

基盤チーム型(若手):

「高温ガス炉の出力分布測定のための核計装システムの開発」

令和7年3月3日

代表機関:原子力機構

再委託先:株式会社 ANSeeN

再委託先:静岡大学



ANSeeN



1. 研究の概要

2. 目標達成度の自己評価

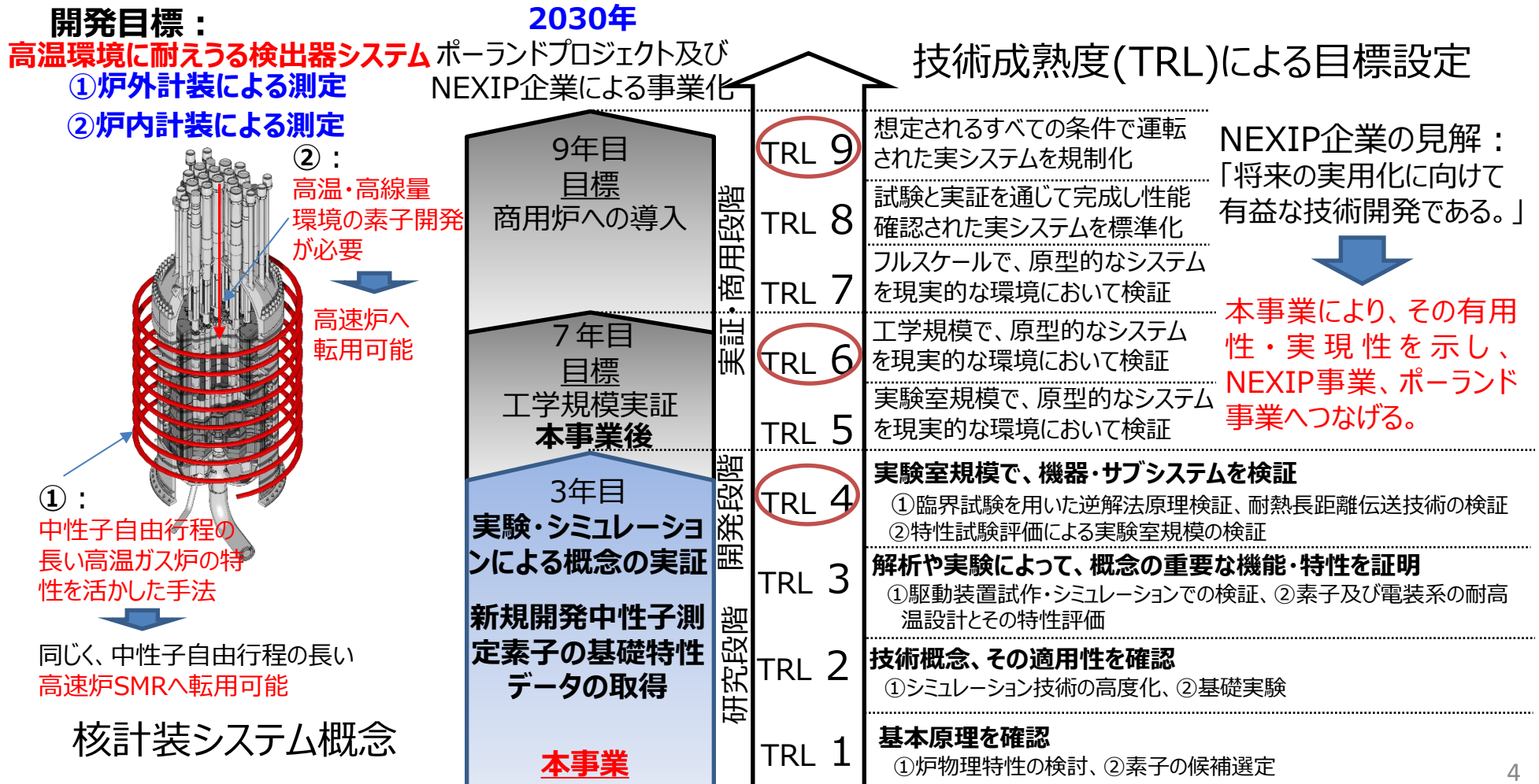
1. 研究の概要

1. 研究の概要 — 研究目標 —

- **研究目標**: 高温ガス炉の出力分布測定のための核計装システムの開発

社会実装を視野に入れ、た開発

- ・ システムの概念・原理のみではなく実験室レベルの実証を目指す。
- ・ 工学時実証に向けた技術課題の抽出。
- ・ ポーランド事業、NEXIP事業への連携を強化し社会実装に資する。



1. 研究の概要 — 研究体制 —

- 高温ガス炉の試験研究炉HTTRの設計・建設・運転の経験を持ち高温ガス炉環境を熟知した**原子力機構**、計測機器の開発製造を行ってきた**ANSeeN社**、センサー素子の研究開発を行ってきた**静岡大学**による**実験・シミュレーション両面による技術開発**

炉外計装

研究項目 1 可動式検出器の開発

- 検出器と駆動方式の検討
- 機器概念設計
- 構造設計及びコスト評価

研究項目 2 出力分布アンフォールディング技術の開発

- 検出器の炉内感度分布評価
- 炉内出力分布評価
- アンフォールディング技術の確立

測定システム
概念・電装システム等は
ANSeeN社が
担当

機器の構造は**原子力機構**が担当
中性子挙動、ガンマ線環境については、**原子力機構**が担当

炉内計装

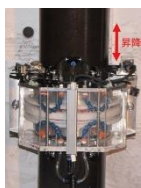
研究項目 3 耐高温センサーの検討・開発

- 素子開発
- 概念設計
- 性能評価

研究項目 4 高温ガス炉の炉内計装運用の検討

- 機器構造検討
- 炉内環境における検出器の応答特性評価
- 検出器のエネルギー特性の実験的評価及び高温動作試験

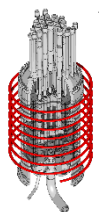
素子検討・開発については、**静岡大学**が担当



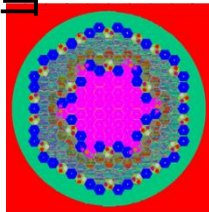
駆動機構



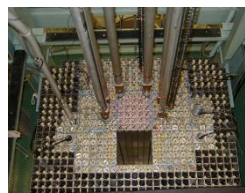
電送技術



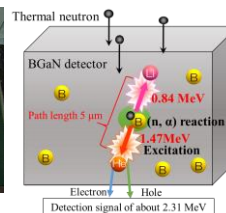
構造設計



中性子挙動評価



臨界実験



素子開発



素子特性評価

2. 目標達成度の自己評価

(1)可動式検出器の開発

① 可動式検出器システムの開発(再委託先:ANSeeN) —達成度と自己評価—

■ 全体計画の目標

各検出器及び駆動方式の本システムへの適用性の評価及び、各要素技術の組み合わせによるシステムの比較、代表システムの決定、代表システムの電装、駆動システムの概念設計を行う。

■ 達成度

目標に掲げた下記4項目を実施し、達成した。

- 各検出器及び駆動方式の本システムへの適用性の評価(令和3年度～5年度)
- 各要素技術の組み合わせによるシステムの比較(令和3年度～5年度)
- 代表システムの決定(令和3年度～5年度)
- 代表システムの電装、駆動システムの概念設計(令和4年度～5年度)

最終成果物は、代表システムの決定のための優劣表である。(令和5年度成果報告書表3.1.1-1)



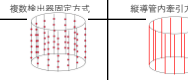
■ 自己評価

目標通りの成果

(1)可動式検出器の開発

① 可動式検出器システムの開発(再委託先: ANSeeN) — 成果の概要 —

令和5年度成果報告書：表3.1.1-1

	縦導管方式	周回クレーン	周回アーム方式	複数検出器固定方式	縦導管内巻引方式	浮遊方式
形状						
駆動系						
駆動系の種類	自走式ロボット	モーター	モーター	モーター	モーター	自律型浮遊ロボット
駆動部の数	1	2	2	N(*)	N(*)	1
駆動部の設置場所	壁内	炉室	炉室	壁内	壁内	炉室
判定結果	○	○	×	○	○	×
判定の要旨	導管内にロボットを自走させる機構が必要となるが、現実的な解がある。	既知のクレーン構造で実現可能なため。	周回クレーンに比べて大きなアーム(輪)を上り下りさせることにメリットがないため、周回クレーンのみを採用とする	計測のための駆動系は不要であるが、保守のための駆動系が必要	既知のクレーン構造で実現可能なため。	ロボットの位置情報の取得および故障時の安全性に大きな懸念あり。
検出器						
検出器の種類	FC/CIC/シンチレータ	高温対応FC/高温対応CIC/シンチレータ	高温対応FC/高温対応CIC/シンチレータ	FC/CIC/シンチレータ	FC/CIC/シンチレータ	FC/CIC/シンチレータ
検出器の数	1	1	1	M×N(*)	N(*)	1
検出器の設置場所	ロボットに搭載	クレーン先端	クレーン先端	縦導管内の壁に固定	クレーン先端	ロボットに搭載
計測器の設置場所	全てをロボットに搭載	炉室外	炉室外	炉室外	炉室外 (ブリアンプはクレーン先端も可)	全てをロボットに搭載
判定結果	○ ○ ×	×	×	×	○ ○ ○	○ ○ × × ×
判定の要旨	PMTの耐熱性に問題がある。FC/CICはCICを代表とした。	検出器(クレーン先端)から上下クレーン、周回クレーンの経路を通り炉室外の計測器まで伝送する検出器を設計することが困難。	検出器(クレーン先端)から周回クレーン、上下クレーンの経路を通り炉室外の計測器まで伝送する検出器を設計することが困難。	FC/CIC/光ファイバはCICを代表とした。	光ファイバは耐久性に問題がある。FC/CICはCICを代表とした。	計測器全てに高温耐性を要求することが困難。
計測面における保守点検法						
保守点検概要	原子炉の定期点検のみ保守作業が可能。ロボットに寿命に応じた使い捨てによる複数台運用が必要だが、計測面の故障時には使い捨てで復旧可能。	計測器は常に保守作業が可能。検出器は原子炉の定期点検時のみ保守作業が可能。検出器故障時の取り換えが定期点検時以外には困難で一台の故障が致命的となる。	計測器は常に保守作業が可能。検出器は原子炉の定期点検時のみ保守作業が可能。検出器故障時の取り換えが定期点検時以外には困難で一台の故障が致命的となる。	保守対象が最も多く保守点検コストが高い。一方で、一台の故障がアンフォールディング計算に影響が左二つの方式の中間、与える影響が小さい。	保守対象の数とアンフォールディング計算の影響が左二つの方式の中間、与える影響が小さい。	運用不可
比較結果	普	難	難	難	普	-
計測面におけるコスト評価						
コスト評価概要	導管内に自走のための構造が必要。使い捨て運用のため複数のロボットが必要だが、ロボットは低コスト。	検出器の数が少なく低コスト。駆動系は炉室内のため耐放射線および耐熱設計が必要で高コスト。加えて周回アームという巨大な構造物を上下駆動させるためにさらなるコストがかかる。	検出器の数も少なく低コスト。駆動系は炉室内のため耐放射線および耐熱設計が必要で高コスト。加えて周回アームという巨大な構造物を上下駆動させるためにさらなるコストがかかる。	駆動系が多いが炉室外のため低コスト。検出器の数も非常に多く高コスト。	駆動系が多いが炉室外のため低コスト。検出器の数も非常に多く高コスト。	評価不可
比較結果	中	低	中	高	中	-
原子炉建屋のレイアウトへの影響						
比較結果	中	大	大	中	低	大
総評	全般に優位性を持つが、原子炉建屋のレイアウトへ影響度合いが縦導管巻引方式に劣る。	計装システムの構築および障害許容設計に難がある。	周回クレーン方式に劣る。	検出器および計測器のコストが極めて高い。	全般に優位性を持つ。	自律型浮遊ロボットを炉室内で運用することが安全性の観点から困難である。
代表システムへの選出	-	-	-	-	-	-

(*)Nは駆動部数、Mは深さ方向の測定点数を表す

代表システムの決定は優劣表を作成することで行われた。

年度ごとに、

- システムへの適用性
 - 各要素技術の比較
 - 概念設計の結果
- を更新し、拡張された。

最終的に、比較項目全般に優位性があること、及び高温ガス炉における炉内出力分布測定ニーズとの適合度から、「**縦導管方式**」が本研究における代表システムとして選出された。



(1)可動式検出器の開発

②提案システムの構造検討(委託先:原子力機構) —達成度と自己評価—

■ 全体計画の目標

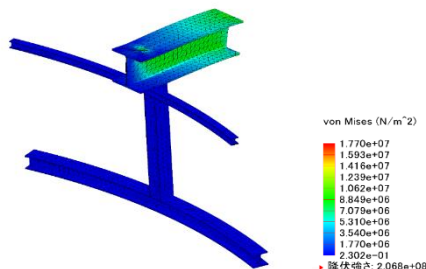
代表システムの構造設計及びコスト評価を行う。

■ 達成度

- 全体計画の目標で示した代表システムの構造設計及びコスト評価に対し、令和4年度に、高温高線量環境となる炉室に駆動機器を配置する必要がある周回クレーン方式に関し構造設計を行い、各方式に対する構造部のコスト評価モデルを作成しその評価を行い、所定の目標を達成した。

構造部のコスト評価

	回収システム	駆動システム	構造部の合計値
螺旋導管方式	0.01	0.03	0.05
周回クレーン方式	0.00	0.88	0.88
周回アーム方式	0.00	1.75	1.75
複数検出器固定方式	0.00	0.03	0.03
縦導管内牽引方式	0.00	0.05	0.05
浮遊方式	0.04	0.03	0.08



■ 自己評価 周回クレーン方式の構造解析

目標を上回る成果

(理由)

課題を抽出し、将来の工業レベル実証へつなげる予定であったが、HTTRの計装の改良で対応でき、将来の課題がないことが確認できたため。

評価法をANSeeNに提示、全体の評価を依頼。

(2)出力分布のアンフォールディング技術の開発

① 検出器感度・出力分布評価手法の整備(委託先:原子力機構) — 達成度と自己評価 —

■ 全体計画の目標

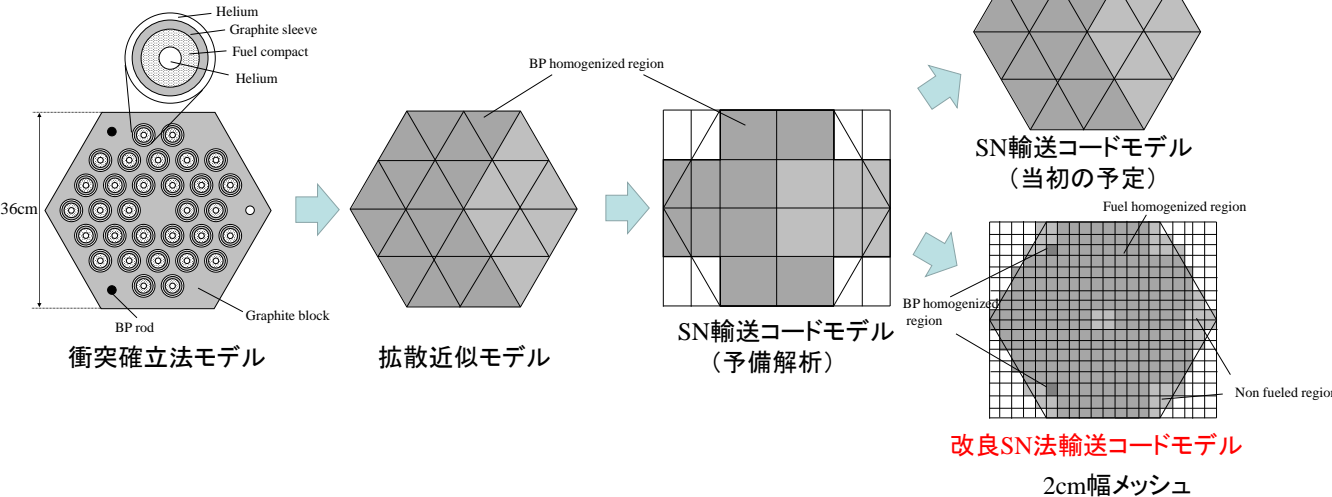
検出器の炉内感度分布の評価手法の整備と評価及び炉内出力分布の評価を実施する。

■ 達成度

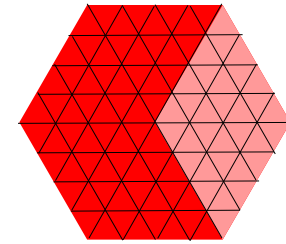
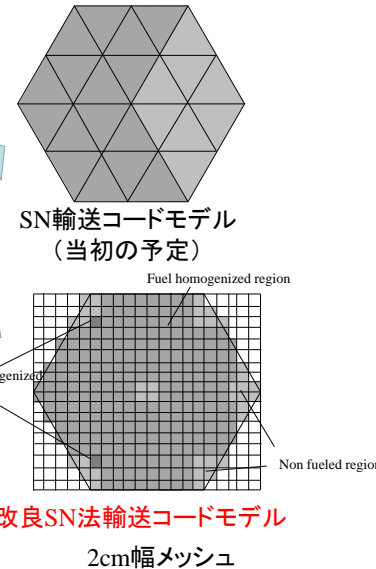
- 全体計画の目標で示した、炉内感度分布評価に関しては令和3年度に実施、炉内出力分布評価に関しては令和3年度に実施したメッシュに対応させる形でR4年度に開発を実施し、所定の目標を達成した。

■ 自己評価

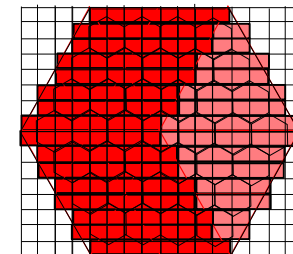
目標通りの成果



感度計算



感度出力計算



(2)出力分布のアンフォールディング技術の開発

②出力分布アンフォールディング手法の検討(委託先:原子力機構) ー達成度と自己評価ー

■ 全体計画の目標

AI・深層学習技術の応用も視野に入れたノイズに対しても安定なアンフォールディング手法を開発する。

■ 達成度

- 全体計画の目標で示したアンフォールディング手法の開発に対し、アンフォールディング手法の高温ガス炉体系に対する適用については、令和5年度においてKUCAの実機信号を用いた出力分布のアンフォールディングにも成功しており、各提案方式を代表できる測定点を想定した解析を行っており、その適用性は確認できた。
- AI技術を用いたノイズに対する安定化に関しては、中性子信号のノイズの除去、電気信号のノイズの除去、検出器感度の非線形内挿の3つの方法に関する実装の準備を行った。

■ 自己評価

目標通りの成果

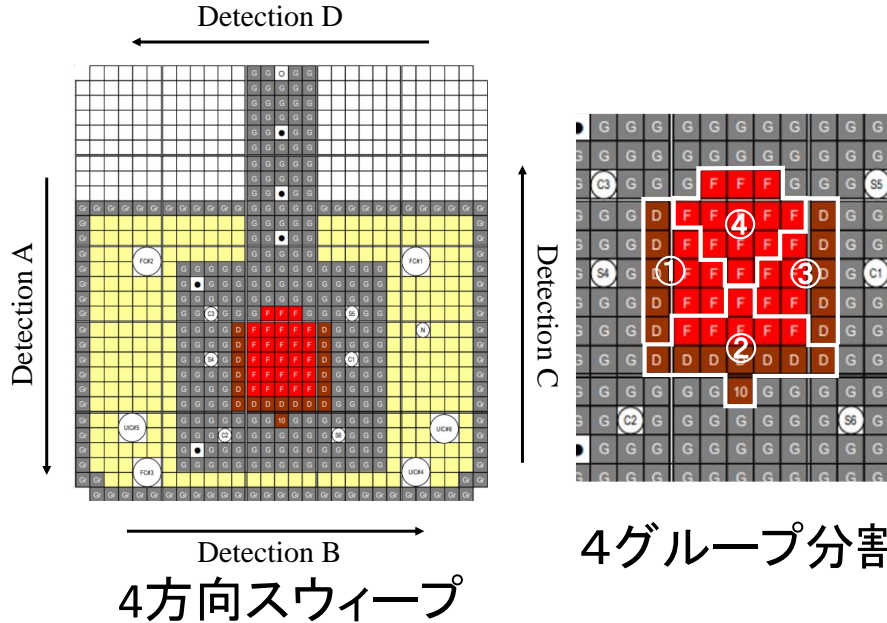
(2)出力分布のアンフォールディング技術の開発

②出力分布アンフォールディング手法の検討(委託先:原子力機構)

— 成果の概要 —

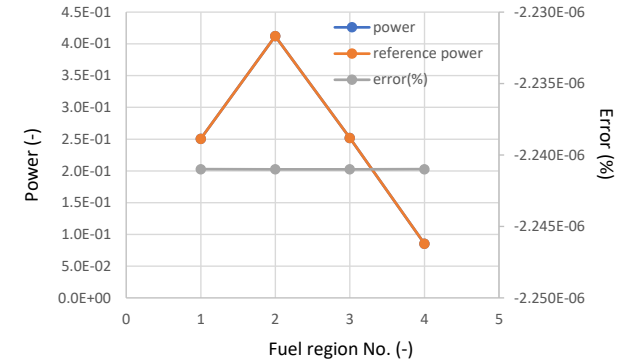


KUCAと可動検出器



4方向スweep

4グループ分割



アンフォールディング結果 (成功)

※ただし、精度の良さは感度係数均質化の出力に参照解を用いたため



精度については、今後の課題。

AI技術の適用の準備:

$$\vec{P} = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \vec{R}$$

出力の精度を得るには、

\vec{R} のノイズ除去

AIを使った類似先行研究を調査、
実装サンプルを作成

中性子信号ノイズ除去の例
音のノイズの除去の例

\mathbf{W} の非線形内挿

(一次独立な測定点を増やす)

非線形内挿の例

(3)耐高温中性子検出器の検討

① センサー素子の開発(再委託先:静岡大学) —達成度と自己評価—

■ 全体計画の目標

高温環境下での使用に耐えうるセンサー素子の候補の選定、代表システムの性能を提示する。

■ 達成度

• 令和3年度

複数のセンサー候補を提案し優劣表を作成を行い、GaN系の半導体検出器を代表として選出した。

• 令和4年度

高温環境下でのセンサー素子基礎特性の評価手法の開発を行った。

• 令和5年度

開発した手法を用いてGaN系半導体検出器を評価したことにより、代表システムの性能の提示を行った。

■ 自己評価

目標通りの成果

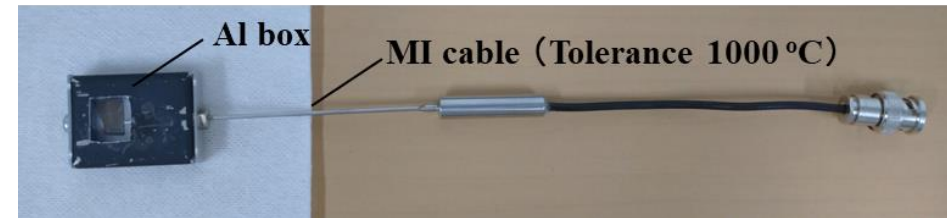
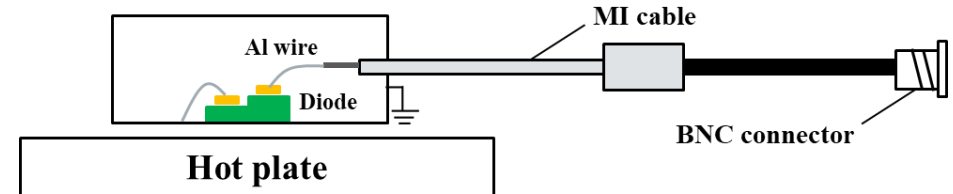
(3)耐高温中性子検出器の検討

① センサー素子の開発(再委託先:静岡大学) — 成果の概要 —

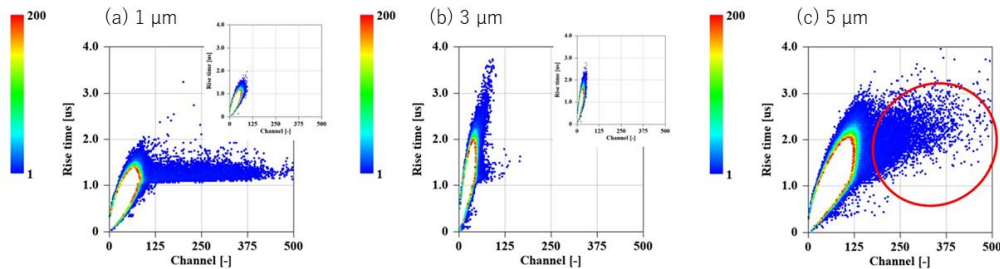
令和3年度報告書：図3.3.1-1

素子	耐熱性	中性子捕獲反応	n-γ弁別性能
フィッションチェンバー	550°C	$^{235}\text{U}(n, \text{FF})$	◎
γ線補償型電離箱	80°C	$^{10}\text{B}(n, \alpha)$	◎
LiCAF系シンチレータ	300°C*	$^6\text{Li}(n, \alpha)$	○
LiAlO ₃ シンチレータ	70°C	$^6\text{Li}(n, \alpha)$	△
Gd ₃ Ga ₃ Al ₂ O ₁₂ シンチレータ	70°C	$^{\text{nat}}\text{Gd}(n, \alpha)$	△
(La,Gd) ₂ Si ₂ O ₇ シンチレータ	70°C	$^{\text{nat}}\text{Gd}(n, \alpha)$	△
BGaN	1000°C**	$^{10}\text{B}(n, \alpha)$	○
CdTe	50°C	$^{113}\text{Cd}(n, \gamma)$	×

令和4年度報告書：図3.3.1-1, 2



令和5年度報告書：図3.3.1-6、表3.3.1-1



BGaN 層膜厚 (μm)	0.98	3.32	5.19
計数率 (cpm)	94.5 (>125 ch)	5.03 (>60 ch)	66 (>150 ch)
中性子捕獲率 (×10 ⁻³ %)	6.68	2.22	29.2

令和3年度：優劣表の作成によりGaN系検出器を代表として選定

令和4年度：高温環境下での評価手法開発し、高温で放射線検出特性評価を実施可能にした

令和5年度：代表システムの性能提示として、BGaN検出器の諸特性を示し、今後の可能性を示唆

(3)耐高温中性子検出器の検討

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN） －達成度と自己評価－

■ 全体計画の目標

代表システムの概念設計を行う。

■ 達成度

(3)①で選出されたGaN系の半導体検出器に対して、検出器システムとしてのコンポーネントを列挙し、代表システムの概念設計を行った。

概念設計したシステムの使用環境条件の提示を行うに際し、非動作時の保管による経時変化を評価した。

■ 自己評価

目標通りの成果

(3)耐高温中性子検出器の検討

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN） — 成果の概要 —

令和5年度報告書：表3.3.2-1

電気信号出力	光信号出力	温度条件
検出器（高電圧）	検出器	図3.3.2-1
メタルケーブル	光ファイバ	1000°C超
プリアンプ	PMT（高電圧）	~50°C
	パルファアンプ	~50°C
計数器	計数器	~50°C
その他：	その他：	光学グリス~200°C
-	光学カップリング	

令和3年度報告書：図3.3.2-1

	検出器 1	検出器 2	検出器 3
作成条件	pin-GaN 検出器 5 um 厚	pin-BGaN 検出器 5 um 厚 1 sscm	pin-BGaN 検出器 5 um 厚 2 sscm
総評	使用外保管によるα線検出特性への影響がある。しかし、BGaN 検出器の特性劣化に比べて軽微である。	使用外保管によるα線検出特性への影響がある。特に初期の特性劣化が顕著である。検出器 1 との差はホウ素ドーピングであることから、保管により検出器内でのホウ素の挙動が変わったものと推測される。	検出器 2 同様に使用外保管によるα線検出特性への影響がある。ホウ素濃度による違いは保管前の特性から現れており、保管による特性劣化後もその関係を保っていることから、ホウ素濃度の違いに対する保管による影響は本評価から見いだせない。

令和4年度報告書：表3.3.2-1

	pn-GaN	pin-GaN	pin-BGaN
有感層厚	~0.3 μm	1 μm	7 μm
検出モード	パルス	パルス	パルス
伝送方式	低インピーダンス 電流伝送	低インピーダンス 電流伝送	低インピーダンス 電流伝送
耐熱性	250°C	> 450 °C	300°C
中性子検出	×	×	○

令和3年度：コンポーネントの列挙

令和4年度：概念設計、使用環境条件の提示

令和5年度：非動作時の保管による経時変化

(4)高温ガス炉での炉内計装運用の検討

① 炉内環境評価及び検出器運用検討(委託先:原子力機構) ー達成度と自己評価ー

■ 全体計画の目標

上記の目標に対し、機器構造の検討、炉内環境における検出器の応答特性シミュレーションを実施する。

■ 達成度

- 全体計画の目標で示した炉内環境評価及び検出器運用検討に関し高温ガス炉のスタンドパイプへ格納・駆動させるための構造検討、炉内の運転状態における γ 線及び中性子線の線源強度評価、モンテカルロ輸送計算により検出器の応答特性のシミュレーションを行い、所定の目標を達成した。

■ 自己評価

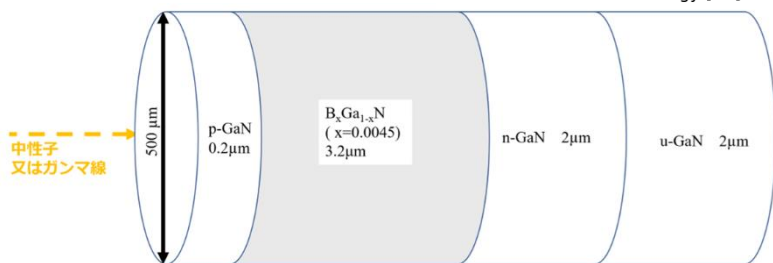
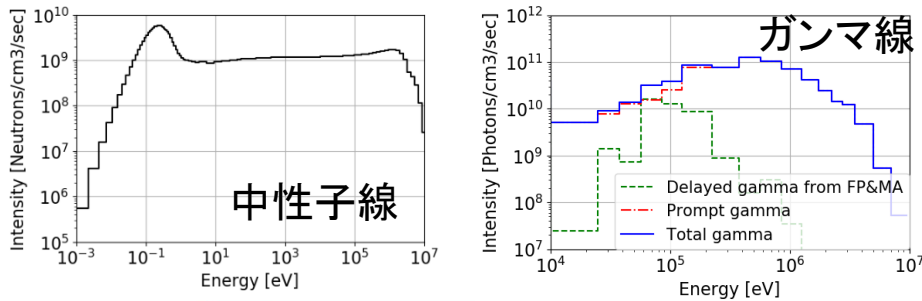
目標通りの成果

(4)高温ガス炉での炉内計装運用の検討

① 炉内環境評価及び検出器運用検討(委託先:原子力機構) — 成果の概要 —

炉内環境評価

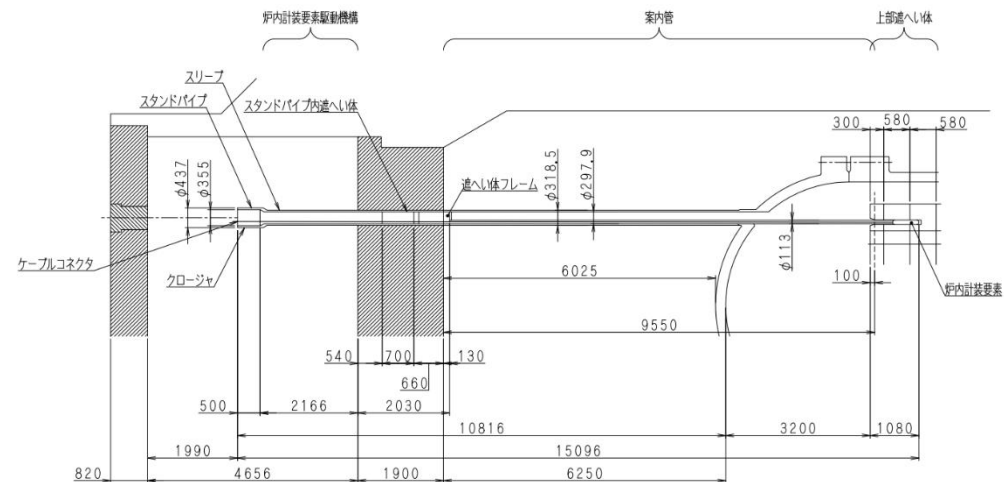
- 高温ガス炉の炉内を想定した中性子線、ガンマ線(下図)を検出器体系に入射
 - 中性子線: MVP-3+JENDL-4.0、ガンマ線: ORIGIN-2(即発)、経験式(遅発)
- 有感領域に対する付与エネルギーは、中性子線の方が1桁程度大きい
 - 中性子線: $(1.4 \pm 0.1) \times 10^{-10}$ Gy/source、ガンマ線: $(9.6 \pm 0.2) \times 10^{-12}$ Gy/source



計算体系

運用方法

- 炉内計装の使用頻度は、2か月に1回程度
- 1回の測定にける時間は、商用蒸気供給用高温ガス炉の場合で35分程度を想定
- 炉内検出器の引抜挿入駆動速度は、HTTRの制御棒駆動機構の通常時駆動速度の最大値と同じ10 mm/secを仮定
- 炉内計装を使用しない間は、スタンドパイプ内に格納することとし、炉内計装を高温及び放射線から保護



全体配置図

(4)高温ガス炉での炉内計装運用の検討

②耐高温中性子検出器の実験(委託先:原子力機構)

－達成度と自己評価－

■ 全体計画の目標

小型加速器中性子源を利用した検出器のエネルギー特性評価及び高温動作試験を実施する。

■ 達成度

- 全体計画の目標で示した耐高温中性子検出器の実験に関し検出器の有感領域を加熱することによる高温動作試験を行い、所定の目標を達成した。

■ 自己評価

目標通りの成果

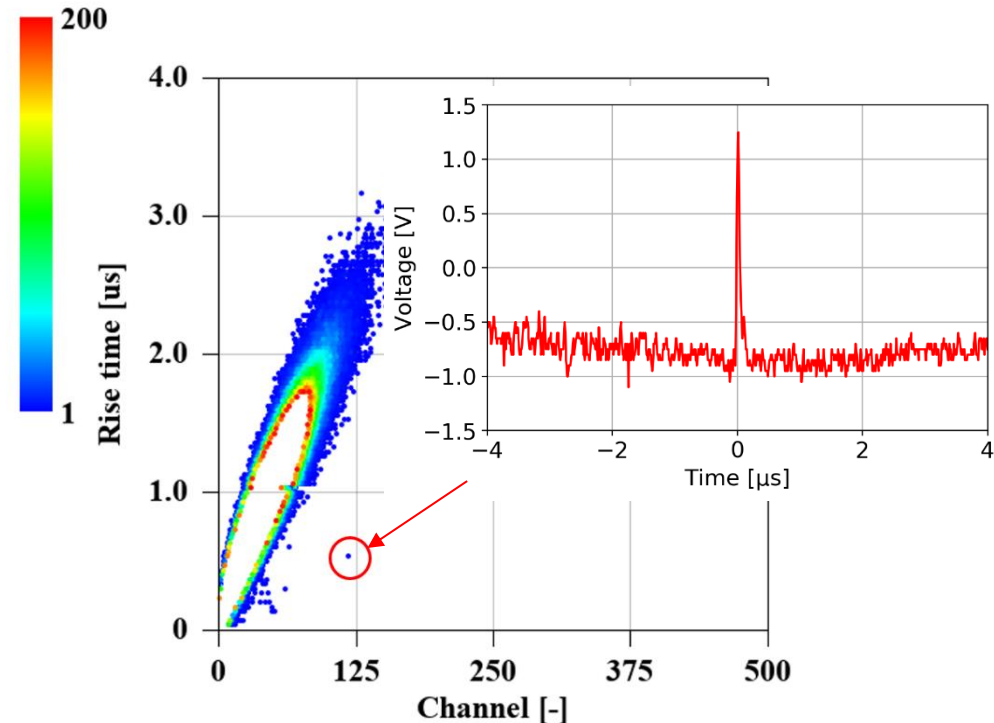
(4)高温ガス炉での炉内計装運用の検討

②耐高温中性子検出器の実験(委託先:原子力機構)

— 成果の概要 —



実験のセットアップ



エネルギースペクトル図と検出信号の例

検出信号を確認

今後の課題・方向性

- 炉外検出器による出力分布測定については国内実証炉の開発を行っている中核企業の三菱重工から前向きに導入を検討するとの意見が述べられ、今後、高温ガス炉の国内実証炉に実装を目指す。
- BGaN検出器については、半導体結晶の品質向上が重要な技術であり、結晶成長技術の向上が継続的なテーマとして挙げられる。高温半導体エレクトロニクスといった新分野の開拓となり、今後も、積極的な外部予算による開発を目指す。