

耐放射線性PEEKケーブルの開発

Development of Radiation Resistant PEEK Insulation Cable

三尾 圭吾 荻原 徳男 古郡 永喜 荒井 秀幸
西澤 代治 西殿 敏朗 引地 裕輔

Keigo MIO, Norio OGIWARA, Hisayoshi FURUKORI, Hideyuki ARAI
Daiji NISHIZAWA, Toshiro NISHIDONO and Yusuke HIKICHI

J-PARCセンター
加速器ディビジョン

Accelerator Division
J-PARC Center

April 2009

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人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>)
より発信されています。

独立行政法人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
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

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, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2009

耐放射線性 PEEK ケーブルの開発

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

三尾 圭吾^{*1}、荻原 徳男、古郡 永喜^{*1}、荒井 秀幸^{*2}、
西澤 代治^{*2}、西殿 敏朗^{*2}、引地 裕輔^{*2}

(2009年3月6日受理)

J-PARC 3GeV RCS 真空システム機器に用いる、耐放射線性を有する PEEK ケーブルの開発を行った。使用するケーブルは、ノンハロゲン性、10MGy 以上の耐放射線性、高難燃性が要求される。ケーブルの開発では、絶縁材料の候補から、ノンハロゲン性、耐放射線性、および高難燃性を満足し、かつ伸び率が比較的大きい PEEK 樹脂を絶縁材料として選定した。

PEEK ケーブルの耐放射線性を実証するため、ガンマ線照射試験を行った。ここでは、樹脂の基本的な照射特性試験、実機相当ケーブルでの電気的特性試験ならびに、耐延焼性試験を実施した。

それぞれの試験項目について、10MGy の耐放射線性を確認した。

J-PARC センター：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

※¹ 出向職員 (株式会社 IHI)

※² 技術開発協力員 (日本アドバンステクノロジー株式会社)

*¹ 株式会社フジクラ

*² 株式会社 IHI

Development of Radiation Resistant PEEK Insulation Cable

Keigo MIO^{※1}, Norio OGIWARA, Hisayoshi FURUKORI^{*1}, Hideyuki ARAI^{*2}
Daiji NISHIZAWA^{*2}, Toshiro NISHIDONO^{*2} and Yusuke HIKICHI^{※2}

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

(Received March 6, 2009)

Material characterization and development has been carried out for cable insulation suitable for use in the J-PARC 3-GeV RCS radiation environment. In spite of its high cost, PEEK(polyether-ether-ketone) has emerged as the leading candidate satisfying requirements of being non-halogen based, highly incombustible and with radiation resistant at least 10 MGy, along with the usual mechanical characteristics such as good elongation at break, which are needed in a cable insulation.

Gamma-ray irradiation tests have been done in order to study radiation resistance of PEEK cable. Further, mechanical, electrical and fire retardant characteristics of a complete cable such as would be used at the J-PARC RCS were investigated.

As a result, PEEK cables were shown to be not degraded by radiation up to at least 10 MGy, and thus could be expected to operate stably under the 3-GeV RCS radiation environment.

Keywords: J-PARC, RCS, PEEK, Radiation Resistant, Cable, Gamma-ray, Irradiation Tests

※1 Research Staff on Loan (IHI Corporation)

※2 Collaborating Engineer (Nippon Advanced Technology Co.,Ltd.)

*1 Fujikura Ltd.

*2 IHI Corporation

目次

1	序論	1
1.1	目的	1
1.2	RCS真空システム概要	1
1.3	RCS主トンネルでの線量	1
2	PEEKケーブル	2
2.1	開発条件	2
2.2	絶縁材料の選定	2
2.2.1	絶縁材料候補	2
2.2.2	PEEK樹脂	3
2.3	試験に用いたPEEKケーブル	4
2.3.1	ケーブルの種類	4
2.3.2	低電圧動力用ケーブル仕様	4
2.3.3	信号用多芯ケーブル仕様	4
2.3.4	高電圧用同軸ケーブル仕様	4
3	耐放射線試験方法	4
3.1	試験概要	4
3.2	照射施設	5
3.3	基礎特性試験	5
3.3.1	基礎特性試験概要	5
3.3.2	試験体	5
3.3.3	試験条件	6
3.4	電気的特性試験	7
3.4.1	電気的特性試験概要	7
3.4.2	試験条件	7
3.5	耐延焼性試験	7
3.5.1	耐延焼性試験概要	7
3.5.2	試験体	8
3.5.3	試験条件	8
4	試験結果	8
4.1	基礎特性試験結果	8
4.1.1	外観試験結果	8
4.1.2	耐電圧試験結果	8
4.1.3	伸び率・抗張力試験結果	8
4.1.4	基礎特性試験まとめ	9
4.2	電気的特性試験結果	9
4.2.1	外観試験結果	9
4.2.2	導通抵抗試験結果	10

4.2.3	耐電圧試験結果.....	10
4.2.4	LCR測定試験結果.....	10
4.2.5	絶縁抵抗試験結果.....	10
4.2.6	電気的特性試験結果まとめ.....	11
4.3	耐延焼性試験結果.....	11
4.3.1	残炎時間.....	11
4.3.2	損傷距離.....	11
4.3.3	耐延焼性試験結果まとめ.....	12
5	考察.....	12
5.1	PEEK樹脂の照射による劣化.....	12
5.2	PEEK樹脂の酸素からの保護.....	12
6	まとめ.....	13
	謝辞.....	13
	参考文献.....	14

Contents

1	Introduction.....	1
1.1	Purpose of this work	1
1.2	Outline of the Vacuum sysytem of RCS	1
1.3	Rdiation intensity at main tunnel of RCS	1
2	PEEK insuration cable	2
2.1	Design basis	2
2.2	Screening of insulation material	2
2.2.1	Candidate materials	2
2.2.2	PEEK resin.....	3
2.3	PEEK cable applied for examination	4
2.3.1	Type of PEEK cable	4
2.3.2	Specification of low voltage power cable	4
2.3.3	Specification of multi cable for signal	4
2.3.4	Specificatio of high voltage Coaxial cable	4
3	Procedure of radiation resistance examination	4
3.1	Overall of the examination	4
3.2	Irradiation facility.....	5
3.3	Basic characteristic examination	5
3.3.1	Outline of the basic characteristic examination.....	5
3.3.2	Examination object	5
3.3.3	Examination condition.....	6
3.4	Electric characteristic examination	7
3.4.1	Outline of the electric characteristic examination	7
3.4.2	Examination condition.....	7
3.5	Fire proof examination	7
3.5.1	Outline of the fire proof examination.....	7
3.5.2	Examination object	8
3.5.3	Examination condition.....	8
4	Examination result	8
4.1	Result of the basic characteristic examination.....	8
4.1.1	Externals examination result.....	8
4.1.2	Voltage examination result.....	8
4.1.3	Elongation and tensil strength examination result	8
4.1.4	Summary of the basic characteristic examination	9
4.2	Result of the electric characteristic examination	9
4.2.1	Externals examination result.....	9

4.2.2	Electrical resistance examination result	10
4.2.3	Voltage examination result.....	10
4.2.4	LCR measurement result	10
4.2.5	Insulation resistance examination result	10
4.2.6	Summary of the electric characteristic examination	11
4.3	Result of the fire proof examination.....	11
4.3.1	Afterflame time measurement result.....	11
4.3.2	Damage length measurement result.....	11
4.3.3	Summary of the fire proof examination	12
5	Consideration	12
5.1	Radiation damage of PEEK cable	12
5.2	Protection from oxygen of PEEK resin	12
6	Summary	13
Acknowledgements.....		13
References.....		14

1 . 序論

1.1 目的

本報告では、3GeV RCS(Rapid-Cycling Synchrotron)主トンネル内で使用可能な PEEK ケーブルの開発と、その耐放射線性試験について述べる。

J-PARC 3GeV RCS 真空システムは、大強度陽子加速に伴う高放射線下において稼動し、真空機器類はこのような環境下においても、安定稼動を維持する事が求められている。また、機器類の残留放射能からの放射線被爆が予想されるため、保守作業の被曝低減の観点から、できるだけ、交換不要であることが望ましい。これら理由により、真空機器類には高い耐放射線性が要求されている。

3GeV RCS 主トンネルで使用するケーブルは、高い耐放射線性に加えて、高難燃性、およびノンハロゲンでなければならない。

この条件を満たすケーブルとして PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)樹脂を絶縁材としたケーブルを開発した。ケーブルの種類は、低電圧(～200V)動力用、信号用多芯、高電圧用(～10kV)同軸線の3種類に大別される。

耐放射線性の評価試験はこの分類ごとに準備したケーブルについて実施した。また、PEEK樹脂の基礎特性を調査するための試験も行った。ここでは、それぞれの対象機器に応じて、照射前後の試験項目を設定し、耐放射線性を評価した。

1.2 RCS 真空システム概要

J-PARC 3GeV RCS 真空システムは、リング全体の真空排気を担当し、ターボ分子ポンプ(TMP)、スパッターイオンポンプ(SIP)、真空計、及びそれらを連結するビームダクトで構成される。

主要な機器のリストを表 2 に示す。リング上の機器位置を図 2 に、リングを設置した主トンネル、および電線や配管が設置されているサブトンネルの断面図を図 3 に、制御、ならびに電源機器が設置されている装置室の配置を図 4 に示す。

本報告で開発した PEEK ケーブルは、耐放射線性が特に問題となる RCS 主トンネルから、サブトンネルに敷設される。

1.3 RCS 主トンネルでの線量

機器に照射される放射線は、加速器運転中のビームの一部が、ビームコリメーター等の機器に衝突して発生する。衝突した高エネルギー陽子はハドロンカスケードを生起させ、中性子、陽子、パイ中間子などが発生するが、荷電粒子は磁石、遮蔽体などで吸収されるので、その外側においては、吸収線量の大部分が中性子によってもたらされると考えられている。

このビームロスによって発生する吸収線量は計算されており¹⁾、その評価結果によれば、主トンネル内壁面線量率は位置によって大きく異なるが、 10^3 mSv/h～ 10^5 mSv/hとなっている。

この線量率は積算線量に換算すると、年間 5000 時間の運転で 30 年間稼働の場合、1.5MGy～150MGyとなる。

真空システム機器に関しては、これらを考慮して、主トンネル機器の耐放射線性の目標を 10MGy とした。

2 . PEEK ケーブル

2.1 開発条件

主トンネルにて使用する真空システム用ケーブルの開発において、以下を開発条件とした。

① 耐放射線性

主トンネルにおいてケーブルに必要な耐放射線性は最低 10MGy とした。

② 高難燃性

ケーブルに必要な難燃性は、JIS C 3521 に準拠した高難燃性とした。

③ ノンハロゲン性

ケーブルは塩素その他の有害物質を含まないノンハロゲンタイプとした。

2.2 絶縁材料の選定

2.2.1 絶縁材料候補

前項にて述べたように、3GeV RCS 主トンネルでは、真空システム用ケーブルについて、10MGy の耐放射線性、高難燃性、ノンハロゲン性を確保することとし、これらを満足する絶縁材料を選定することとした。

(1) 候補材料

従来、10MGy級の高放射線下で使用できるケーブルとして、酸化マグネシウムなどを絶縁材としたMI (Mineral Insulator) ケーブルが知られているが、かとう性 (柔軟性)、端末処理の容易さ、価格が問題となっている。一方、ポリエチレンなどの通常の有機材料は、最大でも 1MGyが耐放射線性の限界²⁾である。又、国内の原子力発電所において使用実績のあるCSM (クロロスルホン化ポリエチレン) と呼ばれる絶縁体は耐放射線性が高いが、塩素を含んでおり、ノンハロゲン性の観点から問題が残る。

そこで、10MGy程度の耐放射線性が期待できるノンハロゲン性の有機材料としてCERNの報告書³⁾から以下をリストアップした。

- ① ポリイミド(PI、商品名カプトン)
- ② ポリエチルイミド(PEI)
- ③ ポリアミドイミド(PAI)
- ④ ポリフェニルサルファイド(PPS)
- ⑤ ポリエーテルエーテルケトン(PEEK)

これらは、汎用樹脂にない耐熱性、機械強度、耐摩耗性等を実現するために開発された、エンジニアリングプラスチックと呼ばれる高機能樹脂である。

(2) 難燃性

難燃性については、これら樹脂は耐熱温度が200℃～300℃とされていることから、難燃性は期待できると考えられる。

(3) 加工性・柔軟性

樹脂材料をケーブル絶縁体に用いるためには、その樹脂材料を押し出し加工できることが必要である。上記①～⑤の押し出し加工性を検討するため、「伸び率」を調査した。伸び率のデータはPI、とPEEKについてのみ得られた。PIとPEEKの伸び率データを以下に示す。

絶縁材量候補	: 伸び率 ^⑥
ポリイミド (PI、商品名カプトン)	: 23.5 ±11.0%
PEEK	: 161 ±12.0%

PIはPEEKと比較して伸び率が小さいので、押し出し加工が難しいと考えられる。PIとPEEK以外の絶縁材量候補は伸び率データが無く、押し出し加工性を評価できていない。PIは、ケーブルの被覆としては、細いケーブルあるいはテープ状に加工して巻きつけた形で使用されている。一方PEEKは伸び率が比較的大きく、耐熱用電線としてのケーブル製作実績も報告^④されている。

(4) 耐放射線性

ケーブルに適用したPIについて耐放射線試験が実施され^⑤、その結果は50MGyまで使用可能とされている。PEEKについては、素材としての照射試験が行われ、PIと比較して優れている伸び率が、照射線量10MGyまで維持されているとの報告^⑥がある。

(5) 絶縁材料の選定

PEEKはPIに比較して、伸び率が大きく、ケーブルの柔軟性、絶縁体の亀裂防止という観点から優れていると考えられる。さらに、この性質は照射後も維持されることが期待できる。これらの理由により、本報告ではケーブルの絶縁材料として、PEEK樹脂を選定することとし、それぞれの用途に適合したケーブルを設計・製作して、耐放射線性を試験することとした。

2.2.2 PEEK樹脂

PEEK樹脂はベンゼン環がエーテルとケトンを形成した図1の構造式^④で表される。耐熱性、および機械的強度に加え、熱可塑性を有している。PEEK樹脂の主な物性値を表1に示す。

2.3 試験に用いた PEEK ケーブル

RCS 真空システム機器に必要な電流および電圧を考慮して、実機用のケーブルを試作した。照射試験においては、これらの PEEK ケーブルを用いた。詳細を次に示す。

2.3.1 ケーブルの種類

耐放射線性試験に供した PEEK ケーブルの種類は、ポンプなどの動力を供給する、低電圧動力用ケーブル、制御信号を伝達する信号用多芯ケーブル、およびスパッタリングイオンポンプに 7 kV 程度の電力を供給する高電圧用同軸ケーブルの 3 種類とした。

これら 3 種類の主な仕様を、表 3 に示す。詳細な仕様およびケーブルの内部構成を次項以降に示す。

2.3.2 低電圧動力用ケーブル仕様

試験に用いた低電圧動力用ケーブル(200V)は、ターボ分子ポンプの動力、およびベーキングヒーターなどへ電力を供給するためのものである。

本ケーブルは 3 芯で構成し、より合わせた外側にシールド網線を施し、最外層はステンレスの保護外装としている。ケーブル仕様を表 4 に、構造を図 8 に示す。

2.3.3 信号用多芯ケーブル仕様

試験に用いた信号用多芯ケーブルはターボ分子ポンプ本体とコントローラーを接続するための制御ケーブルである。

本ケーブルは 49 芯で、ユニット A~D の 4 種類のユニットで構成されている。各ユニットの仕様と、ケーブル全体の仕様を表 5、表 6 および図 9、図 10 に示す。

2.3.4 高電圧用同軸ケーブル仕様

試験に用いた高電圧用同軸ケーブルは、スパッタリングイオンポンプに高電圧電力 (7 kV) を供給するものである。

本ケーブルは高電圧用の同軸線に、安全用の信号線 2 本を追加したものである。仕様を表 7 および図 11 に示す。

3 . 耐放射線試験方法

3.1 試験概要

PEEK ケーブルの対放射線性試験は、基礎特性、電気的特性、耐延焼性の 3 項目について実施した。

基礎特性試験では、電線としての基本的性能が、照射後も維持されることを評価する。

PEEK 樹脂の力学的な照射特性、PEEK 電線素線の電気的特性に関する照射特性を試験した。

電気的特性、および耐延焼性の評価では、実機相当のケーブルを製作し、外観、導通抵抗、

耐電圧、絶縁抵抗及び耐延焼性の照射特性を試験した。

3.2 照射施設

コバルト 60 によるガンマ線照射を、JAEA 高崎量子応用研究所、第 1 照射棟、No2 セルにて実施した。

ケーブル照射中のセル内状況を図 5 示す。No.2 セルでの照射線源からのガンマ線線量率分布を図 6 に示す。

3.3 基礎特性試験

3.3.1 基礎特性試験概要

本項では、ガンマ線照射における基礎特性試験として、PEKK ケーブル素線の外観、耐電圧および、チューブ状に整形した PEEK 樹脂試験体の伸び率・抗張力の照射特性を調査した。

3.3.2 試験体

試験体の仕様を次の①～④に示す。2 種類の絶縁体厚さの異なる PEEK ケーブル素線（線芯）と 1 種類の PEEK チューブとした。

PEEK ケーブル素線については、円状に曲げた試験体を用い（サンプル 3）、内部応力が掛かった状態での照射特性を調査することとした。

PEEK ケーブル素線の絶縁体構造を模擬した PEEK チューブを製作し、伸び率等の計測に用いた。

①PEEK ケーブル素線サンプル 1（フジクラ製）

- a. 導体線: Ni メッキ軟銅撚り線, $\phi 0.2 \times 19$ 本撚り
- b. 絶縁体: PEEK, 厚さ 0.34mm
- c. 線芯: 仕上り径 $\phi 1.7$ mm
- d. 状態: $\phi 34$ mm の SUS パイプ（仕上り径の 20 倍の金属製マンドレル）に巻き付けた状態
- e. 数量: 3 本

②PEEK ケーブル素線サンプル 2（日星電気製）

- a. 導体線: 銀メッキ軟銅撚り線, $\phi 0.2 \times 7$ 本撚り
- b. 絶縁体: PEEK, 厚さ 0.95mm
- c. 線芯: 仕上り径 $\phi 2.5$ mm
- d. 状態: 長さ ~ 400 mm、直線状
- e. 数量: 3 セット（5 本/セット）

③PEEK ケーブル素線サンプル 3（日星電気製）

- a. 導体線: 銀メッキ軟銅撚り線, $\phi 0.2 \times 7$ 本撚り

- b. 絶縁体: PEEK, 厚さ 0.95mm
- c. 線 芯: 仕上り径 ϕ 2.5mm
- d. 状 態: $\sim \phi$ 300mm 円弧状
- e. 数量: 3セット (5本/セット)

④PEEK チューブ (日星電気製)

- a. 形 状: 内部が空洞の線芯状構造 (PEEK 絶縁体の構造を模擬したもの)
- b. 寸 法: 外径 1.6mm, 内径 0.8mm
- c. 数 量: 3セット (5本/セット)

3.3.3 試験条件

(1)試験内容

基礎特性試験の内容は以下とした。

①外観試験

試験体に目標線量のガンマ線を照射後に、損傷の有無等を目視にて確認する。

②耐電圧試験

試験体に目標線量のガンマ線を照射後に、耐電圧の値が規定値を満たすかどうかを確認する。

③伸び率・抗張力試験

PEEK チューブに目標線量のガンマ線を照射前後に、伸び率の変化を計測する。また、伸び率と密接に関連する抗張力 (引張り強度) についても計測する。

④準用規格 (参考規格)

・耐電圧試験

PEEK ケーブルは特殊な電線のため、決められた規格はないので、次を準用することとした。

a. PEEK ケーブル素線サンプル 1

電気学会技術報告 (Ⅱ部) 139号

(原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼性試験方法に関する推奨案)

b. PEEK ケーブル素線サンプル 2、サンプル 3

JIS C 3005

・伸び率・抗張力試験

JIS K 6301

(2)照射要領

ガンマ線の照射線量は、RCS 主トンネルの環境を考慮して、10MGy、30MGy、50MGy とした。照射期間は(H15.6.20~H15.12.24)である。

図 7 に、JAEA高崎量子応用研究所、第 1 照射棟、No2 セルにセットした下記①～③の試験体を示す。

3.4 電气的特性試験

3.4.1 電气的特性試験概要

実機用に開発した PEEK 電線の耐放射線性試験は、低電圧動力用ケーブル、信号用多芯ケーブル及び高電圧用同軸ケーブルの 3 種類について実施した。照射前後のこれらのケーブルの直流導体抵抗、耐電圧、絶縁抵抗を測定した。

また、照射に起因する寸法などの外観、インダクタンス、リアクタンスの変化の有無について調査した。

3.4.2 試験条件

(1)試験項目

実施した電气的特性試験項目を、照射線量と共に、表 8 に示す。低電圧動力用ケーブル、信号用多芯ケーブルについては、外観（試験成績書では構成と表記した）、直流導通抵抗、耐電圧(1500V)、絶縁抵抗を測定した。なお、10MGy 照射時に、接続ケーブルのインダクタンス (L)、静電容量 (C)、抵抗 (R) を測定し、未照射の測定値と比較した。

高電圧用同軸ケーブルは他のケーブルと同様な材料構成であるが、絶縁体が厚いこと、同軸構造の高電圧リード線であり、DC 7kV を印加するため、放射線による絶縁劣化が生じると問題である。それで、高電圧用同軸ケーブルについては、ガンマ線照射後に、使用上最も重要な特性である、絶縁抵抗特性を調べることとし、照射量を徐々に（20MGy から 30 MGy まで 1 MGy ステップ）増加させ、その照射特性を測定した。

(2)照射要領

電气的特性試験に使用した 3 種類のケーブルについて、ガンマ線照射の詳細を表 9 に。また、その時の設置の形状を図 13 に、照射場所の状況を図 14 に示す。

3.5 耐延焼性試験

3.5.1 耐延焼性試験概要

実機用に開発した PEEK 電線の耐延焼性試験は、低電圧動力用ケーブル、信号用多芯ケーブルの 2 種類を用い、照射前後の残炎時間、損傷距離を測定した。

3.5.2 試験体

耐延焼性試験に用いた2種類のPEEKケーブルを表10に示す。

3.5.3 試験条件

耐延焼性試験の試験条件はJIS C 3521(1986)「通信ケーブル用難燃シース燃焼性試験方法」に拠った。試験装置を図15に示す。多数のケーブルが敷設された実機ケーブルトレイ条件での燃焼性を試験し、実際の火災等において、被害が増大しないことを確認する。実機の試験は株式会社フジクラ鈴鹿事業所燃焼試験室にて行った。

照射線量は0、10、30MGyとした。又、照射条件は電気的特性試験と同様とした。

4 . 試験結果

4.1 基礎特性試験結果

4.1.1 外観試験結果

約10MGyの照射により、すべての供試体に着色が認められた。図16～図21に照射した試験体の写真を示す。照射線量30MGyでは、さらに着色が進んだ。また、「PEEKケーブル素線サンプル1」では端部直線部の絶縁体に亀裂が見られた。さらに「PEEKケーブル素線サンプル2、サンプル3」では、弱い力でPEEK絶縁体部が簡単に折れる状態となった。外観試験結果をまとめて表11に示す。

4.1.2 耐電圧試験結果

耐電圧試験結果を表12に示す。約10MGyのガンマ線照射後に於いて、PEEKケーブル素線サンプル1、2、および3はいずれも準用した規格の耐電圧試験に合格した。

従って、PEEKケーブル素線の耐電圧は、線量10MGyの照射に耐えうるものと判断した。また、約30MGyのガンマ線照射後のPEEKケーブル素線サンプル1”は準用規格の耐電床試験に合格した。しかし、PEEKケーブル素線サンプル2及び3”は、耐電圧試験時に曲げ圧力を加えると絶縁体が折れてしまい、計測を行うことができなかった。

照射線量50MGyの場合も照射線量30MGyと同様の結果となった。

4.1.3 伸び率・抗張力試験結果

(1) 伸び率試験

ガンマ線照射試験における、線量をパラメーターとした伸び率の変化を図22に示す。10MGyのガンマ線照射後は、PEEKチューブの伸び率は平均値(N=5)で153⇒108となり、初期値に比べ約29%低下した。積算線量30MGy照射においては、PEEKの伸び率は平均値(N=5)

で $153 \Rightarrow 0.6$ となり、初期値に比べ 100% 低下した。即ち伸び率は殆ど 0 であり、柔軟性がな
いため、非常に折れやすい状態となっている。

(2) 抗張力試験

ガンマ線照射試験における、線量をパラメーターとした、抗張力の変化を図 23 に示す。
10MGy の照射後は、PEEK チューブの抗張力は $86.3\text{Mpa} \Rightarrow 81.1\text{Mpa}$ (N=5 平均値) となり、
照射前に比べ約 6% 低下した。伸び率の低下と比べると、抗張力の低下は小さいことが実験結
果から示された。積算線量約 30MGy の照射後は、PEEK の抗張力は平均値 (N=5) で 86.3Mpa
 $\Rightarrow 6.7\text{MPa}$ となり、初期値に比べ約 92% 低下した。30MGy 照射後は、伸び率だけでなく、引っ
張り強度も極端に大きく低下することが明らかとなった。50MGy 照射結果も、30MGy 照射と
同様であった。

4.1.4 基礎特性試験まとめ

10MGy のガンマ線照射後の耐電圧性能は、全ての試験体が合格した。一方、20~30MGy
の照射量においては、PEEK 絶縁体がひび割れるなどして、計測不可能なものが半数以上とな
った。従って、PEEK ケーブル素線の耐電圧は照射線量 10MGy が上限と判断した。10MGy
照射後の伸び率試験の結果は、初期値のデータから 29% 劣化した。又、照射線量 30MGy 以
上では 100% 劣化し、完全に伸び率を失っている。抗張力試験も同様な傾向である。すなわち、
照射線量 10MGy では 6% の低下、同 30MGy 以上では 92% の低下という結果となった。機器
の内部配線やケーブル線芯としての使用を想定すると、PEEK ケーブル素線は照射線量
30MGy 程度で可とう性を喪失し、使用できないと考えられる。一方、照射線量 10MGy まで
であれば、伸び率および抗張力の劣化ははわずかであり、使用範囲と判断できる。

線芯絶縁体の伸び率が大きく低下すると、ケーブル（電線）の曲率部で絶縁体に割れや破壊
を生ずることになる。しかしながら、伸び率がどの程度以上であれば線芯絶縁体の機能に問題
を生じないか等定量化されていない。一方、UL1581 規格では ETFE 絶縁電線に対し、加熱
後の伸び率 75% 以上を求めている。又、伸び率 50% 以上であれば仕上り径の 2 倍程度に線芯
を丸めても計算上割れを生じないとされることから、伸び率は 75%、ないしは 50% が実用上
の目安になると考えられる。従って、PEEK ケーブル素線は伸び率の観点から、10MGy の照射
に耐えると判断できる。

これらの試験結果から、PEEK ケーブル素線の耐放射線性は 10MGy と判断した。

4.2 電気的特性試験結果

PEEK ケーブルの電気的特性に関する、耐放射線性試験結果を表 13 にまとめた。高電圧用
同軸ケーブルの絶縁抵抗測定結果は、照射線量と共に図 25 に示す。なお、詳細な試験結果に
ついては表 13 中に参照先を示した。

4.2.1 外観試験結果

外観試験は、信号用多芯ケーブルおよび低電圧動力用ケーブルについて行った。ケーブルの

絶縁体などの構成物について、寸法、外観上の劣化の検査を行った。これらの検査結果を表 15～表 18 に示す。検査の結果、照射線量 30MGy まで特に変化は観測されなかった。

4.2.2 導通抵抗試験結果

信号用多芯ケーブルおよび低電圧動力用ケーブルの導通抵抗試験は直流抵抗を測定した。検査結果を表 15～表 18 に示す。検査の結果、照射線量 30MGy まで直流抵抗に有意な変化は観測されなかった。

4.2.3 耐電圧試験結果

信号用多芯ケーブルおよび低電圧動力用ケーブルの耐電圧試験は、1.5kV、一分間の印加を行った。試験結果を表 15～表 18 に示す。

検査の結果、照射線量 10MGy においては信号用多芯ケーブルは耐電圧に合格したが、30MGy の照射後は低電圧動力用ケーブルは、本体の曲がり箇所における絶縁体亀裂部から地絡し、耐電圧が失われていることが判明した。地絡の原因である絶縁不良は、PEEK 樹脂の亀裂によるもので、放射線による劣化が原因と考えられる。

4.2.4 LCR 測定試験結果

10MGy 照射後の信号用多芯ケーブルについて、インダクタンス (L)、静電容量 (C)、抵抗 (R) を測定し、未照射の測定値と比較した。その結果を表 14 に示した。照射線量 10MGy においては、有意な差は観測されなかった。

4.2.5 絶縁抵抗試験結果

絶縁抵抗試験は全てのケーブルについて実施した。特に高電圧用同軸ケーブルについては照射線量 20MGy から 1MGy ステップでガンマ線線量を蓄積し、絶縁抵抗の変化を調査した。

(1) 信号用多芯および低電圧動力用ケーブルの絶縁抵抗試験結果

試験結果を表 15～表 18 に示す。いずれも照射後、絶縁抵抗が約一桁低下した。しかしながら、規格値と比較すると、十分に余裕があり、使用可能と判断できる。

(2) 高電圧用同軸ケーブルの絶縁抵抗試験結果

試験結果を表 19、図 25、図 24 に示す。図 25 に示されるように、絶縁抵抗とガンマ線線量との相関は観測されなかった。

また、30MGy 照射後、電線を屈曲させて、絶縁抵抗を再度測定した。

絶縁体の劣化は、本試験においても、照射線量の増加とともに、電線端部の PEEK 絶縁体は脆く、折れやすくなっていた。ケーブルを屈曲させた場合、絶縁体が破損し、絶縁抵抗が低下する事が懸念された。そこで、照射後のケーブルを最小曲げ半径（ケーブル直径の 8 倍：80mm）に屈曲させ、絶縁抵抗を測定した。その結果、絶縁抵抗の低下は観測されなかった。

また、外観検査において、端部の絶縁体露出部では、PEEK 絶縁体が脆く、折れやすくなっていたが、被覆で覆われていた部分は、最小曲げ半径に屈曲させても割れが生じなかった。屈曲させている状況を、図 26 に示す。屈曲後の絶縁抵抗、外観検査結果を表 20 および表

21 に示す。

4.2.6 電気的特性試験結果まとめ

実記相当に製作した 3 種類の PEEK ケーブルについて、照射を実施し、次に示す電気的特性を測定した。

30MGy までの照射後、外観検査において、ケーブル端部の絶縁体の劣化（脆く折れやすくなる）がみられたが、それ以外の外観・寸法上の変化は観測されなかった。

導通抵抗試験においては、30MGy 照射後まで直流抵抗に有意な変化は観測されなかった。

耐電圧試験においては、低電圧動力用ケーブル、信号用多芯ケーブルについて試験を行い、照射線量 10MGy 照射までの耐電圧性を確認した。照射線量 30MGy においては、絶縁体亀裂部から地絡する結果となった。

LCR 測定試験においては、信号用多芯ケーブルに対して、照射線量 10MGy のインダクタンス (L)、静電容量 (C)、抵抗 (R) を測定し、未照射の測定値と比較した。その結果、照射後の有意な差は観測されなかった。

絶縁抵抗試験においては、絶縁抵抗が特に問題となる高電圧同軸ケーブルでは、照射線量 30MGy までの段階で、絶縁抵抗の有意な劣化は観測されなかった。また、30MGy 照射後、最小曲げ半径で屈曲させたが、PEEK 絶縁体の割れは発生せず、絶縁抵抗も変化しなかった。一方、信号用多芯、低電圧動力用ケーブルでは照射後一桁絶縁抵抗が劣化した。しかしながら規格値は十分満足しているので使用可能と判断している。

これらの試験結果から、PEEK ケーブルは電気的特性試験の観点からは、少なくとも 10MGy の耐放射線性は有していると結論した。

4.3 耐延焼性試験結果

実機用に開発した PEEK 電線の耐延焼性試験は、低電圧動力用ケーブル、信号用多芯ケーブルの 2 種類を用いて照射による延焼性の変化を調査した。評価項目は、残炎時間、損傷距離とした。表 22 にその結果を示した。それぞれの試験結果詳細は表中に参照した。

4.3.1 残炎時間

残炎時間は、バーナの燃焼を停止してから、試験体の火炎が無くなるまでの時間であるが、本試験では、照射前後、いずれも発火しなかったため、ゼロ時間となった。本 PEEK 電線は発火しないことを確認した。

4.3.2 損傷距離

損傷距離は、最大燃焼長ともいわれ、バーナ位置を基点として、そこから上方に燃焼したケーブルの長さである。なお、燃焼とは、灰化、炭化した部分も含む。

本試験では、照射線量 10MGy、および同 30MGy のいずれの場合においても、損傷距離の照射による劣化（長くなること）は観測されなかった。

4.3.3 耐延焼性試験結果まとめ

PEEK ケーブルの耐延焼性試験結果は、実施した照射線量（10MGy、および 30MGy）においては、照射に起因すると考えられる残炎時間、損傷距の変化は観測されなかった。

本試験の結果、PEEK ケーブルについて、照射線量 30MGy までは、耐延焼性の変化は無いと結論した。

5 考察

5.1 PEEK 樹脂の照射による劣化

PEEK 樹脂を絶縁体に使用したケーブルについて、樹脂の基本的な照射特性試験と、実機相当ケーブルでの電気的特性試験、耐延焼性試験を行った。その結果、樹脂の伸び率などの基本的特性は照射線量 10MGy までは、概ね、維持されていることが明らかとなった。しかしながら、30MGy 以上では、伸び率、抗張力は完全に失われており、大変脆く、折れやすい状態となった。

一方、実機ケーブルを用いた、電気的特性、耐延焼性、絶縁抵抗試験については、照射線量 30MGy での耐電圧試験において、絶縁体亀裂部より地絡した以外は問題がなかった。特に、30MGy 照射後、高電圧用同軸ケーブルの被覆をはがして、内部を検査したところ、絶縁体が露出していた場所と異なり、明らかに脆くなっておらず、劣化の進行が抑えられている様子であった。

PEEK樹脂の放射線による劣化は、おかれた雰囲気中の酸素の有無によって、大きく変化することが報告⁷⁾されている。それによれば、窒素中、真空においては、照射線量 100MGy まで、PEEK樹脂の伸び率が 25%程度維持されている。仮定ではあるが、今回の試験において、PEEK樹脂の照射による劣化の進行が、被覆があることにより、酸素と遮断され、抑えられるのであれば、PEEKケーブルは、端部とケーブル部で劣化度合いが異なっており、ケーブル部は本報告の基礎特性試験結果ほど劣化していないことが期待できる。

5.2 PEEK 樹脂の酸素からの保護

本報告で述べた照射試験の結果、照射線量 10MGy であれば、基礎特性、電気的特性、耐延焼性すべての試験項目を満足している。従って、PEEK ケーブルの耐放射線性は 10MGy が確認できたと考えられる。

さらに、前項で述べたとおり、PEEK ケーブルは、端部とケーブル部で照射による劣化度合いが異なっている場合があり、ケーブル部の PEEK 絶縁体は、空気に露出している端部のそれに比べて劣化していないことが期待できる。端部を除くケーブル部は、被覆などによって酸素から遮断されている場合には、10MGy 以上の耐放射線性が期待できると考えられる。しかしながら、ケーブルの被覆材は内部を酸素と遮断する観点では設計されていない。従って、10MGy 以上の耐放射線性を保証するためには、劣化防止の機能としての被覆材を確認する必要があると考えられる。

6 まとめ

J-PARC 3GeV RCS 真空システム機器への使用を目的に開発を進めた PEEK ケーブルは、照射後の一連の試験結果から、十分な耐放射線性を有することを確認した。

RCS 真空システム機器は主トンネルに設置されるが、ここで使用されるケーブルには、ノンハロゲン性、10MGy 以上の耐放射線性、高難燃性が要求される。

ケーブルの開発においては、絶縁材料の選定より行い、候補材料の中から、ノンハロゲン性、耐放射線性、高難燃性を満足し、かつ伸び率のデータが良好な PEEK 樹脂を絶縁材料として選定した。

実機で使用する PEEK ケーブルを代表する 3 種類として、低電圧動力用ケーブル、信号用多芯ケーブル、高電圧用同軸ケーブルを設計製作した。これらのケーブルについて、PEEK 樹脂の基本的な照射特性試験、実機相当ケーブルでの電気的特性試験、および耐延焼性試験を実施した。夫々の試験において、照射前後の試験項目を設定し、耐放射線性を評価した。

基礎特性試験では、PEEK 樹脂の伸び率などの物性値の照射特性を試験した。その結果、照射線量 10MGy まではおおむね初期の物性が維持されていることを確認した。

電気的特性試験では、耐電圧、絶縁抵抗などの照射特性を試験した。その結果 10MGy までの耐放射線性を確認した。

耐延焼性試験では、残炎時間、損傷距離という対延焼性の照射特性を試験した。その結果、照射線量 30MGy 照射の場合まで、高難燃性が確認された。

上記試験結果から、PEEK ケーブルについて、10MGy の耐放射線性を確認することができたと考える。

謝辞

ガンマ線照射試験に関して、J-PARC センター、草野譲一氏、金正倫計氏、竹田修氏には照射計画について、高崎量子応用研究所、森下憲雄氏には照射時の配置など詳細についてご指導をいただいた。深く感謝する。

参考文献

- 1) N.Nakao,N.Mokhov,K.Yamamoto, et al. : “MARS14 Shielding Calculations for the J-PARC 3GeV RCS” , KEK Report 2004-1 (2004)
- 2) プラスチックスVol51.No6,P126
- 3) M.Tavlet, et.al. :”Compilation Of Radiation Damage Test Data”, CERN 98-01 (1998)
- 4) 古郡永喜他 : ”耐熱性に優れたPEEK電線”,フジクラ技報,第 104 号,(2003)
- 5) K.Obara, et al. :”High Gamma-Rays Irradiation Tests Of Critical Components For ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor) In-Vessel Remote Handling System” ,JAERI Tech 99-003 (1999)
- 6) H.Schönbacher, et al. :”Results Of Radiation Tests At Cryogenic Temperature On Some Selected Organic Materials For The LHC” ,CERN 96-05 (1996)
- 7) 岡清他 : “耐放射線性機器の開発”、プラズマ・核融合学会誌, 73, 1, P.69-82(1997)

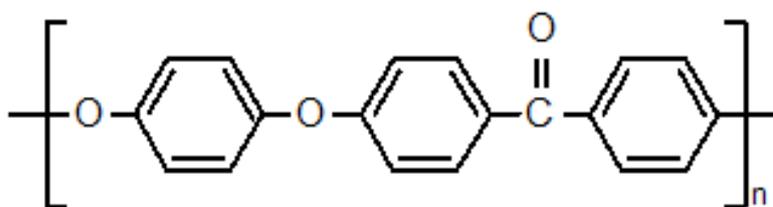


図 1. PEEK(poly-ether-ether-ketone)の構造⁴⁾

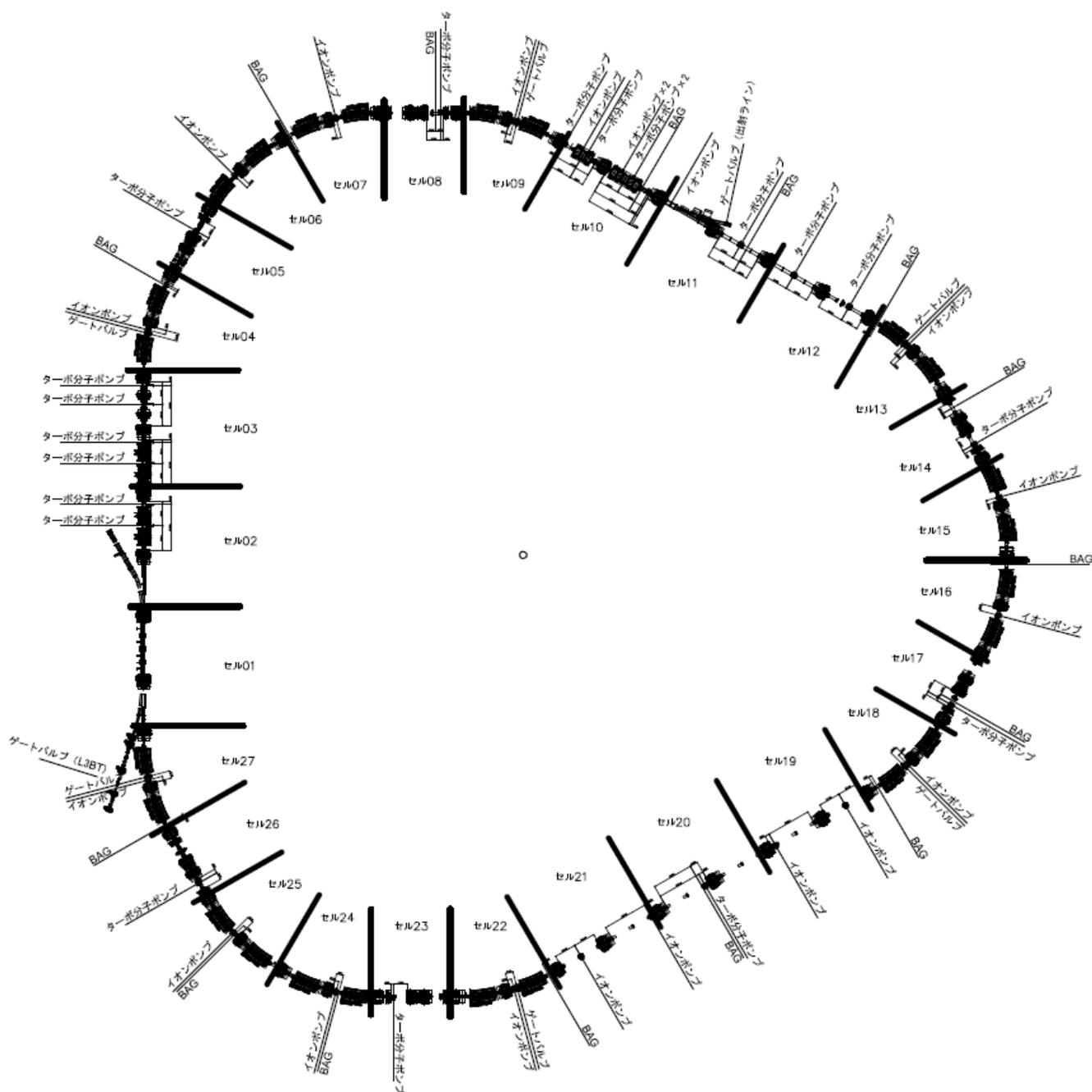


図 2. 3 GeVRCS リング上機器配置 (真空システム)

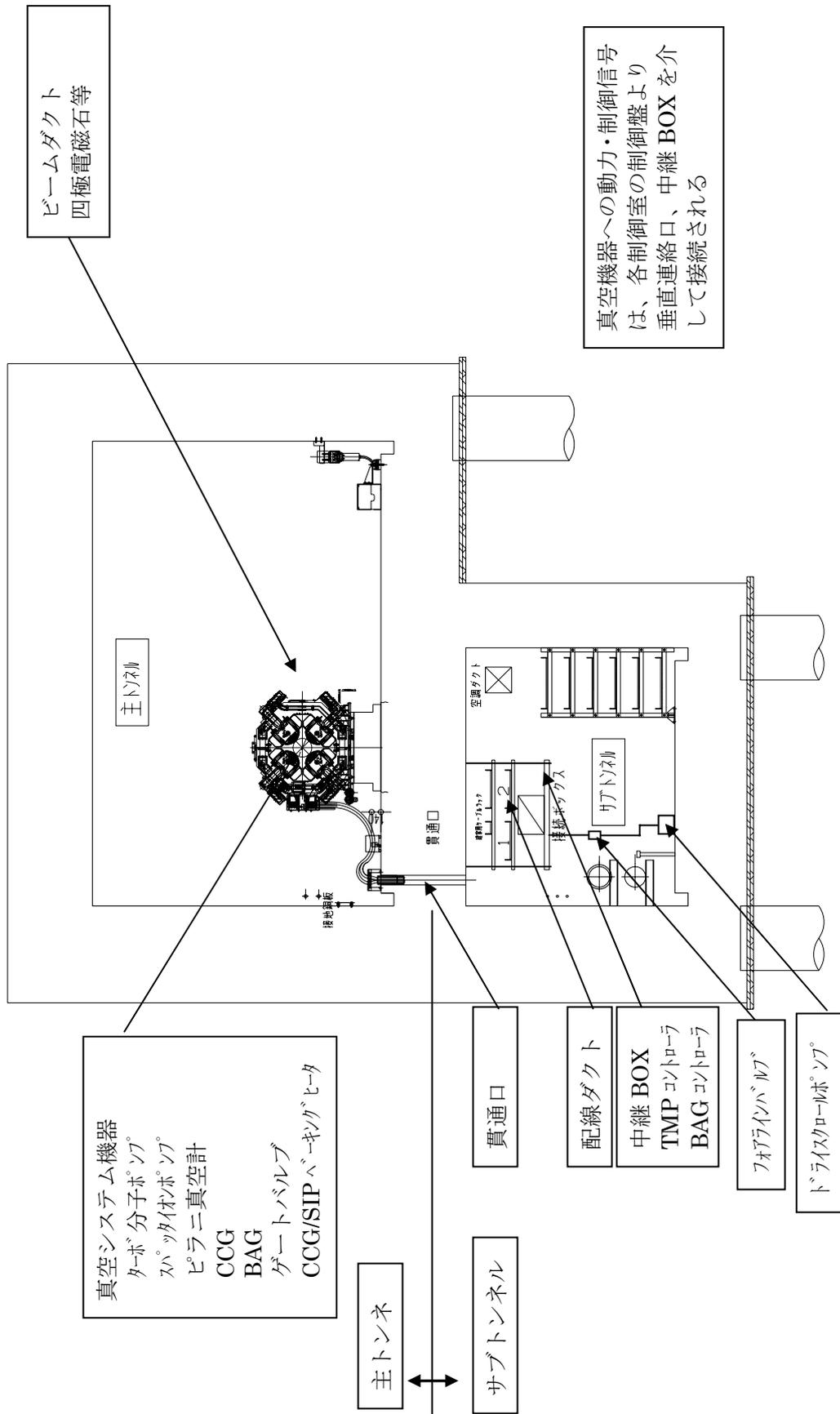


図 3. 3 Ge VRCS 主トンネル、サブトンネル断面

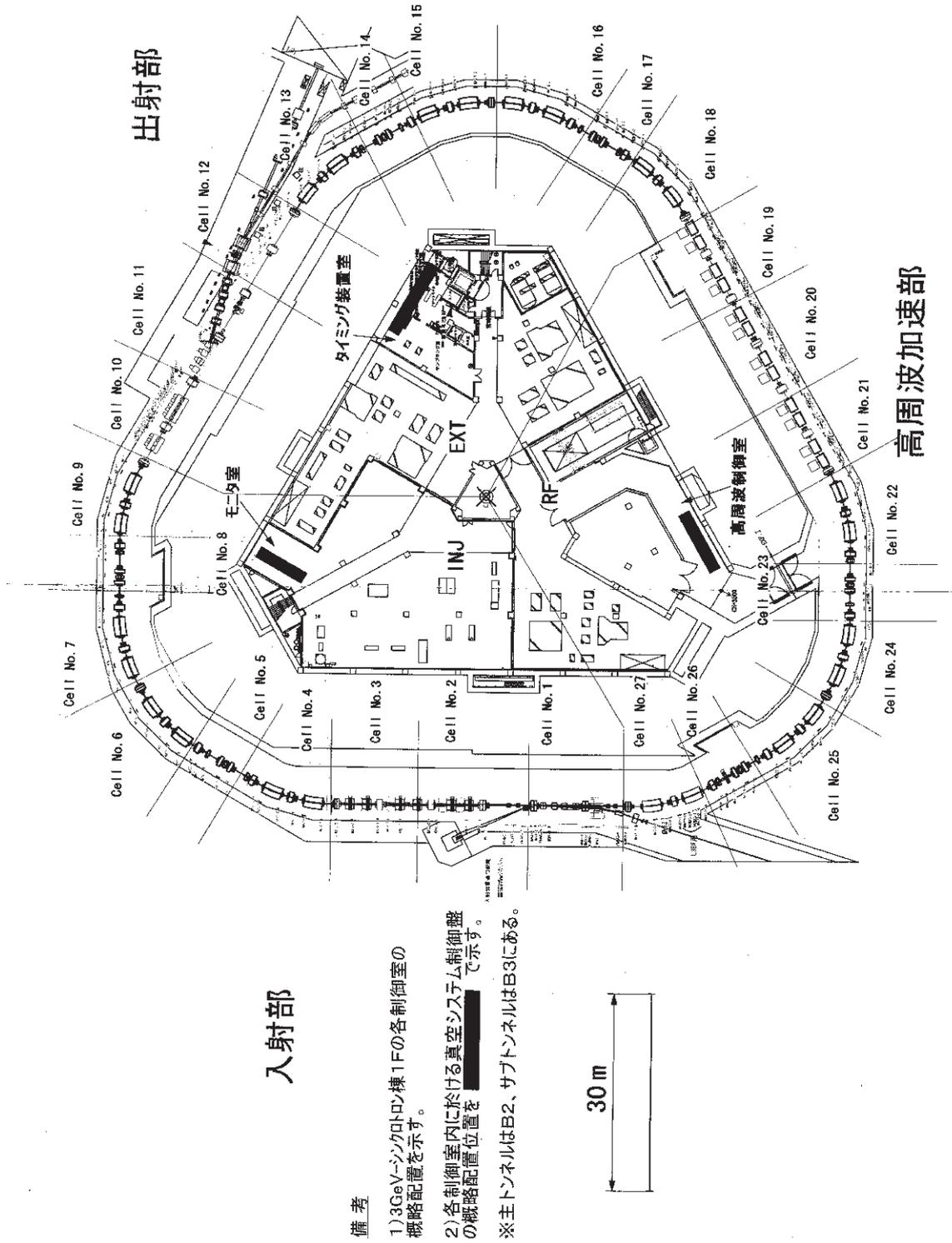


図 4. 3 GeV RCS 主トンネル (B2F) 及び装置室 (1F) 配置

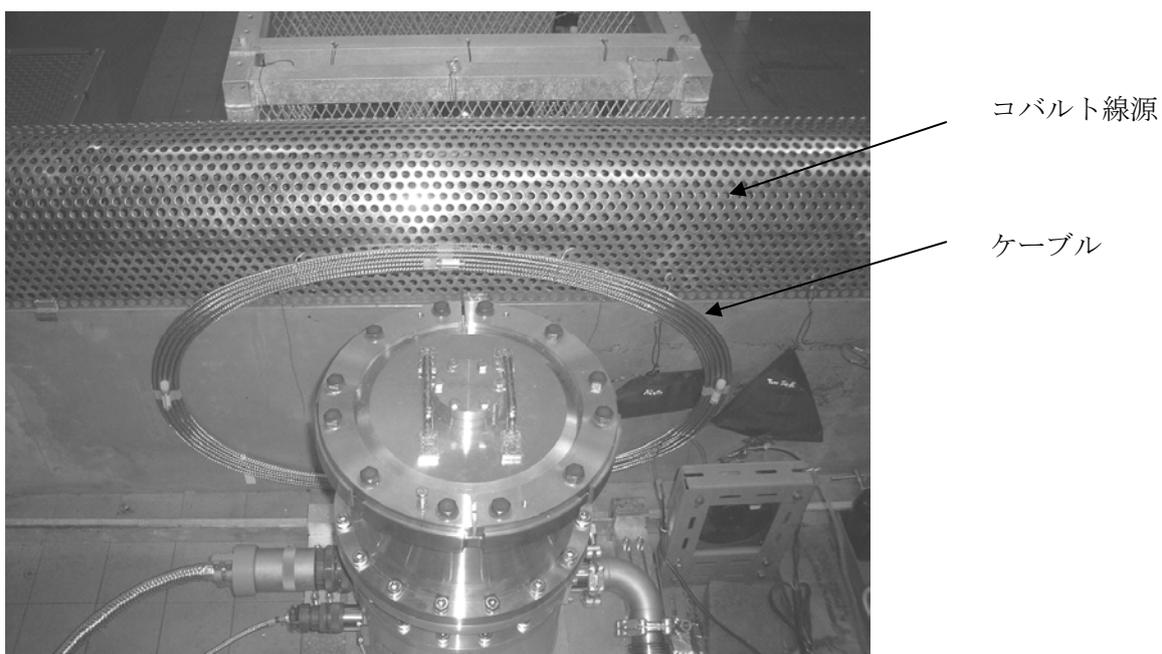


図 5. 第1照射棟 No.2 セルにおけるケーブル照射状況

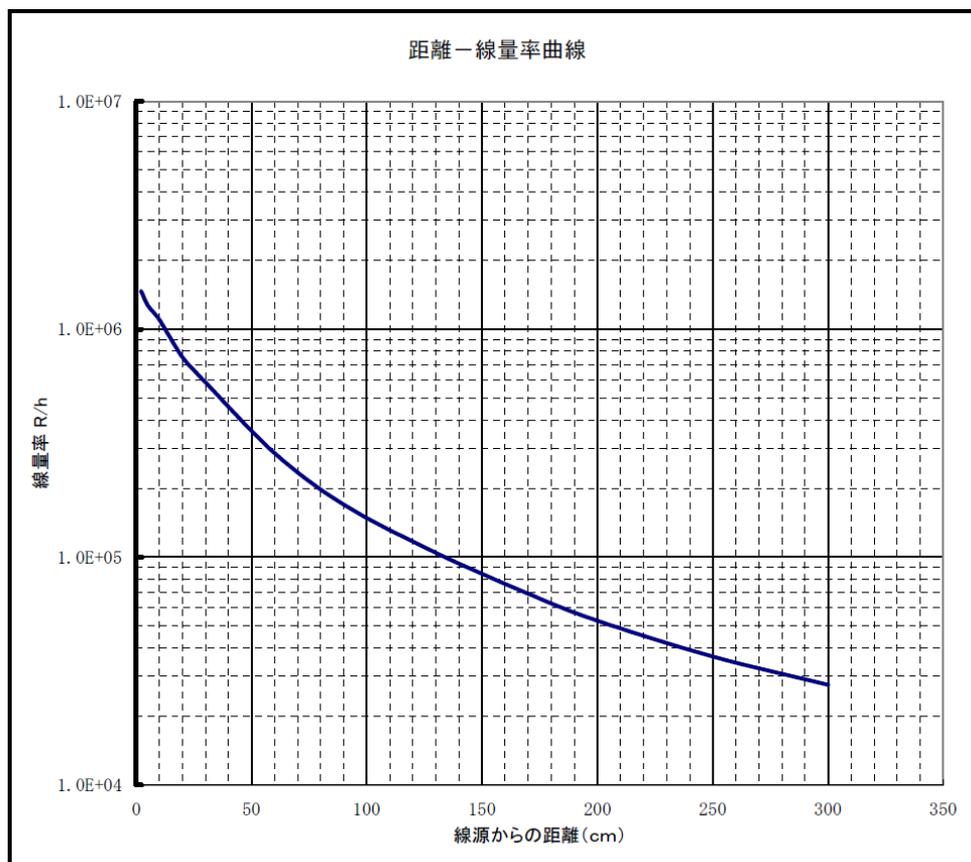


図 6. 第1照射棟 No.2 セルの線量率分布例 (2007年10月)

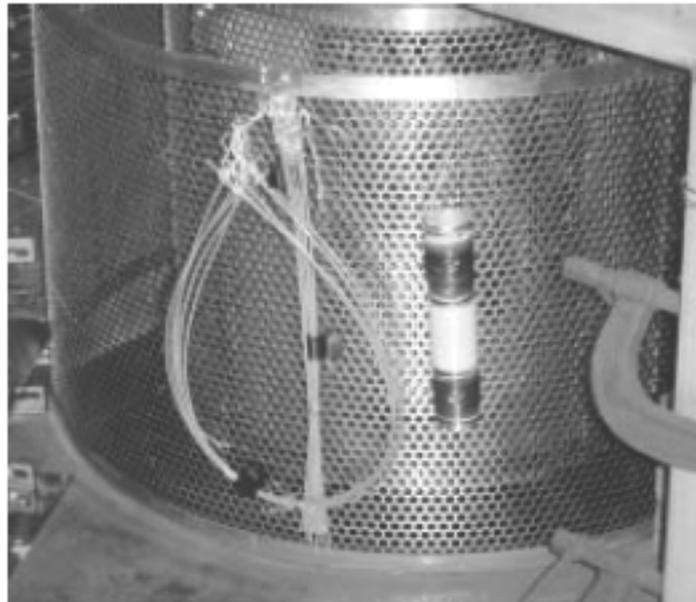


図 7. PEEK ケーブル素線の供試体 (①、②、③)

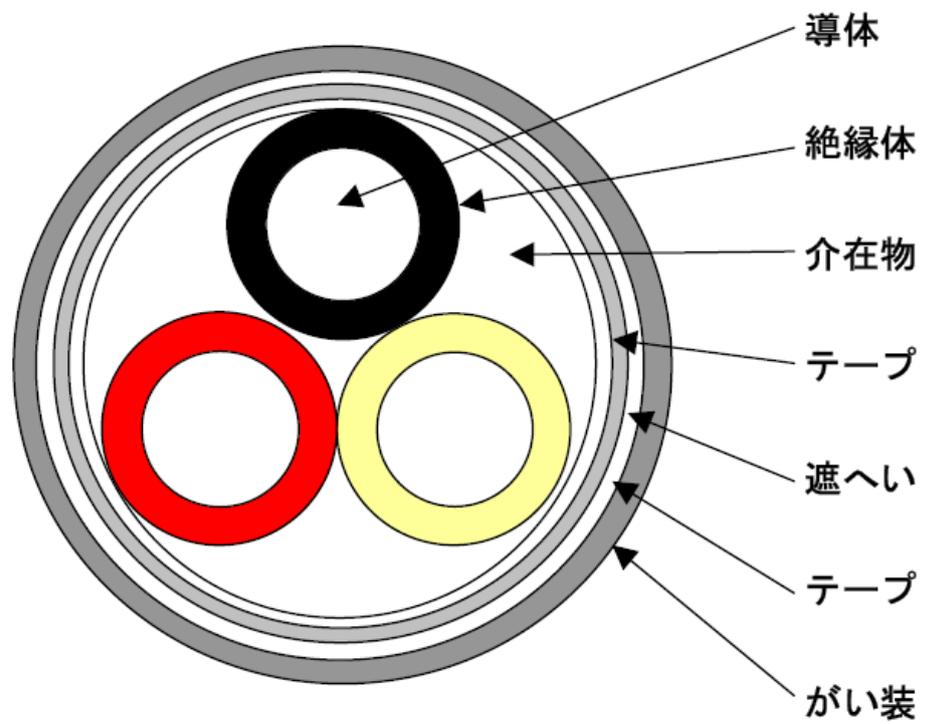


図 8. 低電圧用動力ケーブル構成

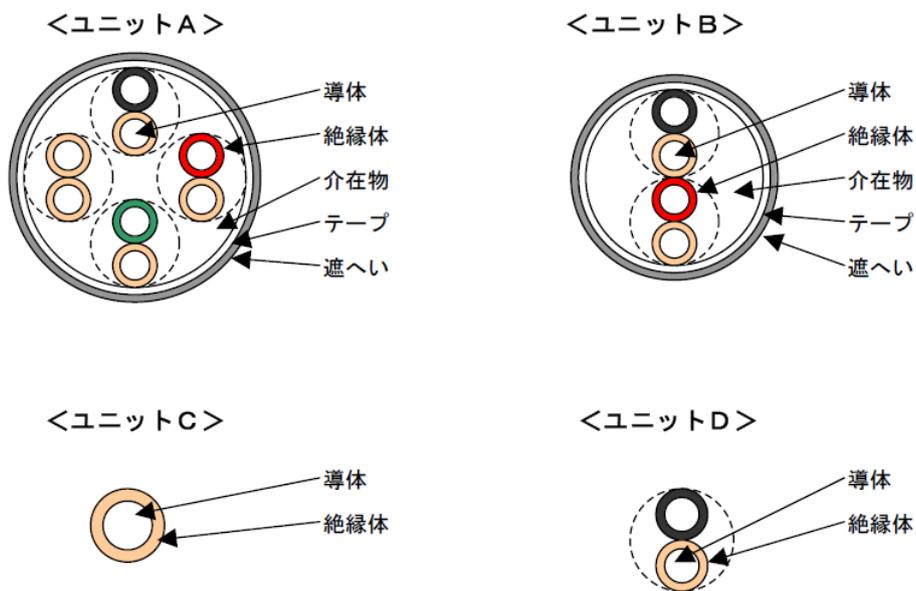


図 9. 信号用多芯ケーブルの各ユニット構造

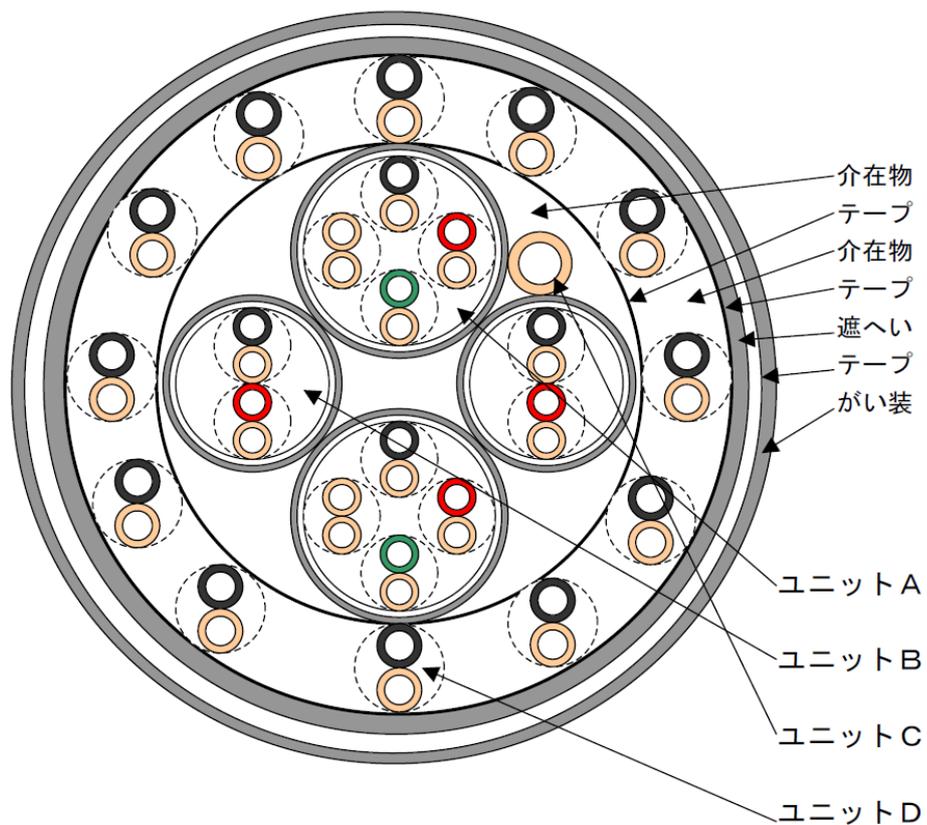


図 10. 信号用多芯ケーブル全体断面

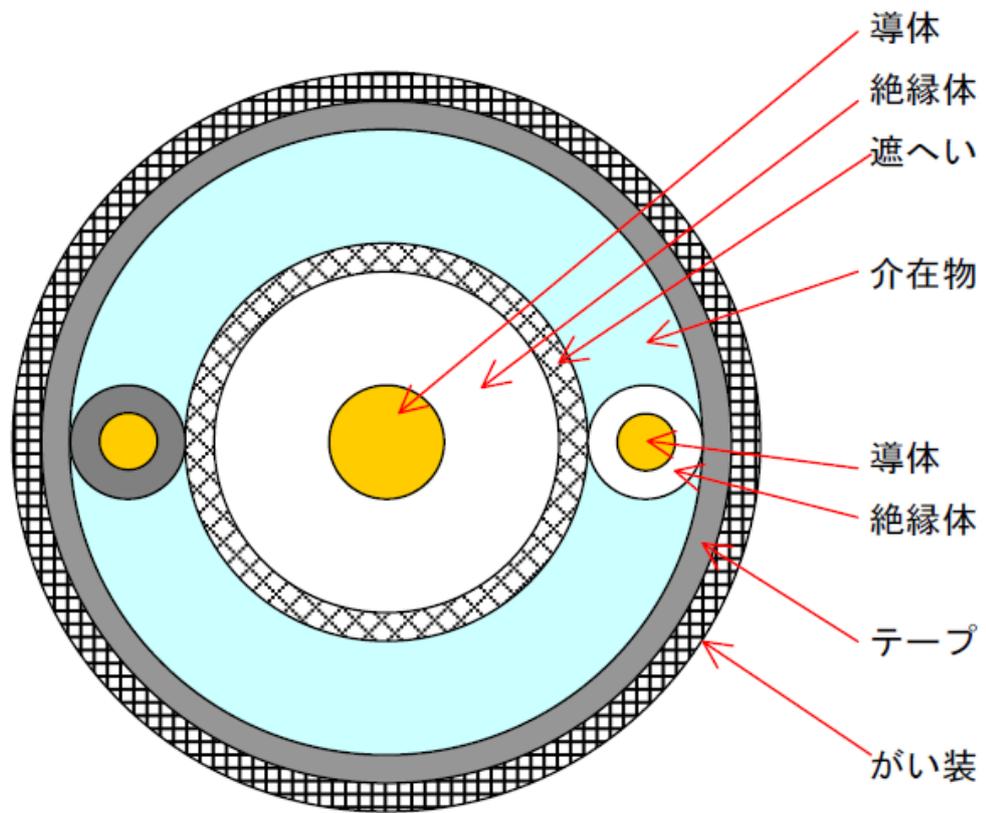
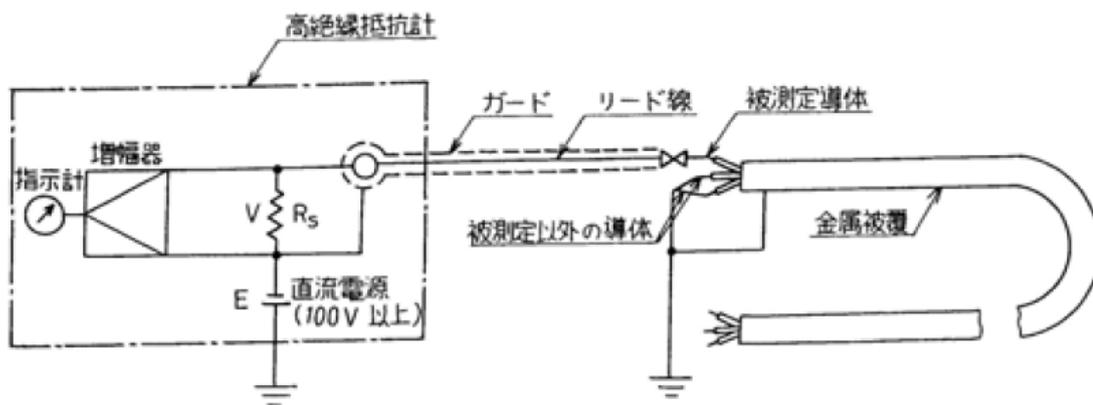


図 11. 高電圧用同軸ケーブル構成



- ただし、
1. 直流電源 E は、電池または安定化直流電源
 2. 標準抵抗 R_s は被測定導体の絶縁抵抗に比較して十分に小さいもの
 3. 高絶縁抵抗計の指示値 R は、 $R = R_s \times E / V$ である。ただし、V は測定時において R_s に生じる電圧、E は測定に用いた直流電源の電圧値

JIS C 3005 より抜粋

図 12. 絶縁抵抗測定方法（電気的特性試験）

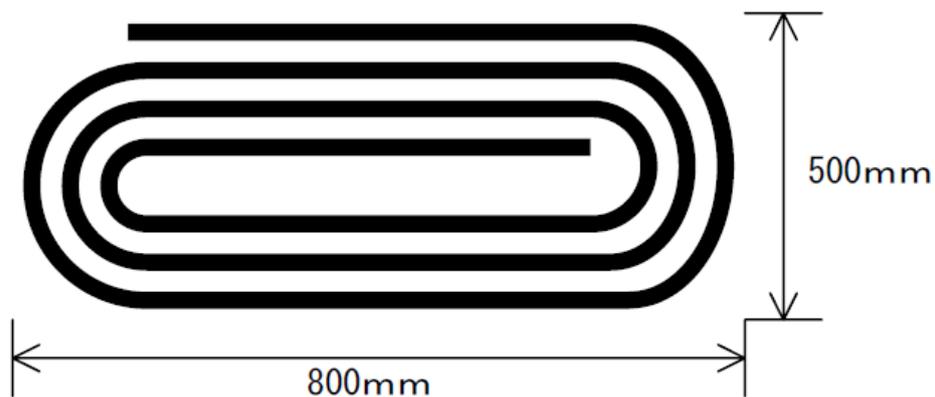


図 13. 照射時のケーブル形状（電気的特性試験）

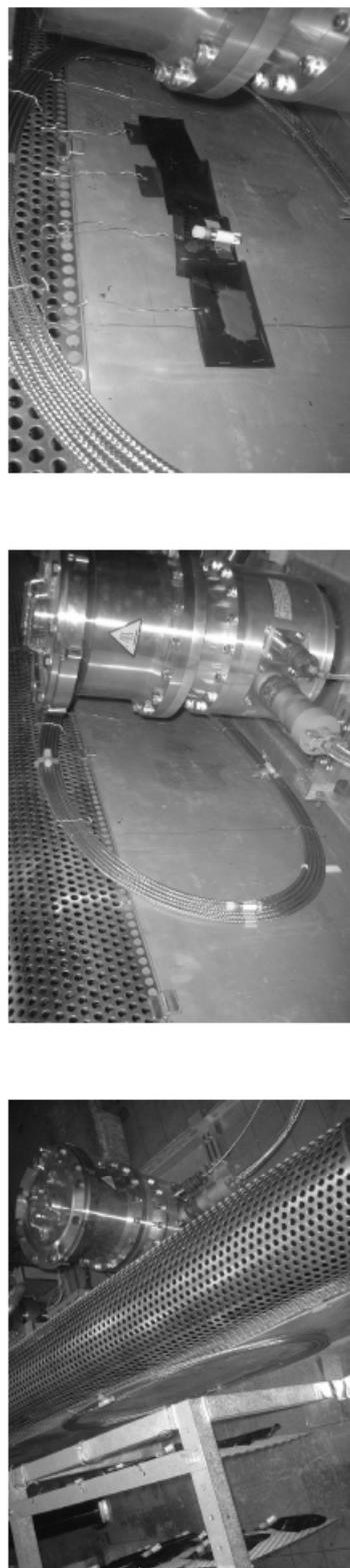
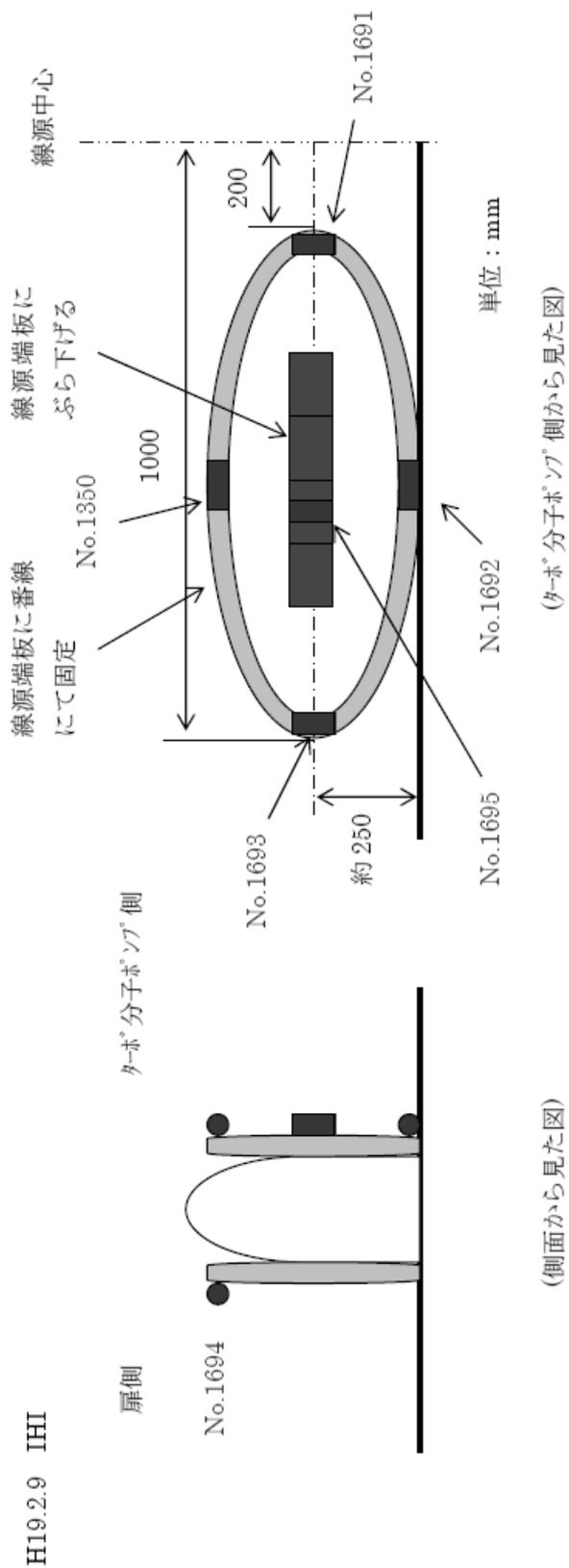
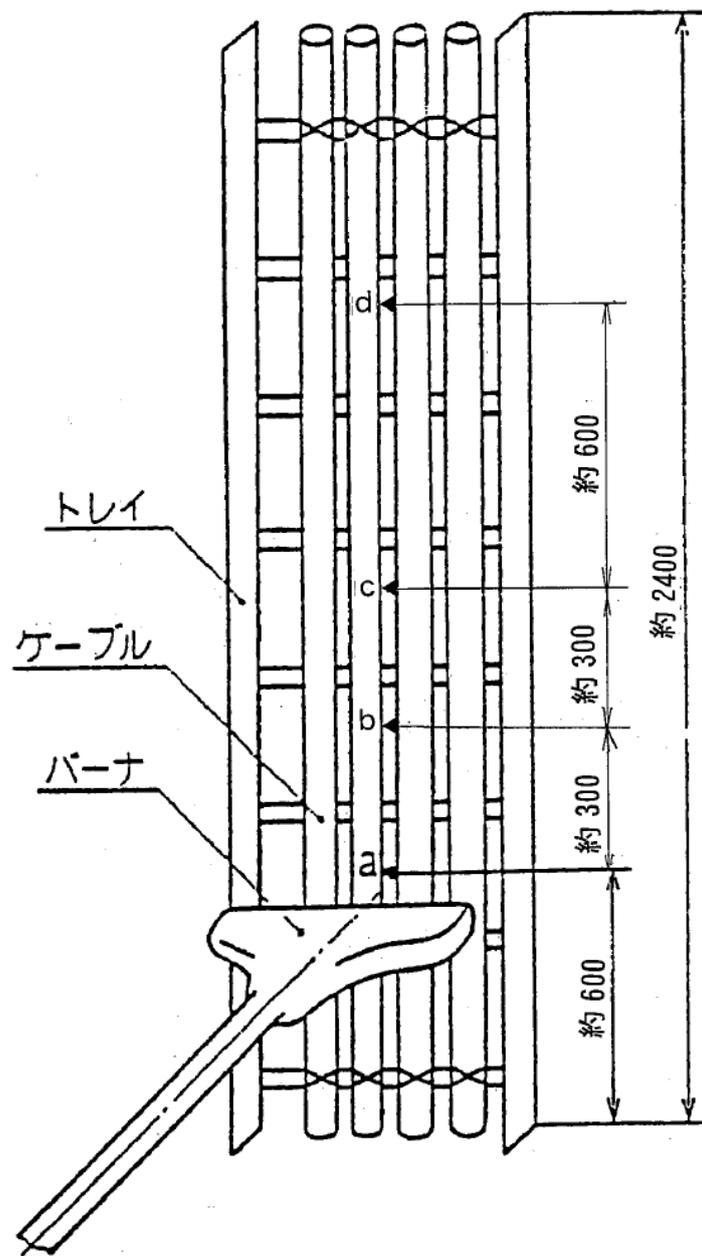


図 14. ケーブル照射状況 (電気的特性試験)



温度測定位置：a, b, c, d
 熱電対の先端はケーブル表面から約 5mm 離すこと。ただし a 点の垂直方向の位置は炎のほぼ中央とする。

図 15. 耐延焼性試験装置及び温度測定位置



図 16. PEEK ケーブル素線サンプル1 (ガンマ線照射前)

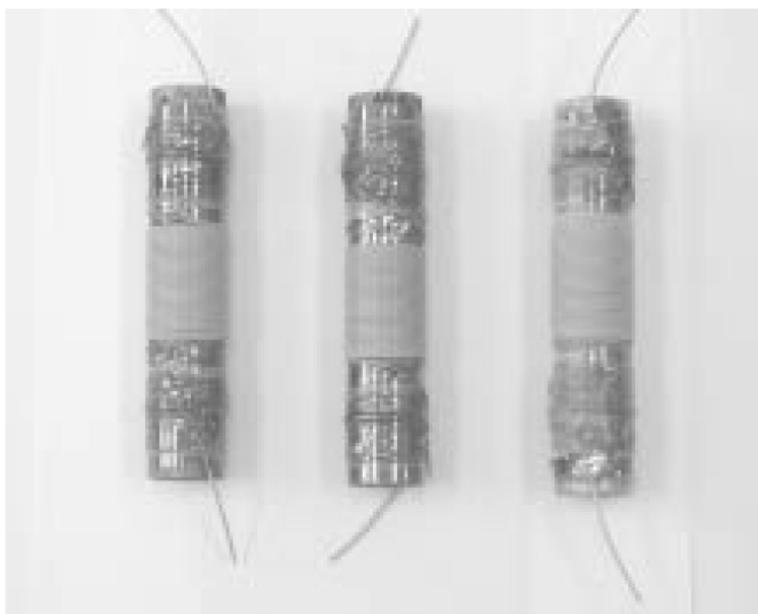


図 17. PEEK ケーブル素線サンプル1 (ガンマ線照射後)
(左) 10. 5 MG y (FJ-PC1-#1)
(中) 11. 8 MG y (FJ-PC1-#2)
(右) 6. 9 MG y (FJ-PC1-#3)

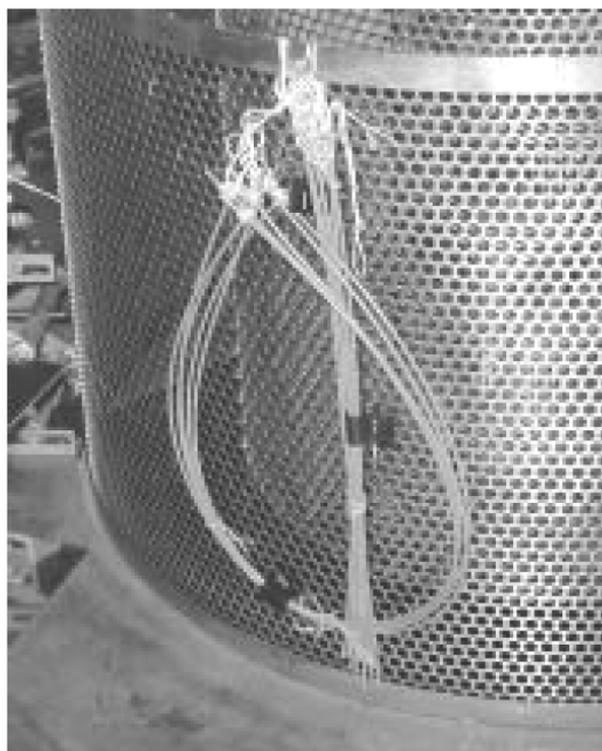


図 18. PEEK ケーブル素線サンプル 2、PEEK ケーブル素線サンプル 3 (照射前)



図 19. PEEK ケーブル素線サンプル 2 (ガンマ線照射後)
(左): 11.8 MGy
(中): 8.3 MGy
(右): 8.3 MGy



図 20. PEEK ケーブル素線サンプル 3 (照射前、照射後)
(左)照射前
(右)照射後 8. 3 MGy

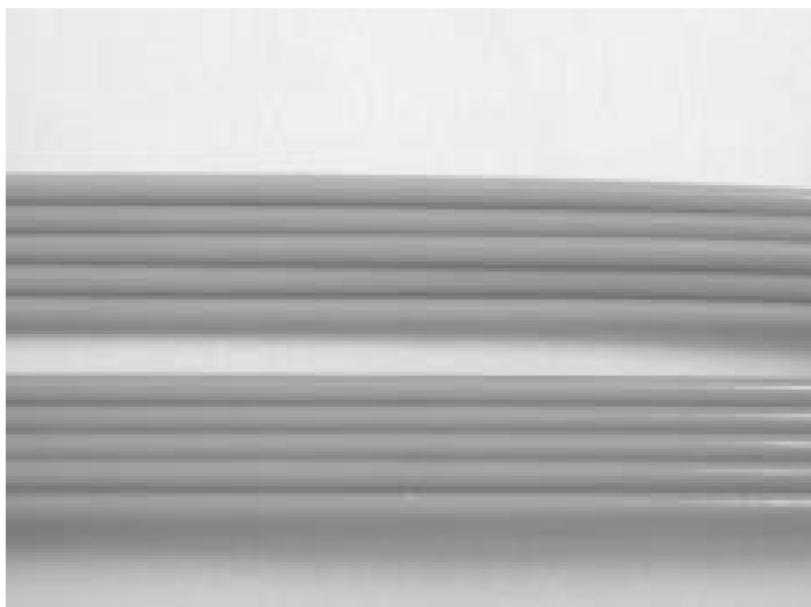


図 21. PEEK チューブ (照射前、照射後)
(上)照射前
(下)照射後 9. 6 MGy (ND-PT1-#1)

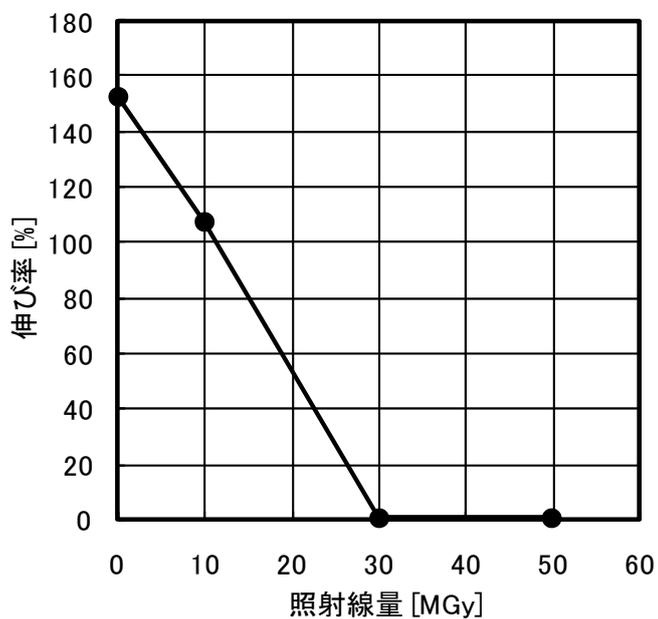


図 22. PEEK チューブの伸び率の照射特性 (PEEK 電線の基礎特性試験)

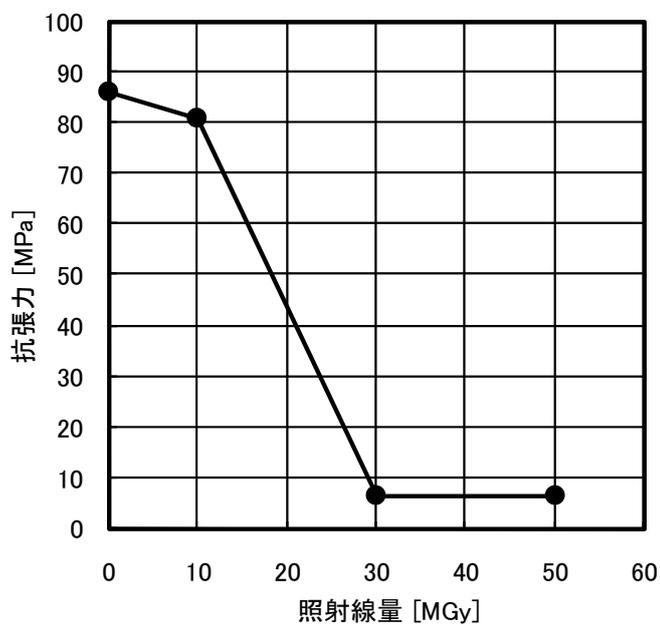


図 23. PEEK チューブの抗張力の照射特性 (PEEK 電線の基礎特性試験)

測定日時 : 2007年8月8日
場所 : 株式会社フジクラ 沼津事業所
気温 : 34.2°C
湿度 : 82%
測定機材 : 超絶縁計 (TOA) DSM-8103
測定資料 : SIP 高圧ケーブル (照射前) 赤、黒



測定結果 : 中心線心と遮へい層間で、500V 印加で測定

試料 No. 1 (黒) => $5.59 \times 10^{12} \Omega$

試料 No. 2 (赤) => $4.11 \times 10^{12} \Omega$



図 24. SIP 高電圧ケーブル絶縁抵抗測定状況

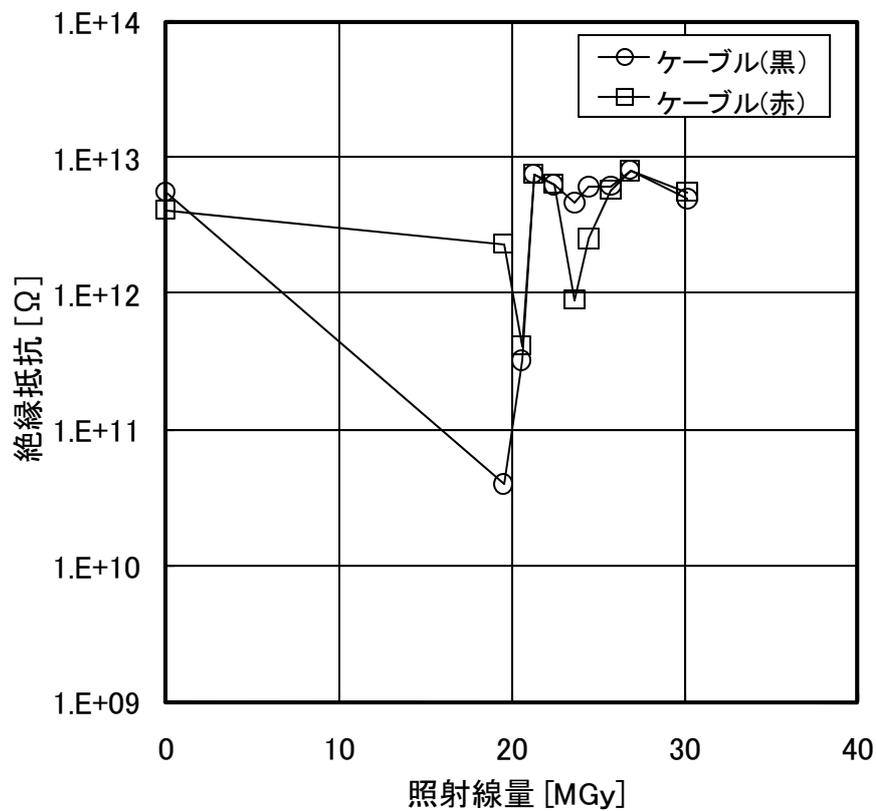


図 25. S I P 高電圧ケーブルの絶縁抵抗と照射線量



図 26. 最小曲げ半径屈曲状況（高電圧用同軸ケーブル 30MGy）



図 27. PEEK 絶縁体の状況（高電圧用同軸ケーブル、30MGy）

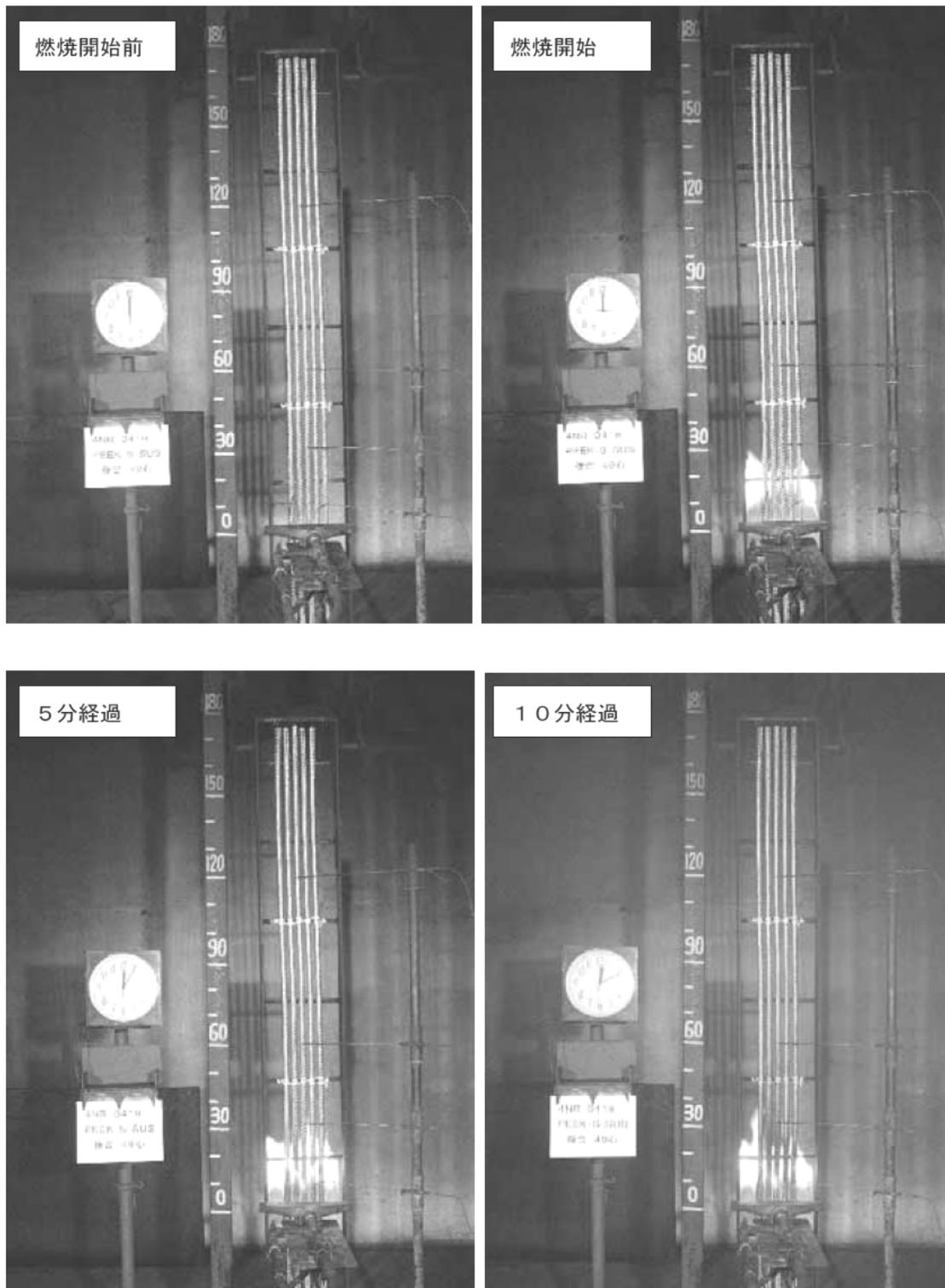


図 28 (1/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 0MG y

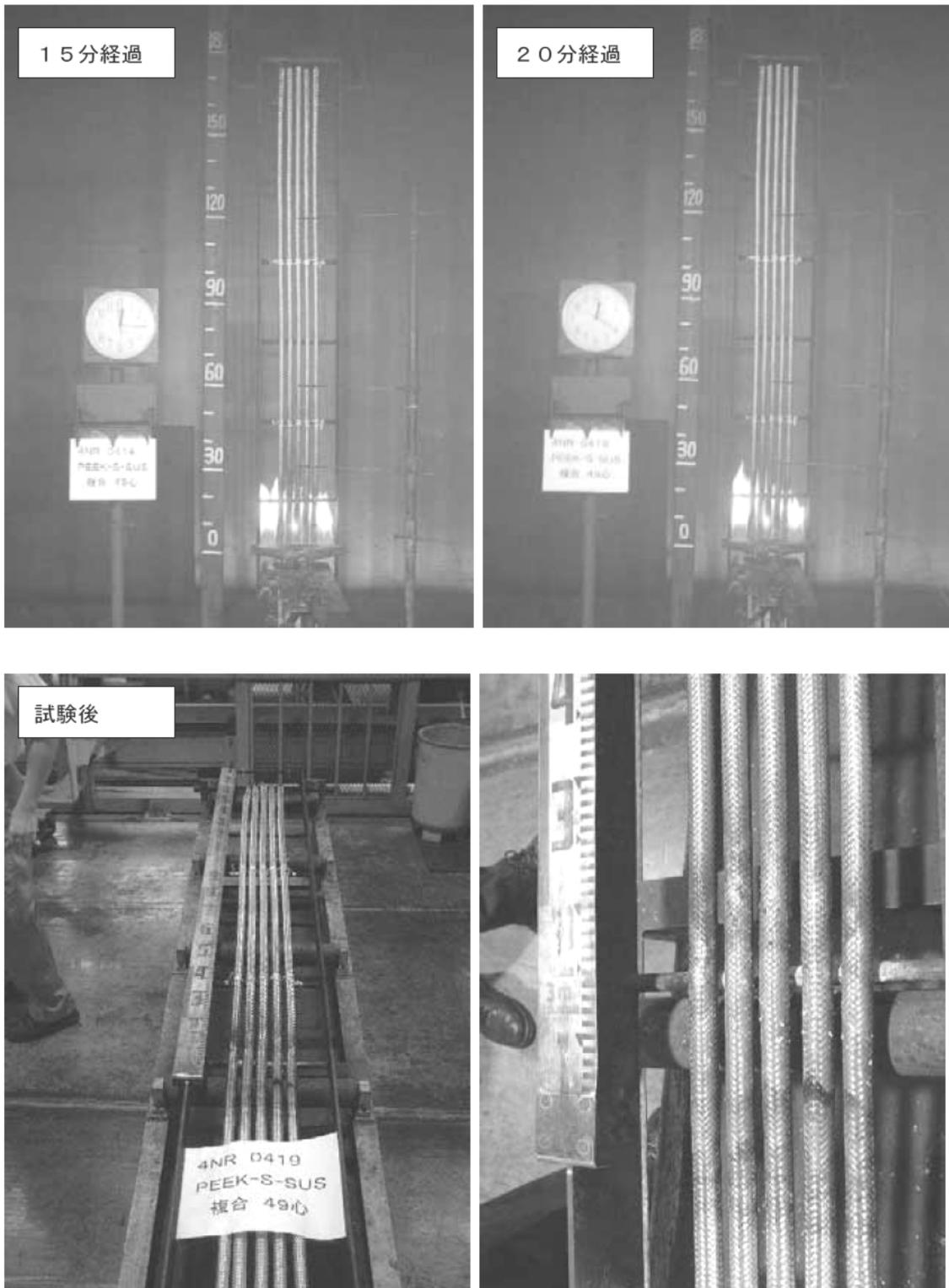


図 28 (2/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 0MG y

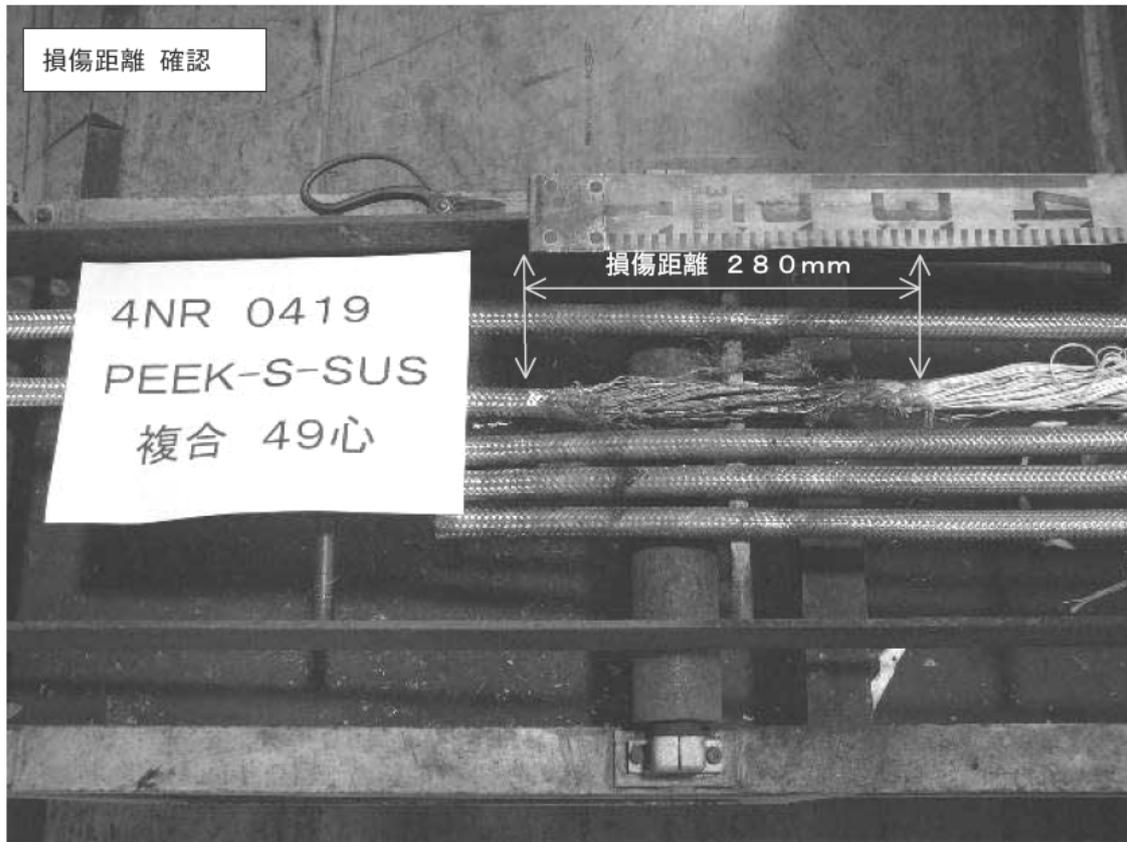


図 28(3/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 0MG y

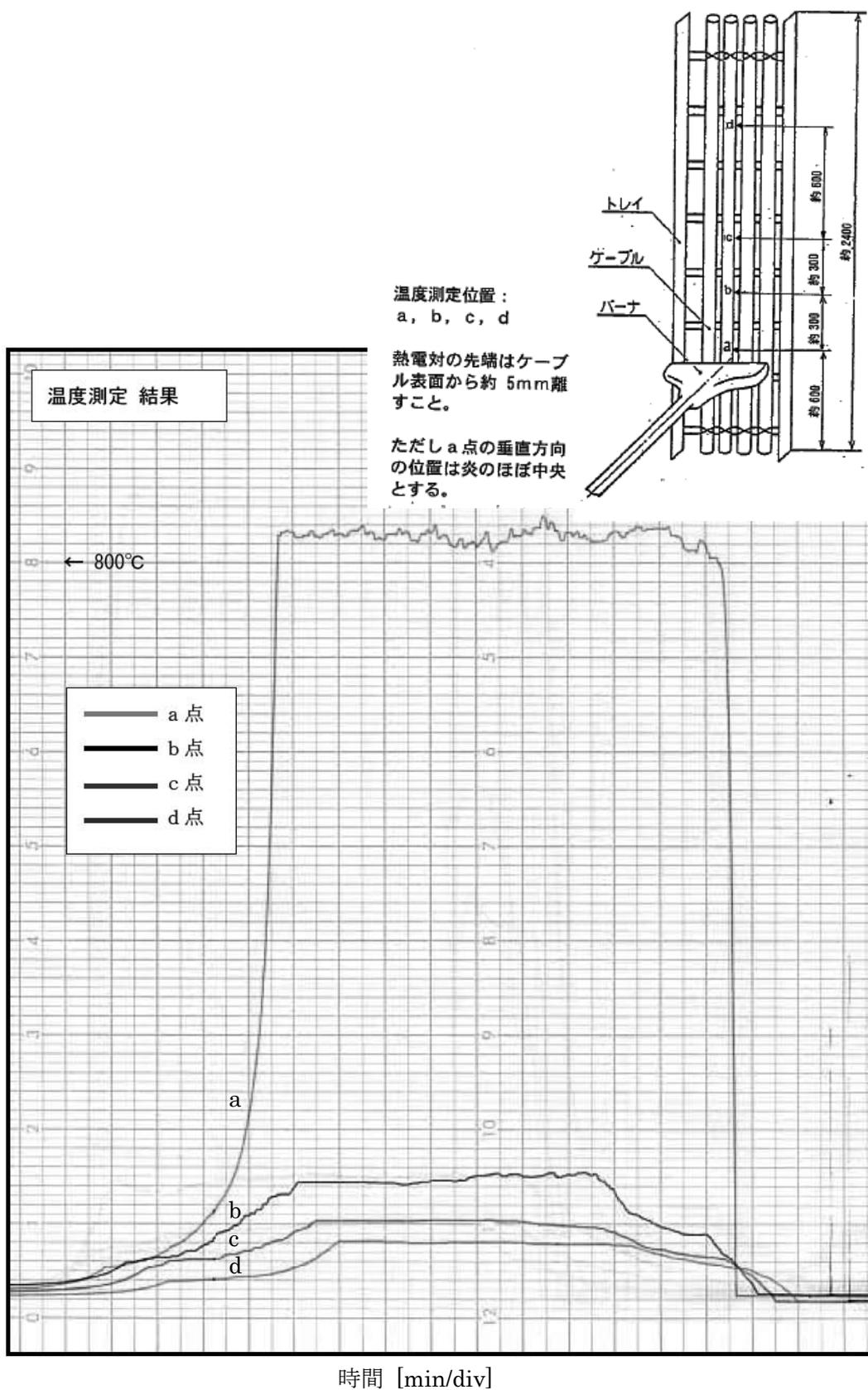


図 28(4/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 0MG y

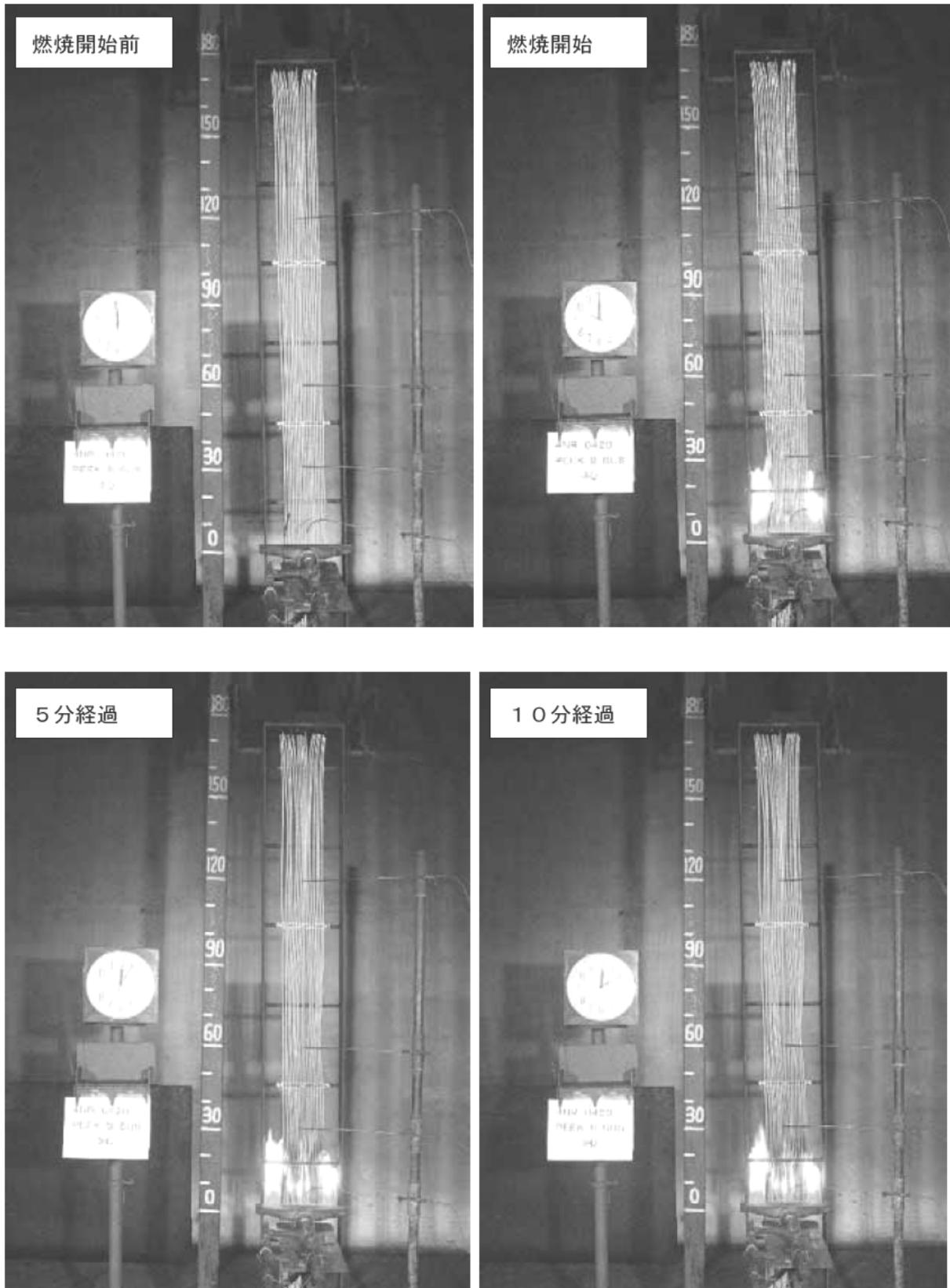


図 29 (1/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 0 MG y

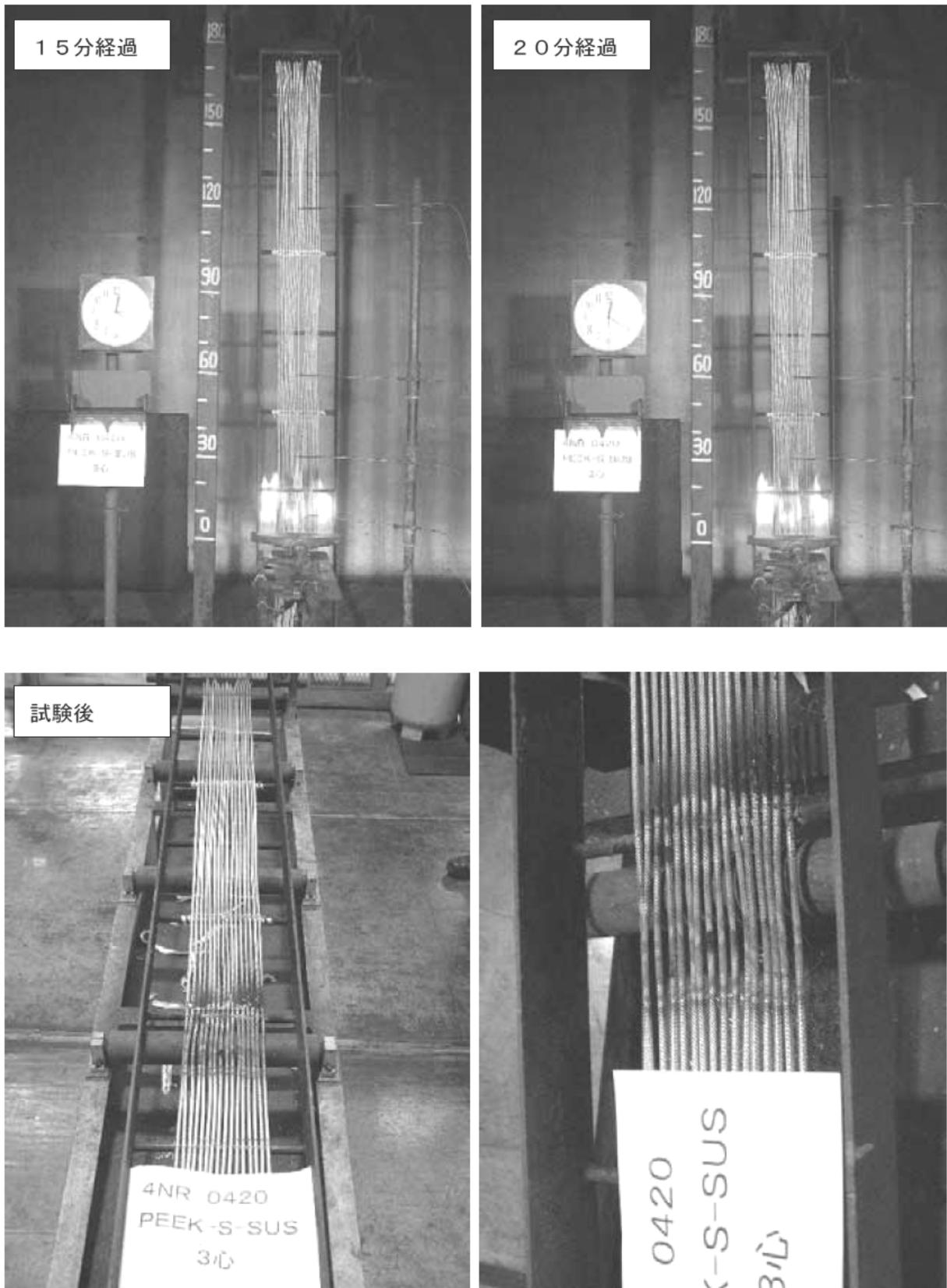


図 29 (2/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 0MG y

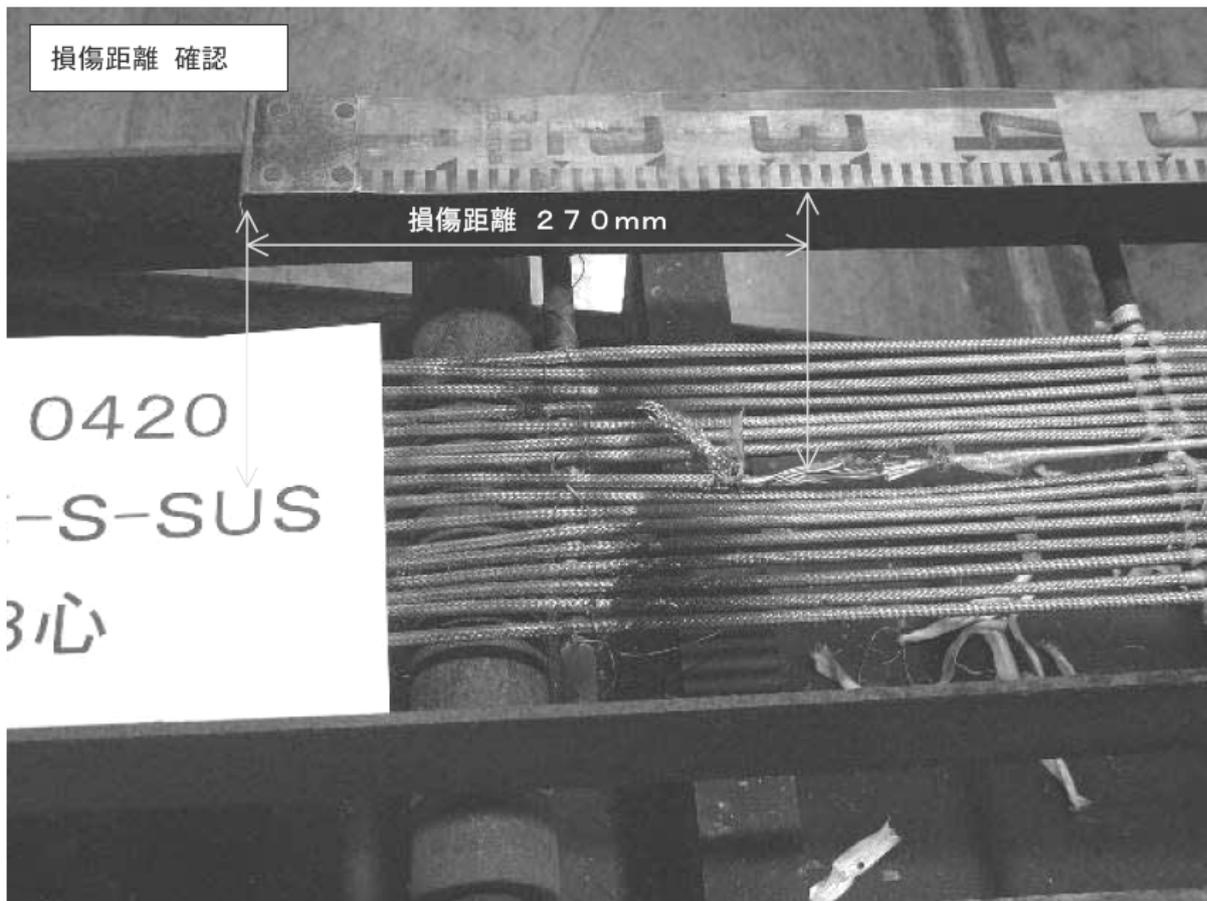


図 29 (3/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 0MG y

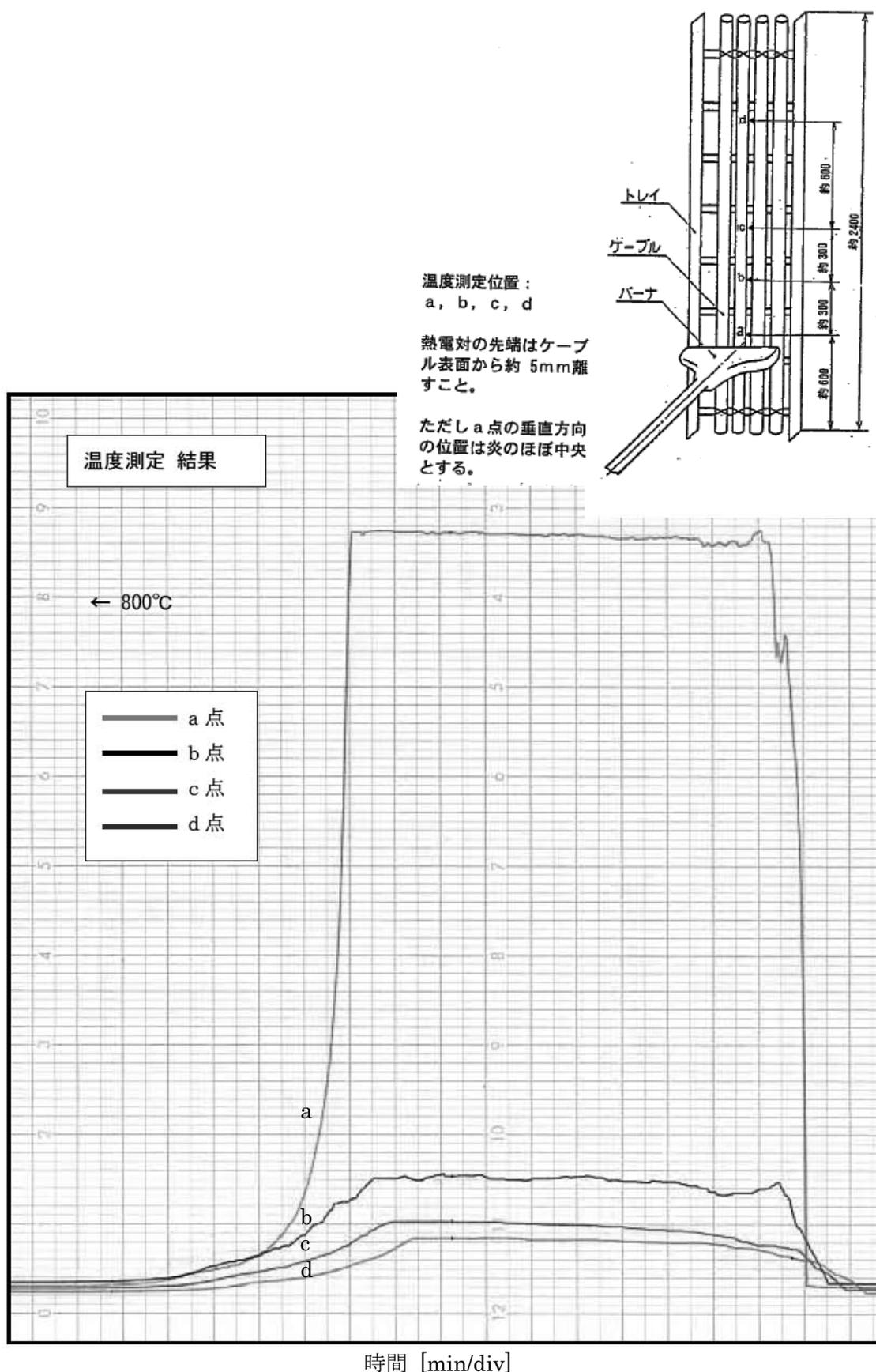


図 29 (4/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 0MG y

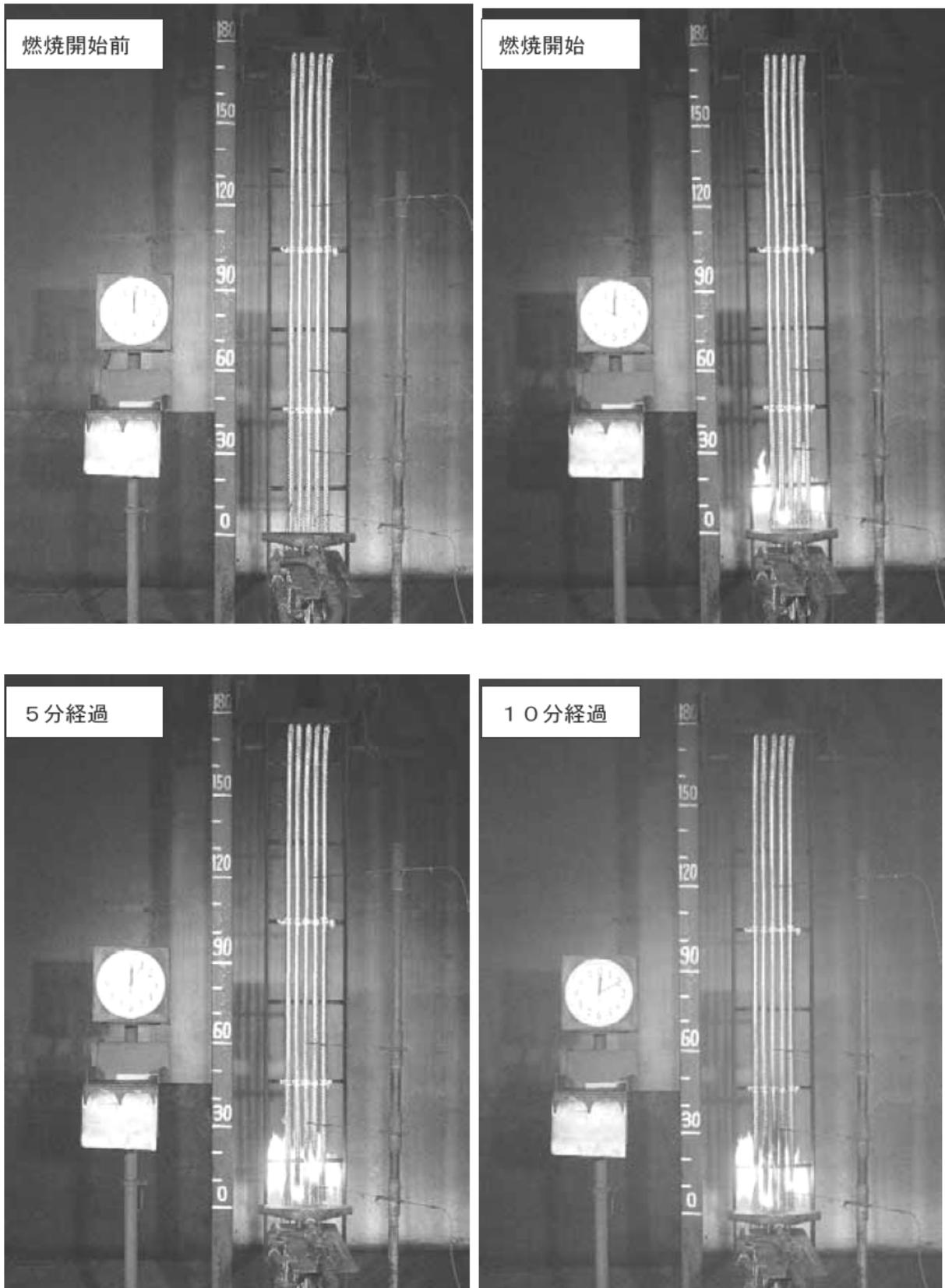


図 30 (1/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 10MG y

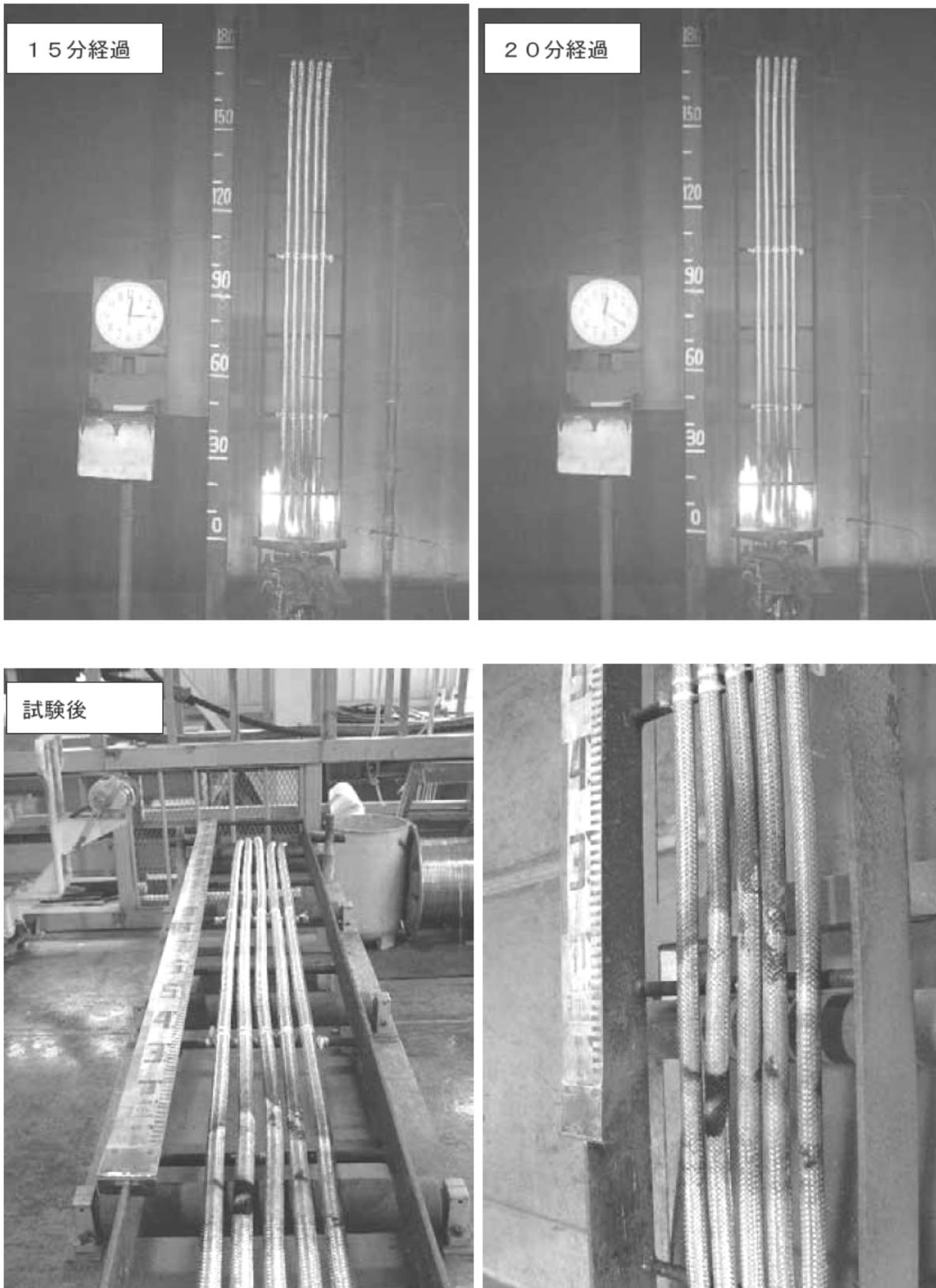


図 30(2/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 10MG y

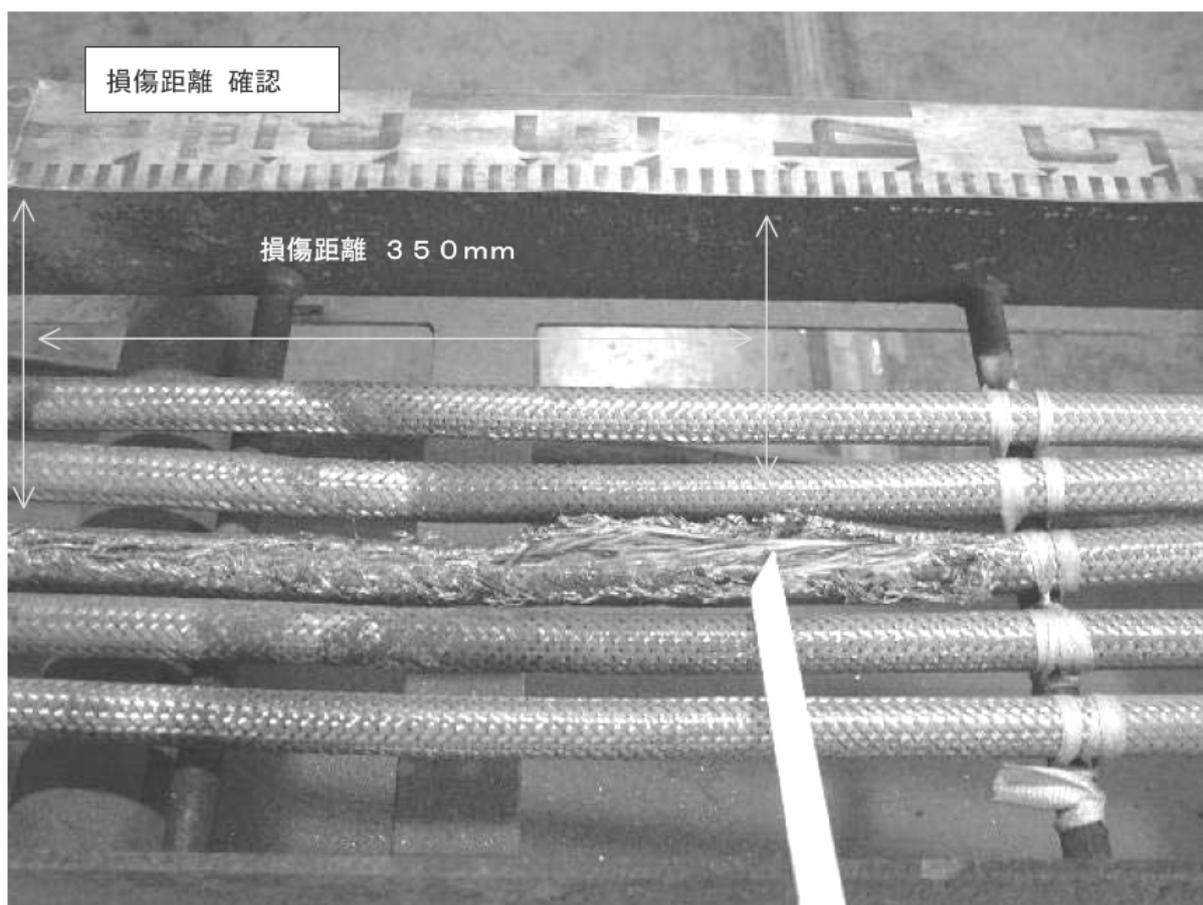


図 30(3/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 1 0MG y

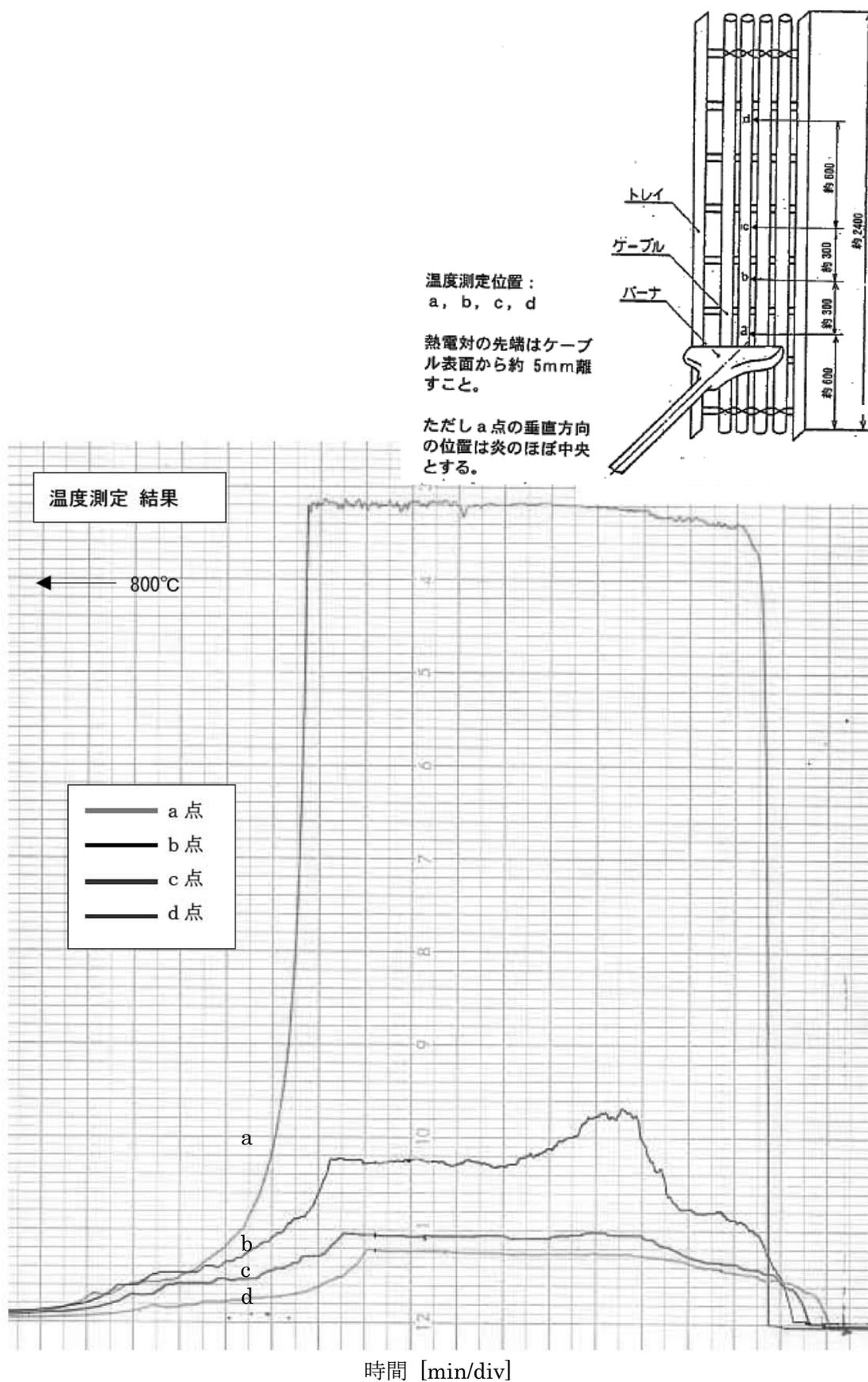


図 30(4/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 10MG y

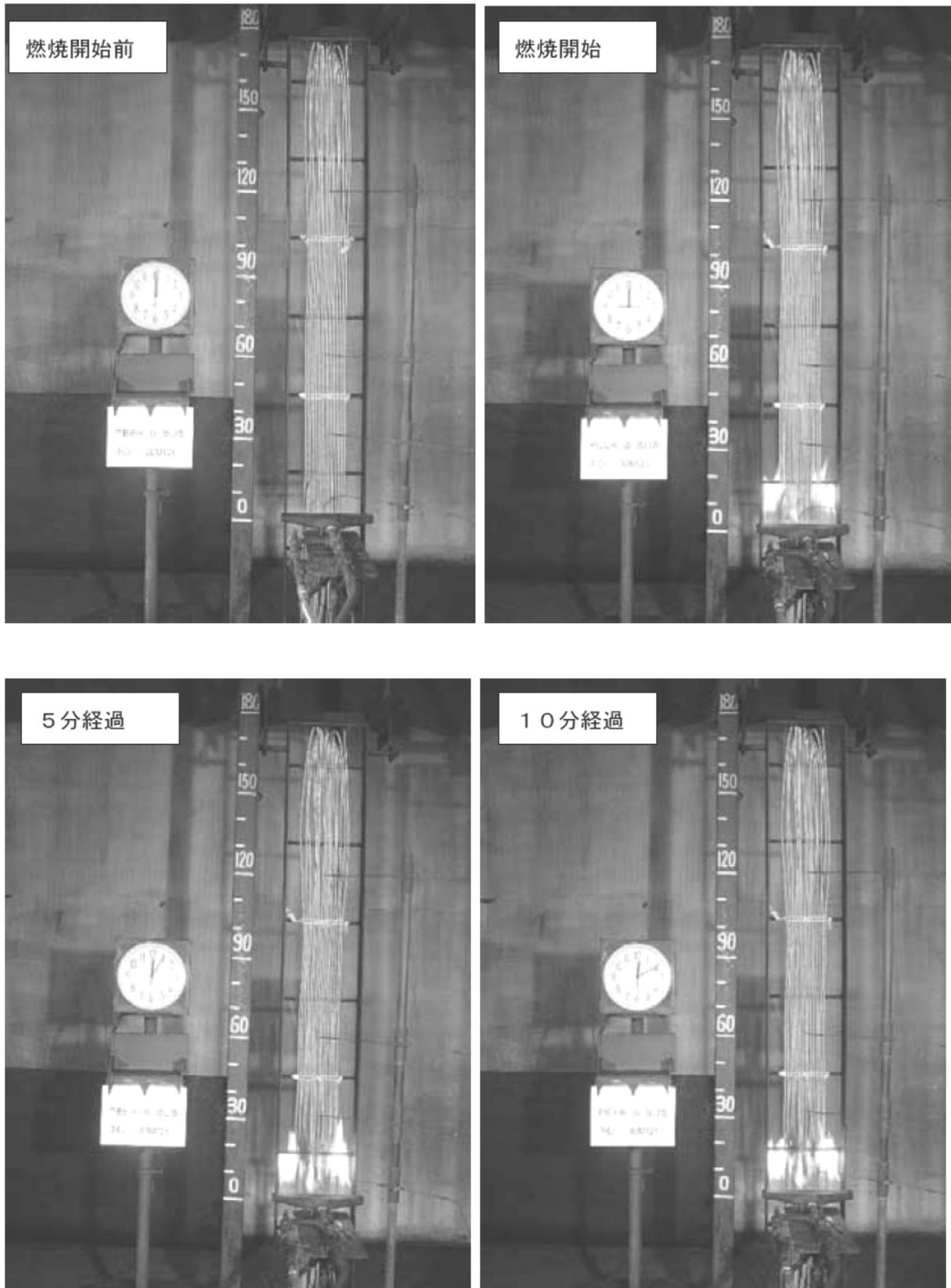


図 31 (1/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 30MGy

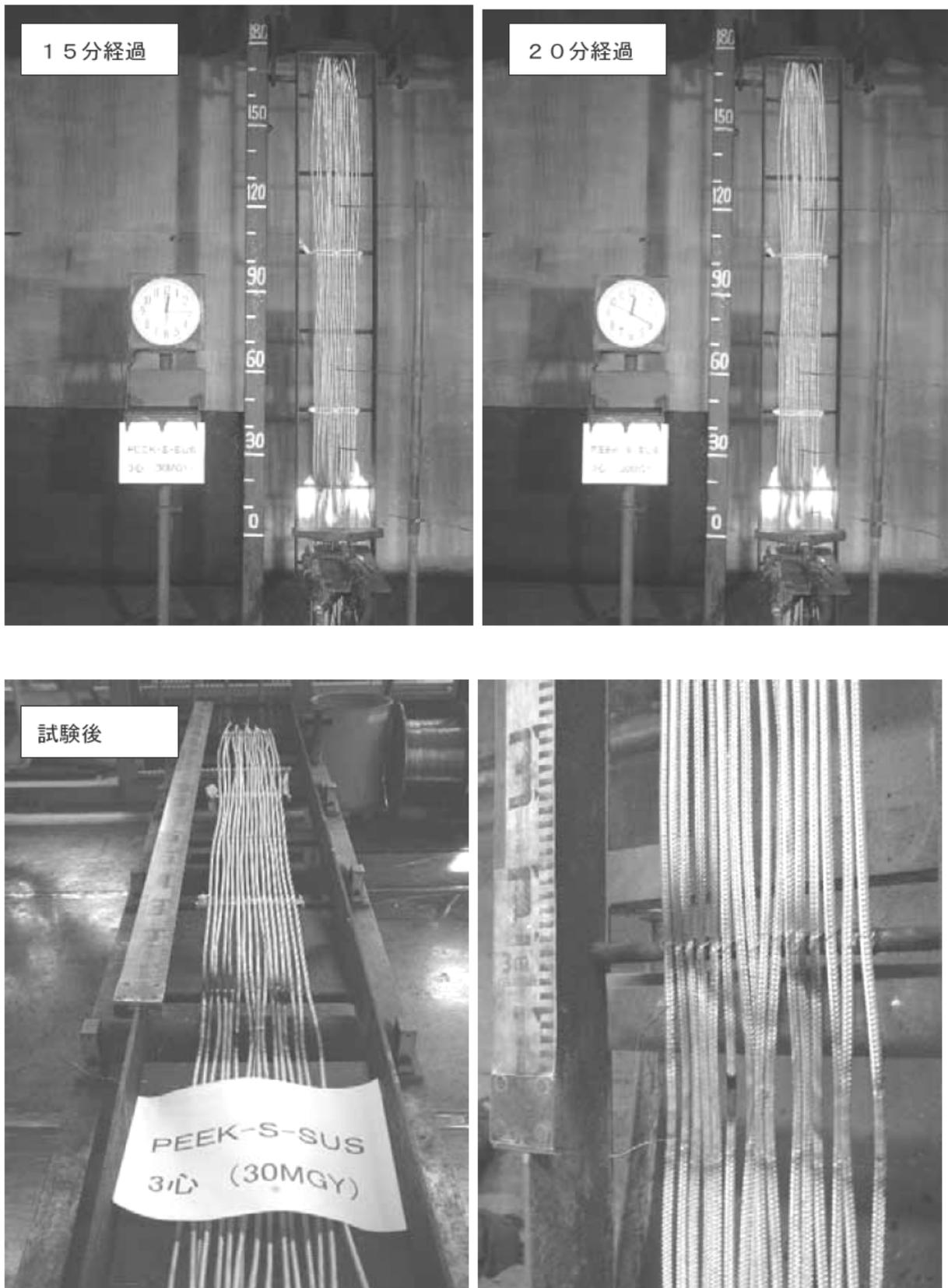


図 31 (2/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 30MGy



図 31 (3/4). 耐延焼性試験状況 (低電圧動力用ケーブル) 30MG y

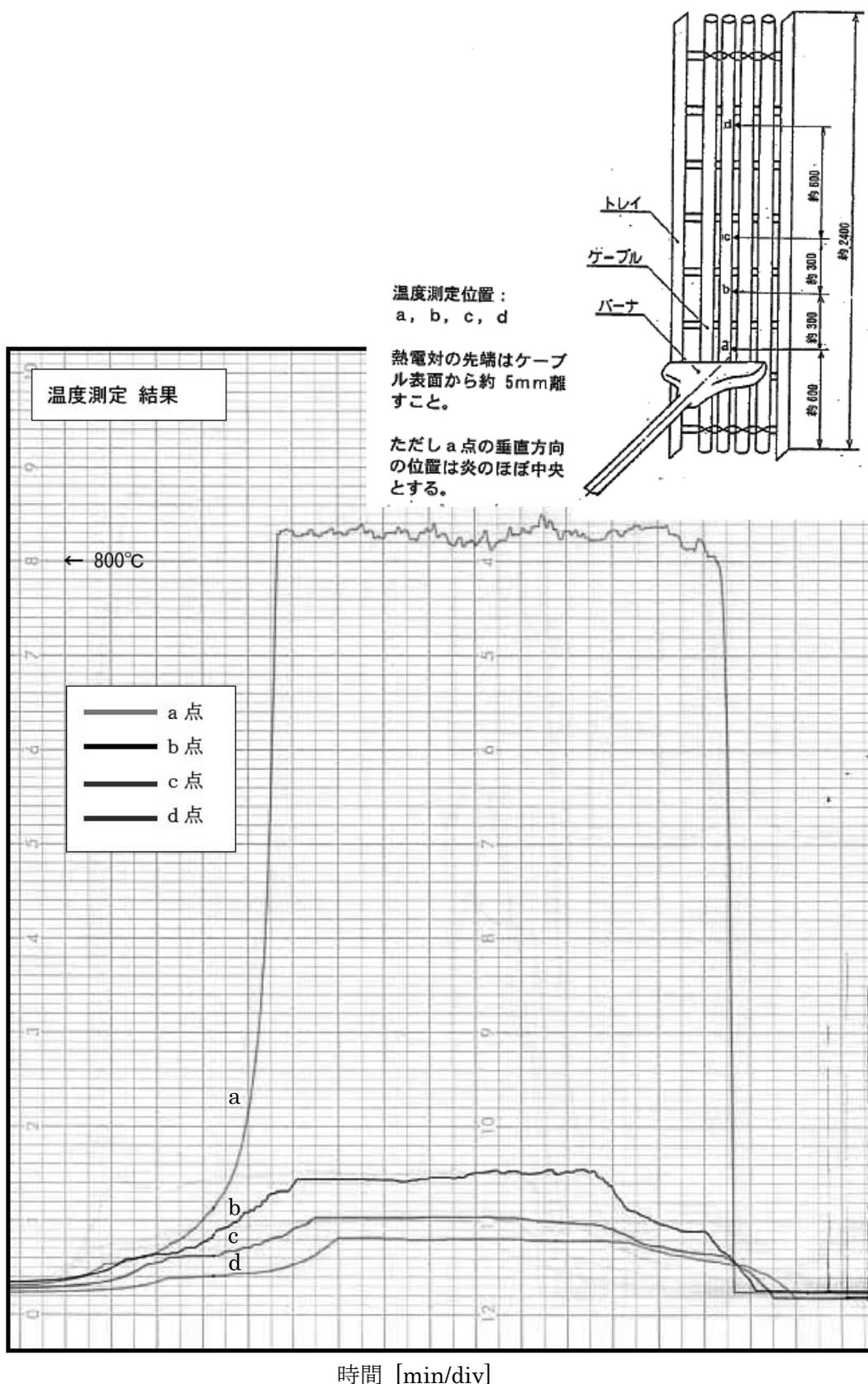


図 28(4/4). 耐延焼性試験状況 (信号用多芯ケーブル) 0MG y

表 1. PEEKの主な物性データ 4)

番号	項目	単位	物性値
1	比重	g/cm ³	1.32
2	引張強さ	MPa	100
3	伸び	%	100
4	比熱	Cal/g・°C	0.32
5	融点	°C	340
6	連続使用可能温度	°C	260
7	線膨張係数	10 ⁻⁵ /°C	4.7
8	分解温度	°C	503
9	耐電圧	kV/mm	105
10	体積固有抵抗	Ω・cm	4.9×10 ¹⁶
11	比誘電率	at 60Hz	2.2
12	表面抵抗	Ω	2×10 ¹⁶
13	酸素指数	—	38
14	燃焼性	—	不燃

表 2. 機器リスト (3 Ge VRCS 真空システム)

機器名称	設置数
ターボ分子ポンプ (TMP)	20 台
ドライスクロールポンプ (DSP)	20 台
スパッタイオンポンプ (SIP)	20 台
SIP用ベーキングヒーター	20 台
圧空式フォアラインバルブ	20 台
コールドカソードゲージ (CCG)	36 台
CCG用ベーキングヒーター	36 台
ピラニゲージ (PIG)	40 台
BA真空計 (BAG)	15 台
圧空式ゲートバルブ	8 台
圧空タンク圧力計	8 台

表 3. 照射試験に用いたケーブルの主要仕様

番号	項目	内容	備考
1	用途	低電圧動力用ケーブル	~200V
	導体	すずめっき軟銅より線 3 芯 1.25mm ²	
	絶縁体	PEEK 厚さ 0.15~0.20mm	
2	用途	信号用多芯ケーブル	
	導体	すずめっき軟銅より線 49 芯 0.5mm ²	
	絶縁体	PEEK 厚さ 0.15mm	
3	用途	高電圧用同軸ケーブル	~10kV
	導体	すずめっき軟銅より線 0.5mm ²	
	絶縁体	PEEK 厚さ 0.8~1.0mm	

表 4. 低電圧動力用ケーブル仕様

種類 (記号)		PEEK-S-SUS 3×2
導体	サイズ mm^2	2
	材料	すずめっき軟銅より線
	構成 本/mmφ	37/0.26
	外径 mm	1.8
絶縁体	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テル-テルクトン)
	色 (線心識別)	黒, 原, 赤
	厚さ mm	0.15 ~ 0.20
	最大外径 mm	2.20
介在物	材料	耐熱アラミド繊維
テープ	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テル-テルクトン)
遮へい	材料・構造	すずめっき軟銅線 編組しゃへい (素線径 0.12mm)
テープ	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テル-テルクトン)
がい装	材料	ステンレス鋼線 (SUS 316)
	素線径 mm	0.3
	最大外径 mm	8.5
概算質量	g/m	155
直流導体抵抗 (20°C)	Ω/km	10.1 以下
耐電圧		AC 1500V に 1 分間たえる。
絶縁抵抗 (20°C)	$\text{M}\Omega \cdot \text{km}$	30 以上

注：耐放射線性試験では、導体サイズが表中の 2mm^2 ではなく 1.25mm^2 を使用した。

表 5(1/4). 信号用多芯ケーブル仕様 (ユニット A)

対数 (線心数) × ユニット数		4 対 (8 心) × 2
導体	サイズ mm^2	0.5
	材料	すずめっき軟銅より線
	構成 本/mm ϕ	20/0.18
	外径 mm	0.9
絶縁体	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
	厚さ mm	0.15
	最大外径 mm	1.40
介在物	材料	耐熱アラミド繊維
テープ	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
遮へい	材料・構造	すずめっき軟銅線 編組しゃへい
	素線径 mm	0.14
	外径 約 mm	6.1
直流導体抵抗 (20°C) Ω/km		41.0 以下
耐電圧		AC 1500V に 1 分間たえる。
絶縁抵抗 (20°C) $\text{M}\Omega \cdot \text{km}$		30 以上

表 5(2/4). 信号用多芯ケーブル仕様 (ユニットB)

対数 (線心数) × ユニット数		2 対 (4 心) × 2
導体	サイズ mm^2	0.5
	材料	すずめつき軟銅より線
	構成 本/mm ϕ	20/0.18
	外径 mm	0.9
絶縁体	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
	厚さ mm	0.15
	最大外径 mm	1.40
介在物	材料	耐熱アラミド繊維
テープ	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
遮へい	材料・構造	すずめつき軟銅線 編組しゃへい
	素線径 mm	0.12
	外径 約 mm	5.1
直流導体抵抗 (20 $^{\circ}\text{C}$) Ω/km		41.0 以下
耐電圧		AC 1500V に 1 分間たえる。
絶縁抵抗 (20 $^{\circ}\text{C}$) $\text{M}\Omega \cdot \text{km}$		30 以上

表 5(3/4). 信号用多芯ケーブル仕様 (ユニットC)

線心数 × ユニット数		1 心 × 1
導体	サイズ mm^2	1.25
	材料	すずめつき軟銅より線
	構成 本/mm ϕ	50/0.18
	外径 mm	1.5
絶縁体	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
	厚さ mm	0.15 ~ 0.20
	最大外径 mm	2.00
直流導体抵抗 (20 $^{\circ}\text{C}$) Ω/km		15.8 以下
耐電圧		AC 1500V に 1 分間たえる。
絶縁抵抗 (20 $^{\circ}\text{C}$) $\text{M}\Omega \cdot \text{km}$		30 以上

表 5(4/4). 信号用多芯ケーブル仕様 (ユニットD)

対数 (線心数) × ユニット数		1 対 (2 心) × 1 2
導体	サイズ mm ²	0.75
	材料	すずめっき軟銅より線
	構成 本/mmφ	30/0.18
	外径 mm	1.1
絶縁体	材料	PEEK (ポリエーテルエーテルケトン)
	厚さ mm	0.15
	最大外径 mm	1.50
対より 外径 約 mm		2.8
直流導体抵抗 (20°C) Ω/km		26.8 以下
耐電圧		AC 1500V に 1 分間たえる。
絶縁抵抗 (20°C) MΩ・km		30 以上

表 6. 信号用多芯ケーブルの各ユニットをより合わせた構造

内層 撚合せ	ユニット数	ユニットA×2 + ユニットB×2 + ユニットC×1
	介在物	耐熱アラミド繊維
	テープ	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
	外径 約 mm	15.5
外層 撚合せ	ユニット数	ユニットD×12
	介在物	耐熱アラミド繊維
	テープ	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
	外径 約 mm	21
遮へい	材料・構造	すずめっき軟銅線 編組しゃへい
	素線径 mm	0.18
	外径 約 mm	23
テープ	材料	PEEK (ホ ^o リエ-テルエ-テルクトン)
がい装	材料	ステンレス鋼線 (SUS 316)
	素線径 mm	0.3
	最大外径 mm	26
概算質量	g/m	905

表 7. 高電圧用同軸ケーブル仕様

高電圧リード線		
導体	サイズ mm^2	0.5
	材料	すずめつき軟銅より線
	構成 本/mm ϕ	20/0.18
	外径 mm	0.9
絶縁体	材料	PEEK (ホ ^o リエーテルエーテルクトン)
	色 (線心識別)	原
	平均厚さ mm	1.00
	最小厚さ mm	0.80
	最大外径 mm	2.85
遮へい	材料	すずめつき軟銅線 編組しゃへい 編組密度 90%以上
安全対策用リード線		
導体	サイズ mm^2	0.5
	材料	すずめつき軟銅より線
	構成 本/mm ϕ	20/0.18
	外径 mm	0.9
絶縁体	材料	PEEK (ホ ^o リエーテルエーテルクトン)
	色 (線心識別)	原および黒
	平均厚さ mm	0.32
	最小厚さ mm	0.28
介在	材料	耐熱アラミド繊維
テープ	材料	PEEK (ホ ^o リエーテルエーテルクトン)
がい装	材料	ステンレス鋼線 (SUS 316)
	素線径 mm	0.3
	最大外径 mm	10.0
概算質量	g/m	130
直流導体抵抗 (20 $^{\circ}$ C)	Ω/km	39.1 以下
耐電圧		AC 30kV に1分間たえる。
絶縁抵抗 (20 $^{\circ}$ C)	$\text{M}\Omega \cdot \text{km}$	1000 以上

表 8. 試験項目・照射線量一覧（電気的特性試験）

番号	ケーブル種類	照射線量 (MG y)	外観 (構成)	導通抵抗	耐電圧 *1	絶縁抵抗 *2
1	低電圧動力用ケーブル	0	○	○	○	○
		30	○	○	○	○
2	信号用多芯ケーブル	0	○	○	○	○
		10 *3	○	○	○	○
3	高電圧用同軸ケーブル	0～30	—	—	—	○

*1：耐電圧試験は JIS C 3605 「ポリエチレンケーブル」に基づき実施した。

*2：絶縁抵抗は JIS C 3005 「ゴム・プラスチック絶縁電線試験方法」の絶縁抵抗試験方法に基づき実施した。

*3：10MG y 時に、インダクタンス (L)、静電容量 (C)、抵抗 (R) を別途測定し、未照射の測定値と比較した。

表 9. ガンマ線照射詳細（電気的特性試験）

項目	低電圧動力用ケーブル		高電圧用同軸ケーブル
照射線量	10MG y 照射	30MG y 照射	20MGy から 1MGy 毎に試験し、30MGy まで照射
線源	コバルト 60 高崎量子応用研究所第 1 照射棟		
照射期間	H16.10.19～ H16.12.08	H16.12.08～ H17.4.15	H19 年 8 月～H20 年 4 月
照射線量率	平均 11.4kGy/h (線源側 14.3kGy/h 裏側 8.41kGy/h)	平均 12.79kGy/h (上 10.3kGy/h 下 13.17kGy/h 東 12.78kGy/h 西 14.90kGy/h)	11.63kGy/h (8 箇所平均)
照射方法	楕円状に固縛して照射		
被照射体（ケーブル） 反転	4.13MG y にて反転	1 5 MG y にて反転	照射ステップごとに 反転
照射時間（h r）	1150	2906	2592 (最終積算値)
照射線量（MGy）	13.1	37.1	30.2MG y (最終積算値)

表 10. 照射試験に用いたケーブル（耐延焼性試験）

番号	項目	内容	備考
1	用途	信号用多芯ケーブル	
	名称	信号用多芯ケーブル	
	導体	すずめっき軟銅より線 49 芯 0.5mm ²	
	絶縁体	PEEK 厚さ 0.15mm	
	試験本数	2. 4 m 5 本	
2	用途	低電圧（～200V）動力用	
	名称	低電圧動力用ケーブル	
	導体	すずめっき軟銅より線 3 芯 1.25mm ²	
	絶縁体	PEEK 厚さ 0.15～0.20mm	
	試験数量	2. 4 m 20 本	

表 11. 外観試験結果 (PEEK 電線の基礎特性試験)

供試体種類	照射線量 (MGy)	外観試験結果 (目視)	写真等
PEEK ケーブル素線サンプル 1	10	着色以外の変化なし	図 16、図 17
	30	端部直線部における PEEK 絶縁体に亀裂あり。	
PEEK ケーブル素線サンプル 2	10	着色以外の変化なし	図 18、図 19
	30	少しの力で折れる。	
PEEK ケーブル素線サンプル 3	10	着色以外の変化なし	図 20
	30	少しの力で折れる。	
PEEK チューブ	10	着色以外の変化なし	図 21

表 12. 耐電圧試験結果 (PEEK 電線の基礎特性試験)

供試体種類	線量 (MGy)	耐電圧試験結果	備考
PEEK ケーブル素線サンプル 1	10	合格	
	30	合格	
	50	合格	
PEEK ケーブル素線サンプル 2	10	合格	
	30	計測不能	絶縁体折損のため計測できなかった。
	50	計測不能	絶縁体折損のため計測できなかった
PEEK ケーブル素線サンプル 3	10	合格	
	30	計測不能	絶縁体折損のため計測できなかった
	50	計測不能	絶縁体折損のため計測できなかった

試験方法：

a. PEEK ケーブル素線サンプル 1

電気学会技術報告 (II 部) 139 号

(原子力発電所用電線・ケーブルの環境試験方法ならびに耐延焼性試験方法に関する推奨案)

b. PEEK ケーブル素線サンプル 2, サンプル 3

JIS C 3005

表 13. 電気的特性試験結果まとめ

線量	種類	試験結果	試験結果詳細
0 (初期値)	信号用多芯ケーブル	直流抵抗：37.9Ω/km 耐電圧1.5kV/min：1分保持 絶縁抵抗：18000MΩ・km等	表 15
	低電圧動力用ケーブル	直流抵抗：15.1Ω/km 耐電圧1.5kV/min：1分保持 絶縁抵抗：63000MΩ・km等	表 16
	高電圧同軸ケーブル	絶縁抵抗：4.1E12Ω/10m	表 19 図 24
10MGy	信号用多芯ケーブル	直流抵抗：37.9Ω/km 耐電圧1.5kV/min：良 絶縁抵抗：2500MΩ・km	表 17
20MGy	高電圧同軸ケーブル	絶縁抵抗：2.3E12Ω/10m	表 19
30MGy	低電圧動力用ケーブル	直流抵抗：15.2Ω/km 耐電圧1.5kV/min：30秒にて ケーブル曲がり箇所、絶縁亀 裂部で地絡 絶縁抵抗：5.200MΩ・km	表 18
	高電圧同軸ケーブル	絶縁抵抗：5.6E12Ω/10m	表 19

注記：高電圧同軸ケーブルの絶縁抵抗と照射線量は図 25に示した。
L, C, R測定結果は表 14に示した。

表 14. L,C,R 測定結果 (信号用多芯ケーブル)

<ユニットA : 黒一原(1) >

周波数 (kHz)	照射前			照射後(10MGy)		
	R (Ω)	L (μH)	C (nF)	R (Ω)	L (μH)	C (nF)
28	0.554	3.93	0.3275	0.550	3.96	0.3284
29	0.556	3.93	0.3279	0.552	3.96	0.3288
30	0.558	3.92	0.3283	0.554	3.95	0.3294
31	0.560	3.92	0.3289	0.556	3.95	0.3300
32	0.562	3.91	0.3296	0.558	3.94	0.3307
33	0.564	3.91	0.3305	0.560	3.94	0.3316
34	0.566	3.90	0.3314	0.562	3.94	0.3325
35	0.568	3.90	0.3323	0.564	3.93	0.3334
36	0.570	3.89	0.3332	0.566	3.93	0.3343
37	0.572	3.89	0.3342	0.568	3.93	0.3352
38	0.575	3.89	0.3352	0.571	3.92	0.3361
39	0.577	3.88	0.3361	0.573	3.92	0.3370
40	0.578	3.88	0.3369	0.574	3.91	0.3377

<ユニットB : 黒一原(1) >

周波数 (kHz)	照射前			照射後(10MGy)		
	R (Ω)	L (μH)	C (nF)	R (Ω)	L (μH)	C (nF)
28	0.514	4.03	0.3083	0.560	4.02	0.3048
29	0.516	4.03	0.3086	0.562	4.01	0.3052
30	0.518	4.03	0.3091	0.563	4.01	0.3057
31	0.520	4.02	0.3097	0.565	4.01	0.3064
32	0.522	4.02	0.3103	0.567	4.01	0.3071
33	0.524	4.02	0.3111	0.569	4.00	0.3079
34	0.526	4.01	0.3119	0.571	4.00	0.3088
35	0.528	4.01	0.3128	0.573	4.00	0.3096
36	0.530	4.01	0.3136	0.575	4.00	0.3105
37	0.532	4.01	0.3145	0.576	4.00	0.3114
38	0.535	4.01	0.3154	0.579	4.00	0.3124
39	0.537	4.00	0.3162	0.581	3.99	0.3131
40	0.539	4.00	0.3169	0.582	3.99	0.3138

<ユニットD : 黒(1)一原(1) >

周波数 (kHz)	照射前			照射後(10MGy)		
	R (Ω)	L (μH)	C (nF)	R (Ω)	L (μH)	C (nF)
1	0.366	3.80	0.3650	0.360	3.90	0.3446
5	0.358	4.00	0.3650	0.351	4.10	0.3451
10	0.360	4.10	0.3646	0.353	4.19	0.3449

表 15(1/6). PEEK ケーブル照射試験成績表(照射前)

試験体	信号用多芯ケーブル ユニットA (*1)				
日時	平成 16 年 6 月 3 日	番号	N2-3747		
品名	TMP 接続ケーブル-1	数量	20m×1、30m×1		
照射線量	0MGy (照射前)	仕様書/製造番号	VIN-1708A 4NR0419		
検査項目	単位	規格	結果		
構造	導体	サイズ	mm ²	0.5	0.5
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	20/0.18	20/0.18~20/0.18
		外径	mm	0.9	0.84~0.85
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良
		色	—	別紙参照	良
		厚さ	mm	0.15	0.17~0.18
		最大外径	mm	1.40	1.19~1.21
	遮へい	材料・構造	—	スズめつき軟銅線・網組遮へい	良
		素線径	mm	0.14	0.14,0.14
		外径	mm	約 6.1	6.10,6.10
	直流導体抵抗(20℃)	Ω/km	41.0 以下	37.8~37.9	
耐電圧 (*2)	KV/1 分間	1.5	良		
絶縁抵抗(20℃)	MΩ・km	30 以上	18000~30000		

*1: ユニット A,B,C に関しては 4/4 参照。

*2: 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 15(2/6). PEEKケーブル照射試験成績表(照射前)

試験体		信号用多芯ケーブル ユニットB (*1)			
検査項目		単位	規格	結果	
構造	導体	サイズ	mm ²	0.5	0.5
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	20/0.18	20/0.18~20/0.18
		外径	mm	0.9	0.84~0.85
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良
		色	—	別紙参照	良
		厚さ	mm	0.15	0.17~0.18
		最大外径	mm	1.40	1.19~1.21
	遮へい	材料・構造	—	スズめつき軟銅線・網組遮へい	良
		素線径	mm	0.12	0.12,0.12
		外径	mm	約 5.1	4.90,4.90
	直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	41.0 以下	37.8~37.9
	耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	13000~19000	

*1 : ユニット A,B,C に関しては 4/4 参照。

*2 : 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 15(3/6). PEEKケーブル照射試験成績表(照射前)

試験体		信号用多芯ケーブル ユニットC (*1)			
検査項目		単位	規格	結果	
構造	導体	サイズ	mm ²	1.25	1.25
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	50/0.18	50/0.18
		外径	mm	1.5	1.32
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良
		色	—	別紙参照	良
		厚さ	mm	0.15~0.20	0.28
		最大外径	mm	2.00	1.88
直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	15.8 以下	15.0	
耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良	
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	190000	

*1 : ユニット A,B,C に関しては 4/4 参照。

*2 : 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 15(4/6). PEEKケーブル照射試験成績表(照射前)

試験体		信号用多芯ケーブル ユニットD (*1)				
検査項目		単位	規格	結果		
構造	導体	サイズ	mm ²	0.75	0.75	
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良	
		構成	本/mm	30/0.18	30/0.18~30/0.18	
		外径	mm	1.1	1.01~1.02	
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良	
		色	—		良	
		厚さ	mm	0.15~0.20	0.17~0.18	
		最大外径	mm	1.50	1.38~1.42	
	直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	26.8 以下	25.2~25.7	
	耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良	
絶縁抵抗(20℃)		MΩ·km	30 以上	11000, 17000		

*1: ユニットA,B,Cに関しては表 15 (6/6) 参照。

*2: 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 15(5/6). PEEKケーブル照射試験成績表(照射前)

試験体		信号用多芯ケーブル ケーブルを撚り合せたケーブル構造			
検査項目		単位	規格	結果	
構造	内層より合わせユニット数	—	A × 2、B × 2、C × y 1	良	
	外層より合わせユニット数	—	D × 1 2	良	
	遮へい	材料・構造	—	スズめっき軟銅線・網組み遮へい	良
		素線径	mm	0.18	0.18
		外径	mm	約 23	21.0
	がい装	材料・構造	—	ステンレス鋼線(SUS316)	良
		素線径	mm	0.3	0.32
		最大外径	mm	26	22.0

表 15(6/6). PEEKケーブル照射試験成績表(照射前)

線心識別		信号用多芯ケーブル	
ユニット名称	ユニット No.	対 No.	識別内容
A	1	1	黒-原 (1)
		2	赤-原 (1)
		3	緑-原 (1)
		4	原 (2) - 原 (3)
	2	1	黒-原 (4)
		2	赤-原 (4)
		3	緑-原 (4)
		4	原 (5) - 原 (6)
B	1	1	黒-原 (1)
		2	赤-原 (1)
	2	1	黒-原 (2)
		2	赤-原 (2)
C	-	-	原
D	1	-	黒 (1) - 原 (1)
	2	-	黒 (2) - 原 (2)
	3	-	黒 (3) - 原 (3)
	4	-	黒 (4) - 原 (4)
	5	-	黒 (5) - 原 (5)
	6	-	黒 (6) - 原 (6)
	7	-	黒 (7) - 原 (7)
	8	-	黒 (8) - 原 (8)
	9	-	黒 (9) - 原 (9)
	10	-	黒 (10) - 原 (10)
	11	-	黒 (11) - 原 (11)
	12	-	黒 (12) - 原 (12)

() 内の数字は、ドットマークを表す。

表 16. PEEK ケーブル照射試験成績表(照射前)

試験体	低電圧動力用ケーブル				
日時	平成 16 年 6 月 3 日	番号	N2-3748		
品名	TMP 接続ケーブルー 2	数量	20 m × 1、30 m × 1		
照射線量	0MGy (照射前)	仕様書/製造番号	- / 4NR0420		
検査項目	単位	規格	結果		
構造	導体	サイズ	mm ²	1.25	1.25
		材料	-	スズめっき軟銅より線	良
		構成	本/mm	50/0.18	50/0.18~50/0.18
		外径	mm	1.5	1.32~1.32
	絶縁体	材料	-	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良
		色	-	黒、原、赤	良
		厚さ	mm	0.15~0.20	0.26~0.28
		最大外径	mm	2.00	1.87~1.89
	遮へい	材料・構造	-	スズめっき軟銅線・網組遮へい	良
		素線径	mm	0.3	0.32
		最大外径	mm	約 8.0	6.52
	直流導体抵抗(20℃)	Ω/km	15.8 以下	15.1~15.1	
	耐電圧 (*)	KV/1 分間	1.5	良	
絶縁抵抗(20℃)	MΩ・km	30 以上	63000~100000		

* : 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 17(1/5). PEEK ケーブル照射試験成績表(10MGy)

試験体	信号用多芯ケーブル ユニットA (*1)				
日時	平成 17 年 1 月 20 日	番号	N2-3747A		
品名	TMP 接続ケーブル-1	数量	7. 2 m × 2		
照射線量	1 0 MG y	仕様書/製造番号	VIN-1708A 4NR0419		
検査項目		単位	規格	結果	
構造	導体	サイズ	mm ²	0.5	0.5
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	20/0.18	20/0.18~20/0.18
		外径	mm	0.9	0.85~0.87
	絶縁体	材料	—	PEEK(ホリエーテルエーテルケトン)	良
		厚さ	mm	0.15	0.16~0.19
		最大外径	mm	1.40	1.18~1.22
	遮へい	材料・構造	—	スズめつき軟銅線・網組遮へい	良
		素線径	mm	0.14	0.14,0.14
		外径	mm	約 6.1	6.08,6.05
直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	41.0 以下	37.9~38.5	
耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良	
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	2500~3000	

*1: ユニットA,B,Cに関しては表 15 (4/4) 参照。

*2: 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 17(2/5). PEEKケーブル照射試験成績表(10MGy)

試験体		信号用多芯ケーブル ユニットB (*1)			
検査項目		単位	規格	結果	
構造	導体	サイズ	mm ²	0.5	0.5
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	20/0.18	20/0.18~20/0.18
		外径	mm	0.9	0.84~0.85
	絶縁体	材料	—	PEEK(ホリエーテルエーテルケトン)	良
		厚さ	mm	0.15	0.18~0.23
		最大外径	mm	1.40	1.19~1.22
	遮へい	材料・構造	—	スズめつき軟銅線・網組遮へい	良
		素線径	mm	0.12	0.12,0.12
		外径	mm	約 5.1	4.95,5.05
直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	41.0 以下	38.0~38.8	
耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良	
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	2500~2900	

*1: ユニットA,B,Cに関しては表 15 (4/4) 参照。

*2: 耐電圧試験値については、JIS C 3605を参照している。

表 17(3/5). PEEKケーブル照射試験成績表(10MGy)

試験体		信号用多芯ケーブル ユニットC (*1)				
検査項目		単位	規格	結果		
構造	導体	サイズ	mm ²	1.25	1.25	
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良	
		構成	本/mm	50/0.18	50/0.18	
		外径	mm	1.5	1.32	
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良	
		厚さ	mm	0.15~0.20	0.30	
		最大外径	mm	2.00	1.90	
直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	15.8 以下	14.9, 14.9		
耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良		
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	2400, 2000		

*1: ユニットA,B,Cに関しては表 15 (4/4) 参照。

*2: 耐電圧試験値については、JIS C 3605を参照している。

表 17(4/5). PEEKケーブル照射試験成績表(10MGy)

試験体		信号用多芯ケーブル ユニットD (*1)			
検査項目		単位	規格	結果	
構造	導体	サイズ	mm ²	0.75	0.75
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	30/0.18	30/0.18~30/0.18
		外径	mm	1.1	1.01~1.02
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良
		厚さ	mm	0.15	0.19~0.24
		最大外径	mm	1.50	1.39~1.44
直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	26.8 以下	25.1~25.8	
耐電圧 (*2)		KV/1 分間	1.5	良	
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	1100, 1500	

*1: ユニットA,B,Cに関しては表 15 (6/6) 参照。

*2: 耐電圧試験値については、JIS C 3605を参照している。

表 17(5/5). PEEKケーブル照射試験成績表(10MGy)

試験体		信号用多芯ケーブル ケーブルを撚り合せたケーブル構造			
検査項目		単位	規格	結果	
構造	内層より合わせユニット数	—	A×2、B×2、C×y 1	良	
	外層より合わせユニット数	—	D×1 2	良	
	遮へい	材料・構造	—	スズめっき軟銅線・網組み遮へい	良
		素線径	mm	0.18	0.18
		外径	mm	約 23	20.6
	がい装	材料・構造	—	ステンレス鋼線(SUS316)	良
		素線径	mm	0.3	0.32
		最大外径	mm	26	21.9

表 18. PEEK ケーブル照射試験成績表(30MGy)

試験体	低電圧動力用ケーブル				
日時	平成 17 年 6 月 15 日	番号	N2-3748A		
品名	TMP 接続ケーブル- 2	数量	2 0 m × 1、3 0 m × 1		
照射線量	30MGy	仕様書/製造番号	VIN-1709A / 4NR0420		
検査項目		単位	規格	結果	
構造	導体	サイズ	mm ²	1.25	1.25
		材料	—	スズめつき軟銅より線	良
		構成	本/mm	50/0.18	50/0.18~50/0.18
		外径	mm	1.5	1.32~1.33
	絶縁体	材料	—	PEEK(ポリエーテルエーテルケトン)	良
		色	—	黒、原、赤	良
		厚さ	mm	0.15~0.20	0.27~0.30
		最大外径	mm	2.00	1.89~1.90
	遮へい	材料・構造	—	スズめつき軟銅線・網組遮へい	良
	直流導体抵抗(20℃)		Ω/km	15.8 以下	15.1~15.2
耐電圧 (*)		KV/1 分間	1.5	1.5kV30 秒、ケーブル曲がり箇所、絶縁亀裂部で地絡	
絶縁抵抗(20℃)		MΩ・km	30 以上	5200~5600	

* : 耐電圧試験値については、JIS C 3605 を参照している。

表 19(1/3). SIP 高電圧ケーブル絶縁抵抗測定結果詳細

測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
初期値測定	2007/8/8	5.59E+12	5.59E+12	4.11E+12	4.11E+12	34.2	84
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)	注記:9月21日(739.5H)にケーブルを反転した。(均一化のため)		
第一回目照射	2007/8/17	2007/11/1	1682:49:00	19.6			
測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
第一回目測定	2007/11/8	3.98E+10	3.98E+10	2.32E+12	2.32E+12	25.7	52
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)			
第二回目照射	2007/11/9	2007/11/13	1772:30:00	20.6			
測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
第二回目測定	2007/11/15	3.58E+10	3.22E+11	4.76E+02	4.20E+12	24.7	50
		6.09E+11		8.40E+12			
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)			
第三回目照射	2007/11/19	2007/11/22	1829:30:00	21.3			
測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
第三回目測定	2007/11/27	2.32E+12	2.28E+12	1.77E+12	1.55E+12	22.3	50
		2.68E+12		1.32E+12			
		1.85E+12					
第三回目測定	2007/11/27	7.61E+12	7.56E+12	7.60E+12	7.57E+12	23.4	48
ケーブル端末加工		7.50E+12		7.53E+12			

表 19(2/3). SIP高電圧ケーブル絶縁抵抗測定結果詳細

照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)	温度(°C)	湿度(%)
第四回自照射 測定	2007/11/30	2007/12/4	1937:27:00	22.5		
	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	温度(°C)	湿度(%)
第四回自測定	2007/12/6	6.30E+12	6.33E+12	6.22E+12	22.8	43
		5.99E+12		6.23E+12		
		6.70E+12		6.68E+12		
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)	温度(°C)	湿度(%)
第五回自照射 測定	2007/12/7	2007/12/11	2034:39:00	23.7		
	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	温度(°C)	湿度(%)
第五回自測定	2007/12/12	5.02E+12	4.67E+12	6.26E+11	24.0	54
		4.42E+12		2.50E+11		
		4.58E+12		1.84E+12		
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)	温度(°C)	湿度(%)
第六回自照射 測定	2007/12/14	2007/12/18	2106:24:00	24.5		
	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	温度(°C)	湿度(%)
第六回自測定	2007/12/21	6.25E+12	6.11E+12	2.24E+12	24.0	54
		5.98E+12		2.87E+12		
		6.10E+12		2.55E+12		

測定中に値が大

表 19(3/3). SIP高電圧ケーブル絶縁抵抗測定結果詳細

照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)			
第七回目照射	2008/1/11	2008/1/15	2219:25:00	25.8			
測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
第七回目測定	2008/1/16	5.81E+12	6.26E+12	5.82E+12	5.84E+12	22.0	39
		6.03E+12		5.76E+12			
		6.94E+12		5.95E+12			
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)			
第八回目照射	2008/1/18	2008/1/22	2311:33:00	26.9			
測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
第八回目測定	2008/1/23	4.55E+12	3.52E+12	2.21E+11	2.31E+11	22.0	39
		2.59E+12		2.46E+11			
		3.41E+12		2.27E+11			
第八回目測定	2008/2/21	7.80E+12	8.13E+12	6.62E+12	7.96E+12	22.1	39
1か月中断したので再測定		8.02E+12		8.63E+12			
		8.58E+12		8.62E+12			
照射	照射開始	照射終了	積算時間(h)	線量(MGy)			
第九回目照射	2008/3/14	2008/3/26	2592:48:00	30.2			
測定	測定日	絶縁抵抗(Ω) 黒	絶縁抵抗(Ω) 黒(平均)	絶縁抵抗(Ω) 赤	絶縁抵抗(Ω) 赤(平均)	温度(°C)	湿度(%)
第九回目測定	2008/3/27	4.27E+12	5.00E+12	5.40E+12	5.64E+12	22.1	39
		5.53E+12		5.55E+12			
		5.21E+12		5.98E+12			

表 20. 30MGy 照射後の屈曲試験 (高電圧用同軸ケーブル)

番号	ケーブル屈曲状態	絶縁抵抗	備考
1	Φ 1 6 0 mm5 回巻	7.19E12Ω	
2	Φ 1 6 0 mm5 回巻 + Φ 1 5 0 mm5 回巻	7.19E12Ω	
		8.77E12Ω	芯線と被覆線を短絡した上で再測定

表 21. 30MGy 照射後の PEEK 絶縁体外観試験 (高電圧用同軸ケーブル)

番号	検査場所	検査結果	備考
1	ケーブル端部絶縁体 (大気に露出していたところ)	PEEK 絶縁体が脆くなって割れやすくなっている。	
2	ケーブル内部絶縁体 (SUSがい装、テープ、アース導体で被覆されていた部分)	最小曲げ半径 80mm で屈曲後も、割れは無かった。	被覆をはがして調査した。

表 22. 耐延焼性試験結果まとめ

種類	線量	試験結果	試験結果詳細
信号用多芯ケーブル	0 (初期値)	残炎時間：0分0秒 損傷距離：280mm 判定：合格	表 23 図 28
	10MGy	残炎時間：0分0秒 損傷距離：350mm 判定：合格	表 25 図 30
低電圧動力用ケーブル	0 (初期値)	残炎時間：0分0秒 損傷距離：270mm 判定：合格	表 24 図 29
	30MGy	残炎時間：0分0秒 損傷距離：200mm 判定：合格	表 26 図 31

表 23. 耐延焼性試験結果（信号用多芯ケーブル）0MGy

品名	TMP接続ケーブル-1（複合49心）
製造番号	4NR0419
試験方法 ・ 試験規格	JIS C 3521（1986） 「通信ケーブル用難燃シース燃焼性試験方法」
ケーブル 外径	21.8 mm
試料本数	5本

試験年月日	2004年9月2日	
試験場所	株式会社フジクラ 鈴鹿事業所 燃焼試験室	
気温	26℃	
湿度	76%	
設定	空気圧力	4.7 (mm/水柱)
	空気流量	4.596 (m ³ /hr)
	ガス圧力	0.5 (mm/水柱)
	ガス流量	0.6 (m ³ /hr)
	炎の長さ	380 mm 以上
	炎の温度	815 °C 以上

試験結果	
残炎時間	0分0秒（残炎なし）
損傷距離	280mm

合否判定	
判定結果	合格

表 24. 耐延焼性試験結果（低電圧動力用ケーブル）OMG_y

品名	TMP 接続ケーブル-2 (3心)
製造番号	4NR0420
試験方法 ・ 試験規格	JIS C 3521 (1986) 「通信ケーブル用難燃シース燃焼性試験方法」
ケーブル 外径	6.5 mm
試料本数	16 本

試験年月日	2004年 9月 2日	
試験場所	株式会社フジクラ 鈴鹿事業所 燃焼試験室	
気温	26℃	
湿度	76%	
設定	空気圧力	4.7 (mm/水柱)
	空気流量	4.614 (m ³ /hr)
	ガス圧力	0.5 (mm/水柱)
	ガス流量	0.6 (m ³ /hr)
	炎の長さ	380 mm 以上
	炎の温度	815 °C 以上

試験結果	
残炎時間	0分0秒 (残炎なし)
損傷距離	270mm

合否判定	
判定結果	合格

表 25. 耐延焼性試験結果（信号用多芯ケーブル）10MGy

品名	(10MGy 照射品) TMP 接続ケーブル-1 (複合49心)
製造番号	4NR0419
試験方法 ・ 試験規格	JIS C 3521 (1986) 「通信ケーブル用難燃シース燃焼性試験方法」
ケーブル 外径	21.8 mm
試料本数	5 本

試験年月日	2005年 1月 24日	
試験場所	株式会社フジクラ 鈴鹿事業所 燃焼試験室	
気温	8℃	
湿度	86%	
設定	空気圧力	4.8 (mm/水柱)
	空気流量	4.638 (m ³ /hr)
	ガス圧力	0.5 (mm/水柱)
	ガス流量	0.618 (m ³ /hr)
	炎の長さ	380 mm 以上
	炎の温度	815 °C 以上

試験結果	
残炎時間	0分0秒 (残炎なし)
損傷距離	350 mm

合否判定	
判定結果	合格

表 26. 耐延焼性試験結果（低電圧動力用ケーブル）30MGy

品名	(30MGy 照射品) TMP 接続ケーブル-2 (3心)
製造番号	4NR0420
試験方法 ・ 試験規格	JIS C 3521 (1986) 「通信ケーブル用難燃シース燃焼性試験方法」
ケーブル 外径	6.5 mm
試料本数	16 本

試験年月日	2005年 6月 27日	
試験場所	株式会社フジクラ 鈴鹿事業所 燃焼試験室	
気温	31℃	
湿度	66%	
設定	空気圧力	4.7 (mm/水柱)
	空気流量	4.689 (m ³ /hr)
	ガス圧力	0.5 (mm/水柱)
	ガス流量	0.615 (m ³ /hr)
	炎の長さ	380 mm 以上
	炎の温度	815 °C 以上

試験結果	
残炎時間	0分0秒 (残炎なし)
損傷距離	200 mm

合否判定	
判定結果	合格

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
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方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
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

- (a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元 1 をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の 1 は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表される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 ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz	s ⁻¹	s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg 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 s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照度	ルーメン	lm		cd sr ^(c)
光度	ルクス	lx	lm/m ²	m ⁻² cd
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq	s ⁻¹	s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー一分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性炭	カタール	kat		s ⁻¹ mol

- (a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコホレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の 1 に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。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である数字の 1 は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号 sr を単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についての、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で "radioactivity" と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV,2002,70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含む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
粘度	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m 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 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 s ⁻² K ⁻¹
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg 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 s ⁻²
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s 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 kg s ⁻² A ⁻²
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg 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 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 s ⁻³ = m ² kg 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 s ⁻³ = kg s ⁻³
酸素活性炭	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol

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	ゼン	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6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min = 60 s
時	h	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、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 単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 1.495 978 706 91(6) × 10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ⁻¹⁵ cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	
ベベル	B	SI 単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P = 1 dyn s cm ⁻² = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁻⁴ cd m ⁻²
フォトル	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガル	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx cm ⁻² = 10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π) A m ⁻¹

- (c) 3 元素のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
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 = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	fm	1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 メートル系カラット = 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
カロリー	cal	1 cal = 4.1868 J (「15°C」カロリー), 4.1868 J (「IT」カロリー), 4.184 J (「熱化学」カロリー)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

