

令和5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6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 6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	15
2.4.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	16
(1) 照射試験結果	16
(2) 遮へい解析コードを用いた遮へい評価結果	17
(3) 課題	17
2.5 令和4年度の実施内容	18
2.5.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得	18
(1) 照射試験結果	18
(2) 課題	20
2.5.2 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得	21
(1) 照射試験結果	21

(2) 遮へい解析結果 .....	22
(3) 課題 .....	22
3. 令和5年度の実施内容 .....	23
3.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得 .....	23
3.2 一般産業用工業品の使用指針の作成 .....	23
4. 一般産業用工業品の照射データの追加取得 .....	24
4.1 概要 .....	24
4.2 通電状態及び入力電圧の影響評価のための照射試験条件及び方法 .....	24
4.2.1 照射試験条件 .....	24
(1) 対象センサ .....	25
(2) 照射線量率、照射上限 .....	26
(3) サンプル数 .....	27
4.2.2 照射試験場所 .....	27
4.2.3 照射試験方法 .....	27
(1) センサ配置 .....	27
(2) データ取得 .....	32
4.3 ドローンの照射試験条件及び方法 .....	35
4.3.1 照射試験条件 .....	35
(1) 照射対象 .....	35
(2) 評価対象とする構成部品 .....	36
(3) 照射線量率、照射上限 .....	36
4.3.2 照射試験場所 .....	36
4.3.3 照射試験方法 .....	37
(1) ドローン配置 .....	37
(2) データ取得 .....	39
4.4 照射試験スケジュール .....	41
5. カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得 .....	45
5.1 概要 .....	45
5.2 カスタマイズしたセンサ類の照射試験 .....	45
5.2.1 照射試験条件及び試験方法 .....	45
(1) 対象センサ .....	45
(2) 遮へい体構造 .....	46
(3) 照射試験場所 .....	50
(4) 照射試験条件 .....	50
5.2.2 照射試験方法 .....	51
(1) センサ配置 .....	51
(2) データ取得 .....	53
5.3 遮へい解析コードを用いた遮へい評価 .....	54

5.3.1	解析コード.....	54
5.3.2	計算で使用する密度及び組成.....	54
5.3.3	線量換算係数.....	58
5.3.4	線源条件.....	59
5.3.5	評価位置.....	61
5.3.6	解析モデル.....	63
6.	照射試験結果及び遮へい解析結果.....	67
6.1	一般産業用工業品の追加データ取得.....	67
6.1.1	光電センサ.....	67
	(1) 5Gy/h・24V.....	67
	(2) 100Gy/h・12V.....	80
	(3) 100Gy/h・非通電.....	92
6.1.2	近接センサ.....	95
	(1) 100Gy/h・12V.....	95
	(2) 100Gy/h・非通電.....	107
6.1.3	ドローン.....	108
6.2	カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得.....	109
6.2.1	照射試験結果.....	109
6.2.2	遮へい解析結果.....	112
7.	考察.....	115
7.1	令和4年度までの試験結果を含む整理.....	115
7.2	光電センサ.....	122
	7.2.1 入力電圧の影響.....	122
	7.2.2 通電状態の影響.....	122
7.3	近接センサ.....	122
	7.3.1 入力電圧の影響.....	122
	7.3.2 通電状態の影響.....	123
7.4	ドローン.....	123
7.5	遮へい解析と照射試験結果の比較.....	124
	7.5.1 カスタマイズによる遮へい効果.....	124
	7.5.2 照射方向の影響評価.....	125
	7.5.3 遮へい解析と測定値の比較.....	127
8.	一般産業用工業品の使用指針の作成.....	128
8.1	技術委員会の設立.....	128
	8.1.1 技術委員会の実施目的.....	128
	(1) 機器への適用方法の検討.....	128
	(2) 機器の作動試験及び適合性評価.....	128
	8.1.2 委員会全体工程.....	128

8.2 第一回技術委員会結果概要.....	129
8.2.1 使用指針概要.....	129
8.2.2 照射試験結果.....	129
9. 今後の課題.....	130
9.1 故障原因調査の実施.....	130
9.2 機器への適用性検討、作動試験の実施.....	130
9.3 見直し全体工程.....	131
10. まとめ.....	132
参考文献.....	134

参考資料 1 第一回技術委員会\_配布資料

参考資料 2 第一回技術委員会\_議事録

－ 表 目 次 －

表 2.2-1	令和 2 -7 年度の実施スケジュール.....	8
表 2.3-1	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 2.3-2	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 2.3-3	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 2.3-4	測域センサ損傷時の集積吸収線量（照射線量率 50Gy/h） .....	10
表 2.4-1	光電センサ照射試験結果 .....	11
表 2.4-2	近接センサ照射試験結果 .....	12
表 2.4-3	トルクセンサ照射試験結果 .....	13
表 2.4-4	測域センサ照射試験結果 .....	14
表 2.4-5	カスタマイズした光電センサの照射試験結果 .....	16
表 2.4-6	カスタマイズした測域センサの照射試験結果 .....	16
表 2.4-7	光電センサ（カスタマイズ）の本解析結果 .....	17
表 2.4-8	測域センサ（カスタマイズ）の本解析結果 .....	17
表 2.5-1	光電センサの照射試験結果 .....	18
表 2.5-2	近接センサの照射試験結果 .....	19
表 2.5-3	カスタマイズした光電センサの照射試験結果（照射時間） .....	21
表 2.5-4	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） .....	21
表 2.5-5	遮へい解析結果 .....	22
表 4.2-1	照射試験条件 .....	24
表 4.2-2	光電センサの試験実施状況（不具合発生前の集積吸収線量） .....	26
表 4.2-3	近接センサの試験実施状況（不具合発生前の集積吸収線量） .....	26
表 4.2-4	照射試験データ取り及び動作確認頻度 .....	32
表 4.3-1	ドローンの照射試験条件 .....	35
表 4.3-2	照射対象ドローンの仕様 .....	35
表 4.3-3	ドローン照射試験の動作確認方法 .....	40
表 5.2-1	カスタマイズ照射試験条件及び照射上限 .....	50
表 5.3-1	遮へい解析に用いた物質の密度及び組成 .....	55
表 5.3-2	遮へい解析に用いた換算係数 .....	58
表 5.3-3	Co-60 線源スペクトル .....	59
表 5.3-4	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 .....	59
表 6.1-1	光電センサ（5Gy/h・24V）の故障を確認した集積吸収線量 .....	69
表 6.1-2	光電センサ（5Gy/h・24V）の不具合発生前の集積吸収線量 .....	69
表 6.1-3	光電センサ（100Gy/h・12V）の故障を確認した集積吸収線量 .....	81
表 6.1-4	光電センサ（100Gy/h・12V）の不具合発生前の集積吸収線量 .....	81
表 6.1-5	光電センサ（100Gy/h・非通電）の故障を確認した集積吸収線量 .....	94
表 6.1-6	光電センサ（100Gy/h・非通電）の不具合発生前の集積吸収線量 .....	94

表 6.1-7	近接センサ（100Gy/h・12V）の故障を確認した集積吸収線量.....	96
表 6.1-8	近接センサ（100Gy/h・12V）の不具合発生前の集積吸収線量.....	97
表 6.1-9	近接センサ（100Gy/h・非通電）の不具合発生前の集積吸収線量.....	107
表 6.1-10	ドローンの照射試験結果.....	108
表 6.1-11	照射中及び動作確認時の確認結果.....	109
表 6.2-1	測域センサのカスタマイズ試験結果.....	109
表 6.2-2	遮へい解析結果.....	112
表 7.1-1	光電センサ照射試験結果.....	115
表 7.1-2	近接センサ照射試験結果.....	119
表 9.3-1	令和 2 -7 年度の見直し全体工程.....	131

－ 図 目 次 －

図 1.1-1	従来のサプライチェーン	2
図 1.1-2	使用指針を活用したサプライチェーン	2
図 2.1-1	指針作成までの業務フロー	6
図 4.2-1	光電センサ概略図	25
図 4.2-2	近接センサ概略図	25
図 4.2-3	光電センサ・近接センサ取付け図	28
図 4.2-4	センサ配置図（光電センサ 100Gy/h）	29
図 4.2-5	照射試験状況写真（光電センサ 100Gy/h）	29
図 4.2-6	センサ配置図（近接センサ 100Gy/h）	30
図 4.2-7	照射試験状況写真（近接センサ 100Gy/h）	30
図 4.2-8	センサ配置図（光電センサ 5Gy/h）	31
図 4.2-9	照射試験状況写真（光電センサ 5Gy/h）	31
図 4.2-10	光電センサの試験用電気回路図	33
図 4.2-11	近接センサの試験用電気回路図	34
図 4.3-1	照射対象ドローンの外観	36
図 4.3-2	ドローン照射試験配置図	37
図 4.3-3	ドローン及びチャート付きカバーの様子	38
図 4.3-4	ドローンの照射試験時の様子	38
図 4.3-5	ドローンのシステム構成図	39
図 4.3-6	ドローンの制御システム構成図	39
図 4.4-1	照射試験スケジュール	42
図 5.2-1	測域センサ概略図	45
図 5.2-2	遮へい体構造図	46
図 5.2-3	追加遮へい体 A 構造図	47
図 5.2-4	追加遮へい体 B 構造図	48
図 5.2-5	遮へい体（写真）	49
図 5.2-6	遮へい体＋追加遮へい体 A（写真）	49
図 5.2-7	遮へい体＋追加遮へい体 B（写真）	50
図 5.2-8	センサ配置図（光電センサ 5Gy/h 及びカスタマイズ試験）	52
図 5.2-9	遮へい体構造及び照射方向	52
図 5.2-10	遮へい体の照射位置及び照射方向	53
図 5.2-11	測域センサの試験用電気回路図	53
図 5.3-1	線源規格化の解析モデル	60
図 5.3-2	解析モデル（前方から照射）における評価位置（ガラス線量計素子設置位置）	61
図 5.3-3	解析モデル（後方から照射）における評価位置（ガラス線量計素子設置位置）	61
図 5.3-4	解析モデル（上方向から照射）における評価位置（ガラス線量計素子設置位置）	62

図 5.3-5	照射室の解析モデル .....	63
図 5.3-6	遮へい体解析モデル図（前方から照射） .....	64
図 5.3-7	遮へい体解析モデル図（後方から照射） .....	64
図 5.3-8	遮へい体解析モデル図（上方向から照射） .....	65
図 5.3-9	遮へい解析モデル図（全体） .....	66
図 6.1-1	光電 5_24V-1 出力電圧変化.....	70
図 6.1-2	光電 5_24V-1 出力電圧変化（縮小図） .....	70
図 6.1-3	光電 5_24V-2 出力電圧変化.....	71
図 6.1-4	光電 5_24V-2 出力電圧変化（縮小図） .....	71
図 6.1-5	光電 5_24V-3 出力電圧変化.....	72
図 6.1-6	光電 5_24V-3 出力電圧変化（縮小図） .....	72
図 6.1-7	光電 5_24V-4 出力電圧変化.....	73
図 6.1-8	光電 5_24V-4 出力電圧変化（縮小図） .....	73
図 6.1-9	光電 5_24V-5 出力電圧変化.....	74
図 6.1-10	光電 5_24V-5 出力電圧変化（縮小図） .....	74
図 6.1-11	光電 5_24V-6 出力電圧変化.....	75
図 6.1-12	光電 5_24V-6 出力電圧変化（縮小図） .....	75
図 6.1-13	光電 5_24V-7 出力電圧変化.....	76
図 6.1-14	光電 5_24V-7 出力電圧変化（縮小図） .....	76
図 6.1-15	光電 5_24V-8 出力電圧変化.....	77
図 6.1-16	光電 5_24V-8 出力電圧変化（縮小図） .....	77
図 6.1-17	光電 5_24V-9 出力電圧変化.....	78
図 6.1-18	光電 5_24V-9 出力電圧変化（縮小図） .....	78
図 6.1-19	光電 5_24V-10 出力電圧変化.....	79
図 6.1-20	光電 5_24V-10 出力電圧変化（縮小図） .....	79
図 6.1-21	光電 100_12V-1 出力電圧変化.....	82
図 6.1-22	光電 100_12V-1 出力電圧変化（縮小図） .....	82
図 6.1-23	光電 100_12V-2 出力電圧変化.....	83
図 6.1-24	光電 100_12V-2 出力電圧変化（縮小図） .....	83
図 6.1-25	光電 100_12V-3 出力電圧変化.....	84
図 6.1-26	光電 100_12V-3 出力電圧変化（縮小図） .....	84
図 6.1-27	光電 100_12V-4 出力電圧変化.....	85
図 6.1-28	光電 100_12V-4 出力電圧変化（縮小図） .....	85
図 6.1-29	光電 100_12V-5 出力電圧変化.....	86
図 6.1-30	光電 100_12V-5 出力電圧変化（縮小図） .....	86
図 6.1-31	光電 100_12V-6 出力電圧変化.....	87
図 6.1-32	光電 100_12V-6 出力電圧変化（縮小図） .....	87
図 6.1-33	光電 100_12V-7 出力電圧変化.....	88

図 6.1-34	光電 100_12V-7 出力電圧変化 (縮小図)	88
図 6.1-35	光電 100_12V-8 出力電圧変化	89
図 6.1-36	光電 100_12V-8 出力電圧変化 (縮小図)	89
図 6.1-37	光電 100_12V-9 出力電圧変化	90
図 6.1-38	光電 100_12V-9 出力電圧変化 (縮小図)	90
図 6.1-39	光電 100_12V-10 出力電圧変化	91
図 6.1-40	光電 100_12V-10 出力電圧変化 (縮小図)	91
図 6.1-41	近接 100_12V-1 出力電圧変化	98
図 6.1-42	近接 100_12V-1 出力電圧変化 (縮小図)	98
図 6.1-43	近接 100_12V-2 出力電圧変化	99
図 6.1-44	近接 100_12V-2 出力電圧変化 (縮小図)	99
図 6.1-45	近接 100_12V-3 出力電圧変化	100
図 6.1-46	近接 100_12V-3 出力電圧変化 (縮小図)	100
図 6.1-47	近接 100_12V-4 出力電圧変化	101
図 6.1-48	近接 100_12V-4 出力電圧変化 (縮小図)	101
図 6.1-49	近接 100_12V-5 出力電圧変化	102
図 6.1-50	近接 100_12V-5 出力電圧変化 (縮小図)	102
図 6.1-51	近接 100_12V-6 出力電圧変化	103
図 6.1-52	近接 100_12V-7 出力電圧変化	103
図 6.1-53	近接 100_12V-8 出力電圧変化	104
図 6.1-54	近接 100_12V-9 出力電圧変化	105
図 6.1-55	近接 100_12V-9 出力電圧変化 (縮小図)	105
図 6.1-56	近接 100_12V-10 出力電圧変化	106
図 6.2-1	カスタマイズした測域センサのみなし集積吸収線量と距離データ	110
図 6.2-2	カスタマイズした測域センサのみなし集積吸収線量と距離データ (縮小図)	110
図 6.2-3	測域センサの集積吸収線量と距離データ	111
図 6.2-4	照射室の線量率分布図 (遮へい体内部の線量計高さ)	112
図 6.2-5	照射方向: 上方向の線量率分布図 (遮へい体内部線量計高さ)	113
図 6.2-6	照射方向: 前方の線量率分布図 (遮へい体内部線量計高さ)	113
図 6.2-7	照射方向: 後方の線量率分布図 (遮へい体内部線量計高さ)	114
図 7.1-1	光電センサの照射試験結果	118
図 7.1-2	近接センサの照射試験結果	121
図 7.5-1	測域センサの検出部及び照射線量率を計算した領域	124
図 7.5-2	照射方向: 上方向遮へい体近傍の線量率分布図 (断面図)	125
図 7.5-3	照射方向: 前方遮へい体近傍の線量率分布図 (断面図)	126
図 7.5-4	照射方向: 後方遮へい体近傍の線量率分布図 (断面図)	126

## 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 1.1-1 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 1.1-2 参照）。

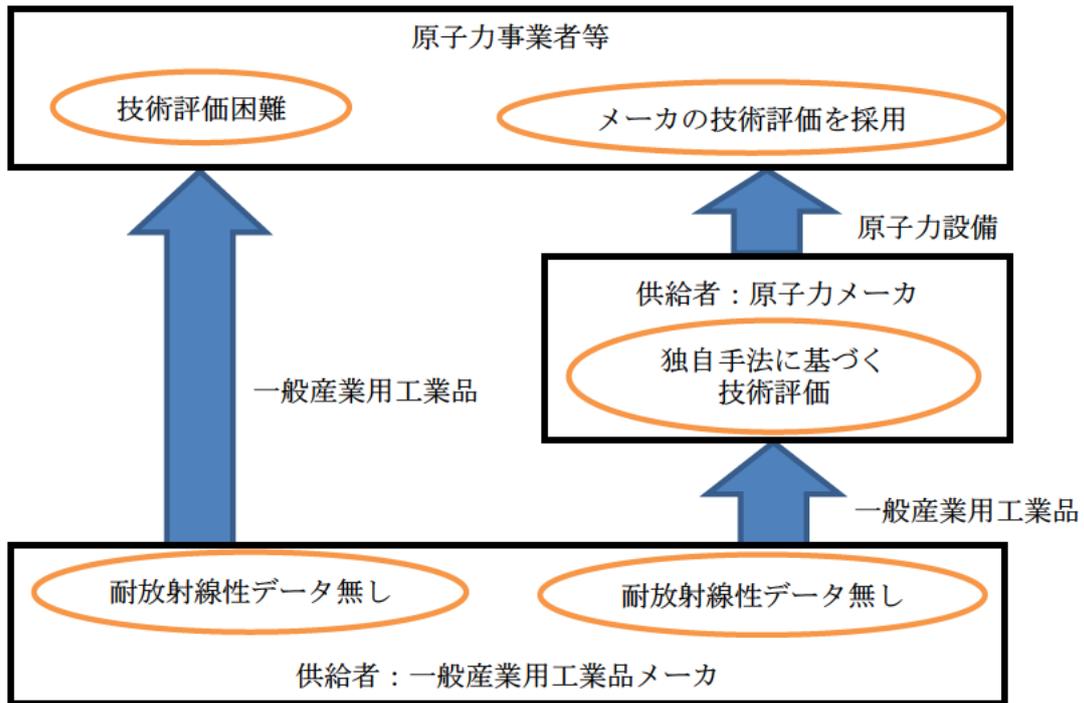


図 1.1-1 従来のサプライチェーン

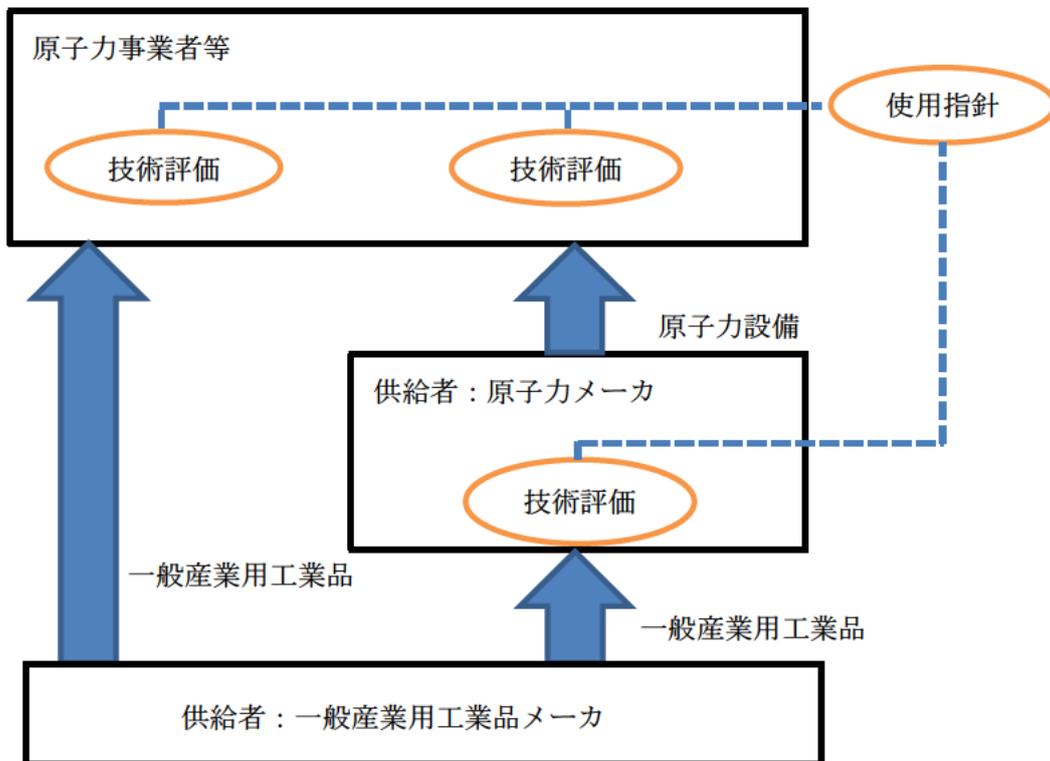


図 1.1-2 使用指針を活用したサプライチェーン

## 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）<sup>[1]</sup>
- 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）<sup>[2]</sup>
- 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）<sup>[3]</sup>

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し、原子力事業者等、原子力メーカー及び一般産業用工業品メーカーの協力体制を構築することで、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

廃棄物取扱施設のような比較的低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 2.1-1 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、6 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 6 ヶ年の実施計画及び令和 5 年度の実施内容について後述する。

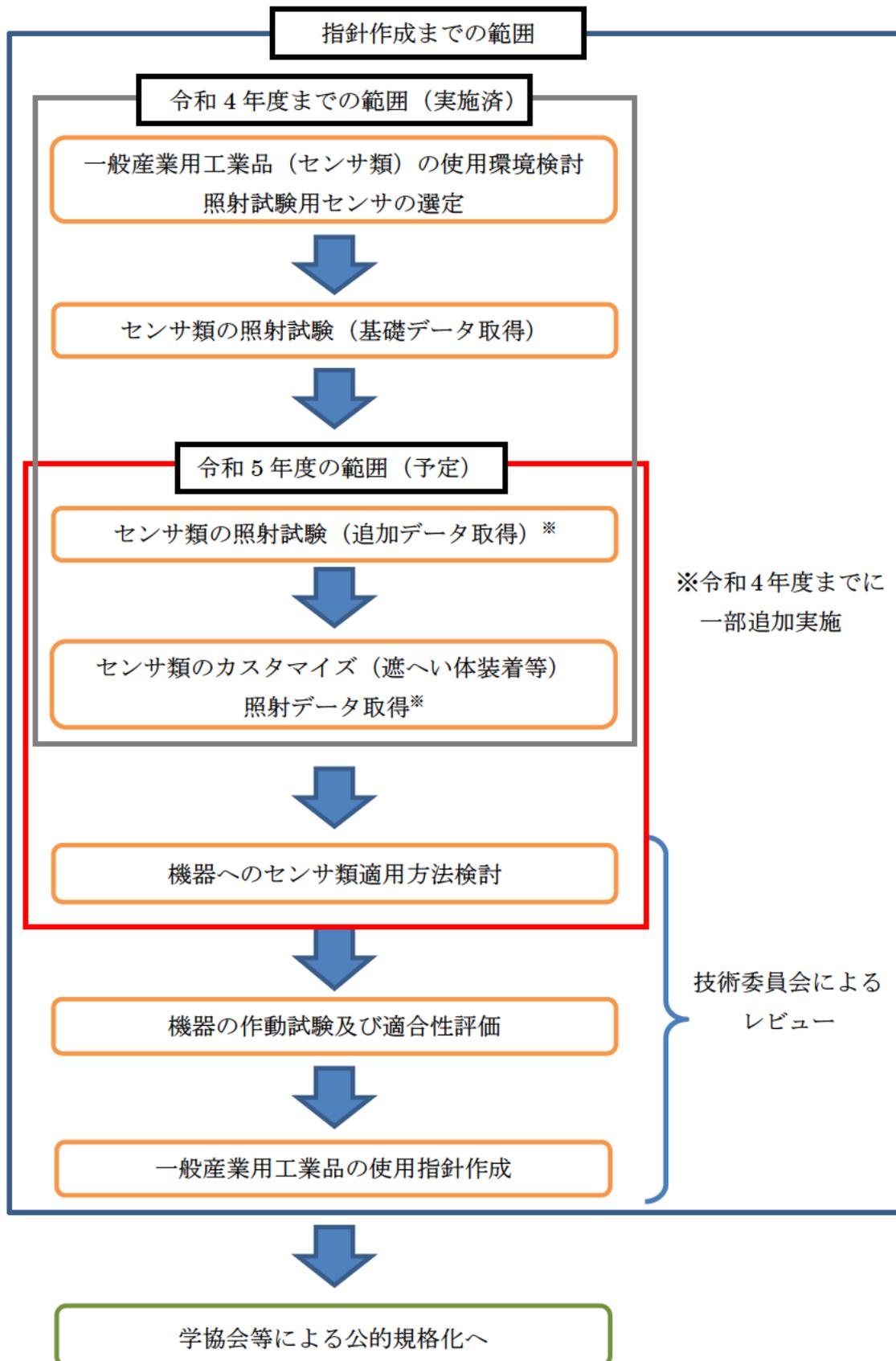


図 2.1-1 指針作成までの業務フロー

## 2.2 6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、6年程度かかるものと考えられる。令和2-7年度の6カ年の実施スケジュールを表2.2-1に示す。

表 2.2-1 令和 2 -7 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	令和 7 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			技術委員会設立▼	●————●		
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、6 カ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<sup>[4]</sup>。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 2.3-1 から表 2.3-4 に示す。

表 2.3-1 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 2.3-2 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 2.3-3 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 2.3-4 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 6 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<sup>5)</sup>。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

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 2.4-1 から表 2.4-4 に示す。

表 2.4-1 光電センサ照射試験結果

No.	照射線量率※ [Gy/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]
		正常な動作を確認した時点		電圧が大きく低下した時点	
光 5-1	4.63	822<	—	343	343 (SD:6)
光 5-2	4.63	822<		337	
光 5-3	4.63	822<		351	
光 50-1	48.5	408	427 (SD:14)	260	283 (SD:18)
光 50-2	49.9	439		278	
光 50-3	51.6	434		295	
光 100-1	102.1	429	428 (SD:25)	297	274 (SD:15)
光 100-2	112.2	427		276	
光 100-3	116.1	441		253	
光 100-4	116.0	441		266	
光 100-5	106.5	405		294	
光 100-6	97.4	409		304	
光 100-7	102.1	490		304	
光 100-8	112.2	427		294	
光 100-9	116.1	418		270	
光 100-10	116.0	395		258	
光 100-TB-1	106.5	426	415 (SD:18)	257	257 (SD:1)
光 100-TB-2	97.4	428		258	
光 100-TB-3	97.4	390		256	
光 100-RL-1	97.4	370	370 (SD:16)	343	343 (SD:6)
光 100-RL-2	97.4	390		337	
光 100-RL-3	97.4	351		351	

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

表 2.4-2 近接センサ照射試験結果

No.	照射線量率 <sup>※1</sup> [Gy/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]
		正常な動作を確認した時点		電圧が大きく低下した時点	
近 5-1	4.63	419 <sup>※2</sup>	684 (SD:188)	— <sup>※3</sup>	—
近 5-2		817		— <sup>※3</sup>	
近 5-3		817		— <sup>※3</sup>	
近 50-1	48.5	1165	1166 (SD:42)	1165 <sup>※4</sup>	1166 (SD:42)
近 50-2	49.9	1217		1217 <sup>※4</sup>	
近 50-3	51.6	1115		1115 <sup>※4</sup>	
近 100-1	102.1	1082	1252 (SD:210)	1082 <sup>※4</sup>	1207 (SD:182)
近 100-2	112.2	1571		1482	
近 100-3	116.1	1462		1265	
近 100-4	116.0	1485		1485 <sup>※4</sup>	
近 100-5	106.5	1385		1385 <sup>※4</sup>	
近 100-6	102.1	1143		1143 <sup>※4</sup>	
近 100-7	112.2	1010		1010 <sup>※4</sup>	
近 100-8	116.1	928		928 <sup>※4</sup>	
近 100-9	116.0	1323		1160	
近 100-10	106.5	1129		1129 <sup>※4</sup>	

※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。

※3 非通電で照射試験を実施したため、出力電圧の連続取得は実施していない。

※4 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集積吸収線量を記入している。

表 2.4-3 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 2.4-4 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。この時、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要性、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要性、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 2.4-5 及び表 2.4-6 に示す。

表 2.4-5 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 <sup>※1</sup> [h]	集積 吸収線量 <sup>※2</sup> [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 <sup>※3</sup> :76.7)	428 (SD <sup>※3</sup> :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 2.4-6 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 <sup>※1</sup> [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 <sup>※2</sup> :35.6)	253 (SD <sup>※2</sup> :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

光電センサ及び測域センサの遮へい解析結果を表 2.4-7 及び表 2.4-8 に示す。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 2.4-7 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 2.4-8 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。

## 2.5 令和4年度の実施内容

令和4年度は、2.4項に示した令和3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<sup>5)</sup><sup>6)</sup>。令和4年度の実施内容の詳細について以下に示す。

### 2.5.1 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

令和4年度に実施した照射データ追加取得のための、光電センサ及び近接センサの照射試験結果を表2.5-1及び表2.5-2に示す。

表 2.5-1 光電センサの照射試験結果

No.	照射線量率 [Gy/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]
		故障した時点		不具合発生前の時点	
1	4.38	618	701 (SD <sup>*1</sup> :148)	600	617 (SD <sup>*1</sup> :14)
2	4.42	659		624	
3	4.43	692		625	
4	4.49	634		634	
5	4.45	629		611	
6	4.38	1122		618	
7	4.42	589		589	
8	4.43	767		625	
9	4.49	670		634	
10	4.45	629		611	

※1 SD : 標準偏差

表 2.5-2 近接センサの照射試験結果

No.	入力 電圧	照射線量率 [Gy/h]	集積 吸収線量 [Gy]	平均 集積 吸収線量 [Gy]	故障時の 様子	集積 吸収線量 [Gy]	平均 集積 吸収線量 [Gy]
1	12	4.38	702> <sup>※1</sup>	802 <sup>※3</sup> (SD <sup>※4</sup> :76)	検知不良	702> <sup>※1</sup>	789 <sup>※3</sup> (SD <sup>※4</sup> :78)
2		4.42	779		検知不良	762	
3		4.43	763		検知不良	745	
4		4.49	756		検知不良	747	
5		4.45	749		検知不良	741	
6		4.38	702> <sup>※1</sup>		検知不良	702> <sup>※1</sup>	
7		4.42	779		検知不良	762	
8		4.43	710> <sup>※1</sup>		検知不良	710> <sup>※1</sup>	
9		4.49	983		出力電圧 低下	977	
10		4.45	802		検知不良	785	
11	24	4.43	1426< <sup>※2</sup>	1012 <sup>※5</sup>	-	1426<	1289 (SD <sup>※4</sup> :209)
12		4.49	1447< <sup>※2</sup>		-	1447<	
13		4.45	1012		出力電圧 低下	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 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。

## (2) 課題

### 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

令和4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通電状態及び入力電圧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。

### 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

令和4年度に通電状態で行った近接センサ24Vの試験では、1400Gy以上照射した照射終了時においても3台中2台で正常な動作が確認された。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照射終了となった。そこで、低線量率領域における通電状態及び入力電圧を評価するため、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。令和4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った。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。

## 2.5.2 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得

### (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。光電センサのカスタマイズ照射試験結果を表 2.5-3 及び表 2.5-4 に示す。

表 2.5-3 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 <sup>※1</sup> [h]	平均照射時間 [h]	【参考】照射時間 <sup>※2</sup> (カスタマイズ無し) [h]
1	140.3	150 (SD <sup>※3</sup> :17)	158 (SD <sup>※3</sup> :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 2.5.1 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 2.5-4 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 <sup>※1</sup> [Gy]	平均 みなし集積 吸収線量 [Gy]	【参考】平均集積 吸収線量 <sup>※2</sup> (カスタマイズ無し) [Gy]
1	4.45	624	667 (SD <sup>※3</sup> :75)	701 (SD <sup>※3</sup> :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 2.5.1 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

## (2) 遮へい解析結果

光電センサの遮へい解析結果を表 2.5-5 に示す。照射試験の測定値と遮へい解析値は概ね 20%以内で一致した。

表 2.5-5 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

## (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。令和 4 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。

### 3. 令和 5 年度の実施内容

#### 3.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得

令和 4 年度の課題として挙げられた通電状態及び入力電圧の耐放射線性への影響評価のため、耐放射線性データを追加取得した。光電センサ、近接センサの令和 4 年度までの照射データを基に、入力電圧・通電状態の評価が実施可能となるように、照射線量率、入力電圧、通電状態等の適切な試験条件を設定した。

また、今後の廃止措置の中で人間が立ち入れないほどの高線量率環境下では、遠隔ロボットによる作業の増加が見込まれる。特に、小型ドローンは狭小な区域での画像診断及び線量率の測定への適用が考えられるため、ドローンに搭載されるセンサを対象に耐放射線性評価を実施した。

さらに、カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得として、測域センサを対象に、令和 3 年度とは異なる照射線量率で照射試験を実施し、遮へい解析の結果との比較評価を行った。また、遮へい解析結果が 20%以内で測定値と一致していることを確認しているため、遮へい解析により、照射方向及び遮へい体構造等の耐放射線性への影響を評価し、効果的な遮へい手法を検討した。

#### 3.2 一般産業用工業品の使用指針の作成

本年度までに取得したセンサ類の照射データ及びカスタマイズしたセンサ類の照射データに基づいて、有識者による技術委員会を設立し、放射線環境下で使用される機器への適用方法の検討を開始した。

#### 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4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なくなった時点までの時間から集積吸収線量を求め、センサ類の耐放射線性データを取得した。

##### 4.2 通電状態及び入力電圧の影響評価のための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。照射試験条件を表 4.2-1 に示す。また、各照射試験条件の詳細について以下に示す。

表 4.2-1 照射試験条件

センサ	試験条件				最大照射時間 [h]	照射上限 <sup>※1</sup> [Gy]
	照射線量率 [Gy/h]	通電状態	電圧 [V]	サンプル数		
光電センサ	5	通電	24	10	166	830
	100	通電	12	10	8.3	830
	100	非通電	-	10	8.3	830
近接センサ	100	通電	12	10	15.8	1580
	100	非通電	-	10	15.8	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4年度までの試験結果より、光電センサでは5Gy/hの照射線量率の試験において、通電状態の耐放射線性への影響が確認された。また、近接センサでは5Gy/hの照射線量率の試験において入力電圧の耐放射線性への影響が確認された。従って、異なる照射線量率の通電状態及び入力電圧による耐放射線性への影響を確認するための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4.2-1に、近接センサの概略図を図4.2-2に示す。

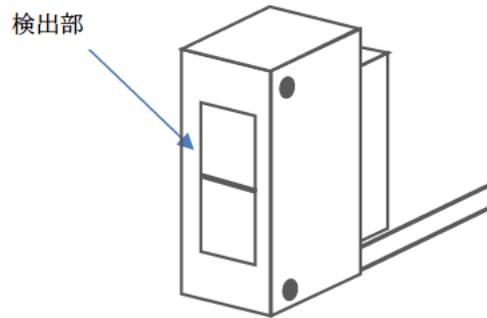


図 4.2-1 光電センサ概略図

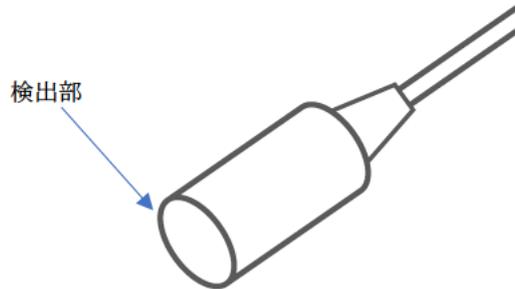


図 4.2-2 近接センサ概略図

(2) 照射線量率、照射上限

令和4年度の試験結果から光電センサ及び近接センサの通電状態及び入力電圧の耐放射線性への影響評価をするため、これまでにデータを取得していない試験条件についてデータを取得することとした。表4.2-2に令和4年度までの光電センサの試験実施状況を、表4.2-3に令和4年度までの近接センサの試験実施状況を示す。

光電センサに対しては100Gy/hの非通電及び12V試験並びに5Gy/hの24V試験、近接センサに対しては100Gy/hの通電及び12Vの試験を行い、耐放射線性を評価することとした。

表 4.2-2 光電センサの試験実施状況（不具合発生前の集積吸収線量）

通電状態 \ 照射線量率	5Gy/h	100Gy/h
非通電	822Gy <sup>※1</sup>	未実施
12V	617Gy (SD <sup>※2</sup> :14)	未実施
24V	未実施	283Gy (SD <sup>※2</sup> :18)

※1 令和3年度に実施した非通電の試験では全てのセンサで不具合が発生する前に照射上限となり照射を終了した。

※2 SD：標準偏差

表 4.2-3 近接センサの試験実施状況（不具合発生前の集積吸収線量）

通電状態 \ 照射線量率	5Gy/h	100Gy/h
非通電	684Gy (SD <sup>※1</sup> :188)	未実施
12V	789Gy (SD <sup>※1</sup> :78)	未実施
24V	1289Gy (SD <sup>※1</sup> :209)	1207Gy (SD <sup>※1</sup> :182)

※1 SD：標準偏差

各センサ類の試験期間は令和4年度までの照射試験結果から正常に動作しなくなるまでの集積吸収線量を予想し、その最大集積吸収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、基本的には連続照射とするが、試験場の都合により連続照射が不可能な場合には、照射中断期間前後の合計照射線量が照射上限と設定した集積吸収線量になるように照射を実施した。

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 4 年度までの試験結果では、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 4 年度までの試験結果では、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の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 年度及び 4 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 5 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サンプル数は 1 条件につき 10 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 4 年度まで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を選定した。

本施設では 2 つの照射棟に合計 6 つの照射室を所有し、約 0.2 Gy/h の低線量率から約 8 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 100Gy/h 及び 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率分布図があらかじめ作成されている。そこで、線量率分布図に基づき目標とする 100Gy/h 及び 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センサを設置して試験を行った。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。しかし、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。従って、照射線量率の高さ依存性を考慮し、センサ類を設置した高さ毎にアラニン線量計を設置し線量測定を行った。その後、測定した集積吸収線量を照射時間で除すことにより照射線量率を求めた。

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、100Gy/hの試験では180mm、5Gy/hの試験では1055mm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4.2-3に示す。

100Gy/hの光電センサの照射試験時のセンサ配置図及び試験状況を図4.2-4及び図4.2-5に、100Gy/hの近接センサの照射試験時のセンサ配置図及び試験状況を図4.2-6及び図4.2-7に、5Gy/hの光電センサの照射試験時のセンサ配置図及び試験状況を図4.2-8及び図4.2-9に示す。なお、5Gy/hの光電センサの照射試験は、試験時間短縮のため、5項に示す測域センサのカスタマイズ試験と同時に実施した。

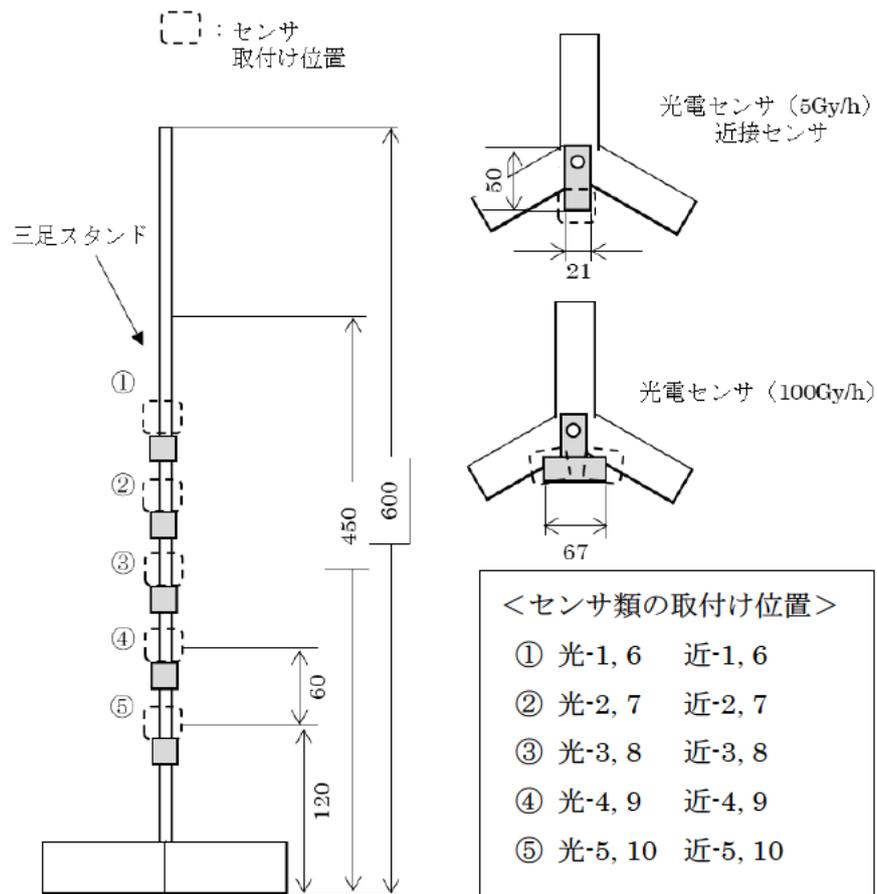


図 4.2-3 光電センサ・近接センサ取付け図

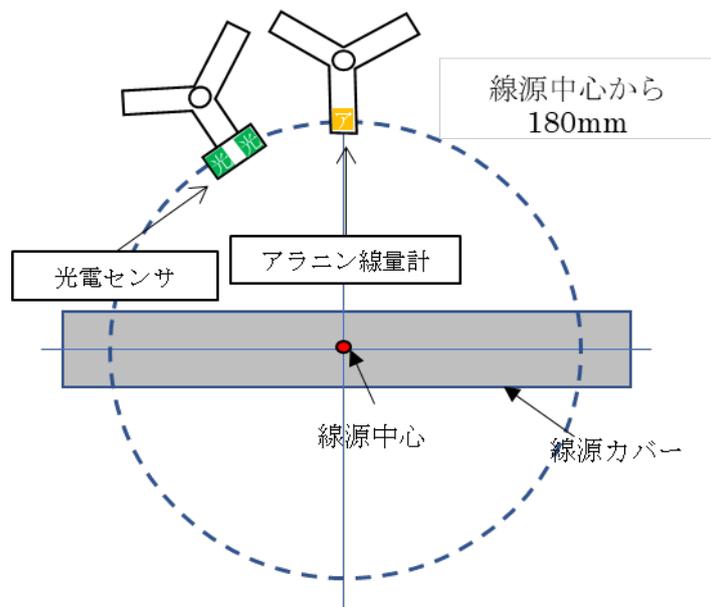


図 4.2-4 センサ配置図 (光電センサ 100Gy/h)

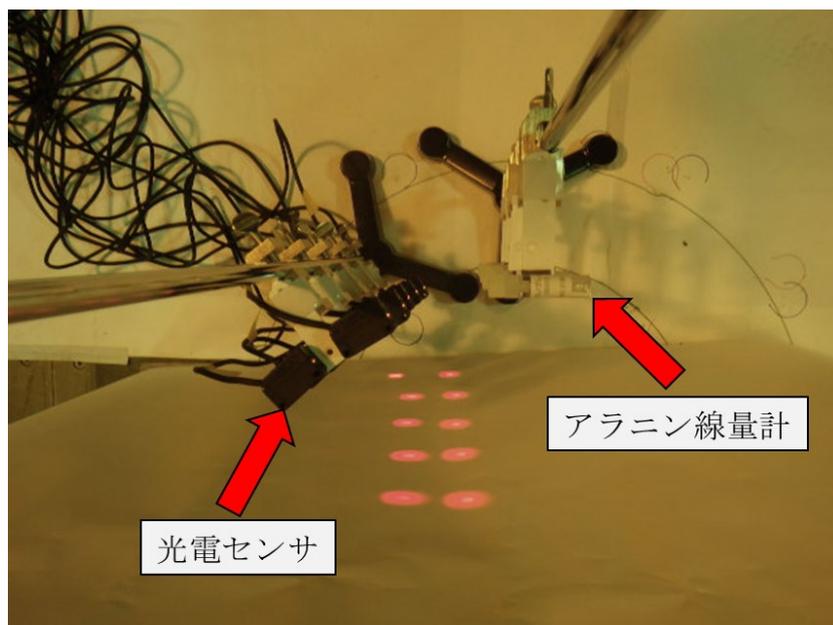


図 4.2-5 照射試験状況写真 (光電センサ 100Gy/h)

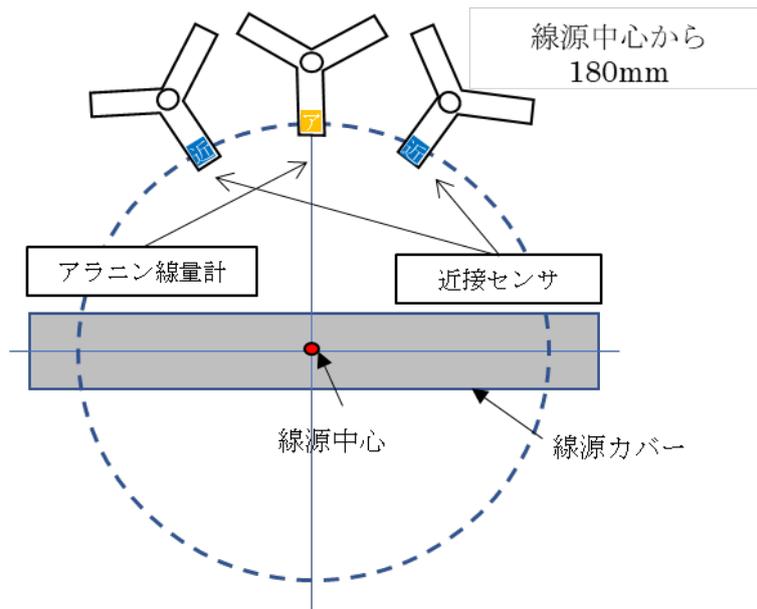


図 4.2-6 センサ配置図 (近接センサ 100Gy/h)

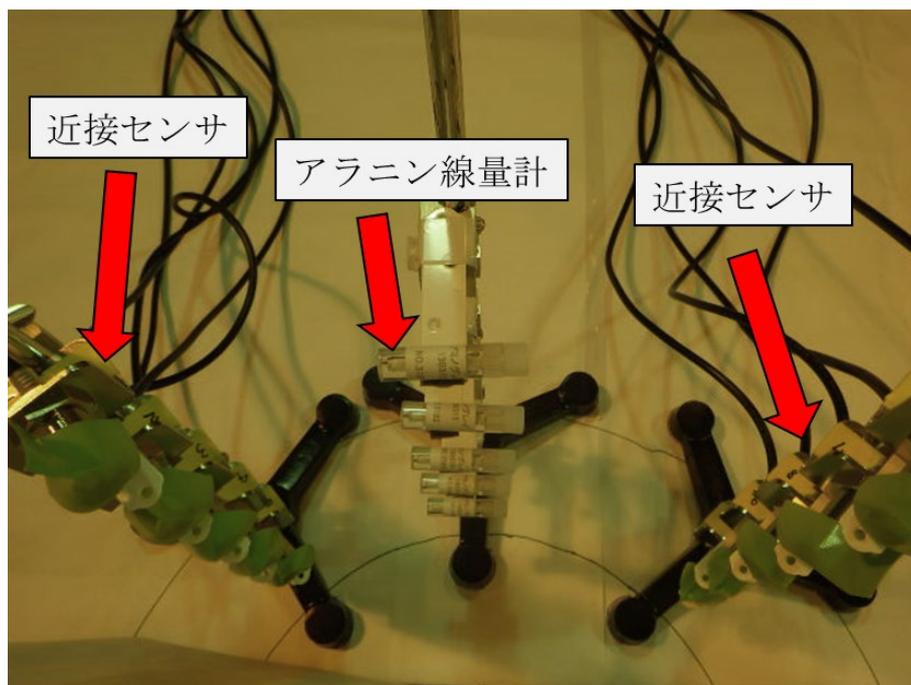


図 4.2-7 照射試験状況写真 (近接センサ 100Gy/h)

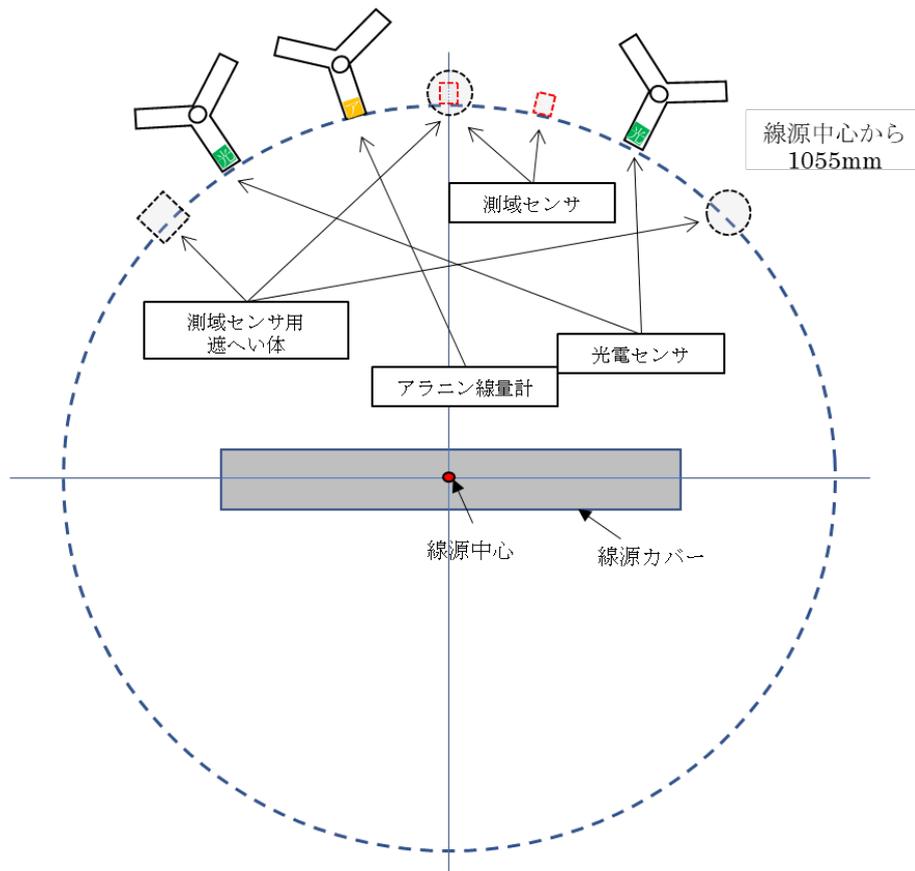


図 4.2-8 センサ配置図 (光電センサ 5Gy/h)

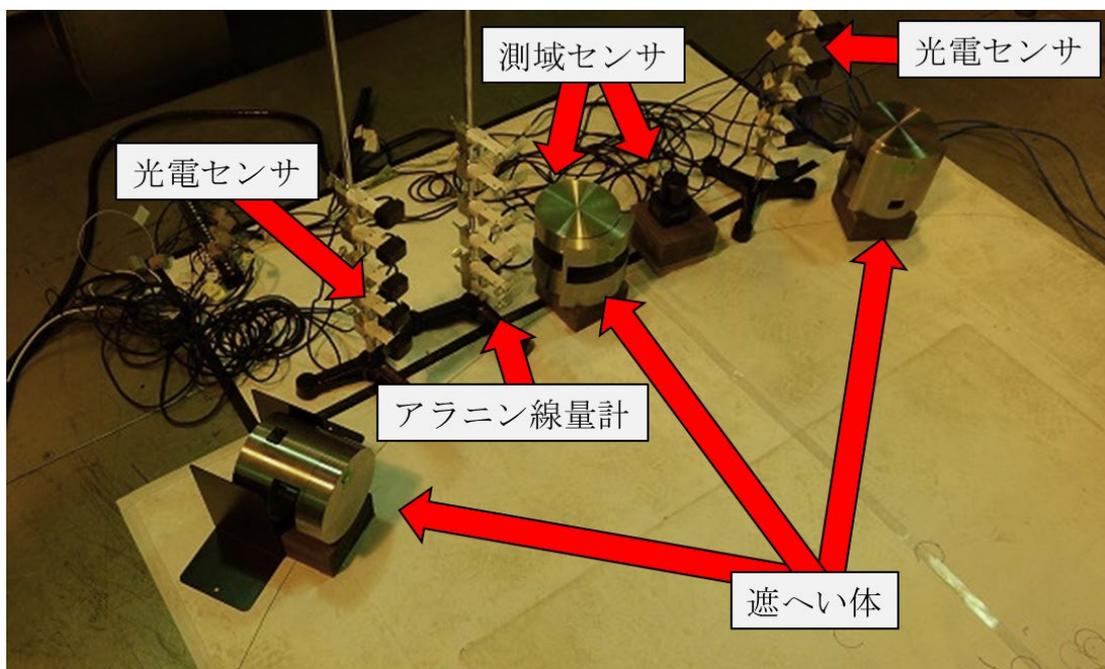


図 4.2-9 照射試験状況写真 (光電センサ 5Gy/h)  
 (写真はカスタマイズした測域センサの試験と同時照射したもの)

## (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した。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集積吸収線量から設定した。出力電圧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照射中のデータ取得の有無及び動作確認頻度を表 4.2-4 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 4.2-4 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]	通電状態	取得データ	動作確認			照射上限 <sup>※1</sup> [Gy]
				開始集積吸収線量 [Gy]	頻度 [Gy]	確認内容	
光電センサ	5	通電 (24V)	電圧 <sup>※2</sup>	600	20	・検知状態の ON/OFF ・検出距離測定	830
	100	通電 (12V)	電圧 <sup>※2</sup>	250	20	・検知状態の ON/OFF ・検出距離測定	830
		非通電	— <sup>※3</sup>	250	20	・検知状態の ON/OFF ・検出距離測定	830
近接センサ	100	通電 (12V)	電圧 <sup>※2</sup>	700	20	・検知状態の ON/OFF	1580
		非通電	— <sup>※3</sup>	700	20	・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。

※3 非通電のため、照射中のデータ取得は行わない。

### 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、24V 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 24V が出力される。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 4.2-10 に示す。

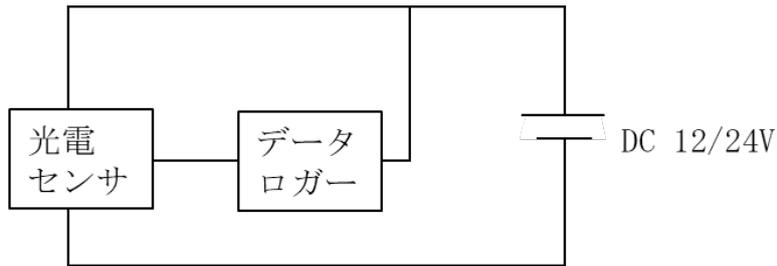


図 4.2-10 光電センサーの試験用電気回路図

<出力データの記録方法>

照射中は光電センサー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。出力電圧は 0.1Gy 以下毎に記録するように、5Gy/h で 10 秒毎、100Gy/h で 1 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、12V の電圧印加時は検知時に約 12V、非検知時に約 0V の電圧を、24V の電圧印加時は検知時に約 24V、非検知時に約 0V の電圧を正常に出力することを確認した。

また、30cm×30cm の白紙を用い光電センサーの検出距離をコンベックスで測定した。センサー仕様上は 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、この傾向の有無を確認した。

動作確認は表 4.2-4 に従い実施した。なお、令和 4 年度までの試験では 100Gy/h では 250Gy を超えたあたりで電圧の低下が確認されたため、250Gy から 20Gy 照射毎に動作確認することとした。また、5Gy/h では 600Gy を超えたあたりで電圧の低下が確認されたため、600Gy から 20Gy 毎に動作確認することとした。

<照射終了基準>

定期的に実施する動作確認において、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した。なお、白紙の検出距離は、判定基準とせず参考記録とした。

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したが、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を継続した。

## 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 4.2-11 に示す。

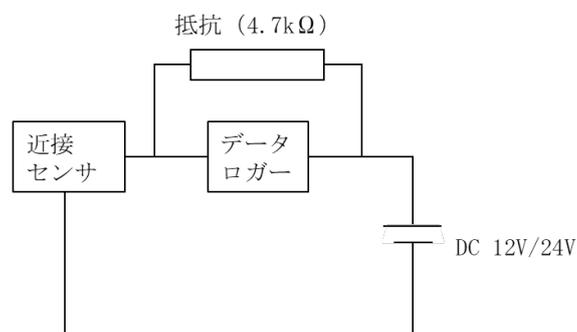


図 4.2-11 近接センサの試験用電気回路図

### <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 4 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、1 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、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 21V、非検知時に約 2V の電圧を正常に出力することを確認した。また、検知状態から金属片を外しても非検知状態となったままとなる事象が確認されているため、検知状態が正常に切り替わることを確認した。

動作確認は表 4.2-4 に従い実施した。なお、令和 4 年度までの試験では 700Gy を超えたあたりで出力電圧不良が確認されたため、700Gy から 20Gy 毎に動作確認することとした。

### <照射終了基準>

定期的に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した。

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したが、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した。

#### 4.3 ドローンの照射試験条件及び方法

##### 4.3.1 照射試験条件

ドローンに対する照射試験について、照射試験条件を設定した。

照射試験条件を表 4.3-1 に示す。また、各照射試験条件の詳細について以下に示す。

表 4.3-1 ドローンの照射試験条件

照射対象	試験条件			照射時間 [h]	照射上限 [Gy]
	照射線量率 [Gy/h]	通電状態	サンプル数		
ドローン	50	通電※1	2	10	500

※1 試験場において、安全性の観点からバッテリーに対する照射が制限されているため、バッテリーを外し、外部電源から給電しながら照射試験を実施した。

##### (1) 照射対象

照射対象のドローンの仕様及び外観を表 4.3-2 及び図 4.3-1 に示す。

表 4.3-2 照射対象ドローンの仕様

項目	仕様
寸法[mm]	194×198×58
重量[g]	243
最大飛行時間[min]	11
使用センサ	ToF 式距離センサ (前後、上下方向の 4 基) IMU (3 軸加速度センサ、3 軸ジャイロセンサ) CCD センサ (カメラ)、気圧センサ
その他構成部品	防塵モータ バッテリー (リチウムポリマー電池: 試験時には 取外し)

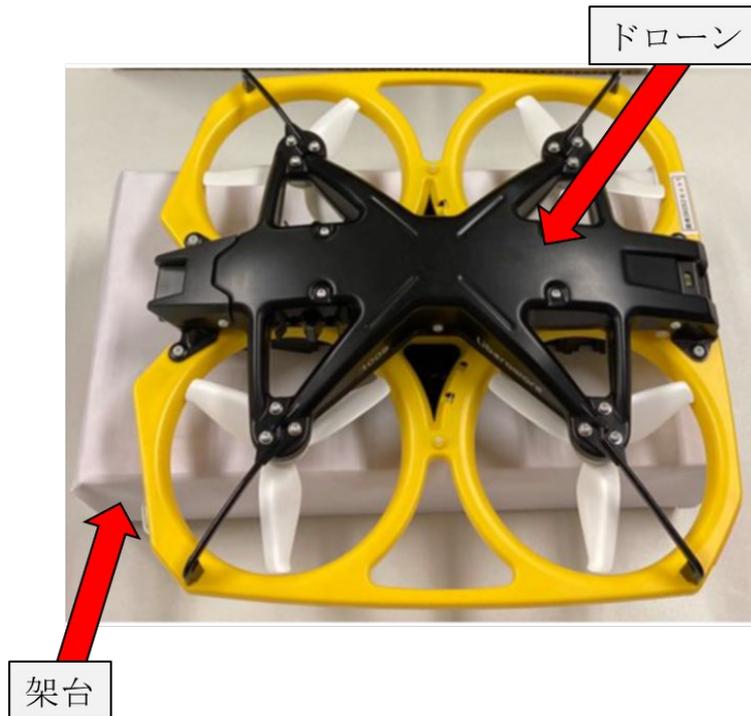


図 4.3-1 照射対象ドローンの外観

## (2) 評価対象とする構成部品

ドローンの照射試験においては、ドローンに使用されているカメラ（CCD センサ）、距離センサ、IMU（3 軸加速度センサ及び 3 軸ジャイロセンサ）、気圧センサ、モータ及び送受信モジュールを評価対象とした。

## (3) 照射線量率、照射上限

ドローンの耐放射線性を評価するために照射上限を設定した。令和 4 年度までに実施したセンサ類の照射試験結果からドローンが正常に動作しなくなるまでの集積吸収線量を予想し、照射上限及び照射線量率を設定した。

ドローンに使用されている代表的なセンサは ToF 式距離センサであり、測域センサと同様にパルス投光したレーザーと反射光の時間差から距離を測定するものである。従って、故障時には測域センサと同様の挙動を示すことが予想される。本試験では、測域センサ故障時の最大集積吸収線量を参考に照射上限を設定した。測域センサの照射試験結果のうち、故障時の最大集積吸収線量は 287Gy であるため、裕度を持たせて照射上限を 500Gy と設定した。また、この時、照射線量率は 50Gy/h、照射時間は 10 時間とした。

### 4.3.2 照射試験場所

ドローンの照射試験は、通電状態、入力電圧の影響評価のための照射データの追加取得と同様に、4.2.2 項に記載した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実施した。

### 4.3.3 照射試験方法

#### (1) ドローン配置

ドローンは、目標とする照射線量率である 50Gy/h となる線源中心からの距離を線量率分布図から読み取り、線源中心から 275mm の位置に設置した。ドローンの照射試験時の配置図を図 4.3-2 に示す。ドローンのセンサ類はドローンの中心部 30mm 幅に縦長に位置しているため、これらの照射線量率のばらつきを小さくするため、線源に対して横向きで照射を実施した。また、ドローンは専用の架台に設置し、通電状態、かつプロペラを低速回転させた状態で照射を実施した。なお、照射によるセンサ等の異常によって発生する飛行を防ぐための安全対策として、プロペラを上下反対方向に設置し、推力が発生しない状態とした。

架台に設置したドローンの写真を図 4.3-3 に、ドローンの照射試験時の写真を図 4.3-4 に示す。なお、ドローンは核防護の観点からチャート付きカバーを設置した状態で照射を行い、送信されるチャートの映像を確認する。

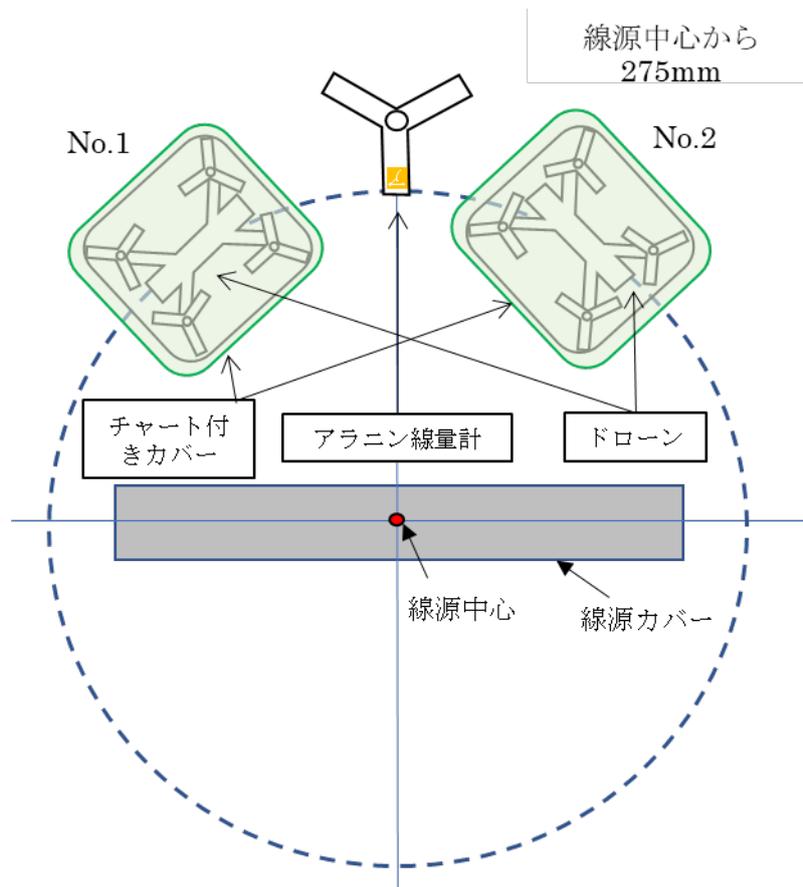


図 4.3-2 ドローン照射試験配置図

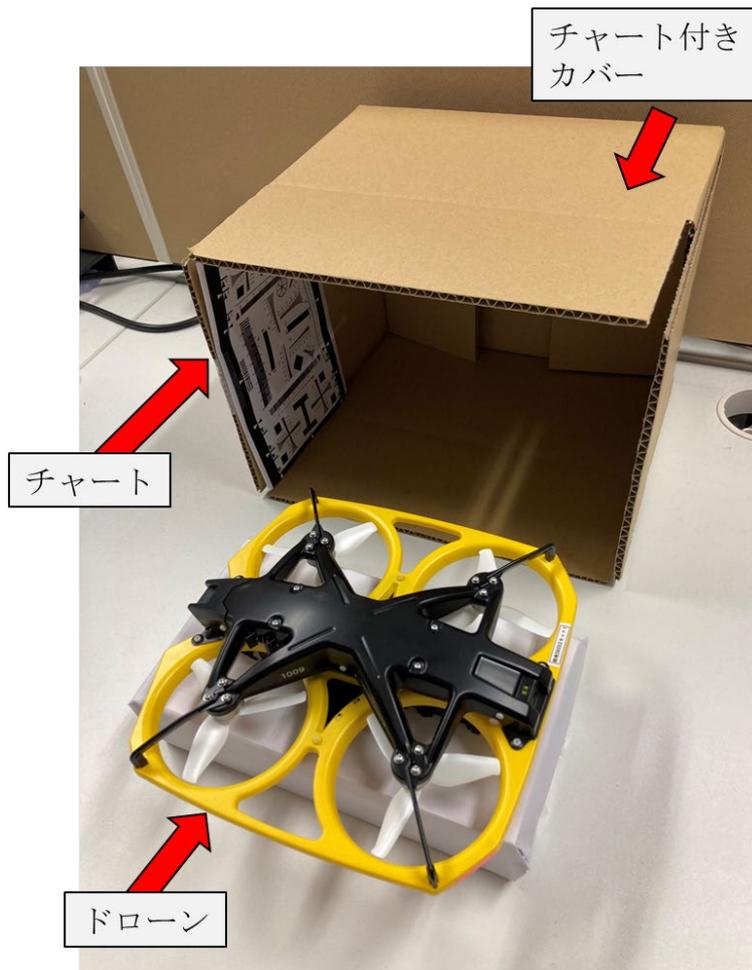


図 4.3-3 ドローン及びチャート付きカバーの様子

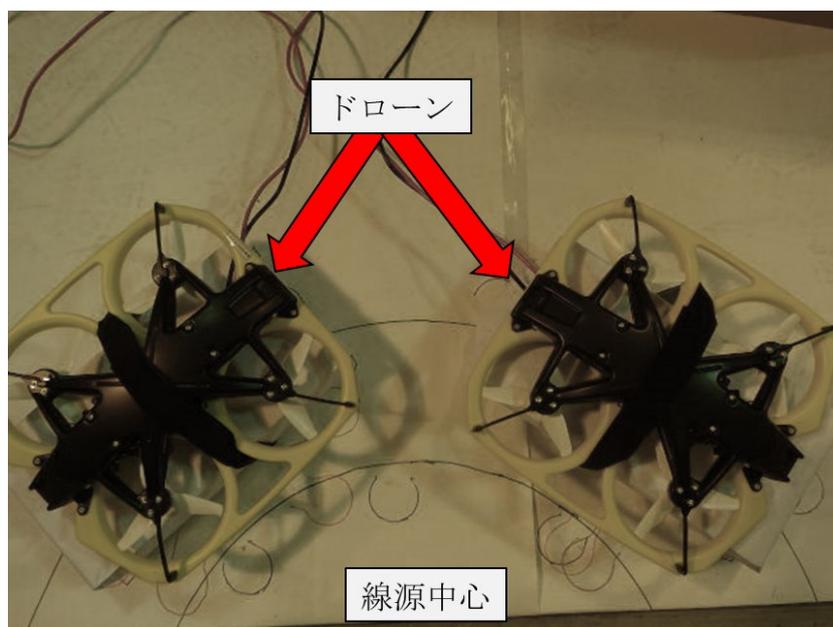


図 4.3-4 ドローンの照射試験時の様子  
(照射中はチャート付きカバーを設置)

## (2) データ取得

### <出力データの記録方法>

ドローンは照射中に取得した画像データ及び各センサのログを本体に保存している。動作確認時に、PC とドローン本体を接続し、本体に記録されたログを PC に転送した。なお、中継器を通してリアルタイムに送信される画像データを、照射室外の映像モニターを用いて確認した。ドローンのシステム図を図 4.3-5 及び図 4.3-6 に示す。

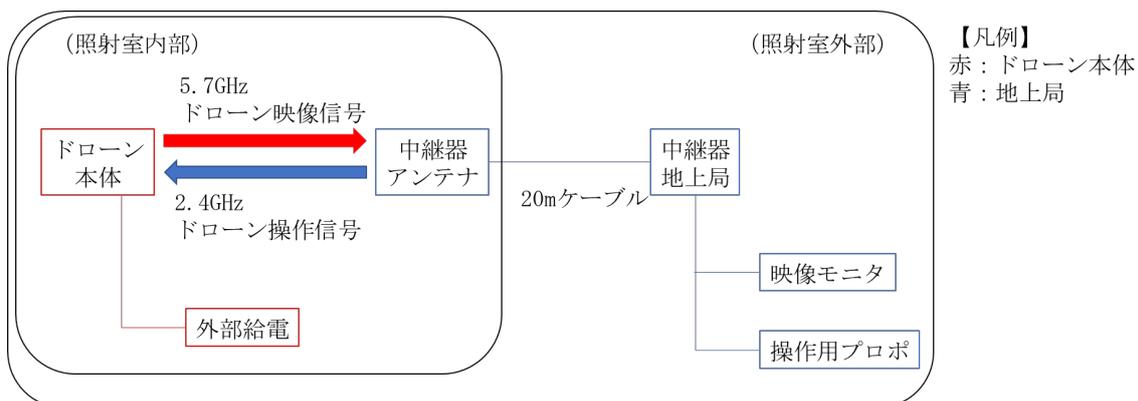


図 4.3-5 ドローンのシステム構成図

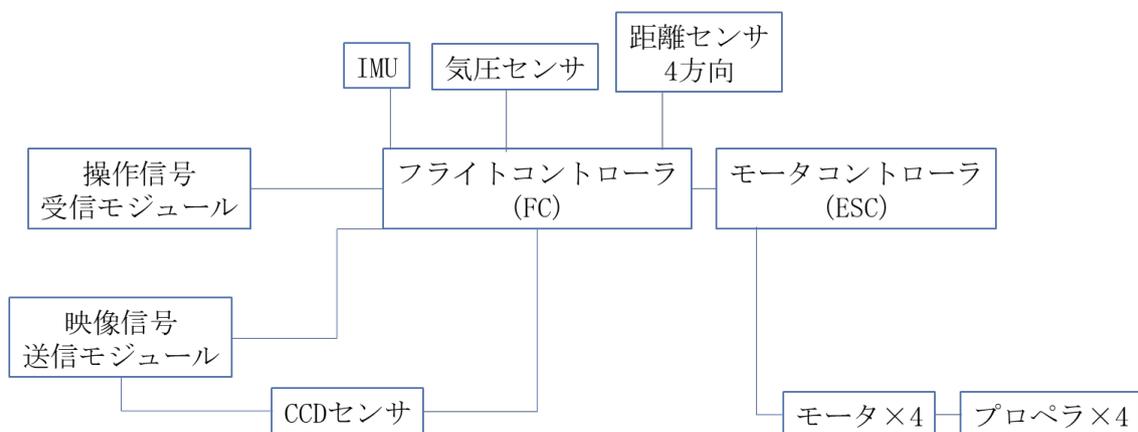


図 4.3-6 ドローンの制御システム構成図

### <動作確認方法>

ドローンに対する照射試験では、映像モニタへドローン本体のカメラで取得した映像がリアルタイムで送信されるため、照射中はこの映像を確認した。ただし、核防護上の観点から照射室内は撮影ができないため、チャート付き段ボールでドローンを覆い、チャート映像を確認した。照射中は、ドローン本体から受信した映像が確認できること、及び正常にドローン本体へ操作信号が送信できることを確認した。

また、定期的に照射を中断し、動作確認を実施した。動作確認時には、ドローンを PC と接続し、動作確認モードにより、モータが正常な動作を行うか確認した。距離センサ、IMU 及び気圧センサは出力データを確認するとともに、詳細な解析のため、動作確認時に本体メモリに保存されているセンサのログを専用の端末を用いて保存し、事後のログ解析により故障の発生時期を評価した。動作確認頻度は、本体メモリの容量を考慮し、最大 90 分に一回と設定した。ドローン照射試験の動作確認方法を表 4.3-3 に示す。

表 4.3-3 ドローン照射試験の動作確認方法

タイミング	確認対象	確認内容
照射中	CCD センサ (カメラ)	映像を確認できること。
	送受信モジュール	ドローンからの映像の送信及び地上局からの操作信号の受信が問題なくできること。
動作確認時	距離センサ (4 方向)	センサを遮った時、概略距離が表示されること。
	IMU (3 軸加速度センサ及び3軸ジャイロセンサ)	機体を手動で動かした時に値が変化すること。
	気圧センサ	温度及び気圧に異常値が表示されないこと。
	モータ	正常に動作すること。
	PC との接続	映像及びログを PC へ転送できること。

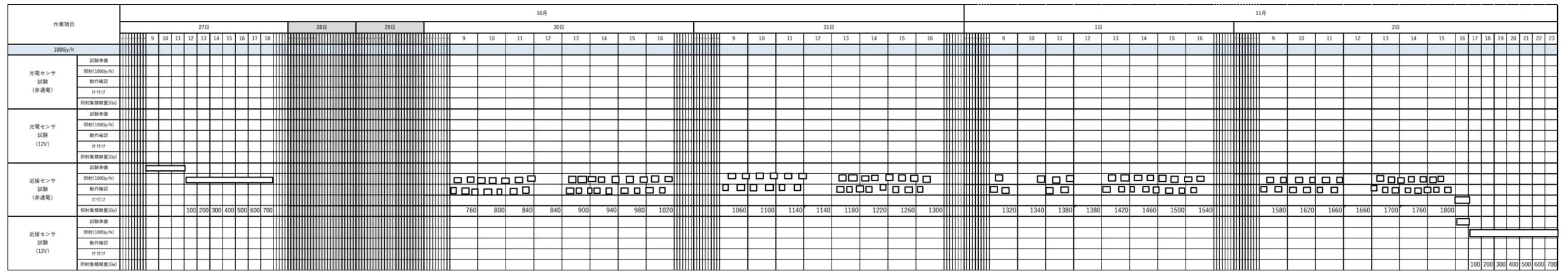
#### <照射終了基準>

定期的に実施する動作確認において、評価対象センサのデータが正常に出力されなくなった場合、または正常な動作ができなくなった時点で、照射終了とした。

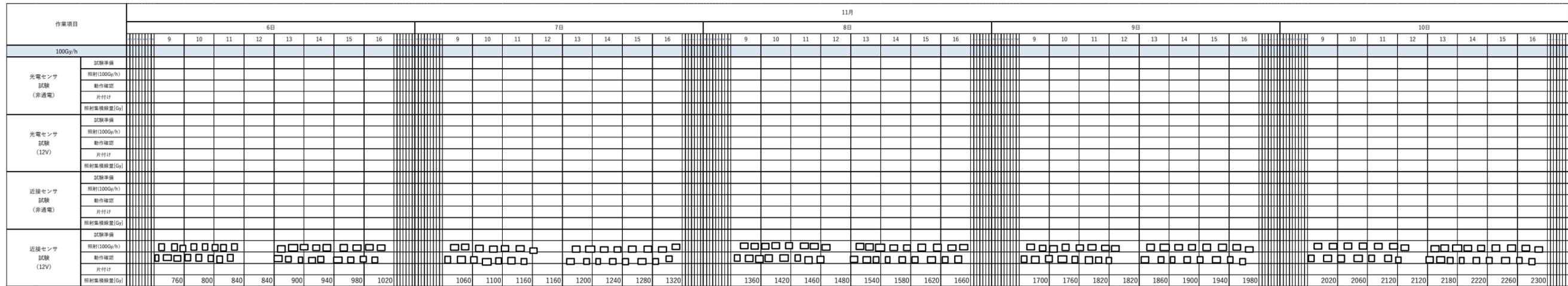
また、上記基準を満たさずとも照射上限に達した時点で照射終了としたが、照射上限に達しても正常に動作していた場合は、試験の進捗上可能であれば照射を継続することとした。

#### 4.4 照射試験スケジュール

照射試験スケジュールの実績を図 4.4-1 に示す。

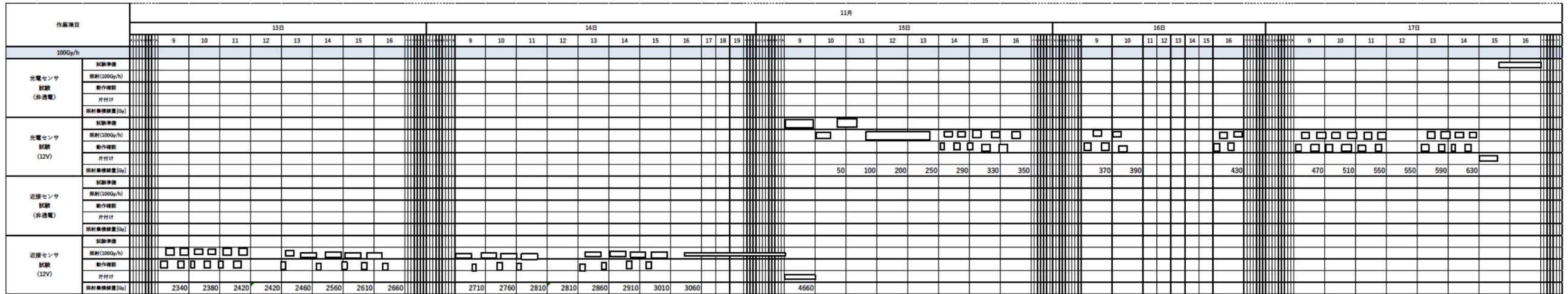


(10/27-11/2)

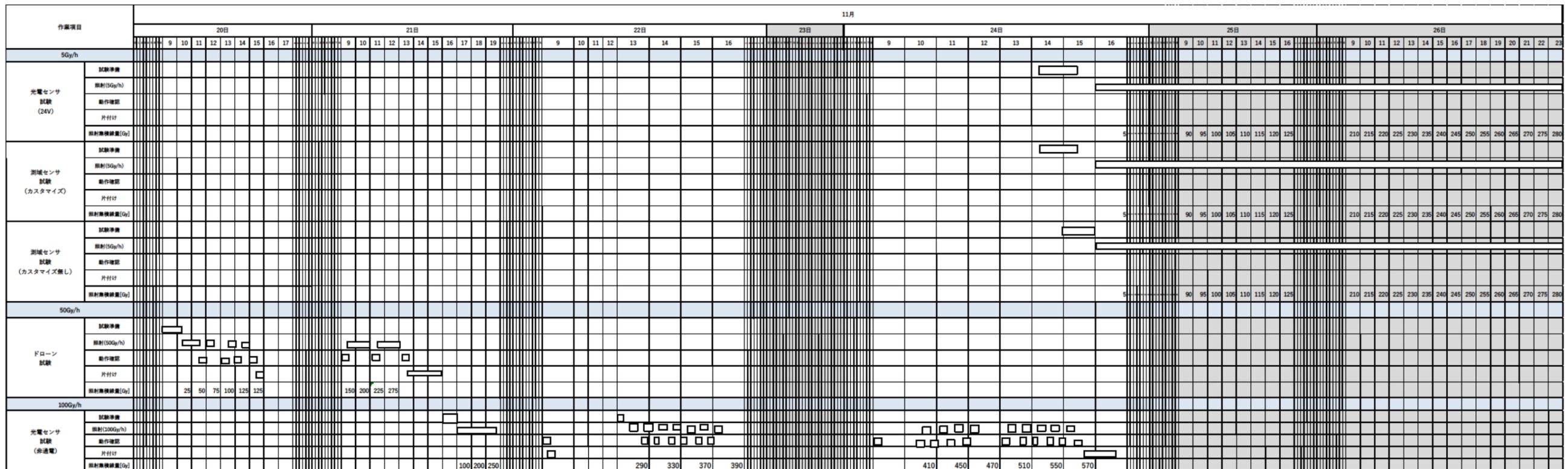


(11/6-11/10)

図 4.4-1 照射試験スケジュール



(11/13-11/17)



(11/20-11/26)

図 4.4-1 照射試験スケジュール (その2)

作業項目		11月																							12月																						
		27日							28日							29日									30日							1日															
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
5Gy/h																																															
光電センサ 試験 (24V)	試験準備																																														
	照射(5Gy/h)	285 290 295 300 305 310 315 320 325							330							410 415 420 425 430 435 440 445									530 535 540 545 550 555 560 565 570 575 580 585 590 595 600									603 608 613 618 620 625 630 635 640 640							643 648 653 658 660 665 670 675 680						
	動作確認																																														
	片付け																																														
測域センサ 試験 (カスタマイズ)																																															
測域センサ 試験 (カスタマイズ無し)	試験準備																																														
	照射(5Gy/h)	285 290 295 300 305 310 315 320 325							330							410 415 420 425																															
	動作確認																																														
	片付け																																														

(11/27-12/1)

作業項目		12月																																																															
		4日								5日								6日								7日								8日																															
5Gy/h		9	10	11	12	13	14	15	16	17	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	18	19	20	21	9	10	11	12	13	14	15	16															
100Gy/h																																																																	
光電センサ 試験 (24V)	試験準備																																																																
	照射(5Gy/h)	683 688 693 698 700 705 710 715 720								720 723 728 733 738 740 745 750 755 760								763 768 773 778 780 785 790 795 800																																															
	動作確認																																																																
	片付け																																																																
光電センサ 試験 (非通電)	試験準備																																																																
	照射(100Gy/h)																	890 940 990 1040 1090 1190 1290								1340 1390																																							
	動作確認																																																																
	片付け																																																																
近接センサ 試験 (非通電)	試験準備																																																																
	照射(100Gy/h)																	1900 1950 2000 2100 2150 2200 2300 2400 2500 2600 2700 2750								2800 2850 2850 2850 2950 3000																																							
	動作確認																																																																
	片付け																																																																

(12/4-12/8)

図 4.4-1 照射試験スケジュール (その3)

## 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）を実施した。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を参考とした。

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。その後、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、令和4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った。

今年度は低照射線量率の追加データ取得として、5Gy/hの照射線量率で測域センサに対する照射試験を行った。また、照射試験環境をモデル化した遮へい評価を実施し、照射試験における測定値と遮へい解析値を比較評価することで、遮へい解析の有効性を確認した。なお、照射試験及び遮へい解析を実施する際には照射位置毎に照射方向を変え、異なる条件における遮へい解析の有効性を評価した。

### 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

##### (1) 対象センサ

令和4年度までの照射試験において、低照射線量率のカスタマイズデータが不足している測域センサを、照射対象センサとして選定した。測域センサの概略図を図5.2-1に示す。

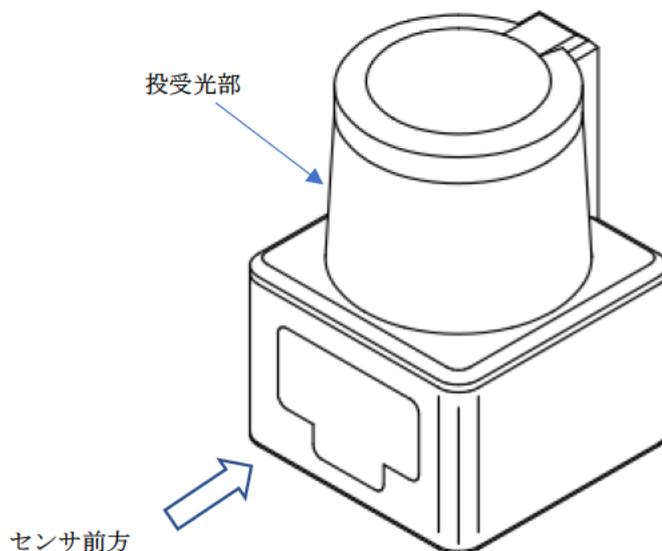


図 5.2-1 測域センサ概略図

## (2) 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を参考に、測域センサを設置する遮へい体及び 2 種類の追加遮へい体を設定した。なお、照射方向により用いる遮へい体が異なる。前方から照射する場合には遮へい体及び追加遮へい体 A を、後方から照射する場合には遮へい体及び追加遮へい体 B を、上方向から照射する場合には遮へい体のみを用いた。

遮へい体の構造を図 5.2-2 に、追加遮へい体 A の構造を図 5.2-3 に、追加遮へい体 B の構造を図 5.2-4 に示す。追加遮へい体 A はセンサ前面に設置し、検出範囲と同様の角度の大きさの開口部を有する。追加遮へい体 B はセンサ背面に設置し、給電及び通信用ケーブル用の開口部を有する。

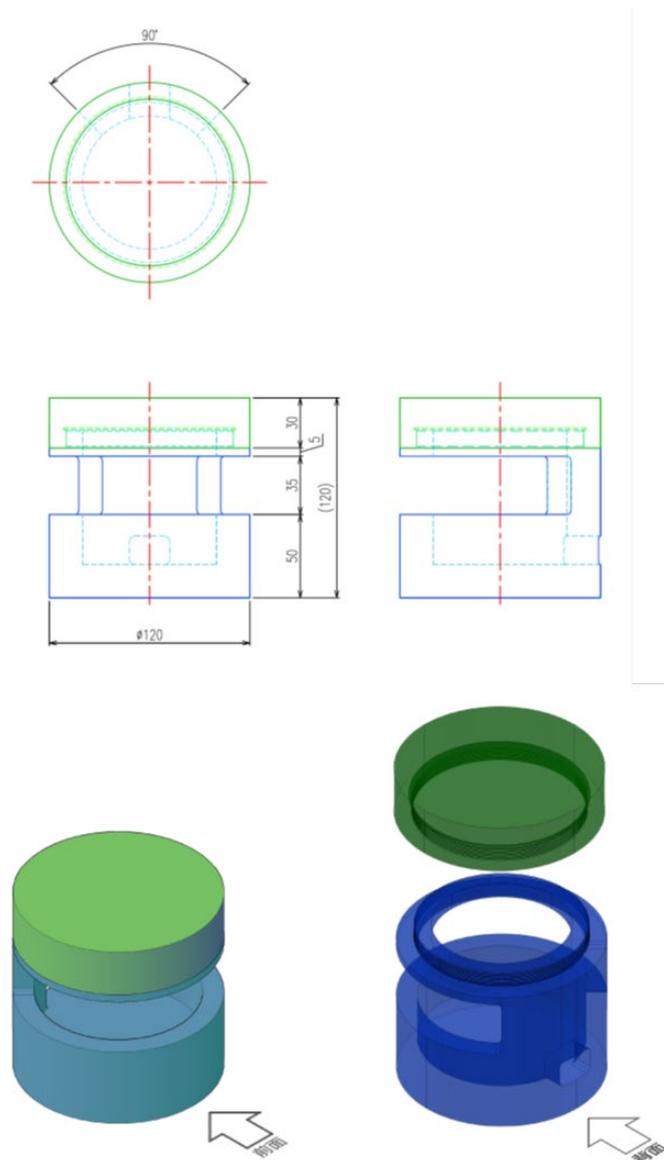


図 5.2-2 遮へい体構造図  
(緑色部：蓋部、青色部：本体)

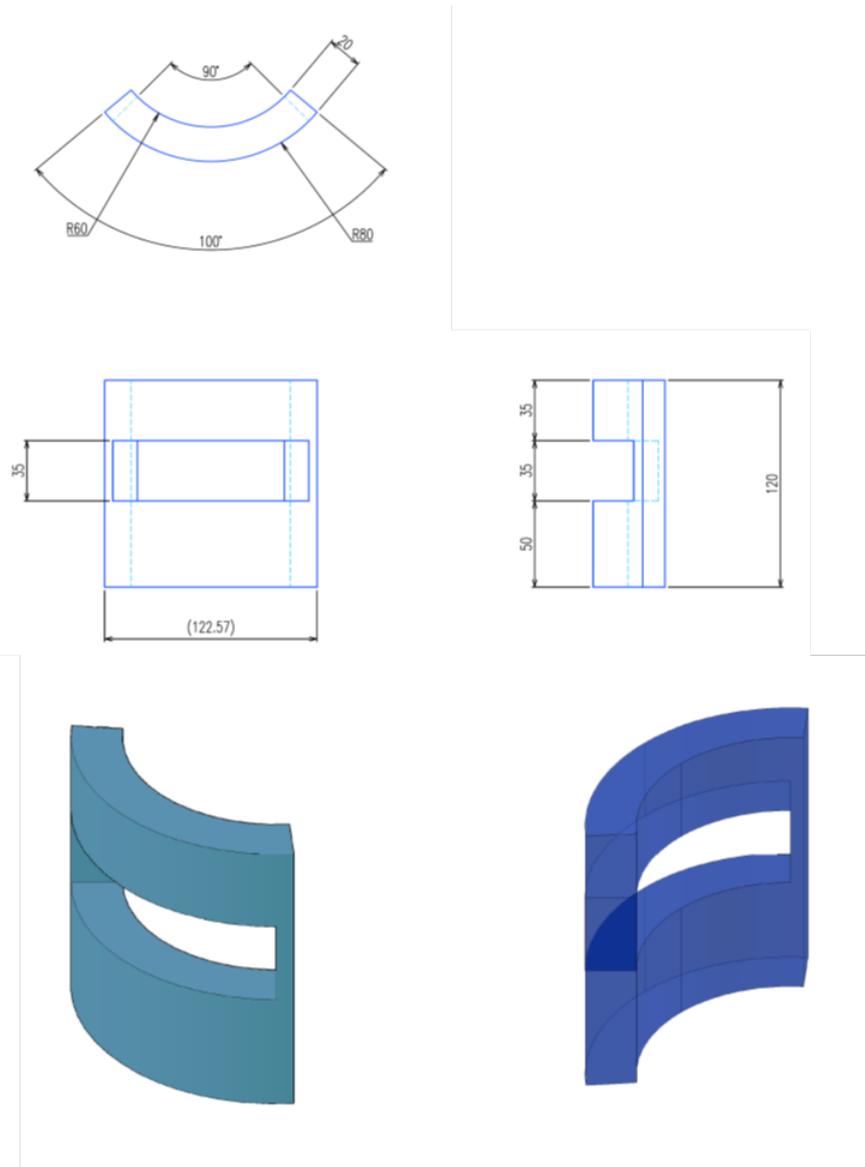


图 5.2-3 追加遮へい体 A 構造図

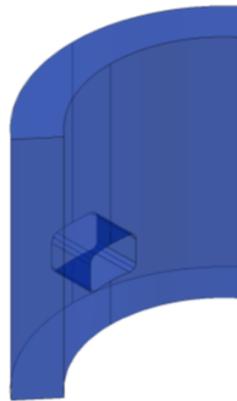
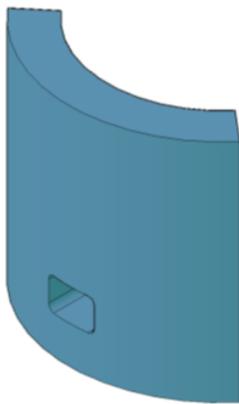
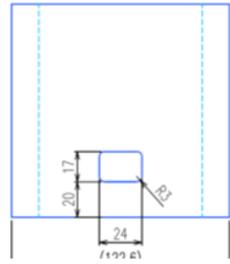
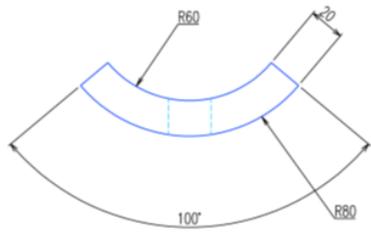


図 5.2-4 追加遮へい体 B 構造図

遮へい体の写真を図 5.2-5 に、遮へい体+追加遮へい体 A の写真を図 5.2-6 に、遮へい体+追加遮へい体 B の写真を図 5.2-7 に示す。

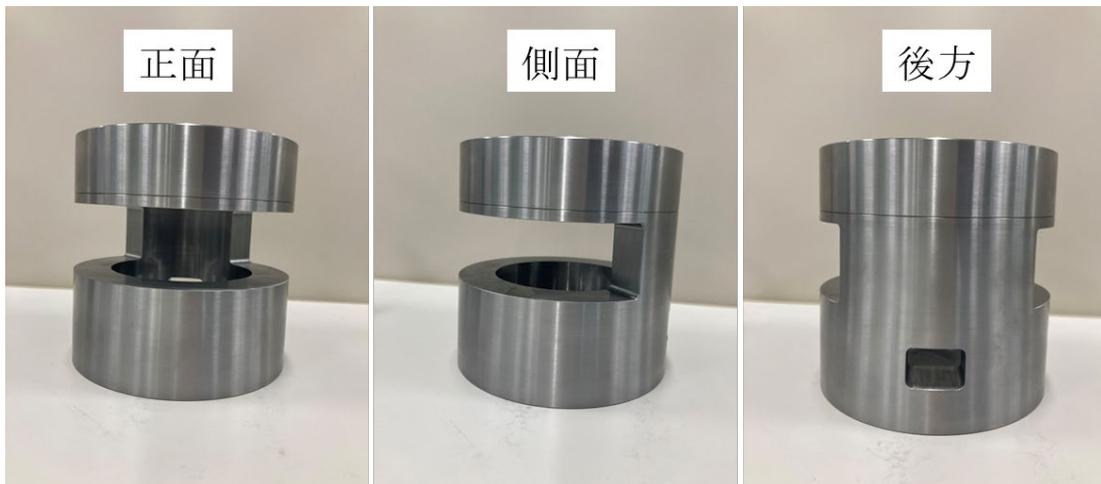


図 5.2-5 遮へい体 (写真)

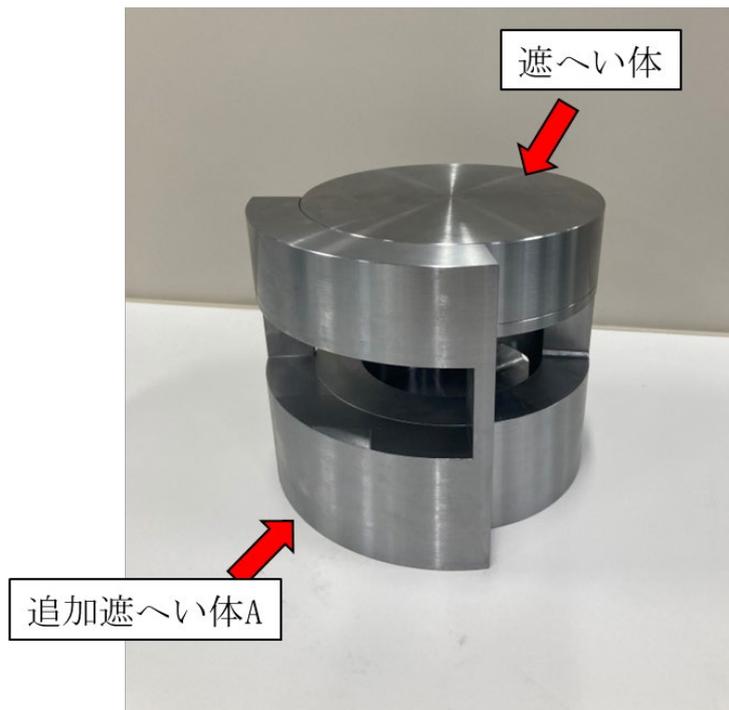


図 5.2-6 遮へい体+追加遮へい体 A (写真)

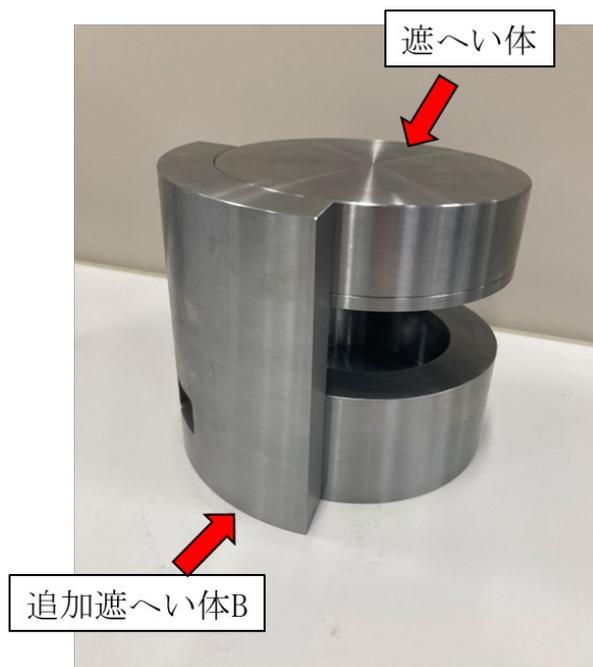


図 5.2-7 遮へい体+追加遮へい体 B (写真)

### (3) 照射試験場所

センサの照射試験は、一般産業用工業品の照射データの追加取得と同様に、4.2.2 項に記載した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実施した。

### (4) 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した。照射試験条件は、4.2 項の照射試験条件を参考に、低照射線量率の追加データ取得のため、照射線量率は 5Gy/h とした。また、遮へい体の方向の解析への影響を評価するため、照射方向はセンサ前方、後方、上方向の三方向とした。センサ前方及び後方は 40mm の遮へい厚を確保するため、追加遮へい体を設置し照射を実施した。なお、照射試験スケジュールは図 4.4-1 に記載の通りである。

試験条件を表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 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 <sup>※1</sup> [Gy]
	照射線量率 (目標値) [Gy/h]	遮へい 体数	照射方向		
測域 センサ	5	3	3 方向 (前方、後方、 上方向)	距離データ <sup>※2</sup>	600

※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 PC と接続し距離データを連続測定する。

## 5.2.2 照射試験方法

### (1) センサ配置

センサは、図 5.2-8 に従って配置した。試験時間短縮のため、図 4.2-8 に示した光電センサ 5Gy/h の試験と同時照射を実施した。また、遮へい解析との比較評価を行うために、ガラス線量計を用いて遮へい体の内外部の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は 1055mm とし、□100mm×H50mm の木材の上に遮へい体及び測域センサを配置した。なお、カスタマイズ試験は 4 章の追加データ取得試験のうち、光電センサの 5Gy/h の試験と同時に実施し、照射方向は前方、後方、上方向の 3 方向を設定した。前方は線源方向のセンサ投光部が遮へい体開口部となっている。一方で、後方及び上方向については、線源方向が遮へい体で覆われているため、直接線の影響は少なく、照射線量率がカスタマイズ無しの場合と比較して極端に小さくなると考えられるため、遮へい体内部に測域センサを設置せず、前方から照射する測域センサが照射上限を超え故障する時点まで照射を実施した。

遮へい体構造と照射方向を図 5.2-9 に、照射時の遮へい体位置及び開口方向を図 5.2-10 に示す。

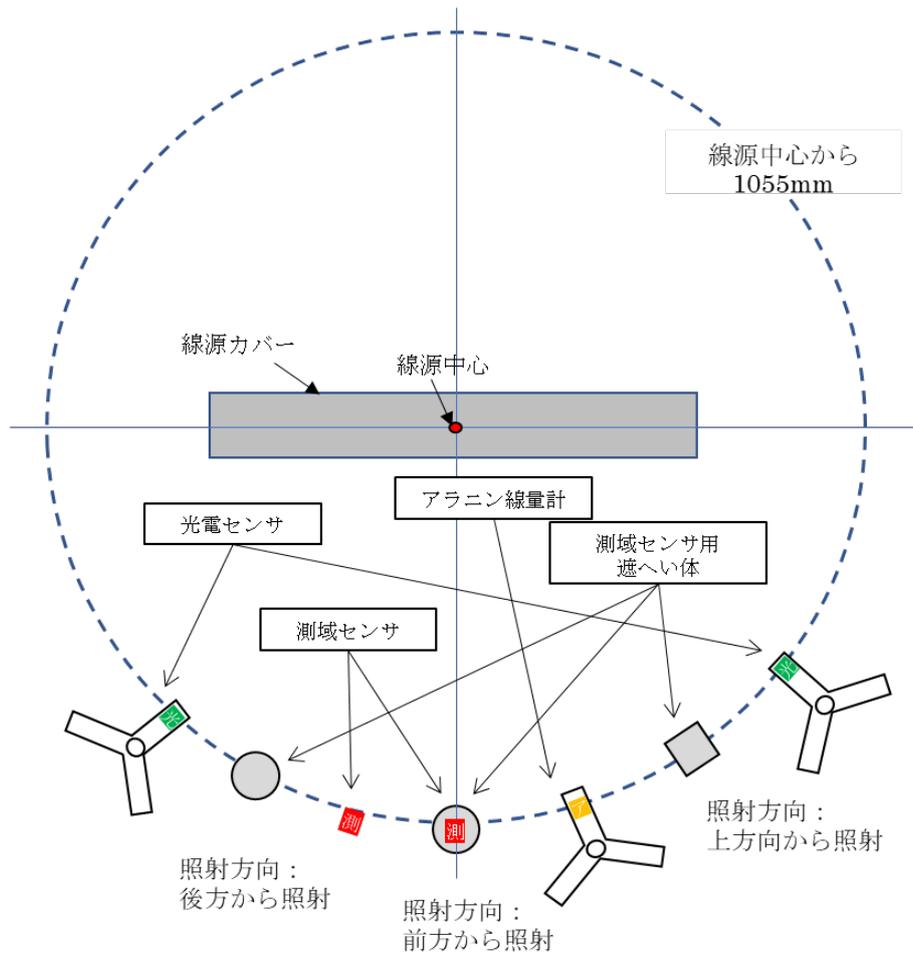


図 5.2-8 センサ配置図 (光電センサ 5Gy/h 及びカスタマイズ試験)

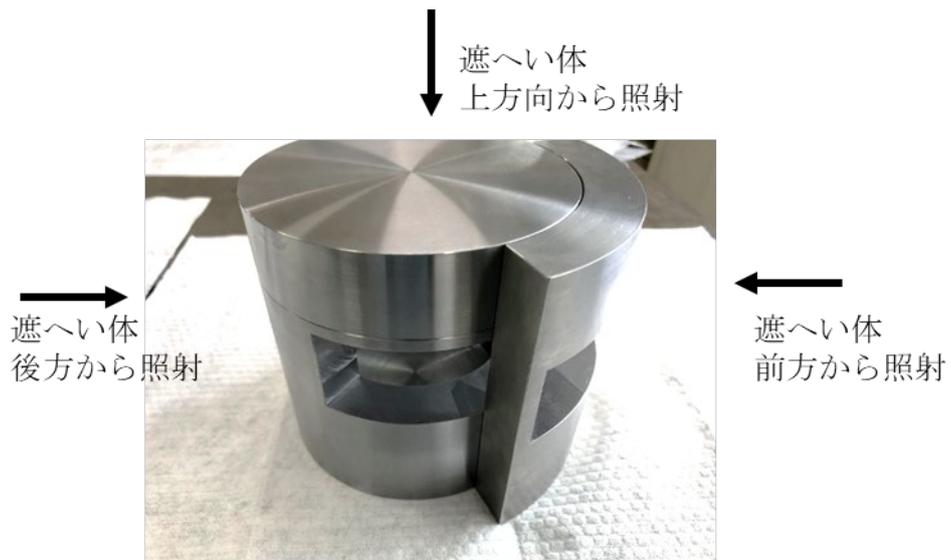


図 5.2-9 遮へい体構造及び照射方向

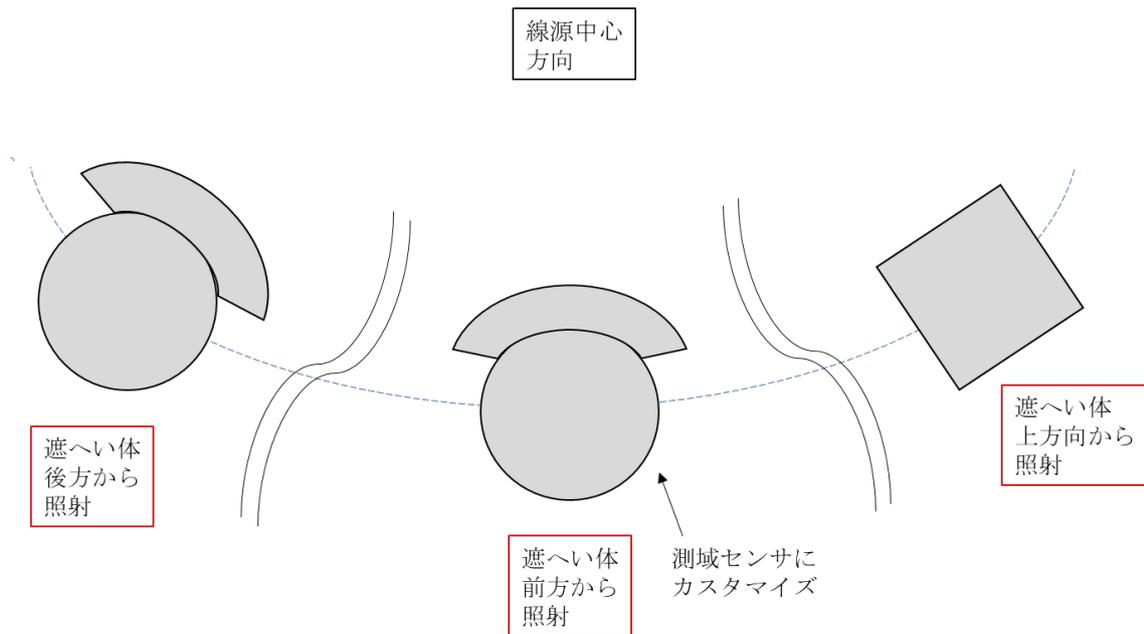


図 5.2-10 遮へい体の照射位置及び照射方向

(2) データ取得

カスタマイズ試験において、測域センサは PC とイーサネットケーブルで接続し出力される距離データを記録した。試験中は距離データを 1 秒毎に PC に出力させることとした。測域センサの電気回路図を図 5.2-11 に示す。

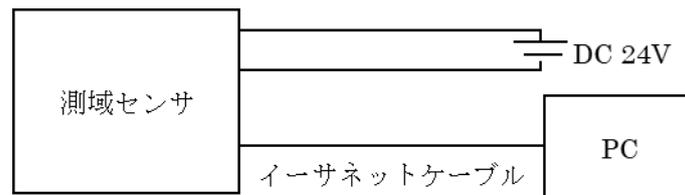


図 5.2-11 測域センサの試験用電気回路図

#### <出力データの記録方法>

測域センサとイーサネットケーブルで接続した PC に出力される距離データを記録した。

#### <照射終了基準>

測域センサは PC で正常な距離データが検出できなくなった場合には、データの取り込みが停止する。従って、センサが測定不能となり、データの取り込みが停止した時点で照射終了とした。また、令和 3 年度に実施した 150Gy/h の照射線量率における測域センサのカスタマイズ試験結果において、カスタマイズした場合の照射上限はカスタマイズ無しの場合の集積吸収線量の 1.7 倍であることを確認した。そこで、本照射試験の照射上限はカスタマイズ無しの場合の 2 倍以上となるように設定した。測域センサの照射試験結果において、故障時の集積吸収線量の最大値は 287Gy であるため、カスタマイズ試験の照射上限を 600Gy と設定した。カスタマイズ照射試験のデータ取得及び照射上限を表 5.2-1 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こととした。

### 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 5.3-1 に示す。

表 5.3-1 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 <sup>3</sup> )	7.86	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup> )	8.9	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup> )	1.2049E-03	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup> )	0.48	
元素	個数比	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 5.3-1 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 <sup>3</sup> )	2.30	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup> )	3.70	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 5.3-1 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 <sup>3</sup> )	7.93	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup> )	7.98	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
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 5.3-2 に示す。

表 5.3-2 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 <sup>2</sup> )
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章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、線源中心から180mm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5.3-3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5.3-1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5.3-4に示す。

線源規格化の結果、本解析での放射エネルギーは $1.72 \times 10^{13} \text{Bq}$ となった。この時、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られる。

表 5.3-3 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 5.3-4 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	97.5	96.1	1.01
2	300	108.9	106.6	1.02
3	240	113.7	113.5	1.00
4	180	112.1	114.0	0.98
5	120	104.4	106.5	0.98

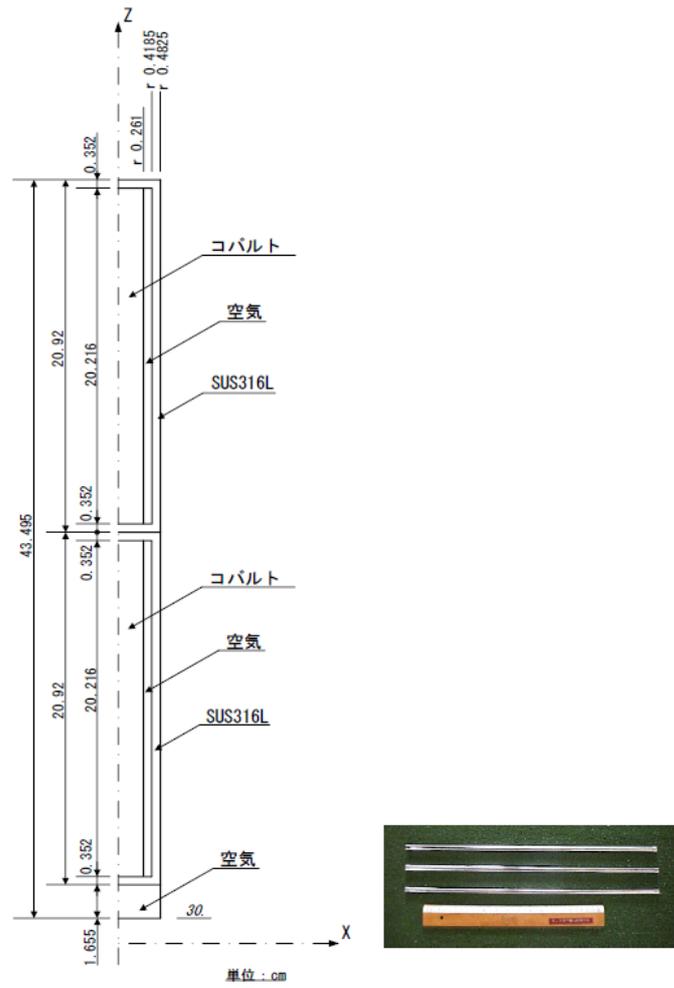


図 5.3-1 線源規格化の解析モデル

### 5.3.5 評価位置

解析値と測定値を比較するための評価位置は、カスタマイズ試験時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 5.3-2 から図 5.3-4 に示す。また、遮へい体内部のガラス線量計は照射線量率が約 5Gy/h となる線源中心から 1055mm に位置するように配置した。

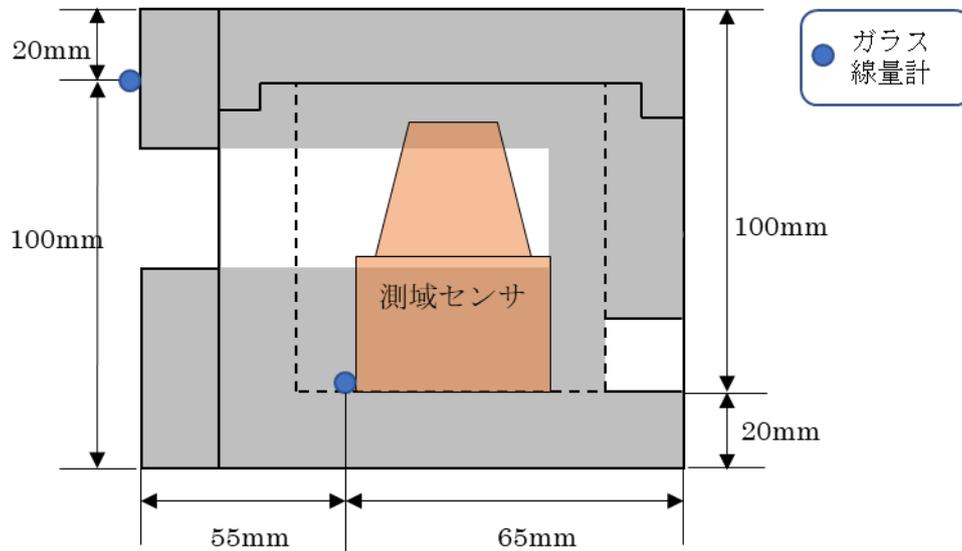


図 5.3-2 解析モデル（前方から照射）における評価位置（ガラス線量計素子設置位置）

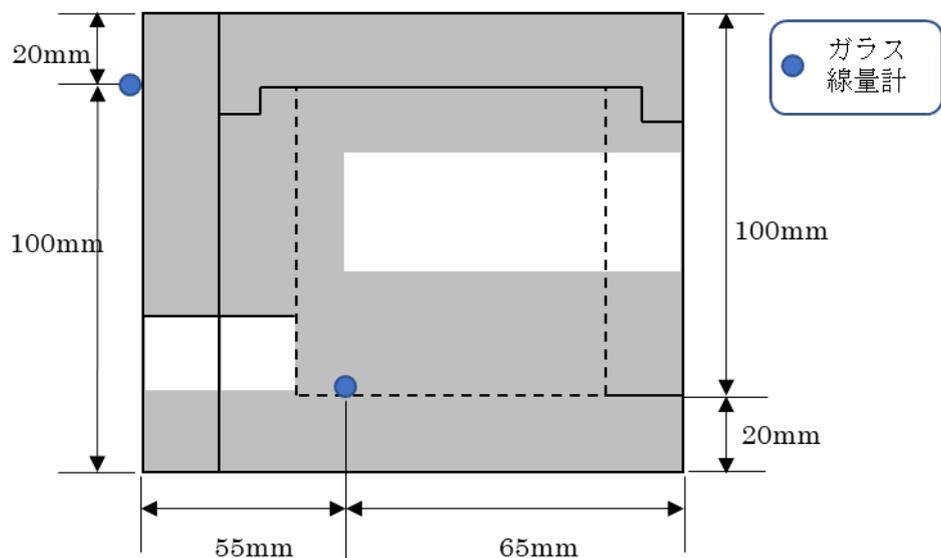


図 5.3-3 解析モデル（後方から照射）における評価位置（ガラス線量計素子設置位置）

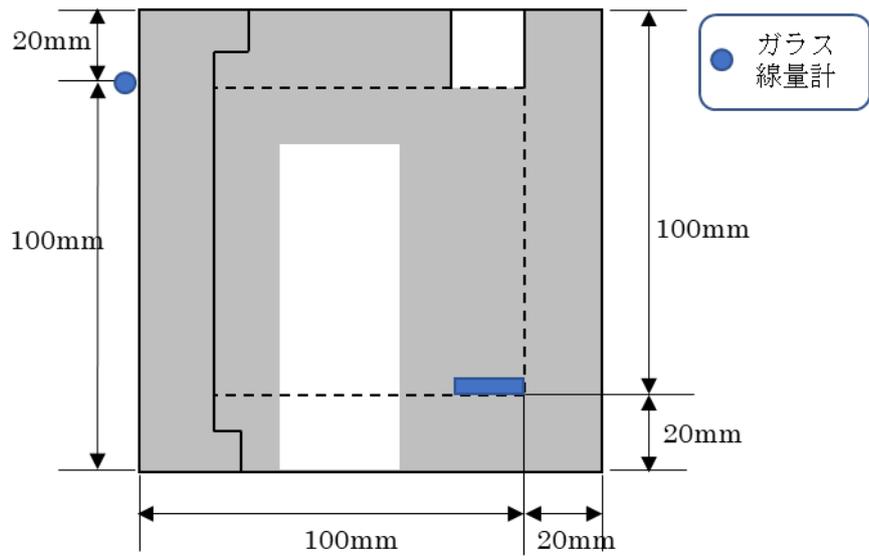


図 5.3-4 解析モデル（上方向から照射）における評価位置（ガラス線量計素子設置位置）

### 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 5.3-5 に示す照射室モデルを作成した。なお、遮へい体内部の測域センサ、ガラス線量計素子、及び同時に照射を実施した 4 章の光電センサ等はモデル化せず空気として扱い、照射室、遮へい体及び木材をモデル化している。

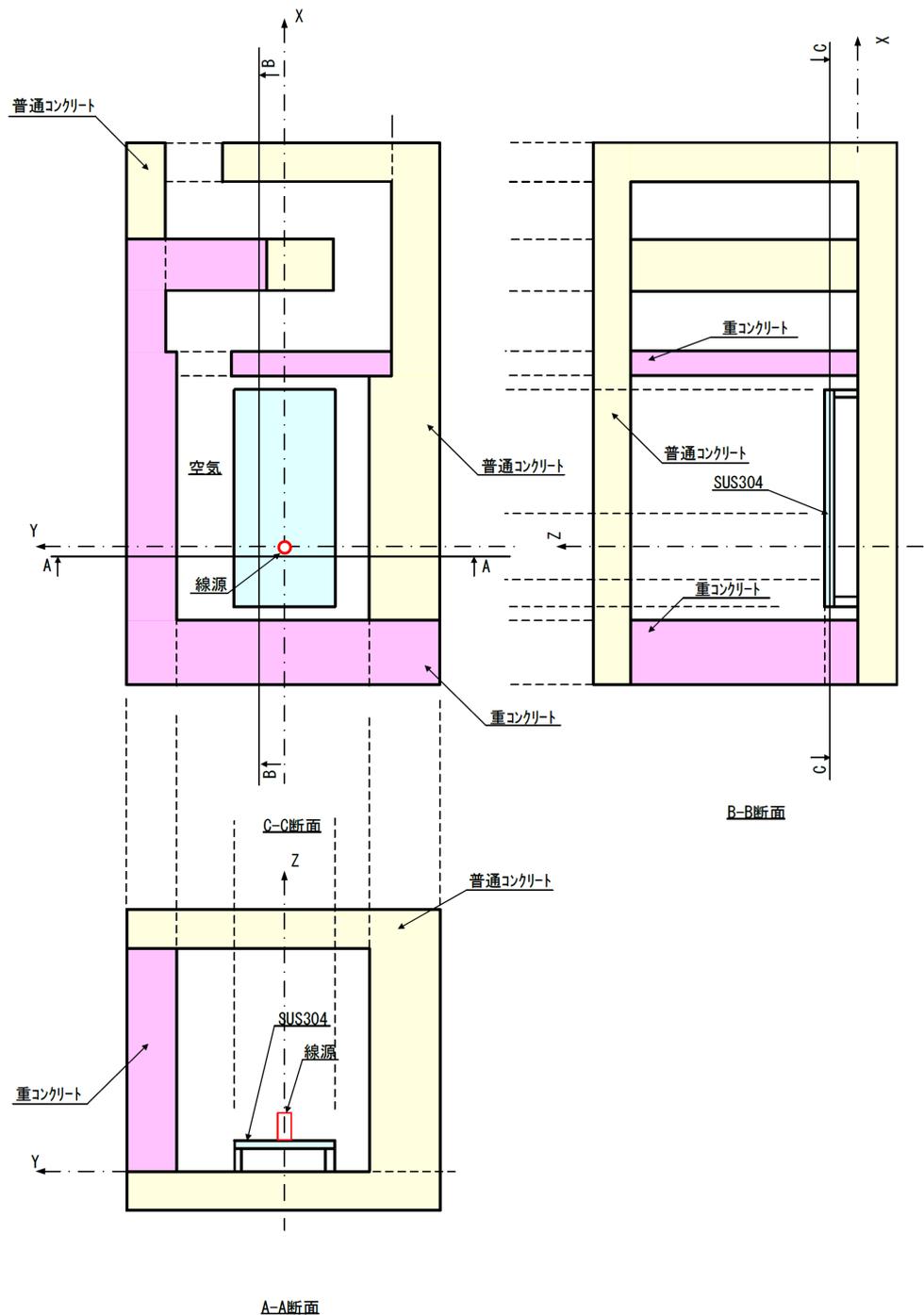


図 5.3-5 照射室の解析モデル

遮へい体の解析モデル図を図 5.3-6 から図 5.3-8 に、全体の解析モデル図を図 5.3-9 に示す。

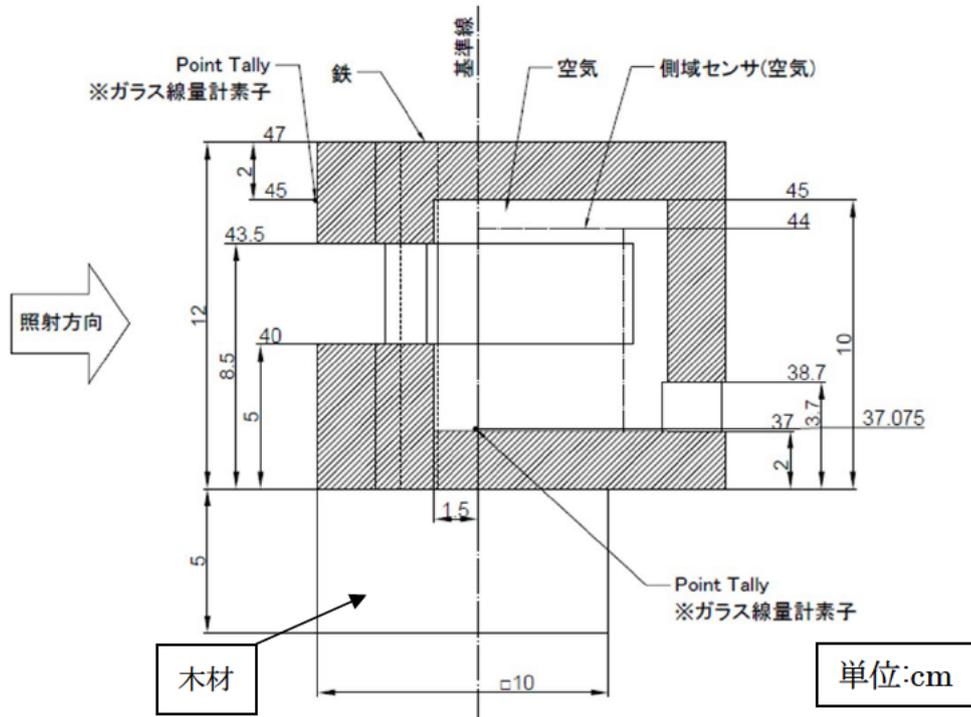


図 5.3-6 遮へい体解析モデル図 (前方から照射)

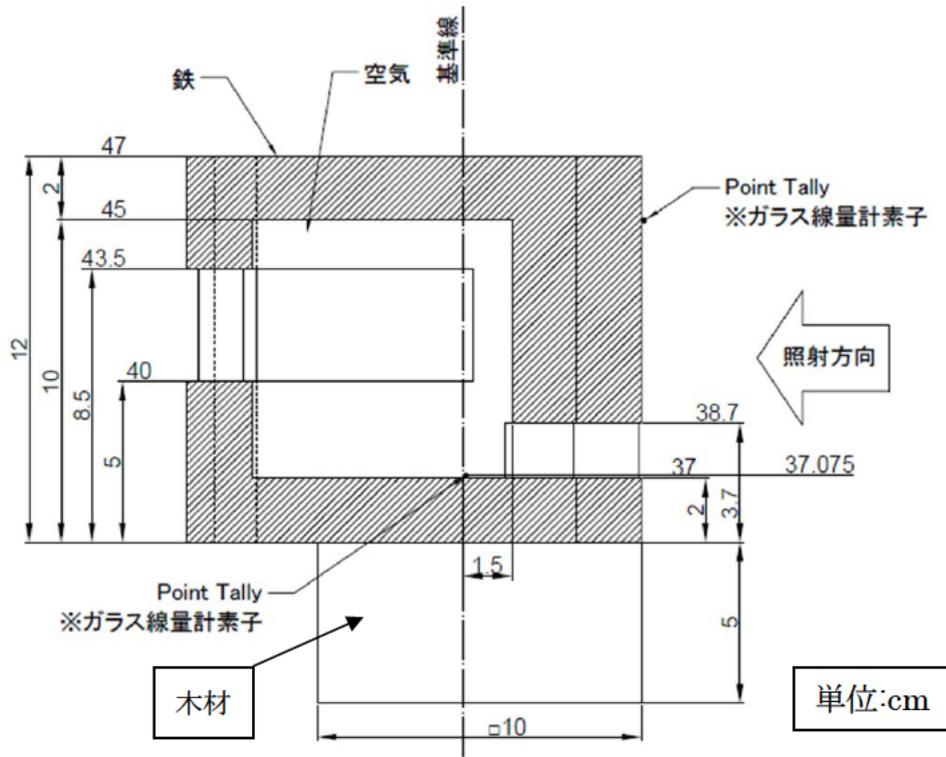


図 5.3-7 遮へい体解析モデル図 (後方から照射)

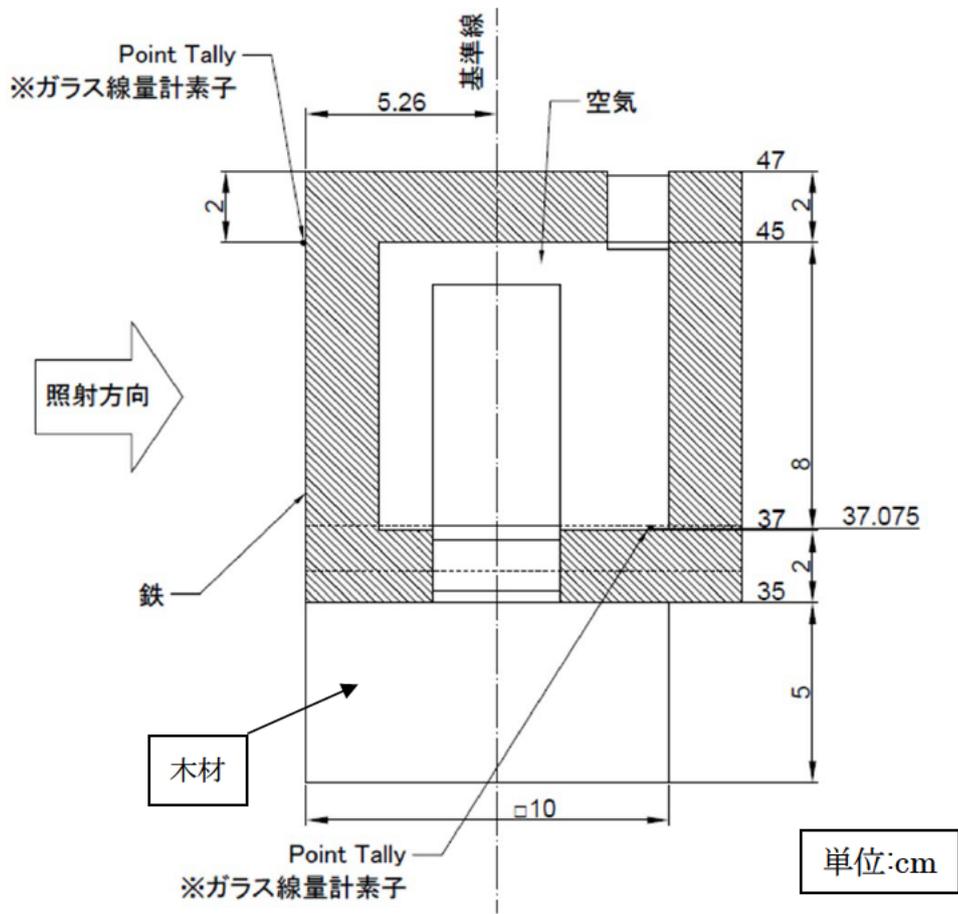


図 5.3-8 遮へい体解析モデル図（上方向から照射）

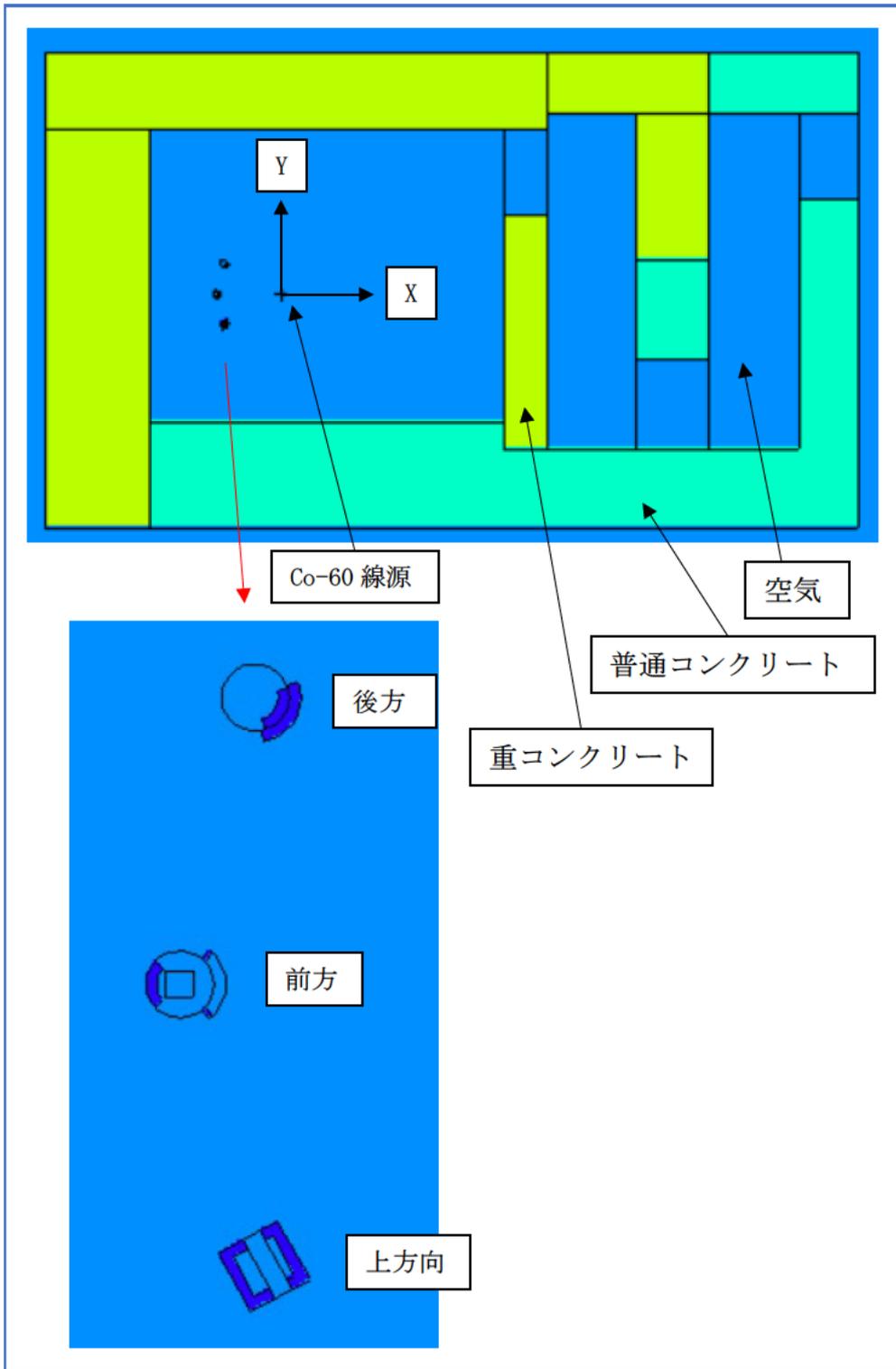


図 5.3-9 遮へい解析モデル図 (全体)

## 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追加データ取得

光電センサ及び近接センサの照射試験においては、照射による検知時のセンサの出力電圧の低下が確認された。検知時の出力電圧低下においては、出力電圧が非検知状態と同程度（光電センサで約 0V、近接センサで約 1V）まで低下する事象を確認しており、これを故障と定義した。なお、特に近接センサにおいては、故障前に最大 0.3V 程度の出力電圧低下が確認されたが、動作確認での検知状態が正常であれば故障と判断していない。

また、照射による動作確認時の検知異常（検知・非検知が正常に切り替わらない状態）も確認された。動作確認時の検知異常においては、センサを検知状態から非検知状態とした時に、検知状態の出力電圧が出力される事象が確認されており、これを故障と定義した。

#### 6.1.1 光電センサ

##### (1) 5Gy/h・24V

4.2 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。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 6.1-1 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 6.1-2 に示す。

各光電センサの出力電圧の変化を図 6.1-1 から図 6.1-20 に示す。

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、照射線量率約 5Gy/h かつ 24V の入力電圧で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後 110.3 時間（集積吸収線量 514Gy）の動作確認で白紙を用いて検知状態としても検知せず、データロガーの出力電圧が 0V 付近から上昇しないことを確認した。しかし、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始後 35.2 時間（集積吸収線量 164Gy）に検知状態の出力電圧が 0V 付近まで低下していた。その後、照射開始後 38.0 時間（集積吸収線量 177Gy）に出力電圧が 24V 付近まで再上昇し、動作確認でも正常な動作を確認したが、出力電圧の低下が確認された照射開始後 35.2 時間（集積吸収線量 164Gy）で故障と判断した。

No.2 は、照射開始後 120.3 時間（集積吸収線量 545Gy）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、照射開始後 119.8 時間（集積吸収線量 542Gy）に出力電圧が低下していた。

No.3 は、No.2 と同様の事象が確認され、照射開始後 128.3 時間（集積吸収線量 552Gy）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、照射開始後 124.3 時間（集積吸収線量 534Gy）に出力電圧が低下していた。

No.4 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 136.3 時間（集積吸収線量 635Gy）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。しかし、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始後 46.0 時間（集積吸収線量 214Gy）に出力電圧が低下しており、その後照射開始後 46.1 時間（集積吸収線量 215Gy）に出力電圧は 24V 付近まで再上昇していたが、照射開始後 46.0 時間（集積吸収線量 214Gy）で故障と判断した。

No.5 は、No.2 と同様の事象が確認され、照射開始後 128.3 時間（集積吸収線量 589Gy）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、照射開始後 124.3 時間（集積吸収線量 570Gy）に出力電圧が低下していた。

No.6 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 120.3 時間（集積吸収線量 560Gy）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、照射開始後 42.6 時間（集積吸収線量 198Gy）に出力電圧が低下しており、その後照射開始後 42.6 時間（集積吸収線量 198Gy）に出力電圧は 24V 付近まで再上昇していたが、照射開始後 42.6 時間（集積吸収線量 198Gy）で故障と判断した。

No.7 は、照射開始後 144.3 時間（集積吸収線量 653Gy）の動作確認で非検知状態としても出力電圧が約 24V から低下しないことを確認した。従って、出力電圧が低下しないと確認された照射開始約 144.3 時間後（集積吸収線量 653Gy）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 140.3 時間後（集積吸収線量 635Gy）の間で測定不能になったと考えられる。また、検知不能となった後も照射を継続すると、照射開始後 152.8 時間（集積吸収線量 692Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下した。

No.8 は、No.2 と同様の事象が確認され、照射開始後 160.3 時間（集積吸収線量 689Gy）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、照射開始後 158.6 時間（集積吸収線量 682Gy）に出力電圧が低下していた。

No.9 は、No.2 と同様の事象が確認され、照射開始後 160.3 時間（集積吸収線量 746Gy）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、照射開始後 157.5 時間（集積吸収線量 733Gy）に出力電圧が低下していた。

No.10 は、No.2 と同様の事象が確認され、照射開始後 128.3 時間（集積吸収線量 589Gy）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、照射開始後 124.3 時間（集積吸収線量 570Gy）に出力電圧が低下していた。

表 6.1-1 光電センサ (5Gy/h・24V) の故障を確認した集積吸収線量

センサ 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]	故障時の 様子
光電 5_24V-1	4.66	35.2	164	486 (SD <sup>※1</sup> :202)	出力電圧低下
光電 5_24V-2	4.53	119.8	542		出力電圧低下
光電 5_24V-3	4.30	124.3	534		出力電圧低下
光電 5_24V-4	4.66	46.0	214		出力電圧低下
光電 5_24V-5	4.59	124.3	570		出力電圧低下
光電 5_24V-6	4.66	42.6	198		出力電圧低下
光電 5_24V-7	4.53	144.3	653		検知異常
光電 5_24V-8	4.30	158.6	682		出力電圧低下
光電 5_24V-9	4.66	157.5	733		出力電圧低下
光電 5_24V-10	4.59	124.3	570		出力電圧低下

※1 SD : 標準偏差

表 6.1-2 光電センサ (5Gy/h・24V) の不具合発生前の集積吸収線量

センサ 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]
光電 5_24V-1	4.66	64.5	301 <sup>※1</sup>	603 <sup>※2</sup> (SD <sup>※3</sup> :73)
光電 5_24V-2	4.53	112.3	508	
光電 5_24V-3	4.30	124.3	534	
光電 5_24V-4	4.66	64.5	301 <sup>※1</sup>	
光電 5_24V-5	4.59	124.3	570	
光電 5_24V-6	4.66	64.5	301 <sup>※1</sup>	
光電 5_24V-7	4.53	140.3	635	
光電 5_24V-8	4.30	156.3	672	
光電 5_24V-9	4.66	156.3	728	
光電 5_24V-10	4.59	124.3	570	

※1 動作確認開始前に出力電圧の低下が発生したが、1回目の動作確認の照射時間を記載している。

※2 動作確認で正常に動作することを確認した No.1,4,6 以外から算出している。

※3 SD : 標準偏差

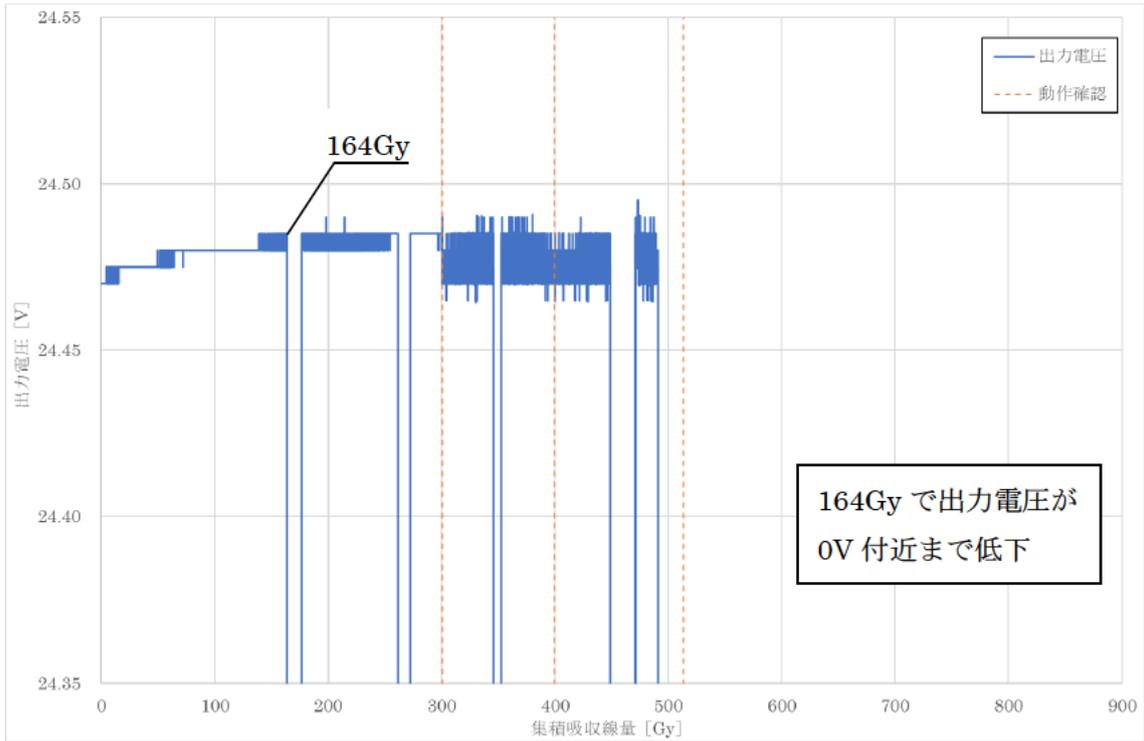


図 6.1-1 光電 5\_24V-1 出力電圧変化

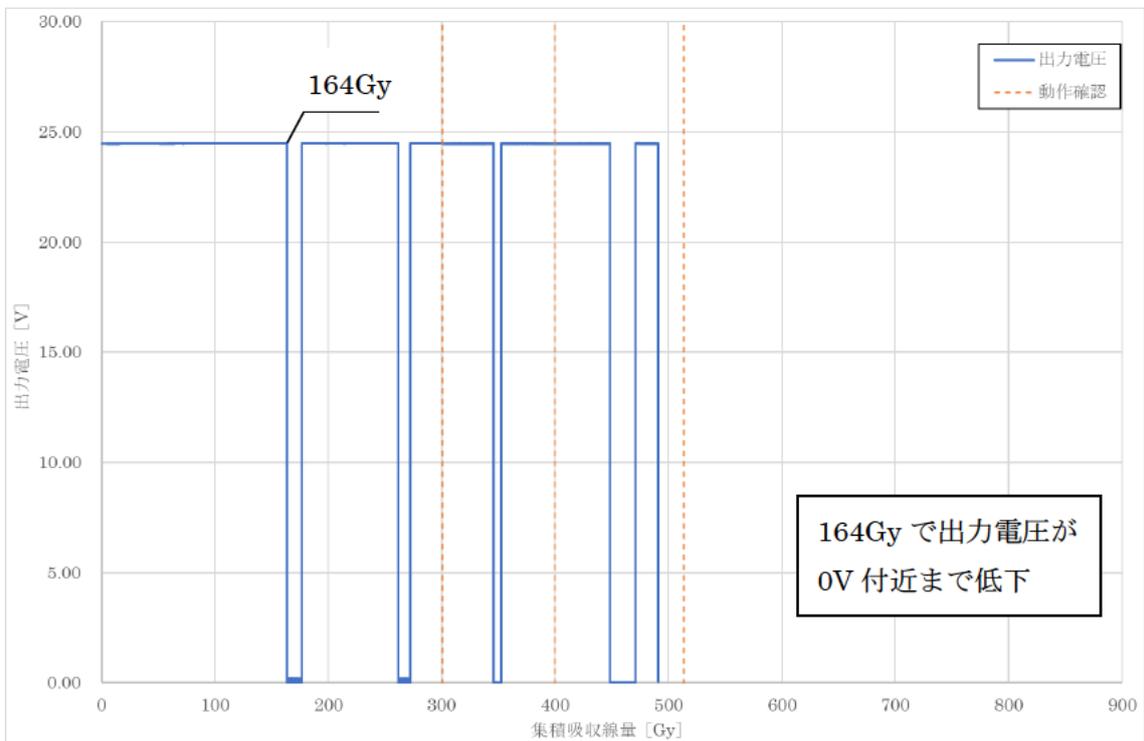


図 6.1-2 光電 5\_24V-1 出力電圧変化 (縮小図)

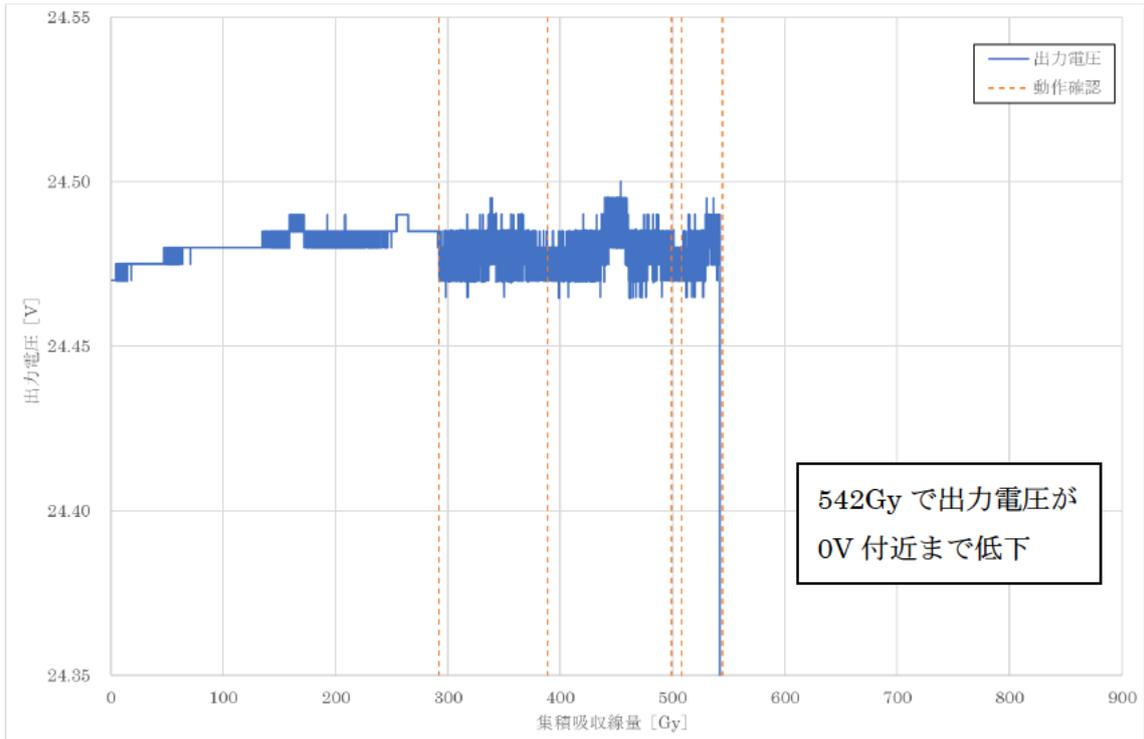


図 6.1-3 光電 5\_24V-2 出力電圧変化

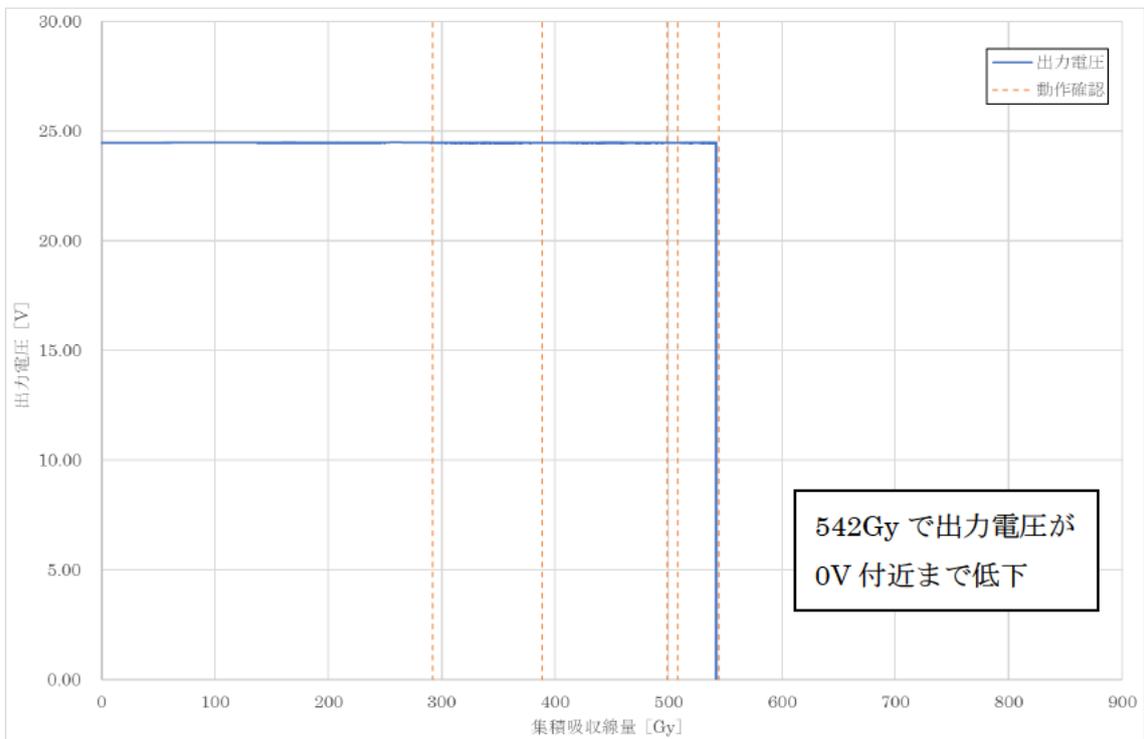


図 6.1-4 光電 5\_24V-2 出力電圧変化 (縮小図)

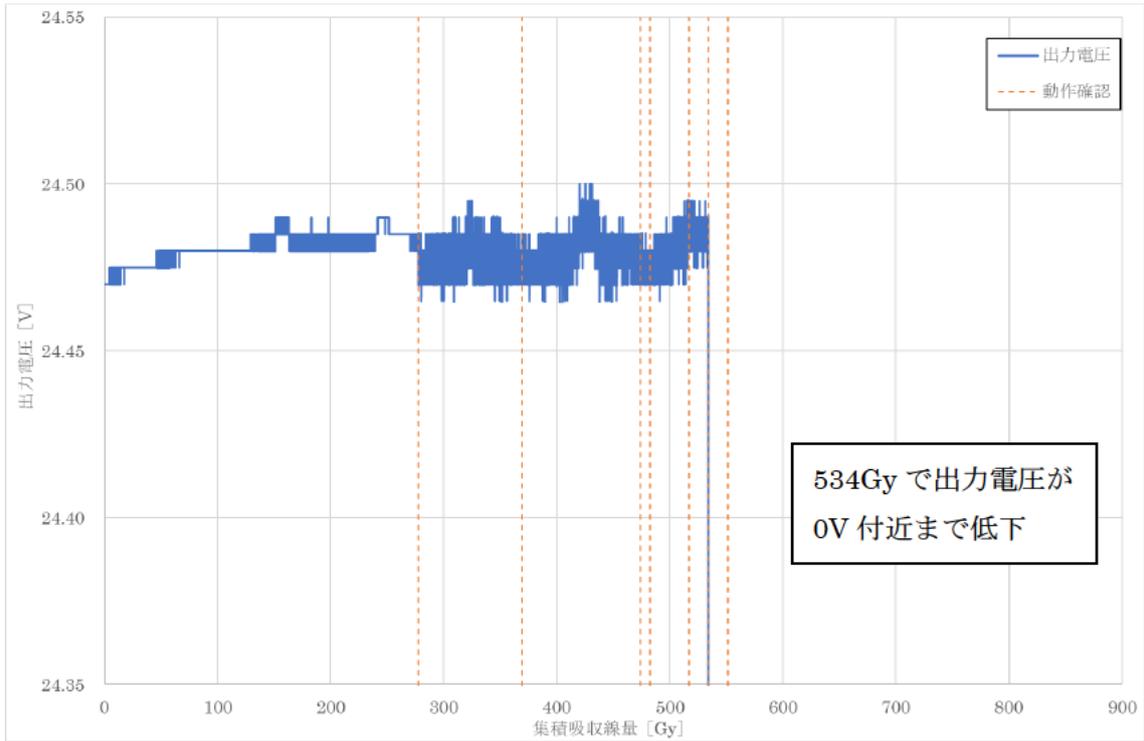


図 6.1-5 光電 5\_24V-3 出力電圧変化

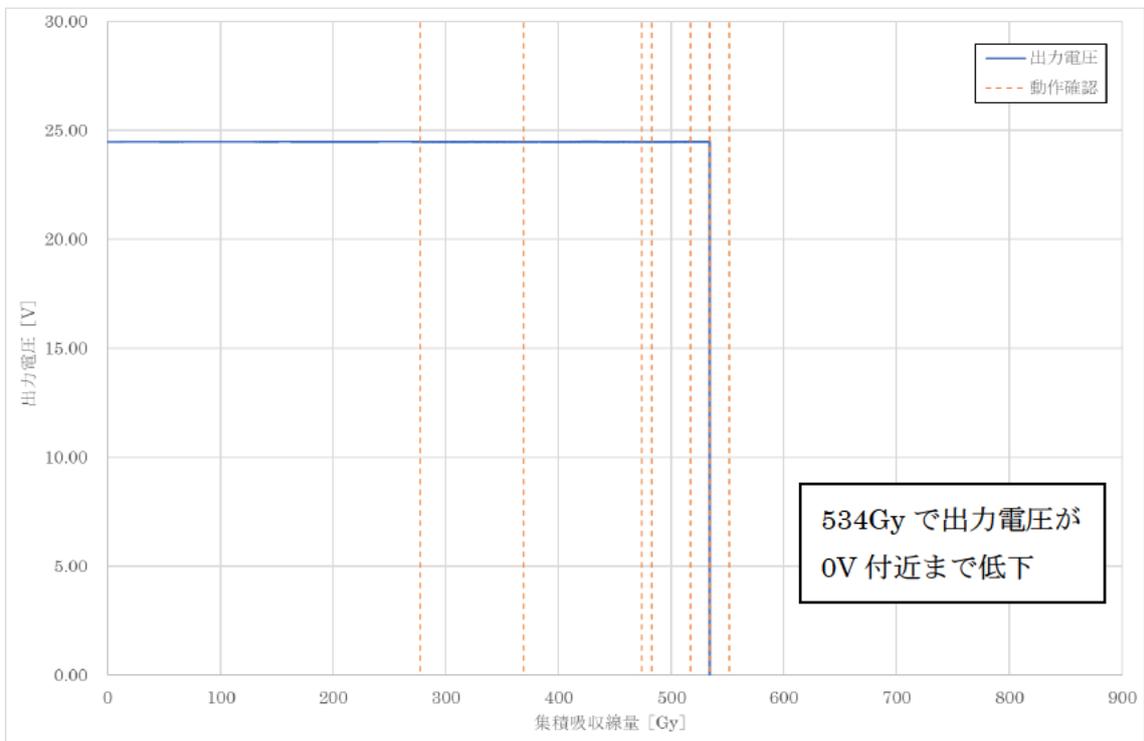


図 6.1-6 光電 5\_24V-3 出力電圧変化 (縮小図)

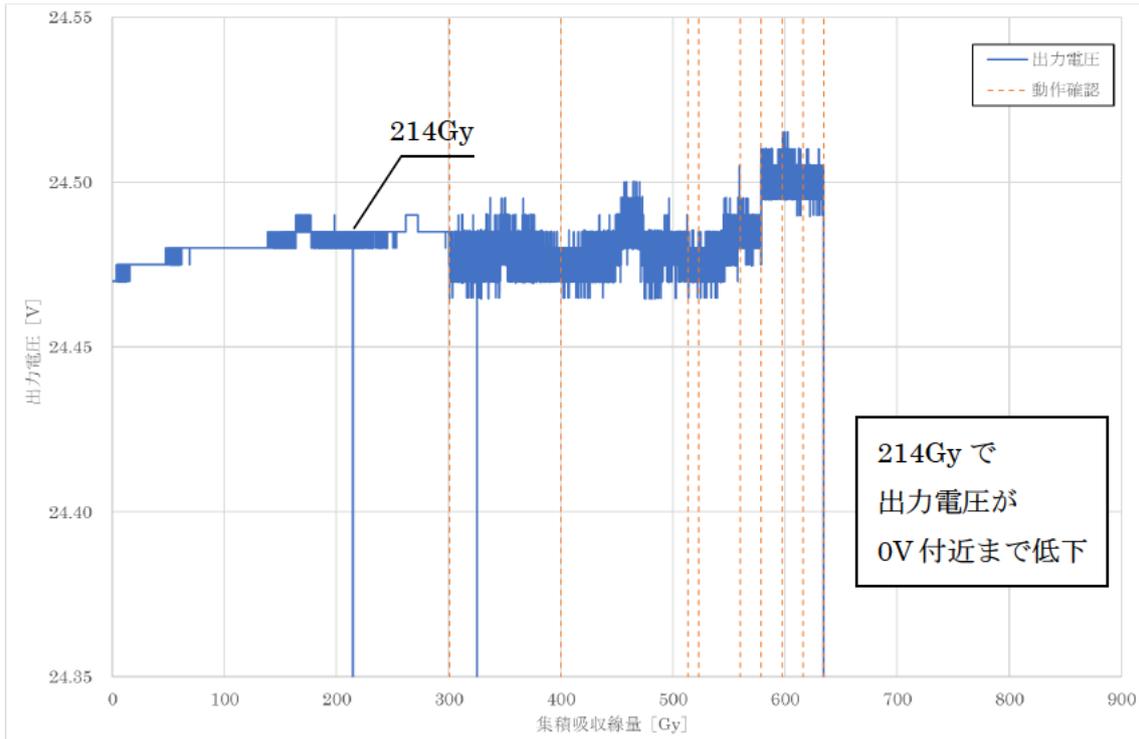


図 6.1-7 光電 5\_24V-4 出力電圧変化

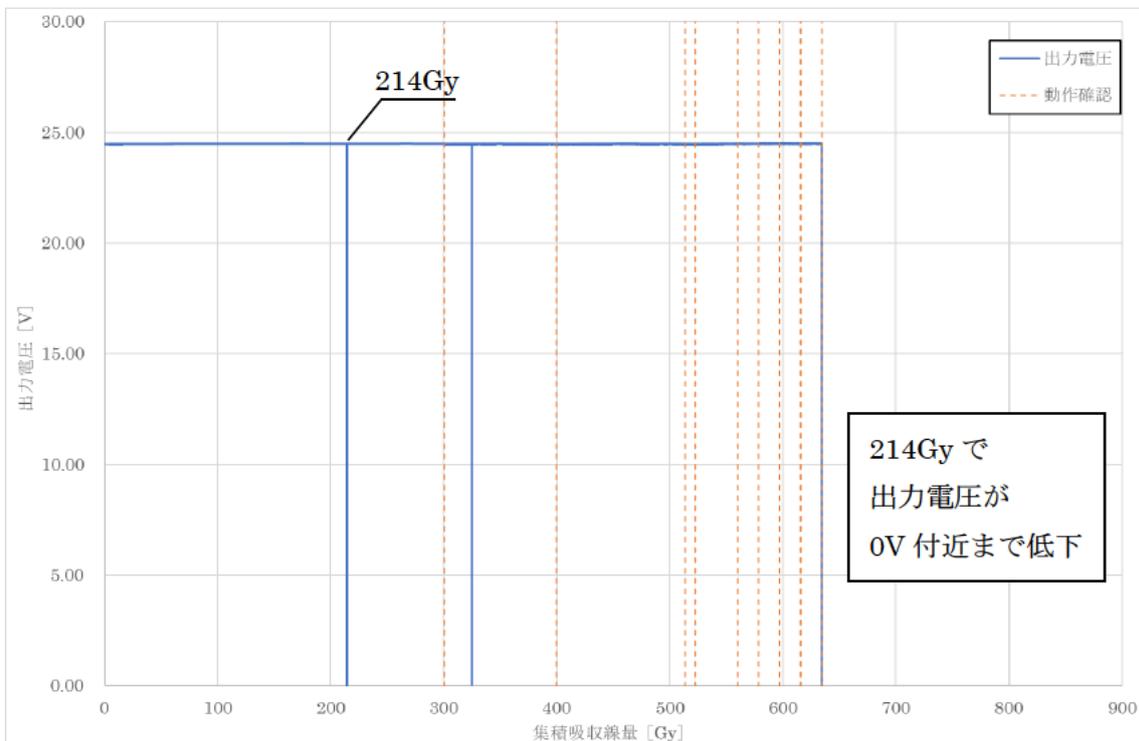


図 6.1-8 光電 5\_24V-4 出力電圧変化 (縮小図)

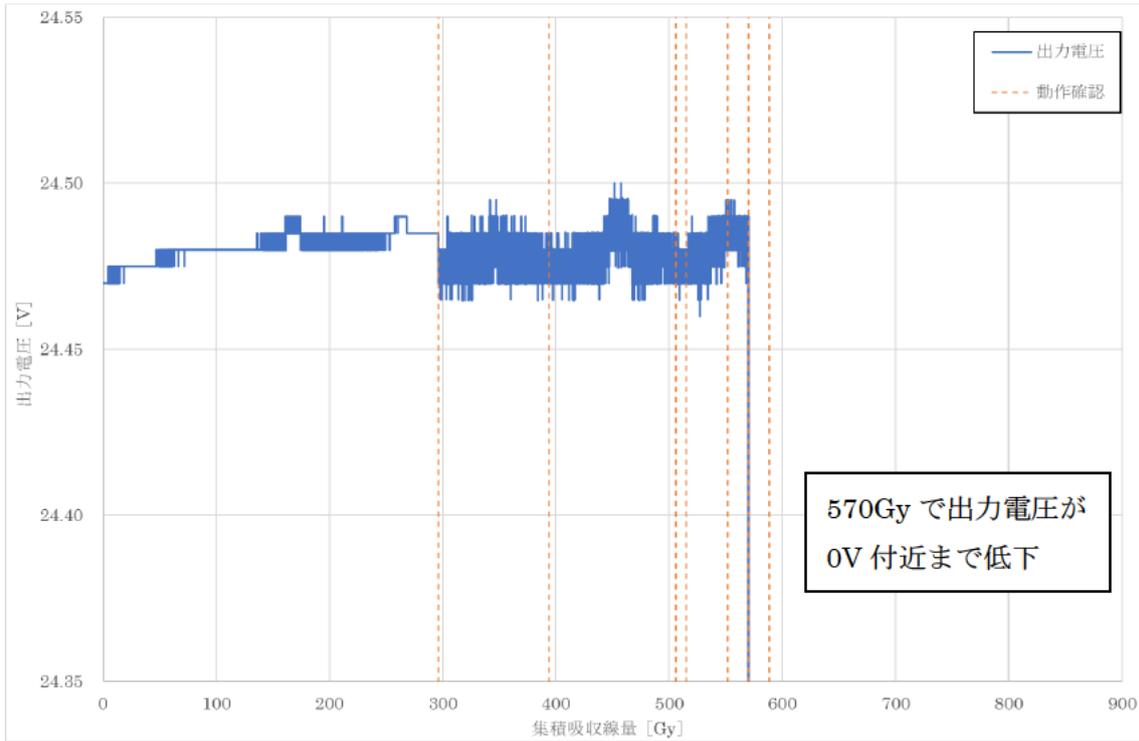


図 6.1-9 光電 5\_24V-5 出力電圧変化

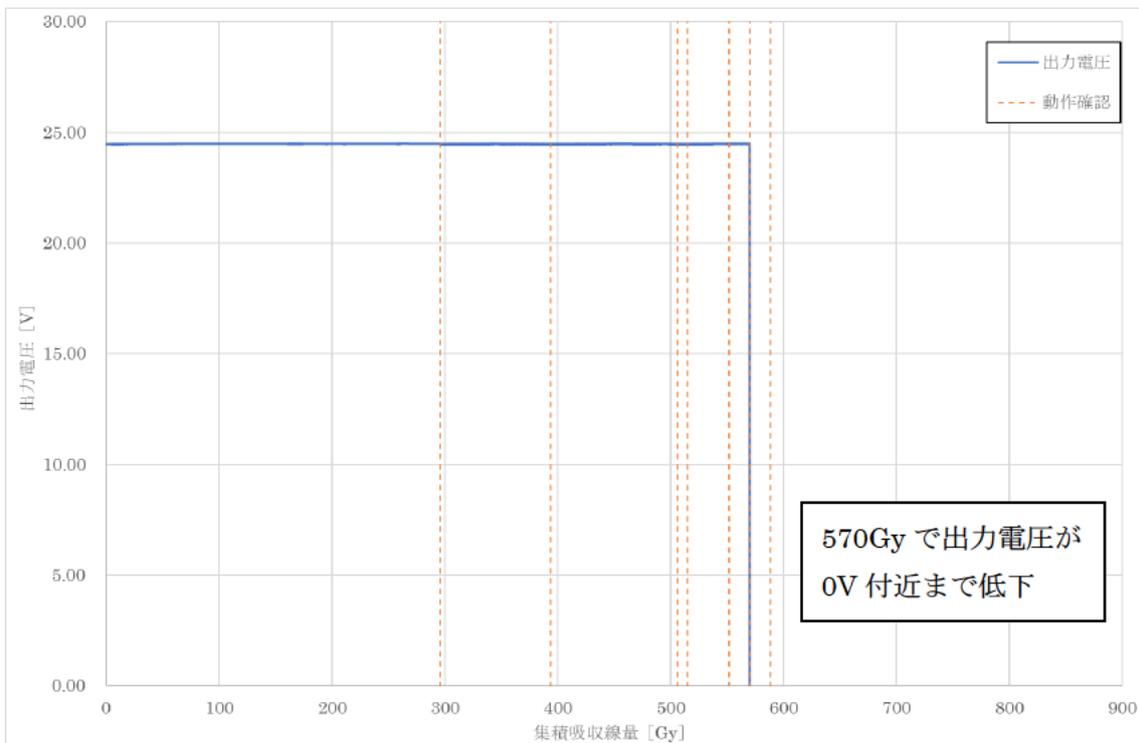


図 6.1-10 光電 5\_24V-5 出力電圧変化 (縮小図)

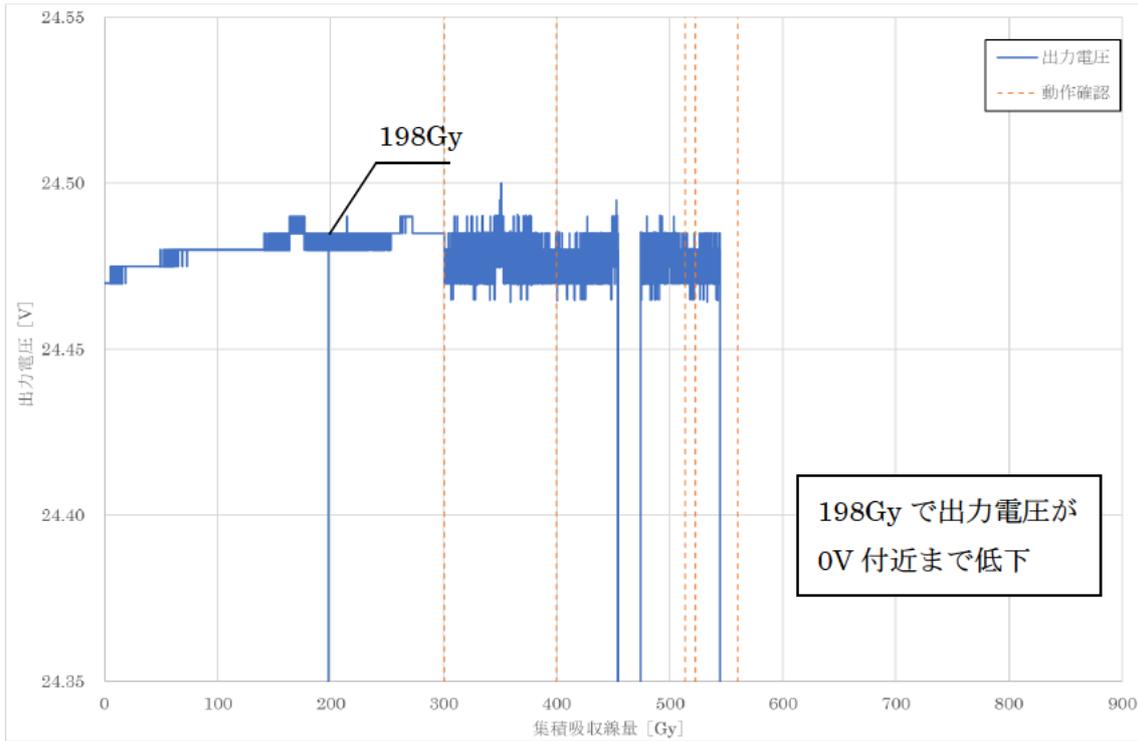


図 6.1-11 光電 5\_24V-6 出力電圧変化

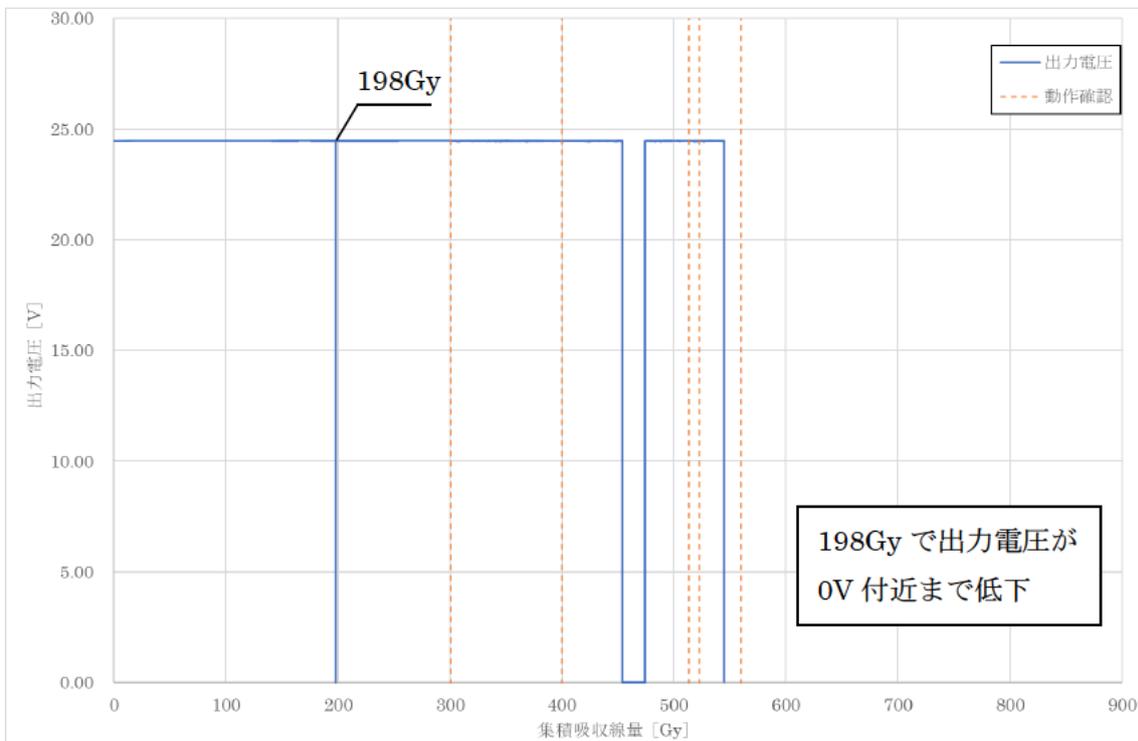


図 6.1-12 光電 5\_24V-6 出力電圧変化 (縮小図)

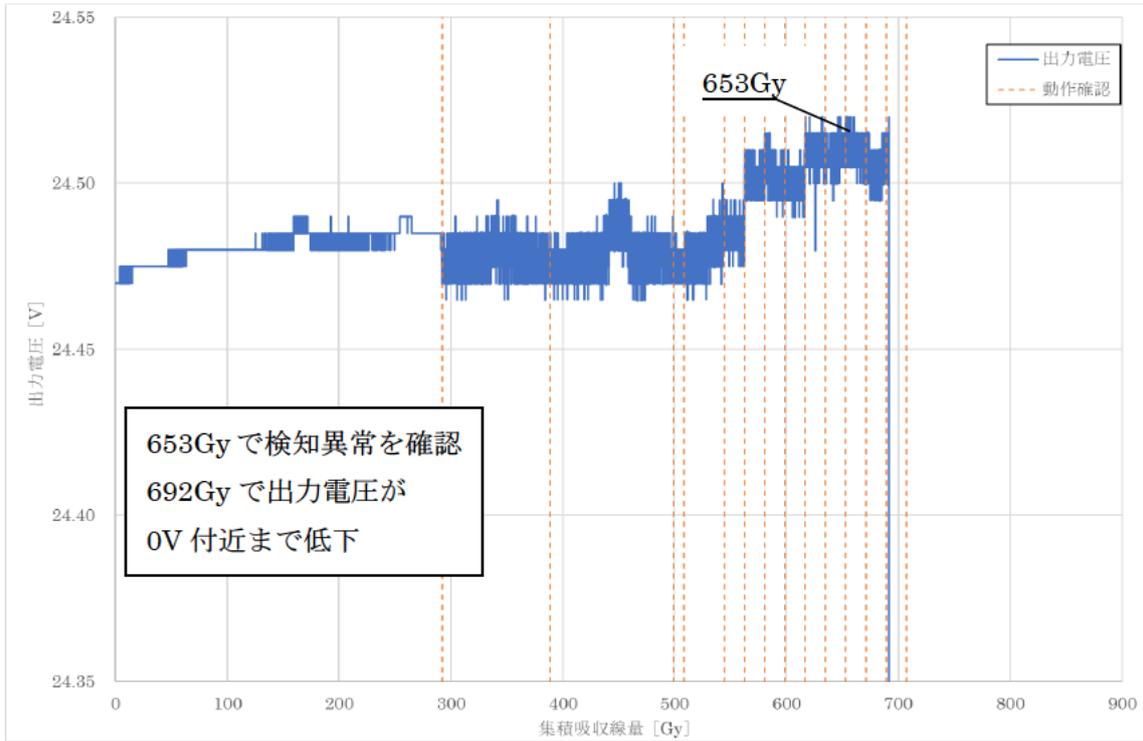


図 6.1-13 光電 5\_24V-7 出力電圧変化

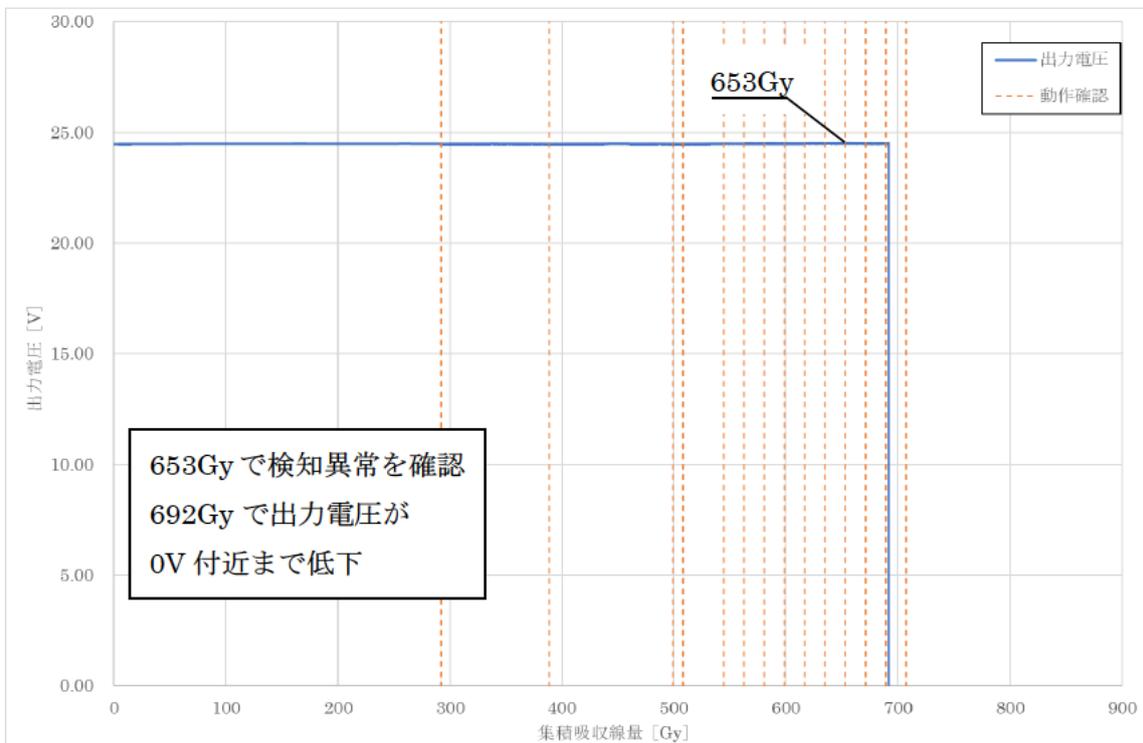


図 6.1-14 光電 5\_24V-7 出力電圧変化 (縮小図)

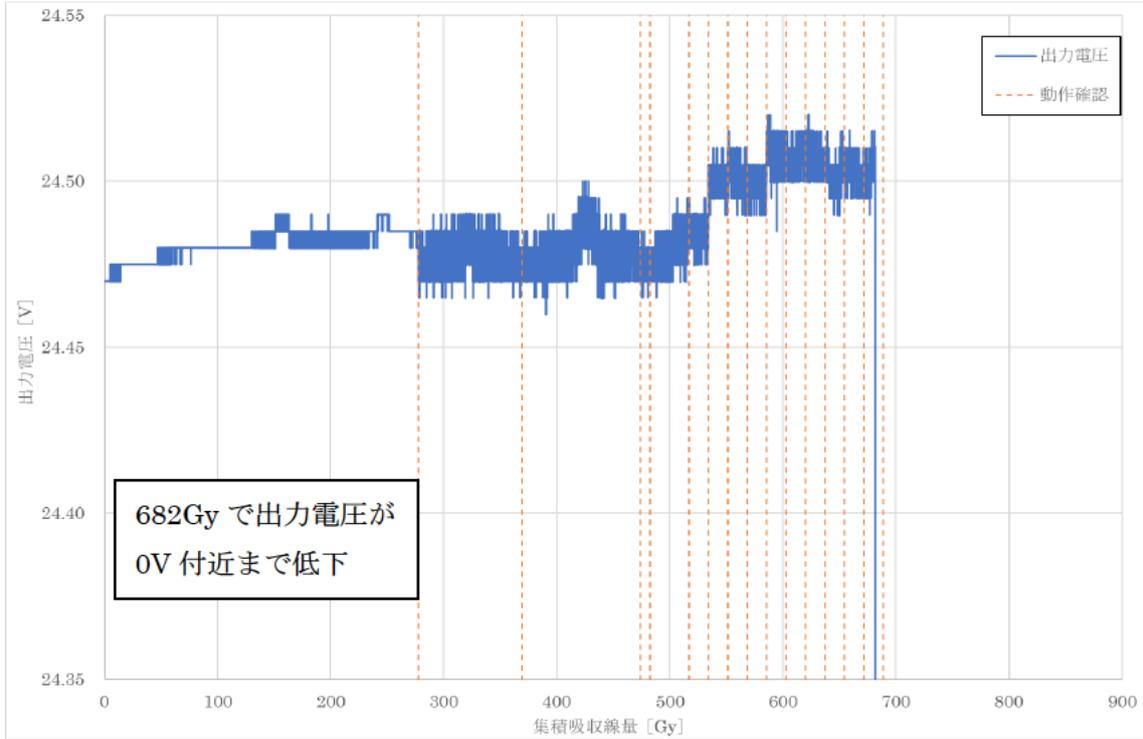


図 6.1-15 光電 5\_24V-8 出力電圧変化

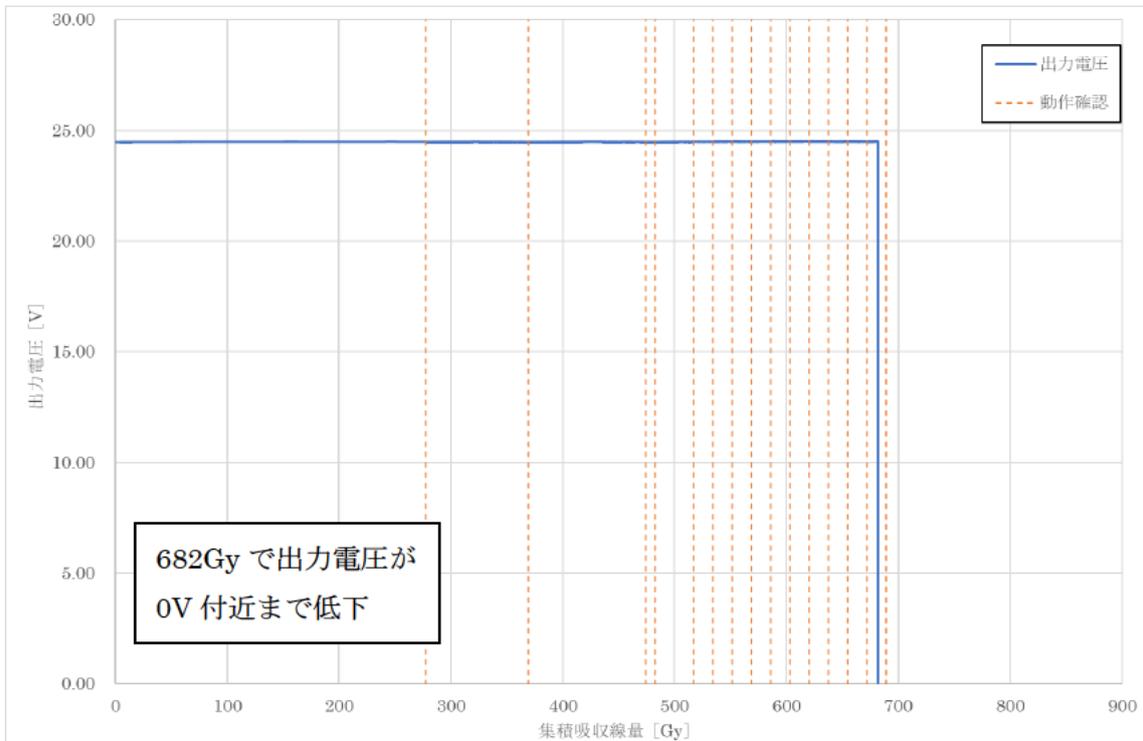


図 6.1-16 光電 5\_24V-8 出力電圧変化 (縮小図)

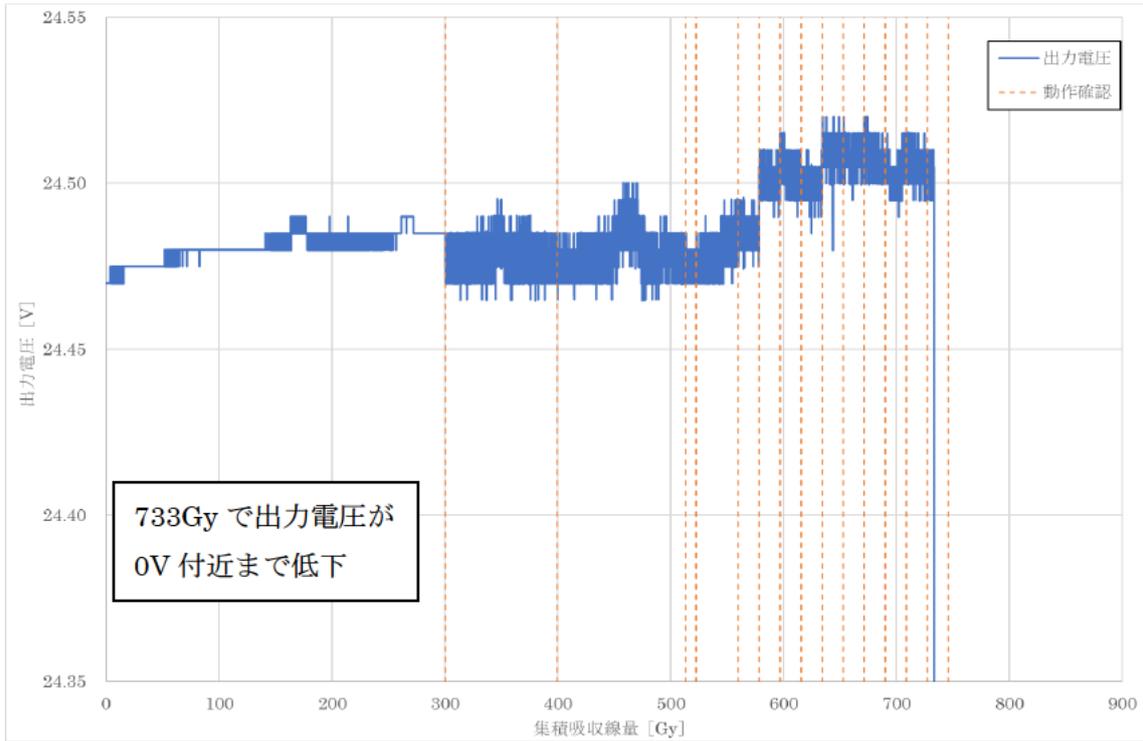


図 6.1-17 光電 5\_24V-9 出力電圧変化

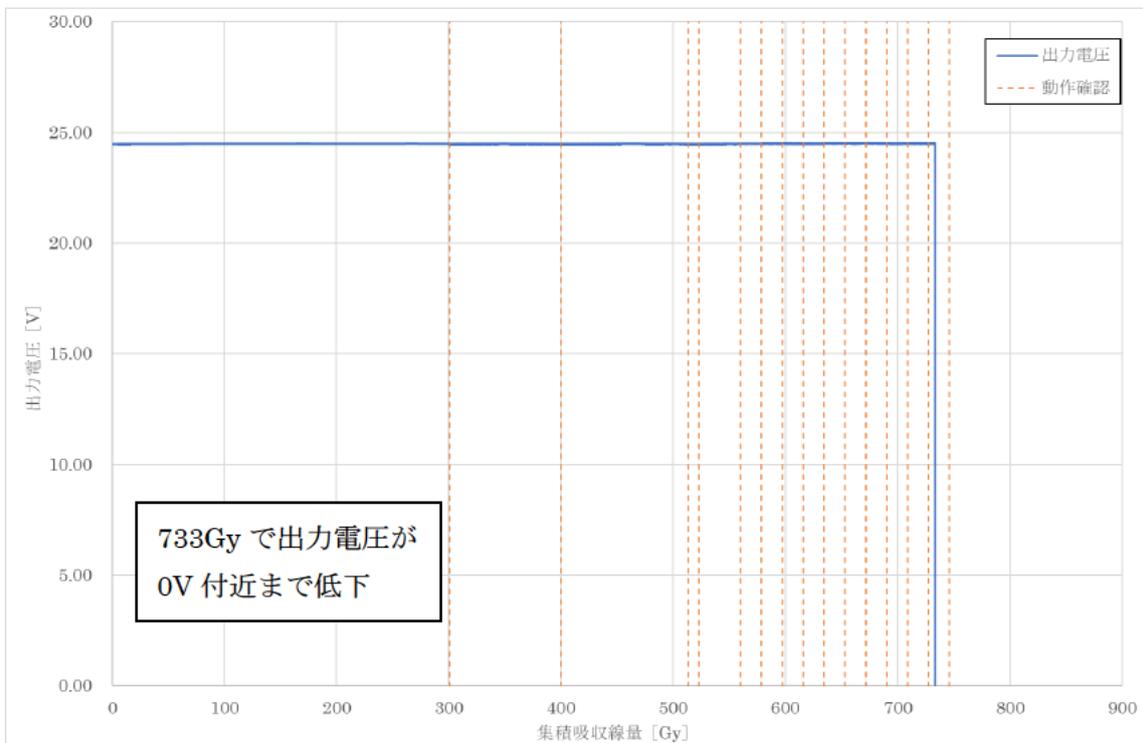


図 6.1-18 光電 5\_24V-9 出力電圧変化 (縮小図)

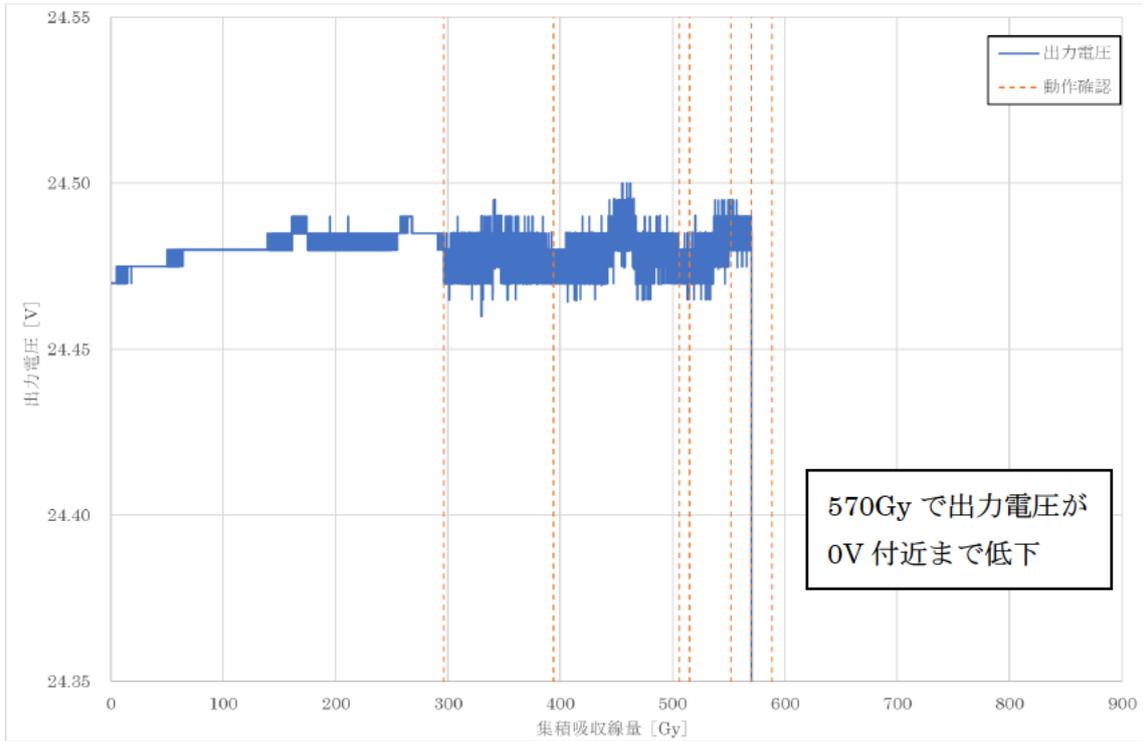


図 6.1-19 光電 5\_24V-10 出力電圧変化

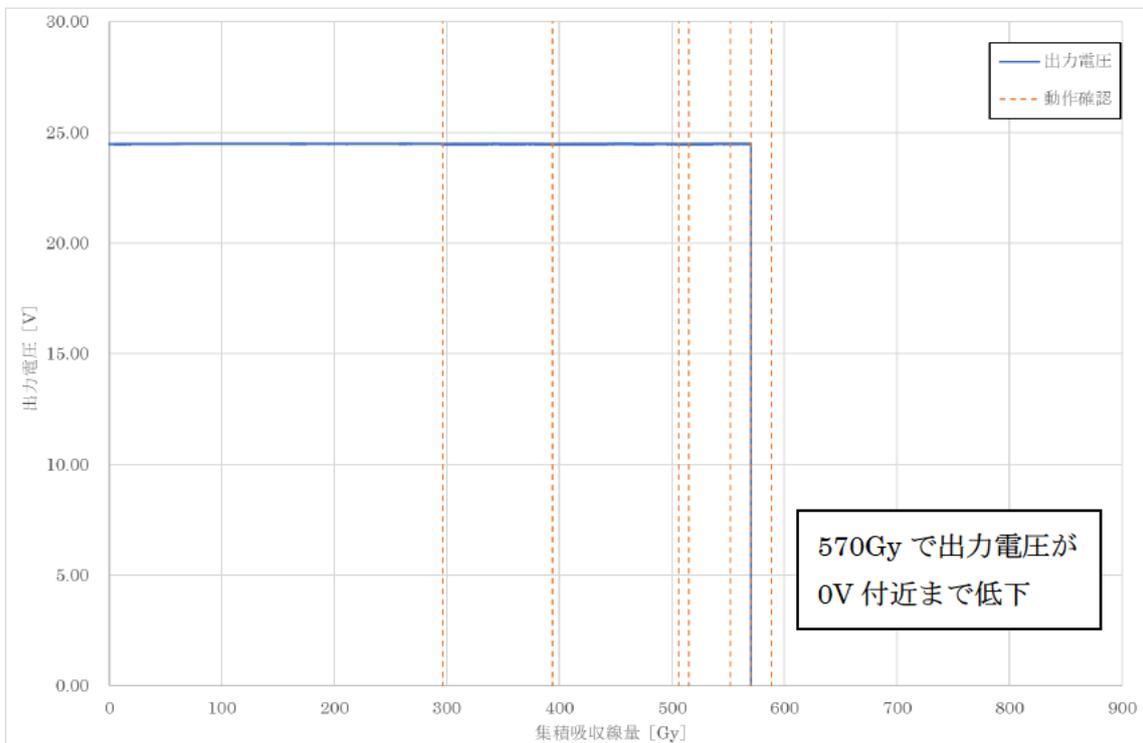


図 6.1-20 光電 5\_24V-10 出力電圧変化 (縮小図)

## (2) 100Gy/h・12V

4.2 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。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 6.1-3 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 6.1-4 に示す。

各光電センサの出力電圧の変化を図 6.1-21 から図 6.1-40 に示す。

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、照射線量率約 100Gy/h かつ 12V の入力電圧で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 567Gy）の動作確認で正常に検知し、出力電圧も正常に出力されることを確認した。しかし、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が 0V 付近まで低下し、測定不能となった。

No.2 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 629Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.3 は、照射開始後 5.10 時間（集積吸収線量 579Gy）の動作確認時に白紙を用いて検知状態としても検知せず、データロガーの出力電圧が 0V 付近から上昇し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、照射開始後時間 4.96（集積吸収線量 563Gy）に出力電圧が低下していた。

No.4 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 673Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.5 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 628Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.6 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 567Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.7 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 6.10 時間（集積吸収線量 650Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.8 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 670Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.9 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 6.10 時間（集積吸収線量 695Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

No.10 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 5.90 時間（集積吸収線量 628Gy）の動作確認時に正常に動作することを確認したが、本体の電源を入れなおすと、データロガーの

出力電圧が低下し、測手不能となったことを確認した。

表 6.1-3 光電センサ（100Gy/h・12V）の故障を確認した集積吸収線量

センサ 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]	故障時の 様子
光電 100_12V-1	96	5.90 <sup>※1</sup>	567	627 (SD <sup>※2</sup> :45)	出力電圧低下
光電 100_12V-2	107	5.90 <sup>※1</sup>	629		出力電圧低下
光電 100_12V-3	114	4.96	563		出力電圧低下
光電 100_12V-4	114	5.90 <sup>※1</sup>	673		出力電圧低下
光電 100_12V-5	106	5.90 <sup>※1</sup>	628		出力電圧低下
光電 100_12V-6	96	5.90 <sup>※1</sup>	567		出力電圧低下
光電 100_12V-7	107	6.10 <sup>※1</sup>	650		出力電圧低下
光電 100_12V-8	114	5.90 <sup>※1</sup>	670		出力電圧低下
光電 100_12V-9	114	6.10 <sup>※1</sup>	695		出力電圧低下
光電 100_12V-10	106	5.90 <sup>※1</sup>	628		出力電圧低下

※1 各照射時間の動作確認後、センサ本体の電源を入れなおすと検知状態の出力電圧が0V付近まで低下した。

※2 SD：標準偏差

表 6.1-4 光電センサ（100Gy/h・12V）の不具合発生前の集積吸収線量

センサ 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]
光電 100_12V-1	96	5.90	567	626 (SD <sup>※1</sup> :46)
光電 100_12V-2	107	5.90	629	
光電 100_12V-3	114	4.90	556	
光電 100_12V-4	114	5.90	673	
光電 100_12V-5	106	5.90	628	
光電 100_12V-6	96	5.90	567	
光電 100_12V-7	107	6.10	650	
光電 100_12V-8	114	5.90	670	
光電 100_12V-9	114	6.10	695	
光電 100_12V-10	106	5.90	628	

※1 SD：標準偏差

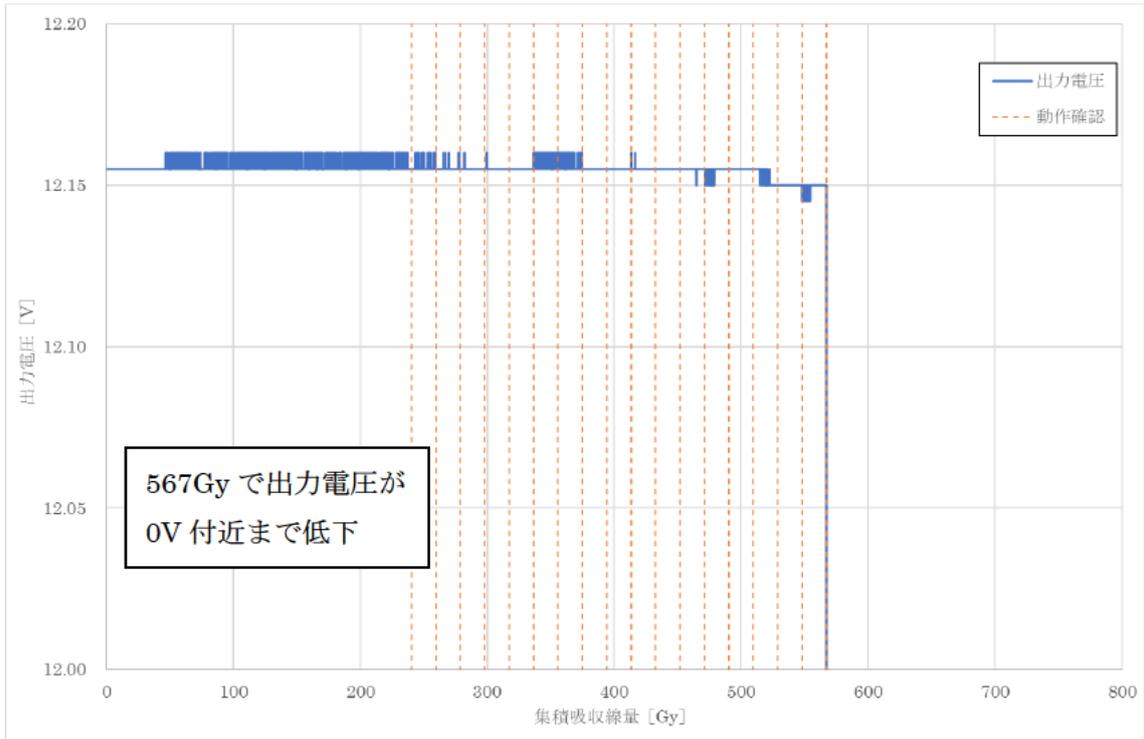


図 6.1-21 光電 100\_12V-1 出力電圧変化

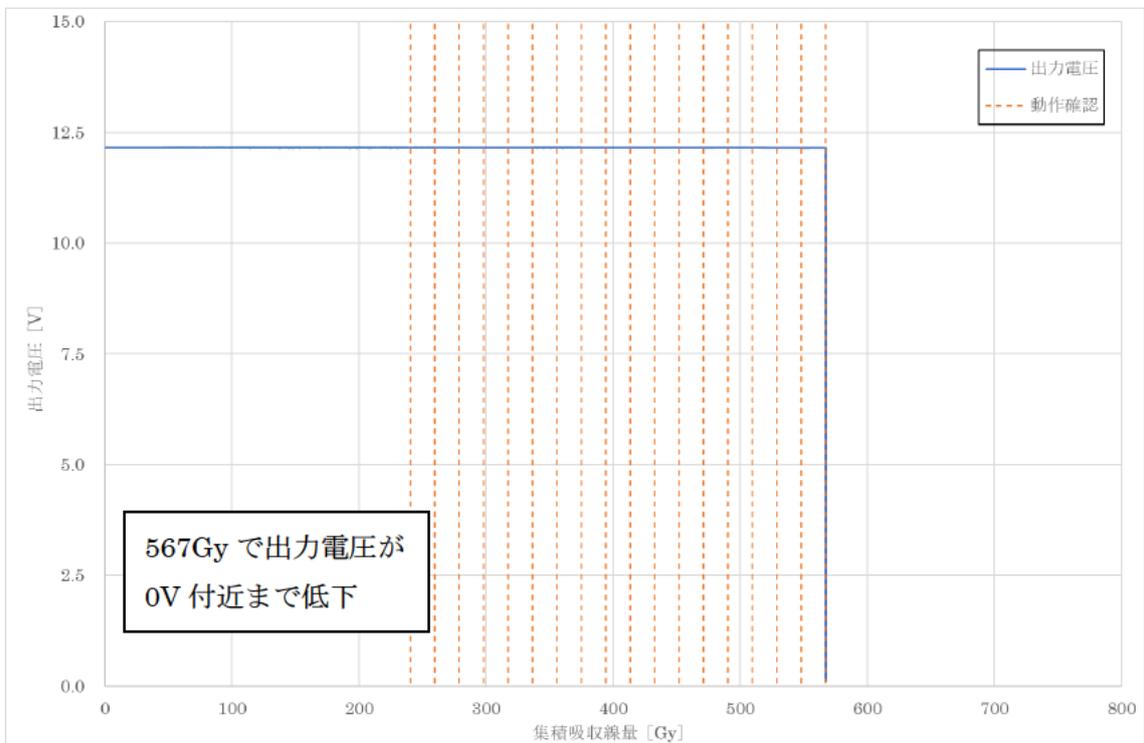


図 6.1-22 光電 100\_12V-1 出力電圧変化 (縮小図)

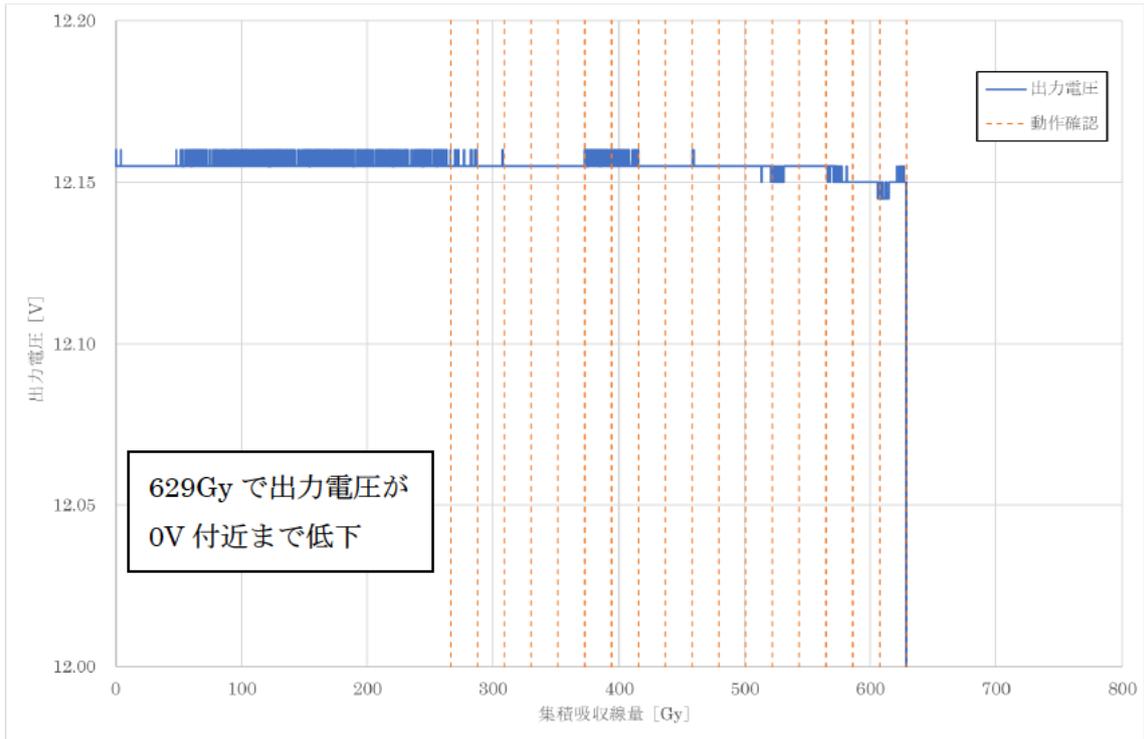


図 6.1-23 光電 100\_12V-2 出力電圧変化

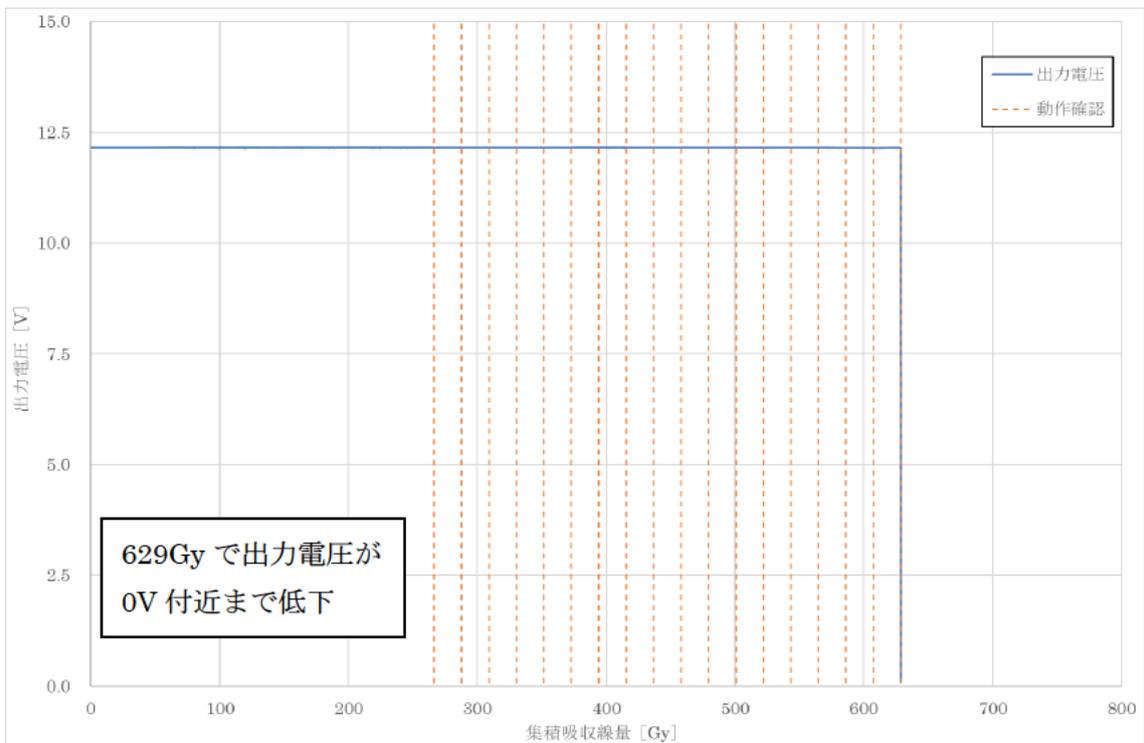


図 6.1-24 光電 100\_12V-2 出力電圧変化 (縮小図)

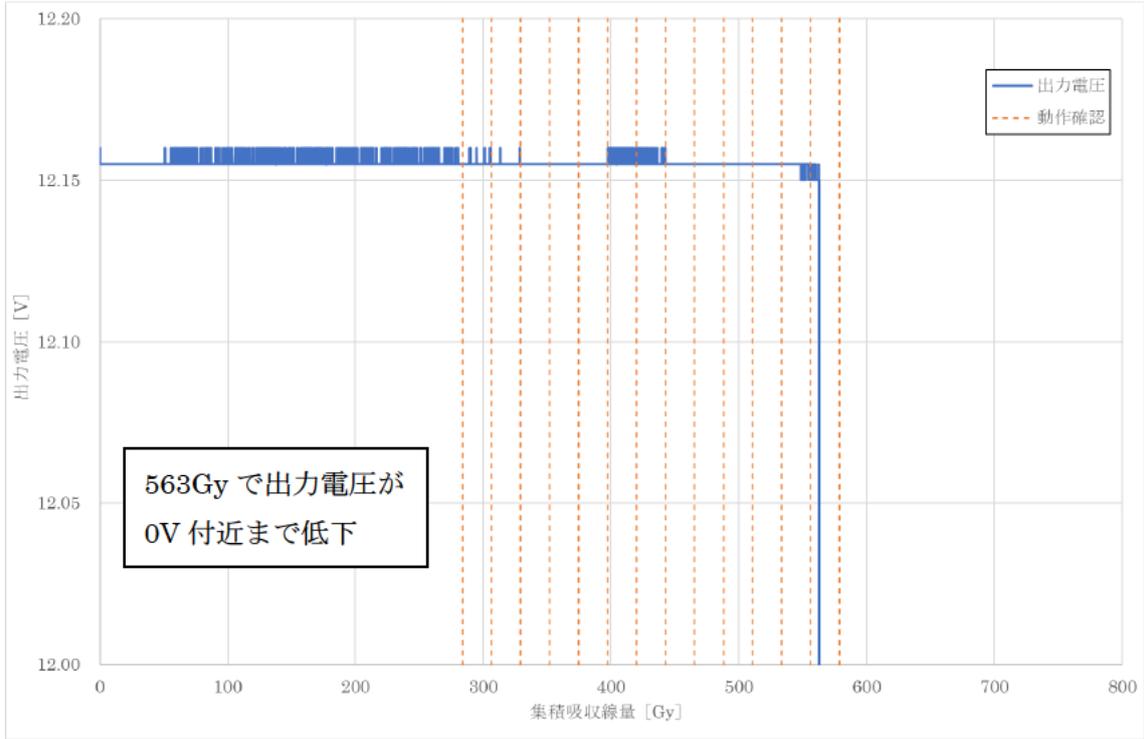


図 6.1-25 光電 100\_12V-3 出力電圧変化

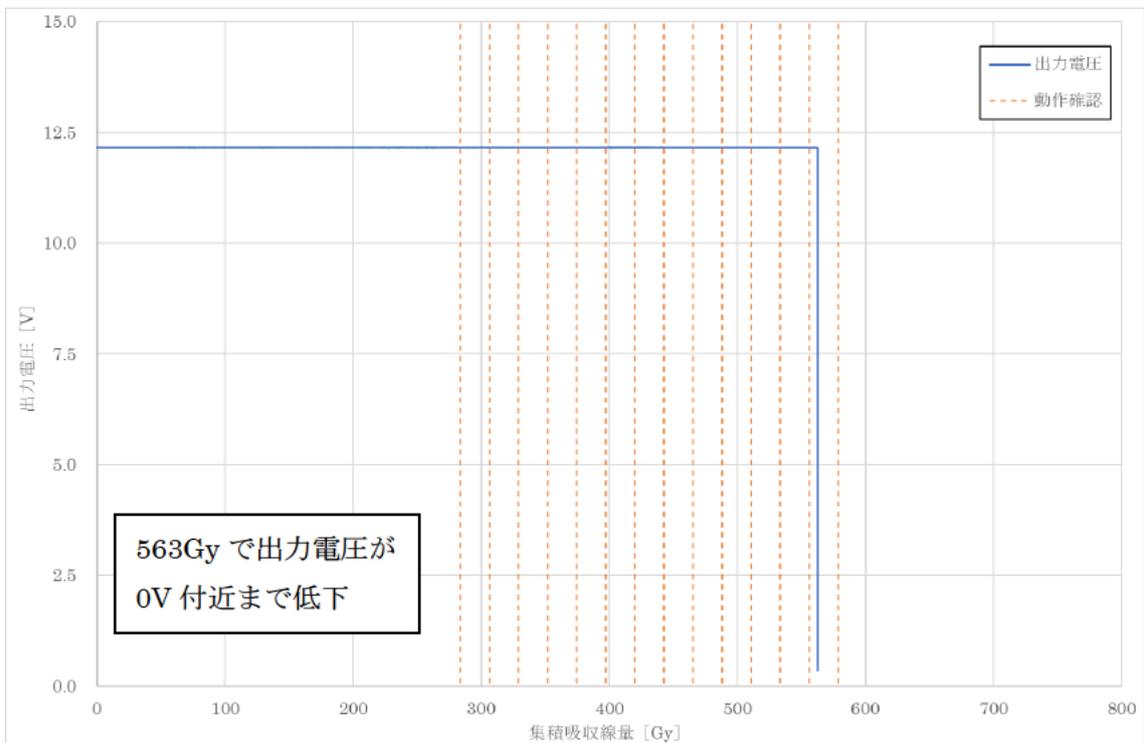


図 6.1-26 光電 100\_12V-3 出力電圧変化 (縮小図)

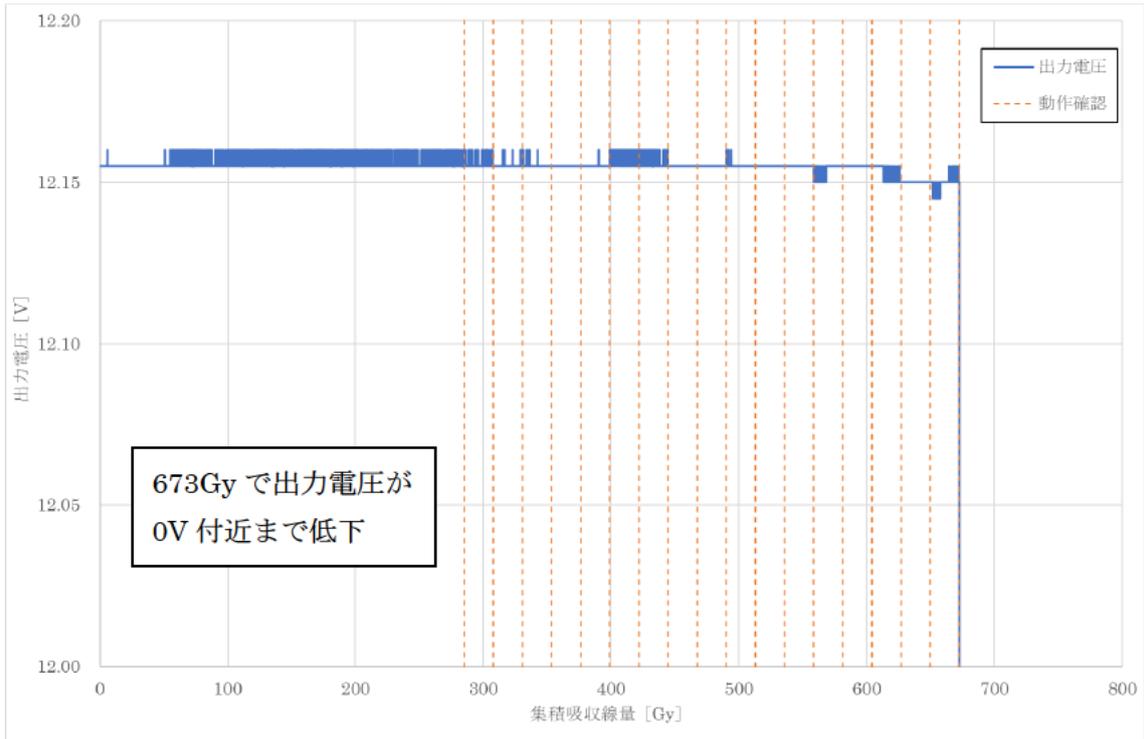


図 6.1-27 光電 100\_12V-4 出力電圧変化

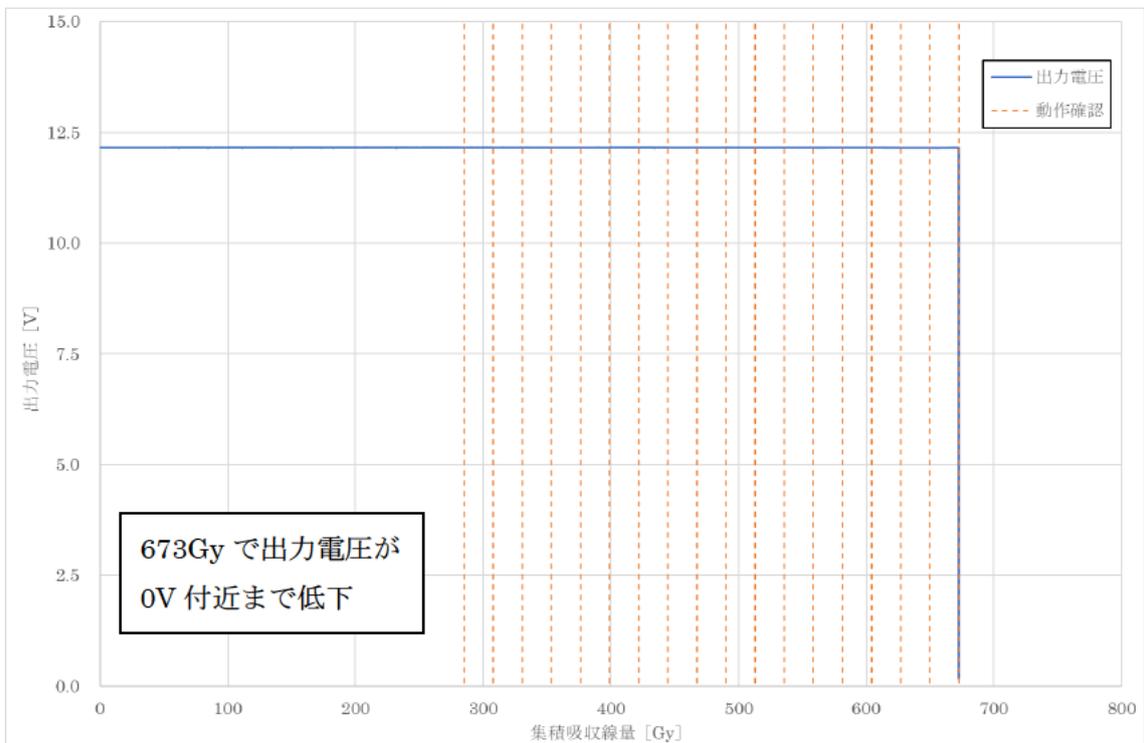


図 6.1-28 光電 100\_12V-4 出力電圧変化 (縮小図)

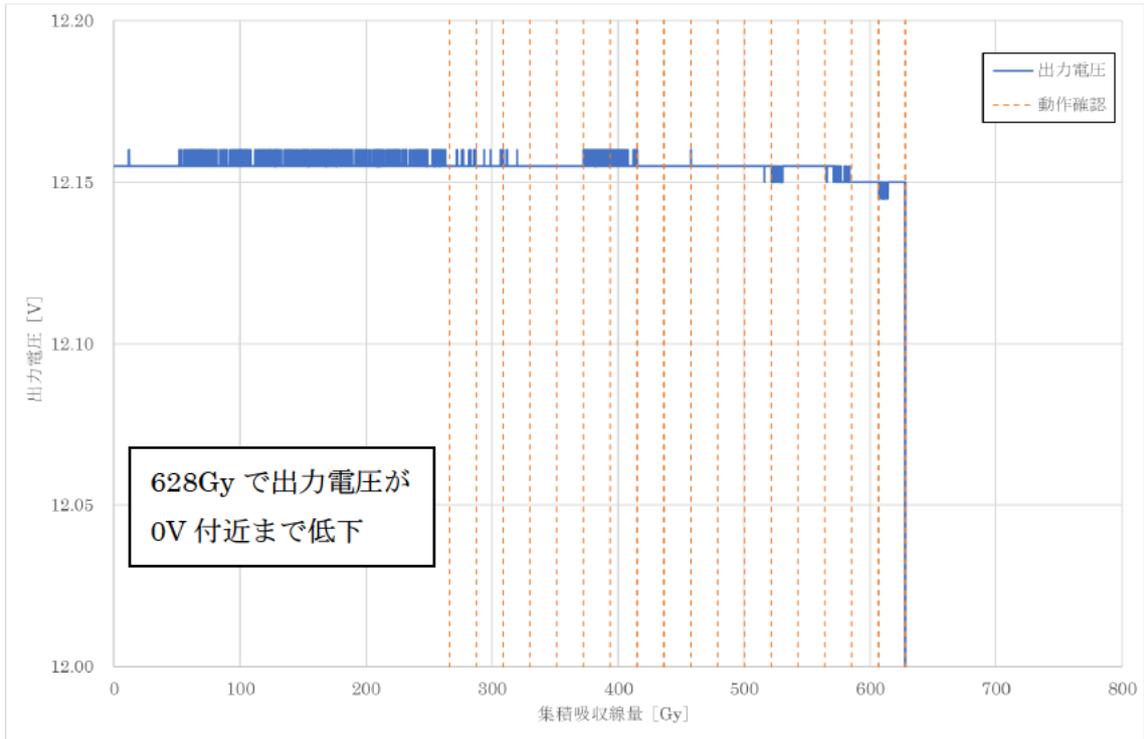


図 6.1-29 光電 100\_12V-5 出力電圧変化

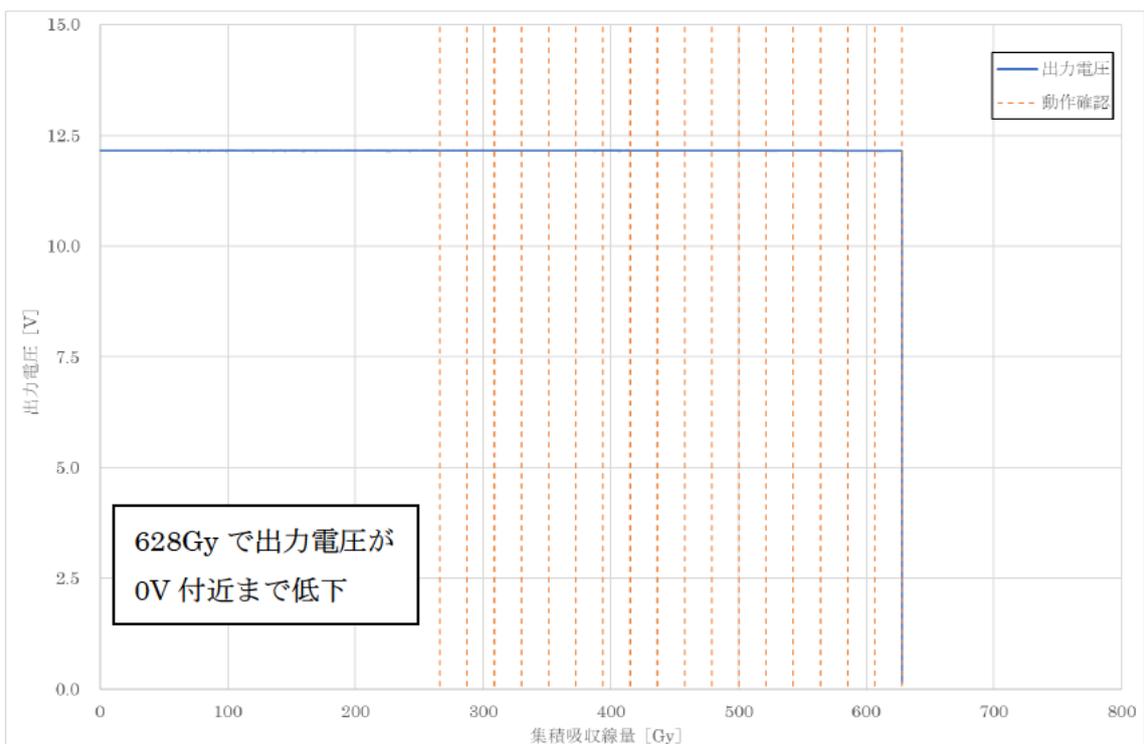


図 6.1-30 光電 100\_12V-5 出力電圧変化 (縮小図)

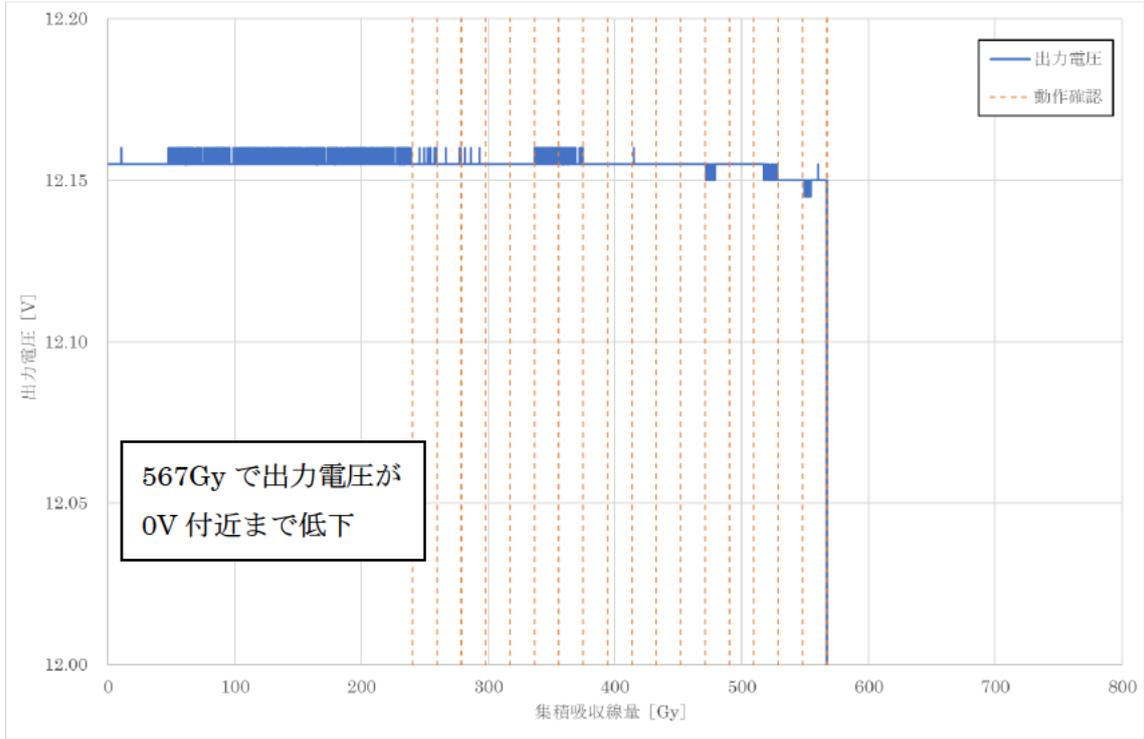


図 6.1-31 光電 100\_12V-6 出力電圧変化

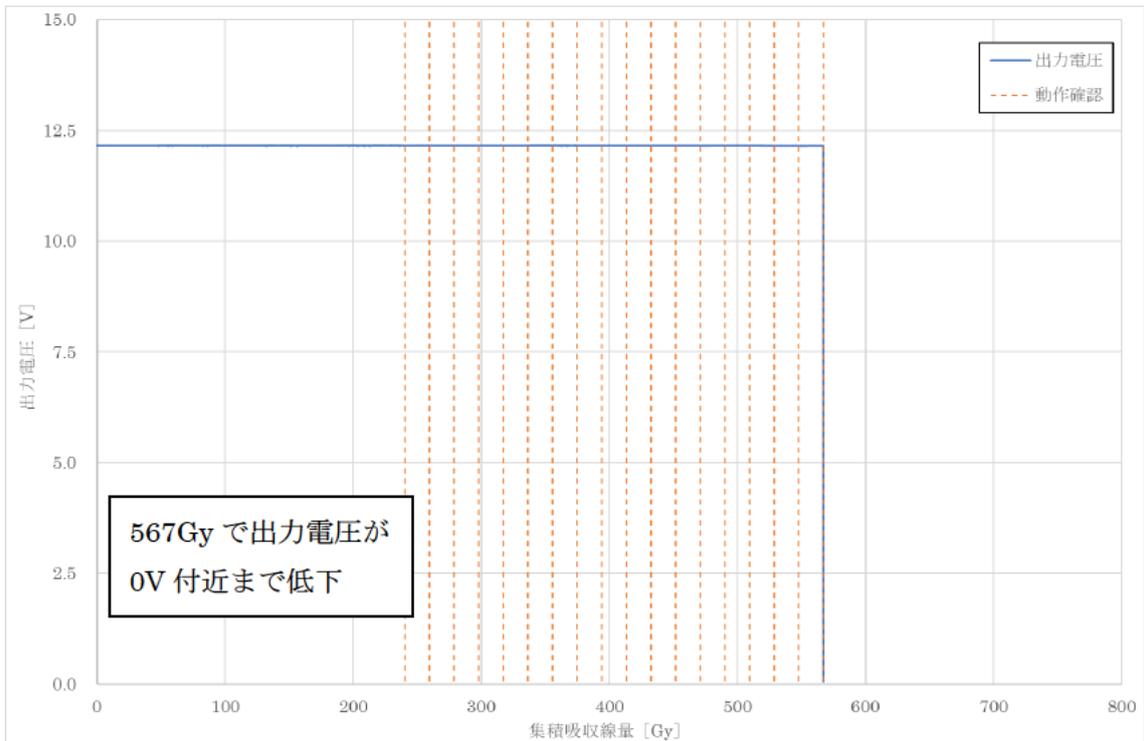


図 6.1-32 光電 100\_12V-6 出力電圧変化 (縮小図)

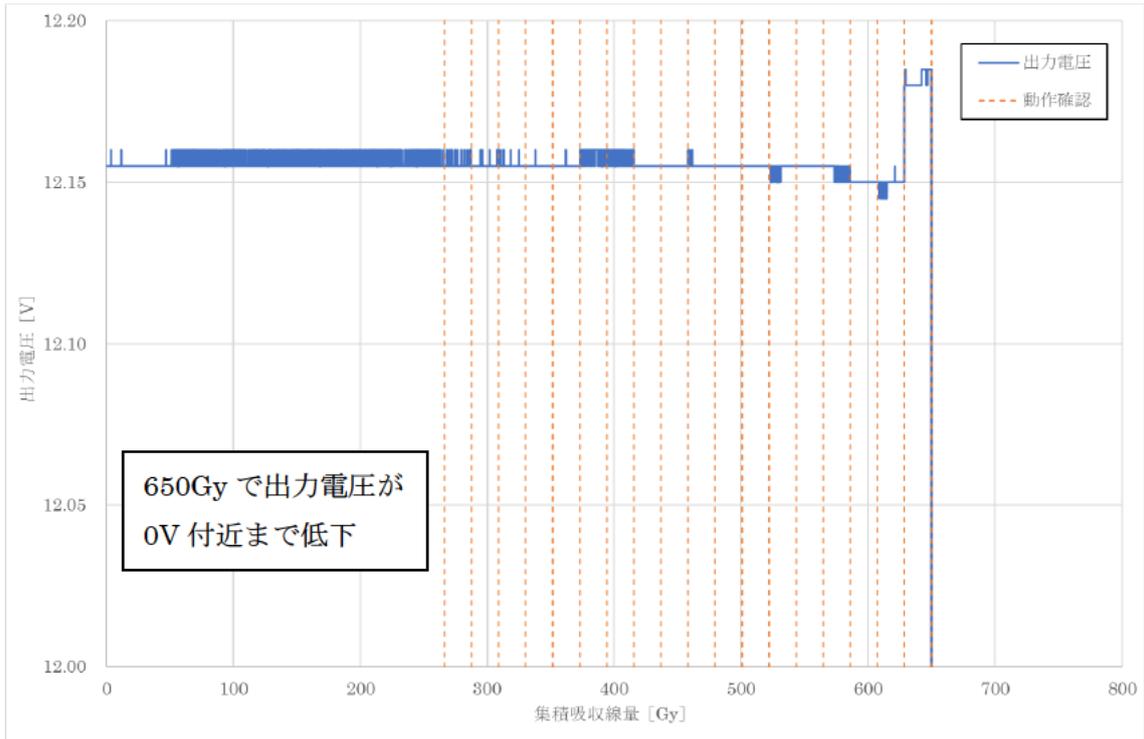


図 6.1-33 光電 100\_12V-7 出力電圧変化

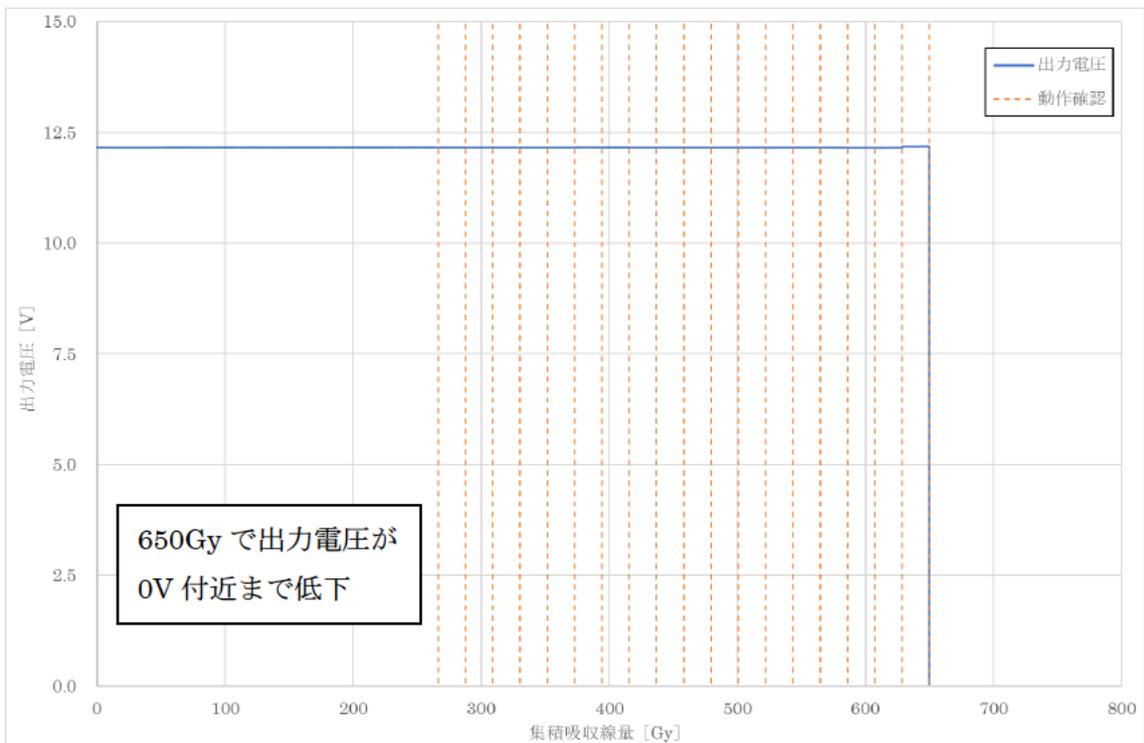


図 6.1-34 光電 100\_12V-7 出力電圧変化 (縮小図)

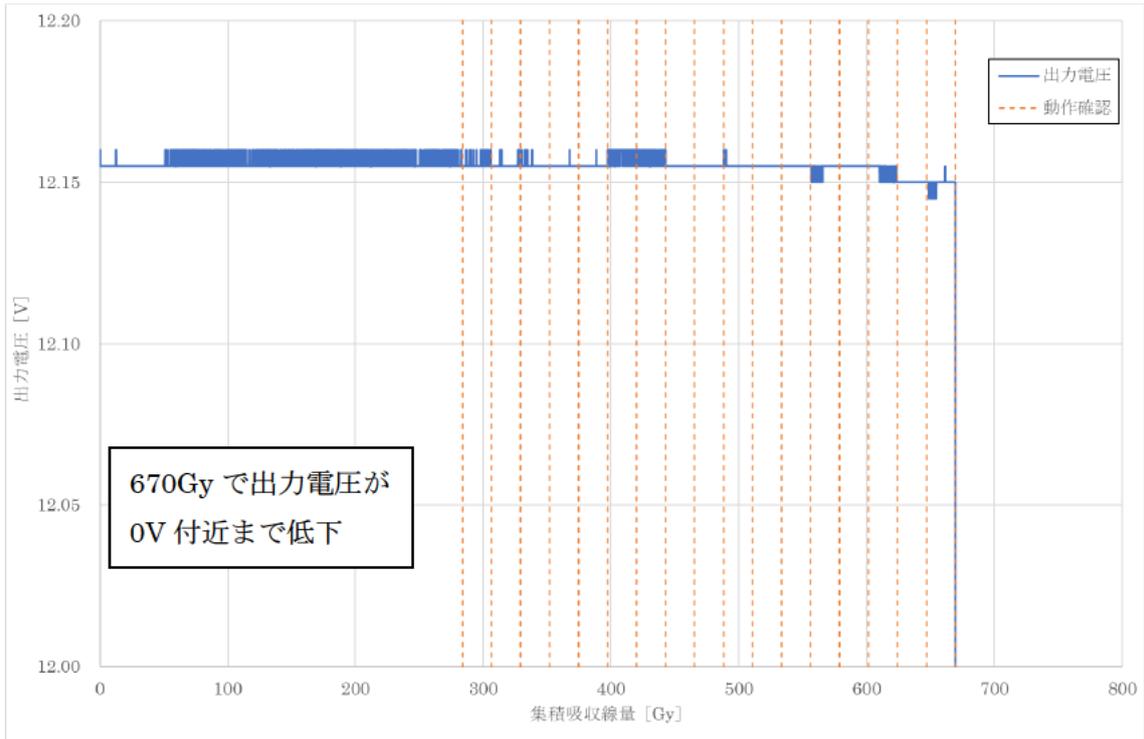


図 6.1-35 光電 100\_12V-8 出力電圧変化

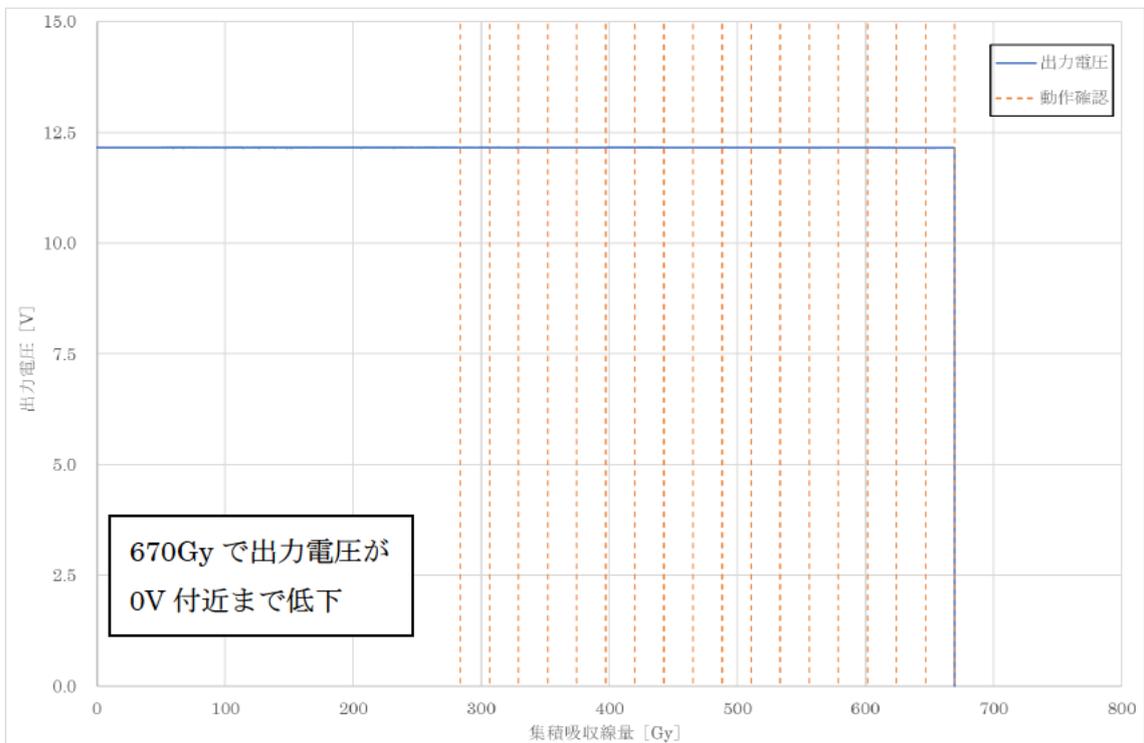


図 6.1-36 光電 100\_12V-8 出力電圧変化 (縮小図)

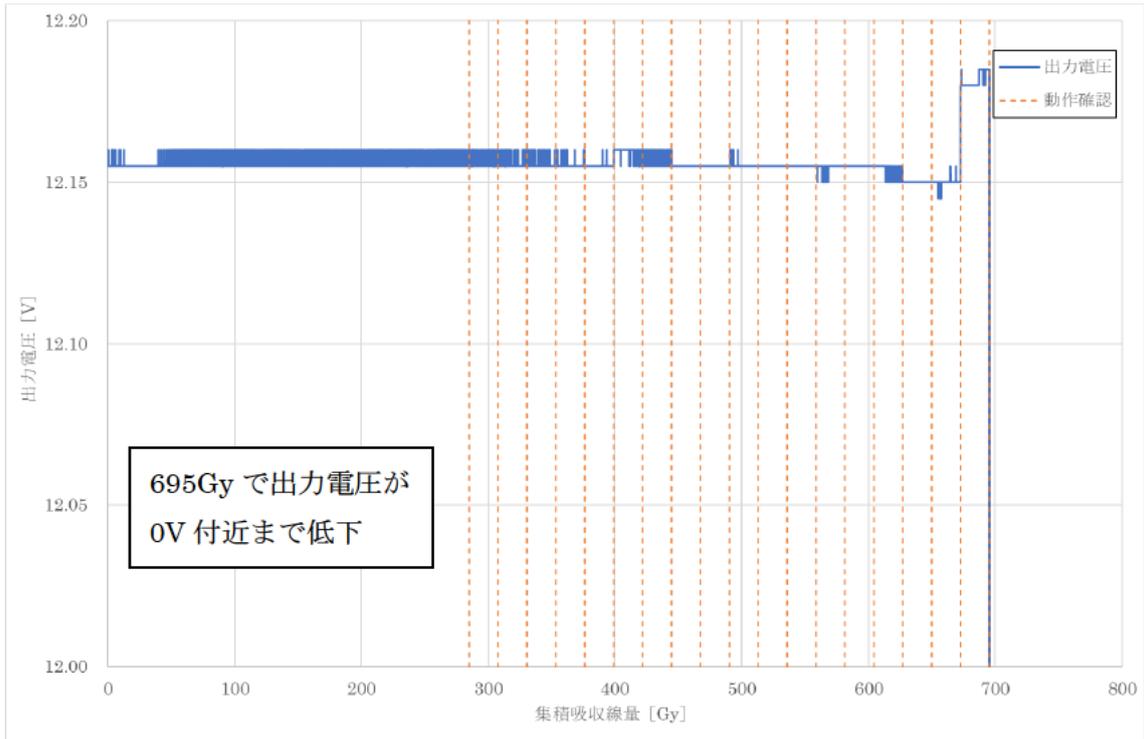


図 6.1-37 光電 100\_12V-9 出力電圧変化

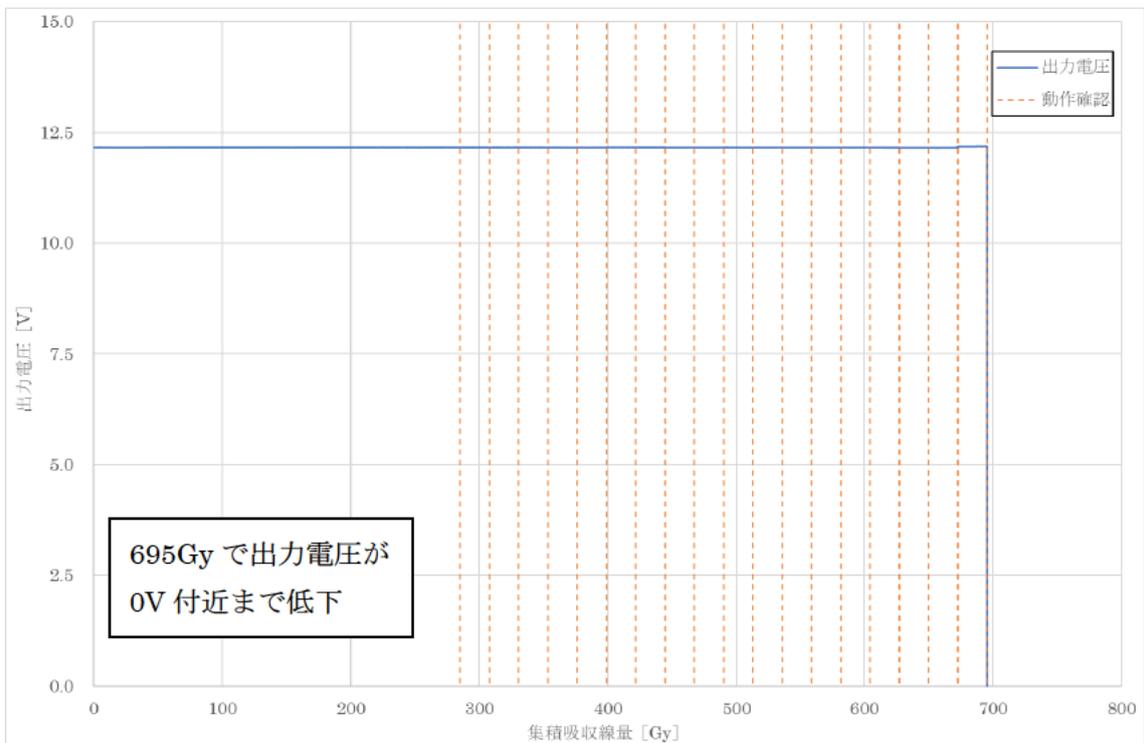


図 6.1-38 光電 100\_12V-9 出力電圧変化 (縮小図)

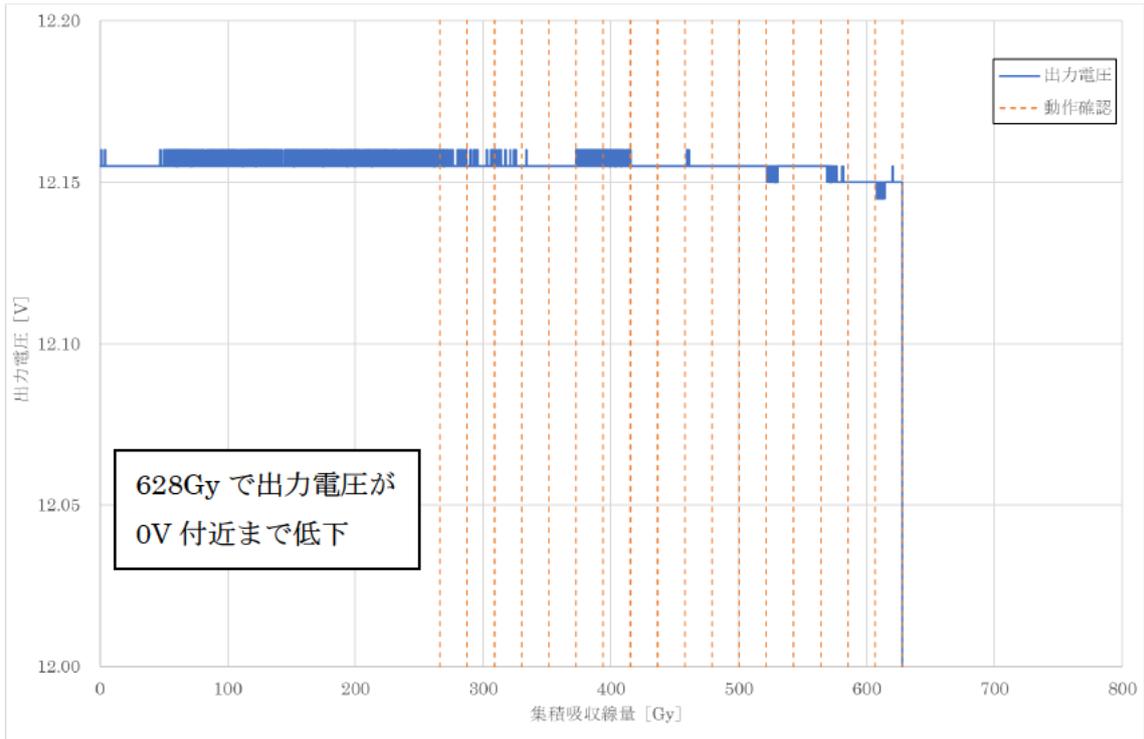


図 6.1-39 光電 100\_12V-10 出力電圧変化

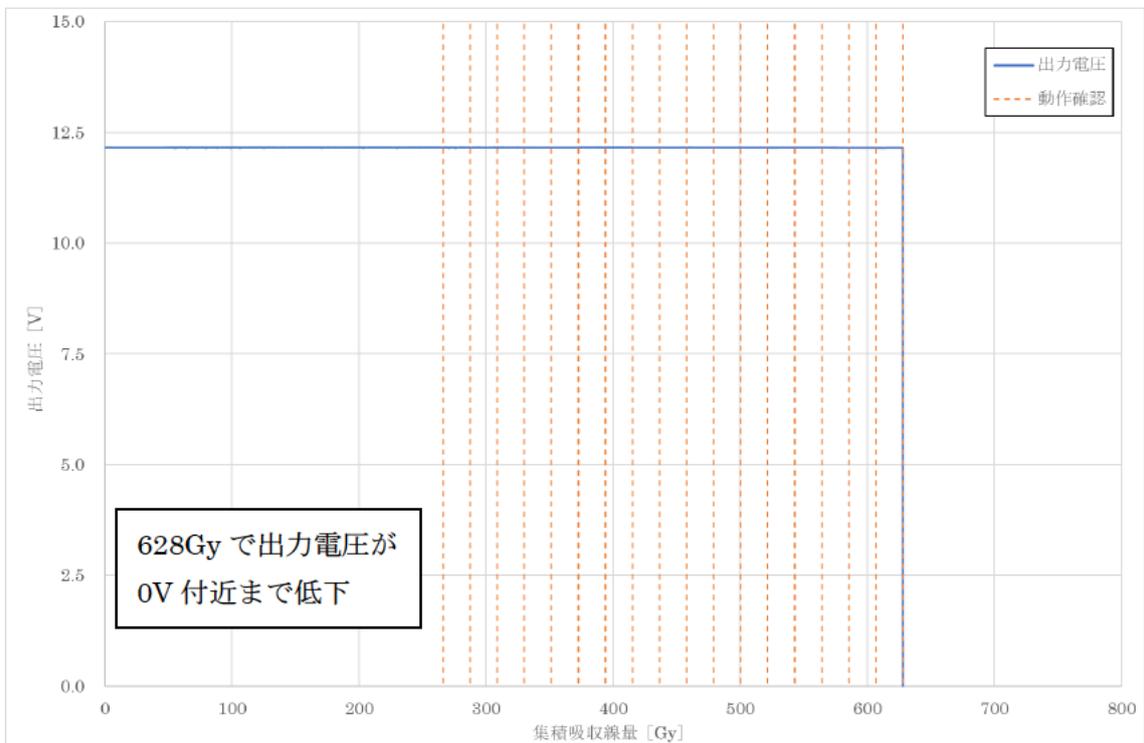


図 6.1-40 光電 100\_12V-10 出力電圧変化 (縮小図)

### (3) 100Gy/h・非通電

4.2 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。動作確認時に光電センサが検知せず、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 6.1-5 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 6.1-6 に示す。

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、照射線量率約 100Gy/h かつ非通電状態で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後 13.90 時間（集積吸収線量 1336Gy）の動作確認で白紙を用いて検知状態としても検知せず、データロガーの出力電圧が 0V 付近から上昇しないことを確認した。また、直前の照射開始後 13.40 時間（集積吸収線量 1288Gy）の動作確認時には正常に動作することを確認しており、照射開始後 13.40 時間（集積吸収線量 1288Gy）から照射開始後 13.90 時間（集積吸収線量 1336Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.2 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1162Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1055Gy）から故障を確認した照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1162Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.3 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1124Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 8.90 時間（集積吸収線量 1010Gy）から故障を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1124Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.4 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1129Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 8.90 時間（集積吸収線量 1015Gy）から故障を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1129Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.5 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1054Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 8.90 時間（集積吸収線量 947Gy）から故障を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1054Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.6 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 11.90 時間（集積吸収線量 1144Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1048Gy）から故障を確認した照射開始後 11.90 時間（集積吸収線量 1144Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.7 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1055Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 8.90 時間（集積吸収線量 948Gy）から故障を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1055Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.8 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1124Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認

した照射開始後 8.90 時間（集積吸収線量 1010Gy）から故障を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1124Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.9 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1243Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1129Gy）から故障を確認した照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1243Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

No.10 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1160Gy）に検知不能かつ出力電圧が 0V 付近まで低下したことを確認しており、直前に正常な動作を確認した照射開始後 9.90 時間（集積吸収線量 1054Gy）から故障を確認した照射開始後 10.90 時間（集積吸収線量 1160Gy）の間に測定不能になったと考えられる。

表 6.1-5 光電センサ（100Gy/h・非通電）の故障を確認した集積吸収線量

センサ 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]	故障時の 様子
光電 100_非-1	96	13.90	1336	1153 (SD <sup>※1</sup> :80)	出力電圧低下
光電 100_非-2	107	10.90	1162		出力電圧低下
光電 100_非-3	114	9.90	1124		出力電圧低下
光電 100_非-4	114	9.90	1129		出力電圧低下
光電 100_非-5	106	9.90	1054		出力電圧低下
光電 100_非-6	96	11.90	1144		出力電圧低下
光電 100_非-7	107	9.90	1055		出力電圧低下
光電 100_非-8	114	9.90	1124		出力電圧低下
光電 100_非-9	114	10.90	1243		出力電圧低下
光電 100_非-10	106	10.90	1160		出力電圧低下

※1 SD：標準偏差

表 6.1-6 光電センサ（100Gy/h・非通電）の不具合発生前の集積吸収線量

センサ 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]
光電 100_非-1	96	13.40	1288	1050 (SD <sup>※1</sup> :94)
光電 100_非-2	107	9.90	1055	
光電 100_非-3	114	8.90	1010	
光電 100_非-4	114	8.90	1015	
光電 100_非-5	106	8.90	947	
光電 100_非-6	96	10.90	1048	
光電 100_非-7	107	8.90	948	
光電 100_非-8	114	8.90	1010	
光電 100_非-9	114	9.90	1129	
光電 100_非-10	106	9.90	1054	

※1 SD：標準偏差

## 6.1.2 近接センサ

### (1) 100Gy/h・12V

4.2 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。近接センサの検知時の出力電圧が非検知時と同程度(約 1V 付近)まで低下し、故障した時点での集積吸収線量を表 6.1-7 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 6.1-8 に示す。

各近接センサの出力電圧の変化を図 6.1-41 から図 6.1-56 に示す。

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、照射線量率約 100Gy/h かつ 12V の入力電圧で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後 46.60 時間後(集積吸収線量 4480Gy)の動作確認では正常に動作することを確認した。しかし、動作確認後にセンサ本体の電源を入れなおすと、検知状態のデータロガーの出力電圧が 1.0V 付近まで低下することを確認した。以降出力電圧は正常に戻ることはなかったため、測定不能と判断した。

No.2 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 46.60 時間後(集積吸収線量 4966Gy)に本体電源を入れなおすと、検知状態の出力電圧が 1.4V 付近まで低下し測定不能となった。

No.3 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 46.60 時間後(集積吸収線量 5290Gy)に本体電源を入れなおすと、検知状態の出力電圧が 1.4V 付近まで低下し測定不能となった。

No.4 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 46.60 時間後(集積吸収線量 5313Gy)に本体電源を入れなおすと、検知状態の出力電圧が 1.4V 付近まで低下し測定不能となった。

No.5 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 46.60 時間後(集積吸収線量 4961Gy)に本体電源を入れなおすと、検知状態の出力電圧が 1.1V 付近まで低下し測定不能となった。なお、照射開始後 17.05 時間後(集積吸収線量 1815Gy)から照射開始後 17.20 時間後(集積吸収線量 1831Gy)までは検知状態とするためのクリップが検出部から外れたため、非検知状態となり出力電圧が低下している。

No.6 は、照射開始後 19.80 時間後(集積吸収線量 1904Gy)の動作確認時に、検出部の金属片を外し、非検知状態としても出力電圧が低下しないことを確認した。従って、出力電圧が低下しないと確認された照射開始約 19.80 時間後(集積吸収線量 1904Gy)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 19.60 時間後(集積吸収線量 1884Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.7 は、No.6 と同様の事象が確認され、照射開始後 19.80 時間後(集積吸収線量 2100Gy)の動作確認時に、非検知状態としても出力電圧が低下しないことを確認した。従って、出力電圧が低下しないと確認された照射開始約 19.80 時間後(集積吸収線量 2100Gy)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 19.60 時間後(集積吸収線量 2089Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.8 は、No.6 と同様の事象が確認され、照射開始後 19.80 時間後(集積吸収線量 2248Gy)の動作確認時に、非検知状態としても出力電圧が低下しないことを確認した。従って、出力電圧が低下しないと確認された照射開始約 19.80 時間後(集積吸収線量 2248Gy)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 19.60 時間後(集積吸収線量 2225Gy)の間で測

定不能になったと考えられる。

No.9 は、No.1 と同様の事象が確認され、照射開始後 46.60 時間後（集積吸収線量 5313Gy）に本体電源を入れなおすと、検知状態の出力電圧が 1.1V 付近まで低下し測定不能となった。

No.10 は、照射開始後 46.60 時間後（集積吸収線量 4961Gy）の動作確認時にも正常な動作を確認した。本体電源を入れなおしたのちにも正常な動作を確認したが、照射終了とした。

表 6.1-7 近接センサ（100Gy/h・12V）の故障を確認した集積吸収線量

センサ 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]	故障時の 様子
近接 100_12V-1	96	46.60	4480	4064 <sup>※1</sup> (SD <sup>※2</sup> :1423)	出力電圧 低下
近接 100_12V-2	107	46.60	4966		出力電圧 低下
近接 100_12V-3	114	46.60	5290		出力電圧 低下
近接 100_12V-4	114	46.60	5313		出力電圧 低下
近接 100_12V-5	106	46.60	4961		出力電圧 低下
近接 100_12V-6	96	19.80	1904		検知異常
近接 100_12V-7	107	19.80	2100		検知異常
近接 100_12V-8	114	19.80	2248		検知異常
近接 100_12V-9	114	46.60	5313		出力電圧 低下
近接 100_12V-10	106	46.60	4961		故障せず

※1 照射終了時点で異常が確認されなかった No.10 以外から算出した。

※2 SD：標準偏差

表 6.1-8 近接センサ（100Gy/h・12V）の不具合発生前の集積吸収線量

センサ 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]
近接 100_12V-1	96	30.60	2942	3107 (SD <sup>※1</sup> :851)
近接 100_12V-2	107	30.60	3261	
近接 100_12V-3	114	30.60	3473	
近接 100_12V-4	114	30.60	3489	
近接 100_12V-5	106	30.60	3258	
近接 100_12V-6	96	19.60	1884	
近接 100_12V-7	107	19.60	2089	
近接 100_12V-8	114	19.60	2225	
近接 100_12V-9	114	30.60	3489	
近接 100_12V-10	106	46.60	4961	

※1 SD：標準偏差

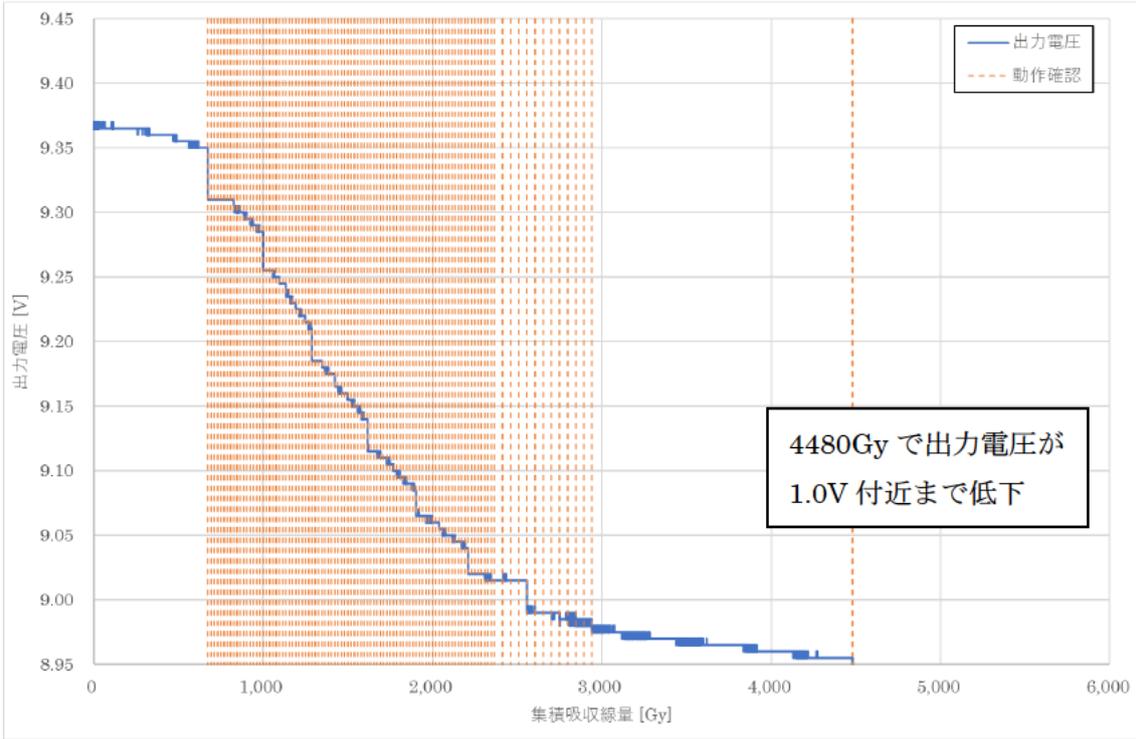


図 6.1-41 近接 100\_12V-1 出力電圧変化

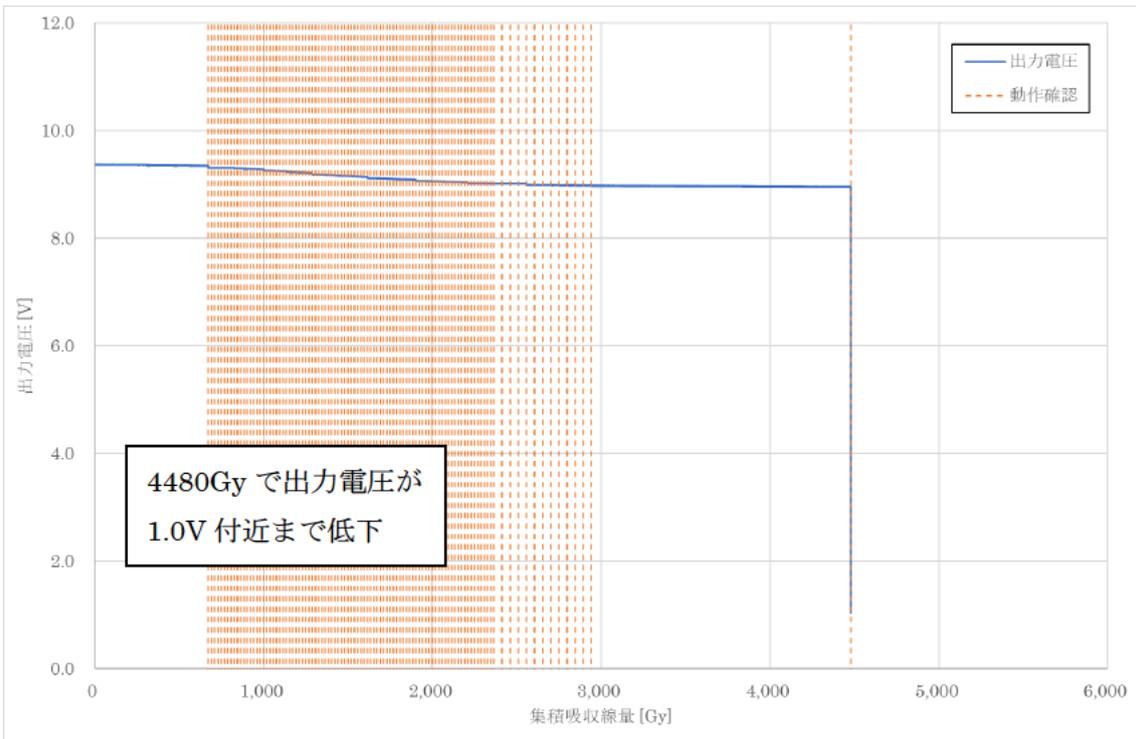


図 6.1-42 近接 100\_12V-1 出力電圧変化 (縮小図)

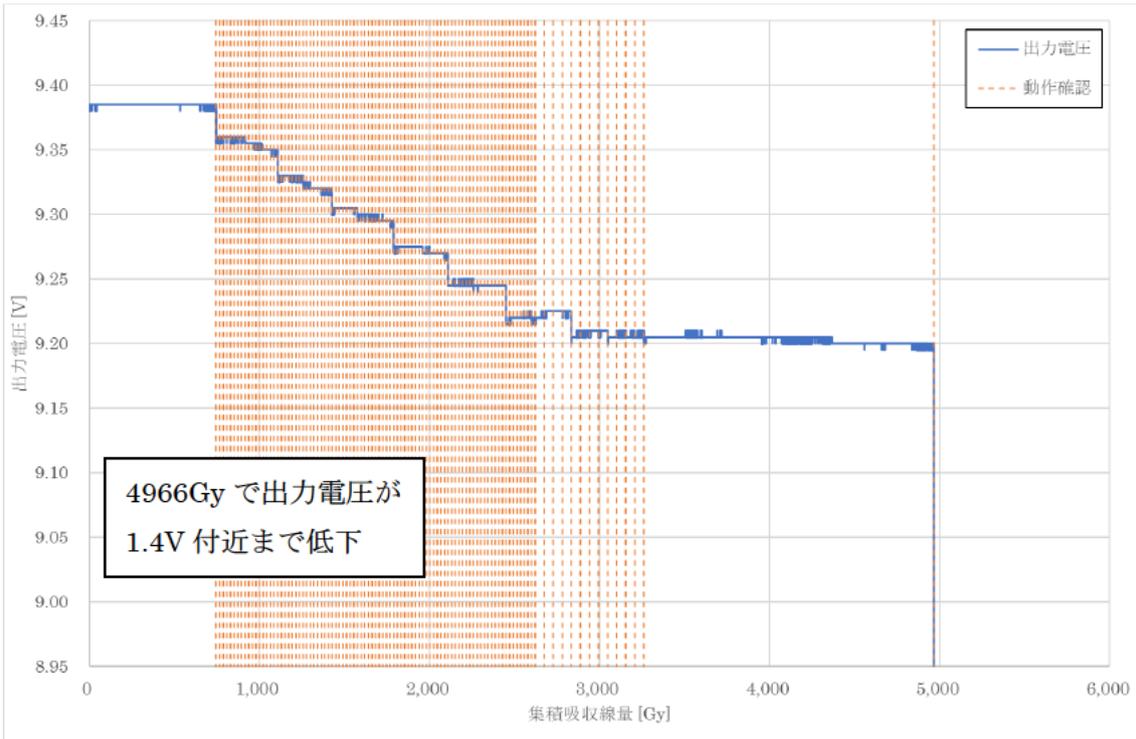


図 6.1-43 近接 100\_12V-2 出力電圧変化

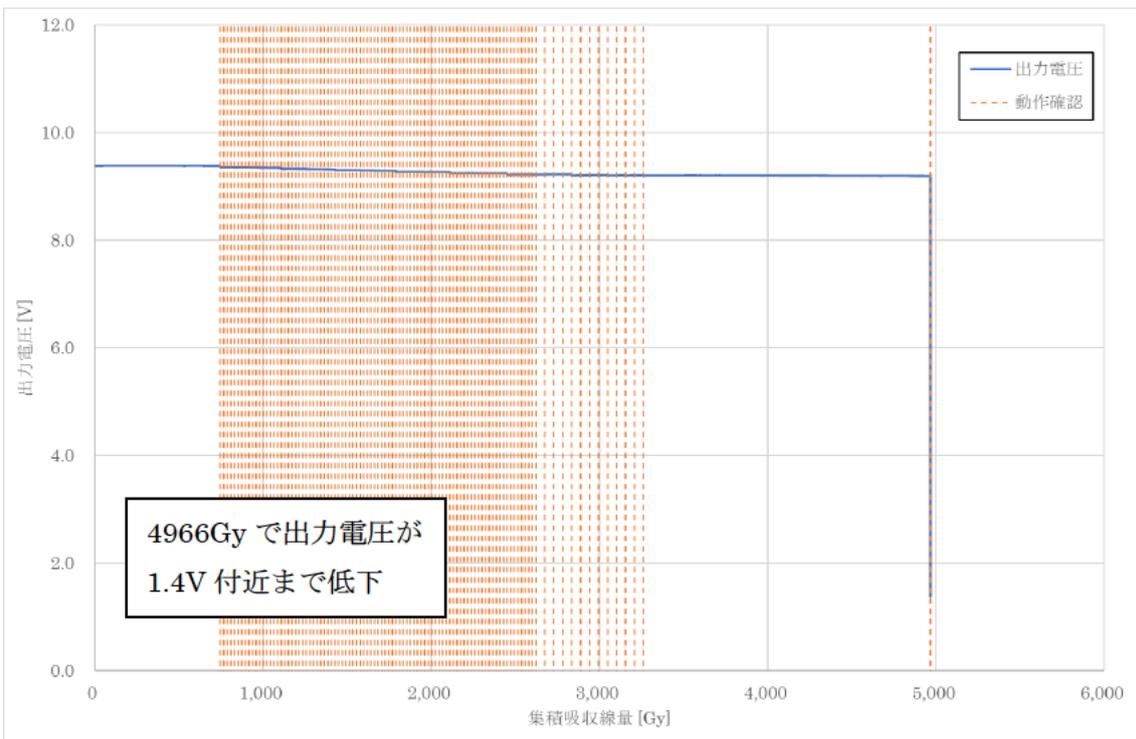


図 6.1-44 近接 100\_12V-2 出力電圧変化 (縮小図)

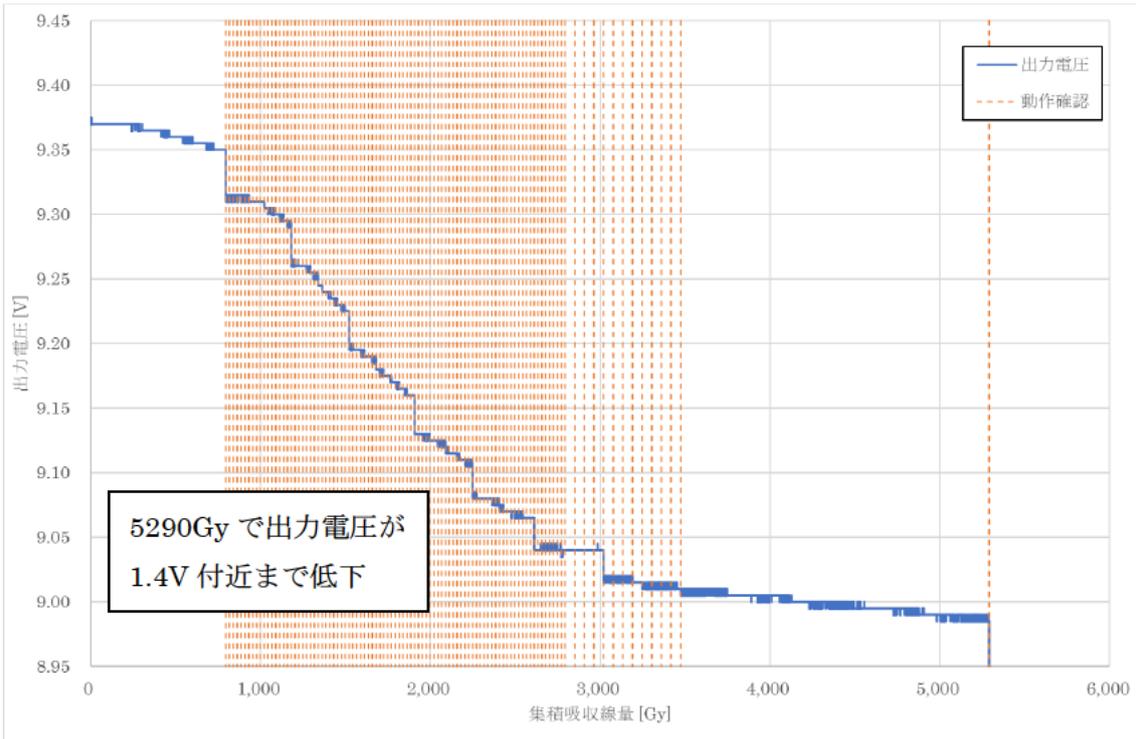


図 6.1-45 近接 100\_12V-3 出力電圧変化

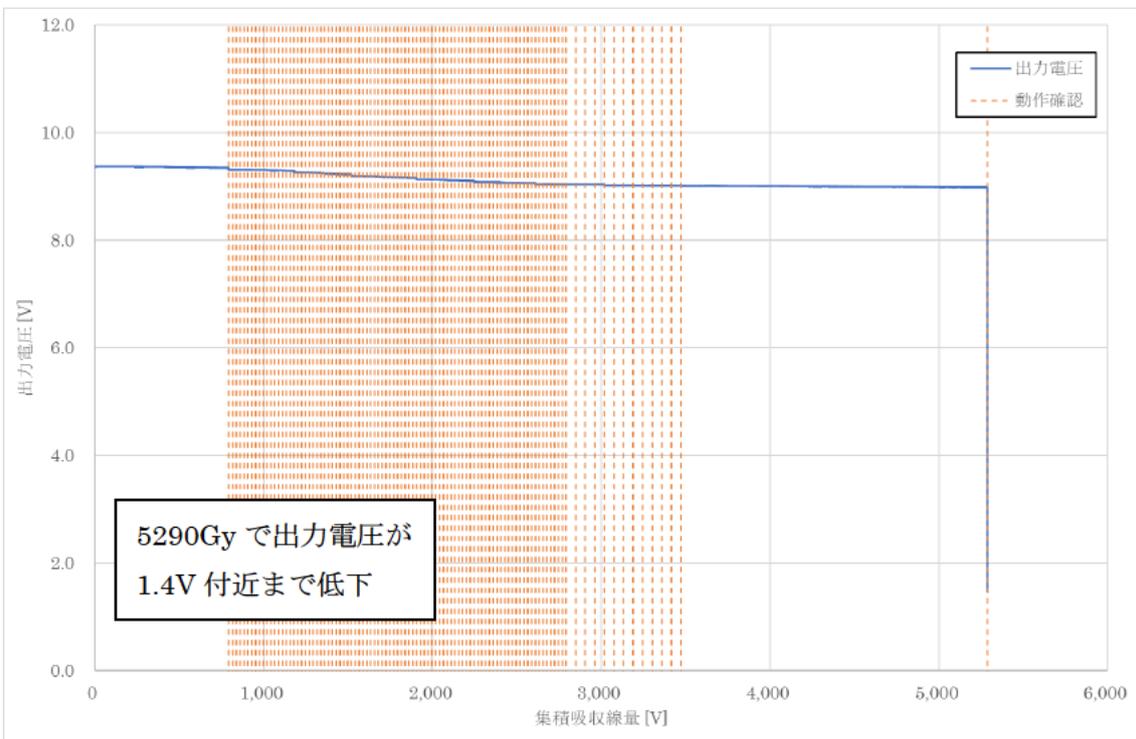


図 6.1-46 近接 100\_12V-3 出力電圧変化（縮小図）

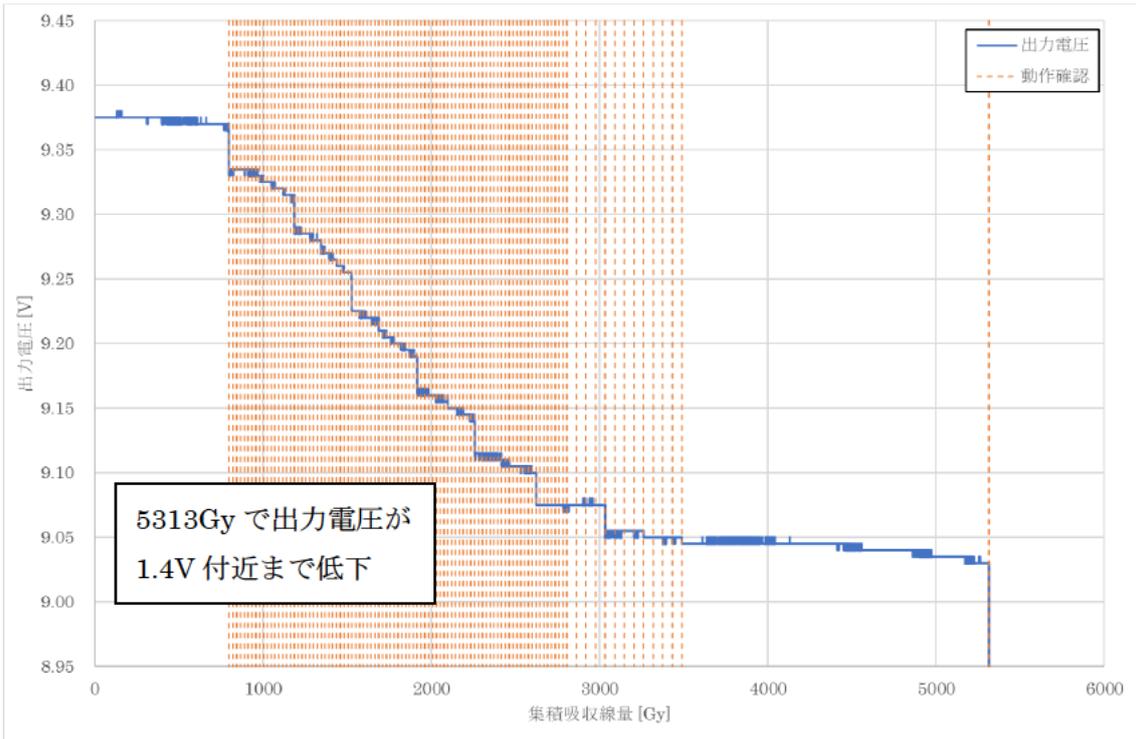


図 6.1-47 近接 100\_12V-4 出力電圧変化

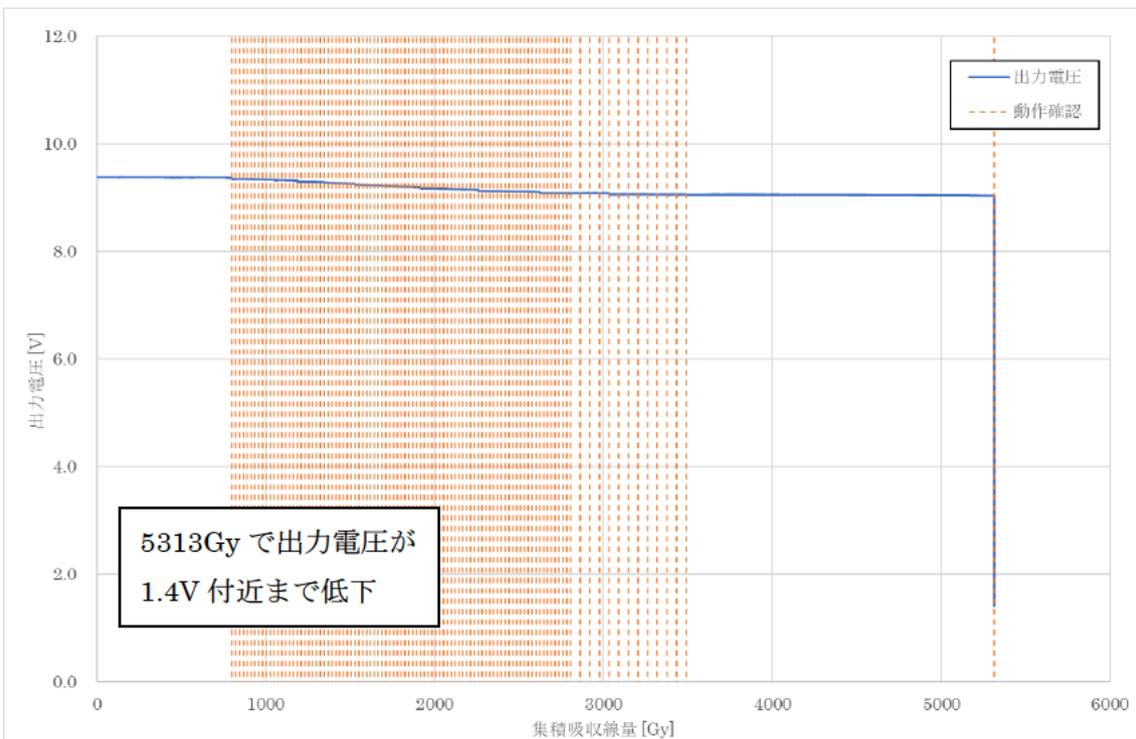


図 6.1-48 近接 100\_12V-4 出力電圧変化 (縮小図)

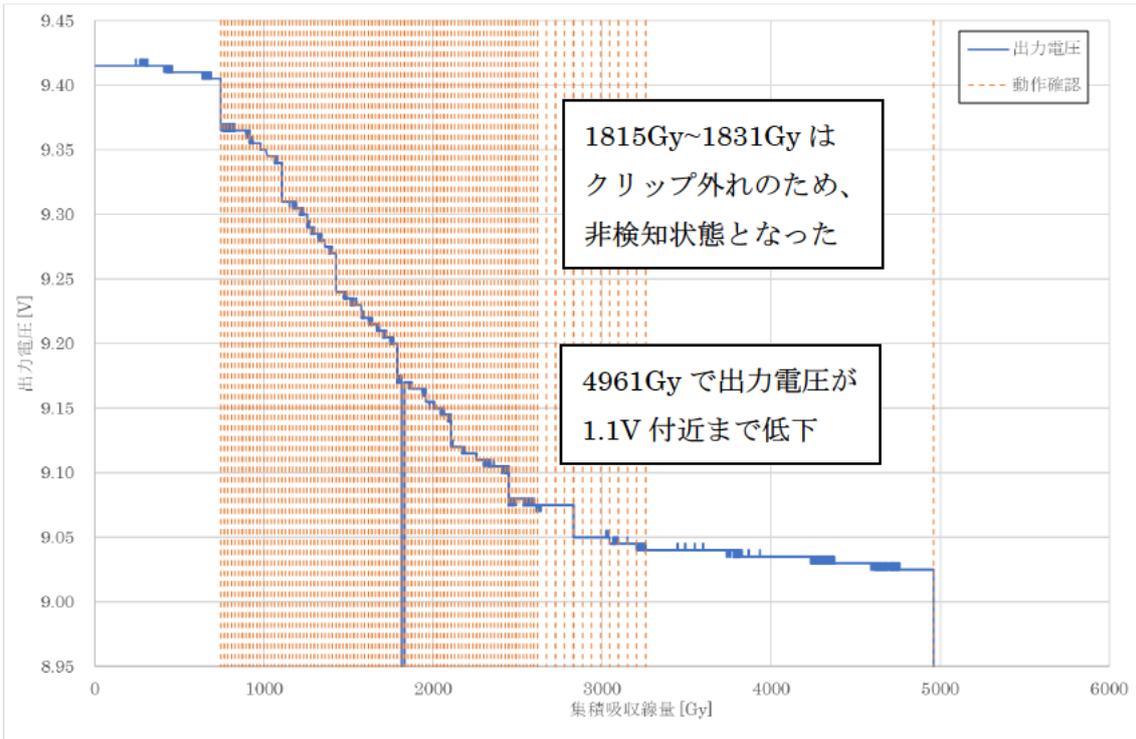


図 6.1-49 近接 100\_12V-5 出力電圧変化

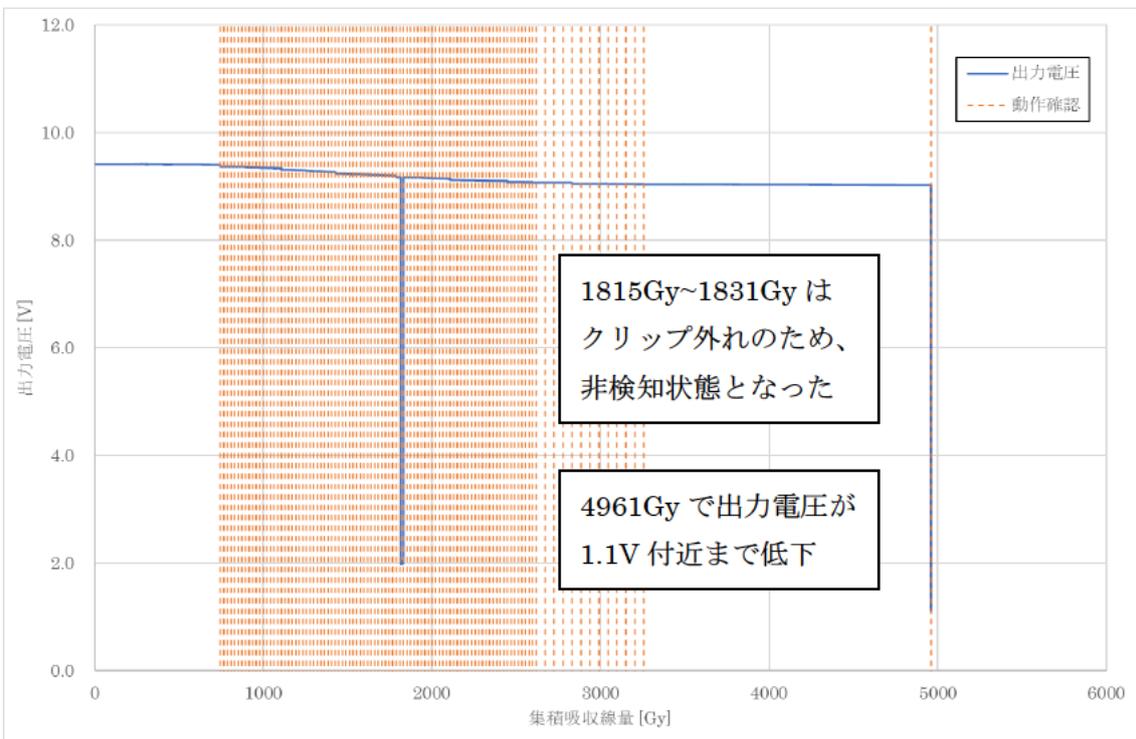


図 6.1-50 近接 100\_12V-5 出力電圧変化 (縮小図)

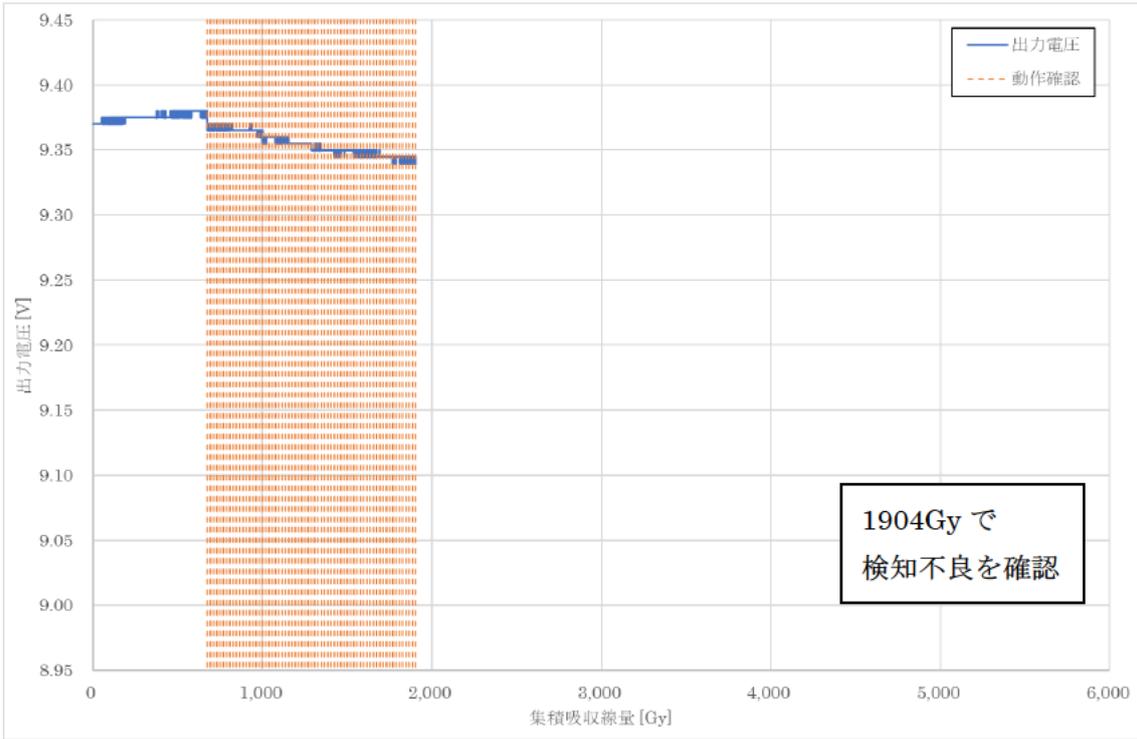


図 6.1-51 近接 100\_12V-6 出力電圧変化

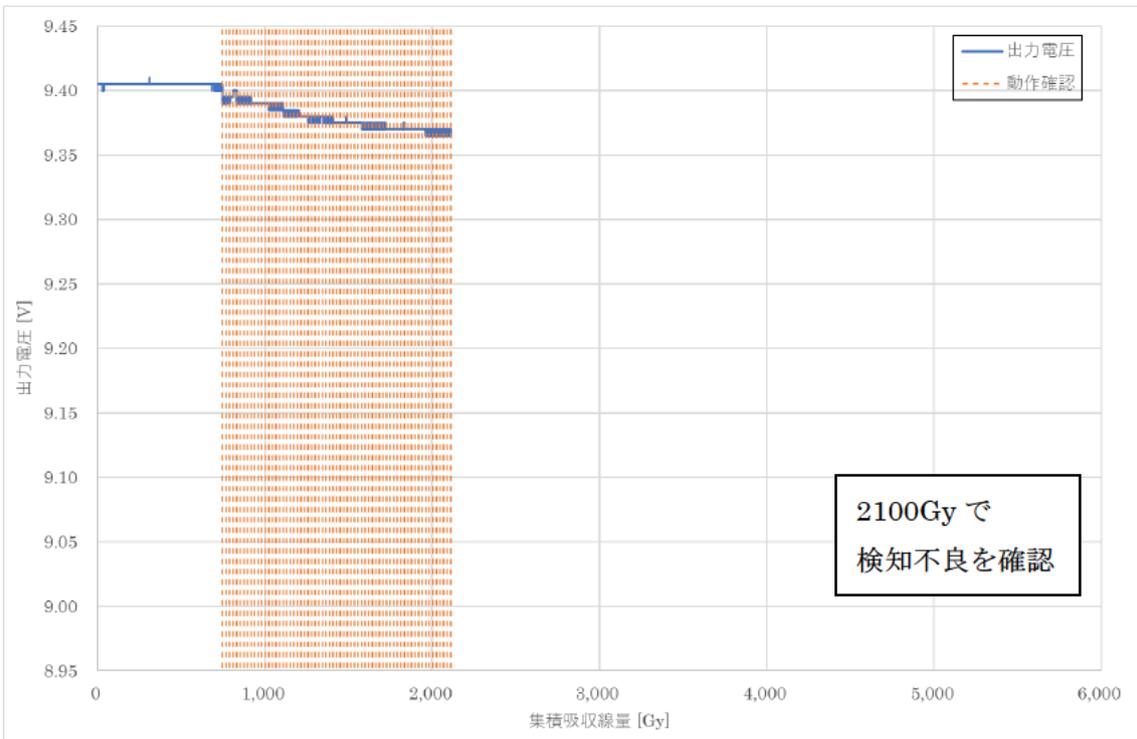


図 6.1-52 近接 100\_12V-7 出力電圧変化

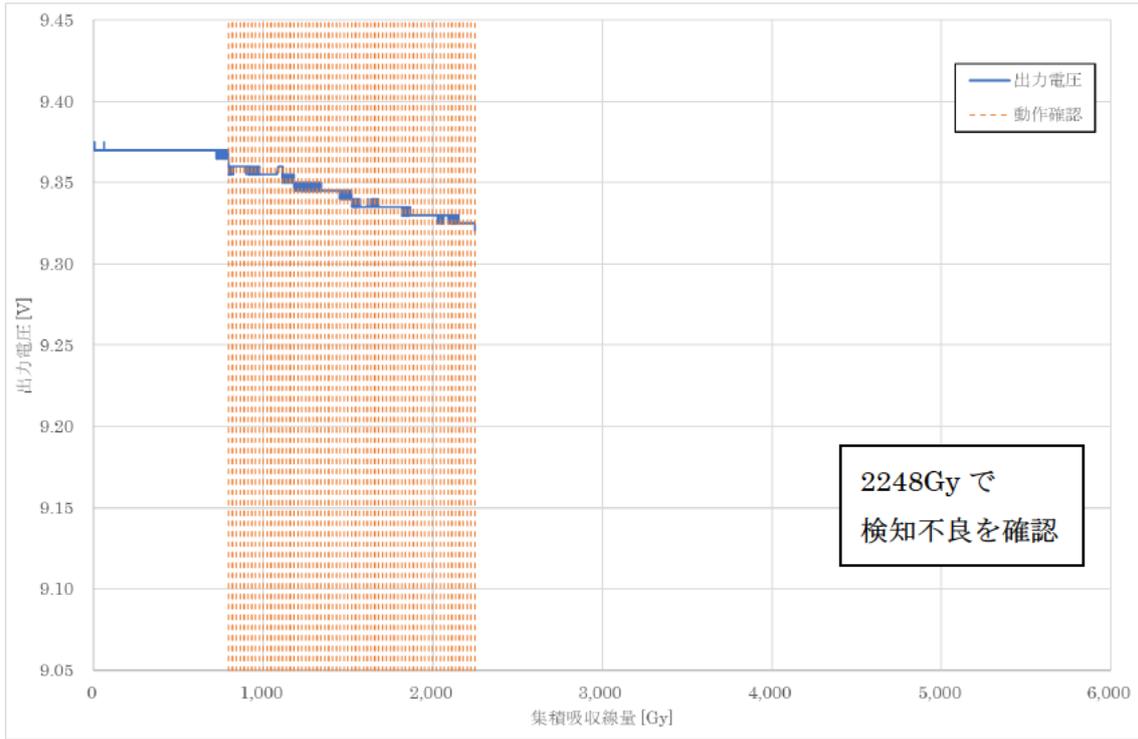


図 6.1-53 近接 100\_12V-8 出力電圧変化

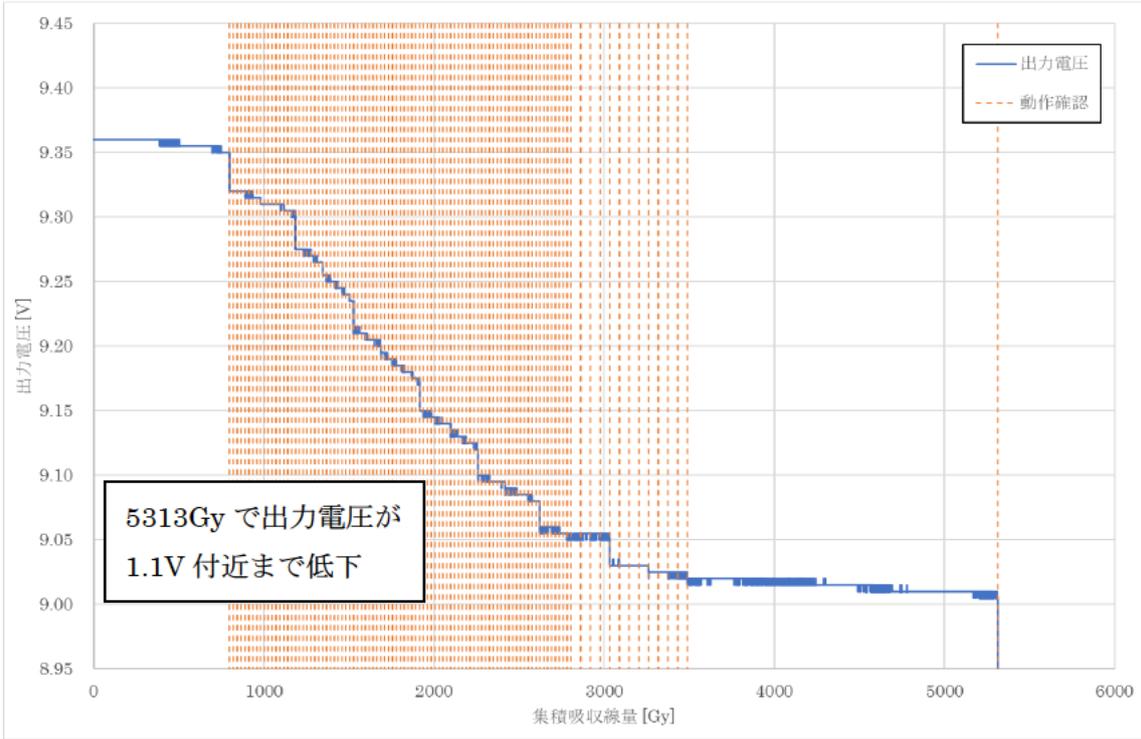


図 6.1-54 近接 100\_12V-9 出力電圧変化

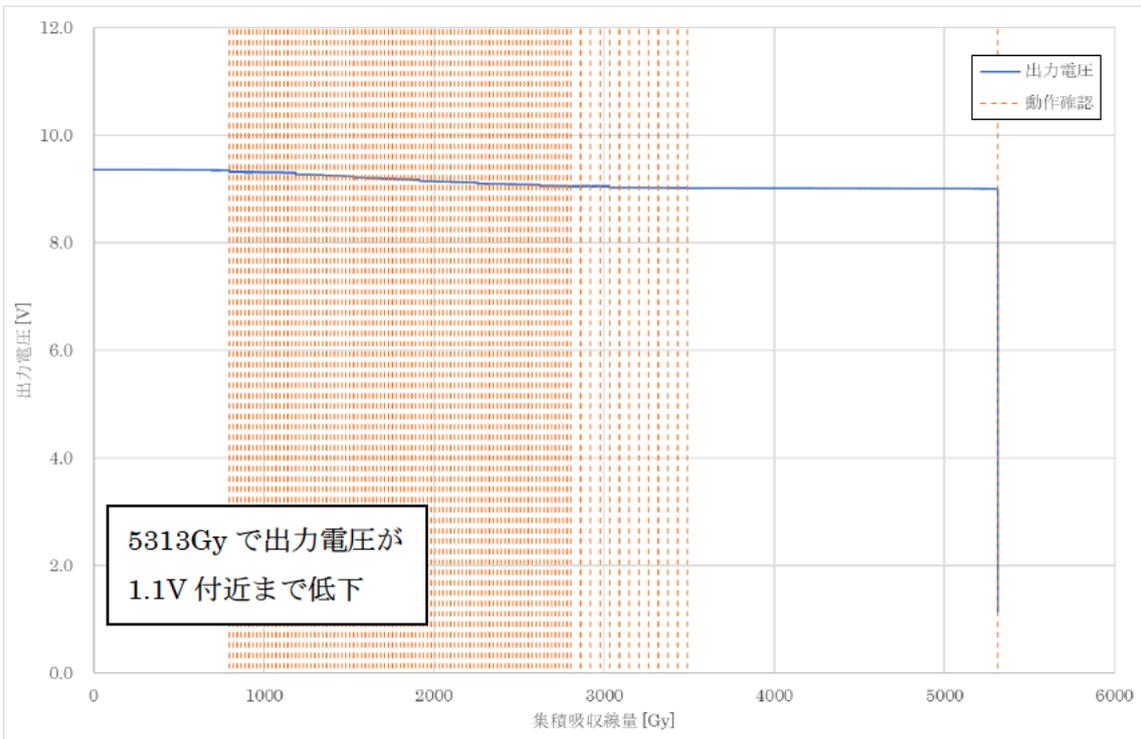


図 6.1-55 近接 100\_12V-9 出力電圧変化 (縮小図)

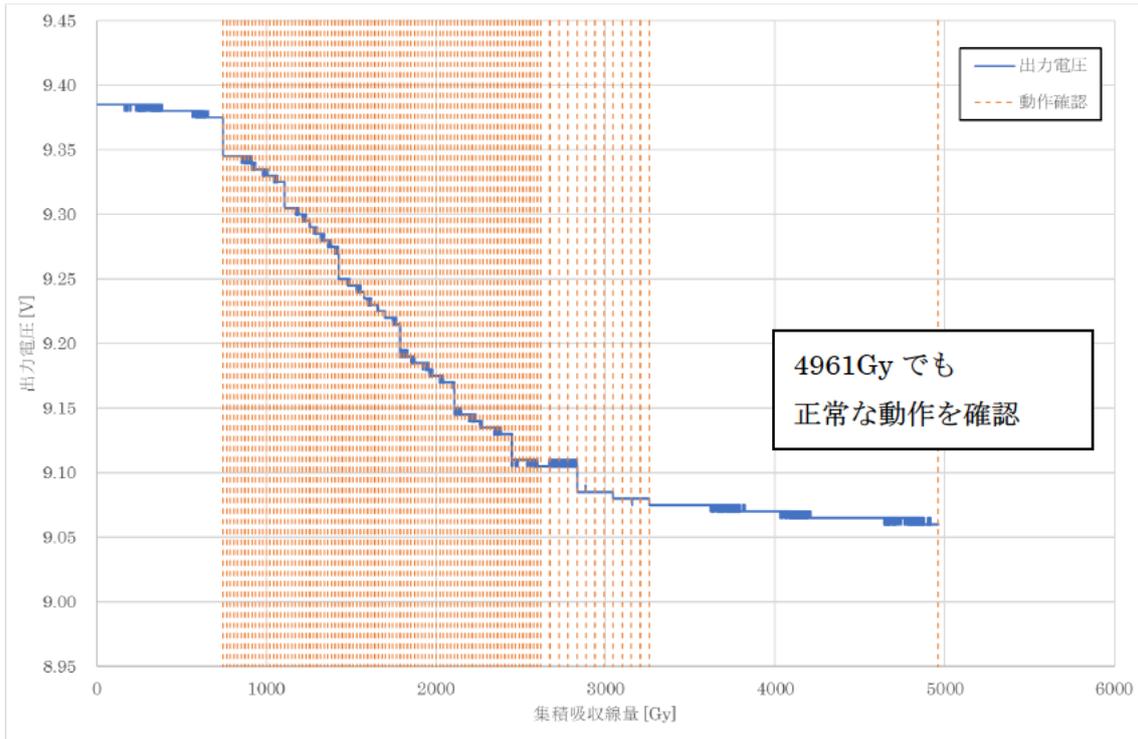


図 6.1-56 近接 100\_12V-10 出力電圧変化

(2) 100Gy/h・非通電

4.2 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。不具合発生前（照射終了時点）の集積吸収線量を表 6.1-9 に示す。

近接センサ 10 台に対して、照射線量率約 100Gy/h かつ非通電状態で照射を実施した結果、No.1-10 の全ての近接センサで照射開始後 30.2 時間後の動作確認においても正常な動作を確認した。なお、試験場の時間的制約からセンサが故障する前に照射終了とした。

表 6.1-9 近接センサ（100Gy/h・非通電）の不具合発生前の集積吸収線量

センサ 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]
近接 100_非-1	96	30.20	2903	3242 (SD <sup>*1</sup> :195)
近接 100_非-2	107	30.20	3218	
近接 100_非-3	114	30.20	3428	
近接 100_非-4	114	30.20	3443	
近接 100_非-5	106	30.20	3215	
近接 100_非-6	96	30.20	2903	
近接 100_非-7	107	30.20	3218	
近接 100_非-8	114	30.20	3428	
近接 100_非-9	114	30.20	3443	
近接 100_非-10	106	30.20	3215	

※1 SD：標準偏差

### 6.1.3 ドローン

4.3 項で設定した試験条件に基づき、ドローンの照射試験を実施した。照射試験結果を表 6.1-10 に示す。また、照射中及び動作確認時の各項目の確認結果を表 6.1-11 に示す。

今回照射試験を実施したドローン 2 台は、照射開始後 5.5 時間（集積吸収線量 306Gy）までドローンに使用されている各種センサの測定値に異常な値は確認されなかった。しかし、操作信号の受信エラーが確認された。照射終了後に行った詳細調査結果から、受信モジュールの故障により、フライトコントローラからの通信ができない状態になったと考えられた。

また、試験結果の詳細を以下に述べる。

ドローン No.1 は、照射開始後 5.5 時間（集積吸収線量 306Gy）の動作確認時に、操作信号の受信エラーを確認し、ドローン本体の操作が不可能となったため、故障と判断した。また、照射試験後にログ解析を実施すると、照射開始後 5.24 時間（集積吸収線量 292Gy）に故障していることを確認した。

ドローン No.2 は、照射開始後 5.5 時間（集積吸収線量 306Gy）の動作確認時に、操作信号の受信エラーを確認し、ドローン本体の操作が不可能となったため、故障と判断した。また、照射試験後にログ解析を実施すると、照射開始後 5.35 時間（集積吸収線量 298Gy）に故障していることを確認した。

表 6.1-10 ドローンの照射試験結果

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]
1	55.7	5.24	292
2		5.35	298

表 6.1-11 照射中及び動作確認時の確認結果

タイミング	確認対象	確認内容	確認結果
照射中	CCD センサ (カメラ)	映像を確認できること。	異常なし
	送受信 モジュール	ドローンからの映像の送信及び地上局からの操作信号の受信が問題なくできること。	No.1 は 292Gy、 No.2 は 298Gy で 受信エラーが発生
動作確認時	距離センサ (4 方向)	センサを遮った時、概略距離が表示されること。	異常なし
	IMU (3 軸加速度 センサ及び 3 軸 ジャイロセンサ)	機体を手動で動かした時に値が変化すること。	異常なし
	気圧センサ	温度及び気圧に異常値が表示されないこと。	異常なし
	モータ	正常に動作すること。	異常なし
	PC との接続	映像及びログを PC へ転送できること。	異常なし

## 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 項で設定した試験条件に基づき、カスタマイズした測域センサの照射試験を実施した。照射方向：前方の測域センサの照射試験結果を表 6.2-1 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、測域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測域センサ試験結果として、故障した照射時間及び集積吸収線量を参考に併記している。また、カスタマイズした測域センサのみなし集積吸収線量と距離データの関係を図 6.2-1 及び図 6.2-2 に、カスタマイズ無しの測域センサの集積吸収線量と距離データの関係を図 6.2-3 に示す。

表 6.2-1 測域センサのカスタマイズ試験結果

試験条件	照射 線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	みなし 集積吸収線量 [Gy]	集積 吸収線量 [Gy]
カスタマイズ	4.77	82.3	393	-
カスタマイズ無し		42.4	-	202

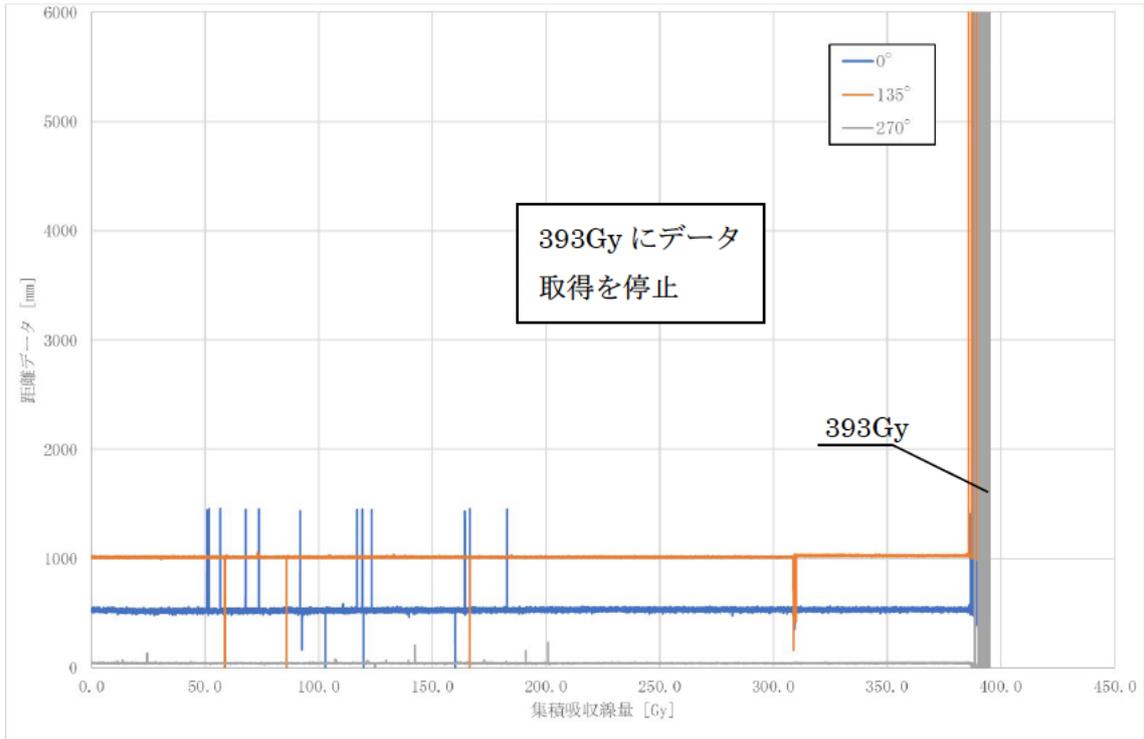


図 6.2-1 カスタマイズした測域センサのみなし集積吸収線量と距離データ

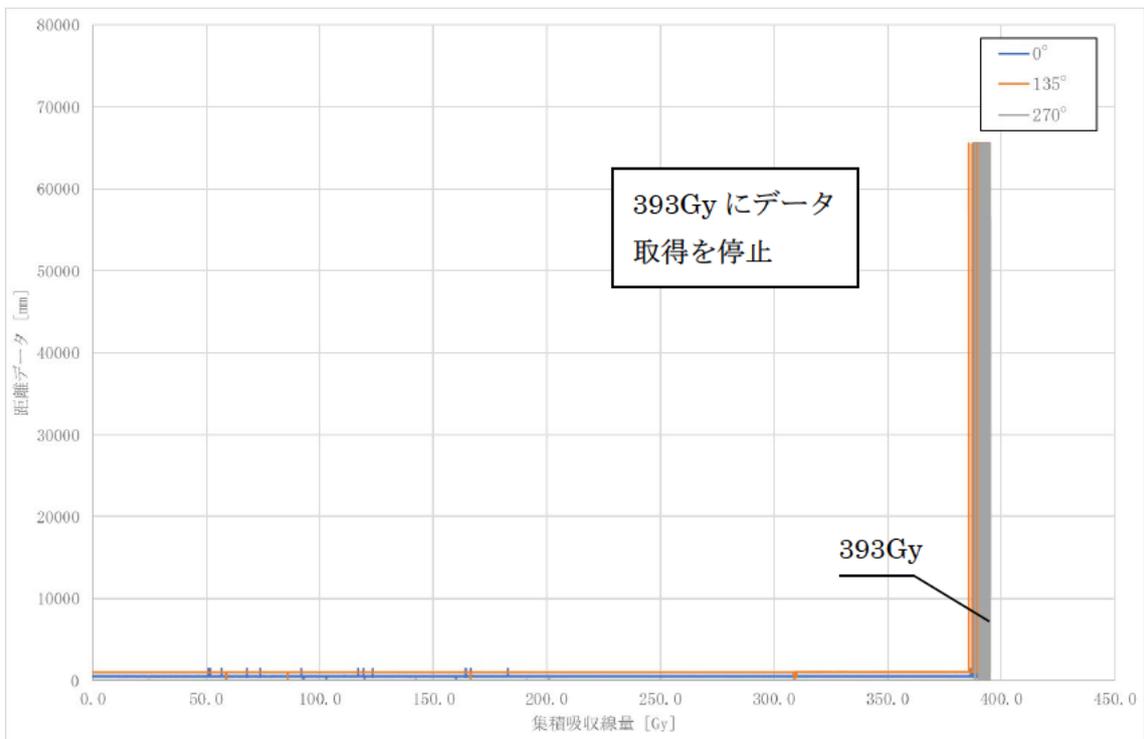


図 6.2-2 カスタマイズした測域センサのみなし集積吸収線量と距離データ (縮小図)

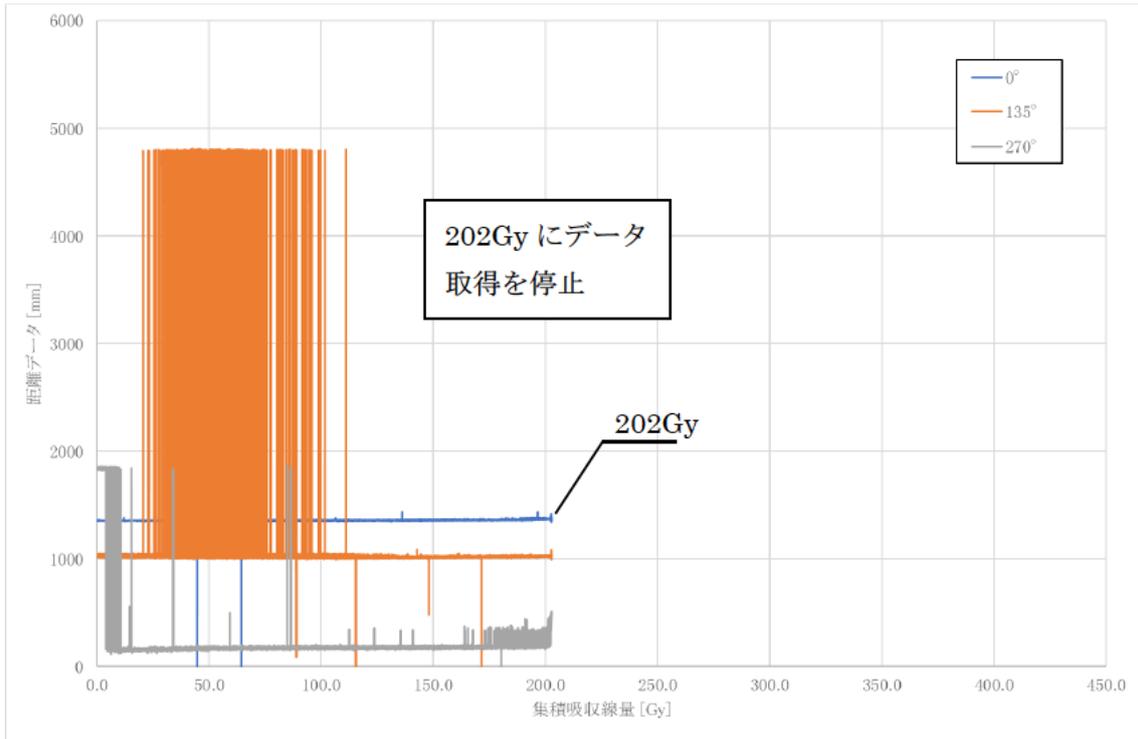


図 6.2-3 測域センサの集積吸収線量と距離データ

## 6.2.2 遮へい解析結果

カスタマイズした測域センサの解析結果を表 6.2-2 に、線量率分布図を図 6.2-4 から図 6.2-7 に示す。遮へい解析結果と照射試験結果は、遮へい体外部において約 20%以内で一致し、遮へい体内部において約 10%以内で一致する結果となった。

表 6.2-2 遮へい解析結果

測定位置	照射方向	解析値 [Gy/h]	測定値 [Gy/h]	比率 (解析値/測定値)
遮へい体外部	上方向	5.53	6.86	0.81
	前方	5.53	6.49	0.85
	後方	5.54	6.10	0.91
遮へい体内部	上方向	2.50	2.44	1.03
	前方	1.70	1.57	1.08
	後方	5.06	5.23	0.97

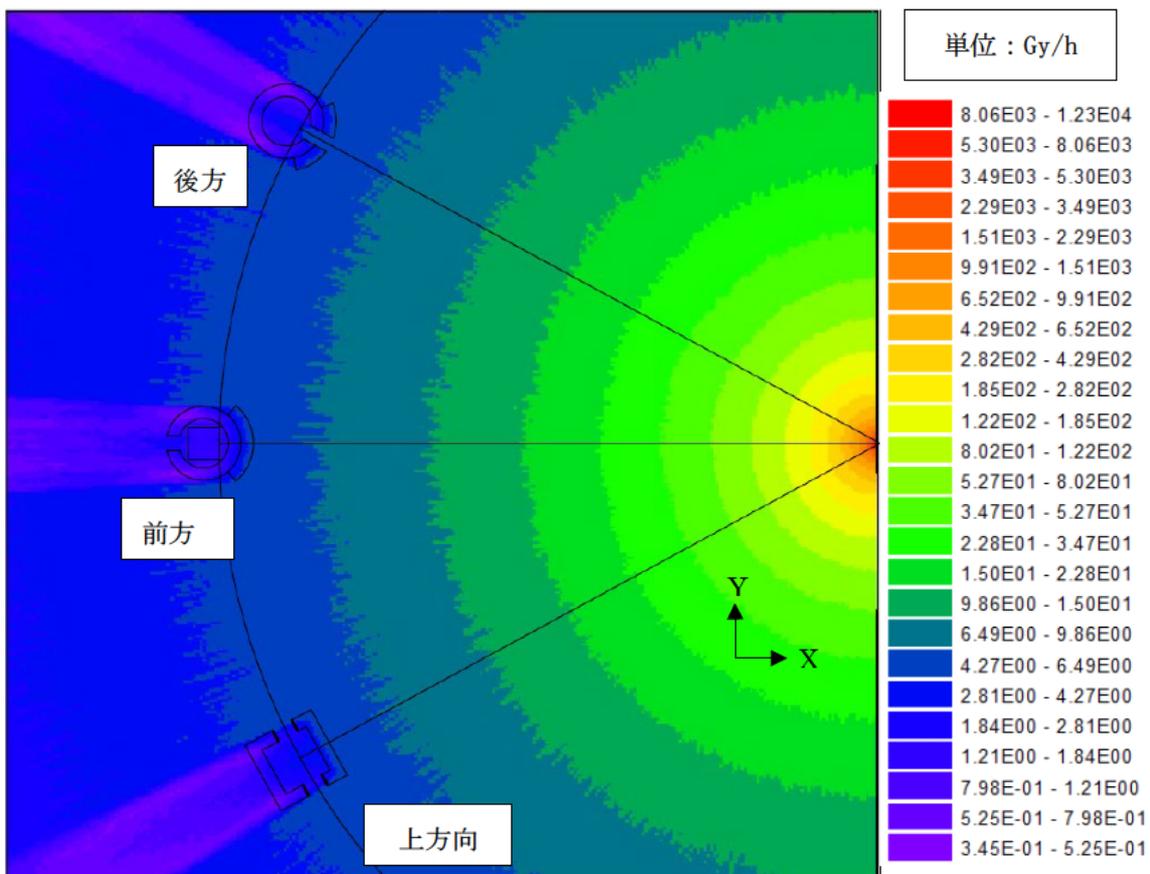


図 6.2-4 照射室の線量率分布図 (遮へい体内部の線量計高さ)

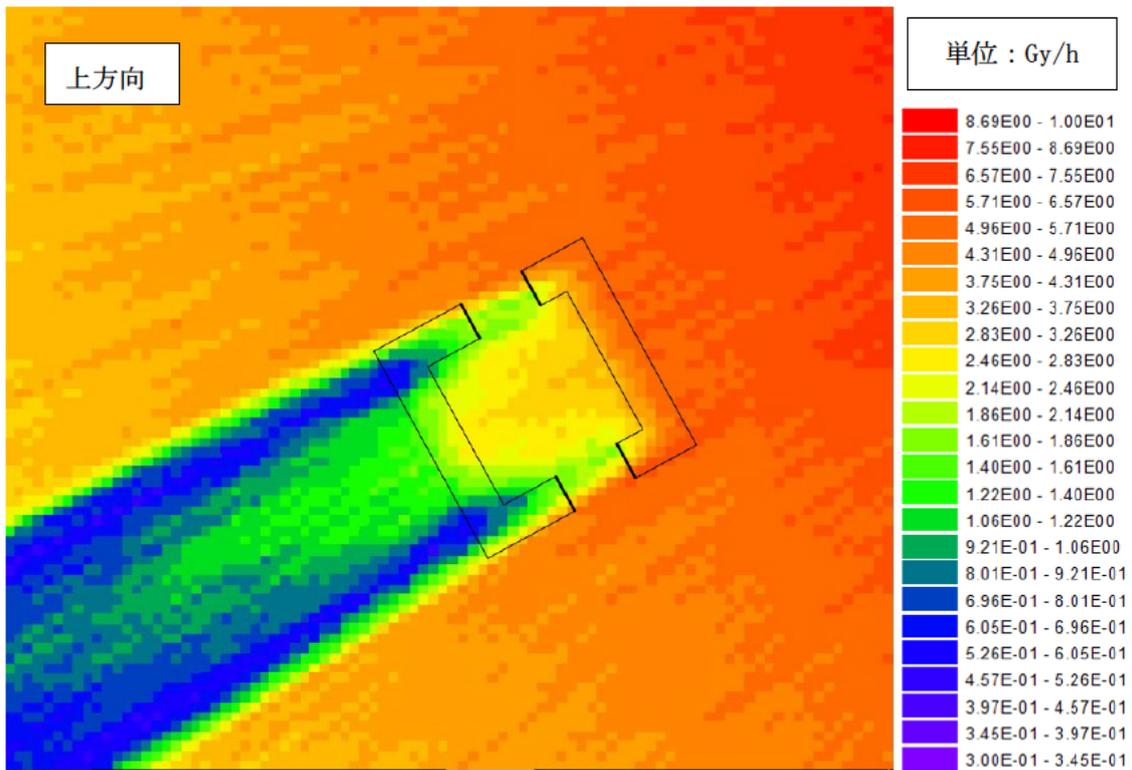


図 6.2-5 照射方向：上方の線量率分布図（遮へい体内部線量計高さ）

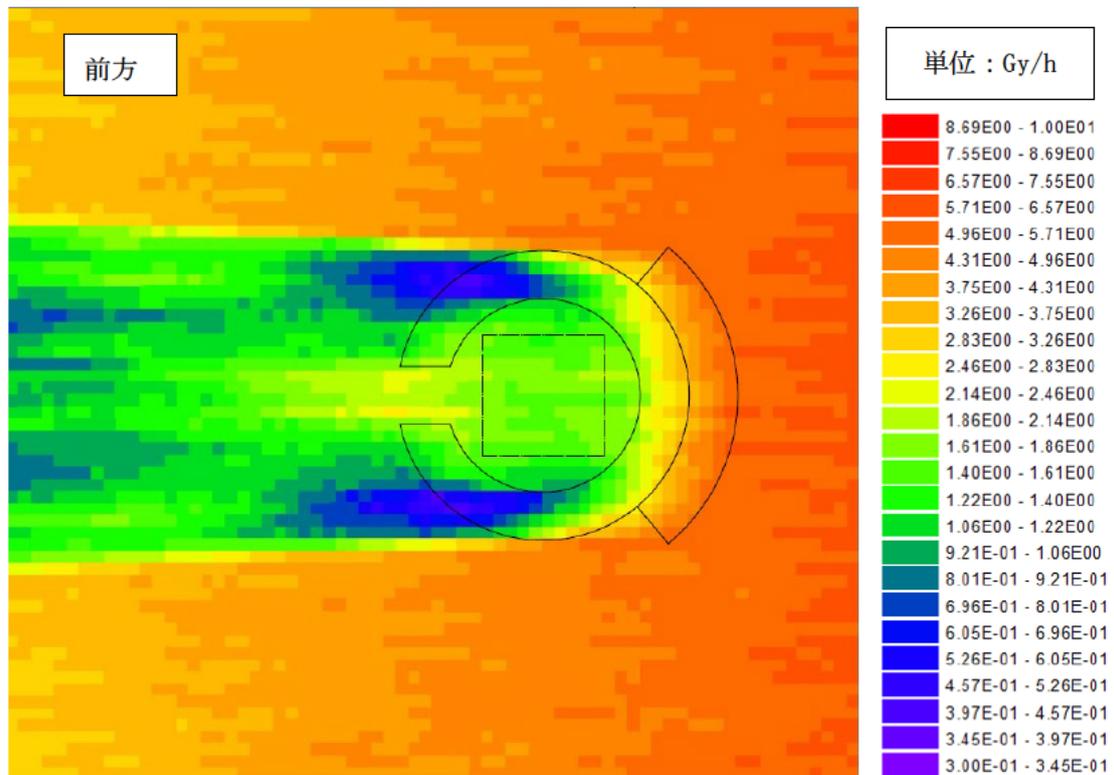


図 6.2-6 照射方向：前方の線量率分布図（遮へい体内部線量計高さ）

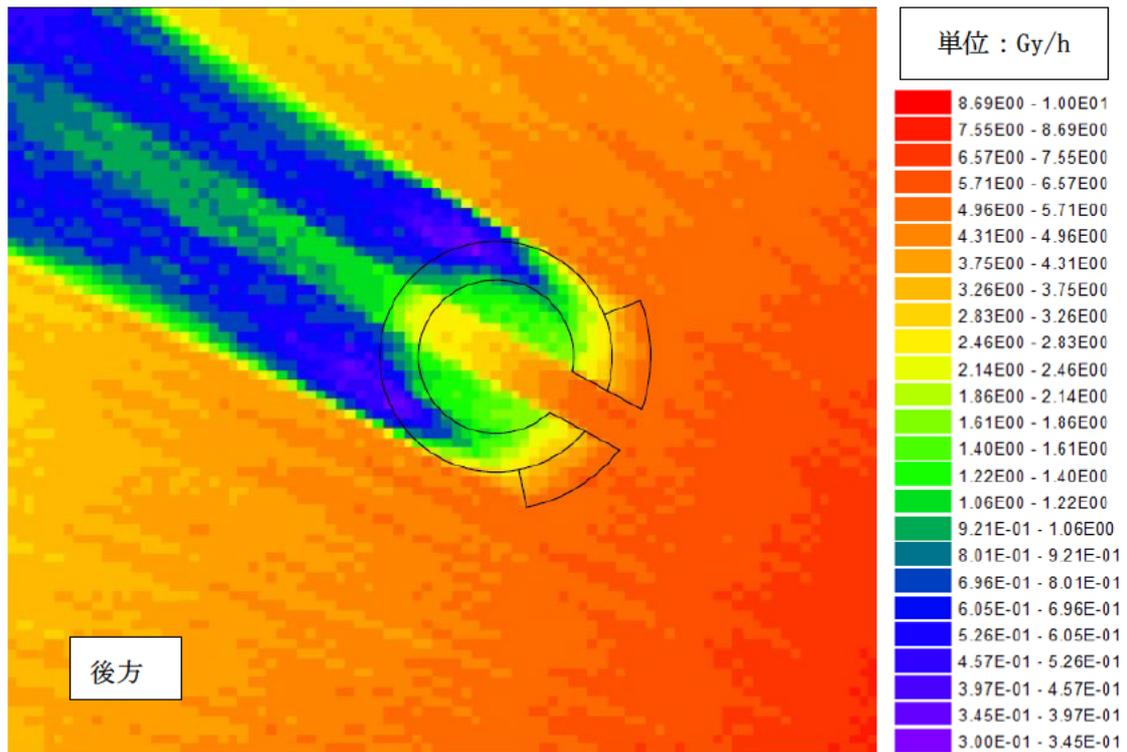


図 6.2-7 照射方向：後方の線量率分布図（遮へい体内部線量計高さ）

## 7. 考察

### 7.1 令和4年度までの試験結果を含む整理

これまでの光電センサの照射試験結果として、センサが正常に動作することを確認した時点での集積吸収線量を表 7.1-1 及び図 7.1-1 に、近接センサの照射試験結果を表 7.1-2 及び図 7.1-2 に示す。

表 7.1-1 光電センサ照射試験結果  
(令和2年度分)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]	
1	A	24	9.50	50	475	475	
2		24	9.50	50	475		
3		24	9.50	50	475		
4		A	24	4.63	75	347	347
5			24	4.63	75	347	
6			24	4.63	75	347	
7			24	2.73	150	410	410 <sup>*2</sup>
8			24	2.62	150	393 <sup>*1</sup>	
9			24	2.62	150	393 <sup>*1</sup>	
10	B	24	14.08	50	704	716 (SD <sup>*3</sup> :56)	
11		24	13.08	50	654		
12		24	15.80	50	790		
13		B	24	8.53	75	640	542 (SD <sup>*3</sup> :138)
14			24	8.53	75	640	
15			24	4.63	75	347	
16			24	3.15	150	473	473
17			24	3.15	150	473	
18			24	3.15	150	473	
19	C	24	20.90	50	1045	1045	
20		24	20.90	50	1045		
21		24	20.90	50	1045		
22		C	24	14.27	75	1070	1070
23			24	14.27	75	1070	
24			24	14.27	75	1070	
25			24	11.40	150	1710	1710
26			24	11.40	150	1710	
27			24	11.40	150	1710	

表 7.1-1 光電センサ照射試験結果 (その 2)

(令和 3 年度、4 年度分)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
28	A	非通電	177.53	4.63	822	822
29		非通電	177.53	4.63	822	
30		非通電	177.53	4.63	822	
31		24	8.4	48.5	408	427 (SD <sup>*3</sup> :14)
32		24	8.8	49.9	439	
33		24	8.4	51.6	434	
34		24	4.2	102.1	429	
35		24	3.8	112.2	427	415 (SD <sup>*3</sup> :31)
36		24	3.8	116.1	441	
37		24	3.8	116	441	
38		24	3.8	106.5	405	
39		24	4.2	97.4	409	
40		24	4.8	102.1	490	
41		24	3.8	112.2	427	
42		24	3.6	116.1	418	
43		24	3.4	116	395	
44		24	4.0	106.5	426 <sup>*4</sup>	
45		24	4.4	97.4	428 <sup>*4</sup>	
46		24	4.0	97.4	390 <sup>*4</sup>	
47		24	3.8	97.4	370 <sup>*5</sup>	
48	24	4.0	97.4	390 <sup>*5</sup>		
49	24	3.6	97.4	351 <sup>*5</sup>		
50	A	12	137.2	4.38	600	664 (SD <sup>*3</sup> :74)
51		12	141.2	4.42	659	
52		12	141.2	4.43	678	
53		12	141.2	4.49	634	
54		12	137.2	4.45	611	
55		12	141.2	4.38	838	
56		12	133.2	4.42	589	
57		12	141.2	4.43	753	
58		12	141.2	4.49	670	
59		12	137.2	4.45	611	

表 7.1-1 光電センサ照射試験結果 (その 3)

(令和 5 年度分)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
60	A	非通電	13.4	96	1288	1050 (SD <sup>*3</sup> :94)
61		非通電	9.9	107	1055	
62		非通電	8.9	114	1010	
63		非通電	8.9	114	1015	
64		非通電	8.9	106	947	
65		非通電	10.9	96	1048	
66		非通電	8.9	107	948	
67		非通電	8.9	114	1010	
68		非通電	9.9	114	1129	
69		非通電	9.9	106	1054	
70		12	5.9	96	567	626 (SD <sup>*3</sup> :46)
71		12	5.9	107	629	
72		12	4.9	114	556	
73		12	5.9	114	673	
74		12	5.9	106	628	
75		12	5.9	96	567	
76		12	6.1	107	650	
77		12	5.9	114	670	
78		12	6.1	114	695	
79		12	5.9	106	628	
80	24	35.2	4.66	164 <sup>*1</sup>	603 <sup>*6</sup> (SD <sup>*3</sup> :73)	
81	24	112.3	4.53	508		
82	24	124.3	4.30	534		
83	24	46.0	4.66	214 <sup>*1</sup>		
84	24	124.3	4.59	570		
85	24	42.6	4.66	198 <sup>*1</sup>		
86	24	140.3	4.53	635		
87	24	156.3	4.30	672		
88	24	156.3	4.66	728		
89	24	124.3	4.59	570		

- ※1 初回の動作確認前に出力電圧が 0V 付近まで低下した。
- ※2 No.8,9 は正常な動作を確認する前に故障したため、No.7 の値を記載している。
- ※3 SD : 標準偏差
- ※4 照射方向はセンサ上下方向。
- ※5 照射方向はセンサ左右方向。
- ※6 No.80,83,85 は正常な動作を確認する前に故障したため、それ以外の値から算出した。

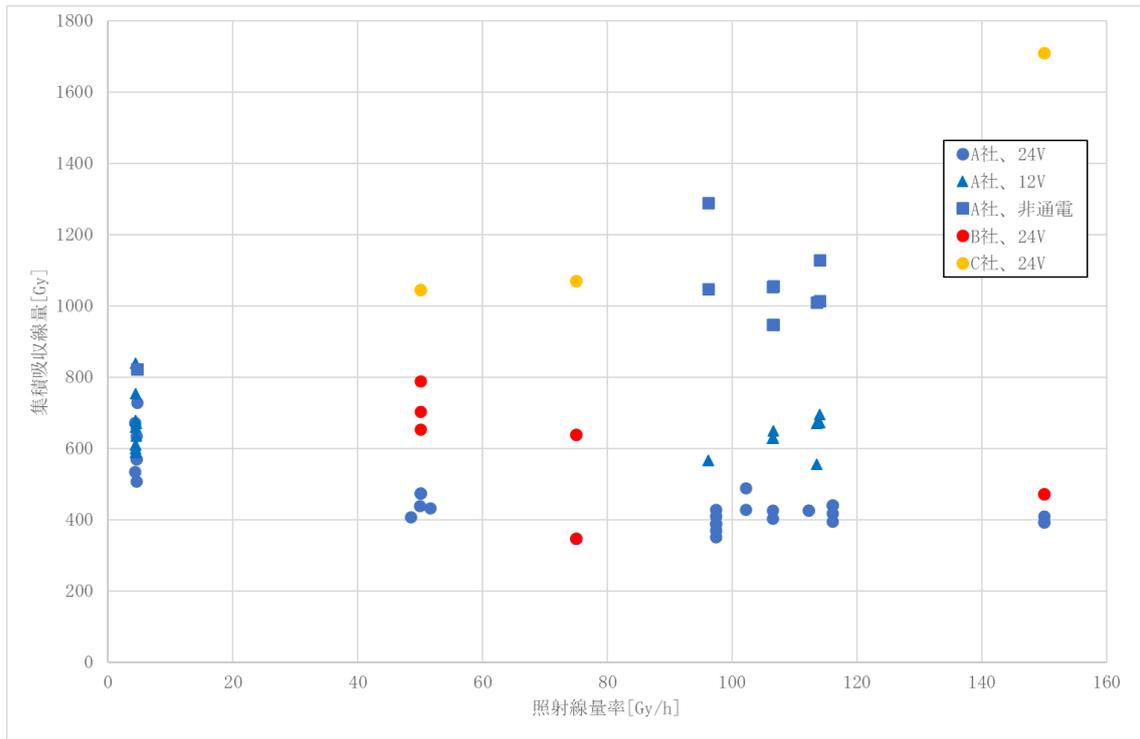


図 7.1-1 光電センサの照射試験結果

表 7.1-2 近接センサ照射試験結果

(令和2年度、3年度)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
1	D	24	16.25	50	813	876
2		24	18.78	50	939	
3	E	24	21.43	50	1072 <sup>**1</sup>	1072
4		24	21.43	50	1072 <sup>**1</sup>	
5		24	21.43	50	1072 <sup>**1</sup>	
6		24	21.43	50	1072 <sup>**1</sup>	
7	D	非通電	90.60	4.63	419	684 (SD <sup>**2</sup> :188)
8		非通電	176.40	4.63	817	
9		非通電	176.40	4.63	817	
10		24	24.0	48.5	1165	1166 (SD <sup>**2</sup> :42)
11		24	24.4	49.9	1217	
12		24	21.6	51.6	1115	
13		24	10.6	102.1	1082	
14		24	14.0	112.2	1571	1252 (SD <sup>**2</sup> :210)
15		24	12.6	116.1	1462	
16		24	12.8	116	1485	
17		24	13.0	106.5	1385	
18		24	11.2	102.1	1143	
19		24	9.0	112.2	1010	
20		24	8.0	116.1	928	
21		24	11.4	116	1323	
22		24	10.6	106.5	1129	

表 7.1-2 近接センサ照射試験結果 (その 2)

(令和 4 年度、5 年度)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	照射時間 [h]	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]	
23	D	12	160.4	4.38	702 <sup>*3</sup>	789 <sup>*4</sup> (SD <sup>*2</sup> :78)	
24		12	172.4	4.42	762		
25		12	168.3	4.43	745		
26		12	166.4	4.49	747		
27		12	166.4	4.45	741		
28		12	160.4	4.38	702 <sup>*3</sup>		
29		12	172.4	4.42	762		
30		12	160.4	4.43	710 <sup>*3</sup>		
31		12	217.6	4.49	977		
32		12	176.3	4.45	785		
33		24	322.2	4.43	1426 <sup>*1</sup>		1289 (SD <sup>*2</sup> :209)
34		24	322.2	4.49	1447 <sup>*1</sup>		
35		24	223.3	4.45	994		
36	D	非通電	30.2	96	2903 <sup>*1</sup>	3242 (SD <sup>*2</sup> :195)	
37		非通電	30.2	107	3218 <sup>*1</sup>		
38		非通電	30.2	114	3428 <sup>*1</sup>		
39		非通電	30.2	114	3443 <sup>*1</sup>		
40		非通電	30.2	106	3215 <sup>*1</sup>		
41		非通電	30.2	96	2903 <sup>*1</sup>		
42		非通電	30.2	107	3218 <sup>*1</sup>		
43		非通電	30.2	114	3428 <sup>*1</sup>		
44		非通電	30.2	114	3443 <sup>*1</sup>		
45		非通電	30.2	106	3215 <sup>*1</sup>		
46		12	30.6	96	2942	3107 (SD <sup>*2</sup> :851)	
47		12	30.6	107	3261		
48		12	30.6	114	3473		
49		12	30.6	114	3489		
50		12	30.6	106	3258		
51		12	19.6	96	1884		
52		12	19.6	107	2089		
53		12	19.6	114	2225		
54		12	30.6	114	3489		
55		12	46.6	106	4961 <sup>*1</sup>		

- ※1 センサの故障前に照射を終了した。
- ※2 SD：標準偏差
- ※3 初回の動作確認前に非検知状態の出力電圧異常を確認した。
- ※4 No.23,28,30 は正常な動作を確認する前に故障したため、その他の値から算出した。

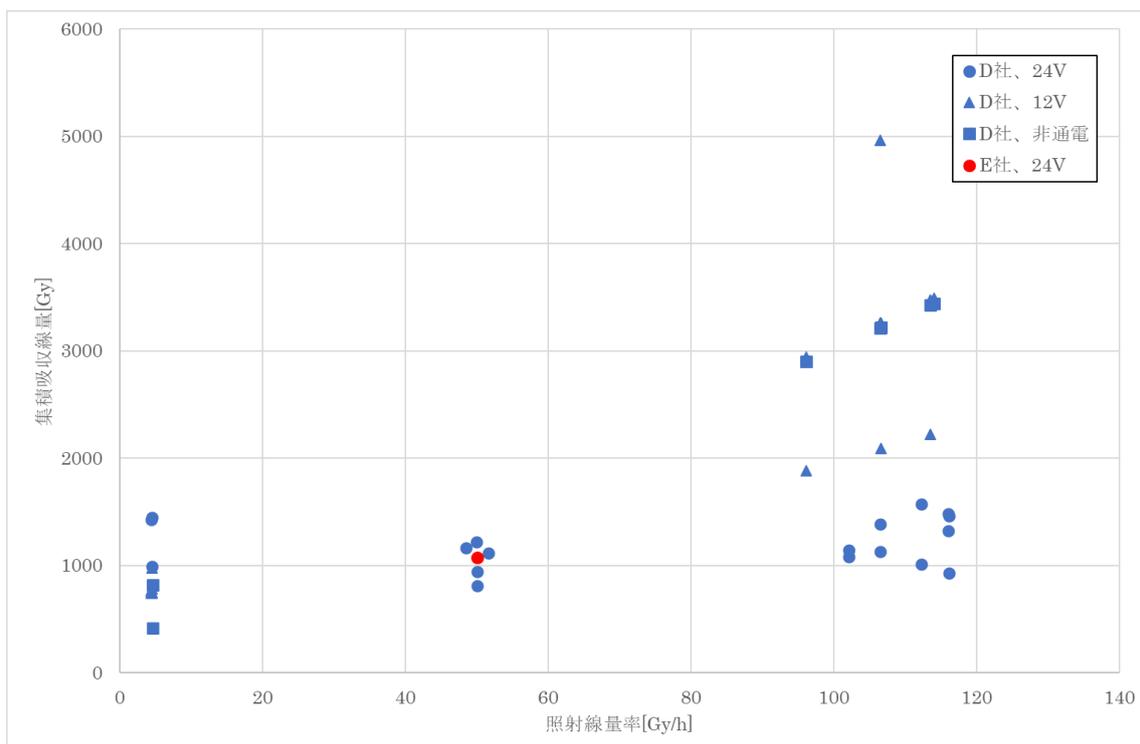


図 7.1-2 近接センサの照射試験結果

## 7.2 光電センサ

### 7.2.1 入力電圧の影響

光電センサを対象に 24V 及び 12V の入力電圧で照射試験を実施した。5Gy/h の照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は 24V で 603Gy、12V で 664Gy であった。100Gy/h の照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は 24V で 415Gy、12V で 626Gy であった。

光電センサでは、照射線量率に依らず、12V と比較し、24V の方が正常な動作を確認した集積吸収線量が小さく、早期に故障することが確認された。令和 2 年度に実施した光電センサの故障原因調査では、フォトダイオードまたは制御回路基板にある半導体の故障が確認された。入力電圧の違いはセンサの電源供給部への影響があると考えられ、今後入力電圧を変化させた際の故障箇所について追加調査を実施し、耐放射線性を評価する必要がある。

### 7.2.2 通電状態の影響

光電センサを対象に通電状態及び非通電状態で照射試験を実施した。5Gy/h の照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は 24V の通電状態で 603Gy、非通電状態で 822Gy であった。100Gy/h の照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は 24V の通電状態で 415Gy、非通電状態で 1050Gy であった。

光電センサでは、照射線量率に依らず、24V の方が非通電よりも正常な動作を確認した集積吸収線量が小さく、早期に故障することが確認された。一般的に、電子機器は非通電状態と比較し通電状態の方が耐放射線性が低下し、本試験結果はこの一般的な傾向に一致する<sup>[7]</sup>。

## 7.3 近接センサ

### 7.3.1 入力電圧の影響

近接センサを対象に 24V 及び 12V の入力電圧で照射試験を実施した。5Gy/h の照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は 24V で 1289Gy、12V で 789Gy であった。100Gy/h の照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は 24V で 1252Gy、12V で 3107Gy であった。

100Gy/h の近接センサにおいては、12V と比較し、24V の方が正常な動作を確認した集積吸収線量が小さく、早期に故障することを確認した。5Gy/h においては、100Gy/h と異なり、24V と比較し、12V の方が耐放射線性が低下することを確認した。

近接センサに使用されているトランジスタは、照射に伴いしきい値電圧が低下し、さらに照射線量が増加するとしきい値電圧が上昇することが分かっている<sup>[8][9][10]</sup>。そこで、昨年度は 5Gy/h の照射試験結果から、近接センサは放射線照射に伴い、しきい値電圧が低下し、センサが検知状態になりやすい状態となっている可能性があると考えた。また、検知異常が発生しなかったセンサに関しては、しきい値電圧が上昇し検知異常による故障ではなく、漏れ電流の発生に伴う突発的なサージによる故障が発生し、検知時の出力電圧が低下していると考えた。

しかし、今年度実施した 100Gy/h の試験では、入力電圧が高いほど耐放射線性が低下してお

り、5Gy/hにおける入力電圧の耐放射線性への影響とは異なる傾向が確認された。今年度照射試験を実施した100Gy/h・12V、100Gy/h・非通電、並びに昨年度照射試験を実施した5Gy/h・24Vに用いた近接センサは、その他の試験条件での照射試験結果と比較して、耐放射線性が優れていることが確認されている。これらのセンサは、その他の試験条件で照射試験を実施した近接センサと型番は同じであるが、一部寸法等が変更となっている。フライスカット部の長さが3mm長くなっているため、センサの内部回路等の配置が以前のセンサの位置関係と異なる可能性があり、耐放射線性へ影響を与えている可能性がある。照射データの再取得、または故障原因調査により、こうした条件の耐放射線性への影響を評価する必要がある。

### 7.3.2 通電状態の影響

近接センサを対象に通電状態及び非通電状態で照射試験を実施した。5Gy/hの照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は24Vの通電状態で1289Gy、非通電状態で684Gyであった。100Gy/hの照射線量率において正常な動作を確認した平均集積吸収線量は24Vの通電状態で1252Gy、非通電状態で3242Gyであった。

100Gy/hの近接センサにおいては、光電センサと同様に非通電状態と比較し、通電状態の方が耐放射線性が低下することを確認した。5Gy/hにおいては、100Gy/hとは異なり、非通電状態と比較し通電状態の方が向上することを確認した。従って、近接センサでは、入力電圧と同様に通電状態の耐放射線性への影響が5Gy/hと100Gy/hで異なっている。ただし、近接センサは7.3.1項で述べたように、照射データの再取得、または故障原因調査により耐放射線性を再評価する必要があると考えられる。

## 7.4 ドローン

ドローンの照射試験計画を作成した際は、測域センサに対するこれまでの照射試験結果から故障する集積吸収線量を予想した。測域センサの故障時の最大集積吸収線量は287Gyであったが、ドローンは292Gy及び298Gyで操作信号の受信モジュールが故障したとみられる。

ドローンのように複数のセンサが使用され、ユニットとなっている場合、センサ単独で照射した場合と故障時の挙動が異なることが確認された。従って、今後搬送装置等のユニットを対象に照射試験を実施し、耐放射線性を評価する際には、センサ単独の耐放射線性データを参考にユニットによる影響も考慮する必要がある。

また、今後ドローンの故障時の挙動を明らかにするための追加照射試験として、今回故障した受信モジュールの放射線損傷箇所検査、今回故障が確認されなかったセンサへの個別照射による耐放射線性評価及び中継器アンテナへの照射試験等の実施が考えられる。

また、ドローンの耐放射線性向上のためのカスタマイズを実施し、遮へい効果を確認したうえで動作試験を実施することも有効だと考えられる。

## 7.5 遮へい解析と照射試験結果の比較

### 7.5.1 カスタマイズによる遮へい効果

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 測域センサの試験条件では、カスタマイズした測域センサは照射開始後約 82.3 時間で距離データの取得を停止し、故障した。この時、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 393Gy である。一方で、カスタマイズせずに照射を行った測域センサ（照射方向：前方）は、照射開始後 42.4 時間、つまり集積吸収線量 202Gy で故障した。本年度の試験条件では、カスタマイズによってセンサが故障するまでの集積吸収線量が 1.95 倍となることが確認された。

また、カスタマイズした測域センサに対して、遮へい体内部の照射線量率から故障する集積吸収線量を算出すると、129Gy となる。ただし、測域センサは図 7.5-1 に示す検出部領域を持つため、開口部に近い検出部上部の照射線量率はより高い照射線量率となっている可能性がある。遮へい解析により、図 7.5-1 に示すセンサ検出部表面における照射線量率を計算すると 3.22Gy/h となり、これを用いて、故障時の集積吸収線量を算出すると 265Gy になる。

なお、測域センサは照射線量率による耐放射線性への影響がほとんど確認されておらず、令和 2 年及び令和 3 年の照射試験では、試験条件に依らず 197~278Gy で故障が発生し、本年度も同様の傾向が確認された。

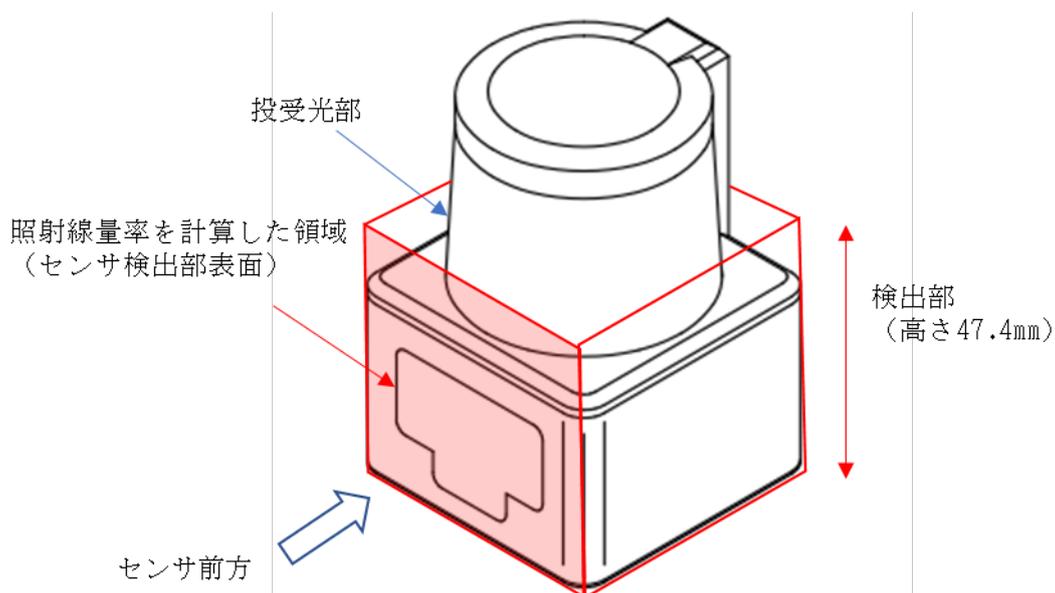


図 7.5-1 測域センサの検出部及び照射線量率を計算した領域

### 7.5.2 照射方向の影響評価

照射方向の耐放射線性への影響に関して、照射方向：前方及び上方向では、遮へい体内部の照射線量率が大きく低下している。照射方向：前方では、線源中心方向の遮へい厚が 40mm であるが、上方向では遮へい厚が 20mm であり、線量率に差異が生じている。一方で、照射方向：後方では照射線量率が遮へい体外部と同程度となっている。これは照射方向：後方では、ガラス線量計の設置箇所と遮へい体開口部位置が一致しており、線源からの直接線が入射するため、直接線の影響が大きくなったためだと考えられる。

遮へい体外部の線量率については、照射方向：上方向のみ線源中心からガラス線量計を設置した遮へい体表面までの距離が遠いため、他の照射方向と比較し小さくなっている。各遮へい体近傍の高さ方向の線量率分布図を図 7.5-2 から図 7.5-4 に示す。

従って、照射方向に加え、遮へい体構造がセンサの耐放射線性に対する影響が大きいと考えられる。

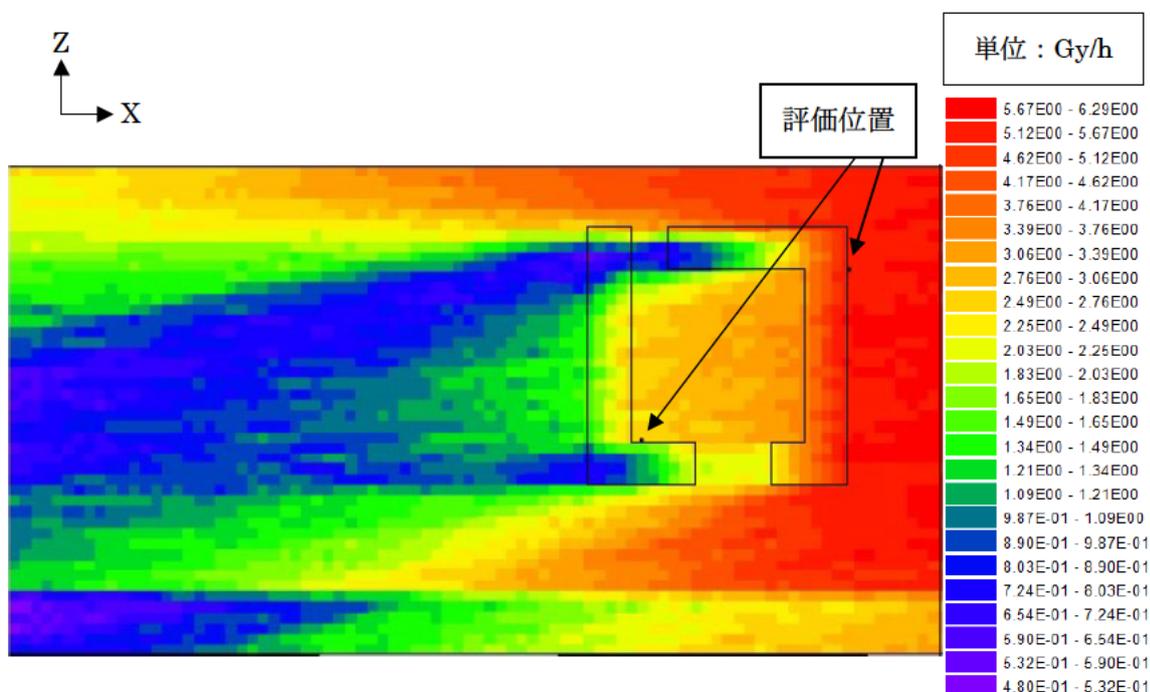


図 7.5-2 照射方向：上方向遮へい体近傍の線量率分布図（断面図）

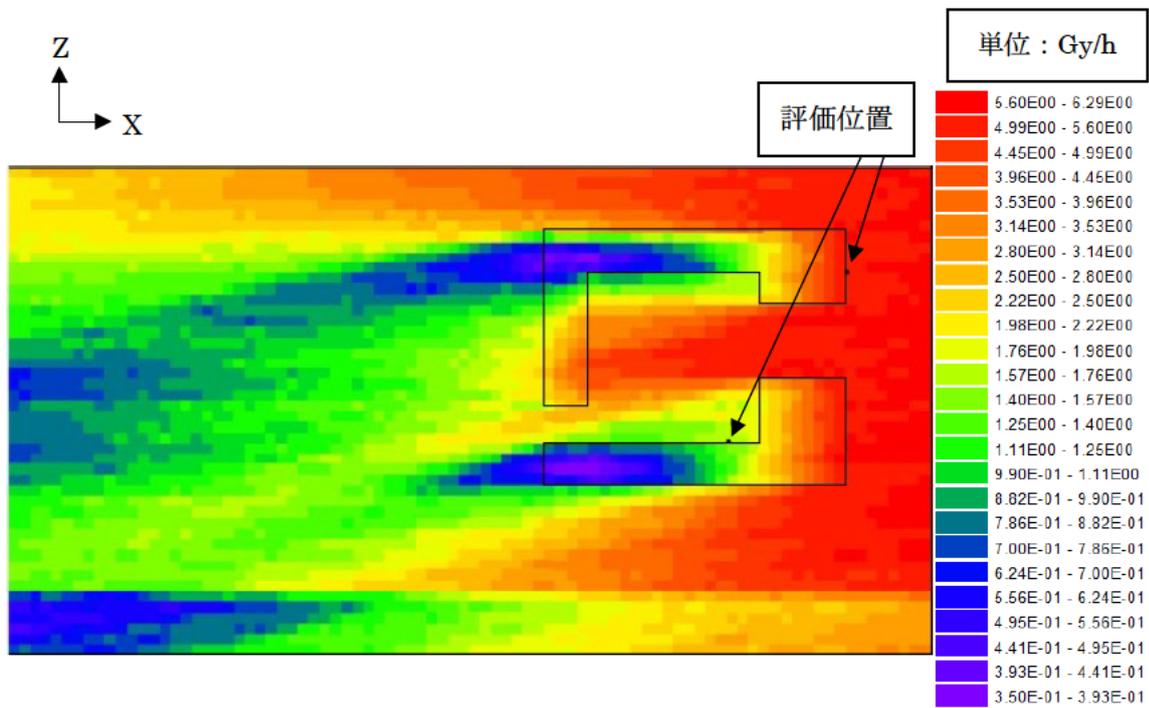


図 7.5-3 照射方向：前方遮へい体近傍の線量率分布図（断面図）

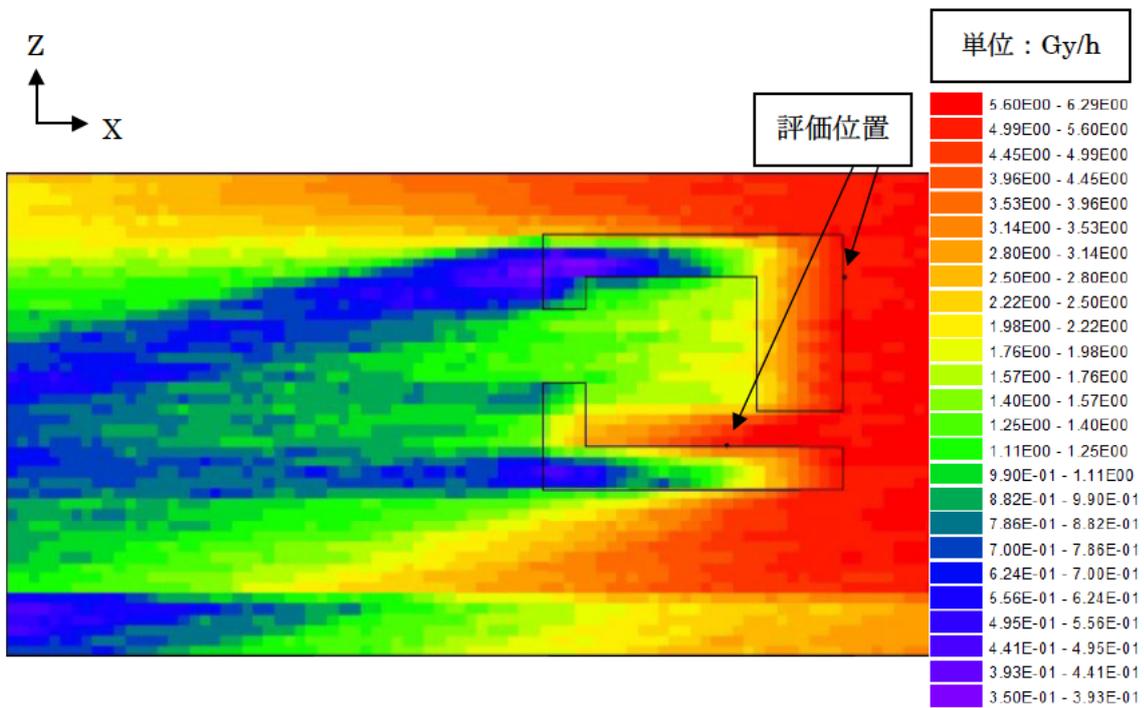


図 7.5-4 照射方向：後方遮へい体近傍の線量率分布図（断面図）

### 7.5.3 遮へい解析と測定値の比較

遮へい解析による解析値と照射試験による測定値は、表 6.2-2 に示した通り、遮へい体外部において約 20%以内で一致し、遮へい体内部において約 10%以内で一致する結果となった。また、遮へい体内部では、測定値と比較して解析値の方が大きくなっており、遮へい体外部では測定値と比較して解析値の方が小さくなっている。照射試験で測定に用いたガラス線量計は、方向特性を持つ。参考ではあるが、ガラス線量計の X 線に対する方向特性について、0°を長軸方向に垂直に入射する角度としたレスポンスを基準とした場合、-90°で 6 割程度までレスポンスが低下することが確認されている<sup>[11][12]</sup>。

遮へい体内部では、遮へい体から散乱された放射線が入射するため、ガラス線量計は線源方向以外の様々な入射角度の放射線を測定していると考えられる。前述のようにガラス線量計は、長軸方向から放射線が入射した場合、応答特性が小さくなるため、測定値と比較して解析値が大きくなったと考えられる。

## 8. 一般産業用工業品の使用指針の作成

### 8.1 技術委員会の設立

#### 8.1.1 技術委員会の実施目的

技術委員会は、本事業で得られた照射試験結果を基に、使用指針案を作成することを目的としている。

令和5年度の技術委員会では、機器へのセンサ類の適用方法の検討を開始するため、使用指針の概要及びこれまでの照射試験結果の内容について審議し、追加試験による耐放射線性データの追加取得の要否について検討する。

また、令和6年度以降は、使用指針案作成のため、機器へのセンサ類の適用方法の検討、機器の作動試験及び適合性評価を行う。それぞれの概要を以下に示す。

##### (1) 機器への適用方法の検討

照射試験によって取得したセンサ類の耐放射線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

検討したカスタマイズ手法について、実際の機器のセンサ類に適用した状態での試験方法を検討し、作動試験を行う。その後、その適合性を評価し、放射線損傷対策の設計手順を検討する。また、耐放射線データ取得するための試験方法の評価を行う。

#### 8.1.2 委員会全体工程

委員会は、2.2項に記載した6ヵ年計画に従い、全3年の計画としている。また、委員会は令和5年度に1回、令和6年度及び令和7年度は2回の合計5回の実施を検討している。令和5年度は使用指針案の概要及びこれまでの試験結果の審議を行い、今後の使用指針案作成に向けた検討項目を整理し、必要な追加試験の内容を決定した。

令和6年度は令和5年度に必要と評価された追加照射試験を実施し、センサの故障原因及び故障メカニズムを明らかにする。また、照射試験結果を踏まえて、実際の機器に遮へいを施す場合の適用方法を検討し、作動試験結果を踏まえて、適合性を評価する。

令和7年度は令和6年度までの試験結果及び審議内容を整理し、使用指針案を整備する。

## 8.2 第一回技術委員会結果概要

第一回技術委員会では、使用指針案の概要及びこれまでの照射試験結果について、委員へ報告し、その内容について審議を行った。委員会での審議結果概要について、以下にまとめる。

### 8.2.1 使用指針概要

技術委員会では、今後作成する使用指針案の概要について説明を行った。使用指針は、原子力分野でのサプライチェーン維持のため、一般産業用工業品の使用のための耐放射線性評価の考え方、また耐放射線性データ取得のための照射試験手法を規定するものである。

技術委員会では主に二点のコメントを頂いた。一点目は、耐放射線性評価時の単位に関してであった。これまでの試験結果は、アラニン線量計の測定結果を基にセンサの故障時の集積吸収線量を算出している。また、遮へい解析では、規格化した線源強度に空気の換算係数をかけており、どちらも吸収線量 (Gy) 表記としている。一方で、原子力発電所放射線遮蔽設計規定: JEAC4615-2020 の空間線量率の規定及び被ばく評価時には、一般的に実効線量 (Sv) を用いることが多い。使用指針として整備する際には、放射線の種類を考慮し実効線量で示した方が良いとコメントを頂いた。

二点目は、既知の耐放射線性データがある場合の耐放射線性評価の考え方に関してであった。既知の耐放射線性データの一例として、量子科学技術研究開発機構殿が所有する高分子系材料・機器の放射線性データベースがある。しかし、このデータベースは実環境での使用時の構成部品の耐放射線性の保証するものではない。また、既知の耐放射線性データについては、試験方法が統一されていない、またはデータの取得時期が古すぎるため、信頼性が低い場合がある。こうした場合には、既知の耐放射線性データを参考に、照射試験による耐放射線性データの取得を要求される可能性もある。既知の耐放射線性データがある場合の具体的な評価については、今後の技術委員会の中で課題を整理し、設計方針を検討したうえで、使用指針への記載案を審議していく予定である。

### 8.2.2 照射試験結果

技術委員会では、これまでの本事業での試験結果及び成果についてご説明した。具体的な成果は、一般産業用工業品のうちセンサに対する耐放射線性データの文献調査、代表センサに対する照射試験による耐放射線性データの取得、及びカスタマイズ照射試験である。技術委員会では、照射線量率、入力電圧及び照射停止時間等の試験条件の各センサの耐放射線性への影響についてコメントを頂いた。また、こうした試験条件の耐放射線性への影響を評価するために、故障メカニズムの解明及び故障箇所の分析が必要であるとコメントを頂いた。令和2年度に各センサの故障原因調査を実施し一部センサの故障箇所を確認したが、具体的な故障メカニズムの解明には至っていない。

従って、今後放射線損傷したセンサの構成部品に対する電気特性試験等の追加の故障原因調査、もしくは構成部品単位に対する照射試験により、耐放射線性の低い部品を明らかにし、センサの故障メカニズムを解明する必要がある。

## 9. 今後の課題

### 9.1 故障原因調査の実施

本年度までの照射試験結果から、各試験条件の耐放射線性への影響を評価した。測域センサでは照射線量率に依らず、耐放射線性のばらつきが小さいことを確認している。光電センサでは、照射線量率に依らず、通電状態、入力電圧等の試験条件により耐放射線性が同様の傾向で変化することを確認している。しかし、近接センサでは、入力電圧及び通電状態の耐放射線性への影響が、照射線量率により異なることを確認している。センサにより試験条件の耐放射線性への影響が異なることを確認しているが、故障メカニズムは明らかとなっていない。

また、各センサを対象に、令和2年度に故障原因調査を実施した。しかし、令和3年度以降の照射試験では、試験条件を変更しているため、故障箇所及び故障メカニズムが令和2年度の故障原因調査結果と異なる可能性がある。つまり、故障箇所及び故障メカニズムの違いにより、故障時の挙動に差異が生じている可能性がある。

技術委員会においても委員より、センサの構成部品に対する電気特性調査等の故障原因調査を実施し、故障メカニズムを明らかにする必要があるとコメントを頂いている。

従って、これまで照射試験及び故障原因調査を実施したセンサに対して、故障箇所特定のため追加調査を実施する必要がある。追加調査では、耐放射線性の低い部品及び故障メカニズムについて検討する必要がある。

### 9.2 機器への適用性検討、作動試験の実施

本年度までの照射試験により、耐放射線性データ取得のための照射試験手法を確認するとともに、複数のセンサの耐放射線性データを取得した。また、カスタマイズによる遮へい効果を確認し、遮へい解析との比較評価を実施した。

本年度まで、センサ単体に対してカスタマイズを実施しているが、実際の使用環境では搬送装置等に設置されたセンサを対象にカスタマイズを実施する必要がある。本年度までの試験結果より、センサをカスタマイズする場合には遮へい体構造等が課題となることが分かった。従って、センサを機器へ搭載する前に、実際の環境でカスタマイズするための手法及び実機でのカスタマイズ試験の試験方法について検討し、その適合性を調査する必要がある。

### 9.3 見直し全体工程

今後の課題として、故障原因調査による故障メカニズムの推定が挙げられた。故障原因調査では、これまで照射試験を実施したセンサもしくはセンサの構成部品に対する照射を実施し、電気特性評価等の詳細調査を行うことにより、故障箇所、メカニズムを明らかにすることを検討している。従って、令和6年度は、追加照射試験の実施が必要になると考えられる。

また、故障原因調査結果を基に、故障メカニズムを考慮したうえで、当初の計画に基づき機器への適用性評価及び作動試験を実施する必要がある。

故障原因調査のための追加照射試験を考慮した、見直し全体工程を表 9.3-1 に示す。

表 9.3-1 令和2-7年度の見直し全体工程

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	令和7 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	●————●				追加 照射試験	
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			技術委員会設立▼	●————●		
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					●	————●

## 10. まとめ

令和 5 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のため、一般産業用工業品の追加データの取得、カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得を実施した。

一般産業用工業品の追加データ取得としては、入力電圧及び通電状態の耐放射線性への影響評価のための追加データ取得、及びユニットにおける耐放射線データ例取得のためドローンの耐放射線性データ取得を行った。

令和 4 年度までの照射試験結果から、5Gy/h の照射線量率において、光電センサ及び近接センサの耐放射線性に対する入力電圧及び通電状態の影響が確認されたため、令和 5 年度は 100Gy/h 及び 5Gy/h の照射線量率で、通電状態及び入力電圧を試験条件として照射試験を実施した。光電センサにおいては、入力電圧が低いほど早期に故障することが確認された。また、非通電状態と比較し、通電状態の方が早期に故障することが確認された。近接センサにおいては、入力電圧及び通電状態による耐放射線性への影響の傾向が、照射線量率によって異なることが確認された。

ドローンの照射試験においては、測域センサの照射試験結果を参考に試験条件を設定し、照射試験を実施し、耐放射線性データを取得した。ドローンは複数のセンサを使用しているが、測域センサと検出原理の近い距離センサが故障すると想定した。しかし、照射試験では距離センサではなく、受信モジュールに異常が発生し、故障した。ドローンを含む複数のセンサを使用するユニットでは、単独のセンサとは異なる耐放射線性となり、異なる故障事象が発生する可能性がある。

カスタマイズした測域センサの試験結果より、本年度の試験条件でのカスタマイズにより故障するまでの集積吸収線量が 1.95 倍になることを確認した。また、遮へい解析との比較結果では、遮へい体外部において約 20%以内で一致し、遮へい体内部において約 10%以内で一致することを確認した。令和 5 年度までの結果より、光電センサ及び測域センサのカスタマイズ試験において、複数の照射線量率での遮へい解析を実施し、いずれの条件でも約 20%以内で解析値と測定値が一致することを確認した。従って、センサ種類及び照射線量率等の照射条件に依らず遮へい解析による評価が実施可能であると評価された。

また、一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針案作成のための技術委員会を設立し、第一回技術委員会を開催した。技術委員会では、使用指針の概要及びこれまでの照射試験結果等の成果を報告し、その内容について審議を行った。

照射試験及び技術委員会での審議の結果を踏まえて、センサ類の耐放射線性への各試験条件の影響を評価するために、センサ類の故障箇所及び故障メカニズムを明らかにする必要がある。そのために、照射後のセンサ類に対する故障箇所の調査とともに、センサ類の構成部品への照射試験が必要となる。

ドローンのような複数のセンサを含むユニットでは、使用されている代表的なセンサ単体の耐放射線性とは異なる耐放射線性を示し、故障時の挙動が異なる可能性がある。従って、ユニットに使用されている代表センサだけではなく、耐放射線性の低い構成部品の有無を考慮し、耐放射線性を評価する必要がある。

カスタマイズ試験の結果を踏まえて、遮へい解析を有効に使用しながらセンサ類の遮へい設計を行う必要がある。また、事業の全体工程を踏まえると、令和 6 年度は機器への適用性検討及び

作動試験を行う必要がある。そこで、照射試験で得られたデータを踏まえて、実際の環境でカスタマイズするための手法及び実機でのカスタマイズ試験の試験方法について検討し、その適合性を調査する必要がある。

故障原因調査及び機器への適用性検討を踏まえた作動試験を実施し、技術委員会の中で審議を行い、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] 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, 神戸製鋼所, 2023.
- [7] 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.
- [8] 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
- [9] 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
- [10] 千葉治雄ら, MOS 型トランジスターの放射線照射効果, Radioisotopes, 1970, 19 (5):229-234
- [11] 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
- [12] 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

# 原子力産業基盤強化事業委託費

## 第一回 一般産業用工業品の 放射線環境下の使用指針案作成 技術委員会

### 委員会資料-1 －事業概要－

2024年2月5日（月）  
株式会社 神戸製鋼所

1. 背景・目的
2. 使用指針の概要
3. 事業の取組み
4. 事業の全体工程
5. 委員会実施スケジュール案
6. 委員等の構成

# 1. 背景・目的

## <背景>

原子力施設の殆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。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。しかし、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。このため、原子力事業者等が、放射線環境下における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課題である。



## <目的>

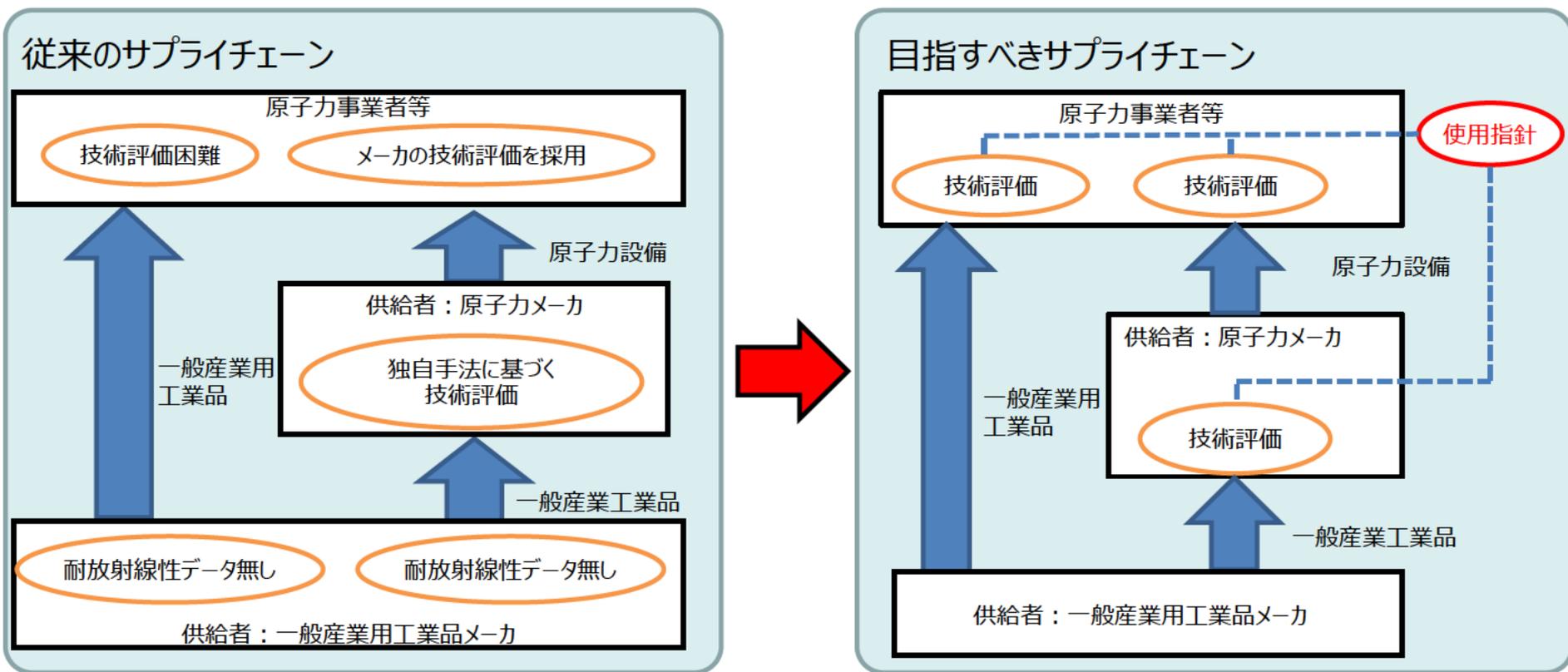
本事業では、代表的な一般産業用工業品の耐放射線性に関するデータを取得し整理することで、使用指針案を作成する。

## 2. 使用指針の概要

### ＜使用指針の目的＞

現在、原子力分野で一般産業用工業品を使用する場合の技術評価は、原子力事業者等が供給者から情報入手して自ら行うか、供給者に依頼して行うものとなっている。しかし、サプライチェーンの劣化に伴い、この技術評価が困難となっている。

そこで、事業者もしくは供給者が行う一般産業用工業品の耐放射線特性の評価に活用できる使用指針の作成が求められている。



## 2. 使用指針の概要

### <使用指針作成による効果>

使用指針を利用した原子力事業者もしくは原子力メーカーによる技術評価の実施



目指すべきサプライチェーンの実現

#### 【使用指針作成によるメリット】

- 一般工業用産業品の利用によるコスト低減
- 目指すべきサプライチェーンによる調達リスクの低減

参入障壁  
の低下

メーカー  
による競合

複数の一般産業用工業品メーカーによる供給

また、上記のような目指すべきサプライチェーンの実現により、  
以下のような付随的効果が発生することも考えられる。

- 合理的な交換頻度の設定による操業中の定検・メンテナンスの効率化
- 原子力事業者もしくはメーカーによる耐放射線性の高い製品の開発
- 耐放射線性データの蓄積によるデータベース化

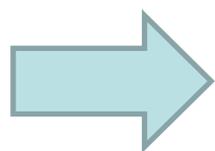
## 2. 使用指針の概要

### 【使用指針で対象とする使用環境】

原子力発電所放射線遮蔽設計規定（JEAC4615）で規定されている最も空間線量率の高い区分は1mSv/h以上であり、1mSv/h以上の空間線量率の環境下では一般産業用工業品は使用できないと考えられ、廃止措置においては1mSv/h以下の環境での作業が想定される。従って、本指針における一般産業用工業品の使用環境として最大1mSv/hを設定した。

### 【使用指針で対象とする一般産業用工業品】

項目	代表的な工業品	耐放射線性データ
駆動源	電動モータ、油圧シリンダ	電動モータは標準仕様で絶縁種が購入可能であり、油圧シリンダも耐放射線性作業油の選定が可能
電気系	ケーブル	絶縁材の耐放射線性が主であり、データは多数ある
制御系	センサ	半導体を含む多くの構成部品からなり、耐放射線性は複合的な要因により決定される



センサは、他の工業品と比較し耐放射線性の評価が困難なことから現状のサプライチェーンでは原子力分野への安定供給は困難である。従って、本指針の対象としてセンサを選定した。

## 2. 使用指針の概要

使用指針は、**放射線環境下での一般産業用工業品適用の設計手順**を示すものである。設計手順とは、適用環境の整理、対象機器の構成調査、耐放射線性データの文献調査、適用環境での放射線損傷対策設計、適用環境での使用条件に関する手順である。

また、センサ類をはじめとする一般産業用工業品のうち耐放射線性データが無いため、使用可否の判断ができない場合の照射試験による耐放射線性の評価手法も併せて示す。さらに、遮へい体の利用等による放射線損傷対策についても設計手順を示す。

なお、使用指針は、すべての一般産業用工業品の耐放射線性を網羅的に記載するデータベースではない。



P.8-9に放射線環境下での一般産業用工業品適用の設計手順を示すための使用指針案の目次及び設計フロー案を示す。

## 2. 使用指針の概要

使用指針（案）の規定内容の目次案を以下に示す。

1. 総則
2. 放射線環境下での一般産業用工業品適用の設計手順
  - 2.1 適用環境（放射線環境）の設定
  - 2.2 対象機器の耐放射線性の調査
  - 2.3 対象機器の構成部品調査
  - 2.4 各構成部品の耐放射線性の調査
  - 2.5 適用環境での放射線損傷対策設計
  - 2.6 適用環境での使用条件設定

附属1. 耐放射線性データ取得のための照射試験手順

- 附属1.1 照射試験方法
- 附属1.2 評価項目
- 附属1.3 評価基準

附属2. 機器の放射線損傷対策の設計手順

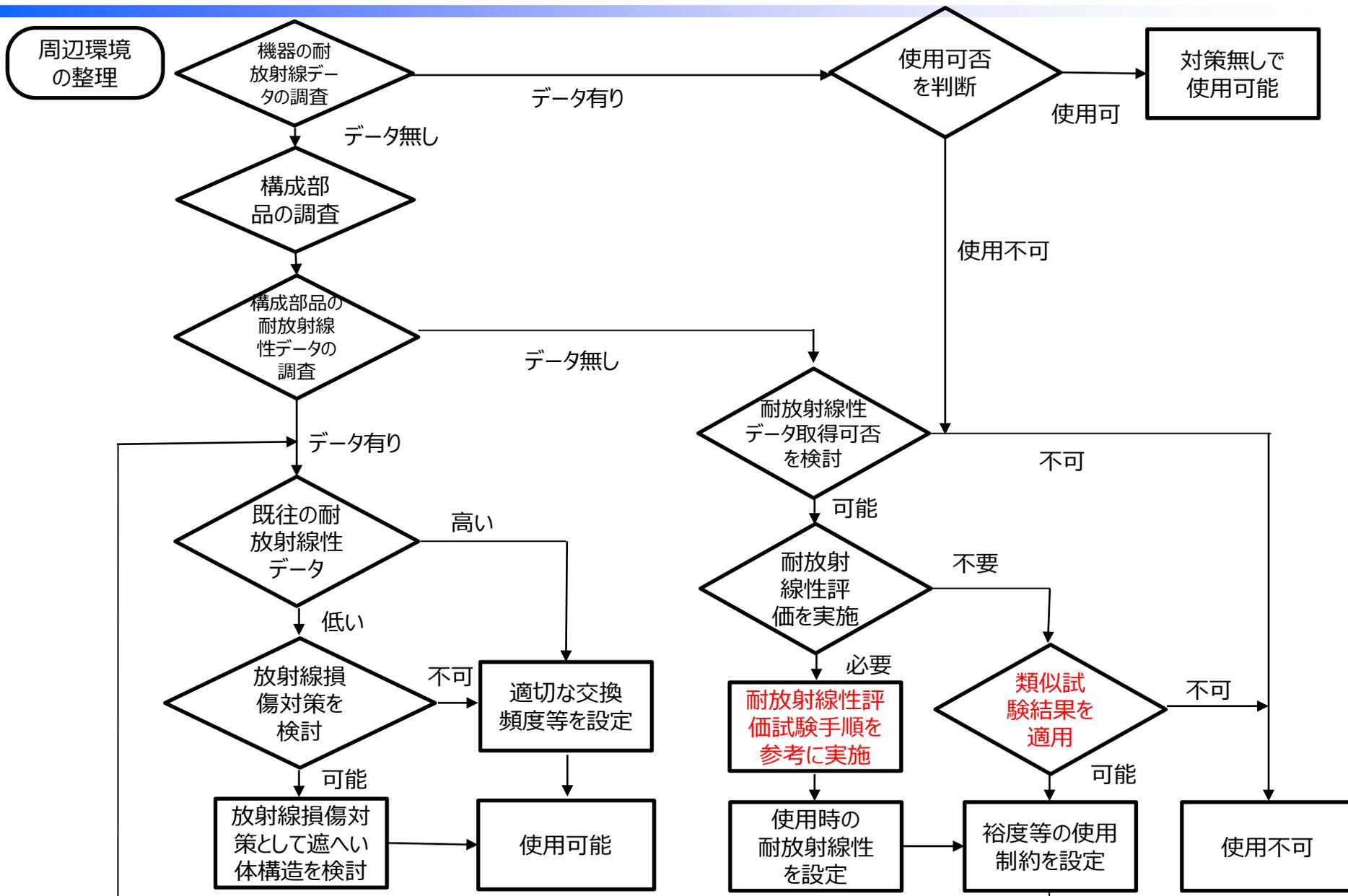
- 附属2.1 放射線損傷対策例
- 附属2.2 放射線損傷対策の選定手順
- 附属2.3 放射線損傷対策の適用方法

耐放射線性データがない場合  
の取得方法を規定

耐放射線性が低い工業品に対する  
放射線損傷対策を規定

解説 照射試験の取得データ例（国プロで取得した照射試験データ）

## 2. 使用指針の概要（設計手順フロー例）



### 3. 事業の取組み

#### <取組み内容>

本事業において、「一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針（案）」を作成するために、令和2年度より、以下の項目を調査・検討している。  
なお、使用指針（案）は作成後、別途公的機関等において正式に規格化する予定である。

- 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\*及び照射データ取得
- ④ 一般産業用工業品の使用指針案作成

\*:カスタマイズとは遮へい体の装着による放射線損傷対策を示す。



特に、④の使用指針案作成において、耐放射線性データ取得のための試験方法、遮へい設計手順、またこれらの評価に関する考え方に関して、委員会の開催し、審議していく予定である。

## 4. 事業の全体計画

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の全体計画を以下に示す。

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	令和 7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				■	▼技術委員会設置	
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案作成						■

## 5. 委員会実施スケジュール案

回数	開催時期	内容
①	令和6年2月5日	照射試験結果のご説明、レビュー 使用指針案の概要のご説明、レビュー
②	令和6年10月	機器へのセンサ類適用方法検討のご説明、レビュー
③	令和7年1月	作動試験結果、適合性評価のご説明、レビュー
④	令和7年10月	一般産業用工業品の使用指針案の審議①
⑤	令和8年1月	一般産業用工業品の使用指針案の審議②

委員会は全5回、各回2時間程度の実施を想定している。

年度	令和5年度	令和6年度	令和7年度
委員会実施時期	▽①	▽② ▽③	▽④ ▽⑤
(参考) 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の全体工程			
機器へのセンサ類適用方法検討			
機器の作動試験及び適合性評価			
一般産業用工業品の使用指針案作成			

## 6. 委員等の構成

第一回委員会の参加者（主査、委員、オブザーバ、事務局）を以下に示す。

	氏名	所属・役職	役割
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	■

## 6. 委員等の構成

	氏名	所属・役職	役割
■	■	■	■
■	■	■	■
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	
■	■	■	■

# 原子力産業基盤強化事業委託費

## 第一回 一般産業用工業品の 放射線環境下の使用指針作成 技術委員会

### 委員会資料-2 —照射試験結果—

2024年2月5日（月）  
株式会社 神戸製鋼所

1. 令和4年度までの成果概要
2. 一般産業用工業品の耐放射線性文献調査結果
3. 照射試験方法
4. 照射試験結果
5. 故障原因調査結果
6. カスタマイズ試験方法
7. カスタマイズ試験結果
8. 令和5年度照射試験結果速報
9. 今後の予定

# 1. 令和4年度までの成果概要

## 1. 照射試験用センサの選定

原子力施設で利用されている装置のうちセンサ類の耐放射線性データの有無を調査し、光電センサ、近接センサ、測域センサ、トルクセンサを照射試験対象センサとして選定した。（使用指針案2.2、2.3項に対応）

## 2. 一般工業用品の照射データの取得

1項で選定したセンサ類に対して、複数の試験条件で照射試験を実施し、耐放射線性データを取得した。（使用指針案2.4項、附属1に対応）

## 3. センサ類のカスタマイズ及び照射データの取得

光電センサ及び測域センサに対して、カスタマイズ（遮へい体を装着）して照射試験を実施し、遮へい解析結果との比較評価を行った。

（使用指針案2.5項、附属2に対応）

## 2. 一般産業用工業品の耐放射線性文献調査結果

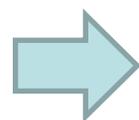
原子力施設で使用実績があるもしくは使用が見込まれるセンサについて、使用されているセンサ及びその構成部品を調査した。センサを検出量ごとに分類したときの代表的なセンサを以下に示す。

検出量	代表センサ
変位検出	レーザ距離計、測域センサ、ロータリーエンコーダ
位置、接触、近接	リミットスイッチ、光電センサ、近接センサ
荷重、トルク、加速度	ロードセル、トルクセンサ、加速度センサ
イメージング	CCDイメージセンサ、CMOSイメージセンサ

これらのセンサの構成部品及び耐放射線性データの文献調査結果をP.5に示す。

## 2. 一般産業用工業品の耐放射線性文献調査結果

センサ	構成部品	耐放射線性 [Gy]	備考
レーザ距離計	集光レンズ、フォトダイオード	10	
測域センサ	集光レンズ、フォトダイオード	40～290	
ロータリーエンコーダ	磁性体歯車、磁気抵抗素子、バイアスマグネット	1.4M	
レゾルバ	鉄心、コイル	22M	鉄心とコイルのみで構成されているため、構造的に高い耐放射線性を持つ
ポテンショメータ	抵抗体、ワイパ、半導体	13.5M	
リミットスイッチ	アクチュエータ、可動片	—	耐放射線用の製品が販売されており、構造的に高い耐放射線性を持つ
光電センサ	投光部、受光部：フォトダイオード、CdSセル、フォトトランジスタ、フォトレジスタ	—	
近接センサ	シリコン樹脂、リードスイッチ、エポキシ樹脂、カバー、端子、コイル	—	
ロードセル	ロードボタン、ロックピン、ダイヤグラム、カバー、ケーブルグランド、ケーブル、端子盤、起歪部、ひずみゲージ	10M	弊社知見
トルクセンサ	検出モータ、永久磁石、コイル、ひずみゲージ、ポテンションメータ、基板、電極	—	
加速度センサ	バネ、錘、半導体、圧電素子	1M	
CCDイメージセンサ	受光素子、半導体、レンズ	500	
CMOSイメージセンサ	受光素子、半導体、レンズ	1k	



廃止措置等で使用が見込まれる搬送装置に使用され、かつ耐放射線性に関する有効なデータの少ない**光電センサ、近接センサ、トルクセンサ及び測域センサ**を照射試験対象とした。

### 3. 照射試験方法

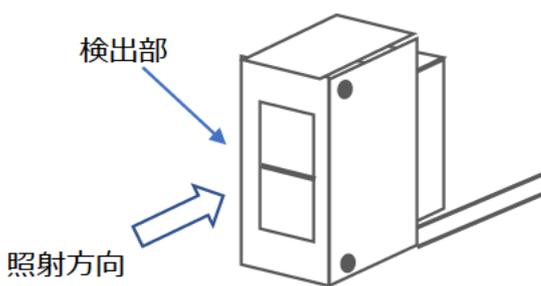
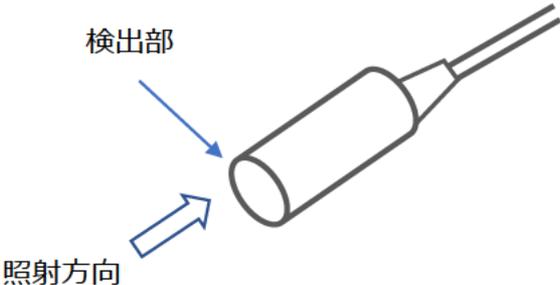
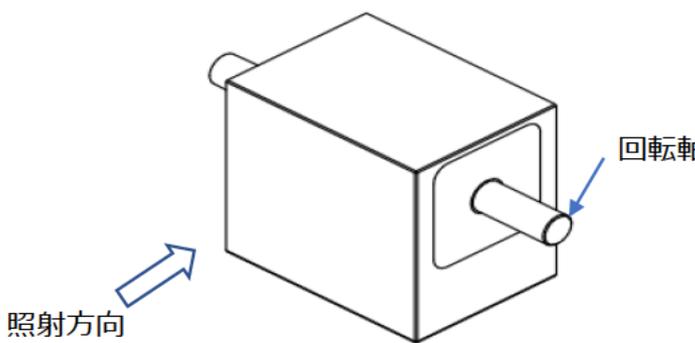
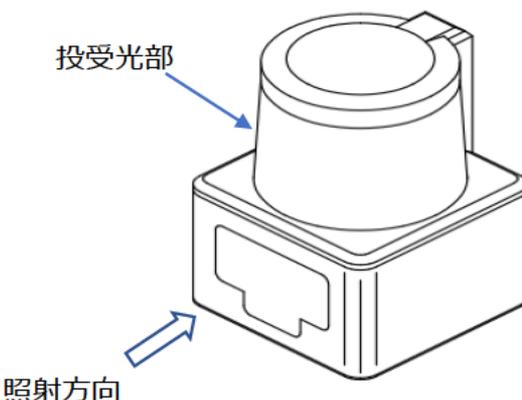
文献調査で耐放射線性データ少ないことが判明した光電センサ、近接センサ、トルクセンサ及び測域センサに対して照射試験を実施した。

以下に照射試験の概要を示す。

項目	内容
対象センサ	光電センサ、近接センサ、トルクセンサ、測域センサ
照射試験パラメータ	メーカー、照射線量率、通電状態、入力電圧
照射試験場所	大阪府立大学放射線研究センター-Co-60ガンマ線照射施設 (照射可能線量率：最大50kGy/h) 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 (照射可能線量率：約0.2Gy/h - 約10kGy/h)
照射試験手順	センサをデータロガーと接続し、 <b>検知状態（通電状態）の出力データ（電圧、距離）を連続取得</b> する。 また、一定の集積吸収線量で <b>動作確認</b> を行う。
動作確認	照射を一時的に停止し、 <b>センサの検知のON/OFFを切替え、出力データの変化を確認</b> する。
評価項目	センサの出力データ（電圧or距離）異常もしくは動作不良が確認された故障するまでの集積吸収線量を評価する。

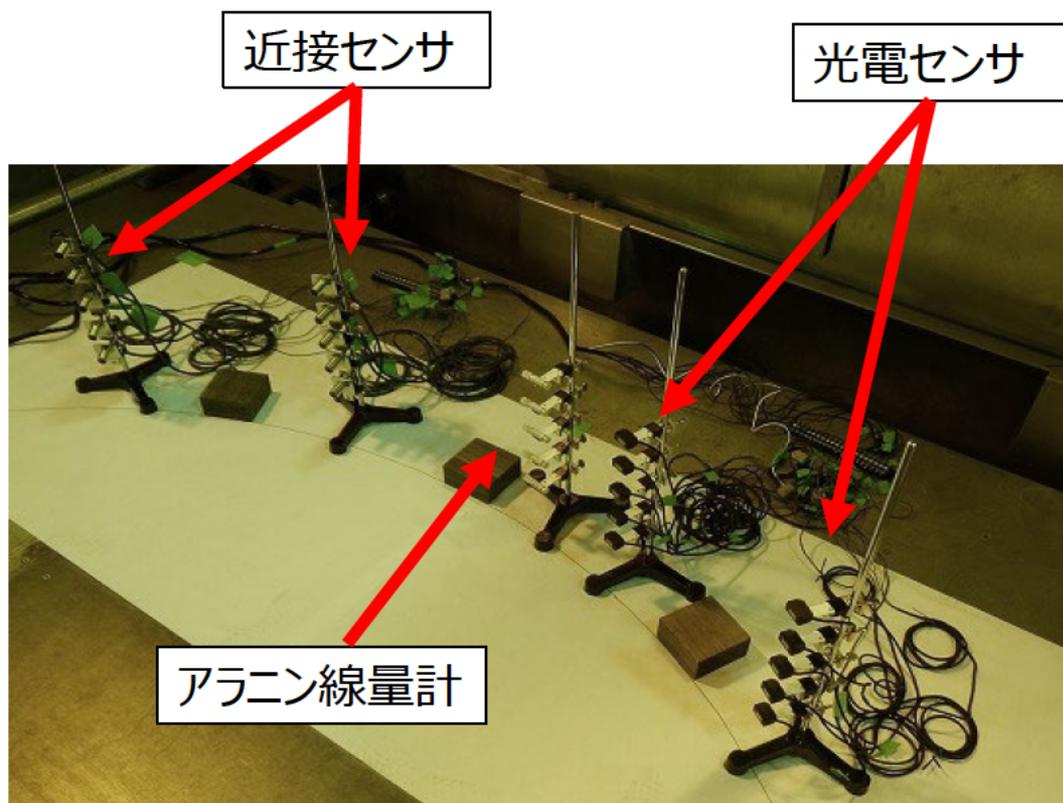
### 3. 照射試験方法

各センサの概略図を以下に示す。

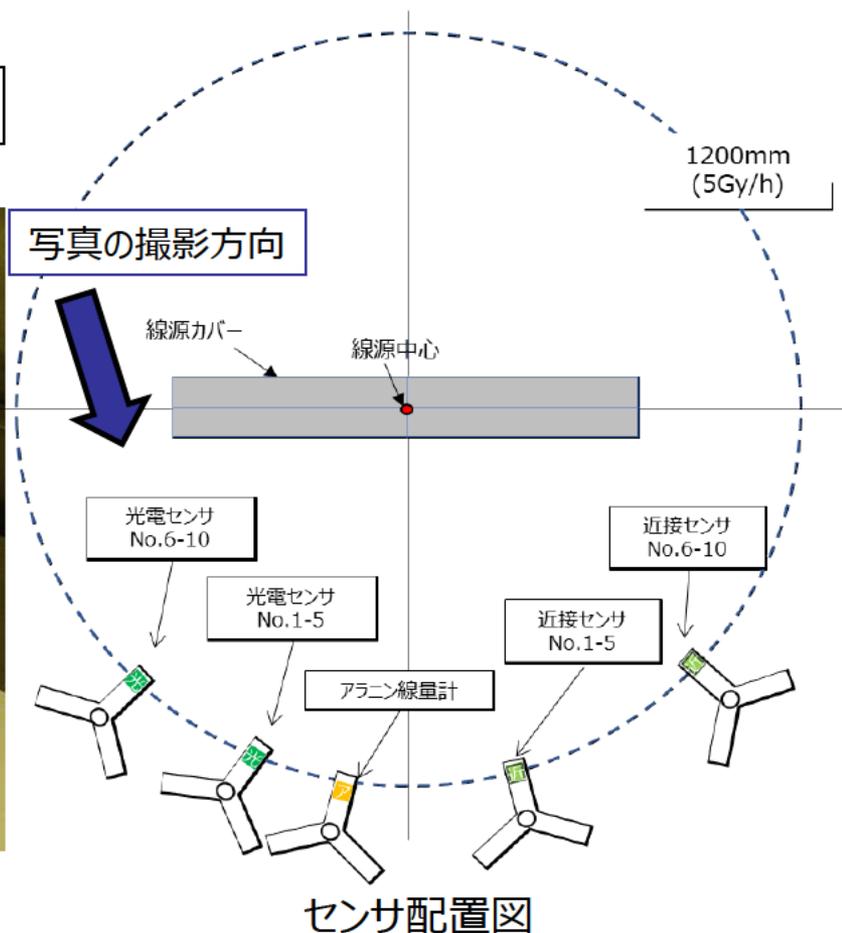
光電センサ	近接センサ
	
トルクセンサ	測域センサ
	

### 3. 照射試験方法

センサはスタンドに固定し、一定の照射線量率（線源中心から一定距離の円周上）で照射を実施した。なお、アラニン線量計を同時照射し、線量計の集積吸収線量から照射線量率を計算した。以下に照射試験の配置例を示す。



QST高崎量子応用研究所での  
光電センサ及び近接センサの照射試験の様子



## 4. 照射試験結果

令和4年度までに実施した光電センサの照射試験条件を以下に示す。

対象センサ	メーカー	通電状態/ 入力電圧 [V]	照射線量率 [Gy/h]	サンプル数
光電センサ	A	非通電	5	3
	A	12	5	10
	A	24	50	6
	A	24	75	3
	A	24	100	16
	A	24	150	3
	B	24	50	3
	B	24	75	3
	B	24	150	3
	C	24	50	3
	C	24	75	3
	C	24	150	3

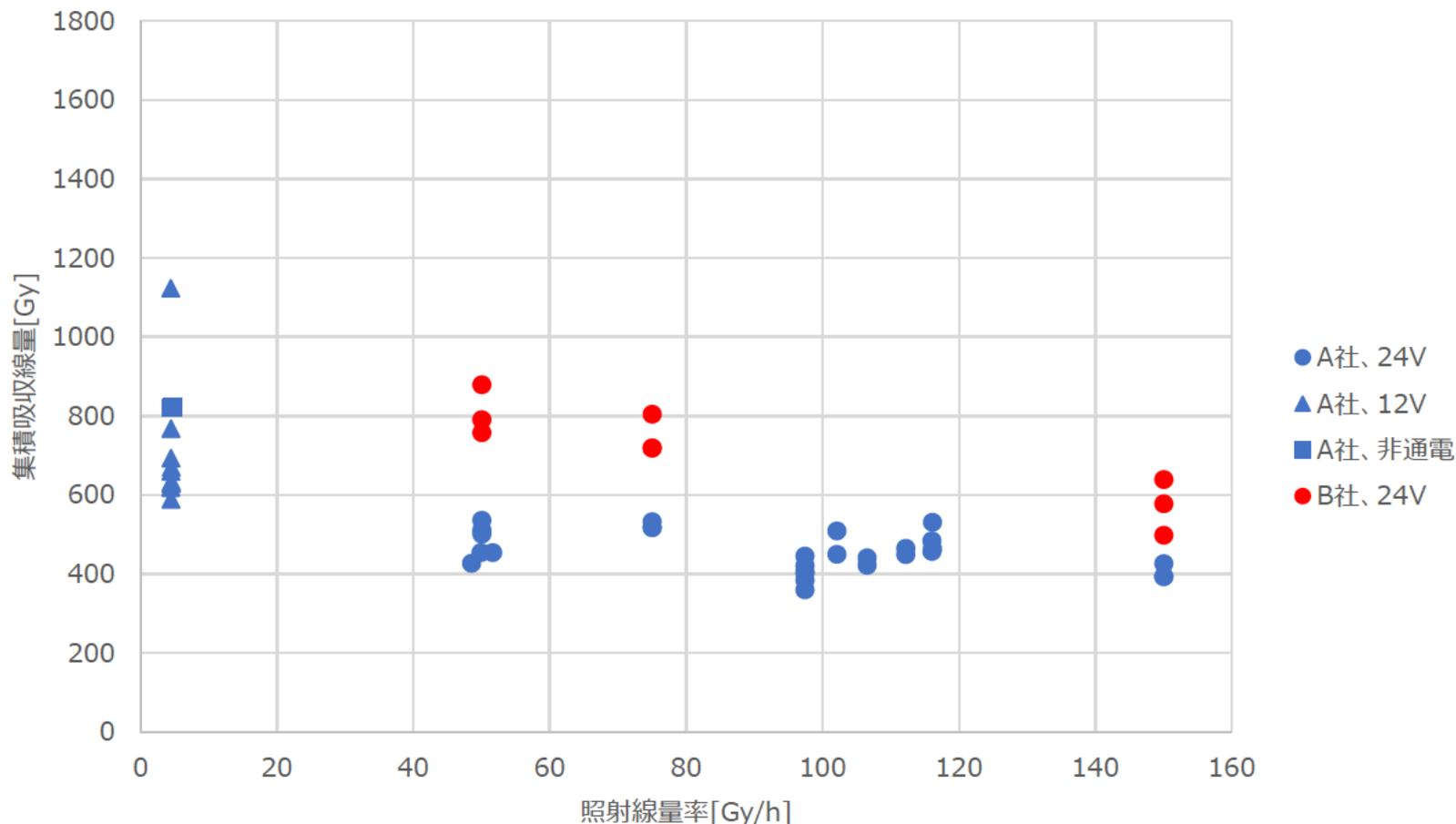
## 4. 照射試験結果

令和4年度までに実施した各センサの照射試験結果を以下に示す。

なお、「出力電圧の0V付近までの低下」もしくは「動作確認時の検知不良」を「故障」と定義した。

また、照射線量率は測定値であるため、P.9に記載した照射線量率と異なる。

### 【光電センサ】



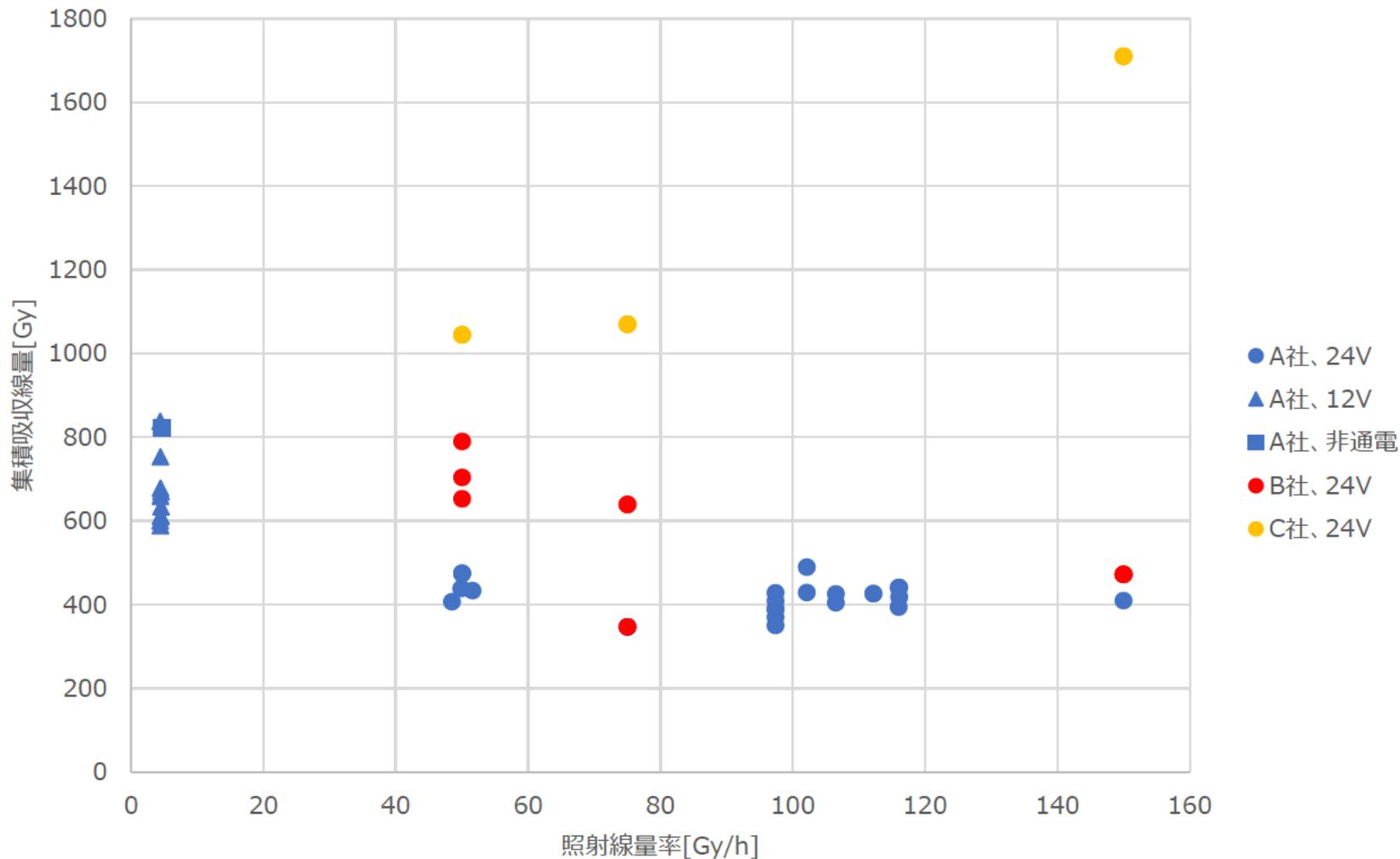
故障時の集積吸収線量[Gy]

※C社の光電センサは照射終了時点においても故障しなかったため、グラフには記載していない

# 4. 照射試験結果

## 【光電センサ】

「正常な動作を確認」とは、「動作確認で正常な検知状態及び出力電圧を確認した状態」と定義した。



正常な動作を確認した集積吸収線量[Gy]

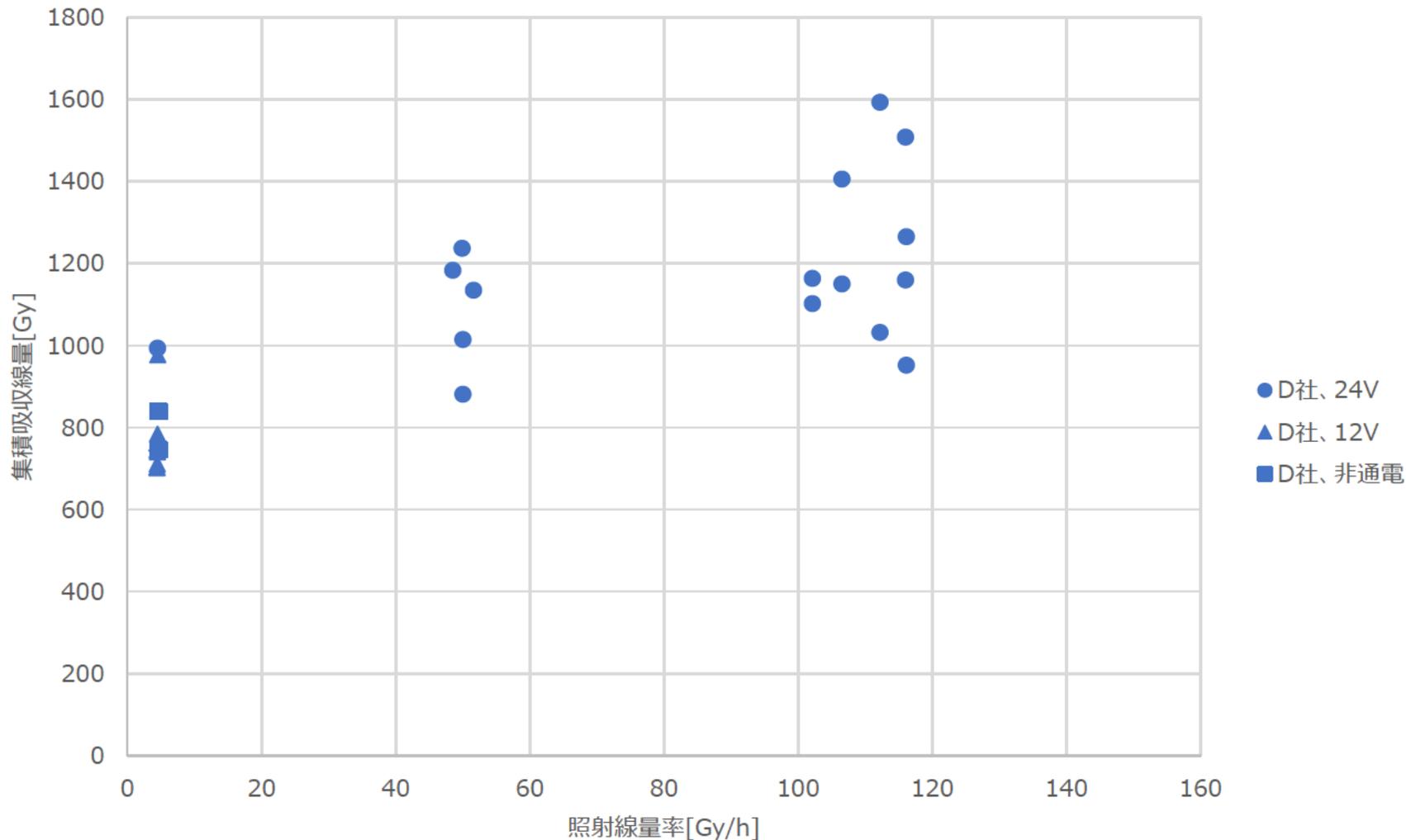
## 4. 照射試験結果

令和4年度までに実施した近接センサの照射試験条件を以下に示す。

対象センサ	メーカー	通電状態/ 入力電圧 [V]	照射線量率 [Gy/h]	サンプル数
近接センサ	D	非通電	5	3
	D	12	5	10
	D	24	5	3
	D	24	50	6
	D	24	100	10
	E	24	50	4

# 4. 照射試験結果

## 【近接センサ】

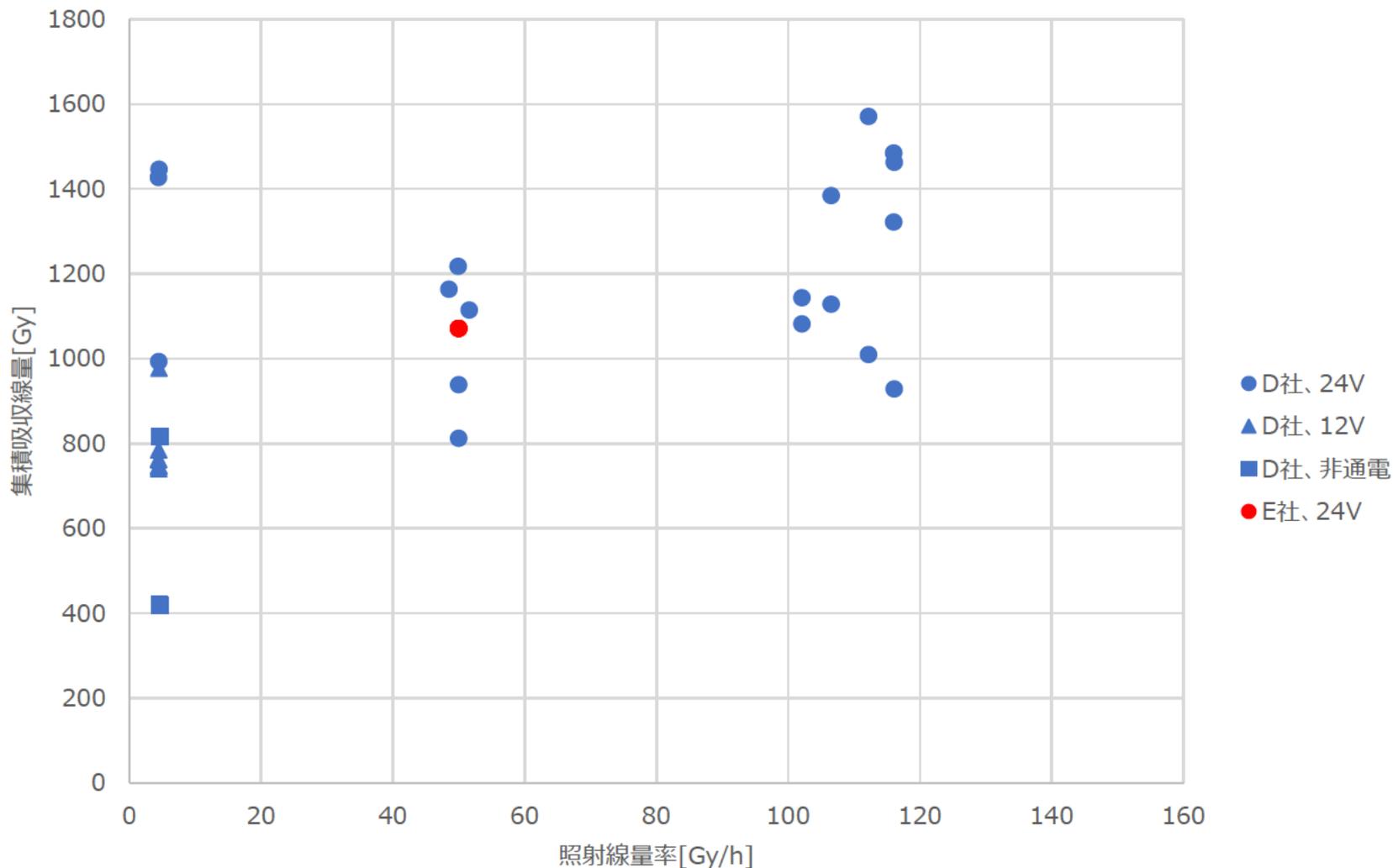


## 故障時の集積吸収線量[Gy]

※E社の近接センサは照射終了時点においても故障しなかったため、グラフには記載していない

# 4. 照射試験結果

## 【近接センサ】



正常な動作を確認した集積吸収線量[Gy]

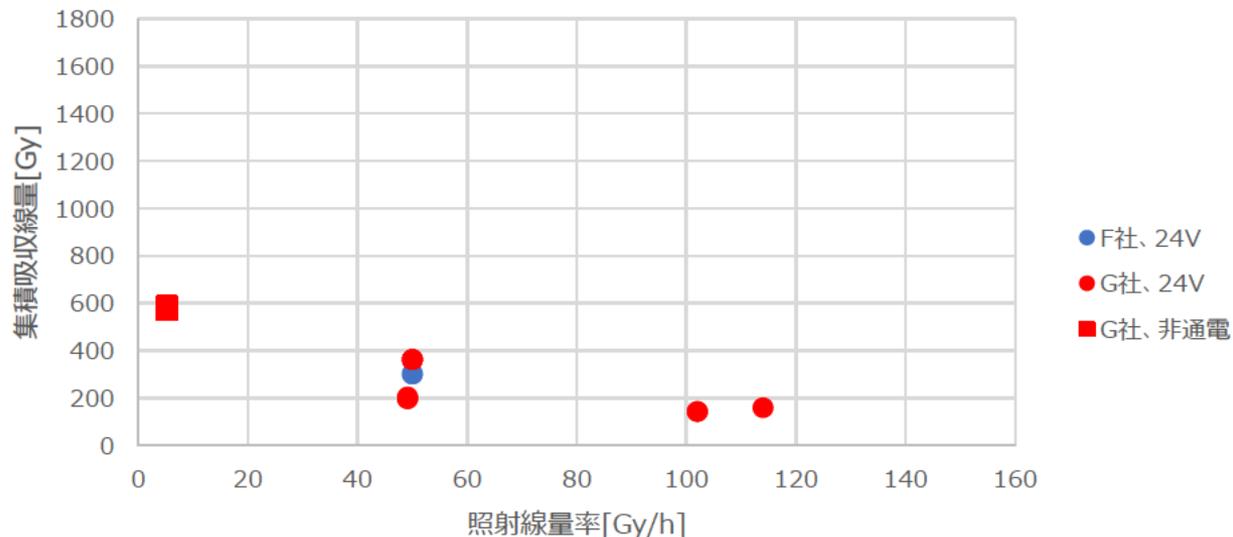
## 4. 照射試験結果

令和4年度までに実施したトルクセンサの照射試験条件を以下に示す。

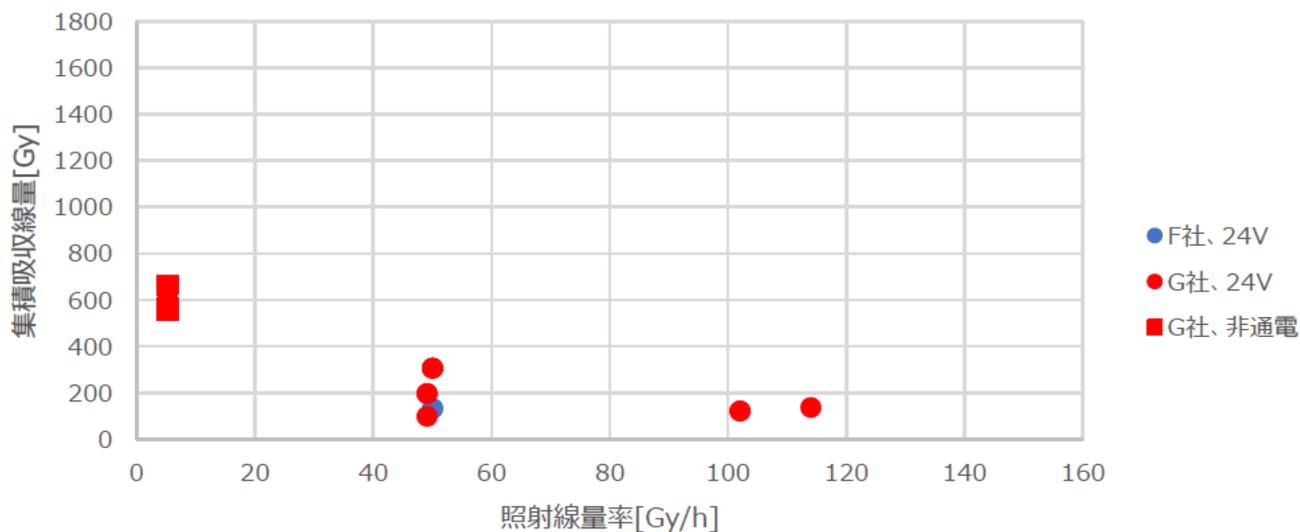
対象センサ	メーカー	通電状態/ 入力電圧 [V]	照射線量率 [Gy/h]	サンプル数
トルクセンサ	F	24	50	3
	G	非通電	5	3
	G	24	50	6
	G	24	100	3

# 4. 照射試験結果

【トルクセンサ】



故障時の集積吸収線量[Gy]



正常な動作を確認した集積吸収線量[Gy]

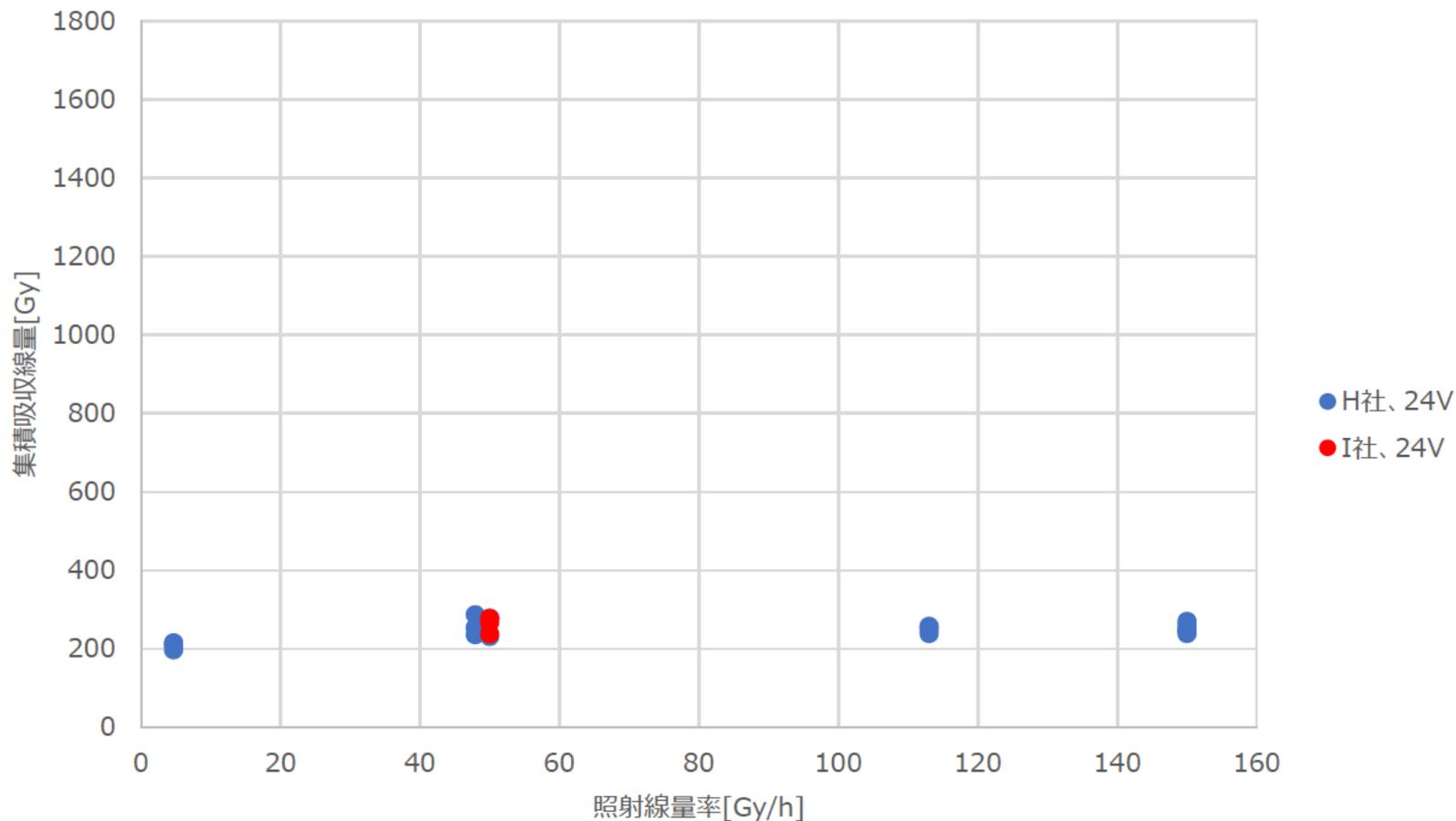
## 4. 照射試験結果

令和4年度までに実施した測域センサの照射試験条件を以下に示す。

対象センサ	メーカー	通電状態/ 入力電圧 [V]	照射線量率 [Gy/h]	サンプル数
測域センサ	H	24	5	3
	H	24	50	6
	H	24	100	4
	H	24	150	5
	I	24	50	3

# 4. 照射試験結果

## 【測域センサ】



### 故障時の集積吸収線量[Gy]

※測域センサは動作確認は行わず、出力される距離データの異常から故障を判断している。

## 4. 照射試験結果

令和4年度までに実施した照射試験における照射パラメータの耐放射線性への影響を示す。

対象センサ	照射パラメータの耐放射線性への影響
光電センサ	<ul style="list-style-type: none"><li>照射線量率が高いほど低下</li><li>通電状態では低下（5Gy/hの試験結果）</li></ul>
近接センサ	<ul style="list-style-type: none"><li>入力電圧が低いほど低下（5Gy/hの試験結果）</li></ul>
トルクセンサ	<ul style="list-style-type: none"><li>照射線量率もしくは通電により低下</li></ul>
測域センサ	<ul style="list-style-type: none"><li>照射線量率による影響はみられない</li></ul>



これまでの試験結果を踏まえ、令和5年度は5Gy/hの試験で耐放射線性への影響が確認された光電センサ及び近接センサの通電状態、入力電圧に関して、追加照射試験を実施した。

また、4種類のセンサに関して、複数の照射パラメータを考慮する必要があるものの照射試験により耐放射線性データを取得することが可能であることを確認した。

## 5. 故障原因調査結果

令和2年度に光電センサ、近接センサ、測域センサ及びトルクセンサの故障箇所の調査として以下の調査を行い、故障原因の推定を行った。

P.21-23に各センサの故障原因の調査結果を示す。

センサ名	外観及び動作確認	内部構造調査	電気特性評価	センサメーカーによる調査
光電センサ	○	○	○	○
近接センサ	○	○	—	○
トルクセンサ	○※	○	—	○
測域センサ	—	—	—	○

※トルクセンサは外観検査のみの実施

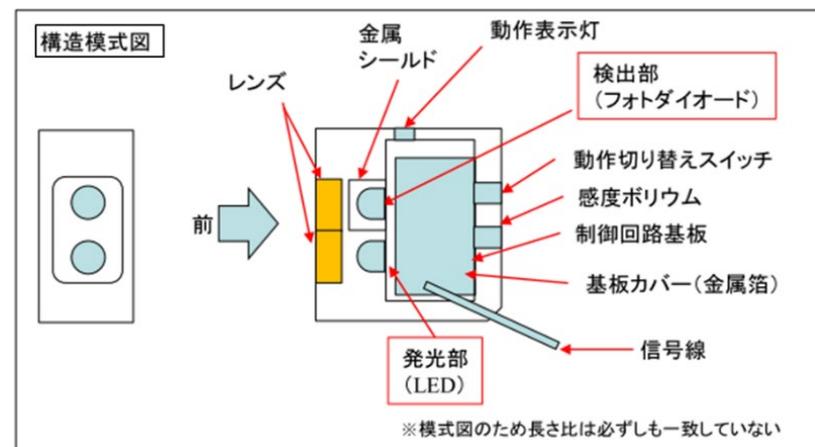
# 5. 故障原因調査結果

## 【光電センサ】

A社及びC社の光電センサに対してセンサメーカーによる調査を実施した。

### A社（照射試験において故障を確認）

- 外観検査→異常なし
- 動作確認→電源が入らないことを確認
- 詳細調査→電源回路部のトランジスタ及びダイオードの破損を確認



A社光電センサの内部構造図

突発的なサージにより、電源ラインに過電圧が印加された可能性があるかと推定された。

### C社（照射試験において異常なし）

- 外観検査→異常なし
- 動作確認→異常なし
- 詳細調査→損傷は確認されなかった

## 5. 故障原因調査結果

### 【近接センサ】

E社の近接センサに対してセンサメーカーによる調査を実施した。

E社（照射試験において故障は確認されなかった）

- 動作確認→制御出力及び表示灯が正常に表示されないことを確認
- 詳細調査→X線観察において内部ハイブリットICのボンディングワイヤの破断を確認



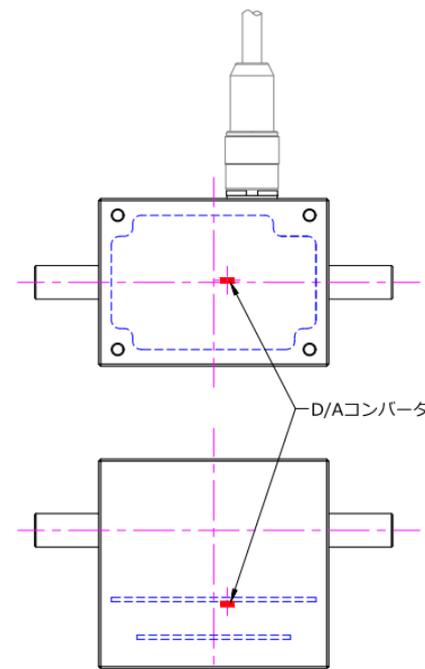
突発的なサージにより、電源ラインに過電圧が印加された可能性があると推定された。

### 【トルクセンサ】

G社のトルクセンサに対してセンサメーカーによる調査を実施した。

G社（照射試験において故障を確認）

- 外観検査→異常なし
- 電気性能確認→D/Aコンバータの異常を確認



G社のトルクセンサの  
D/Aコンバータの位置

# 5. 故障原因調査結果

## 【測域センサ】

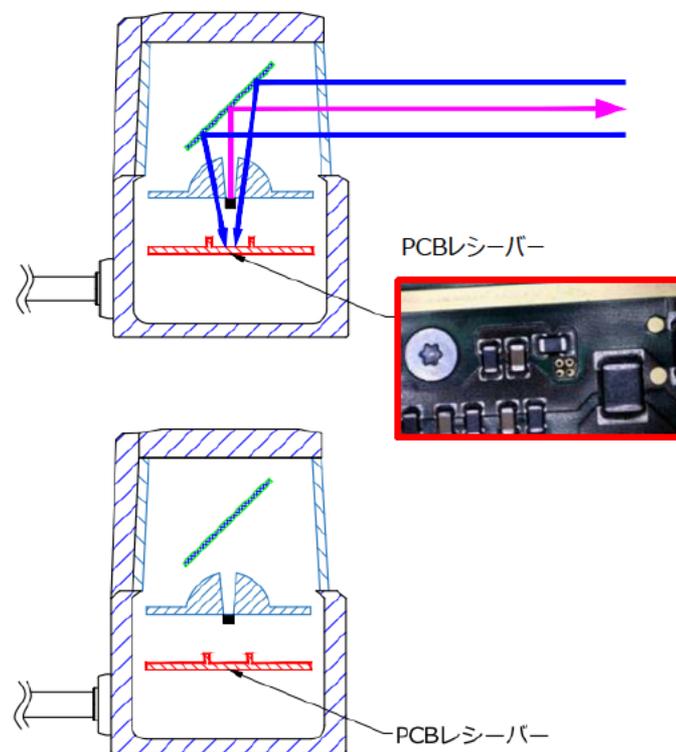
I社の測域センサに対してセンサメーカーによる調査を実施した。

I社（照射試験において故障を確認）

- 動作確認→1台はランプが点灯せず、モータも回転せず、PCに応答しないことを確認  
2台はランプは不規則に点灯するが、PCへの不安定応答を確認
- 電氣的性能調査→PCBレシーバの不具合を確認



外部からの電磁的な影響が原因で電子素子が損傷したと考えられる。

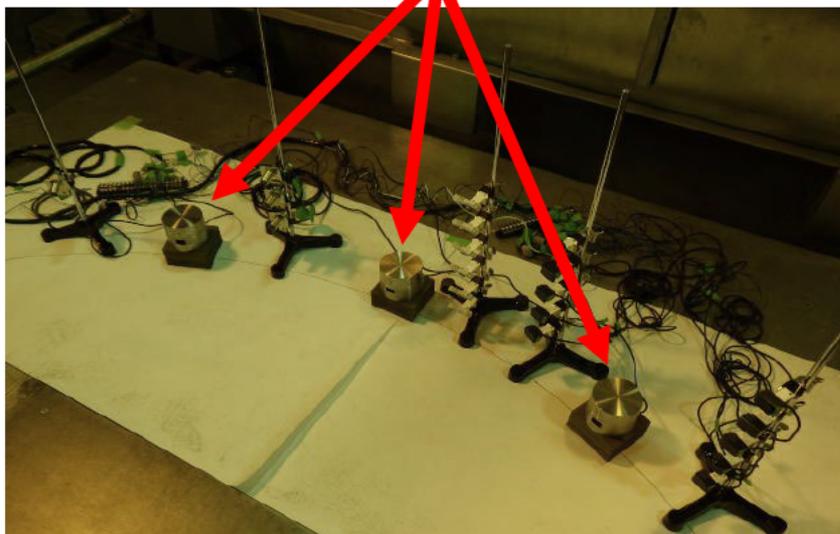


I社測域センサのPCBレシーバの位置

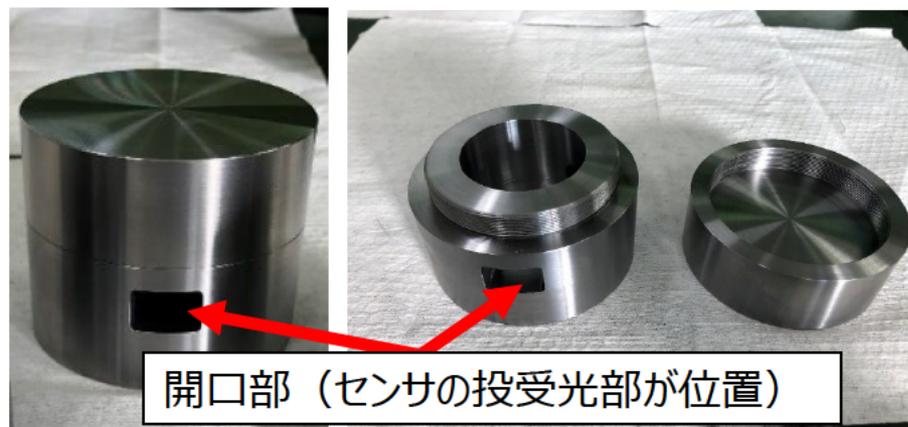
## 6. カスタマイズ試験概要

光電センサ及び測域センサに対して、カスタマイズ（遮へい体を装着）して照射試験を実施した。また、照射試験を模擬した条件で遮へい解析を実施し、遮へい解析と照射試験の比較評価を実施した。

カスタマイズした光電センサ

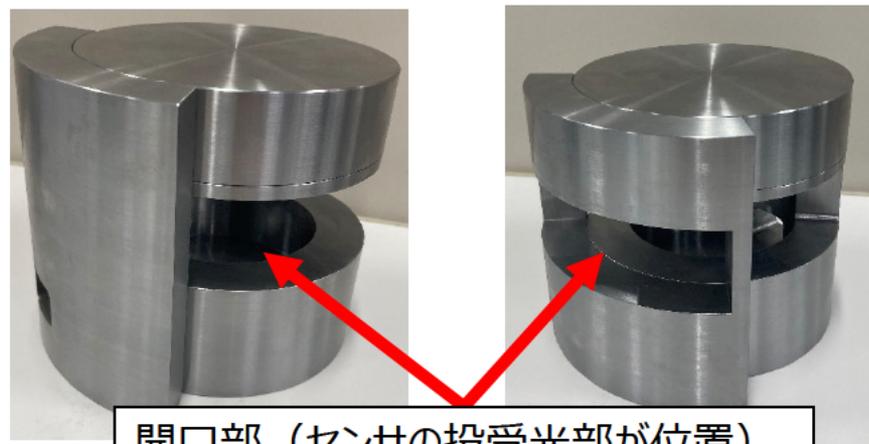


光電センサのカスタマイズ試験の様子



開口部（センサの投受光部が位置）

光電センサ用遮へい体構造図



開口部（センサの投受光部が位置）

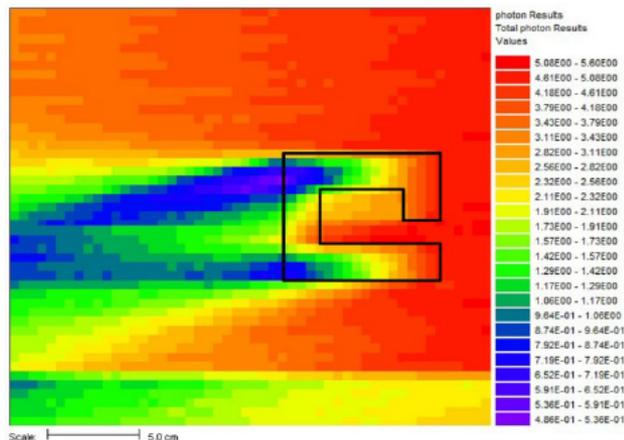
測域センサ用遮へい体構造図

# 7. カスタマイズ試験結果

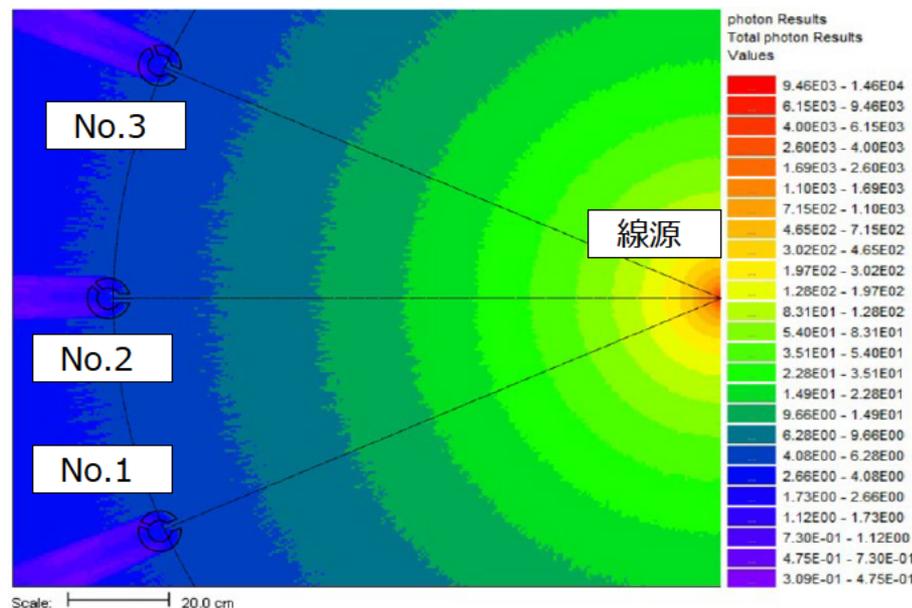
対象センサ	照射線量率 [Gy/h]	正常に動作する 平均みなし集積 吸収線量*[Gy]	遮へい 効果	測定値と解析値の比 (解析値/測定値)	
				遮へい体 内部	遮へい体 外部
光電センサNo.1	4.45	624	0.89	1.17	0.88
光電センサNo.2		604	0.87	1.15	0.91
光電センサNo.3		772	1.10	1.12	0.84

\* : 遮へい体外部の照射線量率から算出した、カスタマイズしなかった場合に故障する集積吸収線量

光電センサの遮へい解析 (5Gy/h) の例を示す。  
遮へい体内部及び後方における照射線量率の  
低下を再現していることを確認した。



線量率分布図 (遮へい体No.2近傍立面図)



線量率分布図

## 7. カスタマイズ試験結果

以下に各センサにおける照射試験の測定値と遮へい解析の解析値の比較を示す。

対象センサ	No.	測定値と解析値の比（解析値/測定値）					
		5 [Gy/h]		100 [Gy/h]		150 [Gy/h]	
		遮へい体 外部	遮へい体 内部	遮へい体 外部	遮へい体 内部	遮へい体 外部	遮へい体 内部
光電センサ	1	0.88	1.17	1.26	1.09	—	
	2	0.91	1.15	1.07	1.04		
	3	0.84	1.12	1.06	0.93		
測域センサ	1	今年度試験 及び解析を実施		—		1.15	1.20
	2					1.01	1.16
	3					0.97	1.06

カスタマイズ試験について、解析値と測定値は1条件を除き、20%以内で照射試験の測定値と遮へい解析の計算値が一致することを確認している。



今後の機器への適用方法の検討において、遮へい解析の適用が有効であることが示された。

## 8. 令和5年度照射試験結果速報

「第1回委員会資料-3 -照射試験結果速報-」  
にて詳細を説明する。

## 9. 今後の予定

これまで取得した耐放射線性データを基に使用指針案の作成を開始する。  
使用指針案作成は以下の手順で行う。  
また、必要に応じて照射試験を行い、耐放射線性データを追加取得する。

### 1. 機器へのセンサ類適用方法検討

照射試験で取得した耐放射線性及びカスタマイズデータを踏まえて、機器へ適用する際のカスタマイズ方法を検討する。

### 2. 機器の作動試験及び適合性評価

1.で検討したカスタマイズ方法について、実際の機器のセンサ類に適用し作動試験を行う。その後、適合性を評価し、放射線損傷対策の設計手順を検討する。

### 3. 一般産業用工業品の使用指針案の作成

一般産業用工業品を放射線環境下で使用する場合の設定手順、耐放射線性データ取得のための照射試験手順、カスタマイズ等の放射線損傷対策を使用指針案として整理する。

# 原子力産業基盤強化事業委託費

## 第一回 一般産業用工業品の 放射線環境下の使用指針案作成 技術委員会

### 委員会資料-3

#### —令和5年度試験結果速報—

2024年2月5日（月）

株式会社 神戸製鋼所

1. 令和5年度照射試験概要
2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果
3. 測域センサのカスタマイズ試験結果
4. ドローン照射試験結果
5. 令和5年度までの成果まとめ

# 1. 令和5年度試験結果概要

## ・光電センサ及び近接センサ照射試験結果

光電センサ及び近接センサに対して、複数の試験条件で照射試験を実施し、耐放射線性データを取得した。

## ・測域センサのカスタマイズ試験結果

測域センサに対して、カスタマイズ（遮へい体を装着）して照射試験を実施し、遮へい解析結果との比較評価を行った。

## ・ドローン照射試験結果

今後廃止措置等での活用が期待され、かつ複数のセンサが使用されている小型ドローンを対象に照射試験を実施した。

## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

令和4年度までの照射試験結果から照射線量率、通電状態に加えて、入力電圧が耐放射線性に影響を与える可能性があることが確認された。そこで、光電センサ及び近接センサに対する通電状態及び入力電圧の影響を評価するため、これまでと異なる試験条件で照射データを取得した。

各試験条件において正常な動作を確認\*した集積吸収線量を以下に示す。

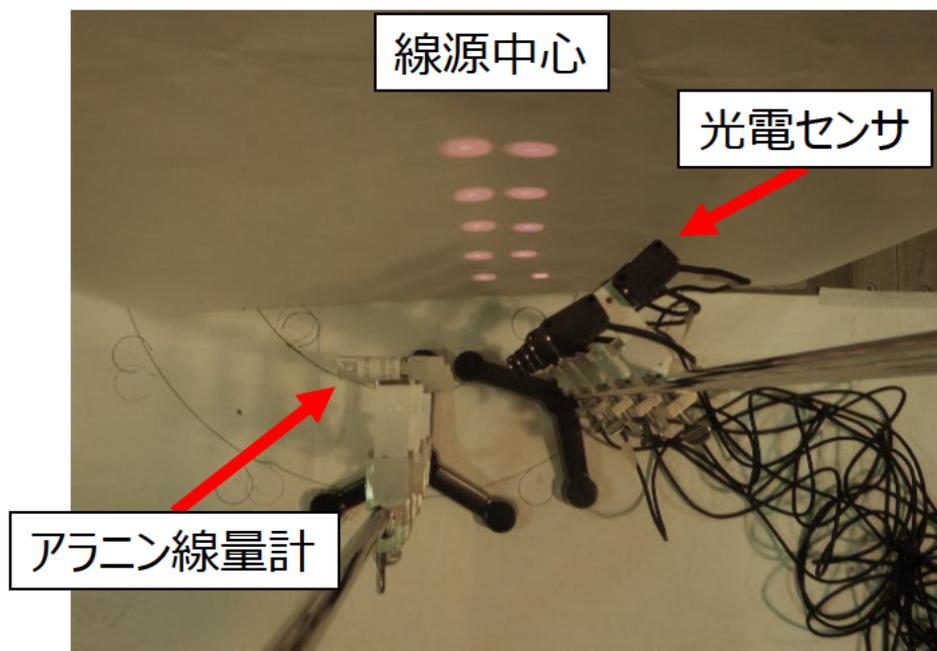
\*：検知時の出力電圧の0Vまでの低下もしくは動作確認の検知異常が発生しない最大集積吸収線量

光電センサ			近接センサ		
照射線量率 通電状態	5 [Gy/h]	100 [Gy/h]	照射線量率 通電状態	5 [Gy/h]	100 [Gy/h]
非通電	822 [Gy]	今年度実施	非通電	684 [Gy] (SD:187)	今年度実施
12V	617 [Gy] (SD:14)	今年度実施	12V	778 [Gy] (SD:78)	今年度実施
24V	今年度実施	415 [Gy] (SD:31)	24V	1289 [Gy] (SD:209)	1266 [Gy] (SD:217)

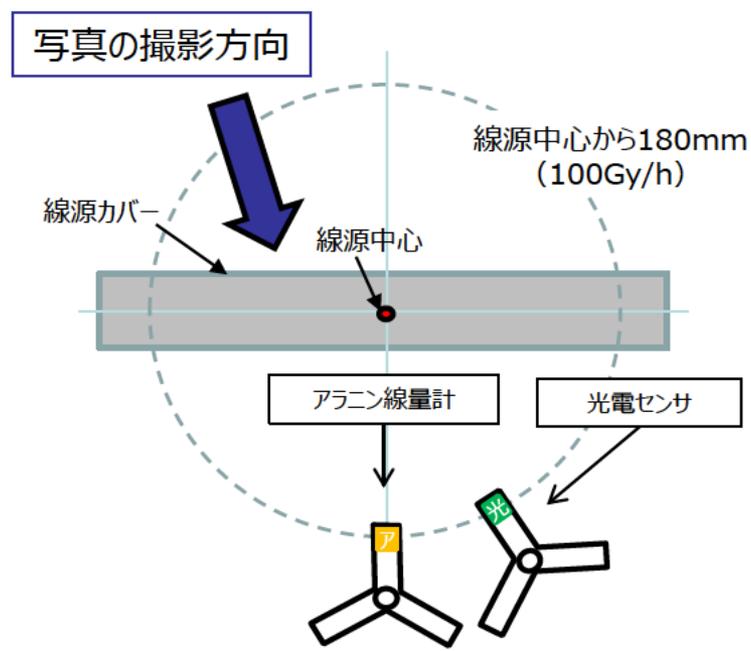
## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

試験方法は令和4年度までと同様とし、センサはスタンドに固定し、一定の照射線量率（線源中心から一定距離の円周上）で照射を実施した。なお、アラニン線量計を同時照射し、線量計の集積吸収線量から照射線量率を計算した。

光電センサ（100Gy/h・入力電圧24V）の照射試験時の様子、及び配置図を以下に示す。



QST高崎量子応用研究所での  
光電センサの照射試験の様子



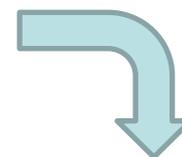
センサ配置図 (光電センサ 100Gy/h)

## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

各試験条件におけるセンサの正常な動作を確認した平均集積吸収線量を以下に示す。

### 【光電センサ照射試験結果】

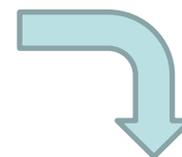
試験条件		正常な動作を確認した 平均集積吸収線量 [Gy]
照射線量率 [Gy/h]	入力電圧 [V]	
5	24	603 (SD:73)
100	12	626 (SD:46)
100	非通電	1050 (SD:94)



光電センサは、  
非通電 > 12V > 24Vの  
順に耐放射線性が高い  
傾向が確認された。

### 【近接センサ照射試験結果】

試験条件		正常な動作を確認した 平均集積吸収線量 [Gy]
照射線量率 [Gy/h]	入力電圧 [V]	
100	12	3107 (SD:851)
100	非通電	3242 (SD:195)

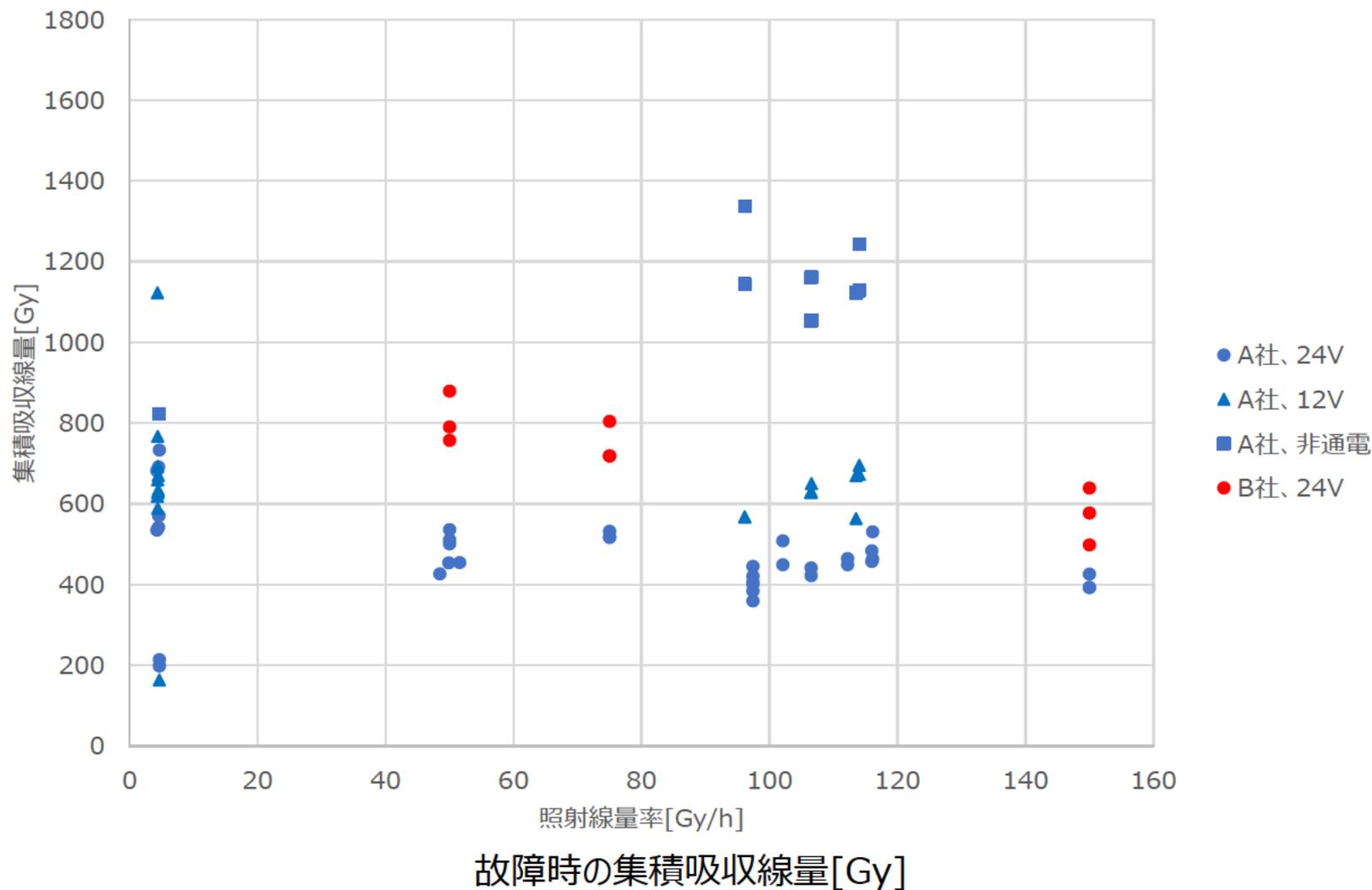


近接センサは、5Gy/hでは  
大きな差は確認されなかつた  
が、100Gy/hでは24Vの耐  
放射線性が低い傾向が確  
認された。

## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

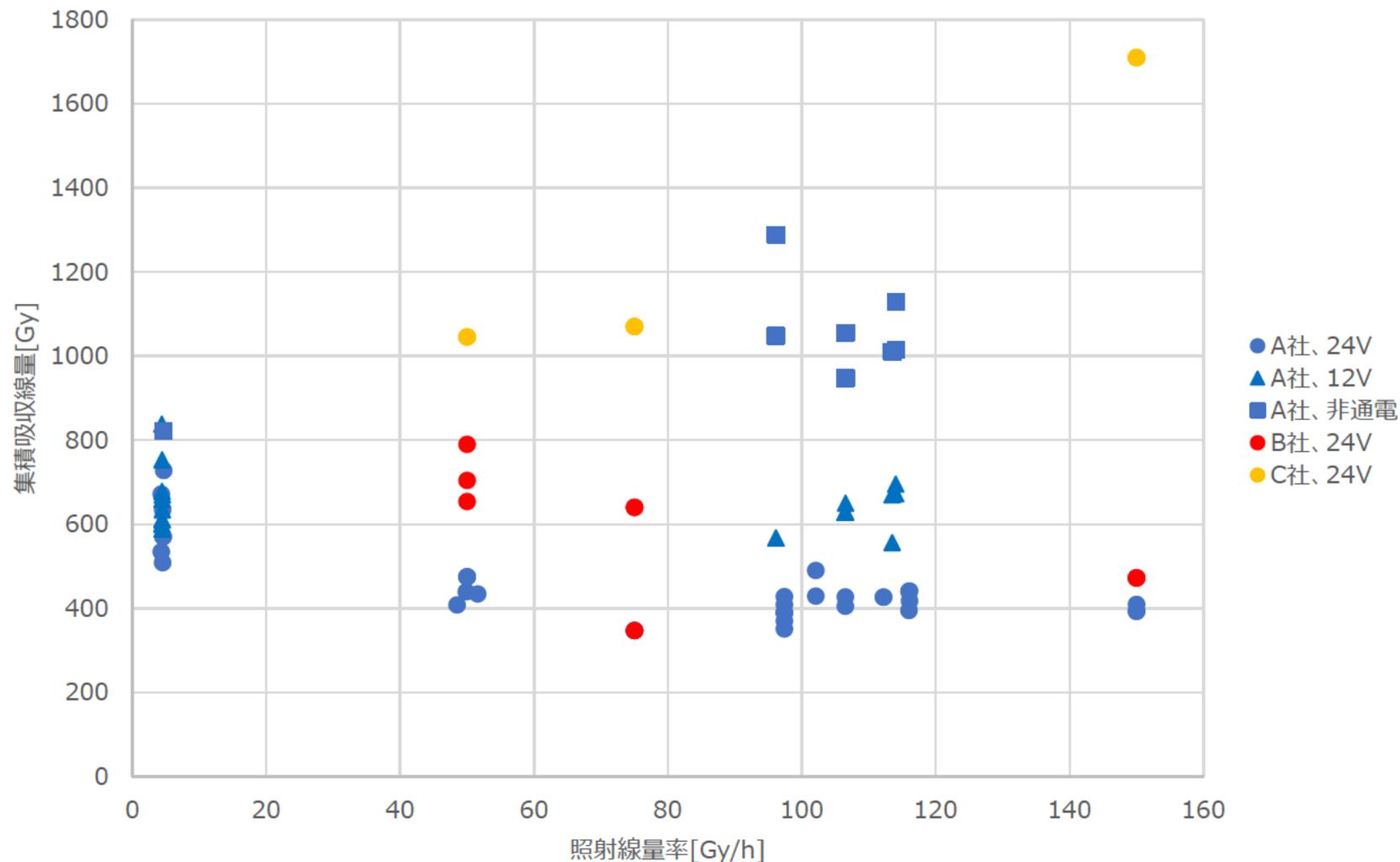
令和4年度までにの照射試験結果に今年度取得した照射データを追記したものを示す。

【光電センサ】



## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

### 【光電センサ】

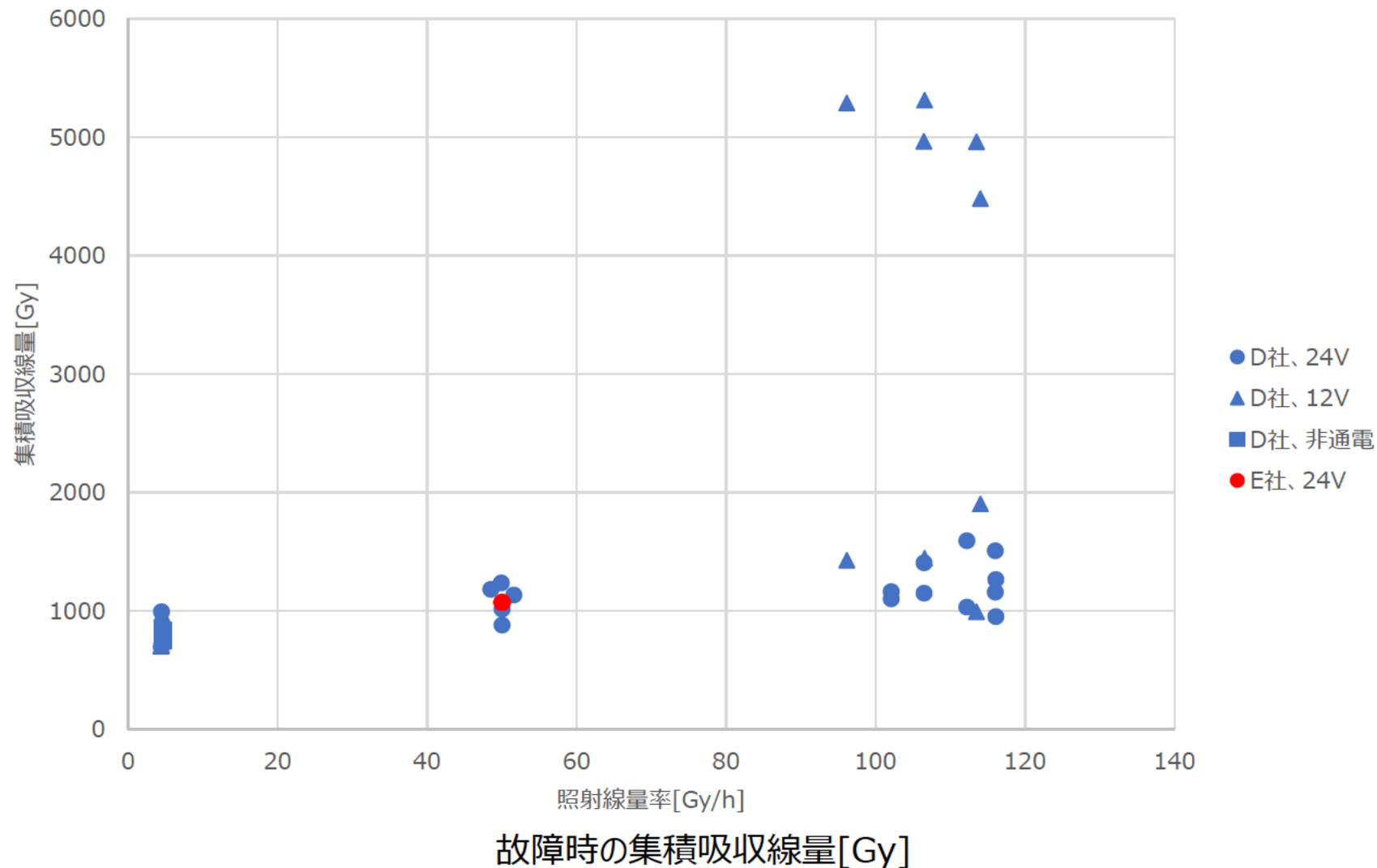


正常な動作を確認した集積吸収線量[Gy]

\* : 5Gy/h・A社、24Vのうち3台は初回の動作確認の前に出力電圧低下が発生したため、グラフには記載していない。

## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

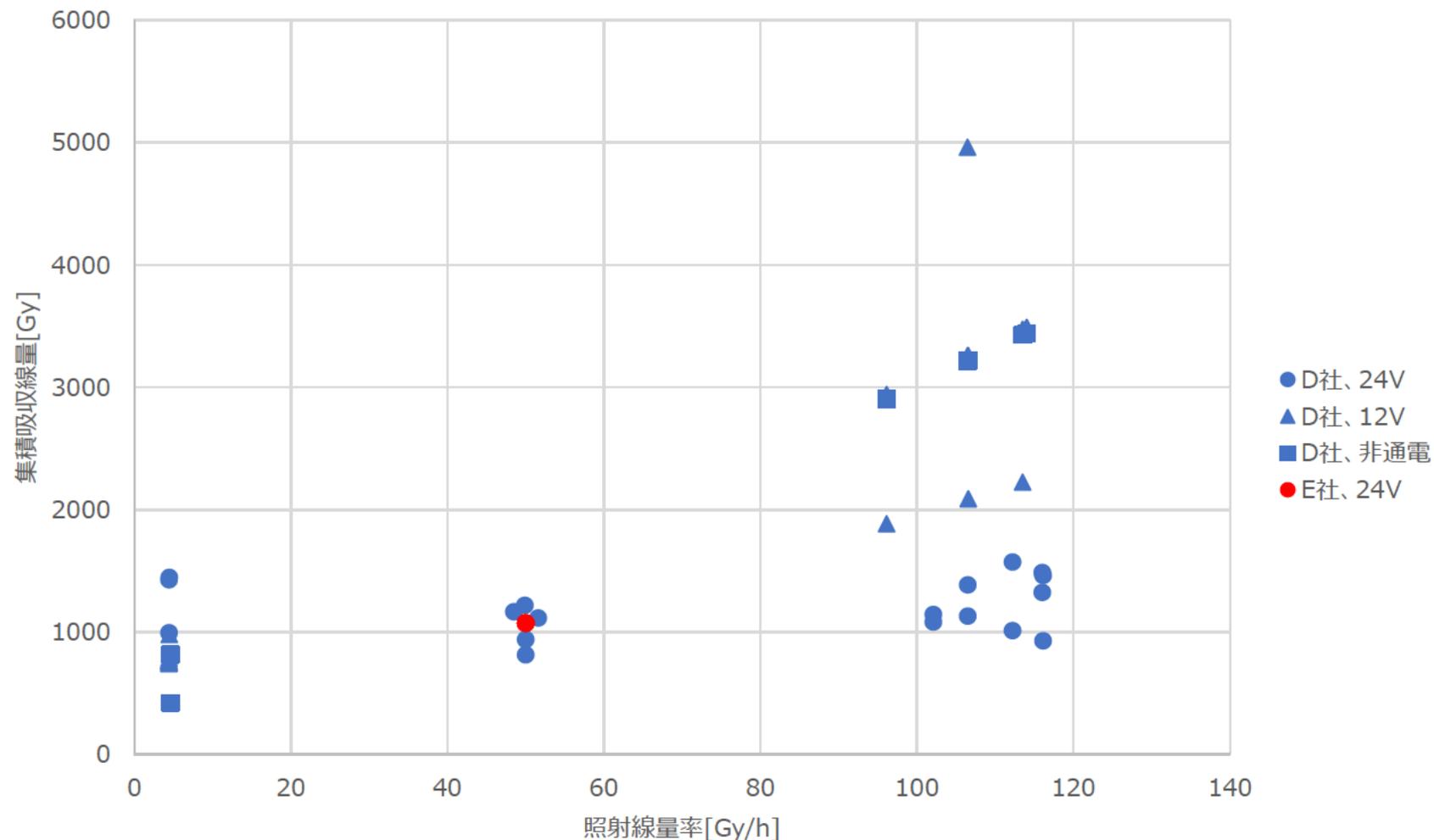
### 【近接センサ】



\* : 故障が確認されなかったD社、12Vの1台のデータはグラフには記載していない

## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

### 【近接センサ】



正常な動作を確認した集積吸収線量[Gy]

## 2. 光電センサ及び近接センサ照射試験結果

照射試験結果速報を示す。(赤字：令和5年度取得データ)

対象センサ	照射線量率 [Gy/h]	正常な動作を確認した平均集積吸収線量[Gy]		
		非通電	12[V]	24[V] (通電)
光電センサ	5	822	664(SD:74)	603(SD:73)
	100	1050(SD:94)	626(SD:46)	415(SD:31)
近接センサ	5	684(SD:187)	778(SD:78)	1289(SD:209)
	100	3242(SD:195)	3107(SD:851)	1266(SD:217)



光電センサ及び近接センサにおける照射試験パラメータの耐放射線性への影響を示す。

対象センサ	照射パラメータの耐放射線性への影響	
	令和4年度の推定	令和5年度試験結果
光電センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>照射線量率が高いほど低下</li> <li>通電状態では低下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>左記の傾向を確認</li> </ul>
近接センサ	<ul style="list-style-type: none"> <li>入力電圧が低いほど低下</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>5Gy/hと100Gy/hでは、入力電圧及び通電状態の影響が逆転することを確認</li> </ul>

### 3. 測域センサのカスタマイズ試験結果

令和4年度までに光電センサ及び測域センサを対象に、複数の照射線量率の条件においてカスタマイズ（遮へい体を装着）試験を実施してきた。カスタマイズ試験では、遮へい体によるカスタマイズ効果を評価するとともに、遮へい解析との比較評価を実施した。

対象センサ	試験結果：測定値と解析値の比（解析値/測定値）					
	5 [Gy/h]		100 [Gy/h]		150 [Gy/h]	
	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部
光電センサ	0.88-0.91	1.12-1.17	1.06-1.26	0.93-1.09	-	
測域センサ	令和5年度実施		-		0.97-1.15	1.06-1.20



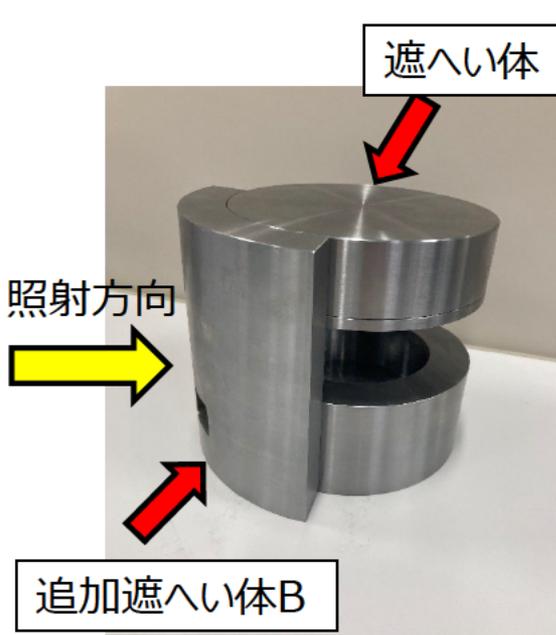
令和5年度は遮へい解析の有効性の評価のため、これまでデータを取得していない5Gy/hにおける測域センサのカスタマイズ試験を実施し、遮へい解析との比較評価を実施した。

### 3. 測域センサのカスタマイズ試験結果

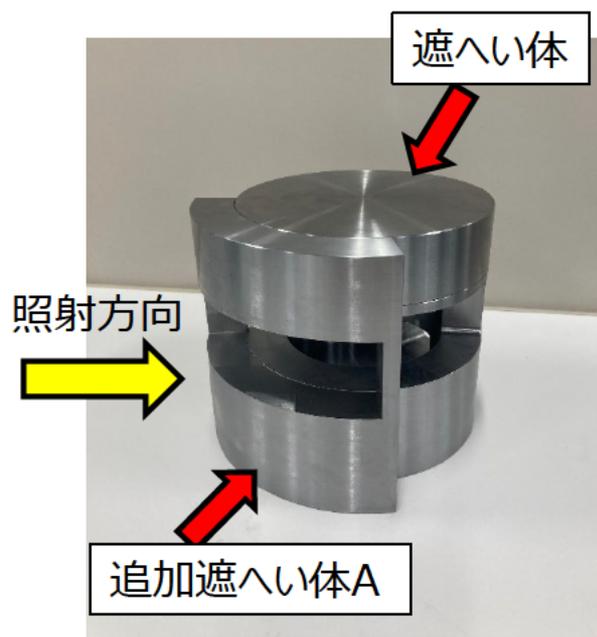
#### 【照射試験条件】

対象センサ	試験条件			
	目標照射線量率	遮へい体数	照射方向	取得データ
測域センサ	5 [Gy/h]	3	3方向 (前方、後方、上方向)	距離データ

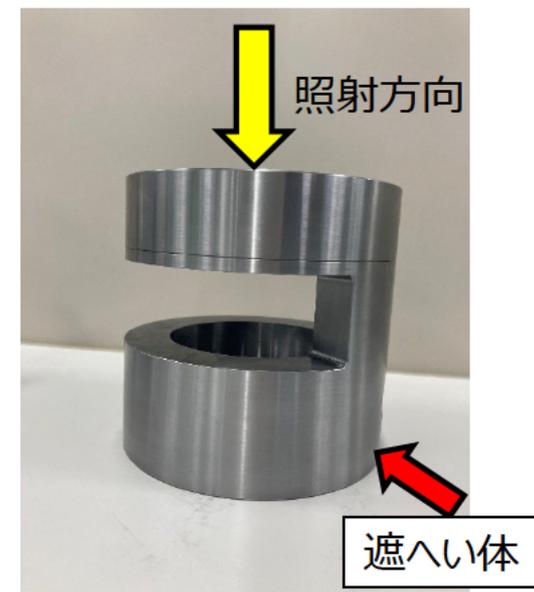
測域センサに装着する遮へい体は照射方向によって構造が異なる。  
各照射方向における遮へい体を以下に示す。



【照射方向：後方】



【照射方向：前方】



【照射方向：上方向】

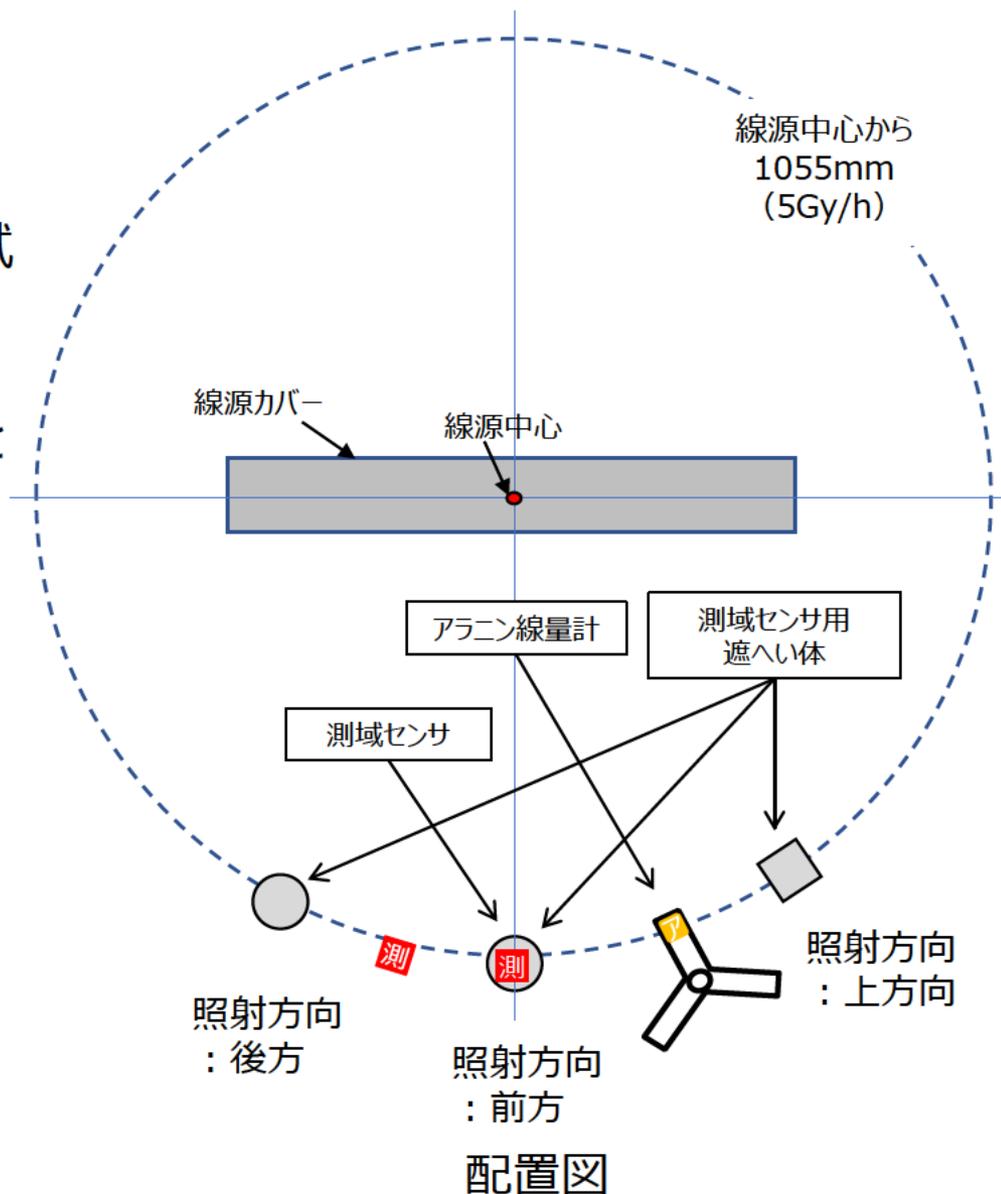
### 3. 測域センサのカスタマイズ試験結果

#### 【照射試験方法】

測域センサは右の配置図に従い、照射試験を実施した。複数の照射方向（前方、後方、上方向）を設定したうえで、照射試験を実施し、遮へい解析と比較評価を実施した。

なお、照射方向：前方の遮へい体のみに内部に測域センサを設置している。

また、カスタマイズしていない測域センサに対して同時照射を実施し、カスタマイズによる遮へい効果も評価した。



### 3. 測域センサのカスタマイズ試験結果

測域センサのカスタマイズ試験結果を以下に示す。

解析値と測定値の比較において、遮へい体外部で20%、遮へい体内部で10%以内で一致することを確認した

照射方向	試験結果：測定値と解析値の比（解析値/測定値）	
	遮へい体外部	遮へい体内部
上方向	0.81	1.03
前方	0.85	1.08
後方	0.91	0.97

遮へい体内部に測域センサを設置したカスタマイズ：前方の試験条件ではセンサが故障するまでの集積吸収線量がカスタマイズしていない測域センサの1.95倍に増加することを確認した。

試験条件	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	みなし集積 吸収線量* [Gy]	集積 吸収線量 [Gy]
カスタマイズ（前方）	4.77	82.3	393	-
カスタマイズ無し		42.4	-	202

\*：遮へい体がない状態での照射線量率から算出した集積吸収線量

## 4. ドローン照射試験結果

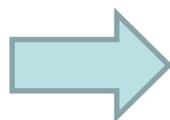
### 【ドローンの照射試験】

今後、廃止措置の中で人間が立ち入れないほどの高線量率環境下では、遠隔ロボットによる作業の増加が見込まれる。特に、小型ドローンは狭小な区域での画像診断及び線量率の測定への適用が考えられるため、ドローンを対象に耐放射線性を評価した。

項目	主な仕様
寸法	194x198x58 [mm]
重量	243 [g]
最大飛行時間	11 [min]
使用センサ	距離センサ (前後、左右方向の4基) IMU (3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ) CCDセンサ (カメラ) 気圧センサ
その他構成部品	防塵モータ バッテリー (リチウムポリマー電池)



ドローン外形図



次頁の試験条件で照射試験を実施した。また、照射中リアルタイムにCCDセンサの画像を確認するとともに一定の照射間隔で動作確認を実施し、健全性を確認した。

# 4. ドローン照射試験結果

## 【照射試験条件】

照射線量率 [Gy/h]	通電状態	サンプル数	照射上限 [Gy]
55.7	通電*	2	500

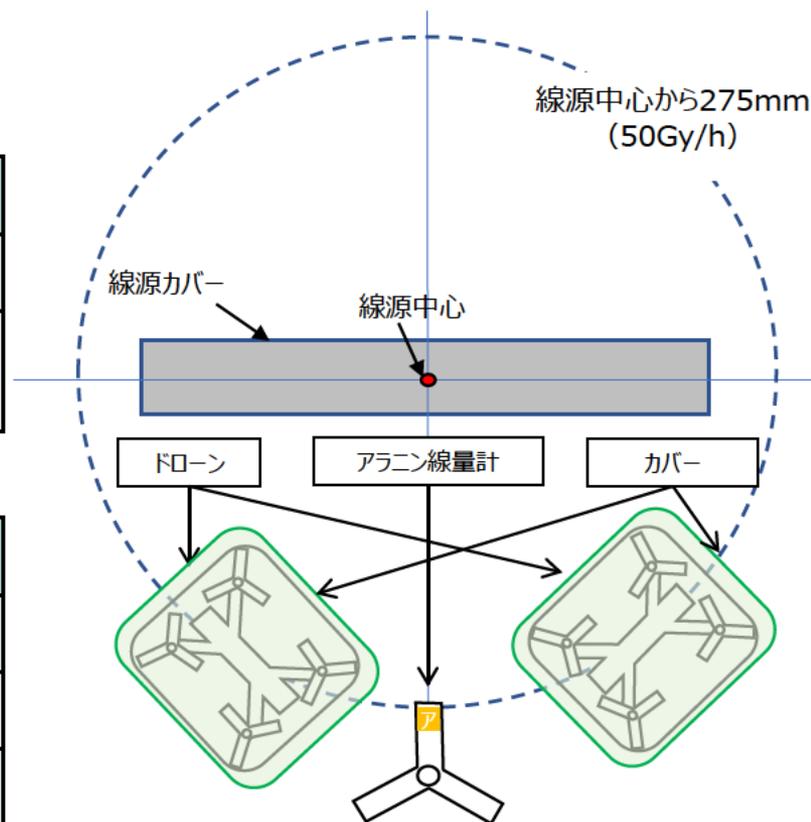
\* : 外部電源からドローン本体へ給電

## <照射中の健全性確認>

確認項目	確認内容
CCDセンサ	映像にノイズが発生しないこと
送受信モジュール	ドローンからの映像送信及び地上局からの操作信号受信が問題なくできること。

## <照射停止時の動作確認>

確認項目	確認内容
距離センサ	センサを遮った時、概略距離が表示されること。
IMU	機体を手動で動かした時に値が変化すること。
気圧センサ	温度及び気圧に異常値が表示されないこと。
PCとの接続	映像及びログをPCへ転送できること。
動作状況	正常に動作すること。



照射試験時の配置図

## 4. ドローン照射試験結果

### 【照射試験結果】

ドローンは2台とも照射終了まで、動作確認において機体の動作及び各種センサの測定値異常は確認されなかったが、操作信号の受信エラーが確認された。  
ドローンの照射試験詳細を以下に示す。

No.	照射線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	故障内容
1	55.7	5.24	292	操作信号の 受信エラーが発生
2		5.35	298	操作信号の 受信エラーが発生



### 【今後の課題】

- 受信モジュールの耐放射線性向上試験
- センサの精度劣化の評価
- 地上局の中継器アンテナの照射試験



ドローンのモニタリング画像例 (No.1)

## 5. 令和5年度までの成果まとめ

令和5年度までに照射試験を実施した試験条件を以下に整理する。

試験条件		対象センサ			
照射線量率 [Gy/h]	通電状態/ 入力電圧[V]	光電センサ	近接センサ	トルクセンサ	測域センサ
5	非通電	○	○	○	-
	12	○	○	-	-
	24	○	○	-	○
50	24	○	○	○	○
75	24	○	○	-	-
100	非通電	○	○	-	-
	12	○	○	-	-
	24	○	○	○	○
150	24	○	○	-	○
メーカーの比較		○ (3社)	○ (3社)	○ (2社)	○ (2社)
照射方向の比較		○ (3方向)	-	-	-
カスタマイズ試験		○	-	-	○

## 第一回 一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針案作成

### 技術委員会 議事録案

#### 1 開催日時

2024 年 2 月 5 日（月）13:00-15:00

#### 2 実施場所

神戸製鋼所 神戸本社 505 会議室

#### 3 議事次第

##### 3.1 事業概要の説明

##### 3.2 令和 4 年度までの成果及び令和 5 年度試験結果速報の報告

##### 3.3 事務連絡

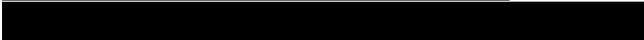
#### 4 配布資料

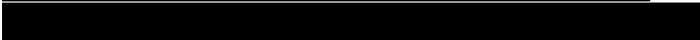
- ・ 技術委員会資料-1 -事業概要-
- ・ 技術委員会資料-2 -照射試験結果-
- ・ 技術委員会資料-3 -令和 5 年度試験結果速報-
  
- ・ 参考資料-1\_令和 4 年度までの照射試験結果詳細
- ・ 参考資料-2\_センサ故障原因調査（R2 年度報告書抜粋）
- ・ 参考資料-3\_各センサの出力電圧データ一覧

#### 5 出席者

【委員】

【オブザーバ】





【事務局】

## 6 議事内容（以下、敬称略）

（FE：富士電機、CTC：伊藤忠テクノソリューションズ、KSL：神戸製鋼所）

### 6.1 事業概要

#### 6.1.1 使用指針の目的

■) 使用指針は、原子炉等の高線量雰囲気での使用を対象としているのか。それとも、廃棄物保管庫等の低線量雰囲気を対象としているのか。

KSL) 廃棄物の保管庫等の低線量雰囲気を想定している。また、原子炉に対しては、廃止措置における第2段階および第4段階等の比較的線量の低い作業も対象としたいと考えている。

■) 指針設定の目的は、稼働率を上げることなのか。安全性向上なのか。

KSL) 安全性向上も重要だが、今回はサプライチェーンの確保を第一の目的としている。

#### 6.1.2 線量の単位

■) 想定は実効線量（Sv）とあるが、原子力分野だと一般的な表現なのか。人体が対象だと問題ないが、材料だと吸収線量（Gy）となる。ガンマ線だと、SvとGyはほぼ一致するが、中性子だと1桁異なってくる。

KSL) ここでは空間線量を記載するため実効線量の記載であるが、評価は吸収線量で記載している。

■) 実効線量（Sv）と吸収線量（Gy）の換算の考え方について、専門家は理解しているが、一般の方（現場の測定者やセンサメーカー等）は分からない可能性があるため、使用指針には記載したほうが良いと考えている。

#### 6.1.3 「データあり」の判定基準

■) P9（設計手順フロー例）「データあり」は、何を持ってデータありと言うのか。

KSL) 判定基準は現在検討中であるが、裕度を考慮した上での使用可能な条件を指針に記載したいと考えている。

■) JAEAの耐放射線性データベースは、J-PARCの設計用に作成している。実際に使用（センサ等の採用）する際、データベースと比較し、想定より早く破損したときの保証をどのように考えるかが課題であった。

■) JAEAデータベースは主に素材の耐放性に関するものが多いと認識している。ユーザとしては複合材料のユニットで使用するので、JAEAデータベースはスクリーニングに使用し、最終的には照射試験を実施することが多い。そのため、本指針により、評価しやすいような状況になることを期待する。

■) 使用指針作成時に「データあり」は重要であるが、保証の課題が残る。

KSL) 照射条件が似たものがあるが、完全に一致する照射条件でのデータはない場合が多い。

そのため、使用指針にて、照射試験方法を提示したいと考えている。ただし、データありでも、評価を実施した方が良い場合もある。

#### 6.1.4 その他

- ) 試験結果は、メーカー等の照射条件が異なっても傾向は一致しており、データがあれば活用できると考える。
- ) 試験と実際の照射線量率の違いが大きければ、使用できる可能性は高くなる。小さい場合は裕度等の設定が必要となる。

### 6.2 照射試験結果

#### 6.2.1 評価時の単位

- ) 単位 Gy は、例えばユニットを構成する半導体のシリコンの吸収線量 (Gy) なのか。空気の吸収線量 (Gy) なのか。
- KSL) アラニン線量計での測定値である。
- ) アラニン線量計は、水に照射したときの吸収線量と同等である。他の試験との比較用に、記載しておく必要がある。
- ) CTC 殿で実施した解析は、どのように対応しているのか。
- CTC) 解析は空気の吸収線量を用いている。
- ) 空気と水 (アラニン) だと、計算値は異なるのか。
- ) ガンマ線の空気と水の場合、吸収線量の差異は小さいと考える。
- ) 水であれば Sv で表現していても問題ないと考える。1F でも東京電力 HD 殿資料では Sv で表記している。KSL で単位の表現について検討すること。
- KSL) 拝承。

#### 6.2.2 入力電圧の影響

- ) 入力電圧の 12V と 24V の照射試験条件は何が異なるのか。対象センサが異なるのか。
- KSL) 各センサで入力電圧に幅があり、同じ型番のセンサに対して、入力電圧 12V と 24V の照射試験を実施している。
- ) 入力電圧に関わらず、例えばセンサの内部回路の印加電圧が 5V で動作していれば、電源供給部を除く故障原因の電圧依存性は小さいのではないかと。
- FE) 半導体設計に関与していないので承知していないが、入力電圧毎にセンサ本体(受光部等)の仕様を変えているとも思えない。入力電圧と耐放性の違いは、電源部分の放射線に対する感受性の違いではないかと思われる。
- ) 入力電圧が低い方が、耐放射線性は高くなるのか。
- KSL) センサによる。故障のメカニズムが分からないため、考察は実施できていない。

### 6.2.3 故障時の挙動、メカニズム

- ) 故障の定義について、完全に故障する前に前兆があるかの評価は実施しているのか。  
KSL) 例えば近接センサの場合、出力電圧が徐々に下がる傾向がある。出力電圧 4V 低下しても、ON/OFF は問題なかった。
- ) 信号が下がっても問題ないのか。  
KSL) ON/OFF が出力されれば問題ない。
- ) 近接センサはどのような構造なのか。  
KSL) コイルの誘導起電圧による発振状態を検知する ON/OFF センサである。
- ) 近接センサの構成部品に半導体が含まれていると想定されるが、ハイブリッド IC を交換すればセンサが直るのか。  
KSL) 理論的には可能であるが、樹脂で固められているため現実的には困難である。
- ) 故障は、徐々に出力電圧が下がり、あるときに故障するのか。  
KSL) センサ毎にことなるが、近接センサはそのような傾向がある。
- ) 有機導体では絶縁材中に電荷が蓄積され、電源の ON/OFF 等の要因により、サージし故障の原因となるのではないかと考えているが、今回もそのような事象が発生しているのか。  
KSL) メカニズムまでは、検討できていない。

### 6.2.4 照射線量率の影響

- ) 照射線量率が高い方が早く壊れるのか。  
KSL) 概ねそのような傾向が見られているが、近接センサは逆転現象が見られている。
- ) 照射線量率は線量率ではなく、照射時間が優位となっているのか。  
KSL) センサのモデルが変わっており、その影響を受けている可能性もある。今後、同一モデルでの照射試験も検討している。
- ) 照射線量率は 3 点以上とれないのか。オーダー的には変わっていないように見える。  
メーカーは結果を受けて、どう考えるのか。  
CTC) 現状のデータでは、何とも言いにくいので、もう少しデータを拡充させてほしい。
- ) 実環境での適用を考えた際、現在の照射試験結果で得られた耐放射線性は十分適用できるオーダーとなっているのか。  
KSL) 低レベル廃棄物の線量率および搬送時間等を考慮すると、耐放射線性は 200Gy 程度あれば、使用は可能だと考える。また、点検頻度を考慮すれば、現状の得られている耐放射線性（試験結果）でも問題ないと考える。
- CTC) 低線量雰囲気での使用事例を蓄積していけば、活用しやすいと考える。あとはエンドユーザー次第である。また、燃料製造施設等を除く大型機器では点検時の作業員の接

触等を考慮し機械式センサを使用する傾向がある。本件の推進により使用環境が広がることを期待する。

#### 6.2.5 照射停止時間の影響

■) 非照射時の時間影響は評価しているのか。

KSL) 今までの照射試験では、夜間や土日で照射を停止する場合もある。アニール効果等が考えられるのか。

■) 電荷がどこかに蓄積し、通電・非通電を切り替えたときに、放電して故障する可能性もある。逆に、電荷が非照射中に放電される可能性もある。

■) 照射試験での電源 ON/OFF のタイミングや頻度、データ取得タイミングは、実際に使用環境に合わせているのか。

KSL) 合わせていない。使用環境は様々であるため、模擬していない。

#### 6.2.6 今後の追加照射試験

■) センサの構成要素で、こんな部品が含まれていれば注意した方が良い等の考察ができれば良いと考える。

■) センサを分解し、電気特性等の取得試験を実施してはどうか。このような考察を入れた方が良いと考える。対象のセンサは別途調整させてほしい。

KSL) 拝承。来年度の実施内容として検討する。

■) 全てのセンサは難しいため、代表的なセンサでの実施で良いと考える。

#### 6.3 事務連絡

- ・ 第2回委員会への電力事業者のオブザーバ参加を調整している。
- ・ 次回は、令和6年10月に実施予定。2ヶ月前の8月に日程調整を実施する。

以上