

令和6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7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	11
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	16
2.4.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	17
(1) 照射試験結果	17
(2) 遮へい解析コードを用いた遮へい評価結果	18
(3) 課題	18
2.5 令和4年度の実施内容	19
2.5.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得	19
(1) 照射試験結果	19
(2) 課題	21
2.5.2 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得	22
(1) 照射試験結果	22

(2) 遮へい解析結果	23
(3) 課題	23
2.6 令和5年度の実施内容	24
2.6.1 一般産業用工業品の追加データ取得	24
(1) 照射試験結果	24
(2) 課題	27
2.6.2 カスタマイズしたセンサ類の追加データ取得	28
(1) 照射試験結果	28
(2) 遮へい解析結果	28
(3) 課題	28
2.6.3 第1回技術委員会の実施	29
(1) 第1回技術委員会結果	29
(2) 課題	30
3. 令和6年度の実施内容	31
3.1 耐放射線性データの追加取得	31
3.2 簡易遮へい評価手法の適用方法検討	31
3.3 故障原因調査の実施	31
3.4 カスタマイズしたセンサの作動試験の実施	31
3.5 技術委員会の実施	31
4. 耐放射線性データの追加取得	32
4.1 概要	32
4.2 照射試験条件	32
4.2.1 対象センサ	32
4.2.2 吸収線量率、照射上限	34
(1) 光電センサ	34
(2) 近接センサ	34
(3) 測域センサ	35
4.2.3 サンプル数	35
4.3 照射試験場所	35
4.4 照射試験方法	35
4.4.1 センサ配置	35
4.4.2 データ取得	45
(1) 光電センサ	45
(2) 近接センサ	47
(3) 測域センサ	48
4.5 照射試験工程実績	48
5. 簡易遮へい評価手法の適用方法検討	52
5.1 ガラス線量計の方向特性評価のための試験条件	52

5.1.1	吸収線量率、照射上限	52
5.1.2	ガラス線量計配置.....	52
5.2	ガラス線量計の吸収線量特性評価のための試験条件.....	55
5.2.1	吸収線量率、想定集積吸収線量.....	55
5.2.2	ガラス線量計配置.....	56
5.3	ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価	58
5.3.1	吸収線量率、想定集積吸収線量.....	58
5.3.2	線量計配置.....	58
5.4	線量計組成を考慮した遮へい解析	61
5.4.1	解析対象ケース	61
5.4.2	解析コード.....	61
5.4.3	計算で使用する密度及び組成	61
5.4.4	線量換算係数.....	66
5.4.5	線源条件	67
5.4.6	評価位置	68
5.4.7	解析モデル.....	72
5.5	ガラス線量計特性評価のための遮へい解析	79
5.5.1	解析対象ケース	79
5.5.2	解析コード.....	79
5.5.3	計算で使用する密度及び組成	79
5.5.4	線量換算係数.....	79
5.5.5	線源条件	80
5.5.6	評価位置	83
5.5.7	解析モデル.....	83
5.6	簡易遮へい評価手法の適用検討.....	87
5.6.1	適用を検討する評価手法.....	87
	(1) QAD	87
	(2) 手計算 1.....	87
	(3) 手計算 2.....	88
	(4) 手計算 3.....	89
5.6.2	手計算で使用するパラメータ	93
5.6.3	計算ケース.....	97
	(1) 代表的な簡易計算ケース	97
	(2) 令和5年度までの遮へい解析を模擬した計算ケース	99
6.	故障原因調査の実施	106
6.1	センサの分解による構成部品調査.....	106
6.2	構成部品の照射試験.....	106
6.2.1	照射試験対象.....	106

(1) バイポーラトランジスタ	107
(2) MOSFET.....	108
(3) JFET	109
(4) コンデンサ	110
(5) ダイオード	111
(6) コンパレータ	112
(7) オペアンプ	112
(8) 三端子レギュレータ	113
6.2.2 構成部品の特性評価方法.....	114
(1) バイポーラトランジスタ	114
(2) MOSFET.....	114
(3) JFET	115
(4) コンデンサ	116
(5) ダイオード	116
(6) コンパレータ	117
(7) オペアンプ	118
(8) 三端子レギュレータ	118
6.2.3 照射試験場所.....	119
7. カスタマイズしたセンサの作動試験の実施.....	120
7.1 照射対象	120
7.2 遮へい体	121
7.3 吸収線量率.....	122
7.4 試験方法	125
8. 試験結果.....	127
8.1 耐放射線性データの追加取得	127
8.1.1 光電センサ.....	127
(1) 50Gy/h 試験	127
(2) 100Gy/h 試験	135
8.1.2 近接センサ.....	143
(1) 50Gy/h 試験	143
(2) 100Gy/h 試験	151
8.1.3 測域センサ.....	159
(1) 50Gy/h 試験	159
(2) 100Gy/h 試験	164
8.2 簡易遮へい評価手法の適用方法検討	169
8.2.1 ガラス線量計特性評価のための照射試験結果.....	169
(1) 方向特性評価.....	169
(2) 吸収線量特性評価	170

(3) アラニン線量計との比較	171
8.2.2 ガラス線量計組成の影響評価	172
(1) 光電センサ 100Gy/h 解析 (解析ケース 1-1)	172
(2) 測域センサ 150Gy/h 解析 (解析ケース 1-2)	172
(3) 光電センサ 5Gy/h 解析 (解析ケース 1-3)	173
(4) 測域センサ 5Gy/h 解析 (解析ケース 1-4)	173
8.2.3 ガラス線量計特性評価のための遮へい解析	174
(1) 吸収線量特性評価 (解析ケース 2-1)	174
(2) アラニン線量計との比較 (解析ケース 2-2)	175
8.2.4 簡易遮へい評価手法の適用性検討結果.....	176
(1) 代表的な簡易計算ケース	176
(2) 令和 5 年度までの遮へい解析を模擬した計算ケース	186
8.3 故障原因調査の実施.....	188
8.3.1 センサの構成部品調査結果.....	188
(1) 光電センサ	188
(2) 測域センサ	190
8.3.2 構成部品の照射試験結果.....	191
(1) バイポーラトランジスタ	192
(2) MOSFET.....	198
(3) JFET	201
(4) コンデンサ	203
(5) ダイオード	205
(6) コンパレータ	212
(7) オペアンプ	213
(8) 三端子レギュレータ	214
8.4 カスタマイズしたセンサの作動試験の実施	215
9. 考察.....	216
9.1 耐放射線性データの追加取得	216
9.1.1 センサメーカーの耐放射線性のばらつき	216
9.2 簡易遮へい評価手法の適用方法検討	226
9.2.1 ガラス線量計特性の評価.....	226
(1) 方向特性	226
(2) 吸収線量特性.....	227
9.2.2 線量計組成の影響評価	230
9.2.3 簡易遮へい評価手法の適用性の検討結果.....	233
9.3 故障原因調査の実施.....	238
9.4 カスタマイズしたセンサの作動試験の実施	239
10. 一般産業用工業品の使用指針の作成.....	240

10.1 令和6年度の技術委員会実施内容.....	240
10.2 第2回技術委員会結果概要.....	240
10.3 第3回技術委員会結果概要.....	240
11. 今後の課題.....	242
11.1 マイコン、FPGAの耐放射線性データの取得.....	242
11.2 簡易遮へい評価手法の適用方法の追加検討.....	242
11.3 作動試験における遮へい体構造の影響評価.....	242
11.4 一般産業用工業品の使用指針案の作成.....	242
12. まとめ.....	243
参考文献.....	245

参考資料-1 第2回技術委員会_配布資料

参考資料-2 第2回技術委員会_議事録

参考資料-3 第3回技術委員会_配布資料

参考資料-4 第3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（吸収線量率 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（吸収線量率 50Gy/h）	9
表 2.3-4	測域センサ損傷時の集積吸収線量（吸収線量率 50Gy/h）	10
表 2.4-1	光電センサ照射試験結果	12
表 2.4-2	近接センサ照射試験結果	13
表 2.4-3	トルクセンサ照射試験結果	14
表 2.4-4	測域センサ照射試験結果	15
表 2.4-5	カスタマイズした光電センサの照射試験結果	17
表 2.4-6	カスタマイズした測域センサの照射試験結果	17
表 2.4-7	光電センサ（カスタマイズ）の本解析結果	18
表 2.4-8	測域センサ（カスタマイズ）の本解析結果	18
表 2.5-1	光電センサの照射試験結果	19
表 2.5-2	近接センサの照射試験結果	20
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）	22
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）	22
表 2.5-5	遮へい解析結果	23
表 2.6-1	光電センサ（5Gy/h・24V）の照射試験結果	24
表 2.6-2	光電センサ（100Gy/h・12V）の照射試験結果	25
表 2.6-3	光電センサ（100Gy/h・非通電）の照射試験結果	25
表 2.6-4	近接センサ（100Gy/h・12V）の照射試験結果	26
表 2.6-5	近接センサ（100Gy/h・非通電）の照射試験結果	26
表 2.6-6	ドローンの照射試験結果	27
表 2.6-7	照射中及び動作確認時の確認結果	27
表 2.6-8	測域センサのカスタマイズ試験結果	28
表 2.6-9	遮へい解析結果	28
表 4.2-1	照射試験条件	32
表 4.4-1	照射試験データ取り及び動作確認頻度	45
表 5.2-1	ガラス線量計の吸収線量特性評価試験条件	55
表 5.3-1	ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価試験条件	58
表 5.4-1	線量計組成の評価のための解析対象ケース	61
表 5.4-2	遮へい解析に用いた物質の密度及び組成	62
表 5.4-3	遮へい解析に用いた換算係数	66
表 5.4-4	解析ケース 1-1 及び 1-2（令和 3 年度）の線源条件	67
表 5.4-5	解析ケース 1-3（令和 4 年度：光電センサ 5Gy/h）の線源条件	67

表 5.4-6	解析ケース 1-4 (令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h) の線源条件.....	67
表 5.5-1	ガラス線量計特性評価のための解析対象ケース	79
表 5.5-2	Co ⁶⁰ 線源スペクトル.....	80
表 5.5-3	規格化手法①による線源強度の規格化計算結果	82
表 5.5-4	規格化手法②による線源強度の規格化計算結果	82
表 5.6-1	線減衰係数 (Z=26, ρ=7.874g/cm ³)	93
表 5.6-2	遮へい体厚さ及びμt.....	93
表 5.6-3	実効線量透過率.....	94
表 5.6-4	実効線量率定数.....	94
表 5.6-5	e ^{-μt} (鉄、Co ⁶⁰ (1.25MeV))	95
表 5.6-6	ビルドアップ係数.....	95
表 5.6-7	簡易遮へい評価手法の適用検討のための代表的な簡易計算ケース	97
表 5.6-8	過去の遮へい解析条件を模擬した簡易計算ケースの手計算モデル.....	105
表 6.2-1	照射試験対象とした構成部品.....	107
表 6.2-2	照射距離と吸収線量率の関係.....	119
表 8.1-1	光電センサ (50Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量	128
表 8.1-2	光電センサ (50Gy/h) の不具合発生前の集積吸収線量	128
表 8.1-3	光電センサ (100Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量	136
表 8.1-4	光電センサ (100Gy/h) の不具合発生前の集積吸収線量	136
表 8.1-5	近接センサ (50Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量	144
表 8.1-6	近接センサ (50Gy/h) の不具合発生前の集積吸収線量	144
表 8.1-7	近接センサ (100Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量	152
表 8.1-8	近接センサ (100Gy/h) の不具合発生前の集積吸収線量	152
表 8.1-9	測域センサ (50Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量	159
表 8.1-10	測域センサ (100Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量	164
表 8.2-1	ガラス線量計方向特性の評価試験結果.....	169
表 8.2-2	ガラス線量計吸収線量特性の評価試験結果.....	170
表 8.2-3	ガラス線量計とアラニン線量計の比較試験結果	171
表 8.2-4	解析ケース 1-1 の解析結果.....	172
表 8.2-5	解析ケース 1-2 の解析結果.....	172
表 8.2-6	解析ケース 1-3 の解析結果.....	173
表 8.2-7	解析ケース 1-4 の解析結果.....	173
表 8.2-8	吸収線量特性評価の解析結果 (解析ケース 2-1)	174
表 8.2-9	アラニン線量計との比較評価解析結果 (解析ケース 2-2)	175
表 8.2-10	簡易計算ケース 1-1 の計算結果及び MCNP との比.....	176
表 8.2-11	簡易計算ケース 1-2 の計算結果及び MCNP との比.....	178
表 8.2-12	簡易計算ケース 1-3 の計算結果及び MCNP との比.....	180
表 8.2-13	簡易計算ケース 1-4 の計算結果及び MCNP との比.....	182

表 8.2-14	簡易計算ケース 1-5 の計算結果	184
表 8.2-15	簡易計算ケース 2-1 の計算結果	186
表 8.2-16	簡易計算ケース 2-2 の計算結果	186
表 8.2-17	簡易計算ケース 2-3 の計算結果	187
表 8.2-18	簡易計算ケース 2-4 の計算結果	187
表 8.2-19	簡易計算ケース 2-5 の計算結果	187
表 8.3-1	構成部品の照射試験結果	191
表 8.3-2	n チャンネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (on) 変化	199
表 8.3-3	n チャンネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (off) 変化	199
表 8.3-4	p チャンネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (on) 変化	200
表 8.3-5	p チャンネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (off) 変化	200
表 8.3-6	オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性 (0Gy)	213
表 8.3-7	オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性 (800Gy)	213
表 8.3-8	オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性 (1200Gy)	213
表 8.4-1	作動試験結果	215
表 9.1-1	光電センサ照射試験結果一覧	217
表 9.1-2	近接センサの照射試験結果一覧	221
表 9.1-3	測域センサの照射試験結果一覧	224
表 9.1-4	センサメーカー間のばらつきの評価結果 (t 検定)	225
表 9.2-1	ガラス線量計の方向特性	226
表 9.2-2	各解析ケースにおけるガラス線量計の集積吸収線量	231
表 9.2-3	アラニン線量計の測定値と計算値の比較一覧	231
表 9.2-4	ガラス線量計 (300Gy より大きい) の測定値と計算値の比較一覧	232
表 9.2-5	ガラス線量計 (300Gy 以下) の測定値と計算値の比較一覧	232
表 9.2-6	MCNP 及び各簡易遮へい評価手法の特徴	233
表 9.2-7	代表的な簡易計算ケースに対して適用可能な簡易遮へい評価手法	234
表 9.2-8	過年度の解析を模擬した計算ケースに対して適用可能な簡易遮へい評価手法	236
表 9.2-9	過年度の解析を模擬した計算ケースの MCNP との比較結果	236
表 9.4-1	作動試験におけるセンサ故障時の集積吸収線量及びその比	239

－ 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	33
図 4.2-2	近接センサ概略図	33
図 4.2-3	測域センサ概略図	33
図 4.4-1	光電センサ・近接センサ取付け図	36
図 4.4-2	センサ配置図（光電センサ 50Gy/h）	37
図 4.4-3	センサ配置図（光電センサ 100Gy/h）	37
図 4.4-4	センサ配置図（近接センサ 50Gy/h）	38
図 4.4-5	センサ配置図（近接センサ 100Gy/h）	38
図 4.4-6	センサ配置図（測域センサ 50Gy/h : No.1,2）	39
図 4.4-7	センサ配置図（測域センサ 50Gy/h : No.3）	39
図 4.4-8	センサ配置図（測域センサ 100Gy/h : No.1,2）	40
図 4.4-9	センサ配置図（測域センサ 100Gy/h : No.3）	40
図 4.4-10	照射試験状況写真（光電センサ 50Gy/h）	41
図 4.4-11	照射試験状況写真（光電センサ 100Gy/h）	41
図 4.4-12	照射試験状況写真（近接センサ 50Gy/h）	42
図 4.4-13	照射試験状況写真（近接センサ 100Gy/h）	42
図 4.4-14	照射試験状況写真（測域センサ 50Gy/h : No.1,2）	43
図 4.4-15	照射試験状況写真（測域センサ 100Gy/h : No.1,2）	44
図 4.4-16	照射試験状況写真（測域センサ 100Gy/h : No.3）	44
図 4.4-17	光電センサの試験用電気回路図	46
図 4.4-18	近接センサの試験用電気回路図	47
図 4.4-19	測域センサの試験用電気回路図	48
図 4.5-1	照射試験工程実績	49
図 5.1-1	ガラス線量計方向特性例	53
図 5.1-2	方向特性評価のためのガラス線量計の照射試験配置図	53
図 5.1-3	ガラス線量計方向特性試験状況写真	54
図 5.1-4	ガラス線量計方向特性試験状況写真（詳細）	54
図 5.2-1	吸収線量特性評価のためのガラス線量計の照射試験配置図	56
図 5.2-2	ガラス線量計の配置詳細	56
図 5.2-3	ガラス線量計吸収線量特性試験状況写真	57
図 5.3-1	線量計特性比較のための照射試験配置図	59
図 5.3-2	ガラス線量計及びアラニン線量計の配置詳細	59
図 5.3-3	ガラス線量計とアラニン線量計の比較試験状況写真	60

図 5.3-4	ガラス線量計とアラニン線量計の比較試験状況写真（詳細）	60
図 5.4-1	解析ケース 1-1（令和 3 年度：光電センサ 100Gy/h）の評価位置	68
図 5.4-2	解析ケース 1-2（令和 3 年度：測域センサ 150Gy/h）の評価位置	69
図 5.4-3	解析ケース 1-3（令和 4 年度：光電センサ 5Gy/h）の評価位置	70
図 5.4-4	解析ケース 1-4（令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h）の評価位置	71
図 5.4-5	解析ケース 1-1（令和 3 年度：光電センサ 100Gy/h）の解析モデル	73
図 5.4-6	解析ケース 1-1 の遮へい体モデル	73
図 5.4-7	解析ケース 1-2（令和 3 年度：測域センサ 150Gy/h）の解析モデル	74
図 5.4-8	解析ケース 1-2 の遮へい体モデル	74
図 5.4-9	解析ケース 1-3（令和 4 年度：光電センサ 5Gy/h）の解析モデル	75
図 5.4-10	解析ケース 1-3 の遮へい体モデル	75
図 5.4-11	解析ケース 1-4（令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h）の解析モデル	76
図 5.4-12	解析ケース 1-4 の遮へい体モデル	77
図 5.4-13	ガラス線量計素子の解析モデル	78
図 5.4-14	アラニン線量計の解析モデル	78
図 5.5-1	線源規格化の解析モデル	81
図 5.5-2	規格化手法の概要	81
図 5.5-3	照射室の解析モデル	83
図 5.5-4	解析ケース 2-1（ガラス線量計の吸収線量特性の評価）の解析モデル	84
図 5.5-5	解析ケース 2-1 のガラス線量計配置詳細（平面図）	85
図 5.5-6	解析ケース 2-1 のガラス線量計配置詳細（立面図）	85
図 5.5-7	解析ケース 2-2（ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価）の解析モデル	86
図 5.5-8	解析ケース 2-2 の線量計配置詳細	86
図 5.6-1	手計算 3 計算モデル（遮へい体無し）	90
図 5.6-2	手計算 3 計算モデル（遮へい体有り）	92
図 5.6-3	$F\theta, b, \theta = 0\sim 8.0, \theta = 1\sim 90^\circ$	96
図 5.6-4	簡易計算ケース 1-1 の計算モデル（点線源、遮へい体無し）	97
図 5.6-5	簡易計算ケース 1-2 の計算モデル（点線源、遮へい体有り）	97
図 5.6-6	簡易計算ケース 1-3 の計算モデル（ライン線源、遮へい体無し）	98
図 5.6-7	簡易計算ケース 1-4 の計算モデル（ライン線源、遮へい体有り）	98
図 5.6-8	簡易計算ケース 1-5 の計算モデル（点/ライン線源、遮へい体無し）	98
図 5.6-9	簡易計算ケース 2-1 の QAD 解析モデル	100
図 5.6-10	簡易計算ケース 2-1 の遮へい体解析モデル	100
図 5.6-11	簡易計算ケース 2-2 の QAD 解析モデル	101
図 5.6-12	簡易計算ケース 2-2 の遮へい体解析モデル	101
図 5.6-13	簡易計算ケース 2-3 の QAD 解析モデル	102
図 5.6-14	簡易計算ケース 2-3 の遮へい体解析モデル	102
図 5.6-15	簡易計算ケース 2-4 の QAD 解析モデル	103

図 5.6-16	簡易計算ケース 2-4 の遮へい体解析モデル	103
図 5.6-17	簡易計算ケース 2-5 の QAD 解析モデル	104
図 5.6-18	簡易計算ケース 2-5 の遮へい体解析モデル	104
図 6.2-1	NPN バイポーラトランジスタの構造概念図	108
図 6.2-2	n チャネル MOSFET の構造概念図	108
図 6.2-3	n チャネル JFET の構造概念図	109
図 6.2-4	アルミ電解コンデンサの構造概念図	110
図 6.2-5	PN 接合型ダイオードの構造	111
図 6.2-6	コンパレータの等価回路の例	112
図 6.2-7	単電源動作オペアンプの等価回路の例	113
図 6.2-8	三端子レギュレータの等価回路の例	113
図 6.2-9	バイポーラトランジスタの特性評価試験概念図	114
図 6.2-10	n チャネル MOSFET の特性評価試験概念図	115
図 6.2-11	n チャネル JFET の特性評価試験概念図	115
図 6.2-12	コンデンサの等価並列回路	116
図 6.2-13	ダイオードの特性評価試験概念図	116
図 6.2-14	コンパレータ特性評価試験回路	117
図 6.2-15	コンパレータ特性評価試験回路の様子	117
図 6.2-16	オペアンプ V_o - f 特性試験回路	118
図 6.2-17	三端子レギュレータ	118
図 7.1-1	光電センサ仕様及び配線図	120
図 7.2-1	遮へい体及び光電センサの様子	121
図 7.3-1	光電センサ近傍のガンマ線強度分布	122
図 7.3-2	センサ位置でのガンマ線エネルギースペクトル (遮へい体無し)	123
図 7.3-3	センサ位置でのガンマ線エネルギースペクトル (遮へい体あり)	123
図 7.3-4	センサに対するエネルギー損失スペクトル (遮へい体無し)	124
図 7.3-5	センサに対するエネルギー損失スペクトル (遮へい体あり)	124
図 7.4-1	作動試験の概念図	125
図 7.4-2	作動試験の様子	126
図 7.4-3	コンベヤ制御部の様子	126
図 8.1-1	光電 50-1 出力電圧変化	129
図 8.1-2	光電 50-1 出力電圧変化 (縮小図)	129
図 8.1-3	光電 50-2 出力電圧変化	130
図 8.1-4	光電 50-2 出力電圧変化 (縮小図)	130
図 8.1-5	光電 50-3 出力電圧変化	131
図 8.1-6	光電 50-3 出力電圧変化 (縮小図)	131
図 8.1-7	光電 50-4 出力電圧変化	132
図 8.1-8	光電 50-4 出力電圧変化 (縮小図)	132

図 8.1-9	光電 50-5 出力電圧変化.....	133
図 8.1-10	光電 50-5 出力電圧変化 (縮小図)	133
図 8.1-11	光電 50Gy/h 全センサ出力電圧変化.....	134
図 8.1-12	光電 50Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)	134
図 8.1-13	光電 100-1 出力電圧変化.....	137
図 8.1-14	光電 100-1 出力電圧変化 (縮小図)	137
図 8.1-15	光電 100-2 出力電圧変化.....	138
図 8.1-16	光電 100-2 出力電圧変化 (縮小図)	138
図 8.1-17	光電 100-3 出力電圧変化.....	139
図 8.1-18	光電 100-3 出力電圧変化 (縮小図)	139
図 8.1-19	光電 100-4 出力電圧変化.....	140
図 8.1-20	光電 100-4 出力電圧変化 (縮小図)	140
図 8.1-21	光電 100-5 出力電圧変化.....	141
図 8.1-22	光電 100-5 出力電圧変化 (縮小図)	141
図 8.1-23	光電 100Gy/h 全センサ出力電圧変化	142
図 8.1-24	光電 100Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)	142
図 8.1-25	近接 50-1 出力電圧変化.....	145
図 8.1-26	近接 50-1 出力電圧変化 (縮小図)	145
図 8.1-27	近接 50-2 出力電圧変化.....	146
図 8.1-28	近接 50-2 出力電圧変化 (縮小図)	146
図 8.1-29	近接 50-3 出力電圧変化.....	147
図 8.1-30	近接 50-3 出力電圧変化 (縮小図)	147
図 8.1-31	近接 50-4 出力電圧変化.....	148
図 8.1-32	近接 50-4 出力電圧変化 (縮小図)	148
図 8.1-33	近接 50-5 出力電圧変化.....	149
図 8.1-34	近接 50-5 出力電圧変化 (縮小図)	149
図 8.1-35	近接 50Gy/h 全センサ出力電圧変化	150
図 8.1-36	近接 50Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)	150
図 8.1-37	近接 100-1 出力電圧変化.....	153
図 8.1-38	近接 100-1 出力電圧変化 (縮小図)	153
図 8.1-39	近接 100-2 出力電圧変化.....	154
図 8.1-40	近接 100-2 出力電圧変化 (縮小図)	154
図 8.1-41	近接 100-3 出力電圧変化.....	155
図 8.1-42	近接 100-3 出力電圧変化 (縮小図)	155
図 8.1-43	近接 100-4 出力電圧変化.....	156
図 8.1-44	近接 100-4 出力電圧変化 (縮小図)	156
図 8.1-45	近接 100-5 出力電圧変化.....	157
図 8.1-46	近接 100-5 出力電圧変化 (縮小図)	157

図 8.1-47	近接 100Gy/h 全センサ出力電圧変化	158
図 8.1-48	近接 100Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)	158
図 8.1-49	測域 50-1 距離データ変化	159
図 8.1-50	測域 50-2 距離データ変化	160
図 8.1-51	測域 50-3 距離データ変化	160
図 8.1-52	測域 50-1 検出範囲 (照射前)	161
図 8.1-53	測域 50-1 検出範囲 (故障後)	161
図 8.1-54	測域 50-2 検出範囲 (照射前)	162
図 8.1-55	測域 50-2 検出範囲 (故障後)	162
図 8.1-56	測域 50-3 検出範囲 (照射前)	163
図 8.1-57	測域 50-3 検出範囲 (故障後)	163
図 8.1-58	測域 100-1 距離データ変化	164
図 8.1-59	測域 100-2 距離データ変化	165
図 8.1-60	測域 100-3 距離データ変化	165
図 8.1-61	測域 100-1 検出範囲 (照射前)	166
図 8.1-62	測域 100-1 検出範囲 (故障後)	166
図 8.1-63	測域 100-2 検出範囲 (照射前)	167
図 8.1-64	測域 100-2 検出範囲 (故障後)	167
図 8.1-65	測域 100-3 検出範囲 (照射前)	168
図 8.1-66	測域 100-3 検出範囲 (故障後)	168
図 8.2-1	簡易計算ケース 1-1 の計算結果	177
図 8.2-2	MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-1)	177
図 8.2-3	簡易計算ケース 1-2 の計算結果	179
図 8.2-4	MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-2)	179
図 8.2-5	簡易計算ケース 1-3 の計算結果	181
図 8.2-6	MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-3)	181
図 8.2-7	簡易計算ケース 1-4 の計算結果	183
図 8.2-8	MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-4)	183
図 8.2-9	簡易計算ケース 1-5 の計算結果 (0cm から 200cm)	185
図 8.2-10	簡易計算ケース 1-5 の計算結果 (30cm から 200cm)	185
図 8.3-1	光電センサ分解時の様子	189
図 8.3-2	光電センサの簡易モデルの電子回路図	189
図 8.3-3	測域センサ分解時の様子	190
図 8.3-4	NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (0Gy)	192
図 8.3-5	NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (200Gy)	192
図 8.3-6	NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (400Gy)	193
図 8.3-7	NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (800Gy)	193
図 8.3-8	NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (1200Gy)	194

図 8.3-9	NPN バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (0Gy)	194
図 8.3-10	NPN バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (200Gy)	194
図 8.3-11	NPN バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (800Gy)	195
図 8.3-12	NPN バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (1200Gy)	195
図 8.3-13	PNP バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (0Gy)	195
図 8.3-14	PNP バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (200Gy)	196
図 8.3-15	PNP バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (600Gy)	196
図 8.3-16	PNP バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (0Gy)	197
図 8.3-17	PNP バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (80Gy)	197
図 8.3-18	PNP バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (1200Gy)	197
図 8.3-19	n チャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (0Gy)	198
図 8.3-20	n チャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (200Gy)	198
図 8.3-21	p チャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (0Gy)	199
図 8.3-22	p チャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (400Gy)	200
図 8.3-23	n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性 (0Gy)	201
図 8.3-24	n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性 (100kGy)	201
図 8.3-25	n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性 (400kGy)	202
図 8.3-26	n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性 (700kGy)	202
図 8.3-27	アルミ電解コンデンサの静電容量(0Gy)	203
図 8.3-28	アルミ電解コンデンサの静電容量(1MGy)	203
図 8.3-29	100nF 積層セラミックコンデンサの静電容量(0Gy)	204
図 8.3-30	100nF 積層セラミックコンデンサの静電容量(1kGy)	204
図 8.3-31	10 μ F 積層セラミックコンデンサの静電容量(0Gy)	204
図 8.3-32	10 μ F 積層セラミックコンデンサの静電容量(1kGy)	205
図 8.3-33	小信号用汎用ダイオードの I_D - V_D 特性変化	206
図 8.3-34	小信号用汎用ダイオードの V_F (0Gy)	206
図 8.3-35	小信号用汎用ダイオードの V_F (400Gy)	207
図 8.3-36	小信号用汎用ダイオードの V_F (600Gy)	207
図 8.3-37	整流ダイオードの I_D - V_D 特性変化	208
図 8.3-38	整流ダイオードの V_F (0Gy)	208
図 8.3-39	整流ダイオードの V_F (200kGy)	209
図 8.3-40	整流ダイオードの V_F (400kGy)	209
図 8.3-41	赤色 LED の電圧 : $I_D=20mA$ (0Gy)	210
図 8.3-42	赤色 LED の電圧 : $I_D=20mA$ (400Gy)	210
図 8.3-43	赤色 LED の電圧 : $I_D=20mA$ (1000Gy)	211
図 8.3-44	フォトダイオードの V_f (0Gy)	211
図 8.3-45	フォトダイオードの V_f (400Gy)	211
図 8.3-46	フォトダイオードの V_f (800Gy)	212

図 8.3-47	放射線環境下におけるコンパレータの動作.....	212
図 8.3-48	オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性	214
図 8.3-49	三端子レギュレータの特性変化	214
図 8.4-1	作動試験時の光電センサの出力電圧.....	215
図 9.1-1	光電センサの照射試験結果	220
図 9.1-2	近接センサの照射試験結果	223
図 9.1-3	測域センサの照射試験結果	225
図 9.2-1	ガラス線量計の方向特性評価結果	227
図 9.2-2	吸収線量特性における測定値及び計算値の比較	228
図 9.2-3	規格化手法①及び規格化手法②の比較	229
図 9.2-4	既往事例のガラス線量計の吸収線量特性の例	229
図 9.2-5	簡易計算ケース 2-2 の手計算 3 の領域設定.....	237
図 9.2-6	簡易計算ケース 2-3 の手計算 3 の領域設定.....	237

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）。

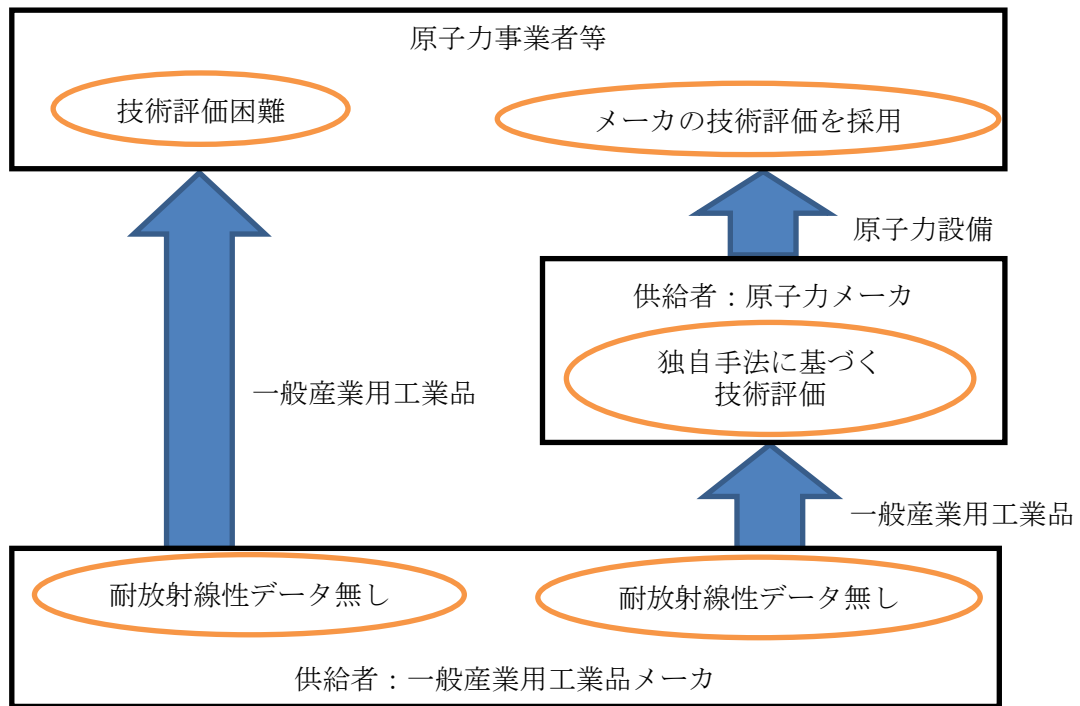


図 1.1-1 従来のサプライチェーン

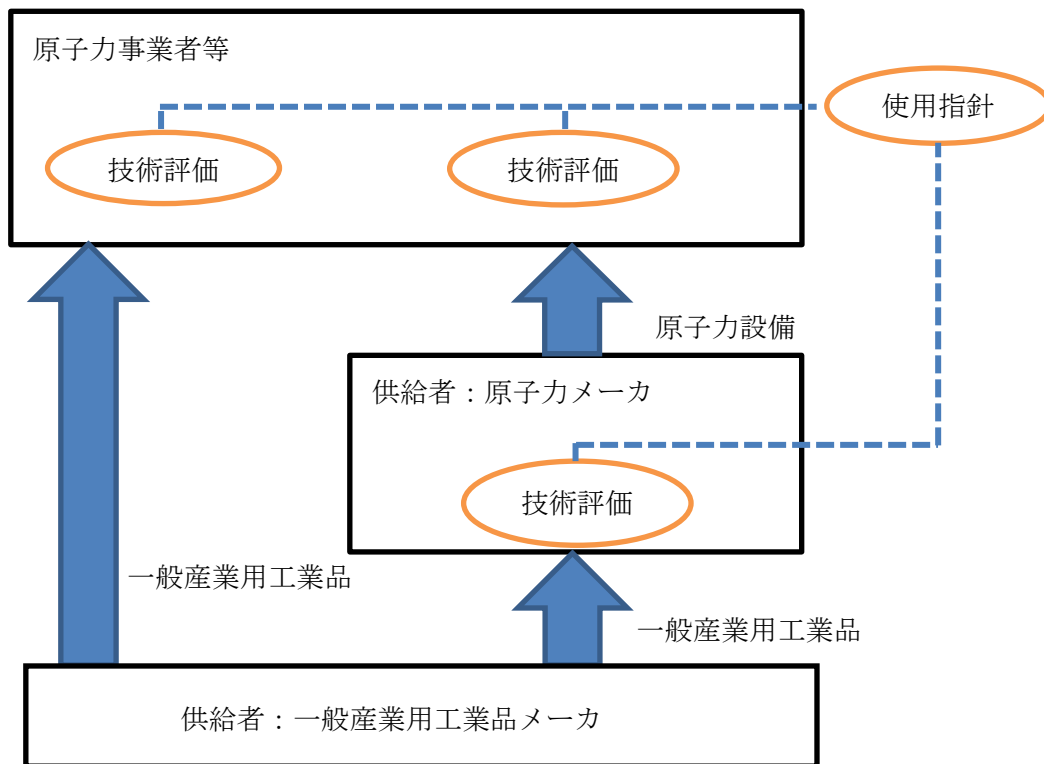


図 1.1-2 使用指針を活用したサプライチェーン

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）^[1]
- ② 高放射線環境で使用される機器・材料類の耐放射線特性データ集（2008年）^[2]
- ③ 各種高分子材料の耐放射線性；実使用環境模擬の劣化評価（2010年）^[3]

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

そこで、本事業において、原子力事業者及び原子力メーカーでも一般産業用工業品であるセンサ類の技術評価が可能な使用指針を作成し、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 6 年度の実施内容について後述する。

また、令和 2 年度から令和 5 年度までの成果概要について示す。

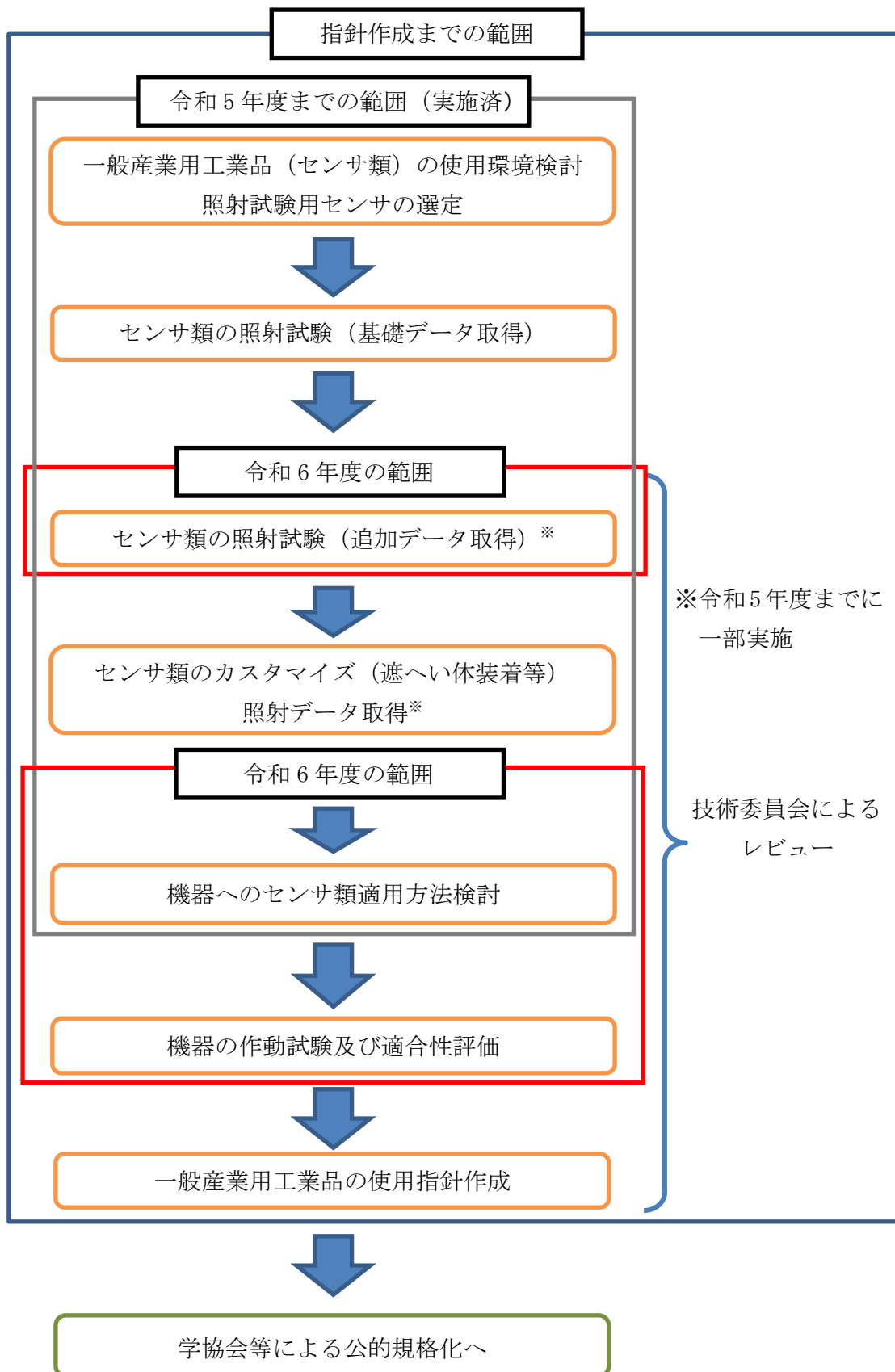


図 2.1-1 指針作成までの業務フロー

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

センサ類への遮へい体の装着等により、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及び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	●————●				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						●————●

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^[4]。令和 2 年度の実施内容の詳細について以下に示す。

2.3.1 センサ類の耐放射線性調査

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

2.3.2 センサ類の照射試験

(1) 照射試験結果

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

対象センサは光電センサ、近接センサ、トルクセンサ、測域センサの 4 種類とした。各センサについて吸収線量率、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	吸収線量率 50Gy/h		吸収線量率 75Gy/h		吸収線量率 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 (吸収線量率 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つ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 (吸収線量率 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（吸収線量率 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	231	260 (SD:22.0)
	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) 吸収線量率における影響評価

光電センサに対して、吸収線量率をパラメータとして照射試験を実施し、吸収線量率が高いほど、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ヵ年の実施計画及び2.3項に示した令和2年度の課題を踏まえて、放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針作成に資するセンサ類の耐放射線性に関する照射データの追加取得、センサ類のカスタマイズ及びその照射データ取得を実施した⁵⁾。令和3年度の実施内容の詳細について以下に示す。

2.4.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得

(1) 照射試験結果

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.	吸収線量率 ^{※1} [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 ^{※4:6})
光 5-2	4.63	822<		337	
光 5-3	4.63	822<		351	
光 50-1	48.5	408	427 (SD ^{※4:14})	260	283 (SD ^{※4:18})
光 50-2	49.9	439		278	
光 50-3	51.6	434		295	
光 100-1	102.1	429	428 (SD ^{※4:25})	297	274 (SD ^{※4:15})
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 ^{※2}	106.5	426	415 (SD ^{※4:18})	257	257 (SD ^{※4:1})
光 100-TB-2 ^{※2}	97.4	428		258	
光 100-TB-3 ^{※2}	97.4	390		256	
光 100-RL-1 ^{※3}	97.4	370	370 (SD ^{※4:16})	343	343 (SD ^{※4:6})
光 100-RL-2 ^{※3}	97.4	390		337	
光 100-RL-3 ^{※3}	97.4	351		351	

※1 アラニン線量計の測定結果から算出した値

※2 TB：上下方向の照射試験結果

※3 RL：左右方向の照射試験結果

※4 SD：標準偏差

表 2.4-2 近接センサ照射試験結果

No.	吸収線量率 ^{※1} [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 ^{※2}	684 (SD ^{※5} :188)	— ^{※3}	—
近 5-2		817		— ^{※3}	
近 5-3		817		— ^{※3}	
近 50-1	48.5	1165	1166 (SD ^{※5} :42)	1165 ^{※4}	1166 (SD ^{※5} :42)
近 50-2	49.9	1217		1217 ^{※4}	
近 50-3	51.6	1115		1115 ^{※4}	
近 100-1	102.1	1082	1252 (SD ^{※5} :210)	1082 ^{※4}	1207 (SD ^{※5} :182)
近 100-2	112.2	1571		1482	
近 100-3	116.1	1462		1265	
近 100-4	116.0	1485		1485 ^{※4}	
近 100-5	106.5	1385		1385 ^{※4}	
近 100-6	102.1	1143		1143 ^{※4}	
近 100-7	112.2	1010		1010 ^{※4}	
近 100-8	116.1	928		928 ^{※4}	
近 100-9	116.0	1323		1160	
近 100-10	106.5	1129		1129 ^{※4}	

※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。

※5 SD : 標準偏差

表 2.4-3 トルクセンサ照射試験結果

No.	吸収線量率※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※4:7)
ト 5-2		108.71	569	
ト 5-3		126.93	644<	
ト 50-1	49.1	4.00	196	164 (SD※4:46)
ト 50-2		4.00	196	
ト 50-3		2.00	98※3	
ト 100-1	102	1.20	123	127 (SD※4:6)
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。

※4 SD : 標準偏差

表 2.4-4 測域センサ照射試験結果

No.	吸収線量率※1 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]
測 5-1	4.63	42.90	199	208 (SD※2:7)
測 5-2		46.51	215	
測 5-3		45.19	209	
測 50-1	47.9	5.31	255	260 (SD※2:21)
測 50-2		4.97	238	
測 50-3		6.00	287	
測 100-1	113	2.25	255	249 (SD※2:8)
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※2:10)
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	

※1 アラニン線量計の測定結果から算出した値

※2 SD : 標準偏差

(2) 課題

1) 低吸収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種類の吸収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、もしくは吸収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.	吸収線量率 [Gy/h]	照射時間 ^{※1} [h]	集積 吸収線量 ^{※2} [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]	【参考】 カスタマイズしない 状態での平均集積 吸収線量[Gy]
光 100-カ-1	94.1	5.60	527	606 (SD ^{※3} :76.7)	428 (SD ^{※3} :25)
光 100-カ-2	111	6.40	710		
光 100-カ-3	112	5.20	582		

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

※2 センサを設置した位置での空間線量率を用いた値

※3 SD：標準偏差

表 2.4-6 カスタマイズした測域センサの照射試験結果

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

※1 センサを設置した位置での空間線量率を用いた値

※2 SD：標準偏差

(2) 遮へい解析コードを用いた遮へい評価結果

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%以内の誤差となった。

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/j]	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/j]	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%以内の誤差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%以内の誤差で一致する結果となった。

令和 3 年度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、令和 3 年度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⁶⁾。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.	吸収線量率 [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 ^{*1} :148)	600	617 (SD ^{*1} :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	吸収線量率 [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> ^{※1}	802 ^{※3} (SD ^{※4} :76)	検知不良	702> ^{※1}	789 ^{※3} (SD ^{※4} :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> ^{※1}		検知不良	702> ^{※1}	
7		4.42	779		検知不良	762	
8		4.43	710> ^{※1}		検知不良	710> ^{※1}	
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< ^{※2}	1012 ^{※5}	—	1426<	1289 (SD ^{※4} :209)
12		4.49	1447< ^{※2}		—	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 ^{※1} [h]	平均照射時間 [h]	【参考】照射時間 ^{※2} (カスタマイズ無し) [h]
1	140.3	150 (SD ^{※3} :17)	158 (SD ^{※3} :34)
2	135.7		
3	173.6		

※1 照射時間は出力電圧が 0V 付近まで低下した時間としている。

※2 参考として 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 SD：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.	吸収線量率 [Gy/h]	みなし集積 吸収線量 ^{※1} [Gy]	平均 みなし集積 吸収線量 [Gy]	【参考】平均集積 吸収線量 ^{※2} (カスタマイズ無し) [Gy]
1	4.45	624	667 (SD ^{※3} :75)	701 (SD ^{※3} :148)
2		604		
3		772		

※1 センサを設置した位置でのアラニン線量計により測定した吸収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 SD：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計算値は概ね 20%以内で一致した。

表 2.5-5 遮へい解析結果

測定位置	No.	計算値 [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、吸収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。

2.6 令和5年度の実施内容

2.6.1 一般産業用工業品の追加データ取得

(1) 照射試験結果

1) 通電状態及び入力電圧の影響評価のための照射試験結果

光電センサ及び近接センサに対して、通電状態及び入力電圧の影響評価のために照射試験を実施した。照射試験結果を表 2.6-1 から表 2.6-5 に示す^[7]。

表 2.6-1 光電センサ (5Gy/h・24V) の照射試験結果

センサ No.	吸収線量率 [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]	故障時の様子
		故障した時点	不具合発生前の時点			
光電 5_24V-1	4.66	164	486 (SD ^{※3} :202)	301 ^{※1}	603 ^{※2} (SD ^{※3} :73)	出力電圧低下
光電 5_24V-2	4.53	542		508		出力電圧低下
光電 5_24V-3	4.30	534		534		出力電圧低下
光電 5_24V-4	4.66	214		301 ^{※1}		出力電圧低下
光電 5_24V-5	4.59	570		570		出力電圧低下
光電 5_24V-6	4.66	198		301 ^{※1}		出力電圧低下
光電 5_24V-7	4.53	653		635		検知異常
光電 5_24V-8	4.30	682		672		出力電圧低下
光電 5_24V-9	4.66	733		728		出力電圧低下
光電 5_24V-10	4.59	570		570		出力電圧低下

※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

表 2.6-2 光電センサ (100Gy/h・12V) の照射試験結果

センサ No.	吸収線量率 [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]	故障時の様子
		故障を確認した時点		不具合発生前の時点		
光電 100_12V-1	96	567 ^{※1}	627 (SD ^{※2} :45)	567	626 (SD ^{※2} :46)	出力電圧低下
光電 100_12V-2	107	629 ^{※1}		629		出力電圧低下
光電 100_12V-3	114	563		556		出力電圧低下
光電 100_12V-4	114	673 ^{※1}		673		出力電圧低下
光電 100_12V-5	106	628 ^{※1}		628		出力電圧低下
光電 100_12V-6	96	567 ^{※1}		567		出力電圧低下
光電 100_12V-7	107	650 ^{※1}		650		出力電圧低下
光電 100_12V-8	114	670 ^{※1}		670		出力電圧低下
光電 100_12V-9	114	695 ^{※1}		695		出力電圧低下
光電 100_12V-10	106	628 ^{※1}		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 2.6-3 光電センサ (100Gy/h・非通電) の照射試験結果

センサ No.	吸収線量率 [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]	故障時の様子
		故障を確認した時点		不具合発生前の時点		
光電 100_非-1	96	1336	1153 (SD ^{※1} :80)	1288	1050 (SD ^{※1} :94)	出力電圧低下
光電 100_非-2	107	1162		1055		出力電圧低下
光電 100_非-3	114	1124		1010		出力電圧低下
光電 100_非-4	114	1129		1015		出力電圧低下
光電 100_非-5	106	1054		947		出力電圧低下
光電 100_非-6	96	1144		1048		出力電圧低下
光電 100_非-7	107	1055		948		出力電圧低下
光電 100_非-8	114	1124		1010		出力電圧低下
光電 100_非-9	114	1243		1129		出力電圧低下
光電 100_非-10	106	1160		1054		出力電圧低下

※1 SD : 標準偏差

表 2.6-4 近接センサ (100Gy/h・12V) の照射試験結果

センサ No.	吸収線量率 [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]		故障時の様子
				故障した時点	不具合発生前の時点	
近接 100_12V-1	96	4480	4064 ^{※1} (SD ^{※2} :1423)	2942	3107 (SD ^{※2} :851)	出力電圧低下
近接 100_12V-2	107	4966		3261		出力電圧低下
近接 100_12V-3	114	5290		3473		出力電圧低下
近接 100_12V-4	114	5313		3489		出力電圧低下
近接 100_12V-5	106	4961		3258		出力電圧低下
近接 100_12V-6	96	1904		1884		検知異常
近接 100_12V-7	107	2100		2089		検知異常
近接 100_12V-8	114	2248		2225		検知異常
近接 100_12V-9	114	5313		3489		出力電圧低下
近接 100_12V-10	106	4961		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 2.6-5 近接センサ (100Gy/h・非通電) の照射試験結果

センサ No.	吸収線量率 [Gy/h]	不具合発生前の集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
近接 100_非-1	96	2903	3242 (SD ^{※1} :195)
近接 100_非-2	107	3218	
近接 100_非-3	114	3428	
近接 100_非-4	114	3443	
近接 100_非-5	106	3215	
近接 100_非-6	96	2903	
近接 100_非-7	107	3218	
近接 100_非-8	114	3428	
近接 100_非-9	114	3443	
近接 100_非-10	106	3215	

※1 SD : 標準偏差

2) ドローンの照射試験

ドローンの照射試験結果を表 2.6-6 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 2.6-7 に示す。

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。

表 2.6-6 ドローンの照射試験結果

No.	吸収線量率 [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 2.6-7 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

(2) 課題

照射試験結果に関する課題は委員会コメントを踏まえたものであるため、2.6.3 項にまとめて記載する。

2.6.2 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

測域センサのカスタマイズ試験結果を表 2.6-8 に示す。令和 5 年度の試験条件ではカスタマイズによって測域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。

表 2.6-8 測域センサのカスタマイズ試験結果

試験条件	吸収線量率 [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

(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 2.6-9 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 2.6-9 遮へい解析結果

測定位置	照射方向	計算値 [Gy/h]	測定値 [Gy/h]	比率 (計算値/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

(3) 課題

カスタマイズ試験結果に関する課題は委員会コメントを踏まえたものであるため、2.6.3 項にまとめて記載する。

2.6.3 第1回技術委員会の実施

(1) 第1回技術委員会結果

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。

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、線量の記載方針について検討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必要があった。

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、吸収線量率、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った。

(2) 課題

1) 故障原因調査の実施

令和5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。測域センサでは吸収線量率に依らず、耐放射線性のばらつきが小さいことを確認した。光電センサでは、吸収線量率に依らず、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た。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、吸収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たが、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と考えられた。

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た。

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り、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と考えられた。

2) 機器への適用性検討、作動試験の実施

令和5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。

令和5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と考えられた。

また、令和5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と考えられた。

3. 令和 6 年度の実施内容

3.1 耐放射線性データの追加取得

令和 5 年度までの照射試験で得られた耐放射線性データにばらつきが確認されている。特にメーカー間の影響については令和 2 年度に比較評価を実施したが、センサ構造等の違いによる耐放射線性もしくは故障時の挙動の差異は確認されていない。そこで、ばらつきが大きいと評価されたメーカー間の耐放射線性の比較評価のため、耐放射線性データを追加取得した。

3.2 簡易遮へい評価手法の適用方法検討

令和 5 年度までの照射試験にてセンサに対してカスタマイズを行い、MCNP による遮へい解析との比較評価を行ってきた。MCNP では概ね 20%以下の誤差でカスタマイズ時の吸収線量率を再現できることを確認した。しかし、MCNP による評価では、照射試験結果と誤差が小さい方が望ましい。令和 5 年度に実施した技術委員会の中で、MCNP と照射試験結果の誤差の要因として、線量計特性があげられた。そこで、照射試験に用いるガラス線量計特性を評価した。

また、一般産業用工業品の耐放射線性を評価する際にはより簡易的に評価できることが望ましい。そこで、簡易遮へい評価手法について検討し、その適用性を評価した。

3.3 故障原因調査の実施

令和 5 年度までの照射試験結果から、放射線照射によるセンサの故障挙動を確認し、照射パラメータの耐放射線性への影響を評価した。光電センサにおいては、令和 2 年度の故障調査で、電源回路部のトランジスタ及びダイオードに破損が確認された。ここで、光電センサ故障時には出力電圧の低下及び検知異常等の故障挙動が確認されており、故障箇所の違いが故障挙動の違いに影響を与えていると考えられるが、そのメカニズムについては明らかとなっていない。そこで、追加照射試験を行い、各センサの故障原因調査を実施するとともに、センサの故障メカニズムの検討を行った。

3.4 カスタマイズしたセンサの作動試験の実施

令和 5 年度までの照射試験では、センサ単体の耐放射線性データ取得及びカスタマイズを行ってきた。しかし、実環境では機器に付属するセンサを対象にカスタマイズを行い、耐放射線性を向上させる必要がある。そこで、機器に付属するセンサへのカスタマイズを実施し、作動試験により適合性を評価した。

3.5 技術委員会の実施

使用指針案の作成に向けて、3.1 項から 3.4 項で取得した耐放射線性データ、簡易遮へい評価手法の評価結果及び実機へのカスタマイズの適合性について技術委員会で審議を行った。

4. 耐放射線性データの追加取得

4.1 概要

令和5年度までに実施した照射試験の課題から、センサメーカー間の耐放射線性のばらつきを評価するための試験条件（照射時間、吸収線量率、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。試験は設定した吸収線量率で照射し、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 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※1 [Gy]
	吸収線量率 [Gy/h]	電圧 [V]	サンプル数		
光電センサ	50	24	5	40	2000
	100	24	5	20	2000
近接センサ	50	24	5	60	3000
	100	24	5	30	3000
測域センサ	50	24	3	8	400
	100	24	3	4	400

※1 照射上限に達しても正常に動作していた場合は、動作確認間隔等を見直したうえで、試験の進捗上可能であれば照射を継続した。

4.2.1 対象センサ

令和2年度の試験結果より光電センサではメーカー間での耐放射線性のばらつきが確認された。一方で、近接センサ及び測域センサではメーカー間でほとんど耐放射線性のばらつきが確認されなかった。そこで、メーカー間での耐放射線性への影響を確認するため、メーカー間で影響がみられたセンサ及びみられなかったセンサの両者の試験を行うこととした。追加データ取得対象センサとして、光電センサ、近接センサ及び測域センサを選定した。各センサについては、令和2年度の照射試験で耐放射線性が低いと評価されたメーカーのセンサを対象に、令和3年度から5年度に照射試験パラメータの影響を評価したが、本年度は令和2年度の試験において耐放射線性が高いと評価されたメーカーのセンサを対象とした。

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、測域センサの概略図を図4.2-3に示す。

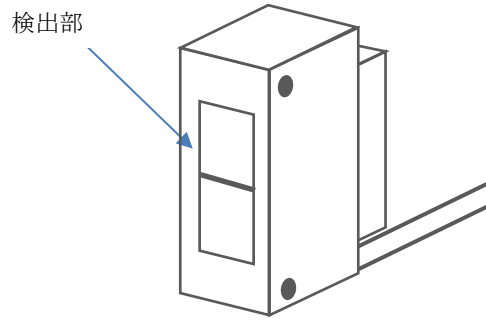


図 4.2-1 光電センサ概略図

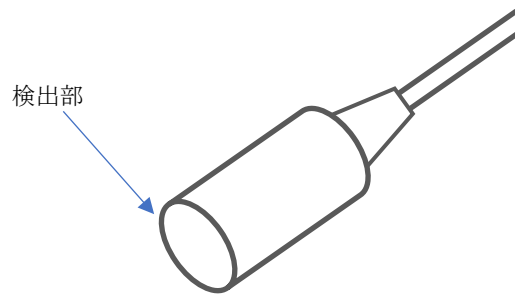


図 4.2-2 近接センサ概略図

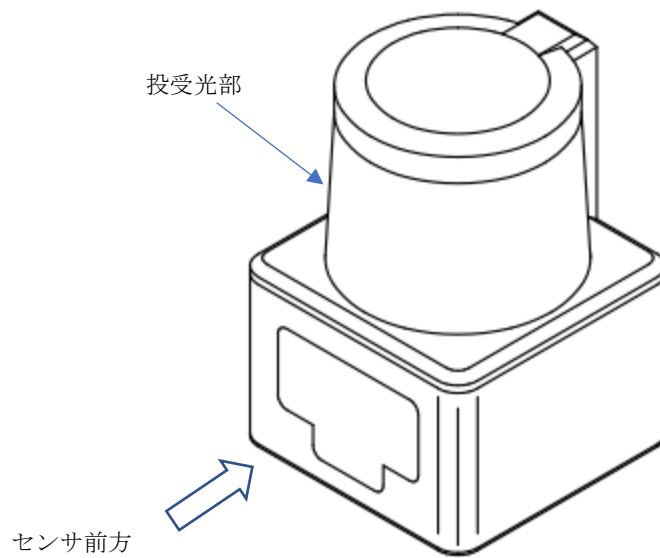


図 4.2-3 測域センサ概略図

4.2.2 吸収線量率、照射上限

令和2年度にメーカー間の耐放射線性比較のため、光電センサでは50Gy/h、75Gy/h、150Gy/h、その他のセンサでは50Gy/hの吸収線量率で耐放射線性データを取得した。また、令和3年度から5年度の照射試験において、5Gy/hから100Gy/hの吸収線量率で、その他の照射パラメータを変化させながら各センサの耐放射線性データを取得した。

本照射試験では、使用指針案策定及びセンサ類の耐放射線性データ取得のための照射試験として、現実的に到達可能な照射上限を設定し、センサの故障する集積吸収線量を推定することを目的とした。

光電センサ及び近接センサでは、吸収線量率の耐放射線性への影響が確認されているが、吸収線量率によるばらつきのおおさは同程度であり、これまでの試験結果から吸収線量率の影響を推定することができると考えられる。従って、効率的な耐放射線性データ取得のため、今回の照射試験における吸収線量率を50Gy/h及び100Gy/hと設定した。

各センサ類の試験期間は、令和5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示す。

(1) 光電センサ

本年度照射する光電センサは、令和2年度の通電状態での照射試験において、最大1710Gyでも故障が確認されず、正常に動作することを確認した。一方で、別メーカーの光電センサに関しても、令和3年度から5年度の照射試験のうち、通電状態で行った全ての試験条件において1000Gy以下で故障が確認された。

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の上限値を2000Gyと設定した。

(2) 近接センサ

本年度照射する近接センサは、令和2年度の照射試験において、1072Gyまで正常に動作することを確認した。一方で、別メーカーの近接センサに関しては、令和3年度から5年度の照射試験のうち、通電状態で行った全ての試験条件において、1台のセンサを除き3489Gy以下で故障が確認された。ただし、3000Gy以上の耐放射線性を有すると評価されたのは、昨年度実施した100Gy/h・12Vの試験のみであり、24Vの試験条件では概ね2000Gy以下で故障が確認された。

この結果を踏まえて、本試験の照射条件として用いる吸収線量率量の上限を3000Gyと設定した。

(3) 測域センサ

今回照射する測域センサは、令和 2 年度の照射試験において、最大 278Gy で故障が確認された。一方で、別メーカーの測域センサに関しても、令和 3 年度から 5 年度の照射試験の全ての試験条件において、278Gy 以下で故障が確認された。

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の上限値を 400Gy と設定した。

4.2.3 サンプル数

令和 2 年度の試験結果から、同一の試験条件においては、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 年度から 5 年度の試験では、ばらつきについて定量評価するため、光電センサ及び近接センサではサンプル数を 10、測域センサではサンプル数を 3 と設定した。ここで、同一の試験条件によるセンサのばらつきは定量評価が可能であることを確認した。

令和 6 年度の照射試験においては、メーカー間の耐放射線性の比較評価のため、サンプル数は 1 条件につき光電センサ及び近接センサで 5、測域センサで 3 とした。

4.3 照射試験場所

立案した照射試験条件及び方法で照射試験が実施可能な照射試験場所として、令和 5 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技術基盤研究所（2024 年 4 月 1 日に名称変更）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た状態で、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、計画している吸収線量率 50Gy/h 及び 100Gy/h の試験実施が可能である。

4.4 照射試験方法

4.4.1 センサ配置

本施設では、線源からの距離に応じた吸収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 50Gy/h 及び 100Gy/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した。線源を中心に円周上にセンサを設置するが、光電センサ及び近接センサは、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吸収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、線源中心が最も吸収線量率が高くなり、線源中心から上下に離れるほど吸収線量率が低くなる。従って、吸収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吸収線量率を求めた。

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165mm、50Gy/hの試験では240mmとして設定した。光電センサ及び近接センサのスタンドへの取付け図を図4.4-1に示す。

照射試験時のセンサ配置図を図4.4-2から図4.4-9に示す。また、照射試験時のセンサの様子を図4.4-10から図4.4-16に示す。

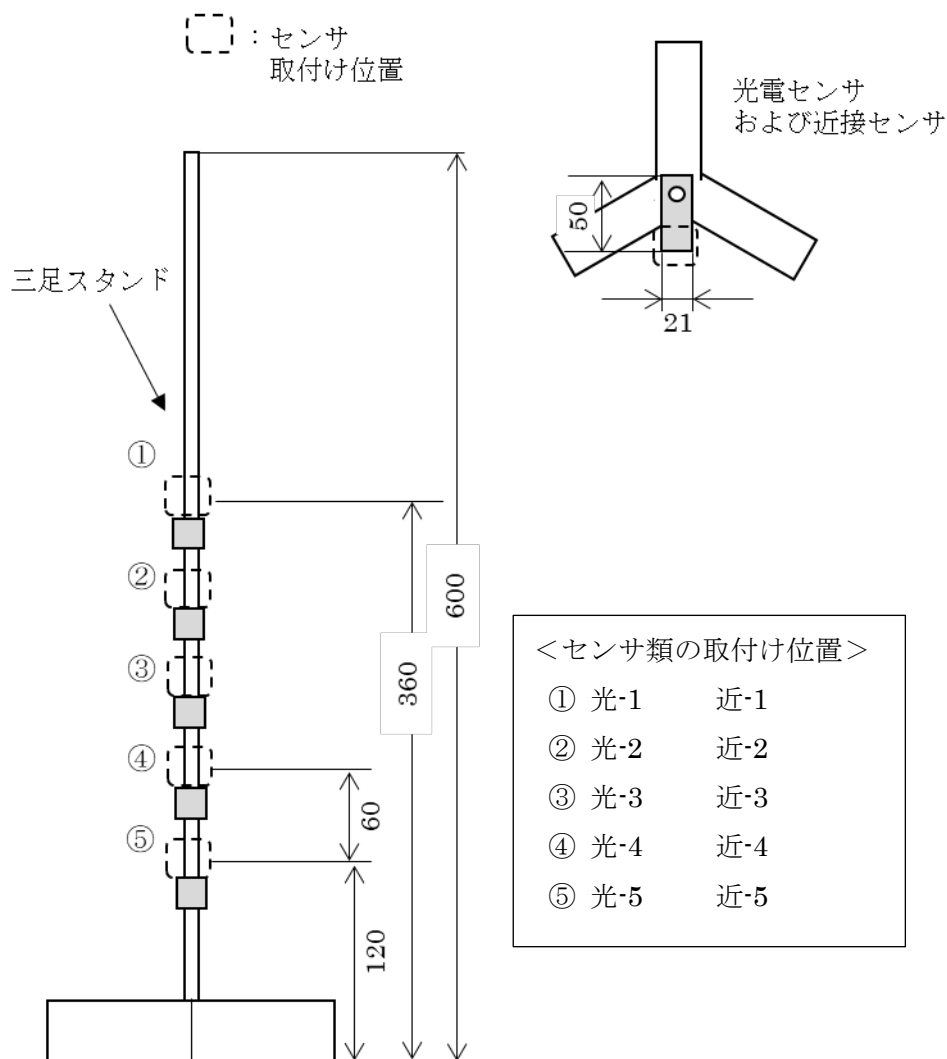


図 4.4-1 光電センサ・近接センサ取付け図

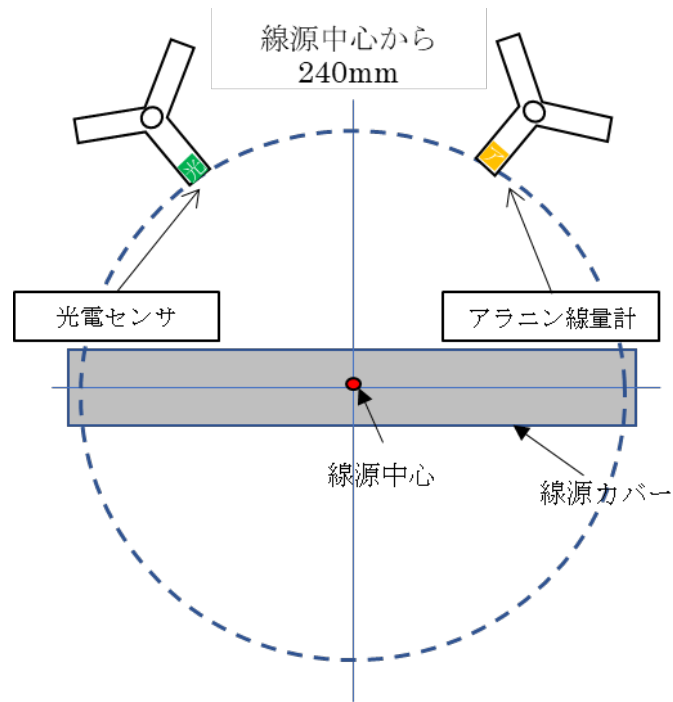


図 4.4-2 センサ配置図 (光電センサ 50Gy/h)

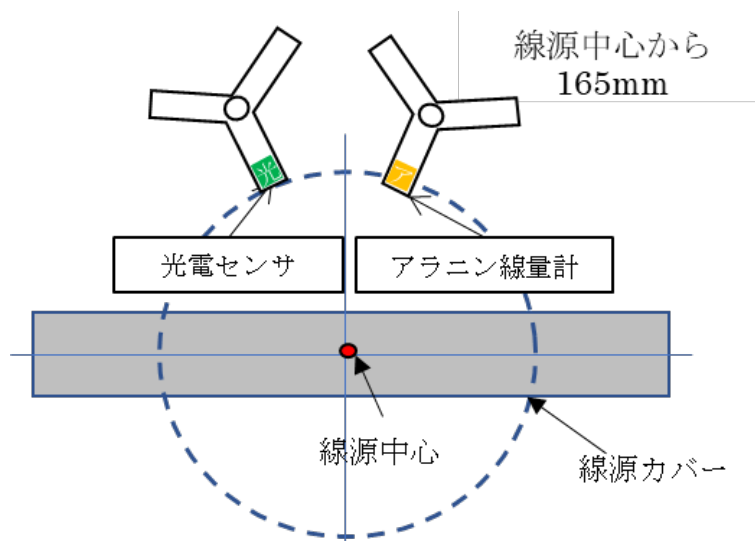


図 4.4-3 センサ配置図 (光電センサ 100Gy/h)

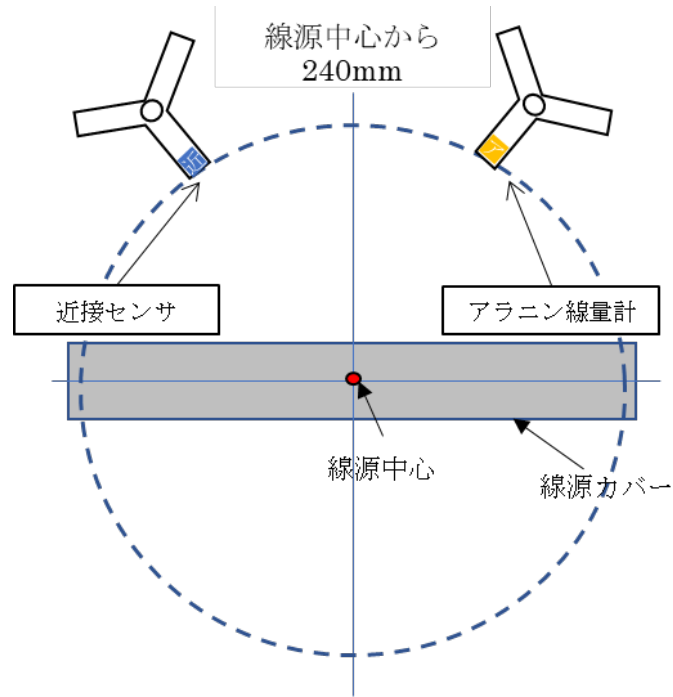


図 4.4-4 センサ配置図 (近接センサ 50Gy/h)

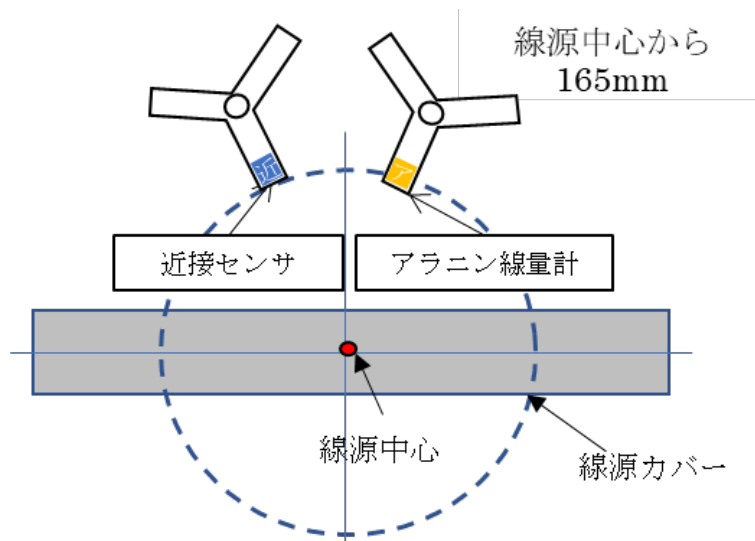


図 4.4-5 センサ配置図 (近接センサ 100Gy/h)

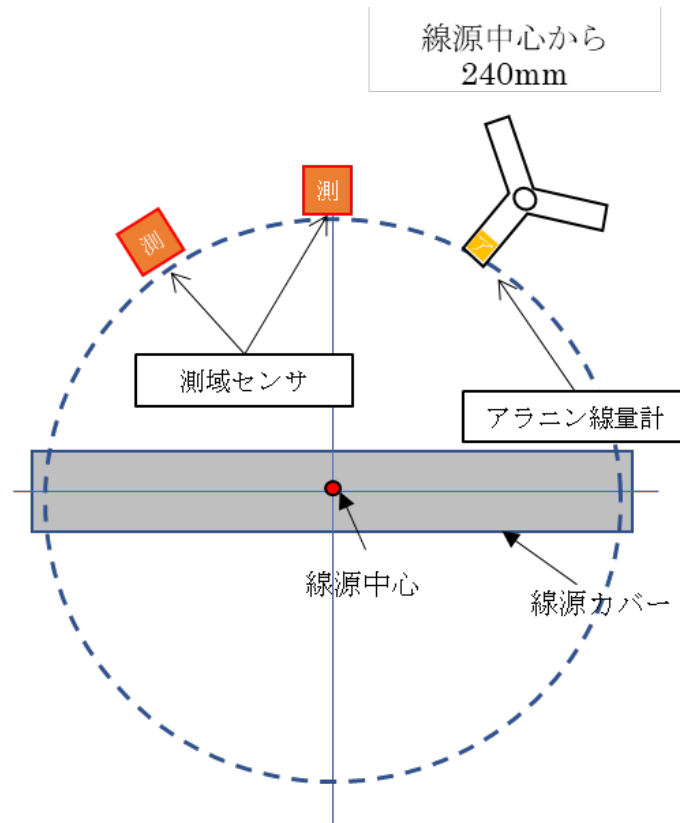


図 4.4-6 センサ配置図 (測域センサ 50Gy/h : No.1,2)

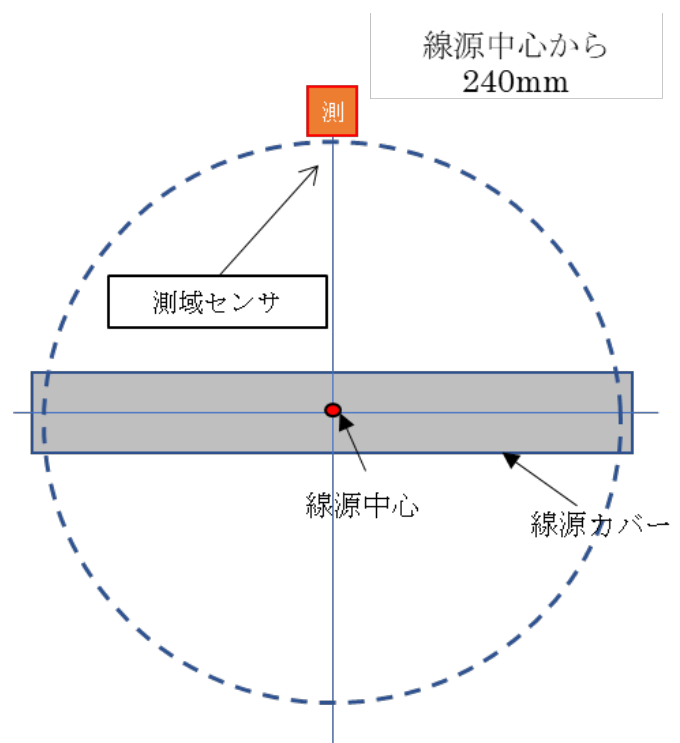


図 4.4-7 センサ配置図 (測域センサ 50Gy/h : No.3)

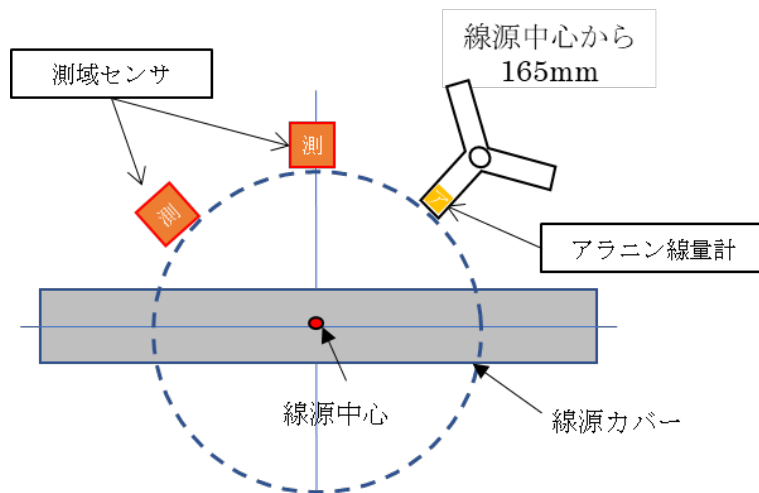


図 4.4-8 センサ配置図 (測域センサ 100Gy/h : No.1,2)

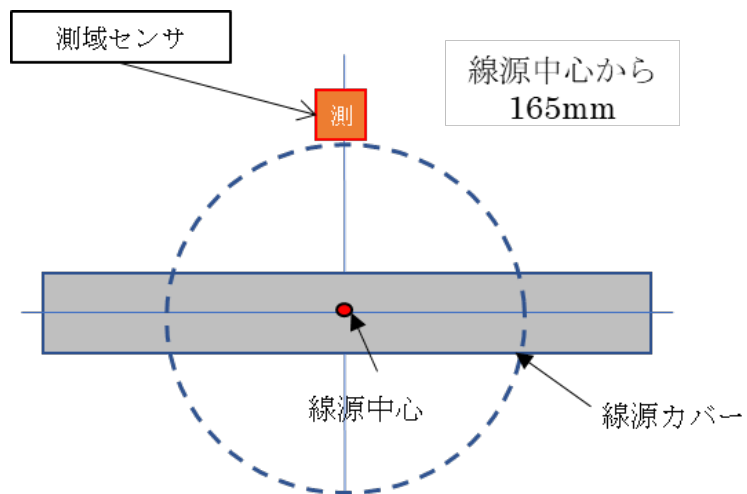


図 4.4-9 センサ配置図 (測域センサ 100Gy/h : No.3)

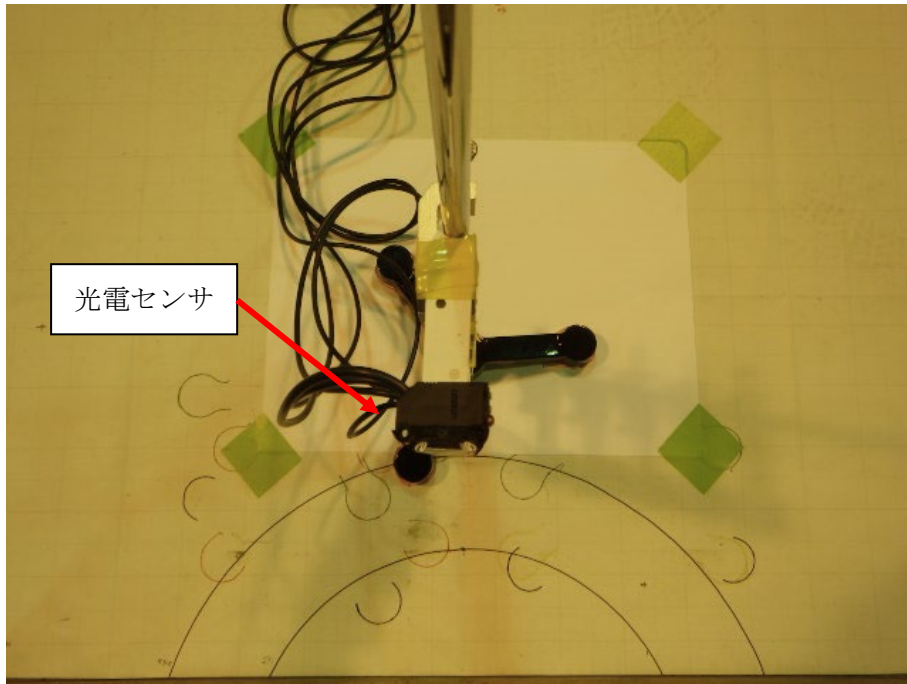


図 4.4-10 照射試験状況写真 (光電センサ 50Gy/h)

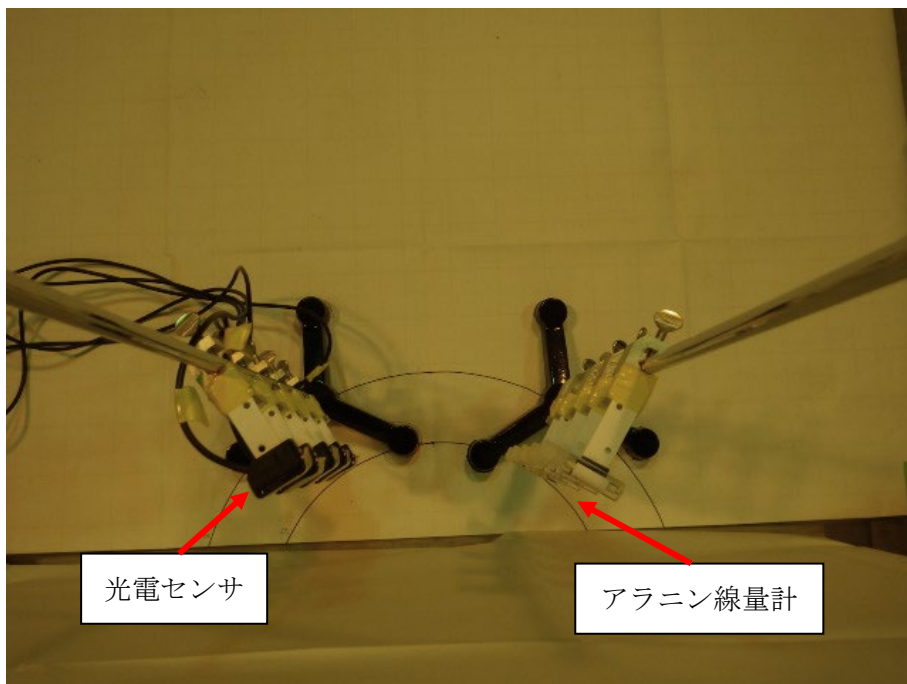


図 4.4-11 照射試験状況写真 (光電センサ 100Gy/h)

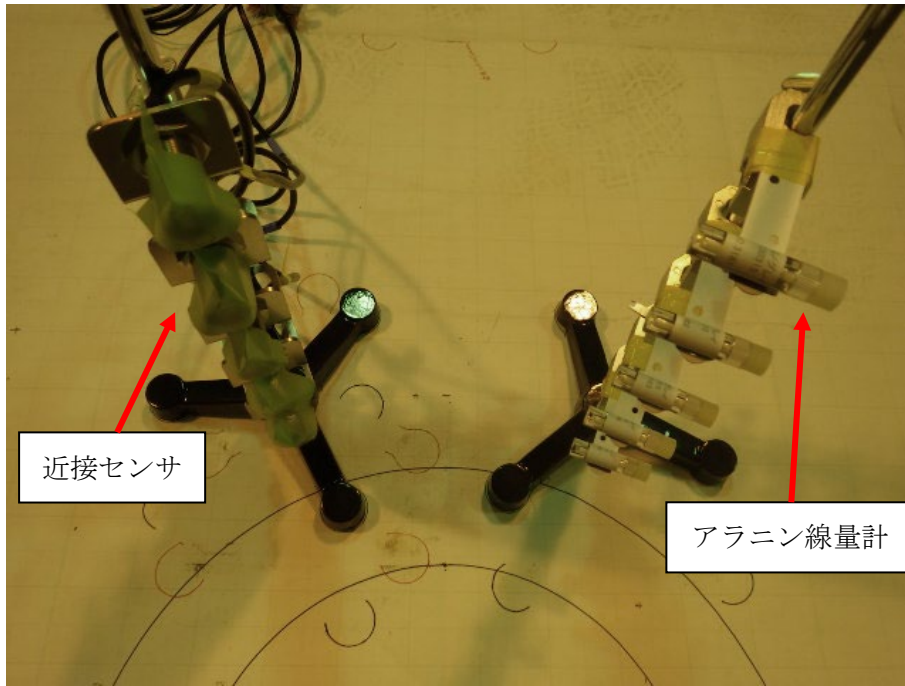


図 4.4-12 照射試験状況写真 (近接センサ 50Gy/h)

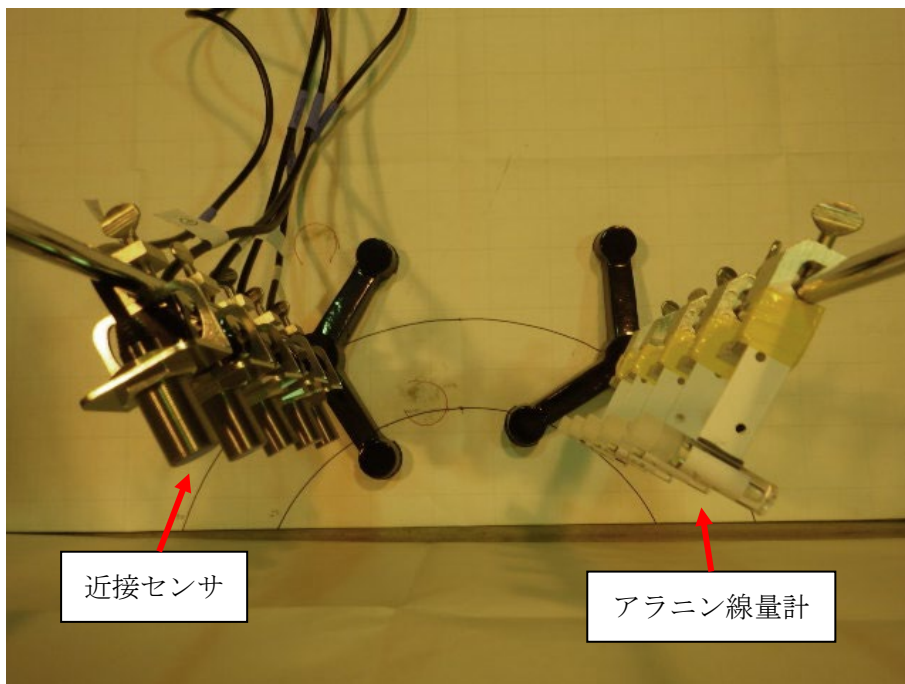


図 4.4-13 照射試験状況写真 (近接センサ 100Gy/h)

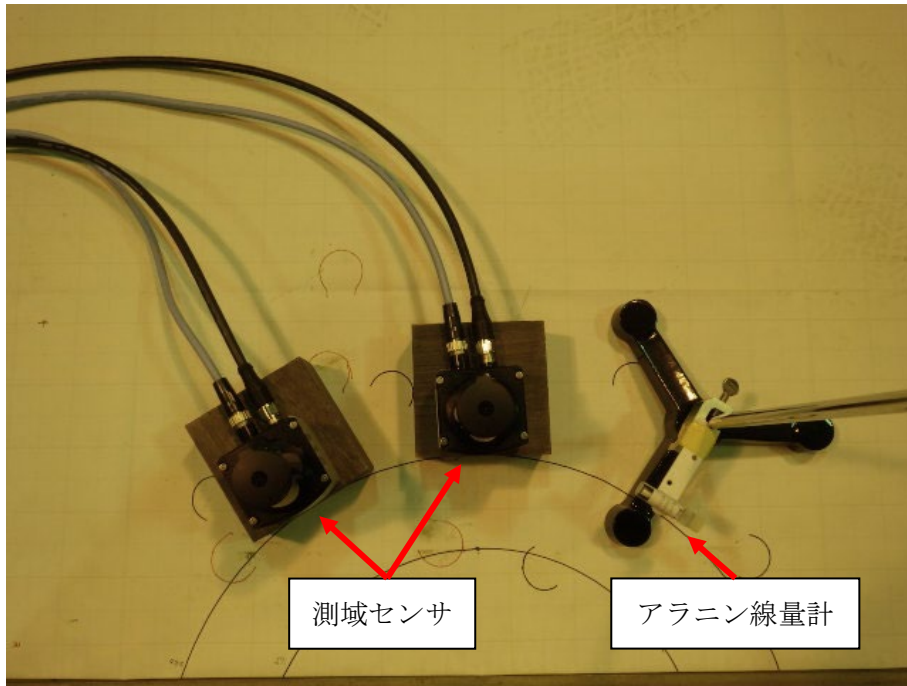


図 4.4-14 照射試験状況写真 (測域センサ 50Gy/h : No1,2)

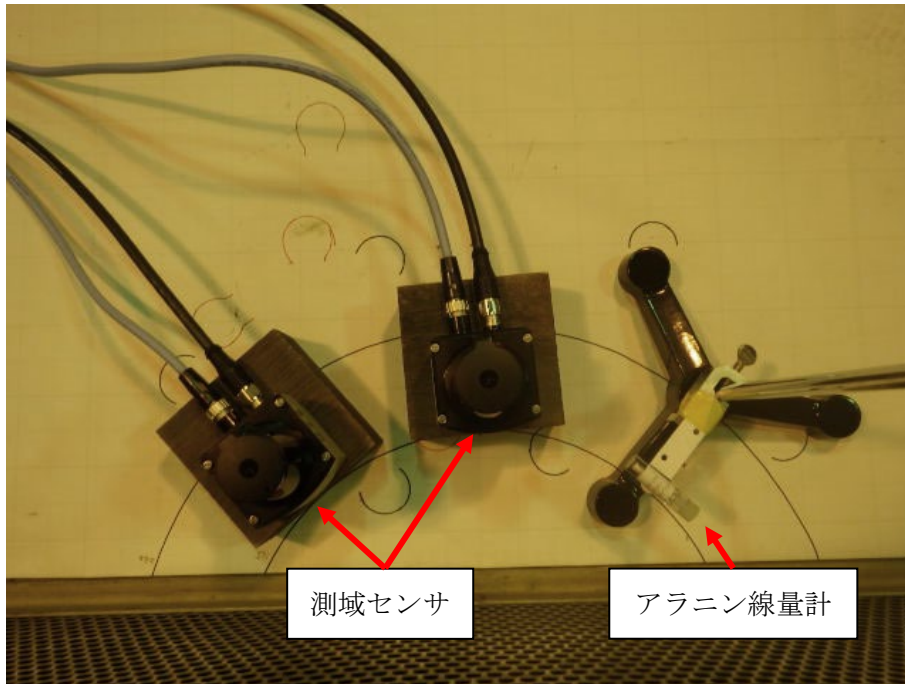


図 4.4-15 照射試験状況写真 (測域センサ 100Gy/h : No.1,2)

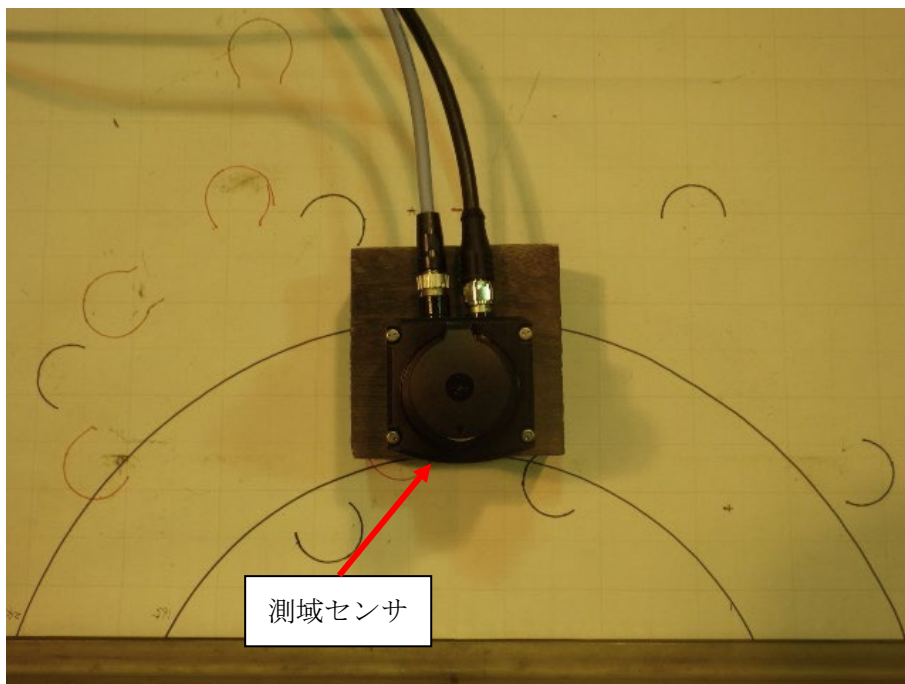


図 4.4-16 照射試験状況写真 (測域センサ 100Gy/h : No.3)

4.4.2 データ取得

照射試験の出力データとして、光電センサ及び近接センサでは電圧を、測域センサでは距離データを記録した。また、光電センサ及び近接センサでは、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を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した。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 4.4-1 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 4.4-1 照射試験データ取り及び動作確認頻度

センサ	吸収線量率 [Gy/h]	取得データ	動作確認		照射上限 ^{※2} [Gy]
			頻度 ^{※1} [Gy 毎] (集積吸収線量[Gy])	確認内容	
光電センサ	50	電圧 ^{※3}	100 (300-500) 50 (500-2000)	・検知状態の ON/OFF ・検出距離測定	2000
	100	電圧 ^{※3}	100 (300-1000) 50 (1000-2000)	・検知状態の ON/OFF ・検出距離測定	2000
近接センサ	50	電圧 ^{※3}	100 (700-2000) 50 (2000-3000)	・検知状態の ON/OFF	3000
	100	電圧 ^{※3}	100 (700-2000) 50 (2000-3000)	・検知状態の ON/OFF	3000
測域センサ	50	距離データ	— ^{※4}	—	400
	100	距離データ	— ^{※4}	—	400

※1 100Gy 毎の動作確認において、いずれかのセンサの故障が確認された場合、動作確認頻度を 50Gy 毎に変更した。

※2 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した。

※3 照射中は光電センサ、近接センサの検知状態 ON の電圧を測定した。

※4 測域センサはエラーメッセージもしくは出力される距離データの異常により故障の判断が可能のため、動作確認を行わない。

(1) 光電センサ

本試験で試験対象とする光電センサは 3 線式であり、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 4.4-17 に示す。

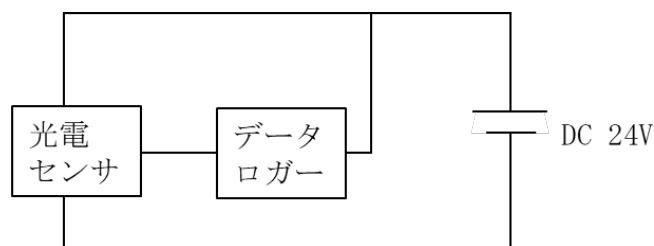


図 4.4-17 光電センサの試験用電気回路図

<出力データの記録方法>

照射中は光電センサの投受光部をテープで遮光することで常に検知状態とし、データロガーにより電圧を連続測定した。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、白紙を用いて ON/OFF させ、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の検出距離をコンベックスで測定した。センサ仕様上は 30cm×30cm の白紙に対し 1m の検出距離を有するが、令和 3 年度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 4.4-1 に従い実施した。なお、令和 5 年度までの試験において 100Gy/h では 300Gy を超えたあたりで動作確認時の動作不良が確認された。一方で、今年度照射を行う光電センサは、令和 2 年度の試験で、少なくとも 1045Gy 以上の耐放射線性を有していることを確認した。そこで、300Gy から 1000Gy までは故障する可能性が小さいと予想されるため、動作確認頻度を 100Gy 毎と設定した。また、1000Gy 以上では、故障時の集積吸収線量をより正確に把握するため、動作確認頻度を 50Gy 毎と設定した。なお、本年度照射試験を行うセンサは、令和 2 年度の試験で耐放射線性が高いと評価されたセンサであり、耐放射線性が優れていると予想されるため、動作確認頻度を令和 5 年度までより長い 50Gy 毎と設定した。

<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。

(2) 近接センサ

本試験で試験対象とする近接センサは 2 線式であり、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 4.4-18 に示す。

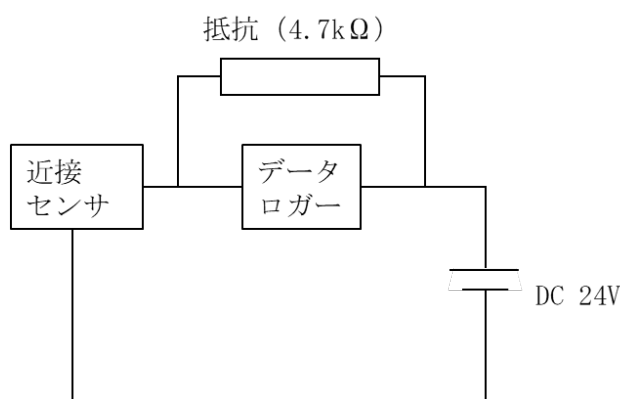


図 4.4-18 近接センサの試験用電気回路図

<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した。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、検知時に約 21V、非検知時に約 2V もしくは 14V 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 4.4-1 に従い実施した。なお、令和 5 年度までの試験では 700Gy を超えたあたりで動作確認時の検知電圧不良が確認された。一方で、本年度照射する近接センサは令和 2 年度の試験で、少なくとも 1072Gy 以上の耐放射線性を有していることを確認した。これまでの照射試験結果から、近接センサは光電センサと比較して、耐放射線性が優れていることを確認しており、700Gy から 2000Gy までは故障する確率が小さいと予想できるため、動作確認頻度を 100Gy 毎と設定し、2000Gy 以上では動作確認頻度を 50Gy 毎と設定した。また、本年度照射試験を行うセンサは、令和 2 年度の試験で耐放射線性が高いと評価されたセンサであり、耐放射線性が優れていると予想されるため、動作確認頻度を令和 5 年度までより長い 50Gy 毎と設定した。

<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。

(3) 測域センサ

本試験で試験対象とする測域センサは、PC とイーサネットケーブルで接続することで距離データが出力される。測域センサの電気回路図を図 4.4-19 に示す。



図 4.4-19 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。測域センサの距離データは専用のアプリケーションを用いて記録される。この時、測定間隔は 1 秒毎に設定した。

<照射終了基準>

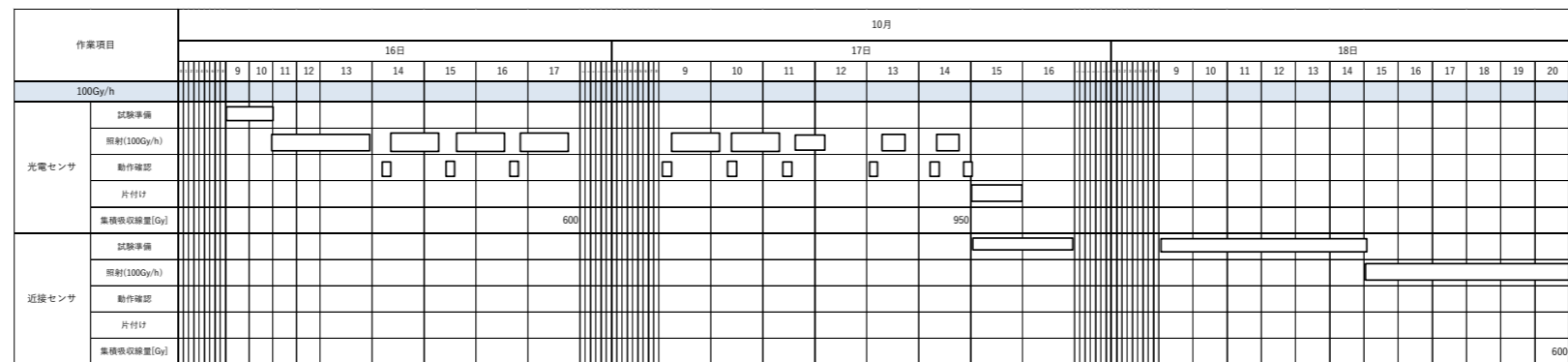
測域センサは、PC で正常な距離データが検出できなくなった場合、データの取り込みが停止する。また、データの取り込みが行われている場合でも、一度測定を停止し、PC との接続を解除すると、センサと PC が再接続できなくなる事象が発生した。

従って、データ取り込みが停止するもしくはセンサとの接続が不可となった時点で照射終了とした。

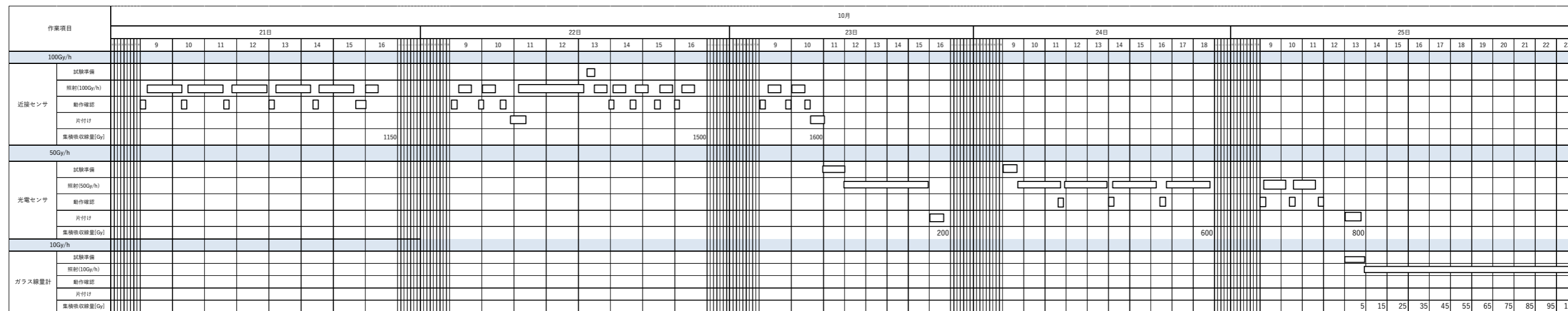
また、上記基準を満たさずとも照射上限に達した時点で照射終了とするが、照射上限に達しても正常に動作していた場合は、試験の進捗上可能であれば照射を継続した。

4.5 照射試験工程実績

照射試験工程実績を図 4.5-1 に示す。なお、工程実績は 5.1 項から 5.3 項のガラス線量計に対する照射試験も含む。



(10/16 (水) - 10/18 (金))



(10/21 (月) - 10/25 (金))

図 4.5-1 照射試験工程実績

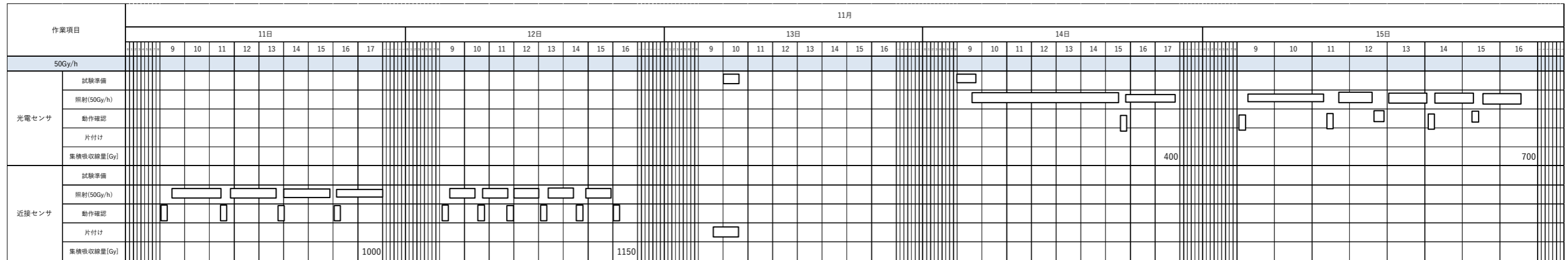
作業項目	10月																												11月																																																																																																																																																																									
	28日							29日							30日							31日							1日																																																																																																																																																																									
100Gy/h																																																																																																																																																																																																						
測域センサ	試験準備																																																																																																																																																																																																					
	照射(100Gy/h)																																																																																																																																																																																																					
	動作確認																																																																																																																																																																																																					
	片付け																																																																																																																																																																																																					
集積吸収線量[Gy]																								400																																																																																																																																																																														
50Gy/h																																																																																																																																																																																																						
測域センサ	試験準備																																																																																																																																																																																																					
	照射(50Gy/h)																																																																																																																																																																																																					
	動作確認																																																																																																																																																																																																					
	片付け																																																																																																																																																																																																					
集積吸収線量[Gy]																								400																																																																																																																																																																														
最大25Gy/h																																																																																																																																																																																																						
ガラス線量計	試験準備																																																																																																																																																																																																					
	照射(25Gy/h)																																																																																																																																																																																																					
	動作確認																																																																																																																																																																																																					
	片付け																																																																																																																																																																																																					
集積吸収線量[Gy]	25	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500																								500																																																																																																																																																										
最大67Gy/h																																																																																																																																																																																																						
ガラス線量計 アラニン線量計	試験準備																																																																																																																																																																																																					
	照射(67Gy/h)																																																																																																																																																																																																					
	動作確認																																																																																																																																																																																																					
	片付け																																																																																																																																																																																																					
集積吸収線量[Gy]	67																							134																									201																									268																									335																									402																									469																									536																								

(10/28 (月) - 11/1 (金))

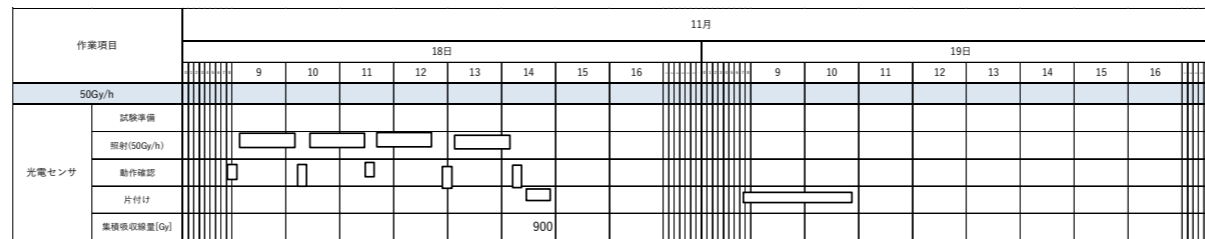
作業項目	11月																											
	5日							6日							7日							8日						
50Gy/h																												
近接センサ	試験準備																											
	照射(50Gy/h)																											
	動作確認																											
	片付け																											
集積吸収線量[Gy]	600							1000							1150							600						
50Gy/h																												
測域センサ	試験準備																											
	照射(50Gy/h)																											
	動作確認																											
	片付け																											
集積吸収線量[Gy]																												

(11/5 (火) - 11/8 (金))

図 4.5-1 照射試験工程実績 (その2)



(11/11 (月) - 11/15 (金))



(11/18 (月) - 11/19 (火))

図 4.5-1 照射試験工程実績 (その3)

5. 簡易遮へい評価手法の適用方法検討

令和 5 年度までの遮へい体内部のガラス線量計の吸収線量率は、測定結果と比較し、計算値が大きくなる傾向が確認された。ガラス線量計は方向特性を持つことが知られているため、照射試験により方向特性を評価した。

また、遮へい体外部のガラス線量計の吸収線量率は、測定結果と比較し、計算値が小さくなる傾向が確認された。ガラス線量計は高線量（～数百 Gy）照射時、低線量（～数 Gy）照射時と比較して低レスポンスとなることが知られているため、高線量照射時のガラス線量計の吸収線量率を対象に、測定値及び計算値を比較することで、高線量下におけるガラス線量計の吸収線量特性を評価した。

遮へい解析において、線量計組成が解析結果に影響を与えている可能性が考えられた。そこで、令和 5 年度までに実施した遮へい解析に対して、線量計組成を考慮した場合の再解析を実施し、線量計組成を考慮しない場合との比較評価を実施した。また、吸収線量特性評価のためのガラス線量計試験についても、線量計組成を考慮した解析を実施した。

令和 5 年度までは MCNP を用いて、カスタマイズしたセンサの遮へい解析を実施した。本年度は、簡易計算コード及び評価式を用いた簡易遮へい評価手法について適用性を評価した。

5.1 ガラス線量計の方向特性評価のための試験条件

5.1.1 吸収線量率、照射上限

今回照射するガラス線量計は、100Gy まで測定可能であるため、照射上限は 100Gy と設定した。また、吸収線量率は 10Gy/h とし、照射時間は 10 時間とした。

5.1.2 ガラス線量計配置

ガラス線量計の X 線測定に対する方向特性の例を図 5.1-1 に示す^[8]。左図が感度補償フィルタなし、右図が感度補償フィルタありの方向特性である。本年度照射試験を行うガラス線量計は感度補償フィルタなしの線量計であり、照射角度が大きくなるとレスポンスが低下する傾向がある。また、左右方向の特性についてはガラス線量計を識別するための ID 部分のガラスが X 線を吸収すると考えられるため、差異が生じる。これらを踏まえ、 -90° から 90° のレスポンスを評価することとし、ガラス線量計素子の ID 記載面から照射した場合を -90° と設定した。

なお、感度補償フィルタありのガラス線量計では 0° 付近はフィルタを介さず直接光子が入射するため、相対的に高いレスポンスとなっている。

方向特性の評価のため、線量計の角度を -90° から 90° まで 30° 毎に角度を変化させて、照射を行った。また、ばらつきの評価のため、180cm から 60cm 毎の 4 つの測定高さにおいて、線量計のレスポンスを測定し、方向特性を評価した。

ガラス線量計の配置図を図 5.1-2 に示す。また、照射試験時のガラス線量計の様子を図 5.1-3 及び図 5.1-4 に示す。

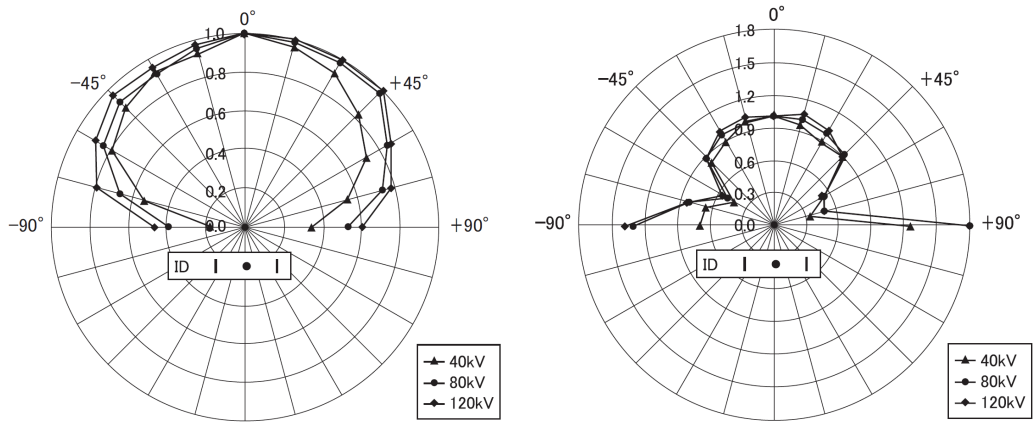


図 5.1-1 ガラス線量計方向特性例

(左図：感度補償フィルタなし 右図：感度補償フィルタあり) [8]

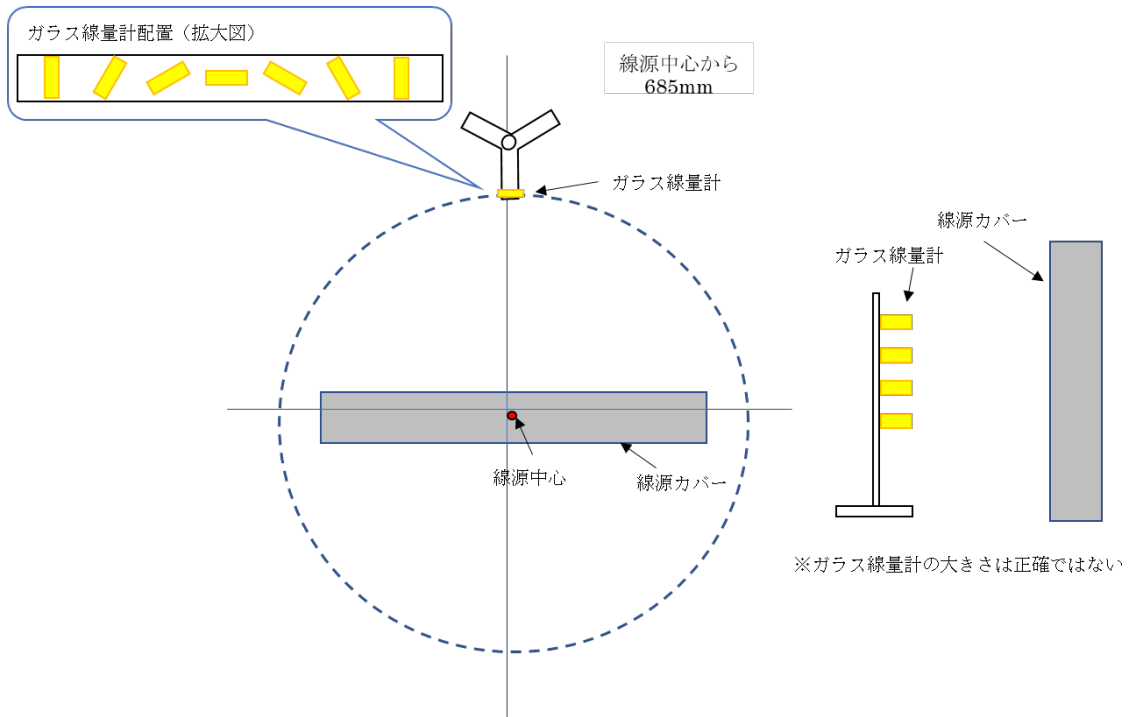


図 5.1-2 方向特性評価のためのガラス線量計の照射試験配置図

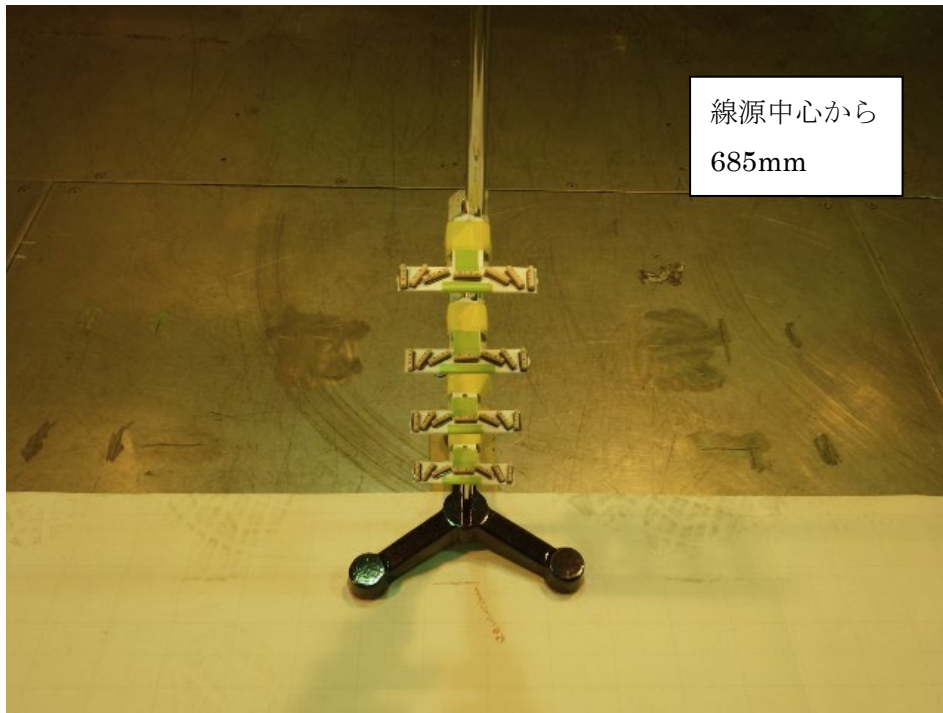


図 5.1-3 ガラス線量計方向特性試験状況写真

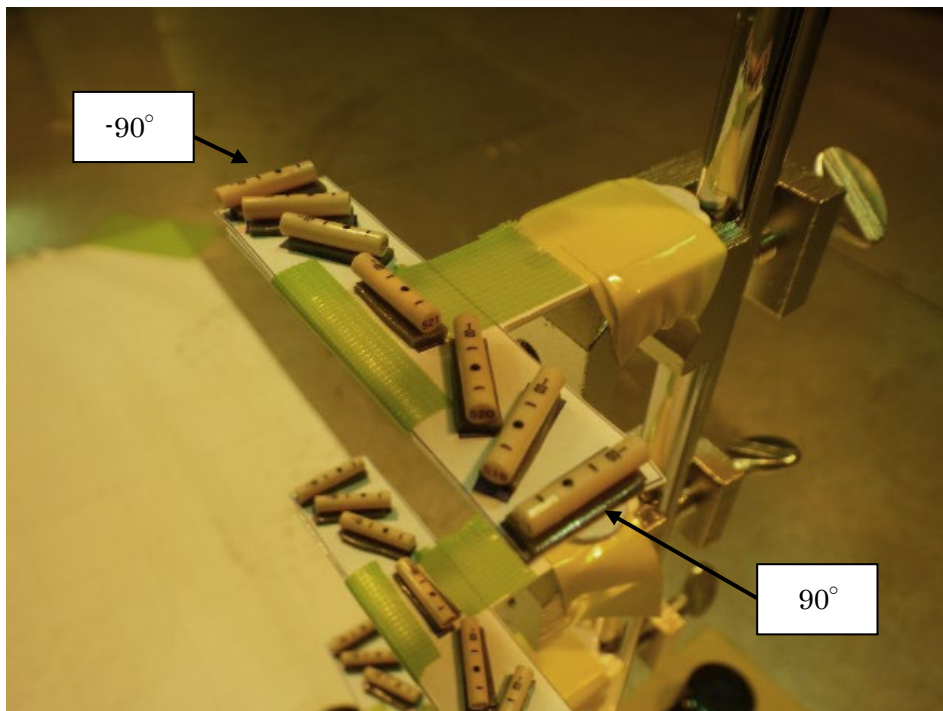


図 5.1-4 ガラス線量計方向特性試験状況写真（詳細）

5.2 ガラス線量計の吸収線量特性評価のための試験条件

5.2.1 吸収線量率、想定集積吸収線量

今回照射するガラス線量計は、100Gy まで測定可能であり、メーカー仕様では参考値扱いだが 500Gy まで測定可能である。吸収線量特性評価では、測定範囲外の集積吸収線量 500Gy 程度まで照射を行い、ガラス線量計のレスポンスを評価した。この時、測定箇所は 20 箇所とした。照射時間は 20 時間とし、想定集積吸収線量が約 100Gy から 500Gy となるように線源中心からの距離を設定した。

吸収線量特性試験の試験条件を表 5.2-1 に示す。

表 5.2-1 ガラス線量計の吸収線量特性評価試験条件

ガラス 線量計 No.	線源中心 からの距離 [mm]	照射時間 [h]	想定集積 吸収線量 [Gy]
1	350	20	510
2	370		460
3	380		440
4	400		410
5	410		390
6	430		360
7	440		345
8	460		320
9	470		310
10	500		280
11	510		270
12	540		245
13	550		235
14	590		210
15	600		205
16	650		180
17	700		160
18	750		140
19	800		125
20	850		110

5.2.2 ガラス線量計配置

ガラス線量計は、線量計毎に目標となる吸収線量率となるよう線源からの距離を変化させて照射を行う。この時、ガラス線量計は木片の上部に設置した状態で照射を行った。

ガラス線量計の配置図を図 5.2-1 及び図 5.2-2 に示す。また、照射試験時のガラス線量計の様子を図 5.2-3 に示す。

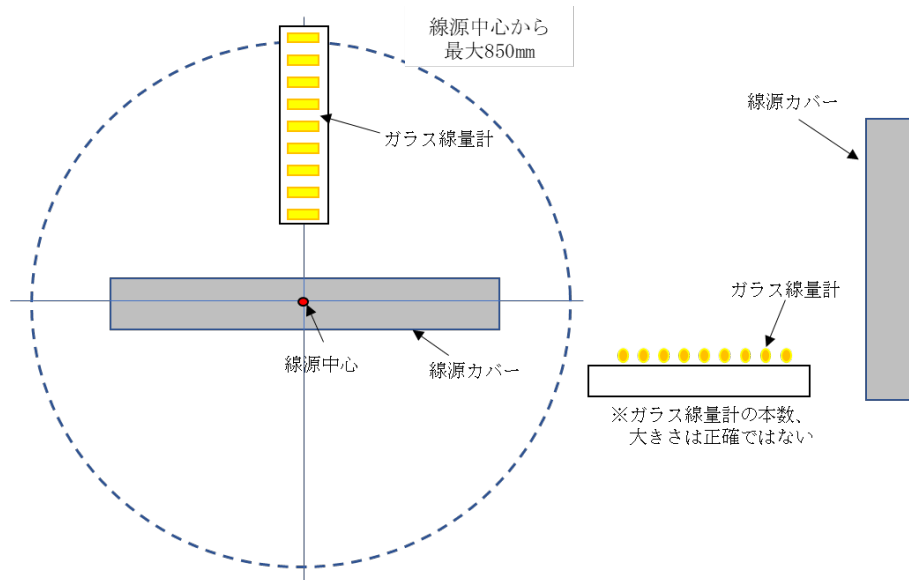


図 5.2-1 吸収線量特性評価のためのガラス線量計の照射試験配置図

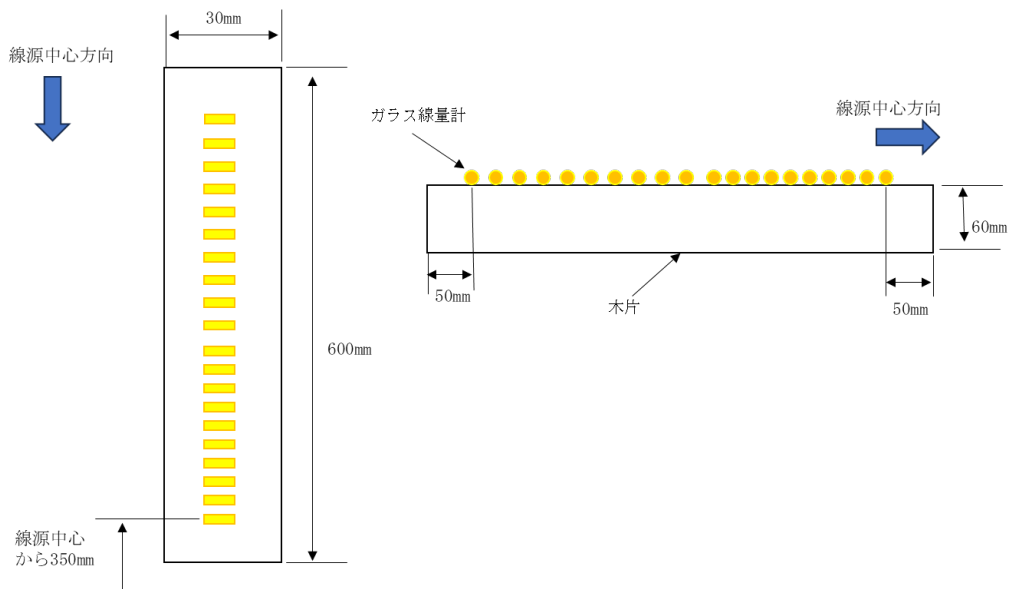


図 5.2-2 ガラス線量計の配置詳細

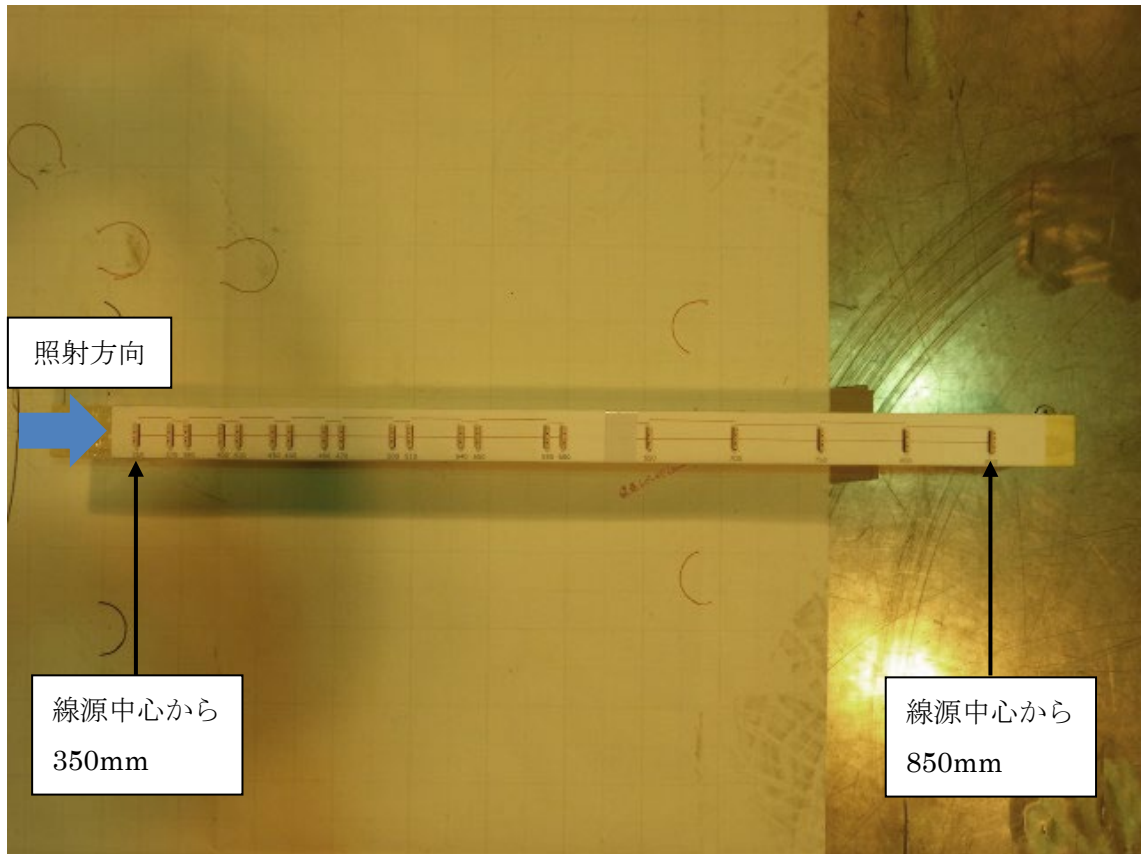


図 5.2-3 ガラス線量計吸収線量特性試験状況写真

5.3 ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価

5.3.1 吸収線量率、想定集積吸収線量

5.2 項では、ガラス線量計の吸収線量特性を評価した。一方で、センサ類の照射試験では、ガラス線量計以外にアラニン線量計を利用している。この時、線量計により特性が異なり、照射試験結果に影響を与えることが考えられるため、特にガラス線量計の測定範囲が参考値となる高集積吸収線量でのガラス線量計とアラニン線量計特性を比較した。

この時、想定集積吸収線量は、150Gy、250Gy、470Gy と設定した。照射時間は 7 時間とし、吸収線量率はそれぞれ、67Gy/h、36Gy/h、22Gy/h とした。

試験条件を表 5.3-1 に示す。

表 5.3-1 ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価試験条件

線量計 No.	想定集積 吸収線量 [Gy]	照射時間 [h]	吸収線量率 [Gy/h]
1	470	7	67
2	250		36
3	150		22

5.3.2 線量計配置

各線量計は、目標となる吸収線量率となるよう線源からの距離を変化させて照射を行った。この時、線量計は木片上に設置した鉄ブロックの正面に設置した。

線量計の配置図を図 5.3-1 及び図 5.3-2 に示す。また、照射試験時のガラス線量計の様子を図 5.3-3 及び図 5.3-4 に示す。

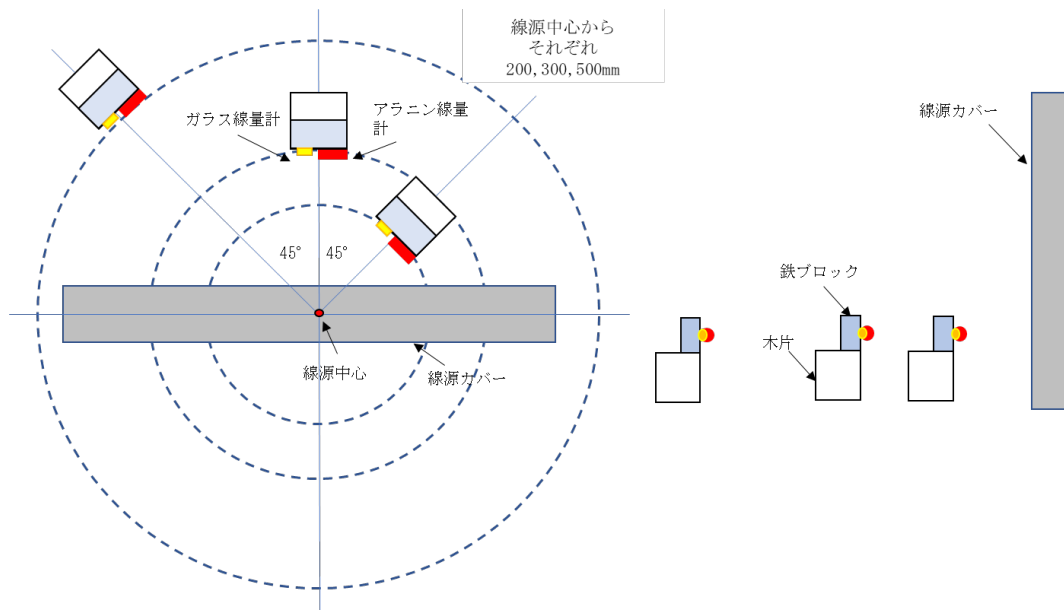


図 5.3-1 線量計特性比較のための照射試験配置図

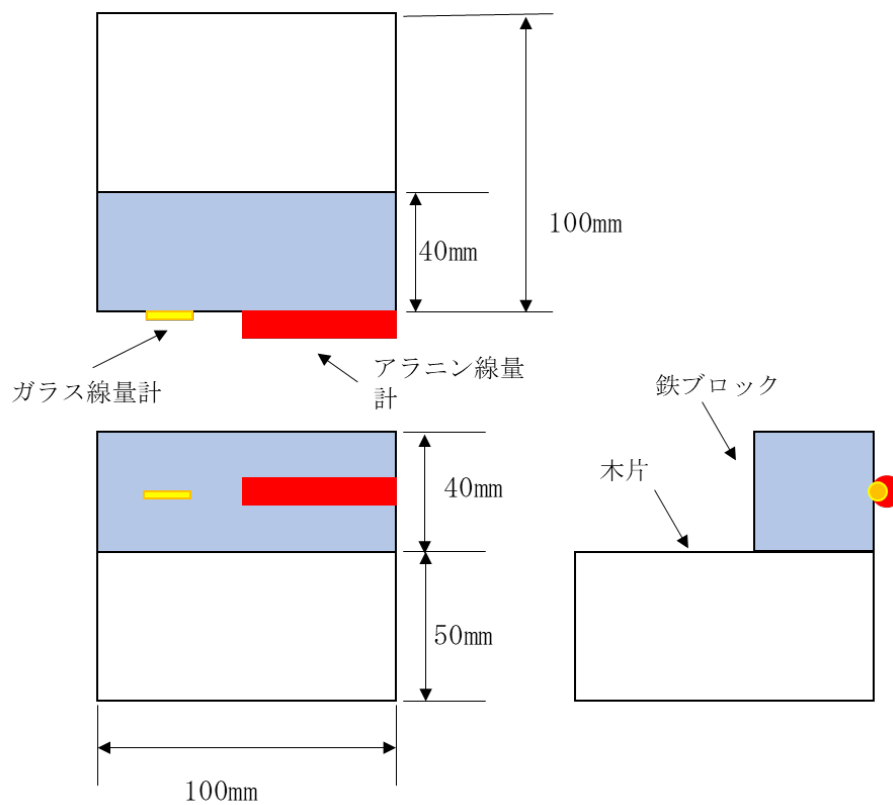


図 5.3-2 ガラス線量計及びアラニン線量計の配置詳細

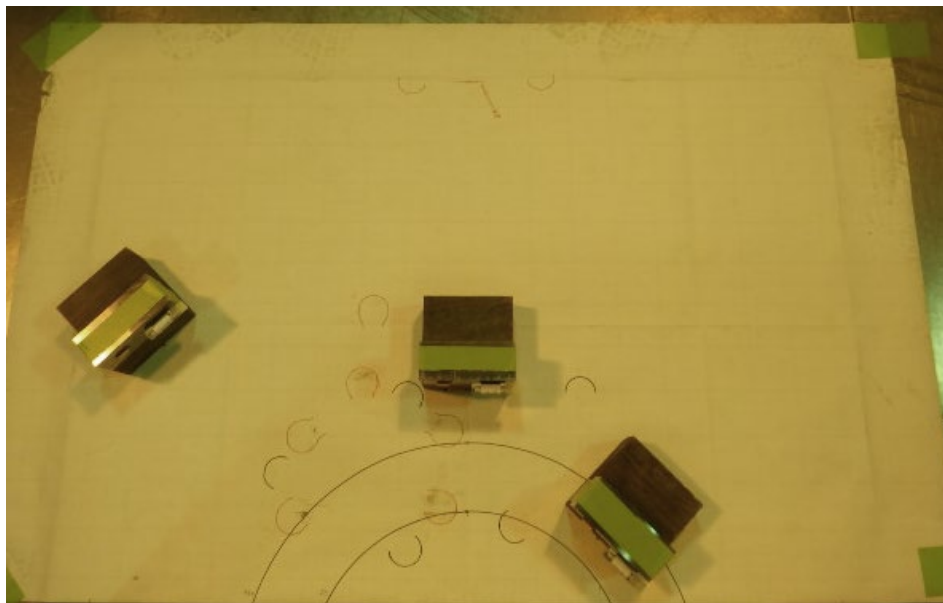


図 5.3-3 ガラス線量計とアラニン線量計の比較試験状況写真

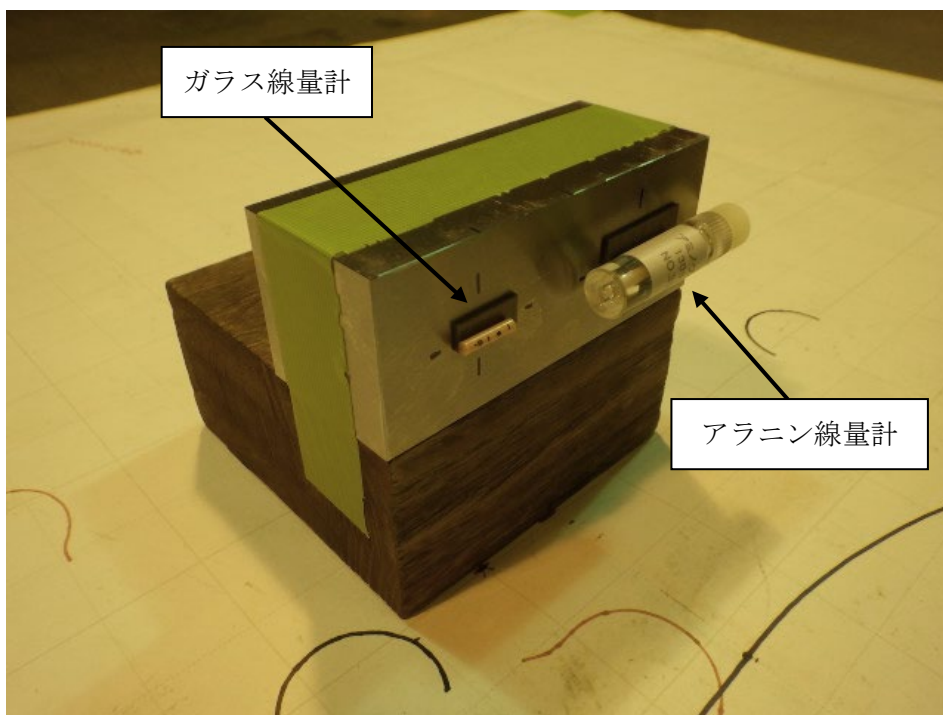


図 5.3-4 ガラス線量計とアラニン線量計の比較試験状況写真（詳細）

5.4 線量計組成を考慮した遮へい解析

線量計組成の遮へい解析への影響評価のため、令和5年度までに実施した4ケースの遮へい解析を対象に、線量計の組成を考慮した再解析を実施した。

5.4.1 解析対象ケース

解析対象は、令和3年度から5年度に実施したカスタマイズした光電センサ及び測域センサの解析とした。

解析ケースを表5.4-1に示す。

表 5.4-1 線量計組成の評価のための解析対象ケース

解析ケース No.	内容	備考
1-1	カスタマイズした光電センサ 100Gy/h 解析	令和3年度に実施
1-2	カスタマイズした測域センサ 150Gy/h 解析	令和3年度に実施
1-3	カスタマイズした光電センサ 5Gy/h 解析	令和4年度に実施
1-4	カスタマイズした測域センサ 5Gy/h 解析	令和5年度に実施

5.4.2 解析コード

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

5.4.3 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5.4-2に示す。

表 5.4-2 遮へい解析に用いた物質の密度及び組成

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

出典：「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

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

出典：「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

物質	空気	
密度(g/cm ³)	1.2049E-03	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	1.0130E-03	1.2049E-08
C	1.2717E-02	1.5126E-07
N	7.6451E+01	9.0934E-04
O	2.3535E+01	2.7993E-04

出典：「遮蔽材料の群定数 (JAERI-M 6928)」

物質	木製ブロック	
密度(g/cm ³)	0.48	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
C	2.8571E+01	—
H	4.7619E+01	—
O	2.3810E+01	—

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 5.4-2 遮へい解析に用いた物質の密度及び組成（その2）

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

出典：「遮蔽材料の群定数（JAERI-M 6928）」

※ 密度は、一般財団法人放射線利用振興協会データベースを参照している。

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

出典：「遮蔽材料の群定数（JAERI-M 6928）」

※ 密度は、一般財団法人放射線利用振興協会データベースを参照している。

表 5.4-2 遮へい解析に用いた物質の密度及び組成（その3）

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

出典：「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯（JIS G 4304）」

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

出典：「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯（JIS G 4304）」

表 5.4-2 遮へい解析に用いた物質の密度及び組成（その 4）

物質	ガラス線量計	
密度(g/cm ³)	2.61	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
P	3.1550E+01	8.2346E-01
O	5.1160E+01	1.3353E+00
Al	6.1200E+00	1.5973E-01
Na	1.1000E+01	2.8710E-01
Ag	1.7000E-01	4.4370E-03
合計	1.0000E+02	2.6100E+00

出典：「大阪大学, 蛍光ガラス線量計小型素子システム(Dose Ace)の高エネルギー領域における基本特性の検討, 平成 24 年 1 月」

物質	アラニン線量計	
密度(g/cm ³)	1.42	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	7.9190E+00	1.1245E-01
C	4.0444E+01	5.7430E-01
N	1.5721E+01	2.2324E-01
O	3.5916E+01	5.1001E-01
合計	1.000E+02	1.4200E+00

出典：「Homeland Security, Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, April, 2021」

物質	ポリエチレン (PE)	
密度(g/cm ³)	1.06	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	7.7426E+00	8.2072E-02
C	9.2257E+01	9.7793E-01
合計	1.0000E+02	1.0600E+00

出典：「Homeland Security, Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling, April, 2021」

5.4.4 線量換算係数

遮へい解析に用いた換算係数を表 5.4-3 に示す。

表 5.4-3 遮へい解析に用いた換算係数

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

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

5.4.5 線源条件

本解析の線源条件は、令和5年度までに実施した解析の線源条件に対して線量計組成を考慮した線源条件とした。なお、線源条件設定の際には、照射施設での吸収線量率の測定結果を基に規格化を行い、線源強度を設定している。線源条件を表5.4-4から表5.4-6に示す。参考に令和5年度までに実施した解析で使用した空気の換算係数を使用した線源条件を合わせて示す。

表 5.4-4 解析ケース 1-1 及び 1-2 (令和3年度) の線源条件

No.	高さ [mm]	線量計組成を考慮		(参考) 空気の換算係数を使用	
		放射エネルギー [Bq]	吸収線量率 [Gy/h]	放射エネルギー [Bq]	吸収線量率 [Gy/h]
1	360	2.01 × 10 ¹³	100.0	2.15 × 10 ¹³	100.0
2	300		111.0		111.1
3	240		115.7		115.7
4	180		114.4		114.3
5	120		106.6		106.7
6	60		93.9		93.8

表 5.4-5 解析ケース 1-3 (令和4年度：光電センサ 5Gy/h) の線源条件

No.	高さ [mm]	線量計組成を考慮		(参考) 空気の換算係数を使用	
		放射エネルギー [Bq]	吸収線量率 [Gy/h]	放射エネルギー [Bq]	吸収線量率 [Gy/h]
1	360	1.91 × 10 ¹³	4.35	2.04 × 10 ¹³	4.34
2	300		4.39		4.40
3	240		4.44		4.45
4	180		4.50		4.48
5	120		4.50		4.49

表 5.4-6 解析ケース 1-4 (令和5年度：測域センサ 5Gy/h) の線源条件

No.	高さ [mm]	線量計組成を考慮		(参考) 空気の換算係数を使用	
		放射エネルギー [Bq]	吸収線量率 [Gy/h]	放射エネルギー [Bq]	吸収線量率 [Gy/h]
1	360	1.61 × 10 ¹³	97.7	1.72 × 10 ¹³	97.5
2	300		108.8		108.9
3	240		113.5		113.7
4	180		112.2		112.1
5	120		104.4		104.4

5.4.6 評価位置

令和3年度から令和5年度の線量計組成を変更した解析において、過去に実施した解析で評価を実施した遮へい体内外部の評価位置と同じ位置で再評価した。

評価位置を図 5.4-1 から図 5.4-4 に示す。

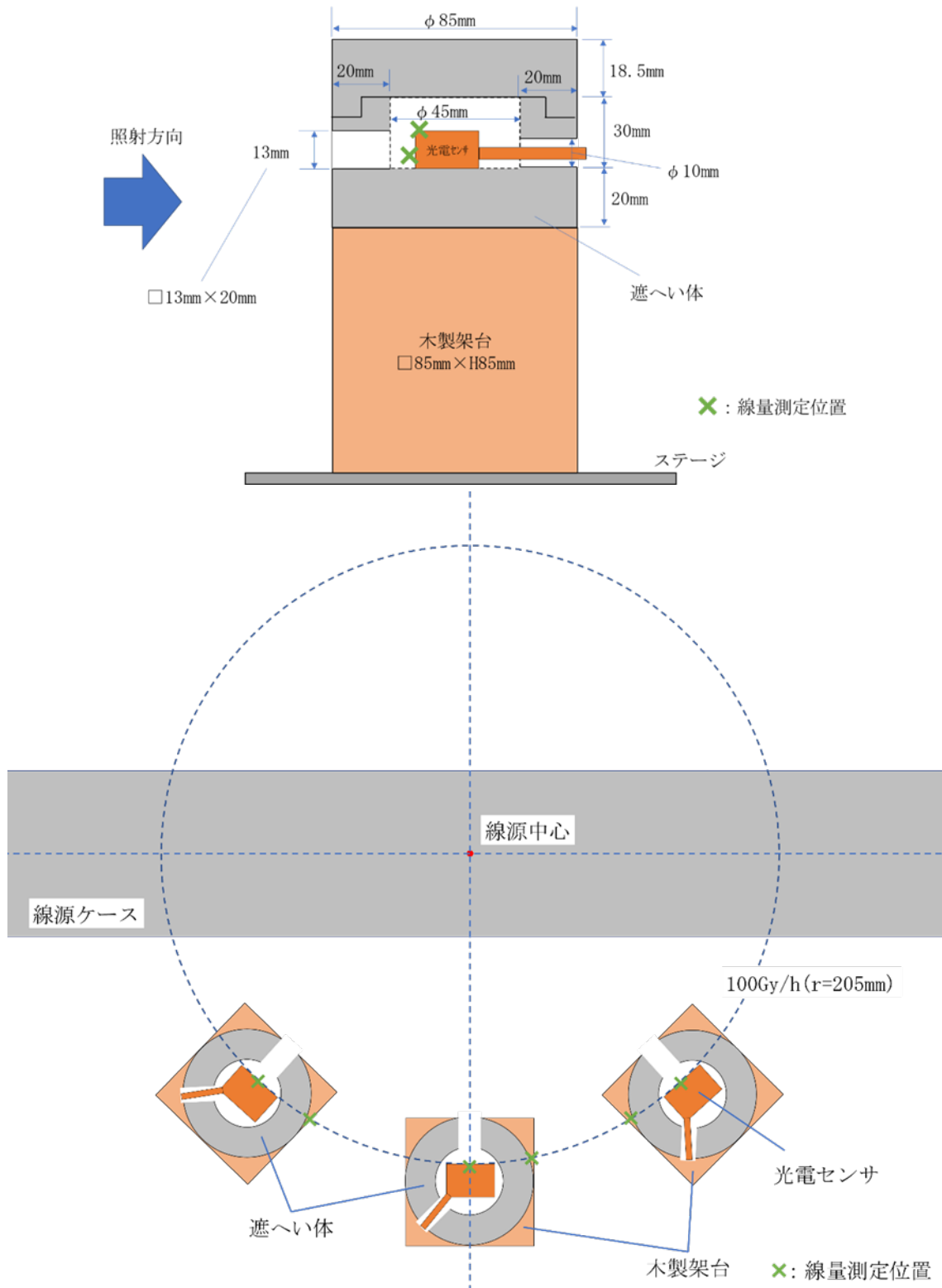


図 5.4-1 解析ケース 1-1 (令和3年度：光電センサ 100Gy/h) の評価位置

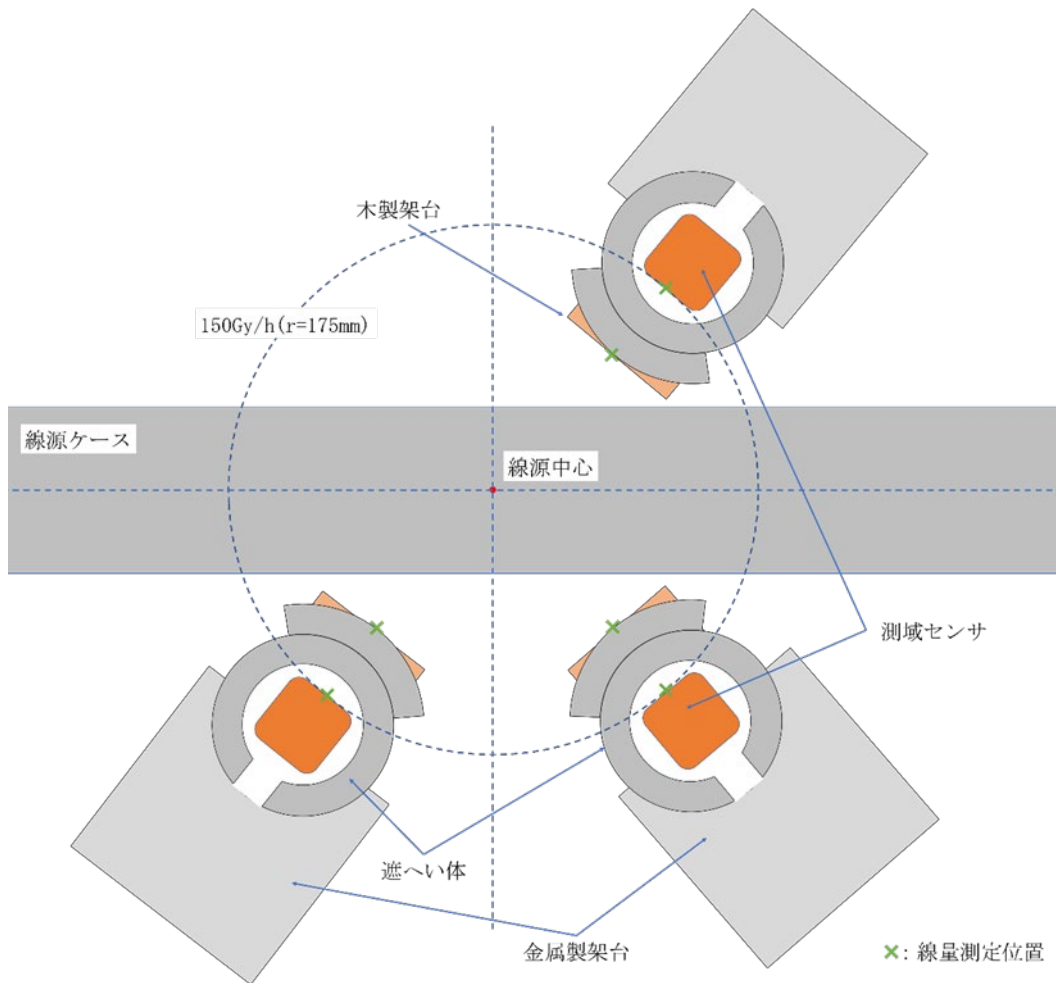
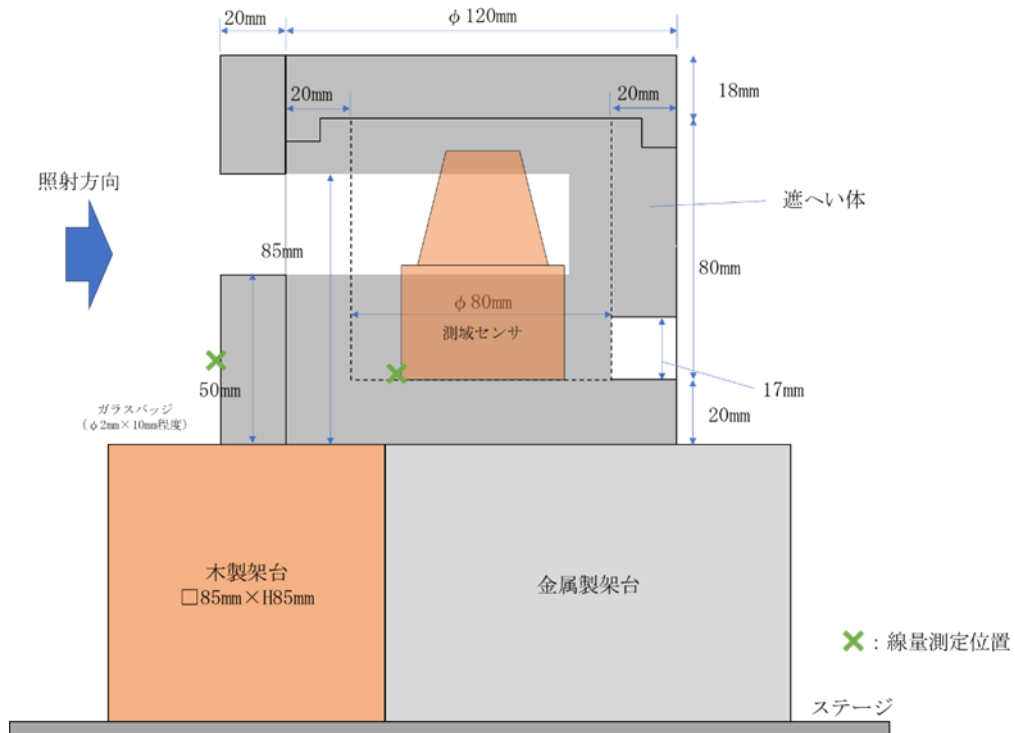


図 5.4-2 解析ケース 1-2 (令和 3 年度 : 測域センサ 150Gy/h) の評価位置

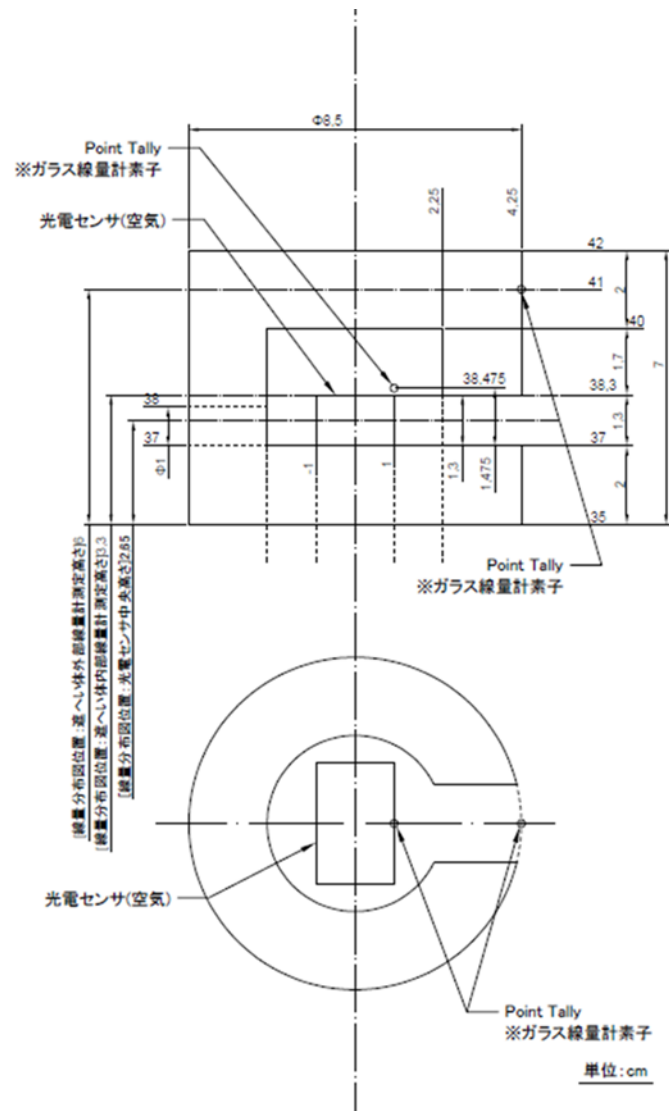


図 5.4-3 解析ケース 1-3 (令和 4 年度 : 光電センサ 5Gy/h) の評価位置

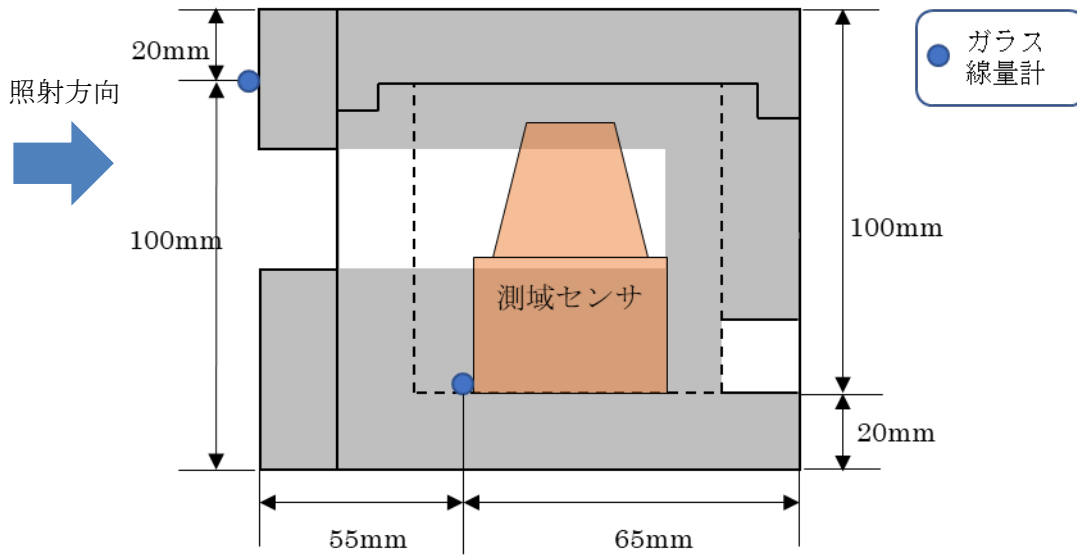


図 5.4-4 解析ケース 1-4 (令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h) の評価位置
(前方から照射：1/3)

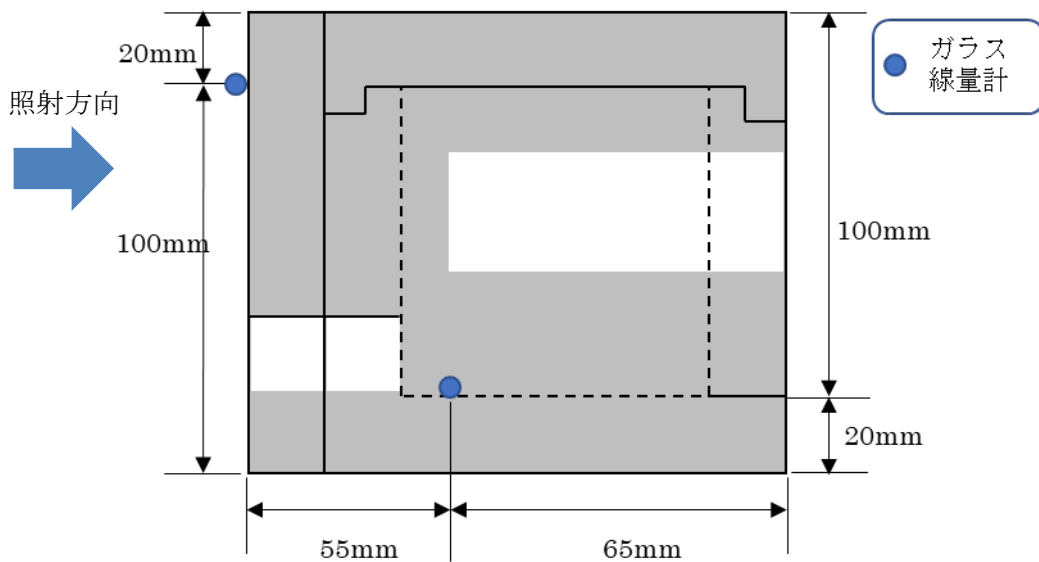


図 5.4-4 解析ケース 1-4 (令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h) の評価位置
(後方から照射：2/3)

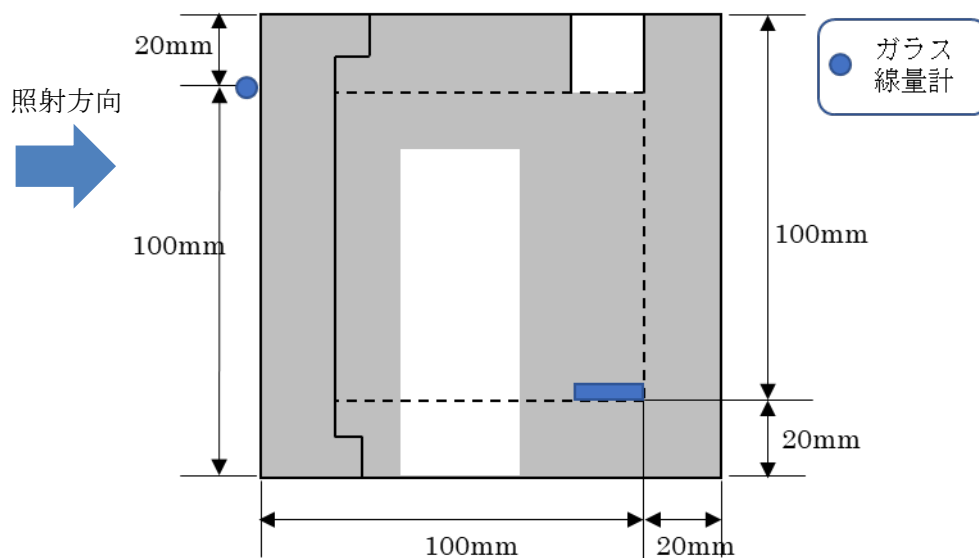


図 5.4-4 解析ケース 1-4（令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h）の評価位置
（上方向から照射：3/3）

5.4.7 解析モデル

線量計組成の影響評価のための解析モデルは、令和 3 年度から 5 年度に実施した解析のモデルを使用した。解析モデルを図 5.4-5 から図 5.4-12 に示す。

ガラス線量計及びアラニン線量計については、モデル化を行い、それぞれの線量計組成を設定した。ガラス線量計及びアラニン線量計の解析モデルを図 5.4-13 及び図 5.4-14 に示す。

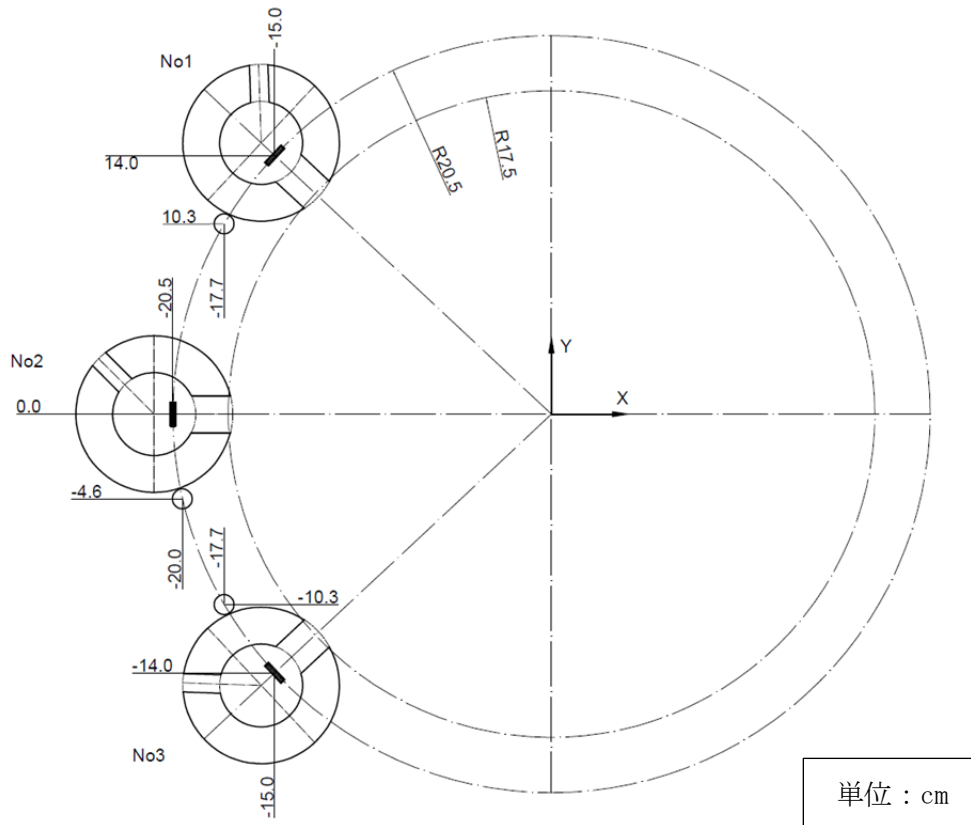


図 5.4-5 解析ケース 1-1（令和 3 年度：光電センサ 100Gy/h）の解析モデル

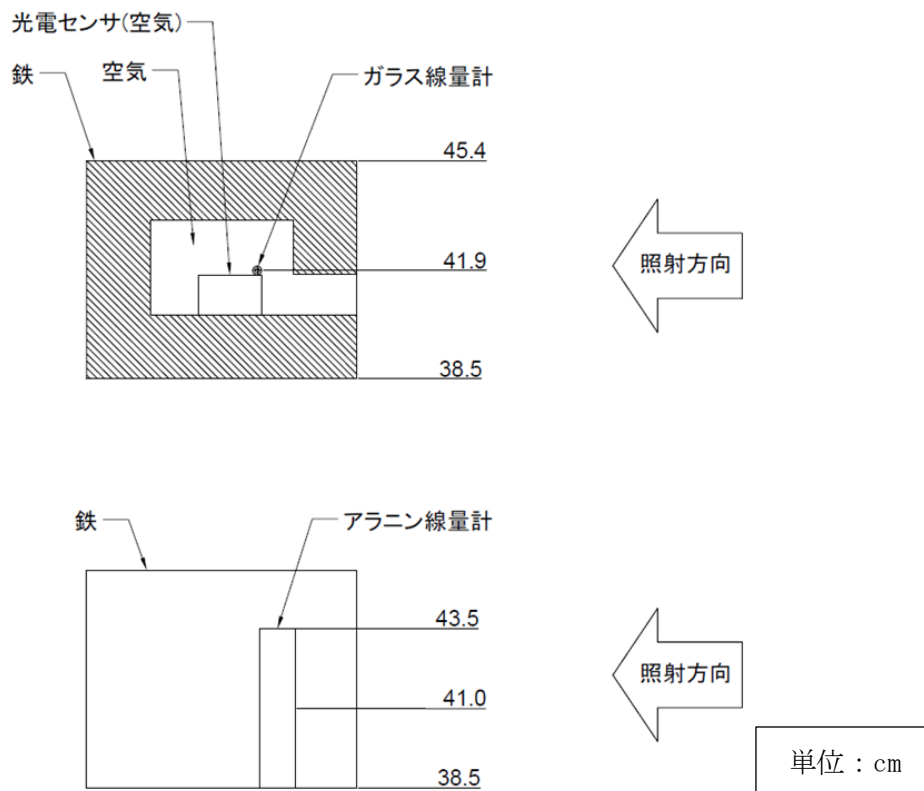


図 5.4-6 解析ケース 1-1 の遮へい体モデル

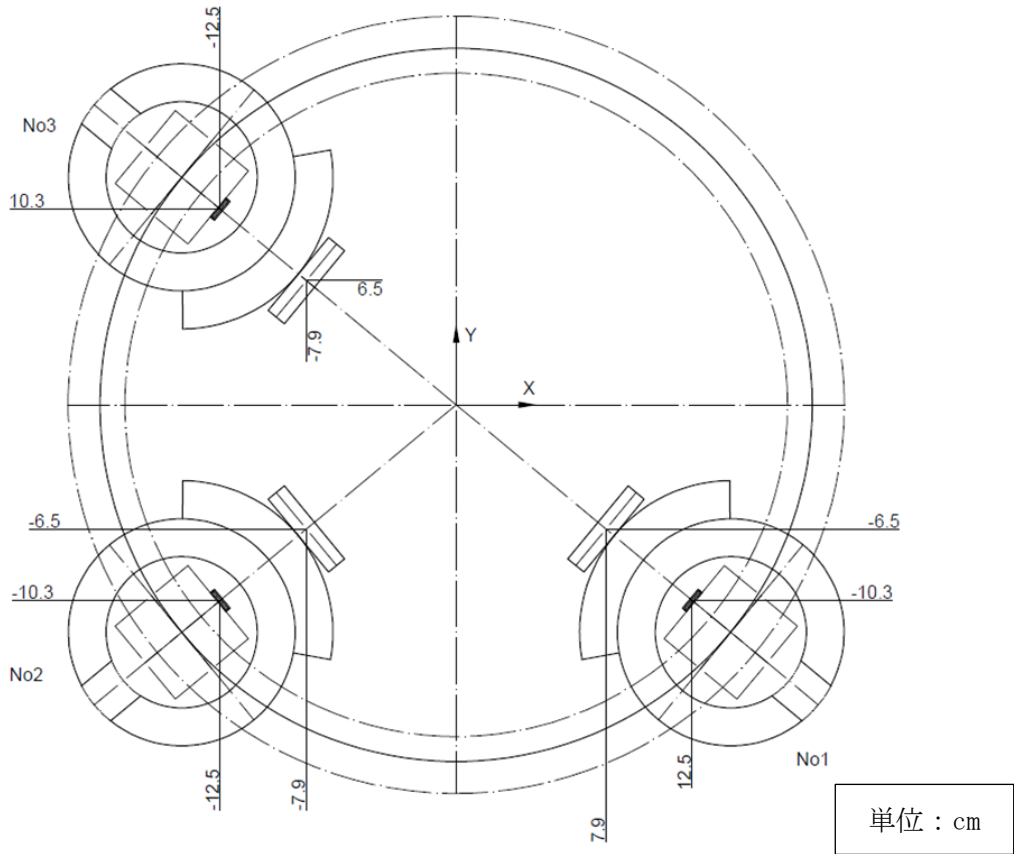


図 5.4-7 解析ケース 1-2（令和 3 年度：測域センサ 150Gy/h）の解析モデル

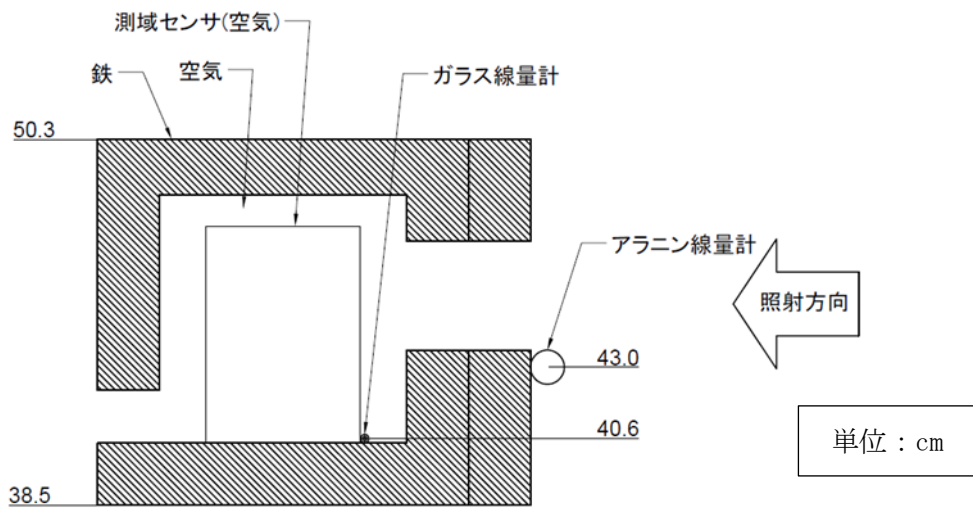


図 5.4-8 解析ケース 1-2 の遮へい体モデル

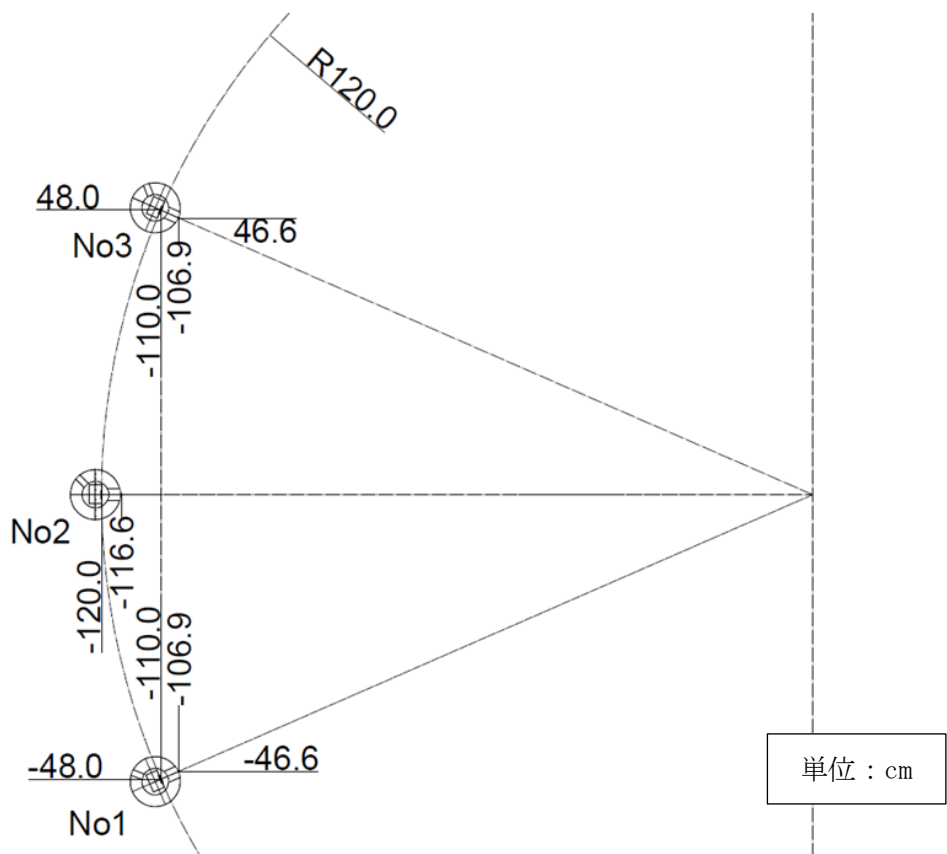


図 5.4-9 解析ケース 1-3 (令和 4 年度 : 光電センサ 5Gy/h) の解析モデル

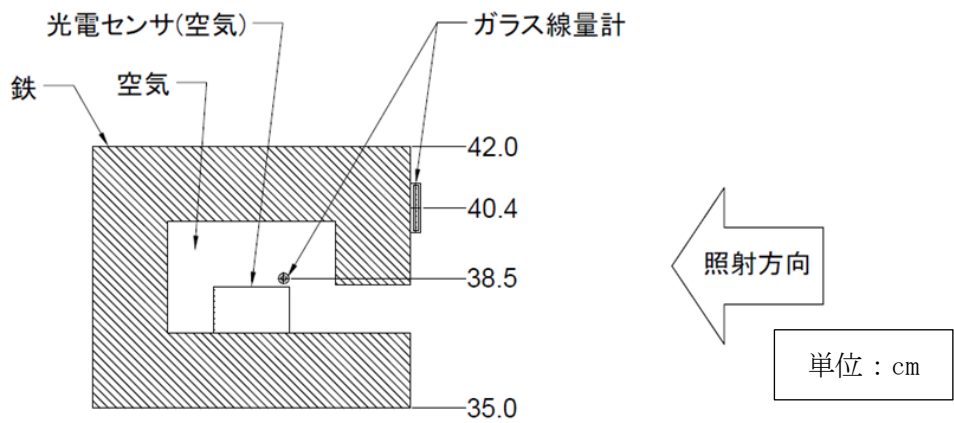


図 5.4-10 解析ケース 1-3 の遮へい体モデル

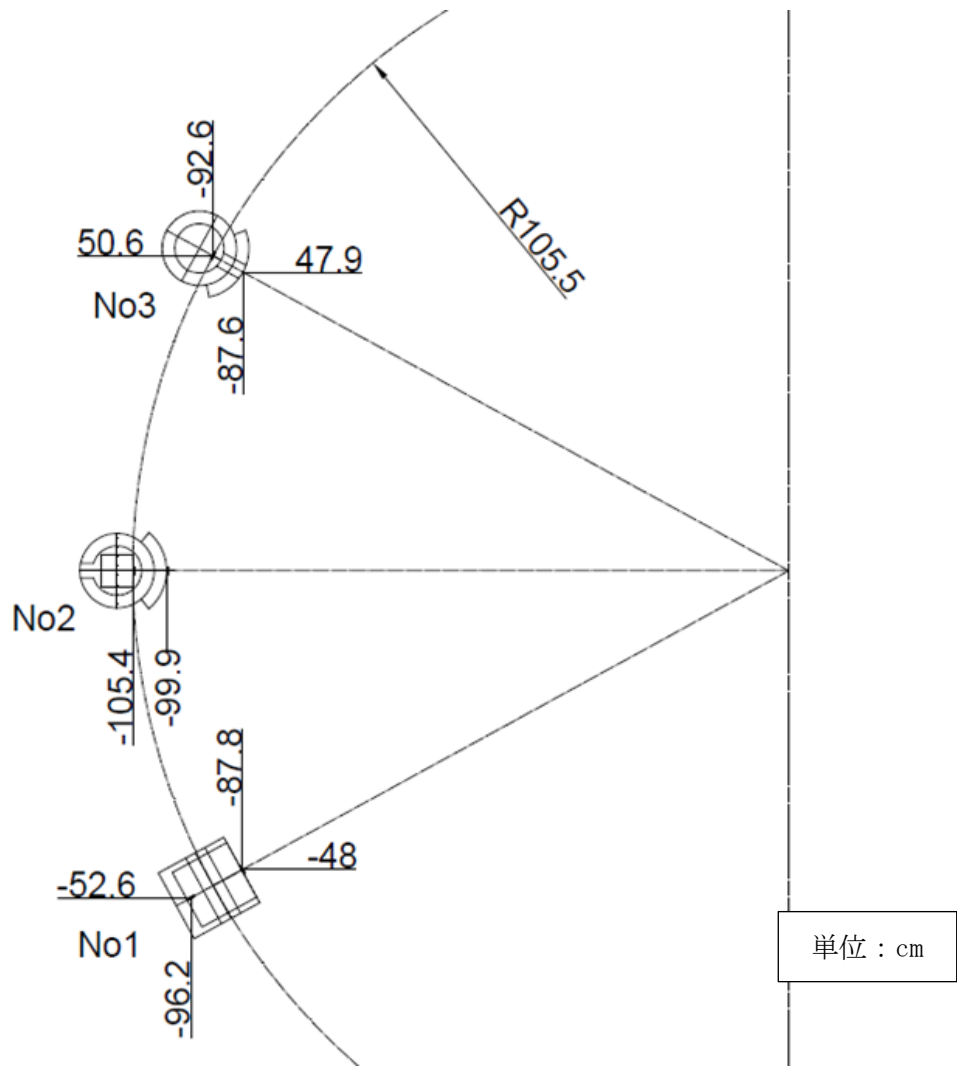


図 5.4-11 解析ケース 1-4 (令和 5 年度：測域センサ 5Gy/h) の解析モデル

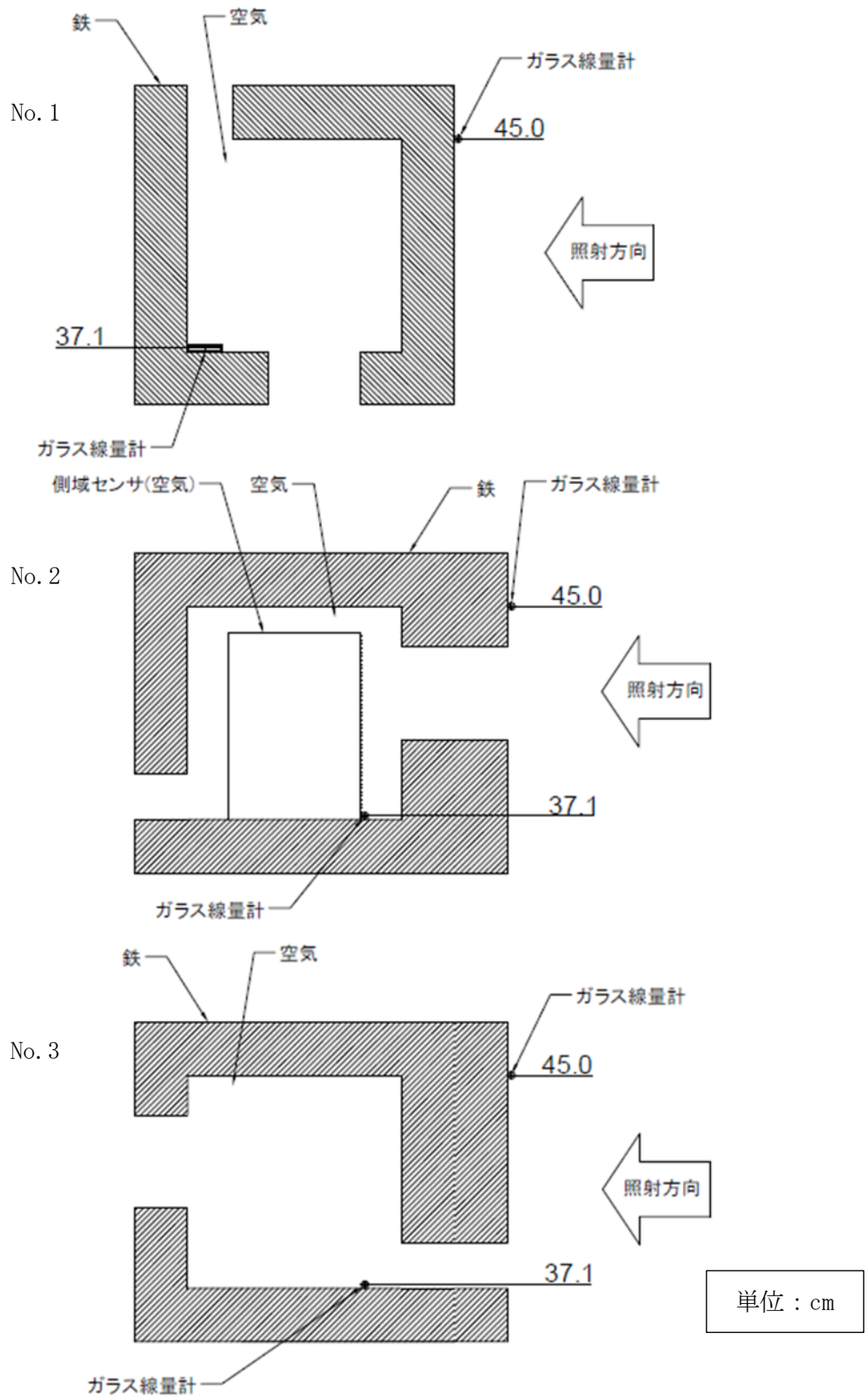


図 5.4-12 解析ケース 1-4 の遮へい体モデル

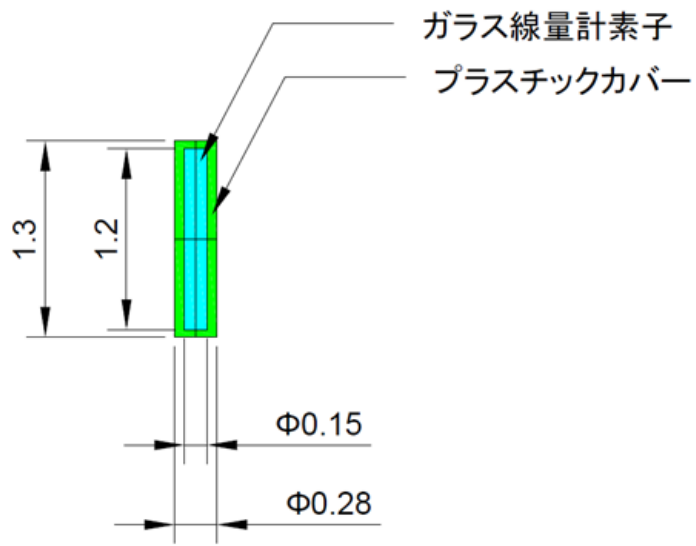


図 5.4-13 ガラス線量計素子の解析モデル

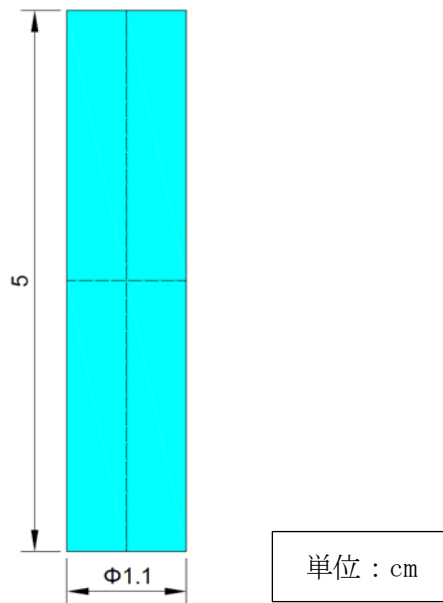


図 5.4-14 アラニン線量計の解析モデル

5.5 ガラス線量計特性評価のための遮へい解析

5.2 項及び5.3 項のガラス線量計の特性評価試験について、MCNP を用いた遮へい計算を行い、比較評価を実施した。

5.5.1 解析対象ケース

解析対象は 5.2 項及び 5.3 項のガラス線量計の照射試験を再現した解析ケースとした。解析ケースを表 5.5-1 に示す。

表 5.5-1 ガラス線量計特性評価のための解析対象ケース

解析ケース No.	内容	備考
2-1	ガラス線量計の吸収線量特性評価解析	5.2 項で実施
2-2	ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価解析	5.3 項で実施

5.5.2 解析コード

5.4 項の線量計組成を考慮した遮へい解析と同様に、MCNP を用いた。

5.5.3 計算で使用する密度及び組成

5.4 項の線量計組成を考慮した遮へい解析と同様とし、表 5.4-2 の密度及び組成を用いた。

5.5.4 線量換算係数

5.4 項の線量計組成を考慮した遮へい解析と同様とし、表 5.4-3 の線量換算係数を用いた。

5.5.5 線源条件

本解析の線源条件は、使用する照射施設の吸収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章で測定したアラニン線量計の吸収線量を基に算出した吸収線量率である。線源は棒状であり、高さ方向で吸収線量率に分布を持つため、線源中心から165mmにおける複数の高さに測定点を設けた。

線源は ^{60}Co とし、表5.5-2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5.5-1に示すペンシル型 ^{60}Co 密封線源のサンプルを参考に線源モデルを設定した。

また、本年度の解析では5.4項を踏まえて、アラニン線量計の組成を考慮したセルの吸収線量から規格化を行う（規格化手法①）とともに、換算係数を用いて規格化（規格化手法②）を行った。規格化手法の概要を図5.5-2に示す。

また、それぞれの規格化手法による計算値及び吸収線量率の測定値の比較結果を表5.5-3及び表5.5-4に示す。

アラニン線量計組成を考慮した規格化手法①による線源規格化の結果、本解析での放射エネルギーは $1.36 \times 10^{13}\text{Bq}$ 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、アラニン線量計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、 ^{60}Co 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。

換算係数を利用した規格化手法②による線源規格化の結果、本解析での放射エネルギーは $1.45 \times 10^{13}\text{Bq}$ 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、アラニン線量計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、 ^{60}Co 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 5.5-2 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

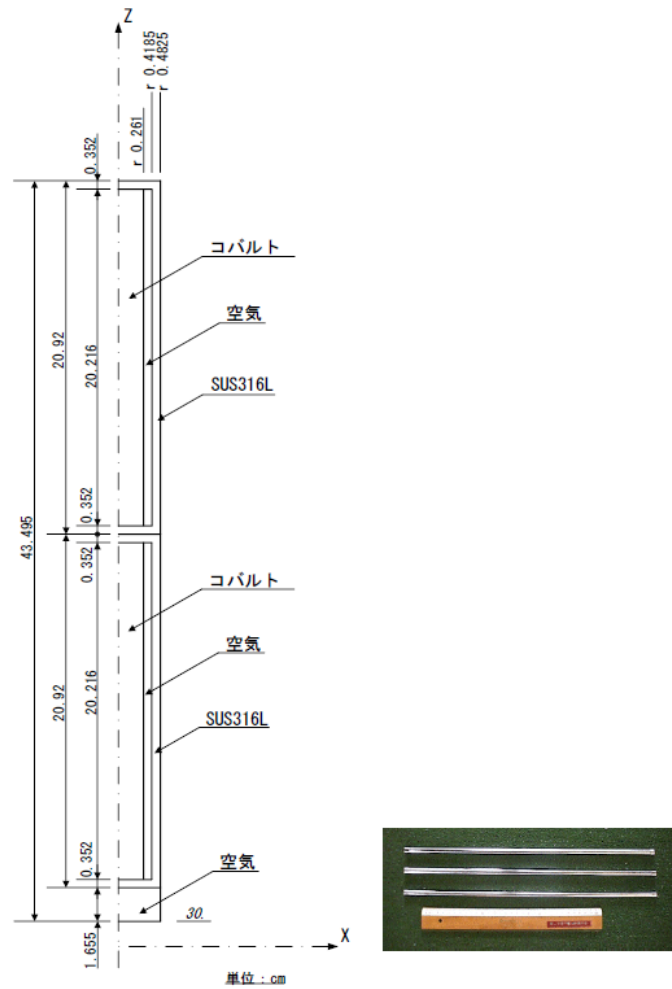


図 5.5-1 線源規格化の解析モデル

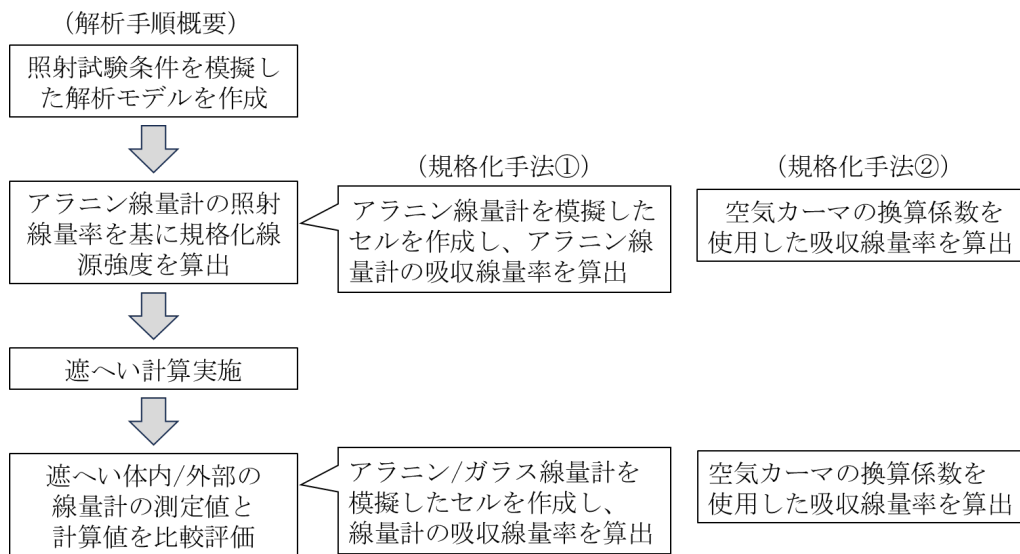


図 5.5-2 規格化手法の概要

表 5.5-3 規格化手法①による線源強度の規格化計算結果

No.	高さ [mm]	計算値 (C ₁) [Gy/h]	測定値 (E) [Gy/h]	測定値との比率 (C ₁ /E)
1	360	94.0	92	1.02
2	300	104.9	101	1.04
3	240	109.5	107	1.02
4	180	108.1	114	0.95
5	120	100.3	103	0.97

表 5.5-4 規格化手法②による線源強度の規格化計算結果

No.	高さ [mm]	計算値 (C ₂) [Gy/h]	測定値 (E) [Gy/h]	測定値との比率 (C ₂ /E)
1	360	93.7	92	1.02
2	300	105.0	101	1.04
3	240	109.6	107	1.02
4	180	108.1	114	0.95
5	120	100.5	103	0.98

5.5.6 評価位置

ガラス線量計の吸収線量特性試験及びアラニン線量計との比較評価解析においては、試験における吸収線量の測定位置と同様とした。それぞれの評価位置は表 5.2-1、及び図 5.2-1 から図 5.3-2 に示す通りである。

5.5.7 解析モデル

照射試験の各線量計の配置及び試験環境を考慮し、ガラス線量計特性評価のための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 5.5-3 に示す照射室モデルを作成した。

解析ケース 2-1 の解析モデルを図 5.5-4 から図 5.5-6 に、解析ケース 2-2 の解析モデルを図 5.5-7 及び図 5.5-8 に示す。

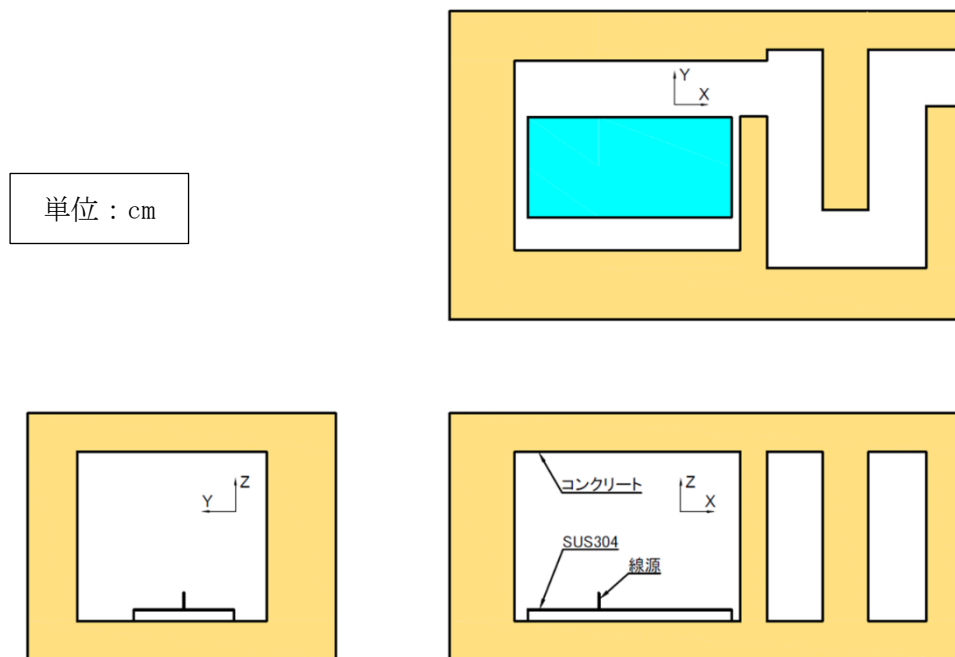


図 5.5-3 照射室の解析モデル

単位 : cm

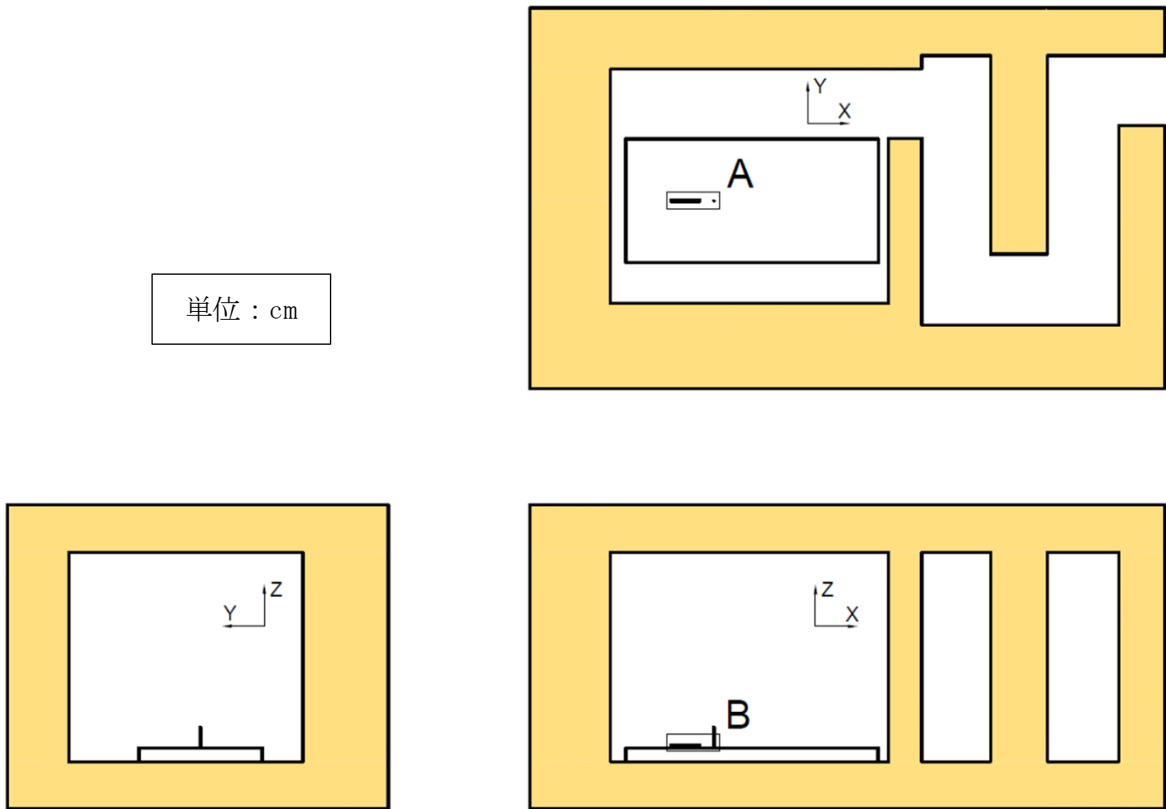


図 5.5-4 解析ケース 2-1 (ガラス線量計の吸収線量特性の評価) の解析モデル

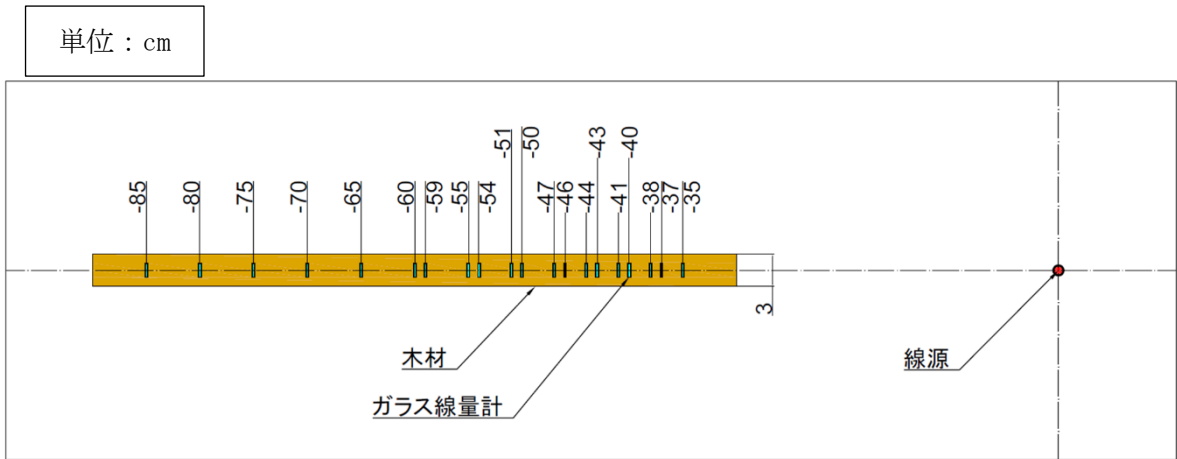


図 5.5-5 解析ケース 2-1 のガラス線量計配置詳細 (平面図)

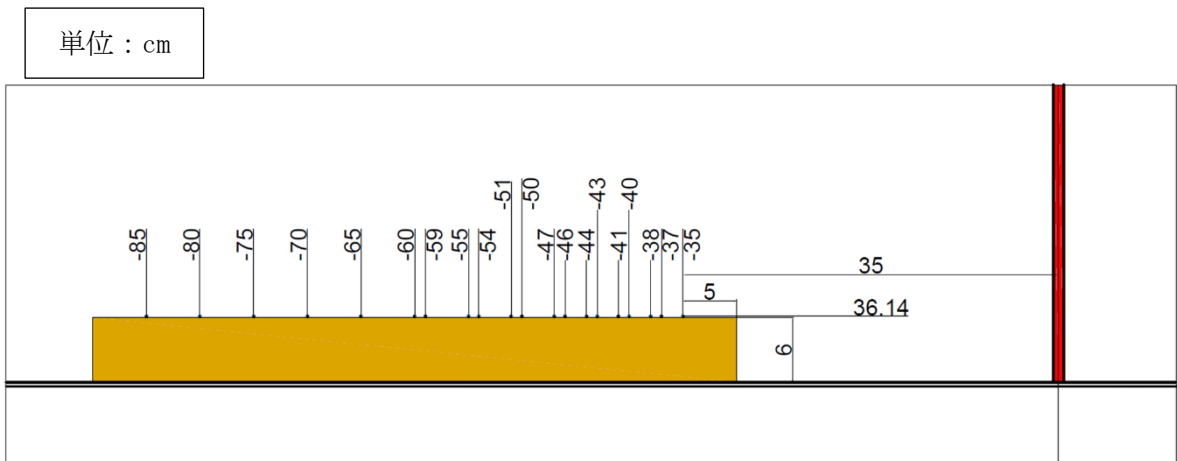


図 5.5-6 解析ケース 2-1 のガラス線量計配置詳細 (立面図)

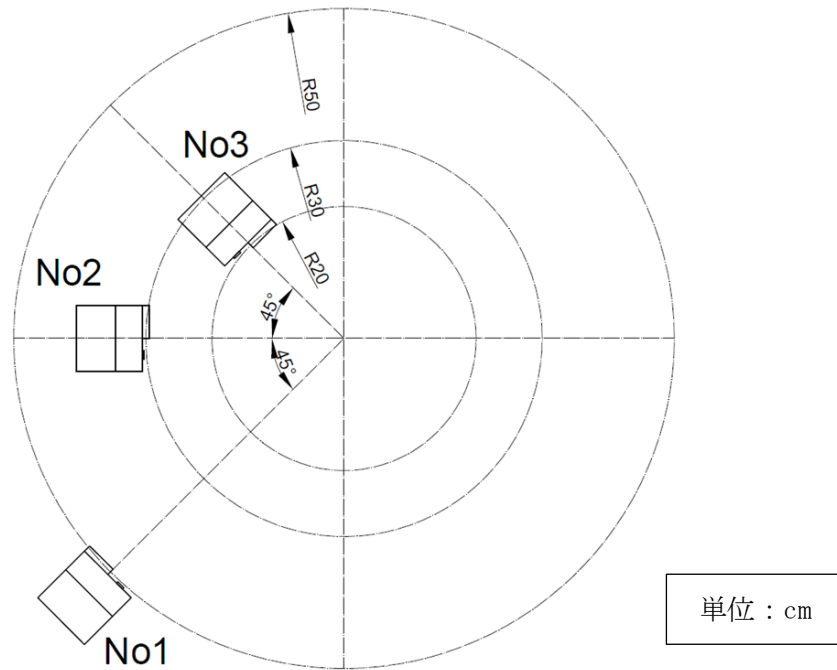


図 5.5-7 解析ケース 2-2 (ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価) の解析モデル

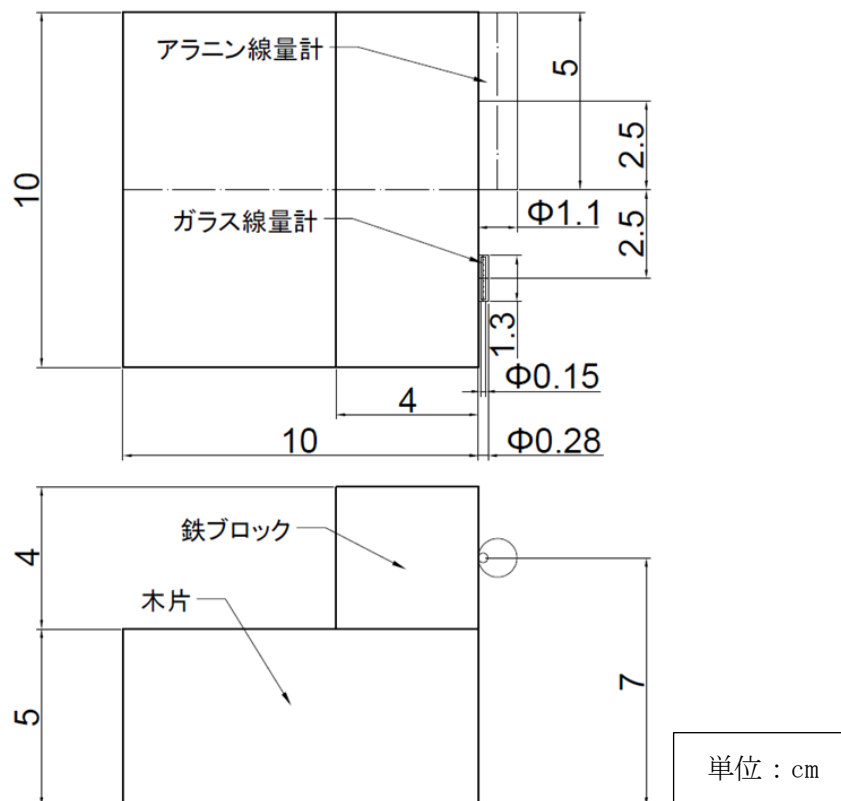


図 5.5-8 解析ケース 2-2 の線量計配置詳細

5.6 簡易遮へい評価手法の適用検討

簡易計算コード及び手計算手法について、簡易的な評価ケースを対象に評価を実施し、MCNPとの比較評価を実施した。また、5.4 項でガラス線量計組成の影響を評価した過年度のカスタマイズ試験を模擬した遮へい解析を対象に、各評価手法で評価を行い、適用性を評価した。

5.6.1 適用を検討する評価手法

本委託において、これまで照射試験を解析で模擬する場合には MCNP を用いた。今回は点減衰核積分コード (QAD) 及び複数の手計算手法を用いて評価を実施した。各手法の概要を以下に示す。

(1) QAD

原子力発電施設、核燃料サイクル施設、RI 取扱施設、放射性物質輸送容器等におけるガンマ線遮へい計算では、点減衰核積分法による線量評価手法が広く用いられている。点減衰核積分法とは、線源から放出された光子ガンマ線を量子化した粒子が一度も散乱せずに評価点に到達した場合の線束を直接線と定義し、直接線の飛程中に存在する遮へい体での散乱効果を表すガンマ線ビルドアップ係数を乗ずることにより、光子の直接線、散乱線を合計した吸収線量を算出する手法である。

QAD コードでは、線源と評価点を結ぶ直線上の減衰とその散乱効果補正によって吸収線量を算出しているため、他の遮へい評価手法に比べて原理や使用法が比較的簡単であり、計算時間も非常に高速であるという利点がある。また、散乱効果の補正に使用するガンマ線ビルドアップ係数は無限媒質中での散乱効果を評価したデータを用いているため、有限媒質におけるデータに比べて一定のバイアス安全評価上の保守性を含有している。

(2) 手計算 1

手計算 1 として、アイソトープ手帳に記載されている (1) 式を用いた評価を実施した。なお、手計算 1 は点線源への適用が可能である。

$$D = \Gamma \cdot \frac{A}{R^2} \cdot F_{\alpha} \cdot 10^{-6} \quad (1)$$

ただし、以下とする。

D : 吸収線量率 [Gy/h]

Γ : 実効線量率定数 [($\mu\text{Sv} \cdot \text{m}^2$)/(MBq \cdot h)]

A : 放射能 [MBq]

R : 線源から評価点までの距離 [m]

F_{α} : 実効線量透過率

(3) 手計算 2

手計算 2 として、アイソトープ手帳に記載の線減衰係数及びガンマ線日本原子力学会標準ビルドアップ係数：2013（AESJ-SC-A005：2013）に記載のビルドアップ係数を用いた（2）式を用いた評価を実施した。手計算 2 では、手計算 1 と同様に、点線源への適用が可能である。

$$D = B \cdot \frac{Ae^{-\mu x}}{4\pi R^2} \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (2)$$

ただし、以下とする。

D ：吸収線量率 [Gy/h]

B ：ビルドアップ係数

A ：線源強度 [ph/sec]

μ ：線減衰係数 [cm^{-1}]

R ：線源から評価点までの距離 [cm]

x ：遮へい体厚さ [cm]

K ：空気カーマに対する換算係数 [$(\mu\text{Gy/h})/(\text{ph/sec/cm}^2)$]

(4) 手計算 3

手計算 3 として、アイソトープ手帳に記載の線減衰係数、ガンマ線日本原子力学会標準 ビルドアップ係数：2013 (AESJ-SC-A005：2013) に記載のビルドアップ係数及び Engineering Compendium on Radiation Shielding 1968 に記載の角度減衰式を用いた評価を実施した。ただし、手計算 3 では、遮へい体の有無によって用いる計算式が異なる。なお、手計算 3 は、ライン線源への適用が可能である。

遮へい体がない場合の評価式を (3) 式から (5) 式に、この時のモデル図を図 5.6-1 に示す。遮へい体がある場合の評価式を (6) 式から (9) 式に示す。また、この時のモデル図を図 5.6-2 に示す。

P1 における評価式

$$D = \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot \theta_1 \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

P2 における評価式

$$D = \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot (\theta_1 + \theta_2) \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (4)$$

P3 における評価式

$$D = \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot (\theta_2 - \theta_1) \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (5)$$

ただし以下とする。

D : 吸収線量率 [Gy/h]

A : 線源強度 [ph/sec]

θ : 角度 [rad]

R : 線源から評価点までの距離 [cm]

L : 線源長さ [cm]

K : 空気カーマに対する換算係数 [(μ Gy/h)/(ph/sec/cm²)]

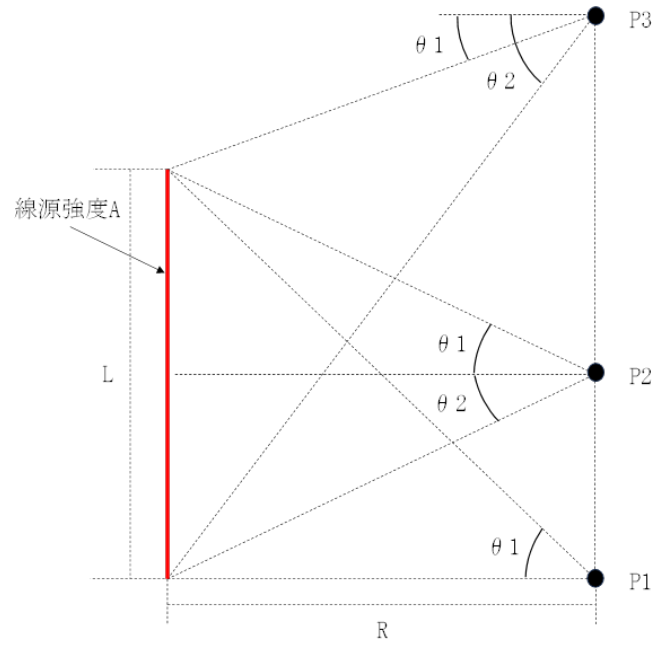


図 5.6-1 手計算 3 計算モデル (遮へい体無し)

P1 における評価式

$$D = B \cdot \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot F(\theta_1, b_1) \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (6)$$

P2 における評価式

$$D = B \cdot \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot [F(\theta_1, b_1) + F(\theta_2, b_1)] \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (7)$$

P3 における評価式

$$D = B \cdot \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot [F(\theta_2, b_1) - F(\theta_1, b_1)] \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

P4 における評価式

$$D = B \cdot \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot [F(\theta_1, b_1) + F(\theta_2, b_1)] \cdot K \cdot 10^{-6} \quad (9)$$

ただし、以下とする。

D : 吸収線量率 [Gy/h]

A : 線源強度 [ph/sec]

B : ビルドアップ係数

θ : 角度 [rad]

b : μt

μ : 線減衰係数 [cm^{-1}]

t : 遮へい体厚さ [cm]

R : 線源から評価点までの距離 [cm]

L : 線源長さ [cm]

K : 空気カーマに対する換算係数 [$(\mu\text{Gy/h})/(\text{ph/sec/cm}^2)$]

$F(\theta, b)$: 線源と評価点との角度、遮へい体厚さによって求められる減衰係数

($\int_0^\theta e^{-b/\cos\theta} d\theta$ にて算出、 $F(\theta, b)$ を図 5.6-3 に示す。)

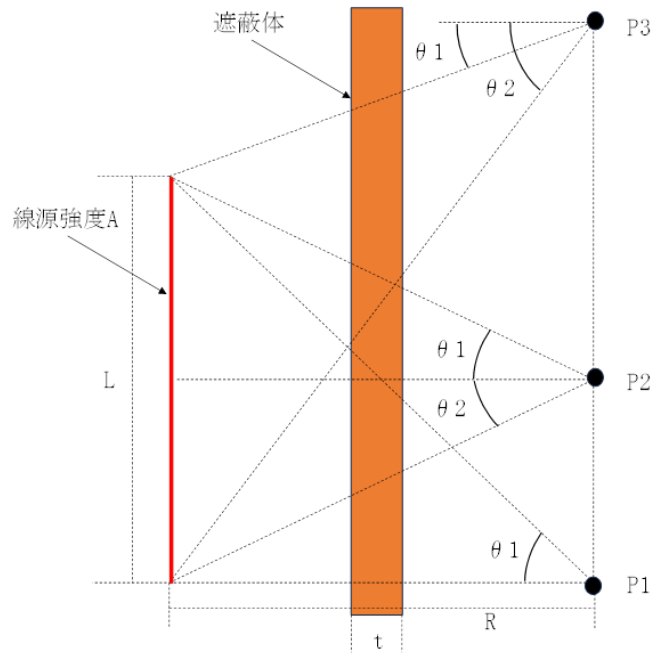


図 5.6-2 手計算 3 計算モデル (遮へい体有り)
(1/2)

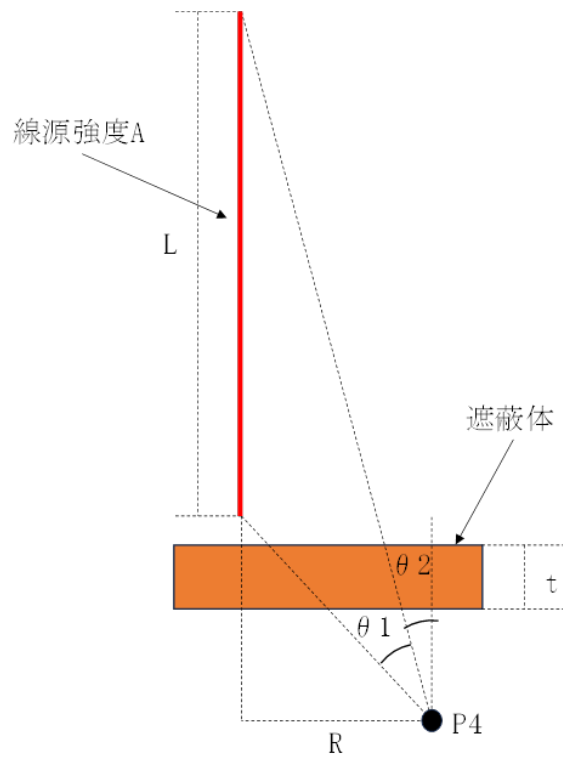


図 5.6-2 手計算 3 計算モデル (遮へい体有り)
(2/2)

5.6.2 手計算で使用するパラメータ

手計算で使用するパラメータを表 5.6-1 から表 5.6-6 に示す。ただし、ガンマ線のエネルギーについて、MCNP では 1.17MeV 及び 1.33MeV として計算したが、手計算では平均エネルギー 1.25MeV のガンマ線として計算した。また、線減衰係数、実効線量透過率及びビルドアップ係数については、遮へい体厚さを考慮した値を liner-log 内挿して使用した。

表 5.6-1 線減衰係数 ($Z=26, \rho=7.874\text{g/cm}^3$)

ガンマ線のエネルギー[MeV]	線減衰係数[cm^{-1}]
1.00	4.720E-01
1.25	4.260E-01 ^{※1}
1.50	3.845E-01

※1 1.00MeV 及び 1.50MeV の線減衰係数から 1.25MeV の値を内挿している

出典：日本アイソトープ協会 アイソトープ手帳 12 版 2020 年 3 月

表 5.6-2 遮へい体厚さ及び μt

遮へい体厚さ[cm]	μt (線減衰係数×遮へい体厚さ)
2	0.852
3	1.278
4	1.704
5	2.130
6	2.556
7	2.982
8	3.408
9	3.834
10	4.260

出典：日本アイソトープ協会 アイソトープ手帳 12 版 2020 年 3 月

表 5.6-3 実効線量透過率

遮へい体厚さ [cm]	μt	実効線量透過率		
		入射光子エネルギー[MeV]		
		1.00	1.25	1.50
—	0.500	8.67E-01	8.54E-01	8.41E-01
2	0.852	7.43E-01	7.26E-01	7.09E-01
—	1.000	6.96E-01	6.78E-01	6.60E-01
3	1.278	5.96E-01	5.77E-01	5.59E-01
4	1.704	4.70E-01	4.51E-01	4.34E-01
—	2.000	3.98E-01	3.81E-01	3.64E-01
5	2.130	3.66E-01	3.49E-01	3.33E-01
6	2.556	2.77E-01	2.63E-01	2.49E-01
7	2.982	2.09E-01	1.98E-01	1.86E-01
—	3.000	2.07E-01	1.95E-01	1.84E-01
8	3.408	1.54E-01	1.45E-01	1.36E-01
9	3.834	1.14E-01	1.06E-01	9.94E-02
—	4.000	1.01E-01	9.43E-02	8.80E-02
10	4.260	8.30E-02	7.72E-02	7.19E-02
—	5.000	4.74E-02	4.38E-02	4.04E-02

注：遮へい体厚さが「—」の箇所は実効線量透過率を linear-log 内挿して算出した。

出典：日本アイソトープ協会 アイソトープ手帳 12 版 2020 年 3 月

表 5.6-4 実効線量率定数

核種	主な光子のエネルギー と放出割合	実効線量率定数
⁶⁰ Co	1.173MeV 99.9% 1.332MeV 100% その他	0.305

出典：日本アイソトープ協会 アイソトープ手帳 12 版 2020 年 3 月

表 5.6-5 $e^{-\mu t}$ (鉄、 Co^{60} (1.25MeV))

遮へい体厚さ[cm]	μt (線減衰係数×遮へい体厚さ)	$e^{-\mu t}$
2	0.852	0.427
3	1.278	0.279
4	1.704	0.182
5	2.130	0.119
6	2.556	0.078
7	2.982	0.051
8	3.408	0.033
9	3.834	0.022
10	4.260	0.014

出典：日本原子力学会標準 γ 線ビルドアップ係数：2013 2013年12月

表 5.6-6 ビルドアップ係数

遮へい体厚さ [cm]	μt	ビルドアップ係数		
		入射光子エネルギー[MeV]		
		1.00	1.25	1.50
—	0.500	1.410E+00	1.395E+00	1.380E+00
2	0.852	1.707E+00	1.679E+00	1.651E+00
—	1.000	1.850E+00	1.815E+00	1.780E+00
3	1.278	2.088E+00	2.039E+00	1.990E+00
4	1.704	2.514E+00	2.437E+00	2.362E+00
—	2.000	2.860E+00	2.758E+00	2.660E+00
5	2.130	2.989E+00	2.878E+00	2.771E+00
6	2.556	3.451E+00	3.306E+00	3.167E+00
7	2.982	3.986E+00	3.798E+00	3.620E+00
—	3.000	4.010E+00	3.821E+00	3.640E+00
8	3.408	4.500E+00	4.266E+00	4.044E+00
9	3.834	5.076E+00	4.786E+00	4.513E+00
—	4.000	5.320E+00	5.006E+00	4.710E+00
10	4.260	5.664E+00	5.315E+00	4.988E+00
—	5.000	6.770E+00	6.304E+00	5.870E+00

注：遮へい体厚さが「—」の箇所はビルドアップ係数を linear-log 内挿して算出した。

出典：日本原子力学会標準 γ 線ビルドアップ係数：2013 2013年12月

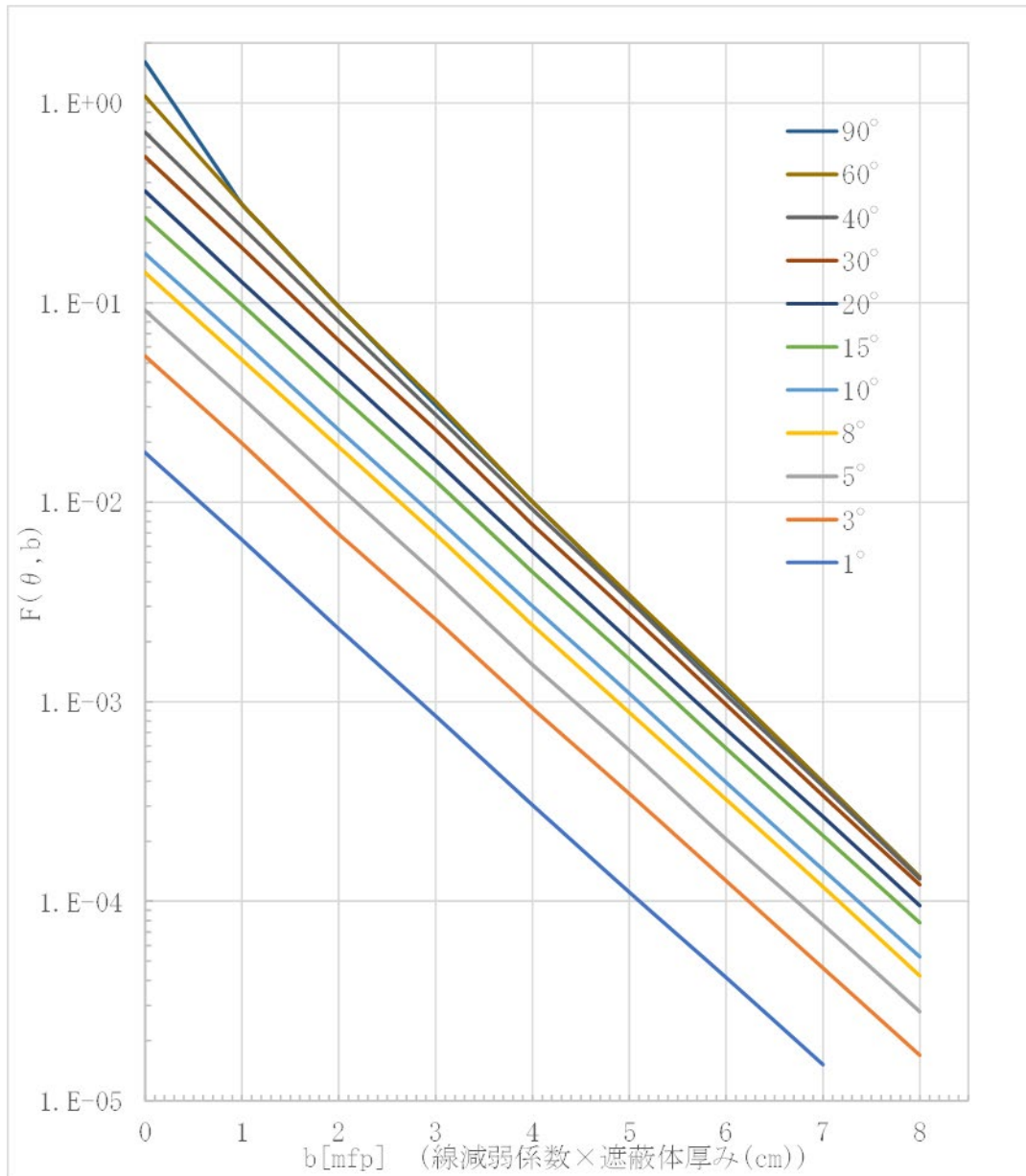


図 5.6-3 $F(\theta, b)$ 、 $b = 0 \sim 8.0$ 、 $\theta = 1 \sim 90^\circ$

出典 : Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
「Engineering Compendium on Radiation Shielding」 (1968)

5.6.3 計算ケース

(1) 代表的な簡易計算ケース

各計算手法の持つ特徴を整理するため、線源形状、線源からの距離及び遮へい体厚さをパラメータとした代表的な簡易計算ケースを対象に、MCNP との比較を実施した。代表的な簡易計算ケースの条件を表 5.6-7 に示す。また、それぞれの簡易計算ケースにおける計算モデルを図 5.6-4 から図 5.6-8 に示す。

表 5.6-7 簡易遮へい評価手法の適用検討のための代表的な簡易計算ケース

ケース No.	線源	遮へい体	評価する簡易遮へい手法
簡易計算ケース 1-1	点	無し	QAD、手計算 1、手計算 2
簡易計算ケース 1-2	点	有り	QAD、手計算 1、手計算 2
簡易計算ケース 1-3	ライン	無し	QAD、手計算 3
簡易計算ケース 1-4	ライン	有り	QAD、手計算 3
簡易計算ケース 1-5	点、ライン	無し	QAD

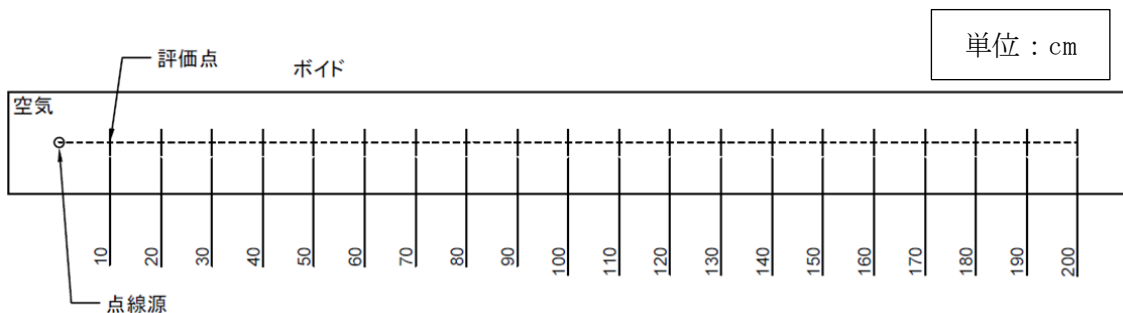


図 5.6-4 簡易計算ケース 1-1 の計算モデル（点線源、遮へい体無し）

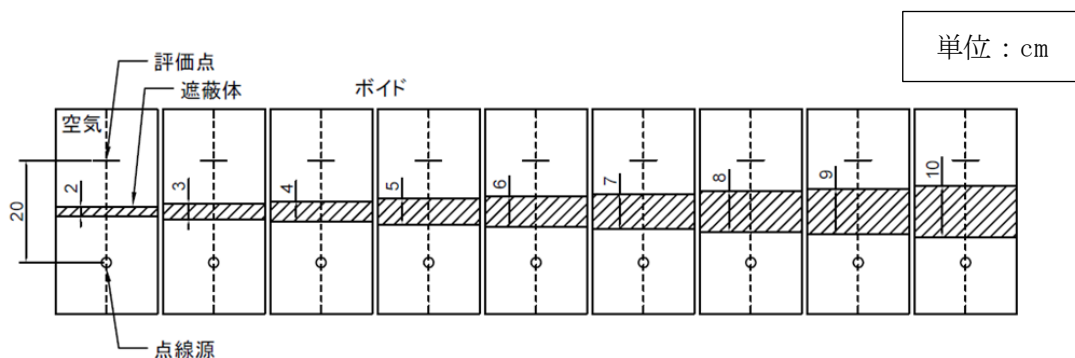


図 5.6-5 簡易計算ケース 1-2 の計算モデル（点線源、遮へい体有り）

注：遮へい厚さ毎にモデル化し計算を実施している。

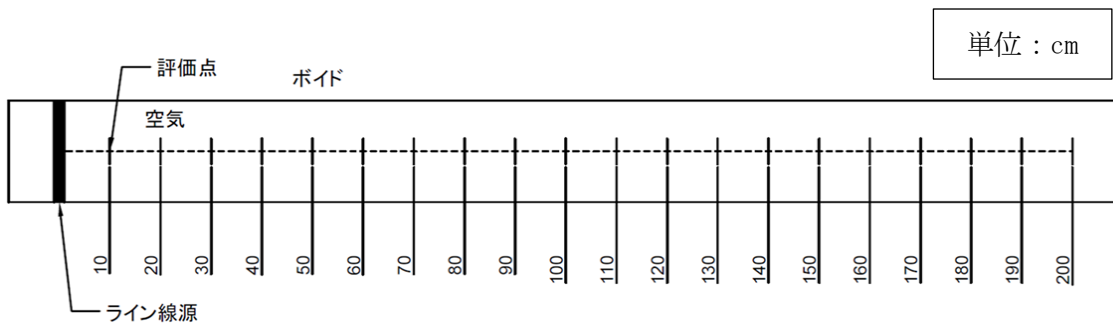


図 5.6-6 簡易計算ケース 1-3 の計算モデル (ライン線源、遮へい体無し)

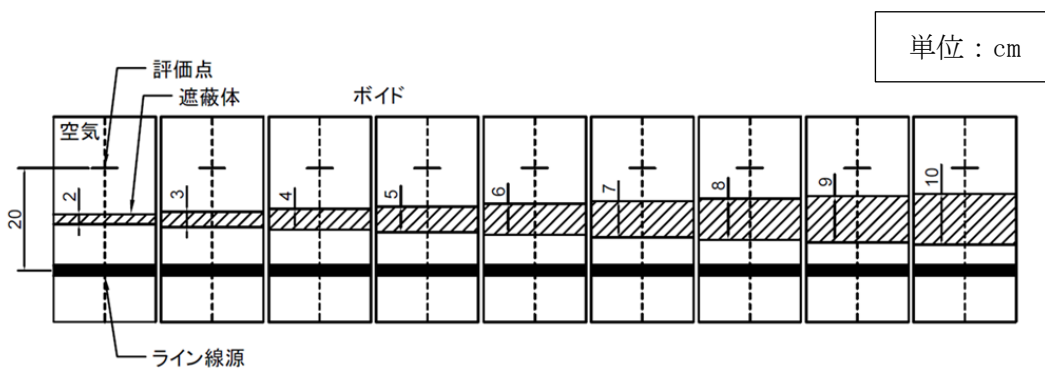


図 5.6-7 簡易計算ケース 1-4 の計算モデル (ライン線源、遮へい体有り)

注：遮へい厚さ毎にモデル化し計算を実施している。

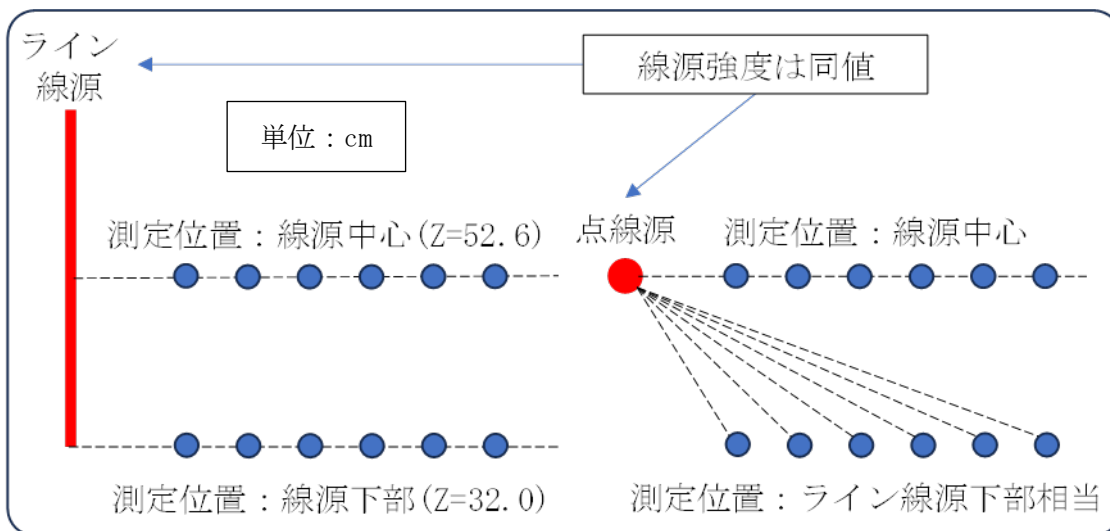


図 5.6-8 簡易計算ケース 1-5 の計算モデル (点/ライン線源、遮へい体無し)

(2) 令和 5 年度までの遮へい解析を模擬した計算ケース

令和 5 年度までに MCNP で実施した遮へい解析条件について、簡易遮へい評価手法を適用し、MCNP との比較を実施した。過去の遮へい解析条件を模擬した簡易計算ケースのうち、QAD の解析モデルを図 5.6-9 から図 5.6-18 に示す。また、手計算の計算モデルを表 5.6-8 に示す。なお、簡易遮へい評価手法を適用した簡易計算ケースは、5.4 項で線量計組成の影響を評価した MCNP の解析ケースを模擬したものである。

QAD については、MCNP の解析モデルを基本に直接線に関与しない形状については簡略化している。例えば、簡易計算ケース 2-1 では、遮へい体後方の開口部は省略し、簡易計算ケース 2-2 では、遮へい体厚さが MCNP では線源方向で 40mm、その他で 20mm であるが、全周を 40mm とモデル化している。また、ビルドアップ係数については、遮へい体外部の評価をする際には空気、遮へい体内部の評価をする際には鉄と設定した。

手計算 1 及び 2 については、ライン線源を点線源で模擬しており、線源中心を点線源の位置とみなした。評価式に用いる遮へい体厚さについては、20mm もしくは 40mm 厚さの遮へい体に対して、評価点と線源を結ぶ直線状に位置する遮へい体厚さに相当する長さをそれぞれ設定した。

手計算 3 については、ライン線源を設定した。遮へい体については開口部の位置を考慮し、遮へい体を通過する領域と遮へい体を通過しない領域を設定した。簡易計算ケース 2-1 及び 2-2 では、遮へい体の開口部と評価点の位置関係を考慮し、線源と評価点の角度に応じて遮へい体を通過する領域及び遮へい体を通過しない領域をそれぞれ設定した。簡易計算ケース 2-3 及び 2-4 については、遮へい体に開口部があるものの、遮へい体の開口部と評価点の位置関係を考慮し、全て遮へい体を通過する領域と設定した。簡易計算ケース 2-5 については、線源方向に開口部が位置しないため、全て遮へい体を通過する領域と設定した。

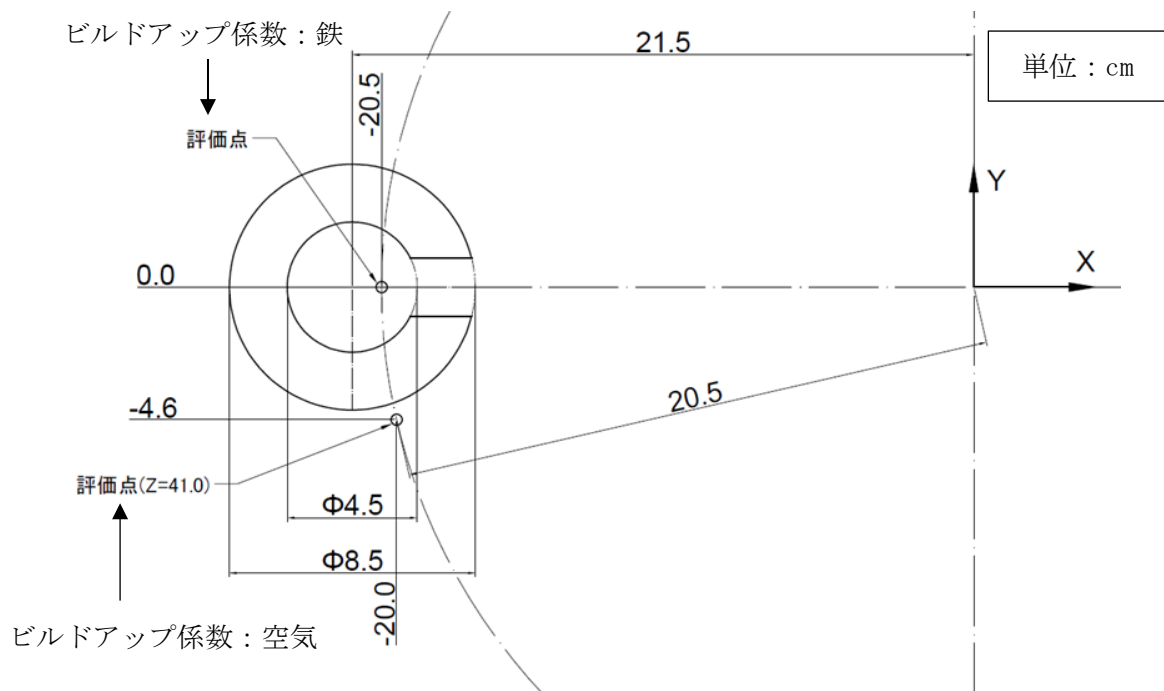


図 5.6-9 簡易計算ケース 2-1 の QAD 解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

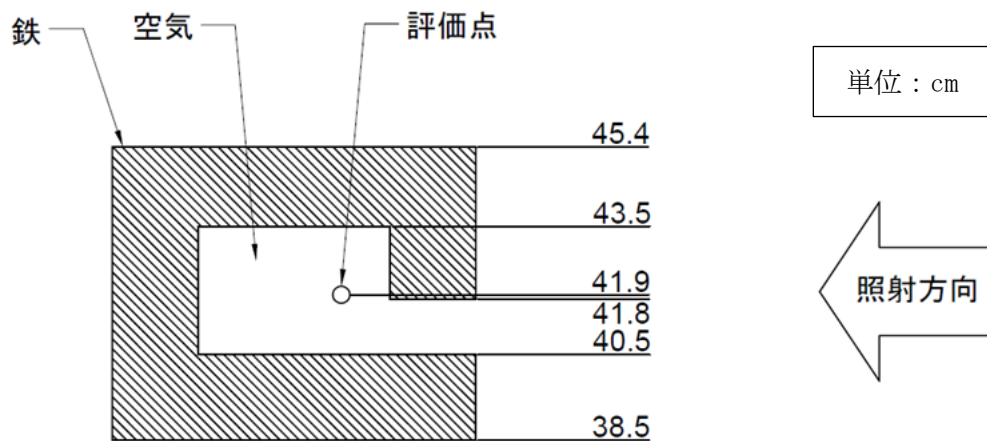


図 5.6-10 簡易計算ケース 2-1 の遮へい体解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

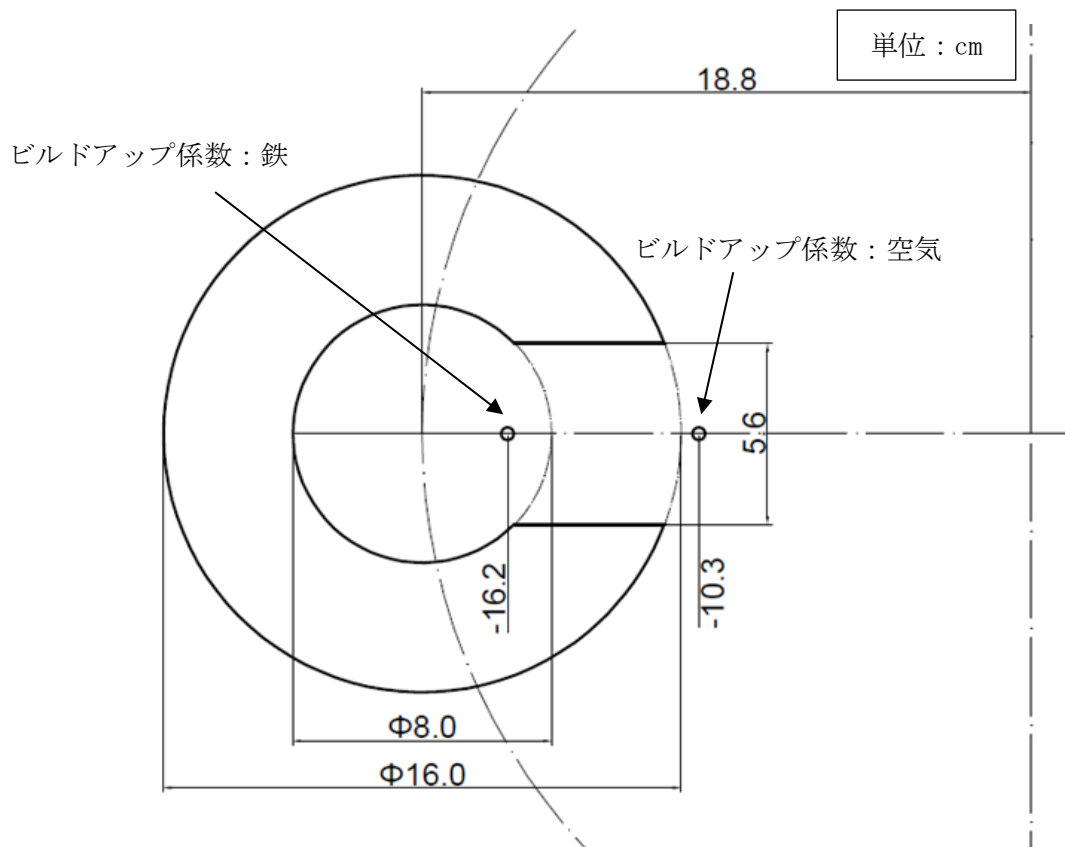


図 5.6-11 簡易計算ケース 2-2 の QAD 解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

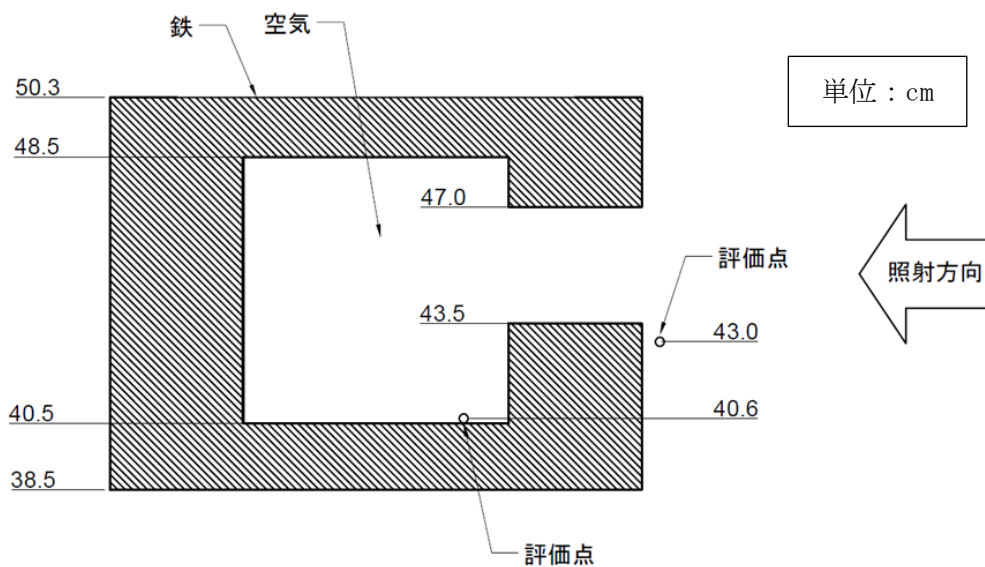


図 5.6-12 簡易計算ケース 2-2 の遮へい体解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

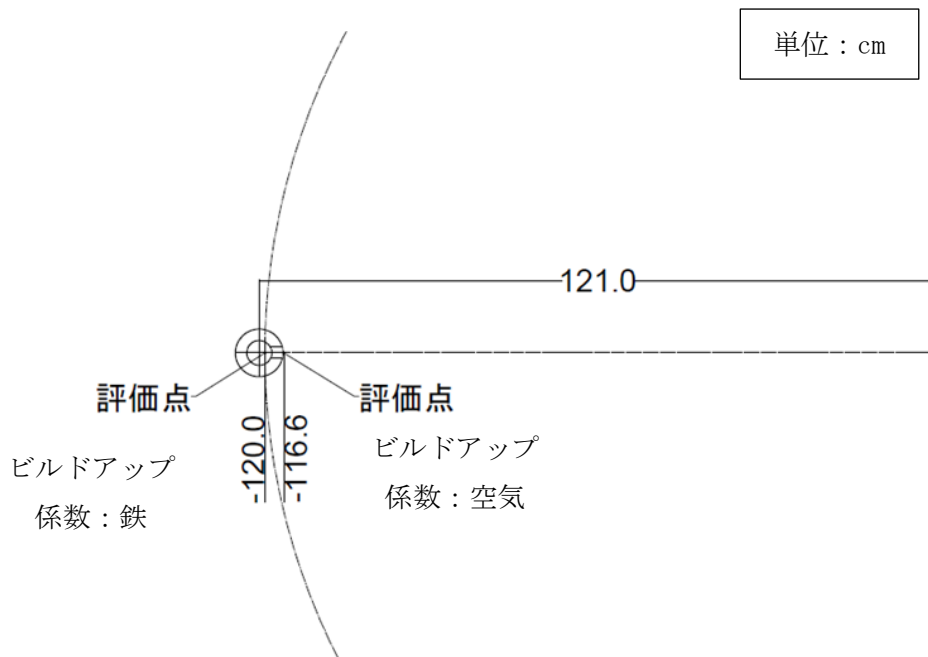


図 5.6-13 簡易計算ケース 2-3 の QAD 解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

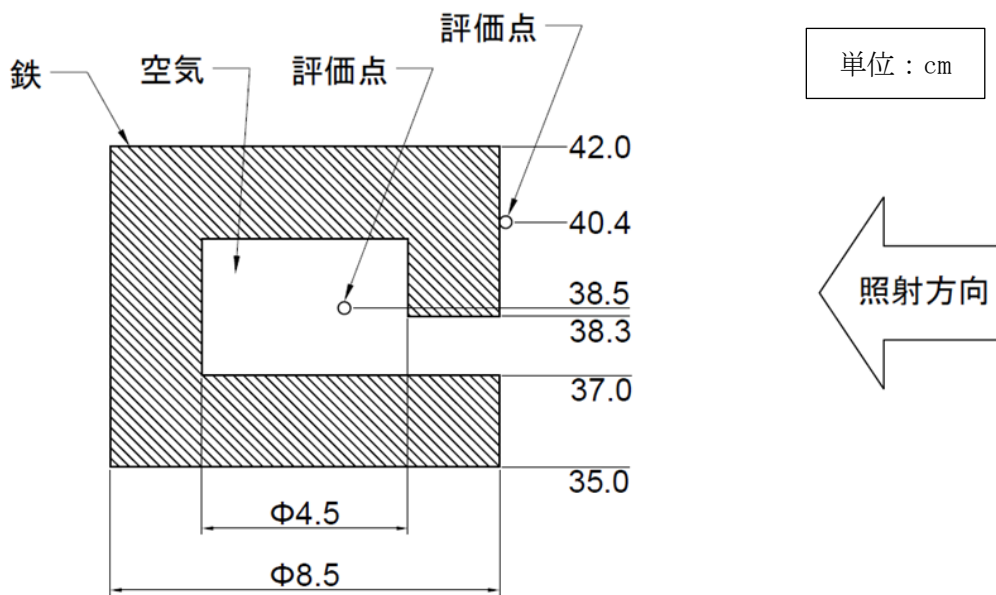


図 5.6-14 簡易計算ケース 2-3 の遮へい体解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

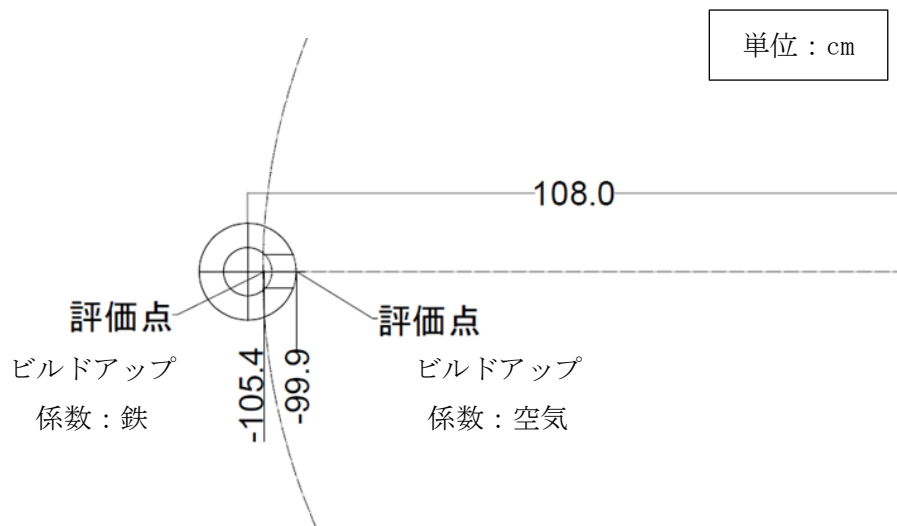


図 5.6-15 簡易計算ケース 2-4 の QAD 解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

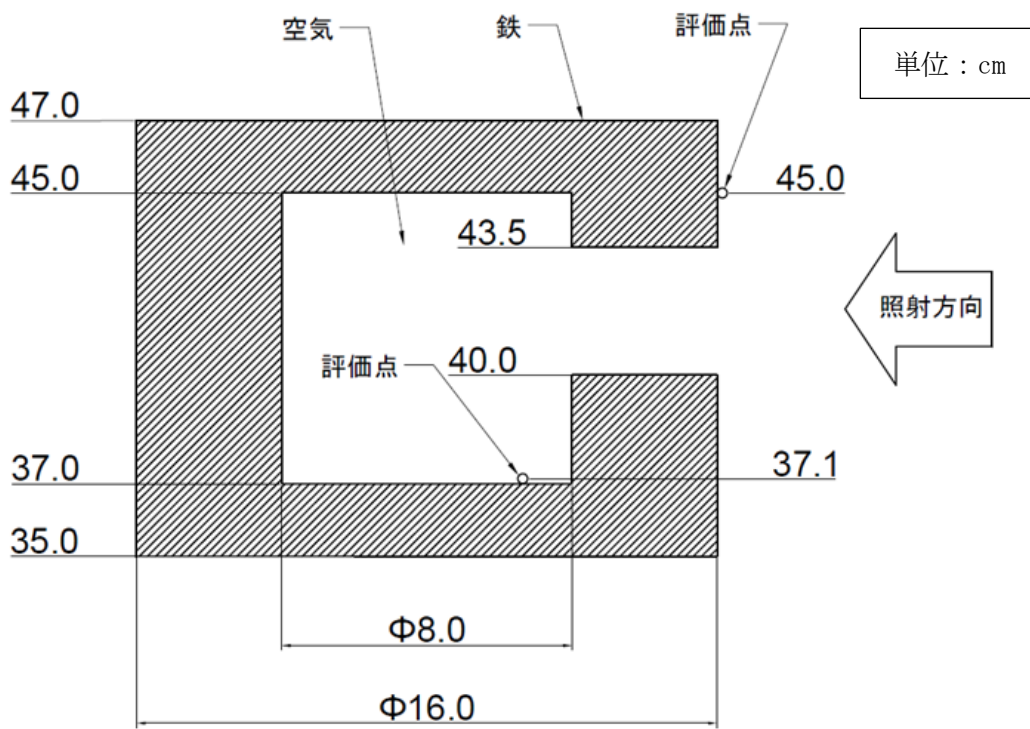


図 5.6-16 簡易計算ケース 2-4 の遮へい体解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

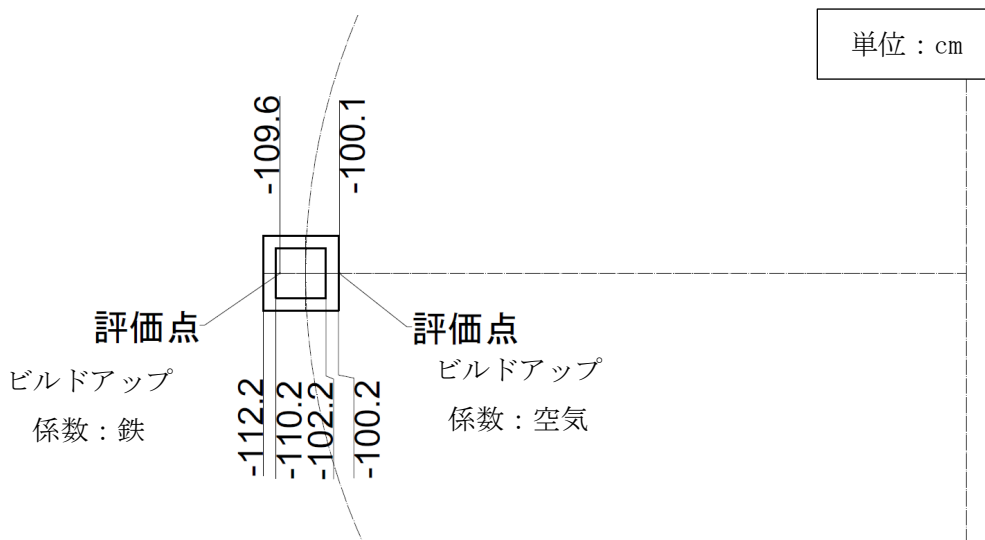


図 5.6-17 簡易計算ケース 2-5 の QAD 解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

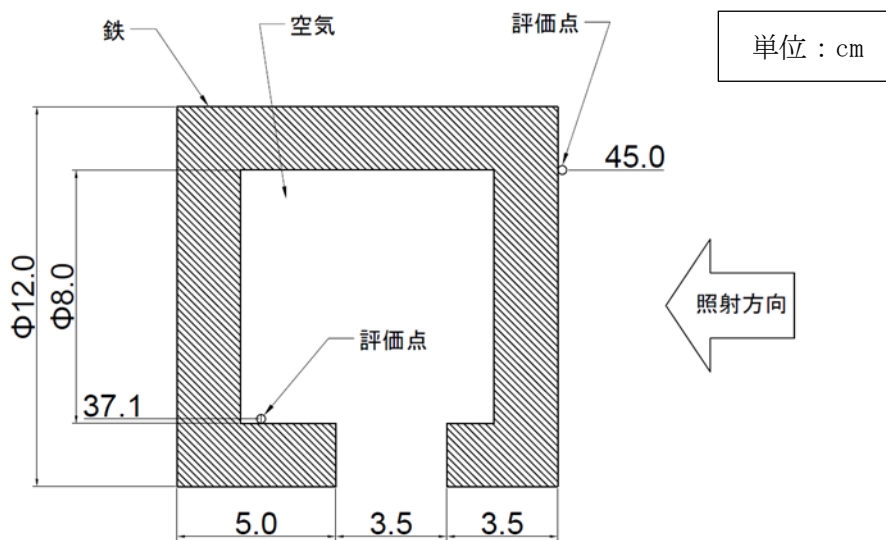
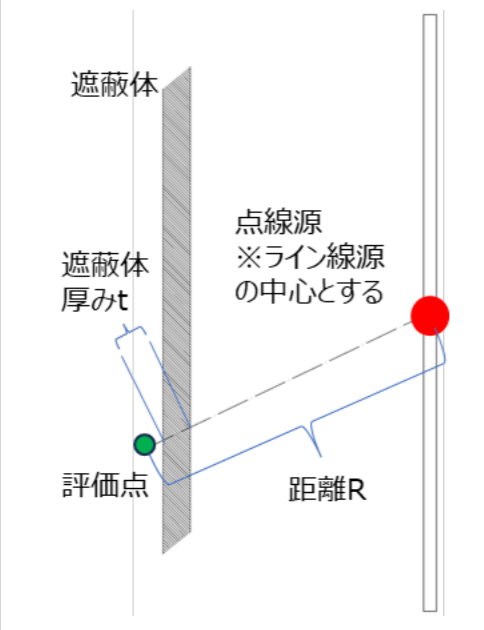
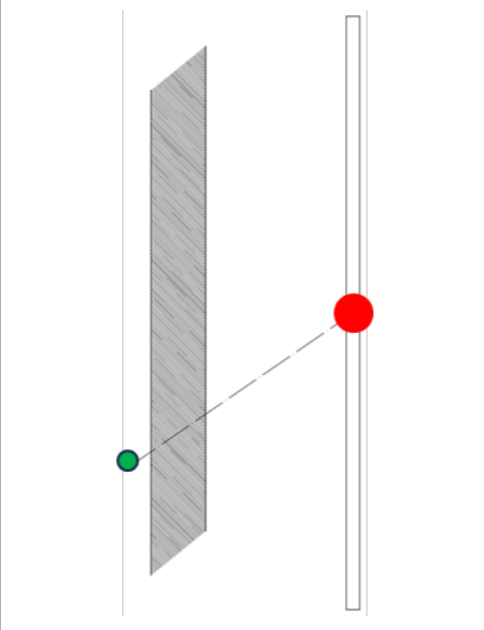
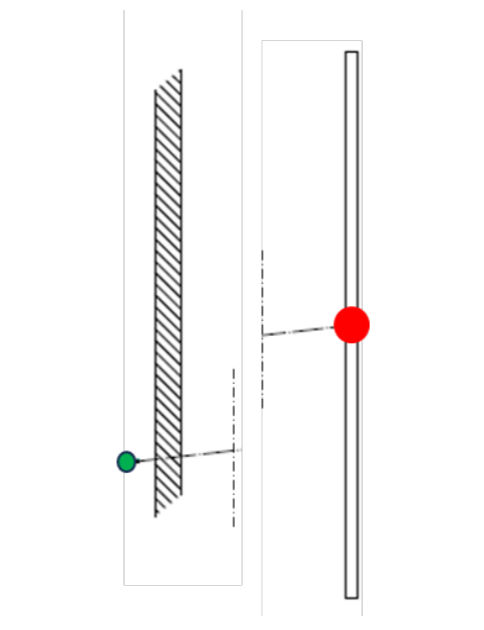
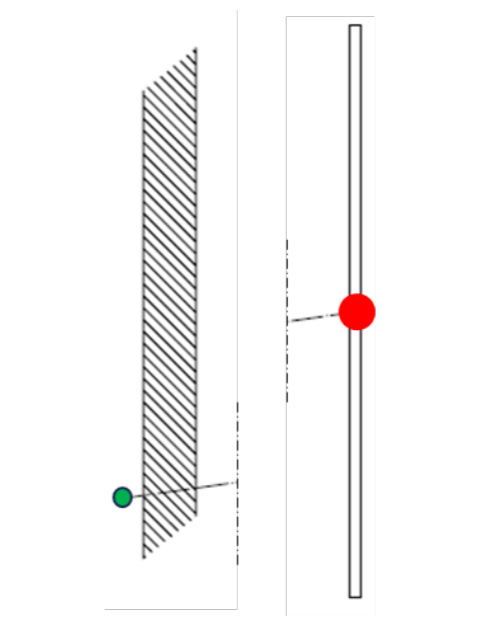
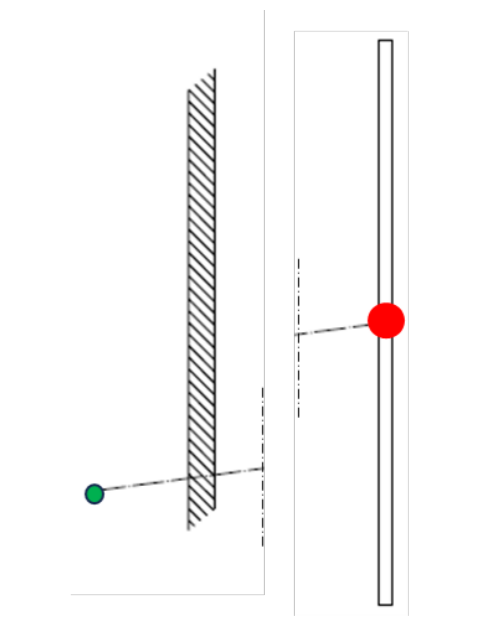
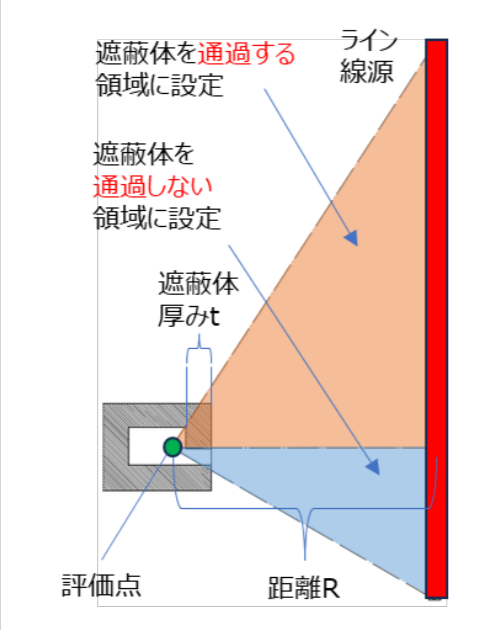
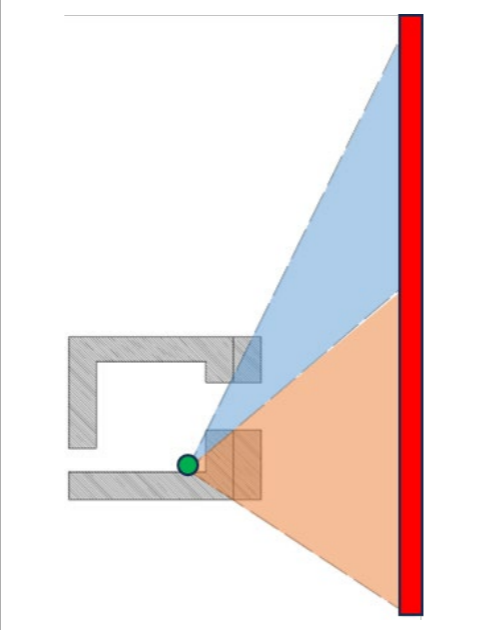
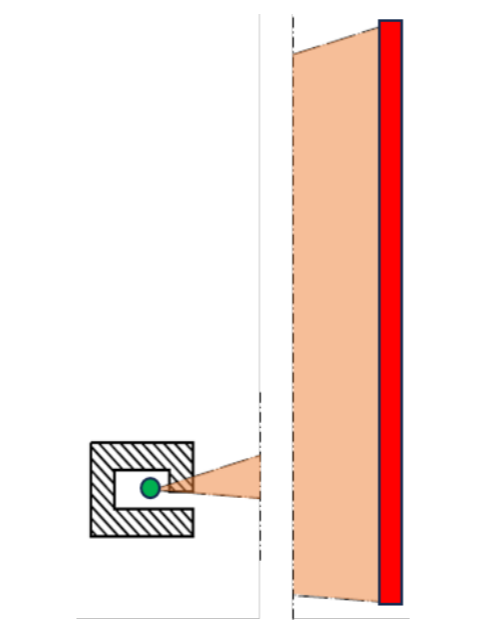
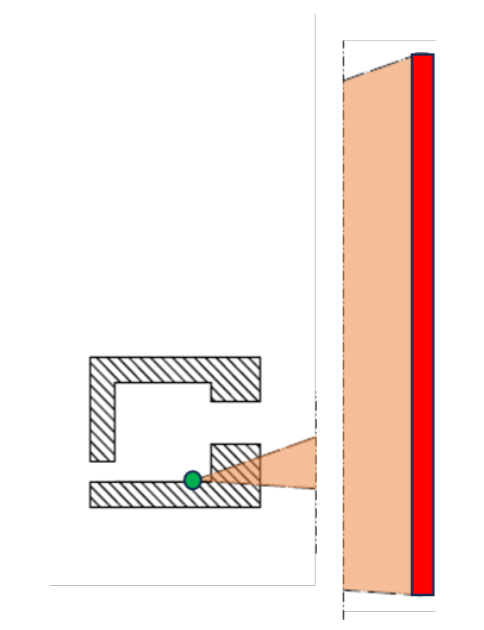
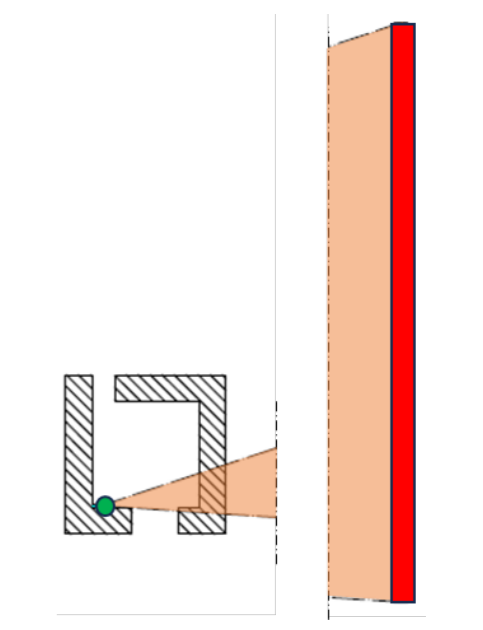


図 5.6-18 簡易計算ケース 2-5 の遮へい体解析モデル

注：直接線に関与しない形状は簡略化している

表 5.6-8 過去の遮へい解析条件を模擬した簡易計算ケースの手計算モデル

簡易計算ケース	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5
線源形状	ライン線源	ライン線源	ライン線源	ライン線源	ライン線源
線源中心から評価点までの距離[mm]	約 200	約 200	約 1200	約 1100	約 1100
遮へい体厚さ[mm]	20	40	20	40	20
線源方向開口部の有無	有り	有り	有り	有り	無し
相当する 5.4 項の解析ケース	解析ケース 1-1	解析ケース 1-2	解析ケース 1-3	解析ケース 1-4 (遮へい体前方から照射)	解析ケース 1-4 (遮へい体上方向から照射)
手計算 1 及び 2 の 計算モデル					
手計算 3 の計算モデル					

6. 故障原因調査の実施

令和5年度までの照射試験結果から、放射線照射によるセンサの故障挙動を確認し、照射パラメータの耐放射線性への影響を評価した。光電センサにおいては、令和2年度の故障調査で、電源回路部のトランジスタ及びダイオードに破損が確認された。ここで、光電センサ故障時には出力電圧の低下及び検知異常等の故障挙動が確認されており、故障箇所の違いが影響を与えていると考えられるが、そのメカニズムについては明らかとなっていない。そこで、追加照射試験を行い、各センサの故障原因調査を実施するとともに、センサの故障メカニズムの検討を行った。

6.1 センサの分解による構成部品調査

センサの分解による構成部品調査では、照射試験を行うセンサの構成部品を決定するため、センサを分解し、構成部品を調査した。調査対象センサは、故障時の集積吸収線量のばらつきが比較的小さく、故障挙動が明確である光電センサ及び測域センサを選定した。

6.2 構成部品の照射試験

6.2.1 照射試験対象

6.1 項のセンサの分解による構成部品調査結果を踏まえて、照射試験対象を決定した。ここではセンサに使用が確認されたバイポーラトランジスタ、MOSFET、JFET、コンデンサ、ダイオード、コンパレータ、オペアンプ及び三端子レギュレータを対象に照射を実施した。コンパレータ、オペアンプ及び三端子レギュレータは集積回路である。照射試験対象とした構成部品を表6.2-1に示す。バイポーラトランジスタ、MOSFET、JFET、コンデンサ及びダイオードについては、ばらつきの評価のため、サンプル数を50もしくは100とした。また、オペアンプについては、特性評価に時間がかかるためサンプル数を10とした。コンパレータ及び三端子レギュレータについては、その場測定（照射中にデータ取得）を行ったため、同時に多くのデータを取得することが難しいことからサンプル数は1である。

また、それぞれの構成部品の概要を以下に示す。

表 6.2-1 照射試験対象とした構成部品

構成部品	個数
NPN バイポーラトランジスタ	50
PNP バイポーラトランジスタ	50
n チャネル MOSFET	100
p チャネル MOSFET	100
n チャネル JFET	100
アルミ電解コンデンサ 10 μ F	50
積層セラミックコンデンサ 100nF	50
積層セラミックコンデンサ 10 μ F	50
小信号用汎用ダイオード	100
整流ダイオード	50
3mm 赤色 LED	50
フォト IC ダイオード	50
コンパレータ	1
オペアンプ	10
三端子レギュレータ	1

(1) バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタ (Bipolar Junction Transistor) は、p 型半導体と n 型半導体の PN 接合によって構成される 3 端子の半導体素子である。エミッタ (E)、ベース (B)、コレクタ (C) という 3 つの端子を持ち、電流の増幅やスイッチングの機能を有している。バイポーラトランジスタには、NPN と PNP 型の 2 種類があり、図 6.2-1 に示すように NPN トランジスタは p 型半導体を 2 つの n 型半導体で挟んだ構造で、PNP トランジスタは n 型半導体を 2 つの p 型半導体で挟んだ構造である。動作原理としては、ベースに電流を流すことで、エミッタ・コレクタ間の電流を制御する。バイポーラトランジスタの主な特徴は、微小な信号で大きな電流を制御可能であること、ノイズに強く、高周波数での使用が可能であること、電流増幅性がありアナログ・デジタル信号の増幅に使用可能なこと、スイッチング可能なこと、発振回路に使用可能であることがあげられる。具体的な応用例としては、増幅器、発振器、温度センサ、低電圧でのスイッチング等がある。

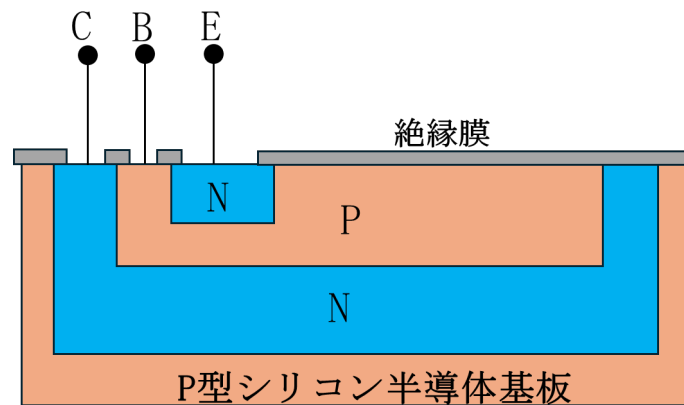


図 6.2-1 NPN バイポーラトランジスタの構造概念図

(2) MOSFET

MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) は、現代の電子機器にひろく使用されている半導体素子のひとつである。MOSFET は、図 6.2-2 に示すようにゲート (G)、ドレイン (D)、ソース (S) の 3 つの端子から構成されており、シリコン基板上に酸化膜 (SiO_2) を形成し、その上にゲート金属電極が配置されている。ゲート電圧によってドレインとソース間の電流を制御する。MOSFET には、n チャンネル型と p チャンネル型の 2 種類があり、その特徴は、バイポーラトランジスタと異なり、電圧で制御するため、リーク電流が少なく低消費電力が小さいことがあげられる。集積回路に適しているため、小型化が容易であり、スイッチング電源、自動車制御電子機器、CPU、スマートフォン等に使用されている。

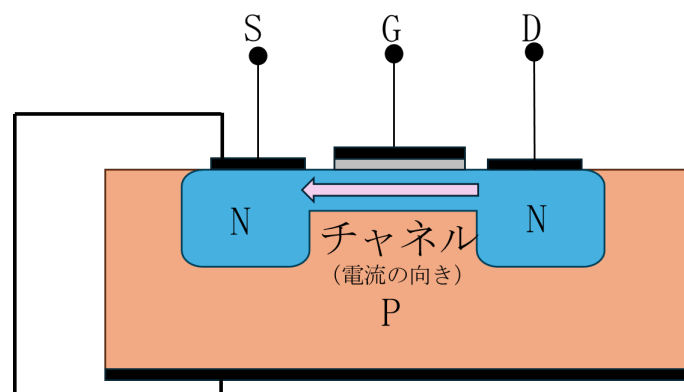


図 6.2-2 n チャンネル MOSFET の構造概念図

(3) JFET

JFET (Junction Field Effect Transistor) は、電界効果トランジスタの一種で、ソース(S)、ゲート(G)、ドレイン(D)の3端子で構成されている。基本構造は、図 6.2-3 に示すように p 型または n 型半導体の土台に、逆の型の半導体をゲート部分に埋め込むことで、PN 接合を形成している。ゲート電圧の大きさでドレイン・ソース間の電流を制御しており、ゲートに電圧を印加して空乏層を生成し、その空乏層の厚さを変えることで、電流の流れを制御する。特徴として、高入力インピーダンスを有し、わずかな入力電流しか流れないため、微弱な信号の増幅に適している。JFET は、低ノイズ回路で使用されることが多く、スイッチング素子としても機能する。特に、その高入力インピーダンスと低ノイズ特性から、微弱な信号を扱う回路、つまりセンサ等の電子回路では不可欠である。

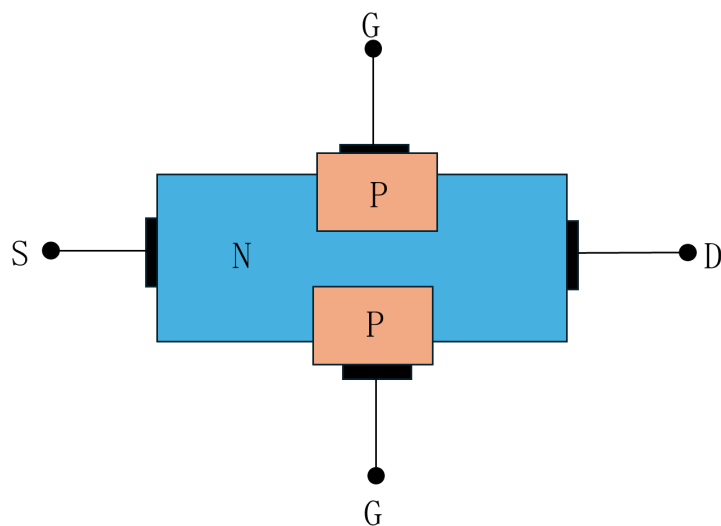


図 6.2-3 nチャネル JFET の構造概念図

(4) コンデンサ

構成部品の照射試験では、アルミ電解コンデンサ及びセラミックコンデンサの2種類のコンデンサを対象とした。アルミ電解コンデンサは、電子回路において広く使用される重要な受動部品のひとつであり、図 6.2-4 に示すように、陽極アルミ箔、電解紙、陰極アルミ箔、電解液、アルミケース等から構成される。誘電体として酸化皮膜 (Al_2O_3) を使用し、電気を蓄える機能を持っている。電解コンデンサの主な特徴として、サイズに対して大きな静電容量を実現できること、他のコンデンサと比較して製造コストが低いこと、一般的に極性を持つこと等があげられる。

セラミックコンデンサは、小型ながらセラミックを誘電体として使用し、複数の電極層を積層することで静電容量を有している。セラミックコンデンサの主な特徴として、高周波特性があり、インダクタンス成分が小さいため、高周波信号を扱う際に信号の減衰が少ない。また、セラミック素材を使用しているため、耐熱性も高く、高温環境下でも安定して動作可能である。

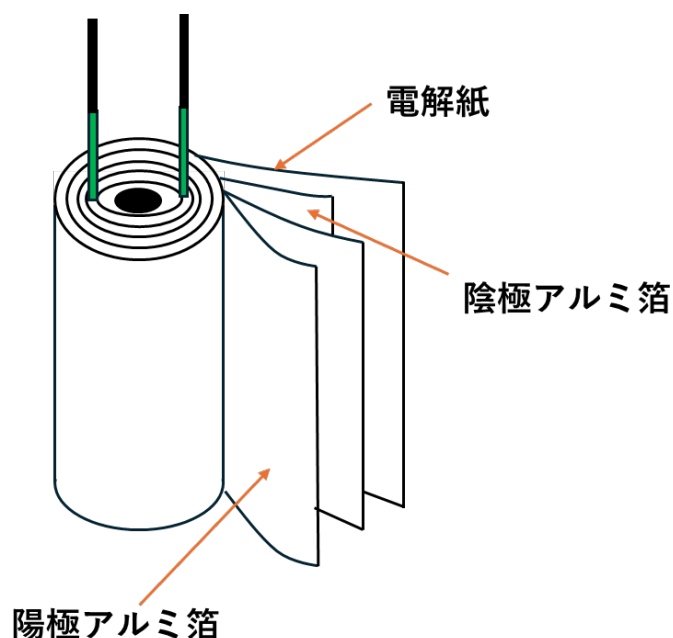


図 6.2-4 アルミ電解コンデンサの構造概念図

(5) ダイオード

ダイオードには、商用周波数の整流に適している整流ダイオード、高速スイッチング用途に適しているスイッチングダイオード、金属と半導体の接合を利用することで順方向電圧が低く、高周波整流に適しているショットキーバリアダイオード等がある。整流ダイオードは、p 型半導体と n 型半導体を接合した構造を持つ PN 接合ダイオードの一種で、PN 接合ダイオードの構造は、図 6.2-5 に示すように、メサ型とプレーナ型に分類される。

LED については、プレーナ型が現在主流となっており、表面が平坦で、PN 接合部を含む表面全体が絶縁物の保護膜で覆われているという特徴がある。

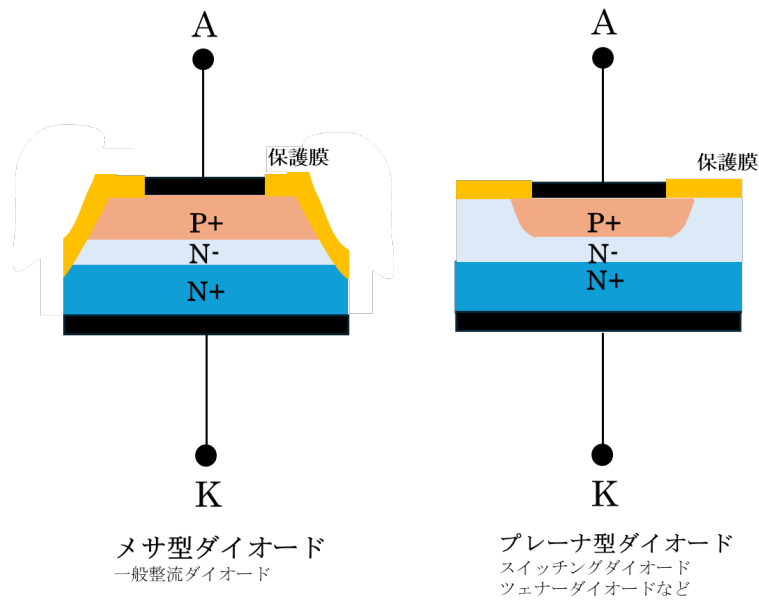


図 6.2-5 PN 接合型ダイオードの構造

(6) コンパレータ

コンパレータは、二つの電圧または電流を比較し、その大小関係に応じて出力が切り替わる電子回路素子で、主に2つの入力端子（非反転入力端子と反転入力端子）と1つの出力端子を持ち、位相補償容量を持たないため、オペアンプと比べ応答性が良い。そして、入力電圧の大小関係に応じて、High（高）またはLow（低）のデジタル信号を出力する。ある市販のコンパレータの電気的特性が記載されたデータシートから引用した等価回路を図 6.2-6 に示す。

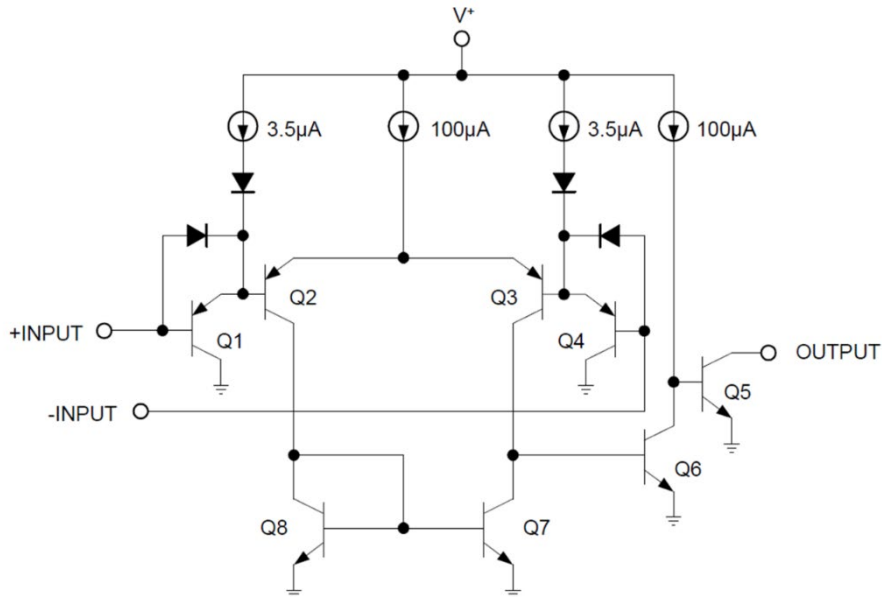


図 6.2-6 コンパレータの等価回路の例
(ある市販のコンパレータ IC のデータシートより引用)

(7) オペアンプ

オペアンプ（演算増幅器）は、2つの入力端子（非反転入力端子と反転入力端子）と1つの出力端子を持つ差動増幅器で、2つの入力の差を非常に大きな倍率で増幅する。オペアンプの主な特徴として、高い開ループ利得、高入力インピーダンス、低出力インピーダンス及び広い周波数帯域があげられる。内部構造は一般的に入力段（差動増幅段）、利得段、出力段の3段の回路構成になっており、増幅回路、コンパレータ、積分回路、微分回路、フィルタ回路、発振回路等に使用される。通常、負帰還をかけて使用されることで、回路の安定性が向上し、外部抵抗で任意の増幅率を設定可能である。ある市販のオペアンプのデータシートから引用した等価回路を図 6.2-7 に示す。

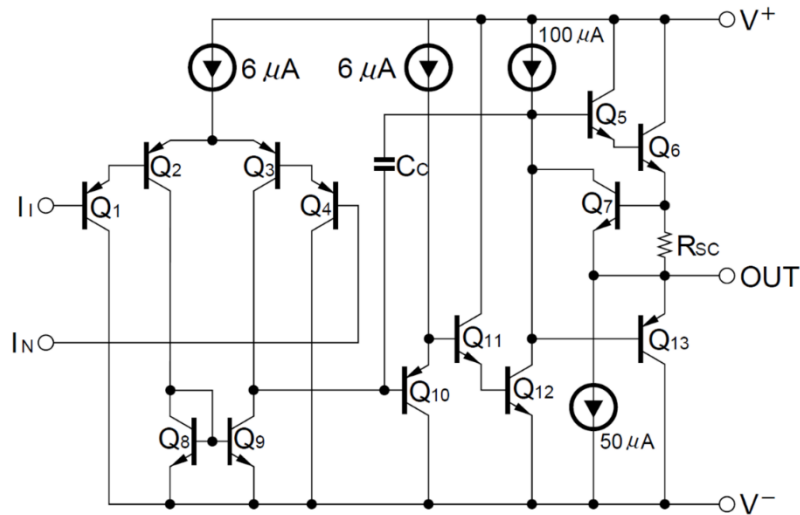


図 6.2-7 単電源動作オペアンプの等価回路の例
(ある市販のオペアンプのデータシートより引用)

(8) 三端子レギュレータ

三端子レギュレータは、入力端子 (IN)、出力端子 (OUT)、グラウンド端子 (GND) の3つの端子を持ち、電圧を制御する。主な特徴として、簡単な回路構成で使用できることがあげられ、基本的に入出力端子にコンデンサを接続するだけで動作する。三端子レギュレータは、入力電圧から余分な電圧をカットして安定した出力電圧を生成しているため、入力電圧は出力電圧よりも一定以上高い必要があり、この最小必要差はドロップアウト電圧と呼ばれる。通常、1V から 2V 程度のドロップアウト電圧が必要であるが、三端子レギュレータの入力電圧と出力電圧の差が大きいと、余分な電圧を熱として放出するため効率が低下し、発熱が問題になることがある。ある市販の三端子レギュレータのデータシートから引用した等価回路の例を図 6.2-8 に示す。

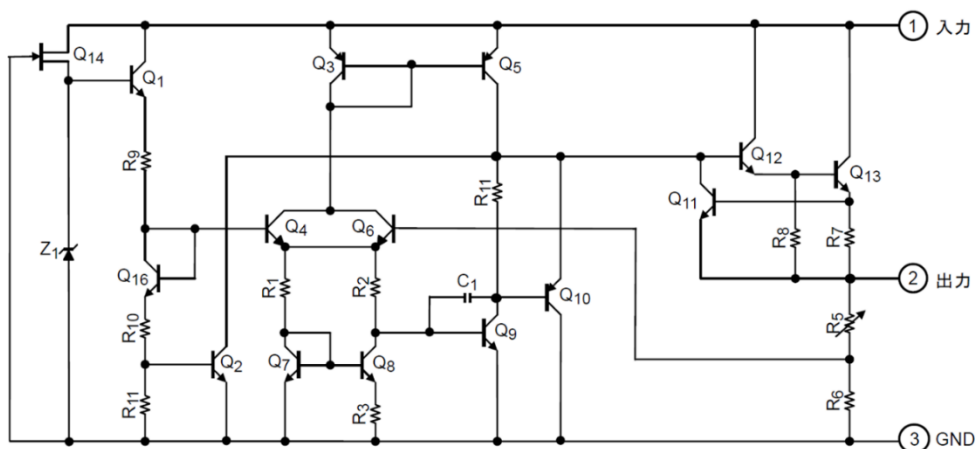


図 6.2-8 三端子レギュレータの等価回路の例
(ある市販の三端子レギュレータのデータシートより引用)

6.2.2 構成部品の特性評価方法

各構成部品に照射を実施し、一定の集積吸収線量となった時点で照射を停止し、電気特性等を評価し、放射線による劣化を評価した。各構成部品の特性評価方法を以下に示す。また、コンパレータ及び三端子レギュレータについては、測定システムを工夫し、ガンマ線照射中にその場測定を実施した。

(1) バイポーラトランジスタ

バイポーラトランジスタの基本特性として、直流電流増幅率（hFE）を測定した。hFEは図6.2-9に示すように、コレクタ電流とベース電流の比で表される。ここでは、デジタルテストのhFE測定機能を用いて評価した。

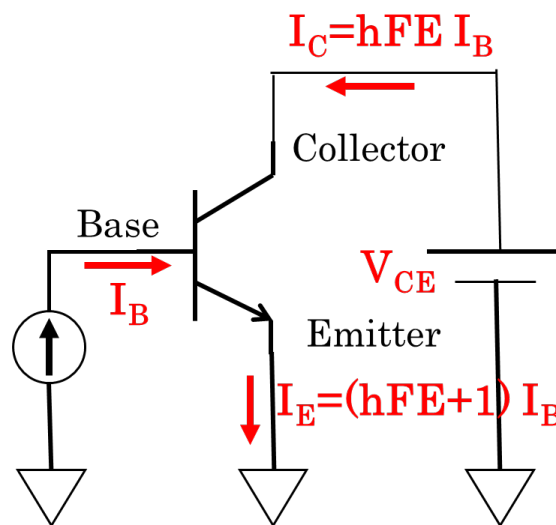


図 6.2-9 バイポーラトランジスタの特性評価試験概念図

(2) MOSFET

MOSFETの特性評価では、図6.2-10に示すように、デジタルテストを用いて、 I_D - V_{DS} 特性を取得した。また、ドレイン・ソース電圧を一定に保ちながら V_{GS} を掃引し、 I_D の変化を観測し、 I_D が5.0mAに達したときにこれを（オン）ゲートしきい値電圧と定義した。

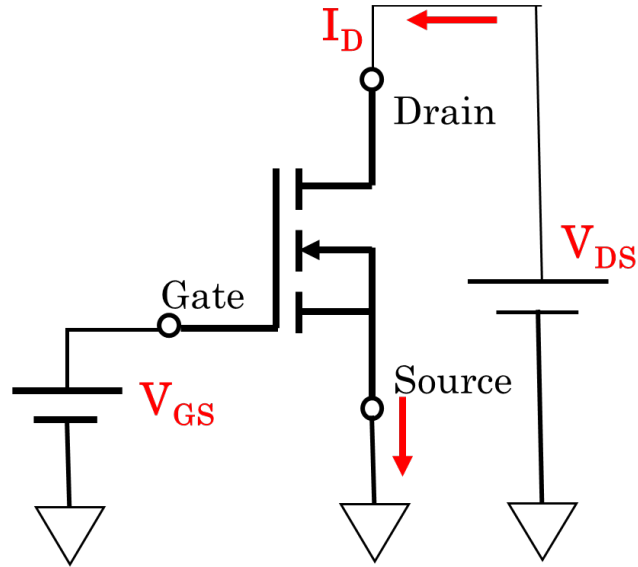


図 6.2-10 nチャネルMOSFETの特性評価試験概念図

(3) JFET

JFET 特性評価では、図 6.2-11 に示すように、ドレイン-ソース間電圧を固定して、 V_{GS} を掃引し、 I_D の変化を評価した。

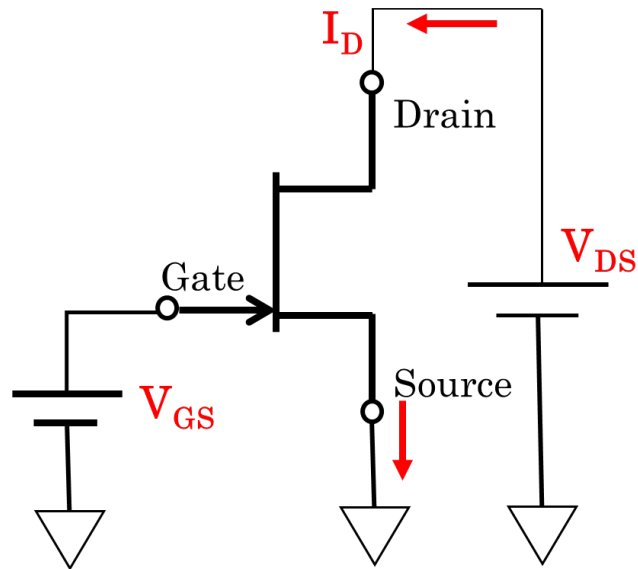


図 6.2-11 nチャネルJFETの特性評価試験概念図

(4) コンデンサ

コンデンサの特性については、インピーダンスアナライザで静電容量を測定した。使用したインピーダンスアナライザでは静電容量を測定するための等価回路の選択があるが、ここでは、図 6.2-12 に示すキャパシタ C_P と抵抗器 R_P の並列回路のモデルにて C_P を測定した。ここで、静電容量 $10\mu\text{F}$ のアルミ電解コンデンサの測定周波数は 100Hz 、 $10\mu\text{F}$ の積層セラミックコンデンサの測定周波数は 100Hz 、 100nF の積層セラミックコンデンサの測定周波数は 1kHz である。

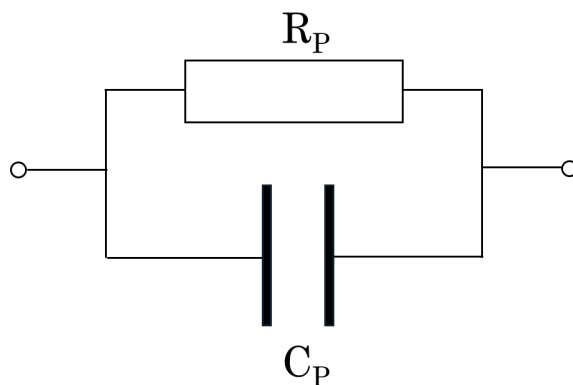


図 6.2-12 コンデンサの等価並列回路

(5) ダイオード

ダイオード特性については、図 6.2-13 に示すように、デジタルテスタで、アノード・カソード間に流れる 5mA の順方向電流となる電圧 V_f を測定した。

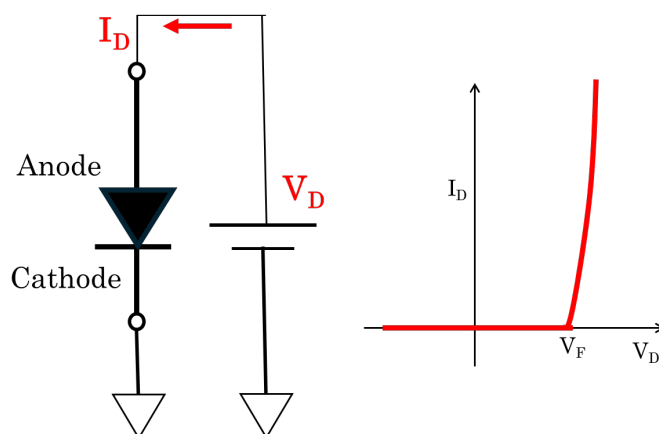


図 6.2-13 ダイオードの特性評価試験概念図

(6) コンパレータ

コンパレータの特性については、コンパレータをガンマ線照射室内に設置し、照射室外より、2Hz の TTL 信号 (5V) の入力信号、及び電源 5V を入力し、出力信号をデータレコーダで測定した。コンパレータのガンマ線照射試験の回路図を図 6.2-14 に、コンパレータ特性評価試験回路の写真を図 6.2-15 に示す。

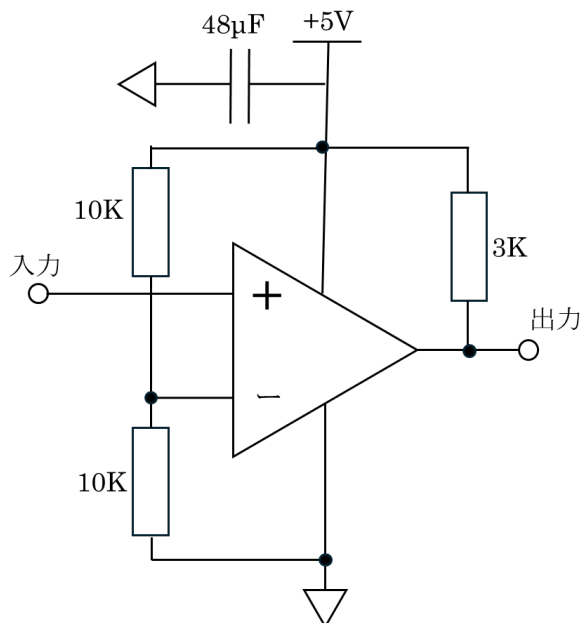


図 6.2-14 コンパレータ特性評価試験回路

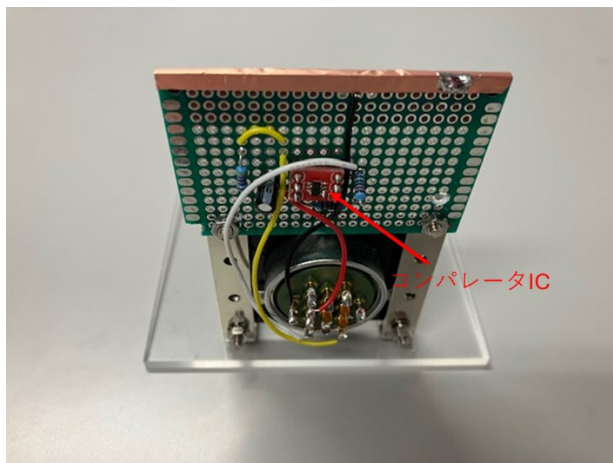


図 6.2-15 コンパレータ特性評価試験回路の様子

(7) オペアンプ

オペアンプの特性について、図 6.2-16 に示す電子回路を作成し、周波数に対する電圧利得特性を評価した。ここでは、ファンクションジェネレータからの正弦波を入力信号として、出力される信号の振幅をオシロスコープで観測し、入力信号と出力信号の振幅の比を求めた。

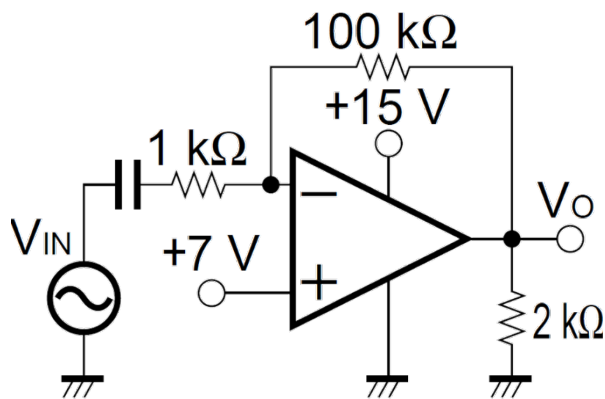


図 6.2-16 オペアンプ V_o - f 特性試験回路

(8) 三端子レギュレータ

三端子レギュレータの特性については、三端子レギュレータをガンマ線照射室内にして、入力信号に DC 電圧を印加し、出力信号電圧を測定した。三端子レギュレータを図 6.2-17 に示す。

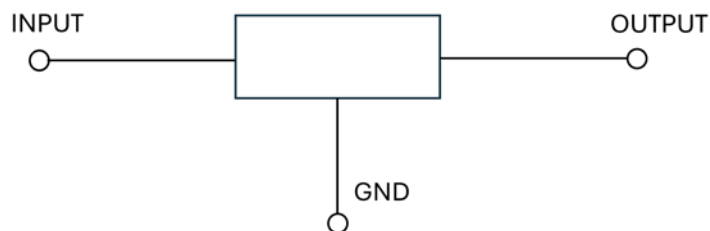


図 6.2-17 三端子レギュレータ

6.2.3 照射試験場所

ガンマ線照射には大阪大学産業科学研究所の⁶⁰Coガンマ線照射施設を利用した。2011年2月10日の⁶⁰Coの放射能は352TBqであり、半減期5.2714年から算出すると照射実施の2025年1月の放射能は57TBqとなる。線源から試料までの距離、照射時間及び実効線量率定数 $0.305(\mu\text{Sv}\cdot\text{m}^2)/(\text{MBq}\cdot\text{h})$ を用いて吸収線量を算出した。

線源からの距離に対する吸収線量率を表6.2-2に示す。⁶⁰Co線源の床面より10cmの位置に強度の中心があり、線量に応じて、最短距離1cmの位置に設置し、照射を実施した。なお、実効線量(Sv)を照射試料の位置での空気に対する吸収線量(Gy)として評価した。

表 6.2-2 照射距離と吸収線量率の関係

照射距離[cm]	吸収線量率[kGy/h]
1	190
2	47
5	7.6
10	1.9
30	0.21
100	0.019

7. カスタマイズしたセンサの作動試験の実施

令和5年度までの照射試験では、センサ単体の耐放射線性データ取得及びカスタマイズを行ってきた。しかし、実環境では機器に付属するセンサを対象にカスタマイズを行い、耐放射線性を向上させる必要がある。そこで、機器に付属するセンサへのカスタマイズを実施し、作動試験により適合性を評価した。また、センサが付随した機器に対して、一部のセンサをカスタマイズした状態で照射試験を実施し、センサの挙動を比較した。

7.1 照射対象

低レベル放射性廃棄物取扱施設等での搬送装置として、コンベヤを想定した。コンベヤには、位置検出のため、光電センサが使用されている。そこで、コンベヤ及びコンベヤに付随する光電センサを試験対象とした。作動試験に用いた光電センサの仕様及び配線図を図7.1-1に示す。

作動試験では、光電センサが物体を検知した時に、NPN オープンコレクタの電流が流れるように設定した。つまり、物体を検知した時には出力電圧は0Vを出力し、物体を検知しない時には、24Vを出力する。

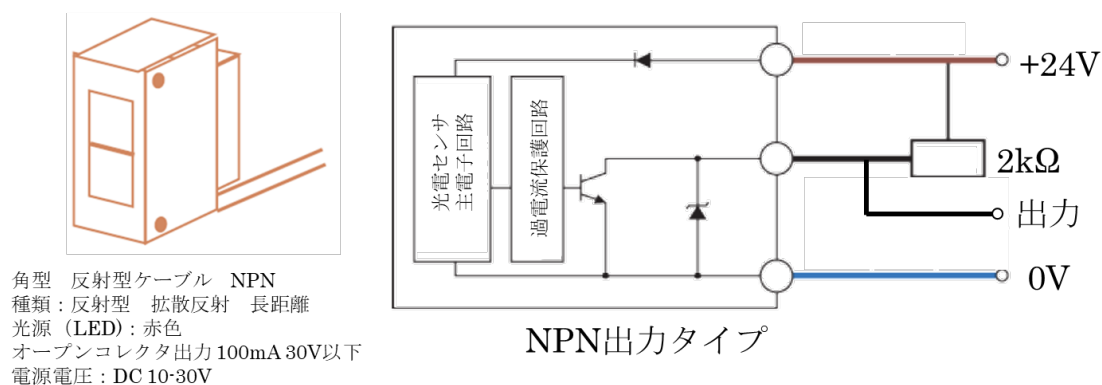


図 7.1-1 光電センサ仕様及び配線図

7.2 遮へい体

照射中のコンベヤに使用される光電センサに対して、カスタマイズするものとカスタマイズしないものを同時に照射した。遮へい体構造については、令和3年度及び4年度に実施した光電センサのカスタマイズ試験を参考に遮へい厚を20mmに設定し、材質は炭素鋼（SS400）とした。遮へい体及び光電センサの様子を図7.2-1に示す。

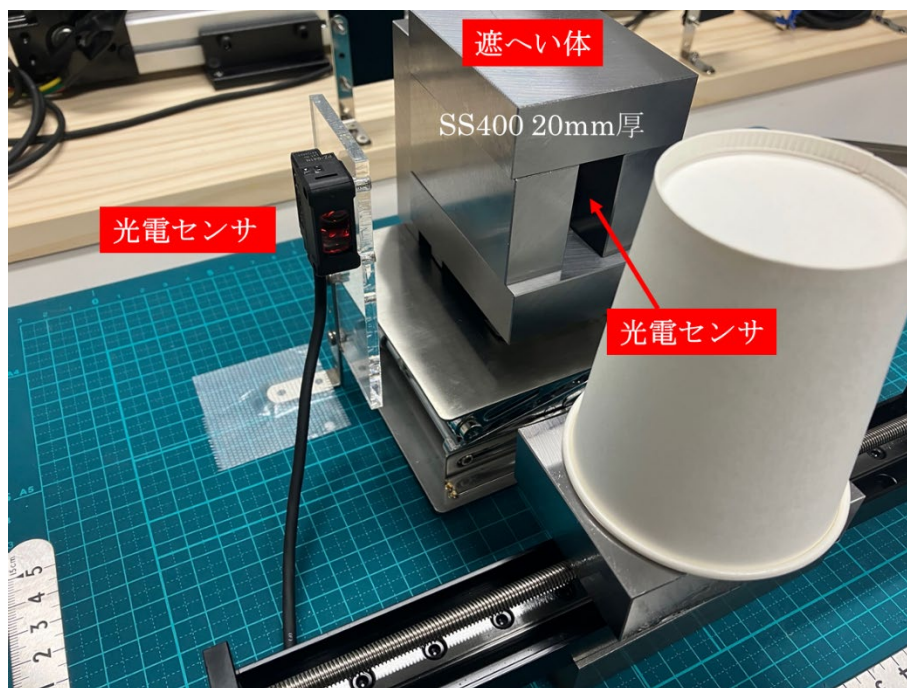


図 7.2-1 遮へい体及び光電センサの様子

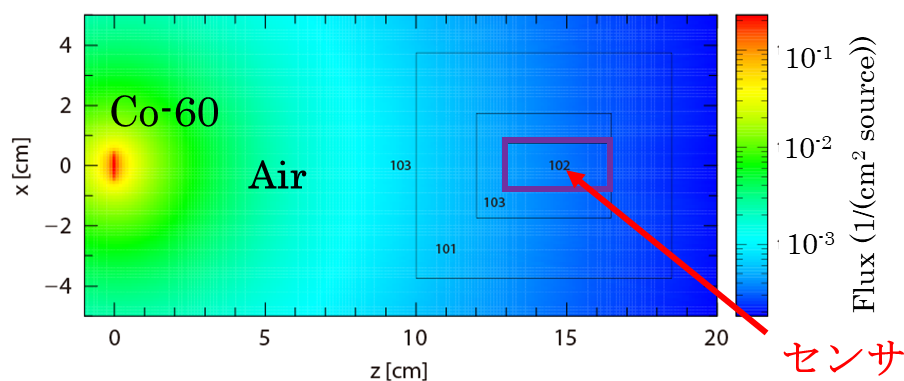
7.3 吸収線量率

線源から 10cm の位置に遮へい体表面が位置する条件で、モンテカルロ計算コードである PHITS を用いて遮へい体内部の光電センサ位置での吸収線量率を評価した。なお、照射試験場所は、6 項の故障原因調査において、構成部品の照射試験を実施した大阪大学産業科学研究所の ^{60}Co ガンマ線照射施設とした。

PHITS による光電センサ近傍のガンマ線強度分布を図 7.3-1 に、センサ位置でのガンマ線エネルギースペクトルを図 7.3-2 及び図 7.3-3 に示す。遮へい体がある場合、遮へい体が無い場合と比較し、200keV から 1MeV のエネルギー領域の散乱ガンマ線が増加していることが分かる。また、ガンマ線との相互作用により高速電子が生じるが、その高速電子がセンサに与えるエネルギー損失の評価を図 7.3-4 及び図 7.3-5 に示す。遮へい体がある場合、200keV 以下の領域でエネルギー損失が増加していることが分かる。

センサ位置での吸収線量率については、遮へい体が無い場合 580Gy/h、遮へい体がある場合 260Gy/h と評価された。

遮へい体無し



遮へい体有り

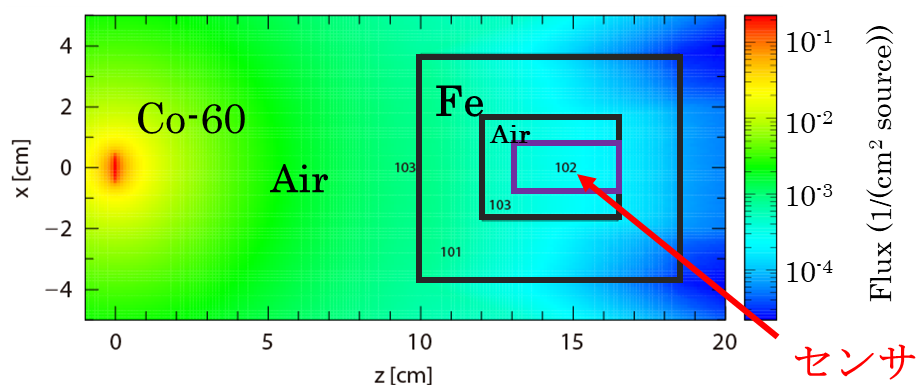


図 7.3-1 光電センサ近傍のガンマ線強度分布

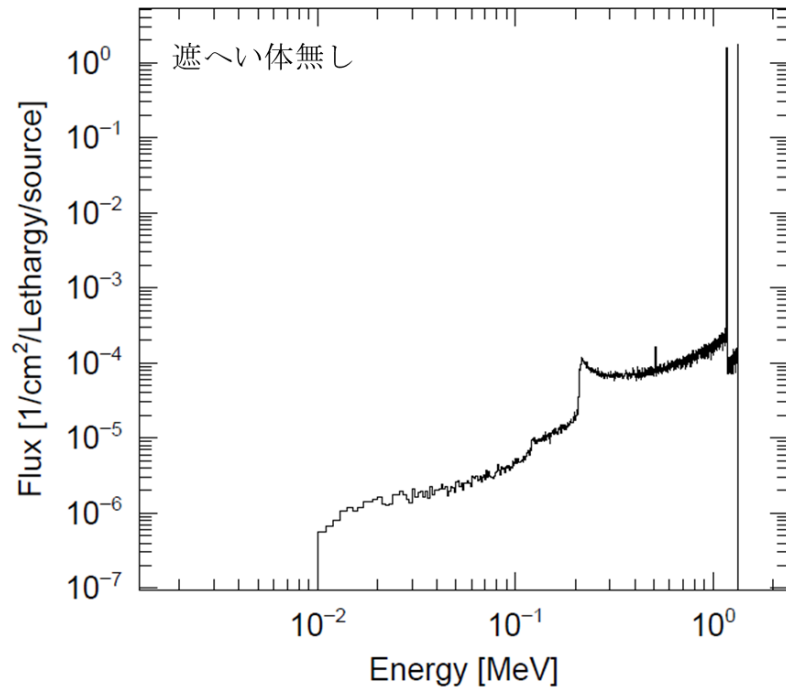


図 7.3-2 センサ位置でのガンマ線エネルギースペクトル (遮へい体無し)

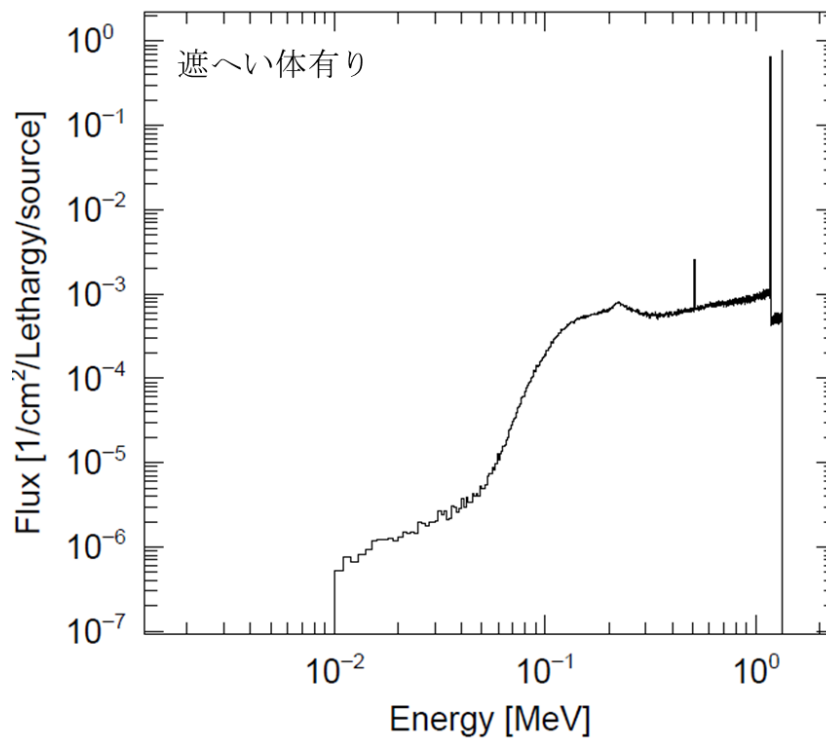


図 7.3-3 センサ位置でのガンマ線エネルギースペクトル (遮へい体あり)

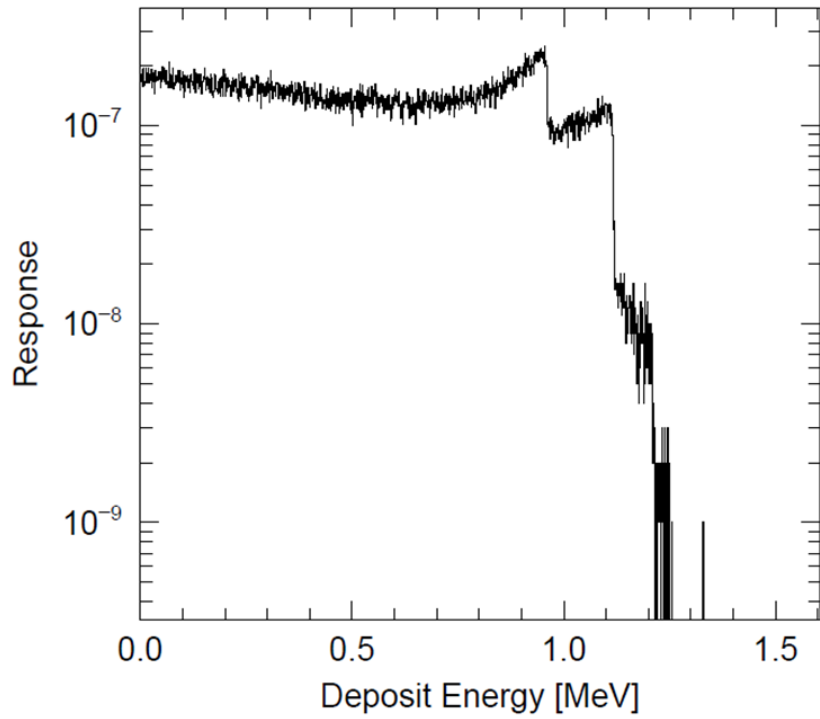


図 7.3-4 センサに対するエネルギー損失スペクトル (遮へい体無し)

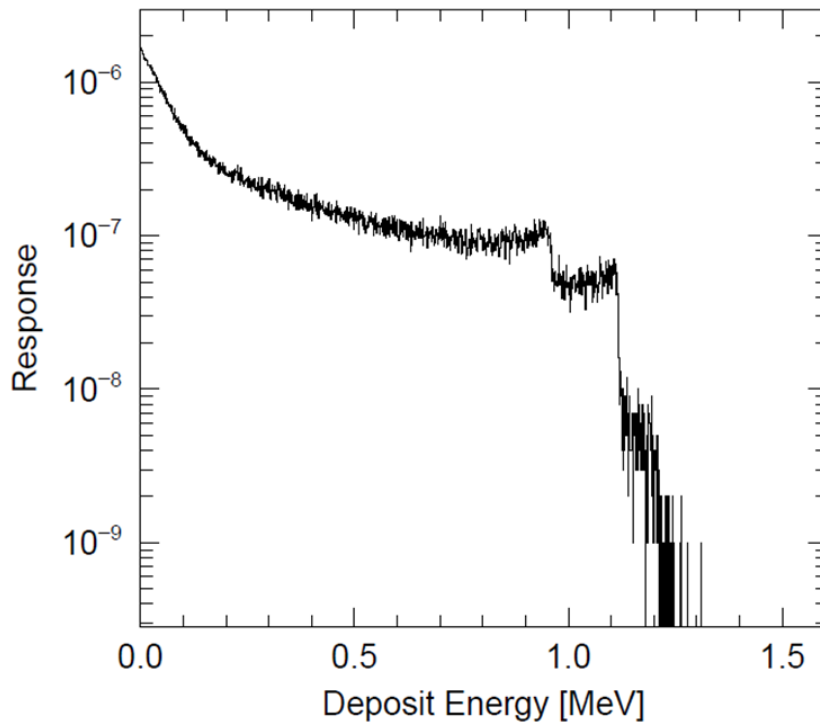


図 7.3-5 センサに対するエネルギー損失スペクトル (遮へい体あり)

7.4 試験方法

コンベヤの作動試験の概念図を図 7.4-1 に、照射中のコンベヤの様子を図 7.4-2 に示す。

^{60}Co ガンマ線源の近傍に光電センサを 2 台設置し、1 台は、カスタマイズした。コンベヤのステージに物体が置かれ、コンベヤの動作は、照射室外に設置されたステージコントローラーによって制御される。コンベヤの耐放射線性については、十分に確保する必要があるため、耐放射線性に優れたステッピングモータ、磁気リードスイッチ、抵抗及びアルミ電解コンデンサで構成し、1MGy 以上の耐放射線性を有している。光電センサからの情報は、照射室外に置かれたデータレコーダに記録される。光電センサ及びデータレコーダを接続する信号、コンベヤを動作させるケーブルの長さは 10m である。また、コンベヤ、制御部及びデータレコーダの写真を図 7.4-3 に示す。

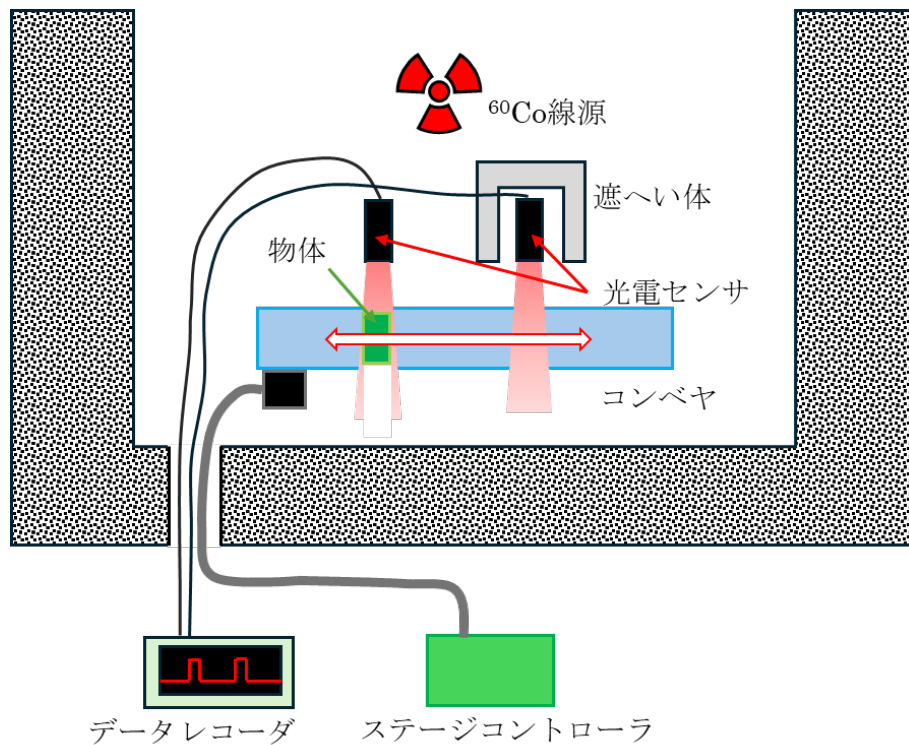


図 7.4-1 作動試験の概念図

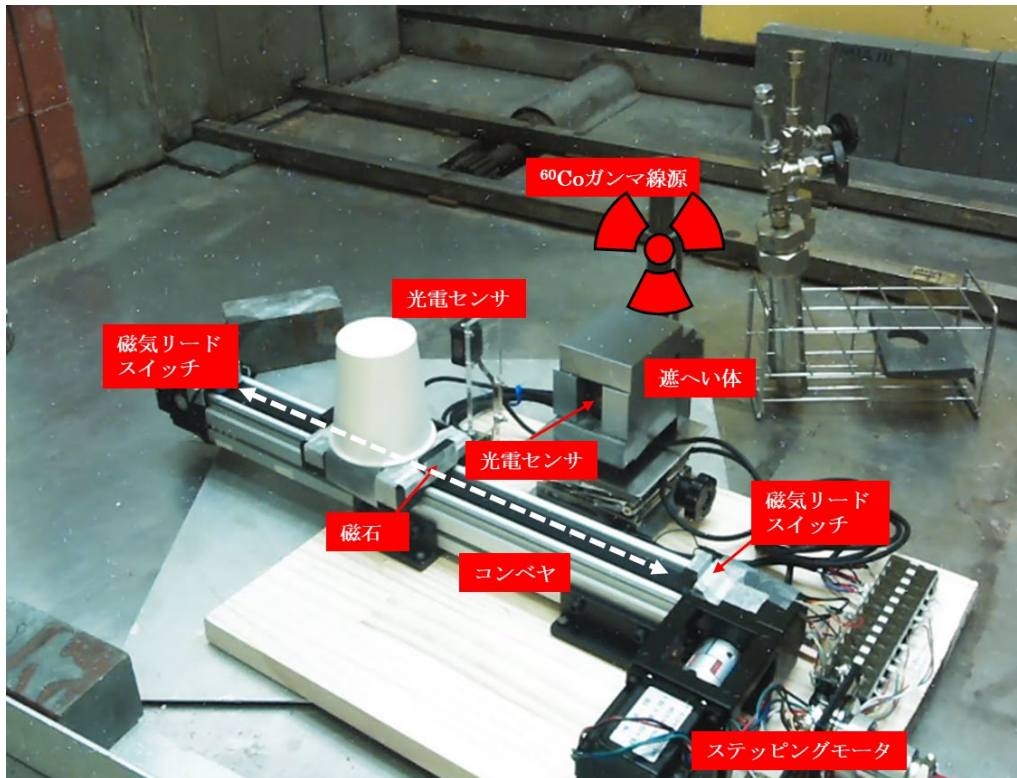


図 7.4-2 作動試験の様子

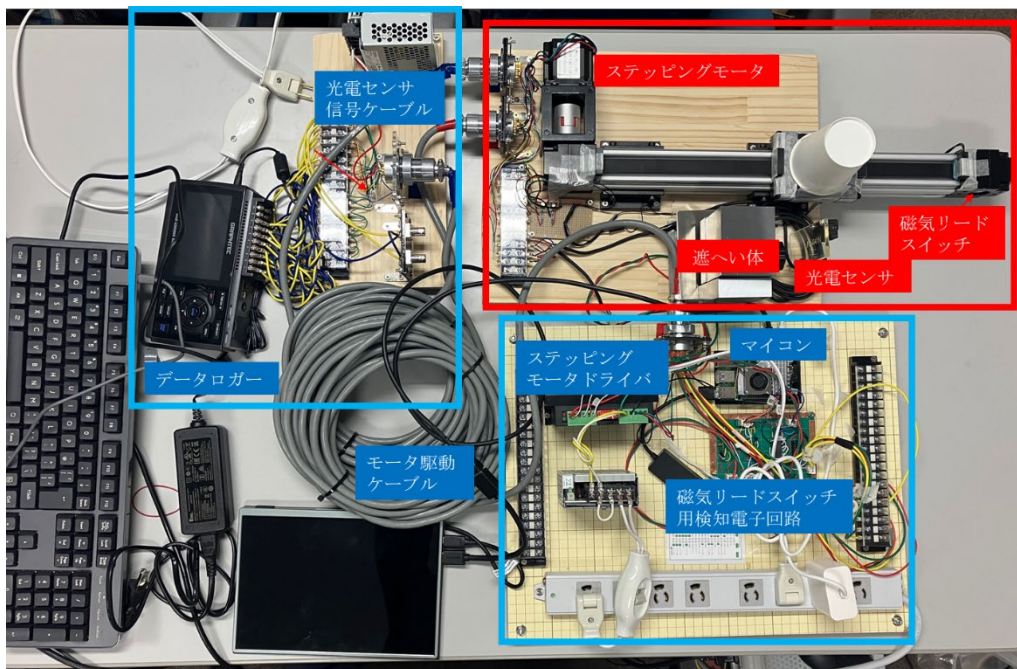


図 7.4-3 コンベヤ制御部の様子

8. 試験結果

8.1 耐放射線性データの追加取得

8.1.1 光電センサ

(1) 50Gy/h 試験

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。光電センサの出力電圧が低下するもしくは検知不良によって故障した時点での集積吸収線量を表 8.1-1 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 8.1-2 に示す。

各光電センサの出力電圧の変化を図 8.1-1 から図 8.1-10 に示す。また、全センサを同一のグラフにプロットした図を図 8.1-11 及び図 8.1-12 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 5 台に対して、吸収線量率約 50Gy/h で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後約 17.0 時間（集積吸収線量 862Gy）の動作確認時に白紙を取外しても非検知状態とならず、データロガーの出力電圧が検知状態と同等である 24V 付近から低下しないことを確認した。従って、動作確認で検知異常を確認した照射開始後 17.0 時間（集積吸収線量 862Gy）で故障と判断した。

No.2 は、照射開始後 16.0 時間（集積吸収線量 1152Gy）の動作確認時に出力電圧が低下せず、非検知状態とならないことを確認した。

No.3 は、照射開始後 15.0 時間（集積吸収線量 1066Gy）の動作確認時に出力電圧が低下せず、非検知状態とならないことを確認した。

No.4 は、照射開始後 15.0 時間（集積吸収線量 1077Gy）の動作確認時に出力電圧が低下せず、非検知状態とならないことを確認した。

No.5 は、照射開始後 15.0 時間（集積吸収線量 1044Gy）の動作確認時に出力電圧が低下せず、非検知状態となら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 14.0 時間（集積吸収線量 973Gy）に出力電圧が低下していた。なお、照射開始後 14.0 時間後から 2 日間の照射停止期間があった。この時、照射停止後、約 5 時間で出力電圧が正常な値に回復していた。

表 8.1-1 光電センサ (50Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 50-1	50.7	17.0	862	1026 (SD ^{*1} :99)	検知異常
光電 50-2	72.0	16.0	1152		検知異常
光電 50-3	71.1	15.0	1066		検知異常
光電 50-4	71.8	15.0	1077		検知異常
光電 50-5	69.6	14.0	973		出力電圧低下 (0V 付近)

※1 SD : 標準偏差

表 8.1-2 光電センサ (50Gy/h) の不具合発生前の集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 50-1	50.7	16.0	811	959 (SD ^{*1} :92)
光電 50-2	72.0	15.0	1080	
光電 50-3	71.1	14.0	995	
光電 50-4	71.8	14.0	1005	
光電 50-5	69.6	13.0	904	

※1 SD : 標準偏差

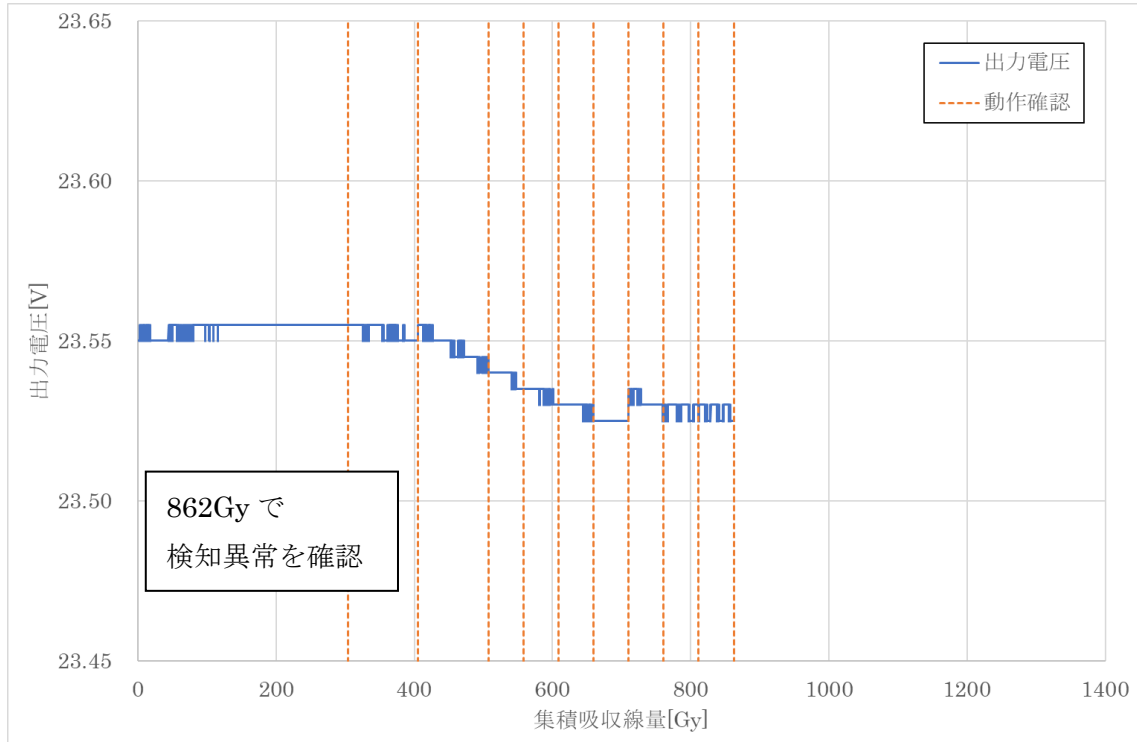


図 8.1-1 光電 50-1 出力電圧変化

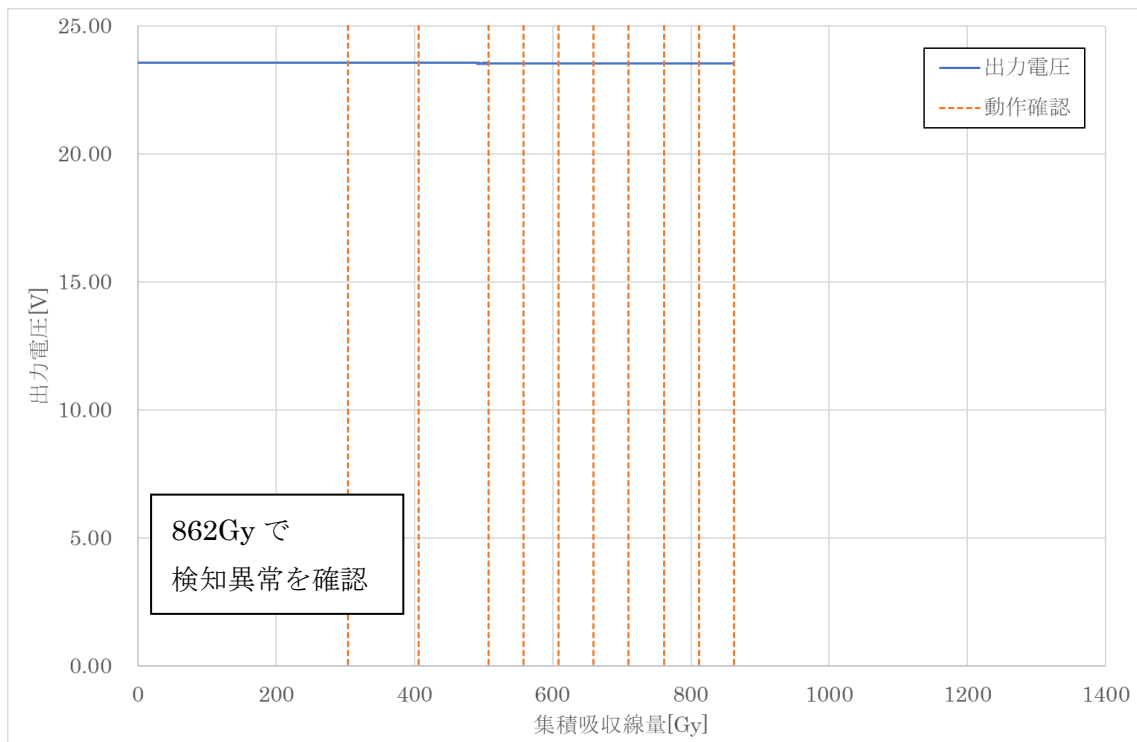


図 8.1-2 光電 50-1 出力電圧変化 (縮小図)

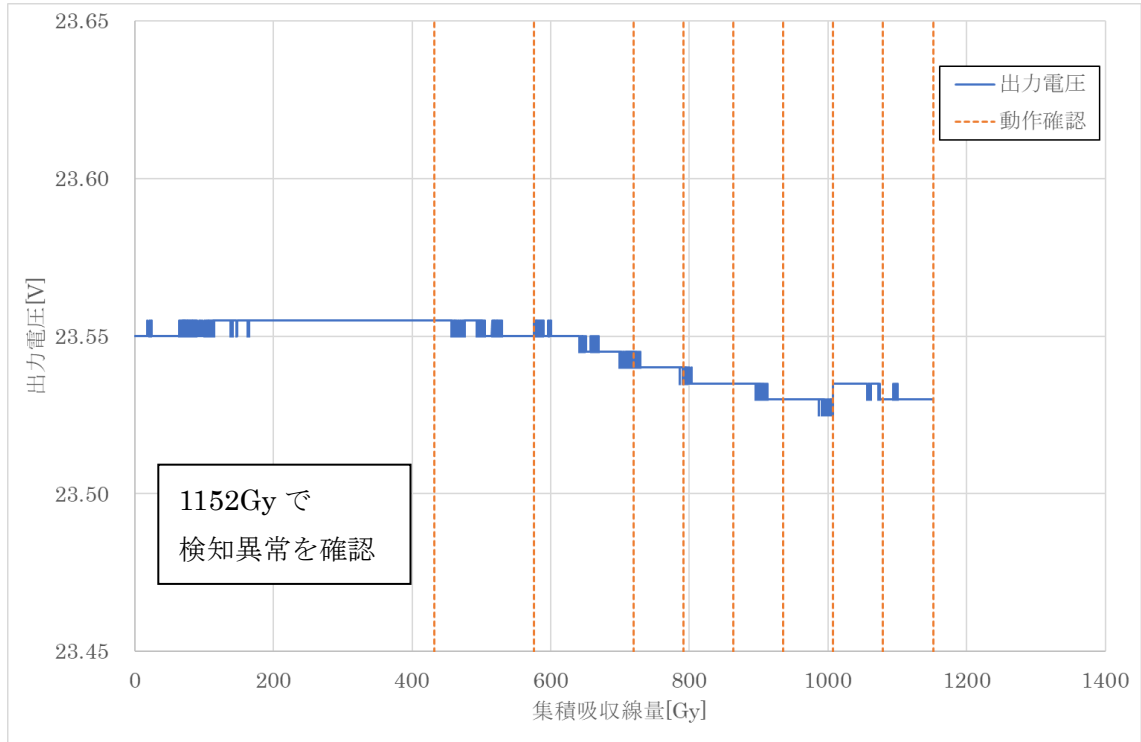


図 8.1-3 光電 50-2 出力電圧変化

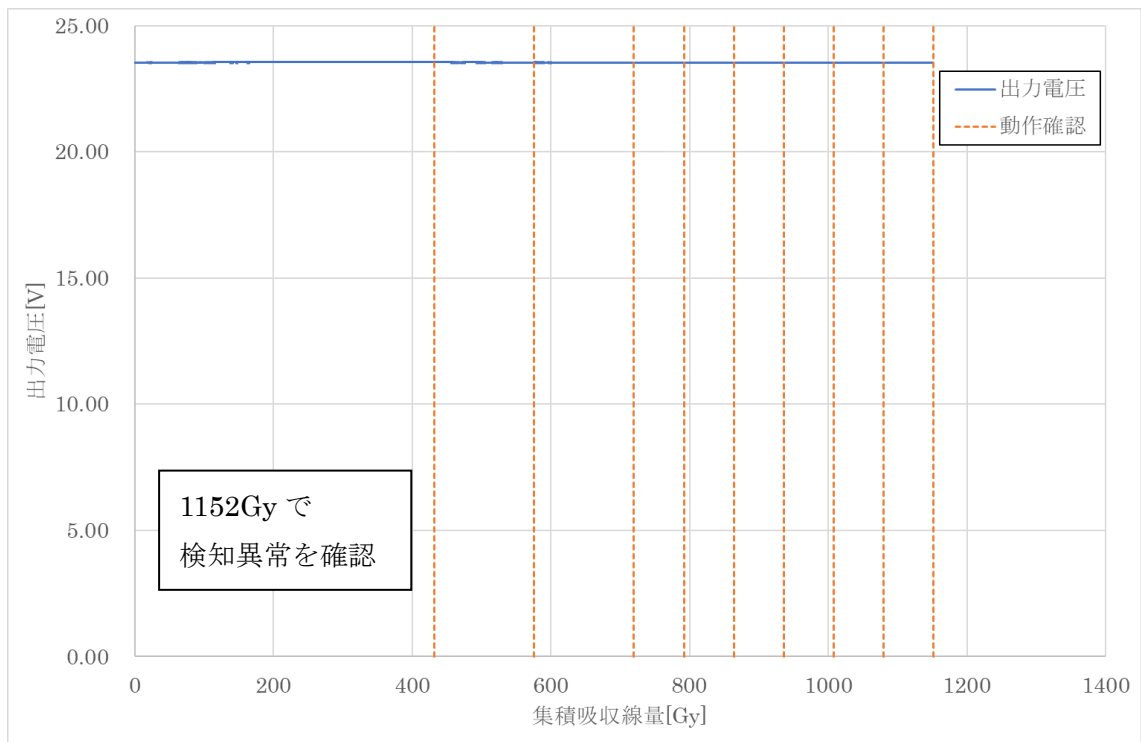


図 8.1-4 光電 50-2 出力電圧変化 (縮小図)

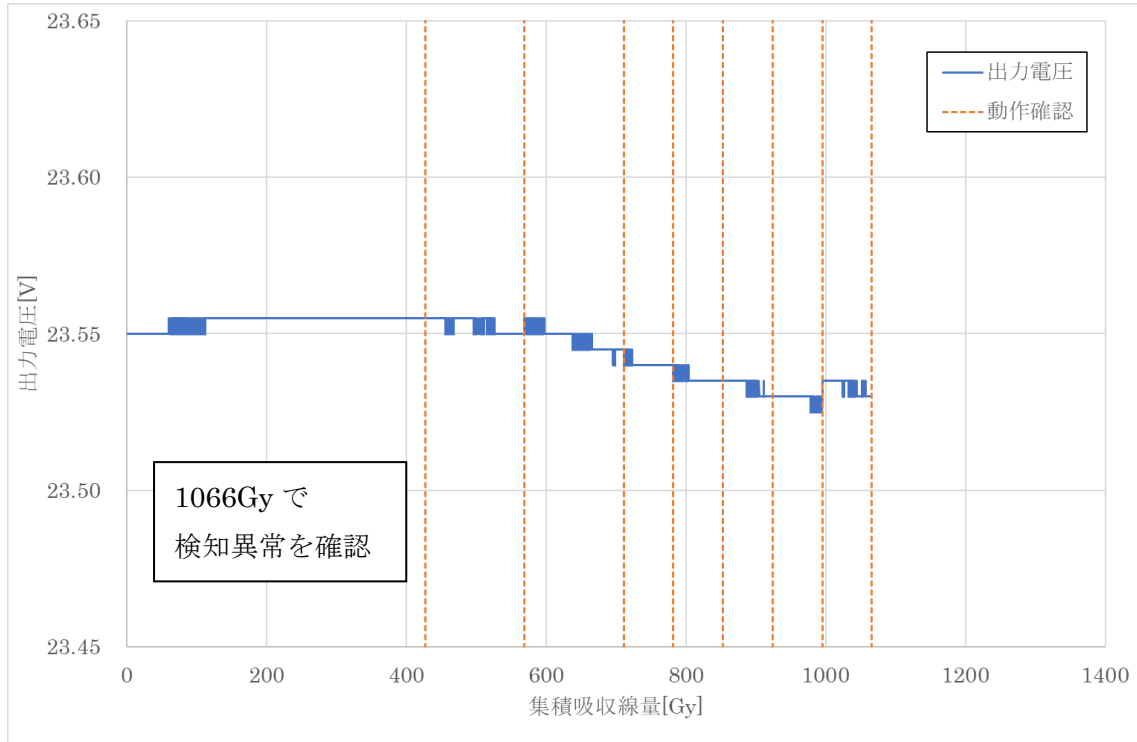


図 8.1-5 光電 50-3 出力電圧変化

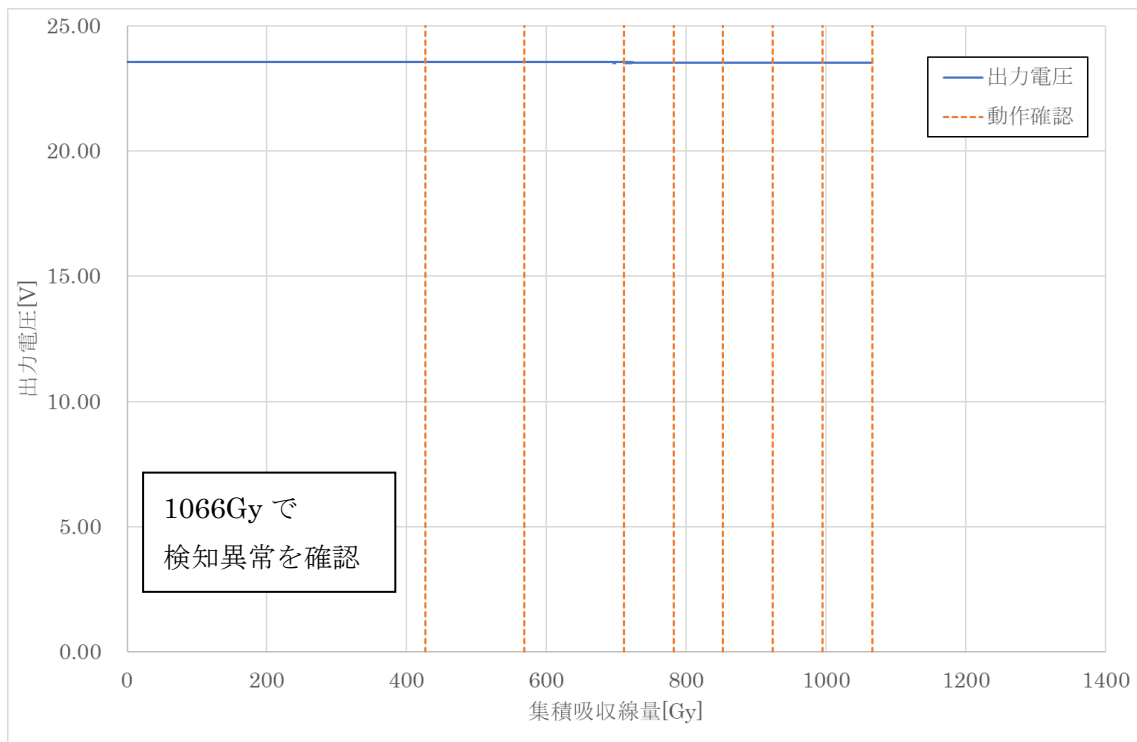


図 8.1-6 光電 50-3 出力電圧変化 (縮小図)

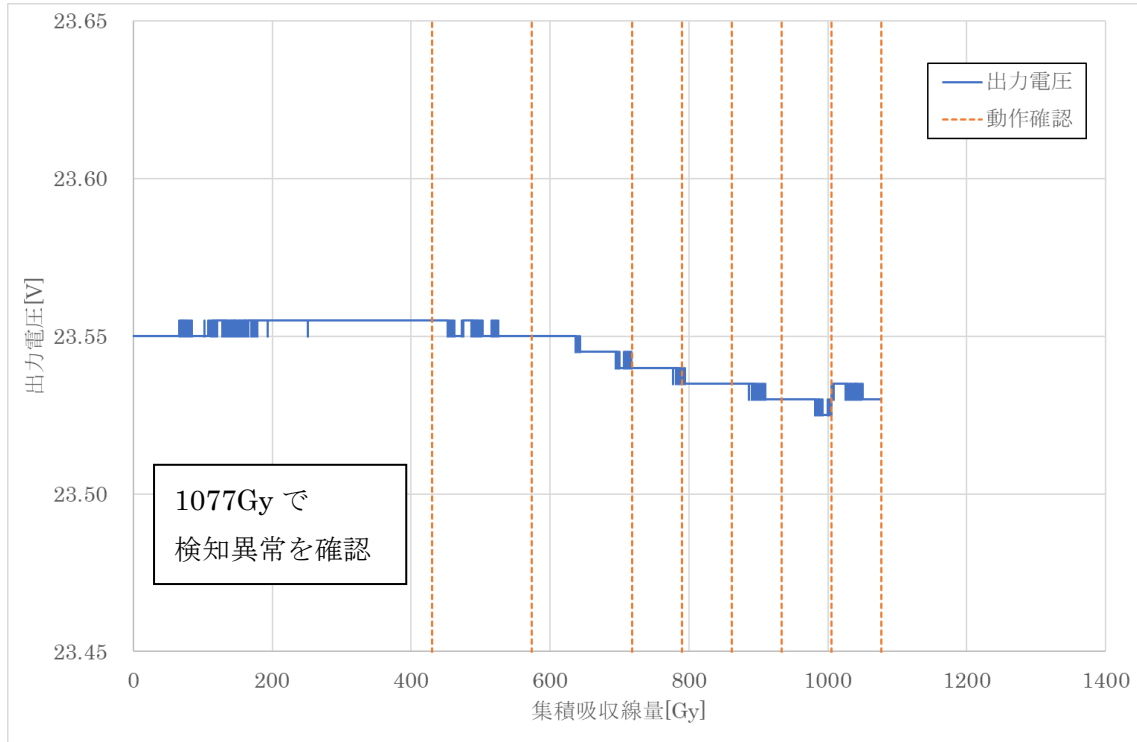


図 8.1-7 光電 50-4 出力電圧変化

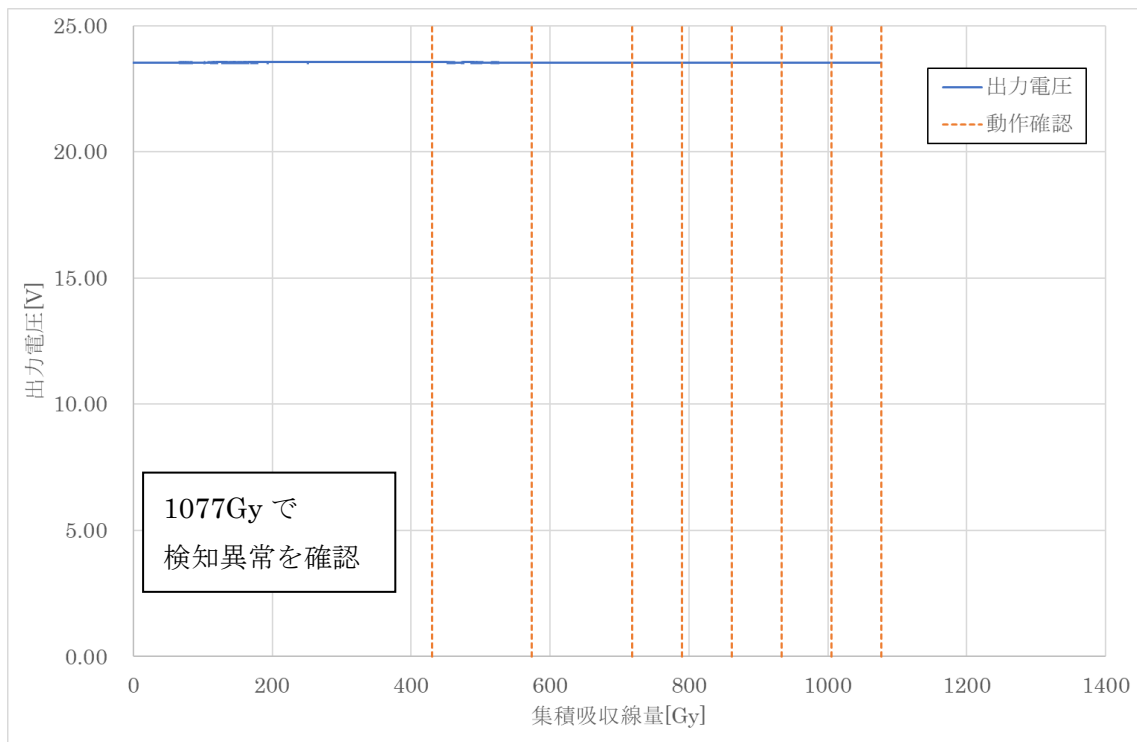


図 8.1-8 光電 50-4 出力電圧変化 (縮小図)

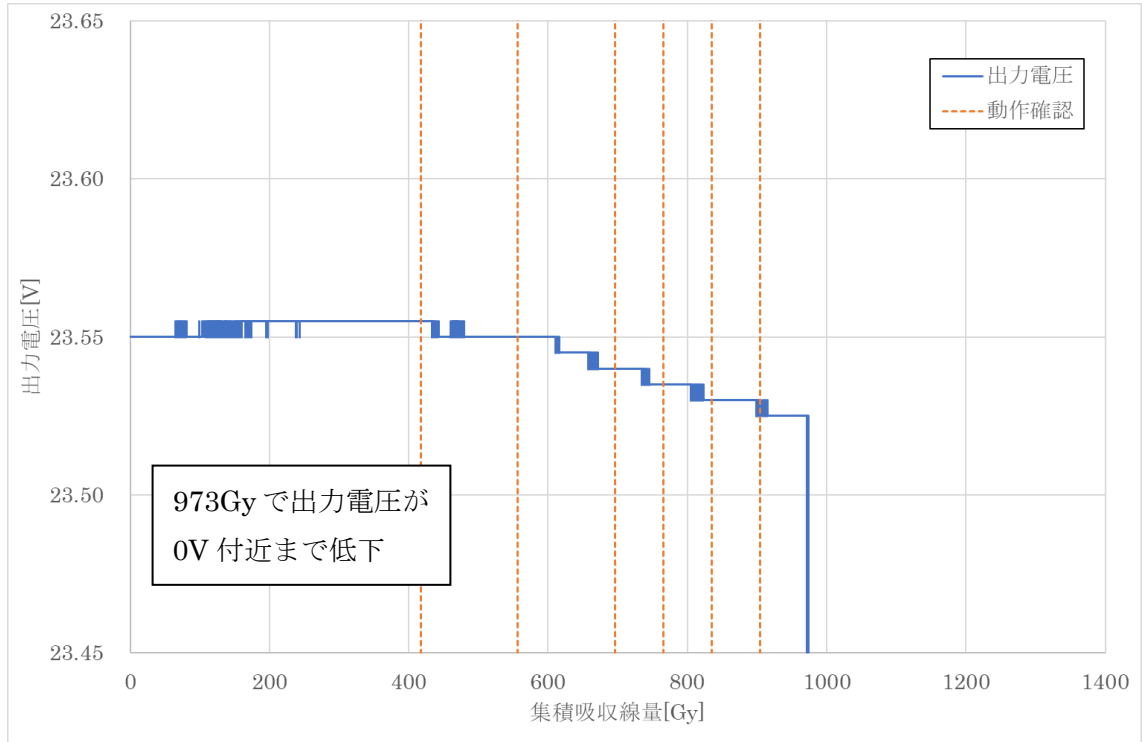


図 8.1-9 光電 50-5 出力電圧変化

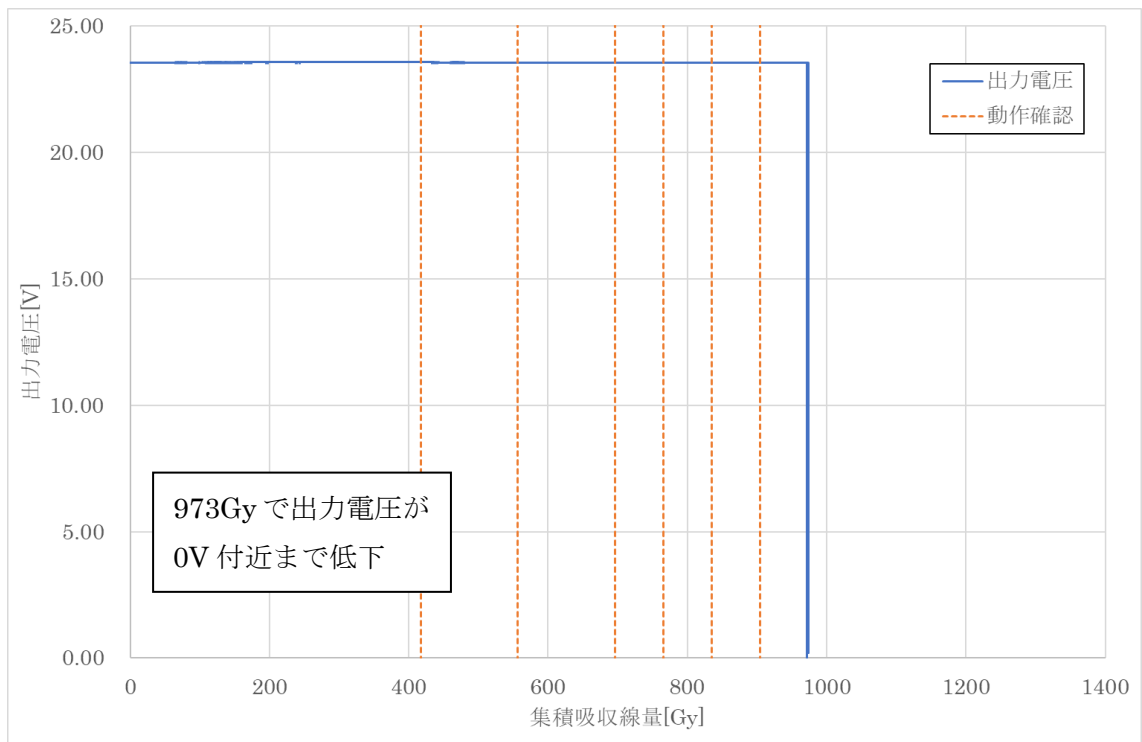


図 8.1-10 光電 50-5 出力電圧変化 (縮小図)

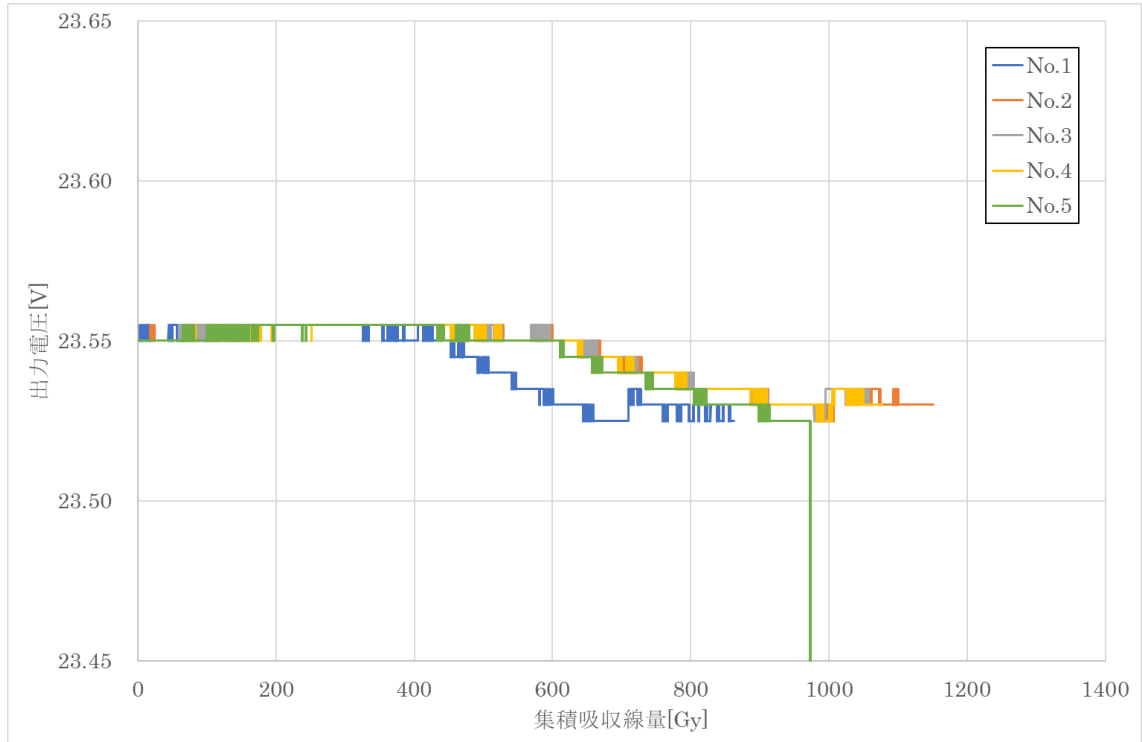


図 8.1-11 光電 50Gy/h 全センサ出力電圧変化

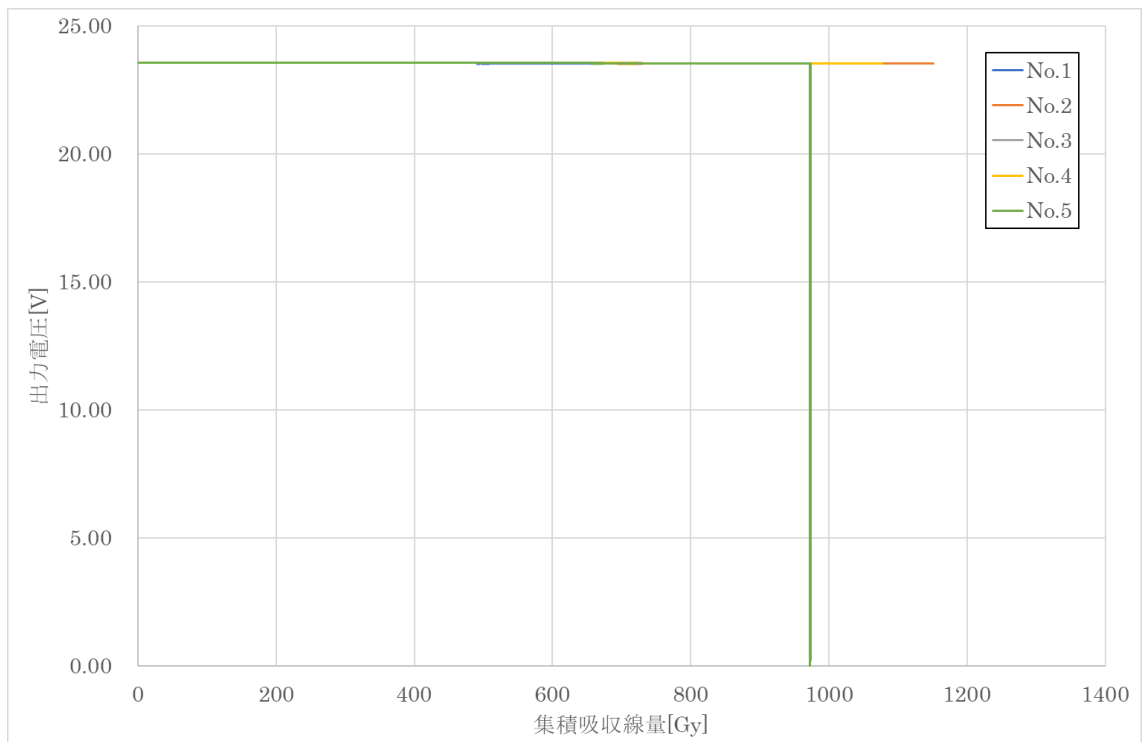


図 8.1-12 光電 50Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)

(2) 100Gy/h 試験

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。光電センサの出力電圧が低下するもしくは検知不良によって故障した時点での集積吸収線量を表 8.1-3 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 8.1-4 に示す。

各光電センサの出力電圧の変化を図 8.1-13 から図 8.1-22 に示す。また、全センサを同一のグラフにプロットした図を図 8.1-23 及び図 8.1-24 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 5 台に対して、吸収線量率約 100Gy/h で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後約 9.00 時間（集積吸収線量 831Gy）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非検知状態と同等である 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 7.88 時間（集積吸収線量 728Gy）に検知状態の出力電圧が 0V 付近まで低下していた。従って、出力電圧が低下した照射開始後 7.88 時間（集積吸収線量 728Gy）で故障と判断した。

No.2 は、照射開始後 7.00 時間（集積吸収線量 705Gy）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 6.44 時間（集積吸収線量 648Gy）に出力電圧が 11V 付近まで低下していた。なお、その後も照射を継続すると、出力電圧が不安定となり、照射開始後 6.71 時間（集積吸収線量 676Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下していた。

No.3 は、照射開始後 7.00 時間（集積吸収線量 750Gy）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 6.46 時間（集積吸収線量 692Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下していた。

No.4 は、照射開始後 7.00 時間（集積吸収線量 800Gy）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 6.52 時間（集積吸収線量 745Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下していた。

No.5 は、照射開始後 8.00 時間（集積吸収線量 823Gy）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 7.60 時間（集積吸収線量 782Gy）に出力電圧が 0V 付近まで低下していた。

表 8.1-3 光電センサ（100Gy/h）の故障を確認した集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 100-1	92	7.88	728	719 (SD ^{*1} :46)	出力電圧低下 (0V 付近)
光電 100-2	101	6.44	648		出力電圧低下 (11V 付近)
光電 100-3	107	6.46	692		出力電圧低下 (0V 付近)
光電 100-4	114	6.52	745		出力電圧低下 (0V 付近)
光電 100-5	103	7.60	782		出力電圧低下 (0V 付近)

※1 SD：標準偏差

表 8.1-4 光電センサ（100Gy/h）の不具合発生前の集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 100-1	92	7.00	646	660 (SD ^{*1} :40)
光電 100-2	101	6.00	604	
光電 100-3	107	6.00	643	
光電 100-4	114	6.00	686	
光電 100-5	103	7.00	720	

※1 SD：標準偏差

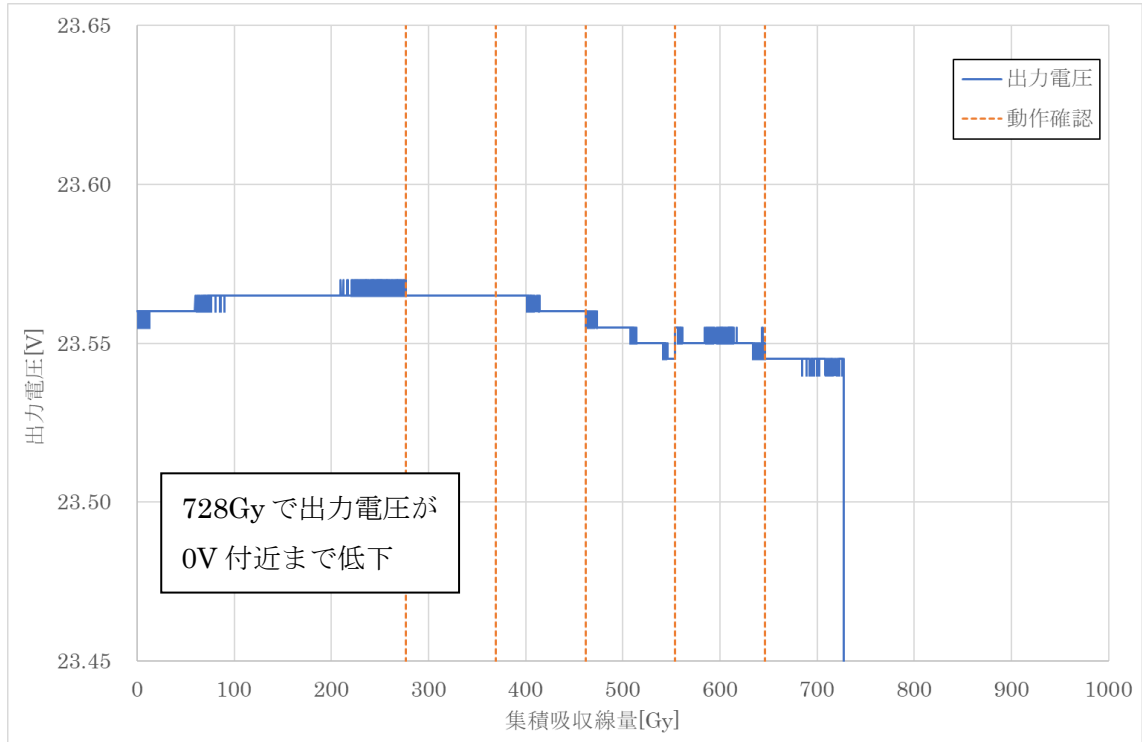


図 8.1-13 光電 100-1 出力電圧変化

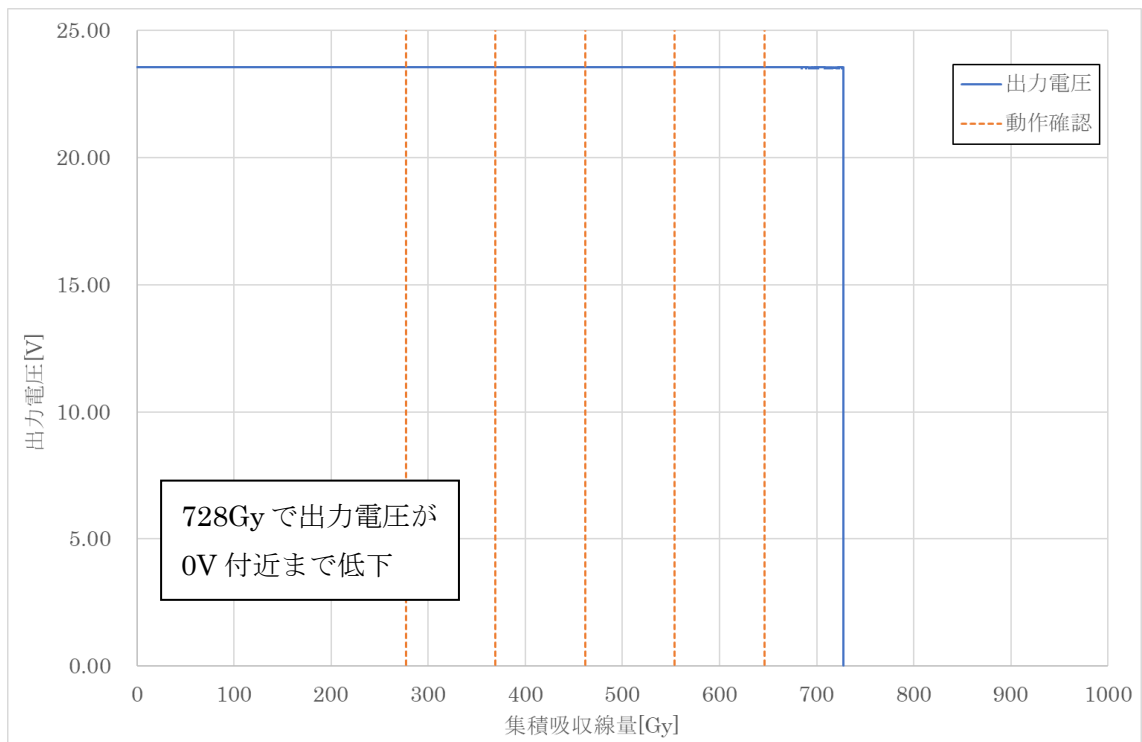


図 8.1-14 光電 100-1 出力電圧変化 (縮小図)

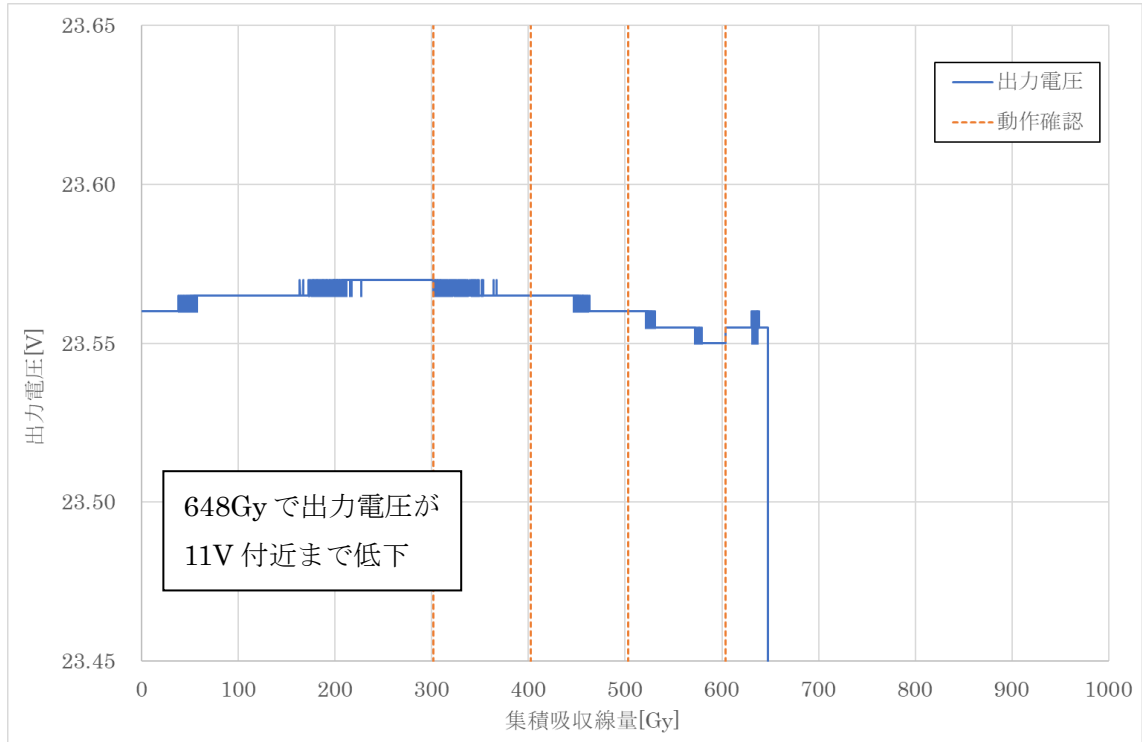


図 8.1-15 光電 100-2 出力電圧変化

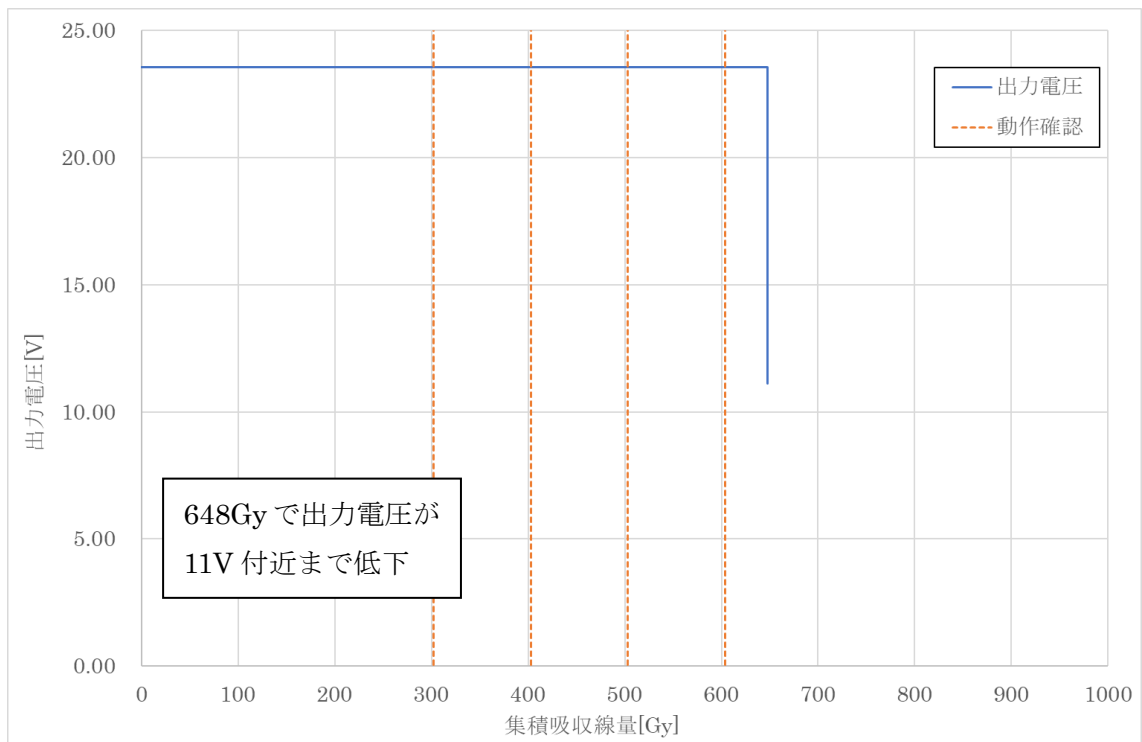


図 8.1-16 光電 100-2 出力電圧変化 (縮小図)

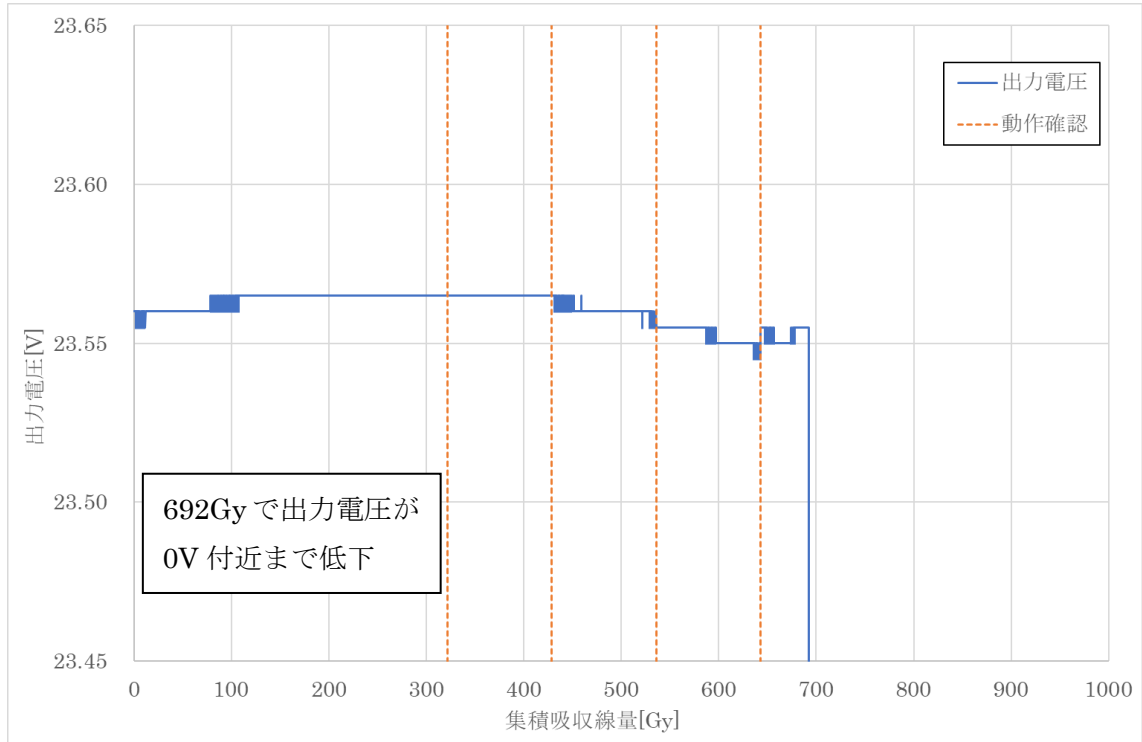


図 8.1-17 光電 100-3 出力電圧変化

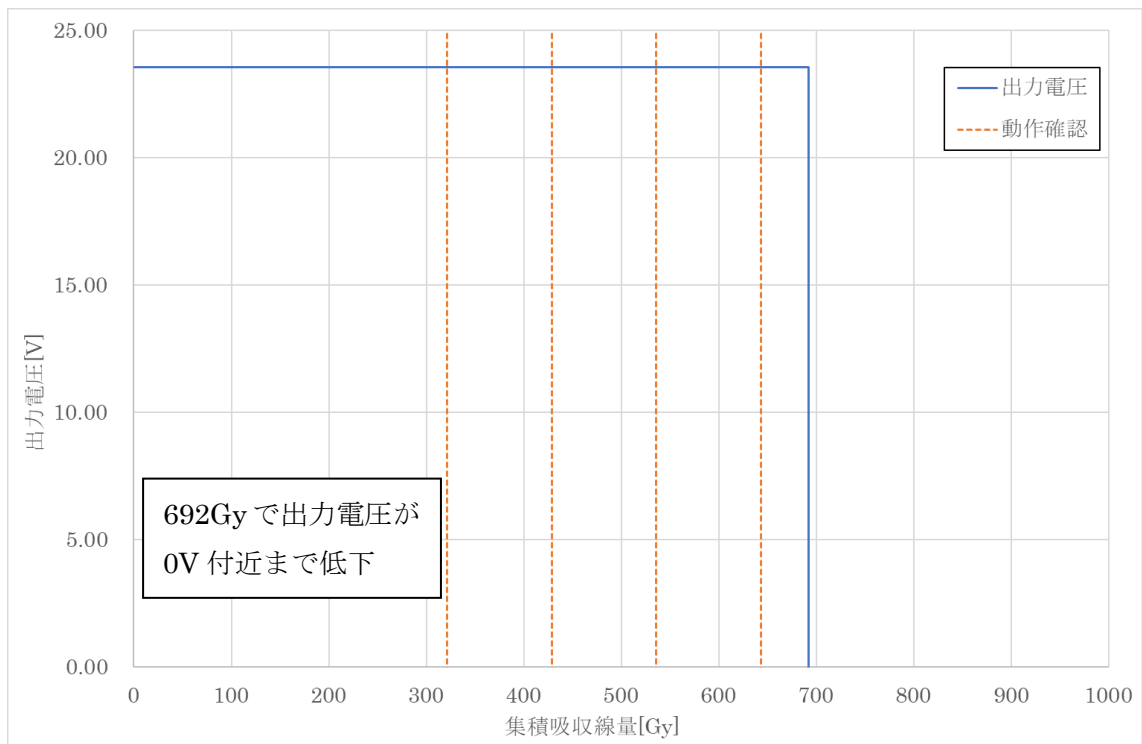


図 8.1-18 光電 100-3 出力電圧変化 (縮小図)

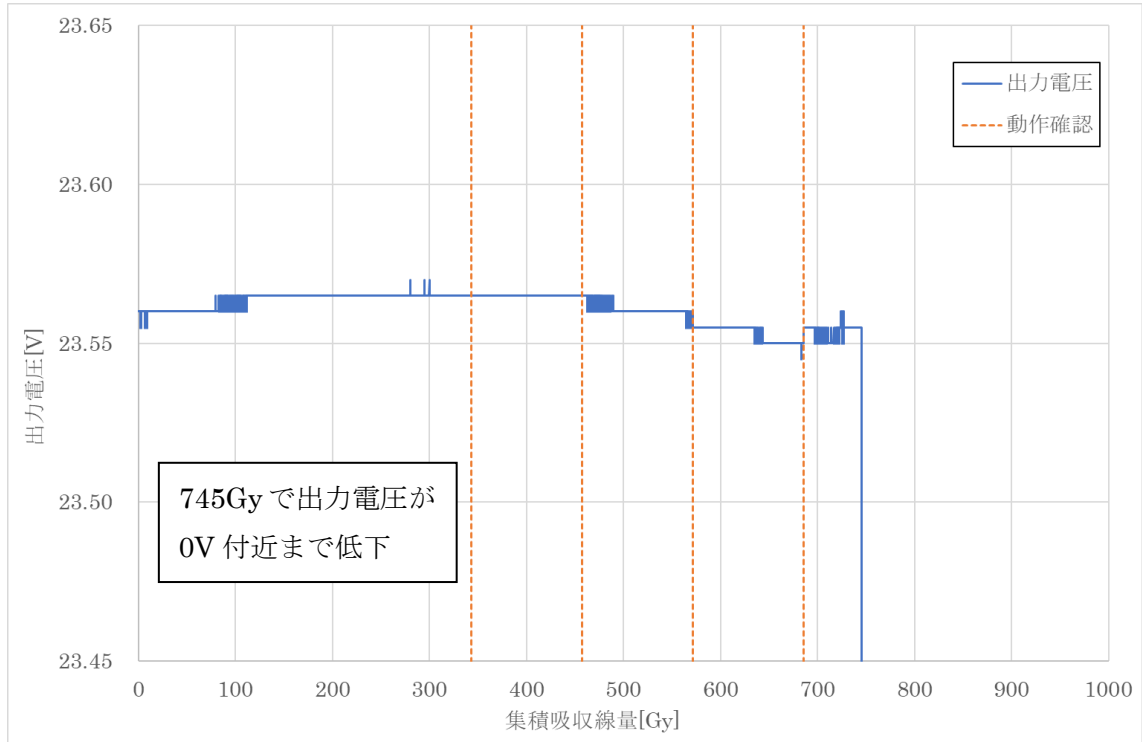


図 8.1-19 光電 100-4 出力電圧変化

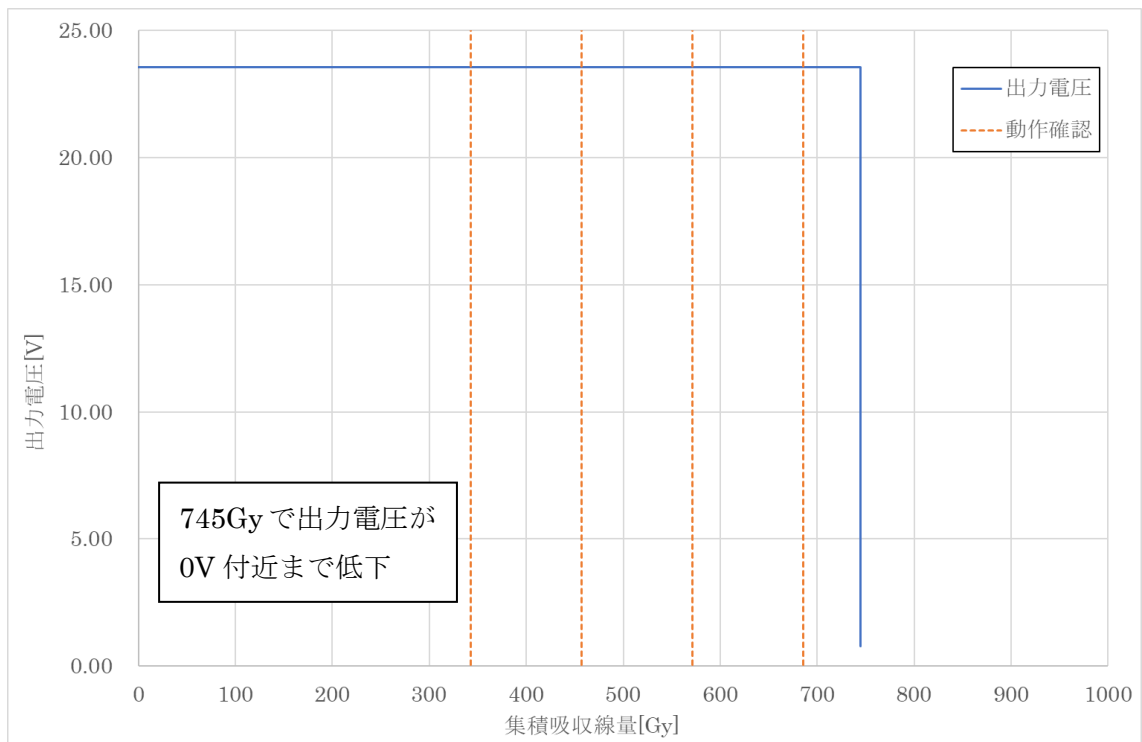


図 8.1-20 光電 100-4 出力電圧変化 (縮小図)

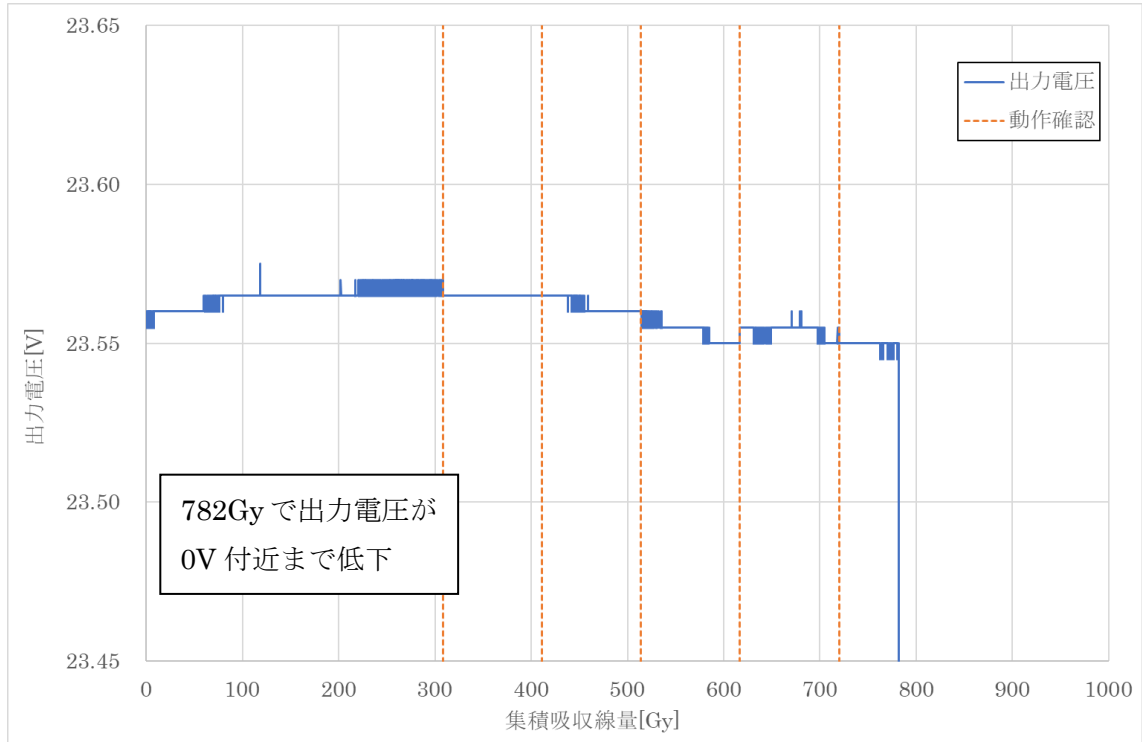


図 8.1-21 光電 100-5 出力電圧変化

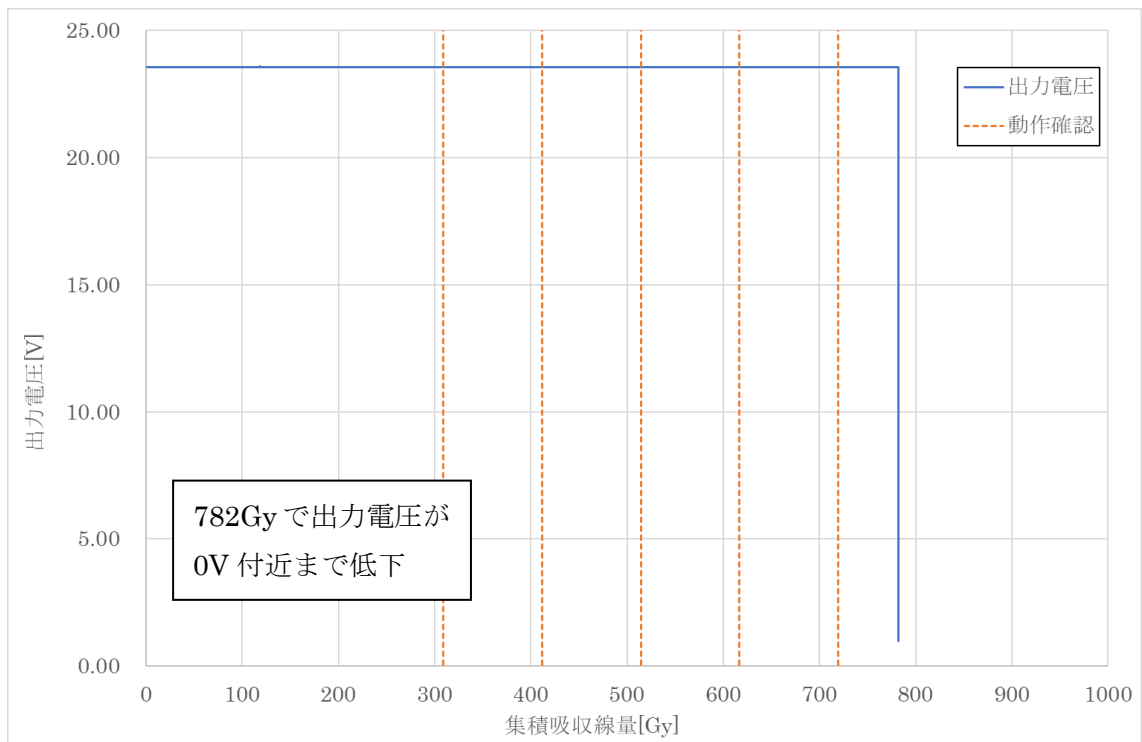


図 8.1-22 光電 100-5 出力電圧変化 (縮小図)

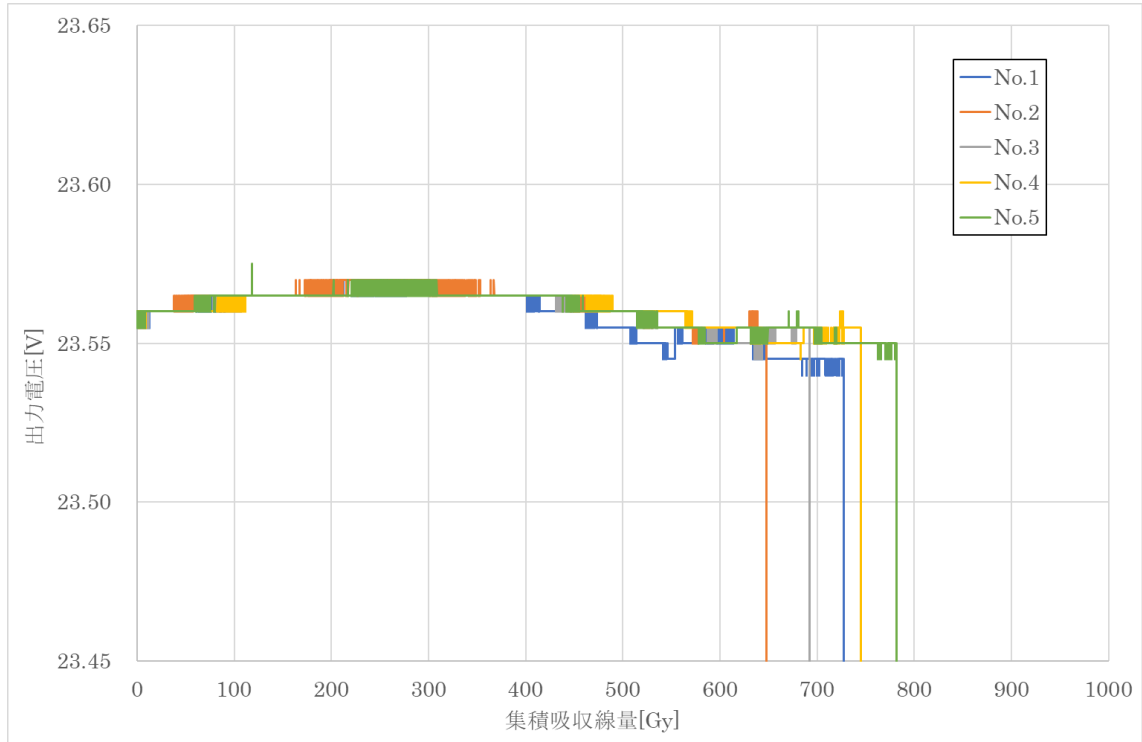


図 8.1-23 光電 100Gy/h 全センサ出力電圧変化

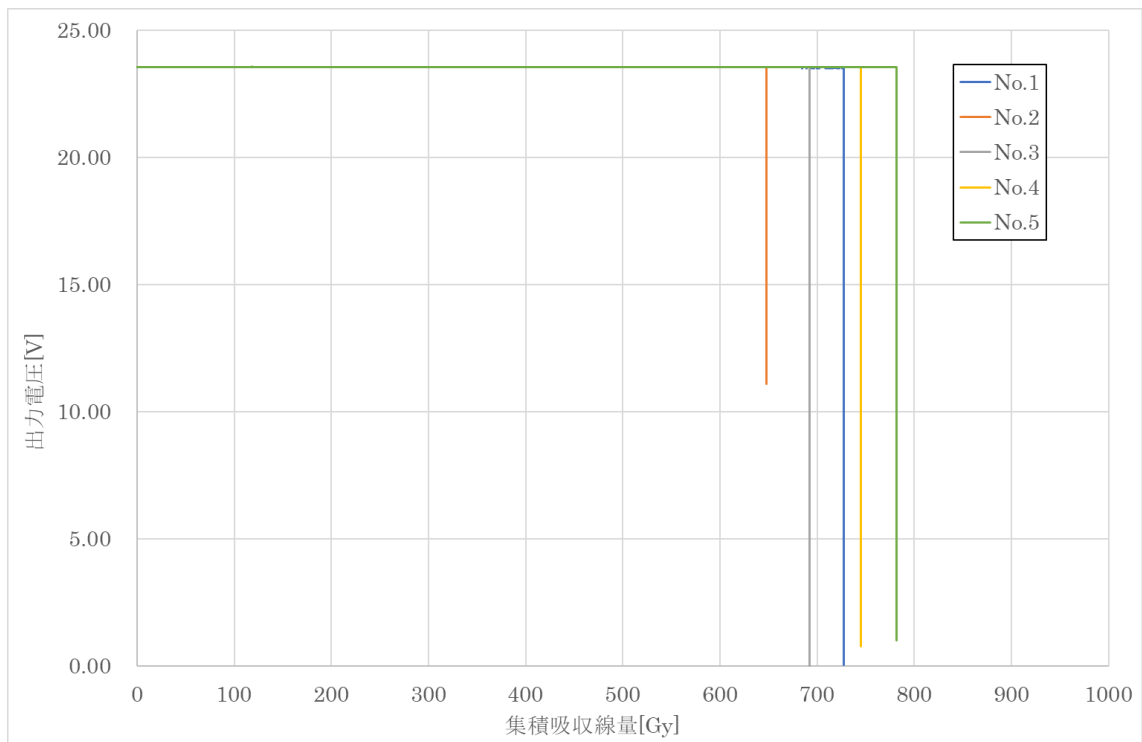


図 8.1-24 光電 100Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)

8.1.2 近接センサ

(1) 50Gy/h 試験

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。近接センサの出力電圧が低下するもしくは検知不良によって故障した時点での集積吸収線量を表 8.1-5 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 8.1-6 に示す。

各近接センサの出力電圧の変化を図 8.1-25 から図 8.1-34 に示す。また、全センサを同一のグラフにプロットした図を図 8.1-35 及び図 8.1-36 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。なお、近接センサは、検知時には全てのセンサで約 21V を出力するが、非検知時には No.1 で約 2V、No.2-4 で約 14V を出力することを確認した。

近接センサ 5 台に対して、吸収線量率約 50Gy/h で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後約 22.0 時間（集積吸収線量 1116Gy）の動作確認時に検知状態としても検知せず、データロガーの出力電圧が非検知状態と同等である 2V 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 22.0 時間（集積吸収線量 1116Gy）の動作確認後に検知状態の出力電圧が 2V 付近まで低下していた。従って、出力電圧が低下した照射開始後 22.0 時間（集積吸収線量 1116Gy）で故障と判断した。

No.2 は、照射開始後 20.0 時間（集積吸収線量 1439Gy）の動作確認時に出力電圧が 14V 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 18.1 時間（集積吸収線量 1301Gy）に出力電圧が 14V 付近まで低下していた。

No.3 は、照射開始後 20.0 時間（集積吸収線量 1421Gy）の動作確認時に出力電圧が 14V 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 18.0 時間（集積吸収線量 1279Gy）に出力電圧が 14V 付近まで低下していた。

No.4 は、照射開始後 20.0 時間（集積吸収線量 1435Gy）の動作確認時に出力電圧が 14V 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 19.1 時間（集積吸収線量 1367Gy）に出力電圧が 14V 付近まで低下していた。

No.5 は、照射開始後 20.0 時間（集積吸収線量 1391Gy）の動作確認時に出力電圧が 14V 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 18.7 時間（集積吸収線量 1304Gy）に出力電圧が 14V 付近まで低下していた。

表 8.1-5 近接センサ (50Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 50-1	50.7	22.0	1116	1273 (SD ^{*1} :84)	出力電圧低下 (2V 付近)
近接 50-2	72.0	18.1	1301		出力電圧低下 (14V 付近)
近接 50-3	71.1	18.0	1279		出力電圧低下 (14V 付近)
近接 50-4	71.8	19.1	1367		出力電圧低下 (14V 付近)
近接 50-5	69.6	18.7	1304		出力電圧低下 (14V 付近)

※1 SD : 標準偏差

表 8.1-6 近接センサ (50Gy/h) の不具合発生前の集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 50-1	50.7	21.0	1065	1208 (SD ^{*1} :92)
近接 50-2	72.0	18.0	1295	
近接 50-3	71.1	16.0	1137	
近接 50-4	71.8	18.0	1292	
近接 50-5	69.6	18.0	1252	

※1 SD : 標準偏差

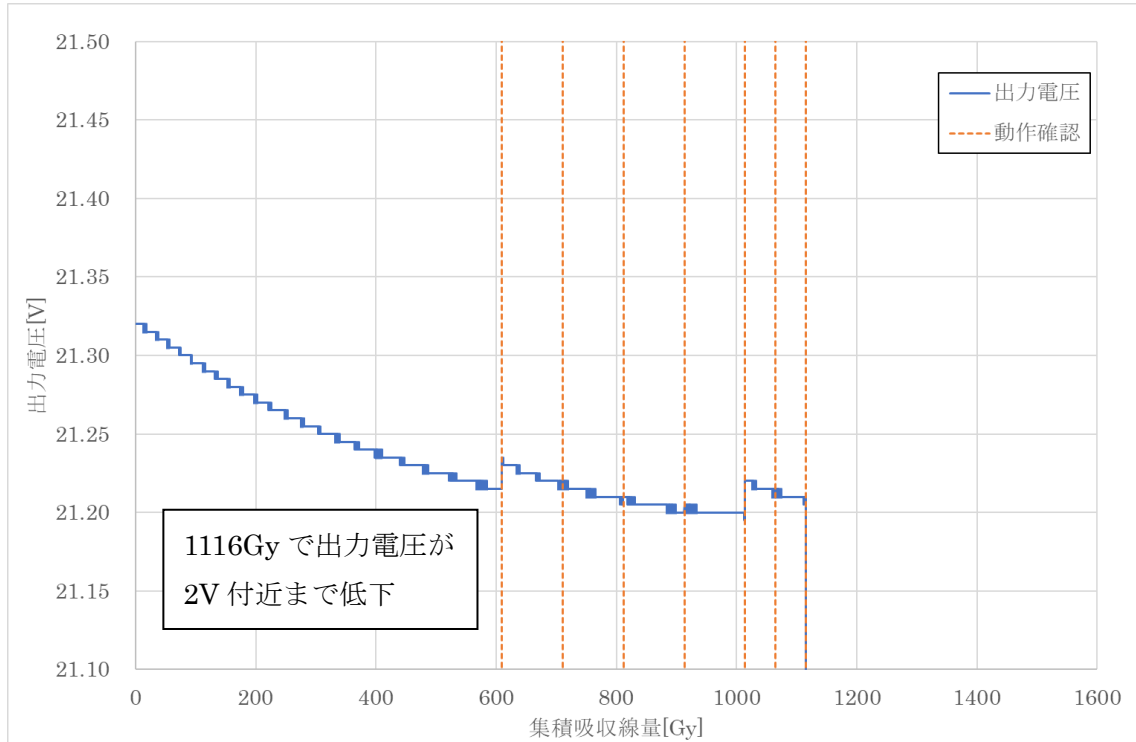


図 8.1-25 近接 50-1 出力電圧変化

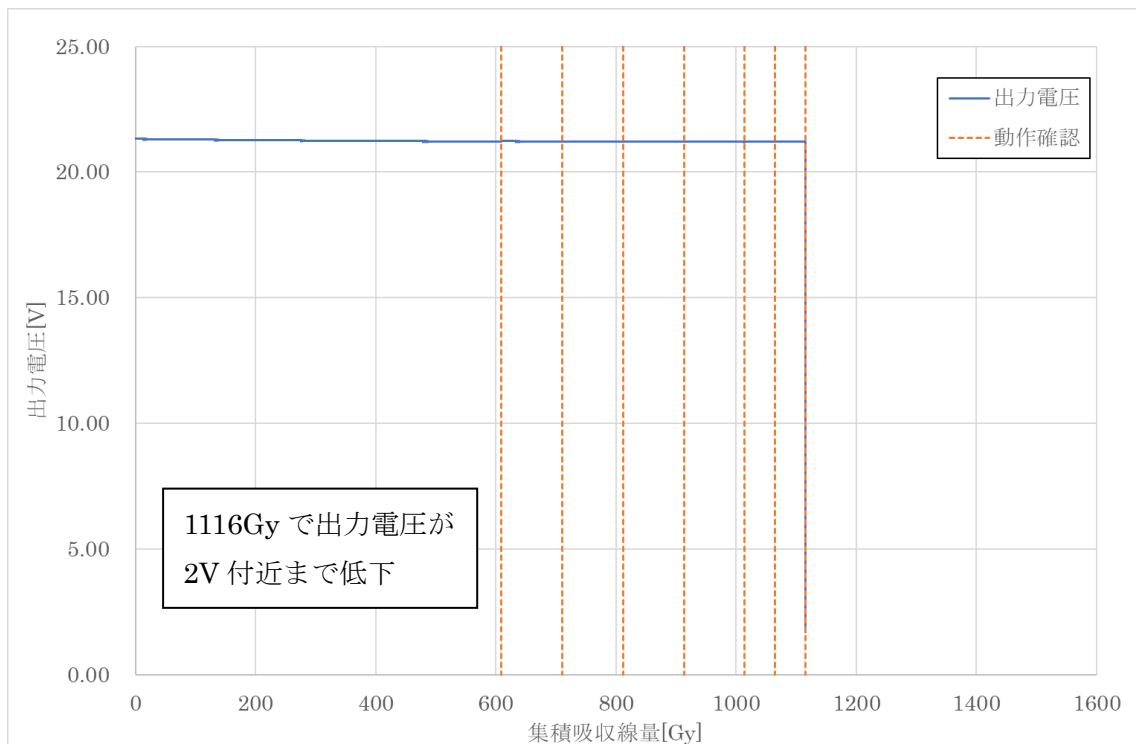


図 8.1-26 近接 50-1 出力電圧変化 (縮小図)

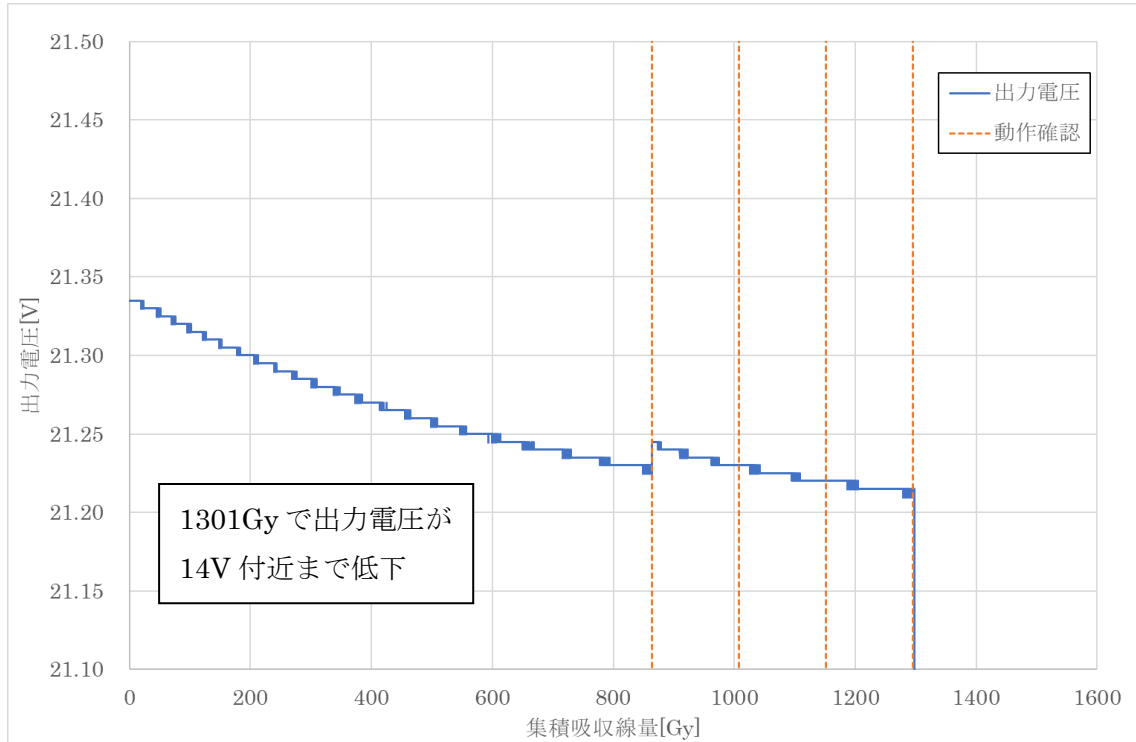


図 8.1-27 近接 50-2 出力電圧変化

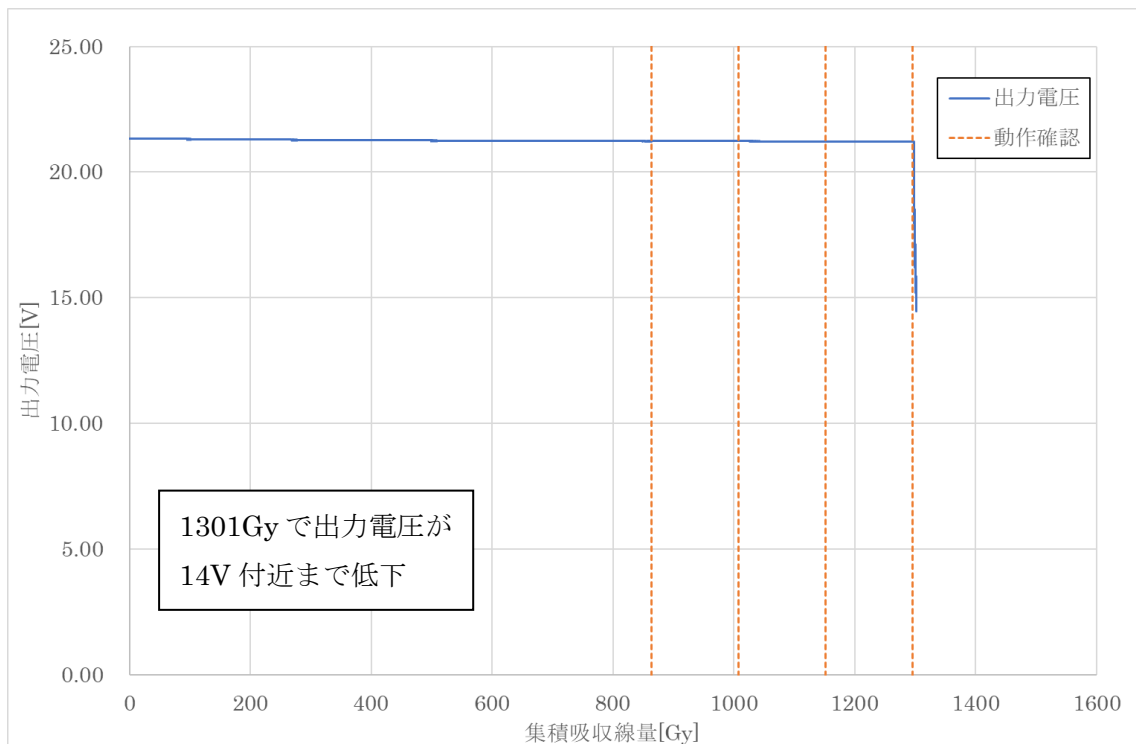


図 8.1-28 近接 50-2 出力電圧変化 (縮小図)

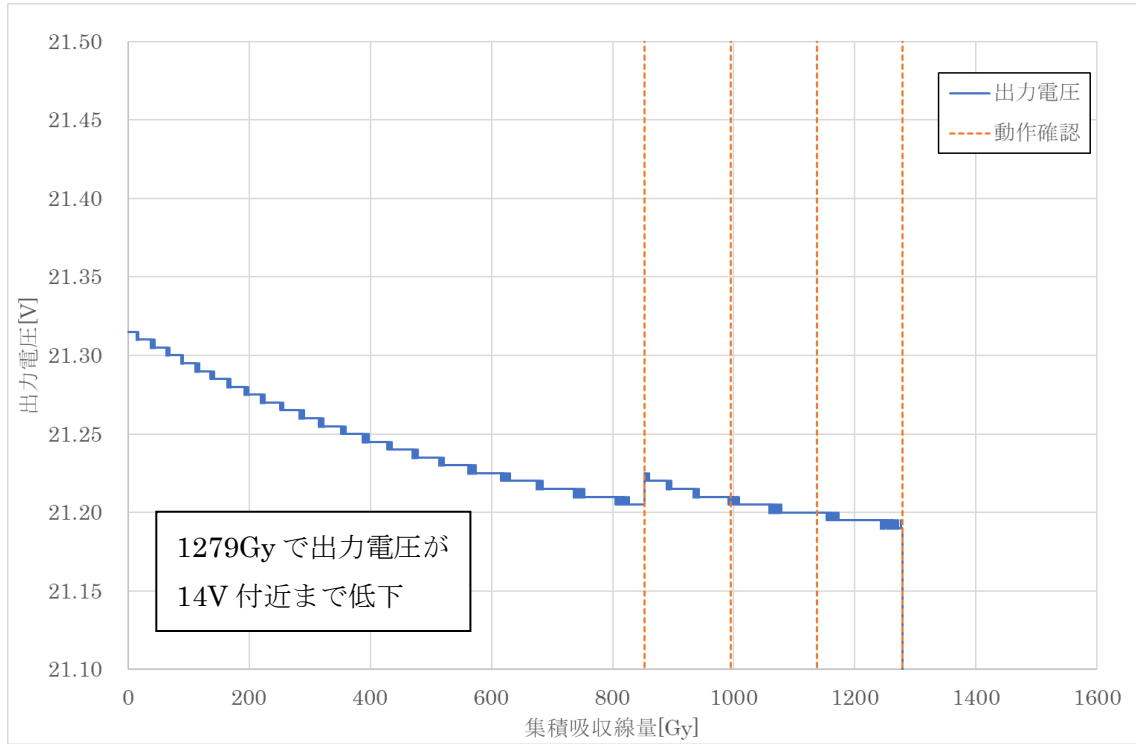


図 8.1-29 近接 50-3 出力電圧変化

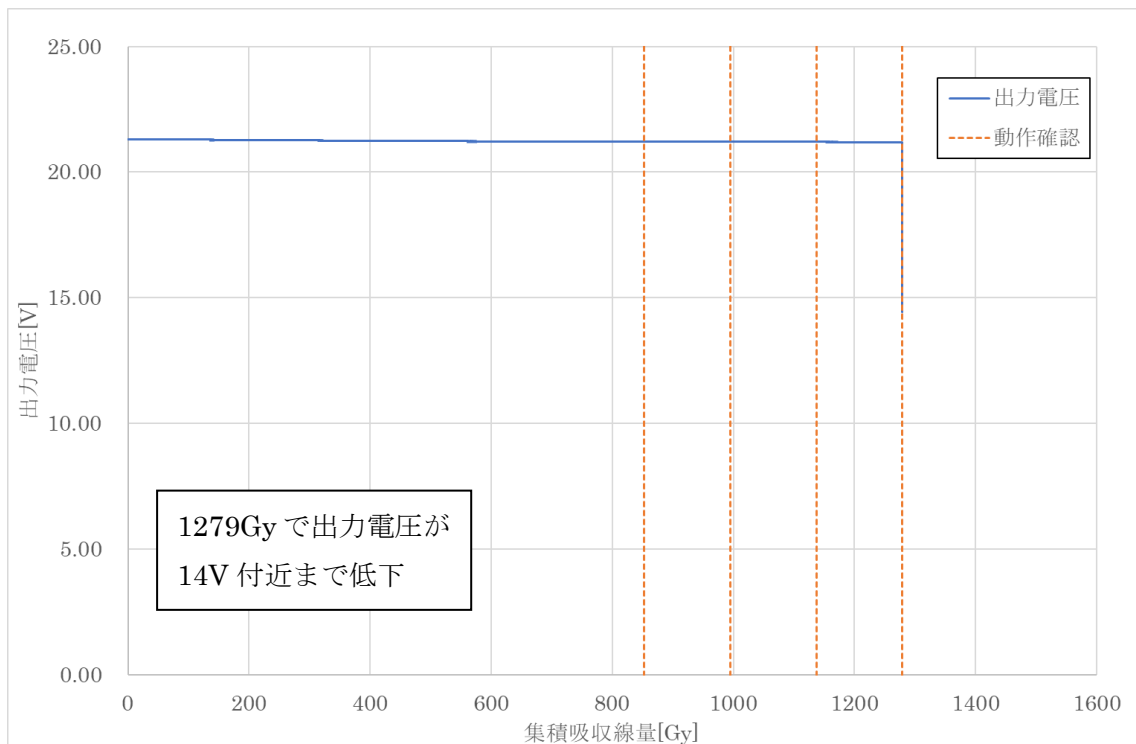


図 8.1-30 近接 50-3 出力電圧変化 (縮小図)

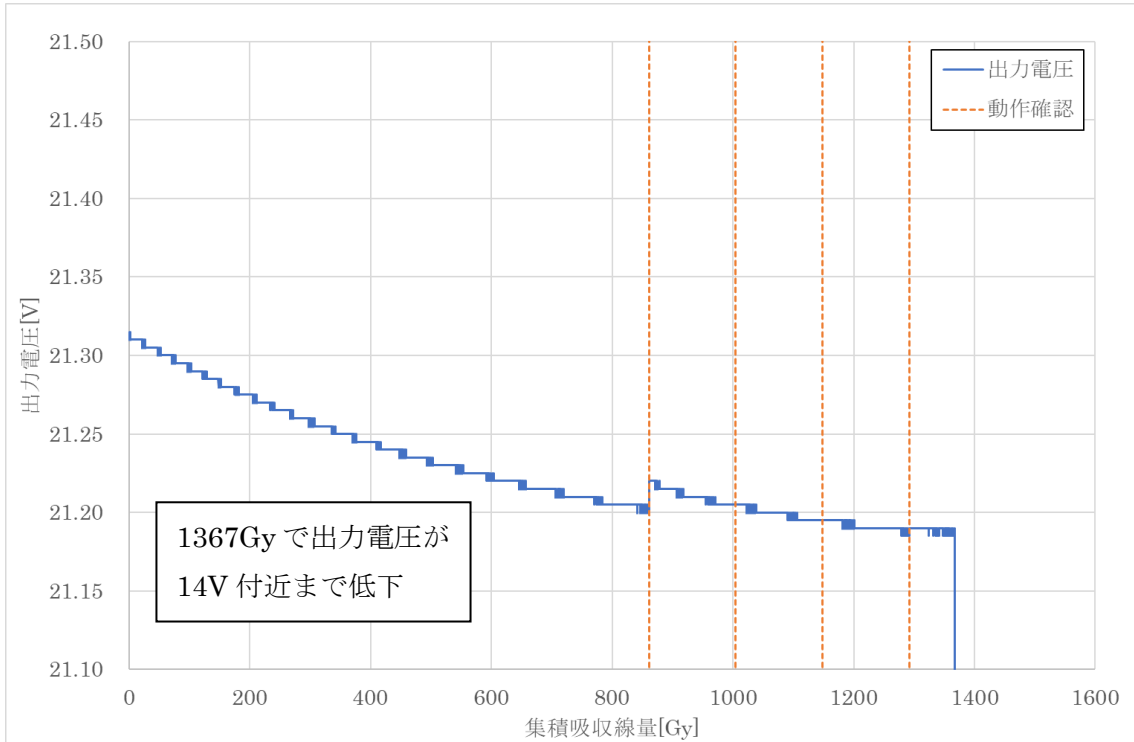


図 8.1-31 近接 50-4 出力電圧変化

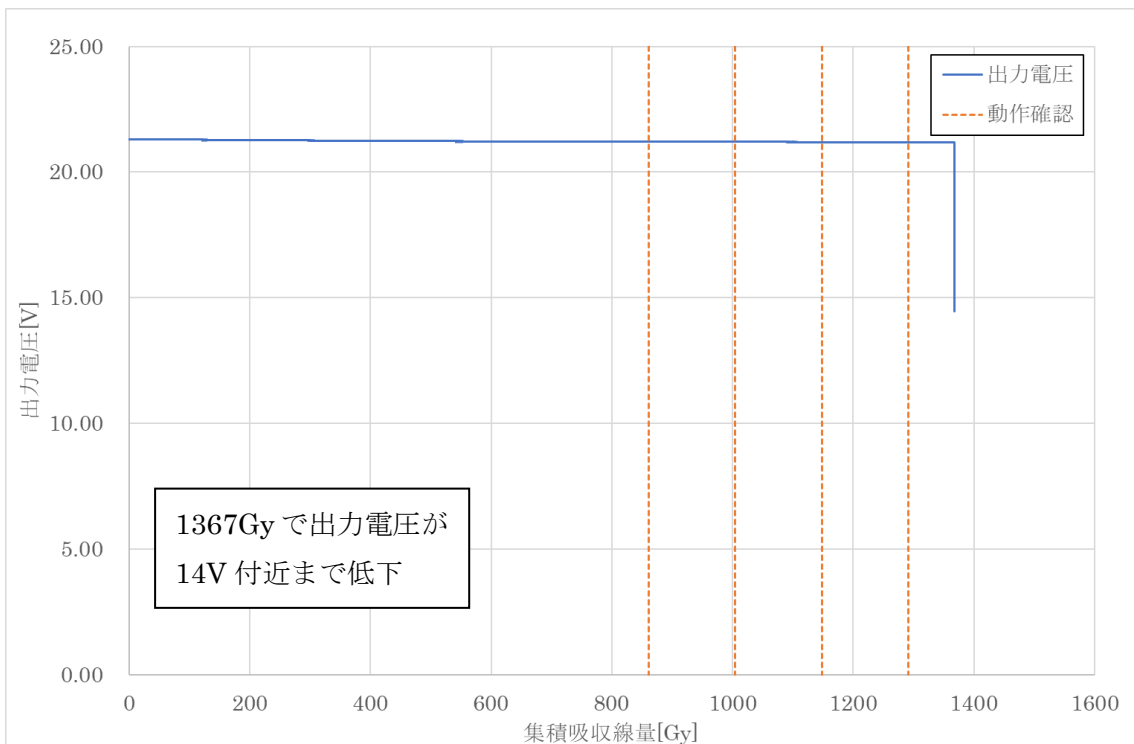


図 8.1-32 近接 50-4 出力電圧変化 (縮小図)

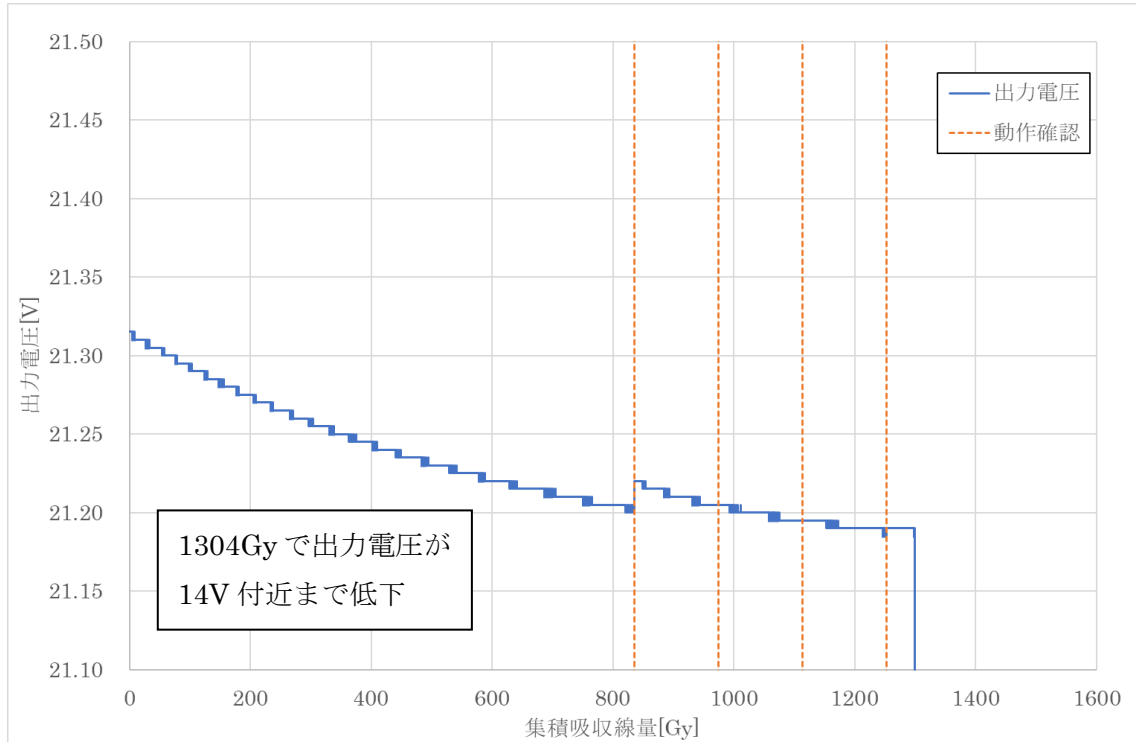


図 8.1-33 近接 50-5 出力電圧変化

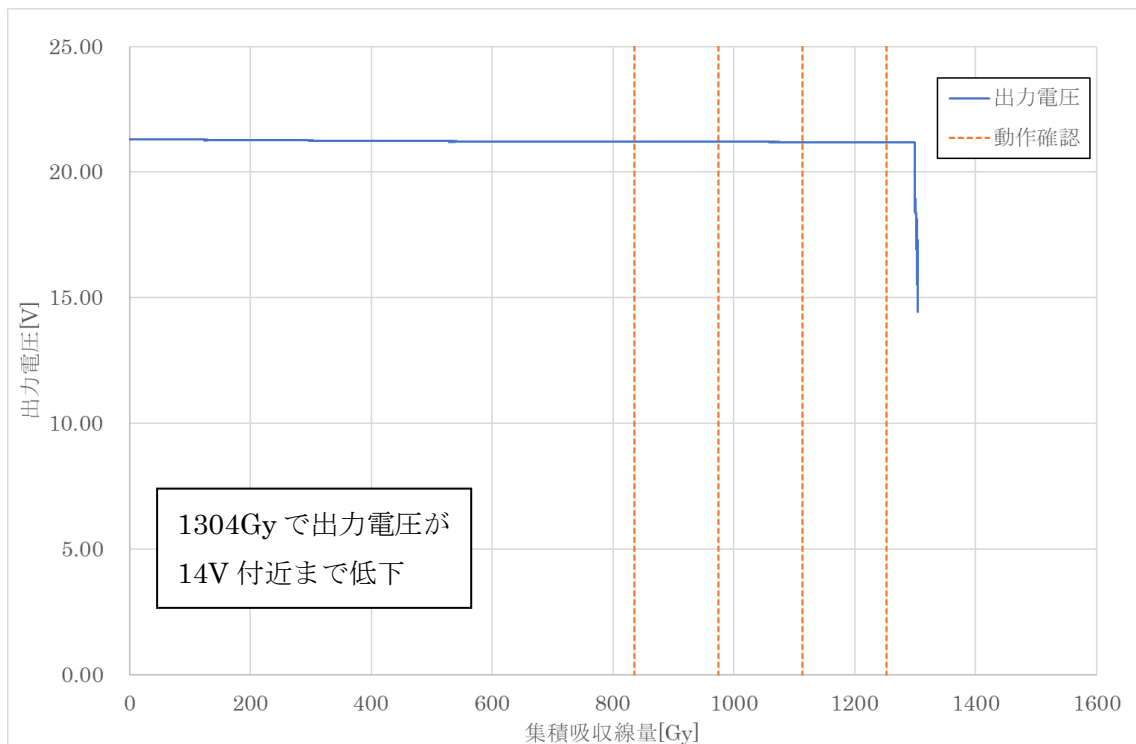


図 8.1-34 近接 50-5 出力電圧変化 (縮小図)

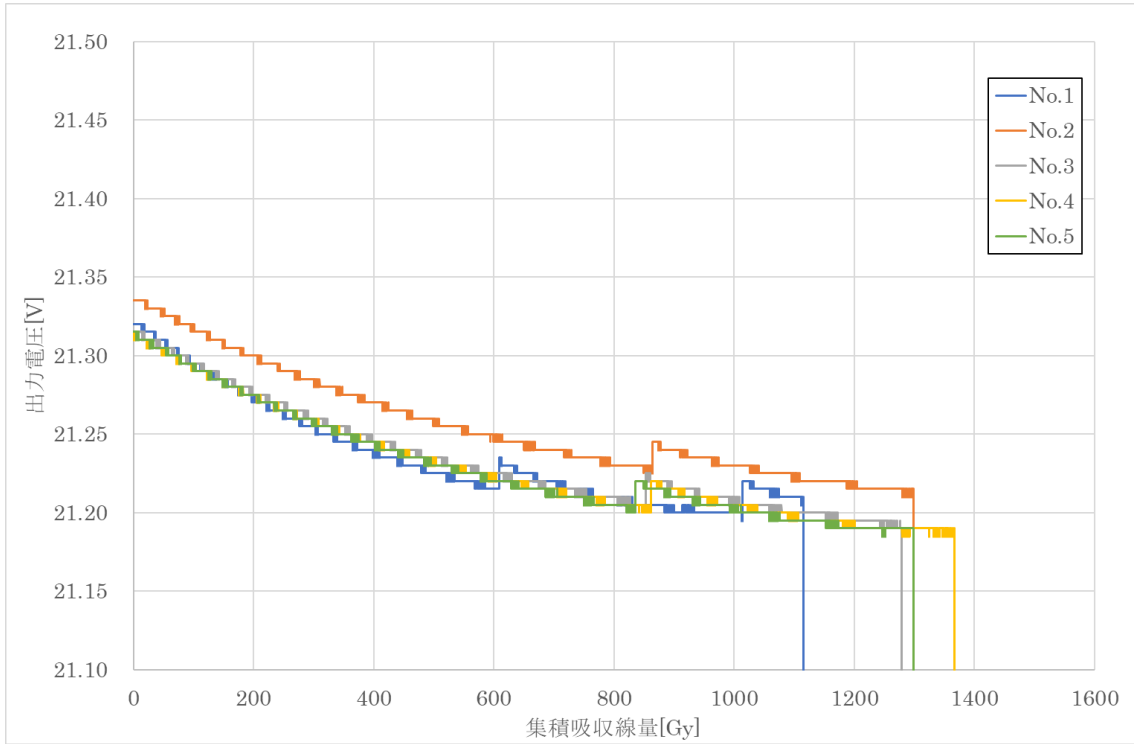


図 8.1-35 近接 50Gy/h 全センサ出力電圧変化

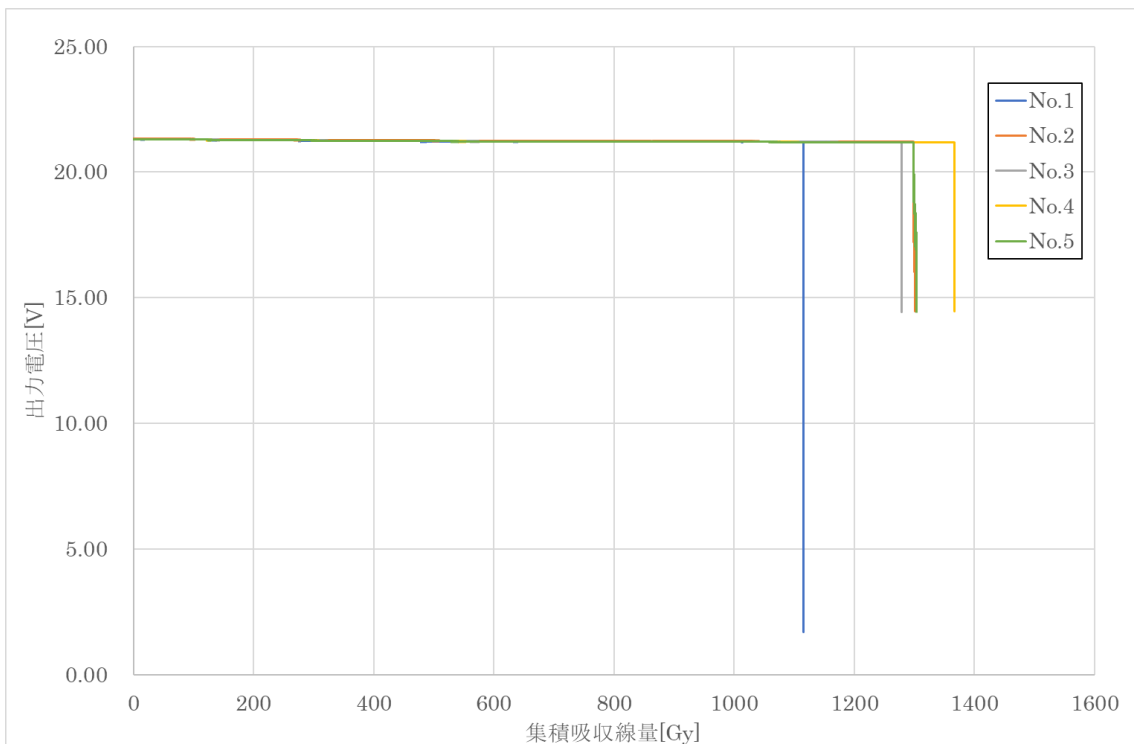


図 8.1-36 近接 50Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)

(2) 100Gy/h 試験

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。近接センサの出力電圧が低下するもしくは検知不良によって故障した時点での集積吸収線量を表 8.1-7 に、不具合発生前の集積吸収線量を表 8.1-8 に示す。

各近接センサの出力電圧の変化を図 8.1-37 から図 8.1-46 に示す。また、全センサを同一のグラフにプロットした図を図 8.1-47 及び図 8.1-48 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。なお、近接センサは、検知時には全てのセンサで約 21V を出力するが、非検知時には No.3,4 で約 2V、No.1,2,5 で約 14V を出力することを確認した。

近接センサ 5 台に対して、吸収線量率約 100Gy/h で照射試験を実施した結果、No.1 は照射開始後約 16.0 時間（集積吸収線量 1477Gy）の動作確認時に検知状態としても検知せず、データロガーの出力電圧が非検知状態と同等である 14V 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 16.0 時間（集積吸収線量 1477Gy）の動作確認後に検知状態の出力電圧が 14V 付近まで低下していた。従って、出力電圧が低下した照射開始後 16.0 時間（集積吸収線量 1477Gy）で故障と判断した。

No.2 は、照射開始後 11.0 時間（集積吸収線量 1107Gy）の動作確認時に出力電圧が 14V 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 10.7 時間（集積吸収線量 1080Gy）に出力電圧が 14V 付近まで低下していた。

No.3 は、照射開始後 11.0 時間（集積吸収線量 1179Gy）の動作確認時に出力電圧が 2V 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 10.8 時間（集積吸収線量 1154Gy）に出力電圧が 2V 付近まで低下していた。

No.4 は、照射開始後 11.0 時間（集積吸収線量 1257Gy）の動作確認時に出力電圧が 2V 付近まで低下していることを確認した。ただし、この時検知状態を変化させると、正常な出力電圧に戻り、正常に検知することを確認した。また、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始後 7.27 時間（集積吸収線量 831Gy）に出力電圧が 17V 付近まで低下していた。センサが正常な状態では検知状態で 17V を示すことは無いため、17V まで電圧が低下した時点でセンサが故障したと判断した。

No.5 は、照射開始後 14.0 時間（集積吸収線量 1440Gy）の動作確認時に出力電圧が 14V 付近まで低下していることを確認した。ただし、この時検知状態を変化させると、正常な出力電圧に戻り、正常に検知することを確認した。また、データロガーの出力電圧を確認すると、照射開始後 6.55 時間（集積吸収線量 674Gy）に出力電圧が 14V 付近まで低下していた。

表 8.1-7 近接センサ（100Gy/h）の故障を確認した集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 100-1	92	16.0	1477	1043 (SD ^{※1} :277)	出力電圧低下 (14V 付近)
近接 100-2	101	10.7	1080		出力電圧低下 (14V 付近)
近接 100-3	107	10.8	1154		出力電圧低下 (2V 付近)
近接 100-4	114	7.27	831		出力電圧低下 (17V 付近)
近接 100-5	103	6.55	674		出力電圧低下 (14V 付近)

※1 SD：標準偏差

表 8.1-8 近接センサ（100Gy/h）の不具合発生前の集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [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 100-1	92	15.5	1431	985 (SD ^{※1} :274)
近接 100-2	101	10.0	1007	
近接 100-3	107	10.0	1072	
近接 100-4	114	7.00	800	
近接 100-5	103	6.00	617	

※1 SD：標準偏差

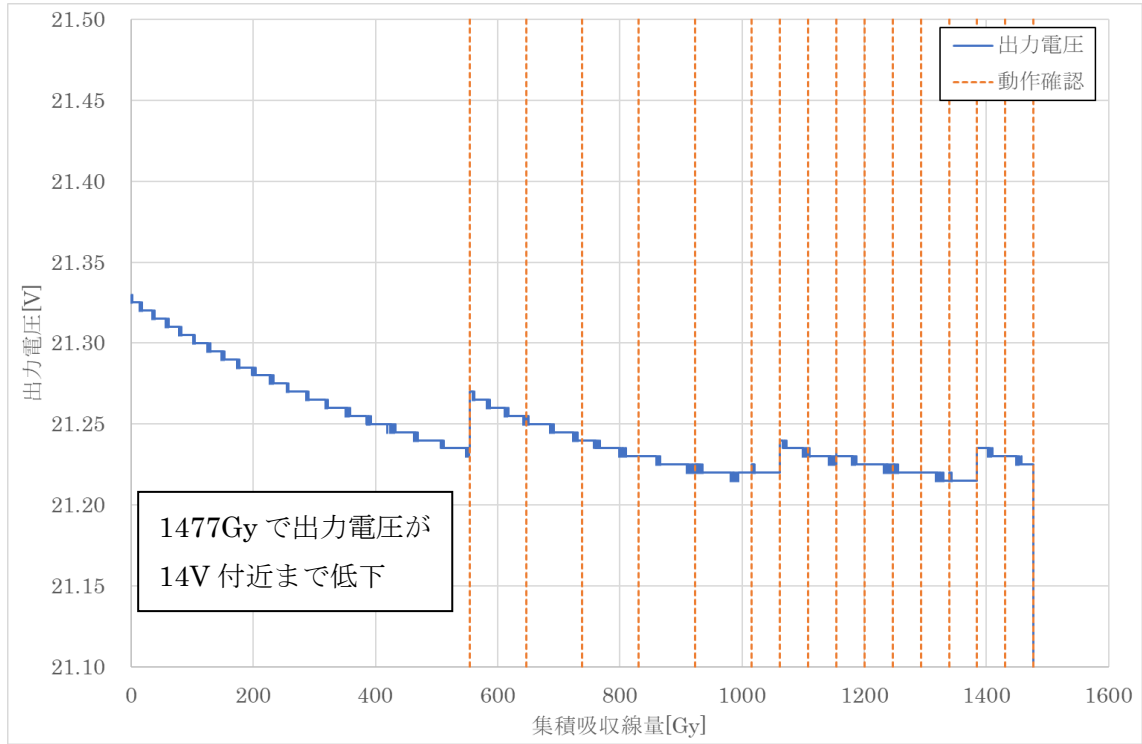


図 8.1-37 近接 100-1 出力電圧変化

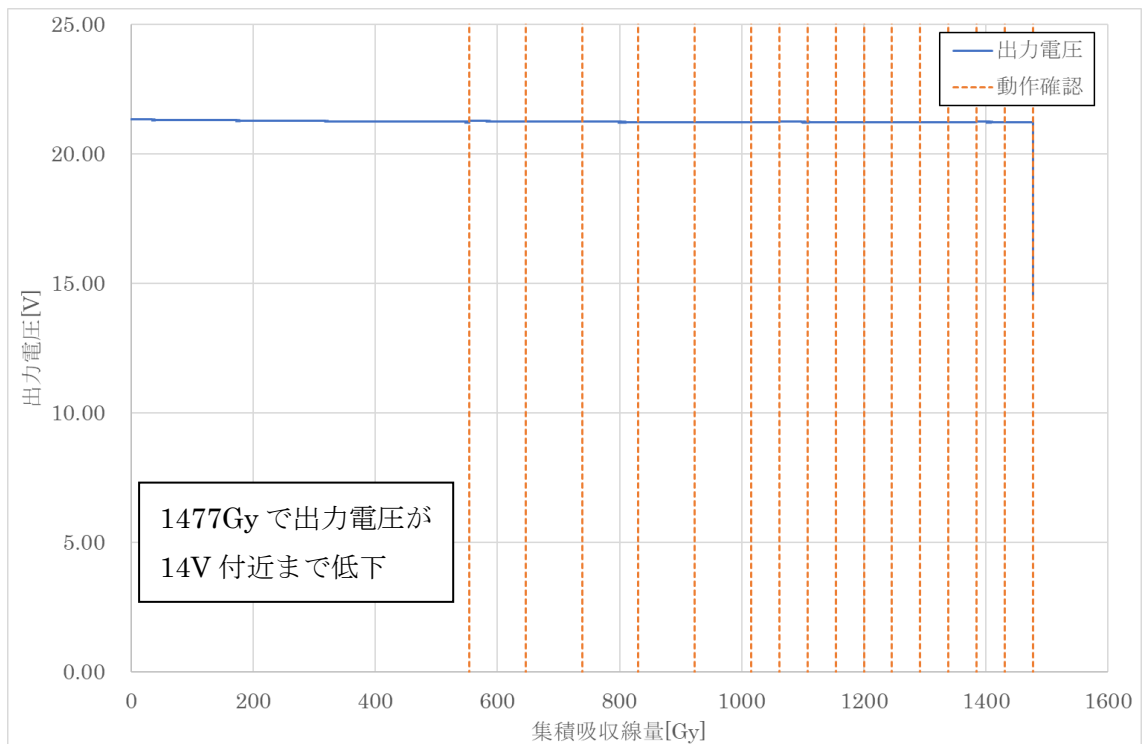


図 8.1-38 近接 100-1 出力電圧変化 (縮小図)

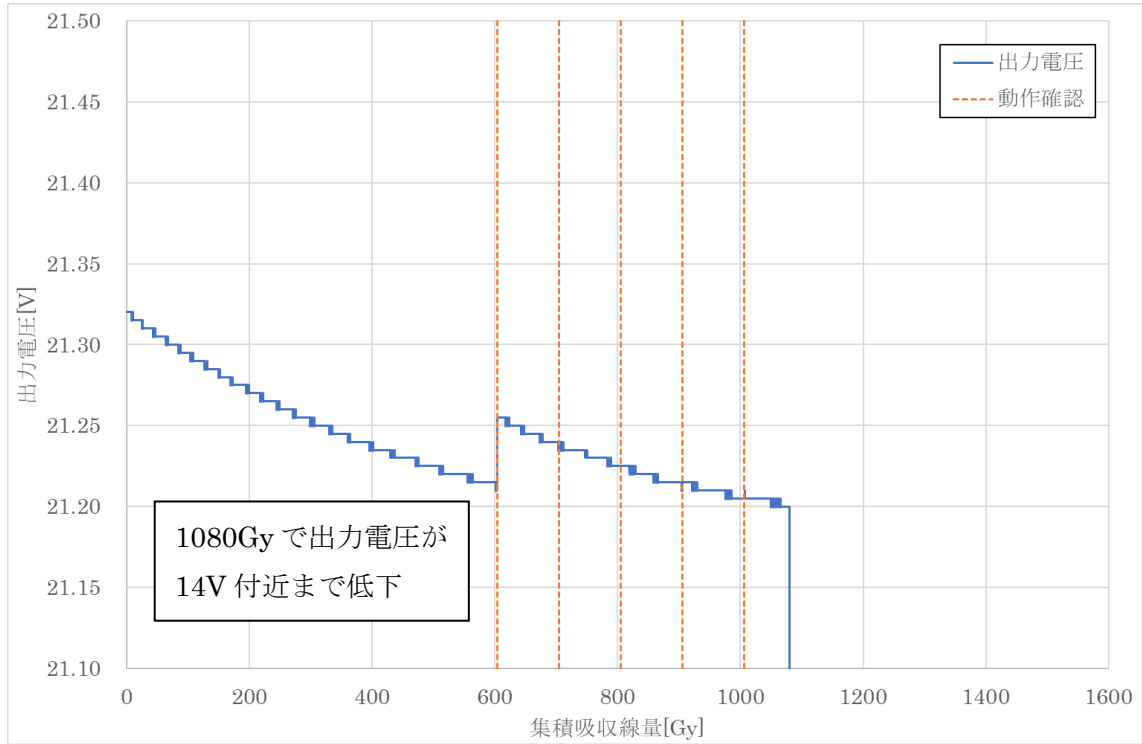


図 8.1-39 近接 100-2 出力電圧変化

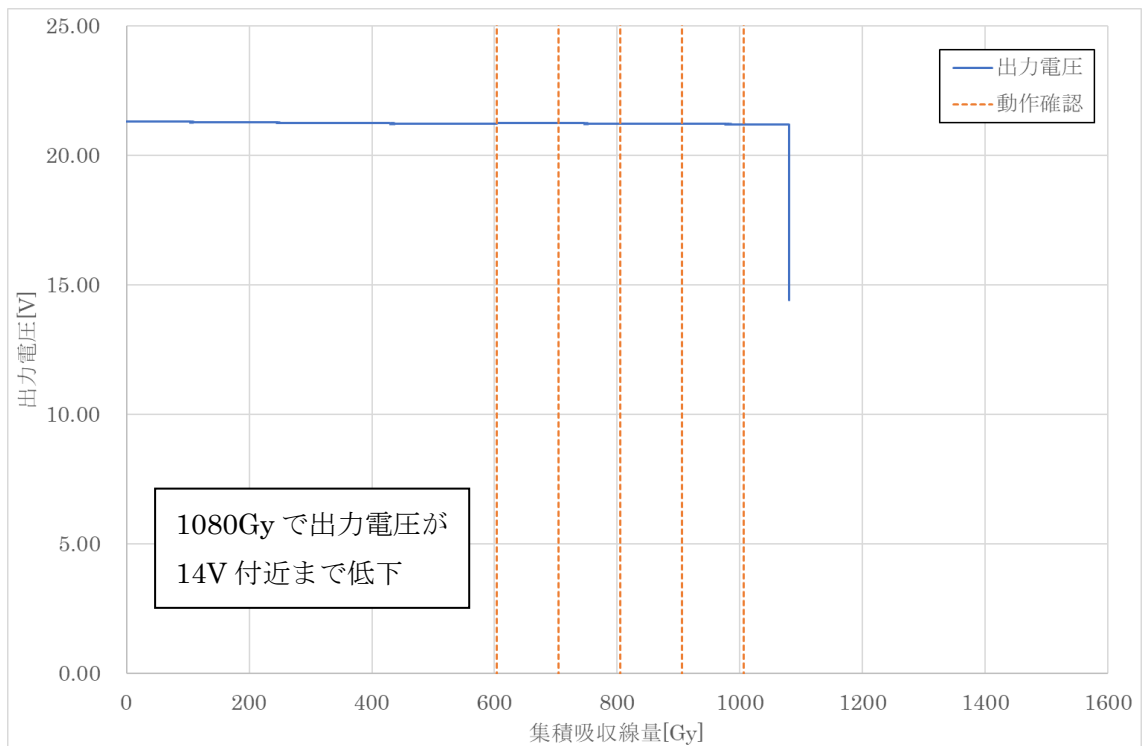


図 8.1-40 近接 100-2 出力電圧変化 (縮小図)

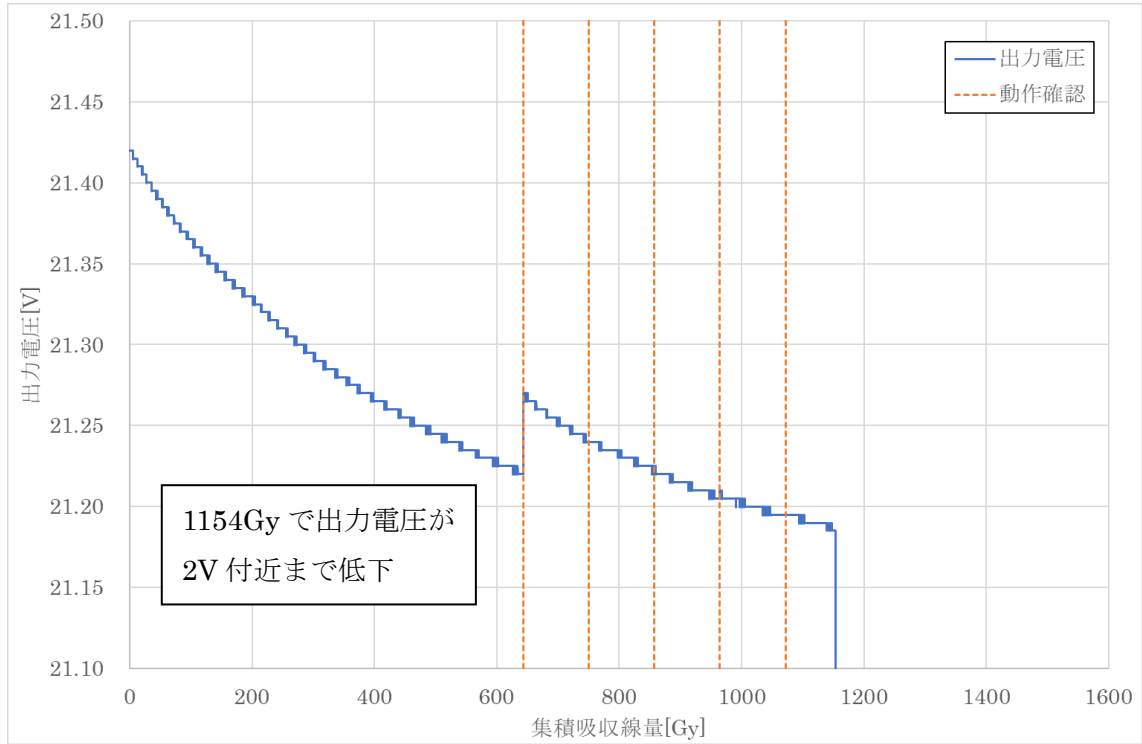


図 8.1-41 近接 100-3 出力電圧変化

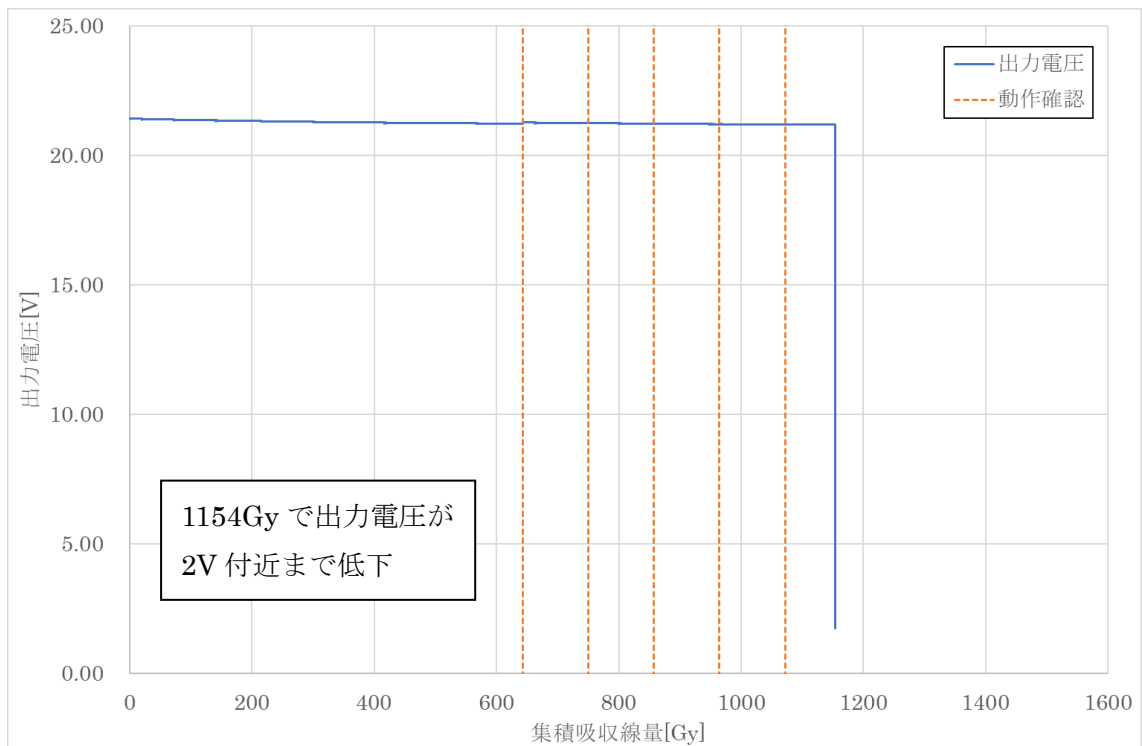


図 8.1-42 近接 100-3 出力電圧変化 (縮小図)

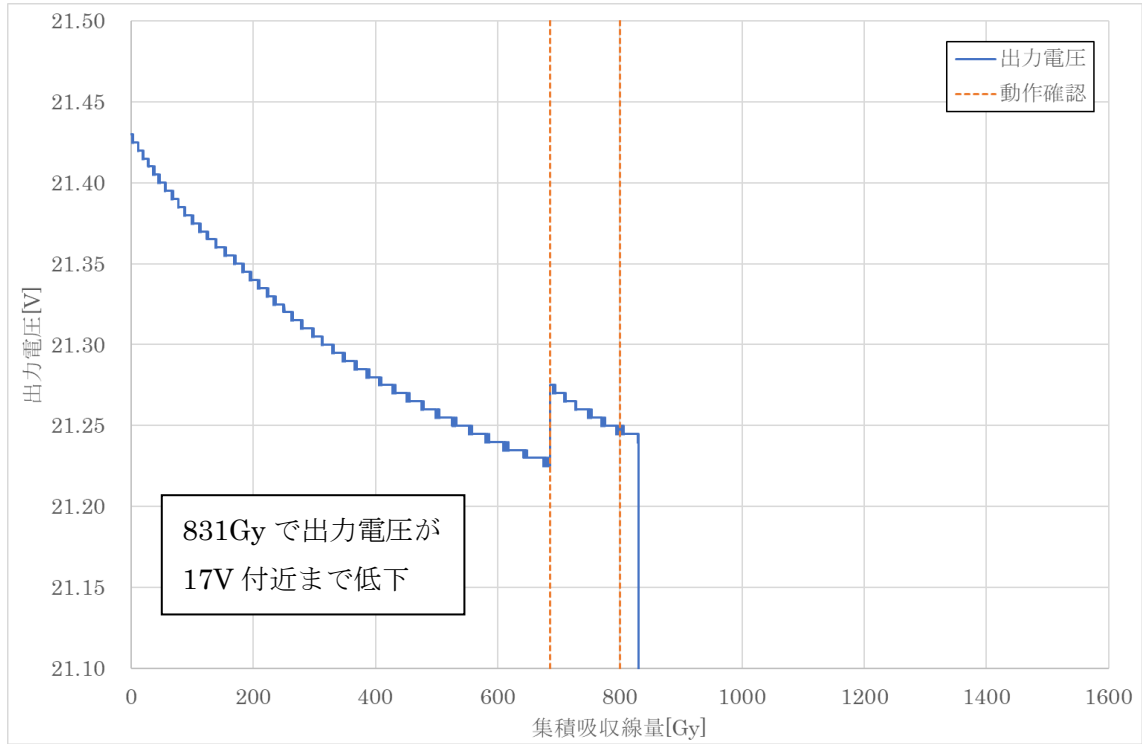


図 8.1-43 近接 100-4 出力電圧変化

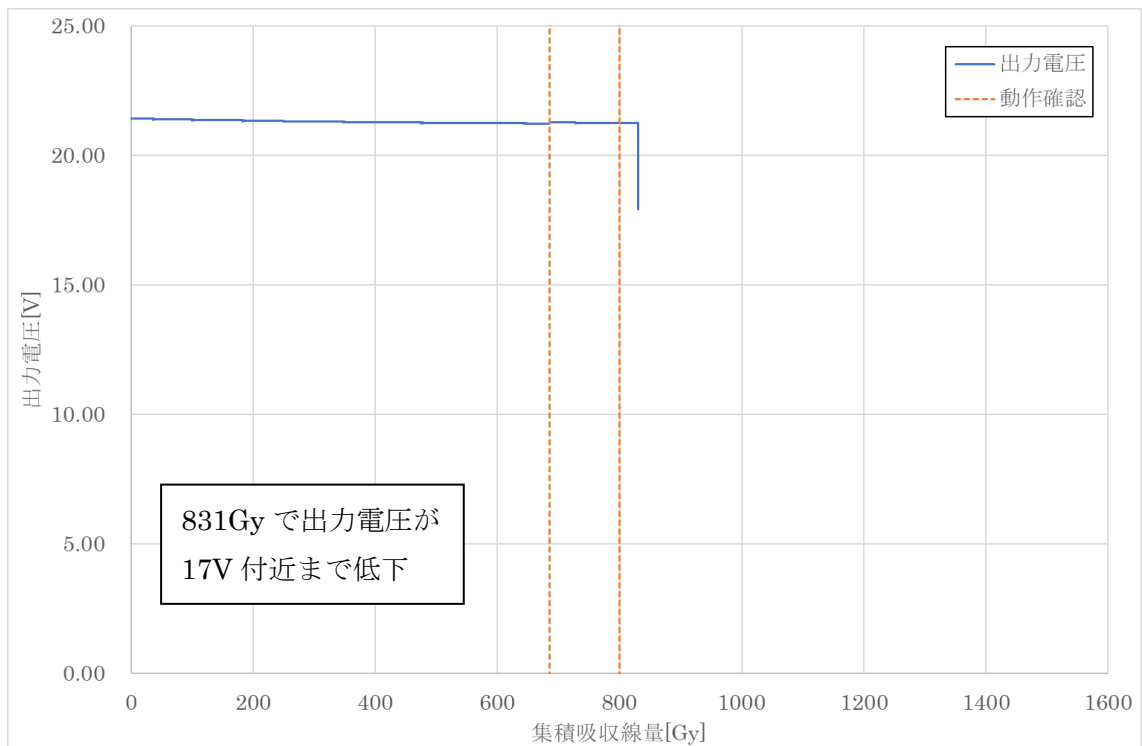


図 8.1-44 近接 100-4 出力電圧変化 (縮小図)

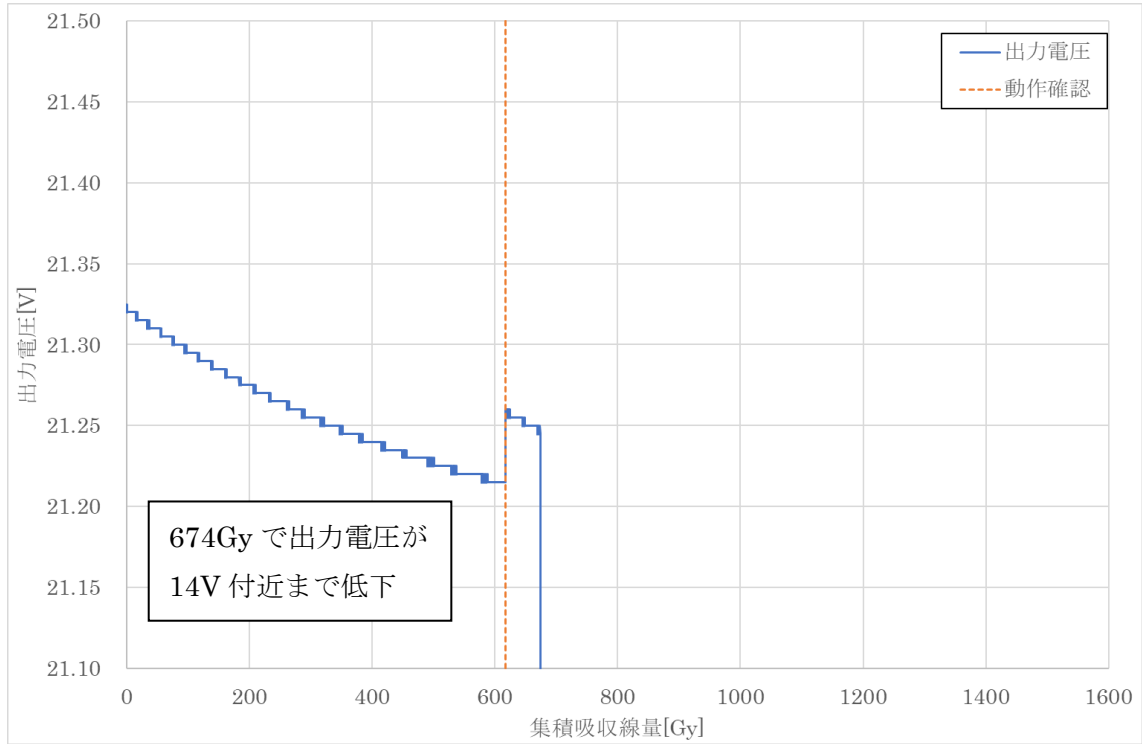


図 8.1-45 近接 100-5 出力電圧変化

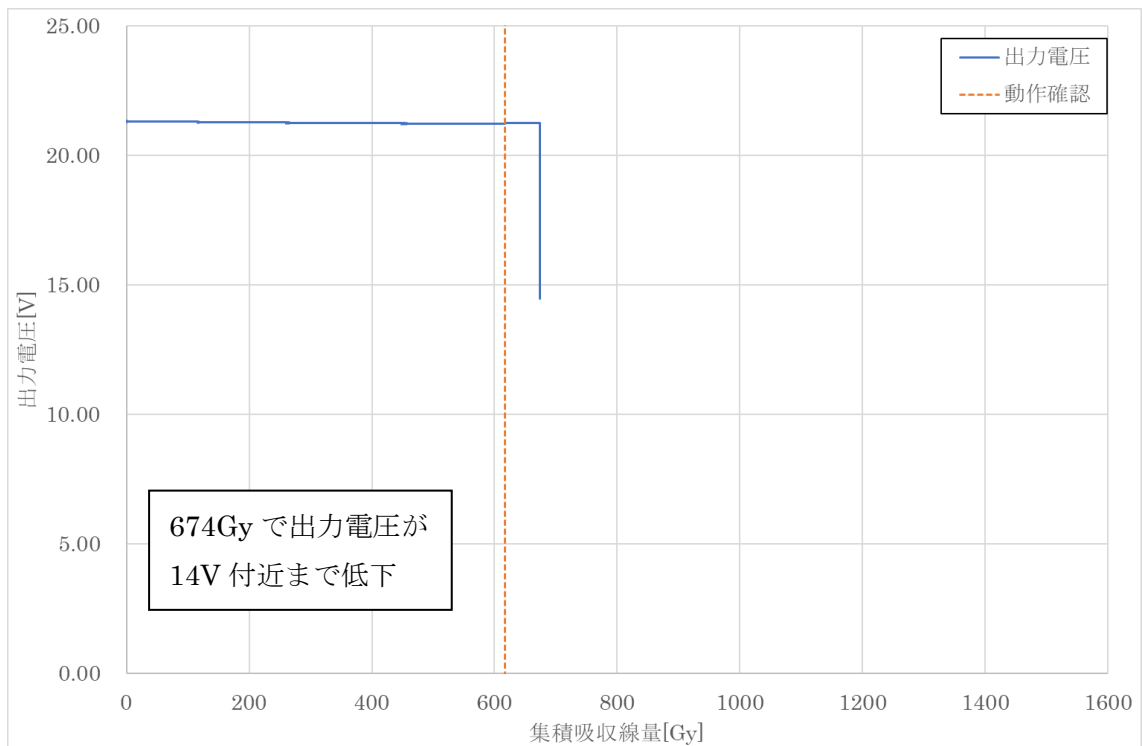


図 8.1-46 近接 100-5 出力電圧変化 (縮小図)

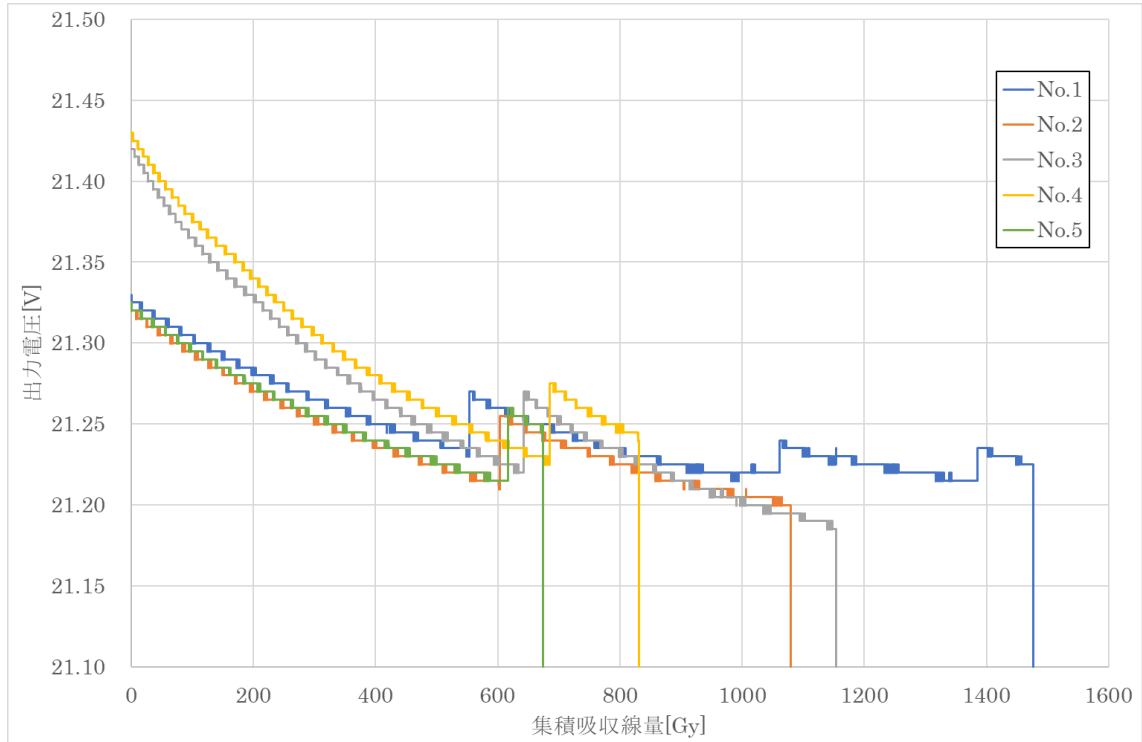


図 8.1-47 近接 100Gy/h 全センサ出力電圧変化

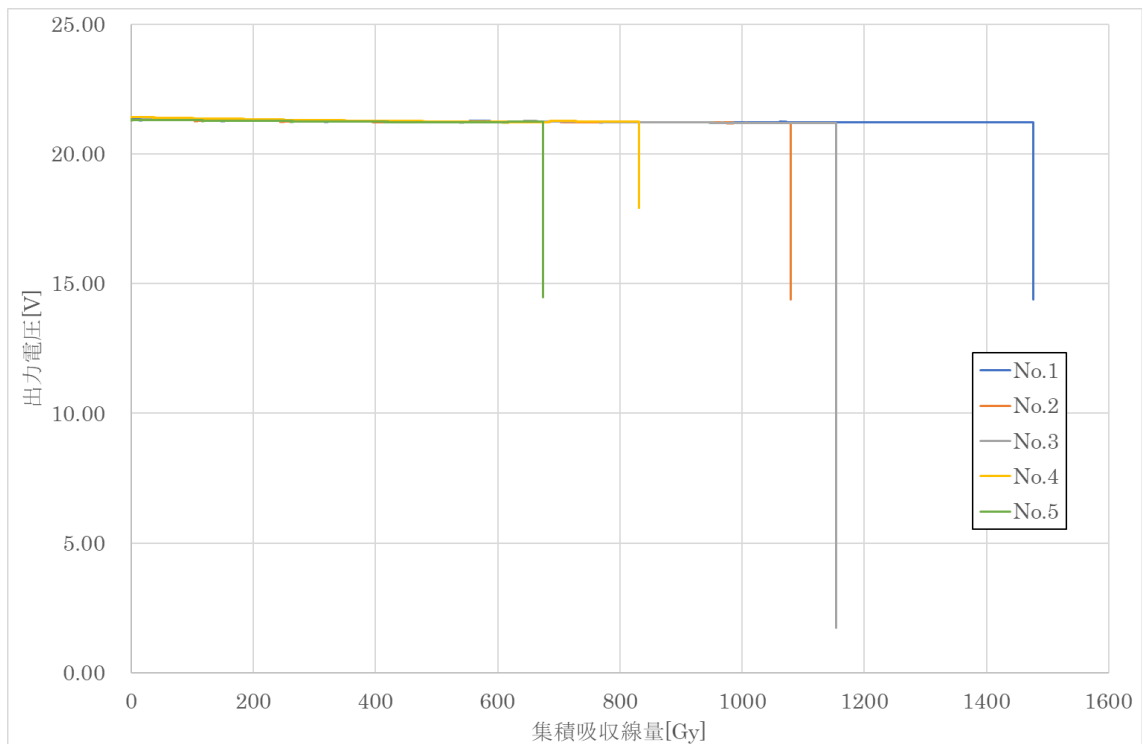


図 8.1-48 近接 100Gy/h 全センサ出力電圧変化 (縮小図)

8.1.3 測域センサ

(1) 50Gy/h 試験

4.2 項で設定した条件に従い、測域センサの照射試験を実施した。測域センサは、測定中、一定のばらつきを示しながら距離データを出し、PC にデータを転送、記録していたが、故障時には PC に記録される距離データが一定となる事象が確認された。また、記録される距離データが一定となった後も照射を続け、照射を中断したタイミングで PC との接続を解除すると、センサと PC が再接続できず、距離データの測定ができなくなったため、試験終了とした。

本試験では、距離データが一定となった集積吸収線量を測域センサが故障した集積吸収線量と定義した。測域センサが故障した時点での集積吸収線量を表 8.1-9 に示す。

各センサの距離データの変化を図 8.1-49 から図 8.1-51 に示す。また、照射前及び故障後の検出範囲を図 8.1-52 から図 8.1-57 に示す。

表 8.1-9 測域センサ (50Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]	故障時の挙動
測域 50-1	52.0	3.92	204	207 (SD ^{※1} :10)	出力データ一定
測域 50-2	52.0	3.79	197		出力データ一定
測域 50-3	52.0	4.24	221		出力データ一定

※1 SD : 標準偏差

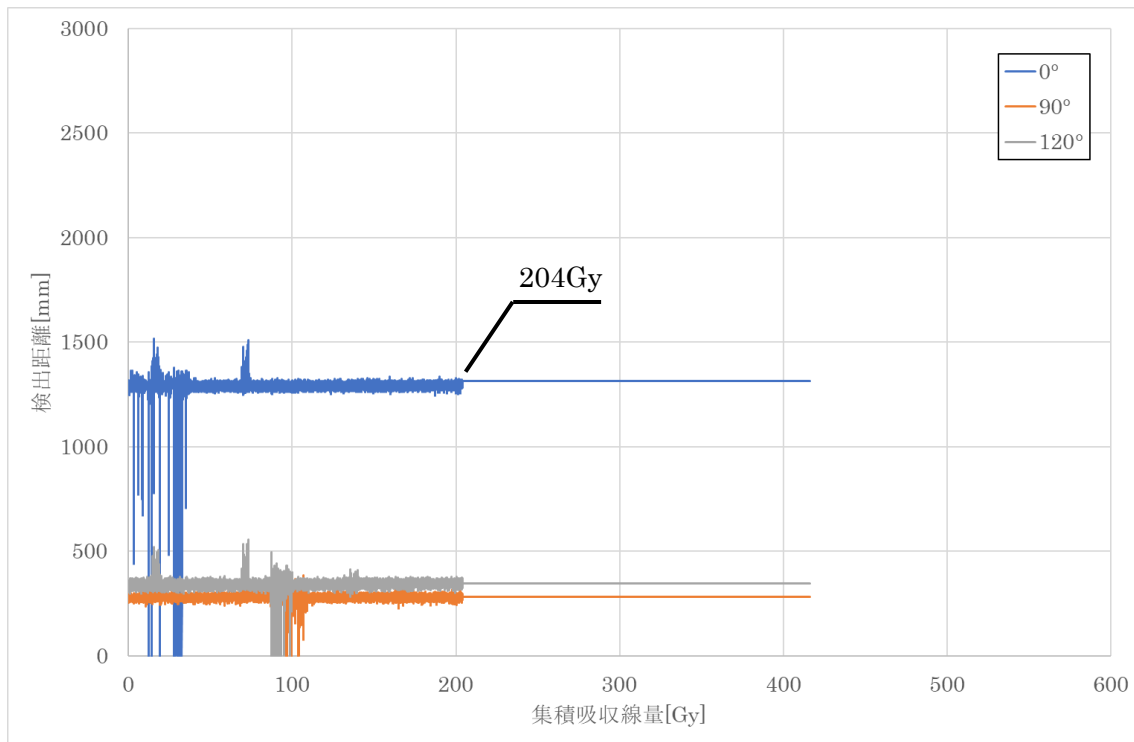


図 8.1-49 測域 50-1 距離データ変化

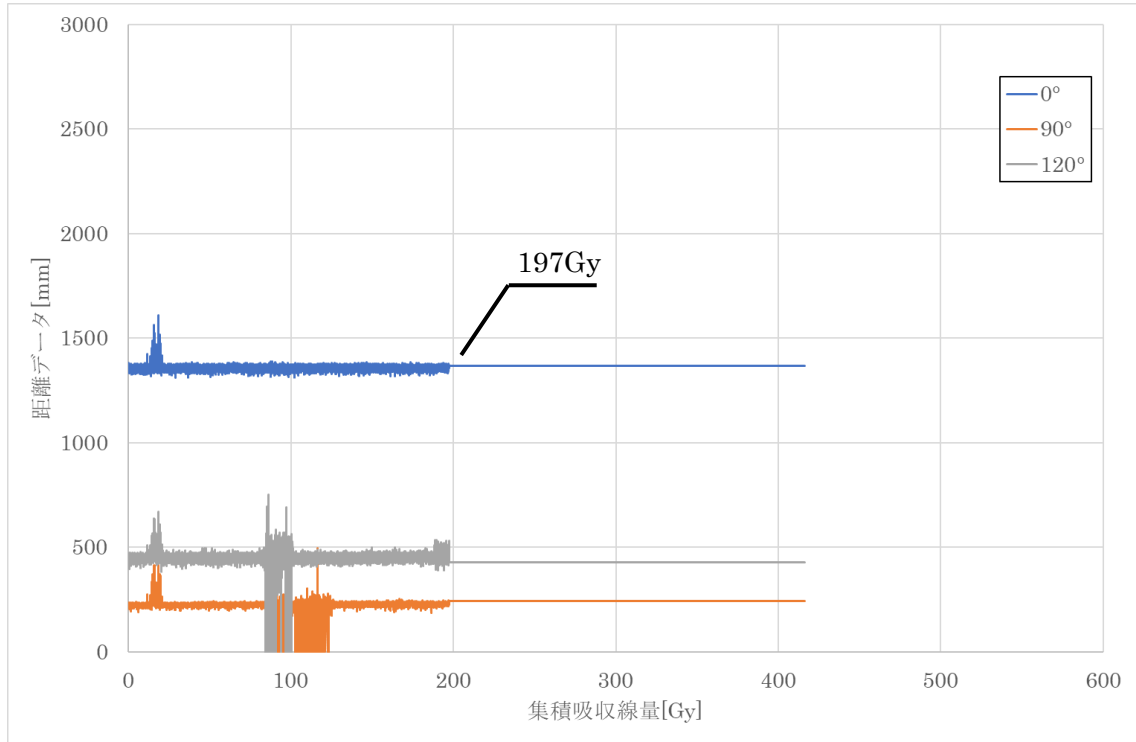


図 8.1-50 測域 50-2 距離データ変化

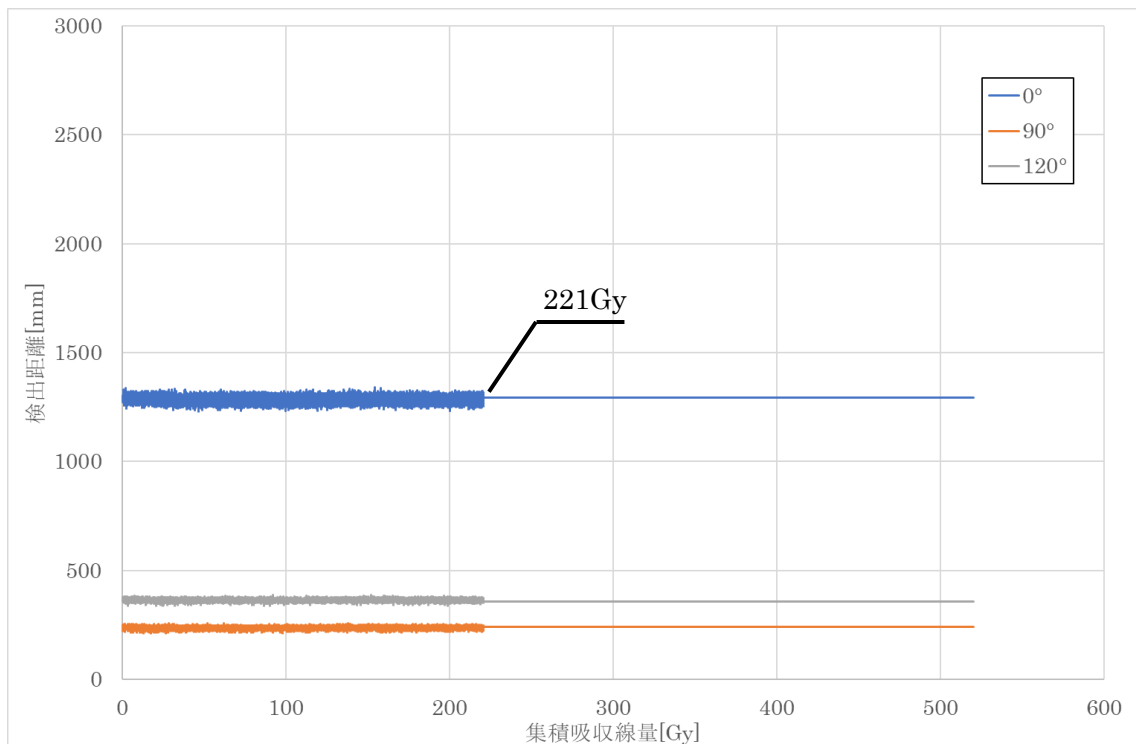


図 8.1-51 測域 50-3 距離データ変化

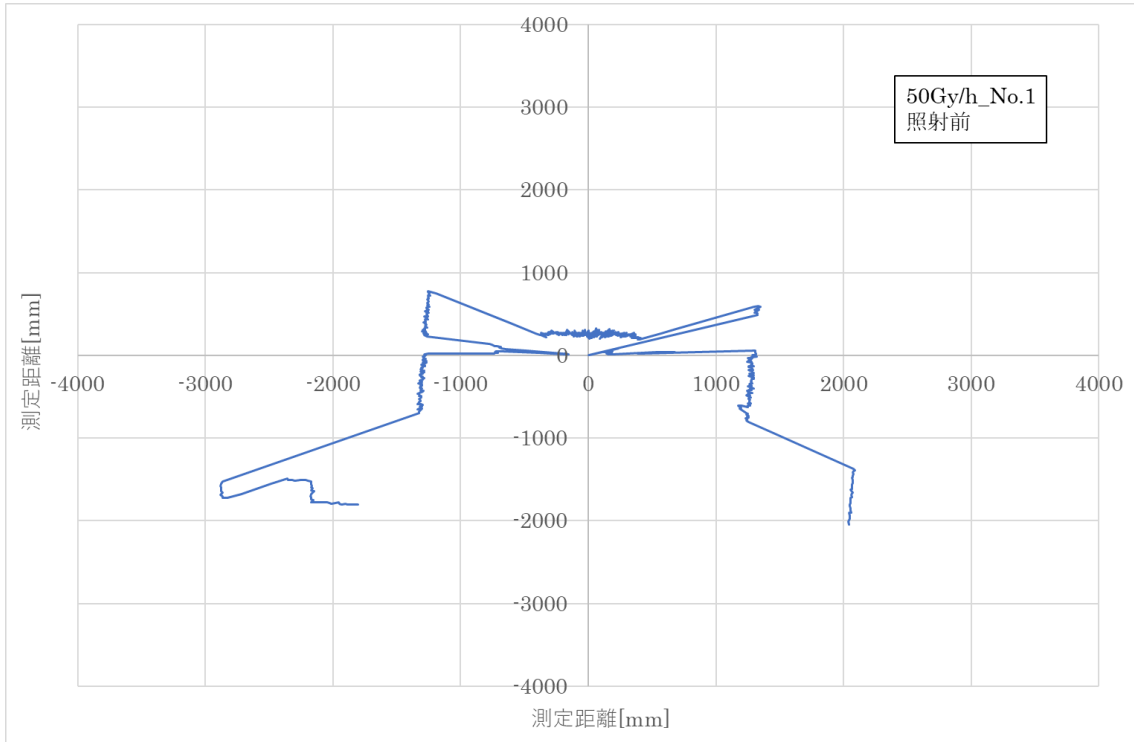


図 8.1-52 測域 50-1 検出範囲 (照射前)

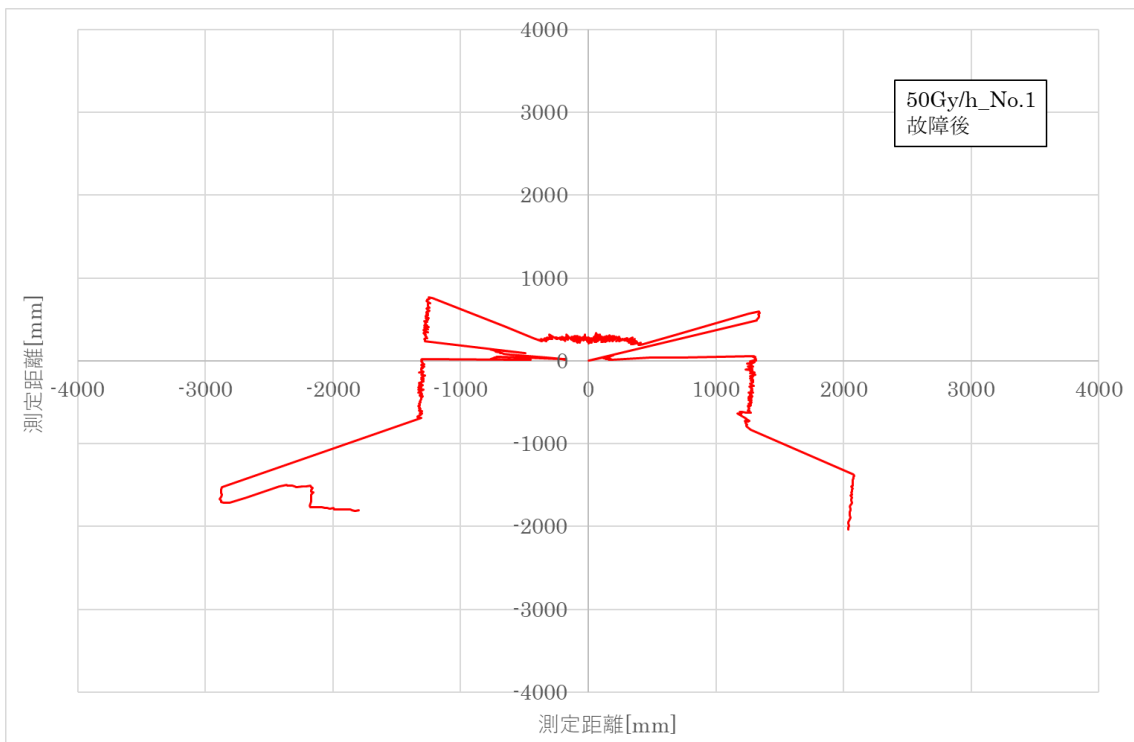


図 8.1-53 測域 50-1 検出範囲 (故障後)

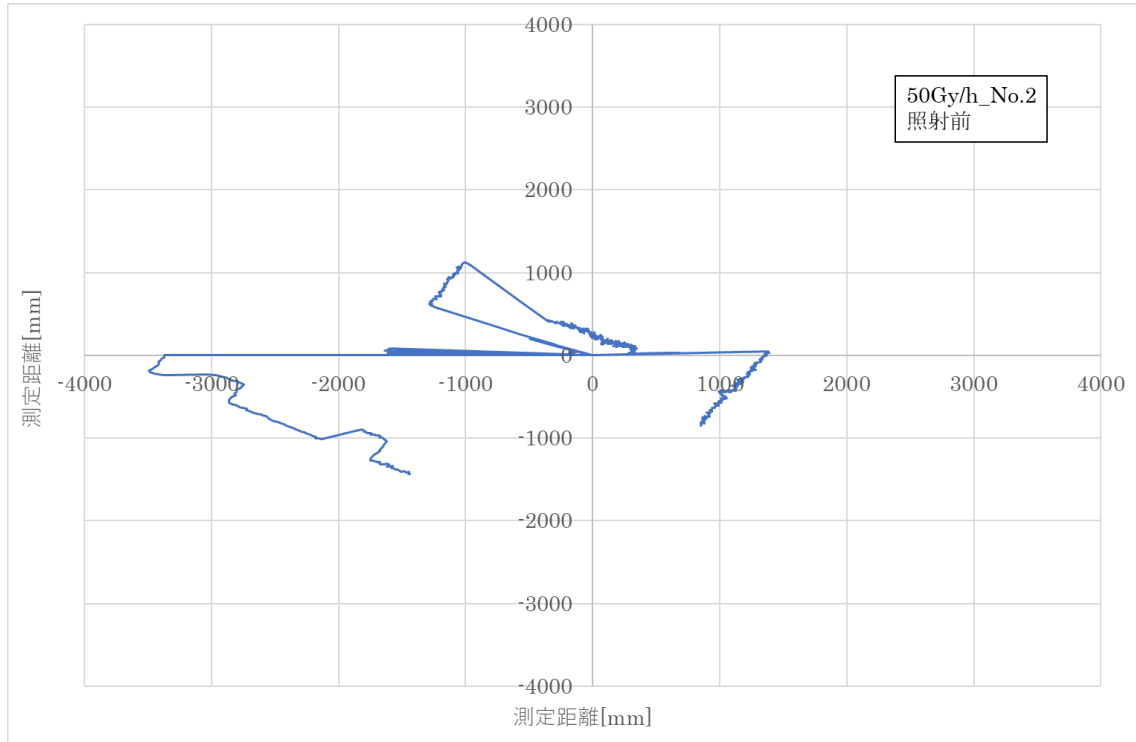


図 8.1-54 測域 50-2 検出範囲 (照射前)

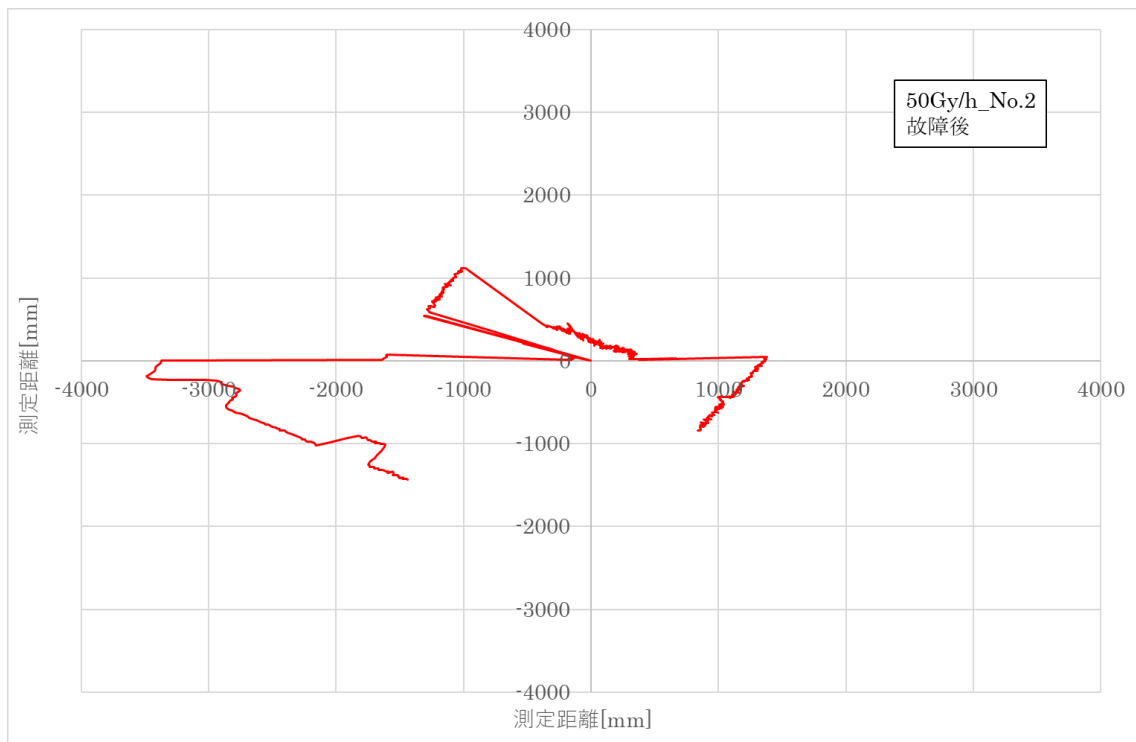


図 8.1-55 測域 50-2 検出範囲 (故障後)

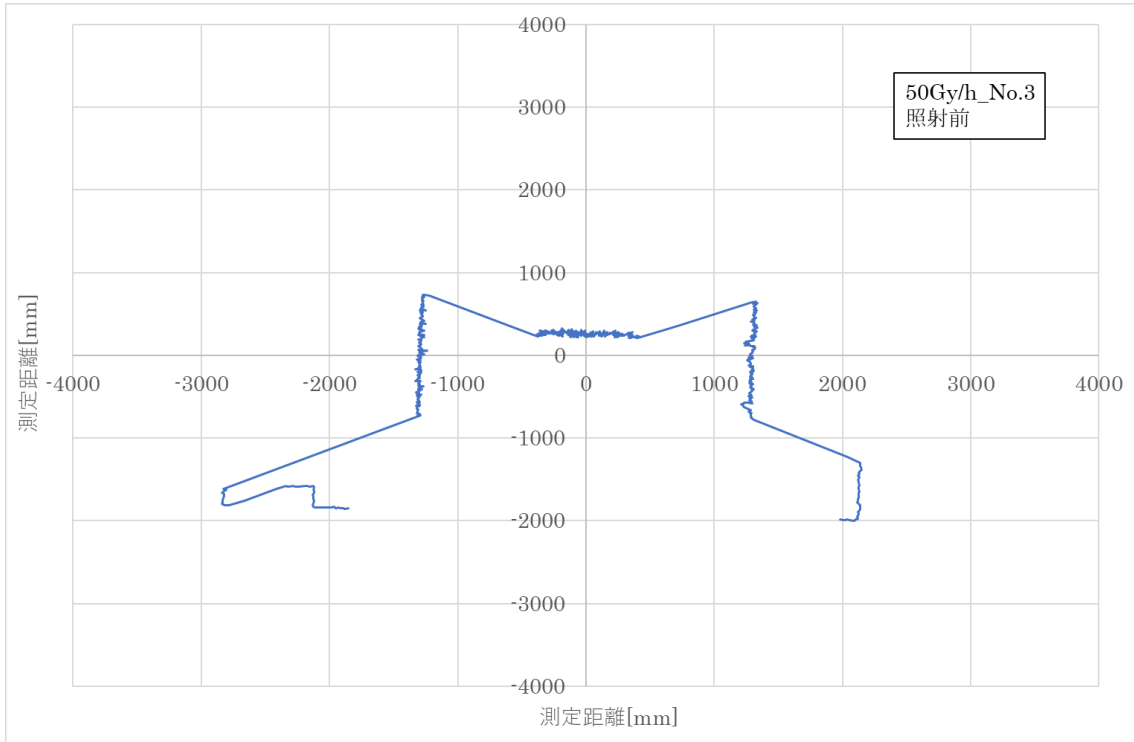


図 8.1-56 測域 50-3 検出範囲 (照射前)

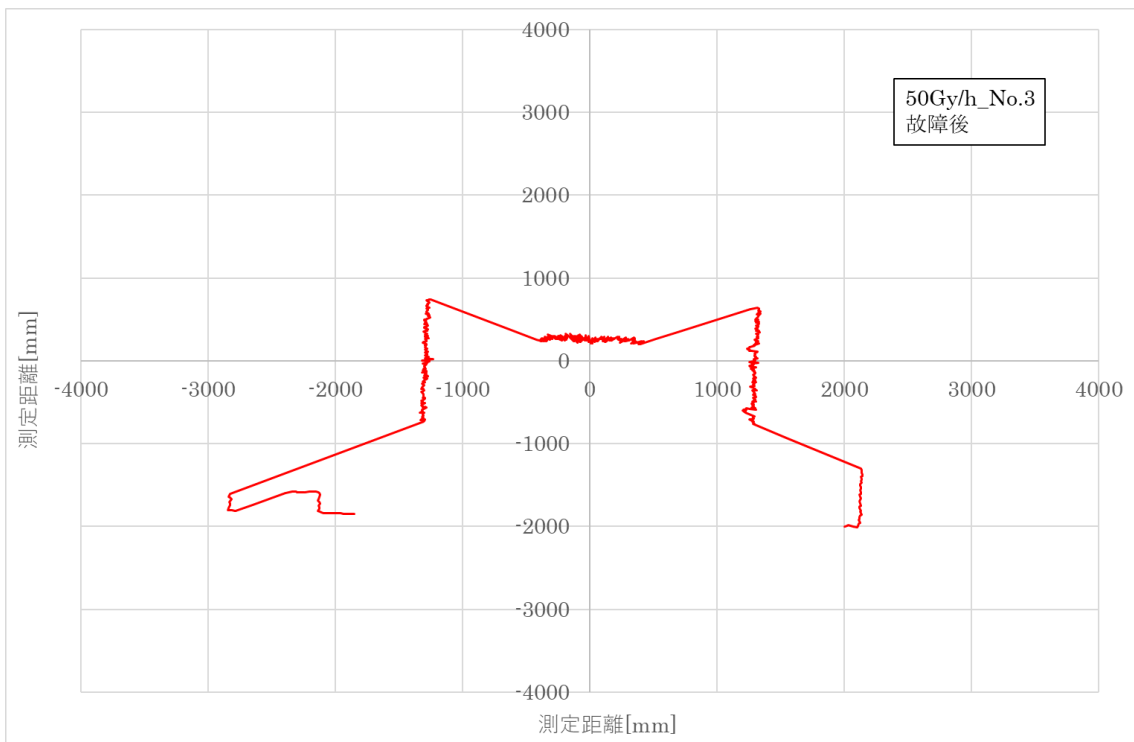


図 8.1-57 測域 50-3 検出範囲 (故障後)

(2) 100Gy/h 試験

4.2 項で設定した条件に従い、測域センサの照射試験を実施した。100Gy/h 試験においても 50Gy/h 試験と同様に、故障時には PC に記録される距離データが一定となる事象が確認された。測域センサが故障した時点での集積吸収線量を表 8.1-10 に示す。

各センサの距離データの変化を図 8.1-58 から図 8.1-60 に示す。また、照射前及び故障後の検出範囲を図 8.1-61 から図 8.1-66 に示す。

表 8.1-10 測域センサ (100Gy/h) の故障を確認した集積吸収線量

センサ No.	吸収線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]	故障時の挙動
測域 100-1	97.7	2.19	214	240 (SD ^{*1} :19)	出力データ一定
測域 100-2	97.7	2.49	244		出力データ一定
測域 100-3	97.7	2.67	261		出力データ一定

※1 SD : 標準偏差

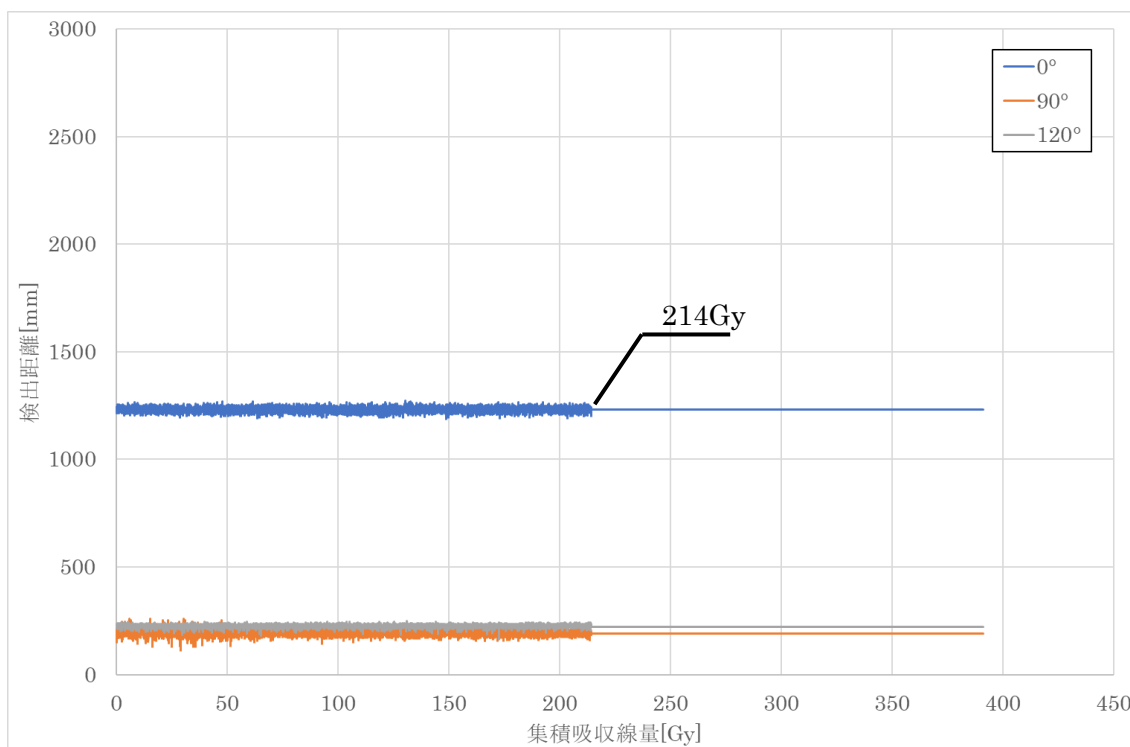


図 8.1-58 測域 100-1 距離データ変化

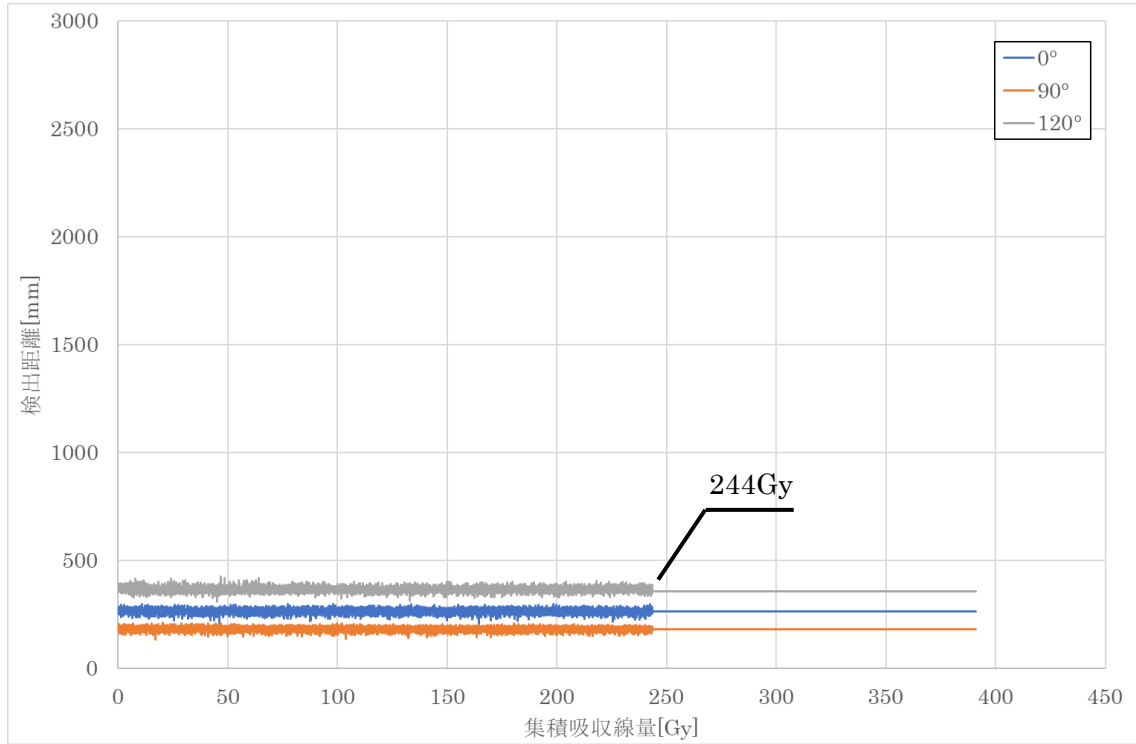


図 8.1-59 測域 100-2 距離データ変化

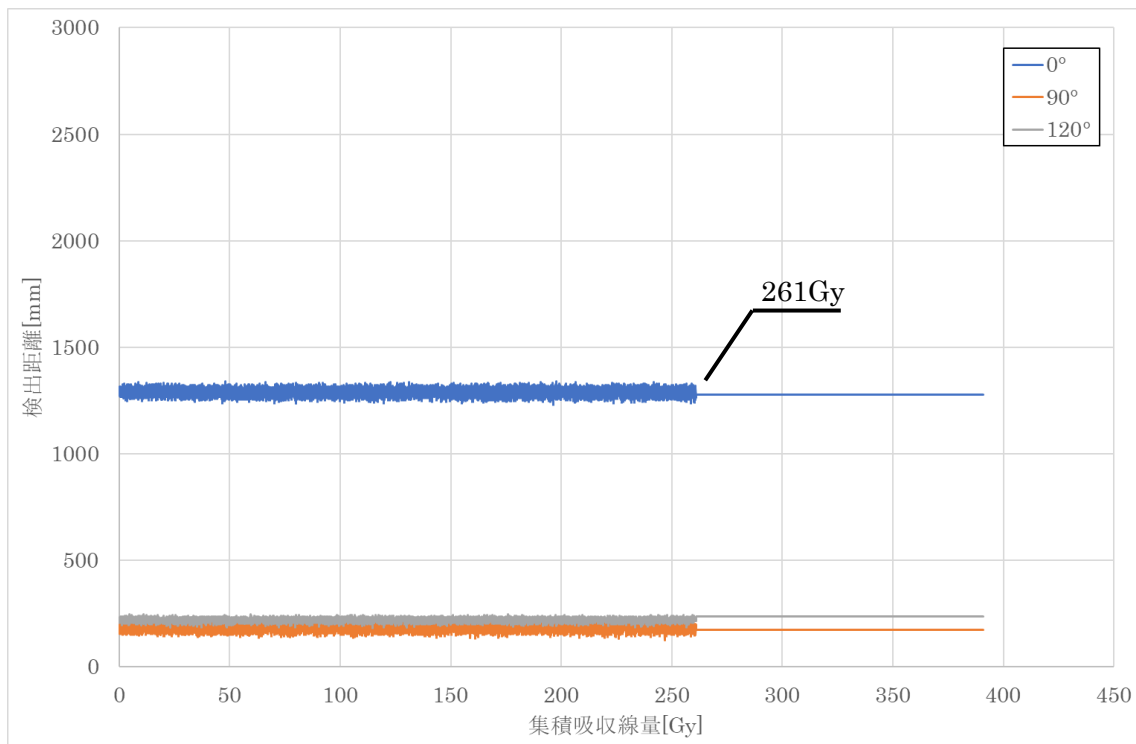


図 8.1-60 測域 100-3 距離データ変化

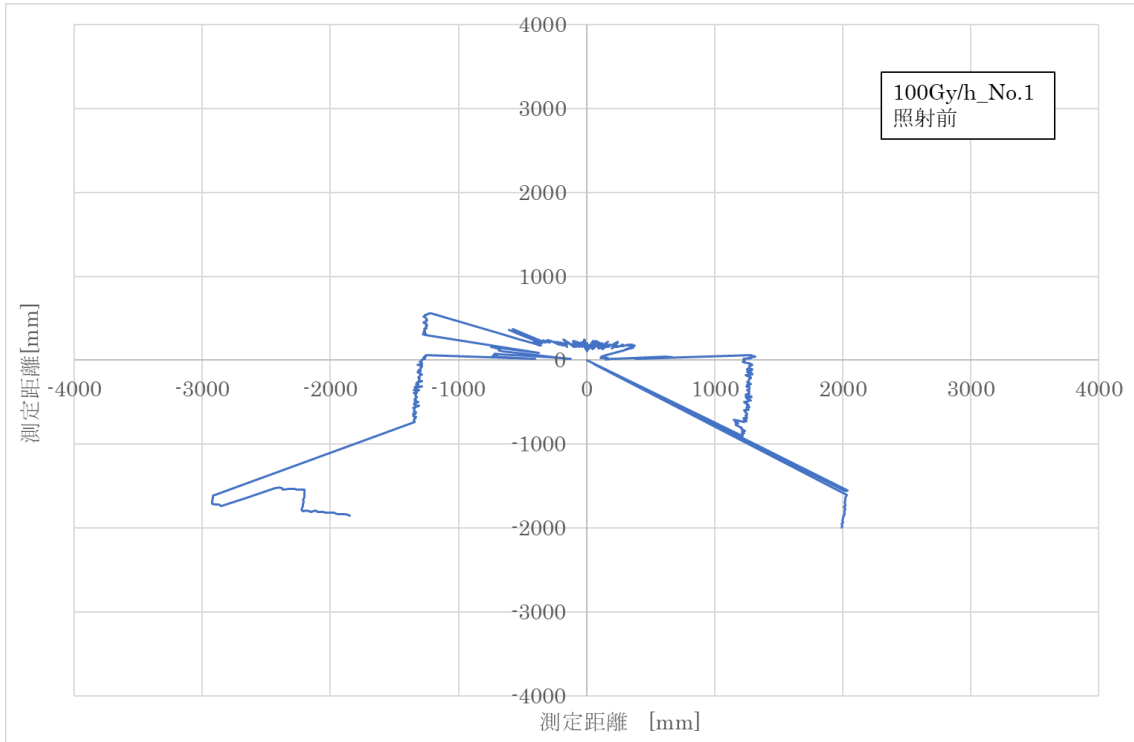


図 8.1-61 測域 100-1 検出範囲（照射前）

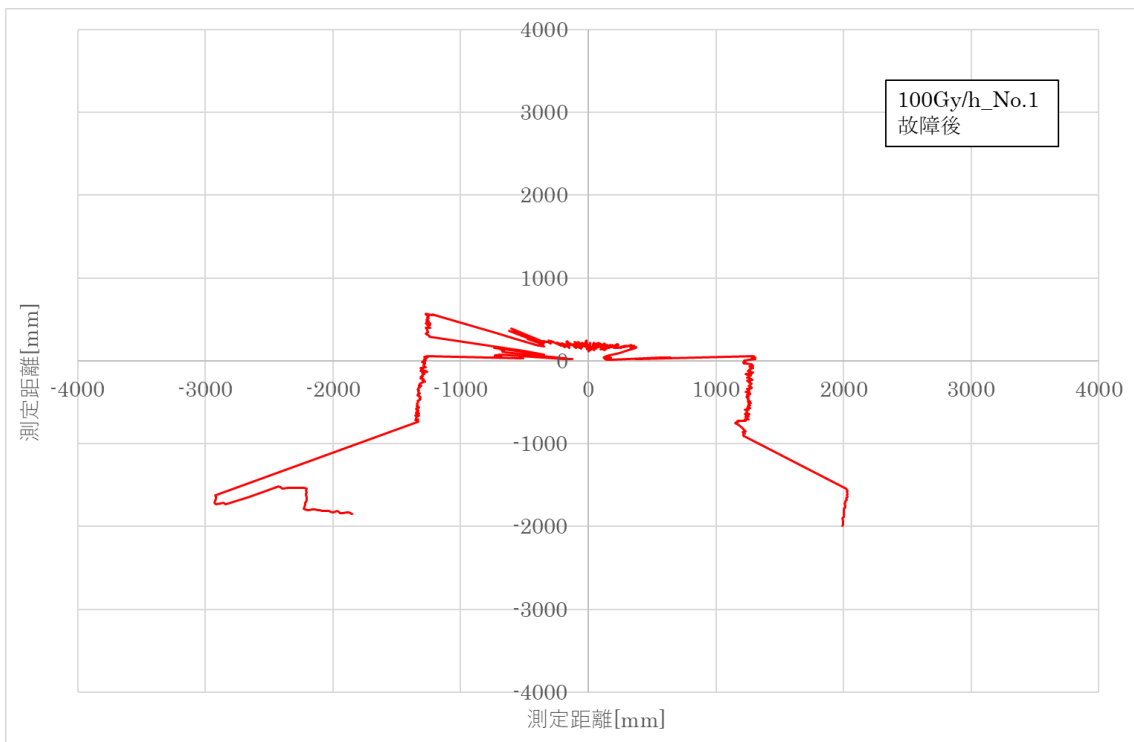


図 8.1-62 測域 100-1 検出範囲（故障後）

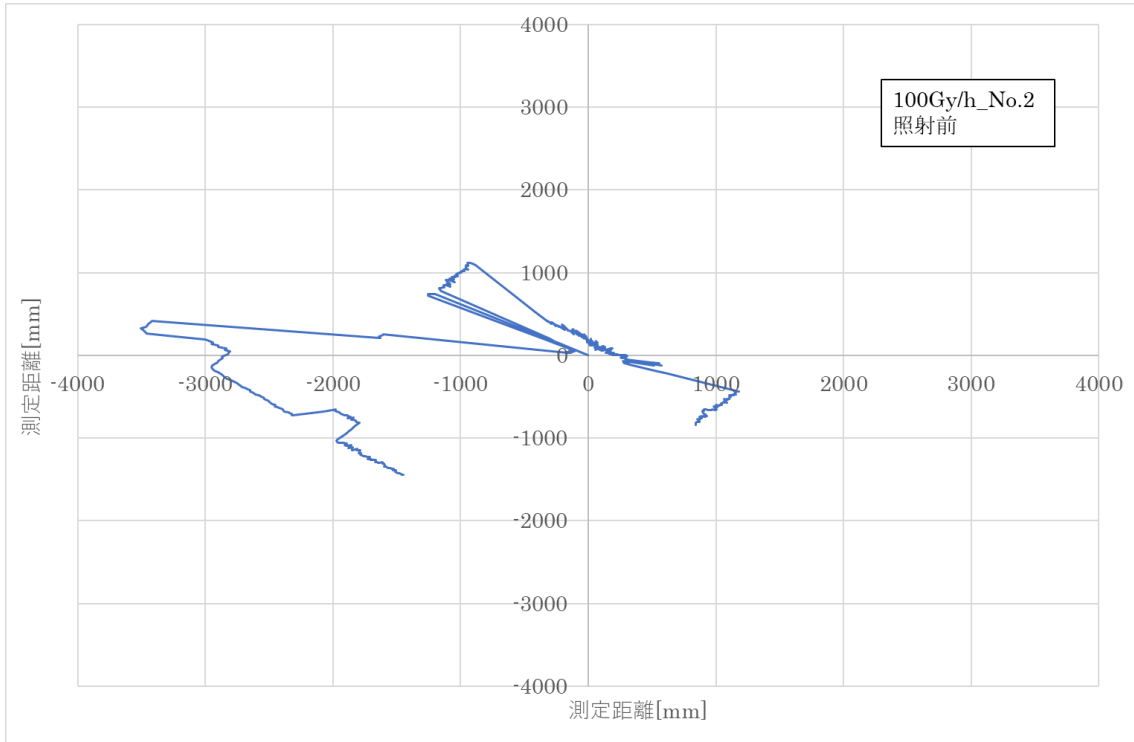


図 8.1-63 測域 100-2 検出範囲 (照射前)

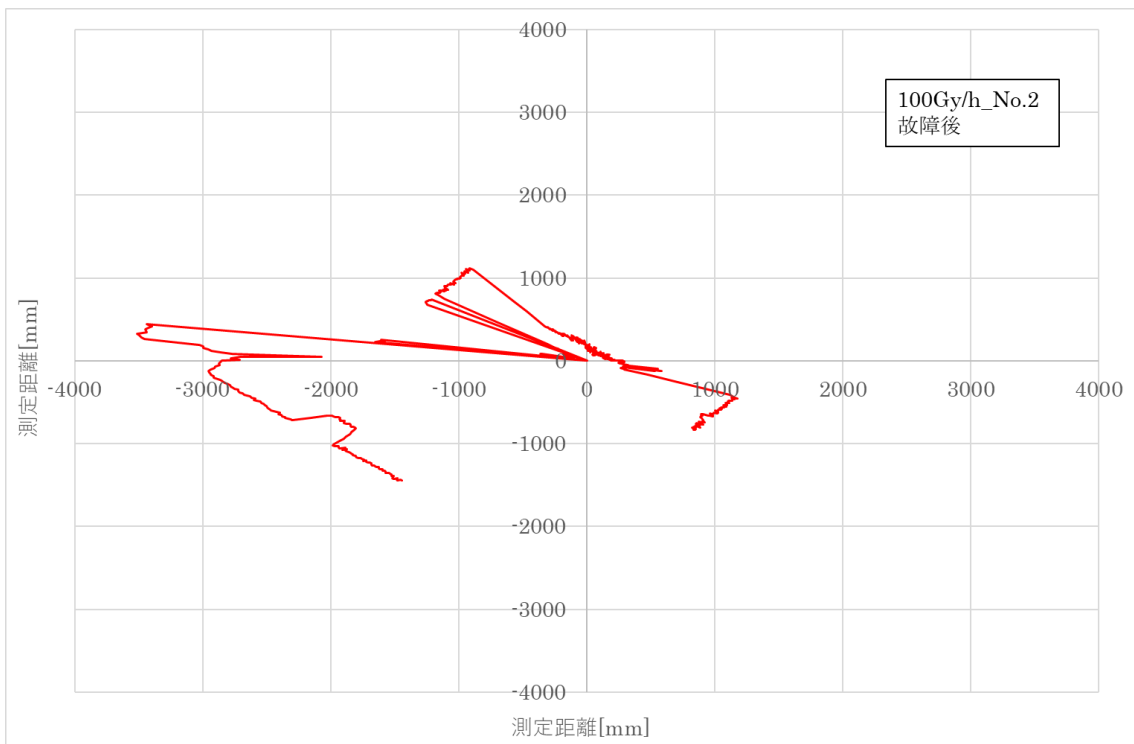


図 8.1-64 測域 100-2 検出範囲 (故障後)

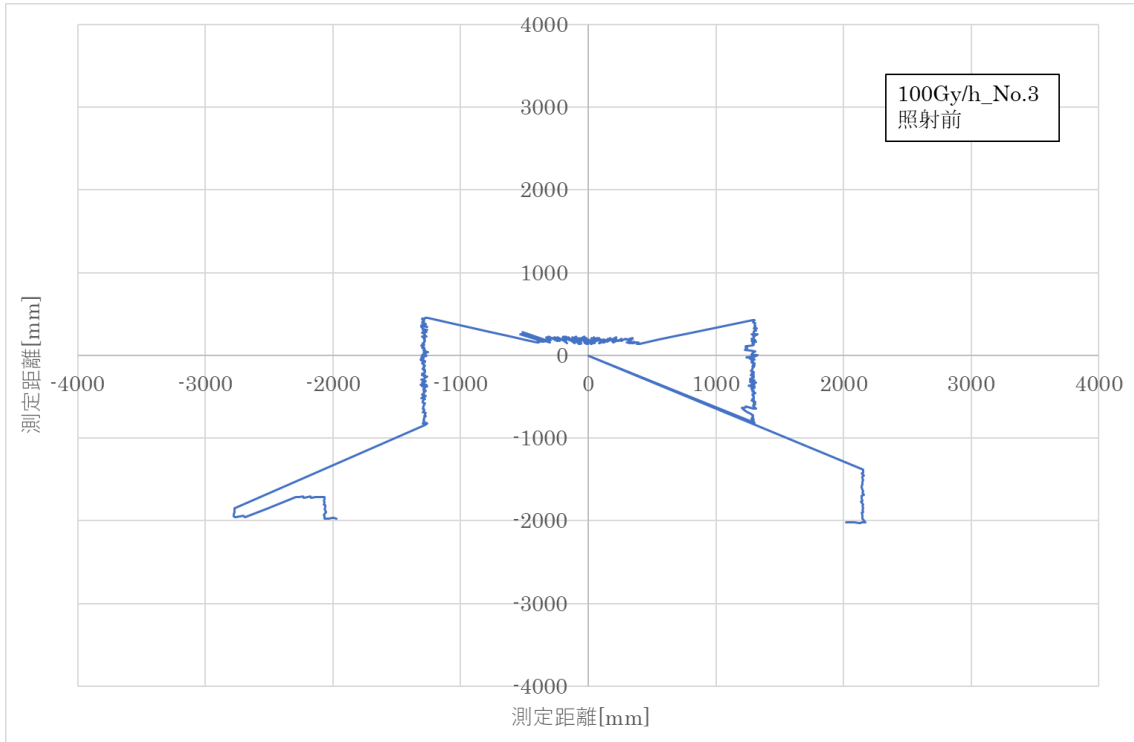


図 8.1-65 測域 100-3 検出範囲 (照射前)

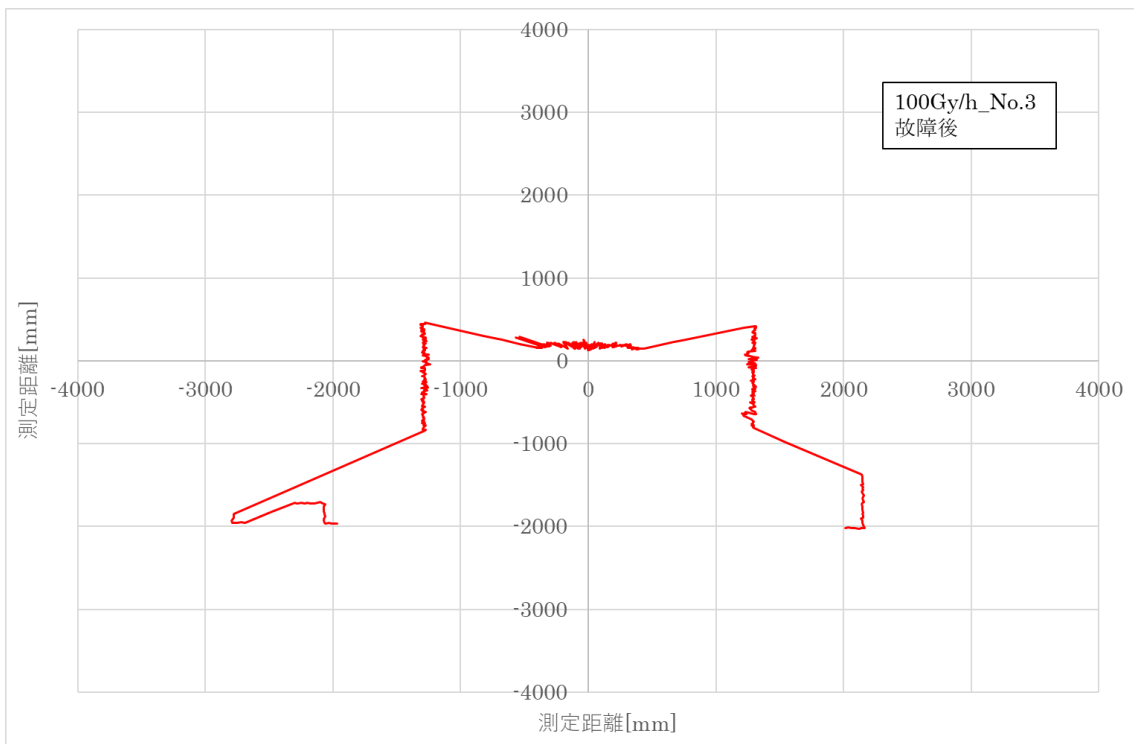


図 8.1-66 測域 100-3 検出範囲 (故障後)

8.2 簡易遮へい評価手法の適用方法検討

8.2.1 ガラス線量計特性評価のための照射試験結果

(1) 方向特性評価

ガラス線量計の方向特性評価試験結果を表 8.2-1 に示す。

照射角度 0° のガラス線量計の集積吸収線量と比較し、照射角度が 90° に近づくほど集積吸収線量が大きくなり、照射角度が -90° に近づくほど集積吸収線量が小さくなる傾向が確認された。

表 8.2-1 ガラス線量計方向特性の評価試験結果

照射高さ [mm]	集積吸収線量[Gy]						
	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°
360	65.4	71.3	80.1	87.4	87.3	95.9	91.7
300	67.1	71.8	81.0	86.1	86.8	96.6	99.2
240	70.2	69.6	77.6	86.2	90.5	95.1	96.3
180	72.0	79.4	87.1	91.3	91.3	97.9	98.8

(2) 吸収線量特性評価

ガラス線量計の吸収線量特性評価試験結果を表 8.2-2 に示す。なお、ガラス線量計 No.1 から No.5 については、測定結果が 500Gy を大きく超える結果となり、集積吸収線量が測定できなかった。

表 8.2-2 ガラス線量計吸収線量特性の評価試験結果

ガラス 線量計 No.	集積吸収線量 [Gy]
1	500<※1
2	500<※1
3	500<※1
4	500<※1
5	500<※1
6	527
7	474
8	451
9	397
10	315
11	304
12	265
13	276
14	241
15	227
16	195
17	173
18	148
19	128
20	108

※1 ガラス線量計の測定上限である 500Gy を大きく超過した。

(3) アラニン線量計との比較

ガラス線量計とアラニン線量計の比較評価試験結果を表 8.2-3 に示す。No.1 ではガラス線量計の測定値が上限である 500Gy を超過したが、アラニン線量計と比較し、ガラス線量計の集積吸収線量が大きくなった。一方で、No.2 及び No.3 では、アラニン線量計と比較し、ガラス線量計の集積吸収線量が小さくなり、集積吸収線量が小さいほど、線量計による誤差が大きくなることが確認された。

表 8.2-3 ガラス線量計とアラニン線量計の比較試験結果

線量計 No.	集積吸収線量 [Gy]		吸収線量率 [Gy/h]		比率 (ガラス/アラニン)
	ガラス 線量計	アラニン 線量計	ガラス 線量計	アラニン 線量計	
1	500 ^{※1}	451	—	64.5	—
2	282	351	40.2	50.1	0.80
3	118	192	16.8	27.4	0.61

※1 ガラス線量計の測定上限である 500Gy を大きく超過した。

8.2.2 ガラス線量計組成の影響評価

(1) 光電センサ 100Gy/h 解析 (解析ケース 1-1)

線量計組成を考慮した場合の再解析結果、及び令和3年度に実施した換算係数を用いた解析結果を表 8.2-4 に示す。

表 8.2-4 解析ケース 1-1 の解析結果

測定位置	センサ No.	測定値	線量計組成を考慮した 再計算値		(参考) 換算係数 を用いた計算値	
		吸収 線量率 (E) [Gy/h]	吸収 線量率 (C ₁) [Gy/h]	C ₁ /E	吸収 線量率 (C ₂) [Gy/h]	C ₂ /E
遮へい体外部 (アラニン線量計)	1	94.1	112	1.19	119	1.26
	2	111	112	1.01	118	1.07
	3	112	112	1.00	119	1.06
遮へい体内部 (ガラス線量計)	1	74.6	75.1	1.01	81.1	1.09
	2	77.7	75.7	0.97	81.2	1.04
	3	87.4	73.7	0.84	80.9	0.93

(2) 測域センサ 150Gy/h 解析 (解析ケース 1-2)

線量計組成を考慮した場合の再解析結果、及び令和3年度に実施した換算係数を用いた解析結果を表 8.2-5 に示す。

表 8.2-5 解析ケース 1-2 の解析結果

測定位置	センサ No.	測定値	線量計組成を考慮した 再計算値		(参考) 換算係数 を用いた計算値	
		吸収 線量率 (E) [Gy/h]	吸収 線量率 (C ₁) [Gy/h]	C ₁ /E	吸収 線量率 (C ₂) [Gy/h]	C ₂ /E
遮へい体外部 (アラニン線量計)	1	259	304	1.17	307	1.19
	2	294	304	1.03	307	1.04
	3	306	304	0.99	307	1.00
遮へい体内部 (ガラス線量計)	1	49.0	56.8	1.16	58.6	1.20
	2	50.3	56.6	1.13	58.4	1.16
	3	54.8	56.9	1.04	58.2	1.06

(3) 光電センサ 5Gy/h 解析 (解析ケース 1-3)

線量計組成を考慮した場合の再解析結果、及び令和 4 年度に実施した換算係数を用いた解析結果を表 8.2-6 に示す。

表 8.2-6 解析ケース 1-3 の解析結果

測定位置	センサ No.	測定値	線量計組成を考慮した再計算値		(参考) 換算係数を用いた計算値	
		吸収線量率 (E) [Gy/h]	吸収線量率 (C ₁) [Gy/h]	C ₁ /E	吸収線量率 (C ₂) [Gy/h]	C ₂ /E
遮へい体外部 (ガラス線量計)	1	5.50	4.73	0.86	4.82	0.88
	2	5.31	4.45	0.84	4.82	0.91
	3	5.73	4.46	0.78	4.82	0.84
遮へい体内部 (ガラス線量計)	1	2.49	2.74	1.10	2.91	1.17
	2	2.52	2.64	1.05	2.90	1.15
	3	2.60	2.62	1.01	2.90	1.12

(4) 測域センサ 5Gy/h 解析 (解析ケース 1-4)

線量計組成を考慮した場合の再解析結果、及び令和 5 年度に実施した換算係数を用いた解析結果を表 8.2-7 に示す。

表 8.2-7 解析ケース 1-4 の解析結果

測定位置	センサ No.	測定値	線量計組成を考慮した再計算値		(参考) 換算係数を用いた計算値	
		吸収線量率 (E) [Gy/h]	吸収線量率 (C ₁) [Gy/h]	C ₁ /E	吸収線量率 (C ₂) [Gy/h]	C ₂ /E
遮へい体外部 (ガラス線量計)	1	6.86	5.13	0.75	5.53	0.81
	2	6.49	5.11	0.79	5.53	0.85
	3	6.10	5.11	0.84	5.54	0.91
遮へい体内部 (ガラス線量計)	1	2.44	2.36	0.97	2.50	1.03
	2	1.57	1.59	1.02	1.70	1.08
	3	5.23	4.67	0.89	5.06	0.97

8.2.3 ガラス線量計特性評価のための遮へい解析

(1) 吸収線量特性評価（解析ケース 2-1）

吸収線量特性評価のための解析結果を表 8.2-8 に示す。規格化手法①による計算値と測定値を比較すると、No.10 から No.20 では 20%以下の誤差となった。この時、集積吸収線量が大きくなる No.6 から No.9 においては、測定値と計算値の誤差が大きくなる傾向が確認された。規格化手法②による計算値と測定値を比較すると、No.10 から No.20 では 10%以下の誤差となった。また、集積吸収線量が大きくなる No.6 から No.9 においては、測定値と計算値の誤差が大きくなる傾向が確認された。規格化手法①と規格化手法②を比較すると、規格化手法②の方が集積吸収線量の計算値が 10%程度大きくなる傾向が確認された。

表 8.2-8 吸収線量特性評価の解析結果（解析ケース 2-1）

ガラス 線量計 No.	測定値 (E) [Gy]	線量計組成を考慮した 集積吸収線量 (規格化手法①)			換算係数から求めた 集積吸収線量 (規格化手法②)			C ₂ /C ₁
		計算値(C ₁) [Gy]	R.E [%]	C ₁ /E	計算値(C ₂) [Gy]	R.E [%]	C ₂ /E	
6	527	369	1.06	0.70	397	0.16	0.75	1.07
7	474	348	1.09	0.73	381	0.24	0.80	1.10
8	451	328	1.12	0.73	351	0.10	0.78	1.07
9	397	309	1.16	0.78	338	0.13	0.85	1.10
10	315	277	1.22	0.88	303	0.14	0.96	1.10
11	304	256	1.27	0.84	292	0.12	0.96	1.14
12	265	239	1.31	0.90	265	0.45	1.00	1.11
13	276	228	1.34	0.83	255	0.23	0.92	1.12
14	241	206	1.41	0.86	225	0.23	0.93	1.09
15	227	199	1.44	0.88	218	0.36	0.96	1.10
16	195	176	1.53	0.90	188	0.25	0.96	1.07
17	173	154	1.63	0.89	164	0.35	0.95	1.07
18	148	131	1.77	0.88	144	0.27	0.98	1.11
19	128	117	1.87	0.91	127	0.22	0.99	1.09
20	108	103	1.99	0.96	113	0.29	1.05	1.10

※1 No.1 から 5 はガラス線量計の測定上限である 500Gy を大きく超過したため、比較表には示していない。

(2) アラニン線量計との比較（解析ケース 2-2）

ガラス線量計及びアラニン線量計の吸収線量率の解析結果を表 8.2-9 に示す。ガラス線量計 No.2 及び No.3 の計算値については測定値との比較結果が 10%以下となった。アラニン線量計については、No.1 は測定値との誤差が 6%であったが、No.2 では 26%、No.3 では 42%と、吸収線量率が小さいほど、誤差が大きくなる傾向を確認した。

表 8.2-9 アラニン線量計との比較評価解析結果（解析ケース 2-2）

線量計 No.	吸収線量率[Gy/h]				C/E	
	測定値 (E)		計算値 (C)			
	ガラス 線量計	アラニン 線量計	ガラス 線量計	アラニン 線量計	ガラス 線量計	アラニン 線量計
1	—※1	64.5	67.2	68.3	—	1.06
2	40.2	50.1	36.8	37.2	0.92	0.74
3	16.8	27.4	15.9	16.0	0.95	0.58

※1 ガラス線量計の測定上限である 500Gy を超過した。

8.2.4 簡易遮へい評価手法の適用性検討結果

簡易遮へい評価手法の評価のために実施した計算結果を以下に示す。

(1) 代表的な簡易計算ケース

1) 簡易計算ケース 1-1

簡易計算ケース 1-1 の計算結果を表 8.2-10、図 8.2-1 及び図 8.2-2 に示す。

QAD、手計算 1 及び手計算 2 の全てにおいて、MCNP と同程度の計算結果となった。

表 8.2-10 簡易計算ケース 1-1 の計算結果及び MCNP との比

線源からの距離 [cm]	計算結果 [Gy/h]				MCNP との比 (簡易計算手法/MCNP)		
	MCNP	QAD	手計算 1	手計算 2	QAD	手計算 1	手計算 2
10	653	661	656	647	1.01	1.00	0.99
20	163	165	164	162	1.01	1.00	0.99
30	72.5	73.3	72.9	71.9	1.01	1.00	0.99
40	40.8	41.2	41.0	40.4	1.01	1.00	0.99
50	26.1	26.4	26.2	25.9	1.01	1.01	0.99
60	18.1	18.3	18.2	18.0	1.01	1.01	0.99
70	13.3	13.5	13.4	13.2	1.01	1.01	0.99
80	10.2	10.3	10.3	10.1	1.01	1.01	0.99
90	8.05	8.13	8.10	7.99	1.01	1.01	0.99
100	6.52	6.59	6.56	6.47	1.01	1.01	0.99
110	5.39	5.44	5.42	5.35	1.01	1.01	0.99
120	4.53	4.57	4.55	4.49	1.01	1.00	0.99
130	3.86	3.90	3.88	3.83	1.01	1.01	0.99
140	3.32	3.36	3.35	3.30	1.01	1.01	0.99
150	2.89	2.92	2.91	2.88	1.01	1.01	0.99
160	2.54	2.57	2.56	2.53	1.01	1.01	0.99
170	2.25	2.28	2.27	2.24	1.01	1.01	0.99
180	2.01	2.03	2.02	2.00	1.01	1.01	0.99
190	1.80	1.82	1.82	1.79	1.01	1.01	0.99
200	1.63	1.64	1.64	1.62	1.01	1.01	0.99

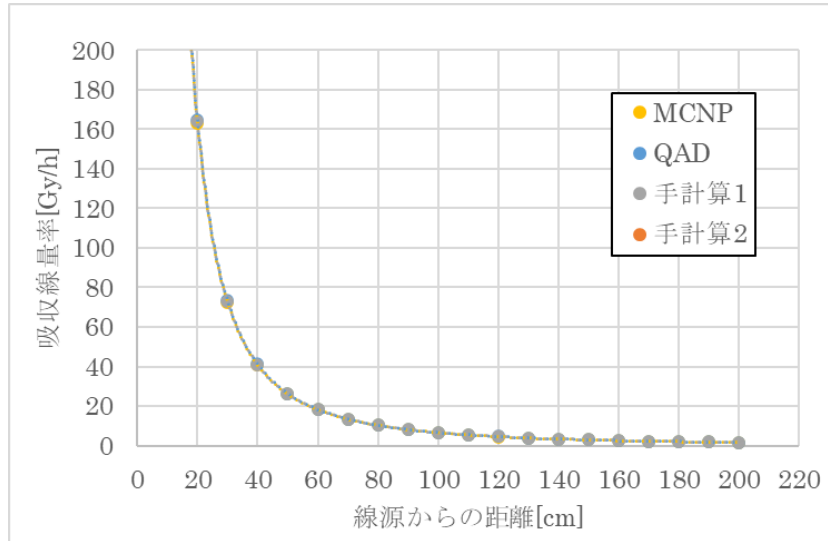


図 8.2-1 簡易計算ケース 1-1 の計算結果

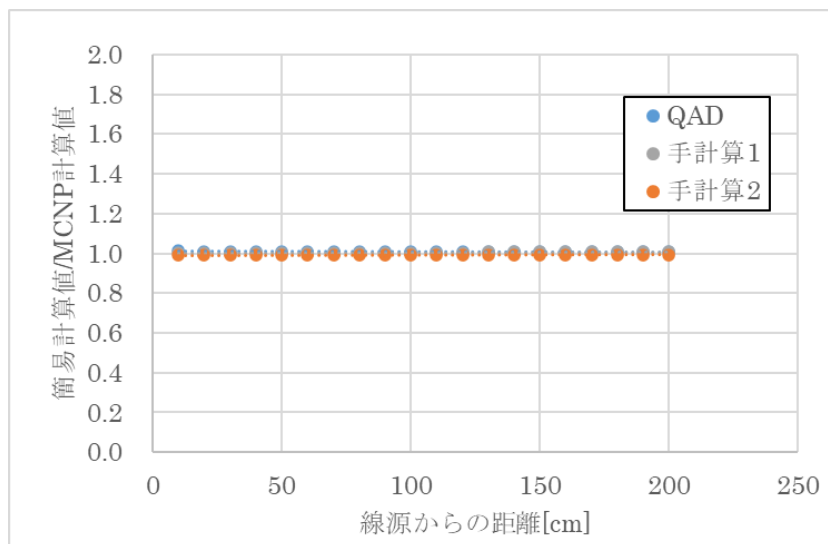


図 8.2-2 MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-1)

2) 簡易計算ケース 1-2

簡易計算ケース 1-2 の計算結果を表 8.2-11、図 8.2-3 及び図 8.2-4 に示す。

QAD 及び手計算 1 では、MCNP と比較し 2cm の遮へい厚で 10%、4cm で 17%保守的、手計算 2 では、MCNP と比較し 2cm の遮へい厚で 6%、4cm で 10%保守的な値となった。

表 8.2-11 簡易計算ケース 1-2 の計算結果及び MCNP との比

遮へい体 厚さ [cm]	計算結果 [Gy/h]				MCNP との比 (簡易計算手法/MCNP)		
	MCNP	QAD	手計算 1	手計算 2	QAD	手計算 1	手計算 2
2	106	117	119	113	1.10	1.12	1.06
3	82.4	93.9	94.6	89.3	1.14	1.15	1.08
4	63.4	73.8	74.0	69.7	1.17	1.17	1.10
5	48.7	56.8	57.2	53.8	1.17	1.17	1.10
6	36.3	43.2	43.0	40.4	1.19	1.18	1.11
7	27.1	32.4	32.4	30.3	1.20	1.20	1.12
8	20.0	24.0	23.8	22.2	1.20	1.19	1.11
9	14.7	17.7	17.4	16.3	1.20	1.19	1.11
10	10.8	12.9	12.7	11.8	1.20	1.18	1.10

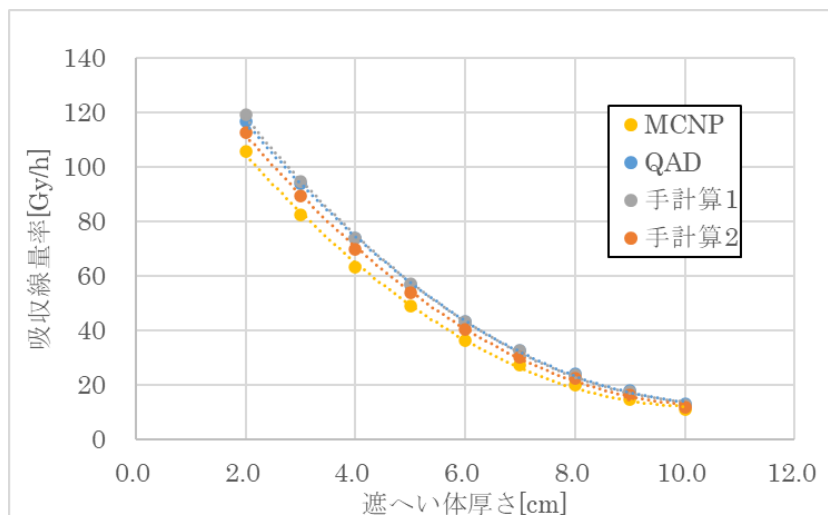


図 8.2-3 簡易計算ケース 1-2 の計算結果

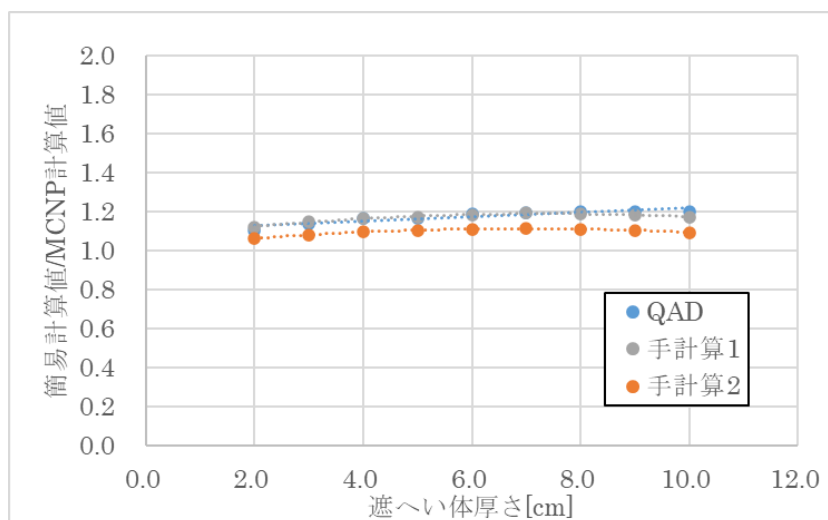


図 8.2-4 MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-2)

3) 簡易計算ケース 1-3

簡易計算ケース 1-3 の計算結果を表 8.2-12、図 8.2-5 及び図 8.2-6 に示す。

QAD、手計算 3 とともに、MCNP と同程度の計算結果となったが、手計算 3 は MCNP より 3%程度非保守的な計算結果となった。

表 8.2-12 簡易計算ケース 1-3 の計算結果及び MCNP との比

線源からの距離 [cm]	計算結果 [Gy/h]			MCNP との比 (簡易計算手法 / MCNP)	
	MCNP	QAD	手計算 3	QAD	手計算 3
10	350	359	342	1.03	0.98
20	126	128	122	1.02	0.97
30	63.4	64.3	61.3	1.01	0.97
40	37.6	38.1	36.3	1.01	0.97
50	24.8	25.0	23.9	1.01	0.96
60	17.5	17.7	16.8	1.01	0.96
70	13.0	13.1	12.5	1.01	0.96
80	9.98	10.1	9.62	1.01	0.96
90	7.92	8.00	7.63	1.01	0.96
100	6.43	6.50	6.20	1.01	0.96
110	5.33	5.38	5.14	1.01	0.97
120	4.48	4.53	4.33	1.01	0.97
130	3.83	3.86	3.69	1.01	0.97
140	3.30	3.33	3.19	1.01	0.97
150	2.88	2.91	2.78	1.01	0.97
160	2.53	2.56	2.44	1.01	0.97
170	2.24	2.27	2.17	1.01	0.97
180	2.00	2.02	1.93	1.01	0.97
190	1.80	1.81	1.74	1.01	0.97
200	1.62	1.64	1.57	1.01	0.97

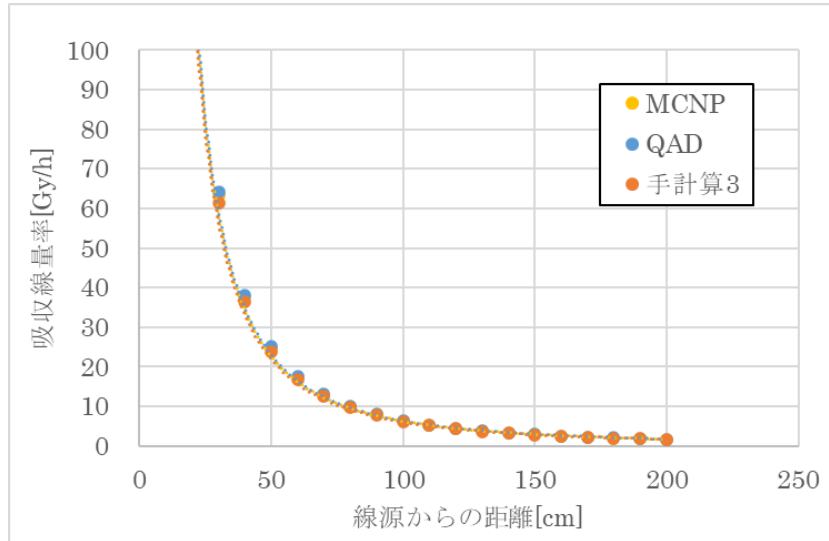


図 8.2-5 簡易計算ケース 1-3 の計算結果

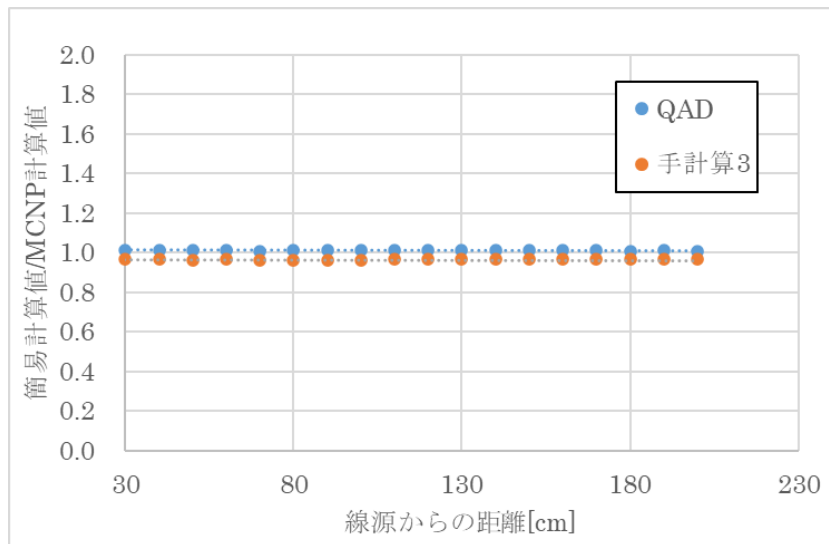


図 8.2-6 MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-3)

4) 簡易計算ケース 1-4

簡易計算ケース 1-4 の計算結果を表 8.2-13、図 8.2-7 及び図 8.2-8 に示す。

QAD では、MCNP と比較し 2cm の遮へい厚で 13%、4cm の遮へい厚で 19%保守的、手計算 3 では、10cm の遮へい厚では 1%非保守的、その他では約 3%保守的な値となった。

表 8.2-13 簡易計算ケース 1-4 の計算結果及び MCNP との比

遮へい体 厚さ [cm]	計算結果 [Gy/h]			MCNP との比 (簡易計算手法 /MCNP)	
	MCNP	QAD	手計算 3	QAD	手計算 3
2	76.7	86.6	78.8	1.13	1.03
3	57.7	67.4	59.2	1.17	1.03
4	42.8	50.9	43.9	1.19	1.03
5	31.2	37.9	32.3	1.21	1.03
6	22.9	27.6	23.5	1.21	1.03
7	16.5	20.0	17.1	1.21	1.04
8	11.8	14.3	11.9	1.22	1.01
9	8.34	10.2	8.70	1.22	1.04
10	5.89	7.17	5.83	1.22	0.99

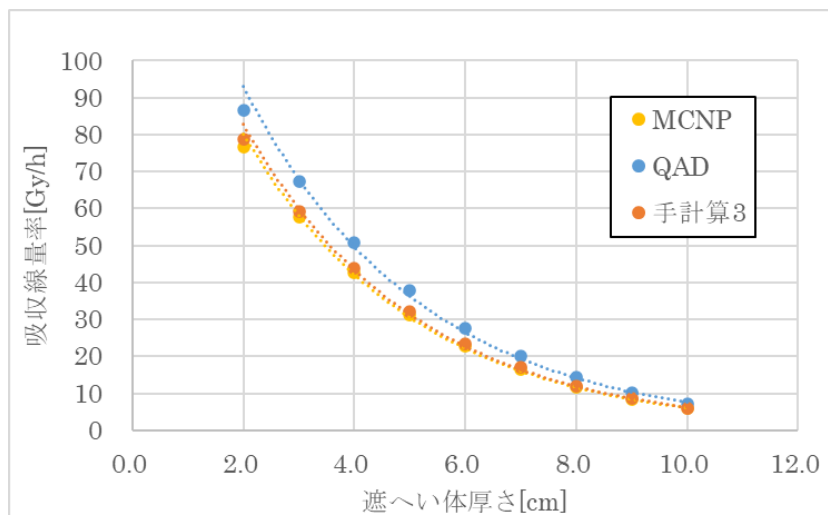


図 8.2-7 簡易計算ケース 1-4 の計算結果

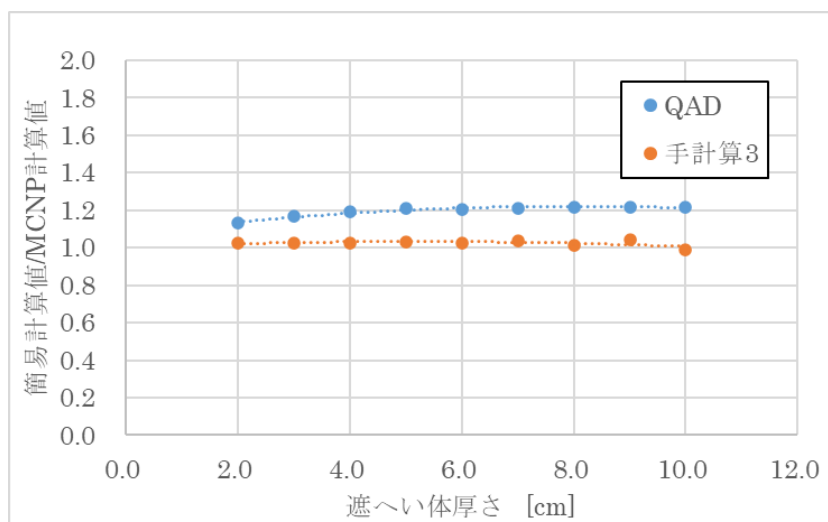


図 8.2-8 MCNP との比較 (簡易計算ケース 1-4)

5) 簡易計算ケース 1-5

簡易計算ケース 1-5 の計算結果を表 8.2-14、図 8.2-9 及び図 8.2-10 に示す。

線源から 100cm 以上離れた評価位置では、点線源、ライン線源に関わらず各評価位置での計算結果が 2%以内で一致することを確認した。

また、ライン線源におけるライン線源下部の計算値と点線源におけるライン線源下部相当の計算値を比較すると線源から 30cm を超える評価位置では線源形状に依らず同程度の評価となる。一方で線源から 20cm より近い評価位置ではライン線源と比較し、点線源で評価した場合、10% 非保守的な評価結果となった。

表 8.2-14 簡易計算ケース 1-5 の計算結果

線源からの距離 [cm]	計算結果 [Gy/h]				ライン線源下部での比較
	点線源 線源中心 (①)	点線源 ライン線源 下部相当 (②)	ライン線源 線源中心 (③)	ライン線源 線源下部 (④)	②/④
10	661	126	359	214	0.59
20	165	80.2	128	89.7	0.89
30	73.3	49.9	64.3	50.3	0.99
40	41.2	32.6	38.1	32.1	1.02
50	26.4	22.6	25.0	22.1	1.02
60	18.3	16.4	17.7	16.1	1.02
70	13.5	12.4	13.1	12.2	1.02
80	10.3	9.66	10.1	9.52	1.02
90	8.13	7.73	8.00	7.63	1.01
100	6.59	6.32	6.50	6.25	1.01
110	5.44	5.26	5.38	5.21	1.01
120	4.57	4.44	4.53	4.41	1.01
130	3.90	3.80	3.86	3.78	1.01
140	3.36	3.29	3.33	3.27	1.01
150	2.92	2.87	2.91	2.86	1.01
160	2.57	2.53	2.56	2.52	1.00
170	2.28	2.24	2.27	2.24	1.00
180	2.03	2.00	2.02	2.00	1.00
190	1.82	1.80	1.81	1.80	1.00
200	1.64	1.63	1.64	1.62	1.00

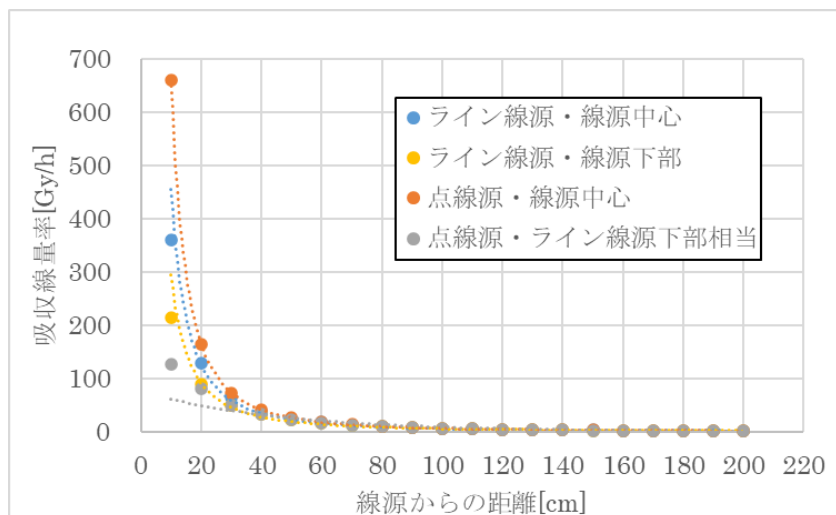


図 8.2-9 簡易計算ケース 1-5 の計算結果 (0cm から 200cm)

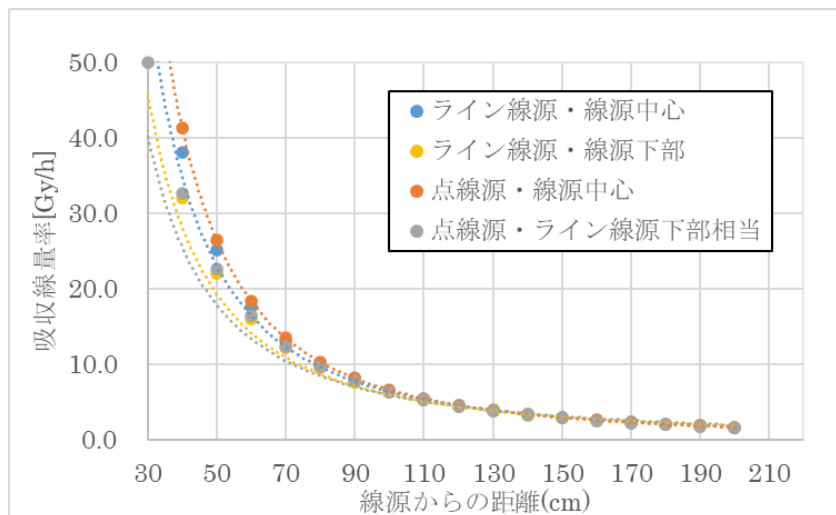


図 8.2-10 簡易計算ケース 1-5 の計算結果 (30cm から 200cm)

(2) 令和5年度までの遮へい解析を模擬した計算ケース

1) 簡易計算ケース 2-1

簡易計算ケース 2-1 の計算結果を表 8.2-15 に示す。

表 8.2-15 簡易計算ケース 2-1 の計算結果

計算手法	吸収線量率[Gy/h]		MCNP との比較	
	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部
MCNP	81.2	118	—	—
QAD	82.5	108	1.02	0.91
手計算 1	87.2	121	1.07	1.02
手計算 2	82.2	116	1.01	0.98
手計算 3	76.5	112	0.94	0.94

2) 簡易計算ケース 2-2

簡易計算ケース 2-2 の計算結果を表 8.2-16 に示す。

表 8.2-16 簡易計算ケース 2-2 の計算結果

計算手法	吸収線量率[Gy/h]		MCNP との比較	
	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部
MCNP	58.4	307	—	—
QAD	67.4	311	1.15	1.01
手計算 1	60.8	359	1.04	1.17
手計算 2	58.3	344	1.00	1.12
手計算 3	85.3	320	1.46	1.04

3) 簡易計算ケース 2-3

簡易計算ケース 2-3 の計算結果を表 8.2-17 に示す。

表 8.2-17 簡易計算ケース 2-3 の計算結果

計算手法	吸収線量率[Gy/h]		MCNP との比較	
	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部
MCNP	2.90	4.82	—	—
QAD	2.87	4.41	0.99	0.91
手計算 1	3.08	4.53	1.06	0.94
手計算 2	2.92	4.35	1.01	0.90
手計算 3	2.53	4.48	0.87	0.93

4) 簡易計算ケース 2-4

簡易計算ケース 2-4 の計算結果を表 8.2-18 に示す。

表 8.2-18 簡易計算ケース 2-4 の計算結果

計算手法	吸収線量率[Gy/h]		MCNP との比較	
	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部
MCNP	1.70	5.53	—	—
QAD	1.93	5.07	1.13	0.92
手計算 1	2.07	5.24	1.22	0.95
手計算 2	1.95	5.02	1.15	0.91
手計算 3	1.72	5.23	1.01	0.95

5) 簡易計算ケース 2-5

簡易計算ケース 2-5 の計算結果を表 8.2-19 に示す。

表 8.2-19 簡易計算ケース 2-5 の計算結果

計算手法	吸収線量率[Gy/h]		MCNP との比較	
	遮へい体内部	遮へい体外部	遮へい体内部	遮へい体外部
MCNP	2.50	5.53	—	—
QAD	2.82	5.05	1.13	0.91
手計算 1	3.10	5.21	1.24	0.94
手計算 2	2.94	5.00	1.17	0.90
手計算 3	2.32	5.21	0.93	0.94

8.3 故障原因調査の実施

8.3.1 センサの構成部品調査結果

(1) 光電センサ

光電センサの分解時の様子を図 8.3-1 に示す。

光電センサの構成要部品には、光源となる LED、光検出のためのフォトダイオード、これらに
関係する光学部品、フォトダイオードで得られた光量を電子回路で演算し、検知について判断す
るためのオペアンプ、コンパレータ及び演算回路、検知信号を外部出力するための電子回路等が
あり、電子回路を動作するための電源関連の部品等で構成されていることを確認した。

光電センサの構成部品を、簡易モデルとした時の電子回路を図 8.3-2 に示す。構成部品として
赤色 LED、フォトダイオード、オペアンプ、コンパレータ、8 ビットマイコン、NPN トランジ
スタを利用しており、それらの集積回路はトランジスタ、ダイオード、抵抗及びコンデンサ等で
構成されている。8 ビットマイコンを利用することで、複雑な処理を行うことが可能であり、例
えば、コンピュータープログラムによる処理によって、検知、非検知が頻繁に繰り返されて安定
していない時には、マイコンでその動作を判定し、センサの検知が不安定であることを出力する。

既往研究により、シリコン半導体を利用するトランジスタ、ダイオードの耐放射線性は低く、
抵抗、コンデンサは耐放射線性が高いことが分かっている。従って、トランジスタ、ダイオード
及びマイコンの放射線影響が光電センサの耐放射線性に強く関係すると推測される。

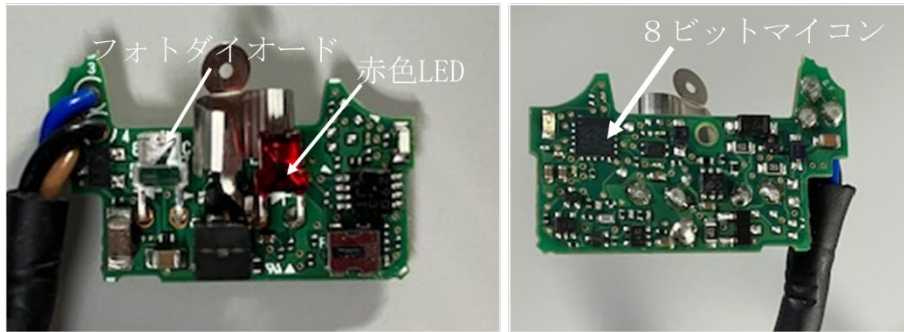


図 8.3-1 光電センサ分解時の様子

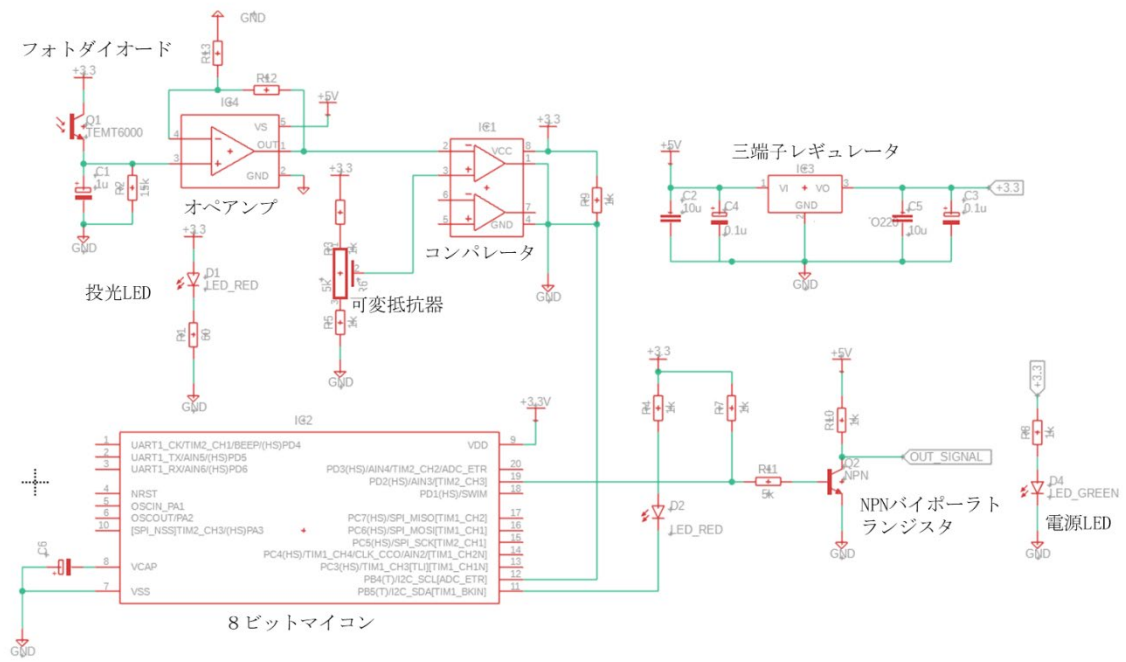


図 8.3-2 光電センサの簡易モデルの電子回路図

(2) 測域センサ

測域センサの分解時の様子を図 8.3-3 に示す。測域センサは、レーザーを照射し、対象物からの反射光との時間差を測定して距離を算出する。主な構成部品はレーザービームの照射と反射光の受光を行う光学距離計、レーザーの照射方位を制御する光学スキャナ、時間差を演算し、距離データに変換する計測回路である。多くの 2 次元測域センサでは、この光学機構を回転させることで広い視野角を実現している。

測域センサは、光源として半導体レーザーが使用され、32 ビットマイコン及び FPGA (Field Programmable Gate Array) が使用されていることを確認した。FPGA は、設計者が現場でプログラム可能な論理回路を集積したデバイスで、プログラム可能性（購入後にユーザーが回路構成を変更できる）を有する。また、並列処理能力に優れることによる高速データ処理、必要な処理のみをプログラムできることによる低消費電力等の特徴もある。測域センサは、LAN による通信も可能となっており、マイコンと FPGA は、計測処理を行うだけでなく、通信機能についてもプログラムされていることが分かった。

上述のように、光電センサでは 8 ビットマイコン、測域センサでは、32 ビットマイコン及び FPGA が内蔵されていることを確認した。これらのプログラムは、フラッシュメモリに書き込まれており、放射線照射に伴うプログラムの書き換えが生じてしまうと、センサが正常な動作をしなくなる。

8.1.3 項に示した測域センサの照射試験結果では、集積吸収線量 200Gy 程度で通信機能が不能となる故障が観測されている。この現象については、放射線照射に伴うマイコン及び FPGA のプログラムの書き換えの可能性も十分に考えられる。

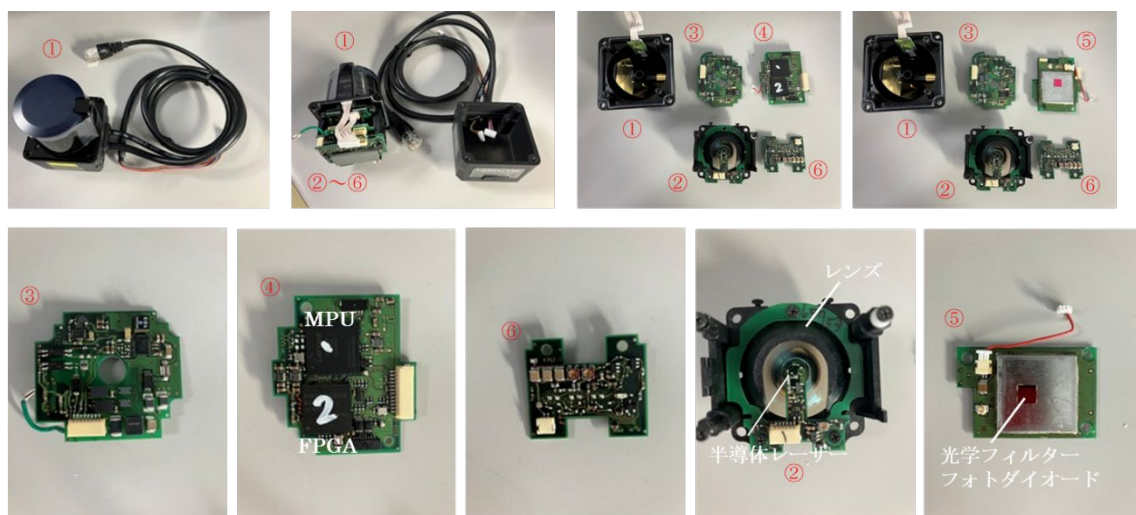


図 8.3-3 測域センサ分解時の様子

8.3.2 構成部品の照射試験結果

構成部品の照射試験結果を表 8.3-1 に示す。

また、耐放射線性データを取得した各構成部品の照射試験結果詳細を示す。

表 8.3-1 構成部品の照射試験結果

構成部品	個数	耐放射線性 [Gy]	備考
NPN バイポーラトランジスタ	50	200	hFE が低下
PNP バイポーラトランジスタ	50	200	hFE が低下
n チャネル MOSFET	100	200	オン電圧が 0.5V 遷移
p チャネル MOSFET	100	200	オン電圧が 0.5V 遷移
n チャネル JFET	100	7×10^5	700kGy でわずかに I_D が減少
アルミ電解コンデンサ 10 μ F	50	$1 \times 10^6 <$	
積層セラミックコンデンサ 100nF	50	1000<	
積層セラミックコンデンサ 10 μ F	50	1000<	
小信号用汎用ダイオード	100	400	V_F がわずかに変化
整流ダイオード	50	2×10^5	V_F が変化
3mm 赤色 LED	50	1000<	$I_D=20\text{mA}$ の V_D の変化を観測
フォト IC ダイオード	50	800<	
コンパレータ	1	1×10^4	低速応答条件
オペアンプ	10	<800	V_o -f 特性が変化
三端子レギュレータ	1	1×10^4	無負荷条件

(1) バイポーラトランジスタ

NPN バイポーラトランジスタの吸収線量に対する I_C - V_{CE} 特性変化を図 8.3-4 から図 8.3-8 に示す。ガンマ線照射に伴い、 I_C が低下していることが分かる。また、 hFE の変化を図 8.3-9 から図 8.3-12 に示す。照射に伴い、 hFE は明らかに低下しているが、素子によって低下の度合いは異なっており、素子間のバラつきが大きくなっていることが分かる。

また、PNP バイポーラトランジスタの吸収線量に対する I_C - V_{CE} 特性を図 8.3-13 から図 8.3-15 に示す。 hFE の変化について図 8.3-16 から図 8.3-18 に示す。照射に伴って hFE が低下していることが分かる。

今回の照射試験では、NPN バイポーラトランジスタと比較し、PNP バイポーラトランジスタは照射に伴う hFE 低下のばらつきはやや小さいことが確認された。

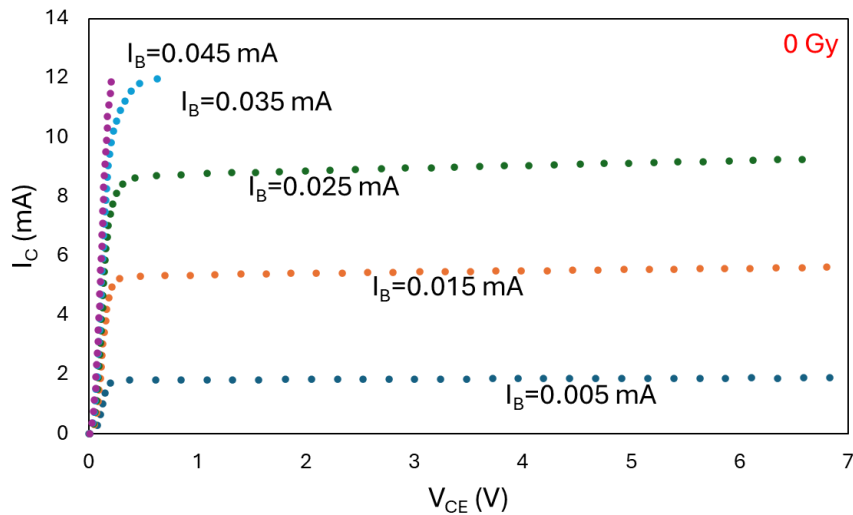


図 8.3-4 NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (0Gy)

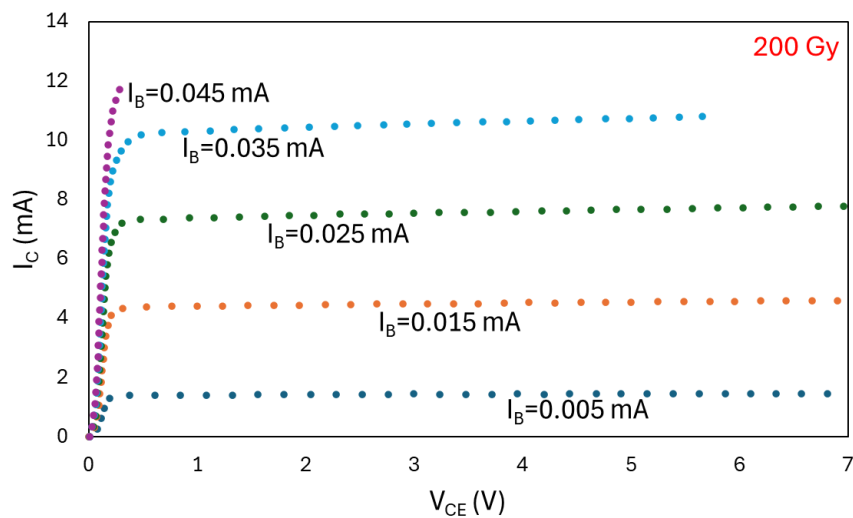


図 8.3-5 NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (200Gy)

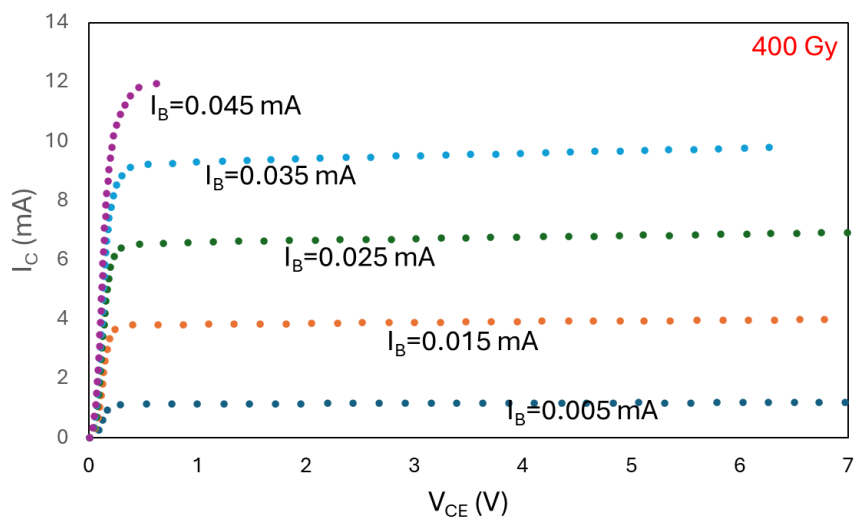


図 8.3-6 NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (400Gy)

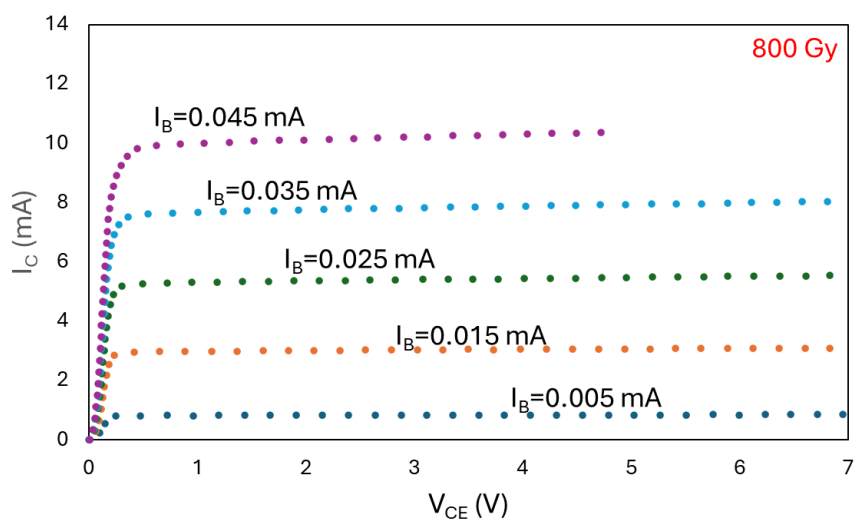


図 8.3-7 NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (800Gy)

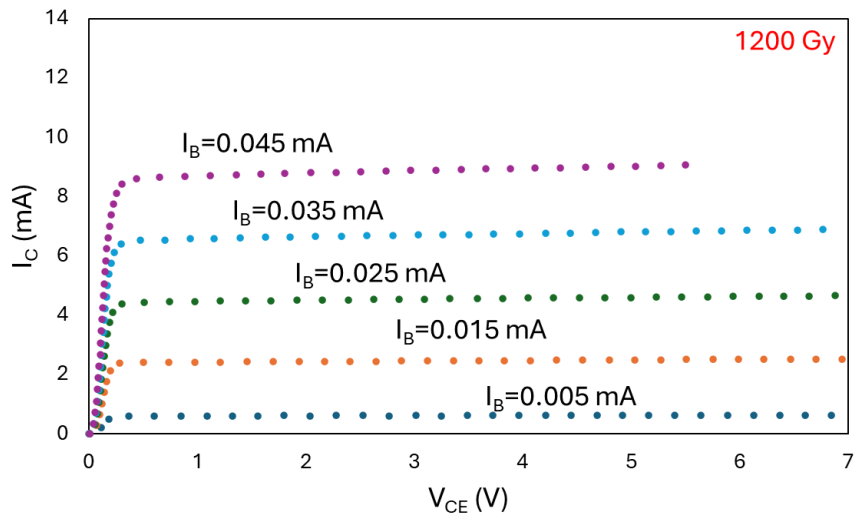


図 8.3-8 NPN バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (1200Gy)

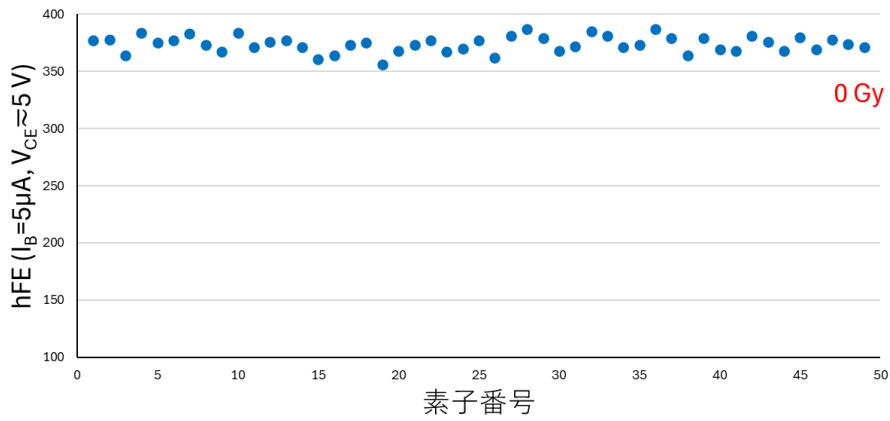


図 8.3-9 NPN バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (0Gy)

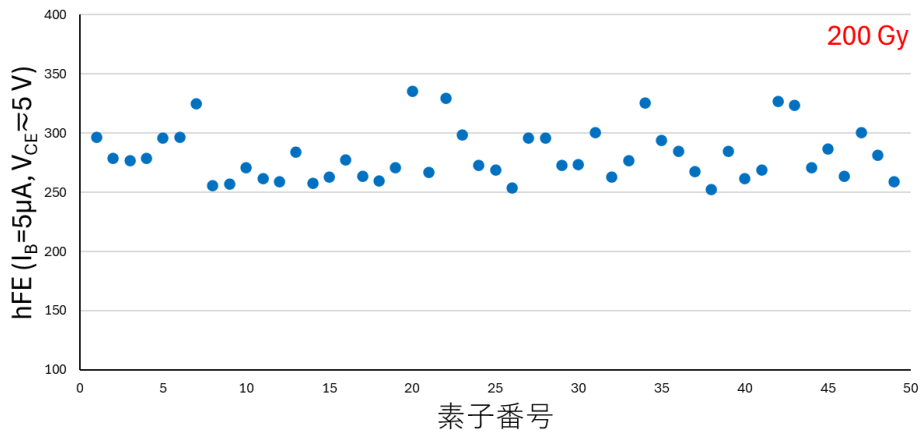


図 8.3-10 NPN バイポーラトランジスタの h_{FE} 特性 (200Gy)

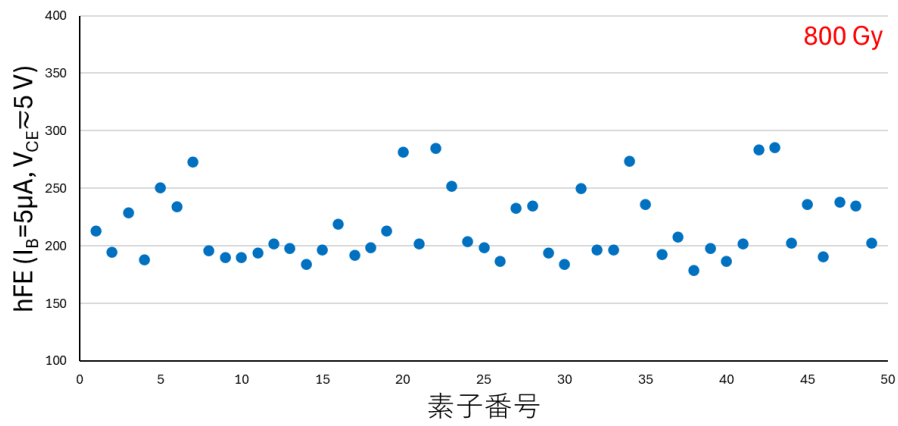


図 8.3-11 NPN バイポーラトランジスタの hFE 特性 (800Gy)

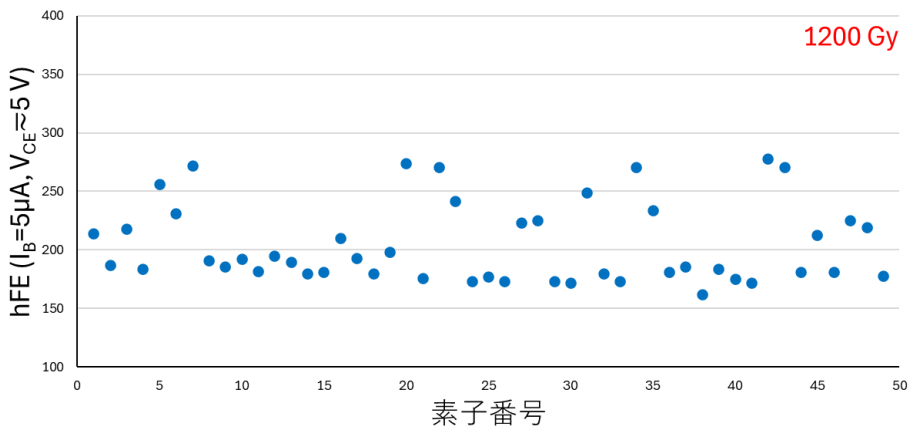


図 8.3-12 NPN バイポーラトランジスタの hFE 特性 (1200Gy)

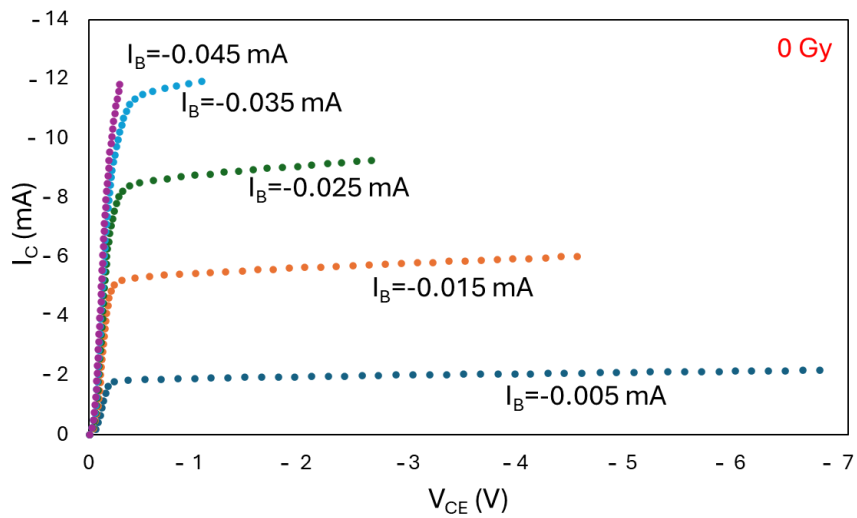


図 8.3-13 PNP バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (0Gy)

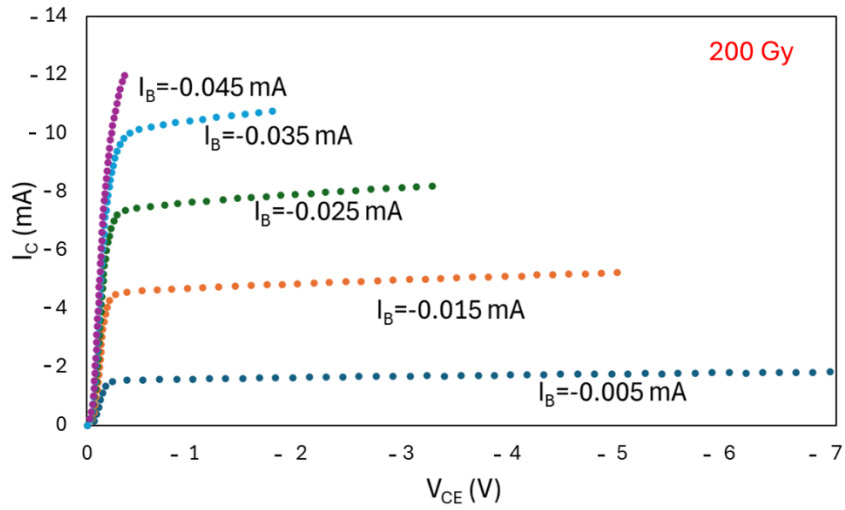


図 8.3-14 PNP バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (200Gy)

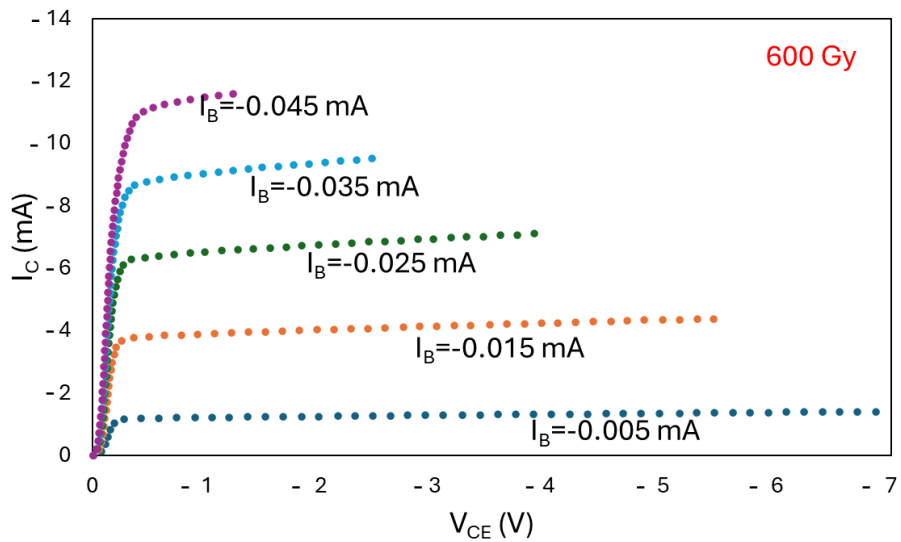


図 8.3-15 PNP バイポーラトランジスタの I_C - V_{CE} 特性 (600Gy)

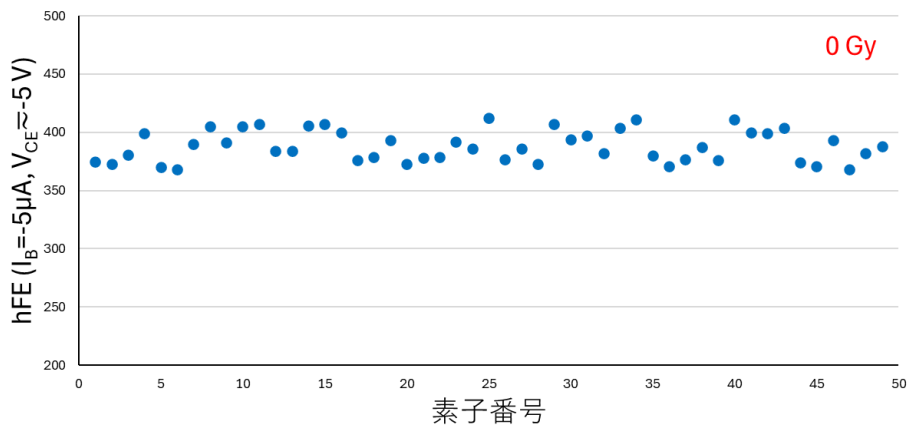


図 8.3-16 PNP バイポーラトランジスタの hFE 特性 (0Gy)

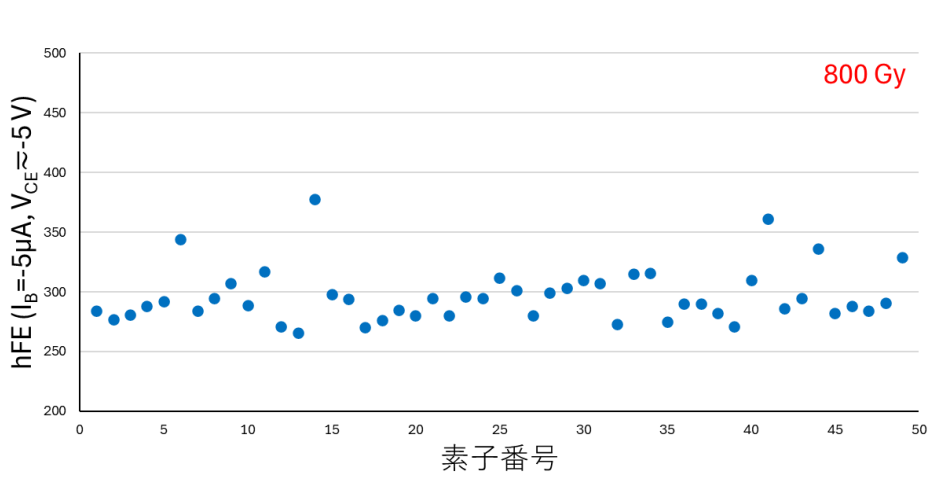


図 8.3-17 PNP バイポーラトランジスタの hFE 特性 (80Gy)

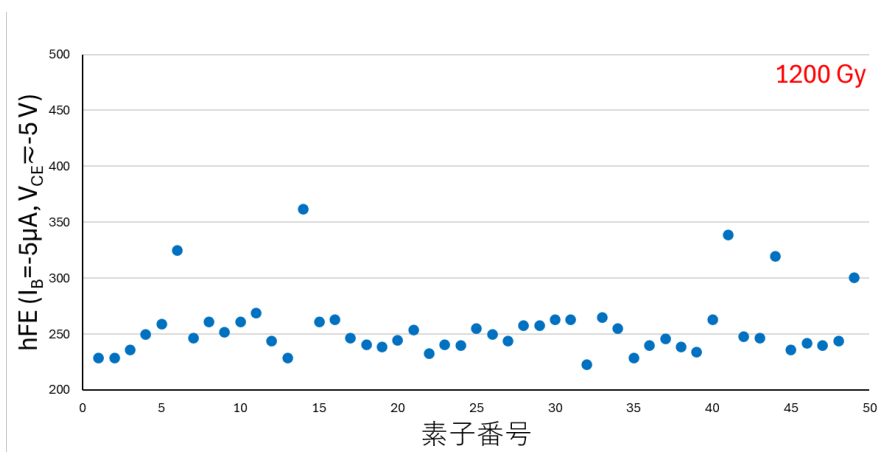


図 8.3-18 PNP バイポーラトランジスタの hFE 特性 (1200Gy)

(2) MOSFET

nチャネル MOSFET の照射に伴う、 I_D - V_{DS} 特性の変化を図 8.3-19 及び図 8.3-20 に示す。照射に伴い、低いゲート電圧 V_{GS} で I_D が流れる傾向にあることが分かる。nチャネル MOSFET 100 個の照射に伴う V_{GS} (on)、(off) の変化を表 8.3-2 及び表 8.3-3 に示す。

また、pチャネル MOSFET の照射に伴う、 I_D - V_{DS} 特性の変化を図 8.3-21 及び図 8.3-22 に示す。pチャネル MOSFET 100 個の照射に伴う V_{GS} (on)、(off) の変化を表 8.3-4 及び表 8.3-5 に示す。

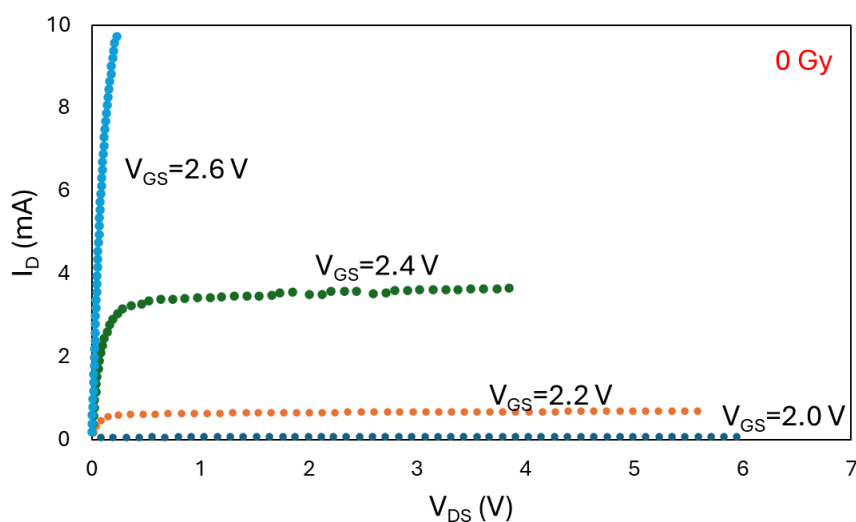


図 8.3-19 nチャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (0Gy)

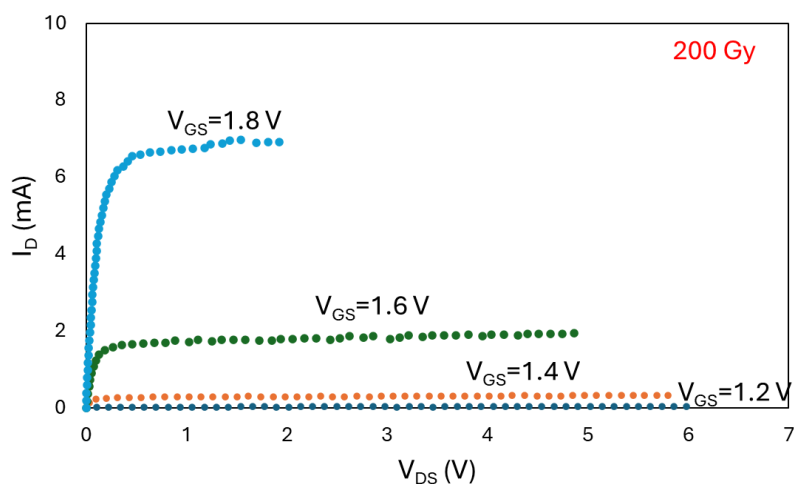


図 8.3-20 nチャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (200Gy)

表 8.3-2 n チャンネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (on) 変化

	V_{GS} (on)[V] at $I_D=5\text{mA}$ and $I_G=5\mu\text{A}$			
集積吸収線量	0Gy	200Gy	400Gy	600Gy
平均	2.4	1.9	1.6	1.3
標準偏差	0.018	0.078	0.12	0.067

表 8.3-3 n チャンネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (off) 変化

	V_{GS} (off)[V] at $I_D=5\mu\text{A}$			
集積吸収線量	0Gy	200Gy	400Gy	600Gy
平均	1.7	1.2	0.96	0.62
標準偏差	0.021	0.080	0.12	0.066

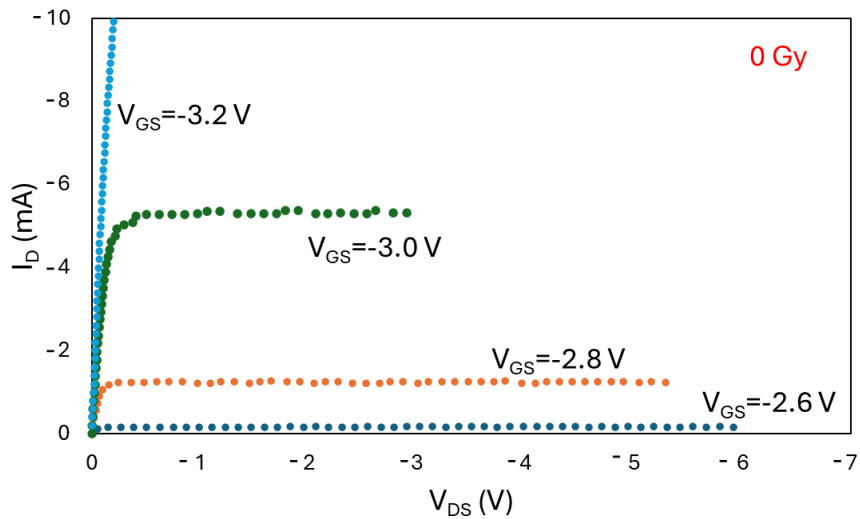


図 8.3-21 p チャンネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (0Gy)

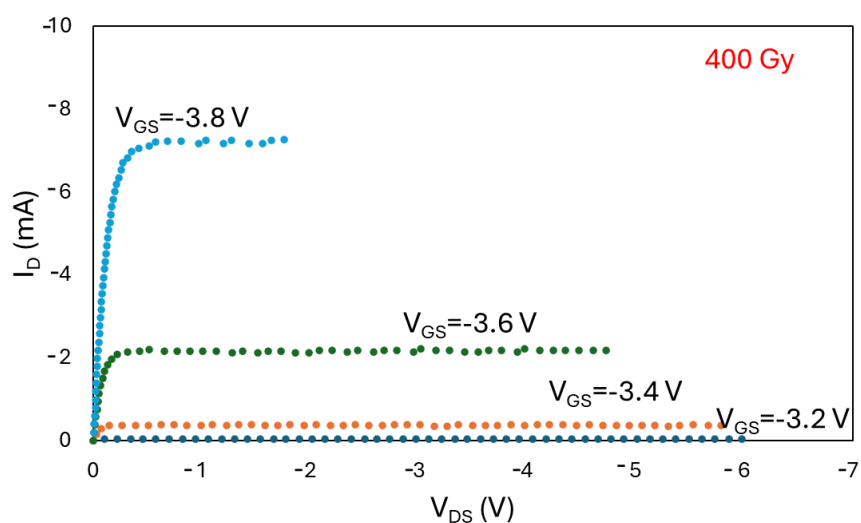


図 8.3-22 p チャネル MOSFET の I_D - V_{DS} 特性 (400Gy)

表 8.3-4 p チャネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (on) 変化

	V_{GS} (on)[V] at $I_D=-5\text{mA}$ and $I_G=-5\mu\text{A}$			
集積吸収線量	0Gy	200Gy	400Gy	600Gy
平均	-3.0	-3.4	-3.7	-3.9
標準偏差	0.074	0.084	0.051	0.046

表 8.3-5 p チャネル MOSFET100 個の照射に伴う V_{GS} (off) 変化

	V_{GS} (off)[V] at $I_D=-5\mu\text{A}$			
集積吸収線量	0Gy	200Gy	400Gy	600Gy
平均	-2.3	-2.7	-3.0	-3.2
標準偏差	0.068	0.091	0.052	0.046

(3) JFET

n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性の照射に伴う変化を図 8.3-23 から図 8.3-26 に示す。集積吸収線量 700kGy においても著しい変化はみられず、バイポーラトランジスタ及び MOSFET と比較し、耐放射線性が高いことが分かる。

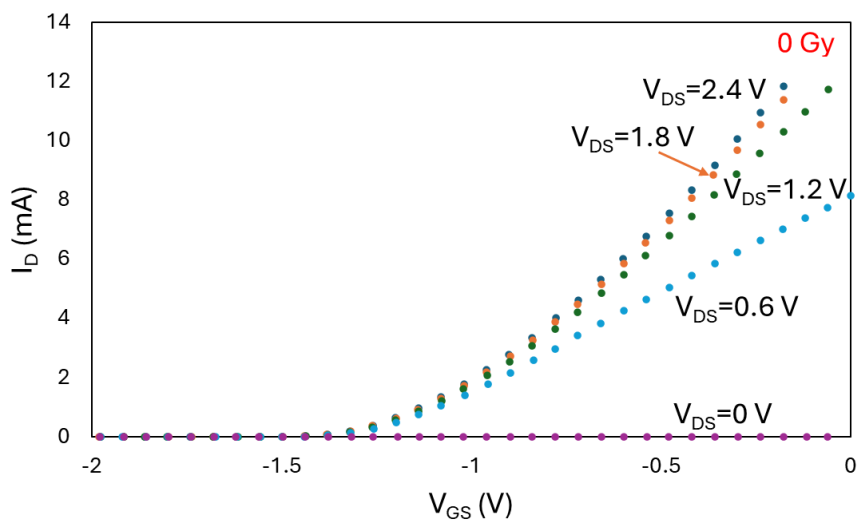


図 8.3-23 n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性 (0Gy)

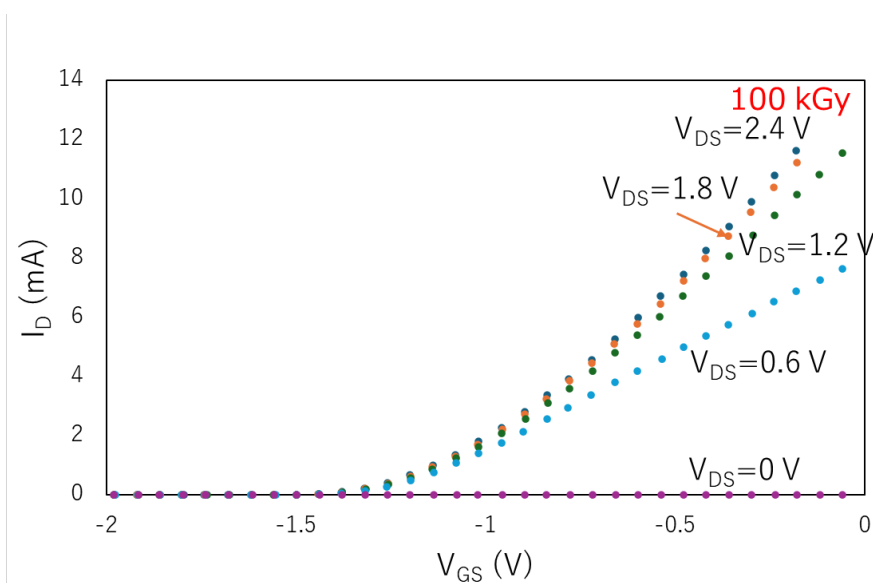


図 8.3-24 n チャネル JFET の I_D - V_{GS} 特性 (100kGy)

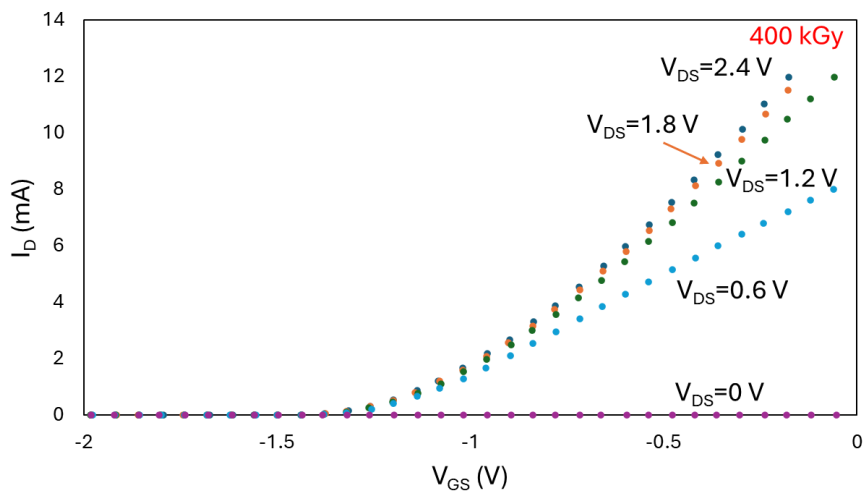


図 8.3-25 nチャネルJFETの I_D - V_{GS} 特性 (400kGy)

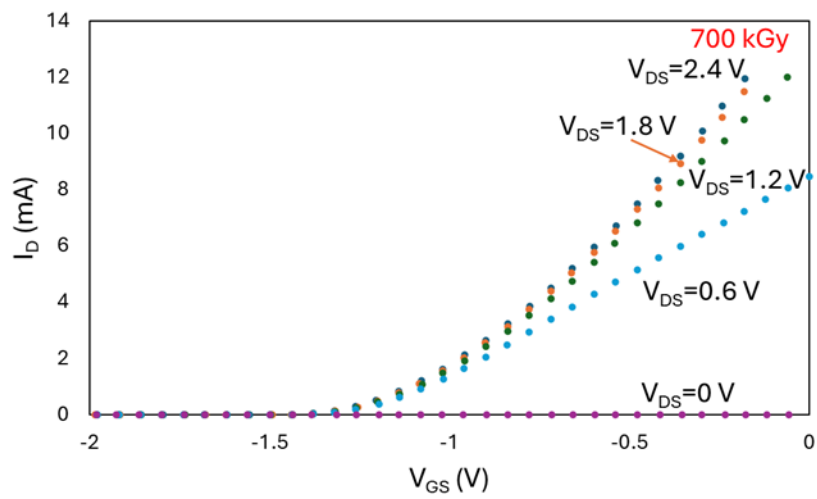


図 8.3-26 nチャネルJFETの I_D - V_{GS} 特性 (700kGy)

(4) コンデンサ

アルミ電解コンデンサの照射に伴う静電容量の変化を図 8.3-27 及び図 8.3-28 に示す。アルミ電解コンデンサは、集積吸収線量 1MGy まで大きな変化は確認できなかった。

100nF 積層セラミックコンデンサの照射に伴う静電容量の変化を図 8.3-29 及び図 8.3-30 に示す。セラミックそのものの耐放射線性は高く、大きな変化はみられないことが予測されたため、1kGy までの照射を行い、静電容量を確認した。また、10 μ F 積層セラミックコンデンサの照射に伴う静電容量を図 8.3-31 及び図 8.3-32 に示す。セラミックコンデンサでは、大きな変化は確認されなかった。

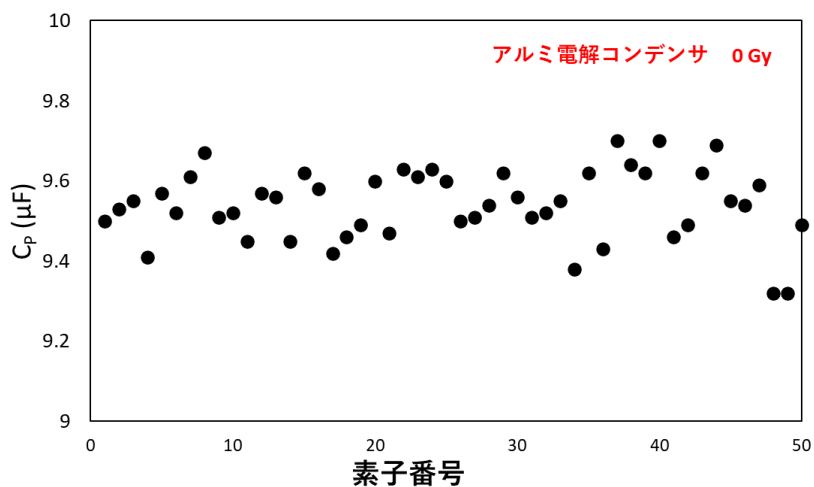


図 8.3-27 アルミ電解コンデンサの静電容量(0Gy)

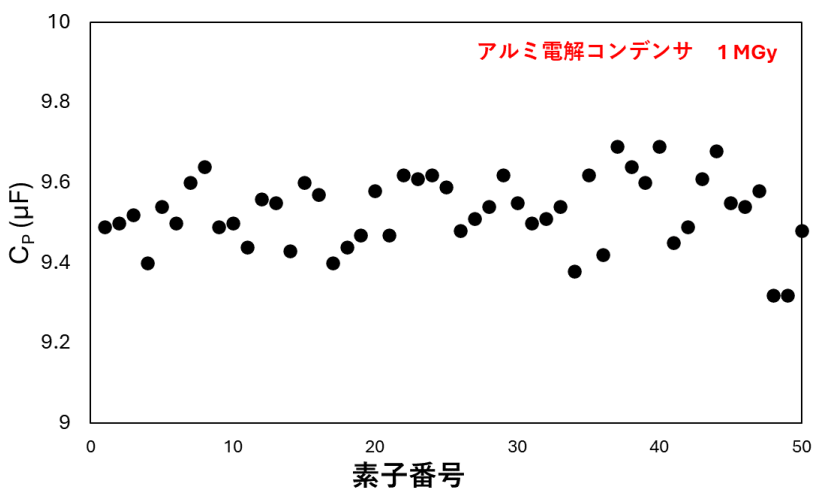


図 8.3-28 アルミ電解コンデンサの静電容量(1MGy)

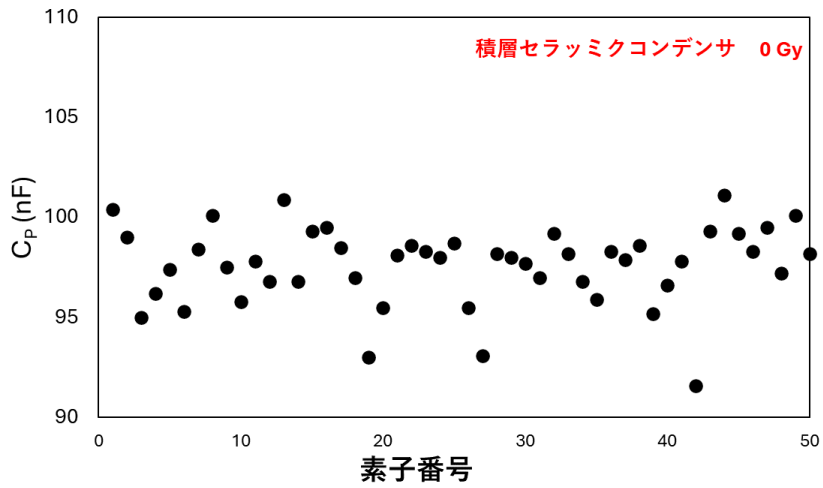


図 8.3-29 100nF 積層セラミックコンデンサの静電容量(0Gy)

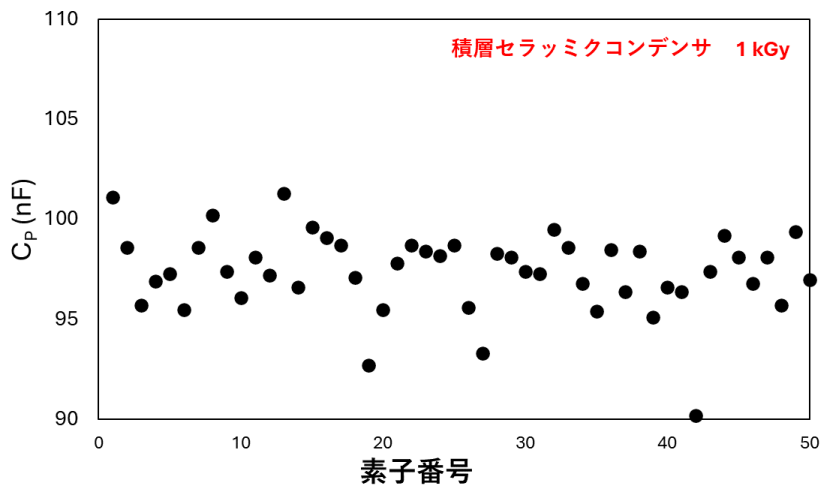


図 8.3-30 100nF 積層セラミックコンデンサの静電容量(1kGy)

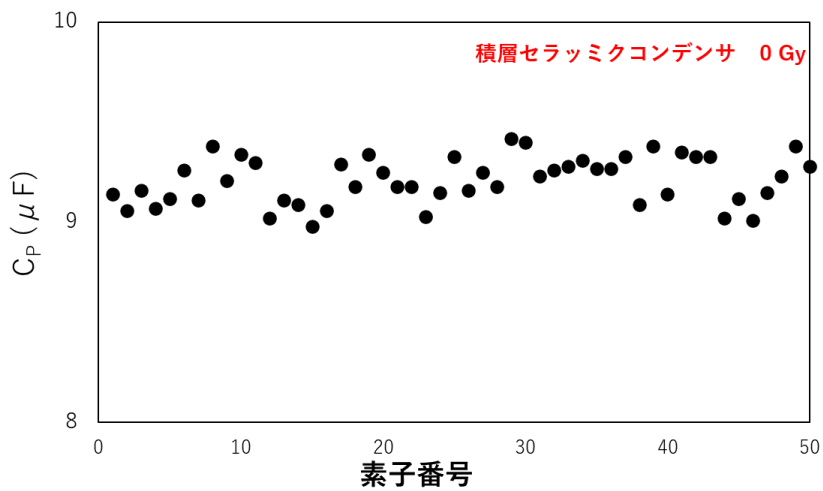


図 8.3-31 10μF 積層セラミックコンデンサの静電容量(0Gy)

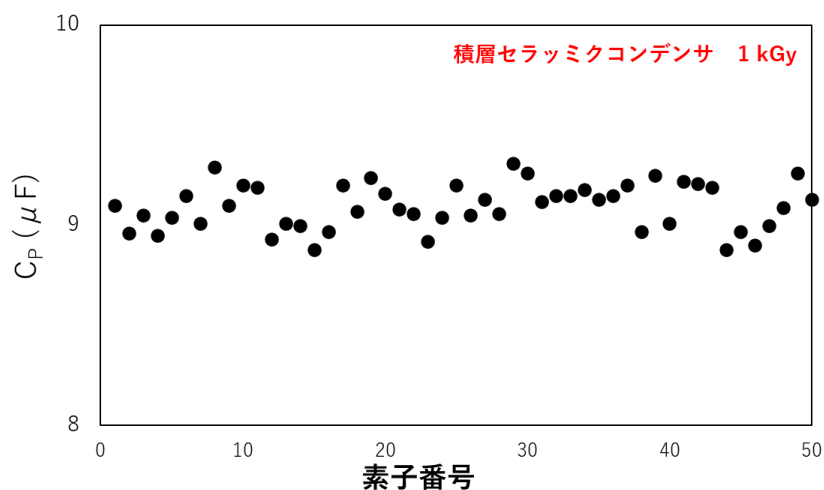


図 8.3-32 10μF 積層セラミックコンデンサの静電容量(1kGy)

(5) ダイオード

小信号用汎用ダイオードの I_D-V_D 特性の照射に伴う変化を図 8.3-33 に示す。600Gy まで大きな変化は確認されなかった。100 個の小信号用汎用ダイオードの V_F の結果を図 8.3-34 から図 8.3-36 に示す。 V_F について、集積吸収線量 0Gy と 400Gy を比較すると、わずかに小さくなっている。

整流ダイオードの I_D-V_D 特性の照射に伴う変化を図 8.3-37 に示す。50 個の整流ダイオードの V_F の結果を図 8.3-38 から図 8.3-40 に示す。照射に伴い、 V_F の減少が確認された。

50 個の赤色 LED が点灯する電流が 20mA となる時の電圧を図 8.3-41 から図 8.3-43 に示す。1000Gy まで大きな変化は確認されなかった。

フォトダイオードの照射に伴う V_F の変化を図 8.3-44 から図 8.3-46 に示す。フォトダイオードは、照射に伴う大きな変化は確認されなかった。

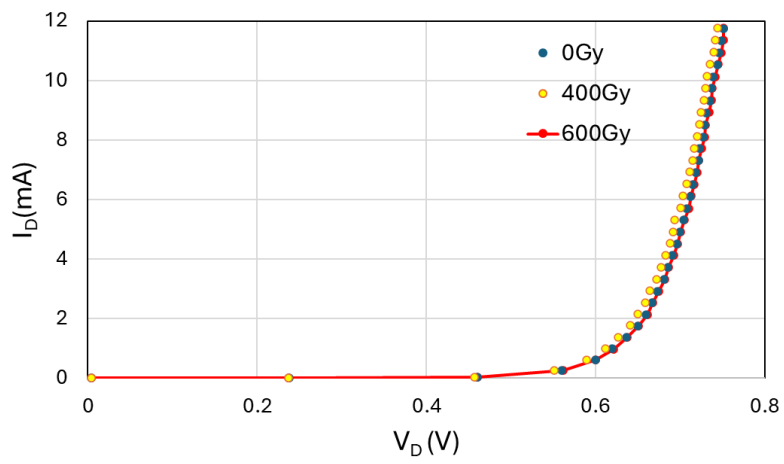


図 8.3-33 小信号用汎用ダイオードの I_D - V_D 特性変化

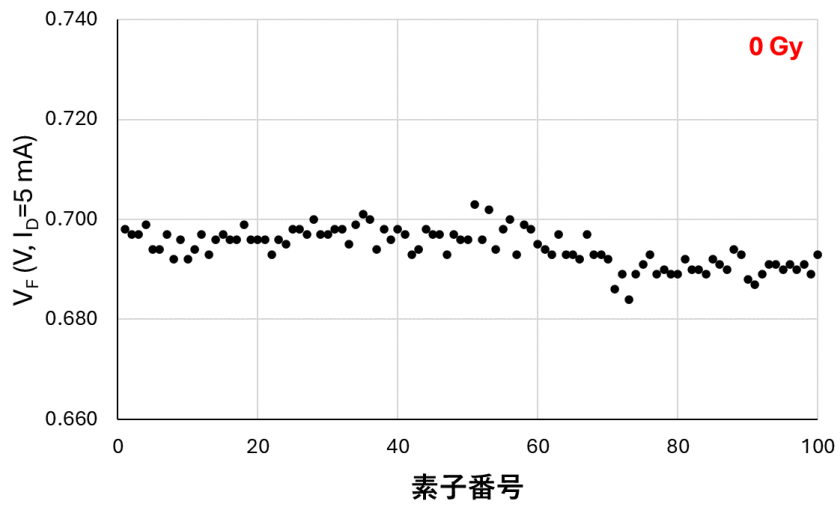


図 8.3-34 小信号用汎用ダイオードの V_F (0Gy)

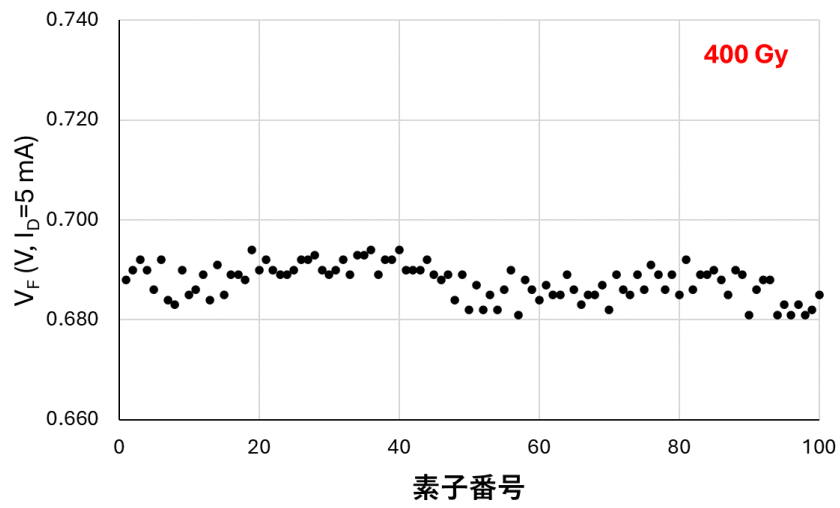


図 8.3-35 小信号用汎用ダイオードの V_F (400Gy)

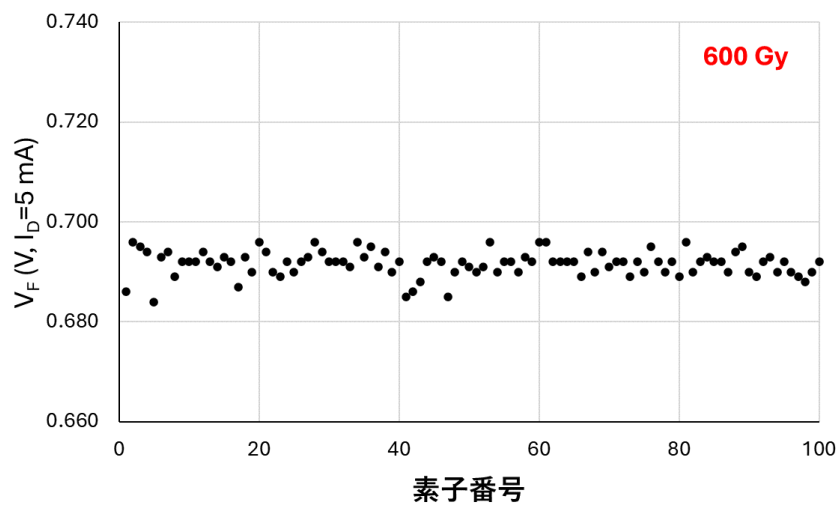


図 8.3-36 小信号用汎用ダイオードの V_F (600Gy)

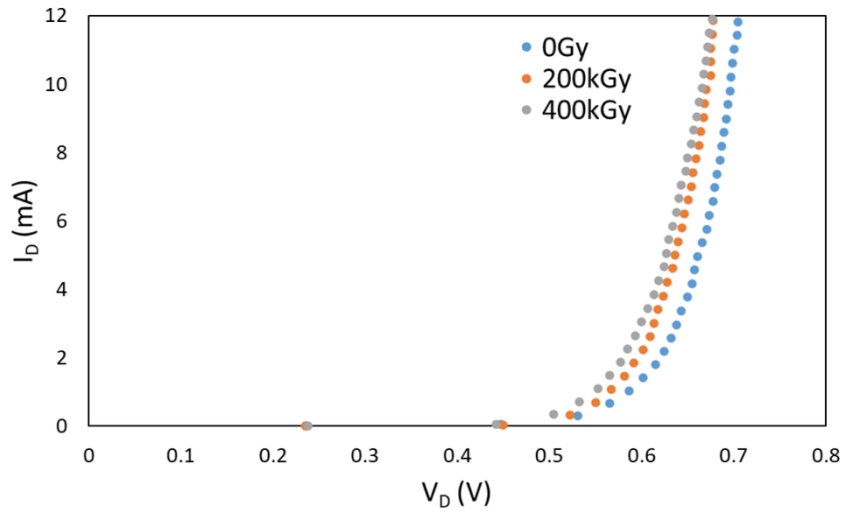


図 8.3-37 整流ダイオードの I_D - V_D 特性変化

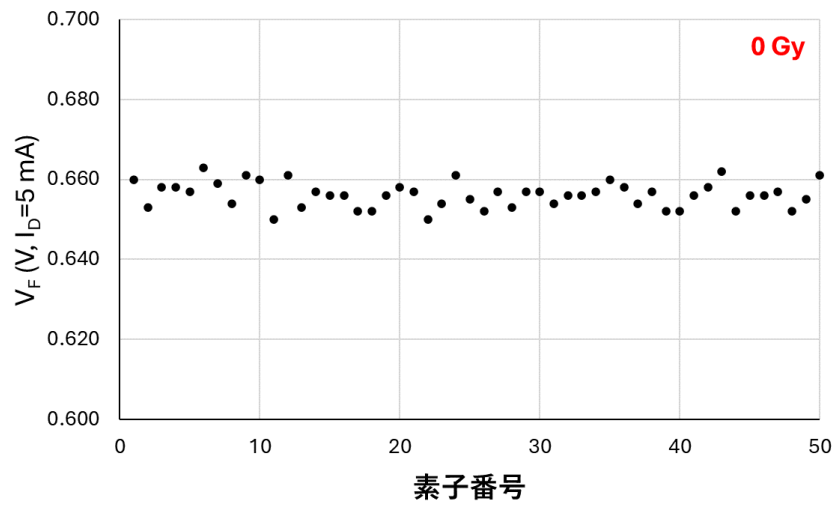


図 8.3-38 整流ダイオードの V_F (0Gy)

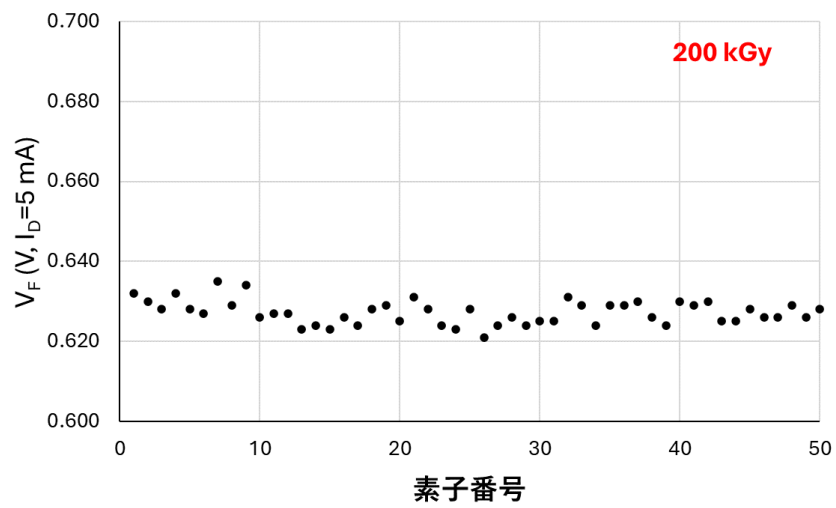


図 8.3-39 整流ダイオードの V_F (200kGy)

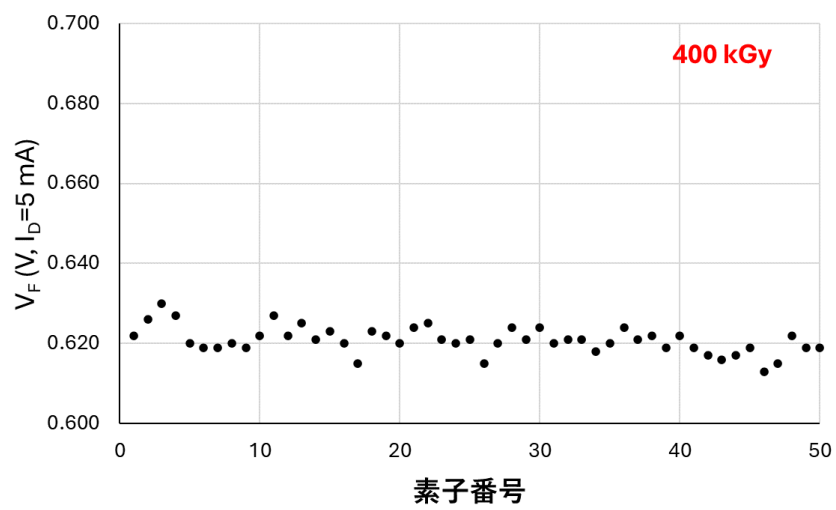


図 8.3-40 整流ダイオードの V_F (400kGy)

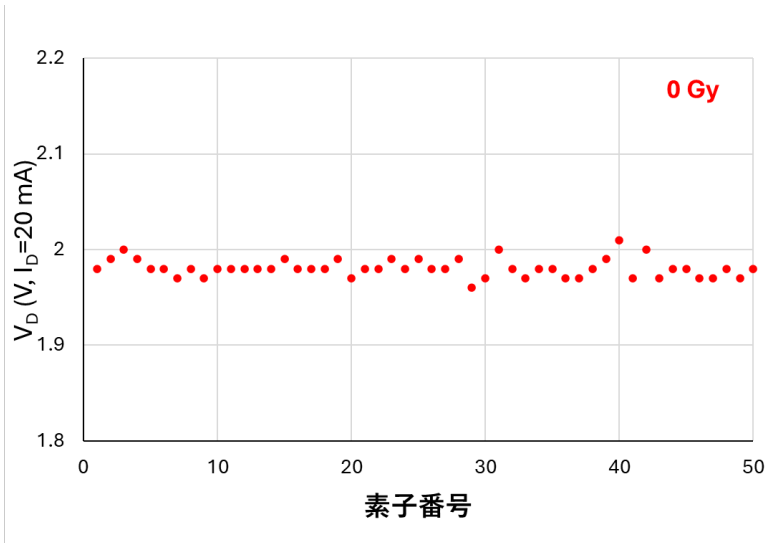


図 8.3-41 赤色 LED の電圧 : $I_D=20\text{mA}$ (0Gy)

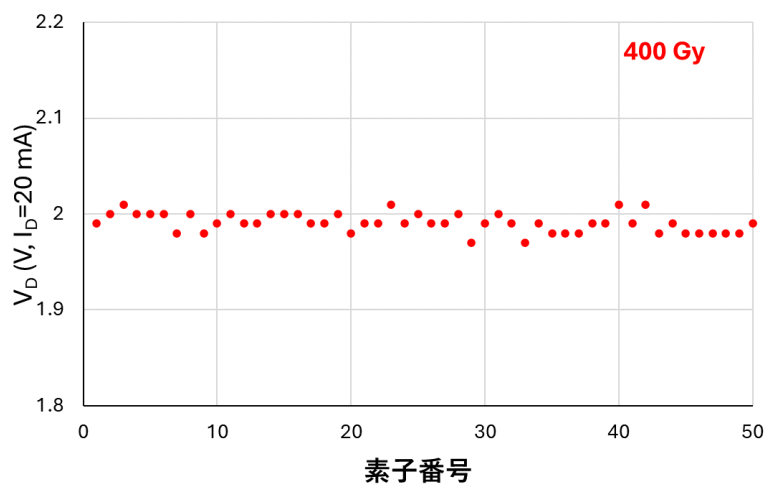


図 8.3-42 赤色 LED の電圧 : $I_D=20\text{mA}$ (400Gy)

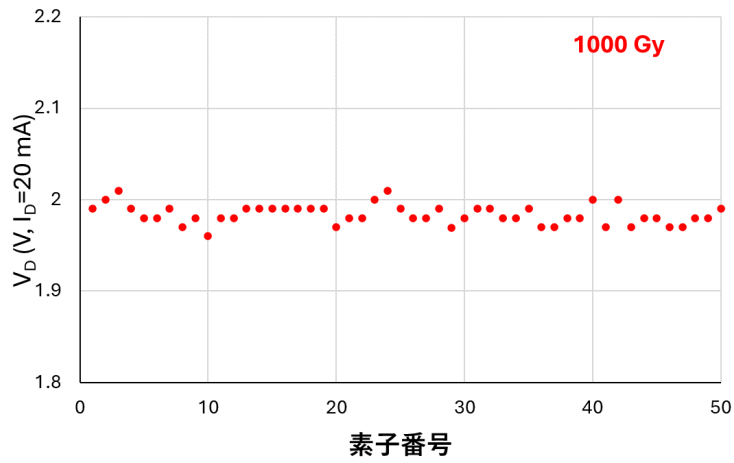


図 8.3-43 赤色 LED の電圧 : $I_D=20\text{mA}$ (1000Gy)

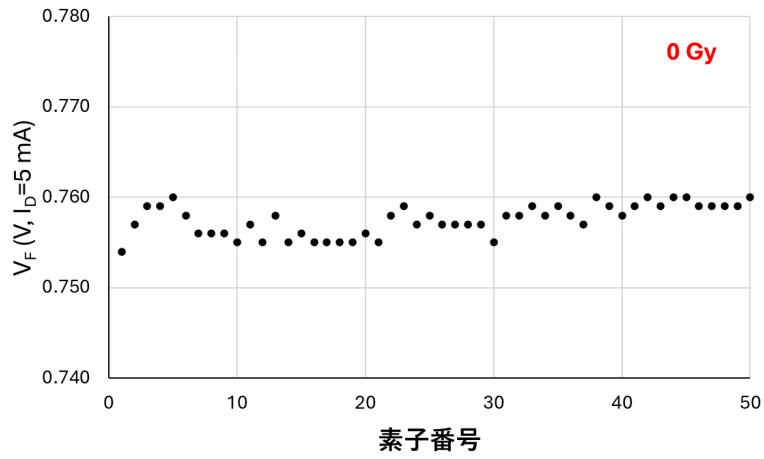


図 8.3-44 フォトダイオードの V_f (0Gy)

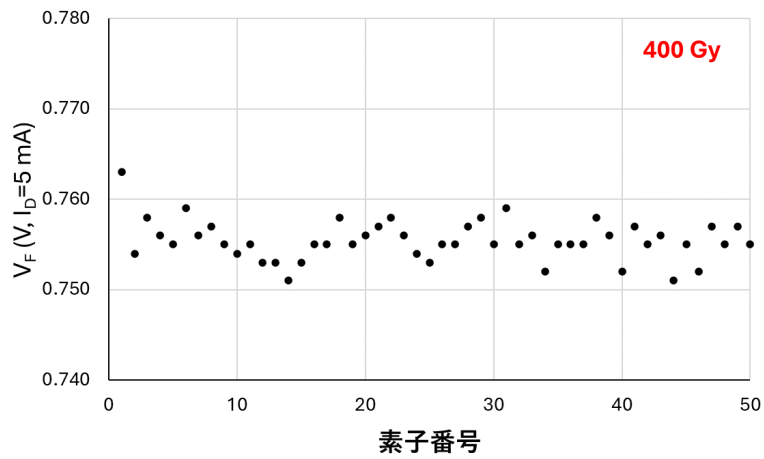


図 8.3-45 フォトダイオードの V_f (400Gy)

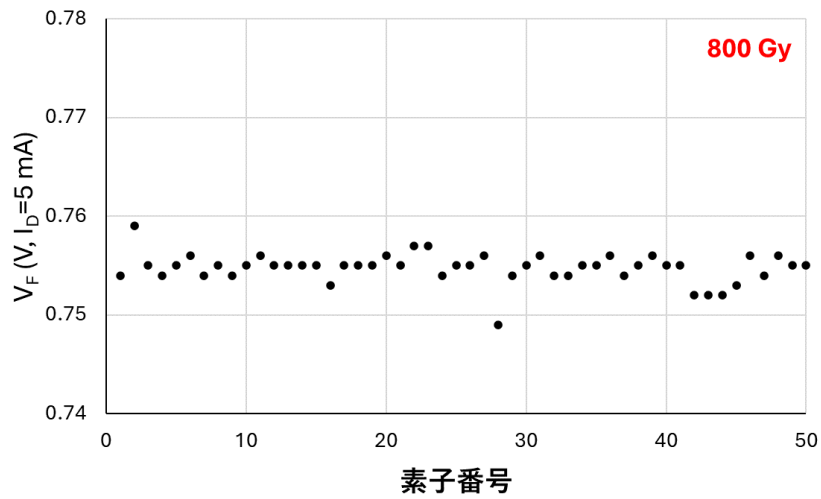


図 8.3-46 フォトダイオードの V_f (800Gy)

(6) コンパレータ

コンパレータは放射線照射中に動作特性を確認したが、2kGy まで照射した時点においても、2Hz の TTL 信号の入力に対して、図 8.3-47 に示すように動作していることが確認された。

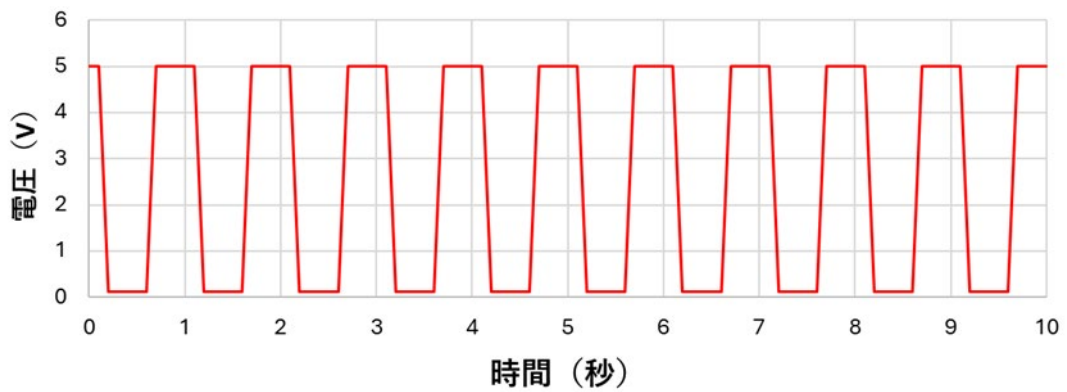


図 8.3-47 放射線環境下におけるコンパレータの動作

(7) オペアンプ

オペアンプ 10 個の出力電圧 V_o - 周波数 f 特性を表 8.3-6 から表 8.3-8 に示す。オペアンプでは、素子間でのバラつきがあることが分かる。また、オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数特性 f の例を図 8.3-48 に示す。照射に伴い、特性が低下していることが分かる。

表 8.3-6 オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性 (0Gy)

No f (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	14	14	13.9	13.9	13.9	13.9	13.7	13.7	13.7	13.7
3	14	13.7	13.7	13.9	13.7	13.9	13.7	13.7	13.7	13.7
5	13.9	13.7	13.9	13.9	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7
10	13.2	12.9	13.2	12.9	13.2	13.2	12.9	13.2	13.1	12.9
30	4.68	4.53	4.68	4.53	4.68	4.68	4.53	4.68	4.68	4.68
50	2.96	2.81	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.96	2.81	2.81
100	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56	1.56
300	0.781	0.625	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.781	0.625	0.625
500	0.625	0.468	0.625	0.468	0.468	0.625	0.468	0.625	0.468	0.468
1000	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468

表 8.3-7 オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性 (800Gy)

No f (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	13.9	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7	13.7
3	9.84	13.7	12.3	10.9	13.7	13.2	12.6	13.7	9.06	10
5	6.09	9.53	7.65	6.71	9.53	7.96	7.81	9.84	5.78	6.09
10	3.28	4.84	4.06	3.43	5	4.21	4.21	5	2.96	3.12
30	1.4	1.87	1.4	1.4	1.87	1.56	1.56	1.87	1.25	1.25
50	0.781	1.25	1.09	0.937	1.25	1.09	1.09	1.25	0.937	0.781
100	0.468	0.625	0.781	0.468	0.781	0.781	0.625	0.781	0.625	0.468
300	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468	0.468
500	0.468	0.312	0.468	0.468	0.312	0.468	0.312	0.312	0.468	0.468
1000	0.312	0.468	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.468	0.312

表 8.3-8 オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性 (1200Gy)

No f (Hz)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	6.75	13.4	10.8	6.12	13.3	7.87	13.1	13.3	7.37	8.06
3	2.56	5.81	4.43	2.31	5.37	2.75	4.62	6.31	2.56	2.87
5	1.68	3.5	2.87	1.5	3.25	1.81	2.87	3.87	1.62	1.87
10	1	1.87	1.5	0.937	1.68	1	1.5	2.12	0.875	1.12
30	0.5	0.75	0.75	0.437	0.687	0.5	0.687	0.875	0.437	0.5
50	0.375	0.562	0.5	0.312	0.5	0.437	0.5	0.562	0.375	0.437
100	0.312	0.437	0.375	0.312	0.375	0.312	0.312	0.437	0.312	0.375
300	0.312	0.312	0.312	0.312	0.312	0.25	0.312	0.312	0.25	0.25
500	0.25	0.25	0.25	0.312	0.312	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
1000	0.25	0.25	0.25	0.312	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

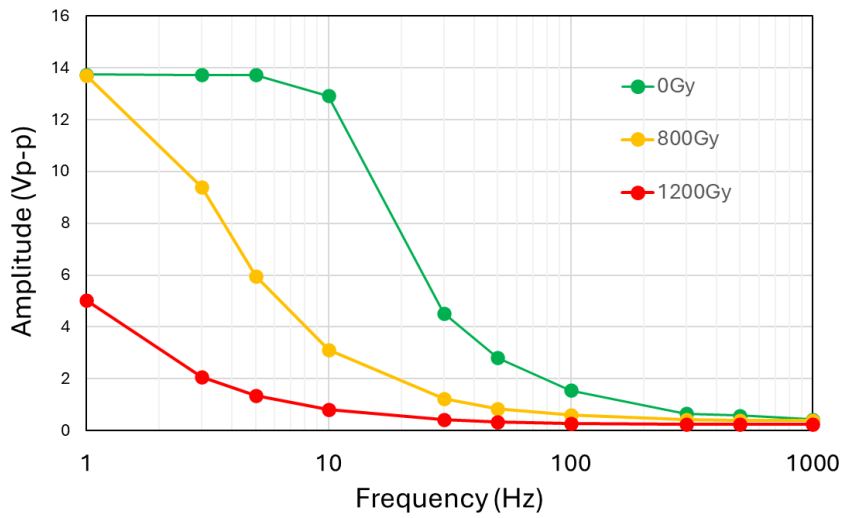


図 8.3-48 オペアンプの出力電圧 V_o - 周波数 f 特性

(8) 三端子レギュレータ

三端子レギュレータの入力電圧に対する出力電圧、及び入力電圧と静止電流の関係を図 8.3-49 に示す。照射に伴い、出力電圧—入力電圧の関係に大きな変化はみられないが、静止電流—入力電圧の関係には変化が認められ、静止電流の減少が確認された。

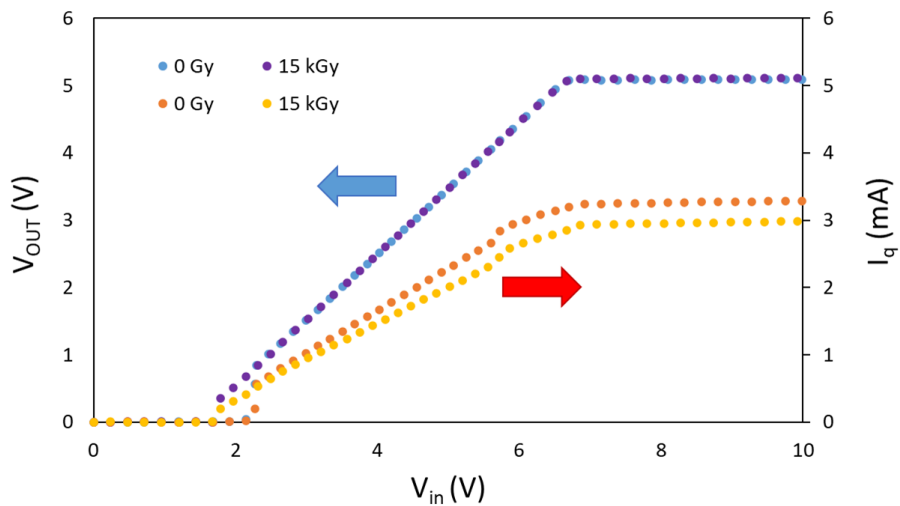


図 8.3-49 三端子レギュレータの特性変化

8.4 カスタマイズしたセンサの作動試験の実施

作動試験結果及び照射中の光電センサの出力を表 8.4-1 及び図 8.4-1 に示す。照射開始後、光電センサの出力は物体の移動に対して反応して出力されているが、約 4200 秒（70 分）付近で、遮へい体が無い光電センサの出力は 24V と一定となった。この時の集積吸収線量は約 680Gy である。4200 秒（70 分）以降も遮へい体有りの光電センサは動作を続け、約 17 時間の照射中断を挟んで、合計照射時間約 18000 秒（300 分）後に 24V の出力の状態となり故障した。

表 8.4-1 作動試験結果

遮へい体の有無	吸収線量率 [Gy/h]	故障時の照射時間 [s]	故障時の集積吸収線量 [Gy]
無し	580	約 4200	約 680
有り	260	約 18000	約 1300

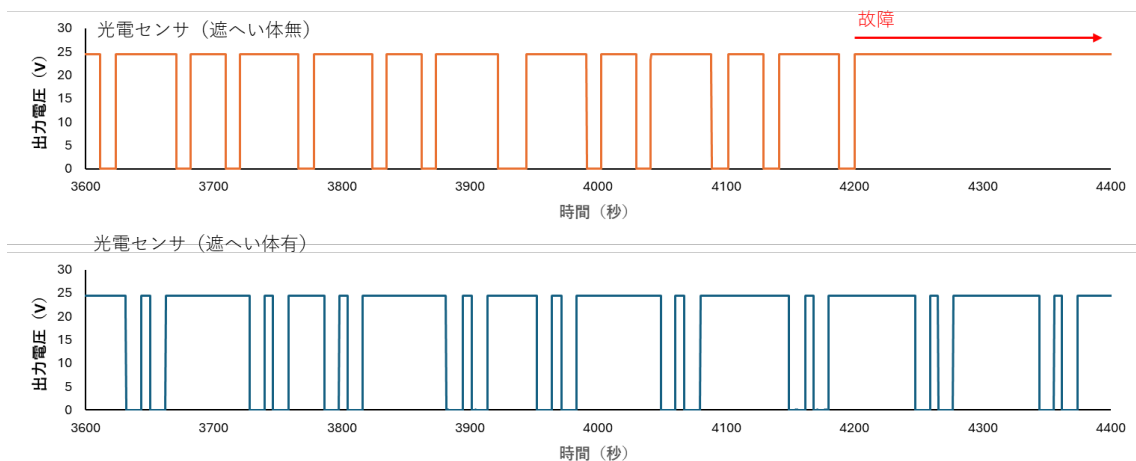


図 8.4-1 作動試験時の光電センサの出力電圧

9. 考察

9.1 耐放射線性データの追加取得

9.1.1 センサメーカーの耐放射線性のばらつき

光電センサ、近接センサ及び測域センサの過年度を含む照射試験結果を表 9.1-1 から表 9.1-3、及び図 9.1-1 から図 9.1-3 に示す。なお、光電センサ及び近接センサは、正常な動作が確認された最大集積吸収線量を、測域センサは故障が確認された集積吸収線量を示す。

光電センサ、近接センサ及び測域センサについて、センサメーカー間の耐放射線性のばらつきを評価した。なお、令和 5 年度までの照射試験において、通電状態及び入力電圧の影響がみられたセンサがあったため、入力電圧 24V の試験結果を対象に、t 検定を行い、耐放射線性のばらつき評価を行った。ばらつきの評価結果を表 9.1-4 に示す。

光電センサの耐放射線性について、センサメーカー間のばらつきに有意差が確認されたが、近接センサ及び測域センサの耐放射線性では、センサメーカー間のばらつきに有意差が確認されなかった。センサメーカー間のばらつきにおいては、センサの構成部品の耐放射線性のばらつきが影響していると考えられる。構成部品の耐放射線性及びセンサ全体の耐放射線性への影響については、故障メカニズムとともに 9.3 項に示す。

表 9.1-1 光電センサ照射試験結果一覧
(令和 2 年度)

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

表 9.1-1 光電センサ照射試験結果一覧（その2）

（令和3年度、4年度）

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

表 9.1-1 光電センサ照射試験結果一覧 (その 3)

(令和 5 年度)

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

表 9.1-1 光電センサ照射試験結果一覧（その 4）

（令和 6 年度）

No.	メーカー	入力電圧 [V]	吸収線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
90	C	24	50.7	16.0	811	959 (SD ^{※3} :92)
91		24	72.0	15.0	1080	
92		24	71.1	14.0	995	
93		24	71.8	14.0	1005	
94		24	69.6	13.0	904	
95		24	92	7.00	646	660 (SD ^{※3} :40)
96		24	101	6.00	604	
97		24	107	6.00	643	
98		24	114	6.00	686	
99		24	103	7.00	720	

※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。

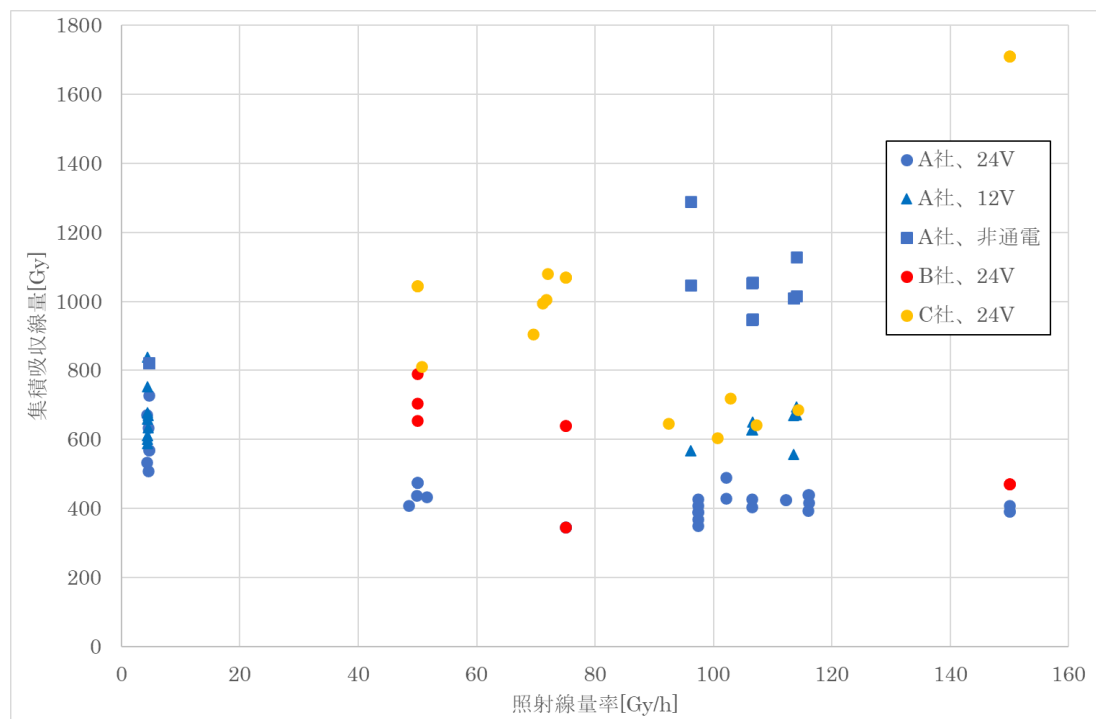


図 9.1-1 光電センサの照射試験結果

表 9.1-2 近接センサの照射試験結果一覧
(令和 2 年度、3 年度)

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

表 9.1-2 近接センサの照射試験結果一覧（その 2）
（令和 4 年度、5 年度）

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

表 9.1-2 近接センサの照射試験結果一覧 (その 3)
(令和 6 年度)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	吸収線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
56	E	24	50.7	21.0	1065	1208 (SD ^{※2} :92)
57		24	72.0	18.0	1295	
58		24	71.1	16.0	1137	
59		24	71.8	18.0	1292	
60		24	69.6	18.0	1252	
61		24	92	15.5	1431	985 (SD ^{※2} :274)
62		24	101	10.0	1007	
63		24	107	10.0	1072	
64		24	114	7.00	800	
65		24	103	6.00	617	

※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。

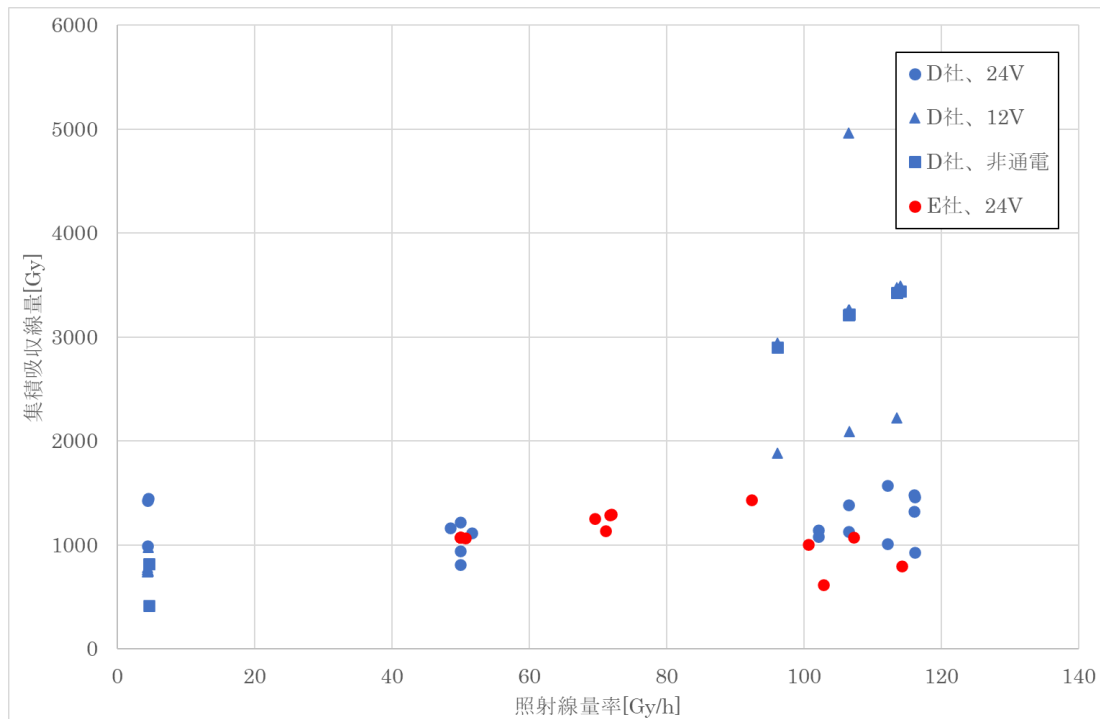


図 9.1-2 近接センサの照射試験結果

表 9.1-3 測域センサの照射試験結果一覧
(令和2年度、3年度、6年度)

No.	メーカー	入力電圧 [V]	吸収線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
1	H	24	50	5.55	278	261 (SD ^{*1} :17)
2		24	50	5.35	268	
3		24	50	4.75	238	
4	I	24	50	4.62	231	260 (SD ^{*1} :22)
5		24	50	5.55	278	
6		24	50	5.56	278	
7	H	24	4.63	42.61	197	207 (SD ^{*1} :7)
8		24	4.63	46.51	215	
9		24	4.63	45.19	209	
10		259 (SD ^{*1} :21)	24	47.9	5.30	254
11			24	47.9	4.92	236
12			24	47.9	6.00	287
13			24	113	2.25	255
14		249 (SD ^{*1} :8)	24	113	2.28	258
15			24	113	2.11	238
16			24	113	2.18	246
17			24	150	1.64	246
18		253 (SD ^{*1} :10)	24	150	1.59	239
19	24		150	1.66	249	
20	24		150	1.80	270	
21	24		150	1.75	263	
22	24		150	1.67	251	
23	I	24	52.0	3.92	204	207 (SD ^{*1} :10)
24		24	52.0	3.79	197	
25		24	52.0	4.24	221	
26		24	97.7	2.19	214	240 (SD ^{*1} :19)
27		24	97.7	2.49	244	
28		24	97.7	2.67	261	

※1 SD : 標準偏差

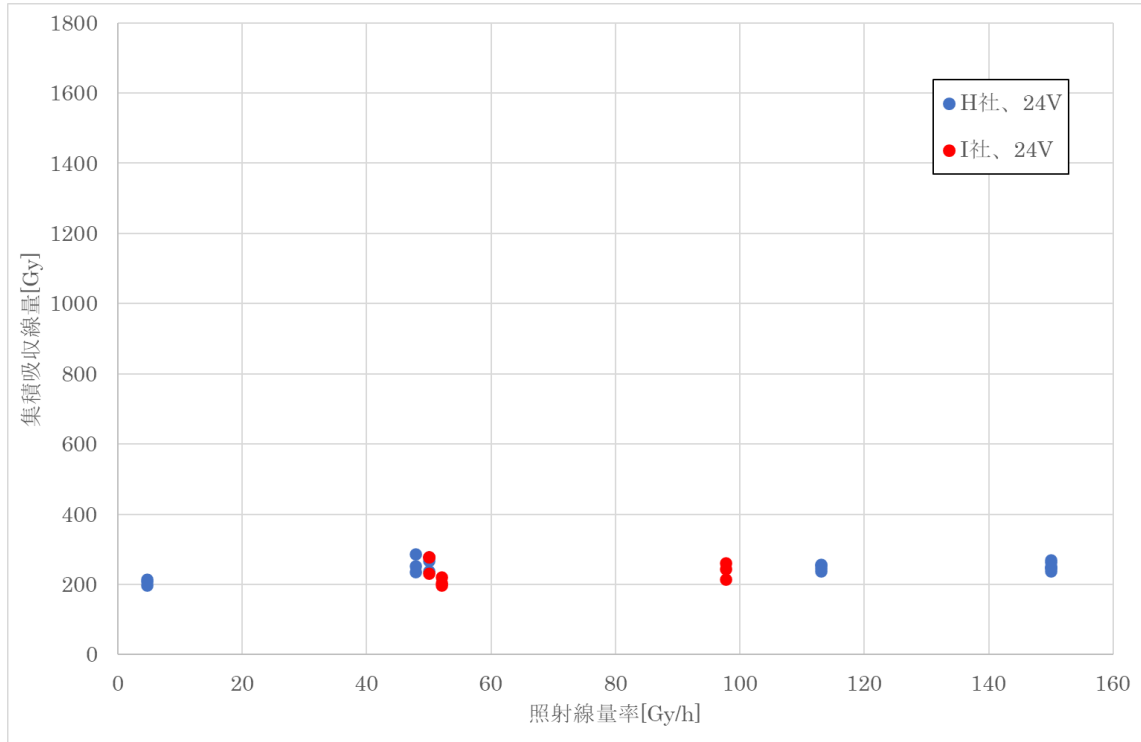


図 9.1-3 測域センサの照射試験結果

表 9.1-4 センサメーカー間のばらつきの評価結果 (t 検定)

センサ	棄却域	t 値	p 値	有意差の判定結果
光電センサ	$ t > 2.01$	-9.07	3.9×10^{-12}	有り
近接センサ	$ t > 2.04$	1.06	0.30	無し
測域センサ	$ t > 2.06$	1.05	0.30	無し

9.2 簡易遮へい評価手法の適用方法検討

9.2.1 ガラス線量計特性の評価

(1) 方向特性

照射試験によって確認したガラス線量計の方向特性を表 9.2-1 に示す。ここでは 0° のガラス線量計の集積吸収線量を 1 とした場合の各角度における集積吸収線量の相対レスポンスを図 9.2-1 に示す。照射角度が 90° に近づくと、相対レスポンスが大きくなり、 -90° に近づくと相対レスポンスが小さくなる傾向が確認された。既往研究では照射角度が 0° から離れるほど、相対レスポンスが低下することが確認されている⁸⁾。特に、 45° までは緩やかにレスポンスが低下し、 45° 以降も減少を続け、 90° では 1/2 のレスポンスになると示されている。

-90° 側では同様の傾向が確認されたが、減少率は既往事例と比較して小さく、約 20%であった。しかし、 90° 側ではガラス線量計のレスポンスが約 10%増加する結果となった。今回の照射試験では、 -90° 側と比較し、 90° 側の集積吸収線量が高くなっており、試験配置が 90° 側の方が線源までの距離が近くなっていた可能性がある。

ガラス線量計は照射角度が 0° から離れるほど、レスポンスのばらつきが大きくなるため、 0° に近い状態で照射することが望ましいと考えられる。

表 9.2-1 ガラス線量計の方向特性

照射高さ [mm]	0° を 1 とした相対レスポンス						
	-90°	-60°	-30°	0°	30°	60°	90°
360	0.75	0.82	0.92	1.00	1.00	1.10	1.05
300	0.78	0.83	0.94	1.00	1.01	1.12	1.15
240	0.81	0.81	0.90	1.00	1.05	1.10	1.12
180	0.79	0.87	0.95	1.00	1.00	1.07	1.08
平均	0.78	0.83	0.93	1.00	1.01	1.10	1.10

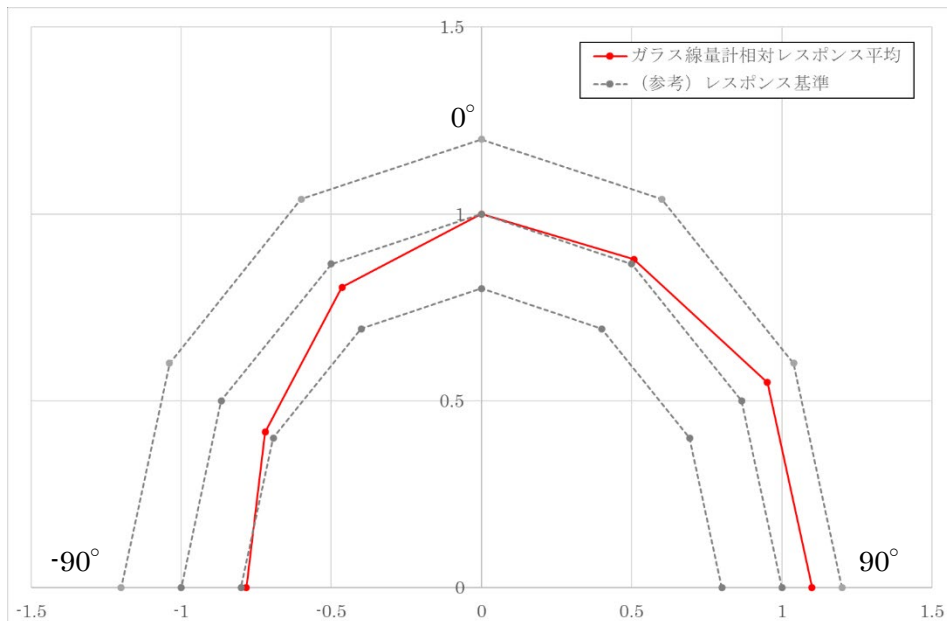


図 9.2-1 ガラス線量計の方向特性評価結果

(2) 吸収線量特性

測定値がガラス線量計の測定上限を超えなかった No.6 から No.20 について、線源中心からの距離と集積吸収線量の関係を図 9.2-2 に示す。また、規格化手法①及び規格化手法②の比較結果を図 9.2-3 に示す。

測定値と計算値について比較すると、測定値と比較し、計算値が小さくなる傾向が確認された。また、測定値の集積吸収線量が 300Gy を超える領域で特に誤差が大きくなることを確認した。

ガラス線量計の吸収線量特性については、既往事例にて数百 mGy オーダでは、集積吸収線量が大きくなるとレスポンスが大きくなることが示されている⁹⁾。ここでは、⁶⁰Co の照射による集積吸収線量が 100mGy の場合、1mGy と比較し、10%程度レスポンスが増加することが報告されている。

図 9.2-2 に示す照射試験結果及び解析結果の比較から、300Gy を超える領域で測定値と計算値のばらつきが大きくなっていることが確認された。従って、300Gy 程度をしきい値にガラス線量計の吸収線量特性が変化していると考えられる。

今後、ガラス線量計を利用し、集積吸収線量を評価する場合には約 300Gy を上限に評価を行う必要があると考えられる。

規格化手法①と規格化手法②について比較すると、規格化手法①と比較し、規格化手法②の値が約 1.1 倍になることを確認した。この時、規格化手法①では、ガラス線量計の集積吸収線量が小さくなり、測定値とのばらつきが大きくなっていることを確認した。約 300Gy までの領域において、規格化手法②の測定値との誤差は約 10%であり、規格化手法①と比較し誤差が小さいため、解析の際にはガラス線量計組成を考慮しなくても良いと考えられる。なお、線量計組成の影響評価については、9.2.2 項に詳細を示す。

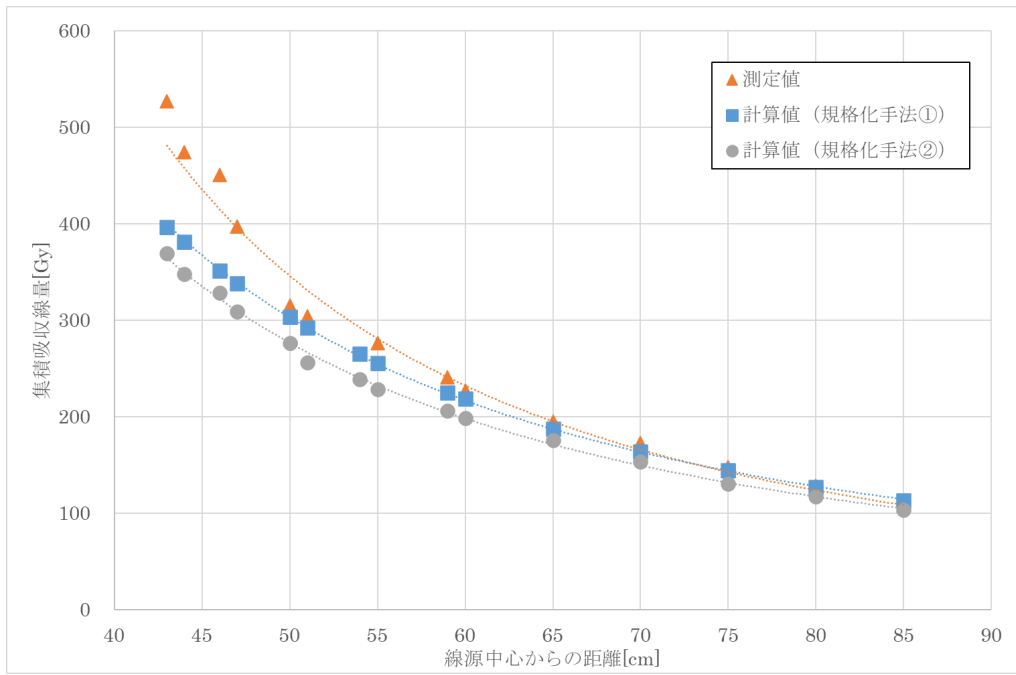


図 9.2-2 吸収線量特性における測定値及び計算値の比較

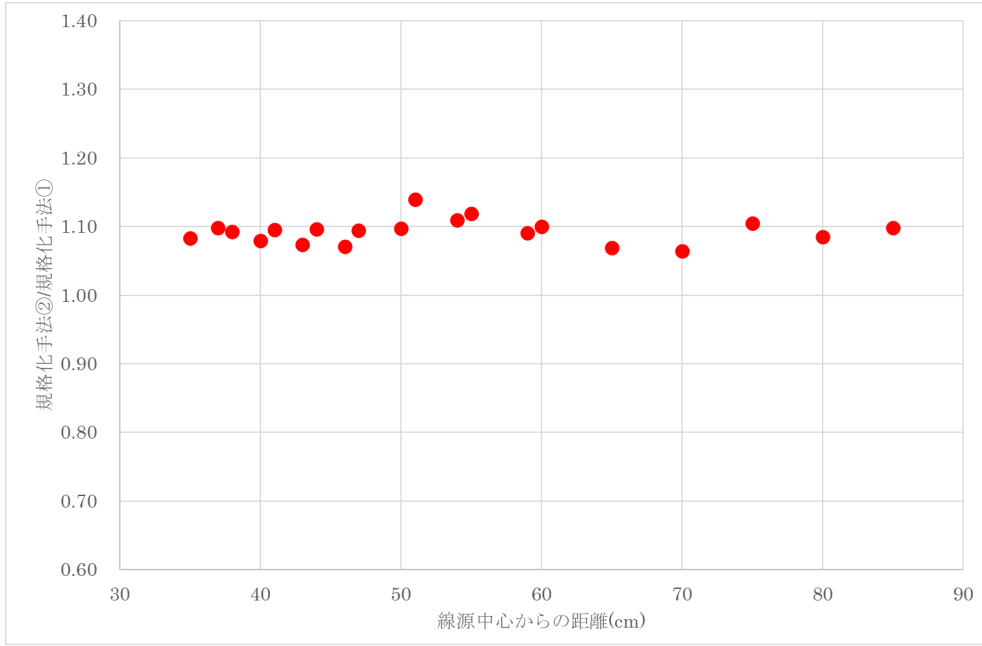


図 9.2-3 規格化手法①及び規格化手法②の比較

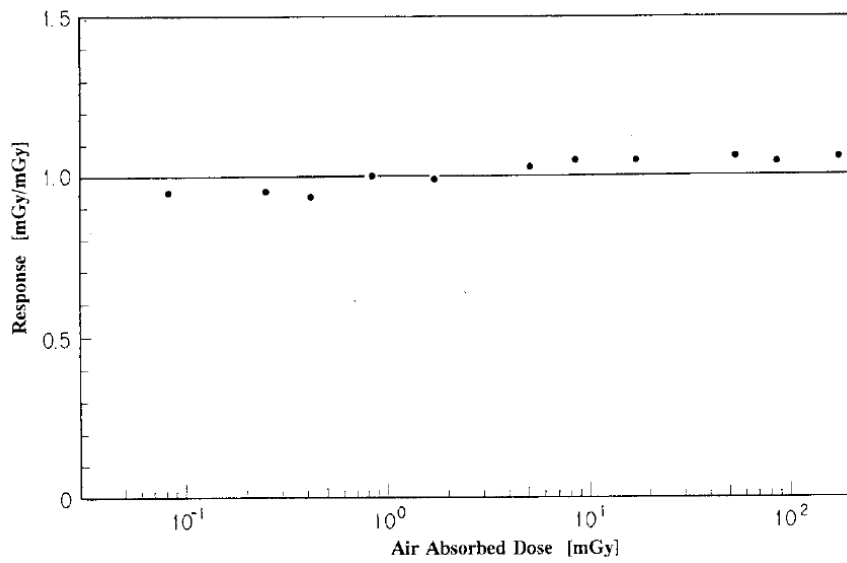


図 9.2-4 既往事例のガラス線量計の吸収線量特性の例

出典：「石川達也ら,蛍光ガラス線量計の基本特性,JEARI-Tech94-034,1994/12」^[9]

9.2.2 線量計組成の影響評価

9.2.1(2)項より、ガラス線量計の吸収線量特性が集積吸収線量の測定値に影響を与えている可能性があることが分かった。ガラス線量計組成の影響評価解析における、ガラス線量計の集積吸収線量の測定値及び計算値を表 9.2-2 に示す。

線量計組成の影響評価を実施した解析ケースに対して、アラニン線量計、集積吸収線量が 300Gy を超えるガラス線量計及び集積吸収線量が 300Gy 以下となるガラス線量計に分類し、それぞれの線量計組成の影響を評価した。線量計の分類毎の線量計組成の影響評価結果を表 9.2-3 から表 9.2-5 に示す。

線量計組成の影響評価のため、測定値 (E) と規格化手法①による計算値 (C₁) の比、及び規格化手法②による計算値 (C₂) の比を比較した。

アラニン線量計については、線量計組成を考慮することで、測定値との誤差が 3%低下し、集積吸収線量が 300Gy 以下となるガラス線量計は 5%低下した。しかし、集積吸収線量が 300Gy を超えるガラス線量計については、線量計組成を考慮することで、測定値との誤差が 4%増加した。300Gy を超える領域ではガラス線量計のレスポンスが変化し、集積吸収線量の測定値が計算値より大きくなる傾向が確認された。また、8.2.3(1)項において、規格化手法②と比較し、規格化手法①は計算値が小さくなる傾向が確認されており、測定値のばらつきの増加によって測定値との誤差が大きくなったと考えられる。

今回の評価においては、アラニン線量計及び 300Gy 以下の集積吸収線量のガラス線量計において、線量計組成を考慮することで、測定値との誤差が約 5%低減することを確認した。しかし、測定値と計算値の誤差は最大 20%であり、線量計組成の考慮と比較し、照射試験における測定値の誤差の影響が大きいと考えられる。

従って、今後遮へい解析により、センサ類の耐放射線性を評価するため、吸収線量率を計算する際には、線量計組成を考慮しなくても良いと考えられる。

表 9.2-2 各解析ケースにおけるガラス線量計の集積吸収線量

解析 ケース	照射位置	センサ No.	集積吸収線量[Gy]		
			測定値 E	計算値 (規格化手法①) C ₁	計算値 (規格化手法②) C ₂
1-1	遮へい体内部	1	343	346	373
		2	357	348	373
		3	402	339	372
1-2	遮へい体内部	1	147	170	176
		2	151	170	175
		3	164	171	175
1-3	遮へい体外部	1	379	326	332
		2	366	307	332
		3	495	385	416
	遮へい体内部	1	172	189	201
		2	174	182	200
		3	225	227	250
1-4	遮へい体外部	1	442	331	357
		2	419	330	357
		3	393	329	357
	遮へい体内部	1	157	152	161
		2	101	103	110
		3	337	301	326

表 9.2-3 アラニン線量計の測定値と計算値の比較一覧

解析 ケース	照射位置	センサ No.	C ₁ /E	$\sqrt{(C_1/E-1)^2}$	C ₂ /E	$\sqrt{(C_2/E-1)^2}$
1-1	遮へい体 外部	1	1.19	0.19	1.26	0.26
		2	1.01	0.01	1.07	0.07
		3	1.00	0.00	1.06	0.06
1-2	遮へい体 外部	1	1.17	0.17	1.19	0.19
		2	1.03	0.03	1.04	0.04
		3	0.99	0.01	1.00	0.00
誤差平均			—	0.07	—	0.10

表 9.2-4 ガラス線量計 (300Gy より大きい) の測定値と計算値の比較一覧

解析 ケース	照射位置	センサ No.	C_1/E	$\sqrt{(C_1/E-1)^2}$	C_2/E	$\sqrt{(C_2/E-1)^2}$
1-1	遮へい体 内部	1	1.01	0.01	1.09	0.09
		2	0.97	0.03	1.04	0.04
		3	0.84	0.16	0.93	0.07
1-3	遮へい体 外部	1	0.86	0.14	0.88	0.12
		2	0.84	0.16	0.91	0.09
		3	0.78	0.22	0.84	0.16
1-4	遮へい体 外部	1	0.75	0.25	0.81	0.19
		2	0.79	0.21	0.85	0.15
		3	0.84	0.16	0.91	0.09
	遮へい体 内部	3	0.89	0.11	0.97	0.03
誤差平均			—	0.15	—	0.11

表 9.2-5 ガラス線量計 (300Gy 以下) の測定値と計算値の比較一覧

解析 ケース	照射位置	センサ No.	C_1/E	$\sqrt{(C_1/E-1)^2}$	C_2/E	$\sqrt{(C_2/E-1)^2}$
1-2	遮へい体 内部	1	1.16	0.16	1.20	0.20
		2	1.13	0.13	1.16	0.16
		3	1.04	0.04	1.06	0.06
1-3	遮へい体 内部	1	1.10	0.10	1.17	0.17
		2	1.05	0.05	1.15	0.15
		3	1.01	0.01	1.12	0.12
1-4	遮へい体 内部	1	0.97	0.03	1.03	0.02
		2	1.02	0.02	1.08	0.08
誤差平均			—	0.07	—	0.12

9.2.3 簡易遮へい評価手法の適用性の検討結果

簡易遮へい評価手法として、QAD、手計算 1、手計算 2 及び手計算 3 と MCNP を比較した。今回設定した条件における MCNP 及び各簡易遮へい評価手法の特徴を表 9.2-6 に示す。

表 9.2-6 MCNP 及び各簡易遮へい評価手法の特徴

	MCNP	QAD	手計算 1	手計算 2	手計算 3
評価可能な線源形状	点、ライン、面等	点、ライン、面等	点	点	ライン
線源形状の影響	—	—	線源から 1m 以上離れた評価位置ではライン線源と 5%以内の差異で一致	線源から 1m 以上離れた評価位置ではライン線源と 5%以内の差異で一致	—
線源距離による影響	—	MCNP とほぼ一致	MCNP とほぼ一致	MCNP とほぼ一致	MCNP とほぼ一致
遮へい体厚さによる影響	—	MCNP と比較し 20% 保守的な値	MCNP と比較し 20% 保守的な値	MCNP と比較し 10% 保守的な値	MCNP と比較し 3% 保守的な値
適用可能な距離	制限なし	制限なし	線源から 1m 以上	線源から 1m 以上	制限なし
散乱線の考慮	照射室遮へい体	—	—	—	—
評価可能な遮へい体形状	3次元 開口部有り 開口部無し	3次元 開口部有り 開口部無し	1次元 開口部無し	1次元 開口部無し	2次元 開口部無し

注：今回設定した線源条件（点線源及びライン線源）における特徴である。

代表的な簡易計算ケース（簡易計算ケース 1-1 から 1-4）の計算結果から、代表的な計算モデルに対して適用可能な簡易遮へい評価手法を評価した。評価結果を表 9.2-7 に示す。ここでは、MCNP との誤差について評価し、今回の適用方法の検討においては、MCNP の値との誤差 15% を基準値と設定し、誤差が 15%以内となる簡易計算手法を示す。

簡易計算ケース 1-1 及び 1-3 に示す遮へい体が無い場合では、QAD、手計算 1、手計算 2 及び手計算 3 が全て適用可能であることが分かった。ただし、手計算 2 及び手計算 3 では、MCNP と比較し、それぞれ約 1%、約 3%非保守的な値となった。なお、QAD は干渉性散乱を考慮したビルドアップ係数を設定しており、計算コード自体が保守性を持つため^[10]、手計算と比較し、保守的な値を示した。

簡易計算ケース 1-2 及び 1-4 に示す遮へい体がある場合では、MCNP と比較し、QAD 及び手計算 1 で約 20%、手計算 2 で約 10%、手計算 2 で 3%保守的な値を示すことが分かった。ただし、手計算 3 では遮へい体厚さが 10cm の時、MCNP と比較し、非保守的な値となった。

簡易計算ケース 1-5 では、線源形状及び評価位置について評価した。ここでは、ライン線源を点線源で模擬した場合のライン線源下部相当位置での影響を評価した。ライン線源におけるライン線源下部の計算値と点線源におけるライン線源下部相当の計算値を比較した場合、線源から 30cm を超える評価位置では、誤差が約 2%以内と線源形状に依らず同程度の評価となった。しかし、線源から 20cm の評価位置ではライン線源と比較し、点線源で評価した方が 10%非保守的、10cm の位置では約 40%非保守的な値となった。従って、線源からの距離が近い場合には、点線源のライン線源下部相当の評価位置での計算値は非保守的となることが分かった。

表 9.2-7 代表的な簡易計算ケースに対して適用可能な簡易遮へい評価手法

		線源形状	
		点線源	ライン線源
遮へい体	無し	QAD 手計算 1 手計算 2	QAD 手計算 3
	有り	手計算 2	手計算 3

注：今回設定した線源条件（点線源及びライン線源）での適用性評価結果である。

また、昨年度までの遮へい解析を模擬した計算ケース（簡易計算ケース 2-1 から 2-5）の結果から、照射試験における線源形状及び遮へい体構造を考慮した場合の各簡易遮へい評価手法の適用性を検討した。評価結果を表 9.2-8 に示す。各簡易遮へい評価手法と MCNP の比較結果を表 9.2-9 に示す。

遮へい体外部の評価位置については、簡易計算ケース 2-2 の手計算 1 を除く全ての評価位置で、MCNP との誤差との誤差が 15%以内となった。また、ケース 2-3 から 2-5 では、非保守的な値となっているが、線源からの距離が 1m 以上離れており、MCNP では、照射室における散乱線が考慮されているためだと考えられる。

遮へい体内部の評価位置について、QAD では、簡易計算ケース 2-1 から 2-5 で MCNP との誤差が 15%以下となった。

手計算 1 及び手計算 2 では、簡易計算ケース 2-1 から 2-3 で MCNP との誤差が 6%以下、2-4 及び 2-5 で 15%以上となった。手計算 1 及び 2 では、遮へい体がある場合、MCNP と比較し、保守的な値を示す（簡易計算ケース 1-2 参照）。また、MCNP では線源の自己遮へいが考慮されていることから、簡易計算ケース 2-4 及び 2-5 では、MCNP と比較し、保守的な評価となったと考えられる。簡易計算ケース 2-1 から 2-3 では、簡易計算ケース 2-4 及び 2-5 でみられた保守的となる効果と、ライン線源を点線源で模擬したことによる非保守性（簡易計算ケース 1-5 参照）及び開口部を遮へい体と設定したことによる非保守性が打ち消し合い、MCNP と同程度の評価になったと考えられる。

手計算 3 では、簡易計算ケース 2-2 で MCNP と比較し 46%保守的、ケース 2-3 で 13%非保守的な評価となった。ケース 2-2 では、開口部近傍の遮へい体を通過しない領域と設定している領域に、実際は遮へい体が存在しているため、保守的な評価になったと考えられる。ケース 2-3 については、開口部近傍を評価しているが、全て遮へい体を通過する領域と設定したため、非保守的な評価になったと考えられる。

今回は代表的な簡易計算ケースとして、線源形状、線源からの距離及び遮へい体の有無を考慮した場合の簡易遮へい評価手法の適用方法について検討した。また、過年度までの解析を模擬した計算条件で評価を実施した。ここでは、ライン線源に対して照射試験に用いた遮へい体構造を考慮したうえで、簡易遮へい評価手法の適用方法について検討した。評価の結果、線源との位置関係及び遮へい体構造によって、適用可能な簡易遮へい評価手法が異なることを確認した。

ただし、今回の適用方法の検討結果は、今回の設定した条件における評価結果である。実環境での評価を考えた場合には、ライン線源ではなく、面線源もしくは体積線源が対象であることが想定される。従って、今回検討したライン線源以外の面線源もしくは体積線源を対象に、簡易遮へい評価手法の適用方法を検討する必要があると考えられる。

また、簡易計算手法の適用が可能となる MCNP もしくは測定値とのばらつきの許容値については、センサの使用環境条件、センサの耐放射線性及びセンサの交換頻度等によって変わると考えられる。従って、センサの適用方法の検討においては、環境条件についても整理する必要がある。

表 9.2-8 過年度の解析を模擬した計算ケースに対して適用可能な簡易遮へい評価手法

		線源中心からの距離	
		1m 以内	1m 以上
遮へい体	無し	QAD、手計算 3	QAD 手計算 1 手計算 2 手計算 3
	有り	QAD	

注：今回設定した線源条件（ライン線源、ライン線源を模擬した点線源）での適用性評価結果である。

表 9.2-9 過年度の解析を模擬した計算ケースの MCNP との比較結果

簡易計算 ケース	評価位置	MCNP との比 (簡易評価計算値/MCNP)			
		QAD	手計算 1	手計算 2	手計算 3
2-1	遮へい体内部	1.02	1.07	1.01	0.94
2-2		1.15	1.04	1.00	1.46
2-3		0.99	1.06	1.01	0.87
2-4		1.13	1.22	1.15	1.01
2-5		1.13	1.24	1.17	0.93
2-1	遮へい体外部	0.91	1.02	0.98	0.94
2-2		1.01	1.17	1.12	1.04
2-3		0.91	0.94	0.90	0.93
2-4		0.92	0.95	0.91	0.95
2-5		0.91	0.94	0.90	0.94

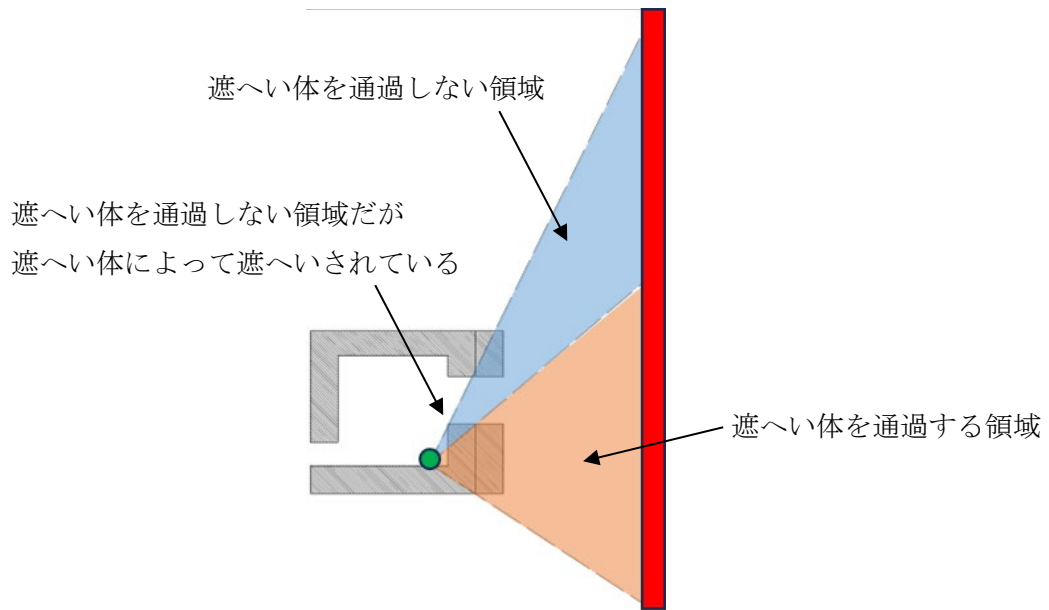


図 9.2-5 簡易計算ケース 2-2 の手計算 3 の領域設定

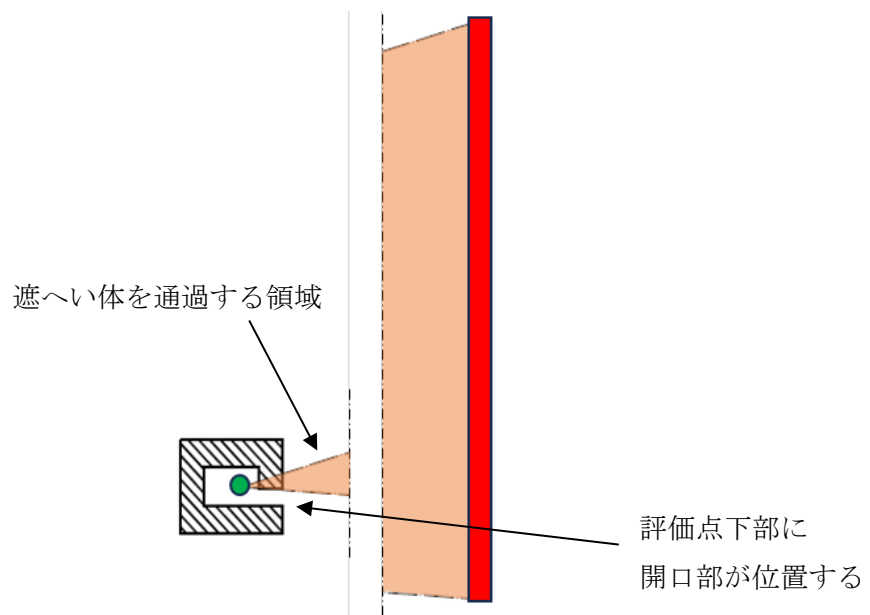


図 9.2-6 簡易計算ケース 2-3 の手計算 3 の領域設定

9.3 故障原因調査の実施

バイポーラトランジスタ等のセンサの構成部品の耐放射線性については、既往研究でも調査されており、製造メーカ、型番等は異なるが、今回の試験結果と同程度のオーダとなっている^[11]。特に、バイポーラトランジスタ及び MOSFET は、他の構成部品と比較し、耐放射線性が低く、センサの耐放射線性に大きく関係していると考えられる。今回取得した耐放射線性データは、サンプル数も十分であり、特に、バイポーラトランジスタ及び MOSFET では、ガンマ線照射に伴う素子間の性能の低下のばらつきが大きくなる傾向も確認された。このことが、センサの故障が生じる集積吸収線量のばらつきにも関係しているものと考えられる。

さらに、8.3.1 項の光電センサ及び測域センサの分解による構成部品調査結果で示したように、センサには電子マイコン、FPGA などが内蔵されており、マイコン等のプログラムが書き込まれているフラッシュメモリの放射線影響についてはさらに調べる必要があると考えられる。フラッシュメモリは浮遊ゲート MOSFET と呼ばれるトランジスタを使用している。浮遊ゲートは電荷を保持する部分であり、浮遊ゲートの電荷がデータの 0 と 1 を表している。従って、放射線の影響により浮遊ゲートの情報が書き換えられ、プログラム部に異常が生じた場合、センサ全体に誤動作を生じさせるため、センサの故障に対する影響は大きいと考えられる。また、同じ種類のマイコンであっても、プログラムサイズがセンサの耐放射線性に影響する可能性がある。プログラムサイズが大きい場合、使用される浮遊ゲート MOSFET の数も増加し、情報が書き換えられる可能性が増加する。特に、センサのマイコンに書き込まれたプログラムは、センサを動作させるために特化されたプログラムであるため、一か所でも情報の書き換えが発生した場合、センサの動作そのものが不能となるプログラムの領域が多く存在すると考えられる。

9.4 カスタマイズしたセンサの作動試験の実施

作動試験におけるセンサ故障時の集積吸収線量及びその比を表 9.4-1 に示す。

遮へい体無しの場合約 680Gy でセンサが故障し、遮へい体有りの場合約 1300Gy で故障しており、遮へい体の有無によるセンサ故障時の集積吸収線量の比については、約 1.9 となった。

作動試験においては、遮へい体がある場合、遮へい体が無い場合と比較してセンサが故障する集積吸収線量が増加することが確認された。しかし、今回作動試験のサンプル数が 1 であること、令和 5 年度までに実施したカスタマイズ試験では、遮へい体の有無にかかわらず同程度の集積吸収線量でセンサが故障していたことから、今回の作動試験で確認された傾向の違いについては検討が必要である。

表 9.4-1 作動試験におけるセンサ故障時の集積吸収線量及びその比

遮へい体の有無	故障時の集積吸収線量 [Gy]	集積吸収線量の比
無し	約 680	約 1.9
有り	約 1300	

10. 一般産業用工業品の使用指針の作成

一般産業用工業品の使用指針案の作成に向け、技術委員会を実施した。本年度の技術委員会では、第1回技術委員会で頂いたコメント対応結果、機器の適用方法及び作動試験について、ご報告し、審議を行った。

10.1 令和6年度の技術委員会実施内容

本年度は2.2項の全体計画に従い、第2回及び第3回技術委員会を実施した。以下に、各回の概要を示す。

10.2 第2回技術委員会結果概要

第2回技術委員会では、第1回技術委員会で委員よりコメントのあったセンサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果及び線量計組成の遮へい解析への影響評価の一部をご報告し、審議を行った。

本年度までの試験結果から光電センサでセンサメーカーによる耐放射線性のばらつきが確認された。技術委員会では、故障時の挙動及びそのばらつきについて、コメントがあった。ただし、故障時の挙動について議論をするためには、故障メカニズムの検討が必要とコメントがあり、第3回技術委員会において、故障メカニズムを含む議論を行うこととした。

線量計組成の影響については、線量計組成を考慮することで、測定値との誤差が2%から3%低減することを確認した。また、線量計の違いによって精度が若干異なるが、測定値とは数%の誤差であるため、線量計組成は考慮せずに吸収線量を評価してよいとコメントを頂いた。

10.3 第3回技術委員会結果概要

第3回技術委員会では、線量計組成の遮へい解析への影響評価、ガラス線量計特性の評価結果、簡易遮へい評価手法の適用方法検討結果、故障原因調査結果及び作動試験方法をご報告し、審議を行った。

線量計組成については、第2回技術委員会と同様に線量計組成を考慮しなくても良いと考えられたが、線量計組成による測定値の誤差が大きく、線量計組成による計算値の誤差と比較し、測定値と計算値の誤差が大きくなる傾向が確認されたことをご報告した。また、使用指針案にはこれまで実施した照射試験結果と使用指針のユーザが実施する試験結果を比較可能とするために、線量の換算等の考え方について明確にする必要があるとコメントを頂いた。

簡易遮へい評価手法については、今回設定した計算条件ではある程度の適用性が確認されたが、今後使用指針のユーザが環境条件に応じて適用可能な計算手法を示す必要があるとコメント頂いた。また、今回適用方法を検討した点線源及びライン線源以外の実環境に近い体積線源もしくは面線源を対象に簡易遮へい評価手法の適用方法を検討する必要があると考えられた。

故障原因調査については、センサの構成部品である電子素子への照射試験結果及びセンサの耐放射線性と電子素子の耐放射線性の比較結果について、審議した。照射を実施した電子素子とセンサの耐放射線性は同程度のオーダーであり、電子素子の耐放射線性によってセンサの耐放射線性が決定されると考えられた。一方で、測域センサ等に使用されるマイコン、FPGA等については、

耐放射線性データが無く、センサ自身の耐放射線性に対して支配的である可能性があるため、マイコン等の耐放射線性データを取得する必要があるとコメント頂いた。また、使用指針案において、照射試験を実施してセンサの耐放射線性データを取得する際の基準値を示す必要があり、環境条件の整理を含めて、照射試験の要否の考え方を整理する必要があるとコメント頂いた。

11. 今後の課題

本年度までの成果及び技術委員会でのコメントを踏まえ、以下の課題が考えられる。

11.1 マイコン、FPGA の耐放射線性データの取得

センサの構成部品への照射試験によって、構成部品である電子素子の耐放射線性データを取得した。ここで、バイポーラトランジスタ及び MOSFET の耐放射線性が、センサの耐放射線性及び耐放射線性のばらつきに関係していると考えられた。

しかし、測域センサの耐放射線性は、トランジスタの耐放射線性と比較して低い。構成部品調査の中で、測域センサには 32bit マイコン、FPGA が使用されていることを確認しており、こうした構成部品がセンサの耐放射線性に寄与している可能性がある。マイコン等のプログラムが書き込まれるフラッシュメモリは、浮遊ゲート MOSFET と呼ばれるトランジスタを使用しており、浮遊ゲートの情報が書き換えによってプログラム部に異常が生じた場合、センサ全体が誤動作を生じ、故障することが考えられる。また、マイコン等の耐放射線性データについては、知見が少ない。使用指針の中でセンサの構成部品の耐放射線性に着目し、センサの耐放射線性を評価するうえでは、マイコン、FPGA の耐放射線性データの取得が必要であると考えられる。

11.2 簡易遮へい評価手法の適用方法の追加検討

本年度は、点線源及びライン線源を対象に簡易遮へい手法の適用方法を検討した。ここでは線源からの距離及び遮へい体厚さの影響を評価するとともに、過年度までの解析を模擬した計算条件で、QAD 及び手計算手法の適用方法を評価した。

ただし、本年度の適用方法の検討結果は、点線源及びライン線源のみが対象であり、また線源形状、遮へい体構造等も今回評価した計算モデルに対する評価結果である。

実環境として、放射性廃棄物保管庫等を想定すると、線源形状は点線源及びライン線源ではなく、体積線源であることが想定される。そこで、実環境に近い面線源もしくは体積線源を対象に簡易遮へい評価手法の適用方法について検討する必要があると考えられる。

11.3 作動試験における遮へい体構造の影響評価

本年度実施した作動試験では、コンベヤに付随する 2 台の光電センサを対象に試験を実施した。この時、1 台のセンサをカスタマイズし照射を実施しところ、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ないものと比較して 1.9 倍となった。これまでセンサ単体を対象に実施したカスタマイズ試験では、カスタマイズの有無にかかわらず、センサの故障する集積吸収線量は同程度であったため、作動試験における遮へい体の影響評価を実施する必要がある。

11.4 一般産業用工業品の使用指針案の作成

本年度までの照射試験結果及び検討結果を踏まえて、一般産業用工業品の使用指針案を作成する必要がある。使用指針案には、一般産業用工業品を放射線環境下で使用する場合の適用環境の整理方法、センサの耐放射線性の評価方法、センサの耐放射線性データの取得方法、遮へい設計の考え方等を示すことが必要であると考えられる。

12. まとめ

令和6年度は、センサメーカー間のばらつき評価のための耐放射線性データの取得、簡易遮へい評価手法の適用方法検討、故障原因調査の実施及び作動試験の実施を行った。

センサメーカー間のばらつき評価においては、令和2年度に耐放射線性が高いと評価されたメーカーの光電センサ、近接センサ及び測域センサの耐放射線性データを追加取得し、耐放射線性の低いセンサメーカーのセンサの耐放射線性と比較を実施した。比較の結果、光電センサではセンサメーカー間の耐放射線性のばらつきに有意差が確認されたが、近接センサ及び測域センサでは耐放射線性のばらつきに有意差は確認されなかった。

簡易遮へい評価手法の適用方法の検討では、第1回技術委員会でコメントのあったMCNPにおける線量計組成の影響評価を行った。ここでは、集積吸収線量が300Gy以下の時、線量計組成の影響は5%程度であり、測定値との誤差と比較し小さいため、MCNPで解析を行う際には、線量計組成を考慮する必要は無いと評価された。また、簡易遮へい手法であるQAD及び複数の手計算手法について、代表的な簡易計算ケースを対象に計算を実施し、MCNPとの比較を実施した。ここでは点線源及びライン線源を対象とし、線源からの距離及び遮へい体厚さの影響を評価した。遮へい体が無い場合には、QAD、手計算1、手計算2及び手計算3の全てがMCNPと同程度となることを確認した。QADは干渉性散乱を考慮したビルドアップ係数を設定しており、手計算と比較し、保守的な値を示すことを確認した。遮へい体がある場合には、MCNPと比較し、QAD及び手計算1で約20%、手計算2で約10%、手計算2で3%保守的な値を示すことを確認した。さらに、昨年度までの遮へい解析を模擬した計算を行った。計算の結果、QADでは、MCNPとの誤差が15%以内となり、手計算1及び手計算2では、計算条件によっては、15%以上、手計算3では、1ケースが46%保守的な値、他の1ケースで13%非保守的な値となった。計算手法の持つ保守性に加えて、ライン線源を点線源で模擬すること、遮へい体通過領域の設定により、誤差が増加することを確認した。ただし、今回の評価結果は、過去の解析を模擬した条件における結果である。実環境の線源は、点線源及びライン線源ではなく、体積線源もしくは面線源に近いと考えられるため、より実環境に近い線源形状において、簡易遮へい手法の適用方法を検討する必要がある。また、簡易計算手法の適用が可能となるMCNPもしくは測定値とのばらつきの許容値については、センサの使用環境条件、センサの耐放射線性及びセンサに要求される耐放射線性とセンサの交換頻度等によって変わるため、センサの適用方法の検討においては、環境条件についても整理する必要がある。

故障原因調査の実施では、光電センサ及び測域センサの構成部品の調査を行い、構成部品の耐放射線性データを取得した。構成部品の中でも、バイポーラトランジスタ及びMOSFETは、他の構成部品と比較し、耐放射線性が低く、センサの耐放射線性に大きく関係していると考えられる。また、バイポーラトランジスタ及びMOSFETでは、ガンマ線照射に伴う素子間の性能の低下のばらつきが大きくなる傾向も確認されており、センサの故障が生じる集積吸収線量のばらつきに影響しているものと考えられる。

作動試験の実施では、搬送装置としてコンベヤを想定し、光電センサの付随するコンベヤに対して照射を行い、動作及びセンサの出力を確認した。この時、遮へい体を装着したセンサと通常のセンサの2台を同時に照射し、センサの故障への影響を確認した。故障時の挙動については、

同様であったが、遮へい体がある場合、センサの耐放射線性が約 1.9 倍となった。これまでのセンサのカスタマイズ試験では、遮へい体の有無にかかわらず同程度の集積吸収線量で故障していたため、センサのばらつきに含まれるのかもしれないか、もしくは他の要因があるのかは検討が必要である。

また、第 2 回及び第 3 回技術委員会を実施し、本年度の検討結果について審議した。第 2 回技術委員会では、センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果及び線量計素子の解析への影響評価結果をご報告した。センサのばらつきについては、故障メカニズムを考慮する必要がある、故障原因調査結果を踏まえて、審議を続けるものとなった。また、解析における線量計組成の影響については、考慮する必要は無いとコメントを頂いた。第 3 回技術委員会では、故障原因調査結果である構成部品への照射試験結果、簡易遮へい手法の適用方法の検討結果等についてご報告した。構成部品の照射試験については、バイポーラトランジスタ及び MOSFET の耐放射線性がセンサの耐放射線性に影響すると考えられた。しかし、マイコン、FPGA については、耐放射線性データが無い、測域センサ等の耐放射線性を評価するためには、追加データ取得が必要であるとコメントを頂いた。簡易遮へい手法の適用方法については、実環境を考慮した評価を実施する必要があるとコメントを頂いた。ここでは、実環境における線源形状とともに環境条件も重要であると考えられる。使用指針案の作成に向けては、適用環境の環境条件の整理とともに、センサの耐放射線性データを取得する照射試験が必要となる吸収線量の基準についても検討が必要であるとコメントを頂いた。

来年度は、全体計画の最終年度であり、本年度の課題を踏まえて検討を実施したうえで、使用指針案を作成することが必要である。

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-Review2008-012, 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/Code2009-018.
- [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] 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, 神戸製鋼所, 2024.
- [8] 白川誠士ら, 蛍光ガラス線量計の基本特性の検討, 医療と物理 155 (5) : 293-298
- [9] 石川達也ら, 蛍光ガラス線量計の基本特性, JEARI-Tech94-034, 1994/12
- [10] 一般社団法人日本原子力学会 放射線工学部会, 平成29年度 簡易遮蔽解析コードレビューワーキンググループ活動報告書, 平成30年8月
- [11] Toshiyuki IIDA etc., Fusion Neutron Irradiation Effects on Electric Characteristics of Semiconductor Electronic Devices, Journal of Nuclear Science and technology, 21(8), P.634-641, 1984

原子力産業基盤強化事業委託費

第2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

ー第1回技術委員会でのコメント及びその対応ー

2024年12月6日（金）
株式会社 神戸製鋼所

1. 第1回技術委員会でのご指摘事項

2024年2月5日（月）に実施した第1回技術委員会では、本委員会で策定予定の使用指針の概要及び照射試験結果を中心とした本委託の成果について、ご報告を行い、審議を行った。

この中で、今後の課題として考えられるコメント及びご指摘事項と、その対応策を以下に示す。

<使用指針案に関するコメント>

No.	コメント及びご指摘事項	対応方法案
1	実効線量（Sv）と吸収線量（Gy）の換算の考え方について、使用指針案に明記すること。	令和7年度の使用指針案策定の際、両者の違い及びその換算について明記する形で内容に取り込む。

1. 第1回技術委員会でのご指摘事項

<照射試験結果に関するコメント>

No.	コメント及びご指摘事項	対応方法案
2	照射試験及び解析において、本来は半導体もしくは線量計の吸収線量 (Gy) で評価すべきであるが、現在は空気の吸収線量 (Gy) で評価している。これらの差異について検討すること。	過年度に実施した遮へい計算において、線量計の組成を考慮した再解析を実施し、線量計組成の影響評価を行う。詳細は委員会資料-2にてご報告する。
3	有機導体の絶縁材中の電荷の蓄積、放出挙動等を含む、センサの故障メカニズムについて検討すること。	今年度、センサの構成部品への照射試験及び特性評価を行ったうえで、故障メカニズムの検討を行う。
4	故障メカニズム検討のため、代表的なセンサを分解し、構成部品への照射及び特性試験を実施してはどうか。	拝承 (No.3参照)。
5	照射停止時の耐放射線性への影響評価を実施しているのか。	故障メカニズムを踏まえて、検討を行う。

原子力産業基盤強化事業委託費

第2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-2 —令和6年度試験結果—

2024年12月6日（金）
株式会社 神戸製鋼所

1. 令和6年度の実施内容
2. 第2回技術委員会でのご報告内容
3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果
4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価
5. まとめ・今後の予定

1. 令和6年度実施内容

全体工程及び令和6年度の実施内容を以下に示す。

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						■

1. 令和6年度実施内容

令和6年度の実施内容として、以下4項目を実施する。

＜耐放射線性のデータの追加取得＞

令和2年度の照射試験においてメーカー間の耐放射線性のばらつきが確認されたため、異なるメーカーのセンサに対して照射を行い、耐放射線性を評価する。

＜故障原因調査の実施＞

代表的なセンサ及びセンサを模擬した回路へ照射を行い、故障箇所を確認する。また、部品の耐放射線性データを回路シミュレータに入力し、センサの故障挙動を評価するとともに、故障メカニズムの検討を行う。

＜簡易遮へい評価手法の適用方法検討＞

MCNPによる解析の精度向上のためガラス線量計特性の評価を行う。また、MCNP以外の簡易計算コード、評価式による適用方法を検討する。

＜カスタマイズ*したセンサの作動試験の実施＞

機器に付随するセンサをカスタマイズし、動作を確認する。また、照射中のカスタマイズの有無による機器の挙動の差異を確認する。

*：カスタマイズとはセンサの耐放射線性向上のため、センサの周囲に遮へい体を設置することを示す。

2. 第2回技術委員会での報告内容

第2回技術委員会での報告内容を以下に示す。

<耐放射線性のデータの追加取得>

⇒ 今回、光電センサ、近接センサ及び測域センサについて、センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果をご報告する。

<故障原因調査の実施>

⇒ (第3回技術委員会でご報告予定。)

<簡易遮へい評価手法の適用方法検討>

⇒ 今回、ガラス線量計の組成の影響評価のため、令和3年度に実施した光電センサ及び測域センサの遮へい解析の組成を変更した解析結果をご報告する。

(簡易遮へい評価手法の適用方法の検討等は第3回技術委員会でご報告予定。)

<カスタマイズしたセンサの作動試験の実施>

⇒ (第3回技術委員会でご報告予定。)

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

センサのメーカーによるばらつきに関しては、令和2年度に比較を実施した。

(青字：令和3-5年度に耐放射線性データを取得したメーカー、赤字：本年度データ取得予定のメーカー)

光電センサの試験結果

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<

近接センサの試験結果 (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<

測域センサの試験結果 (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	278 268 238	261 (SD:17.0)
I社	225 278 278	260 (SD:25.0)

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

令和2年度に耐放射線性についてメーカー間の比較評価を実施したが、近接センサ及び測域センサについては、有意差が確認されなかった。また、50Gy/hの耐放射線性データしか取得していないため、本年度の試験では、50Gy/hに加えて、100Gy/hのデータの追加取得を行った。

光電センサでは、令和2年度にメーカー間の有意差が確認されたが、サンプル数が3と少なかったため、50Gy/h、100Gy/hで追加データ取得を行った。

以下に、これまで試験を実施したメーカー及び今年度試験を実施したメーカーを示す。

センサ	R3-5年度にデータを取得し 照射パラメータの影響を評価したメーカー	今年度照射試験を実施したメーカー
光電センサ	A社	C社
近接センサ	D社	E社
測域センサ	H社	I社

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

耐放射線性のメーカー影響の評価のための照射試験条件を以下に示す。

センサ	メーカー	試験条件			最大照射時間 [h]	照射上限 [Gy]
		想定照射線量率 [Gy/h]	電圧 [V]	サンプル数		
光電センサ	C社	50	24	5	40	2000
		100	24	5	20	2000
近接センサ	E社	50	24	5	60	3000
		100	24	5	30	3000
測域センサ	I社	50	24	3	8	400
		100	24	3	4	400

<試験場所>

量子科学技術研究開発機構 高崎量子技術基盤研究所 ガンマ線照射施設

<試験方法>

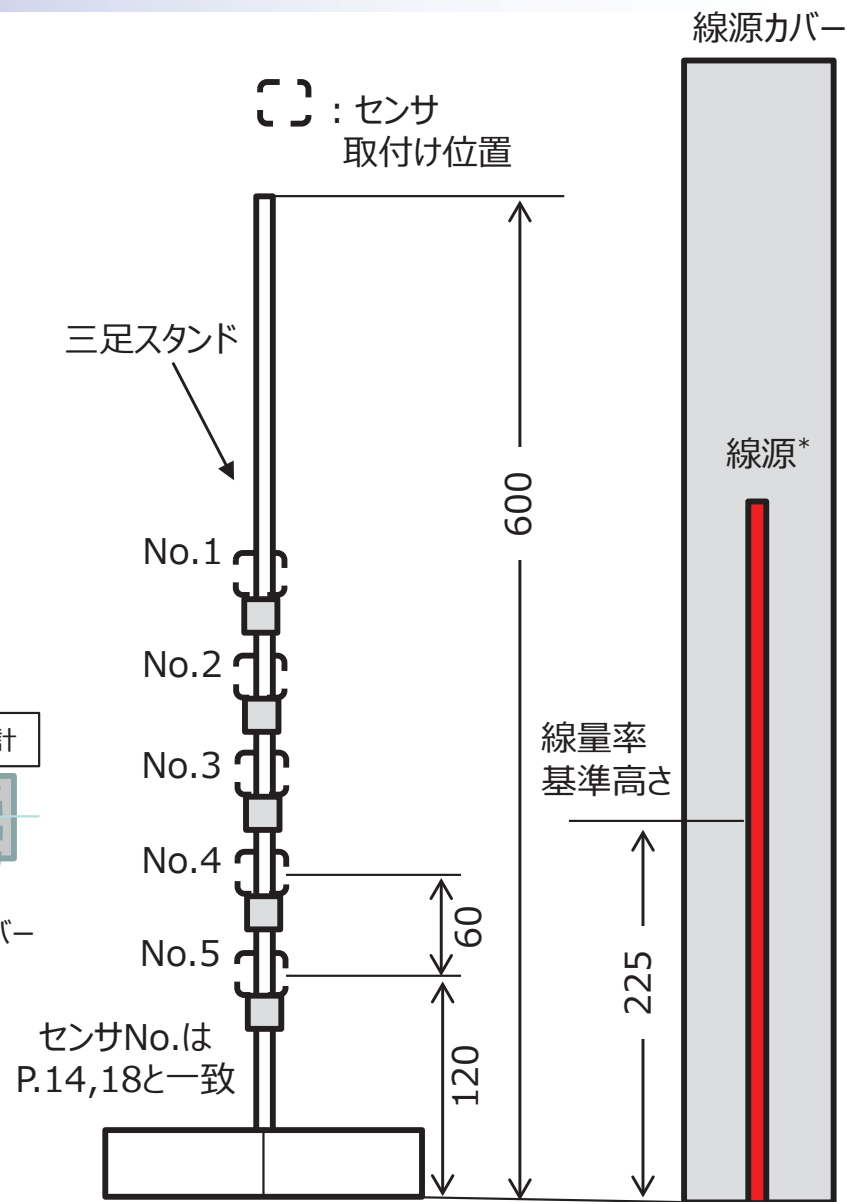
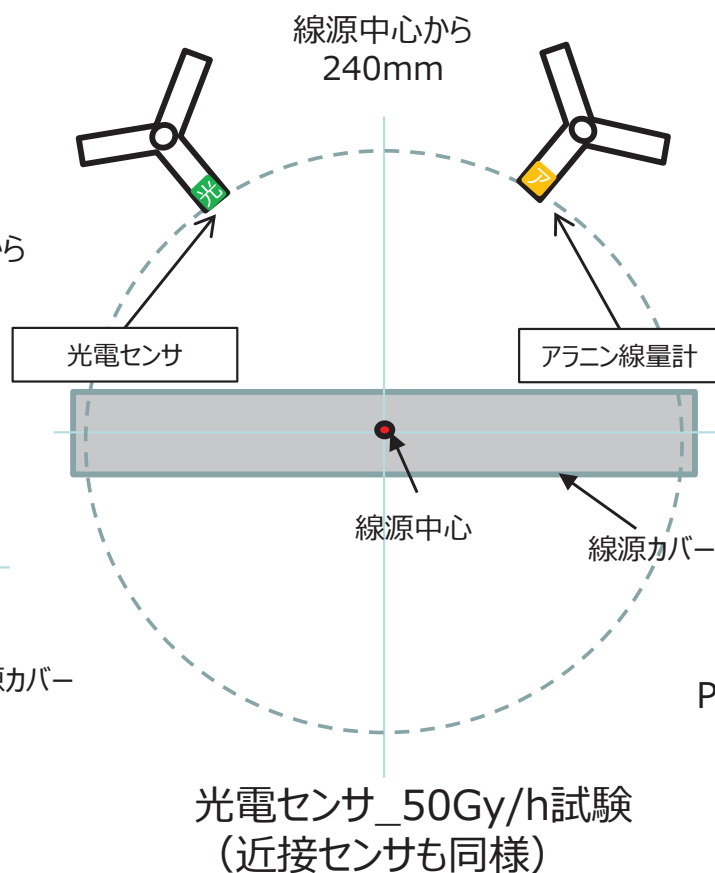
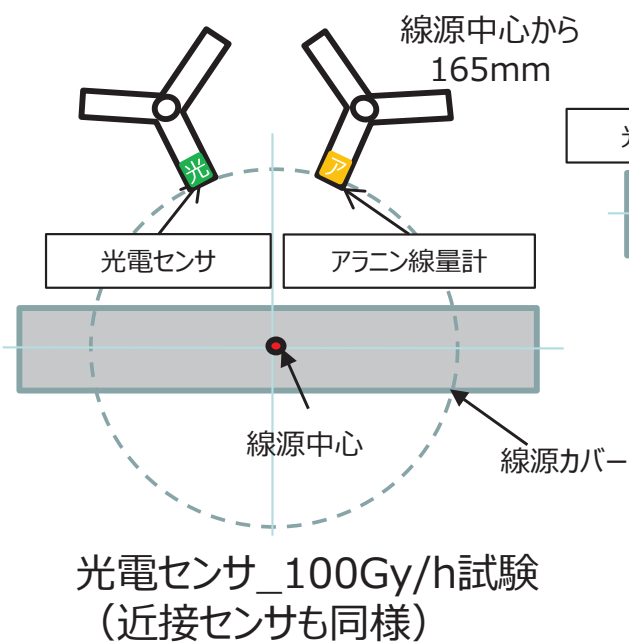
- 以下の検知時の出力データを記録した。
光電センサ及び近接センサ→出力電圧、測域センサ→距離データ
- 光電センサ及び近接センサでは50Gyもしくは100Gyごとに検知/非検知状態の動作確認を実施した。

<試験終了条件>

- 検知状態の出力データを連続記録し、検知時の出力データの異常（電圧の0V付近までの低下もしくは距離データの測定異常）もしくは検知状態の異常をセンサの故障とし、試験を終了した。

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

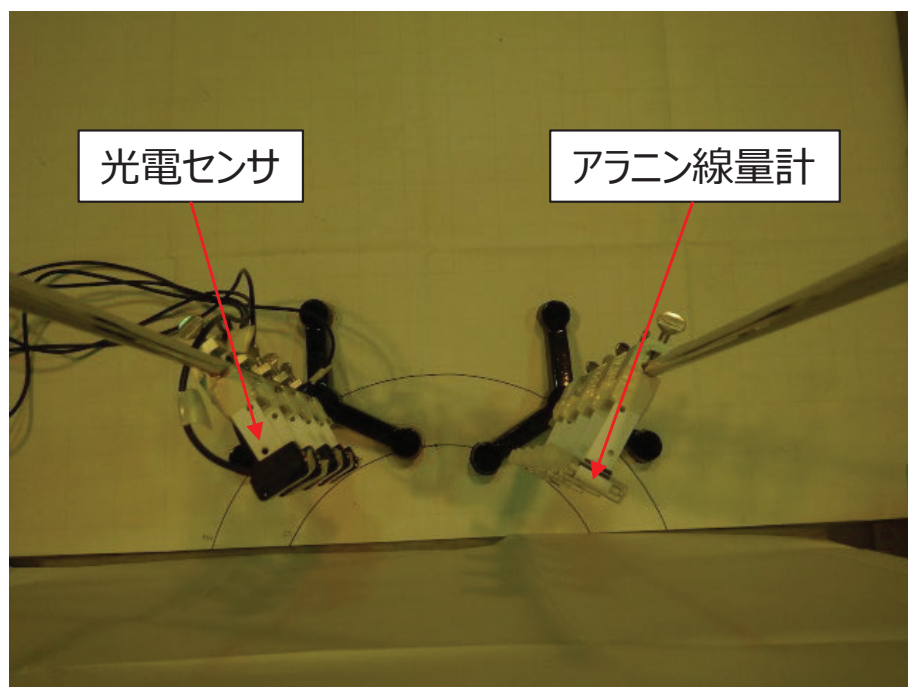
照射試験場におけるセンサの配置図を以下に示す。
 光電センサ及び近接センサはスタンドに設置し、
 5台同時に照射を行った。



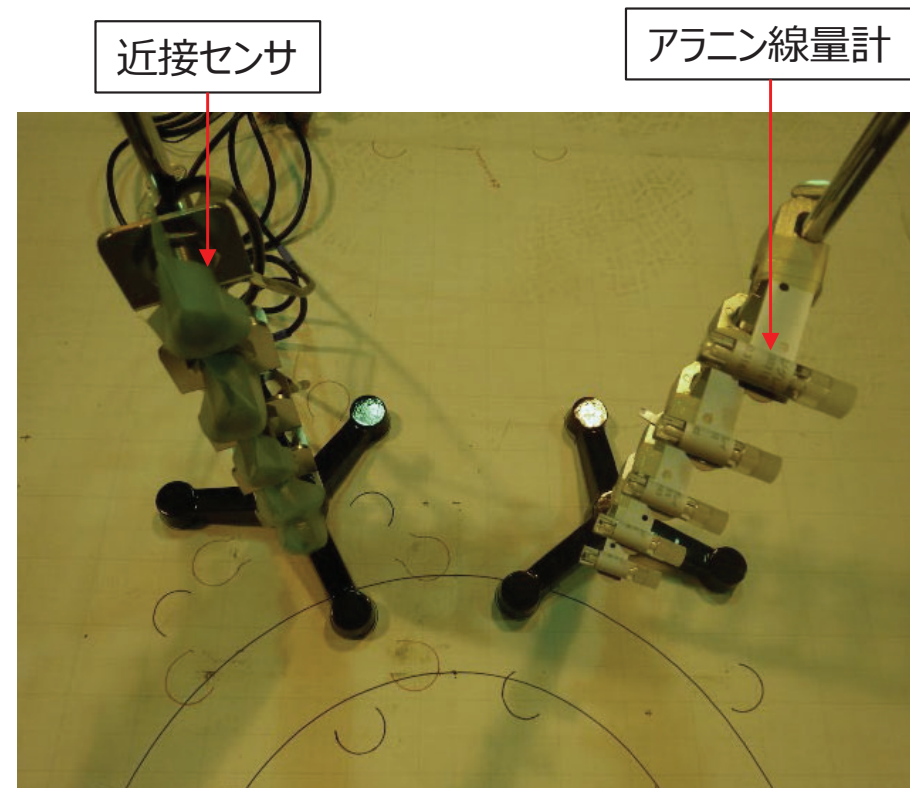
*線源情報は不明のため、イメージを記載
 線量率基準高さを参考にセンサの設置高さを決定

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

光電センサ及び近接センサの試験時の様子を以下に示す。



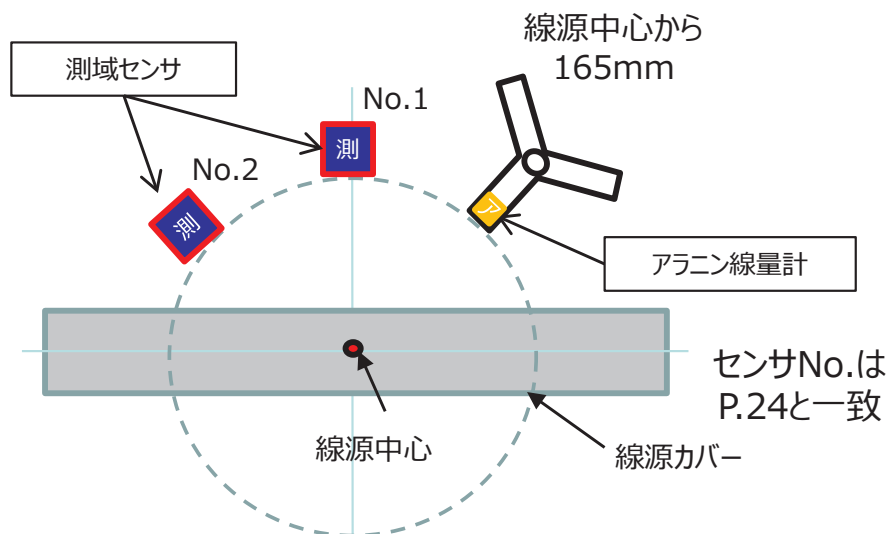
光電センサ_100Gy/h試験の様子



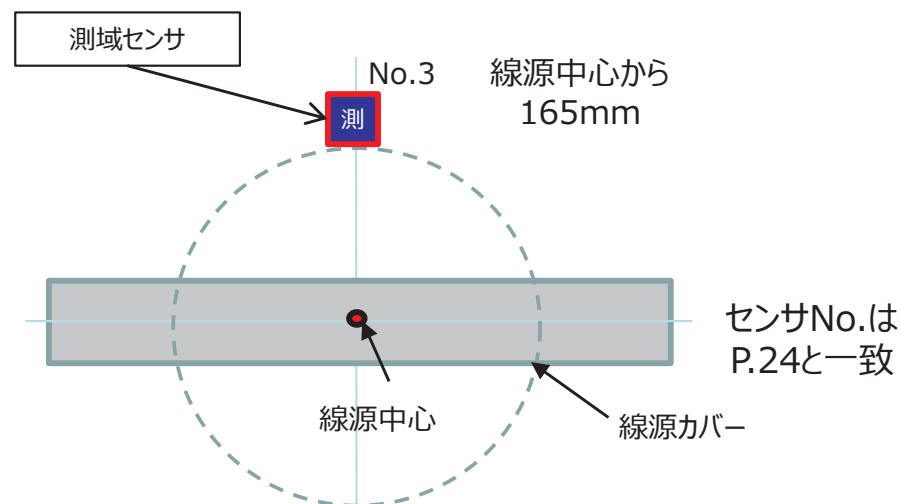
近接センサ_50Gy/h試験の様子

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

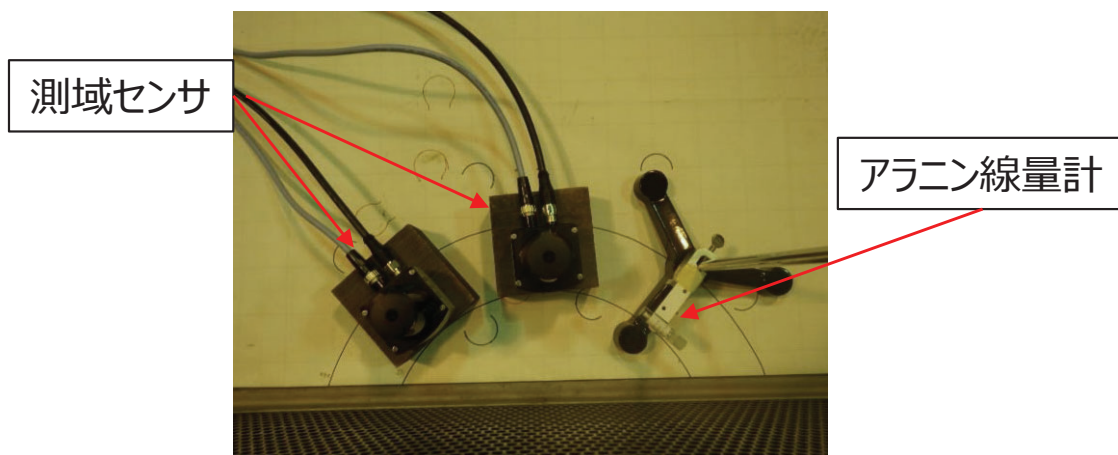
照射試験場におけるセンサの配置図及び照射時の様子を以下に示す。
測域センサは木片上に設置し、2台同時もしくは1台で照射を行った。



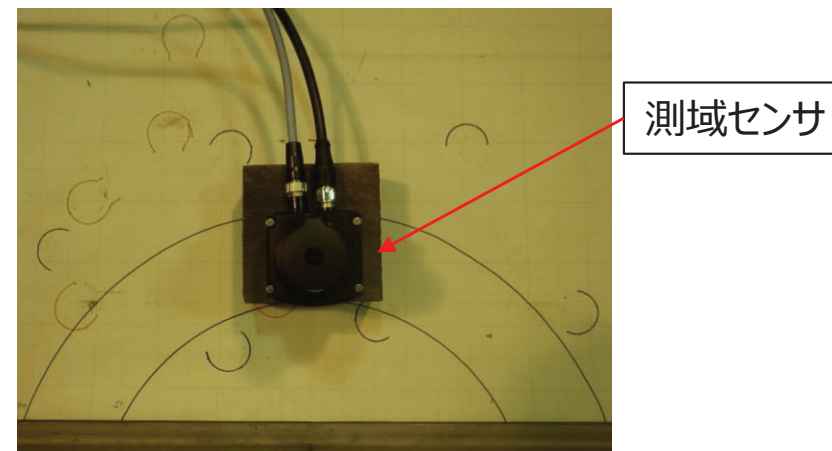
測域センサ_100Gy/h試験：No.1,2の配置
(50Gy/h試験は距離を変更)



測域センサ_100Gy/h試験：No.3の配置
(50Gy/h試験は距離を変更)



測域センサ_100Gy/h試験の様子：No.1,2



測域センサ_100Gy/h試験の様子：No.1,3

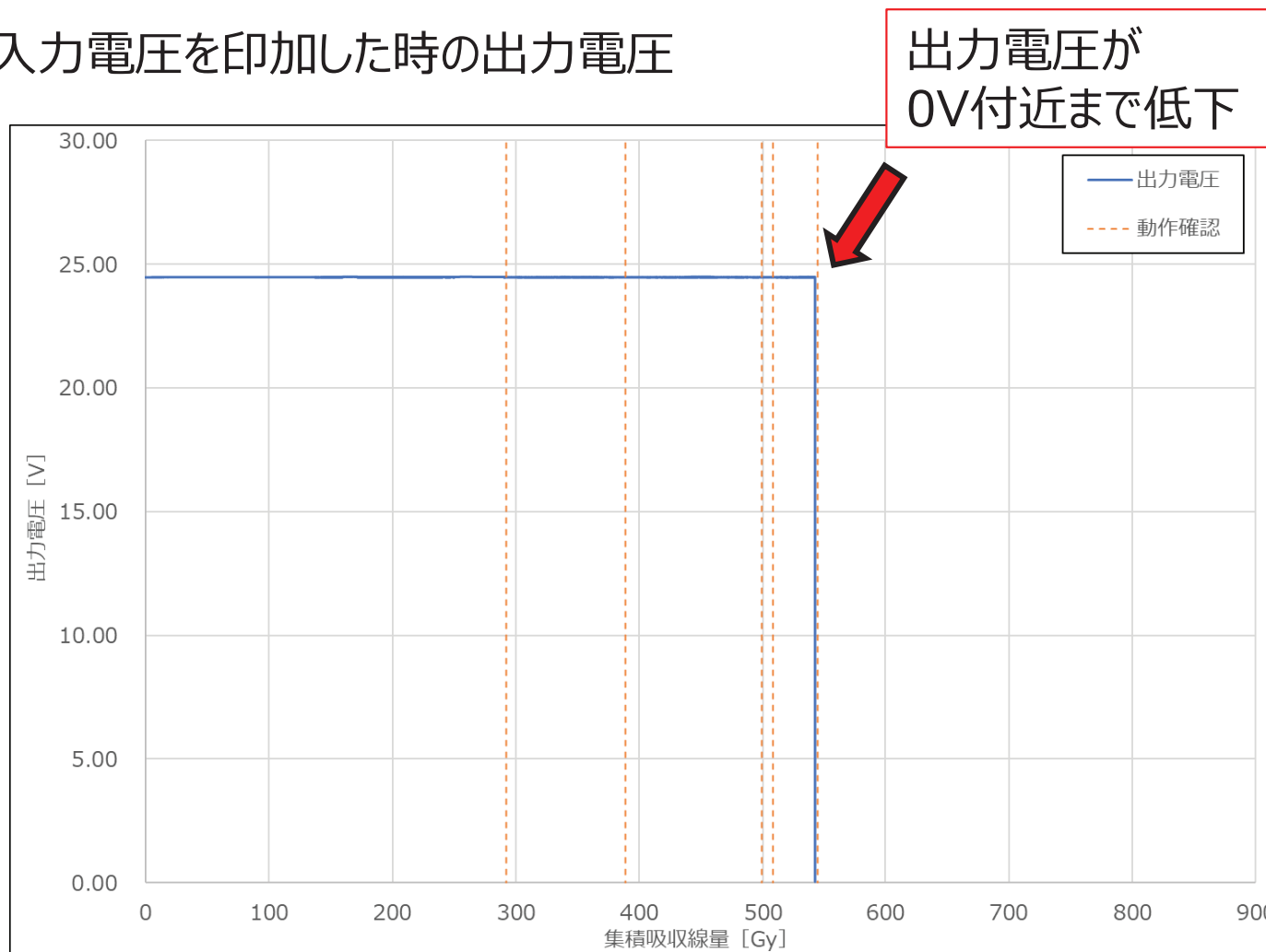
3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<故障挙動>

昨年度確認された光電センサの故障時に発生する典型的な挙動を以下に示す。

- ① 検知時の出力電圧*（約24V）が非検知時と同様の0V付近まで低下

*：24Vの入力電圧を印加した時の出力電圧

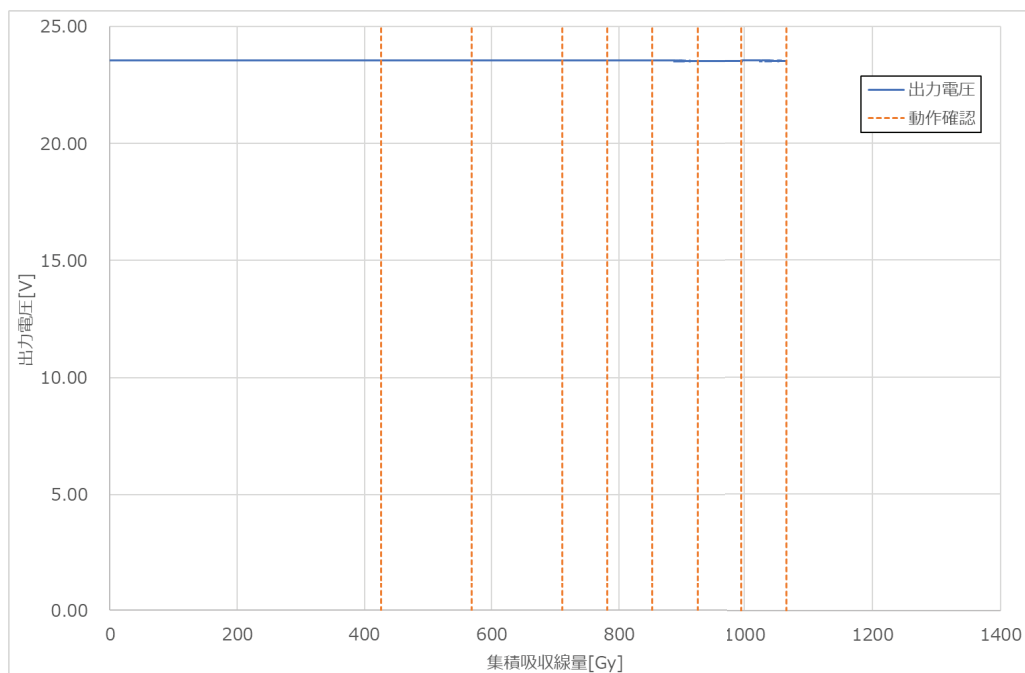


3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

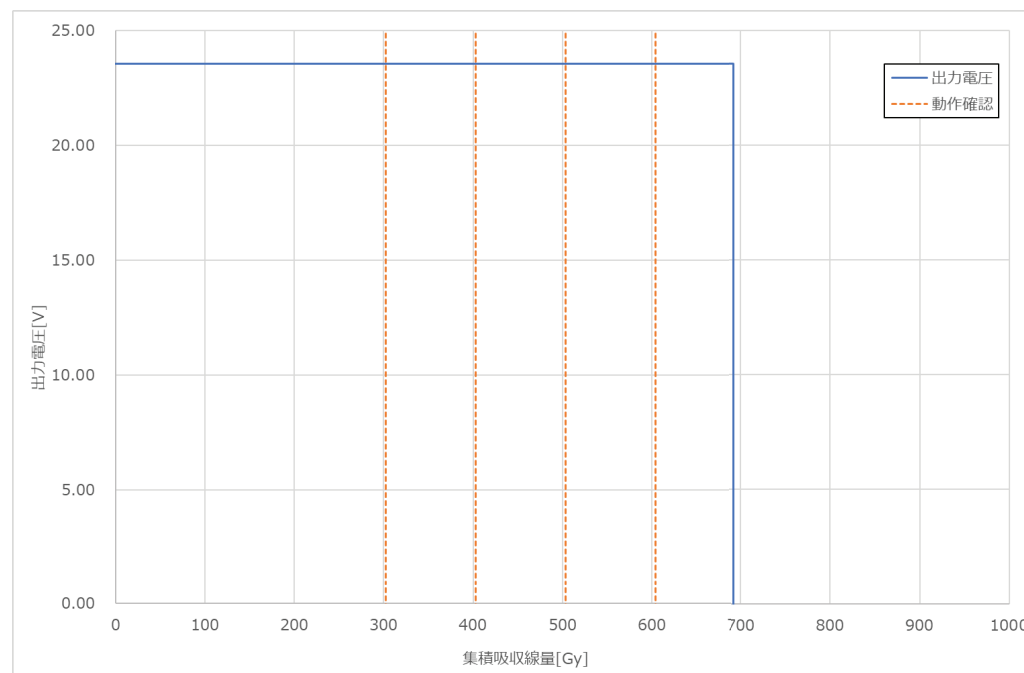
<試験結果>

光電センサの照射中の出力電圧の変化を以下を示す。

本年度実施した50Gy/h試験では、動作確認時の検知異常が発生する事象が多く確認され、100Gy/h試験では故障時、出力電圧が0V付近まで低下する事象が多く確認された。



50Gy/h試験
No.3の例



100Gy/h試験
No.3の例

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<試験結果>

光電センサの照射試験結果を以下に示す。

なお、ここでは動作確認で正常な動作を確認した最大集積吸収線量を示す。

光電センサ No.	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量[Gy]	故障時の挙動
1	51	811	959 SD:92.4	動作確認時の検知異常
2	72	1080		動作確認時の検知異常
3	71	995		動作確認時の検知異常
4	72	1005		動作確認時の検知異常
5	70	904		出力電圧が0V付近まで低下

光電センサ No.	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量[Gy]	故障時の挙動
1	92	646	660 SD:39.6	出力電圧が0V付近まで低下
2	101	604		出力電圧が11V付近まで低下
3	107	643		出力電圧が0V付近まで低下
4	114	686		出力電圧が0V付近まで低下
5	103	720		出力電圧が0V付近まで低下

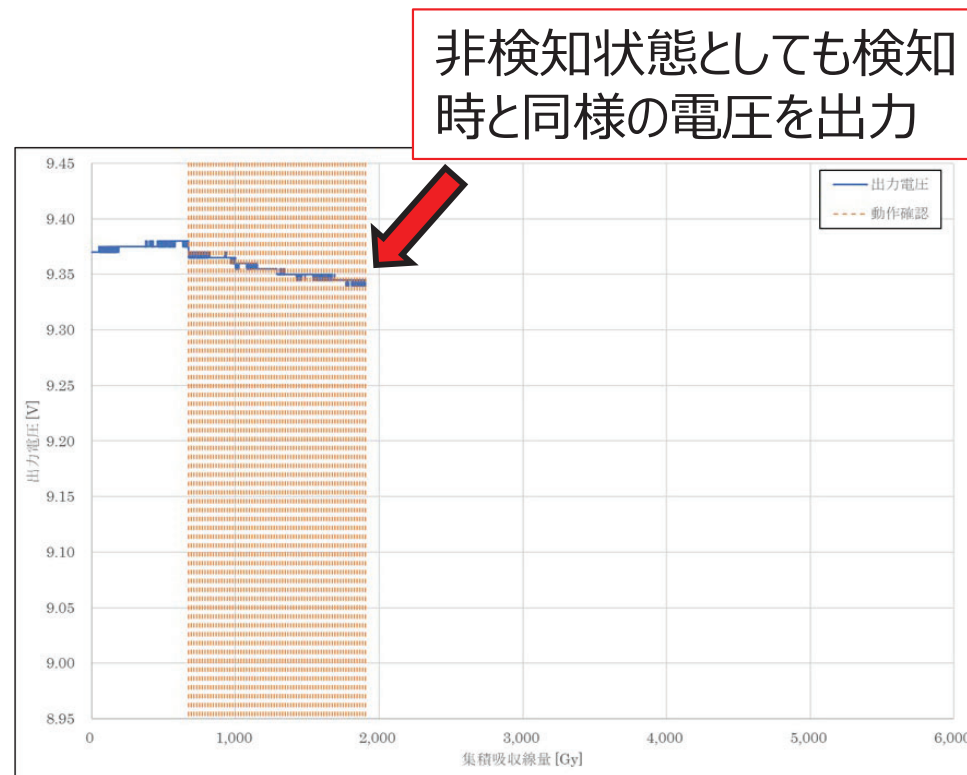
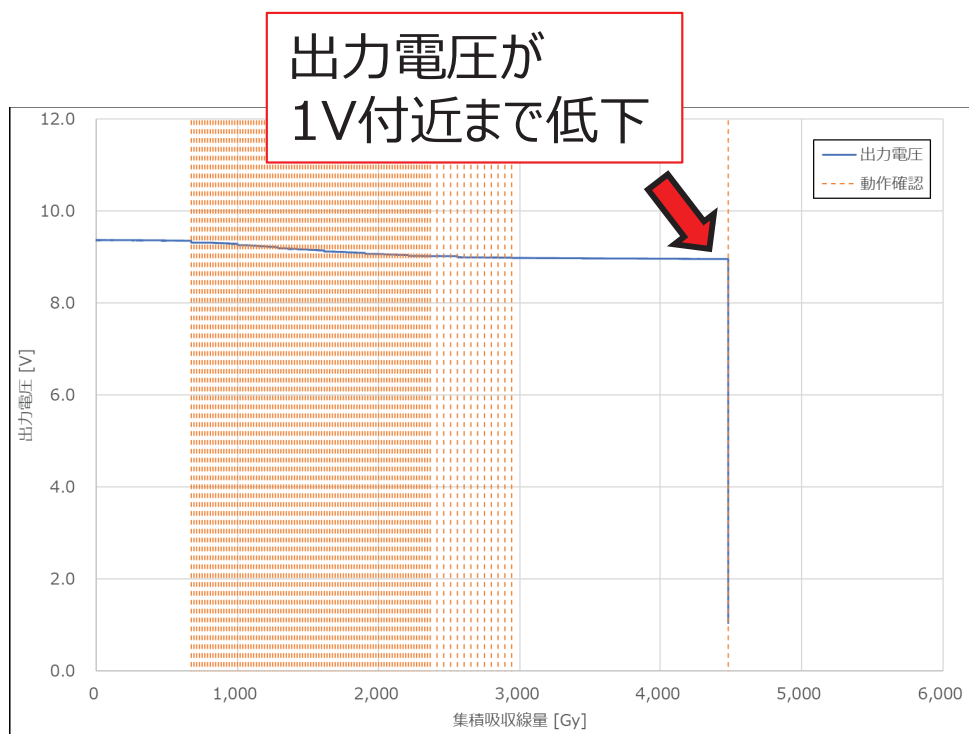
3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<故障挙動>

昨年度確認された近接センサの故障時に発生する典型的な挙動を以下に示す。

- ① 検知時の出力電圧*（約9V）が非検知時と同様の1V付近まで低下
- ② 動作確認時に非検知状態としても検知時の出力電圧を示す検知異常

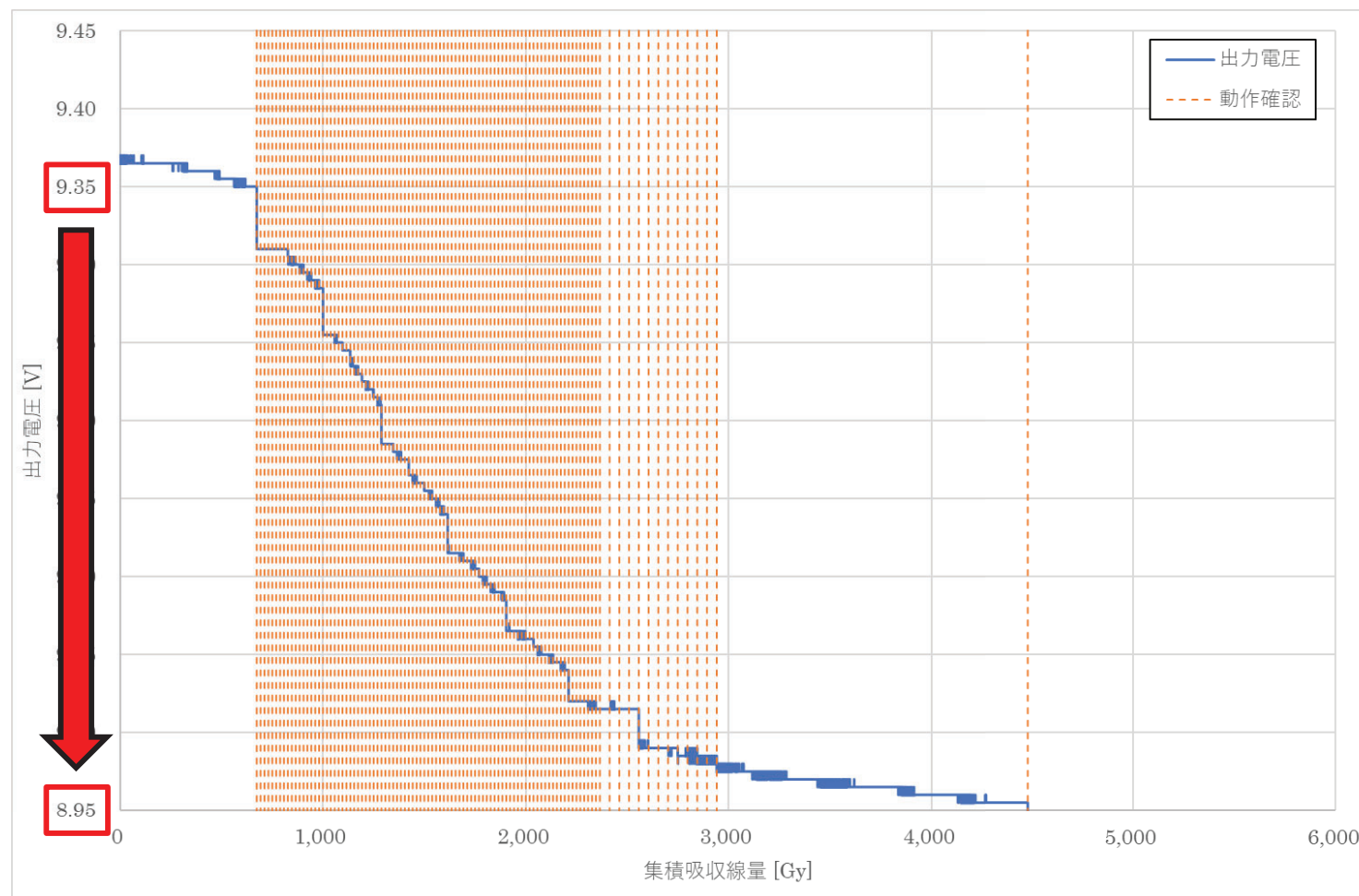
* : 12Vの入力電圧を印加した時の出力電圧



3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<試験結果>

また、昨年度の試験においては、近接センサは故障前に、動作確認では正常な検知状態を示すが、照射に伴い、出力電圧が0.2-0.4V程度低下する事象が確認された。



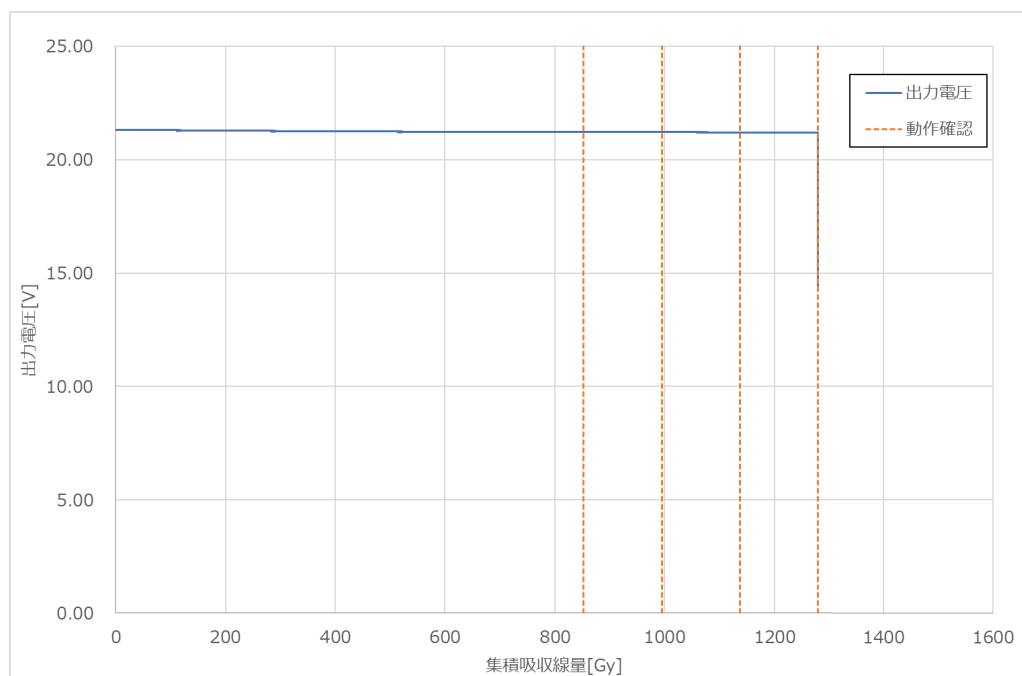
出力電圧が
0.4V程度低下

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

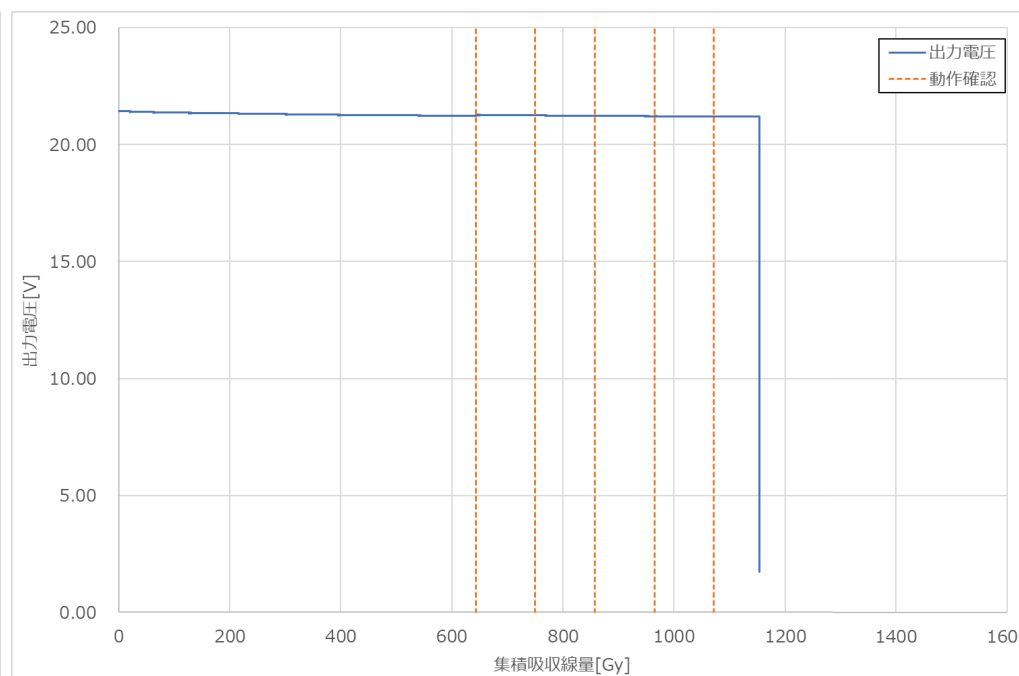
<試験結果>

近接センサの照射中の出力電圧の変化を以下を示す。

本年度実施した50Gy/h試験、100Gy/h試験ともに、検知時の出力電圧が低下する事象が確認された。



50Gy/h試験
No.3の例



100Gy/h試験
No.3の例

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<試験結果>

近接センサの照射試験結果を以下に示す。

なお、ここでは動作確認で正常な動作を確認した最大集積吸収線量を示す。

近接センサ No.	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量[Gy]	故障時の挙動
1	51	1065	1208 SD:91.8	検知時の出力電圧が約2V付近まで低下
2	72	1295		検知時の出力電圧が14V付近まで低下
3	71	1137		検知時の出力電圧が14V付近まで低下
4	72	1292		検知時の出力電圧が14V付近まで低下
5	70	1252		検知時の出力電圧が14V付近まで低下

近接センサ No.	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量[Gy]	故障時の挙動
1	92	1431	985 SD:274	検知時の出力電圧が14V付近まで低下
2	101	1007		検知時の出力電圧が14V付近まで低下
3	107	1072		検知時の出力電圧が約2V付近まで低下
4	114	800		検知時の出力電圧が約17V付近まで低下
5	103	617		検知時の出力電圧が14V付近まで低下

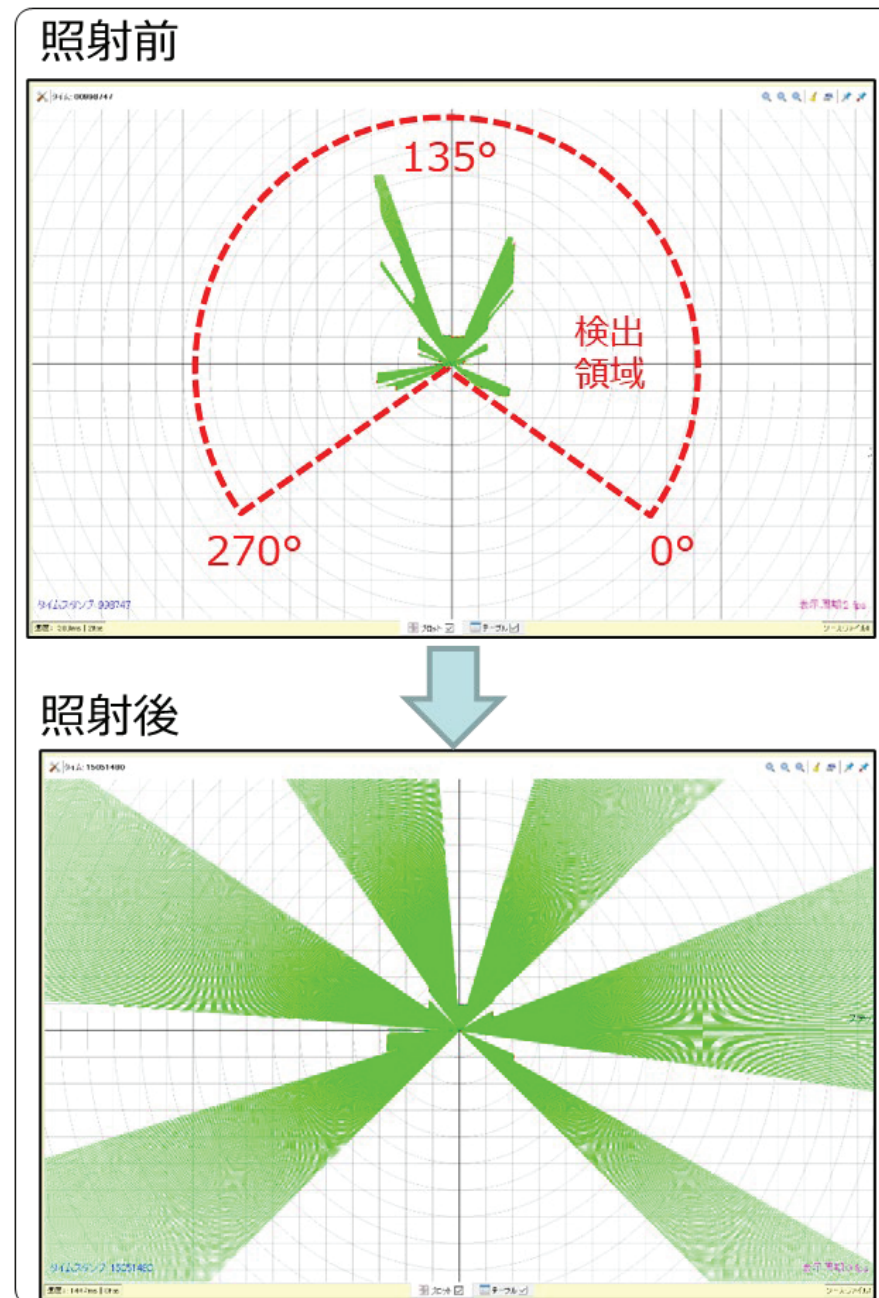
3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<故障挙動>

昨年度確認された測域センサの故障時に発生する典型的な挙動を以下に示す。

- ① 検出距離が検出上限（65533mm）を示す

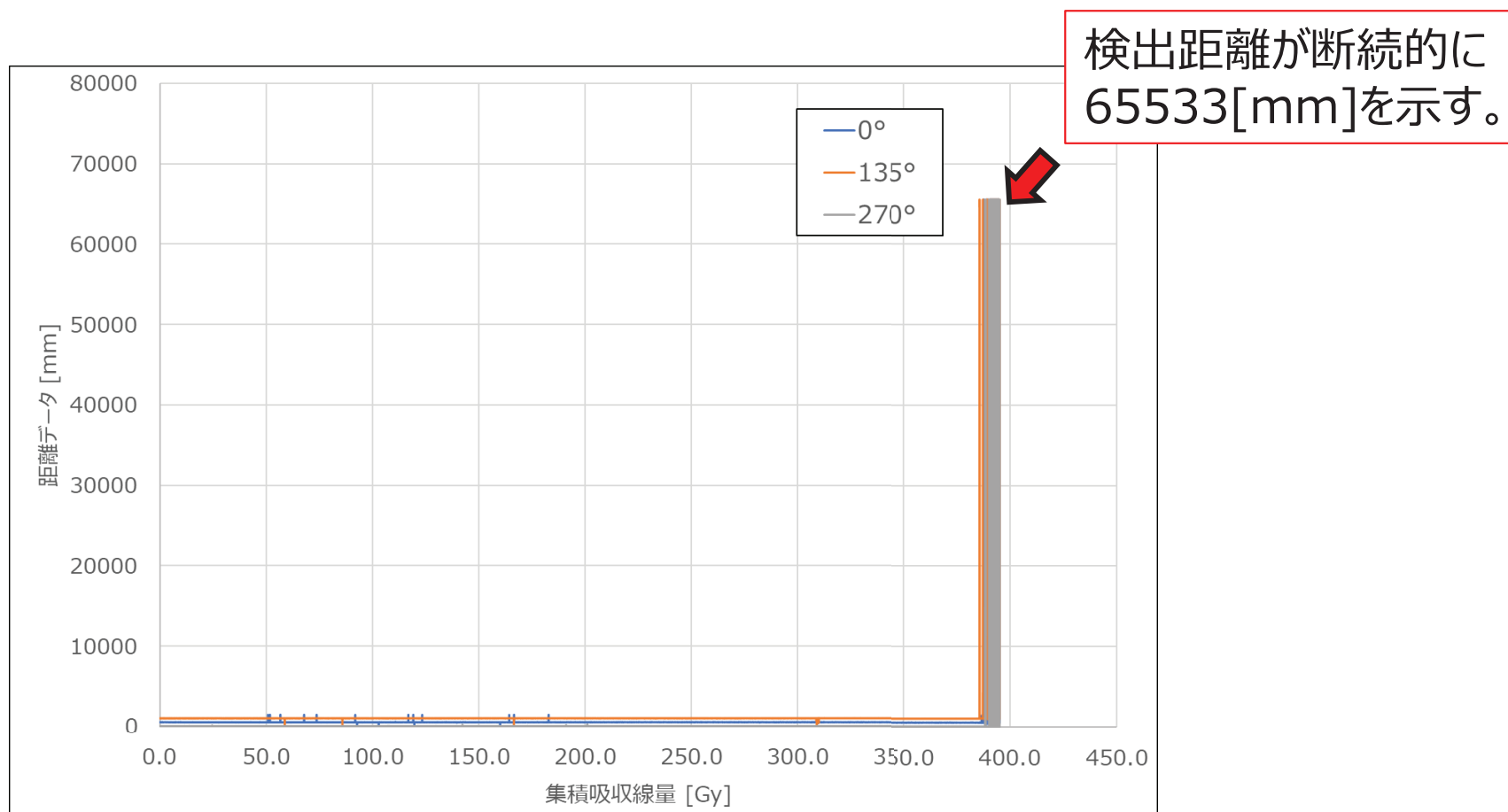
測域センサでは右図のような画面で測定距離を確認できるが、故障時には正常な距離の測定ができなくなっていることが分かる。



3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<故障挙動>

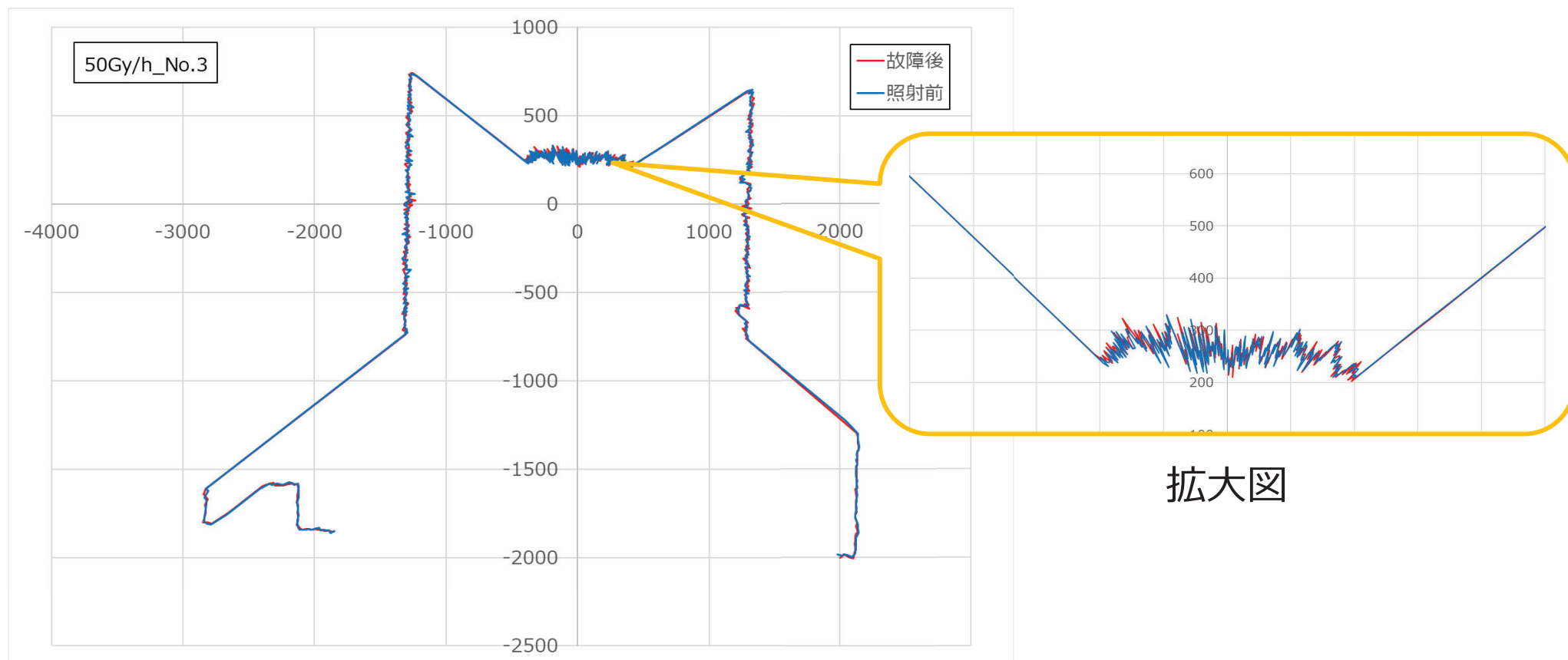
また、昨年度の試験における測域センサの特定の測定位置の検出距離データを以下に示す。センサ故障時には、各測定位置の検出距離が65533[mm]を示し、正常な距離の検出ができなくなることが分かった。



3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<試験結果>

測域センサの50Gy/h試験における距離データの例を示す。
今年度の試験では、照射前後で大きく検出距離が変化することは無かった。



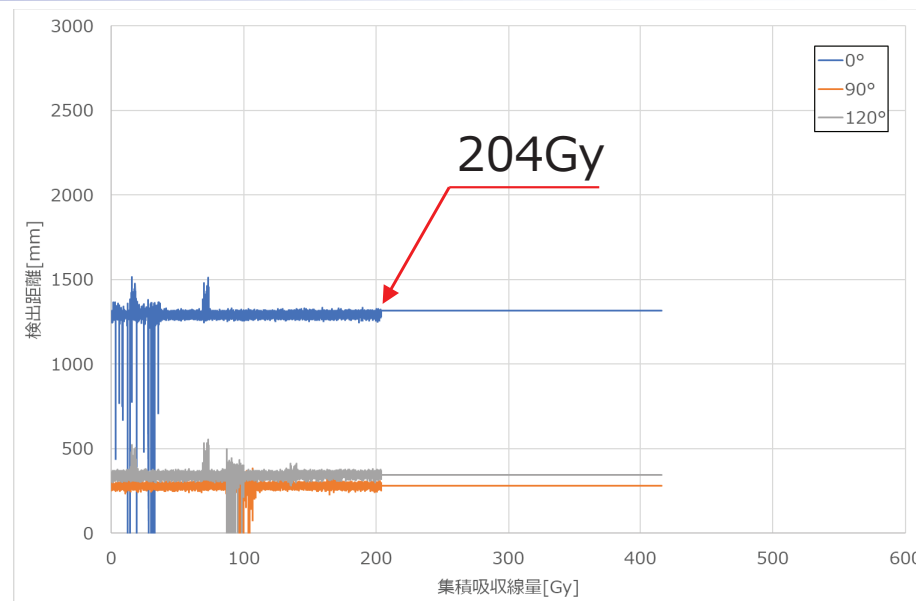
測域センサの距離データ (No.3の例)

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

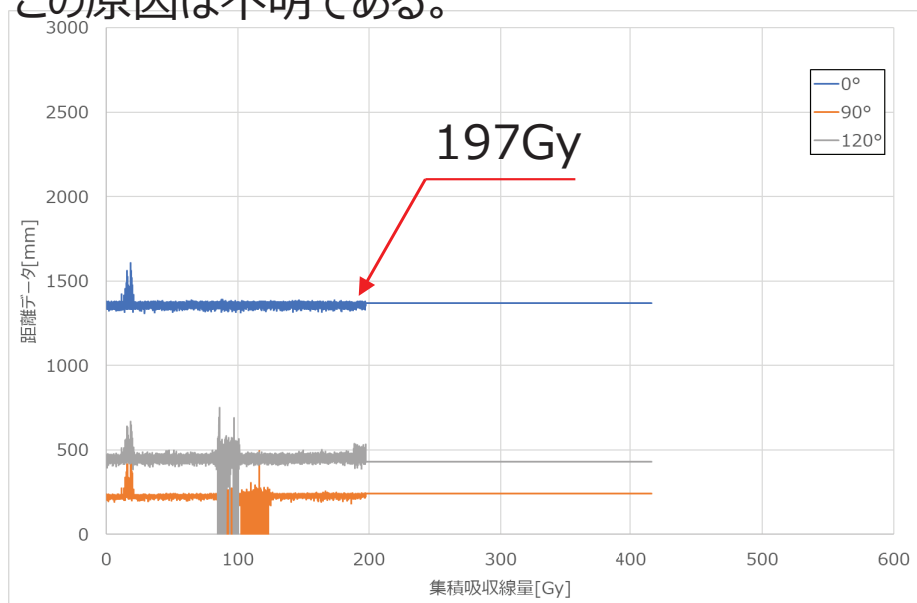
<測域センサ50Gy/h試験>

測域センサの50Gy/h試験における距離データの変化を示す。本年度実施した試験では、距離データが一定になる事象が確認され、その後照射を停止しセンサとの接続を解除すると再接続できなくなり、データ取得ができない状態となった。ここでは、距離が一定になった状態を故障と定義した。

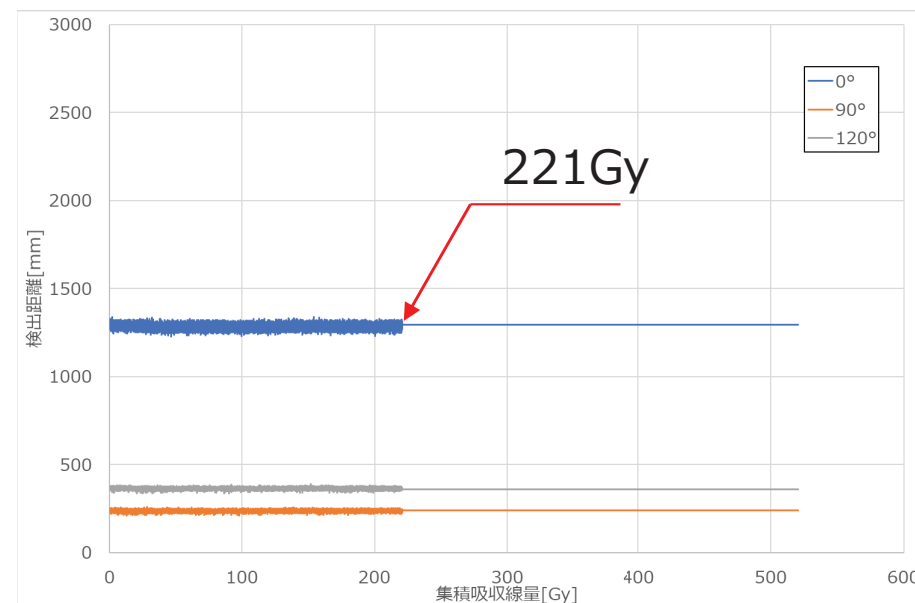
なお、No.1及びNo.2では故障（距離データが一定になる）前に距離データのばらつきが確認されたが、この原因は不明である。



No.1



No.2

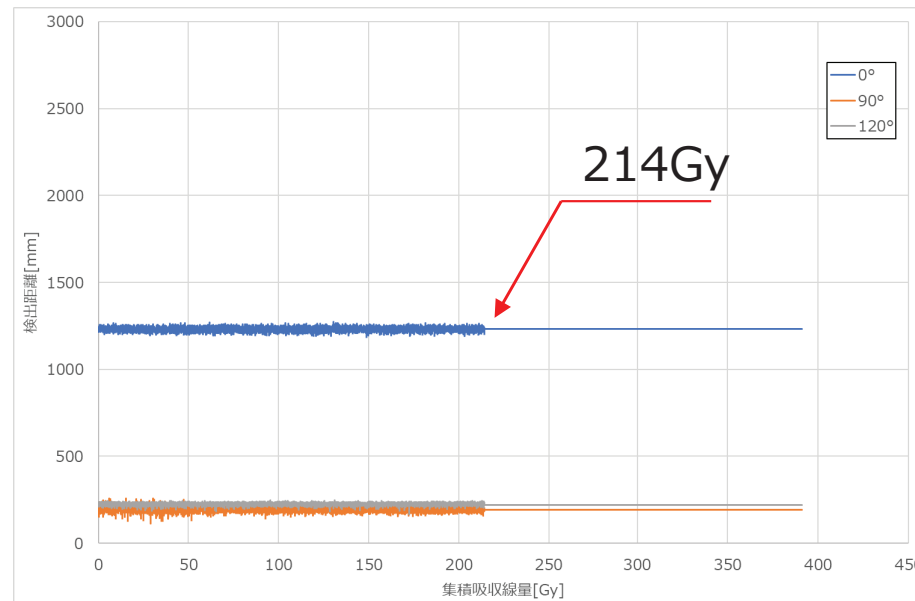


No.3

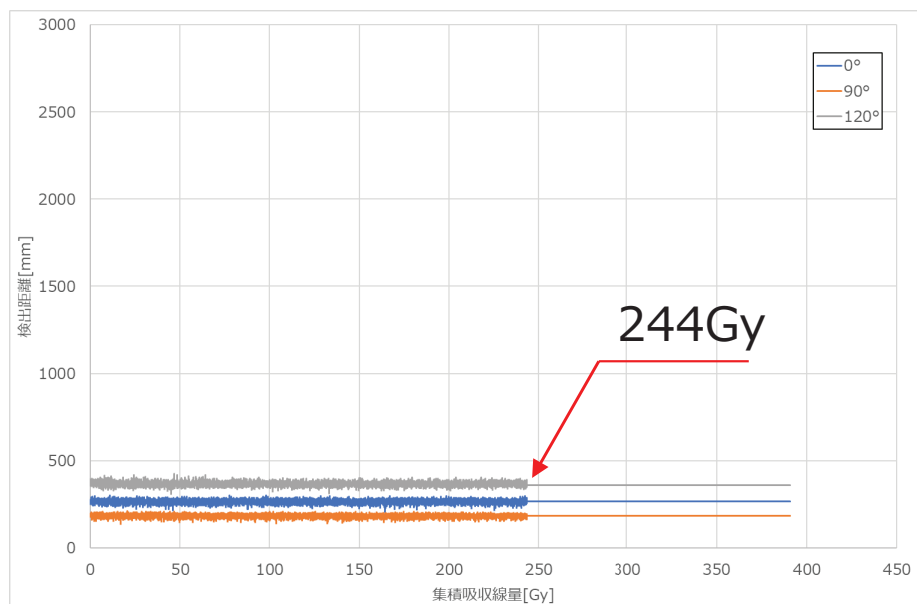
3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<測域センサ100Gy/h試験>

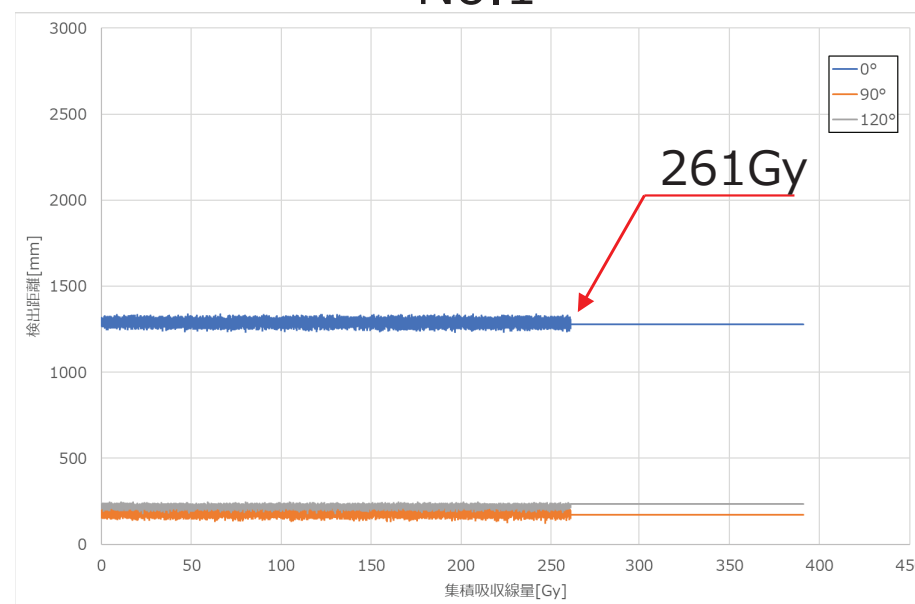
測域センサの100Gy/h試験における距離データの変化を示す。
50Gy/hと同様に、距離データの出力が一定になる事象が確認された。



No.1



No.2



No.3

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

<試験結果>

測域センサの照射試験結果を以下に示す。

なお、ここではセンサが故障し、距離データの出力が一定になった集積吸収線量を示す。

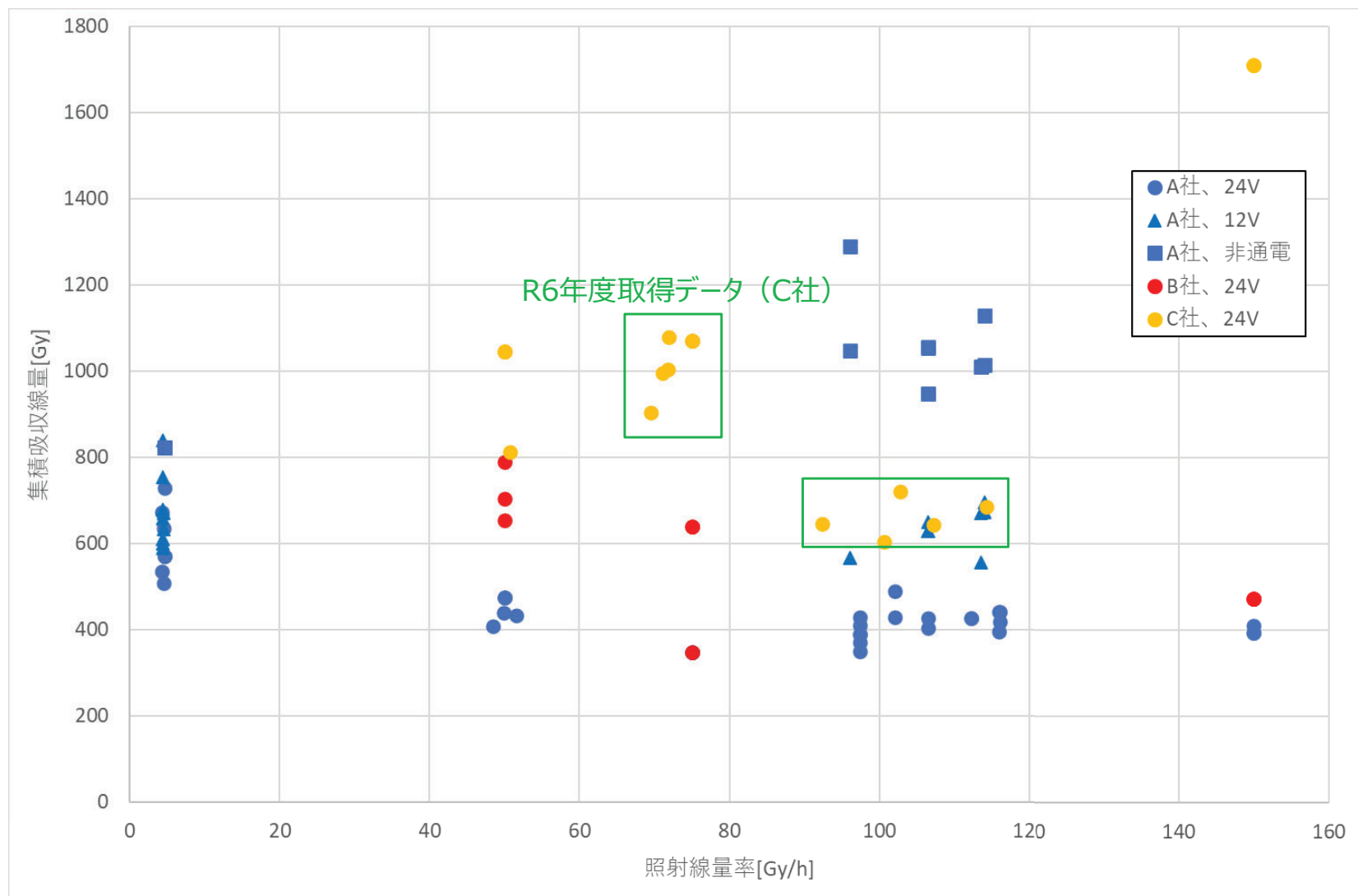
測域センサ No.	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量[Gy]	故障時の挙動
1	52	204	207 SD:9.8	距離データの出力が一定
2	52	197		距離データの出力が一定
3	52	221		距離データの出力が一定

測域センサ No.	照射線量率 [Gy/h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量[Gy]	故障時の挙動
1	98	214	240 SD:19.3	距離データの出力が一定
2	98	244		距離データの出力が一定
3	98	261		距離データの出力が一定

3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

昨年度までの試験結果との比較を以下に示す。

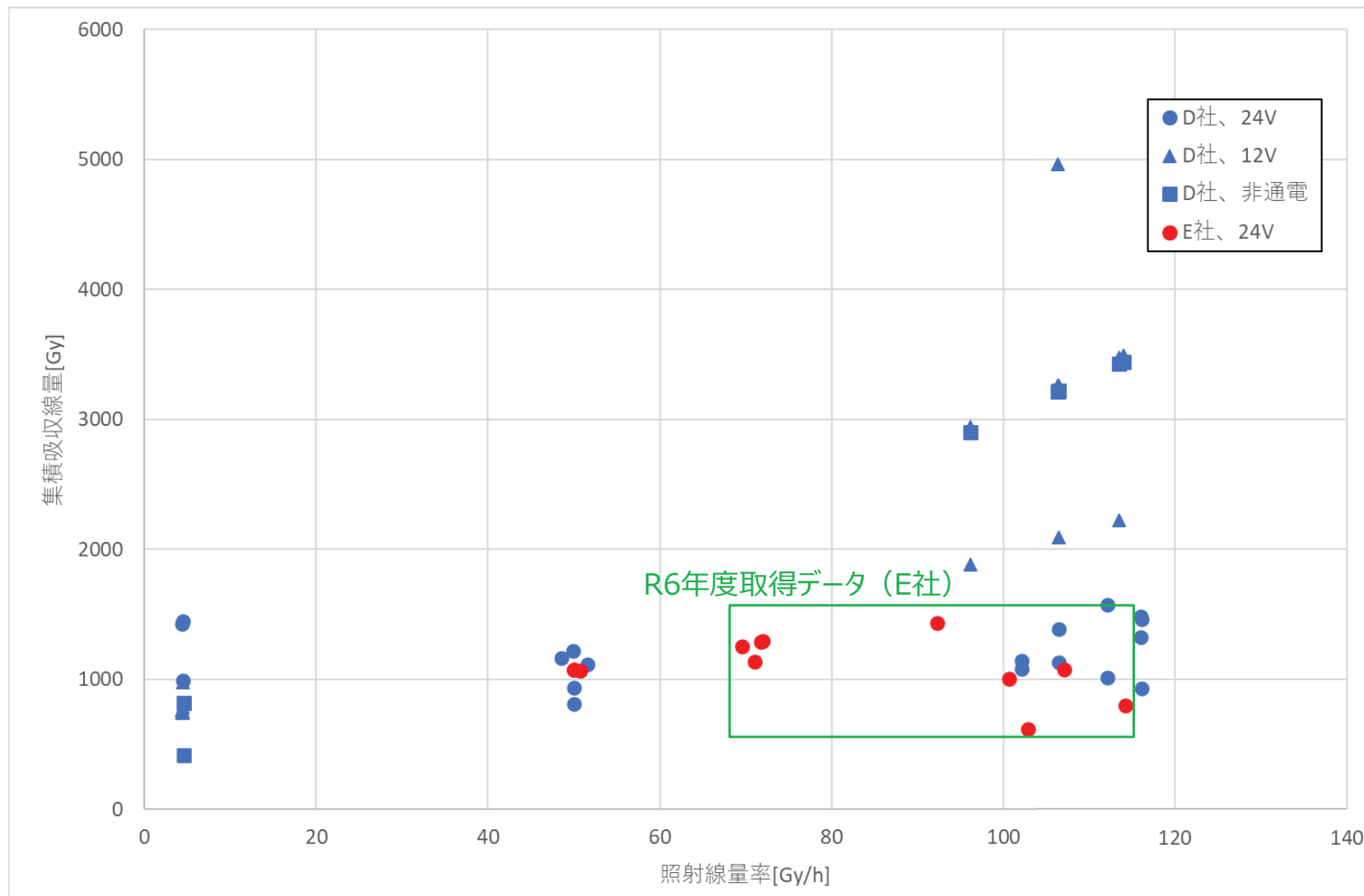
<光電センサ>



3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

昨年度までの試験結果との比較を以下に示す。

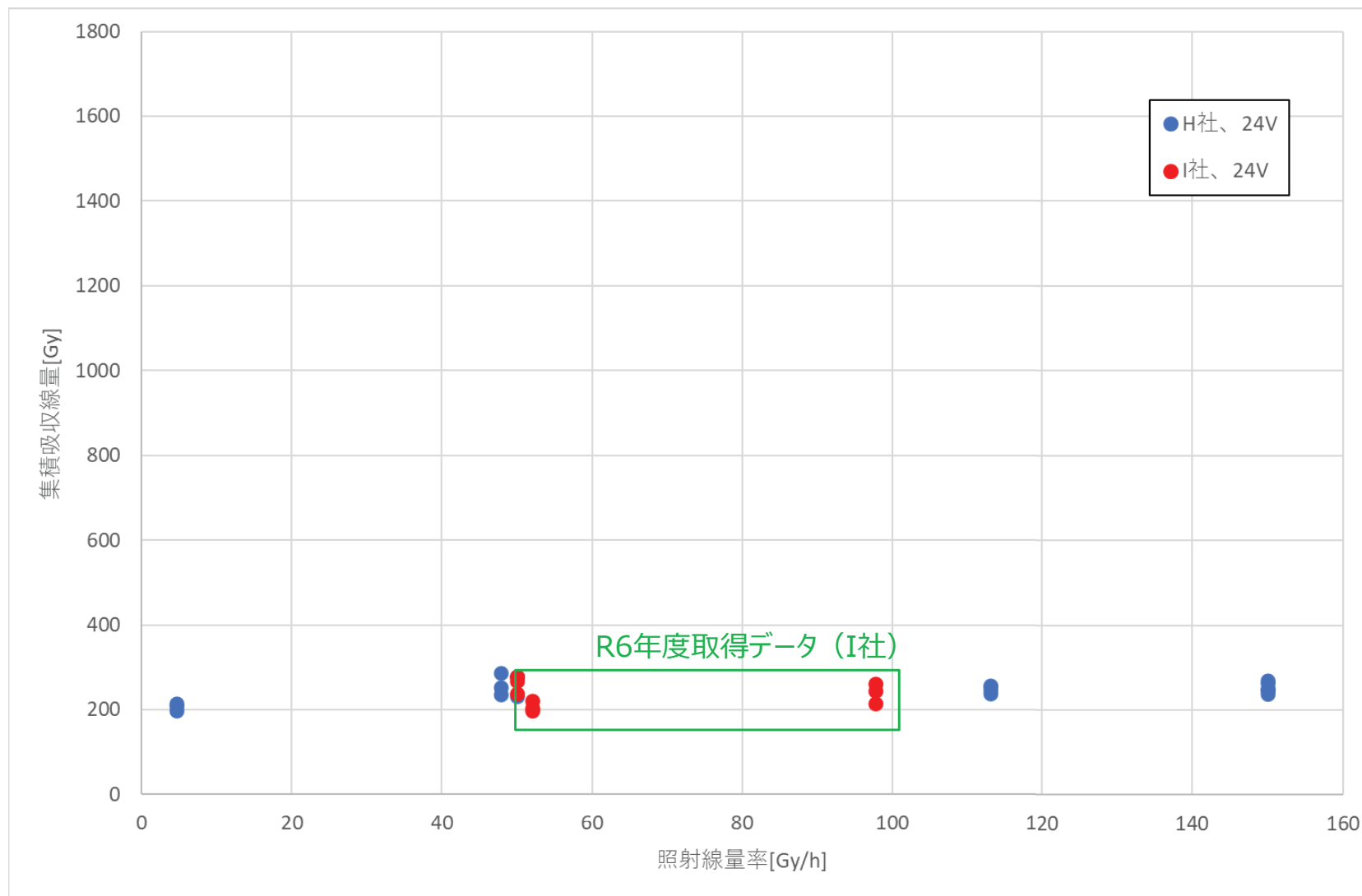
<近接センサ>



3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

昨年度までの試験結果との比較を以下に示す。

<測域センサ>



3. センサメーカーによる耐放射線性のばらつきの評価結果

センサメーカー間の耐放射線性のばらつきの評価を行った。

この時、既往研究において、非通電状態で機器類の耐放射線性が向上するというデータ*があるため、入力電圧が24Vのデータのみを対象にt検定を実施し、比較評価を実施した。

<光電センサ>

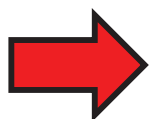
棄却域	t値	p値	評価結果
$ t > 2.01$	-9.07	3.9×10^{-12}	メーカー間で耐放射線性に有意差が認められる

<近接センサ>

棄却域	t値	p値	評価結果
$ t > 2.04$	1.06	0.30	メーカー間で耐放射線性に有意差が認められない

<測域センサ>

棄却域	t値	p値	評価結果
$ t > 2.06$	1.05	0.30	メーカー間で耐放射線性に有意差が認められない



光電センサでは、センサメーカー間の耐放射線性のばらつきが確認された。

* : 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

4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和5年度までに実施したセンサ類の遮へい解析において、MCNPの計算結果と照射試験結果に20%以下の誤差が生じている。令和5年度に実施した第1回技術委員会において、「線量計の組成を考慮せず、空気の換算係数で吸収線量率を算出している計算方法は妥当であるか」とコメントを頂いた。

そこで、令和5年度までに実施した遮へい解析について、線量計の組成を考慮したうえで、再解析を行い、吸収線量率への影響を評価した。

<再解析対象ケース>

カスタマイズ*した光電センサ（100Gy/h）の遮へい解析：令和3年度に実施

カスタマイズした測域センサ（150Gy/h）の遮へい解析：令和3年度に実施

カスタマイズした光電センサ（5Gy/h）の遮へい解析：令和4年度に実施

カスタマイズした測域センサ（5Gy/h）の遮へい解析：令和5年度に実施

*：カスタマイズとはセンサの耐放射線性向上のため、センサの周囲に遮へい体を設置することを示す。

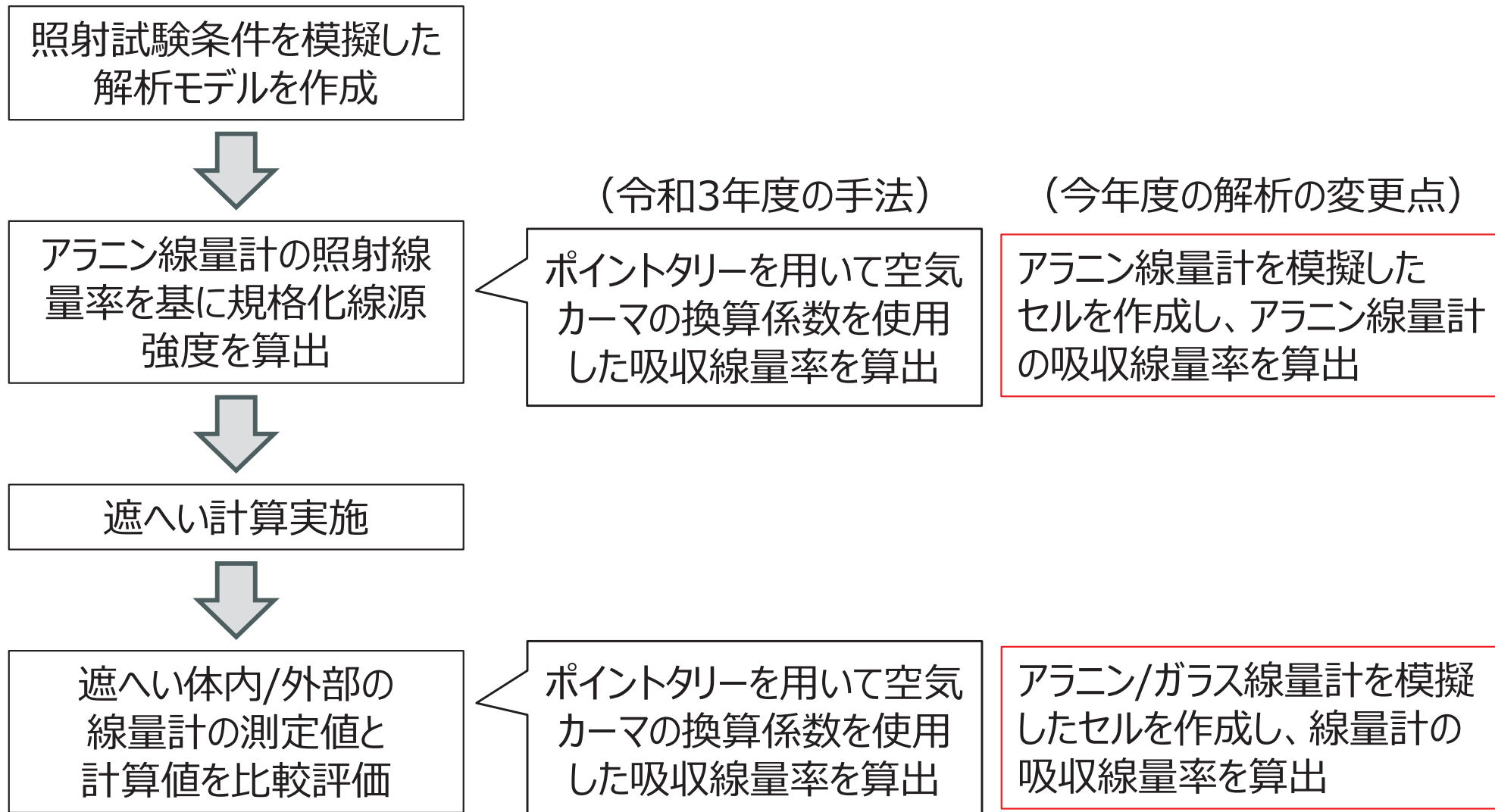


第2回技術委員会では令和3年度に遮へい解析を実施した2ケース
（光電センサ：100Gy/h及び測域センサ：150Gy/h）の再評価結果をご報告する。

4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

＜解析手順概要及び組成影響評価のための変更点＞

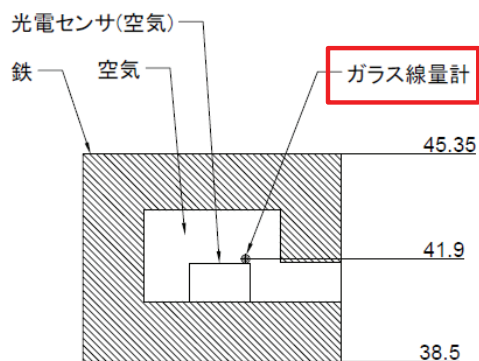
(解析手順概要)



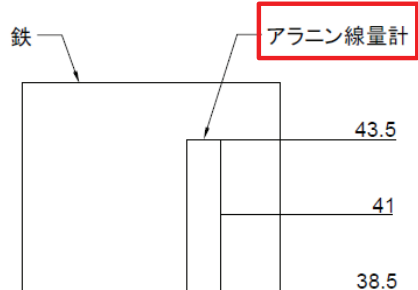
4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和3年度に実施した光電センサの遮へい解析における解析モデルを以下に示す。

A-A'断面

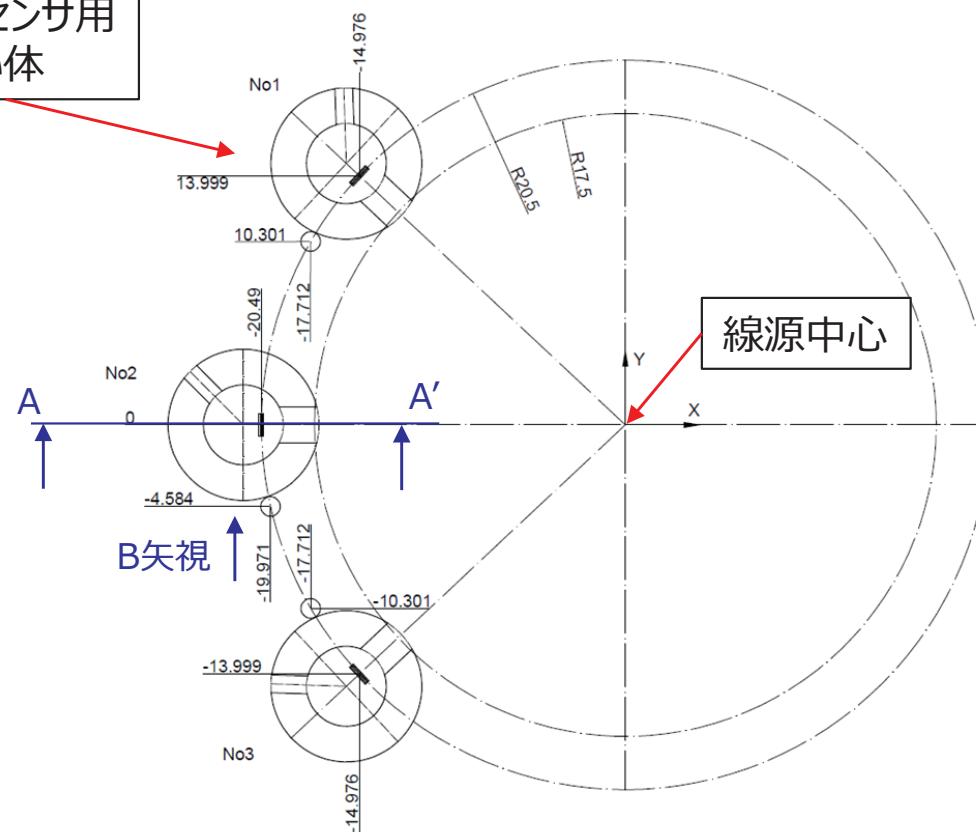


B矢視



光電センサ用遮へい体モデル

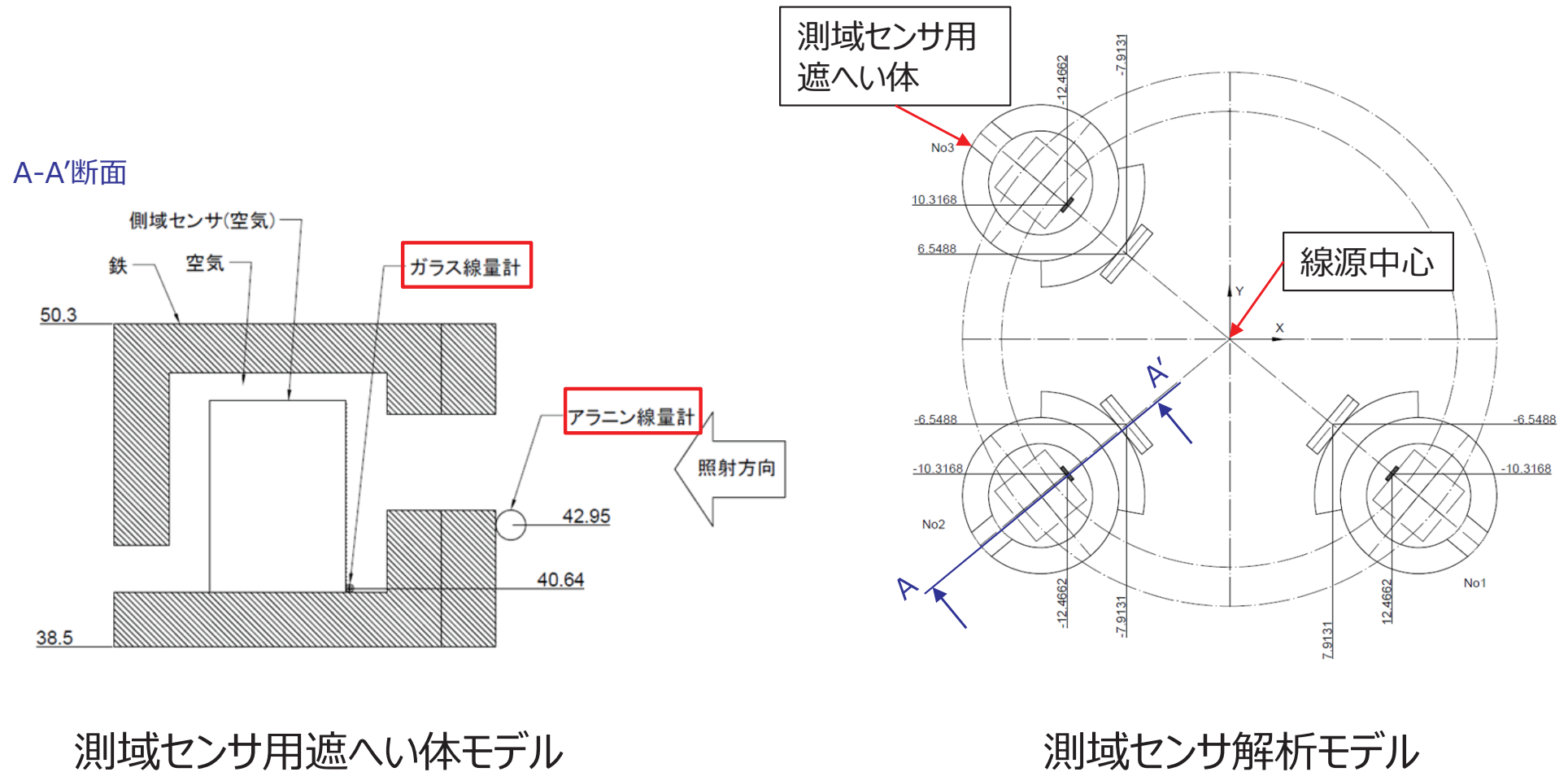
光電センサ用遮へい体



光電センサ解析モデル

4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和3年度に実施した測域センサの遮へい解析における解析モデルを以下に示す。



4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和3年度の遮へい計算に用いた物性値を以下に示す。

空気の密度*1

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

空気カーマの換算係数*2

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

*1：小山 謹二, 奥村 芳弘, 古田 公人, 他, “遮蔽材料の群定数—中性子 100 群・ガンマ線 20群・P5 近似—,” JAERI-M 6928, (1977).

*2：一般社団法人 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)

4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

本年度の遮へい解析に用いた物性値を以下に示す。

なお、令和3年度の試験では、遮へい体外部はアラニン線量計、遮へい体内部はガラス線量計を用いて吸収線量率の評価を行っているため、解析においても各線量計を模擬したセルを作成し、吸収線量率を評価した。

ガラス線量計の密度*1

物質	ガラス線量計	
密度 (g/cm ³)	2.61	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
P	3.1550E-01	8.2346E-01
O	5.1160E-01	1.3353E+00
Al	6.1200E-02	1.5973E-01
Na	1.1000E-01	2.8710E-01
Ag	1.7000E-03	4.4370E-03
合計	1.0000E+00	2.6100E+00

アラニン線量計の密度*2

物質	アラニン線量計	
密度 (g/cm ³)	1.42	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm ³)
H	7.9190E-02	1.1245E-01
C	4.0444E-01	5.7430E-01
N	1.5721E-01	2.2324E-01
O	3.5916E-01	5.1001E-01

*1 : 大阪大学「蛍光ガラス線量計小型素子システム(Dose Ace)の高エネルギー領域における基本特性の検討」(平成24年1月)

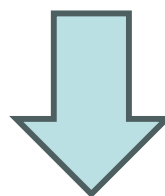
*2 : Homeland Security「Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling」(April, 2021)

4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

光電センサの遮へい計算結果を以下に示す。

測定位置	センサ No.	測定値	令和3年度計算値			本年度再計算値		
		線量率 [Gy/h]	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$
遮へい体外側 (アラニン線量計)	1	94.1	118.7	1.26	0.26	111.8	1.19	0.19
	2	110.6	118.3	1.07	0.07	111.8	1.01	0.01
	3	111.6	118.7	1.06	0.06	112.1	1.00	0.00
遮へい体内側 (ガラス線量計)	1	74.6	81.1	1.09	0.09	75.1	1.01	0.01
	2	77.7	81.2	1.04	0.04	75.7	0.97	0.03
	3	87.4	80.9	0.93	0.07	73.7	0.84	0.16
-		平均誤差			0.10	平均誤差		0.07

* : C/Eは計算値 (C) と測定値 (E) の比を示す。



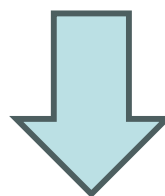
アラニン線量計及びガラス線量計の組成を考慮することで平均誤差が**3%低下**する結果となった。

4. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

測域センサの遮へい計算結果を以下に示す。

測定位置	センサ No.	測定値	令和3年度計算値			本年度再計算値		
		線量率 [Gy/h]	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$
遮へい体外側 (アラニン線量計)	1	258.7	306.9	1.19	0.19	303.6	1.17	0.17
	2	293.9	307.1	1.04	0.04	303.9	1.03	0.03
	3	306.3	306.6	1.00	0.00	303.3	0.99	0.01
遮へい体内側 (ガラス線量計)	1	49.0	58.6	1.20	0.20	56.8	1.16	0.16
	2	50.3	58.4	1.16	0.16	56.6	1.13	0.13
	3	54.8	58.2	1.06	0.06	56.9	1.04	0.04
-		平均誤差			0.11	平均誤差		0.09

* : C/Eは計算値 (C) と測定値 (E) の比を示す。



アラニン線量計及びガラス線量計の組成を考慮することで平均誤差が**2%低下**する結果となった。

5. まとめ・今後の予定

<まとめ>

センサのメーカー間の耐放射線性のばらつきの比較評価を実施した。
入力電圧24Vのデータについて比較評価したところ、光電センサではメーカー間のばらつきに関して、有意差が認められたが、近接センサ及び測域センサでは有意差が認められなかった。

遮へい計算において、線量計の組成影響を評価した。
令和3年度に実施した光電センサ及び測域センサの遮へい計算に対して、線量計の組成を考慮すると、測定値と計算値の平均誤差が2-3%低減することを確認した。

<今後の予定>

線量計の組成影響について、令和4,5年度の遮へい計算に対して、線量計組成を考慮した解析を実施し、線量計組成の吸収線量率への影響を評価する。

故障原因調査として、センサの模擬回路及びへの照射試験を実施し、照射中のセンサの構成部品の特性を評価する。また、構成部品の特性を基に、センサの故障メカニズムの検討を行う。

作動試験として、搬送装置に付随するセンサを遮へいした状態で照射試験を行い、その影響を評価する。

6 議事内容（以下、敬称略）

([REDACTED])

6.1 第1回委員会でのコメント及びその対応のご説明

6.1.1 実効線量 (Sv) と吸収線量 (Gy) の表記

- [REDACTED]) コメント No.1 について、使用指針には Gy と Sv の単位はどちらの表記を使用するのか。換算係数を記載するのは良いと思われるが、福島第一原子力発電所等の資料では Sv で表記されており、今回のセンサのような半導体の場合、Gy 表記で良いのか確認が必要である。
- [REDACTED]) Sv 表記の場合は、人体影響（環境影響）を目的としている。材料の耐放射線性評価の場合、Gy で表記するケースが多く、Gy 表記とすれば、既往の材料試験結果と比較しやすいと考えている。
- [REDACTED]) 換算係数を付けた上で Gy 表記とすること。
- [REDACTED]) 拝承。

6.1.2 絶縁材中の電荷の挙動に係る故障メカニズム

- [REDACTED]) コメント No.3 について、有機導体と記載があるが、有機物ではないのか。前回の委員会議事録に記載されていると思われるが、今後は有機物と表現すること。
- [REDACTED]) 拝承。今後、有機物と記載する。
- [REDACTED]) 有機物に電荷が蓄積・放出されるが、その挙動を正確に把握するための試験条件を設定するのは難しいと思われる。
- [REDACTED]) 試験を実施しても、再現性が得られない可能性が高いと考えられる。
- [REDACTED]) 福島第一原子力発電所で用いるカメラの耐放射線性試験において同様の事象が報告されていたように思う。
- [REDACTED]) メカニズムを解明するのは難しいと思われるが、多少のばらつきがあっても、試験結果を示すことが良いと考える。また、バルク等に対する耐放射線性は評価されていると思われる。
- [REDACTED]) 絶縁特性の観点だと、ケーブルの絶縁性は評価されている。
- [REDACTED]) ケーブルの誘起起電力は測定されているのか。MI ケーブルの場合、多量の放射線を照射すると 1V 程度の電位差が生じるという試験結果もある。ただし、これは核融合や原子炉内のような高線量環境を想定した試験結果であり、今回のような低線量環境では問題ないと評価される可能性もある。
- [REDACTED]) 来年度以降も継続して照射試験ができるのであれば、ケーブルの照射試験は有用だと考える。

6.1.3 センサ構成部品への照射試験

-) コメント No.4 について、センサの構成部品を特定し、構成部品への照射試験を大阪大学で実施している。故障原因は、トランジスタの影響が大きいと考えられるが、試験結果について、次回の委員会で議論したい。

6.1.4 照射停止時の耐放射線性への影響

-) コメント No.5 について、事象を説明してほしい。
-) 照射を停止したときに、照射によるセンサの電圧低下が回復する事象が見られている。
-) 連続照射か断続照射の違いと考えられる。ケーブルの耐放射線性評価及び構造材料の強度評価等では、連続か断続かは、あまり考慮されていない。
-) 連続照射の方が厳しい条件だと考えられる。
-) 低線量環境での使用の場合、回復の影響が大きいと考えられるため、回復に係る指標として指針案に示すことが良いと考える。
-) 無機物の場合、連続と断続の照射で耐放射線性への影響は小さいと考える。
しかし、有機物においては、高線量・短時間照射と比較し、低線量・長時間照射の方が、劣化が早い場合がある。有機物の損傷では、照射によりラジカルが生成され、ラジカル反応の酸化によって特性が劣化する。短時間照射の場合、表層の酸素のみがラジカル反応を起こすが、長時間照射の場合、内部の酸素までラジカル反応に寄与するため、損傷が大きくなる。有機物に対する加速試験では、加温、加圧して酸素を内部に印加する等の工夫を行っている場合もある。
半導体ではこのような事象は発生しないと考えられる。今回の構成物（センサ）であれば、影響はないが、有機物を含む材料の場合は注意する必要がある。

6.2 令和6年度試験結果のご報告

6.2.1 光電センサの照射試験結果

-) 光電センサの試験について、動作確認時は、照射を止めているのか。また、どの程度、停止しているのか。
-) 照射は停止し、照射室に入り動作確認を実施している。動作確認の時間は、10～15分程度である。
-) 線源を撤去し、動作確認を実施するという理解で良いか。
-) その通りである。
-) 動作確認時に故障したパターンと、照射中に故障したパターンの2パターンの故障があるように思われる。
-) どちらのパターンも、センサの故障時には、投光部のLEDが消えていた。動作

確認時の故障パターンは、非検知状態としたときに、検知時の出力電圧が出力されている状態であった。

-) 故障パターンの違いは、吸収線量の違いなのか。それともセンサの個体差によるものなのか。
-) センサの個体差によるものであると考えている。
-) 使用指針案に、故障パターンを記載することが良いと考えられるが、センサメーカー名が出ないため、購入したセンサの耐放射線性の評価判定（何 Gy の耐放射線性を有するか）が困難と考える。

-) 連続照射の場合、現在の試験条件では、動作確認で故障するパターンの判定ができない。
-) 試験の工夫が必要と考える。
-) 断続照射の場合、吸収線量の蓄積と回復のバランスで評価が難しい。また、メカニズムが分かっていると、試験方法は提案できない。今後データが集まってくると、新たな試験方法を提案できると考えられるが、今回は試験方法の提案に向けた試験の例と考えれば問題ないと考えている。
-) 大阪大学で照射しながら動作確認の ON/OFF の確認を実施できる試験を計画している。

-) サンプル数は今回 5 個だが問題ないのか。実際に耐放射線性を評価する際、5 個実施すれば良いのか。
-) 耐放射線性の絶対値を評価するのではなく、故障挙動を確認するうえで、あたりを付けるのであれば 5 個程度でも良いと考える。
-) 耐放射線性のオーダーが分かれば良いように考える。

-) メーカー間で耐放射線性のばらつきはあるのか。
-) 光電センサでは、メーカーによるばらつきが確認された。
-) 光電センサ内のどの部品が故障したのか明確にすることは重要である。

-) センサメーカーとして、このような試験を実施し対外発表する場合、センサ名は出してほしくないのか。
-) 基本的にはセンサ名は出していない。
-) 有機絶縁材料等では組成、配合比については、公開しないことを条件に試験を実施するケースが多く、メーカーは（ノウハウである）材質（配合）を出すことはない。材料供給する場合も基本的な材料のみで、メーカーノウハウが入った材料提供の実績はなく、内部構造の開示は難しいと考える。

-) 試験の実施及び試験結果の公開に関して、メーカーに確認したところ、ほとんどのメーカーは開示不可の回答を得ている。
-) 光電センサを分解し、ある程度の部品推定は可能であることを確認したが、詳細を判定することは難しい。また、設計メーカーと製造メーカーが異なる場合、製造メーカーが変更となる可能性があり、製造年度によって、部品がマイナーチェンジする場合もあると考えられる。
-) 低線量率の方が、動作確認時の故障が多かったとデータから判断できるが、実環境はより低線量率であるため、更に低い吸収線量で、電圧は下がらないが壊れているケースが発生すると考えられる。そのため、常に検知状態であるような使用環境であれば故障を発見できないため、飛び抜けて耐放射線性が低いものがあると注意する必要がある。故障箇所を判定でき、こんな構造のものは例外と言えれば良いが、現在はそこまで検討できていないものとする。
-) 同じ 0V を出力する場合でも、故障挙動が異なる可能性があるため、見落とし及び故障の判定に注意する必要がある。実際の運用では、2 台のセンサを設置し、定期的に片方を交換する運用になるものと考えられる。また、故障の発生頻度によっても対策が異なるものとする。
-) 今回の試験結果では特別に耐放射線性の低い個体はなく、センサの耐放射線性のばらつきの範囲内と考えられる。

6.2.2 近接センサの照射試験結果

-) 近接センサについて、構造を教えてください。
-) コイルによる誘導起電力の変化により ON/OFF を検知している。
-) 近接センサも、複数の故障挙動が見られている。吸収線量率の違いはあるのか。
-) 吸収線量率の影響については、定量評価できていない。
-) 出力電圧の低下は、どのような事象なのか。例えば、照射線量 100Gy/h の No.4 の場合、24V を出力するはずが、17V まで低下したということか。
-) その通り。
-) 今回の試験に使用した近接センサは、オープンコレクタであるが、オープンコレクタ部の故障なのか、それとも電源部（三端子レギュレータ）の故障なのか。この時、2V まで出力低下しているセンサについて、投光部以外の付属する動作ランプは、点灯していたのか。つまり、電源と出力 LED のどちらが故障していると考えているのか。
-) 検出を示すランプと安定状態を示すランプの両方が消えていた。そのため、電源

が故障した可能性があると考えている。

■) 過去の調査では、電源部分の故障が原因と記載されていたと記憶している。

■) 令和2年度に実施した故障原因調査では、制御回路部及び表示灯の部品損傷が確認された。また、X線観察の結果、内部ハイブリッドICのボンディングワイヤの破断が確認された。そのため、故障原因は、突発的なサージ等による過電圧による故障と推定している。

■) 突発的な故障や回復する場合もあると聞いているが、吸収線量率の影響はあるのか。

■) 出力電圧が17Vに低下した試験では、瞬間的に17Vまで電圧が低下し、故障している。

■) 完全に故障するのではなく、一時的な不良が発生する場合もあると考えられる。なお、実際の使用環境で複数のセンサを設置することで、安全性を向上させることが出来ると思う。

■) 今回の照射試験では、一時的な故障も故障と判定している。ただし、データロガーのデータ取得間隔を1秒としているため、それ以下の短時間での異常は確認できない。

■) 一時的な故障について、使用指針案への記載方法は注意する必要がある。なお、瞬間的な異常を確認する試験については、大阪大学での試験実施を計画している。使用指針案への記載方法は、別途議論させてほしい。

■) センサの二重化等、安全に対するトリガーに関する記載が必要と考える。

■) 低線量率の場合、瞬間的な出力電圧低下等の一時的な不良が発生しないということであれば問題ないが、試験実施者の立場ではどう思うか。

■) 低線量率の試験では、感覚的には少ないように思われる。ただし、測定間隔を長時間に設定しているため、一概には言えない。

■) 一時的な故障から復帰したセンサはあるのか。また、照射時のデータ取得間隔も、使用指針案に記載する必要があると考える。この時、データ取得間隔は、実際の機器に対する仕様を基に設定する必要がある。

■) 100Gy/h試験で一時的な故障が確認された2台については、一時的な不良が発生した直後の動作確認後、検知状態が復帰している。なお、一時的な電圧低下後、徐々に出力電圧が低下することを確認している。

■) 動作確認時は、線源の上げ下げのみで復帰しているのか。

■) 照射停止中に、取り付けした金属片の取外し、取付けを行うことでON/OFFさせており、検知状態を変化させたのちに復帰している。

■) 光電センサで同様の事象はなかったのか。

-) 本年度の試験では、光電センサで同事象は発生しなかった。
-) サンプル数が増加すると、一時的な故障が確認される可能性はあるので、その対応を検討しておく必要がある。
-) 一時的な故障が電荷の蓄積の影響である場合、今回の試験では、動作確認時に検知状態を変化させているため、電荷を開放している可能性もある。

-) 今回の試験は、実環境で想定される耐放射線性を設定するための試験という理解で良いのか。つまり、実環境で 100Gy までしか使用しない場合、600Gy の耐放射線性があれば問題ないといえるのか。
-) その通り。
-) 使用指針案を適用する使用環境は、どのような環境を考えているのか。
-) 原子炉等の高線量下ではなく、低線量下の環境を想定している。
-) 極低線量環境下の場合、メーカーの推奨する一般的な交換頻度内に収まる可能性もあると考えられる。
-) 使用環境等の前提条件が分かれば、指針案も作成しやすい。
-) 低線量環境では数 100Gy も使用しないと思われるが、どうでしょうか。
-) 指針案には、補足として、想定使用環境を超える吸収線量 (数 100Gy) まで使用する際の注意事項等を記載することも良いと考える。

6.2.3 測域センサの照射試験結果

-) 測域センサについて、データ出力値が一定になって故障している。故障後は、検知範囲内に何かを設置 (検知) させても、出力値は一定のままなのか。
-) その通り。
-) 取得データを PC に送信しているが、同じ値を送信していると考えられる。センサの検出は正常であるが、データ通信に異常が発生している可能性もあると考えている。
-) センサを再起動しても正常に動作しないのか。
-) 照射停止後、センサと PC の接続を解除し、再接続しようとする、接続 (通信) が出来ない状態となった。
-) 異常値を送信しているのではなく、測定データを送信してできていない可能性もあると思われる。また、検出部が故障していればノイズが出るため、送信機能の異常と考える。

-) 接続できない状態の時に電源の ON/OFF を実施しても、起動の LED は点灯しないのか。
-) その通り。

-) 他のセンサと比較し、複雑なセンサであり、プログラムの異常も考えられる。測域センサの構造調査を大阪大学で実施したいと考えている。
-) 過去に同メーカーの測域センサの故障原因調査を実施した結果、電気性能検査でPCB レシーバーの故障が確認されている。
-) 通信機能をセンサに持たせなければ、耐放射線性は向上可能と考えられるが、一般品を放射線環境下で用いるという指針の本来の目的とは異なってしまう。
-) そのような改造等の対応も指針案に記載しても良いと考える。また、使用環境(何 Gy までの耐放射線性が必要なのか)との比較が重要である。
-) 通信機能が放射線に弱いのであれば、通信機能を持つセンサは、注意するような内容を指針案に記載としても良い。
-) 光電センサでも通信機能を持つセンサと比較試験を実施しても良いと考える。使用指針案にも記載しやすくなる。

6.2.4 線量計の組成を考慮した線量評価結果

-) アラニンとガラス線量計は使い分けるのか。それとも統一するのか。また、使用指針案への記載はどのようにするのか。
-) 使用指針案には線量計の種類までは記載しない予定である。なお、アラニン線量計は、製造中止となっている。
-) アラニン線量計の製造メーカーが撤退し、別メーカーが代替品の製造販売を試みようとしたが実現には至っていない。
使い勝手はアラニン線量計の方が良いが、入手が困難な状況である。測定精度に問題がなければ、線量計の種類にはこだわらなくても良いと考える。ガンマ線計測の場合、換算係数は $Gy=Sv$ で良い。
-) 空気への換算は不要なのか。
-) 各線量計の組成を用いて計算している。
-) 評価上はアラニン線量計の測定結果の方が計算値に近く、アラニン線量計とガラス線量計で分けて評価しようと考えている。
-) ガラス線量計はピーク面積で校正カーブを算出しており、精度に違いがあるものの、現在の数%の誤差であれば、精度としては十分であると考えている。
-) 照射試験の測定結果を信頼できる結果として使用できるということで良いと考える。
-) 線源強度の設定等、どのように計算しているのか。

-) アラニン線量計で測定した吸収線量率から線源強度を規格化(計算)している。センサの吸収線量率の評価は、その規格化した線源強度を用いて、センサ等をモデル化し計算している。
-) センサ No.1 の遮へい体外部のみ測定値と解析値で 20%の誤差が生じる理由はあるのか。
-) 照射試験による誤差の可能性もある。線源までの距離が近いこと、設置位置が少しずれるだけで、吸収線量率が大きく変わる。
-) ^{60}Co 線源に対する実効線量率定数を用いて、線源からの距離だけで、簡易的に評価できないのか。
-) フラックスと実効線量率定数で計算は可能である。MCNP は詳細な計算を実施できる。今後、簡易計算の適用性を評価する計画である。
-) 試験計画を策定する上で、事前の簡易計算は有用だと考えられる。
-) 量子科学技術研究開発機構(QST)の試験では毎回アラニン線量計を設置して、線量測定しているのか。
-) 照射施設ごとに、吸収線量率の基準(線量率分布図)は計算しているが、線源が複雑な場合、簡易計算での吸収線量率の設定は難しいため、アラニン線量計等による吸収線量率の計測を実施している。
-) 線量計によって吸収線量率を都度測定した方が、正確な測定が実施できることを使用指針案に記載してはと考える。

6.3 事務連絡

- ・ 次回の第3回技術委員会は、令和7年2月初旬に神戸製鋼所の東京本社での開催を予定している。オンライン参加も可能とし、日程は別途調整する。

以上

原子力産業基盤強化事業委託費

第3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 —令和6年度実施内容—

2025年2月3日（月）
株式会社 神戸製鋼所

1. 令和6年度実施内容
2. 第3回技術委員会でのご報告内容

1. 令和6年度実施内容

全体工程及び令和6年度の実施内容を以下に示す。

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						■

1. 令和6年度実施内容

令和6年度の実施内容として、以下4項目を実施する。

＜耐放射線性のデータの追加取得＞

令和2年度の照射試験においてメーカー間の耐放射線性のばらつきが確認されたため、異なるメーカーのセンサに対して照射を行い、耐放射線性を評価する。

＜故障原因調査の実施＞

代表的なセンサ及びセンサを模擬した回路へ照射を行い、故障箇所を確認する。また、部品の耐放射線性データを回路シミュレータに入力し、センサの故障挙動を評価するとともに、故障メカニズムの検討を行う。

＜簡易遮へい評価手法の適用方法検討＞

MCNPによる解析の精度向上のため線量計特性の評価を行う。
また、MCNP以外の簡易計算コード、評価式による適用方法を検討する。

＜カスタマイズ*したセンサの作動試験の実施＞

機器に付随するセンサをカスタマイズし、動作を確認する。
また、照射中のカスタマイズの有無による機器の挙動の差異を確認する。

*：カスタマイズとはセンサの耐放射線性向上のため、センサの周囲に遮へい体を設置することを示す。

2. 第3回技術委員会でのご報告内容

第3回技術委員会での報告内容を以下に示す。

＜耐放射線性のデータの追加取得＞

➡ (第2回技術委員会でご報告済。)

＜故障原因調査の実施＞

➡ 構成部品への照射試験結果及び試験結果を踏まえた故障メカニズムの検討結果についてご報告する。

＜簡易遮へい評価手法の適用方法検討＞

➡ 今回、ガラス線量計の組成の影響評価のため、令和4年度に実施した光電センサ及び令和5年度に実施した測域センサの遮へい解析の組成を変更した解析結果をご報告する。
また、簡易遮へい評価手法の適用方法の検討結果についてもご報告する。
(線量計組成変更解析について、令和3年度に実施した2ケースは第2回技術委員会でご報告済。)

＜カスタマイズしたセンサの作動試験の実施＞

➡ コンベアに使用されるセンサをカスタマイズし、照射時の装置の動作を確認するための試験方法についてご説明する。

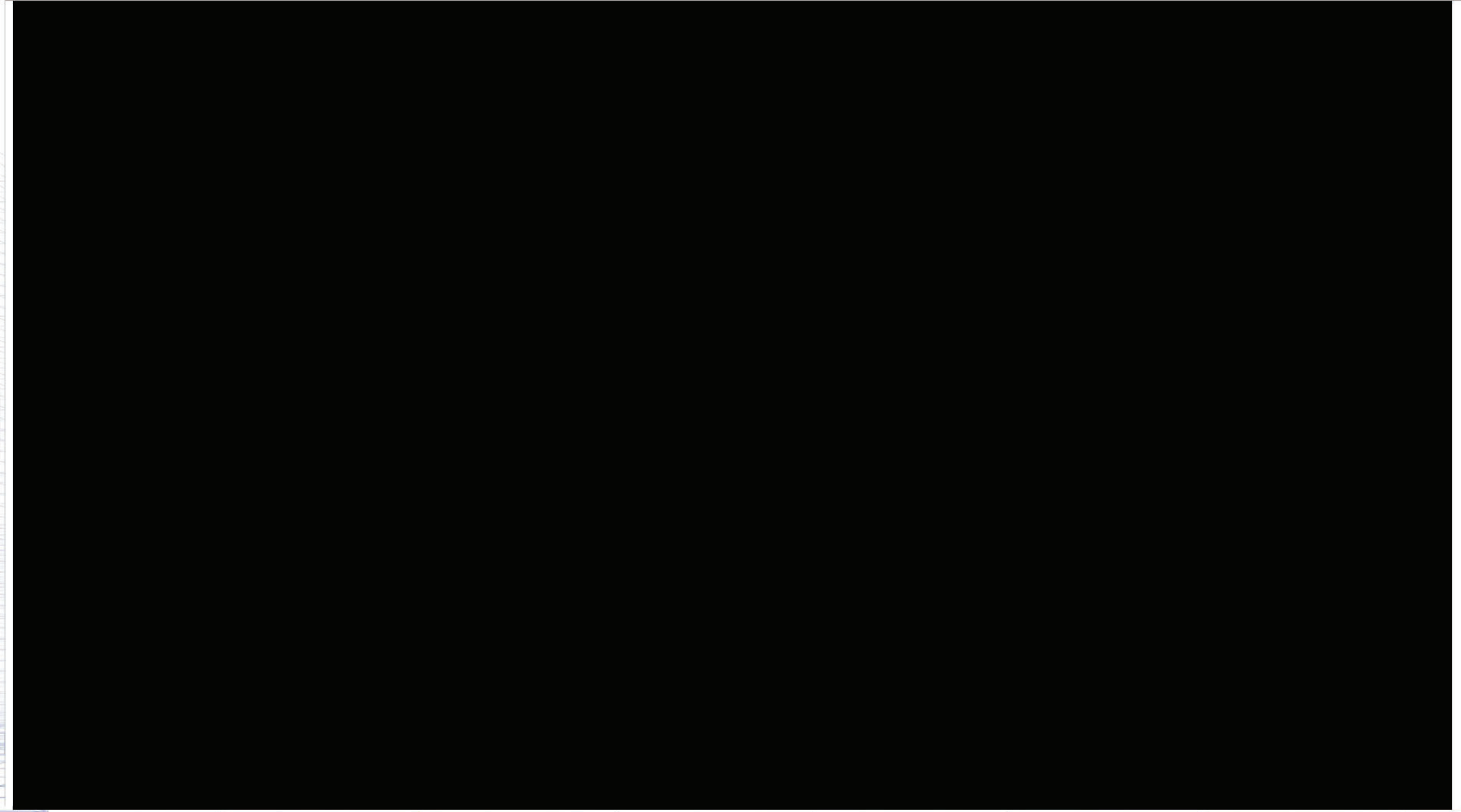
**第3回 原子力産業基盤強化事業委託費
一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針案作成
技術委員会**

**委員会資料-2
—故障原因調査結果、作動試験方法—**

大阪大学 大学院工学研究科
佐藤 文信

委託内容：センサーの耐放射線性に関する考察

- ・ 光電センサー、測域センサの分解**
- ・ 電子素子の放射線照射試験**
- ・ 光電センサーの放射線下動作試験**

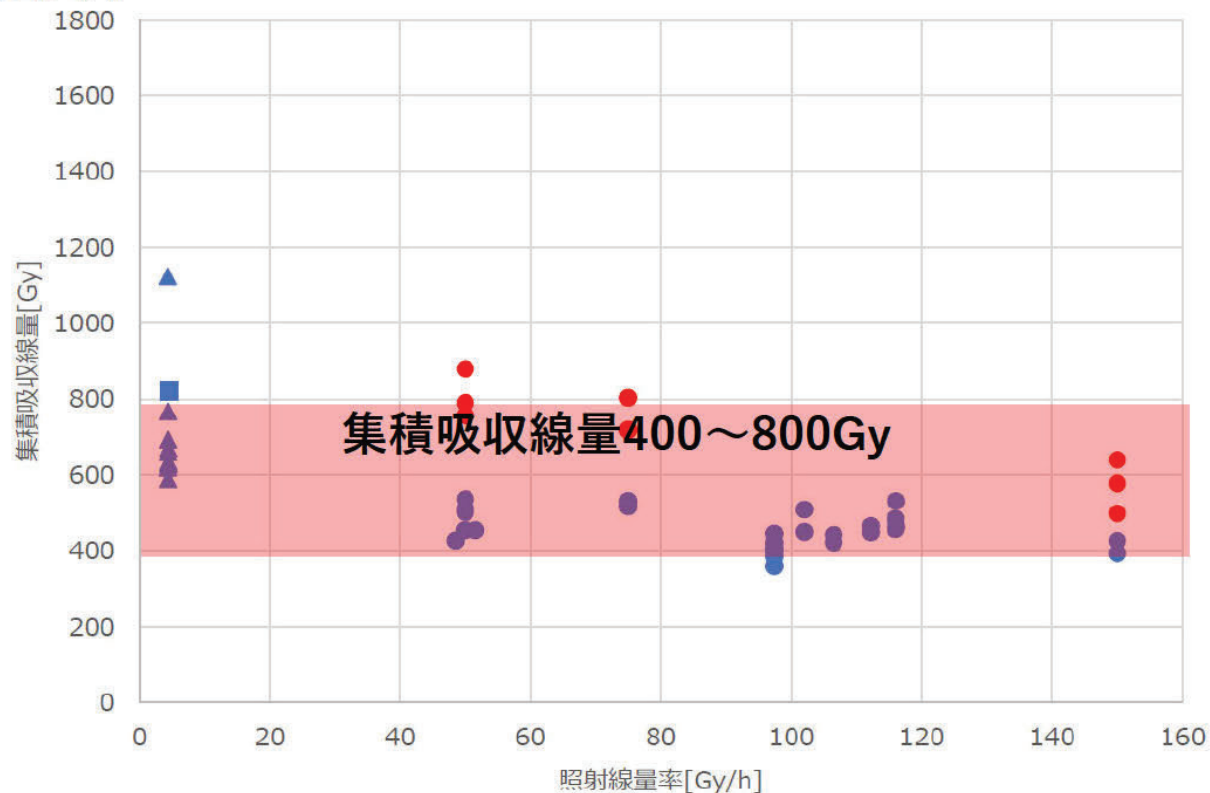


4. 照射試験結果

本書には神戸製鋼所の技術情報が含まれておりますので、神戸製鋼所の承認なく他社に伝達、開示されることのないようお願い致します。

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。

【光電センサ】

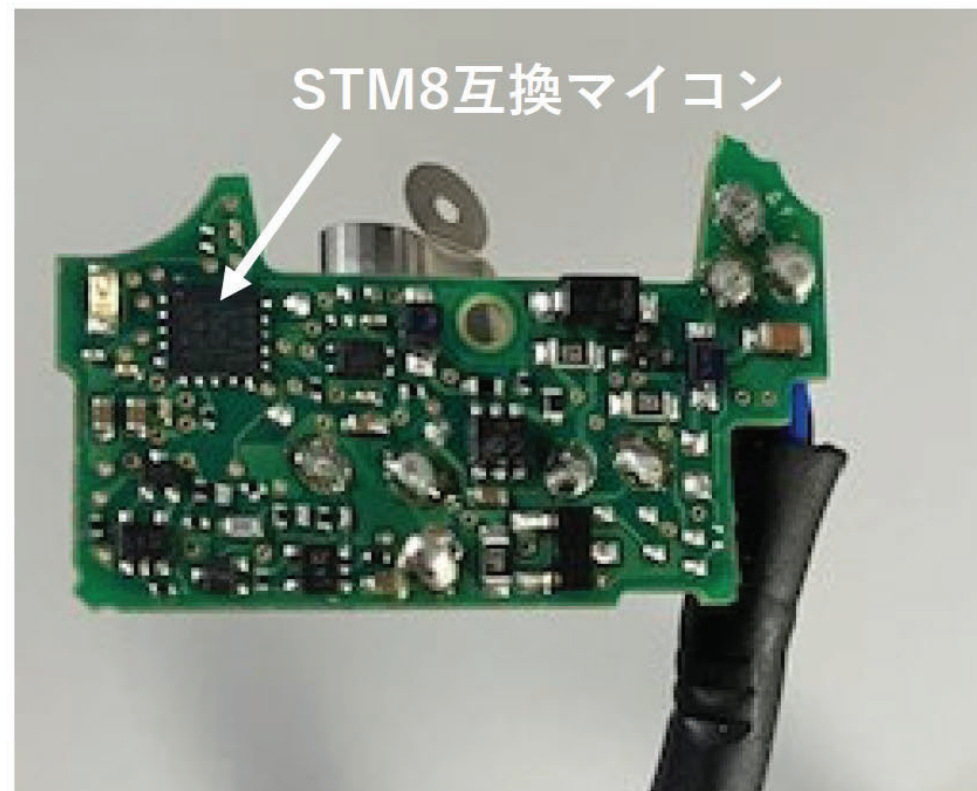
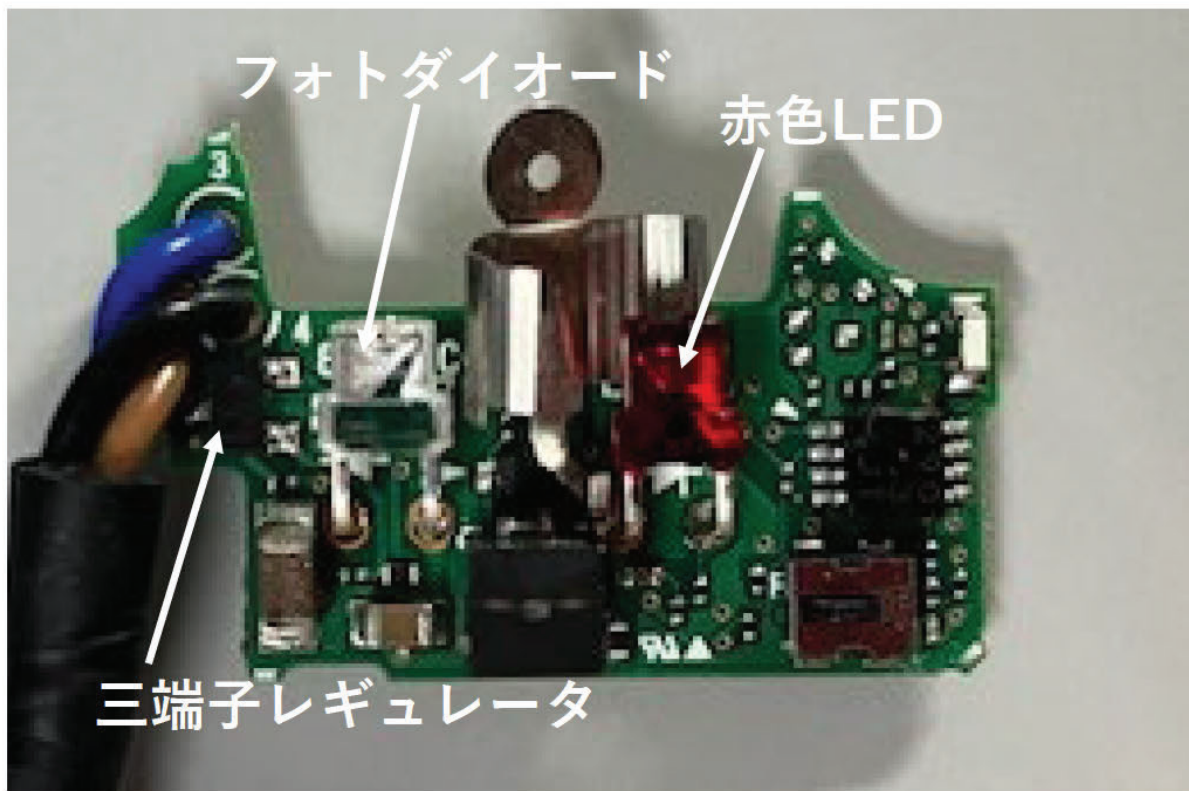


メーカーによる回答
電源ラインの損傷？
〔電源を入れても〕
動作しない。〕
など

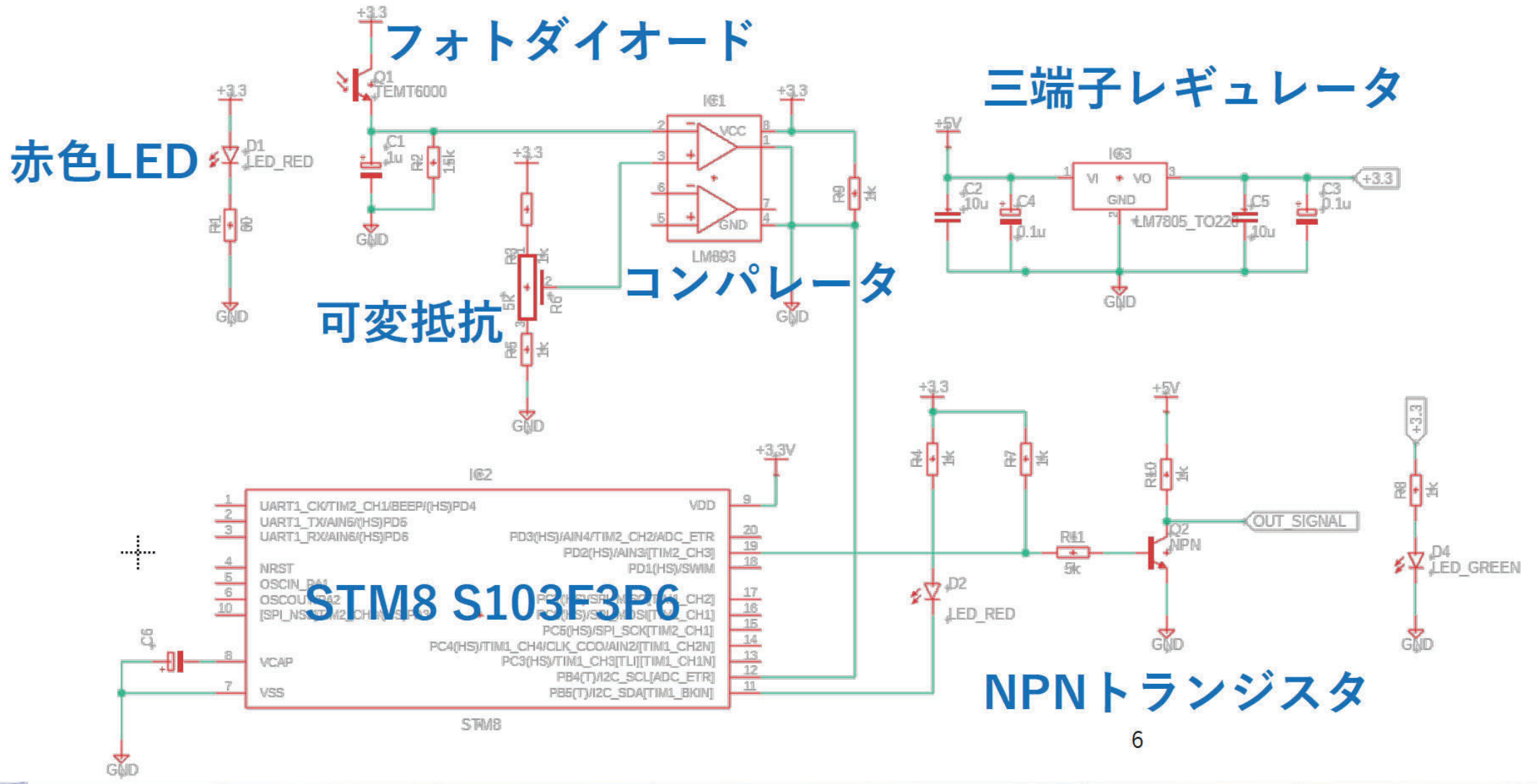
故障時の集積吸収線量[Gy]

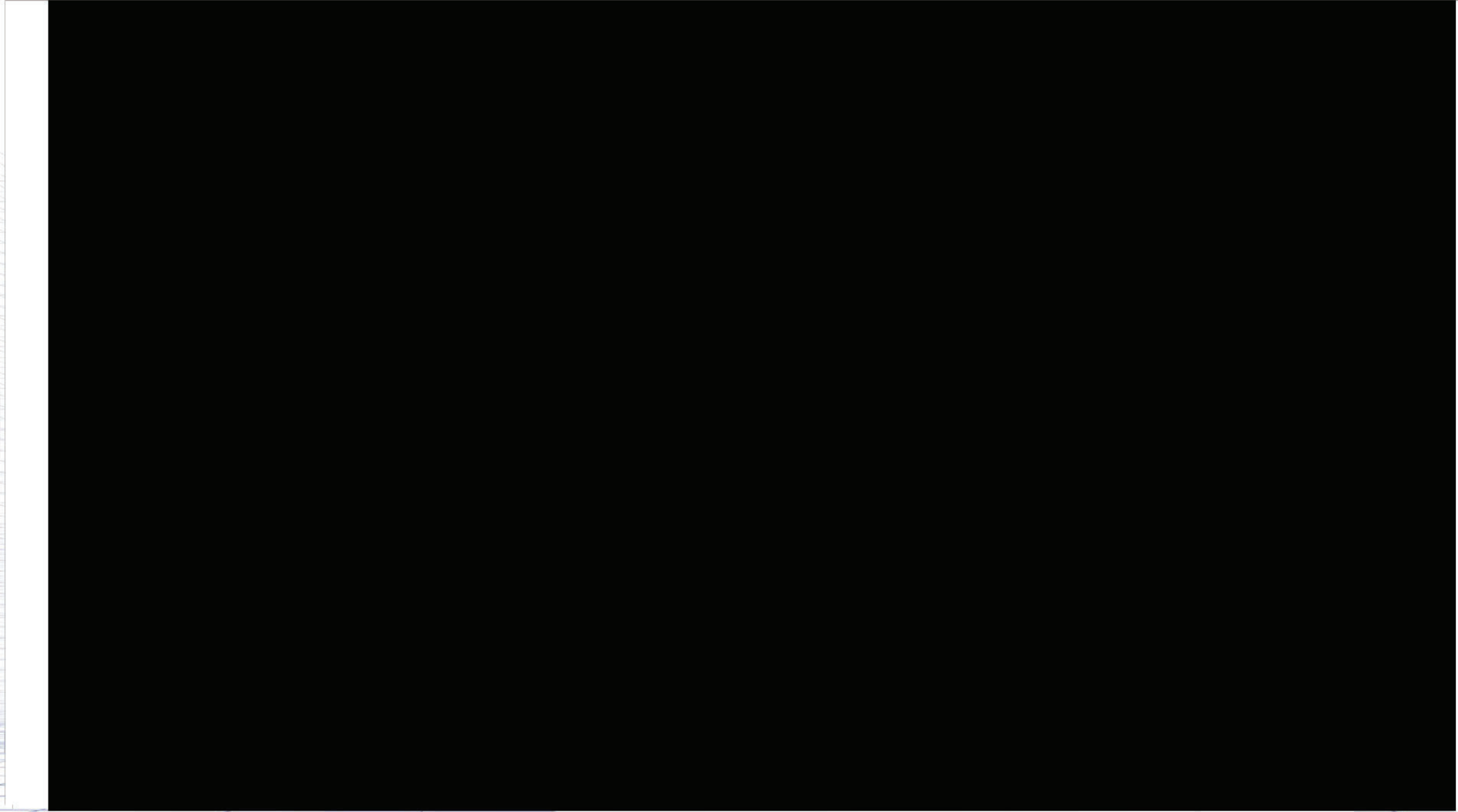
※C社の光電センサは照射終了時点においても故障しなかったため、グラフには記載していない

PZ-G41N分解

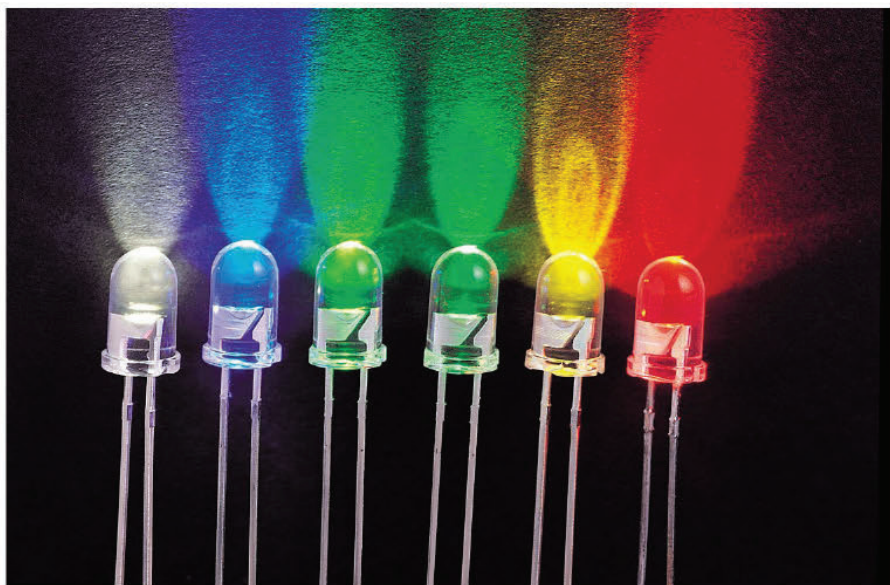


光電センサー 簡易モデル 回路図

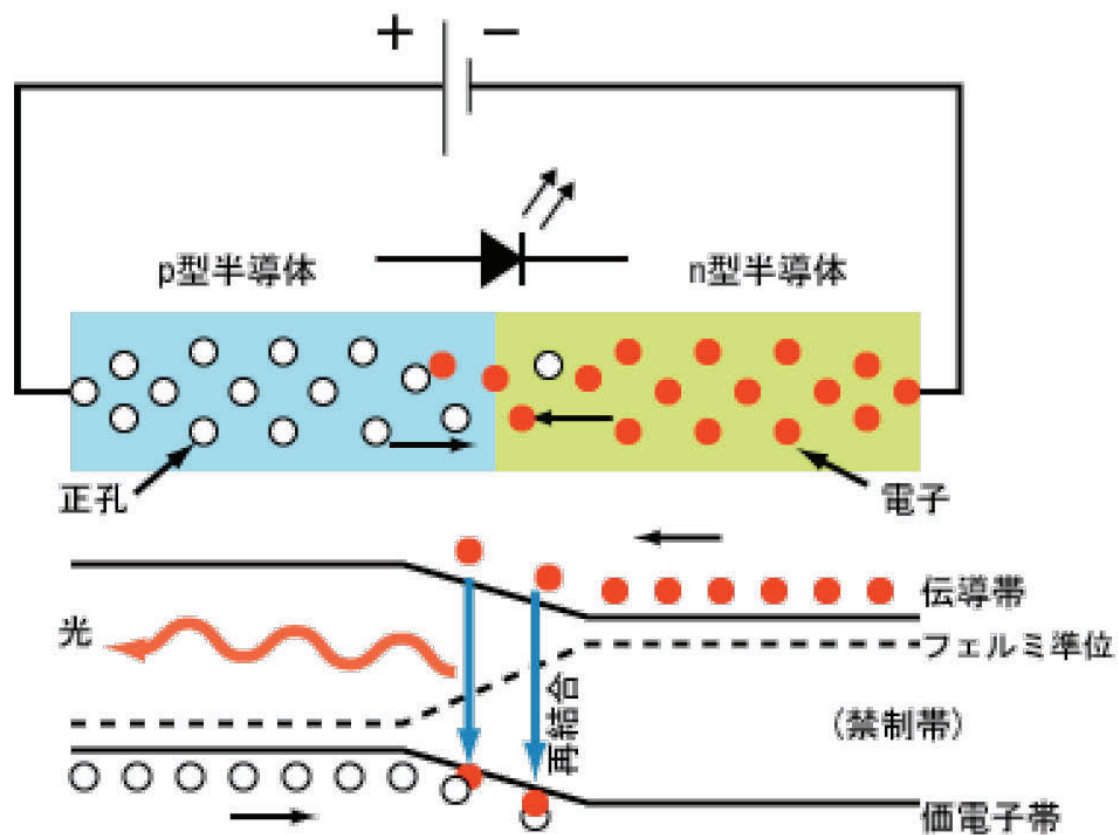




LED (発光ダイオード)

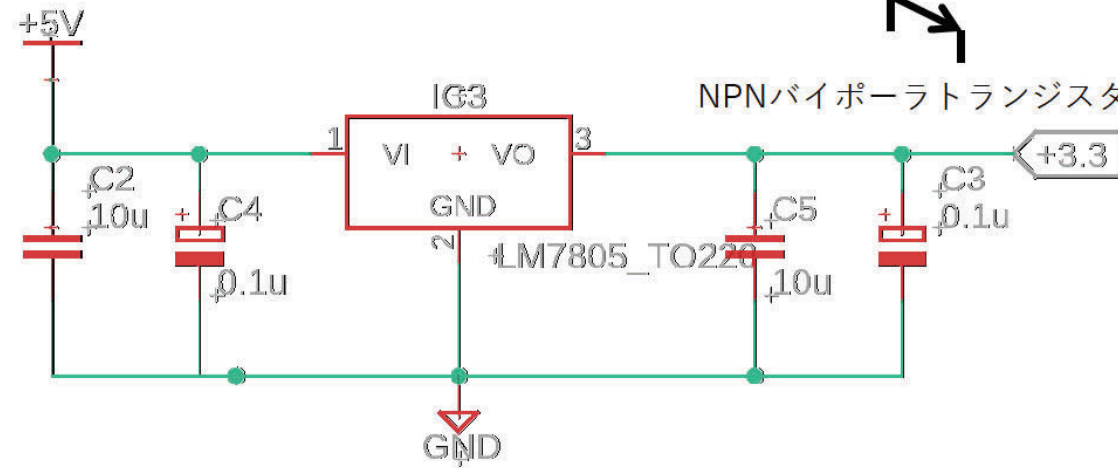


発光ダイオード電気記号

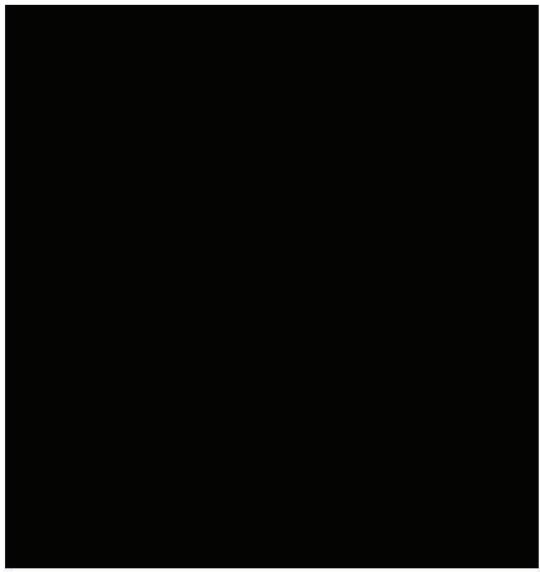
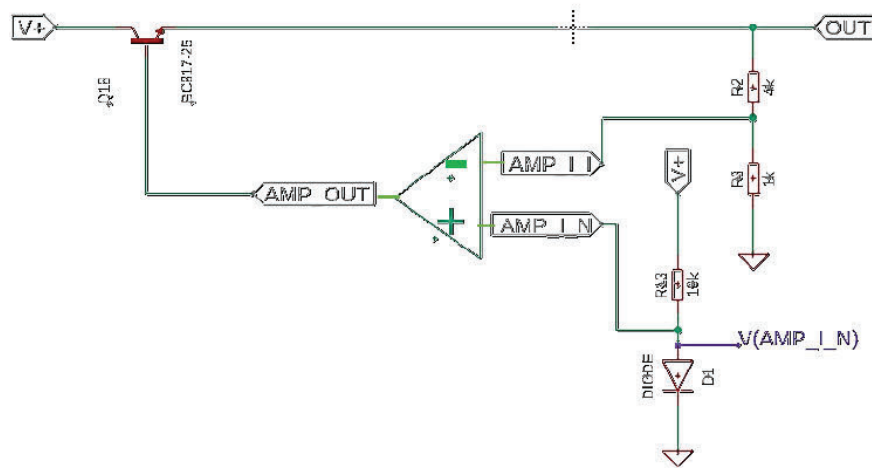
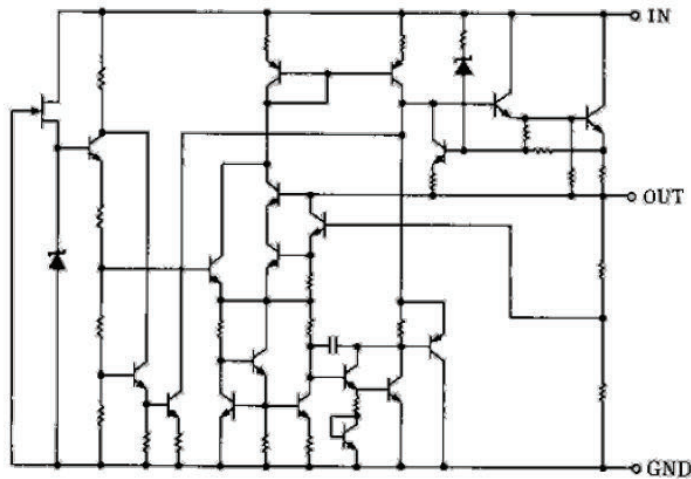


発光ダイオードの回路図と、電子・正孔の分布を模式的に描いた図 (Wikipedia)

三端子レギュレータ

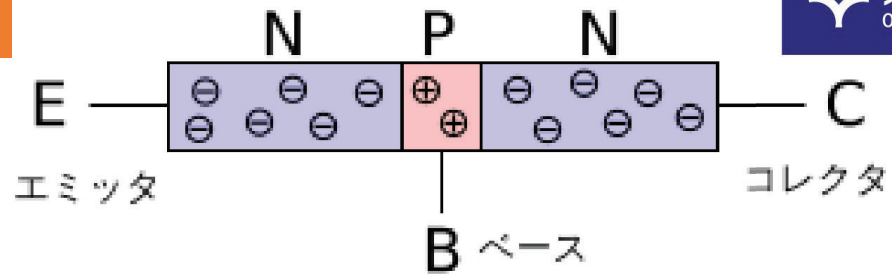
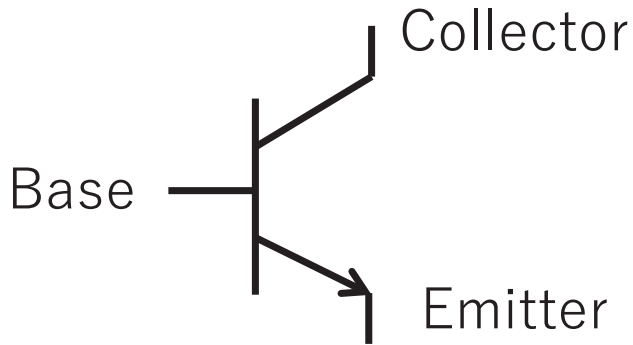


NPNバイポーラトランジスタ PNPバイポーラトランジスタ



三端子レギュレータ NJM7800 等価回路図

バイポーラトランジスタ

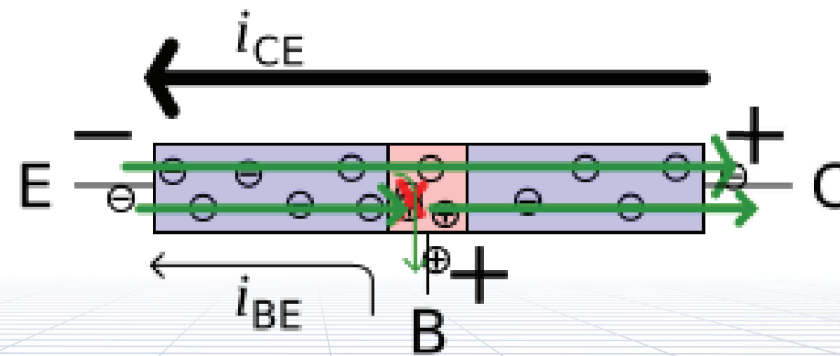
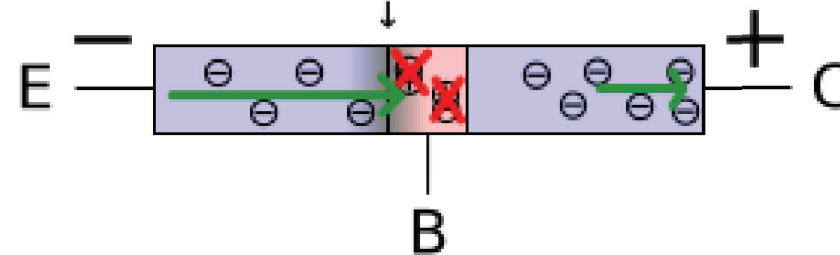


NPNバイポーラトランジスタ

増幅作用

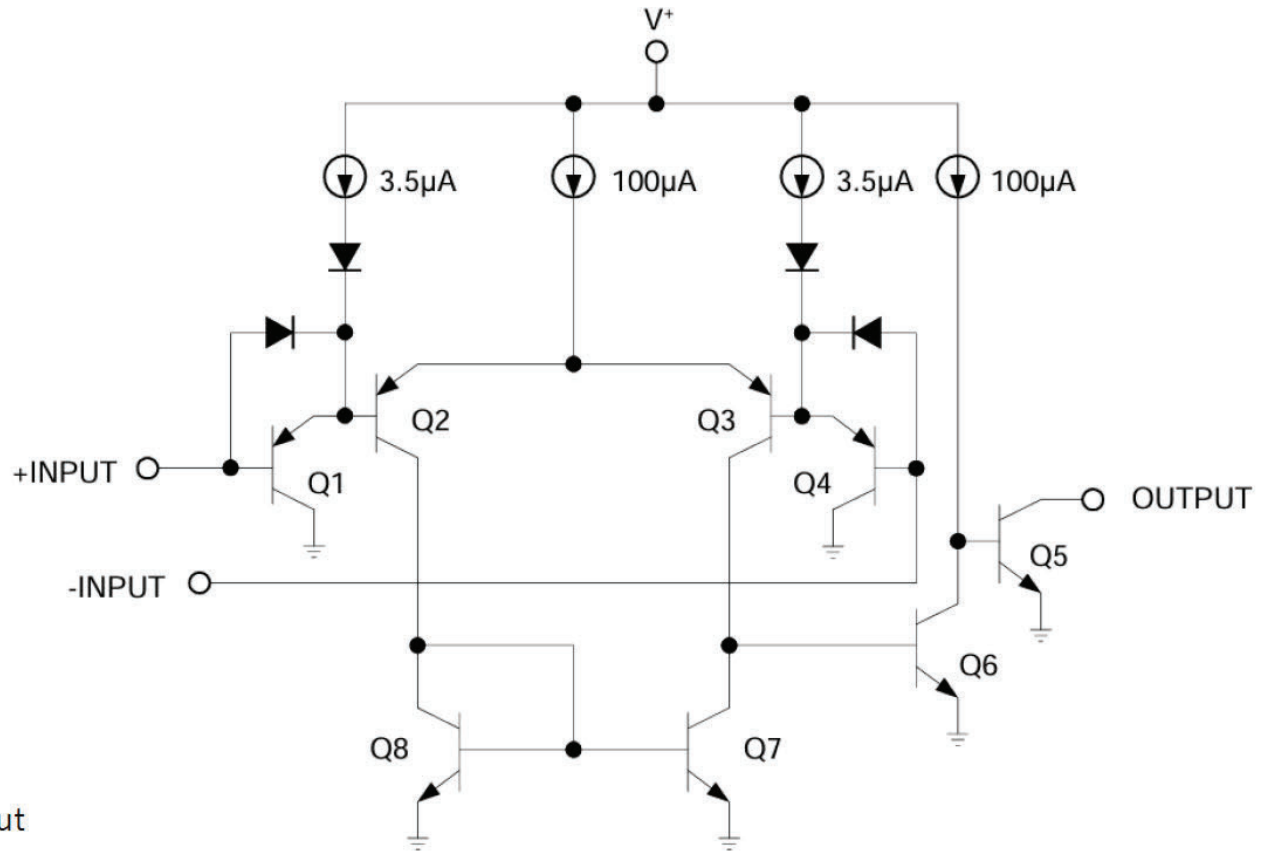
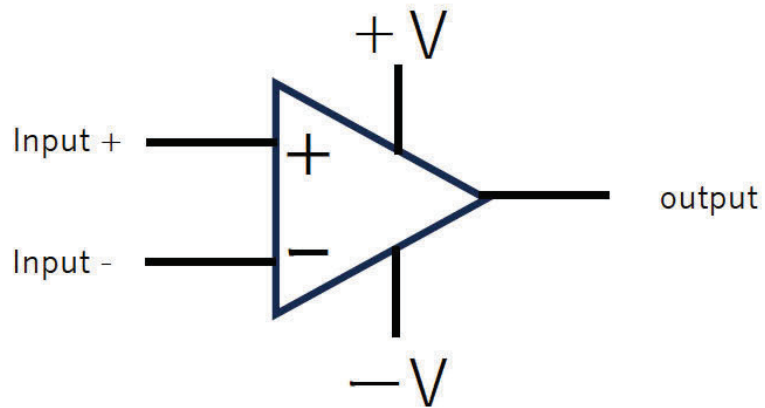
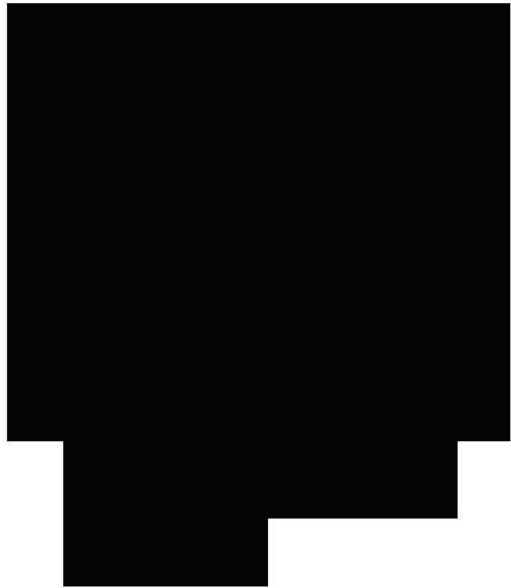
エミッタ - ベース間のわずかな電流変化が、エミッタ - コレクタ間電流に大きな変化となって現れる。

電子と正孔の結合により
空乏層に変化

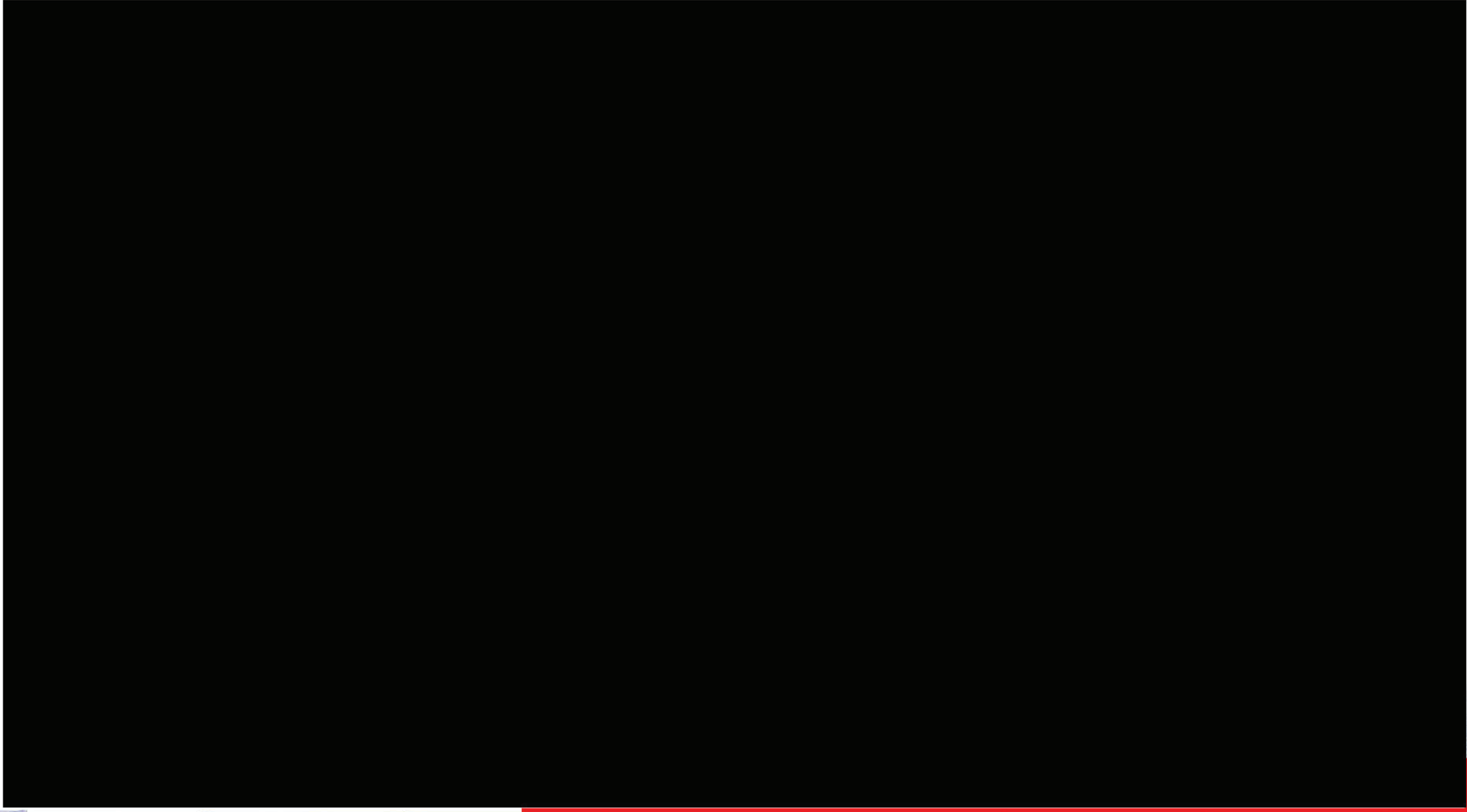


NPN型トランジスタの模式図 (Wikipedia)

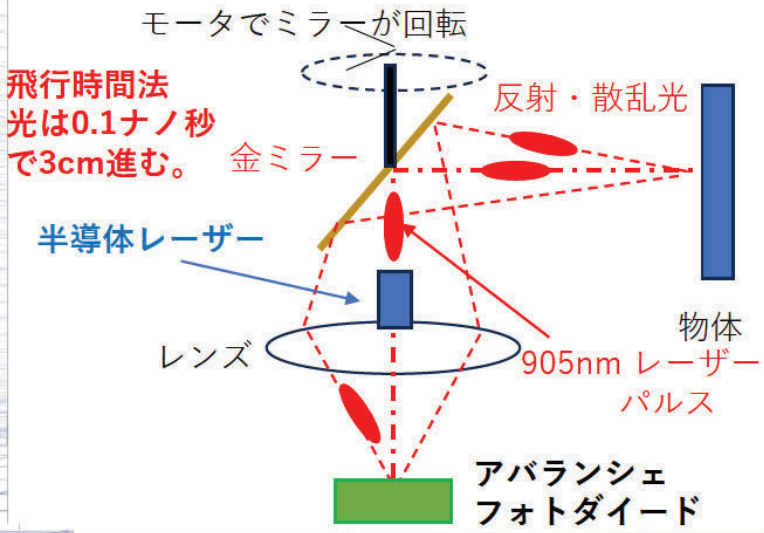
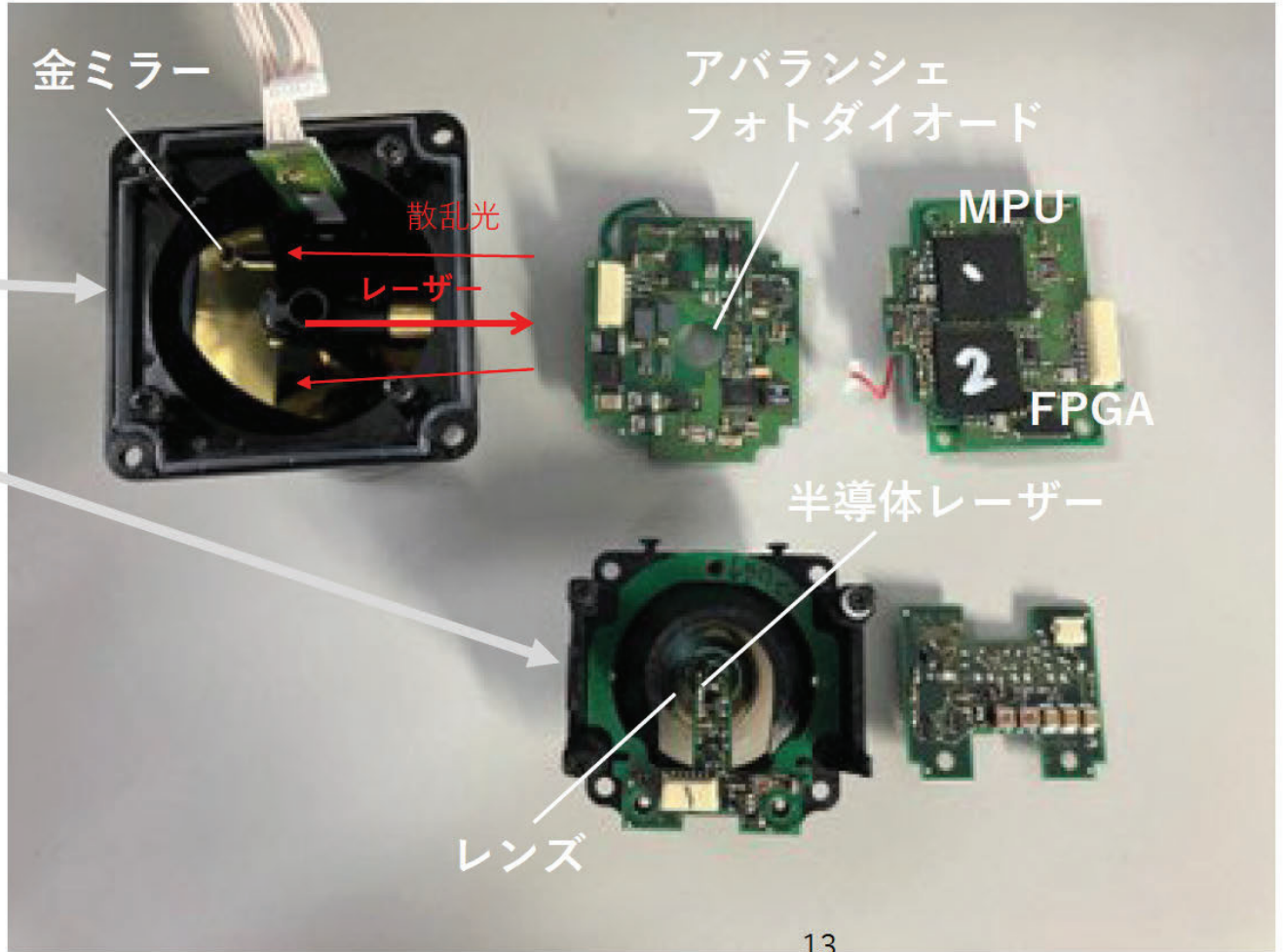
コンパレータ



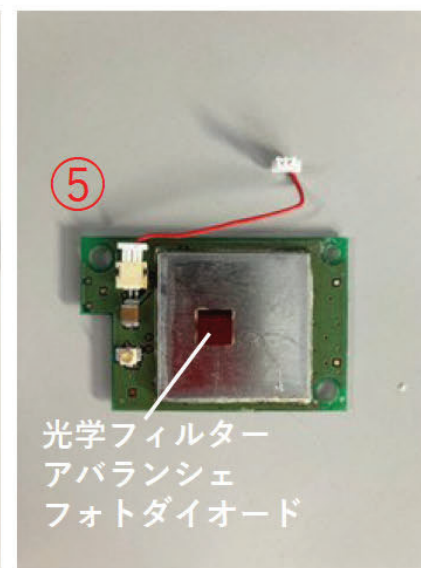
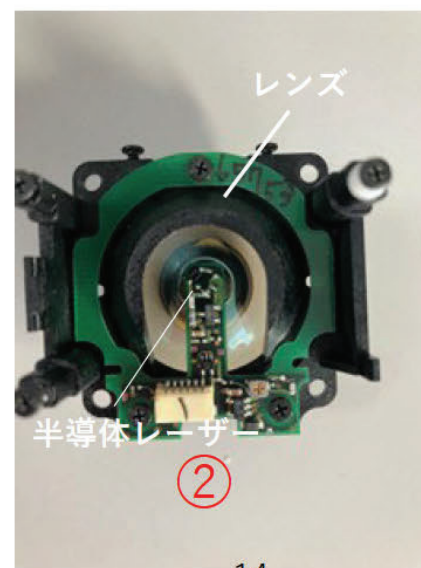
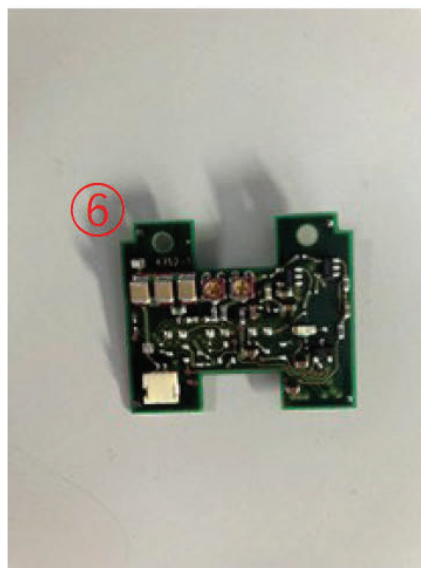
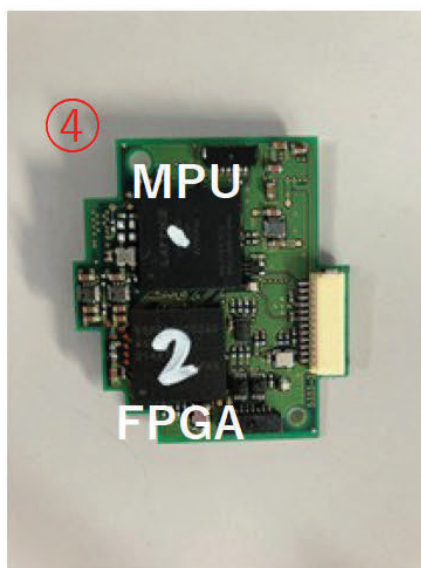
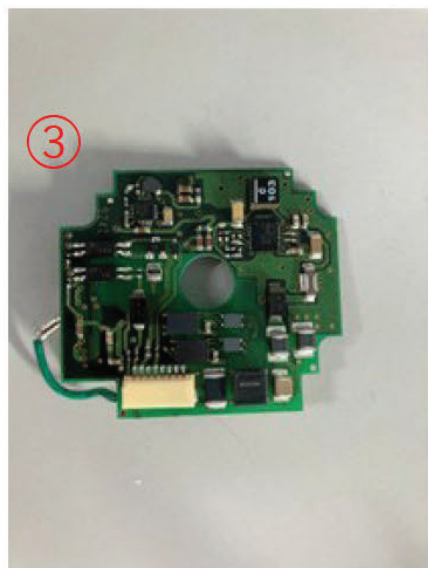
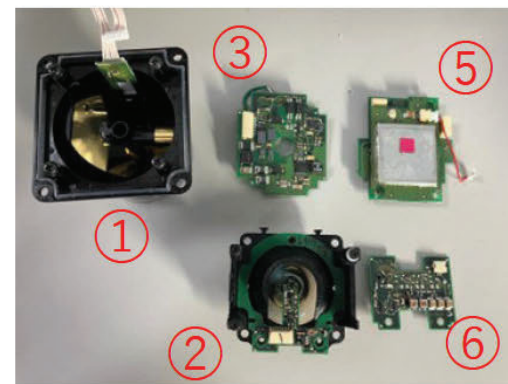
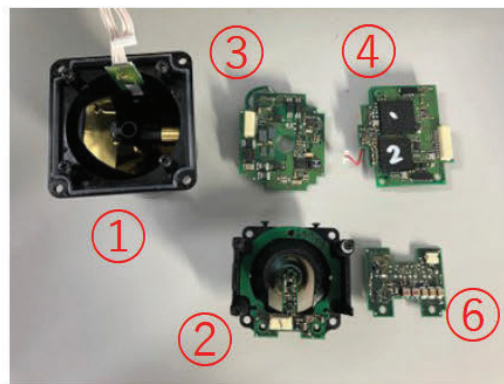
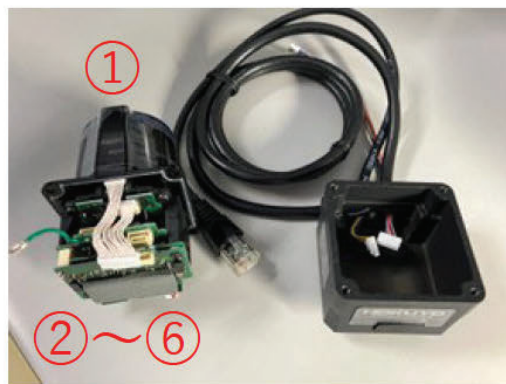
コンパレータ—AP331Aの
等価回路図



UUST204の測定原理と分解



UUST204の分解





電子素子の放射線照射実験

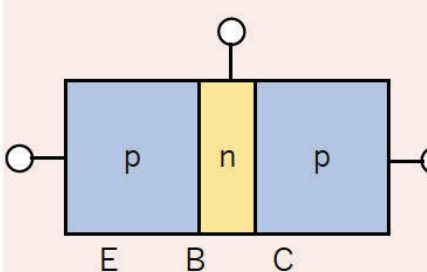
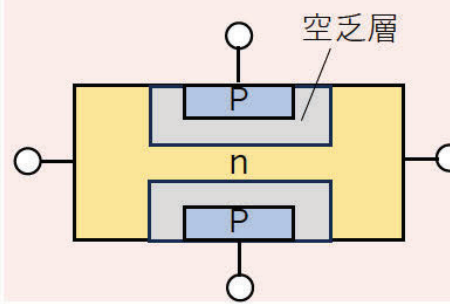
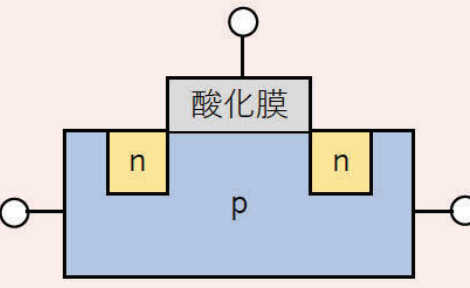
	電子素子		個数
トランジスタ	nチャンネルMOSFET		100
	pチャンネルMOSFET		100
	nnpバイポーラトランジスタ		92
	pnpバイポーラトランジスタ		100
	nチャンネルJFET		100
	nチャンネルJFET		10
	pチャンネルJFET		10
ダイオード	3mm赤色LED		50
	フォトICダイオード		50
	小信号用汎用ダイオード		100
コンデンサ	積層セラミックコンデンサ(MLCC) 10 μ F		100
	アルミ電解コンデンサー 10 μ F		100
集積回路	オペアンプ		99
	コンパレータ		
	三端子レギュレータ		17

抵抗、コイルは対象外

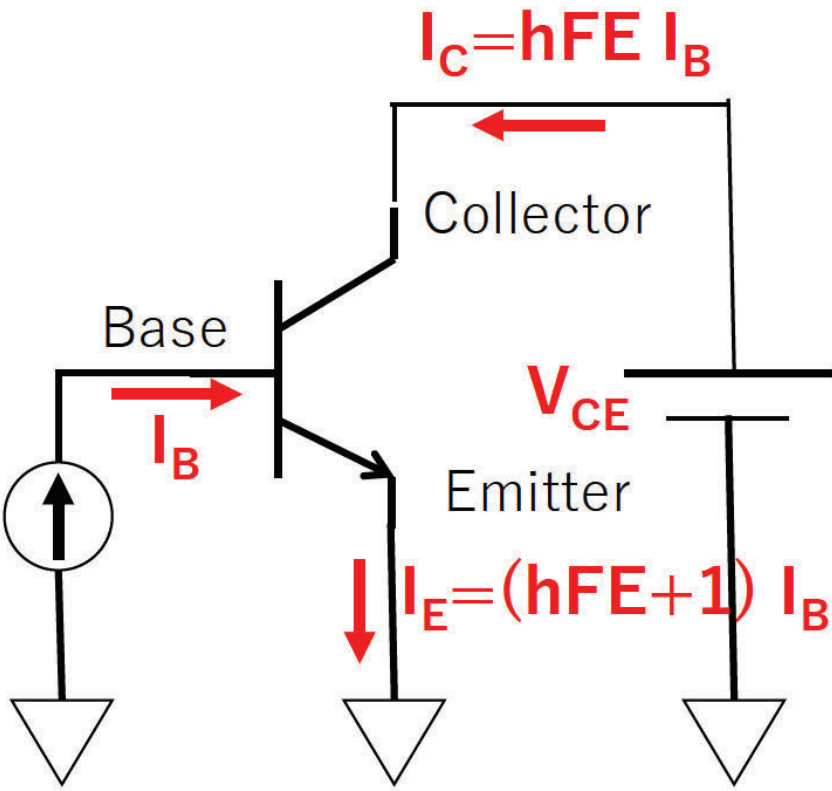
トランジスタの放射線照射試験

<電子回路で用いられる主なトランジスタ>

バイポーラトランジスタ、JFET (Junction Field Effect Transistor)、MOSFET
トランジスタのガンマ線耐放射線性の比較

	バイポーラトランジスタ (NEC:2SC2026)	JFET (NEC:2SK68A)	MOSFET (Toshiba : 2SK241)
耐放射線 積算線量 (Sv)	~2,600	~600,000	~300
構造			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 電流制御 	<ul style="list-style-type: none"> 電圧制御 ゲート酸化膜がない 	<ul style="list-style-type: none"> 放射線により酸化膜に電荷が蓄積

バイポーラトランジスタの放射線照射試験



NPNバイポーラトランジスタ

電気的特性 (TA = 25°C)

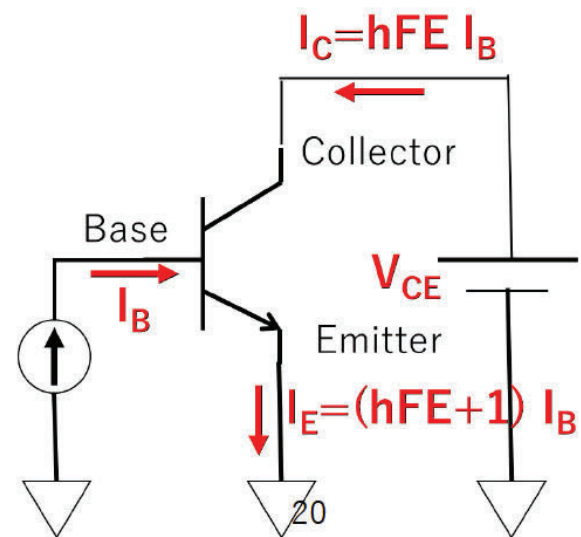
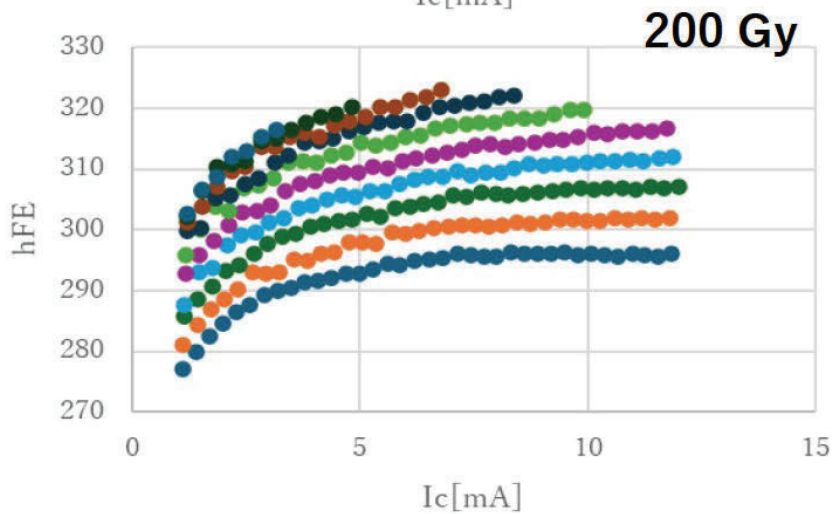
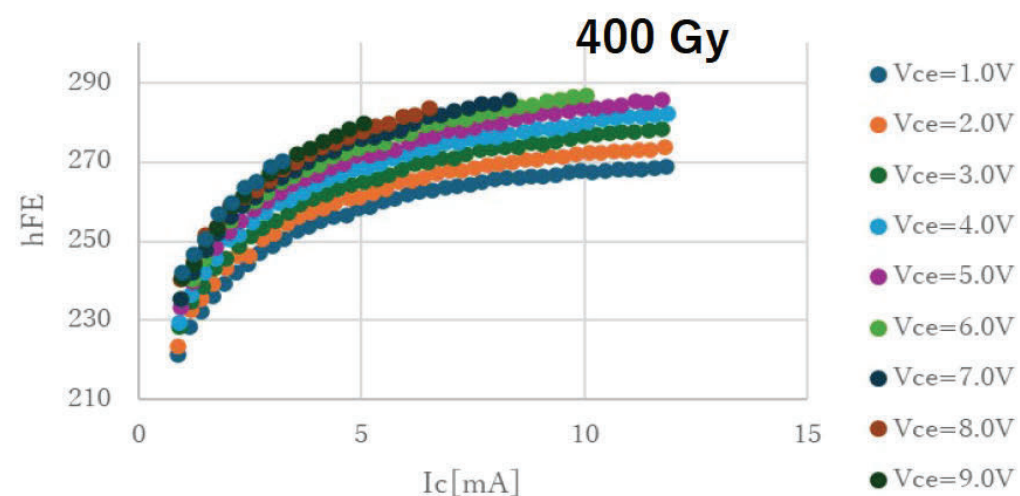
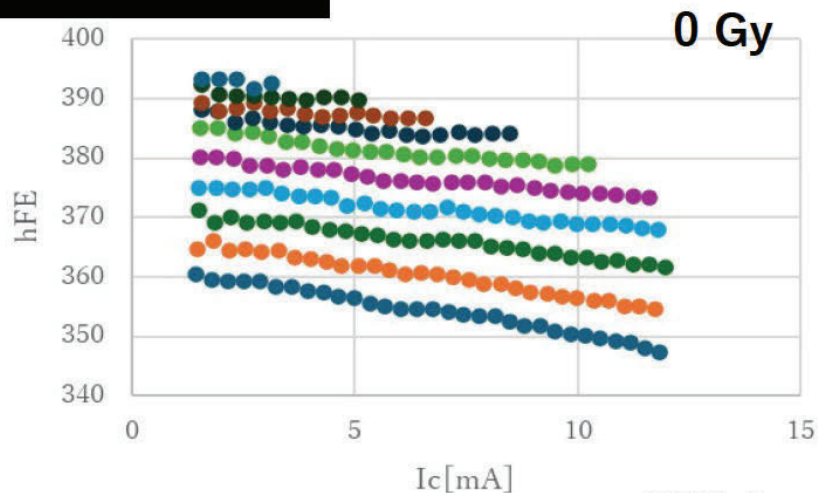
項目	略号	条件	MIN.	TYP.	MAX.	単位
コレクタしや断電流	I_{CBO}	$V_{CE} = 60 V, I_E = 0 A$			100	nA
エミッタしや断電流	I_{EBO}	$V_{EB} = 5.0 V, I_C = 0 A$			100	nA
直流電流増幅率	h_{FE1}	$V_{CE} = 6.0 V, I_C = 0.1 mA$	50	185		
直流電流増幅率	h_{FE2}	$V_{CE} = 6.0 V, I_C = 1.0 mA$	90	200	600	
直流ベース電圧	V_{BE}	$V_{CE} = 6.0 V, I_C = 1.0 mA$	0.55	0.62	0.65	V
ベース飽和電圧	$V_{BE(sat)}$	$I_C = 100 mA, I_B = 10 mA$		0.86	1.0	V
コレクタ飽和電圧	$V_{CE(sat)}$	$I_C = 100 mA, I_B = 10 mA$		0.15	0.3	V
利得帯域幅積	f_T	$V_{CE} = 6.0 V, I_E = -10 mA$		250		MHz
コレクタ容量	C_{ob}	$V_{CB} = 6.0 V, I_E = 0, f = 1.0 MHz$		3.0		pF

hFE規格区分

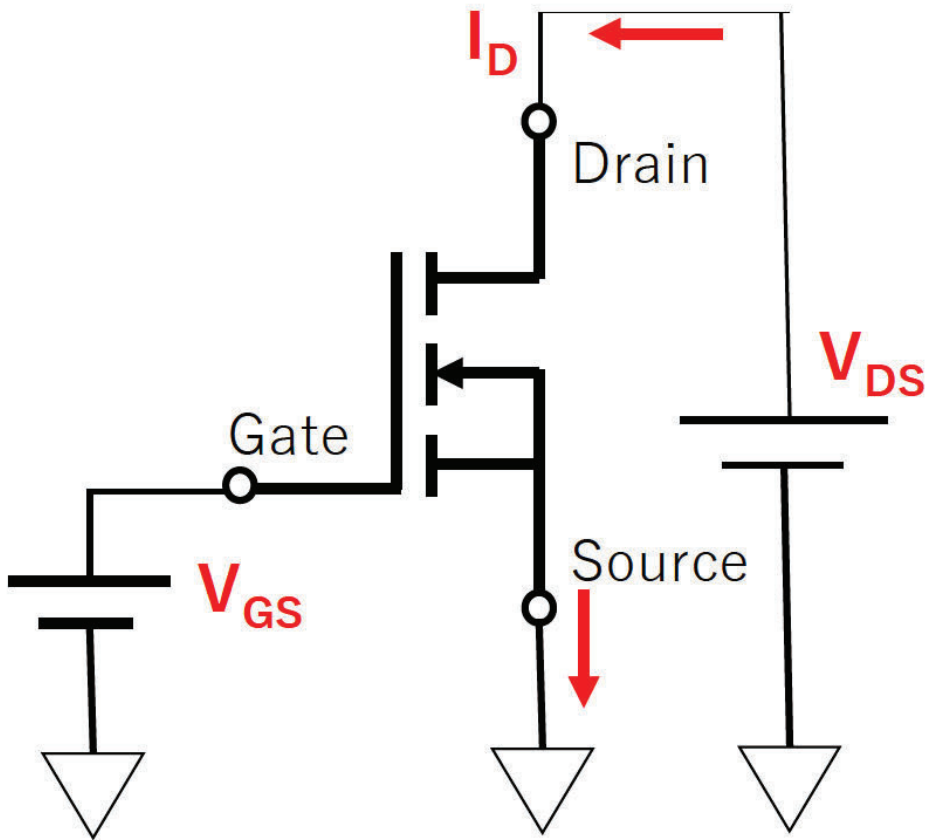
捺印	R	Q	P	K
h_{FE2}	90~180	135~270	200~400	300~600

備考 h_{FE2} テスト条件 : $V_{CE} = 6.0 V, I_C = 1.0 mA$

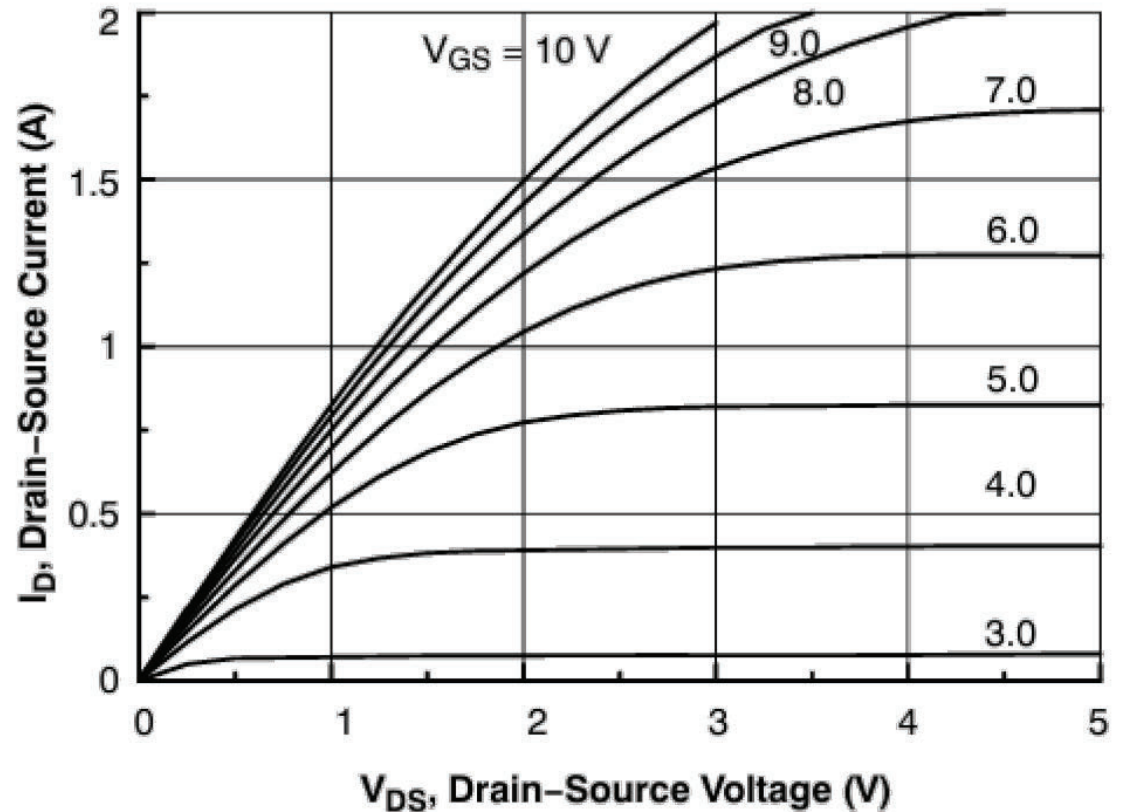
バイポーラトランジスタの放射線照射試験



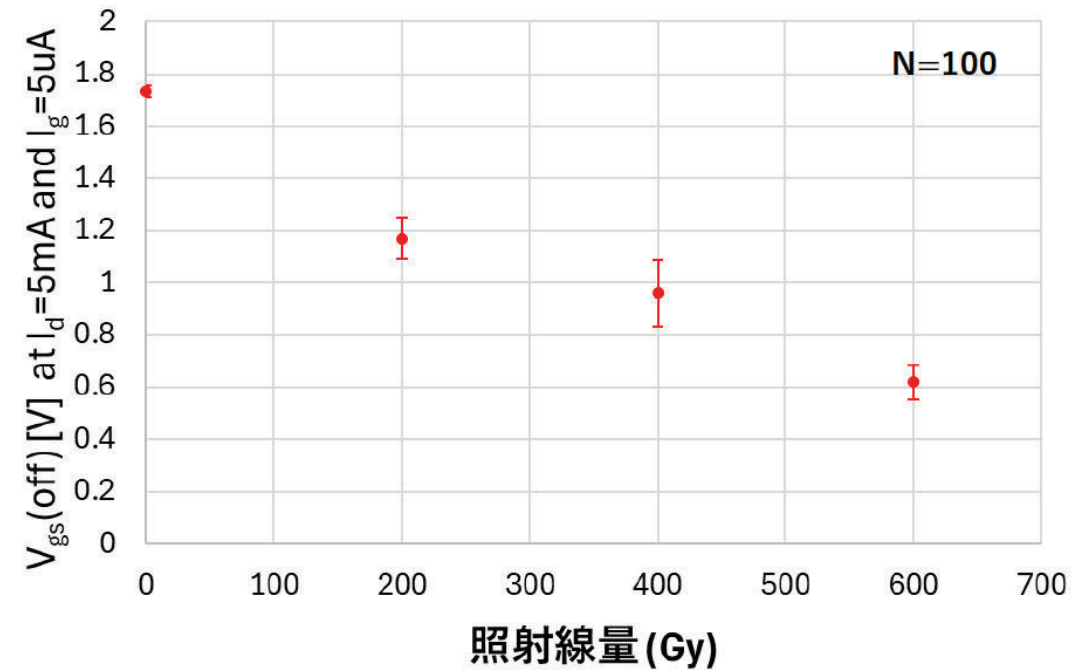
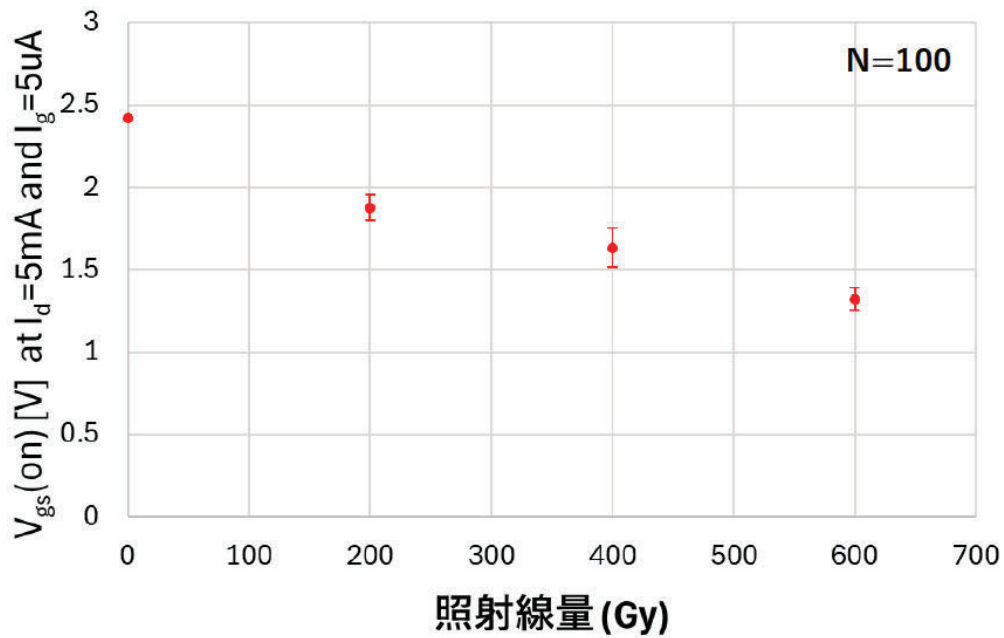
MOSFETの放射線照射試験



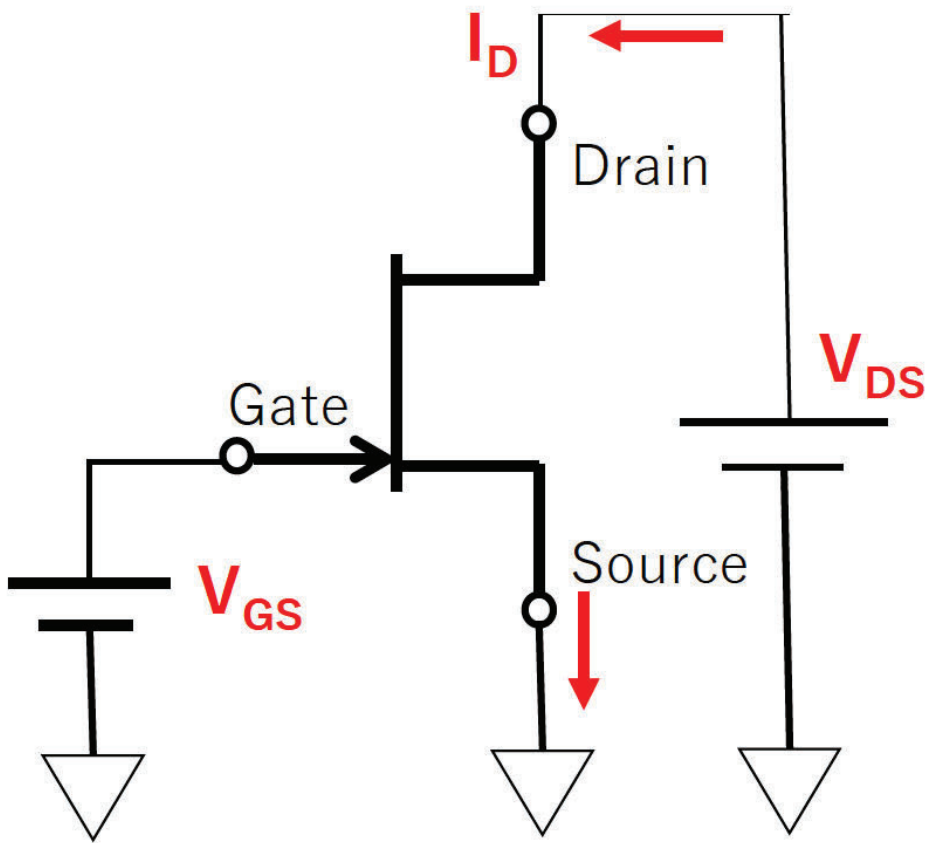
NチャンネルMOSFET



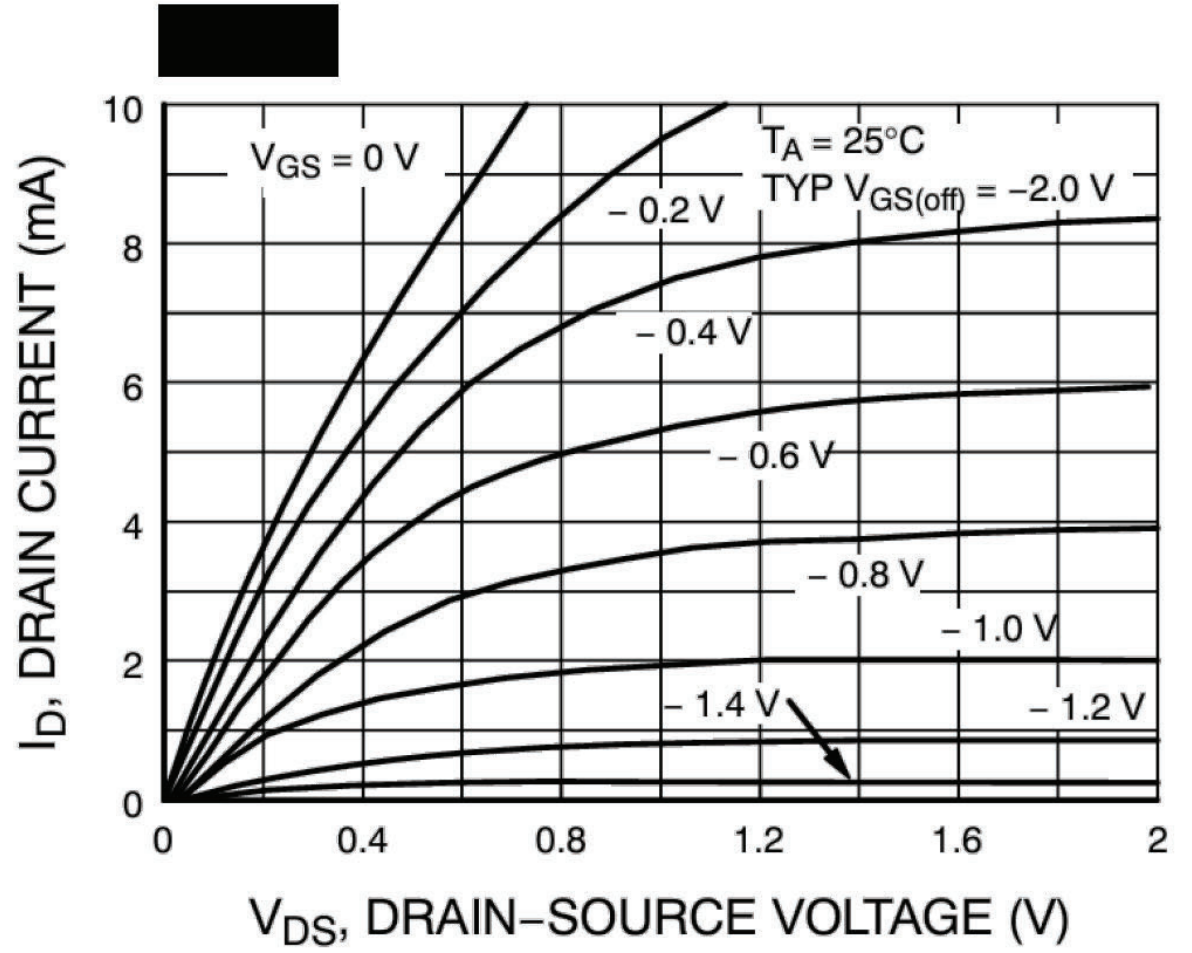
MOSFETの放射線照射試験



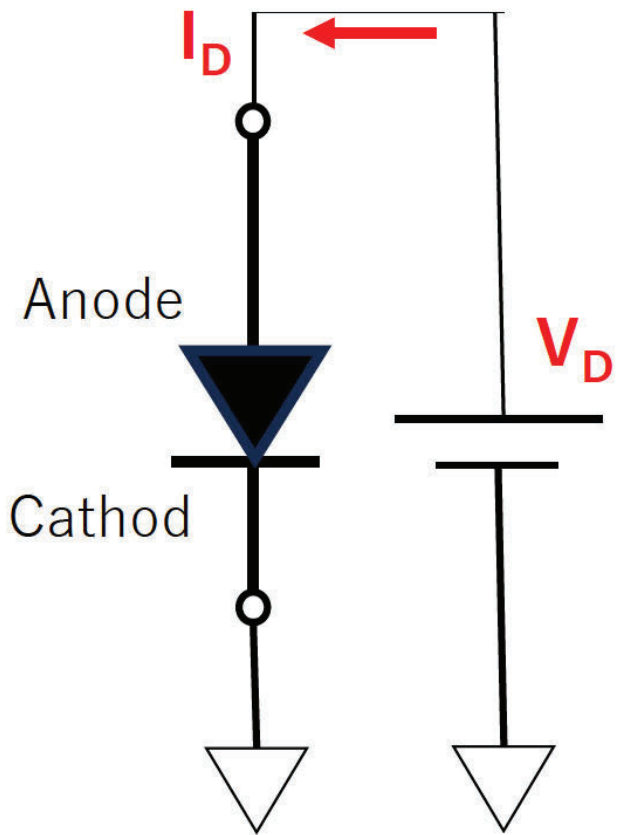
JFETの放射線照射試験



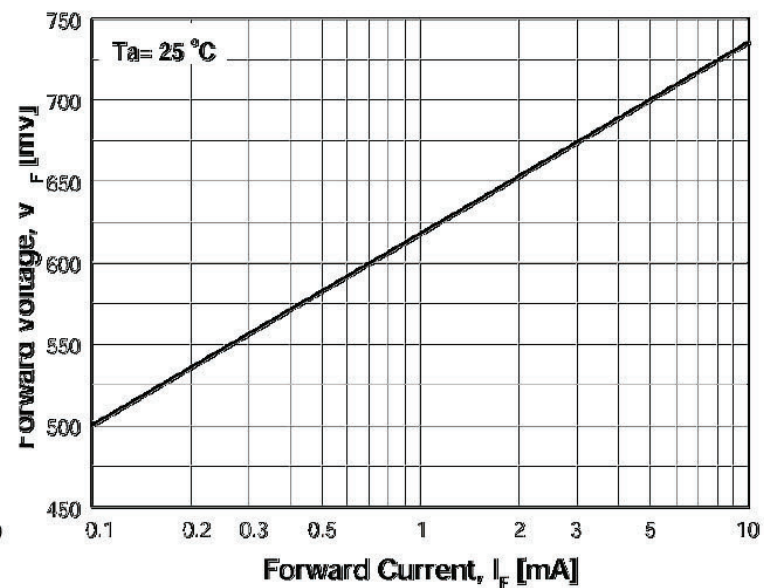
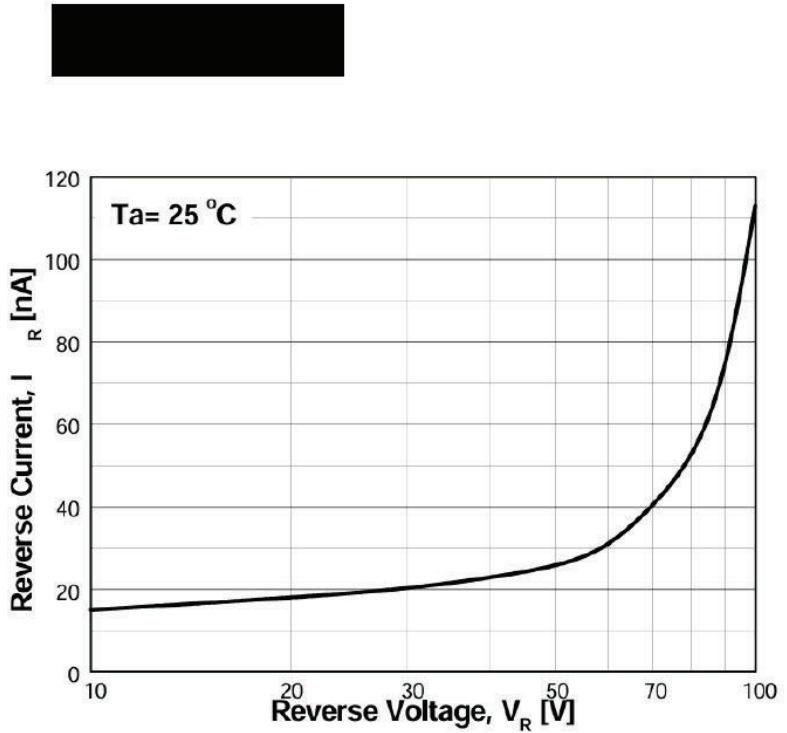
NチャンネルJFET



ダイオードの放射線照射試験

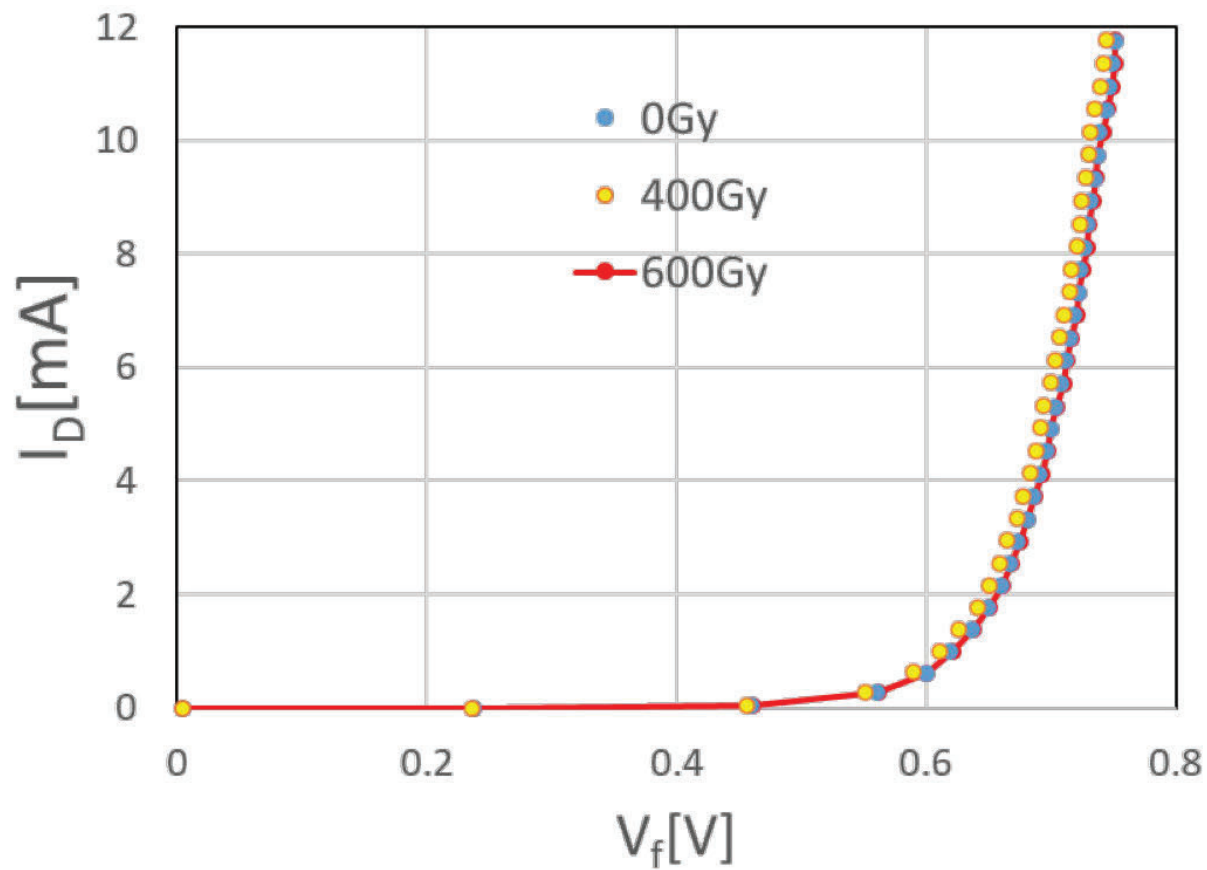


ダイオード

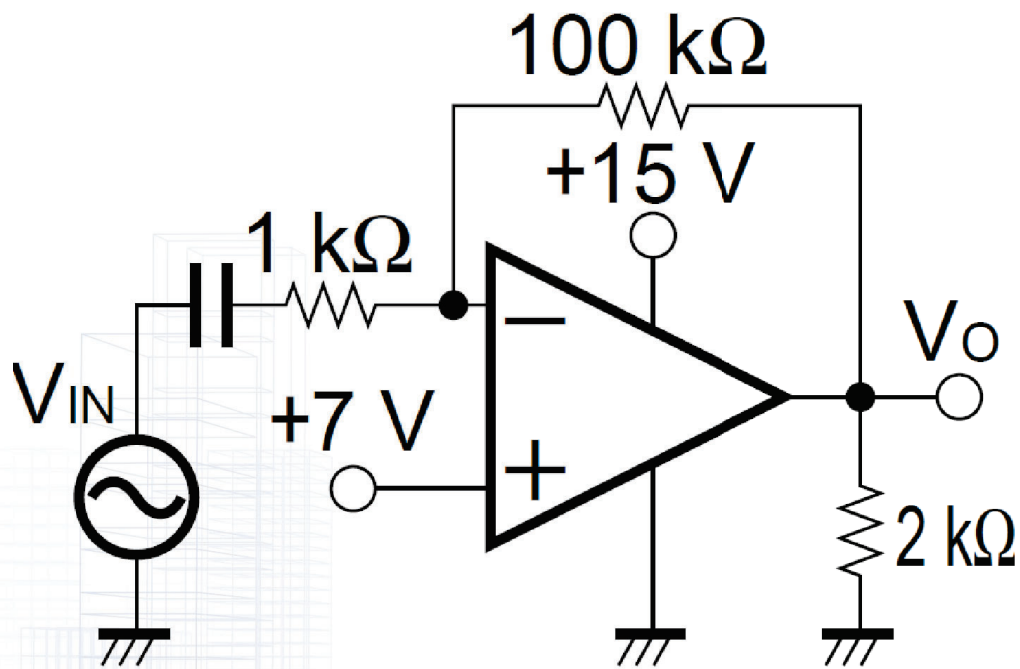


ダイオードの放射線照射試験

小信号用汎用ダイオード



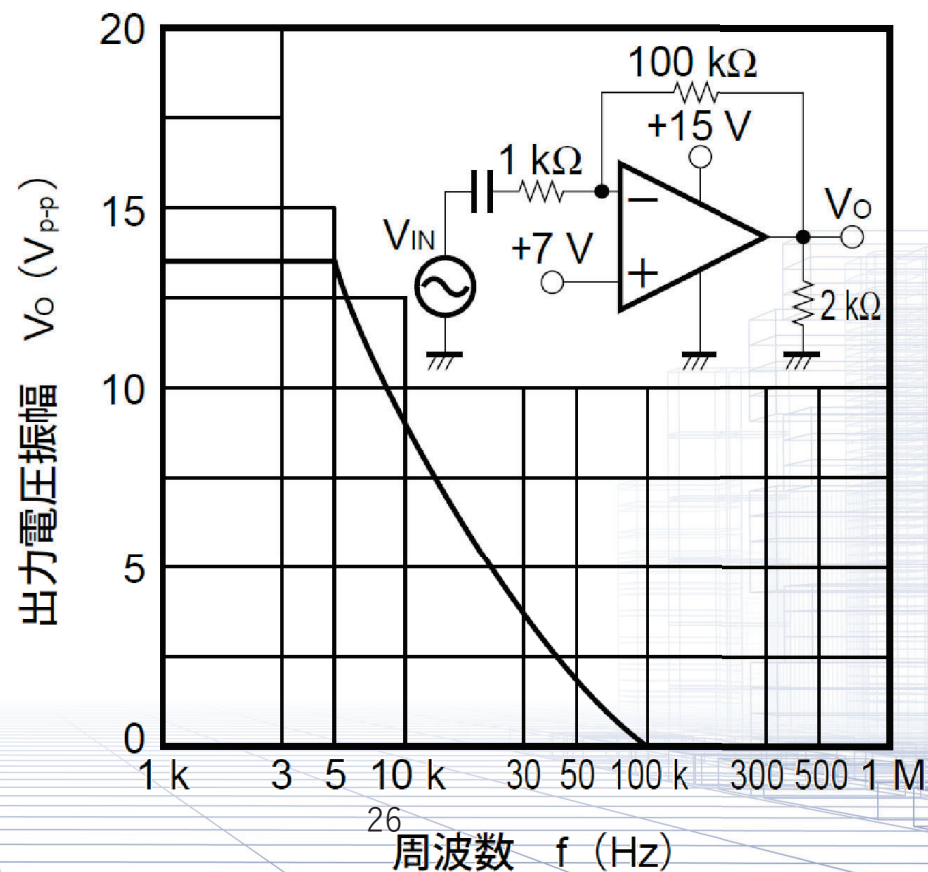
オペアンプの放射線照射試験



V_o - f 特性

データシート

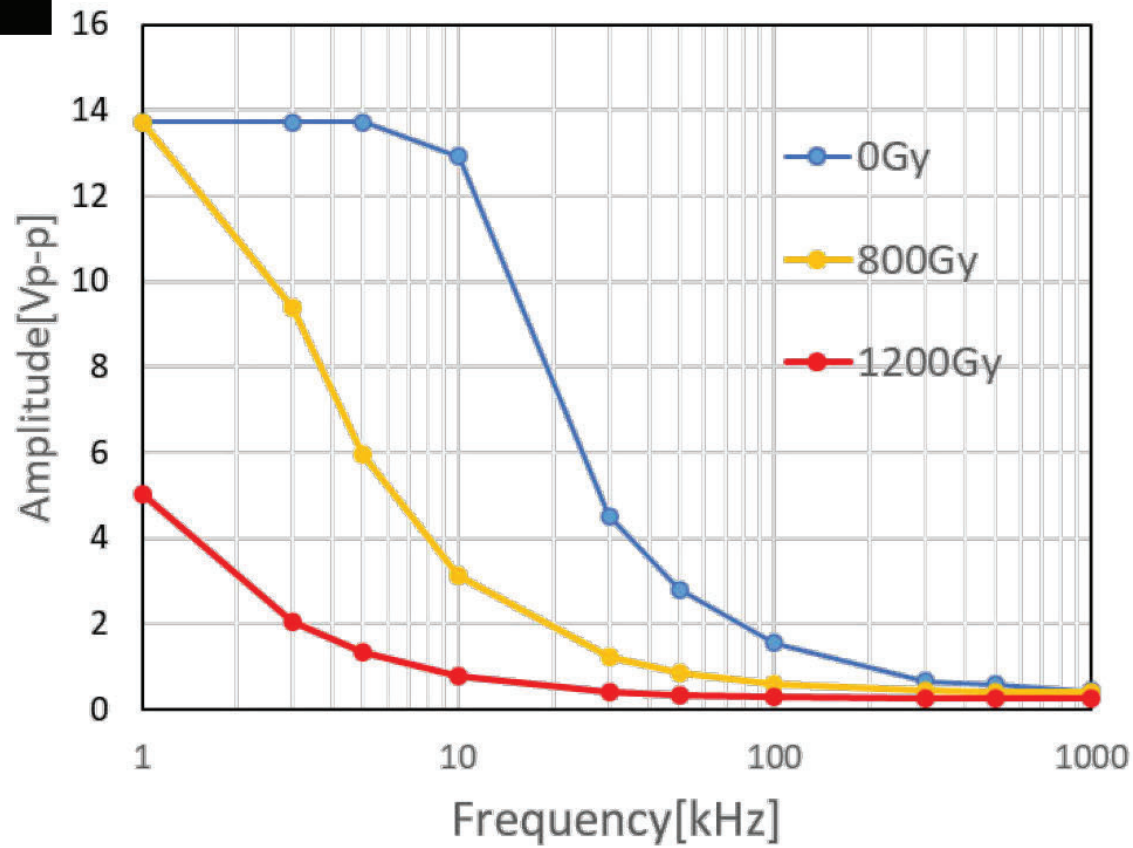
V_o - f 特性



26

周波数 f (Hz)

オペアンプの放射線照射試験

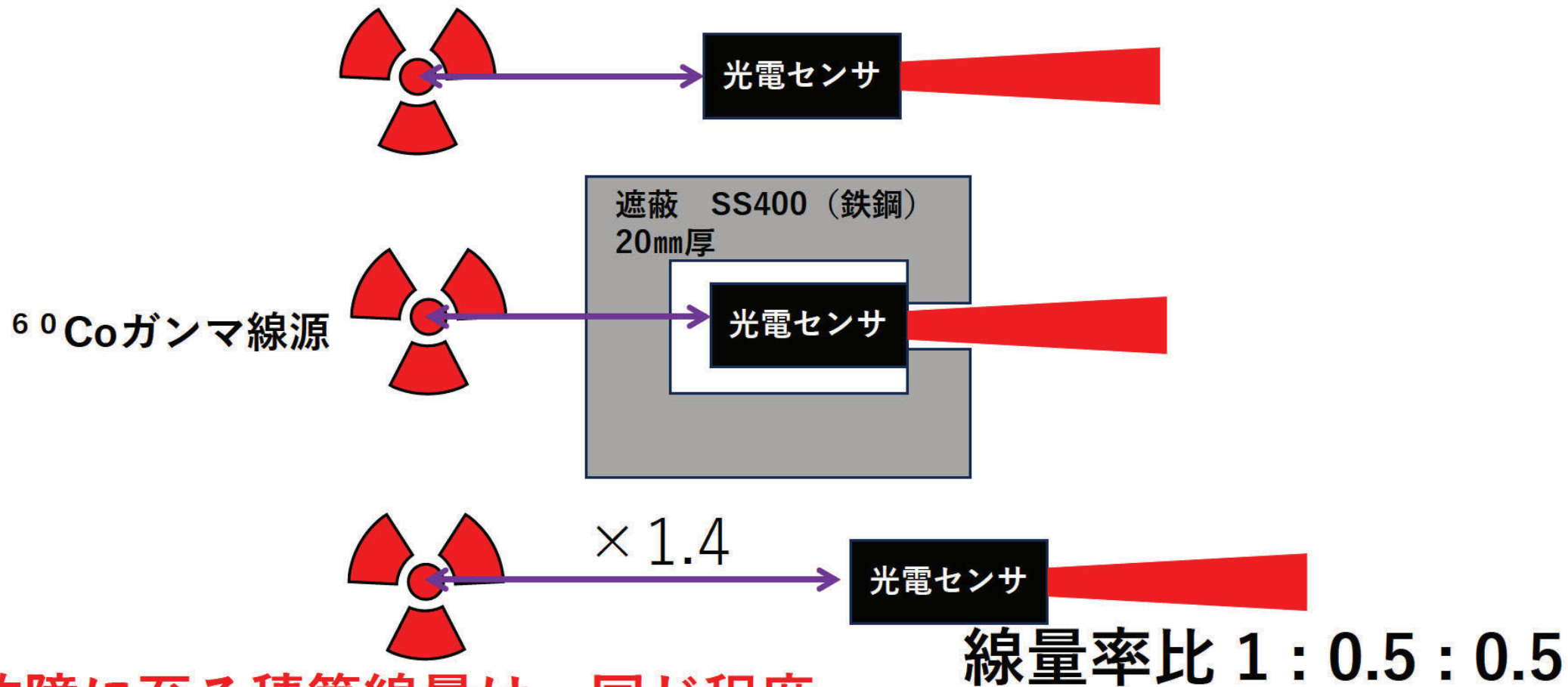


V_o -f特性

電子素子の放射線照射実験結果

	電子素子		耐放射性 (Gy)	備考
トランジスタ	nチャンネルMOSFET		200	オン電圧が0.5V遷移
	pチャンネルMOSFET		200	オン電圧が0.5V遷移
	nnpバイポーラトランジスタ		200	hFEがデータシートから逸脱
	pnpバイポーラトランジスタ		600	hFEがデータシートから逸脱
	nチャンネルJFET		> 2,000,000	2 MGy で僅かにIdが減少
	nチャンネルJFET		> 2,000,000	2 MGy まで変化なし
	pチャンネルJFET		> 2,000,000	2 MGy まで変化なし
ダイオード	3mm赤色LED		>1,000	1 kGyまで変化なし
	フォトICダイオード		>1,000	1 kGyまで変化なし
	小信号用汎用ダイオード		>1,000	1 kGyまで変化なし
コンデンサ	積層セラミックコンデンサ (MLCC) 10 μ F		>1,000,000	1 MGyまで変化なし
	アルミ電解コンデンサー 10 μ F		>1,000,000	1 MGyまで変化なし
集積回路	オペアンプ		300	200Gyより変化あり
	コンパレータ			試験中
	三端子レギュレータ			試験中

放射線照射実験 遮蔽体について



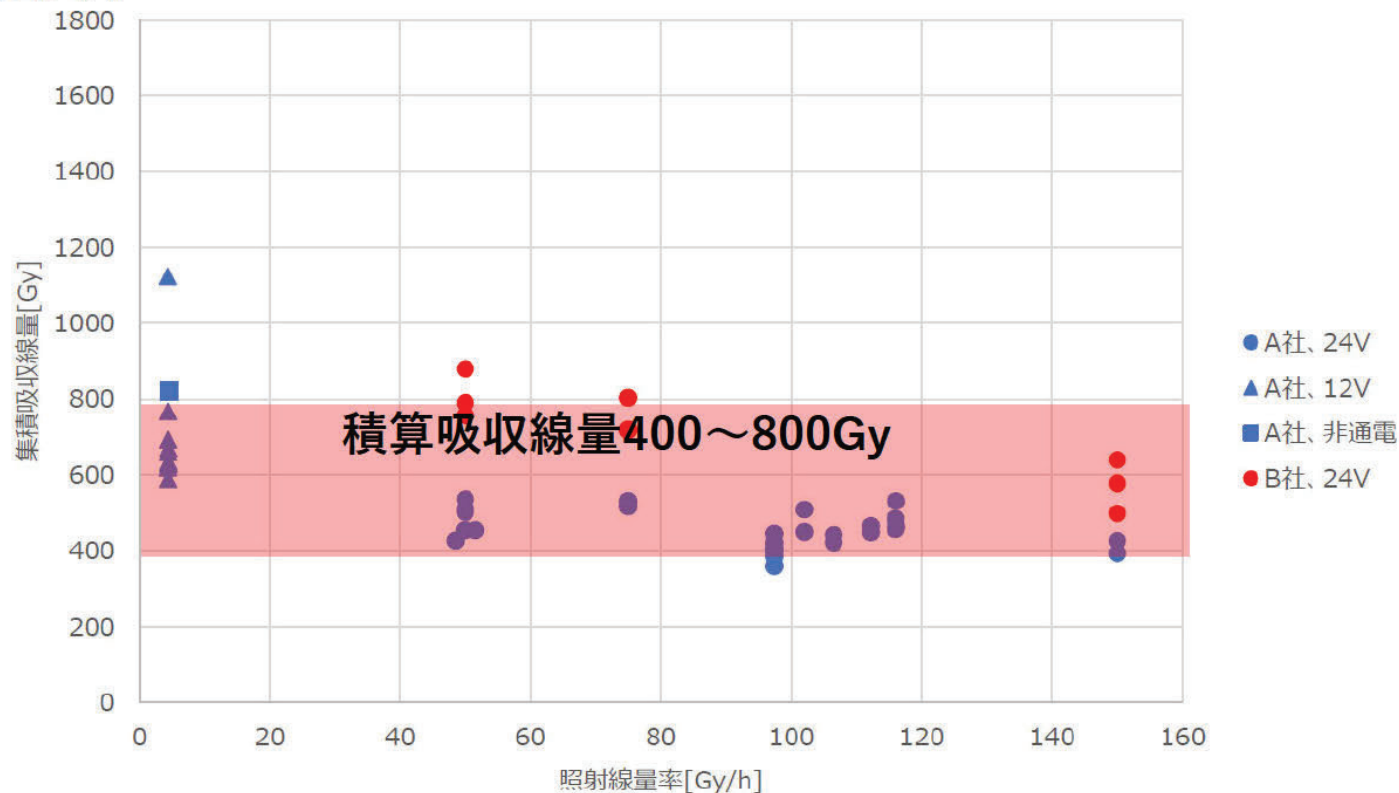
故障に至る積算線量は、同じ程度
(前回の調査委員会より神戸製鋼より報告)

4. 照射試験結果

本書には神戸製鋼所の技術情報が含まれておりますので、神戸製鋼所の承認なく他社に伝達、開示されることのないようお願い致します。

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。

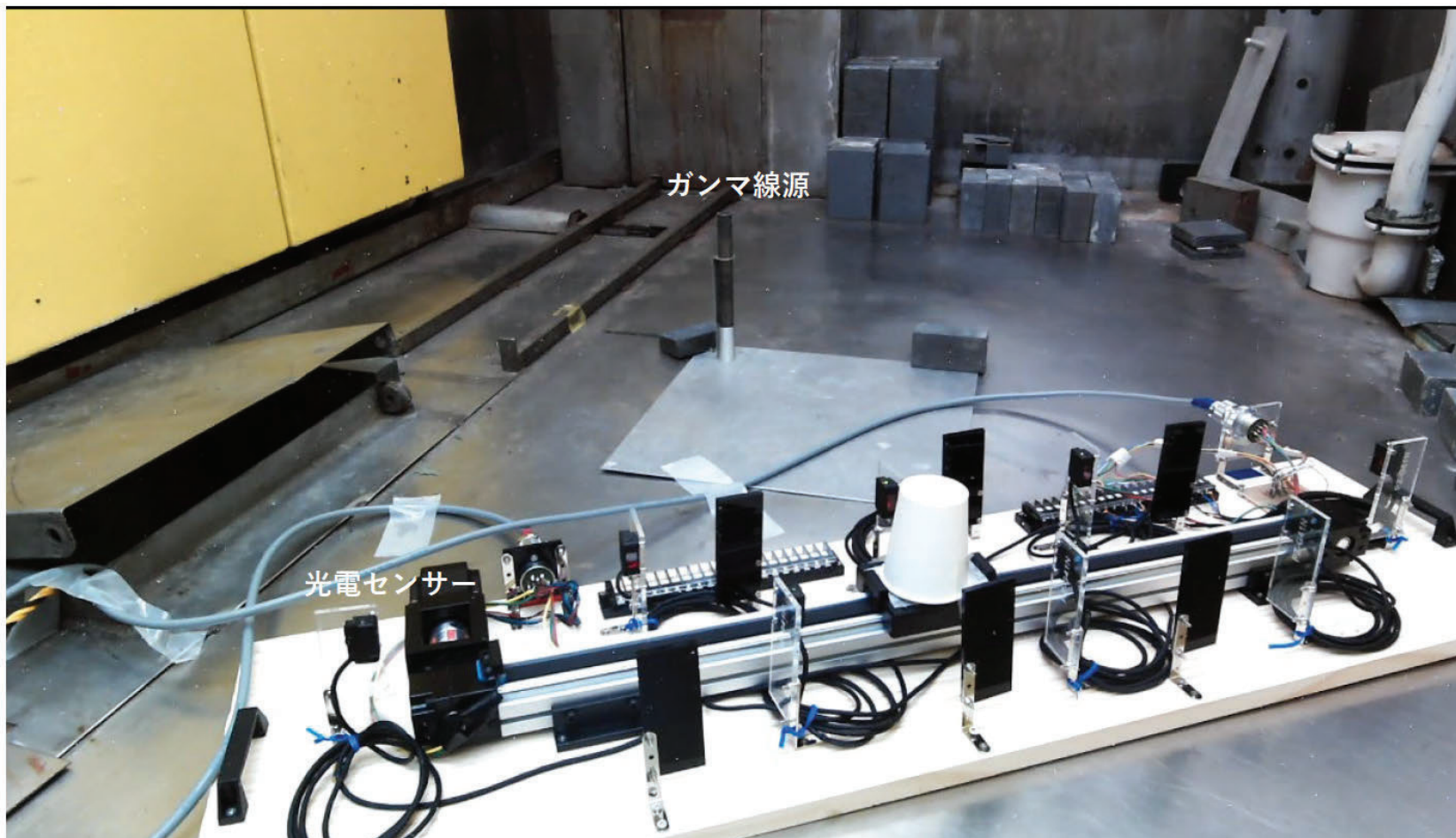
【光電センサ】



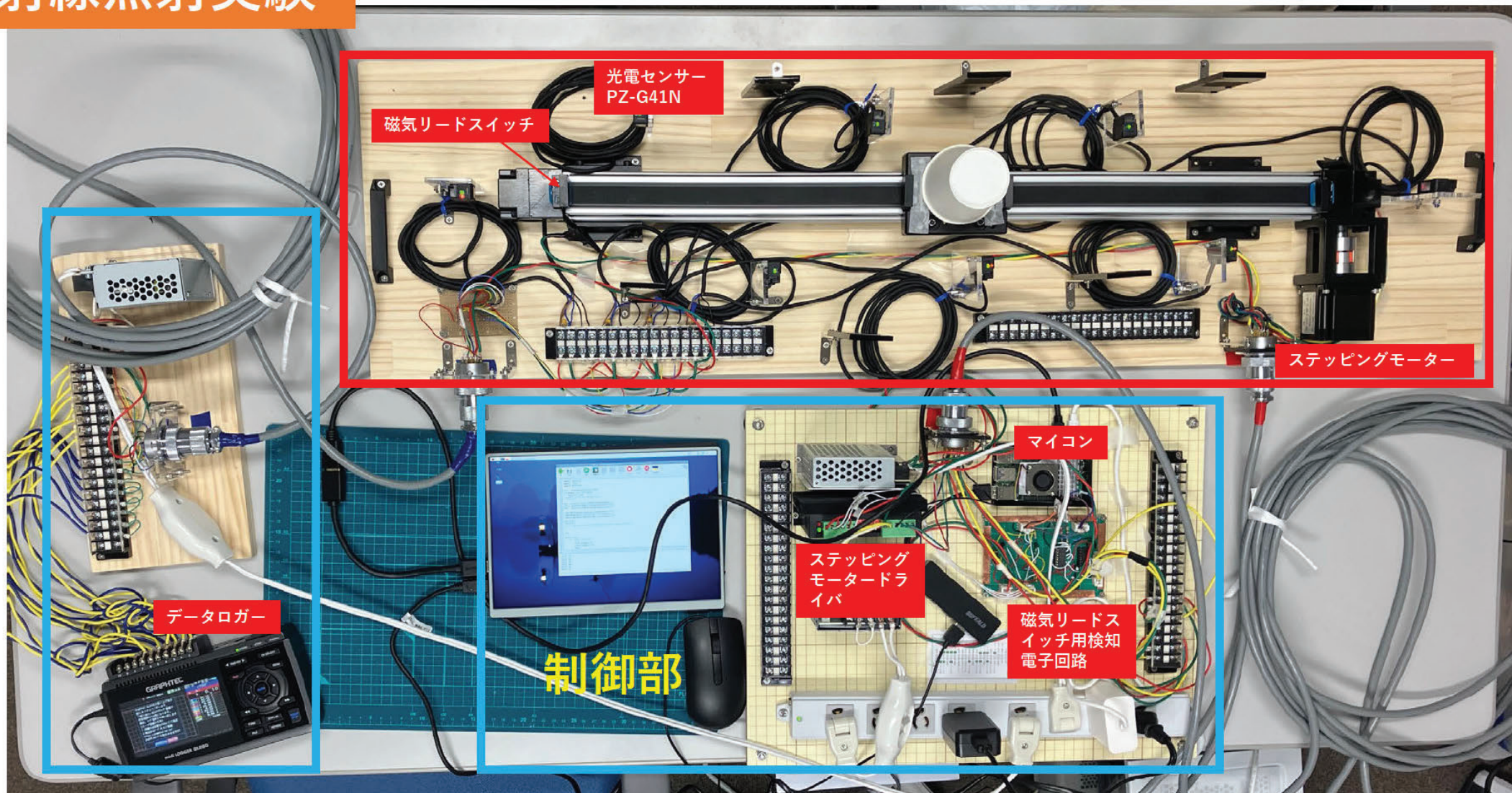
故障時の集積吸収線量[Gy]

※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

放射線照射実験



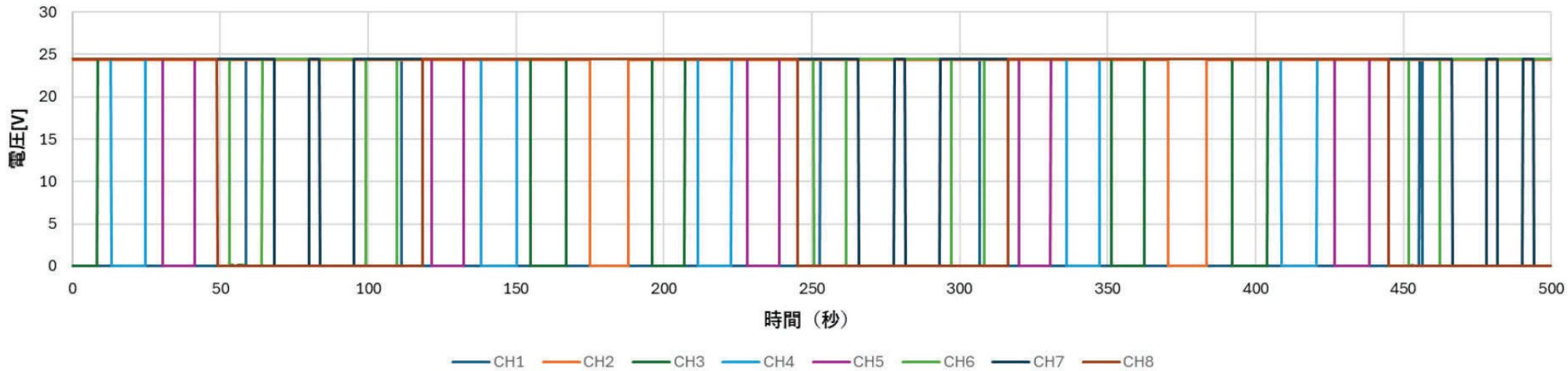
放射線照射実験



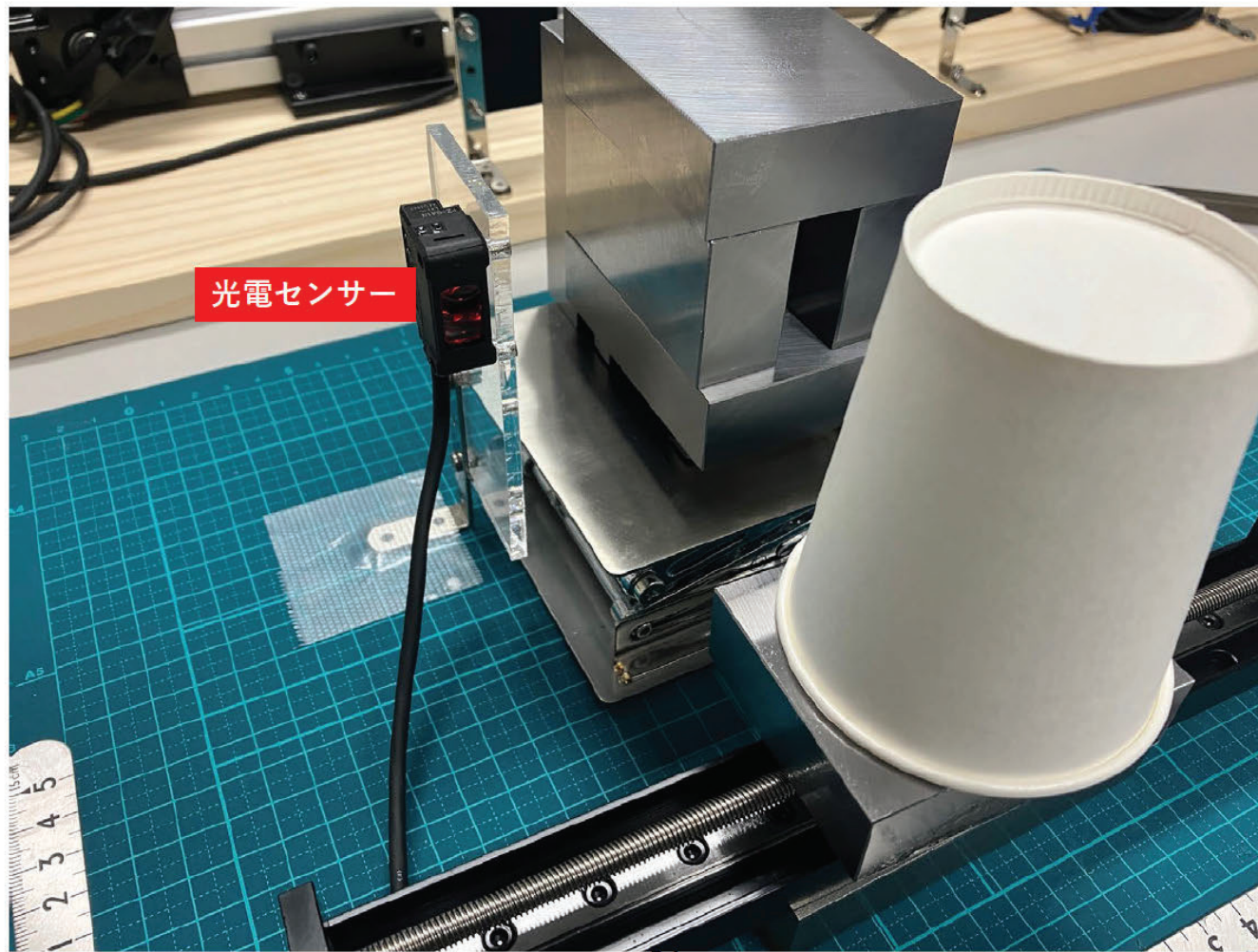
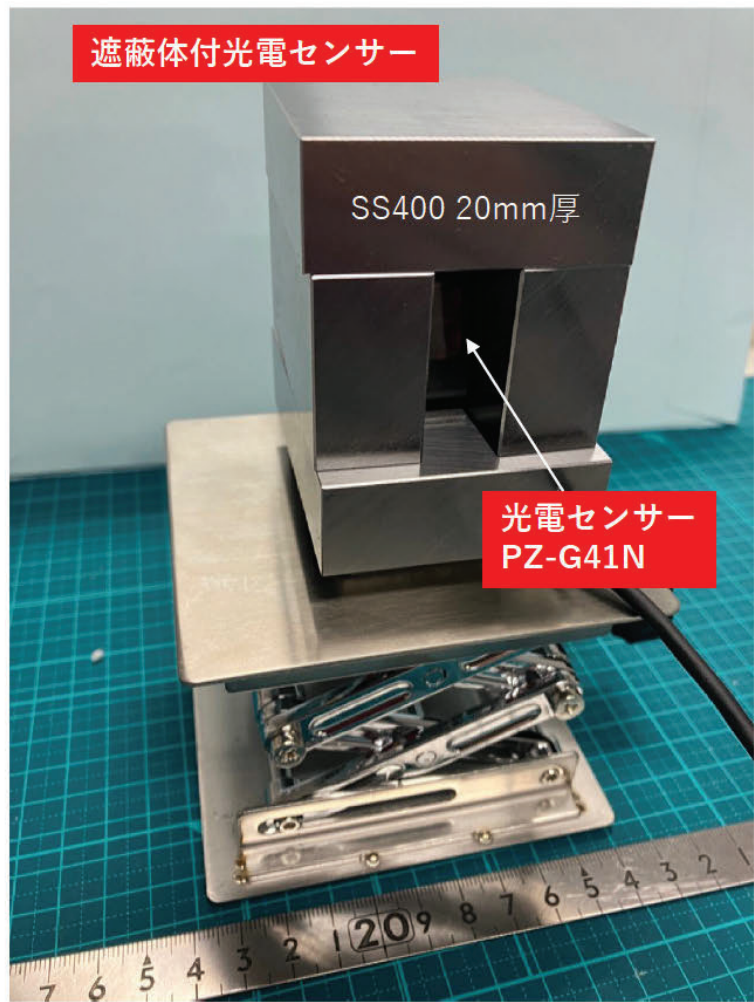
放射線照射実験

光電センサー検知信号

正常にステージセンサーが動作しているときは、光電センサーの検知信号は、同じパターンの繰り返しとなっている。



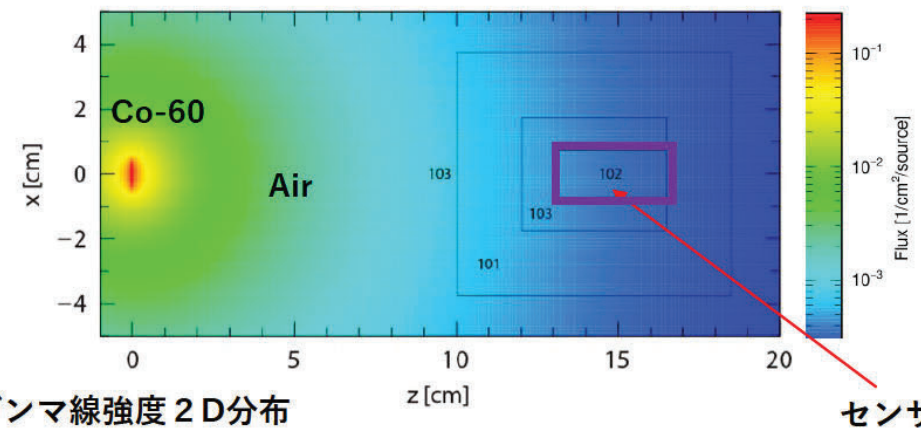
放射線照射実験



放射線照射実験 遮蔽体無し

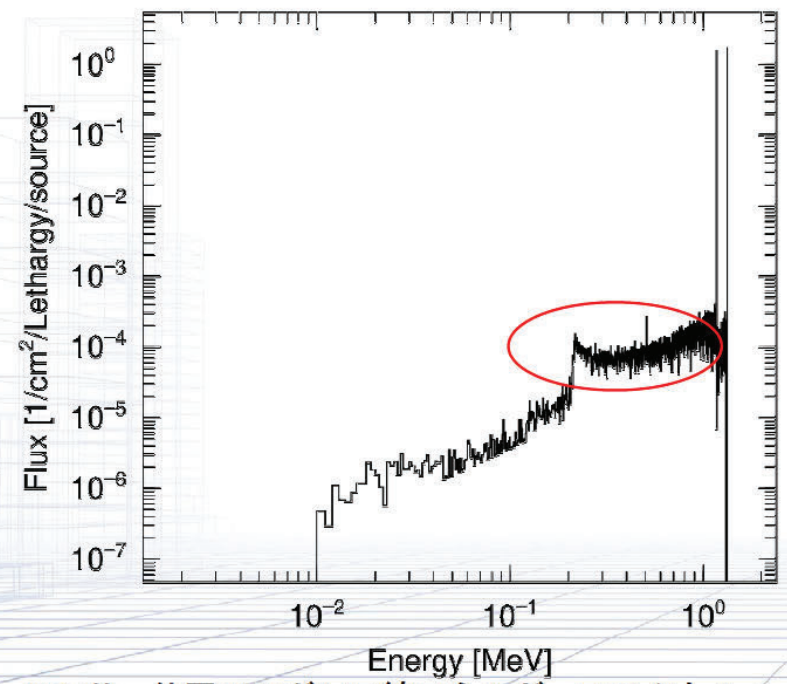


emin = 0.0000E+00 [MeV]
 emax = 1.0000E+03 [MeV]
 ymin = -5.0000E+00 [cm]
 ymax = 5.0000E+00 [cm]
 part. = all

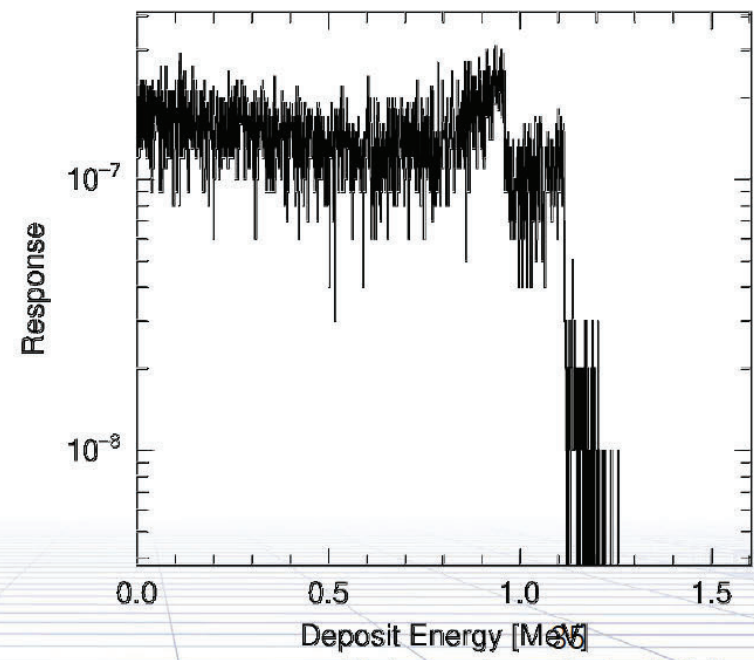


ガンマ線強度 2D分布

センサー

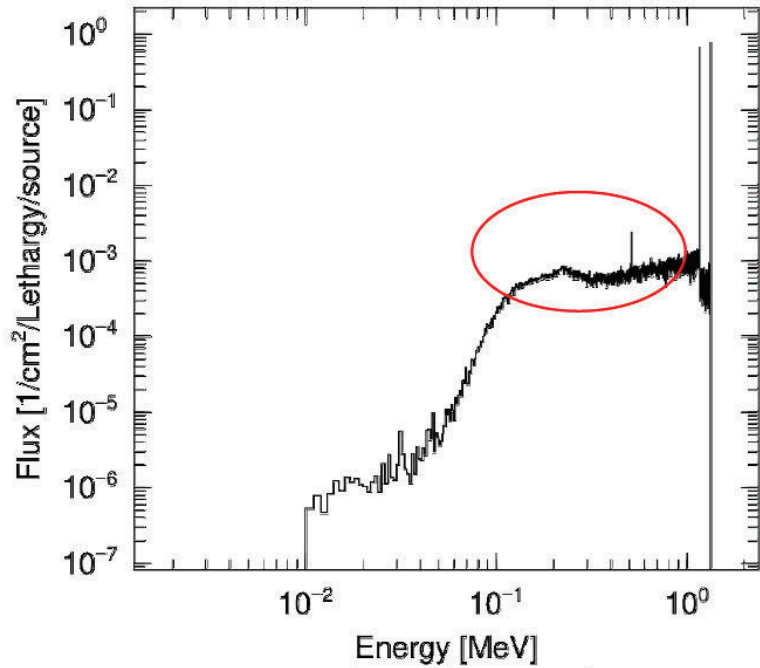
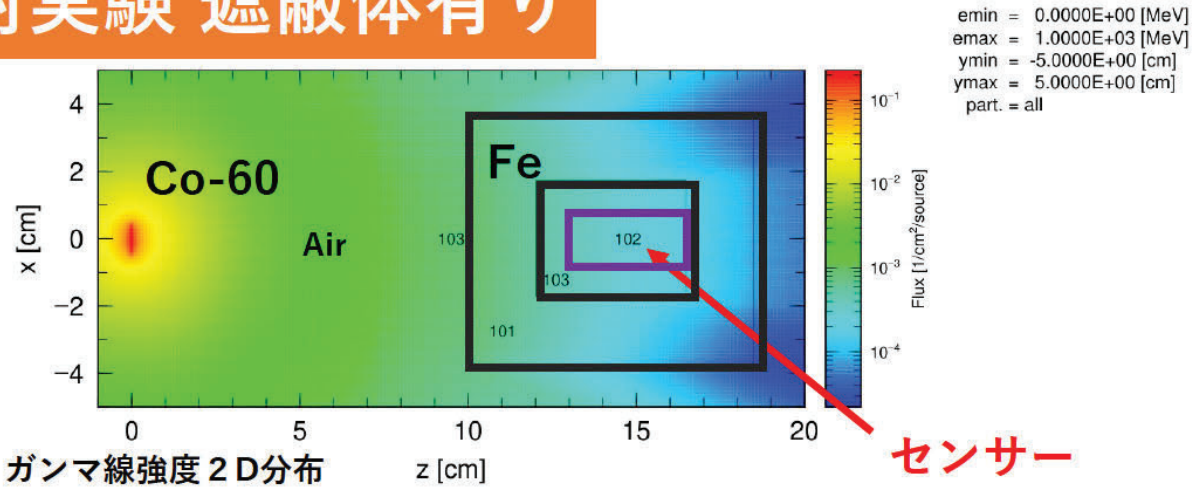


センサー位置でのガンマ線エネルギースペクトル

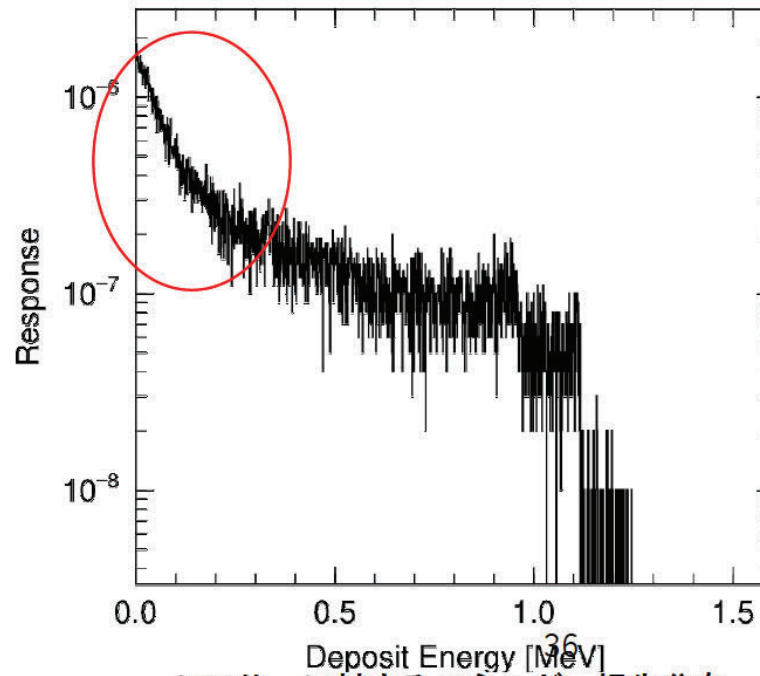


センサーに対するエネルギー損失分布

放射線照射実験 遮蔽体有り



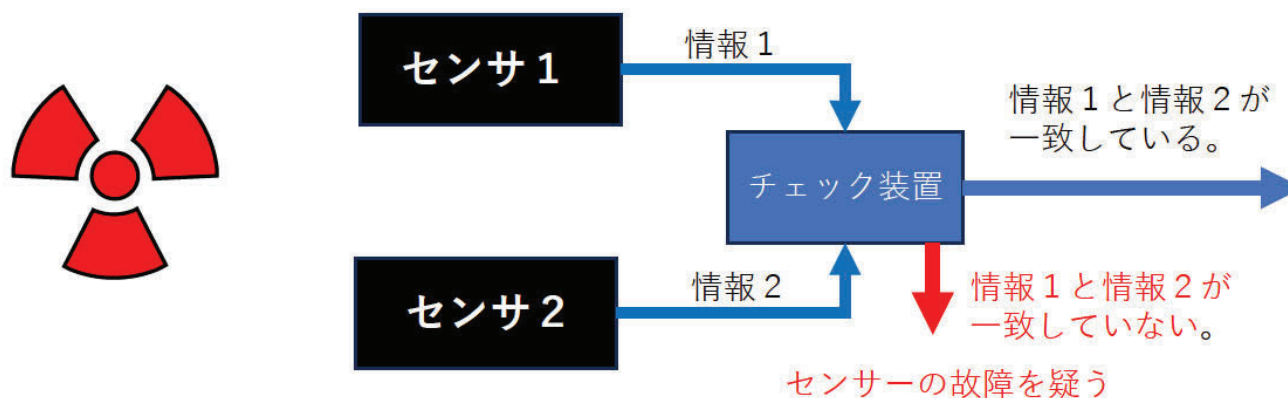
センサー位置でのガンマ線エネルギースペクトル



センサーに対するエネルギー損失分布

議論すべき項目

- 一般産業用センサー等を放射線場で使用する事を検討する場合、事前に照射試験は必要か？
想定される積算線量（空気換算）がどれくらい以上であれば必要か？
この委託事業で実施されている加速照射試験は有効か？
マイコン、FPGAなど耐放射線性が低いと想定される素子で耐放射線が決まるのか？
- 一般産業用センサー等を放射線場で使用するとき、
遮蔽は有効であるが、加速照射試験の評価から安全側に耐放射線量を評価できるか？
センサーそのものの耐用年数との関係は？
並列冗長系（検出部については、1か所に2つ以上のセンサを使って常時測定し、両方の測定値の偏差が許容範囲を超えたらセンサーのエラーとするなどの方式）は有効か？ センサーが同時に壊れる可能性は？



並列冗長系の例

原子力産業基盤強化事業委託費

第3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

—簡易遮へい評価手法の適用方法検討結果—

2025年2月3日（月）
株式会社 神戸製鋼所

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価
2. ガラス線量計特性の評価試験・解析
3. 簡易遮へい評価手法の適用性検討
4. まとめ

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和5年度までに実施したセンサ類の遮へい解析において、MCNPの計算結果と照射試験結果に20%以下の誤差が生じている。令和5年度に実施した第1回技術委員会において、「線量計の組成を考慮せず、空気の換算係数で吸収線量率を算出している計算方法は妥当であるか」とコメントを頂いた。

そこで、令和5年度までに実施した遮へい解析について、線量計の組成を考慮したうえで、再解析を行い、吸収線量率への影響を評価した。第2回技術委員会では、2ケースの評価結果について、ご報告した。

<再解析対象ケース>

カスタマイズ*した光電センサ（100Gy/h）の遮へい解析：令和3年度に実施
カスタマイズした測域センサ（150Gy/h）の遮へい解析：令和3年度に実施

カスタマイズした光電センサ（5Gy/h）の遮へい解析：令和4年度に実施
カスタマイズした測域センサ（5Gy/h）の遮へい解析：令和5年度に実施

*：カスタマイズとはセンサの耐放射線性向上のため、センサの周囲に遮へい体を設置することを示す。

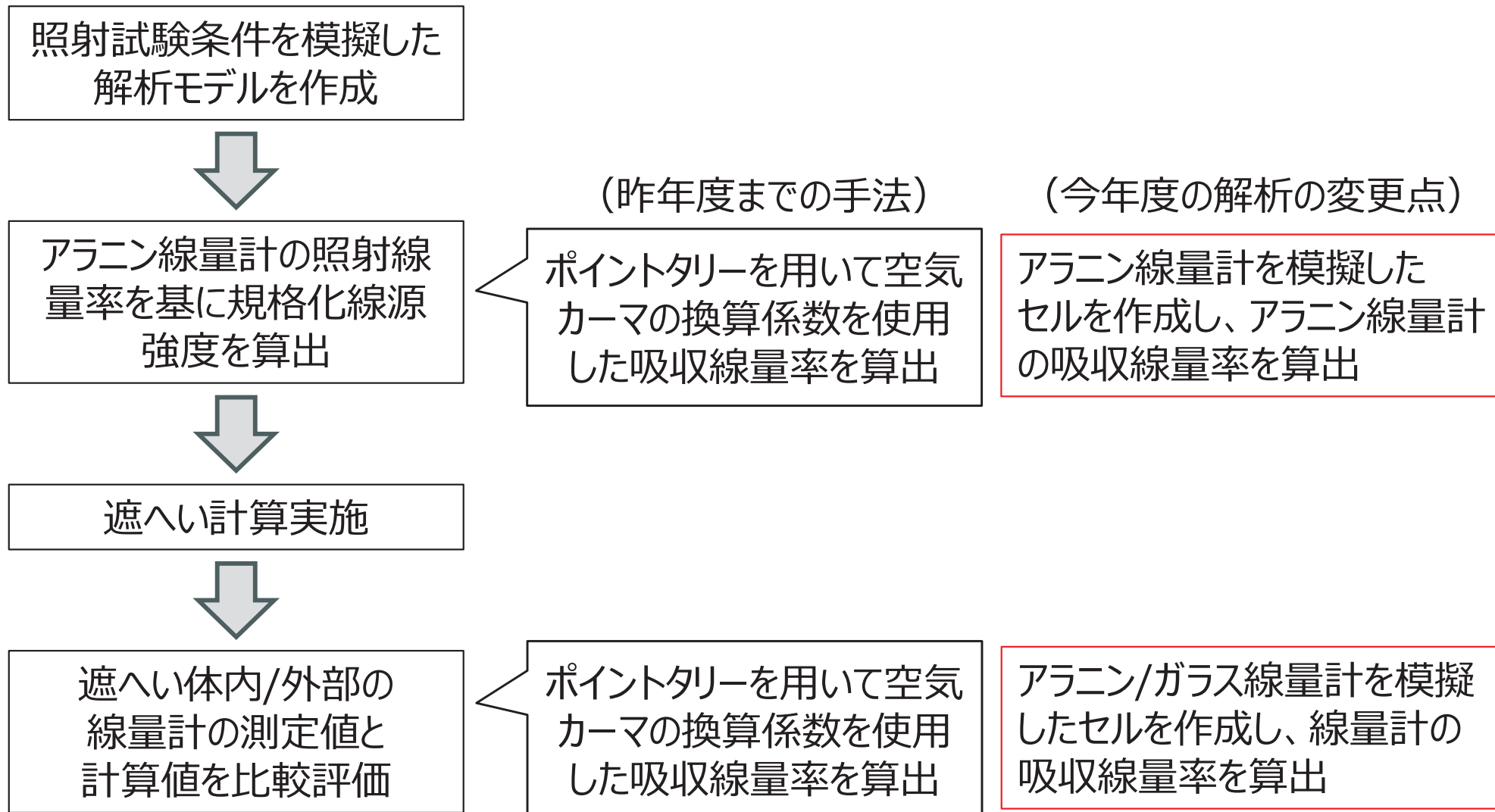


第3回技術委員会では令和4,5年度に遮へい解析を実施した2ケース
（光電センサ：5Gy/h及び測域センサ：5Gy/h）の再評価結果をご報告する。

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

＜解析手順概要及び組成影響評価のための変更点＞

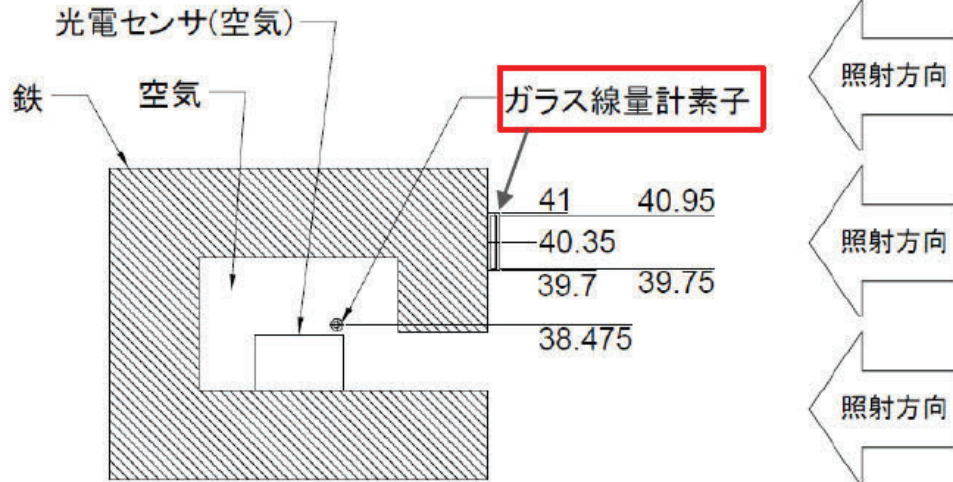
(解析手順概要)



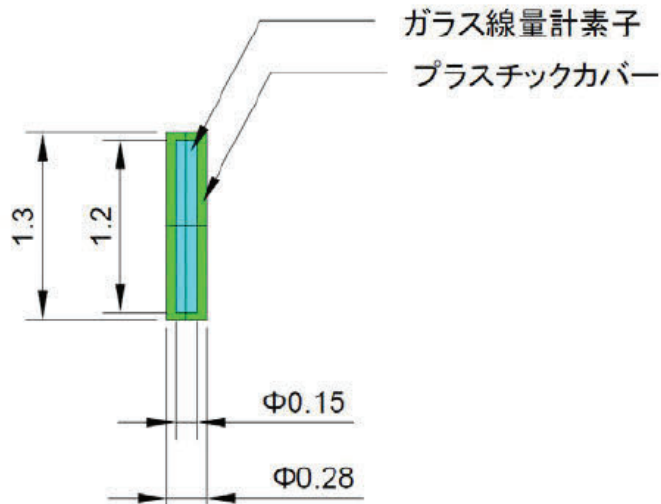
1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和4年度に実施した光電センサの遮へい解析における解析モデルを以下に示す。

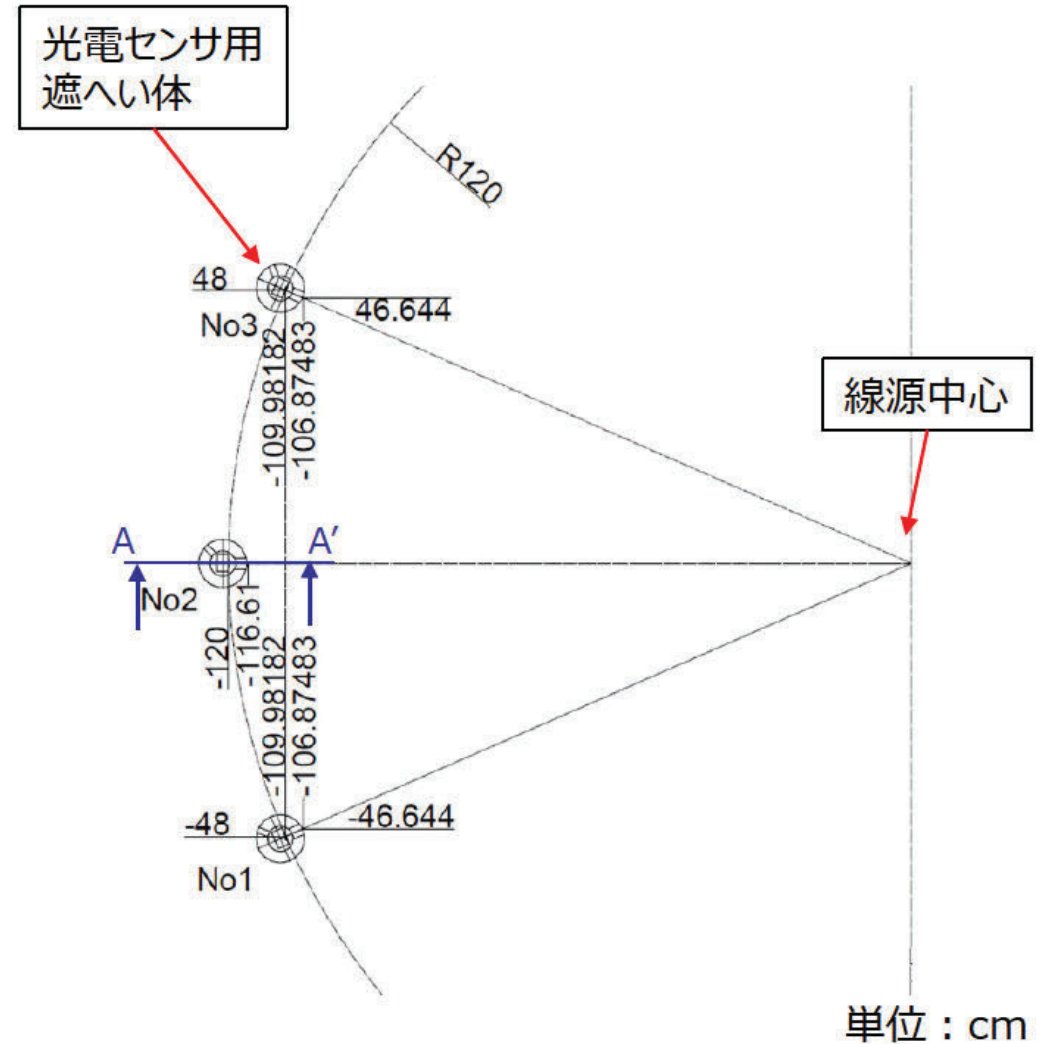
A-A'断面



光電センサ用遮へい体モデル



ガラス線量計解析モデル

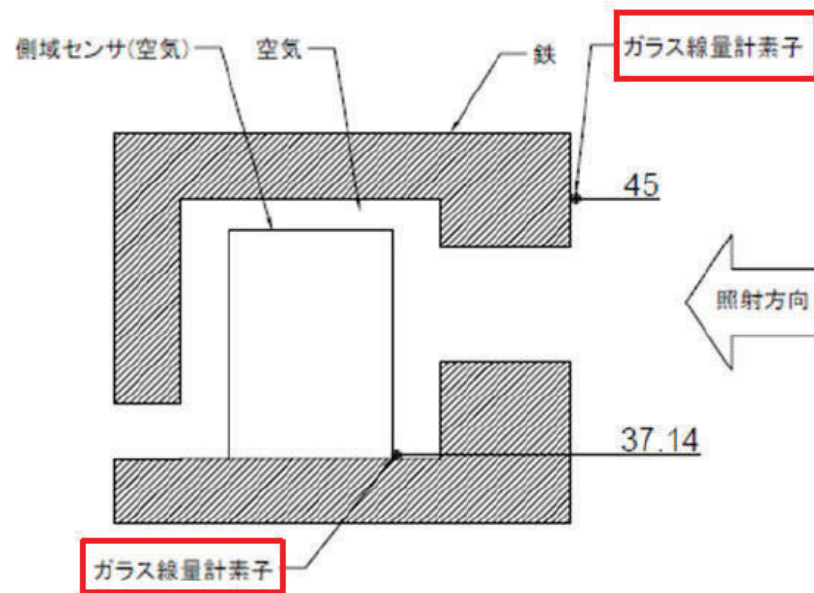


光電センサ解析モデル

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

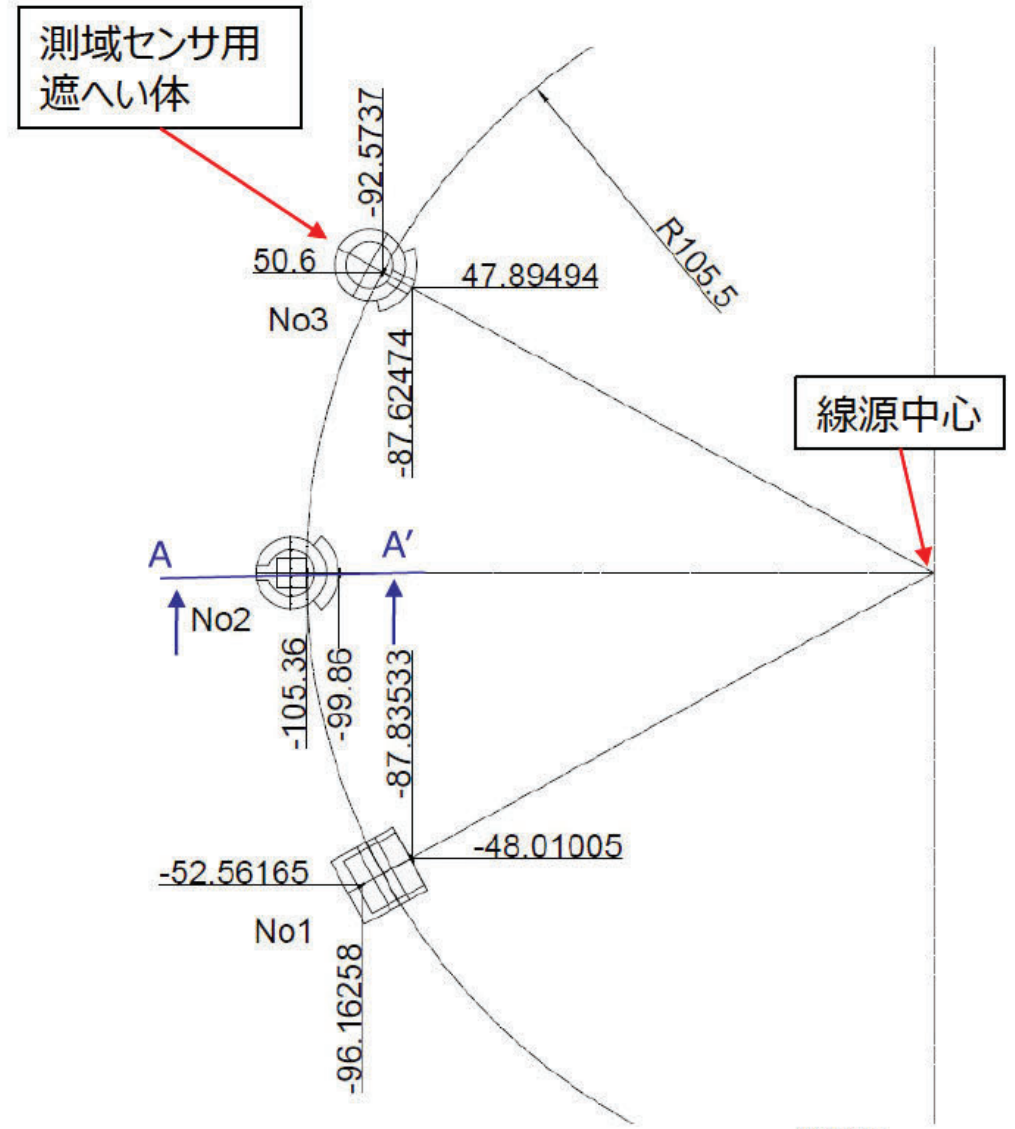
令和5年度に実施した測域センサの遮へい解析における解析モデルを以下に示す。

A-A'断面



測域センサ用遮へい体モデル

注：令和5年度は、照射位置によって測域センサ用遮へい体の設置向きが異なる。遮へい体正面から照射した例を示す。



測域センサ解析モデル 単位：cm

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

令和4,5年度の遮へい計算に用いた物性値を以下に示す。

空気の密度*1

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

空気カーマの換算係数*2

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

*1：小山 謹二, 奥村 芳弘, 古田 公人, 他, “遮蔽材料の群定数—中性子100群・ガンマ線20群・P5近似—”, JAERI-M 6928, (1977).

*2：一般社団法人 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)

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

本年度の遮へい解析に用いた物性値を以下に示す。

なお、令和4,5年度の試験では、アラニン線量計の測定結果を用いて線源を規格化した。また、遮へい体内/外部ともに、ガラス線量計を用いて吸収線量率の評価を行っているため、解析においても各線量計を模擬したセルを作成し、吸収線量率を評価した。

ガラス線量計の密度*1

物質	ガラス線量計	
密度(g/cm ³)	2.61	
元素	組成比(W/O)	密度(g/cm ³)
P	3.1550E-01	8.2346E-01
O	5.1160E-01	1.3353E+00
Al	6.1200E-02	1.5973E-01
Na	1.1000E-01	2.8710E-01
Ag	1.7000E-03	4.4370E-03
合計	1.0000E+00	2.6100E+00

アラニン線量計の密度*2

物質	アラニン線量計	
密度(g/cm ³)	1.42	
元素	組成比(W/O)	密度(g/cm ³)
H	7.9190E-02	1.1245E-01
C	4.0444E-01	5.7430E-01
N	1.5721E-01	2.2324E-01
O	3.5916E-01	5.1001E-01

*1 : 大阪大学「蛍光ガラス線量計小型素子システム(Dose Ace)の高エネルギー領域における基本特性の検討」(平成24年1月)

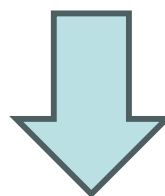
*2 : Homeland Security「Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling」(April, 2021)

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

光電センサの遮へい計算結果を以下に示す。

測定位置	センサ No.	測定値	令和4年度計算値			本年度再計算値		
		線量率 [Gy/h]	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$
遮へい体外側	1	5.50	4.82	0.88	0.12	4.73	0.86	0.14
	2	5.31	4.82	0.91	0.09	4.45	0.84	0.16
	3	5.73	4.82	0.84	0.16	4.46	0.78	0.22
遮へい体内側	1	2.49	2.91	1.17	0.17	2.74	1.10	0.10
	2	2.52	2.90	1.15	0.15	2.64	1.05	0.05
	3	2.60	2.90	1.12	0.12	2.62	1.01	0.01
-			平均誤差		0.14	平均誤差		0.11

* : C/Eは計算値 (C) と測定値 (E) の比を示す。



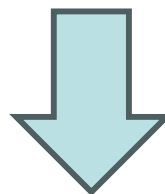
ガラス線量計の組成を考慮することで平均誤差が約3%低下する結果となった。

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

測域センサの遮へい計算結果を以下に示す。

測定位置	センサ No.	測定値	令和5年度計算値			本年度再計算値		
		線量率 [Gy/h]	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$	線量率 [Gy/h]	C/E*	$\sqrt{(C/E-1)^2}$
遮へい体外側	1	6.86	5.53	0.81	0.20	5.13	0.75	0.25
	2	6.49	5.53	0.85	0.15	5.11	0.79	0.21
	3	6.10	5.54	0.91	0.09	5.11	0.84	0.16
遮へい体内側	1	2.44	2.50	1.03	0.03	2.36	0.97	0.03
	2	1.57	1.70	1.08	0.08	1.59	1.02	0.02
	3	5.23	5.06	0.97	0.03	4.67	0.89	0.11
-		平均誤差			0.10	平均誤差		0.12

* : C/Eは計算値 (C) と測定値 (E) の比を示す。



ガラス線量計の組成を考慮することで平均誤差が**約2%増加**する結果となった。

1. 線量計の組成を考慮したMCNPによる線量評価

測域センサの遮へい計算では、組成を考慮した場合、誤差が大きくなる結果が得られた。

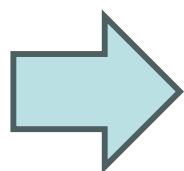
誤差の要因としては、ガラス線量計の吸収線量依存性の影響が考えられた。

遮へい解析と比較を行ったカスタマイズ試験におけるガラス線量計の集積吸収線量を以下に示す。

測定位置	センサ No.	令和4年度光電センサ				令和5年度測域センサ			
		線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	C/E*	線量率 [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	C/E* ¹
遮へい体外側	1	5.50	68.9	379	0.86	6.86	64.5	443	0.75
	2	5.31		366	0.84	6.49* ²		441	0.79
	3	5.73	86.4	495	0.78	6.10		394	0.84
遮へい体内側	1	2.49	68.9	171	1.10	2.44		158	0.97
	2	2.52		174	1.05	1.57* ²		102	1.02
	3	2.60	86.4	225	1.01	5.23		337	0.89

*1 : C/Eは線量計組成を考慮し再計算した計算値と測定値の比を示す。

*2 : No.2については64.5h及び21.3h照射したガラス線量計の集積吸収線量から算出している。

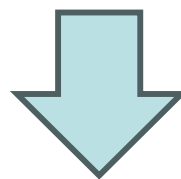


集積吸収線量が約300Gyを超える場合、測定値との誤差が大きくなり、約200Gy以下の場合、測定値との誤差が小さくなる傾向が確認された。

ただし、測定値との誤差と比較し、線量計組成による解析の誤差の影響は小さいため、必ずしも解析時に線量計組成を考慮する必要は無い。また、保守的な解析結果を算出している空気カーマの換算係数を使用することについても問題はないと考えられる。

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

MCNPによる遮へい解析では、遮へい体外部で測定値と計算値の誤差が大きくなり、計算値が小さくなる傾向が確認された。この要因として、ガラス線量計の吸収線量特性が考えられた。既往研究により、ガラス線量計は高線量（～数百Gy）照射時、低線量（～数Gy）照射時と比較してレスポンスが低下することが知られている。そこで、照射試験及びMCNPを用いた遮へい解析により、ガラス線量計の吸収線量特性を評価した。



ガラス線量計に対して、約100Gyから500Gyの集積吸収線量のレスポンスを評価した。

【照射試験】

ガラス線量計20本に対して、約100Gyから500Gyの集積吸収線量となるよう照射を実施した。



【遮へい解析】

MCNPにて照射試験を模擬した解析を実施。このとき線量計組成の影響もあわせて評価した。

比較評価を実施し、
ガラス線量計の吸収線量特性を評価

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

【照射試験条件】

照射試験条件を下表に示す。

想定吸収線量は、照射時間20時間を前提とし、事前にMCNPを用いて概算した吸収線量率から想定吸収線量を算出し、線源中心からの距離を決定した。

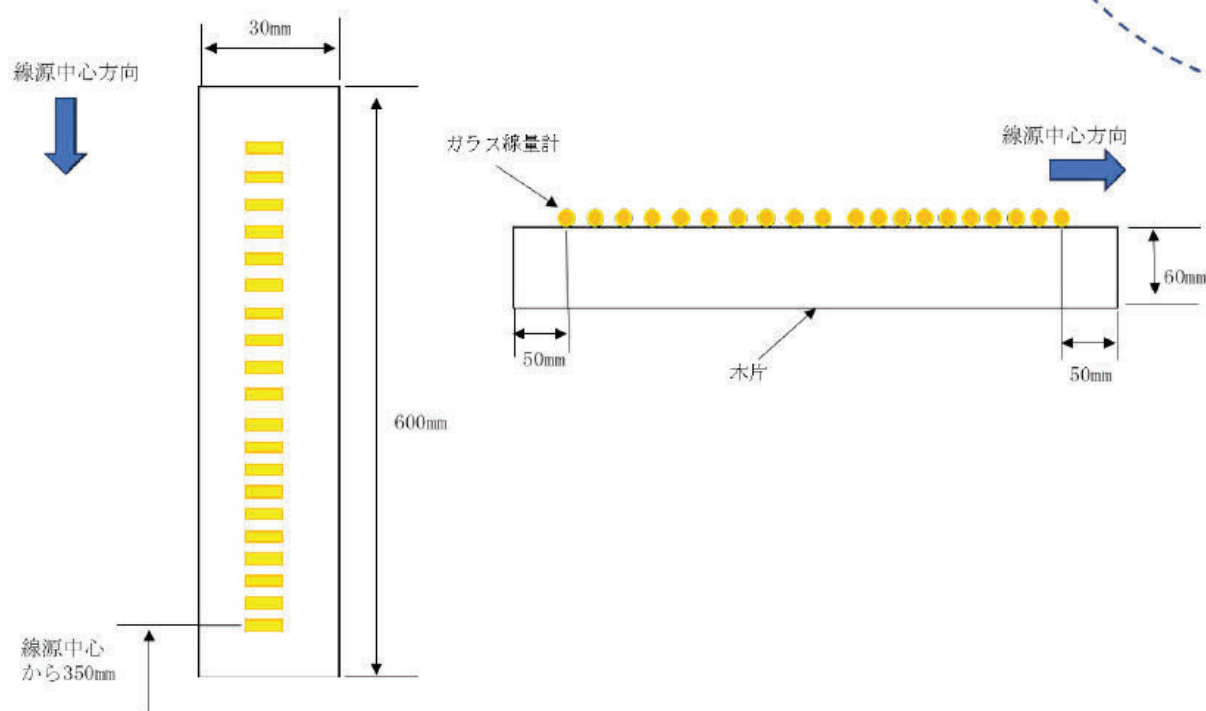
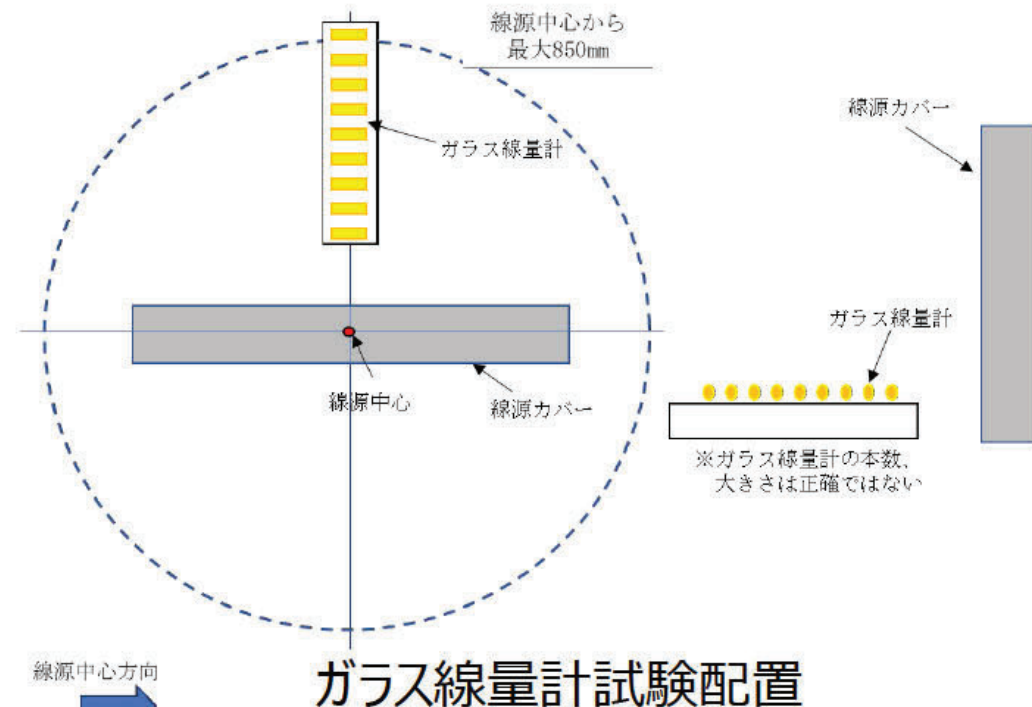
以下に照射試験条件を示す。

ガラス線量計No.	線源中心からの距離 [mm]	照射時間 [h]	想定吸収線量 [Gy]
1	350	20	510
2	370		460
3	380		440
4	400		410
5	410		390
6	430		360
7	440		345
8	460		320
9	470		310
10	500		280

ガラス線量計No.	線源中心からの距離 [mm]	照射時間 [h]	想定吸収線量 [Gy]
11	510	20	270
12	540		245
13	550		235
14	590		210
15	600		205
16	650		180
17	700		160
18	750		140
19	800		125
20	850		110

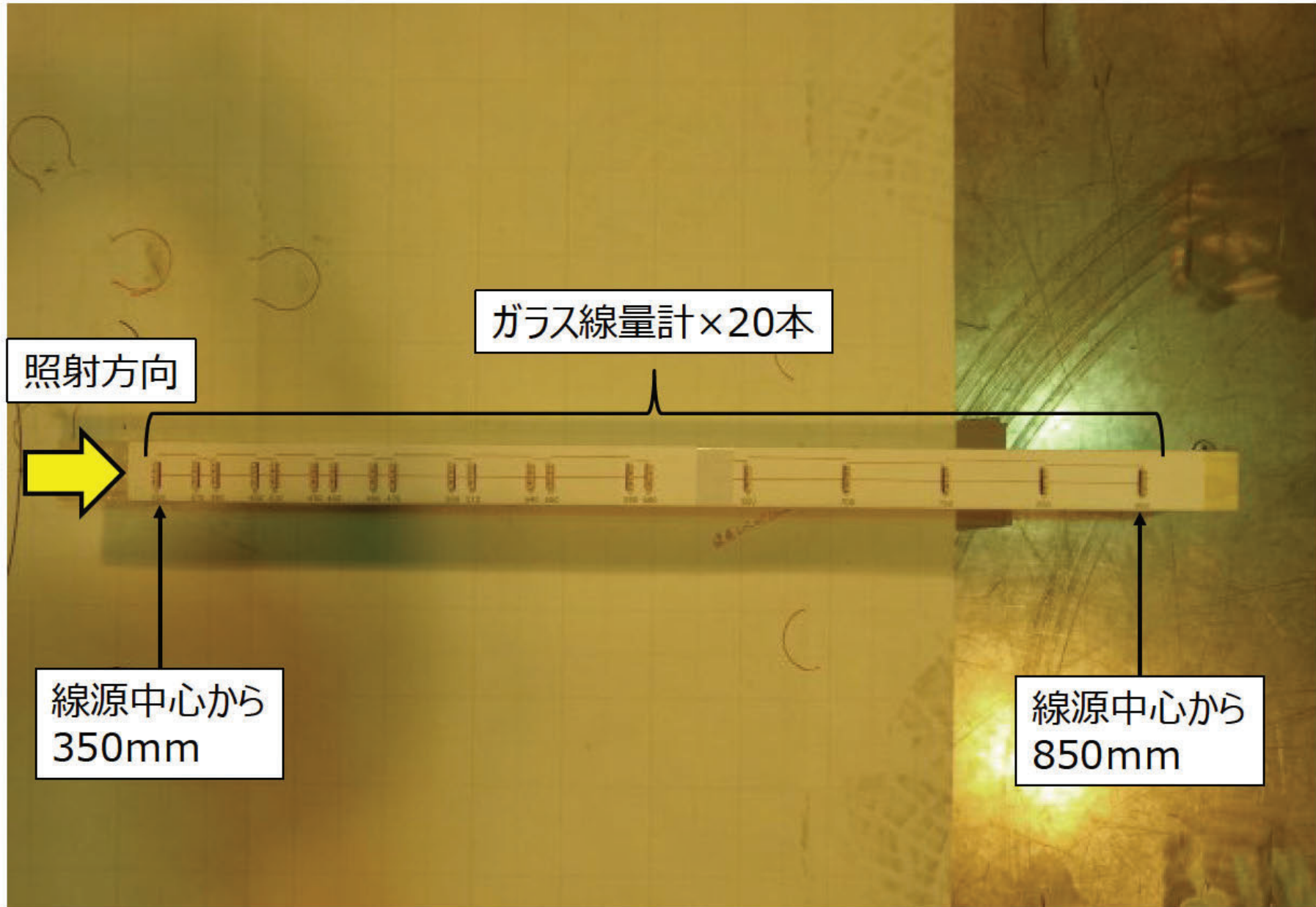
2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

ガラス線量計の吸収線量特性評価のための試験時のガラス線量計の配置を示す。



ガラス線量計試験配置（詳細）

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析



ガラス線量計試験の様子

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

【照射試験結果】

照射試験結果を下表に示す。

全てのガラス線量計で、想定吸収線量と比較し、集積吸収線量が高くなった。

また、線源中心に近く、集積吸収線量が高いNo.1-5では、ガラス線量計の測定上限である500Gyを大きく超えたため、測定不能となった。

以下に照射試験結果を示す。

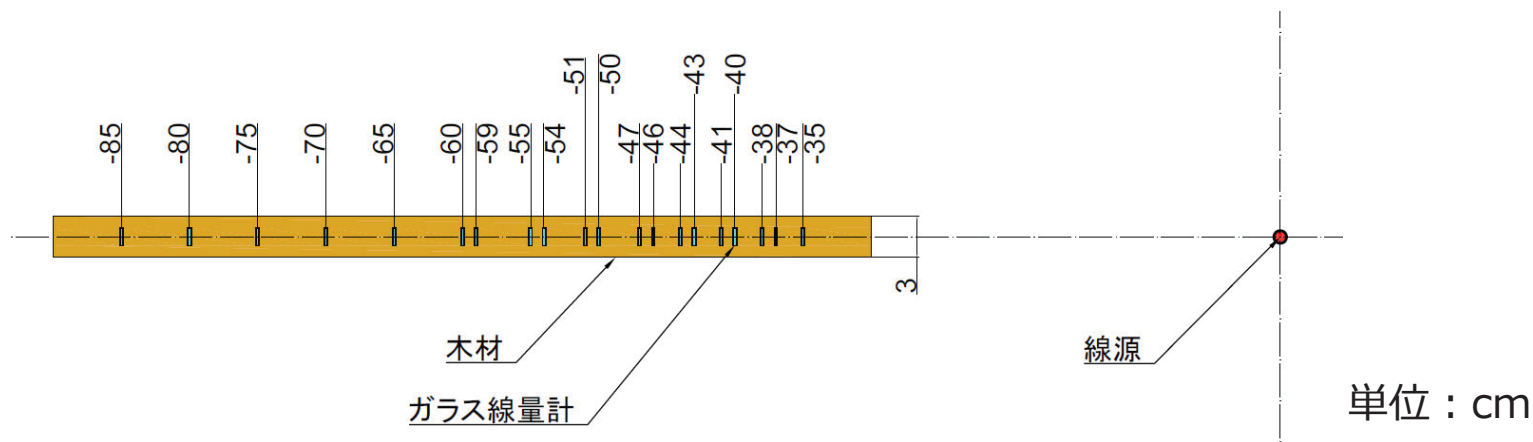
ガラス線量計No.	線源中心からの距離 [mm]	想定吸収線量 [Gy]	集積吸収線量 [Gy]	ガラス線量計No.	線源中心からの距離 [mm]	想定吸収線量 [Gy]	集積吸収線量 [Gy]
1	350	510	500<	11	510	270	304
2	370	460	500<	12	540	245	256
3	380	440	500<	13	550	235	276
4	400	410	500<	14	590	210	241
5	410	390	500<	15	600	205	227
6	430	360	527	16	650	180	195
7	440	345	474	17	700	160	173
8	460	320	451	18	750	140	148
9	470	310	397	19	800	125	128
10	500	280	315	20	850	110	108

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

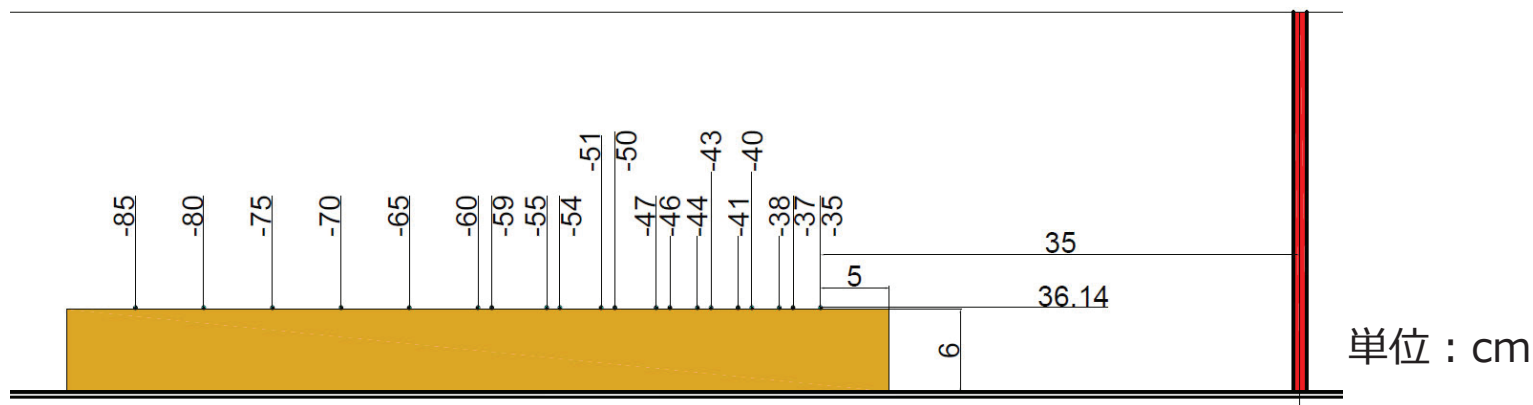
【遮へい解析条件】

照射室、線源、ガラス線量計及びガラス線量計を設置した木材をMCNPでモデル化し、遮へい解析を実施した。遮へい解析においては、ポイントタリーを用いる評価と、ガラス線量計を模擬したセルを用いた評価を実施し、ガラス線量計組成の影響も確認した。

以下にガラス線量計の吸収線量評価のための解析モデルを示す。



遮へい解析モデル（平面図）



遮へい解析モデル（立面図）

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

【遮へい解析結果】

遮へい解析結果を下表に示す。

測定値と比較し、計算値が小さくなる傾向が確認された。

また、ガラス線量計組成を考慮した集積吸収線量は、ポイントタリーを用いて評価した集積吸収線量と比較し、小さくなる傾向が確認された。

以下に遮へい解析結果を示す。

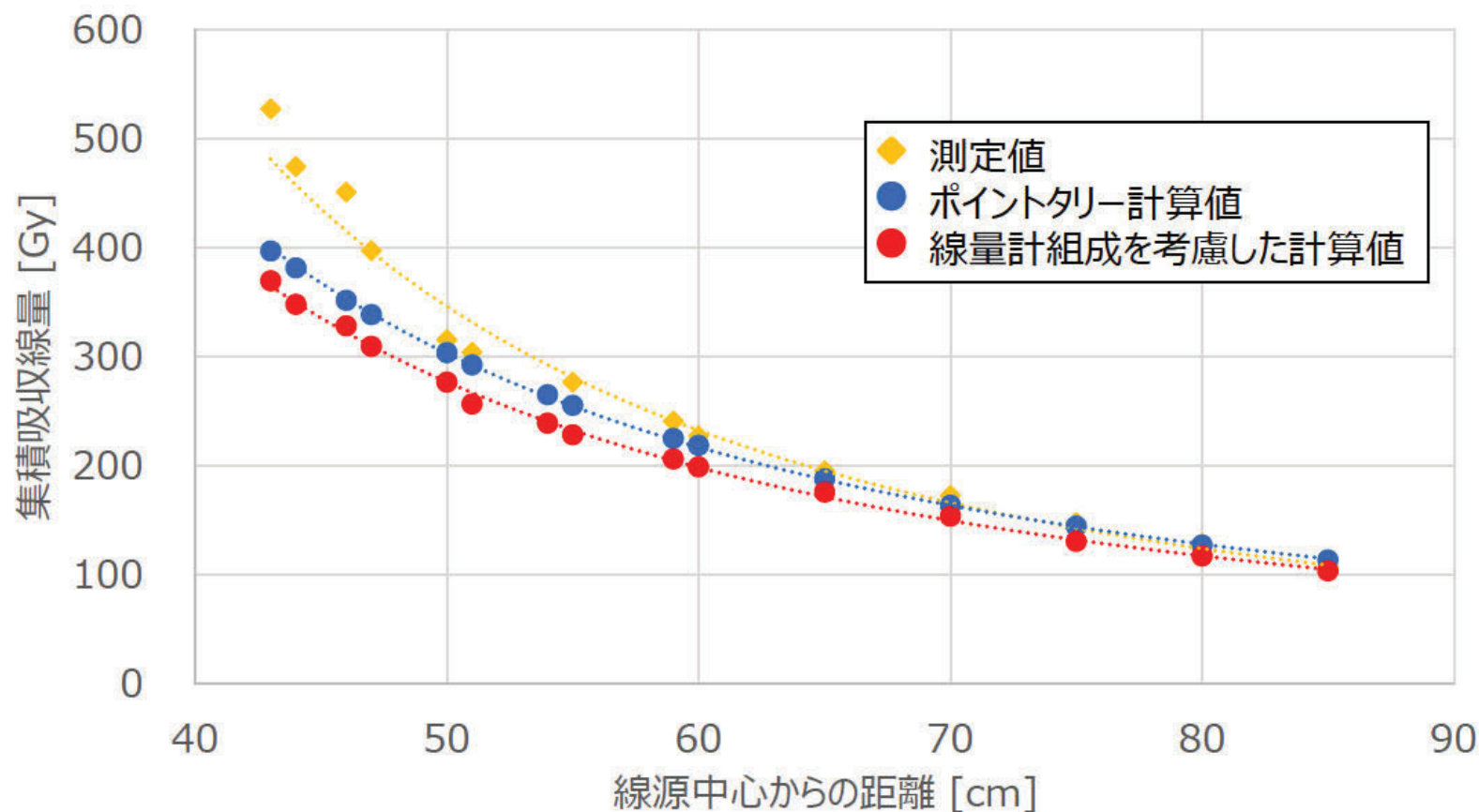
ガラス線量計 No.	測定値 [Gy]	計算値[Gy]		①/②
		ポイントタリー (①)	線量計組成考慮 (②)	
1	500<	564	521	1.08
2	500<	514	468	1.10
3	500<	491	449	1.09
4	500<	450	417	1.08
5	500<	432	394	1.10
6	527	397	369	1.07
7	474	381	348	1.10
8	451	351	328	1.07
9	397	338	309	1.10
10	315	303	277	1.10

ガラス線量計 No.	測定値 [Gy]	計算値[Gy]		①/②
		ポイントタリー (①)	線量計組成考慮 (②)	
11	304	292	256	1.14
12	256	265	239	1.11
13	276	255	228	1.12
14	241	225	206	1.09
15	227	218	199	1.10
16	195	188	176	1.07
17	173	164	154	1.07
18	148	144	131	1.11
19	128	127	117	1.09
20	108	113	103	1.10

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

ポイントタリーによる計算値と線量計組成を考慮した計算値では線量計組成を考慮した場合、**線量計組成を考慮した場合約10%程度集積吸収線量が小さくなっていることを確認した。**
また、測定値と計算値は約300Gyまでは概ね一致しているが、**300Gyを超える領域で計算値と比較し、測定値が顕著に大きくなり、吸収線量が増加した場合ガラス線量計の応答特性が変化していることが確認された。**

測定値及び計算値の比較を以下に示す。



吸収線量特性評価のための測定値及び計算値の比較

2. ガラス線量計特性の評価試験・解析

今回吸収線量特性を評価したガラス線量計は、100Gyまで測定可能であり、また参考値として500Gy程度まで測定が可能である。

測定値と計算値の比較において、300Gy程度までは概ね一致しているが、300Gyを超えたあたりで、測定値と計算値の誤差が大きくなることを確認した。これはガラス線量計の集積吸収線量の推奨測定範囲と一致していることが確認できた。



今後センサ類の照射試験を行う際にガラス線量計を用いる場合には、集積吸収線量が300Gyを超える環境下では線量計の吸収線量特性のため測定値の誤差が大きくなることが確認されたため、100Gy程度を照射上限として利用することが良いと考えられる。

また、遮へい解析時の線量計組成については、組成を考慮した場合10%程度低下することが分かった。P.11に示したように線量計組成の考慮による計算値の誤差と比較し、測定値と解析値の誤差の方が大きいため、必ずしも解析時に線量計組成を考慮する必要はない。また、保守的な解析結果を算出している空気カーマの換算係数を使用することに問題はないと考えられる。

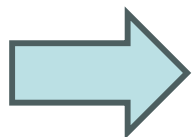
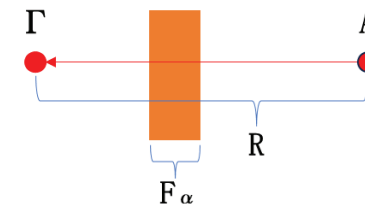
3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

簡易遮へい評価手法の適用性検討では、遮へい設計の際より簡易的な手法で評価することを想定し、MCNPとQAD（点減衰核積分コード）及び以下の3つの手計算手法を比較し、その適用性を検討した。

手計算1

$$\text{計算結果(Gy/h)} = \Gamma \cdot \frac{A}{R^2} \cdot F_{\alpha} \times 10^{-6}$$

記号	内容	単位
Γ	実効線量率定数	$(\mu\text{ Sv} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MBq}^{-1} \cdot \text{h}^{-1})$
R	線源から評価点までの距離	m
A	数量	MBq
F_{α}	実効線量透過率	

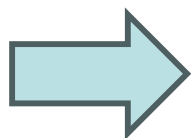
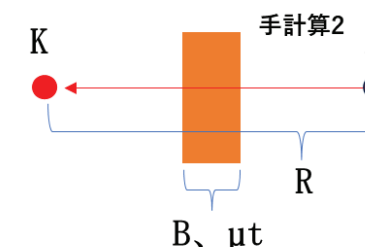


点線源の場合に適用
(アイソトープ手帳の評価式を引用)

手計算2

$$\text{計算結果(Gy/h)} = B \cdot \frac{Ae^{-\mu t}}{4\pi R^2} \cdot K \cdot 10^{-6}$$

記号	内容	単位
B	ビルドアップ係数	
μ	線減衰係数	cm^{-1}
R	線源から評価点までの距離	cm
A	線源強度	ph/sec
t	遮蔽体厚み	cm
K	空気カーマに対する換算係数	$(\mu\text{ Gy/hr}) / (\text{ph/sec/cm}^2)$



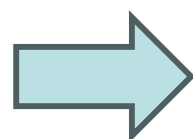
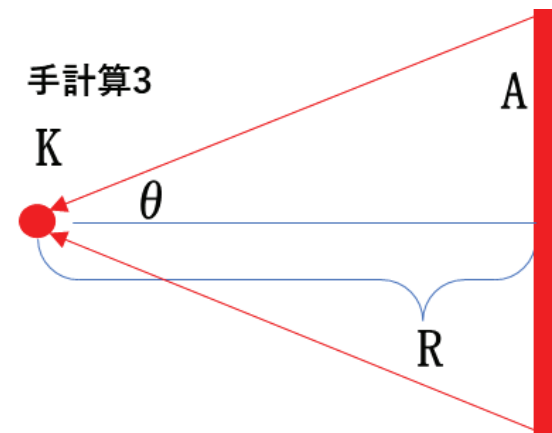
点線源の場合に適用し、ビルドアップ係数を考慮
(アイソトープ手帳の線減衰係数 + 原子力学会標準のビルドアップ係数を利用)

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

手計算3

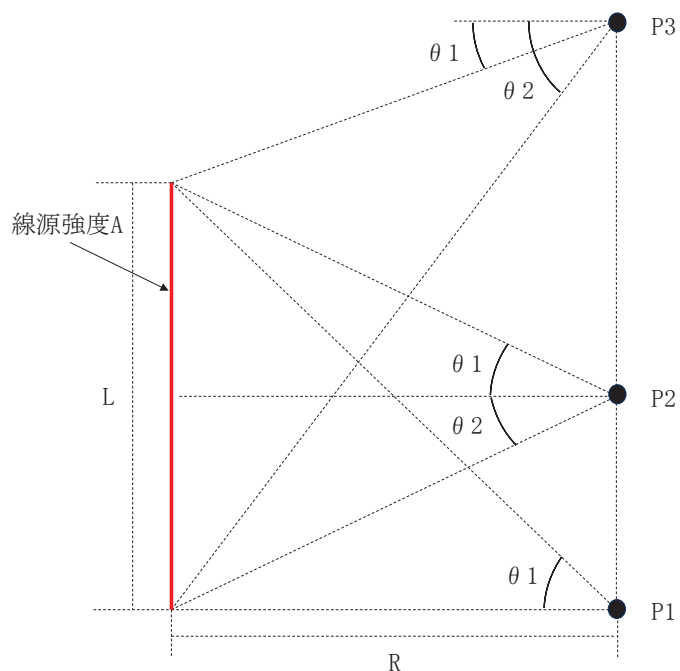
(遮へい体無し)

$$\text{計算結果(Gy/h)} = \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot \theta_1 \cdot K \cdot 10^{-6}$$



ライン線源で遮へい体がない場合に適用

(アイソトープ手帳の線減衰係数 + 原子力学会標準のビルドアップ係数 + Engineering Compendium on Radiation Shieldingの角度減衰式を利用)



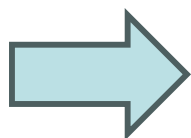
記号	内容	単位
A	線源強度	ph/sec
R	線源から評価点までの距離	cm
L	線源長さ	cm
θ	角度	rad
K	空気カーマに対する換算係数	$(\mu \text{ Gy/hr}) / (\text{ph/sec/cm}^2)$

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

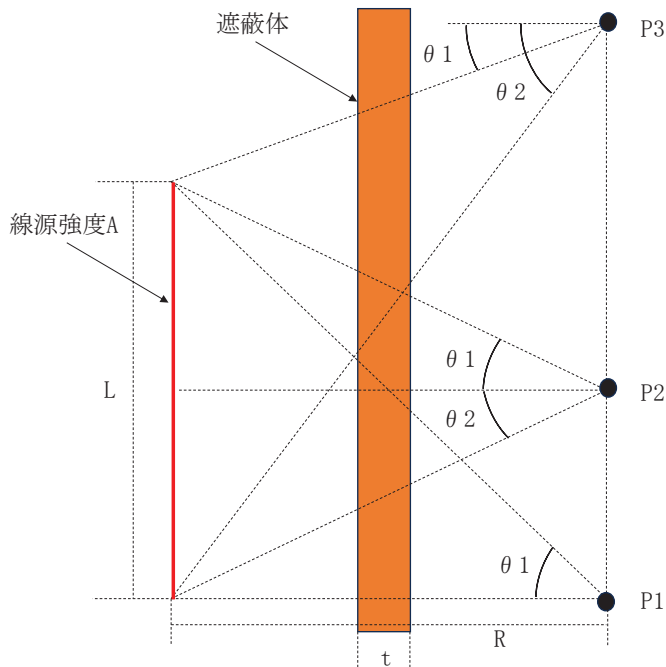
手計算3

(遮へい体有り)

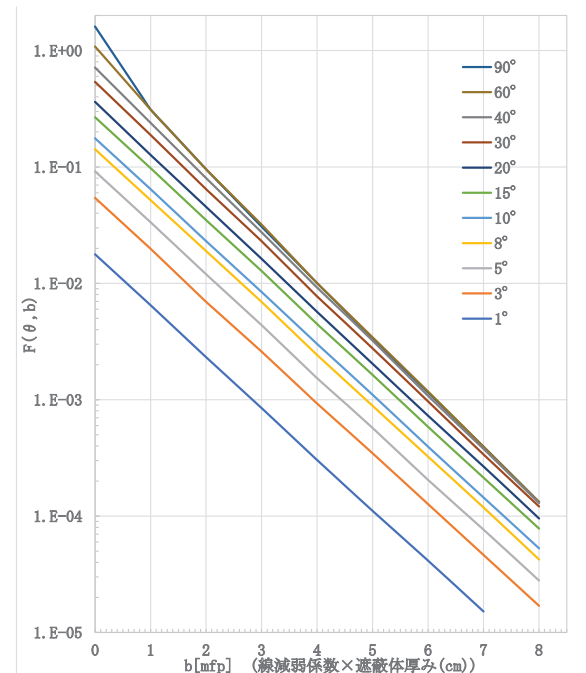
$$\text{計算結果(Gy/h)} = B \cdot \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot F(\theta_1, b_1) \cdot K \cdot 10^{-6}$$



ライン線源で遮へい体がある場合に適用
 (アイソトープ手帳の線減衰係数+原子力学会
 標準のビルドアップ係数+Engineering
 Compendium on Radiation Shieldingの角
 度減衰式を利用)



記号	内容	単位
B	ビルドアップ係数	
A	線源強度	ph/sec
R	線源から評価点までの距離	cm
L	線源長さ	cm
θ	角度	°
b	μt	
μ	線減衰係数	cm^{-1}
t	遮蔽体厚み	cm
$F(\theta, b)$	$\int_0^\theta e^{-b \sec \theta} d\theta$ ※線源と評価点の角度、遮蔽体厚みより求められる減衰係数	
K	空気カーマに対する換算係数	$(\mu \text{ Gy/hr}) / (\text{ph/sec/cm}^2)$

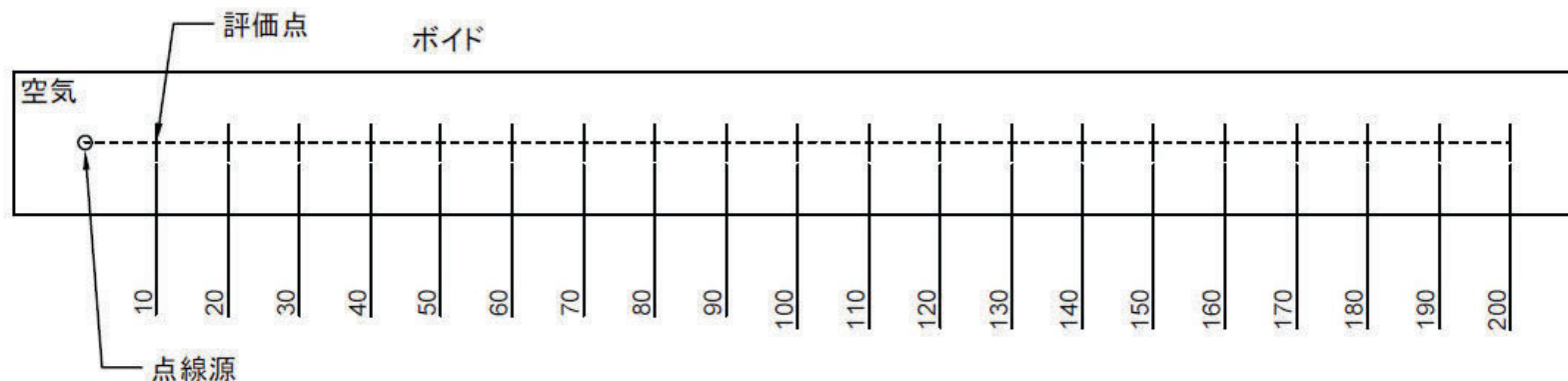


3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

【評価ケース①】

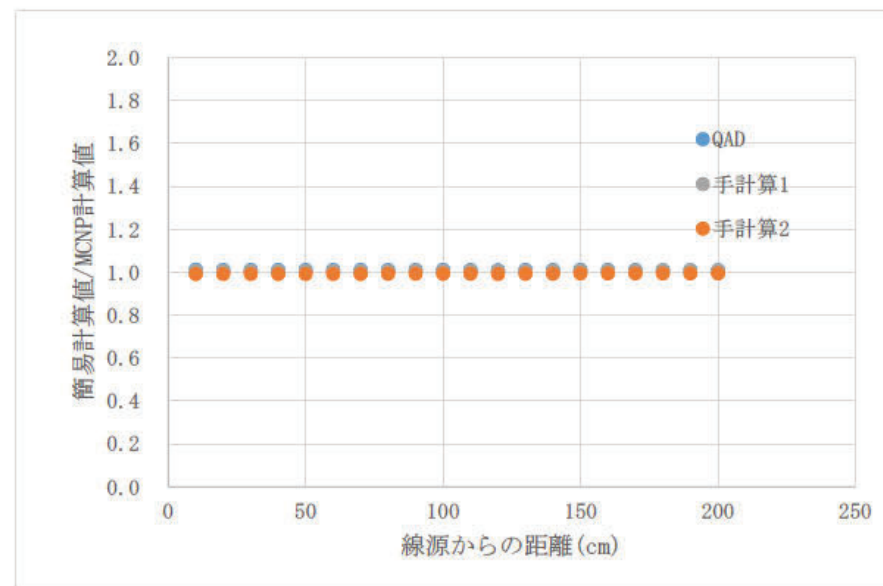
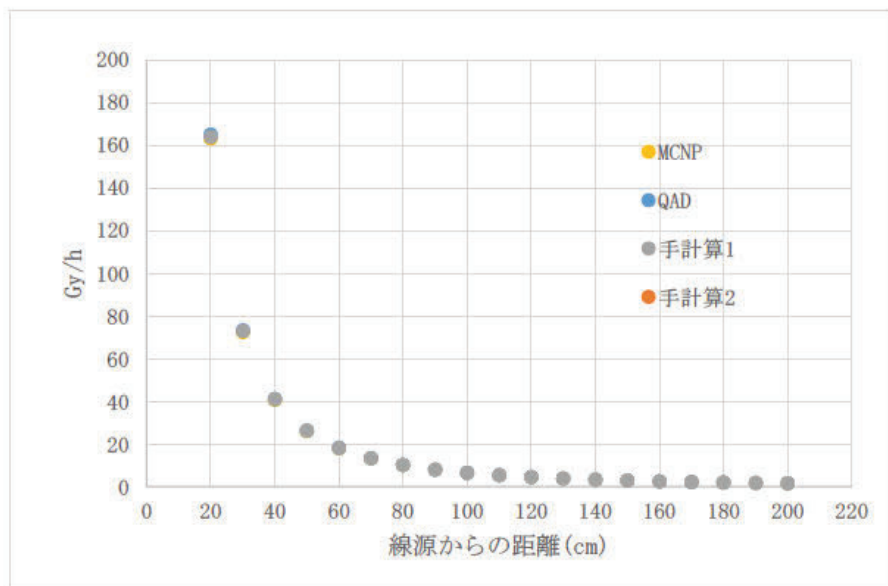
【目的】 点線源に対して遮へい体がない場合の簡易遮へい評価手法の比較評価

【解析モデル】



【評価結果】

QAD、手計算1、手計算2の全てにおいて、MCNPと同程度の評価結果となった。

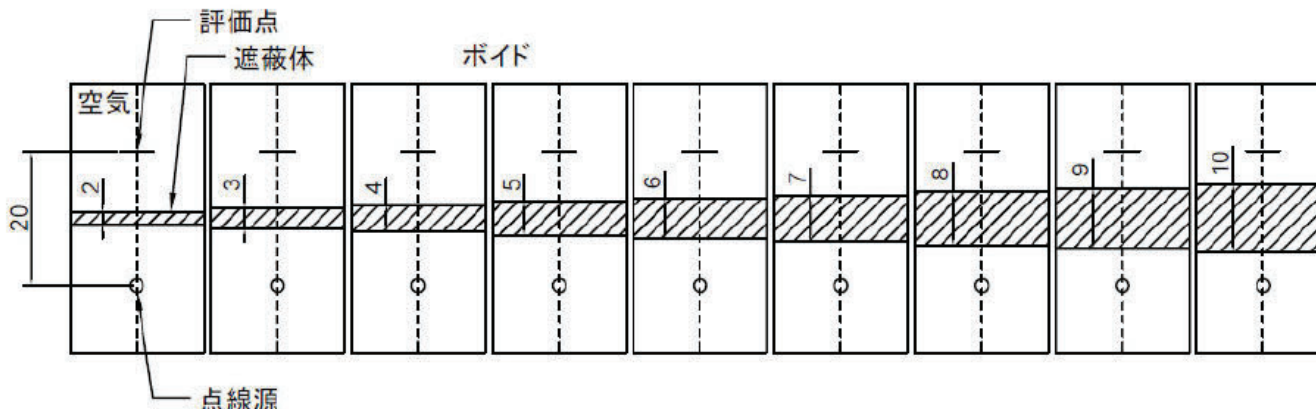


3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

【評価ケース②】

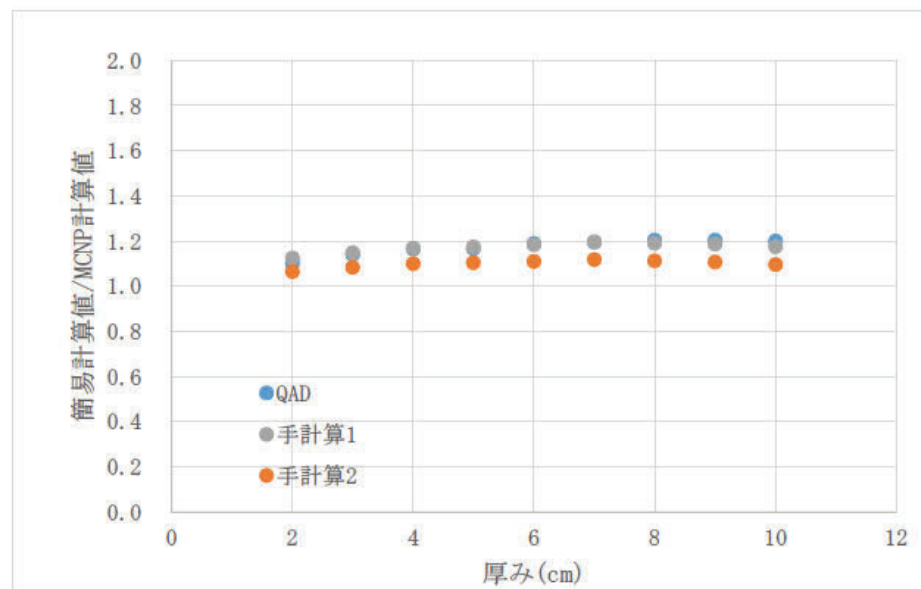
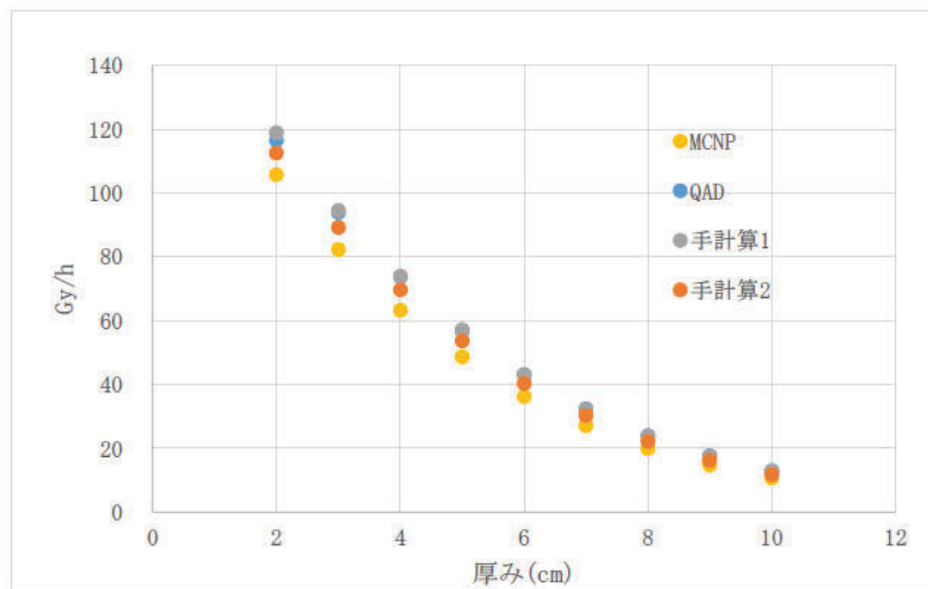
【目的】 点線源に対して遮へい体がある場合の簡易遮へい評価手法の比較評価

【解析モデル】



【評価結果】

QAD及び手計算1では、MCNPと比較し2cmの遮へい厚で10%、4cmで17%保守的、手計算2では、MCNPと比較し2cmの遮へい厚で6%、4cmで10%保守的な値となった。

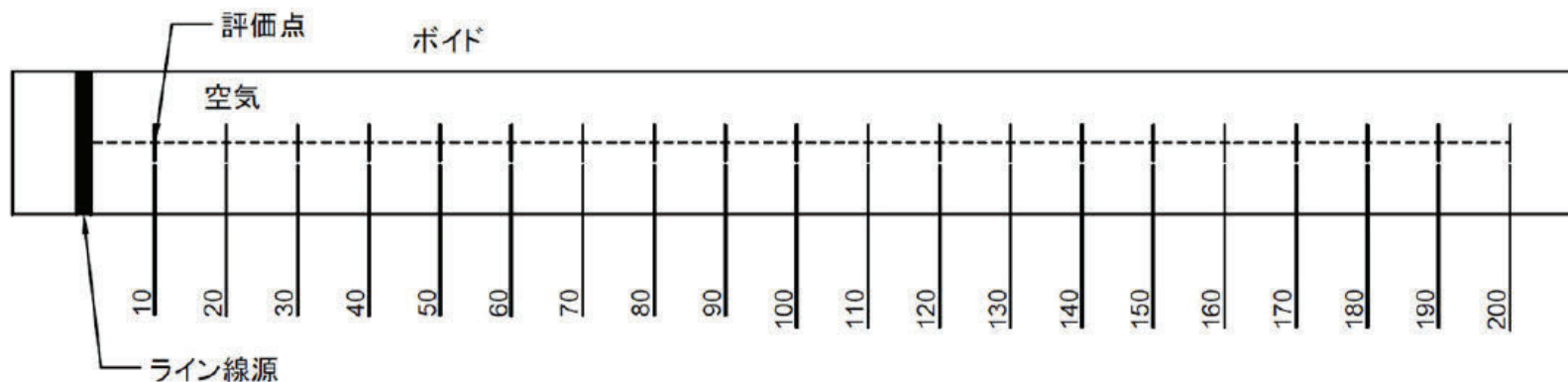


3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

【評価ケース③】

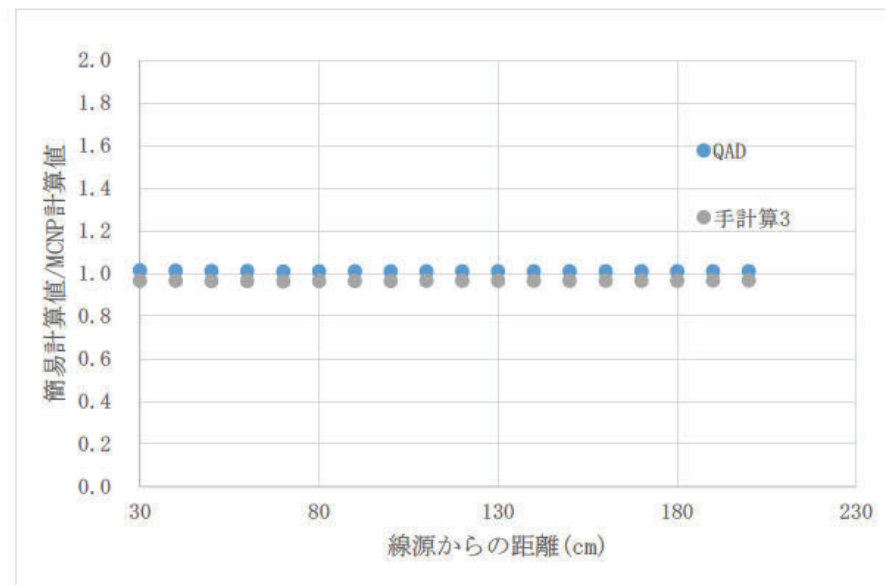
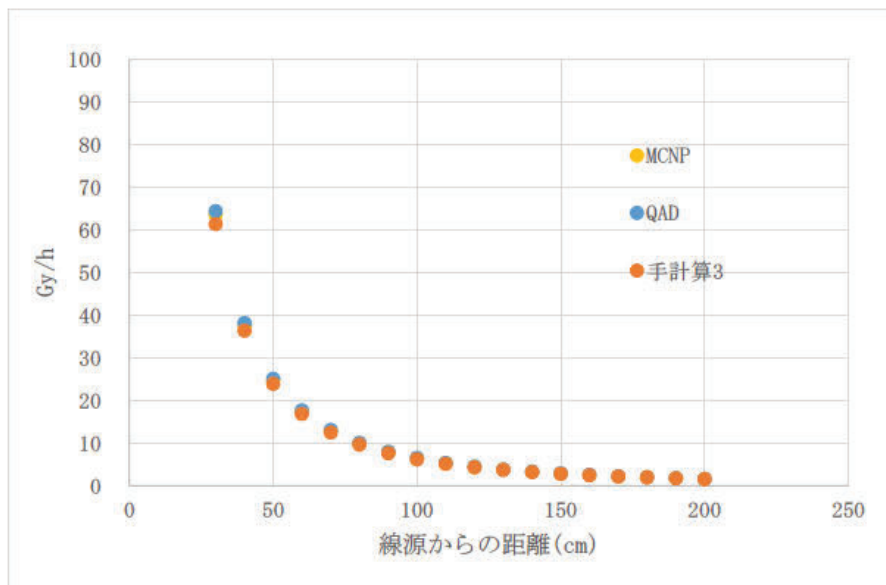
【目的】 ライン線源に対して遮へい体がない場合の簡易遮へい評価手法の比較評価

【解析モデル】



【評価結果】

QAD、手計算3ともに、MCNPと同程度の評価結果となったが、手計算3はMCNPより3%程度非保守的な評価となった。

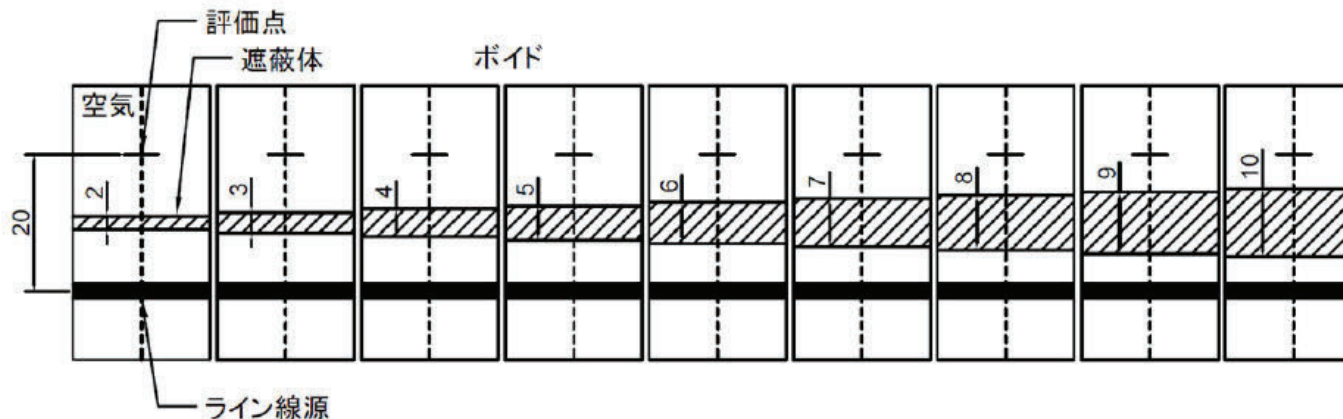


3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

【評価ケース④】

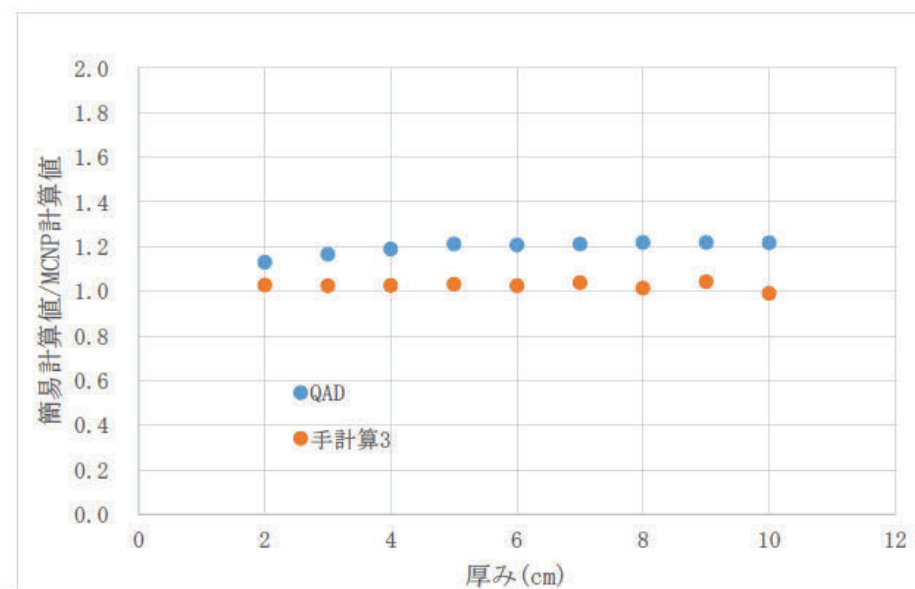
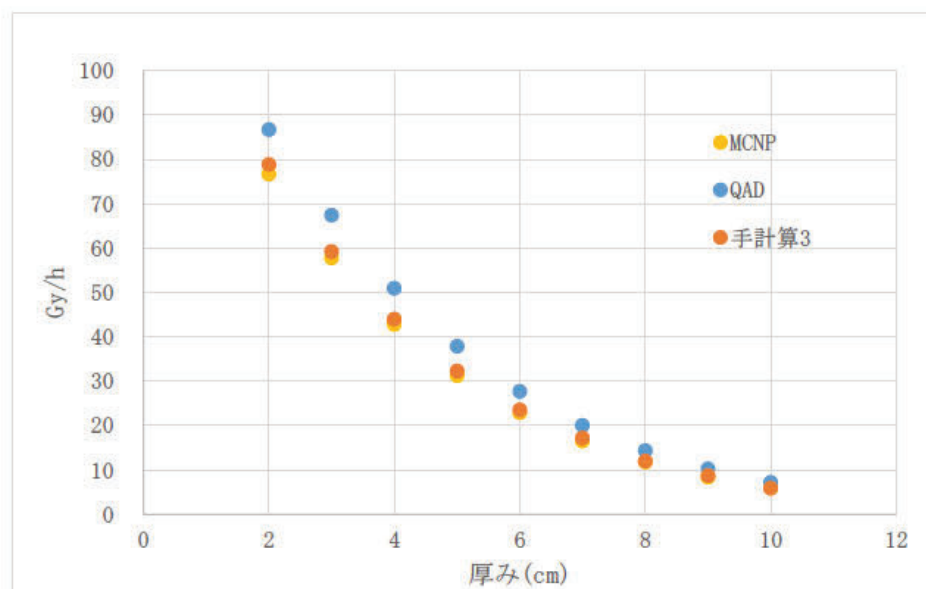
【目的】 ライン線源に対して遮へい体がある場合の簡易遮へい評価手法の比較評価

【解析モデル】



【評価結果】

QADでは、MCNPと比較し2cmの遮へい厚で13%、4cmの遮へい厚で19%保守的、手計算3では、10cmの遮へい厚では1%非保守的、その他では約3%保守的な値となった。



3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

評価ケース①から④の結果から、遮へい体がない場合、QAD及び線源形状に応じた手計算手法を用いれば、MCNPと同様の評価が可能であることが分かった。

遮へい体がある場合、点線源ではQAD及び手計算1で約20%、手計算2で約10%程度MCNPより保守的となり、ライン線源ではQADで約20%、手計算3で約3%MCNPより保守的となることが分かった。

ただし、手計算3では、MCNPと比較し非保守的な評価となる可能性を考慮する必要がある。簡易遮へい評価手法の適用性の評価結果を以下に示す。

簡易遮へい評価手法 の適用性評価結果		線源形状	
		点線源	ライン線源
遮へい体	無し	QAD 手計算1、手計算2	QAD 手計算3*1
	有り	手計算2	手計算3*1

*1:手計算3では、MCNPと比較し非保守的な評価になる可能性を考慮する必要がある。

なお、QADでは、コードそのものの持つ保守性（干渉性散乱を考慮したビルドアップ係数の設定）によって吸収線量率が保守的となるため*、手計算と比較し、MCNPとの誤差が大きくなっていると考えられる。

*：日本原燃株式会社，廃棄物埋施設における許認可規則への適合性について第四条地震による損傷の防止添付資料，P.添付1-8，2020年1月

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

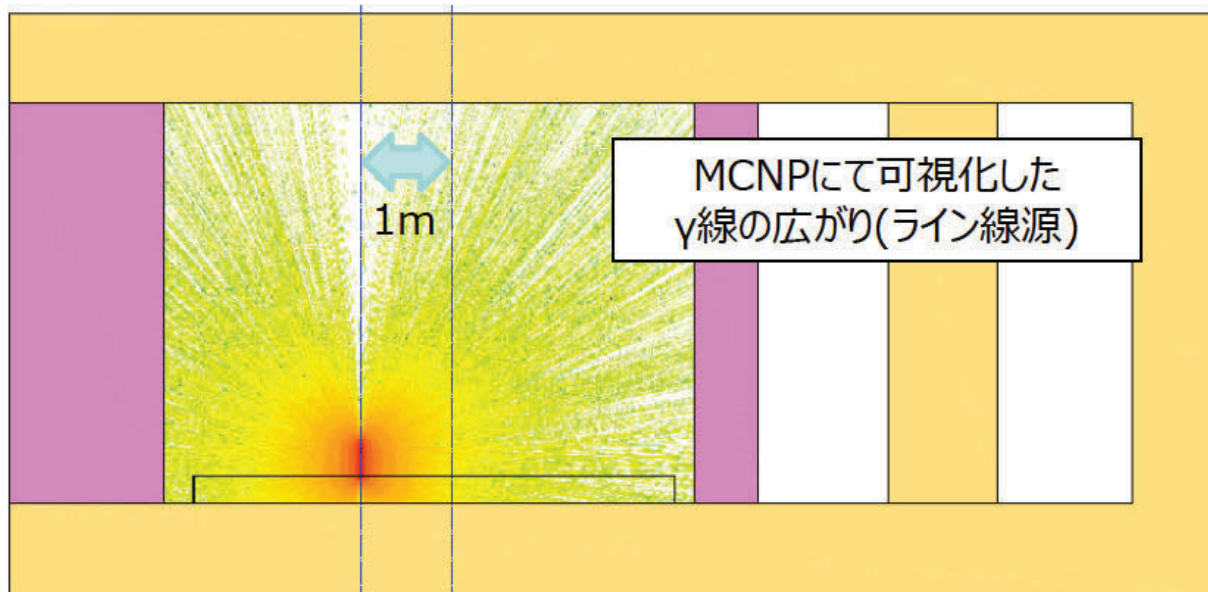
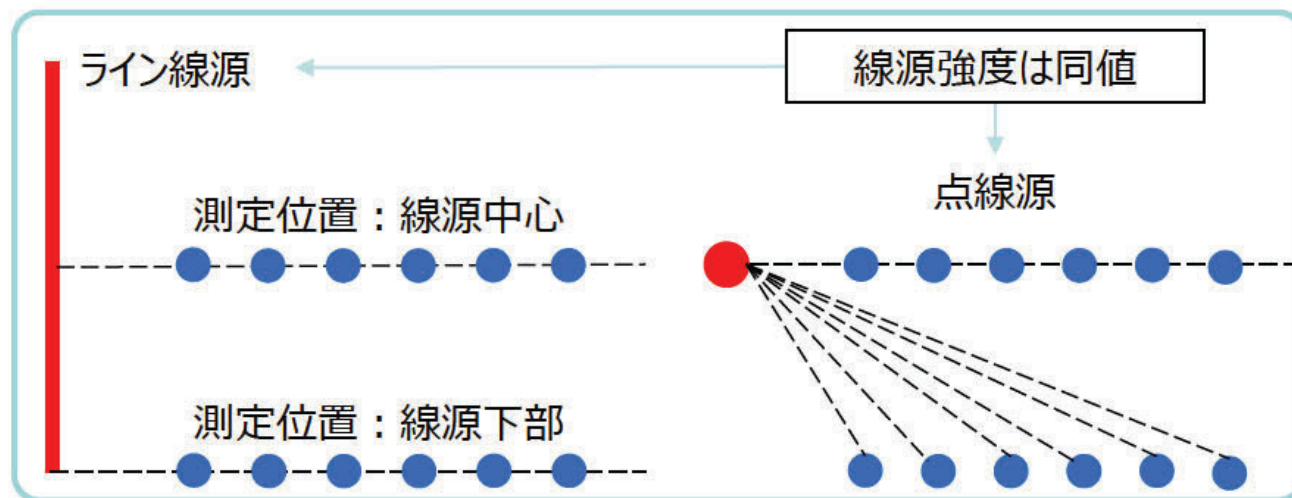
【評価ケース⑤】

【目的】 昨年度までMCNPで評価を実施した解析の線源形状及び評価位置を考慮した場合のQADの評価の比較評価

【解析モデル】

以下の解析モデルを考慮し、4箇所の評価点を比較した。

- 点線源 (線源中心高さ)
- 点線源 (線源下部高さ)
- ライン線源 (線源中心高さ)
- ライン線源 (線源下部高さ)



※MCNP計算時、照射室、SUS床は空気としてモデル化

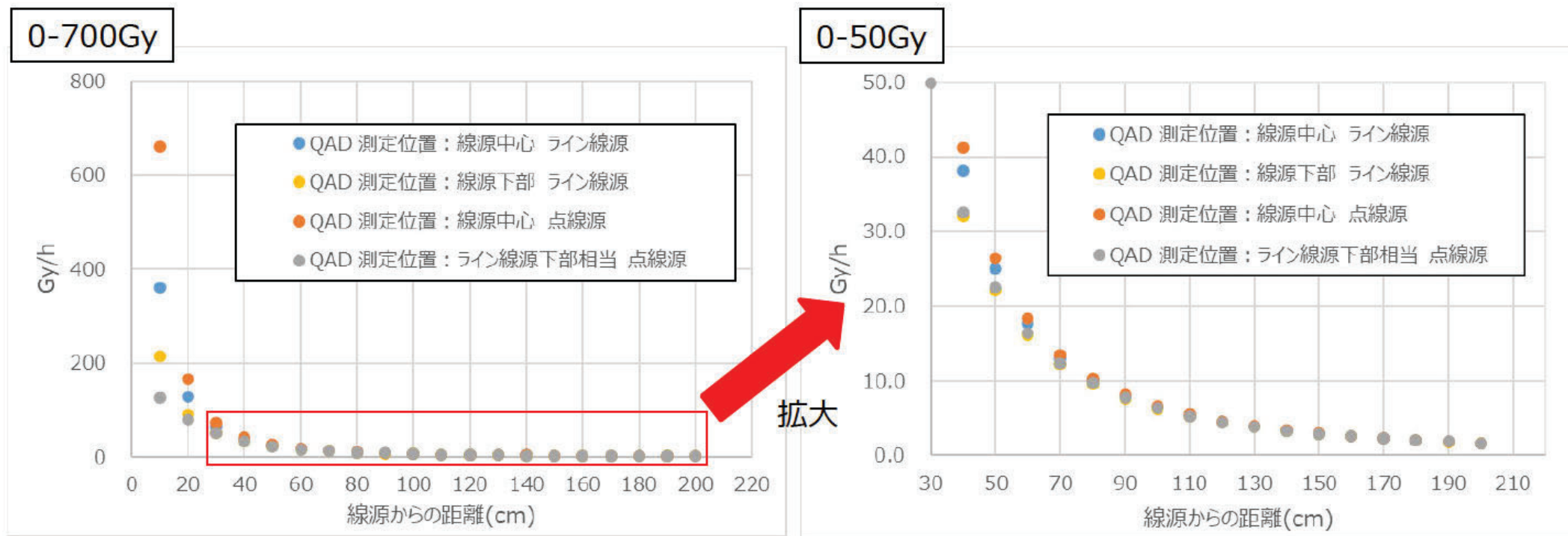
3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

【評価ケース⑤】

【評価結果】

今回設定したライン線源の場合、線源中心から1m以上離れた評価点においては、いずれの評価手法においても、集積吸収線量が5%以下の誤差となった。

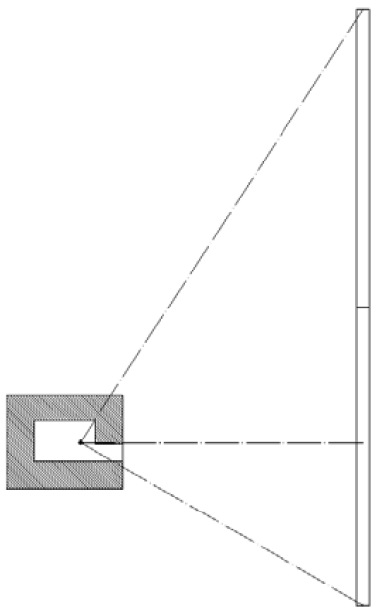
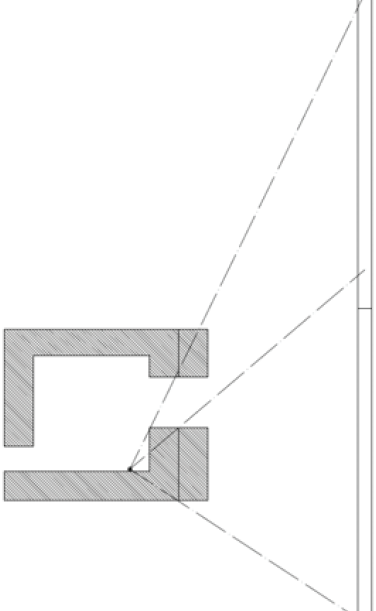
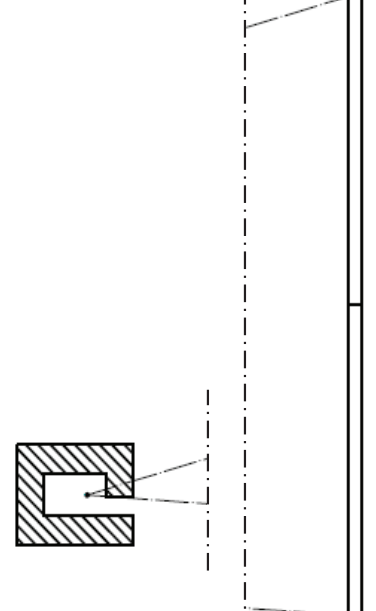
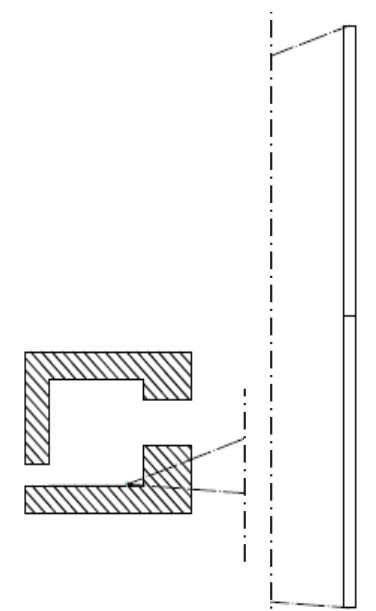
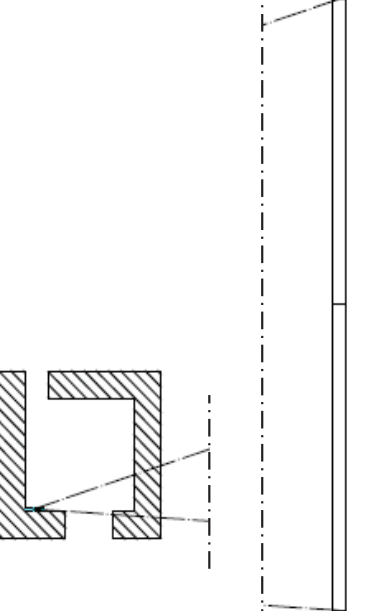
線源下部においては、0.3m程度離れると線源形状に寄らず同程度の評価となるが、0.2mより近い場合、ライン線源と比較し、点線源で評価したほうが10%低い評価結果となり、線源形状によって評価結果に誤差が生じることが分かった。



線源形状及び評価位置を考慮した簡易評価手法の評価結果

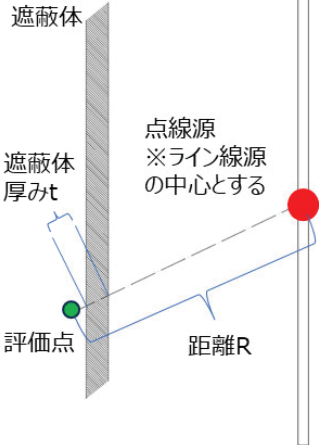
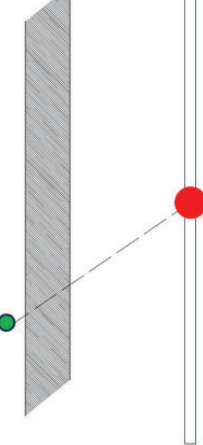
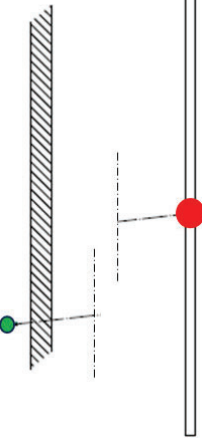
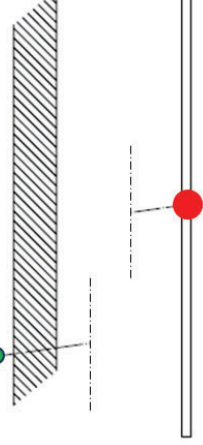
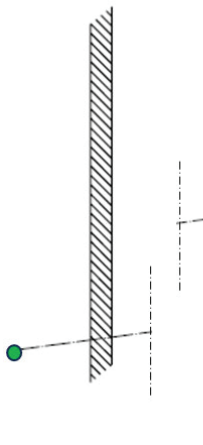
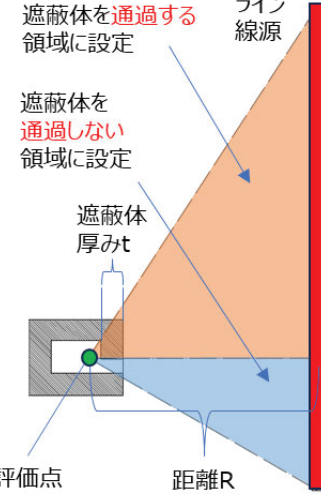
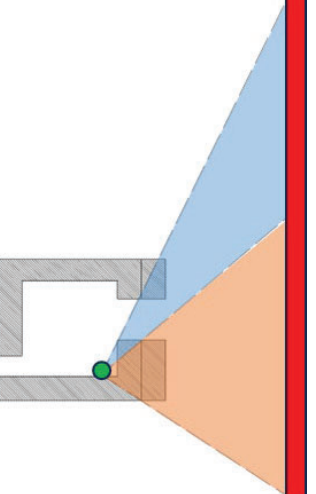
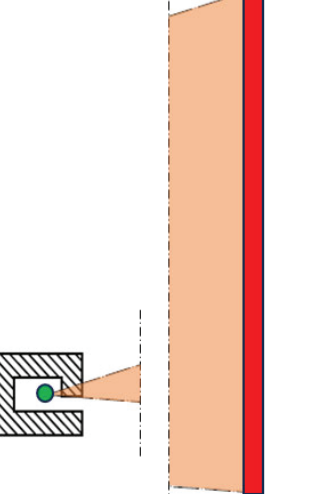
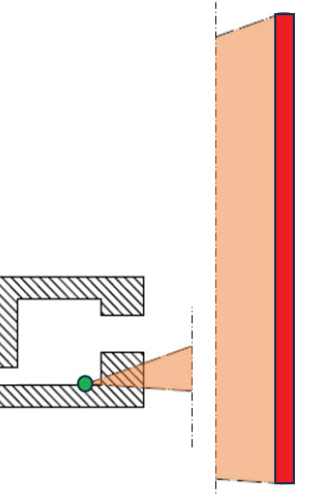
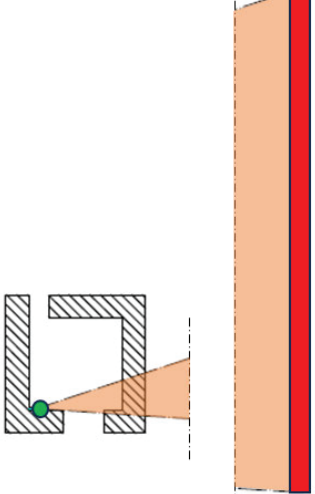
3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

昨年度までに実施した照射試験条件を模擬した解析に対して簡易遮へい評価手法を適用し、MCNP、QAD、手計算手法の比較評価を実施した。
各評価ケースを以下に示す。

				
<p>21年度光電センサ 線源中心からの 遮へい体距離：約20cm 遮へい体厚み：2cm</p>	<p>21年度測域センサ 線源中心からの 遮へい体距離：約20cm 遮へい体厚み：4cm</p>	<p>22年度光電センサ 線源中心からの 遮へい体距離：約120cm 遮へい体厚み：2cm</p>	<p>23年度測域センサ 線源中心からの 遮へい体距離：約110cm 遮へい体厚み：4cm</p>	<p>23年度測域センサ 線源中心からの 遮へい体距離：約110cm 遮へい体厚み：2cm</p>

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

各手計算手法における計算モデルを以下に示す。

21年度光電センサ	21年度測域センサ	22年度光電センサ	23年度測域センサ	
手計算1及び2の計算モデル				
				
手計算3の計算モデル				
				

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

MCNPと簡易遮へい評価手法の比較評価結果を以下に示す。

	MCNP値		QAD値				手計算1 ※ライン線源を点線源とみなして計算				手計算2 ※ライン線源を点線源とみなして計算				手計算3 ※ライン線源計算式			
							計算結果(Gy) = $\Gamma \cdot \frac{A}{R^2} \cdot F_{\alpha}$				計算結果(Gy) = $B \cdot \frac{Ae^{-\mu t}}{4\pi R^2} \cdot K$				計算結果(Gy) = $B \cdot \frac{A}{4\pi R} \cdot \frac{1}{L} \cdot F(\theta 1, b1) \cdot K$			
	内側	外側	内側	QAD値/ MCNP値	外側	QAD値/ MCNP値	内側	手計算値/ MCNP値	外側	手計算値/ MCNP値	内側	手計算値/ MCNP値	外側	手計算値/ MCNP値	内側	手計算値/ MCNP値	外側	手計算値/ MCNP値
21年度光電センサ	81.20	118.25	82.49	1.02	108.10	0.91	87.21	1.07	121.09	1.02	82.18	1.01	116.16	0.98	76.50	0.94	111.54	0.94
21年度測域センサ	58.40	307.12	67.43	1.15	311.20	1.01	60.77	1.04	358.53	1.17	58.26	1.00	343.93	1.12	85.29	1.46	319.56	1.04
22年度光電センサ	2.90	4.82	2.87	0.99	4.41	0.91	3.08	1.06	4.53	0.94	2.92	1.01	4.35	0.90	2.53	0.87	4.48	0.93
23年度測域センサ	1.70	5.53	1.93	1.13	5.07	0.92	2.07	1.22	5.24	0.95	1.95	1.15	5.02	0.91	1.72	1.01	5.23	0.95
23年度測域センサ	2.50	5.53	2.82	1.13	5.05	0.91	3.10	1.24	5.21	0.94	2.94	1.17	5.00	0.90	2.32	0.93	5.21	0.94

QADについては、MCNPと比較し保守的な評価となった。

手計算1及び2については、□部についてはMCNPと同程度、□部では保守的な評価となった。□部では、手計算1及び2の特徴（評価ケース②参照）及び線源の自己減衰を考慮していないことから保守的な評価になったと考えられる。□部については前述の保守的となる効果と、評価ケース⑤で示したライン線源を点線源で模擬したこと及び開口部を考慮しないことにより非保守的となる効果が打ち消し合い、MCNPと近い値になったと考えられる。

手計算3については、□部においては遮へい体を通過しない領域として設定している領域に遮へい体が多く含まれるため保守的な評価になったと考えられる。

□部については開口部近傍を評価しているが、手計算3の解析モデルにおいて、遮へい体を通過する領域として設定しているため、非保守的な評価になったと考えられる。

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

今回実施した簡易遮へい評価手法の適用性検討で確認されたMCNP、QAD、手計算手法1-3の各計算手法の特徴を以下に示す。

	計算可能な線源形状	線源形状による影響評価	線源距離による影響 (遮へい体無し)	遮へい体の厚みによる影響	適用箇所	散乱	遮へい体形状
MCNP	点、ライン、面、etc	—	—	—	線源から1m以内 & 1m以降	照射室遮へい体	3次元 開口部有り 開口部無し
QAD	点、ライン、面、etc	—	MCNPとほぼ一致	MCNPと比較し20%程度保守的な値	線源から1m以内 & 1m以降	—	3次元 開口部有り 開口部無し
手計算1	点	線源から1m以上のときライン線源と5%以内の差異で一致	MCNPとほぼ一致	MCNPと比較し20%程度保守的な値	線源から1m以降	—	1次元 開口部無し
手計算2	点	線源から1m以上のときライン線源と5%以内の差異で一致	MCNPとほぼ一致	MCNPと比較し10%程度保守的な値	線源から1m以降	—	1次元 開口部無し
手計算3	ライン	—	MCNPとほぼ一致	MCNPと比較し3%程度保守的な値	線源から1m以内 & 1m以降	—	2次元 開口部無し

注：適用性の評価結果は今回検討した評価条件の場合に限る

3.簡易遮へい評価手法の適用性検討

今回検討したQAD、手計算1-3のそれぞれの簡易遮へい評価手法について、適用可能となる条件（遮へい体の有無、線源中心からの距離）を検討した。簡易遮へい評価手法の適用性の検討結果を以下に示す。

適用性評価結果		線源中心からの距離	
		1m以内	1m以上
遮へい体	有り	QAD	QAD 手計算1 手計算2 手計算3
	無し	QAD 手計算3	

注：適用性の評価結果は今回検討した評価条件の場合に限る



今回は点線源もしくは照射試験のライン線源を模擬した条件に対しての適用性評価である。しかし、実際にセンサ類に遮へい体を装着し、遮へい解析を行う場合、面線源もしくは体積線源が対象になると考えられる。

今後は、面線源もしくは体積線源を対象に、今回検討した簡易遮へい評価手法の適用性について検討する必要がある。

4. まとめ

<まとめ>

遮へい計算において、線量計の組成影響を評価した。
令和3年度に実施した光電センサ及び測域センサの遮へい計算に対して、線量計の組成を考慮すると、光電センサでは測定値と計算値の平均誤差が3%低減し、測域センサでは約2%増加することを確認した。測定値との誤差と比較し、線量計組成による解析の誤差の影響は小さいため、必ずしも解析時に線量計組成を考慮する必要は無い。また、保守的な計算結果を算出している空気カーマの換算係数を使用することについても問題はないと考えられる。

ガラス線量計の吸収線量特性について、照射試験及び遮へい解析で評価した。
測定値と計算値の比較より、約300Gyまでは測定値と計算値が概ね一致するが、300Gy以上では測定値の方が顕著に大きな値を示すことを確認した。つまり、高線量領域ではガラス線量計の応答特性が変化していることが分かった。
また、遮へい解析においては、線量計組成の影響を評価し、線量計組成を考慮した場合10%程度計算値が小さくなることを確認した。

QAD及び手計算による簡易遮へい評価手法の適用性を検討した。
MCNPの計算値と各計算方法の結果を比較した結果、今回計算した条件においては、線源形状、遮へい体の有無及び線源からの距離に応じて、適切な計算方法を用いることにより評価できる可能性があることが分かった。
今後は面線源もしくは体積線源を対象に今回検討した簡易遮へい評価手法の適用性について検討する必要がある。

原子力産業基盤強化事業委託費

第3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-4 —技術委員会日程案—

2025年2月3日（月）
株式会社 神戸製鋼所

・技術委員会日程

＜委員会全体工程＞

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12月6日	耐放射線性のばらつき評価結果のご説明、レビュー
③	令和7年2月3日	故障原因調査結果、簡易遮へい評価手法の適用方法検討① 及び作動試験方法のご説明、レビュー
④	令和7年9月	作動試験結果のご説明、レビュー 一般産業用工業品の使用指針案の審議①
⑤	令和7年11月	簡易遮へい評価手法の適用方法検討②のご説明、レビュー 一般産業用工業品の使用指針案の審議②
⑥	令和8年1月	一般産業用工業品の使用指針案の審議③

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▽⑥
(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			

・技術委員会審議内容

<審議内容詳細>

技術委員会	開催予定時期	審議内容
第4回	令和7年9月	<ul style="list-style-type: none">➤ 作動試験結果 →コンベアに付属するセンサの遮へいの有無によるの機器への影響評価➤ 一般産業用工業品の使用指針案の審議① →放射線環境下で一般産業用工業品を使用する場合のフロー、目次案と記載内容概要のレビュー
第5回	令和7年11月	<ul style="list-style-type: none">➤ 簡易遮へい手法の適用方法の検討結果② →面線源を対象とした適用性検討➤ 一般産業用工業品の使用指針案の審議② →フローへのコメント反映結果 指針案の条文案のご確認①
第6回	令和8年1月	<ul style="list-style-type: none">➤ 一般産業用工業品の使用指針案の審議③ →指針案の条文案のご確認②

実施予定場所：神戸製鋼所東京本社（エンジ）大崎GT会議室

実施時間：各回2時間程度を想定

第3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

1 開催日時

2025年2月3日(月) 13:30-15:30

2 実施場所

Web (Microsoft Teams)

3 議事次第

3.1 令和6年度実施内容及び第3回技術委員会での報告内容概要

3.2 故障原因調査結果、作動試験方法

3.3 簡易遮へい評価手法の適用方法検討結果

3.4 事務連絡

4 配布資料

- ・ 第3回技術委員会資料-1 -令和6年度実施内容-
- ・ 第3回技術委員会資料-2 -故障原因調査結果、作動試験方法-
- ・ 第3回技術委員会資料-3 -簡易遮へい評価手法の適用方法検討結果-
- ・ 第3回技術委員会資料-4 -技術委員会日程案-

5 出席者

【委員】

【オブザーバ

【事務局

Web 参加者

【委員】

【オブザーバ

-) また、センサが同時に故障することはないと考えることができれば、センサの二重化は、異常の発見に有効と考える。
-) 原子力施設では、重要機器は二重化するケースが多い。
-) 機器の二重化について、一般的に実施されていると思われるが、これらも指針に記載してはどうか。照射試験が必要となる吸収線量基準も含め、これらについては、来年の委員会等で議論したい。
-) 承知した。

6.3 簡易遮へい評価手法の適用方法検討結果

6.3.1 実効線量 Sv と吸収線量 Gy の取扱い

-) P.16 のガラス線量計の組成を考慮したときの計算値は、ガラス線量計の吸収線量なのか。それとも、ガラス線量計から算出した空気カーマの線量なのか。
-) ガラス線量計の吸収線量である。
-) ガラス線量計の線量評価では一般的に被ばく管理用に人間の組成を考慮した測定値を示す。放射線のエネルギーは 1MeV 程度であるので、ガラス線量計の測定結果 Sv と解析結果 Gy を同等で考えることに問題はないと考えるが、ガラス線量計の測定に用いる密度と解析で評価しているセルの密度が異なるため、実効原子番号が異なり、評価結果が異なる可能性がある。
-) 第 2 回技術委員会で γ 線照射の場合、Sv と Gy は等しく評価して良いとコメント頂いているため、問題ないと考えている。
-) 環境影響評価については、厳密に言うと、Sv と Gy は若干異なる。しかし、今回の吸収線量の評価においては、線量の換算のばらつきと比較し、線量計特性の影響が大きいと考えられる。
-) 1MeV 程度であれば、差はないと考えるが、注記は必要と考える。使用指針のユーザが照射試験を実施する場合、今回の実験結果と比較するために、比較するために今回の考え方について記載が必要であると考え（例えば、測定値と線量値との補正を行う等）。詳細については、来年度議論したい。
-) QST 殿では、アラニン線量計を使用されていると思うが、どちらの線量計で測定するのが良いと考えるか。
-) アラニン線量計とガラス線量計は、両方使用しているが、測定する吸収線量による。集積吸収線量が 500Gy 程度であれば、ガラス線量計は補正する必要がある。なお、QST では、線量計は照射場の吸収線量率測定に用い、集積線量を測定することは少ない。
吸収線量と実効線量の換算については、使用した線量計と換算の考え方を報告

書に記載しておけば問題ないと思う。

-) ガラス線量計は、集積線量ではなく、吸収線量率測定に使用する方針としたい。そうすれば、ガラス線量計でも正確な数値が出ると考える。
-) 試験場は一定の吸収線量率であるが、吸収線量率の変動するような場合は、集積線量（被ばく測定等）を測定した方が良い。
-) ガラス線量計は、100Gy 以上は参考扱いとなるため、照射上限についてあわせて記載したい。

6.3.2 誤差の定義

-) 解析値、計算値および測定値の定義を教えてください。誤差は、正しい値からのバラつきだと考えるが、今回の場合、正しい値は何を示しているなのか。解析値を正として、解析値からのバラつきを誤差としているのか。
-) 計算値（解析値）はシミュレーションもしくは手計算の値である。当初は、測定値を正としていたが、集積吸収線量の大きい領域において、正とした試験における測定値にも線量計の吸収線量特性による誤差が生じている。用語の記載は適切なものに見直す。
-) 「線量計組成による実測値の誤差」、「解析値と実測値の誤差」の2つの誤差があるのか。
-) その通りである。

6.3.3 計算コード

-) QAD は一般的に使用可能なコードなのか。
-) 難易度は高いと考える。組織への登録やライセンス料の支払いが必要となる。
-) 複雑な体系の評価をする場合には、専門業者に委託することも良いと考える。また、手計算は一般的に評価可能なのか。
-) 今回用いた手計算 3 では、使用したパラメータの一部を古い文献から引用しており、本文献は入手場所も限られている。そのため、簡単に評価できない手法もある。
-) 指針に、計算の例題を記載しておけば、使用しやすくなると思う。
-) 承知した。

-) MCNP と QAD は、どちらの信頼性が高いのか。
-) MCNP である。
-) MCNP と同じモンテカルロ計算コードである PHITS でも計算可能なのか。
-) PHITS と MCNP はどちらも計算可能であり、同等な評価になると考えている。
-) PHITS は講習会等も実施されているため、MCNP と比較し、ライセンスの入手

性は優れていると考える。ただし、中性子を評価する場合は、PHITSではなく、MCNPを使用する場合もある。

-) 原子力業界的にはMCNPを使用するが多い。
-) 許認可では、QADやMCNPの実績があるが、PHITSはない。なお、原子力学会の分科会のなかで、PHITS使用の要望が出ている。

6.3.4 手計算の適用範囲

-) P.35の手計算手法の使い分けについて、使用可能な手法を統一して記載できないか。
-) 今回示した手計算結果は、今回の計算条件の場合の結果である。実際には、使用環境に応じた線源を設定する必要があるため、指針には使用環境を考慮して使用することを記載したい。
-) 手計算3のライン線源を複数の点線源に分割し、手計算2を適用すると評価結果は、合致するのか。
-) 単純に一つの点線源で模擬した場合と比較し、ライン線源を複数の点線源で模擬した場合、計算精度は向上すると思われるが、計算負荷は上がる。また、ライン線源を複数の点線源に分割した時の定量的な評価は実施できていない。
-) 理論上は合致すると思われるが、別途、評価してほしい。
-) 吸収線量率を下げるためには線源方向は完全に遮へい体で覆うことが有効であると考えますが、遮へい体の線源方向に開口があるのはなぜか。
-) 線源方向に開口を設けているのは、実際の環境でもこのような場合があると考えられるためである。
-) 複雑なモデルはMCNPを用い、専門業者に計算を委託するのが良いと考える。

6.3.5 来年度の実施内容

-) 今年度、解析・手計算を実施した結果、課題（来年度の実施内容）はあるのか。
-) 点線源やライン線源ではなく、実際の線源を模擬した体積線源等に対し、手計算の適用性を評価したいと考えている。
-) そこまでしなくても、センサ位置での空間線量率が分かれば良いのではないか。照射試験の校正用ではないのか。
-) 実際の使用環境を模擬したいと考えている。
-) 実環境の空間線量率を評価する場合、線量計で測定することで十分ではないか。
-) 新規施設を設計する場合には、実環境での空間線量率測定が不可能であり、解析による評価が必要となる。使用指針へ記載する際には、一般産業用工業品の照射試験だけでなく、施設の設計にも展開できればよいと考えている。

-) 例えば、ドラム缶状の廃棄物の遮へい計算を実施しても良いと考える。
-) ドラム缶 1 本の場合は問題ないが、複数本ある場合は、線源の設定について、検討が必要である。
-) QST では新しい線源を導入する場合、等間隔に並べるのではなく、両端の隙間を小さくする等して、一定距離における空間線量率が平均化されるように事前計算を実施している。QST での計算方法を確認する。

6.4 事務連絡

- ・ 来年度の委員会は、9月、11月、1月の3回を予定している。詳細日程は別途調整する。

以上