

令和5年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

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

成果報告書

令和6年3月

国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構

本報告書は、文部科学省の原子力システム研究開発事業による委託業務として、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が実施した令和3年度～令和5年度「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」の成果を取りまとめたものです。

目次

概略	v
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 各年度計画	2.2-1
3. 業務の実施内容及び成果	
3.1 可動式検出器の開発	3.1-1
3.1.1 可動式検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）【R3-R5】	3.1-1
3.1.2 提案システムの構造検討【R3-R5】	3.1-9
3.2 出力分布のアンフォールディング技術の開発	3.2-1
3.2.1 検出器感度・出力分布評価手法の整備【R3-R5】	3.2-1
3.2.2 出力分布アンフォールディング手法の検討【R3-R5】	3.2-10
3.3 耐高温中性子検出器の検討	3.3-1
3.3.1 センサー素子の開発（再委託先：静岡大学）【R3-R5】	3.3-1
3.3.2 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）【R3-R5】	3.3-6
3.4 高温ガス炉での炉内計装運用の検討	3.4-1
3.4.1 炉内環境評価及び検出器運用検討【R3-R5】	3.4-1
3.4.2 耐高温中性子検出器の実験【R3-R5】	3.4-7
3.5 研究推進【R3-R5】	3.5-1
4. 結言	4.1

表一覧

表 3. 1. 1-1 可動式検出器システムの総合比較	3. 1-5
表 3. 1. 1-2 各方式のコスト評価の比較結果	3. 1-7
表 3. 1. 1-3 ロボットの走行方式の比較結果	3. 1-7
表 3. 1. 2-1 HTRR の核計装費用で規格化された構造部の費用	3. 1-11
表 3. 3. 1-1 異なる BGeN 膜厚(1、3、5 μm)で作製した BGeN 検出器 中性子検出の計数率及び中性子捕獲率	3. 3-5
表 3. 3. 2-1 耐高温中性子検出器の使用外保管による影響評価の総評	3. 3-8
表 3. 3. 2-2 α線検出評価評価に用いた検出器バイアス	3. 3-8
表 3. 3. 2-3 保管後の検出器 1 のα線のピーク位置	3. 3-8
表 3. 4. 2-1 主な測定条件	3. 4-8

図一覧

図 2. 1-1 本業務の全体計画図	2. 1-3
図 3. 1. 1-1 螺旋導管方式における計測ステップの主要要素	3. 1-7
図 3. 1. 1-2 螺旋導管方式の自走型ロボットの形状及び走行イメージ	3. 1-8
図 3. 1. 1-3 螺旋導管方式の非常回収用ロボットの構成及び動作	3. 1-8
図 3. 1. 2-1 本研究で検討された可動検出器の方式	3. 1-9
図 3. 2. 1-1 KUCA 黒鉛減速炉心	3. 2-4
図 3. 2. 1-2 KUCA 黒鉛減速炉心の燃料構成	3. 2-4
図 3. 2. 1-3 可動式検出器	3. 2-5
図 3. 2. 1-4 可動式検出器の移動	3. 2-5
図 3. 2. 1-5 A 方向に移動した際の検出器信号	3. 2-6
図 3. 2. 1-6 B 方向に移動した際の検出器信号	3. 2-7
図 3. 2. 1-7 C 方向に移動した際の検出器信号	3. 2-7
図 3. 2. 1-8 D 方向に移動した際の検出器信号	3. 2-8
図 3. 2. 1-9 燃料領域の分割法	3. 2-8
図 3. 2. 1-10 4 領域出力のアンフォールディングの結果	3. 2-9
図 3. 2. 1-11 提案可動式検出システムの体系	3. 2-9
図 3. 2. 1-12 提案可動式検出システムの体系 におけるアンフォールディングの結果	3. 2-9
図 3. 2. 2-1 ニューラルネットワークの実装	3. 2-11
図 3. 2. 2-2 生成されたデータ(ノイズ有無)	3. 2-12
図 3. 2. 2-3 予測結果(-10<=y<=10)	3. 2-13
図 3. 2. 2-4 予測結果(-1<=y<=1)	3. 2-14
図 3. 2. 2-5 音声データ及びノイズを加えたデータ	3. 2-15
図 3. 2. 2-6 ノイズ除去工程のダイアグラム	3. 2-15
図 3. 2. 2-7 分割した波形データ	3. 2-16
図 3. 2. 2-8 フーリエ変換に用いるハミング関数	3. 2-17

図 3. 2. 2-9	$\sin(10 \cdot 2\pi t)$ * 矩形関数と $\sin(10 \cdot 2\pi t)$ * ハミング関数	3. 2-18
図 3. 2. 2-10	ハミング関数スケール後の波形データ	3. 2-18
図 3. 2. 2-11	フーリエ変換後の虚数の長さ	3. 2-19
図 3. 2. 2-12	実フーリエ変換の要素抽出の結果	3. 2-19
図 3. 2. 2-13	抽出された周波数成分 (ハミング関数スケール有)	3. 2-20
図 3. 2. 2-14	抽出された周波数成分 (ハミング関数スケール無)	3. 2-20
図 3. 2. 2-15	ニューラルネットワークに対する入出力	3. 2-21
図 3. 2. 2-16	元の音声、ノイズ入り音声及びノイズ除去音声	3. 2-22
図 3. 2. 2-17	ネットワークの構成	3. 2-24
図 3. 2. 2-18	重み関数の比較	3. 2-25
図 3. 2. 2-19	値の再現結果 (正則化条件無: $\lambda=0$)	3. 2-26
図 3. 2. 2-20	値の再現結果 (正則化条件有: $\lambda=0.01$)	3. 2-26
図 3. 3. 1-1	放射線計測用高温加熱真空チャンバー	3. 3-1
図 3. 3. 1-2	各 B Ga N 膜厚における中性子捕獲時に得られる エネルギースペクトルの計算結果	3. 3-2
図 3. 3. 1-3	異なる B Ga N 膜厚 (1、3、5 μm) の B Ga N-pin 構造の断面 SEM 像	3. 3-2
図 3. 3. 1-4	異なる B Ga N 膜厚 (1、3、5 μm) の B Ga N-pin 構造の XRD 測定結果 ($2\theta-\omega$ 測定、 図中 FWHM は B Ga N (0002) 面の XRC-FWHM 値)	3. 3-3
図 3. 3. 1-5	異なる B Ga N 膜厚 (1、3、5 μm) で作製した B Ga N 検出器の α 線 2D エネルギースペクトル	3. 3-3
図 3. 3. 1-6	UTR-KINKI での中性子照射実験による中性子検出特性評価結果： 異なる B Ga N 膜厚 (1、3、5 μm) で作製した B Ga N 検出器の 中性子検出 2D エネルギースペクトル	3. 3-4
図 3. 3. 1-7	高温加熱真空チャンバーによる高温環境下での放射線検出特性評価結果： 各 B Ga N 膜厚の高温環境でのノイズ信号の変化	3. 3-5
図 3. 3. 2-1	耐高温中性子検出器の使用外保管環境を模した保管環境	3. 3-9
図 3. 3. 2-2	保管前の α 線検出特性 (条件 0)	3. 3-10
図 3. 3. 2-3	保管後の検出器 1 の α 線検出特性	3. 3-11
図 3. 3. 2-4	保管後の検出器 2 の α 線検出特性	3. 3-12
図 3. 3. 2-5	保管後の検出器 3 の α 線検出特性	3. 3-13
図 3. 4. 1-1	全体配置図	3. 4-4
図 3. 4. 1-2	駆動機構配置図その 1	3. 4-4
図 3. 4. 1-3	駆動機構配置図その 2	3. 4-5
図 3. 4. 1-4	駆動機構配置図その 3	3. 4-5
図 3. 4. 1-5	駆動機構配置図その 4	3. 4-6
図 3. 4. 1-6	駆動機構配置図その 5	3. 4-6
図 3. 4. 2-1	高温動作試験の実験体系の写真	3. 4-8
図 3. 4. 2-2	検出信号の例	3. 4-9

図 3.4.2-3 波高とパルスの立ち上がり時間で整理した

2次元エネルギースペクトル図・・・・・・・・・・ 3.4-9

略語一覧

BGaN	: Boron Gallium Nitride	(ホウ素を含む窒化ガリウム)
CIC	: Compensated Ion Chamber	(補償型電離箱)
CT	: Computed Tomography	(コンピュータ断層撮影)
HTR	: High Temperature Engineering Test Reactor	(高温工学試験研究炉)
KUANS	: Kyoto University proton Accelerator Neutron Source	(京都大学加速器中性子源)
KUCA	: Kyoto University Critical Assembly	(京都大学臨界集合体)
API	: Application Programming Interface	
UTR-KINKI	:	(近畿大学原子炉)
NN	: Neural Network	(ニューラルネットワーク)
STFT	: Short Time Fourier Transform	(短時間フーリエ変換)

用語一覧

MI ケーブル	: Mineral insulated ケーブル	金属チューブ (シース) に導線と無機絶縁材を圧縮充填したケーブル
エンドレステルハ	: クレーンの一種、ループ状のレール上をホイストが移動する構造	
フィッションチェンバー	: 核分裂計数管とも呼ばれる中性子検出器の一種。検出器の内側に濃縮ウランが塗布されており、中性子と反応し核分裂し、封入ガスを電離させる。	

概略

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所事故以降、非常に優れた安全性を持つ高温ガス炉が注目を浴びてきた。さらに近年の脱炭素化社会への要求による水素製造の需要により、益々、高温ガス炉に期待されるものが大きくなりつつある。一方で、新型炉である高温ガス炉は、その名が示すように、炉内構造物は 1000 °C 近い高温にさらされるため、現行軽水炉で行われるような炉内計装による出力分布測定を想定してこなかった。現行軽水炉では、このような直接的な出力分布測定により、炉内燃料管理を行っており、もし、新型炉である高温ガス炉が同様の利便性を発揮できない場合、運転管理を行う電力事業者の立場からすれば、信頼性を損ねることになりかねない。また、新型炉であり、運転経験が乏しいため運転経験を積む中で、過剰に保守側に積み上げられた工学的安全係数を合理的に低減し、より経済的な発電を行う必要がある。そのため、高温ガス炉においても出力分布の測定法が必要である。そこで、本研究では高温ガス炉の出力分布測定のため、炉外計装による方法と、炉内計装による方法の 2 つの方法を開発することを目的とする。

3 ヶ年計画の 3 年目である令和 5 年度は、以下を実施した。

(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）

令和 4 年度に決定した検出器システムの概念設計に対して長年にわたって安定動作させ、有用なデータを取得することができるよう、可動式検出器システムの計測面における保守点検法の概念設計及びコスト評価を行い、実施項目 (1) ② の評価結果と統合して、代表システムを決定した。

② 提案システムの構造検討

実施項目 (1) ① で ANSeeN が令和 4 年度に決定した代表システムとなりうる各検出器システム（提案システム）の概念設計に対して構造面における保守点検法の検討を行うとともに検出器システムの構造面におけるコスト評価を行った。

(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

対象炉心に関し、令和 3 年度に開発した検出器感度評価法、令和 4 年度に開発した出力分布の評価法を用いた検出器感度及び出力分布を用いて検出器信号を合成しその妥当性を確認した。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

不確かさの影響を考慮して AI・深層学習技術の検出器信号のノイズ低減及び測定点を増やすための検出器感度評価の加速の両面に対する応用を検討し、ノイズに対して安定なアンフォールディング手法を確立した。

(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）

令和 4 年度に開発した評価手法を用いて、中性子検出特性及び高温環境下で放射線

検出特性について性能評価を行った。

② 検出器システムの開発 (再委託先：ANSeeN)

令和4年度に提示した使用環境条件に基づき、耐高温中性子検出器の使用外保管、およそ200 °Cにおける非動作時の保管に対する経時変化を評価した。

(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

令和4年度の成果を基に、炉内計装の駆動機構等の構造に関する調査及び検討を行い、機器構造図を作成し、運用方法を検討した。

② 耐高温中性子検出器の実験

令和4年度に実施した予備実験を基に、低エネルギーの中性子ビームを用いて、耐高温中性子検出器の高温環境下での中性子計測の動作性を確認した。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めた。

以上、3カ年計画の3年目として令和5年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。特に、可動式検出器においては、高温工学試験研究炉（以下、「HTTR」と略す。）からの技術ギャップが最も小さい縦導管内牽引方式が総合的に優れており、本研究における代表概念に決定された。出力分布のアンフォールディン手法では、京都大学臨界集合体（以下、「KUCA」と略す。）における実測値の検出器信号から出力分布の再合成に成功するとともに、実験実証に成功した。同体系において、これまで検討してきた各可動式検出器がとりうる検出器位置における信号を模擬した数値実験において、出力分布のアンフォールディンに成功し、提案方式の妥当性を示した。炉内核計装技術の開発では、高温環境下で動作可能な検出器の可能性について検証を行い、BGaN半導体検出器の材料特性より高温耐性の可能性を見出し、中性子検出器デバイスの作製及び評価を実施することで高温中性子検出器の可能性を示唆した。今後は、本研究において得られた結果を以って、更なる工業実証、社会実装に向けた研究開発を行っていく予定である。

1. はじめに

東京電力ホールディングス株式会社福島第一原子力発電所事故以降、非常に優れた安全性を持つ高温ガス炉が注目を浴びてきた。さらに近年の脱炭素化社会への要求による水素製造の需要により、益々、高温ガス炉に期待されるものが大きくなりつつある。一方で、新型炉である高温ガス炉は、その名が示すように、炉内構造物は 1000 °C 近い高温にさらされるため、現行軽水炉で行われるような炉内計装による出力分布測定を想定してこなかった。現行軽水炉では、このような直接的な出力分布測定により、炉内燃料管理を行っており、もし、新型炉である高温ガス炉が同様の利便性を発揮できない場合、運転管理を行う電力事業者の立場からすれば、信頼性を損ねることになりかねない。また、新型炉であり、運転経験が乏しいため運転経験を積む中で、過剰に保守側に積み上げられた工学的安全係数を合理的に低減し、より経済的な発電を行う必要がある。そのため、高温ガス炉においても出力分布の測定法が必要である。

そこで、研究者らは、この高温環境において出力分布を測定する方法を考案した。1 つ目は、黒鉛減速炉の特徴を活かした、中性子の飛程の長さを利用し、炉外検出器により炉内の出力分布を測定する手法である。このような試みは原子力の歴史の中で試みられたことは無く、完成した場合、その利便性は大きい。また、同様に新型炉であり、炉内環境が高温であることから同様に出力分布測定を検討してこなかった高速炉も中性子の飛程が長い炉心であり、同様に本開発技術の適用が期待できる。また、この技術を軽水炉の炉内計装に適用すれば、これまで、特定の燃料集合体の出力分布しか観測できなかったものに対し、複数の炉内計装を相補的に用いることにより、全燃料集合体の出力分布の測定が可能となる見込みがある。2 つ目は、耐高温検出器を開発し直接出力分布を測定する方法である。この方法に関しても、多くの波及効果が期待できる。また、この両方に対し、高温・高線量環境下の計装、計測信号の長距離伝送など各要素技術、システム設計など、システム面に対する課題も多く、これらの成果も今後の計装技術の発展に資するものとなる。

このように、本研究における開発は、関連する各分野に技術的な新規性があり、その対象も高温ガス炉、高速炉の新型炉だけではなく、既存の軽水炉にも適用可能なものであり、波及効果も大きなものである。

本報告書では、第 1 章に本研究の業務計画、第 3 章に本研究の令和 5 年度における成果をそれぞれ述べるとともに、第 4 章にまとめを述べる。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。研究開発項目を以下に示す。

(1) 可動式検出器の開発

軽水炉の運転系炉外計装として用いられる補償型電離箱(以下「CIC」と略す。)と同等の中性子検出率が得られ、連続的に駆動させることが可能で、測定信号も連続的に伝送でき、メンテナンス性に優れたシステムの設計及びコスト評価を行う。

① 可動式検出器システムの開発 (再委託先: ANSeeN)

上記の目標に対し、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。

② 提案システムの構造検討

上記の目標に対し、代表システムの構造設計及びコスト評価を行う。

(2) 出力分布のアンフォールディング技術の開発

検出器信号が出力領域と各検出器位置の感度係数との加重合計により評価できる。感度係数は事前に解析により求める必要があり、出力領域の数と同数の測定点数以上の測定ができれば、理論上逆算が可能である。この感度係数の評価手法及び、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。

① 検出器感度・出力分布評価手法の整備

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。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

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。

(3) 耐高温中性子検出器の検討

高温ガス炉では、制御棒のスタンドパイプ内に放射線センサーを格納でき、ガスタービンのバイパス流での冷却により、使用外では200℃程度の環境で保存可能である。使用時は専用の駆動装置を設計することにより、炉心の開放を行わずに自在に炉内への装荷が可能である。そこで、耐高温性、耐放射性、 γ 線との分離特性の組み合わせからいくつかの素子が候補になる。そこで、使用に耐えうる素子の選定、電装系の設計を行い、それぞれの候補の性能の提示を行う。

① センサー素子の開発 (再委託先: 静岡大学)

上記の目標に対し、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。

② 検出器システムの開発 (再委託先：ANSeeN)

上記の目標に対し、代表システムのプロトタイプ設計を行う。

(4) 高温ガス炉での炉内計装運用の検討

研究項目(3)で検討した中性子検出器を用いた、高温ガス炉のスタンバイパイプへ格納・駆動させるための構造を検討するとともに、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を行い、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実施する。炉内では、 γ 線強度が著しく大きいため、中性子線と γ 線との分離性能を向上させることが必要である。そこで、ボロン添加検出器と非ボロン添加検出器の2種類を用意し、CICと同様の考え方で、 γ 線ノイズを低減する工夫なども検討する。また、加速器中性子源施設を用いて、中性子飛行時間(以下、「TOF」と略す。)法による検出器のエネルギー特性の実験的評価、及び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実施する。

① 炉内環境評価及び検出器運用検討

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。

② 耐高温中性子検出器の実験

上記の目標に対し、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。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

項目	年度	令和3年度	令和4年度	令和5年度
(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) ② 提案システムの構造検討		システム概念検討	システム設計	システム保守検討 ・コスト評価
		構造概念検討	構造設計	構造保守検討 ・コスト評価
(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 ② 出力分布アンフォールディング 手法の検討		検出器感度評価手法の整備	出力分布評価手法の整備	検出器感度・出力分布評価
		予備検討	成立性確認	ノイズ影響の検討 安定化手法の整備
(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) ② 検出器システムの開発 (再委託先: ANSeeN)		センサー素子選定	高温下評価手法開発	高温動作試験
		検出器システム検討	検出器システム検討 ・使用環境条件を提示	使用外保管評価
(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 ② 耐高温中性子検出器の実験		中性子線・ガンマ線環境 評価手法の整備	中性子線・ガンマ線評価	機器構造検討
		実験方法検討	エネルギー特性評価	高温動作試験
(5) 研究推進		研究管理	研究管理	研究管理
		まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

図 2.1-1 本業務の全体計画図

2.2 各年度計画

2.2.1 令和3年度の計画

令和3年度の計画の概要は以下の通りである。

(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）

可動式検出器システムの検出器・駆動方式の組み合わせを検討し、代表概念の決定を行う。また、回転機構と検出器の連携動作、遠距離伝送、制御等について、シミュレーションや小型モデルを構築することにより基本概念の検討を行う。

② 提案システムの構造検討

実施項目(1)①でANSeeNが提案した検出器の稼働方式に対して、構造、製作性、保守性等の観点からの技術検討を行い、優劣を評価して、ANSeeNによる代表概念決定に資する情報を提供する。代表概念に関し、駆動・構造面において構造概念図の製図を行う。

(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

輸送方程式を解くためのXYZメッシュ体系を従来より詳細化し、数値誤差の少ないメッシュ体系における検出器感度評価手法の整備を行う。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

手法の成立性評価、課題抽出を目的として、先行してアンフォールディング手法の予備検討を行う。

(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）

高温環境下での使用に耐えうるセンサー素子の候補を複数選定し、各々の使用条件を提示する。

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）

実施項目(3)①の素子候補（複数）に対して、中性子の検出を行う炉内において、検出器信号の増幅、変換、伝送、及び検出器の制御を行うために高温環境下での動作を視野に入れた検討を進め、検出器システムとしての概念設計を行う。

(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

高温ガス炉の炉内環境を模擬するため、炉内における中性子、即発 γ 線、遅発 γ 線の評価手法についての検討を行う。

② 耐高温中性子検出器の実験

令和4年度以降に実施する中性子ビームを利用した検出器の応答特性試験に向けて準備を行い、また、実験体系の具体化についての検討を行う。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

2.2.2 令和4年度の計画

令和4年度の計画の概要は以下の通りである。

(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）

高温・高線量下の原子炉環境を考慮し、令和3年度に決定した代表概念に対して可動式検出器システムの概念設計を行う。

② 提案システムの構造検討

高温・高線量下の原子炉環境を考慮し、実施項目(1)①でANSeeNが令和3年度決定した可動式検出器の代表概念の1つに対して構造設計を行う。

(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

対象炉心に関し核設計を行い、出力分布を評価する。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

不確かさを含む体系を対象に、アンフォールディング手法の適用性につき検討する。

(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）

高温環境下でのセンサー素子基礎特性の評価手法開発を行う。

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）

実施項目(3)①の素子候補（複数）に対して、耐高温中性子検出器システムの概念設計を行い、使用環境条件の提示を行う。

(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

HTTRを対象に高温ガス炉の炉内における中性子・即発 γ 線、遅発 γ 線のエネルギー分布を評価する。

② 耐高温中性子検出器の実験

加速器中性子源を用い、TOF 法に基づく実験を行う。耐高温中性子検出器のエネルギー毎の検出効率の評価を目的とし、予備実験として常温環境での実験を行う。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

2.2.3 令和5年度の計画

令和5年度の計画の概要は以下の通りである。

(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）

令和4年度に決定した、検出器システムのプロトタイプ設計に対して長年にわたって安定動作させ、有用なデータを取得することができるよう、可動式検出器システムの計測面における保守点検法のプロトタイプ設計及びコスト評価を行い、実施項目(1)②の評価結果と統合して、代表システムを決定する。

② 提案システムの構造検討

実施項目(1)①でANSeeNが令和4年度に決定した代表システムとなりうる各検出器システム（提案システム）のプロトタイプ設計に対して構造面における保守点検法の検討を行うとともに検出器システムの構造面におけるコスト評価を行う。

(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

対象炉心に関し、令和3年度に開発した検出器感度評価法、令和4年度に開発した出力分布の評価法を用いた検出器感度及び出力分布を用いて検出器信号を合成しその妥当性を確認する。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

不確かさの影響を考慮してAI・深層学習技術の検出器信号のノイズ低減及び測定点を増やすための検出器感度評価の加速の両面に対する応用を検討し、ノイズに対して安定なアンフォールディング手法を確立する。

(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）

令和4年度に開発した評価手法を用いて、中性子検出特性及び高温環境下で放射線検出特性について性能評価を行う。

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）

令和 4 年度に提示した使用環境条件に基づき、耐高温中性子検出器の使用外保管、およそ 200 °Cにおける非動作時の保管に対する経時変化を評価する。

(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

令和 4 年度の成果を基に、炉内計装の駆動機構等の構造に関する調査及び検討を行い、機器構造図を作成し、運用方法を検討する。

② 耐高温中性子検出器の実験

令和 4 年度に実施した予備実験を基に、低エネルギーの中性子ビームを用いて、耐高温中性子検出器の高温環境下での中性子計測の動作性を確認する。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進める。

3. 業務の実施内容及び成果

3.1 可動式検出器の開発

3.1.1 可動式検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）【R3-R5】

【R3-R4】

令和3年度は、可動式検出器システムの検出器・駆動方式の組み合わせを検討し、代表概念の決定を行った。決定された代表概念に対して、回転機構と検出器の連携動作、遠距離伝送、制御等について、シミュレーションや模型による小型モデルを構築することにより基本概念の検討を行った。成果として、5つの方式の駆動方式を提案し、そのうち4つの方式を代表概念として令和4年度での検討を継続することとした。

令和4年度は、高温・高線量下の原子炉環境を考慮し、令和3年度に決定した代表概念に対して可動式検出器システムの概念設計を行った。また、複数の条件での検討を行い代表となるシステムを選定設計した。各種条件で必要なシステムを明確化し、実装時のバックアップや性能向上のための知見を得た。成果として、4つの代表概念のうち、2つの方式が実現可能性が高い概念であるという結果を得て、代表となるシステムとして令和5年度での検討を継続することとした。

【R5】

令和5年度は、令和4年度に決定した検出器システムの概念設計に対して長年にわたって安定動作させ、有用なデータを取得することができるよう、可動式検出器システムの計測面における保守点検法の概念設計及びコスト評価を行い、「3.1.2 提案システムの構造検討」の評価結果と統合して、代表システムを決定した。具体的には、これまでに提案した複数の概念設計に対して、それぞれの保守点検法の概念設計及びコスト評価、原子炉建屋のレイアウトへの影響の検討結果を追加し、総合的な比較を行った。その結果を表3.1.1-1に示す。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。

計測面における保守点検法の概念設計については以下の通りである。

● 螺旋導管方式

原子炉の定期点検時に必要な数のロボット（検出器及び計測器を搭載している）を待機場所へ搬入する。必要数はロボットの寿命と計測回数からなる最低台数に、故障率からなら予備台数を加えた値とする。計測時はロボットを順番に使用し、寿命を迎えたロボットや故障したロボットはスキップする。例えば、2年の定期点検の間に月1回の計測を行い、ロボットの寿命が1計測分の場合、24台＋予備機を搬入する。また、駆動部の故障により導管内で停止したロボットを救出するための救助ロボットも一緒に搬入する。救助ロボットは計測できないが、導管内で停止したロボットを押し出す機構を有する。

● 周回クレーン／周回アーム方式

計測器は炉外に設置されるため常に保守点検が可能である。一方で、クレーン／アームの先に取り付けられる検出器は原子炉の定期点検時のみ保守作業が可能である。検出器故障時の取り換えが定期点検時以外は困難で、1台の故障が計測に対して致命的となる。

- **複数検出器固定方式**

保守対象が最も多く保守点検コストが高い。計測器は炉外に設置されるため常に保守点検が可能である。検出器の取り換えが定期点検時以外は困難であるが、1台の故障がアンフォールディング計算に与える影響が小さく、計算精度が低下するものの検出器システムとしては稼働し続ける。

- **縦導管内牽引方式**

保守対象の数とアンフォールディング計算に対する影響が、周回クレーン／周回アーム方式と複数検出器固定方式の間である。

- **浮遊方式**

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り、採用不可。

コスト評価については、計測面におけるコスト評価を実施した。その結果と3.1.2項の構造面に対するコスト評価結果を合わせたコスト評価の結果を、HTTRの核計装全体の費用で規格化した値として表3.1.1-2に示す。各方式における結果の概略は以下の通りである。

- **螺旋導管方式**

導管内にロボットが自走するための構造が必要である。使い捨て運用のため複数台のロボットが必要である。

- **周回クレーン／周回アーム方式**

駆動系及び検出器の数が少ない。一方で、駆動系は炉室内のため耐放射性及び耐熱設計が必要である。

- **複数検出器固定方式**

駆動系の数が多い。検出器の数が最も多い。

- **縦導管内牽引方式**

駆動系の数が多い。検出器の数が多い。

- **浮遊方式**

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り、採用不可。

以上の検討結果を踏まえ、構造・計測・保守・コストいずれにおいても実現性が高い方式は、螺旋導管方式と縦導管内牽引方式の2つである。これら2方式のうち、高温ガス炉における原子炉建屋全体での整合性を踏まえると、縦導管内牽引方式の方がより適していると考えられる。もともと炉内出力分布測定は軽水炉において必要であるが、高温ガス炉においては安全性の観点からは不要であった。しかしながら、軽水炉と同じ利便性を求める電力事業者からは炉内出力分布測定のニーズが残ると考えられる。したがって、炉内出力分布測定は高温ガス炉としては完全なオプションであるべきであり、そのために前例のない構造・装置を導入して原子炉建屋内のレイアウトが変わることは得策ではない。このことを考慮すると、駆動系が現行のHTTRのものと変わらず周方向に増えただけで、新たな他の設備の移転も含むようなレイアウトの変更は不要であるため、HTTRからの技術ギャップの小さい縦導管牽引方

式の方が代表概念として適している。よって、縦導管牽引方式が総合的に優れており、本研究における代表概念として採択した。なお、令和5年度のコスト評価にあたっては、前例のない駆動方式である螺旋導管方式に対して、計測ステップ、ロボットの走行方式、ロボット装置構成と設計を行いコストの試算を行った。図3.1.1-1に計測ステップの主要要素を示す。計測ステップは搬送フェイズ、測定フェイズ、回収フェイズの3要素に分かれており、それぞれの詳細は以下の通りである。

- **搬送フェイズ**

1. 待機場所にて充電中のロボットをクレーン等で搬送し縦穴上まで移動する。
2. 入り口縦穴内へロボットを降下させ、レールに設置する。
3. ロボットの自走スイッチが入力され、螺旋導管内へと移動する。

- **測定フェイズ**

1. ロボットは螺旋導管内を連続走行し、ドグを検知した時にセンサー側へ接点信号を送信する。
2. センサーはロボット側からの接点信号を受信したらその時の測定データを順番に記録する。
3. 測定が完了したロボットは出口側縦穴内で停止する。

- **回収フェイズ**

1. 出口側縦穴内のロボットをクレーン等で回収し待機場所へ搬送する。
2. 待機場所でロボットを充電しつつ、通信ケーブルを接続しデータを回収する。

このような計測ステップを実現するための自走型ロボットとして、以下の4つの走行方式を検討した。

- **ラック走行式**

螺旋導管内に走行ガイドレールを施設し、レール上のラックギヤとロボットのピニオンギヤをかみ合わせて走行する方式。滑りによる「走行距離と現在位置の誤差」が生じにくいと見込まれるため、サーボモータやエンコーダを採用することで測定位置を正確に推定することが可能となる。ただし、ギヤ同士がかみ合うことで、電源喪失時に非常回収を試みても位置が固定されてしまい回収難易度が高くなると予想され、また螺旋導管を設置する際に距離300 mと想定されるラックギヤを螺旋状に精度よく敷設する必要があるため、技術的な面でも成立性に課題が残る。

- **タイヤ走行式**

ロボットにモータで駆動するタイヤが備わっており、螺旋導管内を自力で走行する方式。タイヤの滑りにより走行距離から推定した位置と実際の位置との間に誤差が生じるため、測定位置にドグを設置しレバースイッチにてそれらを検出することで位置決めを行う。ラック方式に比べ精度は劣るものの、精密部品の使用率が低いため比較的耐放射線性が高く、導管内へ設置する必要のある部品もドグだけであるため構造が簡素である。ただし、ガイドとなるものが存在しないため、螺旋導管内での姿勢安定性に課題が残る。

- **ワイヤー移動式**

螺旋導管内にロープウェイのようにワイヤーを張り巡らせ、ワイヤーを送ることによって検出器が動いていく方式。ワイヤーは螺旋導管の両端に設置されたウィンチにより送られる。モータやギヤボックス、バッテリーなど走行用の機構をロボットに搭載する必要がなく、検出器及びその周辺機器に大きくスペースを割けるメリットがある。一方で、ワイヤーが消耗した場合に交換することが困難なため、保守性に劣る。

- **タイヤ式+走行ガイド**

タイヤ走行式のロボットに加えて、螺旋導管内にガイドレールを施設し姿勢安定性の課題を克服した方式。優位性は、精密部品の使用率が低いことによる比較的高い耐放射線性のみであるが、大きなデメリットがなくバランスのいい方式である。

検討結果を表3.1.1-3に示す。特徴として、高い測定精度を期待できるラック式、実現性の高いタイヤ式、耐荷重の高いワイヤー式があり、タイヤ式のデメリットを克服したタイヤ式+走行ガイド方式を代表方式として採用し、詳細な設計及びコストの試算を行った。設計したロボットの装置構成を以下に示す。

- **装置仕様**

本体重量：50 kg

走行速度：20 mm/s以上

機械式スイッチによりモータの動作や検出器への位置検出信号の送信を行う。

バッテリー：耐熱性に優れるリン酸鉄リチウム電池

位置検出精度（総合）：±100 mm

耐放射線性： $1 \times 10^6 \mu\text{Sv}$ 以上（1回の測定ごとの使い捨てを想定）

非常回収方法：類似構成の非常回収用ロボットを準備

- **測定部仕様**

サイズ：φ 150 mm L300 mm

ロボットとの通信インターフェースを備える

待機ステーションとコネクタ接続時、記録データ読み出し機構

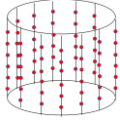
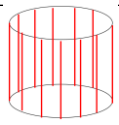
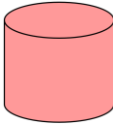
ロボットの形状および走行イメージを図3.1.1-2に、非常回収用のロボットの構成及び動作を図3.1.1-3に示す。以上の設計されたロボットを用いて、表3.1.1-2における螺旋導管方式のコスト評価を実施した。

表 3. 1. 1-1 可動式検出器システムの総合比較 (1/2)

	螺旋導管方式	周回クレーン	周回アーム方式
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
駆動部の数	1	2	2
駆動部の設置場所	壁内	炉室	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）を上下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
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
検出器の数	1	1	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
計測器の設置場所	全てをロボットに搭載	炉室外	炉室外
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。
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。ロボットの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は困難で一台の故障が致命的となる。
比較結果	普	難	難
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台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性および耐熱設計が必要で高コスト。	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性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。
比較結果	中	低	中
原子炉建屋のレイアウトへの影響			
比較結果	中	大	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牽引方式に劣る。	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。
代表システムへの選出	-	-	-

(*)Nは縦導管数、Mは深さ方向の測定点数を表す

表 3.1. 1-1 可動式検出器システムの総合比較 (2/2)

	複数検出器固定方式	縦導管内牽引方式	浮遊方式
形状			
駆動系			
駆動系の種類	モーター	モーター	自律型浮遊ロボット
駆動部の数	N(*)	N(*)	1
駆動部の設置場所	壁内	壁内	炉室
判定結果	○	○	×
判定の要旨	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	FC CIC シンチレータ	FC CIC シンチレータ
検出器の数	M × N(*)	N(*)	1
検出器の設置場所	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	炉室外	炉室外 (プ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	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	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に対する影響が左二つの方式の中間。	運用不可
比較結果	難	普	-
計測面におけるコスト評価			
コスト評価概要	駆動系の数が多いが炉室外のため低コスト。検出器の数が非常に多く高コスト。	駆動系の数が多いが炉室外のため低コスト。検出器の数が多く高コスト。	評価不可
比較結果	高	中	-
原子炉建屋のレイアウトへの影響			
比較結果	中	低	大
総評	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は縦導管数、Mは深さ方向の測定点数を表す

表 3. 1. 1-2 各方式のコスト評価の比較結果

	計装	回収システム	駆動システム	検出器	合計
螺旋導管方式	0.44	0.01	0.03	0.90	1.39
周回クレーン方式	0.03	0.00	0.88	0.03	0.93
周回アーム方式	0.03	0.00	1.75	0.03	1.81
複数検出器固定方式	7.61	0.00	0.03	8.68	16.32
縦導管方式	0.76	0.00	0.05	0.87	1.68
浮遊方式	0.44	0.04	0.03	0.90	1.42

表 3. 1. 1-3 ロボットの走行方式の比較結果

評価基準	ラック式	タイヤ式	ワイヤー式	タイヤ式 +走行ガイド
測定位置検出精度・安定性	○	×	△	△
非常回収難易度	×	△	△	△
導管内設置物の規模・実現性	×	○	×	△
ロボットに使用する機器の耐放性	×	○	○	○
ロボットに搭載できる計測機器の重量	△	△	○	△
保守性	△	△	×	△

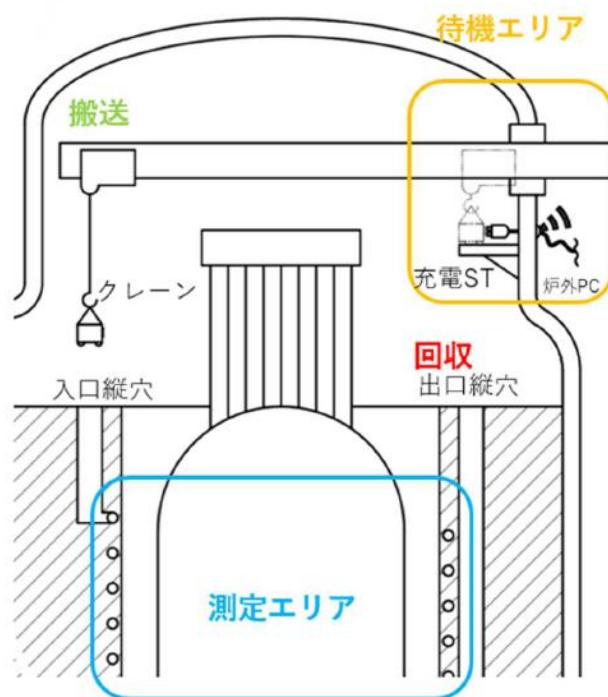


図 3. 1. 1-1 螺旋導管方式における計測ステップの主要要素

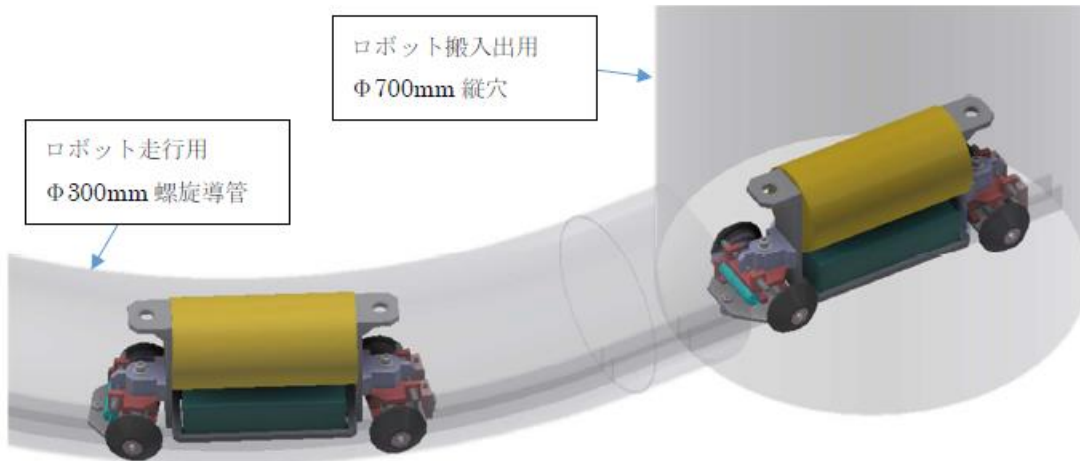


図 3. 1. 1-2 螺旋導管方式の自走型ロボットの形状及び走行イメージ

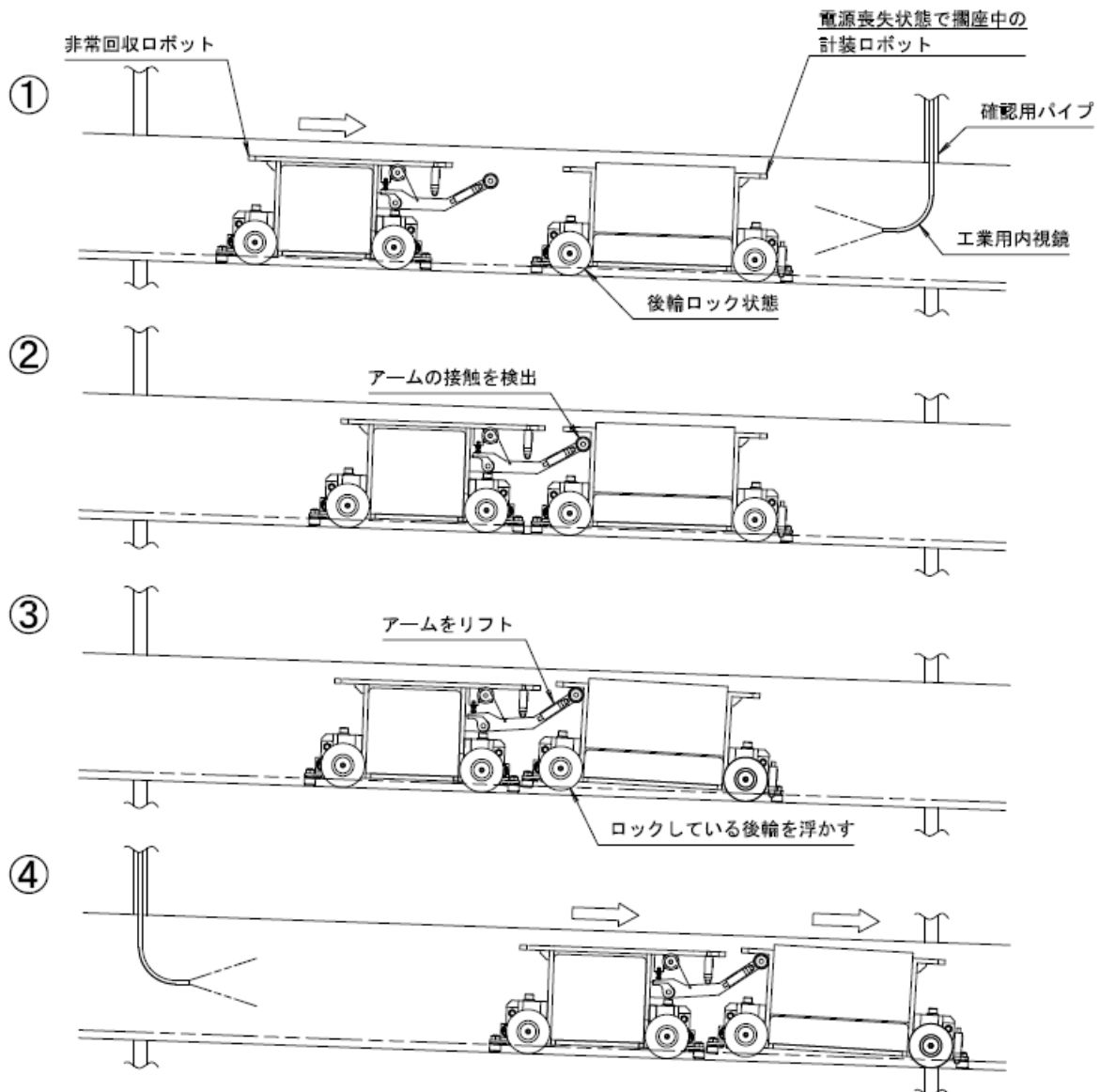


図 3. 1. 1-3 螺旋導管方式の非常回収用ロボットの構成及び動作

3.1.2 提案システムの構造検討【R3-R5】

【R3-R4】

令和3年度は、「3.1.1 可動式検出器システムの開発」で ANSeeN が提案した検出器の可動方式に対して、構造、製作性、保守性等の観点からの技術検討を行い、優劣を評価して、ANSeeNによる代表概念決定に資する情報を提供した。代表概念に関し、駆動・構造面において構造概念図の製図を行った。

令和4年度は、高温・高線量下の原子炉環境を考慮し、「3.1.1 可動式検出器システムの開発」で ANSeeN が令和3年度決定した可動式検出器の代表概念の1つである周回クレーン方式に対して炉室の高温環境を考慮しつ構造設計を行った。

【R5】

令和5年度は、「3.1.1 可動式検出器システムの開発」で ANSeeN が令和4年度に決定した代表システムとなりうる各検出器システム（提案システム）の概念設計に対して構造面における保守点検法の検討を行うとともに検出器システムの構造面におけるコスト評価を行った。具体的には、以下の通りである。

代表システムとなる各検出器システムとしては、令和4年度までの検討で成立性の観点から脱落したものもある。一方で、前提条件が崩れた場合、排除した候補に対しても総合的な優劣を評価しておくことにより、今後、本研究成果の利用価値が汎用的なものになると期待できる。そのため、本研究で対象としたすべての方式について構造面に対する保守点検法及びコスト評価を行っていく。



螺旋導管方式 周回クレーン方式 周回アーム方式 複数検出器固定方式 縦導管内牽引方式 浮遊方式

図 3.1.2-1 本研究で検討された可動検出器の方式

本研究で対象とした方式を図 3.1.2-1 に示す。初めに、構造面に対する保守点検法としては、大きく2つに分けられる。生体遮蔽である炉室のコンクリート壁に埋め込まれるものと、高温・高線量の炉室内に敷設されるものである。螺旋導管方式、複数検出器固定方式、縦導管内牽引方式、浮遊方式に関しては、炉室のコンクリート壁に埋め込まれる。原子炉建屋のコンクリートはその健全性を保つため、65℃以下に保たなければならないとする基準があり、炉容器冷却設備の冷却パネルにより冷やされている。そのため、これらの構造に関しては、健全性を損ねる要因は無く、定期検査においてもそれに伴い行われる自主検査においても検査の対象外である。一方で、周回クレーン方式及び、周回アーム方式はそれぞれ、上部に設置されたレールをクレーンが回り、検出器を上下させる、回転する土台にアームを設置し、そのアームが回転及び検出器を上下させることによる検出器の移動を行う。その設置場所は原子炉圧力容器近辺の炉室内であり、高温高線量環境である。可動部のベアリングは消耗品であり、交換が必要である。炉室内での分解・清掃・点検は困難であり、これらの方式は保守性が非常に悪いと評価される。一方で、螺旋導管方式、複数検出器固定方式、縦導管

方式、浮遊方式に関して、その検出器が配置される導管等の部分に関しては、保守点検は不要であるが、検出器を回収する機構は保守点検が必要である。螺旋導管方式に関しては、自走ロボットが導管内を走行し、浮遊方式についてはドローンが炉室内を飛行する。そして、計測ロボット及びドローンは炉壁内の縦導管を通じてクレーンで引き上げられ、通信により原子炉格納容器もしくはコンファインメント（簡易型の格納容器）外に伝送される。そのため、簡単なクレーンシステムが必要となるが、作業スペースは室温かつ非管理区域であるため、保守性は高く、簡単な外観検査及び動作確認、定期的な分解清掃と部品交換で実施可能である。ただし、非管理区域と言っても安全の思想上、原子炉運転中に原子炉格納容器もしくは、コンファインメントの機密を開放することは許されないため、定期検査に限られる。

複数検出器固定方式、縦導管方式では、検出器は導管内にワイヤーで吊るされ、その上部には、回収用のワイヤー巻き取り機構が設置される。複数検出器固定方式では、吊り下げるだけなので、巻き取りと巻き戻しの機能だけあればよいが、縦導管内牽引方式に関しては、正確な位置の把握が必要なため、ロータリーエンコーダーが敷設される。しかし、その両者には大きな構造の違いはない。一方で、複数検出器固定方式に関しては、測定の上でこれらの構造に動作を期待しないため、保守点検は不要である。縦導管方式に関しては、正確な位置を把握しつつ動作する必要があるため、定期点検時に分解清掃、部品交換のほかには校正が必要となる。ただし、作業スペースは室温かつ非管理区域であるため、保守性は高い。

次に、構造面のコスト評価について検討する。コスト評価に関しては、HTTRの運転系核計装のコストを基準として行う。また、機微情報であるため、以下の様に行う。また、その価格についても明示的には示さず、HTTRの運転系核計装の価格に対する比率で示すものとする。

考慮する費用としては、エンジニアリング費、部材費とする。エンジニアリング費に関しては、設計費であるが、工場における製造のための設計費も含むため、2基以降はゼロにできるというものでもない。一方で、習熟効果での低減を望める部分であり、一般的な原子炉の習熟効果を15%減^(3.1.2-1)としている。これを、エンジニアリング費の削減のみの効果とすると、エンジニアリング費は1/4程度になった。また、このシステム全体が安全保護系から独立できると想定し、その分のコスト減の効果も考慮している。また、据え付け費用は炉室コンクリート内に敷設される導管などを想定すると、原子炉建屋の建設費と分離が不可能となるため、ここでは考慮しないこととした。また、螺旋導管方式のロボットの回収及び、浮遊方式のドローンの回収には、同じく非原子炉グレードのクレーン設備を参考に価格を推定した。検出器機構自体駆動させるシステムに関しては、駆動システムを想定した。周回クレーン方式、周回アーム方式では、倒壊時には直接的に原子炉圧力容器や炉容器冷却設備を損傷する恐れがあるため、原子炉施設内の大型駆動機器としての価格の推定を行っている。一方で、複数検出器固定方式に関しては、HTTRの運転系計装と同様、運転中は動かさないものの、検出器の交換を想定して、巻き取り機構が敷設してある。縦導管方式に関しては、位置検知を行う巻き取り機構が敷設してある。これらの評価された費用をHTTRの核計装全体の費用で規格化した値を表3.1.2-1に示す。

表 3.1.2-1 HTTR の核計装費用で規格化された構造部の費用

	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

参考文献

(3.1.2-1) OECD/NEA, “Reduction of Capital Costs of Nuclear Power Plants,” Head of Publication Service, (2000).

3.2 出力分布のアンフォールディング技術の開発

3.2.1 検出器感度・出力分布評価手法の整備【R3-R5】

【R3-R4】

令和3年度は、輸送方程式を解くためのXYZメッシュ体系を従来より詳細化し、数値誤差の少ないメッシュ体系における検出器感度評価手法の整備を行った。

令和4年度は、対象炉心に関し核設計を行い、出力分布を評価した。令和3年度、令和4年度において、高温ガス炉体系を対象とする検出器感度及び出力分布評価法が完成した。

【R5】

令和5年度は、対象炉心に関し、令和3年度に開発した検出器感度評価法、令和4年度に開発した出力分布の評価法を用いた検出器感度及び出力分布を用いて検出器信号を合成しその妥当性を確認した。実機データを用いての手法検証を優先し、対象炉心をKUCA臨界実験体系とし、検討を行った。評価手法に関しては、上記の令和3年度、令和4年度の開発において並行して行ったものであり、原理的には同等のものである。以下に、KUCA実験の概要及び開発手法の適用の結果を示す。

令和3年度に実施したKUCA架台Bにおいて、高温ガス炉の炉心特性を模擬した黒鉛減速材体系における臨界実験^(3.2.1-1)の実施項目の1つとして、本アンフォールディング手法実証のために、可動式検出器を用いた検出器信号の測定を行ったものである。なお、この臨界実験自体は、京都大学複合原子力科学研究所の令和2年度臨界集合体実験装置共同利用研究課題(R2CA09)とし採択され、令和3年度に実施されたものである。B7/4"G2/8"p8EU(3)+3/8"p38EU炉心と名付けられたこの炉心の構成は図3.2.1-1に示すような体系となっている。炉心の燃料構成は図3.2.1-2に示すように、炉心のスペクトル特性を再現するためのFuel assembly、臨界性を保つためのDriver fuel assemblyと臨界調整のための部分長Driver fuel assemblyの3種類から構成される。減速材として黒鉛の他、ポリエチレンが含まれるが、水やポリエチレンよりも減速能に劣り、適切な減速体系を実現するためには炉心構造が大きくなりがちな黒鉛減速炉心を体系の小さなKUCAで実現するために補助的に加えたものである。これらの燃料を図3.2.1-1の様に配置していく。黒鉛減速材の周りにポリエチレン減速材を配置しているのも十分に中性子を反射させるための対策である。また、密なポリエチレン減速材に複数の検出器が配置されている。そのため、外部検出器(可動式検出器は外部検出器)から見た中性子のストリーミングは複雑なものとなることが予測される。

図3.2.1-3にKUCAに実際に可動式検出器を配置した際の構造を示す。³He検出器を有効長の中心が炉心の中心高さ付近になるように設置している。水平方向の位置関係は図3.2.1-4に示す。ステッピングモーターとボールねじを組み合わせ、検出器を固定した台座の移動位置を監視しながら約1mの範囲で水平移動することが可能である。配置をA、B、C、D方向の4位置に配置し直すことにより、炉心周りの周回を実現している。原子炉を臨界維持した状態において、この検出器を周回させ出力分布のアンフォールディングに必要な検出器信号を取得した。

参照解として必要な出力分布については、積分型中性子輸送方程式をモンテカルロ法に

より解く MVP コード^(3.2.1-2)及び評価済み核データ JENDL4.0^(3.2.1-3)により求めた。令和4年度「3.2.2 出力分布アンフォールディング手法の検討」の実施項目において、アンフォールディングを適用した際は、アンフォールディングに失敗したが、その要因としては、測定データ数自体は多かったものの、それに含まれる実質的な拘束条件が少ない事、随伴法で求めた検出器感度が不適切な結果を与えていたことにあった。そのため、今回は、880枚の燃料板を4グループに分け、アンフォールディングを適用し、検出器感度に関しては、直接法により評価した。直接法では、880枚の燃料版1枚1枚に中性子源を設定した固定源問題を880回繰り返すことにより、検出器効率を評価した。

令和3年度に導出したように、検出器位置 j における検出器信号 R_j は、検出器位置 j の検出器に燃料要素 i からの感度 $w_{j,i}$ と燃料要素 i に対する出力密度 p_i によって、次のように表すことができる。

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i \quad (3.2.1-1)$$

複数の検出器位置 j において、検出器信号を得ることにより複数の方程式が得られ、行列表示で、

$$\vec{R} = \mathbf{W}\vec{P} \quad (3.2.1-2)$$

と表すことができる。出力分布のアンフォールディングは以下の様に行う。

$$\vec{P} = \mathbf{W}^+ \vec{R} \quad (3.2.1-3)$$

$$\mathbf{W}^+ = (\mathbf{W}^T \mathbf{W})^{-1} \mathbf{W}^T \quad (3.2.1-4)$$

この出力分布は最小二乗解として得られる。

初めに検出効率の再現性を確認するため、参照解として MVP コードにより求めた各燃料要素の出力分布 \vec{P} と同じく MVP コードにより評価した検出器感度 \mathbf{W} を (3.2.1-2) 式を用いて検出器信号 \vec{R} を評価し、実測値と比較した。図 3.2.1-5 から図 3.2.1-8 に示す。検出器台座のスweepは、有効長 1 m の間を 86 秒で完了する。1 秒間で、1.2 cm 移動するが、その 1 秒間で係数率を算出し、1.2 cm の移動距離の間の中点位置で検出率を代表させる。青い線が測定値、オレンジの線が固有値問題で発生する中性子を直接的に検出器で検出させた計算値であり、黄色い線は固定源問題として評価した検出器感度と固有値問題として評価した出力分布を掛け合わせたことによる係数率の計算値である。オレンジと黄色の線が完全一致することにより、検出器感度の値が妥当であることが分かる。一方で、計算値と実験値の齟齬は、解析において再現しきれない部分があるためであると推測できる。計測値と計算値の規格化に関しては、それぞれの積分値を一致させるように、計測値に合わせて規格化してある。

B 方向、D 方向に関しては、測定値と計算値が良い傾向を示している。一方で、A 方向、C 方向ではスweep開始点及び終了点付近で、実測値が計算値より大きく上回っている傾向が確認できる。図 3.2.1-4 に示すように、炉心に対して B 方向、D 方向に関しては、ポリエチレン反射体層が薄く直接到達する成分が主体的で解析値と実測値が良い一致を示している。一方で、A 方向、C 方向では炉心からの直接到達成分が厚いポリエチレン反射体層により減衰し、B 方向、D 方向からの漏洩中性子の回り込みの影響が大きいものと推測される。そこで、臨界集合体周りの柱や床面等、解析においてモデル化されていない部分

により、差異が表れていると判断した。

上記の様に燃料領域を4領域として扱っている。その分割を図3.2.1-9に示す。

図3.2.1-1に示す燃料構成の様に、Fuel assembly、Driver fuel assembly及び部分長Driver fuel assemblyの燃料は、それぞれ、8、38、10個の濃縮ウラン板1枚を含む単位セルの繰り返しで構成されるが、検出器は高さ方向には移動させないため、燃料集合体の高さ方向の分割は行わなかった。そして、燃料集合体毎に、4領域に分けている。

アンフォールディングの実機信号に対しての適用結果を図3.2.1-10に示す。横軸は燃料要素領域に対して連番をつけたもの、縦軸は炉心出力を1に規格化したものである。実機測定データより再合成された出力は参照解として与えた出力と完全一致を示しており、ほぼその誤差は無視できる程度である。これは、領域数が少なく、領域内における検出効率の均質化を参照出力の重みづけを用いているため、その中で考慮される出力自体に誤差が発生しないため、4領域の絶対値が評価されることとなる。4領域の絶対値を決めるためには、実機測定値と解析による検出器信号の違いは出力分布の再構成に誤差を与えるに至らない程度の差異であったと考えられる。結果として、実機データによるアンフォールディングの実証は成功したと言える。

次に、実機高温ガス炉模擬（黒鉛減速炉）体系において、本研究で提案した、可動式検出器が実現できるかの検証を行なった。最終的に、代表概念として決定された縦導管内牽引方式の他、螺旋導管方式、周回クレーン方式、周回アーム方式、複数検出器固定方式、浮遊方式に対しても共通するのは、測定点は基本的に、炉心の周囲及び、その上下方向に限られるということである。これは、原子炉圧力容器が円筒形であり、上部はコンクリート遮蔽体に覆われ、下部はスカート部によりコンクリート部に固定されているためである。その意味では、図3.2.1-11に示すように、周方向A、B、C、D方向の他に、それを補完するようにAB、BC、CD、DA方向を追加し、高さ方向にも、検出器長を上下に拡張した3方向とした。それぞれ、86点と考えると、測定点は2064点(86×8×3)となり、それぞれ、一次独立な位置に測定点がある場合、880枚の燃料板の出力分布は無視できる程度の誤差で求まるものとなる。実際に、KUCA実験実証で行ったと同じ条件で評価した検出器感度を用いたアンフォールディングにより出力分布測定を行った出力分布の参照解との比較を図3.2.1-12に示す。誤差の絶対値を平均すると、全体で0.8%と非常に良い一致を示すことを確認した。1点だけ局所的に53.9%の大きな誤差が見られたものの、十分に実用に耐えるものと言える。

このように、本手法は、実機で検証できたうえに、各可動検出器機構の成立性の確認もできた。

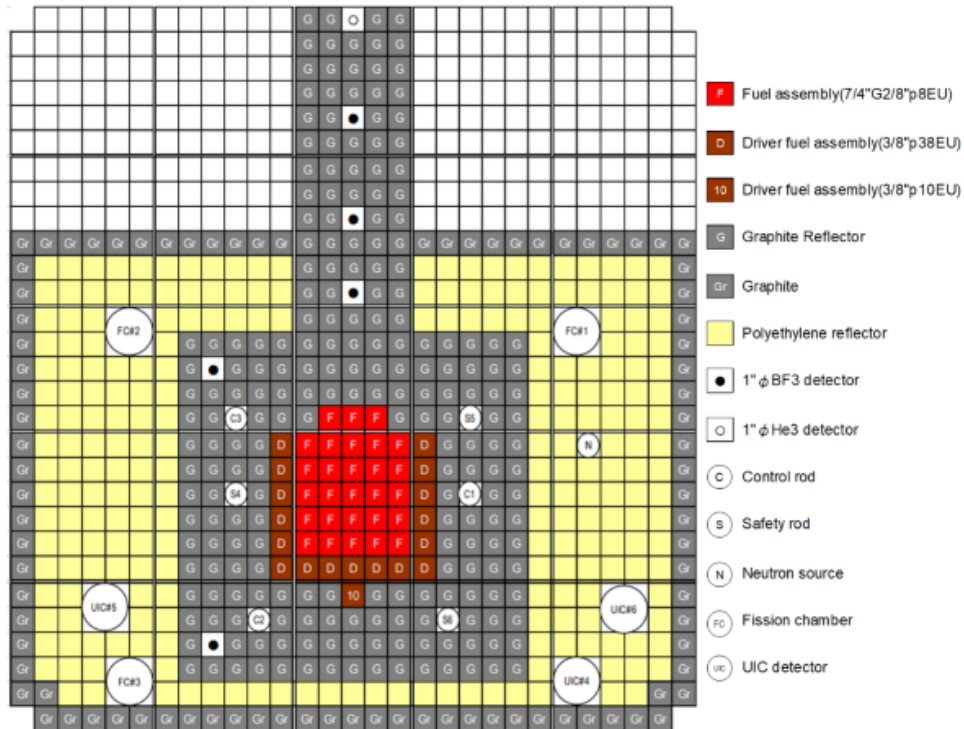
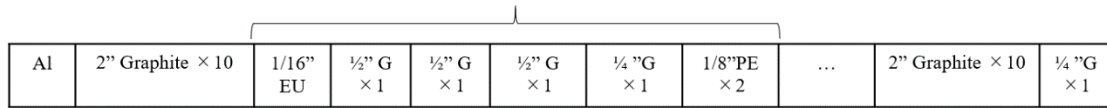


図 3. 2. 1-1 KUCA 黒鉛減速炉心

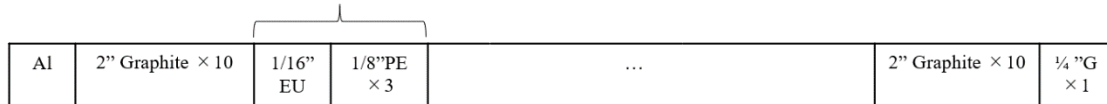
$$1/16'' \text{ EU} + 1/2'' \text{ G} \times 3 + 1/4'' \text{ G} \times 1 + 1/8'' \text{ PE} \times 2$$



8 times repetition

Fuel assembly (7/4''G2/8''p8EU)

$$1/16'' \text{ EU} + 1/8'' \text{ PE} \times 3$$



38 times repetition

Driver fuel assembly (3/8''p38EU)

$$1/16'' \text{ EU} + 1/8'' \text{ PE} \times 3$$



10 times repetition

Driver fuel assembly (3/8''p10EU)

図 3. 2. 1-2 KUCA 黒鉛減速炉心の燃料構成

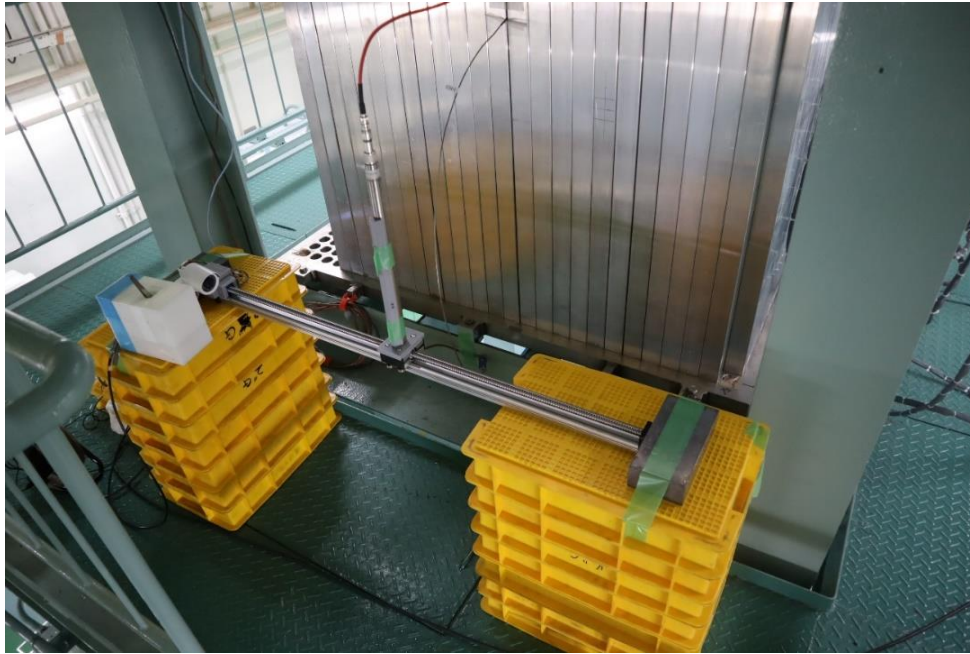


図 3.2.1-3 可動式検出器

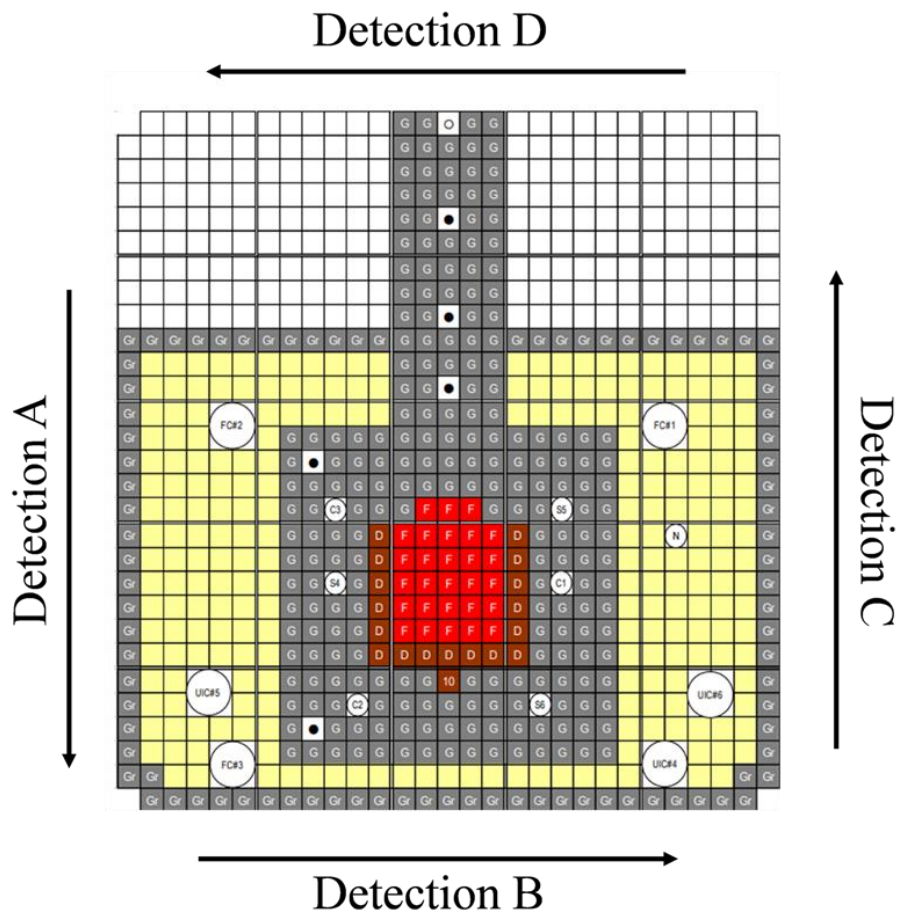


図 3.2.1-4 可動式検出器の移動

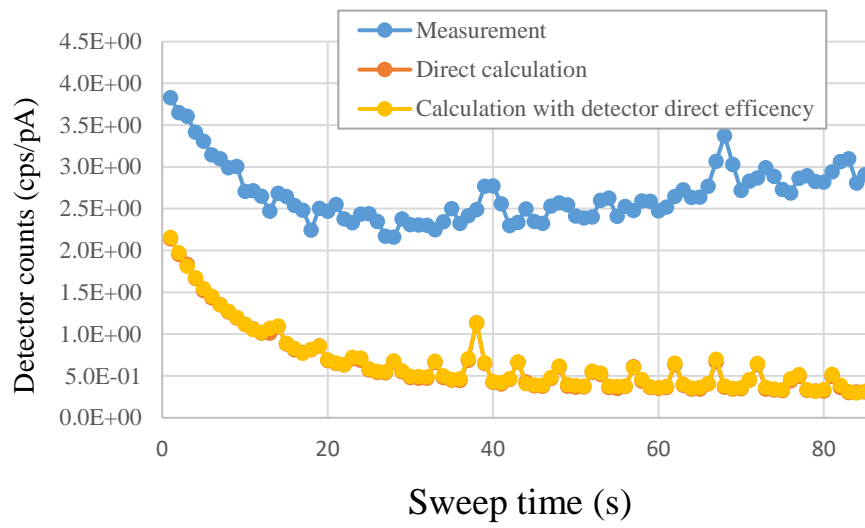


図 3.2.1-5 A 方向に移動した際の検出器信号

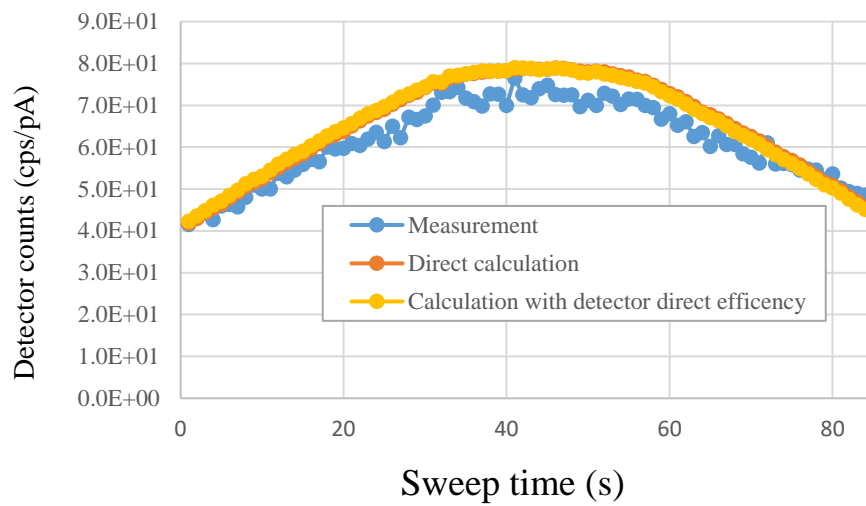


図 3.2.1-6 B 方向に移動した際の検出器信号

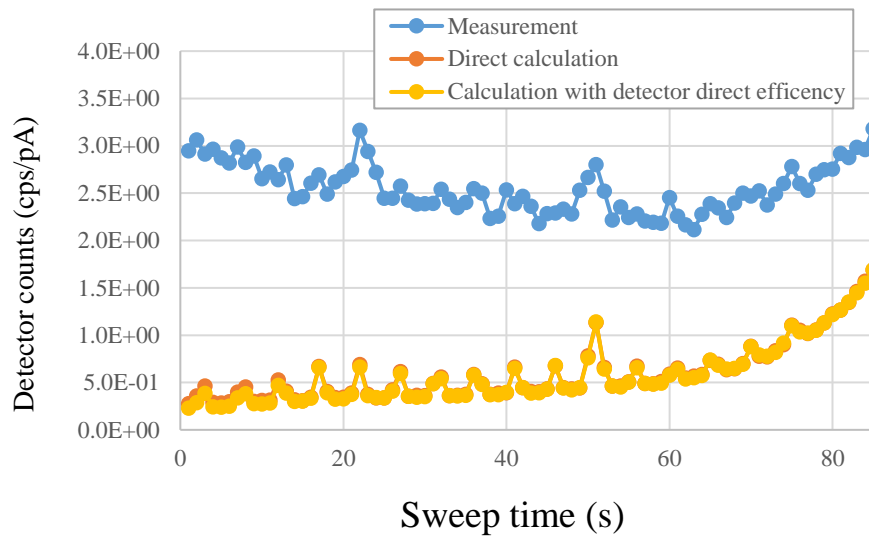


図 3.2.1-7 C方向に移動した際の検出器信号

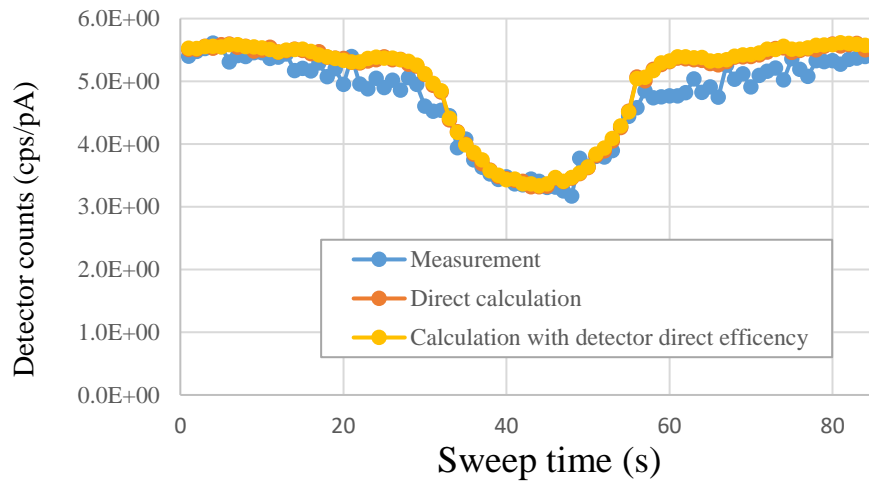


図 3.2.1-8 D方向に移動した際の検出器信号

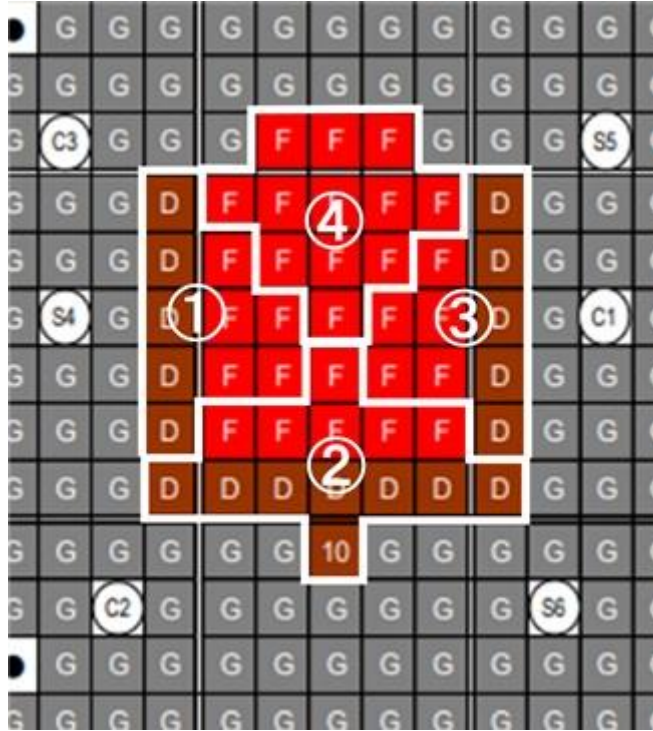


図 3. 2. 1-9 燃料領域の分割法

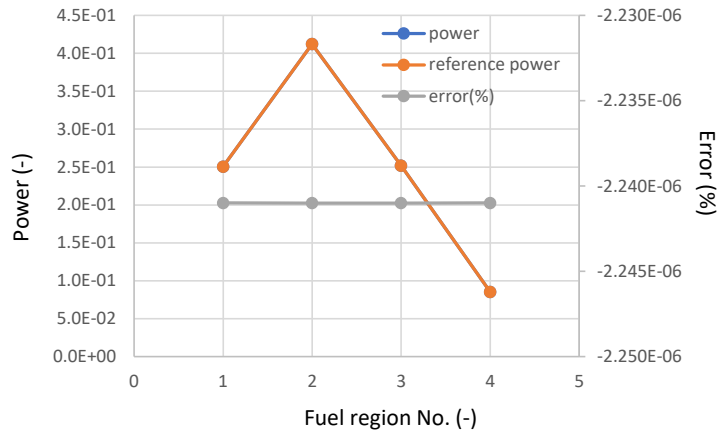


図 3. 2. 1-10 4 領域出力のアンフォールディングの結果

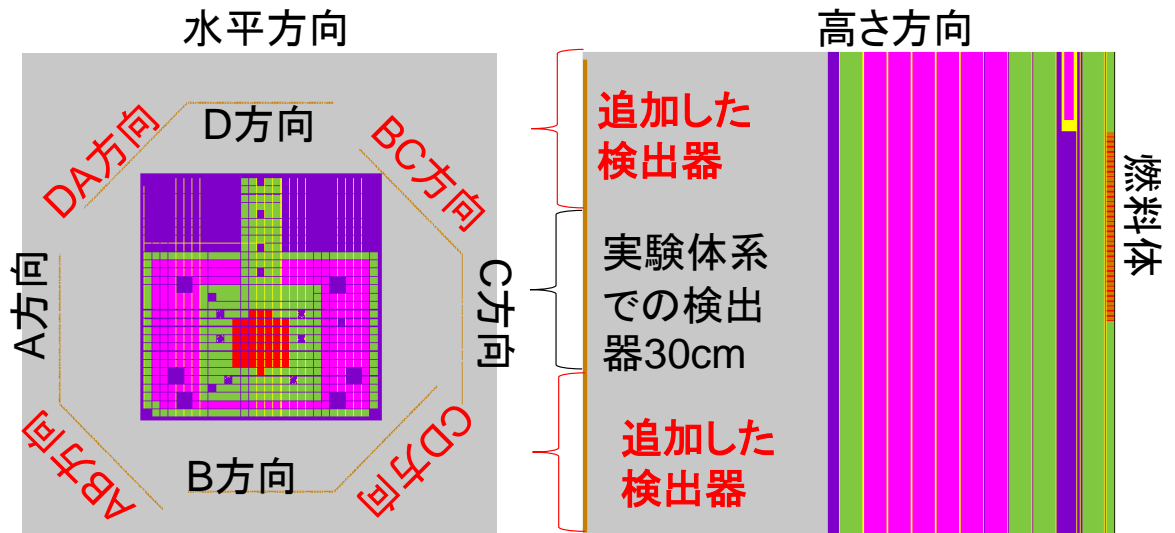


図 3. 2. 1-11 提案可動式検出システムの体系

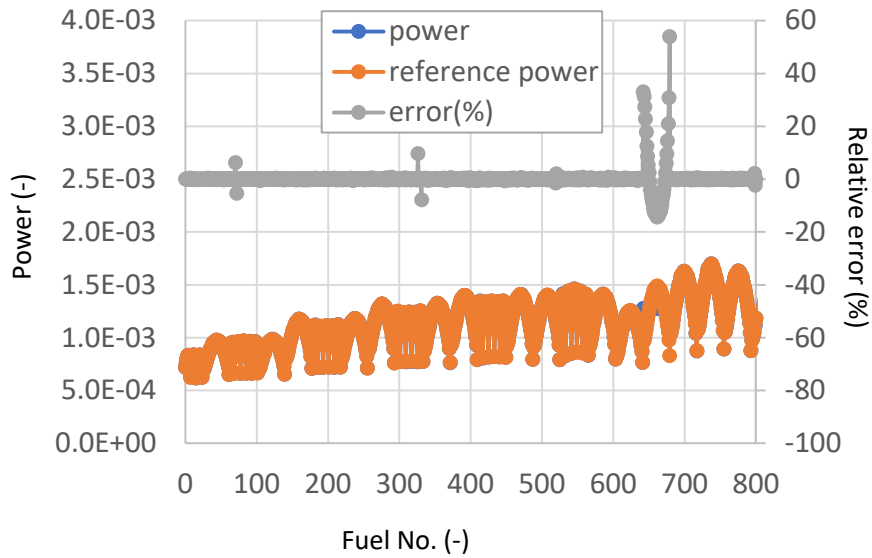


図 3. 2. 1-12 提案可動式検出システムの体系におけるアンフォールディングの結果

3.2.2 出力分布アンフォールディング手法の検討【R3-R5】

【R3-R4】

令和3年度は、手法の成立性評価、課題抽出を目的として、先行してアンフォールディング手法の予備検討を行った。簡易的な評価手法であるものの、HTTR体系において、燃料ブロック150体の出力分布の完全再現に至っている。

令和4年度は、不確かさを含む体系を対象に、アンフォールディング手法の適用性につき検討した。中性子雑音、電気雑音を含むKUCA臨界実験の結果を適用し、不確かさがアンフォールディングの適用時に与える問題点を抽出した。

【R5】

令和5年度は、不確かさの影響を考慮してAI・深層学習技術の検出器信号のノイズ低減及び測定点を増やすための検出器感度評価の加速の両面に対する応用を検討し、ノイズに対して安定なアンフォールディング手法を確立した。具体的には、以下の項目に関し実施した。

初めに、考えうるノイズを想定し、その対処法につき検討した。KUCA実験体系におけるノイズは臨界集合体における実験のため、中性子雑音由来の雑音が主であった。一方で、HTTRの信号に基づいての検討では、出力領域における炉外に設置された運転系検出器では、そのノイズは電気雑音が主体であり、電気ノイズも計装システムで電気回路のレベルでキャンペル平均がなされており、目立たないものである。一方で、HTTRの炉内計装としては、起動系検出器が温度の低い固定反射体のさらに温度の低い上部（高温ガス炉では温度の低い冷却材が一度、反射体の上部まで移動し、炉心の上部から炉心部に入り、炉心出口まで流れ加熱される。）に一部挿入される。その挙動としては、運転領域では飽和してしまっただけで検出器としては機能せず、制御棒価値測定などの炉物理試験ではゼロ出力とみなせる低出力で出力を監視するため、その場合は中性子雑音が顕著となる。炉内検出器開発は、1000℃を目標に開発を行い、現時点では600℃は十分に達成できると見込んでいる（「3.3.1 センサー素子の開発」を参照）。高温ガス炉の固定反射体では、出口近辺の下部では、1000℃程度に達するが、一部の冷却材を引き込んだ冷却を考慮すれば、固定反射体内に設置した検出器付近の温度を600℃程度に下げる設計対応は十分に可能である。その冷却材としては、蒸気発電等の炉心の300℃から400℃近辺、ガスタービン発電炉の500℃から600℃近辺の入口温度の他、純化系出口からの200℃近辺の冷却材、及びガスタービン前置冷却器出口からの150℃近辺の冷却材の引き込みが可能である。当然、Computed Tomography(CT)原理を用いれば、工学的に難しい設計は避けて、検出器が配置できる範囲での運用でも測定点は十分に稼げると思われる。もし、ゼロ出力領域での出力分布測定が必要な場合、反射体領域での炉内計装を縦導管内牽引方式のような運用で用いれば、目的を達成しうる。その際は、中性子雑音の効果も顕著になると思われる。

また、直接的なノイズ除去の他、測定点の数を多くすることにより、出力分布決定時の最小二乗法の処理で、ノイズを除去すること、ノイズの影響が反映されにくくすることが可能である。一方で、本手法では、測定点の増加は、検出器の可動機構が許す限り簡単に増加できるものの、この測定点に対応する検出器効率の評価は、事前の中性子輸送計算に

よる評価が必要である。この場合、高速で効率的な検出器感度の評価が必要であり、この点でも AI 技術に期待ができる。

これらのニーズを考慮し、適用可能性のある AI 技術を文献調査し、その API 実装の確認を行った。なお、API はどのライブラリ、どの言語でも類似しているため Python 及び Tensorflow ライブラリで最低限の実装を行い、その動作を確認した。ただし、具体的な調整及び実装は、本研究の目標の次のステップである、工業実証の段階において行われるべきであり、本研究成果はその実装を速やかに行うための準備の位置づけとなる。

(1) 中性子信号のノイズの除去

文献^(3.2.2-1)では、材料表面を観察するために開発された中性子反射法の測定において、深層学習が適用されており、従来のフィルター法と比較し、統計数を劇的に減らした測定においても十分な精度が得られることが報告されている。このノイズ除去法は、対象を中性子反射法としておりながらも、結局は中性子の統計的な不確かさによるノイズの除去であり、CT原理を用いた出力分布測定法において測定される中性子信号（各位置における積算値）に対しても適用可能である。

この問題は、AI 技術の実装の観点からは、波形データからノイズを除去できる畳み込みニューラルネットワーク (1DCNN:1D Convolutional Neural Network) を実装する問題に帰結できる。

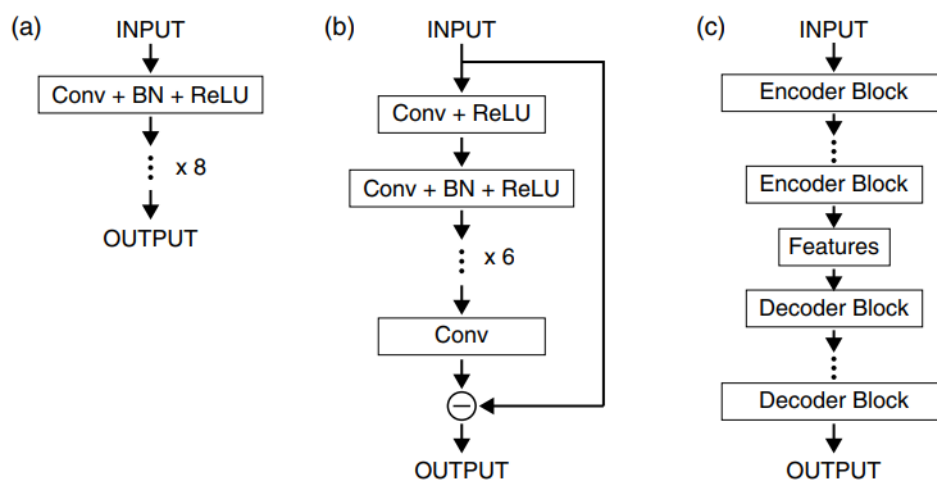


図 3.2.2-1 ニューラルネットワークの実装

図 3.2.2-1 はニューラルネットワークの実装を示す。(b)と(c)の実装方法は(a)と類似しているため(a)のニューラルネットワークを代表して実装する。まずはニューラルネットワークに読み込ませるデータを作成する。ここでは以下のようにノイズ有とノイズ無の sin 関数を 200 タイムステップ生成する（図 3.2.2-2）。なお、ここでは、信号値とノイズ合成値の挙動が直観的に推測できるようにノイズとして一様分布を与えているが、実際の中性子ノイズは出力が低い領域でポアソン分布、出力が高くなるにつれて正規分布に近づく特性を持つものである。

```

t = np.arange(200)
signal_clean = np.exp(0.01*16*np.pi*t/200)+0.5*np.sin(16*np.pi*t/200)-1.25
signal_noise = signal_clean+np.random.choice([0,1],200)*np.random.uniform(-0.5,0.5,200)

```

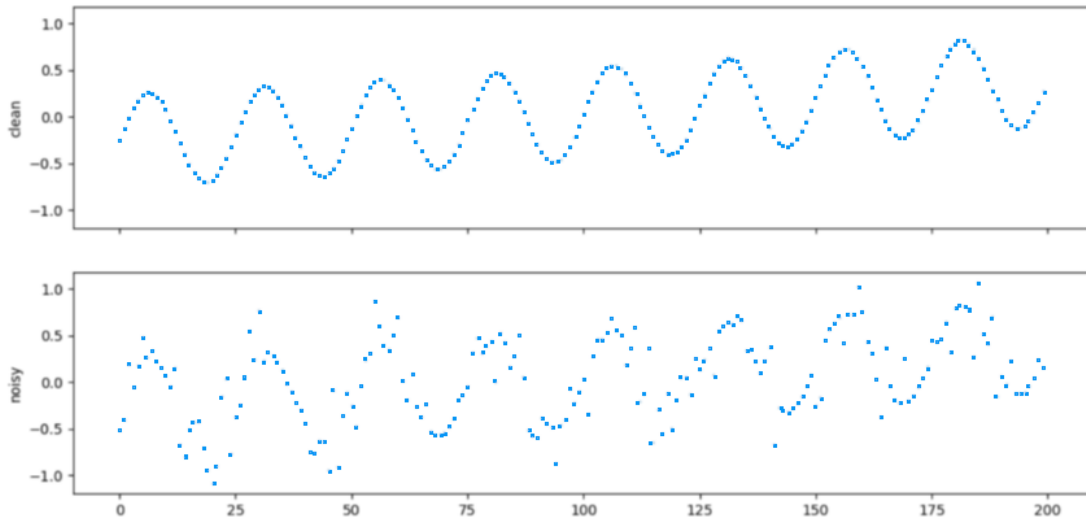


図 3.2.2-2 生成されたデータ(ノイズ有無)

データをトレーニングデータとテストデータに分ける。トレーニングデータはニューラルネットワークに学習させるデータであり、テストデータは予測結果の検証用データである。Convolutional Neural Network(CNN)にノイズ有の波形を読み込み、ノイズ無の波形を出力させる。

入力データ `x_train`: ノイズ有、0~100 タイムステップ

出力データ `y_train`: ノイズ無、0~100 タイムステップ

前処理として学習データにバッチ数とチャンネル数の次元を追加する。バッチ数はデータの数、チャンネル数は画像の特徴量の次元数(例: RGB 色の画像データはチャンネル数=3)のことである。

バッチ数=1、タイムステップ=100、チャンネル数=1 (以下参照)

```

x_train = signal_noise[None,0:100,None] #(1,100,1)
y_train = signal_clean[None,0:100,None] #(1,100,1)

```

NN は Conv1D レイヤーを 8 つ重ねたものを使用する。フィルター数は 100、カーネルサイズは 3、活性化関数は ReLU を用いる。通常の畳み込み処理を行うと画像のサイズが小さくなるため、サイズが変わらないようにパディング処理(same)を使用する。また重みが発散しないように L2 正則化(0.01)も追加する。畳み込み後 Batch Normalization で出力を標準化する。出力チャンネル数が 1 なので最後の Conv1D レイヤーのフィルター数を 1 にする (以下参照)。

```

#build network
model = tf.keras.Sequential([
    tf.keras.Input(shape=(None,1)),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=100, kernel_size=3, padding="same", activation="relu", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Conv1D(filters=1, kernel_size=3, padding="same", kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01)),
])
model.summary()

```

損失関数は平均二乗誤差(MSE)、モデルは2つ(Adam最適化とSGD最適化)用意する。それぞれ2000回(エポック)学習する(以下参照)。

```

model_sgd = tf.keras.models.clone_model(model)
model_sgd.compile(loss="mse", optimizer=tf.keras.optimizers.SGD(learning_rate=0.01, momentum=0.9))
model_sgd.fit(x_train, y_train, batch_size=1, epochs=2000)
signal_pred_sgd = model_sgd.predict(signal_noise[None, :, None])[0, :, 0]

model_adam = tf.keras.models.clone_model(model)
model_adam.compile(loss="mse", optimizer=tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.01))
model_adam.fit(x_train, y_train, batch_size=1, epochs=2000)
signal_pred_adam = model_adam.predict(signal_noise[None, :, None])[0, :, 0]

```

予測結果(-10 < =y <=10)を図3.2.2-3に示す。

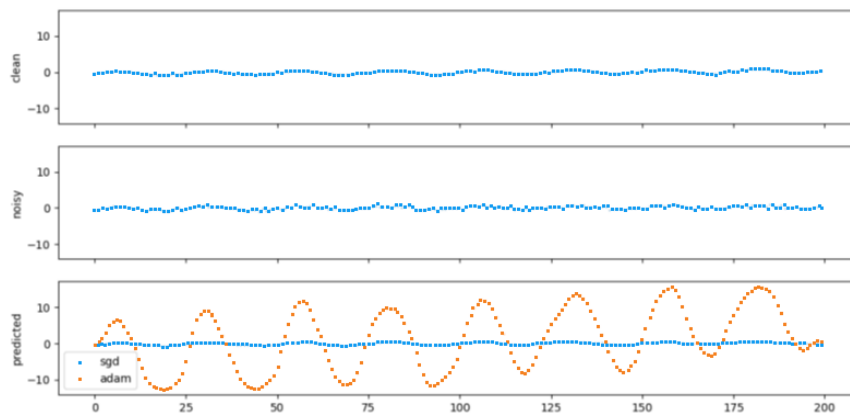


図 3.2.2-3 予測結果(-10 < =y <=10)

予測結果(-1<=y<=1)を図 3. 2. 2-4 に示す。

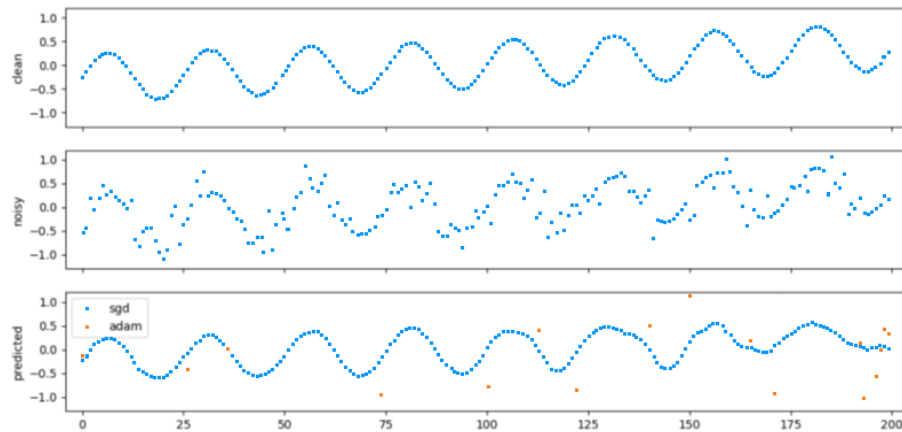


図 3. 2. 2-4 予測結果(-1<=y<=1)

上記の結果から CNN を学習する際は SGD 最適化を使った方がよいことが分かる。

(2) 電気信号のノイズの除去

電気ノイズに関しては、いくつか要因は考えられるが、対策が取れない雑音としての熱雑音に注目して考える。その際、アンプの熱雑音を想定していると思われる音声のノイズ除去の方法^(3.2.2-2)が流用可能であるとし検討を進める。まずは音声データを読み込む。計算量を減らすためオーディオサンプルを 48 kHz から 8 kHz に落とす。そのあとノイズを注入する (図 3. 2. 2-5)。

```
samplerate = 8000
q = 48000//samplerate
_, audio = sp.io.wavfile.read("common_voice_en_10110.wav")
_, noise = sp.io.wavfile.read("noise.wav")
audio_clean = downsample(audio, q)
audio_noise = audio_clean + noise

fig = plt.figure()
ax = fig.add_subplot()
ax.plot(np.arange(len(audio_clean))/samplerate, audio_clean, label="clean", zorder=1, alpha=0.5)
ax.plot(np.arange(len(audio_noise))/samplerate, audio_noise, label="noise", zorder=0, alpha=0.5)
ax.legend()
plt.show()
```

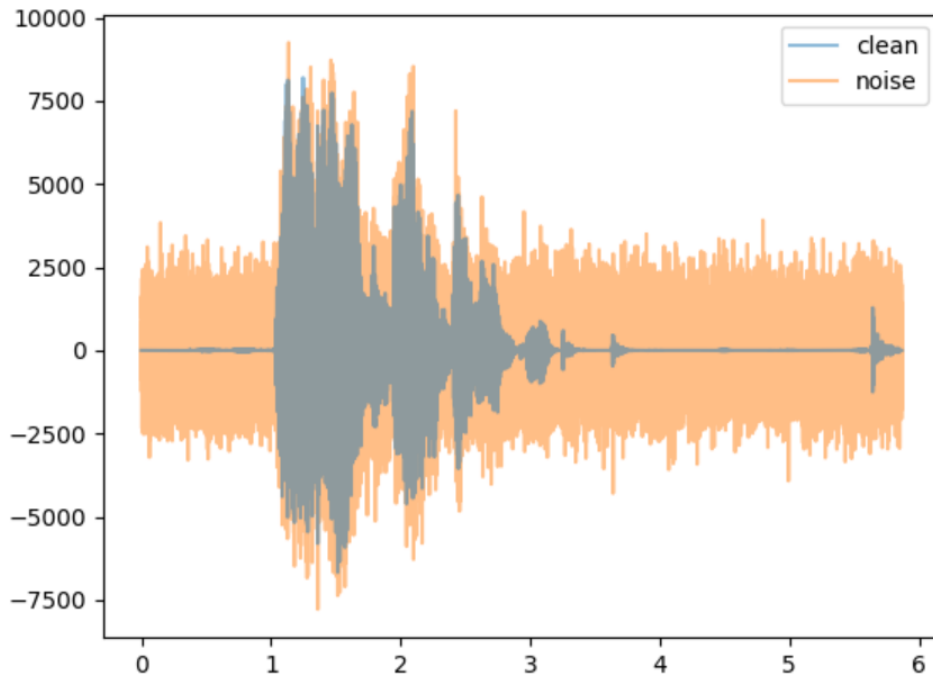


図 3.2.2-5 音声データ及びノイズを加えたデータ

今回、図 3.2.2-6 に示すニューラルネットワークを作成する。前処理に短時間フーリエ変換 (STFT) を用い、波形データを周波数領域に変換、後処理に逆 STFT で時間領域に戻す。

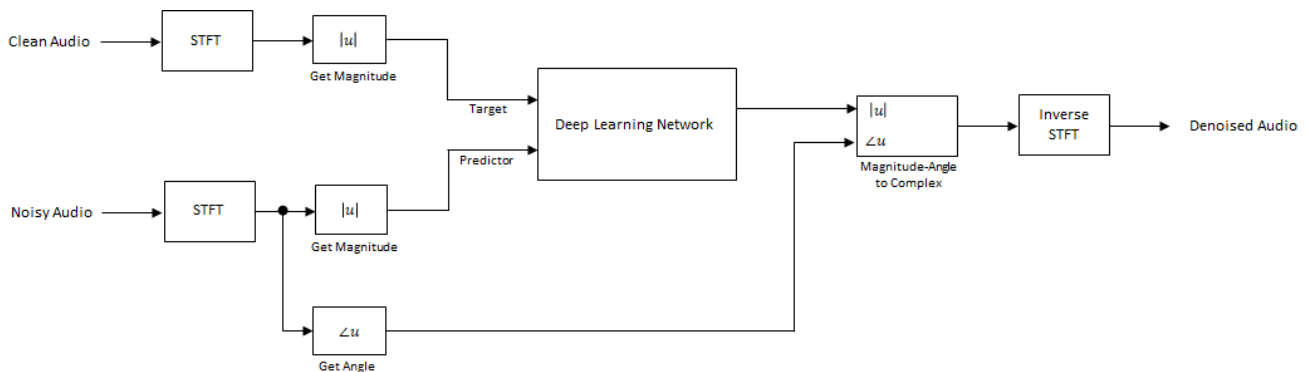


図 3.2.2-6 ノイズ除去工程のダイアグラム

前処理に STFT が必要のためこれを実装する。STFT を forward 関数、逆 STFT を invert 関数として実装する (以下参照)。

```
class STFT():
    def __init__(self, N, s, w=None):
        if w is None:
            w = hamming_window(N)
        self.N, self.s, self.w = N, s, w

    def forward(self, x):
        y = np.fft.fft(roll(x, self.N, self.s).T * self.w[None], axis=1)[..., 0: self.N // 2 + 1]
        return np.dstack([np.abs(y), np.angle(y)])

    def invert(self, y):
        x = y[..., 0] * (np.cos(y[..., 1]) + 1j * np.sin(y[..., 1]))
        if np.mod(self.N, 2):
            x = np.concatenate([x.real, x.real[..., 1:][..., :-1]], axis=-1) + 1j * np.concatenate([x.imag, -x.imag[..., 1:][..., :-1]], axis=-1)
        else:
            x = np.concatenate([x.real, x.real[..., 1:-1][..., :-1]], axis=-1) + 1j * np.concatenate([x.imag, -x.imag[..., 1:-1][..., :-1]], axis=-1)
        return overlap_add(np.fft.ifft(x, axis=1).real / self.w[None], self.s)
```

STFT は波形データを分割した後、離散フーリエ変換(DFT)を行いる。

ステップ①～④の詳細は以下の通り：

STFT ステップ①

音声データを長さ $N=256$ 、移動幅 $s=64$ に分割する (roll 関数)：

```
class STFT():
    def __init__(self,N,s,w=None):
        if w is None:
            w = hamming_window(N)
        self.N,self.s,self.w = N,s,w

    def forward(self,x):
        y = np.fft.fft(roll(x,self.N,self.s).T*self.w[None],axis=1)[...,0:self.N//2+1]
        return np.dstack([np.abs(y),np.angle(y)])

    def invert(self,y):
        x = y[...,0]*(np.cos(y[...,1])+1j*np.sin(y[...,1]))
        if np.mod(self.N,2):
            x = np.concatenate([x.real,x.real[...,-1:][...::-1]],axis=-1)+1j*np.concatenate([x.imag,-x.imag[...,-1:][...::-1]],axis=-1)
        else:
            x = np.concatenate([x.real,x.real[...,-1:][...::-1]],axis=-1)+1j*np.concatenate([x.imag,-x.imag[...,-1:][...::-1]],axis=-1)
        return overlap_add(np.fft.ifft(x,axis=1).real/self.w[None],self.s)
```

波形データの最初を 3 分割 (R, G, B) する (図 3. 2. 2-7)。

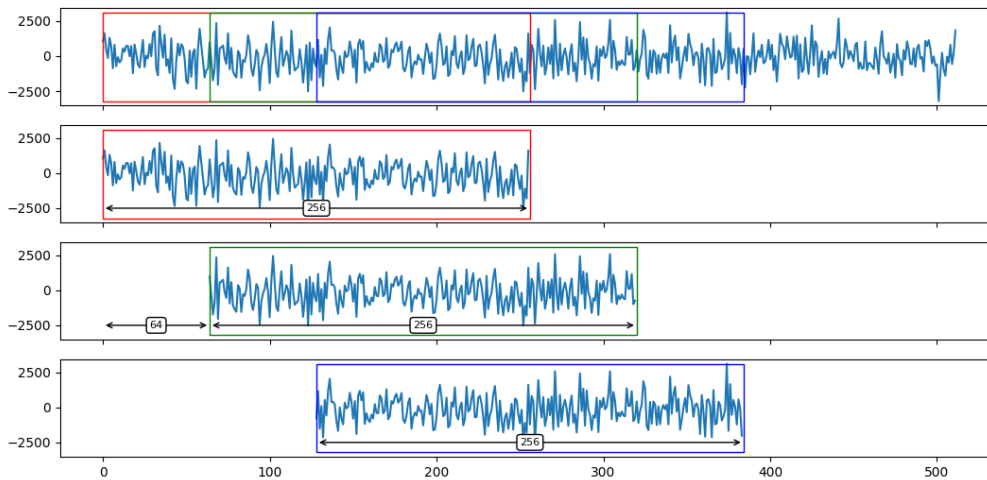


図 3. 2. 2-7 分割した波形データ

長さ (n) のベクトルを $((n-256)/64+1, 256)$ の行列に変換する：

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ \vdots \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_{255} \\ x_{64} & x_{65} & x_{66} & \cdots & x_{255+64} \\ x_{128} & x_{129} & x_{130} & \cdots & x_{255+128} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (3. 2. 2-1)$$

STFT ステップ②

フーリエ変換を行う前に分割音声データをハミング関数でスケーリングする。エッジ部分をゼロに近づける事によりフーリエ変換の精度を上げる。

```
class STFT():
    def __init__(self, N, s, w=None):
        if w is None:
            w = hamming_window(N)
        self.N, self.s, self.w = N, s, w

    def forward(self, x):
        y = np.fft.fft(roll(x, self.N, self.s).T * self.w[None], axis=1)[..., 0:self.N//2+1]
        return np.dstack([np.abs(y), np.angle(y)])

    def invert(self, y):
        x = y[..., 0] * (np.cos(y[..., 1]) + 1j * np.sin(y[..., 1]))
        if np.mod(self.N, 2):
            x = np.concatenate([x.real, x.real[..., 1:][..., ::-1]], axis=-1) + 1j * np.concatenate([x.imag, -x.imag[..., 1:][..., ::-1]], axis=-1)
        else:
            x = np.concatenate([x.real, x.real[..., 1:][..., ::-1]], axis=-1) + 1j * np.concatenate([x.imag, -x.imag[..., 1:][..., ::-1]], axis=-1)
        return overlap_add(np.fft.ifft(x, axis=1).real / self.w[None], self.s)
```

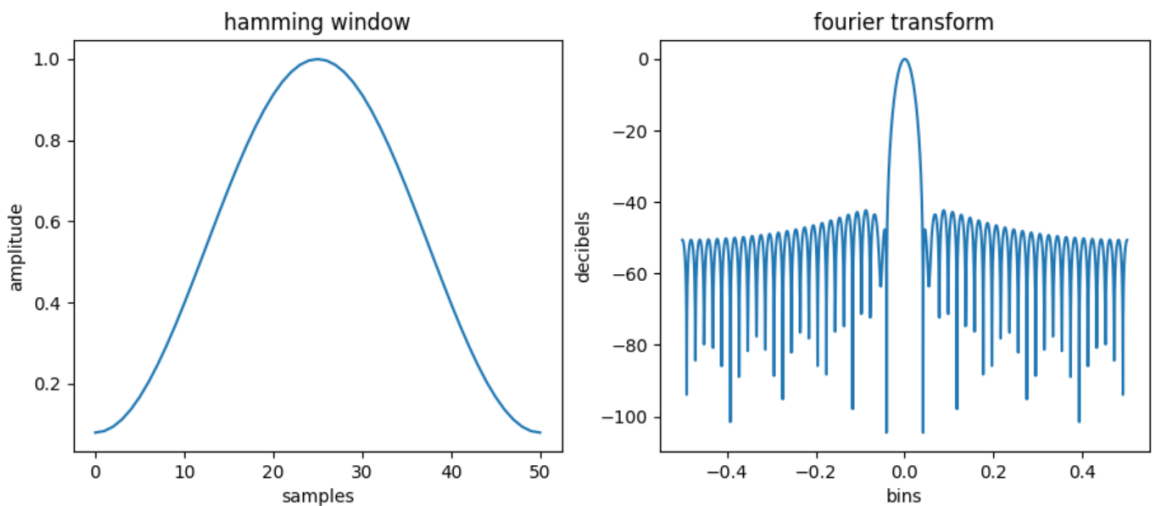


図 3.2.2-8 フーリエ変換に用いるハミング関数

図 3.2.2-8 にフーリエ変換に用いるハミング関数を示す。左は時間領域、右は周波数領域である。関数形は以下のようなものである。

$$0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi x}{n-1}\right) \quad (3.2.2-2)$$

$$x \in \left\{0, \frac{1}{n-1}, \frac{2}{n-1}, \dots, 1\right\}$$

図 3.2.2-9 は $\sin(10 \cdot 2\pi t) \cdot \text{rect}$ 及び $\sin(10 \cdot 2\pi t) \cdot \text{hamming}$ 関数を示す。右図はそれぞれの関数をフーリエ変換したものである。周波数分布を比べると矩形関数のノイズが露わになる。

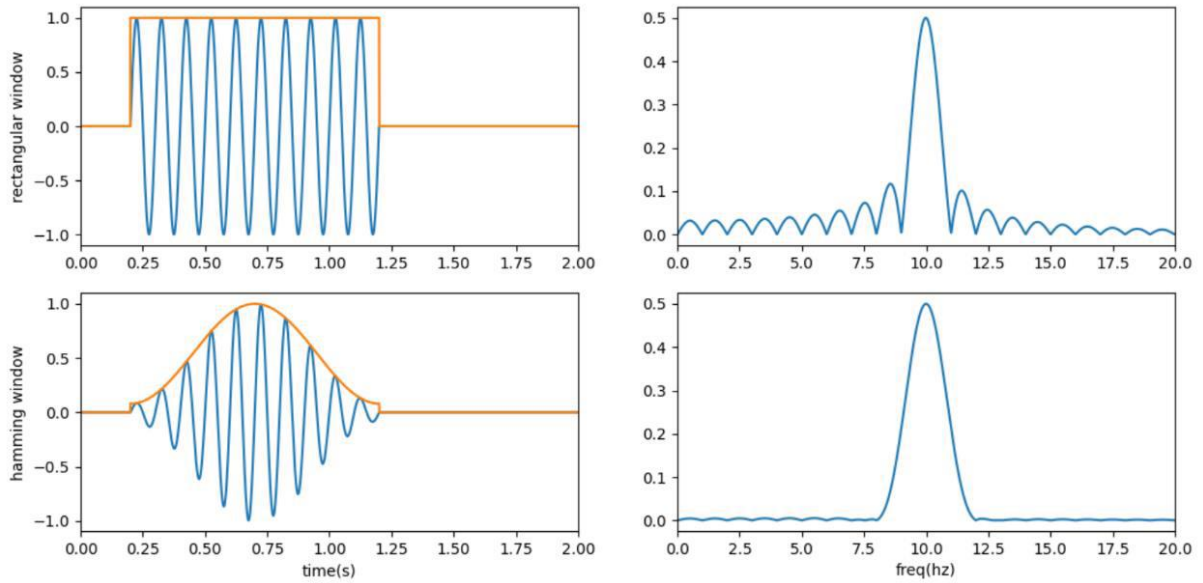


図 3. 2. 2-9 $\sin(10 \cdot 2 \pi t)$ * 矩形関数と $\sin(10 \cdot 2 \pi t)$ * ハミング関数

ハミング関数スケーリング後の波形データを図 3. 2. 2-10 に示す。

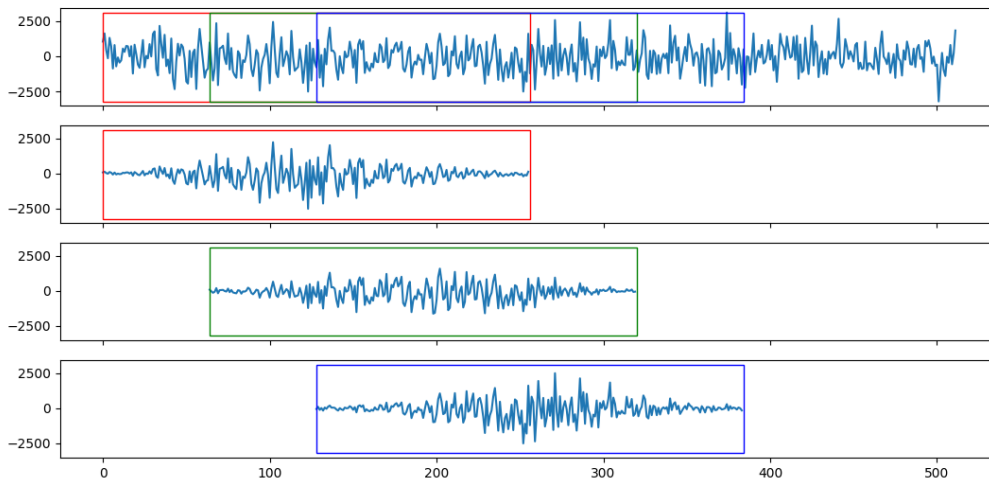


図 3. 2. 2-10 ハミング関数スケーリング後の波形データ

STFT ステップ③

フーリエ変換後、虚数の長さと角度を抽出(図 3. 2. 2-11 は虚数の長さのみ表示) :

```
class STFT():
    def __init__(self, N, s, w=None):
        if w is None:
            w = hamming_window(N)
        self.N, self.s, self.w = N, s, w

    def forward(self, x):
        y = np.fft.fft(roll(x, self.N, self.s).T * self.w[None], axis=1)[...:0:self.N//2+1]
        return np.dstack([np.abs(y), np.angle(y)])

    def invert(self, y):
        x = y[...,0] * (np.cos(y[...,1]) + 1j * np.sin(y[...,1]))
        if np.mod(self.N, 2):
            x = np.concatenate([x.real, x.real[...,1:][...,::-1]], axis=-1) + 1j * np.concatenate([x.imag, -x.imag[...,1:][...,::-1]], axis=-1)
        else:
            x = np.concatenate([x.real, x.real[...,1:][...,::-1]], axis=-1) + 1j * np.concatenate([x.imag, -x.imag[...,1:][...,::-1]], axis=-1)
        return overlap_add(np.fft.ifft(x, axis=1).real / self.w[None], self.s)
```

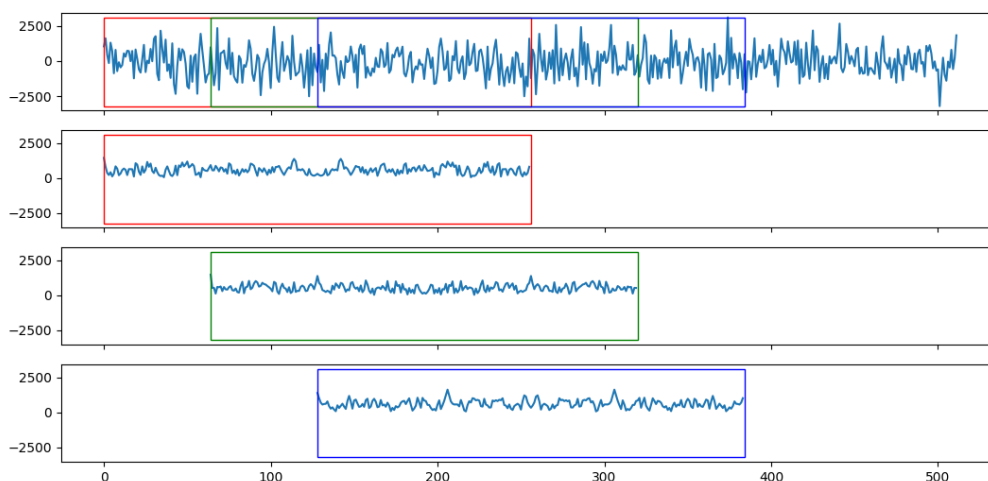


図 3. 2. 2-11 フーリエ変換後の虚数の長さ

STFT ステップ④

実数のフーリエ変換は左右対称なので最初の $256/2+1=129$ 個の要素を抽出及び逆 STFT

(図 3. 2. 2-12) :

```
class STFT():
    def __init__(self,N,s,w=None):
        if w is None:
            w = hamming_window(N)
        self.N,self.s,self.w = N,s,w

    def forward(self,x):
        y = np.fft.fft(roll(x,self.N,self.s).T*self.w[None],axis=1)[...,0:self.N//2+1]
        return np.dstack([np.abs(y),np.angle(y)])

    def invert(self,y):
        x = y[...,0]*(np.cos(y[...,1])+1j*np.sin(y[...,1]))
        if np.mod(self.N,2):
            x = np.concatenate([x.real,x.real[...,1:-1][...,::-1]],axis=-1)+1j*np.concatenate([x.imag,-x.imag[...,1:-1][...,::-1]],axis=-1)
        else:
            x = np.concatenate([x.real,x.real[...,1:-1][...,::-1]],axis=-1)+1j*np.concatenate([x.imag,-x.imag[...,1:-1][...,::-1]],axis=-1)
        return overlap_add(np.fft.ifft(x,axis=1).real/self.w[None],self.s)
```

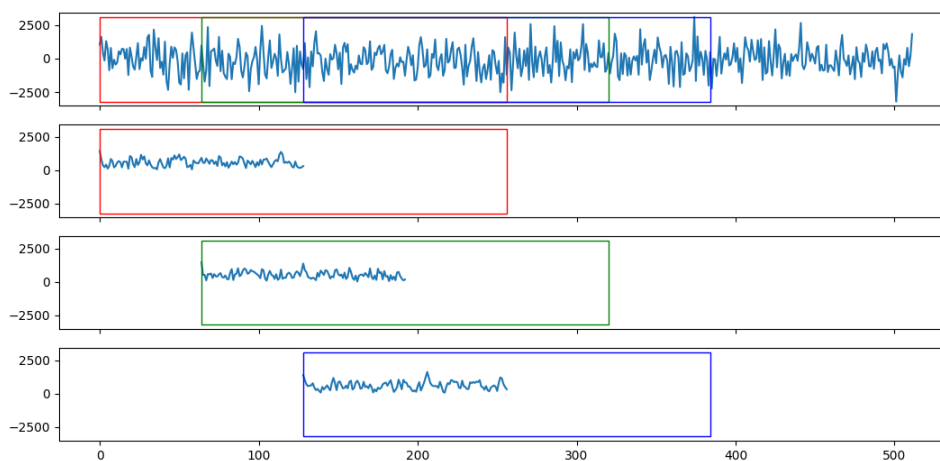


図 3. 2. 2-12 実フーリエ変換の要素抽出の結果

なお、逆 STFT の場合はステップ①～④の逆プロセスになる。

STFT を使えば波形の周波数を時間毎に抽出できる。またハミング関数を使うことでスケールリングができより正確な周波数が抽出可能になる。

ハミング関数スケールリング有の場合 (図 3. 2. 2-13)

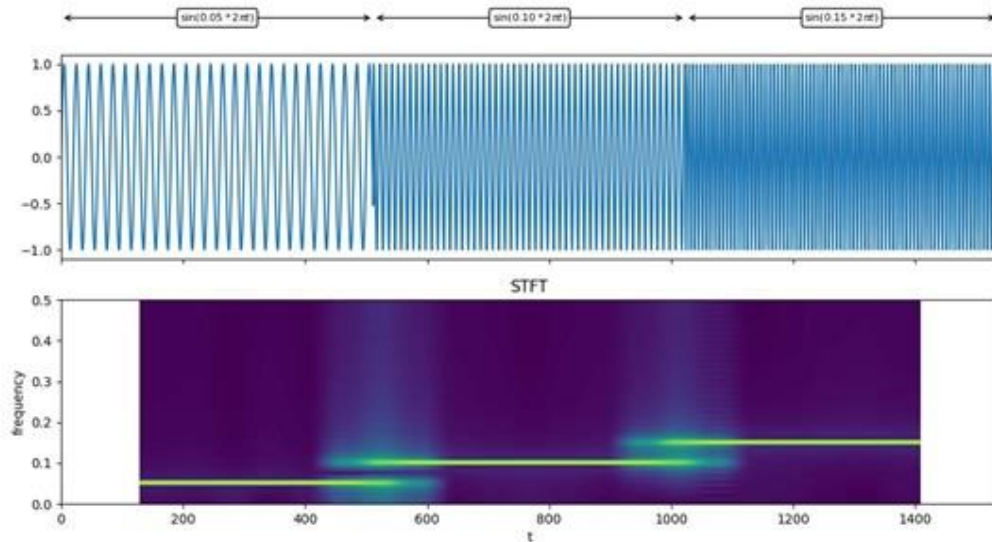


図 3. 2. 2-13 抽出された周波数成分 (ハミング関数スケールリング有)

ハミング関数スケールリング無の場合 (図 3. 2. 2-14)

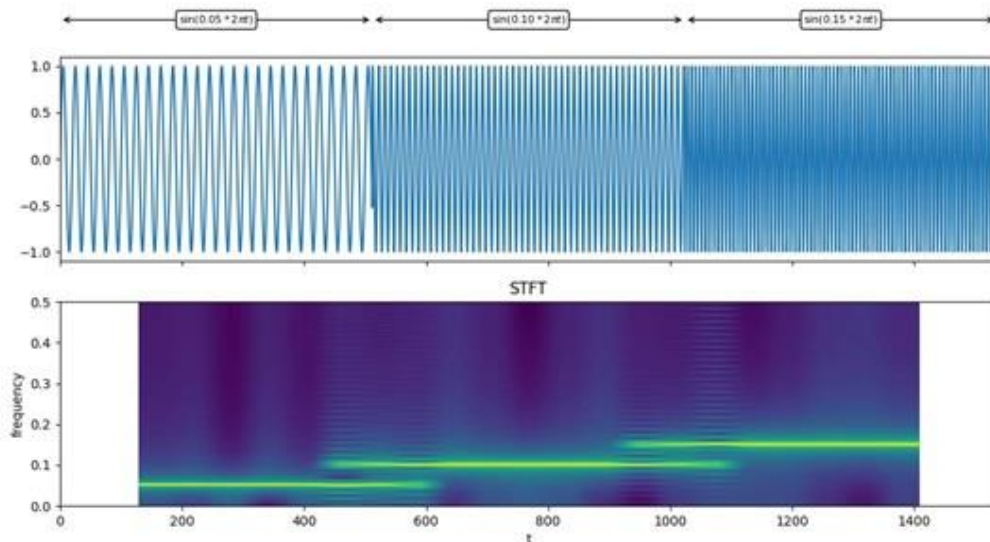


図 3. 2. 2-14 抽出された周波数成分 (ハミング関数スケールリング無)

上図の結果からハミング関数有の方がより正確に周波数 (0.05、0.10、0.15 Hz) が抽出できている事が分かる。

次に学習データの作成については以下ようになる：

```
stft = STFT(256,int(256*(1-0.75)))
stft_clean = stft.forward(audio_clean)
stft_noise = stft.forward(audio_noise)
x_train = np.moveaxis(roll(stft_noise[:, :, 0].T, 8, 1), 2, 0).reshape(-1, 129*8)
y_train = np.moveaxis(roll(stft_clean[:, :, 0].T, 8, 1), 2, 0)[ :, :, -1]
x_mu, x_sigma, x_train = standardize(x_train, axis=0)
y_mu, y_sigma, y_train = standardize(y_train, axis=0)
```

STFT データの形は(m, 129)、 $m=(n-256)/64+1$ 。Clean サンプルの STFT を計算して長さ N=8、移動幅 s=1 に分割する。それぞれ分割したデータをベクトルに変換($129*8=1032$)した後、標準化する。ここでデータの形は(m-7, 1032)となる。ノイズサンプルの STFT を計算して長さ N=8、移動幅 s=1 に分割する。それぞれ分割したデータの最後のベクトルを抽出した後、標準化する。このときデータの形は(m-7, 129)となる。

次にニューラルネットワークの作成については図 3. 2. 2-15 のようになる。

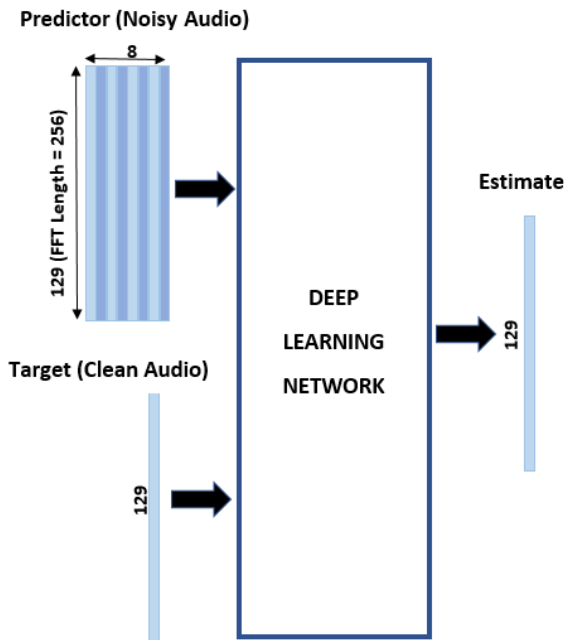


図 3. 2. 2-15 ニューラルネットワークに対する入出力

```
#build network
model = tf.keras.Sequential([
    tf.keras.Input(shape=(129*8)),
    tf.keras.layers.Dense(1024, activation="relu"),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Dense(1024, activation="relu"),
    tf.keras.layers.BatchNormalization(),
    tf.keras.layers.Dense(129)
])
```

文献^(3.2.2-2)に基づき、1024 ノード隠れ層を 2 つ、バッチ正規化と ReLU 活性化関数を使用する。先ず学習と予測を行う：

```
model.compile(loss="mse", optimizer=tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.1))
model.fit(x_train, y_train, batch_size=128, epochs=1000)
```


次に予測結果を標準値から元の値に戻す。角度はノイズ有の STFT から抽出してから逆 STFT を行う :

```
pred_mag = model(tf.constant(x_train,tf.float32)).numpy()*y_sigma+y_mu
pred_ang = np.moveaxis(roll(stft_noise[:, :, 1].T,8,1),2,0)[ :, :, -1]
audio_pred = stft.invert(np.dstack([pred_mag,pred_ang]))
```

次に結果を表示する。ノイズ有の音声(中)をニューラルネットワークに読み込んでノイズ無の音声(下)を予測する :

```
fig,ax = plt.subplots(nrows=3,sharex=True,sharey=True)
ax[0].set_ylabel("clean")
ax[0].plot(audio_clean)
ax[1].set_ylabel("noisy")
ax[1].plot(audio_noisy)
ax[2].set_ylabel("prediction")
ax[2].plot(np.concatenate([np.nan*np.ones(64*7),audio_pred]))
plt.show()
```

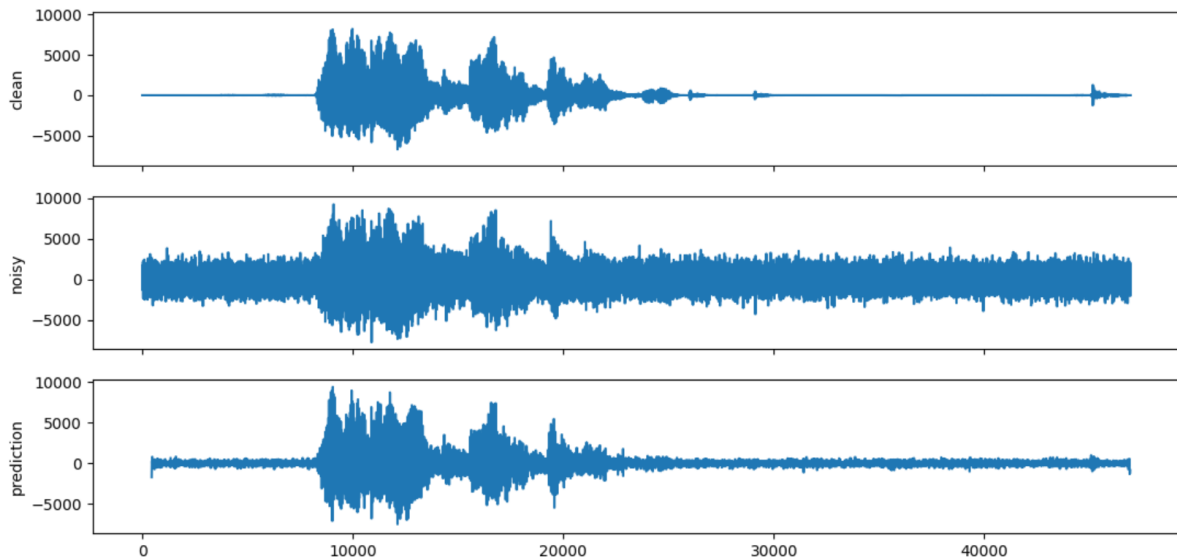


図 3.2.2-16 元の音声、ノイズ入り音声及びノイズ除去音声

図 3.2.2-16 に示すように、ニューラルネットワークによるノイズ除去法をトレースできた。

(3) 検出器感度の非線形内挿

文献^(3.2.2-3)に基づき検出器の位置 (x, y, z) と検出器感度の値に重回帰分析を行い、非線形内挿を行うことを考える。

最初に学習データを作成する。検出器 6 つと位置情報 (x, y, z) の $(6, 3)$ 行列を作る。データ標準化後、多項式特徴量に変換する。

```

x = np.array([[ 900, 250, 1400],
              [1800, 2100, 350],
              [3200, 400, 450],
              [2800, 2850, 750],
              [ 530, 3200, 1350],
              [1800, 2700, 350]])
x_mu, x_sigma, x_norm = standardize(x)
x_train = polynomial_features(x_norm)

```

ここで Standardize はデータを正規化する関数である。

$$\frac{x - \mu}{\sigma}$$

μ = 平均

σ = 標準偏差

また Polynomial features はデータを 3 次多項式特徴量に変換する。

$[x, y, z]$ (3 次元) $\Rightarrow [x, y, z, xx, yy, zz, xy, yz, zx, xxx, \dots]$ (19 次元) (式 3.2.2-3)

次に出力データを作成する。検出器の値(温度)の(6, 1)行列を作る。

```

y = np.array([[23.0],
              [23.0],
              [21.9],
              [22.0],
              [24.1],
              [23.0]])
y_mu, y_sigma, y_norm = standardize(y)
y_train = y_norm

```

ニューラルネットワークは線形回帰モデルを使用する。ニューラルネットワークの重みを制限するためにリッジ回帰(L2)を使用する。

$$y = Xw \tag{3.2.2-4}$$

X: (6, 19) 入力行列(計画行列) 検出器の位置情報

y: (6, 1) 出力ベクトル 検出器の温度

w: (19, 1) ニューラルネットワークの重みベクトル

損失関数は平均二乗誤差(MSE)とリッジ回帰(L2)を用いる:

$$L = \underbrace{(y - Xw)^T (y - Xw)}_{\text{MSE}} + \lambda \underbrace{\|w\|_2}_{\text{L2}} \tag{3.2.2-5}$$

$\lambda = 0.01$

MSE: 平均二乗誤差

ここで正解値と予測値の二乗誤差を最小化する：

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - (Xw)_i)^2 \quad (3.2.2-6)$$

↑
↑
 正解値 予測値

n：データの数(6)

L2：リッジ回帰。重みが爆発しないように重みに二乗ペナルティを追加する。

$$L2 = \lambda \sum_{i=1}^{20} w_i^2 \quad (3.2.2-7)$$

入力層(19次元)と出力層(1次元)のニューラルネットワークを作成する。その後、Adam最適化法で1000回学習する：

```
model = tf.keras.Sequential([
    tf.keras.Input(shape=(19)),
    tf.keras.layers.Dense(1, kernel_regularizer=tf.keras.regularizers.L2(0.01))
])

model.compile(loss="mse", optimizer=tf.keras.optimizers.Adam(learning_rate=0.1))
model.fit(x_train, y_train, batch_size=6, epochs=1000)
```

図3.2.2-17にネットワークの構成を示す。入力ベクトルは20次元(重み(19次元)+バイアス(1次元))となる：



図3.2.2-17 ネットワークの構成

wの微分=0にすることで損失関数Lを最小値にするwが計算できる。なお、リッジ回帰は線形式で解くことができる：

$$\frac{\partial}{\partial w}(Xw - y)^T(Xw - y) + \lambda w^T w = 2(X^T X + \lambda I)w - 2X^T y = 0 \quad (3.2.2-8)$$

$$w = (X^T X + \lambda I)^+ X^T y$$

w は特異値分解で求められる :

$$X = USV^T$$

$$X^T X = VSU^T USV^T = VS^2 V^T$$

$$X_\lambda = U \frac{S}{S^2 + \lambda} V^T \quad (3.2.2-9)$$

$$w = X_\lambda^T y$$

入力行列(X)から平均(μ)を差し引くとバイアス(b)を求める事ができる :

$$\mu = \frac{1^T}{1^T 1} X$$

$$w = ((X - 1\mu)^T(X - 1\mu) + \lambda I)^+(X - 1\mu)^T y \quad (3.2.2-10)$$

$$b = \frac{1}{n} 1^T y - \mu w$$

1 : (6, 1)要素が 1 のベクトル

$$n = 1^T 1 = 6$$

図 3.2.2-18 は線形式を解いた重みベクトル(true:青) vs. ニューラルネットワークモデルの重みベクトル(model:オレンジ)である。1 レイヤーのニューラルネットワークの重みベクトルと線形式の重みベクトルは同値となる :

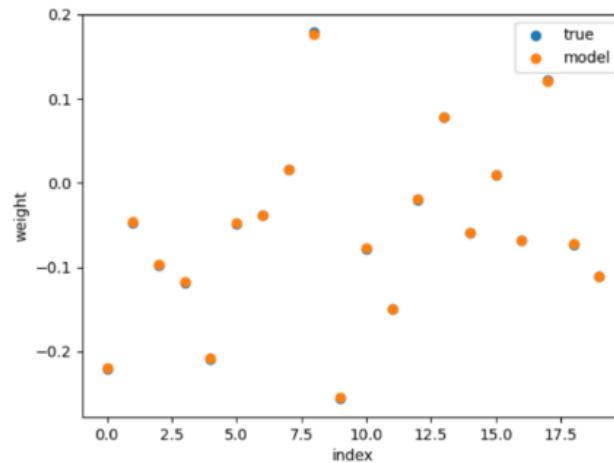


図 3.2.2-18 重み関数の比較

ニューラルネットワークで予測した内挿値($x=0-4000$ 、 $y=0-4000$ 、 $z=0$ 、 700 、 1400)を可視化する (図 3. 2. 2-19、図 3. 2. 2-20)。

```

z = [0,700,1400]
label = ["A","B","C","D","E","F"]
fig,ax = plt.subplots(ncols=3,sharex=True,sharey=True)
ax[0].set_ylabel("y")
for i in range(len(z)):
    x_mark = np.copy(x)
    x_mark[:,2] = z[i]
    y_mark = model.predict(polynomial_features(standardize(x_mark,x_mu,x_sigma)[2]))*y_sigma+y_mu
    xg,yg,zg = np.meshgrid(np.linspace(0,4000,100),np.linspace(0,4000,100),np.array([z[i]]))
    x_image = np.stack([xg.ravel(),yg.ravel(),zg.ravel()]).T
    y_image = model.predict(polynomial_features(standardize(x_image,x_mu,x_sigma)[2]))*y_sigma+y_mu
    ax[i].set_title("z="+str(z[i]))
    ax[i].set_xlabel("x")
    ax[i].imshow(y_image.reshape(100,100),vmin=17,vmax=27,cmap="jet",origin="lower",extent=[0,4000,0,4000])
    ax[i].scatter(x_mark[:,0],x_mark[:,1],marker="x")
    for j in range(6):
        ax[i].text(x_mark[j,0],x_mark[j,1],label[j]+" "+str(np.round(y_mark[j,0],2)))
plt.show()

```

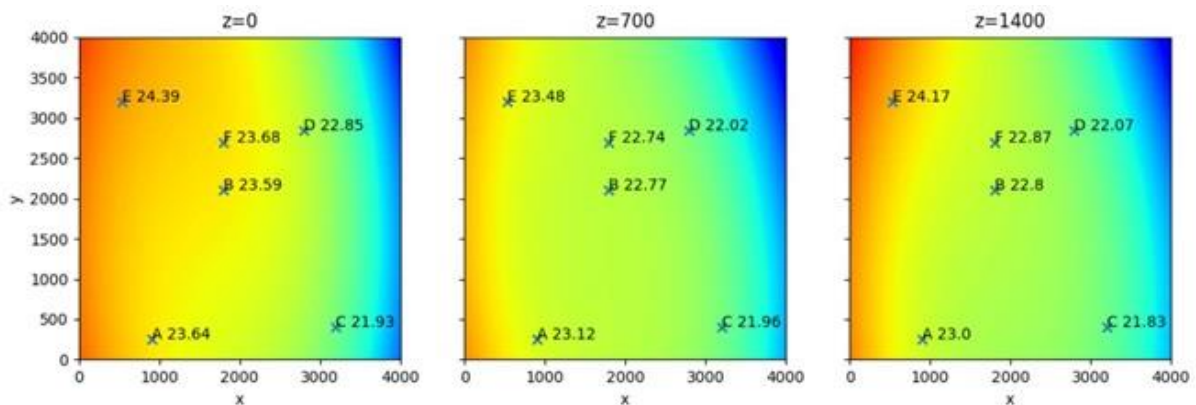


図 3. 2. 2-19 値の再現結果(正則化条件無: $\lambda=0$)

$\lambda=0$ にすると外挿領域には大きな値が入ってしまう。また過度にトレーニングデータを学習(過学習)するので内挿値の精度が落ちる。

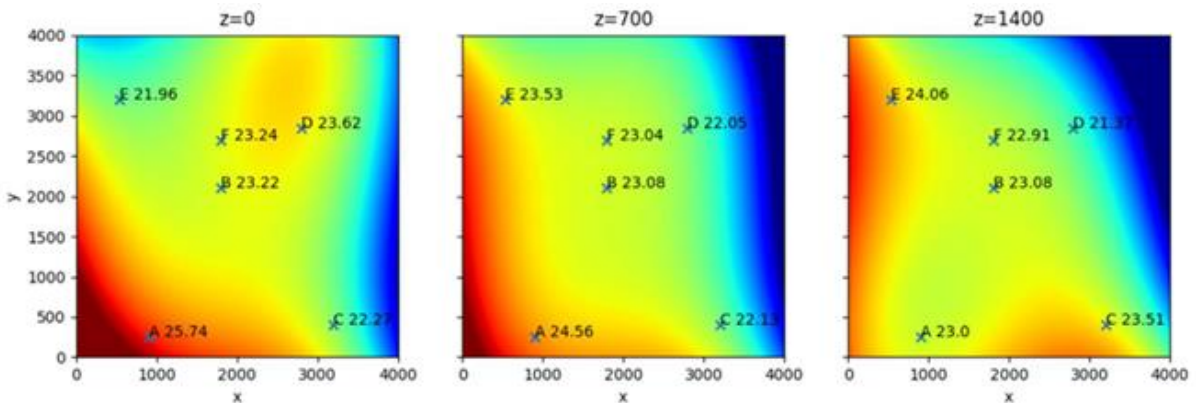


図 3. 2. 2-20 値の再現結果(正則化条件有: $\lambda=0.01$)

データの数 ≤ 20 次元(式の数 \leq 変数の数)なので必ずトレーニングデータの値が学習可能になる。ニューラルネットワークの隠れ層を増やす、または多項式の次元を増やせばデータの数 > 20 のデータセットでも学習できる。

参考文献

(3.2.2-1) H. Aoki, Y. Liu, T. Yamashita, “Deep learning approach for an interface structure analysis with a large statistical noise in neutron reflectometry,” Scientific Reports, (2021).

URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-021-02085-6>

(3.2.2-2) MathWorks, “深層学習ネットワークを使用した音声のノイズ除去”、

URL: <https://jp.mathworks.com/help/signal/ug/denoise-speech-using-deep-learning-networks.html>

(3.2.2-3) ブログ記事, “空間の温度分布を推定する”、

URL: <https://emotionexplorer.blog.fc2.com/blog-entry-318.html?sp>

3.3 耐高温中性子検出器の検討

3.3.1 センサー素子の開発（再委託先：静岡大学）【R3-R5】

【R3-R4】

令和3年度は、高温環境下での使用に耐えうるセンサー素子の候補を複数選定し、入手したセンサー素子に対して実際に加熱試験を行うことで各々の使用条件を提示した。

令和4年度は、高温環境下でのセンサー素子基礎特性の評価手法開発を行った。また、GaN系の半導体検出器も試作を進め、特に長距離伝送に適した低インピーダンス電流伝送が可能となる構造や追加素子の設計開発も含め試作し高温環境下での特性評価を行った。

【R5】

令和5年度は、令和4年度に開発した評価手法を用いて、中性子検出特性及び高温環境下で放射線検出特性について性能評価を行った。具体的には、以下の様に高温環境でのデバイス動作実験を実施した。

令和4年度に検討を実施した開発手法をもとに、以下の評価実験を用いて UTR-KINKI での中性子照射実験による中性子検出特性及び高温加熱真空チャンバーによる高温環境下での放射線検出特性について性能評価を行った。高温加熱環境での動作実験に関しては、図 3.3.1-1 に示す MSA ファクトリー社製の PH225-2480 を本測定用に仕様変更したもので、図中の検出器を設置する部分が 800 °C まで加熱可能であり、対面にある冷却壁に放射線源を設置して測定が可能である。チャンバーは 3 Pa 程度まで真空引きが可能であり、ヒーターからの放射線源に及ぼす熱伝導が輻射熱のみで、空気を介した熱伝導が極めて小さく放射線源への加熱が少ない状況で実験の実施が可能である。



図 3.3.1-1 放射線計測用高温加熱真空チャンバー

今回、使用した B GaN 検出器には今後のデバイス開発の指針を明らかにするために、1 μm 、3 μm 、5 μm の B GaN 結晶を用いた検出器を用意した。令和4年度の検討結果より高温耐性に重要なパラメーターとして、結晶性及び空乏層厚さが重要であることが示されており、

BGaN 膜厚に関する中性子捕獲の計算結果は文献^(3.3.1-1)に示されている。十分な膜厚の BGaN 層は中性子検出感度向上に有効な手法であるが、厚膜結晶成長による結晶性の低下があるため、最適な膜厚があると考え BGaN 膜厚が異なった場合に実際の付与エネルギーがどのようになるかを計算した結果を図 3.3.1-2 に示す。

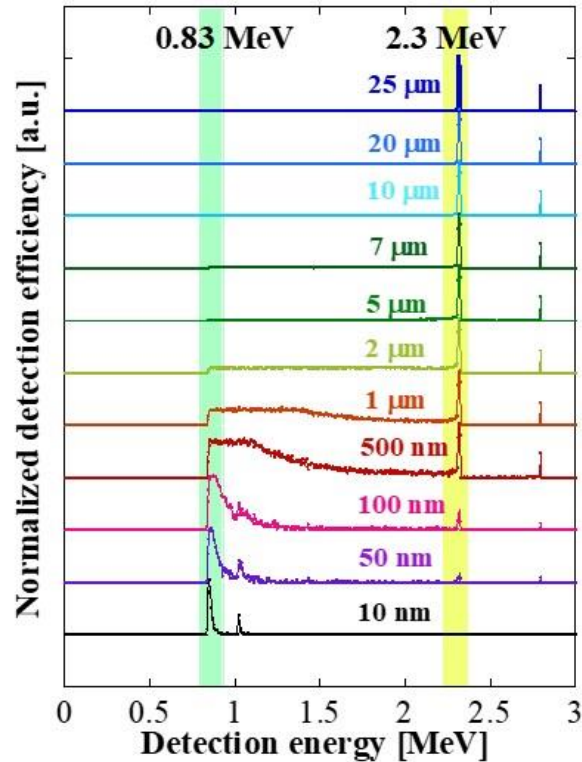


図 3.3.1-2 各 BGaN 膜厚における中性子捕獲時に得られるエネルギースペクトルの計算結果

計算結果から、BGaN 膜厚が 100 nm 以下の領域では 2.3 MeV のエネルギーピークが弱く 0.83 MeV が強く現れていることが確認された。さらに膜厚が増加するにつれて 2.3 MeV のピークが強くなり、支配的になることが明らかになっている。1 μm 以上から 2.3 MeV のピークが支配的であることから、核計装において膜厚が 1 μm 以上であれば良い可能性が示唆された。この結果から、前述したように BGaN 膜厚を 1、3、5 μm に設定して、デバイス作製を行った。図 3.3.1-3 に成長した BGaN-pin 構造の断面 SEM 像を、図 3.3.1-4 に各 BGaN 結晶の XRD 測定結果を示す。なお、特性評価において使用したデバイスサイズは 1 μm-BGaN が 500 μm φ、3 及び 5 μm-BGaN が 200 μm φ を用いた。

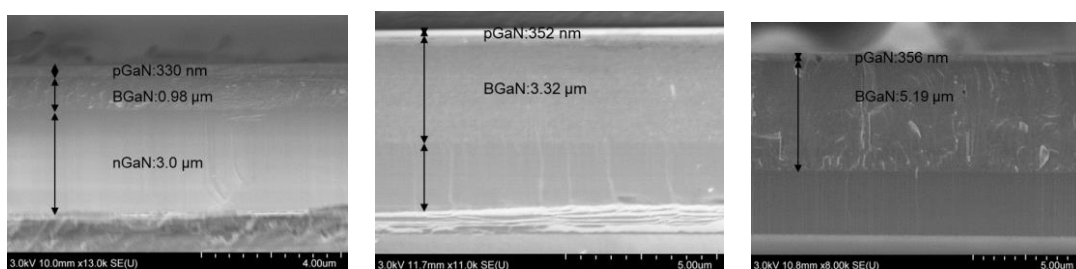


図 3.3.1-3 異なる BGaN 膜厚(1、3、5 μm)の BGaN-pin 構造の断面 SEM 像

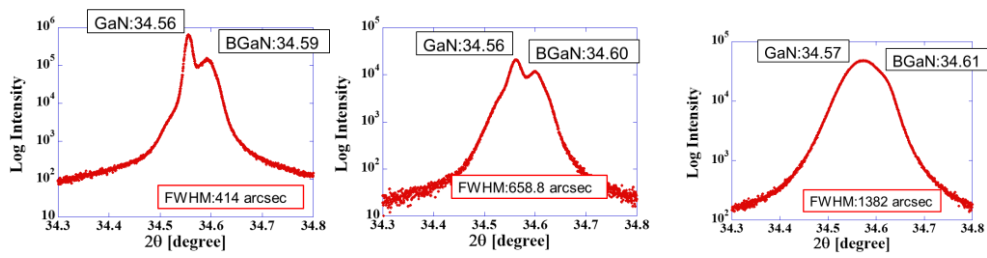


図 3.3.1-4 異なる BGaN 膜厚(1、3、5 μm)の BGaN-pin 構造の XRD 測定結果(2θ-ω 測定)、図中 FWHM は BGaN(0002)面の XRC-FWHM 値

図 3.3.1-3 の断面 SEM 像により、BGaN 層が設定した膜厚に対して 1 割程度のバラツキで成膜されていることが確認された。また、BGaN 層において大きなボイドなどは無く平坦性も高い結晶成長が実現していることが示唆された。図 3.3.1-4 に示す XRD 測定結果においては各 BGaN 膜厚の測定結果より導出されたピーク位置を図中に示してある。GaN のピーク位置を基準とした場合に 1 μm-BGaN だけ 0.01° 低角に存在している。成長によるバラツキや歪緩和の影響などが考えられるが、大きな違いはないと思われる。一方で、各 BGaN ピークに対して実施した X 線ロックアップ測定から導出された XRC-FWHM は膜厚の増加に伴い増加していることが確認された。これは、膜厚増加に伴って結晶性が劣化していることを示唆しており、GaN と BGaN の格子定数差が存在することから、厚膜成長により格子定数差による歪が大きくなり、歪を持った状態での結晶成長から格子緩和を行った結晶成長に変化した可能性が考えられる。また、BGaN 成長時におけるホウ素原料の気相反応によるアダクト形成が少ないながらも発生しており、厚膜成長時に積算され結晶欠陥が増加することで結晶性低下になっている可能性を示唆している。以上の結果より、厚膜 BGaN 成長時には、高品質な結晶成長を行ったとしても微小な影響の蓄積により、結晶性の低下が発生することが確認され、膜厚により結晶性が変化することが確認された。

次に、各膜厚の BGaN 結晶を用いて作製した BGaN-pin ダイオードを用いて放射線検出特性評価を実施した。2.3 MeV の α 線を照射した場合に得られた 2D α 線エネルギースペクトルを図 3.3.1-5 に示す。

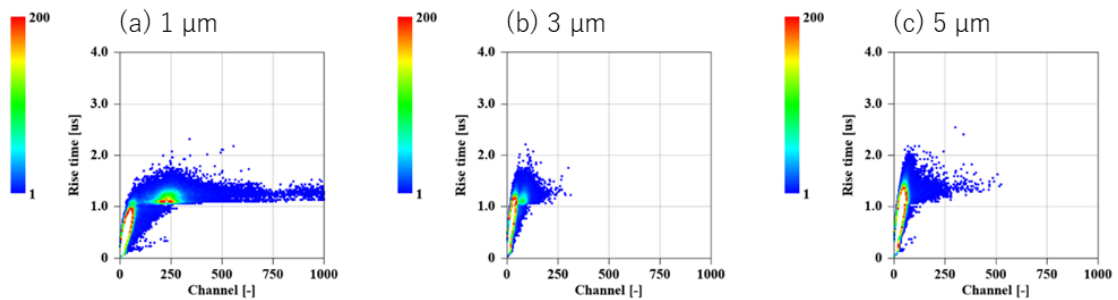


図 3.3.1-5 異なる BGaN 膜厚(1、3、5 μm)で作製した BGaN 検出器の α 線 2D エネルギースペクトル

図 3.3.1-5(a)より、1 μm -BGaN のデバイスでは検出信号が明確に表れており急峻なエネルギーピーク確認が容易であることが確認された。一方で、図 3.3.1-5(b)の 3 μm -BGaN の測定結果では、ノイズ領域については大きく変化がないが、ピーク位置が低チャンネルに位置しておりノイズとの弁別が難しい結果となっている。また、検出信号が低チャンネルシフトしたことから電荷収集効率が低下したことが示唆される。結晶性の低下に伴い、結晶欠陥が増えたことで移動度が低下したなどの要因から電荷収集効率が低下したことが考えられる。5 μm -BGaN を用いた測定結果(図 3.3.1-5(c))では、 α 線検出に由来する信号が確認されるが、1 μm や 3 μm の場合と比べて信号強度が弱く、検出信号チャンネルにバラツキがあった。結晶性が悪くなり十分な電荷収集が行われずノイズとの弁別が困難になったことなどが要因として考えられる。これらの結果より、各膜厚の BGaN 結晶における放射線検出特性は膜厚の増加に伴い結晶性の低下が起こることによって、検出特性が低下することが明らかとなった。

さらに、各デバイスを用いて中性子照射実験を行った。UTR-KINKI にて原子炉内で 90 分間の照射を行い得られた 2D エネルギースペクトル及び、原子炉内で原子炉停止中の 2D エネルギースペクトルを図 3.3.1-6 に示す。

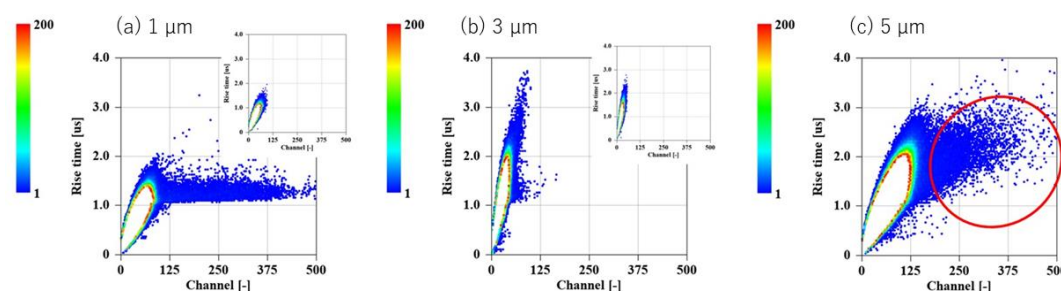


図 3.3.1-6 UTR-KINKI での中性子照射実験による中性子検出特性評価結果：異なる BGaN 膜厚(1、3、5 μm)で作製した BGaN 検出器の中性子検出 2D エネルギースペクトル

図 3.1.6(a)より、1 μm -BGaN においても中性子検出信号が確認された。信号のバラツキが大きく、ピークを形成するには至らなかった。 α 線照射よりも高チャンネルに信号が多く存在しているのは、膜厚が 1 μm と薄いため、2.3 MeV α 線照射では入射 α 線が透過し、検出信号が 1 MeV 以下のエネルギー波高値となったのに対して、中性子照射においては図 3.3.1-2 に示すように壊変反応のエネルギーを吸収する場合があります、信号が広範囲にあり 2.3 MeV にピークを持つはずである。しかしながら検出器由来のピークの広がり存在すること及び、検出感度が十分でないことから図 3.3.1-6(a)に示されるような検出信号になったと考えられる。図 3.3.1-6(b)に示す検出信号では、ノイズ領域が Rise time の大きい方向に拡大しており、原子炉内の環境によるノイズが増加していることが確認された。一方で、信号は α 線検出と同様の位置に確認されたが、強度は弱く十分なピークを得ることはできなかった。これは結晶性の低下などに由来したものであり、結晶性向上による改善が期待される。5 μm -BGaN においては図 3.3.1-6(c)に示すように検出信号由来の信号領域も確認されたが、ノイズ領域の拡大も大きく明確な検出信号の弁別は困難であった。

また、未照射時に得られたノイズ信号領域を削除して検出信号をカウントし、計数率及び捕獲率を算出した。結果を表 3. 3. 1-1 に示す。

表 3. 3. 1-1 異なる BGaN 膜厚 (1、3、5 μm) で作製した BGaN 検出器の中性子検出の計数率及び中性子捕獲率

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 ($\times 10^{-3}$ %)	6. 68	2. 22	29. 2

この結果より、1 μm の検出器においても十分に検出が可能であり、核計装用デバイスとしては膜厚を薄くして高品質かつ弁別性能が高くなる BGaN 層を設定し、評価することが重要であることが示唆された。

更に、1 μm 及び 5 μm -BGaN を用いて高温耐性の評価を実施した。3 μm の検出器に関しては、中性子照射実験での振動により試作検出器の電極に剥がれが発生し、配線ができなくなったため、1 μm 及び 5 μm で検討を行った。これまでの研究により、高温環境下での放射線検出特性の性能劣化の原因の 1 つがノイズの増大であることが分かっており、高温耐性向上にはノイズ領域の拡大抑制が重要であることから各温度におけるノイズ領域の変化を評価した。650 $^{\circ}\text{C}$ まで加熱した際のノイズ信号領域の変化を図 3. 3. 1-7 に示す。

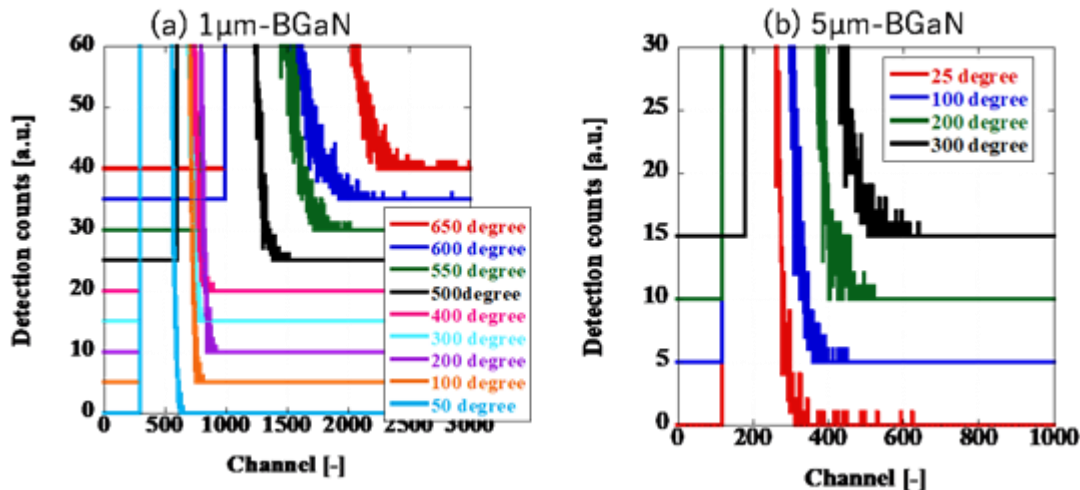


図 3. 3. 1-7 高温加熱真空チャンバーによる高温環境下での放射線検出特性評価結果：各 BGaN 膜厚の高温環境でのノイズ信号の変化

図 3. 3. 1-7 より、1 μm -BGaN が約 400 $^{\circ}\text{C}$ まで信号ノイズの顕著な変化がないことが確認でき、この範囲においてノイズによる放射線検出特性の性能劣化が抑制されることが期待される。一方で、5 μm -BGaN は信号ノイズの変化が大きく 200 $^{\circ}\text{C}$ 以上で大幅に領域が拡大していることが確認された。これらの結果より、膜厚の設定を最適化することで 400 $^{\circ}\text{C}$ 以上の高温耐性デバイスの作製が可能であることが示唆された。また、さらにホウ素濃度の

低減により結晶性向上を行うことで500 °C、600 °Cといった環境での動作が可能であることが期待される。600 °C以上に関しても動作の可能性は十分にあり、伝送部品などの高温耐性についての評価を進めて総合的なシステム構築による炉内核計装技術の確立が期待される。

高温環境下での評価手法が確立されたことにより、今後の開発が加速され更なるデバイス開発の発展が期待される。

参考文献：

(3.3.1-1) T. Nakano, et al., “Effective neutron detection using vertical-type BGe diodes,” J. Appl. Phys. 130 p. 124501, (2021).

3.3.2 検出器システムの開発 (再委託先：ANSeeN) 【R3-R5】

【R3-R4】

令和3年度は、中性子の検出を行う炉内において、検出器信号の増幅、変換、伝送、及び検出器の制御を行うために高温環境下での動作を視野に入れた検討を進め、検出器システムとしてのコンポーネントを列挙することで概念設計を行った。

令和4年度は、令和3年度に3.3.1項の実施項目として選定した素子候補(複数)に対して、耐高温中性子検出器システムの概念設計を行い、使用環境条件の提示を行った。概念設計では検出器や伝送系のシステムの環境性能を算出、または小型モデルで検証し、条件毎に使用環境条件を提示し実装に向けた指針を得た。

【R5】

令和5年度は、令和4年度に提示した使用環境条件に基づき、耐高温中性子検出器の使用外保管、およそ200 °Cにおける非動作時の保管に対する経時変化を評価した。具体的には、以下の項目について実施した。

令和4年度までは、検出器システムの使用時を中心に概念設計を行ってきたが、使用外保管時は使用時と比較し、温度、線量条件が緩和されると言えども、圧力容器の内部に保管されているのは変わらず、比較的過酷な状況にさらされる。また、使用中とは異なり、その持続時間は圧倒的に長い。そこで、令和5年度は耐高温中性子検出器の使用外保管による影響評価を行った。具体的には、使用外保管時の環境を200 °Cのヘリウム(He)雰囲気下と想定し、3.3.1項にて静岡大学が作製したGa₂O₃系検出器をその雰囲気下に保管した場合のα線検出特性の経時変化を評価した。表3.3.2-1に評価結果の総評を示す。結果として、ホウ素をドーピングしたGa₂O₃検出器には保管初期に大きな特性劣化が発生した。保管によりホウ素の挙動が変化してしまうものと推測されるが、事象としては低温アニールを行ったことと同義であるから、検出器作製時のアニール条件の最適化により改善が見込まれる。

GaN系検出器として次の3種類を用意した。

1. pin-GaN検出器5 μm厚

2. pin-BGaN検出器5 μm 厚、ホウ素の割合0.12 %

3. pin-BGaN検出器5 μm 厚、ホウ素の割合0.24 %

いずれのサンプルもpinダイオード構造を有しており、 α 線に対する有感層となるi層の厚みが5 μm である。サンプル2と3の違いはホウ素の濃度である。中性子検出は検出器内のホウ素がコンバータとして働き2次的に発生した α 線を検出することになるため、特性の指標として α 線検出特性を評価した。 α 線源は ^{241}Am で、検出器から約10 mm離れた場所に設置した。使用した検出器と保管環境を図3.3.2-1に示す。3サンプルはセラミック基板に実装した後、石英ホルダーに乗せ、ゴールドファーネス内に通した石英管内に安置し200 $^{\circ}\text{C}$ に加熱した。加熱中は図中右側からHeを5 sccmで流し石英管内をHe雰囲気とした。検出特性の評価は上記の保管前及び、保管中に一時的に取り出し複数の経過時間にて行った(表3.3.2-1)。それぞれには順番に条件番号を付与してある。評価時に検出器は常温下(制御無し室温、大気雰囲気)に置かれている。

図3.3.2-2に条件0(保管前)の α 線検出評価結果を示す。各グラフ中、上部が波高値スペクトルで、下部が波高値対立ち上がり時間のヒートマップ(2次元ヒストグラム)を示している。サンプル1は波高値スペクトルの段階でピークが明確に認識できる。一方で、サンプル2と3の結果では波高値スペクトルで α 線ピークを視認するのが困難である。2次元ヒストグラムを用いると、 α 線由来のイベントである高波高値でありながら立ち上がり時間の短い領域にもイベントが分布していることが分かる(図中赤点線領域)。以降の結果は2次元ヒストグラムのみを掲載する。

図3.3.2-3に保管後の検出器1の α 線検出特性を示す。2次元ヒストグラムより、 α 線のピーク位置が保管時間によって移動していることが分かる。表3.3.2-3にピーク位置を示す。保管によるピーク位置の変化は単調ではなく、340時間までの減少と、その後の増加で保管前の特性に戻りつつある。いずれの時点においても、 α 線のピークを判別するのに十分な特性を備えている。

図3.3.2-4と図3.3.2-5に保管後の検出器2と検出器3の α 線検出特性を示す。検出器2と3は最初の保管期間後に特性が劣化し、 α 線を検出するためには検出器バイアスを6 Vから3 Vに低減しなければならなかった。印可した検出器バイアスの値は表3.3.2-2に示してある。検出器2の結果では、条件により雑音(左下から右上に伸びている領域)の増減が激しい。また、 α 線由来のイベントの波高値が増減を繰り返しながら減少している。検出器1のように保管前の特性に近づく兆候は見られない。検出器3の結果では、雑音の激しい増減は見られなかったが、 α 線由来のイベントの波高値が減少し、検出器1のように保管前の特性に近づく兆候は見られなかった。検出器1とそれ以外の検出器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。また、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かった。

表3.3.2-1 耐高温中性子検出器の使用外保管による影響評価の総評

	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 sccm	pin-BGaN 検出器 5 um 厚 2 sccm
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。

表 3.3.2-2 α 線検出評価に用いた検出器バイアス

条件	保管時間[時間]	検出器バイアス[V]		
		検出器 1	検出器 2	検出器 3
0	0 (保管前)	0	6	6
1	80	0	3	3
2	340	0	3	3
3	460	0	3	3
4	900	0	3	3
5	1440	0	3	3

表 3.3.2-3 保管後の検出器 1 の α 線のピーク位置

条件	保管時間[時間]	α 線のピーク位置[ch]
0	0 (保管前)	7512
1	80	7236
2	340	6460
3	460	6684
4	900	6796
5	1440	7104

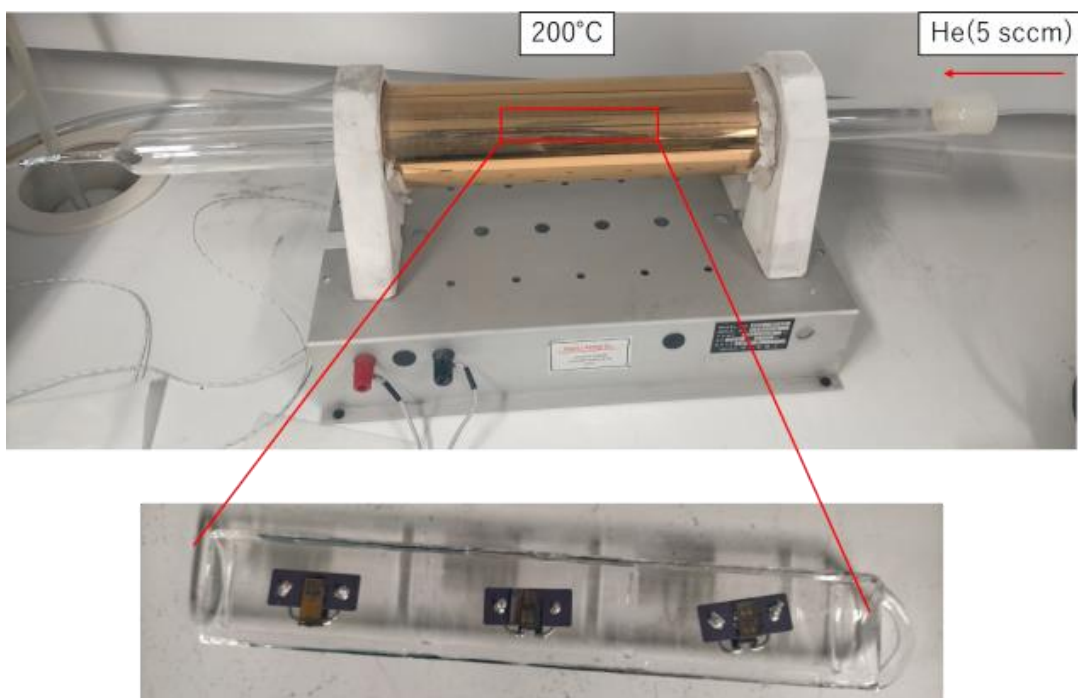
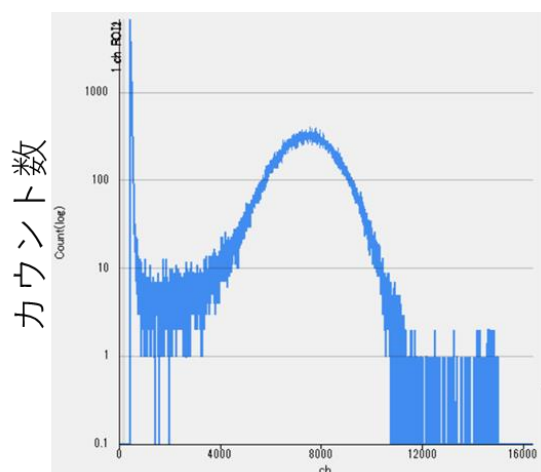
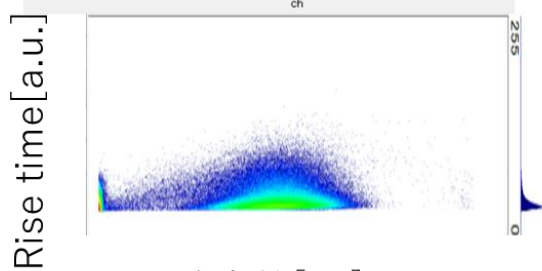


図 3. 3. 2-1 耐高温中性子検出器の使用外保管環境を模した保管環境



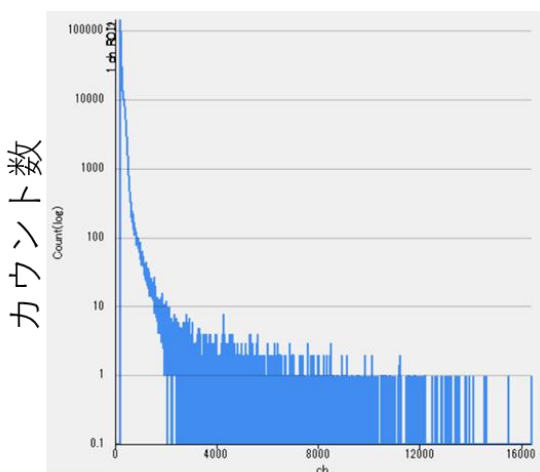
カウント数



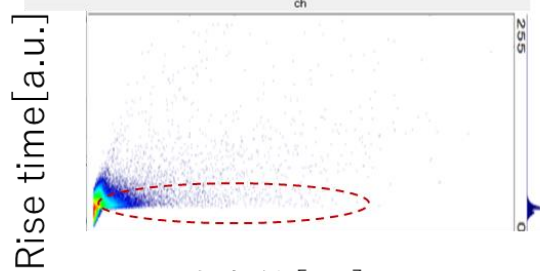
Rise time[a.u.]

波高値[ch]

サンプル 1



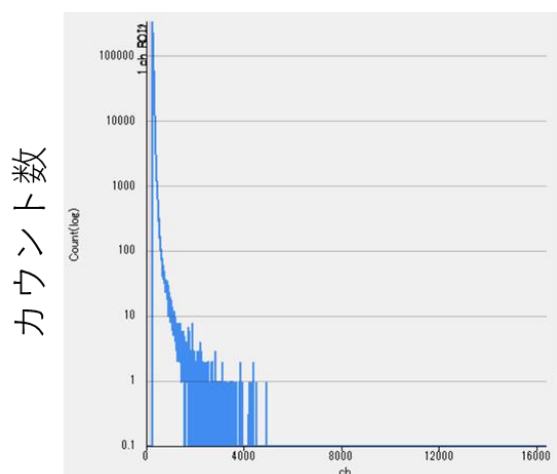
カウント数



Rise time[a.u.]

波高値[ch]

サンプル 2



カウント数



Rise time[a.u.]

波高値[ch]

サンプル 3

図 3. 3. 2-2 保管前の α 線検出特性 (条件 0)

保管時間[時間]

0 (保管前)

80

340

460

900

1440

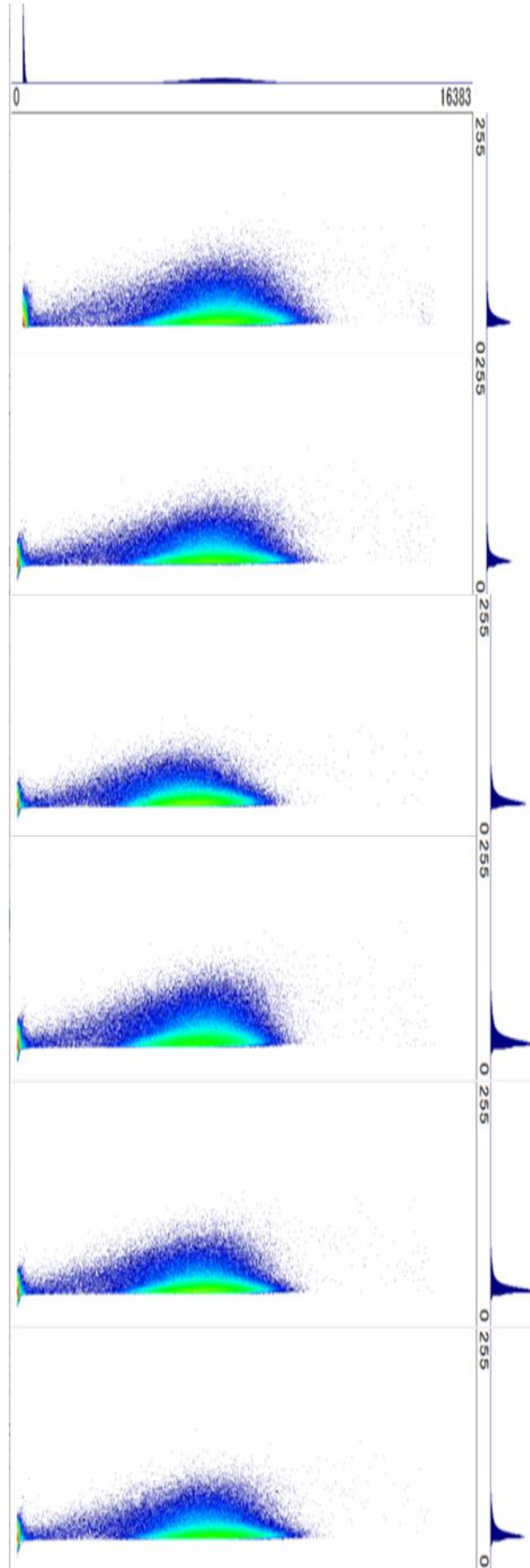


図 3. 3. 2-3 保管後の検出器 1 の α 線検出特性

保管時間[時間]

0 (保管前)

80

340

460

900

1440

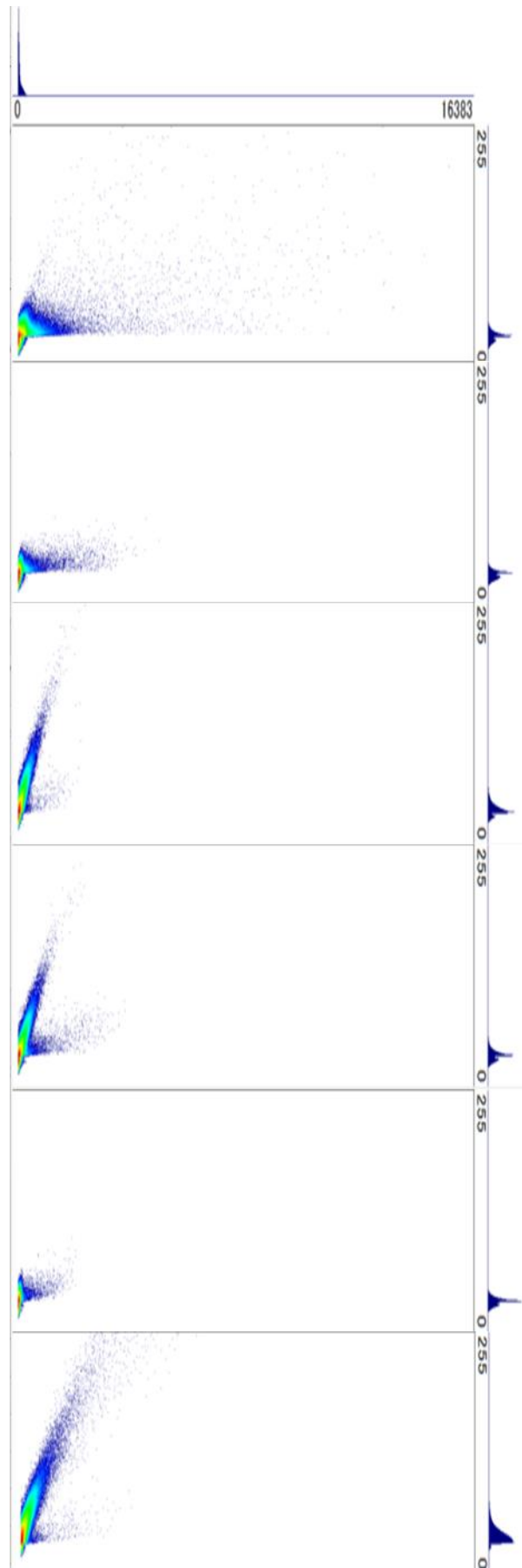


図 3. 3. 2-4 保管後の検出器 2 の α 線検出特性

3.4 高温ガス炉での炉内計装運用の検討

3.4.1 炉内環境評価及び検出器運用検討

【R3-R4】

令和3年度は、高温ガス炉の炉内環境を模擬するため、炉内における中性子線、即発 γ 線、遅発 γ 線の評価手法について検討した。

令和4年度は、高温ガス炉の炉内環境を模擬するため、HTTRを対象に高温ガス炉の炉内における中性子・即発 γ 線、遅発 γ 線のエネルギー分布を評価した。

【R5】

令和5年度は、令和4年度の成果を基に、炉内計装の駆動機構等の構造に関する調査及び検討を行い、機器構造図を作成し、運用方法を検討した。具体的には、商用蒸気供給用高温ガス炉を対象に、炉内出力分布を測定することが可能な炉内計装の駆動機構等の構造に関する調査及び検討を行った。

(1) 炉内検出器機構の概要

高温ガス炉商用炉を対象とした炉内検出器機構では、運転中の炉心内を検出器が上下に駆動することができる構造を提示する。具体的には、HTTRの制御棒駆動機構を流用することで、炉内検出器を炉心軸方向に駆動させることを検討する。

(2) スタンドパイプ及び遮蔽体検討

提案する炉内検出器機構の全体配置図を図3.4.1-1に示す。スタンドパイプ内遮へい体は、駆動機構を炉心からの放射線や熱から防護するために駆動機構の下方に設置するもので、金属ブロック及び黒鉛と断熱材で構成したものである。HTTRの制御棒駆動機構と同じ構成とする。炉内検出器の駆動用に使用するワイヤロープ等の貫通孔は、炉心からの中性子ストリーミングを少なくするために、必要以上大きくならない寸法とする。案内管は、スタンドパイプ内遮へい体の下部に設置され、炉内検出器の挿入及び引抜きをスタンドパイプ内遮へい体の下部から上部遮へい体ブロックの上端まで案内するものである。また、HTTRの制御棒案内管と同様に、案内管が上部遮へい体ブロックに正しく装着されることを検出する案内管装着検出機構を装備する。案内スリーブはスタンドパイプ内遮へい体の下部に取付ける円筒で、万一スタンドパイプが破断した場合に、炉内への空気侵入を制限し、案内管の振れ回り等を防止するものである。

(3) 駆動機構に係る検討

駆動機構は、2本の制御棒をワイヤロープにより同時に駆動するもので、電動機、減速機構、電磁クラッチ、巻取機構、調速機構、緩衝機構等から構成され、制御棒スタンドパイプ内に据え付けられる。制御棒駆動機構の構造を図3.4.1-2～図3.4.1-6に示す。各機器の概要は以下の通りである。

電動機

電動機は、炉内検出器の挿入及び引抜き動作を行う巻取機構を回転させるもので、レゾ

ルバ等を内蔵する。レゾルバは、位置の検出機構で駆動制御のための信号を駆動機構制御盤に送る。

減速機構

減速機構は、電動機の回転を減速し、ドラムを回転するもので、電磁クラッチと電動機の上に設置するサイクロ減速機、平歯車、かさ歯車等から構成する。

電磁クラッチ

電磁クラッチは、スクラム信号により駆動機構から電動機、減速機構の系統を切離し、制御棒を自重によりスクラムさせる機能を持ち、コイル、アーマチュア、ロータ等から構成する。

巻取機構

巻取機構は、ドラム、ワイヤロープ、吊り金具で構成し、炉内検出器を連結したワイヤロープを巻上げ、巻下ろしする。ドラムはワイヤロープのガイド溝を設けた構造とする。吊り金具は、炉内検出器とワイヤロープを安全、確実に装着できる構造とする。

調速機構

調速機構は、炉内検出器の挿入速度を一定に保持する機能を有するもので、駆動軸、マグネット、コイル等で構成される発電機により、速度に比例した制動トルクを発生させるものである。

発電機のエネルギーはスタンドパイプ内に設けた電気抵抗器により熱エネルギーとして放出する。

ケーブルコネクタ

ケーブルコネクタはスタンドパイプクロージャを介して、電気動力、電気信号を制御盤へ伝達するもので、接触不良及び絶縁劣化を生じにくい構造とする。

ケーブルコネクタは、スタンドパイプクロージャを貫通するため、貫通部は1次冷却材の漏えい量が許容値以下となるようシールする。

支持枠

支持枠はスタンドパイプクロージャの下面に自在継手により接続され、駆動機構、スタンドパイプ内遮へい体、炉内検出器等の自重を支持するものである。

温度計装

温度計装は、駆動機構内の雰囲気、電磁クラッチの表面温度を監視するものである。

位置検出機構

位置検出機構は、炉内検出器の位置を高精度で連続的に検出するもので、全ストロークに対し1回転するシンクロ発信機及び変換器を備える。また、リミットスイッチ、感知ロッド等から構成される校正用の機構を併せて有する。

(4) 運用方法

燃料の燃焼度管理の観点から、炉内計装の使用頻度は、2か月に1回程度とし、1回の測定にかかる時間は、商用蒸気供給用高温ガス炉の場合では35分程度を想定する。ここで、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を仮定している（炉心の上端から下端までを炉内計装が往復する時間が35

分)。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する。

(5) 炉内検出器位置の誤差検討

炉内検出器位置の誤差は、位置検出機構の角度誤差を $\Delta\theta_d$ [°]とすると以下の式で表すことができる。

$$\Delta L = D\pi r_{\text{wire}}\Delta\theta_d/360^\circ,$$

ここで、 D はワイヤドラム直径[mm]、 r_{wire} はシンクロ発信機とワイヤドラムのギヤ比（入力軸の歯数と出力軸の歯数の比）である。更に、位置検出機構の角度誤差は、シンクロ電機と歯車の組立品であるシンクロ発信機の角度検出誤差[°] ($\Delta\theta_{\text{syn}}$) と変換器の角度誤差[°] ($\Delta\theta_{\text{tra}}$) から評価することができる。

$$\Delta\theta_d = \Delta\theta_{\text{syn}} + \Delta\theta_{\text{tra}},$$

HTTRの制御棒駆動機構を流用する場合、 $\Delta\theta_{\text{syn}} = \pm 14$ 分、 $\Delta\theta_{\text{tra}} = \pm 8$ 分となり、炉内検出器位置の誤差は、約6 mmとなる。

(6) 技術課題の抽出

HTTR の制御棒駆動機構と同様の構成とするため、本機構を製作するに当たり技術的な課題はない。

以上の通り、炉内計装の駆動機構等の構造に関する調査及び検討を行い、機器構造図の作成及び運用方法の検討が完了した。

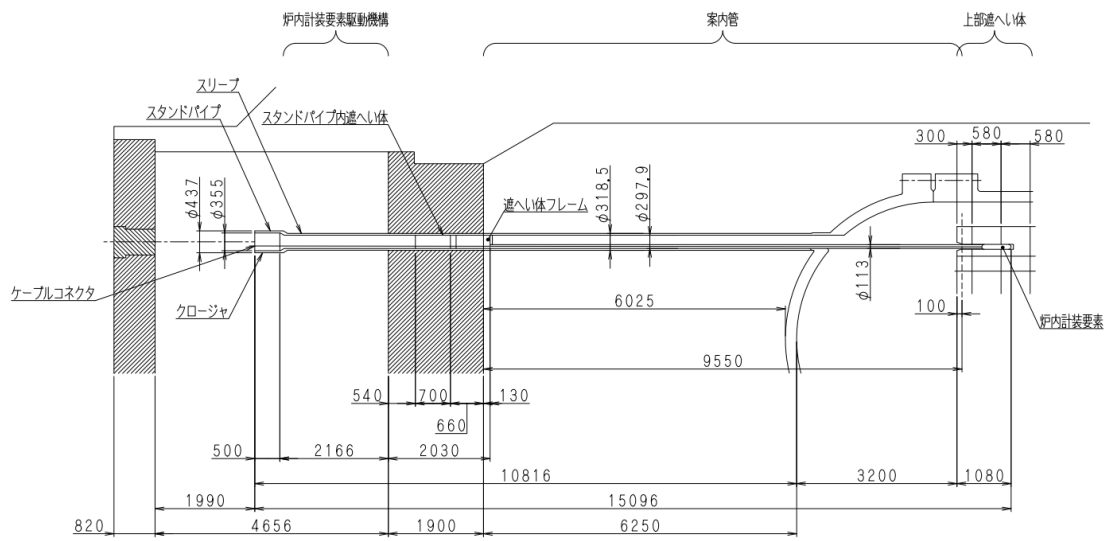


図 3.4.1-1 全体配置図

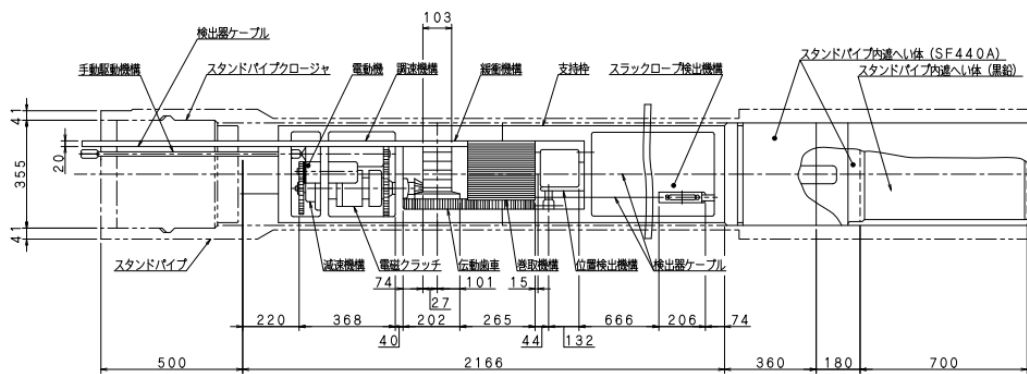


図 3.4.1-2 駆動機構配置図その 1

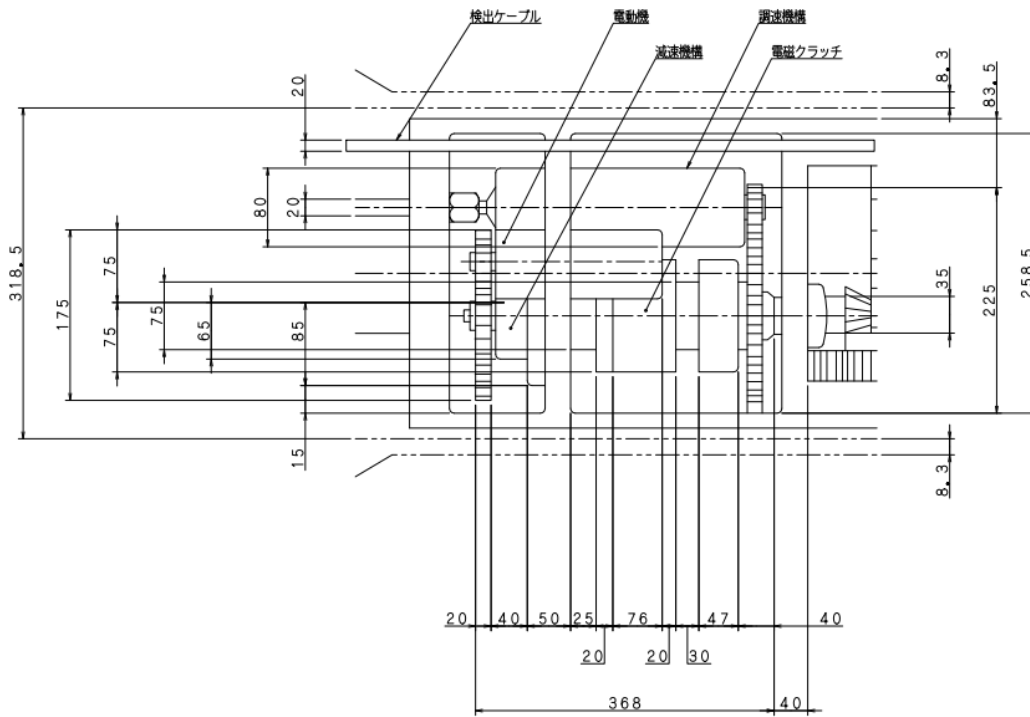


図 3.4.1-3 駆動機構配置図その 2

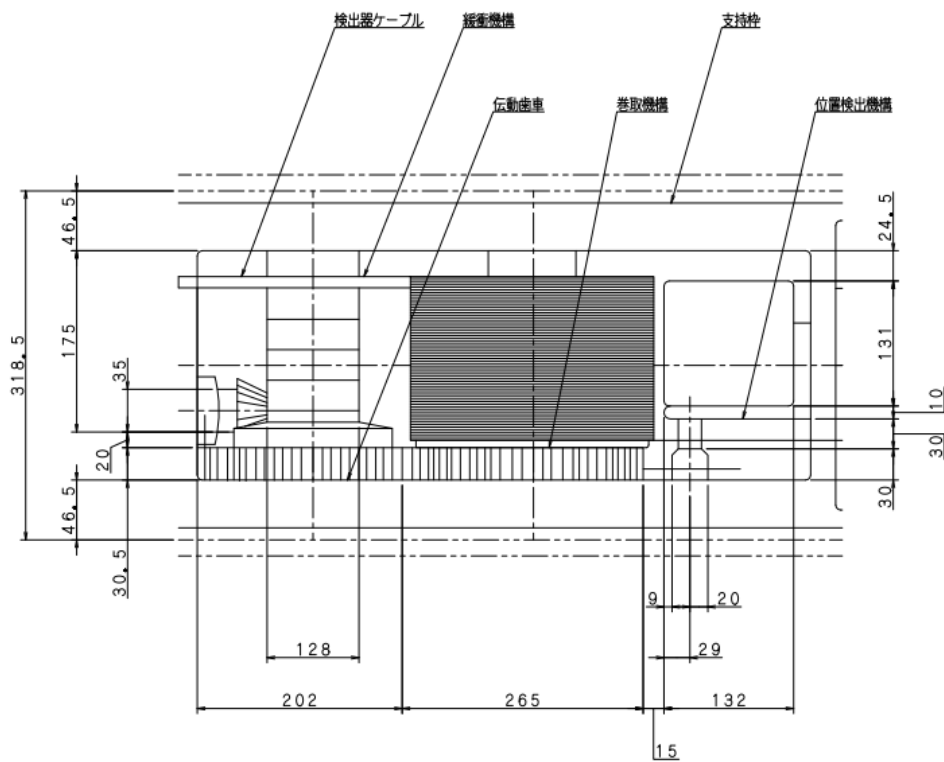


図 3.4.1-4 駆動機構配置図その 3

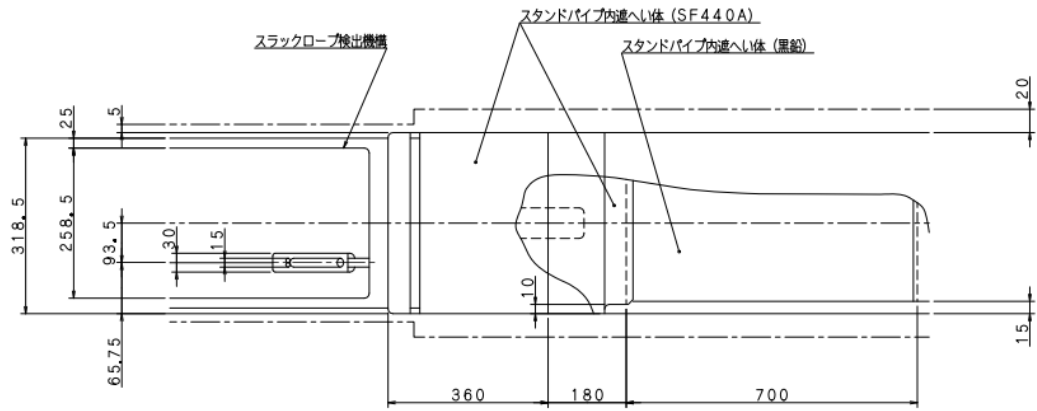


図 3.4.1-5 駆動機構配置図その 4

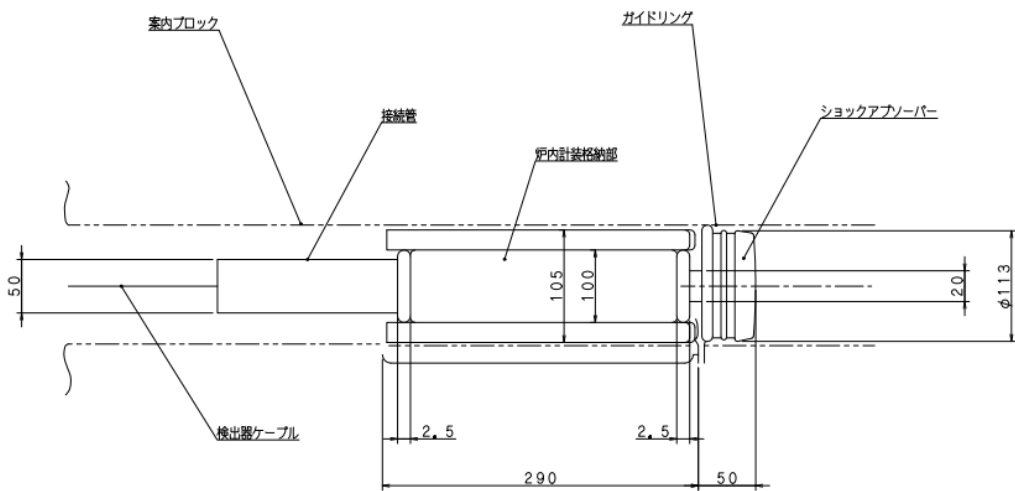


図 3.4.1-6 駆動機構配置図その 5

3.4.2 耐高温中性子検出器の実験

【R3-R4】

令和3年度は、令和4年度以降に実施する中性子ビームを利用した検出器の応答特性試験に向けて準備を行い、また、実験体系の具体化についての検討を行った。

令和4年度は、令和5年度に実施する検出器の応答特性試験に向けて、加速器中性子源を用い、TOF法に基づく実験を行った。また、耐高温中性子検出器のエネルギー毎の検出効率の評価を目的とし、予備実験として常温環境での実験を行った。

【R5】

令和5年度は、令和4年度に実施した予備実験を基に、低エネルギーの中性子ビームを用いて、耐高温中性子検出器の高温環境下での中性子計測の動作性を確認した。具体的には、以下の項目について実施した。

(1) 高温動作試験

本実験では、国立大学法人京都大学の冷中性子ビームライン(CN-3)^(3.4.2-1)を用いて、300℃まで加熱した高温ホットプレート上に設置した上で、本研究で開発を進めているBGaN検出器に対して中性子ビームを照射し、中性子由来のパルス検出信号の観測を行った。なお、本実験は施設側の安全要求から使用温度は300℃を上限としている。

高温動作試験の実験体系の写真を図3.4.2-1に示す。中性子ビームは、写真奥側の矩形の穴から写真手前側のホットプレートの方向に流れ、BGaN検出器を2台同時に照射する体系となっている。ここで便宜上、各BGaN検出器のサンプルをビームラインの上流側から順に検出器1、検出器2と呼ぶこととする。本BGaN検出器は、高温耐性のMIケーブルでプリアンプ装置(CSP02、ANSeeN社製)に接続され、プリアンプ装置で処理されたパルス信号はマルチチャンネルアナライザ(ZMCAN-CH04、ANSeeN社製)によって波高(チャンネル番号)と立ち上がり時間ごとに弁別される。検出器への電圧印加は、直流安定化電源(PA250-0.25A、KENWOOD社製、PA600-0.1B、TEXIO Technology社製)で行った。併せて、オシロスコープ(MS05074、RIGOL Technologies社製)を用いて電気信号の波形をモニターする。その他の主な測定条件は表3.4.2-1の通りである。

両BGaN検出器において、図3.4.2-2に示すような明瞭なパルス計上の検出信号が、数回程度観測された。ここで、パルス信号の立ち上がり時間は0 μ sに設定している。このパルス信号は、周囲の電気ノイズに比べて十分に大きく、パルスの立ち上がり時間が鋭いことから、BGaN層における $^{10}\text{B}(n, \alpha)$ 反応に起因するものと推測される。また、図3.4.2-3に波高とパルスの立ち上がり時間で整理した2次元エネルギースペクトル図を示す。予備実験で確認された信号と同様の領域に信号を確認することができる。これらの結果は、BGaN半導体中性子検出器が少なくとも300℃程度で動作可能であることを示唆している。

(2) 技術課題の抽出

本実験では、施設側の安全の要求から使用できる温度の上限が300℃までであったため、それに合わせた検出器仕様としたが、高温ガス炉の炉内環境相当の温度域での測定を行うためには、電極線やケーシングなどの取り付け部品の材質を変更する必要がある。また、

本研究課題で試作した B GaN 検出器はまだ開発途上であることから検出効率が低いため、検出効率の向上が課題となる。今後、B GaN 層を厚くする、素子を複数個同時に測定する等の改良を施すことが有効であると考えられる。

以上の通り、令和 4 年度に実施した予備実験を基に、低エネルギーの中性子ビームを用いて、耐高温中性子検出器の高温環境下での中性子計測の動作性の確認が完了した。

表 3. 4. 2-1 主な測定条件

	検出器 1	検出器 2
型式	p-up	p-up
B GaN 層厚さ	5 μm	3.5 μm
電極直径	500 μm ϕ	500 μm ϕ
印加電圧	75 V	20 V
原子炉出力	5 MW (最大出力)	
測定時間	約 90 分間 (中性子測定)、10 分 (バックグラウンド測定)	

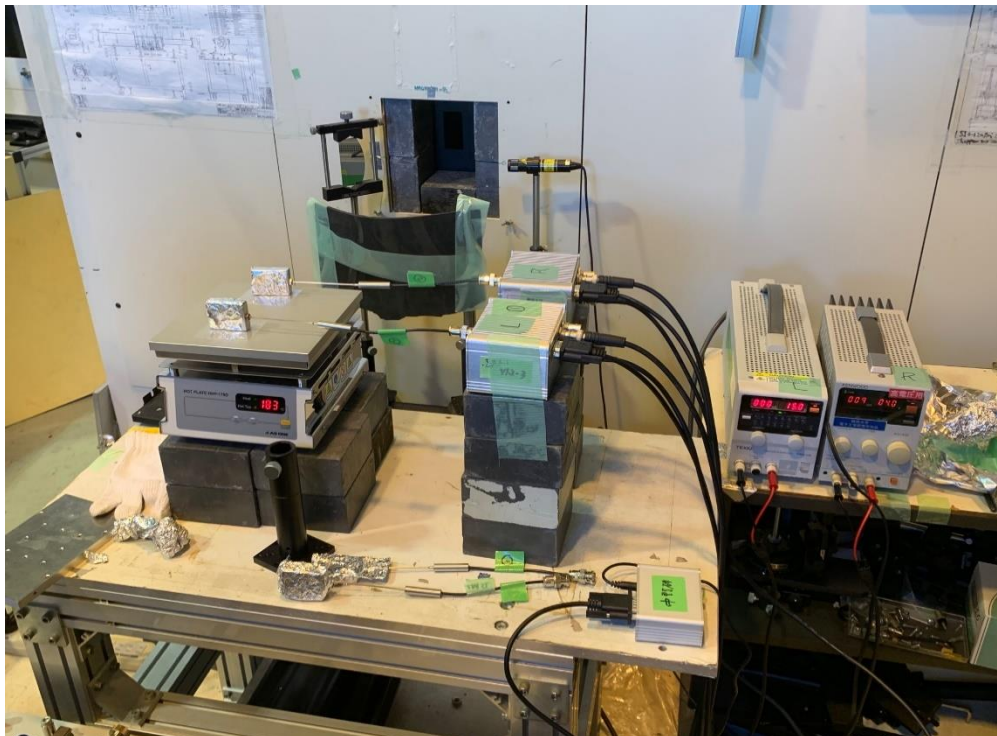


図 3. 4. 2-1 高温動作試験の実験体系の写真

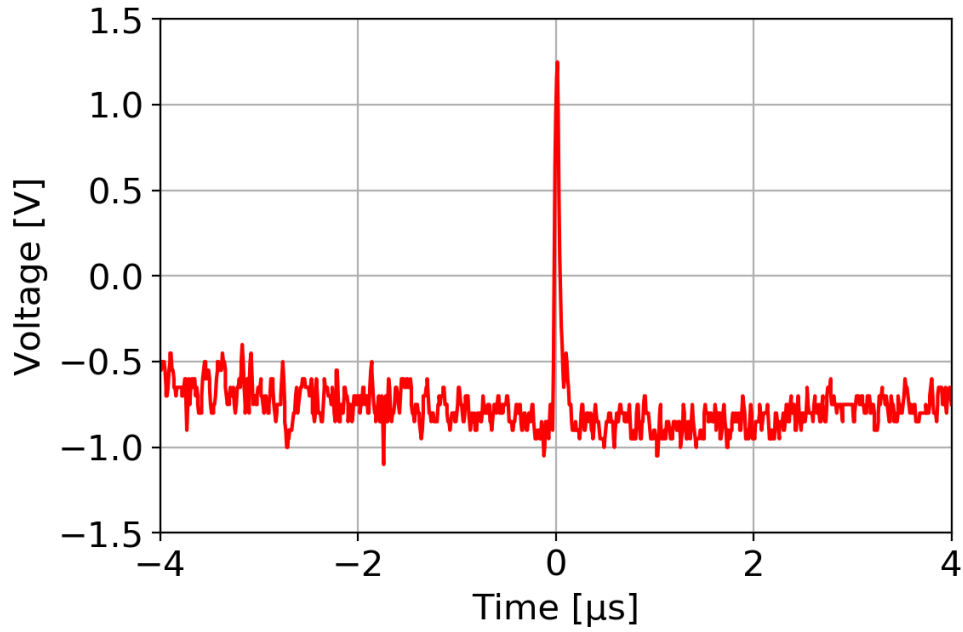


図 3.4.2-2 検出信号の例

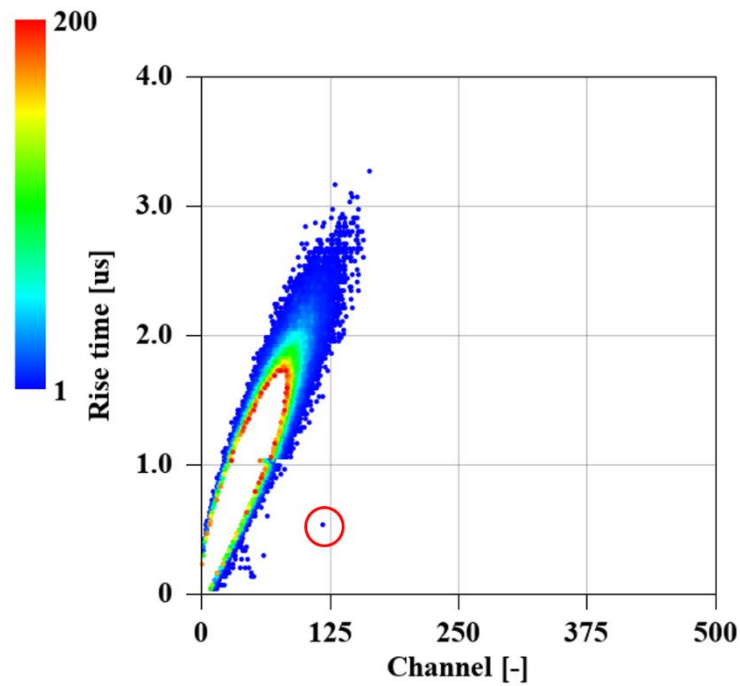


図 3.4.2-3 波高とパルスの立ち上がり時間で整理した 2 次元エネルギースペクトル図

参考文献

(3.4.2-1) S. Okita, et al., “Neutronic Design of Neutron Moderator on a Reentrant-hole Configuration for Kyoto University Accelerator based Neutron Source (KUANS).,” Transactions of the Atomic Energy Society of Japan, 19(3), 178–186 (2020).

3.5 研究推進 【R3～R5】

本研究を推進するに当り、令和3年度には研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めるため、研究代表者と再委託先との間での研究打ち合わせを合計5回行った。成果として、論文1件(参考文献(3.5-1))、特許出願1件(参考文献(3.5-2))の発表を行った。

令和4年度には、研究代表者と再委託先との間での研究打ち合わせを合計4回行った。成果として、令和3年度に申請した日本国への特許出願内容に関し、イギリス、フランス、ポーランド3国へ特許出願を行った。結果として、特許出願3件(参考文献(3.5-3)～(3.5-5))の発表を行った。

令和5年度には、研究代表者と再委託先との間での研究打ち合わせを合計3回行った。成果として、最終年度として令和3年度から令和5年度までの研究成果を令和6年10月に実施される国際会議 GLOBAL2024 に2件(参考文献(3.5-6)～(3.5-7))投稿を行った。

参考文献

- (3.5-1) Y. Fukaya, S. Okita, S. Nakagawa, et al. “Computed tomography neutron detector system to observe power distribution in a core with long neutron flight path,” Ann. Nucl. Energ. 168, pp.108911_1-108911_7 (2022).
- (3.5-2) 深谷裕司、中川繁昭、沖田将一郎、“原子炉内出力分布の測定方法及びその装置”、特願 2021-188522、(2021).
- (3.5-3) Y. Fukaya, S. Okita, S. Nakagawa, “METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING A POWER DISTRIBUTION IN A REACTOR CORE,” UK Patent Application 2217320.7 (2023).
- (3.5-4) Y. Fukaya, S. Okita, S. Nakagawa, “METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING A POWER DISTRIBUTION IN A REACTOR CORE,” France Patent Application FR2212041 (2023).
- (3.5-5) Y. Fukaya, S. Okita, S. Nakagawa, “METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING A POWER DISTRIBUTION IN A REACTOR CORE,” Poland Patent Application P.442859 (2023).
- (3.5-6) Y. Fukaya, S. Okita, S. Nakagawa, et al., “Development of Nuclear Instruments to Measure Power Distribution of HTGR, (1) Development of Ex-core Detector,” Prog. of GLOBAL 2024, (2024). [to be Published]
- (3.5-7) T. Nakano, H. Koike, T. Sakurai, et al., “Development of Nuclear Instruments to Measure Power Distribution of HTGR, (2) Development of In-core Detector,” Prog. of GLOBAL 2024, (2024). [to be Published]

4. 結言

「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」として、3 カ年計画の 3 年目として令和 5 年度の受託研究を以下の通り実施した。

(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）

令和4年度に決定した、検出器システムの概念設計に対して長年にわたって安定動作させ、有用なデータを取得することができるよう、可動式検出器システムの計測面における保守点検法の概念設計及びコスト評価を行い、実施項目(1)②の評価結果と統合して、代表システムを決定した。

② 提案システムの構造検討

実施項目(1)①でANSeeNが令和4年度に決定した代表システムとなりうる各検出器システム（提案システム）の概念設計に対して構造面における保守点検法の検討を行うとともに検出器システムの構造面におけるコスト評価を行った。

(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

対象炉心に関し、令和3年度に開発した検出器感度評価法、令和4年度に開発した出力分布の評価法を用いた検出器感度及び出力分布を用いて検出器信号を合成しその妥当性を確認した。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

不確かさの影響を考慮してAI・深層学習技術の検出器信号のノイズ低減及び測定点を増やすための検出器感度評価の加速の両面に対する応用を検討し、ノイズに対して安定なアンフォールディング手法を確立した。

(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）

令和4年度に開発した評価手法を用いて、中性子検出特性及び高温環境下で放射線検出特性について性能評価を行った。

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）

令和4年度に提示した使用環境条件に基づき、耐高温中性子検出器の使用外保管、およそ200℃における非動作時の保管に対する経時変化を評価した。

(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

令和4年度の成果を基に、炉内計装の駆動機構等の構造に関する調査及び検討を行い、機器構造図を作成し、運用方法を検討した。

② 耐高温中性子検出器の実験

令和4年度に実施した予備実験を基に、低エネルギーの中性子ビームを用いて、耐

高温中性子検出器の高温環境下での中性子計測の動作性を確認した。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目間における連携を密にして研究を進めた。

以上、3カ年計画の3年目として本年度の業務項目を実施し、所期の目標を達成した。

また、以下に、令和3年度から令和5年度まで通しての事業全体の達成度について評価する。なお、本事業においては、実験室実証までを目的としており、将来の工業実証、社会実装までの課題についても記載する。

(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）

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。」に対し以下の実績を上げた。
達成度：

全体計画の目標で示した代表システムの決定に関し、通年を通して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を行い、提案した複数システムに対する優劣表を作成し代表システムを決定し、所定の目標を達成した。また、適用性の評価及び、システムの比較を行うに際して、各提案システムの伝送及び駆動システムの概念設計を行っており、代表システムの電装、駆動システムの概念設計に関しても、所定の目標を達成した。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標としたが、今後の工業レベルの実証を達成するために、実機に即した駆動システムを用いた、測定点の位置精度及び移動速度等を評価することにより、運用手順を確立する必要がある。

② 提案システムの構造検討

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。」に対し以下の実績を上げた。

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。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標とした。今後の工業レベルの実証の観点

では、最終的な代表システムである縦導管内牽引方式に関しては、HTTRの運転系計装と構造が同じであるため、工業レベルでの課題はなく、実機導入において実証兼実用第一号としての導入が期待される。

(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

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。」に対し以下の実績を上げた。

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。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標としたが、今後の工業レベルの実証を達成するためには、実証炉もしくは、実機体系にて要求される精度を見極めつつ、手法を再整備していく必要がある。本手法の成立性については、今年度KUCA体系において実証したように、燃料グループ4群ではあるが、実機信号を用いたアンフォールディングに成功しており、求める解像度には依存するが、本手法が実機体系で利用できることは確認できている。また、ハードウェア面での実装は問題がないと思われ、実証炉・実機に本手法に適用できるハードウェアの実装が先行して行われれば、運用しながらの手法改良は可能である。

② 出力分布アンフォールディング手法の検討

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。」に対し以下の実績を上げた。

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3年度において先行してHTTR体系に適用し、数値解法としての妥当性はこの時点で確認できている。また、解析内容から「**3.2.1 検出器感度・出力分布評価手法の整備**」の成果として計上したが、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、物理現象としての妥当性の確認もできている。なお、提案手法に対する妥当性評価としては、令和3年度のHTTR体系への適用は、螺旋導管方式としているが、結局のところ、どの方式も圧力容器の周囲に対して測定点を複数設ける点は変わらず、他の方式に関しても代表されていると考えられる。さらに、令和5年度において、KUCAの実機信号の出力分布のアンフォールディングに成功した体系においても、改めて、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。ただし、測定点の想定自体は実際の検出器位置とは異なり、実機の信号は得られないので、各提案方式の妥当性確認に関しては、数値解法のみのものである。

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。ノイズ除去については、入力値からノイズを排除することによる安定化であるが、検出器感度の非線形内挿に関しては、測定点を疑似的に増やしアンフォールディングの最小二乗法処理における統計的ノイズの平均化を狙ったものである。本手法の実機信号への適用という観点では、今回のKUCA体系における実験が検出器の掃引時の高さ数が一つしかなかったことから、測定数が344点ありながらも、実際の拘束条件数が4つ程度しかなく、最小二乗法処理における統計的ノイズの平均化が十分に働いてしまい、今回整備したAI技術の入り込む余地はなかったと結論付ける。一方で、整備した技術自体は次のステップにおいて有益であると期待できる。

結果として、上記の様に、所定の目標を達成した。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標とした。今後の工業レベルの実証を実機への実装を考えると、残っているのはソフトウェア的な問題と考えられる。実験としては十分な検出器の配置ができなかったものの、実機への成立性は確認できており、数値解法ではあるが、十分な拘束条件が得られる検出器配置も確認されている。そのため、ハードウェアの実機実装を行い、その運用の中でソフトウェア対応の高精度化は十分可能であると思われる。本手法は適切な検出器の配置と駆動機構を考えれば、測定点は十分に確保できる。一方で、その測定点毎に必要な検出器感度は中性子輸送計算が必要となるため、その点が問題である。そこで、今後は今回整備したAI技術を如何に有効利用できるかが問題となる。開発課題としては、ハードウェアの実装は実装する実機で十分と結論付けたが、これらの検討を先行するための、実験実証は十分に可能であると考えられるため、今後、検討していきたい。

(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)

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。」に対し以下の実績を上げた。

達成度：

全体計画の目標で示した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に関し、複数のセンサー候補を提案した中で優劣表の作成を行い、GaN系の半導体検出器を代表として選出した。また、高温環境下でのセンサー素子基礎特性の評価手法を開発しGaN系の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い、所定の目標を達成した。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標としたが、今後の工業レベルの実証を達成するために、GaN系の半導体検出器であるBGaNを用いたデバイス作製技術の向上による高温耐性の更なる向上と、実証実験に向けて高温耐性を有する配線材料やパッケージ素材など各構成素子の検証によりシステム全体の作製が必要である。

② 検出器システムの開発（再委託先：ANSeeN）

全体計画の目標「代表システムの概念設計を行う。」に対し以下の実績を上げた。

達成度：

全体計画の目標で示した代表システムの概念設計を行うに関し、3.3.1節で選出されたGaN系の半導体検出器に対して代表システムの概念設計を行い、所定の目標を達成した。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標としたが、今後の工業レベルの実証を達成するために、今回選出されたセンサー及び代表システムに対して長期安定性の評価を行い、必要に応じてセンサーに対してフィードバックを行うことが必要である。

(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

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。」に対し以下の実績を上げた。

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。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標としたが、今後の工業レベルの実証を達成するために、モックアップ試験として、実機サイズの駆動機構を設計・製作し、所定の動作性を満足することを確認する必要がある。

② 耐高温中性子検出器の実験

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。」に対し以下の実績を上げた。

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。但し、中性子飛行時間法による検出器のエネルギー特性の実験的評価は、検出器の検出効率の制約から実施できなかったが、エネルギー毎の検出効率は、原理上 ^{10}B の断面積に比例するため、その位置づけはあくまで得られる検出信号が $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応に由来するものであるということを確認するための方法の1つであり、開発上必ずしも必要ではない。

今後の課題：

本研究では実験室実証段階を目標としたが、今後の工業レベルの実証を達成するために、本事業で利用した施設側の安全の要求の制約により実施できなかったより高温条件での高温動作試験を行い、必要に応じてセンサー素子、電流伝送系等へのフィードバックが必要である。その際、電極線やケーシングなどの取り付け部品の材質を変更、及び、BGaN層を厚くする、素子を複数個同時に測定する等の改良を施す必要がある。