.10	1.37	0.00	0.02	4.18
N-500	1.08	1.09	1.44	0.10	0.02	3.43
PAO	1.99	0.99	1.07	0.00	0.07	5.51
DOS	1.24	1.23	1.15	5.04	6.49	15.60
DOA	1.19	1.17	1.22	5.31	7.22	15.40
PET	1.19	1.23	1.21	5.89	4.91	6.97
TCP	1.39	1.43	1.35	9.69	12.40	12.90
TOP	1.25	1.30	1.35	10.60	10.10	21.10
PPG	1.85	1.75	0.39	0.08	0.23	28.20
DMSi	5.78	3.48	1.68	0.02	0.06	0.32
PCTFE	1.29	1.73	0.82	0.34	2.18	28.10
TFFPM	1.77	1.85	0.99	14.10	16.20	13.70
PFPE	0.96	0.78	0.75	6.14	31.60	14.20

限界 $\eta / \eta_0 = 1.2$ 、限界TAN = 1.0mg/KOH/g としたときの使用限界線量				
名 称	Vac(MGy)		Oxygen	
	粘度 η / η_0	TAN	粘度 η / η_0	TAN
LP-80	1.65	-	1.05	0.35
LP-350	1.30	-	0.70	0.35
N-350	2.10	-	0.50	0.25
N-500	2.50	-	0.40	0.30
PAO	1.60	-	1.80	0.30
DOS	0.80	0.20	1.15	0.10
DOA	1.05	0.20	1.20	0.10
PET	1.05	0.15	0.95	0.15
TCP	0.50	0.10	0.65	0.05
TOP	0.80	0.10	0.50	0.05
PPG	0.25	-	0.25	0.05
DMSi	0.05	-	0.10	0.20
PCTFE	0.05	-	0.90	0.05
TFFPM	0.35	0.10	-	0.05
PFPE	0.90	0.05	0.50	0.05

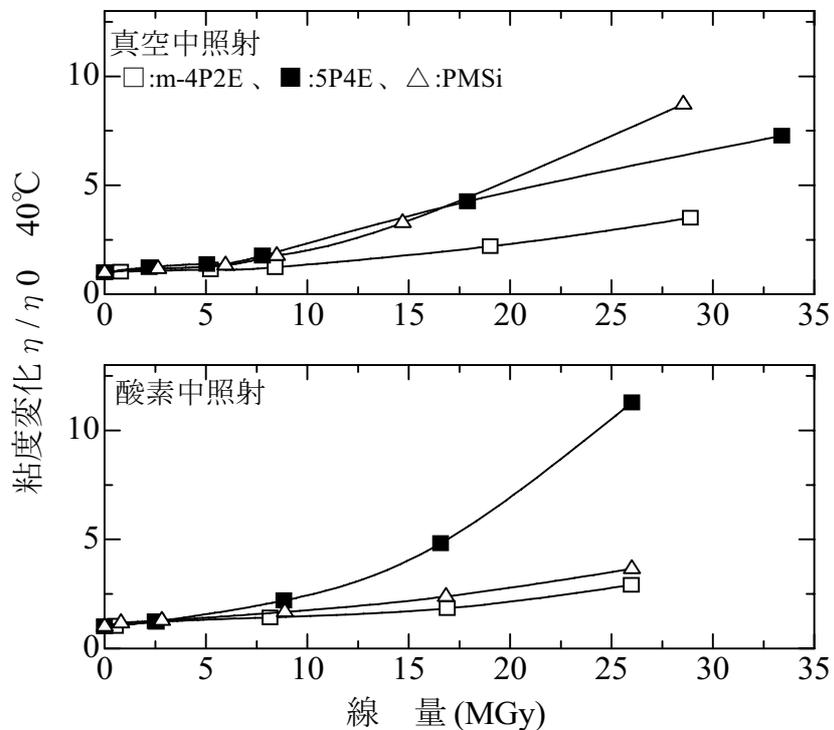
データシート No Compo-2

出典:“芳香族系潤滑油の耐放射線性” 日本原子力学会誌、26, 918(1984).

対象機器	芳香族系潤滑油
目的	放射線場で使用するのに適した潤滑油の選択データの取得
製作者／開発履歴	(株)村松石油研究所、モンサント、信越化学工業等／市販品
使用材料・その他	芳香族系油7種類。化学名、名称、分子量及び粘度等は下表。
照射条件	^{60}Co γ 線 1×10^4 Gy/h、室温、真空中(ガラスアンプル中)及び酸素中(酸素吹き込み)
測定	JIS規格にしたがった比重、粘度、全酸価(Total Acid Number, TAN)、引火点、色測定。
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・芳香族潤滑油は石油系潤滑油に比べて高い耐放射線性。 ・真空中、酸素中照射とも10MGy程度までは粘度変化が小さく、また油間での違いは少ないが、それ以上の線量域では化学構造の差が現れる。 ・5P4Eとm-4P2Eは耐放射線性が高く、m-4P2Eがよりすぐれている。トリフェニルエーテルとジフェニルエーテルの違いによる。 ・芳香族油でもアルキル基側鎖を持つと耐放射線性が低くなる。 ・一般に芳香族油は照射による色の変化が大きい。

化学名	名称	分子量	粘度(cSt)	芳香族炭素%
m-(m-Phenoxy phenenxy)diphenyl	m-4P24	338	124	100
Pentaphenyl ether	5P4E	446	286	100
Pentaphenyl trimethyl trisiloxane	PMSi	546	59.5	
Mono-alkyl diphenyl ether C-14	MADE:C-14	366	18.6	46
Mono-alkyl diphenyl ether C-16	MADE:C-16	349	21.2	43
Mono-alkyl diphenyl ether C-18	MADE:C-18	422	26.3	40
Di-alkyl diphenyl ether C-16	DADE:C-16	618	48.8	27
	C-14, C-16等はアルキル炭素数			
	MADE:C-14; C ₁₄ アルキル-φ-O-φを示す			

Compo-2
市販潤滑油の耐放射線性(続き)



限界 $\eta / \eta_0 = 1.2$ 、限界TAN = 1.0mg/KOH/g としたときの使用限界線量				
名称	Vac(MGy)		Oxygen	
	粘度 η / η_0	TAN	粘度 η / η_0	TAN
m-4P24	5.20	-	4.70	5.70
5P4E	2.80	-	2.30	3.00
PMSi	2.90	-	4.40	1.70
MADE:C-14	2.30	-	2.20	1.50
MADE:C-16	2.60	-	2.30	1.70
MADE:C-18	2.00	-	1.90	1.30
DADE:C-16	2.40	-	1.40	1.20

データシート No Compo-3

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 57(1999).

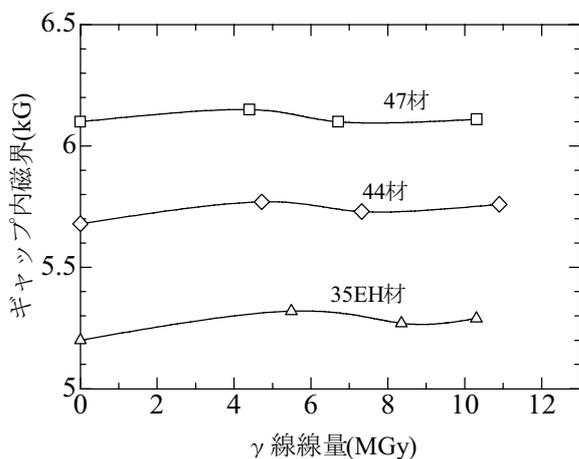
対象機器	耐放射線性グリース
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	(株)村松石油研究所／改良製品
使用材料・その他	ベースオイル GS-1: di-alkyl-tetra-phenylether (R2-4P2E) GS-4: tetra-phenylether (4P2E) GS-7: R2-4P2E+penta-phenylether (5P4E) GS-13-2: 4P2E+mono-alkyl-tetra-phenyl-ether (R-4P2E) 増ちょう剤: Bentnite, Powdered MoS ₂ , 酸化防止剤
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.37×10 ⁶ R/h、室温、 空気中 、積算線量;49.7 MGy
測定	重量減少(照射前)、照射後のちょう度
評価	許容線量;49.7 MGy ・GS-1, GS-7, GS-13-2, GS-4の順に放射線硬化 ・真空中150°Cでの重量減少はGS-4が最も高い

グリースの耐放射線性試験結果				
未照射グリースの真空中150°Cでの蒸発量				
グリース	蒸発量(%)			
	24hr	48hr	96hr	
GS-1	5.54	7.99	10.59	
GS-4	77.99	78.79	79.19	
GS-7	18.03	28.8	37.87	
GS-13-2	32.72	42.35	51.56	
グリース	ちょう度			
	未照射	1 MGy	5.1 MGy	10.2 MGy
GS-1	288	323	351	353
GS-4	266	265	265	258
GS-7	265	304	300	323
GS-13-2	265	219	293	290
ちょう度:グリースの硬さをいう。				
規定の円錐が規定時間に試料に進入する深さをミリメートルの10倍で表したもの。				

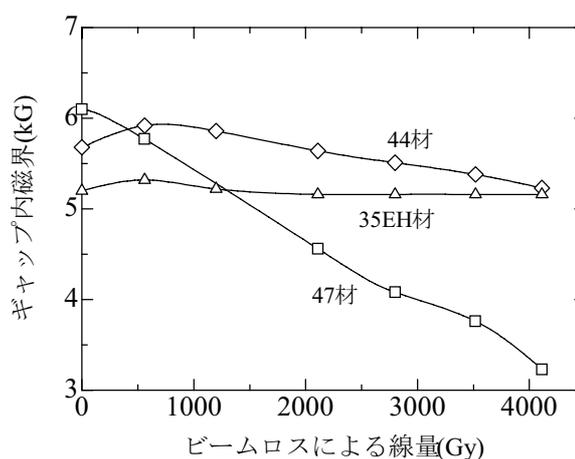
データシート No Compo-4

出典; “高い発生磁界を持つ永久磁石の放射線照射による劣化”

対象材料	Nd-Fe-B 焼結磁石
目的	セプタムマグネットへの使用適合性の評価
製作者/開発履歴	住友特殊金属(株)/市販品
使用材料	Nd-Fe-B 焼結磁石: NEOMAX 47, 44H, 35EH, 32EH
形状/寸法等	23.6mm × 23.6 × 34mm ³ (1.6mmのポールピース付き)。
照射条件	⁶⁰ Co γ 線(線量率記載なし)、14MeV 中性子(FNS、中性子束記載なし)、12GeV陽子(KEK-PS)。上記試料を鉄製磁気シールドに入れ照射。
測定	内径1.6mmのポールピース中に組入れたのスペーサー中のホール素子を用いた磁力測定。スペーサー;アクリル樹脂、アルミ材。
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・ γ線10MGyの照射では減磁なし。 ・ 14MeV 中性子 1×10^{13}個/cm²の照射で、47材;10.2%、44H材;1.8%、39SH材;0.7%、32E材;0.3%の減磁。照射後15日での磁性回復は、それぞれ1.0%、1.9%、2.5%、1.4%。 ・ 12 GeV陽子 1kGy当たり(EP2取りだしライン付近)の減磁は、47材;11.6%、44H材;3.7%、35EH材;1.0%。 ・ 陽子照射の場合、固有保磁力が高いほど減磁率が急激に減少。



10MGy以上の γ 線照射では減磁なし

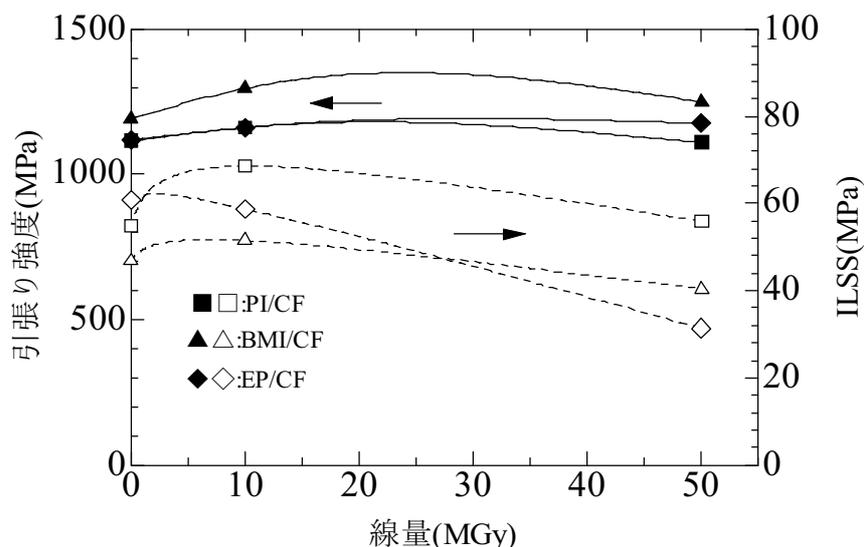


KEK-PS 主リング引き出し点付近の 12 GeV陽子で照射されたときの結果

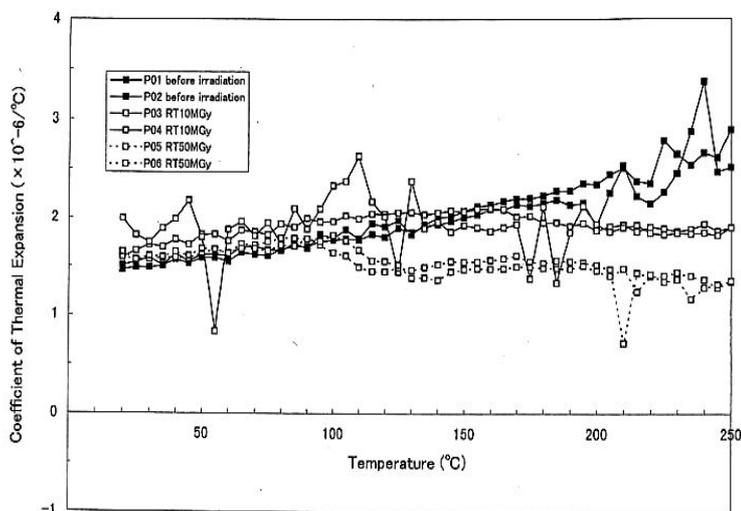
データシート No Compo-5

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 299(1999).

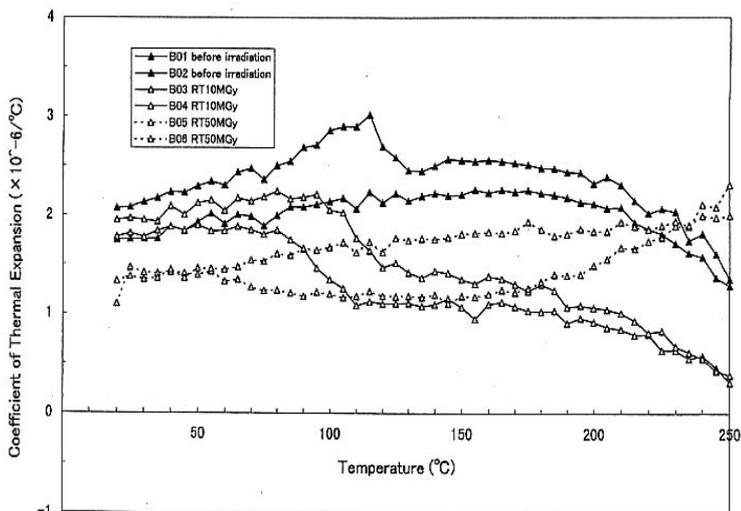
対象材料	炭素繊維強化複合材料(CFRP)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	三菱電機(株)/市販品
使用材料	炭素繊維強化(CF)/ポリイミド(PI)、ビスマレイミド(BMI)、エポキシ(EP)
性能等	引張り強度(MPa): PI/CF ;1100、BMI/CF ;1300、EP/CF ;1100 ILSS(Inter laminar shear strength, MPa): PI/CF ;55、 BMI/CF ;46、EP/CF ;60。 熱膨張係数(×10 ⁻⁶ °C at 20 °C):PI/CF ;1.5、BMI/CF ;1.8、 EP/CF ;1.4。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.4 × 10 ⁶ R/h、室温、空气中、積算線量;50 MGy
測定	引張り特性、ILSS、熱膨張係数、他。
評価	許容線量; PI/CF及びBMI/CF ; 50 MGy以上、EP/CF ;50 MGy ・ EP/CFの熱膨張係数は10MGy以上で急激に低下。 ・反射率は全て変わらず。



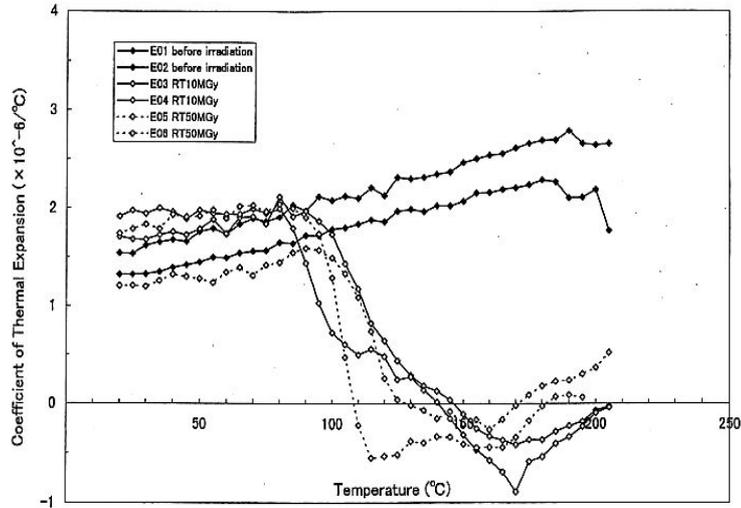
Compo-5(続き)
炭素繊維強化複合材料(CFRP)



PI/CFを10, 50 MGy
照射した時の熱膨張率



PMI/CFを10, 50 MGy
照射した時の熱膨張率

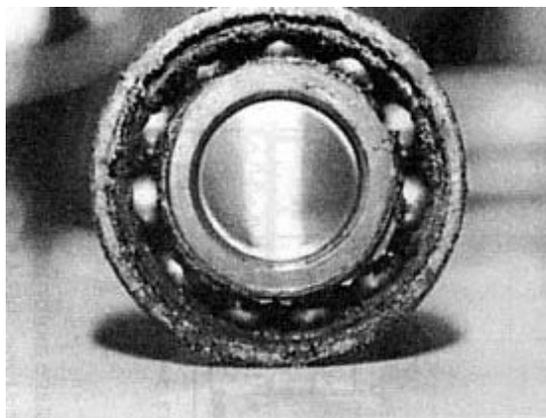


EP/CFを10, 50 MGy
照射した時の熱膨張率

データシート No Compo-6

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 59(1999).

対象機器	ACサーボモータ
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	(株)安川電機／新規開発
形状／性能等	260mm φ × 130mm、15 kg／100W、トルク;5.4 kgf-cm、回転数;1800rpm、パワーレート;0.3 kW/s
使用材料・その他	固定子・レゾルバー絶縁;セラミックス(SiO ₂)、耐放射線性グリース塗布ベアリング。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.5 × 10 ⁶ R/h、室温、 空気中 、積算線量;67 MGy
測定	照射中の電圧、電流、温度、照射終了後の目視
評価	許容線量;40~50 MGy ・ベアリング中のグリースの硬化による回転シャフトの固着。 ・電気的性能は不変。 ・全稼働時間;4, 475時間。



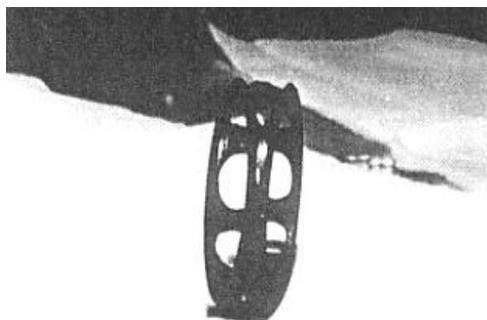
モータに使用したベアリングのグリースの 67MGy 照射後の状況。

グリースの硬化によりトラブルが発生したことが分かる。

データシート No Compo-7

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 63(1999).

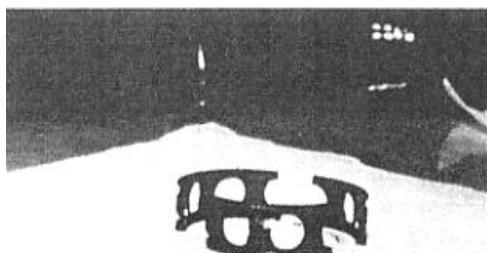
対象機器	ACサーボモータ
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	(株)安川電機／新規開発
形状／性能等	98mm φ × 175mm、6.2 kg／100W、トルク;5.3 kgf-cm、回転数;1800rpm、パワーレート;0.85 kW/s。
使用材料・その他	固定子・レゾルバー絶縁;セラミックス(SiO ₂)、自己潤滑合金(Cu-W) タイプリテーナー入りベアリング。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.34 × 10 ⁶ R/h、室温、真空中、積算線量;65 MGy
測定	照射中の電圧、電流、温度、照射終了後の目視
評価	許容線量; 55 MGy。 ・ベアリングリテーナーの摩滅、破損。 ・全稼働時間;4, 800時間。



モータに使用したベアリングリテーナーの 64.5 MGy 照射後の状況。

上; ブラケット側、
下; レゾーバー側。

トラブルはベアリングリテーナーの摩滅、破損により発生。

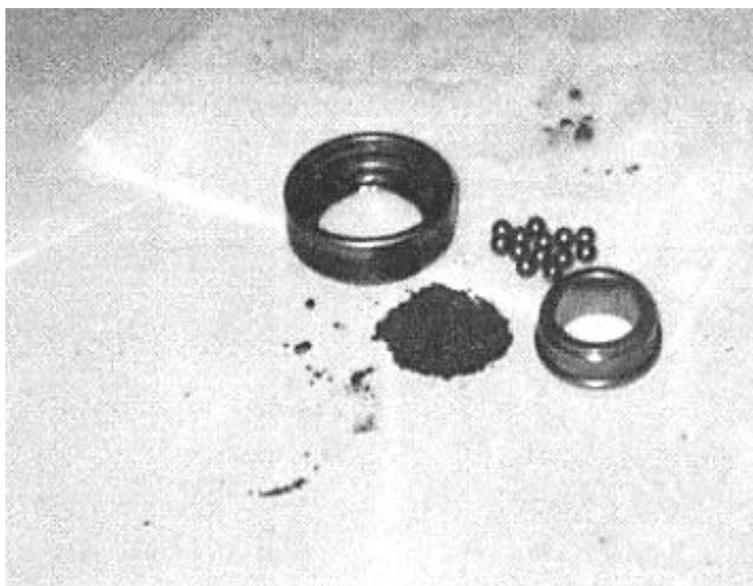


データシート No Compo-8

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR)

IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 67(1999).

対象機器	ACサーボモータ
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	(株)安川電機／新規開発
形状／性能等	80mm φ × 211mm、5 kg／462W、トルク;15 kgf-cm、回転数;3000rpm、パワーレート;29.3 kW/s。
使用材料・その他	固定子絶縁;セラミックス(SiO ₂)、レゾルバー絶縁;ポリイミド、自己潤滑合金(Cu-W) タイプリテーナー入りベアリング。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.01 × 10 ⁶ R/h、室温、真空中、積算線量;11 MGy
測定	照射中の電圧、電流、温度、照射終了後の目視
評価	許容線量;10 MGy。 ・ベアリングリテーナーの摩滅、破損。 ・全稼働時間;1, 074時間。



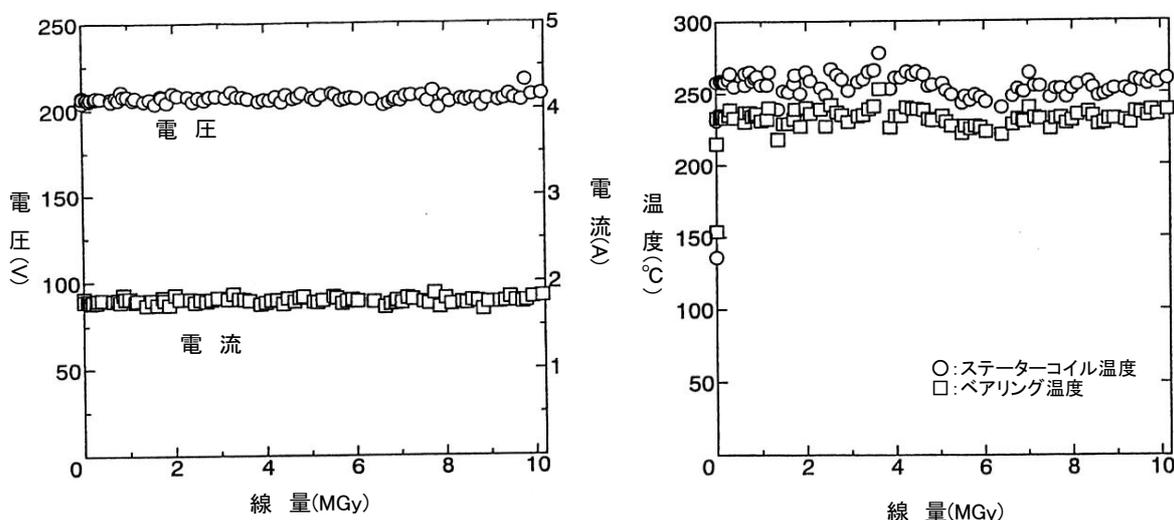
モータに使用したベアリングリテーナーは細かく粒状に破砕していた。

トラブルはベアリングリテーナーの摩滅、破損により発生。

データシート No Compo-9

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 72(1999).

対象機器	インダクションモータ
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)日立製作所/新規開発
形状/性能等	130mm φ × 225mm l、10 kg/400W、トルク;27 kgf-cm、回転数;1500rpm、パワーレート;29.3 kW/s。
使用材料・その他	固定子絶縁;ポリイミド、耐放射線性グリース入りベアリング
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5 × 10 ⁵ R/h、200 °C、N ₂ ガス中、積算線量;11.5 MGy
測定	照射中の電圧、電流、温度、照射終了後の目視
評価	許容線量;10 MGy ・ベアリング中のグリースの硬化による回転シャフト固着。 ・電気的性能は不変。 ・全稼働時間;2, 000時間。 ・新しいベアリングに交換して100MGyまでのテストを予定。



運転電圧・電流値(左図)は10MGy照射によっても不変。固定子の温度とベアリング温度(右図)も10MGy照射によっても不変。

データシート No Compo-10

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 78(1999).

対象機器	熱可塑性ポリイミドリテーナーを使用ボールベアリング(Type A)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)安川電機/改良製品
形状/性能等	42mm(外周)φ × 20mm(内周)φ × 12mm t。
使用材料・その他	リテーナー材質;熱可塑性ポリイミド“AURAM”、スライド潤滑剤;MoS ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.95 × 10 ⁵ R/h、室温、 真空中、空气中 、積算線量; 0.52 MGy
測定	インダクションモータの両軸に取り付け、回転数1500rpm、6.75kgf 予圧・照射下の電圧、電流、温度
評価	2組は真空中照射、1組は照射なしの真空テストを行った。 ・照射下での全運転時間;70時間、照射なしでの全運転時間; 402時間。 ・熱可塑性ポリイミド製リテーナーの放射線劣化が原因。

Specimen No	Test conditions				Temp.	Running Time(hr)	Irradiation Time (hr)	Dose (MGy)
	Irradiation	Air	Vac.	Inert gas				
A-1, 2	√		√		R.T.	78.9	58.1	0.35
A-3, 4	√		√		R.T.	88.3	86.8	0.52
A-5, 6			√		R.T.	402.2		

データシート No Compo-11

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 85(1999).

対象機器	熱硬化型ポリイミドリテーナーを使用ボールベアリング(Type B)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)安川電機/改良製品
形状/性能等	42mm(外周)φ × 20mm(内周)φ × 12mm t。
使用材料・その他	リテーナー材質;熱硬化型ポリイミド“VESPEL”、スライド潤滑剤;MoS ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.95 × 10 ⁵ R/h、室温、 真空中、空气中 、積算線量; 0.38 MGy
測定	インダクションモータの両軸に取り付け、回転数1500rpm、6.75kgf予圧・照射下の電圧、電流、温度
評価	2組は真空中照射、1組は照射なしの真空テストを行った。 ・照射下での全運転時間;63時間、照射なしでの全運転時間;670時間。 ・熱可塑性ポリイミド製リテーナーの放射線劣化が原因。 ・熱可塑性・熱硬化性ポリイミドには差が認められない。

Specimen No	Test conditions					Running Time(hr)	Irradiation Time (hr)	Dose (MGy)
	Irradiation	Air	Vac.	Inert gas	Temp.			
B-1, 2	√		√		R.T.	71.2	63.1	0.83
B-3, 4	√		√		R.T.	45.4	53.1	0.31
B-5, 6			√		R.T.	670.3		

データシート No Compo-12

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 89(1999).

対象機器	PEEK リテーナー使用をボールベアリング(Type C)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)安川電機/改良製品
形状/性能等	42mm(外周)φ × 20mm(内周)φ × 12mm t。
使用材料・その他	リテーナー材質;熱可塑性芳香族高分子ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)”,スライド潤滑剤;MoS ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.95 × 10 ⁵ R/h、室温、 真空中、空气中 、積算線量; 3.09 MGy
測定	インダクションモータの両軸に取り付け、回転数1500rpm、6.75kgf予圧・照射下の電圧、電流、温度
評価	2組の真空中照射、1組の空气中照射、1組の照射なしの真空テストを行った。 ・真空中照射では、530時間と155時間と違いが見られた。 ・照射なしでは670時間の全運転時間。 ・PEEK 製リテーナーの放射線劣化が原因。 ・熱可塑性・熱硬化性ポリイミド及びPEEKの間では差が認められない。

Type C ボールベアリング連続運転テスト結果								
Specimen No	Test conditions					Running Time(hr)	Irradiation Time (hr)	Dose (MGy)
	Irradiation	Air	Vac.	Inert gas	Temp.			
C-1, 2	√		√		R.T.	527.1	519.5	3.09
C-3, 4	√		√		R.T.	155.2	10.0	0.06
C-5, 6			√		R.T.	410.8		
C-9, 10		√			R.T.			
2C-1, 2*	√	√			R.T.			
*:C- とはロット違い								

データシート No Compo-13

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR)

IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 93(1999).

対象機器	自己潤滑合金リテーナーを使用ボールベアリング(Type D)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)安川電機/改良製品
形状/性能等	42mm(外周)φ × 20mm(内周)φ × 12mm t。
使用材料・その他	リテーナー材質;自己潤滑W-Cu合金”,スライド潤滑剤;MoS ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.95 × 10 ⁵ R/h、室温、真空中、空气中、積算線量; 3.03 MGy
測定	インダクションモータの両軸に取り付け、回転数1500rpm、6.75kgf予圧・照射下の電圧、電流、温度
評価	2組の真空中照射、2組の空气中照射、1組の照射なしの真空テスト、2組の照射なしの空气中テストを行った。 ・真空中照射と空气中照射にはほとんど差が認められない。 ・照射がない状態では真空中、空气中にかかわらず極めて長く運転できる。 ・Type DはType A-Cに比べて性能的に優れる。

Type D ボールベアリング連続運転テスト結果								
Specimen No	Test conditions					Running Time(hr)	Irradiation Time (hr)	Dose (MGy)
	Irradiation	Air	Vac.	Inert gas	Temp.			
D-1, 2	√		√		R.T.	320.6	260.2	1.55
D-3, 4	√		√		R.T.	138.1	134.1	0.80
D-5, 6			√		R.T.	2019.0		
2D-1, 2*	√	√			R.T.	341.8	340.0	3.03
2D-3, 4*	√	√			R.T.	247.6	245.9	2.19
2D-5, 6*		√			R.T.	187.8		
2D-7, 8*		√			R.T.	1400.1		

*:D- とはロット違い

データシート No Compo-14

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 99(1999).

対象機器	SS310 焼結合金リテーナーを使用ボールベアリング(Type E)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)安川電機/改良製品
形状/性能等	42mm(外周)φ × 20mm(内周)φ × 12mm t。
使用材料・その他	リテーナー材質;自己潤滑W-Cu合金”,スライド潤滑剤;MoS ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.95 × 10 ⁵ R/h、室温、真空中、空气中、積算線量; 16.4 MGy
測定	インダクションモータの両軸に取り付け、回転数1500rpm、6.75kgf予圧・照射下の電圧、電流、温度
評価	2組の真空中照射、2組の空气中照射、1組の照射なしの真空テスト、2組の照射なしの空气中テストを行った。 ・他のタイプのものに比べて極めて長いランニング時間。 ・照射のあるなしにかかわらず、真空中では空气中に比べて長いランニング時間。 ・Type EはType Dに比べても良好なベアリング。

Specimen No	Test conditions					Running Time(hr)	Irradiation Time (hr)	Dose (MGy)
	Irradiation	Air	Vac.	Inert gas	Temp.			
E-1, 2	√		√		R.T.	1320.5	1232.3	11.00
E-3, 4	√		√		R.T.	2942.6	1838.7	16.40
E-5, 6			√		R.T.	1991.9		
2E-1, 2*	√	√			R.T.	788.4	771.2	0.69
2E-3, 4*	√	√			R.T.	860.1	854.0	7.62
2E-5, 6*		√			R.T.	1418.9		
2E-7, 8*		√			R.T.	167.7		

*:E- とはロット違い

データシート No Compo-15

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 105(1999).

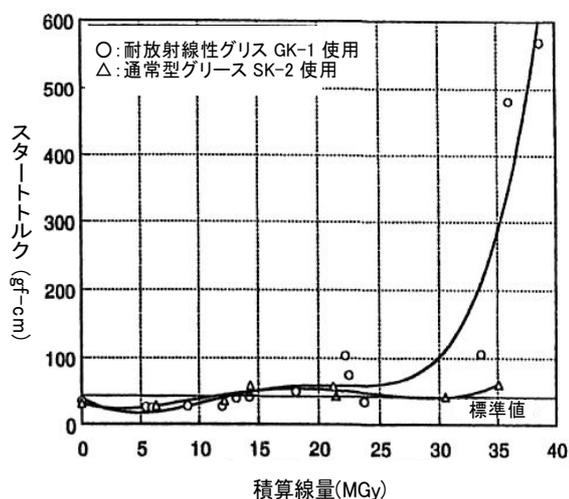
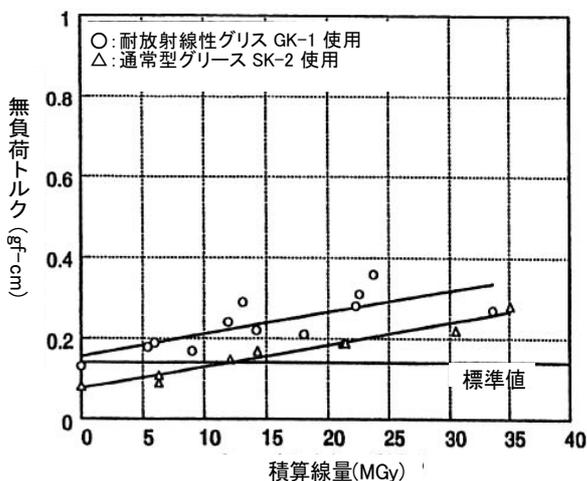
対象機器	セラミックスボールを使用したボールベアリング(Type F)
目的	核融合実験炉用耐放射線性遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	光洋精工/改良製品
形状/性能等	42mm(外周)φ × 20mm(内周)φ × 12mm t。
使用材料・その他	ボール材質;セラミックス(SiN) [™] 、スライド潤滑剤;MoS ₂ 。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 5.95 × 10 ⁵ R/h、室温、 真空中 、 空気中 、積算線量; 11.6 MGy
測定	インダクションモーターの両軸に取り付け、回転数1500rpm、6.75kgf予圧・照射下の電圧、電流、温度
評価	3組の真空中照射、1組の照射なしの真空テストを行った。 ・照射のあるなしにかかわらず、真空中でのランニング時間がばらついた。 ・加えてこのタイプは多少扱いにくい。

Specimen No	Test conditions					Running Time(hr)	Irradiation Time (hr)	Dose (MGy)
	Irradiation	Air	Vac.	Inert gas	Temp.			
F-9, 10	√		√		R.T.	43.9	43.8	0.39
F-15, 16	√		√		R.T.	1369.7	1299.4	11.60
F-17, 18	√		√		R.T.	25.5	2.1	0.02
F-3, 4			√		R.T.	2041.3		

データシート No Compo-16

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 109(1999).

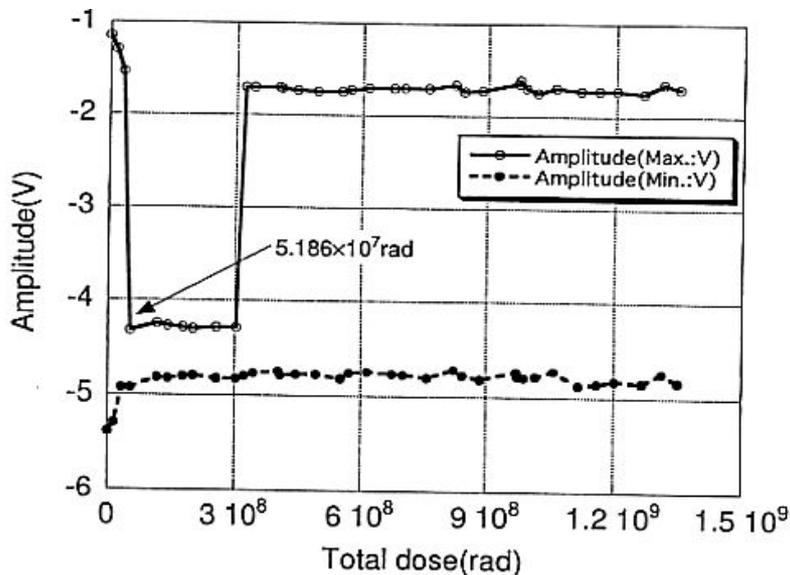
対象機器	減速ギヤボックス(Harmonic Drive™)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	Harmonic Drive Systems Inc./市販品
形状/性能等	33 mm φ × 76 mm l、125g/減速比1/50、トルク;15kgf・cm、入力回転数;3500rpm。
使用材料・その他	Al合金(筐体)、Ni-Cr-Mo鋼、炭素鋼、潤滑剤;SK-2(通常型)及びGK-1(耐放射線性)グリース。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.1 × 10 ⁶ R/h、室温、 空気中 、積算線量;30MGy (SK-2 used)、40 MGy(GK-1 used)
測定	ギヤボックス;スターティングトルクなど、グリース;粘度など
評価	許容線量;30MGy (SK-2 used)、25 MGy(GK-1 used)。 ・ギヤボックスの性能変化はグリースの変成による。 ・GK-1を用いているギヤボックスのスタートトルクは25MGyで急増。 ・SK-2グリースは照射をはじめると直ぐ筐体からしみ出した。



データシート No Compo-17

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 113(1999).

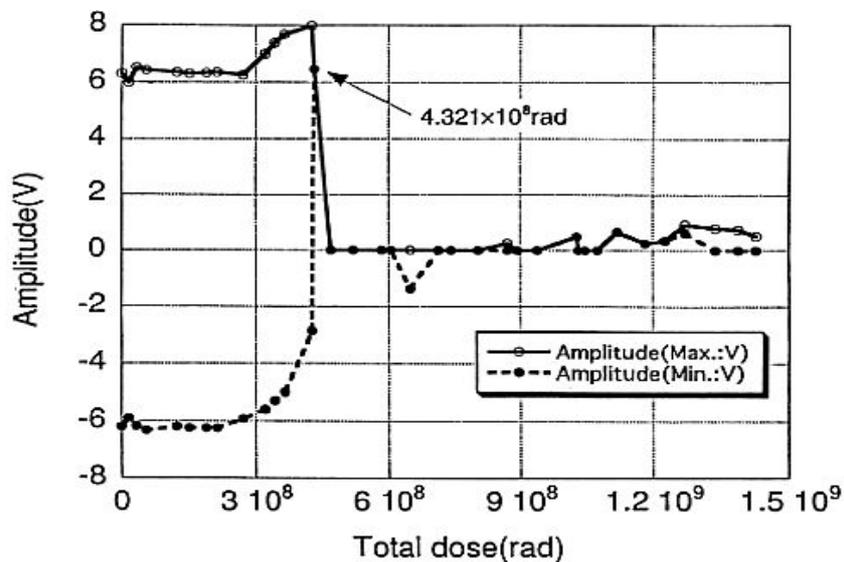
対象機器	ポテンシオメーター(Wirewound type)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	緑測器/市販品(CP-4M)
形状/性能等	36.5 mm ϕ \times 20.5mm l、50g/入力抵抗;1k Ω 、回転角:350 $^\circ$ 、リニアリティー; \pm 0.5、トルク;8 gfcm。
使用材料・その他	主な材料;Al合金、Cu、Ni、Fe。
照射条件	^{60}Co γ 線 9.36×10^5 R/h、室温、空气中、積算線量;14.3MGy
測定	照射下でのサイクリックローテーション振幅
評価	許容線量; 0.14MGy。 ・照射開始15時間後に振幅がドリフトし、58時間後に振幅がゼロレベルに。 ・ポテンシオメーター内部のアクチュエーターの損傷に起因と考えられる。



データシート No Compo-18

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 120(1999).

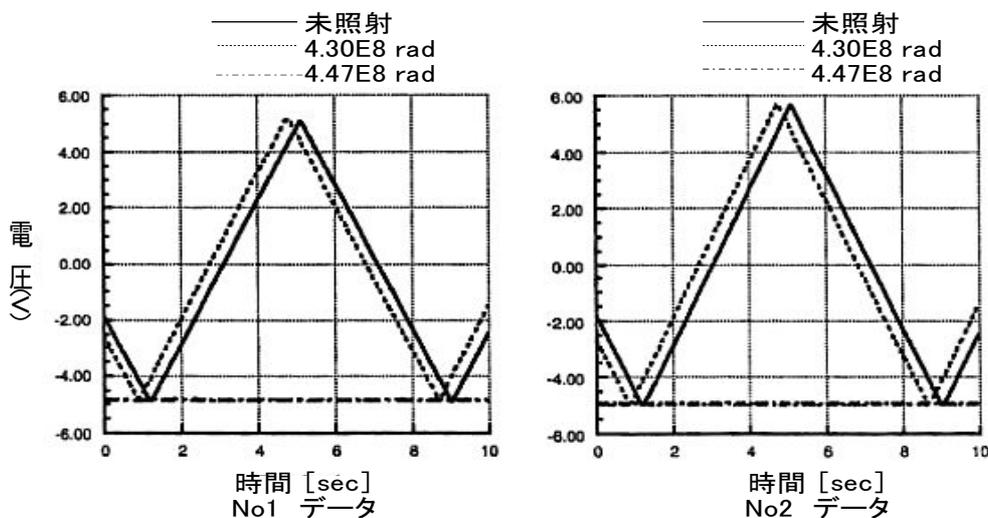
対象機器	ポテンシオメーター(Magnet resistive type)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	緑測器/市販品(CP-2URBM)
形状/性能等	30 mm φ × 100mm l、50g/入力抵抗;15k Ω、回転角:±45°、リニアリティー;±1.5、トルク;5 gfcm。
使用材料・その他	主な材料;Al合金、Cu、Ni、Fe。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 9.36 × 10 ⁵ R/h、室温、空气中、積算線量;13.5MGy
測定	照射下でのサイクリックローテーション振幅
評価	許容線量; 2.5 MGy。 ・照射開始290時間後に振幅がドリフトし、456時間後に振幅がゼロレベルに。 ・ポテンシオメーター内部のアクチュエーターの損傷に起因と考えられる。



データシート No Compo-19

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 125(1999).

対象機器	差動トランス(LVDT)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	新光電子(株)/市販品(ST-2)
形状/性能等	12 mm φ × 87mm l、100g/周波数;300 kHz、発生電圧: 1V _{rsm} 、出力: ±4V、入力インピーダンス:200 Ω。
使用材料・その他	主な材料;真ちゅう、エポキシ樹脂、SS。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 9.71 × 10 ⁵ R/h、室温、N ₂ ガス中、積算線量;4.5MGy
測定	照射下でのサイクリック直線移動による出力電圧変化
評価	許容線量; 4.3 MGy。 ・3個のLVDTを窒素ガス雰囲気チェンバーに入れ同時照射。 ・4.5 MGy照射後、出力電圧は検知できなかった。

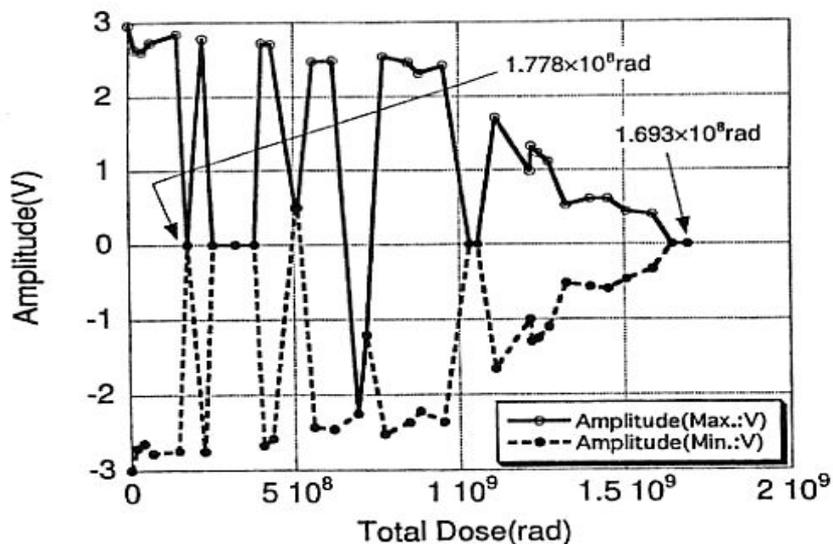


4.3 × 10⁸ rad (4.3 MGy) の照射ではほぼ健全であったが、4.5 MGy の照射で出力は検出できなかった。3番目の差動トランスも同じ結果が得られた。

データシート No Compo-20

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 128(1999).

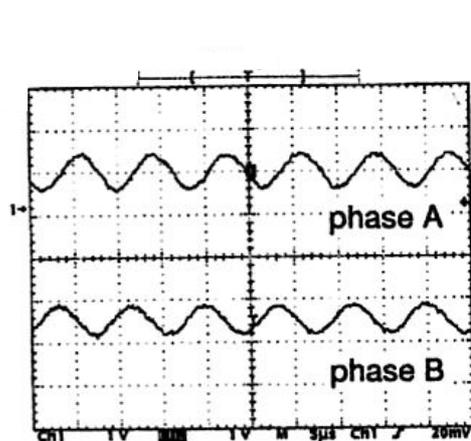
対象機器	シンクロナスレゾルバー
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	ミネベア(株)／市販品(23BCX-9007-A01)
形状／性能等	57 mm φ × 127mm l、100g／周波数;50/60 Hz、一次電圧:100V、二時電圧:90V、入力インピーダンス:700 Ω。
使用材料・その他	記述なし。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.11 × 10 ⁶ R/h、室温、 空气中 、積算線量;17.7 MGy
測定	照射下でのサイクリック回転による振幅変化
評価	許容線量;1.8 MGy ・1.8 MGy照射後、振幅レベルが一定でなくなった。 ・1.7 MGy照射で、信号がゼロレベルになった。回転機構の損傷と考えられる。



データシート No Compo-21

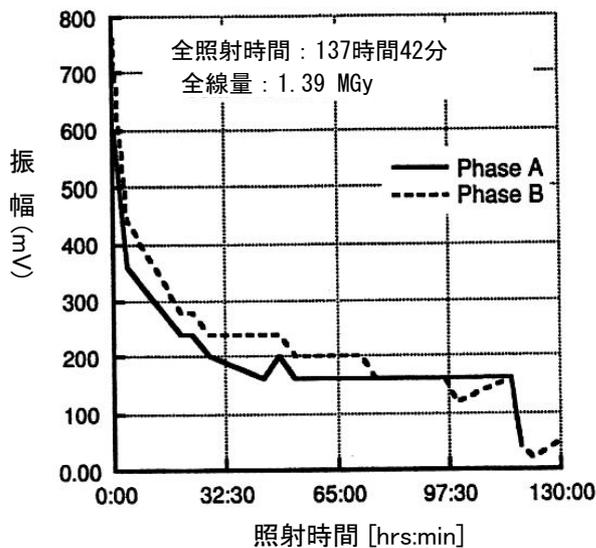
出典:“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 134(1999).

対象機器	光ファイバ使用ロータリーエンコーダ
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	(株)Fujikura Co./市販品(FMI-30-2000)
形状/性能等	40 mm φ × 42mm l、50g/アウトプット;3相(phase A, B, Z)、ファイバ(耐放射線性型に非ず)、分解能:2000 ppr、回転数:6000 rpm、応答周波数:100 kHz、使用温度範囲:-10~60°C。
使用材料・その他	記述なし。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.01 × 10 ⁶ R/h、室温、N ₂ ガス中、積算線量;1.4 MGy
測定	照射下でのサイクリック回転による振幅変化
評価	許容線量;1.1 MGy ・1.1~1.2 MGy 照射後に出カシグナルが検知できなくなった。



照射開始30分後の波形

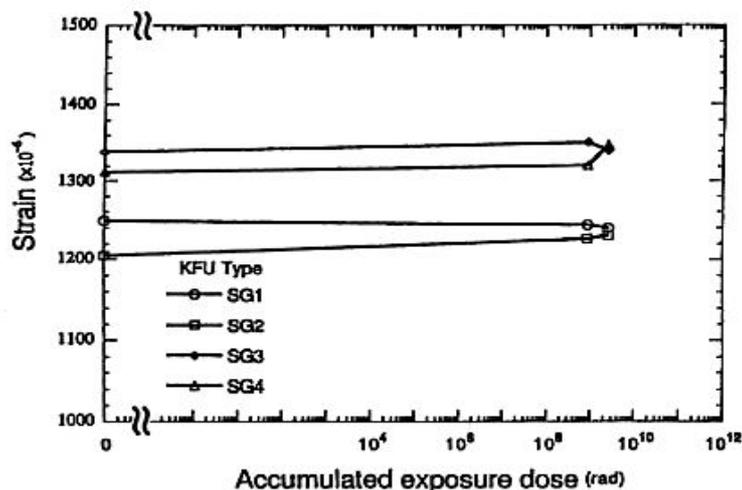
照射時間と共に振幅が減少し、
118時間の照射で出力ゼロ



データシート No Compo-22

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 137(1999).

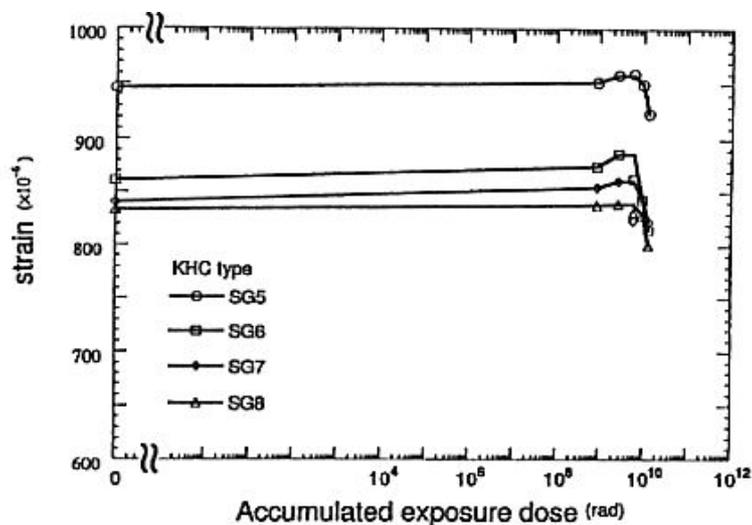
対象機器	ストレインゲージ(Foil type)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	Kyowa Electronic Instruments Co. /市販品(KUF)
形状/性能等	使用温度範囲:-196~350℃。
使用材料・その他	ゲージ: Ni-Cr、ベース: ポリイミド/Al ₂ O ₃ 、接着: ポリイミド/Al ₂ O ₃ 、リード線: 高分子被覆 Niメッキ Cu。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.5 × 10 ⁶ R/h、室温、 空気中 、積算線量;127 MGy
測定	照射下で一定ストレス負荷でのストレインシグナル取得。リード線の抵抗変化、ゲージの電気特性、周期的ロード負荷試験。
評価	許容線量;20 MGy ・24.5 MGyの照射後シグナルは検出できず。 ・80 MGyの照射後リード線抵抗;0.2~12MΩ(未照射時無限大)。 ・ゲージベースとリード線間抵抗:1.6 × 10 ⁵ (未照射) → 1.2 × 10 ⁴ MΩ(80 MGy)。 ・周期的ロード負荷試験は良好な結果。ヒステリシス2%以下。



データシート No Compo-23

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 142(1999).

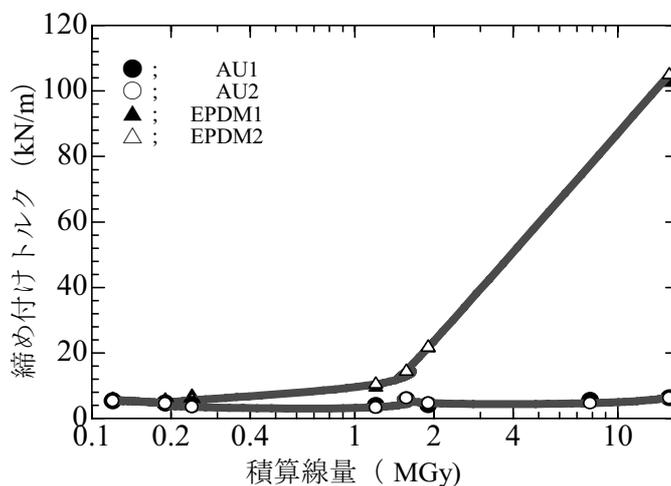
対象機器	ストレインゲージ(Capsule type)
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者/開発履歴	Kyowa Electronic Instruments Co. /市販品(KHC)
形状/性能等	使用温度範囲:-196~550°C。
使用材料・その他	ゲージ: Ni-Cr-V、ベース: SS316、接着: ポイント溶接、リード線: MIケーブル(MgO絶縁カバー/SSチューブ)。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 1.5 × 10 ⁶ R/h、室温、空气中、積算線量; 127 MGy
測定	照射下で一定ストレス負荷でのストレインシグナル取得。
評価	許容線量; 20 MGy ・ 24.5 MGyの照射後何らトラブルなし。 ・ 20 MGy付近のシグナルの変化はゲージの溶接時応力解放によると推定。



データシート No Compo-24

出典;“HIGH GAMMA-RAYS IRRADIATION TESTS OF CRITICAL COMPONENTS FOR ITER(INTERNATIONAL THERMONUCLEAR EXPERIMENTAL REATOR) IN-VESSELL REMOTE HANDLING SYSTEM” JAERI-TECH 99-3, 305(1999).

材料／用途	エラストマー(EP-ゴム、ウレタン)／ガスケット
目的	核融合実験炉用遠隔操作機器の開発データ取得
製作者／開発履歴	記載なし／市販品
形状／性能等	内径;54.5 ± 0.25 mm、リング径;4 ± 0.1mm(JIS V-55準拠)／引張り強度 EPDM / AU ;16.4/40 MPa、破断伸び;共に800%、使用温度域; -60～150/-60～80 °C。
使用材料・その他	エチレンプロピレン共重合体(EPDM)、ウレタン(AU)。
照射条件	⁶⁰ Co γ線 2.4×10 ⁴ R/h、1.9×10 ⁵ R/h、1.57×10 ⁶ R/h 室温、空気中、積算線量;15.7 MGy
測定	表面観察、硬度、シール能力。
評価	許容線量; 0.9 MGy (フランジへの粘着が起こる線量、許容リーク速度限界値を超えたときの線量、照射後のトルクスパナによる締めつけトルクが照射前の値と変わらない限界線量で評価)。 ・EPDMガスケットは線量と共に表面がベタ付くが内部は硬くなる。 ・AUガスケットはベタ付く。

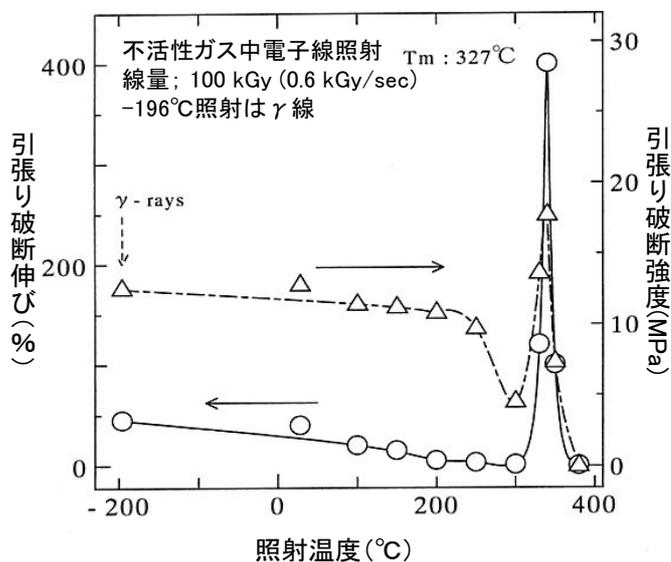


照射によるガスケットの硬さ変化。
硬さは未照射物の25%の厚さにつぶすときの締めつけトルクで評価。

データシート No Compo-25

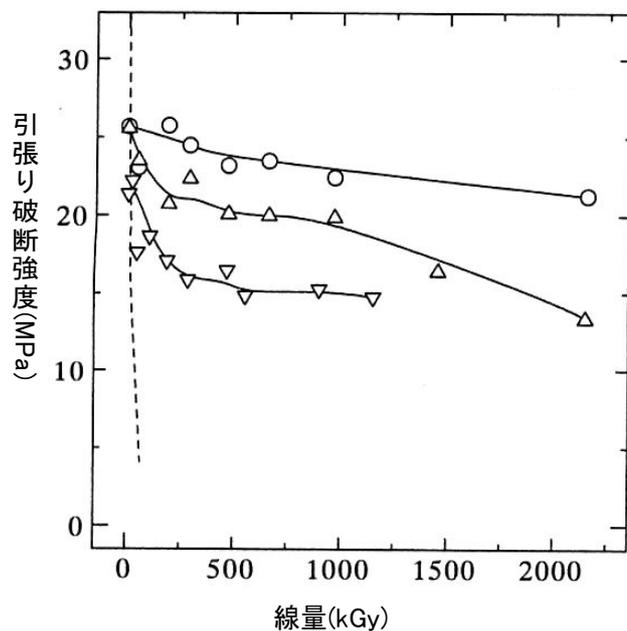
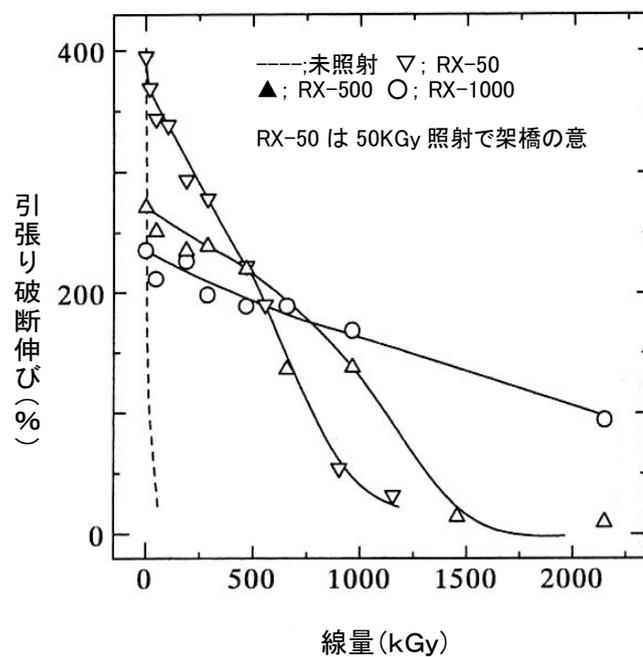
出典; “Radiation Induced Crosslinking of Polytetrafluoroethylene” Radiat. Phys. Chem., 45, 269(1995). “Improvement of Radiation Resistance for polytetrafluoroethylene (PTFE) by Radiation Crosslinking” Radiat. Phys. Chem., 49, 279 (1997).

対象材料	ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)
目的	PTFEの放射線架橋と耐放射線性の検討
製作者/開発履歴	原研高崎研究所/開発研究
特徴/性能等	放射線崩壊型 PTFE を融点付近で放射線照射により得られる耐薬品・耐熱性の半透明性シート。
使用材料・その他	焼結 PTFE シート
照射条件	2MeV電子; 0.6 kGy/sec、アルゴンガス中室温~380°C、 ⁶⁰ Co γ線 29.6kGy/h、8.85kGy/h、77K、 真空中
測定	引張り特性、熱分析、動的粘弾性測定。
評価	<ul style="list-style-type: none"> ・極低温~常温で照射すると、主査切断のみが起こるが、融点(327°C)近傍で照射すると放射線架橋が起こる。 ・透明性が付与され、良好な機械特性を示し、耐放射線性もきわめて高くなった。



照射温度が高くなるにつれて引張り破断強度・伸びが低下する。
 しかし、融点近傍で照射すると共に急激に増大 ⇒ 架橋の生成

No Compo-25 PTFEの放射線架橋(続き)



高温照射架橋したPTFEの真空中 γ 線照射による機械的特性変化
 架橋により 耐放射線性が極めて高くなる

データシート No Compo-25-2

出典：“耐摩耗性や耐放射線性を大幅に向上させたフッ素樹脂の開発に成功”
 科学技術振興事業団報 第248号

対象材料	高温放射線架橋ポリテトラフルオロエチレン (PTFE)
目的	良好な電気特性を持つ耐薬品・耐熱性材料の開発
製作者／開発履歴	日立電線(株)／開発・市販品
特徴／性能等	耐薬品・耐熱性を活かしたブロック、シート、リング等。
使用材料・その他	架橋PTFE成型体
照射条件	2MeV電子;窒素ガス中、室温～380℃
評価	PTFE本来の特長である滑り性や耐熱性を保ちつつ、耐摩耗性や耐クリープ性、耐放射線性を大幅に向上させた材料である。潤滑性・耐摩耗性が要求され、かつ耐放射線が要求される各種分野へ適用されることが期待される。



謝 辞

本報告の作成の基本資料は、財団法人 放射線利用振興協会を通し、原子力機構 OB の貴家恒男氏にとりまとめをお願いしたものであります。非常に範囲の広い分野の材料・機器について、耐放射線の観点からの試験データを収集することは多大な時間を必要とし、データの見易さのためには共通の様式にまとめていただきました。ここに深甚な感謝の意を表します。

また、この資料をまとめるにあたり報告集の方向性、内容について議論をし、貴重なコメントをいただきました原子力機構量子ビーム応用研究部門環境・産業応用研究開発ユニット半導体・高分子材料耐放射線評価研究グループの森下憲雄さんに厚く御礼申し上げます。

国際単位系 (SI)

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度 (質量密度)	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
質量体積 (比体積)	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
(物質量の) 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	(数の) 1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m ⁻¹ ・m ¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s ¹ ・A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光束流	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
照射 (放射性核種の) 放射能	ベクレル	Bq	lm/m ²	m ² ・m ⁻¹ ・cd=m ² ・cd
吸収線量, 質量エネルギー分与, カーマ線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量, 組織線量当量	グレイ	Gy	J/kg	m ² ・s ⁻²
	シーベルト	Sv	J/kg	m ² ・s ⁻²

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときにいくつかの用例は表4に示されている。
 (b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。
 (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
 (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘力のモーメント	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg ¹ ・s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg ¹ ・s ⁻²
表角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m ¹ ・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱流密度, 放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg ¹ ・s ⁻³
熱容量, エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量熱容量 (比熱容量), 質量エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
質量エネルギー (比エネルギー)	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・K ⁻¹
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg ¹ ・s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻³ ・A ⁻¹
体積電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s ¹ ・A
電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s ¹ ・A
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	m ¹ ・kg ¹ ・s ⁻² ・A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・mol ⁻¹
モルエントロピー	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol・K)	m ² ・kg ¹ ・s ⁻² ・K ⁻¹ ・mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ ・s ¹ ・A
吸収線量	グレイ毎秒	Gy/s	m ² ・s ⁻³
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =m ² ・kg ¹ ・s ⁻³
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² ・sr)	m ² ・m ⁻² ・kg ¹ ・s ⁻³ =kg ¹ ・s ⁻³

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10 (Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	海里	1 海里=1852m
ノット	ノット	1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バール	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St=1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≡ 10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≡ (1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≡ 10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb=1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal=1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	X	1 X unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	fm	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1μm=10 ⁻⁶ m

