

大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器
性能確認試験報告書
(平成 29 年度)

2018 年 3 月

日本原子力研究開発機構
核燃料サイクル工学研究所
プルトニウム燃料技術開発センター

本資料は、日本原子力研究開発機構が実施した受託業務の成果を取りまとめたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部又は一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別な許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1194

茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 33

日本原子力研究開発機構

核燃料サイクル工学研究所

プルトニウム燃料技術開発センター

技術部 技術課

大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験報告書
(平成 29 年度)

要旨

本報告は、原子力規制庁殿と国立研究開発法人日本原子力研究開発機構との間で平成 29 年 4 月に締結した受託業務契約「平成 29 年度軽水炉等改良技術確証試験等委託費（大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験）事業」に基づき実施した保障措置機器に対する性能確認試験の結果をとりまとめたものである。

本業務において性能確認試験の対象とした保障措置システムは、燃料集合体測定機器（AFAS）及びバルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器（AVIS）である。

AFAS の性能確認試験のうち、「MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性確認及び校正作業の効率化策の検討」では、ふげんタイプの燃料集合体を用いた実測定を実施した結果、ロスアラモス国立研究所（LANL）が開発した有効長評価アルゴリズムが妥当であることを確認した。また、モンテカルロシミュレーションコードを用い、上記実測定を再現したことにより、将来、大型混合酸化物燃料加工施設（J-MOX）において、AFAS の校正試験項目を削減できる可能性があることを確認した。

また、「AFAS の機器の健全性確認方法の検討」では、J-MOX の AFAS 設置環境において、AFAS の各検出器中央に ^{252}Cf 中性子線源が配置不可能な場合でも、Fork 検出器においては検出器間中央位置、Collar 検出器においては検出器側面中央位置に線源を配置することで、健全性確認が実施可能であることを確認した。また、Collar 検出器においては、約 0.2MBq 以上の ^{252}Cf 中性子線源を用い、且つシングル値による評価を行うことにより、 ^3He 比例計数管の故障検知が可能であることを確認した。

AVIS の性能確認試験のうち、「中性子計数装置の確認試験」では、複数の MOX サンプルの測定を実施した結果、JSR-15 可搬型マルチプリシティレジスターが AMSR の代替として使用可能であることを確認した。

また、「プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器（HRGS）の測定性能確認試験」では、定期的な MOX サンプルの測定を実施した結果、本試験で使用した HRGS においては、規定の冷却時間の約 1/2 の時間で測定可能となること及び測定誤差は冷却完了から数十分経過後には十分小さくなることを確認した。

目次

1. 試験概要	1
1.1 試験対象機器	1
1.2 試験項目	3
1.3 試験スケジュール	4
1.4 試験実施場所	4
1.5 測定パラメータ	5
1.6 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源	6
1.7 試験に使用した燃料集合体	7
1.8 試験に使用した MOX サンプル	8
2. AFAS 性能確認試験	9
2.1. MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性確認及び校正作業の効率化策の検討	9
2.1.1 目的	9
2.1.2 方法	9
2.1.3 結果	12
2.1.4 考察	19
2.2 AFAS の機器の健全性確認（ノーマリゼーション）方法の検討	21
2.2.1 目的	21
2.2.2 方法	21
2.2.3 結果	25
2.2.4 考察	40
3. AVIS 性能確認試験	41
3.1. 中性子計数装置の確認試験	41
3.1.1 目的	41
3.1.2 方法	41
3.1.3 結果	44
3.1.4 考察	50
3.2. プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器の測定性能確認試験	51
3.2.1 目的	51
3.2.2 方法	51
3.2.3 結果	54
3.2.4 考察	60
4. 結論	61
【参考文献】	63

図目次

図 1.7-1	封入棒集合体の側面図及び断面図	7
図 2.1.2-1	燃料集合体測定位置	10
図 2.1.2-2	AFAS の各検出器、AMSR 及び PC 間の配線図	10
図 2.1.3-1	シングル値測定結果 (Collar 検出器)	12
図 2.1.3-2	シングル値測定結果 (Top Fork 検出器)	12
図 2.1.3-3	シングル値測定結果 (Bottom Fork 検出器)	13
図 2.1.3-4	ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関	13
図 2.1.3-5	AFAS-P シミュレーションモデル	14
図 2.1.3-6	AFAS-P シミュレーションモデル (燃料集合体追加)	15
図 2.1.3-7	ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関	15
図 2.1.3-8	AFAS-P シミュレーションモデル (試験環境追加)	16
図 2.1.3-9	ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関	17
図 2.1.3-10	「シミュレーションにより得られた相関」から算出した有効長と実際の有効長との差	18
図 2.1.4-1	「シミュレーションにより評価された相関」から算出した有効長と実際の有効長との差	20
図 2.2.2-1	線源配置位置による計数率の違い	21
図 2.2.2-2	J-MOX における AFAS の設置環境	22
図 2.2.2-3	Fork 検出器における線源の配置位置	23
図 2.2.2-4	Collar 検出器における線源の配置位置	23
図 2.2.2-5	線源強度と計数誤差の相関	24
図 2.2.3-1	Fork 検出器のシミュレーションモデル	25
図 2.2.3-2	Fork 検出器のシミュレーションモデル	26
図 2.2.3-3	検出効率評価結果 (AFAS-B Fork 検出器)	26
図 2.2.3-4	検出効率評価結果 (AFAS-P Fork 検出器)	26
図 2.2.3-5	²⁵² Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-B Top Fork 検出器)	28
図 2.2.3-6	²⁵² Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-B Bottom Fork 検出器)	28
図 2.2.3-7	²⁵² Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-P Top Fork 検出器)	28
図 2.2.3-8	²⁵² Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-P Bottom Fork 検出器)	29
図 2.2.3-9	AFAS-P Collar 検出器及び保護管のシミュレーションモデル	30
図 2.2.3-10	Collar 検出器のシミュレーションモデル	31
図 2.2.3-11	検出効率 (垂直方向) 評価結果 (AFAS-B Collar 検出器)	31
図 2.2.3-12	検出効率 (水平方向) 評価結果 (AFAS-B Collar 検出器)	32
図 2.2.3-13	検出効率 (垂直方向) 評価結果 (AFAS-P Collar 検出器)	32
図 2.2.3-14	検出効率 (水平方向) 評価結果 (AFAS-P Collar 検出器)	32

図 2.2.3-15	^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-B Collar 検出器)	34
図 2.2.3-16	^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-P Collar 検出器)	34
図 2.2.3-17	線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-B Collar 検出器)	35
図 2.2.3-18	線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-P Collar 検出器)	35
図 2.2.3-19	AFAS-B Collar 検出器の ^3He 比例計数管配置	36
図 2.2.3-20	AFAS-P Collar 検出器の ^3He 比例計数管配置	37
図 2.2.3-21	線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-B Collar 検出器)	38
図 2.2.3-22	線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-P Collar 検出器)	38
図 2.2.3-23	線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-B Collar 検出器)	39
図 2.2.3-24	線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-P Collar 検出器)	39
図 3.1.2-1	信号分岐装置とパルス発生装置及び計数装置の接続	42
図 3.1.2-2	AVIS と各計数装置の接続	43
図 3.1.3-1	計数値 (TOTAL) の比較	44
図 3.1.3-2	計数値 (R+A) の比較	44
図 3.1.3-3	計数値 (A) の比較	45
図 3.1.3-4	シングル値の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-5	ダブル値の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-6	トリプル値の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-7	Pu 量 (Multiplicity 法) の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-8	Pu 量 (Knowna 法) の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-9	Pu 量 (Multiplicity 法) の %RSD の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-10	Pu 量 (Knowna 法) の %RSD の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)	46
図 3.1.3-11	シングル値の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-12	ダブル値の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-13	トリプル値の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-14	Pu 量 (Multiplicity 法) の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-15	Pu 量 (Knowna 法) の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-16	Pu 量 (Multiplicity 法) の %RSD の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-17	Pu 量 (Knowna 法) の %RSD の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)	47
図 3.1.3-18	シングル値の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-19	ダブル値の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-20	トリプル値の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-21	Pu 量 (Multiplicity 法) の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-22	Pu 量 (Knowna 法) の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-23	Pu 量 (Multiplicity 法) の %RSD の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-24	Pu 量 (Knowna 法) の %RSD の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)	48
図 3.1.3-25	シングル値の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49

図 3.1.3-26	ダブル値の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49
図 3.1.3-27	トリプル値の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49
図 3.1.3-28	Pu 量 (Multiplicity 法) の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49
図 3.1.3-29	Pu 量 (Knowna 法) の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49
図 3.1.3-30	Pu 量 (Multiplicity 法) の %RSD の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49
図 3.1.3-31	Pu 量 (Knowna 法) の %RSD の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)	49
図 3.2.2-1	HRGS と MCA の接続図	51
図 3.2.2-2	冷却時間と測定精度の相関 (イメージ)	51
図 3.2.2-3	HRGS へのサンプル配置 (平面図)	53
図 3.2.3-1	^{240}Pu 実効質量(%)	55
図 3.2.3-2	%RSD (^{240}Pu 実効質量(%))	55
図 3.2.3-3	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	55
図 3.2.3-4	%RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	55
図 3.2.3-5	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	55
図 3.2.3-6	%RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	55
図 3.2.3-7	^{240}Pu 実効質量(%)	56
図 3.2.3-8	%RSD (^{240}Pu 実効質量(%))	56
図 3.2.3-9	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	56
図 3.2.3-10	%RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	56
図 3.2.3-11	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	56
図 3.2.3-12	%RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	56
図 3.2.3-13	^{240}Pu 実効質量(%)	57
図 3.2.3-14	%RSD (^{240}Pu 実効質量(%))	57
図 3.2.3-15	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	57
図 3.2.3-16	%RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	57
図 3.2.3-17	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	57
図 3.2.3-18	%RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	57
図 3.2.3-19	^{240}Pu 実効質量(%)	58
図 3.2.3-20	%RSD (^{240}Pu 実効質量(%))	58
図 3.2.3-21	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	58
図 3.2.3-22	%RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	58
図 3.2.3-23	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	58
図 3.2.3-24	%RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	58
図 3.2.3-25	^{240}Pu 実効質量(%)	59
図 3.2.3-26	%RSD (^{240}Pu 実効質量(%))	59
図 3.2.3-27	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	59
図 3.2.3-28	%RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	59

図 3.2.3-30	%RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)	59
図 3.2.3-29	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比	59
図 3.2.4-1	冷却完了直後の γ 線スペクトル及び FWHM (2018 年 2 月測定)	60
図 3.2.4-2	冷却完了から約 3 時間後の γ 線スペクトル及び FWHM (2018 年 2 月測定)	60

表目次

表 1.2-1	AFAS 性能確認試験項目	3
表 1.2-2	AVIS 性能確認試験項目	3
表 1.3	性能確認試験スケジュール	4
表 1.5-1	AFAS-B 用中性子検出器の測定パラメータ	5
表 1.5-2	AFAS-P 用中性子検出器の測定パラメータ	5
表 1.5-3	中性子検出器パラメータ	6
表 1.6	試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源	6
表 1.7-1	封入棒集合体の仕様	7
表 1.7-2	封入棒集合体の同位体組成比 (集合体平均)	7
表 1.8-1	MOX サンプルの性状	8
表 1.8-2	MOX サンプルの同位体組成比	8
表 2.1.3-1	中性子検出効率の比較 (Collar 検出器)	14
表 2.1.3-2	中性子検出効率の比較 (Fork 検出器)	14
表 2.2.3-1	Fork 検出器 検出効率評価結果	25
表 2.2.3-2	Collar 検出器 検出効率評価結果	30
表 2.2.3-3	AFAS-B Collar 検出器における検出器が健全な場合	36
表 2.2.3-4	AFAS-P Collar 検出器における検出器が健全な場合	37

写真目次

写真 1.1-1	AFAS の外観写真	1
写真 1.1-2	AVIS の外観写真	2
写真 1.8-1	試験に使用したバイアル及び 2 重ビニールバッグによる梱包状態	8
写真 2.1.3-1	実際の燃料集合体測定の様子	16
写真 2.2.3-1	線源固定治具 (AFAS-B Fork 検出器)	27
写真 2.2.3-2	線源固定治具 (AFAS-P Fork 検出器)	27
写真 2.2.3-3	線源固定治具 (AFAS-B Collar 検出器)	33
写真 2.2.3-4	線源固定治具 (AFAS-P Collar 検出器)	33
写真 3.1.2-1	試験に使用した JSR-15	41
写真 3.1.2-2	試験に使用した信号分岐装置 (LANL 製)	41
写真 3.1.2-3	J-MOX における AVIS 設置予定のグローブボックス底部を模擬した治具	43
写真 3.1.2-4	サンプルホルダー (拡大: サンプル収納部)	43
写真 3.2.2-1	JAEA 所掌の HRGS (検出器)	52
写真 3.2.2-2	JAEA 所掌の HRGS (MCA 及び PC)	52
写真 3.2.2-3	MOX サンプル及びサンプル固定治具	53

1. 試験概要

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構（以下、「JAEA」という）は、原子力規制庁殿（以下、「NRA」という）と平成 29 年 4 月に締結した受託業務契約「平成 29 年度軽水炉等改良技術確証試験等委託費（大型混合酸化物燃料加工施設保障措置機器性能確認試験）事業」に基づき、大型混合酸化物燃料加工施設（以下、「J-MOX」という）に設置される保障措置機器である燃料集合体測定機器（以下、「AFAS」という）及びバルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器（以下、「AVIS」という）の性能確認試験を実施した。

1.1 試験対象機器

(1) AFAS

AFAS は、軽水炉用 MOX 燃料集合体用の非破壊測定装置であり、PWR 用の AFAS-P 及び BWR 用の AFAS-B の 2 式から構成される。1 式の AFAS は、単位長さあたりの Pu 量測定用の中性子検出器 1 台（Collar 検出器）と燃料集合体の有効長（充填されている MOX ペレットのスタック長）測定用の中性子検出器 2 台（Top Fork 検出器及び Bottom Fork 検出器）により構成される。装置の外観写真を写真 1.1-1 に示す。

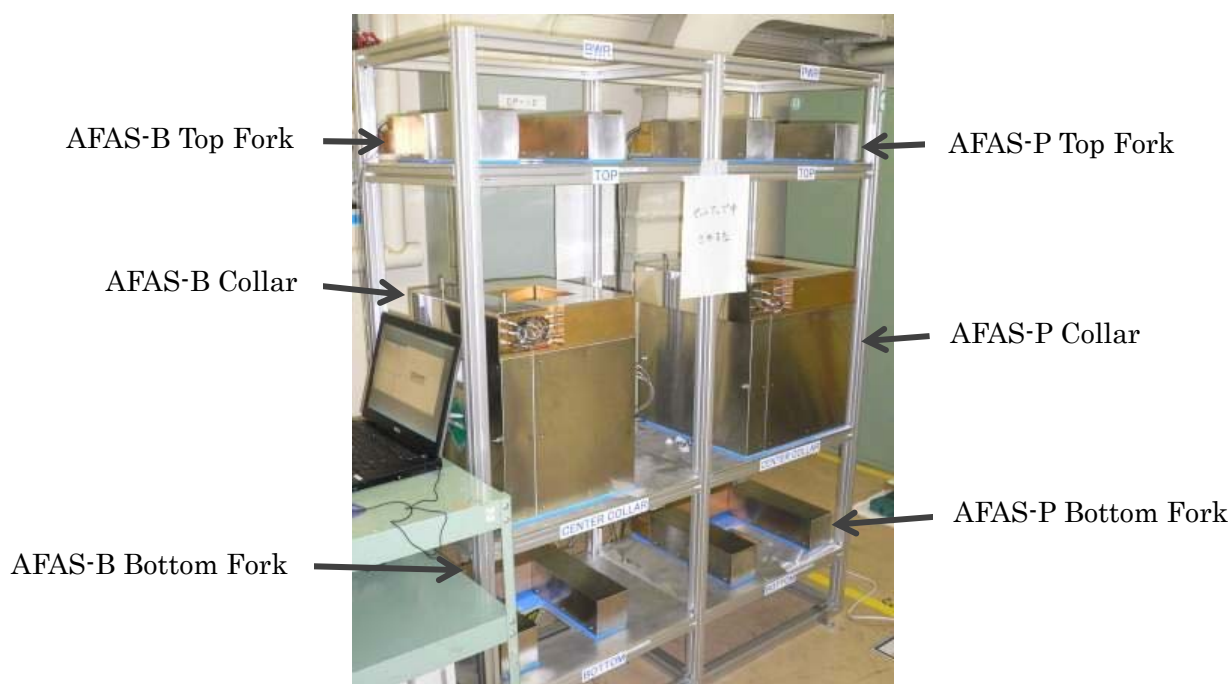


写真 1.1-1 AFAS の外観写真

(2) AVIS

AVIS は、工程内から収去した粉末及びペレット用の非破壊測定装置であり、Pu 量測定用の中性子検出器及び Pu 同位体組成比測定用の高純度ゲルマニウム (HPGe) 半導体検出器 (ガンマ線検出器) により構成される。装置の外観写真を写真 1.1-2 に示す。



写真 1.1-2 AVIS の外観写真

1.2 試験項目

(1) AFAS 性能確認試験

AFAS の性能確認試験項目を表 1.2-1 に示す。各試験の詳細については 2.項に示す。本試験では、ロスアラモス国立研究所（以下、「LANL」という）が開発した MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性を確認するため、JAEA が所有するふげんタイプの燃料集合体を用いた実測定を行い、LANL がシミュレーションにより評価したアルゴリズムとの比較を実施した。また、将来 J-MOX へ AFAS を設置した後に必要となる校正作業の効率化策を検討するため、上記の燃料集合体の実測定をシミュレーションにより再現し、シミュレーションによる有効長評価アルゴリズムに与える測定パラメータの評価精度の確認を実施した。

さらに、J-MOX における実際の AFAS 設置環境を踏まえた AFAS の健全性確認方法について検討するため、最適な ^{252}Cf 線源配置位置の評価及び ^3He 比例計数管故障検知の実現性の評価を実施した。

表 1.2-1 AFAS 性能確認試験項目

機器名	試験項目	参照項
AFAS	MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性確認及び校正作業の効率化策の検討	2.1
	AFAS の機器の健全性確認方法の検討	2.2

(2) AVIS 性能確認試験

AVIS の性能確認試験項目を表 1.2-2 に示す。各試験の詳細な内容については 3.に示す。

本試験では、メーカーの供給停止により入手困難となった AVIS 用中性子計数装置 AMSR-150（以下、「AMSR」という）以外の中性子計数装置の使用の可能性について検討するため、JSR-15 可搬型マルチプリシティレジスター（以下、「JSR-15」という）を用いた MOX サンプルの測定を実施し、AMSR による測定結果との比較を実施した。

また、プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器（以下、「HRGS」という）の使用に必要な冷却時間を確認するため、液体窒素充填から測定が可能となるまでの時間の確認及び冷却時間と測定精度の相関の評価を実施した。

表 1.2-2 AVIS 性能確認試験項目

機器名	試験項目	参照項
AVIS	中性子計数装置の確認試験	3.1
	プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器の測定性能確認試験	3.2

1.3 試験スケジュール

AFAS 及び AVIS の性能確認試験スケジュールを表 1.3 に示す。

表 1.3 性能確認試験スケジュール

内容	平成 29 年度											
	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
性能確認試験												
報告書作成												
試験に係る会合等	<p>▲ 試験計画打合せ (NRA)</p> <p>▲ JTC(*1)会合 (JNFL(*2))</p> <p>▲ JTC 会合 (JNFL)</p> <p>▲ 受託試験機器に係る会議 (米国 LANL)</p>											

表中の()は開催場所を示す。

*1 : JTC (共同技術会合 (Joint Technical Committee))

*2 : JNFL (日本原燃株式会社 (Japan Nuclear Fuel Limited))

1.4 試験実施場所

(1) AFAS 性能確認試験

- ・プルトニウム燃料第二開発室 試験検査室 (C) (C-137)
- ・プルトニウム燃料第二開発室 集合体貯蔵室 (C-130)

(2) AVIS 性能確認試験

- ・プルトニウム燃料第一開発室 燃料要素組立室 (R-120)
- ・プルトニウム燃料第二開発室 試験検査室 (E) (C-139)

1.5 測定パラメータ

(1) AFAS 用測定パラメータ

本試験に用いた AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器の測定パラメータを表 1.5-1 及び表 1.5-2 に示す。

表 1.5-1 AFAS-B 用中性子検出器の測定パラメータ

項目	Collar	Top Fork	Bottom Fork
シフトレジスタの種類	AMSR	AMSR	AMSR
プレディレイ (μs)	1.5	1.5	1.5
ゲート幅 (μs)	64.0	64.0	64.0
印加電圧 (V)	1720	1720	1720
ダイアウエイタイム (μs)	50.0	50.0	50.0
中性子検出効率(²⁵² Cf)	0.197	0.008	0.006
Multiplicity デッドタイム補正係数	160.0000×10 ⁻⁹	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 a	0.6419×10 ⁻⁶	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 b	0.1030×10 ⁻¹²	0.0000	0.0000

表 1.5-2 AFAS-P 用中性子検出器の測定パラメータ

項目	Collar	Top Fork	Bottom Fork
シフトレジスタの種類	AMSR	AMSR	AMSR
プレディレイ (μs)	1.5	1.5	1.5
ゲート幅 (μs)	64.0	64.0	64.0
印加電圧 (V)	1720	1720	1720
ダイアウエイタイム (μs)	50.0	50.0	50.0
中性子検出効率(²⁵² Cf)	0.162	0.0126	0.0127
Multiplicity デッドタイム補正係数	86.5×10 ⁻⁹	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 a	0.3458×10 ⁻⁶	0.0000	0.0000
デッドタイム補正係数 b	0.02989×10 ⁻¹²	0.0000	0.0000

(2) AVIS 用測定パラメータ

本試験に用いた AVIS の中性子検出器の測定パラメータを表 1.5-3 に示す。なお、3.1 における JSR-15 を用いた測定においても、本パラメータを使用した。

表 1.5-3 中性子検出器パラメータ

項目	パラメータ
シフトレジスタの種類	AMSR
プリディレイ(μs)	1.5
ゲート幅(μs)	64.0
印加電圧(V)	1,740
ダイアウエイタイム(μs)	30.0
中性子検出効率	0.675
Multiplicity デッドタイム補正係数	72.60×10^{-9}
デッドタイム補正係数 a	0.2904×10^{-6}
デッドタイム補正係数 b	0.0211×10^{-12}
ダブルゲートフラクション	0.7930
トリプルゲートフラクション	0.6225
スロープ <i>b</i>	3.240449×10^2
Alpha weight	1.000
ρ_0	4.707231×10^{-1}
K	2.166

1.6 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源

本試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源の線源番号及び中性子放出率を表 1.6 に示す。表中の中性子放出率は、各線源の線源証明書に記載されている値を、評価日に合わせて崩壊計算することにより求めた値である。

表 1.6 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源

線源番号	中性子放出率(n/s)	評価日
WW-906	8.3×10^3	2014/4/1
H4-694	1.7×10^5	
K7-436	3.3×10^5	
I7-106	3.97×10^5	2012/1/15

1.7 試験に使用した燃料集合体

AFAS の性能確認試験に使用した燃料集合体（封入棒集合体）の側面図及び断面図を図 1.7-1 に示す。また、集合体の仕様及び同位体組成比を表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す。本集合体は、プルトニウム燃料第二開発室に残存していた新型転換炉ふげん用製品ペレットを充填した封入棒 28 本から構成されたものであり、平成 24、25 及び 26 年度に公益財団法人核物質管理センター殿からの受託試験として実施した、AFAS の性能確認試験においても使用された。

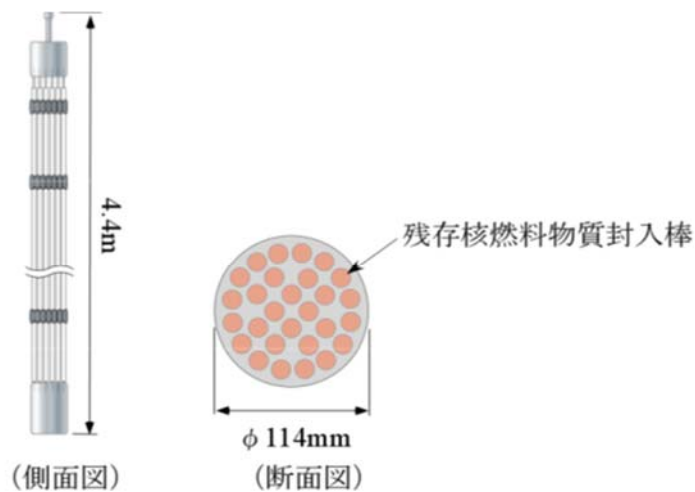


図 1.7-1 封入棒集合体の側面図及び断面図

表 1.7-1 封入棒集合体の仕様

集合体 No.	Pu 量 (g)	Pu 含有率 (*3) (%)	有効長 (*4) (m)	内容
P1	3533.991	2.1	3.7	残存核燃料物質（製品ペレット）

*3 : Pu 含有率(%)=Pu 重量/MOX 重量×100

*4 : 燃料集合体を構成する各燃料棒に充填されているペレットのスタック長の平均

表 1.7-2 封入棒集合体の同位体組成比（集合体平均）

集合体 No.	同位体組成比						崩壊計算日
	²³⁸ Pu (%)	²³⁹ Pu (%)	²⁴⁰ Pu (%)	²⁴¹ Pu (%)	²⁴² Pu (%)	²⁴¹ Am (*5) (%)	
P1	1.3233	61.493	27.841	3.8401	5.5022	6.3855	2013/1/30

*5 : ²⁴¹Am 量/Pu 量

1.8 試験に使用した MOX サンプル

AVIS の性能確認試験に使用した MOX サンプルの性状及び同位体組成比を表 1.8-1 及び表 1.8-2 に示す。サンプル容器には、IAEA が査察において使用しているポリスチレンバイアル（SPEX 社製 12ml Polystyrene Grinding Vial with Slip-On Cap）を用いた。また、本試験では、サンプルをグローブボックス外で取り扱うため、2重のビニールバッグでバイアルを梱包した。（写真 1.8-1）

表 1.8-1 MOX サンプルの性状

サンプル ID	性状	Pu 量 (g)
A	粉末	1
B		9
C	ペレット	1
D		3

表 1.8-2 MOX サンプルの同位体組成比

サンプル ID	^{238}Pu (%)	^{239}Pu (%)	^{240}Pu (%)	^{241}Pu (%)	^{242}Pu (%)	^{241}Am (*6) (%)	崩壊計算日
A	1.168	63.261	26.643	4.184	4.744	3.100	2012/6/21
B							
C	1.067	64.761	25.194	4.709	4.269	5.201	2007/9/7
D							

*6 : ^{241}Am 量/Pu 量

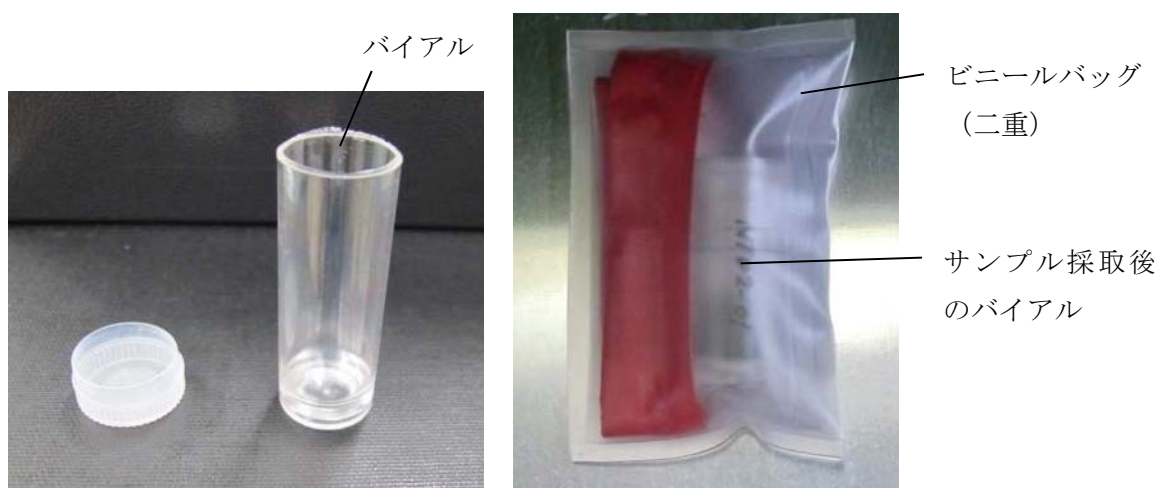


写真 1.8-1 試験に使用したバイアル及び2重ビニールバッグによる梱包状態

2. AFAS 性能確認試験

2.1. MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性確認及び校正作業の効率化策の検討

2.1.1 目的

(1) 有効長評価アルゴリズムの妥当性確認

LANL が開発した MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズム（別添参照）の妥当性を確認する。

(2) 校正作業の効率化策の検討

J-MOX へ機器設置後に必要な校正作業の効率化策について検討する。

2.1.2 方法

(1) 有効長評価アルゴリズムの妥当性確認

1.7 項に示す燃料集合体を AFAS にて測定し、 $\text{ratio} [(\text{Top Fork} + \text{Bottom Fork}) / \text{Collar}]$ と燃料集合体有効長の相関を求め、LANL が示すアルゴリズムの計算結果と比較する。

本試験は AFAS-P の検出器を用いて実施する。JAEA の試験環境では、天井高の制約により、J-MOX における実環境のように Top Fork 検出器と Bottom Fork 検出器を同時に設置することはできないため、「Top Fork + Collar」及び「Bottom Fork + Collar」の組み合わせにより、それぞれ測定を実施する。

使用する燃料集合体の Pu 量、有効長及び同位体組成比を 1.7 項の表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す。

詳細な試験手順を以下に示す。

- ① 図 2.1.2-1 及び図 2.1.2-2 に示すように、Top Fork 検出器及び Collar 検出器を架台に設置し、各装置を接続する。
- ② クレーンを用いて燃料集合体を吊り上げる。
- ③ 燃料集合体の有効長の上端を Top-Fork 検出器の中心から下方向に 20cm の位置に配置し、5 分間の測定を行う。
- ④ クレーンを用いて燃料集合体を 2cm 上昇させ、5 分間の測定を行う。
- ⑤ 燃料集合体の有効長の上端が Top-Fork 検出器の中心から上方向に 20cm の位置となるまで④を繰り返す。（測定位置の合計：21 箇所）
- ⑥ Top Fork 検出器と Bottom Fork 検出器を入れ替え、②～⑤を行う。本測定は、クレーンによる燃料集合体の配置精度（約±1mm）が測定値へ与える影響を考慮し、各 3 回繰り返し行う。
- ⑦ Fork 検出器及び Collar 検出器で取得した各シングル値を用いて、 $\text{ratio} [(\text{Top Fork} + \text{Bottom Fork}) / \text{Collar}]$ と有効長の相関を求めるとともに、LANL が示すアルゴリズムの計算結果と比較する。

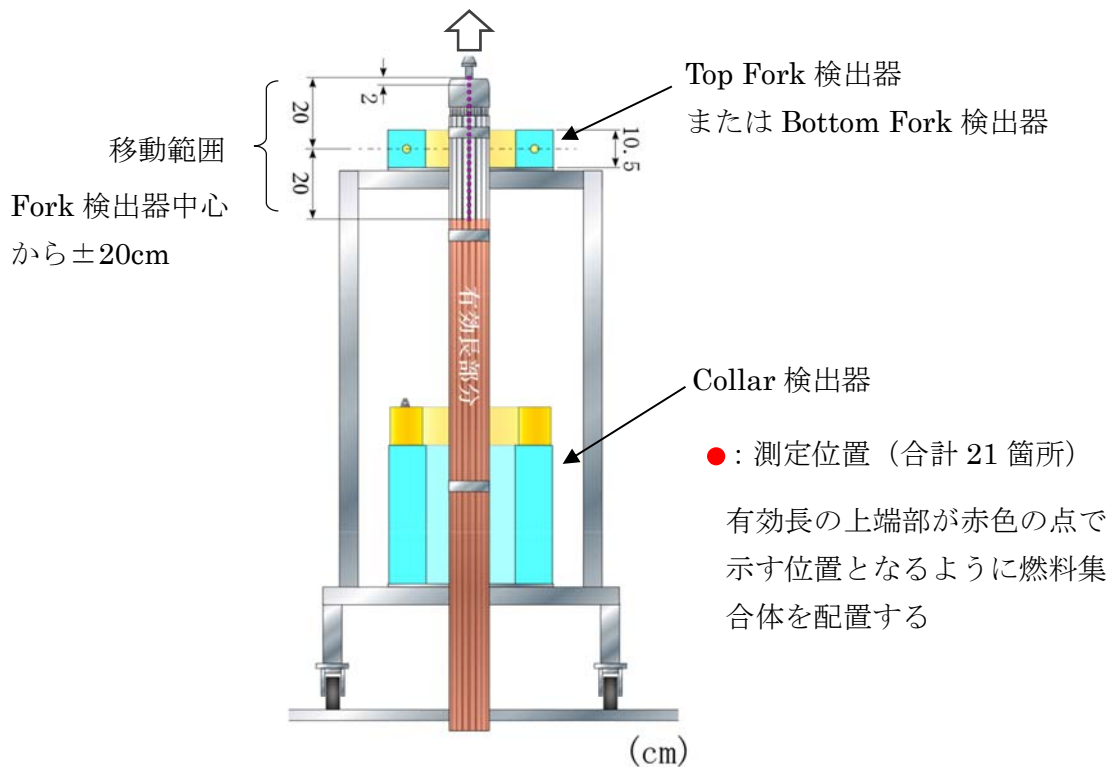


図 2.1.2-1 燃料集合体測定位置

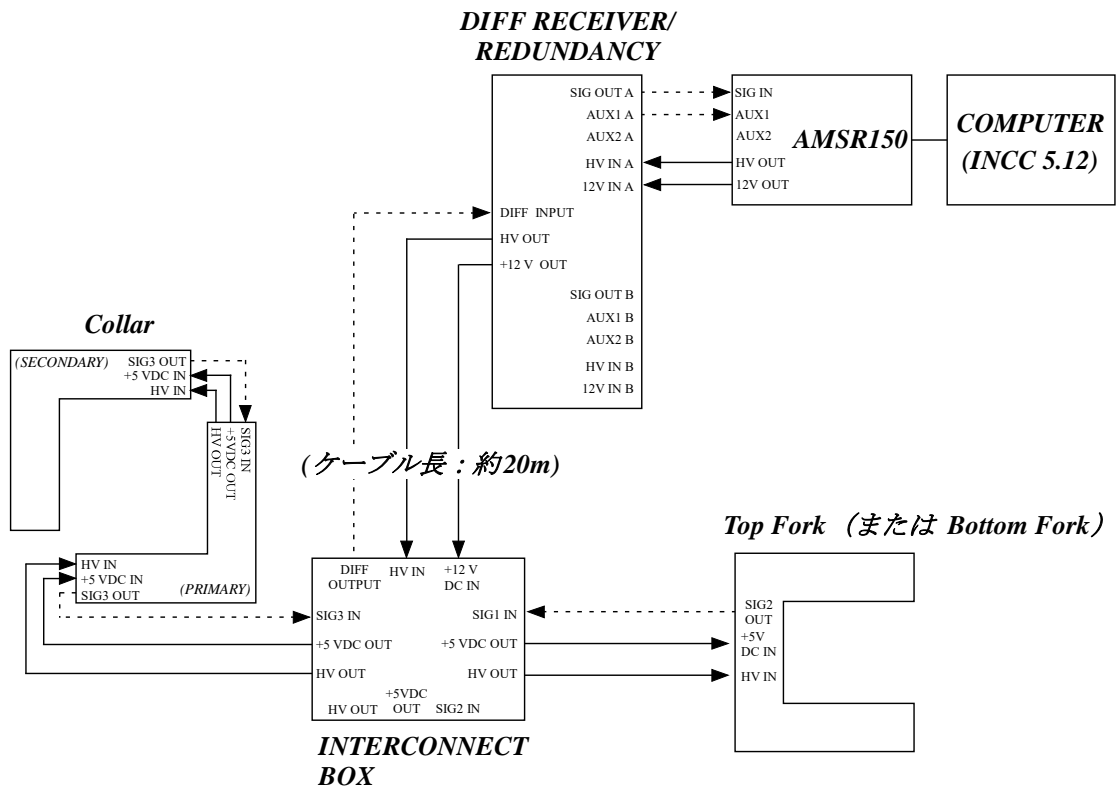


図 2.1.2-2 AFAS の各検出器、AMSR 及び PC 間の配線

(2) 校正作業の効率化策の検討

有効長評価アルゴリズムに与える測定パラメータに関し、事前にシミュレーションを用いた評価が可能であれば、将来 J-MOX において行う校正試験項目を削減できる可能性がある。

このことから、本検討では、(1)で実施した実測定の体系をモンテカルロシミュレーションコード (MCNPX) を用いて再現し、実測定及びシミュレーションによって得られたそれぞれの ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関を比較することにより、シミュレーションによる有効長評価アルゴリズムに与える測定パラメータの評価精度を確認する。

詳細な手順を以下に示す。

- ① Fork 検出器、Collar 検出器及び試験用架台のシミュレーションモデルを作成する。
作成したシミュレーションモデルの妥当性を確認するため以下を行う。
 - ^{252}Cf の組成を与えた線源を各検出器中心に追加したモデルを作成しシミュレーションを行い、各検出器の中性子検出効率 (ϵ) を求める。
 - 実際に 1.6 項の表 1.6 に示す ^{252}Cf 中性子線源 (H4-694) を各検出器に配置し測定を行い、各検出器の中性子検出効率 (ϵ) を求める。
 - 実測定及びシミュレーションにより得られた中性子検出効率を比較し、シミュレーションモデルの妥当性を確認する。
- ② 1.7 項の表 1.7-1 及び表 1.7-2 に示す燃料集合体 (P1) のシミュレーションモデルを作成する。本モデルは、燃料集合体の構成部材のうち、燃料要素 (MOX ペレット、アルミナ断熱ペレット、二酸化ウランペレット及び被覆管) 及び上部タイプレートモデル化したものとし、細部の部材 (プレナムスプリング、スペーサ等) は省略する。
- ③ (1)と同様の測定をシミュレーションで再現し、各検出器で取得したシングル値を用いて、ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関を求める。
- ④ 実測定及びシミュレーションにより得られた ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関を比較するとともに、シミュレーションによる有効長評価アルゴリズムに与える測定パラメータの評価精度を確認する。

2.1.3 結果

(1) 有効長評価アルゴリズムの妥当性確認

Top Fork検出器、Bottom Fork検出器及びCollar検出器にて燃料集合体を3回繰り返し測定し、シングル値を取得した。測定結果を図2.1.3-1～図2.1.3-3に示す。各シングル値は、各検出器共に誤差 (2σ) の範囲で一致した。

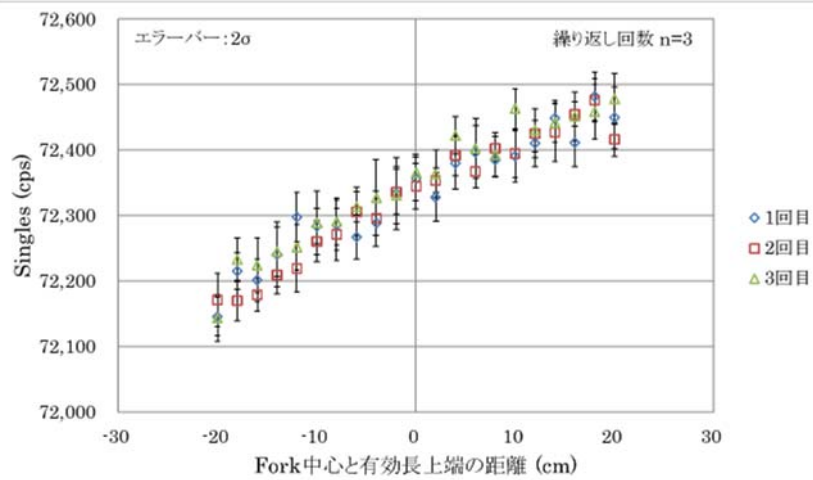


図 2.1.3-1 シングル値測定結果 (Collar 検出器)

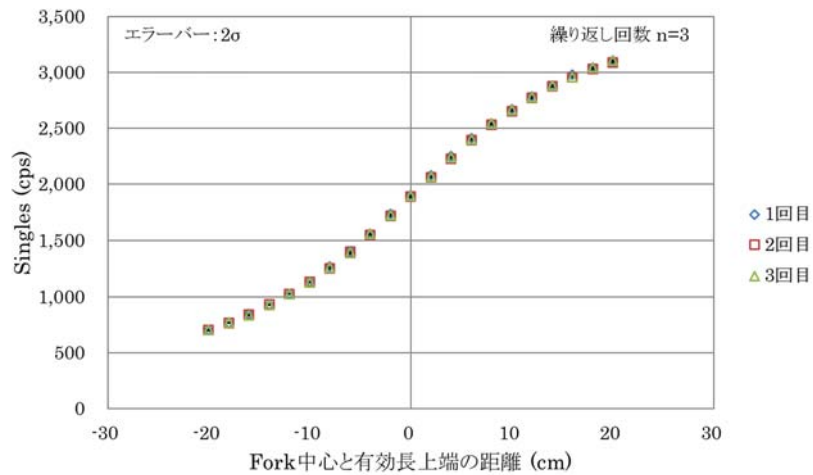


図 2.1.3-2 シングル値測定結果 (Top Fork 検出器)

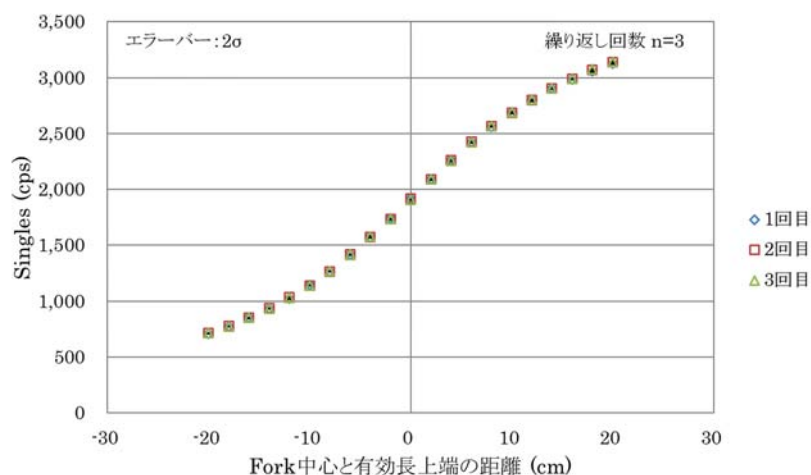


図 2.1.3-3 シングル値測定結果 (Bottom Fork 検出器)

次に、LANLの有効長評価アルゴリズムの妥当性を確認するため、これらのシングル値（各Fork及びCollar検出器共に1回目の測定値）を用いて、ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関を求めた。結果を図2.1.3-4に示す。

本相関は、LANL報告書^(参考文献1) に示されている通り、3次関数の曲線（式（2.1））となった。

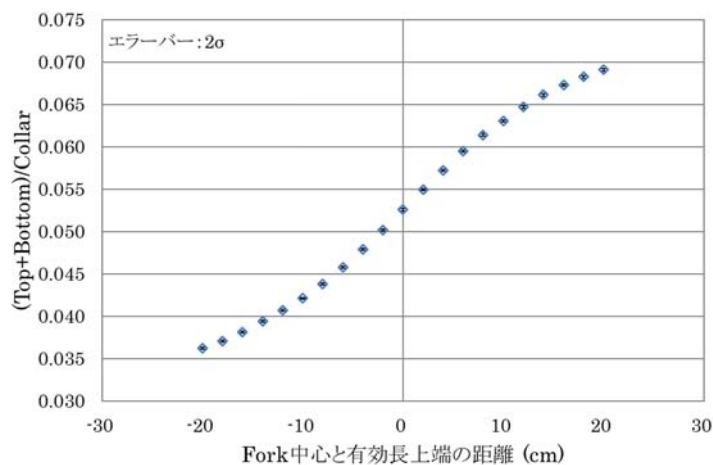


図 2.1.3-4 ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関

$$y = -7.89 \times 10^{-7}x^3 + 3.06 \times 10^{-7}x^2 + 1.12 \times 10^{-3}x + 5.26 \times 10^{-2} \quad \dots \quad (2.1)$$

(2) 校正作業の効率化策の検討

① シミュレーションモデルの妥当性確認

(1) で実施した実測定をシミュレーションで模擬するため、AFAS-PのFork検出器、Collar検出器及び試験用架台のシミュレーションモデルを作成した。本モデルについては、AFAS製作設計図^(参考文献2)、AFAS技術仕様書^(参考文献3)及び試験用架台製作設計図に示されている寸法、材質等を基に作成した。作成したシミュレーションモデルを図2.1.3-5に示す。

本モデルの妥当性を確認するため、実際に²⁵²Cf中性子線源を測定し得られた各検出器の中性子検出効率と本シミュレーションモデルにより得られた中性子検出効率を比較した。比較結果を表2.1.3-1及び表2.1.3-2に示す。その結果、シミュレーションと実測定により得られた中性子検出効率の差は、Collar検出器では約0.7%、Fork検出器では約-0.3%であった。

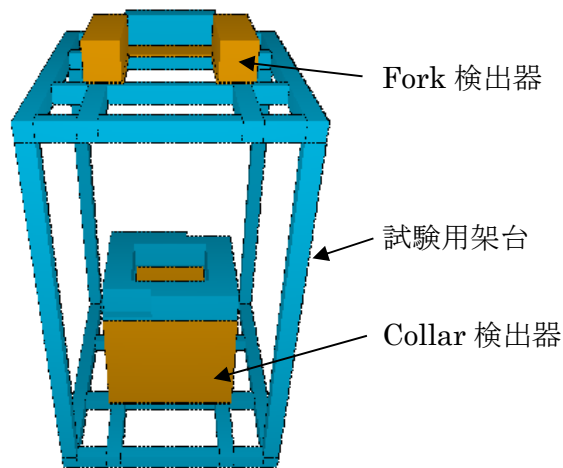


図 2.1.3-5 AFAS-P シミュレーションモデル

表 2.1.3-1 中性子検出効率の比較 (Collar 検出器)

	中性子検出効率 (%)	σ
実測定	16.079	0.009
シミュレーション	15.965	0.019
差 (%) (実測定-シミュレーション) / 実測定×100	0.707	0.131

表 2.1.3-2 中性子検出効率の比較 (Fork 検出器)

	中性子検出効率 (%)	σ
実測定	0.848	0.002
シミュレーション	0.851	0.005
差 (%) (実測定-シミュレーション) / 実測定×100	-0.300	0.609

② シミュレーションによる有効長測定パラメータ評価精度の確認

①で作成したモデルに燃料集合体のモデルを追加したシミュレーションモデル（図2.1.3-6）を用いて、(1)で実施した燃料集合体の実測定を再現し、ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関を求めた。結果を図2.1.3-7に示す。

シミュレーションにより得られた相関（式（2.2））は、実測定により得られた相関（式（2.1））と同様に3次関数の曲線となったが、両相関には図2.1.3-7に示すように約2～8%の差があり、一致しなかった。

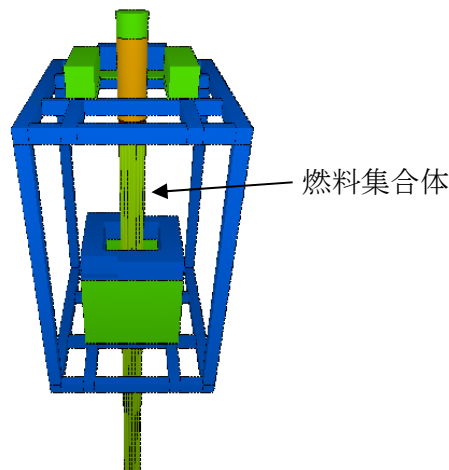


図 2.1.3-6 AFAS-P シミュレーションモデル（燃料集合体追加）

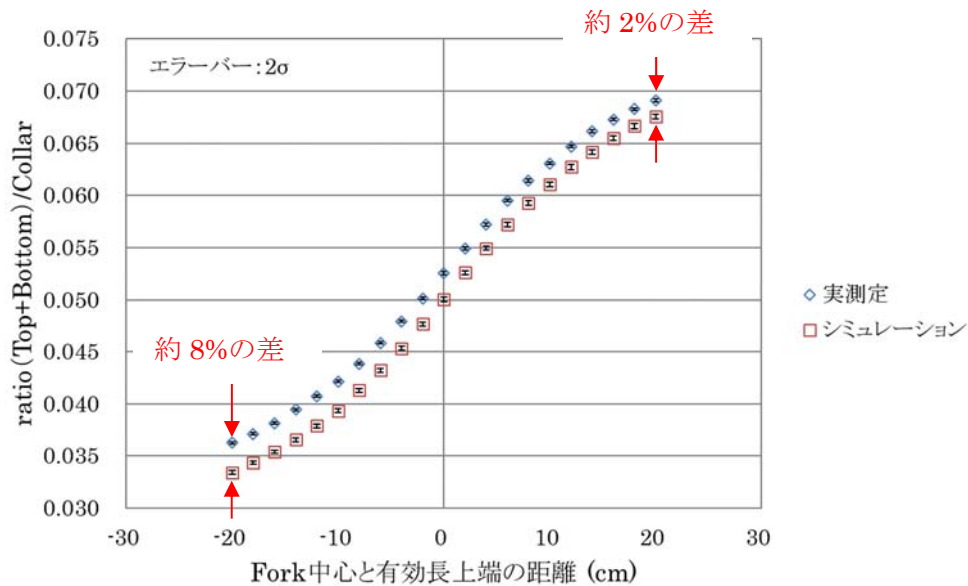


図 2.1.3-7 ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関

$$y = -7.96 \times 10^{-7}x^3 + 1.06 \times 10^{-6}x^2 + 1.16 \times 10^{-3}x + 5.01 \times 10^{-2} \quad \dots (2.2)$$

そこで、さらに精密に実測定を再現するため、試験環境に存在するコンクリート床、集合体貯蔵筒及び実際に貯蔵されている燃料集合体等を追加したシミュレーションモデルを作成した。作成したモデル及び実際の燃料集合体測定の様子を図2.1.3-8及び写真2.1.3-1に示す。

本モデルを用いてシミュレーションを実施した結果を図2.1.3-9に示す。シミュレーションにより得られた相関（式（2.3））と実測定により得られた相関（式（2.1））との差は、最大でも約2%となり、試験環境を考慮することにより大きく改善された。

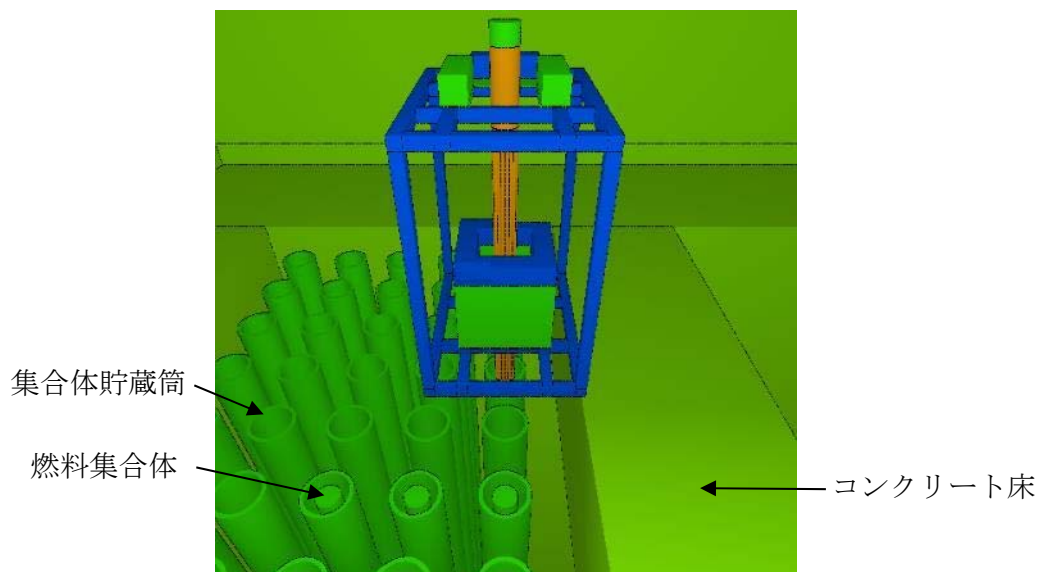


図 2.1.3-8 AFAS-P シミュレーションモデル（試験環境追加）



写真 2.1.3-1 実際の燃料集合体測定の様子

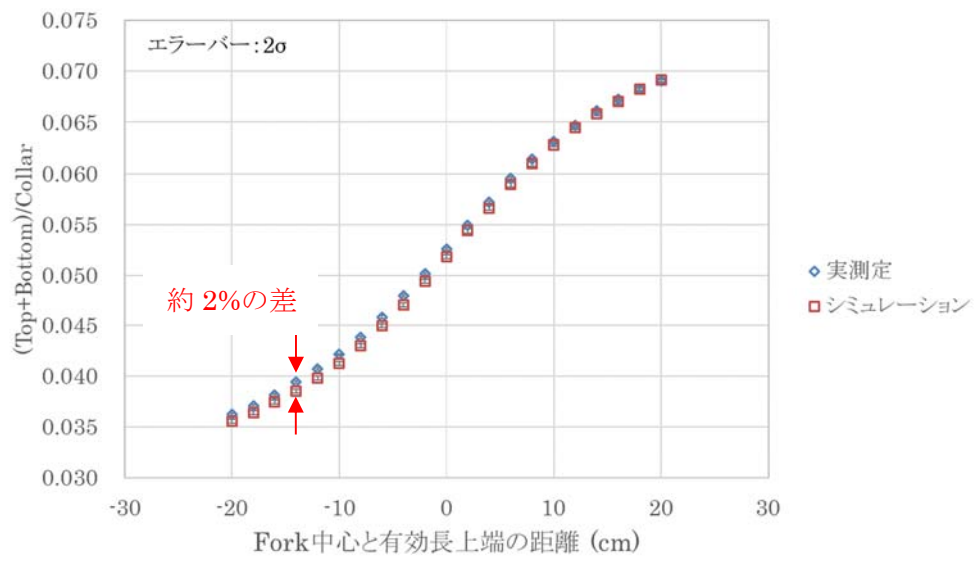


図 2.1.3-9 ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関

$$y = -8.23 \times 10^{-7}x^3 + 1.34 \times 10^{-6}x^2 + 1.15 \times 10^{-3}x + 5.19 \times 10^{-2} \quad \dots (2.3)$$

次に、シミュレーションによる有効長測定パラメータの評価精度を確認するため、「シミュレーションにより得られた相関（式（2.3））」に、「実測定より得たシングル値から算出したratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar]」を与え算出した有効長（A）と、実際の有効長（B）との差（B-A）を確認した。確認結果を図2.1.3-10に示す。

有効長上端がFork検出器中心（0cm）に位置する場合、有効長の差は約-0.6cmであった。また、有効長上端がFork検出器中心から-18cmに位置する場合、有効長の差は最大となり、約-1.9cmであった。

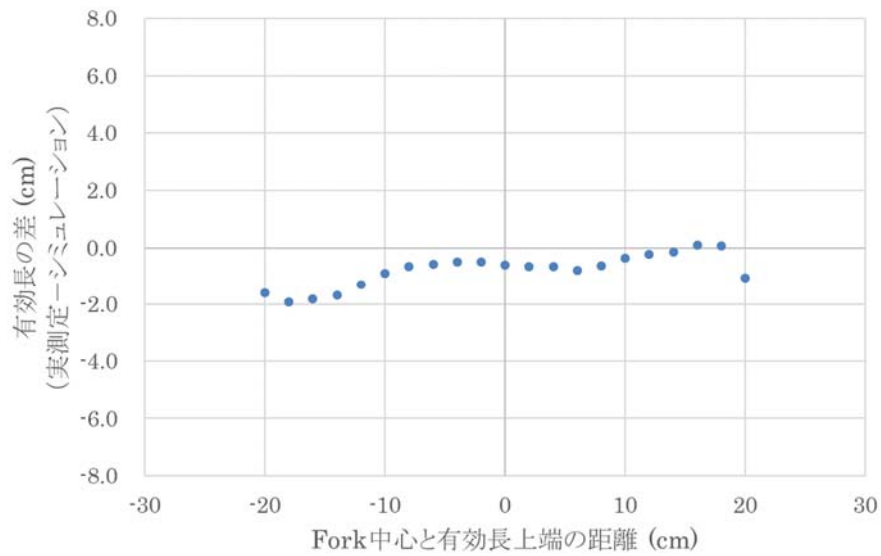


図 2.1.3-10 「シミュレーションにより得られた相関」から算出した有効長と実際の有効長との差

2.1.4 考察

(1) 有効長評価アルゴリズムの妥当性確認

J-MOXにおけるMOX新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムについて記されているLANL報告書^(参考文献1)では、ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関は、3次関数の曲線となることが示されている。JAEAが燃料集合体の実測定を行い、同相関を求めた結果、本相関は3次関数となり、LANLのアルゴリズムと同様の傾向を示すことを確認した。このことから、LANLが開発した有効長評価アルゴリズムは妥当なものであるといえる。

(2) 校正作業の効率化策の検討

① シミュレーションモデルの妥当性確認

JAEAが作成したシミュレーションモデルにより得られたAFAS-PのFork検出器及びCollar検出器の中性子検出効率は、実測定により得られた中性子検出効率とほぼ一致したことから、本シミュレーションモデルは妥当なものであると考えられる。

なお、本モデルについては、2017年10月に米国にて実施されたLANLとの技術会合において報告を行った結果、良く再現できているとのコメントをLANLより得ている。

② シミュレーションによる有効長測定パラメータ評価精度の確認

AFASの要求仕様書^(参考文献4)では、AFASの要件の一つとして「有効長を誤差2%未満で測定できること」との記載がある。本要件を本試験の燃料集合体測定に適用した場合、JAEAの燃料集合体の有効長は370cmであるため、許容される有効長の測定誤差は±7.4cm未満となる。

本試験においてシミュレーションにより得られたratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関に、実測定で得た計数値を与えて算出した有効長と、実際の有効長との差は、図2.1.4-1に示すように、最大で約2cm (有効長370cmに対し約0.5%)であった。このことから、シミュレーションによる有効長測定パラメータの評価精度は、IAEAの要件を十分満たすと考えられる。

したがって、将来J-MOXにおいては、AFASの校正にシミュレーションを用いることで、校正試験項目を削減できる可能性は十分あると考える。

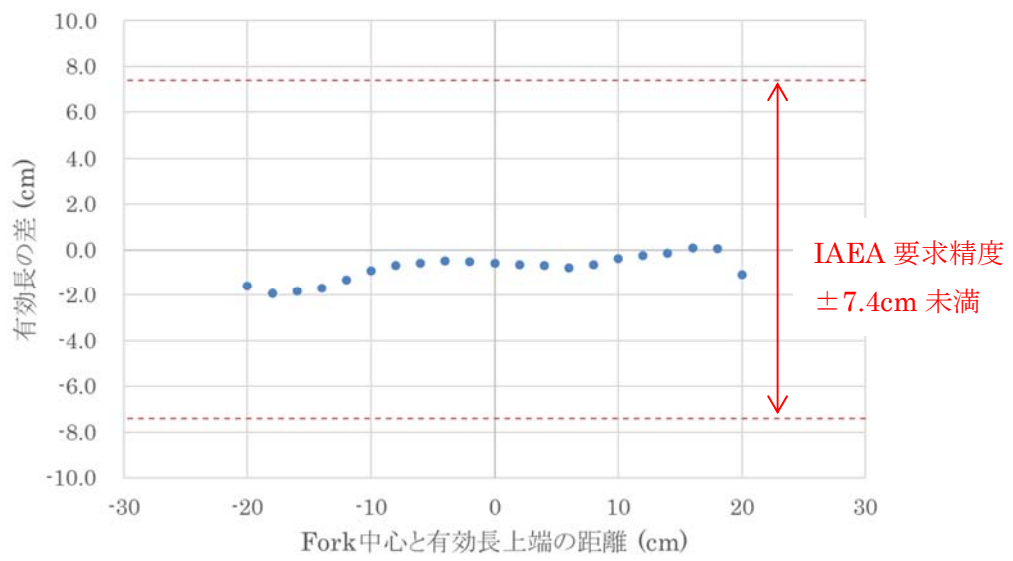


図 2.1.4-1 「シミュレーションにより評価された相関」から算出した有効長と実際の有効長との差

2.2 AFAS の機器の健全性確認（ノーマリゼーション）方法の検討

2.2.1 目的

J-MOX における AFAS の設置環境を踏まえ、AFAS の保障措置検査での使用開始前等定期的に必要となる ^{252}Cf 中性子線源による AFAS の健全性確認方法について検討する。

2.2.2 方法

健全性確認における最適な ^{252}Cf 中性子線源の配置位置は、図 2.2.2-1 の左図の例に示すように、中性子検出効率が最も高く、また ^3He 比例計数管の故障を検知する観点から、各計数管の中性子計数率に大きな差が生じない検出器の中心が理想的であると考えられる。しかし、J-MOX における AFAS の設置環境では、図 2.2.2-2 に示すように燃料集合体の保護管が AFAS の各検出器内側に配置されるため、線源を検出器の中心に配置することができない。したがって、図 2.2.2-1 の右図に示す例のように、検出器外側に線源を配置することになると考えられるが、この場合、線源から離れた位置にある ^3He 比例計数管の中性子計数率は低くなるため、健全性確認の際、当該検出器の故障検知が困難となる可能性がある。

本検討では、保護管設置を考慮した場合の最適な線源配置位置及び本最適な配置位置に線源を配置した場合の ^3He 比例計数管の故障検知の実現性について、シミュレーション及び実測定により評価を行う。

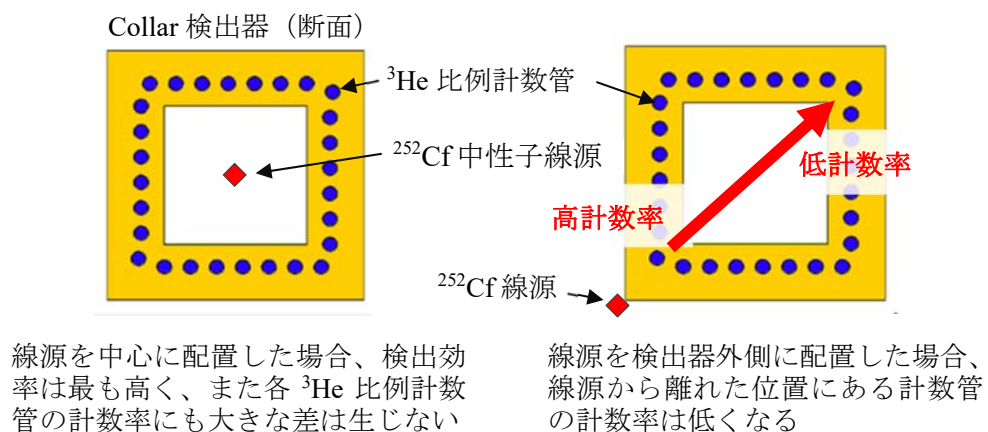


図 2.2.2-1 線源配置位置による計数率の違い

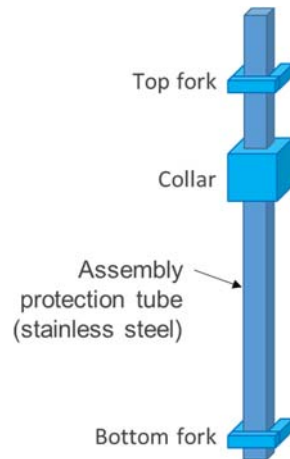


図 2.2.2-2 J-MOX における AFAS の設置環境

(1) 最適な線源配置位置の評価

シミュレーションコード (MCNPX) を用いて、検出器外側の様々な位置に ^{252}Cf 中性子線源を配置したシミュレーションを行い、健全性確認に最適な線源配置位置 (中性子検出効率が最大となる位置) について評価する。また本評価により決定した配置位置へ実際に線源を配置し定期的な測定を行い、初期値との差を評価する。

本評価は、AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器について行う。本評価で使用する線源 (K7-436) を 1.6 項の表 1.6 に示す。

詳細な手順を以下に示す。

- ① 燃料集合体の保護管を含んだ Fork 検出器及び Collar 検出器のシミュレーションモデルを作成する。なお、Top Fork 検出器と Bottom Fork 検出器は同一形状のため、本評価は Top Fork 検出器のモデルを用いて行う。また、本シミュレーションは、線源配置位置の違いによる各中性子検出効率の差を評価することが目的であるため、2.1 で作成したような試験環境及び試験架台等も含めた精密なシミュレーションモデルではなく、検出器及び燃料集合体保護管のみの比較的簡易なモデルにより評価を行う。
- ② ①で作成した検出器モデルに ^{252}Cf の組成を与えた線源を配置し、シミュレーションを行い、中性子検出効率が最大となる配置位置 (健全性確認に最適な線源配置位置) を決定する。以下に各検出器における線源の配置位置 (各 2 箇所) を示す。なお、Collar 検出器において、保護管と検出器間のクリアランスは約 6mm であるため、直径約 10mm の線源を当該位置に配置することは不可である。

【Fork 検出器】

- 1) 検出器間 (図 2.2.2-3 の A)
- 2) ジャンクションボックス上 (図 2.2.2-3 の B)

【Collar 検出器】

- 1) 検出器側面中央 (図 2.2.2-4 の A (^3He 比例計数管の中心位置))
 - 2) ジャンクションボックス上 (図 2.2.2-4 の B)
- ③ ②にて決定した検出効率が最大となる配置位置へ実際に ^{252}Cf 中性子線源を配置するための固定治具を製作する。
 - ④ 固定治具を用いて ^{252}Cf 中性子線源を各検出器に配置し、20 分間の測定を行い、初期値を取得する。
 - ⑤ 固定治具を用いて ^{252}Cf 中性子線源を各検出器に配置し、10 分間の測定を行い、健全性を確認する。
 - ⑥ 月 1 回の頻度で⑤を行う。

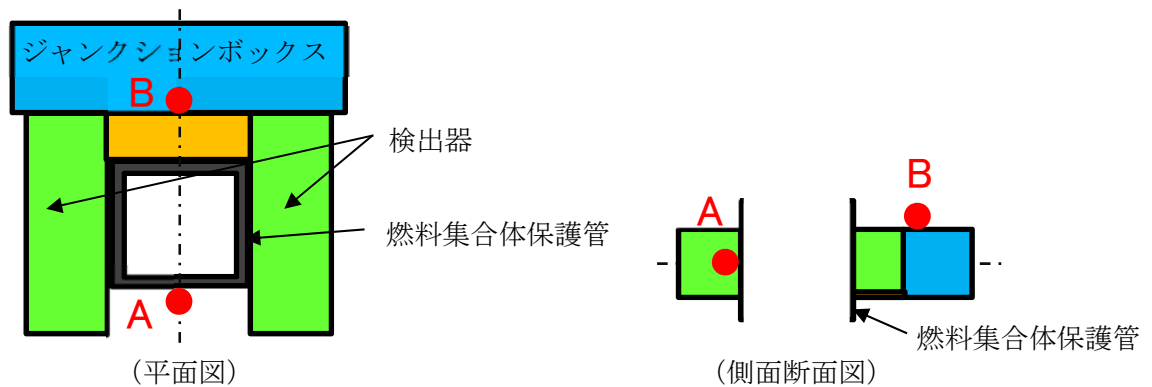


図 2.2.2-3 Fork 検出器における線源の配置位置

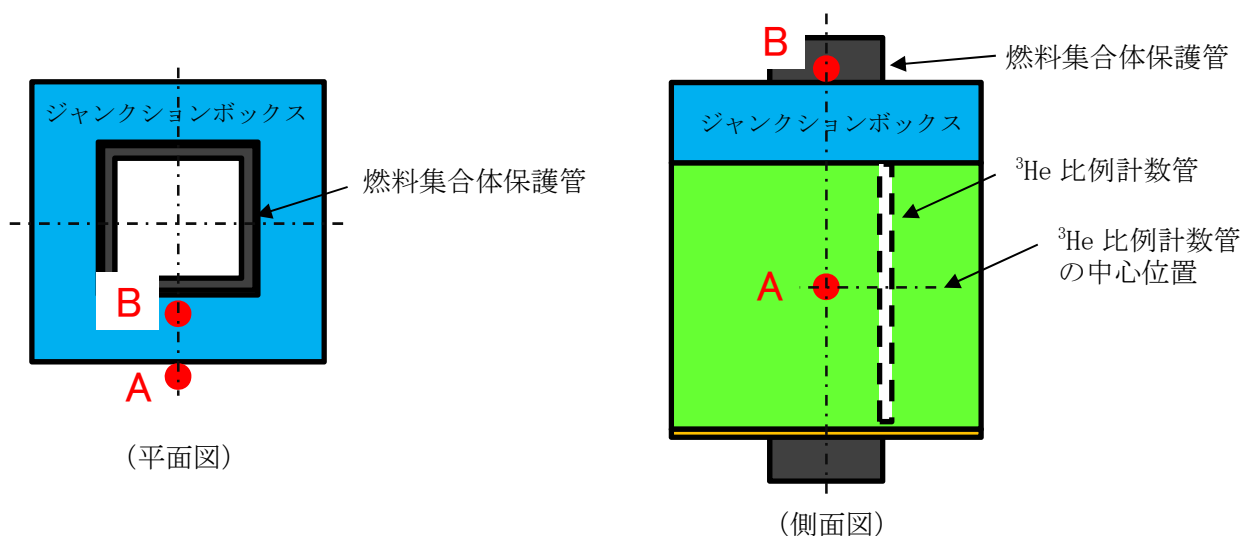


図 2.2.2-4 Collar 検出器における線源の配置位置

(2) ^3He 比例計数管故障検知の実現性評価

最も中性子計数率の低い ^3He 比例計数管の故障を検知可能な線源強度について、シミュレーション及び実測定により評価する。

本評価は、AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器について行う。Fork 検出器については、内蔵されている ^3He 比例計数管が 2 本のみであり、このうち 1 本の故障は容易に検知できることから、評価は実施しない。

本評価で使用する線源 (WW-906、H4-694、K7-436) を 1.6 項の表 1.6 に示す。

詳細な手順を以下に示す。

- ① ^{252}Cf 中性子線源を (1) で決定した位置に配置し、10 分間の測定を行い、ダブル値及び誤差を取得する。
- ② ①を線源 (WW-906、H4-694、K7-436) に対して行う。
- ③ ①～②で取得した結果より、図 2.2.2-5 に示すような線源強度と計数誤差 (3σ) の相関を求める。
- ④ (1) で作成したモデルを用いてシミュレーションを行い、検出器が健全な場合と最も中性子計数率の低い ^3He 比例計数管 1 本が故障した場合の計数値の差を求める。
- ⑤ ③で求めた線源強度と計数誤差 (3σ) の相関より、④で評価した計数値の差が判別可能な線源強度を確認する。

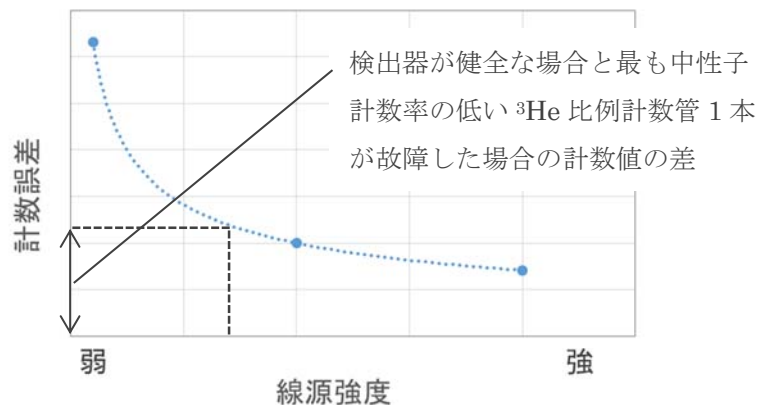


図 2.2.2-5 線源強度と計数誤差の相関

2.2.3 結果

(1) 最適な線源配置位置の評価

① Fork 検出器

AFAS-B 及び AFAS-P の Fork 検出器及び燃料集合体保護管のシミュレーションモデルを作成し、検出器間 (図 2.2.3-1 の A) 及びジャンクションボックス上 (図 2.2.3-1 の B) に線源を配置した場合の中性子検出効率を評価した。参考として、検出器中心位置 (図 2.2.3-1 の C) に線源を配置した場合の中性子検出効率についても評価を行った。評価結果を表 2.2.3-1 に示す。

評価の結果、当初の想定通り、位置 A,B 共に位置 C より中性子検出効率は低くなった。また、位置 A における中性子検出効率は、位置 B と比較し AFAS-B では約 1.7 倍、AFAS-P では約 1.3 倍高かった。

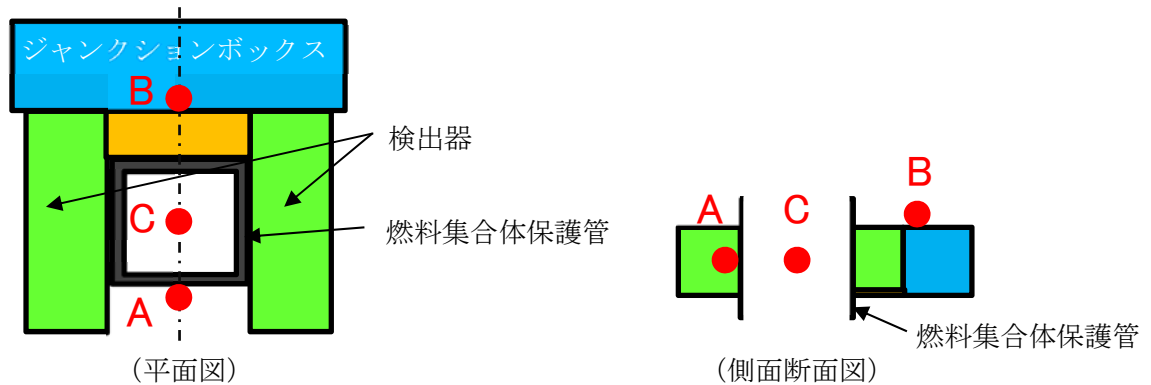


図 2.2.3-1 Fork 検出器のシミュレーションモデル

表 2.2.3-1 Fork 検出器 検出効率評価結果

検出器	線源位置	検出効率 (%)	σ (検出効率)
AFAS-B Fork	A	0.943	0.005
	B	0.568	0.004
	C	1.214	0.006
AFAS-P Fork	A	0.584	0.004
	B	0.435	0.003
	C	0.914	0.005

次に、位置 A における最適な線源配置位置を詳細に評価するため、図 2.2.3-2 に示すように保護管に沿って垂直方向に線源を配置したシミュレーションモデルを作成し、最も中性子検出効率が高くなる線源配置位置を評価した。評価結果を図 2.2.3-3 及び 2.2.3-4 に示す。

評価の結果、AFAS-B 及び AFAS-P いずれの検出器においても中性子検出効率は、検出器中心位置（図 2.2.3-3 及び 2.2.3-4 の 0cm の位置）に線源を配置した場合に最大値となった。

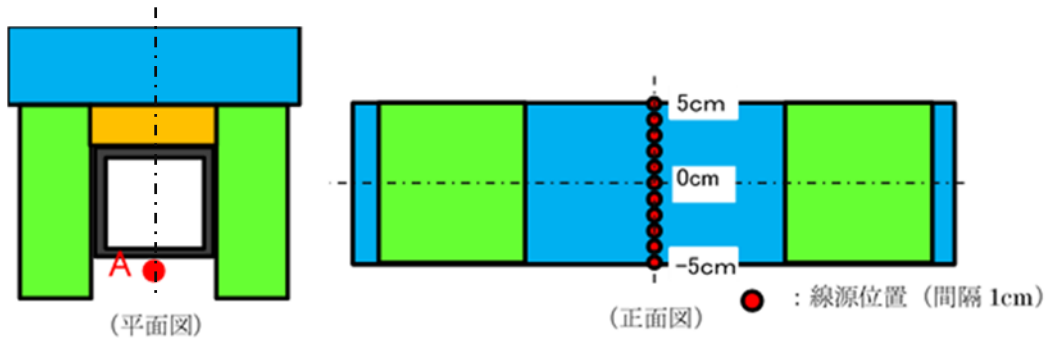


図 2.2.3-2 Fork 検出器のシミュレーションモデル

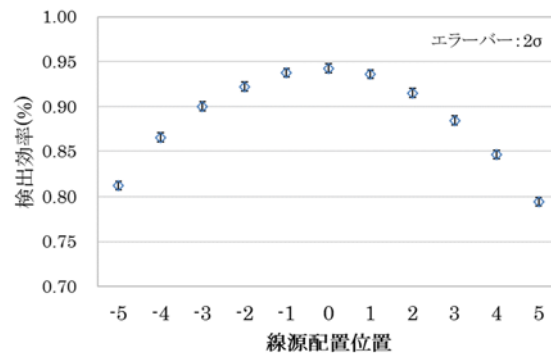


図 2.2.3-3 検出効率評価結果 (AFAS-B Fork 検出器)

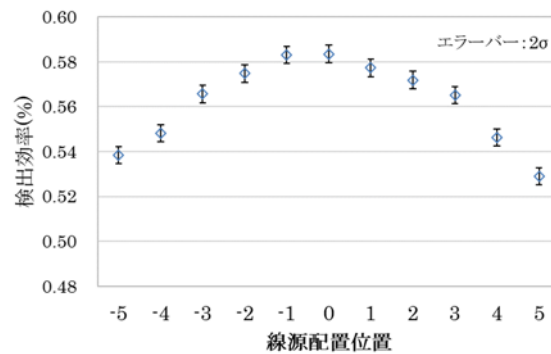


図 2.2.3-4 検出効率評価結果 (AFAS-P Fork 検出器)

以上の結果から、Fork 検出器における最適な線源配置位置は、AFAS-B 及び AFAS-P 共に、検出器間（図 2.2.3-1 の A）であり且つ垂直方向においては検出器中心位置であったことから、本位置に線源を固定するための治具を製作した。本治具を用いて中性子線源を AFAS-B 及び AFAS-P の Fork 検出器に取り付けた様子を写真 2.2.3-1 及び写真 2.2.3-2 に示す。

本治具を用いた ^{252}Cf 中性子線源測定を 2017 年 6 月～2018 年 3 月の期間において毎月実施した。測定結果を図 2.2.3-5～2.2.3-8 に示す。いずれの測定においても各測定値は、初期測定値（2017 年 6 月に取得）から求めた期待値に対し、誤差（ 2σ ）の範囲で一致した。

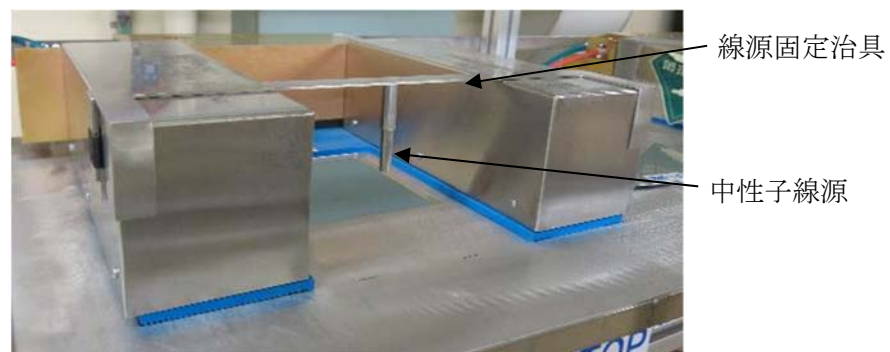


写真 2.2.3-1 線源固定治具（AFAS-B Fork 検出器）

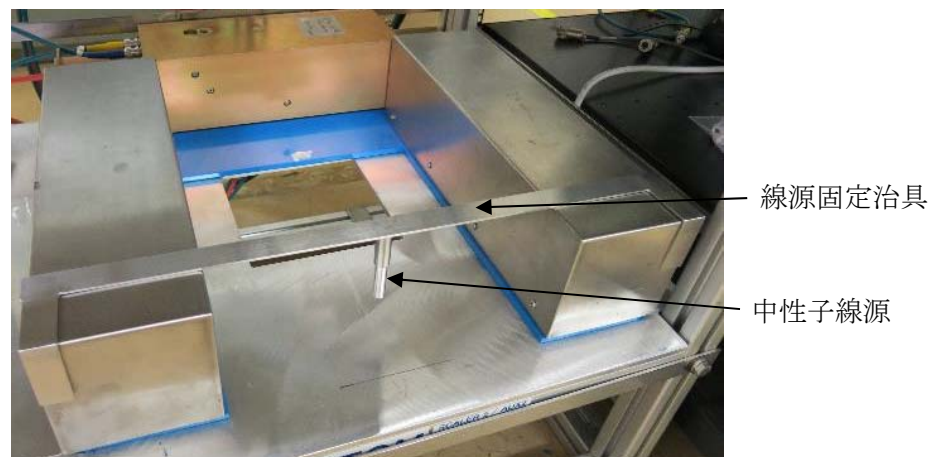


写真 2.2.3-2 線源固定治具（AFAS-P Fork 検出器）

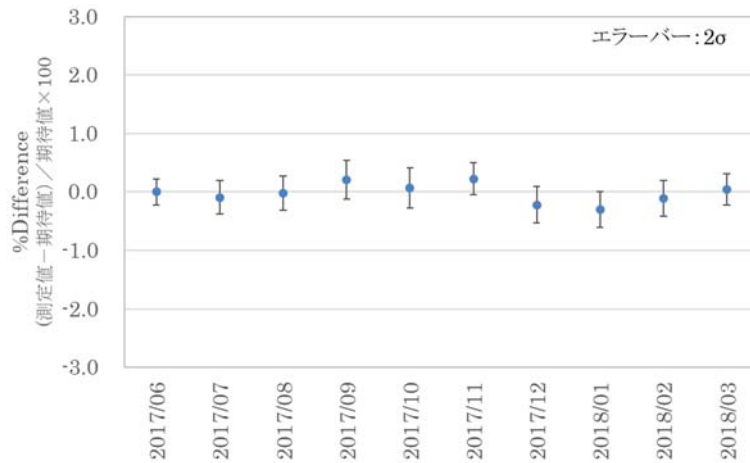


図 2.2.3-5 ^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-B Top Fork 検出器)

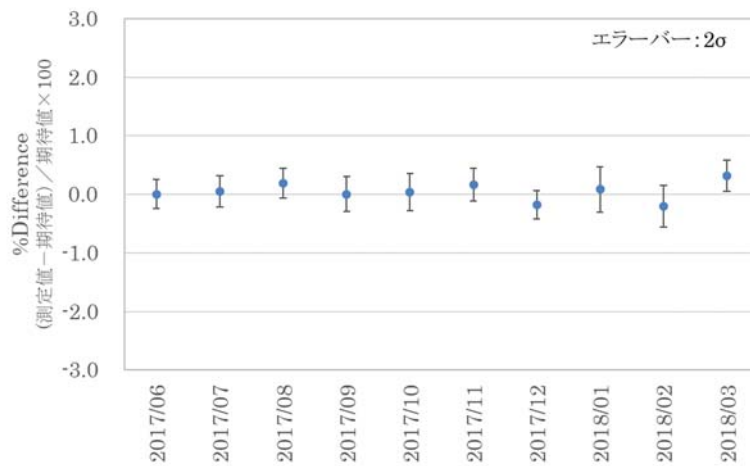


図 2.2.3-6 ^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-B Bottom Fork 検出器)

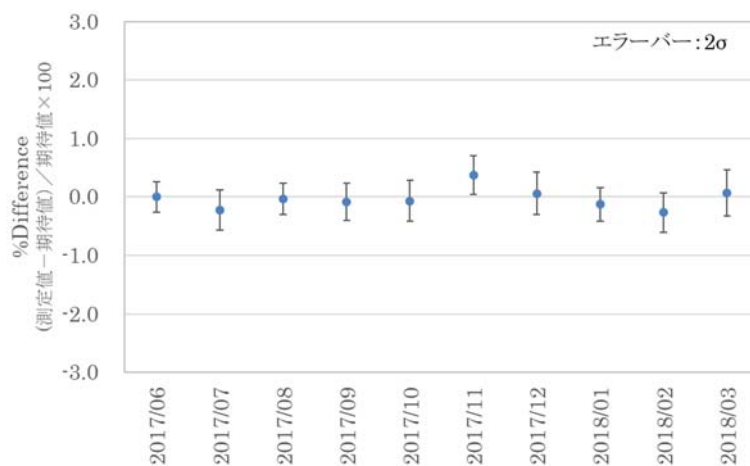


図 2.2.3-7 ^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-P Top Fork 検出器)

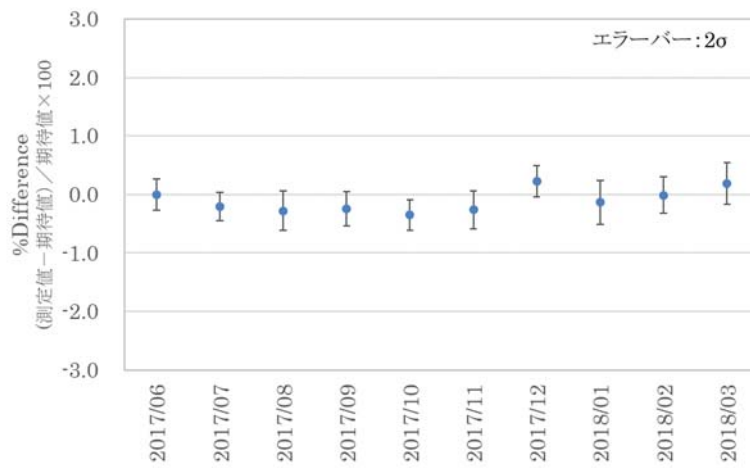


図 2.2.3-8 ^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-P Bottom Fork 検出器)

③ Collar 検出器

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器及び燃料集合体保護管のシミュレーションモデルを作成し、検出器側面中央（図 2.2.3-9 の A）及びジャンクションボックス上（図 2.2.3-9 の B）に線源を配置した場合の中性子検出効率を評価した。参考として、検出器中心位置（図 2.2.3-9 の C）に線源を配置した場合の中性子検出効率についても評価を行った。評価結果を表 2.2.3-2 に示す。

評価の結果、当初の想定通り、位置 A,B 共に位置 C より中性子検出効率は低くなった。また、いずれの検出器においても位置 A における検出効率は、位置 B と比較し 2 倍程度高かった。

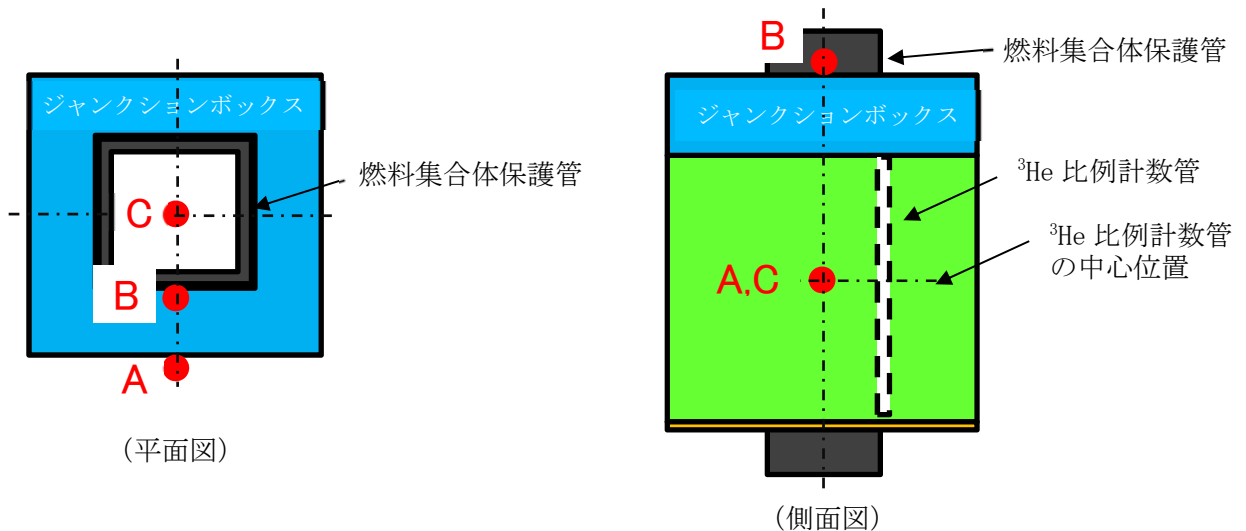


図 2.2.3-9 AFAS-P Collar 検出器及び保護管のシミュレーションモデル

表 2.2.3-2 Collar 検出器 検出効率評価結果

検出器	線源位置	検出効率 (%)	σ (検出効率)
AFAS-B Collar	A	8.639	0.015
	B	2.744	0.009
	C	20.679	0.023
AFAS-P Collar	A	8.235	0.015
	B	3.004	0.009
	C	16.588	0.020

次に、位置 A における最適な線源配置位置を詳細に評価するため、図 2.2.3-10 に示すように検出器側面中央（図中の 0cm の位置）を中心として垂直及び水平方向に線源を配置したシミュレーションモデルを作成し、最も中性子検出効率が高くなる線源配置位置を評価した。評価結果を表 2.2.3-11～2.2.3-14 に示す。

評価の結果、AFAS-B 及び AFAS-P いずれの検出器においても中性子検出効率は、検出器中心位置（図 2.2.3-10 の 0cm の位置）に線源を配置した場合に最大値となった。

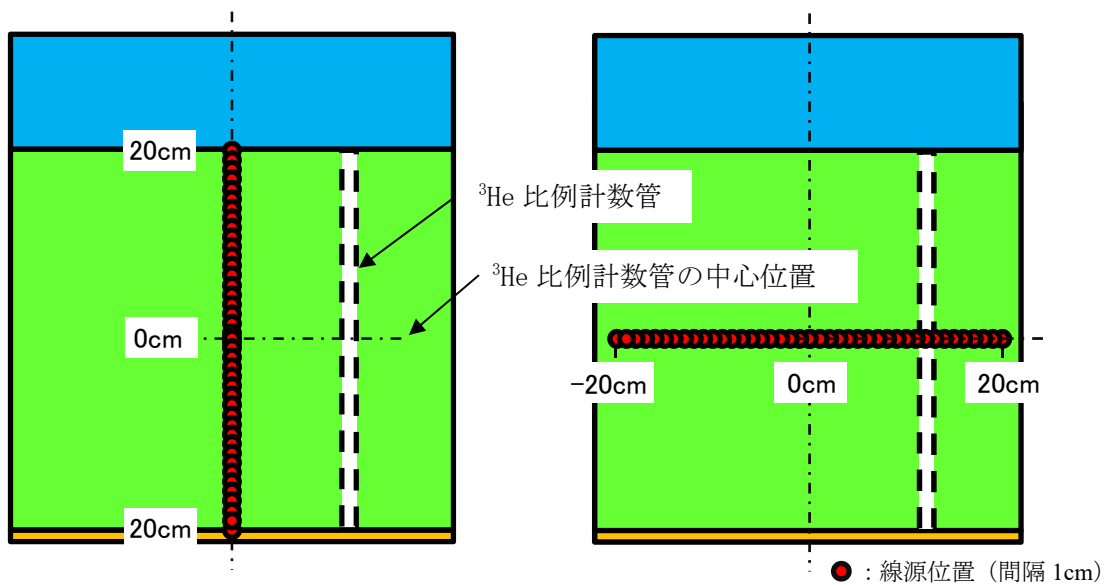


図 2.2.3-10 Collar 検出器のシミュレーションモデル

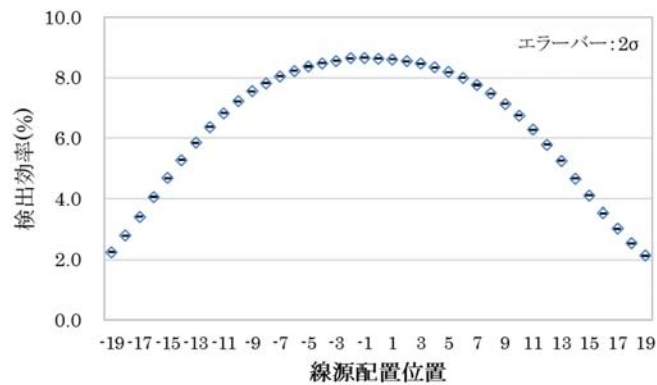


図 2.2.3-11 検出効率（垂直方向）評価結果（AFAS-B Collar 検出器）

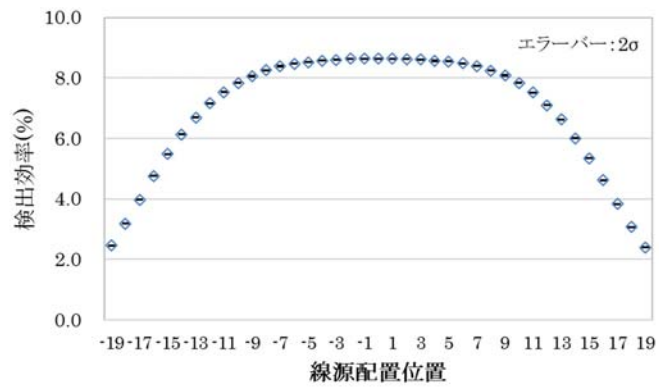


図 2.2.3-12 検出効率（水平方向）評価結果（AFAS-B Collar 検出器）

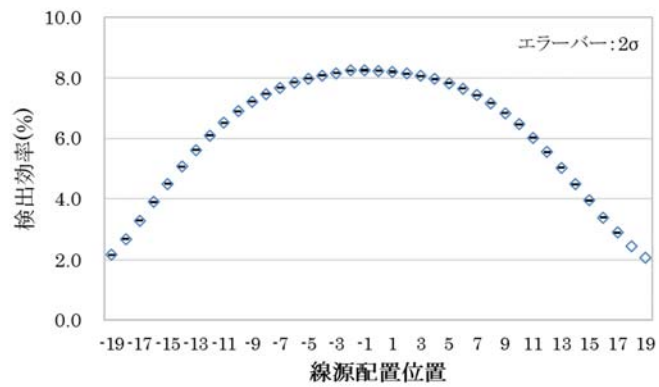


図 2.2.3-13 検出効率（垂直方向）評価結果（AFAS-P Collar 検出器）

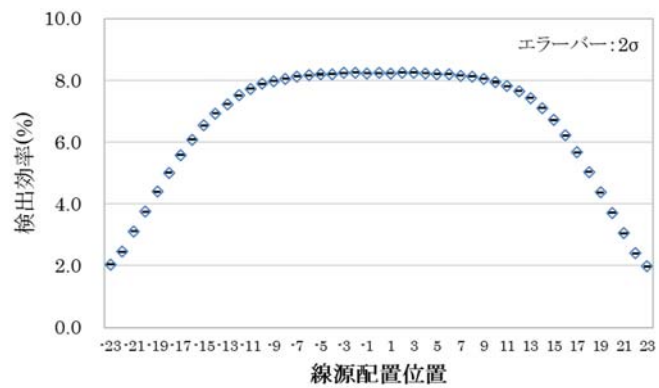


図 2.2.3-14 検出効率（水平方向）評価結果（AFAS-P Collar 検出器）

以上の結果から、Collar 検出器における最適な線源配置位置は、AFAS-B 及び AFAS-P 共に、検出器側面中央（図 2.2.3-9 の A）であったことから、本位置に線源を固定するための治具を製作した。本治具を用いて中性子線源を AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器に取り付けた様子を写真 2.2.3-3 及び写真 2.2.3-4 に示す。

本治具を用いた ^{252}Cf 中性子線源測定を 2017 年 6 月～2018 年 3 月の期間において毎月実施した。測定結果を図 2.2.3-15～2.2.3-16 に示す。いずれの測定においても各測定値は、初期測定値（2017 年 6 月に取得）から求めた期待値に対し、誤差（ 2σ ）の範囲で一致した。

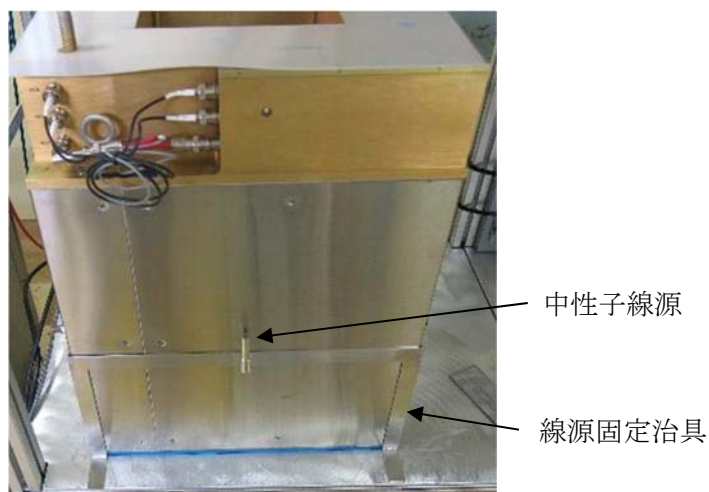


写真 2.2.3-3 線源固定治具（AFAS-B Collar 検出器）

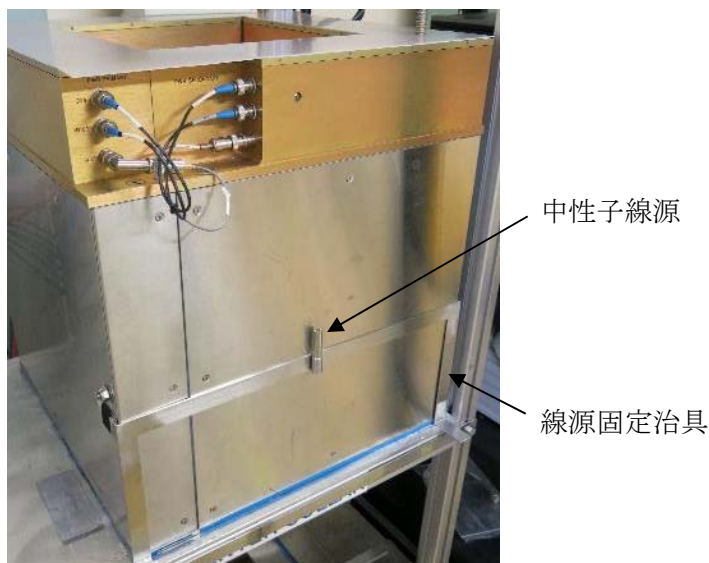


写真 2.2.3-4 線源固定治具（AFAS-P Collar 検出器）

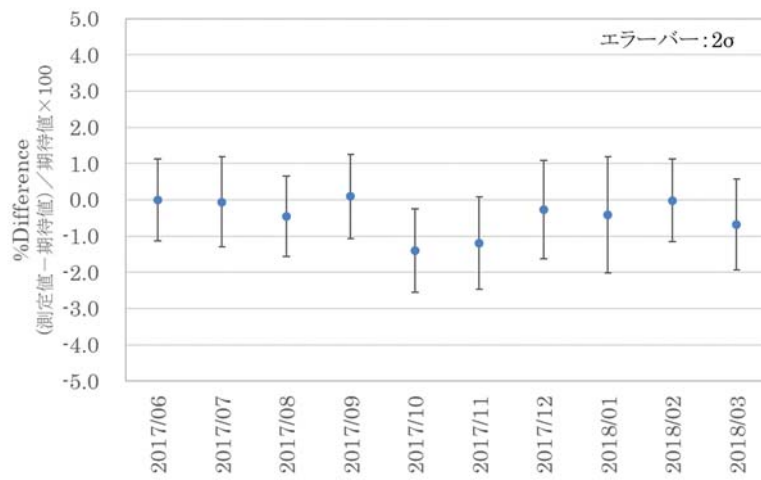


図 2.2.3-15 ^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-B Collar 検出器)

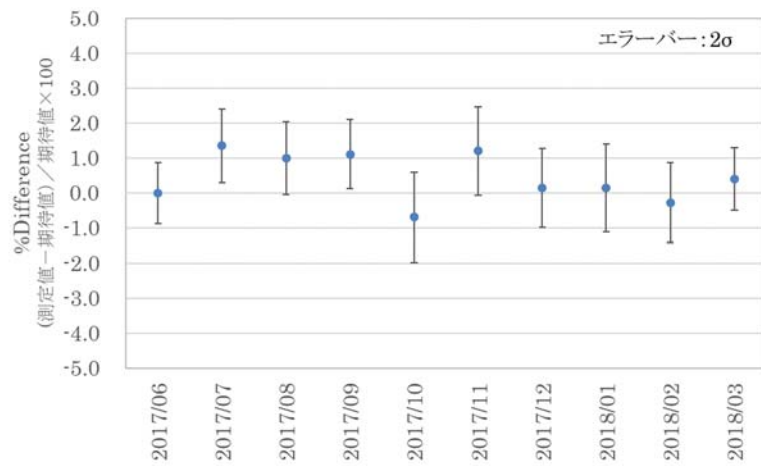


図 2.2.3-16 ^{252}Cf 中性子線源測定結果 (AFAS-P Collar 検出器)

(2) ^3He 比例計数管故障検知の実現性評価

① 線源強度と計数誤差の相関の評価

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器の側面中央 ((1) で決定した位置) に強度の異なる ^{252}Cf 中性子線源を配置し、各 10 分間の測定を行い、線源強度とダブル値の計数誤差 (3σ) (式 (2.4)) の相関を求めた。結果を図 2.2.3-17 及び 2.2.3-18 に示す。

いずれの検出器においても線源強度の増加に伴い計数誤差が減少する傾向を確認した。また、各相関は式 (2.5) 及び式 (2.6) の通りとなった。

$$\%RSD = \frac{3\sigma(\text{Doubles})}{\text{Doubles}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

$$\text{AFAS-B Collar検出器} : y = 2.0288 \times e^{(-5.8768x)} + 1.4485 \quad \dots \dots (2.5)$$

$$\text{AFAS-P Collar検出器} : y = 2.0058 \times e^{(-8.8374x)} + 1.4972 \quad \dots \dots (2.6)$$

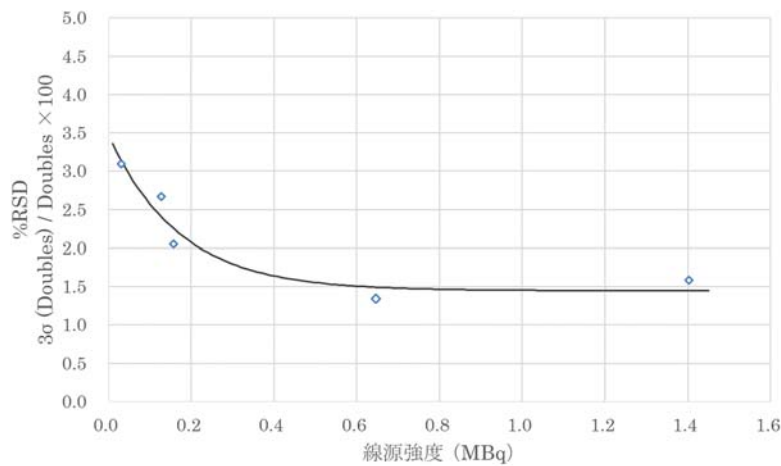


図 2.2.3-17 線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-B Collar 検出器)

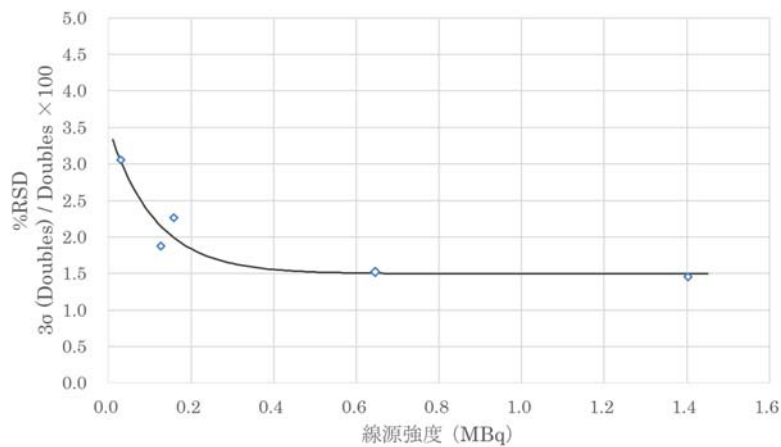


図 2.2.3-18 線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-P Collar 検出器)

② 検出器が健全な場合と ^3He 比例計数管 1 本が故障した場合の計数値の差の評価
次に、シミュレーションにより、検出器の ^3He 比例計数管全てが健全な場合の計数値と 1 本故障した場合の計数値の差を求めた。結果を表 2.2.3-3 及び表 2.2.3-4 に示す。
なお、使用したシミュレーションモデルは (1) と同一のものである。

評価の結果、AFAS-B の Collar 検出器では図 2.2.3-19 に示す 24 番の ^3He 比例計数管、AFAS-P の Collar 検出器では図 2.2.3-20 に示す 28 番の ^3He 比例計数管が故障した場合、健全な場合との計数値の差が最も小さかった。

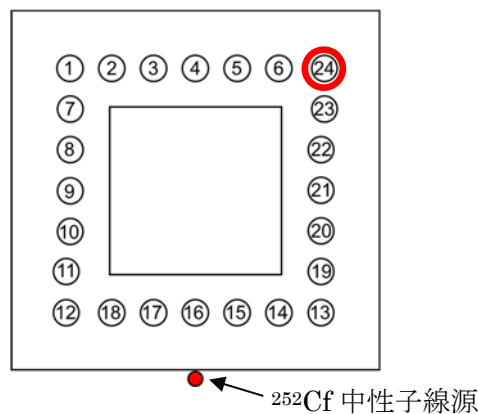


図 2.2.3-19 AFAS-B Collar 検出器の ^3He 比例計数管配置

表 2.2.3-3 AFAS-B Collar 検出器における検出器が健全な場合と ^3He 比例計数管 1 本が故障した場合の計数値の差

全ての ^3He 比例計数管が健全な場合の Singles(cps)	以下の番号の ^3He 比例計数管が1本故障した場合の Singles(cps)	差(%) (健全-故障)/健全*100	全ての ^3He 比例計数管が健全な場合の Doubles(cps)	以下の番号の ^3He 比例計数管が1本故障した場合の Doubles(cps)	差(%) (健全-故障)/健全*100		
1052180.70	1	1048478.09	0.35	92607.36	1	91959.83	0.70
	2	1044215.54	0.76		2	91157.43	1.57
	3	1041157.39	1.05		3	90592.48	2.18
	4	1040280.13	1.13		4	90435.41	2.35
	5	1041146.36	1.05		5	90595.30	2.17
	6	1043999.90	0.78		6	91129.99	1.60
	7	1046648.83	0.53		7	91609.66	1.08
	8	1045286.38	0.66		8	91348.69	1.36
	9	1043181.45	0.86		9	90971.20	1.77
	10	1039726.33	1.18		10	90369.62	2.42
	11	1032311.29	1.89		11	89136.55	3.75
	12	1019212.45	3.13		12	87092.88	5.95
	13	1017292.53	3.32		13	86733.40	6.34
	14	965319.88	8.26		14	78141.05	15.62
	15	862556.90	18.02		15	62308.13	32.72
	16	788310.95	25.08		16	51814.48	44.05
	17	862597.34	18.02		17	62298.70	32.73
	18	963413.43	8.44		18	77877.26	15.91
	19	1031318.86	1.98		19	88932.43	3.97
	20	1039673.65	1.19		20	90356.02	2.43
	21	1043117.74	0.86		21	90960.17	1.78
	22	1045243.50	0.66		22	91345.38	1.36
	23	1046998.02	0.49		23	91685.50	1.00
	24	1048670.45	0.33		24	92001.86	0.65

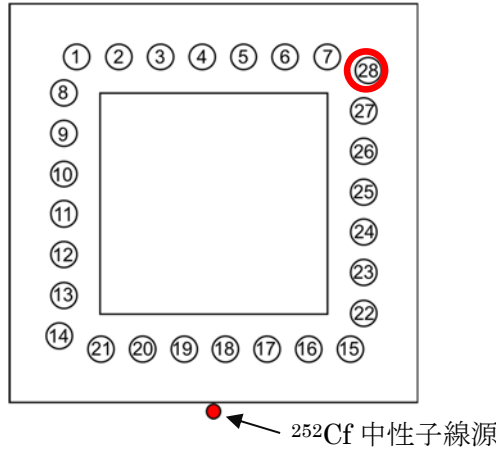


図 2.2.3-20 AFAS-P Collar 検出器の ^3He 比例計数管配置

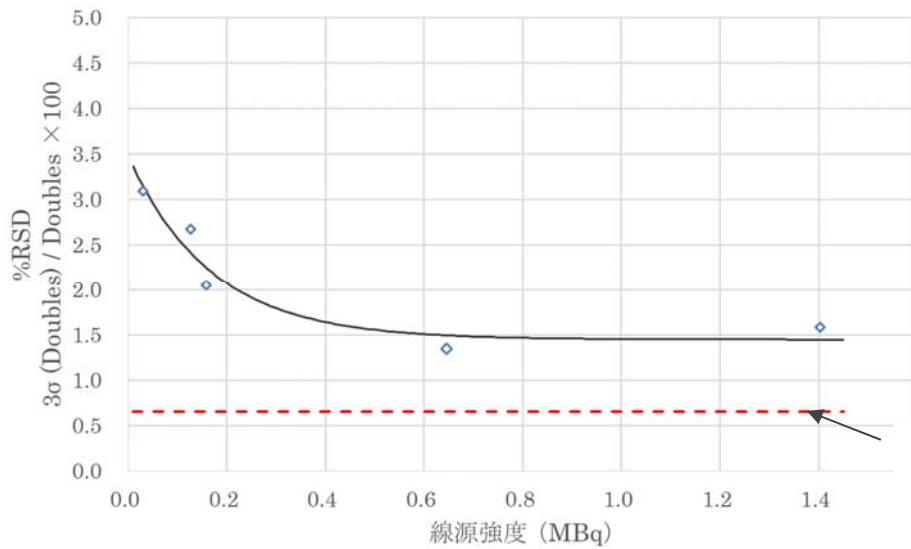
表 2.2.3-4 AFAS-P Collar 検出器における検出器が健全な場合
と ^3He 比例計数管 1 本が故障した場合の計数値の差

全ての ^3He 比例計数管が健全な場合の Singles(cps)	以下の番号の ^3He 比例計数管が1本故障した場合の Singles(cps)		差(%) (健全-故障)/健全*100	全ての ^3He 比例計数管が健全な場合の Doubles(cps)	以下の番号の ^3He 比例計数管が1本故障した場合の Doubles(cps)		差(%) (健全-故障)/健全*100
	番号	計数値			番号	計数値	
1002762.63	1	999227.87	0.35	82638.84	1	82052.32	0.71
	2	996362.08	0.64		2	81544.23	1.32
	3	995053.54	0.77		3	81319.52	1.60
	4	994563.45	0.82		4	81240.37	1.69
	5	994496.07	0.82		5	81225.30	1.71
	6	995130.73	0.76		6	81335.45	1.58
	7	997198.91	0.55		7	81700.44	1.14
	8	999111.48	0.36		8	82025.12	0.74
	9	998429.03	0.43		9	81897.33	0.90
	10	997549.32	0.52		10	81747.73	1.08
	11	996538.51	0.62		11	81573.88	1.29
	12	995591.42	0.72		12	81419.99	1.47
	13	994039.06	0.87		13	81185.60	1.76
	14	989568.23	1.32		14	80553.63	2.52
	15	981153.41	2.15		15	79218.39	4.14
	16	943922.61	5.87		16	73366.61	11.22
	17	850071.90	15.23		17	59537.78	27.95
	18	736002.59	26.60		18	44372.00	46.31
	19	778210.23	22.39		19	49781.10	39.76
	20	900032.74	10.24		20	66754.83	19.22
	21	964759.95	3.79		21	76629.62	7.27
	22	992235.53	1.05		22	80912.62	2.09
	23	995031.49	0.77		23	81329.93	1.58
	24	996079.05	0.67		24	81500.36	1.38
	25	997214.83	0.55		25	81691.98674	1.15
	26	998229.32	0.45		26	81864.13031	0.94
	27	998898.29	0.39		27	81982.60919	0.79
		28	999896.84		0.29		28

③ 故障検知可能な線源強度の評価

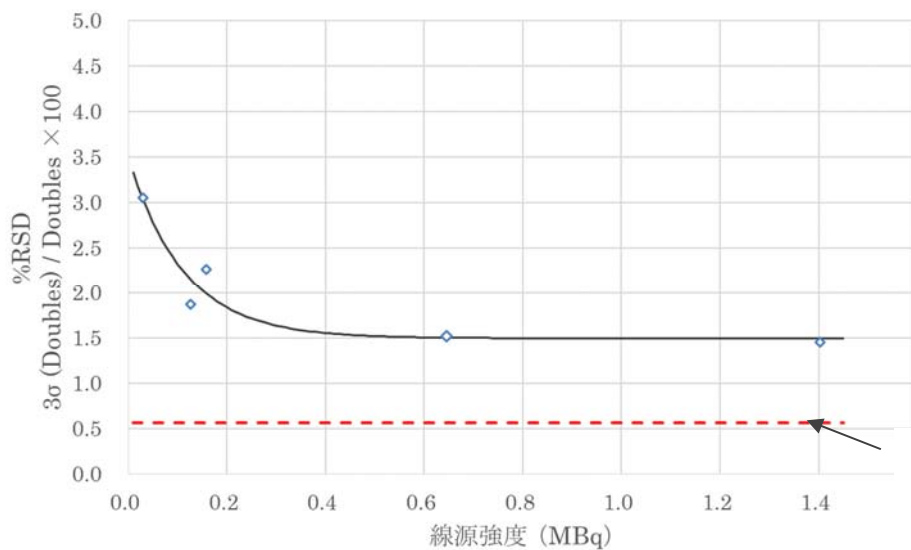
①で求めた線源強度とダブル値の計数誤差の相関（式（2.5）及び式（2.6））から、②で評価した AFAS-B Collar 検出器では 24 番、AFAS-P Collar 検出器では 28 番の ^3He 比例計数管の故障検知の実現性について評価を行った。評価結果を図 2.2.3-21 及び 2.2.3-22 に示す。

評価の結果、上記の ^3He 比例計数管の故障は、たとえ強度の高い線源を用いて測定を行ったとしても、ダブル値の計数誤差が約 1.5% までしか減少せず、 ^3He 比例計数管 1 本が故障した場合の計数値の減少率（AFAS-B の 24 番では 0.65%、AFAS-P の 28 番では 0.56%）より大きいため、検知不可能であった。



検出器が健全な場合と24番の ^3He 比例計数管1本が故障した場合の計数値の差(0.65)

図 2.2.3-21 線源強度と計数誤差の相関（AFAS-B Collar 検出器）



検出器が健全な場合と28番の ^3He 比例計数管1本が故障した場合の計数値の差(0.56)

図 2.2.3-22 線源強度と計数誤差の相関（AFAS-P Collar 検出器）

前述の結果のとおり、ダブル値を用いた評価では、³He 比例計数管 1 本の故障は検知不可能であったことから、代替としてシングル値を用いた場合の故障検知の実現性について評価を行った。

線源強度とシングル値の計数誤差 (3σ) (式 (2.7)) の相関を求め、②で評価した AFAS-B Collar 検出器では 24 番、AFAS-P Collar 検出器では 28 番の ³He 比例計数管 1 本の故障が検知可能な線源強度を評価した。評価結果を図 2.2.3-23 及び図 2.2.3-24 に示す。

評価の結果、シングル値を用いた場合、上記の ³He 比例計数管 1 本の故障を検知するために必要な線源強度は、AFAS-B Collar 検出器では 約 0.18MBq 以上、AFAS-P Collar 検出器では約 0.20MBq 以上であった。

$$\%RSD = \frac{3\sigma(\text{Singles})}{\text{Singles}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

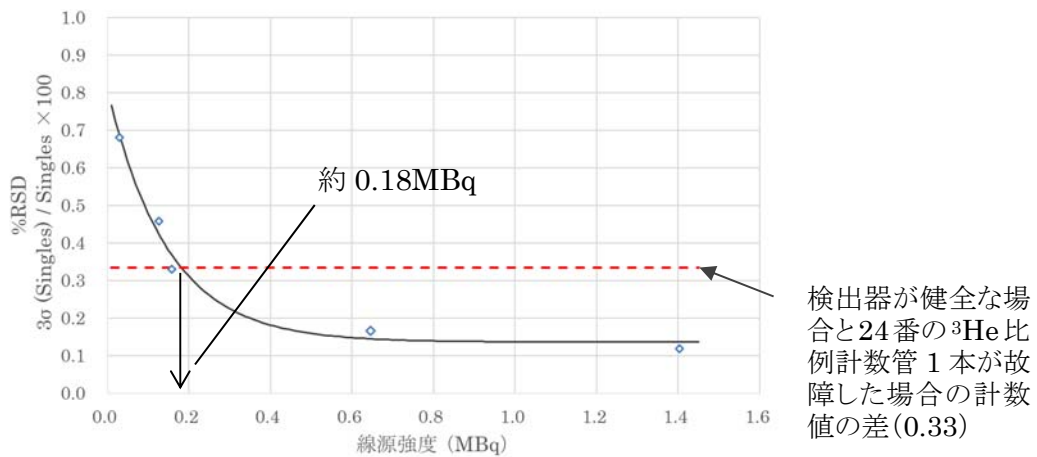


図 2.2.3-23 線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-B Collar 検出器)

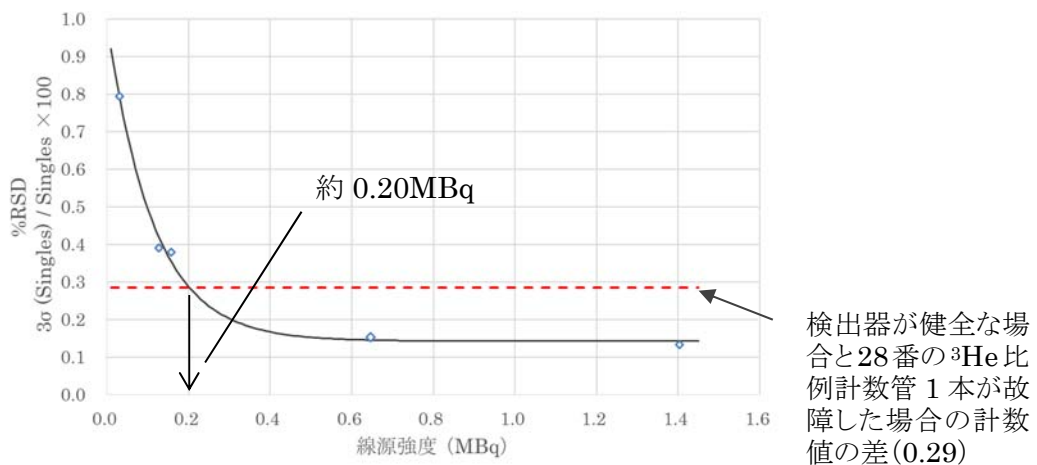


図 2.2.3-24 線源強度と計数誤差の相関 (AFAS-P Collar 検出器)

2.2.4 考察

(1) 最適な線源配置位置の評価

J-MOX の実環境において検出器の健全性確認を行う場合の最適な線源配置位置（中性子検出効率が最も高くなる配置位置）は、Fork 検出器においては図 2.2.3-1 に示す検出器間中央位置であり、Collar 検出器においては、図 2.2.3-9 に示す検出器側面中央であった。

これらの位置に実際に ^{252}Cf 中性子線源を配置し、定期的な測定を 10 ヶ月間継続して実施した結果、いずれの測定においても各測定値は、期待値に対し誤差 (2σ) の範囲で一致し、また、一般的な中性子測定用 NDA における健全性の判断基準となっている「期待値の $\pm 3\%$ 」の範囲内となった。

このことから、J-MOX における実際の AFAS 設置環境において、AFAS の各検出器の中心に中性子線源が配置不可能であっても、本試験で評価した上記の位置に線源を配置することにより、健全性確認を実施することが可能であると考えられる。

(2) ^3He 比例計数管故障検知の実現性評価

^3He 比例計数管 1 本の故障検知については、ダブル値による評価は困難であることが分かった。これは、ダブル値の計数誤差（約 1.5% (3σ)）が、計数率の低い ^3He 比例計数管が 1 本故障した場合の計数値の減少率（約 0.6~0.7%）よりも大きいためである。

一方、シングル値による評価では、約 0.2MBq 以上の線源を用いることで、計数率の低い ^3He 比例計数管の故障が検知可能という結果となった。これは、シングル値は同測定時間における計数誤差がダブル値より小さいためである。

したがって、J-MOX における実際の AFAS 設置環境において、Collar 検出器の ^3He 比例計数管一本の故障を検知するためには、シングル値による評価が必要になると考えられる。

3. AVIS 性能確認試験

3.1. 中性子計数装置の確認試験

3.1.1 目的

メーカーの供給停止により入手困難となった AVIS 用中性子計数装置 AMSR-150 の代替として、AMSR 以外の中性子計数装置（JSR-15 等）の使用の可能性について検討する。

3.1.2 方法

AMSR 以外の中性子計数装置のひとつである JSR-15 の適用性を確認するため、AMSR、JSR-15 を同時に AVIS に接続し、1.8 項に示した Pu 量(*7)の異なる MOX 粉末及びペレットサンプルの測定を実施し、それぞれの装置で得られた計数値（シングル値、ダブル値、トリプル値）及びこれら計数値より評価された Pu 量を比較する。

本試験に使用する JSR-15 を写真 3.1.2-1 に示す。また、同時に 2 つの計数装置を AVIS に接続するため、写真 3.1.2-2 に示す信号分岐装置（LANL 製）を使用する。本装置は 1 つの信号入力端子と 4 つの信号出力端子を有している。MOX サンプル測定を行う前に本装置の健全性について確認を行う。

*7: IAEA User Requirements AVIS によると、J-MOX における AVIS 測定サンプルの Pu 量は、1~20g と想定されている。



写真 3.1.2-1 試験に使用した JSR-15
(Canberra Model: JSR-15 S/N: 13000030)



写真 3.1.2-2 試験に使用した信号分岐装置（LANL 製）

詳細な手順を以下に示す。

(1) 信号分岐装置の健全性確認

- ① 1.6 項に示す ^{252}Cf 中性子線源 (I7-106) を専用の固定治具に取り付け、AVIS の中性子検出器に挿入する。
- ② JSR-15 を AVIS の中性子検出器に接続し、10 分間の測定を行い、計数値 (TOTAL、R+A、A) を取得する。
- ③ 図 3.1.2-1 に示す通り、AVIS の中性子検出器を信号分岐装置の信号入力端子に接続する。また、JSR-15 を信号分岐装置の信号出力端子に接続し、10 分間の測定を行い、計数値 (TOTAL、R+A、A) を取得する。
- ④ 全ての信号出力端子に対して③を行う。
- ⑤ ②により取得した計数値及び③～④により取得した計数値を比較し、有意差の有無を確認する。



図 3.1.2-1 信号分岐装置とパルス発生装置及び計数装置の接続

(2) MOX サンプル測定

- ① 図 3.1.2-2 に示す通り、AVIS、信号分岐装置、AMSR、JSR-15 及びデータ収集用 PC を接続する。検出器への高電圧 (HV) 及び低電圧 (+5V) の供給は AMSR より行う。
- ② 写真 3.1.2-3 及び写真 3.1.2-4 に示す J-MOX における AVIS 設置予定のグローブボックスの底部を模擬した治具及びサンプルホルダーを AVIS 検出器上部に設置する。
- ③ サンプルホルダーに MOX サンプルをセットし、5 分間、10 分間及び 15 分間 (*8)の測定を行う。
- ④ MOX サンプルを入れ替え③を繰り返す。
- ⑤ ③～④により取得した各計数値 (シングル値、ダブル値、トリプル値) 及びこれらより評価された Pu 量を比較し、有意差の有無を確認する。

*8: AVIS の要求仕様書^(参考文献 5)に記載されている J-MOX における AVIS の測定時間は 15 分

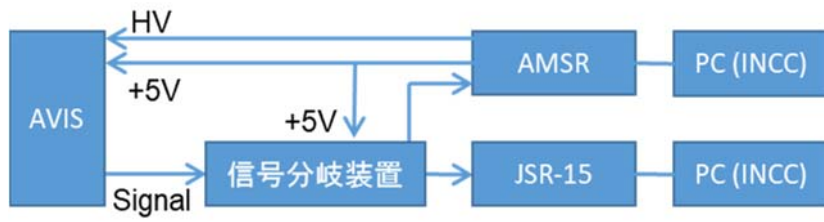


図 3.1.2-2 AVIS と各計数装置の接続



写真 3.1.2-3 J-MOX における AVIS 設置予定のグローブボックス底部を模擬した治具



写真 3.1.2-4 サンプルホルダー（拡大：サンプル収納部）

3.1.3 結果

(1) 信号分岐装置の健全性確認

JSR-15をAVISの中性子検出器の信号出力端子及び信号分岐装置の各出力端子に接続し、10分間の測定を実施し、計数値（TOTAL、R+A、A）を取得した。これら計数値の比較結果を図3.1.3-1～図3.1.3-3に示す。

各計数値（TOTAL、R+A、A）は、いずれも計数誤差（ 2σ ）の範囲において一致していたことから、本信号分岐装置は健全であることが確認できた。

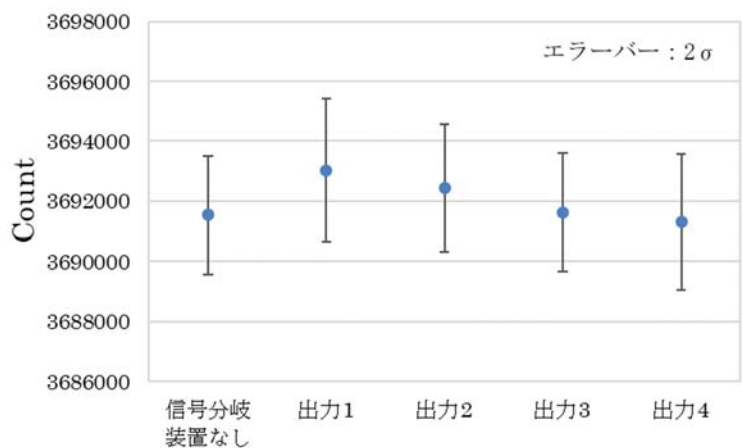


図 3.1.3-1 計数値（TOTAL）の比較

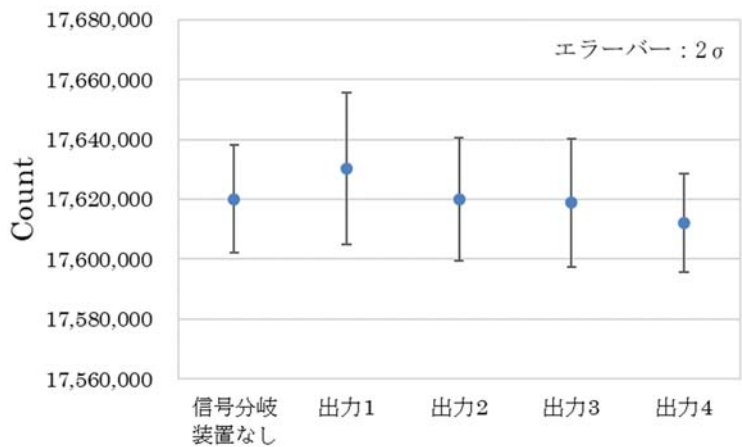


図 3.1.3-2 計数値（R+A）の比較

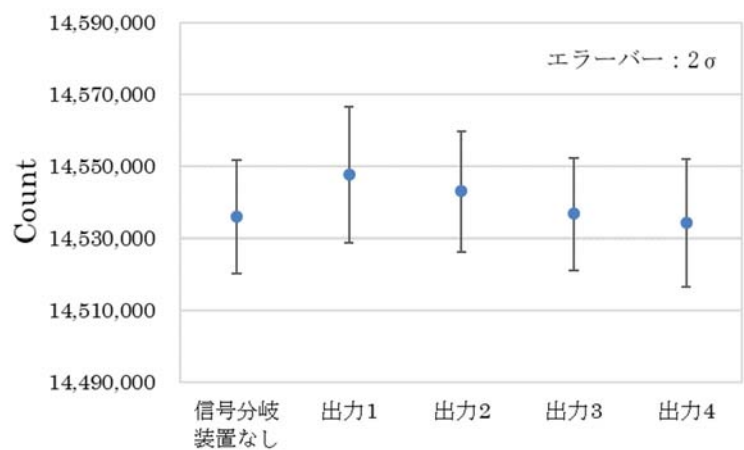


図 3.1.3-3 計数值 (A) の比較

(2) MOXサンプル測定

AMSR及びJSR-15を信号分岐装置に接続し、4つのMOXサンプル（MOX粉末1g-Pu及び9g-Pu、MOXペレット1g-Pu及び3g-Pu）についてそれぞれ5分、10分、15分間の測定を行った。

各計数装置で取得した計数值（シングル値、ダブル値、トリプル値）及びこれらより評価されたPu量の比較結果を図3.1.3-4～8、11～15、18～22、25～29に示す。Pu量の評価については、Multiplicity法及びKnown α法の2通りの解析方法で評価した。また、各サンプルの測定における測定時間とPu量の誤差（式(3.1)）の相関を図3.1.3-9～10、16～17、23～24、30～31に示す。

本評価の結果、AMSR及びJSR-15により取得した各計数值及びこれらより評価されたPu量は、いずれも誤差（2σ）の範囲において一致した。また、AMSR及びJSR-15ともに、測定時間が長くなるほど誤差（%RSD）が減少する傾向を示した。

$$\%RSD = \frac{\sigma(Pu量)}{Pu量} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3.1)$$

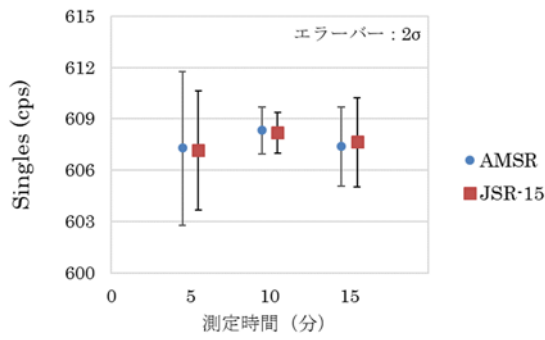


図 3.1.3-4 シングル値の比較
(MOX 粉末 1g-Pu)

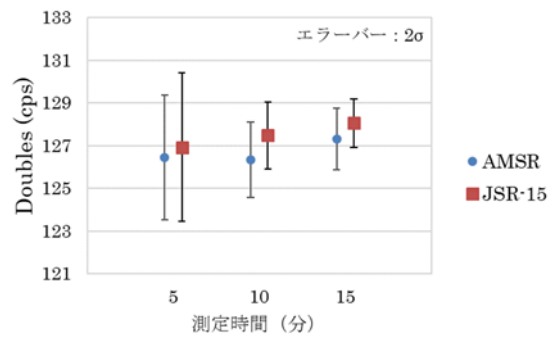


図 3.1.3-5 ダブル値の比較
(MOX 粉末 1g-Pu)

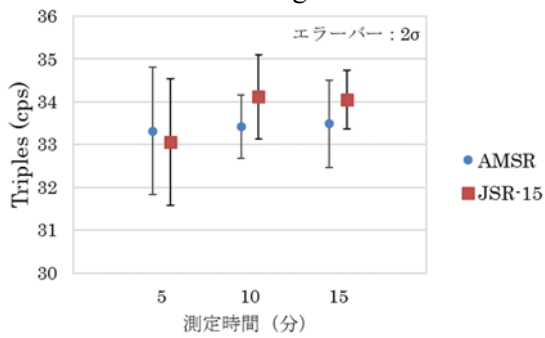


図 3.1.3-6 トリプル値の比較
(MOX 粉末 1g-Pu)

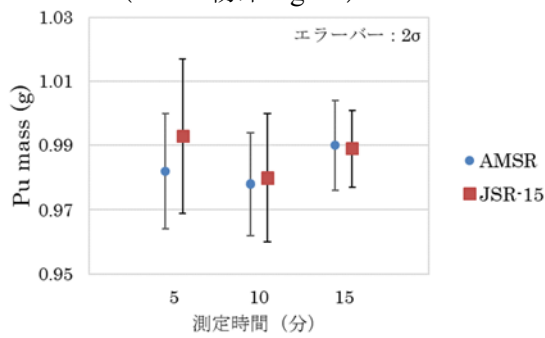


図 3.1.3-7 Pu 量 (Multiplicity 法) の比較
(MOX 粉末 1g-Pu)

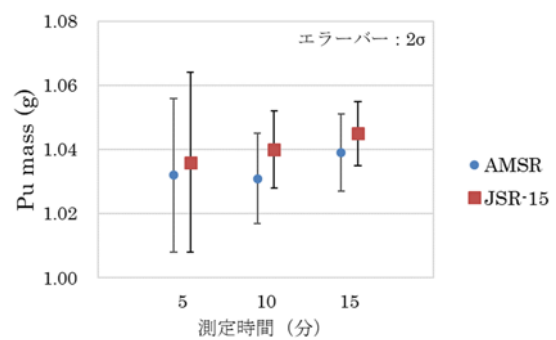


図 3.1.3-8 Pu 量 (Known α 法) の比較
(MOX 粉末 1g-Pu)

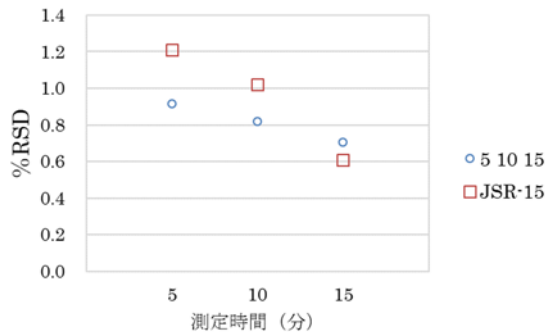


図 3.1.3-9 Pu 量 (Multiplicity 法) の%RSD
の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)

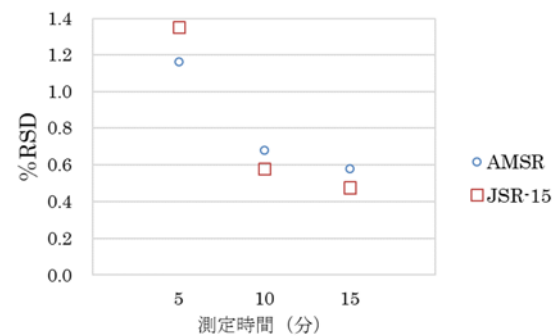


図 3.1.3-10 Pu 量 (Known α 法) の%RSD
の比較 (MOX 粉末 1g-Pu)

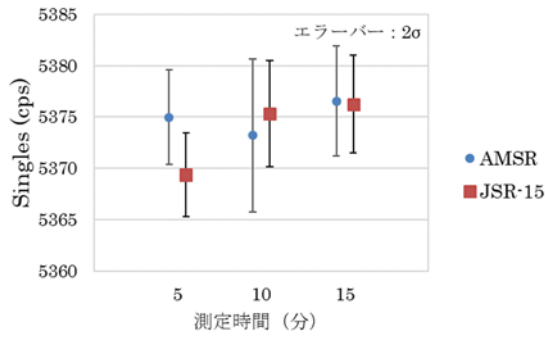


図 3.1.3-11 シングル値の比較
(MOX 粉末 9g-Pu)

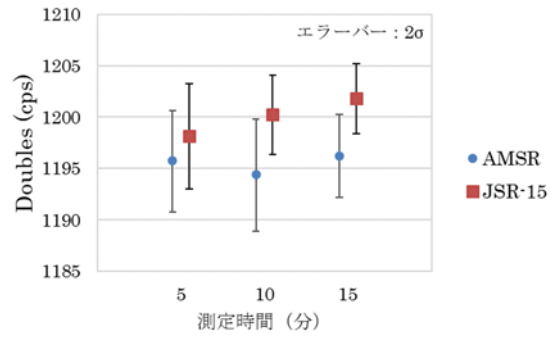


図 3.1.3-12 ダブル値の比較
(MOX 粉末 9g-Pu)

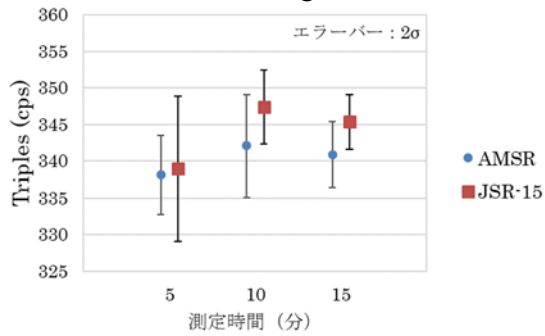


図 3.1.3-13 トリプル値の比較
(MOX 粉末 9g-Pu)

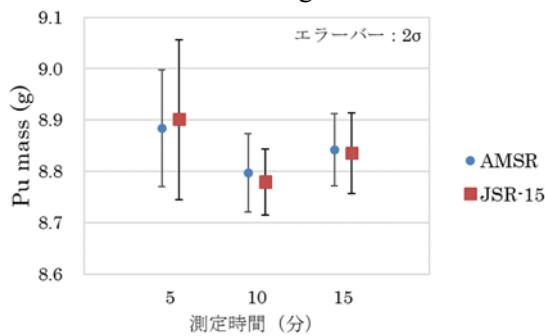


図 3.1.3-14 Pu 量 (Multiplicity 法) の比較
(MOX 粉末 9g-Pu)

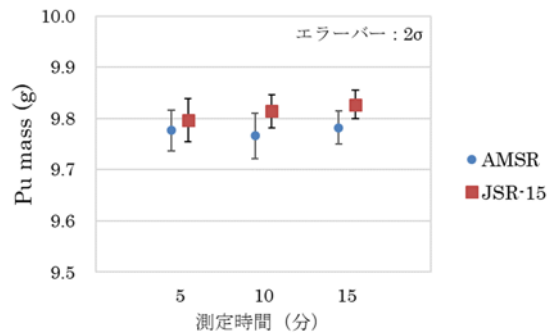


図 3.1.3-15 Pu 量 (Known α 法) の比較
(MOX 粉末 9g-Pu)

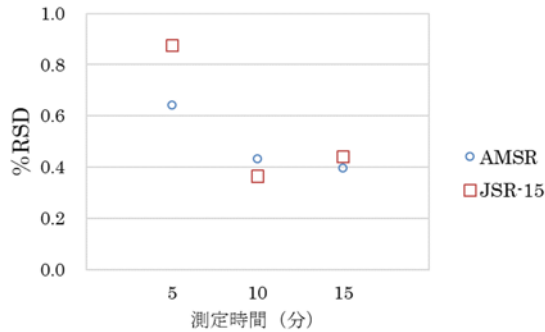


図 3.1.3-16 Pu 量 (Multiplicity 法) の%RSD
の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)

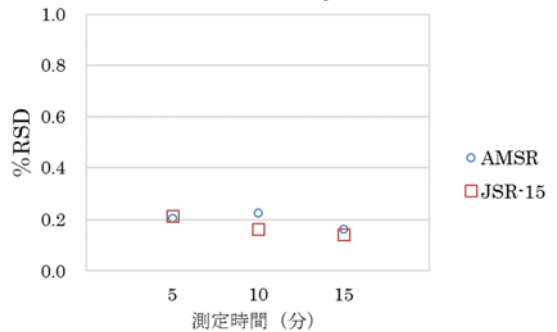


図 3.1.3-17 Pu 量 (Known α 法) の%RSD
の比較 (MOX 粉末 9g-Pu)

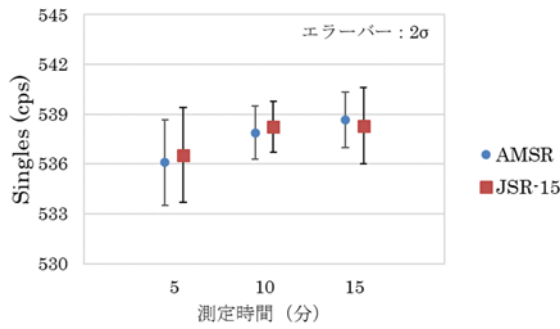


図 3.1.3-18 シングル値の比較
(MOX ペレット 1g-Pu)

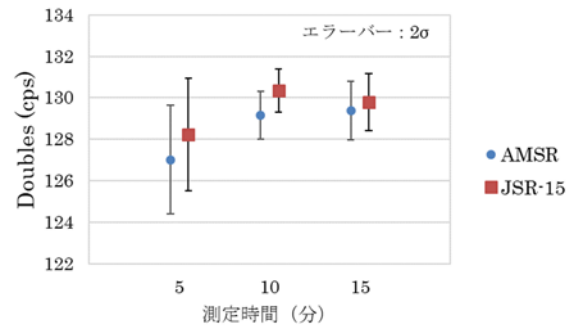


図 3.1.3-19 ダブル値の比較
(MOX ペレット 1g-Pu)

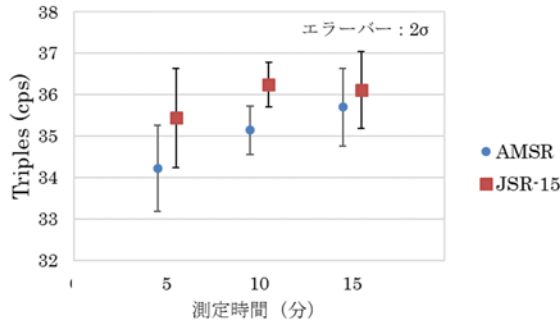


図 3.1.3-20 トリプル値の比較
(MOX ペレット 1g-Pu)

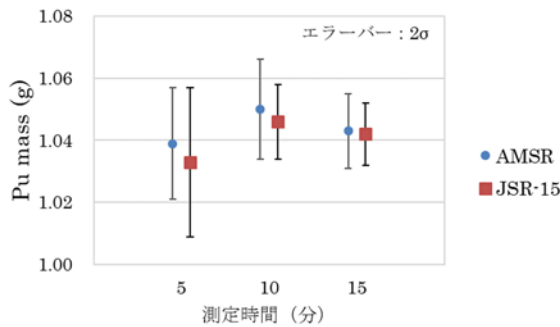


図 3.1.3-21 Pu 量 (Multiplicity 法) の比較
(MOX ペレット 1g-Pu)

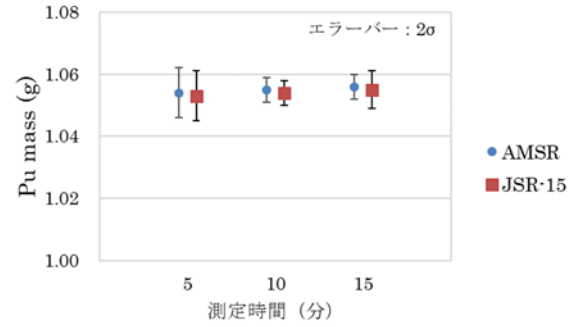


図 3.1.3-22 Pu 量 (Known α 法) の比較
(MOX ペレット 1g-Pu)

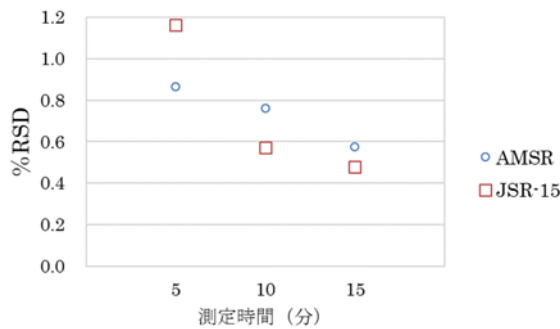


図 3.1.3-23 Pu 量 (Multiplicity 法) の%RSD
の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)

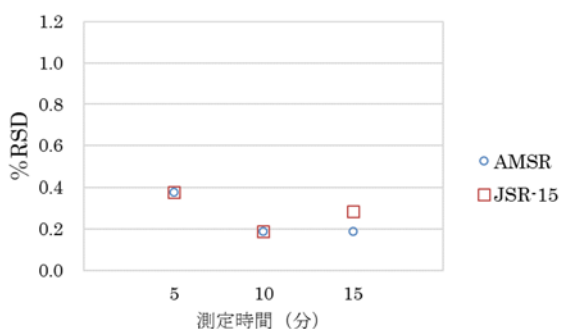


図 3.1.3-24 Pu 量 (Known α 法) の%RSD
の比較 (MOX ペレット 1g-Pu)

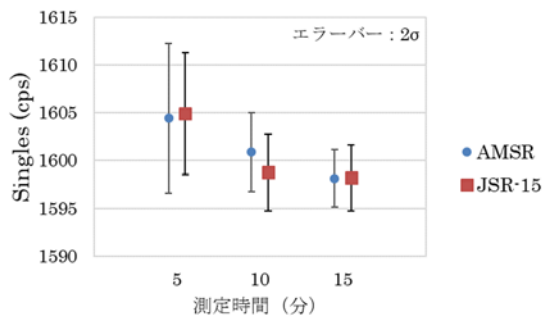


図 3.1.3.25 シングル値の比較
(MOX ペレット 3g-Pu)

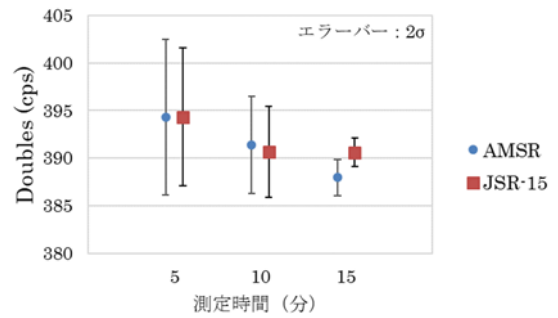


図 3.1.3.26 ダブル値の比較
(MOX ペレット 3g-Pu)

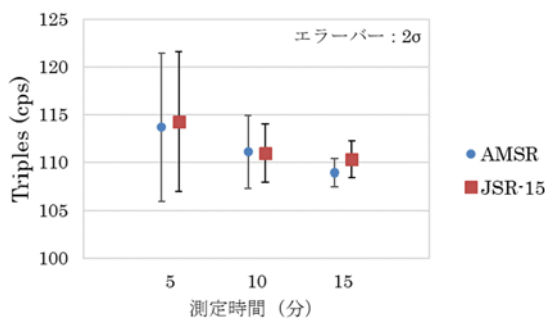


図 3.1.3.27 トリプル値の比較
(MOX ペレット 3g-Pu)

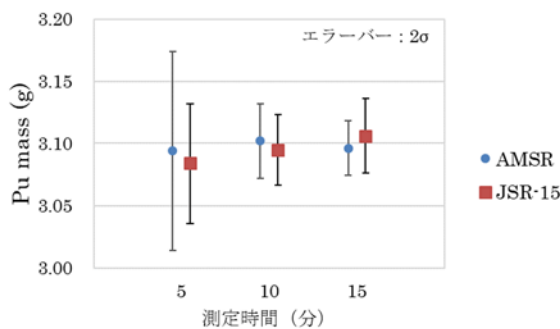


図 3.1.3.28 Pu 量 (Multiplicity 法) の比較
(MOX ペレット 3g-Pu)

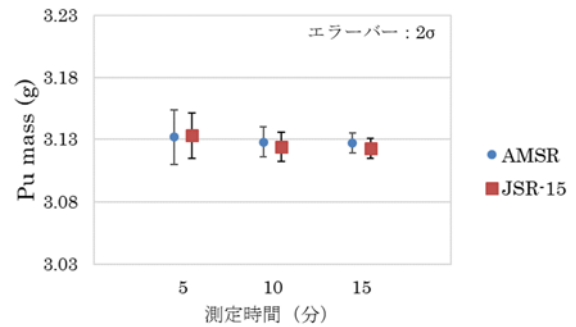


図 3.1.3.29 Pu 量 (Known α 法) の比較
(MOX ペレット 3g-Pu)

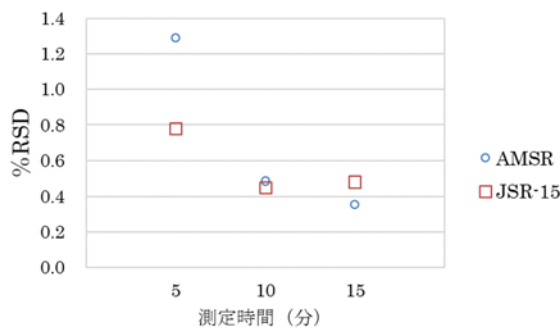


図 3.1.3.30 Pu 量 (Multiplicity 法) の%RSD
の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)

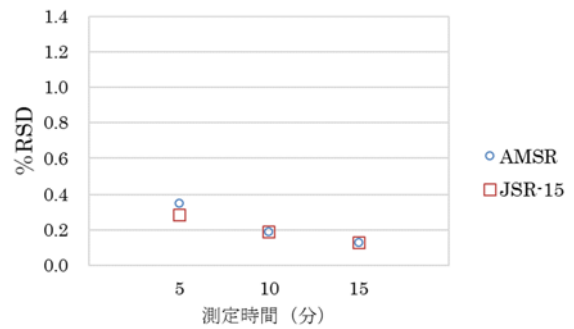


図 3.1.3.31 Pu 量 (Known α 法) の%RSD
の比較 (MOX ペレット 3g-Pu)

3.1.4 考察

Pu量及び性状の異なる複数のサンプルを測定し、AMSR及びJSR-15により取得した各計数値及びこれらより評価されたPu量は、いずれも誤差 (2σ) の範囲において一致し、有意な差はみられなかった。また、測定時間が同じ場合、AMSRとJSR-15の計数誤差に大きな差はなかった。したがって、AVIS測定においてJSR-15はAMSRの代替として使用可能である。

なお、各サンプル測定で取得したダブル値とトリプル値については、上記の通り誤差の範囲で一致していたが、JSR-15にて取得した値の方がAMSRにて取得した値よりも若干大きい傾向がみられた。これは、LANL報告書^(参考文献6) に示されている通り、JSR-15とAMSRのクロック周波数の相違によるものである。(JSR-15のクロック周波数:50MHz、AMSRのクロック周波数:4MHz)

3.2. プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器の測定性能確認試験

3.2.1 目的

保障措置検査で使用する前に液体窒素の冷却が必要なプルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器(HRGS)の冷却時間と測定精度の相関について評価し、HRGSの使用に必要な冷却時間について検討する。

3.2.2 方法

HRGSには、未冷却時に高電圧が印加されることにより検出器が損傷することを防止するため、HV Inhibit機能(冷却が完了すると、検出器から+12Vの電圧が多重波高分析装置(MCA)に印加される機能(図3.2.2-1参照)が備わっている。したがって、本試験では、液体窒素による冷却開始から本電圧が印加されるまでの時間を計測し、HRGSが測定可能となるまでの時間を確認するとともに、MOXサンプルの測定を行い、図3.2.2-2の例に示すような冷却時間と測定精度の相関について評価を行う。

本試験に使用するMOXサンプルのPu量及び同位体組成比を1.8項の表1.8-1及び表1.8-1に示す。なお、AVIS用HRGSの故障を2017年4月に確認したため、本試験には、代替としてJAEAが所有するHRGS(写真3.2.2-1及び写真3.2.2-2)を用いた。(試験期間:2017年11月~2018年3月)

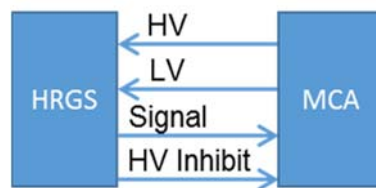


図 3.2.2-1 HRGS と MCA の接続図

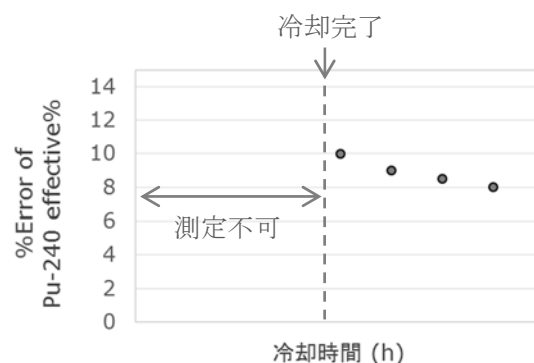


図 3.2.2-2 冷却時間と測定精度の相関 (イメージ)



写真 3.2.2-1 JAEA 所掌の HRGS (検出器)
(Canberra Model: GL0515R S/N: 04034924)

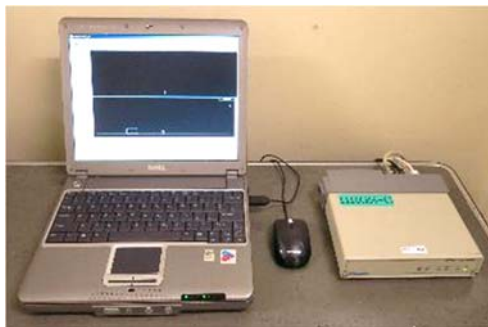


写真 3.2.2-2 JAEA 所掌の HRGS (MCA 及び PC)
(MCA : Canberra Model: IN2K S/N: 03030916)
(PC : DELL LATITUDE X300 PR04S)
(Software : Genie 2000 V2.1A、MGA version : MGA V9.63F)

詳細な手順を以下に示す。

- ① 検出器から出力される HV Inhibit ケーブルに電圧計を接続する。
- ② HRGS に液体窒素を充填する。また、充填時における HRGS を設置している部屋の温度及び湿度を記録する。
- ③ 10分経過毎に電圧計を確認し、+12Vの電圧が印加されるまでの時間を計測する。
- ④ ③の電圧印加確認後（検出器冷却が完了後）、HV Inhibit ケーブルを MCA に接続し、検出器に高電圧を印加する。
- ⑤ 図 3.2.2-3 に示すように HRGS の検出部の前面 100mm の位置に MOX サンプルを配置する。配置には、測定中のサンプル位置変動防止のため、写真 3.2.2-3 に示す固定治具を使用する。また、Cd フィルター1.25mm をコリメーター前面に取り付ける。
- ⑥ 15 分間の測定を行い、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比、 ^{240}Pu 実効質量(%)及び誤差を確認する。
- ⑦ ⑥を 20 分経過毎に行う。
- ⑧ ⑥~⑦の結果より、 ^{240}Pu 実効質量(%)等の誤差と冷却時間との相関を評価する。

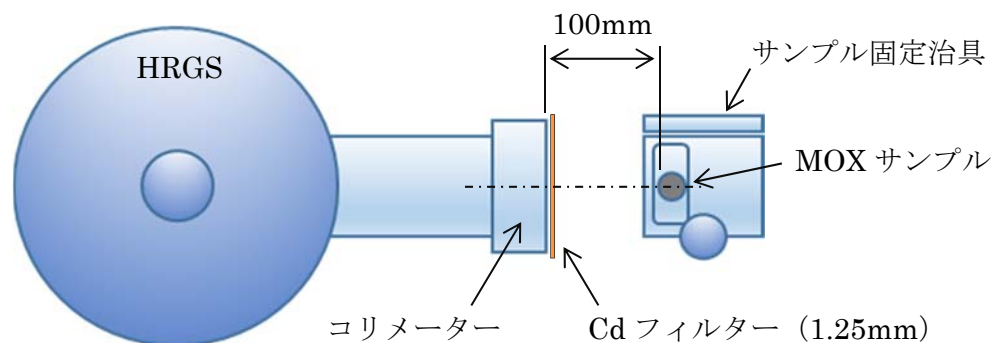


図 3.2.2-3 HRGS へのサンプル配置 (平面図)

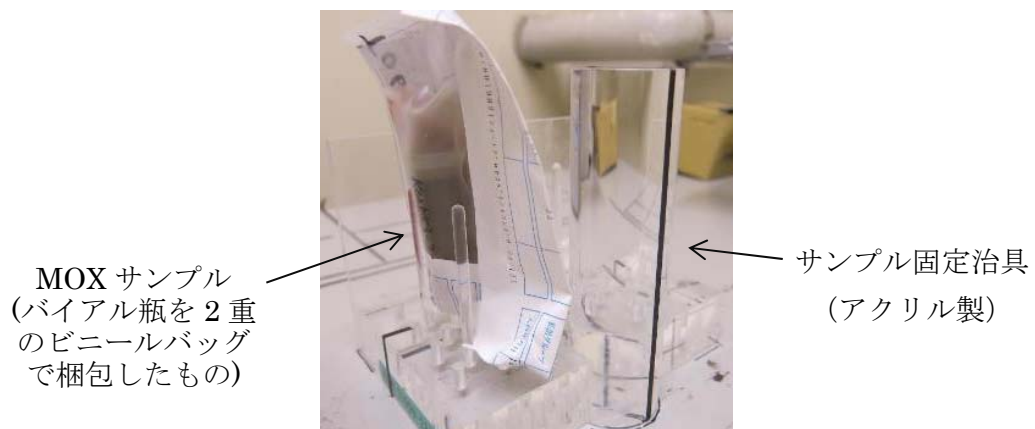


写真 3.2.2-3 MOX サンプル及びサンプル固定治具

3.2.3 結果

HRGSへ液体窒素を充填後、冷却が完了し、測定が可能になるまでの時間及び充填時におけるHRGSを設置している部屋の温度、湿度の計測結果を表3.2.3-1に示す。

いずれの測定においても冷却完了時間は1時間40分～1時間50分程度であった。また、各試験日における部屋の温度及び湿度は、17℃～23℃及び18%～29%の範囲で変動した。なお、2018年1月期は、施設保守の都合上、試験が実施不可能であったため、代替として2月期に2回試験を実施した。

表 3.2.3-1 HRGS の冷却時間

	冷却完了時間	部屋の温度 (°C)	部屋の湿度 (%)
2017年11月	1時間40分	17	27
2017年12月	1時間50分	18	25
2018年2月(1)	1時間50分	23	18
2018年2月(2)	1時間50分	17	24
2018年3月	1時間50分	19	29

冷却完了後20分経過毎にMOXサンプル測定を実施し、 ^{240}Pu 実効質量(%), $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比を評価した。評価結果を図3.2.3-1～図3.2.3-30に示す。

^{240}Pu 実効質量(%), $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、いずれの冷却時間においても誤差(2σ)の範囲において一致した。

また、 ^{240}Pu 実効質量(%), $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の誤差(式(3.2)～式(3.4))と液体窒素充填後の経過時間との相関を評価した結果、各誤差は、いずれも冷却完了直後の測定では、数十～数百%と非常に大きかったが、これより20分経過後の測定ではそれぞれ6%、5%及び30%程度に減少し、その後の測定においてもほぼ同等の値であった。

$$\%RSD(^{240}\text{Pu実効質量}(\%)) = \frac{\sigma(^{240}\text{Pu実効質量}(\%))}{^{240}\text{Pu実効質量}(\%)} \times 100 \quad \dots \quad (3.2)$$

$$\%RSD(^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu比}) = \frac{\sigma(^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu比})}{^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu比}} \times 100 \quad \dots \quad (3.3)$$

$$\%RSD(^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu比}) = \frac{\sigma(^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu比})}{^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu比}} \times 100 \quad \dots \quad (3.4)$$

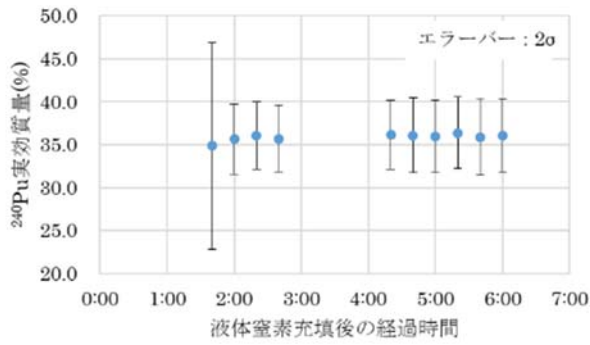


図 3.2.3-1 ^{240}Pu 実効質量(%)
(2017年11月)

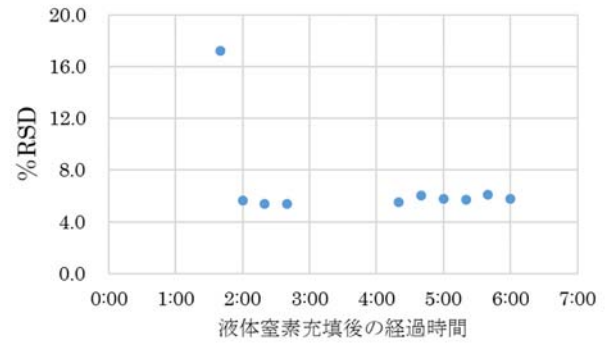


図 3.2.3-2 %RSD (^{240}Pu 実効質量(%))
(2017年11月)

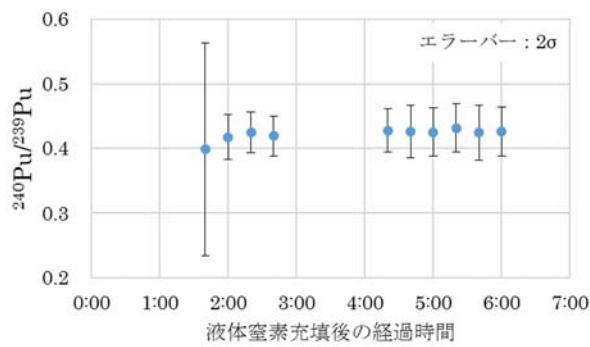


図 3.2.3-3 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2017年11月)

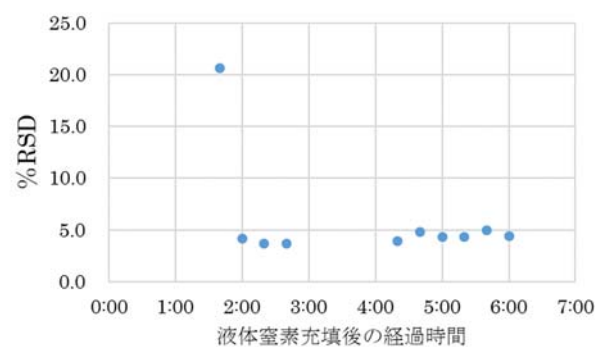


図 3.2.3-4 %RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2017年11月)

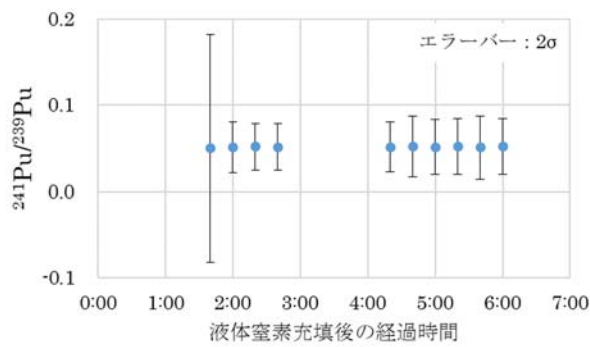


図 3.2.3-5 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2017年11月)

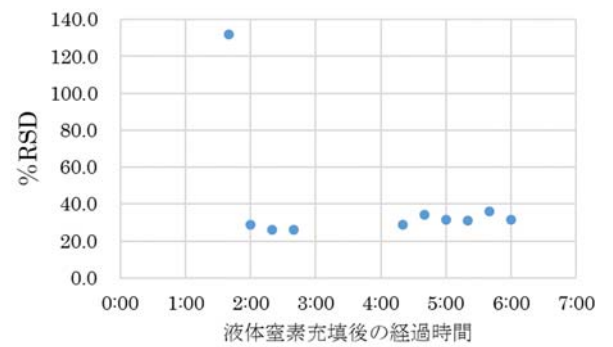


図 3.2.3-6 %RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2017年11月)

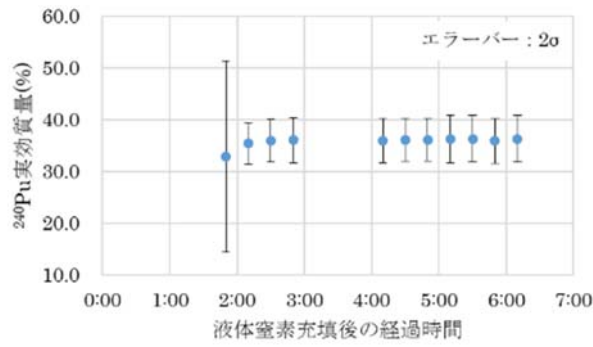


図 3.2.3-7 ^{240}Pu 実効質量(%)
(2017年12月)

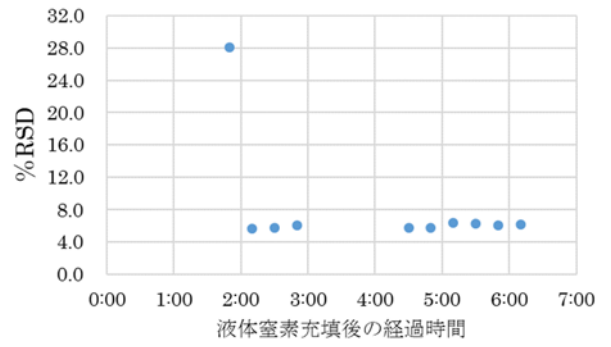


図 3.2.3-8 %RSD (^{240}Pu 実効質量(%))
(2017年12月)

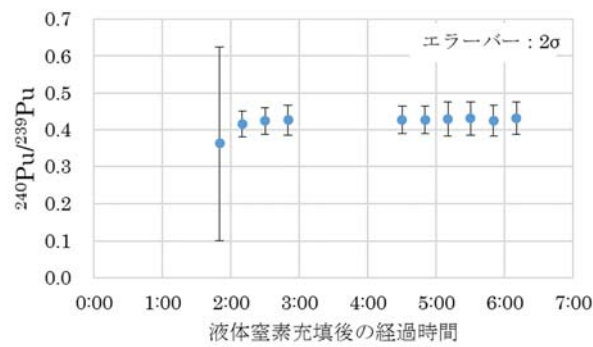


図 3.2.3-9 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2017年12月)

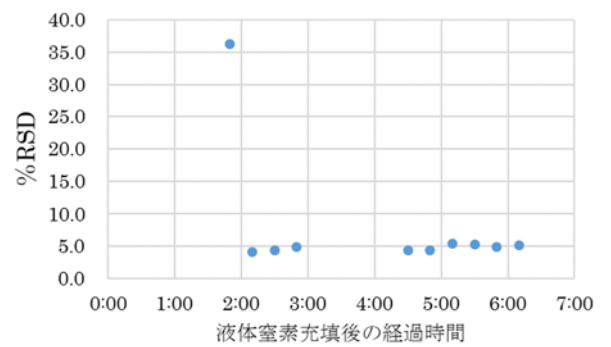


図 3.2.3-10 %RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2017年12月)

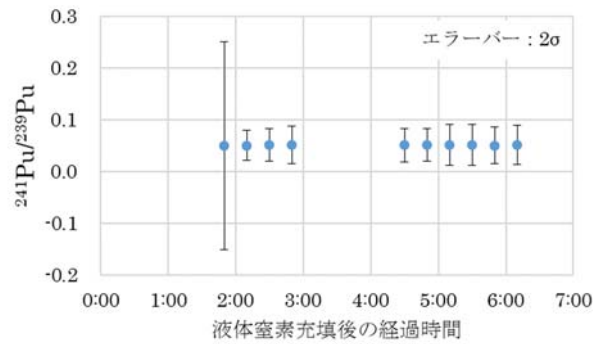


図 3.2.3-11 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2017年12月)

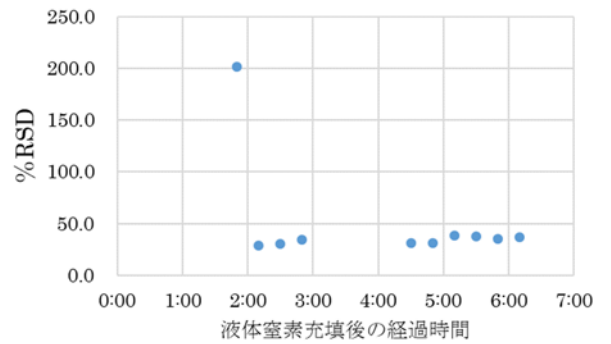


図 3.2.3-12 %RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2017年12月)

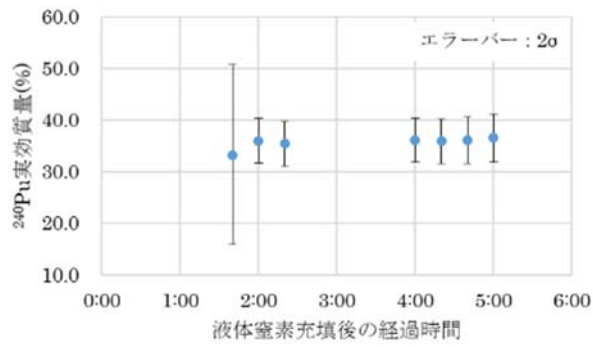


図 3.2.3-13 ^{240}Pu 実効質量(%)
(2018年2月(1))

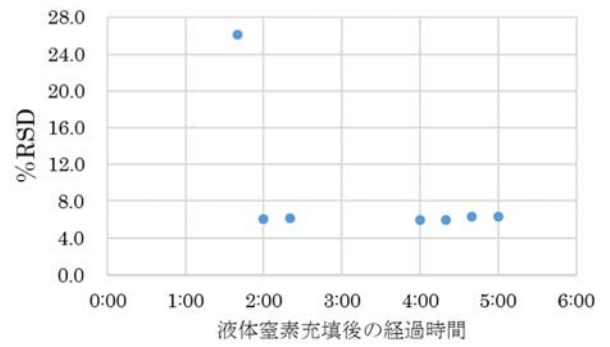


図 3.2.3-14 %RSD (^{240}Pu 実効質量(%))
(2018年2月(1))

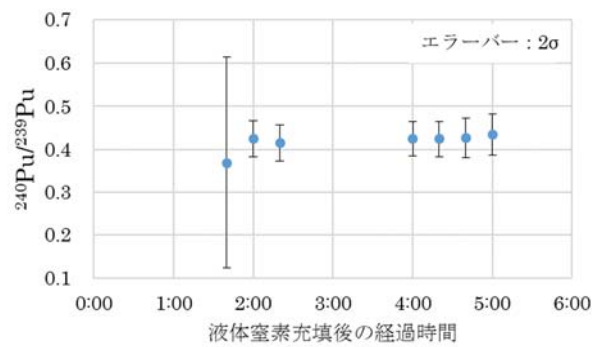


図 3.2.3-15 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2018年2月(1))

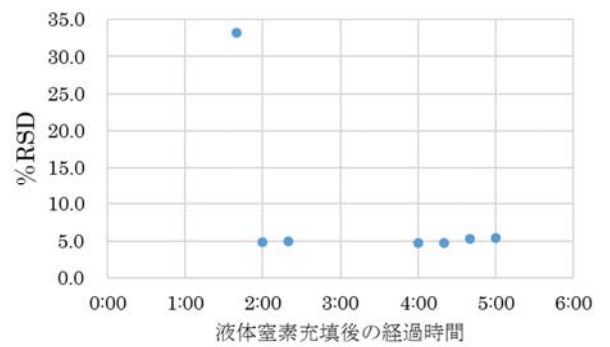


図 3.2.3-16 %RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2018年2月(1))

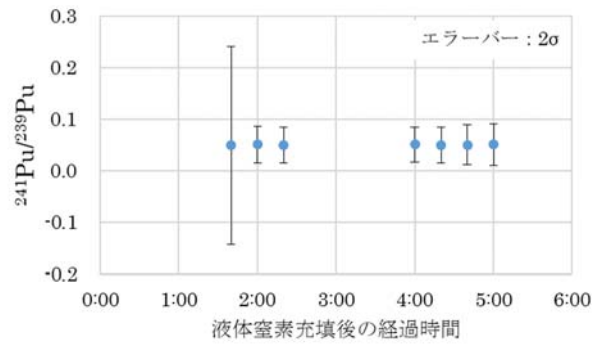


図 3.2.3-17 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2018年2月(1))

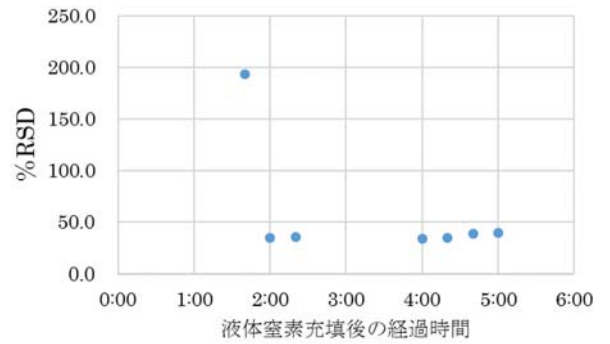


図 3.2.3-18 %RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2018年2月(1))

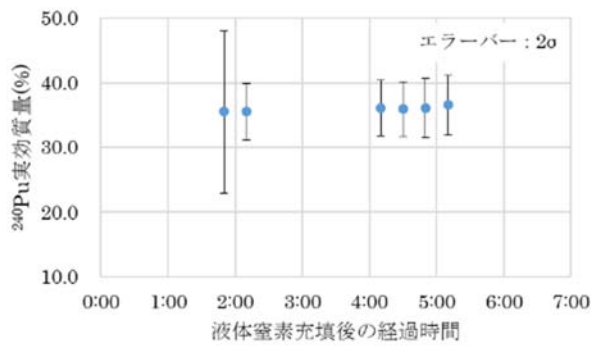


図 3.2.3-19 ^{240}Pu 実効質量(%)
(2018年2月(2))

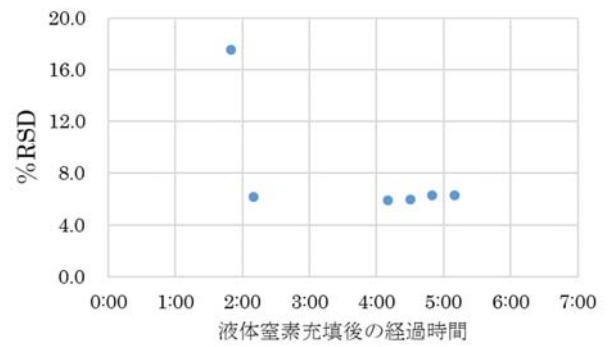


図 3.2.3-20 %RSD (^{240}Pu 実効質量(%))
(2018年2月(2))

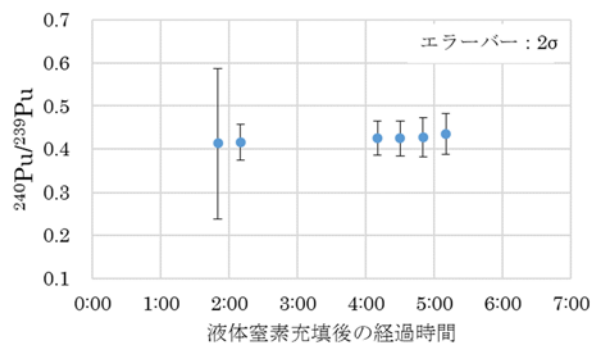


図 3.2.3-21 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2018年2月(2))

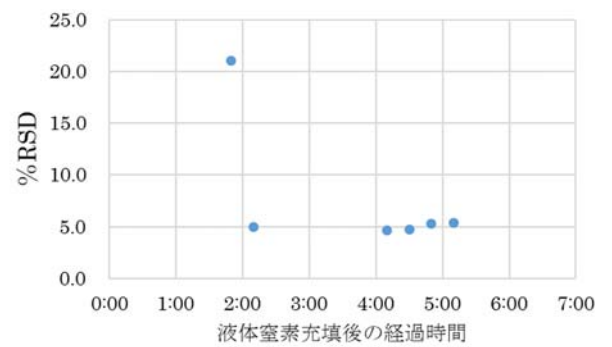


図 3.2.3-22 %RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2018年2月(2))

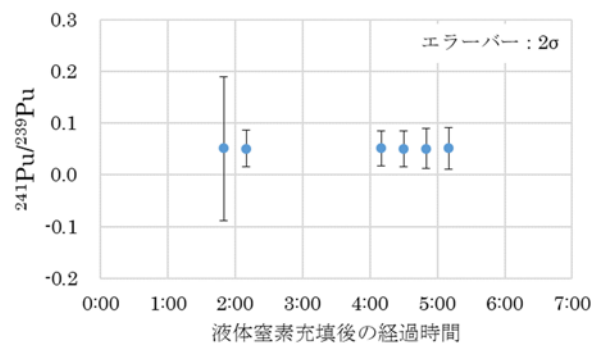


図 3.2.3-23 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2018年2月(2))

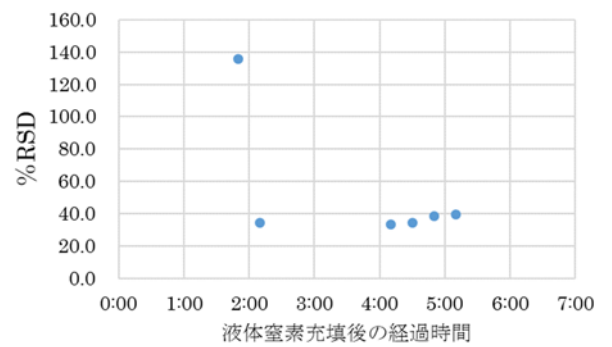


図 3.2.3-24 %RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2018年2月(2))

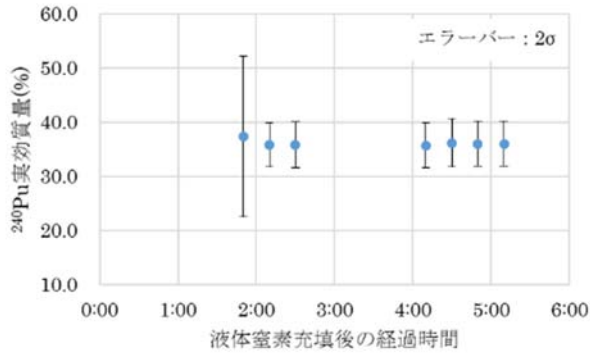


図 3.2.3-25 ^{240}Pu 実効質量(%)
(2018年3月)

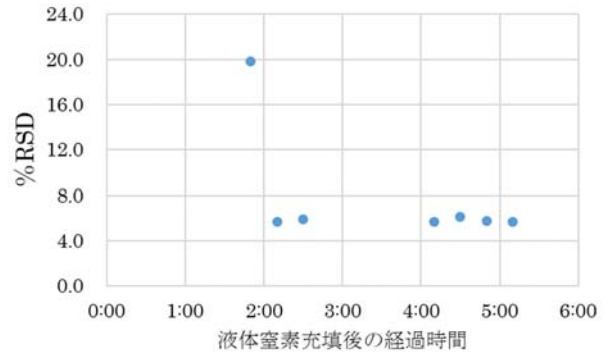


図 3.2.3-26 %RSD (^{240}Pu 実効質量(%))
(2018年3月)

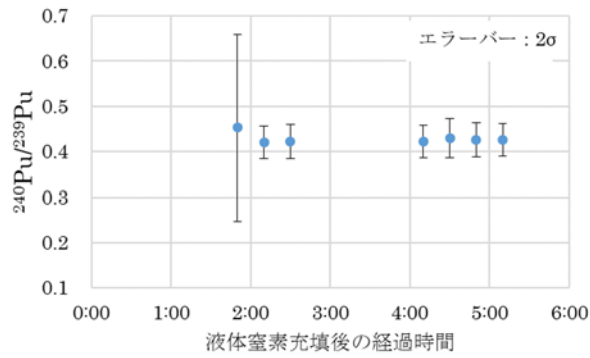


図 3.2.3-27 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2018年3月)

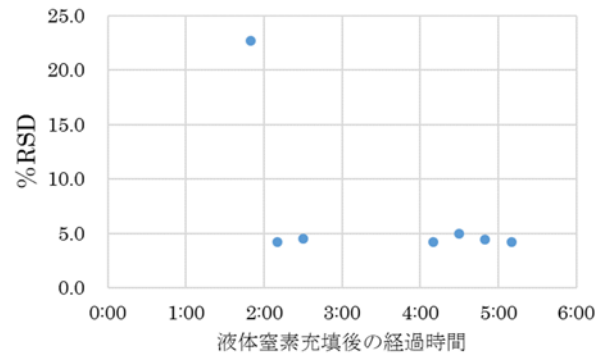


図 3.2.3-28 %RSD ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2018年3月)

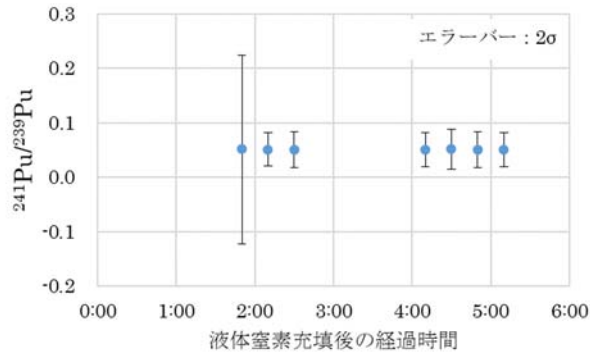


図 3.2.3-29 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比
(2018年3月)

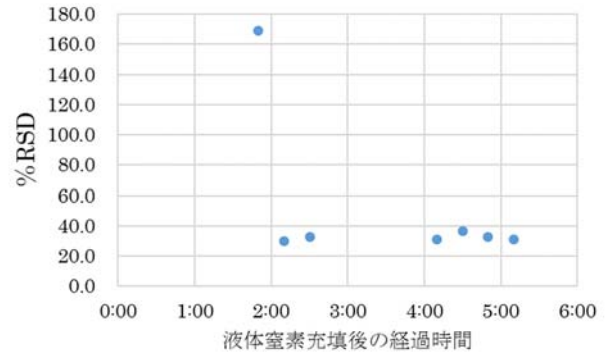


図 3.2.3-30 %RSD ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比)
(2018年3月)

3.2.4 考察

本試験で使用したHRGSは、2時間程度の冷却時間で使用可能となった。これは、本HRGSの規定の（メーカー指定の）冷却時間である4時間の約1/2の時間である。

冷却時間と測定誤差の相関を評価した結果、冷却完了直後は、誤差が大きいことが分かった。これは、冷却直後は熱励起によるノイズ等の原因により、分解能が低下していたためであると考えられる。参考として、図3.2.4-1及び図3.2.4-2に冷却完了直後及び冷却完了から約3時間経過後に取得した γ 線スペクトル及び半値幅（FWHM）を示す。

したがって、J-MOXにおいてHRGS測定を実施する際、メーカー指定の冷却時間経過前に測定を開始する場合は、検出器の冷却完了直後の測定は避け、冷却完了から20～30分以上経過後に行うことを推奨する。

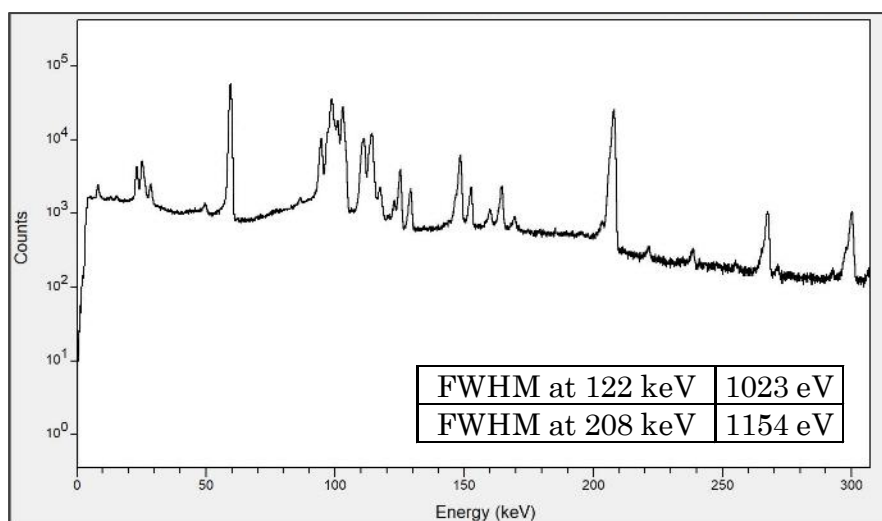


図 3.2.4-1 冷却完了直後の γ 線スペクトル及びFWHM（2018年2月測定）

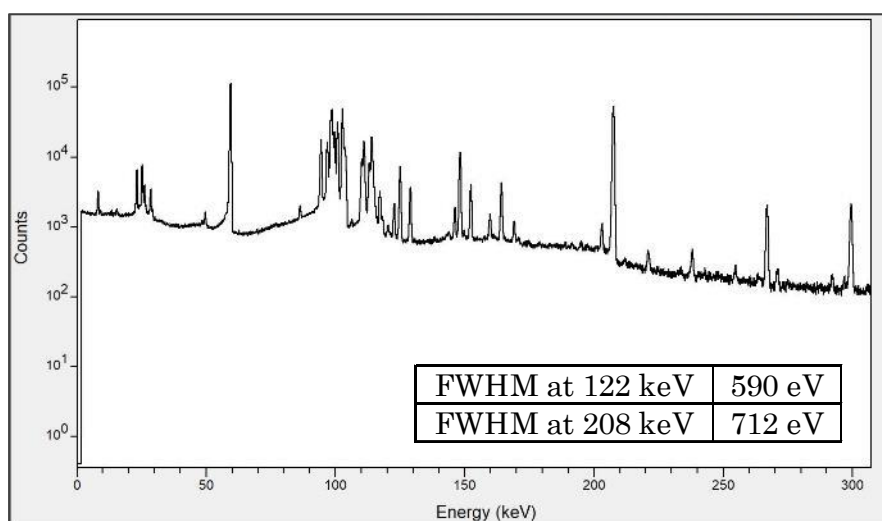


図 3.2.4-2 冷却完了から約3時間後の γ 線スペクトル及びFWHM（2018年2月測定）

4. 結論

AFAS の性能確認試験では、「MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性確認及び校正作業の効率化策の検討」及び「AFAS の機器の健全性確認方法の検討」を実施した。

「MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性確認及び校正作業の効率化策の検討」では、LANL が開発した MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズムの妥当性を確認するため、ふげんタイプの燃料集合体を用いた実測定を行い、LANL がシミュレーションにより評価したアルゴリズムとの比較を実施した。その結果、実測定と LANL の評価結果の傾向が一致したことから、当該アルゴリズムが妥当であることを確認した。

また、将来 J-MOX へ AFAS を設置した後に必要となる校正作業の効率化策を検討するため、実測定の体系をシミュレーションコードにより再現し、有効長測定に用いる測定パラメータのシミュレーションによる評価精度の確認を実施した。その結果、「シミュレーションにより評価された有効長測定パラメータ」を用いて算出した有効長と実際の有効長の差は最大約 2cm であり、AFAS の要求仕様書記載の性能条件（有効長の測定精度：2%未満、本試験に用いた燃料集合体に適用した場合±7.4cm 未満）を十分満たすものであったことから、将来 J-MOX においては、AFAS の校正にシミュレーションを用いることで、校正試験項目を削減できる可能性は十分あることを確認した。

「AFAS の機器の健全性確認方法の検討」では、J-MOX における実際の AFAS 設置環境を踏まえた AFAS の健全性確認方法について検討するため、最適な ^{252}Cf 線源配置位置の評価及び ^3He 比例計数管故障検知の実現性の評価を実施した。その結果、AFAS の各検出器中央に ^{252}Cf 中性子線源が配置不可能な場合でも、Fork 検出器においては検出器間中央位置、Collar 検出器においては検出器側面中央位置に線源を配置することで健全性確認が可能であることを確認した。また、Collar 検出器においては、約 0.2MBq 以上の ^{252}Cf 中性子線源を用い、且つシングル値による評価を行うことにより、 ^3He 比例計数管の故障検知が可能であることを確認した。

AVIS の性能確認試験では、「中性子計数装置の確認試験」、「プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器の測定性能確認試験」を実施した。

「中性子計数装置の確認試験」では、メーカーの供給停止により入手困難となった AMSR 以外の中性子計数装置の使用の可能性について検討するため、JSR-15 及び AMSR による MOX サンプル測定を実施し、それぞれの測定結果を比較した。その結果、両装置により取得された各計数値及び Pu 量は、いずれも誤差 (2σ) の範囲において一致し、有意な差はみられなかったことから、JSR-15 は AMSR の代替として使用可能であることを確認した。

「プルトニウム同位体組成比検認用ゲルマニウム検出器の測定性能確認試験」では、HRGS の使用に必要な冷却時間を確認するため、液体窒素充填から測定が可能と

なるまでの時間の確認及び冷却時間と測定精度の相関の評価を実施した。その結果、本試験で使用した HRGS においては、規定の冷却時間の約 1/2 である 2 時間程度で冷却が完了することを確認した。また、測定誤差は、冷却完了直後は分解能の低下により大きいですが、冷却完了から約 20 分経過後は小さくなり、それ以降はほぼ一定となることを確認した。

【参考文献】

- 参考文献 1 : M. T. Swinhoe, J. B. Marlow, and H.O. Menlove, “Active Length Analysis Algorithm for Fuel Assemblies in the Advanced Fuel Assay System (AFAS)” (2015) (LA-CP-15-20630)
- 参考文献 2 : “AFAS Mechanical Drawing” (2009) (68Y-156116)
- 参考文献 3 : M. T. Swinhoe, J. B. Marlow, and H.O. Menlove, “Technical Specification for the Advanced Fuel Assembly Assay System (AFAS)” (2007) (LA-CP-07-1148)
- 参考文献 4 : User Requirements AFAS Version No.1, IAEA (2007) (SG-TE-GNRL-ZZ-1010)
- 参考文献 5 : User Requirements AVIS Version No.1, IAEA (2007) (SG-TE-GNRL-ZZ-1020)
- 参考文献 6 : Newell, Matthew R., Swinhoe, Martyn Thomas, Bourret, Steven C., “Shift Register Clock Rate Effects on Coincidence Collection 50MHz versus 4MHz Comparison Tests” (2015) (LA-CP-15-28593)

MOX 新燃料集合体の有効長評価アルゴリズム

J-MOX では、図 1 に示すように、Top Fork 及び Bottom Fork 検出器は、集合体有効長の上端及び下端位置に、Collar 検出器は、その中間位置に配置される。集合体の有効長は、式 1 に示すこれらの検出器で取得したシングル値の比の和 ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] から求められる。

$$\text{ratio} [(Top + Bottom) / Collar] = \frac{S_T + S_B}{S_C} \quad \dots \dots \dots \text{(式 1)}$$

但し、 S_T : Top Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_B : Bottom Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_C : Collar 検出器で取得したシングル値 (cps)

この ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] は、測定される集合体の有効長のみ依存し、Pu 量には依存しない。この原理を利用し、初期キャリブレーション時に「標準」となる集合体を測定し評価された ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関 (校正曲線) から、図 2 に示すように、有効長を求めることができる。LANL の評価^(*)では、本校正曲線は図 3 に示すような 3 次関数の曲線になると想定されている。

*1: 参考文献 Active Length Analysis Algorithm for Fuel Assemblies in the Advanced Fuel Assay System (AFAS) (LA-CP-15-20630)

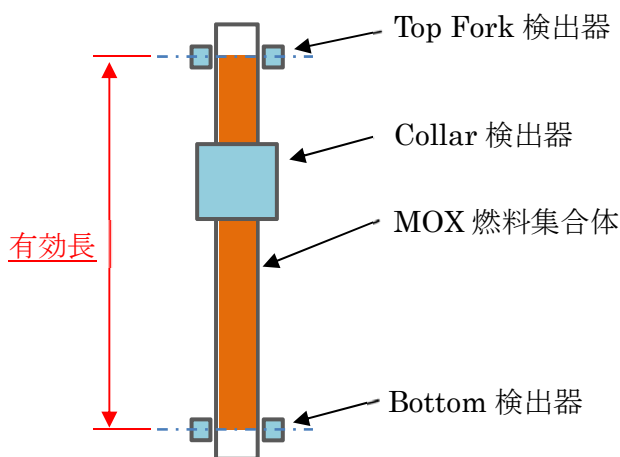


図 1 J-MOX における MOX 燃料集合体と AFAS 検出器の配置

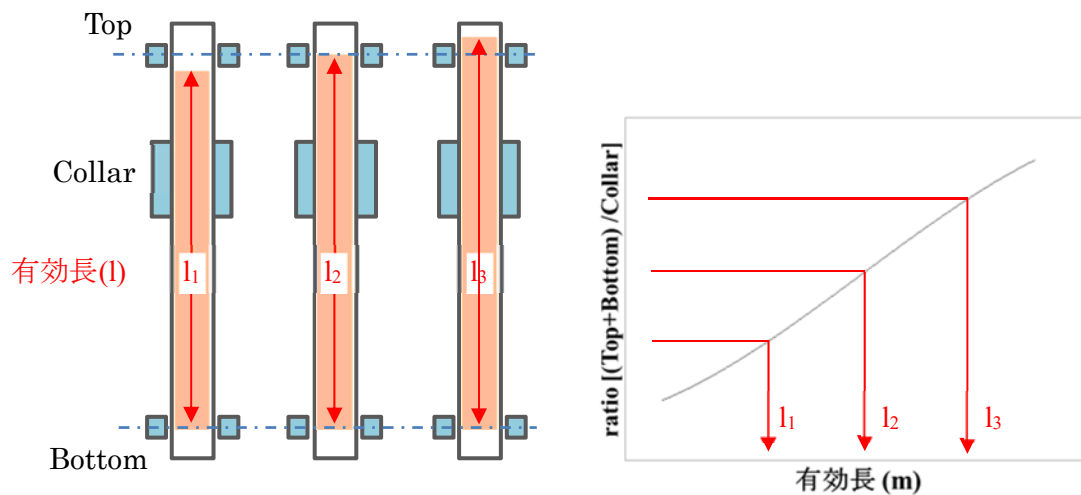


図 2 ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関 (概念)

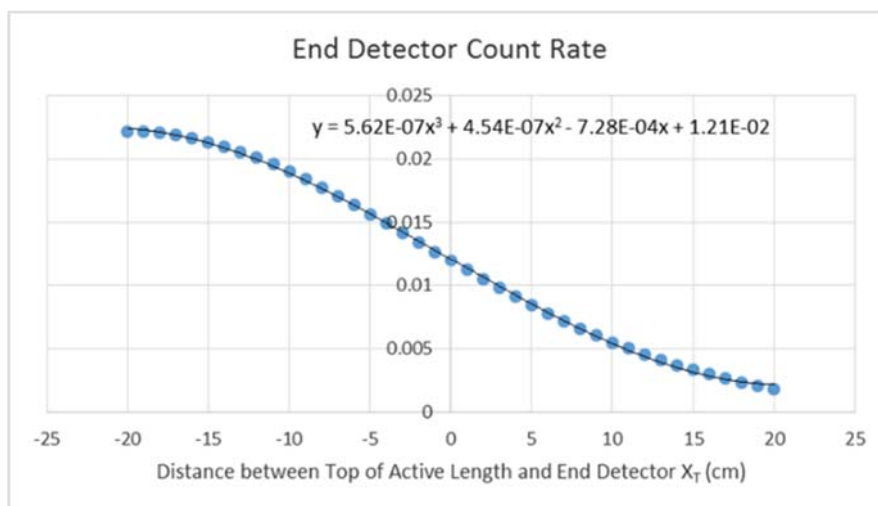


図 3 LANL 評価