## 令和3年度原子力產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4年2月

(株)神戸製鋼所

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
2.25ヵ年の実施計画	7
2.2.1 一般産業用工業品の照射データ取得	7
(1) センサ類の使用環境検討及び照射試験用センサ類の選定	7
(2) センサ類の照射試験	7
(3) センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	7
2.2.2 一般産業用工業品の使用指針作成	7
(1) 機器へのセンサ類適用方法検討	7
(2)機器の作動試験及び適合性評価	7
(3) 一般産業用工業品の使用指針作成	7
2.3 令和 2 年度の実施内容	8
2.3.1 センサ類の耐放射線性調査	8
2.3.2 センサ類の照射試験	8
(1) 照射試験結果	8
(2) 課題	10
2.4 令和 3 年度の実施内容	. 10
2.4.1 一般産業用工業品の照射データの追加取得	11
(1) 照射線量率における影響評価	11
(2) 放射線の照射方向による影響評価	11
(3) 個体差のばらつき評価	11
(4) 裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値評価	11
2.4.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得	11
3. 一般産業用工業品の照射データの追加取得	. 12
3.1 概要	. 12
3.2 照射試験条件及び方法	. 12
3.2.1 照射試驗条件	. 12
(1) メーカ	12
(2) 照射線量率	12
(3) 照射方向	13

(4) サンプル数	
3.2.2 照射試験場所	
3.2.3 照射試験方法	
(1) センサ配置	
(2) データ取得	
3.2.4 照射試験スケジュール	
3.3 照射試験結果	
3.3.1 アラニン線量計による線量測定	
3.3.2 光電センサ	
(1) 照射線量率 5Gy/h	
(2) 照射線量率 50Gy/h	
(3) 照射線量率 100Gy/h	35
3.3.3 近接センサ	
(1) 照射線量率 5Gy/h	51
(2) 照射線量率 50Gy/h	51
(3) 照射線量率 100Gy/h	52
3.3.4 トルクセンサ	
(1) 照射線量率 5Gy/h	64
(2) 照射線量率 50Gy/h	64
(3) 照射線量率 100Gy/h	65
3.3.5 測域センサ	
(1) 照射線量率 5Gy/h	69
(2) 照射線量率 50Gy/h	70
(3) 照射線量率 100Gy/h	70
(4) 照射線量率 150Gy/h	70
3.4 考察	
3.4.1 照射線量率における影響評価	
3.4.2 放射線の照射方向による影響	
3.4.3 個体差のばらつき評価	
3.4.4 裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値評価	
<b>3.4.5</b> 照射試験において得られた知見	
(1) センサの通電・非通電による影響	85
(2) 高さ方向・周方向による照射線量率の影響	85
(3) 非照射時の回復効果	85
4. 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	
4.1 概要	
4.2 遮へい体構造検討	
4.2.1 遮へい体構造検討対象センサ	

4.2.2 予備解析用の遮へい体構造検討	
(1) 光電センサに装着する遮へい体	
(2) 測域センサに装着する遮へい体	
4.2.3 遮へい解析コードを用いた遮へい評価(予備解析)	
(1) 計算条件	90
(2) 計算結果	103
4.2.4 遮へい体構造検討結果	106
4.3 カスタマイズしたセンサ類の照射試験	112
4.3.1 照射試験条件及び方法	
(1) 照射試験条件	
(2) 照射試験方法	
4.3.2 照射試験結果	116
(1)線量測定	
(2) カスタマイズした光電センサ	
(3) カスタマイズした測域センサ	
4.4 遮へい解析コードを用いた遮へい評価(本解析)	
4.4.1 計算条件	
(1) 解析コード	121
(2) 計算で使用する密度及び組成	121
(3) 線量率換算係数	
(4) 線源条件	
(5) 評価位置	
(6) 計算モデル	
4.4.2 計算結果	
4.5 考察	
4.5.1 光電センサの遮へい評価(予備解析)	
4.5.2 カスタマイズ(遮へい体装着)による効果	
4.5.3 照射試験と遮へい評価(本解析)の比較	
5. 今後の課題	
6. まとめ	
参考文献	

- 表 目 次 -

表 2-1	令和 2~6 年度の実施スケジュール	8
表 2-2	光電センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量	9
表 2-3	近接センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量(照射線量率 50Gy/h)	9
表 2 <b>-</b> 4	トルクセンサが正常に動作した時点までの集積吸収線量(照射線量率 50Gy/h)	9
表 2-5	測域センサ損傷時の集積吸収線量(照射線量率 50Gy/h)	10
表 3-1	照射試験条件	16
表 3-2	照射試験データ取り及び動作確認頻度	23
表 3-3	高さ方向のアラニン線量計の集積吸収線量測定結果(50Gy/h)	31
表 3-4	高さ方向のアラニン線量計の集積吸収線量測定結果(100Gy/h)	32
表 3-5	使用する各センサの設置高さにおける照射線量率	32
表 3-6	光電センサ照射試験結果(正常な動作が確認された時点)	39
表 3-7	光電センサ照射試験結果(電圧が大きく下がり始めた時点)	40
表 3-8	近接センサ照射試験結果(正常に動作が確認できた時点)	54
表 3-9	近接センサ照射試験結果(電圧が大きく下がり始めた時点)	55
表 3-10	トルクセンサ照射試験結果	66
表 3-11	測域センサ照射試験結果	71
表 3-12	測域センサ照射試験結果(測距データに異常が見られた時点)	72
表 3-13	放射線の照射方向による影響(不具合発生前の集積吸収線量)	83
表 3 <b>-</b> 14	個体差のばらつきによる影響(不具合発生前の集積吸収線量)	84
表 4-1	予備解析で用いた物質の密度及び組成	91
表 4-2	解析で用いた換算係数	92
表 4 <b>-</b> 3	Co-60 線源スペクトル	94
表 4 <b>-</b> 4	線源からの距離による線量率測定値と計算値の比較	94
表 4-5	光電センサの遮へい予備解析結果	103
表 4-6	測域センサの遮へい予備解析結果(ケース 1~3)	104
表 4-7	測域センサの遮へい予備解析結果(ケース 4)	105
表 4-8	カスタマイズしたセンサ類の照射試験条件	112
表 4-9	カスタマイズ照射試験のデータ取得及び動作確認頻度	116
表 4-10	カスタマイズした光電センサの線量測定結果	117
表 4-11	カスタマイズした測域センサの線量測定結果	117
表 4-12	カスタマイズした光電センサの照射試験結果	118
表 4-13	カスタマイズした測域センサの照射試験結果	121
表 4-14	本解析で用いた物質の密度及び組成(その 1)	122
表 4-15	本解析で用いた物質の密度及び組成(その 2)	123
表 4-16	本解析で用いた物質の密度及び組成(その 3)	124
表 4-17	線源規格化における測定結果及び計算結果の比較	126

表 4-18	光電センサ(カスタマイズ)	の本解析結果	131
表 4-19	測域センサ (カスタマイズ)	の本解析結果	131

- 図 目 次 -

义	1-1	従来のサプライチェーン	<b>2</b>
义	1-2	使用指針を活用したサプライチェーン	<b>2</b>
义	2-1	指針作成までの業務フロー	6
义	3-1	光電センサ被照射面1	4
义	3-2	近接センサ被照射面1	4
义	3-3	トルクセンサ被照射面1	4
义	3-4	測域センサ被照射面1	15
义	3-5	センサ取付け図 (5Gy/h)1	17
义	3-6	光電センサ・近接センサ取付け図(50Gy/h、100Gy/h)1	18
义	3-7	トルクセンサ取付け図(50Gy/h、100Gy/h)1	8
义	3-8	測域センサ取付け図(50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)1	9
义	3-9	センサ配置図 (5Gy/h)1	9
义	3-10	センサ配置図その1(50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)2	20
义	3-11	センサ配置図その2(50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)2	20
义	3-12	センサ配置図その3(50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)2	21
义	3-13	センサ配置図その4(50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)2	21
义	3-14	センサ配置図その5(50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)2	22
义	3-15	光電センサの試験用電気回路図2	23
义	3-16	近接センサの試験用電気回路図2	25
义	3-17	トルクセンサの試験用電気回路図2	26
义	3-18	トルクセンサ治具取付け図2	26
义	3-19	測域センサの試験用電気回路図2	27
义	3-20	照射試験スケジュール(5Gy/h)2	29
义	3-21	照射試験スケジュール(50、100、150Gy/h)	30
义	3-22	高さ方向の照射線量率の計算結果(50Gy/h)	33
义	3-23	高さ方向の照射線量率の計算結果(100Gy/h)	33
义	3-24	光 50-1 電圧変化	11
义	3-25	光 50-2 電圧変化	11
义	3-26	光 50-3 電圧変化	12
义	3-27	光 100-1 電圧変化	12
义	3-28	光 100-2 電圧変化	13
义	3-29	光 100-3 電圧変化	13
义	3-30	光 100-4 電圧変化	14
义	3-31	光 100-5 電圧変化	14
义	3-32	光 100-6 電圧変化	15
义	3-33	光 100-7 電圧変化	15

🗵 3-34	光 100-8 電圧変化	. 46
図 3-35	光 100-9 電圧変化	. 46
図 3-36	光 100-10 電圧変化	. 47
図 3-37	光 100-TB-1 電圧変化	. 47
図 3-38	光 100-TB-2 電圧変化	. 48
図 3-39	光 100-TB-3 電圧変化	. 48
図 3-40	光 100-RL-1 電圧変化	. 49
図 3-41	光 100-RL-2 電圧変化	. 49
図 3-42	光 100-RL-3 電圧変化	. 50
図 3-43	近 50-1 電圧変化	. 56
図 3-44	近 50-2 電圧変化	. 56
図 3-45	近 50-3 電圧変化	. 57
図 3-46	近 100-1 電圧変化	. 57
図 3-47	近 100-2 電圧変化	. 58
図 3-48	近 100-2 電圧変化(縮小図)	. 58
図 3-49	近 100-3 電圧変化	. 59
図 3-50	近 100-3 電圧変化(縮小図)	. 59
図 3-51	近 100-4 電圧変化	. 60
図 3-52	近 100-5 電圧変化	. 60
図 3-53	近 100-6 電圧変化	. 61
図 3-54	近 100-7 電圧変化	. 61
図 3-55	近 100-8 電圧変化	. 62
図 3-56	近 100-9 電圧変化	. 62
図 3-57	近 100-9 電圧変化(縮小図)	. 63
図 3-58	近 100-10 電圧変化	. 63
図 3-59	ト 50-1 電圧変化	. 66
図 3-60	ト 50-2 電圧変化	. 67
図 3-61	ト 50-3 電圧変化	. 67
図 3-62	ト 100-1 電圧変化	. 68
図 3-63	ト 100-2 電圧変化	. 68
図 3-64	ト 100-3 電圧変化	. 69
図 3-65	測 5-1 測定距離の時間変化	. 73
図 3-66	測 5-2 測定距離の時間変化	. 73
図 3-67	測 5-3 測定距離の時間変化	. 74
図 3-68	測 50-1 測定距離の時間変化	. 74
図 3-69	測 50-2 測定距離の時間変化	. 75
図 3-70	測 50-3 測定距離の時間変化	. 75
図 3-71	測 100-1 測定距離の時間変化	. 76

図 3-72	測 100-2 測定距離の時間変化	76
図 3-73	測 100-3 測定距離の時間変化	77
図 3-74	測 100-4 測定距離の時間変化	77
図 3-75	測 150-1 測定距離の時間変化	78
図 3-76	測 150-2 測定距離の時間変化	78
図 3-77	測 150-3 測定距離の時間変化	79
図 3-78	測 150-4 測定距離の時間変化	79
図 3-79	測 150-5 測定距離の時間変化	80
図 3-80	測 150-6 測定距離の時間変化	80
図 3-81	照射線量率による耐放射線性への影響	82
図 3-82	光電センサの構造模式図	83
図 4-1	光電センサ外形図	87
図 4-2	光電センサに装着する予備解析用遮へい体構造	87
図 4-3	測域センサ外形図及び検出角度	88
図 4-4	測域センサに装着する予備解析用遮へい体構造	89
図 4-5	線源規格化の計算モデル(予備解析用)	93
図 4-6	線源からの距離による線量率測定値と計算値の比較	94
図 4-7	光電センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース1: 遮へい体なし)	96
図 4-8	光電センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース 2: 遮へい体あり・開口部あ	ちり)
		97
図 4-9	光電センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース 3: 遮へい体あり・開口部な	こし)
		98
図 4-10	測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース1:遮へい体なし)	99
図 4-11	測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース 2 : 遮へい体あり・開口部あ	あり)
		100
図 4-12	測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース 3: 遮へい体あり・開口部な	まし)
		101
図 4-13	測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース4:遮へい厚の増加)	102
図 4-14	光電センサ遮へい体の構造図	107
図 4-15	光電センサ遮へい体の写真	108
図 4-16	測域センサ遮へい体の構造図	109
図 4-17	測域センサ遮へい体(追加部)の構造図	110
図 4-18	測域センサ遮へい体の写真	111
図 4-19	カスタマイズした光電センサの照射試験の配置図	113
図 4-20	カスタマイズした測域センサの照射試験の配置図	114
図 4-21	カスタマイズした光電センサ及び測域センサの試験状況写真	115
図 4-22	No.光 100-カ-1 の電圧変化	119
図 4-23	No.光 100-カ-2 の電圧変化	119

図 4-24	No.光 100-カ-3 の電圧変化	120
図 4-25	線源規格化の計算モデル(本解析用)	125
図 4-26	測定結果及び計算結果のグラフ	126
図 4-27	照射室のモデル図	128
図 4-28	光電センサ(カスタマイズ)の本解析モデル	129
図 4-29	測域センサ(カスタマイズ)の本解析モデル	130
図 4-30	MCNP コード計算による光電センサにおける線量率分布(開口部高さ中心位置)	132
図 4-31	MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(遮へい体底部高さ位)	133
図 4-32	MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(センサ下部高さ位置)	134
図 4-33	MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(開口部高さ中心位置)	135
図 4-34	MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(センサ上部空間高さ位	立置)
		136
図 4-35	線源と遮へい体付き光電センサの位置関係	138
図 4-36	DIN 規格によるストリーミング計算のイメージ図	138

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いれば、供給 を拒否される可能性が高く、原子力機器の構成部品の調達が困難になることにより、原子力施設 の保安に支障が生じるおそれがある。たとえ、納入時の協力が免責されても、納入後のフォロー が厳しいとの不安があるため、供給者の中には原子力向けの製品提供を拒否する風潮が広がって おり、サプライチェーンが劣化している(図1-1参照)。

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

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

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

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



図 1-1 従来のサプライチェーン



図 1-2 使用指針を活用したサプライチェーン

1.2 一般産業用工業品の使用指針の必要性

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

① 耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備(1993年)[1]

② 高放射線環境で使用される機器・材料類の耐放射線特性データ集(2008年)[2]

③ 各種高分子材料の耐放射線性; 実使用環境模擬の劣化評価(2010年)<sup>[3]</sup>

これらの文献等の耐放射線性データは、主に機器の構成部品に関するデータであり、購入品の 放射線による耐久性を評価するためには、構成部品を調査し、どの部品が耐放射線性の観点で律 速になるかを検討する必要がある。したがって、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)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 力を強いれば、サプライチェーンが更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でも一般産業用工業品であるセンサ 類の技術評価が可能な使用指針を作成することで、原子力事業者等、原子力メーカ及び一般産業 工業品メーカの協力体制が構築されることにより、センサメーカ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こと、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るとは限らず、 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。したがって、同一の製品であれば再現性があるため、試験によって製品の耐 放射線性データを得られる可能性がある。 以上のことから、本事業では、センサ類に着目して一般産業用工業品の使用指針を定めること としている。

#### 1.4 使用指針の適用例

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

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

1.5 目的

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

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

#### 2. 全体計画の策定

#### 2.1 概要

放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針を作成するためには、一般産業用工業品の耐放射線性に関するデータ(照射データ)を取得する必要がある。指針作成までの業務フローを図 2-1 に示す。一般産業用工業品の使用指針の作成に必要な期間は、5 年程度と考えられる。一般産業用工業品の使用指針作成のための 5 ヵ年の実施計画及び令和 3 年度の実施内容について後述する。



図 2-1 指針作成までの業務フロー

2.2 5 ヵ年の実施計画

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

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

(2) センサ類の照射試験

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

(3) センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得

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

2.2.2 一般産業用工業品の使用指針作成

(1)機器へのセンサ類適用方法検討

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

(2)機器の作動試験及び適合性評価

センサ類を搭載した機器の作動試験(コールド試験)を行い、適合性を評価する。

(3) 一般産業用工業品の使用指針作成

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

以上より、放射線環境下の一般産業用工業品の使用指針を作成するまでには、5 年程度かか るものと考えられる。令和 2~6 年度の 5 ヵ年の実施スケジュールを表 2-1 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
1.一般産業用工業品の照射データ取得					
1) センサ類の使用環境検討及び照射試 験用センサ類の選定	•				
2) センサ類の照射試験	•				
3) センサ類のカスタマイズ (遮へい体 注差笠) みび昭射データ取得					
<ul> <li>● 一般産業田工業品の値田指針作成</li> </ul>					
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作成					

#### 表 2-1 令和 2~6年度の実施スケジュール

2.3 令和2年度の実施内容

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

2.3.1 センサ類の耐放射線性調査

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

2.3.2 センサ類の照射試験

(1) 照射試験結果

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

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

8

	照射線量率	率 50Gy/h	照射線量	率 75Gy/h	照射線量率	率 150Gy/h
メーカ 名	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<

表 2-2 光電センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量

※ SD:標準偏差

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

メーカ名	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 <sup>※</sup> [Gy]
D 社	813 939	876
E 社	1072< 1072< 1072< 1072<	1072<

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

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

メーカ名	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)		

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

表 2-5 測域センサ損傷時の集積吸収線量(照射線量率 50Gy/h)

(2)課題

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

1) 照射線量率における影響評価

光電センサに対して、照射線量率をパラメータとして照射試験を実施し、照射線量率が高 いほど、耐放射線性が低下するという結果が得られた。一般産業用工業品のセンサ類を使用 する環境としては、50Gy/h よりも低い環境であることが想定された。したがって、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。 したがって、センサへ照射させる向きによっては、センサが損傷するまでの集積吸収線量の 結果が変わる可能性も考えられた。

3) 個体差のばらつき評価

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

2.4 令和3年度の実施内容

令和3年度は、2.2項に示した5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する。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) 照射線量率における影響評価

令和2年度の照射試験結果から、照射線量率が高いほどセンサの耐放射線性は低下すること が示された。高い照射線量率での試験は保守的(安全側)ではあるが、センサの実際の使用環 境を考えると、過大評価している可能性がある。そこで、照射試験を長期化し、より低く現実 的な放射線環境下の耐放射線性データを取得する。

(2) 放射線の照射方向による影響評価

同種のセンサであっても構成部品の配置等がメーカにより異なり、これらが耐放射線性に影響を与えると考えられた。そこで、配置するセンサの向きを変更し、センサで最も放射線に弱 い方向における耐放射線性データを取得する。

(3) 個体差のばらつき評価

令和2年度の照射試験では、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の確認はできたが、サンプル数が3であったため、定量的に評価するまでには至っていない。ばらつきについて定量評価が可能となるよう、必要なサンプル数の耐放射線性データを追加取得する。

(4) 裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値評価

照射線量率、照射方向、個体差のばらつきに関する追加データを取得し評価したうえで、センサが実際に使用可能となるよう、集積吸収線量の裕度を検討し、その上限値を設定する。

#### 2.4.2 センサ類のカスタマイズ及び照射データ取得

センサ類の外側に遮へい体を装着する等により、放射線環境下用に簡単にカスタマイズする手 法を試みる。カスタマイズしたセンサ類に対して照射データを取得する。 3. 一般産業用工業品の照射データの追加取得

3.1 概要

令和2年度に実施した照射試験の課題から追加データ取得のための試験条件(照射時間、照射線量率、照射距離、照射方向、試験回数等)、試験場所、試験スケジュールを検討し、照射試験 計画を作成した。

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

3.2 照射試験条件及び方法

3.2.1 照射試験条件

照射試験用センサ類について、照射線量率、放射線の照射方向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確認するための照射試験条件を設定した。

各照射試験条件の詳細について以下に示す。また、照射試験条件を表 3-1 に示す。

(1) メーカ

令和3年度の試験では令和2年度に選定したメーカのうち、センサごとに代表して1社選定 した。メーカは令和2年度の試験結果から、耐放射線性が最も低いセンサを選定した。その結 果、光電センサはA社、近接センサはD社、トルクセンサはG社、測域センサはH社を選定 した。

(2) 照射線量率

令和2年度の試験結果から照射線量率が高いほどセンサの耐放射線性は低下する傾向があり、 照射線量率による耐放射線性への影響があることが分かった。そのため、照射線量率を上げた 加速試験では保守的な試験結果となっていることが考えられる。したがって、試験期間等も考 慮し、最低照射線量率を現実的に試験可能な5Gy/hにて照射することとした。5Gy/h以上の照 射線量率は、50Gy/h、100Gy/h、150Gy/hとし、各センサ類の試験目的に応じて適切な照射線 量率を選定して、照射線量率の違いによる影響を評価することとした。

また、各センサ類の試験期間を計画するために、令和2年度の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、基本的に照射線量率の低い順で照射試験を実施する 計画にしており、先に実施した試験結果を踏まえて照射上限を見直すこととした。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、試験期間に余裕があれば照射は継続する こととし、ここでの照射上限は目安値とした。

各センサ類の照射線量率及び照射上限について以下に述べる。

1) 光電センサ

照射線量率の違いによる耐放射線性への影響について確認するために、5Gy/h に加えて、

50Gy/h、100Gy/hの照射線量率で試験を実施することとした。

令和2年度の試験結果から光電センサは最大で536Gy 照射するまで正常に動作していた。 本試験の照射条件は、令和2年度と異なるため、令和2年度の結果に比べ正常に動作しなく なる最大集積吸収線量が上がった場合を考慮して700Gy を照射上限として設定した。

2) 近接センサ

照射線量率の違いによる耐放射線性への影響について確認するために、5Gy/h に加えて、 50Gy/h、100Gy/hの照射線量率で試験を実施することとした。

令和2年度の試験結果から近接センサは最大で939Gy照射するまで正常に動作していた。 本試験の照射条件は、令和2年度と異なるため、令和2年度の結果に比べ正常に動作しなく なる最大集積吸収線量が上がった場合を考慮して1100Gyを照射上限として設定した。

3) トルクセンサ

照射線量率の違いによる耐放射線性への影響について確認するために、5Gy/h に加えて、 50Gy/h、100Gy/hの照射線量率で試験を実施することとした。

令和 2 年度の試験結果からトルクセンサは最大で 306Gy 照射するまで正常に動作していた。本試験の照射条件は、令和 2 年度と異なるため、令和 2 年度の結果に比べ正常に動作しなくなる最大集積吸収線量が上がった場合を考慮して 500Gy を照射上限に設定した。

4) 測域センサ

照射線量率の違いによる耐放射線性への影響について確認するために、5Gy/h に加えて、 50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h の照射線量率で試験を実施することとした(計画時は、3条件 を考えていたが、測域センサは、ばらつきが少なかったことから、試験途中で4条件に変更 した)。

令和2年度の試験結果から測域センサは最大で278Gy照射するまで正常に動作していた。 本試験の照射条件は、令和2年度と異なるため、令和2年度の結果に比べ正常に動作しなく なる最大集積吸収線量が上がった場合を考慮して500Gyを照射上限に設定した。

(3) 照射方向

令和2年度の試験結果から同種のセンサであっても構成部品の配置等がメーカにより異なり、 放射線の影響を受けやすい基盤類の照射方向が異なるため、照射方向が耐放射線性に影響を与 えていると考えられた。そこで、配置(照射方向)の影響を確認するためにセンサの向きを変 更し、センサの放射線に弱い方向における耐放射線性データを取得する。内部構造が比較的単 純で評価しやすい光電センサを試験対象とし、投受光部を正面としたとき、正面・背面方向、 上面・下面方向、右面・左面方向の3方向から照射を実施する。光電センサの被照射面を図3・1 に示す。他のセンサは正面・背面方向から照射を実施した。近接センサ、トルクセンサ及び測 域センサの被照射面を図3・2~図3・4に示す。



図 3-1 光電センサ被照射面



図 3-2 近接センサ被照射面



図 3-3 トルクセンサ被照射面



図 3-4 測域センサ被照射面

(4) サンプル数

令和2年度の試験結果からセンサ個体差によるばらつきがそれほど大きくないことの確認は できたが、サンプル数が3であったため、定量的に評価するまでには至っていない。ばらつき について定量評価するため、耐放射線性データを追加取得する。代表して、光電センサ、近接 センサの照射線量率100Gy/hの試験において、サンプル数を10と設定した。また、測域セン サの照射線量率100Gy/h、150Gy/hの試験において、それぞれサンプル数を4、6と設定した。

センサ名	試験条件				是十	昭計	
	照射 線量率 [Gy/h]	メーカ数	照射方向	サンプル 数	<ul><li>センサ</li><li>試験台数</li></ul>	取八 照射時間 [h]	上限*1 [Gy]
・光電センサ	5	1	1	3	3	140	700
	50	1	1	3	3	14	700
	100	1	1	10	10	7	700
	100	1	$2^{*_2}$	3	6	7	700
近接センサ	5	1	1	3	3	220	1100
	50	1	1	3	3	22	1100
	100	1	1	10	10	12	1200
トルクセンサ	5	1	1	3	3	250	500
	50	1	1	3	3	25	500
	100	1	1	3	3	5	500
測域センサ	5	1	1	3	3	250	500
	50	1	1	3	3	25	500
	100	1	1	4	4	5	500
	150	1	1	6	6	3.3	500

表 3-1 照射試験条件

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

※2 ばらつき評価の試験(サンプル数10)と合わせて、3方向の照射方向とする。

3.2.2 照射試験場所

立案した照射試験条件及び方法が実施可能な照射試験場所として、量子科学技術研究開発機構 の高崎量子応用研究所にあるガンマ線照射施設を選定した。

本施設では3つの照射棟に合計8つの照射室を所有し、約0.2 Gy/hの低線量率から約10 kGy/h の高線量率までの広い範囲で、線源から試験体までの距離を調整することで任意の線量率で照射 できる。コバルト 60 線源は金属製の筒に密封されていて、水中に格納されており、照射すると き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、使用する照射室、線源、線源からの距離の選択により、計画している 照射線量率 5~150Gy/h の試験実施が可能である。

3.2.3 照射試験方法

(1) センサ配置

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

照射試験では、試験時間の短縮のため複数台のセンサを同時に照射することとした。線源を

中心に円周上にセンサを設置するが、スタンドや棚などを用いて高さ方向にも複数台設置して 試験を行う。5Gy/h の試験では、棚を配置し 2 段に分けて試験をする(図 3-5)。50、 100Gy/h の試験では光電センサ及び近接センサは、スタンド(図 3-6)、トルクセンサは棚

(図 3-7)、測域センサは木製ブロック(図 3-8)に載せて試験をする。なお、照射室の床面 に直接センサを設置した場合、床面からの放射線の散乱によって照射線量率が上がることが考 えられるため、センサは床面から離して設置することとした。

線源は棒線源であるため、平面上では線源から同じ距離に設置した場合であれば、基本的 に同一の線量率で照射できるが、設置高さが異なる場合は線源中心が最も照射線量率が高くな り、線源中心から上下に離れるほど、照射線量率が低くなる傾向がある。したがって、センサ 類を設置した位置における照射線量率は、アラニン線量計による線量測定を行い、線量率を算 出する。測定した集積吸収線量をアラニン線量計が照射された時間で除すことにより照射線量 率を求めることができる。アラニン線量計は各照射線量率に対応した線源からの距離及び各セ ンサの設置高さに配置し、測定を行って照射線量率を算出した。

照射線量率が 5Gy/h の試験は、食品棟第1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 950mm として設定した。5Gy/h の照射試験のセンサ配置図を図 3-9 に示す。

照射線量率が 50、100、150Gy/h の試験は、コバルト第1棟第3 照射室にて実施することと し、線源からセンサまでの距離を 350mm、205mm 及び 175mm として設定した。50、100、 150Gy/h の照射試験のセンサ配置図を、図 3-10 から図 3-14 に示す。



図 3-5 センサ取付け図 (5Gy/h)



図 3-6 光電センサ・近接センサ取付け図 (50Gy/h、100Gy/h)



※ 50Gy/h と 100Gy/h 試験で使用する木製ブロックのサイズは異なる。

図 3-7 トルクセンサ取付け図 (50Gy/h、100Gy/h)



図 3-8 測域センサ取付け図 (50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)



図 3-9 センサ配置図 (5Gy/h)



図 3-10 センサ配置図その1 (50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)



図 3-11 センサ配置図その2 (50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)



図 3-12 センサ配置図その3 (50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)



図 3-13 センサ配置図その4 (50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)



図 3-14 センサ配置図その5 (50Gy/h、100Gy/h、150Gy/h)

(2) データ取得

照射試験対象としたセンサは、それぞれ検知方式が異なるため出力するデータも異なる。そ こで、センサごとに出力データを記録することとした。また、光電センサ、近接センサでは検 知状態の ON/OFF の切替わりを、トルクセンサは負荷によって正常に電圧が切替わるかを確 認するため動作確認を実施することとし、動作確認頻度を設定した。動作確認頻度は正常な動 作がしなくなると予想される予想集積吸収線量から設定した。出力データはデータロガーまた は PC で記録するが、食品棟での光電センサ、近接センサ及びトルクセンサの 5Gy/h の照射試 験は照射室の制約から照射中にデータ取りができないため、動作確認のみ実施する。各センサ における照射条件ごとの出力データ及び照射中のデータ取りの有無並びに動作確認頻度を表 3-2 に示す。

また、各センサのデータ取得方法の詳細を以下に示す。

22

センサ	照射線量率 [Gy/h]	照射中の データ取り	取得 データ	動作確認		照射
				頻度(目安) [Gy]	確認内容	上限 <sup>**1</sup> [Gy]
光電 センサ	5	無	電圧 <sup>※2</sup>	200,300 400~(20Gy 毎)	<ul> <li>・検知状態の ON/OFF</li> <li>・検出距離測定</li> </ul>	700
	50	有		200,300 400~(20Gy 毎)		700
	100	有		200, 300~(20Gy 毎)		700
近接 センサ	5	無	電圧*2	700~(20Gy 毎)	・検知状態の ON/OFF	1100
	50	有		400,600,700, 800~(20Gy 毎)		1100
	100	有		500,700 800~(20Gy 毎)		1200
トルク センサ	5	無	電圧 <sup>※2</sup>	200~(20Gy 毎)	・負荷変動した 際の電圧変化	500
	50	有		200~(20Gy 毎)		500
	100	有		100~(20Gy 毎)		500
 測域 センサ	5,50,100,150	有	測距 データ	_	_	500

表 3-2 照射試験データ取り及び動作確認頻度

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

※2 照射中は光電センサ、近接センサは検知状態 ON の電圧、トルクセンサは負荷状態の 電圧を測定する。

1) 光電センサ

本試験で試験対象とした光電センサは3線式であり、障害物を検知(遮光)した際にリレー側の回路に約24Vが出力される。したがって、照射中は光電センサの投受光部をテープで 遮光することで常に検知状態とし、データロガーで出力電圧を連続測定することとした。た だし、5Gy/h の試験では照射室の制約の関係から、センサを通電させず、動作確認の時のみ 測定を実施する。光電センサの電圧を記録するための電気回路図を図3-15に示す。



図 3-15 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等で遮光することで常に検知状態とし、デー タロガーにより電圧を連続測定する。令和2年度の試験結果から数百Gyのオーダで正 常に動作しなくなると考えられるため、出力電圧は0.1Gy以下毎に記録するように、 50Gy/hで5秒毎、100Gy/hで2秒毎に記録することとした。

<動作確認方法>

定期的に照射を中断して照射室内に入室し、白紙を用いて ON/OFF させ、検知時は約 24V、非検知時は約 0V の電圧が正常に出力することを確認する。

また、30cm×30cm の白紙を用い光電センサの検出距離をコンベックスで測定する。 センサ仕様上は 30cm×30cm の白紙に対し 1m の検出距離を持つが、令和 2 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、この傾向を確認する。

動作確認は表 3-2 に従い実施し、正常に動作しなくなると考えられる集積吸収線量に 近い線量に達すると 20Gy 照射毎に確認することとした。照射試験は 5Gy/h、50Gy/h、 100Gy/h の順で実施しており、先に実施した試験の結果を踏まえて試験条件を見直して いるため、同一のセンサでも照射線量率によって動作確認頻度が異なる。

<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する。なお、白紙の検出距離は、 判定基準とせず参考記録とする。

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

2) 近接センサ

本試験で試験対象とした近接センサは2線式であり、金属を検知した際に約21Vを出力する。したがって、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。ただし、5Gy/h の試験では照射室の制約の関 係から、センサを通電させず、動作確認の時のみ測定を実施する。近接センサの電圧を記録 するための電気回路図を図3-16に示す。



図 3-16 近接センサの試験用電気回路図

<出力データの記録方法>

照射中は近接センサの検出部に金属片を貼ることで常に検知状態とし、データロガー により電圧を連続測定する。令和2年度の試験結果から数百Gyのオーダで正常に動作 しなくなると考えられるため、出力電圧は0.1Gy毎に記録することとした。

<動作確認方法>

検出部に金属片を付け外しすることで検知状態を ON/OFF させ、検知時は約 21V、 非検知時は約 0V の電圧が正常に出力することを確認する。

令和 2 年度の試験結果から数百 Gy のオーダで正常に動作しなくなると考えられるため、出力電圧は 0.1Gy 以下毎に記録するように、50Gy/h で 5 秒毎、100Gy/h で 2 秒毎 に 記録することとした。

動作確認は表 3-2 に従い実施し、正常に動作しなくなると考えられる集積吸収線量に 近い線量に達すると 20Gy 照射毎に確認することとした。照射試験は 5Gy/h、50Gy/h、 100Gy/h の順で実施しており、先に実施した試験の結果を踏まえて試験条件を見直して いるため、同一のセンサでも照射線量率によって動作確認頻度が異なる。

<照射終了基準>

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

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

3) トルクセンサ

トルクセンサは負荷トルクに応じて定格容量±2Nm に対し、電圧±5V が出力される。照 射中は定格容量 2Nm の負荷をかけて出力電圧(約5V)をデータロガーで連続測定すること とした。ただし、5Gy/h の試験では照射室の制約の関係から、センサを通電させないが、負 荷をかけた状態で照射し、動作確認の時のみ測定を実施している。トルクセンサの電圧を記 録するための電気回路図を図 3-17 に示す。



図 3-17 トルクセンサの試験用電気回路図

試験中はトルクセンサの片側の軸を固定させ、片側の軸にウエイトを取付けることでトル クを発生させる治具を取付けた。治具の取付け図を図 3-18 に示す。



図 3-18 トルクセンサ治具取付け図

<出力データの記録方法>

照射中はトルクセンサに約 2Nm のトルクをかけることで約 5V の電圧を出力させ、 データロガーにより電圧を連続測定する。令和 2 年度の試験結果から数百 Gy のオーダ で正常に動作しなくなると考えられるため、出力電圧は 0.1Gy 以下毎に記録するように、 50Gy/h で 5 秒毎、100Gy/h で 2 秒毎に 記録することとした。

<動作確認方法>

トルクセンサに取付けたウエイトを外し、出力電圧が変化するか確認する。

動作確認は表 3-2 に従い実施し、正常に動作しなくなると考えられる集積吸収線量に 近い線量に達すると 20Gy 照射毎に確認することとした。照射試験は 5Gy/h、50Gy/h、 100Gy/h の順で実施しており、先に実施した試験の結果を踏まえて試験条件を見直して いるため、同一のセンサでも照射線量率によって動作確認頻度が異なる。
<照射終了基準>

定期的に実施する動作確認時において、負荷を外しても出力電圧が変化しなくなった時点で照射終了とする。

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

4) 測域センサ

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 PC に測距データを出力する。 試験中は測距データを 1 秒毎に PC に出力させ確認しながら記録することとした。測域セン サの測距データを記録するための電気回路図を図 3-19 に示す。



図 3-19 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 に測距データを出力する。

<照射終了基準>

測域センサは、PC で正常な測距データが検出できくなった場合には、データの取り 込みが停止する。したがって、センサが測定不能となり、データの取り込みが停止した 時点で照射終了とする。

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

## 3.2.4 照射試験スケジュール

照射試験条件及び照射試験方法より、照射試験スケジュールを計画した。計画した照射試験ス ケジュール及び実績を図 3-20、図 3-21 に示す。

佐業百日			11月																					
	作未項目	1	8日	9日	10日	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日	21日	22日	23日	24日	25日	26日	27日	28日	29日
1	光電センサ	試験準備																						
2	試験	5Gy/h						-																
3	近接センサ	試験準備																						
4	試験	5Gy/h													3			-				2		
5	トルクセンサ	試験準備																						
6	試験	5Gy/h																						
7		試験準備																						
8	測域センサ 試験	5Gy/h <sup>漆</sup> (2台)																						
9		5Gy/h <sup>※</sup> (1台)																						
10	片付け																							
10	0.011										上面			巨綪										

※ 測域センサは配線の関係上、2 台と1 台に分けて試験を行う。

図 3-20 照射試験スケジュール (5Gy/h)

作業項目												1	月	6	~	11					<i>6</i> - 1	1	
	旧未识日	1	11日	12日	13日	14日	15日	16日	17日	18日	19日	20日	21日	22日	23日	24日※1	25日*1	26日※1	27日	28日	29日	30日	31日
1		試験準備																					
2	光電センサ 試験	50Gy/h																					
3	2. 0.00000011200	100Gy/h																				1	Þ
4		試験準備																	8				
5	近接センサ 試験	50Gy/h																					
6		100Gy/h																	=				
7		試験準備																	=				
8	トルクセンサ 試験	50Gy/h																					
9		100Gy/h																	_				
10		試験準備				с — 0 04 П																	
11		50Gy/h																					
12	測はおいれ	150Gy/h <sup>※2</sup> (1台)																					
13	試験	150Gy/h <sup>卷2</sup> (4台)																					
14		150Gy/h <sup>举2</sup> (1台)								_													
15		100Gy/h (4台)																					
16		試験準備							,		l					8						2	
17	カスタマイズ 試験	光電 100Gy/h																					
18	1	測域 150Gy/h																					
19	片付け	la della con																					

※1 他ユーザが施設を利用するため、試験を実施していない。

※2 測域センサ150Gy/h 試験は配線の関係上、1台、4台、1台に分けて試験を行う。

図 3·21 照射試験スケジュール (50、100、150Gy/h)

3.3 照射試験結果

3.3.1 アラニン線量計による線量測定

センサ類を設置した位置における照射線量率は、アラニン線量計による線量測定を行い、集積 吸収線量率から算出する。50Gy/h、100Gy/h の試験では、動作確認の間隔を 1 時間以上空ける 長時間照射と24分または12分間隔で停止させる短時間照射を計画している。照射時間には線源 の立上げ下げ時間は含まれておらず、線源が定常位置に設置された時点から開始としているため、 短時間照射の場合は、線源の立上げ下げの際の照射分が、集積吸収線量へ与える影響が生じる可 能性が考えられる。したがって、線源の立上げ下げの集積吸収線量へ与える影響を評価するため に、長時間照射と短時間照射(複数回)を実施することとした。測定したアラニン線量計の集積 吸収線量から照射線量率を評価した結果を表 3·3 および表 3·4 に示す。これより、線量測定結果 から長時間と短時間の照射で有意な差はなく、線源の立上げ下げの影響は小さいことが分かった。 そのため、本試験では、必要な設置高さのデータを取得することができた 100Gy/h の光電・近接 センサ(長時間照射)を対象としたアラニン線量計の高さ方向の測定結果をベースとして算出し た照射線量率を採用することとした。なお、5Gy/h の試験では、短時間の照射でも4時間照射す るため、50Gy/h、100Gy/h のように立ち上げ下げの影響評価は実施していない。本試験の評価 で使用する各センサの設置高さにおける照射線量率を表 3·5 に示す。

				-
計免	床面高さ	照射時間	集積吸収線量	照射線量率
八家	[cm]	[h]	[Gy]	[Gy/h]
火雪, 浜埣セン井	30	2	194.1	48.5
していた。 (長時間昭射)	24	2	199.5	49.9
(这时间想到)	18	2	206.5	51.6
火雪、汚拡みいみ	30	0.4 imes 3回	60.5	50.4
兀电・辺接センリ (毎時間昭射)	24	0.4 imes 3回	62.6	52.1
(应可用用常习)	18	0.4 imes 3回	62.6	52.2
トルクセンサ (長時間照射)	11	6	294.7	49.1
トルクセンサ (短時間照射)	11	0.4×4回	72.6	45.4
トルクセンサ (長時間照射 2)	11	6	257.2	42.9
トルクセンサ (短時間照射 2)	11	0.4×4回	43.4	54.3

表 3-3 高さ方向のアラニン線量計の集積吸収線量測定結果(50Gy/h)

是在	床面高さ	照射時間	集積吸収線量	照射線量率
刈家	[cm]	[h]	[Gy]	[Gy/h]
	36	2	204.1	102
	30	2	224.5	112
光電・近接センサ	24	2	232.1	116
(長時間照射)	18	2	232.1	116
	12	2	213.0	107
	6	2	194.8	97.4
火雪, 浜体わい井	30	6	732.3	122
ル电・辺接ビンリ (長時間昭射 9)	24	6	740.5	123
(此时间照初 2)	18	6	757.2	126
と書もと生	30	0.2×3 回	72.7	121
(毎時間昭射)	24	0.2×3 回	84.1	140
(人工中丁间)用用制制	18	0.2×3 回	73.6	123
トルクセンサ	11.2	2	205.0	102
(長時間照射)	24.2	2	227.5	114
トルクセンサ	11.2	0.2×3 回	61.4	102
(短時間照射)	24.2	0.2×3 回	66.1	110
トルクセンサ (長時間照射 2)	11.2	6	695.7	116
トルクセンサ (短時間照射 2)	11.2	0.2×3回	77.4	129

表 3-4 高さ方向のアラニン線量計の集積吸収線量測定結果(100Gy/h)

表 3-5 使用する各センサの設置高さにおける照射線量率

対象	目標照射線量率 [Gy/b]	床面高さ [cm]	照射線量率 [Gy/h]
	5	30	4.63
		30	48.5
	50	24	49.9
		18	51.6
米雪・近控センサ		36	102
「儿电・灯按ビンク		30	112
	100	24	116
	100	18	116
		12	107
		6	97.4
	5	20.2	5.23
トルクセンサ	50	11.2	49.1
	100	11.2	102
	100	24.2	114
	5	30	4.63
測域センサ	50	10.5	47.9
	100	10.5	113
	150	10.5	150





図 3-22 高さ方向の照射線量率の計算結果(50Gy/h)

図 3-23 高さ方向の照射線量率の計算結果(100Gy/h)

3.3.2 光電センサ

3.2 項で設定した試験条件に従い光電センサの照射試験を実施した。各照射試験条件で正常に 動作した時点までの集積吸収線量を表 3-6 に示す。また、データロガーで記録した出力電圧が大 きく変化した時点の集積吸収線量を表 3-7 に示す。

各照射線量率における照射試験結果の詳細を以下に述べる。

## (1) 照射線量率 5Gy/h

光電センサ3台を照射線量率5Gy/hで照射試験を実施した結果、No.光5-1、No.光5-2及び No.光5-3は照射開始177.53時間後(集積吸収線量822Gy)の動作確認時においても、検知時 の電圧(約24V)が出力され、動作ランプも正常に反応し、ON/OFFが切替わる状態であるこ とを確認した。検出距離も100cm以上あることが確認されており、異常は確認されていない。 照射上限に達した後も工程に影響のない範囲で照射を継続したが、集積吸収線量が800Gyを 超えた時点で終了した。

## (2) 照射線量率 50Gy/h

光電センサ3台を照射線量率50Gy/hで照射試験を実施した結果、No.光50-1は、照射開始 8.40時間後(集積吸収線量408Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約24V)が正常に出力 されていたが、照射開始8.80時間後(集積吸収線量427Gy)の動作確認時に、検知時の電圧 (約24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。電圧が出力さ れなくなる直前の動作確認では、検出距離が75cmと短くなっていることが確認された。

No.光 50-2 は、照射開始 8.80 時間後(集積吸収線量 439Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 9.20 時間後(集積吸収線量 459Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。照射開始 8.40 時間後(集積吸収線量 419Gy)の動作確認では、検出距離が 95cm と短くなっていることが確認されたが、電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離 が 100cm 以上あった。

No.光 50-3 は、照射開始 8.40 時間後(集積吸収線量 434Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 8.80 時間後(集積吸収線量 454Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

光電センサを照射線量率 50Gy/h で照射した際の照射時間と出力電圧の関係を示した照射試験結果を図 3-24~図 3-26 に示す。No.光 50-1 は照射開始 7.06 時間後(集積吸収線量 343Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 8.80 時間後(集積吸収線量 427Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 50-2 は照射開始 6.75 時間後(集積吸収線量 337Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 9.09 時間後(集積吸収線量 453Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 50-3 は照射開始 6.80 時間後(集積吸収線量 351Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 8.80 時間後(集積吸収線量 454Gy)の動作確認時に約 0V となった。

これより、照射線量率 50Gy/h で照射した際に、光電センサが正常に動作した時点までの集 積吸収線量は 337~351Gy と推定される。

(3) 照射線量率 100Gy/h

光電センサ 10 台を照射線量率 100Gy/h で照射試験を実施した結果、No.光 100-1 は、照射開始 4.20 時間後(集積吸収線量 429Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が正常に 出力されていたが、照射開始 4.40 時間後(集積吸収線量 449Gy)の動作確認時に、検知時の 電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。電圧が出 力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが確認されており、異常 は確認されていない。

No.光 100-2 は、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 427Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 449Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-3 は、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 441Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 464Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-4 は、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 441Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 464Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-5 は、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 405Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 426Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-6 は、照射開始 4.20 時間後(集積吸収線量 409Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.40 時間後(集積吸収線量 428Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-7 は、照射開始 4.80 時間後(集積吸収線量 490Gy)の動作確認時に、検知時の電

圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 5.00 時間後(集積吸収線量 510Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-8 は、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 427Gy)の動作確認時に、検知時の電 E (約 24V) が正常に出力されていたが、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 449Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V) が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-9 は、照射開始 3.60 時間後(集積吸収線量 418Gy)の動作確認時に、検知時の電 圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 441Gy)の動 作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であること を確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あることが 確認されており、異常は確認されていない。

No.光 100-10 は、照射開始 3.40 時間後(集積吸収線量 395Gy)の動作確認時に、検知時の 電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 3.60 時間後(集積吸収線量 418Gy)の 動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であるこ とを確認した。電圧が出力されなくなる直前の動作確認では検出距離が 100cm 以上あること が確認されており、異常は確認されていない。

光電センサを照射線量率100Gy/hで照射した際の照射時間と出力電圧の関係を示した照射試 験結果を図 3-27~図 3-36 に示す。No.光 100-1 は照射開始 2.55 時間後(集積吸収線量 260Gy) に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.40 時間後(集積吸収線量 449Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 100-2 は照射開始 2.48 時間後(集積吸収線量 278Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 449Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 100-3 は照射開始 2.54 時間後(集積吸収線量 295Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 3.99 時間後(集積吸収線量 463Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-4 は照射開始 2.56 時間後(集積吸収線量 297Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 3.94 時間後(集積吸収線量 457Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-5 は照射開始 2.59 時間後(集積吸収線量 276Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 3.96 時間後(集積吸収線量 422Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-6 は照射開始 2.60 時間後(集積吸収線量 253Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.32 時間後(集積吸収線量 421Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-7 は照射開始 2.61 時間後(集積吸収線量 266Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.98 時間後(集積吸収線量 508Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-8 は照射開始 2.62 時間後(集積吸収線量 294Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.14 時間後(集積吸収線量 464Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-9 は照射開始 2.62 時間後(集積吸収線量 304Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.57 時間後(集積吸収線量 530Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No.光 100-10 は照射開始 2.62 時間後(集積吸収線量 304Gy)に出力電圧が下がり始め、照 射開始 4.17 時間後(集積吸収線量 484Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないこと を確認した。

光電センサ 3 台の上面を線源に向けた状態で、照射線量率 100Gy/h 照射試験を実施した結 果、No.光 100-TB-1 は、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 426Gy)の動作確認時に、検知 時の電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.20 時間後(集積吸収線量 447Gy) の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態である ことを確認した。

No.光 100-TB-2 は、照射開始 4.40 時間後(集積吸収線量 428Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.60 時間後(集積吸収線量 448Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。

No.光 100-TB-3 は、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 390Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.20 時間後(集積吸収線量 409Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。

光電センサの上面を線源に向けた状態で照射線量率100Gy/hで照射した際の照射時間と出力 電圧の関係を示した照射試験結果を図 3·37~図 3·39 に示す。No.光 100-TB-1 は 2.76 時間後 (集積吸収線量 294Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 4.14 時間後(集積吸収線量 441Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 100-TB-2 は照射開始 2.77 時間後(集積吸収線量 270Gy)に出力電圧が下がり始め、 照射開始 4.57 時間後(集積吸収線量 445Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 100-TB-3 は照射開始 2.65 時間後(集積吸収線量 258Gy)に出力電圧が下がり始め、 照射開始 4.17 時間後(集積吸収線量 406Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないこ とを確認した。

光電センサ 3 台の側面を線源に向けた状態で、照射線量率 100Gy/h 照射試験を実施した結果、No.光 100-RL-1 は、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 370Gy)の動作確認時に、検知

時の電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 390Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。

No.光 100-RL-2 は、照射開始 4.00 時間後(集積吸収線量 390Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 4.20 時間後(集積吸収線量 409Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。

No.光 100-RL-3 は、照射開始 3.60 時間後(集積吸収線量 351Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が正常に出力されていたが、照射開始 3.80 時間後(集積吸収線量 370Gy)の動作確認時に、検知時の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。

光電センサの側面を線源に向けた状態で照射線量率100Gy/hで照射した際の照射時間と出力 電圧の関係を示した照射試験結果を図 3-40~図 3-42 に示す。No.光 100-RL-1 は 2.64 時間後 (集積吸収線量 257Gy)に出力電圧が下がり始め、照射開始 3.94 時間後(集積吸収線量 384Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 100-RL-2 は照射開始 2.65 時間後(集積吸収線量 258Gy)に出力電圧が下がり始め、 照射開始 4.11 時間後(集積吸収線量 400Gy)の動作確認時に約 0V となった。

No.光 100-RL-3 は照射開始 2.63 時間後(集積吸収線量 256Gy)に出力電圧が下がり始め、 照射開始 3.69 時間後(集積吸収線量 359Gy)に約 0V となり、その後も電圧が戻っていないこ とを確認した。

これより、照射線量率100Gy/hで照射した際に、光電センサが正常に動作した時点までの集 積吸収線量は256~304Gyと推定される。

No.	照射線量率 <sup>※</sup> [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]		
光 5-1	4.63	177.53	822<			
光 5-2	4.63	177.53	822<	] —		
光 5-3	4.63	177.53	822<			
光 50-1	48.5	8.40	408			
光 50-2	49.9	8.80	439	427 (SD:14)		
光 50-3	51.6	8.40	434			
光 100-1	102.1	4.20	429			
光 100-2	112.2	3.80	427			
光 100-3	116.1	3.80	441			
光 100-4	116.0	3.80	441			
光 100-5	106.5	3.80	405	428		
光 100-6	97.4	4.20	409	(SD:25)		
光 100-7	102.1	4.80	490			
光 100-8	112.2	3.80	427			
光 100-9	116.1	3.60	418			
光 100-10	116.0	3.40	395			
光 100 <b>-TB-</b> 1	106.5	4.00	426			
光 100 <b>-</b> TB-2	97.4	4.40	428	415 (SD:18)		
光 100-TB-3	97.4	4.00	390	(01.10)		
光 100-RL-1	97.4	3.80	370			
光 100-RL-2	97.4	4.00	390	370 (SD:16)		
光 100-RL-3	97.4	3.60	351			

表 3-6 光電センサ照射試験結果(正常な動作が確認された時点)

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

No.	照射線量率 <sup>※</sup> [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]		
光 50-1	48.5	7.06	343			
光 50-2	49.9	6.75	337	343 (SD:6)		
光 50-3	51.6	6.80	351			
光 100-1	102.1	2.55	260			
光 100-2	112.2	2.48	278			
光 100-3	116.1	2.54	295			
光 100-4	116.0	2.56	297			
光 100-5	106.5	2.59	276	283		
光 100-6	97.4	2.60	253	(SD:18)		
光 100-7	102.1	2.61	266			
光 100-8	112.2	2.62	294			
光 100-9	116.1	2.62	304			
光 100-10	116.0	2.62	304			
光 100-TB-1	106.5	2.76	294	974		
光 100-TB-2	97.4	2.77	270	(SD:15)		
光 100-TB-3	97.4	2.65	258			
光 100-RL-1	97.4	2.64	257			
光 100-RL-2	97.4	2.65	258	257 (SD:1)		
光 100-RL-3	97.4	2.63	256			

表 3-7 光電センサ照射試験結果(電圧が大きく下がり始めた時点)

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

























46

図 3-35 光 100-9 電圧変化

















3.3.3 近接センサ

3.2 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。各照射試験条件で正常に動作 した時点までの集積吸収線量を表 3-8 に示す。また、データロガーで記録した出力電圧が大きく 変化した時点の集積吸収線量を表 3-9 に示す。

各照射線量率における照射試験結果の詳細を以下に述べる。

## (1) 照射線量率 5Gy/h

近接センサ 3 台を照射線量率 5Gy/h で照射試験を実施した結果、No.近 5-1 は照射開始約 161.20 時間後(集積吸収線量 746Gy)の動作確認時に、検出部から金属片を外すと、動作ラ ンプは正常に反応するが、データロガーの電圧値が 0V に戻らない状態であることを確認した。 電源を一度切り再起動させても事象が改善されることがなかったため測定不能と判断した。電 圧値が 0V に戻らない状態であることが確認された照射開始約 161.20 時間後(集積吸収線量 746Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 90.60 時間後(集積 吸収線量 419Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 5-2、No.近 5-3 も No.近 5-1 と同様な事象が確認され、No.近 5-2 と No.近 5-3 ともに 照射開始約 176.40 時間後(集積吸収線量 817Gy)と照射開始約 181.40 時間後(集積吸収線量 840Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

(2) 照射線量率 50Gy/h

近接センサ3台を照射線量率50Gy/hで照射試験を実施した結果、No.近50-1は照射開始約24.40時間後(集積吸収線量1184Gy)の動作確認時に、検出部から金属片を外すと、動作ランプは正常に反応するが、データロガーの電圧値が0Vに戻らない状態であることを確認した。データロガーの電圧値を確認すると照射開始後から徐々に出力電圧が下がっていたが、いつの時点から0Vに戻らない状況になったかが判断できないため、電圧値が0Vに戻らない状態であることが確認された照射開始約24.40時間後(集積吸収線量1184Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約24.00時間後(集積吸収線量1165Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 50-2 も No.近 50-1 と同様な事象が確認され、No.近 50-2 は照射開始約 24.80 時間後 (集積吸収線量 1237Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 24.40 時間後(集積吸収線量 1217Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 50-3 も No.近 50-1 と同様な事象が確認され、No.近 50-3 は照射開始約 22.00 時間後 (集積吸収線量 1136Gy) と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 21.60 時間後(集積吸収線量 1115Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

近接センサを照射線量率 50Gy/h で照射した際の照射時間と出力電圧の関係を示した照射試験結果を図 3-43~図 3-45 に示す。

これより、照射線量率 50Gy/h で照射した際に、近接センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量は 1115~1217Gy と推定される。

(3) 照射線量率 100Gy/h

近接センサ 10 台を照射線量率 100Gy/h で照射試験を実施した結果、No.近 100-1 は照射開 始約 10.80 時間後(集積吸収線量 1102Gy)の動作確認時に、検出部から金属片を外すと、動 作ランプは正常に反応するが、データロガーの電圧値が 0V に戻らない状態であることを確認 した。電源を一度切り再起動させても事象が改善されることがなかったため測定不能と判断し た。データロガーの電圧値を確認すると照射開始後から徐々に出力電圧が下がっていたが、い つの時点から 0V に戻らない状況になったかが判断できないため、電圧値が 0V に戻らない状 態であることが確認された照射開始約 10.80 時間後(集積吸収線量 1102Gy)と、その前に動 作確認して正常であることを確認した照射開始約 10.60 時間後(集積吸収線量 1082Gy)の間 で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-2 は照射開始約 14.20 時間後(集積吸収線量 1594Gy)の動作確認時に検出時の出 力電圧が大きく低下していた。データロガーの電圧値を確認すると照射開始約 13.20 時間後 (集積吸収線量 1482Gy)から検知時の電圧が急激に減少していた。No.近 100-2 は照射開始 約 14.20 時間後(集積吸収線量 1594Gy)の動作確認時と、その前に動作確認して正常である ことを確認した照射開始約 14.00 時間後(集積吸収線量 1571Gy)の間で測定不能になったと 考えられる。

No.近 100-3 も No.近 100-2 と同様な事象が確認され、照射開始約 10.90 時間後(集積吸収 線量 1265Gy)から検知時の電圧が急激に減少していた。No.近 100-3 は照射開始約 12.80 時間 後(集積吸収線量 1485Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 12.60 時間後(集積吸収線量 1462Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-4 も No.近 100-1 と同様な事象が確認され、No.近 100-4 は照射開始約 13.00 時間後(集積吸収線量 1509Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 12.80 時間後(集積吸収線量 1485Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-5 も No.近 100-1 と同様な事象が確認され、No.近 100-5 は照射開始約 13.20 時間後(集積吸収線量 1406Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 13.00 時間後(集積吸収線量 1385Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-6 も No.近 100-1 と同様な事象が確認され、No.近 100-6 は照射開始約 11.40 時間後(集積吸収線量 1164Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 11.20 時間後(集積吸収線量 1143Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-7 も No.近 100-1 と同様な事象が確認され、No.近 100-7 は照射開始約 9.20 時間後(集積吸収線量 1033Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 9.00 時間後(集積吸収線量 1010Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-8 も No.近 100-1 と同様な事象が確認され、No.近 100-8 は照射開始約 8.20 時間後(集積吸収線量 952Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 8.00 時間後(集積吸収線量 928Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-9 も No.近 100-2 と同様な事象が確認され、照射開始約 10.00 時間後(集積吸収 線量 1160Gy)から検知時の電圧が急激に減少していた。No.近 100-9 は照射開始約 11.60 時間 後(集積吸収線量 1346Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 11.40時間後(集積吸収線量1323Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

No.近 100-10 も No.近 100-1 と同様な事象が確認され、No.近 100-10 は照射開始約 10.80 時 間後(集積吸収線量 1150Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始 約 10.60 時間後(集積吸収線量 1129Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

近接センサを照射線量率100Gy/hで照射した際の照射時間と出力電圧の関係を示した照射試験結果を図 3-46~図 3-58 に示す。これより、照射線量率100Gy/hで照射した際に、近接センサが正常に動作した時点までの集積吸収線量は928~1571Gyと推定される。

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

表 3-8 近接センサ照射試験結果(正常に動作が確認できた時点)

※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。

No.	照射線量率 <sup>※1</sup> [Gy/h]	照射時間 [h]	集積吸収線量 [Gy]	平均集積 吸収線量 [Gy]		
近 50-1	48.5	$24.00^{st_2}$	1165			
近 50-2	49.9	$24.40^{*2}$	1217	1166 (SD:42)		
近 50-3	51.6	$21.60^{st_2}$	1115			
近 100-1	102.1	$10.60^{st_2}$	1082			
近 100-2	112.2	13.20	1482			
近 100-3	116.1	10.90	1265			
近 100-4	116.0	$12.80^{st_2}$	1485	1207		
近 100-5	106.5	$13.00^{st_2}$	1385			
近 100-6	102.1	$11.20^{st_2}$	1143	(SD:182)		
近 100-7	112.2	$9.00^{st_2}$	1010			
近 100-8	116.1	$8.00^{*2}$	928			
近 100-9	116.0	10.00	1160			
近 100-10	106.5	$10.60^{st_2}$	1129			

表 3-9 近接センサ照射試験結果(電圧が大きく下がり始めた時点)

※1 アラニン線量計の測定結果から算出した値

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



図 3-43 近 50-1 電圧変化



図 3-44 近 50-2 電圧変化



図 3-45 近 50-3 電圧変化



図 3-46 近 100-1 電圧変化



図 3-48 近 100-2 電圧変化(縮小図)



図 3-50 近 100-3 電圧変化(縮小図)



図 3-52 近 100-5 電圧変化





図 3-54 近 100-7 電圧変化



図 3-56 近 100-9 電圧変化


図 3-58 近 100-10 電圧変化

#### 3.3.4 トルクセンサ

3.2 項で設定した条件に従いトルクセンサの照射試験を実施した。各条件の試験結果を表 3-10 に示す。

## (1) 照射線量率 5Gy/h

トルクセンサの3台を照射線量率5Gy/hで照射試験を実施した結果、No.ト5-1は照射開始約 108.71時間後(集積吸収線量 569Gy)の動作確認時に、トルクをかけても電圧に変化が見られない状態であることを確認したことから試験を終了した。照射中は負荷をかけた状態であったが、通電させていなかったため電圧が変化は確認できていない。照射開始約 108.71 時間後(集積吸収線量 569Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 105.96時間後(集積吸収線量 554Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

Noト5-2もNoト-1と同様な事象が確認され、No.ト5-2は照射開始約 112.71 時間後(集積 吸収線量 589Gy)と照射開始約 108.71 時間後(集積吸収線量 569Gy)の間で測定不能になっ たと考えられる。No.ト5-3 は照射上限の 500Gy 照射後も、動作確認で電圧の変化が確認でき ていた。試験期間に影響のない範囲で照射を継続したが照射開始約 126.93 時間後(集積吸収 線量 664Gy)も異常は確認できず、試験を終了した。

### (2) 照射線量率 50Gy/h

トルクセンサの3台を照射線量率50Gy/hで照射試験を実施した結果、No.ト50-1は照射開 始約4.40時間後(集積吸収線量216Gy)の動作確認時に、トルクをかけても電圧に変化が見 られない状態であることを確認したことから試験を終了した。照射開始約4.40時間後(集積 吸収線量216Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約4.00時間 後(集積吸収線量196Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

データロガーに記録していた出力電圧を確認したところ、No.ト 50-1 は照射中に負荷をかけることで約 5V の電圧を出力し続ける状態にしていたが、照射開始後、数 mV 程度であるが徐々に電圧が上昇する事象が確認された。照射開始約 4.17 時間後(集積吸収線量 205Gy)に出力電圧は約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No ト 50-2 も No.ト 50-1 と同様な事象が確認され、No ト 50-2 は照射開始約 4.40 時間後 (集積吸収線量216Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 4.00 時間後(集積吸収線量 196Gy)の間で測定不能になったと考えられる。照射開始後、数 mV 程 度であるが徐々に電圧が上昇する事象が確認された。No.ト 50-2 は照射開始約 4.03 時間後(集 積吸収線量 198Gy)に出力電圧は約 0V となり、その後も電圧が戻っていないことを確認した。

No ト 50-3 は照射開始約 4.00 時間後(集積吸収線量 196Gy)とその前に動作確認して正常 であることを確認した照射開始約 2.00 時間後(集積吸収線量 98Gy)の間で測定不能になった と考えられる。照射開始後、数mV程度であるが徐々に電圧が上昇する事象が確認された。No. ト 50-3 は照射開始約 4.00 時間後(集積吸収線量 196Gy)の動作確認で出力電圧は約 0V とな ったことを確認した。

これより、照射線量率 50Gy/h で照射した際に、トルクセンサが正常に動作した時点までの 集積吸収線量は 98~196Gy と推定される。 (3) 照射線量率 100Gy/h

トルクセンサの3台を照射線量率100Gy/hで照射試験を実施した結果、No.ト100-1は照射 開始約1.40時間後(集積吸収線量143Gy)の動作確認時に、トルクをかけても電圧に変化が 見られない状態であることを確認したことから試験を終了した。照射開始約1.40時間後(集 積吸収線量143Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約1.20時 間後(集積吸収線量123Gy)の間で測定不能になったと考えられる。

データロガーに記録していた出力電圧を確認したところ、No.ト 100-1 は照射中に負荷をかけることで約 5V の電圧を出力し続ける状態にしていたが、照射開始約 1.40 時間後(集積吸収線量 143Gy)に出力電圧は約 0V となっていることを確認した。

No ト 100-2 も No.ト 100-1 と同様な事象が確認され、照射開始約 1.40 時間後(集積吸収線 量 159Gy)と、その前に動作確認して正常であることを確認した照射開始約 1.20 時間後(集 積吸収線量 136Gy)の間で測定不能になったと考えられる。No.ト 100-2 は照射開始約 1.40 時 間後(集積吸収線量 159Gy)の動作確認で出力電圧は約 0V となったことを確認した。

Noト 100-3 は照射開始約 1.40 時間後(集積吸収線量 143Gy)と、その前に動作確認して正 常であることを確認した照射開始約 1.20 時間後(集積吸収線量 123Gy)の間で測定不能にな ったと考えられる。No.ト 100-3 は照射開始約 1.40 時間後(集積吸収線量 143Gy)の動作確認 で出力電圧は約 0V となったことを確認した。

これより、照射線量率100Gy/hで照射した際に、トルクセンサが正常に動作した時点までの 集積吸収線量は123~136Gyと推定される。

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

表 3-10 トルクセンサ照射試験結果

※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。



図 3-59 ト 50-1 電圧変化



図 3-61 ト 50-3 電圧変化







図 3-64 ト 100-3 電圧変化

3.3.5 測域センサ

3.2 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。各条件の試験結果を表 3-11、 測距データに異常が見られた時点での集積吸収線量を表 3-12 に示す。また、照射中に測定した 測距データから3点抽出した測定距離の変化を図 3-65~図 3-80 に示す。

(1) 照射線量率 5Gy/h

測域センサ 3 台を照射線量率 5Gy/h で照射試験を実施した結果、No.測 5-1 は照射開始約 42.90 時間後(集積吸収線量 199Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距デー タから測定距離を確認したところ、照射開始約 42.61 時間後(集積吸収線量 197Gy)から測定距離に異常が見られた。

No.測 5-2 も No.測 5-1 と同様であり、No.測 5-2 は照射開始約 46.51 時間後(集積吸収線量 215Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したと ころ、データの取り込みが停止される直前の測定距離に異常が見られた。

No.測 5-3 も No.測 5-1 と同様であり、No.測 5-3 は照射開始約 45.19 時間後(集積吸収線量 209Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したところ、データの取り込みが停止される直前の測定距離に異常が見られた。

これより、照射線量率 5Gy/h で照射した際に、測域センサが正常に動作した時点までの集積 吸収線量は 197~215Gy であった。

(2) 照射線量率 50Gy/h

測域センサ3台を照射線量率50Gy/hで照射試験を実施した結果、No.測50-1は照射開始約 5.31時間後(集積吸収線量255Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距デー タから測定距離を確認したところ、正常に検出し続けていたが、データの取り込みが停止する 直前に測定距離に異常が見られた。

No.測 50-2 も No.測 50-1 と同様であり、No.測 50-2 は照射開始約 4.97 時間後(集積吸収線 量 238Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認した ところ、照射開始約 4.92 時間後(集積吸収線量 236Gy)から検出距離に伸縮や出力データが 回転するなどの事象が確認された。

No.測 50-3 は照射開始約 6.00 時間後(集積吸収線量 287Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したところ、正常に検出し続けていた。

これより、照射線量率 50Gy/h で照射した際に、測域センサが正常に動作した時点までの集 積吸収線量は 236~287Gy であった。

# (3) 照射線量率 100Gy/h

測域センサ4台を照射線量率100Gy/hで照射試験を実施した結果、No.測100-1は照射開始約2.25時間後(集積吸収線量255Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したところ、正常に検出し続けていたが、データの取り込みが停止される直前の測定距離に異常が見られた。

No.測 100-2、No.測 100-3 及び No.測 100-4 も No.測 100-1 と同様であり、No.測 100-2 は照 射開始約 2.28 時間後(集積吸収線量 258Gy)、No.測 100-3 は照射開始約 2.11 時間後(集積 吸収線量 238Gy)、No.測 100-4 は照射開始約 2.18 時間後(集積吸収線量 246Gy)にデータ の取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したところ、データの取 り込みが停止される直前の測定距離に異常が見られた。

これより、照射線量率100Gy/hで照射した際に、測域センサが正常に動作した時点までの集 積吸収線量は238~258Gyであった。

(4) 照射線量率 150Gy/h

測域センサ6台を照射線量率150Gy/hで照射試験を実施した結果、No.測150-1は照射開始約1.64時間後(集積吸収線量247Gy)データの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したところ、正常に検出し続けていたが、データの取り込みが停止される直前に測定距離に異常が見られた。

No.測 150-2~No.測 150-6 も No.測 150-1 と同様であり、No.測 150-2 は照射開始約 1.59 時 間後(集積吸収線量 238 Gy)、No.測 150-3 は照射開始約 1.66 時間後(集積吸収線量 250 Gy)、 No.測 150-4 は照射開始約 1.80 時間後(集積吸収線量 270 Gy)、No.測 150-5 は照射開始約 1.75 時間後(集積吸収線量 262 Gy)、No.測 150-6 は照射開始約 1.67 時間後(集積吸収線量 250 Gy)にデータの取り込みが停止していた。照射中の測距データから測定距離を確認したと ころ、データの取り込みが停止される直前の測定距離に異常が見られた。 これより、照射線量率150Gy/hで照射した際に、測域センサが正常に動作した時点までの 集積吸収線量は238~270Gyであった。

No.	照射線量率 <sup>*</sup> [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		42.90	199	
測 5-2	4.63	46.51	215	208 (SD:7)
測 5-3		45.19	209	
測 50-1		5.31	255	
測 50-2	47.9	4.97	238	260 (SD:21)
測 50-3		6.00	287	
測 100-1	113	2.25	255	
測 100-2		2.28	258	249
測 100-3		2.11	238	(0.0)
測 100-4		2.18	246	
測 150-1		1.64	247	
測 150-2		1.59	238	
測 150-3	150	1.66	250	253
測 150-4		1.80	270	(SD:10)
測 150-5		1.75	262	
測 150-6		1.67	250	

表 3-11 測域センサ照射試験結果

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値

No.	照射線量率 <sup>※</sup> [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		42.61	197	
測 5-2	4.63	46.51	215	207 (SD:7)
測 5-3		45.19	209	
測 50-1		5.30	254	
測 50-2	47.9	4.92	236	$259 \\ (SD:21)$
測 50-3		6.00	287	
測 100-1	113	2.25	255	
測 100-2		2.28	258	249
測 100-3		2.11	238	(5.03)
測 100-4		2.18	246	
測 150-1		1.64	247	
測 150-2		1.59	238	
測 150-3	150	1.66	250	253
測 150-4		1.80	270	(SD:10)
測 150-5		1.75	262	
測 150-6		1.67	250	

表 3-12 測域センサ照射試験結果(測距データに異常が見られた時点)

※ アラニン線量計の測定結果から算出した値







図 3-66 測 5-2 測定距離の時間変化







図 3-68 測 50-1 測定距離の時間変化







図 3-70 測 50-3 測定距離の時間変化















図 3-74 測 100-4 測定距離の時間変化





図 3-75 測 150-1 測定距離の時間変化

















図 3-80 測 150-6 測定距離の時間変化

3.4 考察

# 3.4.1 照射線量率における影響評価

各センサについて、照射線量率における耐放射線性への影響を図 3-81 に示す。光電センサ及 び近接センサは電圧値の低下または動作確認で正常に確認できた時点までの内、集積吸収線量の 低い方を不具合発生前の集積吸収線量として整理した。これより、光電センサは、照射線量率 5Gy/h、50Gy/h、100Gy/h に対して、不具合発生前の平均集積吸収線量は 822Gy、343Gy、 283Gy という結果が得られた。近接センサは、照射線量率 5Gy/h、50Gy/h、100Gy/h に対して、 不具合発生前の平均集積吸収線量は 684Gy、1166Gy、1207Gy という結果が得られた。トルク センサは、照射線量率 5Gy/h、50Gy/h、100Gy/h に対して、正常に動作しなくなるまでの平均 集積吸収線量は 561Gy、164Gy、127Gy という結果が得られた。測域センサは、照射線量率 5Gy/h、50Gy/h、100Gy/h に対して損傷時の平均集積吸収線量は 207Gy、259Gy、 249Gy、253Gy という結果が得られた。

5Gy/h の試験は測域センサを除き、センサを通電していない状態で照射を実施した。試験結果 から光電センサ、近接センサ及びトルクセンサの通電(5Gy/h)と非通電(50、100Gy/h)ではセンサ が正常に動作した時点までの集積吸収線量の傾向から、通電の有無によって耐放射線性に影響を 与えていた可能性が考えられる。したがって、光電センサ、近接センサ及びトルクセンサの照射 線量率による影響評価を実施するにあたり、5Gy/h の試験結果は参考値とした。

光電センサでは 50Gy/h、100Gy/h の試験において集積吸収線量に有意な差がないことが分かった。

近接センサでは 50Gy/h で 1166Gy、100Gy/h で 1207Gy と約 40Gy の集積吸収線量の違いが 確認された。ただし、ばらつき評価で後述するとおり、近接センサの 50Gy/h、100Gy/h の標準 偏差 42、182 を考慮すると、集積吸収線量に有意な差がないものと考えられる。

トルクセンサでは 50Gy/h で 164Gy、100Gy/h で 127Gy と約 40Gy の集積吸収線量の違いが 確認された。ばらつき評価で後述するとおり、トルクセンサの 50Gy/h、100Gy/h の標準偏差 46、 6 を考慮すると、集積吸収線量に有意な差ないものと考えられる。ただし、トルクセンサは動作 確認時の電源の入切で正常に動作しなくなるという事象が発生しており、電源の入切が原因でセ ンサが故障した可能性も考えられる。したがって、トルクセンサにおいて照射線量率による影響 があったと結論づけるためには、試験方法を見直して追加データを取得する必要がある。

測域センサでは 5、50、100、150Gy/h の 4 条件で試験した結果、照射線量率の違いによる集 積吸収線量に有意な差は確認されなかった。

以上の試験結果から、光電センサ、近接センサ、トルクセンサは 50Gy/h~100Gy/h の範囲で、 測域センサは 5~150Gy/h の範囲で、照射線量率による耐放射線性への影響は確認されなかった。



図 3-81 照射線量率による耐放射線性への影響

# 3.4.2 放射線の照射方向による影響

放射線の照射方向による影響を表 3·13 に示す。光電センサが不具合発生前までの平均集積吸 収線量(10または3台の平均値)は、100Gy/hで照射した場合、正面-背面では283Gy、上面-下 面では274Gy、右面-左面方向では257Gyという結果が得られ、右面-左面方向が最も耐放射線性 が低いという結果が得られた。令和2年度に実施した光電センサの故障調査結果では、図3·82 の光電センサの構造配置に示しているフォトダイオードまたは制御回路基板にある半導体が故障 していた。今回の照射試験で照射方向により耐放射線性へ影響があったことから、照射方向によ り故障した構成部品が異なっていた可能性が考えられる。また、放射線に弱い制御回路基板への 照射方向により当該部品への影響が異なっていた可能性も考えられる。したがって、センサの照 射方向の影響を考慮して耐放射線性を評価する必要がある。

照射方向	平均集積吸収線量 [Gy]
正面·背面	283 (SD:18)
上面·下面	274 (SD:15)
右面·左面	257 (SD:1)

表 3-13 放射線の照射方向による影響(不具合発生前の集積吸収線量)



図 3-82 光電センサの構造模式図

# 3.4.3 個体差のばらつき評価

各センサのばらつきによる影響を表 3·14 に示す。各センサのばらつきを確認すると正常に動 作した時点までの集積吸収線量は光電センサ及び測域センサでは標準偏差が 25、10 であったが、 近接センサでは 210 と大きい結果となった。電圧が下がり始めた時点までの集積吸収線量は光電 センサで 18、近接センサで 182 という結果となった。標準偏差の大きい近接センサは他のセン サに比べ耐放射線性が高く、試験期間も長くなっている。試験期間中は夜間に照射を実施しない 時間があったため、センサの異常が緩和された可能性も考えられる。センサの種類によって個体 差によるばらつきに差がある結果が得られたことから、センサの種類によってばらつき具合が異 なる点に注意して、耐放射線性を評価する必要がある。

センサ	サンプル数	集積吸収線量 [Gy]	平均集積吸収線量 [Gy]
光電センサ	10	$253{\sim}304$	283 (SD:18)
近接センサ	10	$928 \sim 1485$	1207 (SD:182)
測域センサ	10	$238{\sim}270$	253 (SD:10)

表 3-14 個体差のばらつきによる影響(不具合発生前の集積吸収線量)

3.4.4 裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値評価

今回の照射試験結果より、センサ類には放射線の照射により故障前に予兆が現れるものと現れ ないものがあることが分かった。例えば、光電センサは、動作確認時には ON/OFF が正常に切 り替わるが、その前から出力電圧が徐々に低下する事象や検出距離が正常時よりも短くなるとい う事象が確認された。通常原子力施設で使用する場合には、これらの故障の予兆が現れる前、ま たは直後にセンサ類を交換することが望ましい。今回、照射試験対象としたセンサの故障前の予 兆としては、光電センサ及び近接センサは出力電圧が低下し始めた時点、測域センサは測距デー タにズレが発生した時点である。なお、トルクセンサについては、明確な故障の予兆が確認され なかった。したがって、本試験結果から使用可能な集積吸収線量の上限値をこれらの故障前の予 兆が最も早く発生した時点と設定した場合、光電センサ、近接センサ、トルクセンサ及び測域セ ンサは、253Gy、898Gy、123Gy、197Gy となる。なお、原子力施設で使用する場合、故障の予 兆となる出力電圧等を連続測定しておくか、定期検査において確認することにより、より安全な 操業に貢献することができるものと考えられる。

センサ類の使用可能な集積吸収線量の上限値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。安全上重要な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値に更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。

したがって、裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値は、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。

3.4.5 照射試験において得られた知見

一般産業用工業品であるセンサ類の使用指針の作成に資すると考えられる照射試験で得られた 知見について以下に示す。

## (1) センサの通電・非通電による影響

今回の照射試験では、5Gy/h の試験は試験場の制約により、光電センサ、近接センサ、トル クセンサは非通電での試験となった。その結果、非通電状態で試験を実施した 5Gy/h と通電状 態で試験を実施した 50、100Gy/h と間に有意な差が確認された。一方、測域センサは 5、50、 100、150Gy/h の 4 種類の照射線量率にて照射試験を実施したが、照射線量率の違いによる耐 放射線性の有意な差は確認されなかった。したがって、測域センサの結果を考慮すると、光電 センサ、近接センサ、トルクセンサの耐放射線性の有意な差は、照射線量率ではなく通電・非 通電による影響である可能性が考えられる。

したがって、センサの通電・非通電による影響を把握するためには、5Gy/h での通電状態での照射試験により、追加データを取得する必要がある。

### (2) 高さ方向・周方向による照射線量率の影響

今回の照射試験では、線源から近い距離に照射対象物であるセンサを上下方向に配置して実施した。一般的に線源に近い方が高さ方向の線量率の差が大きくなり、高さ方向及び周方向の 設置位置のズレによる線量率への影響も大きくなる。今回の照射試験では、高さ方向の線量率 の影響については、アラニン線量計により設置位置による照射線量率を計算して評価に使用した。しかし、アラニン線量計と全く同じ場所にセンサ類を設置することは難しく、多少の設置 ズレがあった可能性も考えられる。したがって、照射試験で複数台のセンサを設置する場合に は、設置高さを統一させる、または目標照射線量率に対して線源からの距離が十分にとれる線 源を選定する必要がある。なお、どうしても十分な線源距離が確保できない場合には、照射対 象物であるセンサに直接アラニン線量計を設置して照射する方法も考えられる。

(3) 非照射時の回復効果

今回の照射試験では、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 (図 3-27 参照)。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る。また、今回の試験において、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。そのため、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 可能性が考えられる。

したがって、使用するセンサ類と線源との位置関係、照射時間等によって、非照射時の回復 効果により使用可能な集積吸収線量の上限値は高くなる傾向があると考えられる。照射試験を 実施するときには、非照射時の回復効果による影響を考慮した試験計画を立案する必要がある。

85

4. 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

4.1 概要

センサ類の耐放射線性を向上させるために、センサ類のカスタマイズ(遮へい体を装着)を実施する。カスタマイズ対象センサについて、センサ機能を阻害しないような遮へい体構造を検討し、遮へい解析コードを用いた遮へい評価(予備解析)を実施し、遮へい体構造を決定した。

本構造に基づき製作した遮へい体を用いた照射試験及び照射試験環境をモデル化した遮へい評価(本解析)実施し、耐放射線性の向上に係る評価を実施した。

4.2 遮へい体構造検討

実際の使用環境において、センサ類のセンシング方向が、線源を向いていない場合は、線源側 に遮へい体を設置することで、放射線の影響を低減できる。しかし、センサ類のセンシング方向 が、線源を向いている場合、センサ類のセンシング機能を阻害しないような、遮へい体の形状を 設定する必要がある。

前者の場合、遮へい評価は容易であるため、本検討では、後者のセンサ類のセンシング方向が 線源を向いている場合の遮へい体構造を設定した。

設定した遮へい体構造については、遮へい解析コード(MCNP)による予備解析を実施し、照 射試験時に想定される吸収線量率の評価を実施した。

4.2.1 遮へい体構造検討対象センサ

本検討の対象センサは、3章で照射試験を実施したセンサ類のうち、光電センサ及び測域セン サとした。

選定理由としては、光電センサ及び近接センサは、検知対象物、センサ投受光部及びセンサ本 体が直線状に位置し、カスタマイズによる遮へい体は同じ構造となる。そのため、代表して、光 電センサを選定した。

トルクセンサは、測定器本体から出る2本の軸にかかるトルクを出力する。軸を延長すれば、 放射線の影響を受けやすい測定器本体のみを遮へいすることは容易であるため、対象外とした。

測域センサは、センシング機能を阻害しないように、放射線に弱い基盤がある本体部分を遮へ いすることが可能であり、他のセンサと異なるため、検討対象として選定した。

4.2.2 予備解析用の遮へい体構造検討

(1) 光電センサに装着する遮へい体

実際の使用環境では、設置する機器に合わせた遮へい体の構造にする必要があるが、本検討では、円筒形の形状とした。また、遮へい体の厚みは、線源を Co-60 とし、遮へい体に鉄を用いたとき、線量率が 1/2(半価層)となる 20mm とした。なお、後述の解析により、遮へい体の厚み及び目標線量率の見直しを実施している。

光電センサは、図 4-1 に示す通り、センサ側面に設置された投光部及び受光部を用いたセン シングを行う。そのため、投光部及び受光部の開口及びケーブル貫通孔を設けた構造とした。

以上により、光電センサに装着する予備解析用遮へい体は、図 4-2 に示す構造とした。



図 4-1 光電センサ外形図



・遮へい体材質:鉄(SS400相当)

図 4-2 光電センサに装着する予備解析用遮へい体構造

(2) 測域センサに装着する遮へい体

測域センサも光電センサと同様、実際の使用環境では、設置する機器に合わせた遮へい体の 構造にする必要があるが、本検討では、円筒形の形状とした。また、遮へい体の厚みは、線源 を Co-60 とし、遮へい体に鉄を用いたとき、線量率が 1/2(半価層)となる 20mm を基準とし、 照射方向の肉厚をパラメータに 20~60mm とした。

本検討で用いた測域センサは、図 4-3 に示す通り、センサ上部に設置された投受光部を用いたセンシングを行い、その検知範囲は 270°である。そのため、投受光部の検知範囲及びケーブル貫通部に開口を設ける構造とした。

以上により、測域センサに装着する予備解析用遮へい体は、図 4-4 に示す構造とした。



図 4-3 測域センサ外形図及び検出角度



図 4-4 測域センサに装着する予備解析用遮へい体構造

4.2.3 遮へい解析コードを用いた遮へい評価(予備解析)

4.2.2 節で設定した予備解析用の遮へい体構造を基に、遮へい解析を実施し、各センサの放射 線の影響を受けやすいと想定される箇所での吸収線量率を計算した。

(1) 計算条件

1) 評価ケース

光電センサ及び測域センサともに、遮へい体の遮へい効果を確認するために、以下の3ケ ースで予備解析を実施した。なお、解析を簡略化させるために、ケーブル貫通孔は解析モデ ルに考慮しない(遮へい体で埋める)ものとした。

また、線源から評価点までの距離をパラメータに計算を実施した。

- ケース1: 遮へい体なし。
- ・ケース2: 遮へい体あり。照射方向の開口あり。
- ・ケース3: 遮へい体あり。照射方向の開口なし。

光電センサは、耐放射線性の弱い箇所が直接照射の影響を受けるが、測域センサは、耐 放射線性の弱い箇所が遮へい体により遮へいされるため、以下のケースを追加で評価した。 なお、ケース 4 では、線源から評価点までの距離を固定し、遮へい厚をパラメータに計算を 実施している。

・ケース4:周方向全面の遮へい厚を増加する(2cmから6cmまで0.5cm毎)。

2) 解析コード

直接線だけでなく、遮へい体による散乱の影響を考慮するため、解析コードは MCNP を 用いた。 3) 計算で使用する密度及び組成

予備解析で用いた物質の密度及び組成を、表 4-1 に示す。

物質	空気
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.2049E-03
元素	重量比(%)
Н	1.0000E-03
С	1.2554E-02
Ν	7.5470E+01
0	2.3233E+01

表 4-1 予備解析で用いた物質の密度及び組成

出典:「遮蔽材料の群定数(JAERI-M 6928)」

物質	鉄
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.86
元素	重量比(%)
Fe	1.0000E+02

出典:「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

物質	コバルト
密度(g/cm <sup>3</sup> )	8.8
元素	重量比(%)
Со	1.0000E+02

出典:「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

4) 線量率換算係数

本解析で用いた換算係数を、表 4-2 に示す。

Gr.	ガンマ線エネルギー (MeV)	空気カーマに対する 換算係数 (µGv/hr)/(ph/sec/cm <sup>2</sup> )
1	0.010	2. 67E-02
2	0.015	1.12E-02
3	0.020	6.05E-03
4	0.030	2.60E-03
5	0.040	1.54E-03
6	0.050	1.16E-03
7	0.060	1.04E-03
8	0.070	1.07E-03
9	0.080	1.11E-03
10	0.100	1.34E-03
11	0.150	2.16E-03
12	0.200	3.08E-03
13	0.300	4.97E-03
14	0.400	6.80E-03
15	0.500	8.57E-03
16	0.600	1.02E-02
17	0.800	1.33E-02
18	1.000	1.61E-02
19	2.000	2.72E-02
20	4.000	4.36E-02
21	6.000	5.80E-02
22	8.000	7.24E-02
23	10.000	8.64E-02

表 4-2 解析で用いた換算係数

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) 線源条件

予備解析実施時は、照射試験実施場所が未確定であったため、架空の線源条件とした。後 述の本解析では、実施した照射試験の線源条件に合わせて解析を実施している。

線源は Co-60 とし、表 4-3 に示す線源スペクトルを用いた。図 4-5 に示す線源規格化の計 算モデルの通り、線源は外形 φ 5cm×H30cm の筒状とした。線源強度は、線量率測定値を 参考に、規格化を行い設定した。線量率測定値及び規格化による計算値との比較結果を、図 4-6 及び表 4-4 に示す。なお、測定値及び計算値は、線源中心からの距離 47.7cm(175Gy/h) を代表して規格化位置とした。

線源規格の結果、予備解析での線源強度は 3.64E+ 14 ph/s であり、放射能量は 1.82E+ 1 4 Bq である。



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

表 4-3 Co-60 線源スペクトル



図 4-6 線源からの距離による線量率測定値と計算値の比較

線源中心 からの 水平距離 (cm)	吸収約	泉量率	比率	備考
	測定値 (Gy/h)	計算値 (Gy/h)	(C/E)	
47.7	175	1.75E+02	1.00	線量率規格化位置
59.1	125	1.15E+02	0.92	
68.5	100	8.59E+01	0.86	
81.7	75	6.06E+01	0.81	
105.6	50	3. 63E+01	0.73	

表 4-4 線源からの距離による線量率測定値と計算値の比較

6) 計算モデル

光電センサは、以下の3ケースで計算を実施した。それぞれの計算モデルを、図4-7から 図4-9に示す。また、線源中心から評価点までの距離を、20,40,60,80,90,100cmとし、 計算を実施した。

- ・ケース1: 遮へい体なし。
- ・ケース2: 遮へい体あり。照射方向の開口あり。
- ・ケース3: 遮へい体あり。照射方向の開口なし。

測域センサは、以下の 4 ケースで計算を実施した。それぞれの計算モデルを、図 4-10 か ら図 4-13 に示す。ケース 1~3 は、線源中心から評価点までの距離を、20,40,60,80,90, 100cm とし、計算を実施した。ケース 4 は、線源中心から評価点までの距離を 25cm に固定 し、遮へい厚をパラメータに計算を実施した。

- ・ケース1: 遮へい体なし。
- ・ケース2: 遮へい体あり。照射方向の開口あり。
- ・ケース3: 遮へい体あり。照射方向の開口なし。
- ・ケース4:周方向全面の遮へい厚を増加する(2cmから6cmまで0.5cm毎)。

また、各センサの評価位置は、放射線の影響を受けやすいと想定される箇所に設定した。

光電センサの評価位置は、センサの中心位置とした。測域センサの評価位置は、本体下部の照射面の内側 5mm の位置で、上部高さ・中央高さ・下部高さの 3 点とした。なお、解析を簡略化させるために、ケーブル貫通孔は解析モデルに考慮しない(遮へい体で埋める)ものとしている。







注:線源中心からセンサ中心までの距離は 20,40,60,80,90,100cm の 6 ケース

図 4-8	光電セン	サ(カスター	ァイズ)のう	「備解析モデル	(ケース2	: 遮へい体あり	<ul> <li>開口部あり)</li> </ul>
-------	------	--------	--------	---------	-------	----------	----------------------------



注:線源中心からセンサ中心までの距離は 20,40,60,80,90,100cm の 6 ケース

図 4-9	光電セン	∕サ(カスタ~	マイズ)の子	備解析モデル	(ケース3	: 遮へい体あり	・開口部なし)
-------	------	---------	--------	--------	-------	----------	---------


## 図 4-10 測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル (ケース1: 遮へい体なし)



図 4-11 測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル (ケース2: 遮へい体あり・開口部あり)



## 図 4-12 測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル(ケース3: 遮へい体あり・開口部なし)



注:線源中心からセンサ中心までの距離は25cm

図 4-13 測域センサ(カスタマイズ)の予備解析モデル (ケース4: 遮へい厚の増加)

## (2)計算結果

光電センサの遮へい解析結果を、表 4-5 に示す。また、測域センサの予備解析結果のケース 1~3 及びケース 4 を、それぞれ表 4-6 及び表 4-7 に示す。

	光電センサ	光電セ	11. जेव			
評価位置	中心からの 線源位置 (cm)	遮へい体なし ①	遮へい体あり (照射側) 開口部あり ②	遮へい体あり (照射側) 開口部なし ③	比率 ②/①	比率 ③/①
	100.0	4.05E+01	4.79E+01	2.61E+01	1.18	0.64
	90.0	4.98E+01	5.78E+01	3.35E+01	1.16	0.67
光電	80.0	6.27E+01	6.99E+01	4.04E+01	1.12	0.65
中心位置	60.0	1.11E+02	1.10E+02	7.05E+01	0.99	0.64
	40.0	2.43E+02	2.14E+02	1.54E+02	0.88	0.63
	20.0	8.63E+02	6.50E+02	5.32E+02	0.75	0.62
光雷	遮へい体	—	0	0		
センサ	遮へい体開口部	_	0		_	
モデル化	ケーブル開口部	_	_	_	_	_

表 4-5 光電センサの遮へい予備解析結果

	測域センサ	測域センサにおける 吸収線量率(Gy/h)				
評価位置	中心からの 線源位置 (cm)	ケース1 遮へい体なし ①	ケース2 遮へい体あり (照射側) 開口部あり ②	ケース3 遮へい体あり (照射側) 開口部なし ③	比率 ②/①	比率 ③/①
	100.0	4.23E+01	2.54E+01	2.77E+01	0.60	0.65
	90.0	5.24E+01	3.13E+01	3.46E+01	0.60	0.66
測域センサ	80.0	6.66E+01	3.92E+01	4.33E+01	0.59	0.65
上部高さ	60.0	1.19E+02	7.59E+01	8.00E+01	0.64	0.67
	40.0	2.70E+02	1.85E+02	1.74E+02	0.69	0.64
	20.0	1.04E+03	7.98E+02	6.38E+02	0.77	0.61
	100.0	4.23E+01	2.62E+01	2.74E+01	0.62	0.65
	90.0	5.24E+01	3.23E+01	3. 41E+01	0.62	0.65
測域センサ	80.0	6.65E+01	4.05E+01	4.27E+01	0.61	0.64
甲犬前さ	60.0	1.19E+02	7.54E+01	7.82E+01	0.63	0.66
	40.0	2.69E+02	1.63E+02	1.75E+02	0.61	0.65
	20.0	1.03E+03	7.15E+02	6.38E+02	0.69	0.62
	100.0	4.23E+01	2.65E+01	2.72E+01	0.63	0.64
測試センサ	90.0	5.23E+01	3.29E+01	3.39E+01	0.63	0.65
側域ビンり 下部高さ	80.0	6.65E+01	4.12E+01	4.24E+01	0.62	0.64
	60.0	1.19E+02	7.45E+01	7.68E+01	0.63	0.65
	40.0	2.68E+02	1.65E+02	1.71E+02	0.62	0.64
	20.0	1.03E+03	6.43E+02	6.20E+02	0.63	0.60
測域	遮へい体	_	0	0	_	_
センサ	遮へい体開口部	_	0	_	_	_
モデル化	ケーブル開口部		_	_	_	_

表 4-6 測域センサの遮へい予備解析結果 (ケース 1~3)

	測域センサ	評価点における 周方向 吸収線量率(Gy/h)				11 etc	
評価位置	評価位置 線源位置 (cm)	遮へい体 厚さ (cm)	遮へい体なし ①	遮へい体あり (照射側) 開口部あり ②	<ul><li>遮へい体あり</li><li>(照射側)</li><li>開口部なし</li><li>③</li></ul>	比率 ②/①	比率 ③/①
		2.0	1.14E+02	8.64E+01	6.82E+01	0.76	0.60
		2.5	1.14E+02	7.99E+01	_	0.70	_
		3.0	1.14E+02	7.38E+01	—	0.65	
測域ヤンサ		3. 5	1.14E+02	6.81E+01	—	0.60	
上部高さ	25.0	4.0	1.14E+02	6.29E+01	—	0.55	-
		4.5	1.14E+02	5.82E+01	_	0.51	_
		5.0	1.14E+02	5.42E+01	_	0.47	_
		5.5	1.14E+02	5.06E+01	_	0.44	_
		6.0	1.14E+02	4.69E+01	_	0.41	_
		2.0	1.14E+02	7.89E+01	6.76E+01	0.69	0.60
		2.5	1.14E+02	7.21E+01	—	0.63	_
	3.0	1.14E+02	6.60E+01	_	0.58	_	
測成センサ		3. 5	1.14E+02	6.05E+01	_	0.53	_
中央高さ	25.0	4.0	1.14E+02	5.55E+01	_	0.49	_
		4.5	1.14E+02	5.07E+01	_	0.45	_
		5.0	1.14E+02	4.68E+01	_	0.41	_
		5.5	1.14E+02	4.32E+01	_	0.38	_
		6.0	1.14E+02	4.00E+01	_	0.35	_
		2.0	1.13E+02	7.12E+01	6.56E+01	0.63	0.58
		2.5	1.13E+02	6.44E+01	_	0.57	_
		3.0	1.13E+02	5.87E+01	_	0.52	_
測成センサ		3.5	1.13E+02	5.37E+01	_	0.47	_
下部高さ	25.0	4.0	1.13E+02	4.91E+01	_	0.43	
		4.5	1.13E+02	4.49E+01	_	0.40	_
		5.0	1.13E+02	4.11E+01	—	0.36	_
		5.5	1.13E+02	3.79E+01	_	0.34	_
		6.0	1.13E+02	3.50E+01	_	0.31	_
	遮へい体	_	_	0	0	—	—
測域センサ	遮へい体開口部	—	_	0	—	—	—
C / / P16	ケーブル開口部	_	_	—	_	—	—

4.2.4 遮へい体構造検討結果

4.2.3節の予備解析結果を参考に、各センサに装着する遮へい体の構造を設定した。

光電センサは、放射線の影響を受けやすい箇所に対し、放射線が遮へい体により遮へいされに くい。逆に、遮へい体による放射線の散乱の影響で、線源との距離が長くなれば、吸収線量率が 増加する。よって、本試験では、4.2.2 項で設定した遮へい厚み 2cm の遮へい体を選定し、図 4·14 に示す構造の遮へい体を照射試験に用いる。また、遮へい体の写真を、図 4·15 に示す。

測域センサは、放射線の影響を受けやすい箇所に対し、放射線が遮へい体により遮へいされや すい。そのため、遮へい厚が増加するほど、吸収線量率が低下する。よって、吸収線量率を遮へ い体なしの場合の 1/2 程度に低減させるように、周方向の遮へい厚みを 4cm に設定する。ただ し、全方向を 4cm にすると遮へい体が大型化するため、照射方向のみ遮へい厚みを 4cm とする。 ただし、製作性の観点から図 4-16 及び図 4-17 に示す通り、分割した遮へい体の構造とした。ま た、遮へい体の写真を、図 4-18 に示す。



注:緑色部が蓋、青色部が本体を示す。

図 4-14 光電センサ遮へい体の構造図



図 4-15 光電センサ遮へい体の写真





注:緑色部が蓋、青色部が本体を示す。

図 4-16 測域センサ遮へい体の構造図









図 4-17 測域センサ遮へい体(追加部)の構造図



図 4-18 測域センサ遮へい体の写真

4.3 カスタマイズしたセンサ類の照射試験

4.3.1 照射試験条件及び方法

各センサの照射試験は、3.2 項に記載した試験場所である量子科学技術研究開発機構の高崎量 子応用研究所にあるガンマ照射施設にて、図 3-20、図 3-21 に記載した照射試験スケジュールで 実施した。また、その他の照射試験条件及び試験方法を以下に記載する。

(1) 照射試験条件

遮へい体の有無の比較評価を実施するため、照射試験条件は、3章の照射試験条件を参考に して設定した。照射線量率は、3章の試験条件の中から、代表して光電センサ 100Gy/h、測域 センサ 150Gy/h とした。試験条件を表 4-8 に示す。

また、各センサのサンプル数は各3であり、それぞれのセンサ名を以下のようにした。

- ・光電センサ: No.光 100-カ-1~3
- ・測域センサ: No.測 150-カ-1~3

表 4-8 カスタマイズしたセンサ類の照射試験条件

		ヤンサ			
センサ	照射線量率 [Gy/h]	メーカ数	照射方向	サンプル数	試験台数
光電センサ	100	1	1	3	3
測域センサ	150	1	1	3	3

(2) 照射試験方法

1) センサ配置

各センサは、3.2.3 節に記載した目標の照射線量率及び線源からセンサまでの距離に基づき、以下の通り配置した。また、後述の解析による遮へい評価を行うために、遮へい体の 内側と外側について、線量測定を実施した。

光電センサの 100Gy/h の照射試験は、線源中心からセンサ表面までの距離を 205mm とし、□85mm×H85mmの木材の上に配置した(図 4-19)。

測域センサの 150Gy/h の照射試験は、線源中心からセンサ表面までの距離を 175mm とし、□85mm×H85mmの木材の上に配置した(図 4-20)。

また、試験状況(写真)を、図 4-21 に示す。なお、核物質防護の観点から、一部、マス キング処理を行っている。



図 4-19 カスタマイズした光電センサの照射試験の配置図



図 4-20 カスタマイズした測域センサの照射試験の配置図





※ 核物質防護の観点から、一部マスキング処理を行っている。

図 4-21 カスタマイズした光電センサ及び測域センサの試験状況写真

2) データ取得及び動作確認

データ取得方法は、3.2.3 項と同様に、電気回路を組み、データ取得及び動作確認を実施した。ただし、照射上限については、予備解析の結果、光電センサは、遮へい効果が低いため、3.2.3 項の条件と同様としたが、測域センサは遮へいによりセンサの吸収線量率が

1/2 程度となるため、照射上限を 2 倍とした。カスタマイズ照射試験のデータ取得及び動作 確認頻度を表 4-9 に示す。なお、照射上限は、計画値であり、照射上限に達しても正常に動 作していた場合は、試験の工程上可能であれば照射は継続する。

その他、データ取得方法等は、3.2.3 項と同様であるため、概要を以下に示す。

	照射線量率	昭射中の	動作	確認	照射
センサ	(目標値) [Gy/h]	取得データ	頻度(目安) [Gy]	確認内容	上限*1 [Gy]
光電 センサ	100	電圧**2	200, 300~(20Gy 毎)	<ul> <li>・検知状態の</li> <li>ON/OFF</li> <li>・検出距離測定</li> </ul>	700
測域 センサ	150	測距データ		_	1000

表 4-9 カスタマイズ照射試験のデータ取得及び動作確認頻度

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

※2 検知状態の電圧を測定する。

a. 光電センサ

出力データの記録方法については、遮へい体の投光部及び受光部の開口部を、テープ等 で遮光し、検知状態の電圧をデータロガーにて測定した。電圧は0.1Gy以下毎になるよう 2秒毎に記録した。動作確認方法については、検知状態のON/OFF及び検出距離の測定を 実施した。照射終了基準については、動作確認による検知不良または照射上限到達時とし た。なお、照射上限に達しても正常に動作していた場合は、試験の進捗上可能であれば照 射は継続する。

b. 測域センサ

出力データの記録方法については、測域センサとイーサネットケーブルで接続した PC に測距データを、1 秒以下毎に出力した。照射終了基準については、PC へのエラーメッ セージ表示または照射上限到達時とした。なお、照射上限に達しても正常に動作していた 場合は、試験の工程上可能であれば照射は継続する。

4.3.2 照射試験結果

(1) 線量測定

図 4-19 及び図 4-20 に示したカスタマイズした光電センサ及び測域センサの線量測定結果を、 それぞれ表 4-10 及び表 4-11 に示す。本結果は、遮へい評価において、解析値と試験値の比較 に用いる。また、光電センサの遮へい体外側の測定は、線源中心から光電センサまでの距離に 相当する位置で実施しているため、本測定値はカスタマイズした光電センサの空間線量率とし て用いる。

NL	吸収線量率 [Gy/h]			
INO.	遮へい体の外側	遮へい体の内側		
光 100-カ-1	94.1	74.6		
光 100-カ-2	111	77.7		
光 100-カ-3	112	87.4		

表 4-10 カスタマイズした光電センサの線量測定結果

表 4-11 カスタマイズした測域センサの線量測定結果

N	吸収線量率 [Gy/h]			
No.	遮へい体の外側	遮へい体の内側		
測 150-カ-1	259	49.0		
測 150-カ-2	294	50.3		
測 150-カ-3	306	54.8		

(2) カスタマイズした光電センサ

カスタマイズした光電センサの照射試験結果を表 4·12 に示す。照射線量率は、図 4·19 に示 す遮へい体外側で測定した線量を用いている。なお、カスタマイズしない状態での照射試験結 果も参考までに併記している。カスタマイズした光電センサを照射線量率100Gy/hで照射した 際の照射時間と出力電圧の関係を示した照射試験結果を図 4·22~図 4·24 に示す。

ここで、照射線量率は、遮へい体内のセンサ設置箇所における吸収線量率ではなく、カスタ マイズした光電センサを設置した位置での空間線量率である。

カスタマイズした光電センサ3台を照射線量率100Gy/hで照射試験を実施した結果、No.光 100-カ-1 は照射開始約5.80時間後(集積吸収線量546Gy)の動作確認時に、検知時の電圧 (約24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。電圧が出力さ れなくなる直前の動作確認では、検出距離が100cm以上あることが確認されており、異常は 確認されていない。データロガーの電圧値を確認すると照射開始約4.00時間後(集積吸収線 量376Gy)から徐々に出力電圧が下がり、照射開始約5.77時間後(集積吸収線量543Gy)に 出力電圧が0Vになった。

No.光 100-カ-2 は照射開始約 6.60 時間後(集積吸収線量 733Gy)の動作確認時に、検知時 の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。電圧が 出力されなくなる直前の動作確認では、検出距離が 100cm 以上あることが確認されており、 異常は確認されていない。データロガーの電圧値を確認すると照射開始約 3.93 時間後(集積 吸収線量 436Gy)から徐々に出力電圧が下がり、照射開始約 6.53 時間後(集積吸収線量 725Gy)に出力電圧が 0V になった。 No.光 100-カ-3 は照射開始約 5.40 時間後(集積吸収線量 605Gy)の動作確認時に、検知時 の電圧(約 24V)が出力されず、動作ランプも点灯しない状態であることを確認した。電圧が 出力されなくなる直前の動作確認では、検出距離が 100cm 以上あることが確認されており、 異常は確認されていない。データロガーの電圧値を確認すると照射開始約 3.93 時間後(集積 吸収線量 440Gy)から徐々に出力電圧が下がり、照射開始約 5.26 時間後(集積吸収線量 589Gy)に出力電圧が 0V になった。

最後に正常動作を確認した動作確認の時間を、動作不能となるまでの集積吸収線量と定義すると、照射線量率100Gy/hで照射した際に、カスタマイズした光電センサが動作不能となるまでの集積吸収線量は527~710Gyと推定される。

以上より、今回の試験条件では、光電センサをカスタマイズすることにより、約 1.4 倍の吸 収線量の増加が確認された。

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

表 4-12 カスタマイズした光電センサの照射試験結果

※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







図 4-23 No.光 100-カ-2の電圧変化



図 4-24 No.光 100-カ-3 の電圧変化

(3) カスタマイズした測域センサ

カスタマイズした測域センサの照射試験結果を表 4-13 に示す。照射線量率は、測域センサ 設置位置付近で測定した空間線量を用いている。なお、カスタマイズしない状態での照射試験 結果も参考までに併記している。

ここで、照射線量率は、遮へい体内のセンサ設置箇所における吸収線量率ではなく、カスタ マイズした測域センサを設置した位置での空間線量率を指す。

カスタマイズした測域センサの 3 台に対して照射線量率 150Gy/h で照射試験を実施した結 果、No.測 150-カ-1 は照射開始約 3.25 時間後(集積吸収線量 488Gy)に、エラーメッセージ が表示され、測定不能となった。

No.測 150-カ-2 及び No.測 150-カ-3 も No.測 150-カ-1 と同様であり、No.測 150-カ-2 は照射 開始約 2.88 時間後(集積吸収線量 432Gy)、No.測 150-カ-3 は照射開始約 2.68 時間後(集積 吸収線量 402Gy)にエラーメッセージが表示され、測定不能となった。

これより、照射線量率150Gy/hで照射した際に、カスタマイズした測域センサが動作不能となるまでの集積吸収線量は402~488Gyであった。

以上より、今回の試験条件では、測域センサをカスタマイズすることにより、約 1.7 倍の吸 収線量の増加が確認された。

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

表 4-13 カスタマイズした測域センサの照射試験結果

※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

4.4 遮へい解析コードを用いた遮へい評価(本解析)

4.3 項で実施した照射試験のセンサ配置及び照射試験環境をモデル化し、遮へい解析コード を用いた遮へい評価を行った。

4.4.1 計算条件

(1) 解析コード

直接線だけでなく、遮へい体による散乱及び照射環境(床または壁からの反射等)の影響を 考慮するため、4.2.3 項と同様、解析コードは MCNP を用いた。

(2) 計算で使用する密度及び組成

本解析で用いた物質の密度及び組成を、表 4-14~表 4-16 に示す。なお、予備解析で用いた 物質と同じ物質は、4.2.3 項と同様である。

	表 4-14	本解析で用いた物質の密度及び組成	(その1)
--	--------	------------------	-------

物質	鉄(SS400相当	á, 遮へい体)
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.	86
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
Fe	100	7.86

出典:「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

物質	空気		
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.2049E-03		
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
Н	1.0000E-03	1.2049E-08	
С	1.2554E-02	1.5126E-07	
Ν	7.5470E+01	9.0934E-04	
0	2.3233E+01	2.7993E-04	

出典:「遮蔽材料の群定数(JAERI-M 6928)」

物質	コバルト		
密度(g/cm <sup>3</sup> )	8.9		
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
Со	1. 0000E+02 8. 9000E+00		

出典:「理科年表 平成 23 年 国立天文台編」

物質	木製ブロック(架台)			
密度(g/cm <sup>3</sup> )	0. 48			
元素	個数比	密度 (g/cm <sup>3</sup> )		
С	6	—		
Н	10	_		
0	5	_		

出典: Scale library: ORNL/TM-2005/39, Version 6.1 (June 2011).※密度は使用した木材(ホオノキ)の数値を用いた。

物質	普通コンクリート		
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2. 3	30	
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
Н	4.1600E-01	9.5680E-03	
0	5.0740E+01	1.1670E+00	
Mg	1.1500E-01	2.6450E-03	
A1	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	

表 4-15 本解析で用いた物質の密度及び組成(その2)

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	重コンクリート		
密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.70		
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
Н	4.5000E-01	1.6650E-02	
0	3.1392E+01	1.1615E+00	
Mg	4.7000E-02	1.7390E-03	
A1	1.9900E-01	7.3630E-03	
Si	2.9820E+00	1.1033E-01	
S	1.9360E+00	7.1632E-02	
Са	4.0810E+00	1.5100E-01	
Fe	5.8913E+01	2.1798E+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	SUS304		
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.93		
元素	組成比 密度 (W/O) (g/cm <sup>3</sup> )		
С	4.0000E-02	3.1720E-03	
Si	5.0000E-01	3.9650E-02	
Mn	1.0000E+00	7.9300E-02	
Р	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		

表 4-16 本解析で用いた物質の密度及び組成(その3)

出典:「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯(JISG4304)」

物質	SUS316L		
密度(g/cm <sup>3</sup> )	7.98		
元素	組成比 (W/O)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	
С	1.5000E-02	1.1970E-03	
Si	5.0000E-01	3.9900E-02	
Mn	1.0000E+00	7.9800E-02	
Р	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	
Мо	2. 5000E+00 1. 9950E-01		
Fe	6.5448E+01	5.2227E+00	

出典:「熱間圧延ステンレス鋼板及び鋼帯(JISG4304)」

(3) 線量率換算係数

4.2.3 項の予備解析と同様の線量率換算係数を用いた。

(4) 線源条件

本解析の線源条件は、使用する照射施設の空間線量率測定結果を基に、規格化を行い設定した。線源は棒状であるため、高さ方向に線量率のコサイン分布を持つため、ある距離において 高さ方向に複数個所の測定点を設けた。

線源は Co-60 とし、予備解析と同様の線源スペクトル(表 4-3 参照)を用いた。線源モデル

は、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、放射線源 を製作したメーカのサンプルを参考に設定した(図 4-25 参照)。

線源強度は、線量率測定値を参考に、規格化を行い設定した。線量率の測定値及び規格化に よる計算値との比較結果を、表 4-17 及び図 4-26 に示す。なお、測定値及び計算値は、線源中 心からの距離 20.5cm(100Gy/h)を代表して規格化位置とした。この 100Gy/h は光電センサ の照射線量率の目標値である。

線源規格化の結果、本解析での放射能量は2.15e+13 Bq である。このとき、規格化線源強度 を用いた線量率分布の計算値は、測定値と比較して、約 5%以下と、良く一致した結果となり、 Co-60の線源強度と高さ方向の線源分布を再現できていると考える。



図 4-25 線源規格化の計算モデル(本解析用)

線	線源中心から ステージ」	ステージ上か	測定值 [Gy/h]		計算結果
INO.	の距離 [cm]	らの <u></u> む [cm]	最大	最小	[Gy/h]
1	20.5	36	102.1	99.2	100.0
2	20.5	30	112.2	109.1	111.1
3	20.5	24	116.1	112.8	115.7
4	20.5	18	116.0	112.8	114.3
5	20.5	12	106.5	103.5	106.7
6	20.5	6	97.4	94.6	93.8

表 4-17 線源規格化における測定結果及び計算結果の比較



図 4-26 測定結果及び計算結果のグラフ

(5) 評価位置

評価位置は、照射試験での線量測定位置(図 4-19 及び図 4-20 参照)とした。

(6) 計算モデル

4.3 項で実施した照射試験の各センサ配置及び試験環境を考慮し、計算モデルを作成した。 本解析では、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 4-27 に示す 照射室モデルを作成した。また、カスタマイズした光電センサ及び測域センサの計算モデルを、 それぞれ図 4-28 及び図 4-29 に示す。なお、各センサはモデル化せず(空気として扱う)、遮 へい体及び架台のみモデル化している。



図 4-27 照射室のモデル図



図 4-28 光電センサ(カスタマイズ)の本解析モデル



図 4-29 測域センサ(カスタマイズ)の本解析モデル

4.4.2 計算結果

カスタマイズした光電センサ及び測域センサの本解析結果を、表 4-18 及び表 4-19 に示す。また、線量率の分布図を、図 4-30 から図 4-34 に示す。

一部、測定値と計算値が、20%を超える項目があるが、概ね20%以内の差となった。

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

表 4-18 光電センサ(カスタマイズ)の本解析結果

表 4-19 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	測定值[Gy/h]	計算值[Gy/h]	比率
遮へい体外側	測150-カ-1	258.7	296.2	1.15
	測150-カ-2	293.9	296.5	1.01
	測150-カ-3	306.3	296.0	0.97
遮へい体内側	測150-カ-1	49.0	58.6	1.20
	測150-カ-2	50.3	58.4	1.16
	測150-カ-3	54.8	58.2	1.06



図 4-30 MCNP コード計算による光電センサにおける線量率分布(開口部高さ中心位置)



図 4-31 MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(遮へい体底部高さ位)



図 4-32 MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(センサ下部高さ位置)


図 4-33 MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(開口部高さ中心位置)



図 4-34 MCNP コード計算による測域センサにおける線量率分布(センサ上部空間高さ位置)

4.5 考察

4.5.1 光電センサの遮へい評価(予備解析)

光電センサの遮へい評価(予備解析)において、線源からセンサ中心までの距離が長くなるほど、遮へい効果が低くなり、約 60cm 以上になると、遮へい体装着時の線量率の方が高くなった (表 4-5 参照)。例えば、線源からセンサ中心までの距離が 100cm のとき、遮へい体装着により、線量率は 1.18 倍に増加する。

これは、図 4-35 に示す通り、線源からセンサ中心までの距離が長くなるほど、遮へい体により遮へいされずに、直接センサに届く放射線が増加するためである。また、遮へい体の開口によるストリーミング効果により、センサ中心部の放射線量が増加する。

ここで、簡易的に計算するため、点線源と仮定したときの DIN 規格のストリーミング計算に より、妥当性を検証する。

線源中心からセンサ中心までの距離が 100cm のケースにおいて、センサ中心の線量率は以下 の計算式で計算される。また、DIN 規格によるストリーミング計算のイメージ図を図 4-36 に示 す。

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

ここで、D<sub>0</sub>: 遮へい体入口での線量率(遮へい体なしでの線量率と同等とする)

D<sub>1</sub>:センサ中心での線量率 L<sub>0</sub>:点線源から遮へい体入口までの距離(95.75cm) L<sub>1</sub>:遮へい体入口からセンサ中心までの距離(4.25cm) B(W/T):補正係数(1.5)

本計算式により計算すると、D1=1.38×D0が得られる。

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

遮へい体開口(1.3cm×2cm:投影面積 2.6cm<sup>2</sup>)を、体積線源( $\phi$ 5cm×H30cm:投影面積 150cm<sup>2</sup>)に投影したとき、開口部の内側は遮へい体開口の全周から散乱(反射)するが、開口 部の外側は遮へい体開口の半周程度から散乱(反射)する。後者からの影響を 1/2 と仮定すると、散乱の影響は 0.51 (=(2.6cm<sup>2</sup>×1+(150cm<sup>2</sup>·2.6cm<sup>2</sup>)×1/2)/150)となる。遮へい体入口での線量 率 (D<sub>0</sub>)が、遮へい体なしでの線量率と同等としたとき、ストリーミングを考慮した線量率は、 1.19 倍 (=(1.38-1)×0.51+1)となり、本条件で、遮へい体装着による線量率の 1.18 倍の増加は 妥当と考える。

以上により、条件次第で遮へい体を装着することで、逆にセンサの吸収線量率が増加する可能 性があるため、使用環境を考慮し、遮へい体の装着要否及び構造を検討する必要がある。



図 4-35 線源と遮へい体付き光電センサの位置関係



4.5.2 カスタマイズ (遮へい体装着) による効果

今回の試験条件では、正常動作が可能な集積線量は、遮へい体装着により、光電センサ及び測 域センサがそれぞれ約 1.4 倍、約 1.7 倍の増加し、カスタマイズが有効であると考える。ただし、 4.5.1 節に示す通り、使用環境次第で同じ遮へい体構造でも、遮へい効果が異なる可能性がある ため、使用環境等の条件に応じた構造とする必要がある。 4.5.3 照射試験と遮へい評価(本解析)の比較

規格化線源強度を用いた軸(高さ)方向の線量率分布は、測定値と比較して、約 5%以内と、 良く一致した結果となり、Co-60の線源強度と軸(高さ)方向の線源分布を再現できていると考 える。

規格化線源強度を用いてカスタマイズした光電センサの解析結果については、一部の評価位置 を除いて、測定値と約10%以内で一致する結果となった。カスタマイズした測域センサの解析結 果については、測定値と約20%以内で一致する結果となった。また、今回の試験条件では、測定 値よりも解析値の方が、高い線量率となり保守的な数値となった。なお、一般的に、MCNP は 解析コード自体に保守性はない(現実的な数値となる)ため、実機に適用する際は裕度または計 算条件に保守性を持たせる必要がある。

今回の照射試験は、線源中心から 20.5cm 程度の位置にセンサを設置し実施している。線源の 位置やセンサ類の設置位置等の誤差により、距離が 1~2cm ずれると、例えば点線源の場合、10 ~20%程度数値がずれる。

このように、解析による測定値との 20%程度の差は許容でき、本試験条件では、MCNP コードを用いた解析による評価が可能と考える。ただし、照射条件により、結果が異なる可能性があるため、今後、複数の条件で評価を実施する必要がある。

### 5. 今後の課題

令和3年度は、2.2項に示した5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。今後、セ ンサ類の使用指針を作成するために、追加データの補充を実施したうえで有識者委員会を設立し、 審議を依頼する必要がある。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 低照射線量率による影響評価

今回の照射試験では、5Gy/h の試験は試験場の制約により、光電センサ、近接センサ、ト ルクセンサは非通電での試験となった。その結果、非通電状態で試験を実施した 5Gy/h と通 電状態で試験を実施した 50、100Gy/h と間に有意な差が確認された。一方、測域センサは 5、50、100、150Gy/h の 4 種類の照射線量率にて照射試験を実施したが、照射線量率の違 いによる耐放射線性の有意な差は確認されなかった。したがって、測域センサの結果を考慮 すると、光電センサ、近接センサ、トルクセンサの耐放射線性の有意な差は、照射線量率で はなく通電・非通電による影響である可能性が考えられる。

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

### ② 非照射時の回復効果による影響

今回の照射試験では、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る。また、今回の試験において、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。したがって、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る。そのため、照射試験を実施するときには、非照射時の回復効果に よる影響を考慮した試験計画を立案する必要がある。

### ③ 設計で使用する集積吸収線量の上限値評価

センサ類の使用可能な集積吸収線量の上限値を設計値として設定する場合には、使用する 施設または装置の安全上の重量性、使用環境、使用方法等を考慮して、使用可能な集積吸収 線量を決定する必要がある。例えば、安全上の重要度が高い施設でセンサを使用する場合に は、本試験結果から設定した使用可能な集積吸収線量の上限値に更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。したがって、 裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値は、照射試験により得られた故障前の予兆、 個体差のばらつきを基に、使用する施設または装置の安全上の重量性、使用環境、使用方法 等を考慮して、使用可能な集積吸収線量を設計値として設定する必要がある。そこで、使用 指針を作成するためには、今後、設計で使用する集積吸収線量の設定方法について、有識者 委員会を設立して審議する必要がある。

# ④ 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、光電センサの解析結果について、一部の評価位置を除いて、測定値 と約 10%以内で一致する結果となった。また、カスタマイズした測域センサの解析結果につ いて、測定値と 20%以内で一致する結果となった。今回の照射条件においては、MCNP コ ードを用いた解析による評価が可能と考えられるが、照射条件により結果が異なる可能性が ある。そこで、今回と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。 6. まとめ

令和3年度は、2.2項に示した5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。

令和3年度は、光電センサ、近接センサ、トルクセンサ及び測域センサを対象として、照射試 験により耐放射線性データを取得した。照射試験では、照射線量率及び照射方向の違いによる耐 放射線性への影響、個体差による耐放射線性データのばらつき(再現性)が分かるような試験条 件を設定した。

照射線量率の耐放射線性への影響については、光電センサ、近接センサ、トルクセンサは 50Gy/h~100Gy/hの範囲で、測域センサは5~150Gy/hの範囲で、照射線量率による耐放射線性 への影響は確認されなかった。

放射線の照射方向による影響については、光電センサの100Gy/hの照射試験結果より、照射方 向により違いが見られたことから、照射方向により故障した構成部品が異なっていた可能性が考 えられる。また、放射線に弱い制御回路基板への照射方向により当該部品への照射量が異なって いた可能性も考えられる。したがって、センサの照射方向に注意して、耐放射線性を評価する必 要がある。

個体差によるばらつきについては、センサ類の中でも比較的耐放射線性に優れていた近接セン サセンサのばらつきが他のセンサ類に比べて大きかった。種類によって個体差によるばらつきに 差がある結果が得られたことから、センサの種類によってばらつき具合が異なる点に注意して、 耐放射線性を評価する必要がある。

裕度を考慮した使用可能な集積吸収線量の上限値は、照射試験により得られた故障前の予兆、 個体差のばらつきを基に、使用する施設または装置の安全上の重量性、使用環境、使用方法等を 考慮して、使用可能な集積吸収線量を設計値として設定する必要がある。

また、一般産業用工業品であるセンサ類の使用指針の作成に資すると考えられる照射試験で得 られた知見としては、通電・非通電による影響、高さ方向・周方向による照射線量率の影響、非 照射時の回復効果による影響がある可能性が分かった。これらの事象について、耐放射線性の評 価に与える影響について、引き続き評価していく必要がある。

今後、取り組むべき課題としては、4 つ挙げられた。1 つ目の課題は、「低照射線量率による 影響評価」である。令和3年度の照射試験では、5Gy/hの試験は試験場の制約により、光電セン サ、近接センサ、トルクセンサは非通電での試験となった。一般産業用工業品のセンサ類を使用 する環境としては、50Gy/hよりも低い環境であることが想定される。そのため、5Gy/h以下で 通電状態における耐放射線性データを追加取得する必要がある。2 つ目の課題は、「非照射時の 回復効果による影響」である。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 施したが、夜間や休日明けには、センサの機能が回復する事象が確認された。そのため、照射試 験を実施するときには、非放射時の回復効果による影響を考慮した試験計画を立案する必要があ る。3 つ目の課題は、「設計で使用する集積吸収線量の上限値評価」である。センサ類の使用可 能な集積吸収線量の上限値を設計値として設定する場合には、使用する施設または装置の安全上 の重量性、使用環境、使用方法等を考慮して、使用可能な集積吸収線量を決定する必要がある。 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。4 つ目の課題は、「カスタマイズしたセンサ類の 追加データ取得」である。令和3年度は、センサ類の耐放射線性を向上させるために、光電セン サ及び測域センサをカスタマイズ(遮へい体を装着)して照射試験を実施し、MCNP コードを 用いた解析結果との比較評価を実施した結果、今回の照射条件においては、MCNP コードを用 いた解析による評価が可能と考えられるが、照射条件により結果が異なる可能性がある。そこで、 今回と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。

以上の令和3年度の成果及び今後の取り組むべき課題を踏まえて、センサ類の耐放射線性デー タを追加取得し、有識者委員会を設立してセンサ類の耐放射線性の評価方法、具体的な機器への センサ類の適用方法及びその適合性評価を審議しながら検討を進めることで、今後の放射線環境 下の一般産業用工業品の使用指針作成に資することができるものと考えられる。 参考文献

- [1] 福島峰夫ら. 耐放射線性機器・材料データベースの構築・整備, 動力炉・核燃料開発事業団, 1993.
- [2] 草野譲一. 高放射線環境で使用される機器・材料類の耐放射線特性データ集, JAEA-Review 2008-012, Mar. 2008.
- [3] 瀬口忠男ら. 各種高分子材料の耐放射線性 実使用環境模擬の劣化評価 , JAEA-Data/Code 2009-018.
- [4] 令和2年度原子力産業基盤強化事業委託費 一般産業用工業品の放射線環境下の使用指針の 整備事業事業報告書,神戸製鋼所, 2021.