

平成28年度補正予算
廃炉・汚染水対策事業費補助金
燃料デブリ・炉内構造物取り出しの基盤技術開発事業
(小型中性子検出器の開発)

フェーズ1完了報告

2017年10月31日

技術研究組合 国際廃炉研究開発機構(IRID)
日立GEニュークリア・エナジー(株)

目次

1. 研究の背景・目的

- 1-1 本研究が必要な理由
- 1-2 本研究の成果の適用先
- 1-3 研究の目標

2. 実施項目とその関連、他研究との関連

- 2-1 本研究の実施項目、実施項目間の関係性
- 2-2 他研究との関係性

3. 実施内容

- 3-1 実施内容の達成度
- 3-2 既存技術との対比
- 3-3 要素試験による性能検証
- 3-4 試験結果によるニーズへの適用性評価

4. まとめ及び今後の計画

1. 研究の背景・目的

1-1 本研究が必要な理由

- 燃料デブリは原子炉圧力容器(RPV)や原子炉格納容器(PCV)底部に存在していると考えられているが、その分布は測定できていない。
- 燃料デブリの分布を把握するために、ガンマ線量やビデオ映像など得られた情報から総合的に判断することが求められるが、ガンマ線量や外観だけではデブリと弁別することが困難なケースも多い。
- PCV内で中性子を測定できれば、アクチニド(主にCm244)から発せられる自発核分裂中性子を測定することで、燃料デブリ(燃料物質)を弁別できる可能性がある。
- 燃料デブリを検知するためには、小型の中性子検出器を、遠隔操作によってきわめて狭い経路を通して燃料デブリ近傍にアクセスし、高ガンマ線量下で、微弱な中性子を計測する必要がある。
- さらに、中性子計測は、PCV内の燃料デブリ検知の他、臨界管理、デブリサンプリング、収納・移送・保管等、複数のニーズがあり、適用対象の検討も合わせて実施する。

1. 研究の背景・目的

1-2 本研究の成果の適用先

ニーズ		内容	必要な中性子検出器の概要	至近の候補
燃料由来の デブリの所在 の特定・検知 (PCV内部調 査)	狭隘部 アクセス (以降、B2' 調査)	ペDESTAL内外の地下階に、狭隘部からアクセスし、燃料デブリの状況を調査	・高ガンマ線環境において低中性子束の検出 ・調査目的であるため、短時間であり、求められる耐放射線性は比較的高くない	○
	上記以外 (詳細調査)	ペDESTAL内外の地下階に、アクセスし、燃料デブリの状況を調査	・高ガンマ線環境において中性子束を検出	○
デブリサンプリング作業中の監視		サンプリング作業中の臨界近接状態を監視	・高ガンマ線環境において中性子束を検出	○
収納、移送、保管		収納缶内の燃料デブリの状態を監視	・高ガンマ線環境かつ、高い耐放射線性が必要	
再臨界になる 可能性がある 場所での監視	臨界近接	燃料デブリ取り出し時、長期間にわたって、燃料デブリの臨界状態監視	・高ガンマ線環境かつ、高い耐放射線性が必要	
	再臨界	PCV水張り時、短時間での、燃料デブリの臨界状態を監視	・高ガンマ線環境での高中性子束検出が必要	

注) ○: 至近に可能性有

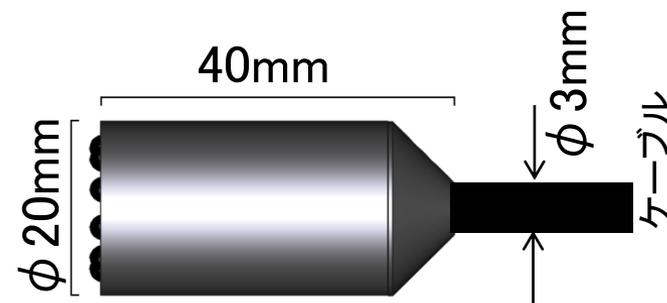
至近の小型中性子検出器適用候補として、PCV内部調査、サンプリング作業中の監視が考えられるが、制約条件が厳しいB2' 調査を想定して開発を進めた。

1. 研究の背景・目的

1-3 研究の目標

B2' 調査に必要なセンサの性能目標のまとめ

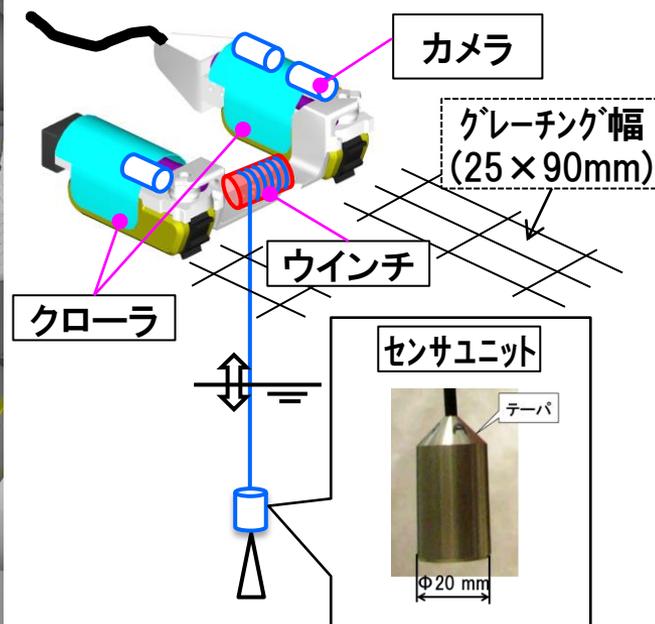
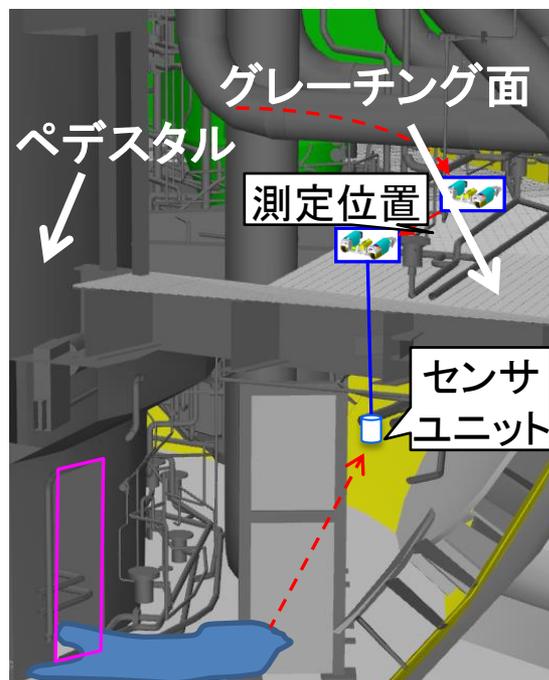
目的	寸法	中性子束測定範囲	最大ガンマ線量率	累積ガンマ線量
PCV内部調査 (B2' 調査)	< ϕ 20mm × 40mm (右図)	0.1~1000 n/(cm ² ・s)	1000 Gy/h	1000 Gy



B2' 調査用の計測ユニット
(B2計測ユニット同形)

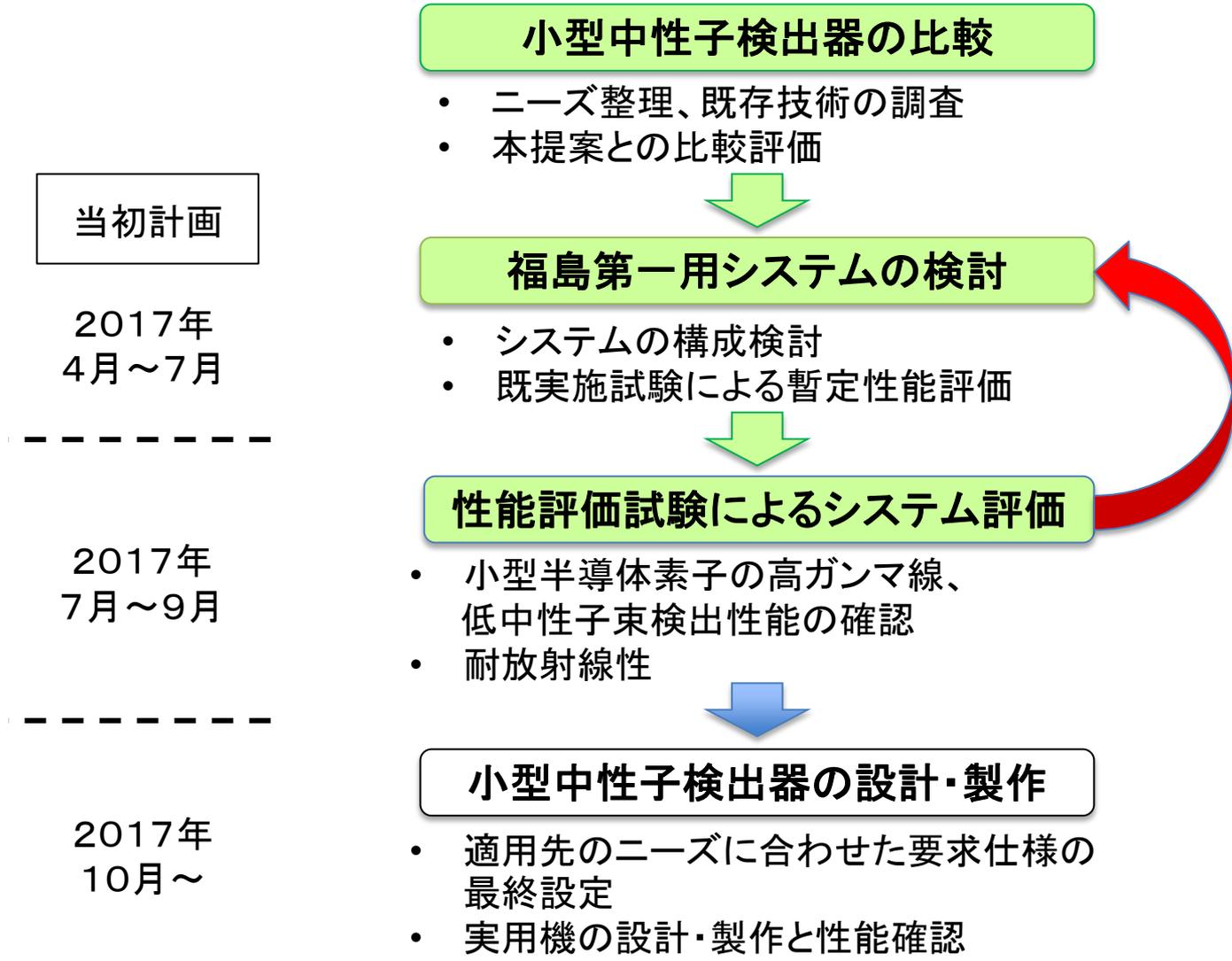
【参考】B2調査の概要

- ・PCV内部のグレーチング上からセンサユニットを降下させ、地下階を調査
- ・地下階ペデスタル外側の線量率と映像情報を取得する



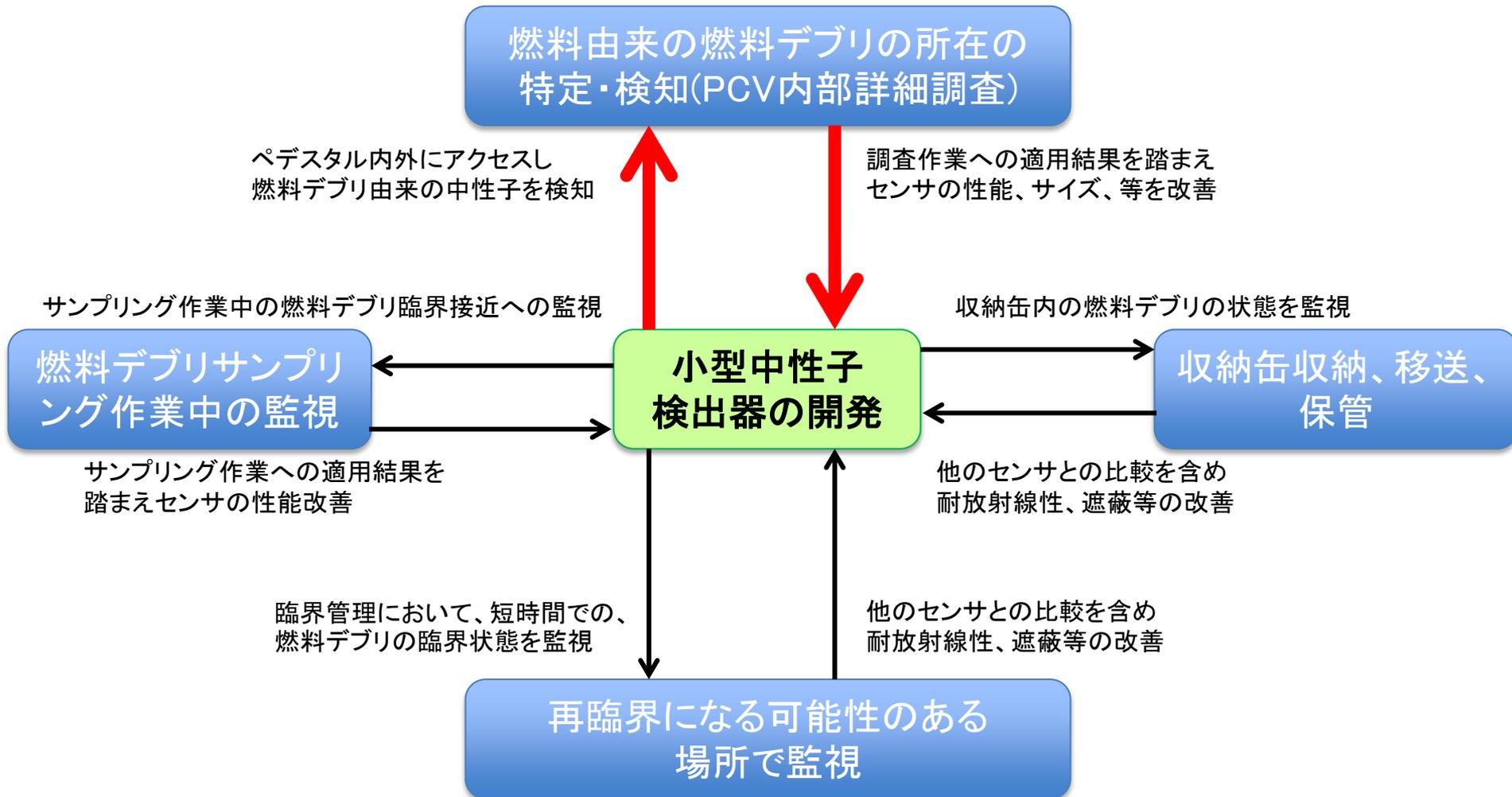
2. 実施項目とその関連、他研究との関連

2-1. 本研究の実施項目、実施項目間の関係性



2. 実施項目とその関連、他研究との関連

2-2. 他研究との関係性



3. 実施内容

3-1 実施内容の達成度

No.	項目	指標	達成度	根拠	関連 スライド
1	中性子 検出性能	中性子検出感度はより高いか。 ※ $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ の中性子束を計測するのに必要な時間を比較する。基準:この時間が1時間以内であること。	達成	中性子束 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ である中性子単一場の照射試験の結果、1時間以内に1カウントを得た。これは、10mm角の1チップによる結果であるが、信頼性を確保するには、10カウント必要であると仮定すると、8素子あれば、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ を検出可となる。	16
2		ガンマ線等に起因するバックグラウンド信号との弁別性能が高いか。 ※弁別可能なバックグラウンドの強度(ガンマ線線量率など)を比較する。基準:ガンマ線線量率が1000Gy/h以上であること。また、中性子による信号と誤認識する可能性のある事象について考慮されているか。	達成	ガンマ線・中性子線の複合場において、以下の弁別性能を確認。 ・1素子では、 $1n/(cm^2 \cdot s) \sim$ 、 $\sim 1000Gy/h$ において、ガンマ線と弁別できた。これより、ガンマ線環境下でも中性子をカウント(測定場における中性子の有無の判定)できるセンサであることを確認。	17, 18
3	耐放射線性	耐放射線性がより優れているか。 ※累積線量と検出器性能(検出感度、弁別性、ノイズ量、等)の劣化との関係を比較する。基準:累積線量1000Gyまでは、上記の中性子検出感度及び弁別性能が保たれること。	達成	・集積線量が約500Gy以上で誤検知率が增加傾向にあるが、 $1n/(cm^2 \cdot s) \sim$ において、集積線量が1000Gyを超えても検出はできることを確認	19,20
4	サイズ	可能な限りの小型化が図られているか。	達成	技術要件である直径20mm、長さ40mmの中に、No.1の項目で示したCMOS8素子を格納できる見通しを得た。	27
5	実現性	小型中性子検出器の開発(フェーズ2)の計画(実機実証用小型中性子検出器の開発スケジュール、システム構成および設計・製作の開発実施スケジュール、体制、モックアップ試験計画)が妥当で現実的か。	達成	フェーズ2は、実機への実証を想定し計画しており、現実的と考える。ただし、スケジュールは厳しく、試験計画や設計・製作については、フェーズ2の検討の中で、適宜最適化を図る。	26, 29
6		実機内で実証試験(フェーズ3)を行うに当たり、概念設計は妥当かつ現実的か。	達成	実証試験については、他の事業(PCV内部詳細調査)の中で、実施する提案としている。実証試験を担当する事業者と連携をとりながら、進める。	
7	その他	中性子束以外に炉内状況把握のために測定可能な情報(例えばガンマ線エネルギースペクトル等)を得ることが可能か。	達成	中性子束の他、ガンマ線の線量率、集積線量も、原理的には測定可能である。エネルギースペクトルは、測定できない。	-
8		デブリ検知以外の臨界近接管理などにも応用可能なように、カスタマイズが可能か。	達成	ガンマ線耐性や寿命を延ばすため遮蔽や電源管理を施す、感度を上げるために、素子数を増やす、等のカスタマイズは可能。	-

3. 実施内容

3-2 既存技術との対比

3-2-1 既存技術の特徴

分類	検出器タイプ	特徴	課題
シンチレータ	^6Li (Eu)	・検出部の小型化が可能	・許容ガンマ線(弁別性)の向上
ガス チェンバ	^3He 比例計数管	・感度が高い	・許容ガンマ線(弁別性)の向上 ・耐放射線性(集積線量)の向上
	^{10}B 被覆 比例計数管	・感度は中程度 ・耐放射線性(集積線量)が高い	・許容ガンマ線(弁別性)の向上
	核分裂 電離箱	・許容ガンマ線(弁別性)が高い ・耐放射線性(集積線量)が高い	・感度の向上
半導体	CMOS	・感度は中程度 ・高ガンマ線環境下での中性子弁別性が良い ・検出部の小型化が可能	・耐放射線性(集積線量)の向上
	PINダイオード	・感度は中程度 ・検出部の小型化が可能	・耐放射線性(集積線量)の向上

3. 実施内容

3-2 既存技術との対比

3-2-2 B2' 調査に対する各センサの適合性

※現時点の暫定評価であり今後継続検討要

分類	検出器タイプ	中性子検出性能 (測定時間要求)	許容ガンマ線 1000Gy/h	耐放射線性 1000Gy	小型化(ケーブル リング含む)	判定
シンチレータ	^6LiI (Eu)	適	不適	適	不適	不適
ガスチェンバ	^3He 比例計数管	適	適	適	不適	不適
	^{10}B 被覆比例 計数管***	適	適	適	不適	不適
	核分裂電離箱 ***	不適	適	適	不適	不適
半導体	CMOS	適	適**	適**	適*	適
	PINダイオード	不適	適**	適**	適*	適

*小型検出器の製造性については次ステップで詳細検討、**今回の性能評価試験にて検証、***既開発品での評価

- B2' 調査を想定した小型中性子検出器開発の対象として半導体センサを選定
- 性能評価試験では、CMOSセンサを対象として実施
- 1cm角の半導体センサが最小単位であり、小型化が容易
- 半導体センサの耐放射線性は、過去の試験から暫定評価。性能評価試験で確認。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-1 課題と要素試験のスコープ

1. 10mm角素子を用いた小型センサの製作

- 本プロジェクトの要求仕様に適応するため、CMOSセンサの最小単位となる10mm角モジュールを製作できることの確認と、下記検証試験を実施。
- 試験データに基づきCMOSセンサの性能を評価し、センサ構成を決定する。

2. 高ガンマ線環境下における低中性子束の検出性能の検証

- 中性子線源とガンマ線源を組合わせた照射試験(校正試験含む)により、高ガンマ線(目標1000Gy/h)環境における低中性子束(目標 $0.1\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$)の検出性能を検証。

3. センサの耐放射線性の検証

- ガンマ線耐性、中性子束耐性、ガンマ線環境下での中性子束検出限界、等の放射線耐性を検証。

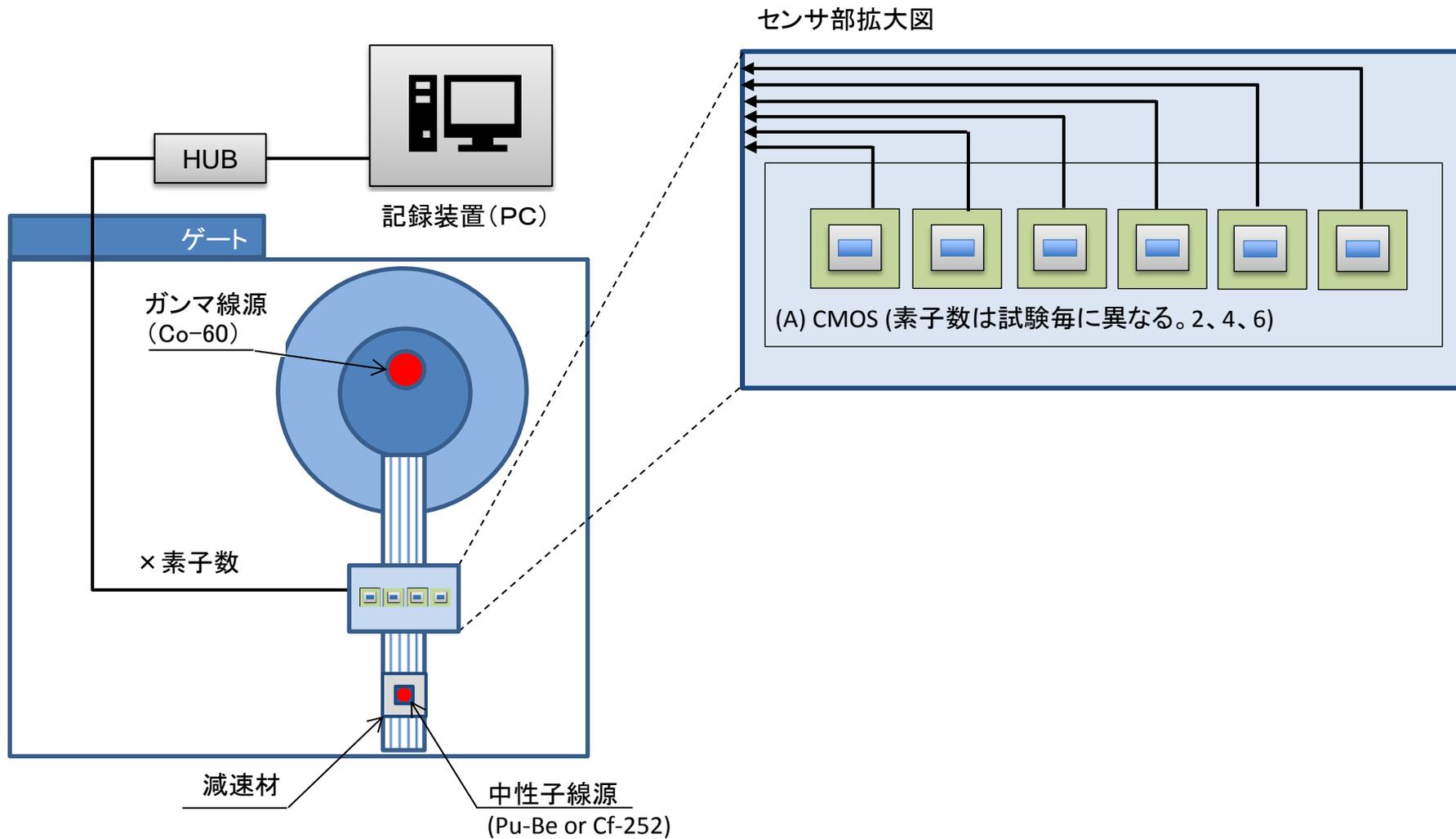
3-3 要素試験による性能検証

3-3-2 試験項目

No	カテゴリ	試験項目	試験の必要性	出カイメージ	試験場所
1	単一場での基礎特性試験	ガンマ線応答特性	ガンマ線入射に対する応答特性を評価。線量率に対する出力信号強度の線形性を確認	ガンマ線信号強度	UMD (メーラント大学)
2		中性子線応答特性	中性子線入射に対する応答特性を評価。中性子束に対するカウントの線形性および感度を確認	中性子カウント、感度(cps/(n/(cm ² ・s)))	
3	ガンマ線環境下での中性子束の検出性能	中性子線とガンマ線を組み合わせた複合環境場での測定試験	ガンマ線環境下での中性子計測性能を評価。誤検知確率、中性子束の検知時間を確認。別途、解析により評価した1Fの環境条件における適用性を検証	中性子カウントのガンマ線線量率依存性、誤検知確率(ガンマ線のみ、中性子のみ、同時照射による出力信号の比較)	
4	耐放射線性	ガンマ線耐性	一般に、CMOSはガンマ線照射で、出力が白色化するため、中性子の検出性能が低下する。中性子を検出可能な集積線量を試験により評価	中性子カウントのガンマ線集積線量依存性	
5		中性子線耐性	上記同様の理由で、中性子線照射で、中性子の検出性能が低下すると考えられる。中性子を検出可能な累積値を試験により評価	中性子束の累積値依存性	
6	長距離信号伝送	ケーブル長の影響評価	ケーブルの長距離伝送確認は、不可の場合対策が必要であるため、確認要	中性子カウントのケーブル長依存性	
7	反応層効果	⁶ Liの有無影響を評価	同一条件で、反応層の有無によるカウント値を比較する。これにより、反応層の効果を確認	中性子カウントの反応層有無依存性	
8	方向依存性	センサ面の方向依存性評価	中性子源に対するセンサ面角度の影響を確認	中性子カウントのセンサ方向依存性	

3-3 要素試験による性能検証

3-3-3 センサシステム構成



3-3 要素試験による性能検証

3-3-4 試験条件

(1) 検出性能評価試験

No.は⑪の試験番号に対応

No.1 ガンマ線応答特性		No.2 中性子線応答特性		No.3 中性子線とガンマ線を組み合わせた複合環境場での測定試験			
		中性子束(n/(cm ² ・s))					
		0 (ガンマ線のみ)	≒0.1	≒1.0	≒10	≒100	≒600
ガンマ線線量率(Gy/h)	0 (中性子線のみ)	90 min 2CMOS	30 min 6CMOS	10 min 6CMOS	5 min 6CMOS	5、90 min 6CMOS	2、180 min 6CMOS
	≒50	5 min 2CMOS					
	≒100	5 min 2CMOS	90 min 6CMOS	60 min 4CMOS	30 min 4CMOS	30 min 6CMOS	30 min 2CMOS
	≒500	5 min 2CMOS					
	≒800	5 min 2CMOS	80 min 6CMOS	60 min 4CMOS	30 min 4CMOS	60 min 4CMOS	60 min 2CMOS
	≒1000	5、90 min 2CMOS	80 min 6CMOS	60 min 4CMOS	30 min 4CMOS	60 min 4CMOS	60 min 2CMOS
	≒1200		90 min 6CMOS	60 min 6CMOS	30 min 6CMOS	85 min 2CMOS	60 min 2CMOS

(2) その他の試験(試験条件は各スライドを参照)

No.4:ガンマ線耐性、 No.5:中性子線耐性、 No.6:ケーブル長の影響評価

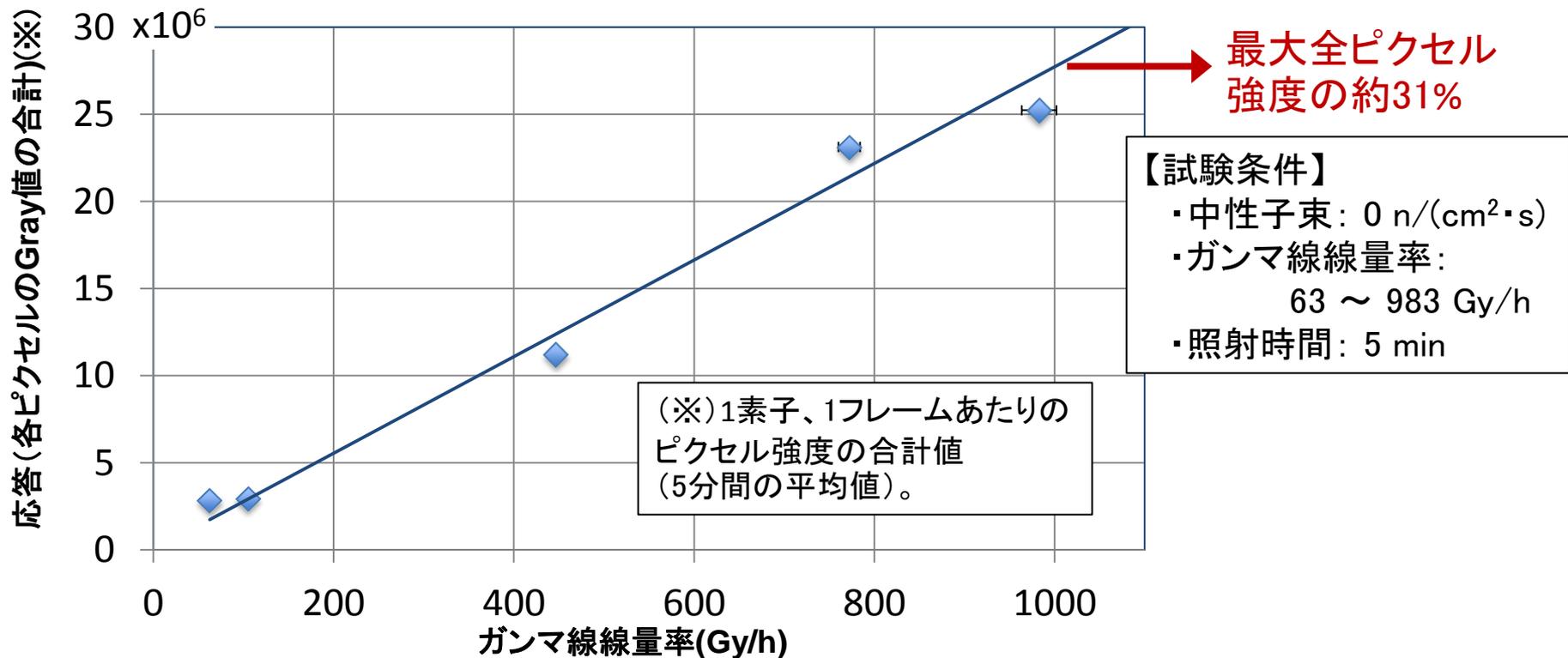
No.7:⁶Liの有無影響を評価、 No.8:センサ面の方向依存性評価

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

(1) ガンマ線応答特性(1/2)

■ ガンマ線単一場での応答特性の評価



ガンマ線線量率に対し、CMOS応答は単調増加傾向があり、1000Gy/hでも、全ピクセルの信号合計値は最大値(255xピクセル数)に対して31%と、余裕がある。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

(1) ガンマ線応答特性(2/2)

■ 誤検出の評価

**ガンマ線
単独照射**



応答信号はガンマ線起因であり、中性子と識別されたカウントがあればそれは誤検出となる

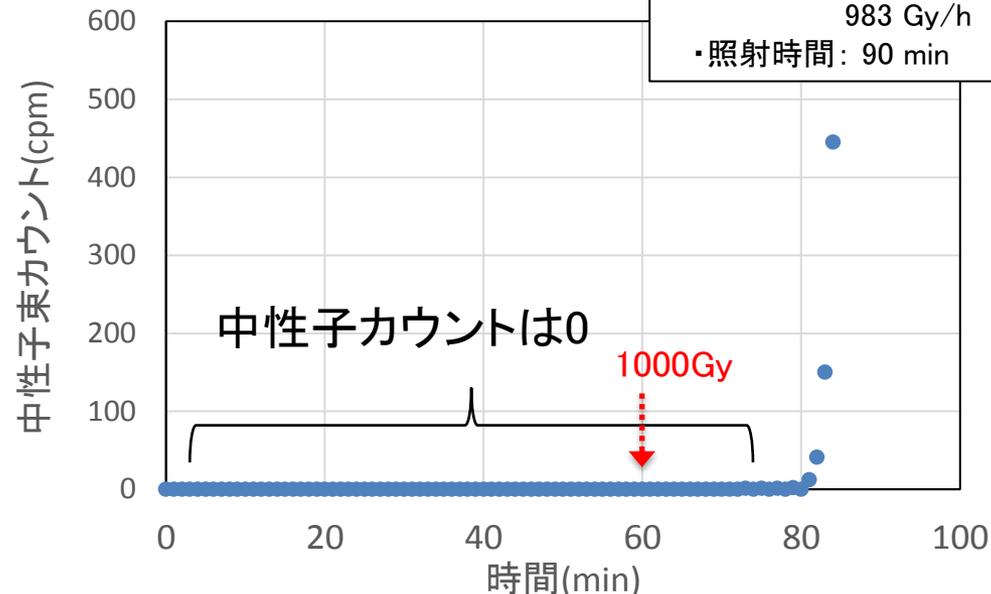
①ガンマ線線量率依存性

ガンマ線線量率 (Gy/h)	測定時間 (min)	中性子カウントレート (cps/素子)
62	5	0.00
105	5	0.00
447	5	0.00
772	5	0.00
983	5	0.00

②ガンマ線集積線量依存性

【試験条件】

- ・中性子束: $0 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
- ・ガンマ線線量率: 983 Gy/h
- ・照射時間: 90 min



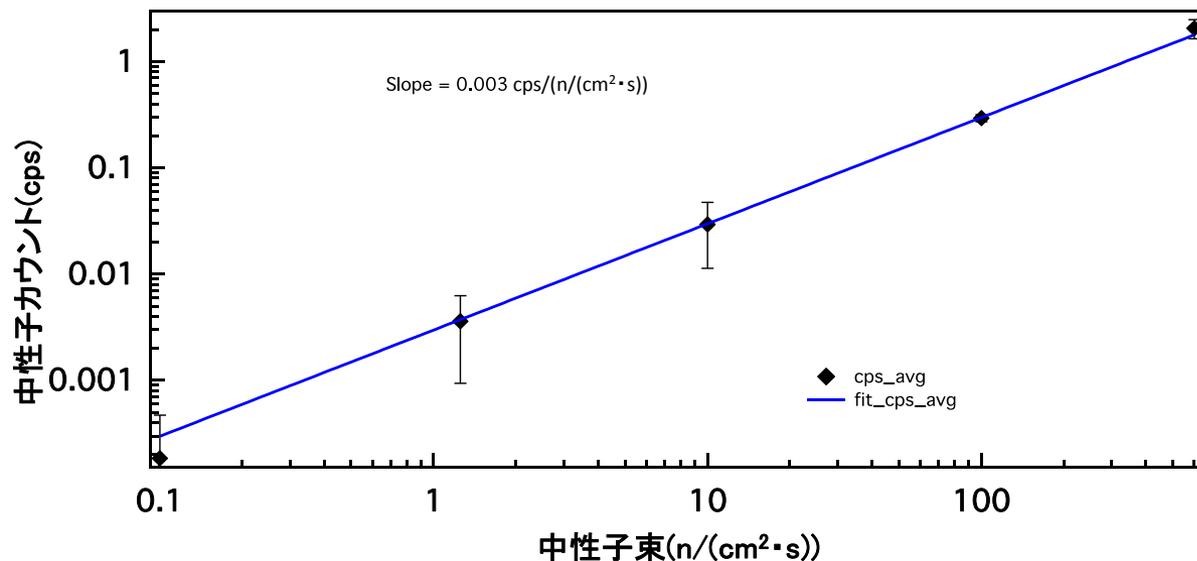
- ・短時間でのガンマの線量率依存性は認められず。
- ・1000Gy程度までは中性子の誤検知はない。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

(2) 中性子線応答特性

■ 中性子束に対するCMOSにおける中性子カウント



(図中の直線は回帰直線、エラーバーは6素子の範囲を示す)

【試験条件】

- ・中性子束: 0.08 ~ 598 n/(cm²·s)
- ・ガンマ線線量率: 0 Gy/h
- ・照射時間: 2, 5, 10, 30 min

中性子束 (n/(cm ² ·s))	平均中性子 カウント (cps/素子)	照射時間 (min)
0.08	0.00019	30
1.25	0.0036	10
11	0.029	5
106	0.29	5
586	2.1	2

- ・ 中性子束と中性子カウントは、線形性があることを確認。【cps/(n/(cm²·s))/素子 ≒ 3.4e-3】
- ・ 有感面積あたりの検出効率 は 0.026cps/(n/(cm²·s))/cm²

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

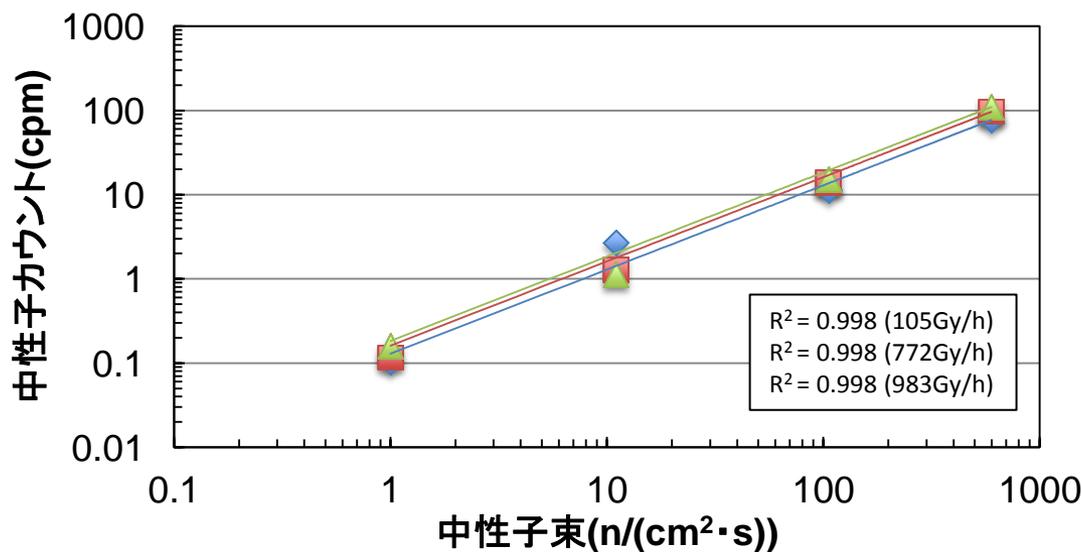
(3) 中性子線とガンマ線を組み合わせた複合環境場での測定試験(1/2)

■ 誤検知の評価

ガンマ線
中性子線
同時照射



原理上、中性子やガンマ線イベントの重畳により誤検知の増加の可能性があるので、ガンマ線、中性子線同時照射時の中性子カウントデータを比較し、評価する。



【試験条件】

- ・中性子束:
1~598 $n/(cm^2 \cdot s)$
- ・ガンマ線線量率:
105~983 Gy/h

- ◆ 105 Gy/h
- 772 Gy/h
- ▲ 983 Gy/h

- ・ 1 $n/(cm^2 \cdot s)$ 以上での測定結果は、あるガンマ線線量率ごとに $R^2 = 0.99$ 程度であることからばらつきが小さく、誤検知程度に変化がないことを確認。
- ・ 0.1 $n/(cm^2 \cdot s)$ の条件では中性子カウントが少なく統計的なばらつきが大きいため、本試験では評価できない。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

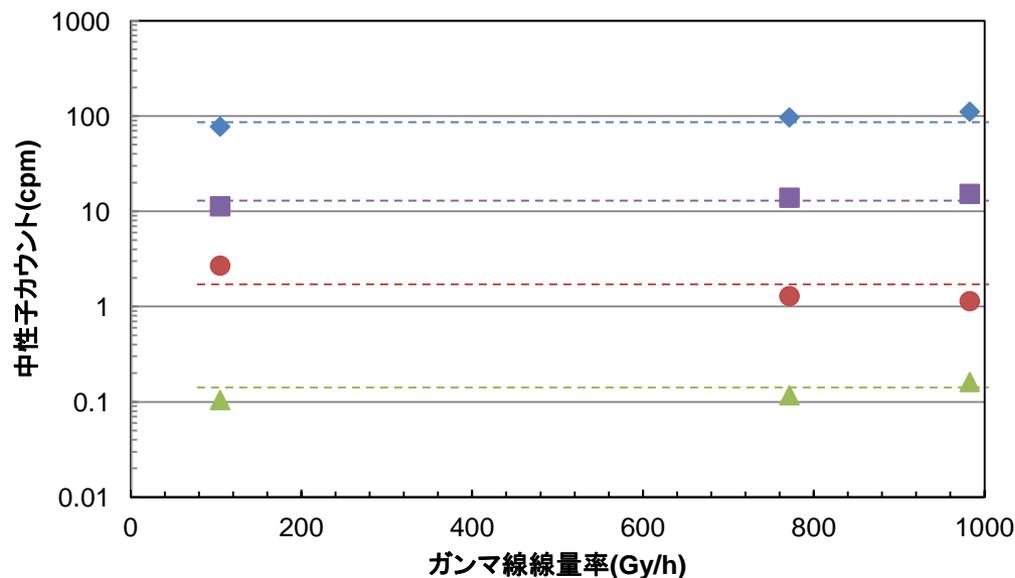
(3) 中性子線とガンマ線を組み合わせた複合環境場での測定試験(2/2)

■ 誤検知の評価

ガンマ線
中性子線
同時照射



原理上、中性子やガンマ線イベントの重畳により誤検知の増加の可能性があるので、ガンマ線、中性子線同時照射時の中性子カウントデータを比較し、評価する。



【試験条件】

- ・中性子束: 1 ~ 598 n/(cm²·s)
- ・ガンマ線線量率:
105~983 Gy/h

- ▲ 1 n/(cm²·s)
- 11 n/(cm²·s)
- 106 n/(cm²·s)
- ◆ 598 n/(cm²·s)

- ・ いずれのケースでも、中性子をカウントでき、ガンマ線と弁別可能であることを確認。
- ・ 加えて、各中性子束における出力の、ばらつきは小さい。

3-3 要素試験による性能検証

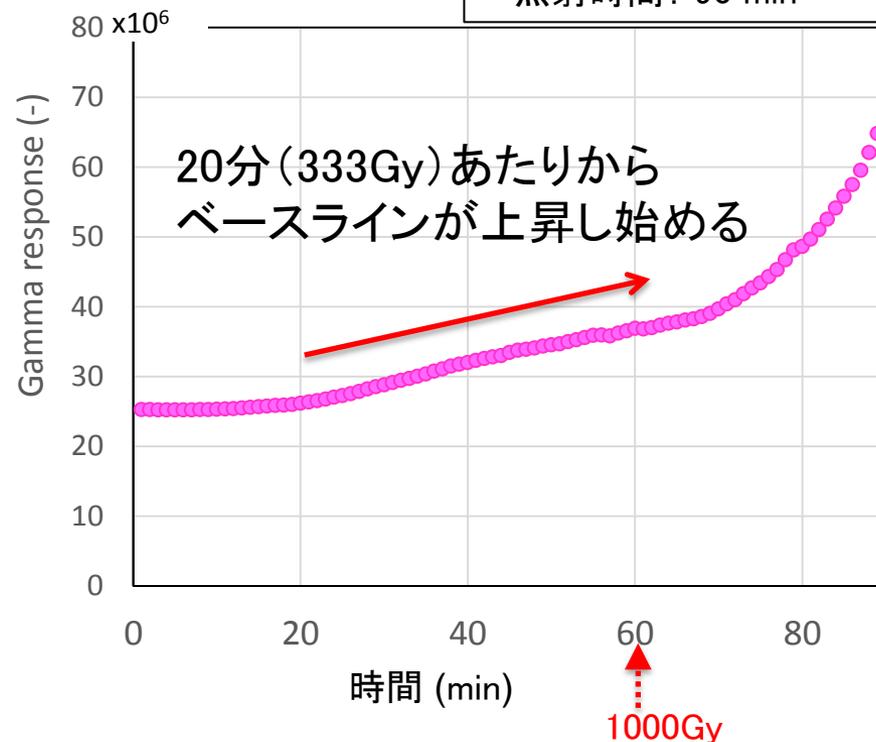
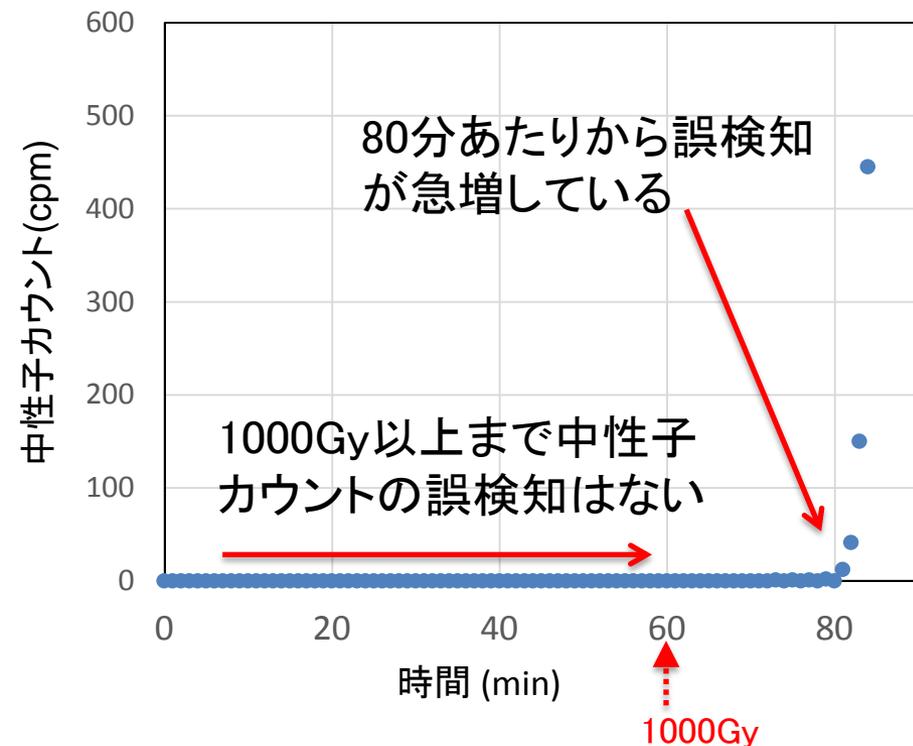
3-3-5 試験結果

(4)ガンマ線耐性(1/2)

■ ガンマ線単独照射

【試験条件】

- ・中性子束: $0 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
- ・ガンマ線線量率: $983 \text{ Gy}/\text{h}$
- ・照射時間: 90 min



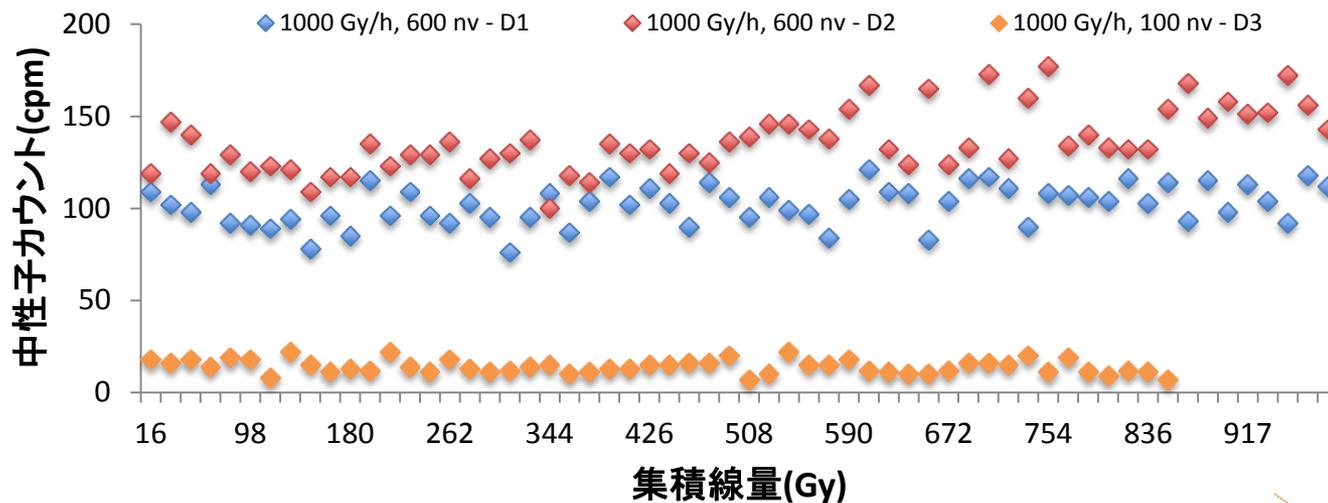
ガンマ線連続照射により、約20分経過後からベースラインが上昇を始めるが、ガンマ線単独照射の場合、1000Gy程度までは中性子の誤検知はない。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

(4)ガンマ線耐性(2/2)

■ ガンマ線／中性子線複合場での照射

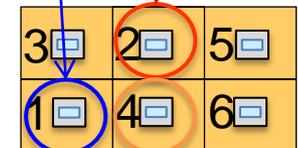


【試験条件】

- ・中性子束:
106, 598 n/(cm²・s)
- ・ガンマ線線量率: 983 Gy/h
- ・照射時間: ~1 h
- ・センサ配置:

D1設置位置

D2設置位置



D3設置位置

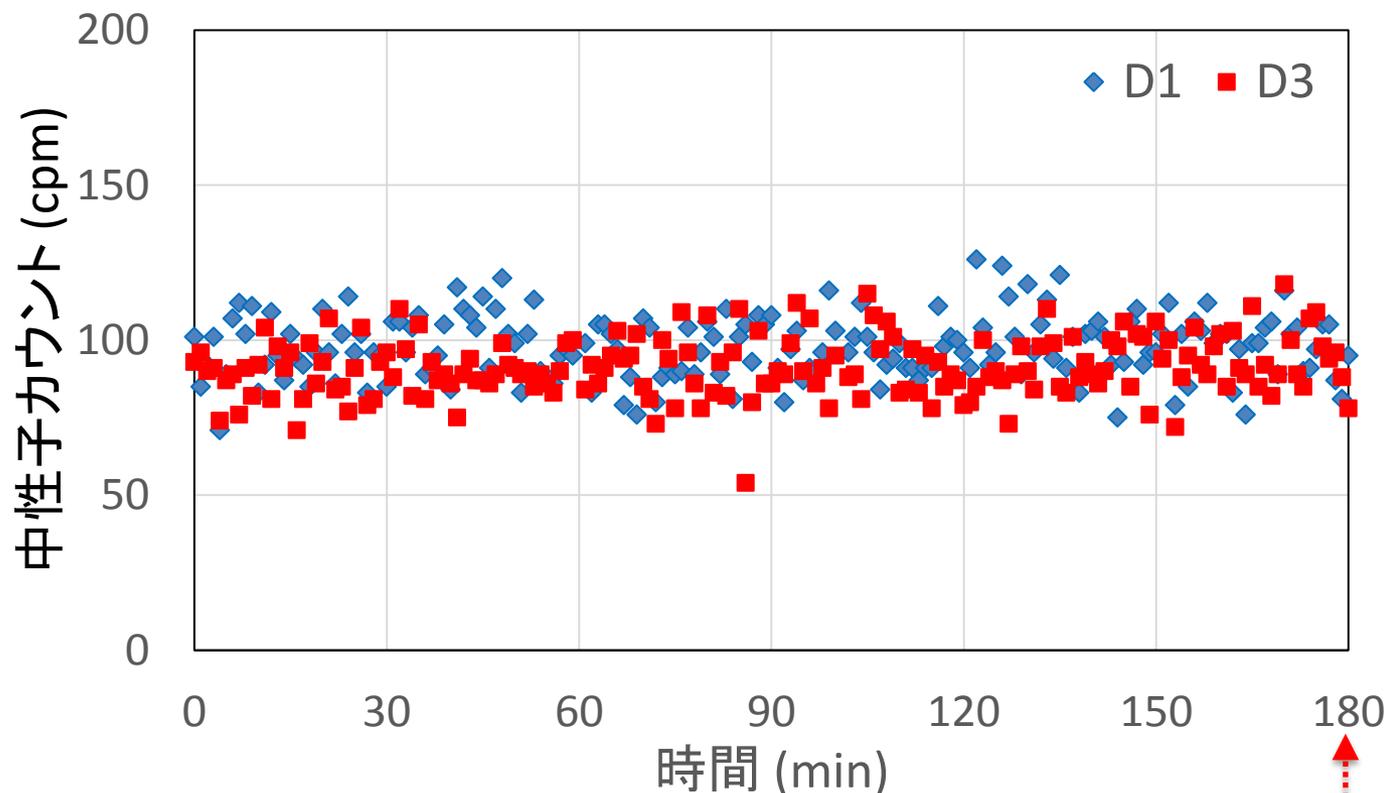
集積線量の増加に伴うベース信号上昇により、約500Gy以上で、中性子誤検知の影響が出ている可能性がある。【上図のうち赤点のケースが該当】

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

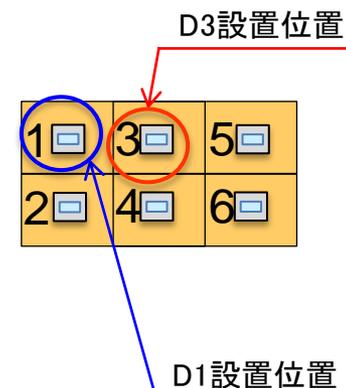
(5)中性子線耐性

■ 中性子単独照射



【試験条件】

- ・中性子束:
598 n/(cm²・s)
- ・ガンマ線線量率:
0 Gy/h
- ・照射時間: 3 h
- ・センサ配置



中性子束の累積値 6.5e+6 n/(cm²・s)・s

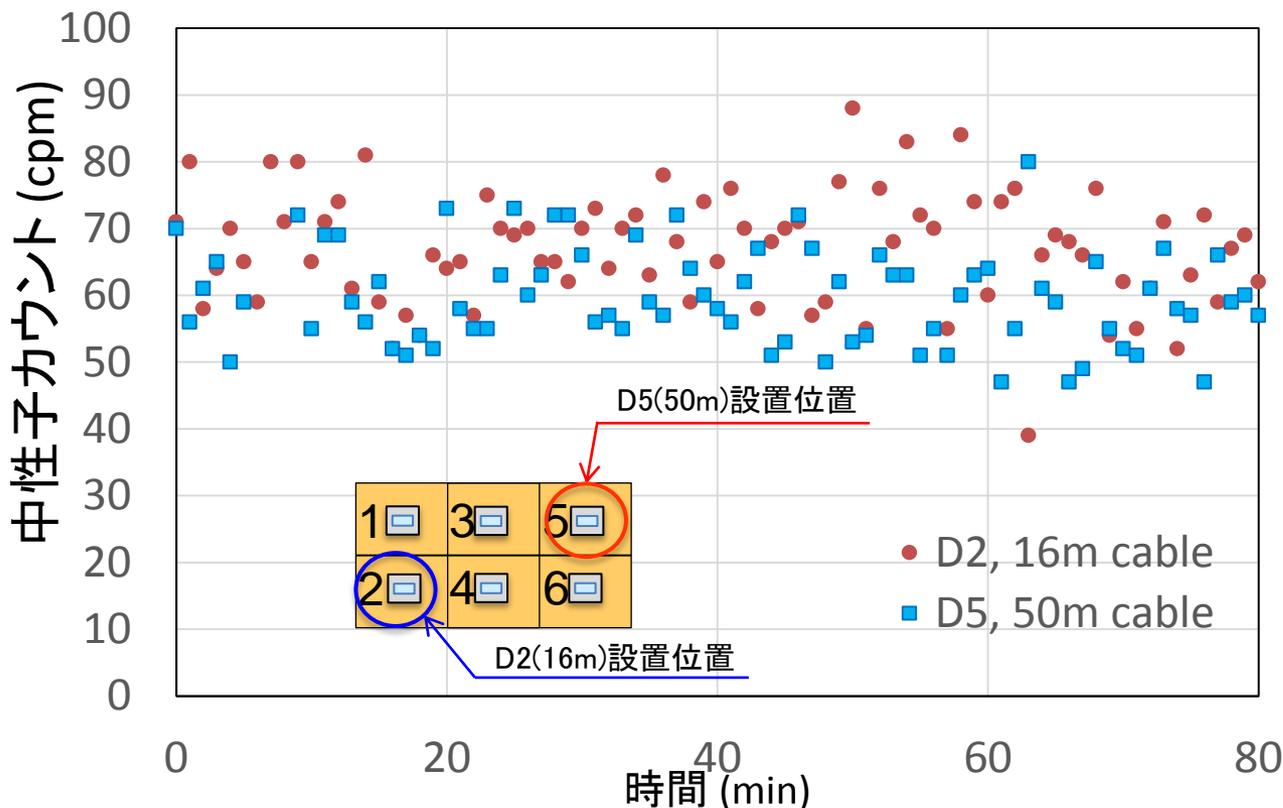
中性子の連続照射による中性子カウントの変化は確認できなかった。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

(6) ケーブル長の影響評価

■ 50mのケーブルを用いた試験(他の試験は16m)



【試験条件】

- 中性子束: 598 n/(cm²·s)
- ガンマ線線量率: 105 Gy/h
- 照射時間: 80min
- 50mの試験では、SN比が低下するためリピータを設置

【中性子カウント(cpm)の平均値】

- 16mケーブル: 67.0
- 50mケーブル: 57.7

50mケーブルによる中性子カウントは、16mケーブルとほぼ同等であり、伝送は可能であることを確認した。

3-3 要素試験による性能検証

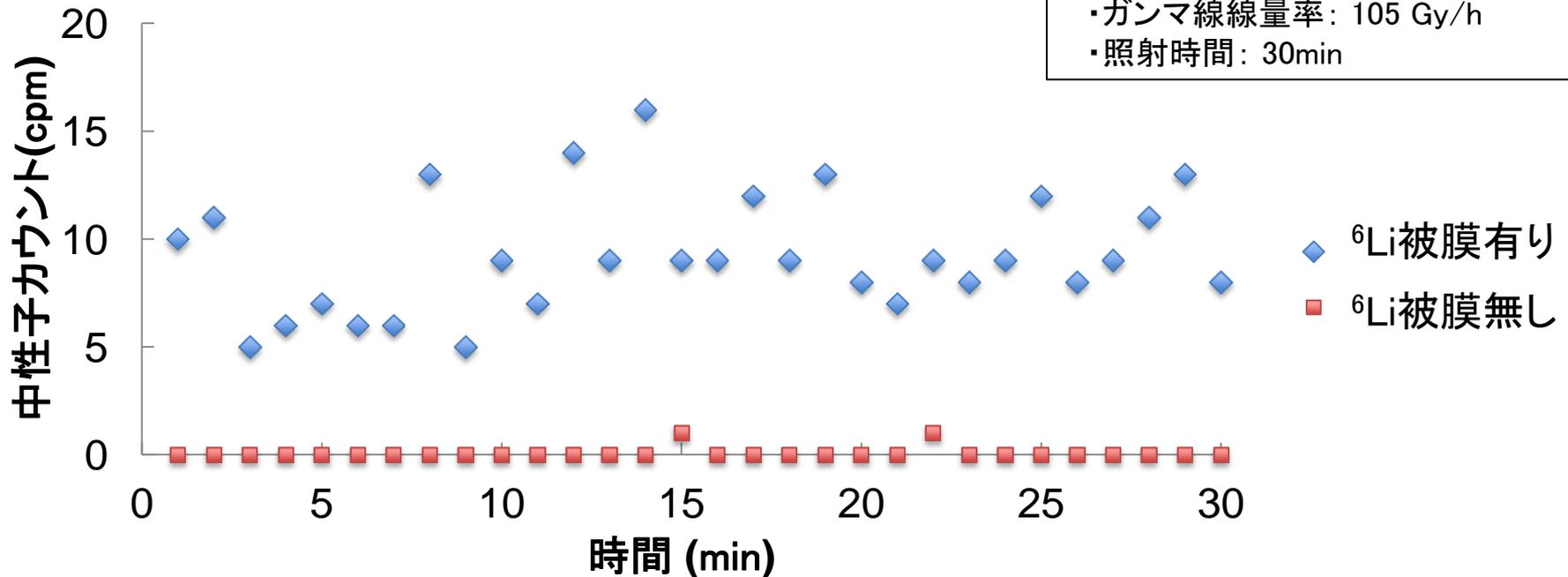
3-3-5 試験結果

(7) ^6Li の有無影響を評価

- 反応層があることで、中性子が検出できることが確認できた。また反応層が無い場合のカウントの頻度は、僅かであった。

【試験条件】

- ・中性子束: $106 \text{ n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$
- ・ガンマ線線量率: $105 \text{ Gy}/\text{h}$
- ・照射時間: 30min



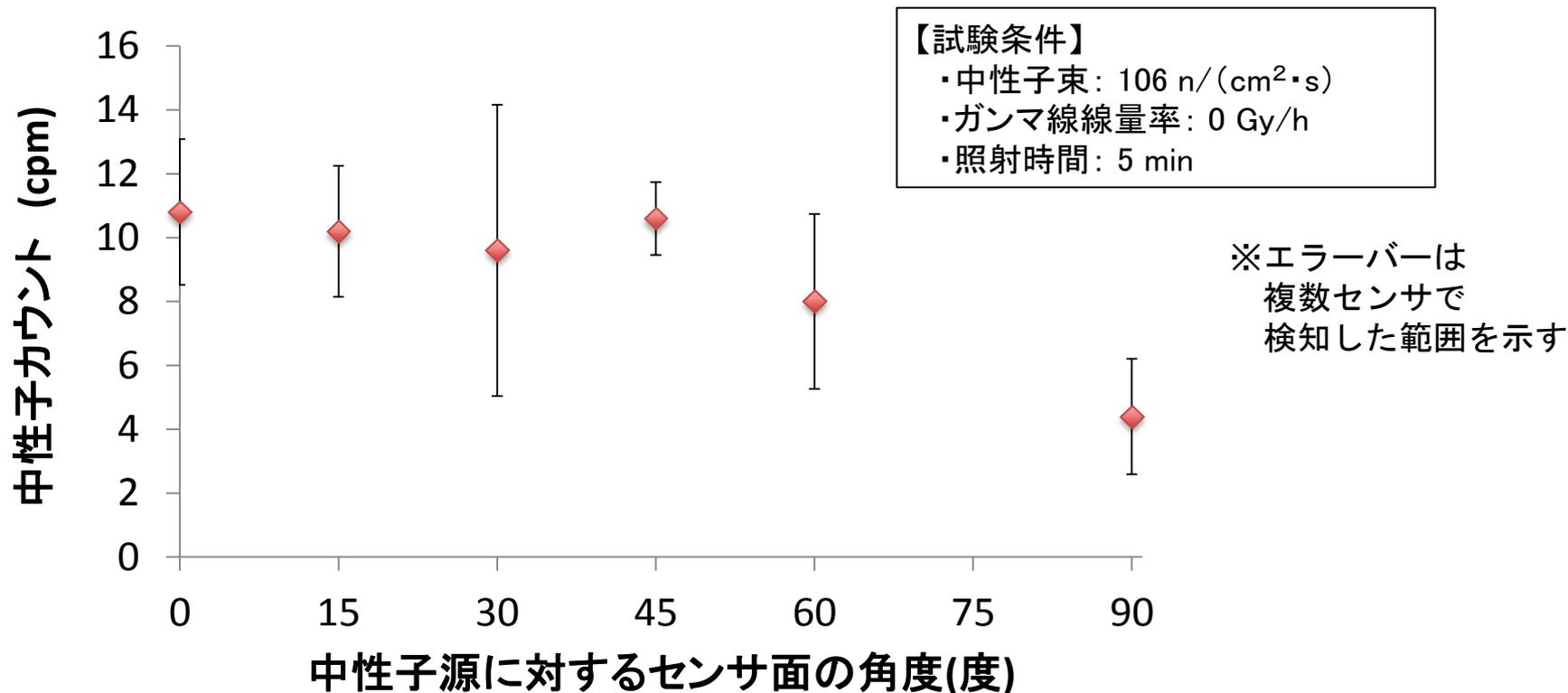
- ・ ^6Li 被膜の有無の結果を比較し、反応層があることで中性子を検出できることを確認
- ・ ^6Li 被膜無しの場合、30分の中性子照射でのカウントは、合計2回と僅かであった

3-3 要素試験による性能検証

3-3-5 試験結果

(8) センサ面の方向依存性評価

■ 中性子源に対するセンサ面の角度が出力値に与える影響を評価



センサ面の角度が45度までは大きな変化は無く、それ以上ではカウント数が低下した。

3-3 要素試験による性能検証

3-3-6 性能評価試験の結果まとめ

No	カテゴリ	内容	結果	
1	単一場での 基礎特性試験	ガンマ線に対する 応答特性	① ガンマ線・中性子線の複合場においても、中性子起因のアルファ線によるクラスタパターンを識別できることを確認 ② 中性子単一場において、中性子カウントから中性子束を求めることが可能なセンサであることを確認 (cps/(n/(cm ² ・s)))/素子≒3.4e-3) ③ ガンマ線・中性子線の複合場において、以下を確認 <ul style="list-style-type: none"> • 1素子では、1n/(cm²・s)～、～1000Gy/hにおいて、ガンマ線と弁別して中性子をカウント(測定場における中性子の有無の判定)ができるセンサであること • 集積線量が約500Gy以上で誤検知率が増加すること 	
2		中性子線に対する 応答特性		
3	ガンマ線と中性子線の複合照射環境下での検出性能	中性子とガンマ線を組み合わせた複数環境場での測定試験(校正試験含む)		
4	耐放射線性	ガンマ線に対する耐性		
5		中性子線に対する耐性		
6	長距離信号伝送	最大50mの伝送可否		50mケーブルによる中性子カウントは、16mケーブルとほぼ同等で、伝送可能であることを確認
7	反応層効果	反応層の有無による検出		反応層があることで、中性子が検出できることが確認できた また反応層が無い場合のカウントの頻度は、僅かであった
8	方向依存性	センサと中性子入射方向の依存性を評価		センサ面の角度が45度までは大きな変化は無く、それ以上では、カウント数の低下が認められた

3-4 試験結果によるニーズへの適用性評価

3-4-1 各ニーズの当初の性能目標に対する適用可能性

 : 未評価

目的		寸法、重量の制約	中性子束測定範囲 ※1時間以内に測定できること	ガンマ線最大線量率	ガンマ線最大集積線量
燃料由来のデブリの所在の特定・検知(PCV内部調査)	B2' 調査	【B2調査同型(X-100Bエントリ)】 < ϕ 20mm × 40mm	0.1 [*] ~ 1000 n/(cm ² ·s)	1000 Gy/h	1000 Gy
	詳細調査	【遊泳型ROV(X-2 ^o ネエントリ)】 < ϕ 80mm × 200mm、< 7kg			
		【アーム型(X-6 ^o ネエントリ)】 < ϕ 140mm × 700mm、< 10kg			
燃料由来のデブリ判定(燃料デブリ取出)		< ϕ 100mm × 400mm、 < 約30kg	0.1 [*] ~ 1000 n/(cm ² ·s)	1000 Gy/h	1M Gy 気中・水中
燃料・燃料由来のデブリの所在の特定・検知(RPV内部調査)		< ϕ 100mm × 400mm、 < 約30kg	0.1 [*] ~ 1000 n/(cm ² ·s)	5000 Gy/h	5M Gy 気中
再臨界になる可能性ある場所で監視	臨界近接	< ϕ 100mm × 200mm、 < 約60kg	0~1000n/(cm ² ·s)	1000 Gy/h	30M Gy (数年耐用)
	再臨界	< ϕ 100mm × 200mm、 < 約60kg	10 ³ ~10 ¹⁰ n/(cm ² ·s)	1000 Gy/h	—

・中性子束の測定下限は、実測から1素子あたり1n/(cm²·s)であるが、素子数を8倍にすれば目標を達成できると思われるため、PCV内部詳細調査への適用可能な見込を確認した。

3-4 試験結果によるニーズへの適用性評価

3-4-2 現地実証における要求仕様(1/2)

■ 技術要件の要求仕様への適用性評価

調査名 通称	調査装置 (エントリ位置)	センサ寸法、 重量の制約	中性子束 測定範囲	ガンマ線最大 線量率	ガンマ線最大 集積線量
PCV内部調査 (B2' 調査)	B2装置同型 (X-100B ^o ネエトリ)	<φ 20mm × 40mm ※重量制約無し	0.1 ~ 1000 n/(cm ² ・s)	1000Gy/h	1000Gy

【適用性評価】

CMOSセンサ数: 8※

(※)

- 検出下限目標である、 $0.1\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ の中性子線は、ガンマ線・中性子線の複合場では、評価できなかったが、中性子単一場では検知できた。
【 検知性能: $3.4\text{e}-3(\text{cps}/(\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})))$ 】
- 本結果から、信頼性を確保するには、10カウント必要であると仮定すると、8素子あれば、約1時間で、 $0.1\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ を検出可となる。ただし上記は、中性子単一場での評価であり、検出性能も含めて、次フェーズで再評価要。

3-4 試験結果によるニーズへの適用性評価

3-4-2 現地実証における要求仕様(2/2)

■ 技術要件に対する達成度

No.	技術要件		結果	達成度	関連 スライド
	項目	内容			
1	センサ 寸法	$< \phi 20\text{mm}$ $\times 40\text{mm}$	センサの最小単位 (CMOS素子1個)のサイズは $10\text{mm} \times 10\text{mm} \times 5\text{mm}$ 以下。	感度を確保するためには、最低8素子が必要。寸 法内に格納可能であることを確認。達成。	27
2	中性子束 測定範囲	$0.1 \sim 1000$ $\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$	$1\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ では1時間で10カウント以 上あり検出できることを確認 $0.1\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ では、1カウントのみで ありノイズとの弁別が不可。	1素子としての下限值は $1\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ であるが、 素子数(有感面積)を増やせば0.1を検出できる見 通しが得られた。一方、約 $600\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ の中性子 照射でも、複数カウントされることは少なかったため、 中性子のパイルアップは、少なくとも上限である $1000\text{n}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$ 程度で発生する可能性は低い。 以上より、達成。	16, 17, 18
3	最大 ガンマ 線量率	$1000\text{Gy}/\text{h}$	$\sim 1000\text{Gy}/\text{h}$ において、ガンマ線と 弁別して中性子をカウント(測定場 における中性子の有無の判定)が できることを確認。	左記の通り、要求仕様の範囲において、中性子束 を検出できることを確認。達成。	17, 18, 19
4	累積 ガンマ 線量	1000Gy	集積線量が約 500Gy 以上で誤検知 率が増加する傾向が見られたが、 中性子は検出できることを確認。	左記の通り、要求仕様の範囲において、中性子束 を検出できることを確認。達成。集積線量の増加 に対する誤検知率の抑制は今後の課題。	20

4. まとめ及び今後の計画

(1)目標に対する達成度

■目標に対し概ね達成

フェーズ1

小型中性子検出器の選定
机上検討

基礎特性試験

小型中性子検出器による
性能・検証試験

適用先の要求事項、調査装置
等とのインターフェイス要件の
明確化と概念設計

- 小型化センサー製作
- 高ガンマ線環境下低中性子束の検出性能
- 耐放射線性の検証

- 格納容器内部詳細調査(水中・気中)
- デブリサンプリング時の監視、臨界管理等

小型中性子検出器の
1Fへの適用性を評価

基礎特性試験結果に
基づき、適用先の要求
事項への適用性評価

フェーズ2

実機適用センサの開発

小型センサ素子の拡張性を活かし、適用先のサイズ要求に合わせてサイズや配置を最適化。実機適用に向けたセンサおよびシステムを開発する。

4. まとめ及び今後の計画

(2) 実施体制図

