

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2 最終報告会

2018年9月25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. 実施スケジュール

4. 実施体制図

5. 実施内容

- 5-1 小型中性検出器の1Fの適用性評価(フェーズ1)結果
- 5-2 センサ設計および製作(フェーズ2:トリアルステージ)
- 5-3 センサユニットの試作および評価(フェーズ2:プロトタイプステージ)
- 5-4 実機適用時の課題検討
- 5-5 目標に照らした達成度

6. まとめ

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RPVや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燃料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、アクチノイド(主にCm-244)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、燃料デブリ取り出し時の臨界管理、燃料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
燃料デブリの 所在の特定・検知 (PCV内部調査)	水中	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	<ul style="list-style-type: none"> ・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、集積線量に対する耐性 条件は比較的高くない
	気中		
再臨界になる 可能性がある 場所での監視	臨界検知	燃料デブリ取り出し時、長期間にわたっ て、燃料デブリの状態を監視	<ul style="list-style-type: none"> ・高ガンマ線環境かつ、集積線 量の高い耐性が必要
	再臨界	堆積物除去の際の、燃料デブリの状態 を監視	<ul style="list-style-type: none"> ・高ガンマ線環境での高中性子 束検出が必要
燃料デブリ取り出し・サンプリ ング作業中の監視		取り出し・サンプリング作業中の臨界状 態を監視	<ul style="list-style-type: none"> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・高ガンマ線環境かつ、集積線 量の高い耐性が必要

1. 研究の背景・目的

1-3 研究の目標

【目標1】フェーズ1の知見に基づき、要求仕様(スライド⑪)に適合した、汎用のセンサシステムを完成させる。

⇒《フェーズ2 実施項目1》

(1) センサ設計および製作(トライアルステージ)

(2) センサユニット試作および評価(プロトタイプステージ)

【目標2】PCV内部詳細調査への適用を想定※し、実機に適用する際に検討が必要となる事項を評価し、問題なく適用できることを確認する。

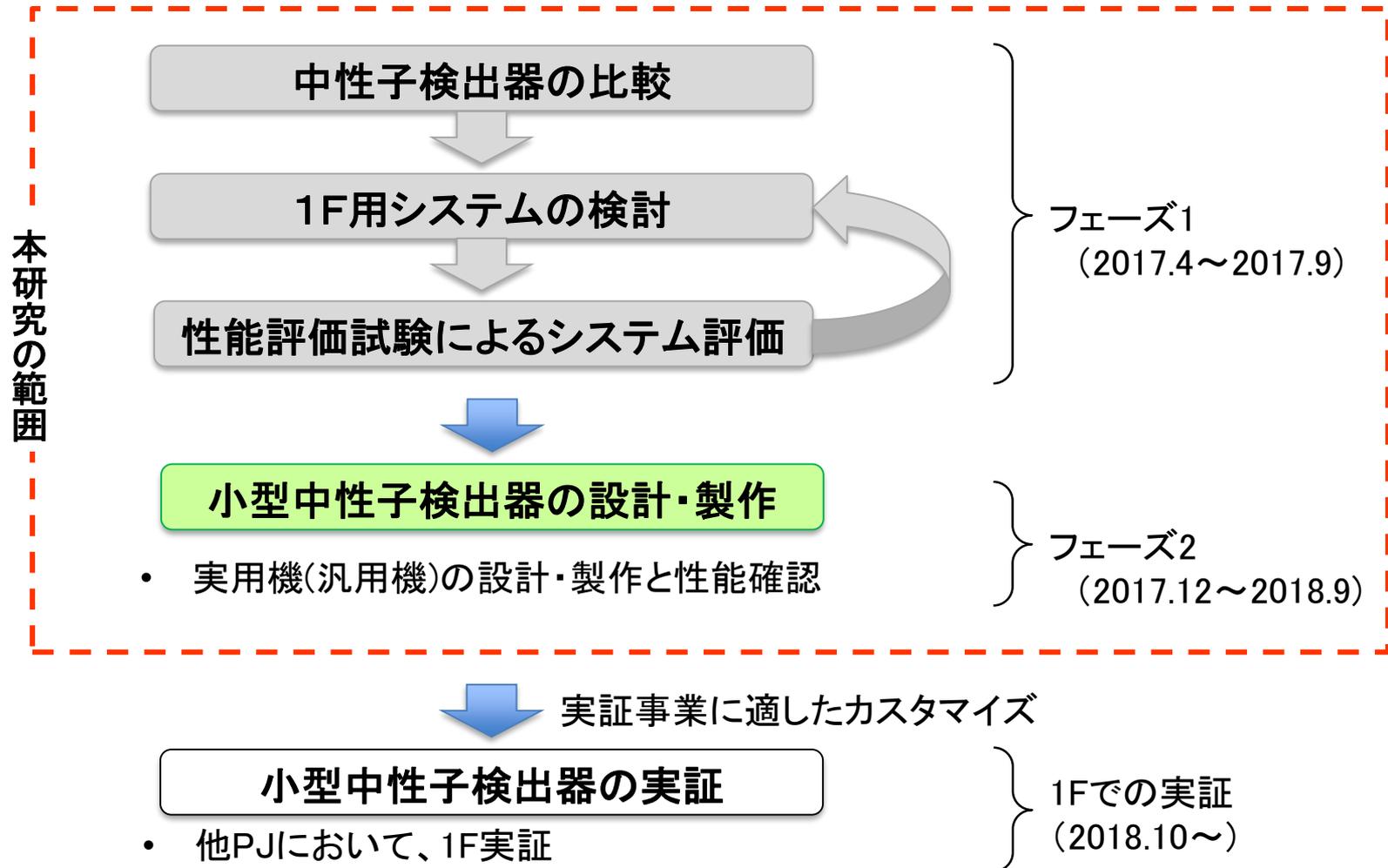
⇒《フェーズ2 実施項目2》

実機適用時の課題検討

※PCV内部詳細調査の調査装置計測ユニットの情報は事務局を介してより入手。

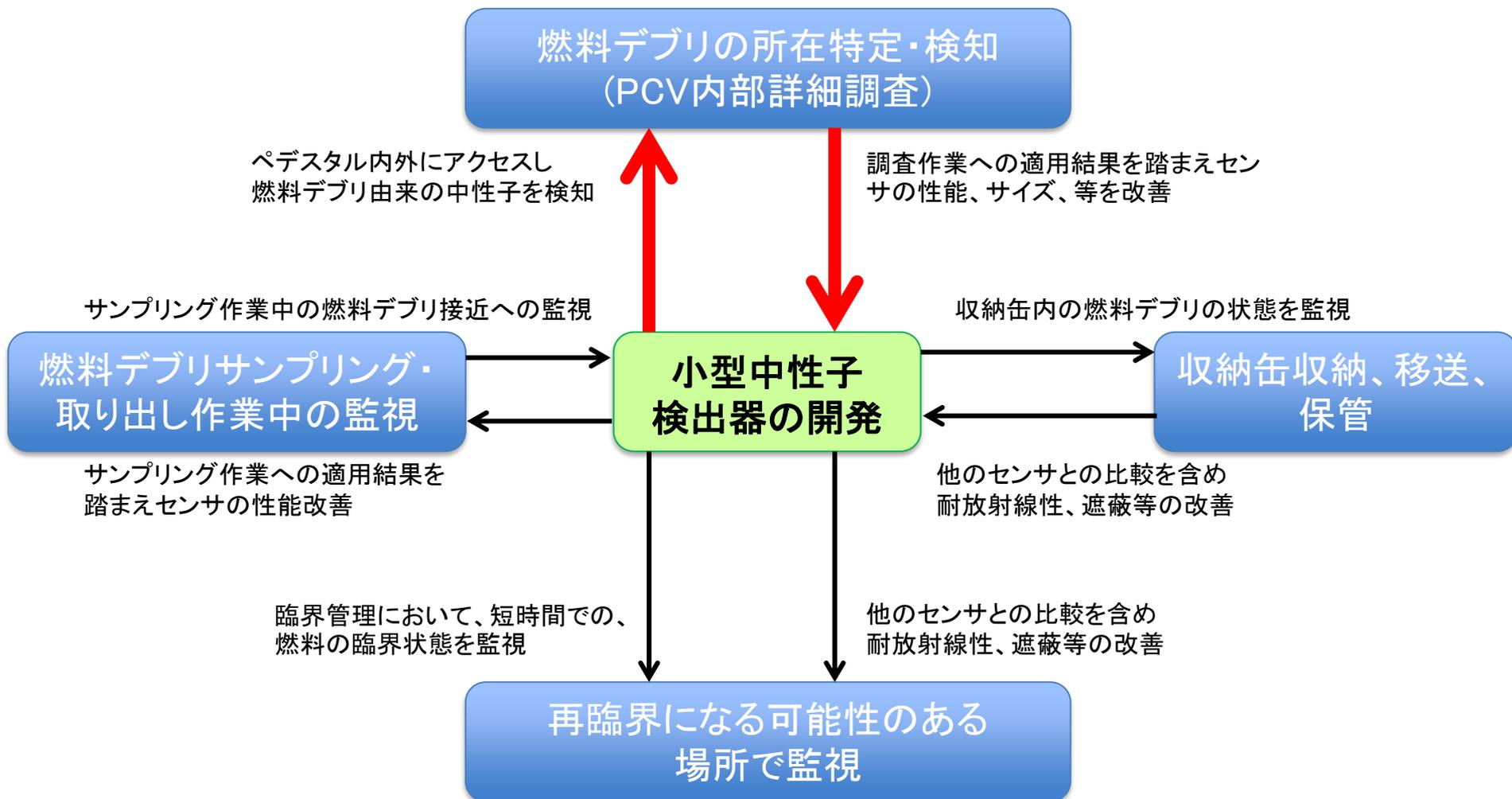
2. 実施項目とその関連、他研究との関連

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

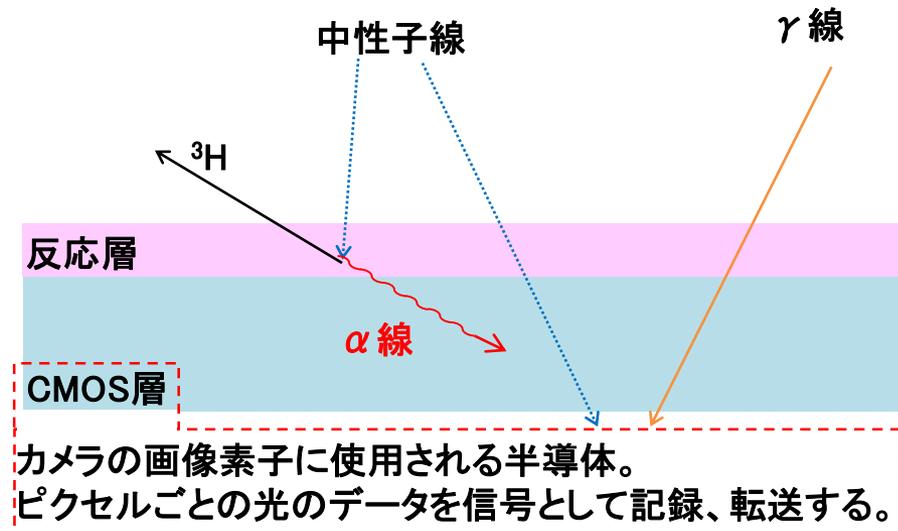
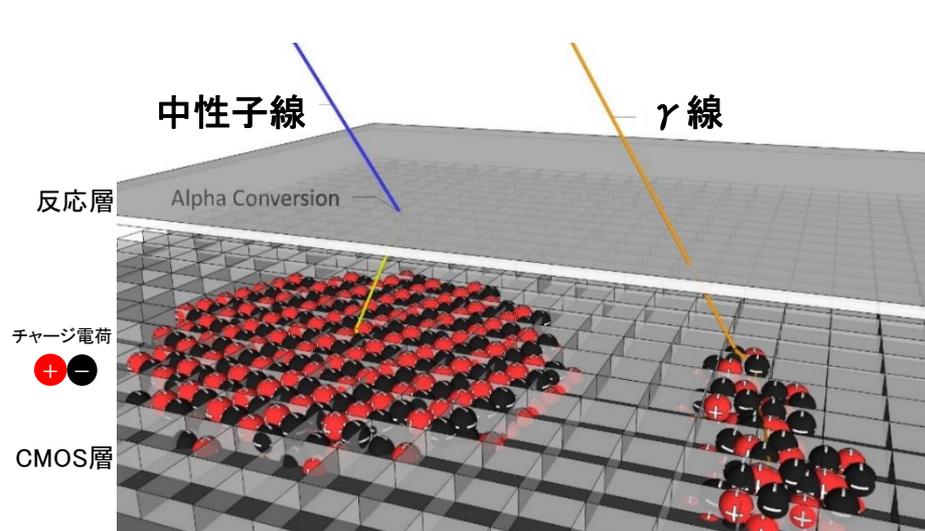


5. 実施内容

5-1 小型中性検出器の1Fの適用性評価(フェーズ1)結果

5-1-1 CMOS型中性子検出器の測定原理

中性子線の一部が反応層で核反応により α 線と ${}^3\text{H}$ になる

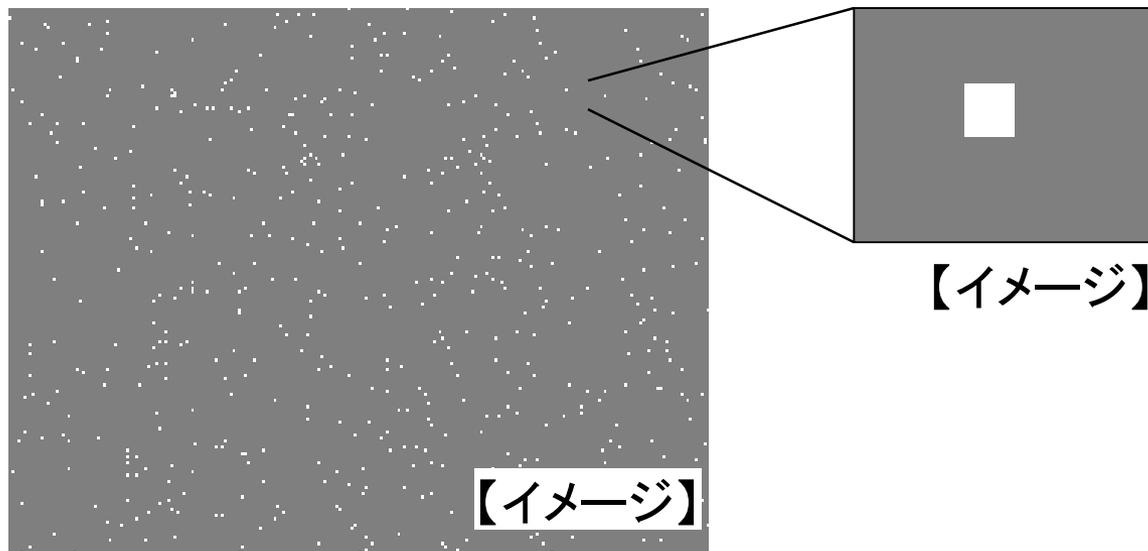


- 中性子との相互作用により生じた重荷電粒子により、CMOSピクセル上に明るいクラスタパターンを生成。
- ガンマ線の場合、相互作用により生じた電子により、CMOSピクセル上に中性子と比較して小さなパターンを生成。

5-1 小型中性検出器の1Fの適用性評価(フェーズ1)結果

5-1-2 CMOS型中性子検出器による中性子の測定例

- ライブラリパターンとの一致による判別により、中性子/ガンマ線の弁別性が高い



グレースケール(黒0~255白)の最高値(255)のクラスタ数を計測
→ガンマ線量率環境でも、中性子を検出可能。

小型化の開発が見込めるCMOS型中性子検出器を用いて、汎用ユニットの試作器を製作し、性能を評価した。

5-2 センサ設計および製作 (トライアルステージ)

5-2-1 フェーズ2の要求仕様

項目	条件	仕様
中性子 検出 性能	中性子 検出感度	計測時間1時間で、燃料デブリから発生した中性子と有意に判別できる計数を、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ の中性子束に対して得られること。
	中性子-ガンマ線 弁別性能	上記の感度を線量率 $1000Gy/h$ のガンマ線場の中で達成できること。
	中性子束の 計測範囲	$0.1n/(cm^2 \cdot s)$ 以上、 $1,000n/(cm^2 \cdot s)$ 以下の中性子束を計測できること。
環境 適応性	耐放射線性	累積線量 $1000Gy$ までは、上記中性子検出感度及び弁別性能が保たれること。
	耐熱性	温度 $40^{\circ}C$ の環境下で正常に動作し性能が保たれること。
	その他	水中でも正常に動作し性能が保たれること。
サイズ	寸法	直径 $20mm$ 、高さ $40mm$ の円筒に収まること。
電源、 ケーブル 等	信号ケーブル	検出器から信号を取り出すために直径 $3mm$ 以下、長さ $60m$ 以上のケーブルを用いても、検出性能の仕様を満たすこと。また、ケーブルは目的の測定場所に送り込むのに十分な柔軟性を有すること。
	電源	格納容器外から電源を安定して供給できること。または、電池等の電源も含めてサイズ条件を満たすこと。
信号 処理系	位置	信号処理装置は格納容器外で人がアクセスできる場所に配置できること。
	速度	中性子を検出したことを遅滞無く示せること。
	操作	特別に長期間の訓練等を行わずに中性子束を測定することができること。

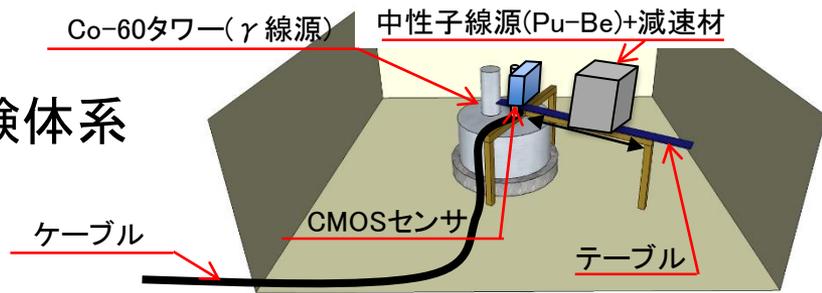
5-2 センサ設計および製作(トライアルステージ)

5-2-2 技術的課題に対する要素試験の内容

■ センサユニットの設計に反映することを目的に実施

	カテゴリ	内容
(1)	CMOSセンサのばらつき	複数個のCMOSセンサに中性子線を同一条件にて照射し、出力のばらつきを評価
(2)	CMOSセンサの積層効果	CMOSセンサを複数枚重ねて検出効率を評価
(3)	ケーブル選定	同じ試験体系で2種のケーブルそれぞれを接続して照射し、比較選定
(4)	耐高温特性	CMOSセンサを直接加熱し(40°C)、検出性を確認
(5)	検出下限値(0.1n/(cm ² ・s))	低い中性子束の線源を用いて検出下限を評価

要素試験の試験体系



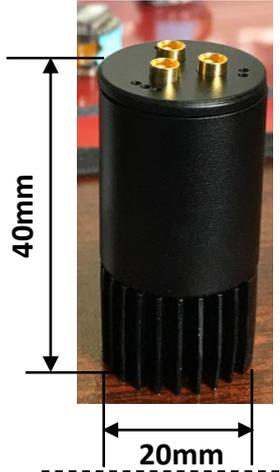
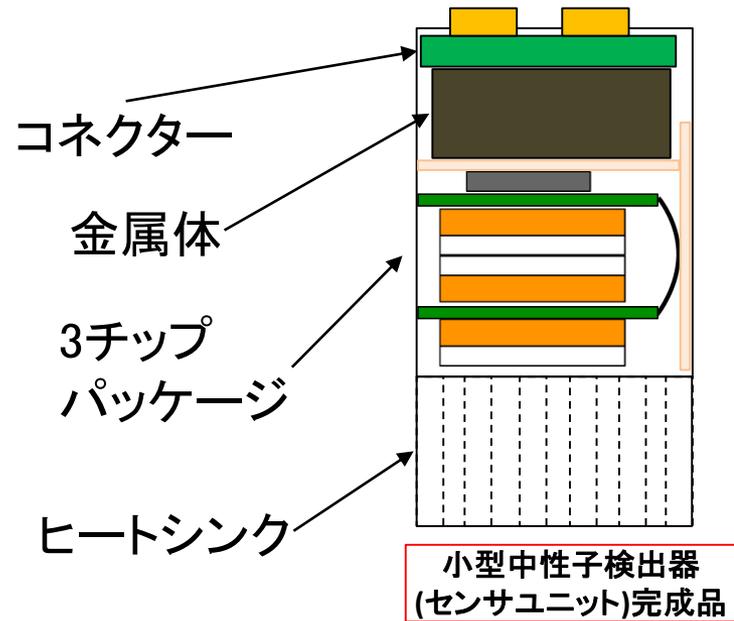
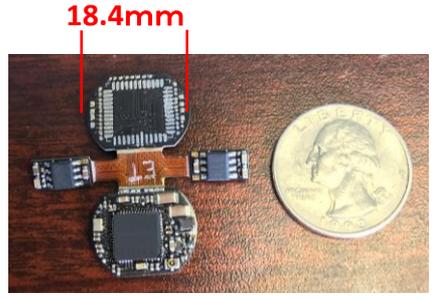
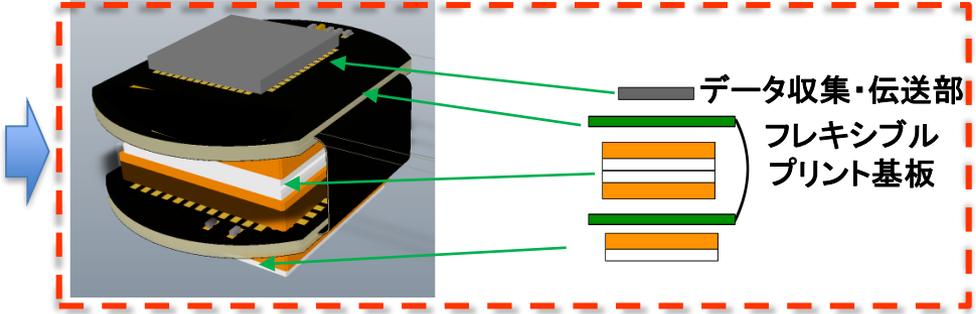
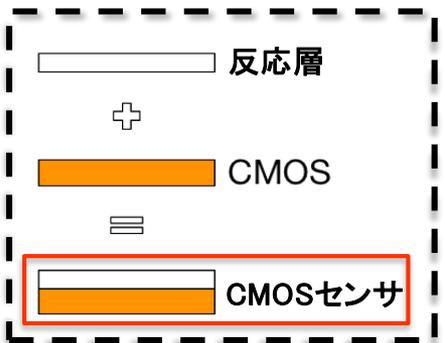
5-2 センサ設計および製作(トライアルステージ)

5-2-3 試験結果とプロトタイプ設計への反映

	カテゴリ	試験結果	プロトタイプ設計への反映
(1)	CMOSセンサのばらつき	±10%以内 (統計的なばらつき程度)	• 同一ロット内では、無作為抽出可能
(2)	CMOSセンサの積層効果	9センサで1センサと比較し 4.7倍の感度	• 9枚のCMOSセンサを積層構造とする ※スライド⑯の検討結果、3枚に変更
(3)	ケーブル選定	ケーブル延長は必要となるが、 直径が許容範囲内である 同軸ケーブルを選定	• ケーブル延長のための増幅器・中継器等の仕様検討
(4)	耐高温特性	中性子検出は可能 但し、CMOS自体の発熱による 周辺の昇温がある。	• プロトタイプで再評価 (ケース内発熱の可能性があるため)
(5)	検出下限値 ($0.1\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$)	複数センサ構造において $0.1\text{n}/(\text{cm}^2\cdot\text{s})$ を検知可能な 見込み	• 解析による確認が可能のため最終的な構造で下限値を評価

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-1 センサユニットの構造

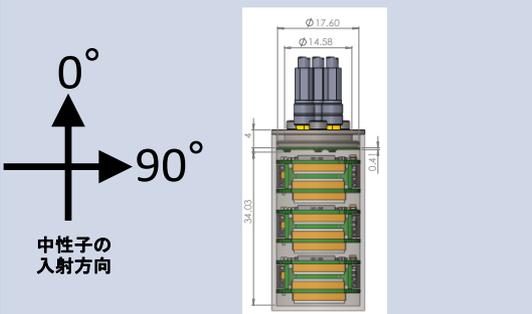
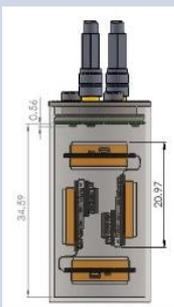
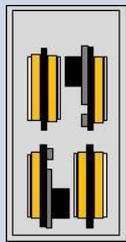


要求仕様
サイズ: φ 20mm × 40mm
ケーブル径: 3mm以下、ケーブル長: 60m以上
を全て満足

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-2 (参考)センサユニットの構造検討(1/2)

※ MCNP: Monte Carlo N-Particleのシミュレーション

構造候補	1) 1×9配置	2) 立方配置	3) 3×2配置
構造制限 (φ 20mm × 40mm)	 <p>0° 90° 中性子の入射方向</p>		
中性子検知 感度 (MCNP※による評価)	a) 中性子入射方向 0° の感度		
	最大	中程度	最小
	b) 中性子入射方向 90° の感度		
	最小	中程度	最大
	c) 散乱場(水中)の場合の感度		
	最大	中程度	中程度
選定	○	×	×
備考	<ul style="list-style-type: none"> 0° は床面に堆積した燃料デブリの方向を想定する。 燃料デブリに向かう方向を想定した場合に、1)1×9配置が最大感度を持ち得る。 		

→1)をメインコンセプトとして選定し、周辺機器(データ伝送等)設計

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

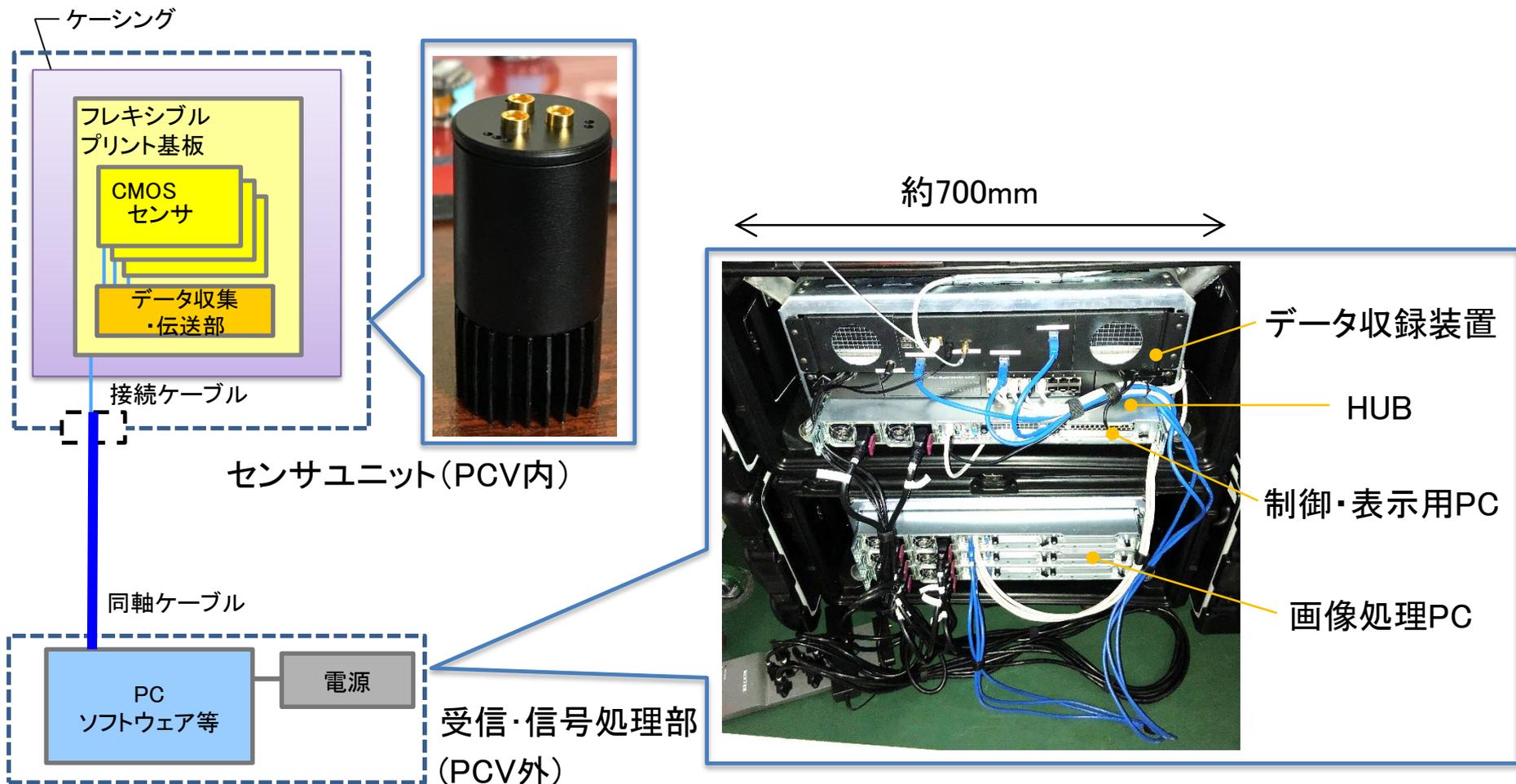
5-3-2 (参考)センサユニットの構造検討(2/2)

	要求仕様	案0	案1	案2	案3	案4	案5	案6	案7	
検討実施項目		当初案	初期案の一つ。	素子数、ケーブル芯線を減らし、細線化を検討。	ケーブル長/径を満足する別の伝送形式を検討。		アンプ内蔵によるデータ伝送距離の延伸を検討。		センサ数を減らし、ケーブル長/径を満足する方法を検討	
検討項目	素子数	9	9	6	9	9	9	6	3	
	伝送	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル+光	デジタル	デジタル	デジタル	
	データ収集	3センサ毎	3センサ毎	3センサ毎	9センサ毎	3センサ毎	3センサ毎	3センサ毎	3センサ毎	
	ケーブル※	同軸B × 3	同軸A × 3	同軸B × 2	同軸A × 1	光ファイバ+電源同軸B	同軸B × 3	同軸B × 2	同軸A × 1	
	電源供給	同軸に含む	同軸に含む	同軸に含む	同軸に含む	同軸B	同軸に含む	同軸に含む	同軸に含む	
	内部装置	設計のみ	-	-	-	伝送基板の新設計	光伝送変換+光源	ユニット内にアンプ	ユニット内にアンプ	-
	外部装置		中継器	-	中継器	-	-	-	-	-
要求仕様との比較	サイズ	Φ20mm × 40mm	Φ20mm × 40mm	Φ20mm × 40mm	Φ20mm × 40mm	Φ40mm × 40mmより大	Φ40mm × 40mmより大	Φ20mm × 46mm	Φ20mm × 40mm	Φ20mm × 40mm
	ケーブル長	60m	30m (→60m)	60m	30m (→60m)	60m	60m	45m	45m	60m
	ケーブル径	<3.0mm	3.3mm (>3.0mm)	6.2mm	3.1mm (>3.0mm)	2.8mm	< 3.0mm	3.3mm (>3.0mm)	3.1mm (>3.0mm)	2.8mm
	感度	0.1~1000nvで検知可能	5.8cph @0.1nv	5.8cph @0.1nv	4.6cph @0.1nv	5.8cph @0.1nv	5.8cph @0.1nv	5.8cph @0.1nv	4.6cph @0.1nv	2.8cph @0.1nv
評価結果		ケーブル長のみ未達。なお実運用を考慮すると、搭載ロボットに中継器は設置可能とは判断される。	ケーブル径のみ未達	ケーブル長/径が未達		センササイズが未達	ケーブル長/径、サイズが未達	ケーブル長/径が未達	すべての仕様を満足	

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-3 中性子検出システムの検討(1/5)

■ CMOSセンサ...3枚、積層



5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-3 中性子検出システムの検討(2/5)

■ ユーザーインターフェース



記録開始、停止、イニシャライズ

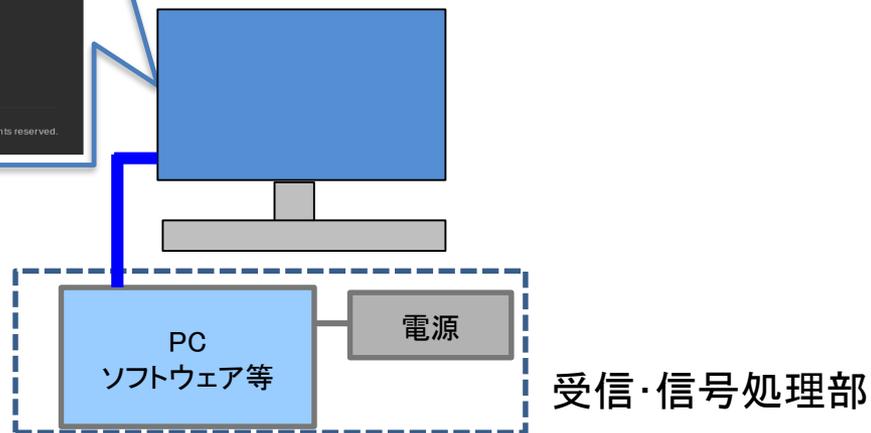
各チップの運転状況(検出中、停止中等)

各センサの中性子検出位置
総カウント数、トータルcps

cps: カウントレートの時間変化

記録情報

- ・中性子検出時間、位置、個数のCSVファイル
- ・各フレームの画像ファイル

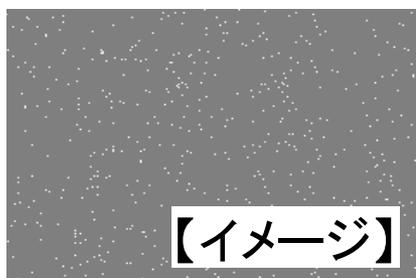


5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-3 中性子検出システムの検討(3/5)

■ 検出アルゴリズムの開発経緯(1/3)

STEP 1 : ピクセルイメージデータ測定
(今回仕様:36万ピクセル、60fps)



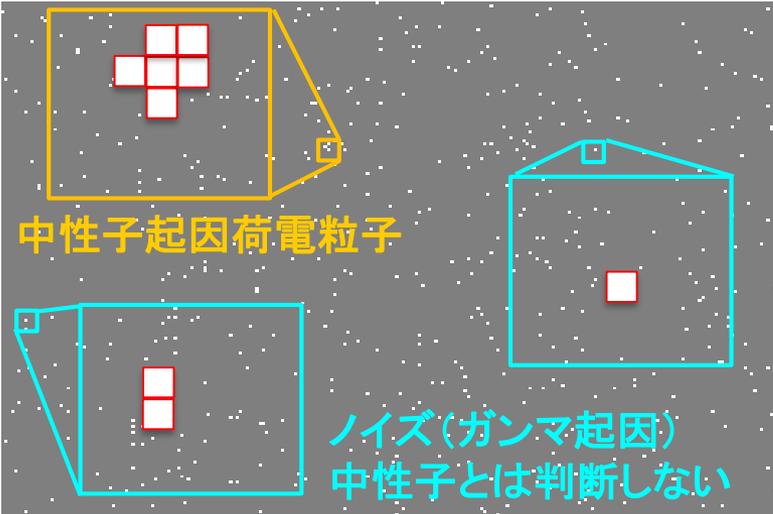
【イメージ】

入力データ(デジタル):

- 座標
- 時刻(1/60秒間の総数)
- 強度(8bitグレースケール(0-255))



STEP 2 : 粒子パターン認識アルゴリズムによる中性子信号の自動識別



STEP 4 : 中性子束変換($n/(cm^2 \cdot s)$)

予め校正場で取得した $n/(cm^2 \cdot s)/cps$ を乗じて中性子束に変換

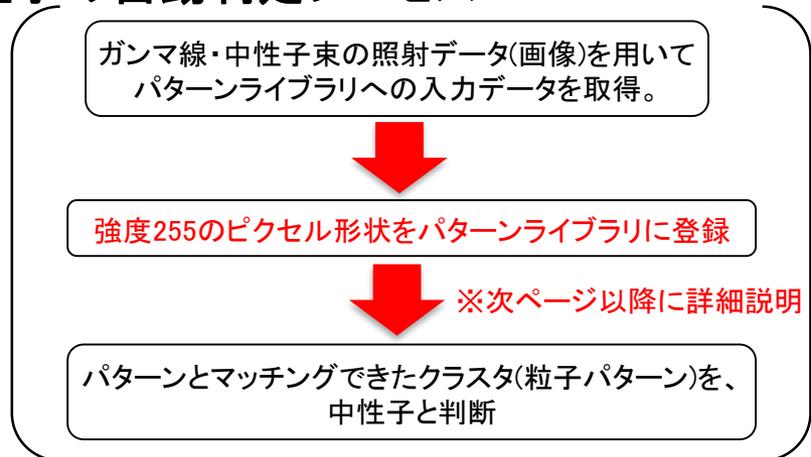


STEP 3 : 中性子カウント出力(cps)

一定時間計測、中性子カウントを算出(60フレームが1秒分に相当)



中性子の自動判定プロセス

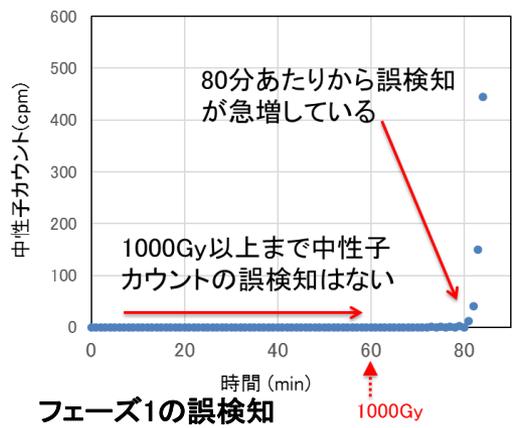
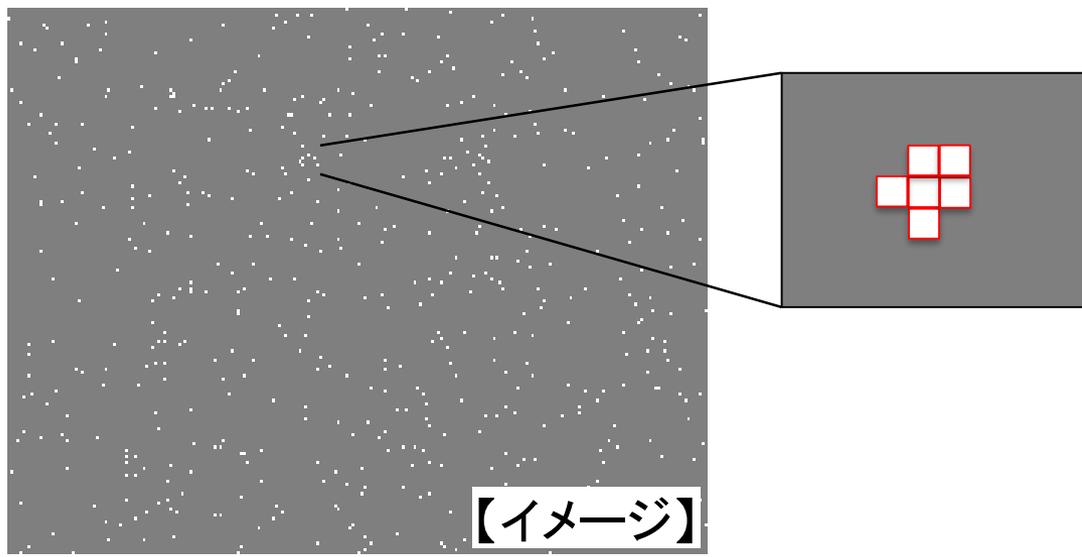


5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-3 中性子検出システムの検討(4/5)

■ 検出アルゴリズムの開発経緯(2/3)- アルゴリズムA(フェーズ1~フェーズ2(2018年5月))

・強度255(完全な白)が、4ピクセル(2×2)以上固まって表出された時に、中性子と判断



課題: 1000Gy以上の高ガンマ蓄積時に、全体がホワイトアウトし誤検知が増加(フェーズ1)
⇒ 全体の強度に応じた、検知サイズの閾値を設定(次ページのアルゴリズムB)

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

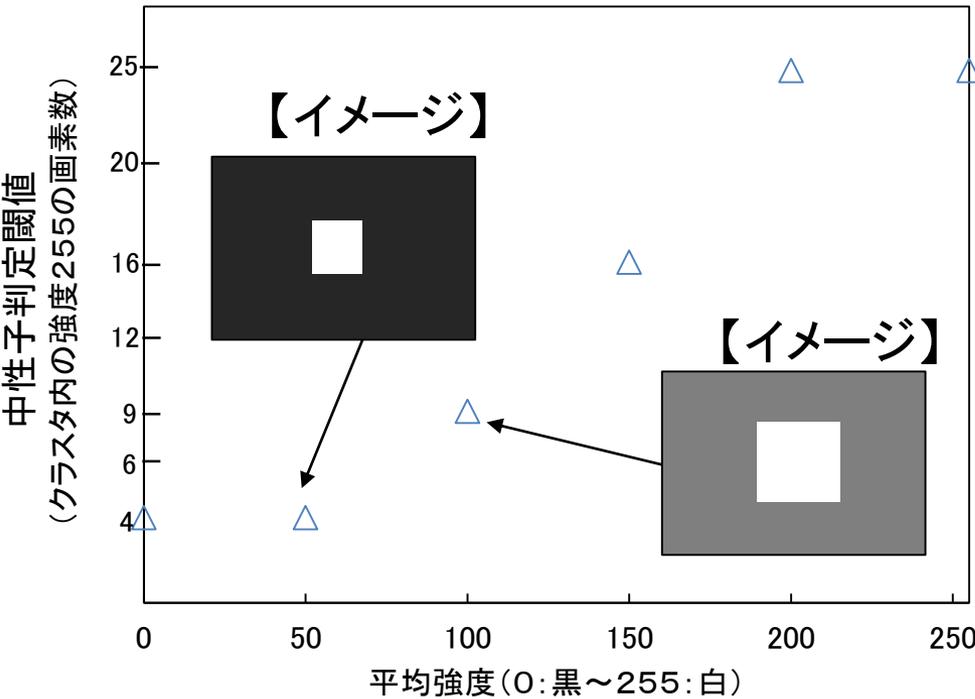
5-3-3 中性子検出システムの検討(5/5)

■ 検出アルゴリズムの開発経緯(3/3)- アルゴリズムB(プロトタイプステージUMD試験8/9迄) アルゴリズムC(プロトタイプステージUMD試験8/10以降)

例)強度が高くなる(高ガンマ蓄積・高温環境の継続環境等)場合の中性子検出

アルゴリズムB:
検出したクラスタの周りの平均の白さに応じて閾値を変更
例(4(2x2)→9(3x3)→16(4x4)→25(5x5))

アルゴリズムC (アルゴリズムBに以下を追加):
弁別性を向上するためにリアルタイム処理時間内で、
パターンマッチング回数を増加させた



高ガンマBGにおける誤検知の改善

中性子なし、1028Gy/hの試験にて数カウント検知

小型中性子検出器
→燃料デブリ由来の中性子の有無を検知することが必要

↓

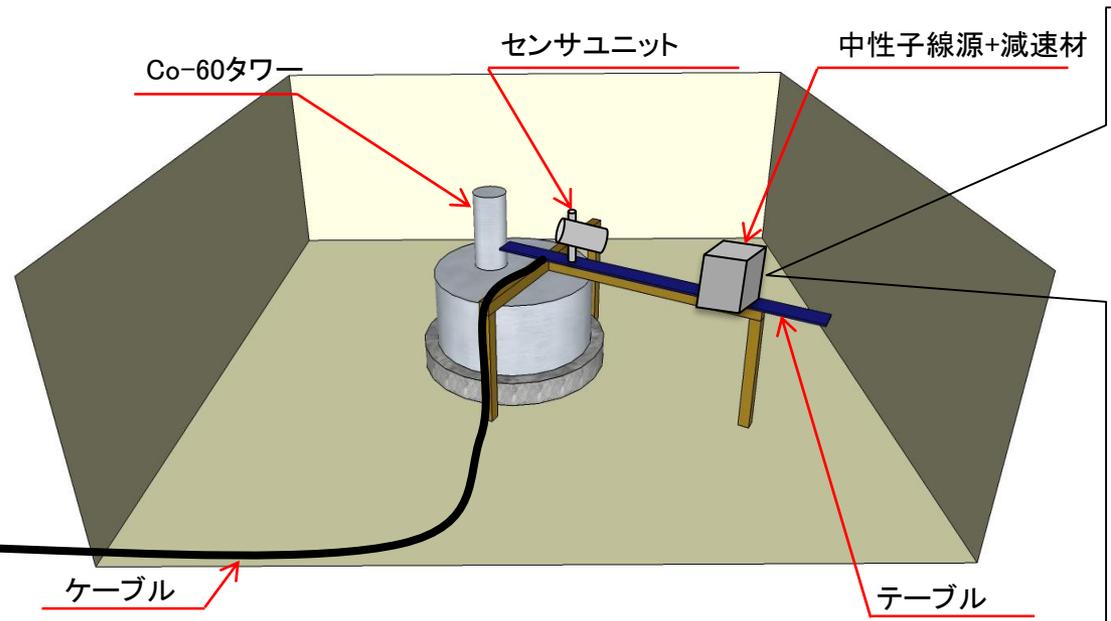
ガンマ線による誤検知は極力減らすべき
よって、アルゴリズムCの適用が現状最善と判断される

※強度(CMOS画像の白さの平均値):集積600~800Gy(1028Gy/h, 40~50分)で100~150程度、1000Gy以上で150以上程度

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-4 評価試験内容(1/2)

■ UMD(※)試験体系



【中性子線源】

- Pu/Be (高強度) 又は Cf-252 (低強度)。
- 減速材(HDPEブロック)を配置
※減速材厚みは約50mm

中性子線源と減速材の配置

中性子線源、ガンマ線源からの距離を調整することで、それぞれの強度を目的の値に調整

(※)UMD:メリーランド大学

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-4 評価試験内容(2/2)

■ 評価試験項目

試験No	カテゴリ	項目	確認事項(要求仕様)	試験条件(赤字は日立での追試験)				
				中性子 (n/cm ² ·s)	γ線量率 (Gy/h)	γ線集積線量 (Gy)	温度 (°C)	他の条件 (-)
①	中性子検出性能	中性子検出感度	0.1n/(cm ² ·s)の中性子を1時間以内に検知可	0.1 0(100分) 0(50時間)	0	0	20	—
②		中性子-ガンマ線弁別性能	1000Gy/hのガンマ線環境下で上記を達成可	0.1	1028	1028	20	—
③		中性子束の計測範囲	中性子束の計測範囲を確認(ガンマ線量率をパラメータとして実施)	0~737	0~1028	—	20	—
④	環境適用性	耐放射線性	ガンマ線の集積線量に対する検出性	737	1028	0~1542	20	—
⑤		耐熱性	雰囲気温度40°Cでのセンサ健全性	737	0	0	20~40 23~60	—
⑥		水密性	水没後のセンサ健全性	0	0	0	20	通電確認 検出可否
⑦	複合・他	耐放射線・耐熱	複合過酷環境下での健全性	737	1028	—	40	—
⑧	他	角度依存性	中性子入射角度の検出性への影響	100/0	0/1028	—	20	0~180°

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

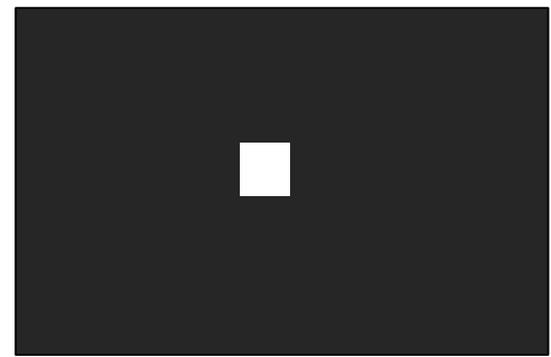
5-3-5 評価試験結果 (1/12)

■ ①中性子検出感度

UMDでの試験

	中性子束(n/(cm ² ・s))		
	BG	0.1	
	100 分	60 分	120分
1回目	0 カウント	2 カウント	6 カウント
2回目			5 カウント
3回目			3 カウント
平均		2.3cph (解析では2.8)	

- 【試験条件】
- ・中性子束: BG、0.1 n/(cm²・s)
 - ・ガンマ線線量率: BG
 - ・照射時間: 60、100、120分
 - ・雰囲気温度: 20°C
 - ・アルゴリズムBにて判定



【イメージ】

日立での試験

中性子線源、ガンマ線の無い状況で50時間カウント無し

0.1n/(cm²・s)単独場において、中性子を検出できる見通しを得た。

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (2/12)

②中性子-ガンマ線弁別性能

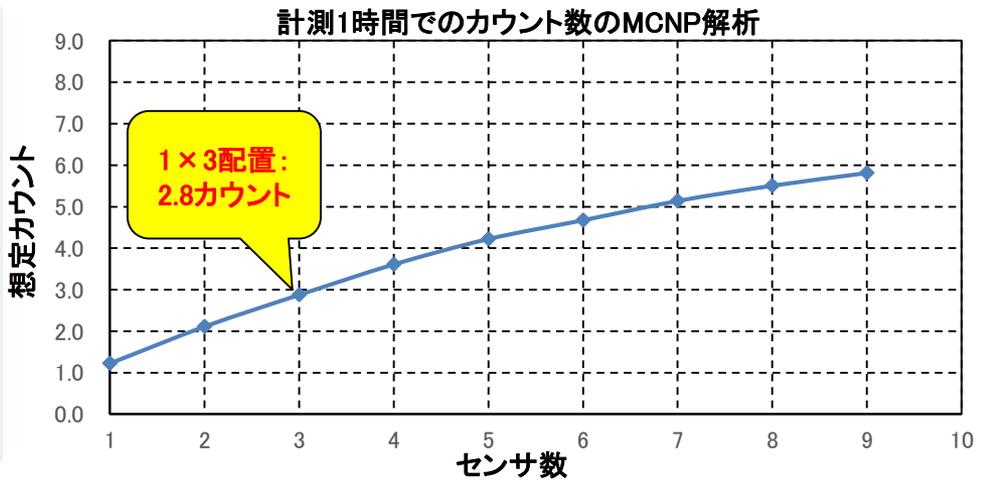
		中性子束($n/(cm^2 \cdot s)$)			
		BG		0.1	
ガンマ線 量率 1028 (Gy/h)	1回目	60分	0カウント	60分	4カウント
	2回目	60分	1カウント		
	3回目	60分	4カウント		

【試験条件】

- ・中性子束: BG、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$
- ・ガンマ線線量率: 1028 Gy/h
- ・照射時間: 60分
- ・雰囲気温度: 20°C
- ・アルゴリズムBにて判定

・解析上、1時間の計測で67%の確率で1.1～4.5カウント(平均2.8カウント)が出力される

・ガンマ線(1028Gy/h)環境下では、中性子 $0.1(n/(cm^2 \cdot s))$ とBGを明確に弁別することができなかった。



5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (3/12)

■ (参考)②中性子-ガンマ線弁別性能

		中性子束($n/(cm^2 \cdot s)$)			
		BG		0.1	
ガンマ線量率 1028 (Gy/h)	1回目	60分	0カウント	60分	1カウント
	2回目	60分	0カウント		
	3回目	60分	0カウント		

【試験条件】

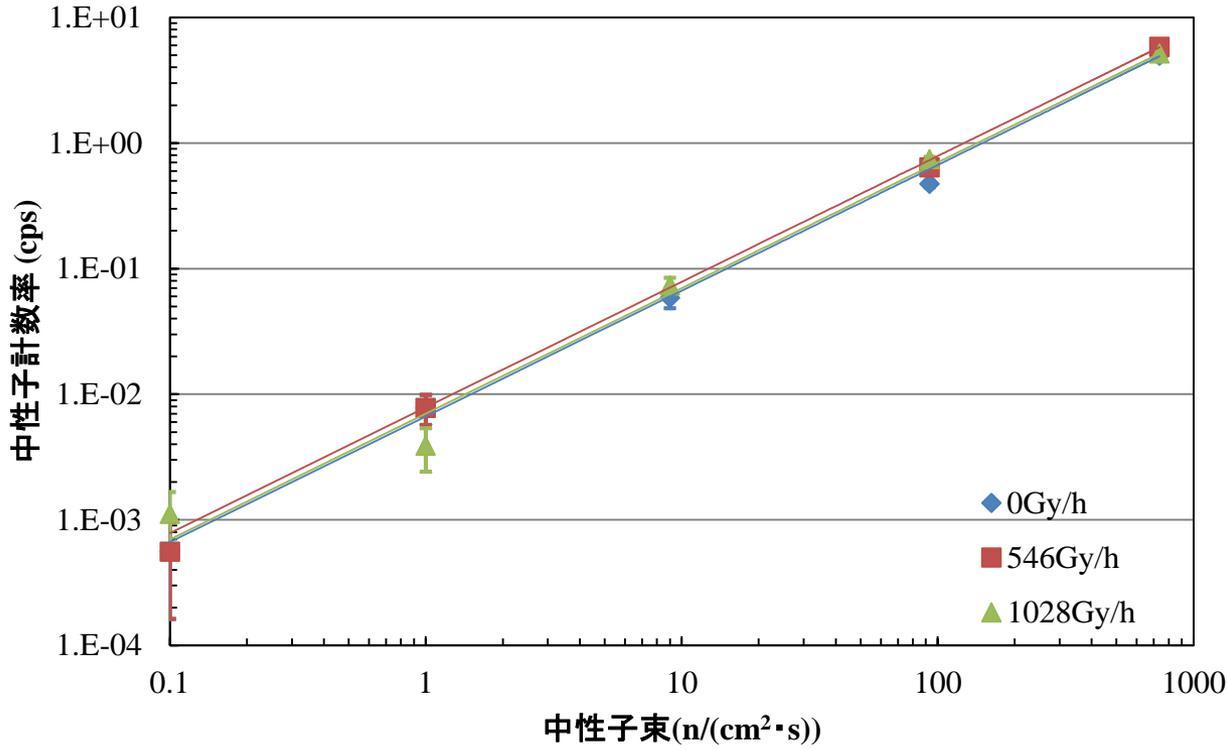
- ・中性子束: BG、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$
- ・ガンマ線線量率: 1028 Gy/h
- ・照射時間: 60分
- ・雰囲気温度: 20°C
- ・**アルゴリズムCにて再判定**

・BGにおいて中性子検知は無く、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ において1カウントという結果となった。
 ・中性子を検知できているものの、高ガンマ環境下では、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ の検知は難しい。

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (4/12)

③中性子束の計測範囲



【試験条件】

- ・中性子束: 0.1 ~ 737 n/(cm²·s)
- ・ガンマ線線量率: BG ~ 1028 Gy/h
- ・照射時間: 10 ~ 60 分
- ・雰囲気温度: 20°C
- ・アルゴリズムBにて判定

・ユニットとしての感度は約0.007cps/(n/(cm²·s))
 →Phase1の1chip(0.0034)の約2.1倍の感度
 ・1000Gy/h環境下でも使用可能。ただし、0.1n/(cm²·s)の中性子はガンマ線と弁別して検出できない(25)と評価されたため。

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

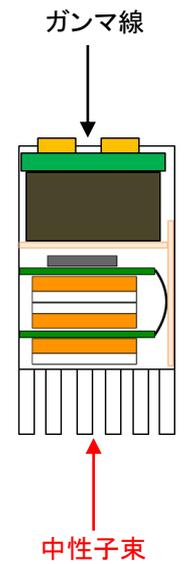
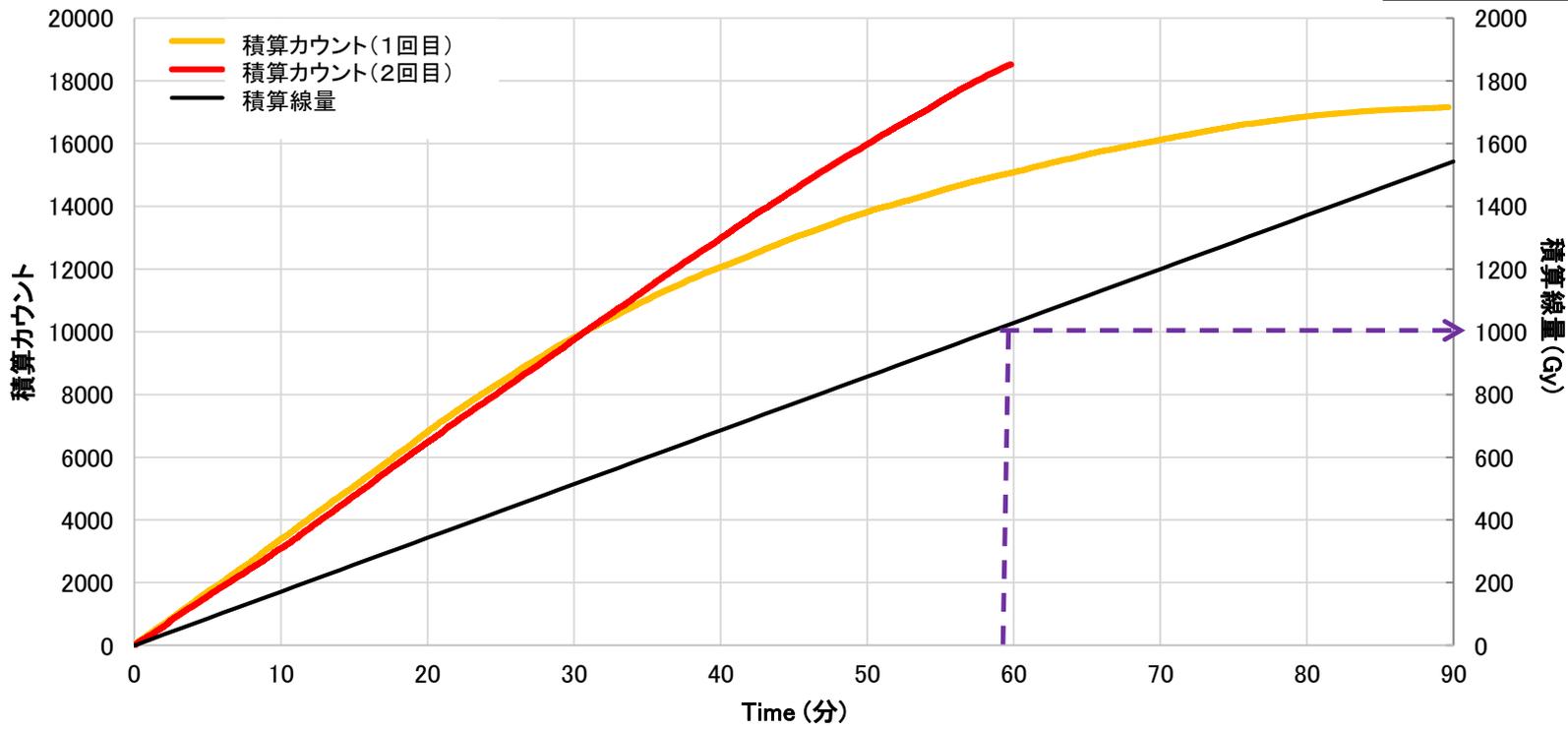
5-3-5 評価試験結果 (5/12)

④耐放射線性

737n/(cm2・s) 1028Gy/h 60分,90分

【試験条件】

- ・中性子束: 737 n/(cm²・s)
- ・ガンマ線線量率: 1028 Gy/h
- ・照射時間: 60分、90分
- ・雰囲気温度: 20℃
- ・アルゴリズムBにて判定

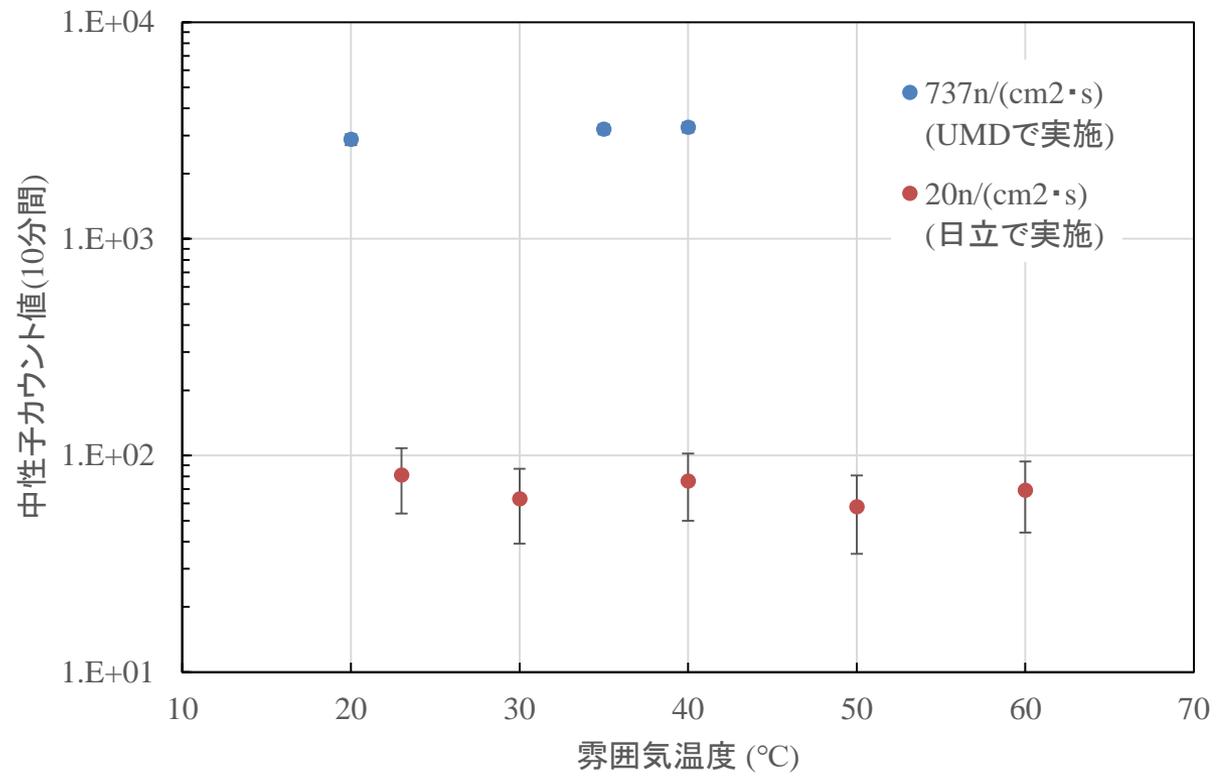


- 試験は2回実施。
- センサー寿命(感度維持)は、30分~1時間程度(約500~1000Gy)

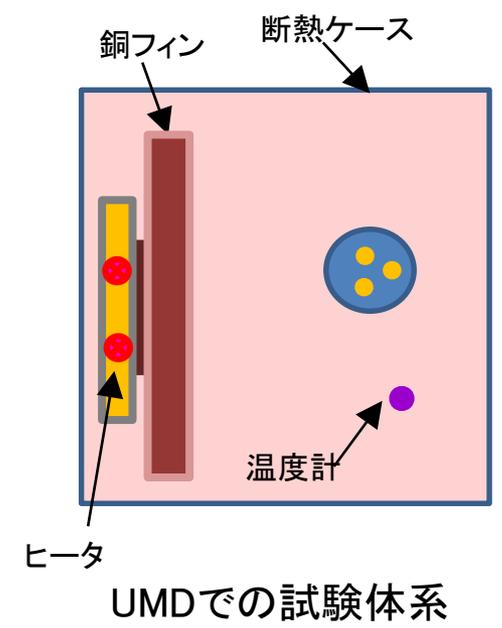
5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (6/12)

⑤耐熱性



- 【試験条件】
- ・中性子束: 737, 20 n/(cm²·s)
 - ・ガンマ線線量率: 0 Gy/h
 - ・照射時間: 各10分
 - ・雰囲気気温度: 20~60°C
 - ・アルゴリズムCにて判定



• 雰囲気気温度が上昇しても、中性子検出に顕著な差は無い。

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (7/12)

■ ⑥水密性

試験(1)

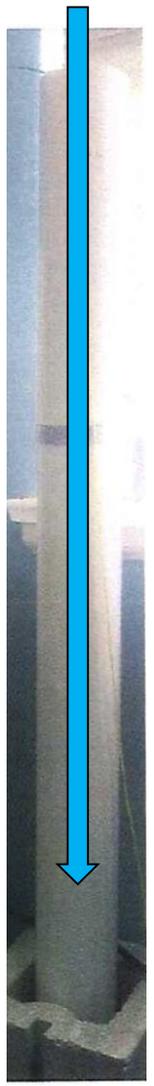
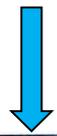
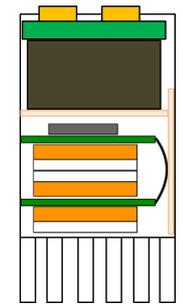
- ・水深1mに水没
- ・合計14時間以上 (14時間50分) 浸漬
- ・センサを導通させ故障の有無を確認

・ 浸漬により水密性が損なわれないことを確認。
 ・ 14時間の水没状態の後でも、動作を確認。

試験(2) ※日立で中性子照射試験を実施した結果

- ・中性子束照射 (10分)
- ・水深1mに水没
- ・合計1時間浸漬
- ・中性子束照射 (10分)

・ 水没前75カウント、水没後62カウントでほぼ変化無し
 ・ CMOSグレースケールの変化や画像の特定領域の欠落等は見られなかった



5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (8/12)

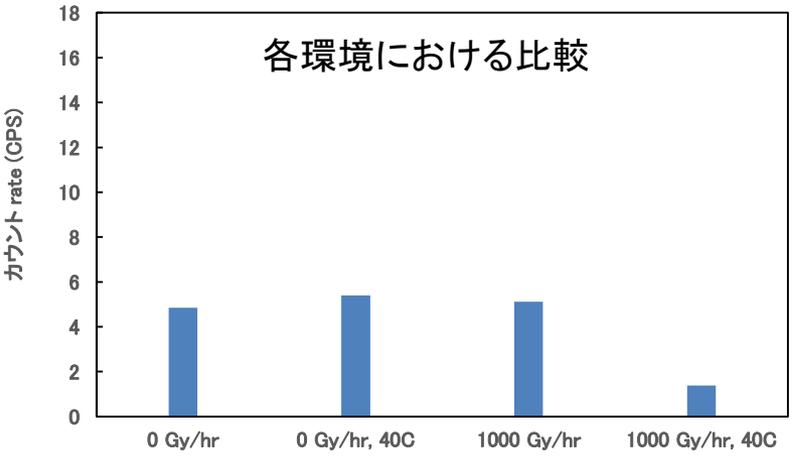
⑦耐放射線・耐熱

		中性子束(n/(cm ² ・s))			
		0.1		737	
ガンマ線量率 (Gy/h)	0(中性子線のみ)			10	3273カウント 5.45cps
	1028	60分	1カウント 2.8e-4cps	10	453カウント 1.38cps

【試験条件】

- ・中性子束: 0.1、737 n/(cm²・s)
- ・ガンマ線線量率: 0、1028 Gy/h
- ・照射時間: 10分
- ・雰囲気温度: 40°C
- ・3センサ、φ2.8mm×60mケーブル
- ・アルゴリズムCにて判定

- ・ 中性子のみの照射において、室温時とほぼ変わらないカウントができた。
- ・ 40°C・1028Gy/hでは、感度が大幅に落ちた。



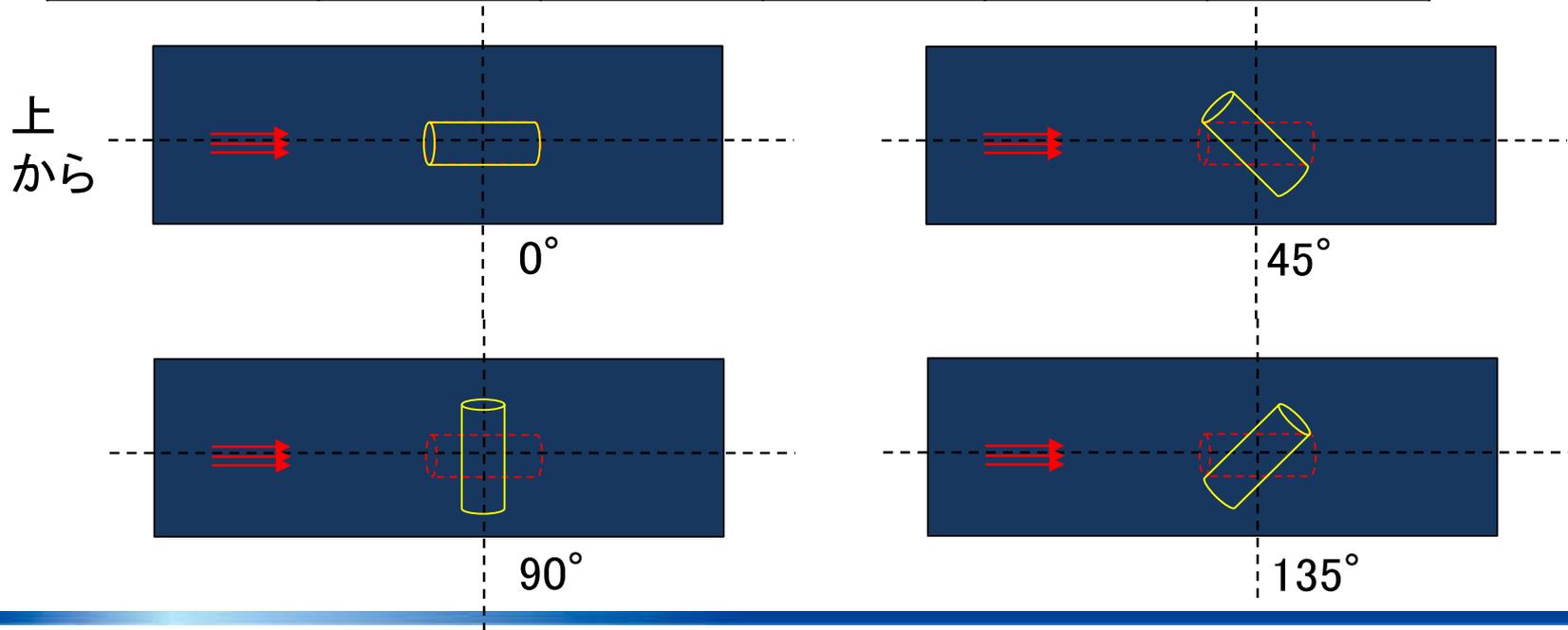
- ・ 雰囲気温度40°Cまたは1028Gy/hの単独での試験では、感度の変化は小さい。
- ・ 中性子検知は可能だが、高温および高ガンマの環境が複合した場合には、大きな感度低下が見られた。

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (9/12)

■ ⑧角度依存性

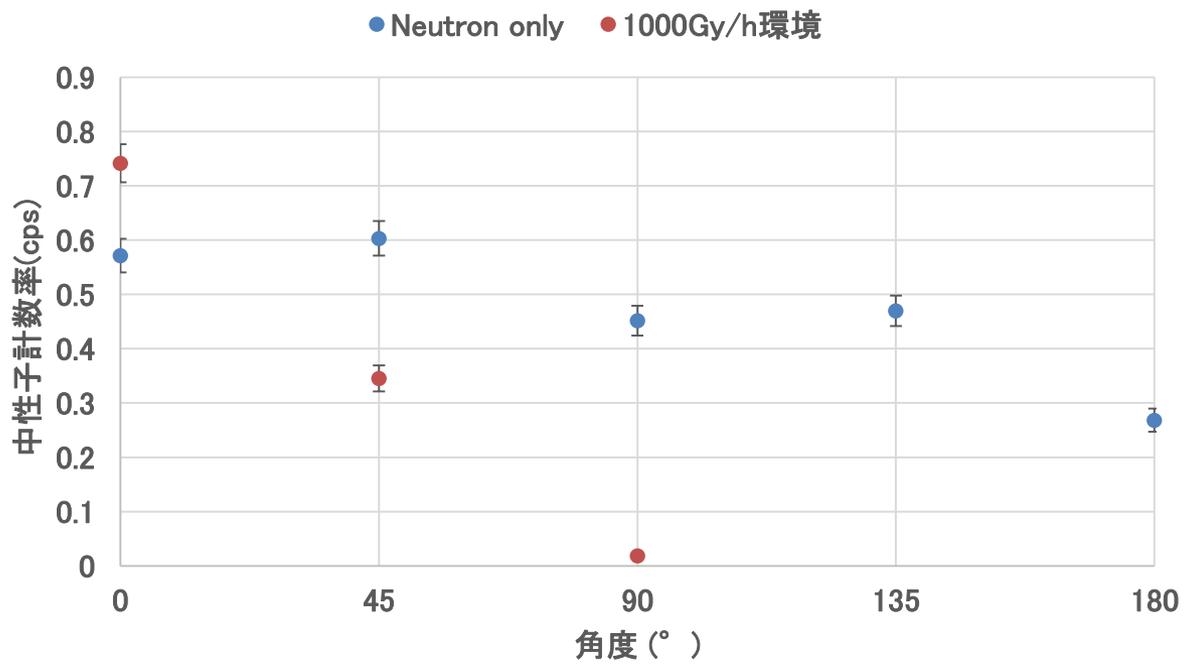
中性子束 100n/(cm ² ・s)、ガンマ線0及び1028Gy/h					
角度	0°	45°	90°	135°	180°
時間 (中性子単一場)	10分	10分	10分	10分	10分
時間 (複合場)		10分	10分		



5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (10/12)

⑧角度依存性



【試験条件】

- ・中性子束: 100 n/(cm²・s)
- ・ガンマ線線量率: 0、1028 Gy/h
- ・照射時間: 10 分
- ・雰囲気温度: 20°C
- ・アルゴリズムCにて判定

0~90° : センサ面の角度が45° までは大きな変化は無く、以降ではカウント数が低下。
 : 高ガンマ環境化ではさらに低下
 90~180° : 135° までは大きな変化は無く、以降ではカウント数が低下
 (背面のセンサヒートシンクのための金属体による遮蔽の効果が大きい)

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (11/12)

項目	条件	要求仕様目標	結果(○:適、△:条件付適)
中性子検出性能	中性子検出感度	0.1n/(cm ² ・s)の中性子束に対し1時間で中性子計数を取得できること。	○合計7時間の測定を実施。1時間当たり平均2.3個の中性子を検出
	中性子-ガンマ線弁別性能	上記感度を線量率1000Gy/hのガンマ線場の中で達成できること。	△ガンマ線によるカウントが出ることで、弁別できない場合有
	中性子束の計測範囲	0.1n/(cm ² ・s)以上、1,000n/(cm ² ・s)以下の中性子束を計測できること。	○中性子束のみの環境であれば、要求仕様の範囲で計測可能
環境適応性	耐放射線性	累積線量1000Gyまで、上記中性子検出感度及び弁別性能が保たれること。	△累積線量1000Gyまで中性子を弁別可。感度は若干低下するケース有
	耐熱性	温度40°Cの環境下で正常に動作し性能が保たれること。	○温度40°Cの環境でも、常温と同一性能で検出可能。
	その他	水中でも正常に動作し性能が保たれること。	○水中においても浸水無く動作
信号伝送	信号ケーブル	検出器から信号を取り出すために直径3mm以下、長さ60m以上のケーブルを用いても、検出性能の仕様を満たすこと。	○上記試験は、全て、左記の要求仕様を満たすケーブルを用いた実施

5-3 センサユニットの試作および評価 (フェーズ2:プロトタイプステージ)

5-3-5 評価試験結果 (12/12)

項目	目的	実施条件	試験結果
その他の試験	耐放射線・耐熱 (複合過酷環境下での健全性を確認)	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子束: 0.1、737 n/(cm²・s) ・ガンマ線線量率: 1028 Gy/h ・照射時間: 60、10分 ・雰囲気温度40°C 	<ul style="list-style-type: none"> ・高温条件(雰囲気温度40°C)、または高ガンマ線量率条件(1028Gy/h)において、感度の変化は小さい。 ・高温条件と高ガンマ線量率条件が複合した場合、急激に感度が低下。
	角度依存性 (中性子入射角度の検出性への影響を確認)	<ul style="list-style-type: none"> ・中性子束: 100 n/(cm²・s) ・ガンマ線線量率: 0、1028 Gy/h ・照射時間: 10分 	<ul style="list-style-type: none"> ・センサ面の角度が45° までは大きな変化は無く、以降ではカウント数が低下。高ガンマ環境化ではさらに低下。 ・90° 以降、135° までは大きな変化は無く、135° 以降カウント数が低下 ※背面に取付けたセンサ保護のための金属体の遮蔽の効果と推定

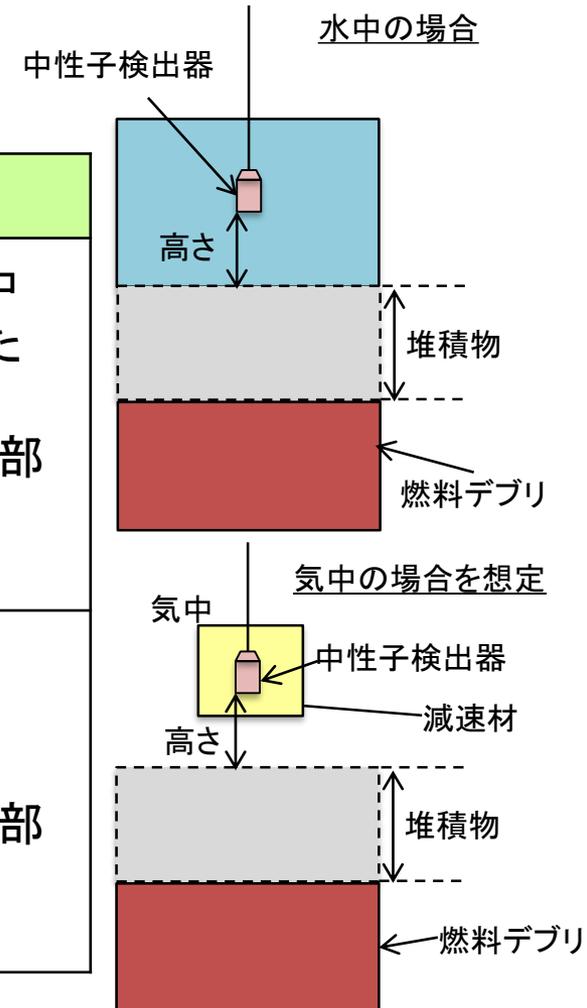
5-4 実機適用時の課題検討

5-4-1 実機想定評価試験内容(1/3)

目的:PCV内部での適用を想定し、模擬環境における中性子計測性を評価

■ 評価試験項目

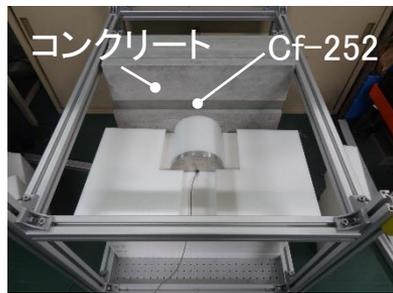
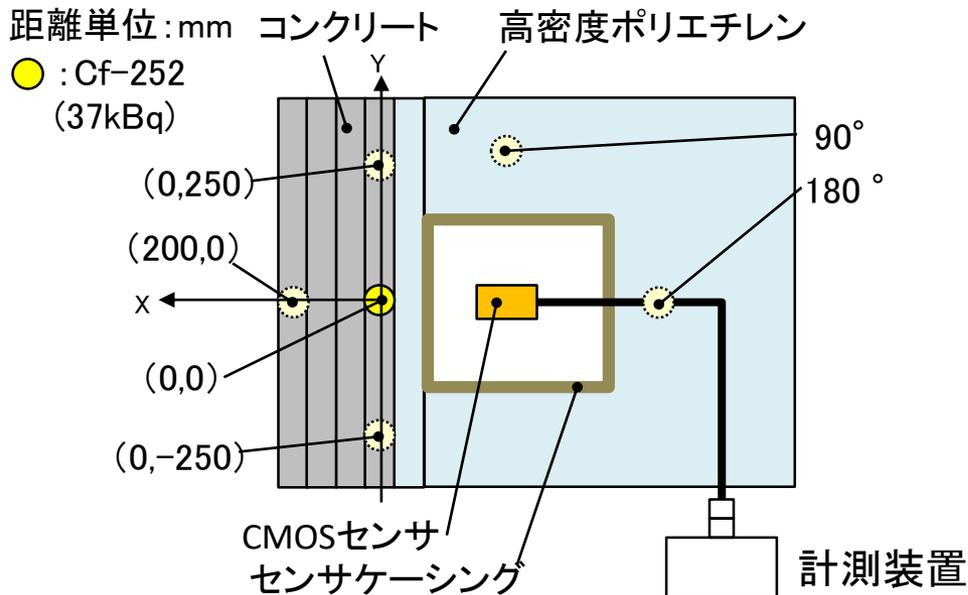
	項目	内容
(1)	水中模擬環境における中性子計測性	<ul style="list-style-type: none"> 高密度ポリエチレンを用いた水中環境内部にCMOSセンサを備えたセンサケーシングを配置 堆積物模擬体(コンクリート)の内部に配置した中性子線源(Cf-252)由来の中性子を計測
(2)	気中模擬環境における中性子計測性	<ul style="list-style-type: none"> 気中環境内部にCMOSセンサと中性子減速材、中性子吸収材を備えたセンサケーシングを配置 堆積物模擬体(コンクリート)の内部に配置した中性子線源(Cf-252)由来の中性子を計測



5-4 実機適用時の課題検討

5-4-1 実機想定評価試験内容(2/3)

■ 水中模擬環境の構成



配置図(上部PE無し)



センサケーシング

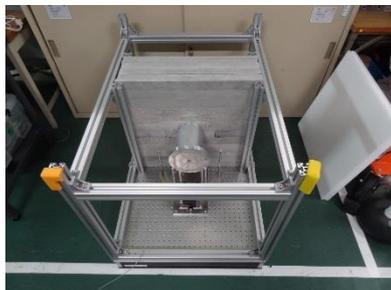
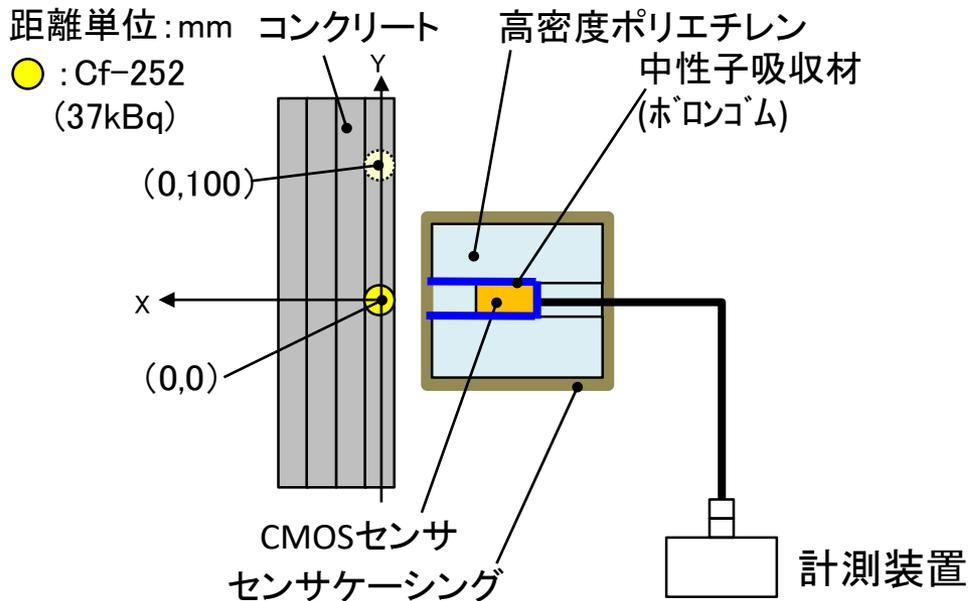
■ 試験内容

	項目	方法
(1)	堆積物内の 中性子線源に よる応答	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積物模擬体内の線源位置にCf-252を設置 (X,Y) = (0,0), (200,0), (0,250), (0,-250) ・測定時間: 15分/点
(2)	周辺の中性子 線源による 応答	<ul style="list-style-type: none"> ・水中模擬体内の線源位置(90°、180°)にCf-252を設置し、0°を(X,Y) = (0,0)として応答比較 ・測定時間: 15分/点

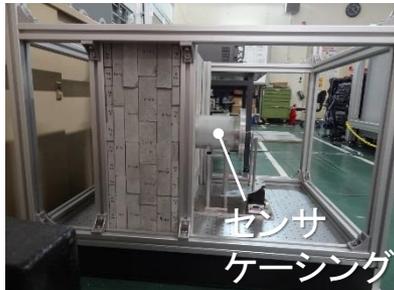
5-4 実機適用時の課題検討

5-4-1 実機想定評価試験内容(3/3)

■ 気中模擬環境の構成



配置図(上面)



配置図(側面)

■ 試験内容

	項目	方法
(1)	堆積物内の中性子線源による応答	<ul style="list-style-type: none"> ・堆積物模擬体内の線源位置(X,Y)にCf-252を設置 (X,Y) = (0,0), (0,100) ・測定時間: 1時間/点以上
(2)	汎用検出器との比較	<ul style="list-style-type: none"> ・小型B-10検出器を使用 ・試験(1)と同様に線源を配置 ・測定時間: 1時間/点

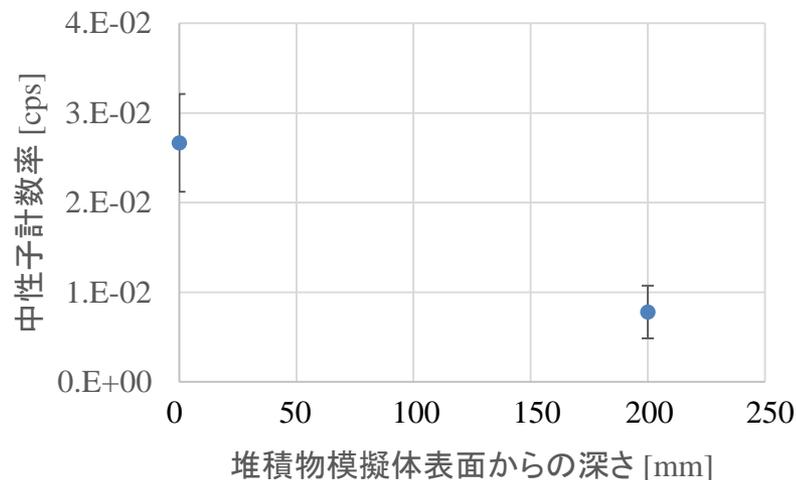
5-4 実機適用時の課題検討

5-4-2 試験結果(1/3)

■ 水中模擬環境: 堆積物中の中性子線源による応答

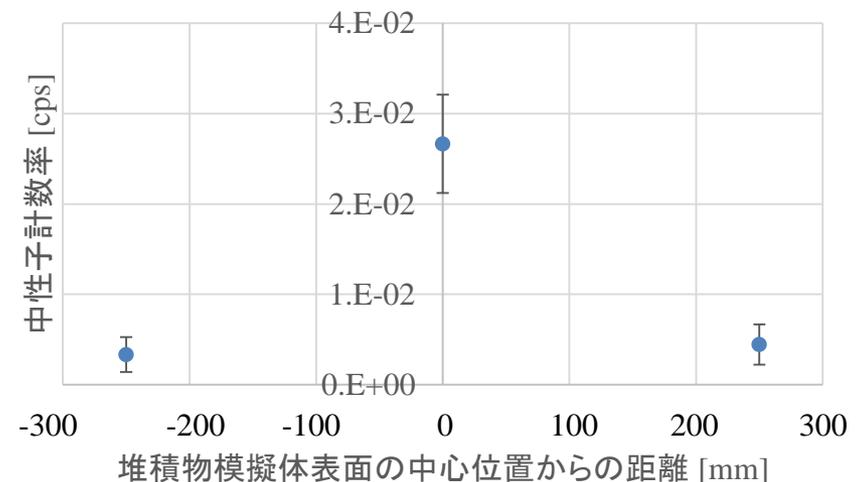
- ・各条件で中性子を検知可能
- ・線源位置(200,0)(0,250)(0,-250)で計数率がほぼ同一であり、測定ポイント1点では3次元的な線源位置情報の取得が困難と想定
- ・実機では平面方向の計数率を取得することで不確定性を低減することが必要

■ 堆積物模擬体の深さ方向



線源位置(0,0)(200,0)における
中性子計数率

■ 堆積物表面の平面方向



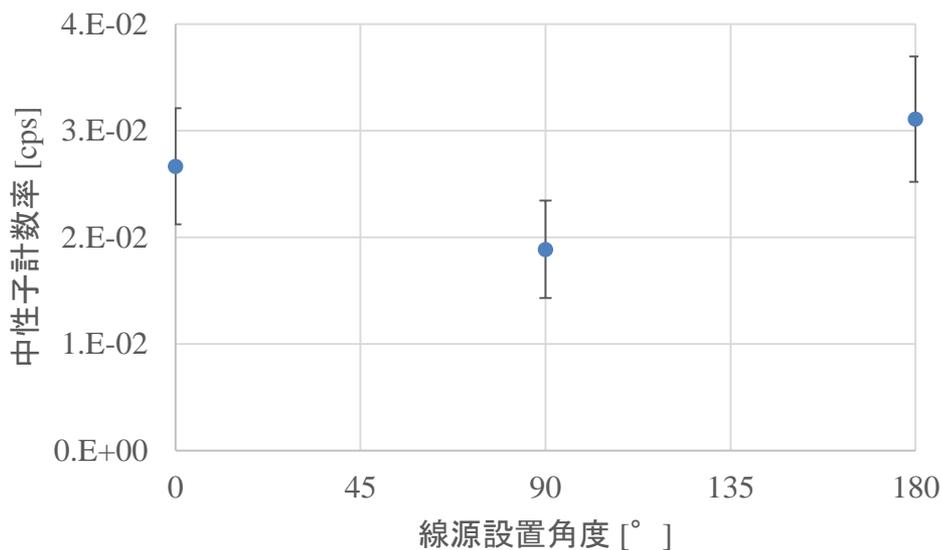
線源位置(0,0)(0,250)(0,-250)における
中性子計数率

5-4 実機適用時の課題検討

5-4-2 試験結果(2/3)

■ 水中模擬環境:周辺の中性子線源による応答

- ・周辺に中性子線源が存在する場合(水中浮遊物、構造物付着物等)にも、中性子を検知可能
- ・使用エリア近傍(200~300mm以内)の周囲に中性子線源がある場合には、中性子吸収材等を用いた遮蔽構造の検討が必要



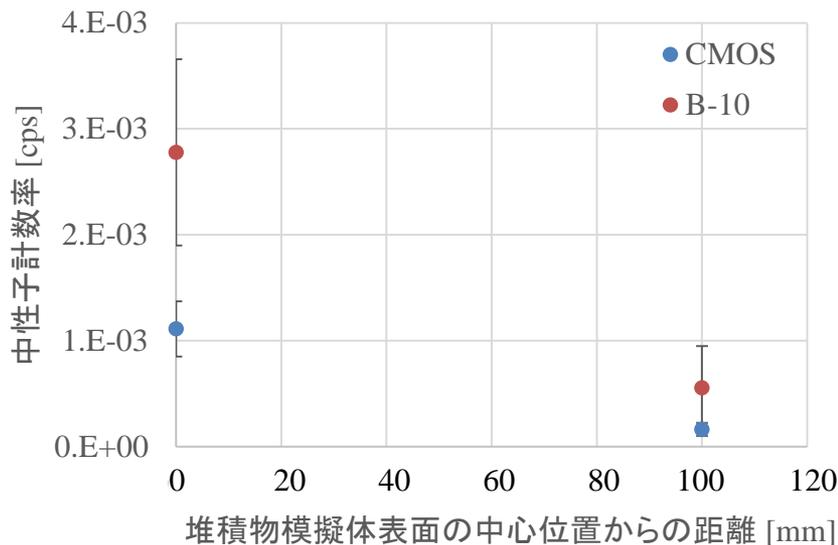
線源位置0、90、180°における
中性子計数率

5-4 実機適用時の課題検討

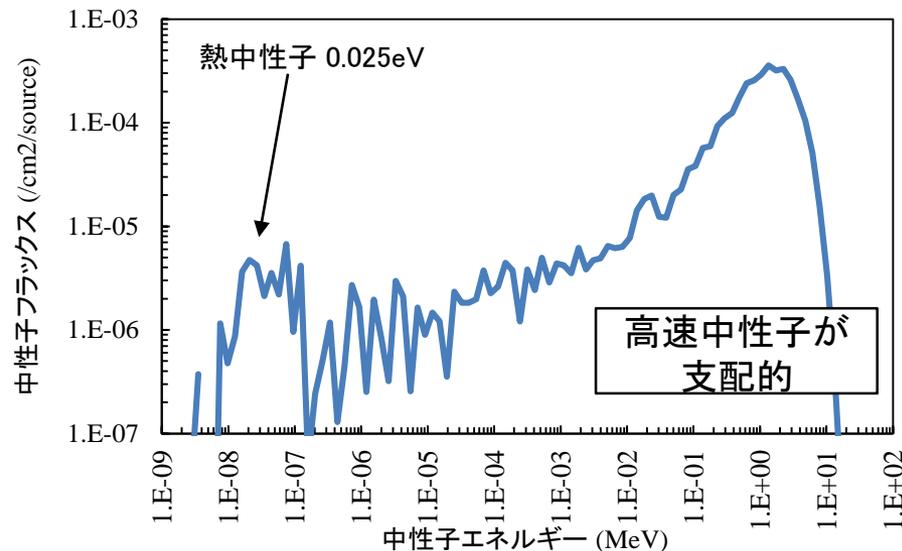
5-4-2 試験結果(3/3)

■ 気中模擬環境

- ・熱中性子束が極めて低い環境であるため、検知に時間を要したが、中性子減速材を組み合わせることで中性子を検知可能
- ・コリメータ形状やコリメータ内減速材サイズを変更することで、より効率的に中性子を検知できる可能性がある



線源位置(0,0)(100,0)における
中性子計数率



センサユニット位置における
中性子フラックス解析結果

5-4 実機適用時の課題検討

5-4-3 実機適用時の課題

■ 水中環境

- ・実機では平面方向の計数率を取得することで不確定性を低減することが必要
- ・使用エリア近傍(200～300mm以内)の周囲に中性子線源がある場合には、中性子吸収材等を用いた遮蔽構造の検討が必要

■ 気中環境

- ・気中では中性子が熱化されないので、CMOSセンサの周囲に中性子減速材を設けることで熱化の促進が必要
- ・水中と比較して中性子検知に時間を要するため、事前の評価試験結果に基づいて調査計画を立案することが必要
- ・より効率的に中性子を検知するため、また使用目的に応じて、コリメータ形状やコリメータ内減速材サイズを変更することで、実用性が高まると想定

5-5 目標に照らした達成度

■ 技術的目標

(※)○達成、△:課題有

項目	条件	仕様	達成度(※)
中性子検出性能	中性子検出感度	計測1時間で、 $0.1n/(cm^2 \cdot s)$ の中性子束を計数できる	○:実験検証済
	中性子-ガンマ線弁別性能	上記感度を線量率1000Gy/hのガンマ線場の中で達成できる	△:スライド25-27参照
	中性子束計測範囲	$>0.1n/(cm^2 \cdot s)$ 、 $<1,000n/(cm^2 \cdot s)$ の中性子束を計測できる	○:実験検証済
環境適応性	耐放射線性	累積線量1000Gyまでは、中性子検出感度及び弁別可	△:スライド28参照
	耐熱性	温度40°Cの環境下で正常に動作し性能が保たれる	○:実験検証済
	その他	水中でも正常に動作し性能が保たれる	○:実験検証済
サイズ	寸法	直径20mm、高さ40mmの円筒に収まる	○:試作検証済
電源、ケーブル等	信号ケーブル	検出器から信号を取り出すために直径3mm以下、長さ60m以上のケーブルを用いても、検出性能の仕様を満たす	○:試作検証済
	電源	格納容器外から電源を安定して供給できる	○:試作検証済
信号処理系	位置	信号処理装置は格納容器外で人がアクセスできる場所に配置可	○:試作検証済
	速度	中性子を検出したことを遅滞無く示せる	○:試作検証済
	操作	特別に長期間の訓練等を行わずに中性子束を測定可	○:試作検証済

■ 研究目標

項目	目標	達成度
1	フェーズ1の知見に基づき、要求仕様に適合した、汎用のセンサシステムを完成させる。	センサシステム完成。【80%】
2	PCV内部詳細調査への適用を想定し、実機に適用する際に検討が必要となる事項を評価し、問題なく適用できることを確認する。	実機適用に必要な事項を抽出、解析的・実験的に評価完【100%】

- 要求仕様に則ったセンサユニットの製作・評価を実施。
- 実機適用に向けた課題・改善点は残るものの、条件付で要求仕様を満足するシステムを完成。
- 実機適用が決まった際は、関連プロジェクトと連携する。