

耐放射線性ケーブル

ケーブル・機器開発センター 右近 誠¹・石田 克義²・高野 一彦³
メタルケーブル事業部 古郡 永喜⁴
日本原子力研究開発機構 草野 譲⁵

Radiation Resistant Cable

S. Ukon, K. Ishida, K. Takano H. Furukoori, and J. Kusano

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)と独立行政法人日本原子力研究開発機構(JAEA)は、茨城県東海村に大強度陽子加速器施設(J-PARC)の建設を共同で進めている。一般的に原子力関連施設の放射線環境で使用されるケーブルは、放射線によるケーブル被覆材料の劣化が起こり、被覆材料の欠落による絶縁効果をはじめとするケーブル保護機能の低下や、難燃性の低下による火災時の延焼等の恐れがある。そのため、放射線環境に晒されるケーブルは、定期的に交換して機能を維持・管理する必要がある。著者ら開発グループは、日本原子力研究開発機構と共同研究契約を締結して原子力関連施設で用いるケーブルの長寿命化の検討を行った。その結果、光安定剤と紫外線吸収剤を組み合わせることで照射後の機械特性および難燃性を改善した耐放射線性に優れた材料を開発した。現用のノンハロゲン難燃シースは積算吸収線量 0.5 MGy の照射により著しい機械特性の低下が生じた。これに対して、開発した耐放射線性シースではその 5 倍以上の 2.5 MGy 照射後においても自己径曲げに相当する破断伸び 50% 以上を維持した。さらにこのシースを被覆したケーブルは、2.5 MGy 照射後の 4 倍径曲げ試験および JIS C 3521 垂直トレイ燃焼試験に合格してすべての開発目標を達成した。本ケーブルは、J-PARC に採用された。

High Energy Accelerator Research Organization(KEK)and Japan Atomic Energy Agency(JAEA)are promoting jointly the construction of Japan Proton Accelerator Research Complex(J-PARC)in Tokai-mura, Ibaraki prefecture since 2001. In general, polymeric cable installed in heavy radiation environment, such as nuclear power plant or radiation research facility as the J-PARC, deteriorates its performance by the effect of radiation damage. The deterioration conducts a decrease of mechanical property and of flame retardant characteristics that require the replacement of the cable within a certain period of time to keep the basic function as insulation or non-flammability.

This report explains the development of radiation resistant polymeric material and cable by the examination of sample gamma-ray irradiation method based on the joint research agreement with JAEA toward the J-PARC application. We studied the irradiation effect in the combination of light stabilizer and ultraviolet absorber. A current non-halogen sheath material observed severe damage on the mechanical property by the irradiation dose of 0.5 MGy. While the developed material demonstrated excellent performance as the elongation brake more than 50%, which corresponding to the self-diameter bending, kept after the irradiation dose of 2.5 MGy. The new cable manufactured with the advanced sheath material maintained at the vertical tray flame test of JIS C 3521, and accomplished to a bending test, in case the cable was bent to a diameter four times of the cable outer diameter, as well as all of the development objectives were achieved successfully. The developed cable is being applied to the J-PARC in these years.

1. ま え が き

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構(KEK)と独立行政法人日本原子力研究開発機構(JAEA)は茨城県東海村に、中性子科学、素粒子・原子核物理学、核変換技術開発などの先端研究を目的として、大強度陽子加速器施設(J-PARC: Japan Proton Accelerator Research Complex)の建設を共同で進めている。(2001

1 鈴鹿開発グループ
2 鈴鹿開発グループ長
3 佐倉開発グループ
4 技術部設計技術グループ
5 元 独立行政法人 日本原子力研究開発機構 現 株式会社エーティー

表 1 安定剤作用機構¹⁾
Table 1. Mechanism of stabilizer.

	ラジカルトラップ効果	放射線吸収効果
	ヒンダードアミン系光安定剤 ; HALS (Hindered Amine Light Stabilizer)	紫外線吸収剤 ; UVA (Ultraviolet Absorber)
	樹脂のラジカル分解連鎖反応を止める	照射された光 (放射線) を熱として無害化する
作用機構		

年着工・2008年稼働予定)このような原子力関連の施設において使用されるケーブルは、放射線暴露によるケーブル被覆の劣化により、機械特性・難燃性等が低下するため、定期的に張り替える必要がある。したがって張り替えにより発生するコストを削減するため、耐放射線性の付与によるケーブルの長寿命化が望まれている。

耐放射線性ケーブルの中でも、高レベルの放射線環境に晒されるケーブル(積算吸収線量 5 MGy 以上)においては、耐放射線性能に優れた PEEK(ポリエチルエーテルケトン)や、PI(ポリイミド)等のエンジニアリングプラスチック系の材料が使用される。しかしながら、比較的弱いレベルの放射線環境で用いられるケーブル(積算吸収線量 5 MGy 以下)においては、価格および可撓性等の観点からポリオレフィン系材料が使用されているが、従来のポリオレフィン系材料では 1 MGy 程度が限界であり、張り替えが必要である。

今回、日本原子力研究開発機構殿と共同研究契約を締結し、ポリオレフィン系材料をベースとした耐放射線ケーブルの開発を行った。

2. 開発目標

開発に当って日本原子力研究開発機構殿と協議を行い、以下の4点を満足するケーブルを開発することとした。

JIS C 3605「600 V ポリエチレンケーブル」の架橋ポリエチレン絶縁体および耐燃性ポリエチレンシースケーブルの諸特性に合格すること。

目標線量は 2 MGy とする。

(1 Gy = 100 Rad)

放射線照射後に垂直トレイ燃焼試験(JIS C 3521)に合格すること。

放射線照射後に 4 倍径 × 3 往復の曲げ試験でシース割

れが発生しないこと。

3. 材料設計

材料設計として、安定剤を添加剤として使用することにより、放射線による高分子劣化を抑制することを目指した。一般的な安定剤の作用機構としては、樹脂の分解連鎖反応を止めるラジカルトラップ機構、照射された光を熱として無害化するエネルギー吸収機構を挙げることができる(表 1)。さらに放射線吸収効果があるとされている鉛元素に着目し、鉛系安定剤も評価候補に加えた。

4. 実験

4.1 実験方法

<放射線照射>

放射線照射実験はコバルト 60 を線源とした線を照射することとし、照射は日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所にて実施した。(図 1)

放射線照射条件

線量率 : 1 ~ 8 kGy / h

照射線量 : 0.5 ~ 3.0 MGy

<試験項目>

照射前後において、以下の項目について試験を実施した。

シートサンプル : 引張試験(破断伸び)

ケーブルサンプル : 引張試験(破断伸び)・曲げ試験・燃焼試験

4.2 照射実験

4.2.1 現用ケーブルの耐放射線性評価

まず、耐放射線性が考慮されていない現用ケーブル(600V NH-CE 絶縁体: 架橋ポリエチレン/シース: ノンハロゲン高難燃シース)に放射線を照射し、照射前



図 1 ケーブル照射状況
Fig. 1. The view of cable irradiation.

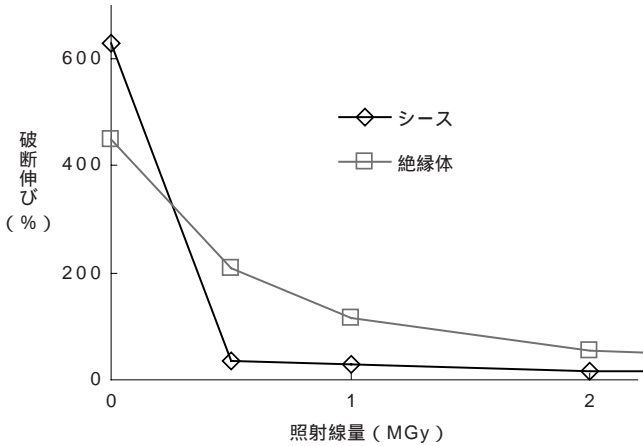


図 2 現用ケーブル材料の耐放射線性
Fig. 2. Irradiation result of current material.

後の機械特性および難燃性を評価した。その結果、0.5 MGy の放射線を照射した時点でシースの破断伸びが 35 % まで低下し、著しい機械特性の劣化が確認された。これに対して、絶縁体はシースと比較して緩やかな劣化を示した。(図 2)

2 MGy 照射後のケーブルを用いて 4 倍径の曲げ試験を実施した結果、シースには割れが発生し、絶縁体には割れが発生しなかった。この結果より、シースは耐放射線性の改良が必要であり、絶縁体には現用の架橋ポリエチレンが使用できることがわかった。

絶縁体は純粋な架橋ポリエチレンを使用しているのに対して、シース材料は難燃性等を付与するための添加剤が多量に含まれている。今回観察されたシース材料の急速な機械特性の低下は、これらの添加剤が関係していると考えられた。

シース材料の劣化にともない懸念されている難燃性の低下について確認するため、2 MGy 照射後のケーブルを用いて垂直トレイ燃焼試験を実施した。その結果、照射前と比較して若干燃焼中の炎が大きくなり、放射線による難燃性の低下が確認されたが、JIS C 3521 の規格には合格することを確認した。

以上の結果から、照射後の機械特性維持に主眼を置いて開発を行うことにした。

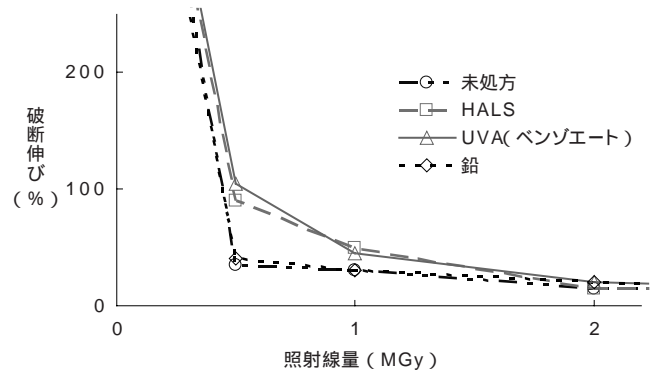


図 3 各種安定剤添加での耐放射線性
Fig. 3. Irradiation result of stabilizer study.

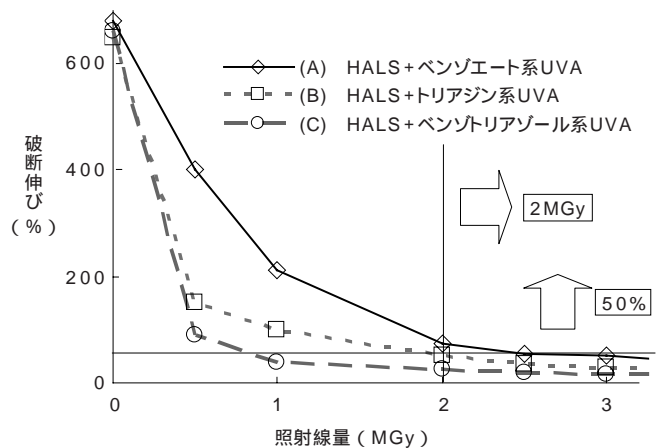


図 4 HALS/UVA 併用での耐放射線性
Fig. 4. Irradiation result of material that used HALS together with UVA.

4.2.2 配合検討

配合検討での照射実験は、時間的効率を考慮し、数多くの材料を一度に照射するためシートサンプルを用いて照射後の破断伸びを評価することとした。

現用シース材料が照射後の難燃性を維持していたことから、その材料をベースとし、安定剤を処方することで放射線照射後の破断伸びを向上させることを目指した。また、機械特性劣化の目安として、ケーブルの自己径曲げに相当する破断伸び 50 % 以上の維持を目標とした。

まず HALS, UVA, 鉛の各種安定剤をそれぞれ単独に添加し、放射線照射後の破断伸びへの効果を確認した。その結果 HALS や UVA では若干の効果は見られたが、目標である 2 MGy 照射での破断伸び 50 % 以上には到達できなかった。また、鉛系安定剤ではまったく効果が得られなかった。(図 3)

作用機構の異なる HALS および UVA それぞれについて効果が認められたことから、HALS のラジカルトラップ効果に加えて、UVA の光吸収の効果を組み合わせることによって、耐放射線性の向上を目指した。

HALS と各種 UVA との併用系においては、HALS と組み合わせる UVA の種類によって相乗効果に大きな差

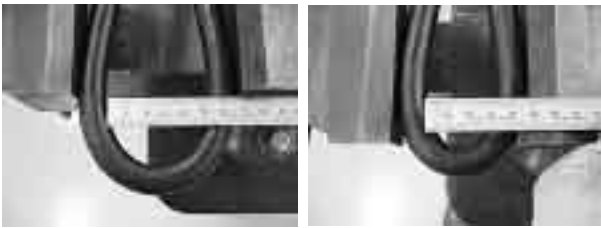


図5 開発ケーブルの曲げ試験
(2.5 MGy 照射後)
(右) 4倍径 (左) 2倍径

Fig. 5. Bend test of developed cable after irradiation.
(Dose of 2.5 MGy)



図6 開発ケーブルの垂直トレイ燃焼試験
(2.5 MGy 照射後)

Fig. 6. Vertical tray flame test of developed cable.
(Dose of 2.5 MGy)

表2 開発品の特徴 (現用品および JIS 規格との比較)
Table 2. Characteristics of development cable.

項目		単位	開発品 (耐放射線仕様)	現用品 (非放射線仕様)	JISC3605規格値	
シース材料 特性	機械特性	引張強さ	MPa	12.6	11.6	10以上
		引張伸び	%	680	634	350以上
	加熱老化 (90 × 96h)	引張強さ残率	%	90	90	80以上
		引張伸び残率	%	95	96	65以上
	脆化温度			- 60以下	- 60以下	- 15以下
	加熱変形率 (75 × 1kg)		%	0	3	10以下
	難燃性 (60° 傾斜)		-	合格	合格	60s以内に消火
	発煙濃度		-	84	75	150以下
	燃焼時発生ガス	pH	-	4.6	4.6	4.3以上
		導電率	μS/mm	0.8	1.1	10以下
酸素指数(参考)		-	39	37	-	
2 MGy照射後の引張強さ		MPa	10.8	11.5	-	
2 MGy照射後の引張伸び		%	75	20	-	
2.5 MGy照射後の ケーブル試験	導体抵抗	・km	0.302	-	0.305以下	
	耐電圧		合格	-	2500V × 1分合格	
	絶縁抵抗	M ・km	8700	-	1500以上	
	曲げ試験 (4倍径 × 3往復)	-	合格	不合格		
	ケーブル燃焼試験 JIS C 3521	-	合格	合格	-	

があった。その中でもっとも良好な効果が得られたのは HALS とベンゾエート系 UVA の組み合わせであった。この材料は目標 2 MGy に対して、2.5 MGy 照射後においても破断伸び 50% を維持した。(図 4)

4.2.3 ケーブル試作

シート試験で相乗効果が確認された HALS + ベンゾエート系 UVA の併用材料をシースとしてケーブル試作を行い、2.5 MGy の放射線を照射した。

照射後にケーブル曲げ試験を行った結果、目標である 4 倍径曲げでシース割れが発生しなかった。さらに、より小さい 2 倍径曲げに対してもシースの割れは生じなかった。この結果から、開発したシース材料の耐放射線性は大幅に改良されていることが確認された。(図 5)

また、2.5 MGy 照射後のケーブルについて垂直トレイ

燃焼試験を実施し、合格することを確認した。(図 6)

最後に、一般特性についての評価を実施した結果、JIS C 3605「600 V ポリエチレンケーブル」の耐燃性ポリエチレンシースに規定されているすべての要求特性を満足することを確認した。(表 2)

5. 考 察

今回の検討で、シース材料の耐放射線性向上には HALS のラジカルトラップ効果と UVA の紫外線吸収効果を併用することによって相乗効果が得られることがわかった。

UVA の種類により相乗効果に差が見られたため、UVA の紫外可視吸収スペクトルを測定した。その結果、

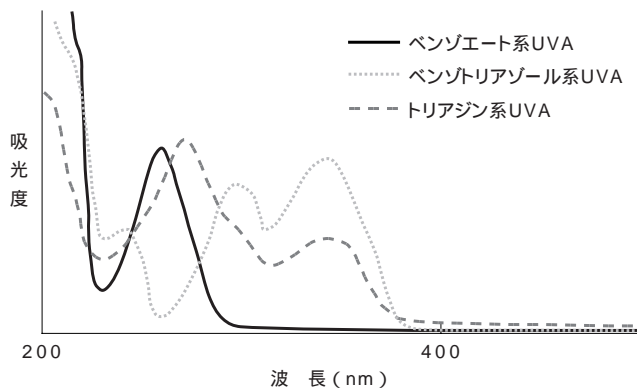


図7 紫外線吸収剤の吸収スペクトル
Fig. 7. UV-Vis spectra of ultraviolet absorber.

最も効果が大きかったベンゾエート系のUVAが最も短波長側に吸収を持つことが確認された。(図7)

一般に放射線による劣化は、高分子の結合に關与する電子が影響を受けると言われている。UVAの吸収波長領域と放射線の影響との関係は不明であるが、今回評価を行った線は超短波長の光(電磁波)として考えられ、光を吸収する紫外線吸収剤でも効果が発現したものと考えられる。

6. む す び

日本原子力研究開発機構殿と共同研究を行い、2.5 MGy 照射後においても、機械特性および難燃性を維持したケーブルを開発した。同ケーブルはJ-PARCに採用となり、2006年6月より出荷され、客先より良好な評



図8 J-PARCに納入された耐放射線性ケーブル
Fig. 8. Radiation resistant cable delivered to J-PARC.

価を得ている。(図8)

日本原子力研究開発機構殿とは2008年度も引き続き共同研究を実施しており、放射線による劣化機構の解明とともに、より高い耐放射線性を有する材料を開発中である。

7. 謝 辞

本研究を実施するにあたり、日本原子力研究開発機構J-PARCセンター竹田 修氏および量子ビーム応用研究部門森下憲雄氏、出崎 亮氏に多大なるご協力を賜りましたことに対しまして、ここに感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 吉田 隆：高分子の寿命予測と長寿命化技術，株式会社エヌ・ティー・エス，2002