平成 29 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

次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発

成果報告書

平成 30 年 3 月

国立大学法人　京都大学

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、国立大学法人　京都大学（受託機関名）が実施した平成 26－29 年度「次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発（契約書第 1 条で定めた委託業務題目）」の成果を取りまとめたものです。

目次

頁

概略 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ xiv

用語集 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ xv

1. はじめに ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1-1

2. 業務計画 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.1-1

2.1 全体計画・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2.1-1

3. 業務の実施内容及び成果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1

3.1 核種濃度定量・可視化技術の高度化(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1

3.1.1 中性子源開発(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.1.1-1

3.1.1.(1) 中性子源検討(再委託先:名古屋大学)(H26～H29) ・・・・・ 3.1.1-1

3.1.1.(2) 中性子源・中性子輸送系整備(H26～H29) ・・・・・・・・・・・ 3.1.1-15

3.1.2 Self-indication 法による核種定量技術の高度化(H26～H29) ・・・・ 3.1.2-1

3.1.3 パルス中性子イメージング技術の高度化(H26～H29) ・・・・・・・・・ 3.1.3-1

3.1.3.(1) 北大ライナックを用いた研究(再委託先:北海道大学) ・・・・ (H26～H29) 3.1.3-1

3.1.3.(2) 京大ライナックを用いた研究(H27～H29) ・・・・・・・・・・・ 3.1.3-13

3.2 物性値の定量・可視化技術の高度化(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・ 3.2.1-1

3.2.1 中性子・X 線イメージングによる形状測定(H26～H29) ・・・・・・・ 3.2.1-1

3.2.1.(1) 北大ライナックを用いた研究(再委託先:北海道大学) ・・・・ (H26～H29) 3.2.1-1

3.2.1.(2) 京大ライナックを用いた研究(H28～H29) ・・・・・・・・・・・ 3.2.1-15

3.2.2 ドップラ効果を利用した温度分布測定(H26～H29) ・・・・・・・・・・ 3.2.2-1

3.2.2.(1) 北大ライナックを用いた研究(再委託先:北海道大学) ・・・・ (H28～H29) 3.2.2-1

3.2.2.(2) 京大ライナックを用いた研究(H26～H29) ・・・・・・・・・・・ 3.2.2-7

3.3 総合測定システムの開発(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1-1

3.3.1 検出器システムの開発(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1-1

3.3.1.(1) 高エネルギー中性子及び X 線用シンチレーション検出器等の開発(再委託先:アールテック株式会社)(H26～H29) ・・・・・・ 3.3.1-1

3.3.1.(2) LiTA 検出器システムの研究開発及び作成(再委託先:高エネルギー加速器研究機構)(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.1-13

3.3.2 データ収集回路・多次元データ処理装置の開発(再委託先:東京都市大学)(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.2-1

3.3.3 制御システムの開発(H28～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.3.3-1

3.4 実証試験に基づく測定システムの総合評価(H29) ・・・・・・・・・・・・ 3.4-1

3.5 研究推進(H26～H29) ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 3.5-1

4. 結言 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 4-1

表一覧

表 3.1.1.(1).⑤-1	Pb を Z=1100 cm、Z=65 cm に設置した場合の中性子数の比較	3.1.1-7
表 3.1.1.(1).⑤-2	様々な Pb 遮蔽体厚さでの中性子数	3.1.1-7
表 3.1.1.(1).⑤-3	Pb 各々の遮蔽体の位置とガンマ強度比	3.1.1-7
表 3.1.1.(1).⑧-1	Al フランジ厚さの違いによる中性子強度の変化	3.1.1-8
表 3.1.1.(2).④-1	得られた中性子束と昨年度との比較	3.1.1-20
表 3.1.2.④-1	実験及び数値計算から求めた各共鳴の Reduction Ratio の比較	3.1.2-7
表 3.1.2.⑤-1	Reduction ratio の実験値と計算値の比較	3.1.2-8
表 3.1.2.⑥-1	典型的な MA 含有 TRU 燃料の TRU 核種組成	3.1.2-8
表 3.2.1.(2).④-1	模擬 MOX 燃料被検体の混合比率	3.2.1-18
表 3.2.1.(2).⑤-1	U 被検体の詳細	3.2.1-19
表 3.2.2.(2).⑤-1	ドップラ効果測定時の加速器運転パラメータと測定時間	3.2.2-11
表 3.2.2.(2).⑤-2	熱中性子領域における透過中性子束比の測定値	3.2.2-11
表 3.2.2.(2).⑤-3	熱膨張を考慮した熱中性子領域における透過中性子束比の計算値	3.2.2-11
表 3.2.2.(2).⑤-4	各 ROI におけるドップラ効果測定値	3.2.2-12
表 3.3.1.(1).③-1	LUT 値表	3.3.1-13
表 3.3.2.⑤-1	京大炉ライナックにおける加速器と検出器システムのパラメータ	3.3.2-10
表 3.3.2.⑤-2	使用した機器等	3.3.2-11
表 3.3.2.⑤-3	実験に必要な最低測定時間の推定	3.3.2-11
表 3.3.2.⑤-4	模擬燃料の中性子スペクトルのディップ推定	3.3.2-12
表 3.4.2-1	本事業で整備し使用した検出器システム及び新たに開発した手法	3.4-3
表 3.5.3-1	国内学会での発表実績	3.5-2
表 3.5.3-2	国際会議での発表実績	3.5-2
表 3.5.3-3	発表論文一覧	3.5-2

図一覧

図 2.1-1	本事業の全体計画	2.1-3
図 2.1-2	本事業の最終進捗状況	2.1-4
図 2.1-3	研究体制	2.1-5
図 3.1.1.(1).②-1	放出角度変更体系	3.1.1-8
図 3.1.1.(1).②-2	角度による中性子強度の減衰割合	3.1.1-8
図 3.1.1.(1).②-3	減速材の回転設置体系	3.1.1-8
図 3.1.1.(1).②-4	設置角度による中性子強度の減衰割合	3.1.1-8

図 3.1.1.(1).③-1	計算に用いた直方体形ターゲットと x,y,z 軸	3.1.1-9
図 3.1.1.(1).③-2	ターゲットの各面から放出される中性子強度のｘｙ面の大きさによる変化	3.1.1-9
図 3.1.1.(1).④-1	中性子・ガンマ線ビームラインコリメータの配置	3.1.1-9
図 3.1.1.(1).④-2	(a)中性子の XZ 分布,(b)ガンマの XZ 分布	3.1.1-10
図 3.1.1.(1).⑤-1	中性子ソースを使ってのタリーの方法	3.1.1-10
図 3.1.1.(1).⑤-2	コリメータモデル	3.1.1-10
図 3.1.1.(1).⑤-3	モデレータ・飛行管中間位置 Pb 遮蔽体	3.1.1-10
図 3.1.1.(1).⑤-4	飛行管出口 Pb 遮蔽体	3.1.1-10
図 3.1.1.(1).⑤-5	ターゲット直後に Pb 遮蔽体を設置	3.1.1-11
図 3.1.1.(1).⑤-6	コリメータモデル Pb 遮蔽体位置 Z=65 cm	3.1.1-11
図 3.1.1.(1).⑤-7	飛行管出口付近でのガンマの挙動	3.1.1-11
図 3.1.1.(1).⑤-8	飛行管中心からの距離と中性子分布	3.1.1-12
図 3.1.1.(1).⑤-9	飛行管中心からの距離とガンマ分布	3.1.1-12
図 3.1.1.(1).⑥-1	実験体系に基づいたコリメータモデル	3.1.1-12
図 3.1.1.(1).⑥-2	コリメータモデルでの粒子の空間分布	3.1.1-12
図 3.1.1.(1).⑦-1	Inclined angle collimator	3.1.1-12
図 3.1.1.(1).⑦-2	Inclined angle 中性子時間分布	3.1.1-12
図 3.1.1.(1).⑦-3	Orthogonal angle moderator	3.1.1-13
図 3.1.1.(1).⑦-4	Orthogonal angle 中性子時間分布	3.1.1-13
図 3.1.1.(1).⑦-5	NO reflector	3.1.1-13
図 3.1.1.(1).⑦-6	NO reflector 中性子時間分布	3.1.1-13
図 3.1.1.(1).⑦-7	各エネルギーでの中性子時間分布の比較	3.1.1-13
図 3.1.1.(1).⑦-8	放出時間分布半値幅	3.1.1-14
図 3.1.1.(1).⑧-1	コリメータモデル	3.1.1-14
図 3.1.1.(1).⑧-2	中性子エネルギー分布の実験値と計算値の比較	3.1.1-14
図 3.1.1.(2).②-1	京大炉ライナックの平面配置図	3.1.1-21
図 3.1.1.(2).②-2	反射材ありの計算体系（setting 2）と得られた中性子スペクトル	3.1.1-21
図 3.1.1.(2).②-3	新しく導入した中性子源システムと昇降式架台の写真	3.1.1-21
図 3.1.1.(2).②-4	減速材を挿入した時の中性子源システムの写真	3.1.1-22
図 3.1.1.(2).②-5	新設したビーム導管の図面	3.1.1-22
図 3.1.1.(2).③-1	減速材（厚さ 5 cm）を挿入した時の中性子源システムの写真	3.1.1-22
図 3.1.1.(2).③-2	実験体系の写真	3.1.1-23
図 3.1.1.(2).③-3	新中性子源システムで得られた TOF スペクトル	3.1.1-23
図 3.1.1.(2).④-1	新しく設置したカーボン反射材	3.1.1-24
図 3.1.1.(2).④-2	シャドーバーの設置写真	3.1.1-24

図 3.1.1.(2).④-3	測定室側のビーム導管出口	3.1.1-25
図 3.1.1.(2).④-4	得られた TOF スペクトル	3.1.1-25
図 3.1.1.(2).⑤-1	転写法による実験状況	3.1.1-26
図 3.1.1.(2).⑤-2	転写法による実験条件(A1,A2,B1,B2)	3.1.1-26
図 3.1.1.(2).⑤-3	条件 A1 のイメージング結果(左：Dy 箔、右:Au 箔)	3.1.1-27
図 3.1.1.(2).⑤-4	Dy 箔によるイメージング結果(B1)	3.1.1-27
図 3.1.1.(2).⑤-5	B2 条件でのイメージング結果(左：Dy 箔、右:Au 箔)	3.1.1-28
図 3.1.1.(2).⑤-6	京大炉ライナックと HUNS の MTF 比較	3.1.1-28
図 3.1.2.②-1	性能試験における検出器配置図	3.1.2-8
図 3.1.2.③-1	self-indication 予備実験で得られた TOF スペクトルの比較（横軸を中性子エネルギーに変換したもの）	3.1.2-9
図 3.1.2.③-2	JENDL-4.0 の評価値を用いて導出した Ta に対する self-indication 反応率の変化	3.1.2-9
図 3.1.2.③-3	Ta の 10.36eV 共鳴に対する計量線と実験値の比較	3.1.2-10
図 3.1.2.③-4	^{238}U に対する self-indication 反応率の計算結果	3.1.2-10
図 3.1.2.③-5	^{238}U の各共鳴に対する計量線	3.1.2-11
図 3.1.2.④-1	self-indication 法の性能試験で得られた TOF スペクトル	3.1.2-11
図 3.1.2.④-2	^{238}U の 6.67eV 共鳴に対する計算値と実験値の比較	3.1.2-12
図 3.1.2.⑤-1	self-indication 実証試験の測定体系の写真	3.1.2-12
図 3.1.2.⑤-2	self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル（横軸を中性子エネルギーに変換）	3.1.2-13
図 3.1.2.⑤-3	self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル（6.7eV 共鳴）	3.1.2-13
図 3.1.2.⑤-4	self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル（20.9, 36.7eV 共鳴）	3.1.2-14
図 3.1.2.⑤-5	self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル（66～117eV 共鳴）	3.1.2-14
図 3.1.2.⑤-6	self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル（146～291eV 共鳴）	3.1.2-15
図 3.1.2.⑤-7	^{238}U の各共鳴に対する計量線（^{238}U の厚さ 7.36×10^{-3}/b の場合）	3.1.2-15
図 3.1.2.⑤-8	^{238}U の 6.7eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較	3.1.2-16
図 3.1.2.⑤-9	^{238}U の 20.9eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較	3.1.2-16
図 3.1.2.⑤-10	^{238}U の 36.7eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較	3.1.2-17
図 3.1.2.⑤-11	^{238}U の 36.7eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較	3.1.2-17
図 3.1.2.⑤-12	^{237}Np, ^{93}Zr, DU を積層させた被検体に対する透過中性子スペクトル	3.1.2-18
図 3.1.2.⑤-13	^{237}Np, ^{93}Zr, DU を積層させた被検体に対する self-	3.1.2-18

indication の TOF スペクトル
図 3.1.2.⑥-1 MA 含有 TRU 燃料中の主要核種の全断面積 3.1.2-19
図 3.1.2.⑥-2 TRU 燃料と ^{239}Pu に対する透過中性子割合の比較 3.1.2-19
図 3.1.2.⑥-3 TRU 燃料と ^{239}Pu に対する透過中性子割合の比較（5-30eV 領域） 3.1.2-20
図 3.1.2.⑥-4 TRU 燃料と ^{239}Pu に対する self-indication 反応率の比較 3.1.2-20
図 3.1.2.⑥-5 TRU 燃料と ^{239}Pu に対する self-indication 反応率の比較（5-30eV 領域） 3.1.2-21
図 3.1.2.⑥-6 透過中性子法と self-indication 法の Reduction Ratio の比較 3.1.2-21
図 3.1.3.(1).②-1 中性子イメージ検出器試験用機材(中性子測定用光センサー)の概念図 3.1.3-7
図 3.1.3.(1).②-2 試作検出器により得られた飛行時間スペクトル 3.1.3-8
図 3.1.3.(1).②-3 64ch.マルチアノード光電子増倍管によるインフォーカス状態の被写体イメージ 3.1.3-8
図 3.1.3.(1).②-4 64ch.マルチアノード光電子増倍管による 16×16 超解像度化被写体イメージ 3.1.3-9
図 3.1.3.(1).③-1 GEM 型検出器により測定した 15μm 厚 Ta 箔の透過スペクトルおよびダイレクトビームのスペクトル（凡例に示す時間は測定時間） 3.1.3-9
図 3.1.3.(1).③-2 GEM 型検出器により測定した 2mm 厚マンガニン板の透過率スペクトル 3.1.3-10
図 3.1.3.(1).③-3 中性子-光コンバータと光電子増倍管を組み合わせた高効率検出器により測定した 25μm 厚 Ta 箔の透過率スペクトル 3.1.3-10
図 3.1.3.(1).④-1 中性子と X 線の透過画像とそれらの間の 2 次元ヒストグラムの概念図 3.1.3-11
図 3.1.3.(1).④-2 相乗イメージングの手順と元素マッピング結果 3.1.3-11
図 3.1.3.(1).④-3 シミュレーション計算用の模擬被検体(左)とそれを撮影した X 線及び中性子ラジオグラフィ画像(右) 3.1.3-11
図 3.1.3.(1).④-4 シミュレーション計算による中性子及び X 線画像と、相乗イメージングによる元素分布 3.1.3-12
図 3.1.3.(1).④-5 3 方向の相乗イメージから再構成された元素のボリューム分布 3.1.3-12
図 3.1.3.(1).⑤-1 ステップ撮像装置と組み合わせた中性子透過撮像体系 3.1.3-13
図 3.1.3.(1).⑤-2 北海道大学パルス中性子源における CNII 検出器の撮像例 3.1.3-13
図 3.1.3.(1).⑤-3 京都大学パルス中性子源における CNII 検出器の撮像例 3.1.3-13
図 3.1.3.(2).②-1 エネルギーを積分した透過中性子束 3.1.3-17

図 3.1.3.(2).②-2	6.67eV 近傍のエネルギーの透過中性子束	3.1.3-17
図 3.1.3.(2).②-3	被検体ステージと真空容器	3.1.3-18
図 3.1.3.(2).③-1	高効率・高分解能型中性子検出器の TOF スペクトルと中性子束の比較	3.1.3-18
図 3.1.3.(2).③-2	高効率・高時間分解能検出器の検出効率評価	3.1.3-19
図 3.1.3.(2).③-3	上流に厚さ 50μm の In 箔を置いた場合と置かない場合の TOF スペクトル	3.1.3-19
図 3.1.3.(2).④-1	Co、Ag、In 箔の TOF 画像測定	3.1.3-20
図 3.1.3.(2).④-2	16×16 中性子画像と重心処理による 32×32 画像の比較	3.1.3-20
図 3.1.3.(2).④-3	模擬燃料体形状・組成と In 共鳴領域での測定結果	3.1.3-21
図 3.1.3.(2).④-4	核燃料被検体の画像測定と TOF スペクトル抽出	3.1.3-21
図 3.1.3.(2).④-5	HU 枚数毎の TOF スペクトル実測値と JENDL-4.0 による計算値	3.1.3-22
図 3.1.3.(2).④-6	DU 枚数毎の TOF スペクトル実測値	3.1.3-22
図 3.1.3.(2).④-7	HU 枚数に対する共鳴点での透過率減衰特性	3.1.3-23
図 3.1.3.(2).④-8	DU 枚数に対する共鳴点での透過率減衰特性	3.1.3-23
図 3.1.3.(2).④-9	Pb50mm 遮蔽下での U、Np、Am 被検体の画像測定	3.1.3-24
図 3.1.3.(2).④-10	天然 U、Np-237、Am-243 領域の透過中性子スペクトル	3.1.3-25
図 3.1.3.(2).④-11	天然 U 共鳴領域の画像化	3.1.3-25
図 3.1.3.(2).④-12	Np-237 共鳴領域の画像化	3.1.3-26
図 3.1.3.(2).④-13	Am-243 共鳴領域の画像化	3.1.3-26
図 3.1.3.(2).④-14	Np-237、Am-243 透過スペクトル実測値(上図)と透過率計算値(下図)	3.1.3-27
図 3.2.1.(1).②-1	試作した高空間分解能型中性子検出器の体系模式図	3.2.1-8
図 3.2.1.(1).②-2	パルス中性子を用いた試作高空間分解能型検出器による撮影結果(ISO100、露出時間 10s)	3.2.1-9
図 3.2.1.(1).②-3	パルス中性子を用いた試作高空間分解能型検出器による撮影結果(ISO1600、露出時間 60s)	3.2.1-9
図 3.2.1.(1).③-1	二次元ヒストグラムの概念図	3.2.1-10
図 3.2.1.(1).③-2	結合確率分布 $p(a_i, b_j)$ および周辺確率分布 $p(a_i), p(b_j)$ の概念図	3.2.1-10
図 3.2.1.(1).③-3	基準画像と位置合わせ前の高精細検出器による中性子画像との比（左）と位置合わせ後の中性子画像との比（右）	3.2.1-10
図 3.2.1.(1).③-4	輝度値への物理量のマッピング法の概念図	3.2.1-11
図 3.2.1.(1).③-5	物理量マッピングのシミュレーション。(a)中性子画像、(b)X 線画像、(c)中性子画像より求めた密度分布、(d)物理量マッピングにより高精細化した密度分布	3.2.1-11

図 3.2.1.(1).④-1	ステップ撮像装置	3.2.1-12
図 3.2.1.(1).④-2	模擬被検体の CT 再構成結果	3.2.1-12
図 3.2.1.(1).⑤-1	元素分布ボリュームモデル再構成用被検体の CT 像	3.2.1-13
図 3.2.1.(1).⑤-2	元素分布ボリュームモデル再構成用被検体の中性子透過画像	3.2.1-13
図 3.2.1.(1).⑤-3	X 線 CT からの投影画像と、その X 線画像を基準に位置合わせした中性子透過画像	3.2.1-13
図 3.2.1.(1).⑤-4	位置合わせ後の X 線及び中性子画像の相乗イメージングの結果	3.2.1-14
図 3.2.1.(1).⑤-5	各金属線領域内の相乗イメージング値を平均した結果	3.2.1-14
図 3.2.1.(1).⑤-6	ボリュームモデルの再構成について Z 方向から見た模式図	3.2.1-14
図 3.2.1.(1).⑤-7	再構成されたボリュームモデルの 3 次元イメージ	3.2.1-15
図 3.2.1.(1).⑤-8	再構成されたボリュームモデルのスライス画像	3.2.1-15
図 3.2.1.(2).②-1	GEM 検出器本体	3.2.1-19
図 3.2.1.(2).②-2	検出器設置台	3.2.1-19
図 3.2.1.(2).②-3	GEM 検出器を用いたイメージング実験体系の概略図	3.2.1-20
図 3.2.1.(2).②-4	ダイレクトビーム測定結果（50Hz,20min）(a)イメージ、(b)スペクトル	3.2.1-20
図 3.2.1.(2).②-5	模擬燃料被検体(a)被検体詳細、(b)写真	3.2.1-20
図 3.2.1.(2).②-6	模擬燃料被検体測定結果（250Hz, 20min）(a)被検体イメージ、(b)透過率画像	3.2.1-21
図 3.2.1.(2).③-1	中性子 I.I.設置写真	3.2.1-21
図 3.2.1.(2).③-2	中性子 I.I.設置写真（被検体中心付近の拡大図）	3.2.1-21
図 3.2.1.(2).④-1	模擬 MOX 燃料と MOX 燃料の中性子吸収マクロ断面積の比較	3.2.1-22
図 3.2.1.(2).④-2	模擬 MOX 燃料被検体の中性子イメージング結果	3.2.1-22
図 3.2.1.(2).⑤-1	U 被検体の中性子イメージング結果 (a)被検体配置、(b)全エネルギー透過画像、(c)HEU の透過スペクトル、(d)DU の透過スペクトル	3.2.1-23
図 3.2.1.(2).⑤-2	Np 被検体の中性子イメージング結果 (a)被検体配置、(b)全エネルギー透過画像、(c)0.49eV 付近の共鳴吸収イメージ、(d)透過スペクトル	3.2.1-23
図 3.2.1.(2).⑤-3	応用試験時の被検体配置	3.2.1-24
図 3.2.1.(2).⑤-4	全エネルギーでの中性子イメージング	3.2.1-24
図 3.2.1.(2).⑤-5	TOF スペクトルと ROI 設定	3.2.1-25
図 3.2.1.(2).⑤-6	^{238}U に対する核種弁別型中性子イメージング	3.2.1-25
図 3.2.1.(2).⑤-7	^{243}Am に対する核種弁別型中性子イメージング	3.2.1-26

図 3.2.1.(2).⑤-8	^{237}Np に対する核種弁別型中性子イメージング	3.2.1-26
図 3.2.2.(1).②-1	温度勾配を持つ UO_2 板のシミュレーションモデル	3.2.2-4
図 3.2.2.(1).②-2	各温度における UO_2 板の中性子透過率スペクトル及び温度の校正曲線	3.2.2-4
図 3.2.2.(1).②-3	温度勾配を持つ UO_2 板の温度イメージング画像	3.2.2-4
図 3.2.2.(1).②-4	シミュレーションにより得た UO_2 板の X 線ラジオグラフィ画像	3.2.2-5
図 3.2.2.(1).②-5	X 線ラジオグラフィ画像への温度イメージングのマッピング	3.2.2-5
図 3.2.2.(1).③-1	断層内温度分布測定用被検体	3.2.2-5
図 3.2.2.(1).③-2	被検体全体の透過スペクトル(ヒータ on : 赤、ヒータ off : 青)	3.2.2-6
図 3.2.2.(1).③-3	REFIT による In の共鳴ディップのフィッティング状況	3.2.2-6
図 3.2.2.(1).③-4	X 線 CT による被検体の断層像	3.2.2-6
図 3.2.2.(1).③-5	再構成された温度分布(左 : 断層内分布、右 : 断層直径方向の温度分布、青線が再構成結果、黒線が伝熱計算結果)	3.2.2-7
図 3.2.2.(1).③-6	X 線 CT 断層像への温度分布マッピング	3.2.2-7
図 3.2.2.(2).②-1	実験室に設置した除振台	3.2.2-12
図 3.2.2.(2).③-1	真空容器とヒーター	3.2.2-12
図 3.2.2.(2).③-2	昇温試験	3.2.2-13
図 3.2.2.(2).④-1	昇温装置内に設置された Ta 板を透過した中性子束測定結果	3.2.2-13
図 3.2.2.(2).⑤-1	測定された TOF スペクトル	3.2.2-14
図 3.2.2.(2).⑤-2	熱中性子領域の TOF スペクトルと ROI 範囲	3.2.2-14
図 3.2.2.(2).⑤-3	共鳴領域の TOF スペクトルと ROI 設定	3.2.2-15
図 3.2.2.(2).⑤-4	計量曲線と測定値の比較	3.2.2-15
図 3.3.1.(1).①-1	高エネルギーX 線用シンチレータの外形図	3.3.1-7
図 3.3.1.(1).①-2	筐体前面	3.3.1-7
図 3.3.1.(1).①-3	筐体側面	3.3.1-7
図 3.3.1.(1).①-4	測定ブロック図概要	3.3.1-7
図 3.3.1.(1).①-5	シンチレータ(10B4C+PS)	3.3.1-8
図 3.3.1.(1).①-6	シンチレータの外形図	3.3.1-8
図 3.3.1.(1).①-7	シンチレータの光透過像	3.3.1-8
図 3.3.1.(1).①-8	ガラス俯瞰図	3.3.1-8
図 3.3.1.(1).①-9	シンチレータ平面	3.3.1-9
図 3.3.1.(1).①-10	シンチレータ外観	3.3.1-9
図 3.3.1.(1).①-11	シンチレータの模擬発光	3.3.1-9
図 3.3.1.(1).①-12	ステップゲージ	3.3.1-9

図 3.3.1.(1).①-13	ステップゲージの構成図（Ag,In,Co の 3 種類）	3.3.1-9
図 3.3.1.(1).①-14	中性子吸収検出チャート	3.3.1-10
図 3.3.1.(1).①-15	同左の構成図	3.3.1-10
図 3.3.1.(1).①-16	分解能チャート	3.3.1-10
図 3.3.1.(1).①-17	正方形とくさび型	3.3.1-10
図 3.3.1.(1).①-18	In 正方形５種	3.3.1-10
図 3.3.1.(1).①-19	測定系概要	3.3.1-11
図 3.3.1.(1).①-20	チャートの近接配置	3.3.1-11
図 3.3.1.(1).③-1	システム構成図	3.3.1-11
図 3.3.1.(1).③-2	GUI 画面	3.3.1-11
図 3.3.1.(1).③-3	管電圧、管電流、Ｘ線量の関係	3.3.1-12
図 3.3.1.(1).③-4	管電圧掃引とＸ線量特性	3.3.1-12
図 3.3.1.(1).③-5	管電圧の変化とＸ線量特性	3.3.1-12
図 3.3.1.(1).③-6	波形改善	3.3.1-13
図 3.3.1.(1).③-7	試験風景	3.3.1-13
図 3.3.1.(2).②-1.(a)	LiTA12e_VME モジュール	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-1.(b)	HV 電源モジュール	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-2.(a)	LiTA12e の構成図	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-2.(b)	写真を使用した各パーツの関係	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-3.(a)	^{6}Li:1mm 厚を取り付け	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-3.(b)	Cd「KENS」文字取り付け	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-4	HV=-520V、lld=60ch の 2 次元図(p60d54)、波高分布図、時間分布図, run7 / run3	3.3.1-19
図 3.3.1.(2).②-5.(a)	補正なしデータ、Cd 文字あり(run7)	3.3.1-20
図 3.3.1.(2).②-5.(b)	補正なしデータ、Cd 文字なし(run3)	3.3.1-20
図 3.3.1.(2).②-6.(a)	^{3}He 検出器の設置	3.3.1-20
図 3.3.1.(2).②-6.(b)	細いビームで測定	3.3.1-20
図 3.3.1.(2).②-7	^{3}He 検出器と H9500-^{6}Li:1mm 厚と H9500- ZnS:0.4mm 厚の時間分布比較図	3.3.1-20
図 3.3.1.(2).②-8	イメージング装置を使用した測定状況	3.3.1-21
図 3.3.1.(2).②-9.(a)	イメージング装置の光を下部に反射	3.3.1-21
図 3.3.1.(2).②-9.(b)	H9500 で受光する	3.3.1-21
図 3.3.1.(2).②-9.(c)	ボロンゴム「×」取り付け	3.3.1-21
図 3.3.1.(2).②-10	H9500 イメージデータ、2 次元図、波高分布図、時間分布図,run9/run10	3.3.1-22
図 3.3.1.(2).②-11.(a)	補正なしデータ、Cd 文字あり(run9)	3.3.1-22
図 3.3.1.(2).②-11.(b)	補正なしデータ、Cd 文字あり(run10)	3.3.1-22
図 3.3.1.(2).③-1	京都大学用の LiTA12e システムの動作試験の様子	3.3.1-22
図 3.3.1.(2).③-2	測定の概要図	3.3.1-23

図 3.3.1.(2).③-3.(a)	LiTA12 検出器	3.3.1-23
図 3.3.1.(2).③-3.(b)	透過被検体に B ゴム-20mm 厚	3.3.1-23
図 3.3.1.(2).③-3.(c)	B ゴム-20mm 厚＋Cd-1.5mm 厚	3.3.1-23
図 3.3.1.(2).③-3.(d)	Cd-1.5mm 厚	3.3.1-23
図 3.3.1.(2).③-3.(e)	Pb-50mm 厚	3.3.1-23
図 3.3.1.(2).③-4	^{6}Li-1mm 厚ガラスシンチレータ	3.3.1-24
図 3.3.1.(2).③-5.(a)	ダイレクトビーム、run6	3.3.1-24
図 3.3.1.(2).③-5.(b)	B ゴム-20mm 厚、run7	3.3.1-24
図 3.3.1.(2).③-5.(c)	B ゴム-20mm 厚＋Cd-1.5mm 厚、run8	3.3.1-24
図 3.3.1.(2).③-5.(d)	Cd-1.5mm 厚、run9	3.3.1-25
図 3.3.1.(2).③-5.(e)	Pb-50mm 厚、run10	3.3.1-25
図 3.3.1.(2).③-6	^{6}Li-1mm 厚ガラスシンチレータ	3.3.1-25
図 3.3.1.(2).③-7	ZnS-0.45mm 厚シンチレータ	3.3.1-26
図 3.3.1.(2).③-8.(a)	ダイレクトビーム、run1	3.3.1-26
図 3.3.1.(2).③-8.(b)	B ゴム-20mm 厚、run2	3.3.1-26
図 3.3.1.(2).③-8.(c)	B ゴム-20mm 厚＋Cd-1.5mm 厚、run3	3.3.1-26
図 3.3.1.(2).③-8.(d)	Cd-1.5mm 厚、run4	3.3.1-27
図 3.3.1.(2).③-8.(e)	Pb-50mm 厚、run5	3.3.1-27
図 3.3.1.(2).③-9	ZnS-0.45mm 厚シンチレータの TOF 特性	3.3.1-27
図 3.3.1.(2).④-1	MPPC-LiTA システム、MPPC アレイ＋CA32M 回路＋高速アンプ＋LiTA12e モジュール	3.3.1-28
図 3.3.1.(2).④-2	MPPC アレイ検出器と CA32M_DAC 基板、CA32M_HV 基板の関係	3.3.1-28
図 3.3.1.(2).④-3.(a)	MPPC アレイ検出器	3.3.1-28
図 3.3.1.(2).④-3.(b)	CA32_DAC 基板 2 枚と CA32M_HV 基板＋高速アンプ	3.3.1-28
図 3.3.1.(2).④-4.(a)	無調整の波高分布図	3.3.1-29
図 3.3.1.(2).④-4.(b)	1 回目調整後	3.3.1-29
図 3.3.1.(2).④-4.(c)	2 回目調整後	3.3.1-29
図 3.3.1.(2).④-5.(a)	一様ビーム照射の様子	3.3.1-29
図 3.3.1.(2).④-5.(b)	Cd「KENS」文字	3.3.1-29
図 3.3.1.(2).④-6.(a)	被検体なし 2 次元図	3.3.1-30
図 3.3.1.(2).④-6.(b)	Cd「KENS」文字 2 次元図	3.3.1-30
図 3.3.1.(2).④-6.(c)	(b)を(a)で強度補正	3.3.1-30
図 3.3.1.(2).④-6.(d)	拡大図	3.3.1-30
図 3.3.1.(2).⑤-1.(a)	40MHz-ADC の 50MHz 読出しの波形データ	3.3.1-30
図 3.3.1.(2).⑤-1.(b)	50MHz-ADC の 50MHz 読出しの波形データ	3.3.1-31
図 3.3.1.(2).⑤-2.(a)	^{6}Li-5mm 厚ピラー型シンチレータ	3.3.1-31
図 3.3.1.(2).⑤-2.(b)	設置の様子	3.3.1-31

図 3.3.1.(2).⑤-3.(a)	In-Ag-Co 被検体	3.3.1-31
図 3.3.1.(2).⑤-3.(b)	内蔵被検体の寸法図	3.3.1-31
図 3.3.1.(2).⑤-4.(a)	ダイレクトビーム、左：2 次元、中：PHA、右：TOF（1us），run4	3.3.1-32
図 3.3.1.(2).⑤-4.(b)	被検体 1 透過、50~1000us 間積分、run8	3.3.1-32
図 3.3.1.(2).⑤-4.(c)	In-115、1.5eV 近辺、640~790us 間積分、run8	3.3.1-32
図 3.3.1.(2).⑤-4.(d)	Ag-109、5.4eV 近辺、360~400us 間積分、run8	3.3.1-32
図 3.3.1.(2).⑤-4.(e)	Co-59、128eV 近辺、74~83us 間積分、run8	3.3.1-33
図 3.3.1.(2).⑤-5	40MHz-ADC の 50MHz 読出しの波形データ、（左 ^{115}In、中 ^{109}Ag、右 ^{59}Co）	3.3.1-33
図 3.3.1.(2).⑤-6	加速器ビーム幅 4us の TOF	3.3.1-33
図 3.3.1.(2).⑤-7.(a)	In くさび形被検体 2、run7_360-410us	3.3.1-34
図 3.3.1.(2).⑤-7.(b)	In 厚さ変化、大きさ変化被検体 3, 4、run9_360-410us	3.3.1-34
図 3.3.1.(2).⑤-7.(c)	B 板に 0.5mm 隙間がいくつかある被検体 5、run10_100-10000us	3.3.1-34
図 3.3.1.(2).⑤-7.(d)	各種被検体の TOF	3.3.1-35
図 3.3.1.(2).⑤-8.(a)	U 被検体の取り付け	3.3.1-35
図 3.3.1.(2).⑤-8.(b)	取り付けの概略図	3.3.1-35
図 3.3.1.(2).⑤-8.(c)	全エネルギー2D グラフ	3.3.1-35
図 3.3.1.(2).⑤-8.(d)	ダイレクト照射と U 被検体透過の TOF	3.3.1-35
図 3.3.1.(2).⑤-8.(e)	6eV 近辺	3.3.1-36
図 3.3.1.(2).⑤-8.(f)	9eV 近辺	3.3.1-36
図 3.3.1.(2).⑤-8.(g)	13eV 近辺	3.3.1-36
図 3.3.1.(2).⑤-8.(h)	22eV 近辺	3.3.1-36
図 3.3.1.(2).⑤-8.(i)	40eV 近辺	3.3.1-36
図 3.3.2.②-1	開発が計画されている高エネルギー中性子用マルチバンドル複合型シンチレータシステム	3.3.2-12
図 3.3.2.②-2	中性子反応を検出してイメージングするための撮像系	3.3.2-13
図 3.3.2.②-3	マルチフォトマル検出器の視野と個々のフォトマルの視野内のシンチレータの関係	3.3.2-13
図 3.3.2.②-4	レンズ系ではっきりと結像した場合のマルチフォトマルの入射強度分布	3.3.2-14
図 3.3.2.②-5	レンズ系でぼかした場合のマルチフォトマルの入射強度分布	3.3.2-14
図 3.3.2.②-6	模擬画像データ取得のための実験体系の概要	3.3.2-15
図 3.3.2.②-7	模擬画像データ取得のための実験体系の写真	3.3.2-15
図 3.3.2.②-8	使用したマルチアノードフォトマル H7546（受光面：18.1 mm x 18.1 mm）	3.3.2-16

図 3.3.2.②-9	ピントが合っている状態	3.3.2-16
図 3.3.2.②-10	ピントがぼけている状態	3.3.2-16
図 3.3.2.②-11	ピントが合った状態での CH4～CH6 の出力分布の光源位置依存性実験	3.3.2-16
図 3.3.2.②-12	ピントがぼけた状態での CH4～CH6 の出力分布の光源位置依存性実験	3.3.2-17
図 3.3.2.②-13	ピントが合った状態での CH4～CH6 の出力分布	3.3.2-17
図 3.3.2.②-14	ピントがぼけた状態での CH4～CH6 の出力分布	3.3.2-17
図 3.3.2.②-15	ピントが合った状態での重心処理結果	3.3.2-18
図 3.3.2.②-16	ピントがぼけた状態での重心処理結果	3.3.2-18
図 3.3.2.③-1	LiTA12 システムのブロック図（多次元データ処理装置の基本構成）	3.3.2-18
図 3.3.2.③-2	模擬輝点発生器	3.3.2-19
図 3.3.2.③-3	光電子増倍管の出力波形（幅 1μs）	3.3.2-19
図 3.3.2.③-4	メインダイアログ	3.3.2-20
図 3.3.2.③-5	HV & TO ダイアログ	3.3.2-20
図 3.3.2.③-6	H/W LLD & Check wave	3.3.2-21
図 3.3.2.③-7	2D グラフ	3.3.2-21
図 3.3.2.③-8	X/Y グラフ	3.3.2-22
図 3.3.2.③-9	PHA グラフ	3.3.2-22
図 3.3.2.③-10	TOF グラフ	3.3.2-22
図 3.3.2.③-11	ログファイル名	3.3.2-23
図 3.3.2.③-12	サブピクセルシフト法の原理図	3.3.2-23
図 3.3.2.③-13	模擬測定画像の生成	3.3.2-23
図 3.3.2.③-14	ML-EM 法による再構成画像	3.3.2-24
図 3.3.2.③-15	サブピクセルシフト法のためのスライド機構（高解像度化処理回路：赤枠内）	3.3.2-24
図 3.3.2.③-16	恒温槽とスライド機構（高解像度化処理回路）	3.3.2-25
図 3.3.2.④-1	試作した Li ガラスシンチレータ　（厚さ 5mm） (1)スリット型(3mm 角) (2)ピラー型（3mm 角） (3)ピラー型（1.5mm 角）	3.3.2-25
図 3.3.2.④-2	シンチレータとプローブ（応用光研製 SP-10）	3.3.2-25
図 3.3.2.④-3	^{252}Cf 熱中性子源	3.3.2-25
図 3.3.2.④-4	Li ガラス・ピラー型 3mm 角シンチレータの中性子スペクトル	3.3.2-26
図 3.3.2.④-5	サブピクセルシフト画像取得のための実験体系	3.3.2-26
図 3.3.2.④-6	Cd ラインペアチャート	3.3.2-26

図 3.3.2.④-7	被検体画像(左)、シェーディング画像(中)、シェーディング補正結果(右)	3.3.2-27
図 3.3.2.④-8	ピクセル並替(左)、積算(中)、ML-EM 法(右)による計算結果	3.3.2-27
図 3.3.2.④-9	再構成結果のラインペアの比較	3.3.2-27
図 3.3.2.④-10	再構成初期画像の違いによる結果の比較	3.3.2-28
図 3.3.2.⑤-1	実験体系図および写真	3.3.2-28
図 3.3.2.⑤-2	被検体の概要図	3.3.2-28
図 3.3.2.⑤-3	測定時間推定時の各係数の位置関係	3.3.2-29
図 3.3.2.⑤-4	全エネルギー積算時の被検体画像 32 × 32[pixel](左)、シェーディング画像 32 × 32[pixel](中)、シェーディング補正画像 32 × 32[pixel] (右)	3.3.2-29
図 3.3.2.⑤-5	Cd と Plate 部分の中性子スペクトル	3.3.2-29
図 3.3.2.⑤-6	模擬燃料部分のスペクトル	3.3.2-30
図 3.3.2.⑤-7	Plate と Spot 部分のスペクトル	3.3.2-30
図 3.3.2.⑤-8	In の中性子共鳴吸収領域で積算した場合の被検体画像 32 × 32[pixel](左)、シェーディング画像 32 × 32[pixel] (中)、シェーディング補正画像 32 × 32[pixel] (右)	3.3.2-30
図 3.3.2.⑤-9	熱領域で積算した場合の被検体画像 32 × 32[pixel](左)、シェーディング画像 32 × 32[pixel](中)、シェーディング補正画像 32 × 32[pixel] (右)	3.3.2-31
図 3.3.2.⑤-10	In の共鳴吸収領域における撮像画像の超解像処理結果 320 × 320[pixel]	3.3.2-31
図 3.3.2.⑤-11	模擬燃料内の In の直径と透過率の関係	3.3.2-32
図 3.3.2.⑤-12	In のサイズと FWHM の関係	3.3.2-32
図 3.3.2.⑤-13	熱中性子領域における撮像画像の超解像処理結果 320 × 320[pixel]	3.3.2-33
図 3.3.3-1	昇温装置コントロール画面	3.3.3-2
図 3.3.3-2	高精度位置調整機能付き架台のコントロール画面	3.3.3-2
図 3.3.3-3	改良ソフト GUI 画面の一例	3.3.3-3

概略

高レベル放射性廃棄物の環境負荷を低減しつつ長期的なエネルギー安定供給を図る次世代原子力システムとして、高速炉システムにおける MA 含有 TRU 燃料の利用が検討されている。「次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発」（以下、本事業）は、MA 含有 TRU 燃料の健全性評価のために、パルス中性子・制動 X 線混在場を用いた総合的な非破壊分析システムを開発し、その実用性を評価することを目的とした４か年の研究プロジェクトである。研究開発項目は、(1)核種濃度定量・可視化技術の高度化、(2)物性値の定量・可視化技術の高度化、(3)総合測定システムの開発、並びに、(4)実証試験に基づく測定システムの総合評価である。これに加えて(5)研究推進として、各機関が連携を取りながら研究を推進した。本研究では遮蔽容器に納められた直径約 10 mm の MA 含有 TRU 燃料ピンを対象として、パルス中性子及び制動 X 線を用いて、核種濃度、（熱特性、形状等の）物性情報を定量、可視化する総合的な非破壊分析測定システムを開発し、その有効性を実証することを目標とした。パルス中性子を用いた核種定量及び可視化技術の研究は、共鳴吸収反応に着目した先行研究等によって工学的見通しが得られているものの、MA の混入した核燃料物質に適用した例はこれまでになく、MA 含有 TRU 燃料の健全性評価に適用しようとする場合、以下に示す課題がある。

課題①：被検体中に含まれる核種数が多い。
課題②：被検体自身が高い放射能を有している。
課題③：被検体が遮蔽体内に収められていることも想定される。
課題④：被検体内の 400 μm 以上のサイズのプルトニウムスポットを検知する必要がある。
課題⑤：被検体内に中性子の共鳴吸収反応を起こさない核種が存在する可能性がある。

上記問題解決のために本事業では、パルス状小型中性子源、中性子イメージング、X 線源、放射線検出器、データ処理回路、核データ、放射線計測分野の専門家が結集し研究開発を行った。

本事業では、中性子源、各検出器、データ処理系及び制御システムの開発・整備を行い、それらをを統合した総合測定システムと新たに開発した測定手法を用いた実証試験を実施した。実証試験は次に示す項目を対象とした。

①核種濃度定量・可視化技術の高度化（核種濃度定量）：

・京大炉ライナックに新中性子源システムを導入し、従前と比較し熱中性子束が約 10 倍、熱外中性子束が約 6 倍に増加した。

・Self-indication 法を用いることで MA や LLFP 等の中性子吸収核種の影響を受けずに MA 含有 TRU 燃料内における Pu の定量が可能となった。

・核種弁別型中性子イメージングを実施し、鉛遮蔽体中或いは熱中性子吸収体に遮蔽された核燃料物質、MA 物質に対する個別の中性子イメージングが可能となった。（次のの物性値の定量・可視化技術の高度化とも一部重複）

②)物性値の定量・可視化技術の高度化（核種組成の弁別・空間分布評価）：

・中性子と X 線イメージングの複合解析（3 次元マッピング技術）による 3 次元元素識別イメージングが可能となり且つ従来の中性子のみを使用する手法に比べ、測定時間が大幅に減少した。

・中性子イメージングにおいて、重心処理とサブピクセルシフト法を組み合わせることで、当初目標である400μｍを大きく上回る200μｍの物体の検知が可能となった。
・3次元マッピング技術の適用と、X線CT断層像を元にした伝熱モデルの適用により被検体断層面上の空間的な温度分布のイメージングが可能であるとの見込みを得た。また、核燃料棒を模擬したバルク状被検体を 300K～600K の範囲で昇温し、ドップラ効果を測定し計量曲線と比較することで温度評価が可能であることを示した。

以上の結果、総合測定システムは核燃料物質及び MA、長寿命核分裂生成物（LLFP）を組み合わせた被検体に対して有効であり、これが実用化できれば、従来の照射後試験では得られなかった核燃料物質の定量や核種組成といった、当該燃料内部の核的・物性的な情報を非破壊で得られるようになり、次世代原子力システムの安全性向上に資することができるとの結論を得た。このように核燃料物質及び MA、LLFP を用いた非破壊分析に対する総合試験、特にこれらの被検体に対する中性子イメージングは国内に例が無く、本事業で得られた結果が唯一である。特に核燃料物質と MA 物質に対する核種弁別型中性子イメージングは世界初のデータである。
今後の見通しとして、本事業で開発した技術や得られた成果は、福島第一原子力発電所事故で発生した溶融燃料（燃料デブリ）内の核種定量、形状評価にも応用ができるため、福島第一原子力発電所の廃炉措置への貢献が期待できる。

用語集

1. TRU 燃料
TRUはTransuranic elements（超ウラン元素） の略。原子番号92のウランよりも原子番号が大きい元素を超ウラン元素と呼ぶ。プルトニウム（原子番号 94）やアメリシウム（同 95）、キュリウム（同96）といったマイナーアクチニド（Minor Actinide:MA）を含有した燃料を TRU 燃料と呼ぶ。

2. MA
マイナーアクチニドのこと。アクチニド核種に属する TRU のうち、Pu を除いた核種を指す。^{237}Np、^{241}Am、^{243}Am、^{242}Cm、^{244}Cm 等がある。

3. 照射後試験
原子炉施設で照射された燃料及び材料に関する機械的、物理的、化学的及び冶金学的特性を破壊検査によって調べること。Post Irradiation Examination:PIE 試験とも呼ばれる。原子炉施設で照射された燃料及び材料に対しての一般的な試験ではあるが、化学処理等では分離が困難な核種があることや、破壊試験であるために核種の被検体中における位置情報を正確に把握できない等、いくつかの改善すべき課題が残されている。

4. L/D

L は Length の略、D は Diameter の略。D とは、ある中性子源から発生した中性子が、遮へい体等（コリメータ）によって絞られた入口等価直径を表す。L は、そのコリメータの全長を表す。L/D は、空間分解能を決定するための幾何学的パラメータで、ビームの平行度を表す。L/D が大きい場合は、ビームの平行度が高い。しかし、ビーム強度はL/D の２乗に反比例する。

5. CT
コンピュータ断層撮影法（Computed Tomography）の略。放射線等の透過力の強い電磁波を用いて物体の断層面を可視化する技術。

6. LAN
Local Area Network の略

7. GUI
Graphical User Interface：デバイス（本事業では測定機器）等の制御を PC 画面上でグラフィカルに操作可能なユーザインタフェース。

8. LUT
Look Up Table の略

9. mPMT
Multi-channel Photo Multiplier Tube：複数の受光面を有する光電子増倍管

10. LiTA
本事業における mPMT を利用した測定系の呼び名

11. TOF
Time of Flight：粒子の発生から被検体への衝突までの時間を測定することで、粒子の運動エネルギーを測定する手法。本事業では中性子を対象とする。

12. GEM 型検出器
Gas Electron Multiplier の略。両面フレキシブル基板に多数の孔を開け、その両面間に高電圧を印加することによって、孔内に発生する高電場でガス増幅を起こさせるガス型検出器。

13. ROI
Reajon Of Interest の略。TOF 測定では注目するエネルギー領域をしめす。

1. はじめに

東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一事故の教訓を受け、次世代原子力システムは、長期的なエネルギー安定供給能力に加えて、原子力発電から発生する高レベル放射性廃棄物による環境負荷を低減し、高度な安全性を有するシステムであることが求められている[1]。そのような要求に答えるシナリオの一つとして、マイナーアクチニド（MA）を効率良く燃焼し、廃棄物の減容及び有害性の低減を図ることができる「MA 含有 TRU 燃料を用いた高速炉システム」[2]が有望視されている。当該燃料では、Pu に MA が同伴することにより、核不拡散抵抗性を向上させるという利点もある。ところが最大 5 % の MA 含有率が想定されている TRU 燃料においては、崩壊熱による発熱量は現行燃料の約 7 倍の 18 W/kgHM、放射線の線量率は現行燃料の約 100 倍になると予想されており[3]、燃料の製造、使用、輸送、貯蔵の各プロセスにおいて、厳格な除熱管理と高い放射線場における燃料の健全性評価が必要となる。また、保障措置の観点においては、迅速且つ遠隔で Pu を定量する技術が求められる。従来の MOX 燃料に対しては、Pu からの自発核分裂中性子を計測する手法が確立されているが、MA 含有 TRU 燃料では同伴する MA である Cm からの自発核分裂中性子が Pu に比べて 100 倍以上多いため、従来手法の適用は難しく、非破壊で Pu を定量する新たな手法の開発が必要でとなる。また、燃焼中の燃料のふるまいを把握することが原子炉の安全性確保に不可欠であることから、照射後試験データの充実が求められる。照射後試験は破壊試験と非破壊試験の二つに大別される。破壊試験では燃料の組成、濃縮度等に関するデータについて精密な分析が可能であるが、試験後に当該燃料を原子炉に再装荷し、照射による燃料挙動の変化を継続的に観察するには、非破壊的手法による試験が有用である。現在運用されている非破壊試験としては、外観試験、燃料棒引抜力試験、直径測定、ガンマスキャンニング等があるが、燃料ペレット中のクラックの成長過程の観測、Pu、MA の再分布挙動の把握、MA の核変換率の確認を行うためには、更に高度な非破壊分析技術が必要である。

このようなニーズを受けて、本研究では遮蔽容器に納められた直径約 10 mmの MA 含有 TRU 燃料ピンを対象として、核種濃度、（熱特性、形状等の）物性情報を定量、可視化する総合的な非破壊分析測定システムを開発し、その有効性を実証することを目標とした。プローブとしてはパルス中性子と制動 X 線を併用する。

当該技術に対する先行研究の現状と課題は、以下のとおりである。核種濃度分析では、低除染 TRU 燃料の非破壊分析・遠隔分析技術として、日本原子力研究開発機構（以下、JAEA）の若井田がはレーザー共鳴分光法による遠隔分析技術を開発し、U, Pu の混合被検体に対して元素及び核種の定量を行えることを示している[4]。これは核燃料物質の計量管理技術として非常に優れた手法であるが、核種濃度の空間分布情報及び温度等の物性値を把握することは難しいといえる。また、遮蔽容器に収納された燃料ピンに対する分析能力についても、レーザーの透過能力によって適用範囲が限定される。一方、中性子をプローブとした非破壊分析手法として、核種固有の共鳴エネルギーを持った中性子が選択的に吸収される現象を利用した中性子共鳴吸収法が提案されている。パルス中性子源を用いることによって、中性子のエネルギーを飛行時間分析法（TOF 法）によって決定し、透過中性子や被検体からの中性子捕獲ガンマ線の変化量から対象核種を定量する技術として透過中性子法[5,6]及び中性子共鳴分光法[7,8]に関する先行研究がある。また、被検体を透過した中性子を高感度且つ高精細な中性子－光変換型デバイスを用いて検出し、中性

子強度を輝度値としたものを中性子共鳴エネルギーに対応するタイミングで撮影することによって行う核種選択型イメージング技術については、JAEA の甲斐らのグループによって先行研究がなされている[9]。共鳴吸収を利用した中性子イメージングでは、核種毎の数密度分布だけでなく、ドップラ効果による共鳴の拡がりを観測することによって、被検体中の温度を測定することができる。このことは、北大の加美山らが平成 17～19 年度にかけて行った若手対象型原子力システム研究開発事業「中性子共鳴吸収による MOX 燃料ペレット模擬体分析法の開発研究」において実現性の見通しが示されている[10]。

このようにパルス中性子を用いた核種定量及び可視化技術の研究は、先行研究によって工学的見通しが得られているものの、本手法を MA の混入した核燃料物質に適用した例はこれまでになく、MA 含有 TRU 燃料の健全性評価に適用しようとする場合、以下に挙げるような固有の技術的課題が考えられる。

課題①：被検体中に含まれる核種数が多い。
課題②：被検体自身が高い放射能を有している。
課題③：被検体が遮蔽体内に収められていることも想定される。
課題④：被検体内の 400 μm 以上のサイズのプルトニウムスポットを検知する必要がある。
課題⑤：被検体内にに中性子の共鳴吸収反応を起こさない核種が存在する可能性がある。

課題①、②に対する解決策として、京都大学の研究分担者である堀らのグループが、透過中性子法と中性子共鳴分光法を結合させた「Self-indication 法」を提案している[11]。Self-indication 法とは、十分にコリメートした中性子ビームに対し、被検体の下流に分析対象核種から成る高純度の indicator を設置し、indicator からの即発ガンマ線をリアルタイムに計測することによって、間接的に透過中性子のエネルギー分布を測定する手法である。本手法を適用することにより、測定対象核種の共鳴エネルギーにおける透過中性子を高感度で測定可能となるため、従来の透過中性子法に比べ信号対ノイズ比が改善することと、被検体からの崩壊ガンマ線の影響を受けることなく indicator からの即発ガンマ線を計測できることが先行研究で確認済である

上記４つの課題解決のために本提案では以下の研究開発項目を挙げる。

課題①、②に対しては、Self-indication 法において、複数の共鳴吸収量を同時且つ簡便に解析する手法を開発し、核種濃度の定量精度を向上させる。（目標精度１ % 以下）

課題③に対しては、高エネルギー中性子（おおよそ 1 eV ～500 eV ）に対して高い感度を有し、且つ、時間応答の早いイメージング装置（以下、高効率・高時間分解能型中性子イメージング装置という）を開発する。これにより、ある程度の厚さの遮蔽体に収められた被検体に対しても、高い透過能力を有する高エネルギー中性子による共鳴反応を分析可能とする。（目標遮蔽体厚さ鉛 5cm 相当）

課題④に対しては、中性子ビームの L/D を向上させるとともに、空間分解能の優れたイメージング装置（以下、高空間分解能型中性子イメージング装置という）を用いることによって、要求された空間分解能を満たすことを検証する。（目標空間分解能　400 μm）

課題⑤に対しては、X 線イメージングも補完的に用いることにより、形状認識能力を向上させる。

本事業で開発した非破壊分析装置を実用化できれば、従来の照射後試験では得られなかった当該燃料内部の核的・物性的な情報を非破壊で得られるようになり、多様な側面からの燃料健全性評価を実現できる。その結果、燃料の品質保証技術を高度化し、次世代原子力システムの安全性向上に資することができる。また、開発される非破壊分析技術は、福島第一原子力発電所事故で発生した溶融燃料（燃料デブリ）内の核種定量、形状評価にも応用できるため、同発電所の廃炉措置への貢献も期待できる。原子力以外の分野であれば、鉱石中のレア・アース等の鉱物資源探査技術への応用や半導体へのドーピング原子の分布状況の可視化等への波及効果が期待できる。更に、当事業に、ポスドク研究者及びリサーチアシスタントとしての学生が参加することにより、異なる分野における最先端の技術に触れながら研究手法を会得することが期待されるため、将来の原子力を支える若手研究者育成効果も大きいといえる。また、本事業におけるシステムの構築のためにアールテック（株）が再委託先として参画するため、現場のニーズに合った計測システムの開発を通して、補助者として本事業に参加する若手技術者の育成と物づくりの技術の伝承が期待できる。

参考文献

[1] 総合資源エネルギー調査会基本政策分科会第 7 回会合　資料 1「今後の原子力政策について」、p.45、平成 25 年 10 月、資源エネルギー庁

[2] 科学技術・学術審議会　研究計画・評価分科会、原子力科学技術委員会もんじゅ研究計画作業部会（第 12 回）資料 1「もんじゅ研究計画（案）」、平成 25 年 9 月 25 日

[3] 敦賀原子力夏の学校「核燃料サイクル～FBR サイクル～」、平成 19 年 9 月 10 日～14 日、講演資料、滑川卓志.

[4] 平成 17～21 年度文部科学省原子力システム研究開発事業「低除染 TRU 燃料の非破壊・遠隔分析技術開発」成果報告書

[5] R. A. Schrack et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., NS-28, 1640-1643 (1981).

[6] J. W. Behrens et al., Nucl. Technol., 67, 162-168 (1984).

[7] Y. Kiyanagi et al., J. Nucl. Sci. Technol., 42, 3, 263-266 (2005).

[8] A. Pietropaolo et al., Applied Spectroscopy, 64, 9, 1068-1071 (2010).

[9] T. Kai et al., Nucl. Instrum. Methods, A 651, 126-130 (2011).

[10] 平成 17～19 年度若手対象型原子力システム研究開発事業「中性子共鳴吸収による MOX 燃料ペレット模擬体分析法の開発研究」成果報告書

[11] J. Hori et al., Proc. Int. Sym. on Nuclear Back-end Issues and the Role of Nuclear Transmutation Technology after the accident of TEPCO’s Fukushima Daiichi Nuclear Power Stations, Kyoto, Nov. 28, 2013. (to be published).

2. 業務計画

2.1 全体計画

本事業では、次世代原子炉用 TRU 燃料に対する品質保証技術の高度化を目指し、燃料内部の核的・物性的な情報を非破壊で取得し、保障措置対応における燃料中の核物質計量管理を可能とする革新的な分析技術を開発すると共に、本分析技術の実用化への道筋の検討を行うことを目的とする。以下に、本事業の各研究項目の概要とそのスケジュール並びに、これらを遂行するための研究体制を示す。

(1) 核種濃度定量・可視化技術の高度化

本研究では、「中性子源開発」、「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」、並びに「パルス中性子イメージング技術の高度化」の 3 項目を実施する。

「中性子源開発」では、実験用核燃料物質を取り扱える国内唯一のパルス中性子源施設である京都大学原子炉実験所電子線型加速器施設（以下、京大炉ライナックという）において、透過力の高い 10eV 以上の熱外中性子を効率良く発生させるための中性子源開発、及び、L/D の優れたビームラインの構築を、京都大学が名古屋大学の協力を得て実施する。

「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」は、先行研究を実施した京都大学が実施する。対象核種の複数の共鳴を同時且つ簡便に解析する手法を開発し、核種濃度定量の高精度化を行う。

「パルス中性子イメージング技術の高度化」は、アールテック（株）が、北海道大学、京都大学の協力を得て実施する。遮蔽体内に納められた燃料の分析を行うために、プラスチックシンチレータとマルチフォトマルから成る高効率・高時間分解能型中性子イメージング装置の開発を行う。はじめにプロトタイプの装置を用いて北海道大学の 45 MeV 電子線型加速器（以下、北大ライナックという）にて性能試験を行い、得られた知見に基づいて改良した装置を京大炉ライナックに設置し、核燃料物質を用いた核種選択型中性子イメージングの試験を実施する。北大ライナックは既に中性子場が構築されており、プロトタイプの試験を先行して行うのに適している。京大炉ライナックは核燃料が使用できる施設なので、中性子源を整備した後であれば改良型装置の試験を行うのに適している。

(2) 物性値の定量・可視化技術の高度化

本研究では、「中性子・X 線イメージングによる形状測定」「ドップラ効果を利用した温度分布測定」の 2 項目を実施する。

「中性子・X 線イメージングによる形状測定」は、中性子イメージングでは認識しきれない情報を X 線イメージングにより補完することによって、イメージの認識能力を向上させることを試みる。電子線型加速器中性子源では、中性子の発生と同時に伴い高強度且つ高エネルギーの制動 X 線が発生するので、一つの線源から中性子と X 線という異なる放射線が発生するという特徴を生かした取り組みである。北海道大学は高エネルギー加速器研究機構、アールテック（株）の協力を得て、CT 技術を結合させた中性子及び X 線イメージング装置の高度化と、被検体内の空孔識別能力の検証を行う。京都大学は高分解能型中性子イメージング装置を整備し、京大炉ライナック照射場における空間分解能に関する性能試験を行う。

「ドップラ効果を利用した温度分布測定」では、昇温装置、被検体ステージの開発を行い、同心円状のペレット形状の被検体に対する温度決定手法の高精度化を行う。最終年度には北海道大学が開発した CT 技術とアールテック（株）が開発した高効率・高時間分解能型中性子イメージング装置を組み合わせて、被検体の温度分布測定試験を実施し、性能を評価する。本項目は京都大学が北海道大学の協力を得て実施する。

(3) 総合測定システムの開発

本研究では、「検出器システムの開発」「データ収集回路・多次元データ処理装置の開発」及び「制御システムの開発」の 3 項目を実施する。

「検出器システムの開発」は、高エネルギー加速器研究機構と、アールテック（株）が実施する。両者ともこれまでに 2 次元検出器システムや中性子イメージング装置の開発を手掛けた豊富な実績と経験があり、それを基に本事業に最適化された検出器システムを開発する。

「データ収集回路・多次元データ処理装置の開発」は、高空間分解能中性子イメージング装置の画像処理及び高効率・高時間分解能中性子イメージング装置等の 2 次元マッピングを行うためのマルチフォトマル回路基板の製作を、東京都市大学がアールテック（株）の協力を得て実施する。北大ライナック用中性子イメージング装置のマルチフォトマルの開発は高エネルギー加速器研究機構が実施し、得られた知見を研究協力者である東京都市大学及びアールテック（株）と共有することで、高度化を図る。

「制御システムの開発」は、京都大学がアールテック（株）、東京都市大学の協力を得て実施する。アールテック（株）と東京都市大学の研究分担者は、複数の計測ユニットを統合して合理的にシステム化することに関して豊富な実績と経験を有するため、本項目の実施にあたり適切な支援を得ることができる。

本事業では、各測定装置をプロトタイプの製作、性能評価、装置の改良、実装という流れで開発していくが、その開発過程に合わせてシステムの統合を図る本研究項目の役割は特に重要である。外注品だけを組み合わせただけでは実現できないオールインワンの総合測定システムを構築する点が本研究の特徴である。

(4) 実証試験に基づく計測システムの性能評価

本研究では、核燃料の健全性評価を行う上で必要な非破壊分析技術の開発項目を精査し、実証試験に必要な核燃料物質及び模擬核燃の入手・製作について検討を行う。最終年度には、入手・製作した核燃料物質あるいは模擬物質を用いた、実証試験を行い、開発した測定システムの性能評価を行う。実証試験は京都大学が、他の全ての再委託先機関の協力を得て実施し、総合評価は京都大学が取り纏める。

(5) 研究推進

研究代表者の下で各研究項目における情報共有及び意見交換を密にして研究を進めるために、全体会合及び個別会合を実施する。

本業務の全体計画図を図 2.1-1 に示す。一方、機器の開発や本業務遂行に必要な新たな研究課題を研究計画にフィードバックした結果、最終的な研究進捗は図 2.1-2 の様になった。

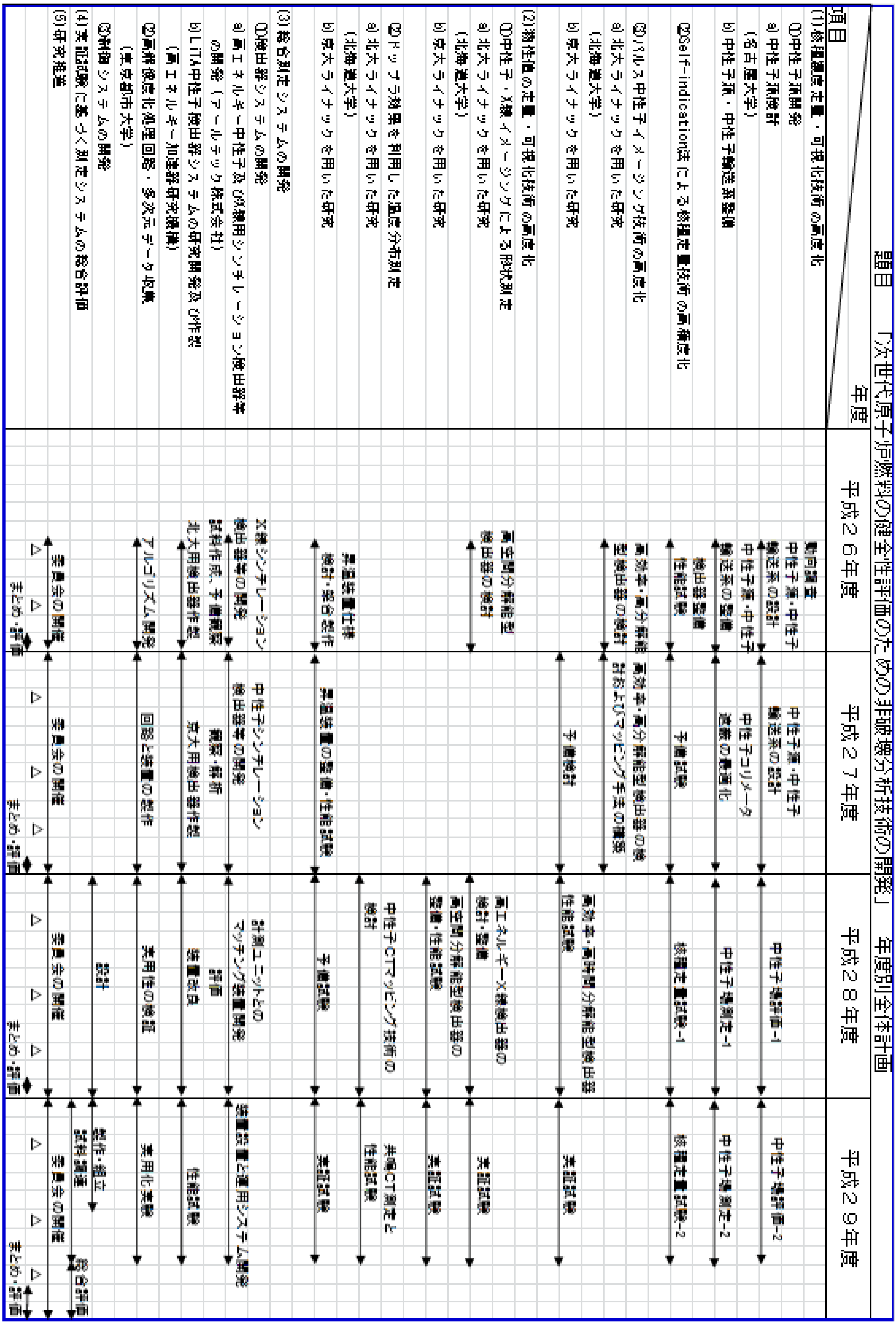
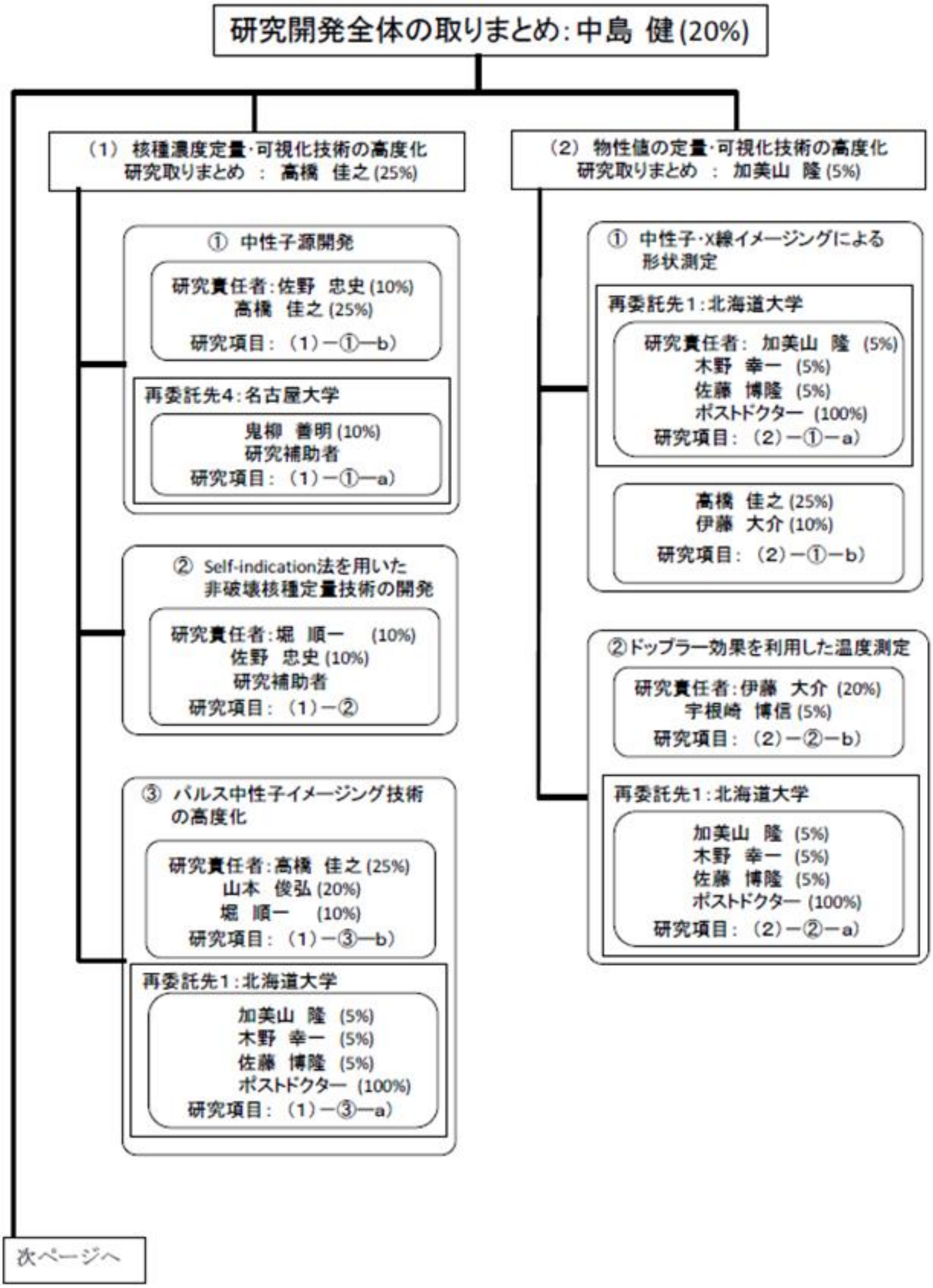


図 2.1-1　本事業の全体計画

題目　「次世代原子炉燃料の健全性評価のための非破壊分析技術の開発」　全体進捗（最終版）				
項目 ＼ 年度	平成２６年度	平成２７年度	平成２８年度	平成２９年度
(1)核種濃度定量・可視化技術の高度化				
①中性子源開発				
a)中性子源検討 （名古屋大学）	動向調査 中性子源・中性子輸送系の設計	中性子輸送系の調査・検討	中性子輸送系の最適化設計	コリメータ系の高性能化 まとめ
b)中性子源・中性子輸送系整備	中性子源・中性子輸送系の整備	中性子輸送系整備 中性子場の性能試験	中性子源、中性子輸送系の改良	中性子輸送系の改良・ビーム品質評価 まとめ
②Self-indication法による核種定量技術の高精度化	検出器整備 性能試験	予備試験	予備試験及び不純物の検討	実証試験 まとめ
③パルス中性子イメージング技術の高度化 a)北大ライナックを用いた研究 （北海道大学）	高効率・高分解能型検出器の検討	高位置分解能ガス検出器及び中性子−光コンバータ式高効率型検出器による中性子場の評価	相乗イメージング法の数値シミュレーション	実証試験 まとめ
b)京大ライナックを用いた研究		被検体ステージの設計・製作及び特性試験	高効率・高時間分解能型検出器性能試験	核種弁別型中性子イメージング試験 まとめ
(2)物性値の定量・可視化技術の高度化				
①中性子・X線イメージングによる形状測定 a)北大ライナックを用いた研究 （北海道大学）	高空間分解能型検出器の検討	数値計算による試料温度情報及び位置情報の評価	高エネルギーX線を用いたCT法による試験	相乗イメージング実証試験・空間分解能評価 まとめ
b)京大ライナックを用いた研究			高空間分解能型検出器の整備・性能試験	核燃料を用いた実証試験 まとめ
②ドップラ効果を利用した温度分布測定 a)北大ライナックを用いた研究 （北海道大学）			中性子CTマッピング技術の検討	空間分解能評価 まとめ
b)京大ライナックを用いた研究	昇温装置仕様検討・架台製作	昇温装置の整備・性能試験	予備試験	実証試験 まとめ
(3)総合測定システムの開発				
①検出器システムの開発 a)高エネルギー中性子及びX線用シンチレーション検出器等の開発（アールテック）	X線シンチレーション検出器等の開発 試料作成、予備観察	中性子シンチレーション検出器等の開発	計測ユニットとのマッチング装置開発	機能改良・最適化 まとめ
b)LiTA中性子検出器システムの研究開発及び作製 （高エネ研）	北大用検出器作製	京大用LiTA中性子検出器作製	装置改良	動作試験 まとめ
②高解像度化処理回路・多次元データ収集 （東京都市大）	アルゴリズム開発	回路と装置の製作・調整 多次元データ処理装置用ソフトウェアの開発	高解像度化処理回路・多次元データ処理装置の開発	改良及びマッチング まとめ
③制御システムの開発			設計	実証試験
(4)実証試験に基づく測定システムの総合評価				総合評価
(5)研究推進	委員会の開催 △　△ まとめ・評価	委員会及び専門研究会の開催 △　△　△　△ まとめ・評価	委員会及び専門研究会の開催 △　△　△　△ まとめ・評価	委員会及び専門研究会の開催 △　△　△　△ まとめ・評価

図 2.1-2　本事業の最終進捗状況

以下に、本事業の研究実施体制図を示す。



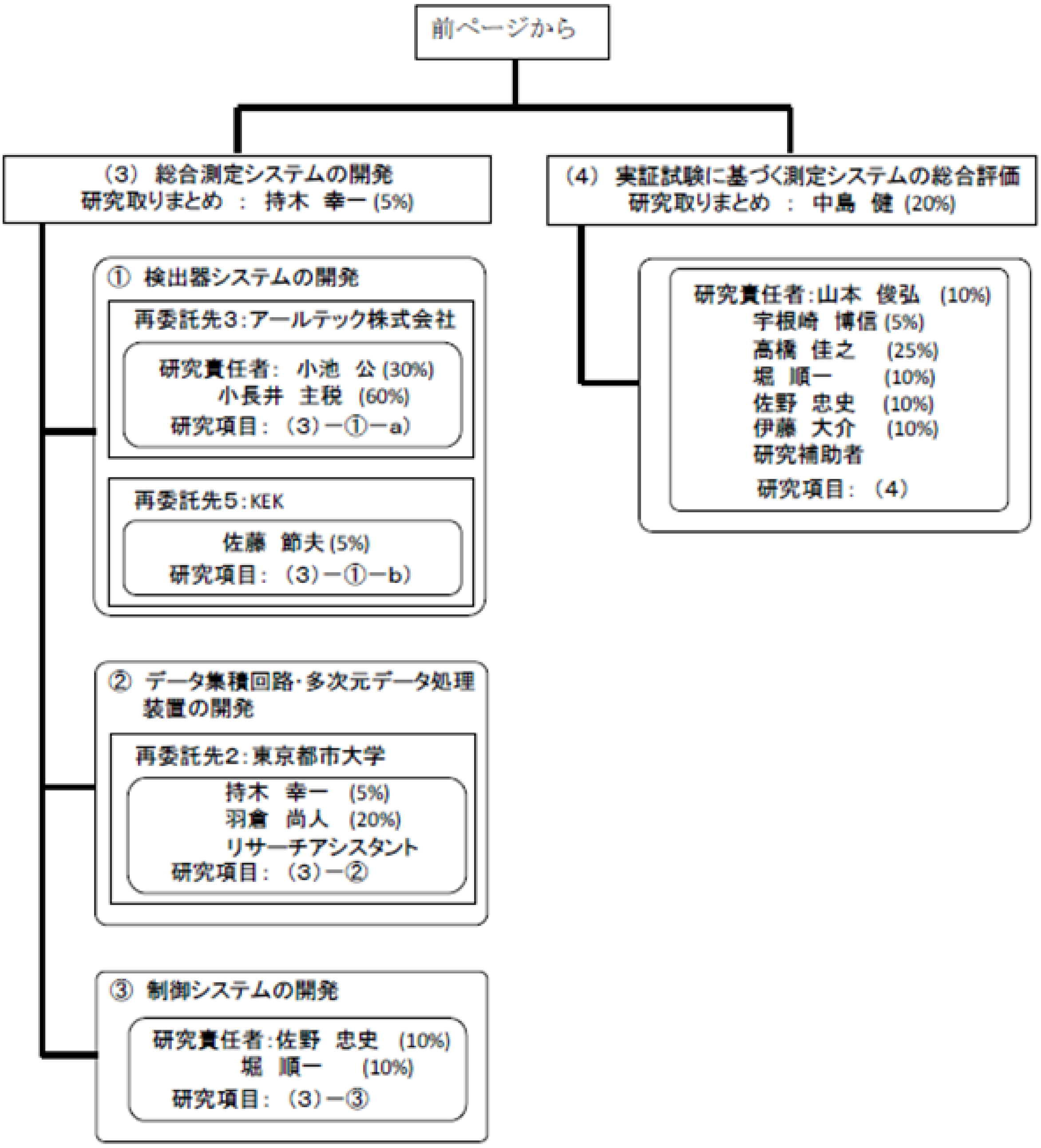

前ページから
（3） 総合測定システムの開発
研究取りまとめ ： 持木 幸一 (5%)
① 検出器システムの開発
再委託先3:アールテック株式会社
研究責任者: 小池 公 (30%)
小長井 主税 (60%)
研究項目: （3）ー①ーa）
再委託先5:KEK
佐藤 節夫 (5%)
研究項目: （3）ー①ーb）
② データ集積回路･多次元データ処理装置の開発
再委託先2:東京都市大学
持木 幸一 (5%)
羽倉 尚人 (20%)
リサーチアシスタント
研究項目: （3）ー②
③ 制御システムの開発
研究責任者:佐野 忠史 (10%)
堀 順一 (10%)
研究項目: （3）ー③
（4） 実証試験に基づく測定システムの総合評価
研究取りまとめ ： 中島 健 (20%)
研究責任者:山本 俊弘 (10%)
宇根崎 博信 (5%)
高橋 佳之 (25%)
堀 順一 (10%)
佐野 忠史 (10%)
伊藤 大介 (10%)
研究補助者
研究項目: （4）

図 2.1-3 研究体制

3.　業務の実施内容及び成果

3.1　核種濃度定量・可視化技術の高度化（H26～H29）

3.1.1　中性子源開発

(1)　中性子源検討（再委託先：名古屋大学）（H26～H29）

①　概要

本研究では 10eV 以上の熱外中性子を効率よく発生することが可能な中性子減速体系の開発及び中性子輸送系整備のために数値シミュレーションを用いてそれらの設計を行うことを目的とした。平成 26 年度は中性子減速体系の設計、平成 27 年度は中性子発生ターゲットの効率化のための解析を実施した。また、平成 27 年度～平成 28 年度に中性子輸送系（コリメータ）の設計を行い、その結果を京大炉ライナックの中性子飛行導管整備に反映した。平成 29 年度は測定のバックグランドとなるガンマ線遮蔽方法の検討と発生したパルス中性子の放出時間分布を評価した。

②　中性子発生ターゲットと中性子減速材配置（H26）

中性子減速材としては、減速効率が良い含水素物質が適しており、水や水より水素数密度が高いポリエチレンが広く用いられている。京大では減速材厚さを遠隔で変えること、強度を少しでも上げたいということ、また減速材の取り換えも可能とすることなどからポリエチレンを利用することにした。中性子発生ターゲットとしてはタンタル、鉛、タングステンといった重金属が使われる。

ターゲットと減速材の位置関係について検討した。京大炉ライナックでは、中性子ビームを電子ビームの進行方向に対して 135 度の方向に引き出す配置になっている。この場合、減速材の設置角度をどうとるのが最適かということが問題となる。まず、減速材からの取り出し角度によって中性子強度がどう変化するかを調べた。粒子輸送計算コードの PHITS[1]でシミュレーション計算を行った。使用した断面積データは JENDL-4.0 である。計算体系を図 3.1.1.(1).②-1 に示す。減速材は 2cm のポリエチレンである。取出し角度 θ に合わせてビーム孔の向きも変化させている。取り出し角が大きくなるに従って高エネルギー中性子成分が減少し、熱中性子成分が増えることが示された。これは実質的に減速材が厚くなって見えるためと考えられる。図 3.1.1.(1).②-2 取り出し角 0 度の時の強度を 1 としたときの減速材角度に対する強度変化である。中性子エネルギー範囲は 1 ～500 eV である。45 度位置では 0 度に比べて約 30 %の強度減であることが分かった。取り出し角を大きくすることによって強度が減少する効果があるので、減速材の設置角度に最適値がある可能性がある。そこで、図 3.1.1.(1).②-3 示すような体系について、減速材を角度を持って設置した場合の中性子強度変化を調べた。設置角度 Φ による中性子スペクトル変化はあまり無かった。設置角度 0 度に対する強度比を図 3.1.1.(1).②-4 に示す。角度が大きくなるに従って強度が減少する傾向が見られので、減速材は角度をもたないで、できるだけ減速材に密着させる方が良いことが分かった。

③　電子加速器中性子発生ターゲットの最適化（H27）

電子加速器中性子源では一般に重金属を中性子発生ターゲットとして用いる。ターゲット材料の選択、サイズの最適化についてシミュレーション計算によって検討した。

ターゲット材料の重金属として鉛（Pb）、タンタル（Ta）、タングステン（W）を候補として考えた。ターゲット物質からの中性子発生を調べた。図 3.1.1.(1).③-1 に計算体系を示す。XY 面に電子ビームが入射する。電子ビームはエネルギーが 40 MeV、ビーム直径は 10 mm である。ターゲットの長さ Z を 6 cm とし、X,Y をパラメータとして計算した。図 3.1.1.(1).③-2 はターゲット各面からの中性子強度である。back つまり入射面からの中性子がほかの面に比べて強くなっていることが分かる。up, down, right, left の４側面は原理的に同じ強度になるはずであるが、シミュレーションでもそのようになっている。2-4 cm 位で最大強度となっている。forward は電子ビームが抜けて行く方向であるが、断面積が大きくなるに従って強度が増えている。これは、側面からの中性子の抜けが減るのと対応している。次に、X,Y=5 cm における長さ Z に対する中性子強度変化も調べたが、どの材質においても Z=3 cm 以降は強度がほぼ飽和していた。

中性子強度が強い順に W、Ta、Pb という結果になった。Ta と W を比較すると、W の方が 25 % 程度強度が強い。しかし、高温で水との反応性が非常に強く、それが事故に繋がる恐れがある。中性子強度的には Ta より少し優れているが安全性も考慮して Ta の方が良いと判断した。

④　コリメータ系（H27～28）

コリメータ体系のシミュレーション計算では、ターゲットに電子を入射させて発生させた中性子・ガンマ線を輸送計算して、その様子をコリメータ体系で観察するには、膨大な数の電子を入射させる必要があり、計算時間がかかりすぎる。そのため、ターゲットに電子を入射させてターゲット表面全体をタリーとしてエネルギー分布を取得し、そのエネルギー分布を点線源としてターゲット位置から発生させることにした。

シミュレーションを行い予備的な検討を行った結果、コンクリート壁内の飛行管については、中性子、ガンマ線が壁から飛行管内へ回り込むため、比較的後方でのコリメーションが大事であることが分かった。それで、コンクリート壁を出たところにコリメータを設置したが、空間への散乱が多いため、コンクリート壁内へ設置することとした。また、途中のコリメータだけでは、そこからビームが広がってしまうため、被検体位置で「コリメートされたビームが必要な場合には飛行管出口にもコリメータを設置しなければならないことが分かった。そのため、飛行管の最後方に PE-B（ボロン入りポリエチレン）と Pb のコリメータを設置した。コリメータの構造を図 3.1.1.(1).④-1 に示す。PE はポリエチレンである。

図 3.1.1.(1).④-2(a)に中性子束の XZ 分布、(b)にガンマ線束の XZ 分布(ターゲット生成ガンマ起因)を示す。コンクリート壁を出たところで散乱中性子・ガンマ線が観測されているが、それ以後は、比較的すぐに主として飛行管内に分布するようになっている。また出口付近に設置されたコリメータのために、中性子・ガンマともに、ビーム径が絞られている。

⑤　ガンマ線遮蔽方法の比較(H29)

Ta ターゲットに電子ビームを照射し中性子を発生させる際に、同時にガンマも発生する。ガンマの発生が増えることにより、検出器が影響を受けてしまうことがある。よって、ガンマの遮蔽についての手段を考えるために、シミュレーション計算を PHITS ver2.82 を使用して行った。使用した断面積データは JENDL-4.0 である。

ここでシミュレーションの方法を示す。電子ビームを Ta ターゲットに入射して、ターゲット表面全体からの中性子、ガンマのエネルギー分布をタリーする。各々のエネルギー分布を使用して、ターゲット位置から中性子ソース、ガンマソースとして、コリメータモデルに入射する。実験での検出器の位置である Z=1195 cm の位置に T-cross の面タリーを設置して、中性子のエネルギー分布をタリーする(図 3.1.1.(1).⑤-1)。

Pb を遮蔽体として体系の中に設置することにより、中性子数を多く確保しながら、効果的にガンマを減らすことのできる Pb 遮蔽体の設置位置、形状を考える。

1)　コリメータ出口後方に Pb 遮蔽体を設置した場合

図 3.1.1.(1).⑤-2 に今回使用したコリメータモデルを示す。ターゲットを直接みないように、モデレータとコリメータ入り口の間 Z=65 cm に Pb 遮蔽体を設置した体系を基準とした。Pb 遮蔽体のサイズはφ5 cm ×20 cm である。これと、容易に取外しできる飛行管出口に設置する方法を比較した。最初に、中性子ソースを使用して図 3.1.1.(1).⑤-3 の Pb を z=65 cm に設置したコリメータ体系にターゲット位置から中性子ソースを発生させる。飛行管出口後方 Z=1195 cm に設置した T-cross タリーで、中性子をタリーする。次に、z=65 cm の鉛は外して、Z=1100 cm に Pb を設置し、その厚さ t cm を調整して、最初の結果と同程度の中性子強度となる厚さを求める (図 3.1.1.(1).⑤-4)。PHITS で Pb の厚さを変えて計算を行った結果、Z=1100 cm において Pb Z=65 cm でのモデルと同程度の中性子を得るには厚さ t=0.55 cm が最適と分かった(表 3.1.1.(1).⑤-1)。

2)　ターゲット・減速材間に Pb 遮蔽体を設置した場合

次に、ターゲットと減速材の間に Pb 遮蔽体を設置した場合について考える。Pb の中性子断面積は MeV 単位のところで減少することから、ターゲットのより近くに遮蔽体を設置することによって、中性子をあまり減衰させずに、ガンマをより効率的に減衰することができるのではないかと考えた(図 3.1.1.(1).⑤-5)。

Pb をターゲット・減速材間に設置した場合に、Pb Z=65 cm に設置した時と同程度の中性子を発生させることのできる Pb の厚さを探すため Pb 厚さ t=1.325 cm、1.450 cm の場合についてシミュレーションを行った(表 3.1.1.(1).⑤-2)。その中性子数から z= 65cm に Pbφ5 cm×20 cm を設置した場合の中性子数 3.8819E+04 n/cm^2/sec と同じ強度になる Pb 厚さを比例配分で計算したところ、t=1.412 cm となった。

その結果を比較すると、Z=65 cm に Pb を設置した場合に比べて Pb をターゲット直後に設置した場合のガンマは約 2 倍となった。よって、ターゲット直後よりも、Z=65 cm に Pb 遮蔽体を設置した方が効果的にガンマを遮蔽できると分かった。

3) Pb位置を変えた場合のガンマ強度の比較

Pb 遮蔽体の位置を変えた 3 つの場合において、ここまでに中性子強度が同程度になるよう Pb の厚さを調整した遮蔽体を用いて、3 つの場合におけるカンマ強度を比較する。

（１）モデレータと飛行管中間 Z=65 cm に Pbφ5 cm×20 cm を設置した場合
(図 3.1.1.(1).⑤-3）。

（２）コリメータ後方(Z=1100 cm)に、Pb φ5 cm×0.55 cm を設置した場合
(図 3.1.1.(1).⑤-4)

（３）ターゲットとモデレータの間に Pb 7 cm×8 cm×1.412 cm を設置した場合
(図 3.1.1.(1).⑤-5)

3 つのモデルにおいて、同じ中性子強度を得られる場合でのガンマの比較をした(表 3.1.1.(1).⑤-3）。gamma ratio より、（１）の Pb を Z=65 cm に Pb を設置した場合、ガンマが約 30%となっており、他のケースより効率よくガンマを減衰させている。よって、Pb 遮蔽体はモデレータと飛行管の中間に設置するのが良い。

4) Pb遮蔽体をZ=65 cmに設置した場合の中性子・ガンマの分布

Pb 遮蔽体を Z=65 cm に設置した場合において、中性子、ガンマの空間分布のシミュレーションを行った(図 3.1.1.(1).⑤-6)。各エネルギー範囲での、ガンマソースから発生するガンマの空間分布を観察する。(図 3.1.1.(1).⑤-7)。左側が、Pb 遮蔽体を Z=65 cm に設置した際の飛行管後方でのガンマ線の分布である。図 3.1.1.(1).⑤-7a) の Pb ありの場合の分布を、 (b) Pb 遮蔽体なしの場合と比較してみると、色調から全体的にガンマの強度が低くなっていることが分かる。特に 1 MeV 以上のエネルギー範囲のガンマの場合は、飛行管外側へのガンマは極めて少なくなっている。そして飛行管内の色が Pb ありの場合は水色、Pb なしの場合は黄緑色となっており、ガンマの数が 1 ケタ程度減少していることが分かる。このことから、1 MeV 以上の高エネルギーのガンマが、よく減衰できていることが分かる。

図 3.1.1.(1).⑤-8 は、全エネルギー範囲での飛行管中心からの距離と中性子数、図 3.1.1.(1).⑤-9 はガンマ数の分布を表したものである。飛行管出口付近に配置している内側のドーナツ状のコリメータの内径が 2.5 cm となっている。Z=1195 cm のタリー位置でも、両方のグラフの Z 軸から 2～3 cm の間で中性子、ガンマの数が大きく減少しており、ビームが絞られていることが分かる。

⑥ ビームコリメーションのシミュレーション計算 (H29)

昨年度決定したコリメータの配置図を図 3.1.1.(1).⑥-1 に示す。Pb を Z=65 cm の所に設置してガンマの遮蔽を行っている。このコリメータ系での中性子分布とガンマ分布についてシミュレーションを行った。図 3.1.1.(1).⑥-2(a)よりコリメータ出口からの中性子が、後方飛行管の後ろの空間に広がることなく、絞られている様子が分かる。一方、(b) ガンマ分布でも、後方飛行管の外側の空間に多く拡がっておらず、遮蔽されていることが分かった。

⑦ 中性子放出時間分布の検証（H29）

1) 中性子放時間分布

京大炉ライナックの減速材体系は減速材がビームラインと直交していない。そのため、検出器までの飛行路長に差ができるため、中性子放出時間分布が広がる可能性がある。それを調べるために、実験体系に基づいたコリメータモデルを使用して中性子の時間分布の計算を行った(図 3.1.1.(1).⑦-1)。この体系ではモデレータがターゲットに平行に設置されている(図 3.1.1.(1).⑦-1)。コリメータの入り口や、Z=1195 cm に設置する面タリーとの位置関係としては、45 度の角度を持っていることになる。そこで、Z=1195 cm にタリーを設置して中性子の時間分布を 1 eV±0.1 %のエネルギー範囲についてシミュレーションを行った(図 3.1.1.(1).⑦-2)。時間分布はピークが立つのが遅く、ピークの後も尾を引くように拡がっている。これは、モデレータがコリメータや、タリー面と 45 度の角度を持っているために、中性子の時間分布の立ち上がりが特に拡がっていると考えられる。そこでモデレータと、コリメータの入り口や面タリーとの位置関係が平行になるように変えて、中性子の時間分布のシミュレーションを行ってみた(図 3.1.1.(1).⑦-3)。図 3.1.1.(1).⑦-4 に、Orthogonal angle moderator についての計算結果を示す。図 3.1.1.(1).⑦-2 の Inclined angle moderator に比べてピークが立つのが早くなっている。しかし依然として、ピーク後方は尾を引いたような状態になっている。

中性子がタリー面に遅れてくるもう一つの原因について考える。ターゲットで発生した中性子が黒鉛反射材に一度入り、出てきた中性子が遅れてタリーに到着すると考えられる。反射材のないモデルについても計算を行い、反射材をなくすことにより、反射材に一度入ってからタリーに到達する中性子は無くなることになる（図 3.1.1.(1).⑦-5、図 3.1.1.(1).⑦-6）。

図 3.1.1.(1).⑦-6 の反射材なしの中性子時間分布は、ピークは早く立ち、ピーク後も中性子が早く減少している。反射材ありの Orthogonal angle の時間分布と比較すると後方の尾を引いた部分がなくなっている。やはり、反射材のある体系では、反射材に一度入った中性子の影響があったと思われる。

図 3.1.1.(1).⑦-7 にこれまでの Inclined angle moderator , Orthogonal angle moderator, NO Reflector の 3 つの体系に対して、中性子放出時間分布を、各エネルギー範囲について比較をした。Inclined の場合にはピークが遅く、ピーク後も中性子が多く観測されている。Orthogonal の場合はピークが立つのは早いが、ピーク後の中性子が尾を引くようになっている。NO Reflector の場合は、ピークが早く、ピーク後の中性子の減少も早いことが分かる。特に低エネルギーの 0.005 eV,0.05 eV では Inclined, Orthogonal の場合に、ピークの後に、長い時間に中性子が検出されている。

2) 半値幅

図 3.1.1.(1).⑦-8 に両対数の半値幅のグラフを示す。黄線は NO reflector、青線は Orthogonal reflector、緑線は Inclined reflector である。この図より半値幅は 1/v にほぼ比例していることが分かった。

この放出時間分布の影響をタンタルの 4.28 eV の中性子共鳴吸収ピークを用いて検討し

た。実際に測定された共鳴ピークの半値幅は 20μsec であった。一方、放出時間分布の半値幅は 2.6 μs であるので、これによる半値幅への影響は、1 % 以下と見積もられた。従って、放出時間分布は、ピーク領域を積分して元素定量分析を行う場合には、大きな影響がないことが分かった。

⑧ 実験体系に基づいたコリメータでのシミュレーション (H29)

1) Al フランジ厚さを変更した場合のシミュレーション計算

図 3.1.1.(1).⑧-1 に現在の実験体系でのコリメータモデルを示す。飛行管に使用されているフランジは Al の 5 mm 厚さとなっており、5 mm の厚さがあると、散乱がより多く生じる。これを厚さ 1 mm にした場合、どの程度中性子強度が増えるのかシミュレーションを行った。真空の飛行管の入口と出口の Al フランジの厚さを 5 mm から 1 mm にコリメータモデルを変更して、その 2 つのシミュレーション計算値を比較してみる。

表 3.1.1.(1).⑧-1 より、0.002～0.2 eV のエネルギー範囲での中性子強度は、Al フランジ 5 mm から 1 mm に変更することによって、10.4 % ほど増加している。よってシミュレーションにより、フランジを変更することによってより多い中性子を得ることができると分かった。

2) 中性子スペクトル強度の実験値との比較 (H29)

実験値と PHITS でのシミュレーションの計算値が一致しているか、比較して検証する。2017 年 5 月に京都大学原子炉実験所で行われた実験の結果と、その実験体系のコリメータモデルを使用して比較した。

図 3.1.1.(1).⑧-2 は、実験値と PHITS 計算値の中性子分布を比較したものである。計算値は実験値のスペクトルをかなり良く再現しているのが分かる。

次に、エネルギー領域毎における中性子強度の実験値と計算値を比較する(表１－５)。中性子のエネルギーが 0.002-0.2 eV の領域では実験値 235.95 /cm^2/μA/sec で、PHITS 計算値は 299.10 /cm^2/μA/sec と 26.8 % 大きくなっている。0.2 eV－1.8 keV の領域では実験値 213.2 /cm^2/μA/sec で、PHITS 計算値は 203.68 /cm^2/μA/sec と、約-4.5 % となっており、実験値と近い値となった。よって PHITS によるシミュレーション計算値と実験値はほぼ一致しており、設計とおりの性能が得られていると考えられる。

⑧ まとめ

京大炉ライナックの照射場における熱外中性子のフラックス及びパルス時間特性が最適になるように、モンテカルロ・シミュレーションによる中性子輸送計算を用いたパラメータサーベイを行い、中性子源（ターゲット・モデレータ・反射材・遮蔽材）及びビームラインの設計を行った。また、国内外の中性子源開発の動向を調査し、最新の知見を中性子源開発に反映させ、中性子場の性能評価を行った。その結果、本研究で整備した中性子減速材及びコリメータを用いた場合、パルス中性子の特性の一つである中性子放出時間分布については、測定した共鳴ピーク積分値の半値幅は 20 μs であり、放出時間分布の半値幅は 2.6 μs であることから、放出時間分布は、ピーク領域を積分して元素定量分析を行

う場合には、大きな影響がないことが分かった。また、各エネルギー領域における数値計算による評価値と実験値はよく一致しており、設計とおりの性能が得られ、本事業で提案した研究は全て達成した。

表 3.1.1.(1).⑤-1　Pb を Z=1100 cm、Z=65 cm に設置した場合の中性子数の比較

Pb position	Pb size	neutron number [n/cm^2/sec]
Z=65 cm	φ5 cm×20 cm	3.8819E+04
Z=1100 cm	φ5 cm×0.6 cm	3.7654E+04
	φ5 cm×0.55 cm	3.8900E+04
	φ5 cm×0.5 cm	3.9803E+04

表 3.1.1.(1).⑤-2　様々な Pb 遮蔽体厚さでの中性子数

Pb position	Pb size	Neutron number [n/cm^2/sec]
Z=65 cm	φ5 cm×20 cm	3.8819E+04
behind target	7 cm×8 cm×1.325 cm	4.0341E+04
	7 cm×8 cm×1.412 cm	3.8819E+04
	7 cm×8 cm×1.450 cm	3.8153E+04

表 3.1.1.(1).⑤-3　Pb 各々の遮蔽体の位置とガンマ強度比

Pb position	neutron num [n/cm2/sec]	neutron ratio [/withoutPb]	gamma num [/cm2/sec]	gamma ratio [/withoutPb]
（1）Z=65 cm	3.8819E+04	0.835	3.8059E+06	0.295
（2）Z=1100 cm	3.8900E+04	0.837	5.7691E+06	0.447
（3） behind target	3.8819E+04	0.835	7.3402E+06	0.569
（4）without Pb	4.6476E+04		1.2899E+07	

表 3.1.1.(1).⑧-1　Al フランジ厚さの違いによる中性子強度の変化

	Al 5 mm [/cm²/μA/sec]	Al 1 mm [/cm²/μA/sec]	Al 1 mm/5 mm
0.002～0.2eV	299.10	330.19	1.104
0.2eV～1.8keV	203.68	201.62	0.990

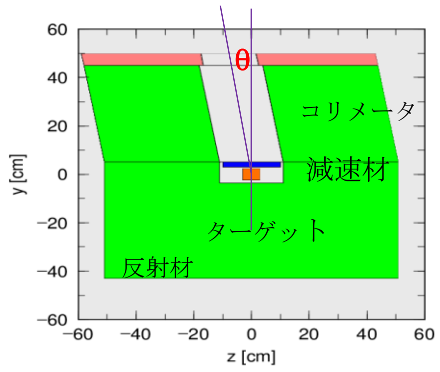


図 3.1.1.(1).②-1　放出角度変更体系

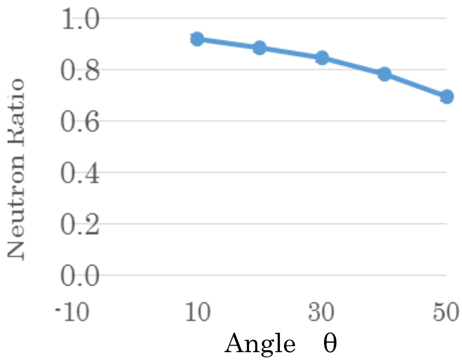


図 3.1.1.(1).②-2　角度による中性子強度の減衰割合

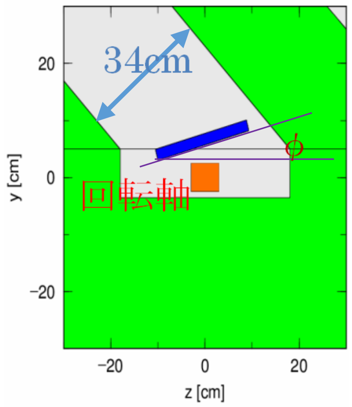


図 3.1.1.(1).②-3　減速材の回転設置体系

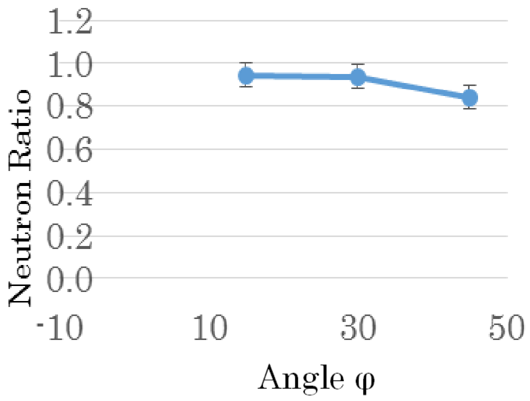


図 3.1.1.(1).②-4　設置角度による中性子強度の減衰割合

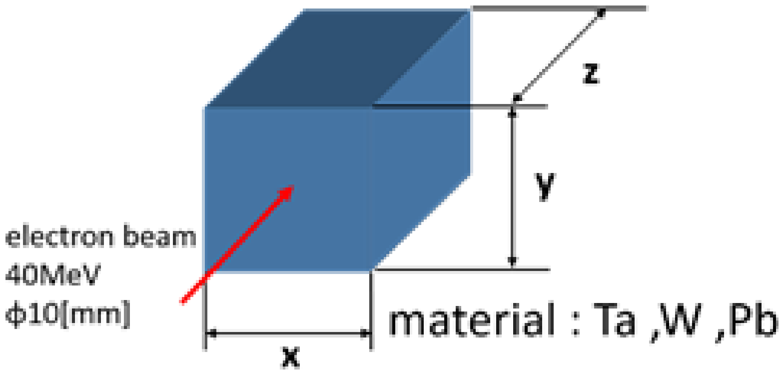


図 3.1.1.(1).③-1　計算に用いた直方体形ターゲットと x, y, z 軸
(電子ビームはｘｙ平面に入射する)

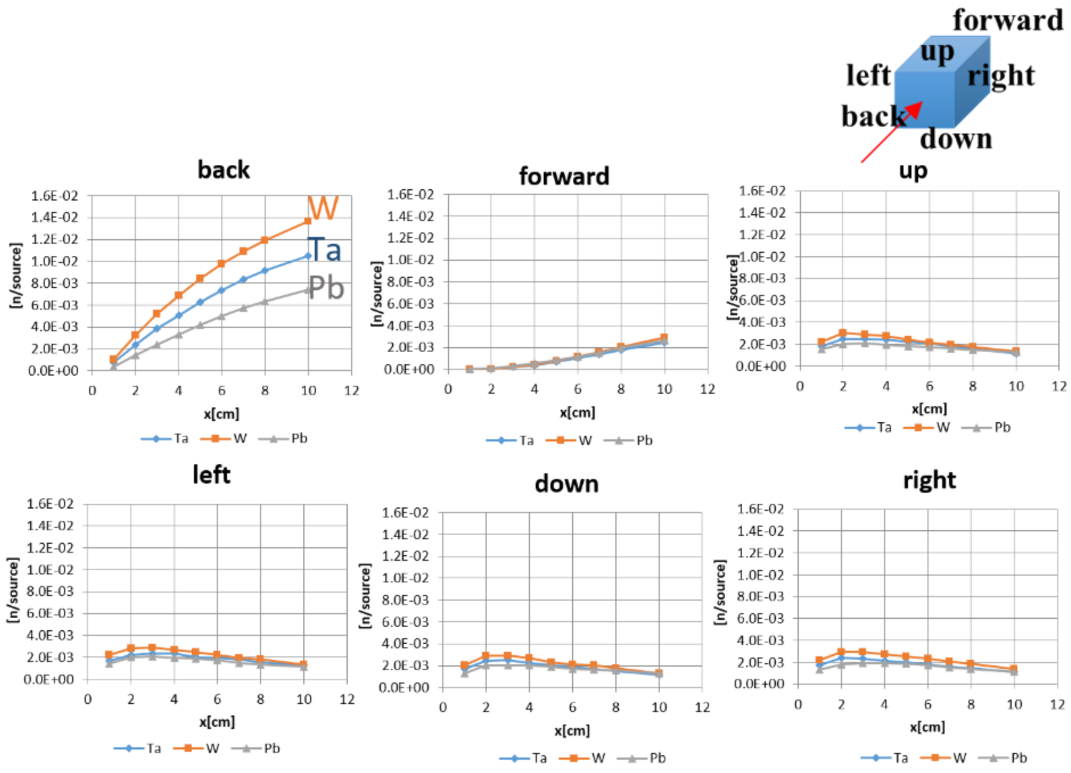


図 3.1.1.(1).③-2　ターゲットの各面から放出される中性子強度のｘｙ面の大きさによる変化
(y の値も x と同じに変化させている)

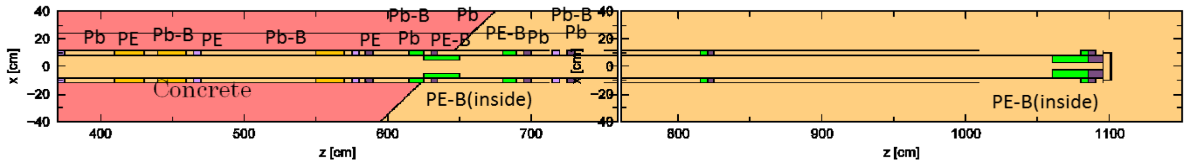


図 3.1.1.(1).④-1　中性子・ガンマ線ビームラインコリメータの配置

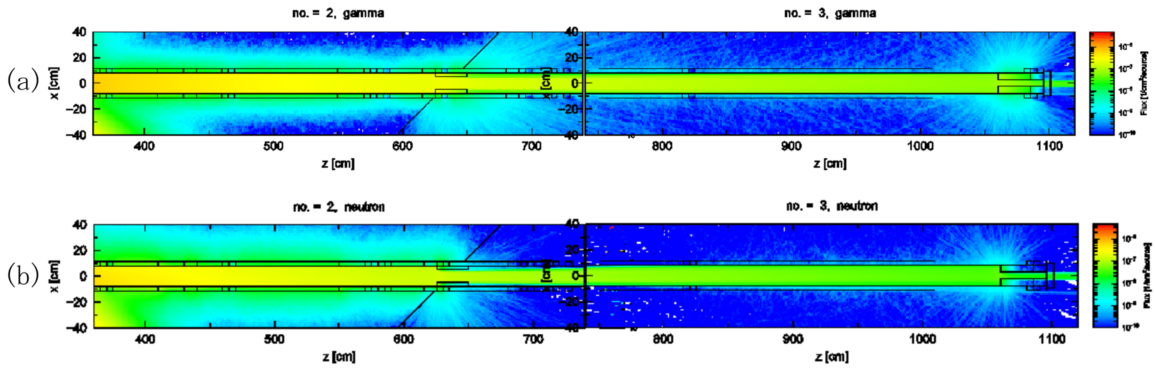


図 3.1.1.(1).④-2　(a)中性子の XZ 分布、(b)ガンマの XZ 分布

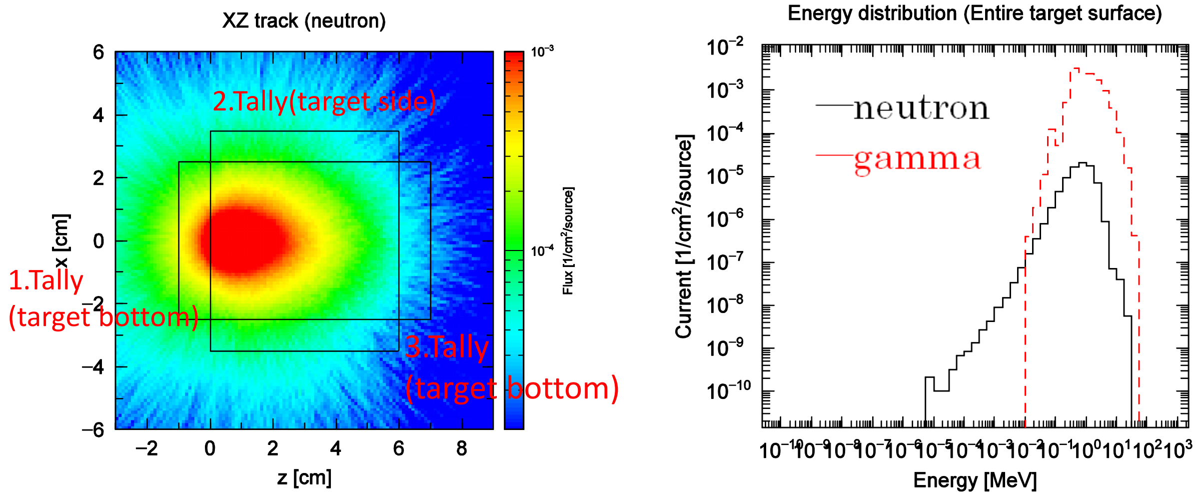


図 3.1.1.(1).⑤-1　中性子ソースを使ってのタリーの方法

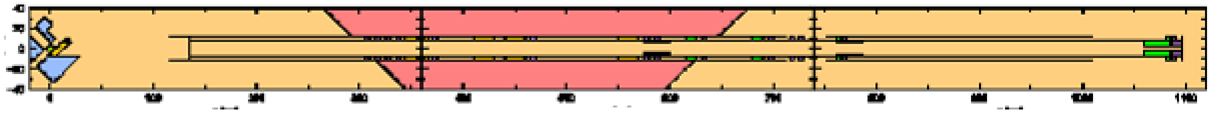


図 3.1.1.(1).⑤-2　コリメータモデル

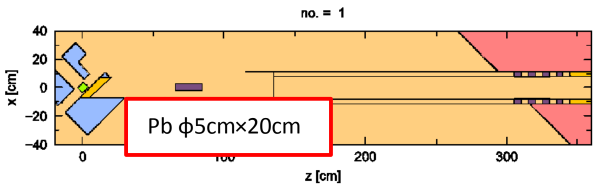


図 3.1.1.(1).⑤-3　モデレータ・飛行導管中間位置 Pb 遮蔽体

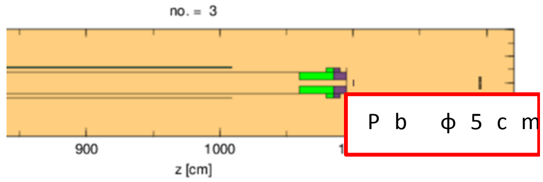


図 3.1.1.(1).⑤-4　飛行管出口 Pb 遮蔽体

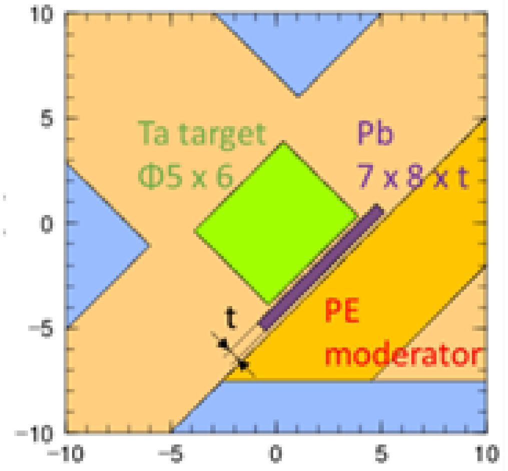


図 3.1.1.(1).⑤-5　ターゲット直後に Pb 遮蔽体を設置

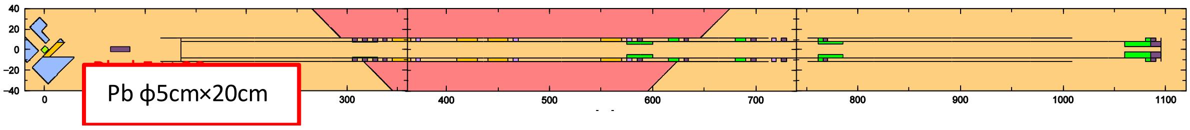


図 3.1.1.(1).⑤-6　コリメータモデル Pb 遮蔽体位置 Z=65 cm

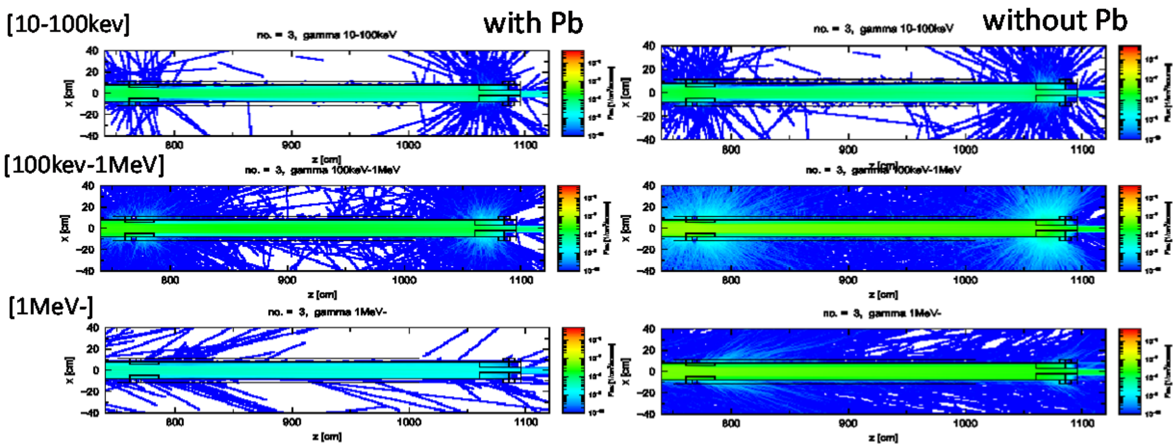
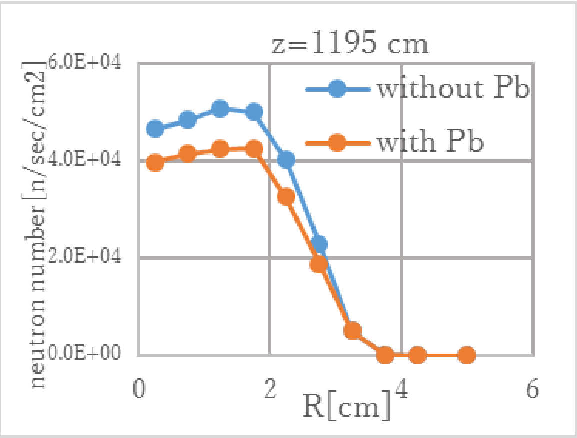


図 3.1.1.(1).⑤-7　飛行管出口付近でのガンマの挙動



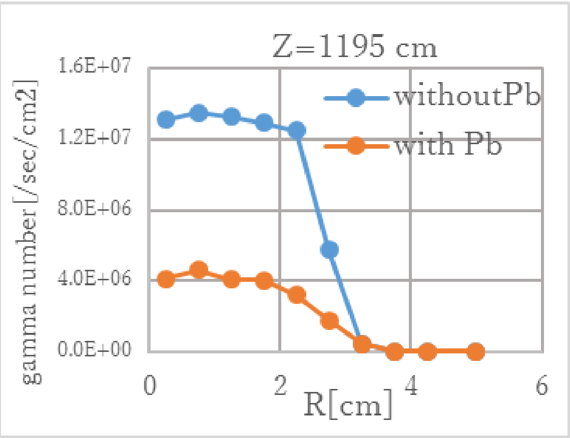


図 3.1.1.(1).⑤-8　飛行管中心からの距離と中性子分布

図 3.1.1.(1).⑤-9　飛行管中心からの距離とガンマ分布

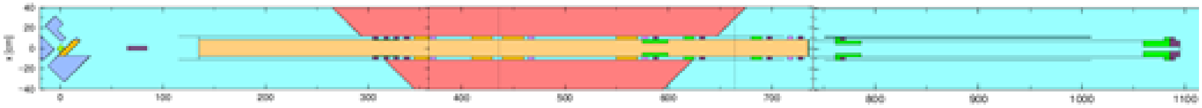


図 3.1.1.(1).⑥-1　実験体系に基づいたコリメータモデル

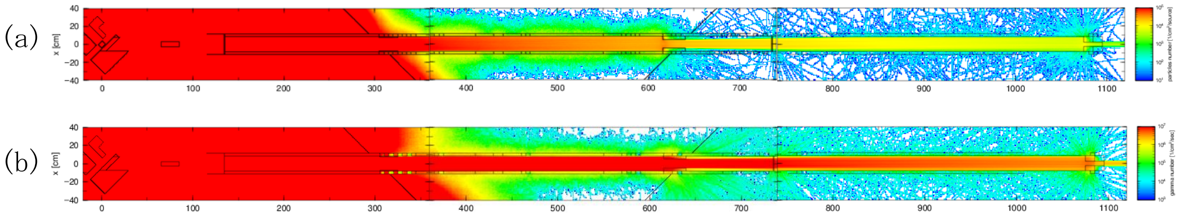
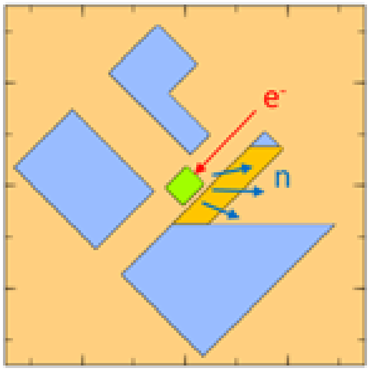


図 3.1.1.(1).⑥-2　コリメータモデルでの粒子の空間分布



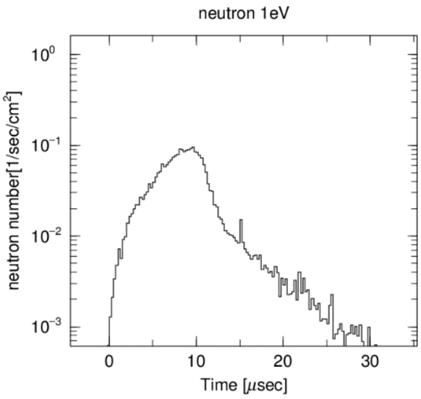


図 3.1.1.(1).⑦-1　Inclined angle collimator

図 3.1.1.(1).⑦-2　Inclined angle 中性子時間分布

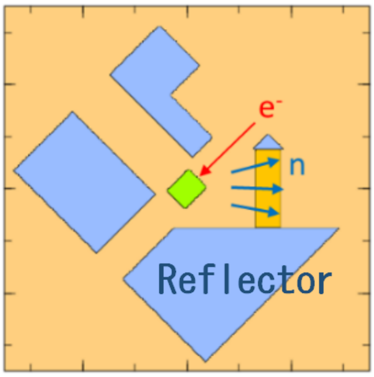


図 3.1.1.(1).⑦-3　Orthogonal angle moderator

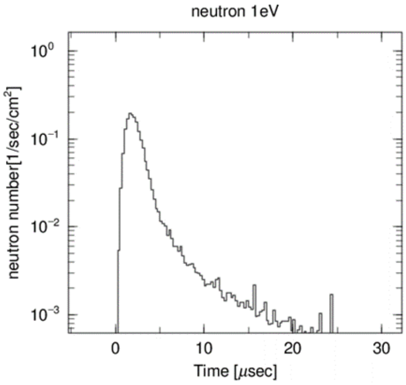


図 3.1.1.(1).⑦-4　Orthogonal angle
中性子時間分布

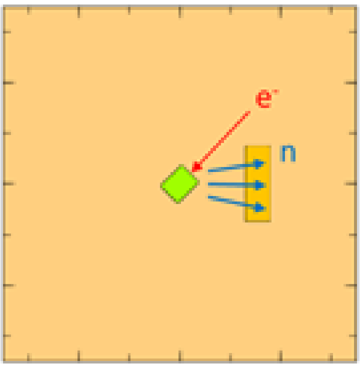


図 3.1.1.(1).⑦-5　NO reflector

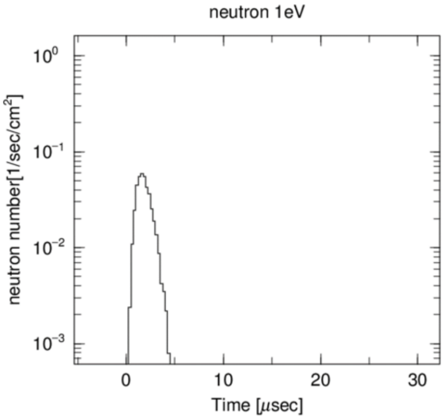


図 3.1.1.(1).⑦-6　NO reflector
中性子時間分布

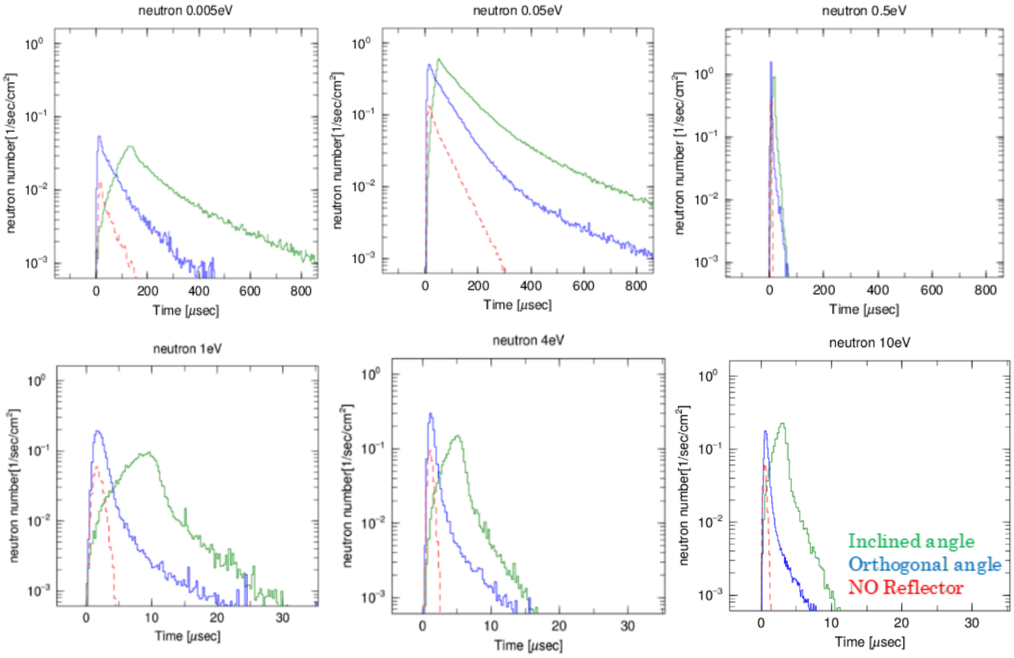


図 3.1.1.(1).⑦-7　各エネルギーでの中性子時間分布の比較

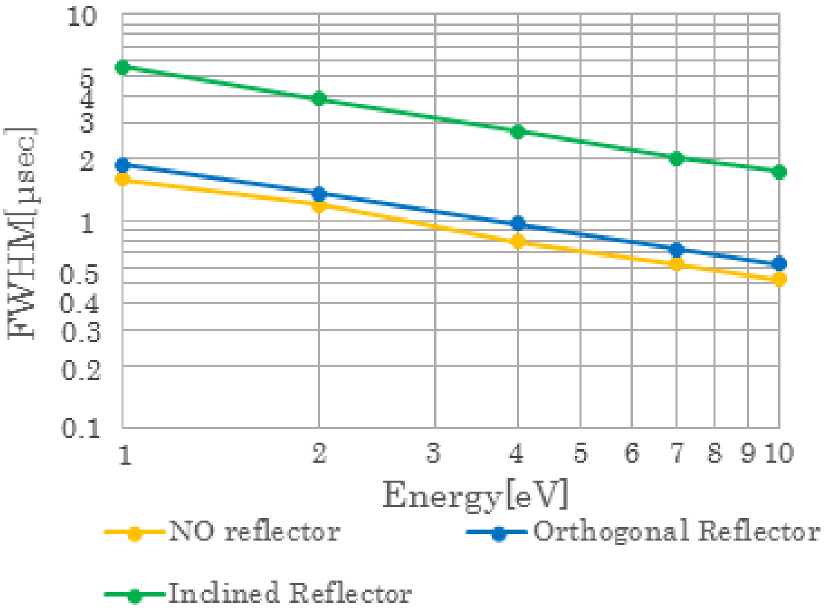


図 3.1.1.(1).⑦-8　放出時間分布半値幅

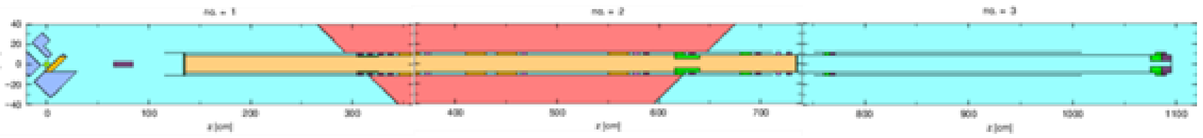


図 3.1.1.(1).⑧-1　コリメータモデル

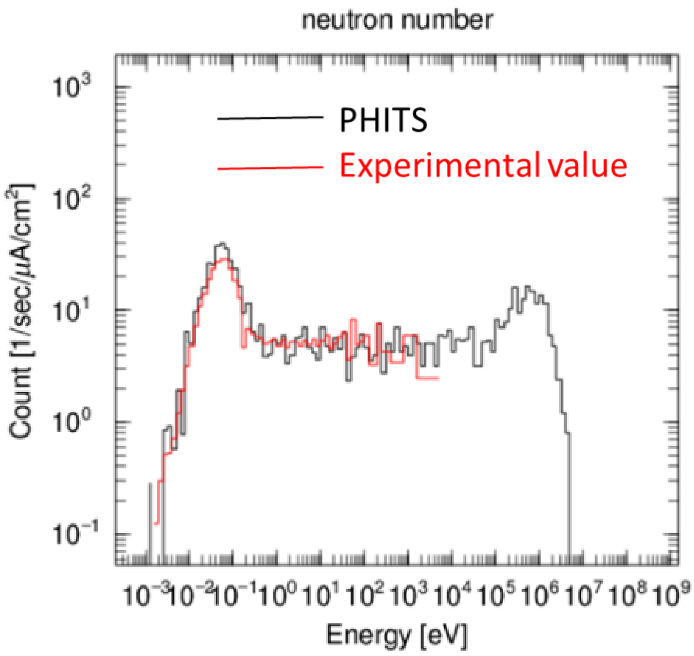


図 3.1.1.(1).⑧-2　中性子エネルギー分布の実験値と計算値の比較

参考文献

[1]T. Sato, K. Niita, N. Matsuda, S. Hashimoto, Y. Iwamoto, S. Noda, T. Ogawa, H. Iwase, H. Nakashima, T. Fukahori, K. Okumura, T. Kai, S. Chiba, T. Furuta and L. Sihver: "Particle and Heavy Ion Transport Code System PHITS, Version 2.52, " J. Nucl. Sci. Technol. 50:9, 913-923 (2013).

(2) 中性子源・中性子輸送系整備（H26～H29）

① 概要

本事業では、核燃料内部の核的・物性的な情報を非破壊・高精度で取得できる総合システムを開発することを目的とする。そのために、本事業では、パルス中性子源を用いた中性子の共鳴吸収による手法を採用し、これによって核種濃度の定量とその可視化技術、物性値の定量とその可視化技術の高度化を実現する。これらを遂行するためパルス中性子源及び中性子輸送系に求められる性能としては、以下のようなことが挙げられる。まず、核種定量技術の高度化のために、高強度の中性子束が必要であること。また、物性値の定量、すなわち、測定対象の内部温度を測定するために、高時間分解能が要求される。これらに加えて、対象物内での定量値の空間分布を取得するためには、高 L/D の中性子輸送系が必要となる。しかし、これらの要求の関係性は、Trade off の関係にあるため、総合的なシステム開発のためには、中性子反射材・減速材や中性子輸送系（以下、中性子源システム）の最適化が重要である。本事業では、パルス中性子源として、京大炉ライナックを使用することとした。京大炉ライナックに設置された中性子源システムの最適化に向けて、平成 26 年度には、モンテカルロ・シミュレーションにより検討及び設計、更に、それに基づく中性子源システムの導入を行った。平成 27 年度には、新しく導入した中性子源システムの性能評価のための基礎試験を実施した。平成 28 年度は、前節 3.1.1.(1)の中性子源検討の計算結果と前年度の実験結果を基に、中性子源システム、特にコリメータ等の中性子輸送系の改良を行い、中性子場の性能試験を実施した。平成 29 年度は、これまでの計算結果と実験結果を基に、本中性子源システムの L/D 評価を実施した。

② 中性子源システムの設計と整備（H26）

1) 京大炉ライナック

本事業で使用した京大炉ライナックの平面配置図を図 3.1.1.(2).②-1 に示す。京大炉ライナックには、主に中性子飛行時間法（Time of flight:TOF）による核データ測定に供するための測定室が 3 室あり、飛行距離はそれぞれ、10 m、12 m、22 m である。本事業では、電子ビームの進行方向から 135 度の方向に中性子が引き出される 12 m 測定室を使用することとした。本事業の中性子源ターゲットには、12 枚のタンタル板が、直径 5 cm、長さ 6 cm のチタンケースに並べられたタンタルターゲットを使用した。各々のタンタル板の間は冷却のため水が流れる構造になっており、タンタルの実効厚さは 29 mm である。

2) 数値計算による検討

核種の定量、物性値の定量並びにイメージングには、十分な中性子束が不可欠であるため、まず初めに、中性子束、特に熱外中性子領域である 1eV～500eV に重点をおいて中性子源システムの設計を行った。数値計算には、連続エネルギーモンテカルロシミュレーションコードである MCNPX[1]を使用し、核データライブラリは、JENDL4.0[2]を用いた。

初めに、減速材の効果を検証するために、反射材を設置せずに減速材の位置とサイズを変化させて計算を行った。減速材の位置は、中性子輸送方向に設置する場合と、ターゲットの直近に設置する場合について検討を行った。どちらの体系についても、線源は、実際に使用するターゲットと同サイズで、直径 5 cm、長さ 6 cm の体積線源とし、中性子のエネルギーは蒸発スペクトルとした。線源の中心から、電子ビームの進行方向からみて 135 度のライン 3 m の位置に直径 18 cm（実際のビームライン孔の大きさ）の tally 領域を設定した。ここでの減速材の材質は軽水とし、サイズは、20 cm 角と 10 cm 角、それぞれ厚みを 1 cm、2 cm、3 cm、5 cm と変化させた。これらを比較すると、減速材のサイズが大きくなるにつれ、熱外中性子束が大きくなることがわかった。また、減速材は、中性子輸送方向に設置するより、ターゲット直近に設置する方が、中性子束が増加することがわかった。

次に反射材を配置した場合について検討を行った。計算体系の例と得られた中性子スペクトルを図 3.1.1(2).②-2 に示す。反射材の材質は、計算結果よりもっとも中性子束が大きくなった黒鉛を用いた。反射材を設置することにより、反射材がない場合に比べて中性子束が大きく増加した。また、反射材がない場合と同様、減速材のサイズが大きくなるにつれ、熱外中性子束が大きくなり、減速材の位置は、中性子輸送方向（setting 1）に設置するより、ターゲット直近（setting 2）に設置する方が、中性子束が増加することがわかった。結果として、反射材ありで減速材を直近に設置した場合（Setting 2）の方が、中性子束が他に比べて増加することがわかった。また、全エネルギー領域における中性子束と 1 eV ～500 eV のエネルギー領域では、最適な減速材の厚みが変わることが分かり、実験条件に合わせて最適な減速材を用いることにより、より最適な実験条件を構築できることが分かった。以上の計算結果を元に、新しい中性子源システムの設計を行った。

3) 計算結果を元にした中性子源システムの整備

計算結果を元に、被検体設置位置における中性子スペクトルと中性子束が最適となるように、タンタルターゲットの位置、反射材、減速材の材質及び幾何形状を検討し、中性子源システムの設計・整備を行った。導入する中性子源システムは、実際の使用状況を考慮して、被曝低減のために容易に中性子源ターゲットを設置できること、実験の再現性を高めるために中性子源システムの設置が容易であること、保管場所の確保のためにターゲット室内に保管専用の格納容器を設けること等を念頭に設計を行った。図 3.1.1(2).②-3 に新しく導入した中性子源システム及び昇降式架台、図 3.1.1(2).②-4 に減速材を挿入した時の中性子源システムの写真を示す。減速材はポリエチレンを使用し、そのサイズは、中性子輸送系の直径を考慮して 15 cm 角とし、厚さは可変とした。反射材は、材質を黒鉛（カーボン）とし、電子ビームが通過する穴に、電流検知のためのアルミ製の内貼を設置

し、インターロック回路に接続可能とした。ターゲットは容易に取り出せるように、反射材一部と一体となる構造とした。昇降式架台の高さは微調整が可能であり、電子ビームライン、中性子輸送ラインとのアライメント調整が行いやすく、また、設置位置を固定すれば実験の再現性も高められる。被曝低減のため、昇降台式架台から格納容器までは取り外しが可能なレール式を採用し、簡単に取り出し・収納が可能となった。ターゲットの取り付けも、一度反射材の一部に接続すれば、容易に取り付け・取り外しが可能となった。

4) 中性子輸送系の整備

中性子源から発生した中性子を効率よく測定室に輸送するためには、中性子輸送ビームラインの最適化も重要な課題である。京大炉ライナックに設置されている既存のビームラインは、設立時のものであるため、経年劣化やビーム角度のずれ等が懸念されたため、既存のビームラインに挿入する形で新たにビーム導管を新設した。図 3.1.1(2).②-5 に新設したビーム導管の図面を示す。青色の部分は、中性子遮蔽用のポリエチレン円環コリメータ（長さ 20 cm）で、赤色の部分は、ポリエチレン円環コリメータのビーム導管挿入時のずれを防止するためのストッパーである。また、この円環コリメータは、ビーム導管接続部の歪みを防止する役割も持つ。ビーム導管の挿入時には、2 分割された円環のコリメータを取り付けながら挿入した。ビーム導管の外側及び内側には、鉛、ポリエチレン、ボロン入りポリエチレン、ボロン入り鉛を適宜配置した。ビーム導管の内側に挿入されたコリメータの内径は全て 5 cm であった。導管挿入後、新しく整備したスクロールポンプにより真空テストを行い、10^{-1} Pa まで真空度が低下したこと確認した。

③ 新しく導入した中性子源システムの性能評価のための基礎実験（H27）

平成 26 年度京大炉ライナックに新しく整備した中性子源を用いて、その性能評価のための基礎実験を行った。減速材の厚さは、中性子束の増加を目的として 5 cm とした。図 3.1.1.(2).③-1 に 減速材（15 cm 角、厚さ 5 cm）を挿入した時の中性子源システムの写真を示す。TOF スペクトル測定のために、コリメートされた中性子ビームを Al 容器に封入された ^{10}B 濃縮被検体（22 mΦ×8 mm^3, 同位体純度 96.98 %）に照射し、$(n,\alpha\gamma)$反応から放出される 478 keV の捕獲ガンマ線を測定することにより、間接的に中性子スペクトルを得た。捕獲ガンマ線検出器には、直径 2 インチ、長さ 2 インチの 2 本の BGO シンチレータを使用し、^{10}B 被検体中心から検出器までの距離を 80 mm となるように中性子ビーム入射方向に対して 90 度方向に設置した。BGO 検出器の結晶部分は直径 70 mm の穴開き鉛（厚さ 50 mm）に挿入することで周辺からのバックグラウンドガンマ線から遮蔽する構造とした。また、上流側からのガンマ線を遮蔽するために、ビームライン両側には鉛ブロックの遮蔽を設置した。実験体系を図 3.1.1(2).③-2 に示す。コリメータについては、計算を基にテーパ型の体系を使用し、測定室側の 3 m のビーム導管については従来のものを使用した。実験前には、測定室側よりレーザーを用いてアライメントの調整を行った。ライナックの運転条件は、パルス幅 100 ns、繰り返し周波数 50 Hz、平均ビーム電流 16.3 μA とした。得られた TOF スペクトルを図 3.1.1(2).③-3 に示す。横軸は中性子エネルギー、縦軸は単位時間、単位面積、平均ビーム電流 1 μA 当たりの中性子束である。

10 eV 以上のエネルギー領域での中性子束の急激な減少増加現象は、中性子源からのガンマフラッシュによる影響と考えられる。10 eV 以上のエネルギーについては、中性子源周りのガンマ線遮蔽やコリメータのガンマ線遮蔽を施すことによって、ガンマフラッシュ対策を行う必要があることが明らかとなった。10 eV 以下のエネルギーにおける中性子束を算出すると、平均ビーム電流 1 μA 当たり 1.9 $\times 10^2$ n/cm^2/s となった。

④ 中性子源・中性子輸送系改良のための整備（H28）

上述したとおり前年度の新中性子源による実験の結果、10 eV 以上のエネルギー領域において中性子束の急激な減少増加現象が確認され、中性子源からのガンマフラッシュによる影響が大きいことが明らかとなった。また、より効率的な中性子イメージングを行うために、中性子束の更なる増強が必要である。そこで、平成 28 年度は、中性子源の反射材、減速材周りの改良とコリメータの改良を実施した。

中性子源周りについては、ターゲット挿入口にターゲット挿入用に空いていた空洞を埋め中性子の反射の効果を増強するために、図 3.1.1.(2).④-1 のようなカーボン反射材を追加した。また、ガンマフラッシュの影響を低減するために図 3.1.1.(2).④-2 のような直径 5 cm、長さ 20 cm 分のシャドーバーを設置した。減速材の厚さは、これまでの実験結果と計算結果から、中性子束の増強に適した厚さ 5 cm（15 cm 角）とした。

中性子輸送系については、アライメント調整が正確かつ簡易に行えるように、アライメント調整台を新たに設置した。ビーム導管のコリメータについては、テーパ型のコリメータとし、約 12 m の導管のうち、ターゲット側（ターゲットから約 3 m）に内径 15 cm、厚さ 20 cm、導管中央付近（ターゲットから約 9 m）に内径 10 cm、厚さ 20 cm、導管出口（ターゲットから約 12 m）に内径 5 cm、厚さ 20 cm のボロン入りポリエチレンをそれぞれ設置した。また、最下流には、ガンマフラッシュの影響を低減するため、内径 5 cm、厚さ 10 cm の鉛コリメータを設置した。図 3.1.1.(2).④-3 に測定室側のビーム導管出口を示す。なお、測定室側のビーム導管約 3 m 分については、本事業の一連の実験に適したコリメータを設置するために、真空引きは行っていない。

中性子束と TOF スペクトル測定のために、前年度と同様コリメートされた中性子ビームを Al 容器に封入された ^{10}B 濃縮被検体（22 mΦ×8 mm^3, 同位体純度 96.98 %）に照射し、(n,α)反応から放出される 478 keV の捕獲ガンマ線を測定することにより、間接的に中性子スペクトルを得た。捕獲ガンマ線検出器には、直径 2 インチ、長さ 2 インチの 1 本の BGO シンチレータを使用し、^{10}B 被検体中心から検出器までの距離を約 60 mm となるように中性子ビーム入射方向に対して 90 度方向に設置した。BGO 検出器の結晶部分は直径 70mm の穴開き鉛（厚さ 50mm）に挿入し、周辺からのバックグラウンドガンマ線から遮蔽する構造とした。ライナックの運転条件は、パルス幅 100 ns、繰り返し周波数 50 Hz、平均ビーム電流 14.5 μA とした。得られた TOF スペクトルを図 3.1.1.(2).④-4 に示す。横軸は中性子エネルギー、縦軸は単位時間、単位面積、平均ビーム電流 1 μA 当たりの中性子束である。図より昨年度は測定が困難であった 10eV 以上の中性子も測定が可能となり、中性子源・中性子輸送系の改良によって、ガンマフラッシュの影響を低減することが可能となった。表 3.1.1.(2).④-1 に実験で得られた中性子束と昨年度との比較を示す。

平成 28 年度の実験によって得られた中性子束は、熱中性子で平均ビーム電流 1 μA 当たり 2.36 ×10^3 n/cm^2/μA/s、熱外中性子で平均ビーム電流 1 μA 当たり 2.13 ×10^2 n/cm^2/μA/s となった。これらは、昨年度に行った実験に比べて、熱中性子束で約 11 倍、熱外中性子束で約 6 倍となり、中性子源・中性子輸送系の改良によって大きく改善し、当初の目標としていた中性子束約 10 倍の目標を達成することができた。京大炉ライナックのスペックは、最大 6 kW の出力で運転が可能であり、その場合の平均ビーム電流は 200 μA となる。従って、現在の京大炉ライナックの 12 m 測定室では、実験で得られた平均ビーム電流 1 μA 当たりの値に 200 を乗じ、熱中性子束で最大 4.72×10^4 n/cm^2/s、熱外中性子束で最大 4.26×10^4 n/cm^2/s の中性子束が得られることが分かった。また、名古屋大学による計算結果から、本中性子源システムの時間分解能は、イメージングに必要な時間分解能を有していることが分かった。

⑤　中性子源システムのL/D評価 (H29)

昨年度までに実施した中性子源システムの評価実験によって、本事業に必要とされる中性子束については、概ね達成された。平成 29 年度は、これまでの計算結果や実験結果を基に、実験にあった本中性子源システムの L/D のような中性子束の均一性や検出器から離れた位置での解像度の評価を実施した。

測定手法としては、ターゲット等から発生するガンマ線の影響がなく、中性子のみのイメージング画像が取得可能な金属箔を用いた転写法を用いることとした。この手法では金属箔を中性子で放射化させ、その後箔を取り出してイメージングプレート（以下、IP）に転写し、それをデジタルで読み出して中性子イメージング画像を取得した。今回用いる金属箔には、熱中性子領域としてディスプロシウム (Dy) 箔 (110×160×0.1 mm) と熱外中性子領域でも撮影が可能な金 (Au) 箔(100×100×0.03 mm)を用いた。これら金属箔は薄く測定治具に直接貼り付けることが難しいため、アルミニウムプレートに固定してから測定治具に固定している。図 3.1.1.(2).⑤-1 転写法による実験状況を示す。測定治具は、ビーム出口 10 cm の位置に設置し、中性子吸収体として 10 cm ごとに Gd_2O_2S セラミックシンチレータを設置した。金属箔にもっとも近いものに 0 番を付け、ビーム側からみて時計周り 60 度ごとにセラミックシンチレータを配置した（実験条件 A1。A2:バックグラウンド測定）。また、ASTM 規格の SI インジケータ (Sensitivity Indicator：感度計) を貼り付け（アクリルステップウェッジが 0.0125、0.025、0.05、0.075、0.1、0.125、0.25μm のギャップ有）、その隙間をイメージングすることで、撮影可能な範囲を特定した。実験条件 B2 では、In 箔や Cd 箔、また、小さい In ワイヤや Au ワイヤを混入した被検体を用意し、実験を行った。図 3.1.1(2).⑤-2 に転写法による各実験条件(A1,A2,B1,B2)を示す。条件 A1 でのライナックの運転条件はパルス幅 4 μs、繰り返し周波数 50 Hz、平均電流 100.3 μA で、照射時間 12.5 時間、転写までの冷却時間 24 分、転写時間:25 時間であった。条件 A2 ではパルス幅 4 μs、繰り返し周波数 50Hz、平均電流 99.7 μA で、照射時間 5 時間、転写までの冷却時間 15 分、転写時間:20 時間であった。条件 B1 ではパルス幅 4 μs、繰り返し周波数 50 Hz、平均電流 98.9 μA で、照射時間 6 時間、転写までの冷却時間 15 分、転写時間:37 時間 35 分であった。条件 B2 ではパルス

幅 4 μs、繰り返し周波数 50Hz、平均電流 98.6 μA で、照射時間 12 時間、転写までの冷却時間 15 分、転写時間:24 時間であった。それぞれの結果を図 3.1.1.(2).⑤-3～図 3.1.1.(2).⑤-5 に示す。測定結果から、金属箔付近では、シンチレータの画像がはっきりと確認でき、距離が離れるに従って、画像がぼやけることが見て取れる。条件 B1 の結果から ASTM 規格 SI インジケータから IP の読み取り精度 25 μm 設定で 50 μm のラインまで視認できることが分かった。また、図 3.1.1.(2).⑤-5 の下部の Cd シート内の In 板の状況も確認できる。更に、Au 箔では、Cd シートに隠れた文字も視認することができ、Au で Cd カットオフよりも高いエネルギーの中性子を確認することができた。これらの撮像結果から、各シンチレータの中心軸を通る対角線上のライン輝度分布を求め、それぞれのシンチレータのエッジ像を取得し、濃度プロファイルからエッジ像のピクセル値のプロファイル ESF (edge spread function) を求めた。この ESF を微分することで線広がり関数 (LSF : line spread function) を求め、フーリエ変換して変調伝達関数 (MTF : modulation transfer function) を求めることができる[3-4]。画像システムの MTF は空間周波数の関数で，様々な空間周波数において解像特性がどのように変化するかを知ることができる。横軸に空間周波数(spatial frequency : cycles/mm)を、縦軸に各空間周波数における MTF 値をとった場合、MTF 値は 0～1.0 の数値で表わされる。ある空間周波数における MTF 値が 1.0 に近いほど，伝達特性つまり解像特性が良いことを表わしている[4]。本事業では、この MTF を用いて空間分解能を評価した。図 3.1.1.(2).⑤-6 京大炉ライナックと同種の実験を行った北大ライナックの中性子源 (HUNS) の MTF 比較結果を示す。測定の結果、京大炉ライナックの MTF は HUS と同程度の値を示し、中性子イメージングの実績が高い HUNS と同程度の空間分解能が得られたことが分かった。

⑥ まとめ

本研究では、本事業において必要とされる京大炉ライナックのパルス中性子源の高度化を目的として研究開発を行った。平成 26 年度～平成 27 年度にかけて、数値計算を用いた検討及び設計を行い、それらに基づく中性子源システムを開発した。更に開発した中性子源システムの特性試験を実施した。平成 28 年度は、3.1.1.(1)節の中性子源検討の計算結果と前年度の試験結果を基に、中性子源システム、特にコリメータ等の中性子輸送系の改良を行い、中性子場の性能試験を実施した。その結果、従前と比較し熱中性子束は約 10 倍、熱外中性子束は約 6 倍に増強された。平成 29 年度は、これまでの計算結果と実験結果を基に本中性子源システムの L/D 評価を実施し、国内の同規模の施設である北大ライナックの HUNS と比較し、同程度の空間分解能が得られたことが分かった。

表 3.1.1.(2).④-1　得られた中性子束と昨年度との比較

	previous	present	present/previous	max (@6kW)
	KURRI (/cm2/μA/sec)	KURRI (/cm2/μA/sec)		
thermal	2.16E+01	2.36E+02	10.92	4.72E+04
epi-thermal	3.40E+01	2.13E+02	6.27	4.26E+04

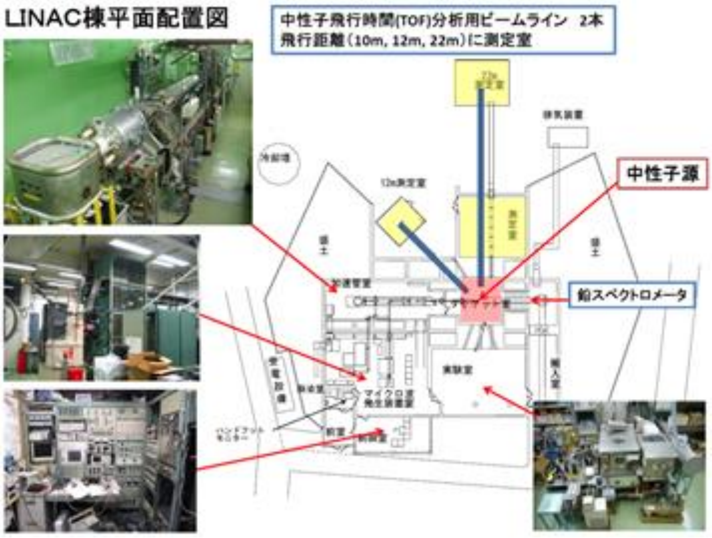


図 3.1.1.(2).②-1　京大炉ライナックの平面配置図

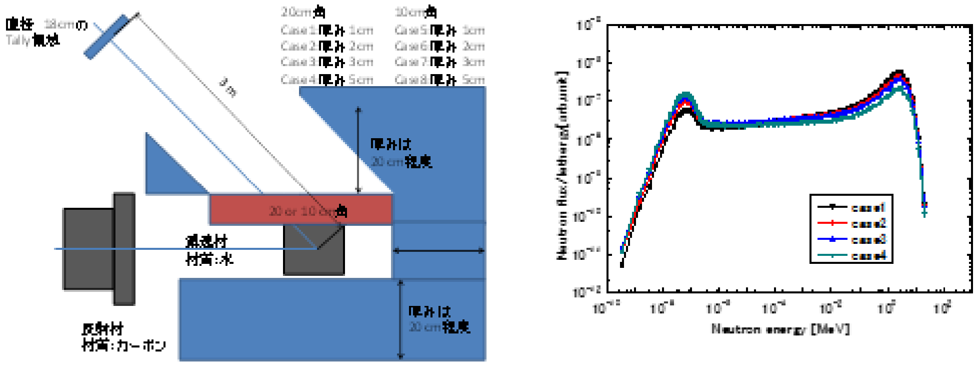


図 3.1.1.(2).②-2　反射材ありの計算体系（setting 2）と得られた中性子スペクトル

図 3.1.1.(2).②-3　新しく導入した中性子源システムと昇降式架台の写真

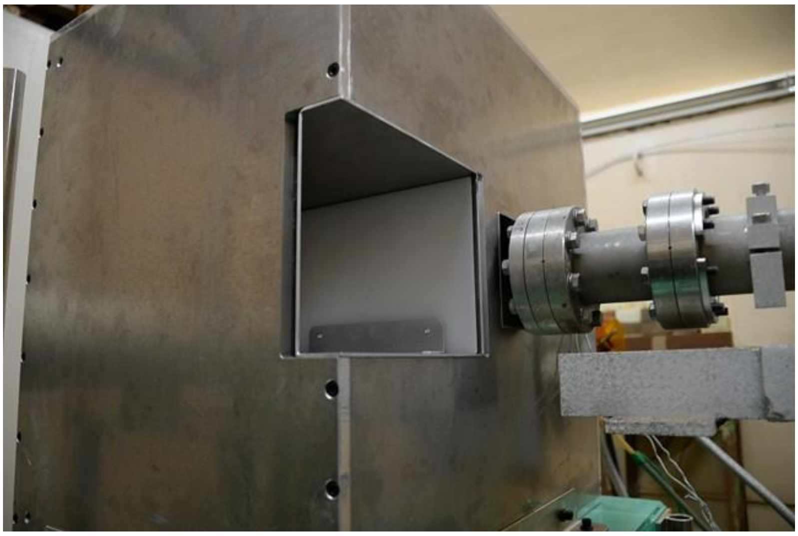


図 3.1.1.(2).②-4　減速材を挿入した時の中性子源システムの写真

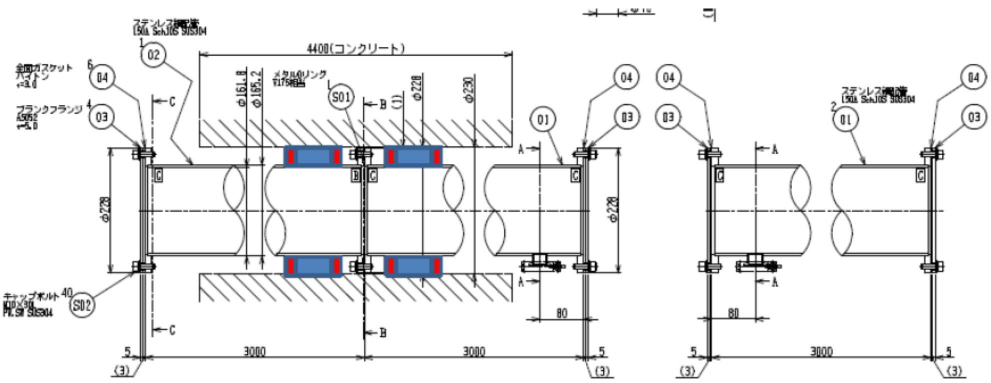


図 3.1.1.(2).②-5　新設したビーム導管の図面

図 3.1.1.(2).③-1　減速材（厚さ 5 cm）を挿入した時の中性子源システムの写真

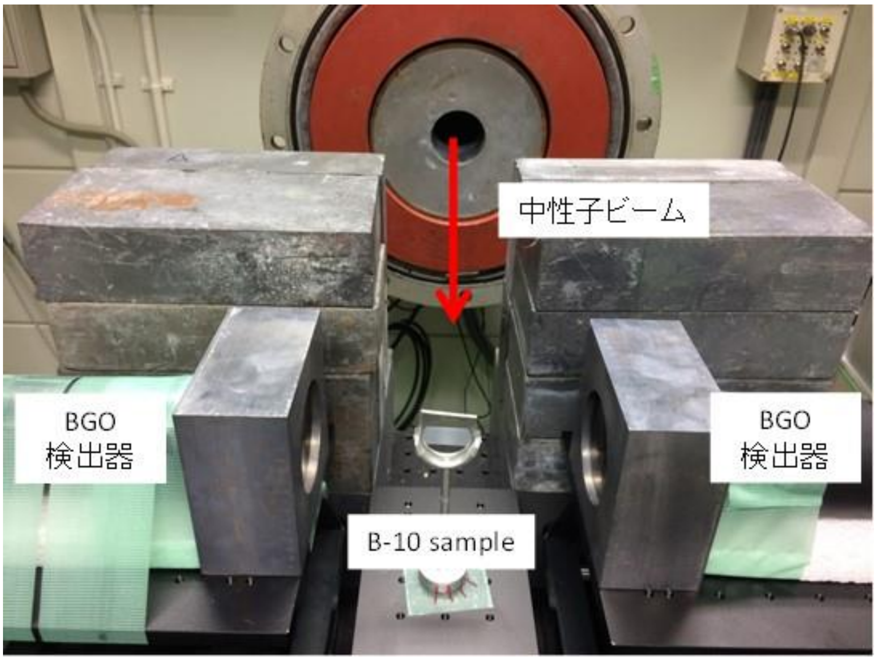


図 3.1.1.(2).③-2　実験体系の写真

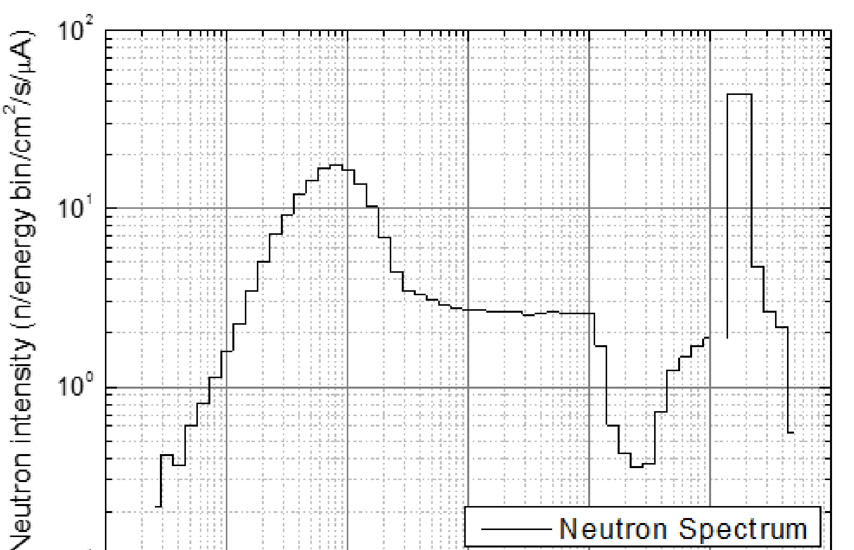


図 3.1.1.(2).③-3　新中性子源システムで得られた TOF スペクトル

図 3.1.1.(2).④-1　新しく設置したカーボン反射材

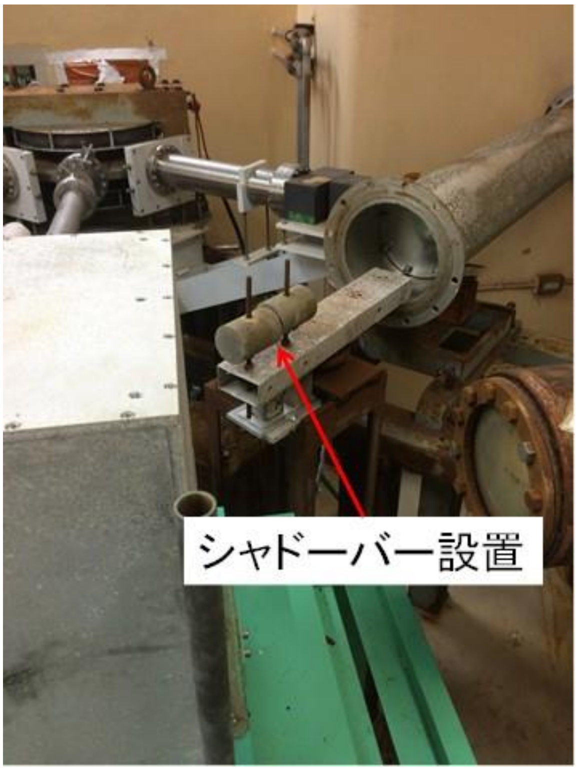


図 3.1.1.(2).④-2　シャドーバーの設置写真

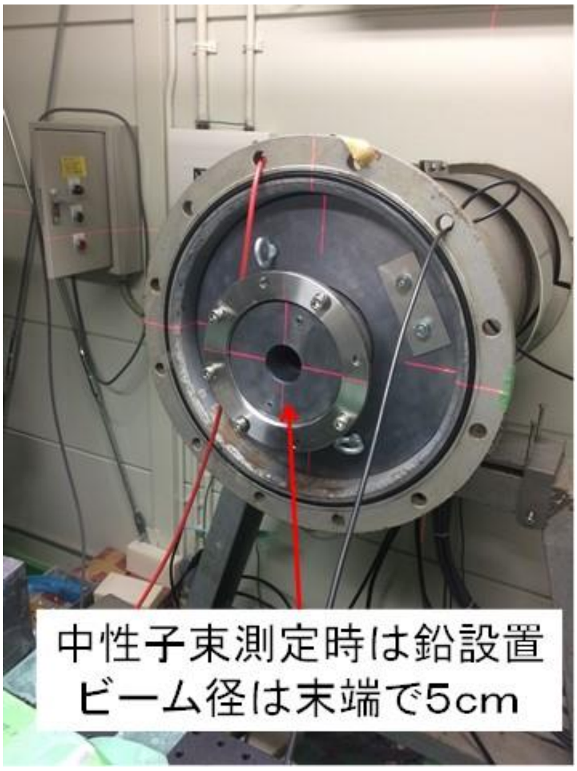


図 3.1.1.(2).④-3　測定室側のビーム導管出口

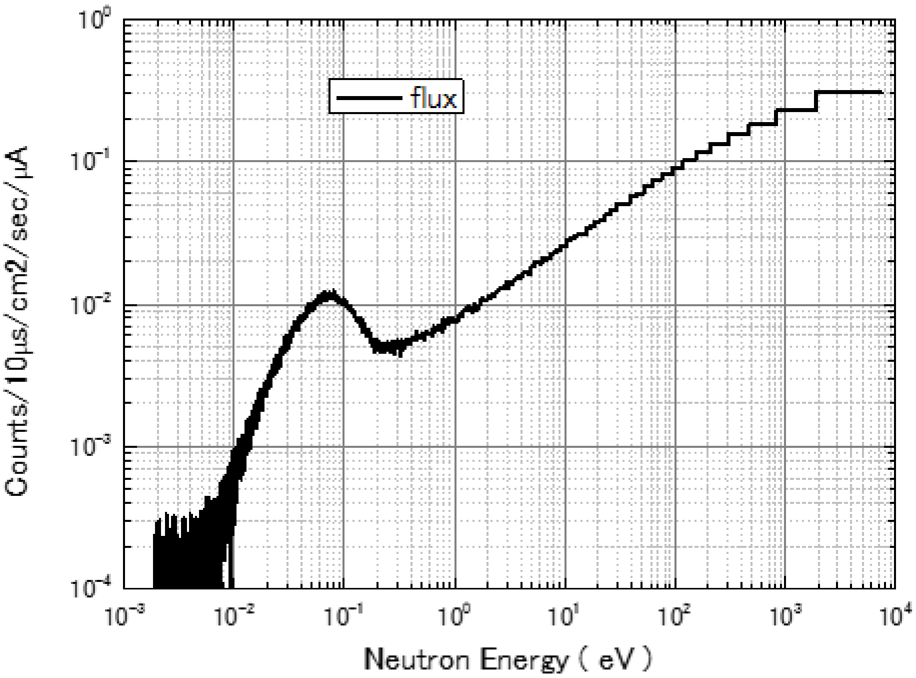


図 3.1.1.(2).④-4　得られた TOF スペクトル

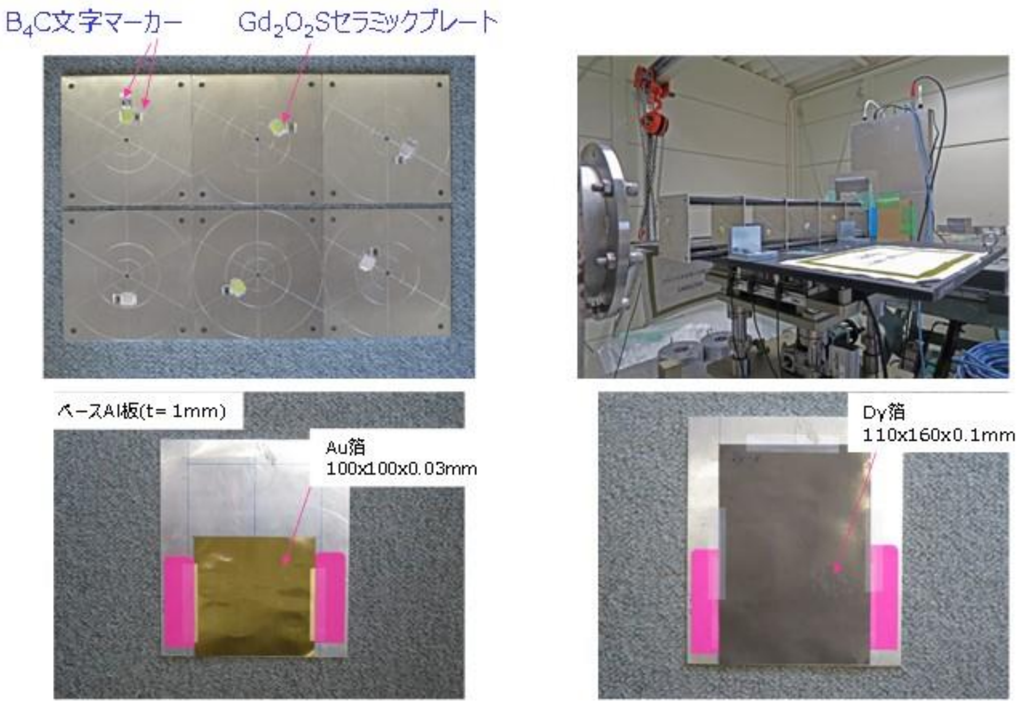


図 3.1.1.(2).⑤-1　転写法による実験状況

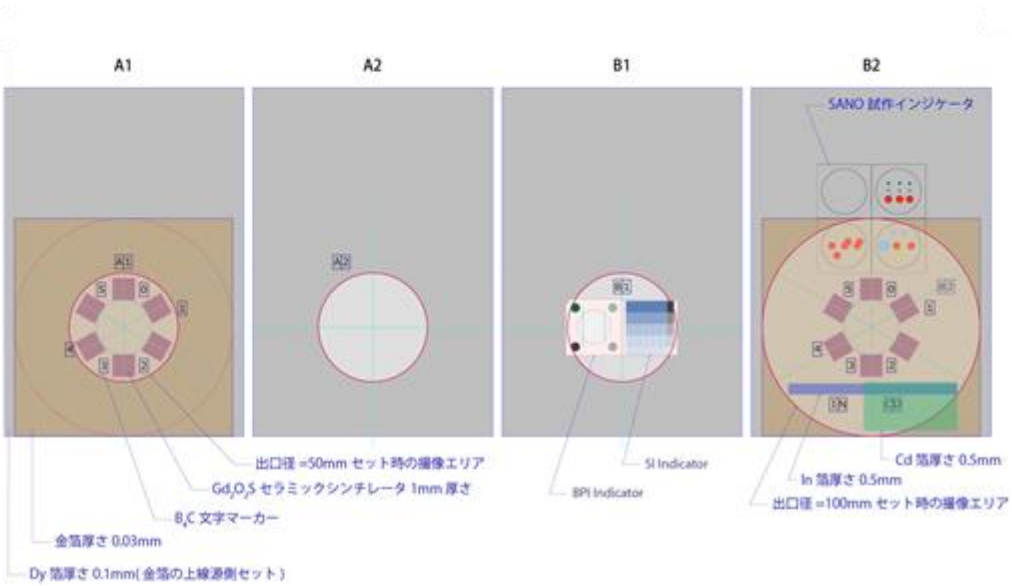


図 3.1.1.(2).⑤-2　転写法による実験条件(A1,A2,B1,B2)

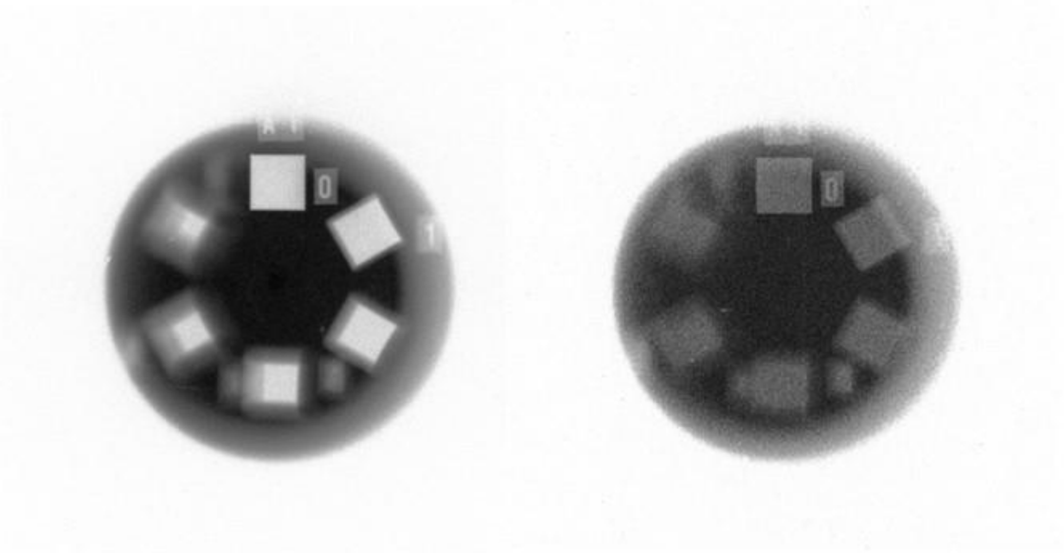


図 3.1.1.(2).⑤-3　条件 A1 のイメージング結果(左：Dy 箔、右:Au 箔)

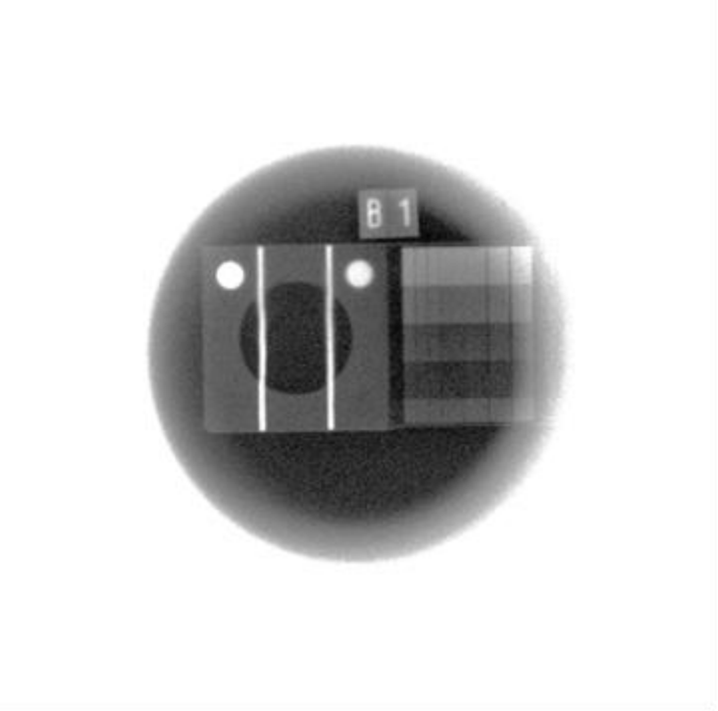


図 3.1.1.(2).⑤-4　 Dy 箔によるイメージング結果(B1)

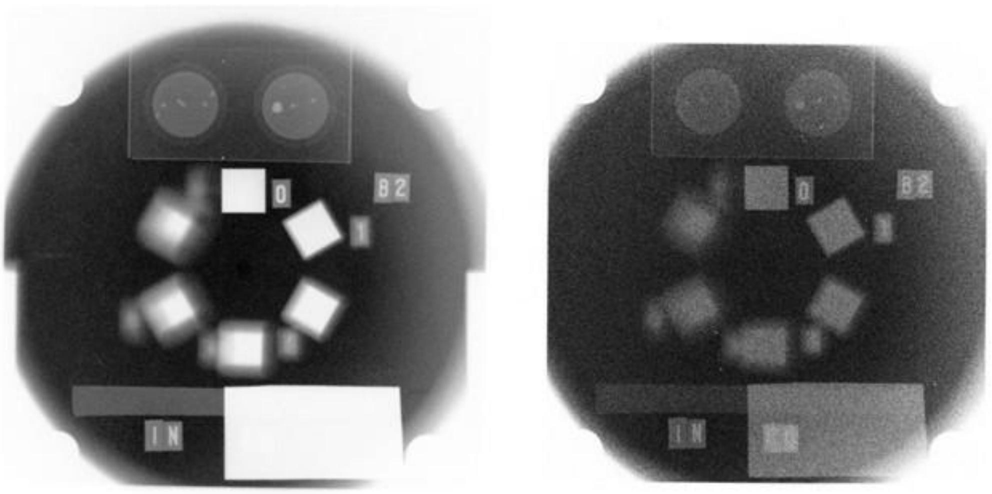


図 3.1.1.(2).⑤-5　B2 条件でのイメージング結果(左：Dy 箔、右:Au 箔)

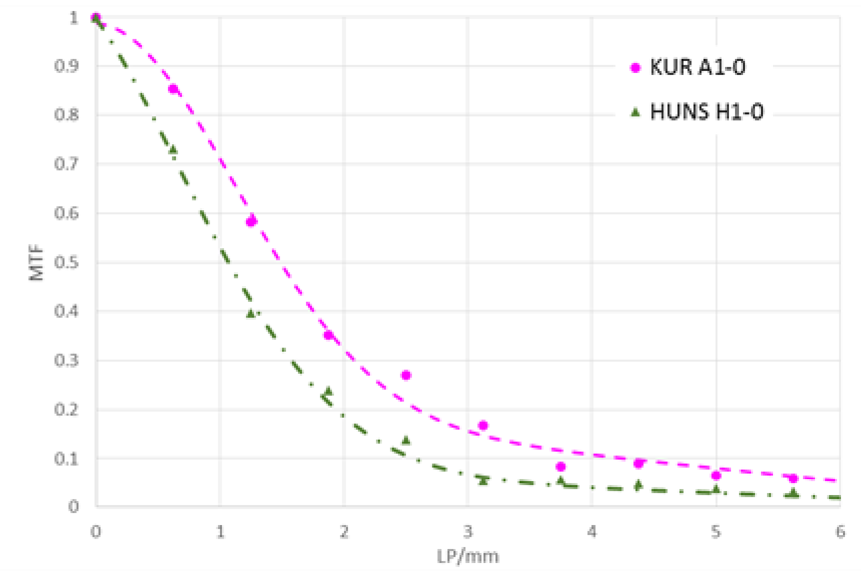


図 3.1.1.(2).⑤-6　京大炉ライナックと HUNS の MTF 比較

参考文献

[1] D. B. Pelowitz, “MCNPX User’s Manual Version 2.5.0” LANL. Report.LA-CP-05-0369 (2005).

[2] K. Shibata, et. al.: ″JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering,″ J. Nucl. Sci. Technol., 48, 1 (2011).

[3] 山下一也, 「放射線画像評価の系譜」医用画像情報学会雑誌 Vol.10, No.1 (1993)

[4]http://www.clg.niigata-u.ac.jp/~medimg/practice_medical_imaging/mtf/3edge/index.htm

3.1.2 Self-indication 法による核種定量技術の高度化（H26～H29）

① 概要

中性子共鳴吸収を利用した核種定量技術は、核種固有の共鳴エネルギーを持った中性子に対する透過量を中性子飛行時間法（TOF 法）によって選択的に検出できることから、非破壊で核種濃度を定量する技術として高い分析能力を有する。しかしながら、MA 含有 TRU 燃料のように、被検体中に含まれる核種数が多く、被検体自身が高い放射能を有している場合、従来から提案されている透過中性子法[1,2]（透過中性子スペクトルをフィッティングして核種濃度を定量する方法）や中性子共鳴分光法[3,4]（被検体からの中性子捕獲ガンマ線を測定し、中性子捕獲事象の変化から核種濃度を定量する方法）をそのまま適用することは困難を伴う。そこで、本事業では透過中性子法と中性子共鳴分光法を結合させた「Self-indication 法」[5,6]を高度化し、MA 含有 TRU 燃料の健全性評価に適用することを目指している。ここで、「Self-indication 法」とは、十分にコリメートした中性子ビームに対し、被検体の下流に分析対象核種から成る高純度の indicator を設置し、indicator からの即発ガンマ線をリアルタイムに計測することによって、透過中性子のエネルギー分布を TOF 法で間接的に測定し、共鳴吸収量から核種濃度を推定する方法である。

平成 26 年度は、核種定量測定に用いる即発ガンマ線検出器として $Bi_4Ge_3O_{12}$(BGO)検出器、高圧電源等の整備を行い、測定システムの性能試験を実施した。平成 27 年度は、厚さの異なる Ta 板を用いて、self-indication 法による核種定量のための予備試験を実施した。被検体の厚さと共鳴吸収割合の相関を示す計量線をあらかじめ数値計算によって求めることにより、実験的に得られる共鳴吸収割合から被検体の厚さを決定する解析法を新たに提案し、予備試験の結果に適用することによって、本手法の妥当性の検証を行った。平成 28 年度は、天然ウラン被検体を用いた self-indicator での捕獲反応の TOF 測定を行った。^{238}U の主要な共鳴に対し実験的に共鳴吸収割合を求め、簡易な数値計算による予測精度の検証を行った。平成 29 年度は、高濃縮ウラン板及び劣化ウラン板を組み合わせることにより、厚さの異なる核燃料物質を用いて self-indication 法による定量技術の実証試験を行った。更に、MA 含有 TRU 燃料を模擬するために MA 核種（^{237}Np）、長寿命核分裂生成核種（^{93}Zr）を積層させた被検体を用いた試験を実施し、MA 含有 TRU 燃料相当の被検体に対する適用性の検証を行った。

② 即発ガンマ線検出器及びデータ収集系の整備（H26）

Self-indication 法による測定では、微量且つ高純度の indicator からの即発ガンマ線を高効率で測定することが求められる。また、TOF 法による測定を行うため、時間分解能もまた要求される。本課題では分離共鳴領域を測定対象としているために、核燃料物質の場合は 500 eV 程度の中性子エネルギーまで測定できれば良いと考えられる。本事業では京大炉ライナックの中性子飛行距離 12 m のビームラインを用いることを想定しているため、500 eV の中性子の飛行時間は約 40 μs であり、1 % 以下の時間分解能を実現するためには検出器の時間応答が 400 ns 以下であれば許容できる。従って、比較的小さいサイズであっても結晶密度が高いため検出効率が高く、減衰定数が 300 ns の BGO 検出器を

選定した。平成 26 年度は、直径 2 インチ、長さ 2 インチのシンチレータが光電子増倍管（浜松ホトニクス社製　H7195）に接続された応用光研工業株式会社製 BGO 検出器を 4 台と ORTEC 社製の高圧電源 1 台を整備した。また、データ収集系としてラボラトリ・イクイップメント社製のマルチチャンネルアナライザ（MCA-BX1）を 1 台整備した。検出器システムの性能試験として図 3.1.2.②-1 に示す様に 2 台の BGO 検出器を対面させるように配置し、検出器間の中心に 130 kBq の ^{137}Cs 標準線源を置いて検出効率を測定した。性能試験では線源から検出器表面までの距離と検出効率の関係を取得したところ、線源から検出器表面までの距離を 5 cm にすると、4 台の BGO 検出器を用いれば約 8 % の検出効率となり、indicator からの中性子捕獲ガンマ線を高効率で測定できる見通しを得た。

③　Self-indication 法を用いた核種定量法の予備試験（H27）

断面積が良く知られている Ta を対象核種として選定し、self-indication 法の予備試験を行った。Self-indicator として厚さ 0.3 mm、28×28 mm の Ta 板を用いた。Indicator からの即発ガンマ線測定には、前年度に整備した BGO 検出器を用いた。Indicator 中心から検出器表面までの距離を 80 mm とし、中性子ビーム入射方向に対して 90 度方向に配置した。BGO 検出器の結晶部分は直径 70 mm の穴開き鉛（厚さ 50 mm）に挿入することで周辺からのバックグラウンドガンマ線から遮蔽する構造とした。また、上流側からのガンマ線を遮蔽するために、ビームライン両側には鉛ブロックの遮蔽を設置した。

予備試験ではビーム上流側に厚さ 0.5 mm、100×100 mm の Ta 板を置いた場合、厚さ 1.0 mm、100×100 mm の Ta 板を置いた場合、被検体を置かなかった場合の測定をそれぞれ 1 時間ずつ行った。京大炉ライナックの運転条件は、パルス幅 33 ns、繰り返し周波数 50 Hz、平均ビーム電流 4.2 μA とした。得られた TOF スペクトルを図 3.1.2.③-1 に示す。^{181}Ta の共鳴として 4.28, 10.36, 13.95, 20.29, 35.90, 39.12 eV の 6 本のピークを観測した。上流側に被検体を置くことによって、各共鳴のピーク部分が減少している様子が分かる。この変化は、上流側の被検体によって共鳴エネルギー付近の透過中性子束が減少したことにより、indicator での中性子捕獲反応率が低下したことに由来する。

ここで、共鳴吸収の減少割合（以下では、Reduction Ratio と呼ぶことにする）を、被検体を置かない測定における正味の共鳴ピーク面積を基準とし、被検体を置いたことによる共鳴吸収による共鳴ピーク面積の減少割合と定義する。共鳴毎の Reduction Ratio と被検体の厚さの関係は、評価済核データを用いて簡易に導出することができる。Ta 被検体に対する self-indication 反応率は評価済核データライブラリ JENDL-4.0[7]を用いて図 3.1.2.③-2 のように求めた。評価値から得られた反応率分布を用いて主要な共鳴に対する計量線を導出し、厚さ 0.5 mm と 1.0 mm の被検体に対して得られた実験値との比較を行った。代表的な例として 10.36 eV 共鳴に対する計量線と実験値の比較を図 3.1.2.③-3 に示す。

4.28 eV、10.36 eV、13.95 eV の共鳴に対して計量線と実験値の比較を行ったところ、4.28 eV と 10.36 eV については計量線と良い一致を示したが、13.95 eV 共鳴については不一致が見られた。不一致の原因としては、中性子発生と同時に発生する強烈な X 線（ガンマフラッシュ）の影響により、ガンマ線検出器の信号のベースラインが揺らいでいるこ

とが考えられる。本結果から、self-indication 法の解析方法の妥当性は示されたものの、核種定量の精度を保証するためにはガンマフラッシュの影響低減が重要な課題であることが分かった。

更に核燃料物質の ^{238}U に対する本手法の適用性についての検討を行った。モンテカルロ・シミュレーション粒子輸送コード MCNP-5[8]を用いて、self-indicator として厚さ 10^{-5} /b の ^{238}U を用いた場合の self-indication 反応率を計算したところ図 3.1.2.③-4 のようになった。6.7 eV から 117 eV まで大小様々な共鳴ピークが観測された。それぞれの共鳴に対して計量線を求めたところ図 3.1.2.③-5 のようになった。核種定量を精度良く行うためには、Reduction Ratio と被検体の厚さが比例関係となっている部分、すなわち Reduction Ratio が 1～10%の領域を用いるのが適切であると考えられる。^{238}U の場合、6.7 eV の単一の共鳴を使った場合、線形性が成り立つ被検体の厚さの範囲は 10^{-6}～10^{-5} /b に限定される。ところが 6.7 eV から 117 eV の 8 本の共鳴を組み合わせて使うことにより、測定可能な被検体の厚さの範囲を 10^{-6}～10^{-2} /b に拡張できる見通しを得られた。

④ 核燃料模擬物質を用いた Self-indication 法の性能試験（H28）

平成 28 年度は、核燃料物質を用いた性能試験を京大炉ライナックの 10m 測定室において行った。本試験は手法の検証を目的したものであるので、本事業で開発中の中性子源及び中性子ビーム輸送系の利用に先立って、従来研究で既に構築された中性子源及び中性子ビームラインを用いて行うことにした。中性子モデレータにはパックマン型と呼ばれる八角形柱の形状をしたアルミニウム容器に封入された軽水を用いた。中性子ビームラインは電子ビーム入射方向に対して 90 度方向に配置されている。self-indicator として 20×20×1.5 mm（原子核数面密度 7.36×10^{-3} /b）の天然ウラン板を用いた。self-indicator は直径 50 mm に絞られた中性子ビームライン上に設置し、中性子源から self-indicator までの距離は 10.1 m とした。

検証実験ではビーム上流側に self-indicator と同じ厚さの 40×40×1.5 mm の天然ウラン板を置いた場合、被検体を置かなかった場合の測定を 2 時間ずつ行った。京大炉ライナックの運転条件は、電子エネルギー約 30 MeV、パルス幅 100 ns、繰り返し周波数 250 Hz、平均ビーム電流 82 μA とした。中性子フラックスを増加させるため繰り返し周波数を増やしたため、低エネルギー中性子が次のバーストに起因する中性子にオーバーラップするのを防ぐために、中性子飛行距離約 5m の位置に厚さ 0.5 mm の Cd カバーを挿入した。被検体を上流に置いた場合と置かなかった場合の TOF スペクトルの比較を図 3.1.2.④-1 に示す。^{238}U の共鳴として 6.67 eV, 20.9 eV, 36.7 eV, 66.0 eV, 80.7 eV, 103.0 eV の 6 本のピークを明確に観測した。上流側に被検体を置くことによって、各共鳴のピーク部分が減少している様子が分かる。実験値からそれぞれの共鳴に対して Reduction Ratio を導出した。

一方、self-indicator 内での中性子捕獲反応事象の時間依存性は、モンテカルロシミュレーションコード MCNP-5 を用いて数値計算によって求めた。数値計算では十分コリメートされた中性子の平行ビームを被検体に入射させ、被検体の下流側に設置された self-indicator 内での中性子捕獲事象に対して tally を取った。共鳴毎に実験と数値計算で得

られたTOFスペクトルの比較を行った。^{238}Uの6.67 eV共鳴に対するTOFスペクトルの形状の比較を図 3.1.2.④-2 に示す。6.67 eV 共鳴に対しては、数値計算によって得られたTOF スペクトルの形状は実験値と良い一致を示した。中性子エネルギーが増加するにつれて、実験値と計算値の形状が少しずつ異なっていく様子が観測されたが、これは数値計算ではパルス中性子源の時間分解能による TOF の拡がりの効果を考慮していないためであると思われる。しかしながら、被検体の厚さを精度良く決定するために必要なのは、数値計算が共鳴ピークの構造を再現することではなく、共鳴毎の Reduction ratio と被検体の厚さの関係が簡易な数値計算によって再現できているかどうかである。そこで、代表的な 6 個の共鳴に対して実験と数値計算から導出した Reduction ratio の比較を表 3.1.2.④-1 に示す。簡易な数値計算によって 6.67 eV 共鳴の Reduction ratio を 1%以内の精度で再現できることを確認した。このことから、Self-indication 法の核種定量法の妥当性を検証することができた。しかしながら、測定対象の被検体の厚さによっては、indicator の厚さと解析に用いる共鳴の選択にも注意を払うことが必要であることが分かった。

⑤ MA含有TRU燃料を模擬した被検体に対するSelf-indication法の実証実験（H29）

平成 29 年度は、高濃縮ウラン板及び劣化ウラン板を組み合わせることにより、厚さの異なる核燃料物質を用いて Self-indication 法による定量技術の実証試験を行った。更に、TRU 燃料を模擬するために MA 核種（^{237}Np）、長寿命核分裂生成核種（^{93}Zr）を積層させた被検体を用いた試験を実施し、TRU燃料相当の被検体に対する適用性の検証を行った。

実験は京大炉ライナックの 12 m 測定室において行った。indicator からの捕獲ガンマ線測定には 3.1.2.②節で整備した 4 台の BGO 検出器に既存の 8 台の BGO 検出器を加えた 12 台のBGO検出器（直径2インチ×長さ2インチ）を用いた。BGO検出器はindicatorを円環状に取り囲むような配置とした。検出器と indicator の間には散乱中性子の遮蔽のために厚さ 4 mm の ^{6}LiF タイル、indicator からのガンマ線遮蔽のために厚さ 10 mm の鉛を設置した。BGO 検出器周りには外部からのガンマ線を遮蔽するために鉛ブロックを設置した。また、indicator に入射する中性子をコリメートするために、indicator の上流側には直径 12mm の穴開きのボロン入りポリエチレンブロックを置き、sample はコリメータの上流側に配置した。図 3.1.2.⑤-1 に実験体系を示す。中性子源から indicator までの中性子飛行距離は 12.5 m とした。BGO 検出器からの Anode 信号は前置増幅器と高速増幅器で波形整形、増幅された後、Dual Sum & Inverter によって足し合わされた。一方、京大炉ライナックの injector 信号をトリガとして基準信号とし、BGO 検出器からの出力信号と同時にデータ収集系に取り込んだ。ライナックの運転条件は、電子の加速エネルギー約 30 MeV、パルス幅 100 ns、繰り返し周波数 300 Hz とし、低エネルギー中性子のオーバーラップを防ぐために、中性子飛行距離約 10 m の場所に厚さ 0.5 mm の Cd フィルターを置いた。実証試験には濃縮度の異なるウランアルミ合金板から成る被検体を用いた。ウランアルミ合金板は 1/2 inch.×1/2 inch.×1 mm^{t} の形状をしており、高濃縮ウラン（濃縮度93%、以下 HU という）、劣化ウラン（濃縮度 0.2%、以下 DU という）の二種類を準備した。実証試験にはHU1枚、HU3枚、DU1枚、DU2枚、DU3枚から成る5種類の被検体を用いた。それぞれの被検体の ^{238}U の実効厚さは、1.49×10^{-5}, 4.47×10^{-5}, 2.11×10^{-4}, 4.22×10^{-4},

6.33×10^{-4} /b である。Indicator には平成 28 年度の性能試験と同じく 20×20×1.5 mm^t（原子核数面密度 7.36×10^{-3} /b）の天然ウラン板を用いた。測定は各被検体に対して 3 時間ずつ行った。

実験で得られた TOF スペクトルを図 3.1.2.⑤-2 に示す。TOF 測定は 1ch. を 100ns として行った。平成 28 年度のビームコリメータの改良と検出器周りの遮蔽強化により、ガンマフラッシュの影響をほとんど受けることなく 300 eV 以下のエネルギー領域で ^{238}U の共鳴を観測することができた。主要な共鳴部分を拡大した TOF スペクトルを図 3.1.2.⑤-3～6 に示す。各共鳴において、共鳴ピーク面積が上流側の被検体の厚さに応じて減少していく様子が観測された。次に、6.7 eV, 20.9 eV, 36.7 eV, 66.0 eV の 4 個の共鳴に対して、実験的に Reduction ratio を導出した。一方、7.36×10^{-3} /b の ^{238}U 厚さの天然ウラン indicator に対して、Reduction ratio と厚さの関係を示す計量曲線を共鳴毎にモンテカルロ・シミュレーションによって導出したところ、図 3.1.2.⑤-7 のようになった。Reduction ratio に対して、計量曲線からの内挿値と実験値の比較を 6.7 eV、20.9 eV、36.7 eV、80.7 eV の 4 個の共鳴に対して行った結果を図 3.1.2.⑤-8～11 に示す。共鳴毎にいずれの共鳴に対しても、DU 板から成る被検体に対しては計量曲線と良い一致を示したが、^{235}U が ^{238}U の 13 倍以上含まれる HU 板に対しては計量曲線との一致は良くなかった。これは ^{238}U 測定における ^{235}U による吸収が不純物の効果として結果に寄与していることに加え、^{238}U の吸収量そのものも少ないことが原因と考えられる。

Reduction ratio の C/E 値を表 3.1.2.⑤-1 に示す。6.7 eV 共鳴については、劣化ウランの測定においては誤差 2～4%の精度で Reduction ratio を取得しているが、DU1, DU3 について C/E 値は誤差の範囲内で 1 である。20.9 eV については C/E 値は 7～12 % 過大となった。この結果は平成 28 年度に実施した性能試験の結果とも整合しており、性能試験によって計量曲線の信頼性が確かめられた 6.7 eV 共鳴を使えば、2 % 以内の精度で ^{238}U の厚さを定量できることが実証できた。測定時間を 4 倍増加させれば統計誤差は 1/2 にできると予測されるため、本実験結果から 12 時間程度の測定を実施すれば精度 1 % の計量が可能であると推察される。また、今回は図 3.1.2.⑤-7 の計量曲線で他の共鳴よりも感度が 1 桁程度小さい 80.7 eV 共鳴についても Reduction ratio を観測することができた。中性子フラックス、測定時間を増加させることにより統計誤差を低減すれば、これらの小さな共鳴も self-indication 法による定量に利用できる可能性があることを示唆する結果を得た。

次に、MA 含有 TRU 燃料を模擬するために、MA 核種（^{237}Np）、長寿命核分裂生成核種（^{93}Zr）を積層させた被検体を用いた試験も行った。^{237}Np 被検体は直径 30 mm のアルミニウム容器の内径 20 mm の領域にペレット状の酸化ネプツニウム（約 1g）が封入されたものであり、26 MBq の放射能を有する密封 RI 線源である。^{93}Zr 被検体は直径 30 mm のアルミニウム容器の内径 20 mm の領域にペレット状の酸化ジルコニウム（約 3.31 g, 同位体濃度約 19 %）が封入されたものであり、47 MBq の放射能を有する密封 RI 線源である。^{237}Np 被検体、^{93}Zr 被検体, DU 被検体を積層した場合についても self-indication 法の測定を行った。また、比較のために indicator として ^{10}B 被検体（厚さ 8 mm）を用いた測定も行った。後者の測定は透過中性子を ^{10}B に吸収させることによって、即発ガンマ線測定

によって透過中性子を間接的に測定することになるので、透過中性子法と同等の測定とみなすことができる。^{10}B を用いた透過中性子の TOF スペクトルと天然ウラン板を indicator とした場合の self-indication の TOF スペクトルを図 3.1.2.⑤-12、3.1.2.⑤-13 に示す。透過中性子法では ^{237}Np 等の不純物による共鳴吸収の dip が観測されているが、self-indication の TOF スペクトルには ^{238}U の共鳴吸収以外の構造は観測されなかった。このことをもって、MA 含有 TRU 燃料のように MA 核種や長寿命核分裂生成物を含む被検体に対しても self-indication 法が適用可能であることを実証することができた。

⑥ MA 含有 TRU 燃料への適用性の検討（H29）

MA 含有 TRU 燃料に対する核種定量の最終目標は、燃料中に含まれる ^{239}Pu の定量を可能にすることである。ところが実際の MA 含有 TRU 燃料を用いた実証試験を行うことは困難であるため、想定される TRU 燃料の核種組成に基づいて数値計算によって ^{239}Pu 定量の可能性について検討を行った。MA 含有 TRU 燃料に含まれる主要な核種は、核燃料物質としては ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu, ^{238}U、MA 核種としては ^{237}Np, ^{241}Am である。典型的な MA 含有 TRU 燃料組成のデータは文献[9]から引用した。Pu 富化度を 26.5 wt%、TRU 富化度を 33.1 wt%、MA 含有率を 6.6 wt%とし、燃料の密度には理論密度である 11 g/cm^3 を採用した。また、燃料体の厚さは 1cm とした。文献[9]から引用した Pu 同位体、MA 核種の TRU 中の組成を表 3.1.2.⑥-1 に示す。また、TRU を除く 66.9 wt%が ^{238}U で構成しているものと仮定した。

JENDL-4.0 から引用した主要 8 核種の全断面積の比較を図 3.1.2.⑥-1 に示す。図から分かるように、^{239}Pu の共鳴近傍には ^{239}Pu 以外の核種の共鳴が乱立している。次に JENDL-4.0 の断面積データと核種数密度データから燃料体における巨視的断面積を導出し、透過中性子割合のエネルギー依存性を算出したところ図 3.1.2.⑥-2 のようになった。比較のために TRU 燃料と同じ数密度の純度 100%の ^{239}Pu に対する中性子透過割合のエネルギー依存性もプロットした。5～30 eV の領域を拡大したものを図 3.1.2.⑥-3 に示す。^{239}Pu 共鳴のうち離散的に観測されている 4 つの共鳴（7.82 eV, 17.66 eV, 22.27 eV, 26.27 eV）を評価対象に選定した。

次に厚さ 10^{-3} /b の ^{239}Pu の indicator を用いた場合の self-indication 反応率を算出した。Indicator として選定した ^{239}Pu の場合、中性子捕獲反応よりも核分裂反応が支配的になるので、indicator からの核分裂生成物の測定をしたときに得られる self-indication 反応率を算出した。被検体を置かない場合、TRU 燃料を置いた場合、TRU 燃料と同じ数密度の純度 100%の ^{239}Pu を置いた場合の self-indication 反応率のエネルギー依存性を図 3.1.2.⑥-4 に示す。5～30eV の領域を拡大したものを図 3.1.2.⑥-5 に示す。4 つの共鳴（7.82 eV, 17.66 eV, 22.27 eV, 26.27 eV）では tail 部分で隣接する不純物核種の共鳴吸収の影響を受けるものの、共鳴ピークにおいて有意な反応率の低下が観測された。

従来の中性子透過法と self-indication 法を比較するため、4 つの共鳴に対してそれぞれの手法の Reduction Ratio を算出した。その結果を図 3.1.2.⑥-7 に示す。どちらの手法も不純物の影響によって、TRU 燃料の Reduction Ratio は純度 100%の ^{239}Pu 被検体に比べて過大になっている。しかし、中性子透過法の補正量が 30～85%であるのに比べて、

self-indication 法の補正量は 10%以下に収まっていることが確認できた。このように、MA 含有 TRU 燃料に対しても 10%程度の不純物補正を適切に行えば、self-indication 実験によって簡便に測定可能な Reduction Ratio を用いて、^{239}Pu の定量を一意的に決定できる見通しを得た。

⑦ まとめ

「Self-indication 法による核種定量技術の高精度化」では、対象核種の複数の共鳴を同時且つ簡便に解析する手法を開発し、核種濃度定量の高精度化を行うことを目的とした。平成 26 年度から平成 27 年度にかけて実験設備の整備及び予備試験を実施し、10eV 以上のエネルギー領域では、ガンマフラッシュの影響により indicator からの中性子捕獲ガンマ線の一部を数え落としている可能性があることを見いだした。平成 28 年度には中性子源及び中性子輸送系の改良によって、ガンマフラッシュの影響が十分低減され、Self-indication 法を用いるのに適した場となっていることを実験的に確認した。更に、被検体中の不純物核種が定量評価に与える影響を低減するための解析法についても検討したところ不純物を含む被検体に対しても Self-indication 法が適用可能であることを確かめることができた。平成 29 年度では、核燃料物質として DU 板及び HU 板を用いた実験を実施し、精度 2 % で ^{238}U 濃度の定量に成功した。本実験結果から測定時間を 4 倍にすれば精度 1 % の計量が可能であるとの知見を得た。以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。更に、TRU 燃料を模擬するために、^{237}Np、^{93}Zr, DU を積層した場合についても self-indication 法の測定を行った。その結果、TRU 燃料に対しても self-indication 法が適用可能であることが実証できた。

表 3.1.2.④-1 実験及び数値計算から求めた各共鳴の Reduction Ratio の比較

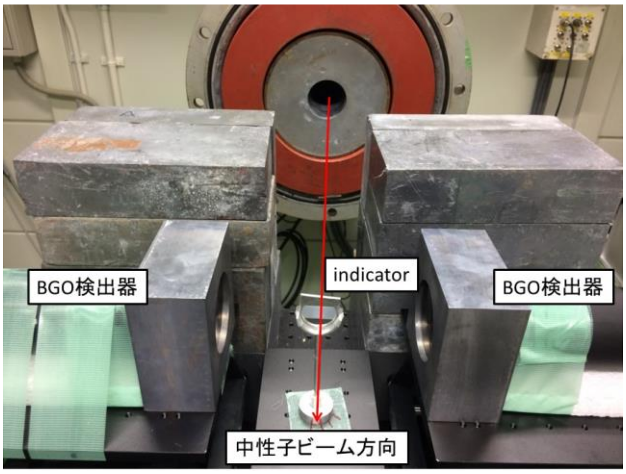
Resonance(eV)	exp.	calc.	C/E	error(%)
6.67	0.686 ±0.005	0.679	0.99 ± 0.01	0.8
20.9	0.683 ±0.008	0.718	1.05 ± 0.01	1.2
36.7	0.637 ±0.008	0.702	1.10 ± 0.01	1.3
66.0	0.675 ± 0.026	0.708	1.05 ± 0.04	3.8
80.7	0.558 ± 0.043	0.616	1.10 ± 0.08	7.7
103.0	0.689 ± 0.031	0.673	0.98 ± 0.04	4.5

表 3.1.2.⑤-1　Reduction ratio の実験値と計算値の比較

sample	6.7eV		20.9eV		36.7eV		80.7eV	
HU1	1.21 ±	0.52	1.59 ±	0.91	16 ±	111	−	
HU3	0.43 ±	0.02	0.46 ±	0.03	0.60 ±	0.06	−	
DU1	0.99 ±	0.04	1.10 ±	0.05	0.99 ±	0.06	1.52 ±	3.97
DU2	0.95 ±	0.02	1.07 ±	0.04	0.98 ±	0.04	1.05 ±	0.96
DU3	1.01 ±	0.02	1.12 ±	0.03	1.05 ±	0.04	1.23 ±	0.49

表 3.1.2.⑥-1　典型的な MA 含有 TRU 燃料の TRU 核種組成

TRU核種	組成(%)
Np-237	7.81
Pu-238	3.61
Pu-239	48.95
Pu-240	26.67
Pu-241	3.19
Pu-242	9.54
Am-241	0.33



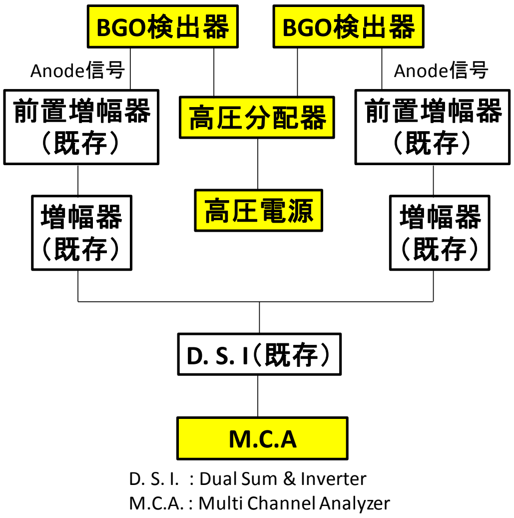


図 3.1.2.②-1　性能試験における検出器配置図

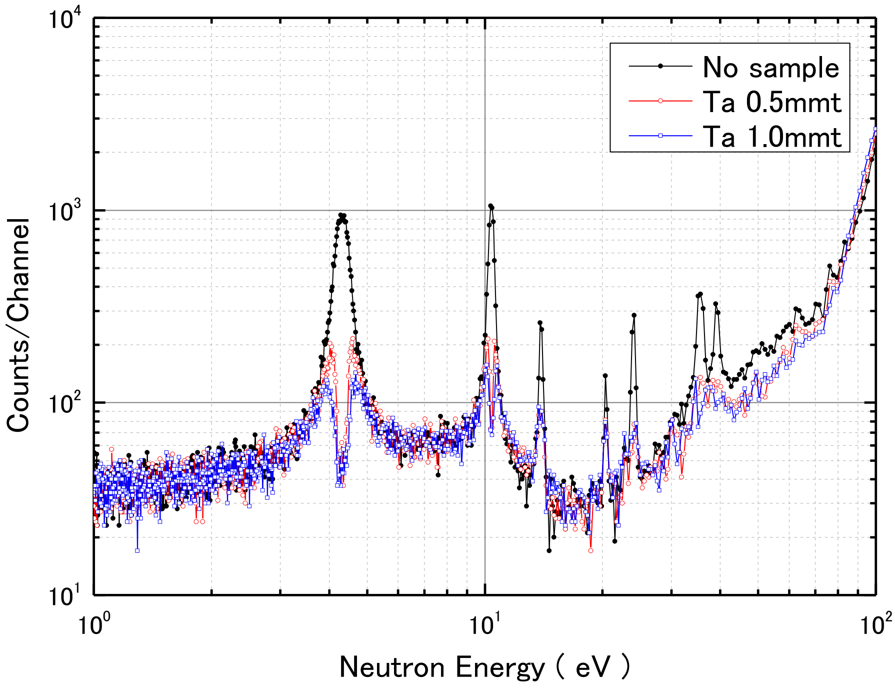


図 3.1.2.③-1　self-indication 予備実験で得られた TOF スペクトルの比較
（横軸を中性子エネルギーに変換したもの）

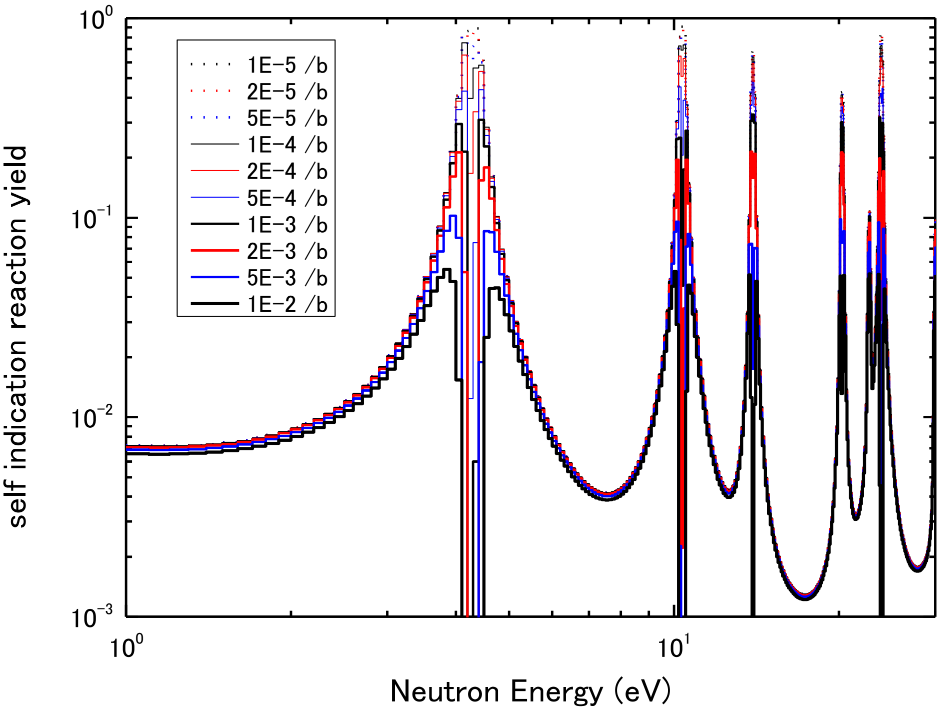


図 3.1.2.③-2　JENDL-4.0 の評価値を用いて導出した Ta に対する self-indication 反応率の変化

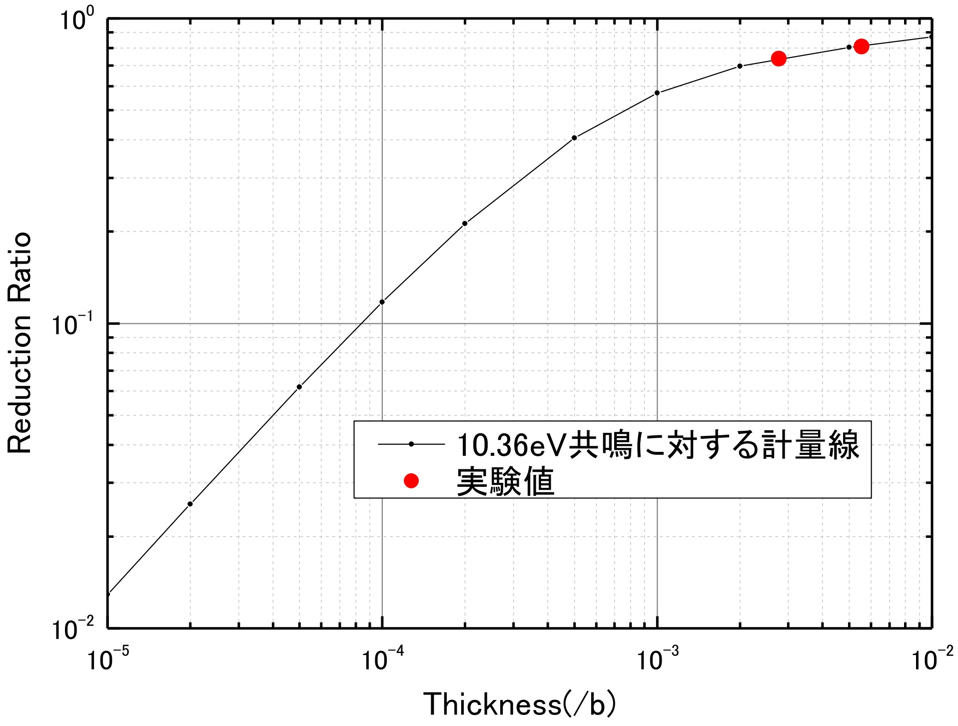


図 3.1.2.③-3　 Ta の 10.36 eV 共鳴に対する計量線と実験値の比較

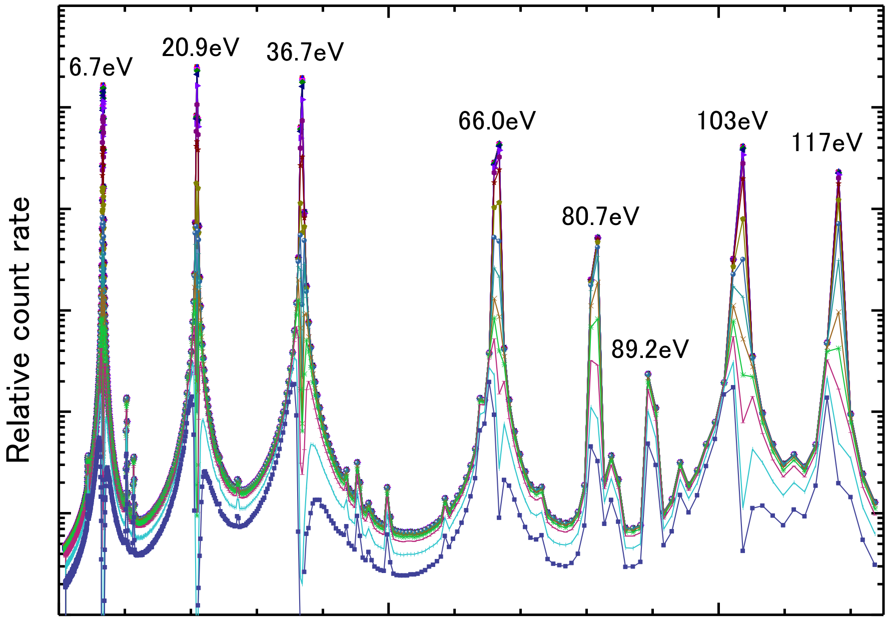


図 3.1.2.③-4　^{238}U に対する self-indication 反応率の計算結果

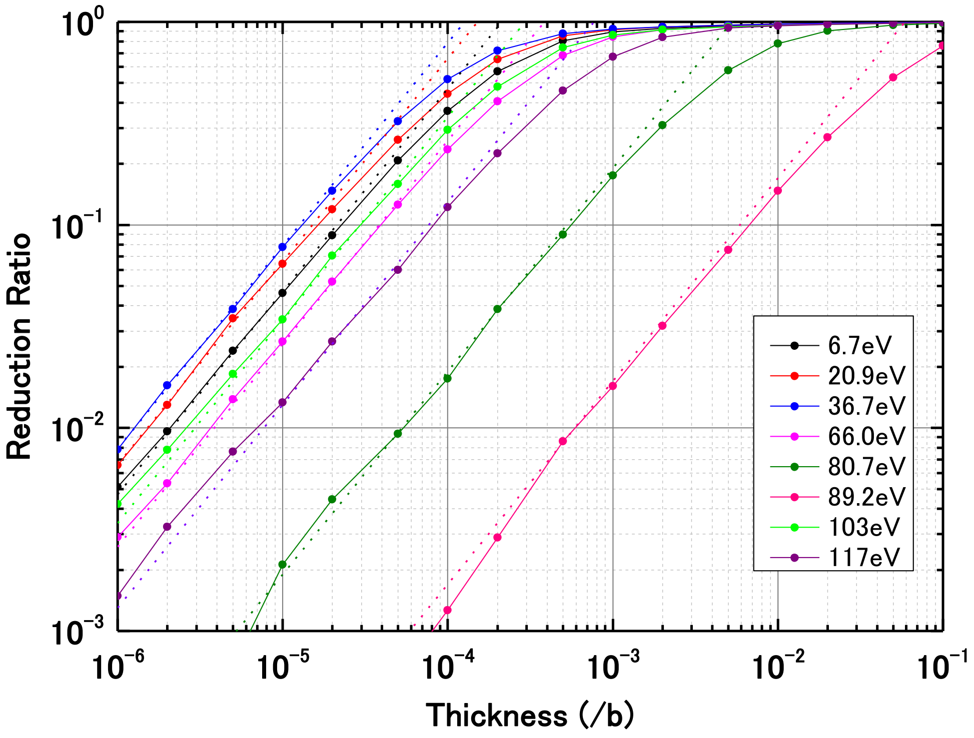


図 3.1.2.③-5　^{238}U の各共鳴に対する計量線

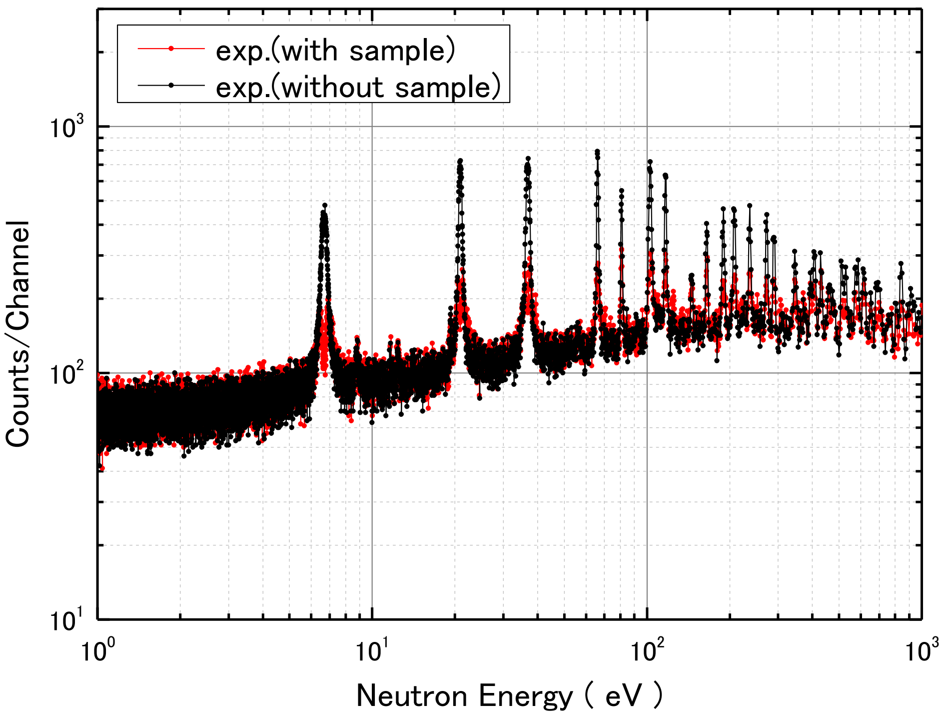


図 3.1.2.④-1 self-indication 法の性能試験で得られた TOF スペクトル

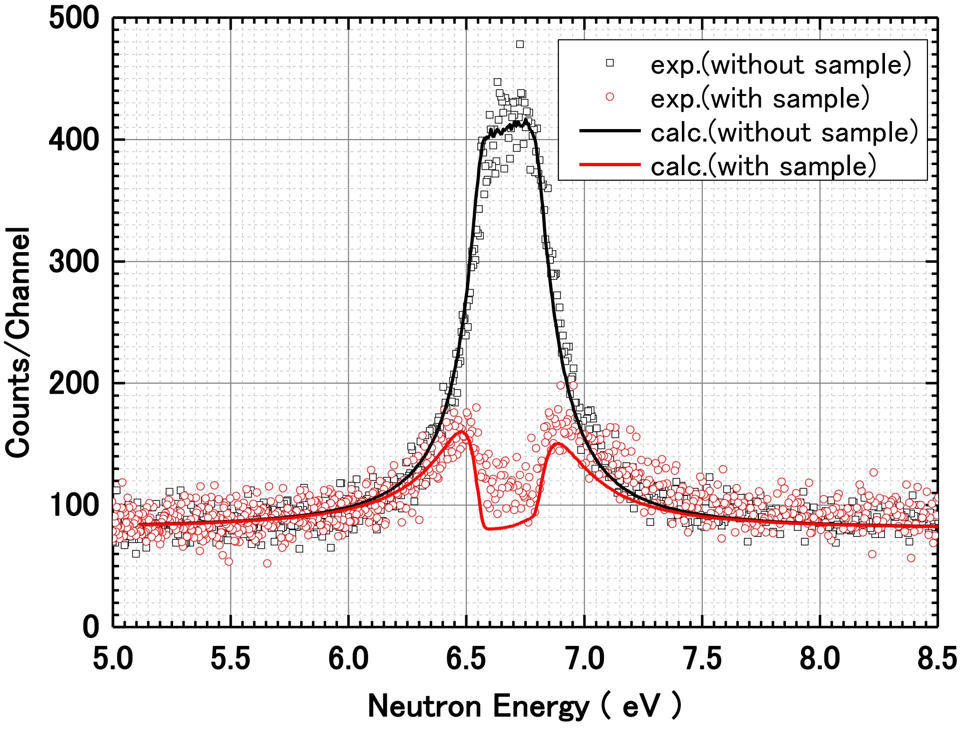


図 3.1.2.④-2　^{238}U の 6.67 eV 共鳴に対する計算値と実験値の比較

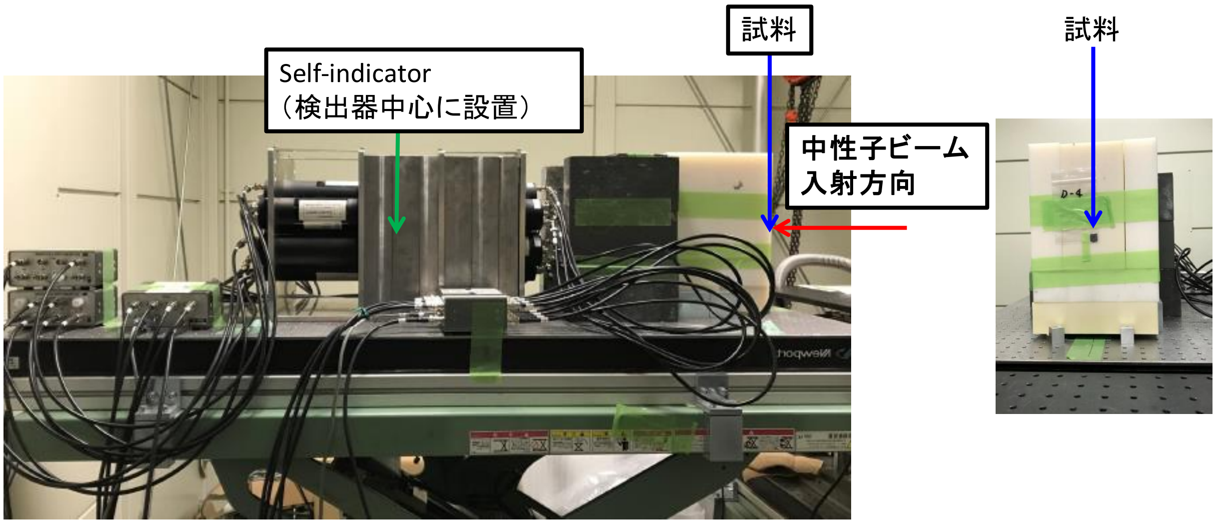


図 3.1.2.⑤-1 self-indication 実証試験の測定体系の写真

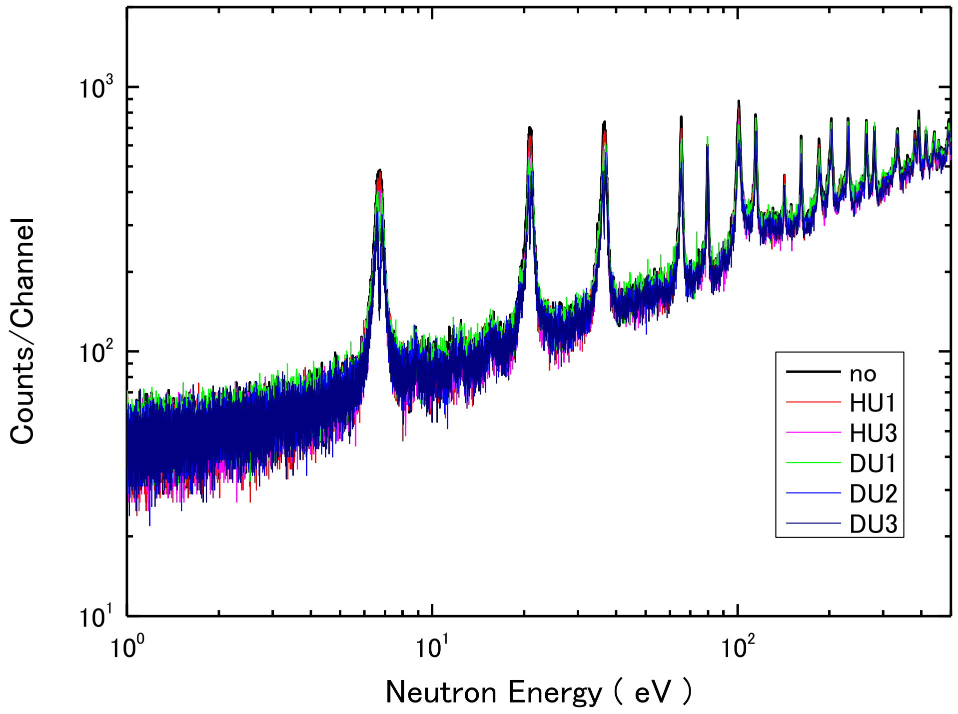


図 3.1.2.⑤-2　self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル
(横軸を中性子エネルギーに変換)

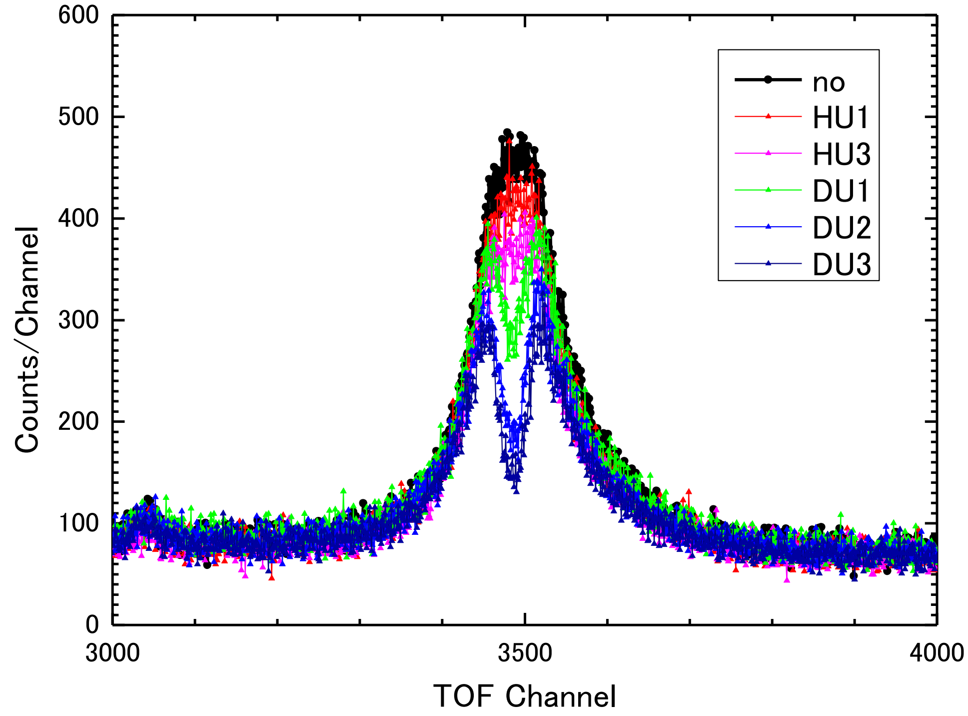


図 3.1.2.⑤-3　self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル (6.7 eV 共鳴)

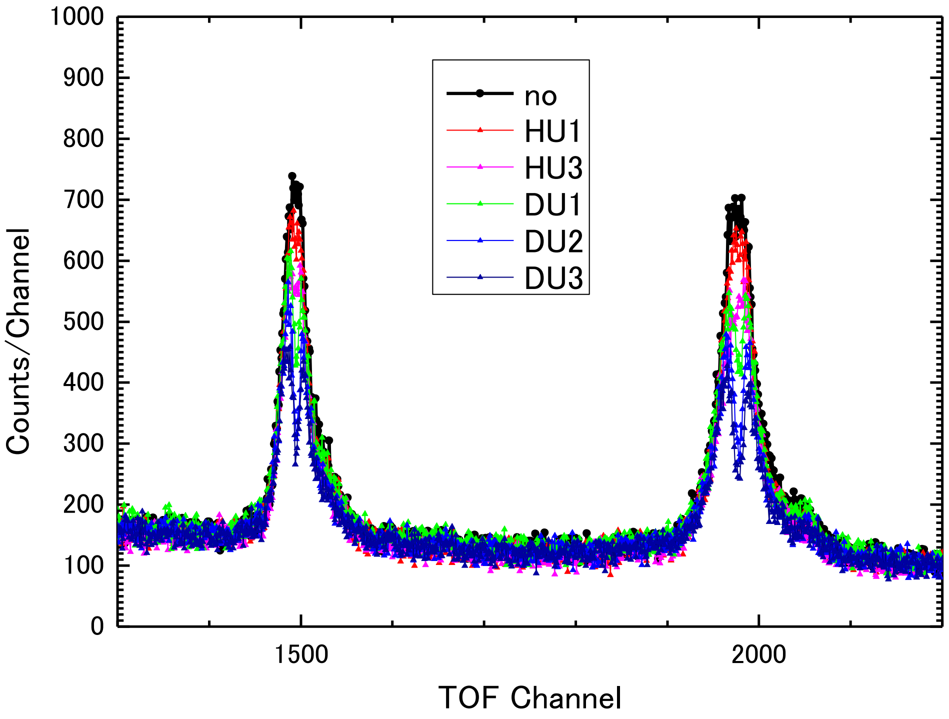


図 3.1.2.⑤-4　self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル
(20.9, 36.7 eV 共鳴)

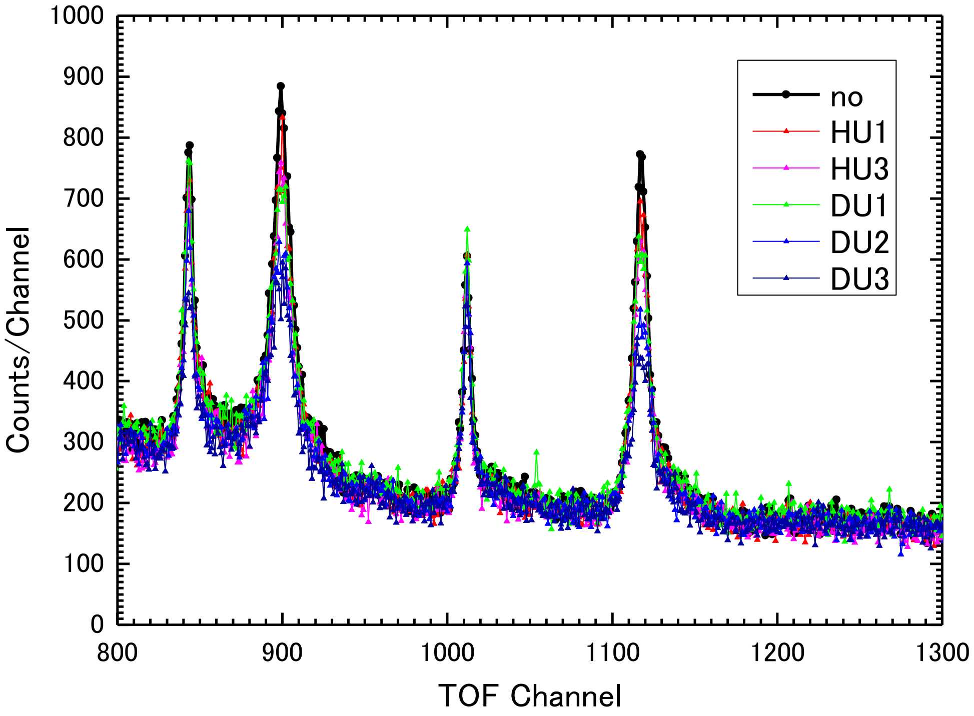


図 3.1.2.⑤-5　self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル (66～117 eV 共鳴)

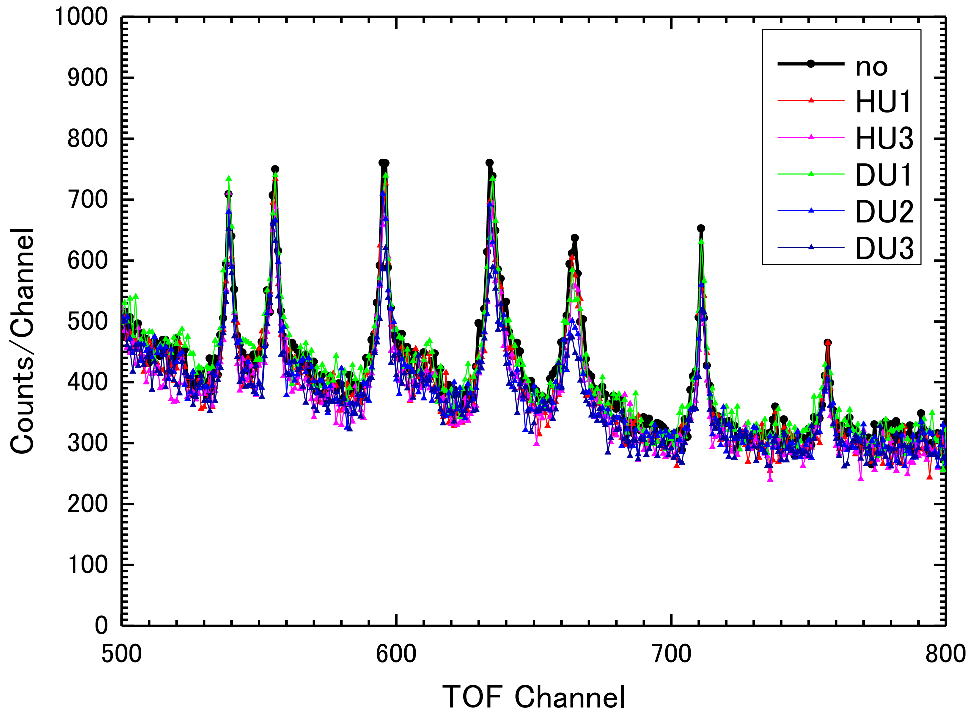


図 3.1.2.⑤-6　 self-indication 法の実証試験で得られた TOF スペクトル
(146～291 eV 共鳴)

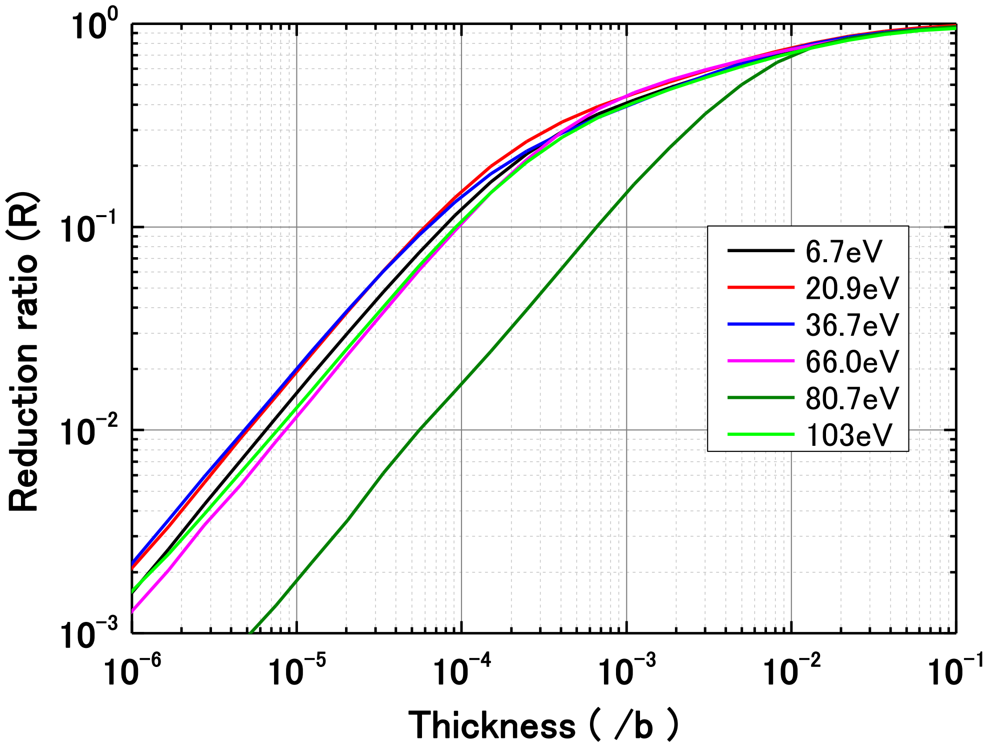


図 3.1.2.⑤-7　^{238}U の各共鳴に対する計量線（^{238}U の厚さ 7.36×10^{-3} /b の場合）

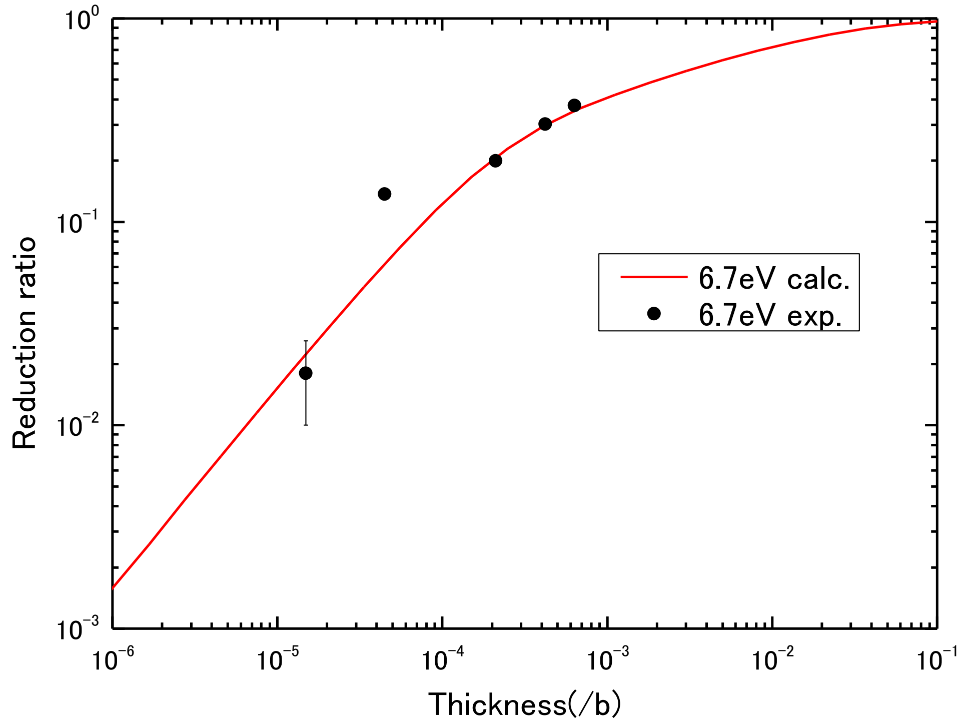


図 3.1.2.⑤-8　^{238}U の 6.7 eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較

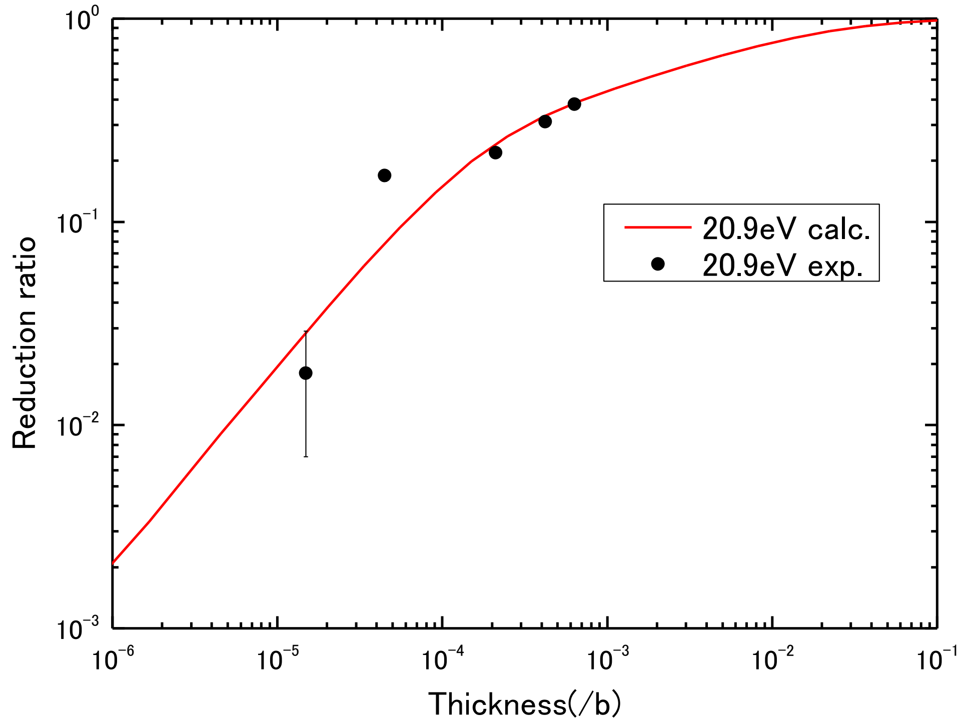


図 3.1.2.⑤-9　^{238}U の 20.9 eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較

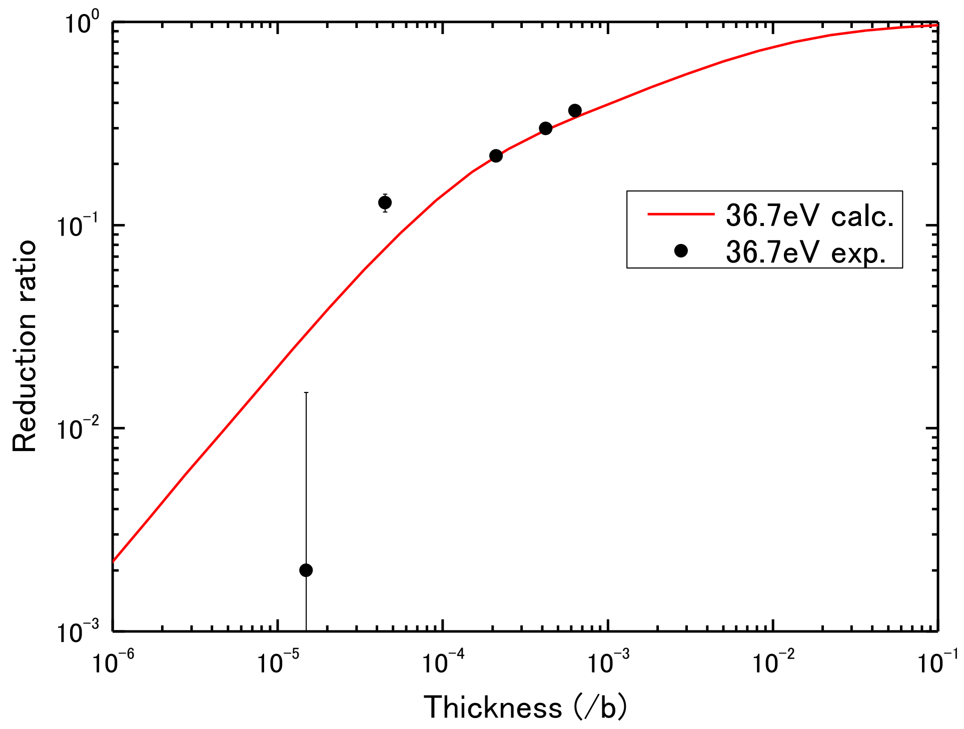


図 3.1.2.⑤-10　^{238}U の 36.7 eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較

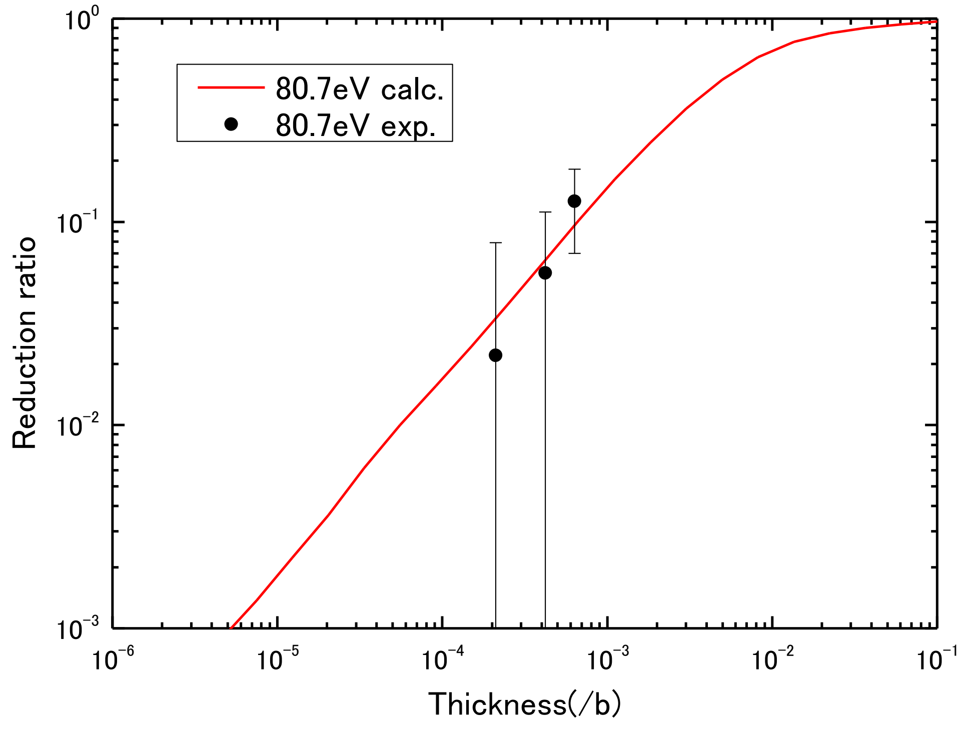


図 3.1.2.⑤-11　^{238}U の 36.7 eV 共鳴に対する計量曲線と実験値の比較

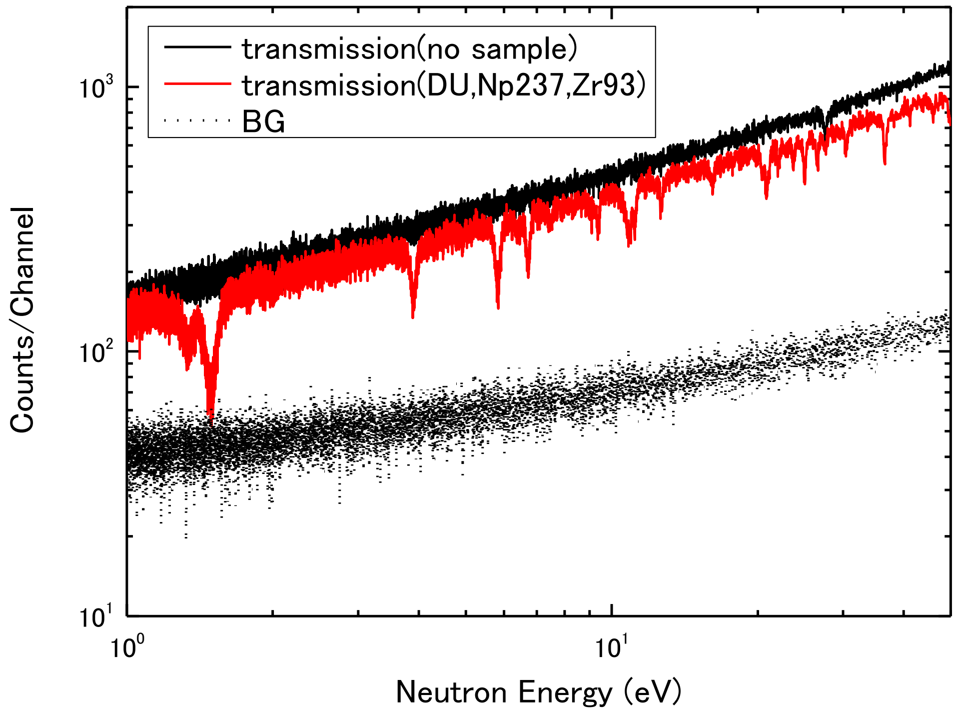


図 3.1.2.⑤-12　^{237}Np, ^{93}Zr, DU を積層させた被検体に対する透過中性子スペクトル

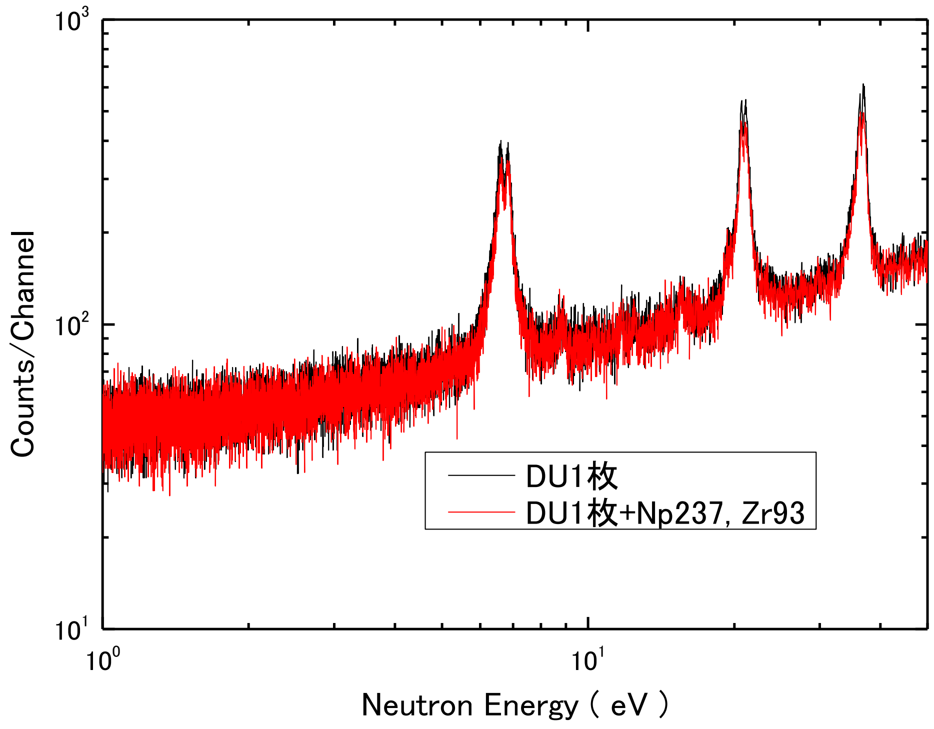


図 3.1.2.⑤-13　^{237}Np, ^{93}Zr, DU を積層させた被検体に対する self-indication の TOF スペクトル

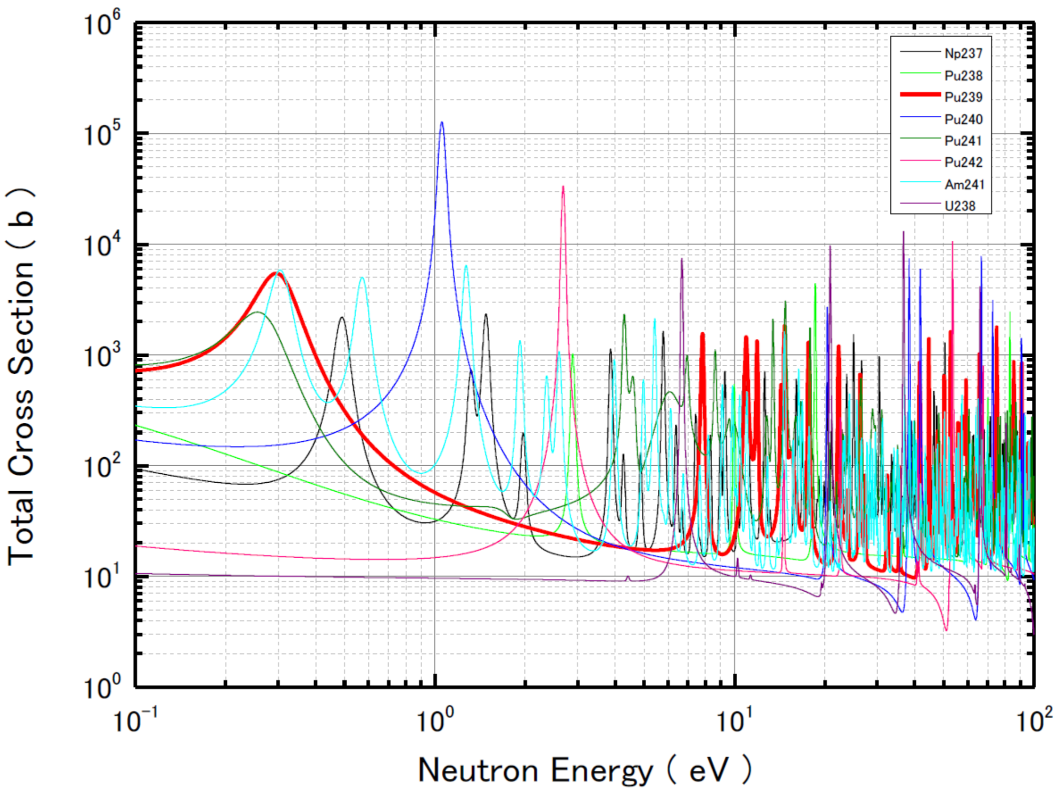


図 3.1.2.⑥-1　MA 含有 TRU 燃料中の主要核種の全断面積

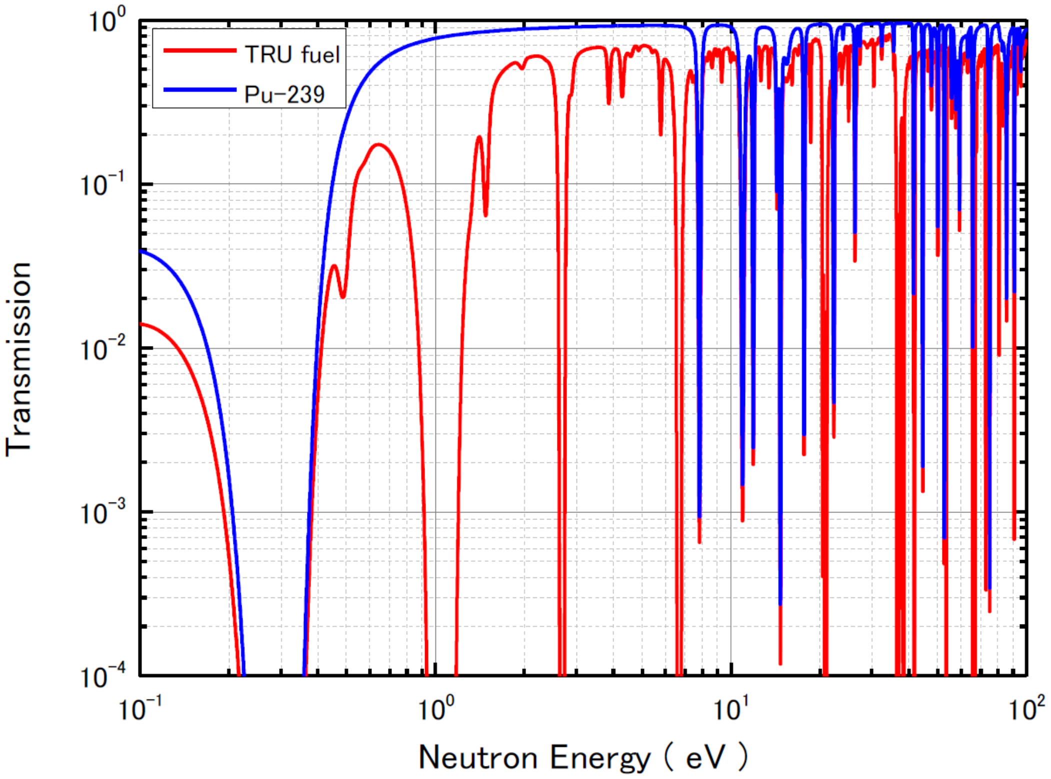


図 3.1.2.⑥-2　TRU 燃料と ^{239}Pu に対する透過中性子割合の比較

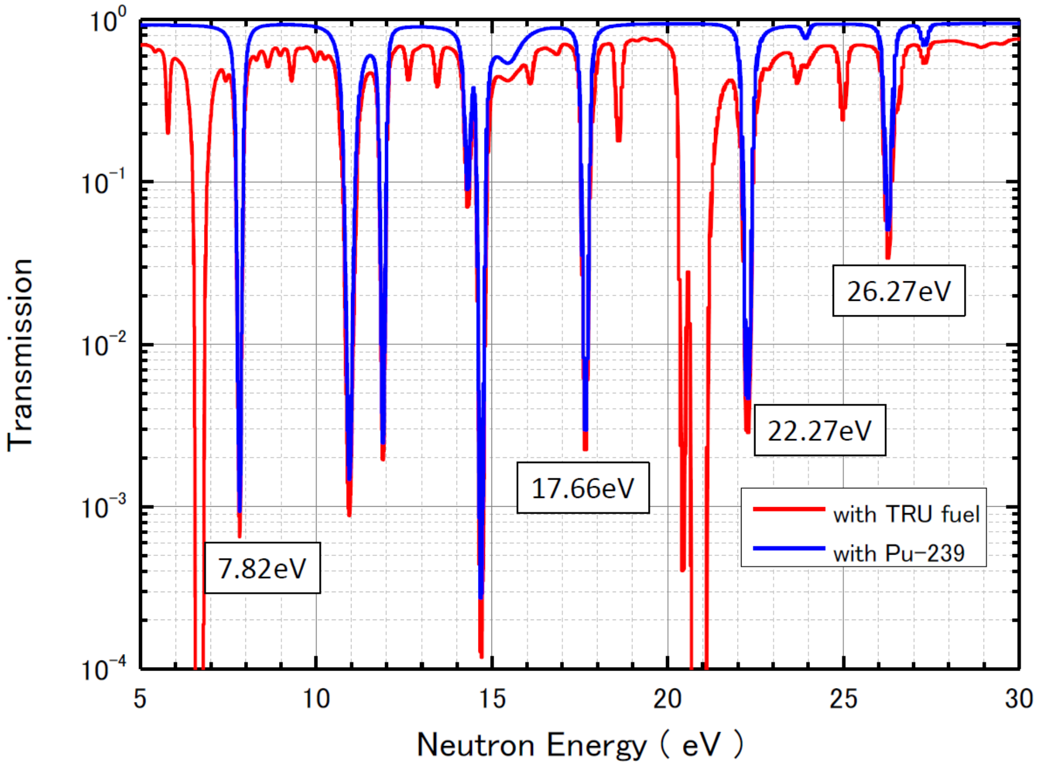


図 3.1.2.⑥-3　TRU 燃料と ^{239}Pu に対する透過中性子割合の比較（5-30eV 領域）

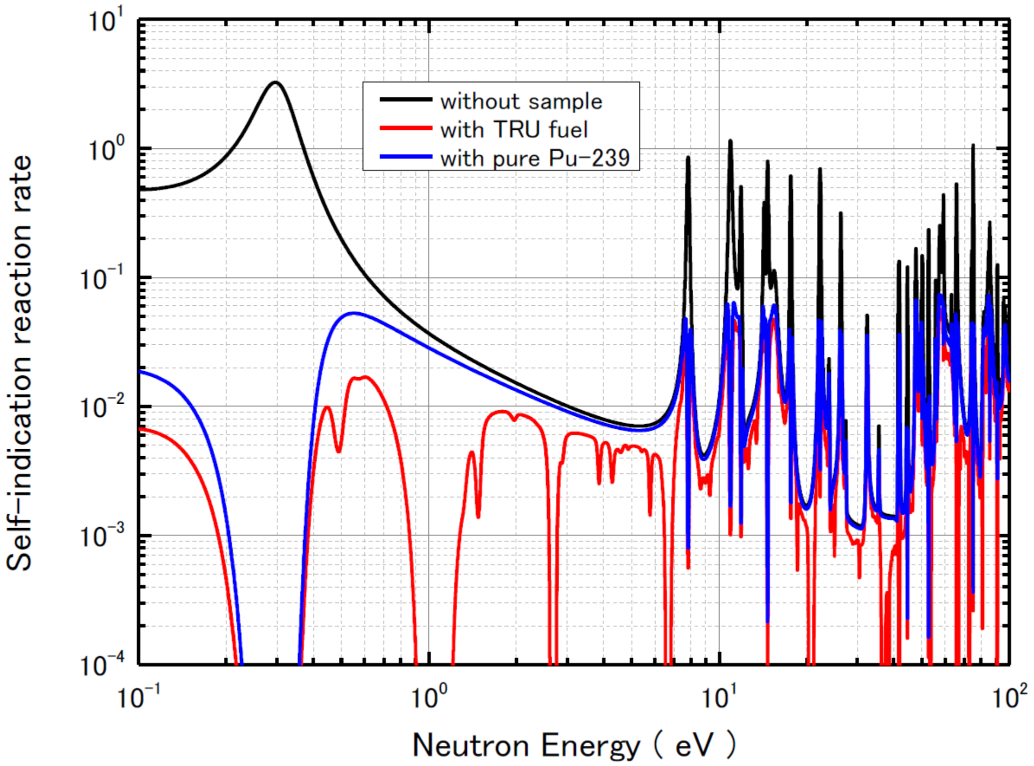


図 3.1.2.⑥-4　TRU 燃料と ^{239}Pu に対する self-indication 反応率の比較

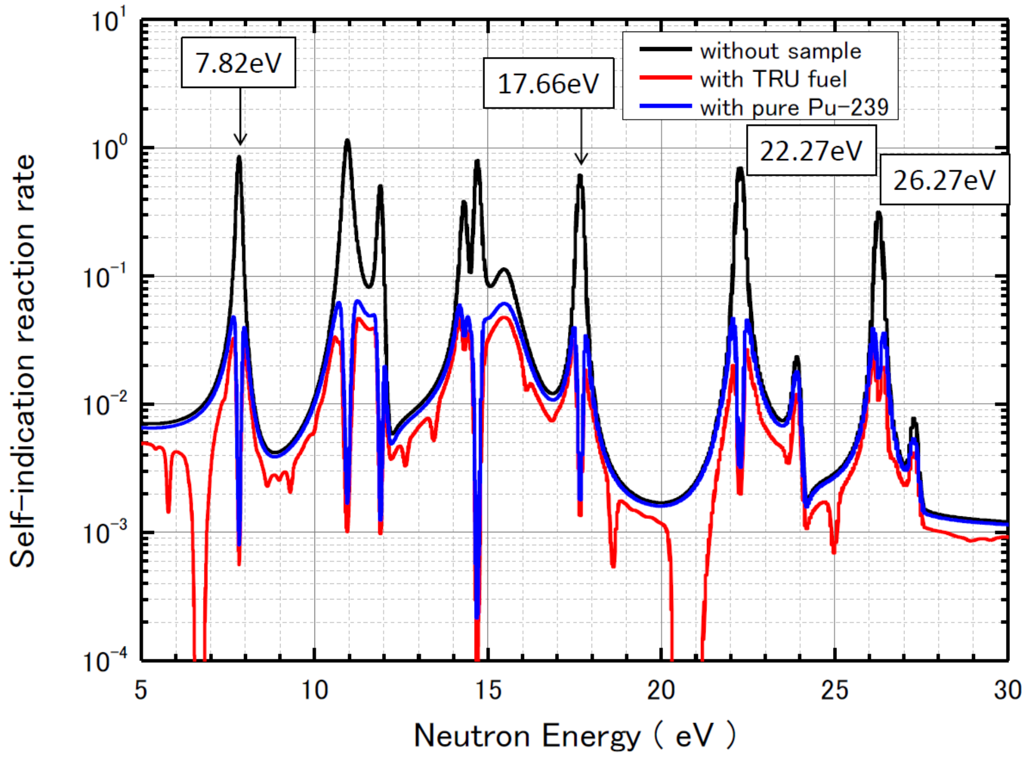


図 3.1.2.⑥-5　TRU 燃料と ^{239}Pu に対する self-indication 反応率の比較
(5-30eV 領域)

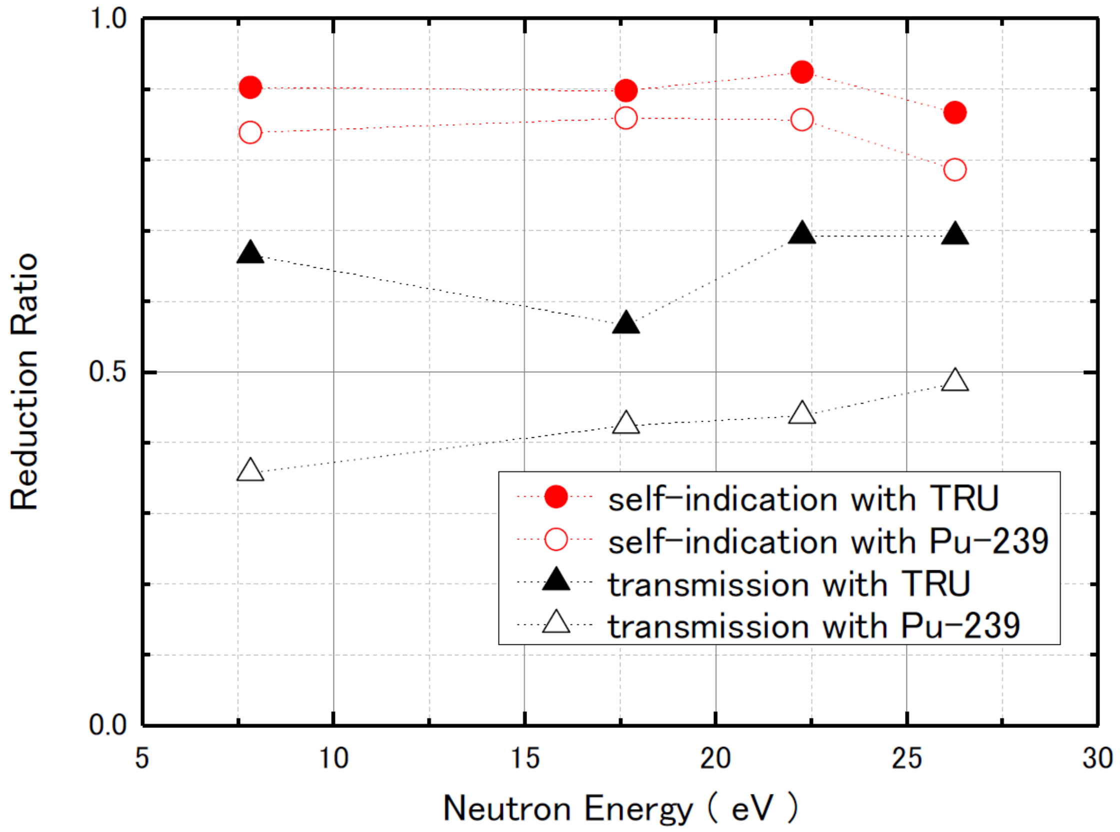


図 3.1.2.⑥-6　透過中性子法と self-indication 法の Reduction Ratio の比較

参考文献

[1] R. A. Schrack *et al.*, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **NS-28**, 1640-1643 (1981).

[2] J. W. Behrens *et al.*, *Nucl. Technol.,* **67**, 162-168 (1984).

[3] Y. Kiyanagi *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **42**, 3, 263-266 (2005).

[4] A. Pietropaolo *et al.*, *Applied Spectroscopy*, **64**, 9, 1068-1071 (2010).

[5] J. Hori *et al.*, *Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal*, Springer, pp. 21-29 (2014).

[6] T. Sano *et al.*, *Nuclear Back-end and Transmutation Technology for Waste Disposal, Springer*, pp. 31-37 (2014).

[7] K. Shibata *et al.*, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **48**, 1-30 (2011).

[8] J. F. Briesmeister (Ed.),Report no. LA-13709-M (2000).

3.1.3　パルス中性子イメージング技術の高度化（H26～H29）

(1)　北大ライナックを用いた研究（再委託先：北海道大学）（H26～H29）

①　概要

中性子共鳴吸収分光法では一般的な中性子散乱法の場合より高速な熱外中性子を用いる必要があるため、平成26年度から平成29年度にかけて、北海道大学内の電子線型加速器を用いた中性子実験施設（HUNS）を利用して、パルス状の中性子ビームを用いたイメージング手法の高度化を図った。まず、平成26年度から平成27年度の間の事業前半部では中性子飛行時間分解能を高めた中性子2次元検出器及びそのエレクトロニクスの開発と性能の検討を実施した。その後の平成28年度から平成29年度にかけては、パルス中性子を用いた中性子ラジオグラフィ画像の取得実験を実施した。

②　中性子-光コンバータと光電子増倍管を組み合わせた高時間分解能型中性子検出器の試作(H26)

中性子共鳴吸収分光法では一般的な中性子散乱法より高速な熱外中性子を用いる必要があるため、加速器を利用したパルス中性子源を用いる共鳴吸収イメージングでは、効率の良い透過測定体系を構築できるように、できるだけ空間分解能を高めた2次元中性子検出と同時に、中性子パルスの時間構造を利用できるように高速動作が可能な検出器システムを利用する必要がある。飛行時間法を利用する中性子イメージング用の2次元検出器は現在までにいくつかの形式の検出器が検討・試験されているが、中性子の検出効率、被検体を置かないダイレクトビームの測定に必要な高い計数率といった能力が必要とされるため、現在のところこれらを比較的満足する2次元位置敏感型の検出器は限られる。

これまでに最も成功したといえる検出器はシンチレータをアノード型のマルチ光電子増倍ユニット(MPMT)に直接装着した形式の^{6}Li ガラスシンチレータ直読型検出器で、現在8×8もしくは16×16ピクセルで計数型の2次元検出が可能であり、検出レートも最大27MHzと現状の計数型検出器では最大である。しかしながら、この検出器では空間分解能は1ピクセルが2×2mm程度になり、比較的巨視的な2次元空間を調べるためには利用できるが、本事業で目指すサブmmの空間分解能には適応できていない。他方、新しい考え方の時間分解2次元検出器として中性子イメージャーと高速度カメラを組み合わせてデジタルカメラの空間分解能で時間分解撮影をする検出器も開発されており、高い空間分解能と広い輝度ゲインから利用が期待されるところであるが、記録画像の転送速度の限界から、中性子共鳴吸収ピーク形状の解析が必要となる定量的中性子共鳴吸収分光法では現時点で使用は難しい。しかしながら、中性子イメージャーとしてパルス中性子源で使用実績のある中性子カラーイメージインテンシファイア(CNII, 東芝製)は空間分解能が高い中性子-光コンバータであるため、平成26年度はこれと高速動作可能なマルチアノード型光電子増倍管ユニット(MPMT)を組み合わせて、本事業で計画されている中性子-光変換シンチレータとMPMTのモデル検出器として試作、試験測定を実施した。

図 3.1.3.(1).②-1 に試作検出器体系の概念図を示す。中性子イメージャーには既存の CNII を利用し、出力された可視光イメージはピント合わせ用のレンズを含む光学系

を通してマルチアノード型光電子増倍管に接続する。マルチアノード型光電子増倍管としては、2.3 mm 角の光電子増倍管モジュールが 8×8 個束ねられた 64ch.MPMT(浜ホト、H7546)、或いは 2.7 mm 角のモジュールを 16×16 個束ねた 256ch.MPMT(浜ホト、H9500)を利用する。これにデータ収集系として連携機関である高エネルギー加速器研究機構で開発された重心処理可能な飛行時間分析用モジュール LiTA12e を組み合わせて飛行時間測定を実施した。図 3.1.3.(1).②-2 には得られた飛行時間スペクトルを示す。64ch.及び 256ch.の光電子増倍管でそれぞれ得たスペクトルを示すが、短い飛行時間のバーストから室温に熱化された中性子のピークまで、熱中性子源の中性子スペクトルをきれいに再現している。64ch.と 256ch.では、それぞれの特性やピクセルサイズの違いから厳密に 4 倍の強度差とはならないが、概ねピクセル数に比例した強度が得られており、飛行時間測定が可能なデータ収集系と確認できた。図 3.1.3.(1).②-3 に 64ch.光電子増倍管を用いて焦点の合ったインフォーカス状態で撮影されたイメージを示す。インフォーカス状態であるため、8×8 のピクセルを反映した解像度となっていることがわかる。これを超解像度化するためにアウトフォーカス測定したデータファイルから重心処理計算により擬似的にピクセルを 4 分割(2×2)した結果が図 3.1.3.(1).②-4 である。重心計算をするとピクセルサイズによるジャギーが減り、ボロンゴムの縁の直線がより明確に見て取れ、検出器のピクセル数以上の高分解能化が可能となることが分かった。

③ GEM 型高空間分解能ガス検出器の特性評価と試作高時間分解能型中性子検出器の比較 (H27)

中性子共鳴吸収分光法では熱外中性子を用いる必要があるため、一般的な中性子散乱法の場合より高速な中性子を飛行時間分析しなければならない。即ち、検出システムでは時間応答性の高い必要があるが、これには、中性子を検出する過程の応答性や検出した中性子の信号を高速に記録する反応性等、複数の要素が影響する。ガスを検出媒体とする 2 次元検出器は飛行時間分析用検出器の 1 つの候補と成り得るが、中性子と成分が反応した後の電荷の移動とその回復に要する時間や、高エネルギー中性子の検出効率の下落という問題点がある。しかしながら、これまでの一般的な実績から、本研究で主要な検出対象となる数 100eV 程度の熱外中性子の飛行時間分析には適用可能と期待できる。ここでは、2 次元検出が可能であり、小型加速器中性子源における透過測定にも実績がある高空間分解能ガス検出器である GEM 型検出器をガス検出器として選択し、その特性を評価した。また、それとともに、平成 26 年度に試作した中性子/X 線両イメージングに使用可能な高効率型検出器を用いて、北大ライナックの熱中性子源において中性子測定実験を行い、中性子共鳴吸収分光法に必要な熱外中性子の飛行時間分析に関する特性をそれぞれの検出器について評価した。この試作検出器はシンチレータを入射面に持つ CNII を用いた中性子－光変換型の検出器で、変換後の光イメージの検出にはピクセル化された光電子増倍管を用いるため、比較的速い中性子の検出も期待されるが、現有の CNII は光イメージ出力蛍光面の発光緩和時間が長いため、早い変化を追う必要がある熱外中性子のエネルギー分解イメージングにはあまり向かない可能性がある。一方で、X 線と中性子の両方に感度を持つため、両者の複合イメージングを行う場合には効率の

良い実験が可能と考えられる。

GEM 型検出器でいくつかの共鳴吸収ピークを有する物質の透過率を測定し、GEM 型検出器の熱外中性子の飛行時間分析に関する特性の評価を行った。図 3.1.3.(1).③-1 に Ta 箔の飛行時間スペクトルを示す。この測定では飛行時間分解能は 150 ns で、GEM 型検出器は高エネルギー中性子に対する検出感度は低いものの数 eV の共鳴に関しては 1 時間程度の測定時間で共鳴吸収によるスペクトルのディップを観測することができた。また、より高いエネルギーの共鳴を測定するため、飛行時間分解能を 50 ns に設定し、マンガニンの透過率測定を行った結果が図 3.1.3.(1).③-2 である。この測定で用いたマンガニンの組成は Mn が 11.61 %、Cu が 85.32 %、Ni が 2.79 %である。透過率スペクトル中には比較的断面積の大きな ^{55}Mn の 2 つの共鳴（341 eV 及び 1098 eV）が確認でき、GEM により 1 keV 程度の共鳴までは測定できると評価された。一方、試作検出器に関しても同様に Ta 箔の透過率測定実験を行ったが、現有の CNII の光イメージ出力蛍光面の発光緩和時間が長いため、共鳴吸収によるスペクトルのディップは観測することができなかった(図 3.1.3.(1).③-3)。試作検出器の中性子−光コンバータは、本事業で高エネルギーの中性子用に開発している物のような、CNII とは異なるタイプを装着する必要がある。従ってこの時点では、両者を比較すると中性子共鳴測定に必要な熱外中性子領域のエネルギー分析には GEM 型検出器が適していると考えられる。

④ 相乗イメージング手法による高精細元素分布イメージ取得及び高エネルギーX 線 CT 像への中性子情報マッピングによる高空間分解能化の検討(H28)

中性子共鳴吸収法では、中性子のエネルギースペクトル中に現れる共鳴吸収ピークの形状を解析することで原子数密度や温度の情報を得る。そのため、これをイメージングに応用するには、中性子の 2 次元検出器の各ピクセルにおいてエネルギースペクトルを測定する必要があるので、エネルギー分析を必要としない通常のラジオグラフィと比較して非常に長時間の測定が必要になる。更に、3 次元データの取得のためにコンピュータ断層撮像（Computer Tomography :CT）を行おうとすれば測定時間が膨大になることは明らかであり、本研究で目標とする小型中性子源での利用は現実的ではなくなってくる。従って、ここでは中性子測定が持つ情報を有効に利用し、効率的な測定を行う手法を開発することを目指して、事業を展開した。本事業では平成 27 年度に、X 線イメージングで得られる高空間分解能の 2 次元及び 3 次元の形状データに対して中性子による低空間分解能での情報を付与することで、高精細な物性値イメージの取得を行う手法が考案されている。その手法を進展することで、X 線イメージと相乗して、中性子イメージの高空間分解能化と元素分布情報の可視化を実施した。また、この手法のさらなる延長として、高エネルギーX 線による CT 像に中性子による情報をマッピングして高空間分解能のボリュームモデルを作成する手法が考えられる。この手法を用いると、課題であった中性子による測定時間を減らすために、限られた方向からの中性子イメージを得るだけで、3 次元中性子情報マッピングモデルを構築できる。これについても計算機シミュレーションを用いて検討した。

中性子イメージと X 線イメージの 2 つの画像を空間的に一致させるために、平成 27

年度に相互情報量(MI)と呼ばれる確率変数の相互依存の尺度を表す量を指標とした位置合わせ法を開発した。相互情報量を計算する際に、2 次元ヒストグラムと呼ばれる 2 つの画像の輝度分布を表したものを求める。もし位置合わせを行う 2 つの画像が全く同じもの、例えば同じものを測定した中性子画像だった場合、2 次元ヒストグラム上に傾き 45 度の直線が引かれることになる。これに対し、中性子と X 線の画像に対して 2 次元ヒストグラムを求めた場合を考える。図 3.1.3.(1).④-1 に中性子と X 線の透過画像とそれらの間の 2 次元ヒストグラムの概念図を示す。中性子と X 線では透過力の元素依存性が異なるため、コントラストの異なる画像が得られる。従って、2 つの画像が空間的に一致していても、2 次元ヒストグラム上には 45 度の直線は引かれずに、異なる傾きを持つ複数の直線に沿ってスポットが現れる。物質の X 線と中性子に対する相互作用断面積比の違いにより現れる各スポットはそれぞれの画像の範囲内に含まれる元素と対応しているため、この情報を利用すれば画像内の元素の分布を作成することが可能となる。このようにして、エネルギー積分型の X 線及び中性子ラジオグラフィ画像からでも両者を相乗的に利用したイメージングが可能となる。

相乗イメージングの利点は、中性子か X 線のどちらかの画像のコントラストが低くとも明確に元素の存在位置を特定することが可能なことである。例えば、中性子の吸収体として用いられるホウ素やカドミウムが被検体に含まれる場合、熱中性子による測定では殆ど吸収されてしまい両者の間にはコントラストがつかないが、X 線では原子番号が離れているため強いコントラストがつく。従って、ホウ素とカドミウムが 2 次元ヒストグラム上に作るスポットはそれぞれ孤立するため、明瞭に元素位置の特定が可能となる。また、2 次元ヒストグラムから作成した元素の分布図はより高精細な方の画像の空間分解能を保持するため、高精細な X 線画像と粗い中性子画像との間で相乗イメージングを行えば、X 線画像の分解能で元素の分布を得ることができる。更には、このようにして得られた元素分布図に対して本事業で平成 27 年度に実施した物理量マッピングの手法を用いてエネルギー分析型中性子イメージングによる密度や温度等の情報を付与することで、高精細の物理量マッピング画像が得られる。このように、相互情報量 MI を用いる複合解析では、画像同士の位置合わせから高精細物理量イメージングまで、系統的な解析を行うことが可能となる。図 3.1.3.(1).④-2 にこの相乗イメージングを実際に実施した結果を示す。MI の 2 次元ヒストグラムでは各元素の示す領域が明確に分かれており、元素の区別は明らかである。この結果から元素情報をマッピングしたイメージが X 線画像と同じレベルに高精細化されていることが分かる。なお、注意が必要なのは、相乗イメージングでは元素毎の分布を解析することはできるが、その元素がどんな種類なのか特定するのがそのままでは難しいことである。元素の特定には、エネルギー分析型のイメージングから解析するか、元素毎の標準的な 2 次元ヒストグラム分布を作っておく等の工夫が必要となる。なお、数種類の元素の混合物やそれらが複合化された物から成る領域が存在する場合にも、X 線と中性子に対する巨視的断面積が純物質と異なれば 2 次元ヒストグラム上で区別される位置に特有のスポットが現れる。この場合に対しても混合比に対する標準 2 次元分布を用意しておくことで、組成の情報まで評価可能と考えられる。

ところで、中性子の3次元データを取得するには膨大な時間が必要となるため、中性子の測定時間を減らすには中性子イメージング測定回数そのものを減らすことが有効である。中性子とX線の相乗イメージングを利用すれば、X線イメージの上に直接中性子情報をマッピングできるので、X線イメージから作られるCTボリュームモデルとも親和性が高いと考えられる。何より、この組み合わせ手法では限られた方向からの中性子投影データを取得するだけなので、大幅に測定時間を減らすことができると期待できる。また、相乗イメージングを行う利点として、X線CT像のコントラストが小さい場合でも元素の特定が可能になる点やCT特有のアーチファクトによる影響を減少させることができる点がある。つまり、X線CT像のみで元素位置の特定が行えるような状況では相乗イメージングを行う必要はないが、より一般的な状況では元素番号の近い元素が被検体中に複数含まれていることや、アーチファクトの影響が無視できないことが想定されるため、相乗イメージングを行う必要があると考えられる。平成28年度は、この手法の確認のため、計算機上でX線CT像を作成し、モンテカルロシミュレーションコードPHITSを用いて中性子透過画像を作成した。そして、それらのデータに対して相乗イメージングを利用した3次元データへのマッピング手法を適用した。図3.1.3.(1).④-3にはシミュレーション計算用の模擬被検体とそれを撮影したX線及び中性子ラジオグラフィ画像を示す。この被検体について、X線CTを模擬してボクセル空間を作成するとともに、直交するX,Y,Z軸方向から中性子及びX線の模擬ラジオグラフィ像を作成した。作成した画像から、3方向についてそれぞれ相乗イメージングを行い、2次元ヒストグラムを作成して、得られた3方向からの元素分布を高精細なX線画像にマッピングする。この一連の結果を図3.1.3.(1).④-4に示す。相乗イメージングにより模擬被検体内の元素分布が2次元平面では忠実に再現されている。次に、これらの元素分布図の数値を400 pixel×400 pixel×400 pixelのボクセル空間に逆投影する。ここで言う逆投影とは、画像のピクセルに格納されている値を1方向にわたるボクセル（1 pixel×1 pixel×400 pixel）全てに分配するという意味である。ここではピクセルの値と等しい値をボクセルに足していった。つまり、1つのボクセルに対して、3つの元素分布図のピクセルの値の合計値が格納されることになる。このボクセルにおける数値と元素分布図において各元素の組み合わせに対して与えた数値から逆算することで、そのボクセルの場所に存在する元素を特定することができる。図3.1.3.(1).④-5には、各ボクセルにおける元素を特定して色分けしたボクセルデータを作成した結果を示す。図にはいくつかの断面図が示されており、最初に作成したX線CT像と同じボリュームを示すボクセルデータを再現することできた。この結果はシミュレーション計算によるものであるが、中性子の測定方向を3方向に局限することができたことになり、最低でも数10イメージが必要なCT測定に対し、大幅に測定を効率することが可能になると期待できる結果である。

⑤ ステップ撮像装置を改造した中性子撮像装置による複数方向からのラジオグラフィイメージの取得(H29)

3.1.3.(1).④節に示した3次元モデルを構築するには、中性子透過像もX線CT用の

透過像と同じ角度で画像を取得する必要があるために、被検体ステージに関し中性子とX 線撮像で同様の駆動機構を備えると利便性が高い。また、物性値を取得するには飛行時間分析可能な中性子検出器が、或いは統計による揺らぎを抑えて領域を明瞭に区別するためには高精細撮像が可能な中性子検出器がそれぞれ望まれるため、中性子検出器を選択して常に一定の位置に設置できることが必要となる。そこで平成 29 年度は、平成 28 年度に製作した高エネルギーX 線 CT 装置用のステップ撮像装置を構成するステージ機構を流用・改造することで、加速器ビームライン上で所定の被検体角度の中性子透過測定可能な撮像系を構築できる測定体系を構築した。図 3.1.3.(1).⑤-1 にこの撮像系の図面を示す。X 線 CT 撮像体系から中性子撮像体系に変換するには、X 線発生装置と検出器を被検体回転用のゴニオメータが配置されているステージから外して中性子検出器をセットするとともに、中性子ビームライン上で全体をアライメントする。中性子利用が終われば、中性子検出器を外して X 線発生装置と検出器を元に戻して CT 測定することが可能である。既存の CT システムを利用することにより、回転ステージを同期させた中性子透過画像を撮影する体系を容易に構築することが可能となった。

この体系では、飛行時間分析測定をするために GEM 型検出器を利用することが可能であるが、更に高精細測定できるように X 線使用時と同様な中性子用のイメージ・インテンシファイア用いることも可能である。図 3.1.3.(1).⑤-2 には中性子イメージ・インテンシファイア検出器を設置した状態を示している。この検出器には、平成 26 年度に高精細撮像用に試作した検出器で利用した既存の 4 インチ CNII を用いたが、光学系の見直しで CT 用のステップ撮像装置と結合できるように筐体をコンパクト化することに成功した。これは、試作で用いた高解像度の一眼レフカメラではなく、感度にリニアリティのある産業用 C-MOS カメラを採用し、光学レンズ系を選択することで光路長を縮めて効率を高めたものとなる。高解像度の産業用カメラはコンパクトかつ比較的安価で、放射線損傷時にも交換し易い。定量測定に鍵となるリニアリティも重要な選択ポイントとなる。また、外部トリガの入力が可能であり、ここでは制御ソフトウェアにより中性子 1 パルス内で時間的なゲートを開けて特定の飛行時間幅内の中性子画像を取得できるようにしてある。更に今回、カメラには測定中一定の温度を保てるように恒温システムを装着した。中性子の測定では一般に長時間測定が必要となるため、カメラセンサのノイズレベルを常に一定にできるよう積極的な温度制御をするものである。この CNII 検出器を用いて北海道大学においてパルス中性子撮像した結果を図 3.1.3.(1).⑤-3 に示す。ビームラインには 3 mm厚の Pb フィルターを設置して測定したため、左図のインジケータでは Pb がほぼ見えずに B と Cd がはっきり写っている。左図内の模擬被検体のペレット間の間隙や右図の Al 円筒内ワイヤも 0.5 mm以下まできれいに映り、高精細測定の効果がわかる。なお、全体をコンパクト化したことにより、CNII 検出器系を取り外した状態で独立させて撮像することができる。この機能により京都大学電子線型加速器の中性子ビームラインで核燃料物質の高精細測定も可能となった。この状況と結果を図 3.1.3.(1).⑤-4 に示す。左図が設置状況、中図がインジケータ類の測定結果、右図が核燃物質の測定結果である。中図のインジケータでは 0.1 mmの間隙が確認でき、京大炉ライナックパルス中性子源の有効性が分かる。右図には薄板状の核燃料物質の重なりや

被検体を入れたビニールが写っており、本撮像系が核燃物質の測定にも利用できることが示された。

⑥ まとめ

中性子共鳴吸収分光法では一般的な中性子散乱法の場合より高速な熱外中性子を用いる必要があるため、北海道大学内の電子線型加速器を用いた HUNS を利用して、パルス状の中性子ビームを用いたイメージング手法の高度化を図った。そのために、中性子飛行時間分解能を高めた中性子 2 次元検出器及びそのエレクトロニクスの開発と性能の検討を実施し、得られた知見を基にパルス中性子を用いた中性子ラジオグラフィ画像の取得実験を実施した。その結果、本事業で開発したステップ撮像装置を改造して中性子ラジオグラフィ撮像にも使用できるものとすることにより、複数方向から中性子イメージを得ることに成功した。以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。

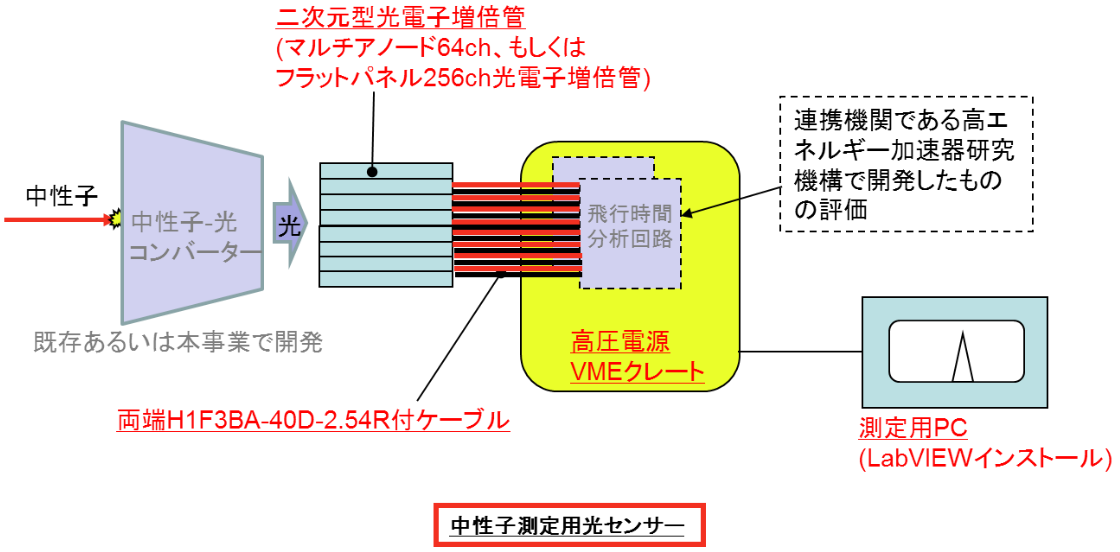


図 3.1.3.(1).②-1. 中性子イメージ検出器試験用機材(中性子測定用光センサー)の概念図

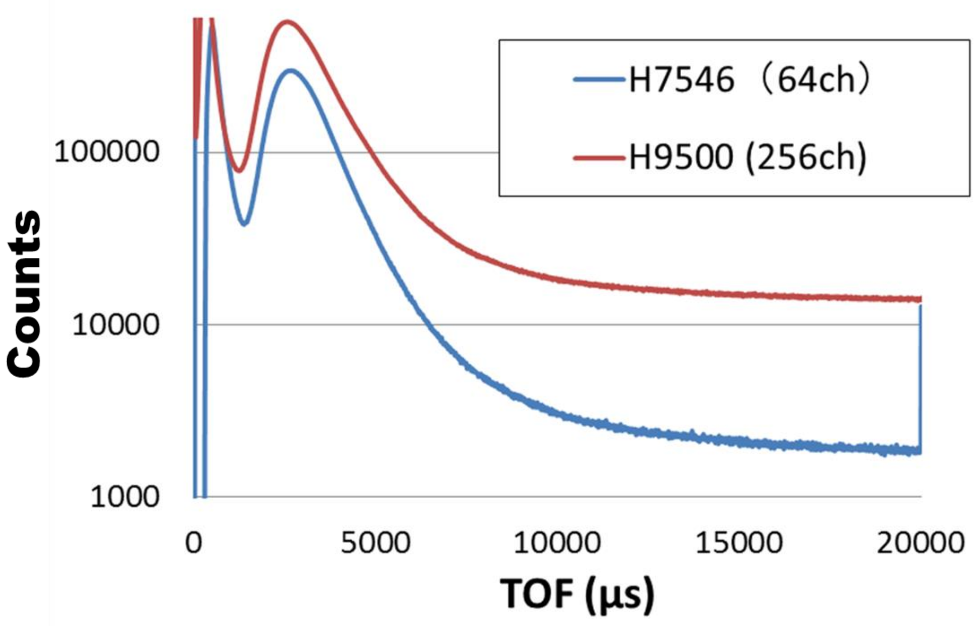


図 3.1.3.(1).②-2　試作検出器により得られた飛行時間スペクトル

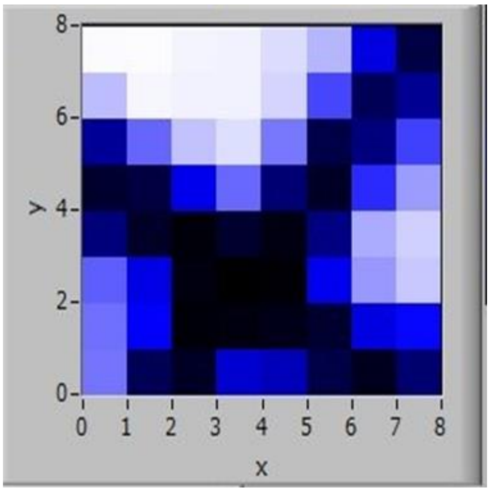


図 3.1.3.(1).②-3　64ch.マルチアノード光電子増倍管によるインフォーカス状態の被写体イメージ

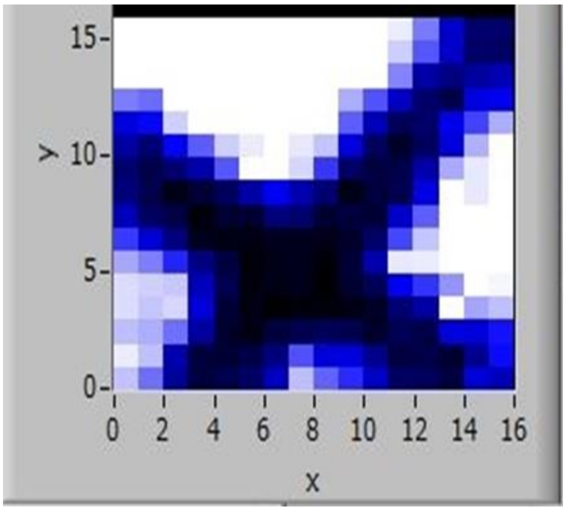


図 3.1.3.(1).②-4　64ch.マルチアノード光電子増倍管による 16×16 超解像度化被写体イメージ

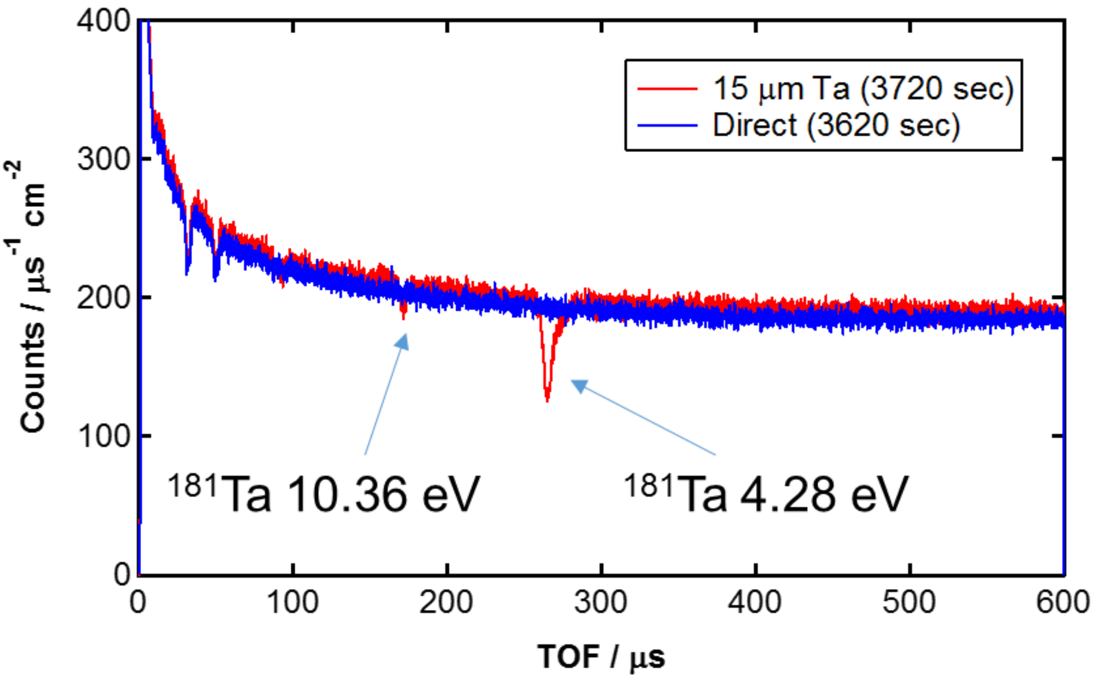


図 3.1.3.(1).③-1　GEM 型検出器により測定した 15 μm 厚 Ta 箔の透過スペクトル及びダイレクトビームのスペクトル（凡例に示す時間は測定時間）

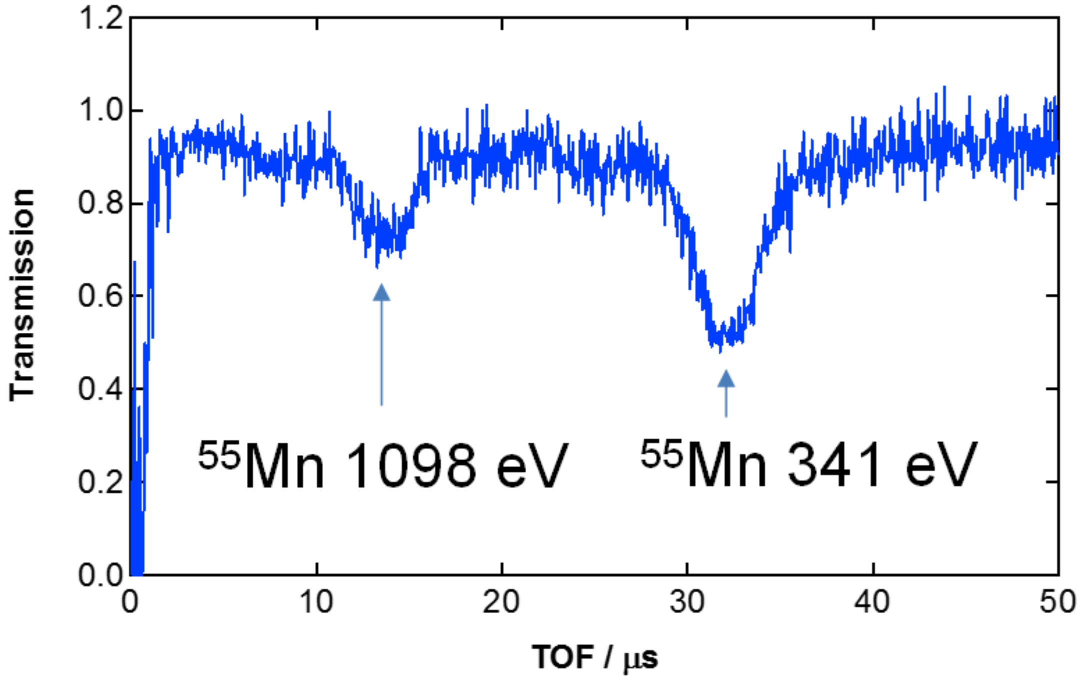


図 3.1.3.(1).③-2 GEM 型検出器により測定した 2 mm 厚マンガニン板の透過率スペクトル

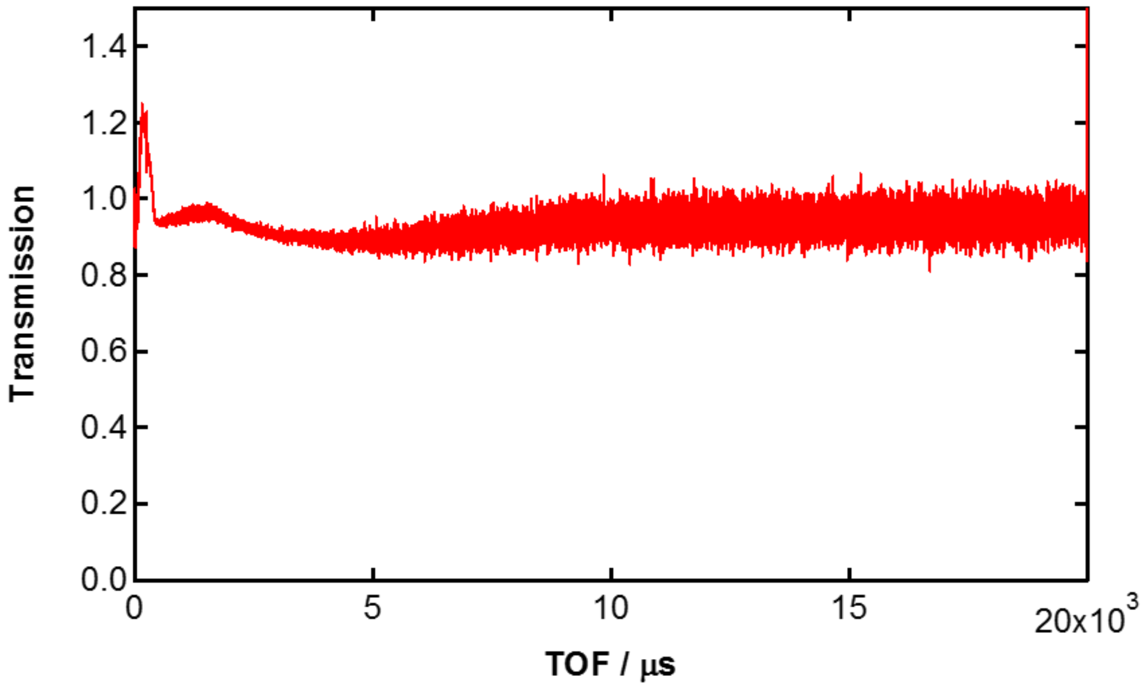


図 3.1.3.(1).③-3　中性子-光コンバータと光電子増倍管を組み合わせた高効率検出器により測定した 25 μm 厚 Ta 箔の透過率スペクトル

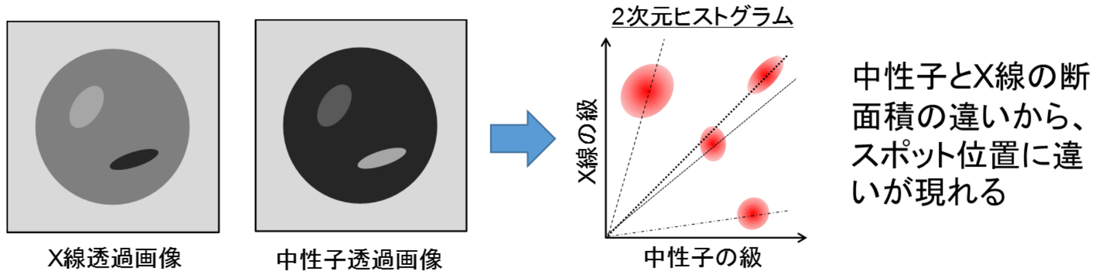


図 3.1.3.(1).④-1 中性子と X 線の透過画像とそれらの間の 2 次元ヒストグラムの概念図

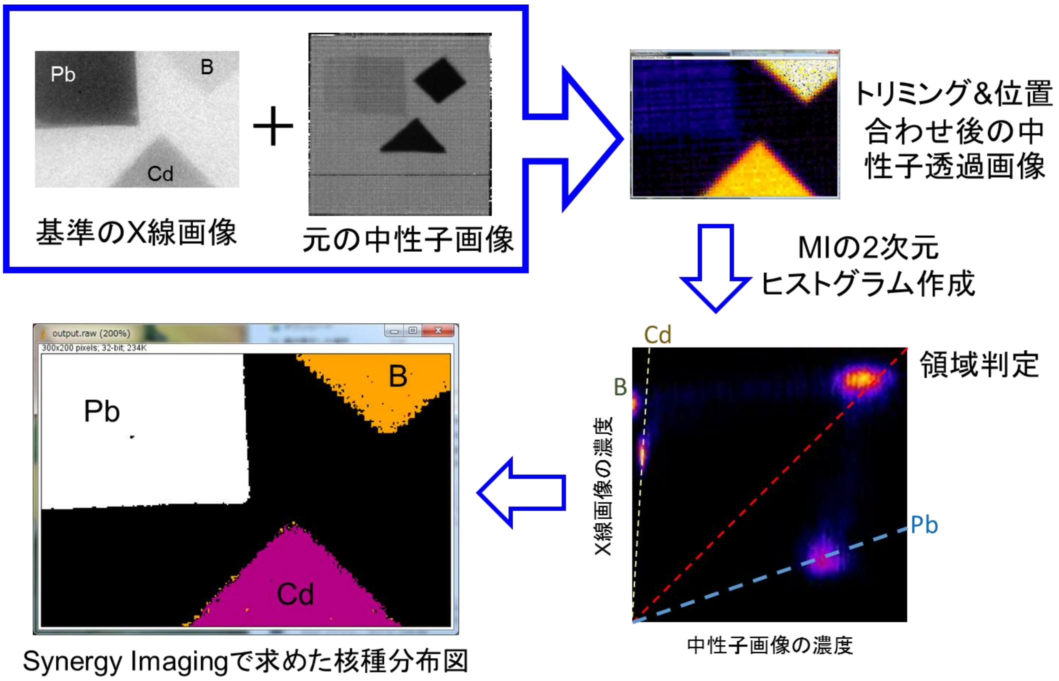


図 3.1.3.(1).④-2 相乗イメージングの手順と元素マッピング結果

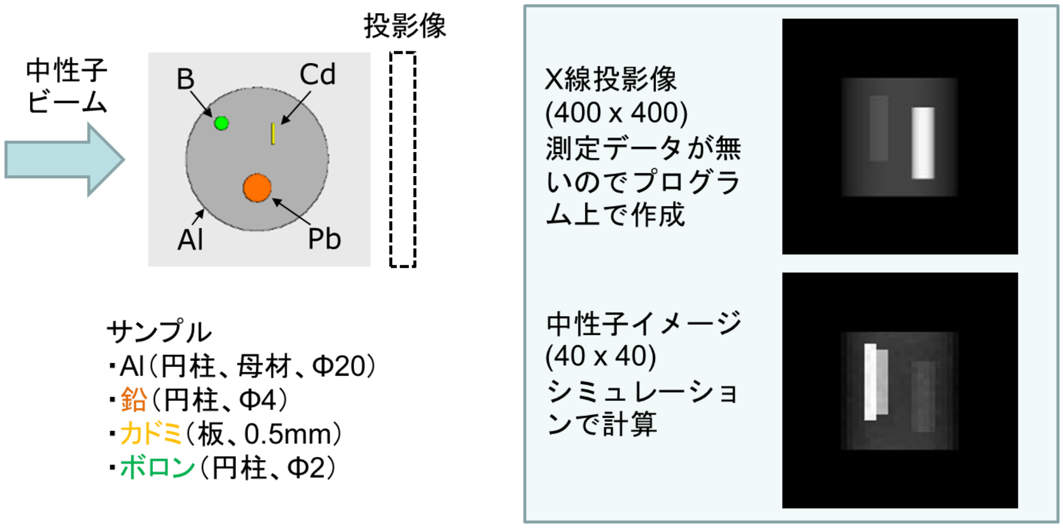


図 3.1.3.(1).④-3 シミュレーション計算用の模擬被検体(左)とそれを撮影した X 線及び中性子ラジオグラフィ画像(右)

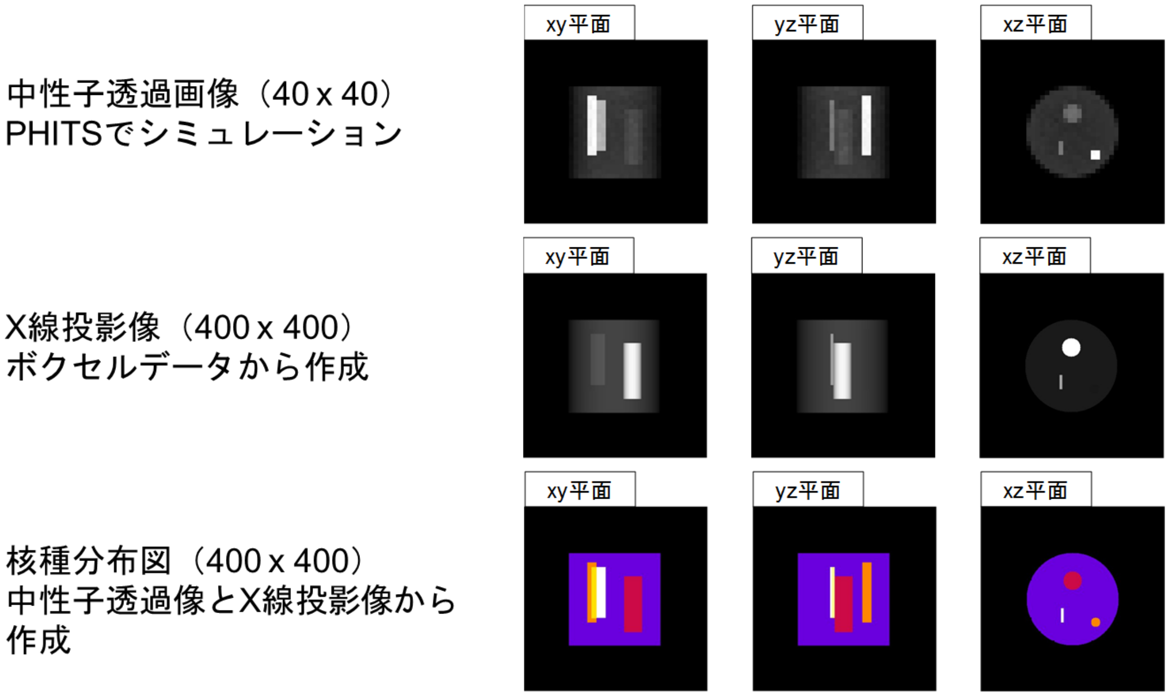


図 3.1.3.(1).④-4 シミュレーション計算による中性子及び X 線画像と、相乗イメージングによる元素分布

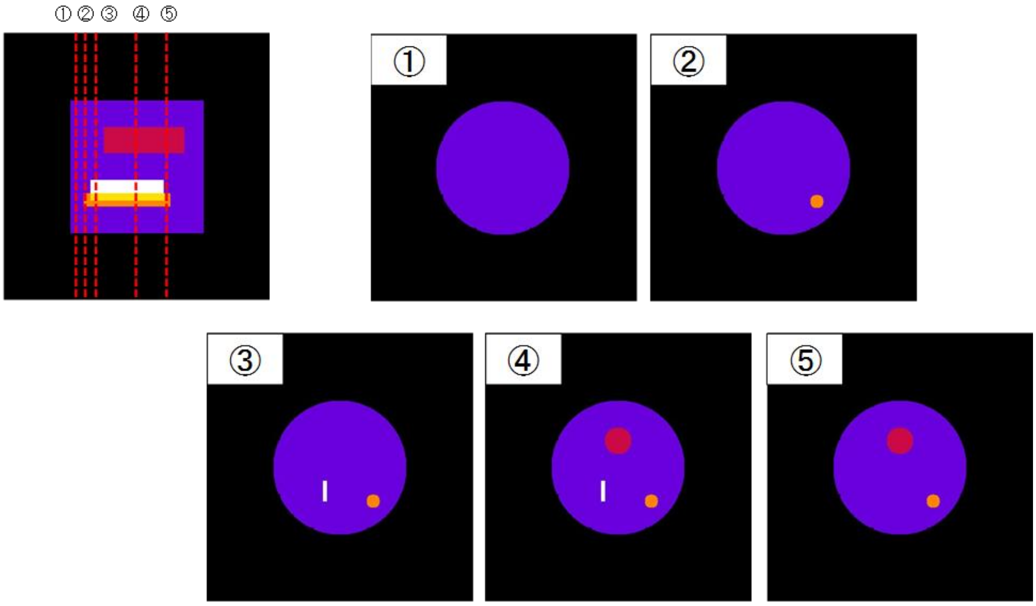


図 3.1.3.(1).④-5　3 方向の相乗イメージから再構成された元素のボリューム分布。左上の点線部の断面が①～⑤の画像に対応する

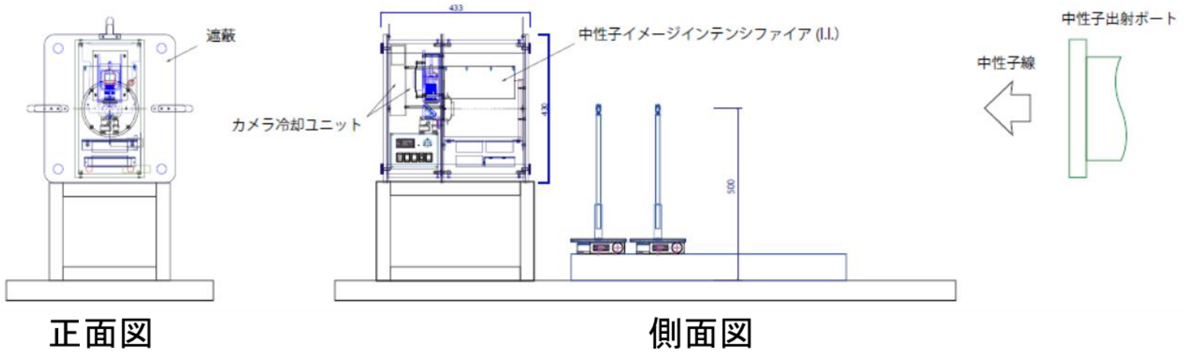


図 3.1.3.(1).⑤-1 ステップ撮像装置と組み合わせた中性子透過撮像体系

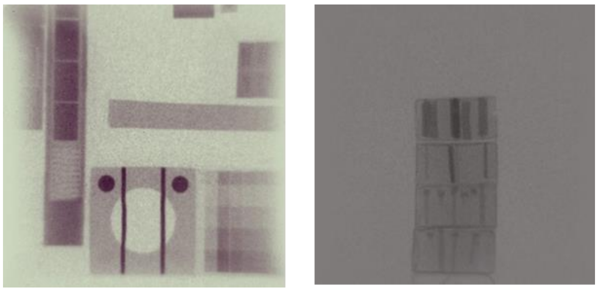


図 3.1.3.(1).⑤-2　北海道大学パルス中性子源における CNII 検出器の撮像例
左はインジケータ類、右は Al 円筒(20 mmφ)に埋め込まれた金属ワイヤ

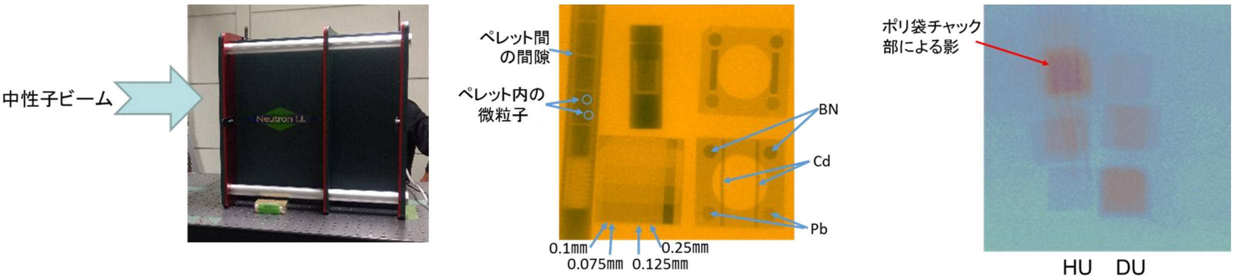


図 3.1.3.(1).⑤-3 京都大学パルス中性子源における CNII 検出器の撮像例
左は CNII 検出器の設置状況、中図はインジケータ類の撮像例、右図は核燃物質の測定例

(2)　京大ライナックを用いた研究（H27～H29）

①　概要

本事業計画書 3.3.1.(1)及び(2)で開発される高効率・高時間分解能検出器と LiTA システムを京大炉ライナックに設置し、核燃料物質を用いた核種選択型中性子イメージングの試験を実施することが本研究の目的である。平成 27 年度では数値計算を用いた核種弁別型中性子イメージングの予備検討と周辺機器の整備を行った。平成 28 年度では予備試験

を実施し、その結果を高効率・高時間分解能検出器及びLiTAシステムの開発にフィードバックした。平成29年度では、核燃料物質、MA、LLFPを用いて試験を実施し、50 mm厚さ鉛容器中の被検体に対する核種弁別型中性子イメージングが可能であることを実証した。

② 核種弁別型イメージングの予備検討と周辺機器の整備（H27）

平成27年度は、数値計算を用いた核種弁別型イメージングの予備検討とイメージング技術高度化に必要な高精度位置調整機能付き被検体ステージを（以下、被検体ステージ）作成し、京大炉ライナックに設置した。

数値計算を用いた予備検討では、真空容器及びその中に設置した被検体をモデル化し粒子輸送モンテカルロ計算コードPHITS2[1]及び核データとしてJENDL-4.0[2]を用いて透過中性子束を評価した。被検体は天然ウラン(NU)及び濃縮度3.2 woウラン（EU）のUO_2ペレットとし、これら2つのペレットを積み重ねた。図3.1.3.(2).②-1は透過中性子束を全エネルギーで積分した結果である。EU中の^{235}Uにより中性子が遮蔽されNU部分より色が濃くなっている。本結果より真空容器を用いても中性子イメージングによりウラン濃縮度の弁別が可能であることが分かった。図3.1.3.(2).②-2に^{238}Uの6.67 eV 近傍のエネルギーの透過中性子束を示す。共鳴により中性子は遮蔽されるが、図3.1.3.(2).②-1の様にEUとNUの間に差は見られない。これは、EUでもNUでも^{238}Uの量はほぼ不変なためである。この結果より、核種固有の共鳴のエネルギーを透過した中性子束を測定することで被検体中の特定核種にたいする中性子イメージングが可能であるとの評価が得られた。

被検体ステージは、本事業計画3.(3).②で開発を行っている高解像度化処理回路・多次元データ処理装置と組み合わせて運用するためにX-Z調整機構を有する構造とした。更に被検体は本事業計画3.(2).①におけるドップラ効果測定の研究と同一被検体を使用することから、研究の合理化を行う目的で本事業計画3.2.2と共通使用可能な被検体ステージと真空容器を作成した（図3.1.3.(2).②-3）。作成した被検体ステージの動作確認を実施した。本事業計画3.(3).②における信号処理では被検体ステージが水平･垂直方向にスムーズな位置調整が求められるが、手動による作動テストの結果は良好であった。一方、真空容器であるが2時間運転の結果、真空度の低下は確認されなかった。

③ 核種弁別型イメージングの予備試験と解析手法の検討（H28）

本事業計画書 3.(3).①において開発した高効率・高分解能型中性子検出器を京大炉ライナックに設置し、核種弁別型イメージングの予備試験を実施した。更に解析手法についても検討を行った。本事業では高効率・高分解能型中性子検出器として、32 ch.×32 ch.の 1.5 mm 角フルサイズシンチレータ（^{6}Li-glass, GS20）を製作した。本検出器の検出効率を把握するために、シンチレータを 1 ch.から成る光電子増倍管（応用光研製 SP-10 プローブ）に接続したものを京大炉ライナックの 12m 測定室に設置し、波高分布（PH）と TOF の 2 次元測定を行った。上述の中性子源評価で述べたように、中性子輸送系の改良後の中性子場については、^{10}B による中性子捕獲ガンマ線を測定することによって、中性子束が評価されている。そこで、本実験で得られた検出器からの出力信号の TOF スペクトルを前述の中性子束と比較することによって、当該検出器の検出効率を評価することができ

る。検出器に用いている ^{6}Li-glass シンチレータは 5 mm の厚さを有しており、熱中性子に対しては 100 % の検出効率とみなしても良いと考えられる。そこで、熱中性子領域で中性子束に規格化した当該検出器の TOF スペクトルを図 3.1.3.(2).③-1 に示す。TOF スペクトルを中性子束で割ることによって評価した検出効率曲線を図 3.1.3.(2).③-2 に示す。中性子エネルギー100 eV 付近での検出効率は 10%を超えており、所期の目標を達成していることを確認できた。次に、核種弁別イメージングの予備試験として、検出器より上流に、厚さ 50 μm のインジウムの薄膜を置いた測定を行った。上流に薄膜がある場合とない場合の TOF スペクトルの比較を図 3.1.3.(2).③-3 に示す。In 箔を置いた場合の TOF スペクトル中には 700 ch.付近に 1.457 eV の共鳴吸収による dip が観測された。通常のイメージングの場合、全 TOF 領域の計数率の比が画像のコントラストを決定する。今回の測定結果からその計数率比を求めると 0.86 であり、厚さ 50 μm の In 箔の存在によって約 14 % 透過中性子の計数率が減少することが確認された。核種弁別型イメージングでは特定の共鳴領域にゲートをかけることで画像化する。その状態を模擬するために In の共鳴領域での計数率比を算出したところ、0.74 となり約 26 % 透過中性子の計数率が減少することが分かった。このことから、本検出器において核種弁別型イメージングを行うと、通常のイメージングに比べてコントラストは約 2 倍向上する見通しを得られた。

④　核種弁別型中性子イメージング実証試験への適用（H29）

平成 29 年度は開発した検出器システムを京大炉ライナックで実施する核種弁別型イメージング実証試験に適用し、模擬燃料、核燃料、マイナーアクチニド(MA)被検体の空間分解能及び時間分解能の評価から、核燃料、MA の選択的な測定が行えることを実証した。具体的には、32 ch ×32 ch×5 mm^{t} ^{6}Li ガラスシンチレータからなる高効率・高時間分解能検出器と 16 ch×16 ch マルチチャンネル光電子増倍管（mPMT）及び LiTA 検出回路系の組合せで被検体オブジェクトに対する空間分解能、TOF 測定によるエネルギー分解特性を評価し、最終的な目標である核燃料物質及びマイナーアクチニド測定を行ない、2 次元プラス時間(エネルギー)分解特性を評価した。尚、本節はアールテック（株）と共同で実施しており、3.3.1.(1)節の内容の一部を含んでいる。以下に詳細を記す。

a)　エネルギー分解特性

共鳴エネルギーの異なる Co、Ag、In の 100 μm 金属箔を領域分けした被検体に対する測定で、2 次元画像化する時間領域を各核種の共鳴領域時間幅に限定することにより、それぞれの核種の 2 次元分布を画像化できることを確認した。図 3.1.3.(2).④-1 に示すように、^{59}Co、^{109}Ag、^{115}In に対応する時間領域に限定することによりそれぞれの金属箔の 2 次元状態が測定できることを確認した。時間領域を限定して特定共鳴エネルギー核種の分布を測定するこの手法は、後述する核燃料、MA 測定でも有効な機能となる。

b)　空間分解特性

熱中性子領域で中性子反応断面積の大きい Cd 箔板(50 μm)を 4 段階厚さのステップ状にした被検体の輝度特性を測定した。mPMT 基本機能の 16×16 透過画像と、LiTA 回路系の

重心処理機能を活用した 32 ch×32 ch 処理で得られた画像を図 3.1.3.(2).④-2 に示す。32×32 ピクセル画像の方がよりシャープにエッジ部吸収特性を示しており、重心処理の有効性が確認された。図 3.1.3.(2).④-3 に示すように模擬燃料体中の共鳴吸収体の画像化でも重心処理機能は有効性を発揮した。スポットサイズの異なる In 封入した被検体で TOF 時間幅を 600 μs ～800 μs に絞り、32×32 画素処理することにより、図に示すように 1mm サイズスポットまで判読できる解像度が確認された。この測定は 3799 s 積算と、オブジェクトなしのバックグラウンド測定 5200 s を行いチャンネル間感度偏差補正のシェーディング処理した結果で、昨年度の 500 s 測定(平成 28 年度報告書ｐ９１：図 3.3.1.(1).①-26)では判読できなかった画像である。なお、以下の画像化でも同様に原画像を背景画像で割算するシェーディング処理し、スペクトル算出処理でも対応チャンネル毎にシェーディング処理した結果に基いている。

c)　核燃料被検体のイメージング特性

核燃料被検体として KUR の HU(高濃縮ウラン)、DU(劣化ウラン)オブジェクトをそれぞれ 1 枚、3 枚、5 枚配置して図 3.1.3.(2).④-4 のように TOF 画像を取得した。画像は 0～１ ms の時間領域から求めた。同図左列 HU5 枚の赤枠領域の TOF スペクトルから ^{235}U の共鳴点が確認できる。同様に右列 DU5 枚領域の TOF スペクトルから ^{238}U 共鳴点が確認できる。なお、共鳴エネルギーは JENDL-4.0 から取得し、TOF からエネルギーへの変換は中性子発生位置から検出器までの距離を 11.85m で計算した。HU、DU それぞれの枚数に対する共鳴点の減衰特性を評価するために、図 3.1.3.(2).④-5、図 3.1.3.(2).④-6 に示すように、HU、DU 各枚数の中心領域に赤枠の ROI を設定して、その領域の TOF スペクトルを求めた。HU の ^{235}U 共鳴点 8.78 eV、19.3 eV での HU 枚数に対する透過率比を図 3.1.3.(2).④-7 に示す。スペクトル測定の統計精度に依存はするが、枚数(=^{235}U 厚さ)に対して指数関数的に減衰する特性が得られた。同様に図 3.1.3.(2).④-8 に示す DU の ^{238}U 共鳴点 6.67 eV、20.9 eV、36.7 eV で求めた DU 枚数に対する透過率比から、指数関数的な減衰特性が確認できた。

d)　ガンマ線遮蔽体内の MA 核種測定

ガンマ線線量率が高い MA の核種分解イメージングでは、γ線遮蔽体内に MA を置いたまま測定することが必要とされる。このため、今年度試験の最後の項目として、鉛 50mm 遮蔽下で MA 被検体(^{237}Np、^{243}Am)及びウラン被検体の画像化試験を実施した。図 3.1.3.(2).④-9 に、鉛 50 mm ブロックの表面側に張り付けた天然 U、^{237}Np、^{243}Am の各被検体をブロック後方の中性子シンチレーション検出器で測定する体系写真、及び 20 μs～10 ms のほぼ全領域の中性子画像を示す。測定時間はオブジェクト測定、背景測定それぞれ 3600 s で、シェーディング処理をして画像及びスペクトルを評価した。赤枠はそれぞれ天然 U 領域、^{237}Np 領域、^{243}Am 領域の TOF エネルギースペクトル取得範囲を示す。取得したそれぞれの TOF スペクトルを図 3.1.3.(2).④-10 に示す。 図中に JENDL-4.0 に基づく共鳴エネルギー値を記載した。鉛 50 mm を透過する中性子はほぼ全エネルギー域で 15%程度に減衰するが、3600 s 測定で画像化が可能であった。天然 U、^{237}Np 、^{243}Am の共鳴スペクトルが得ら

れたので、特定共鳴エネルギー領域の画像化により核種弁別イメージングを検討した。図3.1.3.(2).④-11に天然Uの6.67eV共鳴点を含む300～350 μs 領域のTOFスペクトルと、その領域の2次元画像を示した。300～350 μs 領域にNp、Amの共鳴がないので、画像上では天然U領域だけの画像が示されている。同様に、^{237}Np 共鳴点 1.48 eV 近傍の 680～700 μsの画像を図3.1.3.(2).④-12に、^{243}Am 共鳴点 1.36 eV 近傍の720～740 μsの画像を図 3.1.3.(1).④-13 にそれぞれ示す。Np 共鳴画像は Am とほぼ分離できているが、^{243}Am 画像には ^{237}Np も僅かに画像化されている。これは、図3.1.3.(2).④-14に示す実測スペクトルデータ及びJENDL-4.0よる中性子透過率計算値からもわかるように、^{243}Am 第1共鳴点に ^{237}Np の共鳴点がオーバーラップしていることによる。これを避けるためには ^{243}Am の第 2 共鳴 1.74 eV で画像化すれば回避できるが、断面積が小さいのでより長時間測定が必要となる。

⑤ まとめ

製作した高効率・高時間分解能検出器（5 mm^t×32 ch×32 ch ガラスシンチレータ検出器）と mPMT、LiTA 検出回路系の組合せで、エピサーマル中性子領域まで、時間分解 2 次元透過画像測定に有効な検出器システムを完成した。模擬燃料物質の測定では 1 mm サイズの共鳴物質まで LiTA 回路の重心処理機能で検出と物質同定が可能なことを示した。核燃料被検体の測定では、各被検体のROI領域のTOFスペクトルから高い精度で物質同定ができる事を示した。また、厚さの異なる被検体の中性子透過データから厚さに対する透過率を有意な精度で指数関数表示できることを示し、核燃料物質の定量測定に有効なデータを取得できた。核燃料物質とともに存在するMAの測定ではγ線遮蔽のために50mm厚さの鉛を通して中性子測定が必要となるが、その条件下でも天然 U、^{237}Np、^{243}Am の被検体のエネルギー分解2次元画像化測定により、それぞれの物質の位置・形状を測定することができた。核燃料物質及び MA 核種に対する核種弁別型中性子イメージングは本事業が世界で初めて取得したデータである。以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。

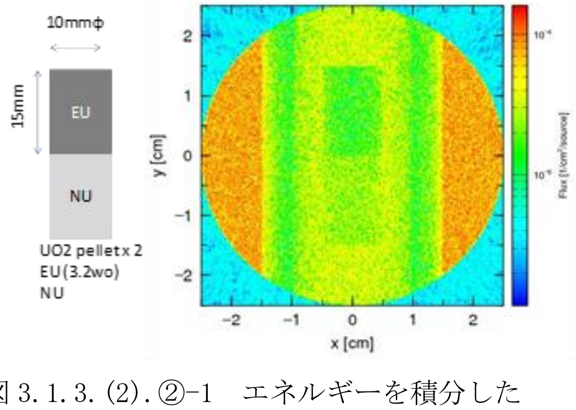


図3.1.3.(2).②-1　エネルギーを積分した透過中性子束

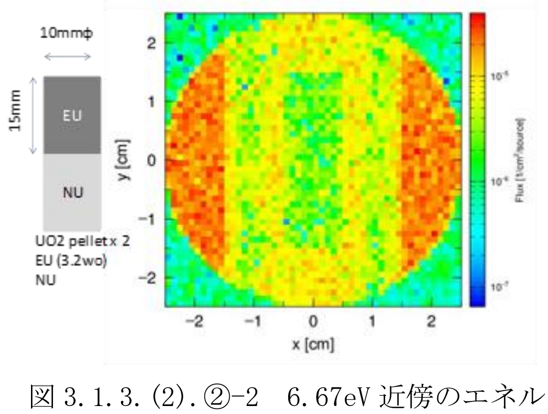


図3.1.3.(2).②-2　6.67eV近傍のエネルギーの透過中性子束

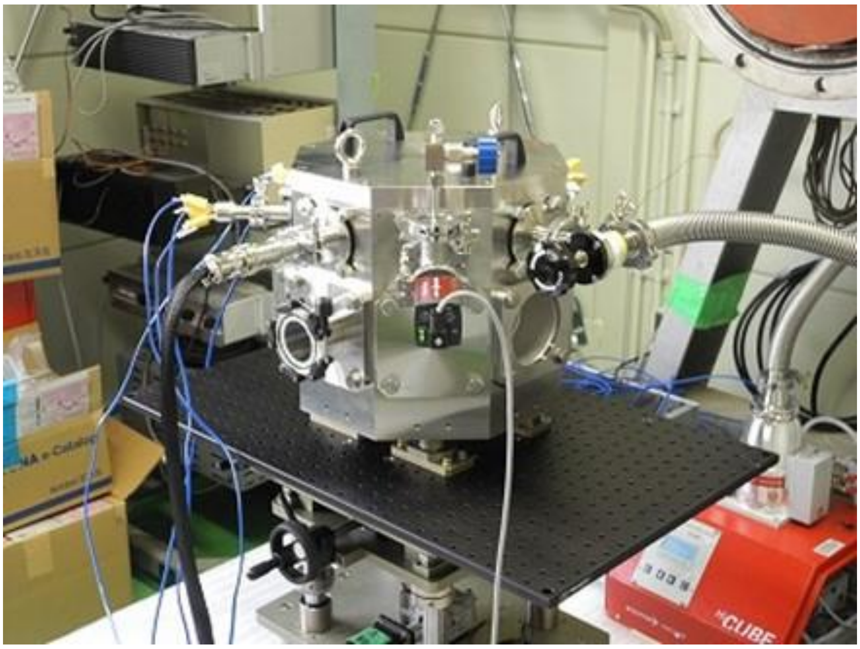


図 3.1.3.(2).②-3　被検体ステージと真空容器

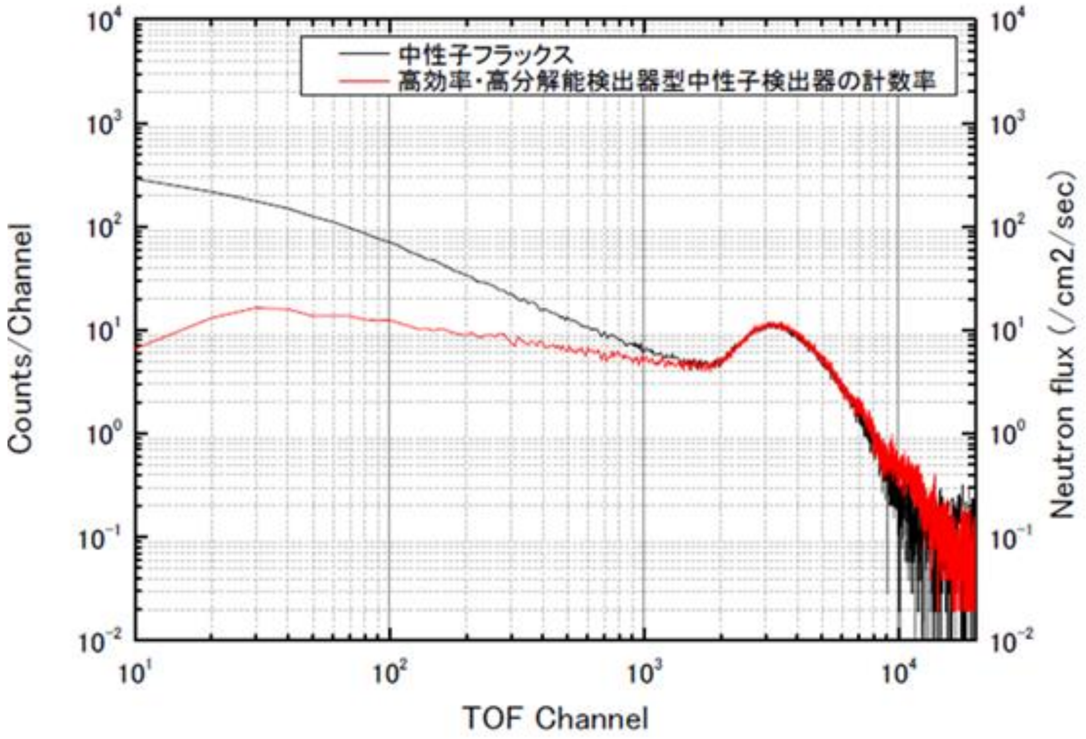


図 3.1.3.(2).③-1　高効率・高分解能型中性子検出器の TOF スペクトルと中性子束の比較

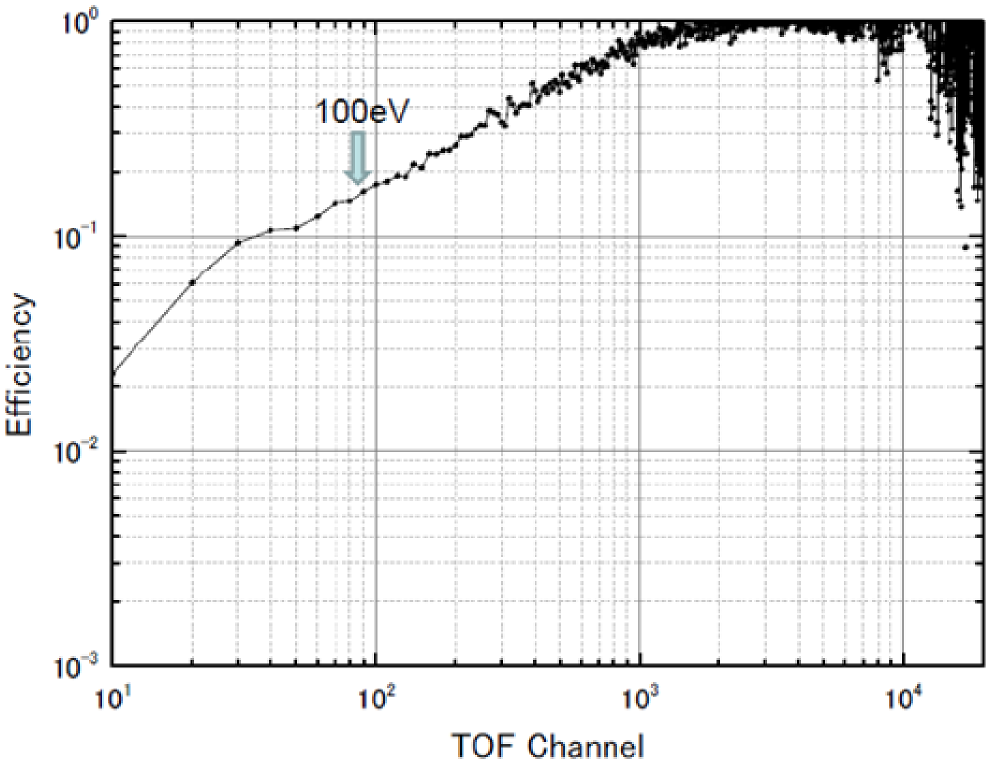


図 3.1.3.(2).③-2　高効率・高時間分解能検出器の検出効率評価

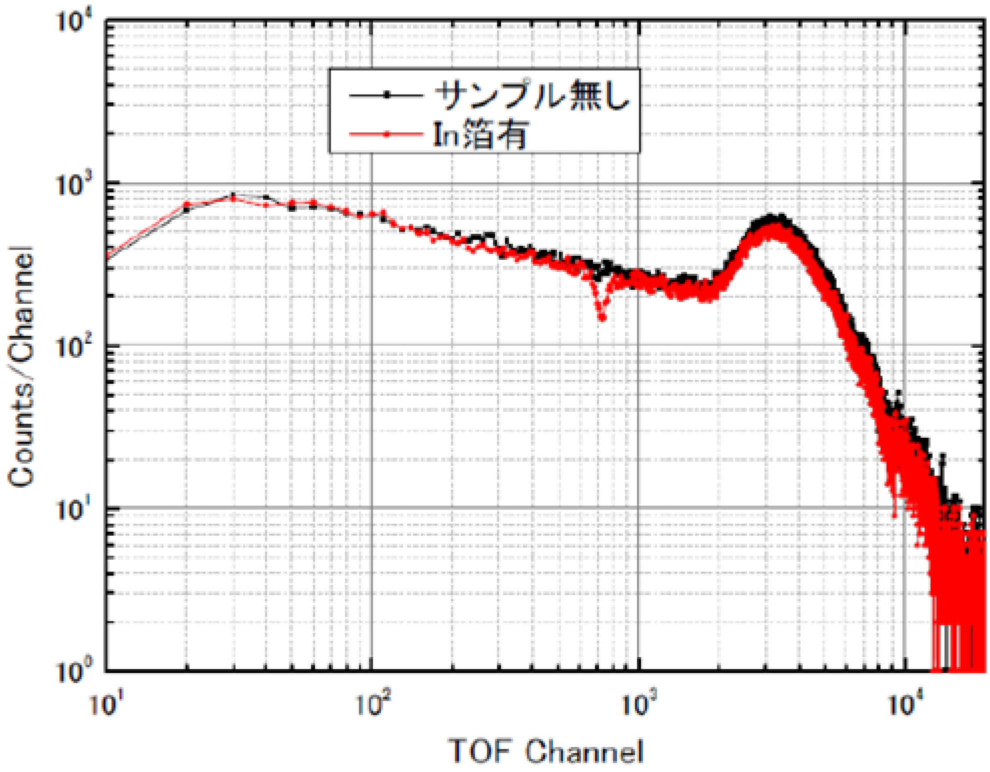


図 3.1.3.(2).③-3　上流に厚さ 50μm の In 箔を置いた場合と置かない場合の TOF スペクトル

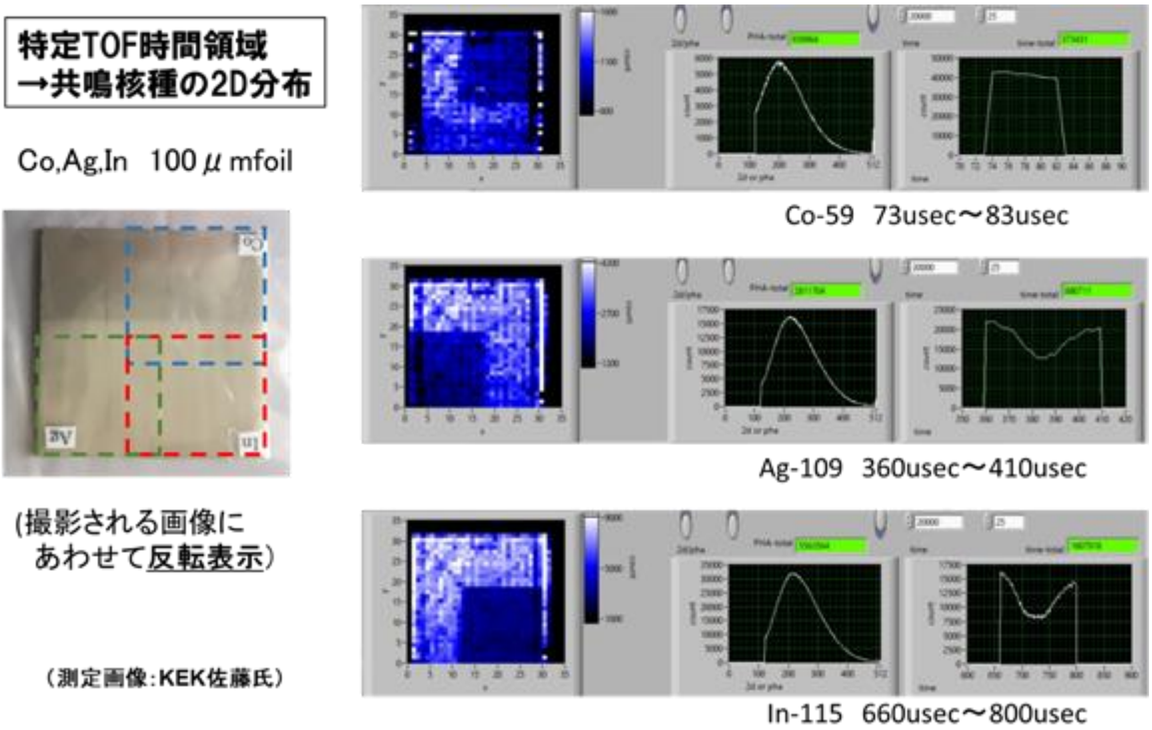


図 3.1.3.(2).④-1　 Co、Ag、In 箔の TOF 画像測定

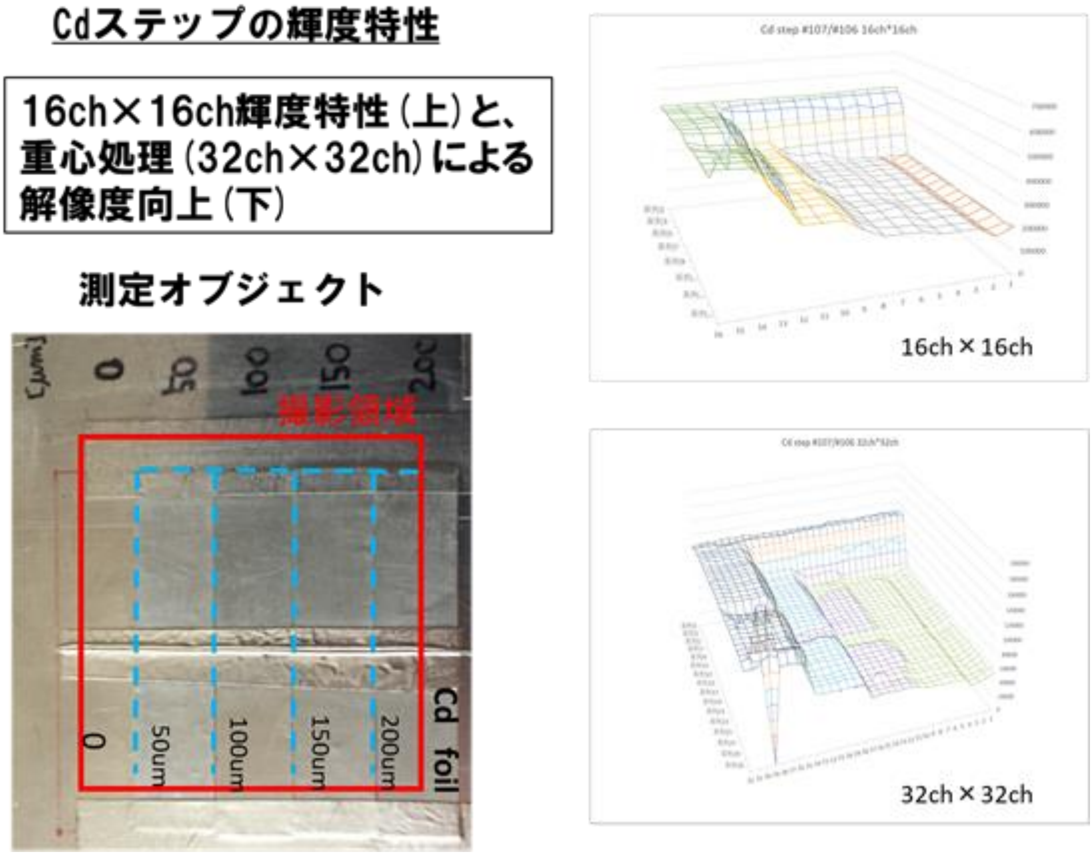


図 3.1.3.(2).④-2　 16×16 中性子画像と重心処理による 32×32 画像の比較

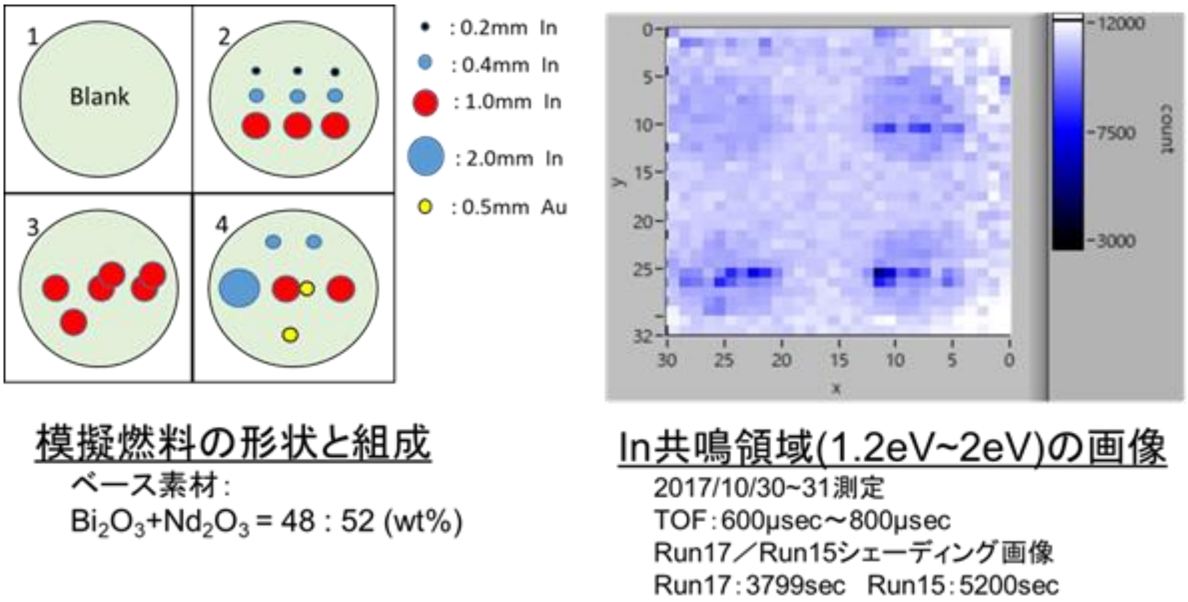


図 3.1.3.(2).④-3　模擬燃料体形状・組成と In 共鳴領域での測定結果

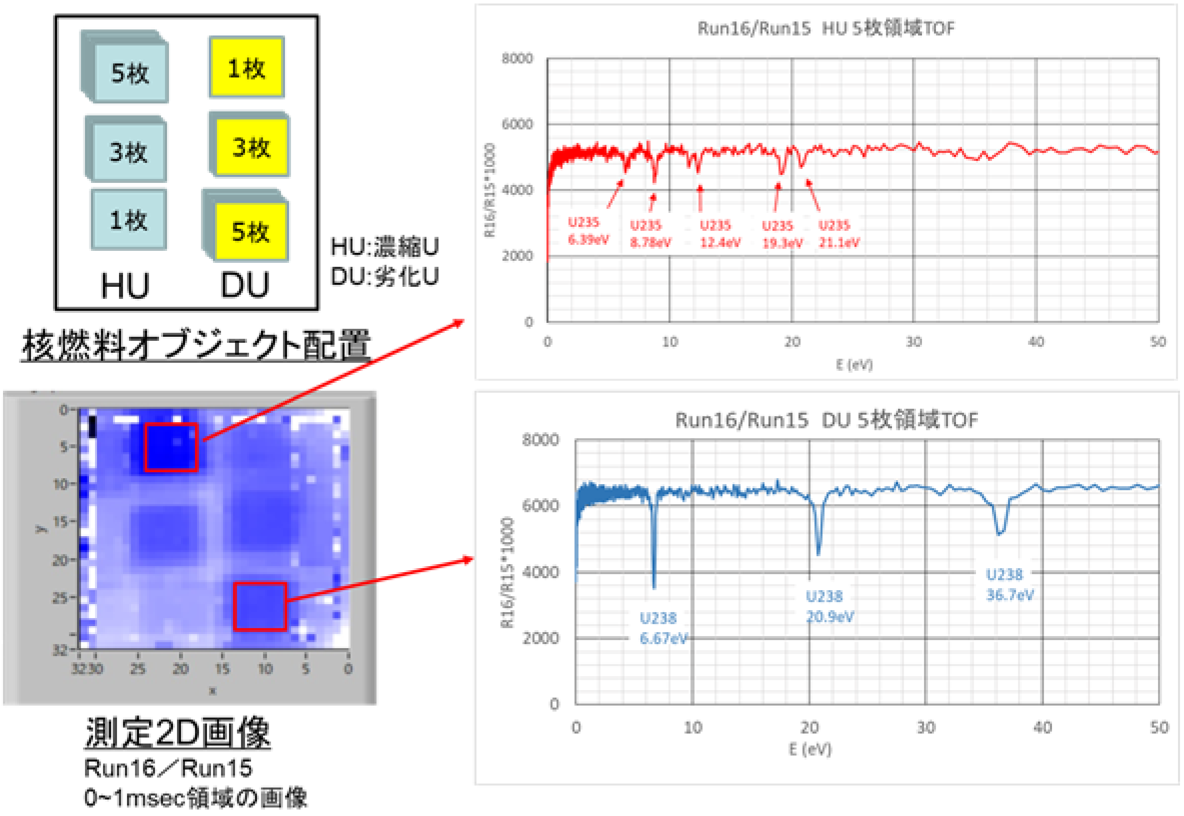


図 3.1.3.(2).④-4　核燃料被検体の画像測定と TOF スペクトル抽出

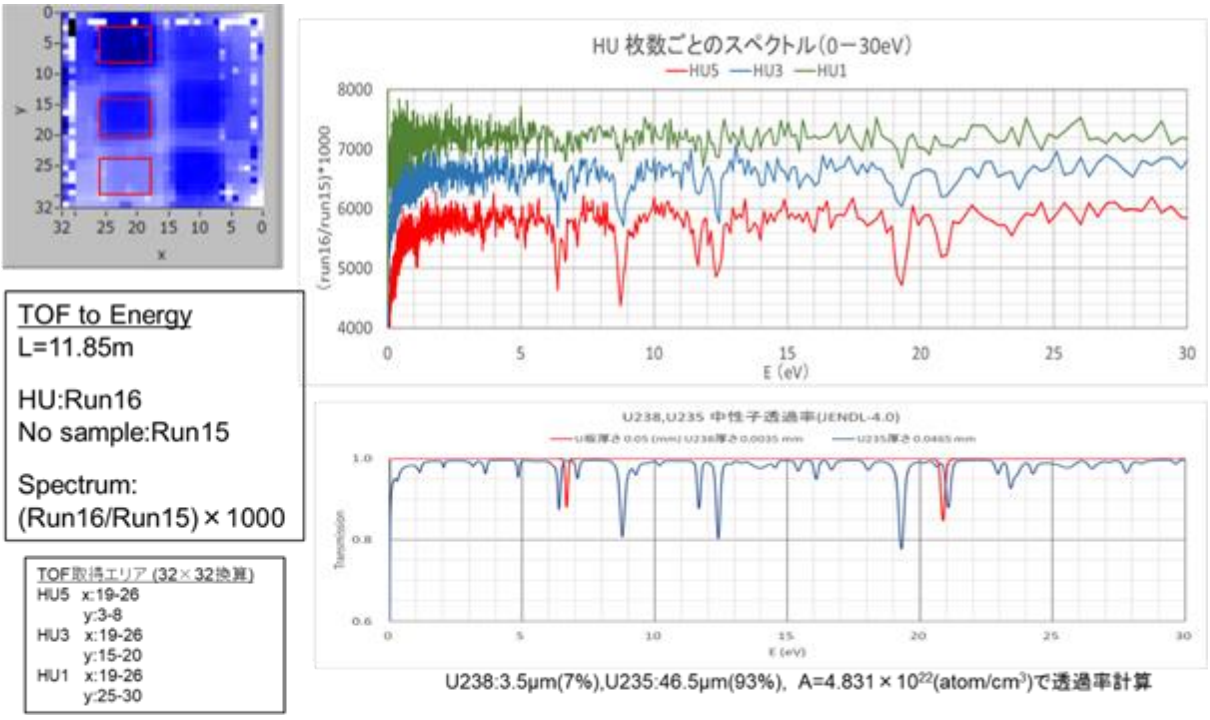


図 3.1.3.(2).④-5　HU 枚数毎の TOF スペクトル実測値と JENDL-4.0 による計算値

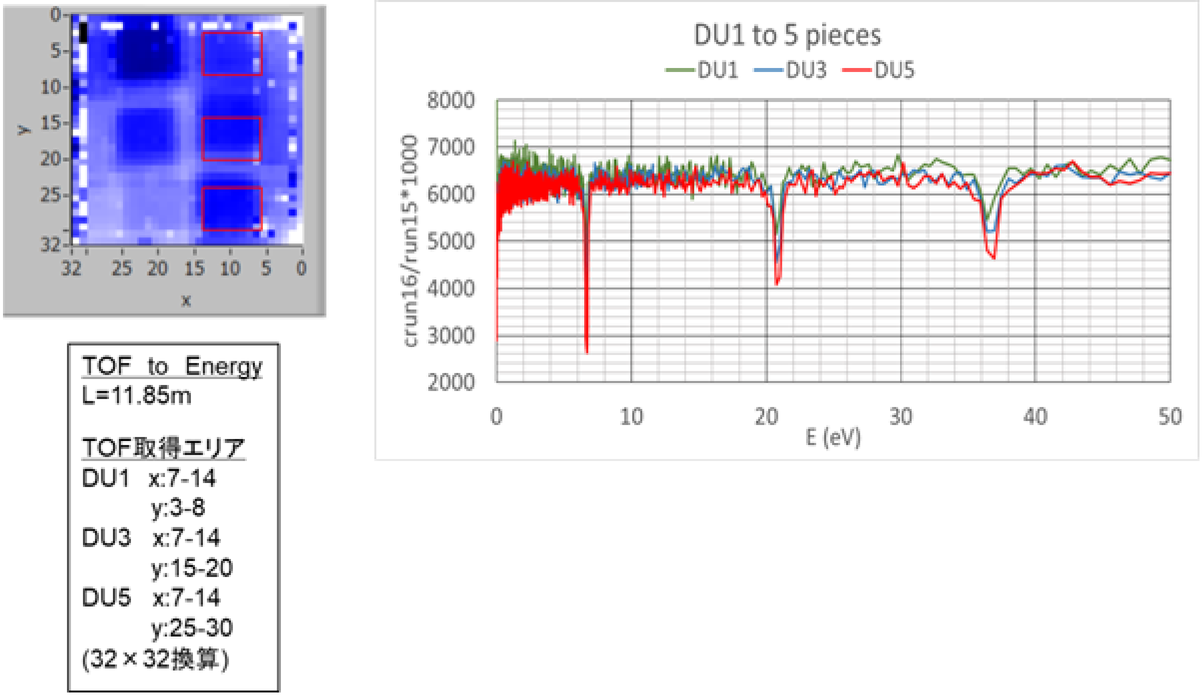


図 3.1.3.(2).④-6　DU 枚数毎の TOF スペクトル実測値

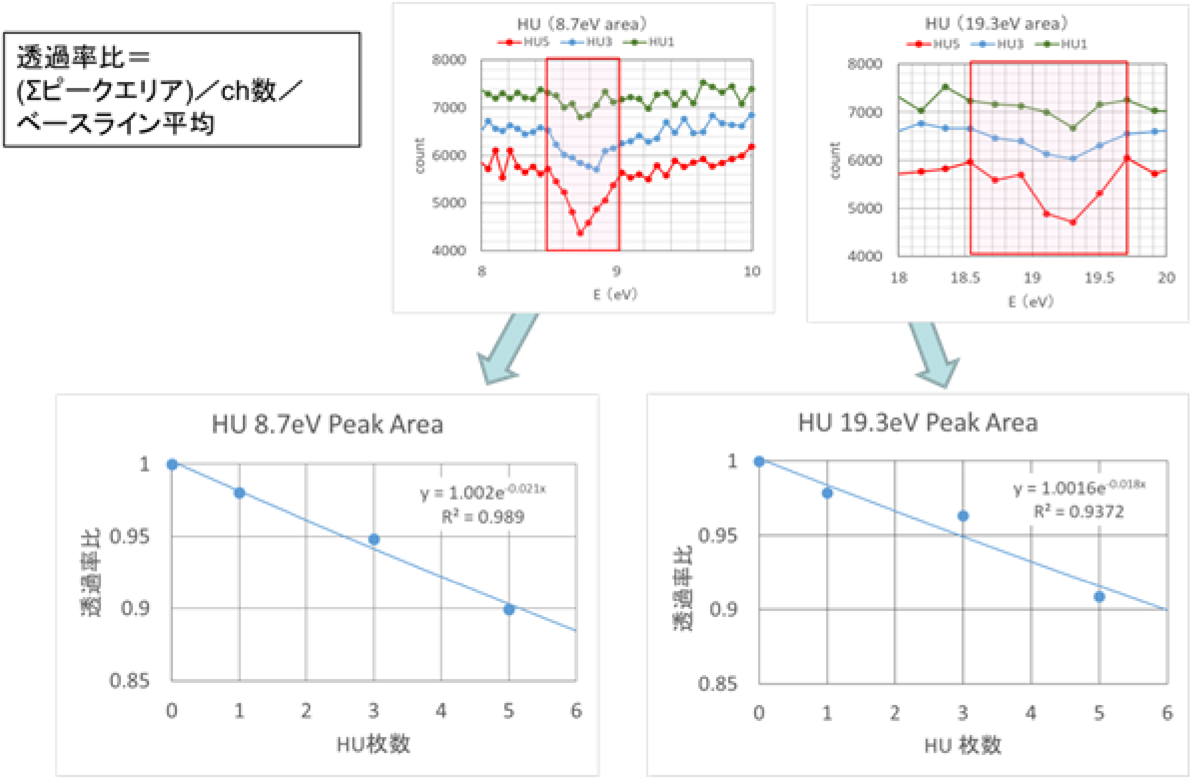


図 3.1.3.(2).④-7　 HU 枚数に対する共鳴点での透過率減衰特性

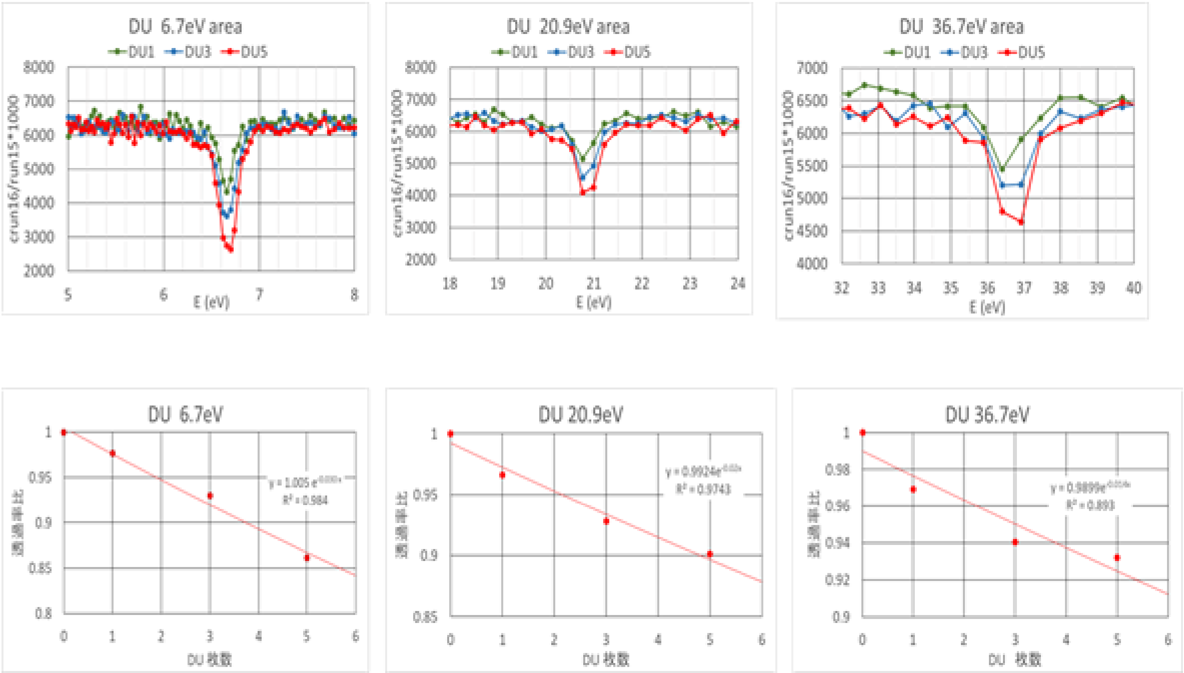


図 3.1.3.(2).④-8　 DU 枚数に対する共鳴点での透過率減衰特性

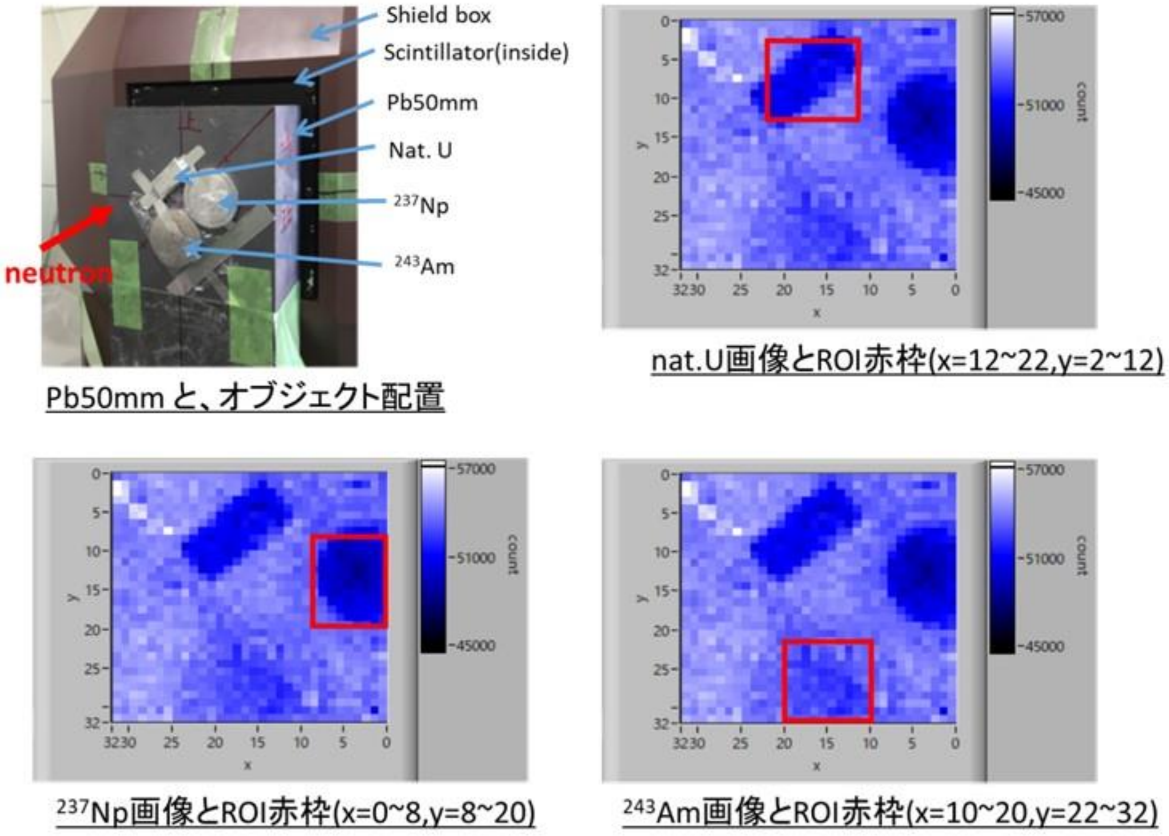


図 3.1.3.(2).④-9　Pb50mm 遮蔽下での U、Np、Am 被検体の画像測定

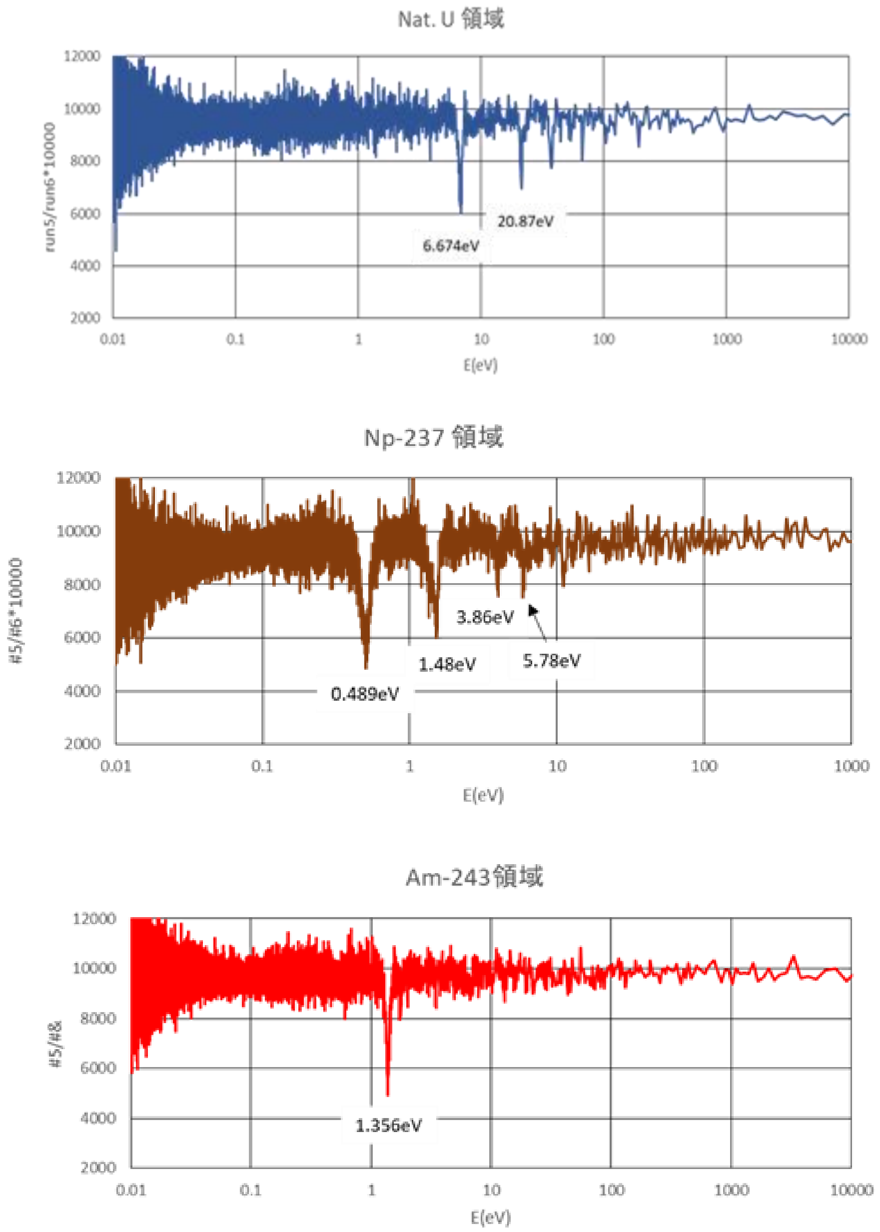


図 3.1.3.(2).④-10　天然 U、Np-237、Am-243 領域の透過中性子スペクトル

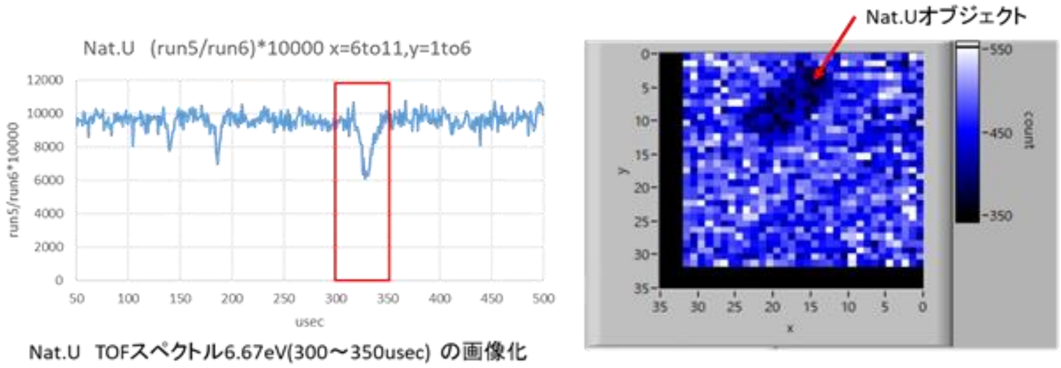


図 3.1.3.(2).④-11　天然 U 共鳴領域の画像化

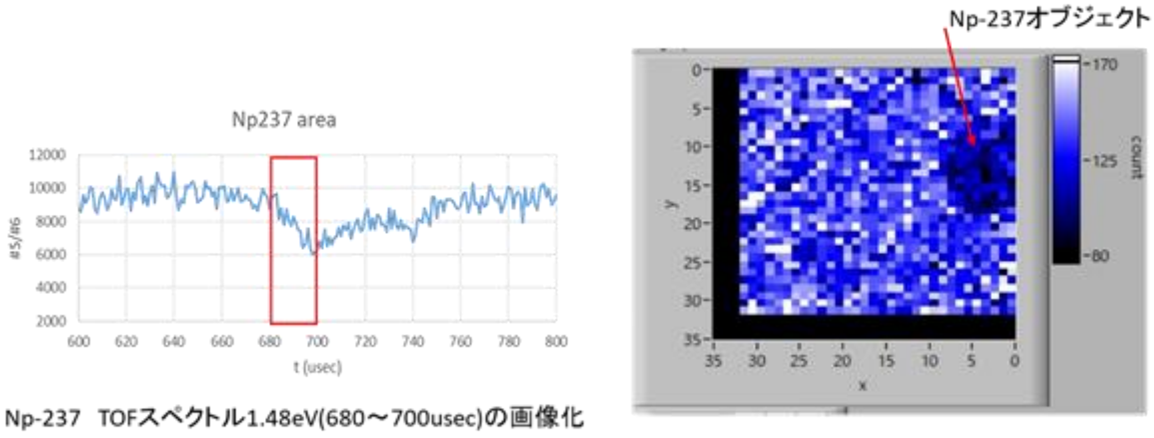


図 3.1.3.(2).④-12　Np-237 共鳴領域の画像化

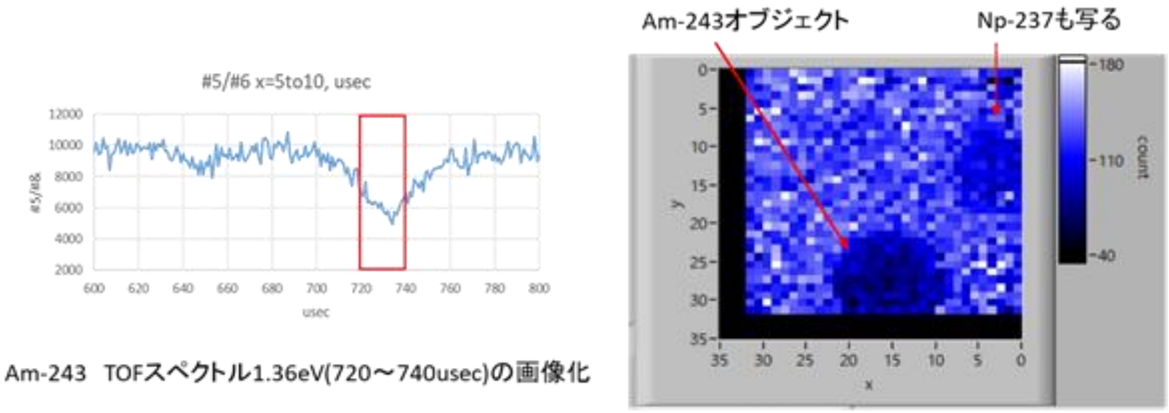
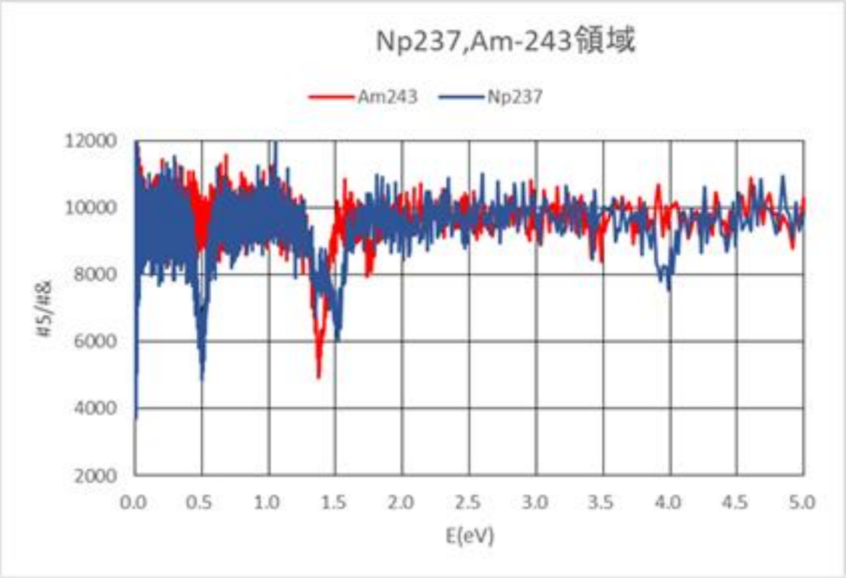
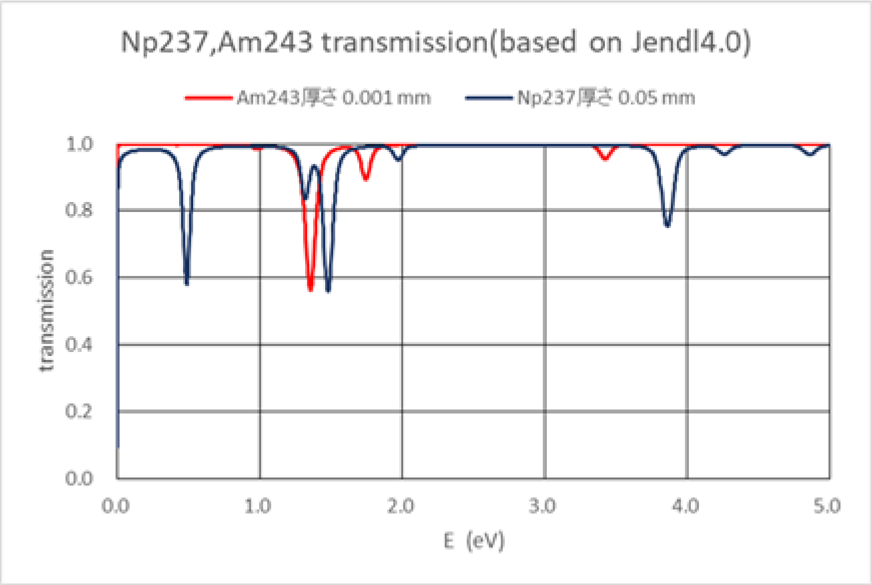


図 3.1.3.(2).④-13　Am-243 共鳴領域の画像化



Run5/run6　Np領域とAm領域実測値



Np237　0.05mm,　Am243　0.001mm
透過率計算値　(断面積:Jendl4.0)

図 3.1.3.(2).④-14　　Np-237、Am-243 透過スペクトル実測値(上図)と透過率計算値(下図)

3.2　物性値の定量・可視化技術の高度化（H26～H29）

3.2.1　中性子・X 線イメージングによる形状測定（H26～H29）

(1)　北大ライナックを用いた研究（再委託先：北海道大学）（H26～H29）

①　概要

3.1.3.(1).③節で述べたように 2 次元空間分解可能な飛行時間分析型中性子検出器では、空間分解能を犠牲にして時間分解能を高めざるを得ないため、情報の空間分布の把握を改善するためには、X 線或いは中性子による高精細透過画像に空間分解能の粗い時間分解イメージをマッピングする方法が考えられる。この手法を構築するため、平成 26 年度から平成 29 年度にかけて以下の事業を実施した。平成 26 年度は、基本データとなる中性子による高精細透過画像を得るため、中性子-光コンバータと高空間分解能デジタルカメラを組み合わせた高空間分解能型中性子検出器を試作し、測定試験を実施した。平成 27 年度は視野の異なる高解像度と低解像度の画像に関し、輝度値を元にしたマッピング及び位置合わせを行う手法について検討した。平成 28 年度は低空間解像度中性子解析情報を 3 次元マッピングする相手となる X 線による高精細な内部構造モデルを作成するための高エネルギーX 線 CT 装置を開発した。平成 29 年度は X 線 CT による内部構造モデルを元にした高解像度イメージと中性子による低解像度イメージにより相乗イメージングを行い、得られた元素分布情報を高分解能に 3 次元ボリュームモデル化する手法を開発した。

②　中性子-光コンバータと光電子増倍管を組み合わせた高空間分解能型中性子検出器の試作(H26)

2 次元空間分解可能な飛行時間測定用中性子検出器では、空間分解能を犠牲にして時間分解能を高めざるを得ない。そこで、中性子或いは X 線による高精細透過ラジオグラフィ画像に、空間分解能の粗い時間分解イメージをマッピングすることで、中性子飛行時間スペクトル解析による情報の空間分布を把握し易くする方法が考えられる。そこで平成 26 年度は、ここで基本データとなる中性子による高精細透過画像を得るための高空間分解能型中性子検出器を検討した。

ここで検討した検出器は、既存の 4 インチ中性子イメージ・インテンシファイア(CNII)を利用するものである。中性子イメージ・インテンシファイアは公称 20 μm 程度の空間分解能を持つ中性子イメージャーであり、現状で最も高分解能な 2 次元検出器の一つである。これを比較的安価に手に入る民生用のデジタルカメラと組み合わせることで、高精細なラジオグラフィ画像が得られる検出器を作製することができる。これによる空間分解能はサブmm以下となることが期待でき、一般的な飛行時間分解能 2 次元検出器の mm オーダーの分解能を充分に凌駕する。ここでは、非常に高い ISO 感度が選択できる ILCE-7s(ソニー)という機種を試験した。この特徴は、有効約 1220 万画素 35 mm フルサイズ CMOS センサを使用したこと、イメージセンサの 1 画素あたりの集光率を向上させ最高 ISO 感度 409600 としたことで、光イメージ取得用のセンサとして高感度・低ノイズ・広いダイナミックレンジという特性の適否を検討した。

検出器全体の体系模式図を図 3.2.1.(1).②-1 に示す。全体の構成は 3.1.3.(1).②節に示した高時間分解能型と基本的には同一で、こちらの方が時間分解動作を省ける分、測

定制御の回路もシンプルな構成になる。

北海道大学パルス中性子源により、試作検出器を用いて撮影した結果を図 3.2.1.(1).②-2～3 に示す。被写体は、中性子イメージ・インテンシファイアの入力窓に貼った、Cd 製の「KENS」文字である。ここでは光路上のミラーの影響により逆さ文字に写っている。図 3.2.1.(1).②-2 は ISO100、露出時間 10s の画像であり、全体に暗いが Cd 製の文字が明瞭に写っている。Cd の重なりや文字の中に含まれている隙間等もはっきり見て取れる。図 3.2.1.(1).②-3 は ISO1600、露出時間 60s と、感度及び露出時間を長くしたもので、全体にやや明るくなってきているが、Cd 文字もかなり明るく写ってしまっている。このように、ISO 感度を上げて露出時間を長くしたにもかかわらず画質が悪くなる方向に変化したのは、撮影時に混入した X 線の影響と考えられる。Cd 文字が明るくなり、Cd の重なりが見えなくなったことは、Cd を透過した X 線の影響が強いことを意味する。露出時間が長くなればなるほどこの影響は大きくなる。更に、全体的に画質が悪くなったのは透過画像を形成した X 線とはまた異なる影響をもたらす X 線の存在を意味する。例えば出力蛍光体に直接入射して発光する X 線があれば画像全体にざらつきの効果をもたらす。パルス中性子ビームを使用した試験測定では、比較的低い感度と短い露出時間で鮮明な中性子透過画像を得ることができたが、感度を上げ、露出時間を長くとるとかえって画質が低下したことになる。これは今回使用した CNII が X 線にも感度を持つ Gd 窓タイプであったことが影響していると考えられる。最適な撮影条件についてはセンサにより更に詰めていく必要があると考えられるが、極端な特性が必要ないとなると、実際に制御がし易いカメラを選択するという考え方も有り得る。

③ 輝度情報の物理量への変換による高空間分解能化及び複数の透過イメージデータの位置合わせ法の検討(H27)

物性値の空間分布を定量的に得るために、中性子共鳴吸収分光法では共鳴吸収ピークの形状を解析して温度や核種密度の情報を引き出すことから、これをイメージングに応用するには多数の解析結果を再構成して位置情報を付加しなければならない。本研究で目標とする小型中性子源の利用を前提とすると、位置情報の再構成のための一連の中性子スペクトルの測定には、X 線利用に比較すると格段に多くの時間が必要となる。この過程を効率化するためには中性子スペクトル測定の回数を減らすことが必須であり、限定された回数の中性子測定から得られる漠然とした位置情報を、対象物の内部構造に合わせて精密化する手法の確立が求められる。平成 27 年度は、このような手法の検討の基盤として、X 線イメージングで得られるような高空間分解能の情報をもとにした低空間分解能情報への位置情報の付加について、計算機シミュレーションにより検討した。即ち、本事業で検討している中性子共鳴吸収分光法を用いる透過イメージングでは、検出器の性能の違いにより、X 線イメージングとは空間分解能が異なって低分解能となり、更に測定時には中性子及び X 線用検出器の交換により被検体の撮影視野が変わってくると考えられる。この両者の透過イメージを空間的に一致させる必要があるため、空間分解能が異なるイメージの重畳法についての検討を行うものである。この枠組みで、計算機シミュレーションを用いた輝度情報の物理量への変換による高空間分解能化について、また

被検体位置及びサイズの異なる複数の透過イメージデータを使用した相互情報量を用いる位置合わせ法について検討を行った。

X 線と中性子で異なる 2 つの検出器を用いた場合、同一の被検体の透過イメージを得たとしてもそれぞれの画像の中での被検体の位置が一致するとは限らない。そのため、低解像度の輝度値（物理量）分布を高解像度輝度値分布へマッピングするには、X 線と中性子両方の画像における被検体の位置を合わせた後に行わなければならない。この 2 つの画像の位置を合わせる手法としては、例えば相互情報量を用いた位置合わせ法(1)が利用できる。

相互情報量（mutual information）とは、2 つの確率変数の相互依存の尺度を表す量である。2 つの画像の位置合わせで考えると、両画像の一致度が高ければこの相互情報量が大きな値を持つことになる。これを利用し、画像間の相互情報量が最大値を取るような位置の変化量を求めることで位置合わせを実現することが可能となる。2 つの画像間の相互情報量を求める手順は大きく分けると次のとおりである。

① 画像の階調変換等の画像処理

② 2 次元ヒストグラムの計算

③ 相互情報量の計算

この手順に従い、まず、濃淡の範囲を等間隔に分けて級（class）をつくる階調変換を行う。X 線画像の輝度値はダイナミックレンジが大きく、濃淡の分解能も高いことが多い。これに対し中性子画像は平坦なことが多いという差があるが、両者共に画像の濃淡変化がある範囲の間を例えば 128 個の級に変換してしまう。またこのとき、視野の違いを無くすため、必要に応じて画像のトリミングやリサイズを行っておく。

次に、諧調変換された 2 つの画像から 2 次元ヒストグラムを作成する。今、画像 A のあるピクセルの級が a_1、画像 B の同じ位置のピクセルの級が b_1 だとすると、2 次元ヒストグラム上の座標（a_1, b_1）で+1 カウントする。同様に、画像 A の別なピクセルの級が a_2、画像 B の対応するピクセルの級が b_2 だとすれば、2 次元ヒストグラム上の座標（a_2, b_2）に+1 カウントする（図 3.2.1.(1).③-1）。このようにして画像 A, B の全てのピクセルに対してこの操作を行い、2 次元ヒストグラムを作成する。このようにすると、もし画像 A, B がまったく同じ画像だった場合には、2 次元ヒストグラム上に傾き 45 度の直線が引かれることになる。級 a_{i}, b_{j} における度数分布 $h(a_{\mathrm{i}}, b_{\mathrm{j}})$ は次の式で表される。

$$h\left(a_i, b_j\right) = \sum_{k=1}^{pix} \delta\left(C_{\mathrm{A}}\left(k\right) - a_i\right) \cdot \left(\delta\left(C_{\mathrm{B}}\left(k\right) - b_j\right)\right) \qquad (3.2.1\text{-}1)$$

ここで、δ はクロネッカーのデルタ、$C_{\mathrm{A}}(k)$、$C_{\mathrm{B}}(k)$ は画像 A, B のピクセル k における級、pix は画像のピクセルの総数である。

最後に、この 2 次元ヒストグラムの度数分布から相互情報量を求める。まずその計算に必要な確率分布を求める。図 3.2.1.(1).③-2 に、2 次元確率分布 $p(a_i, b_j)$ 及び周辺確率分布 $p(a_i)$, $p(b_j)$ の概念図を示す。2 次元確率分布 $p(a_i, b_j)$ は次の式で表される。

$$p\left(a_i, b_j\right) = \frac{h\left(a_i, b_j\right)}{\sum_{i=1}^{bin}\sum_{j=1}^{bin} h\left(a_i,\ b_j\right)} \qquad (3.2.1\text{-}2)$$

ここで、bin は階調を分けた級の総数である。また、周辺確率分布 $p(a_i)$，$p(b_j)$ は 2 次元ヒストグラムを縦方向もしくは横方向に積算したものであり、それぞれ次の式で表される。

$$p\left(a_i\right) = \sum_{j=1}^{bin} p\left(a_i, b_j\right) \qquad (3.2.1\text{-}3)$$

$$p\left(b_j\right) = \sum_{i=1}^{bin} p\left(a_i, b_j\right) \qquad (3.2.1\text{-}4)$$

このとき、画像 A，B に関する相互情報量 MI(A，B)は次の式で定義される。

$$MI\left(\mathrm{A},\mathrm{B}\right) = \sum_{i=1}^{bin}\sum_{j=1}^{bin} p\left(a_i, b_j\right)\log_2 \frac{p\left(a_i, b_j\right)}{p\left(a_i\right)p\left(b_j\right)} \qquad (3.2.1\text{-}5)$$

2 つの画像 A と B の一致度が高ければこの MI(A，B)が大きくなるので、最大化するように画像の位置を移動させて調整する。例えば、相互情報量 MI の最大値を求める手法として滑降シンプレックス法、画像の幾何学的変換（画像の移動）の際の補間方法としてバイリニア補間を用いれば良い。図 3.2.1.(1).③-3 にこの方法で中性子同士の画像の位置合わせをした例を示す。左図が位置合わせ前で、画像下部のカドミウムの影に注目するとわかりやすいが、基準画像と位置合わせ前の画像との比においては位置がずれているため、被検体と被検体がない領域との境界でコントラストが白黒逆転していることがわかる。一方、右図に示した基準画像と位置合わせ後の画像との比の画像においては、コントラストの逆転している領域がかなり小さくなっており、位置合わせができていることを示している。

次に、位置を合わせた後、低解像度の 2 次元中性子測定結果を解析して得たピクセル毎の物理量を高精細な X 線画像にマッピングする手法について検討した。図 3.2.1.(1).③-4 に輝度値への物理量のマッピング法の概念図を示す。一般的な中性子検出器の 1 ピクセルのサイズは mm オーダーであり、一方でカメラ等の 1 ピクセルのサイズは 100μm 以下である。従って、図に示すように中性子イメージ画像の 1 ピクセルのサイズは X 線イメージ画像の数 10 ピクセル×数 10 ピクセルのサイズに相当する。この X 線イメージ画像の数 10 ピクセル角の範囲に中性子イメージ画像の 1 ピクセルの情報を分配する。具体的な手順としては、まず中性子画像の 1 ピクセルに相当する範囲内の X 線画像の複数のピクセルを 1 つのまとまりとして考え、その 1 つのまとまりの中で平均の輝度を 1 とした平均輝度分布を作成する。X 線画像における輝度は撮像対象の密度に反比例して減少するため、求めた平均輝度値の逆数を対応する中性子画像のピクセルにおける密度に掛け合わせることで、X 線高精細画像のあるピクセルのまとまりに物理量を分配することができる。また、温度に関しても同様の手順が利用できる。この時、X 線画像のあるピクセルに相当する位置に被検体がない場合、そのピクセルにおける輝度値は被検体がある位置のピクセルに比べ大きくなるはずである。本手法では輝度値に閾値を設定し、ある一

定以上の輝度値であればそのピクセルにおける物理量（密度）を 0 として扱い、その他の輝度値が閾値を超えないピクセルに対してのみ物理量の分配を行うようにしている。この手順を全ての領域に対して行うことで高精細物理量分布の取得が可能となる。図3.2.1.(1).③-5 にこの手法のシミュレーションを示した。図中(b)の X 線画像を利用することで、中性子画像から求めた密度を(d)のように高解像度化することができる。

④ 高エネルギーX 線を用いた CT 撮像のためのステップ撮像装置の開発と制御ソフトウェアの整備(H28)

中性子共鳴吸収分光法を利用したイメージング及び CT 撮像には多大な測定時間を要すると考えられる。また、中性子のエネルギー分析が可能な 2 次元検出器の空間分解能は 1mm 程度であることから、本事業で目標とする 400 μm の Pu スポットの検出は可能であるが、そのサイズや形状の把握までは行うことができない。一方で、被写体の形状認識のみであれば X 線を利用した方が線源強度や検出器の空間分解能の観点から有利である。X 線 CT 撮像を行うことで、物体の内部形状を高精細で把握することが可能となり、その 3 次元形状データに中性子による情報を付与することで高空間分解能な物性値の可視化が可能になると考えられる。そのため、平成 28 年度は、透過力が高く迅速な測定が期待できる高エネルギーX 線 CT により被写体の形状測定を行うことを検討するため X 線 CT 撮像を行うためのステップ撮像装置の開発とステップ撮像の制御**ソフトウェア**及び撮像した画像の CT 再構成**ソフトウェア**の整備を行った。

X 線 CT 撮像のためのステップ撮像装置には X 線源、X 線画像検出器、被検体の回転ステージの 3 つの要素及びそれらを制御する装置・ソフトウェアが必要となる。本事業では、X 線源として浜松ホトニクス製のマイクロフォーカス X 線源（L8121-02）を選択した。この線源は X 線焦点寸法が 7～50 ミクロンと非常に小さいため、拡大撮影においてもボケの少ない鮮明な画像を取得することが期待できる。最大管電圧は 150 kV、最大電流は 500 μA（75 W）と比較的高出力である。X 線画像検出器に関しては、東芝製の X 線イメージ・インテンシファイア（Ultimage™γ）（以降、X 線 I.I.）を X 線のコンバータとし、そこに産業用 CMOS カメラ（東芝テリー、DU657MC）を光学的に接続することで X 線画像検出器とした。回転ステージはステッピングモータ駆動のパルス当たり 0.005°の分解能を有する自動回転ステージ（シグマ光機製、SGSP-160YAW）を使用した。回転ステージはレール上に設置してあり、X 線源と被検体の距離を変えることで拡大率の異なる画像を取得できる。これらの機器類を正確なアライメントが取れるよう一枚のブレッドボード上に設置した（図 3.2.1.(1).④-1）。自動回転ステージ及び X 線源はリモートによる操作が可能で、測定前にパラメータをセットすることにより、自動的に一連の測定を実施できる。

この装置で撮影したデータから CT 再構成を行うために必要なパラメータを決定した後、実際にステップ撮像により CT 撮像を行った。用いた被検体の一例としては、アルミニウム製で形状は直径 20 mm、高さ 10 mm の円筒内に径の異なるタンタル線が挿入したもので、線径はそれぞれ 0.1 mm、0.2 mm、0.4 mm、1.0 mm、1.5 mm のものである。これを X 線源が出力 150 kV、120 μA、被検体の回転角が 360°、576 ステップ（つまり 0.625°刻

み）でステップ撮像した結果を、コーンビーム CT 用の再構成ソフトウェア「COBRA」を用いて画像再構成した。また、再構成した 3 次元データの可視化には断層画像の 2 次元/3 次元的可視化ソフトウェア「ExFact VR 2.0」を用いた。この CT 再構成した結果を ExFact VR 2.0 にて可視化した様子を図 3.2.1.(1).④-2 に示す。このソフトウェアではルックアップテーブルを調整することで特定の濃度の物質のみを表示させることができるので、アルミニウムが見えないようにルックアップテーブルを調整して、内部の金属線のみが見えるようにした。この被検体では 0.1 mm から 1.5 mm までの金属線が挿入されているが、0.1 mm までの金属線まで全て再構成されたことが確認できた。本事業の分解能の目標は 400 μm であり、それを上回る性能での形状認識に成功した。

⑤ X 線 CT と中性子ラジオグラフィを組み合わせた高分解能 3 次元元素分布イメージの構築(H29)

放射線による非破壊透過ラジオグラフィの最終的な目標の一つは、CT による 3 次元測定である。しかしながら、中性子ビームは X 線より一般に強度が低く、積分型ラジオグラフィでも中性子は X 線の数倍から数 10 倍の時間がかかる。密度や温度等の情報を得る目的で行うエネルギー分析型の中性子測定では更に測定時間が必要なため、中性子による情報を 3 次元化する CT 測定は測定時間の面でハードルが高い。そこで、中性子による測定回数を減らしても 3 次元化可能な X 線 CT 像への中性子情報マッピングを考える必要がある。平成 29 年度は 3.1.3.(1).④節で示した相乗イメージングの適用による 3 次元ボリュームモデルの構築手順を整理し、実際に高エネルギーX 線 CT 測定によって得られた 3 次元のボリュームモデルに対して中性子測定による情報を付与して元素分布ボリュームモデルを再構成した。

以下、整理したボリュームモデル再構成の手順を示す。

① X 線 CT 撮像を行い、被検体の高精細な 3 次元ボリュームモデル（ボクセルデータ）を取得する。

② 被検体の 3 方向（x, y, z 軸方向）からの中性子透過画像をそれぞれ取得する。

③ X 線によるボクセルデータから 3 方向それぞれの投影画像を作成し、中性子画像と相乗イメージングを行う。

④ 相乗イメージングの結果できた 3 方向の元素分布図の数値をボクセルデータに逆投影して各方向から足していく。

⑤ 元素分布図の数値の組み合わせによりボクセルデータに入る数値が決まるので、各ボクセルにおける元素の弁別が可能となる。

中性子の 3 次元データを取得するには膨大な時間が必要となるが、この手法では限られた方向からの中性子投影データを取得するだけなので、大幅に測定時間を減らし効率化することができる。また、途中で相乗イメージングを行うのは、X 線 CT 像のコントラストが小さい場合でも元素の特定が可能になることや、CT 特有のアーチファクトによる影響を減少させることができるという利点からである。つまり、X 線 CT 像のみで元素位置の特定が行えるような状況では相乗イメージングを行う必要はないが、より一般的な状況では原子番号の近い元素複数の存在やアーチファクトの影響が無視できないことが

想定されるためである。

図 3.2.1.(1).⑤-1 に元素分布ボリュームモデル再構成用の被検体を示す。被検体は直径 20 mm×高さ 10 mm の Al 円筒に Ta, W, Pb, In, Ag の 1 mm 径金属線を埋め込んだものである。この被検体に対して高エネルギーX 線 CT 測定を行い、図のようにボリュームモデルを構築した。図ではルックアップテーブルの調整で Al 円筒を不可視にしており、各金属線のみが見えている。この測定ではボクセルサイズが 33 μm^3 となる。この被検体に対し、GEM 検出器で直交する x,y,z 方向について中性子透過画像を取得した結果が図 3.2.1.(1).⑤-2 である。中性子測定では測定体系が拡大光学系とならないので、GEM 検出器の 100 mm×100 mm 検出窓に対して、限られた領域にのみ被検体が写ることになる。この段階では、被検体中にワイヤ形に物質が入っていることが視認できる。

次に、X 線 CT 像から中性子の画像と撮像方向が一致する投影画像を作成する。それら X 線及び GEM で得た中性子画像との間で X 線画像を基準に画像拡大をしながら位置を合わせた結果が図 3.2.1.(1).⑤-3 となる。X 線画像の方は一部アーチファクトが見られるが、全体として金属線が明瞭に確認できる。一方、中性子画像は 1 ピクセルが約 0.8 mm角であり、拡大によりコントラストも不明瞭で、統計が低い画像であることがわかる。このように中性子測定では非常に質の悪い画像しか得られていないが、3.1.3.(1).③節で述べた相乗イメージングを適用すると図 3.2.1.(1).⑤-4 のようにある程度明瞭に金属線の存在部分が浮かび上がってくる。中性子画像の統計が悪いため、相乗イメージングの結果得られた金属線には色の違いとして示されている揺らぎが存在している。このままでは金属線の区別がつかないため、金属線の領域内で揺らぎを平均してしまった結果が図 3.2.1.(1).⑤-5 である。この結果から、平均値をとった場合、各金属線の元素の違いが明らかになることが分かる。

3 方向からの相乗イメージングの結果が得られたので、次にこの結果を数値としてボクセルの並びに足し込んでいくことでボリュームモデルを再構成する。この手順の模式図を図 3.2.1.(1).⑤-6 に示す。それぞれの方向の相乗イメージングで得た数値を、被検体の投影方向に向かって一列にボクセルに足し込んでいく。これを x,y,z の 3 方向について行うと、ボクセルには数値の大小として領域ができる。これらの領域の数値の差は、元素の違いに起因するもので、ある適当な範囲で閾値を設定することによりそれぞれの元素の存在ボクセルを区別することが可能となる。この任意の閾値は相乗イメージングの 2 次元ヒストグラム上で各スポットを区別するときに設定した値と同じでよい。図 3.2.1.(1).⑤-7 の右図は、この手順により元素を弁別してその分布を 3 次元可視化した結果である。金属線の湾曲等、左図に示した X 線 CT によるボリュームモデルとほぼ同じ解像度で元素の違いを可視化できている。図 3.2.1.(1).⑤-8 は、このボリュームモデルをスライスした結果を示しており、各金属線の中も元素がしっかりと詰まっていることがわかる。

このように、解像度や統計が異なる X 線及び中性子画像から、相乗イメージングして最終的にそれぞれの領域を平均することで元素弁別した 3 次元モデルを作り出すことができた。相乗イメージングは、統計が悪く粗い解像度のデータでも別な測定による補完を受けて新しい情報を生み出すことができる。この方法を利用すれば、元素弁別した上

に、元素毎の各種物理量を重ねることで、物体内の構造に基づいた物理量の 3 次元分布を構築することも可能となる。また、単純に物理量の 2 次元分布についても、いくつかの方向からのデータを使って位置合わせとボリュームモデル再構成の手順を踏むことで、3 次元分布モデル化することが可能になると考えられる。

⑥ まとめ

本章では、2 次元空間分解可能な飛行時間分析型中性子検出器を用いる場合において、情報の空間分布の把握を改善するためには、X 線或いは中性子による高精細透過画像に空間分解能の粗い時間分解イメージをマッピングする方法を開発した。そのために、基本データとなる中性子による高精細透過画像を得るため、中性子-光コンバータと高空間分解能デジタルカメラを組み合わせた高空間分解能型中性子検出器を試作し、測定試験を実施した。また、視野の異なる高解像度と低解像度の画像に関し、輝度値を元にしたマッピング及び位置合わせを行う手法について検討し、低空間解像度中性子解析情報を 3 次元マッピングする相手となる X 線による高精細な内部構造モデルを作成するための高エネルギー X 線 CT 装置を開発した。これらの知見を基に、X 線 CT による内部構造モデルを元にした高解像度イメージと中性子による低解像度イメージにより相乗イメージングを行い、得られた元素分布情報を高分解能に 3 次元ボリュームモデル化する手法を開発した。

これまで中性子分光法を用いた 3 次元 CT 画像の取得には膨大な時間を費やしていたが、本手法を用いることで大幅な測定時間の短縮が可能となった。これは、本研究独自の成果である。以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。

参考文献

(1) J. P. Pluim, J. B. A. Maintz and M. A. Viergever: Mutual-information-based registration of medical images: A survey, IEEE Trans. Medical Imaging, vol. 22(8), pp. 986-1004, (2003).

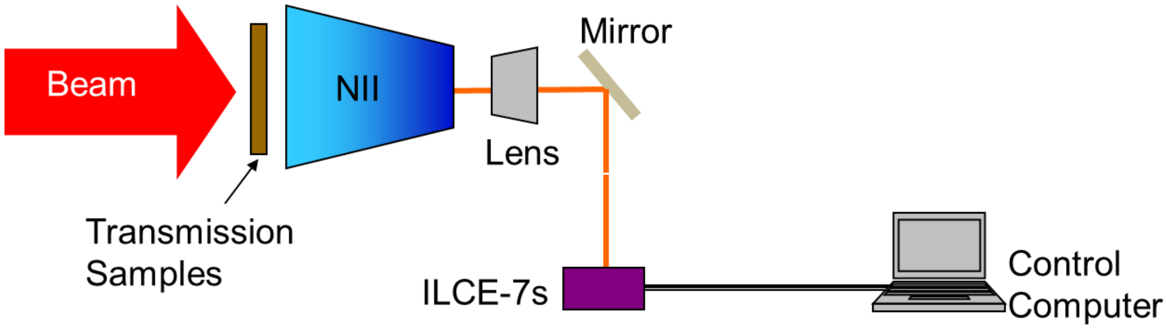


図 3.2.1.(1).②-1. 試作した高空間分解能型中性子検出器の体系模式図

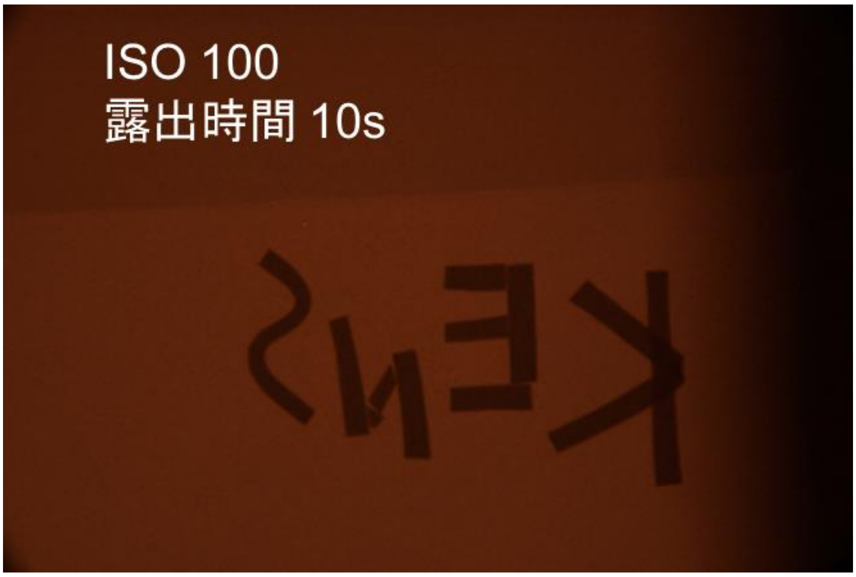


図 3.2.1.(1).②-2　パルス中性子を用いた試作高空間分解能型検出器による撮影結果
（ISO100、露出時間 10 s）

図 3.2.1.(1).②-3　パルス中性子を用いた試作高空間分解能型検出器による撮影結果
（ISO1600、露出時間 60 s）

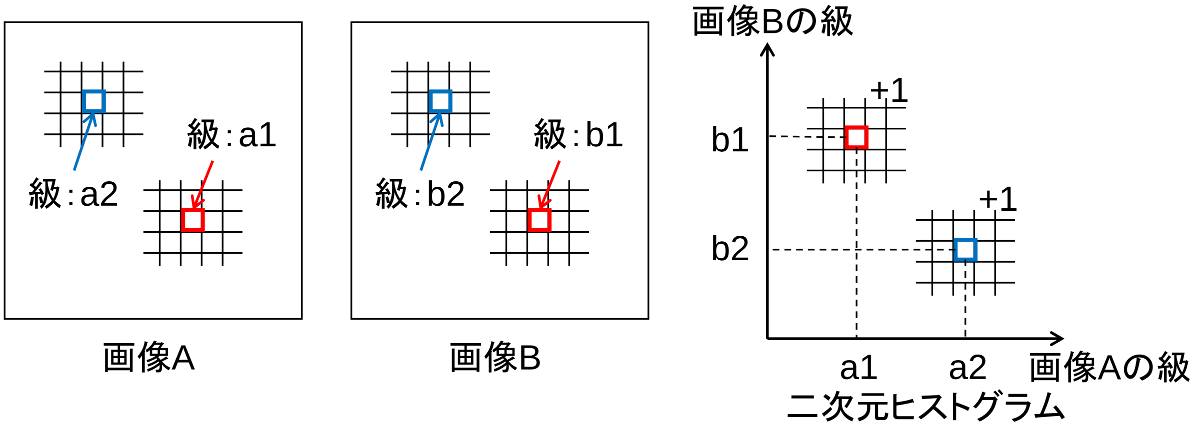


図 3. 2. 1. (1). ③-1　二次元ヒストグラムの概念図

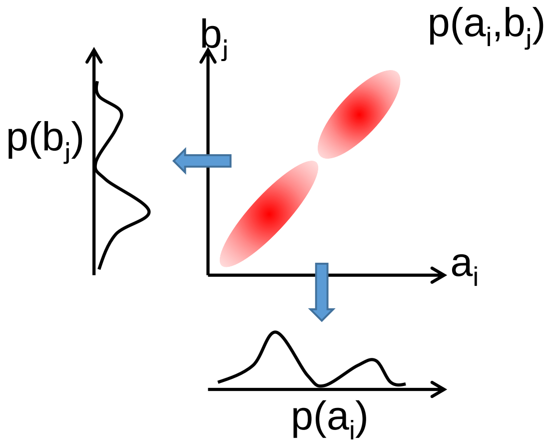


図 3. 2. 1. (1). ③-2　結合確率分布 $p(a_i, b_j)$ 及び周辺確率分布 $p(a_i)$, $p(b_j)$ の概念図

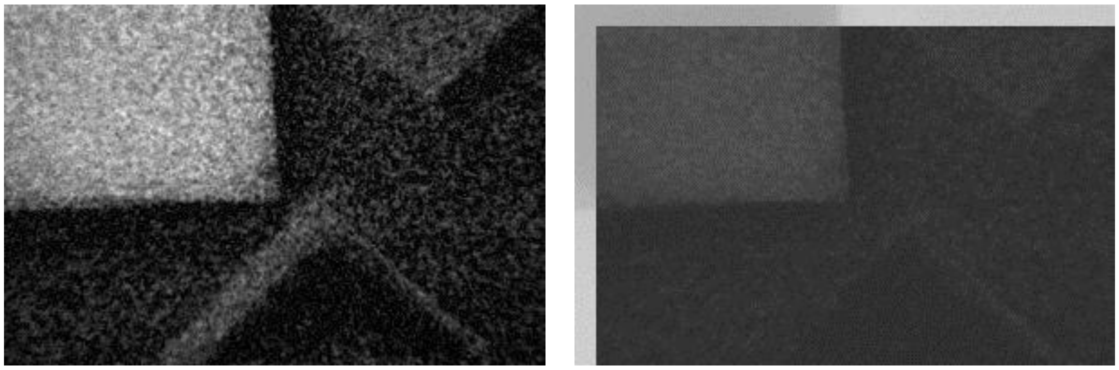


図 3. 2. 1. (1). ③-3　基準画像と位置合わせ前の高精細検出器による中性子画像との比（左）と位置合わせ後の中性子画像との比（右）

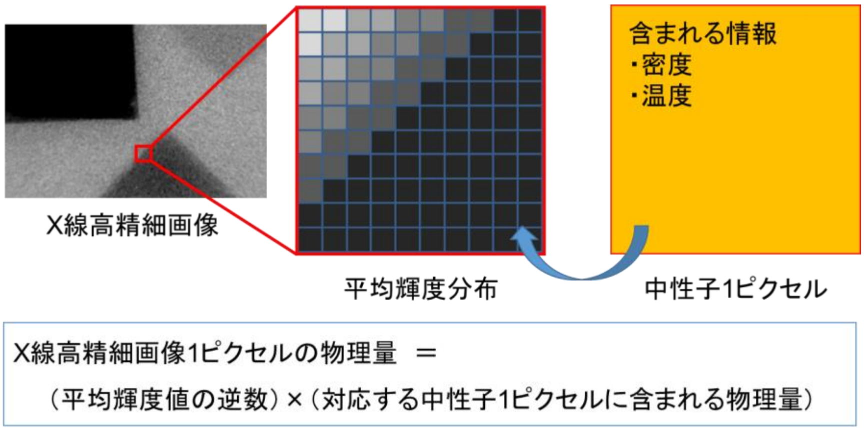


図 3.2.1.(1).③-4　輝度値への物理量のマッピング法の概念図

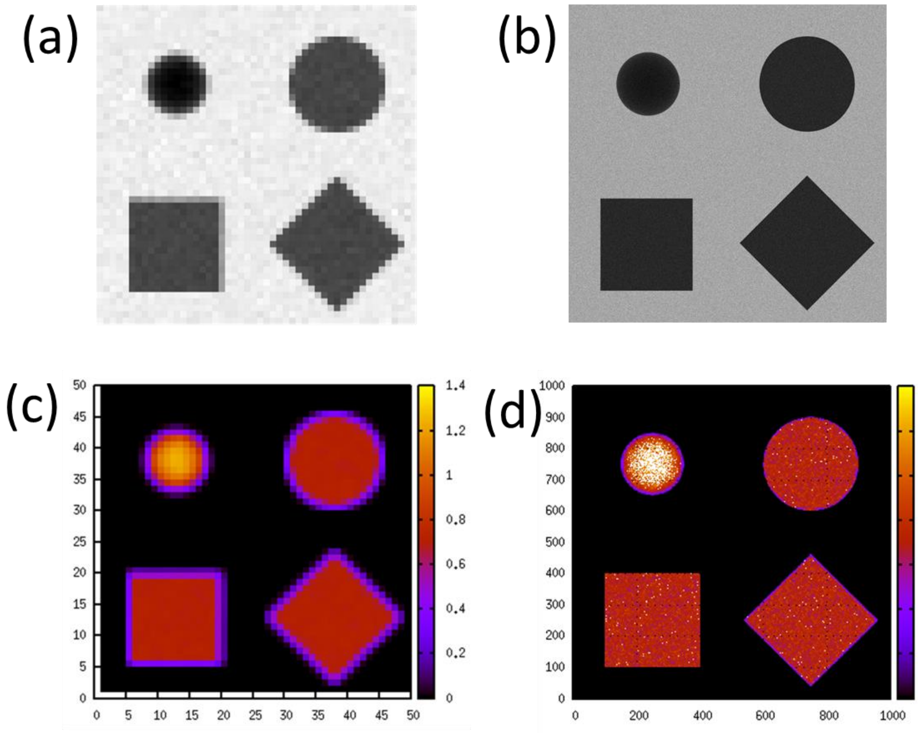


図 3.2.1.(1).③-5　物理量マッピングのシミュレーション。(a)中性子画像、(b)X 線画像、(c)中性子画像より求めた密度分布、(d)物理量マッピングにより高精細化した密度分布

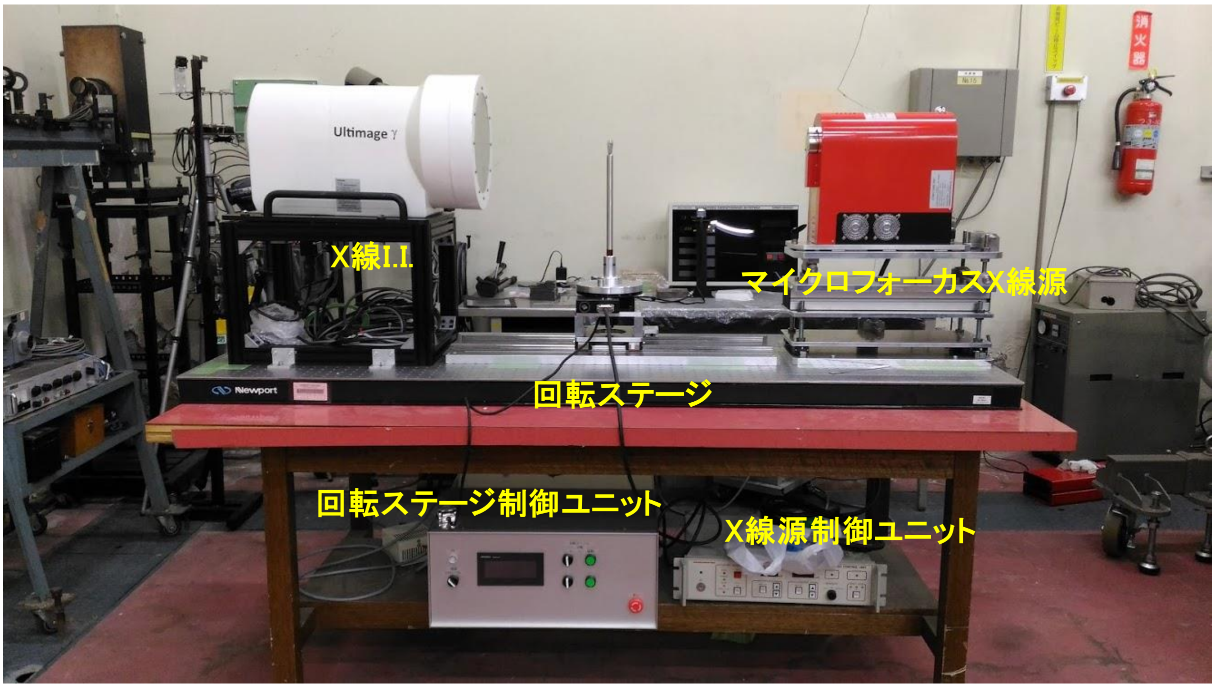


図 3.2.1.(1).④-1　ステップ撮像装置

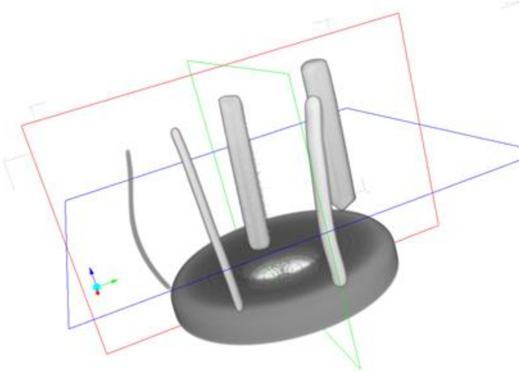


図 3.2.1.(1).④-2　模擬被検体の CT 再構成結果

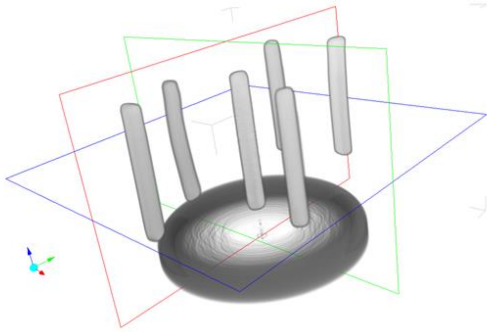


図 3.2.1.(1).⑤-1　元素分布ボリュームモデル再構成用被検体の CT 像

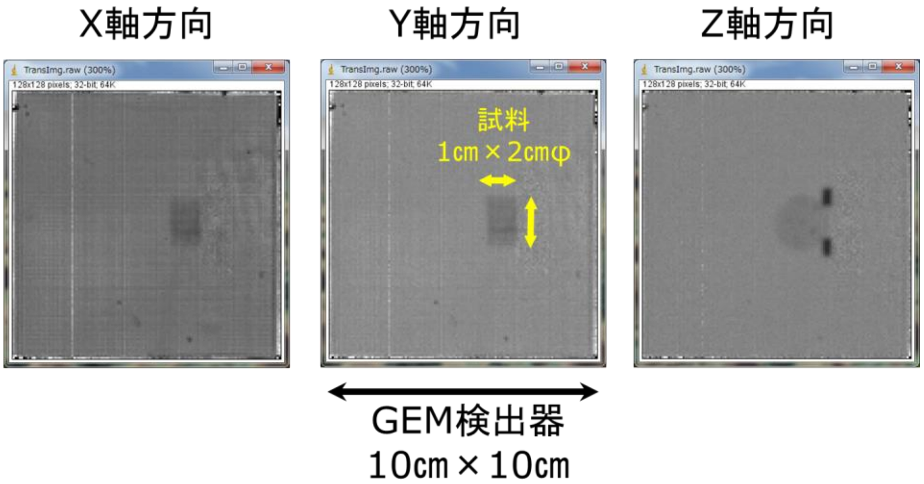


図 3.2.1.(1).⑤-2　元素分布ボリュームモデル再構成用被検体の中性子透過画像

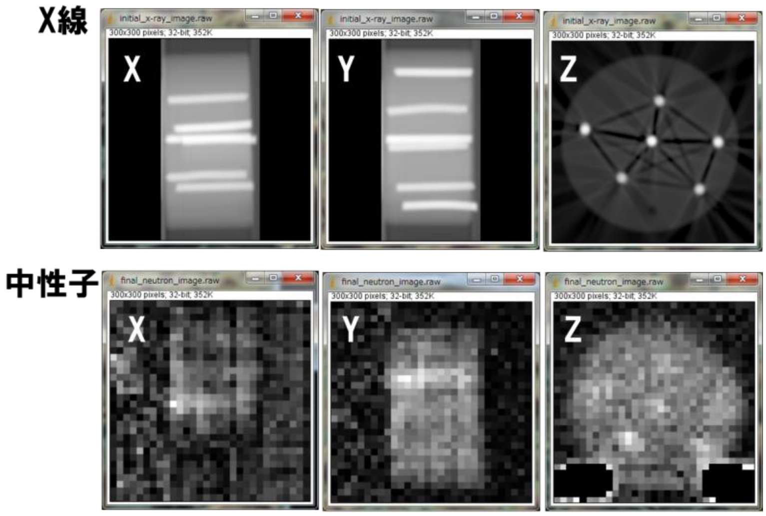


図 3.2.1.(1).⑤-3　 X 線 CT からの投影画像と、その X 線画像を基準に位置合わせした中性子透過画像

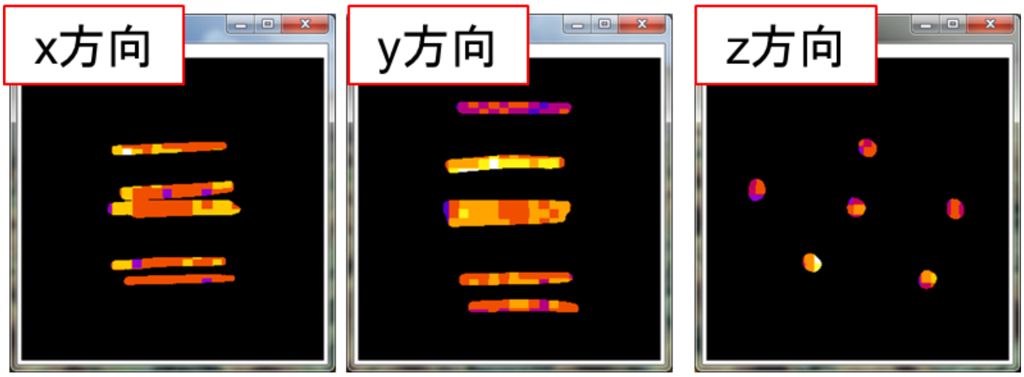


図 3.2.1.(1).⑤-4　位置合わせ後の X 線及び中性子画像の相乗イメージングの結果

図 3.2.1.(1).⑤-5　各金属線領域内の相乗イメージング値を平均した結果

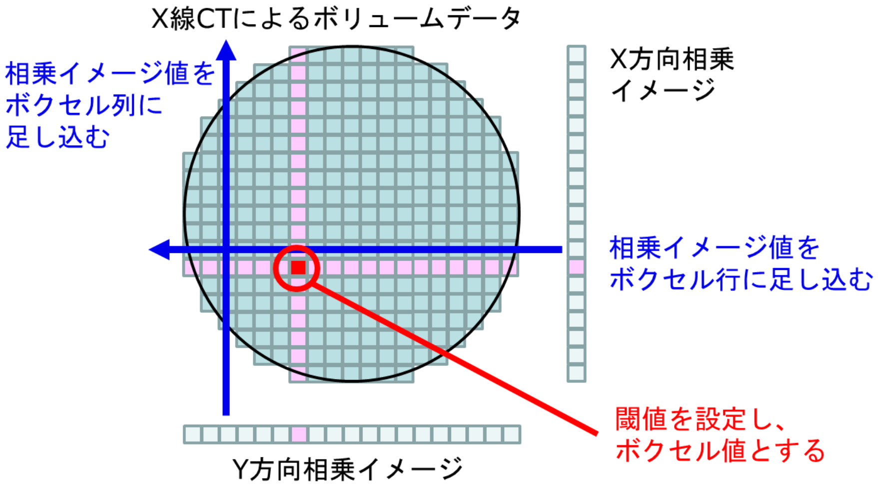


図 3.2.1.(1).⑤-6　ボリュームモデルの再構成について Z 方向から見た模式図

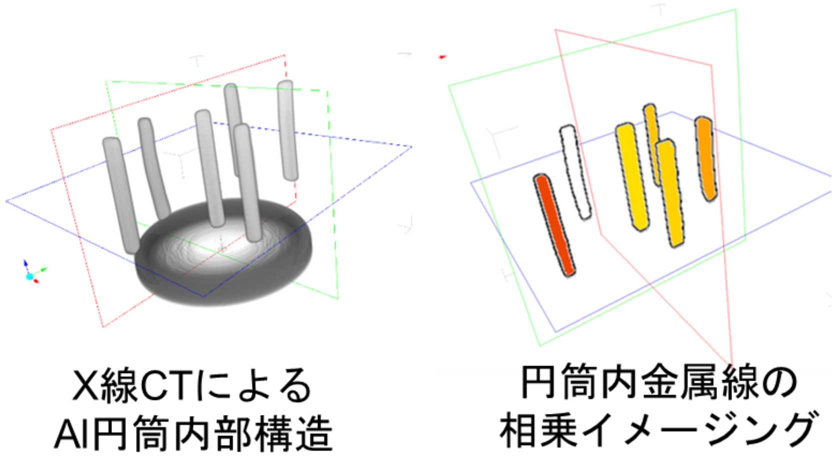


図 3.2.1.(1).⑤-7　再構成されたボリュームモデルの 3 次元イメージ

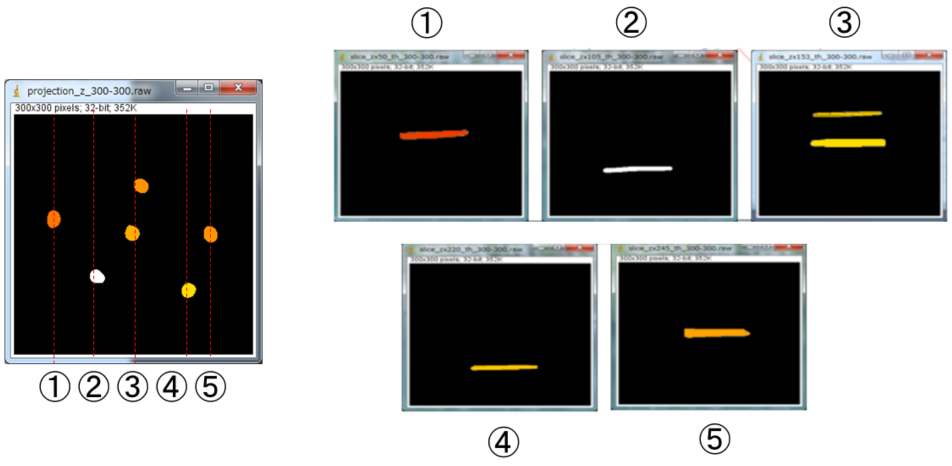


図 3.2.1.(1).⑤-8　再構成されたボリュームモデルのスライス画像。
左図の赤点線部でスライスした結果を右図に示した

(2)　京大ライナックを用いた研究（H28～H29）

①　概要

核燃料物質の定量及びその形状把握に向けて、平成 28 年度は京大炉ライナックの 12m 測定室に高空間分解能型中性子イメージング装置を整備し、模擬燃料被検体を用いた性能試験を行った。また、中性子カラーイメージインテンシファイアによる可視化結果との比較により、空間分解能の評価を行った。更に、サブピクセルシフト法を用いた空間分解能の改良を行った。平成 29 年度には実証試験として、模擬 MOX 燃料被検体及び実際の核燃料物質と MA 核種に対する中性子イメージングを実施した。

② GEM検出器及び設置台の整備、GEM検出器の性能試験（H28年度）

高空間分解能型中性子イメージング装置として、GEM 型検出器 THIN-GEM (Bee Beans Technologies Co.,Ltd.)の整備を行った。本検出器の時間分解能は 10 ns、空間分解能は 0.8mm、検出面積は 100×100 mm である。GEM検出器本体の写真を図 3.2.1.(2).②-1 に示す。また、GEM 型検出器等を設置するために、図 3.2.1.(2).②-2 に示すように検出器設置台を２台整備した。この検出器設置台は耐荷重 500 kg であり、検出器の他にガンマ線遮蔽体等の重量物も設置可能である。また、検出器設置台下部からの回り込みにより検出器に入射する中性子線及びガンマ線を遮蔽することでバックグランドの低減を目的として、Bi_2O_3及びB_4C入りエポキシ樹脂をブレッドボード下面に装着した。

GEM 検出器の空間分解能の評価を行うため、京大炉ライナックの 12 m 測定室において性能試験を行った。本実験の概略図を図 3.2.1.(2).②-3 に示す。GEM 型検出器は 12m 測定室内のビームライン上に設置し、制御用 PC 及び高圧電源は制御室に配置した。本実験において、検出器に印加した電圧は-2500 V であった。また、測定中は Ar-CO2 ガス(70:30)を一定の流量で流し続けた。測定中は制御室において、加速器の制御及び測定データのモニタリングを行った。加速器の繰り返し周波数は 50 Hz または 250 Hz、パルス幅は100 nsとした。

被検体なしでのダイレクトビームの測定結果を図 3.2.1.(2).②-4 に示す。(a)は 20 分間の積算ラジオグラフィ画像であり、(b)は中央直径 50 mm の領域における平均スペクトルを示す。得られた2次元画像においては、コリメータ出口サイズ（100 mm）と同程度のビームが得られていることが分かる。また、画像中の縞模様は検出器の特性によるものと考えられる。

測定に用いた核燃料模擬被検体を図 3.2.1.(2).②-5 に示す。模擬被検体は、Bi_2O_3粉末をベースとして、熱中性子吸収率を Nd_2O_3 粉末により調整した。また、本被検体のそれぞれの濃度は、本研究では、3.4 wt% UO_2の熱中性子吸収率と等価な濃度を、MVP2.0 を用いた解析結果より求め、42 w% Bi_2O_3、58w% Nd_2O_3とした。アルミ製容器に模擬被検体を入れ、(a)に示すように異なるサイズのIn片及びAu片を挿入した。

図 3.2.1.(2).②-6 に模擬被検体のイメージング結果を示す。(a)に示す被検体イメージに対して、ダイレクトビーム結果によって比をとり、透過率として求めた画像を(b)に示す。本結果より、20 分の測定であっても、2 mm の In 片の検出が可能であることが分かった。より長時間の測定により、小さなIn片の検出も可能になると考えられる。

③ 比較用２次元中性子検出器の調査及び比較（H28年度）

整備したGEM型検出器の性能を比較するための２次元中性子検出器について、中性子イメージング対する実績及び空間分解能の観点から調査を行った。その結果、東芝製カラーイメージインテンシファイア（中性子 I.I.）を選定した。この中性子 I.I.を京大炉ライナックで使用するために整備を行い、図 3.2.1.(2).③-1 に示すように京大炉ライナックの 12m 測定室に設置した。この中性子 I.I.を用いて GEM 型検出器の性能試験で用いた模擬燃料被検体を使用し中性子イメージングのリファレンス画像を撮影した。図 3.2.1.(2).②-8 に撮影した中性子イメージング画像を示す。本結果の測定時間は 11 時間であり、得

られた画像に対してバックグランド処理等を施してある。図 3.2.1.(2).③-2 と GEM 型検出器による図 3.2.1.(2).②-6.(b)と比較及び 3.3.2.④節の結果より、GEM 型検出器による画像の解像度は中性子 I.I に劣るものの、測定時間を十分に取り、サブピクセル法による処理を行うことで更に解像度の向上が可能であり、Pu スポットを模擬した被検体中の極小被検体（～400 μm）の検知が可能であることが分かった。但し、3.3.2.④節にも記した様に、GEM 型検出器では本来の空間分解能以上の改善は困難なことから、400 μm 以下の被検体の検知及び形状認識に対しては高効率・高時間分解能検出器を用いることとした。また、一連の性能試験を通して GEM 検出器はガンマ線に対する感度が極めて低いことが実証され、高放射能被検体に対し極近傍まで検出器を近づけることが可能であることが分かり、次年度の核燃料物質や MA に対する中性子イメージングに使用することとした。

④ 模擬 MOX 燃料を用いたイメージング実験（H29 年度）

MOX 燃料を模擬した被検体において、被検体内の空隙や共鳴吸収スポットの検出を目的として、GEM 検出器を用いたイメージング実験を実施した。模擬被検体は MOX 燃料と等価な熱中性子吸収断面積となるようにいくつかの材料を配合して用意した。モンテカルロシミュレーションコード MVP2.0 と核データライブラリ JENDL-4.0 を用いて、模擬燃料物質の中性子捕捉断面積を計算し、表 3.2.1.(2).④-1 に示す混合割合を求めた。また作成した模擬 MOX 燃料体と MOX 燃料体（Pu 富化度 7.0wt%）の中性子吸収マクロ断面積を図 3.2.1.(2).④-1 に示す。今回用いた模擬被検体は 5 つの材料から成る。作成した混合物は図 3.2.1.(2).④-2.(a)に示すような 5 つの模擬ペレット状に成型し、ステンレス鋼製容器に封入した。上部 2 つの模擬ペレットは空隙スポットを模擬するためにアルミニウムの棒を挿入した。また、下部の 2 つのペレットは共鳴スポットの検出を目的として、模擬被検体中にサイズの異なる In 片を分散させてある。図 3.2.1.(2).④-2.(b)に全中性子エネルギー領域における透過画像を示す。被検体画像が 10 時間測定、ダイレクトビームが 4 時間測定であり、それらの比から透過率画像を求めている。模擬 MOX 燃料被検体において大きな減衰が見られ、燃料領域及びバネ領域の判別が可能である。しかしながら、本結果において、空隙を模擬したアルミ棒の検出は困難である。次に、In の共鳴吸収領域(0.94～2.1 eV)における共鳴吸収イメージを求めた。結果を図 3.2.1.(2).④-2.(c)に示す。2mm の In 片を検知することができた。より長い測定時間をかけることで、より小さな In 片や Al 棒の検出が可能になると考えられる。

⑤ 核燃料物質を用いた核種弁別型中性子イメージング実験（H29 年度）

京大炉ライナックでは核燃料物質の取り扱いが可能であるため、U 被検体及び Np 被検体を用いた核種弁別型中性子イメージング実験を実施した。まず、板状の高濃縮ウラン（HEU）及び劣化ウラン（DU）被検体を用いた実験を行った。被検体の詳細を表 3.2.1.(2).⑤-1 に示し、配置図を図 3.2.1.(2).⑤-1.(a)に示す。被検体厚さは板の枚数により変化させた(左: 1 枚, 中央: 3 枚, 右: 5 枚)。測定時間は 9 時間である。(b)に全エネルギー領域における中性子透過イメージを示す。厚い被検体に対しては被検体の形状の把握が可能である。また、DU に比べて HEU の減衰が大きいことが分かる。更に、それ

それの被検体の領域において透過スペクトルを求めた。(c)、(d)に HEU と DU の中性子透過スペクトルを示す。それぞれに対して、^{238}U の共鳴ディップが確認できる。しかしながら、本実験の HEU 被検体において、^{235}U の共鳴吸収は見られなかった。HEU や DU の共鳴吸収イメージを得るためには、より長い測定時間が必要である。

次に、^{237}Np の共鳴吸収イメージングを行った。^{237}Np 被検体(直径 20 mm, 26 MBq)と ^{93}Zr 被検体を図 3.2.1.(2).⑤-2.(a)に示すように配置した。全エネルギー領域における中性子透過画像を(b)に示す。結果より、^{93}Zr に対する中性子の減衰は小さいことが分かる。また、^{237}Np においても減衰は大きくなく、形状の把握は難しい。そこで、Np 領域に対して(d)に示す透過スペクトルを求め、^{237}Np の共鳴吸収の大きな 0.49eV 付近での共鳴吸収イメージを作成した。その結果を(c)に示す。^{237}Np の共鳴吸収を利用することで、被検体形状の判別可能である。

更に、応用試験として被検体の一部に熱中性子に対し黒体である Cd 板を張付けた場合の核種弁別型中性子イメージングを実施した。加速器の運転条件は、平均ビーム電流が 99.9 μA、パルス幅が 4 μs、繰り返し周波数が 50 Hz、測定時間は 8 h であった。図 3.2.1.(2).⑤-3 に示す様に被検体を配置した。図 3.2.1.(2).⑤-4 は全エネルギーで積分した場合の中性子イメージングである。これは従来の中性子イメージングに相当する。Cd による熱中性子束吸収により、Cd を貼り付けた領域は何も映っておらず、また、Cd を貼り付けた領域でも ^{243}Am、^{237}Np は見えない。一方で U 被検体については HU が鮮明に写っている。これは、^{235}U 熱中性子断面積が 686.2 b (JENDL-4.0、Maxwellian average) と大きいためである。この中性子イメージングの TOF スペクトルに対し、図 3.2.1.(2).⑤-5 に示す様に、各核種固有の共鳴の ROI を設定し共鳴吸収イメージを作成した (図 3.2.1.(2).⑤-6～8) 。図 3.2.1.(2).⑤-6 は ^{238}U、図 3.2.1.(2).⑤-7 は ^{243}Am、図 3.2.1.(2).⑤-8 は ^{237}Np である。このように中性子イメージング時に測定される TOF スペクトルを解析し、適切な ROI を設定することで、Cd 等の熱中性子吸収物質に隠された被検体に対しても中性子イメージングが可能であることを実証した。

⑥ まとめ

本章では核燃料物質の定量及びその形状把握に向けて、京大炉ライナックの 12m 測定室に高空間分解能型中性子イメージング装置を整備し、模擬燃料被検体等を用いて空間分解能の評価を行った。更に、サブピクセルシフト法を用いた空間分解能の改良を行った。その結果、400 μm 程度の被検体の検知が可能であることが示された。実証試験では、模擬 MOX 燃料被検体、核燃料物質及び MA 核種に対する中性子イメージングを実施した。特に核種弁別型中性子イメージングを実施することで、これまでは不可能であった中性子吸収体の陰に隠れた被検体の中性子イメージングに成功した。

表 3.2.1.(2).④-1　模擬 MOX 燃料被検体の混合比率

Material	Bi_2O_3	Ag_2O	Ta_2O_5	Eu_2O_3	Er_2O_3
Weight ratio [%]	73.1	5.4	7.1	6.1	8.3

表 3.2.1.(2).⑤-1　U 被検体の詳細

	HEU	DU
Chemical formula	U_3O_8-Al	
Size	12.7 x 12.7 x 1 mm	
Total weight	11.42g	11.39 g
Weight of uranium	2.25 g	2.25 g
Weight of fissile material	2.08 g	0 g
Enrichment	93 %	0.3 %

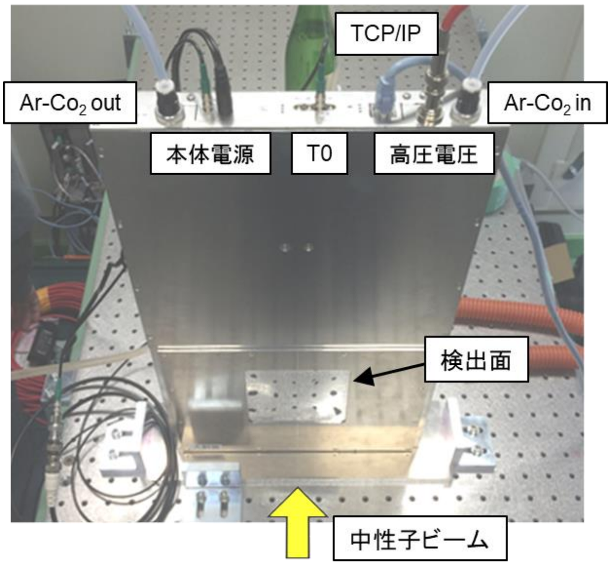


図 3.2.1.(2).②-1 GEM 検出器本体

図 3.2.1.(2).②-2　検出器設置台

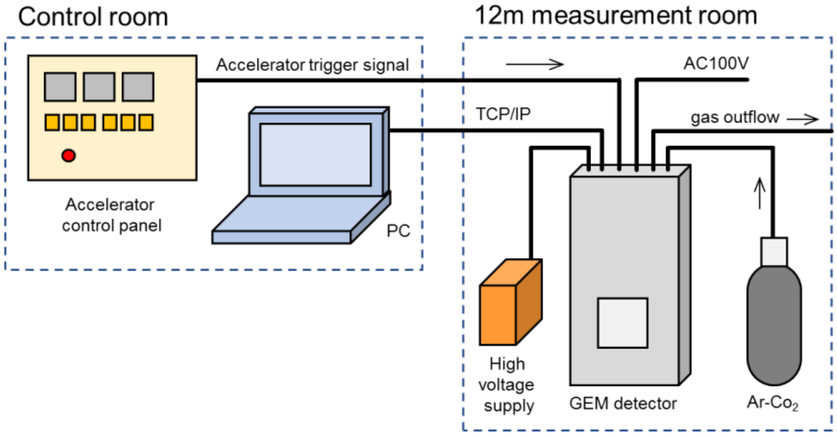
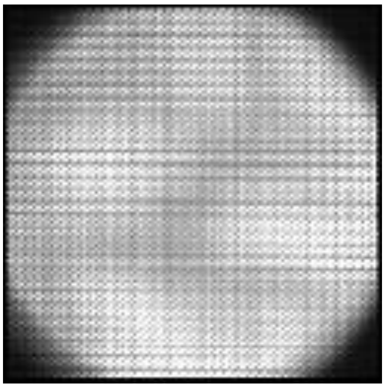
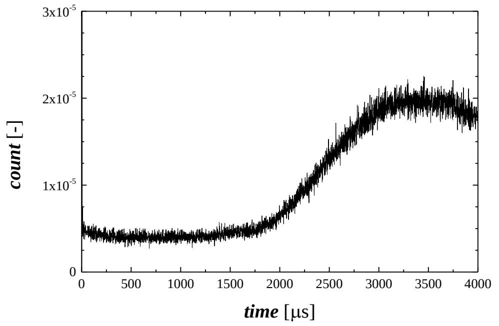


図 3.2.1.(2).②-3　 GEM 検出器を用いたイメージング実験体系の概略図

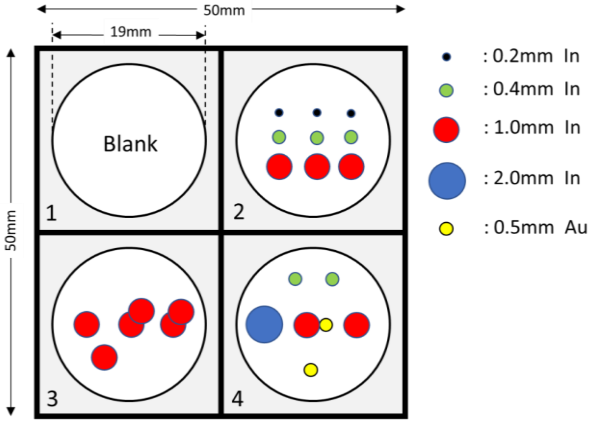


(a) イメージ



(b) スペクトル

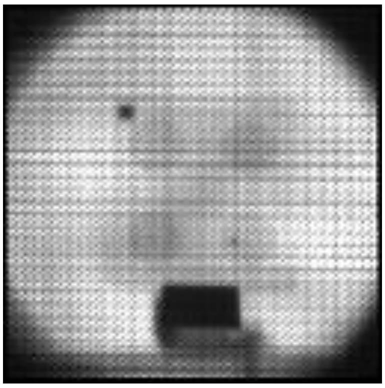
図 3.2.1.(2).②-4　ダイレクトビーム測定結果 (50 Hz, 20 min)



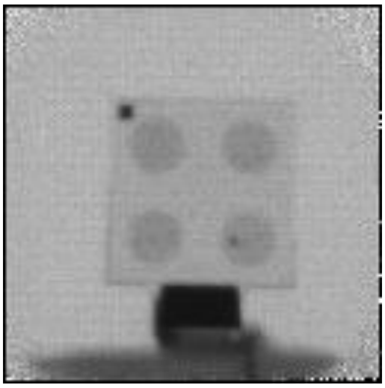
(a)　　　　被検体詳細

(b)　　　　写真

図 3.2.1.(2).②-5　模擬燃料被検体



(a) 被検体イメージ



(b) 透過率画像

図 3.2.1.(2).②-6　模擬燃料被検体測定結果 (250 Hz, 20 min)

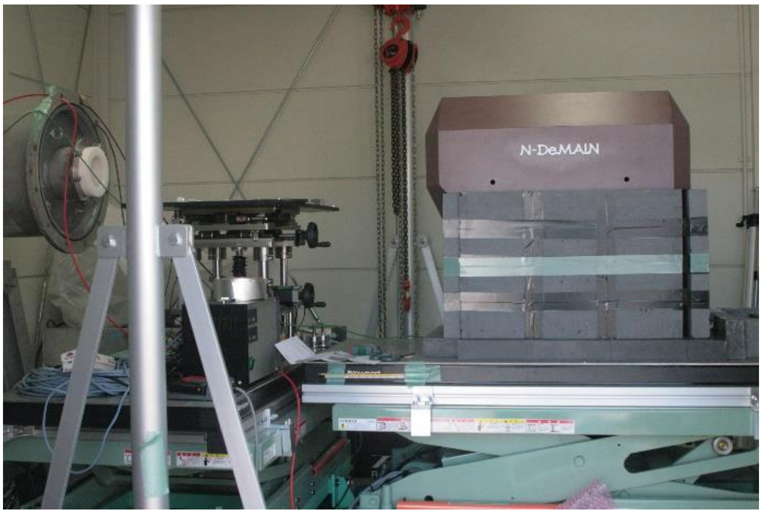


図 3.2.1.(2).③-1　中性子 I.I.設置写真

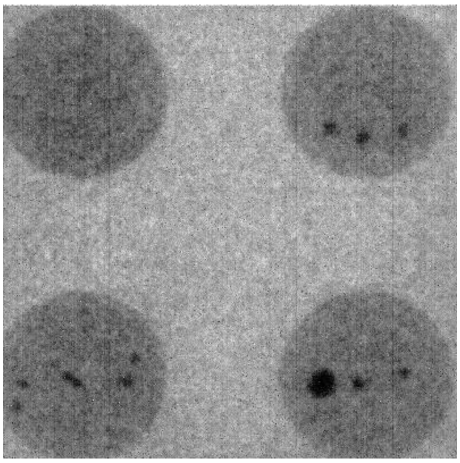


図 3.2.1.(2).③-2　中性子 I.I.設置写真（被検体中心付近の拡大図）

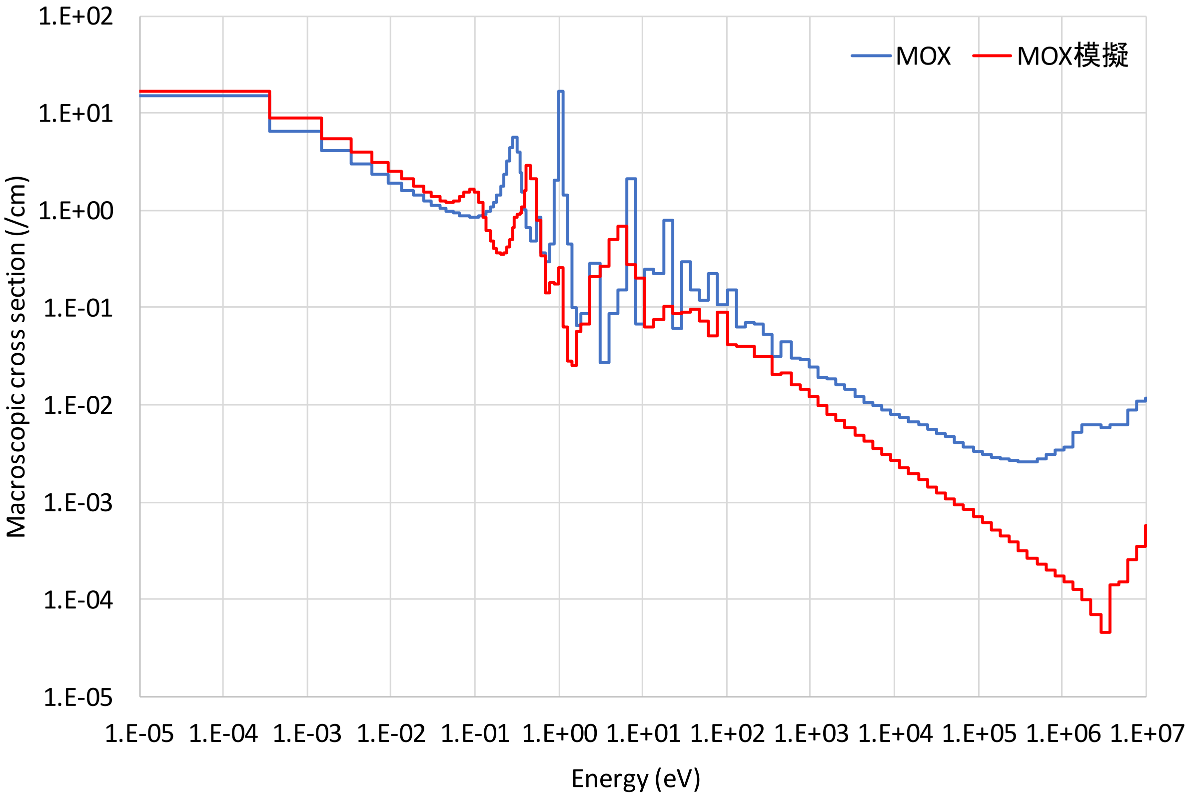


図 3.2.1.(2).④-1 模擬 MOX 燃料と MOX 燃料の中性子吸収マクロ断面積の比較

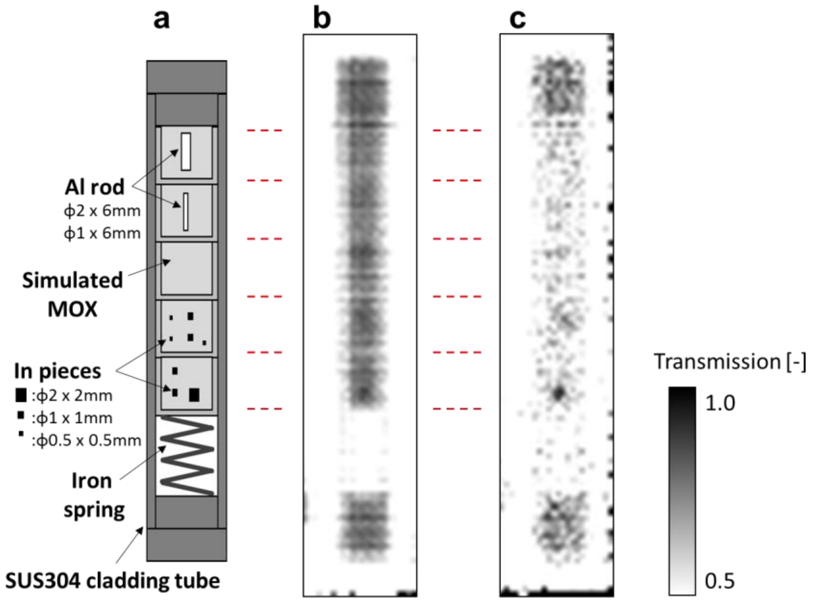


図 3.2.1.(2).④-2 模擬 MOX 燃料被検体の中性子イメージング結果

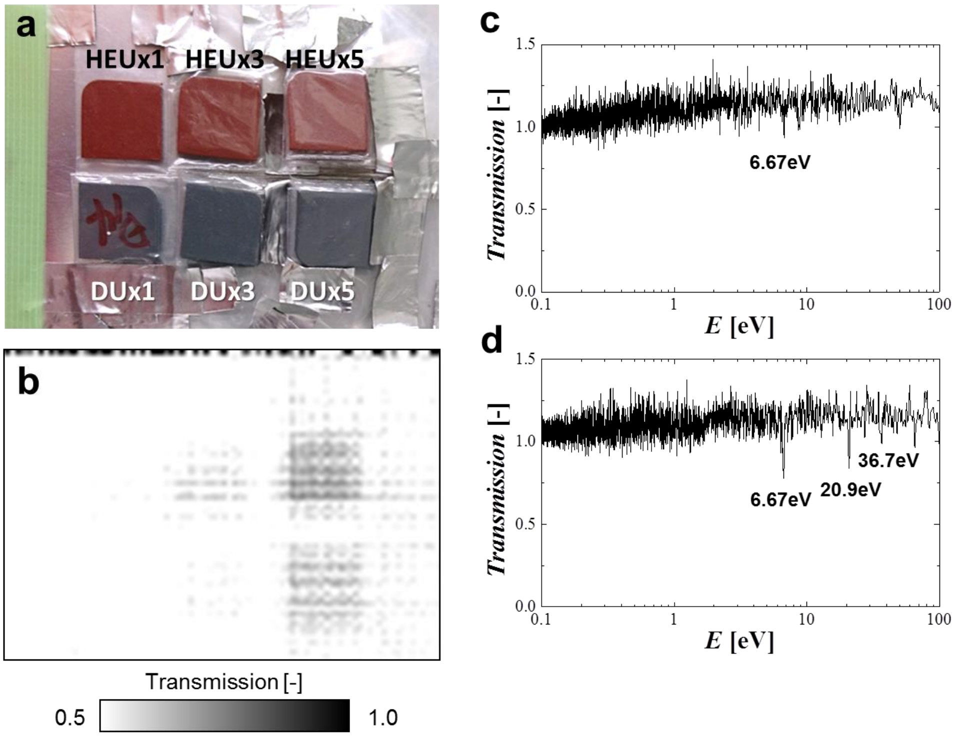


図 3.2.1.(2).⑤-1 U 被検体の中性子イメージング結果　(a)被検体配置、(b)全エネルギー透過画像、(c)HEU の透過スペクトル、(d)DU の透過スペクトル

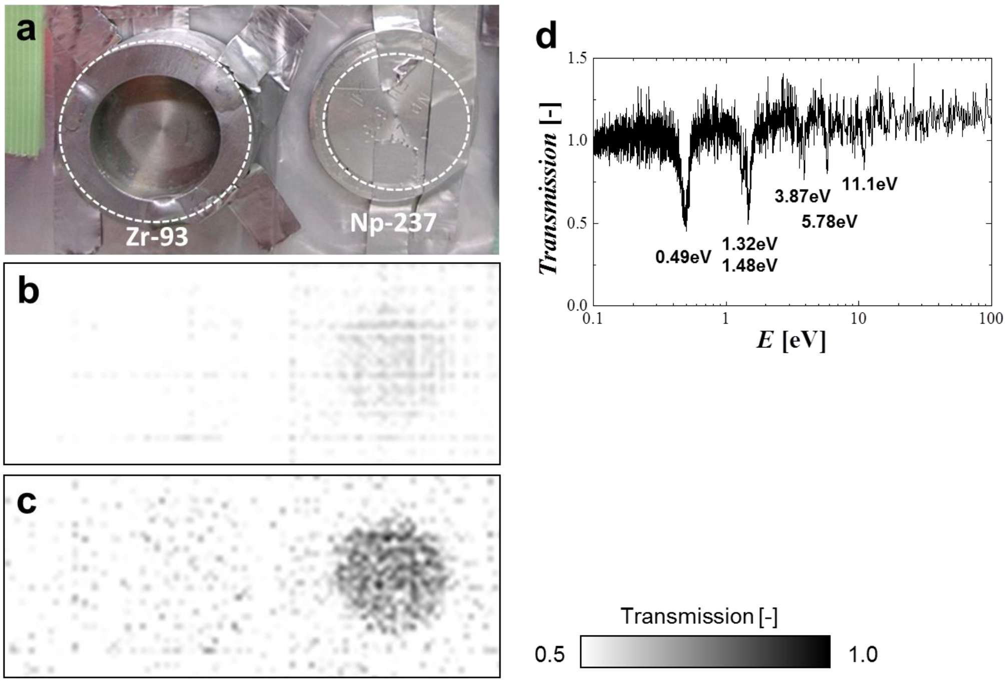


図 3.2.1.(2).⑤-2　Np 被検体の中性子イメージング結果　(a)被検体配置、(b)全エネルギー透過画像、(c)0.49 eV 付近の共鳴吸収イメージ、(d)透過スペクトル

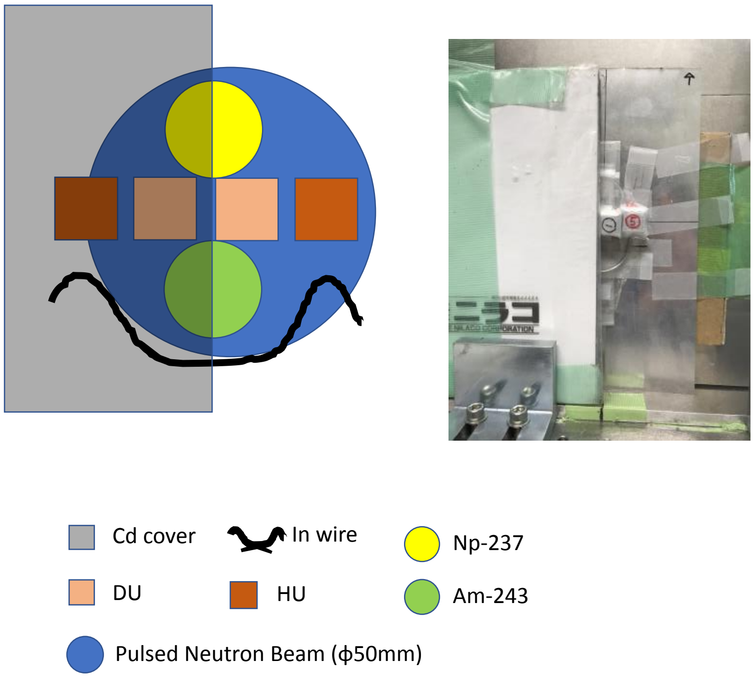


図 3. 2. 1. (2). ⑤-3　応用試験時の被検体配置

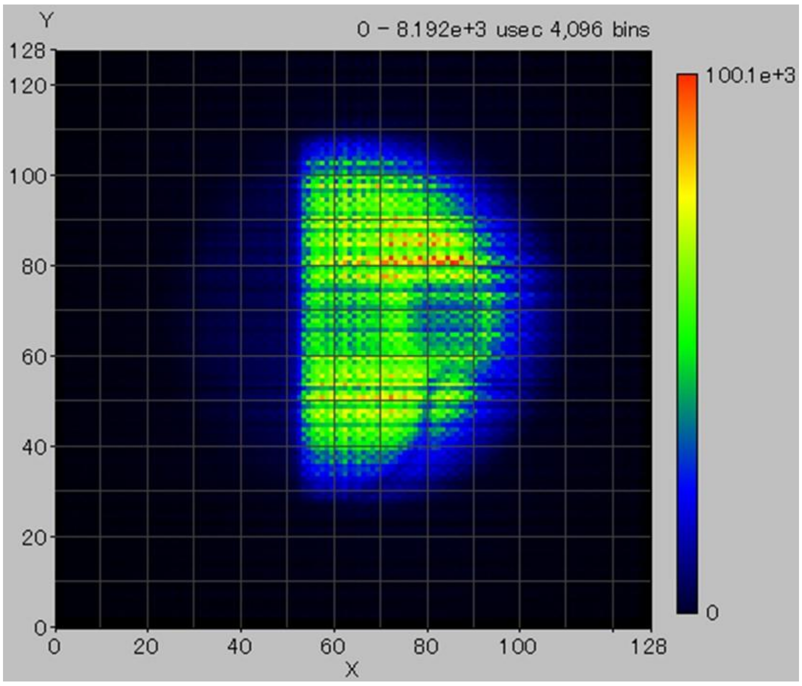


図 3. 2. 1. (2). ⑤-4　全エネルギーでの中性子イメージング

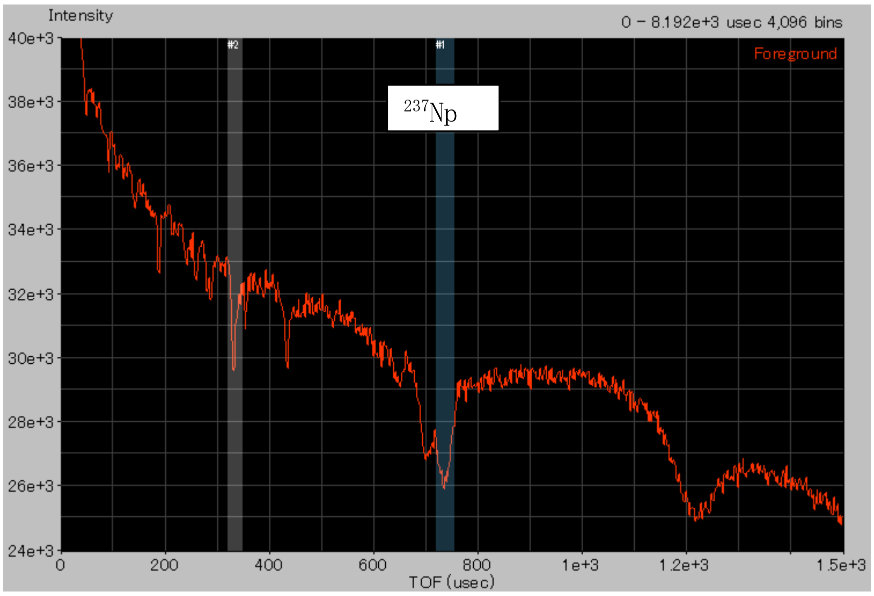


図 3.2.1.(2).⑤-5　TOF スペクトルと ROI 設定

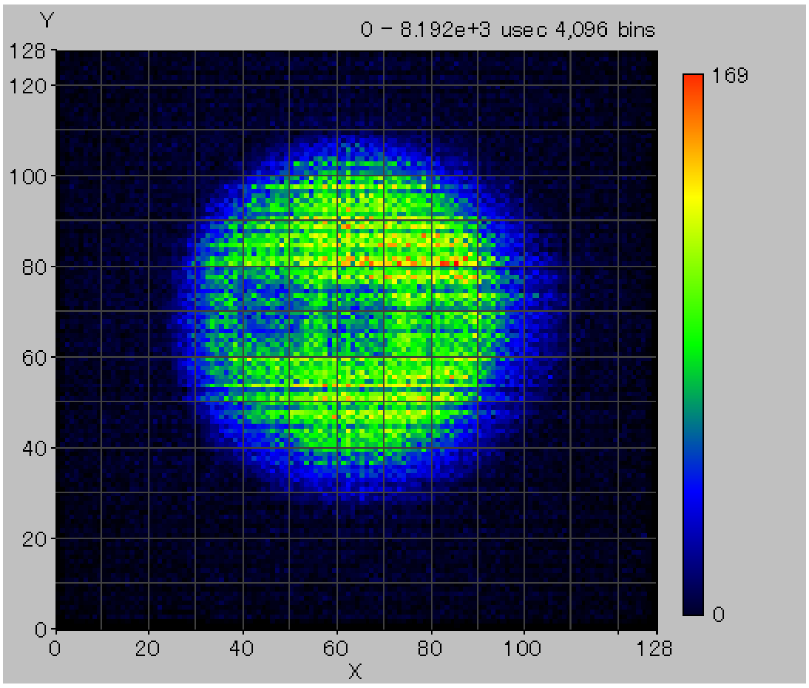


図 3.2.1.(2).⑤-6　^{238}U に対する核種弁別型中性子イメージング

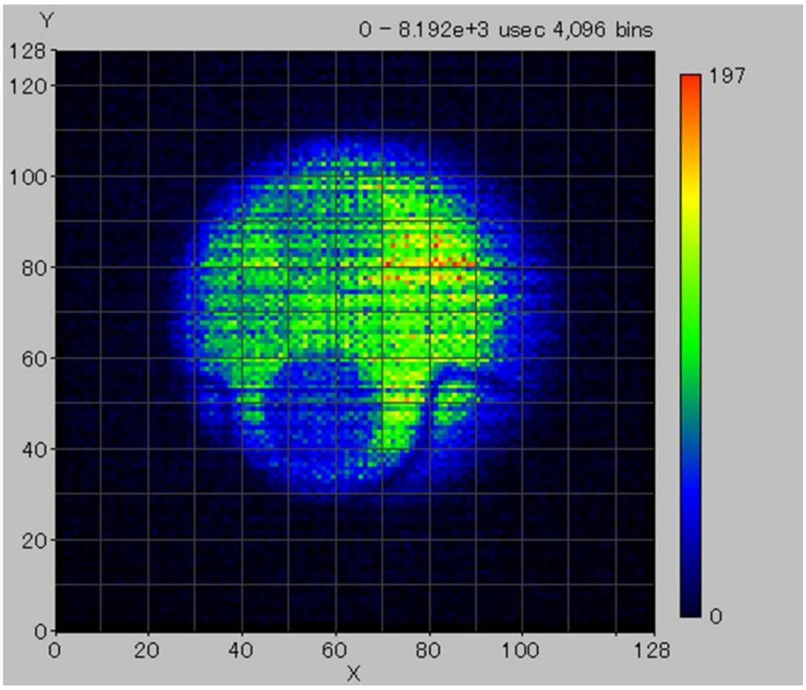


図 3.2.1.(2).⑤-7　^{243}Am に対する核種弁別型中性子イメージング

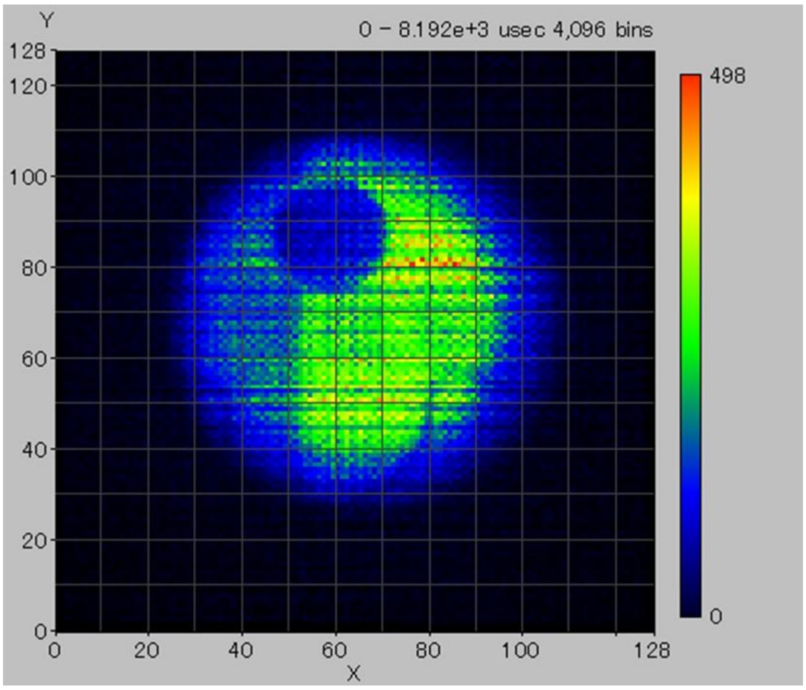


図 3.2.1.(2).⑤-8　^{237}Np に対する核種弁別型中性子イメージング

3.2.2　ドップラ効果を利用した温度分布測定（H26～H29）

(1)　北大ライナックを用いた研究（再委託先：北海道大学）（H28～H29）

①　概要

中性子共鳴吸収分光法において、原子核の熱振動に起因した共鳴吸収ピークの拡がり（ドップラ効果）を解析することで物質の温度を非破壊・非接触で測定することが可能である。北海道大学では、平成28年度から平成29年度にかけて、この手法の解析結果から物体の温度の空間的な分布を把握するために利用できる手法を検討した。平成 28 年度は、中性子のエネルギー分析が可能な 2 次元検出器の低空間分解能を補うため、3.2.1.(1)節で開発したマッピング技術の温度イメージングへの適用性について数値シミュレーションにより検討した。平成 29 年度は共鳴吸収のドップラ効果測定により実験的に得られる被検体の平均温度情報から、X 線 CT 断層像を元にした伝熱モデルの適用により被検体断層面上の空間的な温度分布を再構成する手順について検討した。

②　数値シミュレーションによる温度イメージングの高解像度マッピング手法の検討(H28)

複数の温度状態における核データライブラリを使うことで、数値シミュレーションによりウラン板（UO_2）の中性子透過スペクトルの計算を行った。ここでは MCNP（Monte Carlo N-Particle）ライブラリ自動編集システム autonj[(1)]を利用することで ^{235}U、^{238}U、^{16}O について 300 K、350 K、400 K、450 K、500 K の温度を持つ核データライブラリを作成した。図 3.2.2.(1).②-1 に、UO_2板のシミュレーション用被検体（厚さ 1 mm×縦 10 mm×横 20 mm）を示したが、板には色で示すように幅 4 mm 毎に上記の温度変化が付けられている。各板は 100 % の UO_2であり、^{235}U の割合は 5.4 wt%、密度は 10.0 g/cm^3 としている。

この被検体に対して、北海道大学電子線型加速器施設の熱中性子源を想定し、中性子透過スペクトルのシミュレーション計算を行った。イメージングを行うために、タリーはメッシュ状のものを用いており、10 pixel×10 pixel で 1 pixel あたり 2mm 角としている。簡易的に温度を評価するために、単一温度のウラン板の透過スペクトルの共鳴ディップ面積から温度校正曲線を作成し、それを用いて被検体の透過スペクトルより各ピクセルでシミュレートした共鳴吸収ディップが示す温度を評価した。図 3.2.2.(1).②-2 左図は 300 K から 500 K のウラン板の透過率スペクトル、図 3.2.2.(1).②-2 右図は温度校正曲線である。図 3.2.2.(1).②-1 に示す被検体の温度イメージング結果が図 3.2.2.(1).②-3 となる。統計による揺らぎはあるものの位置による温度の違いを再現することができた。

次いで、3.2.1.(1)節に示した低空間解像度情報の高空間解像度イメージへの物理量マッピング手法を用い、図 3.2.2.(1).②-3 として得られたドップラ効果解析による温度情報を高解像度の X 線イメージにマッピングした。まず、モンテカルロシミュレーションコード PHITS を用いて、図 3.2.2.(1).②-1 に示す UO_2板の X 線ラジオグラフィ像を得る。この時の X 線のエネルギーは北海道大学に導入した X 線 CT 用線源に合わせて 150 kV とした。画像のサイズは 200 pixel×200 pixel で、分解能は 0.1 mm/pixel となる。被検体がありなしのそれぞれの状態での画像を取得することで透過率画像を作成し、それを密度相当の量に変換した。図 3.2.2.(1).②-4 に UO_2板の X 線ラジオグラフィ画像を示す。X 線ラ

ジオグラフィの場合、温度の違いによる変化は見られていない。このX線ラジオグラフィ画像に中性子による温度イメージング結果をマッピングしたものが図3.2.2.(1).②-5となる。この図においては温度が高い方が白色で示されている。このように、本事業で開発した物理量マッピング手法により、中性子共鳴吸収のドップラ効果で得た2次元的な温度分布情報をX線の空間解像度を持つイメージにマッピングすることに成功した。

③ X線CTとの組み合わせによる断層内温度分布のモデル化 (H29)

共鳴吸収のドップラ効果の測定では線幅の解析を行うために、比較的統計の良いスペクトル測定が要求される。多数の核燃料の管理を行う上で測定を効率化するためには、1つの被検体の測定を短時間で終わらせる必要があり、2次元検出器のピクセルで充分な統計を得ることが難しいと予想される。そこで本事業では、被検体全体の透過スペクトルから被検体の内部温度分布を含めた上での平均的な温度をドップラ効果により求め、X線CTにより取得した断層上に伝熱モデルを用いて温度分布を再構成する手法を検討した。この手法では、中性子によるバルク内部の温度情報と容易に測れる被検体の表面温度を用いるだけで大まかな温度分布が再構成できるため、物体内部の最高温度とその位置の予想等、燃料の管理にも有効と考えられる。

図3.2.2.(1).③-1に今回用いた被検体を示す。被検体は外筒20 mmφ、内筒10 mmφの2重円筒状で中央に加熱用のヒータが通っている。内外筒にはアルミナで密度を調整した粉末状のIn、内筒には更にAgが入る。この被検体に対し、ヒータを加熱しながらInディップに関し共鳴吸収測定を実施した。得られたスペクトルは、位置毎に分解して共鳴吸収ディップを得ようとすると円筒の端に行くほど統計が悪く、解析は困難である。しかしながら、全体からの透過スペクトルを積算すると比較的明瞭な共鳴吸収ディップが得られた。この時の透過スペクトルを図3.2.2.(1).③-2に示す。スペクトルにはInとAgの共鳴吸収ディップが現れている。これらのディップには物体内部各所を透過した中性子による情報が含まれ、物体全体の温度を平均化した情報を持つと考えられる。

次に、共鳴吸収ディップのドップラ効果から被検体の温度情報を得るために、REFITによりInの共鳴吸収ディップのフィッティング解析を行った。フィッティングの状況を図3.2.2.(1).③-3に示す。この結果より、被検体の実効温度 T_{eff} が 347.96 K (74.81 ℃) と求められた。ヒーター (326.9 ℃) と被検体表面の温度 (50.5 ℃) から計算によって求められた被検体の平均温度は82 ℃で、共鳴吸収解析による温度と約8 ℃程度の差があるが、粉末被検体によるディップの変形や伝熱ロス等、幾つかの原因が考えられる。

この被検体をX線CT測定した結果を図3.2.2.(1).③-4に示す。CTによる断層像には2重円筒構造や中心部のヒータが明瞭に写されている。その他に円筒とは異なる中心を持つ円状の影が見えるが、これはアーチファクトである。この高解像度画像上に、中心のヒータから外周に向けて温度勾配を持つ伝熱モデルを用いて、ドップラ効果から求めた平均温度を元にした断層内の温度分布を再構成する。ここで用いた伝熱モデルは、被検体が円筒対称でほぼ密度一定であるので単純な次式を用いた。即ち、被検体は2重円筒構造を持つが、内外筒内の主たる成分が共通(Al_2O_3)で、密度差が9%と比較的近いことから熱伝導度は内外で差がないという仮定をおいた。

$$T(r) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{\ln\frac{r_2}{r_1}} \ln\frac{r}{r_1} \qquad (3.2.2.2\text{-}1)$$

ここで、T は温度、r は中心からの距離、1 と 2 はそれぞれ中心と外周を示す。なお、再構成時のもう一つの拘束条件は被検体外面の温度である。外面の温度を固定した上で被検体中心（ヒーター部）の温度を求めると、解析から求められた中心温度は 263.56℃となった。この時の温度分布が図 3.2.2.(1).③-5、これを元に X 線 CT 断層内に温度分布をマッピングしたのが図 3.2.2.(1).③-6 である。伝熱モデルにより、中心部から急激に温度が下がり、外縁に近づくに従って温度分布が緩やかになっている。これは、同様の被検体に対し中性子 CT により直接断層内温度分布を再構成した結果(2)と矛盾しない。再構成による中心部の温度とヒータ温度で差が出たのは、この方法で測定したのはヒータ温度ではなくの In の温度であることから、先述のとおりやはり粉体との間の伝熱ロスの影響が大きいものと考えられる。また、他の可能性としては、共鳴吸収による平均温度測定時の誤差、特に中心部ヒータの温度がそのまま測定されていないことによる影響の可能性も考えられる。図 3.2.2.(1).③-5 には r 方向の温度変化も示したが、ここでは伝熱モデルを固定して解析しているので、実測のヒータ温度と共鳴吸収測定による温度との差によって、共鳴吸収による温度分布の方が全体的に下がった結果になっていることがわかる。

ドップラ効果による温度測定の精度に関してはまだ検討する余地があるものの、全体の平均温度と外面温度、適切な伝熱モデルがあれば、物体断層内の温度分布を非破壊・非接触で測定できる目途はついたものといえる。伝熱モデルは、これらの温度情報を満足するように逐次近似で構築する。ここで用いた被検体は温度測定用の核種が内部に均一に存在している場合であるが、この対局となる局所的に核種が分布している場合はピンポイントで核種位置の温度が測定できることになる。この中間の場合、本事業で進めた X 線や中性子イメージングによる核種分布解析を元に、核種存在領域の決定や伝熱分布モデル計算を併用して物体内の温度分布を解析していくことになると考えられる。

④ まとめ

中性子共鳴吸収分光法を用いたドップラ効果の測定結果を用いて物体の温度の空間的な分布を把握するために利用できる手法を検討した。また、中性子のエネルギー分析が可能な 2 次元検出器の低空間分解能を補うため、3.2.1.(1)節で開発したマッピング技術の温度イメージングへの適用性について数値シミュレーションにより検討した。これらの知見を基に、共鳴吸収のドップラ効果測定により実験的に得た被検体の平均温度情報を、X 線 CT 断層像を元にした伝熱モデルに適用することで、被検体内部の空間的な温度分布を再構成することができた。以上のことから、本事業で提案した研究は全て達成できた。

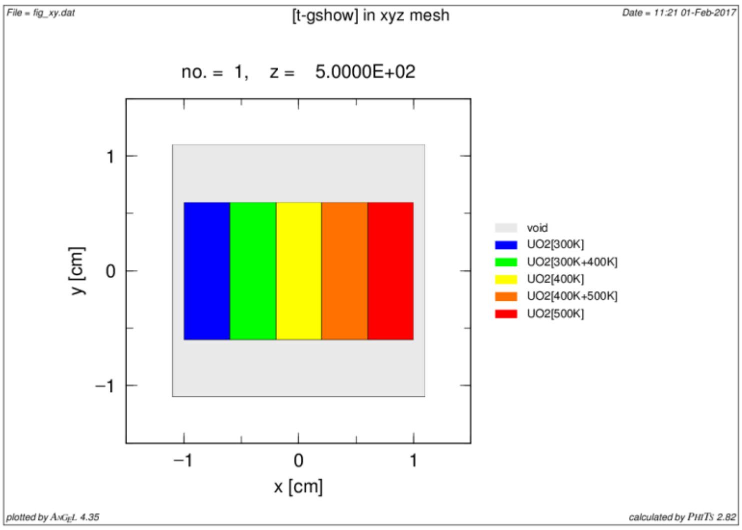


図 3.2.2.(1).②-1　温度勾配を持つ UO_2 板のシミュレーションモデル

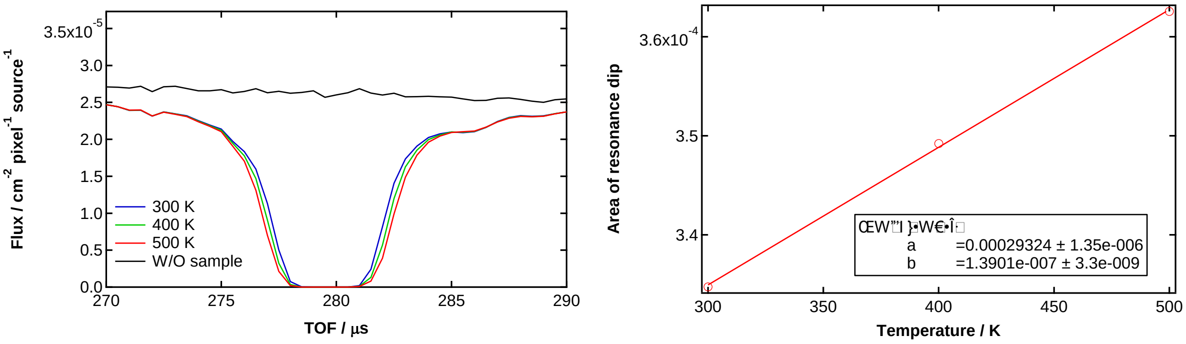


図 3.2.2.(1).②-2　各温度における UO_2 板の中性子透過率スペクトル及び温度の校正曲線

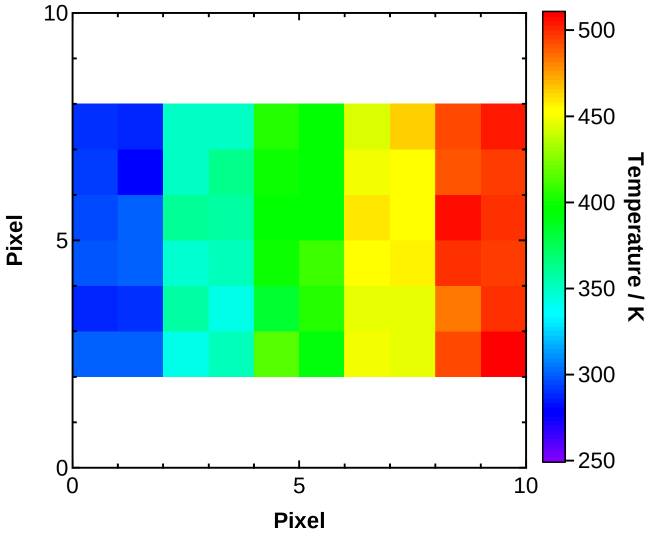


図 3.2.2.(1).②-3　温度勾配を持つ UO_2 板の温度イメージング画像

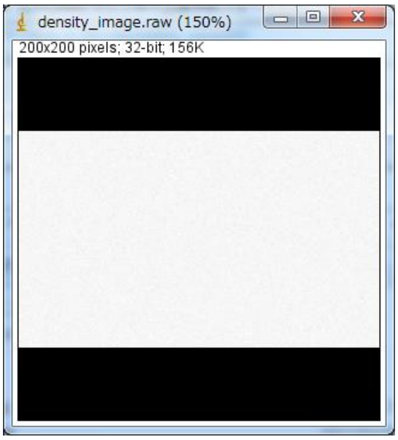


図 3.2.2.(1).②-4　シミュレーションにより得た UO_2 板の X 線ラジオグラフィ画像

図 3.2.2.(1).②-5　X 線ラジオグラフィ画像への温度イメージングのマッピング

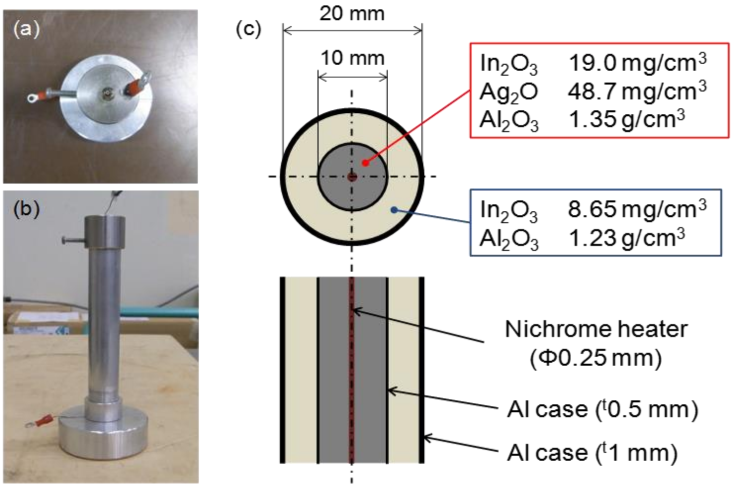


図 3.2.2.(1).③-1　断層内温度分布測定用被検体

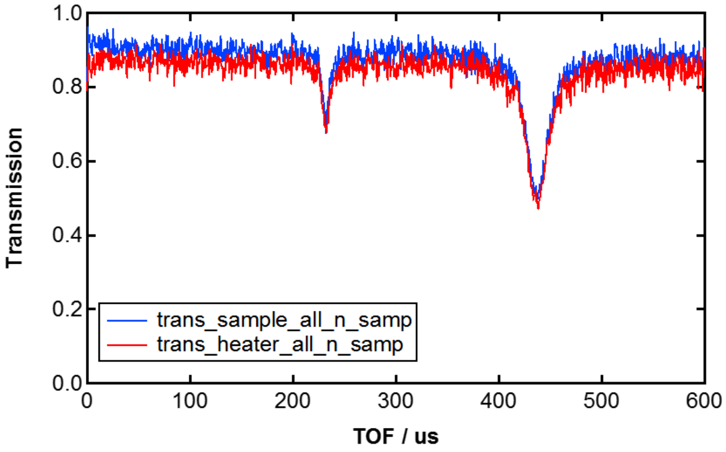


図 3.2.2.(1).③-2　被検体全体の透過スペクトル
(ヒーターon：赤、ヒーターoff：青)

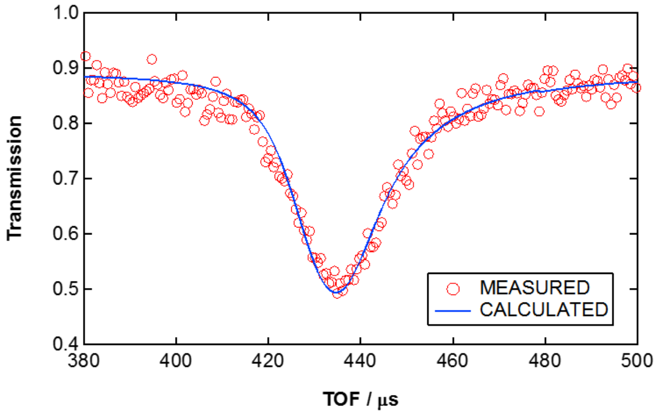


図 3.2.2.(1).③-3　 REFIT による In の共鳴ディップのフィッティング状況

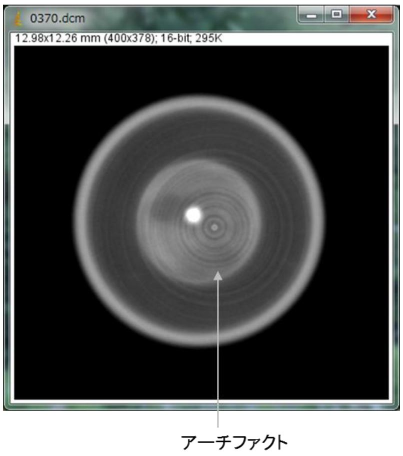


図 3.2.2.(1).③-4　 X 線 CT による被検体の断層像

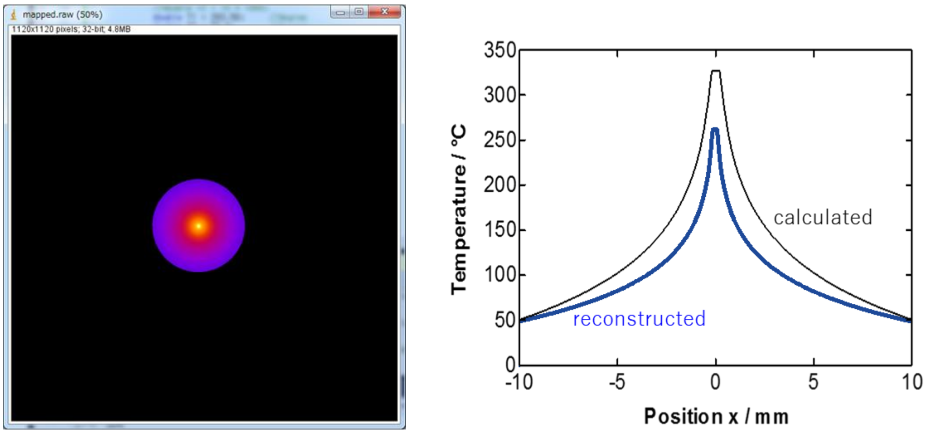


図 3.2.2.(1).③-5　再構成された温度分布(左：断層内分布、右：断層直径方向の温度分布、青線が再構成結果、黒線が伝熱計算結果)

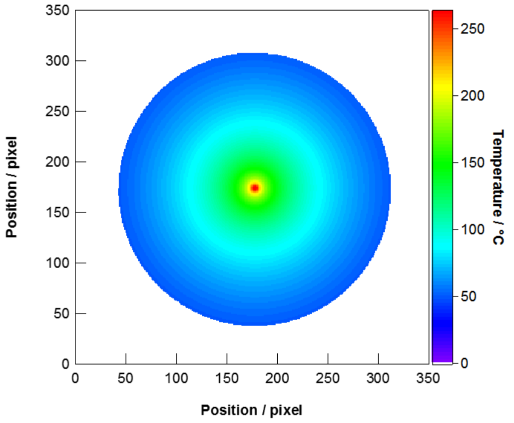


図 3.2.2.(1).③-6　 X 線 CT 断層像への温度分布マッピング

参考文献

(1) 前川藤夫，桜井淳，小迫和明，久米悦雄，川崎信夫，野村靖，内藤俶孝，「MCNP ライブラリ自動編集システム autonj の開発」，JAERI-Data/Code 99-048（1999 年 12 月）.

(2) T. Kamiyama, H. Noda, J. Ito, H. Iwasa, Y. Kiyanagi, S. Ikeda, "Remote-Sensing, Non-destructive, and Computed-Tomography-Assisted Thermometry by Neutron Resonance Absorption Spectroscopy", J. Neutron Research, 13(1-3) (2005), 97-101.

(2)　京大ライナックを用いた研究（H26～H29）

①　概要

平成 26 年度～平成 27 年度にかけた核燃料ペレットに使用されるバルク状被検体に対するドップラ効果を利用した温度分布測定を実施するために昇温装置の設計及び製作、モン

テカルロシミュレーション計算による温度上昇に伴う共鳴吸収量の積分値の変化を導出に基づいた被検体温度の上昇範囲の決定を実施した。平成 28 年度は北大ライナックを用いて予備試験を実施し、測定パラメータを決定した。最終年度にバルク被検体を用いたドップラ効果測定を実施し、計量曲線との比較することでドップラ効果を測定することで被検体温度測定が可能であることを実証した。また、前節の北大ライナックを用いた研究成果と組み合わせることで、被検体内部の温度分布イメージングが可能である見通しを得た。

② 昇温装置の仕様の検討及び架台の整備 (H26)

1) 昇温装置の仕様の検討

昇温装置については、被検体の大きさ、被検体位置調整機能、真空容器、昇温方法と昇温範囲の観点よりその使用を決定した。

被検体大きさについて、入手可能な核燃料物質の被検体に関する調査を行ったところ、直径約 10 mm、高さ約 10 mmの円柱状のペレットが標準的な大きさであり、また、昇温対象が核燃料物質の場合、汚染の散逸を防ぐために別途真空容器内に収める必要があるため、容器を含めて直径 30 mm、高さ 30 mm程度のものを想定した。

被検体位置調整機能については、配線等の観点より、昇温装置全体の位置を調整することとし、昇温装置を支える架台に高さ調整機能及び横方向へのスライド機能を持たせる方針とした。

ヒータを設置する真空容器（昇温装置全体）については、被検体温度を輻射熱により効率的に昇温させるためには、発熱面と被検体の間を真空に維持する必要がある。そのため、真空引き口、ビーム窓（直径 5cm 以内にコリメートされた中性子ビームが透過するための窓）、容器内部の様子を監視するための監視窓及び信号線用の機密端子を設けた。但し、ビーム窓材には中性子 TOF 測定に影響を与えるような中性子吸収物質を極力含まないような物質としてアルミ板を選定した。

昇温方法と昇温範囲については、被検体の中心に発熱体を設置して昇温させる方法または高温のガスにより昇温させる方法と、外部からの熱輻射により昇温する方法が考えられるが、被検体は核燃料物質も想定しているので、安全に取り扱うために外部からの熱輻射によって昇温する方法を採用した。温度上昇に伴う共鳴のドップラ拡がりが TOF 測定によって十分測定可能な昇温範囲を決定する必要があるため、核燃料物質のうち ^{238}U の 20.87eV の共鳴を例にとり、温度を 300 K, 600 K, 900 K とした場合の共鳴拡がりについて、モンテカルロシミュレーションコード MVP-2.0 と核データライブラリ JENDL-4.0 を用い予備検討を行った。その結果、900 K まで昇温させても共鳴吸収量の積分値の変化は高々1%程度であり定量は難しいことから、昇温範囲の目標値として 300～900 K と設定した。

2) 架台の整備

昇温装置及び透過中性子測定のための検出器の配置について検討し、これらの機器を保持するための除振ステージと実験用架台を整備した。

ドップラ効果を利用した温度測定における昇温装置はビーム上流側の実験架台に設置し、

ビーム下流側には透過中性子測定のための検出器を設置することとした。また、これらの装置を設置するための、図 3.2.2.(2).②-1 に示す 2400×1500×203 ㎜の Newport 社製の M-RS2000-58-8　RS2000 除振ステージを整備した（写真では梱包を解いていない）。尚、実験室改修のための許認可作業の関係から実際の設置は平成 27 年度に実施した。

③　昇温装置の作成及び特性試験（H27）

平成27年度は、H26年度に仕様を決定した被検体昇温装置を製作し、京大炉ライナックに設置して温度上昇試験等の特性試験及び装置の調整を行った。

被検体昇温装置本体は株式会社ブラスト製のガラスヒータを基に作成し、3.1.3.(2)節で製作した真空容器中に設置した（図3.2.2.(2).③-1）。被検体昇温装置は被検体容器周囲に4枚、被検体容器下部に1枚設置した。更に被検体の効率的な温度上昇及び熱の漏洩を防ぐためステンレス製の熱反射材を設置した。

作成した昇温装置を用いて、昇温試験を実施した。尚、今回は被検体容器中の温度上昇を測定した。測定は被検体容器内側にK型熱電対を設置し、K型熱電対からの信号を観測した。尚、メーカーからの要請により昇温措置の設定温度上限は250 ℃ とした。図3.2.2.(2).③-2に被検体昇温装置設定温度を150 ℃ と250 ℃ とした場合での被検体温度上昇曲線を示す。どちらの曲線も、昇温開始後600秒程度で被検体温度が安定することを確認した。また、設定温度が250 ℃ の場合、被検体温度は約200 ℃ まで上昇することを確認した。次に、ドップラ効果の測定時間は数時間以上が必要であることから、長時間使用時の被検体温度安定性ついて試験を実施した。設定温度を250℃として2時間の運転を実施したところ、被検体温度に数 ℃ 以上の変動はなく、昇温装置は安定して運転されていることを確認した。

④　ドップラ効果を利用した温度分布測定の予備試験と測定パラメータの検討（H28）

(1) ドップラ効果を利用した温度分布測定の予備試験

北大ライナックにおいて、平成 27 年度に整備した昇温装置を用いてドップラ効果を利用した温度分布測定の予備試験を実施した。被検体は HUS の 5 m 飛行ラインに設置し、透過中性子束は GEM 型 2 次元中性子検出器を用いて測定した。被検体は 30 mm×10 mm×1 mm^t のタンタル(Ta)板及び 30 mm×φ10 mm の Ta 円柱を用いた。また、本予備試験は次の４点の観点より実施した。

a)昇温装置内に設置した被検体の透過中性子束が測定できるか。

b)バルク状被検体についても測定可能か。

c)中性子照射場において昇温装置が作動するか。

d)ドップラ効果による透過中性子束変化が観測できるか。

図 3.2.2.(2).④-1 に昇温装置内に設置された Ta 板を透過した中性子束空間分布を示す。本画像及び TOF 測定結果からは昇温装置による著しい中性子遮蔽は観測されず、本昇温装置を用いた透過中性子束測定が可能であることが分かった。また、バルク被検体についても透過中性子束測定が可能であることが分かった。

(2)測定パラメータの検討

測定対象となる共鳴について、中性子幅が大きく自己遮蔽効果により共鳴が飽和している状態、即ち共鳴吸収率が増加せずドップラ効果は観測されない或いは観測されても有意では無いと予想される。また、飽和共鳴以外の共鳴であっても、被検体厚さが厚くなるについて低いエネルギーの共鳴から自己遮蔽効果が大きくなりドップラ効果の観測は困難になる。また、Time-of-flight (TOF) 法で各共鳴のドップラ効果を測定する場合、エネルギー分解能が極めて優れた TOF 実験であれば、ドップラ効果を共鳴ピークの拡がりとして直接観測することができる。ところが実験から生じるエネルギー分解能がドップラ拡がりに比べて大き過ぎると、観測されるピーク幅に占めるドップラ効果による共鳴拡がりの割合は小さくなり、ドップラ効果の評価精度は低下する。従って、本研究においては、個々の共鳴のドップラ効果を測定するのではなく、透過中性子束についてガンマフラッシュの影響を受けない全エネルギー領域或いは共鳴エネルギー部分についての積分量を測定することに決定した。

⑤　ドップラ効果を利用した温度分布測定（H29）

平成 29 年度は、昇温装置について安定化のための改良を行い、前年度に決定した測定パラメータを用いて、ドップラ効果による透過中性子束測定を実施した。ここで、室温時と昇温時の共鳴領域における積分量の比（昇温時/25 ℃）をドップラ効果と定義し、予め数値計算で求めておいた曲線と比較した。実験は、京大炉ライナックを用いて実施した。表 3.2.2.(2).⑤-1 に加速器の運転パラメータと実験条件を示す。ここで、平成 29 年度事業計画書には被検体として核燃料ペレットを用いると記載したが、平成 29 年 6 月の JAEA 大洗事業所での核燃料物質飛散事故の影響により、JAEA から被検体用核燃料ペレットの輸送が実施できなくなった。そこで、核燃料ペレット模擬物質として直径 10mm、長さ 30mm の Ta 棒を用いてドップラ効果の測定を実施した。図 3.2.2.(2).⑤-1 に得られた TOF スペクトルを示す。通常、ドップラ効果は核の熱振動により共鳴吸収が増加する現象であるが、本測定においては、被検体の昇温によって透過中性子束が変化しないはずの熱中性子領域で、透過中性子束が変化した。図 3.3.2.(2).⑤-2 に熱中性子領域での ROI 設定を示し、表 3.2.2.(2).⑤-2 に透過中性子束比（昇温時/25 ℃）を示す。被検体温度が上昇すると共に、透過中性子束比は増加している。これが熱膨張による影響であることを示すために、Ta 金属の熱膨張係数（6.7 μm/K）より体積膨張率（昇温時/25℃）を考慮した数値計算結果を表 3.2.2.(2).⑤-3 に示す。測定値を比較すると良く一致した。従って、ドップラ効果の測定値についても熱膨張による透過中性子束の増加が含まれることから、ドップラ効果測定値を熱中性子領域の透過中性子束比（表 3.2.2.(2).⑤-2 の比）で割りドップラ効果を評価した。図 3.2.2.(5).⑤-3 にドップラ効果評価のための ROI 設定を示し、各 ROI におけるドップラ効果を表 3.2.2.(2).⑤-4 に示す。ROI#1～#5 は各共鳴におけるドップラ効果であり、#6 は 50 ch から 550 ch までの透過中性子束を積分した後に比を求めた値である。被検体温度が 125 ℃ の場合、各共鳴でのドップラ効果はほぼ 1.0 であったが、積分値では 0.983±3.03%と明らかにドップラ効果が観測された。被検体温度が 350 ℃ の場合、全ての共鳴でドップラ効果は 2.04 % ～3.33 % の精度で観測された。

図 3.2.2.(2).⑤-4 に#6 のドップラ効果について、予め数値計算で作成した計量曲線と比較を示す。125 ℃ については、C/E=0.999、350 ℃ については C/E=1.011 となり計算と測定値は実験誤差範囲で一致した。一方、3.2.2.(1)節では、全体の平均温度を測定することで、物体断層内の温度分布を非破壊・非接触で測定できるとの結論を得ている。従って本研究で得られたドップラ効果の測定手法と 3.2.2.(1)節で開発したマッピング技術の温度イメージングへ適用方法を組み合わせることで被検体内部の温度分布のイメージングができる見通しを得た。

⑥　まとめ

本研究ではドップラ効果を測定することで被検体内部の温度分布を評価するために、実験室への架台の設置、昇温装置の作成を行った。昇温装置については性能試験及びドップラ効果測定の予備試験で得られた知見及びデータを基に改良を行った。最終年度にバルク被検体に対するドップラ効果測定を実施し、予め求めた計量曲線と比較することで温度評価が可能であることを示した。また、3.2.2.(1)節で開発したマッピング技術と組み合わせることで被検体内部の温度分布のイメージングができる見通しを得た。また、透過中性子束を測定することで被検体の熱膨張を観測することができ、他分野への応用が期待できる。以上、本事業で提案した研究ついては概ね達成できた。

表 3.2.2.(2).⑤-1　ドップラ効果測定時の加速器運転パラメータと測定時間

平均電流	154 μA	室温(25℃)	14.6 h
パルス幅	3.0 μsec	昇温 1 (125℃)	4 h
繰り返し周波数	100 Hz	昇温 2 (350℃)	8 h

表 3.2.2.(2).⑤-2　熱中性子領域における透過中性子束比の測定値

	25℃	125℃	350℃
測定値	1.000	1.011±0.112%	1.027±0.113%

表 3.2.2.(2).⑤-3　熱膨張を考慮した熱中性子領域における透過中性子束比の計算値

	25℃	125℃	350℃
計算値	1.000	1.010	1.025

表 3.2.2.(2).⑤-4　各 ROI におけるドップラ効果測定値

ROI	125℃	350℃
#1	1.004±2.03%	0.960±2.04%
#2	0.999±3.83%	0.974±2.83%
#3	0.998±4.23%	0.956±3.12%
#4	0.988±5.41%	0.940±3.33%
#5	1.009±5.43%	0.975±2.41%
#6	0.983±3.03%	0.960±2.08%

図 3.2.2.(2).②-1　実験室に設置した除振台

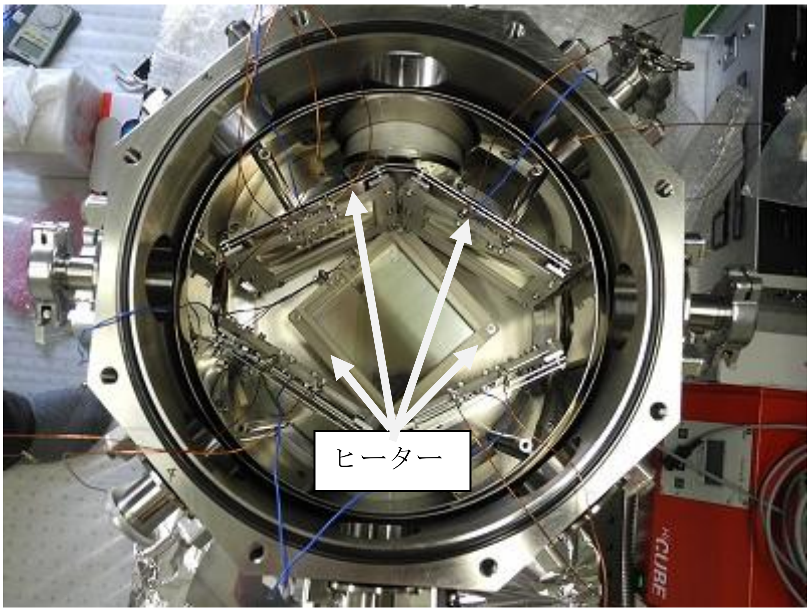


図 3.2.2.(2).③-1　真空容器とヒータ

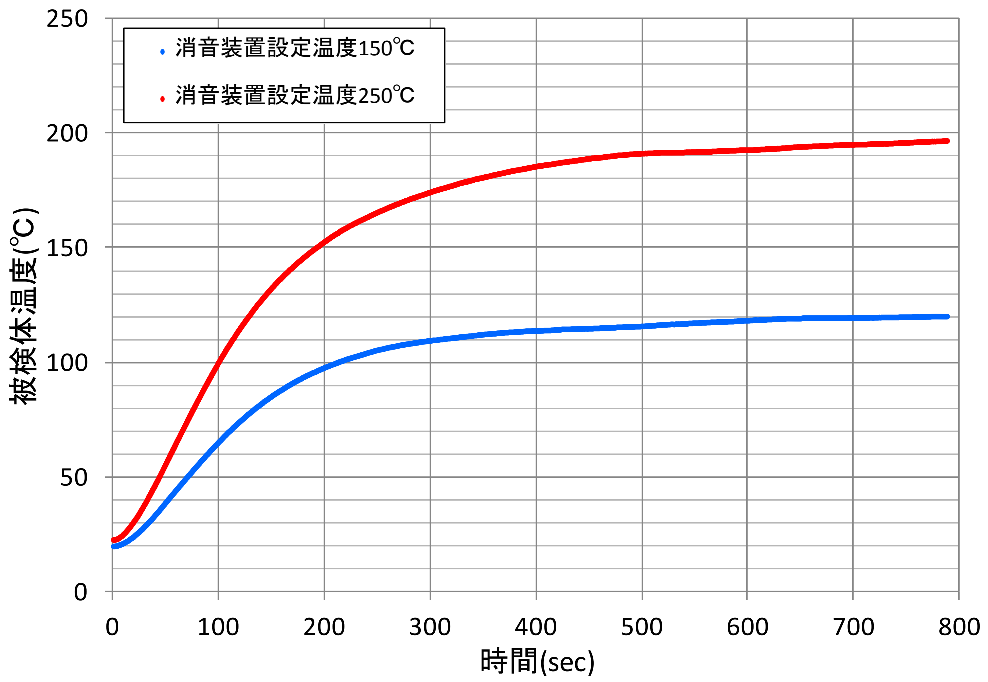


図 3.2.2.(2).③-2　昇温試験

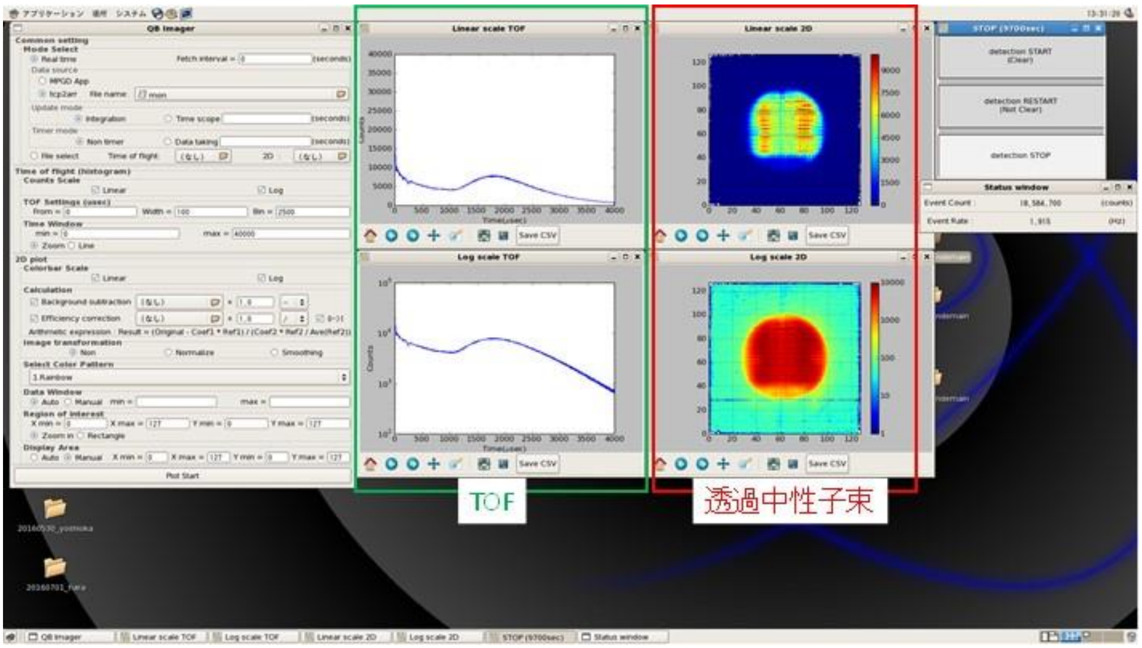


図 3.2.2.(2).④-1　昇温装置内に設置された Ta 板を透過した中性子束測定結果

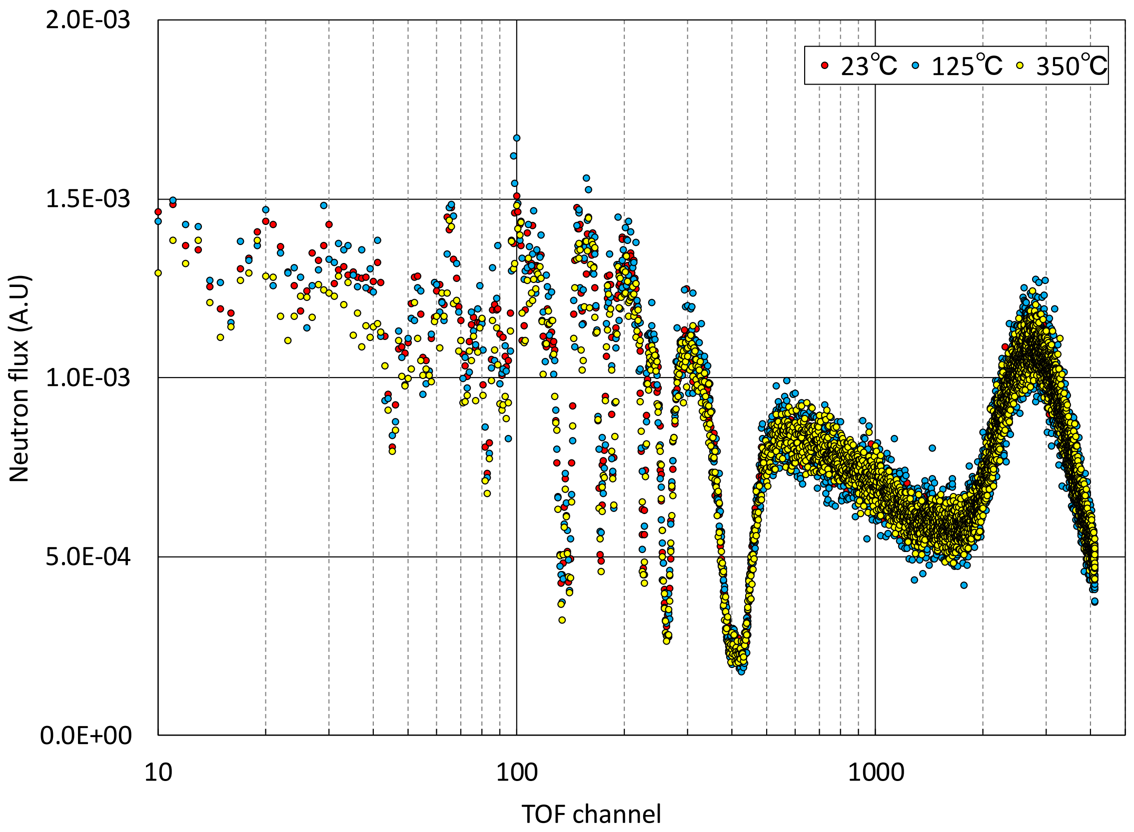


図 3.2.2.(2).⑤-1　測定された TOF スペクトル

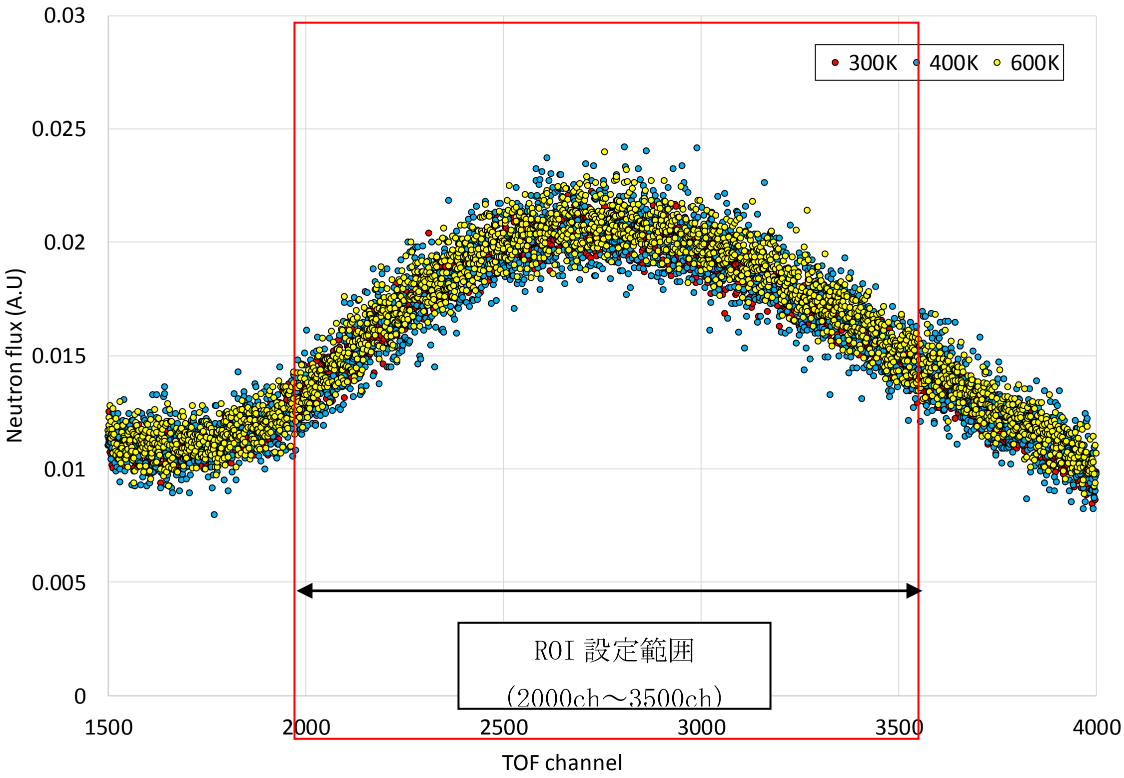


図 3.2.2.(2).⑤-2　熱中性子領域の TOF スペクトルと ROI 範囲

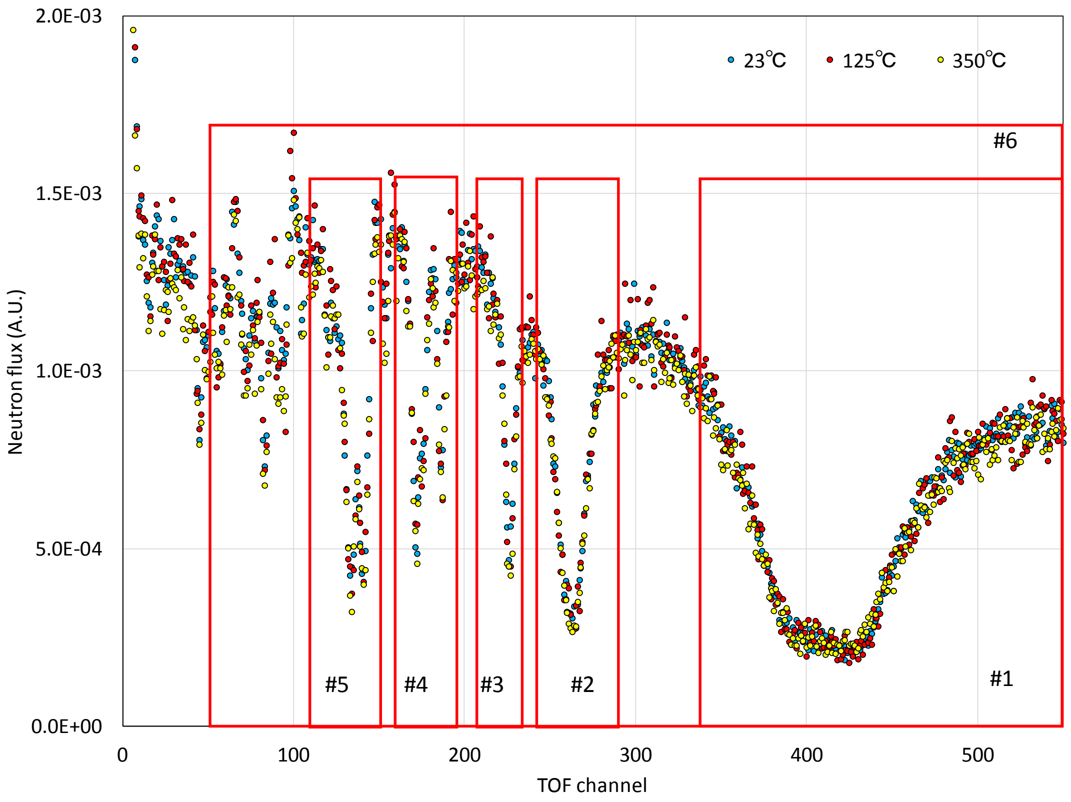


図 3.2.2.(2).⑤-3　共鳴領域の TOF スペクトルと ROI 設定

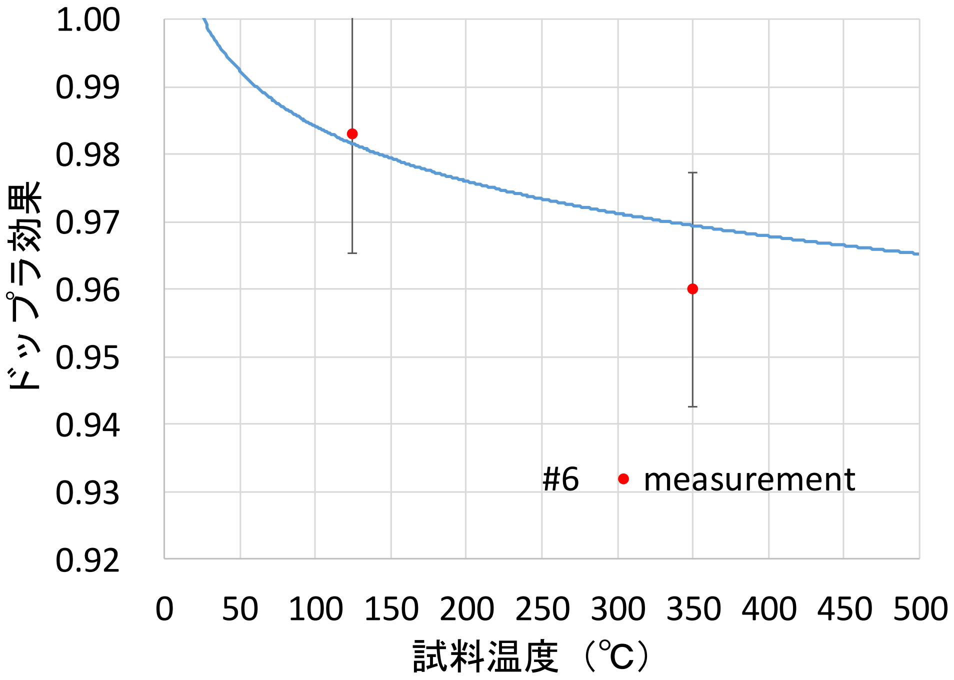


図 3.2.2.(2).⑤-4　計量曲線と測定値の比較

3.3　総合測定システムの開発（H26～H29）

3.3.1　検出器システムの開発（H26～H29）

(1)　高エネルギー中性子及びX線用シンチレーション検出器等の開発（再委託先：アールテック株式会社）（H26～H29）

① シンチレータの改良開発（H26～H29）

1)　概要

平成26年度から平成28年度にかけてMA含有TRU燃料ピンの非破壊検査に適用可能な高エネルギーX線及び中性子用シンチレーション検出器（高効率・高時間分解能検出器）を作成し、平成29年度に連携する部門が担当する検出回路系、データ処理系と組み合せた検出器システムの機能確認を行った。

2)　実施内容

a)　高エネルギーX線用シンチレータ

高エネルギーX線用シンチレータは、平成26年度において高感度のテルビウム賦活酸硫化ガドリニウム（Gd_2O_2S:Tb）の素材を選定し、約1 mm角シンチレータを100 mm×100 mm×20 mmにマルチバンドル化したシンチレータを試作した。このシンチレータ画像は光学系を通してマルチフォトマルに撮影するための光学系機器の収納と散乱X線から遮蔽する収納容器を製作した。このシンチレータを図3.3.1.(1).①-1に示し、収納容器（筐体）の外観を図3.3.1.(1).①-2と3にそれぞれ前面（中性子入射側）及び側面からの外観を示す。また、測定系のブロック図の配置概要を図3. 3.1.(1).①-4に示す。平成29年度にこれらを組み合せたシステム実験を行い、高エネルギーX線に対する特性測定と高エネルギーX線での画像撮影ができて高エネルギー領域でも鉛(Pb)厚さ約20 mm に対して1 mmの輝度変化を画像として識別できることを実測確認した。

b)　高エネルギー中性子用シンチレータの開発

中性子を検出するキーコンポーネントであるシンチレータの開発は平成27年度に濃縮炭化ホウ素（$^{10}B_4C$）とプラスチックシンチレータ（PS）の加工品を積層構造に組立て製作した。実験に使用したシンチレータの外観を図3.3.1.(1).①-5に示す。その中性子実験等において平成27年度報告の今後の課題に記載されているように$^{10}B_4C$膜+プラスチックシンチレータ方式のシンチレーション検出器の代替シンチレータ等の方式の選定と試作評価を平成28年度から実施した。

これらの問題点を解決するための取り組みにより、中性子を効率よく変換する各種材料や方式の検討の結果、^{6}Li含有（酸化リチウムとして含有量6%）の透明なクリスタルガラスであるガラスシンチレータ（厚さ5 mm）を採用することにした。更に小型シンチレータの試作品を製作してカルホルニウム源（^{252}Cf）やパルス中性子源による要素実験と検討を行った。これらの実験を参考にしてシンチレータとしての絞り込みを行い検出器システム取付け用の中性子を光に変換するエリアが32チャンネル×32チャンネル、外形48 mm×48 mmのシンチレータを試作した。シンチレータはマルチフォトマル（光電子増倍管、

既製品）と密着配置されるのでマルチフォトマルの16チャンネル×16チャンネル、外形48 mmに対応した仕様を選択している。

平成27年度から平成29年度にかけて本システムが高効率と高時間分解能が得られるように最適化するために要素実験のほかに光学的実験も取り入れて開発を進めた。画像を形成するためのシンチレータの画素サイズはガラスエレメント1個の受光面の大きさが1.5 mm角、長さは5 mmのピラー（角柱）としている。このピラーの総数1,024個を正方格子状に並べて2次元構造としている。ピラー構造の形状を維持するために、ピラー1本の辺の寸法は1.520±0.004 mm の高精度の加工を行っている。また、長さ方向についてはシンチレータの平坦性を維持するために長さを5.04±0.004 mmとした。これらのピラー1本毎が1画素になるので側面は光学研磨により表面粗さを小さくした鏡面に加工した。この面に付着力の強い光学的な反射薄膜をつけてあるので鏡の箱内のように光を反射する。このシンチレータの外形図は図3.3.1.(1).①-6に示したとおりであり、シンチレータ内部で変換され発光した波長375 nmの青い光を効率よくフォトマル側に取り出すために背面となるAl板表面は反射率の高い処理を施している。シンチレータとしての組立は外形60×60 mmのアルミ製の枠内にピラーを順次はめ込み固定して製作した。シンチレータの背面側から白色光を当てた時の透過像を図3.3.1.(1).①-7に示す。組立品を俯瞰したピラー内を傾斜した壁面に囲まれた状態のシンチレータを図3.3.1(1)①-8に示す。シンチレータの平面図及び外観を図3.3.1.(1).①-9､10に示す。このシンチレータが中性子を受けて発光した場合には375 nmの波長の光を発することが知られている。この状態は通常の環境では再現することはできないので主材料が透明のガラスであることを利用してブラックライトの紫外線（波長395 nm）を照射することによって模擬的な発光状態を観察することが可能になった。この状態を図3.3.1.(1).①-11に示す。シンチレータの格子状配置を確認することができる。

このシンチレータを用いた評価には、物理的な基礎実験として中性子共鳴吸収が既知の取り扱いが容易な素材を使用して創作した評価用チャートを用いて実験を進めた。更に並行してさまざまな核種等の検知測定に使用された。ここでは前項の検証実験に使用した主な評価チャートの構成と形状を記載する。3種類の材料を使用してステップゲージを製作し、それぞれの材料の厚さは0.1 mmの方形シートの幅は10mmとして6段に積層している。銀シート（Ag）の例を図3.3.1.(1).①-12に、他の材料を含む構成例を図3.3.1.(1).①-13に示す。諧調や画像化等の実験に使用するために製作した。更に、これらの材料の中性子吸収特性を実験で確認するために各材料の位置を近接させて画像内に配置して単独材料と異種積層材料の形態にして中性子吸収検出チャートを製作したので外観写真を図3.3.1.(1).①-14に示す。配置の構成はAg,In,Coの各シートの大きさは30 mm角、その厚さは0.1 mmとし、窒化アルミニウムの大きさ50 mm角、厚さ0.4 mmの板の上に固定配置している。これを用いた実験は高エネルギー研究所や東京都市大学、京大炉ライナックにおいて実施された。このチャートの配置図を図3.3.1(1)①-15に示す。

そのほかに、分解能の画像確認の目的にはインジウム箔を使用してスリット状のチャートを用意した。製作には装飾材の箔押しの技法等を参考にして水素を含有する接着剤を使用せずにインジウム箔を窒化アルミ板厚0.4 mmの板の表面に密着させてスリット形状品

を製作した。スリット幅は0.4 mmから5 mmを任意に選択しているがその2例（幅3 mmと0.8 mm）をノギスゲージと共に図3.3.1.(1).①-16に示す。分解能に関する形状測定用にはインジウムシートを大きさの異なる四角形にして窒化アルミニウム（AlN）板の面上に張り付けて中性子照射による形状識別実験に使用した。東京都市大学から報告される実験において識別能の確認ができた。

そこに使用したチャート例2種類を図3.3.1.(1).①-17,18に示す。これらの物理評価用の各種のチャートを使用して次項報告等の実験に組み込まれ、更にシンチレータを組み込んだシンチレーション検出器は京都大学原子力実験所で行われた平成29年度の実証試験に供することができた。

模擬燃料及び核燃料被検体の実験にて高効率・高時間分解能等総合システムとしての評価実験が遂行された。

今回の測定系において、中性子シンチレータ、マルチフォトマル、信号伝送系のLiTAシステムは筐体内に連結配置しておりこの配置図概要を図3.3.1(1)①-19に示す。また、この系は中性子が入射する筐体前面内部に近接して設置し、筐体外部に置かれる被検体等が幾何ボケを低減できるように構成している。測定チャートと筐体前面との近接位置がわかる例を図3.3.1.(1).①-20に示す。

3) まとめ

パルス中性子源を用いた中性子の物質透過による共鳴吸収を効率よく検出する検出器システムの開発に取り組んだ。当初採用した検出器の方式課題を解決するために、各種の方式の選定と試作・実験を行い、^{6}Li含有の透明なガラスシンチレータを採用した。また、種類の異なる構成の小型品を製作してカルホルニウム実験と中性子実験を行った。これらの実験から32×32チャンネルのシンチレータを製作し、実証試験を実施できた。シンチレータについて主な項目を以下に記す。

①このシンチレータは、100 eV入射中性子に対して10 % 捕捉効率が得られた。
②中性子実験用の各種の測定チャートの製作と小型品の要素実験によりTOF測定、二次元画像化等物理測定に寄与できた。
③研究目的である各種の実証実験への適用において次項にあるように有効性が確認できた。
④本研究において、シンチレータ開発の基本事項が明らかになったので更に高効率・高時間分　解能を有する高度な実用性の検出器が得られるよう期待される

以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。

② 核種選択型中性子イメージング実証試験への適用（H29）

開発した高効率・高時間分解能検出器を用いて、京都大学と共同で核種選択型中性子イメージング実証試験を実施した。対処とした被検体は核燃料物質として^{238}U、MA核種として^{243}Am、^{237}Npである。本試験では、これら核種を50 mm厚さ鉛容器中に設置した状況を模擬し、その条件下でも^{238}U、^{237}Np、^{243}Amの被検体のエネルギー分解2次元画像化測定に

より、それぞれの物質の位置・形状を測定することができた。詳細は 3.1.3.(2)節に記す。

③ エネルギー掃引型パルスＸ線装置の設計、製作及び検証（H26～H29）

1) 概要

平成 26 年度から平成 28 年度にかけて X 線シンチレータ校正及び機能確認のために、エネルギー掃引型パルス X 線装置の設計及び製作を行った。平成 29 年度では同装置におけるグリッド制御回路のパルス駆動による X 線量定量化への最適化制御、及び熱特性の改善を行い、その装置動作の検証を行った。また、本装置を用いて X 線検出系装置へ機能確認を行った。

2) 実施内容

本事業は平成 26 年度から平成 29 年度（本年度）の４カ年事業として実施してきた。

平成 26 年度：装置基本仕様の策定、パルス X 線高電圧回路の設計、製作、評価の実施。システム基本仕様から管電圧の掃引、短時間の X 線照射（パルス照射）等を基にＸ線管の選定、高圧回路の検討、製作を実施した。パルス照射駆動の必要性から X 線管はフィラメントの熱電子制御による方法ではなく、一部の大型 X 線管で用いられていた陰極、フィラメント極を分離した陰極の電位制御（グリッド制御）を使用する方式として X 線管の改造製作をメーカーに依頼製作した。製作 X 線管の仕様から一部最高管電圧値等の仕様変更を行い、X 線源高電圧部（X 線発生器と称す）の設計、製作を行った。高圧回路、X 線管を一体とした油浸構造として軽量化、携帯性を考慮した形状とした。動作試験は試験制御器と接続し X 線発生器の出力の確認ができた。

平成 27 年度：制御装置の制御系の装置構成、システムの設計、製作の実施。

照射のエネルギー掃引制御システムとして X 線制御回路系及び制御ソフトウェアの構成として設計を行った。制御回路系は短時間の X 線制御として管電圧、管電流の可変制御回路の設計、特に短時間内に管電流を可変することにより X 線量を一定化するためのグリッド制御回路を主項目として設計、製作した。グリッド制御回路は管電圧掃引時でも X 線量を一定量とするために管電流の制御を微小時間(ms 単位)で行うためにトランスを介しての俊敏な直流応答性が求められる。そのため、高周波信号を基とした振幅変調方式を用いて高圧電源部側にて精度の良い直流制御電圧の再生、制御ができる回路設計を取り入れた。X 線制御ソフトウェアは遠隔から外部 PC を利用し LAN を経由して X 線制御の操作 GUI によるインターフェースを採用して種々のパラメータの監視設定を、更に X 線量の一定量化を得るための管電流制御パターン、管電圧制御パターンの生成を容易とするパターン生成機能を取り入れて制御回路の機能向上を図った。システムは外部ＰＣ,制御装置及び X 線源高電圧部から成る構成とした。図 3.3.1(1)③-1 にシステム構成図、図 3.1.1.(1)③-2 に GUI 操作画面を示す。

平成 28 年度：制御装置の製作・動作検証の実施。

製作面は主にグリッド制御回路の製作、発生器内部へのグリッド電源発生回路の組込みを実施した。ソフト面では制御ソフトウェアの詳細設計を行った。制御装置の検証は X

線連続モードで行い基本動作、GUI 操作の動作確認はできた。グリッド制御電源回路は制御系、出力系ともにパルス特性（短時間）の基本動作の確認を行った。微小時間でのグリッド電圧の制御、管電流の抑制制御の確認、また管電圧を変化させた時の X 線量の抑制の動作の検証を行い装置の基礎動作の確認ができた。図 3.3.1(1)③-4 に X 線量関係図を示す。図から管電圧は 60 kV～80 kV と変化（掃引）させているが（中軸：管電圧の掃引波形）その時の X 線量（下軸）は通常動作では管電圧の増加共に増加するがグリッド制御電圧が電圧制御パターン（枠波形図）の制御波形により管電流が抑制されて X 線出力はその制御値に正確に従った X 線量の出力となっているのが確認できる。カットオフ制御、電流制御となっているのが判る。

本年度（平成 29 年度）は X 線量定量化の最適化制御、熱特性の改善、X 線検出系への適用として前年度までの検証評価での課題になっていたグリッド制御による X 線量定量化制御の精度アップにルックアップテーブルを用いて予め設定、その値を基に制御する短時間での安定出力する手法にために管電圧の変化に伴う X 線量一定量化の安定した精度の良い制御方式の確認、検証を行った。X 線駆動、出力回路系の発熱、放熱等熱対策については駆動回路への波形改善ためのコイルの挿入、駆動周波数値の低域化を行うことでの発熱を低減できた。X 線発生器の冷却は外部ファンを用いた強制空冷方式の採用し改善することができた。本装置を用いて他機関と共同で X 線検出器と組み合わせて定線量下での管電圧を掃引する線質特性の確認試験を実施した。

a) X 線量定量化の制御の検証、熱特性の改善（H29）

ｉ） グリッド制御回路のルックアップテーブルによる X 線量の制御動作の検証

前年度までに得られたグリッド制御特性の基本動作特性からグリッド回路のグリッドバイアス電圧値を微小時間Δｔ（1 ms）設定することで X 線管に流れる管電流を遮断、導通または任意量に制御することが検証できている。この特性を利用し、微小時間毎を続けて制御することで短時間（50 ms）での連続した制御を行ない管電流の抑制をし、X 線量出力の定量化が得られる。（図 3.3.1(1)②-3 参照）。X 線の出力（X 線量）はX線管に与える管電圧 kV と管電流 I により、その線量 R は　R∝(ｋＶ)２・Ｉ　となります。また管電圧 kV は出力 X 線の線質（エネルギー値）を決定する値となります。線質（エネルギー値）を変化させると線量も大きく変動してしまい定量 X 線量の出力を得ることが容易ではなかった。（図 3.3.1(1)③-3 a）参照）　数秒以上の時間で使用する場合は管電圧 kV の変化に伴い管電流を同時に変えることにより X 線量の定量化は得られている（連続稼働）。数 ms 期間での管電流の変更は従来のフィラメント温度の制御による熱電子放出の制御では温度慣性(電圧を急に変化させてもフィラメントの表面温度は急に変化しない)により制限され短時間での制御ができない、グリッド制御よる X 線量（管電流）の制御は図 3.3.1(1)③-3 に示すようにフィラメント温度の抑制で管電流を変化させるのではなくグリッド電極の電圧により陰極からの放出電子線束の制御を行うことにより管電流の抑制制御となります。その原理はグリッド電極の電位の変化―>陰極電子線の抑制、変化―>管電流の変化―>X 線量の変化となり熱慣性の影響は受けずに制御ができます。図 3.1.1(1)③-5 a）からグリッド制御が無い場合は管電圧の

変化に伴いＸ線量は増加します。グリッド制御を行ない、管電流を抑制するとＸ線量は一定化することができます。この特性を利用してグリッド制御電圧を微小時間毎に連続して制御できるように予め制御パターンを作成し、管電圧 kV を変化させたときのＸ線量の精度良い定量化の手法についてを検証した。

先に、グリッド電圧制御の効果の確認としてグリッド制御を行なわずに管電圧を 80～100 kV と変化させた場合の管電圧とＸ線量の関係を図 3.3.1.1(1)③-5 a)に示す。管電圧の増加と共にＸ線量も増加している。（図中赤破線表示）

グリッド制御を用いた場合は管電圧を 80～100 kV と変化させていてもグリッド制御電圧（バイアス電圧）により出力 X 線量は一定量に抑制されているのが確認できる。X 線量とグリッド制御電圧の関係を図 3.3.1(1)③-5 b)に示す。グリッド制御電圧を管電圧の変化に従い増加させることによりＸ線量はほぼ一定に制御されている。この時のグリッド制御電圧は予め X 線管電圧を 80～100 kV と掃引し、各管電圧でX線量値が基準となる 80 kV 時の値と同じなる制御電圧を予備試験から求め、それを基に 80～100 kV の間の短時間 50 ms を微小時間 1 ms 毎の制御電圧値とする LUT 値とする制御パターンを作成。その制御パターンを基にグリッド電圧出力としている。そのパターン値 LUT を表 3.1.1(1)③-1 に示す。この表では 1ms 毎の各時間での制御値を求めグリッド電圧出力としている。これらから管電圧を変化（掃引）させていてもグリッド制御を有効に動作させることにより管電流を抑制して X 線出力の一定量化が精度よく動作していることが確認、検証できた。この方式（微小時間毎の組み合わせで連続的に制御する）により短時間パルス照射のＸ線出力が得られることが実証できた。

ⅱ）Ｘ線駆動、出力回路系、Ｘ線発生器筐体の発熱低減、放熱対策の実施（H29）

駆動回路の発熱対策として駆動回路へのコイル挿入による波形改善及び駆動周波数の低域化で電源入力電流値で約 16 % の減少、電力値換算で 25 % の低減ができた。図 3.3.1(1)③-6 参照

X 線発生器の放熱対策は強制空冷用ファンを用いた一体型強制冷却カバーの製作を実施して放熱効果を増強した。長時間の使用ができるようになった。

(c) まとめ

エネルギー掃引型パルス X 線装置は X 線管の陰極-フィラメント極の分離製作、グリッド制御回路の採用及び制御パターン LUT による微小時間制御等の手法により管電圧（エネルギー）掃引時のＸ線量のパルス照射時のX線定量化出力の装置の製作、制御系の最適化を行い所期の目標の検証確認ができた。今回は管電圧 80～100 kV、パルス時間 50 ms 範囲での検証であったが範囲を任意に設定し制御パターンを種々作成することによりパルス照射Ｘ線の使用範囲が広がると期待できる。熱特性の改善はＸ線駆動回路の発熱低減策及びＸ線発生器の冷却方式の改善による発熱の低減策の実施、検証し確認した。これにより制御系の装置最適化ができたことが確認できた。本装置を用いて他機関と共にＸ線検出系の検出機能確認及び校正に供した（図 3.3.1(1).③-7 参照）。以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。

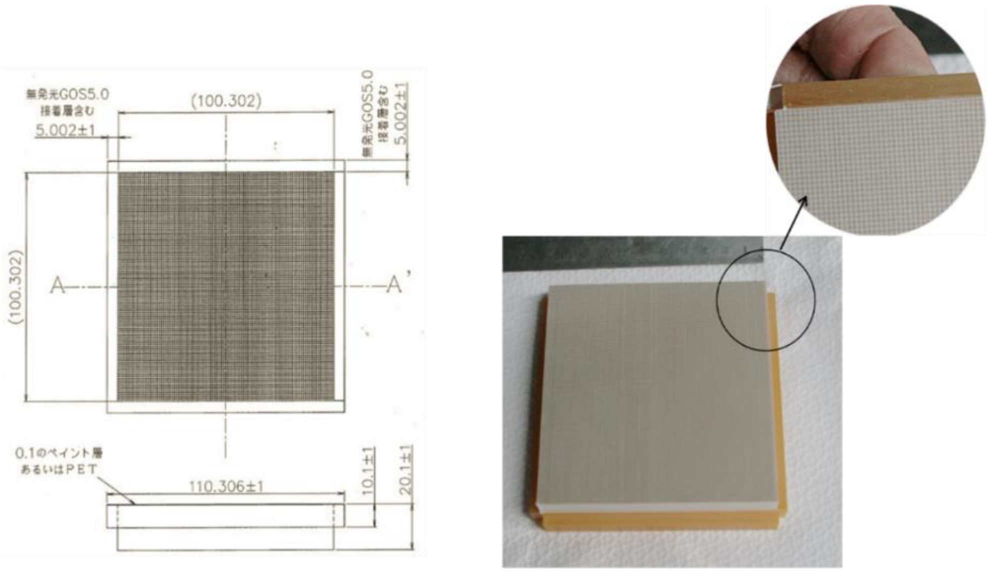


図 3.3.1.(1).①-1　高エネルギーX 線用シンチレータの外形図

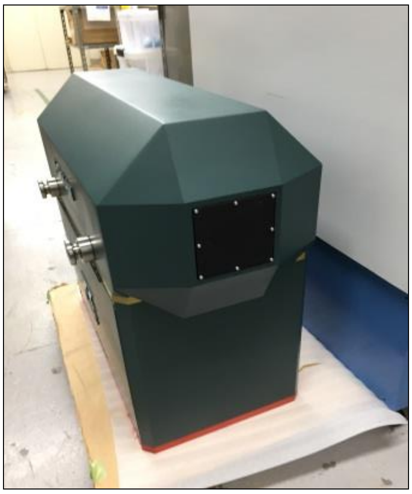


図 3.3.1(1).①-2　筐体前面

図 3.3.1(1).①-3　筐体側面

図 3.3.1(1).①-4　測定ブロック図概要

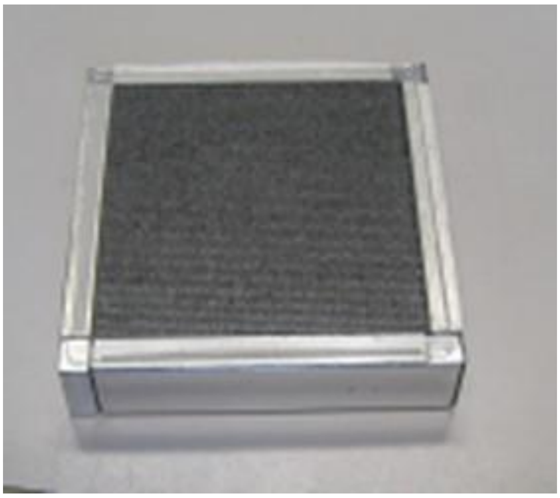


図 3.3.1.(1).①-5　シンチレータ ($^{10}B_4C$+PS)

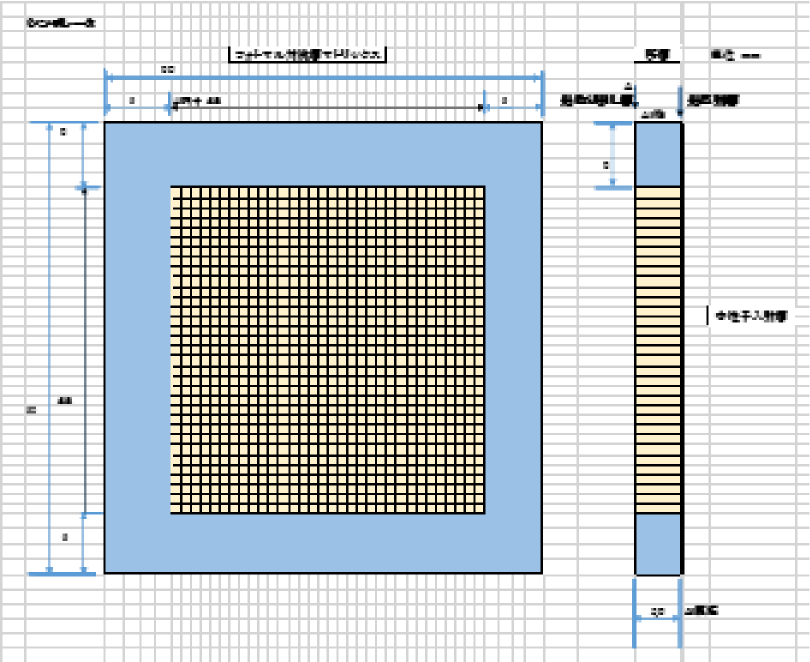


図 3.3.1(1).①-6　シンチレータの外形図

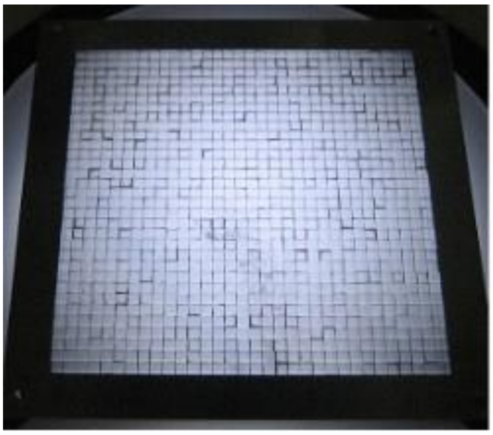


図 3.3.1(1).①-7　シンチレータの光透過像

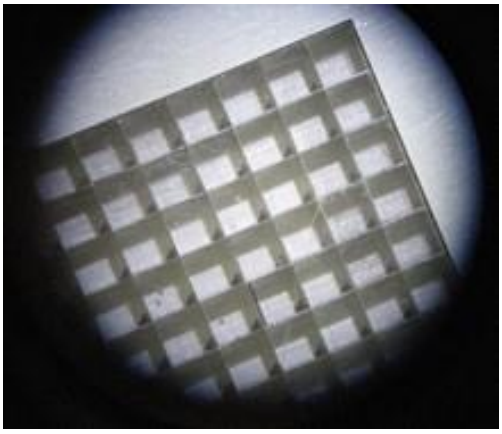
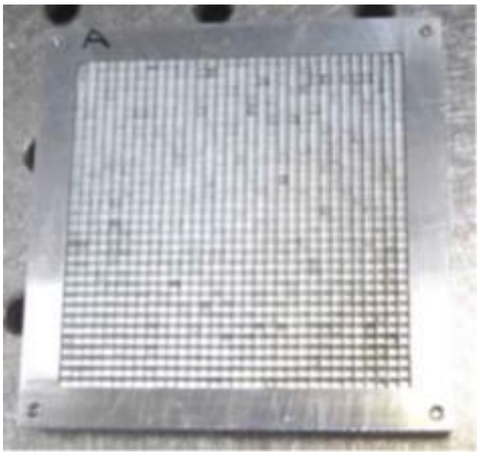


図 3.3.1(1).①-8　ガラス俯瞰図



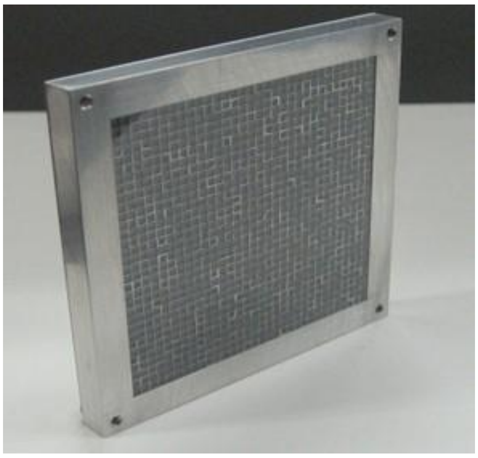
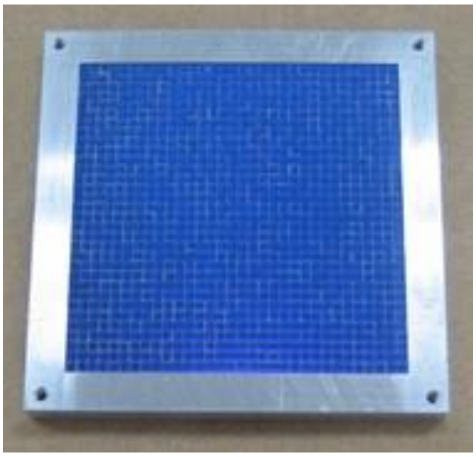


図 3.3.1(1).①-9　シンチレータ平面　　図 3.3.1(1).①-10　シンチレータ外観



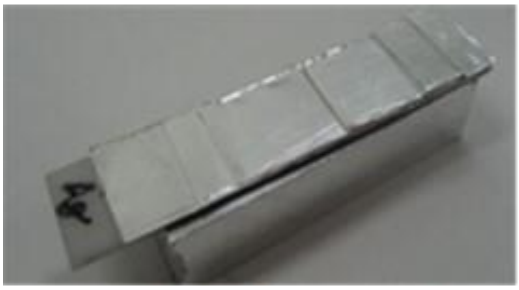
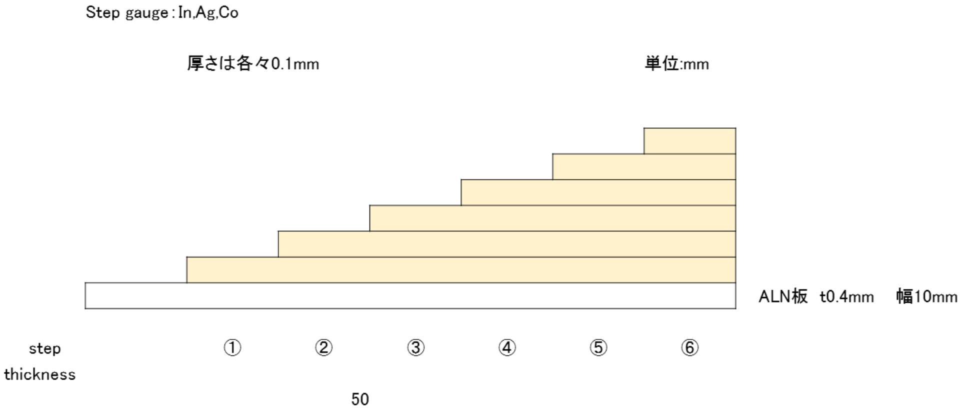


図 3.3.1(1).①-11　シンチレータの模擬発光　　図 3.3.1(1).①-12　ステップゲージ



		①	②	③	④	⑤	⑥
Step 幅	In Step	6	5	9	13	4	8
	Ag Step	8	4	13	10	5	5
	Co Step	6	7	11	11	6	5

図 3.3.1.(1).①-13　ステップゲージの構成図（Ag,In,Co の 3 種類）

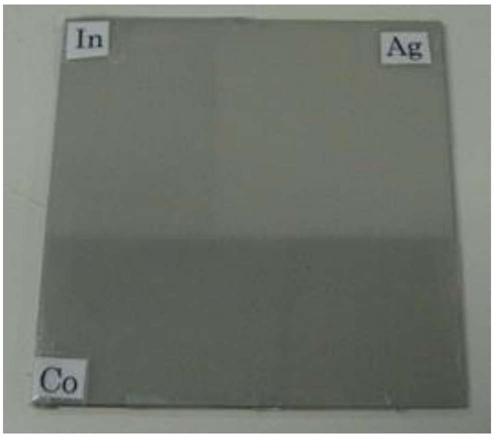


図 3.3.1(1).①-14　中性子吸収検出チャート

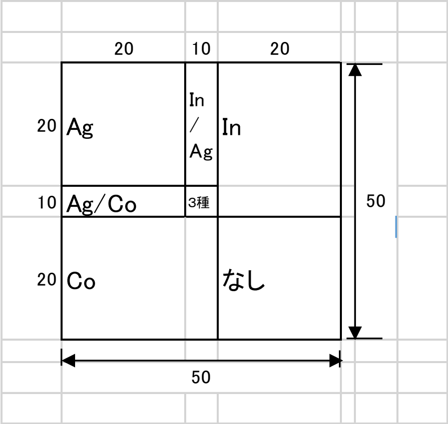


図 3.3.1(1).①-15　同左の構成図

図 3.3.1(1).①-16　分解能チャート

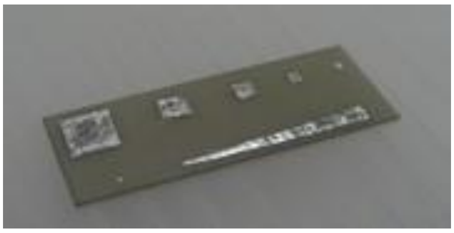


図 3.3.1(1).①-17　正方形とくさび型

図 3.3.1(1).①-18　 In 正方形５種

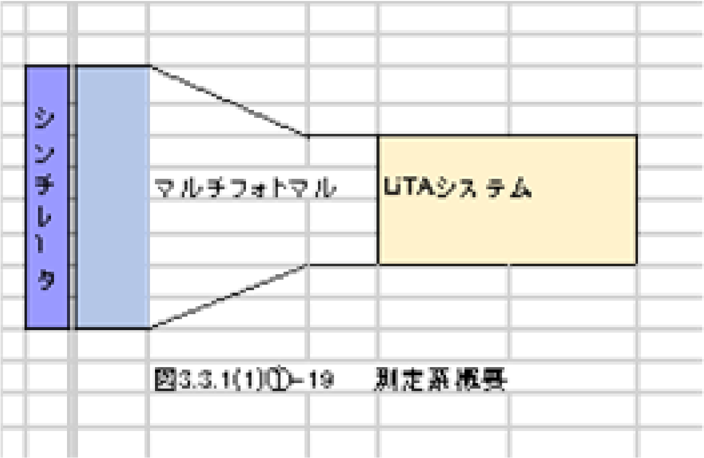


図 3.3.1(1).①-19　 測定系概要

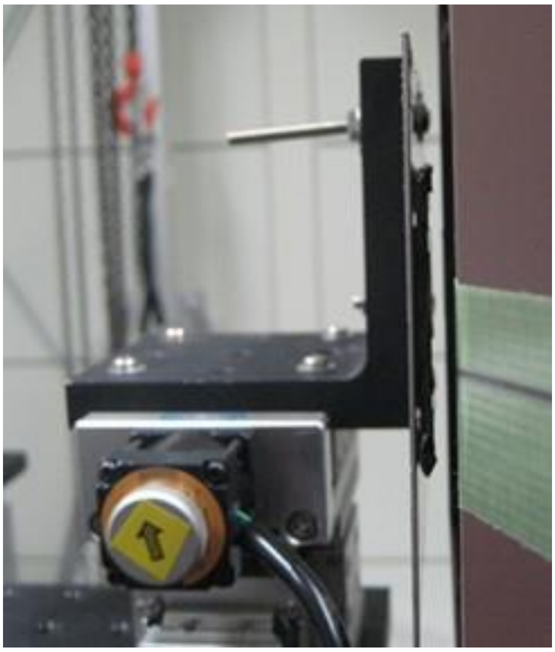


図 3.3.1(1).①-20　 チャートの近接配置

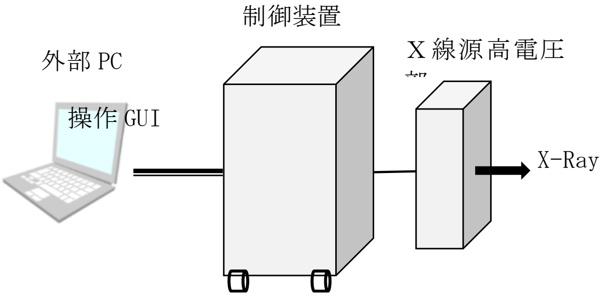


図 3.3.1.(1).③-1　システム構成図

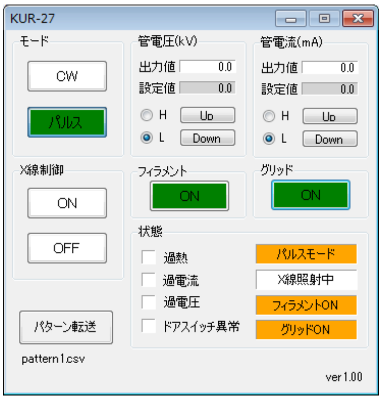
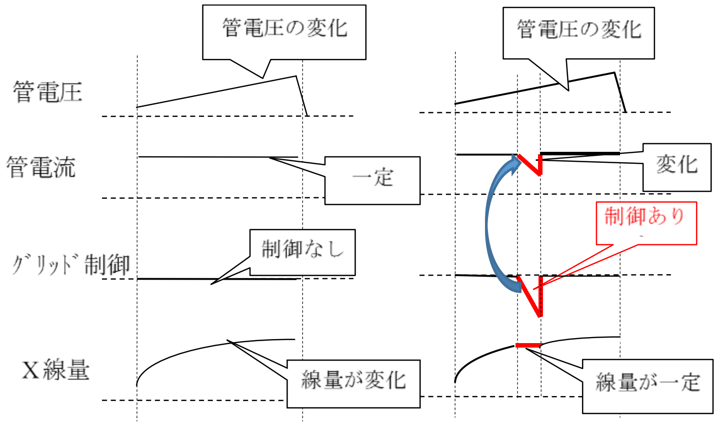


図 3.3.1.(1).③-2　 GUI 画面



a)グリッド制御の無い場合　　b)グリッド制御のある場合

図 3.3.1.(1).③-3　管電圧、管電流、X 線量の関係

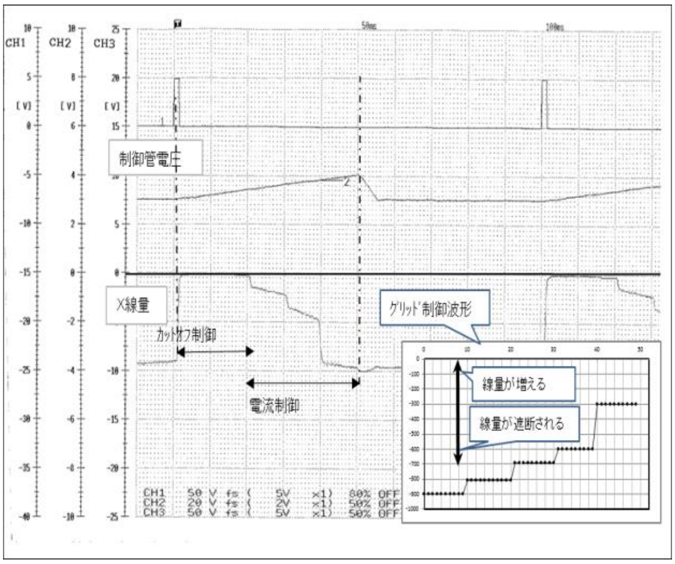
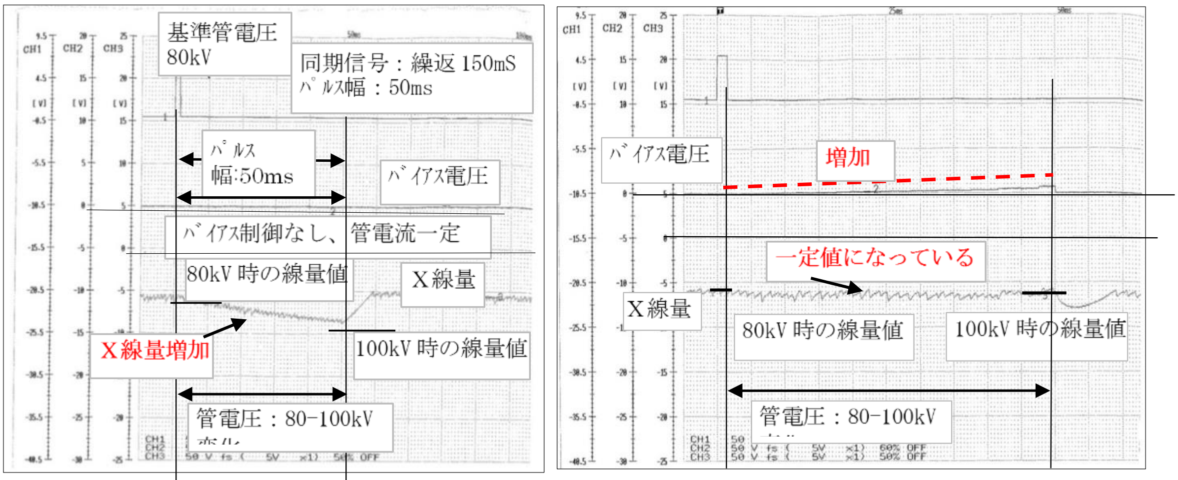


図 3.3.1.(1).③-4　管電圧掃引と X 線量特性



a)グリッド制御の用いない場合　　b)グリッド制御を用いた場合

図 3.3.1.(1).③-5　管電圧の変化と X 線量特性

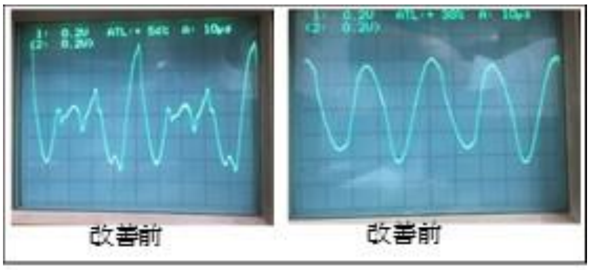


図 3.3.1.(1).③-6　波形改善

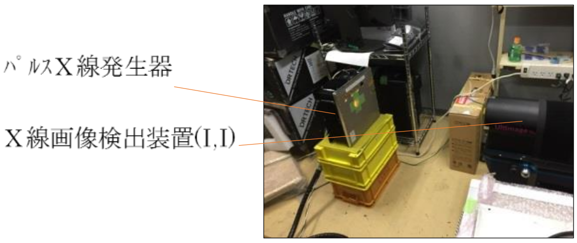


図 3.3.1.(1).③-7　試験風景

表 3.3.1.(1).③-1　LUT 値表

時間 (ms)	設定値	ｸﾞﾘｯﾄﾞ電圧 (V)	時間 (ms)	設定値	ｸﾞﾘｯﾄﾞ電圧 (V)	時間 (ms)	設定値	ｸﾞﾘｯﾄﾞ電圧 (V)
0	-100.0	0						
1	-100.0	0	21	-98.5	-45	41	-96.5	-105
2	-100.0	0	22	-98.0	-60	42	-95.0	-150
3	-100.0	0	23	-98.0	-60	43	-95.0	-150
4	-100.0	0	24	-98.0	-60	44	-95.0	-150
5	-100.0	0	25	-98.0	-60	45	-95.0	-150
6	-100.0	0	26	-98.0	-60	46	-95.0	-150
7	-99.5	-15	27	-98.0	-60	47	-95.0	-150
8	-99.5	-15	28	-98.0	-60	48	-93.0	-210
9	-99.5	-15	29	-97.5	-75	49	-93.0	-210
10	-99.5	-15	30	-97.5	-75	50	-93.0	-210
11	-99.5	-15	31	-97.5	-75			
12	-99.0	-30	32	-97.5	-75			
13	-99.0	-30	33	-97.0	-90			
14	-99.0	-30	34	-97.0	-90			
15	-99.0	-30	35	-97.0	-90			
16	-99.0	-30	36	-97.0	-90			
17	-99.0	-30	37	-97.0	-90			
18	-98.5	-45	38	-96.5	-105			
19	-98.5	-45	39	-96.5	-105			
20	-98.5	-45	40	-96.5	-105			

(2)　LiTA 検出器システムの研究開発及び作成
（再委託先：高エネルギー加速器研究機構）（H26～H29）

①概要

3.3.1.(1).①節で開発した、高効率・高時間分解能検出器を用いた中性子イメージング装置の高度化に資するために、LiTA 検出器システムを開発した。H26 年度～H27 年度にかけて 2 台の LiTA 検出器システムの設計及び製作を実施し、特性試験を実施した。H28 年度には高度化として、シリコン受光素子（MPPC）でも使用可能な LiTA 検出器システムの開発を行い、特性試験を実施した。その結果、LiTA 検出器システムはピクセルごとにゲインを調整可能となった。H29 年度はできるようにし、特性試験を実施した。H29 年度は LiTA 検出器システムの ADC を 40 MHz から 50 MHz に変更し、時間分析精度を改良し、こ

れらが設計とおりに動作することを確認し、LiTA 検出器システムが本事業で実施する実証試験に使用できることを実証した。

②北海道大学用LiTA中性子検出器システムの作製（H26）

北海道大学用のLiTA中性子検出器システム[1]を作製した。アンプ回路、処理回路、HV電源を組み合わせ、調整作業を行った。作製した主な部品は、LiTA12e_VME基板、LiTA12e_ADC基板、HV電源モジュールである。基本設計及び動作確認は高エネ研予算で行っていたが、システム全体を組み上げたことがなかったので、組み上げてシステムとしての動作試験を行った。図3.3.1.(2).②-1.(a)にLiTA12e_VME基板とLiTA12e_ADC基板を組み上げたLiTA12e_VMEモジュールを、(b)にHV電源モジュールを示す。

LiTA12e 検出器システムは、マルチアノード型の光電子増倍管（MA-PMT）に中性子シンチレータを取り付け、中性子検出により発生した光を電気信号として出力する。高速アンプで増幅し、全ピクセルの信号をアナログ‐デジタル変換器（ADC）でデジタル信号に変換する。このデジタル信号はゲートアレイ（FPGA）でヒストグラムデータとして蓄積し、イベントデータとして読み出すことができる。MA-PMTは16 ch×16 chのH9500か8 ch×8 ch の H8500 を使用できる。各ピクセルを独立に動作させる高計数率モードと、相互比較して高位置分解能を求める重心計算モードを持つ。図 3.3.1.(2).②-2.(a)に LiTA12e検出器システムの構成図を、(b)に写真を使用した各パーツの関係を示す。

北大ライナックを使用し、LiTA12e 検出器システムの検証を行った。各測定の検出器地点は 6.1 m で、0.6 ms 近辺が Cd のカットオフエネルギー（0.5 eV）となる。50 Hz 周期100 秒の測定で、2 次元図と波高分布図の時間積分は、1 ms から 20 ms 間（0.19 eV から0.5 meV）を積算した。時間分布図は、10 μs 単位で 10 ms までを表示した。

図 3.3.1.(2).②-3.(a)に、H9500 に ^{6}Li:1 mm 厚を取り付けた様子を示す。16×16 のピクセル配置に 5×5 cm^{2} の ^{6}Li:1 mm 厚を貼り付けている。(b)に、(a)の遮光後にカドミウム（Cd）「KENS」文字を取り付けたところを示す。

図 3.3.1.(2).②-4.に ^{6}Li-1.0 mm 厚の 2 次元図、波高分布図、時間分布図を示す。2 次元図は Cd 文字を貼り付けた時のデータを外した時のデータで強度補正している。非常に良い位置分解能が得られることがわかった。Cd 文字を保持しているテープに含まれる水素が見えている。時間分布図から、1.8 ms 近辺で最大の 235,000 カウントで、最大計数率は 4.7 Mcps であった。図 3.3.1.(2).②-5.は補正なしデータで、(a)は Cd 文字あり、(b)はCd文字なしの2次元図を示す。

^{3}He 検出器と各シンチレータの時間分布データを比較した。図 3.3.1.(2).②-6.(a)に ^{3}He 検出器の設置の様子を、(b)に細いビームで測定のためのビーム穴を示す。^{3}He 検出器は1インチ径6気圧であった。

図3.3.1.(2).②-7に^{3}He検出器とH9500-^{6}Li:1 mm厚とH9500- ZnS:0.4 mm厚の時間分布比較図を示す。シンチレータの供給電圧を変えてみた。^{6}Liはノイズと信号の分岐点が明確なので、ほとんど変わらない。しかし、ZnSは明確でないので、電圧が高い方が高い効率になった。2 ms（49 meV）付近では ^{3}He：^{6}Li：ZnS＝12:9:2=100:75:17 程度であるが、4 ms（12 meV）付近では^{3}He：^{6}Li：ZnS＝2:2:0.5=100:100:25程度となる。およそ合って

いる。

イメージング装置で得られる2次元画像を直接H9500に投影してLiTA12eシステムで得られるか、検証を行った。図 3.3.1.(2).②-8.にイメージング装置を使用した測定状況を、図 3.3.1.(2).②-9.(a)にイメージング装置の光を下部に反射する様子を、(b)に下のH9500 で受光する様子を、(c)にイメージング装置の前面にボロンゴム「×」取り付けの様子を示す。図 3.3.1.(2).②-10. に H9500 イメージデータの 2 次元画像、波高分布図、時間分布図を示す。2 次元図はボロンゴムを貼り付けた時のデータを外した時のデータで強度補正している。図 3.3.1.(2).②-11.は補正なしデータで、(a)に Cd 文字あり、(b)に Cd 文字なしを示す。投影画像なので、直付けのシンチレータが発光するのと違った重心計算式が必要である。また、焦点が合ってしまうと重心計算ができない。投影画像でも重心計算が合う 2 分の 1 の位置分解能で計算できたので、ピクセルサイズは 1.5 mm となる。

③ 京都大学用LiTA中性子検出器システムの作製 (H27)

京都大学用の LiTA 中性子検出器システムを作製した。アンプ回路、処理回路、HV 電源を組み合わせ、調整作業を行った。作製した主な部品は、LiTA12e_VME モジュール、アンプ基板、HV 電源モジュールである。前年度の北海道大学用の LiTA 中性子検出器システム作製・測定結果を参考に、京都大学用の LiTA12e システムを作製した。図 3.3.1.(2).③-1 に京都大学用の LiTA12e システムの動作試験の様子を示す。LED テスト試験回路で基本的な動作確認及び調整を行った。

京都大学原子炉実験所 (KUR) の電子ライナックを使用し、京都大学用の LiTA12e 検出器システムで、^{6}Li ガラスシンチレータと ZnS シンチレータを比較測定した。

各測定の検出器地点は 12m で、飛行時間測定 (TOF) データの 1.2 ms 近辺が Cd のカットオフエネルギー (0.5 eV) となる。100 Hz 周期 100 秒の測定で、2 次元図と波高分布図の時間積分は、0.2 ms から 10 ms 間 (0.19 eV から 7.5 meV) を積算している。TOF は、0.1 ms 単位で 10 ms までを表示している。

測定は、LiTA12 検出器に取り付けるシンチレータを各種変え、検出器前に各種透過被検体を変えて行った。図 3.3.(2).③-2 に測定の概要図を示す。図 3.3.(2).③-3.(a)に被検体の無いダイレクトビームの、(b)に B ゴム-20 mm 厚の、(c)に B ゴム-20 mm 厚+Cd-1.5 mm 厚の、 (d)に Cd-1.5 mm 厚の、(e)に Pb-50 mm 厚の測定をしている様子を示す。

図 3.3.(2).③-4 に ^{6}Li-1 mm 厚ガラスシンチレータを取り付けたところを示す。供給電圧は-580V であった。

図 3.3.(2).③-5(a)にダイレクトビームの、(b)に B ゴム-20 mm 厚の、(c)に B ゴム-20 mm 厚+Cd-1.5 mm 厚の、 (d) に Cd-1.5 mm 厚の、(e)に Pb-50 mm 厚の測定データを示す。左が 2 次元図で、中心が波高分布図、右が時間分布図 (0.1 ms 単位) である。(a)の波高分布図のように、^{6}Li ガラスシンチレータは中性子と反応すると 4.8 MeV のピークだけとなる。(c)のように、Cd の 2 次γ線だけで光っているときは中性子のピークはない。(d)の中性子とγ線の混合の場合はピークもあることがわかる。時間制限を加えると分離できることを確かめている。(e)では(a)と同様に、中性子だけになるので、4.8 MeV のピークだけとなる。

図 3.3.(2).③-6 に ^{6}Li-1 mm 厚ガラスシンチレータの TOF 特性を示す。図中の(c)は(b)より小さくなるはずが、Cd のカットオフエネルギー以降、吸収した中性子が 2 次γ線になり、それを感じて中性子量に応じたカウント数がある。また、(d)ではカットオフ以上のエネルギーでは(a)と同じで、それ以下では(c)より 2 cm 分近いだけ大きな Cd の 2 次γ線をカウントしている。

図 3.3.(2).③-7 に ZnS-0.45 mm 厚シンチレータを取り付けたところを示す。供給電圧は-440 V であった。

図 3.3.(2).③-8(a) にダイレクトビームの、(b)に B ゴム-20 mm 厚の、(c)に B ゴム-20 mm 厚＋Cd-1.5 mm 厚の、 (d) に Cd-1.5 mm 厚の、(e)に Pb-50 mm 厚の測定データを示す。左が 2 次元図で、中心が波高分布図、右が時間分布図 (0.1 ms 単位) である。

ZnS/^{6}Li の ^{6}Li が中性子と反応すると本来は 4.8 MeV のピークがあるが、ZnS シンチレータは不透明で、内部で光った光が出にくく、(a)の波高分布図のように小さな信号の割合が指数関数的に多くなる。右側のピークは大きな信号が電源電圧にクリップされている状態である。しかし、γ線を感じないので、(b)と(c)ではほとんど信号がなくなり、(d)では Cd のカットオフエネルギー以上の中性子だけが見えている。(e)では(a)と同様に、中性子だけのデータとなる。

図 3.3.(2).③-9 に ZnS-0.45 mm 厚シンチレータの TOF 特性を示す。図中の(c)は(b)より小さくなる。また、(d)ではカットオフ以上のエネルギーでは(a)と同じで、それ以下では 4 桁も小さくなっている。

④ LiTA 検出器のシリコン受光素子 (MPPC) 化の研究開発 (H28)

LiTA 中性子検出器システムをシリコン受光素子 (MPPC) でも使用できるように研究開発し、ピクセルごとにゲインを調整できるようにした。また、LiTA 中性子検出器システムで、本プロジェクトの中性子測定を行った。

MPPC-LiTA 検出器の開発では、東京都市大学と協力して開発を行った。使用した MPPC アレイは浜松ホトニクス製の S13361-3075AE-08 で、3 mm 角の受光面を持つ MPPC が 8×8 の配列で配置されている。MPPC アレイは MA-PMT と同じ配置の受光面を構成できる。供給する電圧を変えることでゲインを可変できるので、全ピクセルのゲイン調整回路を開発した。

LiTA システムから MPPC-LiTA システムへの変更は、LiTA 検出器と高速アンプ部分を MPPC アレイ検出器と CA32M_DAC 基板、CA32M_HV 基板、CAMP32 アンプに置き換える。図 3.3.(2).④-1. に MPPC-LiTA システムの構成図を示す。

図 3.3.(2).④-2. は MPPC アレイ検出器と CA32M_DAC 基板、CA32M_HV 基板の関係を示している。C32M_HV 基板で MPPC 用の高電圧を発生し、MPPC アレイ検出器の全 MPPC のカソードに供給される。MPPC アレイ検出器の温度を測っていて、この値から補正用の電圧を割り出し、常時この高電圧を微調整している。各 MPPC のアノードは、CA32M_DAC 基板のデジタル—アナログ変換回路 (DAC) から抵抗を介して電圧を変えられる。MPPC を、ダイオードとみると、逆電圧がかけられ、微妙に電圧が調整できるので、各 MPPC のゲイン調整ができる。図 3.3.(2).④-3(a)に光拡散ガラスを付けた MPPC アレイ検出器を、(b)に

CA32M_DAC 基板、CA32M_HV 基板を示す。CA32M_HV 基板の下側に高速アンプがある。

MPPC の調整は LED を直接パルスジェネレータで発光させて行う。使用する ZnS/LiF 中性子シンチレータの発光波長に近い、青色 LED を使用し、パルスジェネレータを矩形波形出力で、10 kHz, 2.92 Vpp, 80 ns パルス幅で暗箱の反対側から照射した。対向して MPPC アレイ検出器を置いて測定した。図 3.3.(2).④-4 に調整時のデータを示す。(a)の無調整の波高分布図では、ゲインが最大で 5 倍以上違っているのがわかる。1 回目調整後のデータでは、2～3 倍に収まっている。更に 2 回目の調整後のデータでは、ほとんど合うことが確認できた。目標のピクセルごとにゲイン調整する機能が完成したことが確認できた。

実際の中性子照射での検証を行った。図 3.3.(2).④-5(a)は一様ビーム照射の様子を、(b)は Cd「KENS」文字（厚さ：0.5 mm、幅：1 mm、横：20 mm、縦：10 mm）の様子を示す。(a)の左上に中性子ビームを散乱させるためのポリエチレンブロックを置き、ビームの 90 度方向の、60 cm 程度離れた位置に MPPC-LiTA 検出器（右上）を置いた。図 3.3.(2).④-6 (a)は被検体なしの、(b)は Cd 文字の、(c)は(b)を(a)で強度補正した 2 次元図を、(d)は拡大図を示す。1 mm 幅が 0.4 mm ピクセルサイズで 3 ピクセル程度に見えているので、十分な位置分解能が得られることが確認できた。

⑤ LiTA 検出器の高速化の研究開発（H29）

LiTA 中性子検出器システムの ADC を 40 MHz から 50 MHz に変更し、時間分析精度を改良し、これらが設計とおりに動作することを確認した。また、小型中性子源の照射実験で、今までに作製している LiTA 中性子検出器システムが物質の透過実験に使用できることを実証した。

LiTA 中性子検出器システムの ADC を 40 MHz から 50 MHz に変更し、時間分析精度を改良した。わかり易い確認方法として、当システムの波形観測機能のデータを示す。従来は図 3.3.(2).⑤-1. (a)のように、ADC のサンプリング周波数を 40 MHz で行っていたが、50 MHz 読出ししていたので、5 回に 1 回同じ値になり、ぎくしゃくした波形となっていた。本研究開発で ADC のサンプリング周波数を 50 MHz に変更したことにより、(b)のようにスムーズな波形が得られるようになった。

物質の透過実験で、LiTA 中性子検出器システムの中性子測定での有用性を検証した。KUR の 30MeV 電子ライナックを使用して、30 MeV、50 Hz で、パルス幅 4 μs、平均電流値 100 μA（ロングモード）で測定を行った。検出器地点はターゲットから約 12.2 m であった。中性子シンチレータとしては ^{6}Li-5 mm 厚ピラー型シンチレータを使用した。図 3.3.(2).⑤-2(a)のように、ピラー型シンチレータのピラーのサイズは 1.5 mm 角 5 mm 厚で、MA-PMT の 3 mm ピッチを 2 個ずつでカバーする。(b)に設置の様子を示す。この後に遮光板を取り付けている。

In 板と Ag 板と Co 板を内蔵する被検体 1 の測定を行った。図 3.3.(2).⑤-3(a)に In-Ag-Co 被検体 1 を検出器前に取り付けたところを、(b)に内蔵被検体の寸法図を示す。

図 3.3.(2).⑤-4(a)はダイレクトビームの、(b)は被検体 1 を置いた時の全時間領域のデータを示す。左は 2 次元グラフ（2D グラフ）、中は波高分布図（PHA）、右は時間分布図（TOF、1 us）である。それぞれ、5cm 径のビームサイズが見えている。(c), (d), (e)

は In、Ag、Co のそれぞれの共鳴エネルギー近辺で TOF 制限を掛けたデータである。選択的に中性子が吸収されているので、それぞれの被検体の影が見えることがわかる。

図 3.3.(2).⑤-5 は、図 3.3.(2).⑤-4 (c), (d), (e)を(a)のダイレクト照射データで強度補正したデータを示す。図 3.3.(2).⑤-5 の左は ^{115}In、中は ^{109}Ag、右は ^{59}Co である。ビーム形状等が相殺されて見えなくなるので、図 3.3.(2).⑤-4 より被検体だけが鮮明に観測できることがわかる。

図 3.3.(2).⑤-6 に TOF を示す。ダイレクト照射と、被検体 1 透過と、In, Ag, Co 板が重なっていた 6 ch だけのデータを表示している。ダイレクト照射と、被検体 1 透過からは、共鳴エネルギーが良く見える。^{59}Co だけは、両方で増えている。重なりのデータからは ^{59}Co が良く見えている。^{115}In と ^{109}Ag の比率も大きくなるので、差が大きく見えている。

図 3.3.(2).⑤-7(a)は、In くさび形被検体 2 で、(b)は In 厚さ変化、大きさ変化被検体 3, 4 で、(c)は B 板に 0.5 mm 隙間がいくつかある被検体 5 である。(a),(b)は 1.5 mm のピクセルサイズでそれなりに見えたが、(c)の 0.5 mm 隙間は識別できない。(d)に TOF を示す。全体量が少ないので見にくいが、比較的量の多い(b)の ^{115}In ディップは見えている。

被検体中の ^{235}U と ^{238}U の量の違いが識別できるか、検証を行った。^{235}U は大きな共鳴エネルギーが少ないが、^{238}U は 6.67 eV, 20.9 eV, 36.7 eV にある。これらの違いを調べた。図 3.3.(2).⑤-8 (a)に U 被検体の取り付けを、(b)に取り付けの概略図を、(c)に全エネルギー (2 meV～312 eV、50 us～19 ms) の 2D グラフを、(d)にダイレクト照射と U 被検体透過の TOF を、(e)～(i)に各エネルギー近辺の 2D グラフを示す。(a)と(b)の数字は被検体の枚数を示し、左側の HU が ^{235}U で、右側の DU が ^{238}U である。(c)の全エネルギー積算 (2 meV～312 eV、50 us～19 ms) の 2D グラフでは HU の吸収が多く、影が濃くなることがわかる。水素を含むビニール袋も写っている。(d)のダイレクト照射と U 被検体透過の TOF が合わないのは、ビーム照射条件が違ってしまったためである。^{238}U の散乱断面積が大きい 6.67 eV, 20.9 eV, 36.7 eV に近い(e), (h), (i)が、右側の DU の影が濃くなっているのが確認できた。

⑥ まとめ

本事業で開発した高効率・高時間分解能検出器の高度化のために LiTA 検出器システムを開発した。本システムを用いて、一連の特性試験及び実証試験を実施し良好な結果が得られ、本事業で提案した研究は全て達成できた。

図 3.3.1.(2).②-1. (a) LiTA12e_VME モジュール　　(b) HV 電源モジュール

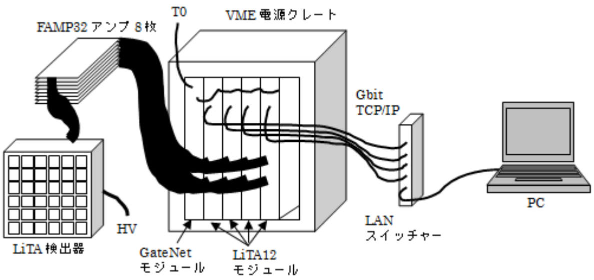


図 3.3.1.(2).②-2. (a) LiTA12e の構成図　　(b) 写真を使用した各パーツの関係

図 3.3.1.(2).②-3. (a) ^{6}Li:1 mm 厚を取り付け　　(b) Cd「KENS」文字取り付け

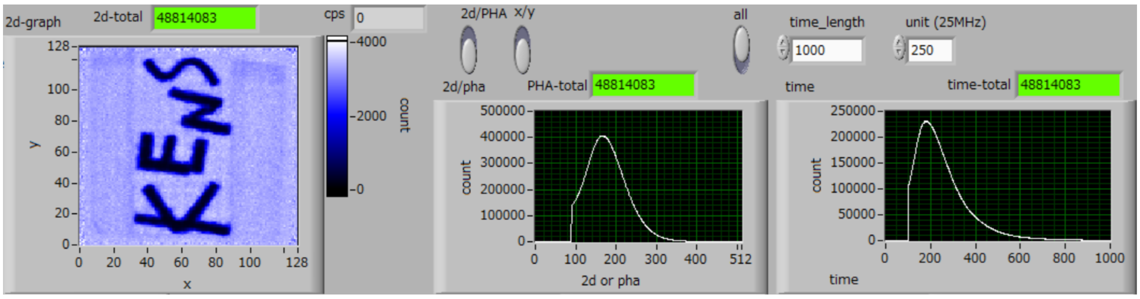
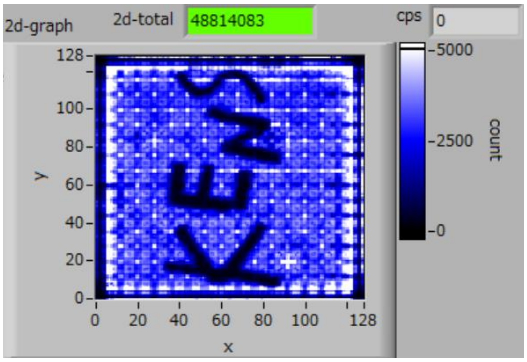


図 3.3.1.(2).②-4 HV=-520 V、lld=60 ch の 2 次元図(p60d54)、波高分布図、時間分布図,
run7 / run3



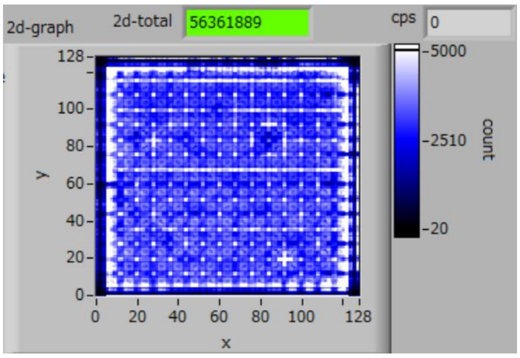


図 3.3.1.(2).②-5　(a) 補正なしデータ Cd 文字あり(run7)　(b) 補正なしデータ Cd 文字なし(run3)

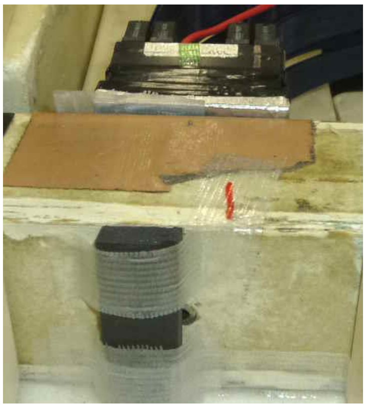


図 3.3.1.(2).②-6　(a) ^{3}He 検出器の設置　(b) 細いビームで測定

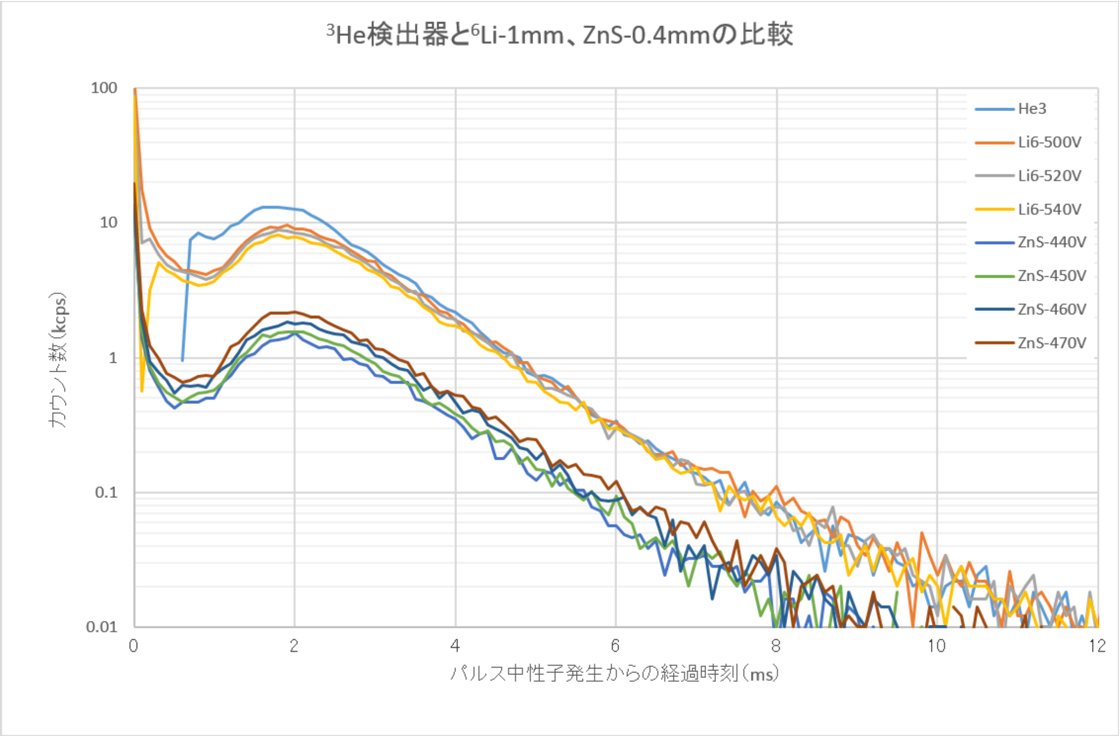


図 3.3.1.(2).②-7　^{3}He 検出器と H9500-^{6}Li:1 mm 厚と H9500- ZnS:0.4 mm 厚の時間分布比較図

図 3.3.1.(2).②-8　イメージング装置を使用した測定状況

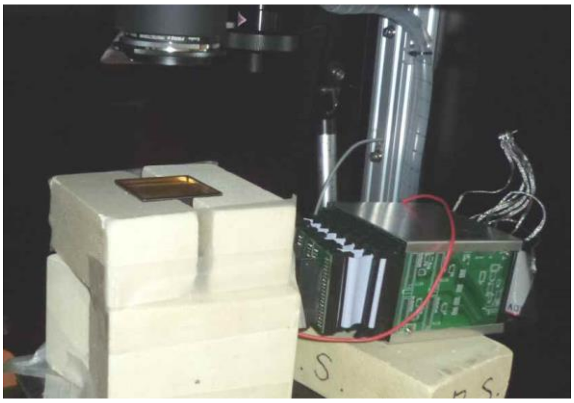


図 3.3.1.(2).②-9　(a) イメージング装置の光を下部に反射　　(b) H9500 で受光する

(c) ボロンゴム「×」取り付け

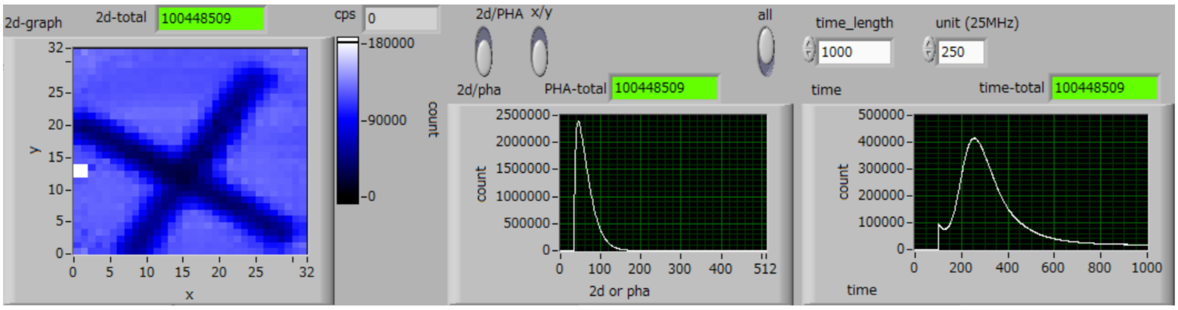


図 3.3.1.(2).②-10　H9500 イメージジデータ、2 次元図、波高分布図、時間分布図,
run9 / run10

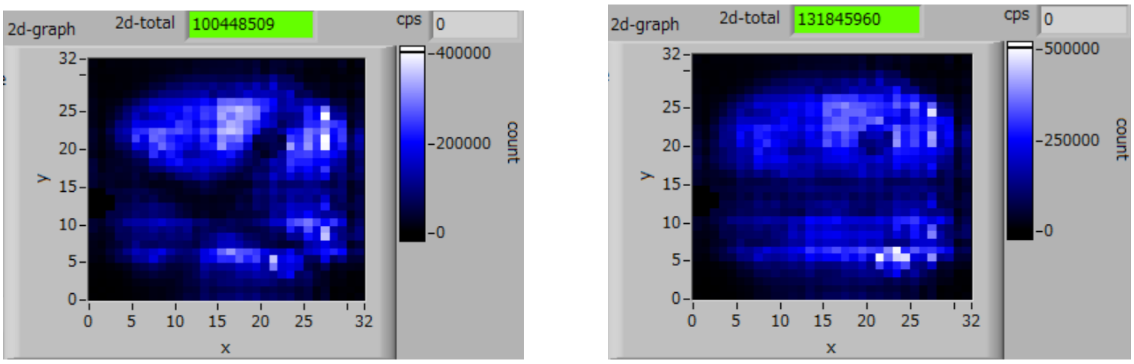


図 3.3.1.(2).②-11　(a) 補正なしデータ、Cd 文字あり(run9)　　(b) 補正なしデータ、Cd 文字なし(run10)

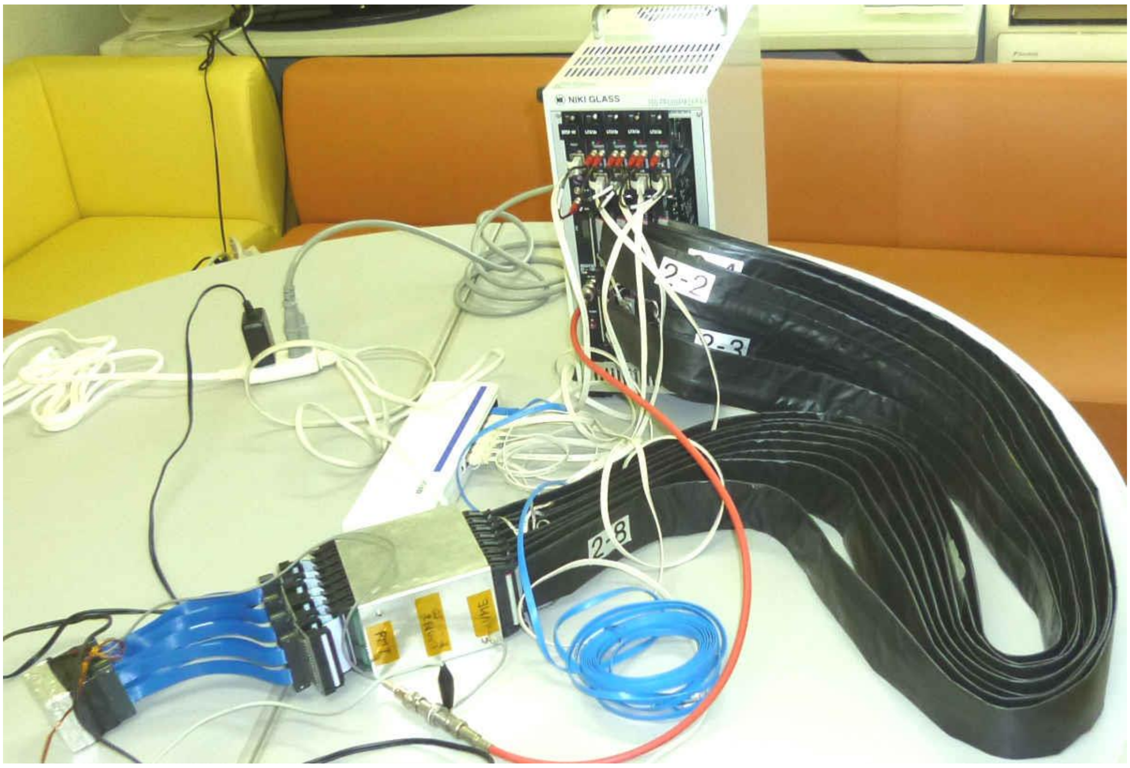


図 3.3.1.(2).③-1　京都大学用の LiTA12e システムの動作試験の様子

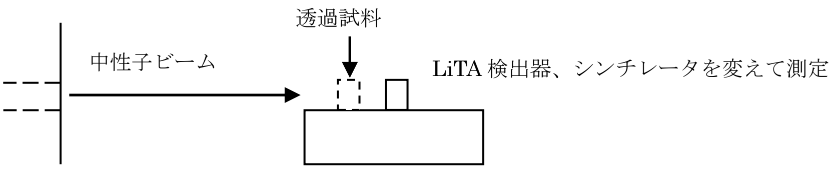


図 3.3.1.(2).③-2　測定の概要図

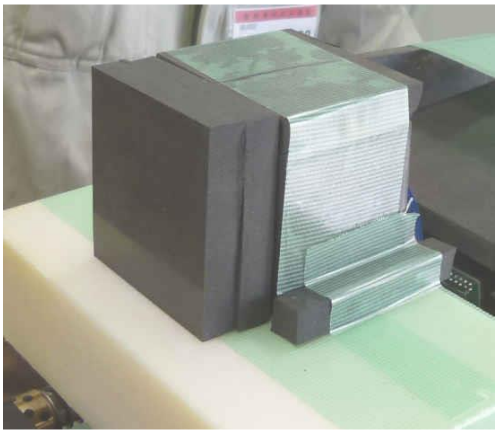
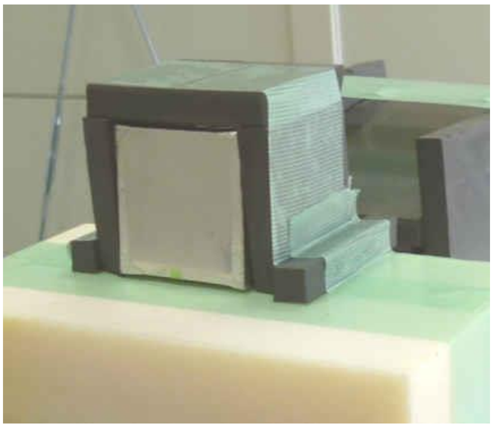
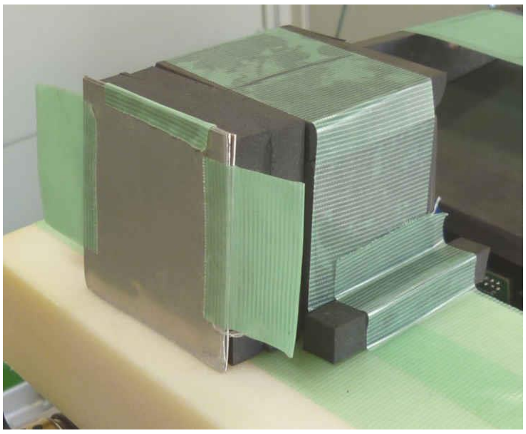


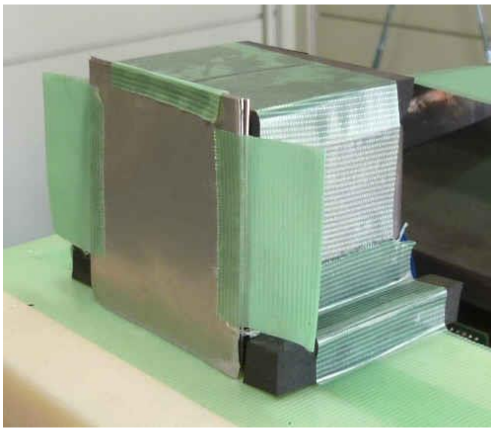
図 3.3.1.(2).③-3　(a)LiTA12 検出器



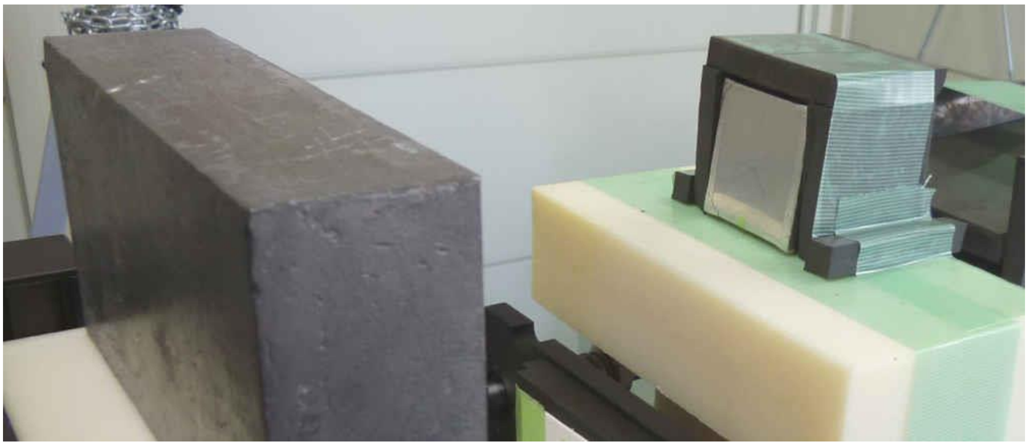
(b)透過被検体に B ゴム-20 mm 厚



(c) B ゴム-20 mm 厚＋Cd-1.5 mm 厚



(d) Cd-1.5 mm 厚



(e)Pb-50 mm 厚

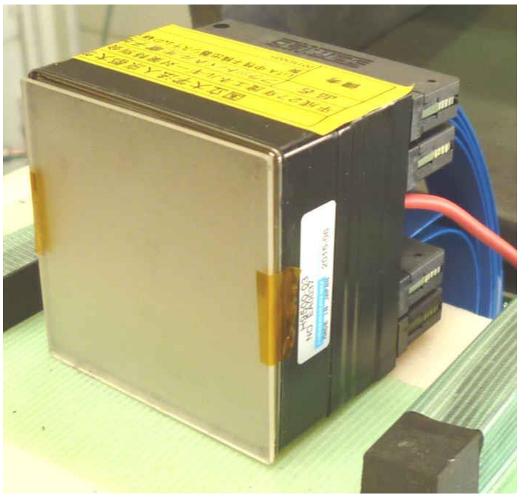


図 3.3.1.(2).③-4　^{6}Li-1 mm 厚ガラスシンチレータ

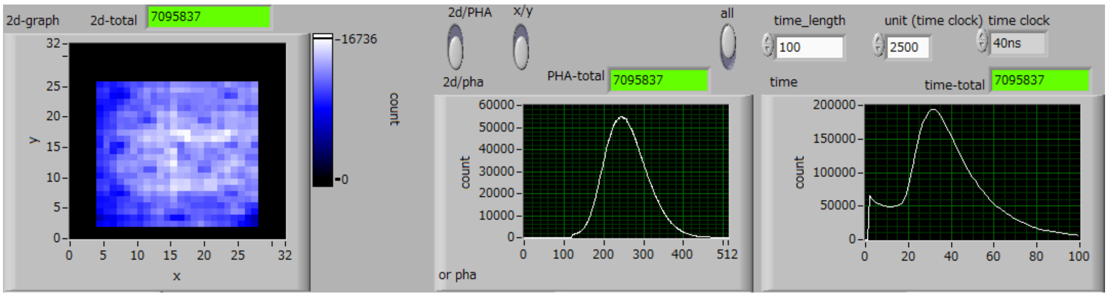
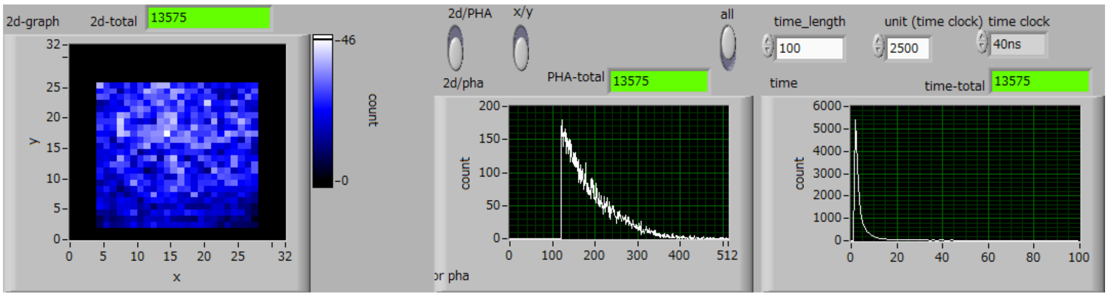
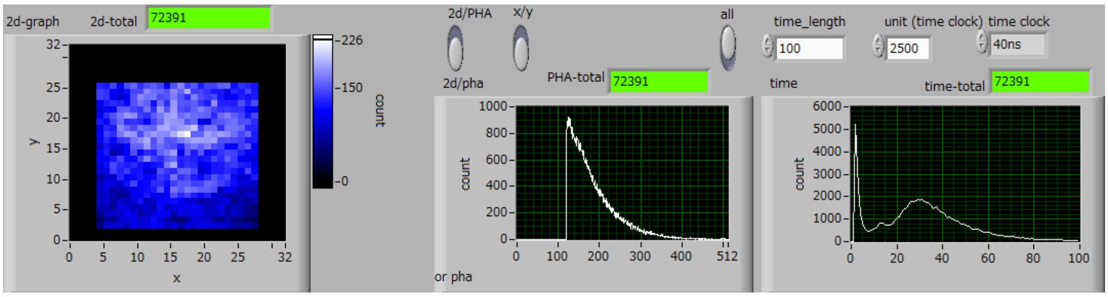


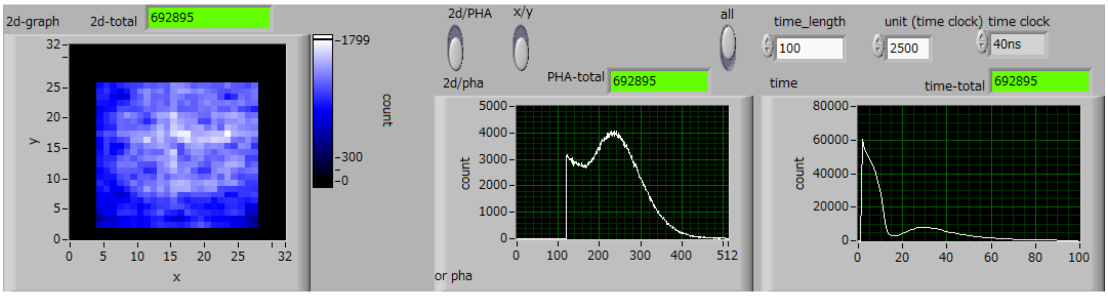
図 3.3.1.(2).③-5 (a) ダイレクトビーム、run6



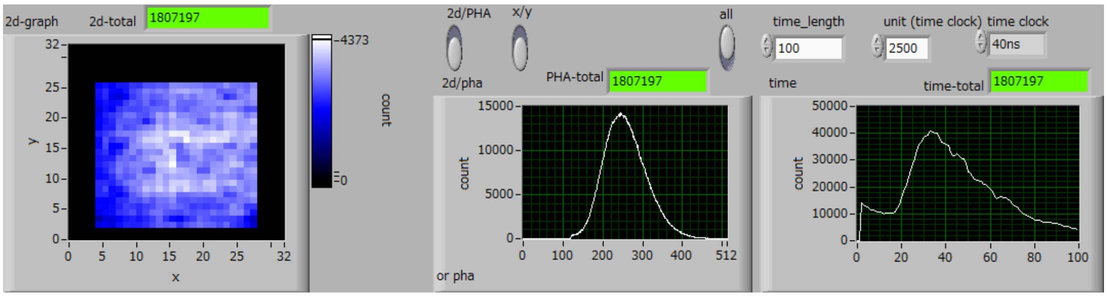
(b) B ゴム-20 mm 厚、run7



(c) B ゴム-20 mm 厚＋Cd-1.5 mm 厚、run8



(d) Cd-1.5 mm 厚、run9



(e) Pb-50 mm 厚、run10

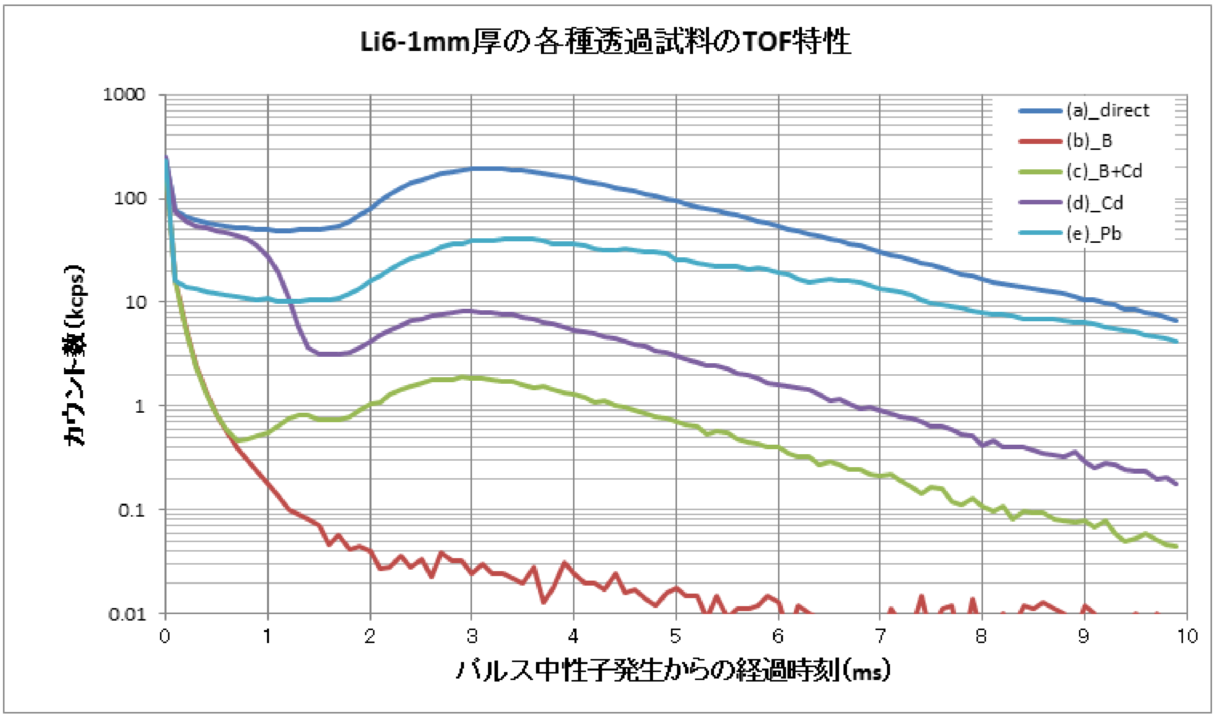


図 3.3.1.(2).③-6 ^{6}Li-1 mm 厚ガラスシンチレータ

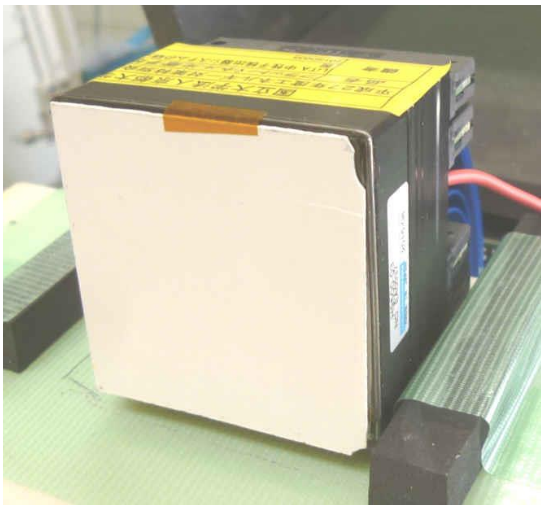


図 3.3.1.(2).③-7　 ZnS-0.45 mm 厚シンチレータ

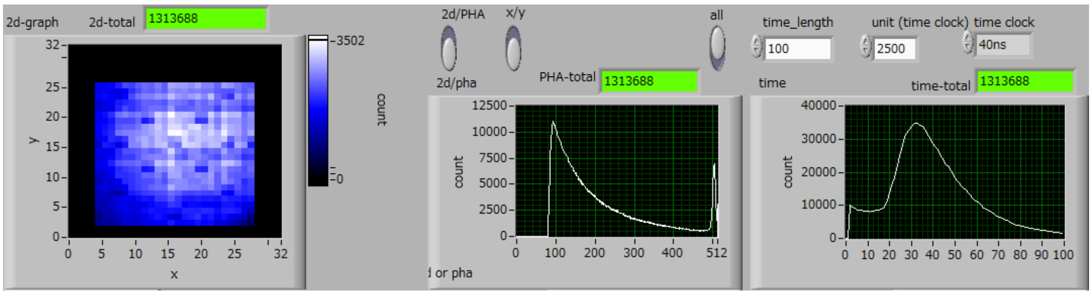
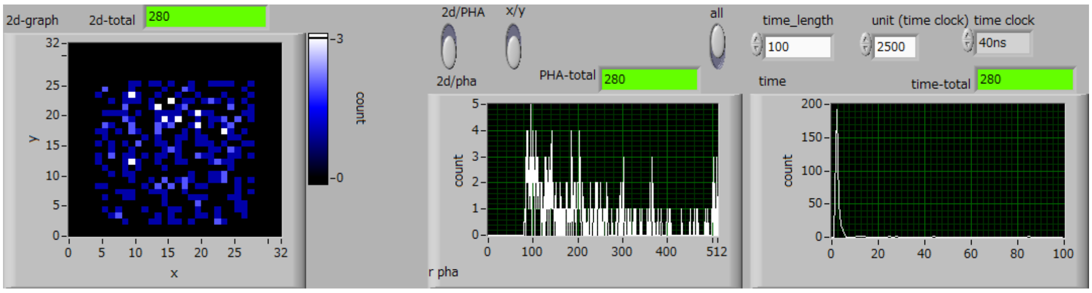
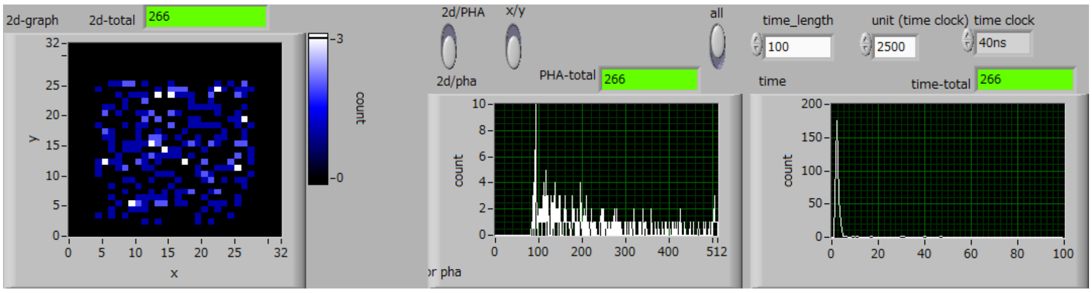


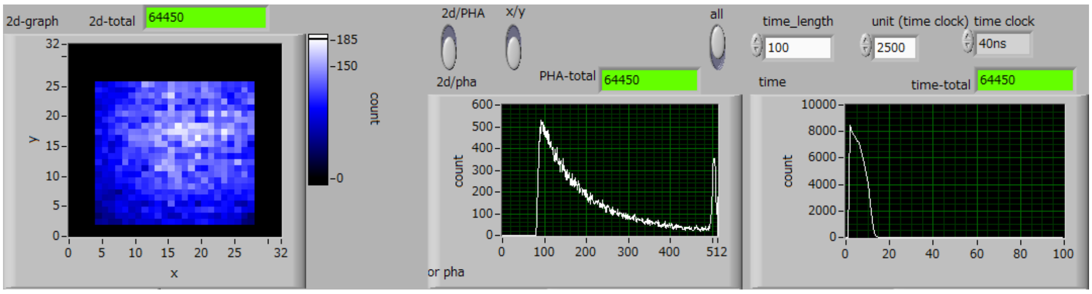
図 3.3.1.(2).③-8　(a) ダイレクトビーム、run1



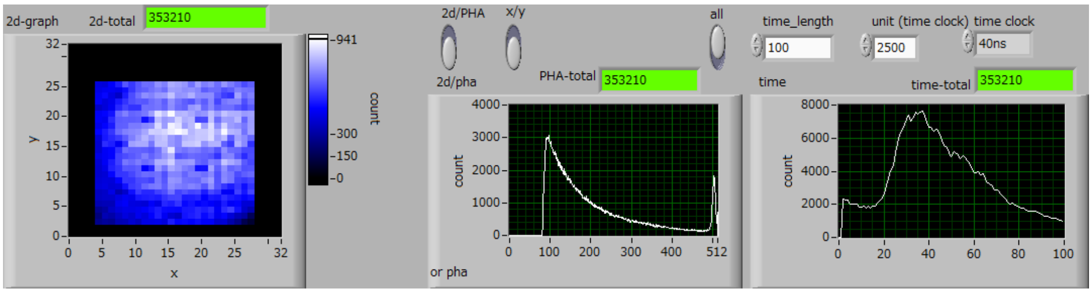
(b) B ゴム-20 mm 厚、run2



(c) B ゴム-20 mm 厚＋Cd-1.5 mm 厚、run3



(d) Cd-1.5 mm 厚、run4



(e) Pb-50 mm 厚、run5

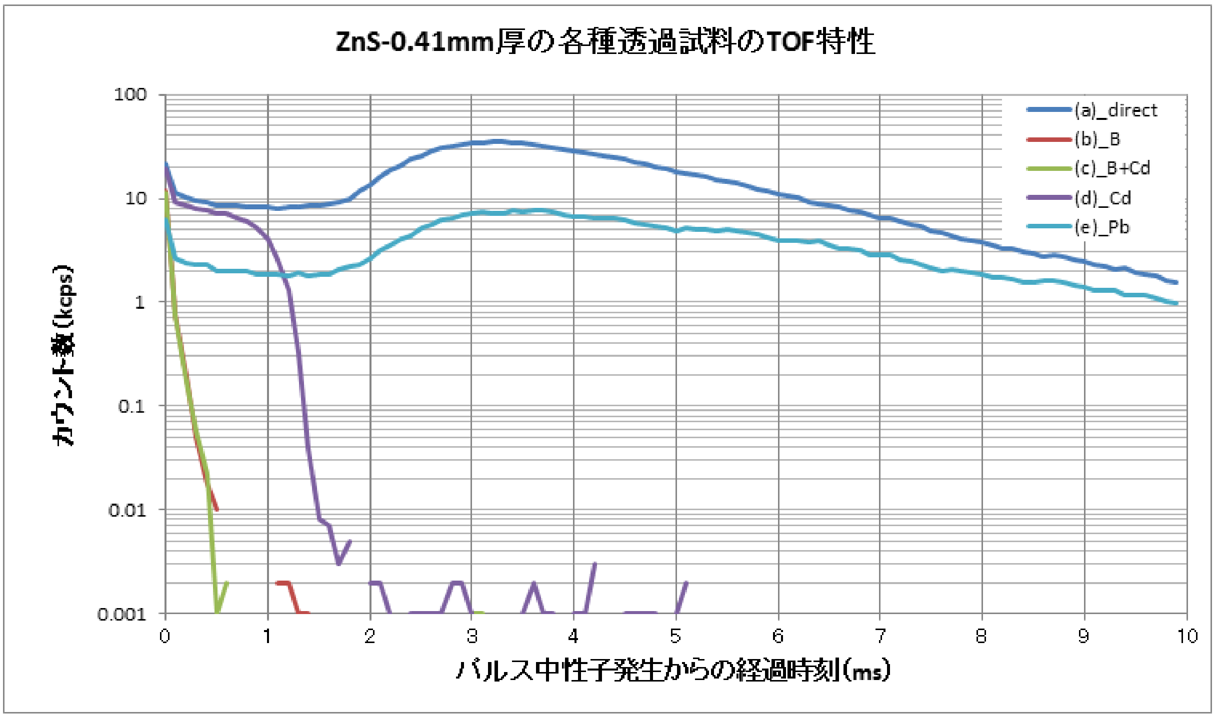


図 3.3.1.(2).③-9　 ZnS-0.45 mm 厚シンチレータの TOF 特性

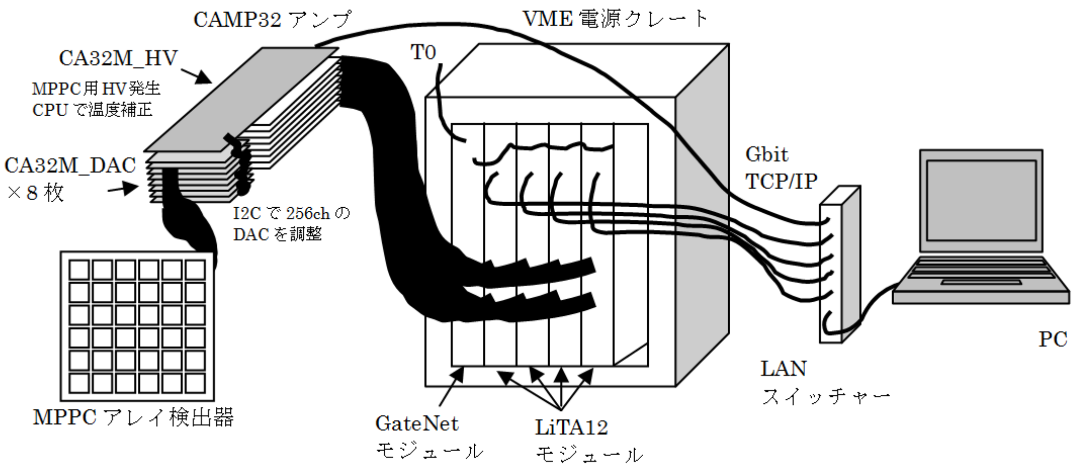


図 3.3.1.(2).④-1　MPPC-LiTA システム、MPPC アレイ＋CA32M 回路＋高速アンプ＋LiTA12e モジュール

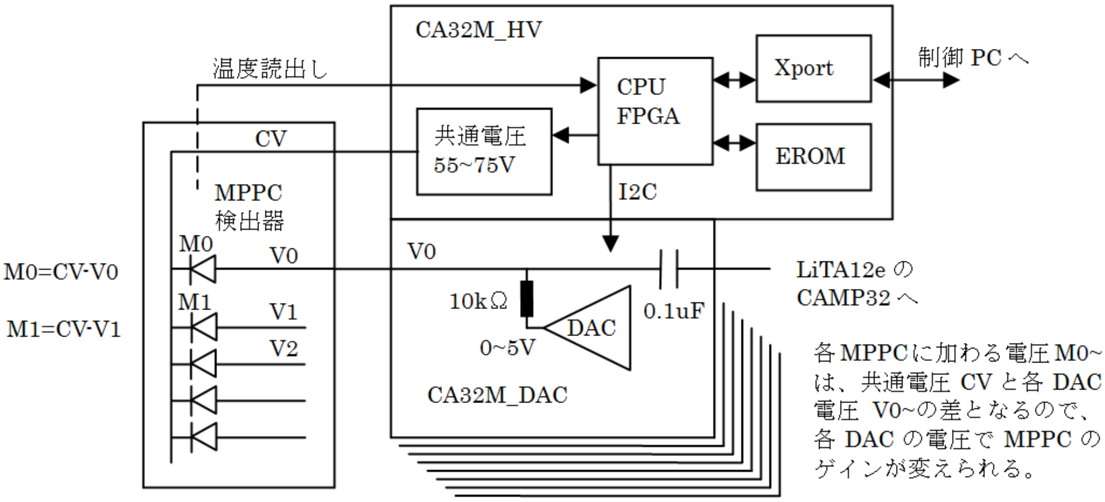


図 3.3.1.(2).④-2　MPPC アレイ検出器と CA32M_DAC 基板、CA32M_HV 基板の関係

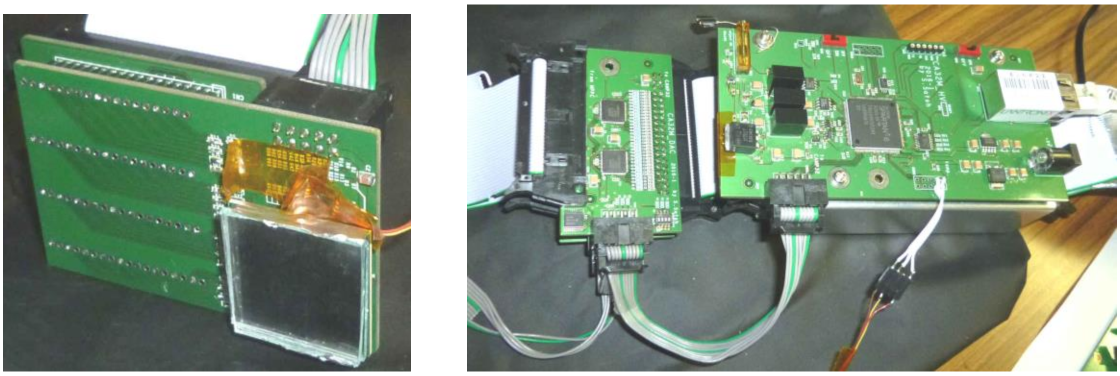
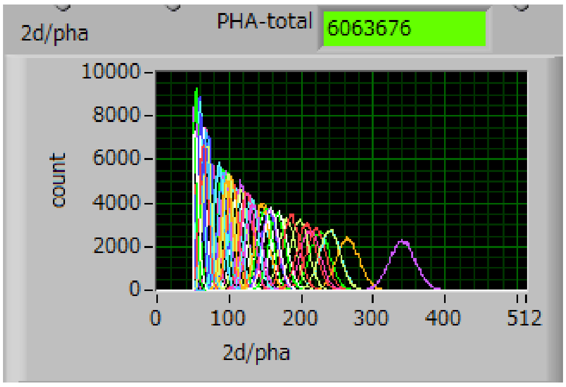


図 3.3.1.(2).④-3　(a) MPPC アレイ検出器　(b) CA32_DAC 基板 2 枚と CA32M_HV 基板＋高速アンプ



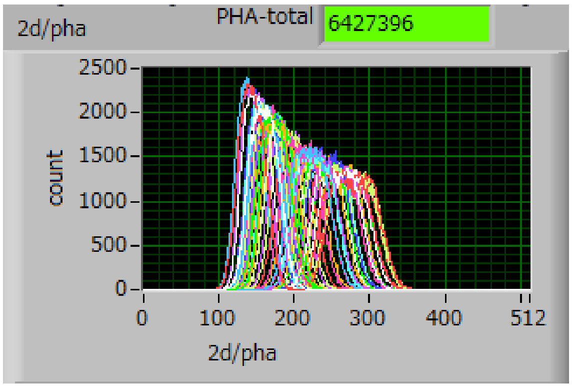
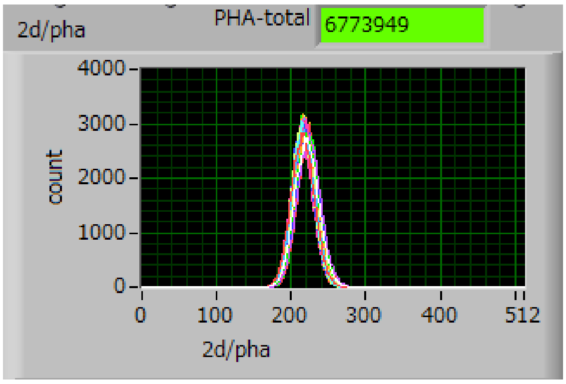
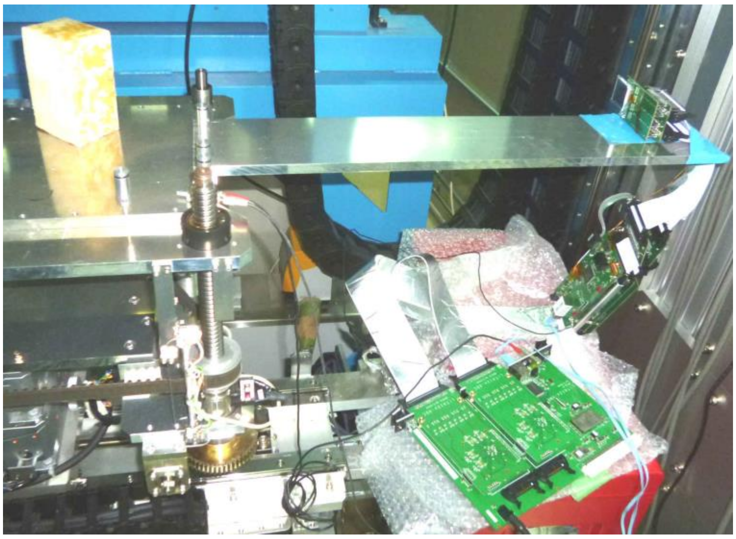


図 3.3.1.(2).④-4　(a) 無調整の波高分布図　　　　(b) 1回目調整後



(c) 2回目調整後



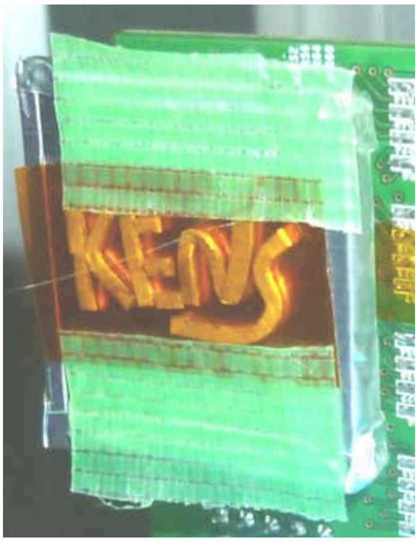


図 3.3.1.(2).④-5　(a) 一様ビーム照射の様子　　　　(b) Cd「KENS」文字

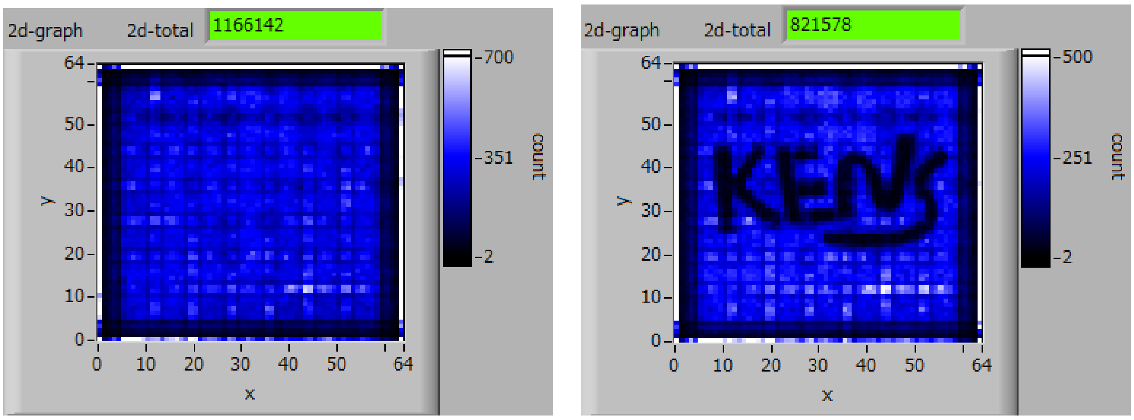
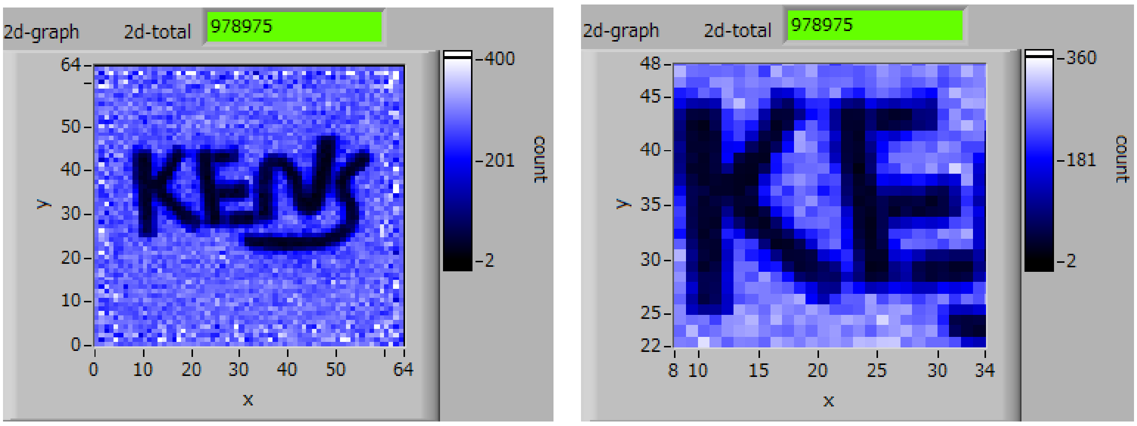


図 3.3.1.(2).④-6　(a)　被検体なし 2 次元図　　　　(b)　Cd「KENS」文字 2 次元図



(c)　(b)を(a)で強度補正　　　　(d)　拡大図

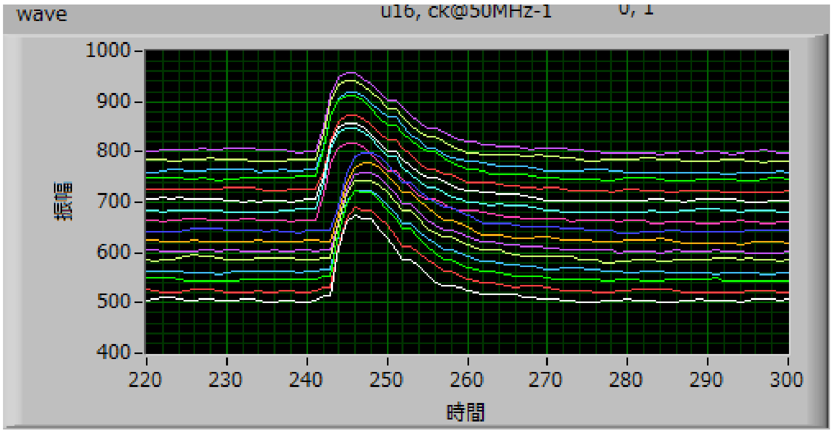
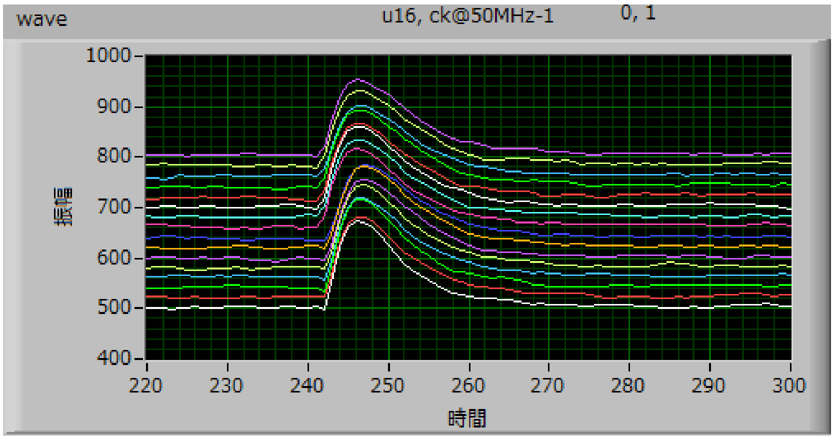


図 3.3.1.(2).⑤-1.(a)　40MHz-ADC の 50 MHz 読出しの波形データ



(b)　50MHz-ADC の 50 MHz 読出しの波形データ

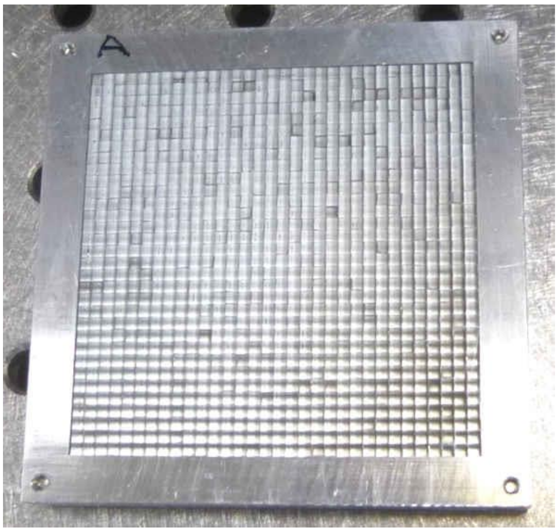
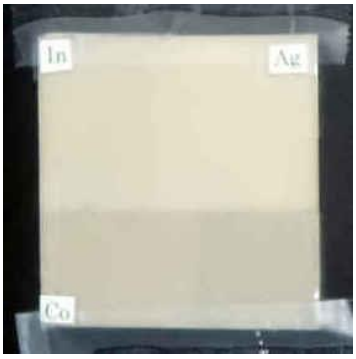


図 3.3.1.(2).⑤-2.(a)　^{6}Li-5 mm 厚ピラー型シンチレータ

(b)設置の様子



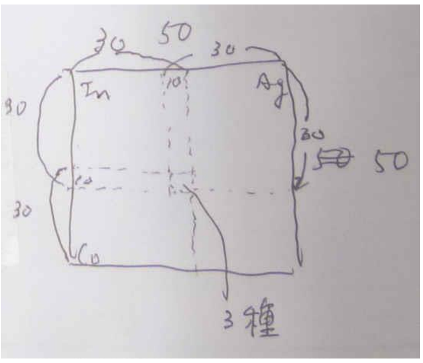


図 3.3.1.(2).⑤-3.(a)　In-Ag-Co 被検体 1

(b)　内蔵被検体の寸法図

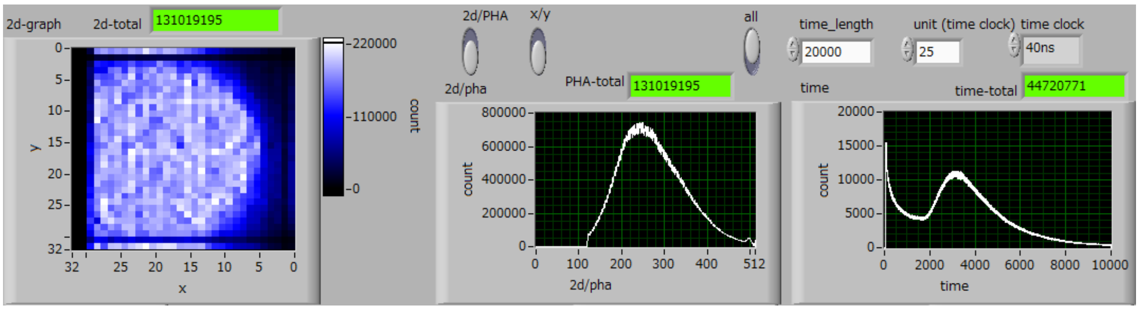
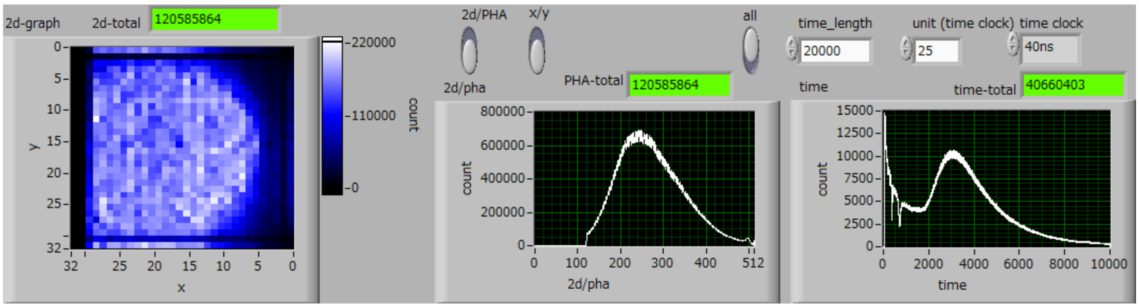
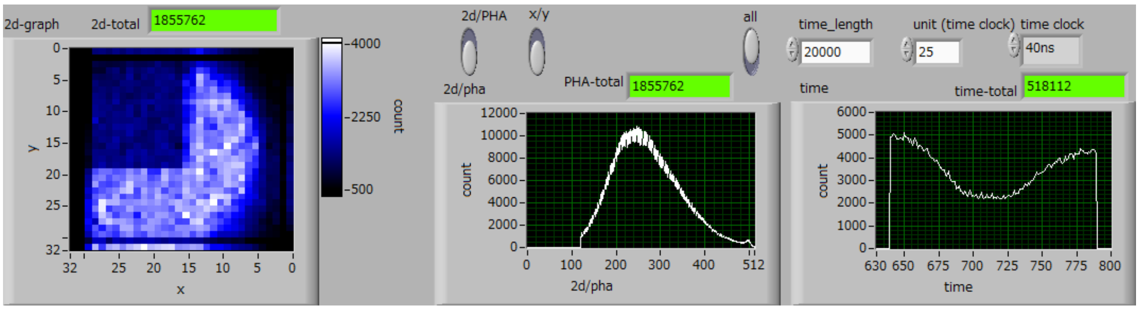


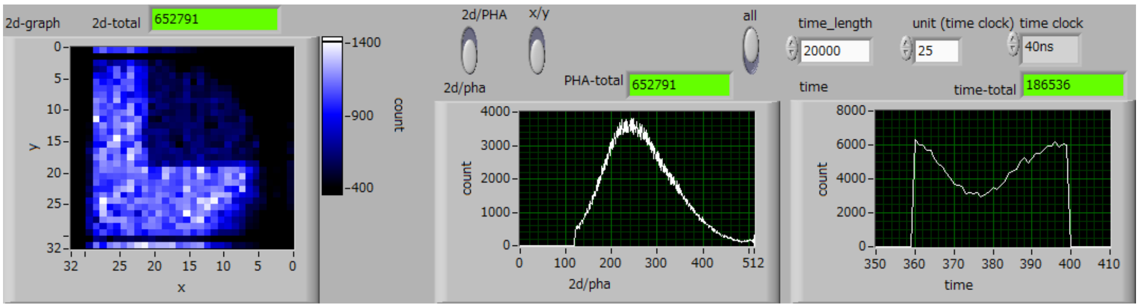
図 3.3.1.(2).⑤-4.(a) ダイレクトビーム、左：2 次元、中：PHA、右：TOF（1 us），run4



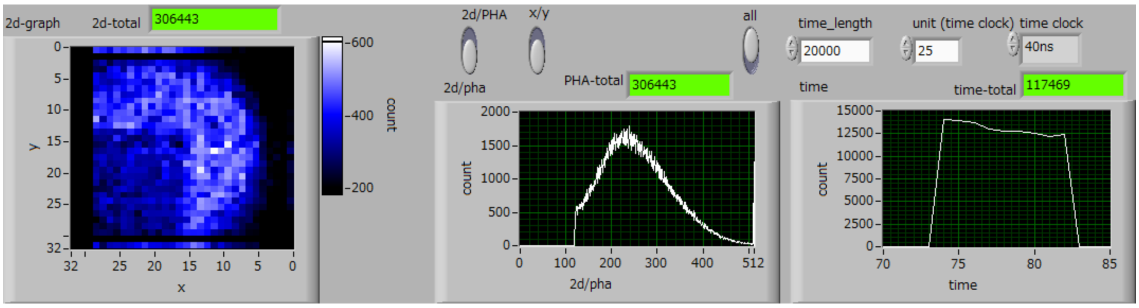
(b) 被検体 1 透過、50～1000 us 間積分、run8



(c) ^{115}In、1.5 eV 近辺、640～790 us 間積分、run8



(d) ^{109}Ag、5.4 eV 近辺、360～400 us 間積分、run8



(e) ^{59}Co、128 eV 近辺、74～83 us 間積分、run8

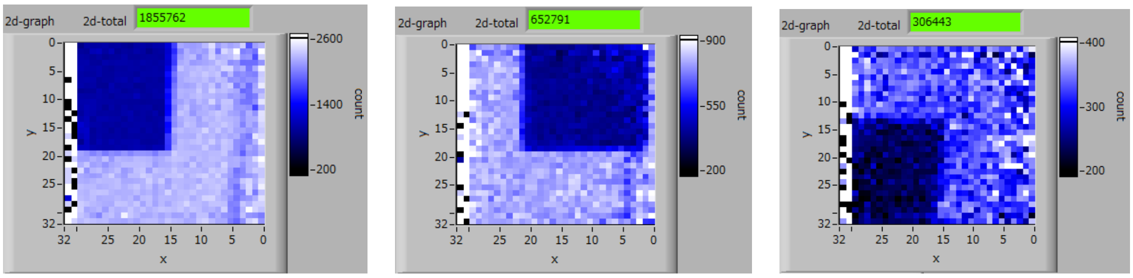


図 3.3.1.(2).⑤-5　40MHz-ADC の 50 MHz 読出しの波形データ、（左 ^{115}In、中 ^{109}Ag、右 ^{59}Co）

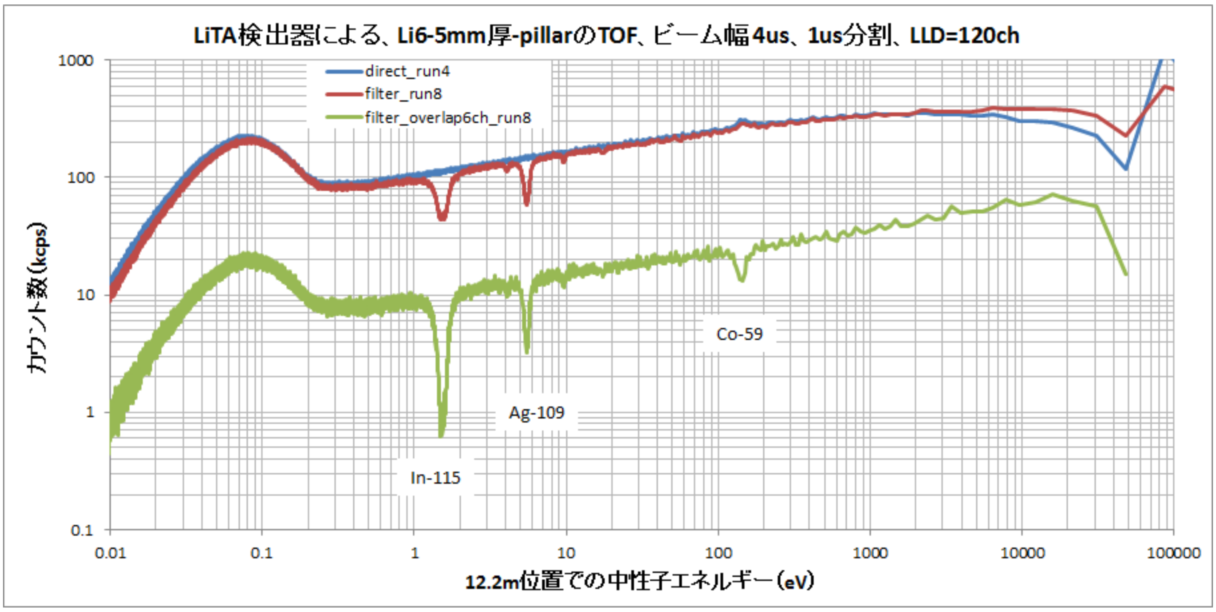


図 3.3.1.(2).⑤-6　加速器ビーム幅 4 us の TOF

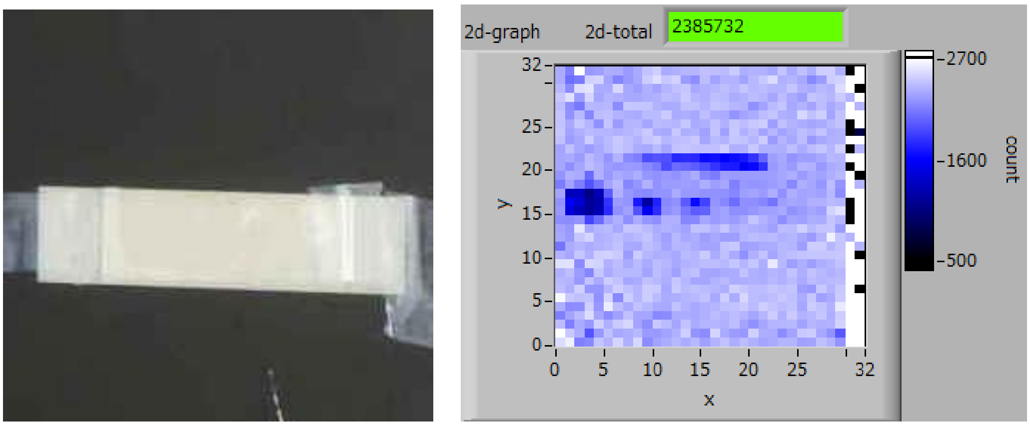
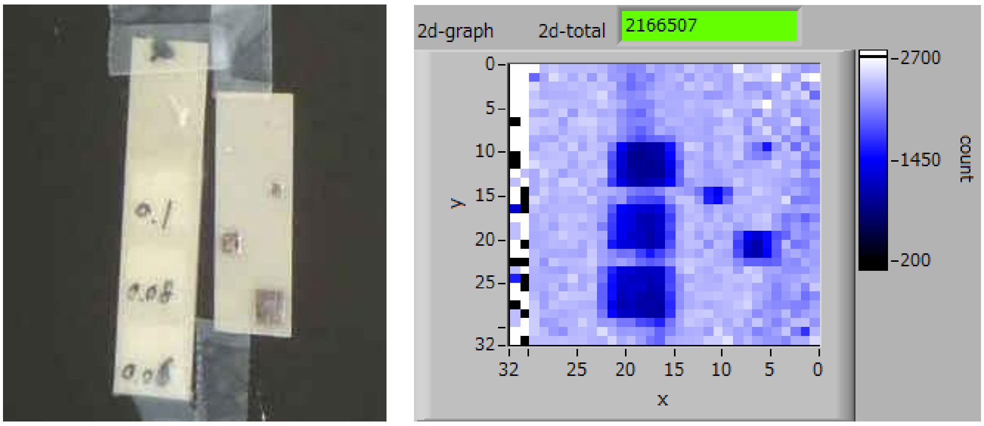
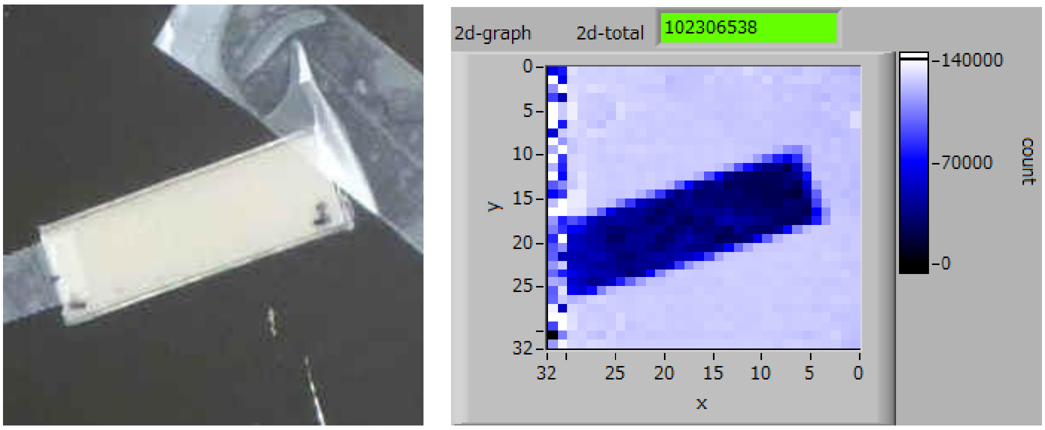


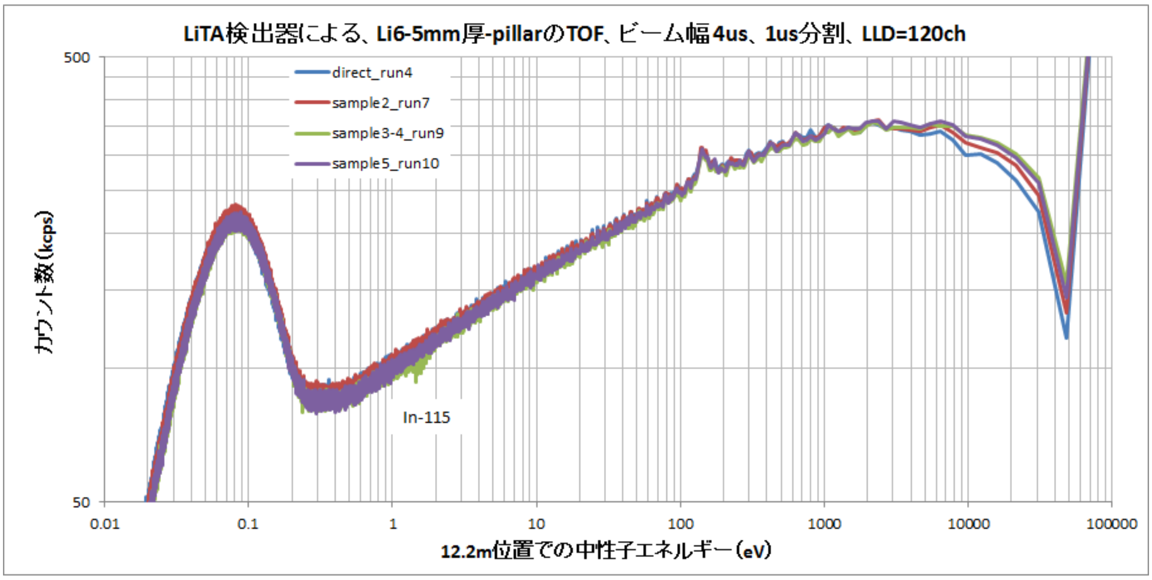
図 3.3.1.(2).⑤−7.(a)　 In くさび形被検体 2、run7_360～410 us



(b) In 厚さ変化、大きさ変化被検体 3, 4、run9_360～410 us



(c) B 板に 0.5 mm 隙間がいくつかある被検体 5、run10_100-～0000 us



(d) 各種被検体の TOF

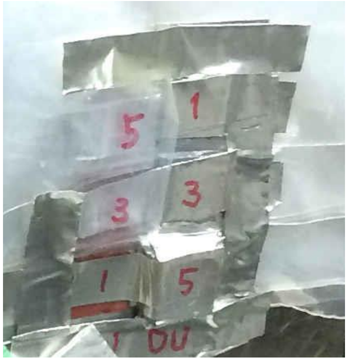
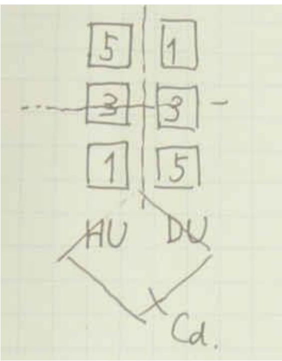
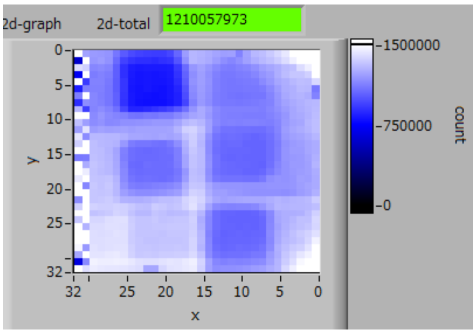
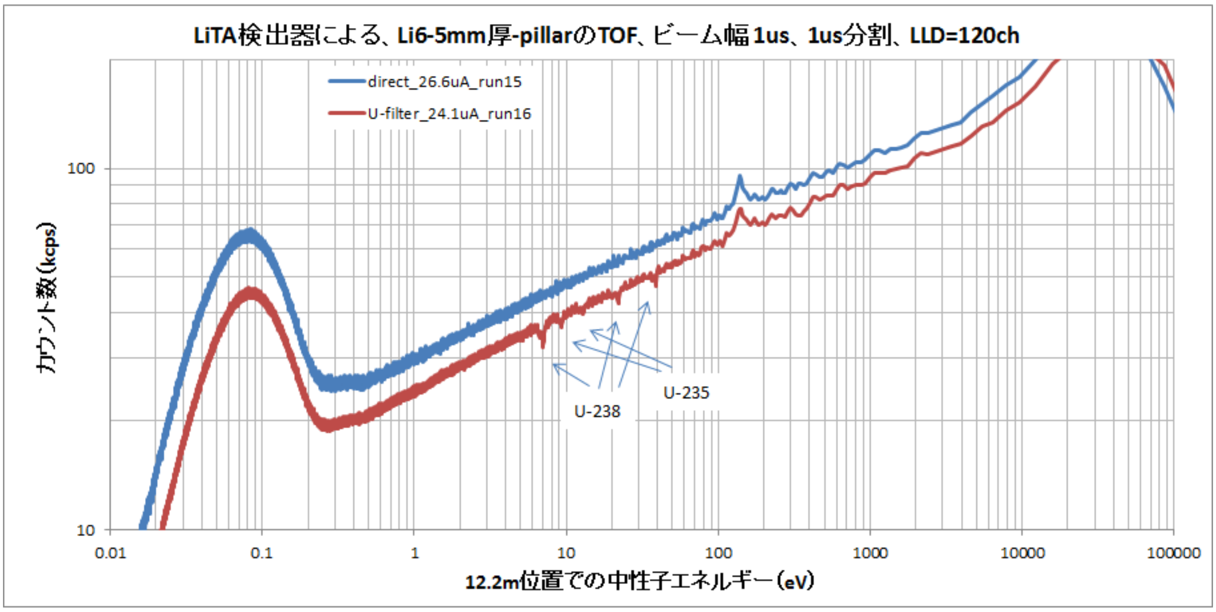
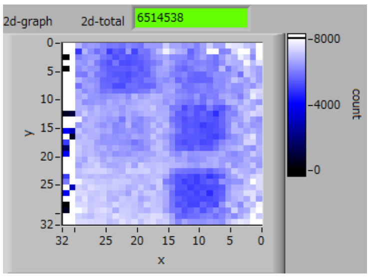




図 3.3.1.(2).⑤-8 (b) 取り付けの概略図 (c) 全エネルギー2D グラフ

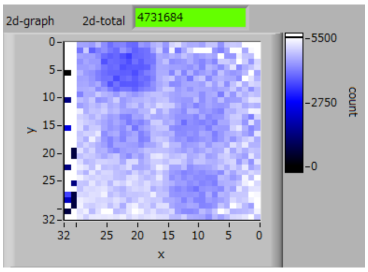
(a) U 被検体の取り付け



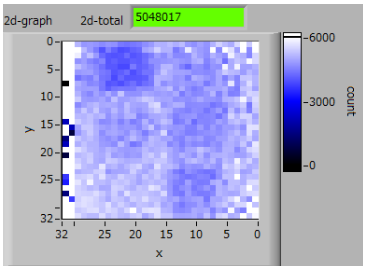
(d) ダイレクト照射と U 被検体透過の TOF



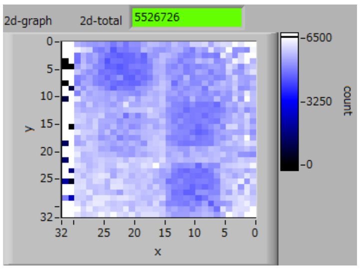
（e） 6 eV 近辺



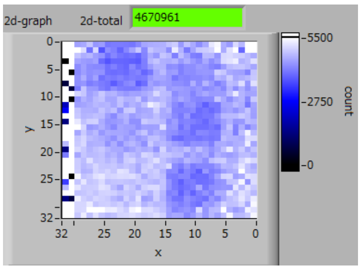
（f） 9 eV 近辺



（g） 13 eV 近辺



（h） 22 eV 近辺



（i） 40 eV 近辺

参考文献

[1] S. Satoh, Development of wide area detector for the 2012 model of the ^{6}Li time analyzer neutron detector system, *in UCANS-V 2015* DOI 10.1393/ncc/i2015-15197-7

3.3.2　データ収集回路・多次元データ処理装置の開発
（再委託先：東京都市大学）（H26～H29）

①　概要

平成26年度は、高解像度化処理回路の開発に資するために、紫外線LEDによるパルス状発光源を2次元的に移動させることのできる模擬信号発生器を作成した。そして、マルチフォトマルからの信号を取得し、発光位置算出のための精度高い算出アルゴリズムとして、重心演算は有望であるとの結果を得た。平成27年度は、LiTA12システムに用いる解像度を向上させるための信号処理法を検討し、高速増幅回路を試作した。また、装置の制御や処理された画像を表示するためのソフトウェアを作成した。更に、解像度を向上させるための信号処理法を検討した結果、サブピクセルシフト法が適していると判断し、被検体をシフトさせるための高解像度化回路を製作した。平成28年度は、前年度に製作した「多次元データ処理装置」と「制御表示ソフトウェア」、及び検討中の「高解像度化処理法」の性能を放射線源を用いて評価した。また、mPMTに代わりMPPCを用いる装置を製作し、性能改善を試みた。平成29年度では、中性子共鳴吸収イメージングにおける超解像処理の有用性の評価及び、0.4 mm 粒子検知への可用性の評価のために、実際のプロジェクトの体系にて撮像した 2 倍超解像後の画像 100 枚を用いて再構成計算を行ったところ、直径0.2 mm の In まで検知することができた。

②　高解像度化処理（H26）

開発する高エネルギー中性子用シンチレータは、図3.3.2.②-1に示すような1本が1 mm x 1 mm の断面を有し、長さが 5 mm 程度で、時間応答の早いプラスチックシンチレータを、縦方向 100 列、横方向 100列を二次元的に並べた 100 mm x 100 mmのマルチバンドル複合型を想定している。これは、検出効率を上げるために厚くなるが、厚くなっても空間分解能を損なわないように、1 mm角の細い棒状のシンチレータを束ねた構造としている。また、中性子がシンチレータと反応し、このシンチレータの端面から放出された光信号は、図3.3.2.②-2に示す撮像系で16 x 16 のマルチアノードフォトマルで検出される。

このような撮像系で、100 mm x 100 mm のシンチレータ面が視野に収まるように、光学レンズ系を選択するのであるが、これからの原理説明を容易にするために、視野を96 mm x 96 mm と想定することにする。この視野を、16 x 16 個に分割されたフォトマルで受光すると、図3.3.2.②-3 に示すような6 x 6で36本のシンチレータからなる部分的視野を個々のフォトマルが分担して検出することになる。なお、中性子の反応はほとんどが1本のシンチレータ内で起こり、従って、その結果1本のシンチレータの端面だけが発光することになる。従って、図3.3.2.②-4に示すように、個々のフォトマルでは36本の内、どのシンチレータで発光したのかを判別できず、従って、このままでは空間分解能は6 mm となり、1 mm 角のシンチレートを有効に使用できていない。

この問題点を解決するために、レンズ系を調整し、通常はマルチフォトマルの入射面にシンチレータの出力面の像が結像するようにピントを合わせた状態であるのを、わざとぼ

かした状態とし、図3.3.2.②-5 に示すように、1本のシンチレータからの光信号を複数のフォトマルで観測し、その輝度の重心を計算により算出する手法を適用する。

そこで、つぎに述べる模擬画像データ取得用実験体系を構築し、輝点重心処理について検討した。レンズ系でシンチレータの発光面の像をぼかし、複数のフォトマルで受光して重心処理を行うと、どの程度空間分解能が改善されるかを実験的に検証するために、図3.3.2.②-6 の模擬信号発生器、レンズ、及びマルチフォトマルからなる実験体系を構築した。図3.3.2.②-7 はその外観写真である。また、図3.3.2.②-8 に実験で使用した 8 x 8 の浜松ホトニクス製のマルチアノードフォトマル H7546 の入射面の形状と外観写真をしめす。断面が 1 mm x 1 mm のオレンジ色で発光するプラスチックシンチレータを、幅 1 μs で周期100 Hz のパルス電圧で駆動された紫外線LED で刺激することで、パルス的に発光する模擬信号源とした。

図3.3.2.②-9 はシンチレータの出力面を有感領域 4.7 mm x 3.5 mm のCCD カメラで撮像し、ピントがあっている状態の画像である。光っている部分が1 mm x 1 mm であるので、有感領域 18.1 mm x 18.1 mm のマルチフォトマルで検出する場合、有効視野は 60 mm x 60 mm となる。また、1 mm x 1 mm のシンチレータは、フォトマル入射面では 0.3 mm x 0.3 mm 程度で結像されており、フォトマル1チャネルの有感領域である 2 mm x 2mm より、十分小さくなるようセッティングした。また、図3.3.2.②-10 はぼかした場合の画像であり、横幅である4.7 mm 程度の大きな円状になっており、フォトマルでは3チャネル分である 6.6 mm にほぼ収まる程度の大きさまでぼかしてある。これらの2種類のフォーカス状態で、CCD の入射面の位置にマルチフォトマルを設置して測定した。シンチレータはX・Z 移動ステージにとりつけ、図3.3.2.②-11 と図3.3.2.②-12 に示すように、X 方向について各々 0.2 mm ステップで移動させ、連続したCH4～CH6 の３チャネルのフォトマルのアノードからの信号を、プリアンプ、波形整形アンプを通してマルチチャネルアナライザー(MCA)で波高分析し、そのMCA のピークチャネルを平均輝度値として求めた。図3.3.2.②-13 にピントを合わせた場合の移動距離と3つの連続したアノードの出力分布を示す。また図3.3.2.②-14 にぼかした場合の出力分布を示す。

図 3.3.2.②-13 と図 3.3.2.②-14 のデータを用いて、重心計算により輝点の位置を次の式により算出した。

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i \cdot Bx_i)}{\sum_{i=1}^{n} Bx_i} \qquad (3.3.2.②\text{-}1)$$

ここで、Bxi はX 座標がxi での輝度値である。図3.3.2.②-15 はピントが合っている場合の重心の位置である。幅約 0.3 mm のシンチレータの像が一つのアノードの有効幅 2.0 mm よりも十分狭いために、通常はひとつのアノードで検出されているため、重心位置は階段状に変化しており、階段幅もアノードピッチである 2.3 mm となっている。従って、ピントが合った状態では、空間分解能はアノード数に依存し、このフォトマルでは8段階しか解像できないことが確認された。一方、図3.3.2.②-14 に示されるぼけた状態でのデータをもとに、連続した 3 チャネルでの重心計算をした結果が図 3.3.2.②-16 である。

ここでは、移動領域の中心の部分である幅 3 mm についてのみ表示している。これからわかることは、一部データに信頼性がない部分があるが、おおむねチャネルの幅 2.3 mm について、線源の位置が正しく内挿されて導出されており、重心計算による高解像度化が可能であるとの見通しがついた。そこで次年度以降、より精度の高い実験を行い、この方式の妥当性とその限界を見極めることとした。

上述した重心演算を実時間で行うために、ハードウェア記述言語を用いて指定し、任意の論理機能を実装でき、当グループで使用実績があり、十分な性能を有している FPGA (field-programmable gate array)電子回路素子が搭載されている東京エレクトロン社製の画像処理ボード TB-7K-ACDC-PRO-TV と TB-7K-325T-IMG を選定し、購入した。

以上、平成 26 年度の成果をまとめると、高解像度化処理回路の開発に資するために、簡素な実験体系として使用が予定されている棒状のプラスチックシンチレータと同じ形状のシンチレータを 1 本使用し、それを紫外線 LED でパルス状に発光させ、この発光源を 2 次元的に移動させることのできる模擬信号発生器を作成した。そして、マルチフォトマルからの信号を取得し、発光位置算出のための精度高い算出アルゴリズムとして、重心演算は有望であるとの結果を得た。なお、これらの重心演算処理は、パソコンでのソフトウェアでおこなった。また、この重心演算処理をハードウェアで短時間に行うための画像処理ボードを選定して購入した。

③ 多次元データ処理装置としての LiTA12 システムの改良 (H27)

この開発プロジェクトでは時間分解能を重視するために減衰時間が ns オーダーと極めて短いプラスチックシンチレータの発光を 16x16 のマルチアノード PMT (光電子増倍管)で検出し、その出力信号を多次元データ処理装置である高エネルギー加速器研究機構で開発した図 3.3.2.③-1 に示す LiTA12 システム (多チャネル信号処理ボードを組み込んだシステム) で処理する方法を採用した。そこで、^{60}Co からのγ線とプラスチックシンチレータを用いて特性試験を行ったが、計数値と強度の関係に線形性が見られなかった。そのために、^{252}Cf からの中性子や ^{60}Co からのγ線源を用い、種々のシンチレータに対する 64 チャネル LiTA12 システムの検出性能を実験的に調査した。その結果、本来の LiTA12 システムは減衰時間数 10 ns の Li ガラスシンチレータ用に設計されているため、LiTA12 システムは減衰時間の短い信号を適正に処理していない可能性があるため、新たに初段の増幅器を改良するために高速増幅器を試作した。また、あらたに処理システムを開発するために改良用の処理回路基板を購入した。この処理回路基板は改良に使用された後は、平成 28 年度に、多チャネル光増幅半導体アレイ(Multi-Pixel Photon Counter:MPPC)を用いた高性能イメージングシステムの開発に使用される。なお、LiTA12 システムの性能を測定するために、模擬光源が必要となり、図 3.3.2.③-2 に示す 16x16 の LED ドットマトリックスと繰り返し発光を制御する電子回路基板からなる模擬輝点発生器を製作した。図 3.3.2.③-3 はその一つの LED の発光を光電子増倍管で検出した出力波形である。この模擬輝点発生器は、今後開発するイメージングシステムの検出性能を試験するために有用な機器である。

KEK の佐藤節夫氏が開発した LiTA12 システムを、本プロジェクト研究では北海道大学

と京都大学のグループが使用するが、このシステムは PC を介して測定パラメータの設定や取得データの表示が行われる。従来は、開発者が LabView で作成したソフトウェアを実験で使用していたが、本プロジェクトでは開発者以外の研究者が LiTA12 システムを使用するため、この制御・表示用ソフトウェアの改修が必要となっていた。そこで、新たに信号処理回路に詳しくない利用者でも使用できる制御・表示用ソフトウェアを作成した。以下にその概要を記す。

検出されたイベントを PC で受信し、PC で可視化処理を行う Event モード、ハードウェアでヒストグラム化されたデータを PC で受信して表示する Histogram モード、及び保存されたデータを再度読み込んで可視化する再可視化モードがある。

図 3.3.2.③-4 は Event モードの場合のパラメータ設定画面である。Connection ボタンをクリックして IP アドレスやポートを指定・確認した後に、HV/T0 ボタンをクリックすると図 3.3.2.③-5 の画面となり、ここで IP Address の確認、HV の設定、Computer Time の読み込み等を行う。次に LLD & Wave... ボタンをクリックして図 3.3.2.③-6 の画面となり、図中の(8)に LLD の値を入力し、Set LLD ボタンをクリックして LLD を設定する。なお、図中の右側の部分で LiTA12 の任意のチャネルのアンプ出力の波形を観測することができる。他に図 3.3.2.③-4 の画面では、LiTA12 システムのチャネル数や重心計算による空間分解能の設定が可能である。また、ログの保存は Log Directory にファイル名を入力して行われる。測定の開始は Start ボタンをクリックし、測定が終了すると Running 表示が STOP に変更される。グラフ表示では、２次元用の 2D Graph ボタン、１次元用の X/Y ボタン、PHA ボタン、及び TOF ボタンがあり、ぞれぞれ図 3.3.2.③-7、図 3.3.2.③-8、図 3.3.2.③-9、及び図 3.3.2.③-10 が表示される。２次元表示では補正用のデータをあらかじめ登録しておくと、補正処理を行い、補正後の画像を表示できる。図 3.3.2.③-8 は X 軸方向或いは Y 軸方向のラインプロファイルである。図 3.3.2.③-9 は指定されたチャネルの波高値分布(Pulse Height Analyzer:PHA)である。図 3.3.2.③-10 は TOF (Time-of-Flight)表示である。データを取得した際の実験条件等はログファイルに記録されており、Select Load Directory から読み込むことができる。なお、ログファイル名は図 3.3.2.③-11 で示される形式となっている。今後、このソフトウェアは LiTA12 システムを用いて実験を行う北海道大学の加美山グループ、京都大学の中島グループ、及び東京都市大学の持木グループが使用することとなる。

つぎに、高解像度化のためのサブピクセルシフト法について述べる。本プロジェクトでは、視野がおよそ 50 mm 角であり、そこに一辺が 1mm の角柱のシンチレータを 50x50 本並べて使用する。それを 16x16 チャネルのマルチアノード PMT で検出するため、輝点の重心処理を行っても、このままでは原理的に 1mm 以下の空間分解能は得られない。そこで、我々はサブピクセルシフト法に着目した。この方法は、測定位置をずらして複数回測定し、それらの複数の画像データを用いて再構成計算を行うことによって解像度を改善するものである。図 3.3.2.③-12 には、この原理を図で示したものである。図 3.3.2.③-13 は X 線透過画像からサブピクセルシフト法のシミュレーション画像用に 16x16 画素に圧縮した模擬画像を４枚生成する過程を示したものである。

模擬画像を生成後に、各画像の輝度値からポアソン分布に従った乱数を生成し、統計誤

差を含む模擬画像４枚を生成した。これらの画像を用い、誤差の大きさに応じて重みをつけるロバスト推定法であるTukye’s Biweight推定法と測定されたデータがポアソン分布に従っているとの仮定による統計学的手法によって、確率的に最も可能性の高い解を推定する方法であるML-EM法（Maximum Likelihood – Expectation Maximization 最尤推定・期待値最大化法）の2種類の方法で高解像化のための再構成を行った。評価は定量性の確保と空間分解能の改善で行った結果、ML-EM法が良い結果を得た。図3.3.2.③-14に再構成画像を示す。

実際にサブピクセルシフト法を実験に適用するためには、検出器か被検体のどちらかをシフトさせる必要がある。検出器は図3.3.2.③-15に示されている中性子線やγ線の重い遮蔽材が充填されている検出器システムの中に設置されているため、ここでは被検体が置かれる昇温装置をシフトすることとし、同図に記されている遠隔操作が可能なステッピングモータで動作するXとZ方向にスライドする制御回路を導入した。制御回路は3.1.3.(2)節で作成された高精度位置調整機能付き被検体ステージに設置された。図3.3.2.③-16は京都大学の実験施設に設置された高解像度化処理回路の写真である。

以上、平成27年度の成果をまとめると、高エネルギー加速器研究機構で開発した多チャネル信号処理ボードを組み込んだ多次元データ処理装置のために、解像度を向上させるための信号処理法を検討し、高速増幅回路を試作した。また、多次元データ処理装置の時間分解能や空間解像等の性能を評価するために、模擬光信号発生器を製作した。また、装置の制御や処理された画像を表示するためのソフトウェアを作成した。また、解像度を向上させるための信号処理法を検討した結果、サブピクセルシフト法が適していると判断した。また、実験で実現するためには、被検体をシフトさせる方法が適していると判断し、そのための高解像度化回路を製作した。

④　高解像度化処理法の評価(H28)

多次元データ処理装置では、これまでは中性子用シンチレータとしてB4Cとプラスチックシンチレータの組み合わせを検討してきたが、前年度(H27)の結果より、Liガラスシンチレータへの変更が検討されてきた。そこで、位置検出機能を有するLiガラスシンチレータを主体とした複数の試作品をアールテック（株）グループが準備し、東京都市大学原子力研究所所有のCf中性子源を用いて、その性能を評価した。図3.3.2.④-1に、当時準備できた3種類のシンチレータを示す。100 eV の中性子に対して検出効率が 10%程度となるように、厚さは全て5 mm とした。(1)のスリット型は3 mm x 3 mm に深さ4.5 mmまでカットし、完全には分離していないタイプである。(2)と(3)のピラー型は、それぞれ3 mm x 3 mm、1.5 mm x 1.5 mmの柱状にシンチレータをカットし、束ねたものである。図3.3.2.④-2 はシンチレータと測定に使用した光電子増倍管を内蔵した応用光研製プローブ SP-10である。図3.3.2.④-3 は^{252}Cf を内蔵したポリエチレンブロックであり、暗幕の中に上述のシンチレータとプローブがある。図3.3.2.④-4 はピラー型3 mm x 3 mm の熱中性子スペクトルであり、中性子のピークが目視され、製法に問題がないことが確認された。また、ピラーの側面を研磨することにより、更に集光効率を上げる可能性があるため、このピラー型でLiTA12用の位置分解能型シンチレータを製作することにした。

次に、サブピクセルシフト法による高解像度化について、その性能を北大ライナックのHUNSにおいてGEM検出器を用いて実験的に評価した。図3.3.2.④-5 に実験体系を示す。HUNSを標準的な条件で運転し、発生点から7mの地点に検出器を設置した。Cdラインペアチャートは図3.3.2.④-6に示すように厚さ0.5mmのAl板にΦ0.25 mm、Φ0.5 mm、Φ1.0 mmのCd線を1〜3本おきに4本ずつ設置されており、実験時は1 mm厚Cd板でそれぞれのラインペアに対して仕切りを設け、GEM検出器にできるだけ近づけた位置に設置した。また、GEM(Thin-GEM, 128×128 pixel, 分解能0.8 mm)はTOF間隔5 μsで1測定当たり5400 s撮像を行っているが、透過画像については全フレームを積算したものを用いた。サブピクセルシフトした画像を得るために、X-Zステージを用いてX方向とZ方向に0.4 mmずつ移動し計4回被検体画像を撮像した。また、シェーディング画像を取得するためにCdラインペアチャートを0.5 mm厚のAl板に変更し、被検体撮像位置と同位置にて計4回測定を行った。図3.3.2.④-7に被検体画像、シェーディング画像、シェーディング補正結果をそれぞれ示す。シェーディング前ではThin-GEMの呼び出し回路である二次元読み出しストリップの各線のゲインの違いにより画像に縦横の線が入っている影響でラインペアの認識は困難であるが、シェーディング補正を行うことによってラインペアチャートが容易になることが分かった。また、それぞれの撮像結果から64×64 pixelだけ取り出し、ピクセルごとに並び替えた結果と、各画像をサブピクセルレベルで移動して積算した結果、MLEM法による再構成結果を図3.3.2.④-8に示す。また白枠部分のラインペア(Φ0.5 mm, duty比33 %)について、横方向の平均値をラインプロファイルにしたものを図3.3.2.④-9に示す。これより、ピクセル並び替えとMLEM法による再構成によって3.5 pixelにある山が復元され、空間分解能の改善を確認した。しかし、ボケが大きかったこともあり、GEMの空間分解能以上の改善は困難であった。図3.3.2.④-10にMLEMの初期画像を積算したものと、ピクセル並替したもののラインプロファイルの比較を示す。このことよりピクセル並替を初期画像として用いた方が高周波成分の回復が早いことが分かった。

次に、MPPCを用いる装置を検討した。これまでのLiTA12中性子検出システムでは16 x 16 マルチチャネル光電子増倍管(mPMT)を 1 か所の高電圧信号で制御し、各チャネルの増倍率の不均一性の補正は、個々の電子回路で行っていたが、高電圧を高くすると、不均一性が広がるため、使用条件に制約があった。MPPC は増幅素子毎に増幅率を調整できるため、性能改善を試みた。MPPCの増幅率調整法はKEKと協力して開発を行った。詳細はKEKより報告される。

次に、総合測定システムの性能を取得するための実験を行った。Li ガラスシンチレータの性能試験をアールテック（株）と協力して HUNS と京大炉ライナックのパルス中性子源で行った。詳細はアールテック（株）より報告される。また、選定された Li ガラスシンチレータを LiTA システムに搭載し、京都大学原子炉実験所にてアールテック（株）と協力して性能取得試験を行った。詳細はアールテック（株）より報告される。また、Thin-GEM 検出器と前年度開発した被検体スライド機構を用いてサブピクセルシフト法のための画像データを京都大学原子炉実験所で取得した。実験は 2 日間にわたり行われ、画像データが温度に依存することが分かった。

以上、平成 28 年度の成果をまとめると、平成 27 年度に製作した「多次元データ処理装置」と「制御表示ソフトウェア」、及び検討中の「高解像度化処理法」の性能を放射線源を用いて評価した。また、mPMT に代わり MPPC を用いる装置を製作し、性能改善を試みた。また、そこで得られた知見をもとに、京都大学原子炉実験所や北海道大学でのパルス中性子源を用いる実験に参加し、総合測定システムの性能取得実験を補助した。

⑤ サブピクセルシフト法のよる高解像度化の実証実験(H29)

サブピクセルシフト法による超解像処理の有用性の評価及び、0.4 mm 粒子検知への可用性の評価のために、京大炉ライナックにて 5 mm 厚の ^{6}Li ピクセルシンチレータ及び LiTA12e システムを用いた体系で実験を行った。表 3.3.2.⑤-1 に京大炉ライナック における加速器のパラメータ及び検出器の仕様を示す。表 3.3.2.⑤-2 に加速器以外で使用した主な機器を示す。図 3.3.2.⑤-1 に実験体系を示す。遮蔽容器と被検体間は 10 mm 程度空いている。図 3.3.2.⑤-2 に実験に使用した被検体の概要図を示す。下部の 2 つの円は、京大グループ作成の模擬燃料である。バルク材料は中性子吸収断面積が 3.5 wt% U 燃料と等価になるように BiO_3 と NdO_3 を混合したものを用いている。模擬燃料内の In においては直径と同等の厚さを持つ。右上にはアールテック (株) 作成の In 板と 0.1 mm^{t} の In チップを配置した。左上には、熱領域様に Cd スターと板を配置した。

本実験は実験時間の関係上、対象物質のピークを認識可能になるのに必要な測定時間を概算する必要があったため、最低限ではあるが中性子計測における計数変動を考慮して測定時間を算出した。図 3.3.2.⑤-3 に 1 mm 幅の対象物質の線を測定したと仮定した場合の各係数の関係を示す。シェーディングの計数 n、被検体材料部分での計数 βn、対象物質部分での計数 αn とすると計数差 L は

$$L = \beta n - \alpha n \qquad (3.3.2.⑤\text{-}1)$$

で表される。また、βn 及び αn がポアソン分布に従うと仮定すると、L の合成標準不確かさ σ_Lは、

$$\sigma_L^2 = \beta n + \alpha n \qquad (3.3.2.⑤\text{-}2)$$

$$\sigma_L = \sqrt{\beta + \alpha}\sqrt{n} \qquad (3.3.2.⑤\text{-}3)$$

となる。ここで 0.4 mm 幅と 1 mm 幅の透過比 γ 及び、重心超解像処理によるピクセル分割数 s、許容変動倍率 k とすると

$$k\sigma_L < \frac{L\gamma}{s} \qquad (3.3.2.⑤\text{-}4)$$

$$k\sqrt{\beta + \alpha}\sqrt{n} < \frac{(\beta - \alpha)n\gamma}{s} \qquad (3.3.2.⑤\text{-}5)$$

$$\frac{k^2 s^2(\beta + \alpha)}{(\beta - \alpha)^2\gamma^2} < n \qquad (3.3.2.⑤\text{-}6)$$

となり、α、β、γ に加え、対象の範囲のシェーディングの計数率を求めておくことで最低限必要な計数を推定可能である。また、γ については空間周波数に換算した後に、線形近似で外挿することで安全な値を求めることができるが、空間分解能を必要としない場合は単純な面積比を用いる事になる。

実験で用いる対象核種と注目するエネルギーは ^{115}In の 1.46 eV のピークである。このピークはエネルギー方向に幅があるため、測定においても理論上 180 ch 付近にピークが現れる。そのため、^{115}In の検知には、180 ch のみを利用して S/N 比の良いデータを抽出するか、半値幅以上のデータで ROI を取り統計精度を上げるかの 2 つの方法が考えられる。そこで(3.3.2.⑤-6) 式を利用して必要な最低測定時間を算出した結果を表 3.3.2.⑤-3 に示す。α 及び β は、JENDL-4.0 の核データと前章のシェーディングデータのスペクトル及び過去の In データの測定値より算出した。また、γ 面積比を用いた。表より、ROI を利用した方がピークのみの利用よりも 48 % 程度測定時間を削減することができることが分かる。以上より、本実験の測定時間は 40 min とした。また、移動量を 2 倍重心超解像処理後の 1/10 pixel (0.15 mm) として、縦横方向に 10 回計 100 回移動させ、それぞれの位置で被検体を撮像した。シェーディング画像は被検体を取り外し、1 枚撮像した。2 倍重心処理かつ、積算エネルギー領域を In(171～186 ch) と Cd(450～1250 ch) として、10 × 10 倍の 100 枚超解像処理を行った後、シェーディング補正を行った。また、In の超解像処理結果より、目視から直径 0.4 mm の In の検知が可能か検証した。また、Cd の超解像処理結果より、その他の考察を行った。図 3.3.2.⑤-4 に、全エネルギー積算時の被検体画像、シェーディング画像及びシェーディング補正後の画像を示す。また、図 3.3.2.⑤-5 に、図 3.3.2.⑤-4 の Cd と Shading 及び Plate 部分のスペクトルを示す。図 3.3.2.⑤-5 の左図の中性子エネルギーに対する計数率の結果より、In の共鳴吸収ピークは 1.453 eV となり、^{115}In の 1.46 eV とほぼ一致した。また、右図の TOF チャンネルに対する計数率の結果より、ピークチャンネルは 180 ch、半値幅の範囲は 170 - 187 ch となり、理論上の積算範囲 171-186 ch とほぼ一致した。Cd については 1 eV 付近で急激に減衰する事から、171-186 ch の積算と熱領域のピーク付近 450-1250 ch の積算値を比較することで In と Cd の分別が可能だと考えられる。図 3.3.2.⑤-6 に、図 3.3.2.⑤-4 の Balk と Shading 及び Spot 部分のスペクトルを示す。また、表 3.3.2.⑤-4 に各ディップについて推測した結果を示す。図 3.3.2.⑤-6 より、^{115}In と模擬燃料材料の ^{145}Nd のディップを観測することができた。図 3.3.2.⑤-7 に Plate と Spot の比較結果を示す。図 3.3.2.⑤-7 より Spot の 1.46 eV のディップは Plate に比べてピークが低いことが分かる。これは、Spot の In 厚さが 2 mm と Plate に比べて 2 倍以上厚い事から、散乱やトラップが起きた為と考えられる。Spot の熱領域が減衰しているのも、In が厚い事による吸収反応の増加が原因であると考えらえる。図 3.3.2.⑤-8 に、In の中性子共鳴吸収領域で積算した場合の被検体画像、シェーディング画像及びシェーディング補正後の画像を示す。図 3.3.2.⑤-8 より、左下の模擬燃料については直径 0.4 mm の In が 2 つとも確認できるが、右下の模擬燃料の方は確認できないことが分かる。また、In チップについては□ 2 mm までしか認識できないことが分かる。図 3.3.2.⑤-9 に、熱領域で積算した場合の被検体画像、シェーディング画像及びシェーディング補正後の画像を示す。

図 3.3.2.⑤-9 より、図 3.3.2.⑤-8 では確認できない Cd 線や Cd チップをはっきりと確認できる。また、In についても 0.06 mm の板上なら熱領域でも十分確認可能なことも分かる。ただし、2 倍重心処理のみでは Cd スターを十分に分別できていないため、超解像による歪みの評価はこの時点では困難である。図 3.3.2.⑤-10 に、In の中性子共鳴吸収領域で積算した場合の超解像処理結果を示す。図 3.3.2.⑤-10 より、図 3.3.2.⑤-8 で確認できなかった右下の模擬燃料中の直径 0.4 mm 及び 0.2 mm の In を全て確認できる。また、In チップについても 0.4 mm まで確認できるようになった。以上の事から、2 倍超解像後の画像に対して 10 × 10 倍 100 枚超解像によって直径 0.4 mm の In の検知は可能であることが分かった。図 3.3.2.⑤-11 に、模擬燃料内の In の直径と透過率の最小値の関係を示す。図 3.3.2.⑤-11 より、直径に対して指数関数的に減少していることが分かる。以上より、超解像処理後においても厚さの情報は失われないことが分かった。図 3.3.2.⑤-12 に、In のチップと模擬燃料内の In の FWHM を測定した結果を示す。不確かさを含まない場合の FWHM の理論値は f(x) = x となるが、実際の FWHM には、In スポット・In チップのサイズの不確かさ α_{object} 及び実験体系による不確かさ α_{system} が含まれるため、近似式 f(x) は

$$f(x)^2 = x^2 + \sigma_{object}^2 + \sigma_{system}^2 \qquad (3.3.2.⑤\text{-}7)$$

$$f(x) = \sqrt{x^2 + \sigma_{object}^2 + \sigma_{system}^2} \qquad (3.3.2.⑤\text{-}8)$$

となる。ここで、σ_{object} を 0.1 mm 程度と仮定して、σ_{system} を、Microsoft Excel のソルバー機能の一般化簡約勾配法(GRG : Generalized Reduced Gradient method) で算出した所、1:173 mm と求まった。実験体系の不確かさの要因としては、L/D による中性子の幾何学的な拡散が考えられる。本体系においては、L/D = 120 程度であるため、被検体-シンチレータ間 d=60 mm と仮定すると幾何学的なハレーションは σ = 0.5 mm となる。よって、サイズ測定の限界は本実験体系では FWHM で 2:35σ = 1:175 mm 程度であるため、実験体系の不確かさにおいては L/D が支配的であると考えられる。図 3.3.2.⑤-13 に熱中性子領域で積算した場合の超解像処理結果を示す。図 3.3.2.⑤-13 より、図 3.3.2.⑤-9 で認識が困難だった中央の空間を含めて Cd スターを正しく認識できるようになっている事が分かる。また、周囲 20 pixel にエラーが発生している事から、重心処理のパラメータの設定が不十分である可能性がある。本件実験体系においては、0.25 mm の Cd のラインペアは超解像後も判別することはできなかった。原因は L/D による幾何学的なハレーションだと考えられる。

以上より、平成 29 年度の成果をまとめると、中性子共鳴吸収イメージングにおける超解像処理の有用性の評価及び、0.4 mm 粒子検知への可用性の評価のために、実際のプロジェクトの体系にて撮像した 2 倍超解像後の画像 100 枚を用いて再構成計算を行ったところ、直径 0.2 mm の In まで検知することができ、中性子共鳴吸収イメージングに対する超解像処理の有用性を示すことができたと共に、プロジェクトの目標を達成することも

できた。また、FWHM においてはL/D による幾何学的なハレーションにほぼ依存しているため、検知ではなく認識が必要となる場合は、L/D による影響をできるだけ小さくすると、更に空間分解能が改善されることがわかった。

⑥ まとめ

「データ収集回路・多次元データ処理装置の開発」では、高空間分解能中性子イメージング装置の画像処理、及び、高効率・高時間分解能中性子イメージング装置等の2次元マッピングを行うためのマルチフォトマル回路基板の製作及び高度化を実施した。平成26年度から平成27年度にかけて基礎研究及び装置の試作等を実施し、平成28年度では作成した装置を北大ライナック及び京大炉ライナックに持ち込み性能評価を実施した。そこで得られた知見を基にmPMTに代わりMPPCを用いる装置を製作し性能改善を試みた。平成29年度では、3.3.1.①節で開発した高効率・高時間分解能中性子イメージング装置を用いた中性子共鳴吸収イメージングにおける超解像処理の有用性の評価及び、0.4[mm] 粒子検知への可用性の評価を実施した。その結果、本事業の体系にて撮像した2 倍超解像後の画像100 枚を用いて再構成計算を行ったところ、当初目標を大きく上回る直径0.2 mm のIn まで検知することができた。以上、本事業で提案した研究は全て達成できた。

表3.3.2.⑤-1　京大炉ライナックにおける加速器と検出器システムのパラメータ

加速器・検出器	条件
ビームライン[m]	12
電子加速エネルギー[MeV]	30
パルス幅[s]	4
繰返周波数[pps]	50
BEAM 電流[A]	100
計測時間[s]	2400
TOF 間隔[s]	4
LiTA12e ソフトウェア重心処理パラメータ	p = 60; d = 40
LiTA12e 重心処理倍率[倍]	2 × 2

表 3.3.2.⑤-2　使用した機器等

機材	仕様
X シフトステージ	ALS-602-H1M；中央精機(株) 分解能：2[μm]
X シフトステージ	ALV-600-H1M；中央精機(株) 分解能：1[μm]
シフトステージコントローラ	QT-CM2, QT-K；中央精機(株)
Li-6 シンチレータ	SG20(95[%] 濃縮 Li-6)；SAINT-GOBAIN □ 1.5[mm] 5[mm] 厚, 32 32[pixel]
光検出器(MA-PMT)	H9500；浜松フォトニクス 16 × 16[ch], □ 3.04[mm]
LiTA12e sytem	計測ソフト： LiTA12e main v2.exe (Version=1.10)
被検体	Gd ラインペアチャート；J-PARC 借用 0.8[mm] 厚 Cd ラインペアチャート

表 3.3.2.⑤-3　実験に必要な最低測定時間の推定

対象 ch(4[μs] 分割時)		171 - 186[ch]	178[ch]
許容係数	k	2.35	2.35
重心超解像での分割数	s	4	4
ディップ部分の透過率	α	0.6	0.2
バルク部分の透過率	β	0.9	0.9
0.4mm ラインペア透過割合	γ	0.3	0.3
必要な計数	n	33263	4480
対象 ch のシェーディング計数率[min^{-1}]		866	61
必要な測定時間[min]		38.5	73.7

表 3.3.2.⑤-4　模擬燃料の中性子スペクトルのディップ推定

ピーク[eV]	核種	推定ピーク[eV]	断面積[b]
1.45 ± 0.01	^{115}In	1.46	3.04×10^{4}
3.79 ± 0.03	^{115}In	3.82	9.59×10^{2}
4.31 ± 0.04	^{145}Nd	4.36	2.76×10^{3}
8.96 ± 0.12	^{115}In	9.07	1.52×10^{3}
12.06 ± 0.19	^{115}In	12.04	6.07×10^{1}
14.76 ± 0.26	^{113}In	14.60	3.81×10^{3}
21.79 ± 0.47	^{115}In	22.73	2.82×10^{2}
42.00 ± 1.25	^{145}Nd	42.60	1.88×10^{4}

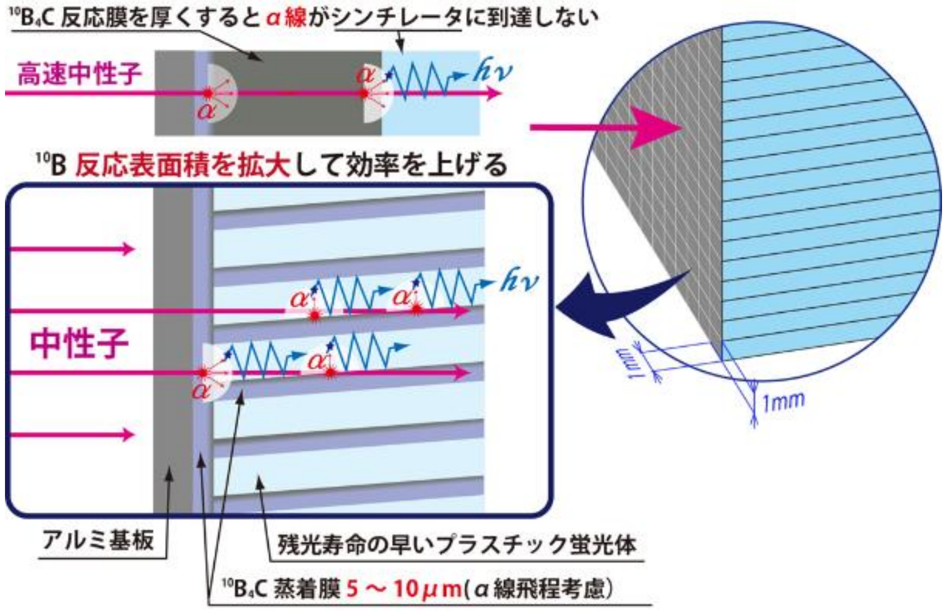


図 3.3.2.②-1　開発が計画されている高エネルギー中性子用マルチバンドル複合型シンチレータシステム

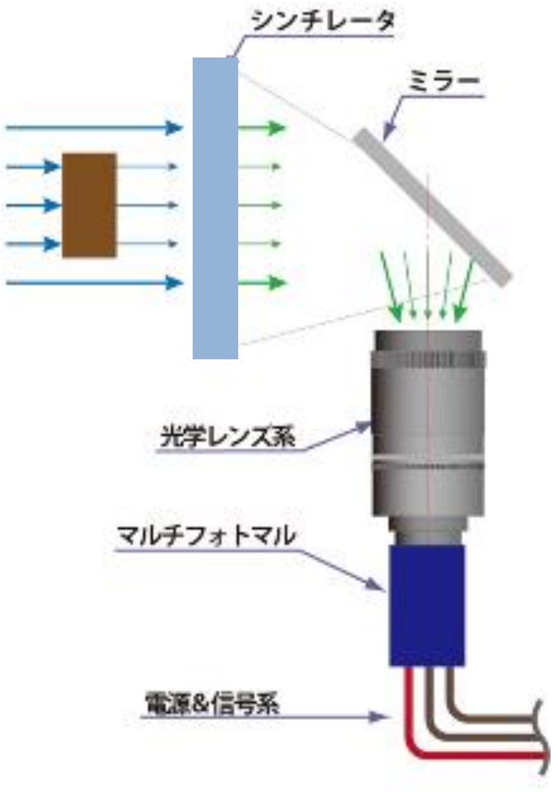


図 3.3.2.②-2　中性子反応を検出してイメージングするための撮像系

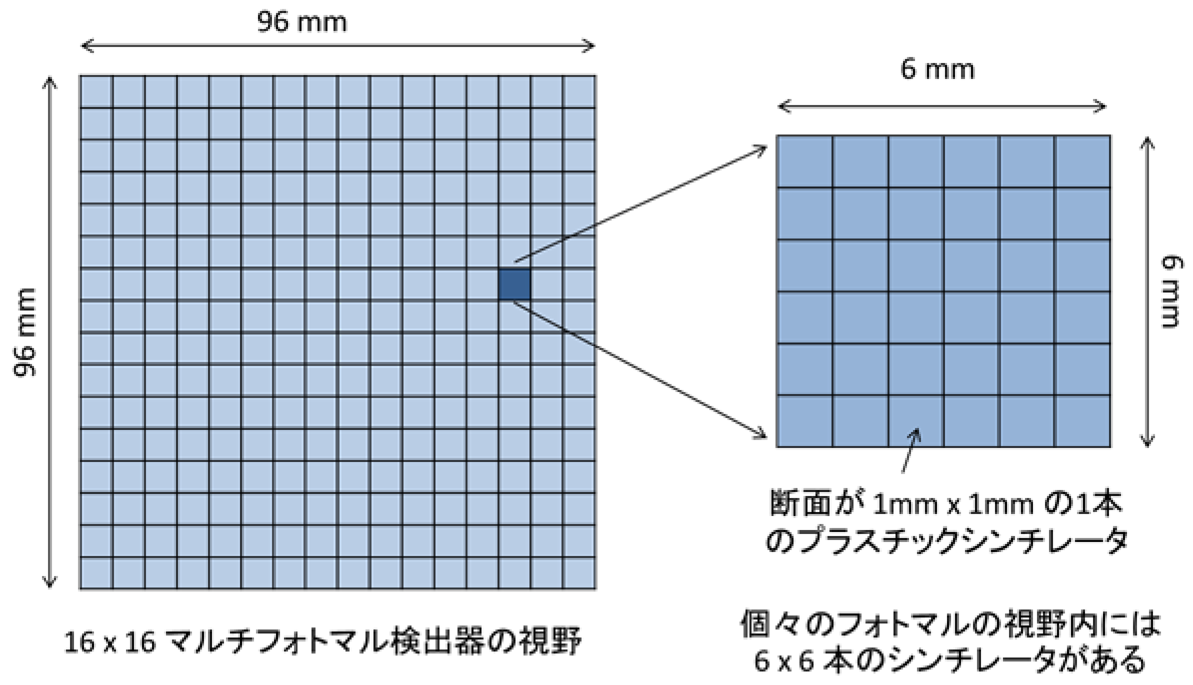


図 3.3.2.②-3　マルチフォトマル検出器の視野と個々のフォトマルの視野内のシンチレータの関係

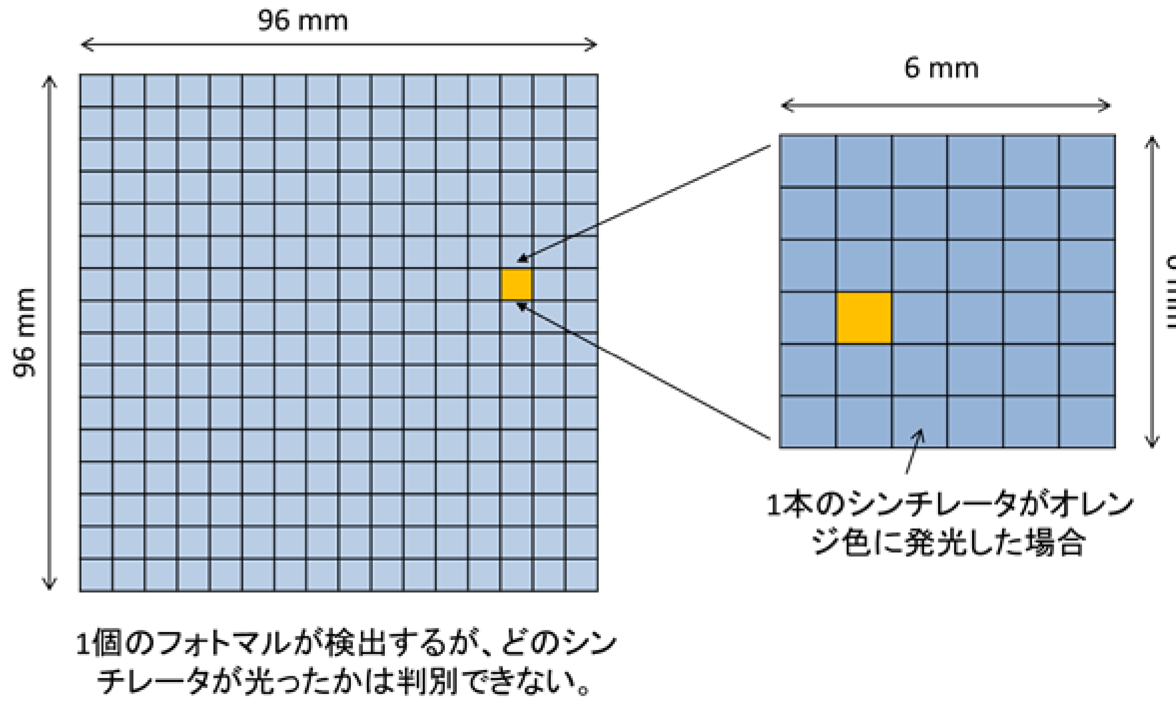


図 3.3.2.②-4　レンズ系ではっきりと結像した場合のマルチフォトマルの入射強度分布

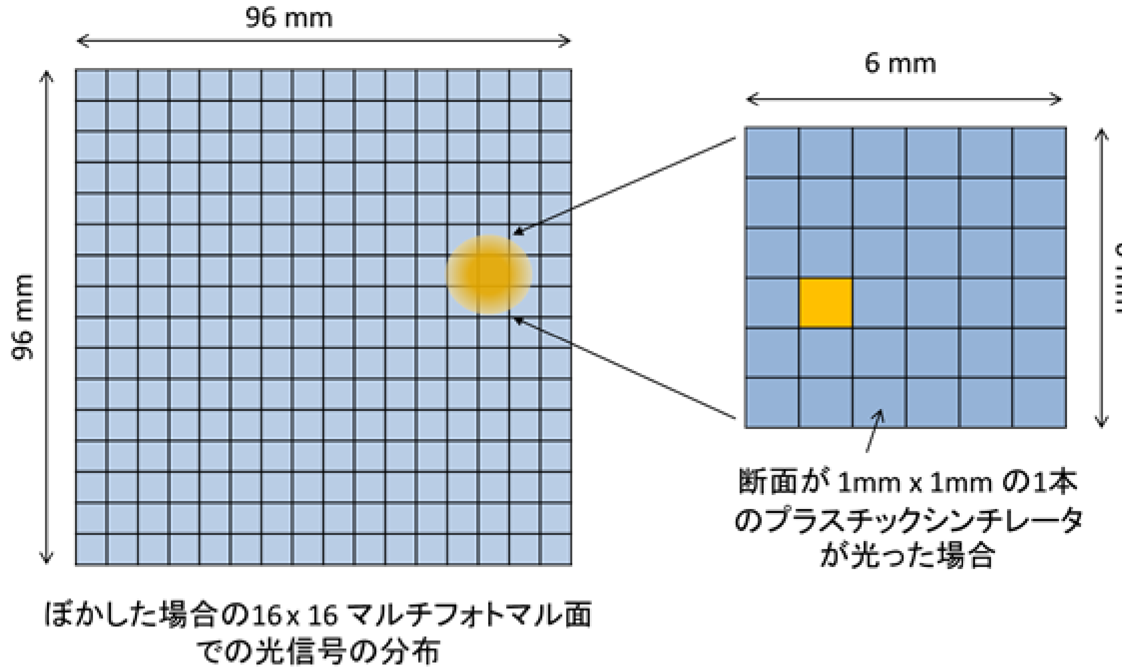


図 3.3.2.②-5　レンズ系でぼかした場合のマルチフォトマルの入射強度分布

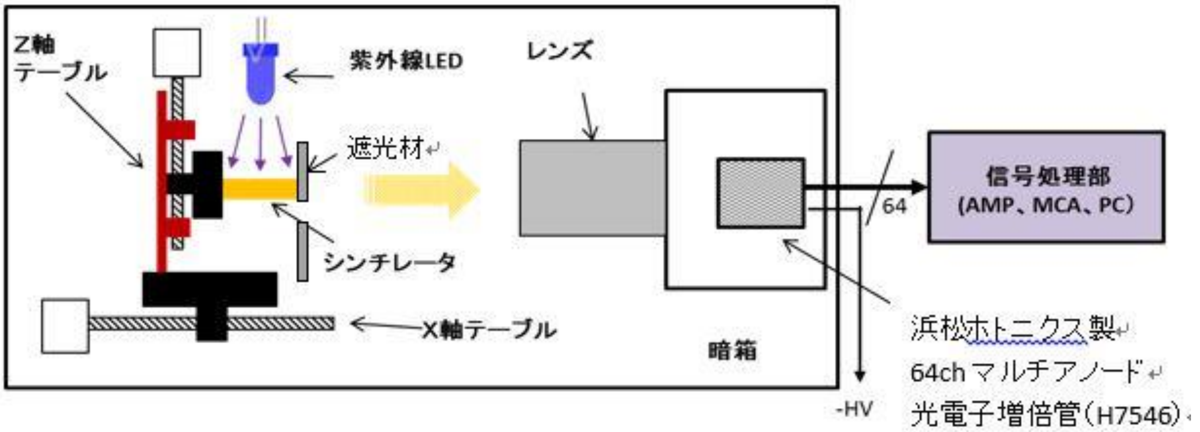


図 3.3.2.②-6　模擬画像データ取得のための実験体系の概要

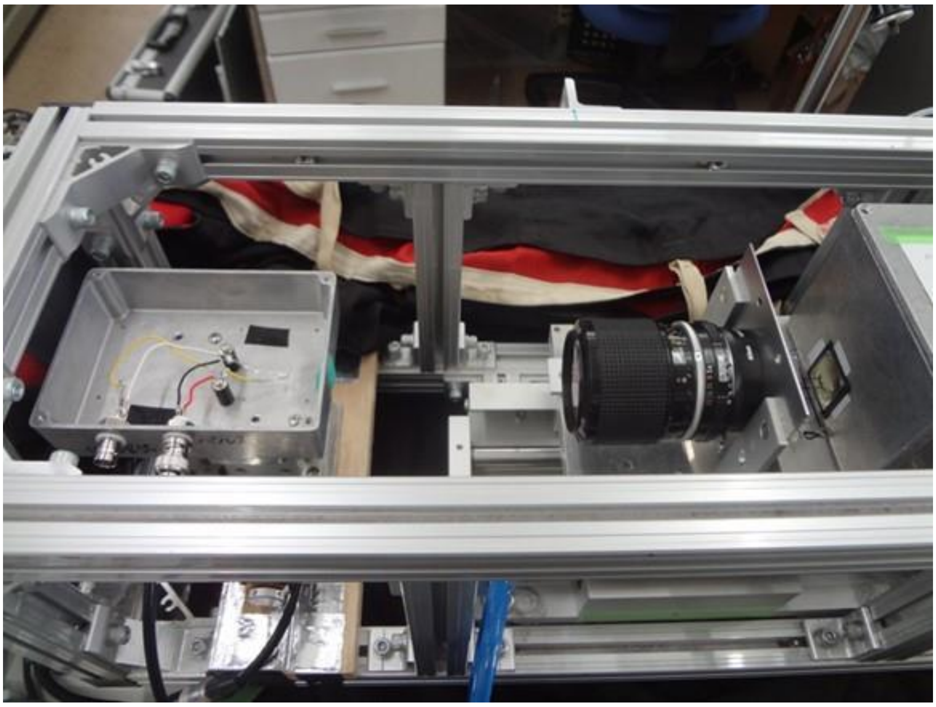


図 3.3.2.②-7　模擬画像データ取得のための実験体系の写真

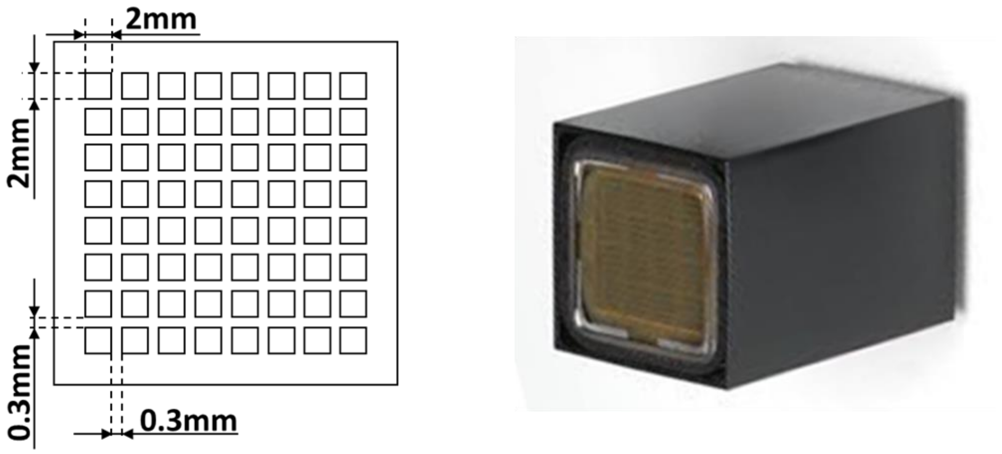


図 3.3.2.②-8　使用したマルチアノードフォトマル H7546（受光面：18.1 mm x 18.1 mm）

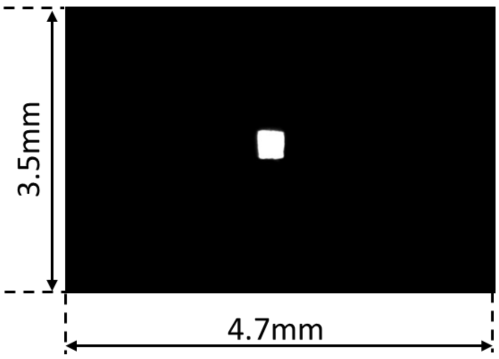


図 3.3.2.②-9　ピントが合っている状態

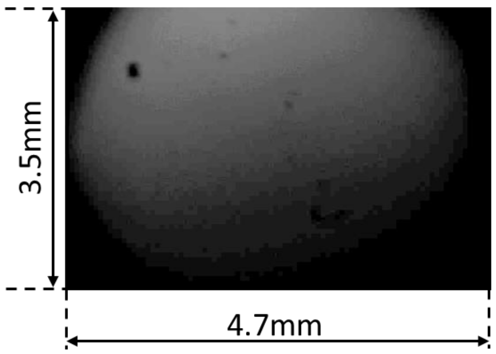


図 3.3.2.②-10　ピントがぼけている状態

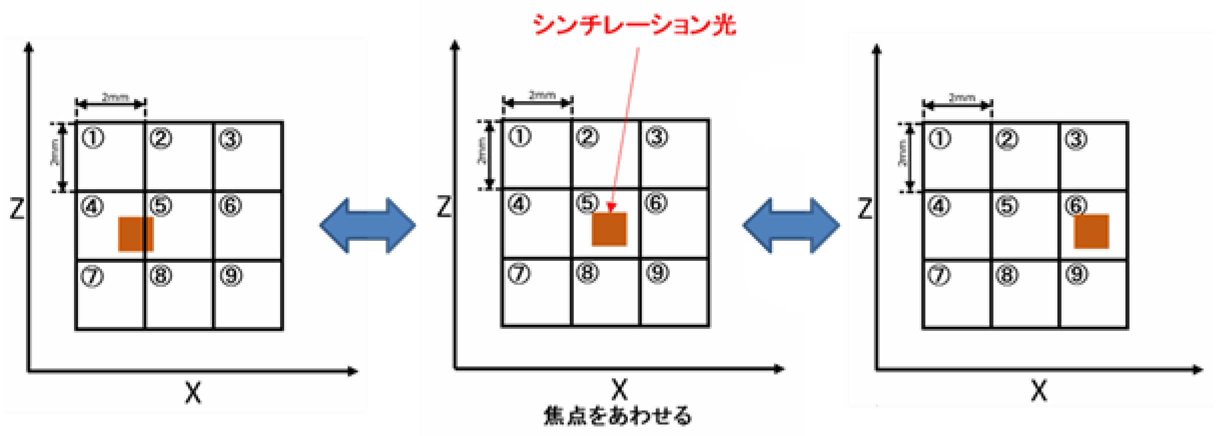


図 3.3.2.②-11　ピントが合った状態での CH4～CH6 の出力分布の光源位置依存性実験

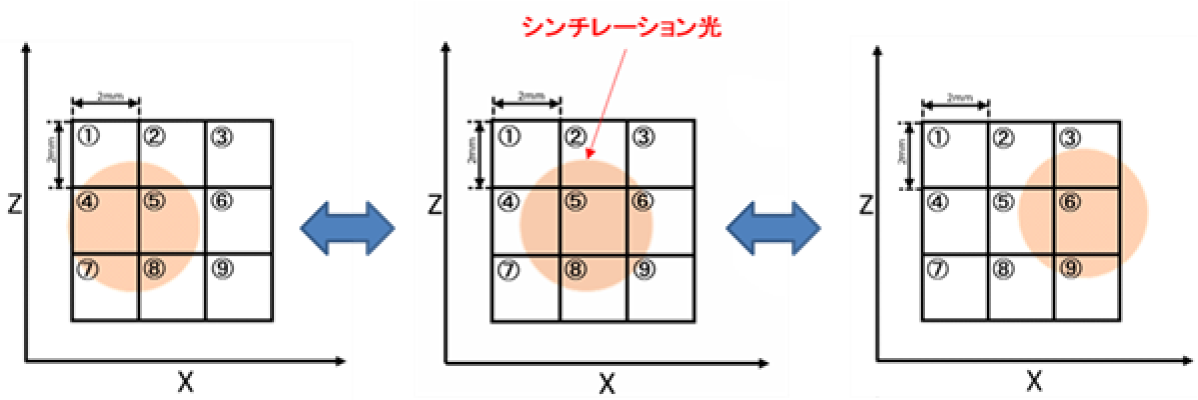


図 3.3.2.②-12　ピントがぼけた状態での CH4～CH6 の出力分布の光源位置依存性実験

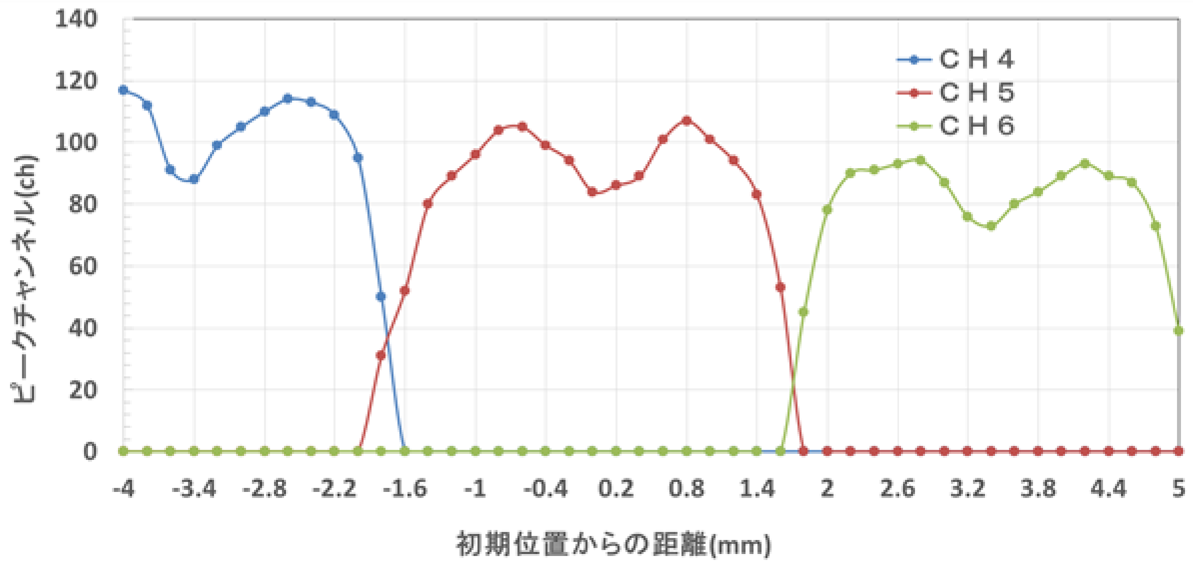


図 3.3.2.②-13　ピントが合った状態での CH4～CH6 の出力分布

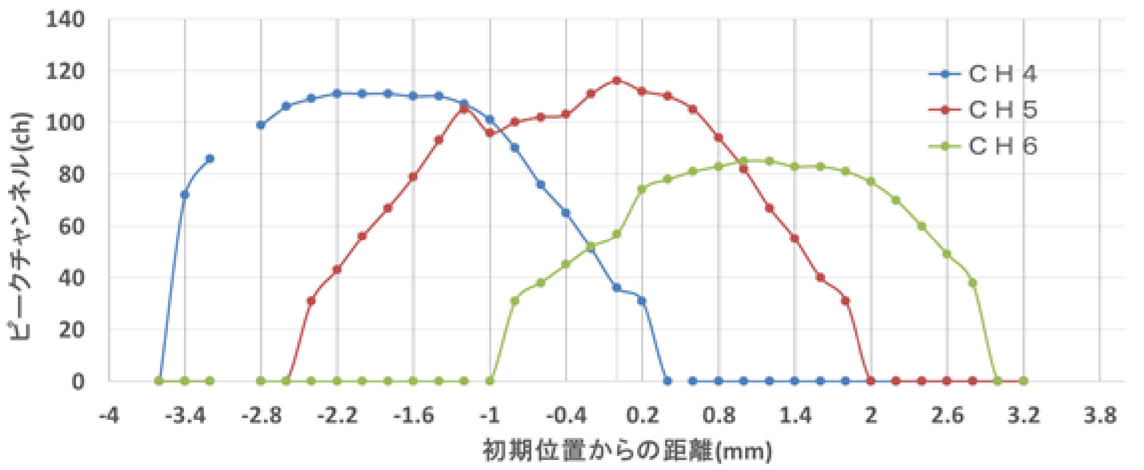


図 3.3.2.②-14　ピントがぼけた状態での CH4～CH6 の出力分布

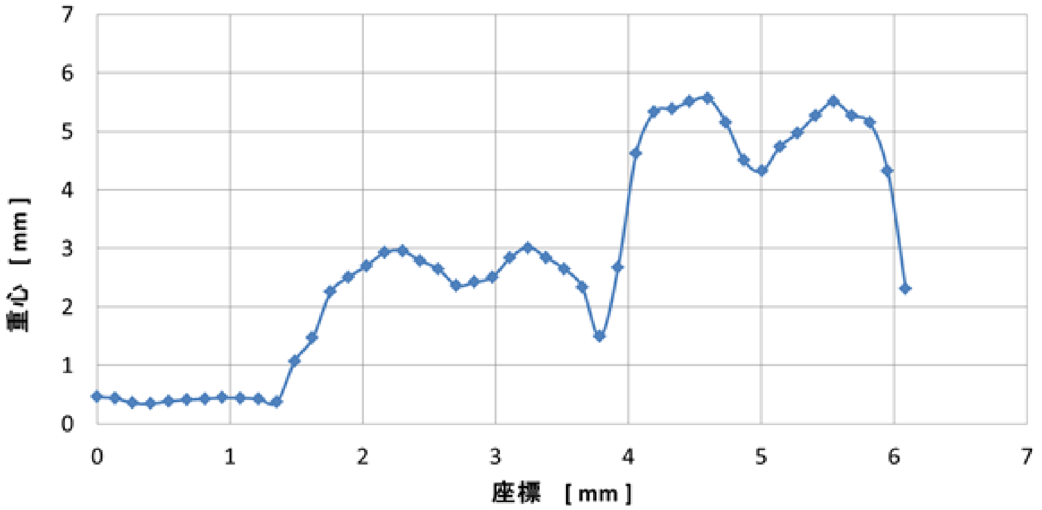


図 3.3.2.②-15　ピントが合った状態での重心処理結果

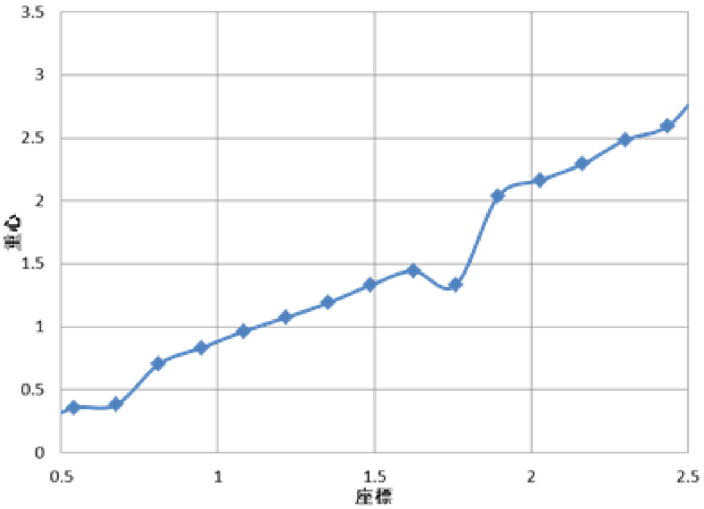


図 3.3.2.②-16　ピントがぼけた状態での重心処理結果

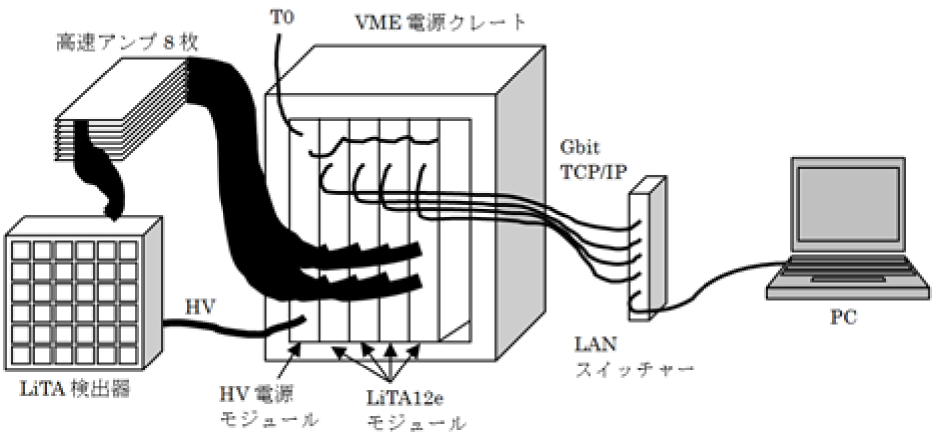


図 3.3.2.③-1　 LiTA12 システムのブロック図（多次元データ処理装置の基本構成）

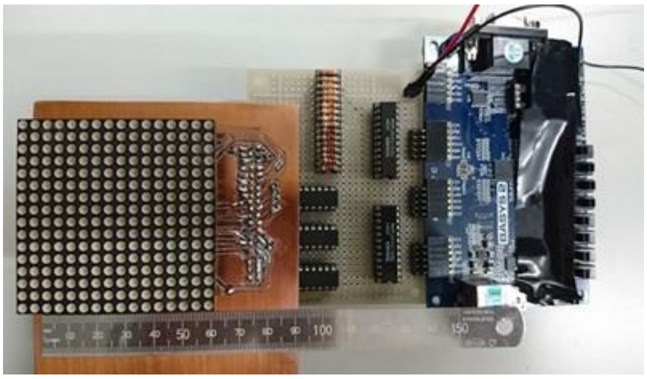


図 3.3.2.③-2　模擬輝点発生器

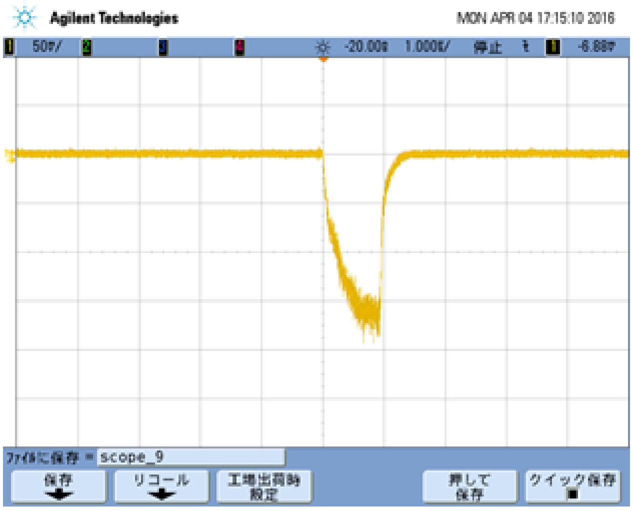


図 3.3.2.③-3　光電子増倍管の出力波形（幅 1μs）

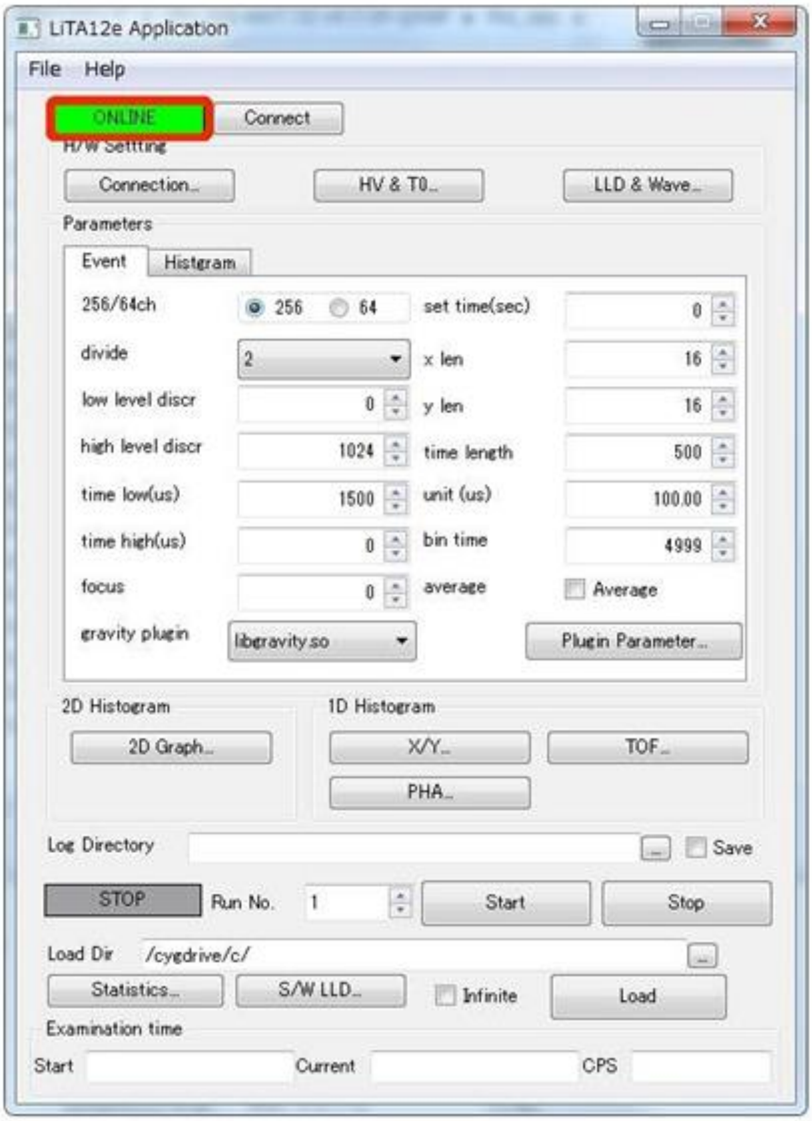


図 3.3.2.③-4　メインダイアログ

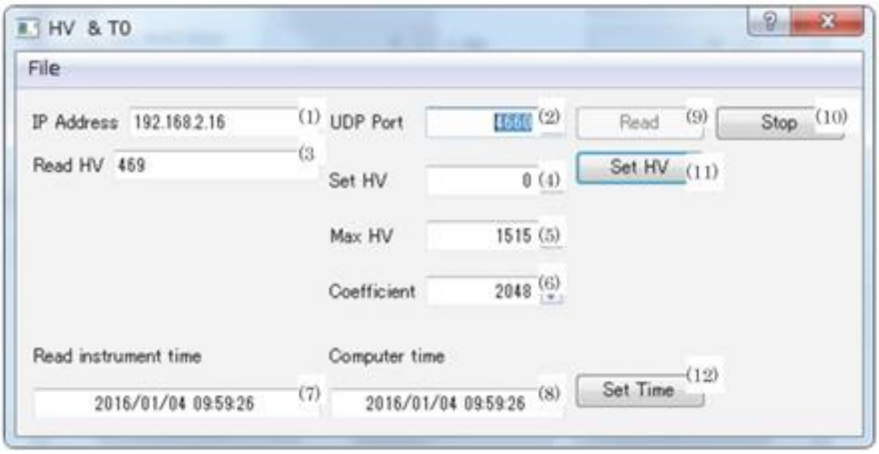


図 3.3.2.③-5　 HV & T0 ダイアログ

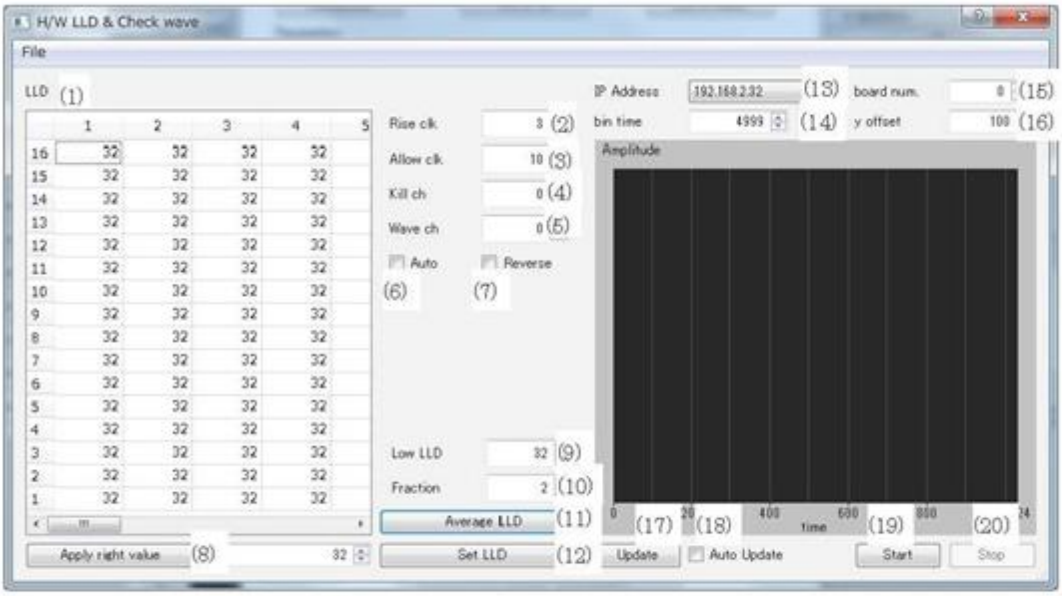


図 3.3.2.③-6　 H/W LLD & Check wave

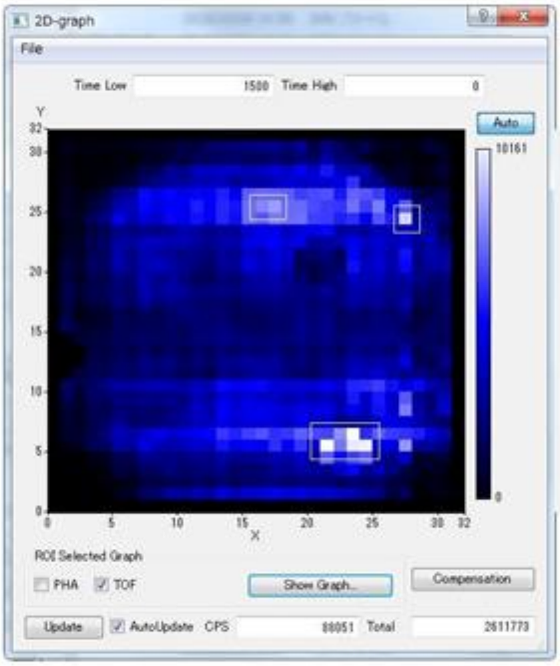


図 3.3.2.③-7　2D グラフ

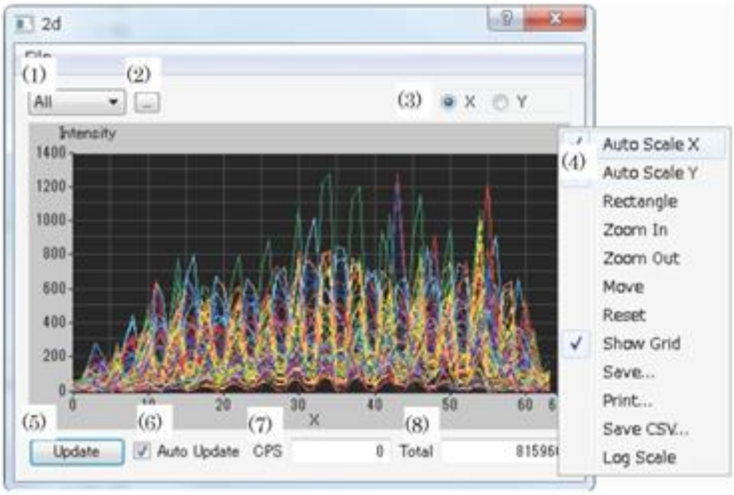


図 3.3.2.③-8　 X/Y グラフ

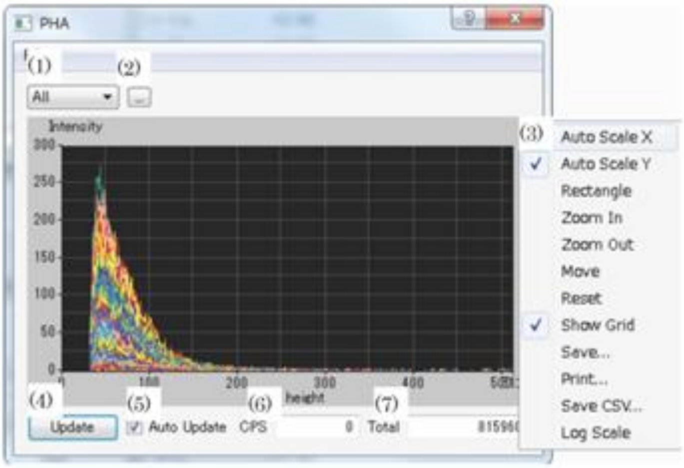


図 3.3.2.③-9　 PHA グラフ

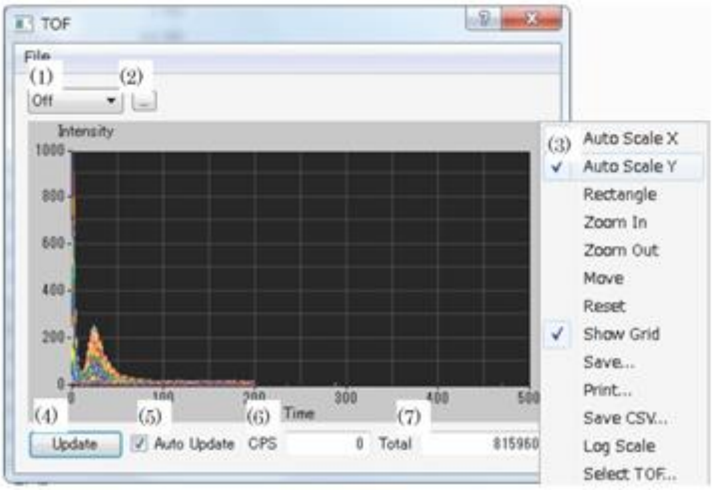


図 3.3.2.③-10　 TOF グラフ

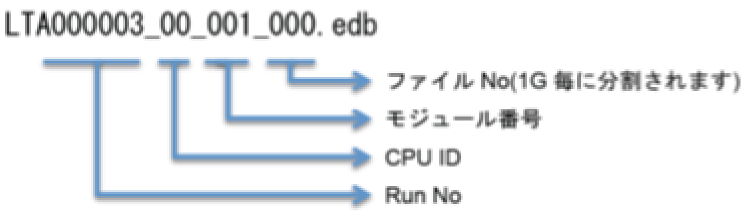


図 3. 3. 2. ③-11　ログファイル名

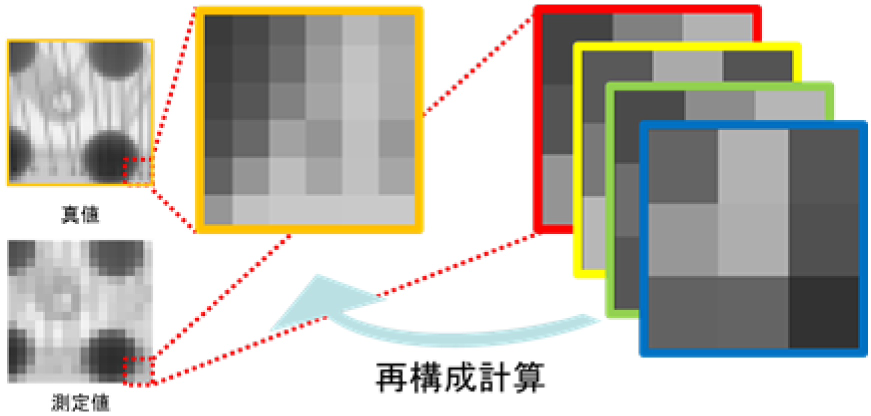


図 3. 3. 2. ③-12　サブピクセルシフト法の原理図

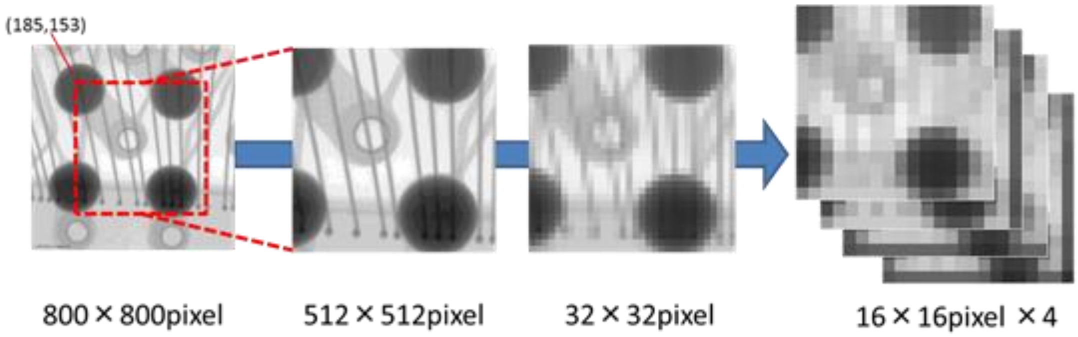


図 3. 3. 2. ③-13　模擬測定画像の生成

図 3.3.2.③-14　ML-EM 法による再構成画像

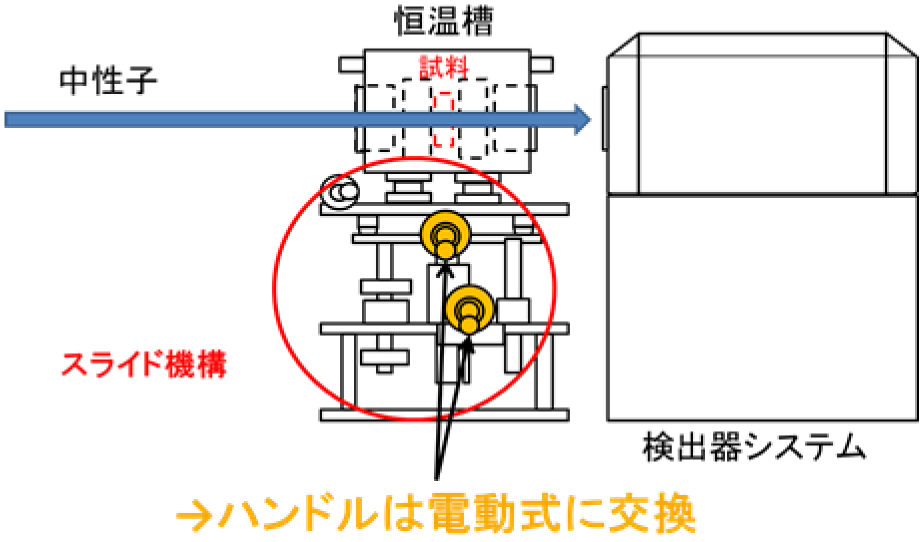


図 3.3.2.③-15　サブピクセルシフト法のためのスライド機構（高解像度化処理回路）

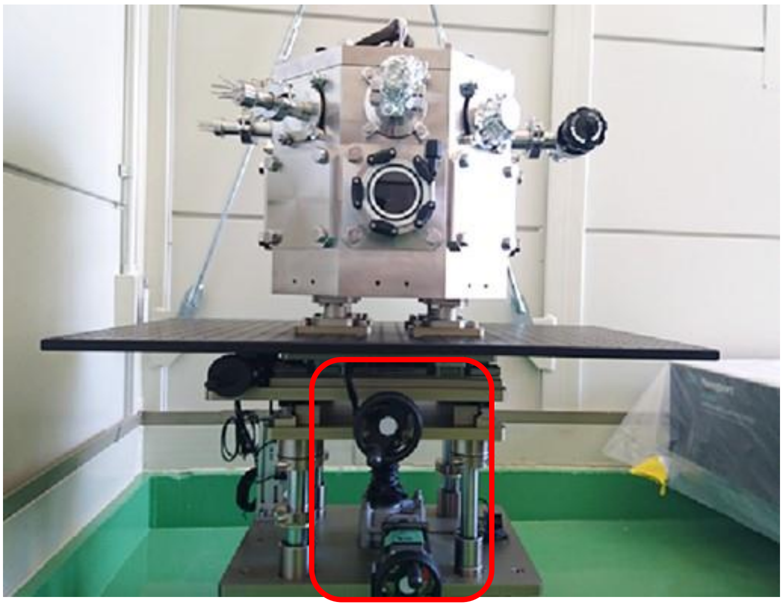
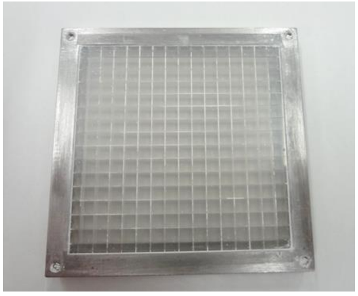
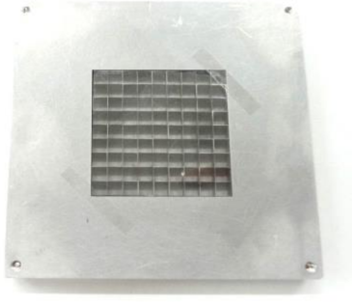
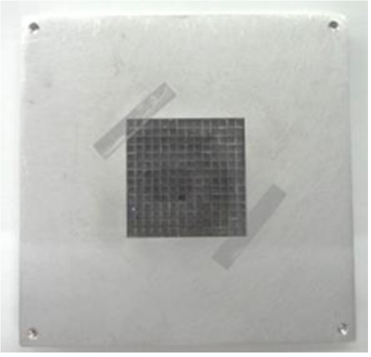


図 3.3.2.③-16　昇温装置とスライド機構（高解像度化処理回路：赤枠内）







(1) スリット型(3mm 角)　　(2) ピラー型（3mm 角）　　(3)　ピラー型　（1.5mm　角）

図 3.3.2.④-1 試作した Li ガラスシンチレータ　（厚さ　5mm）

図 3.3.2.④-2　シンチレータとプローブ
（応用光研製 SP-10）

図 3.3.2.④-3 ^{252}Cf 熱中性子源

図 3.3.2.④-4　 Li ガラス・ピラー型 3mm 角シンチレータの中性子スペクトル

図 3.3.2.④-5　サブピクセルシフト画像取得のための実験体系

図 3.3.2.④-6　 Cd ラインペアチャート

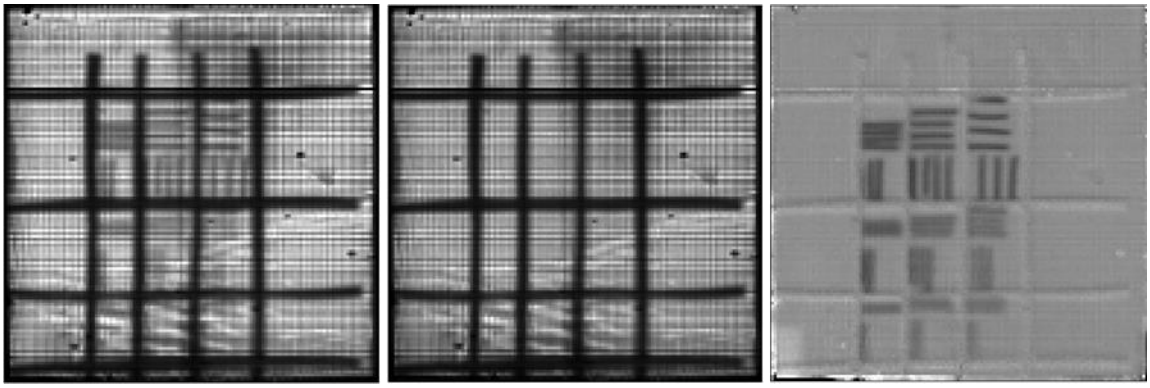


図 3.3.2.④-7　被検体画像(左)、シェーディング画像(中)、シェーディング補正結果(右)

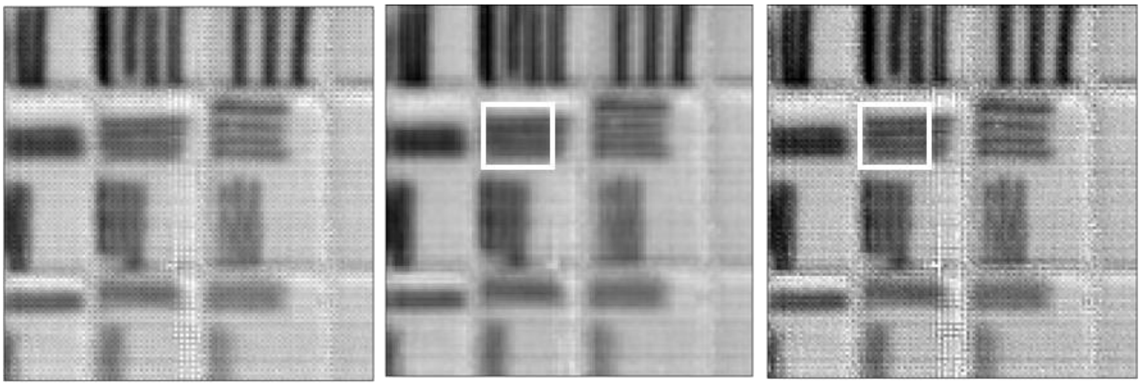


図 3.3.2.④-8　ピクセル並替(左)、積算(中)、ML-EM 法(右)による計算結果

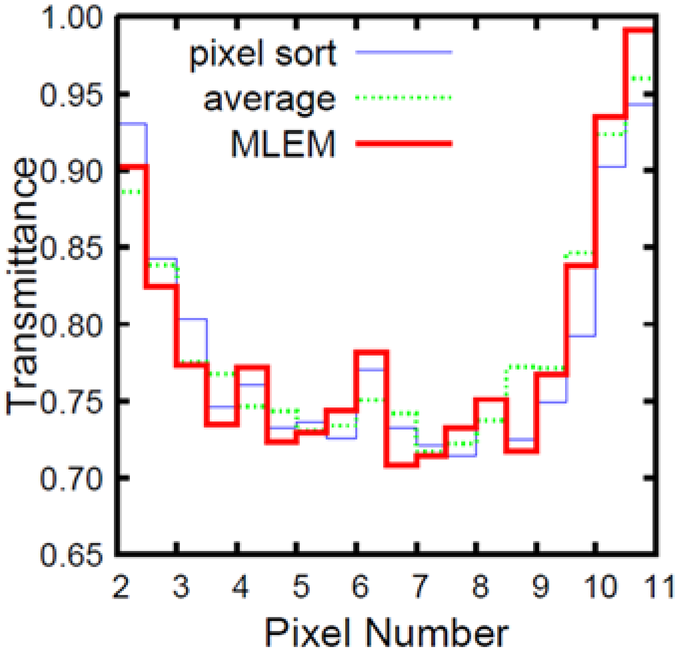


図 3.3.2.④-9　再構成結果のラインペアの比較

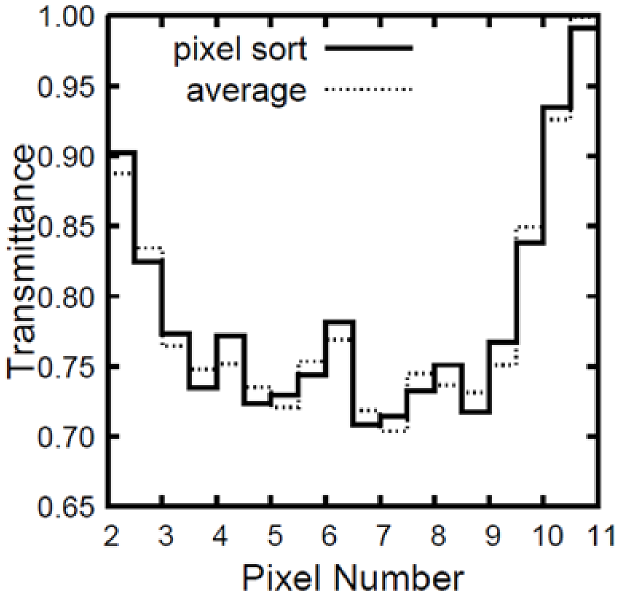


図 3.3.2.④-10　再構成初期画像の違いによる結果の比較

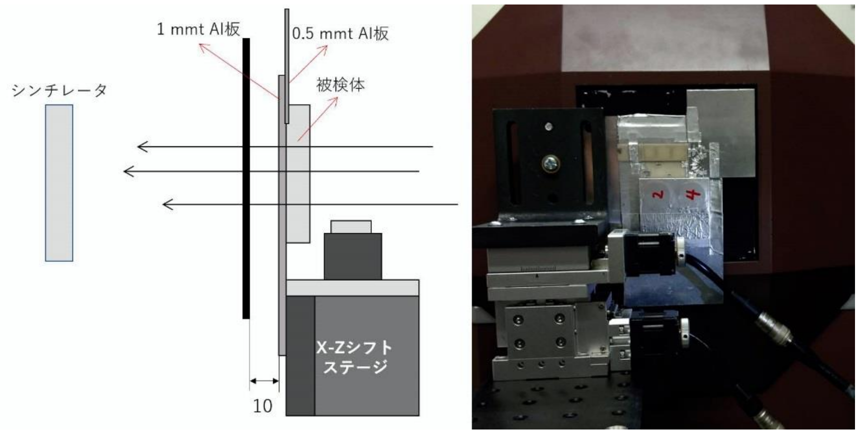


図 3.3.2.⑤-1　実験体系図及び写真

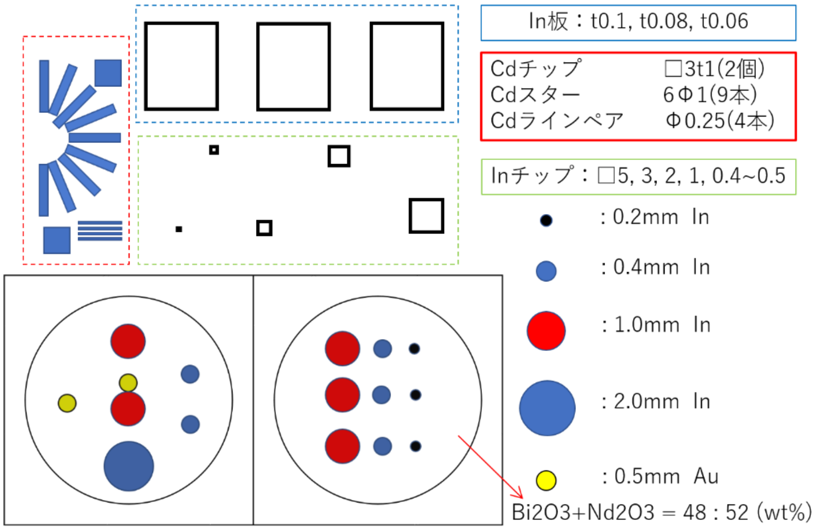


図 3.3.2.⑤-2　被検体の概要図

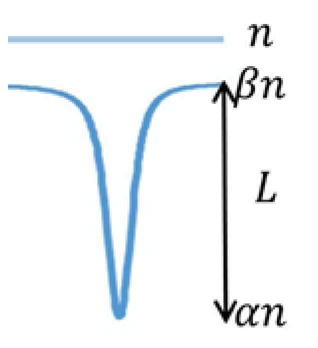


図 3.3.2.⑤-3　測定時間推定時の各係数の位置関係

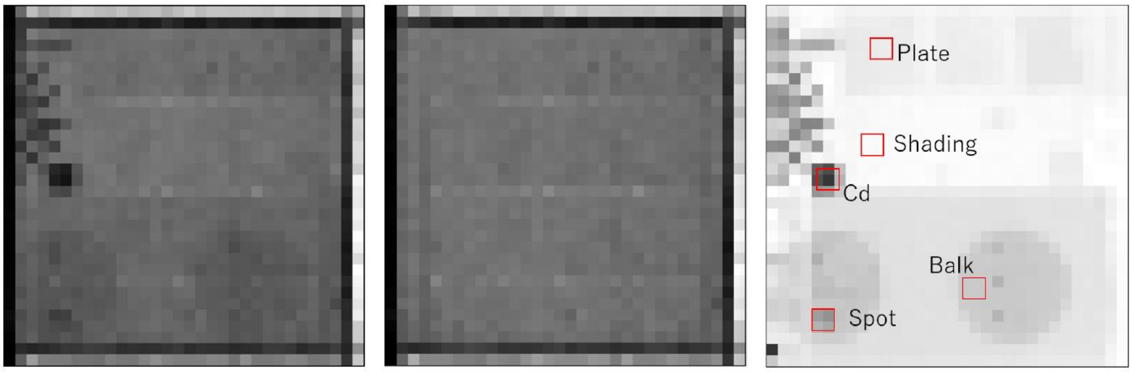


図 3.3.2.⑤-4　全エネルギー積算時の被検体画像 32 × 32[pixel](左)、シェーディング画像 32 × 32[pixel](中)、シェーディング補正画像 32 × 32[pixel] (右)

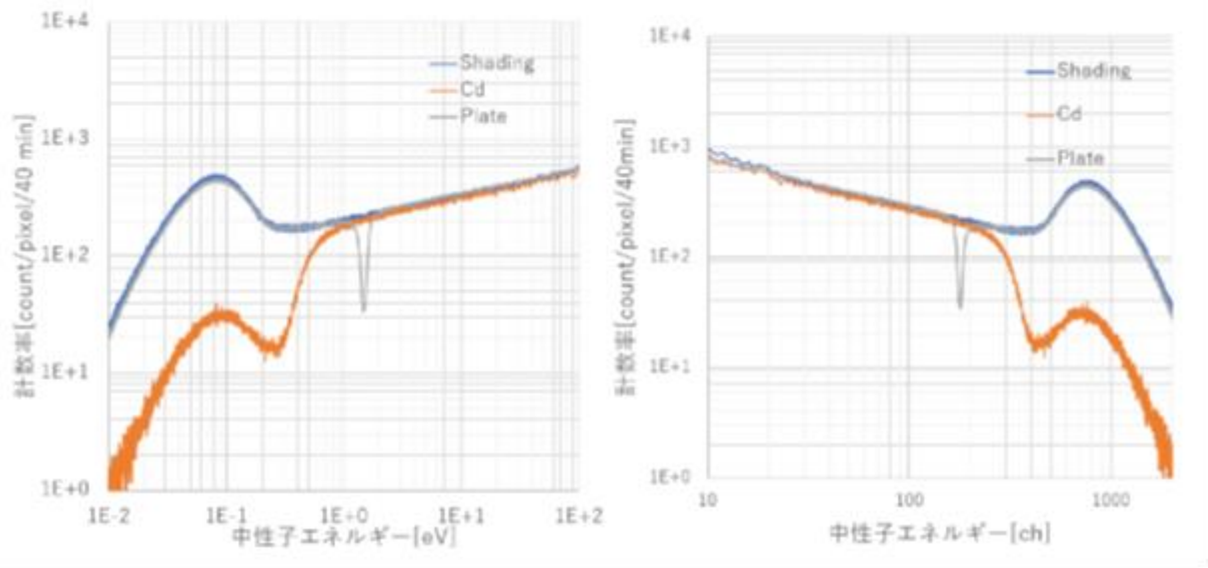


図 3.3.2.⑤-5　 Cd と Plate 部分の中性子スペクトル

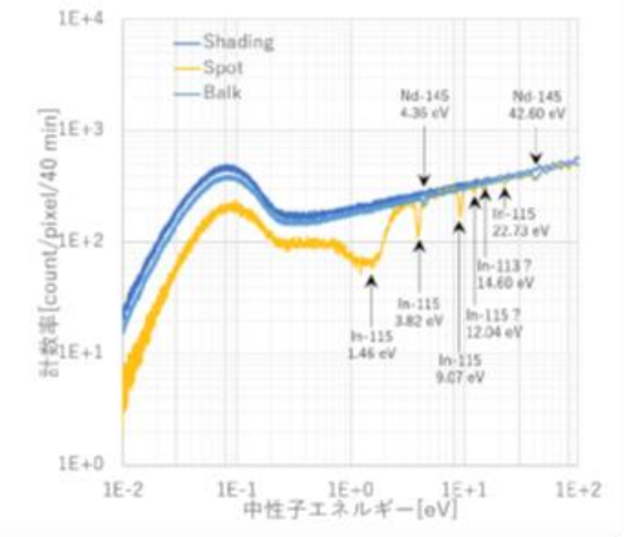


図 3.3.2.⑤-6　模擬燃料部分のスペクトル

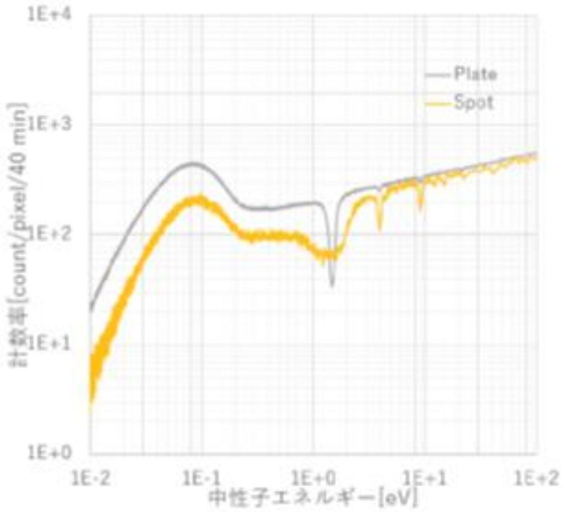


図 3.3.2.⑤-7　Plate と Spot 部分のスペクトル

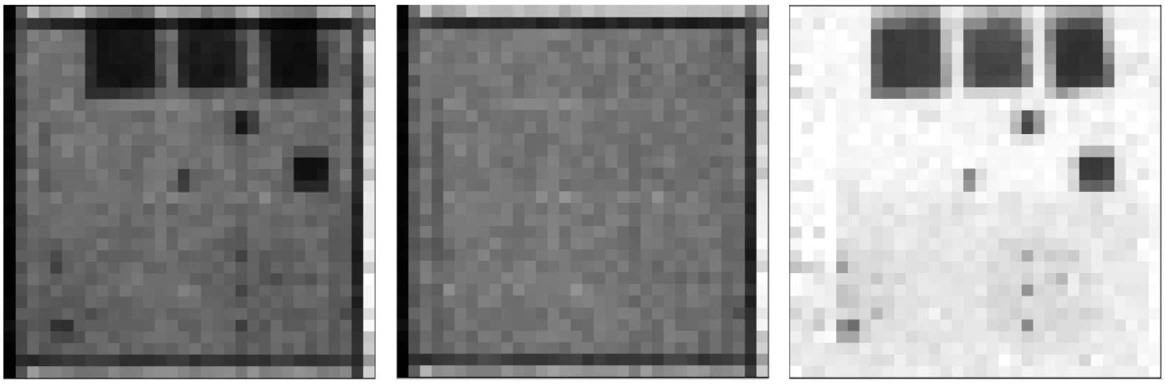


図 3.3.2.⑤-8　In の中性子共鳴吸収領域で積算した場合の被検体画像 32×32[pixel](左)、シェーディング画像 32 × 32[pixel]（中)、シェーディング補正画像 32 × 32[pixel]（右）

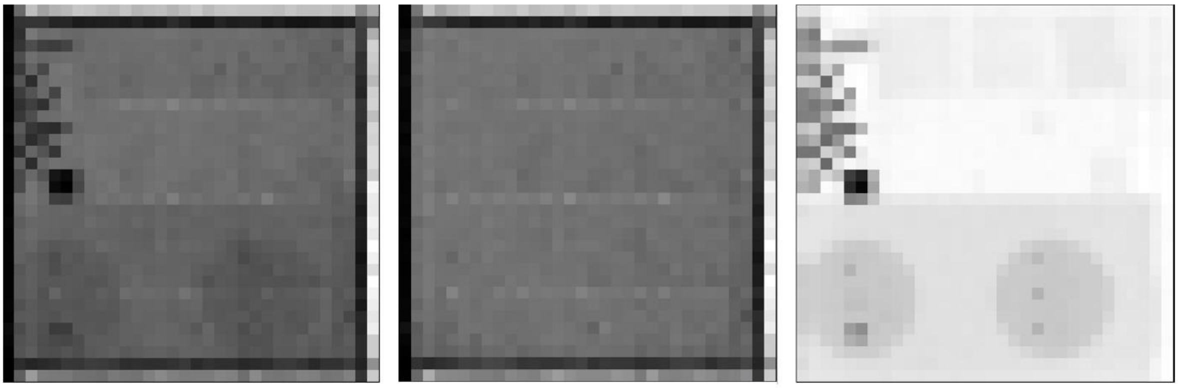


図 3.3.2.⑤-9　熱領域で積算した場合の被検体画像 32 × 32[pixel](左)、
シェーディング画像 32 × 32[pixel](中)、
シェーディング補正画像 32 × 32[pixel] (右)

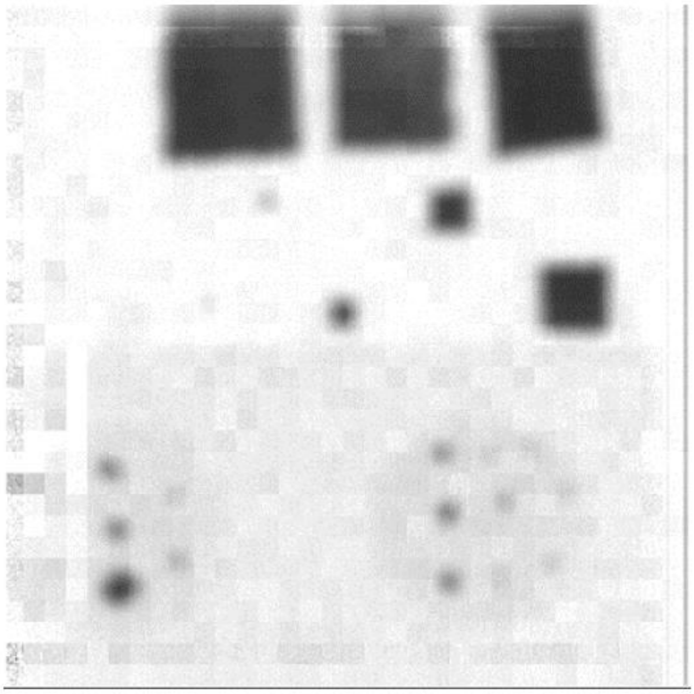


図 3.3.2.⑤-10　In の共鳴吸収領域における撮像画像の超解像処理結果
320 × 320[pixel]

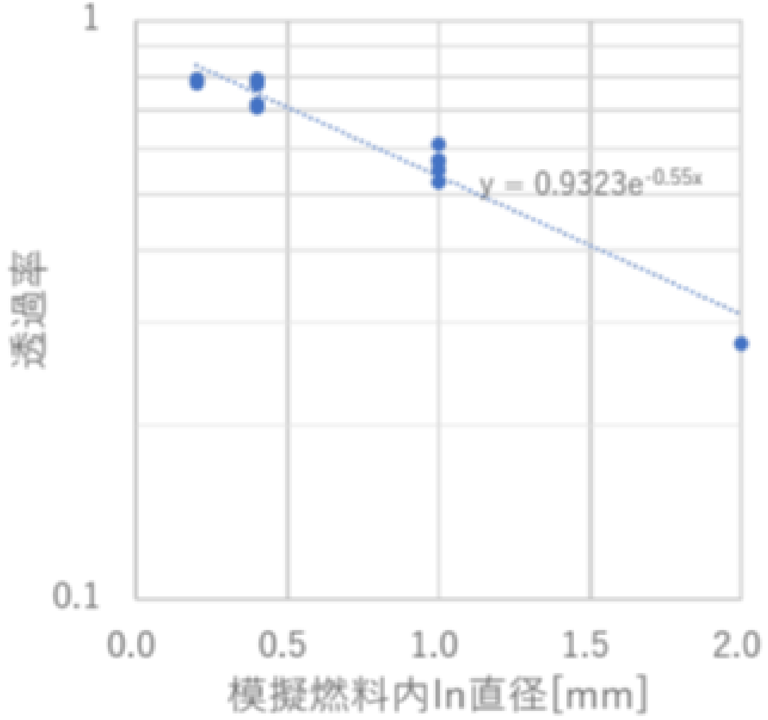


図 3.3.2.⑤-11　模擬燃料内の In の直径と透過率の関係

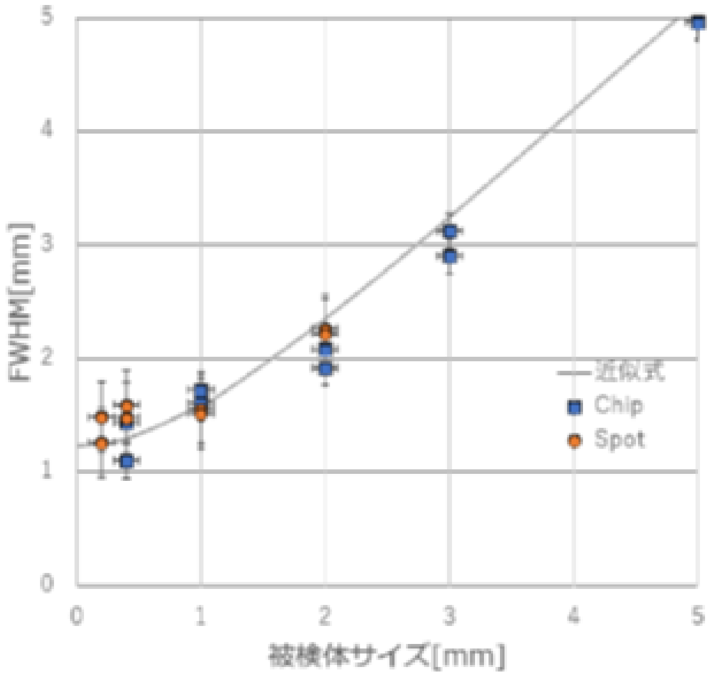


図 3.3.2.⑤-12　In のサイズと FWHM の関係

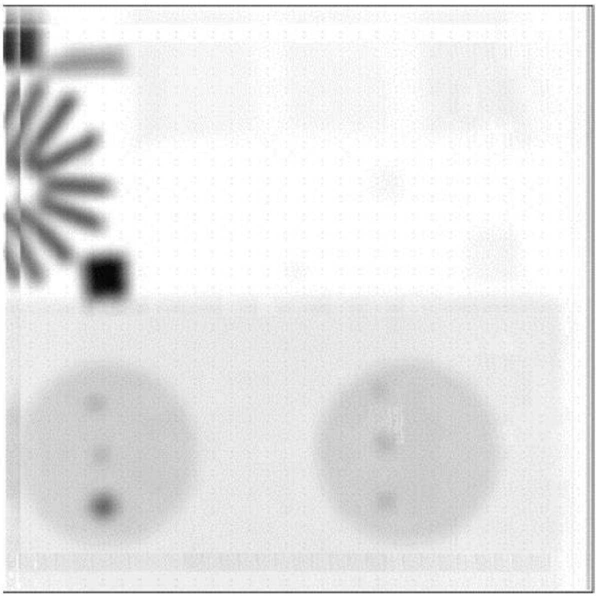


図 3.3.2.⑤-13　熱中性子領域における撮像画像の超解像処理結果 320 × 320[pixel]

3.3.3　制御システムの開発（H28～H29）

(1)　概要

平成 28 年度に検出器設置台、機器制御用ワークステーション及び実験データ収集系から構成される制御システムの整備を実施し、更に、平成 27 年度までに整備した被検体温度昇温装置の温度制御及び高精度位置調整機能付き架台の制御が可能な制御装置と制御プログラムも開発した。平成 29 年度にシステム全体のマッチング及び実験データ収集プログラムの改良を実施し、実証試験に供した。

(2)　制御システムの整備・開発（H28）

平成 28 年度に制御用ワークステーションにデータ収集系機能を持たせた制御システムを整備し、測定系に接続し試運転を実施し、機器の制御及び実験データの収集に問題ないことを確認した。ここで、ワークステーションは次の基準を基にした。

①機器の制御を行い且つ実験データ収集が可能な CPU を搭載していること。
②機器の制御を行い且つ実験データ収集が可能なメモリーを搭載していること。
③短時間に大量の実験データが収集可能な SSD を有していること。
④SSD とは別にデータを収納する HDD を有していること。
⑤GEM 型 2 次元中性子検出器の制御ソフトのインストールが可能なこと。
⑥被検体温度昇温装置の温度制御及び高精度位置調整機能付き架台の制御が可能な制御プログラムがインストール可能なこと。

更に、被検体温度昇温装置の温度制御及び高精度位置調整機能付き架台の制御が可能な制御装置と制御プログラムを開発した。本制御プログラムは図 3.3.3-1、2 に示すように GUI 機能を持たせ、被検体温度昇温装置の温度制御については、被検体温度昇温装置内に設置されたガラスヒータを独立で制御できることを確認した。また、高精度位置調整機能付き架台の制御については、当該架台をμm 単位で制御できることを確認した。

(3)　制御システムのマッチング（H29）

平成 28 年度までに整備した制御システムと各測定系とのマッチングを実施し、本制御システムで高効率・高時間分解能検出器及び GEM 型 2 次元中性子検出器の中性子検出器系、被検体昇温装置、高精度位置調整機能付き架台の制御が問題無く作動することを確認した。更に、本システムの性能向上を目的に、測定された透過中性子束についてリアルタイムで任意関数に基づく解析が可能となるよう GEM 型 2 次元中性子検出器の制御ソフトを改良した。以下に、追加した機能を記す。

①任意の 2 次元領域の TOF データ収集機能（オンライン）
②TOF データ表示上の ROI 設定（オンライン）
③TOF データ表示において Background データの読込み機能と TOF データから Background 除去機能
④測定データの任意関数に基づく解析機能（オンライン）

本改良プログラムについては、北大ライナックを用いた試験において機能確認を実施した。一例として図 3.3.3-3 に本改良プログラムの GUI 画面を示す。

(4) まとめ

総合測定システム制御のための制御システムの整備・開発を実施し、更に性能向上のための改良を行い、総合測定システムとのマッチングを行った。本システムは、本年度に実施した総合試験に供し、当初計画とおりの成果を得た。

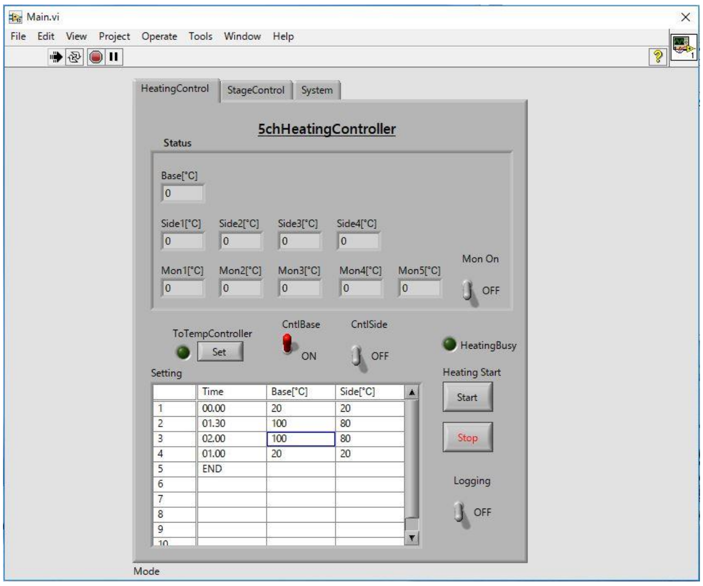


図 3.3.3-1 昇温装置コントロール画面

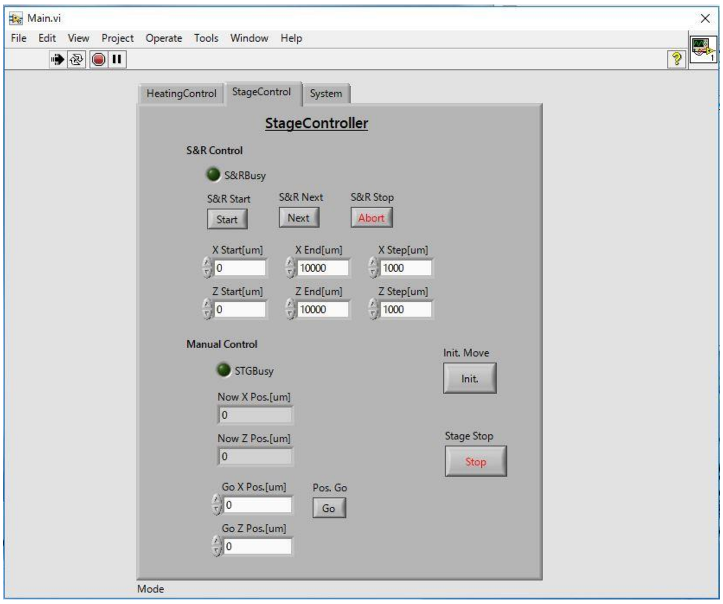


図 3.3.3-2　高精度位置調整機能付き架台のコントロール画面

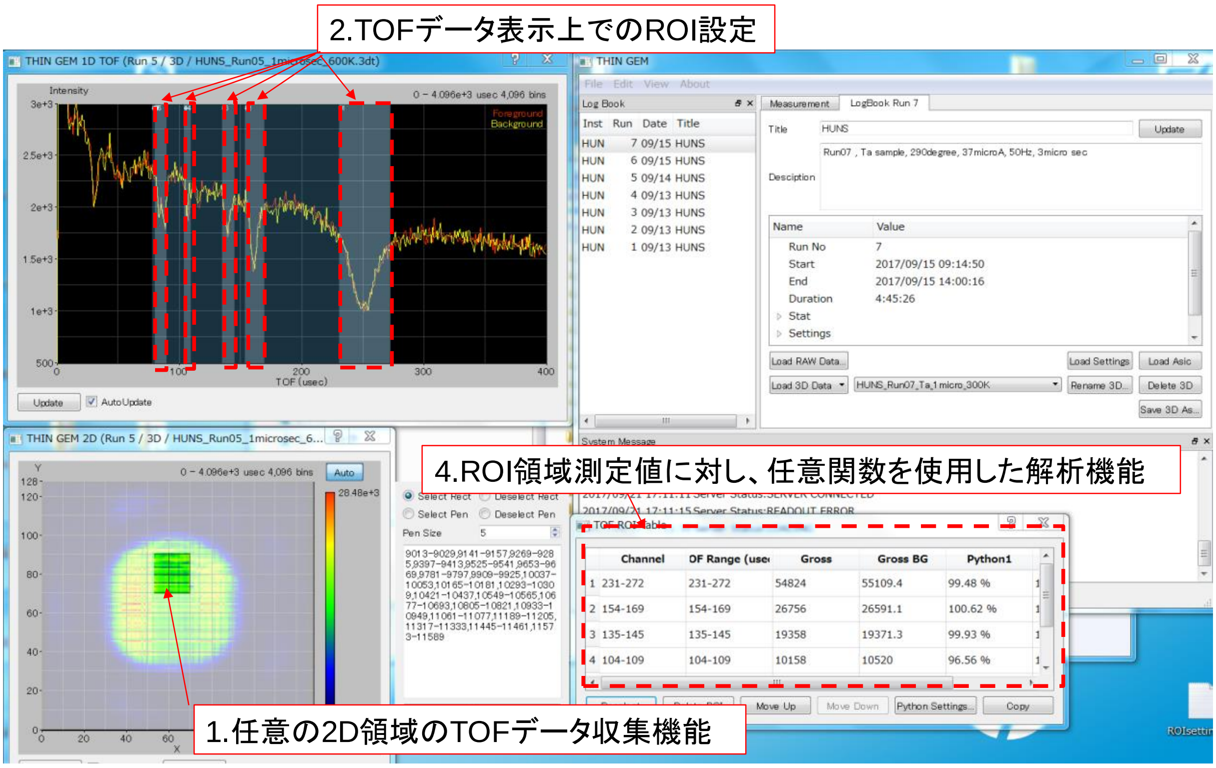


図 3.3.3-3　改良ソフト GUI 画面の一例

3.4 実証試験に基づく測定システムの総合評価（H29）

3.4.1 概要

核燃料物質及び模擬核燃料被検体を用いて、本事業で開発・整備した測定システムの性能評価を行った。本実証試験は京都大学原子炉実験所に設置された京大炉ライナックを用いて京都大学が、他の全ての再委託先機関の協力を得て実施した。実証試験は平成29年度上半期及び下半期に実施し、上半期の試験結果や学会等での議論を下半期の試験にフィードバックし、当初計画とおりの試験を実施した。その結果、本測定システムはTRU核燃料の非破壊検査としてPuの定量、燃料中の核種組成の弁別・空間分布評価、TRU燃料の温度評価に対し有効であることが示された。

3.4.2 実証試験

実証試験は平成29年度に京大炉ライナックを用いて実施した。研究開発項目毎の試験の詳細は3.1章〜3.2章に記したとおりである。ここでは、①核種濃度定量・可視化技術の高度化、②物性値の定量・可視化技術の高度化に分類し試験結果をまとめる。

① 核種濃度定量・可視化技術の高度化

本項目では、中性子源開発、Self-indication法を用いた核燃料中の核種濃度定量及びパルス中性子イメージング技術の高度化を実施した。中性子源開発開発では、京大炉ライナックに新中性子源システムを導入し、従前と比較し熱中性子束が約10倍、熱外中性子束が約6倍に増加した。また、L/Dは北大ライナックのHUNSと同程度となった。

Self-indication法を用いた核燃料中の核種濃度定量では高濃縮ウラン板（^{235}U濃縮度約93 %）と劣化ウラン板を組み合わせることにより、厚さの異なる核燃料被検体を用いてSelf-indication法の実証試験を実施した。その結果、厚さ6.3×10^{-4} n/barnの被検体については測定時間3時間で精度2%での測定に成功し、測定時間等の調整で目標精度の1%を達成できる見込みを得た。更に、Self-indication法を適用すれば被検体中のMA核種やLLFP核種の影響をほとんど受けずに核燃料核種の測定ができることを確認できた。以上の実証試験で得られた知見を踏まえ、本事業の主目的の一つであるMA含有TRU燃料中のPuの定量評価について検討を行った。その結果、Self-indication法を用いることで簡便にPuの定量が可能であることを示した。

パルス中性子イメージング技術の高度化では中性子飛行時間分解能を高めた中性子2次元検出器およびそのエレクトロニクスの開発と性能試験を実施した。また、データ解析において重心処理とサブピクセルシフト法を組み合わせることで、200 μm の被検体の検知に成功した。更に、核種弁別型中性子イメージング法を新たに開発し、厚さ50mm^{t}の鉛遮蔽体中に核燃料物質及びMA核種が設置された場合を模擬し中性子イメージング測定を実施した。その結果、U、^{237}Np、^{243}Amに対してTOF測定による弁別に成功し、更に核種毎の画像化に成功した。

② 物性値の定量・可視化技術の高度化

本項目では、中性子・X線イメージングによる形状測定とドップラ効果を利用した温度

分布測定を実施した。

中性子・X線イメージングによる形状測定では、X線CTで得られた高精細な内部構造モデルに対し、低空間解像度中性子解析情報を3次元マッピングする相乗イメージングを行い、得られた元素分布情報を高分解能に3次元ボリュームモデル化する手法を開発した。本開発により、3次元元素識別イメージングに必要な測定時間を大幅に減少させることが可能となった。

ドップラ効果を利用した温度分布測定では、上述の 3 次元マッピング技術の適用と、X線 CT 断層像を元にした伝熱モデルの適用により被検体断層面上の空間的な温度分布のイメージングが可能であるとの見込みを得た。また、核燃料棒を模擬したバルク状被検体を300K～600K の範囲で昇温し、ドップラ効果を測定した。得られたデータは予め求めた計量曲線と比較することで温度評価が可能であることを示した。また、透過中性子束を測定することで被検体の熱膨張を観測することができ、他分野への応用が可能であることが分かった。

③　本事業で開発・整備した検出器及び新たに開発した手法について

表3.4.2-1に本事業で整備し使用した検出器システム及び新たに開発した手法を示す。開発・整備した検出器システムは高効率・高時間分解能検出器とLiTAシステム（以下、高効率システム）、高空間分解能型検出器（以下、GEM型検出器）、BGO検出器、X線シンチレータ検出器である。また、主な設備はステップ撮像装置、被検体昇温装置、高精度位置調整機能付き被検体ステージ（以下、被検体ステージ）があげられる。この他、新中性子源システム、中性子輸送系、除振ステージは全課題共通の設備であり、掃引型パルスX線発生装置はX線シンチレータの特性試験に使用された。

計画当初、研究開発項目毎に必要な性能を踏まえて、使用する検出器システムを割り振っていた。しかし、研究開発が進むにつれ、予想を上回る性能が得られたことから、検出器システムの適用範囲が拡大した。具体的には、核種弁別型中性子イメージングに使用するために開発した高効率・高時間分解能検出器とLiTAシステムを組合せた検出器システムの空間分解能が予想を上回り200μmとなったことから、この検出器システムを中性子・X線イメージングによる形状測定にも使用することとした。また、形状測定のために導入した高空間分解能型検出器では、核種弁別型中性子イメージングも可能であることが明らかになった。

3.4.3　総合評価

京大ライナックにおいて、平成29年7月に実施した予備試験及び10～11月に実施した実証試験により、本事業で開発した各要素技術が初期の性能を達成していることを実証した。その中でも、下記の4点は特筆すべき結果である。

①核種濃度定量ではMAやLLFP等の中性子吸収核種の影響を受けずにMA含有TRU燃料内におけるPuの定量が可能となった。

②中性子とX線イメージングの複合解析による3次元元素識別イメージングが可能となり且つ従来の中性子のみを使用する手法に比べ、測定時間が大幅に減少した。

③中性子イメージングにおいて、重心処理とサブピクセルシフト法を組み合わせることで、当初目標である400μmを大きく上回る200μmの物体の検知が可能となった。

④核種弁別型中性子イメージングにおいて、熱中性子吸収体に遮蔽された核燃料物質、MA物質に対する個別の中性子イメージングが可能となった。

また、開発・整備した検出器システムは当初の計画以上の性能が得られた。

以上、本測定システムは当初の予定とおりTRU核燃料の非破壊検査に対し有効であることが実証された。

表3.4.2-1　本事業で整備し使用した検出器システム及び新たに開発した手法

核種濃度定量・可視化技術の高度化		
研究開発項目	本事業で開発・整備し、使用した主な検出器・設備	新たに開発された手法及び得られた主な成果
Self-indication法を用いた核燃料中の核種濃度定量	・BGO検出器	・Self-indication法の高度化 ・1%の精度で核種濃度定量が可能
パルス中性子イメージング技術の高度化	・高効率システム ・被検体ステージ	・50mm厚の鉛遮蔽体中の中性子イメージングに成功 ・重心処理＋サブピクセルシフト法 ・空間分解能200μmを達成
	・X線シンチレータ検出器 ・ステップ撮像装置	・中性子飛行時間分解能の高度化
	・GEM型検出器	・核種弁別型中性子イメージング
物性値の定量・可視化技術の高度化		
研究開発項目	本事業で開発・整備し、使用した主な検出器・設備	新たに開発された手法及び得られた主な成果
中性子・X線イメージングによる形状測定	・GEM型検出器 ・X線シンチレータ検出器 ・ステップ撮像装置	・中性子・X線相乗イメージング法 ・3次元元素識別イメージングの大幅な測定時間の減少
	・GEMシステム	・400μmの被検体を検知
ドップラ効果を利用した温度分布測定	・GEM型検出器 ・被検体昇温装置	・中性子・X線相乗イメージング法が適用可 ・被検体の熱膨張を観測

3.5 研究推進（H26～H29）

3.5.1 全体会合及び個別会合

本研究を推進にするにあたり、研究代表者の下で各研究項目における情報共有及び意見交換を密にして研究を進めるとともに、研究推進及びデータ評価を協議するために全体会合を開催した。全体会合は各年度 3～4 回開催した。また、全体会合以外にも適宜個別会合を実施し、問題点の洗い出しや解決方法についての検討を行った。このように異なる分野の研究者が積極的に情報共有することで、本研究を着実に推進した。

3.5.2 核燃料物質に対する非破壊分析技術に関する研究会の開催

京都大学原子炉実験所において平成 27 年度、平成 28 年度、平成 30 年度に「核燃料物質を対象とした非破壊検査技術に関する研究会」を主催し、年度毎に本事業についての進捗状況を報告し、本事業に参加していない研究者や事業者と情報交換を行った。最終年度である平成 29 年度は本事業の実証試験の一部について、同研究会においてデモンストレーションを実施した。また、当研究会では非破壊分析技術に関する専門家だけではなく核セキュリティ関連の研究者及び事業者、核燃料製造会社、原子力機器総合メーカー、電力会社等の担当者が参加し、本事業以外の核燃料物質を対象とした非破壊分析に関する研究発表も行われ国内に例を見ない会合となった。以下に各年度の参加人数と研究発表件数（本事業の発表を含む）を記す。

平成 27 年度　平成 27 年 11 月 11 日～12 日　参加人数 47 名　発表件数 13 件
平成 28 年度　平成 28 年 9 月 29 日～30 日　参加人数 28 名　発表件数 9 件
平成 29 年度　平成 29 年 3 月 1 日～2 日　参加人数 40 名　発表件数 9 件

3.5.3 研究成果の発表

本事業で得た研究成果の発表について表 3.5.3-1、2 に示す。国内学会発表では日本原子力学会での口頭発表を中心に 32 件の発表を行った。国際会議では、本事業における中性子イメージングや小型中性子源開発について IEEE/NSS を中心に 18 件の発表を行った。この内、国内学会発表 3 件、国際会議 2 件は修士課程の学生が本事業による研究成果の一部を発表しており、本事業が人材育成に貢献した。論文発表については、国外雑誌を中心に表 3.5.3.-3 に示すように 10 編の論文を発表した（内 4 件は掲載予定）。また、平成 30 年度に開催される国際会議(IEEE Nuclear Science Symposium 2018)でも本事業の成果を発表する予定である。

表 3.5.3-1　国内学会での発表実績

国内学会発表	件数
日本原子力学会　2015 年秋の大会、2016 年秋の大会、2017 年春の年会 2017 年秋の大会、2018 年春の年会	16
第 4 回京都大学原子炉実験所原子力安全基盤科学研究シンポジウム	1
アイソトープ・放射線研究発表会　第 54 回、第 55 回	3
第 36 回核物質管理学会日本支部年次大会	1
日本中性子科学会 第 15 回年会、第 16 回年会	2
核燃料物質を対象とした非破壊分析技術に関する研究会 (平成 27 年度、平成 28 年度、平成 29 年度)	10
計	32

表 3.5.3-2　国際会議での発表実績

国際学会発表	件数
5th International Meeting of Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources, Padova, Italy, 2016	2
7th International Meeting of Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources,Bariloche, Argentina	1
IEEE Nuclear Science Symposium 2016, Strasbourg, France	3
IEEE Nuclear Science Symposium 2017, Atlanta, U.S.A	2
International Conference on Nuclea Data for Sicence and Technology 2016, Buruge, Belgium	1
8th International Topical Meeting on Neutron Radiography, Beijing, China	3
Workshop on Neutron Resonance Densitometry、Geel, Belgium	1
9th Neutron Wavelength-dependent Imaging workshops, NIST, U.S.A	1
International Conference on Neutron Scattering 2017, Daejeon, Korea	1
International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses (ISRD2018), Tsukuba, Japan	3
計	18

表 3.5.3-3　発表論文一覧

タイトル	著者氏名	雑誌名	発表年	査読の有無
Development of wide area detector for the 2012 model of the	S. Sato	Il Nuovo Cimento C Vol.38, 2015	2015/6	有

6Li time analyzer neutron detector system				
Optimization of Moderator Size of Thermal and Epithermal Neutron Source Based on a Compact Accelerator for Neutron Imaging	Hiroyuki Hasemi,Takashi Kamiyama, Hirotaka Sato, Koichi Kino, Yoshiaki Kiyanagi, Ken Nakajima	Physics Procedia Volume 88, 2017, Pages 369-375	2017/6	有
Pulsed neutron imaging for non-destructive testing using simulated nuclear fuel samples	D. Ito, T. Sano, J. Hori, Y. Takahashi, H. Hasemi, T. Kamiyama, K. Nakajima	Physics Procedia Volume 88, 2017, Pages 89-94	2017/10	有
Spatial resolution enhancement of neutron radiogram by cooperating with X-ray radiography	H. Hasemi, T. Kamiyama, H. Sato, K. Kino, K. Nakajima	Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD), 2016	2017/10	有
Neutron counting type imaging detector with super-resolution technique	Takashi Kamiyama, Setsuo Sato, Hirotaka Sato, Hiroyuki Hasemi, Koichi Kino, Ken Nakajima	Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD), 2016	2017/10	有
Improvement of Spatial Resolution of Time-Resolved MA-	J. Koide, T. Uragaki, N. Hagura, J. Kawarabayashi, K.	Nuclear Science Symposium, Medical Imaging Conference and Room-	2017/10	有

PMT Camera for Imaging of TRU Elements	Mochiki	Temperature Semiconductor Detector Workshop (NSS/MIC/RTSD), 2016		
Development of a neutron source for imaging at the electron linac facility at Kyoto University Research Reactor Institute	Y. Kiyanagi, Y. Takahashi, A. Uritani, K. Watanabe, T. Sano, J. Hori, K. Nakajima	Physica B: Condensed Matter	(to be pablished)	有
Outline of the Development of Nondestructive Methods Adopted For Integrity Test of Next Generation Nuclear Fuels (N-DEMAIN)	Ken Nakajima, Takashi Kamiyama, Koh-ichi Mochiki, Yoshiaki Kiyanagi, Kou Koike, Setsuo Satoh	JPS Conference Proceedings	(to be published)	有
Identification and quantification of nuclear nuclides using a pulsed neutron imaging technique	D. Ito, T. Sano, J. Hori, Y. Takahashi, K. Nakajima	JPS Conference Proceedings	(to be published)	有
Development of high-efficiency neutron imaging detector for non-destructive test of next generation nuclear fuels	Y. Takahashi, J. Hori, T. Sano, D. Ito, C. Konagai, K. Koike, S. Satoh, H. Unesaki, K. Nakajima	JPS Conference Proceedings	(to be published)	有

4. 結言

本研究では、遮蔽容器に納められた直径約 10 mm の MA 含有 TRU 燃料ピンを対象として、パルス中性子・制動 X 線混在場を用いて、核種濃度、（熱特性、形状等の）物性情報を定量、可視化する総合的な非破壊分析システムを開発し、その実用性を評価することを目的とした。この目標を達成するために設定した研究開発項目は、(1)核種濃度定量・可視化技術の高度化、(2)物性値の定量・可視化技術の高度化、(3)総合測定システムの開発、並びに、(4)実証試験に基づく測定システムの総合評価である。これに加えて(5)研究推進として、各機関が連携を取りながら研究を推進した。

その結果、この研究で開発した総合測定システムと手法は TRU 燃料を模擬した核燃料物質及び MA、長寿命核分裂生成物（LLFP）を組み合わせた被検体の非破壊分析に対して有効であることが実証された。本システムが実用化できれば、従来の照射後試験では得られなかった当該燃料内部の核的・物性的な情報である核燃料物質量、核種組成の弁別・空間分布、温度分布が非破壊で得られるようになり、次世代原子力システムの安全性向上に資することができるとの結論を得た。

本研究で実施した核燃料物質及び MA、LLFP を用いた非破壊分析に対する総合試験、特にこれらの被検体に対する中性子イメージングは国内に例が無く、<u>本事業で得られた結果が唯一</u>である。特に<u>核燃料物質に対する核種弁別型中性子イメージングは世界初のデータ</u>である。以下に特筆すべき成果を記す。

①核種濃度定量では MA 含有 TRU 燃料において、MA や LLFP の影響を受けずに核燃料物質の定量が可能となった。
②中性子と X 線イメージングの複合解析による 3 次元元素識別イメージングが可能となり、且つ従来の中性子のみを使用する手法に比べ、測定時間が大幅に減少した。
③中性子イメージングにおいて、重心処理とサブピクセルシフト法を組み合わせることで、当初目標である 400μm を大きく上回る 200μm の物体の検知が可能となった。
④核種弁別型中性子イメージングにおいて、熱中性子吸収体に遮蔽された核燃料物質、MA 物質に対する個別の中性子イメージングが可能となった。

また、この研究では京都大学原子炉実験所において「核燃料物質を対象とした非破壊検査技術に関する研究会」を主催した。この研究会では、非破壊分析技術に関する専門家だけではなく核セキュリティ関連の研究者及び事業者、核燃料製造会社、原子力機器総合メーカー、電力会社等の担当者が参加し、本研究以外の核燃料物質を対象とした非破壊分析に関する研究発表も行われ国内に例を見ない会合となった。

今後の見通しとして、本事業で開発した技術や得られた成果は、福島第一原子力発電所事故で発生した溶融燃料（燃料デブリ）内の核種定量、形状評価にも応用ができるため、福島第一原子力発電所の廃炉措置への貢献や、青森県六カ所村で生産が予定されている J-MOX に対する健全性評価、例えば Pu スポットの検知への適用が期待できる。