

令和4年度原子力産業基盤強化事業委託費

一般産業用工業品の放射線環境下の
使用指針の整備事業

事業報告書

令和5年2月

(株)神戸製鋼所

目次

1. 事業の概要	1
1.1 背景	1
1.2 一般産業用工業品の使用指針の必要性	3
1.3 本事業でセンサ類を対象とする理由	3
1.4 使用指針の適用例	4
1.5 目的	4
2. 全体計画の策定	5
2.1 概要	5
2.2 5ヵ年の実施計画	7
2.2.1 一般産業用工業品の照射データ取得	7
(1) センサ類の使用環境検討及び照射試験用センサ類の選定	7
(2) センサ類の照射試験	7
(3) センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	7
2.2.2 一般産業用工業品の使用指針作成	7
(1) 機器へのセンサ類適用方法検討	7
(2) 機器の作動試験及び適合性評価	7
(3) 一般産業用工業品の使用指針作成	7
2.3 令和2年度の実施内容	8
2.3.1 センサ類の耐放射線性調査	8
2.3.2 センサ類の照射試験	8
(1) 照射試験結果	8
(2) 課題	10
2.4 令和3年度の実施内容	10
2.4.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得	11
(1) 照射試験結果	11
(2) 課題	17
2.4.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	18
(1) 照射試験結果	18
(2) 遮へい解析コードを用いた遮へい評価結果	19
(3) 課題	19
3. 令和4年度の実施内容	20
3.1 一般工業用品の照射データの追加取得（低照射線量率による影響評価）	20
3.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	20
4. 一般産業用工業品の照射データの追加取得	20
4.1 概要	20
4.2 照射試験条件及び方法	20

4.2.1	照射試験条件	20
(1)	対象センサ	21
(2)	照射線量率	21
(3)	サンプル数	22
4.2.2	照射試験場所	22
4.2.3	照射試験方法	22
(1)	センサ配置	22
(2)	データ取得	25
4.2.4	照射試験スケジュール	27
5.	カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得	31
5.1	概要	31
5.2	カスタマイズしたセンサ類の照射試験	31
5.2.1	照射試験条件及び試験方法	31
(1)	照射試験条件	31
(2)	照射試験方法	31
5.3	遮へい解析コードを用いた遮へい評価	33
5.3.1	解析コード	33
5.3.2	計算で使用する密度及び組成	33
5.3.3	線量換算係数	37
5.3.4	線源条件	38
5.3.5	評価位置	40
5.3.6	解析モデル	41
5.3.7	遮へい体構造	42
6.	照射試験結果及び遮へい解析結果	45
6.1	一般産業用工業品の照射データの追加取得	45
6.1.1	光電センサ	45
6.1.2	近接センサ	57
6.2	カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得	67
6.2.1	照射試験結果	67
6.2.2	遮へい解析結果	70
7.	考察	74
7.1	令和3年度までの試験結果を含む整理	74
7.2	照射線量率による影響	78
7.3	通電状態による影響	81
7.4	入力電圧による影響	84
7.5	遮へい解析と照射試験結果の比較	87
8.	今後の課題	91
8.1	高線量率領域における通電状態及び入力電圧の影響評価	91

8.2 低線量率領域における通電状態及び入力電圧の影響評価	91
8.3 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得.....	91
9. まとめ	92
参考文献	94

－ 表 目 次 －

表 2-1	令和 2・6 年度の実施スケジュール.....	8
表 2-2	光電センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量.....	9
表 2-3	近接センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量（照射線量率 50Gy/h）.....	9
表 2-4	トルクセンサが正常に動作した時点までの集積吸収線量（照射線量率 50Gy/h）.....	9
表 2-5	測域センサ損傷時の集積吸収線量（照射線量率 50Gy/h）.....	10
表 2-6	光電センサ照射試験結果（正常な動作が確認された時点）.....	11
表 2-7	光電センサ照射試験結果（電圧が大きく下がり始めた時点）.....	12
表 2-8	近接センサ照射試験結果（正常に動作が確認できた時点）.....	13
表 2-9	近接センサ照射試験結果（電圧が大きく下がり始めた時点）.....	14
表 2-10	トルクセンサ照射試験結果.....	15
表 2-11	測域センサ照射試験結果.....	16
表 2-12	カスタマイズした光電センサの照射試験結果.....	18
表 2-13	カスタマイズした測域センサの照射試験結果.....	18
表 2-14	光電センサ（カスタマイズ）の本解析結果.....	19
表 2-15	測域センサ（カスタマイズ）の本解析結果.....	19
表 4-1	照射試験条件.....	20
表 4-2	照射試験データ取り及び動作確認頻度.....	25
表 5-1	カスタマイズ照射試験条件及び照射上限.....	32
表 5-2	遮へい解析に用いた物質の密度及び組成.....	34
表 5-3	遮へい解析に用いた換算係数.....	37
表 5-4	Co-60 線源スペクトル.....	38
表 5-5	規格化線源強度を用いた計算による線量率と測定値の比較.....	38
表 6-1	光電センサの照射試験結果（電圧が 0V 付近まで低下し故障した時点）.....	46
表 6-2	近接センサの照射試験結果（故障を確認した時点）.....	58
表 6-3	カスタマイズした光電センサの照射試験結果（照射時間）.....	67
表 6-4	カスタマイズした光電センサの照射試験結果（みなし集積吸収線量）.....	68
表 6-5	遮へい解析結果.....	70
表 7-1	光電センサの照射試験結果（不具合発生前の時点）.....	75
表 7-2	近接センサの照射試験結果（不具合発生前の時点）.....	76
表 7-3	光電センサの照射線量率の影響評価.....	79
表 7-4	近接センサの照射線量率の影響評価.....	80
表 7-5	光電センサの通電状態の影響評価.....	82
表 7-6	近接センサの通電状態の影響評価.....	83
表 7-7	光電センサの入力電圧の影響評価.....	85
表 7-8	近接センサの入力電圧の影響評価.....	86

－ 図 目 次 －

図 1-1	従来のサプライチェーン	2
図 1-2	使用指針を活用したサプライチェーン	2
図 2-1	指針作成までの業務フロー	6
図 4-1	光電センサ概略図	21
図 4-2	近接センサ概略図	21
図 4-3	光電センサ・近接センサ取付け図	23
図 4-4	センサ配置図	24
図 4-5	照射試験状況写真	24
図 4-6	光電センサの試験用電気回路図	25
図 4-7	近接センサの試験用電気回路図	27
図 4-8	10月照射試験スケジュール	28
図 4-9	12月照射試験スケジュール	29
図 4-10	1月照射試験スケジュール	30
図 5-1	カスタマイズした光電センサの試験状況写真	33
図 5-2	線源規格化の解析モデル	39
図 5-3	解析モデルにおける評価位置（ガラス線量計素子設置位置）	40
図 5-4	遮へい室の解析モデル	41
図 5-5	遮へい体構造図（本体部）	42
図 5-6	遮へい体構造図（蓋部）	43
図 5-7	遮へい体解析モデル図	43
図 5-8	遮へい解析モデル図（全体）	44
図 6-1	光電センサ No.1 の電圧変化	47
図 6-2	光電センサ No.1 の電圧変化（縮小図）	47
図 6-3	光電センサ No.2 の電圧変化	48
図 6-4	光電センサ No.2 の電圧変化（縮小図）	48
図 6-5	光電センサ No.3 の電圧変化	49
図 6-6	光電センサ No.3 の電圧変化（縮小図）	49
図 6-7	光電センサ No.4 の電圧変化	50
図 6-8	光電センサ No.4 の電圧変化（縮小図）	50
図 6-9	光電センサ No.5 の電圧変化	51
図 6-10	光電センサ No.5 の電圧変化（縮小図）	51
図 6-11	光電センサ No.6 の電圧変化	52
図 6-12	光電センサ No.6 の電圧変化（縮小図）	52
図 6-13	光電センサ No.7 の電圧変化	53
図 6-14	光電センサ No.7 の電圧変化（縮小図）	53
図 6-15	光電センサ No.8 の電圧変化	54

図 6-16	光電センサ No.8 の電圧変化 (縮小図)	54
図 6-17	光電センサ No.9 の電圧変化	55
図 6-18	光電センサ No.9 の電圧変化 (縮小図)	55
図 6-19	光電センサ No.10 の電圧変化	56
図 6-20	光電センサ No.10 の電圧変化 (縮小図)	56
図 6-21	近接センサ No.1 の電圧変化	59
図 6-22	近接センサ No.2 の電圧変化	59
図 6-23	近接センサ No.3 の電圧変化	60
図 6-24	近接センサ No.4 の電圧変化	60
図 6-25	近接センサ No.5 の電圧変化	61
図 6-26	近接センサ No.6 の電圧変化	61
図 6-27	近接センサ No.7 の電圧変化	62
図 6-28	近接センサ No.8 の電圧変化	62
図 6-29	近接センサ No.9 の電圧変化	63
図 6-30	近接センサ No.9 の電圧変化 (縮小図)	63
図 6-31	近接センサ No.10 の電圧変化	64
図 6-32	近接センサ No.11 の電圧変化	64
図 6-33	近接センサ No.12 の電圧変化	65
図 6-34	近接センサ No.13 の電圧変化	65
図 6-35	近接センサ No.13 の電圧変化 (縮小図)	66
図 6-36	カスタマイズ光電センサ No.1 電圧変化	68
図 6-37	カスタマイズ光電センサ No.2 電圧変化	69
図 6-38	カスタマイズ光電センサ No.3 電圧変化	69
図 6-39	照射室の線量率分布図 (光電センサ投光部高さ)	71
図 6-40	遮へい体近傍の線量率分布図 (遮へい体内部ガラス線量計高さ)	72
図 6-41	遮へい体近傍の線量率分布図 (遮へい体外部ガラス線量計高さ)	73
図 7-1	光電センサ不具合発生前の平均集積吸収線量	77
図 7-2	近接センサ不具合発生前の平均集積吸収線量	77
図 7-3	DIN 規格によるストリーミング計算の概略図	88
図 7-4	遮へい体近傍の照射線量率分布図 (高さ方向)	89
図 7-5	遮へい体近傍の線量率分布図 (センサ投光部高さ)	90

1. 事業の概要

1.1 背景

原子力施設のほとんどの機器の構成部品には、数多くの一般産業用工業品が使用されている。

令和 2 年から施行された、「原子力施設の保安のための業務に係る品質管理に必要な体制の基準に関する規則」（第三十四条）によれば、「原子力事業者等は、保安活動の重要度に応じて、調達物品等の供給者及び調達物品等に適用される管理の方法及び程度を定めなければならない。この場合において、一般産業用工業品については、調達物品等の供給者等から必要な情報を入手し当該一般産業用工業品が調達物品等要求事項に適合していることを確認できるように、管理の方法及び程度を定めなければならない。」と定められている。

ここで、一般産業用工業品の技術評価については、原子力事業者等が供給者から情報を入手して自ら行うか、供給者に評価を依頼するルールとなっている（同規則の解釈）。技術評価項目のうち、一般的な要求事項（耐熱性、耐食性、強度等）は一般産業と同等であり、なんら問題ないが、全ての原子力施設に共通で、かつ、基本的な要求事項である耐放射線性の技術評価に課題がある。

一般産業用工業品は、放射線環境下での使用は想定されておらず、供給者から必要な情報（耐放射線性）を入手するのは困難である。また、原子力事業者等の依頼があっても、限られた数量の需要しかない原子力産業向けの用途で、供給者が必要な情報（耐放射線性）を新たに取得することも考え難い。

このような状況のまま、一般産業用工業品について、供給者に依存して協力を強ければ、供給を拒否される可能性が高く、原子力機器の構成部品の調達が困難になることにより、原子力施設の保安に支障が生じるおそれがある。たとえ、納入時の協力が免責されても、納入後のフォローが厳しいとの不安があるため、供給者の中には原子力向けの製品提供を拒否する風潮が広がっており、サプライチェーンが劣化している（図 1-1 参照）。

また、今後、原子力発電所の再稼働に伴う設備更新及び廃止措置に伴う設備解体が活発になると、炉内構造物や使用済みイオン交換樹脂を代表とする様々な高線量廃棄物が発生するため、ますます、放射線環境下での一般産業用工業品の需要及び技術評価の要求が高まると予想される。

このため、原子力事業者等が、放射線環境下の一般産業用工業品の特性を、供給者に成り代わって評価できる状況にしていくことは、サプライチェーンが劣化している原子力業界の持続にとって大変重要な目標である。

本事業では、一般産業用工業品の中で、全ての原子力施設に多数存在し、放射線に弱い構成部品であるセンサ類について注目し、放射線下の性能を検証するプロセスを実践して放射線環境下での使用指針を作成する。

一般産業用工業品であるセンサ類の使用指針ができることにより、原子力事業者等及び原子力メーカーの自律性が高まり、一般産業用工業品メーカーの原子力業界への不安が払拭され、センサ提供を拒否している風潮が緩和され、サプライチェーンの維持、ひいては全産業界の強化につながる（図 1-2 参照）。

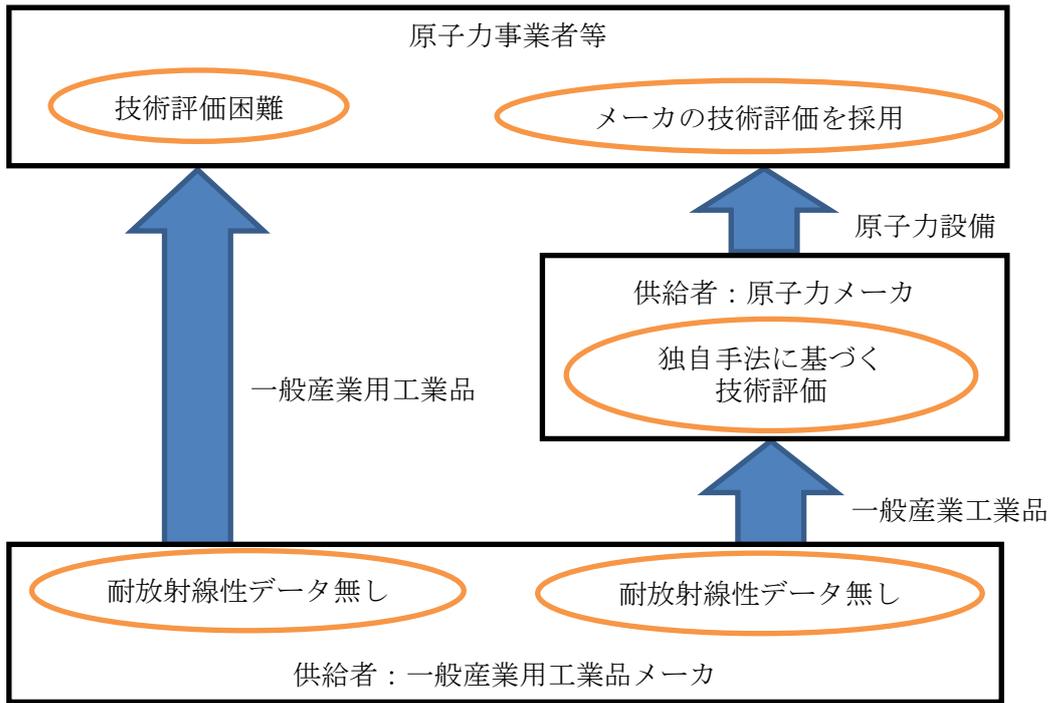


図 1-1 従来のサプライチェーン

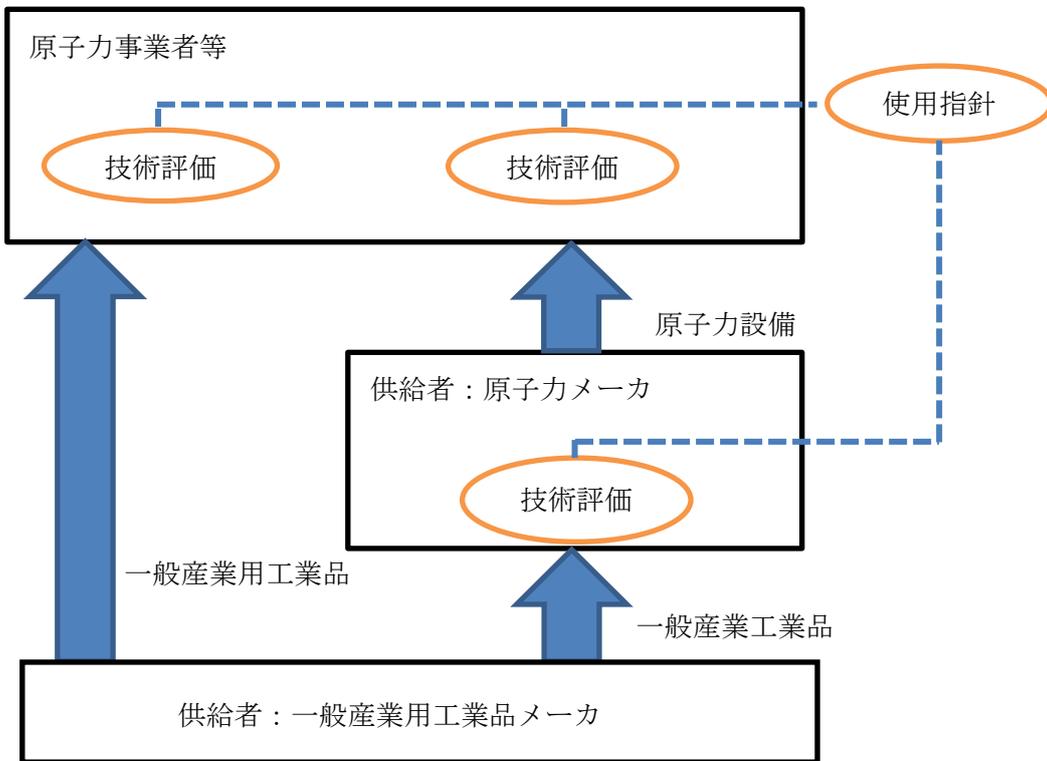


図 1-2 使用指針を活用したサプライチェーン

1.2 一般産業用工業品の使用指針の必要性

日本原子力研究開発機構殿において、機器・材料の耐放射線性データに関する以下の代表的な文献がある。

- ① 耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備（1993年）^[1]
- ② 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（2008年）^[2]
- ③ 各種高分子材料の耐放射線性；実使用環境模擬の劣化評価（2010年）^[3]

これらの文献等の耐放射線性データは、主に機器の構成部品に関するデータであり、購入品の放射線による耐久性を評価するためには、構成部品を調査し、どの部品が耐放射線性の観点で律速になるかを検討する必要がある。従って、構成部品が複雑なセンサ類等については、組み込まれている構成部品の詳細が分かる供給者（センサメーカー）に評価を依頼する必要がある。供給者の中には原子力事業者向けの製品提供を拒否する風潮が広がっており、供給者に依存して協力を強ければ、サプライチェーンがさらに劣化するおそれがある。

そこで、本事業において、原子力事業者及び原子力メーカーでも一般産業用工業品であるセンサ類の技術評価が可能な使用指針を作成することで、原子力事業者等、原子力メーカー及び一般産業工業品メーカーの協力体制が構築されることにより、センサメーカーの原子力業界への不安が払拭され、サプライチェーンの維持、ひいては全産業界の強化につながるものと考えられる。

1.3 本事業でセンサ類を対象とする理由

一般に、装置を製作する際の購入品は、駆動源（電動モータ、油圧シリンダ）、電気系（ケーブル、端子台）、制御系（センサ類）である。このうち、駆動源（電動モータ）、電気系は、絶縁材の耐放射線性が問題となる。絶縁材に使用する素材については、既に耐放射線性データが多数蓄積されている。例えば、電動モータは標準仕様で絶縁種が選定できるものが購入可能であり、絶縁種を適切に選択することで電動モータは高い耐放射線性を得ることができる。油圧シリンダは絶縁性能ではなく、作動油の照射による劣化が問題になる。一般に、耐放射線性作動油を購入することが可能であり、それを選定することにより油圧シリンダは高い耐放射線性が得られる。駆動源、電気系については、構造がセンサ類に比べて単純な点、使用条件に応じたオプションが用意されていることから、高い耐放射線性を得るうえでの障壁は少ない。

一方、制御系に関わるセンサ類は、駆動源と比べて電子部品、接着剤、リード線、絶縁材等、多くの構成部品から成るため、絶縁材の劣化のみならず、半導体の照射による劣化等複合的な要因により耐放射線性が決まる。構成部品が多く量産品であるため、個々の照射による劣化要因に対して特注の生産に応じてもらうことは、コスト・納期・保守の観点で得策ではない。仮に初期設置時には特注に応じてもらえたとしても、保守交換時に再製作に応じてもらえないとは限らず、サプライチェーンの現状を鑑みると、実際に生産に応じてもらえないことの方が多い。

また、弊社の社内試験として実施したレーザスキャナの照射試験では、5基のセンサ類に対して放射線を照射した結果、センサ類が故障するまでの集積吸収線量のばらつきが比較的小さいことが分かっている。従って、同一の製品であれば再現性があるため、試験によって製品の耐放射線性データを得られる可能性がある。

以上のことから、本事業では、センサ類に着目して一般産業用工業品の使用指針を定めることとしている。

1.4 使用指針の適用例

高線量廃棄物取扱施設のような高線量環境下において、一般産業用工業品のセンサ類を適用した場合の交換頻度の評価に適用することができる。また、ホットラボ、廃止措置等、線源に接近した位置にセンサ類を設置する必要がある作業環境においても同様に交換頻度の評価に適用することができる。

特注のセンサ類を使用している既存施設においては、本使用指針に基づいた一般産業用工業品のセンサ類に交換することにより、入手性（コスト、納期）が向上するため、保守性を向上させることができる。

1.5 目的

原子力事業者等が、放射線環境下の一般産業用工業品の特性を供給者に成り代わって評価できる状況にすることは、サプライチェーンが劣化している原子力業界にとって大変重要な目標である。従って、一般産業用工業品の中で、全ての原子力施設に多数存在し、放射線に弱い構成部品であるセンサ類について注目し、耐放射線性に関するデータ（照射データ）を整理したうえで、機器へのセンサ類の適用方法を検討し、使用指針を作成することが重要である。

本事業では、代表的なセンサの耐放射線性に関するデータを取得し整理することで、使用指針の作成に資することを目的とする。

2. 全体計画の策定

2.1 概要

放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針を作成するためには、一般産業用工業品の耐放射線性に関するデータ（照射データ）を取得する必要がある。指針作成までの業務フローを図 2-1 に示す。一般産業用工業品の使用指針の作成に必要な期間は、5 年程度と考えられる。一般産業用工業品の使用指針作成のための 5 ヶ年の実施計画及び令和 4 年度の実施内容について後述する。

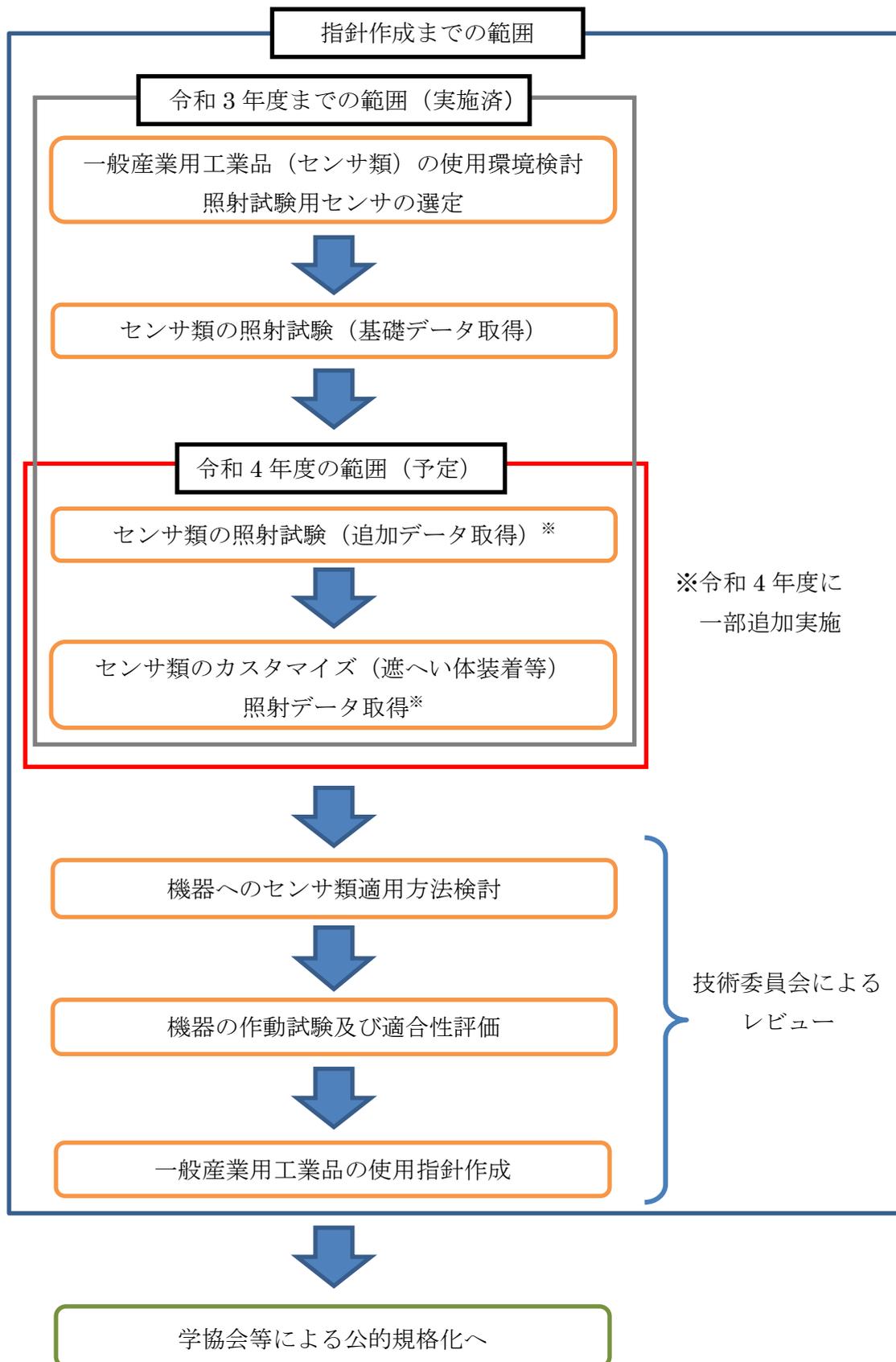


図 2-1 指針作成までの業務フロー

2.2 5カ年の実施計画

放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針は、以下の手順にて、センサ類の耐放射線性に関するデータを取得したうえで作成する必要がある。

2.2.1 一般産業用工業品の照射データ取得

(1) センサ類の使用環境検討及び照射試験用センサ類の選定

一般産業用工業品（センサ類）の使用環境を検討する。また、センサ類の耐放射線性に関して文献等によりデータの有無を調査し、有効なデータが無いセンサ類を照射試験の対象として選定する。

(2) センサ類の照射試験

照射試験対象として選定したセンサ類に対して放射線を照射し、耐放射線性に関するデータを取得する。

(3) センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得

センサ類に遮へい体を装着する等により、放射線環境下用に簡単にカスタマイズする手法を試みる。カスタマイズしたセンサ類に対して照射データを取得する。

2.2.2 一般産業用工業品の使用指針作成

(1) 機器へのセンサ類適用方法検討

センサ類の特性データやカスタマイズ手法に基づいて、センサ類の機器への適用方法を検討する。

(2) 機器の作動試験及び適合性評価

センサ類を搭載した機器の作動試験（コールド試験）を行い、適合性を評価する。

(3) 一般産業用工業品の使用指針作成

以上のプロセスを取り纏めて、一般産業用工業品（センサ類）の使用指針を作成する。

以上より、放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針を作成するまでには、5年程度かかるものと考えられる。令和2-6年度の5カ年の実施スケジュールを表2-1に示す。

表 2-1 令和 2 - 6 年度の実施スケジュール

実施項目	令和 2 年度	令和 3 年度	令和 4 年度	令和 5 年度	令和 6 年度
1. 一般産業用工業品の照射データ取得					
1) センサ類の使用環境検討及び照射試験用センサ類の選定	●——●				
2) センサ類の照射試験	●————●				
3) センサ類のカスタマイズ（遮へい体装着等）及び照射データ取得		●————●			
2. 一般産業用工業品の使用指針作成					
1) 機器へのセンサ類適用方法検討				●————●	
2) 機器の作動試験及び適合性評価				●————●	
3) 一般産業用工業品の使用指針作成					●————●

2.3 令和 2 年度の実施内容

令和 2 年度は、5 ヶ年の実施計画を踏まえて、センサ類の耐放射線性調査及び照射試験によるセンサ類の耐放射線性に関するデータの取得を実施した⁴⁾。令和 2 年度の実施内容の詳細について以下に示す。

2.3.1 センサ類の耐放射線性調査

原子力施設で使用されている装置（クレーン、コンベア、台車、フォークリフト等）のセンサ類を調査した。これらのセンサ類に対し、一般産業用工業品の耐放射線性について文献調査を行い、耐放射線性データの有無の整理を行った。

2.3.2 センサ類の照射試験

(1) 照射試験結果

2.3.1 項で実施した耐放射線性データの有無の整理結果に基づき、有効なデータが無いセンサ類の中から、今後の指針作成に資すると考えられるセンサ類を、照射試験対象として選定した。

対象センサは光電センサ、近接センサ、トルクセンサ、測域センサの 4 種類とした。各センサについて照射線量率、メーカーの違い及び個体差によるばらつき（再現性）等の耐放射線性への影響を考慮した試験条件にて、照射試験を実施した。令和 2 年度の照射試験結果を表 2-2 から表 2-5 に示す。

表 2-2 光電センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量

メーカー名	照射線量率 50Gy/h		照射線量率 75Gy/h		照射線量率 150Gy/h	
	集積 吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]	集積 吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]	集積 吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
A 社	501 511 536	516 (SD:14.7)	532 517 518	522 (SD:6.8)	426 393 393	404 (SD:15.6)
B 社	790 757 879	809 (SD:51.5)	719 804 719	747 (SD:40.1)	498 639 578	572 (SD:57.7)
C 社	1045< 1045< 1045<	1045<	1070< 1070< 1070<	1070<	1710< 1710< 1710<	1710<

※ SD : 標準偏差

表 2-3 近接センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量 (照射線量率 50Gy/h)

メーカー名	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量* [Gy]
D 社	813 939	876
E 社	1072< 1072< 1072< 1072<	1072<

※ 標準偏差は、D 社はサンプル数が 2、E 社は照射上限値でも測定不能とならなかったため算出していない。

表 2-4 トルクセンサが正常に動作した時点までの集積吸収線量 (照射線量率 50Gy/h)

メーカー名	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
F 社	306 133 133	191 (SD:81.6)
G 社	306 306 306	306 (SD:0)

※ SD : 標準偏差

表 2-5 測域センサ損傷時の集積吸収線量（照射線量率 50Gy/h）

メーカー名	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
H 社	278	261 (SD:17.0)
	268	
	238	
I 社	225	260 (SD:25.0)
	278	
	278	

※ SD：標準偏差

(2) 課題

令和 2 年度は、一般産業用工業品（センサ類）の耐放射線性に関して文献等によりデータの有無を調査し、有効なデータが無いセンサ類に対して、照射試験を実施して耐放射線性に関するデータを取得した。今後、これらセンサ類の使用指針を作成するために、追加データの補充や、センサ類に遮へい体を装着する等により、放射線環境下用に簡単にカスタマイズする手法を試みる必要がある。ここでは、放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針を作成するための今後の課題について以下に示す。

1) 照射線量率における影響評価

光電センサに対して、照射線量率をパラメータとして照射試験を実施し、照射線量率が高いほど、耐放射線性が低下するという結果が得られた。一般産業用工業品のセンサ類を使用する環境としては、50Gy/h よりも低い環境であることが想定された。従って、令和 2 年度に得られた結果は保守的（安全側）ではあるが、過大評価している可能性があった。

2) 放射線の照射方向による影響評価

メーカーによる違いで、構成部品の配置等が異なり、耐放射線性に影響があると考えられた。従って、センサへ照射させる向きによっては、センサが損傷するまでの集積吸収線量の結果が変わる可能性も考えられた。

3) 個体差のばらつき評価

令和 2 年度の照射試験では、サンプル数が 3 であったため、ばらつきがそれほど大きくないことの確認はできたが、定量的に評価するまでには至らなかった。

2.4 令和 3 年度の実施内容

令和 3 年度は、2.2 項に示した 5 ヶ年の実施計画及び 2.3 項に示した令和 2 年度の課題を踏まえて、放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針作成に資するセンサ類の耐放射線性に関する照射データの追加取得、センサ類のカスタマイズ及びその照射データ取得を実施した⁵⁾。令和 3 年度の実施内容の詳細について以下に示す。

2.4.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得

(1) 照射試験結果

以下に、令和3年度に実施した照射データ取得の追加取得のための、光電センサ、近接センサ、トルクセンサ、測域センサの照射試験結果を表 2-6 から表 2-11 に示す。

表 2-6 光電センサ照射試験結果（正常な動作が確認された時点）

No.	照射線量率* [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
光 5-1	4.63	177.53	822<	—
光 5-2	4.63	177.53	822<	
光 5-3	4.63	177.53	822<	
光 50-1	48.5	8.40	408	427 (SD:14)
光 50-2	49.9	8.80	439	
光 50-3	51.6	8.40	434	
光 100-1	102.1	4.20	429	428 (SD:25)
光 100-2	112.2	3.80	427	
光 100-3	116.1	3.80	441	
光 100-4	116.0	3.80	441	
光 100-5	106.5	3.80	405	
光 100-6	97.4	4.20	409	
光 100-7	102.1	4.80	490	
光 100-8	112.2	3.80	427	
光 100-9	116.1	3.60	418	
光 100-10	116.0	3.40	395	
光 100-TB-1	106.5	4.00	426	415 (SD:18)
光 100-TB-2	97.4	4.40	428	
光 100-TB-3	97.4	4.00	390	
光 100-RL-1	97.4	3.80	370	370 (SD:16)
光 100-RL-2	97.4	4.00	390	
光 100-RL-3	97.4	3.60	351	

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

表 2-7 光電センサ照射試験結果（電圧が大きく下がり始めた時点）

No.	照射線量率* [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
光 50-1	48.5	7.06	343	343 (SD:6)
光 50-2	49.9	6.75	337	
光 50-3	51.6	6.80	351	
光 100-1	102.1	2.55	260	283 (SD:18)
光 100-2	112.2	2.48	278	
光 100-3	116.1	2.54	295	
光 100-4	116.0	2.56	297	
光 100-5	106.5	2.59	276	
光 100-6	97.4	2.60	253	
光 100-7	102.1	2.61	266	
光 100-8	112.2	2.62	294	
光 100-9	116.1	2.62	304	
光 100-10	116.0	2.62	304	
光 100-TB-1	106.5	2.76	294	274 (SD:15)
光 100-TB-2	97.4	2.77	270	
光 100-TB-3	97.4	2.65	258	
光 100-RL-1	97.4	2.64	257	257 (SD:1)
光 100-RL-2	97.4	2.65	258	
光 100-RL-3	97.4	2.63	256	

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

表 2-8 近接センサ照射試験結果（正常に動作が確認できた時点）

No.	照射線量率※1 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
近 5-1	4.63	90.60	419※2	684 (SD:188)
近 5-2		176.40	817	
近 5-3		176.40	817	
近 50-1	48.5	24.00	1165	1166 (SD:42)
近 50-2	49.9	24.40	1217	
近 50-3	51.6	21.60	1115	
近 100-1	102.1	10.60	1082	1252 (SD:210)
近 100-2	112.2	14.00	1571	
近 100-3	116.1	12.60	1462	
近 100-4	116.0	12.80	1485	
近 100-5	106.5	13.00	1385	
近 100-6	102.1	11.20	1143	
近 100-7	112.2	9.00	1010	
近 100-8	116.1	8.00	928	
近 100-9	116.0	11.40	1323	
近 100-10	106.5	10.60	1129	

※1 アラニン線量計の測定結果から算出した値

※2 動作確認を 20Gy 毎で実施する前に正常に動作しなくなったため、測定不能となったと考えられる集積吸収線量の範囲が 419 - 738Gy と広い。

表 2-9 近接センサ照射試験結果（電圧が大きく下がり始めた時点）

No.	照射線量率※1 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
近 50-1	48.5	24.00※2	1165	1166 (SD:42)
近 50-2	49.9	24.40※2	1217	
近 50-3	51.6	21.60※2	1115	
近 100-1	102.1	10.60※2	1082	1207 (SD:182)
近 100-2	112.2	13.20	1482	
近 100-3	116.1	10.90	1265	
近 100-4	116.0	12.80※2	1485	
近 100-5	106.5	13.00※2	1385	
近 100-6	102.1	11.20※2	1143	
近 100-7	112.2	9.00※2	1010	
近 100-8	116.1	8.00※2	928	
近 100-9	116.0	10.00	1160	
近 100-10	106.5	10.60※2	1129	

※1 アラニン線量計の測定結果から算出した値

※2 電圧の大きな変化がなかったため、正常に動作した時点までの時間を記入している。

表 2-10 トルクセンサ照射試験結果

No.	照射線量率※1 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
ト 5-1	5.23	105.96	554	561※2 (SD:7)
ト 5-2		108.71	569	
ト 5-3		126.93	644<	
ト 50-1	49.1	4.00	196	164 (SD:46)
ト 50-2		4.00	196	
ト 50-3		2.00	98※3	
ト 100-1	102	1.20	123	127 (SD:6)
ト 100-2	114	1.20	136	
ト 100-3	102	1.20	123	

※1 アラニン線量計の測定結果から算出した値

※2 ト 5-1、ト 5-2 より算出した。

※3 動作確認を 20Gy 毎で実施する前に正常に動作しなくなったため、測定不能となったと考えられる集積吸収線量の範囲が 98 - 196Gy と広い。

表 2-11 測域センサ照射試験結果

No.	照射線量率※ [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
測 5-1	4.63	42.90	199	208 (SD:7)
測 5-2		46.51	215	
測 5-3		45.19	209	
測 50-1	47.9	5.31	255	260 (SD:21)
測 50-2		4.97	238	
測 50-3		6.00	287	
測 100-1	113	2.25	255	249 (SD:8)
測 100-2		2.28	258	
測 100-3		2.11	238	
測 100-4		2.18	246	
測 150-1	150	1.64	247	253 (SD:10)
測 150-2		1.59	238	
測 150-3		1.66	250	
測 150-4		1.80	270	
測 150-5		1.75	262	
測 150-6		1.67	250	

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

(2) 課題

1) 低照射線量率による影響評価

令和3年度の試験では、光電センサ、近接センサ、トルクセンサは非通電で5Gy/hの照射試験を行った。このとき通電状態で試験を行った50、100Gy/hと間に有意な差が確認された。一方で、5、50、100、150Gy/hの4種類の照射線量率全てを通電状態で試験を行った測域センサは有意な差は確認されなかった。

従って、光電センサ、近接センサ、トルクセンサについては通電状態で5Gy/hの照射を行うことで、5Gy/hの時の試験結果の有意な差が通電非通電、もしくは照射線量率による影響なのかを明確にする必要がある。

また、一般産業用工業品のセンサ類を使用する環境としては、50Gy/hよりも低い環境であることが想定されるため、5Gy/h以下で通電状態における耐放射線性データを取得する必要がある。

2) 非照射時の回復効果による影響

令和3年度の照射試験では、夜間や休日は照射試験を中断して実施した。例えば、光電センサでは、故障の予兆と考えられる出力電圧の低下が確認されていたものが、夜間や休日明けには、出力電圧が正常値付近まで上昇する事象や、短くなっていた検出距離が長くなる事象が確認された。この事象により、センサが故障するまでの時間が連続照射時に比べて長くなっている可能性が考えられた。また、試験において、近接センサの正常に動作しなくなるまでの集積吸収線量のばらつきが大きかったが、集積吸収線量が高かったセンサは、低かったセンサに比べて、照射日数が長かった。従って、集積吸収線量が高かったセンサは、夜間や休日時の非照射時の回復効果により、センサの寿命が延びたため、ばらつきが大きくなった可能性が考えられた。従って、非照射時の回復効果による影響を確認する必要がある。

3) 設計で使用する集積吸収線量の上限值評価

センサ類の使用可能な集積吸収線量の上限值を設計値として設定する場合には、使用する施設または装置の安全上の重量性、使用環境、使用方法等を考慮して、使用可能な集積吸収線量を決定する必要がある。例えば、安全上の重要度が高い施設でセンサを使用する場合には、本試験結果から設定した使用可能な集積吸収線量の上限值にさらに裕度を考慮する必要がある。一方、安全上の重要度が低い施設でありセンサの故障が容認される場合には、経済性を考慮して、平均集積吸収線量を上限値とする考え方もある。また、センサを二重化する設計とした場合も使用可能な集積吸収線量を高めに設定することが可能である。従って、裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限值は、照射試験により得られた故障前の予兆、個体差のばらつきを基に、使用する施設または装置の安全上の重量性、使用環境、使用方法等を考慮して、使用可能な集積吸収線量を設計値として設定する必要がある。そこで、使用指針を作成するためには、今後、設計で使用する集積吸収線量の設定方法について、有識者委員会を設立して審議する必要がある。

2.4.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得

(1) 照射試験結果

センサ類の外側に遮へい体を装着し、カスタマイズしたセンサ類に対して照射データ取得を行った。光電センサ及び測域センサのカスタマイズ照射試験結果を表 2-12 及び表 2-13 に示す。

表 2-12 カスタマイズした光電センサの照射試験結果

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 ^{※1} [h]	集積 吸収線量 ^{※2} [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]	【参考】 カスタマイズしない 状態での平均集積 吸収線量[Gy]
光 100-カ-1	94.1	5.60	527	606 (SD ^{※3} :76.7)	428 (SD ^{※3} :25)
光 100-カ-2	111	6.40	710		
光 100-カ-3	112	5.20	582		

※1 照射時間は、電圧が 0V となった時点の直前の動作確認の時間としている。

※2 センサを設置した位置での空間線量率を用いた値

※3 SD：標準偏差

表 2-13 カスタマイズした測域センサの照射試験結果

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積 吸収線量 ^{※1} [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]	【参考】 カスタマイズしない 状態での平均集積 吸収線量[Gy]
測 150-カ-1	150	3.25	488	441 (SD ^{※2} :35.6)	253 (SD ^{※2} :10)
測 150-カ-2	150	2.88	432		
測 150-カ-3	150	2.68	402		

※1 センサを設置した位置での空間線量率を用いた値

※2 SD：標準偏差

(2) 遮へい解析コードを用いた遮へい評価結果

以下の表 2-14 及び表 2-15 に光電センサ及び測域センサの遮へい解析結果を示す。一部、測定値と計算値が、20%を超えるセンサあったが、概ね 20%以内の差となった。

表 2-14 光電センサ（カスタマイズ）の本解析結果

測定位置	センサ番号	測定値[Gy/h]	計算値[Gy/h]	比率
遮へい体外側	光100-カ-1	94.1	118.7	1.26
	光100-カ-2	111	118.3	1.07
	光100-カ-3	112	118.7	1.06
遮へい体内側	光100-カ-1	74.6	81.1	1.09
	光100-カ-2	77.7	81.2	1.04
	光100-カ-3	87.4	80.9	0.93

表 2-15 測域センサ（カスタマイズ）の本解析結果

測定位置	センサ番号	測定値[Gy/h]	計算値[Gy/h]	比率
遮へい体外側	測150-カ-1	258.7	296.2	1.15
	測150-カ-2	293.9	296.5	1.01
	測150-カ-3	306.3	296.0	0.97
遮へい体内側	測150-カ-1	49.0	58.6	1.20
	測150-カ-2	50.3	58.4	1.16
	測150-カ-3	54.8	58.2	1.06

(3) 課題

1) カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得

センサ類の耐放射線性を向上させるために、光電センサ及び測域センサをカスタマイズ（遮へい体を装着）して照射試験を実施し、MCNP コードを用いた解析結果との比較評価を実施した。その結果、カスタマイズした光電センサの解析結果について、一部の評価位置を除いて、測定値と約 10%以内で一致する結果となった。また、カスタマイズした測域センサの解析結果について、測定値と 20%以内で一致する結果となった。

今回の照射条件においては、MCNP コードを用いた解析による評価が可能と考えられるが、照射条件により結果が異なる可能性があった。そこで、今回とは異なる複数の試験条件で耐放射線性データを追加取得し、評価を実施する必要がある。

3. 令和4年度の実施内容

3.1 一般工業用品の照射データの追加取得（低照射線量率による影響評価）

令和3年度の照射試験では、5Gy/hの試験は試験場の制約により、光電センサ、近接センサ、トルクセンサは非通電での試験となった。一方で、一般産業用工業品のセンサ類を使用する環境としては、50Gy/hよりも低い環境であることが想定される。そこで、5Gy/h以下で通電状態における耐放射線性データを追加取得する。

3.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得

令和3年度は、センサ類の耐放射線性を向上させるために、光電センサ及び測域センサをカスタマイズ（遮へい体を装着）して照射試験を実施し、MCNPコードを用いた解析結果との比較評価を実施した結果、MCNPコードを用いた解析による評価が可能と考えられるが、照射条件により結果が異なる可能性があることが分かった。そこで、令和3年度と異なる試験条件で耐放射線性データを追加取得し、評価を実施する。

4. 一般産業用工業品の照射データの追加取得

4.1 概要

令和3年度に実施した照射試験の課題から追加データ取得のための試験条件（照射時間、照射線量率、照射距離、試験回数等）、試験場所、試験スケジュールを検討し、照射試験計画を作成した。

検討した試験条件に基づき、適切な照射試験場を選定するとともに、照射試験場にてセンサ類の照射試験を実施した。試験は設定した照射線量率で照射し、放射線によりセンサが正常に動作した時点までの時間から集積線量を求め、センサ類の耐放射線性データを取得した。

4.2 照射試験条件及び方法

4.2.1 照射試験条件

照射試験用センサ類について、照射試験条件を設定した。

各照射試験条件の詳細について以下に示す。また、照射試験条件を表4-1に示す。

表 4-1 照射試験条件

センサ	試験条件			最大照射時間 [h]	照射上限 ^{※1} [Gy]
	照射線量率 [Gy/h]	電圧 [V]	サンプル数		
光電センサ	5	12	10	170	830
近接センサ	5	12	10	320	1580
		24	3	320	1580

※1 照射上限に達しても正常に動作していた場合でも、試験の進捗上可能であれば照射は継続する。

(1) 対象センサ

令和3年度の試験結果より、全て通電状態で試験を行った測域センサでは、照射線量率による有意な差異は認められなかった。一方で、光電センサ、近接センサ及びトルクセンサについては非通電状態で実施した5Gy/hの試験結果と、通電状態で行った50Gy/h及び100Gy/hの試験結果で有意な差異が認められた。従って、通電の有無及び照射線量率による影響を確認するために、追加データ取得対象センサとして、光電センサ及び近接センサを選定した。

光電センサの概略図を図4-1に、近接センサの概略図を図4-2に示す。

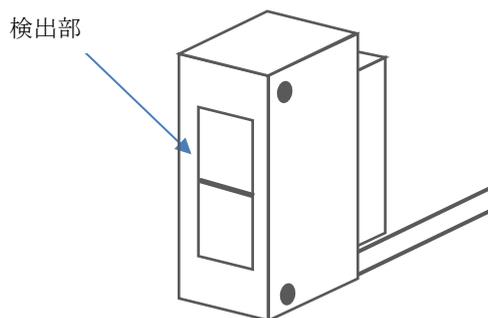


図 4-1 光電センサ概略図

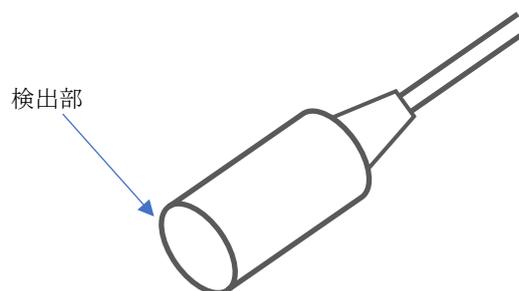


図 4-2 近接センサ概略図

(2) 照射線量率

令和3年度の試験結果から低照射線量率における通電状態での光電センサ及び近接センサの耐放射線性を確認する必要があると考えられた。そこで、5Gy/hの低照射線量率で通電状態の各センサを対象として照射を行い、耐放射線性を評価することとした。

各センサ類の試験期間は令和3年度の照射試験結果から正常に動作しなくなるまでの集積線量を予想し、その最大集積線量を照射上限とすることで、照射時間及び動作確認頻度等を設定した。なお、試験場の都合のため、照射試験は3回に分けて実施し、その合計照射線量が照射上限と設定した集積線量になるようにした。

各センサ類の照射上限について以下に述べる。

1) 光電センサ

令和 3 年度の試験結果から光電センサは最大で 822Gy 照射するまで正常に動作していた。この結果を踏まえて、本試験の照射条件として用いる照射線量率量の上限を 830Gy と設定した。

2) 近接センサ

令和 3 年度の試験結果から近接センサは最大で 1571Gy 照射するまで正常に動作していた。この結果を踏まえて、本試験の照射条件として用いる照射線量率量の上限を 1580Gy と設定した。

(3) サンプル数

令和 2 年度の試験結果からセンサ個体差によるばらつきがそれほど大きくないことを確認しており、令和 3 年度の試験では、ばらつきについて定量評価するため、サンプル数を 10 と設定した。そこで、令和 4 年度の照射試験においてもばらつきの定量評価のため、光電センサ及び近接センサの 12V の試験ではサンプル数を 10 とした。また、近接センサでは印加電圧の違いも評価するために 24V の試験を行い、サンプル数は 3 とした。

4.2.2 照射試験場所

立案した照射試験条件及び方法が実施可能な照射試験場所として、令和 3 年度と同様に量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所にあるガンマ線照射施設とした。

本施設では 3 つの照射棟に合計 8 つの照射室を所有し、約 0.2 Gy/h の低線量率から約 10 kGy/h の高線量率までの広い範囲で、線源から試験体までの距離を調整することで任意の線量率で照射できる。コバルト 60 線源は金属製の筒に密封されていて、水中に格納されており、照射する時には昇降装置によって、照射高さまで上昇させる。

以上より、本施設では、計画している照射線量率 5Gy/h の試験実施が可能である。

4.2.3 照射試験方法

(1) センサ配置

本施設では、線源からの距離に応じた線量率が記載されている線量分布図があらかじめ作成されている。そこで、線量分布図に基づき目標とする 5Gy/h となる距離を読み取り、センサの配置を決定した。

照射試験では、試験時間の短縮のため複数台のセンサを同時に照射することとした。線源を中心に円周上にセンサを設置するが、スタンドを用いて高さ方向にも複数台設置して試験を行う。なお、照射室の床面に直接センサを設置した場合、床面からの放射線の散乱によって照射線量率が上がることが考えられるため、センサは床面から離して設置することとした。

線源は棒線源であるため、平面上では線源から同じ距離に設置した場合であれば、基本的に同一の線量率で照射できるが、設置高さが異なる場合は線源中心が最も照射線量率が高くなり、線源中心から上下に離れるほど、照射線量率が低くなる傾向がある。従って、センサ類を設置した位置における照射線量率は、アラニン線量計による線量測定を行い、線量率を算出する。

測定した集積吸収線量をアラニン線量計が照射された時間で除すことにより照射線量率を求めることができる。アラニン線量計は各センサの設置高さに配置し、測定を行って照射線量率を算出した。

本試験は、コバルト第1棟第3照射室にて実施することとし、線源中心からセンサまでの距離を1200mmとして設定した。光電センサ及び近接センサの取付け図を図4-3に、照射試験時のセンサ配置図を図4-4に、照射試験状況(写真)を図4-5に示す。

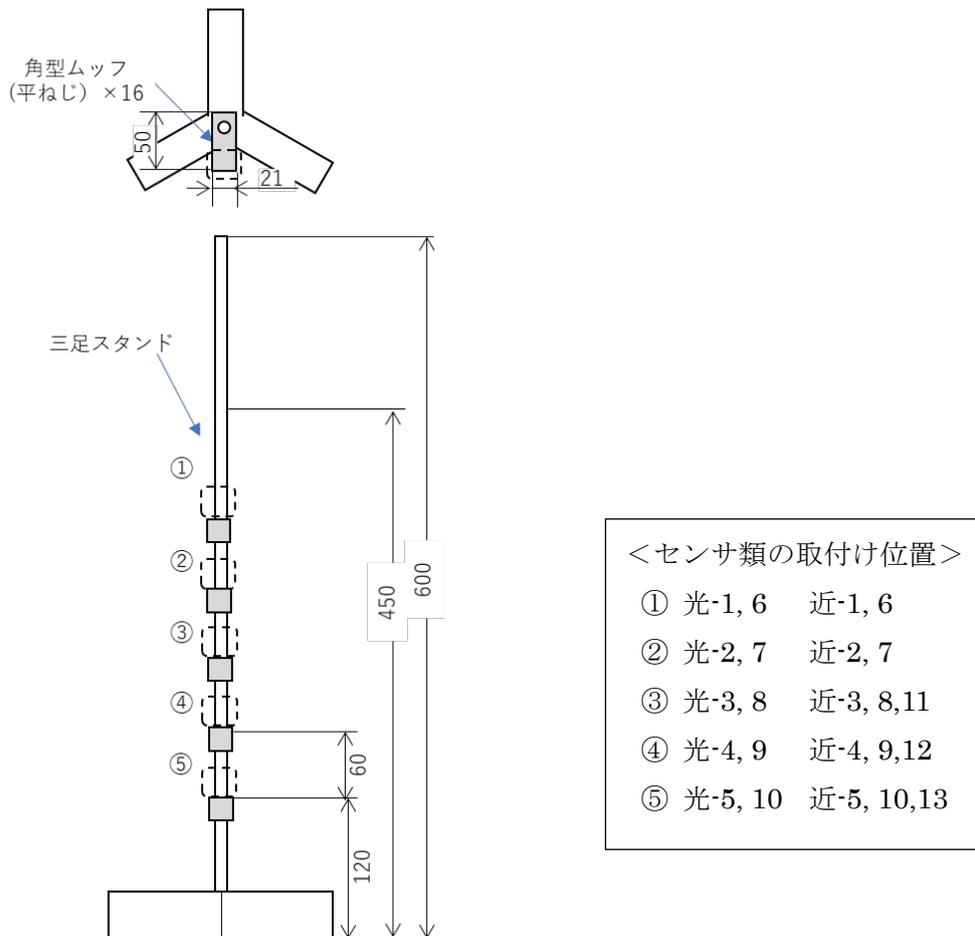


図 4-3 光電センサ・近接センサ取付け図

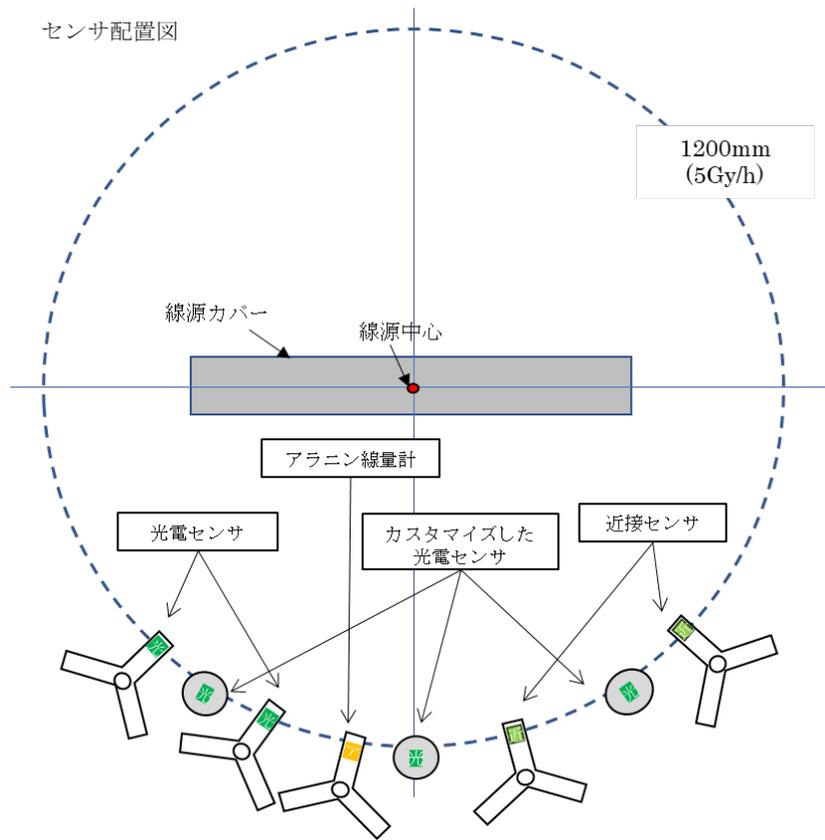


図 4-4 センサ配置図

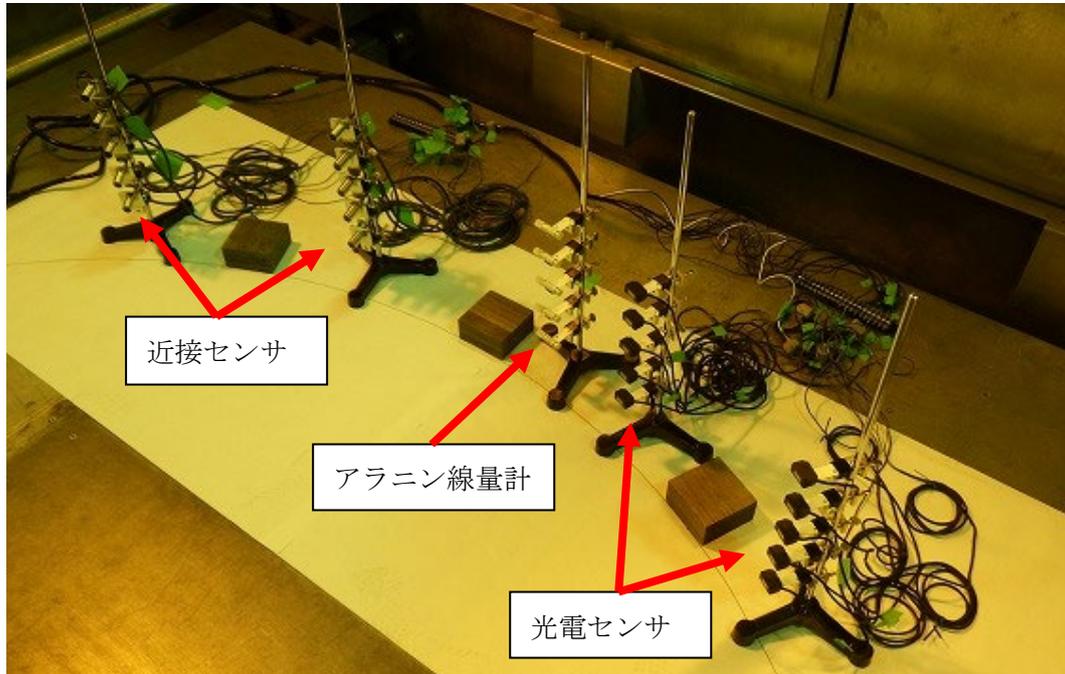


図 4-5 照射試験状況写真

(2) データ取得

照射試験では出力データとして電圧を記録する。また、検知状態の ON/OFF の切り替わりを確認するため動作確認を実施することとし、動作確認頻度を設定した。動作確認頻度は正常な動作がしなくなると予想される予想集積吸収線量から設定した。出力データはデータロガーで記録する。各センサにおける照射条件毎の出力データ及び照射中のデータ取りの有無並びに動作確認頻度を表 4-2 に示す。

また、各センサのデータ取得方法の詳細を以下に示す。

表 4-2 照射試験データ取り及び動作確認頻度

センサ	照射線量率 [Gy/h]	取得 データ	動作確認		照射 上限 ^{※1} [Gy]
			頻度 (目安) [Gy]	確認内容	
光電センサ	5	電圧 ^{※2}	240~(20Gy 毎)	・検知状態の ON/OFF ・検出距離測定	830
近接センサ	5	電圧 ^{※2}	800~(20Gy 毎)	・検知状態の ON/OFF	1580

※1 照射上限に達しても正常に動作していた場合でも、試験の進捗上可能であれば照射は継続する。

※2 照射中は光電センサ、近接センサは検知状態 ON の電圧を測定する。

1) 光電センサ

本試験で試験対象とした光電センサは 3 線式であり、12V の電圧を印加し障害物を検知（遮光）するとリレー側の回路に約 12V が出力される。従って、照射中は光電センサの投受光部をテープで遮光することで常に検知状態とし、データロガーで出力電圧を連続測定することとした。光電センサの電圧を記録するための電気回路図を図 4-6 に示す。

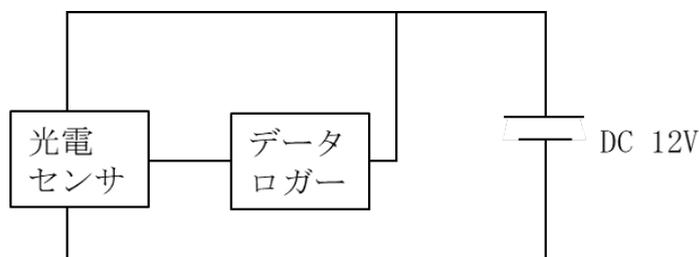


図 4-6 光電センサの試験用電気回路図

<出力データの記録方法>

照射中は光電センサの投受光部をテープで遮光することで常に検知状態とし、データロガーにより電圧を連続測定する。令和3年度までの試験結果から数百 Gy のオーダで正常に動作しなくなると考えられるため、出力電圧は 0.1Gy 以下毎に記録するように、10 秒毎に記録することとした。

<動作確認方法>

定期的に照射を中断して照射室内に入室し、白紙を用いて ON/OFF させ、検知時は約 12V、非検知時は約 0V の電圧が正常に出力することを確認する。

また、30cm×30cm の白紙を用い光電センサの検出距離をコンベックスで測定する。センサ仕様上は 30cm×30cm の白紙に対し 1m の検出距離を有するが、令和3年度までの照射試験では検出距離が 1m より短くなる事象が確認されているため、この傾向を確認する。

動作確認は表 4-2 に従い実施した。なお、令和3年度の試験では 240Gy を超えたあたりで電圧の低下が確認されたため、240Gy から 20Gy 照射毎に動作確認することとした。

<照射終了基準>

定期的に行う動作確認において、白紙を用いて検知状態を ON/OFF させた時、電圧が出力できなくなる状態になった時点で照射終了とする。なお、白紙の検出距離は、判定基準とせず参考記録とする。

また、上記基準を満たさずとも照射上限に達した時点で照射終了とする。なお、照射上限に達しても正常に動作していた場合は、試験の進捗上可能であれば照射は継続する。

2) 近接センサ

本試験で試験対象とした近接センサは 2 線式であり、12V の電圧を印加し金属を検知すると約 9V を出力し、24V の電圧を印加し金属を検知すると約 21V を出力する。従って、照射中は近接センサの検出部に金属片を貼ることで常に検知状態とし、データロガーで電圧を連続測定することとした。近接センサの電圧を記録するための電気回路図を図 4-7 に示す。

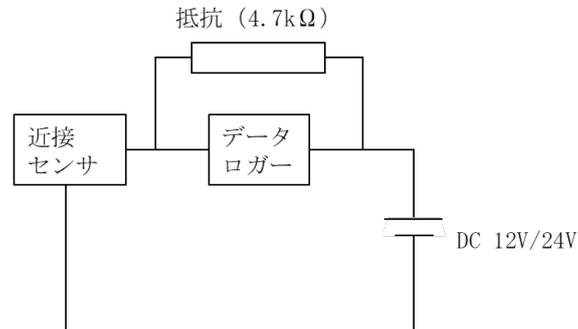


図 4-7 近接センサの試験用電気回路図

<出力データの記録方法>

照射中は近接センサの検出部に金属片を貼ることで常に検知状態とし、データロガーにより電圧を連続測定する。令和 3 年度までの試験結果から数百 Gy のオーダで正常に動作しなくなると考えられるため、出力電圧は 0.1Gy 以下毎に記録するように、10 秒毎に記録することとした。

<動作確認方法>

検出部に金属片を付け外しすることで検知状態を ON/OFF させ、12V の電圧印加時は検知時に約 9V、非検知時に約 2V の電圧を正常に出力することを確認し、24V の電圧印加時は検知時に約 12V、非検知時に約 2V の電圧を正常に出力することを確認する。

動作確認は表 4-2 に従い実施した。なお、令和 3 年度の試験では 800Gy を超えたあたりで電圧の低下が確認されたため、800Gy から 20Gy 照射毎に動作確認することとした。

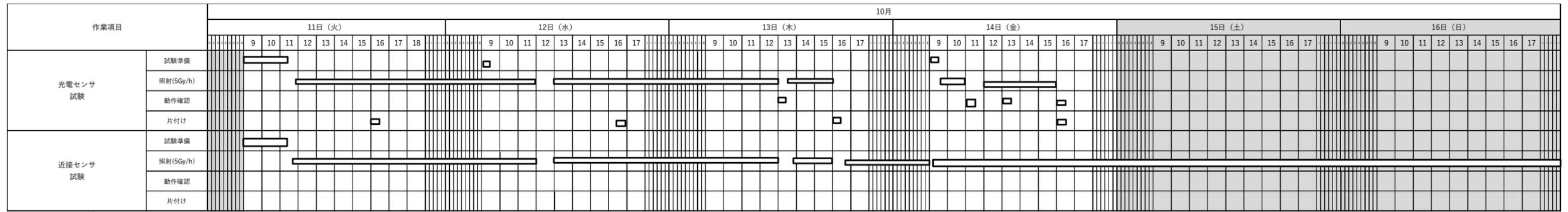
<照射終了基準>

定期的実施する動作確認時において、検知状態を ON/OFF させた時、電圧が出力できなくなる状態、または電圧が切り替わらなくなった時点で照射終了とする。

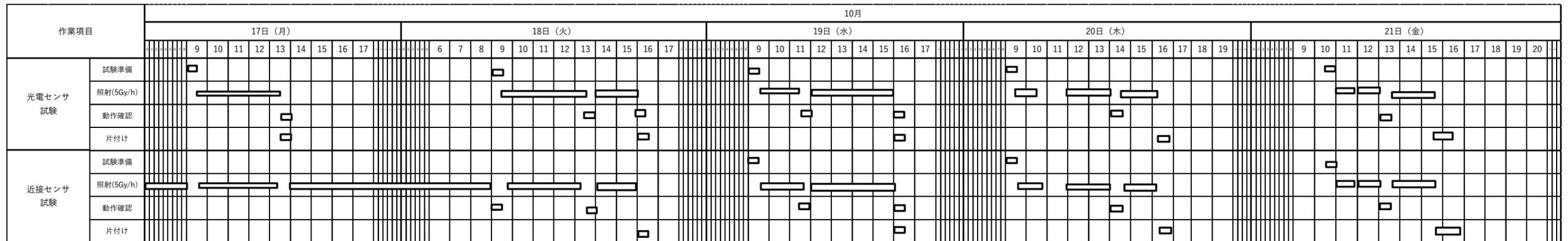
また、上記基準を満たさずとも照射上限に達した時点で照射終了とする。なお、照射上限に達しても正常に動作していた場合は、試験の進捗上可能であれば照射は継続する。

4.2.4 照射試験スケジュール

照射試験条件及び照射試験方法より、照射試験スケジュールを計画した。計画した照射試験スケジュール及び実績を図 4-8 から図 4-10 に示す。



(10/11-10/16)



(10/17-10/21)

図 4-8 10月照射試験スケジュール

作業項目		12月																																																																											
		5日(月)					6日(火)					7日(水)					8日(木)					9日(金)					10日(土)					11日(日)																																													
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16	17	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
光電センサ試験	試験準備																																																																												
	照射(5Gy/h)																																																																												
	動作確認																																																																												
近接センサ試験	試験準備																																																																												
	照射(5Gy/h)																																																																												
	動作確認																																																																												
光電センサ(カスタマイズ)試験	試験準備																																																																												
	照射(5Gy/h)																																																																												
	動作確認																																																																												
光電センサ(カスタマイズ)試験	試験準備																																																																												
	照射(5Gy/h)																																																																												
	動作確認																																																																												
光電センサ(カスタマイズ)試験	試験準備																																																																												
	照射(5Gy/h)																																																																												
	動作確認																																																																												

(12/5-12/11)

作業項目		12月																																																				
		12日(月)					13日(火)					14日(水)					15日(木)					16日(金)																																
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	9	10	11	12	13	14	15	16	17
光電センサ試験	試験準備																																																					
	照射(5Gy/h)																																																					
	動作確認																																																					
近接センサ試験	試験準備																																																					
	照射(5Gy/h)																																																					
	動作確認																																																					
光電センサ(カスタマイズ)試験	試験準備																																																					
	照射(5Gy/h)																																																					
	動作確認																																																					
光電センサ(カスタマイズ)試験	試験準備																																																					
	照射(5Gy/h)																																																					
	動作確認																																																					

(12/11-12/16)

図 4-9 12月照射試験スケジュール

作業項目		1月																																												
		10日(火)					11日(水)					12日(木)					13日(金)																													
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
光電センサ 試験	試験準備																																													
	照射(5Gy/h)																																													
	動作確認																																													
	片付け																																													
近接センサ 試験	試験準備																																													
	照射(5Gy/h)																																													
	動作確認																																													
	片付け																																													

(1/10-1/13)

作業項目		1月																																																							
		16日(月)				17日(火)				18日(水)				19日(木)				20日(金)				21日(土)				22日(日)																															
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
光電センサ 試験	試験準備																																																								
	照射(5Gy/h)																																																								
	動作確認																																																								
	片付け																																																								
近接センサ 試験	試験準備																																																								
	照射(5Gy/h)																																																								
	動作確認																																																								
	片付け																																																								

(1/16-1/20)

作業項目		1月																
		23日(月)								24日(火)								
		9	10	11	12	13	14	15	16	17	9	10	11	12	13	14	15	16
光電センサ 試験	試験準備																	
	照射(5Gy/h)																	
	動作確認																	
	片付け																	
近接センサ 試験	試験準備																	
	照射(5Gy/h)																	
	動作確認																	
	片付け																	

(1/23,24)

図 4-10 1月照射試験スケジュール

5. カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得

5.1 概要

センサ類の耐放射線性を向上させるために、センサ類のカスタマイズ（遮へい体を装着）を実施する。使用する遮へい体は令和3年度に実施した遮へい解析コードを用いた遮へい評価によって決定した遮へい体構造とする。

令和3年度は光電センサ及び測域センサに対して、それぞれ100Gy/h、150Gy/hの照射線量率でカスタマイズ試験を行った。実際のセンサ類の使用環境はより低照射線量率であることが予想されるため、本年度は5Gy/hの照射線量率で、光電センサに対する照射試験を行うことでカスタマイズ試験の追加データを取得するとともに、照射試験環境をモデル化した遮へい評価を実施し、耐放射線性の向上に係る評価を実施する。

5.2 カスタマイズしたセンサ類の照射試験

5.2.1 照射試験条件及び試験方法

センサの照射試験は、3.2項に記載した試験場所である量子科学技術研究開発機構の高崎量子応用研究所にあるガンマ線照射施設にて、図4-9に記載した照射試験スケジュールで実施した。また、その他の照射試験条件及び試験方法を以下に記載する。

(1) 照射試験条件

遮へい体の有無による耐放射線性の比較評価を実施するため、照射試験条件は、4.2項の照射試験条件を参考に設定した。対象センサは光電センサ、照射線量率は5Gy/hとした。試験条件を表5-1に示す。また、センサのサンプル数は3とした。

(2) 照射試験方法

1) センサ配置

センサは、4.2.3項に記載した配置図に従って配置した。また、後述の解析による遮へい評価を行うために、遮へい体の内側と外側について、ガラス線量計を用いて線量測定を実施した。

線源中心からセンサ投光部表面までの距離を1200mmとし、□100mm×H50mmの木材の上に配置した。なお、カスタマイズ試験は4項の追加データ取得試験と同時に実施した。また、試験状況（写真）を図5-1に示す。

2) データ取得

カスタマイズ試験においても、4.2.3項と同様に、電気回路を組み、検知時の出力電圧データを取得した。ただし、令和3年度のカスタマイズ試験結果より、照射上限はカスタマイズ無しの場合の集積吸収線量の1.2倍とした。カスタマイズ照射試験のデータ取得及び照射上限を表5-1に示す。なお、照射上限は計画値であり、照射上限に達しても正常な出力であった場合は、試験の工程上可能であれば照射を継続する。また、データ取得方法等は、4.2.3項と同様である。

出力データの記録方法については、光電センサの投光部及び受光部の正面に位置する遮へい体の開口部を、テープで遮光し、検知状態の電圧をデータロガーにて測定した。電圧は0.1Gy以下毎になるよう10秒毎に記録した。

令和3年度の試験結果より、光電センサは、出力電圧は問題ないが、検知ON/OFFが切り替わらずに故障するのではなく、照射中に出力電圧が徐々に低下し故障に至る傾向がみられる。そのため、試験工程短縮の観点から動作確認は行わず、照射終了基準は電圧の出力データ異常または照射上限到達時とした。なお、先行して実施する通常の光電センサ照射試験にて、検知ON/OFFが切り替わらずに故障する事象がみられる場合は動作確認を実施することとする。

また、照射上限に達しても正常な出力が行われていた場合は、試験の進捗上可能であれば照射は継続する。

表 5-1 カスタマイズ照射試験条件及び照射上限

対象センサ	試験条件		照射中の 取得データ	照射上限 ^{※1} [Gy]
	照射線量率 (目標値) [Gy/h]	サンプル数		
光電センサ	5	3	電圧 ^{※2}	960

※1 照射上限に達しても正常な出力であった場合、試験の進捗上可能であれば照射は継続する。

※2 検知状態の電圧を測定する。

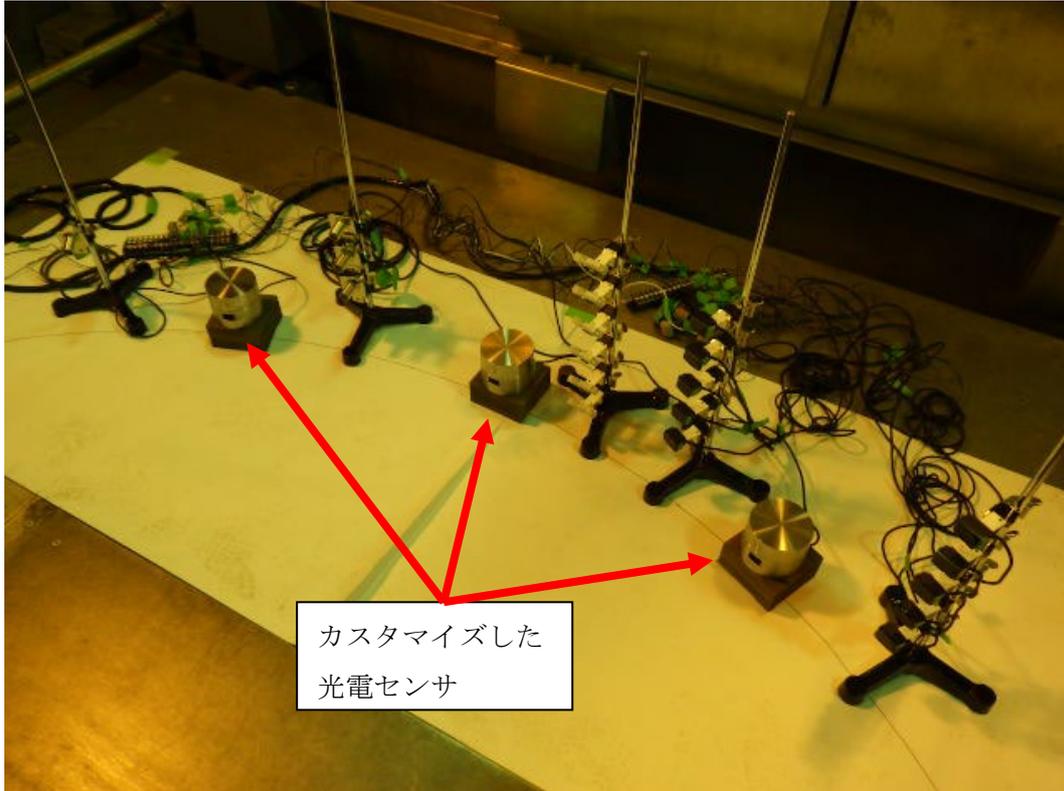


図 5-1 カスタマイズした光電センサの試験状況写真

5.3 遮へい解析コードを用いた遮へい評価

5.3.1 解析コード

解析コードは、直接線だけでなく遮へい体による散乱の影響を考慮するため、MCNP を用いる。

5.3.2 計算で使用する密度及び組成

遮へい解析に用いた物質の密度及び組成を表 5-2 に示す。

表 5-2 遮へい解析に用いた物質の密度及び組成

物質	鉄(SS400 相当, 遮へい体)	
密度(g/cm ³)	7.86	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
Fe	100	7.86

出典：「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

物質	コバルト	
密度(g/cm ³)	8.9	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
Co	1.0000E+02	8.9000E+00
合計	1.0000E+02	8.9000E+00

出典：「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

物質	空気	
密度(g/cm ³)	1.2049E-03	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	1.0000E-03	1.2049E-08
C	1.2554E-02	1.5126E-07
N	7.5470E+01	9.0934E-04
O	2.3233E+01	2.7993E-04

出典：「遮蔽材料の群定数 (JAERI-M 6928)」

物質	木製ブロック	
密度(g/cm ³)	0.48	
元素	個数比	密度 (g/cm ³)
C	6	—
H	10	—
O	5	—

出典：Scale library: ORNL/TM-2005/39, Version 6.1 (June 2011).

※ 密度は使用した木材 (ホオノキ) の数値を用いた。

表 5-2 遮へい解析で用いた物質の密度及び組成（その 2）

物質	普通コンクリート	
密度(g/cm ³)	2.30	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	4.1600E-01	9.5680E-03
O	5.0740E+01	1.1670E+00
Mg	1.1500E-01	2.6450E-03
Al	4.4600E-01	1.0258E-02
Si	3.8606E+01	8.8794E-01
S	7.0000E-02	1.6100E-03
Ca	6.8690E+00	1.5799E-01
Fe	2.7380E+00	6.2974E-02
合計	1.0000E+02	2.3000E+00

出典：「遮蔽材料の群定数（JAERI-M 6928）」

※ 密度は、一般財団法人放射線利用振興協会データベースを参照している。

物質	重量コンクリート	
密度(g/cm ³)	3.70	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	4.5000E-01	1.6650E-02
O	3.1392E+01	1.1615E+00
Mg	4.7000E-02	1.7390E-03
Al	1.9900E-01	7.3630E-03
Si	2.9820E+00	1.1033E-01
S	1.9360E+00	7.1632E-02
Ca	4.0810E+00	1.5100E-01
Fe	5.8913E+01	2.1798E+00
合計	1.0000E+02	3.7000E+00

出典：「遮蔽材料の群定数（JAERI-M 6928）」

※ 密度は、一般財団法人放射線利用振興協会データベースを参照している。

表 5-2 遮へい解析で用いた物質の密度及び組成 (その 3)

物質	SUS304	
密度(g/cm ³)	7.93	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
C	4.0000E-02	3.1720E-03
Si	5.0000E-01	3.9650E-02
Mn	1.0000E+00	7.9300E-02
P	2.2500E-02	1.7843E-03
S	1.5000E-02	1.1895E-03
Ni	9.2500E+00	7.3353E-01
Cr	1.9000E+01	1.5067E+00
Fe	7.0173E+01	5.5647E+00
合計	1.0000E+02	7.9300E+00

出典：「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (JIS G 4304)」

物質	SUS316L	
密度(g/cm ³)	7.98	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
C	1.5000E-02	1.1970E-03
Si	5.0000E-01	3.9900E-02
Mn	1.0000E+00	7.9800E-02
P	2.2500E-02	1.7955E-03
S	1.5000E-02	1.1970E-03
Ni	1.3500E+01	1.0773E+00
Cr	1.7000E+01	1.3566E+00
Mo	2.5000E+00	1.9950E-01
Fe	6.5448E+01	5.2227E+00
合計	1.0000E+02	7.9800E+00

出典：「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯 (JIS G 4304)」

5.3.3 線量換算係数

遮へい解析に用いた換算係数を表 5-3 に示す。

表 5-3 遮へい解析に用いた換算係数

Gr.	ガンマ線エネルギー (MeV)	空気カーマに対する換算係数 ($\mu\text{Gy/hr}$)/(ph/sec/cm ²)
1	0.010	2.67E-02
2	0.015	1.12E-02
3	0.020	6.05E-03
4	0.030	2.60E-03
5	0.040	1.54E-03
6	0.050	1.16E-03
7	0.060	1.04E-03
8	0.070	1.07E-03
9	0.080	1.11E-03
10	0.100	1.34E-03
11	0.150	2.16E-03
12	0.200	3.08E-03
13	0.300	4.97E-03
14	0.400	6.80E-03
15	0.500	8.57E-03
16	0.600	1.02E-02
17	0.800	1.33E-02
18	1.000	1.61E-02
19	2.000	2.72E-02
20	4.000	4.36E-02
21	6.000	5.80E-02
22	8.000	7.24E-02
23	10.000	8.64E-02

出典：「一般社団法人 日本原子力学会；日本原子力学会標準 放射線遮へい計算のための線量換算係数：2010（AESJ SC R002 2010）；2010年10月）」

5.3.4 線源条件

本解析の線源条件は、使用する照射施設の照射線量率測定結果を基に規格化を行い、線源強度を設定した。なお、規格化の際に用いる測定値は、4項で測定したアミノグレイの吸収線量を基に算出した照射線量率である。線源は棒状であり、高さ方向で照射線量率に分布を持つため、1200mmにおける複数の高さに測定点を設けた。

線源はCo-60とし、表5-4の線源スペクトルを用いた。核物質防護の観点から照射施設で使用されている線源情報を入手できないため、図5-2に示すペンシル型Co-60密封線源のサンプルを参考に線源モデルを設定した。

照射線量率の測定値及び規格化による計算値との比較結果を表5-5に示す。なお、測定値及び計算値は、線源中心からの距離1200mm(5Gy/h)とした。なお、この5Gy/hはカスタマイズした光電センサの照射線量率の目標値である。

線源規格化の結果、本解析での放射エネルギーは 2.04×10^{13} Bqとなった。このとき、規格化線源強度を用いた線量率分布の計算値は、アミノグレイの測定結果から算出した測定値と比較して、約5%以下と、良く一致した結果となり、Co-60の線源強度と高さ方向の線源分布を再現できていると考える。

表 5-4 Co-60 線源スペクトル

	線源エネルギー (MeV)	放出割合
1	1.1732E+00	9.9900E-01
2	1.3325E+00	9.9980E-01

表 5-5 規格化線源強度を用いた計算による線量率と測定値の比較

No.	高さ [mm]	計算値 (C) [Gy/h]	測定値 (E) [Gy/h]	測定値との比率 (C/E)
1	360	4.342	4.38	0.99
2	300	4.403	4.42	1.00
3	240	4.452	4.43	1.00
4	180	4.480	4.49	1.00
5	120	4.494	4.45	1.01

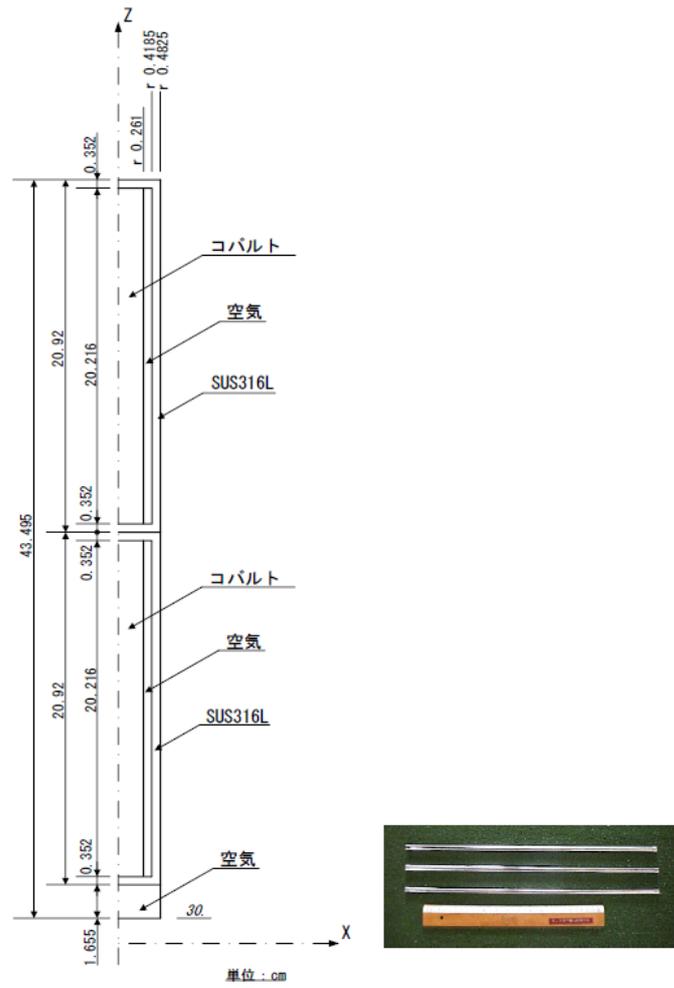


図 5-2 線源規格化の解析モデル

5.3.5 評価位置

評価位置は、照射試験時のカスタマイズした光電センサのガラス線量計設置位置とした。解析モデルにおける評価位置を図 5-3 に示す。

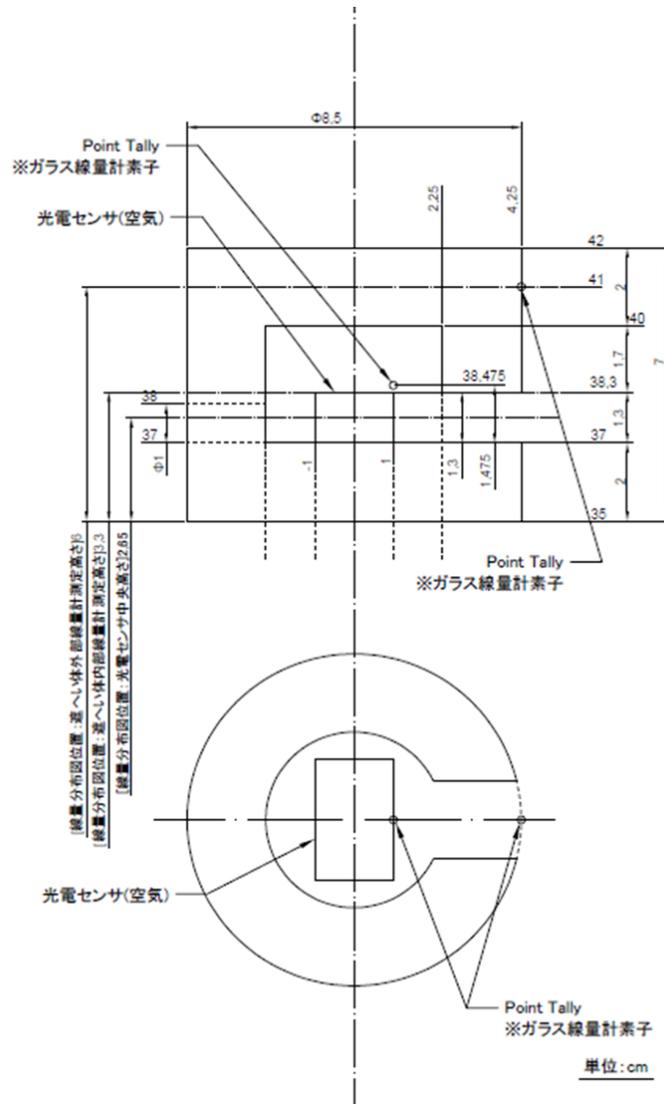


図 5-3 解析モデルにおける評価位置 (ガラス線量計素子設置位置)

5.3.6 解析モデル

照射試験の各センサ配置及び試験環境を考慮し、解析モデルを作成した。解析時には壁や床からの散乱を考慮するため、照射室もモデル化した。公開資料（一般財団法人放射線利用振興協会データベース）を基に、必要に応じて寸法を仮定し、図 5-4 に示す照射室モデルを作成した。なお、遮へい体内部の光電センサ、ガラス線量計素子、及び同時に照射を実施した 4 項のセンサ等はモデル化せず空気として扱い、照射室及び遮へい体のみをモデル化している。

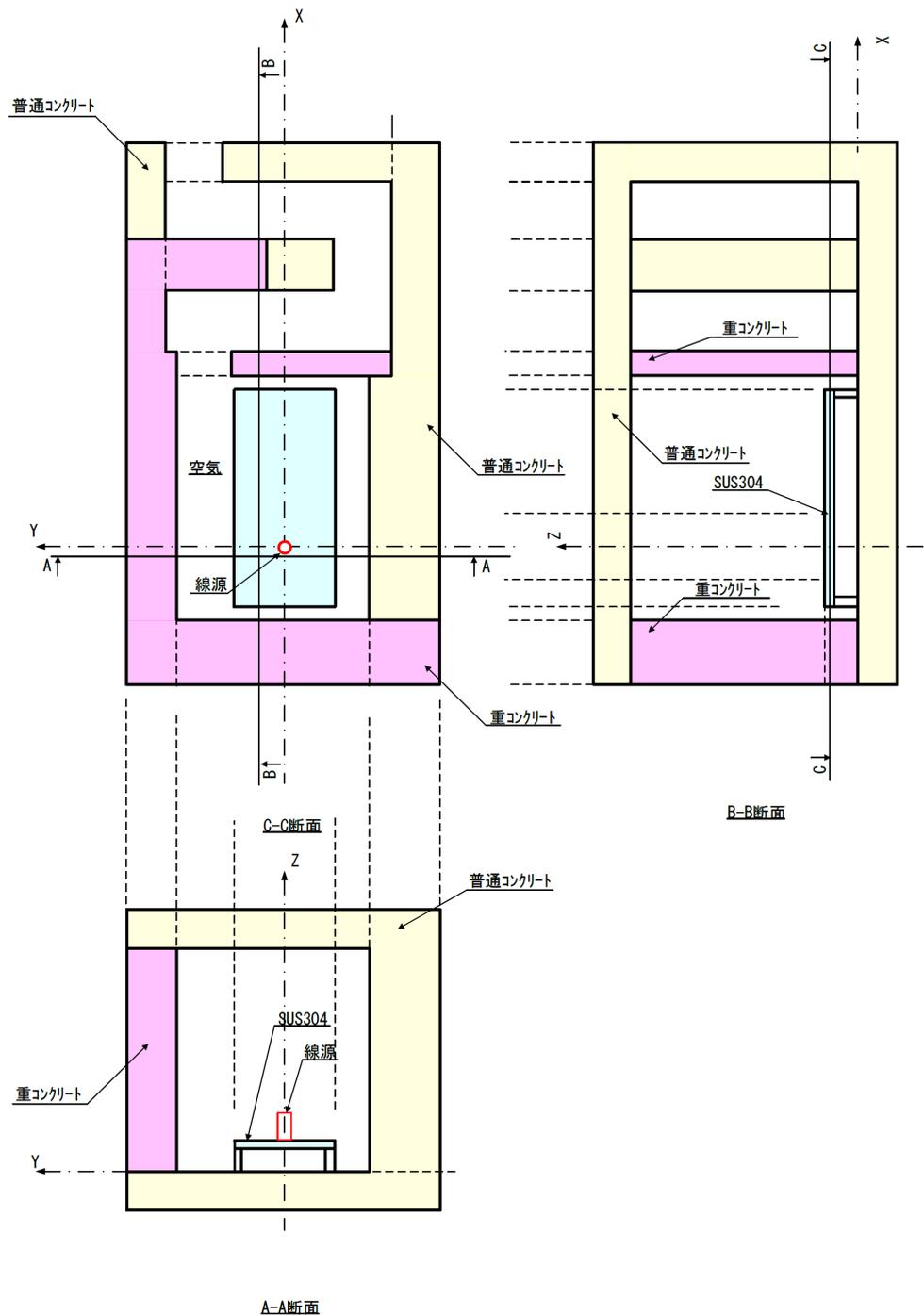


図 5-4 遮へい室の解析モデル

5.3.7 遮へい体構造

遮へい体構造は、令和3年度の予備解析によって決定し、照射試験に用いた構造と同様の構造とした。なお、遮へい体は光電センサを設置する本体とその蓋部からなる。

遮へい体本体の構造を図5-5に、遮へい体蓋部の構造を図5-6に示す。また、遮へい体の解析モデル図を図5-7に、全体の解析モデル図を図5-8に示す。

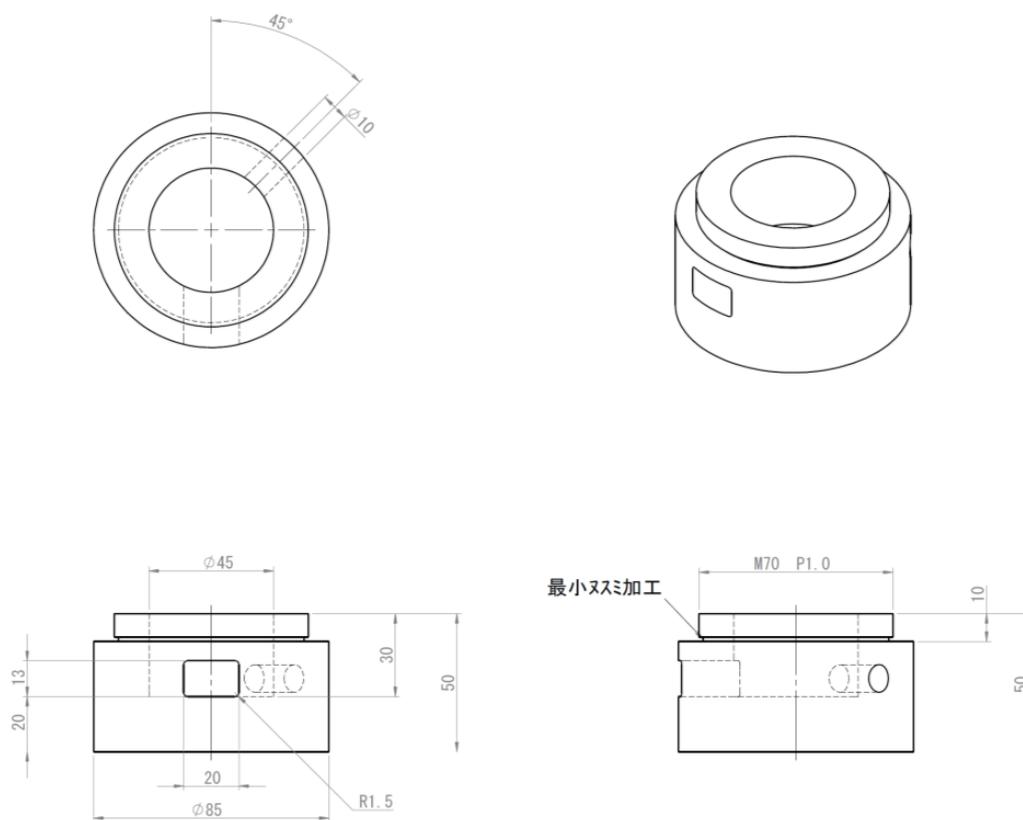


図 5-5 遮へい体構造図（本体部）

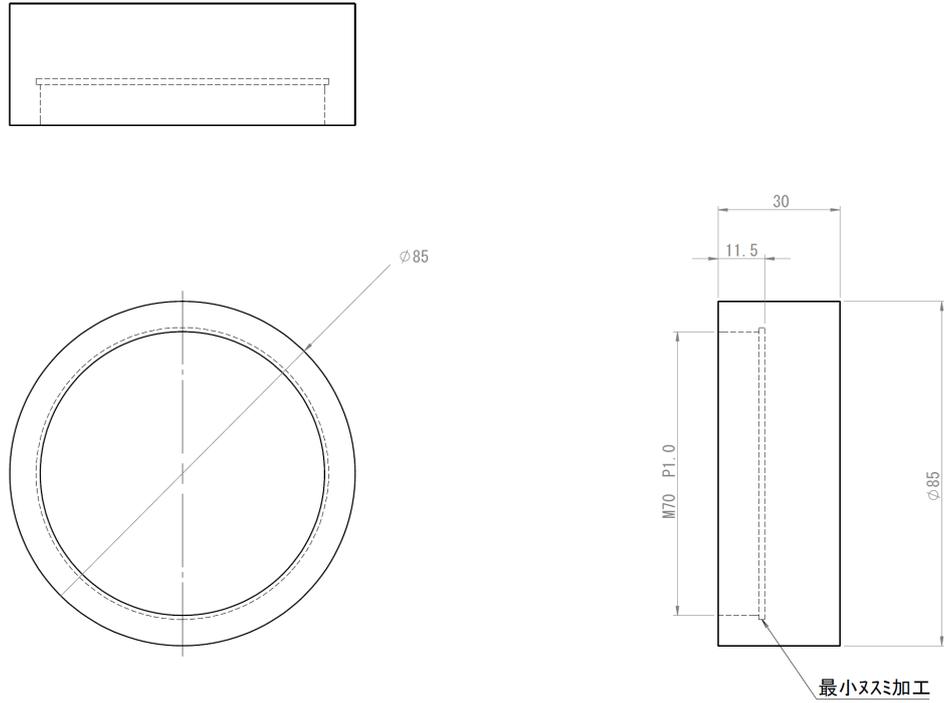


図 5-6 遮へい体構造図 (蓋部)

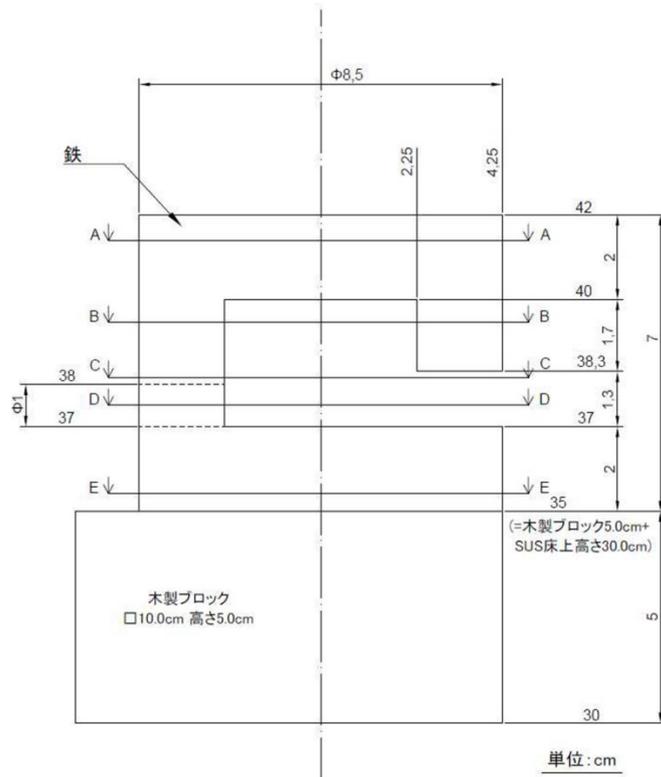


図 5-7 遮へい体解析モデル図

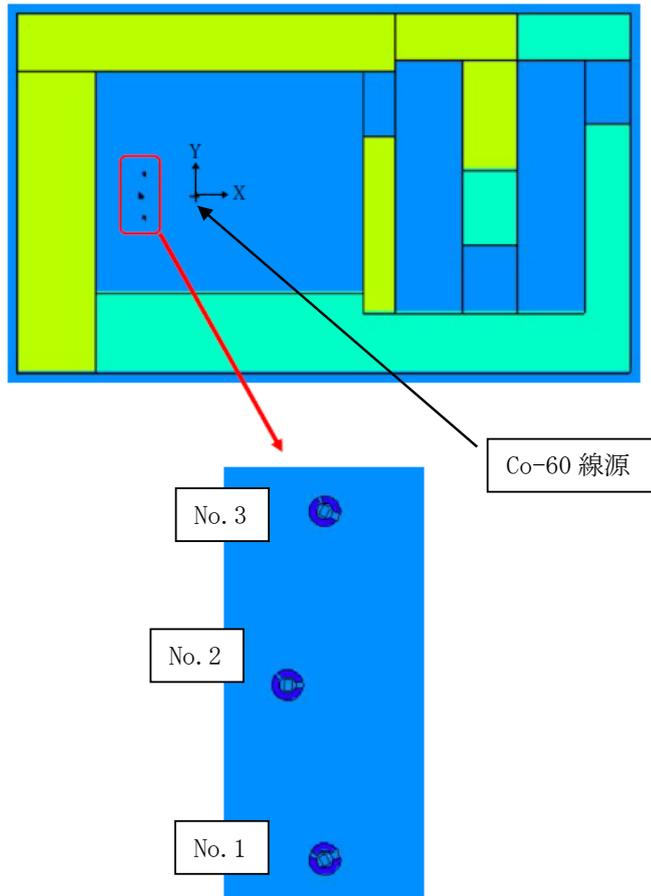


図 5-8 遮へい解析モデル図 (全体)

6. 照射試験結果及び遮へい解析結果

6.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得

6.1.1 光電センサ

4.2.3 項で設定した条件に従い、光電センサの照射試験を実施した。各照射試験条件で光電センサの検知時の出力電圧が 0V 付近まで低下し、故障した時点での集積吸収線量を表 6-1 に示す。

各近接センサの出力電圧の変化を図 6-1 から図 6-19 に示す。なお、照射開始から最初の動作確認を行った 56.1 時間まではデータロガーの出力不良により、データが欠損している。また、照射開始後 103.7 時間にはデータロガーと測定ユニットの無線通信の接続不良により 40 秒分のデータが 32.765V と出力されているが、瞬間的なノイズとして取り除いている。

さらに、各センサの照射試験結果の詳細を以下に述べる。

光電センサ 10 台に対して、照射線量率 5Gy/h で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 618Gy）の動作確認時に検知時の電圧が 0V 付近まで低下し、検知もされないことを確認した。

No.2 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 149.2 時間後（集積吸収線量 659Gy）に行った動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し、故障したことを確認した。なお、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 624Gy）から検知状態は問題ないが、出力電圧が 0.01V 以上上昇する事象が確認されている。

No.3 では、照射開始約 157.2 時間後（集積吸収線量 696Gy）の動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し、検知もされないことを確認した。また、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始約 156.4 時間後（集積吸収線量 692Gy）に電圧が低下していた。なお、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 625Gy）から検知状態は問題ないが、出力電圧が 0.01V 以上上昇する事象が確認されている。

No.4 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 634Gy）に行った動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し故障したことを確認した。

No.5 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 629Gy）に行った動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し故障したことを確認した。

No.6 でも No.3 と同様の事象が確認され、照射開始約 256.6 時間後（集積吸収線量 1123Gy）の動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し、検知もされないことを確認した。また、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始約 256.4 時間後（集積吸収線量 1122Gy）に電圧が低下していた。なお、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 618Gy）から検知状態は問題ないが、出力電圧が 0.01V 以上上昇する事象が確認されている。

No.7 は、12 月度の照射試験終了時にあたる照射開始約 133.2 時間後（集積吸収線量 589Gy）の動作確認で正常な電圧を出力することを確認した。しかし、その後未照射の状態のまま保管し、1 月度の照射試験を開始前に動作確認を行うと、検知時に正常な電圧が出力されないことを確認した。従って、照射開始約 133.2 時間後（集積吸収線量 589Gy）で測定不能になったと判断した。

No.8 でも No.3 と同様の事象が確認され、照射開始約 173.6 時間後（集積吸収線量 769Gy）の動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し、検知もされないことを確認した。また、データロ

ガーの出力電圧を確認すると、照射開始約 173.2 時間後（集積吸収線量 767Gy）に電圧が低下していた。なお、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 625Gy）から検知状態は問題ないが、出力電圧が 0.01V 以上上昇する事象が確認されている。

No.9 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 149.2 時間後（集積吸収線量 670Gy）に行った動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し故障したことを確認した。なお、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 634Gy）から検知状態は問題ないが、出力電圧が 0.01V 以上上昇する事象が確認されている。

No.10 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 141.2 時間後（集積吸収線量 629Gy）に行った動作確認時に出力電圧が 0V 付近まで低下し故障したことを確認した。

表 6-1 光電センサの照射試験結果（電圧が 0V 付近まで低下し故障した時点）

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
1	4.38	141.2	618	701 (SD ^{※1} :148)
2	4.42	149.2	659	
3	4.43	156.4	692	
4	4.49	141.2	634	
5	4.45	141.2	629	
6	4.38	256.4	1122	
7	4.42	133.2	589	
8	4.43	173.2	767	
9	4.49	149.2	670	
10	4.45	141.2	629	

※1 SD : 標準偏差

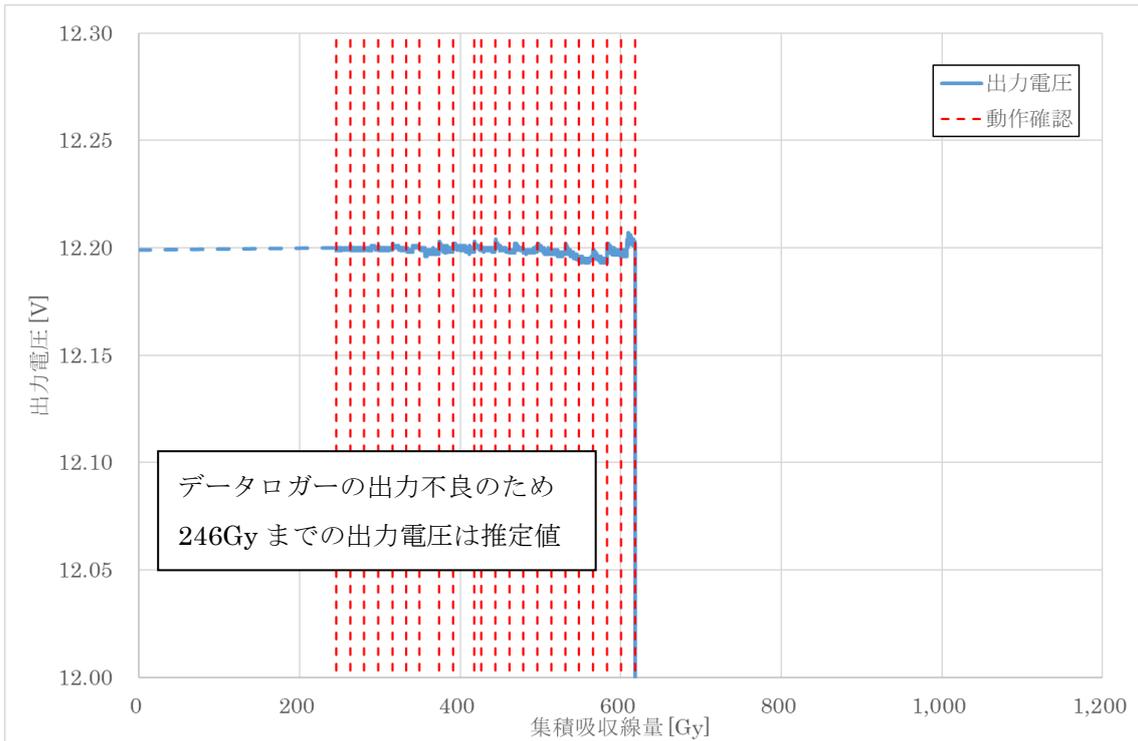


図 6-1 光電センサ No.1 の電圧変化

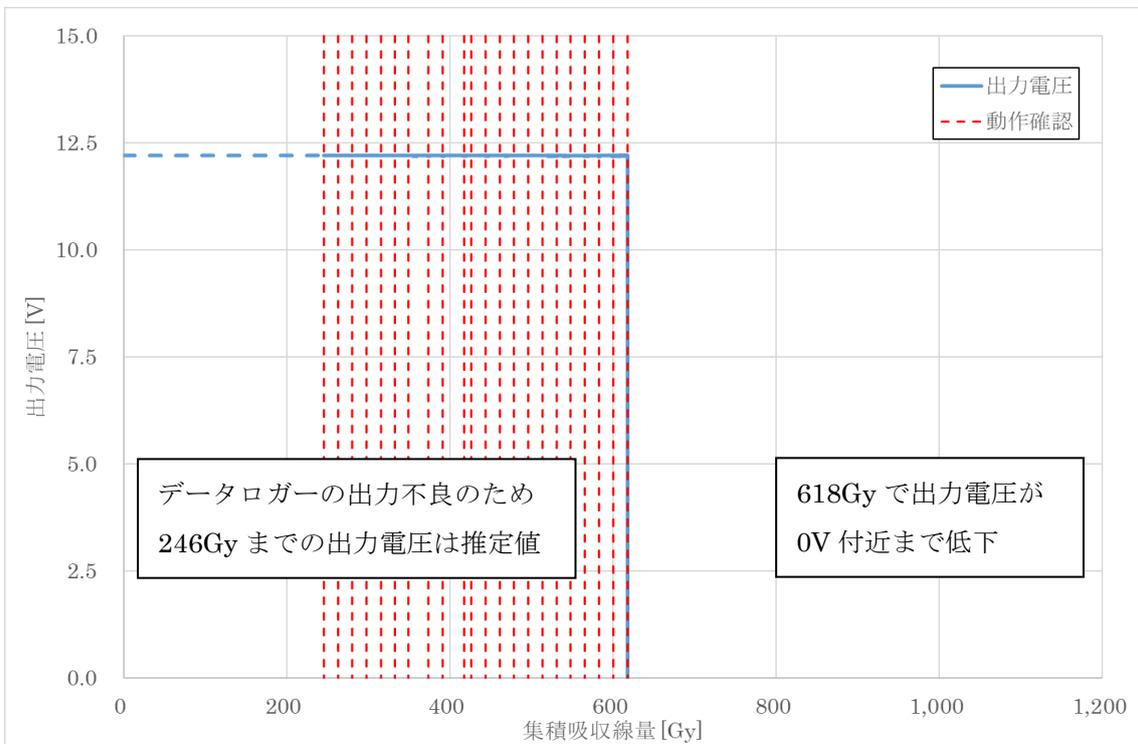


図 6-2 光電センサ No.1 の電圧変化 (縮小図)

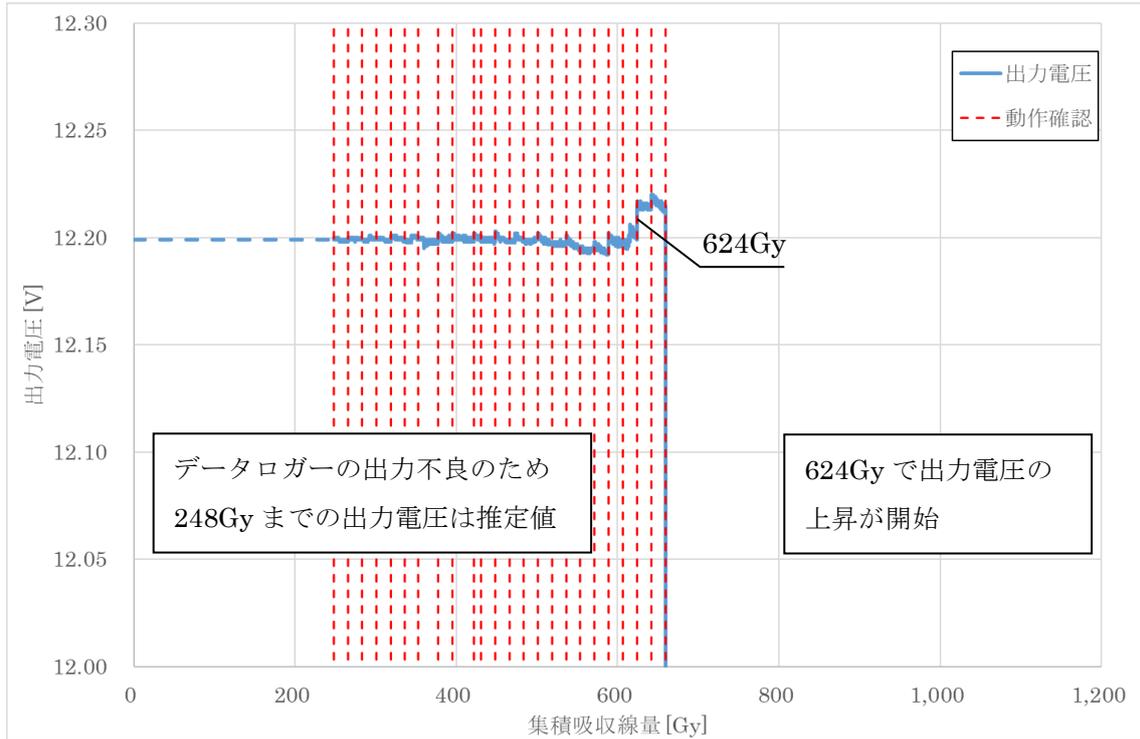


図 6-3 光電センサ No.2 の電圧変化

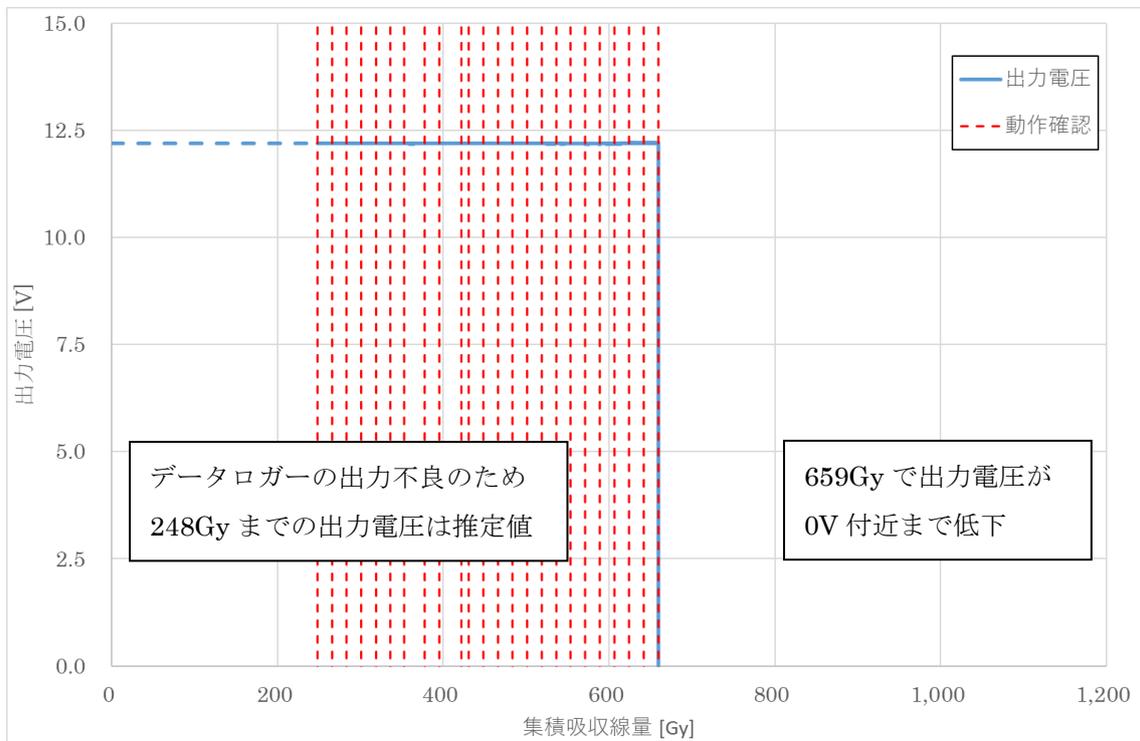


図 6-4 光電センサ No.2 の電圧変化 (縮小図)

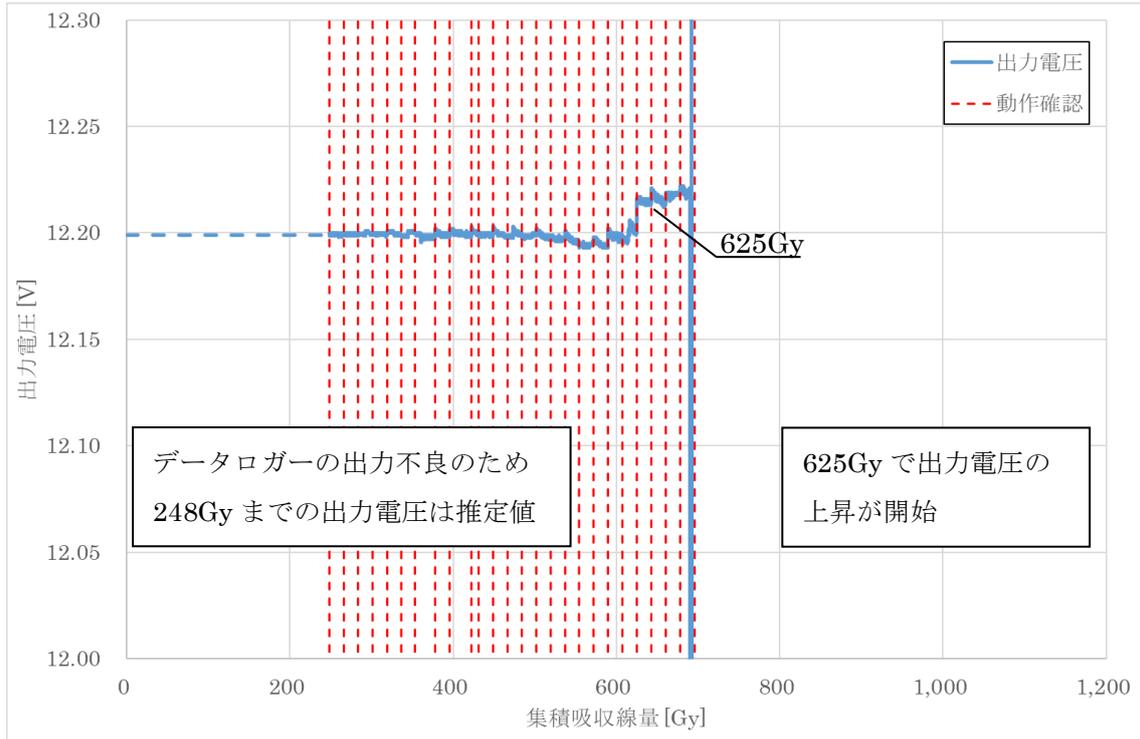


図 6-5 光電センサ No.3 の電圧変化

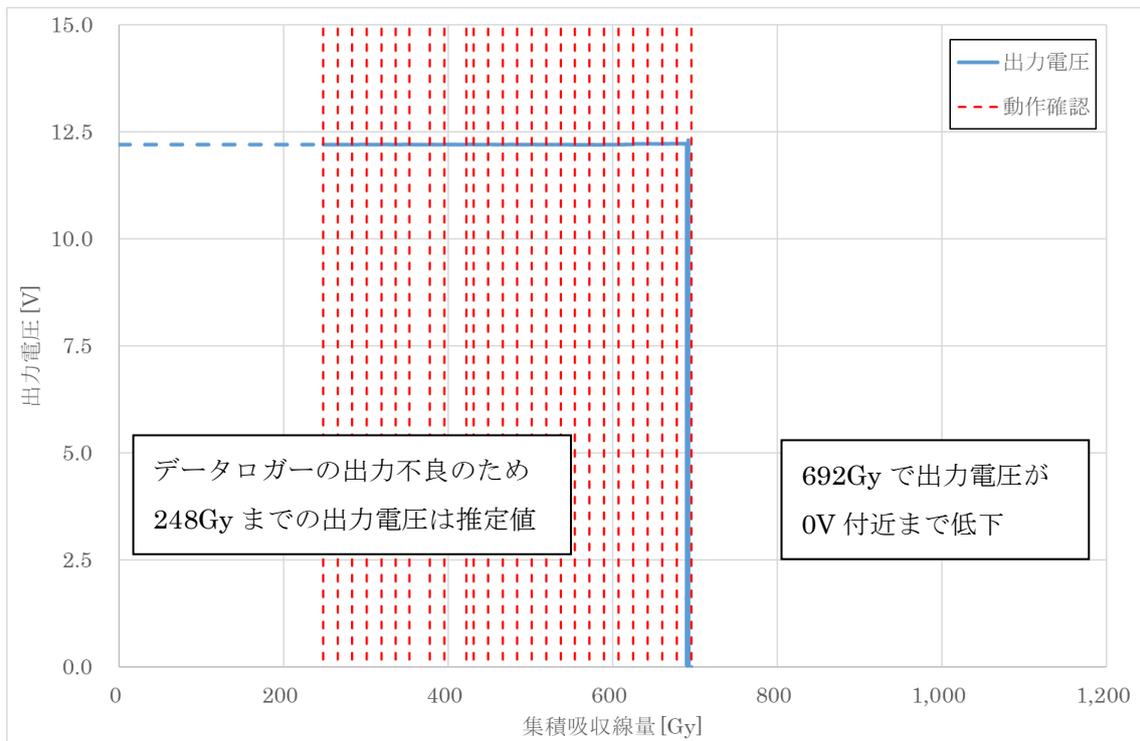


図 6-6 光電センサ No.3 の電圧変化 (縮小図)

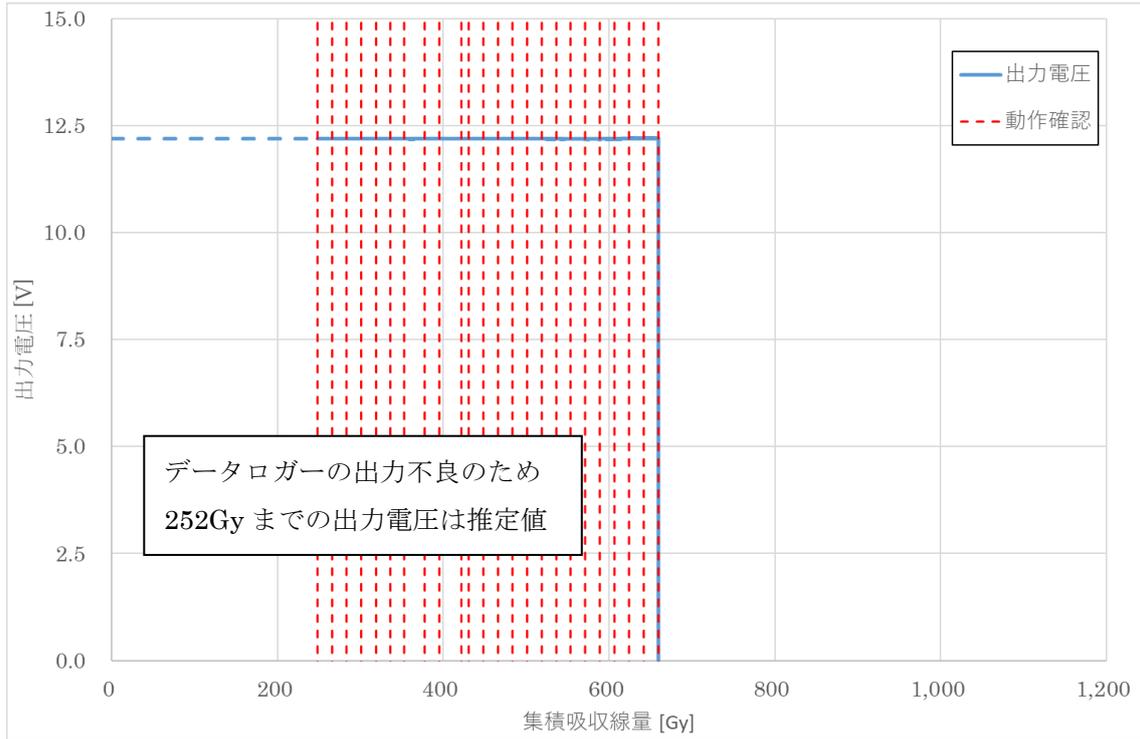


図 6-7 光電センサ No.4 の電圧変化

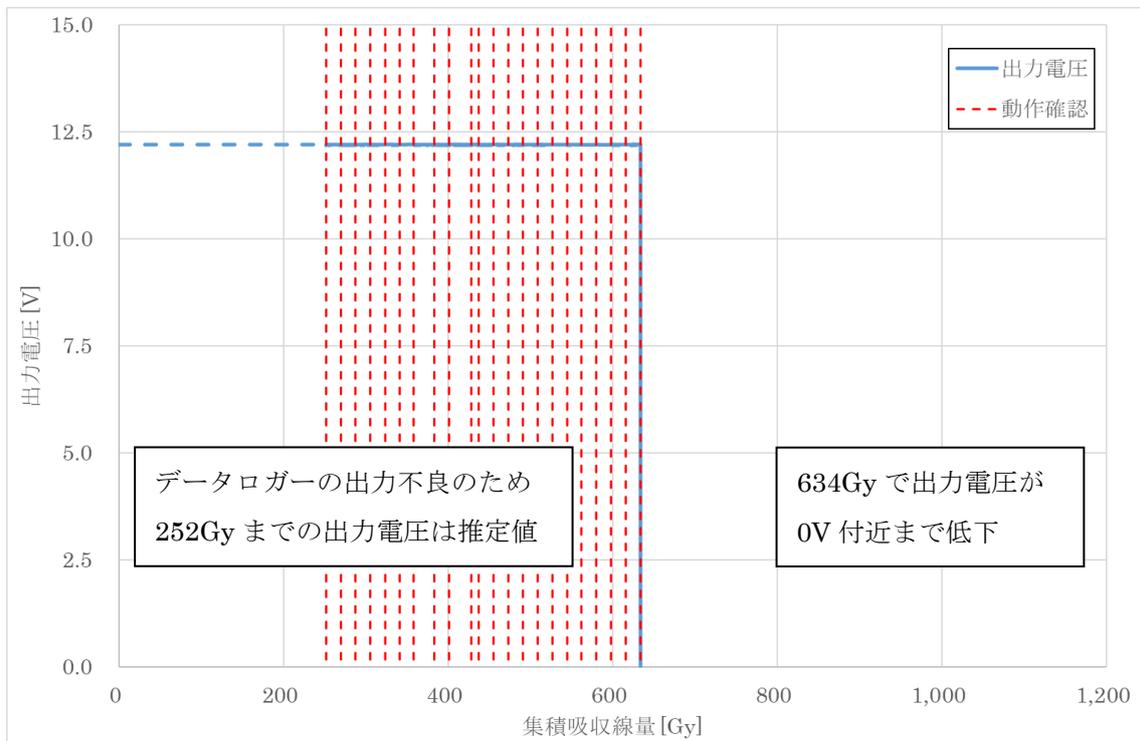


図 6-8 光電センサ No.4 の電圧変化 (縮小図)

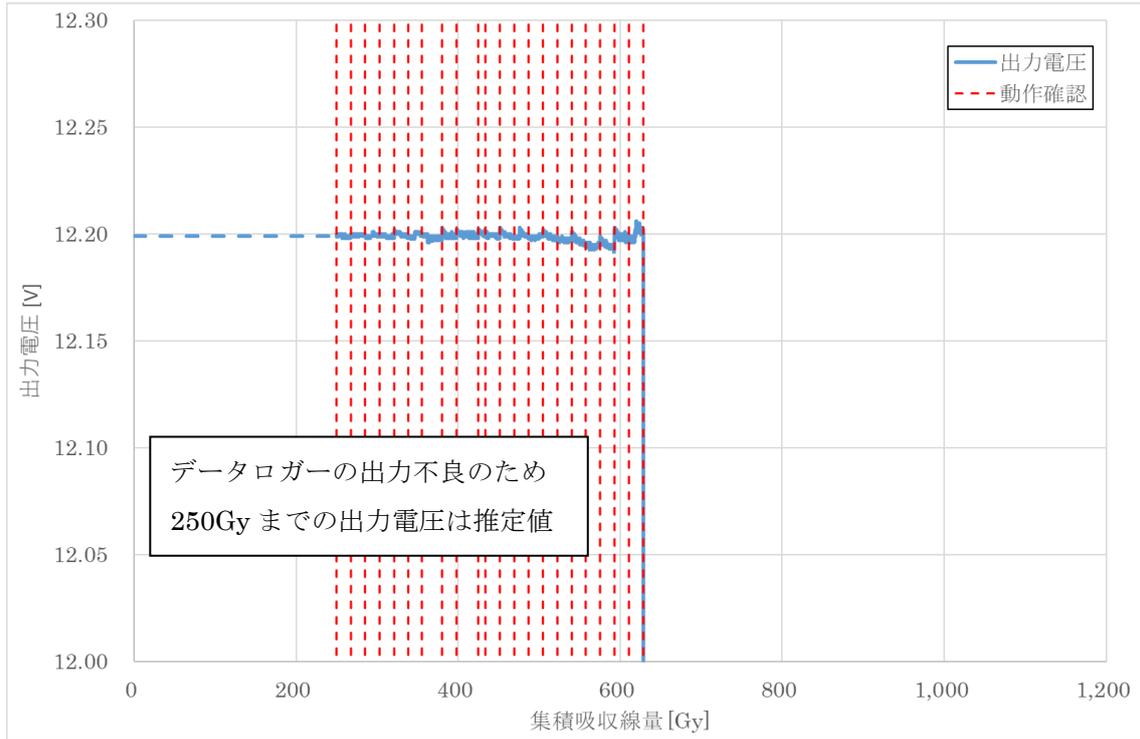


図 6-9 光電センサ No.5 の電圧変化

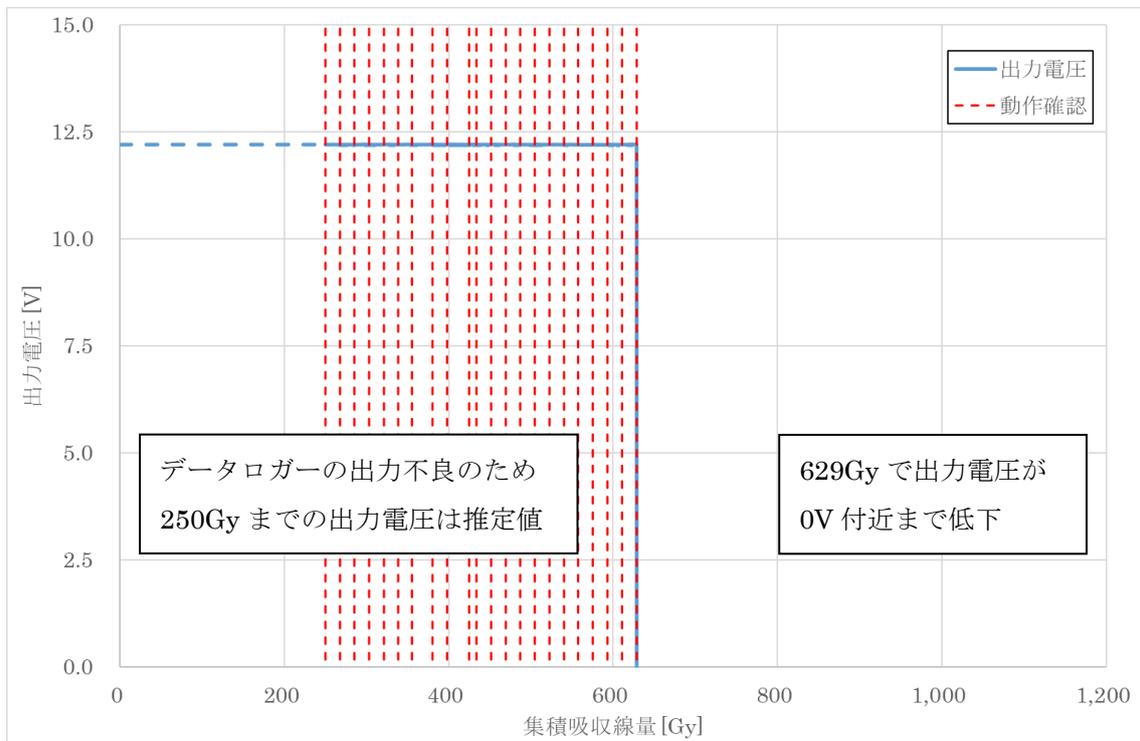


図 6-10 光電センサ No.5 の電圧変化 (縮小図)

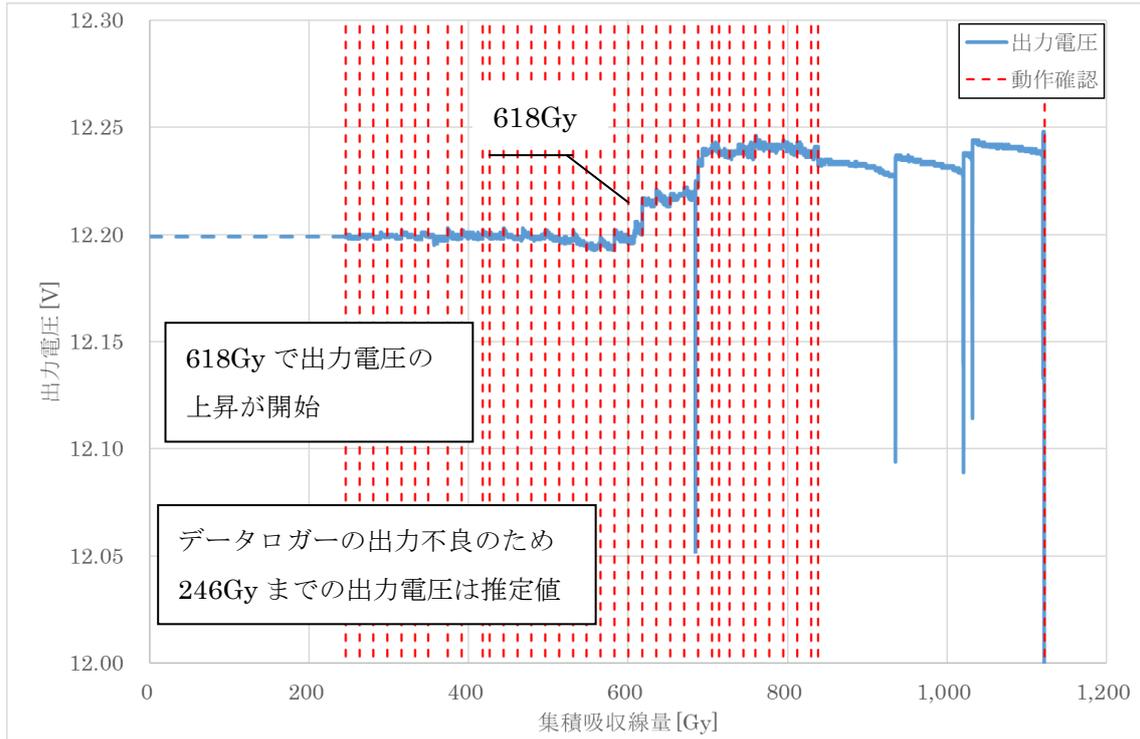


図 6-11 光電センサ No.6 の電圧変化

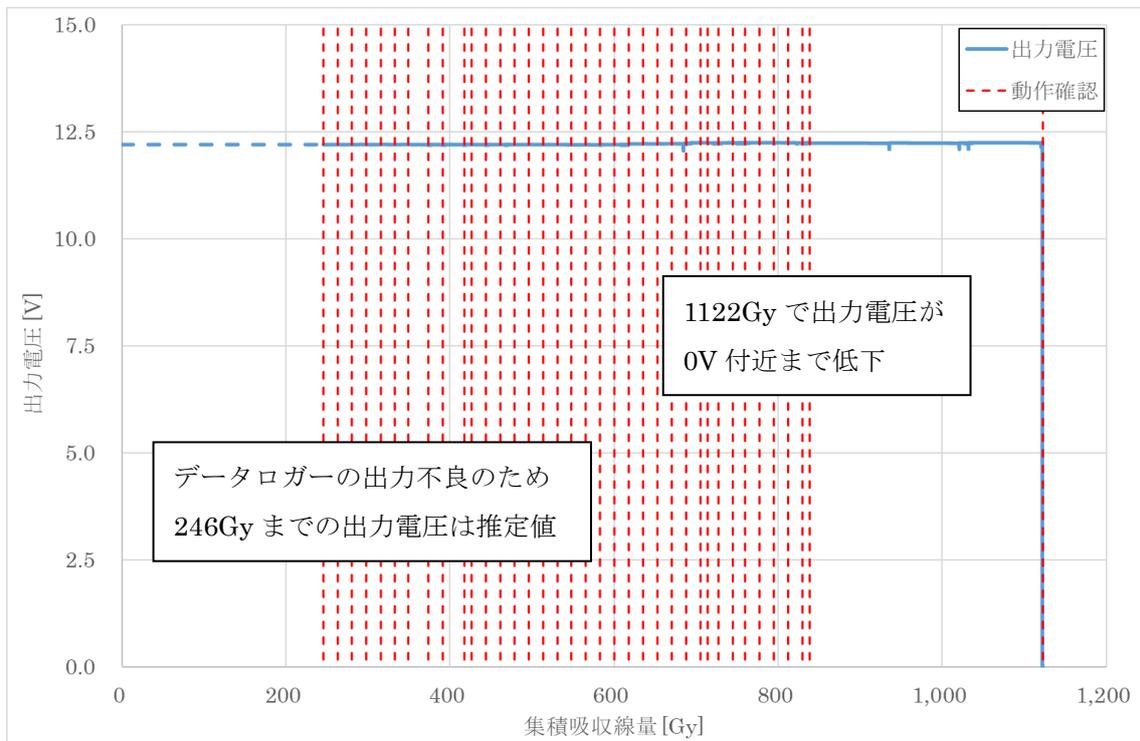


図 6-12 光電センサ No.6 の電圧変化 (縮小図)

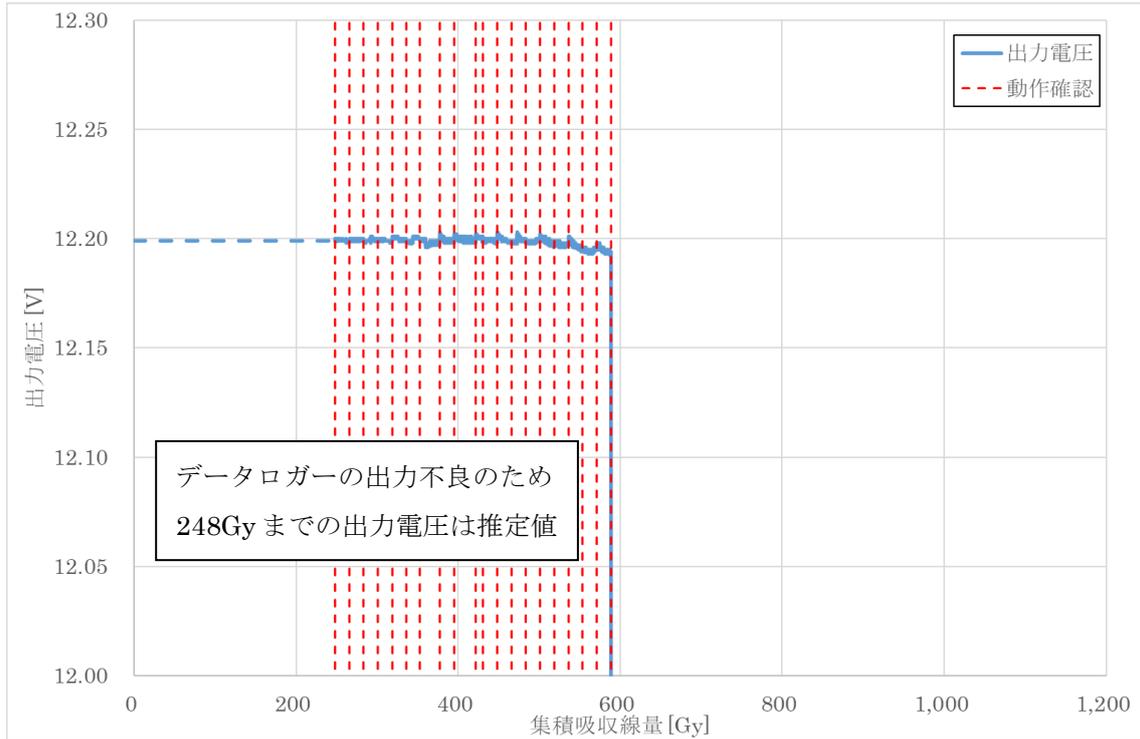


図 6-13 光電センサ No.7 の電圧変化

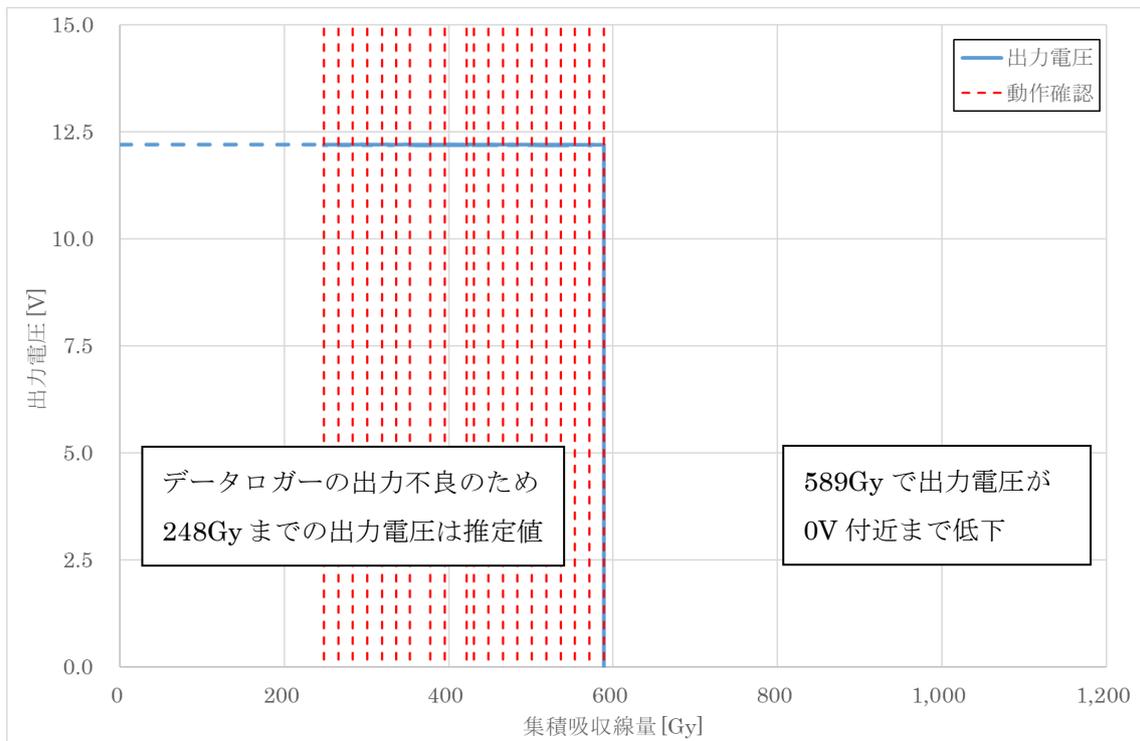


図 6-14 光電センサ No.7 の電圧変化 (縮小図)

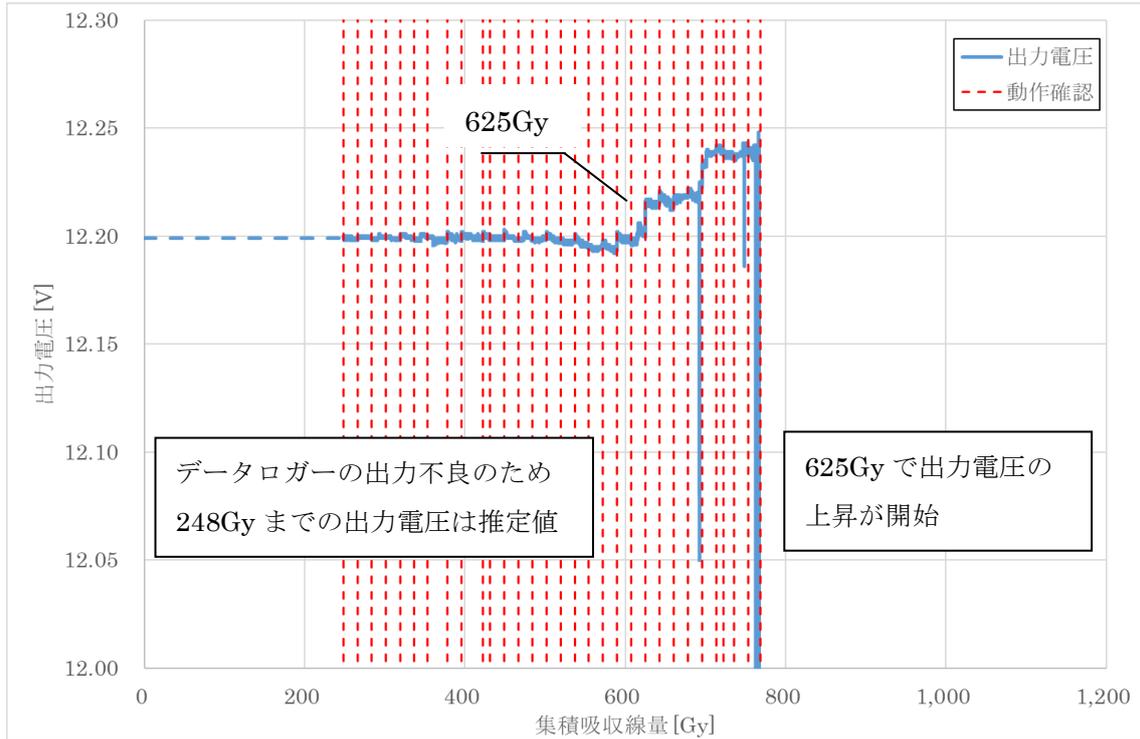


図 6-15 光電センサ No.8 の電圧変化

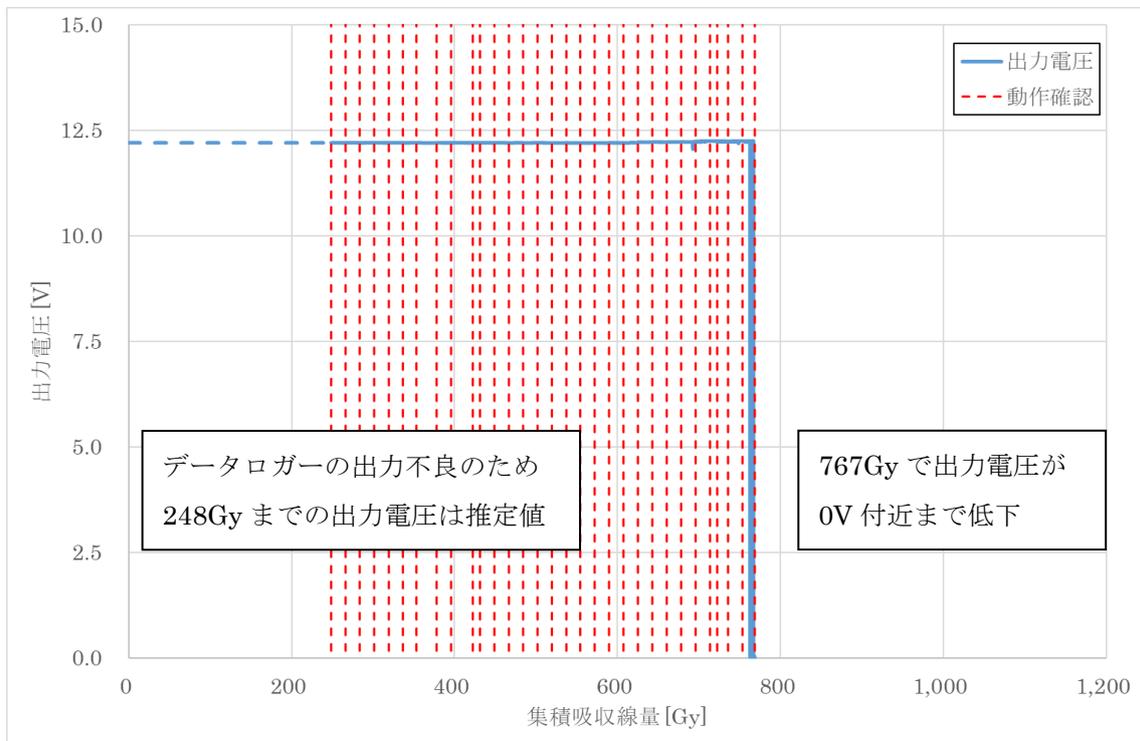


図 6-16 光電センサ No.8 の電圧変化 (縮小図)

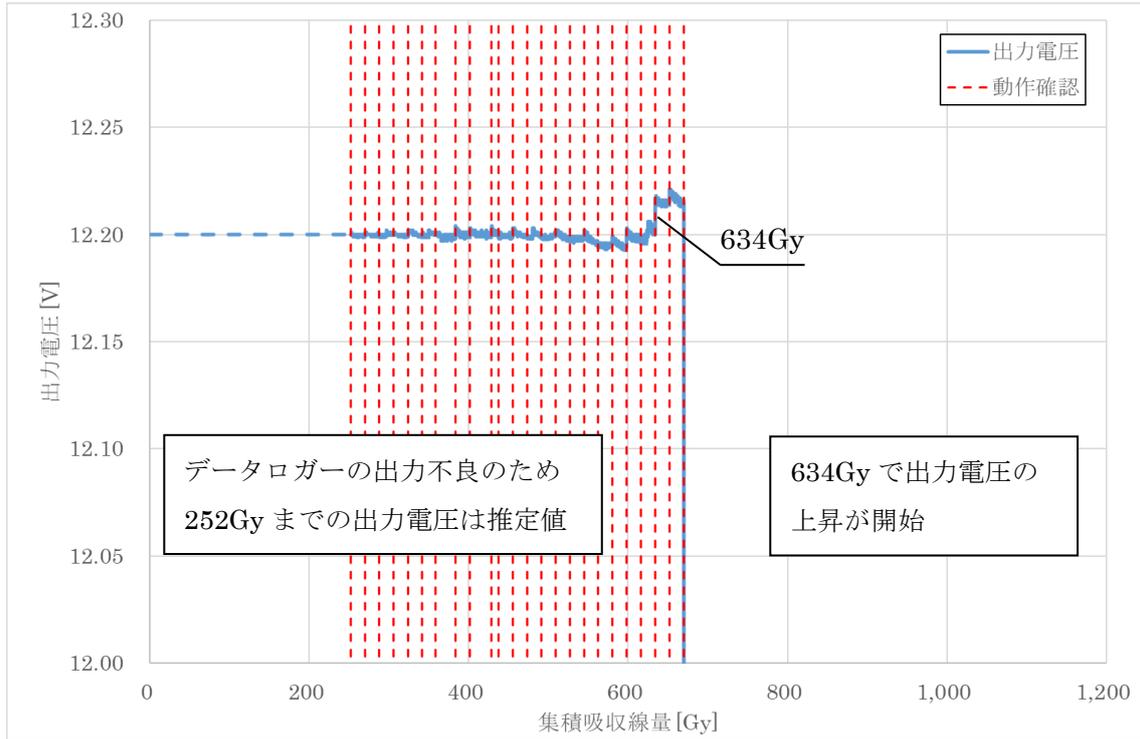


図 6-17 光電センサ No.9 の電圧変化

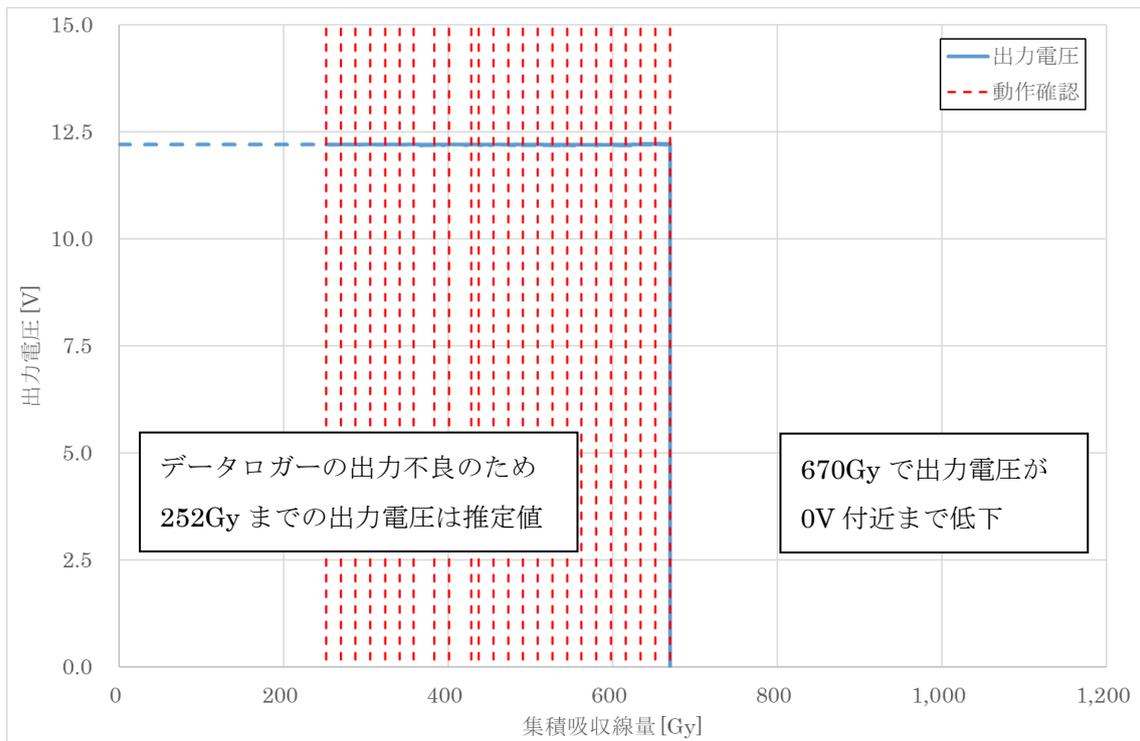


図 6-18 光電センサ No.9 の電圧変化 (縮小図)

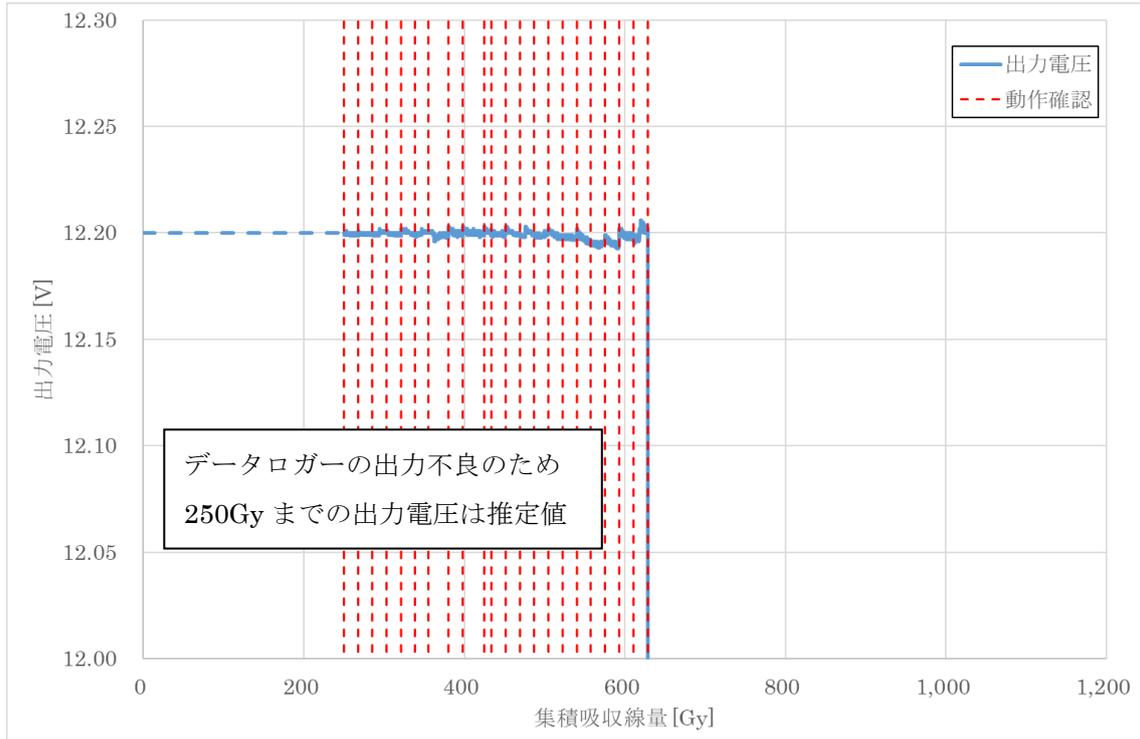


図 6-19 光電センサ No.10 の電圧変化

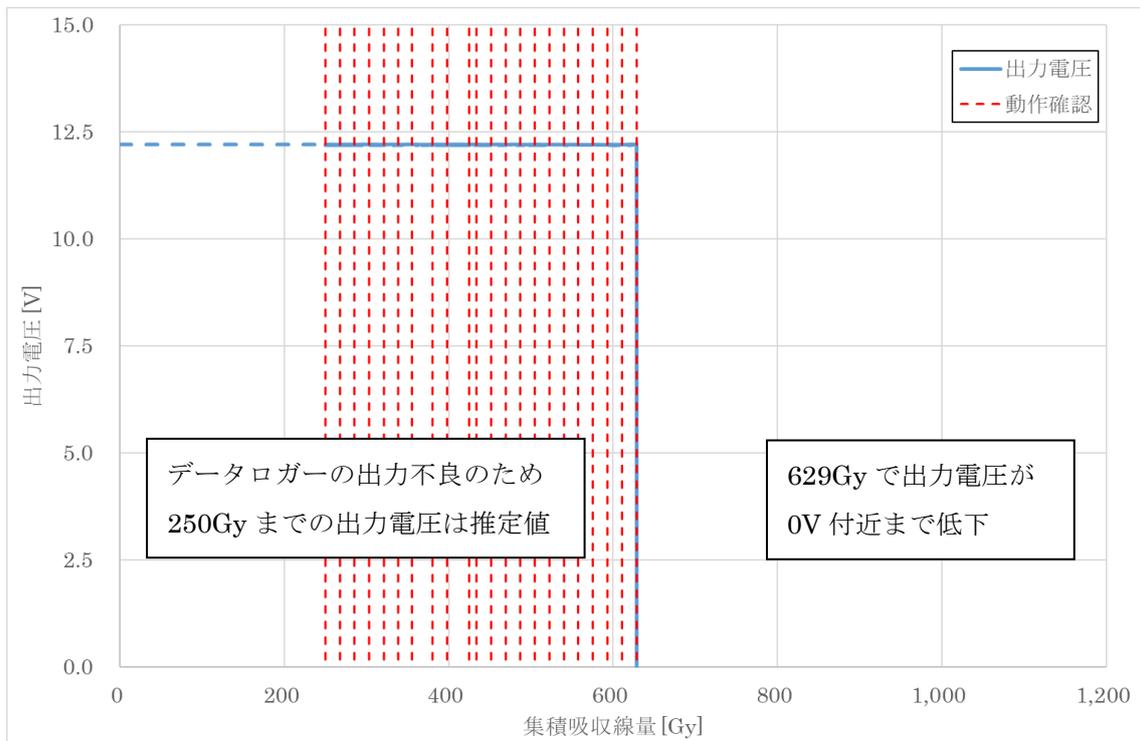


図 6-20 光電センサ No.10 の電圧変化 (縮小図)

6.1.2 近接センサ

4.2.3 項で設定した条件に従い、近接センサの照射試験を実施した。各照射試験条件で近接センサの検知時の出力電圧が 0V 付近まで低下する、もしくは非検知時の出力電圧が正常な値まで低下せず検知不良となり、故障した時点での集積吸収線量を表 6-2 に示す。

各近接センサの出力電圧の変化を図 6-21 から図 6-35 に示す。なお、照射開始から最初の動作確認を行った 72.9 時間まではデータロガーの出力不良によりデータが欠損している。

さらに、各近接センサの照射試験結果の詳細を以下に述べる。

近接センサ 10 台に対して、照射線量率 5Gy/h で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始約 160.4 時間後（集積吸収線量 702Gy）の動作確認時に検出部から金属片を外し非検知状態としても、データロガーの出力電圧が低下しない状態であることを確認した。このときセンサの電源を切り再起動させても事象が改善されることがなかったため測定不能と判断した。データロガーの電圧値を確認すると照射開始後から徐々に出力電圧が低下していることが認められたが、No.1 は 1 回目の動作確認の時点から正常な出力電圧を示しておらず、いつの時点から 0V に戻らない状況になったかが判断できないため、照射開始から電圧が低下しない状態であることが確認された照射開始約 160.4 時間後（集積吸収線量 702Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.2 は、照射開始約 176.3 時間後（集積吸収線量 779Gy）の動作確認時に非検知状態で出力電圧が低下しない状態であることが確認された。従って、出力電圧が低下しないと確認された照射開始約 176.3 時間後（集積吸収線量 779Gy）とその直前の正常に動作することが確認された照射開始約 172.4 時間後（集積吸収線量 762Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.3 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 168.3 時間後（集積吸収線量 745Gy）と照射開始約 172.4 時間後（集積吸収線量 763Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.4 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 166.4 時間後（集積吸収線量 747Gy）と照射開始約 168.3 時間後（集積吸収線量 756Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.5 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 166.4 時間後（集積吸収線量 741Gy）と照射開始約 168.3 時間後（集積吸収線量 749Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.6 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始から照射開始約 160.4 時間後（集積吸収線量 702Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.7 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 172.4 時間後（集積吸収線量 762Gy）と照射開始約 176.3 時間後（集積吸収線量 779Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.8 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始から照射開始約 160.4 時間後（集積吸収線量 710Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.9 では、照射開始約 221.6 時間後（集積吸収線量 995Gy）の動作確認時に検知時の出力電圧が大きく低下し、その後照射開始約 229.4 時間後（集積吸収線量 1030Gy）の動作確認時に非検知時と同様の出力となることを確認した。従って、開始約 229.4 時間後（集積吸収線量 1030Gy）と開始約 219.0 時間後（集積吸収線量 983Gy）の間に測定不能になったと考えられる。また、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始約 219.0 時間後（集積吸収線量 983Gy）から急激に電圧が低下していることが確認された。

No.10 でも No.1 と同様の事象が確認され、照射開始約 176.3 時間後（集積吸収線量 785Gy）と照射開始約 180.0 時間後（集積吸収線量 802Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.11 では、照射開始約 332.2 時間後（集積吸収線量 1426Gy）の動作確認でも正常な電圧出力が確認されたが、照射施設の時間的制約により試験終了とした。

No.12 でも No.11 と同様に、照射開始約 332.2 時間後（集積吸収線量 1447Gy）の動作確認でも正常な電圧出力が確認されたが、照射施設の時間的制約により試験終了とした。

No.13 では、照射開始約 227.3 時間後（集積吸収線量 1012Gy）の動作確認後に、非照射状態かつ通電状態で一晩保管すると出力電圧が 0V 付近まで低下していた。なお、照射再開前に再度動作確認を行うと検知状態の出力電圧が低下しており、検知もしないことを確認したため、センサが故障したと判断した。

表 6-2 近接センサの照射試験結果（故障を確認した時点）

No.	入力電圧	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]	故障時の様子
1	12	4.38	160.4 ^{※1}	702>	802 ^{※3} (SD ^{※4} :76)	検知不良
2		4.42	176.3	779		検知不良
3		4.43	172.4	763		検知不良
4		4.49	168.3	756		検知不良
5		4.45	168.3	749		検知不良
6		4.38	160.4 ^{※1}	702>		検知不良
7		4.42	176.3	779		検知不良
8		4.43	160.4 ^{※1}	710>		検知不良
9		4.49	219.0	983		出力電圧低下
10		4.45	180.0	802		検知不良
11	24	4.43	322.2 ^{※2}	1426<	1012 ^{※5}	-
12		4.49	322.2 ^{※2}	1447<		-
13		4.45	227.3	1012		出力電圧低下

※1 照射開始後初めての動作確認で検知状態から非検知時にした時、非検知時の出力電圧が正常な値まで低下しないことを確認した。

※2 検知不良及び出力電圧低下がみられなかったため、正常な動作を確認した照射時間を記載している

※3 平均集積吸収線量は No.1,6,8 以外の値から算出した。

※4 SD：標準偏差

※5 No.11 及び 12 では故障が確認されなかったため、No.13 の値を記載している。

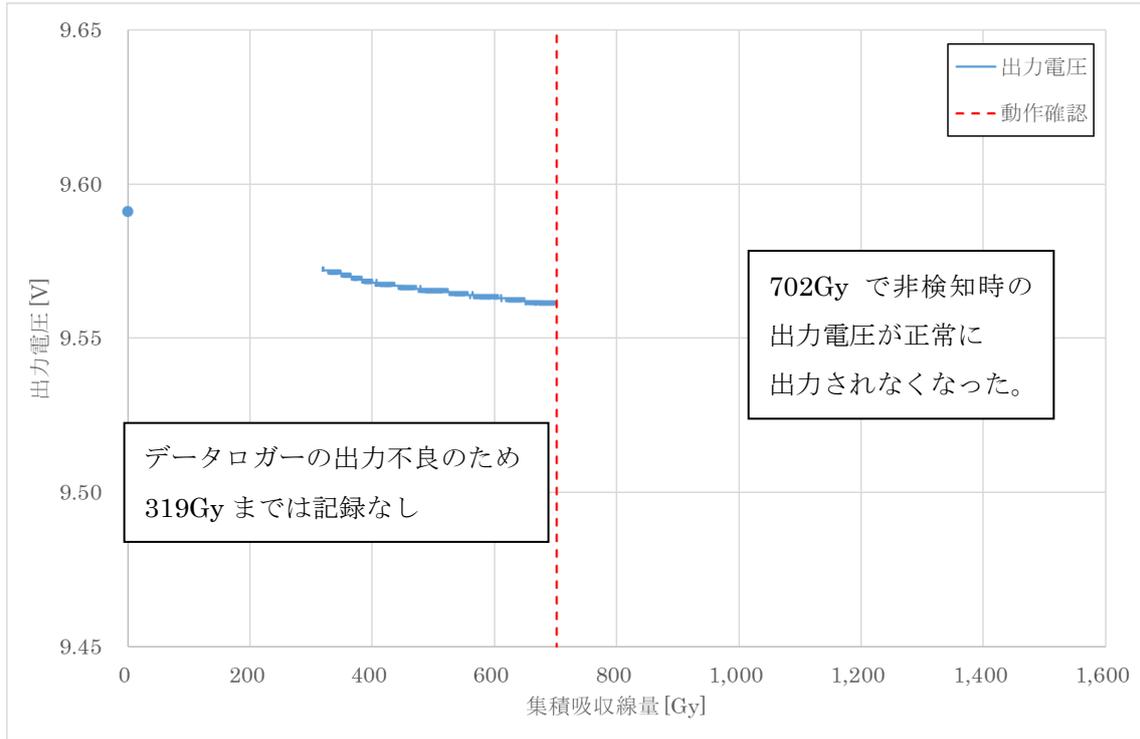


図 6-21 近接センサ No.1 の電圧変化

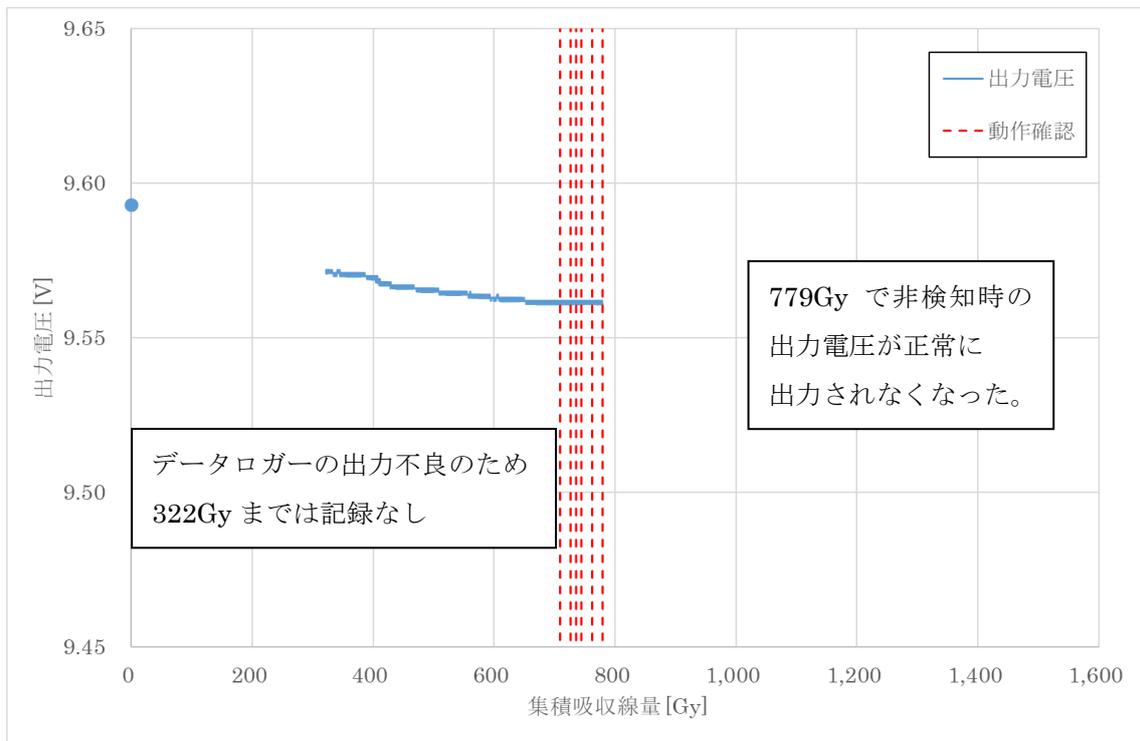


図 6-22 近接センサ No.2 の電圧変化

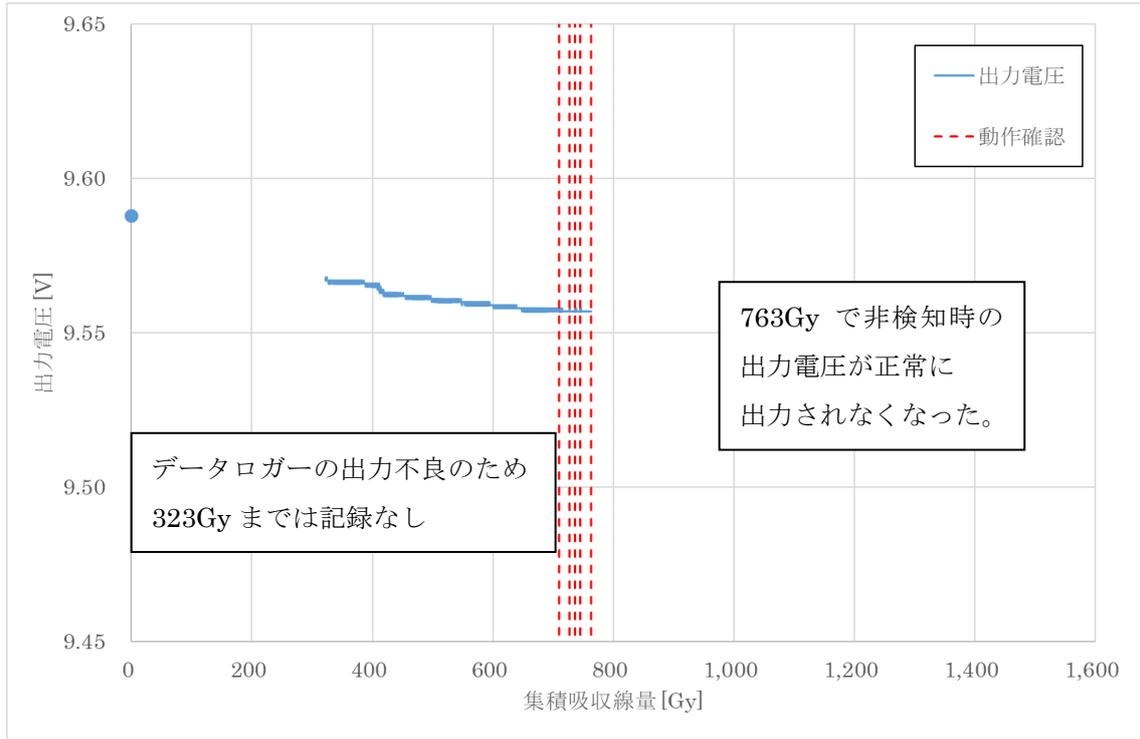


図 6-23 近接センサ No.3 の電圧変化

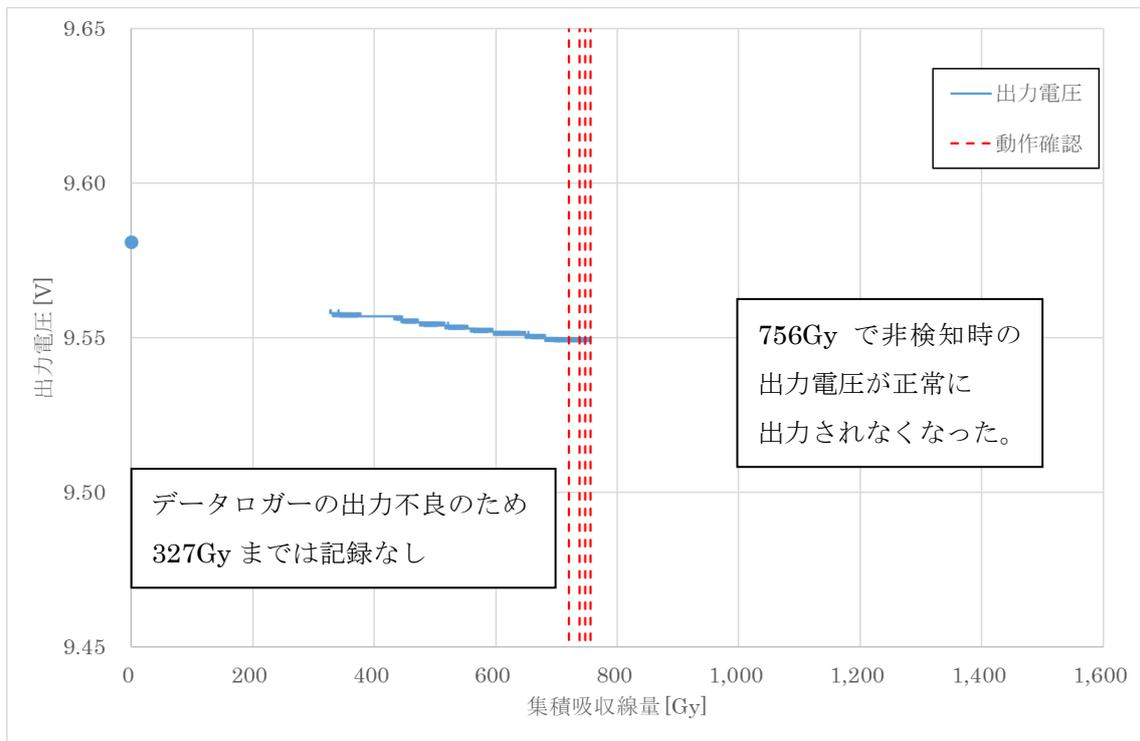


図 6-24 近接センサ No.4 の電圧変化

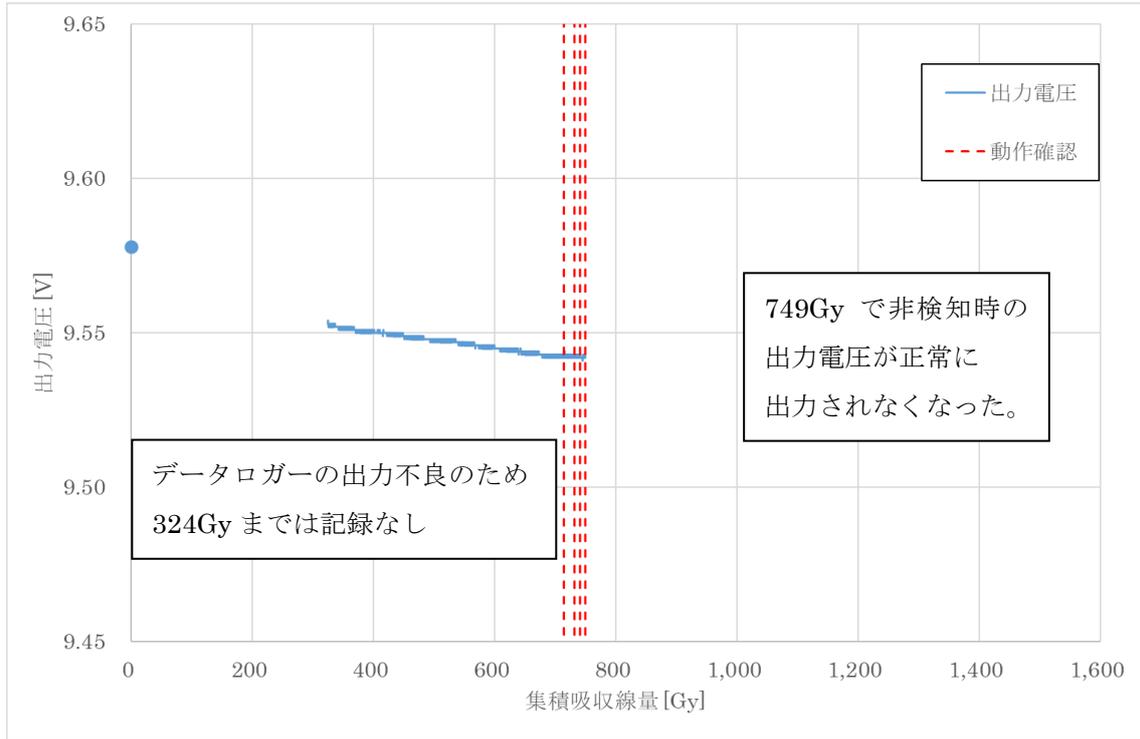


図 6-25 近接センサ No.5 の電圧変化

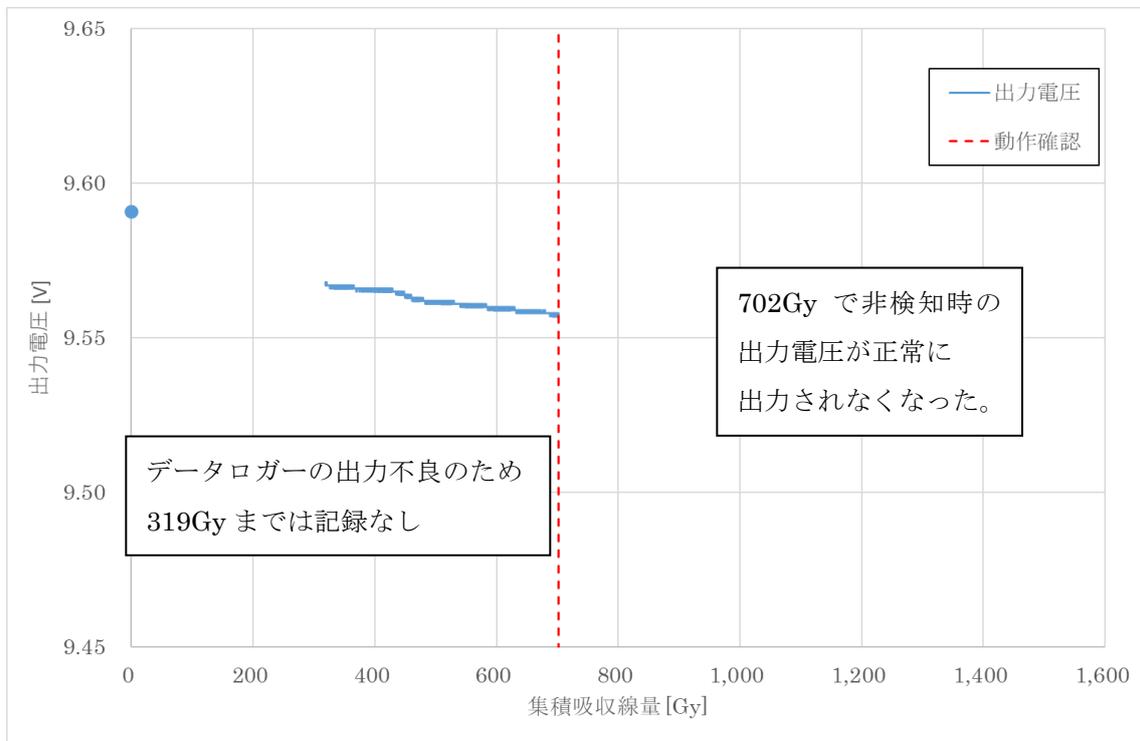


図 6-26 近接センサ No.6 の電圧変化

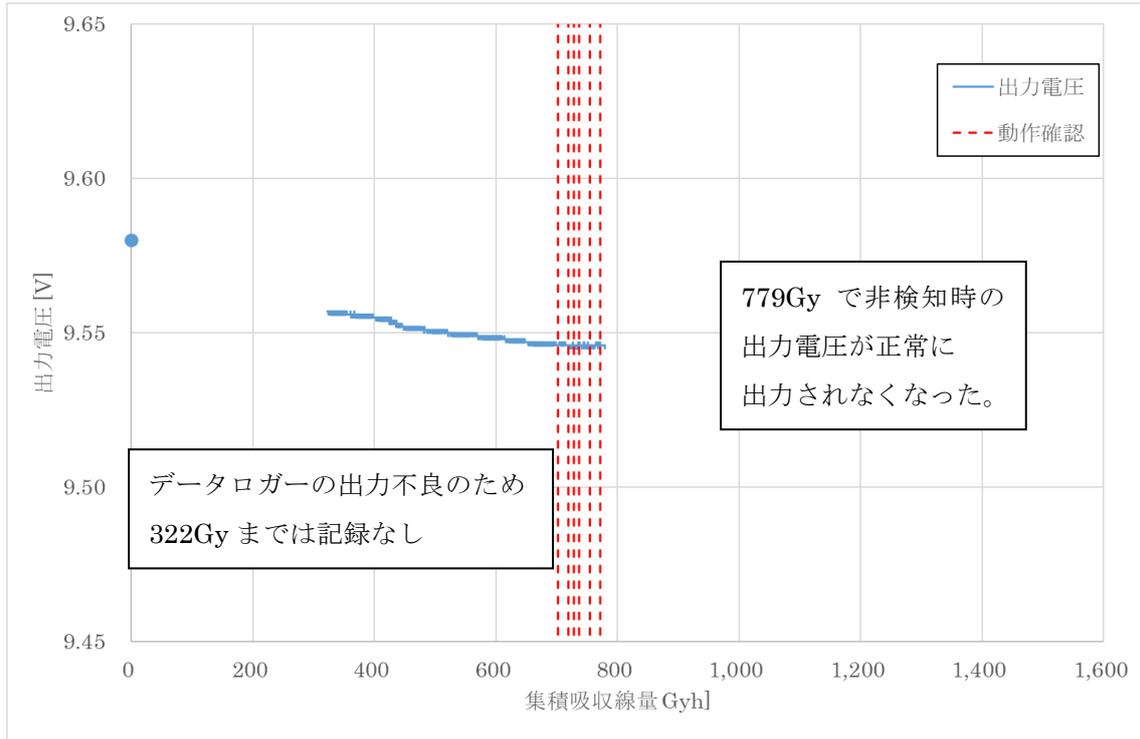


図 6-27 近接センサ No.7 の電圧変化

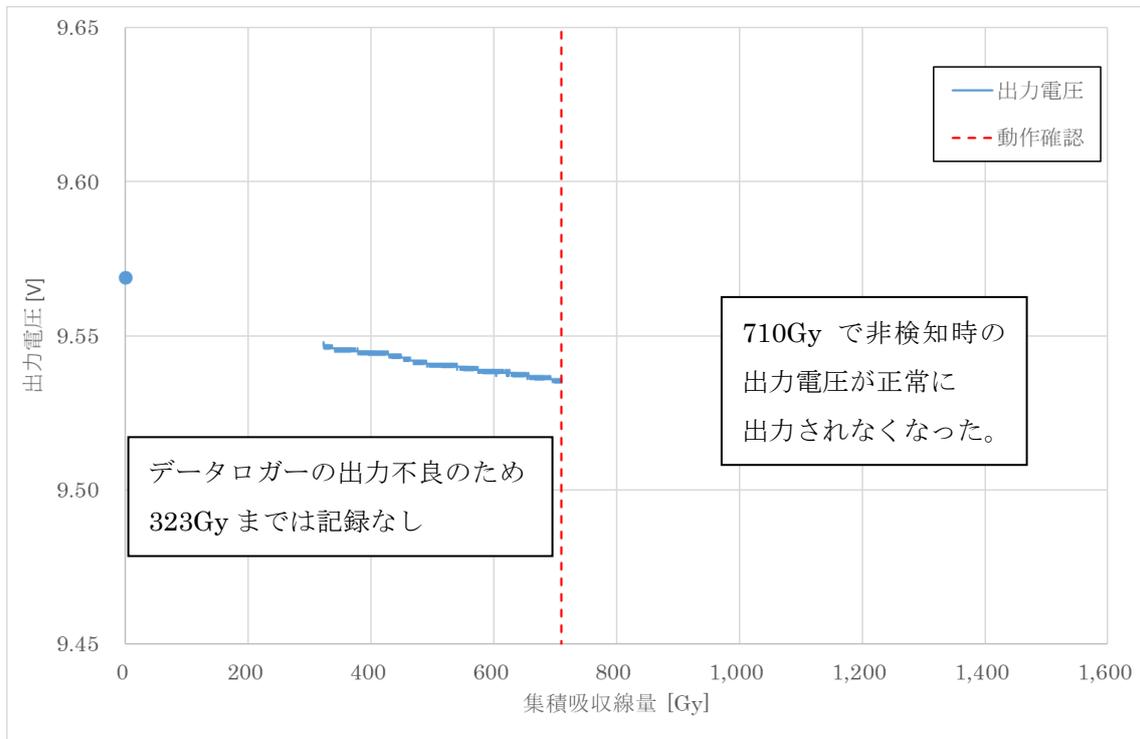


図 6-28 近接センサ No.8 の電圧変化

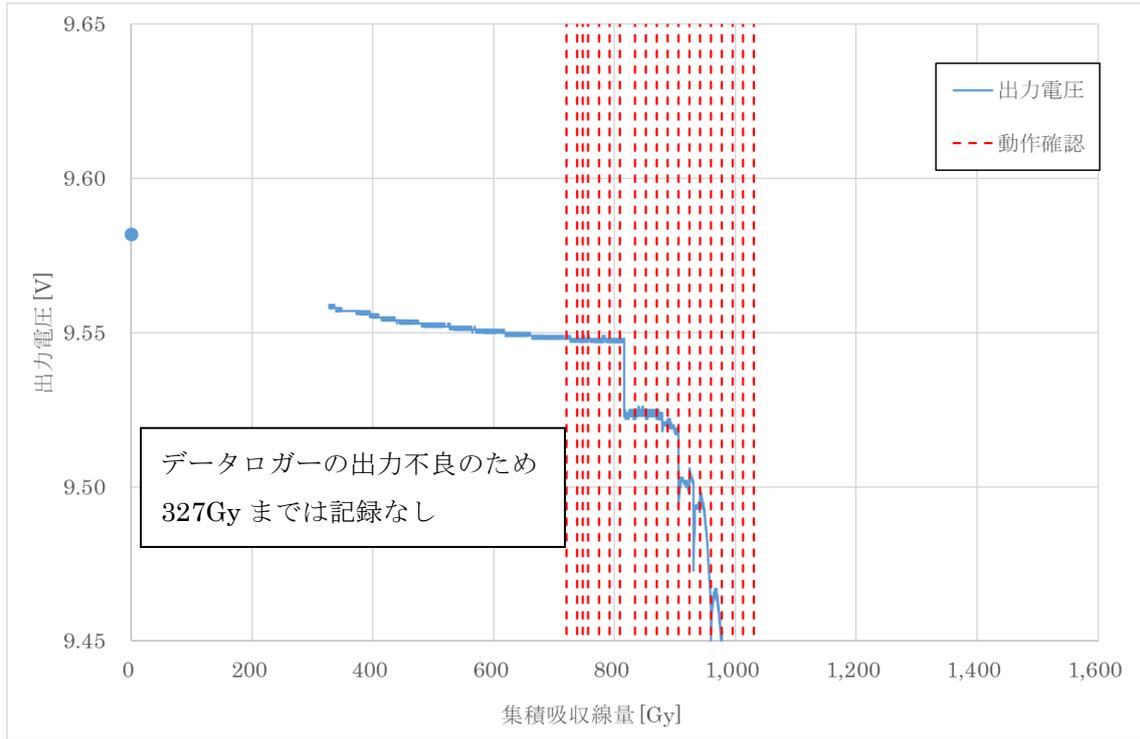


図 6-29 近接センサ No.9 の電圧変化

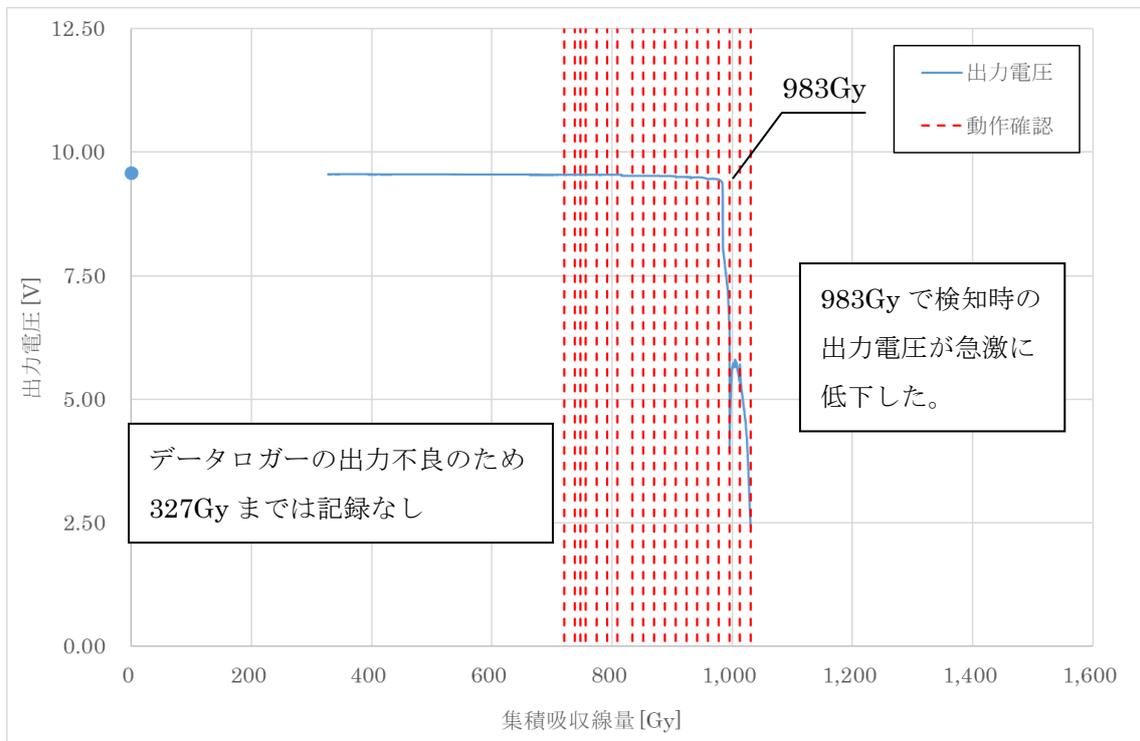


図 6-30 近接センサ No.9 の電圧変化 (縮小図)

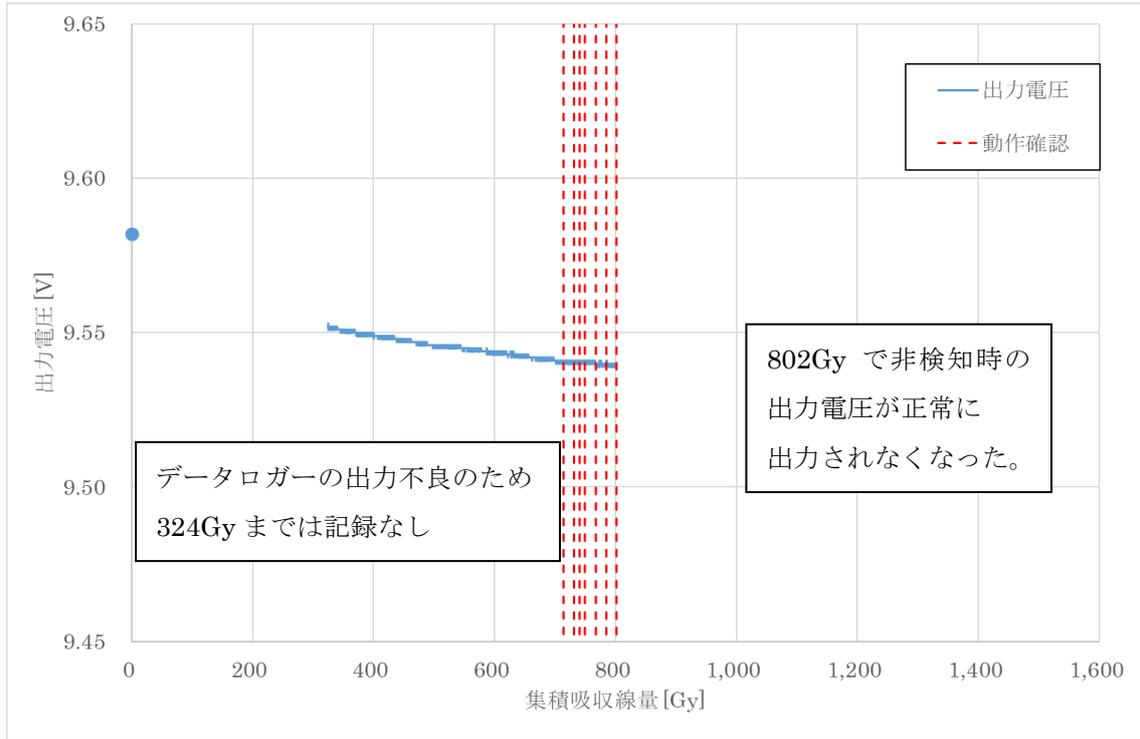


図 6-31 近接センサ No.10 の電圧変化

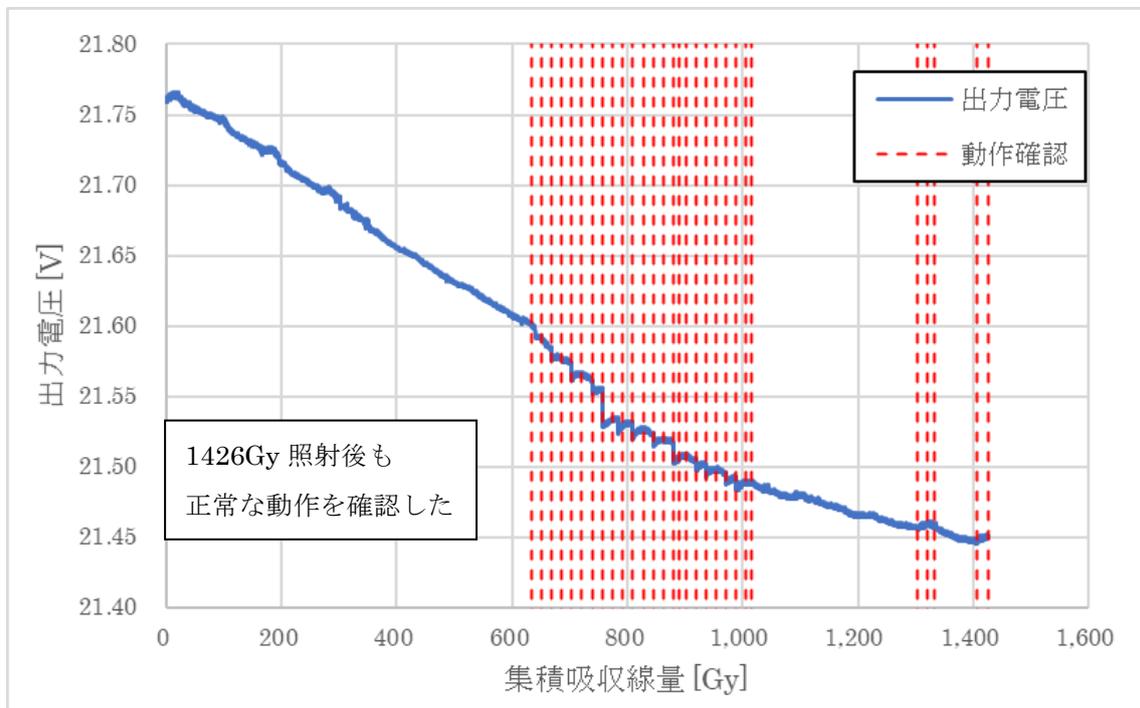


図 6-32 近接センサ No.11 の電圧変化

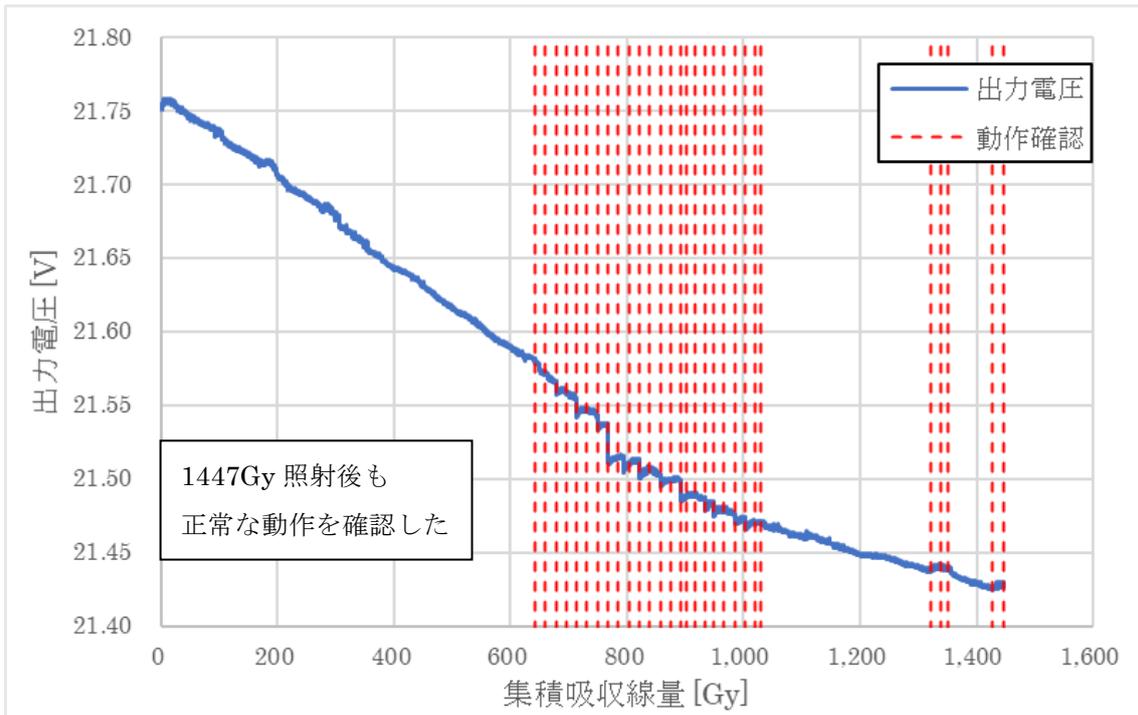


図 6-33 近接センサ No.12 の電圧変化

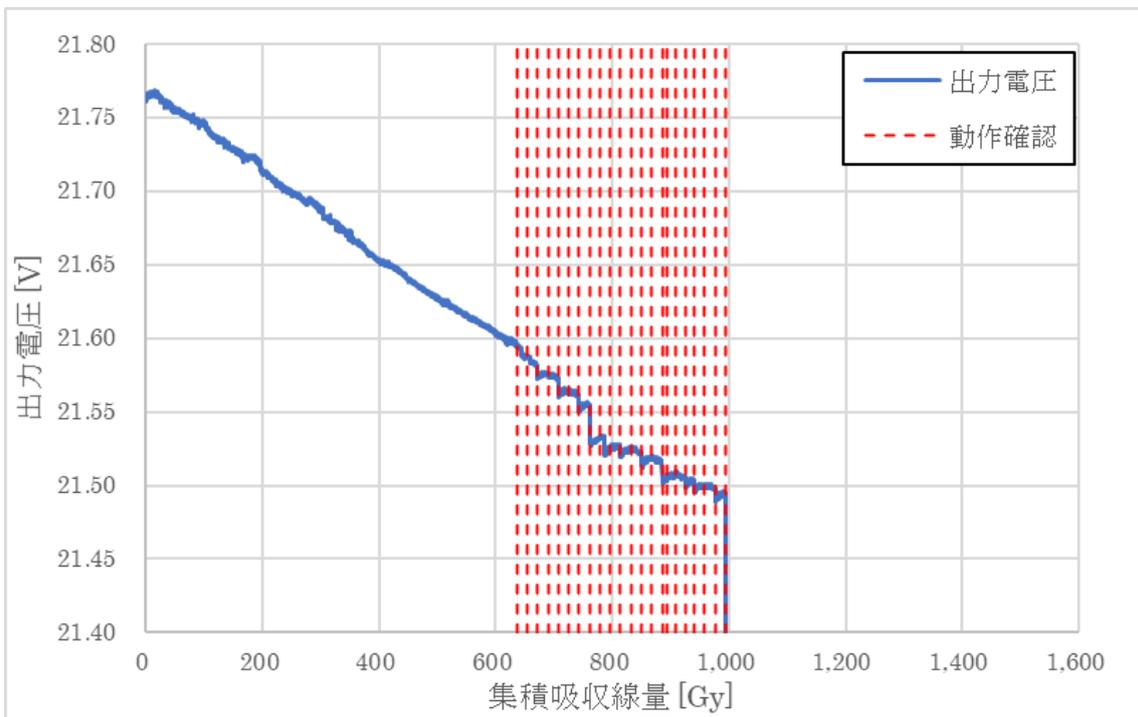


図 6-34 近接センサ No.13 の電圧変化

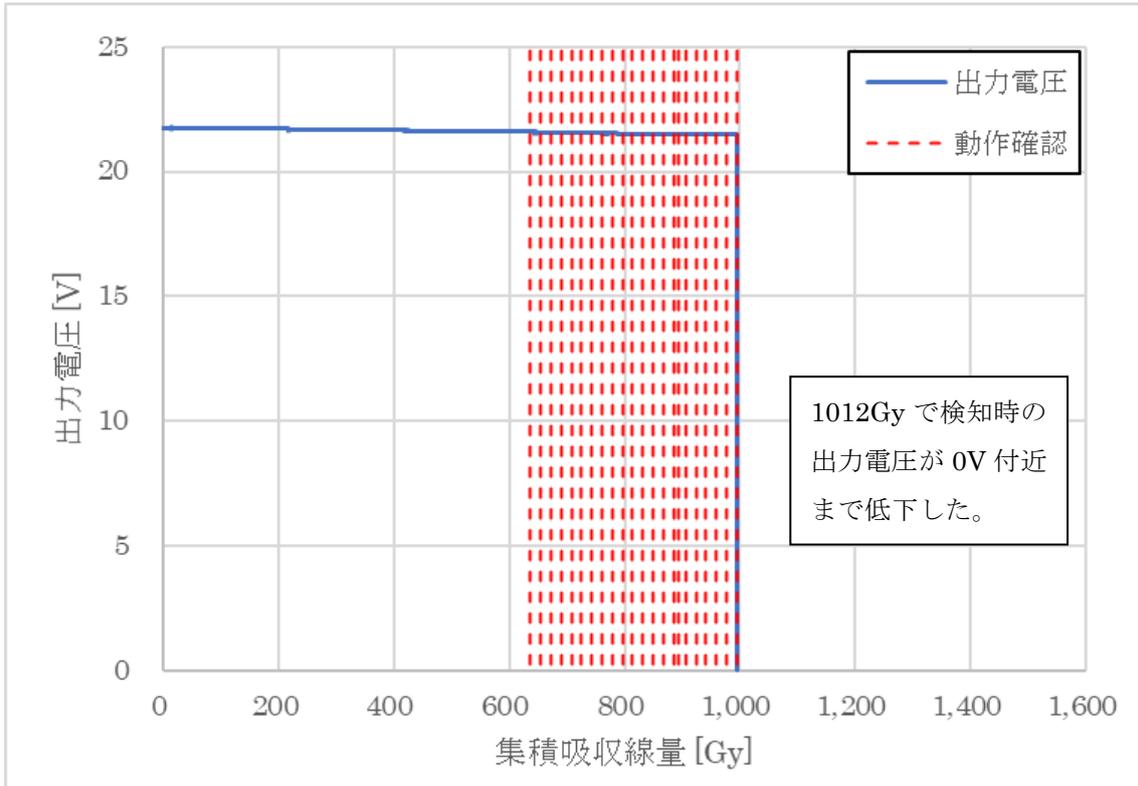


図 6-35 近接センサ No.13 の電圧変化 (縮小図)

6.2 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得

6.2.1 照射試験結果

5.2.1 項で設定した試験条件に基づきカスタマイズした光電センサの照射試験を実施した。照射試験結果を表 6-3 及び表 6-4 に示す。ここで、照射線量率は遮へい体内部の照射線量率ではなく、光電センサ設置位置高さにおけるアラニン線量計による遮へい体外部の吸収線量測定結果を用いて算出した照射線量率である。遮へい体外部の照射線量率に照射時間を乗じたものをカスタマイズ時のみなし集積吸収線量とする。なお、カスタマイズ無しの照射試験結果として、6.1.1 項の照射時間及び集積吸収線量を参考に併記している。

また、図 6-36 から図 6-38 にカスタマイズした各光電センサのみなし集積吸収線量と出力電圧を示す。

各センサの照射試験結果の詳細を以下に述べる。

カスタマイズした光電センサ 3 台を照射線量率 5Gy/h で照射した結果、No.1 は照射開始 140.3 時間後（みなし集積吸収線量 624Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下していることを確認した。同様に No.2 では照射開始 135.7 時間後（みなし集積吸収線量 604Gy）に、No.3 では照射開始 173.6 時間後（みなし集積吸収線量 772Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下していることを確認した。カスタマイズした光電センサにおいて、出力電圧の低下が開始したみなし集積吸収線量を各センサが故障したみなし集積吸収線量と定義すると、カスタマイズした光電センサが動作不能となり故障するみなし集積吸収線量は 604Gy - 772Gy と推定される。

表 6-3 カスタマイズした光電センサの照射試験結果（照射時間）

No.	照射時間 ^{※1} [h]	平均照射時間 [h]	【参考】照射時間 ^{※2} (カスタマイズ無し) [h]
1	140.3	150 (SD ^{※3} :17)	158 (SD ^{※3} :34)
2	135.7		
3	173.6		

※1 照射時間は出力電圧が 0V 付近まで低下した時間としている

※2 参考として 6.1.1 項の光電センサの照射時間の平均値を記載している

※3 標準偏差

表 6-4 カスタマイズした光電センサの照射試験結果（みなし集積吸収線量）

No.	照射線量率 [Gy/h]	みなし集積 吸収線量 ^{※1} [Gy]	平均 みなし集積 吸収線量 [Gy]	【参考】平均集積 吸収線量 ^{※2} (カスタマイズ無し) [Gy]
1	4.45	624	667 (SD ^{※3} :75)	701 (SD ^{※3} :148)
2		604		
3		772		

※1 センサを設置した位置でのアラニン線量計により測定した照射線量率から算出した値

※2 参考として 6.1.1 項の光電センサの集積吸収線量の平均値を記載している

※3 標準偏差

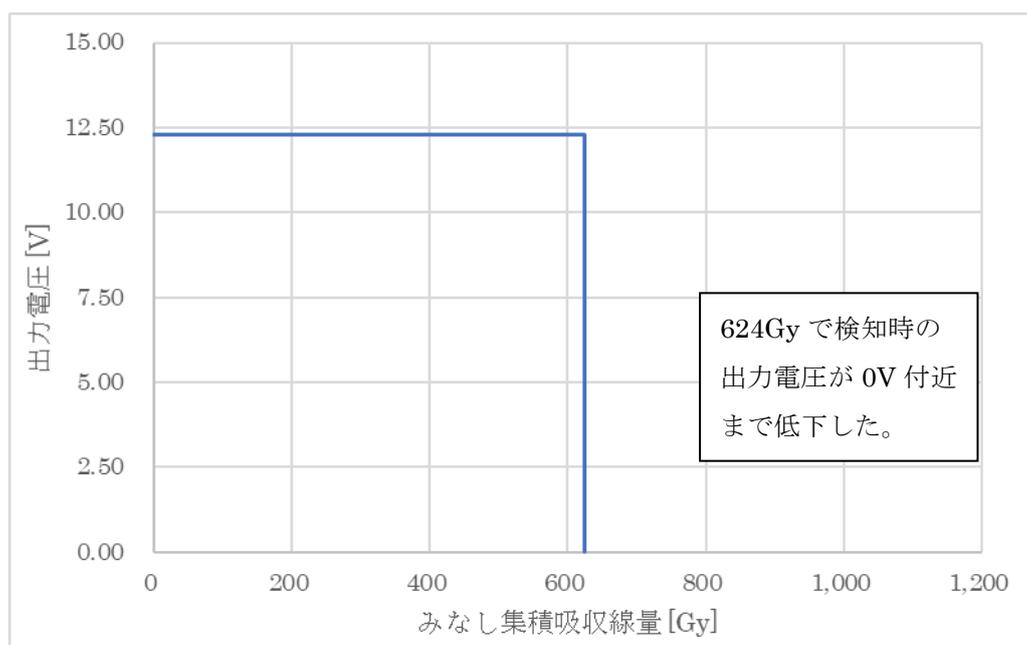


図 6-36 カスタマイズ光電センサ No.1 電圧変化

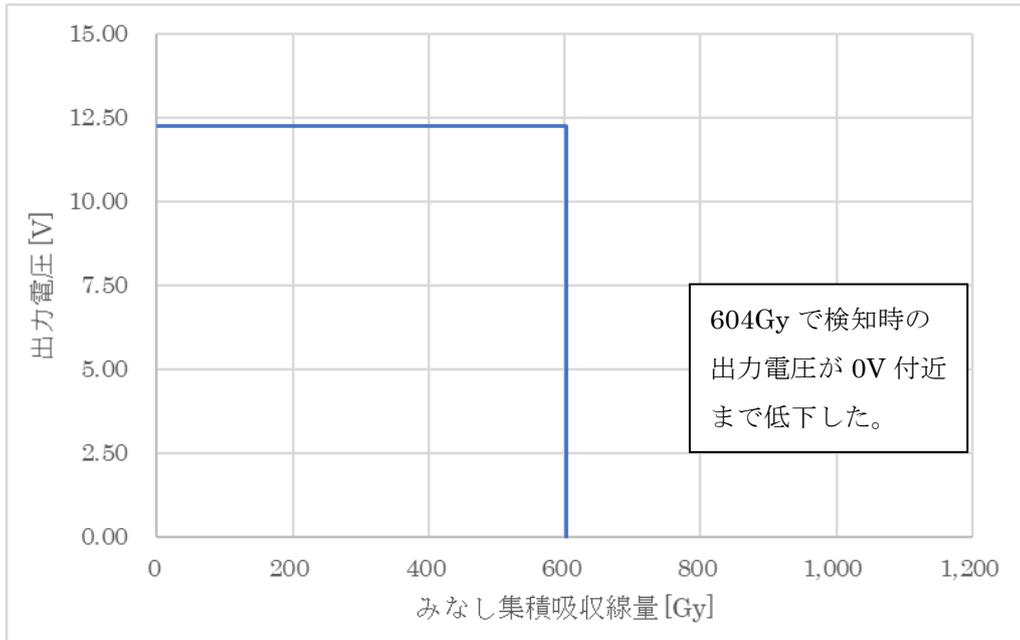


図 6-37 カスタマイズ光電センサ No.2 電圧変化

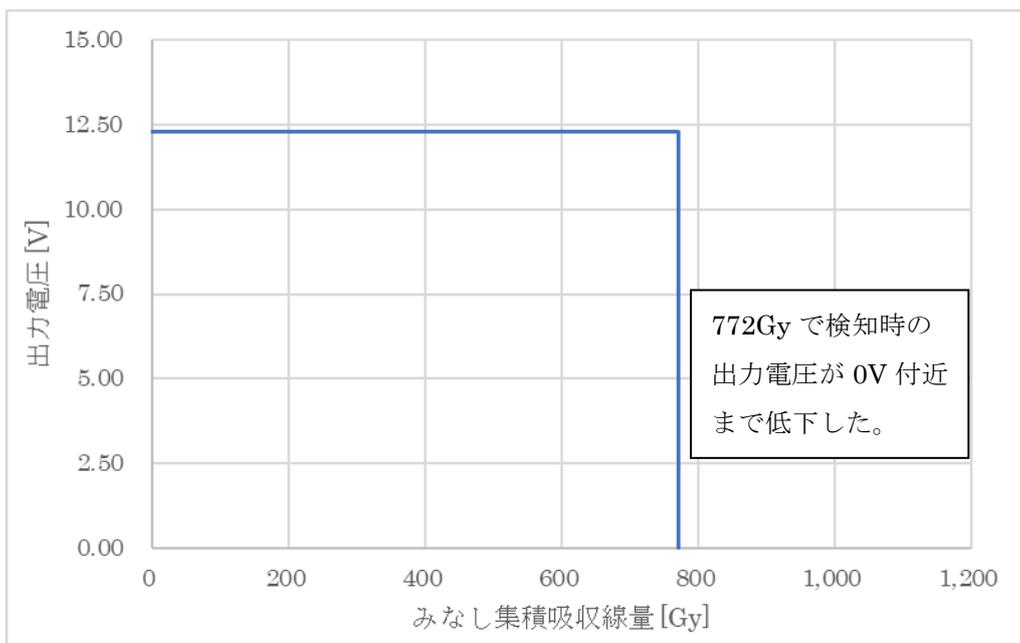


図 6-38 カスタマイズ光電センサ No.3 電圧変化

6.2.2 遮へい解析結果

カスタマイズした光電センサの解析結果を表 6-5 に、線量率分布図を図 6-39 から図 6-41 に示す。解析結果と照射試験結果は、遮へい体外部及び遮へい体内部において 20%以内で一致する結果となった。

表 6-5 遮へい解析結果

測定位置	No.	解析値 [Gy/h]	測定値 [Gy/h]	比率
遮へい体外部	1	4.82	5.50	0.88
	2	4.82	5.31	0.91
	3	4.82	5.73	0.84
遮へい体内部	1	2.91	2.49	1.17
	2	2.90	2.52	1.15
	3	2.90	2.60	1.12

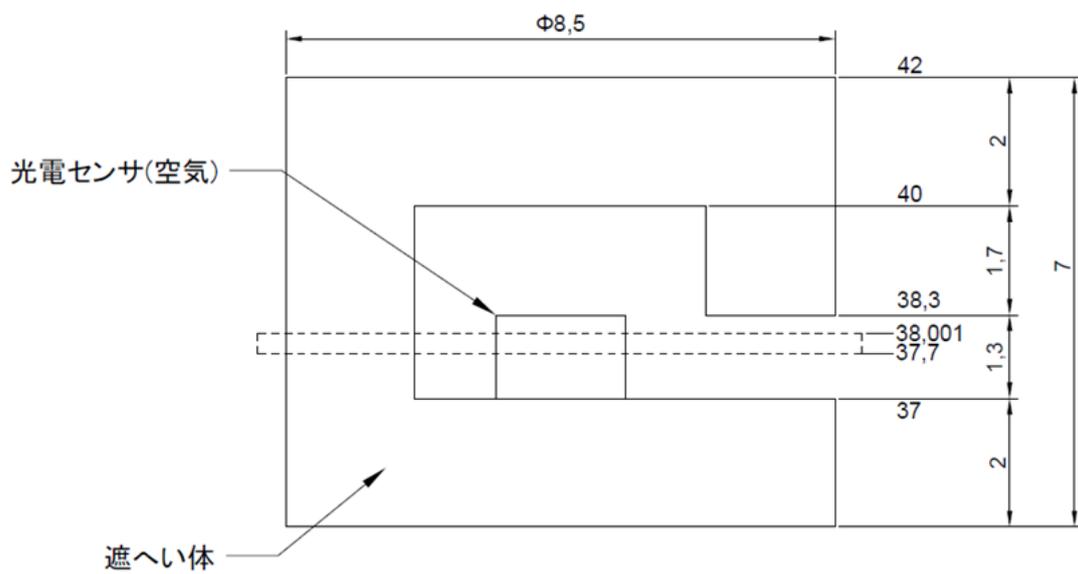
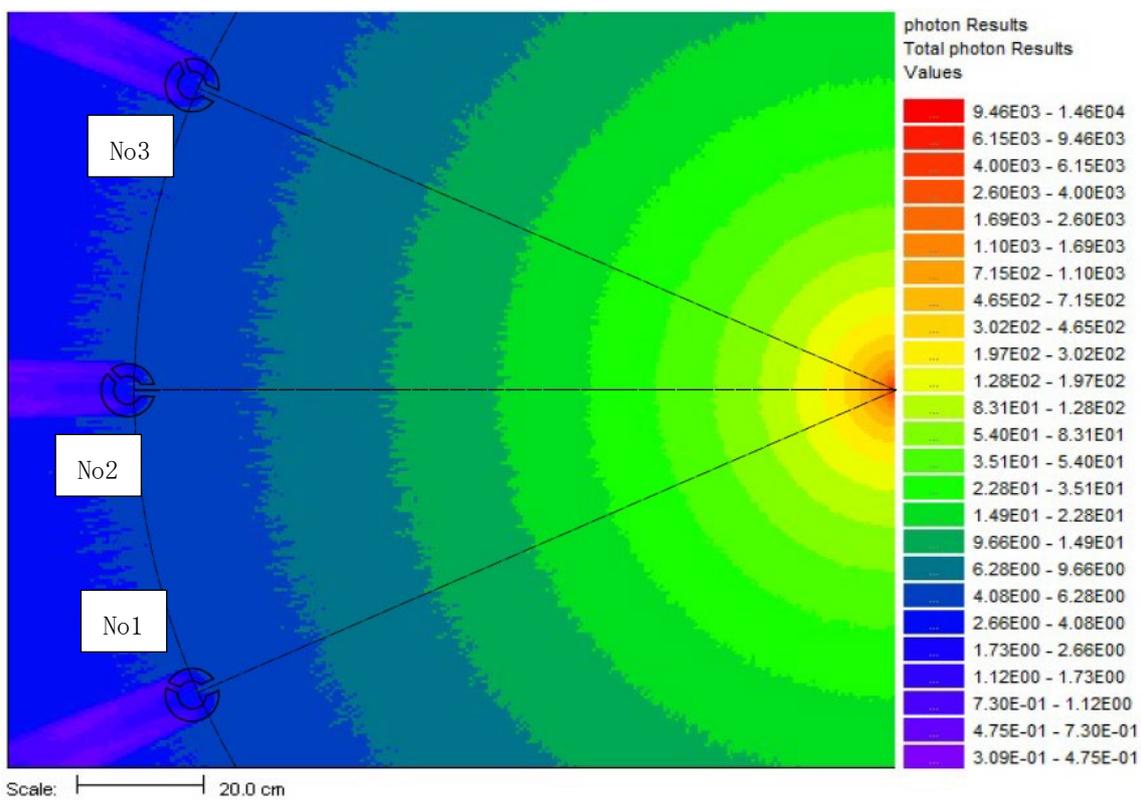


図 6-39 照射室の線量率分布図 (光电センサ投光部高さ)

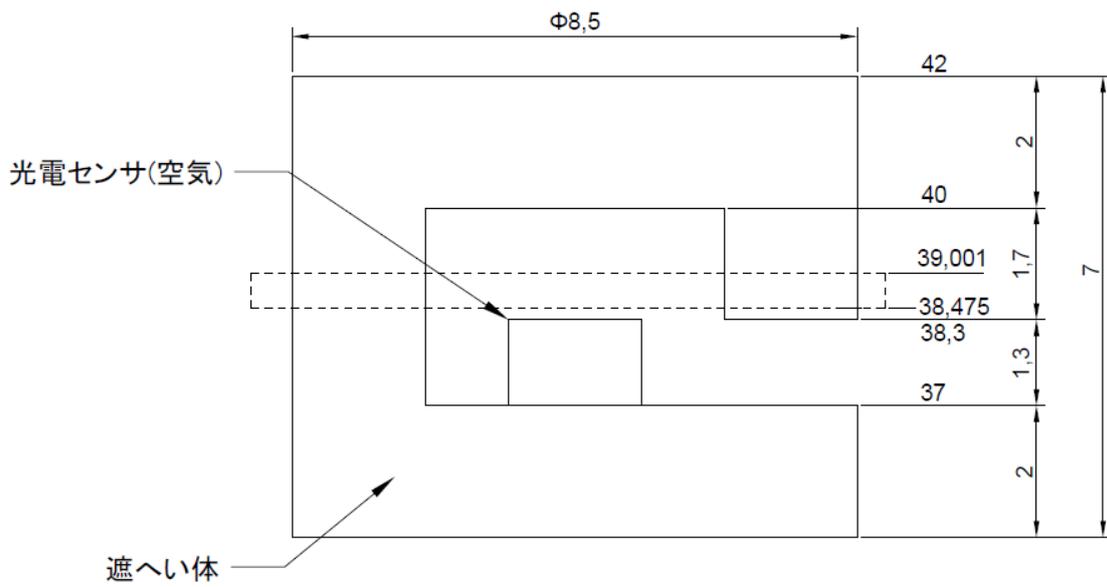
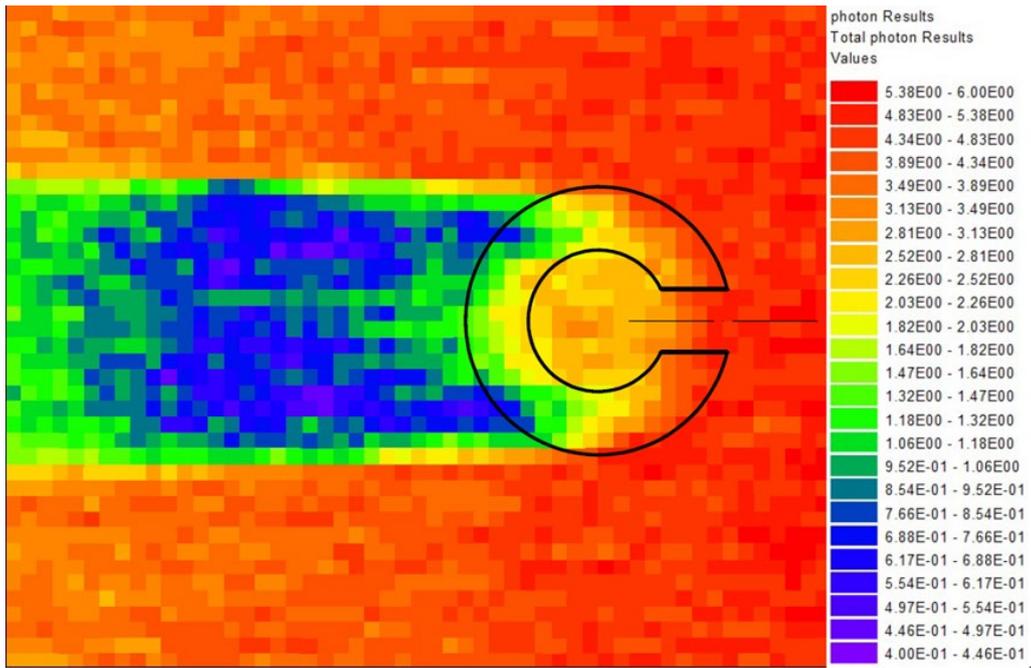


図 6-40 遮へい体近傍の線量率分布図 (遮へい体内部ガラス線量計高さ)

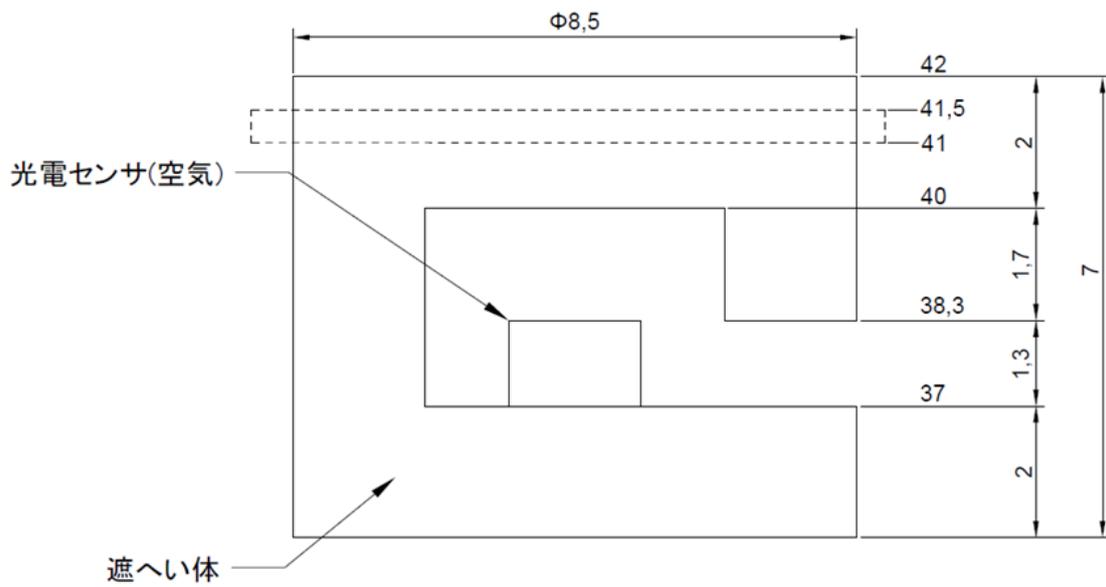
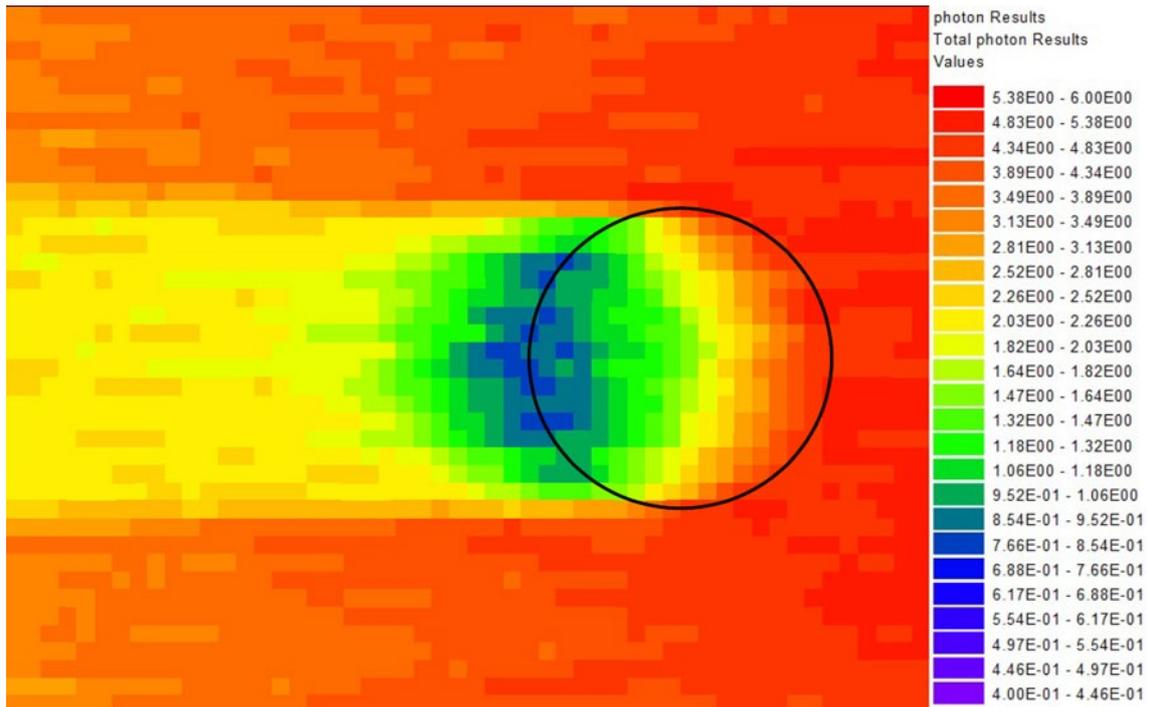


図 6-41 遮へい体近傍の線量率分布図 (遮へい体外部ガラス線量計高さ)

7. 考察

7.1 令和3年度までの試験結果を含む整理

本年度までの光電センサ及び近接センサの照射試験結果を表 7-1、表 7-2、図 7-1 及び図 7-2 に示す。照射線量率、通電状態、入力電圧について、照射試験結果を整理した。ここで、表中及び図中に示す平均集積吸収線量とは、各センサの不具合発生前の平均集積吸収線量である。これは、出力電圧の有意な低下/上昇、もしくは動作確認で正常な動作を確認した時点での集積吸収線量のうち、より低い値を指す。また、図中の誤差範囲は標準偏差を示す。なお、本年度照射試験を行った 5Gy/h かつ入力電圧 24V の近接センサ No.11・13 では照射開始直後から継続的に出力電圧の低下が認められたが、これは不具合とせず、0V まで急激に電圧が低下した時点の不具合発生の照射時間及び集積吸収線量とした。

光電センサでは、5Gy/h (非通電)、50Gy/h (通電・24V)、100Gy/h (通電・24V)、5Gy/h (通電・12V) に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量はそれぞれ 822Gy、343Gy、283Gy、617Gy であった。

近接センサでは、5Gy/h (非通電)、50Gy/h (通電・24V)、100Gy/h (通電・24V)、5Gy/h (通電・12V)、5Gy/h (通電・24V) に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量はそれぞれ 684Gy、1166Gy、1207Gy、789Gy、1289Gy であった。ここで、非通電の照射試験結果について、近 5-1 は、20Gy 毎の動作確認前に不具合が発生している。738Gy 時点の動作確認で検知異常が発生したが、直前の動作確認は 419Gy であるため、不具合発生前の集積吸収線量は同じ試験条件のその他のセンサより小さくなっている。

表 7-1 光電センサの照射試験結果（不具合発生前の時点）

No.	通電状態	入力電圧 [V]	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
光 5-1	非通電	24	4.63	177.53	822<	822
光 5-2				177.53	822<	
光 5-3				177.53	822<	
光 50-1	通電	24	48.5	7.06	343	343 (SD ^{※1} :6)
光 50-2			49.9	6.75	337	
光 50-3			51.6	6.80	351	
光 100-1	通電	24	102.1	2.55	260	283 (SD ^{※1} :18)
光 100-2			112.2	2.48	278	
光 100-3			116.1	2.54	295	
光 100-4			116.0	2.56	297	
光 100-5			106.5	2.59	276	
光 100-6			97.4	2.60	253	
光 100-7			102.1	2.61	266	
光 100-8			112.2	2.62	294	
光 100-9			116.1	2.62	304	
光 100-10			116.0	2.62	304	
1	通電	12	4.38	137.2	600	617 (SD ^{※1} :14)
2			4.42	141.2	624	
3			4.43	141.2	625	
4			4.49	141.2	634	
5			4.45	137.2	611	
6			4.38	141.2	618	
7			4.42	133.2	589	
8			4.43	141.2	625	
9			4.49	141.2	634	
10			4.45	137.2	611	

※1 SD : 標準偏差

表 7-2 近接センサの照射試験結果（不具合発生前の時点）

No.	通電状態	入力電圧 [V]	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量[Gy]	平均集積吸収線量[Gy]
近 5-1	非通電	24	4.63	90.60	419 ^{*1}	684 (SD ^{*4} :188)
近 5-2				176.40	817	
近 5-3				176.40	817	
近 50-1	通電	24	48.5	24.00	1165	1166 (SD ^{*4} :42)
近 50-2				24.40	1217	
近 50-3				21.60	1115	
近 100-1	通電	24	48.5	102.1	1082	1207 (SD ^{*4} :182)
近 100-2				112.2	1482	
近 100-3				116.1	1265	
近 100-4				116.0	1485	
近 100-5				106.5	1385	
近 100-6				102.1	1143	
近 100-7				112.2	1010	
近 100-8				116.1	928	
近 100-9				116.0	1160	
近 100-10				106.5	1129	
1	通電	12	4.38	160.4 ^{*2}	702 ^{>}	789 ^{*3} (SD ^{*4} :78)
2				172.4	762	
3				168.3	745	
4				166.4	747	
5				166.4	741	
6				160.4 ^{*2}	702 ^{>}	
7				172.4	762	
8				160.4 ^{*2}	710 ^{>}	
9				217.6	977	
10				176.3	785	
11	通電	24	4.43	322.2	1426 ^{<}	1289 (SD ^{*4} :209)
12				322.2	1447 ^{<}	
13				223.3	994	

※1 20Gy 毎の動作確認前に正常に動作しなくなったため、他の 2 台のセンサより集積吸収線量が小さい。

※2 照射開始後初めての動作確認で検知状態から非検知時にした時、非検知時の出力電圧が正常な値まで低下しないことを確認した。

※3 平均集積吸収線量は No.1,6,8 以外の値から算出した。

※4 SD : 標準偏差

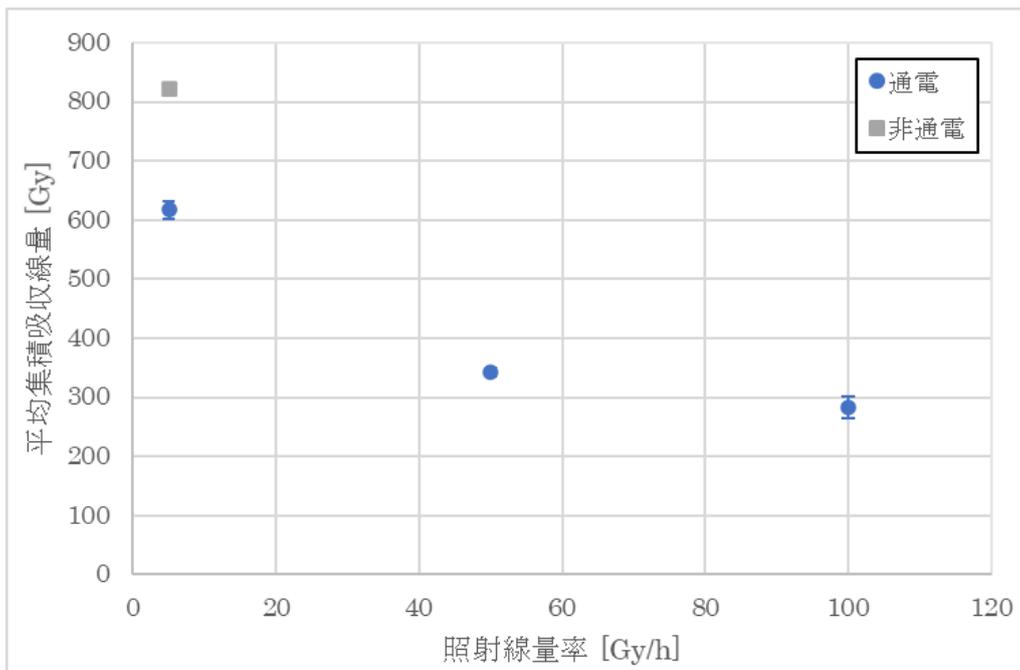


図 7-1 光电センサ不具合発生前の平均集積吸収線量

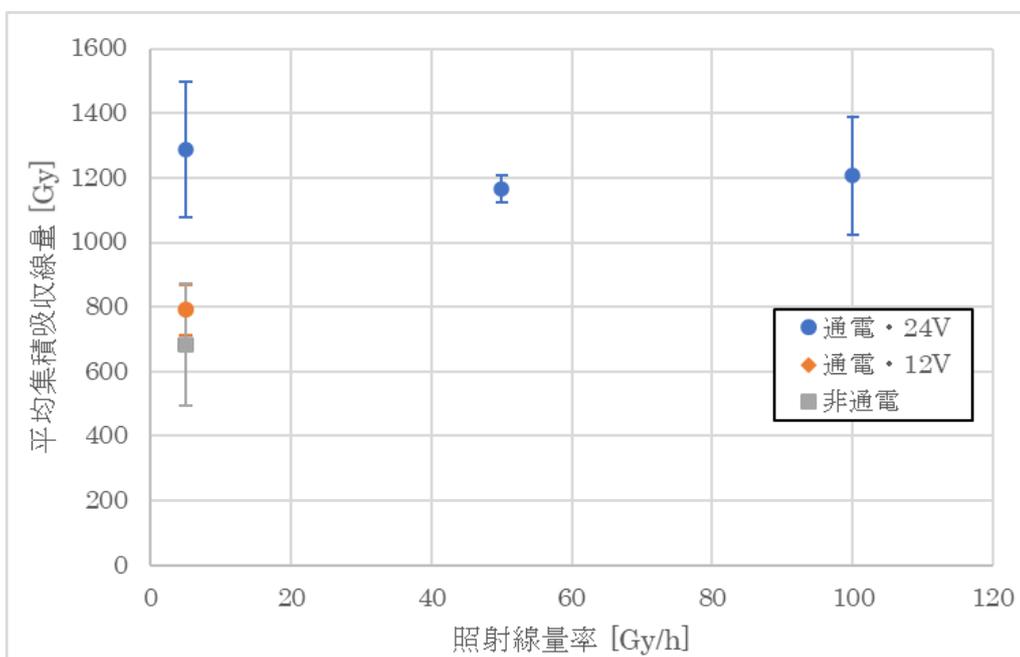


図 7-2 近接センサ不具合発生前の平均集積吸収線量

7.2 照射線量率による影響

光電センサ及び近接センサの照射線量率の耐放射線性への影響を表 7-3 及び表 7-4 に示す。

光電センサでは、通電状態で照射試験を実施した 5Gy/h、50Gy/h、100Gy/h の照射線量率に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量はそれぞれ 617Gy、343Gy、283Gy であった。

一般に、電子機器は照射線量率が高いほど耐放射線性が低下する傾向があり⁶⁾、今回の照射試験でも 50Gy/h 及び 100Gy/h の高放射線量率の場合の不具合発生前の平均集積吸収線量と比較して、5Gy/h の低線量率の場合の不具合発生前の平均集積吸収線量が大きくなることが確認された。5Gy/h・100Gy/h の照射線量率の範囲では、光電センサの照射線量率による耐放射線性への影響は一般的な傾向と一致している。しかし、5Gy/h は 12V、50Gy/h 及び 100Gy/h は 24V と入力電圧が異なっており、入力電圧の影響評価も含め追加データの取得及び評価を行う必要がある。

近接センサでは、24V の入力電圧かつ通電状態で照射試験を実施した 5Gy/h、50Gy/h、100Gy/h に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量はそれぞれ 1289Gy、1166Gy、1207Gy であった。本年度の試験結果では、集積吸収線量のばらつきも考慮すると照射線量率の耐放射線性への影響はみられなかった。ただし、5Gy/h で試験を行った光電センサに関しては、3 台のうち 2 台は不具合が発生しておらず、不具合発生に至る集積吸収線量を過小評価している可能性がある。5Gy/h・100Gy/h の照射線量率の範囲では、近接センサは照射線量率の耐放射線性への影響が一般的な傾向と異なっていたため、今後、より長期間のデータを取得する必要がある。

表 7-3 光電センサの照射線量率の影響評価

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	不具合発生前の 集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
1	4.38	137.2	600	617 (SD ^{*1} :14)
2	4.42	141.2	624	
3	4.43	141.2	625	
4	4.49	141.2	634	
5	4.45	137.2	611	
6	4.38	141.2	618	
7	4.42	133.2	589	
8	4.43	141.2	625	
9	4.49	141.2	634	
10	4.45	137.2	611	
光 50-1	48.5	7.06	343	343 (SD ^{*1} :6)
光 50-2	49.9	6.75	337	
光 50-3	51.6	6.80	351	
光 100-1	102.1	2.55	260	283 (SD ^{*1} :18)
光 100-2	112.2	2.48	278	
光 100-3	116.1	2.54	295	
光 100-4	116.0	2.56	297	
光 100-5	106.5	2.59	276	
光 100-6	97.4	2.60	253	
光 100-7	102.1	2.61	266	
光 100-8	112.2	2.62	294	
光 100-9	116.1	2.62	304	
光 100-10	116.0	2.62	304	

※1 SD : 標準偏差

表 7-4 近接センサの照射線量率の影響評価

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	不具合発生前の 集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
11	4.43	322.2	1426<	1289 (SD ^{※1} :209)
12	4.49	322.2	1447<	
13	4.45	223.3	994	
近 50-1	48.5	24.00	1165	1166 (SD ^{※1} :42)
近 50-2	49.9	24.40	1217	
近 50-3	51.6	21.60	1115	
近 100-1	102.1	10.60	1082	1207 (SD ^{※1} :182)
近 100-2	112.2	13.20	1482	
近 100-3	116.1	10.90	1265	
近 100-4	116.0	12.80	1485	
近 100-5	106.5	13.00	1385	
近 100-6	102.1	11.20	1143	
近 100-7	112.2	9.00	1010	
近 100-8	116.1	8.00	928	
近 100-9	116.0	10.00	1160	
近 100-10	106.5	10.60	1129	

※1 SD : 標準偏差

7.3 通電状態による影響

光電センサ及び近接センサの通電状態の耐放射線性への影響を表 7-5 及び表 7-6 に示す。

光電センサでは、5Gy/h で照射試験を実施した非通電状態、通電状態に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量はそれぞれ 822Gy、617Gy であった。

通電状態では出力電圧の有意な低下/上昇もしくは検知状態の異常によって、センサの不具合の発生を確認したが、非通電状態の試験では出力電圧の連続記録が行えないため、動作確認によってセンサの検知状態を確認し、故障の判断を行った。

通電状態で照射を実施した場合、非通電状態で照射を実施した場合と比べて小さい集積吸収線量で光電センサが故障することが確認された。一般に、電子機器は非通電状態と比べて通電状態の方が、耐放射線性が低下する^[6]。今回の照射試験でも同様の傾向が認められ、通電状態では 617Gy で光電センサに不具合が発生し、非通電状態では少なくとも 822Gy までセンサが正常に動作することが確認された。

また、令和 2 年度のセンサ類の故障原因調査^[4] から、光電センサでは放射線照射によって LED 素子のボンディングワイヤもしくは電源回路のトランジスタ及びダイオードに放射線損傷が生じると考えられた。こうした半導体素子への放射線影響として、電子正孔対生成による素子の特性劣化や故障がある^[7]。正孔は半導体中の酸化膜に補足され、しきい値電圧を変化させる。また、素子間領域に蓄積し、漏れ電流の発生を増加させる。

光電センサでは漏れ電流によって損傷が発生している可能性がある。照射試験対象の光電センサは LED、フォトダイオード及び制御回路が一体となっているため、放射線照射によって LED に生じた突発的なサージによって制御回路等の他部品に影響を与える。一般に、LED では出力制御のためのトランジスタを有しており、放射線照射によってトランジスタの漏れ電流が増加する。その後、漏れ電流の増加に伴い LED 素子の温度が上昇し、漏れ電流が著しく増加する熱暴走が発生する。これは通電状態で発生し、LED の故障の原因となることが知られている^[8]。今回の照射試験結果は、非通電状態に比べ、通電状態の方が故障するまでの集積吸収線量が小さくなり耐放射線性が低下していることが確認され、一般的な傾向と一致する。

近接センサでは、5Gy/h かつ入力電圧 24V で照射試験を実施した非通電状態、通電状態に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量はそれぞれ 684Gy、1289Gy であった。

通電状態で照射を実施した場合、非通電状態で照射を実施した場合と比べて正常な動作を確認した最大集積吸収線量が大きくなっていることが分かり、大きな集積吸収線量で近接センサが故障することが確認された。一方で、5Gy/h かつ 12V の通電状態で行った照射試験結果では、不具合発生前の集積吸収線量は 789Gy であった。誤差を考慮すると、これは非通電状態の照射試験結果と有意な差がないと考えられ、通電状態による耐放射線性への影響が一般的な傾向と異なることが確認された。近接センサでは通電状態と比較して、入力電圧による耐放射線性への影響が大きいと考えられる。

また、令和 2 年度のセンサ類の故障原因調査^[4] から、近接センサでは放射線照射によって制御回路に放射線損傷が生じ、発振回路、発振状態検出回路、出力回路が一体となったハイブリット IC のボンディングワイヤが破断していることが確認された。また、近接センサは光電センサで放射線損傷が生じていた LED が無く、制御回路への放射線損傷の原理及びその影響が異なると考

えられる。

さらに、通電状態の試験結果のうち No.11,12 は故障していないため、過小評価になっていることにも注意が必要である。

表 7-5 光電センサの通電状態の影響評価

No.	通電状態	照射時間 [h]	不具合発生前の 集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
光 5-1	非通電	177.53	822<	822
光 5-2		177.53	822<	
光 5-3		177.53	822<	
1	通電	137.2	600	617 (SD ^{※1} :14)
2		141.2	624	
3		141.2	625	
4		141.2	634	
5		137.2	611	
6		141.2	618	
7		133.2	589	
8		141.2	625	
9		141.2	634	
10		137.2	611	

※1 SD : 標準偏差

表 7-6 近接センサの通電状態の影響評価

No.	通電状態	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	不具合発生前の 集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
近 5-1	非通電	24	90.60	419 ^{※1}	684 (SD ^{※4} :188)
近 5-2			176.40	817	
近 5-3			176.40	817	
11	通電	24	322.2	1426<	1289 (SD ^{※4} :209)
12			322.2	1447<	
13			223.3	994	
1	通電	12	160.4 ^{>※2}	702>	789 ^{※3} (SD ^{※4} :78)
2			172.4	762	
3			168.3	745	
4			166.4	747	
5			166.4	741	
6			160.4 ^{>※2}	702>	
7			172.4	762	
8			160.4 ^{>※2}	710>	
9			217.6	977	
10			176.3	785	

※1 20Gy 毎の動作確認前に正常に動作しなくなったため、他の 2 台のセンサより集積吸収線量が小さい。

※2 照射開始後初めての動作確認で検知状態から非検知時にした時、非検知時の出力電圧が正常な値まで低下しないことを確認した。

※3 平均集積吸収線量は No.1,6,8 以外の値から算出した。

※4 SD : 標準偏差

7.4 入力電圧による影響

光電センサ及び近接センサの入力電圧の耐放射線性への影響を表 7-7 及び表 7-8 に示す。

通電状態で行った 5Gy/h の試験のみ入力電圧が 12V であり、24V で試験を行った 50Gy/h 及び 100Gy/h の試験と比較して、不具合発生前の平均集積吸収線量が大きくなることが確認された。このとき、不具合発生前の集積吸収線量はそれぞれ 617Gy、343Gy、283Gy である。しかし、この試験結果は 7.2 項及び 7.3 項で考察したように照射線量率及び通電状態の影響があると考えられるため、今後、低線量率領域での 24V の通電試験、もしくは高線量率領域での 12V の通電状態で対照試験を実施することによって、光電センサにおける入力電圧の耐放射線性への影響を確認する必要がある。

近接センサについて、通電状態で行った 5Gy/h の試験では、入力電圧が 12V 及び 24V の場合の不具合発生前の平均集積吸収線量は、それぞれ 789Gy、1289Gy である。また、24V で試験を行った 50Gy/h 及び 100Gy/h の不具合発生前の平均集積吸収線量は、それぞれ 1166Gy、1207Gy である。このように、入力電圧が高い 24V の方が不具合発生前の平均集積吸収線量が多い。本年度、照射試験を行った近接センサはトランジスタ出力であり、ゲート電圧がしきい値電圧を超えた時、検知状態となる。トランジスタにガンマ線を照射するとトータルドーズ効果によって、しきい値電圧が低下し、さらに照射線量が増加すると逆にしきい値電圧が上昇することが分かっている^{[9] [10] [11]}。放射線照射によって生じた電子正孔対の一部は再結合し、再結合されなかったキャリアのうち、正孔に比べて電子は移動度が大きいため、微小な電界でも電極等に移動する。一方で、移動度の小さい正孔は酸化膜中をゆっくり移動し、酸化膜界面の正孔捕獲中心に補足され、しきい値電圧が低下する。さらに、n チャンネルトランジスタでは、照射量が多くなると補足された正孔により界面準位が増加し、しきい値電圧が増加する^{[7] [10]}。

本試験においても、故障時に検知状態から非検知状態にしても、出力電圧が低下しなくなることが確認されており、しきい値電圧が低下し、非検知状態にならなくなっていると考えられる。集積吸収線量が同じ場合、放射線照射による電子正孔対生成のイベント数も同じになり、しきい値電圧の低下も同じになると考えられる。また、しきい値電圧は出力電圧に依存するため^[11]、出力電圧が大きいほどしきい値も高くなる。従って、入力電圧が大きいほどしきい値が高くなり、結果として検知状態から非検知状態にならなくなる検知異常の発生頻度が低下し、耐放射線性が高くなっていると考えられる。さらに、集積吸収線量が大きくなると、界面準位が上昇し、しきい値は上昇するため、漏れ電流による突発的なサージによる検知時の出力電圧低下が発生し、故障していると考えられる。

表 7-7 光電センサの入力電圧の影響評価

No.	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	不具合発生前の 集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
1	12	137.2	600	617 (SD ^{*1} :14)
2		141.2	624	
3		141.2	625	
4		141.2	634	
5		137.2	611	
6		141.2	618	
7		133.2	589	
8		141.2	625	
9		141.2	634	
10		137.2	611	
光 50-1	24	7.06	343	343 (SD ^{*1} :6)
光 50-2		6.75	337	
光 50-3		6.80	351	
光 100-1	24	2.55	260	283 (SD ^{*1} :18)
光 100-2		2.48	278	
光 100-3		2.54	295	
光 100-4		2.56	297	
光 100-5		2.59	276	
光 100-6		2.60	253	
光 100-7		2.61	266	
光 100-8		2.62	294	
光 100-9		2.62	304	
光 100-10		2.62	304	

※1 SD：標準偏差

表 7-8 近接センサの入力電圧の影響評価

No.	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	不具合発生前の 集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
1	12	160.4> ^{※1}	702>	789 ^{※2} (SD ^{※3} :78)
2		172.4	762	
3		168.3	745	
4		166.4	747	
5		166.4	741	
6		160.4> ^{※1}	702>	
7		172.4	762	
8		160.4> ^{※1}	710>	
9		217.6	977	
10		176.3	785	
11	24	322.2	1426<	1289 (SD ^{※3} :209)
12		322.2	1447<	
13		223.3	994	

※1 照射開始後初めての動作確認で検知状態から非検知時にした時、非検知時の出力電圧が正常な値まで低下しないことを確認した。

※2 平均集積吸収線量は No.1,6,8 以外の値から算出した。

※3 SD : 標準偏差

7.5 遮へい解析と照射試験結果の比較

線源の規格化に関して、規格化線源強度を用いて評価した高さ方向の線量率分布は測定値と比較して約 5%以内とよく一致した結果となり、線源強度及び照射線量率の高さ分布をよく再現できていると考えられる。

今回の 5Gy/h の試験条件では、カスタマイズした光電センサは照射開始後約 150 時間で急激な出力電圧の低下が発生し、故障が発生している。このとき、センサを設置した位置での遮へい体外部の照射線量率を用いて計算したみなし集積吸収線量は 667Gy となる。一方、カスタマイズせずに照射を行った光電センサが故障した集積吸収線量は 701Gy であり、誤差を考慮すると本年度の試験条件では、カスタマイズの有無による耐放射線性に大きな違いはみられなかった。特に、体積線源に対して開口部を直面させた場合、条件によっては直接線による影響が大きくなるため、遮へい体による遮へい効果が小さくなっていると考えられる。

ここで、令和 3 年度と同様に DIN 規格のストリーミング計算^[12]を用いて、本年度の試験条件における遮へい体内部の光電センサ投光部の照射線量率を簡易計算する。DIN 規格のストリーミング計算の概略図を図 7-3 に示す。ただし、今回は開口部からセンサ投光部までの簡易計算であり、第 1 脚部（一つ目の直角屈曲部）までの計算を実施する。

$$D_1 = D_0 \left(\frac{L_0}{L_0 + L_1} \right)^2 B \left(\frac{W}{T} \right) \quad (1)$$

ただし、以下とする。

D_0 : 遮へい体入口 (P_0) での照射線量率 (遮へい体無しでの照射線量率と同等とする)

D_1 : センサ投光部 (P_1) での照射線量率

L_0 : 点線源から遮へい体入口までの距離 (115.75cm)

L_1 : 遮へい体入口からセンサ投光部までの距離 (3.25cm)

$B(W/T)$: 補正係数 (安全側として 1.5)

このとき式(1) は $D_1 = 1.42D_0$ となる。

次に、体積線源の影響を考える。実際の照射試験では、点線源ではなく体積線源のため、線源位置によって、遮へい体開口部の照射面積が異なり、開口部での散乱 (反射) の寄与が異なることが考えられる。

遮へい体開口部 (1.3cm×2cm : 投影面積 2.6cm²) を、体積線源 (φ0.97cm×H43.5cm : 投影面積 41.8cm²) に投影した時、開口部の内側は遮へい体開口の全周から散乱 (反射) するが、開口部の外側は遮へい体開口の半周程度から散乱 (反射) する。後者からの影響を 1/2 と仮定すると、散乱の影響は $0.53 (= (2.6\text{cm}^2 \times 1 + (41.8\text{cm}^2 - 2.6\text{cm}^2) \times 1/2) / 41.8\text{cm}^2)$ となる。遮へい体入口での線量率 (D_0) が、遮へい体無しでの線量率と同等とした時、ストリーミングを考慮した線量率は、1.22 倍 ($= (1.42 - 1) \times 0.53 + 1$) となり、センサ投光部の照射線量率は 5.43Gy/h となる。実際に、遮へい解析の結果、センサ投光部の照射線量率は 4.88Gy/h であり、遮へい体が無い場合

の照射線量率の 1.10 倍となっている。ストリーミング計算では保守的な補正係数を用いているため、遮へい解析結果は妥当と考えられる。

遮へい解析の解析値と照射試験による測定値の比較の結果、遮へい体外部では解析値より測定値の方が大きくなり、遮へい体内部では測定値が小さくなった。これは測定に用いたガラス線量計素子の方向特性によると考えられる。ガラス線量計素子には方向特性があり、素子正面からの入射と比較して入射角度が大きい場合、感度が低下する^{[13] [14]}。遮へい体外部では素子正面にあたる線源方向からのガンマ線の入射の寄与が大きいのに対し、遮へい体内部では遮へい体によって散乱されたガンマ線が多方向から入射する。従って、遮へい体内部では解析値と比較して測定値が小さくなっていると考えられる。

また、遮へい体内部の複数の高さについて線量率の遮へい計算を実施したところ、遮へい体と開口部の境界付近では、線量評価高さが 1mm 変化すると照射線量率が 0.3Gy/h 変化することが確認された。遮へい体近傍の高さ方向の照射線量率分布図を図 7-4 に、センサ投光部高さの照射線量率分布図を図 7-5 に示す。

図 7-4 に示すように遮へい体内部に設置したガラス線量計の位置での照射線量率とセンサ投光部の照射線量率は異なっている。しかし、遮へい解析では遮へい体内部の高さによる照射線量率分布も模擬できており、遮へい解析が有効であると考えられる。実際に、遮へい体内部及び外部の照射線量率は解析値と測定値で 20%以内の差異で一致しており、遮へい解析を用いて遮へい体を用いた場合のセンサの照射線量率を評価することが可能だと考えられる。

今後は、遮へい体内部の高さによる照射線量率のばらつきや線源形状、線源特性も考慮したうえで、センサの耐放射線性を評価する必要がある。

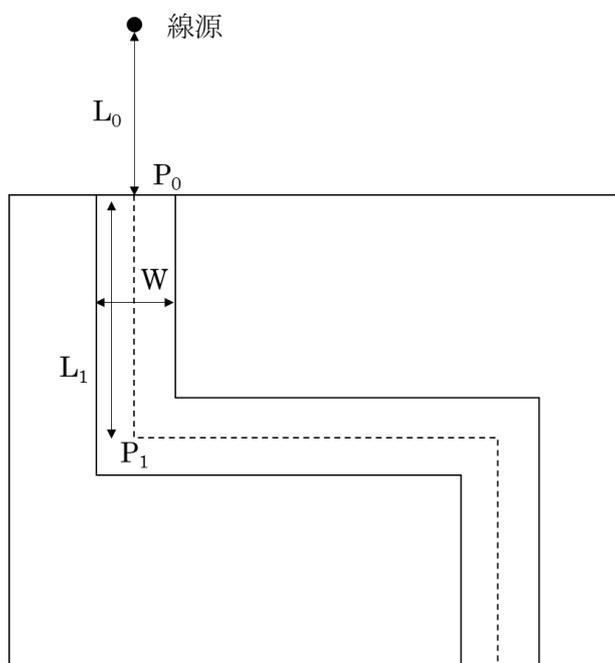


図 7-3 DIN 規格によるストリーミング計算の概略図

(出典：放射線遮蔽ハンドブック基礎編^[12])

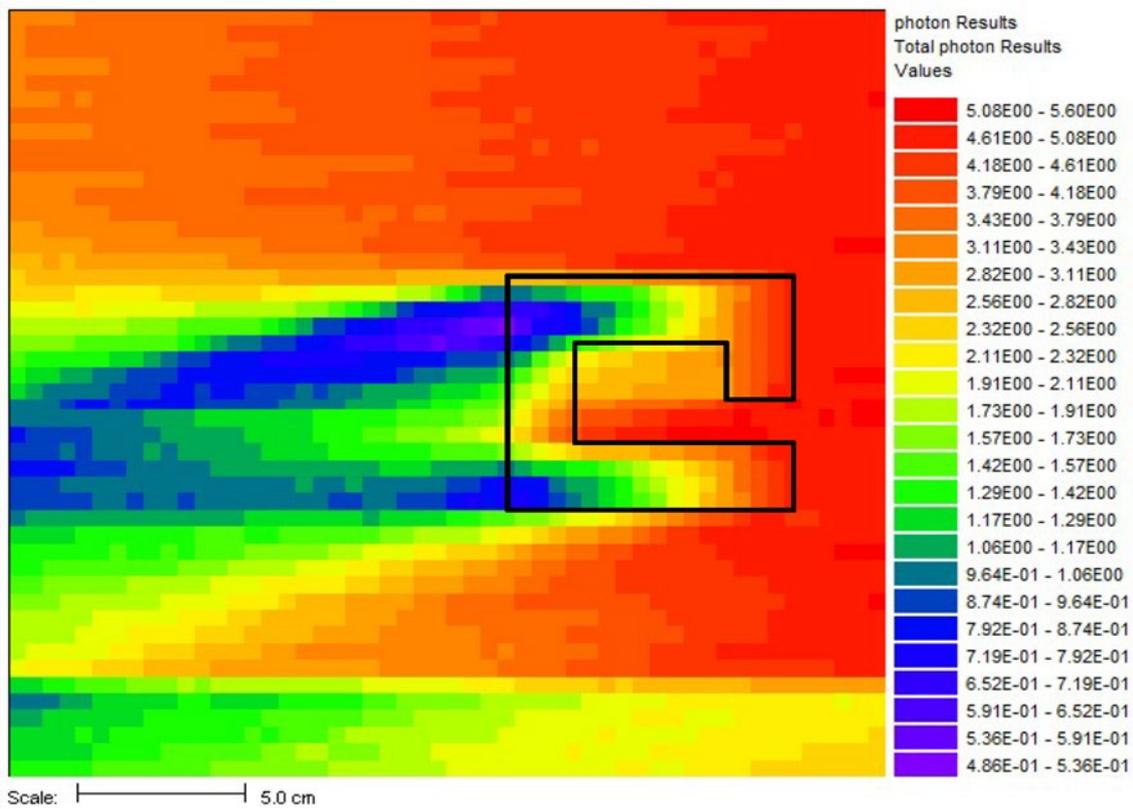


図 7-4 遮へい体近傍の照射線量率分布図（高さ方向）

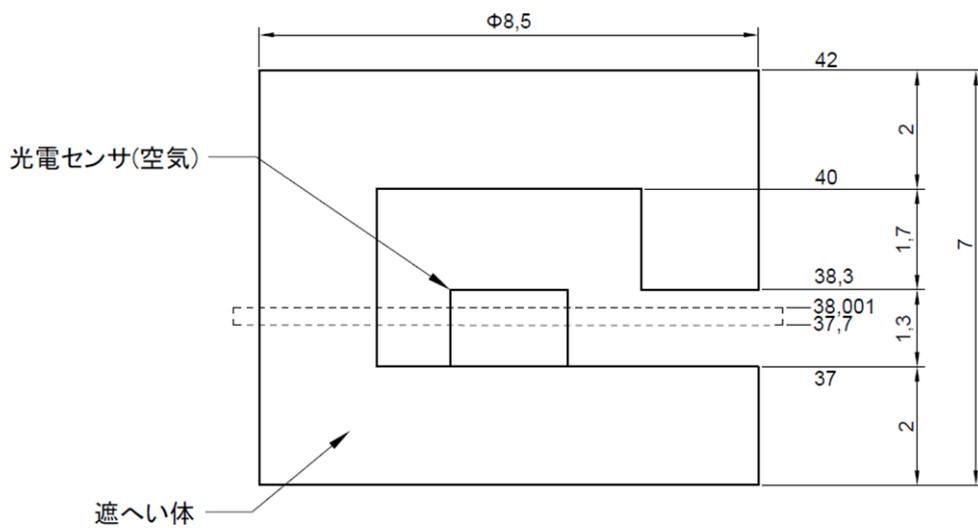
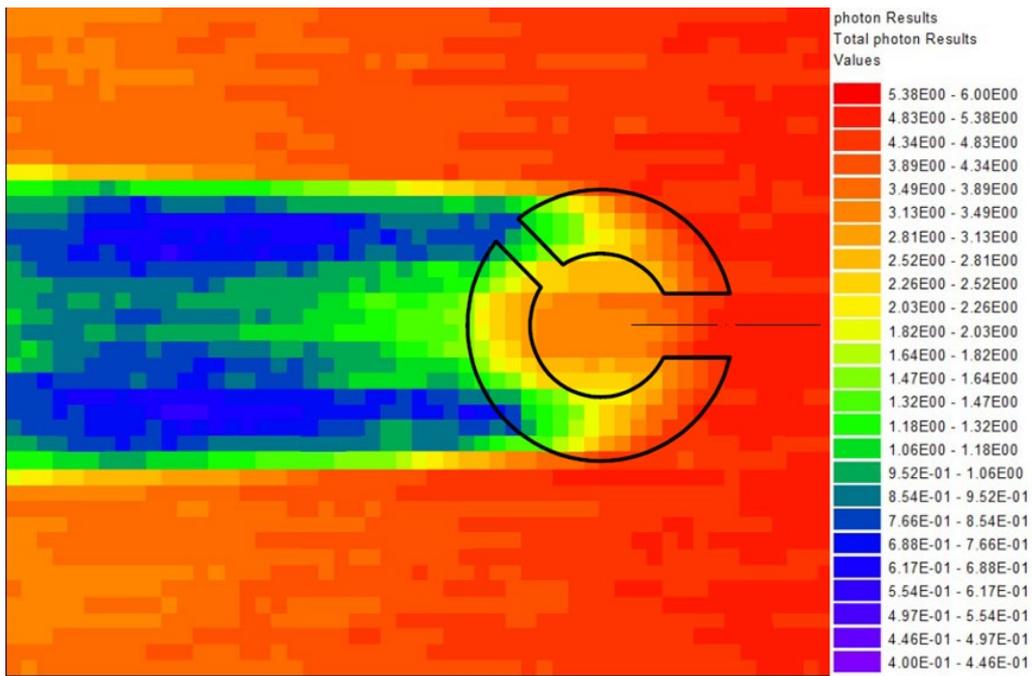


図 7-5 遮へい体近傍の線量率分布図 (センサ投光部高さ)

8. 今後の課題

8.1 高線量率領域における通電状態及び入力電圧の影響評価

本年度までの照射試験結果から、低線量率領域における光電センサの通電状態の耐放射線性への影響及び近接センサの入力電圧の影響を確認した。光電センサでは通電状態で照射した場合、耐放射線性が低下することが確認された。また、近接センサでは 5Gy/h の試験において入力電圧が低い場合、耐放射線性が低下することが確認された。

そこで、高線量率領域においても同様に確認する必要がある。高線量率領域における各センサの入力電圧及び非通電の影響評価のため追加データを取得し、評価する必要がある。

8.2 低線量率領域における通電状態及び入力電圧の影響評価

本年度、近接センサの通電状態で行った 24V の試験では、1400Gy 以上照射した照射試験終了時においても 3 台中 2 台で正常な動作が確認されている。また、令和 3 年度の照射試験においても光電センサの非通電状態の試験はセンサに異常が発生する前に試験終了となった。そこで、低線量率領域における入力電圧及び通電状態を評価するため、照射時間及び集積吸収線量が十分に確保できるよう試験計画を策定し、追加データを取得する必要がある。また、光電センサにおいては、検知時の出力電圧が上昇する前に瞬間的に低下するものも存在した。本年度の照射試験では、データロガーの測定間隔が 10 秒であったため、瞬間的な電圧低下が確認できなかった光電センサでも出力電圧上昇前に電圧低下が発生している可能性もある。出力電圧上昇直前の挙動を確認するために、測定間隔を短くしたうえで照射試験を実施する必要がある。さらに、光電センサについては、低線量率領域における 24V の試験も実施し、入力電圧の耐放射線性への影響を確認する必要がある。

8.3 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得

センサ類の耐放射線性を向上させるために光電センサをカスタマイズし、照射試験を実施したうえで MCNP コードを用いた解析結果との比較評価を実施した。令和 3 年度までの照射試験条件では、照射試験結果と遮へい解析結果が概ね 20%以内で一致することを確認した。本年度も遮へい体外部及び内部で照射試験結果と遮へい解析結果が 20%以内で一致することを確認した。また、遮へい体のカスタマイズに関して、試験条件によって遮へい効果に違いがみられる。遮へい効果の違いは、線源・センサ・遮へい体の配置、照射線量率及び線源形状に由来すると考えられるため、今後は異なる照射試験条件での照射試験の実施、もしくは異なる解析条件での遮へい解析の実施により、耐放射線性データを取得する必要がある。その後、適切な遮へい体のカスタマイズ要件及び手法を検討する必要がある。

9. まとめ

令和4年度は、放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針作成に資するセンサ類の耐放射線性に関する照射データの追加取得、センサ類のカスタマイズ及びその照射データ取得を実施した。

光電センサ及び近接センサを対象として、照射試験により低照射線量率における耐放射線性データを取得した。また、カスタマイズ効果の評価のため、光電センサに対して低照射線量率での照射試験を実施した。

照射線量率の耐放射線性への影響としては、光電センサでは照射線量率が高いほど耐放射線性が低下し、早期にセンサが故障することが確認された。ただし、入力電圧が異なることに注意が必要である。一方で、近接センサでは照射線量率の差異による耐放射線性への有意な影響は確認されなかった。

通電状態の耐放射線性への影響については、光電センサにおける5Gy/hの試験結果から、通電により耐放射線性が低下し、早期に故障することが確認された。一方で、近接センサでは通電状態の差異による耐放射線性への有意な影響は確認されなかった。

入力電圧については、光電センサでは5Gy/h、50Gy/h及び100Gy/hと異なる照射線量率による試験結果であるものの、耐放射線性への有意な影響は確認されなかった。一方で、近接センサでは5Gy/hの試験結果より、入力電圧が高いほど耐放射線性が向上し、不具合の発生する集積吸収線量が増加することが確認された。

カスタマイズしたセンサ類の試験結果より、本年度の試験条件においては、カスタマイズの有無による有意な耐放射線性の違いはみられなかった。一方で、解析値と測定値は20%以内で一致することを確認し、カスタマイズ試験における遮へい解析の有効性を確認した。

また、一般工業品であるセンサ類の使用指針作成に資する照射試験で得られた知見として、センサ類の耐放射線性に対して照射線量率、通電状態、入力電圧が影響する可能性があることが確認された。

照射試験の結果を踏まえ、今後取り組むべき課題として3点が挙げられた。1つ目の課題は、「高線量率領域における通電状態及び入力電圧の影響評価」である。本年度実施した近接センサに対する5Gy/hの照射試験結果より、入力電圧の耐放射線性への影響が確認された。今後は、高線量率領域においても同様の傾向が確認されることを確認し、入力電圧の耐放射線性への影響を評価する必要がある。2つ目の課題は「低線量率領域における通電状態及び入力電圧の影響の追加データ取得」である。センサ類の適用が想定される低線量率領域での各センサの追加データを取得し、通電状態及び入力電圧の耐放射線性への影響を評価する必要がある。3つ目の課題は「カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得」である。本年度実施した照射試験及び遮へい解析の結果、遮へい体内部と外部の照射線量率について、測定値と解析値が20%以内で一致した。カスタマイズ効果の評価するため、照射条件や線源形状を考慮したうえで本年度までと異なる照射試験条件での照射試験、もしくは異なる解析条件での遮へい解析を実施することにより追加データを取得し、適切なカスタマイズ要件及び手法を検討する必要がある。

さらに、令和3年度までの残された課題を踏まえると、非照射時の回復効果による影響や設計で使用する集積吸収線量の上限評価値の設定も今後必要となる。

以上を踏まえて、適切な試験計画を立案し、照射試験によってセンサ類の耐放射線性データを

追加取得すること、また、有識者委員会を設立してセンサ類の耐放射線性の評価、具体的な機器へのセンサ類の適用方法及びその適合性評価を審議しながら検討を進めることで、今後の放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針作成に資することができるものと考えられる。

参考文献

- [1] 福島峰夫ら, 耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備, 動力炉・核燃料開発事業団, 1993.
- [2] 草野譲一 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, JAEA-Review 2008-012, Mar. 2008.
- [3] 瀬口忠男ら 各種高分子材料の耐放射線性 - 実使用環境模擬の劣化評価 -, JAEA-Data/Code 2009-018.
- [4] 令和 2 年度原子力産業基盤強化事業委託費 一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針の整備事業 事業報告書, 神戸製鋼所, 2021.
- [5] 令和 3 年度原子力産業基盤強化事業委託費 一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針の整備事業 事業報告書, 神戸製鋼所, 2022.
- [6] 中山雅ら モニタリング機器の放射線影響に関する検討, JAEA-Review 2019-032.
- [7] 大西一功, 放射線による半導体素子の劣化・故障, 日本信頼性学会誌, 2004, 26(1), 37-45
- [8] Yuji Hosaka et al. Visualization of light-emitting diode lighting damage process in radiation environment by an in situ measurement Japanese Journal of Applied Physics, 61, 2022
- [9] 大島武, 放射線による半導体デバイスへの影響, 応用物理, 2012, 81(3):216-219
- [10] 後川昭雄ら, 耐放射線強化素子研究の現状, 応用物理, 1986, 55(3):225-233
- [11] 千坂治雄ら, MOS 型トランジスターの放射線効果, Radioisotopes, 1970, 19 (5):229-234
- [12] 一般社団法人日本原子力学会「遮蔽ハンドブック」研究専門委員会編, 放射線遮蔽ハンドブック-基礎編-, 2015:248-249
- [13] 白川誠士ら, 蛍光ガラス線量計の基本特性の検討, 医学と生物学, 2011, 155(5):293-298
- [14] 廣澤文香ら, X 線 CT における線量評価を目的とした蛍光ガラス線量計の特性および使用方法の検討, 日本放射線技術学会誌, 2015, 71(1):12-18