JAEA-Technology 2017-026 DOI:10.11484/jaea-technology-2017-026



光学部品のガンマ線照射劣化挙動 (受託研究)

Degradation Behavior of Optical Components by Gamma Irradiation (Contract Research)

武内 伴照	柴田 裕司	花川 裕規	上原 聡明
上野 俊二	土谷 邦彦	熊原 肇	柴垣 太郎
駒野目 裕久	, 		

Tomoaki TAKEUCHI, Hiroshi SHIBATA, Hiroki HANAKAWA, Toshiaki UEHARA Shunji UENO, Kunihiko TSUCHIYA, Hajime KUMAHARA, Taro SHIBAGAKI and Hirohisa KOMANOME

> 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 照射試験炉センター

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center Oarai Research and Development Center Sector of Nuclear Science Research

February 2018

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは国立研究開発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(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 研究連携成果展開部 研究成果管理課 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村大字白方 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 Institutional Repository Section,

Intellectual Resources Management and R&D Collaboration Department, Japan Atomic Energy Agency.

2-4 Shirakata, 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, 2018

光学部品のガンマ線照射劣化挙動 (受託研究)

日本原子力研究開発機構 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター 照射試験炉センター

武内 伴照、柴田 裕司、花川 裕規、上原 聡明^{*1}、上野 俊二^{*2}、土谷 邦彦 熊原 肇^{*3}、柴垣 太郎^{*4}、駒野目 裕久^{*4}

(2017年11月10日 受理)

原子力施設でシビアアクシデントが発生した際に、プラント状態を監視し、緊急時対応を円滑 に実施するためには、信頼性の高い伝送技術が必要である。本研究では、水中で伝送可能な可視 光無線伝送システムの構築を目指して、LED やフォトダイオード等の光学部品に対して 10⁶Gy まで のガンマ線の照射による影響を調べた。その結果、LED は全光束が減少するとともに樹脂レンズ 部が着色したが、電流-電圧特性にはほとんど変化は無かった。フォトダイオードは、受光感度 が減少するとともに窓材の樹脂が着色した。フォトダイオードの暗電流は伝送に悪影響を与える ほどの大きさにはならなかった。これらの結果から、両素子を無線伝送システムに適用する場合 に考慮すべき特性劣化の主因は、半導体部分の劣化ではなく、樹脂の着色によって発光及び受光 量が減少することによるものであることが示唆された。また、発光・受光回路部を環境から隔離 するための窓材や、外乱ノイズ光を軽減するための光学フィルタとして、各種ガラスについても ガンマ線照射による透過率の減少を評価し、伝送システムの構築に向けた基礎データを取得した。

本報告書は、資源エネルギー庁の受託研究である平成 25 及び 26 年度発電用原子炉等安全対策高度化 技術基盤整備事業「特殊環境下で使用可能な監視システム高度化」における成果の一部である。 原子力科学研究部門 大洗研究開発センター:〒319-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002 ※1 原子力エンジニアリング株式会社

- ※2 東京ニュークリア・サービス株式会社
- ※3 旧日本原子力研究所大洗研究所 材料試験炉部 (2004年3月迄在籍)
- ※4 池上通信機株式会社

JAEA-Technology 2017-026

Degradation Behavior of Optical Components by Gamma Irradiation (Contract Research)

Tomoaki TAKEUCHI, Hiroshi SHIBATA, Hiroki HANAKAWA, Toshiaki UEHARA^{**1}, Shunji UENO^{**2}, Kunihiko TSUCHIYA, Hajime KUMAHARA^{**3}, Taro SHIBAGAKI^{**4} and Hirohisa KOMANOME^{**4}

Neutron Irradiation and Testing Reactor Center, Oarai Research and Development Center, Sector of Nuclear Science Research, Japan Atomic Energy Agency Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received November 10, 2017)

Under severe accidents, high-integrity transmission techniques are necessary in order to monitor the situation of the nuclear power plant. In this study, effects of gamma irradiation up to 10⁶ Gy on properties of optical devices were evaluated toward the development of a wireless transmission system with radiation resistance available under water using visible light. For the light emitting diodes, the total luminous flux decreased and the browning of resin lenses occurred after the irradiation. Meanwhile, the current-voltage characteristics hardly changed. For the photo diodes, the light sensitivity decreased and the browning of resin window occurred. The dark currents did not become large enough to adversely affect transmission. These results indicated that both the decreases of the total luminous flux of the light emitting diodes and the light sensitivity of the photo diodes were mainly caused by not the degradation of the semiconductor parts but the browning of the resin parts by the irradiation. In addition, basic decrease behaviors of light transmission of several different types of glasses by gamma irradiation were also obtained so as to select the suitable optical windows and filters for the developing the transmission system.

Keywords: Wireless Transmission, Optical Device, Gamma, Irradiation, Degradation

Present study is entrusted from Agency for Natural Resources and Energy.

*1 Nuclear Engineering, Ltd.

2 Tokyo Nuclear Services Co., Ltd.

%3 formerly Japan Atomic Energy Research Institute, Oarai Research Institute, Department of JMTR, until March 2004.

**4 Ikegami Tsushinki Co., Ltd.

目 次

1.	序	論	1
2.	可視	見光水中無線伝送の概要	1
3.	試	験	3
3.	1.	光学部品	3
3.	2.	ガンマ線照射試験	6
3.	3.	特性試験	7
4.	結果	やおよび考察	9
4.	1.	発光・受光素子	9
4.	2.	窓 材	20
4.	3.	光学フィルタ	23
5.	まと	: め	25
謝	辞		26
参考	⋚ 文南	₭	26

Contents

1.	Int	roduction	1			
2.	In-	water Wireless Transmission System Using Visible Light	. 1			
3.	Ex	perimental	3			
3	.1.	Optical Component	3			
3	.2.	Gamma Irradiation Test	6			
3	.3.	Characteristic Test	7			
4.	Re	sults and Discussion	9			
4	.1.	Light-emitting and –receiving Device	9			
4	.2.	Window Material	20			
4	4.3. Optical Filter					
5.	Su	mmary	25			
Ack	nov	vledgements	26			
Ref	eren	ICES	26			

1. 序論

東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の経験や、事故から得られた教訓を踏まえ、既設 原子力発電所について、シビアアクシデント対策を中心に安全対策の高度化を適切に進めていく ことが必要である。安全対策の高度化に当たっては、電気事業者や原子力プラントメーカー、研 究機関等において研究開発が進められているところであるが、安全の高度化に向けて基礎基盤と なる部分については、国が主導して研究開発を進め、技術基盤を整備することが必要である。ま た、IAEA 閣僚会合に向けて平成23年6月に取りまとめられた日本国政府報告書^{[11}において、教 訓 14 として「原子炉及び格納容器などの計装系の強化」が挙げられている。さらに、平成24 年3月に当時の原子力安全・保安院が発表した「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の 技術的知見について」^[2]においては、対策27「事故時における計装設備の信頼性確保」や対策 28「プラント状態の監視機能の強化」が挙げられており、シビアアクシデントの発生時における プラント状態把握の重要性について指摘されているところである。

こうした背景を踏まえ、発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業(特殊環境下で使用 可能な監視システム高度化)として、経済産業省資源エネルギー庁から独立行政法人日本原子力 研究開発機構が受託した。同受託事業では、原子力施設でシビアアクシデントが発生した際にも プラント状態を監視し、緊急時対応を円滑に実施するための研究開発を行ってきた。特に、使用 済燃料プールの監視においては、信頼性の高い水中伝送技術が必要となる。本稿は、水中伝送を 実現するため、可視光無線伝送システムの構築を目指した光学部品のガンマ線照射による影響に ついて調べたものである。各主要部品の候補を数種類選び、ガンマ線照射前後の特性変化を調べ、 無線伝送システムへの適用可能性や照射劣化の原因及び伝送に有利な組合せを明らかにするた めの基礎的なデータをまとめた。

2. 可視光水中無線伝送の概要

水中無線伝送システムの概要を図 2-1 に示す。水中における無線通信方式は、主に3種類に分 類可能である。超音波による音響モデムを利用した音による方式、アンテナをともなう電磁波の 電波による方式、また近年、光応用技術の発展がめざましい LED (Light Emitting Diode:発光 ダイオード)などの光源を利用した光による無線方式が挙げられる。それぞれの水中無線方式の 特徴を表 2-1 にまとめた。比較検討の結果、光のなかでも可視光域は、水中における減衰が小さ く、比較的速い伝送速度を有することから、可視光による水中無線伝送技術の整備を図ることと した。

無線伝送システムの技術基盤整備にあたり、システムの構成部品である発光・受光素子や発信・ 受信器、これらを水環境から隔離するための窓材、外乱光を低減する光学フィルタ等を選定する 必要がある。また、これらの部品等が実際に使用される環境下における水中伝送距離で通信が可 能かどうかや、想定される温度や放射線等の条件でも伝送に必要な特性を失わないかどうかを確 認するため、性能特性試験を実施する必要がある。



図 2-1 水中無線伝送システムの概要

伝送方式 項 目	電波	光	音波
ー般的な水中での 通信の可否	Δ	0	0
通信距離	数メートル	不明	数百メートル
利点	 ・汎用の構成部品が多い。 ・伝送速度が速い。 	 ・電磁ノイズを受けない。 ・可視光は水中での減衰が小さい。 ・伝送速度が速い。 	・通信距離が長い。
欠点	 ・消費電力が大きい。 ・低周波数帯のみ使用 可能。 	 ・他の光源がノイズになる可能性がある。 ・散乱が大きい。 	・伝達速度が遅い。
水中での使用例	水中トランシーバー	ダイバー用通信器	水中トランシーバー

表 2-1 水中無線方式の比較

3. 試験

3.1. 光学部品

(1) 発光素子

発光素子は、LED を候補とした。LED は、電気エネルギーを光エネルギーに変換する半導体 素子である。LED に電流を流す(順方向バイアス電圧印加)と、pn 接合部にキャリアが注入さ れ、電子と正孔(正負キャリア)の再結合が起こり、電荷が消滅する際に光エネルギーに変換 される。発光波長は素子の種類によって異なり、紫外線から赤外線まで可視光の広帯域に及ぶ ため、使用する波長を選定する必要がある。可視光の水中減衰係数はおよそ 650nm 以上で急激 に大きくなることが知られており^[3]、燃料プールにおける外乱光となるチェレンコフ光の波長 分布は、京都大学原子炉炉心における分光測定から紫外~青色光でピークを持ち、およそ 570nm 以上で急激に減衰することが分かっている^[4]。したがって、本開発における使用波長は、 上述の水中の減衰及び外乱チェレンコフ光の両者が顕著には無線伝送に悪影響を与えない 600nm 前後が有力であると考えられる。以上から、発光素子の性能特性試験の対象として、一 般的な砲弾型 LED で発光波長が 600nm 前後のものを、LED 製造メーカ 3 社について計 5 種類を 選定した。また、砲弾型と比較して耐熱性に優れたガラス封止 LED もあわせて性能特性試験を 実施した。発光素子の仕様を表 3-1 に示す。

	発光波長[nm]	発光色	レンズ材質	最高使用温度[℃]
A 社砲弾型①	575	黄緑色	樹脂	85
A 社砲弾型②	609	橙色	樹脂	85
A 社砲弾型③	635	赤色	樹脂	85
B 社砲弾型①	600	橙色	樹脂	85
B 社砲弾型②	633	赤色	樹脂	85
C 社砲弾型①	611	橙色	樹脂	85
C 社砲弾型②	630	赤色	樹脂	85
ガラス封止型	440, 555	白色	ガラス	135

表 3-1 発光素子の仕様

(2) 受光素子

受光素子は、PD (Photo Diode:フォトダイオード)を候補とした。PD は、LED とは逆に、 光エネルギーを電気エネルギーに変換する半導体素子である。pn 接合部の空乏層に入射した光 子のエネルギーが、価電子帯の電子が伝導帯に遷移するエネルギーに使われ、電子正孔対が生 じることで電気エネルギーに変換される。エネルギー変換が可能な波長帯域、すなわち受光感 度を持つ帯域は、素子等の種類によって異なるが、市販されている PD の多くは可視光の全帯 域に及ぶ受光感度を持つうえ、電子なだれ型等の特殊なものを除けば、受光感度の大きさに顕 著な違いはない。したがって、PDの出力電流は受光面積の大きさの違いによるところが大きい。 また、放射線の影響によって窓材質の着色等が生じることも考えられることから、互いに受光 面積及び窓材質の異なる3種のPDを選定した。2種をSi型、1種をGaAsP型半導体素子とし、 性能特性試験に供した。PDの仕様を表 3-2に示す。

		PD(1)	PD2	PD3
半導体		GaAsP	Si	Si
窓材質		ホウケイ酸ガラス +シリコーン樹脂	エポキシ樹脂	石英ガラス
受光面積[mm ²]	7.3	6.7	33.6
受光感度 [A/W]	650nm	0.27	0.38	0.34
	550nm	0.27	0.32	0.28
	450nm	0.14	0.25	0.22
最高使用温	【度[度]	80	60	60
周波数特性		上昇時間:4µs	上昇時間:0.5µs	上昇時間:2µs
		(逆電上:0V 負荷抵抗:1kΩ)	(逆電上:0V 負荷抵抗:1kΩ)	(逆電圧:0V 負荷抵抗:1kΩ)

表 3-2 受光素子の仕様

(3) 窓 材

周囲の水環境から発信・受信回路部を隔離しつつ、伝送に使用する可視光を透過する性質を 有する窓材の材料には、ガラスを候補とした。水環境に長期間さらされても健全性を失わない 観点から、耐食性が高いものが望ましいと考えられる。また、一般的に、ガラスは放射線によ って着色することが知られていることから^[5]、着色による影響が通信に使用する可視光波長域 の光透過率の大幅な減少を伴わないものである必要がある。このため、耐食性に優れるサファ イヤガラスに加えて、一般的なソーダ石灰ガラスやホウケイ酸ガラスよりも放射線による着色 が少ないとされる石英ガラスについて照射前後の可視光透過特性試験に供した。石英ガラスに ついては、OH 基の添加量によって放射線による着色の程度が異なるとされている^[6]。この影響 を確かめるために、OH 基含有量の比較的多い合成石英及び比較的少ない溶融石英の2種を試験 に供した。窓材の仕様を表 3-3 に示す。

	大きさ[mm]	OH 基[ppm]
溶融石英	Ф10×t3	—
合成石英	Ф10×t3	≦200
サファイヤ	Ф10×t3	—

表 3-3 受光素子の仕様

(4) 光学フィルタ

先述したように、使用想定環境下である燃料プールではチェレンコフ光が存在するとともに、 その他の可視光成分も混在している可能性があり、これらの光源に由来する信号が伝送に悪影 響を及ぼすことが考えられる。対策として、伝送に使用する発信側のLED発光波長成分は透過 するが、その他の波長成分の透過を減じることができる光学フィルタを使用することで、受信 側のPD出力電流に対する外乱光由来のノイズ成分を軽減することとした。

光学フィルタの材質は、ガラスを候補とした。フィルタを大別すると、ある特定の帯域のみ を透過するバンドパス型と、ある波長以上または以下のみを透過するロングまたはショートパ ス型の2種がある。外乱光として想定されるチェレンコフ光は、発光強度のピークを紫外~青 色領域に持つため、こうした帯域の透過をカットするロングパスフィルタを使用すれば伝送シ ステムへの影響を減少させることが可能であると考えられる。しかし、一般的にバンドパス型 とロングパス型のフィルタは、透過する帯域を制御するフィルタリングの原理が互いに異なっ ている。前者は光の透過特性が互いに異なる誘電体間の界面で生じる反射が干渉する誘電体薄 膜を利用しており、後者は光の吸収に波長選択性のあるもの(例えばCdSなどの半導体微粒子) をガラス中に分散させ、その吸収によって透過する光を選択する光吸収物質によるものが主体 である。こうした違いが照射によってどのような影響を生じるかを評価するため、両タイプと も性能確認試験に供した。フィルタの仕様を表 3-4 に示す。

	大きさ[mm]	フィルタ性能	フィルタ原理
バンドパスフィルタ	50×50×t5	中心波長:630nm 半値幅:40nm	誘電体薄膜
ロングパスフィルタ	50×50×t2.5	透過限界波長:520nm	光吸収物質含有

表 3-4 光学フィルタの仕様

3.2. ガンマ線照射試験

3.1 で述べた光学部品について、ガンマ線照射前後における各種特性データを取得し、耐放射線性を調べた。照射試験は原子力機構高崎量子応用研究所(現量子科学技術研究開発機構高崎量子応用研究所)内のコバルト照射施設を使用した^[7]。発光素子は、A 社製は各 3 個、B 社及び C 社製は各 10 個、受光素子は各 3 個、窓材及び光学フィルタは各 1 枚を照射試験に供した。照射線量のばらつきを軽減するため、素子の架台は密度が高くガンマ線の反射が大きい金属材料ではなく、発泡スチロールや段ボール等の密度の低い材料を使用した。ガンマ線照射条件を表 3-5 に、照射試験の概略図を図 3-1 に示す。また、素子の個体差によるデータばらつきを軽減するため、照射後および特性試験には、同じ素子について順次追加照射を行って再び照射後特性試験を行うことを繰り返した。

表 3-5 ガンマ線照射条件

吸収線量[kGy]	吸収線量率[kGy/h]	温度[℃]
10, 20, 50, 100, 1000	10	20



図 3-1 照射試験の概略図及び照射時の様子

3.3. 特性試験

照射前及び照射後において各素子の光学特性を取得した特性試験の概要について述べる。LED は、電流源(ケースレー社製、2400 SourceMeter)及び電圧計(ケースレー社製、2000 Multimeter) を接続し、これを分光器付き積分球(ラブスフェア社製、LCS-100)内に設置し、電流-電圧特性 及びある特定の電流印加時の発光スペクトル・全光束を測定した。PD は、電圧源(ADCMT 社製、 6244 DC Voltage/Current Source/Monitor)及び微小電流計(ケースレー社製、487 Picoammeter/Voltage Source)を接続し、積分球(ラブスフェア社製、4P-GPS-060-SF)のポート に挿入した。別の2つのポートには、分光器(オーシャンオプティクス社製、Maya2000)と可変 波長光源(浜松ホトニクス社製、L12194-00-39070)の光ファイバライトガイドをそれぞれ挿入し、 5V 印加時の暗電流及び 400nm から 700nm までの発光波長に対する受光感度を測定した。窓材及び 光学フィルタについては、まず積分球の2つのポートに基準光源(オーシャンオプティクス社製、 LS-1-CAL-INT)及び分光器の光ファイバライトガイドをセットし、基準光を入射した際の分光器 による各波長の放射照度測定値を1とした。次に、基準光源からポートまでの光路に窓材や光学 フィルタを設置して積分球内に透過光が入射するようにし、測定値を各波長に対する相対透過率 とした。測定領域は 450nm から 800nm とした。上記の各測定系の概略図を図 3-2 に示す。



図 3-2 特性試験測定系の概略図。(a)LED の全光束及び電流-電圧特性測定、(b)PD の暗電 流及び受光感度測定、(c)窓材及び光学フィルタの透過率測定。

4. 結果および考察

4.1. 発光·受光素子

図 4-1~図 4-8 に照射前後の LED の電流-電圧特性を示す。全ての LED について、照射による 顕著な変化は見られなかった。このことから、1000kGy までのガンマ線照射は、LED の発光原理で ある順方向バイアス電圧印加時の pn 接合部でのキャリア移動にはほとんど影響しなかったと考 えられる。したがって、pn 接合部における正負キャリアの再結合により発せられた光の波長は、 照射前後でほぼ同じであると考えられる。一方、LED の外観は、図 4-9 に示すように、ガラス封 止型以外はレンズ部に着色が見られ、着色は照射量が増加するにしたがって濃くなった。全光束 については、図 4-10~図 4-17 に示すような結果となった。全光束は照射量の増加とともに減少 し、A 社の砲弾型 LED は発光波長が短いものほど顕著に減少した。一方、ガラス封止型は、デー タのばらつきが大きかったが、誤差棒の範囲内であることから全光束の有意な変化は確認されな かった。

上記の結果から、全光束の減少は、LED の半導体部分の劣化ではなく、半導体から発した光が、 放射線によって着色したレンズ部で吸収されたことによるものであることが示唆された^[8]。また、 着色による全光束の減少は波長の長い赤色 LED が最も少なく、本開発における水中無線伝送の発 光素子として有力である。ガラス封止型 LED は、照射後も着色せず、全光束の減少が見られない ことから、高積算線量が想定される場合の候補となりうることが明らかになった。



図 4-1 発光素子(A 社砲弾型①)の電流-電圧特性



図 4-2 発光素子(A 社砲弾型②)の電流-電圧特性



図 4-3 発光素子(A 社砲弾型③)の電流-電圧特性



図 4-4 発光素子(B 社砲弾型①)の電流-電圧特性



図 4-5 発光素子(B 社砲弾型②)の電流-電圧特性



図 4-6 発光素子(C社砲弾型①)の電流-電圧特性



図 4-7 発光素子(C 社砲弾型②)の電流-電圧特性



図 4-8 発光素子(ガラス封止型)の電流-電圧特性

	A 社	A 社	A社	B社	B社	C 社	C 社	ガラス
	砲弾型①	砲弾型②	砲弾型③	砲弾型①	砲弾型②	砲弾型①	砲弾型②	封止型
照射前	103				13		CH II	61
1000kGy 照射後	0	•	•	E.	B	2,9		0

図 4-9 照射前後の LED 外観写真^[8]



図 4-10 発光素子(A 社砲弾型①)の全光束の吸収線量依存性



図 4-11 発光素子(A 社砲弾型②)の全光束の吸収線量依存性



図 4-12 発光素子(A 社砲弾型③)の全光束の吸収線量依存性



図 4-13 発光素子(B 社砲弾型①)の全光束の吸収線量依存性



図 4-14 発光素子(B 社砲弾型②)の全光束の吸収線量依存性



図 4-15 発光素子(C 社砲弾型①)の全光束の吸収線量依存性



図 4-16 発光素子(C 社砲弾型②)の全光束の吸収線量依存性



図 4-17 発光素子(ガラス封止型)の全光束の吸収線量依存性

受光素子については、1000kGy までの照射量において暗電流は最大で 10nA 以下であった。した がって、これらの PD の半導体部分には無線伝送に悪影響を及ぼすような顕著な劣化はなかったと 考えられる。一方で、PD の外観は、図 4-18 に示すように、受光部材質が"ホウケイ酸ガラス+ シリコーン樹脂"のものは照射量の増加に伴って顕著に着色した。また、"エポキシ樹脂"もシリ コーン樹脂ほどは濃くないものの若干の着色がみられた。図 4-19~図 4-21 に示した受光感度の 波長依存性に関する照射量毎のグラフによれば、着色の顕著な"ホウケイ酸ガラス+シリコーン 樹脂"は大きな受光感度の減少がみられることから、LED と同様に、半導体の劣化ではなくガラ スや樹脂の着色によって受光が妨げられ、受光感度が減少したと考えられる^[8]。PD は、材質に樹 脂を用いずガラスのみの場合が、照射後の受光感度の減少もほとんど無く、特に本試験に供した PD③素子は受光面積や暗電流の有意な増加が見られない点からも有利なため、水中無線伝送の受 光素子として有力である。また、樹脂を用いた PD①及び②は、シリコーン樹脂よりもエポキシ樹 脂のほうが着色が薄いため、使用を想定している波長である 600nm 前後における受光感度の低下 も小さいことが予想され、受光素子として使用可能であると考えられる。

	PD(1)	PD2	PD3
材質	ホウケイ酸ガラス +シリコーン樹脂	エポキシ樹脂	石英ガラス
照射前			
1000kGy 照射後			
1000kGy 照射後の 断面観察	硼挂酸ガラス(無着色) ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ 、 、 、 、 、 、 、 、 、	エポキシ系樹脂(着色) ↓ ケース・土台	石英ガラス(無着色) 空間 ケース・土台

図 4-18 照射前後の PD の外観及び断面写真^[8]



図 4-19 受光素子 (PD①)の受光感度の波長依存性



図 4·20 受光素子 (PD2) の受光感度の波長依存性



図 4-21 受光素子 (PD③)の受光感度の波長依存性

4.2. 窓材

照射前後の外観は、合成石英およびサファイヤは 1000kGy まで着色は見られなかったが、溶融 石英は 10kGy でわずかに薄紫色に着色し、その後 1000kGy まで着色の濃さに変化は無かった。図 4-22 に 10kGy 照射後の外観を示す。透過率の照射量依存性は、図 4-23~図 4-25 に示すように、 着色のあった溶融石英では、10kGy でおよそ 700nm 以下の波長領域において 80%程度まで透過率 が低下し、その後は 1000kGy まで有意な透過率の変化は無かった。一方、着色の無かった合成石 英およびサファイヤは、照射量毎に数%の透過率の変動はあるものの、系統的な変化はみられな かった。こうした変動の要因として、透過率測定時に使用した光源と試料との間の非常にわずか な角度の変化によって表面反射等の大きさの違いが生じたこと等によるものであると考えられ、 照射による有意な透過率の低下はなかったと思われる。以上の結果から、水中無線伝送の窓材と して用いるガラスには、耐食性が高く、最大吸収線量の 1000kGy でも透過率の有意な減少が無か ったサファイヤが有力な候補である。また、高い耐食性が要求されない環境で使用する場合には、 合成石英も適した候補であると考えられる。

	溶融石英	合成石英	サファイヤ
照射前		. Course	
10kGy 照射後	((

図 4-22 照射前後の窓材の外観写真



図 4-23 窓材(溶融石英)透過率の吸収線量毎の波長依存性



図 4-24 窓材(合成石英)透過率の吸収線量毎の波長依存性



図 4-25 窓材(サファイヤ)透過率の吸収線量毎の波長依存性

4.3. 光学フィルタ

照射後の外観は、ロングパスフィルタは、照射前において黄色を呈しており、照射量が増加 するにしたがって茶色に着色し、1000kGy 照射後は黒色に近い色となった。バンドパスフィルタ は、照射前は薄青色を呈しており、照射とともに青色が濃くなり、1000kGy 照射後は濃青色にな るとともに表面が鏡面状態となった。図 4-26 に 1000kGy 照射後の外観を示す。10kGy 照射後に、 伝送波長として想定している 600nm 前後の波長領域で、ロングパスフィルタ透過率は未照射時 から 80%程度まで低下した。一方、バンドパスフィルタは 40%程度まで大きく低下した。しかし その後、前者は照射量の増加に伴って透過率は大きな低下を続けたが、後者は透過率の低下が あまり進まなかった。結果的に、1000kGy 照射後の透過率は、前者が 10%以下まで低下したが、 後者は 20%以上を保った。透過率の照射量依存性を図 4-27~図 4-28 に示す。これらの結果から、 水中無線伝送の光学フィルタにはバンドパスフィルタのほうが有力であると考えられる。しか し、その場合でも、照射による着色後も十分な透過率を保ち得るように、未照射時の透過帯域 として本試験で使用した 40nm もしくはそれ以上の幅を確保し、無用に狭い透過帯域のフィルタ を用いないことが求められる。

	ロングパスフィルタ	バンドパスフィルタ
照射前		
1000kGy 照射後		

図 4-26 照射前後の光学フィルタの外観写真



図 4-27 光学フィルタ (ロングパスフィルタ) 透過率の吸収線量毎の波長依存性



図 4-28 光学フィルタ (バンドパスフィルタ) 透過率の吸収線量毎の波長依存性

5. まとめ

シビアアクシデント発生時をはじめとする過酷環境下において、緊急時対応の円滑な実施を可 能とするべく、使用済燃料貯蔵プール等の水中でも高い信頼性で信号を伝送できる無線システム 基盤技術の整備に取り組んだ。光による無線伝送方式を選定し、各素子の候補について 1000kGy までのガンマ線による影響を調べ、以下のことがわかった。

- (1) LED の全光束の減少は、半導体部分の劣化ではなく、放射線によって着色したレンズ部で 光が吸収されたことによるものであることが示唆された。また、全光束の減少は発光波長 の長い赤色 LED が最も少なかった。
- (2) PD の受光感度の減少は、LED と同様に、半導体の劣化ではなくガラスや樹脂の着色によっ て光が吸収されたことによるものであることが示唆された。また、受光感度の減少は波長 が長いほうが少なかった。
- (3) ガラスの透過率は、サファイヤ及び合成石英は可視光領域においてほとんど減少せず、着 色も確認されなかった。一方、溶融石英は薄紫色に着色するとともに、700nm以下の波長 領域で透過率が 20%程度減少した。
- (4) フィルタの透過率は、600nm 前後の波長に対して、100kGy 程度まではロングパスフィルタ のほうが高かったが、1000kGy ではバンドパスフィルタのほうが高くなった。

以上の結果は、ガンマ線照射前後における特性を評価したものである。今後は、さらに実際の 使用環境に近い条件において適用可能性を検討するため、通電状態にある素子のガンマ線照射下 の劣化特性を評価し、可視光を用いた水中無線伝送システムの概念設計を進めていく。

謝 辞

本研究開発は、資源エネルギー庁発電用原子炉等安全対策高度化技術基盤整備事業「特殊 環境下で使用可能な監視システム高度化」の成果の一部である。本研究開発の実施にあたり、 大洗研究開発センター石原正博前副所長及び神永雅紀副所長(兼照射試験炉センター長)に 有意義なご指導及びご助言を頂きました。また、本報告書をまとめるにあたり、原子力科学 研究部門 大洗研究開発センター 高温工学試験研究炉部 石塚悦男 HTTR 技術課長には有意義 なご助言をいただきました。さらに、ガンマ線照射試験データの取得にあたっては、国立研 究開発法人 量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門 高崎量子応用研究所の山 縣諒平氏にご協力を頂きましたことを深く感謝いたします。

参考文献

- [1]「原子力安全に関する IAEA 閣僚会議に対する日本国政府の報告書-東京電力福島原子 力発電所の事故について-」,原子力災害対策本部,2011年.
- [2] 「東京電力株式会社福島第一原子力発電所事故の技術的知見について」,原子力安全・保安院,2012年.
- [3] R. M. Pope and E. S. Fry, "Absorption spectrum (380-700nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements, " Applied Optics, Vol. 36, No. 33, 1997, pp. 8710-8723.
- [4] 木村伸明,武内伴照,柴田 晃,竹本紀之,木村明博,那珂通裕,西方香緒里,谷本 政隆,土谷邦彦,佐野忠史,宇根崎博信,藤原靖幸,奥村 清,中島 健,Development on In-reactor Observation System Using Cherenkov Light (IV), KURRI Progress Report 2012, 2013, p. 209.
- [5] 作花済夫他, ガラスハンドブック, 朝倉書店, 1975, 1082p.
- [6] 田中大一郎, 光波センシング技術の進展, フジクラ技報, vol. 2, no. 123, 2012, pp. 38-42.
- [7] 清藤 一,春山保幸,花屋博秋,山縣諒平他,「電子線・ガンマ線照射施設データ 1号加速器・コバルト 60 照射施設—」, JAEA-Technology 2008-071, 2008, 29p.
- [8] T. Takeuchi, et. al, "Development of Radiation-Resistant In-Water Wireless Transmission System Using Light Emitting Diodes and Photo Diodes," IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 63(5), 2016, pp. 2698-2702.

_

表 1. SI 基本単位				
甘大昌	SI 基本単位			
本平里	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	Α		
熱力学温度	ケルビン	Κ		
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			
AI 立 是 SI 組 立 単位	SI 組立単位			
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 さ , 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 ⁸			
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	1			
比 透 磁 率 ^(b) (数字の) 1	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

			SI 租立单位	
組立量	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
立体鱼	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
力	ニュートン	Ν		m kg s ⁻²
E 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	С		s A
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{\cdot 3} A^{\cdot 1}$
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	ジーメンス	s	A/V	$m^{2} kg^{1} s^{3} A^{2}$
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^2 A^{-1}$
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$
インダクタンス	ヘンリー	Н	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
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
照度	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
吸収線量, 比エネルギー分与, 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	カタール	kat		s ⁻¹ mol

酸素活性(1) ダール kat [s¹ mol]
 (w)SH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 コヒーレントではない。
 (h)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。
 (a)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)へルツは周期現象についてのみ、ペラ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。 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。それシウス度とケルビンの
 (a)やレシウス度はケルビンの特別な名称で、温度器や温度開隔を表す整備はどもらの単位で表しても同じである。
 (b)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物告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

	S	[組立単位	
組立量	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
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
表 面 張 九	リ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
電東密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ² s A
誘 電 辛	コアラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$
透 磁 率	ペンリー毎メートル	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
吸収線量率	ダレイ毎秒	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
酵素活性濃度	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	名称	东 記号 乗数		名称	記号	
10^{24}	э 9	Y	10 ⁻¹	デシ	d	
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с	
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m	
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ	
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナノ	n	
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	р	
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f	
10^3	+ 1	k	10^{-18}	アト	а	
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z	
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	v	

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	۰	1°=(π/180) rad		
分	,	1'=(1/60)°=(π/10 800) rad		
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648 000) rad		
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²		
リットル	L, 1	1 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					
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=0.1MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg≈133.322Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m
海 里	Μ	1 M=1852m
バーン	b	$1 \text{ b}=100 \text{ fm}^2=(10^{-12} \text{ cm})^2=10^{-28} \text{m}^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位しの粉結的な朋友け
ベル	В	対数量の定義に依存。
デシベル	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		
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s		
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{ m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$		
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd m}^{-2}$		
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ⁻² =10 ⁴ lx		
ガ ル	Gal	1 Gal =1cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²		
マクスウエル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$		
ガウス	G	1 G =1Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T		
エルステッド ^(a)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4 π)A m ⁻¹		
(a) 3元系の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					
	-	名利	5		記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ſ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\scriptstyle u$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				K	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\scriptstyle u$				Д	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	$1 \gamma = 1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{T}$
フ	T.		N	"		1フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メー	ートル	采	カラゞ	ット		1 メートル系カラット= 0.2 g = 2×10 ⁻⁴ kg
ŀ				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
+1	ы		11	_		1 cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J
15	Ц		9		cal	(「IT」カロリー), 4.184J(「熱化学」カロリー)
3	ク			~	u	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$