

委託業務成果報告書

平成 26 年度

大型混合酸化物燃料加工施設保障措置試験研究委託費
(大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験) 事業

平成 27 年 3 月

公益財団法人 核物質管理センター

平成 26 年度大型混合酸化物燃料加工施設保障措置試験研究委託費
(大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験) 事業

要 旨

本報告書は、原子力規制庁との平成 26 年度大型混合酸化物燃料加工施設保障措置試験研究委託費（大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験）事業による受託契約に基づき、公益財団法人核物質管理センターが平成 26 年 4 月 1 日より平成 27 年 3 月 31 日までの期間に実施した業務に関する成果報告である。

大型 MOX 燃料加工施設（以下、「JMOX」という。）では、新技術の導入等により運転が自動化されるとともに、大量の核燃料物質を取り扱うため、既存の保障措置技術では有効な保障措置の適用が困難となる。このため、最小限の支出で適切な保障措置手法が合理的に適用されるよう、施設的设计・建設の進捗に合わせて、各種保障措置システムの開発及び新規保障措置手法の最適な適用を図るため、下記 4 項目について技術開発を実施した。

(1) MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の性能確認試験

IPCA (Improved Plutonium Canister Assay system) は原料 MOX 粉末受入貯蔵区域において MOX 原料粉末貯蔵容器中の Pu 質量を正確に測定する測定機器であり、IPCA を仮設置している米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) において、同研究所が所有する放射線源を使用し、平成 22 年より実施している長期性能確認試験の一環として、平成 24 年度より着手した模擬運転下における性能確認試験（統合性能確認試験）を行った。具体的には、

- ① 長期管理限界の妥当性確認
- ② ^3He 比例計数管の不具合の検知に係る試験
- ③ 低エネルギーガンマ線遮蔽材の検討
- ④ MOX 原料粉末に含まれる水分量の影響の検討
- ⑤ 測定手順書の作成

を実施した。

(2) 燃料集合体測定機器 (AFAS) の性能確認試験

新燃料集合体に対し部分欠損レベルの測定を可能とする AFAS (Advanced Fuel assembly Assay System) は、集合体中の Pu 質量を正確に測定することを目的として加圧水型原子炉 (PWR) 用及び沸騰水型原子炉 (BWR) 用が製作された。平成 26 年度は、AFAS を仮設置

している（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）核燃料サイクル工学研究所において、同研究所が所有する放射線源及び MOX 燃料集合体と PWR 用 MOX 新燃料集合体向け AFAS を使用して、平成 22 年より実施している長期性能確認試験の一環として、平成 24 年度に着手した模擬運転下における性能確認試験（統合性能確認試験）を行った。

- ① 維持管理手法の検討
- ② PWR 用 MOX 新燃料集合体向け AFAS 中央部検出器の検出効率の確認
- ③ 短尺燃料棒を有する燃料集合体の有効長測定に係る検討
- ④ ^3He 比例計数管の故障の検知に係る試験
- ⑤ 測定手順書の作成

(3) バルク工程内 MOX 粉末・ペレット（サンプル）測定機器（AVIS）の性能確認試験

AVIS（Advanced Verification for Inventory Samples system）は MOX の粉末及びペレットのバイアス欠損を検知可能とする精度を有する測定を行うことを目的に製作された NDA 機器である。平成 26 年度は、AVIS を仮設置している JAEA 核燃料サイクル工学研究所において、同研究所が所有する放射線源（標準線源）及び MOX 試料を使用して、平成 22 年より実施している長期性能確認試験の一環として、平成 24 年度に着手した模擬運転下における性能確認試験（統合性能確認試験）を行った。

- ① 維持管理手法の検討
- ② プルトニウム同位体比評価の性能確認
- ③ ^3He 比例計数管の故障の検知に係る検討
- ④ 測定手順書の作成

(4) データ収集・評価システムの機能評価

大型 MOX 燃料加工施設の燃料製造工程に設置される各保障措置機器からの査察側 NDA データと施設側申告データをデータベースに格納し、ニア・リアルタイム計量管理(NRTA)により検認評価するシステム「データ収集・評価システム」は、①施設側申告データの評価機能、②査察側 NDA データの評価機能、③ランダム中間査察の在庫検認データ評価機能から構成されている。

平成 26 年度は、前年度に引き続き、事業者が検討している計量管理を反映した計量管理モデル設定により同様なシミュレーションを行い②及び③の機能の評価を行った。

シミュレーションの実施に当たっては NDA の測定精度及びサンプリング数の検討を合わせて行った。

目 次

1. MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の性能確認試験	1
1.1. はじめに.....	1
1.2. 長期管理限界の妥当性確認 (継続)	2
1.2.1. 中性子検出器の長期管理限界の妥当性確認.....	2
1.2.2. ガンマ線検出器の長期管理限界の妥当性確認	5
1.2.3. 重量測定装置 (ロードセル) の長期管理限界の妥当性確認	11
1.2.4. 最適な放射線源の選定に係る検討	11
1.2.5. 気候変動が各種パラメータにあたる影響の評価.....	13
1.2.6. パラメータの再確認	16
1.3. ^3He 比例計数管の不具合の検知に係る試験	18
1.4. 低エネルギーガンマ線遮蔽材の検討	20
1.5. MOX 原料粉末に含まれる水分量の影響の検討.....	23
1.6. 測定手順書の作成 (継続)	25
2. 燃料集合体測定機器 (AFAS) の性能確認試験	26
2.1. はじめに.....	26
2.2. 試験の概要	28
2.2.1. 試験対象のシステム	28
2.2.2. 試験用測定パラメータ.....	28
2.2.3. 試験に使用した線源	29
2.2.4. 試験に使用した封入棒集合体.....	29
2.3. 維持管理手法の検討 (継続)	31
2.4. PWR 用 MOX 新燃料集合体向け AFAS 中央部検出器の検出効率の確認.....	40
2.5. 短尺燃料棒を有する燃料集合体の有効長測定に係る検討	45
2.5.1. 9×9A 型燃料集合体の検認測定方法.....	46
2.5.2. シミュレーション評価.....	48
2.5.3. 9×9A 型燃料集合体の検認測定精度の確認に係る試験項目	52
2.5.4. バックグラウンド測定.....	52
2.5.5. 集合体移動状態における Collar 検出器の測定精度評価	53

2.5.6.	短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響評価	63
2.5.7.	Collar 検出器の検出効率プロファイル比較評価	68
2.6.	^3He 比例計数管の故障の検知に係る試験	72
2.7.	測定手順書の作成 (継続)	77
3.	バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS) の性能確認試験	78
3.1.	はじめに	78
3.2.	試験の概要	80
3.2.1.	試験の概要	80
3.2.2.	試験用測定パラメータ	80
3.2.3.	試験に使用した線源	81
3.2.4.	試験に使用したサンプル	82
3.2.5.	試験の測定体系	82
3.3.	維持管理手法の検討	85
3.4.	プルトニウム同位体比評価の性能確認 (継続)	93
3.5.	^3He 比例計数管の故障の検知に係る検討	103
3.6.	測定手順書の作成	105
3.7.	その他	106
3.7.1.	MOX 試料の 3 者 (施設者/NMCC DA/AVIS) の比較	106
4.	データ収集・評価システムの機能評価	109
4.1	査察側測定データを用いた物質収支の評価	110
4.1.1	シミュレーション条件	110
4.1.2	シミュレーション結果	111
4.2	査察側測定データを用いた物質収支による損失検知能力	125
4.2.1	シミュレーション条件	125
4.2.2	PWR 燃料製造キャンペーンの結果	126
4.2.3	BWR 燃料製造キャンペーンの結果	130
4.3	在庫検認データ評価機能の評価	133
4.3.1	システム概要	133
4.3.2	計量ユニットの在庫量分布	137
4.3.3	シミュレーションによる機能の評価	141

付録 1	MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の測定手順書 (案)	153
1.	MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA)	154
2.	システム構成	154
2.1.	中性子検出器	154
2.2.	ガンマ線検出器	155
2.3.	ロードセル	156
2.4.	ID カメラ	156
2.5.	不正開封防止(Tamper-Proof)	156
2.6.	回転機能	157
3.	点検手順	158
4.	校正手順	158
5.	定期的な健全性確認(ノーマリゼーション)	159
5.1.	中性子検出器	159
5.2.	ガンマ線検出器	159
5.3.	ロードセル	159
5.4.	ID カメラ	160
6.	非立会測定	160
7.	メンテナンス	160
8.	^3He 管のガス漏出等の故障検知手順	171
付録 2	燃料集合体測定機器 (AFAS) の測定手順書 (案)	173
1.	燃料集合体測定機器 (AFAS)	174
2.	システム構成	175
2.1.	中性子検出器	175
2.2.	不正開封防止(Tamper-Proof)	176
3.	点検手順	177

4. 校正手順.....	178
5. 定期的な健全性確認(ノーマリゼーション).....	178
6. 非立会測定	178
7. メンテナンス.....	178
8. ^3He 管のガス漏出等の故障検知手順	179
付録3 バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS) の測定手順書 (案)	181
1. バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS)	182
2. システム構成.....	184
2.1. 中性子検出器	184
2.2. ガンマ線検出器.....	184
3. 使用前点検手順.....	185
4. 校正手順.....	186
5. 検認測定手順.....	187
6. メンテナンス.....	187
7. ^3He 管のガス漏出等の故障検知手順	187

1. MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の性能確認試験

1.1. はじめに

MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA : Improved Plutonium Canister Assay System) は、JMOX の MOX 原料粉末貯蔵区域において、以下にあげる機能を有する査察官非立会型の非破壊測定機器の開発を目的に設計・製作された。

- (1) MOX 原料粉末容器内のプルトニウム質量をバイアス欠損レベルの精度で測定する (再処理施設からの受入時及び査察活動時)。
- (2) 再処理施設に払い出される MOX 原料粉末容器が空であることを確認するための測定を行う。

IPCA は図 1-1 に示すように、中性子検出器、電気冷却式ガンマ線検出器 (3 台)、重量測定装置 (以下、「ロードセル」と称す。) 及び MOX 原料粉末容器 の ID 番号を記録する装置 (カメラを想定) により構成される。

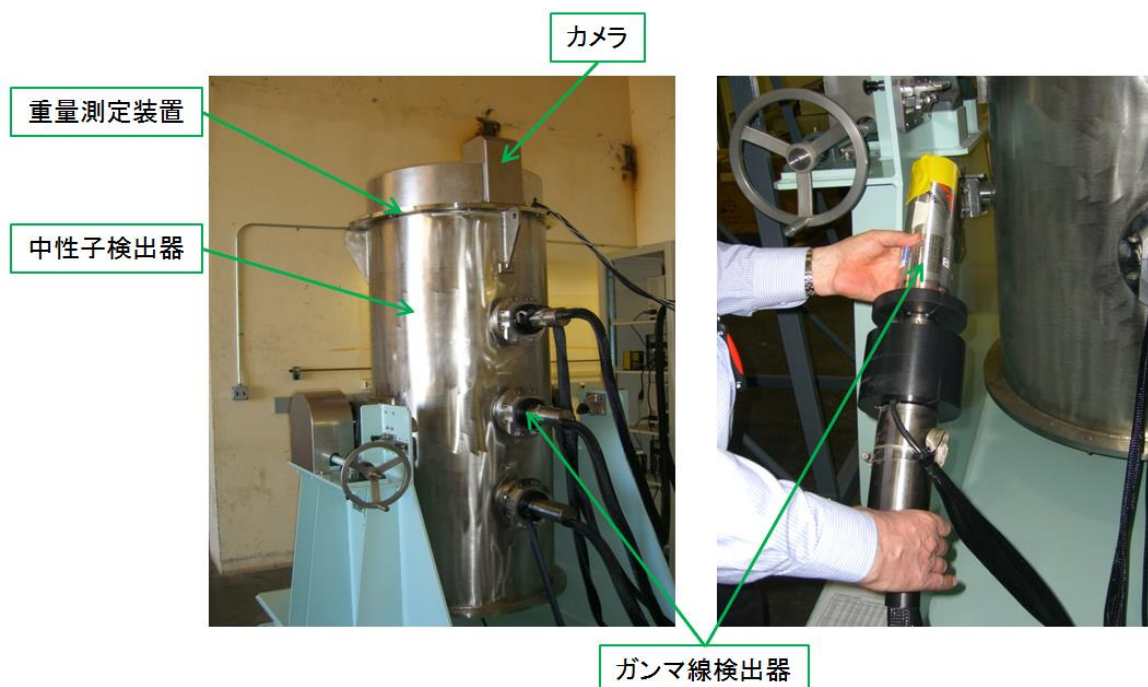


図 1-1. (左) LANL に仮設置中の IPCA の外観 (右) ガンマ線検出器の本体部分

平成 26 年度は、原子力規制庁が指定した米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) において、平成 22 年より文部科学省で開始した長期間性能確認試験の継続試験として、平成 24 年度に着手した統合性能確認試験を継続した。

表 1-1 に示す試験を実施した。各試験項目の詳細については、1.2 項以降に示す。

表 1-1 試験項目一覧

試験項目
長期管理限界の妥当性確認
³ He 比例計数管の不具合の検知に係る試験
低エネルギーガンマ線遮蔽材の検討
MOX 原料粉末に含まれる水分量の影響の検討

1.2. 長期管理限界の妥当性確認（継続）

前年度に引き続き、これまでの統合性能確認試験から得られた IPCA を構成する ³He 比例計数管による中性子検出器、HPGe（高純度ゲルマニウム）ガンマ線検出器及びロードセル（荷重変換器）の各種パラメータの長期管理限界の妥当性確認（長期管理限界内に収まっているか否かの確認）を月一回程度の頻度で行った（1.2.1 項～1.2.3 項参照）。

なお、上記試験にあわせて、JMOX への設置後のメンテナンス時に用いる最適な放射線源（²⁴⁴Cm 及び ²⁵²Cf）の選定（1.2.4 項参照）、短期的、長期的な気候変動が各種パラメータに与える影響の評価、検討（1.2.5 項参照）及び中性子検出器の ³He 比例計数管に貼付したカドミウム箔の経年変化を考慮したパラメータ（Die-away タイム、不感時間補正係数等の検出器の特性を表すパラメータ）の再確認（1.2.6 項参照）を行った。

1.2.1. 中性子検出器の長期管理限界の妥当性確認

(a) 方法

Pu 線源を用いて中性子検出器の検出効率を月一回程度の頻度で測定し、管理限界を設定して測定値がその範囲内に収まっているか否かの確認を行った。管理限界は、平成 25 年度に実施した「長期管理限界の妥当性確認試験」において同じ Pu 線源を月一回程度の頻度で測定して得られた検出効率のデータを用いて、その平均値と標準偏差を計算し、下限値を(平均値-2×標準偏差)、上限値を(平均値+2×標準偏差)で設定した。表 1-2 に、管理限界を示す。

また、中性子検出器を用いて AmLi 線源が放出する中性子の計数率（シングル値）を月一回程度の頻度で測定し、管理限界に収まっているか否かの確認を行った。管理限界は、平成 25 年度に実施した「長期管理限界の妥当性確認試験」において同じ AmLi 線源を月一回程度の頻度で測定して得られたシングル値のデータを用いて、検出効率と同様の方法で設定した。表 1-3 に、管理限界を示す。

表 1-2 Pu 線源の管理限界

単位：%

	平均値	標準偏差	管理限界	
			下限値	上限値
管理限界	7.34	0.07	7.20	7.49

表 1-3 AmLi 線源の管理限界

単位：cps

	平均値	標準偏差	管理限界	
			下限値	上限値
管理限界	24,596	42	24,512	24,681

(b) 結果

表 1-4 に、平成 25 年度からの Pu 線源を用いて測定した検出効率の結果を示す。管理限界に収まっているか否かは Yes/No で表記した。表 1-4 のデータを図示すると図 1-2 となる。この図において、破線は管理限界を示す。

表 1-4 Pu 線源の測定値

日付	検出効率 [%]	
2014/4/22	7.31	Yes
2014/5/28	7.36	Yes
2014/7/15	7.35	Yes
2014/8/13	7.35	Yes
2014/9/10	7.48	Yes
2014/10/21	7.38	Yes
2014/11/25	7.36	Yes
2014/12/22	7.34	Yes
2015/1/12	7.40	Yes
2015/2/10	7.30	Yes
2015/3/9	7.34	Yes

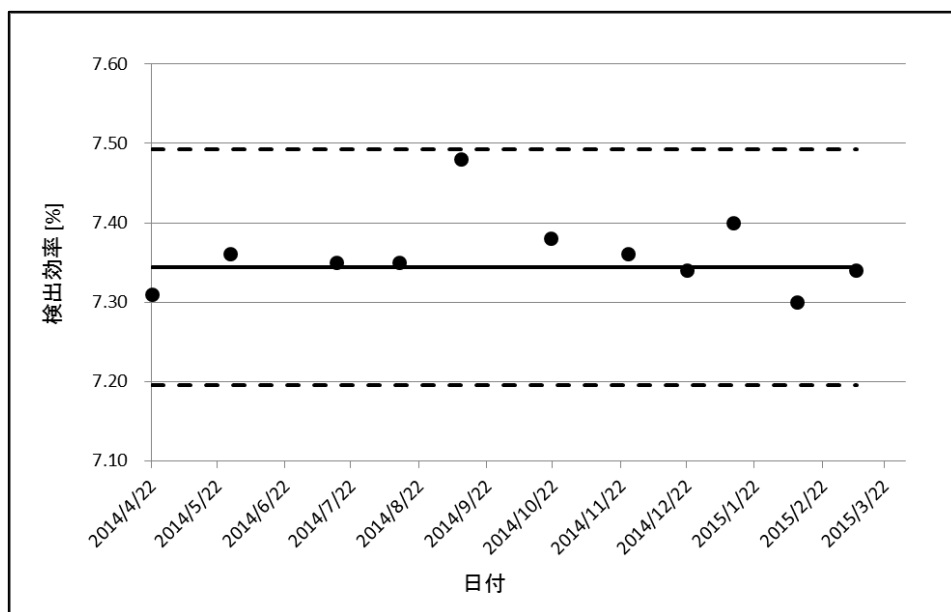


図 1-2 Pu 線源の測定値 (破線は管理限界を示す)

表 1-5 に、平成 25 年度からの AmLi 線源を用いて測定したシングル値の結果を示す。管理限界に収まっているか否かは Yes/No で表記した。表 1-5 のデータを図示すると図 1-3 となる。この図において、破線は管理限界を示す。

表 1-5 AmLi 線源の測定値

日付	シングル値 [cps]	
2014/4/22	24531.710	Yes
2014/5/28	24590.231	Yes
2014/7/15	24611.935	Yes
2014/8/13	24599.742	Yes
2014/9/10	24596.739	Yes
2014/10/21	24613.493	Yes
2014/11/25	24569.486	Yes
2014/12/22	24577.715	Yes
2015/1/12	24562.602	Yes
2015/2/10	24590.689	Yes
2015/3/9	24522.745	Yes

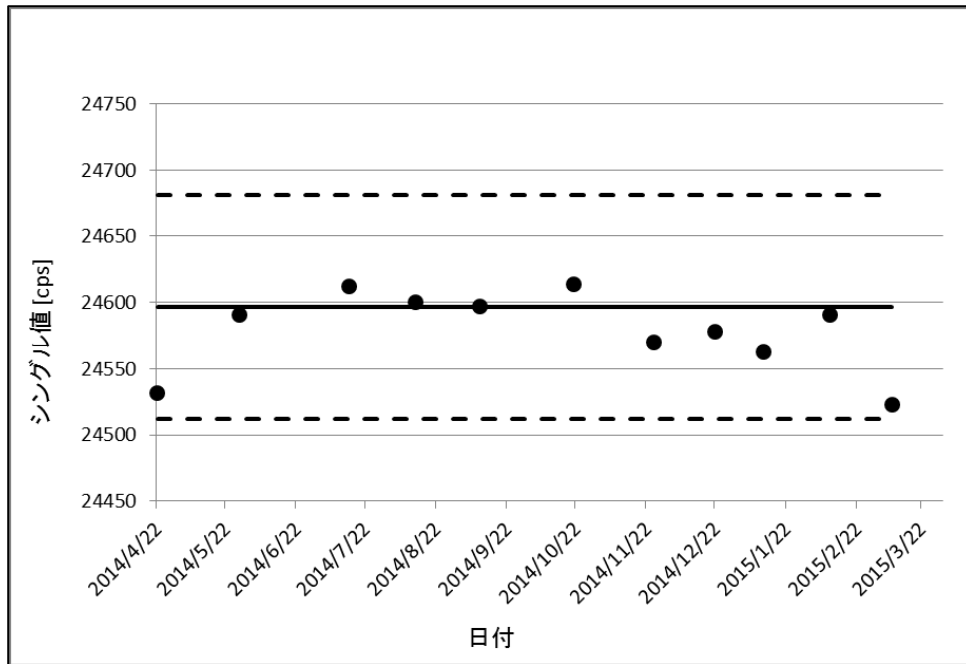


図 1-3 AmLi 線源の測定値 (破線は管理限界を示す)

(c) 考察

本年度の Pu 線源の測定結果から得られた IPCA の検出効率について、全ての期間で管理限界の範囲内の値が得られた。また、本年度実施した AmLi 線源が放出する中性子の計数值(シングル値)の測定結果について、全ての期間で管理限界の範囲内の値が得られた。従って、本年度は平成 25 年度と同程度の精度で測定できていると言える。

1.2.2. ガンマ線検出器の長期管理限界の妥当性確認

(a) 方法

ガンマ線検出器を用いて Pu 線源の Pu 同位体比 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) を月一回程度の頻度で測定し、管理限界を設定して測定値がその範囲内に収まっているか否かの確認を行った。管理限界は、平成 25 年度に実施した「長期管理限界の妥当性確認試験」において同じ Pu 線源を月一回程度の頻度で測定して得られた Pu 同位体比のデータを用いて、その平均値と標準偏差を計算し、下限値を(平均値 $-2\times$ 標準偏差)、上限値を(平均値 $+2\times$ 標準偏差)で設定した。表 1-6 から表 1-8 に、それぞれのガンマ線検出器の管理限界を示す。同一の Pu 線源を測定しているため、平均値及び標準偏差は全てのガンマ線検出器で近い値となっている。

表 1-6 ガンマ線検出器（下部）の管理限界

		平均値	標準偏差	管理限界	
				下限値	上限値
管理限界	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.405	0.022	0.362	0.449
	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.029	0.0006	0.028	0.030

表 1-7 ガンマ線検出器（中央部）の管理限界

		平均値	標準偏差	管理限界	
				下限値	上限値
管理限界	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.409	0.019	0.372	0.446
	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.028	0.0005	0.027	0.029

表 1-8 ガンマ線検出器（上部）の管理限界

		平均値	標準偏差	管理限界	
				下限値	上限値
管理限界	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.403	0.021	0.361	0.445
	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.029	0.0006	0.027	0.030

(b) 結果

表 1-9 に、平成 25 年度から実施している下部のガンマ線検出器による Pu 線源の測定で得られた Pu 同位体比 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) の結果を示す。管理限界に収まっているか否かは Yes/No で表記した。表 1-9 のデータを図示すると、図 1-4 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) 及び図 1-5 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) となる。この図において、破線は管理限界を示す。

表 1-9 ガンマ線検出器（下部）による測定値

日付	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$		$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	
2014/4/23	0.4469	Yes	0.0284	Yes
2014/5/28	0.4436	Yes	0.0282	Yes
2014/7/15	0.4161	Yes	0.0271	No
2014/8/13	0.4349	Yes	0.0275	No
2014/9/10	0.4265	Yes	0.0265	No
2014/10/21	0.4260	Yes	0.0273	No
2014/11/25	0.4389	Yes	0.0277	Yes
2014/12/22	0.4191	Yes	0.0274	No
2015/1/12	0.3929	Yes	0.0269	No
2015/2/11	0.4501	No	0.0269	No
2015/3/10	0.4521	No	0.0266	No

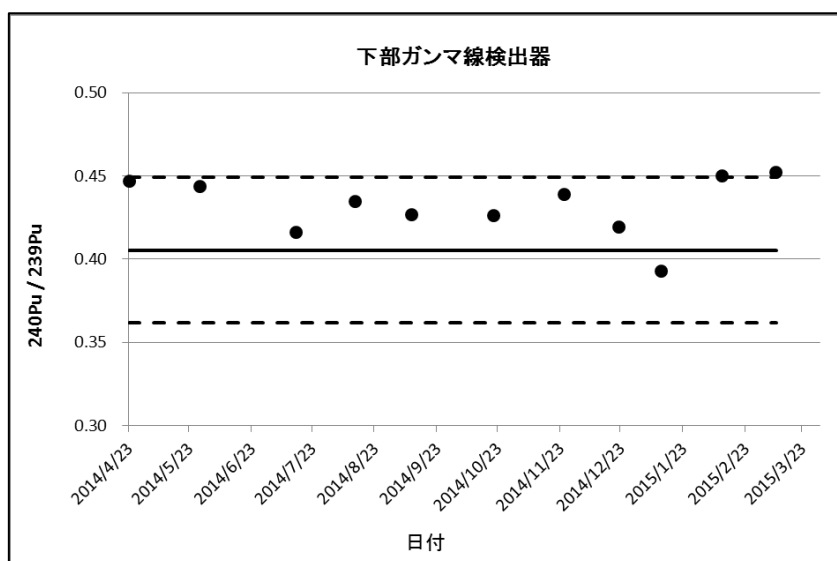


図 1-4 ガンマ線検出器（下部）による測定値（ $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ）（破線は管理限界を示す）

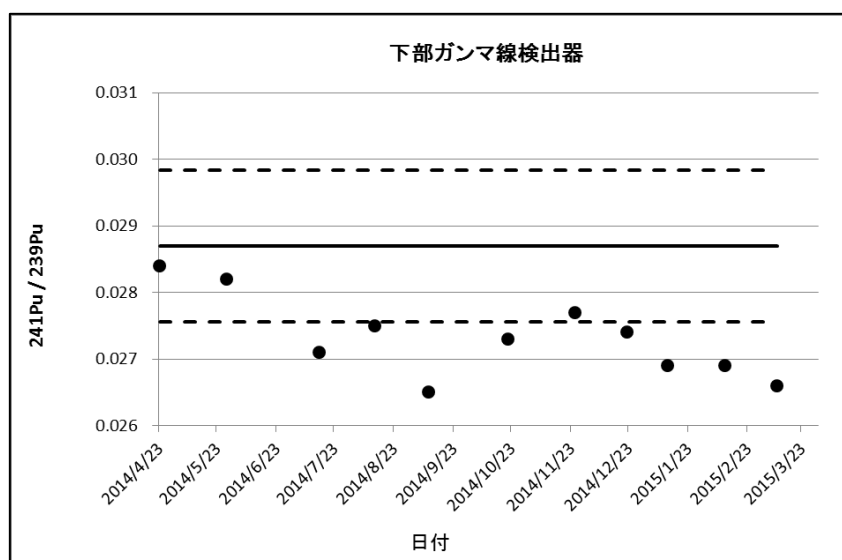


図 1-5 ガンマ線検出器（下部）による測定値（ $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ）（破線は管理限界を示す）

表 1-10 に、平成 25 年度から実施している中央部のガンマ線検出器による Pu 線源の測定で得られた Pu 同位体比（ $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比）の結果を示す。管理限界に収まっているか否かは Yes/No で表記した。表 1-10 のデータを図示すると、図 1-6（ $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ）及び図 1-7（ $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ）となる。この図において、破線は管理限界を示す。

表 1-10 ガンマ線検出器（中央部）による測定値

日付	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$		$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	
2014/4/23	0.4001	Yes	0.0279	Yes
2014/5/28	0.4461	Yes	0.0271	No
2014/7/15	0.4206	Yes	0.0282	Yes
2014/8/13	0.3822	Yes	0.0277	Yes
2014/9/10	0.4095	Yes	0.0266	No
2014/10/21	0.4047	Yes	0.0276	Yes
2014/11/25	0.4252	Yes	0.0275	Yes
2014/12/22	0.3750	Yes	0.0276	Yes
2015/1/12	0.4165	Yes	0.0275	Yes
2015/2/11	0.4158	Yes	0.0266	No
2015/3/10	0.3921	Yes	0.0267	No

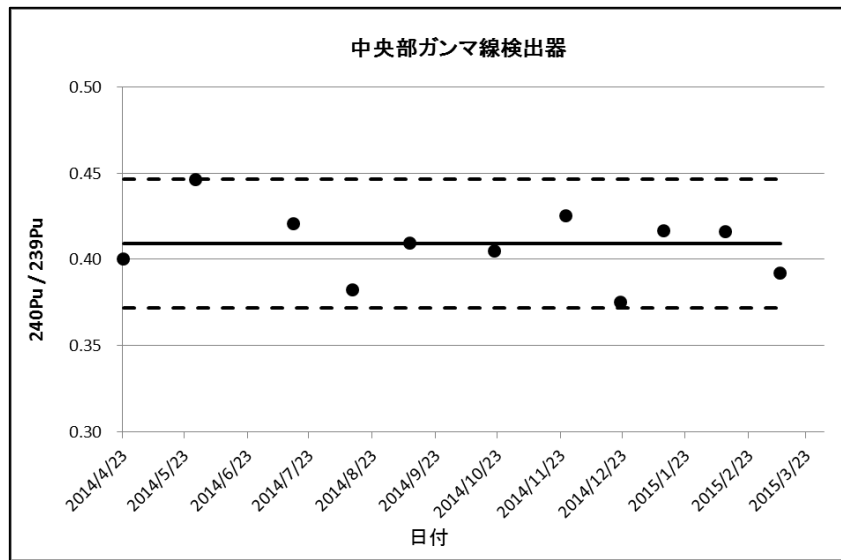


図 1-6 ガンマ線検出器（中央部）による測定値 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) (破線は管理限界を示す)

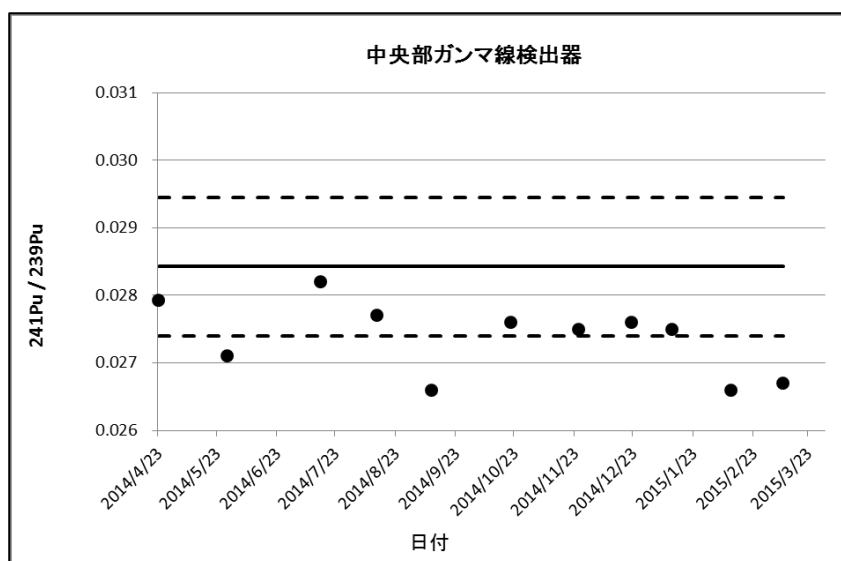


図 1-7 ガンマ線検出器（中央部）による測定値 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) (破線は管理限界を示す)

表 1-11 に、平成 25 年度から実施している上部のガンマ線検出器による Pu 線源の測定で得られた Pu 同位体比 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) の結果を示す。管理限界に収まっているか否かは Yes/No で表記した。表 1-11 のデータを図示すると、図 1-8 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) 及び図 1-9 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$) となる。この図において、破線は管理限界を示す。

表 1-11 ガンマ線検出器（上部）による測定値

日付	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$		$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	
2014/4/23	0.4213	Yes	0.0285	Yes
2014/5/28	0.3593	No	0.0282	Yes
2014/7/15	0.4155	Yes	0.0278	Yes
2014/8/13	0.3857	Yes	0.0274	No
2014/9/10	0.3829	Yes	0.0273	No
2014/10/21	0.4048	Yes	0.0276	Yes
2014/11/25	0.3962	Yes	0.0270	No
2014/12/22	0.3564	No	0.0270	No
2015/1/12	0.4000	Yes	0.0271	No
2015/2/11	0.3989	Yes	0.0272	No
2015/3/10	0.3767	Yes	0.0263	No

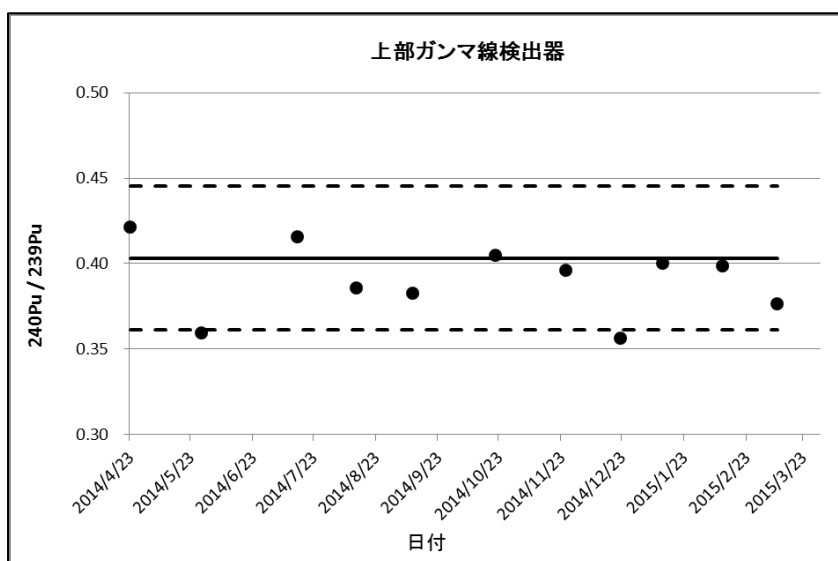


図 1-8 ガンマ線検出器（上部）による測定値（ $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ）（破線は管理限界を示す）

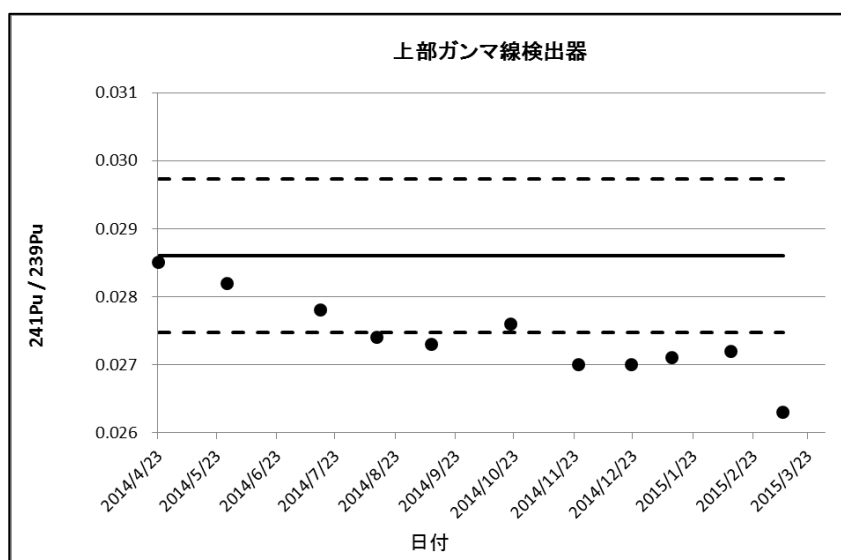


図 1-9 ガンマ線検出器（上部）による測定値（ $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ ）（破線は管理限界を示す）

(c) 考察

本年度実施した Pu 線源が放出するガンマ線の測定結果から得られた $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ について、中央部のガンマ検出器では全ての期間で管理限界の範囲内の値が得られた。一方、下部及び上部のガンマ線検出器では管理限界を超える値が得られたが、全て標準偏差の 3 倍の範囲内にあった。

一方、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ については、全てのガンマ検出器において、管理限界の下限値に近い値が得られており、管理限界を超えることもあった。これは、管理限界を設定した時から時間経過とともに ^{241}Pu は崩壊（半減期 14.35 年）して減少し組成比が小さくなっていることが、測定結果に表れているものと考えられる。

1.2.3. 重量測定装置（ロードセル）の長期管理限界の妥当性確認

(a) 方法

ロードセルを用いて標準重錘の重量を月一回程度の頻度で測定した。

(b) 結果

表 1-12 に、2014 年度から実施しているロードセルによる標準重錘の測定で得られた重量の結果を示す。

表 1-12 ロードセルによる測定値

日付	重量 [kg]
2014/4/24	22.69
2014/5/28	22.69
2014/7/16	22.69
2014/8/13	22.69
2014/9/10	22.69
2014/10/21	22.69
2014/11/25	22.69
2014/12/22	22.69
2015/1/12	22.69
2015/2/10	22.69
2015/3/9	22.69

(c) 考察

2014 年度に実施した標準重錘の測定値について、全ての期間で 22.69kg となった。従って、ロードセルによる標準重錘の測定は、正常であった。

1.2.4. 最適な放射線源の選定に係る検討

(a) 方法

JMOX への設置後のメンテナンスに用いる中性子ダブル値を測定確認するための適切な放射線源の選定のための検討を行った。1.2.1 で使用した AmLi 線源は、同時中性子を放出しないため、²⁴⁴Cm 及び ²⁵²Cf の二つの放射線源の有効性を検討した。

²⁴⁴Cm の放射線源を用いて、IPCA の検出効率を測定する。次に、得られた結果を ²⁵²Cf の放射線源を用いて測定した検出効率と比較した。

(b) 結果

表 1-13 に、使用した線源の情報と測定値を示す。²⁴⁴Cm 及び ²⁵²Cf の放射線源を用いて検出効率を測定した結果、どちらを用いても 7.26% という結果が得られた。

表 1-13 ^{244}Cm 及び ^{252}Cf の線源の情報と IPCA による測定値

パラメータ	^{252}Cf	^{244}Cm
線源強度 [n/s]	3.59×10^4	1.54×10^4
シングル値 [cps]	2605.0	1117.6
検出効率 [%]	7.26	7.26

(c) 考察

表 1-14 に、 ^{244}Cm 及び ^{252}Cf の核データを示す。 ^{244}Cm を使用する利点の 1 つには、 ^{252}Cf と比べて半減期が長いということがある。 ^{252}Cf は、 ^{244}Cm より半減期が短いので、より大きな崩壊補正が必要になる。また、 ^{252}Cf の放射線源には ^{250}Cf が含まれており、線源が新しければ ^{250}Cf の影響は無視できるが、時間と共に ^{250}Cf が増えると測定誤差の原因の 1 つになる。

^{244}Cm 及び ^{252}Cf の放射線源を用いて測定した検出効率は、どちらも 7.26% という結果となった。このことは、 ^{244}Cm 及び ^{252}Cf が放出する中性子のエネルギースペクトルの差は十分に小さく、IPCA の検出効率に影響していないことを意味している。図 1-10 に、 ^{244}Cm 及び ^{252}Cf の自発核分裂のエネルギースペクトルを示す。

以上より、 ^{244}Cm の放射線源は ^{252}Cf の放射線源の代わりに IPCA の性能確認に用いる放射線源として使用可能であると考えられる。

表 1-14 ^{244}Cm 及び ^{252}Cf の核データ

パラメータ	^{252}Cf	^{244}Cm
自発核分裂収量 [n/s-g]	2.34×10^{12}	1.08×10^7
自発核分裂中性子放出数	3.76	2.72
半減期 [年]	2.65	18.1

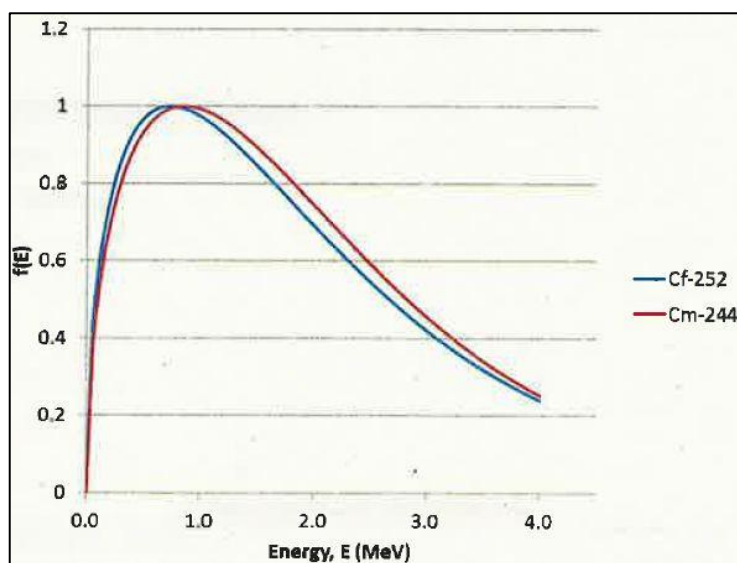


図 1-10 標準化した ^{244}Cm 及び ^{252}Cf の自発核分裂の中性子エネルギースペクトル

1.2.5. 気候変動が各種パラメータにあたる影響の評価

(a) 方法

長期的な気候変動が各種パラメータにあたる影響の評価については、1.2.1 の AmLi 線源を用いたシングル値の測定に合わせて、機器周辺の温度及び湿度を測定し、得られたシングル値と温度、湿度の関係を図にすることで、相関が見られるか確認する。また、シングル値と温度、湿度の関係を回帰分析（2変数の関係を直線の関係で表現する分析法）して、決定係数（回帰分析によって求められた直線（回帰直線）が2変数の関係をどのくらいよく表しているか判断するための指標で、0と1の間の値を取り、1に近いほど回帰直線は2変数の関係をよく表していると判断できる）を算出することで、相関が見られるか確認する。

短期的な気候変動が各種パラメータにあたる影響の評価については、AmLi 線源が放出する中性子の1時間の測定を64時間連続して実施し、1時間の測定で得られる中性子計数率（シングル値）と測定中の温度及び湿度の変化との関係を確認する。

(b) 結果

表 1-15 に、1.2.1 の試験で得られたシングル値と温度、湿度の測定結果を示す。また、図 1-11 にシングル値と温度の関係を表したものを、図 1-12 にシングル値と湿度の関係を表したものを示す。

図 1-13 に、64時間連続して実施した AmLi 線源の測定で得られたシングル値並びに測定中の温度及び湿度の時間変化を示す。

表 1-15 シングル値と温度、湿度の測定結果

測定日	温度[°C]	湿度[%]	シングル値[cps]
2013/12/9	16	—	24608.249
2014/1/14	20	—	24565.089
2014/2/11	21	—	24533.068
2014/3/31	21	—	24655.402
2014/4/22	24	—	24568.651
2014/5/28	22	—	24630.631
2014/7/15	25	—	24657.798
2014/8/13	25	37	24648.721
2014/9/10	24	31	24648.742
2014/10/21	22	27	24669.973
2014/11/25	16	16	24629.649
2014/12/22	22	16	24640.820
2015/1/12	18	16	24627.939
2015/2/10	21	16	24659.240
2015/3/9	21	16	24594.022

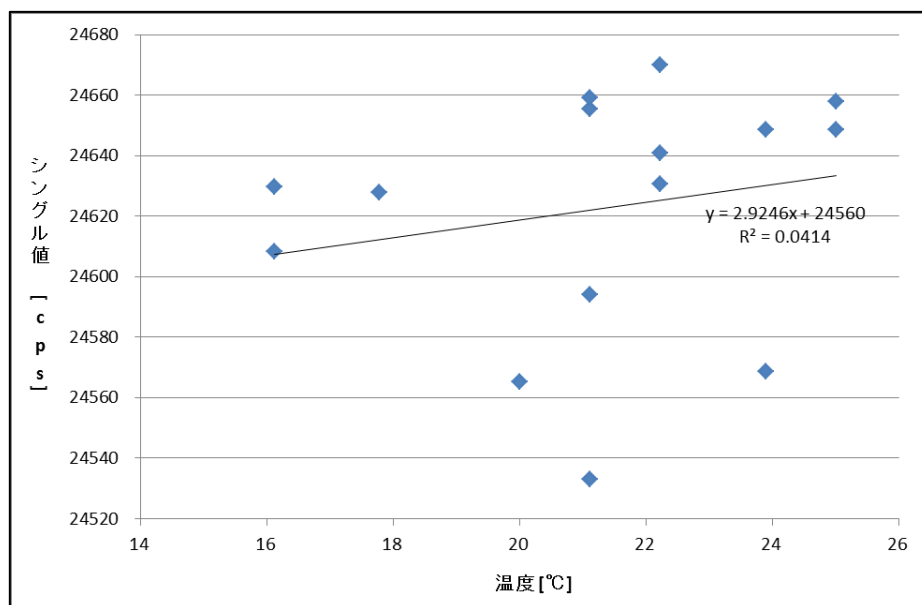


図 1-11 シングル値と温度の関係

R^2 は決定係数

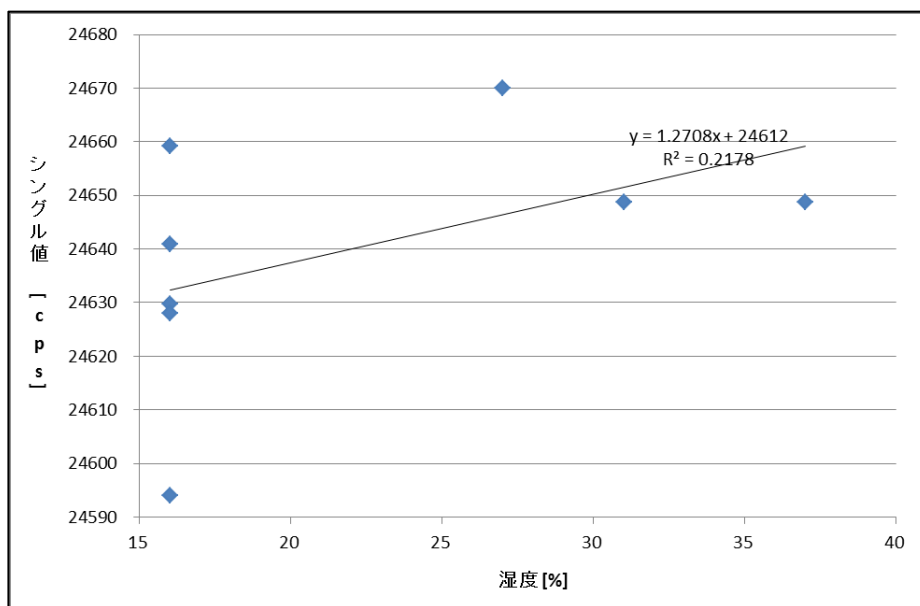


図 1-12 シングル値と湿度の関係

R^2 は決定係数

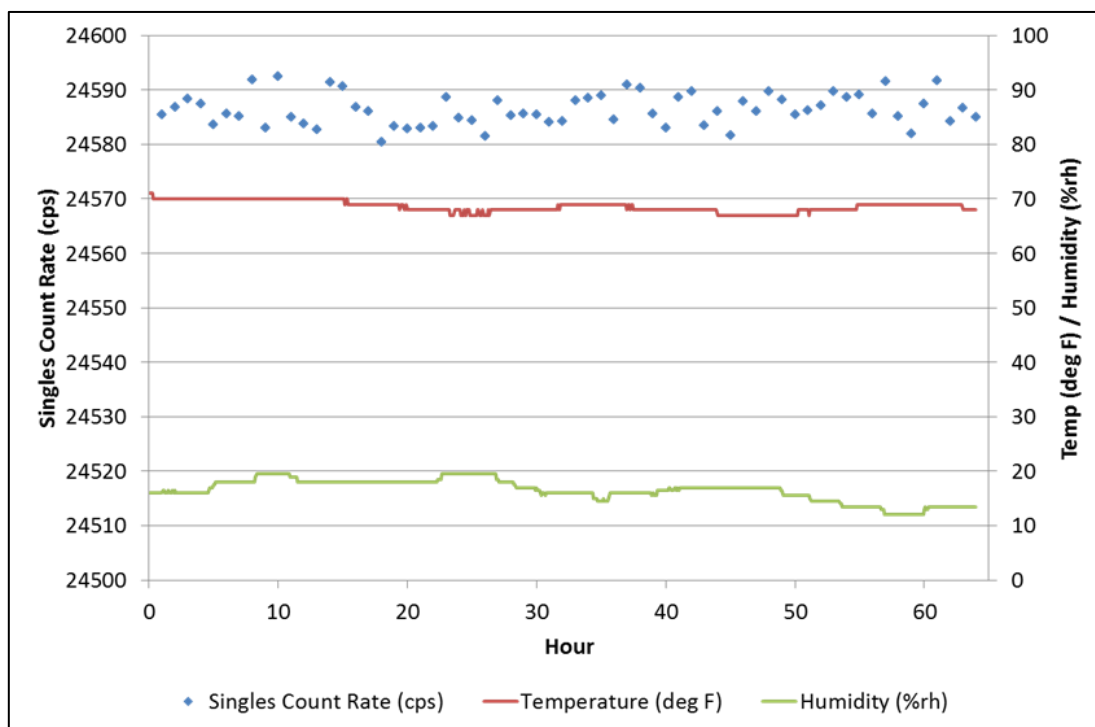


図 1-13 64 時間の AmLi 線源の測定結果

(c) 考察

長期的なシングル値と温度の関係について、図 1-11 から相関は見られない。また、シングル値と温度の関係の決定係数を算出した結果は 0.0414 で、0 に近い値となった。以上より、シングル値と温度の間に相関はないと考えられる。IAEA が示す User Requirements にある IPCA を使用する部屋の温度は、16～26℃となっている。本試験を実施した場所の温度は、これと同程度の範囲となっている。

長期的なシングル値と湿度の関係について、図 1-12 から相関は見られない。また、シングル値と湿度の関係の決定係数を算出した結果は 0.2178 で、0 に近い値となった。以上より、シングル値と湿度の間に相関はないと考えられる。

短期的なシングル値と温度・湿度の関係について、図 1-13 より温度・湿度に変動がなくてもシングル値は変動していることがわかる。従って、シングル値と温度・湿度の間に相関はないと考えられる。

1.2.6. パラメータの再確認

(a) 方法

中性子検出器の ^3He 比例計数管に貼付したカドミウム箔の経年変化を考慮したパラメータの再確認を実施した。以下に、Die-away タイムを評価する方法を示す。

2 個目同時中性子の検出確率分布は指数関数で減衰することが知られている。そのため、ダブル値 (D)、Die-away タイム (t) 及び同時中性子計測用ゲートの時間幅 (G) の間には以下のような比例関係式、

$$D \propto 1 - e^{-\frac{G}{t}}$$

が成立する。この関係式を用いると、2 つの異なるゲートの時間幅 G_1 及び G_2 に対するダブル値の測定結果 D_{m1} 及び D_{m2} は、次式の間関係を満たす。

$$\frac{D_{m1}}{D_{m2}} = \frac{1 - e^{-\frac{G_1}{t}}}{1 - e^{-\frac{G_2}{t}}}$$

この式において $G_2 = 2G_1$ とすれば、t は解析的に求めることができ、

$$t = \frac{-G_1}{\ln\left(\frac{D_{m2}}{D_{m1}} - 1\right)}$$

となる。従って Die-away タイム t を評価するには、同時中性子計測用ゲートがある時間幅 G_1 のときのダブル値 D_{m1} と、 G_1 の 2 倍の時間幅 G_2 のときのダブル値 D_{m2} を測定すれば良い。本性能確認試験では、同時中性子計測用ゲートの時間幅 10、20、40、80 及び 160 μs において ^{252}Cf 線源を測定し、得られたダブル値を用いて Die-away タイムを評価した。

(b) 結果

表 1-16 に、Die-away タイムを再確認した結果を示す。Die-away タイムは、21.4 μ s という結果が得られた。

表 1-16 Die-away タイムの評価結果

ゲート幅 [μ s]	ダブル値 [cps]	Die-away タイム [μ s]
10	104.6	—
20	165.8	18.7
40	231.0	21.4
80	266.6	21.4
160	270.7	19.1

(c) 考察

今回の試験で得られた Die-away タイム (21.4 μ s) は、2012 年 2 月の LANL 資料¹において評価された Die-away タイム (20.2 μ s) とほぼ同等であった。従って、中性子検出器の ³He 比例計数管に貼付したカドミウム箔に経年変化は見られない。

1 : [参考文献] K. A. Miller, J. B. Marlow, I. P. Martines, M. T. Swinhoe, and H. O. Menlove, “Cadmium Tailoring and Long Term Test Plan Results for the Improved Plutonium Canister Assay System 2 (IPCA 2)” (LA-CP-12-00159)

1.3. ^3He 比例計数管の不具合の検知に係る試験

(a) 目的

平成 25 年度にバルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS) を構成する中性子検出器の ^3He 比例計数管 (1 本) に封入された ^3He 混合ガスの漏洩が発生したこと及び当該機器の不具合が発生しやすいという懸念があることから、不具合発生時の判断材料となる、高電圧下におけるプラトー曲線について測定し、健全状態におけるプラトー曲線のデータ蓄積を半年に一回の程度の頻度で行った。

(b) 方法

INCC (IAEA Neutron Coincidence Counting : 中性子測定ソフトウェア) を用いて、検出器に印加する HV を 1200V~1900V の範囲で 20V ずつ上昇させ測定を行い、各電圧におけるシングル値を取得する。電圧ごとの測定時間は 10 秒とする。取得した各電圧のシングル値から電圧ごとの検出器の検出効率を計算し、プラトー曲線 (グラフ) を作成する。

また、シングル値の取得と同時に中性子を検知すると点滅する LED の観測を実施する。

(c) 結果

図 1-14 に、2 度のプラトー曲線の測定結果を示す。また、図 1-14 にプラトー曲線の曲がっている部分を拡大した図を示す。拡大図を見ると、2 つのプラトー曲線の間には整合性があることがわかる。

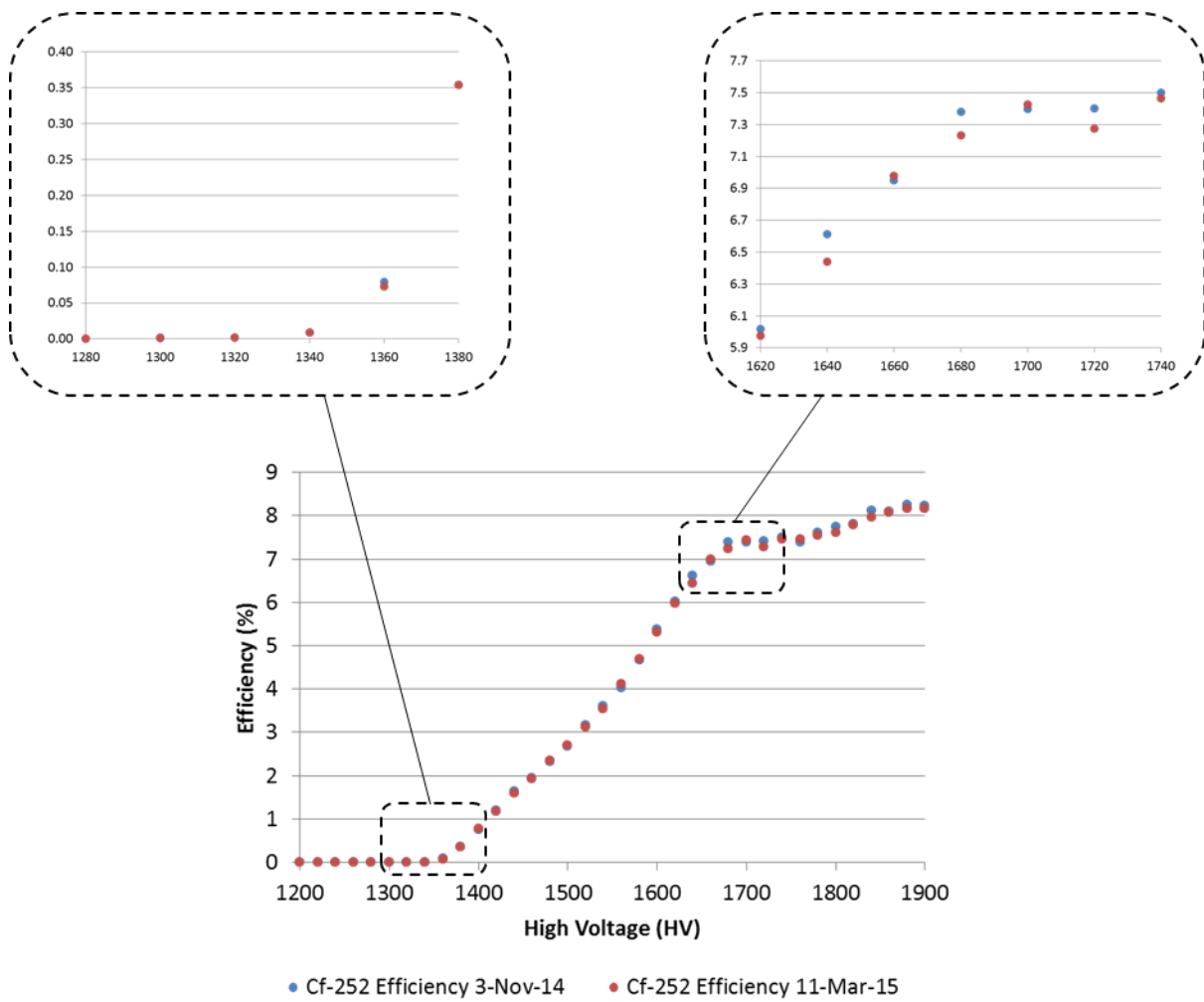


図 1-14 プラトー曲線測定結果

(d) 考察

プラトー曲線の測定結果及びLEDの観測から、機器の不調を示す兆候は見られなかった。従って、本試験で得られたプラトー曲線は、不具合発生の検知に用いることができると考えられる。

1.4. 低エネルギーガンマ線遮蔽材の検討

(a) 目的

ガンマ線検出器に関し、測定対象物中のアメリカシウムから放出される低エネルギーガンマ線の遮蔽材の選定に資することを目的として、現在貼付しているカドミウム薄板と錫薄板*を比較検討した。

カドミウムは、MOX 原料粉末貯蔵容器からの中性子と捕獲反応を起こしてガンマ線を放出し、そのガンマ線により同位体組成比の解析結果に悪影響を与える可能性がある。

* 錫を低エネルギーガンマ線の遮蔽材として用いることには、錫は強力な熱中性子吸収体ではなく、毒性のある物質ではない。また、錫はカドミウムのような中性子を捕獲してガンマ線を放出する反応を起こさないといった利点がある。

(b) 方法

IPCA の 3 台のガンマ線検出器に貼付されている低エネルギーガンマ線遮蔽材を Cd 薄板から LANL の所有する Sn 薄板に代えた状態で Pu 線源を測定し、ガンマ線測定値から得られる Pu 同位体組成比より等価 ^{240}Pu 同位体組成比 (Pu 線源から放出された中性子が全て ^{240}Pu から放出されたとして求めた全 Pu 量中の ^{240}Pu の重量の比率) を計算する。得られた等価 ^{240}Pu 同位体組成比を、カドミウム薄板を貼付した状態で測定して得られた等価 ^{240}Pu 同位体組成比と比較する。

以下に、Pu 同位体組成比から等価 ^{240}Pu 同位体組成比を計算する式を示す。また、表 1-17 に Cd 及び Sn の基本特性を示す。

$$\begin{aligned} \cdot \text{等価 } ^{240}\text{Pu} \text{ 同位体組成比} &= 2.52 \times ^{238}\text{Pu} \text{ 同位体組成比} \\ &+ ^{240}\text{Pu} \text{ 同位体組成比} \\ &+ 1.68 \times ^{242}\text{Pu} \text{ 同位体組成比} \end{aligned}$$

表 1-17 Cd 及び Sn の薄板の基本特性

吸収材	密度 [g/cm ³]	吸収係数 [cm ² /g] (160 keV)	吸収係数 [1/mm] (160 keV)	吸収係数 [cm ² /g] (642 keV)	吸収係数 [1/mm] (642 keV)
Cd	8.65	0.44459	0.38457	0.07401	0.06402
Sn	7.29	0.48573	0.35410	0.07451	0.05432

- ^{240}Pu は、160keV のガンマ線と 642keV のガンマ線を放出する。
- 160keV のガンマ線に対して、厚さ 1.09mm の Sn の吸収量が厚さ 1mm の Cd と同程度である。
- 642keV のガンマ線に対して、厚さ 1.18mm の Sn の吸収量が厚さ 1mm の Cd と同程度である。

(c) 結果

表 1-18 及び表 1-19 に、Cd または Sn 薄板を設置した状態で Pu を測定して得られた、各検出器の等価 ^{240}Pu 同位体組成比の測定結果を示す。また、図 1-15 に Cd 薄板を設置して測定したガンマ線スペクトル (赤) に Sn 薄板を設置して測定したガンマ線スペクトル (青) を重ねた図を示す。

表 1-18 等価 ^{240}Pu 同位体組成比測定結果（120～460keV のガンマ線の測定値から評価）

ガンマ線検出器	吸収材	厚さ [mm]	$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ [%]	$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ の誤差	証明値との差 [%rel.]
証明値*			36.7525		
検出器（上部）	Sn	1.65	36.9849	0.5444	0.6284
	Cd	0.5	36.8425	0.4105	0.2443
検出器（中央部）	Sn	1.65	36.5442	0.5697	-0.5700
	Cd	0.5	37.1548	0.5003	1.0828
検出器（下部）	Sn	1.65	36.8907	0.5714	0.3746
	Cd	0.5	37.3672	0.4980	1.6450

* 線源証明書に記載された値

表 1-19 等価 ^{240}Pu 同位体組成比測定結果（180～1010keV のガンマ線の測定値から評価）

ガンマ線検出器	吸収材	厚さ [mm]	$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ [%]	$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ の誤差	証明値との差 [%rel.]
証明値*			36.7525		
検出器（上部）	Sn	1.65	37.5847	0.8612	2.2142
	Cd	0.5	36.3890	0.9468	-0.9989
検出器（中央部）	Sn	1.65	36.0886	1.0242	-1.8396
	Cd	0.5	37.9364	0.9670	3.1207
検出器（下部）	Sn	1.65	36.7704	1.0212	0.0487
	Cd	0.5	35.2824	1.1164	-4.1667

* 線源証明書に記載された値

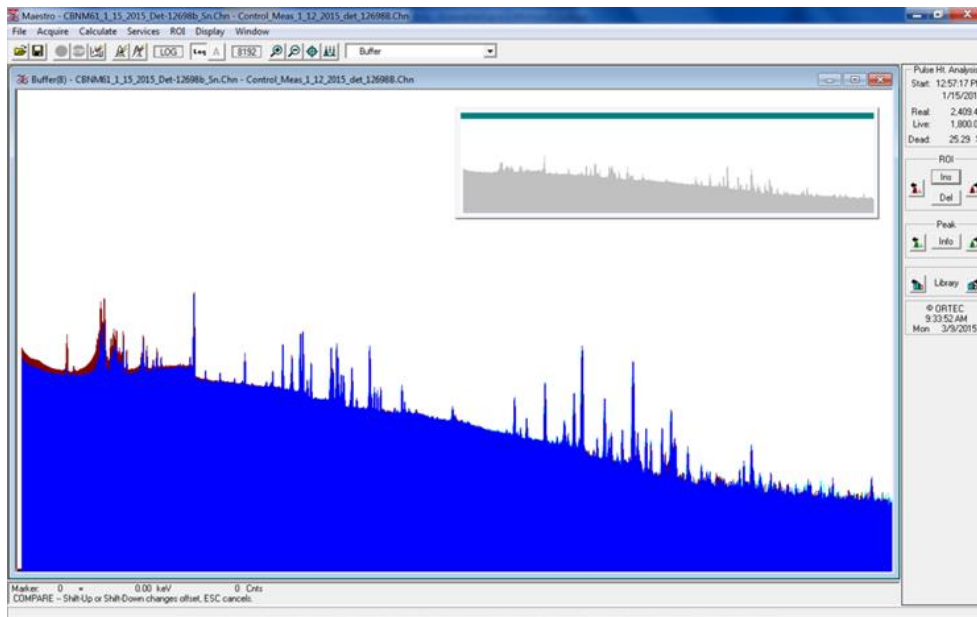


図 1-15 Cd または Sn の薄板を設置して測定したガンマ線スペクトルの比較

(d) 考察

120~460keV のガンマ線の測定結果から Pu 同位体比を評価した場合、Cd 薄板を設置した状態で得られた等価 ^{240}Pu 同位体組成比の誤差は、Sn 薄板を設置した状態で得られた等価 ^{240}Pu 同位体組成比の誤差よりも小さくなった (表 1-18 参照)。これは、Cd 薄板が Sn 薄板に比べ板厚が薄いので、ガンマ線検出器が検出するガンマ線の数が多くなったためと考えられる (図 1-15 を見ると、200keV 以下では Cd を用いた時のガンマ線スペクトル (赤) が Sn を用いた時のガンマ線スペクトル (青) より大きくなっている)。より薄い Sn の薄板を用いれば、測定精度はより良くなると考えられる。また、図 1-15 より、高エネルギーの領域では 2 つのスペクトルはほぼ同じとなった。高エネルギーの領域では Cd 及び Sn の薄板の影響は極めて小さく、Cd を用いた時の測定値と Sn を用いた時の測定値は同程度になると考えられる。

Cd または Sn の薄板を用いた時の等価 ^{240}Pu 同位体組成比と証明値から計算した等価 ^{240}Pu 同位体組成比の差を比較すると、上部のガンマ線検出器では Cd の薄板を用いた時の等価 ^{240}Pu 同位体組成比の方が証明値に近い値が得られ、中央部及び下部のガンマ線検出器では Sn の薄板を用いた時の等価 ^{240}Pu 同位体組成比の方が証明値に近い値が得られた。

以上の測定結果より、Sn は Cd に代わる低エネルギーガンマ線の遮蔽材として適切であると考えられる。

1.5. MOX 原料粉末に含まれる水分量の影響の検討

(a) 目的

MOX 原料粉末貯蔵容器内の MOX 原料粉末の水分量変化が、Pu 質量の測定精度に及ぼす影響について検討するためシミュレーション評価を行う。シミュレーション評価は水分量を変化させながらリング比に対して行う。シミュレーションの妥当性を確認するため、Pu 線源に対するシミュレーションの結果は測定結果と比較する。

ここで、リング比とは、図 1-16 右に示す IPCA の外側リング ^3He 管 2 本の計数値を内側リング ^3He 管 6 本のそれで除した値である。内側リングには高密度ポリエチレンが挿入されていない。そのため、同じ Pu 質量の原料粉末でもその水分含有率が増えると、その水分により中性子が減速され、内側リング ^3He 管の計数値は増加する。一方、外側リングにはポリエチレンが挿入されており、同水分により減速が過剰となり計数値は減少する。

(b) 方法

シミュレーション評価は、LANL が開発した MCNP コード (Monte Carlo N-Particle Transport Code) を用いて行う。まず、本コードの予測精度の妥当性を確認するため、Pu 線源 (FCZ-158) を IPCA で測定し、リング比を求め、シミュレーションで求めた値と比較する。

次に、シミュレーションにより MOX 原料粉末が充填されたキャニスター (Pu を約 18 kg 含む) を測定したときのリング比を求める。このシミュレーションは、原料粉末の水分含有率を 0~0.5% の範囲で変化させ実施する。水分含有率が 0% のときの MOX 原料粉末の密度は 2.2 g/cm^3 とし、水分含有率を変化させても原料粉末の体積は一定と仮定する。

(c) 結果

シミュレーション上に設定した IPCA 及びキャニスターの横断面図及び上面図を図 1-16 に示す。

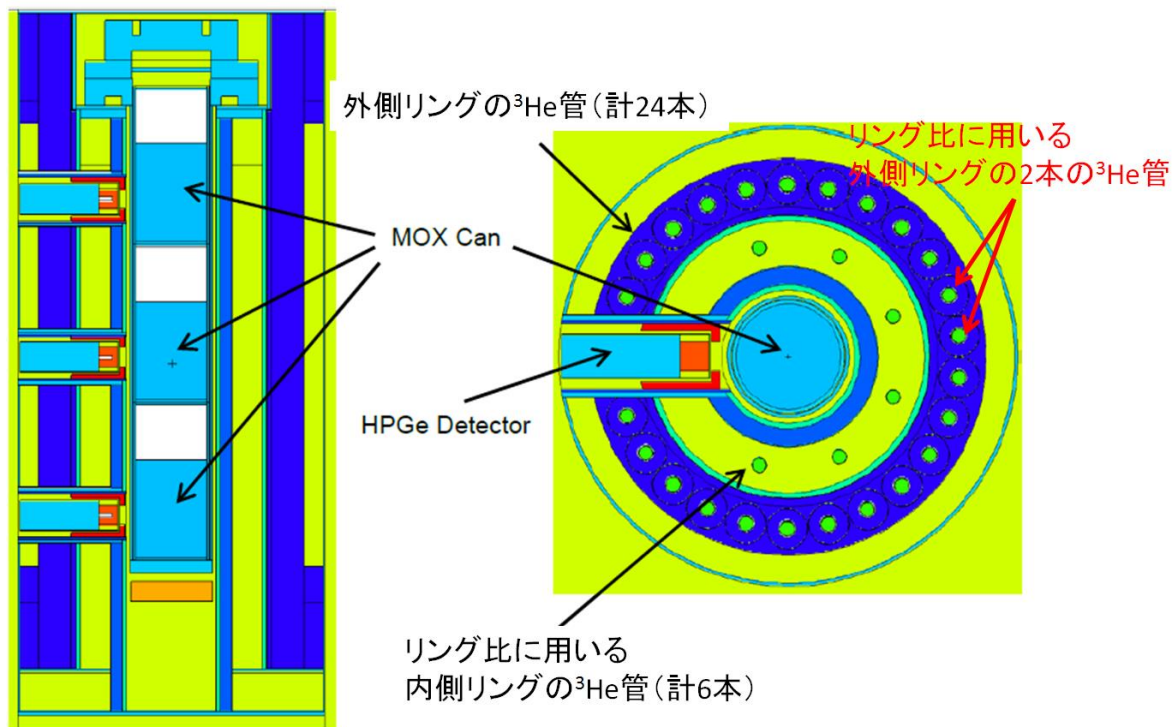


図 1-16. シミュレーション上に設定した IPCA 及びキャニスターの横断面図(左)及び上面図(右)

表 1-20 に Pu 線源 (FCZ-158) を用いたリング比の測定結果とシミュレーション結果を示す。両値は合致し、MCNP コードのリング比の予測精度は良いことがわかった。

表 1-20. Pu 線源 (FCZ-158) を用いたリング比の測定結果とシミュレーション結果の比較

リング比 (測定値)	リング比 (MCNP)
1.9 ± 1.5	1.9

リング比のシミュレーションの結果を表 1-21 に示す。同表では、各水分含有率における外側リングのすべての ^3He 管による計数値の合計 (外側リングの計数値) も、水分含有率が 0.0 wt% のときのそれからの増加率で示している。

表 1-21. リング比のシミュレーション結果

水分含有率 (wt%)	計数率の増加率(%)	リング比
0.0	—	1.966
0.1	0.37	1.957
0.2	0.66	1.956
0.3	0.96	1.955
0.4	1.25	1.948
0.5	1.52	1.947

(d) 考察

今回のシミュレーションで想定した最も水分含有率が高い 0.5 wt% では、それが 0.0 wt% のときと比べて、外側リングの計数値が 1.52% 増加する結果となった。0.5 wt% の水分含有率の変化で Pu 質量測定に及ぼす影響は 1.5% 程度であると考えられる。一方リング比では、0.0 wt% 及び 0.5wt% の両水分含有率における相対差は約 1% となった。この相対差は、IPCA に要求される中性子測定精度 0.85% と比較して差ほど大きくない。MOX 原料粉末が充填されたキャニスター (Pu を約 18 kg 含む。) を測定したときにリング比を 1% より十分小さい統計誤差で定めることができれば、水分含有量の影響を取り除く補正係数をこのリング比から求めることも可能であると考えられる。

1.6. 測定手順書の作成 (継続)

付録 1 に示すように、平成 25 年度までに作成した測定手順書 (システム構成、セットアップ手順、較正手順、測定手順を含む) に対して、平成 26 年度の結果を分析し反映した。

2. 燃料集合体測定機器 (AFAS) の性能確認試験

2.1. はじめに

燃料集合体測定機器 (AFAS : Advanced Fuel assembly Assay System) は、JMOX の MOX 燃料集合体貯蔵区域において、燃料集合体中の Pu 質量 (g) を部分欠損レベルで測定する測定機器の開発を目的に設計・製作された。本機器は 2 台製作され、それぞれ沸騰水型原子炉 (BWR) 用及び加圧水型原子炉 (PWR) 用燃料集合体測定に使用する (以下、BWR 用の AFAS は「AFAS-B」、PWR 用の AFAS は「AFAS-P」と記載する)。図 2-1 に示すように、本機器は、上部及び下部の Fork 検出器並びに中央部の Collar 検出器の計 3 台の中性子検出器から構成される。燃料集合体の有効長 (燃料ペレットが充填されている部位の長さ) の単位長さあたりの Pu 質量 (gPu/cm) を Collar 検出器で測定し、有効長 (cm) を 3 台の検出器を用いて測定する。単位長さあたりの Pu 質量に有効長を乗じて集合体中の総 Pu 質量を求め、申告値の正確性を確認する。AFAS に要求されている主な性能は表 2-1 のとおりである。

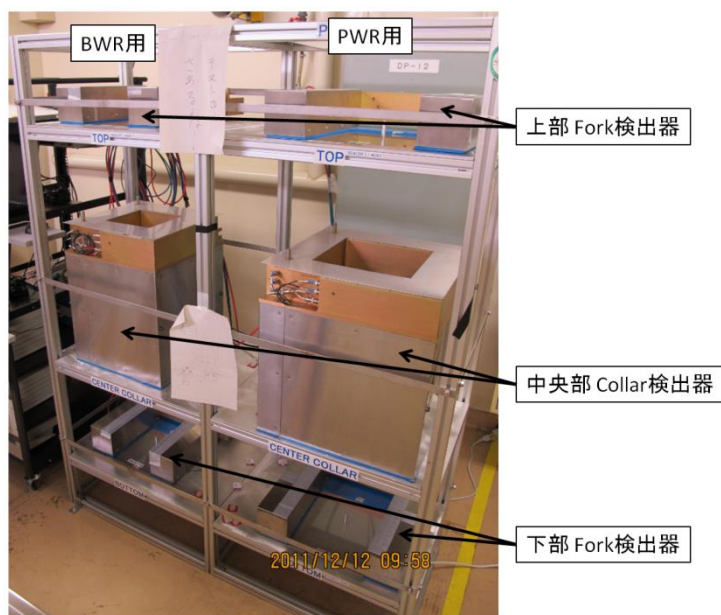


図 2-1. AFAS の外観 (左 : BWR 用、右 : PWR 用)

表 2-1 AFAS に要求される主な性能

NDA機器	AFAS
モード	非立会モード
測定対象物	MOX新燃料集合体
測定精度	部分欠損レベル
具体的機器性能	^{240}Pu 実効質量測定精度 : < 2% (1σ) 集合体有効長測定精度 : < 2%
測定時間	10分以内

平成 26 年度は、原子力規制庁が指定した場所（（独）日本原子力研究開発機構（JAEA）東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所）において、平成 22 年度より文部科学省が開始した長期性能確認試験の継続試験として、平成 24 年度に着手した統合性能確認試験を継続した。

具体的には、表 2-2 に示す試験を実施した。各試験項目の詳細については、2.3 項以降に示す。

表 2-2 試験項目一覧

試験項目
維持管理手法の検討（継続）
PWR 用 MOX 新燃料集合体向け AFAS 中央部検出器の検出効率の確認
短尺燃料棒を有する燃料集合体の有効長測定に係る検討
^3He 比例計数管の故障の検知に係る試験

2.2. 試験の概要

AFAS の核物質等を用いた性能確認試験の試験対象のシステム、試験用測定パラメータ、試験に使用した線源及び封入棒集合体を以下に示す。

2.2.1. 試験対象のシステム

本試験は、AFAS-B 及び AFAS-P を対象として実施した。

2.2.2. 試験用測定パラメータ

AFAS のキャリブレーション報告書²に記載されている米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) において評価された AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器の測定パラメータを表 2-3 及び表 2-4 に示す。本試験では、これらのパラメータを使用して測定を行った。

表 2-3 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(暫定値)	0.006(暫定値)
Multiplicity デッドタイム	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 2-4 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(暫定値)	0.0127(暫定値)
Multiplicity デッドタイム	86.5×10 ⁻⁹	0.0000	0.0000

2 : [参考文献] M. T. Swinhoe, H. O. Menlove and C. D. Rael, “Calibration Test Report for the Advanced Fuel Assembly Assay System (AFAS) - PWR system” (2008) (LA-CP-08-0573)

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

2.2.3. 試験に使用した線源

本試験で使用した ^{252}Cf 中性子線源の線源番号及び中性子放出率を表 2-5 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 2-5 試験に使用する ^{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	

2.2.4. 試験に使用した封入棒集合体

本試験で使用した封入棒集合体の側面図及び断面図を図 2-2 に示す。また、封入棒集合体の仕様及び同位体組成比を、表 2-6 及び表 2-7 に示す。本集合体は、日本原子力研究開発機構ブルトニウム燃料第二開発室に残存していた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、平成 24 年度及び 25 年度に実施した AFAS の性能確認試験においても使用している。

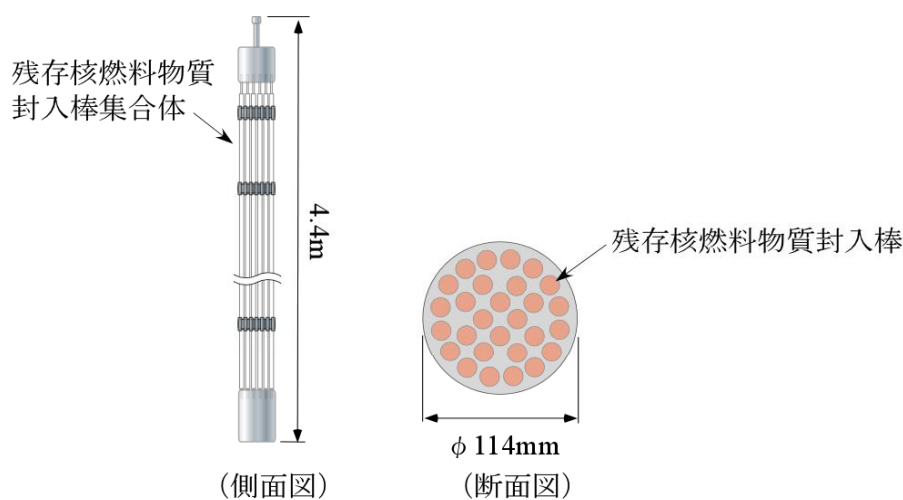


図 2-2 残存核燃料物質封入棒集合体の概要

表 2-6 試験用封入棒集合体の仕様

集合体 No.	Pu 質量 (g)	Pu 含有率 (*1) (%)	有効長 (*2) (m)	内容
P1	3533.991	2.1	3.7	残存核燃料物質 (製品ペレット)

*1 : Pu 含有率(%)=Pu 重量/MOX 重量×100

*2 : 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 2-7 試験用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(*) (%)	
P1	1.3233	61.4933	27.8411	3.8401	5.5022	6.3855	2013/1/30

* : ²⁴¹Am 量/Pu 質量
×100

2.3. 維持管理手法の検討（継続）

(a) 目的

これまでの統合性能確認試験の結果を踏まえ、AFAS-P に求められる性能が保持されていることを確認するために、月一回程度の頻度で放射線源（ ^{252}Cf 線源）（表示付認証機器であるものを使用。）を用いた測定試験を行い、それにより得られたデータ（検出器出力信号パルス、計数値）を評価することにより、JMOX への設置後の維持管理手法を検討した。

(b) 方法

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器、上部（Top）Fork 検出器及び下部（Bottom）Fork 検出器を対象に、定期的な ^{252}Cf 中性子線源測定を行い、表 2-8 に示すデータ（計数値及び信号パルス）を取得する。

表 2-8 取得データ一覧

対象機器	取得するデータ
Collar 検出器（AFAS-B、AFAS-P）	ダブル値
Top Fork 検出器（AFAS-B、AFAS-P）	シングル値
Bottom Fork 検出器（AFAS-B、AFAS-P）	シングル値
全検出器	信号パルス

AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器は、図 2-3 に示すように、プルトニウム燃料第二開発室 試験検査室（C）に設置した試験用架台に固定する。また AFAS の各装置（検出器、AMSR 及び PC）は、図 2-4 に示すように接続する。INTERCONNECT BOX と DIFF RECEIVER /REDUNDANCY 間の 3 本のケーブル（差動信号、HV 及び +12V 用）は、実際に AFAS を J-MOX に設置した際に起こる可能性のある電圧の降下及び信号の減衰を模擬するため、約 20m のケーブルを使用する。

以下に試験手順を示す。

- 1) INCC (IAEA Neutron Coincidence Counting) の Background モードにより、30 秒×20 回（10 分間）のバックグラウンド測定を行う。
- 2) ^{252}Cf 中性子線源（線源番号：H4-694）を専用の治具を用いて、図 2-5～図 2-8 に示すように、検出器中央に配置する。
- 3) INCC の Normalization モードにより 30 秒×20 回（10 分間）の測定を行い、シングル値またはダブル値を取得する。
- 4) 3) で取得した測定値 m_{meas} と初期値から崩壊計算した測定日の期待値 (m_{exp}) を式 2-1 に代入し、測定値と期待値の差 %Difference を求める。本試験では 2014 年 5 月に取得した測定値を初期値とする。

$$\%Difference = \frac{m_{meas} - m_{exp}}{m_{exp}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2-1)$$

- 5) オシロスコープを検出器出力信号ケーブル（AMSR 入力箇所）に接続し、信号パルスを取得し、パルスの高さ及び幅を測定する。
- 6) 5)で取得した測定値 m_{p_meas} と初期値 m_{p_ini} を式 2-2 に代入し、測定値と初期値との差 $\%Difference$ を求める。本試験では 2014 年 5 月に取得した測定値を初期値とする。

$$\%Difference = \frac{m_{p_meas} - m_{p_ini}}{m_{p_ini}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (2-2)$$

- 7) 1)~6)を AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器について行う。
- 8) 以上を 1 回/月の頻度で実施する。

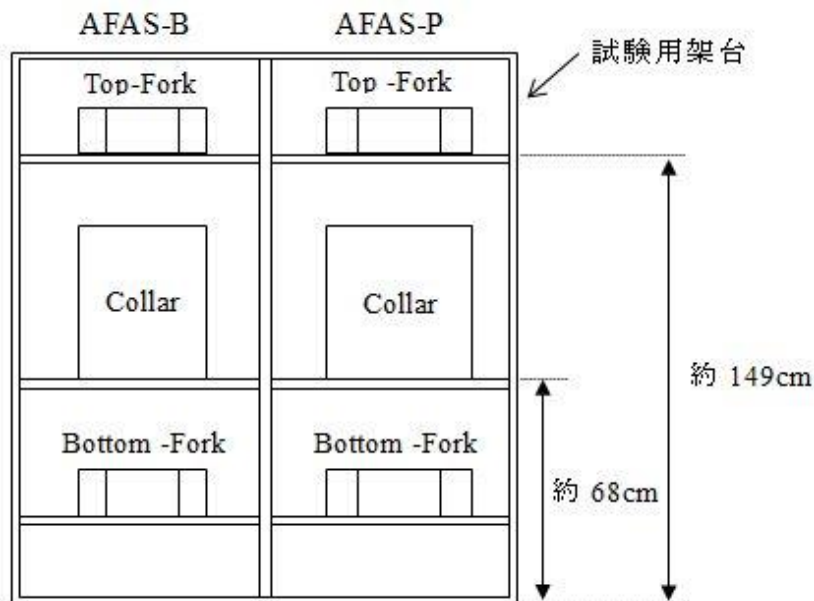


図 2-3 AFAS 検出器の設置

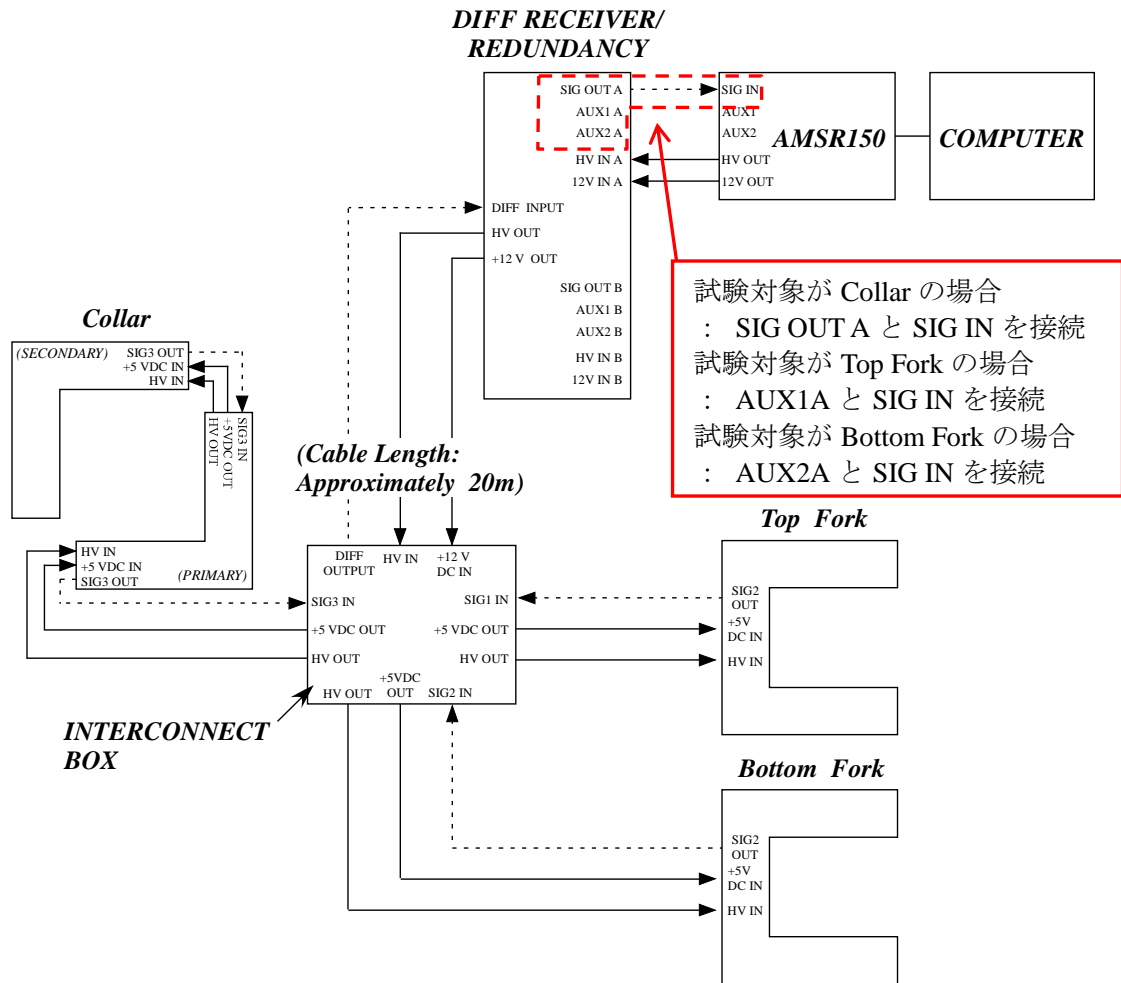


図 2-4 AFAS の各検出器、AMSR 及び PC 間の配線図

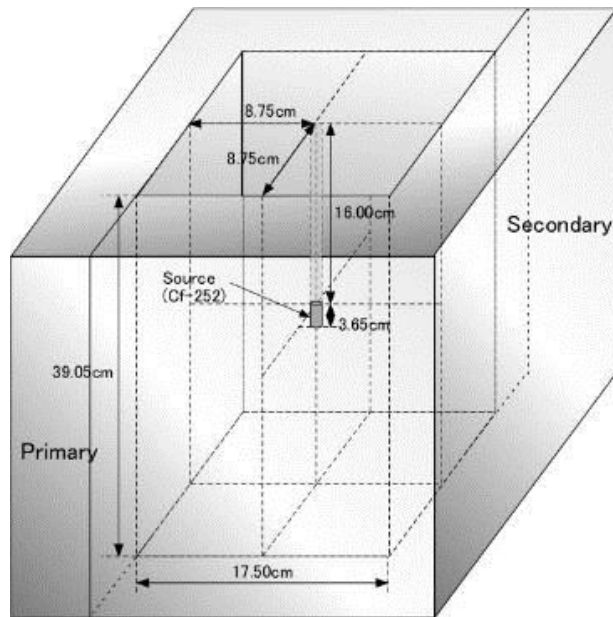


図 2-5 AFAS-B Collar 検出器の ^{252}Cf 中性子線源の配置箇所

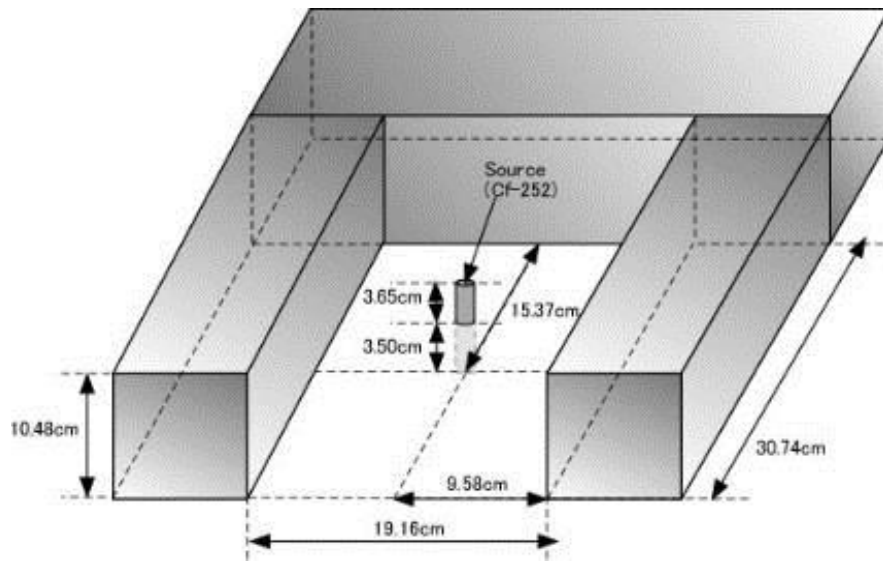


図 2-6 AFAS-B Top Fork、Bottom Fork 検出器の ^{252}Cf 中性子線源の配置箇所

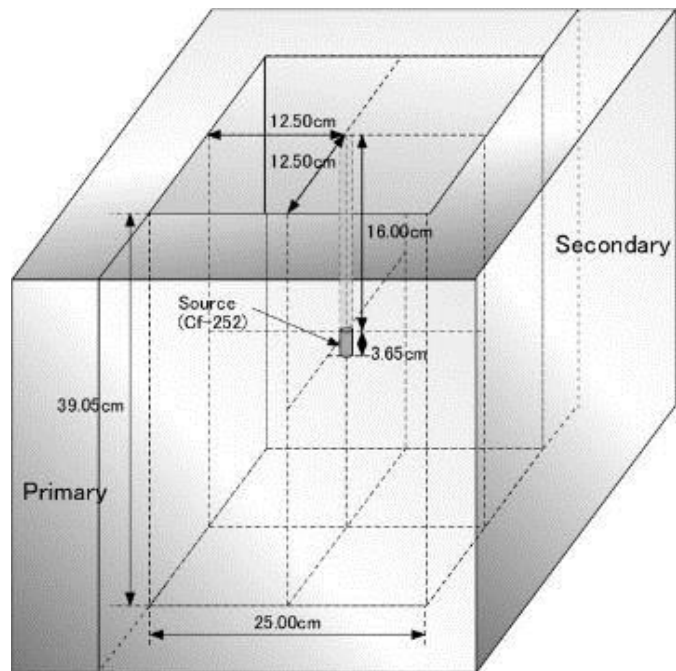


図 2-7 AFAS-P Collar 検出器の ^{252}Cf 中性子線源の配置箇所

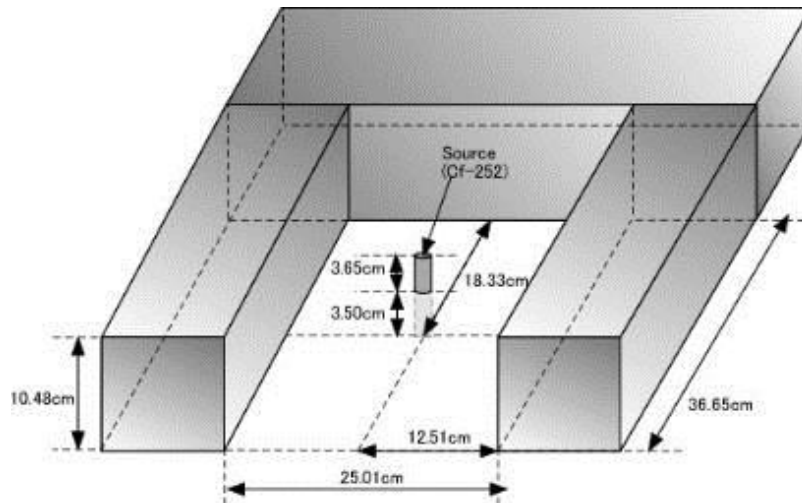


図 2-8 AFAS-P Top Fork、Bottom Fork 検出器 ^{252}Cf 中性子線源の配置箇所

(c) 結果

AFAS-B 及び AFAS-P の ^{252}Cf 中性子線源測定結果を図 2-9～図 2-14 に示す。いずれの検出器でも、各月に取得した各測定値と期待値の差 *%Difference* は、誤差 (2σ) の範囲でほぼ一致した。

また、AFAS-B 及び AFAS-P の信号パルスの高さ及び幅の測定結果を表 2-9～表 2-10 に示す。試験期間中の各検出器のパルスの高さ及び幅の変動は、それぞれ AFAS-B の場合は約 1% 及び 3%以内、AFAS-P の場合は約 10%及び約 3%以内であった。

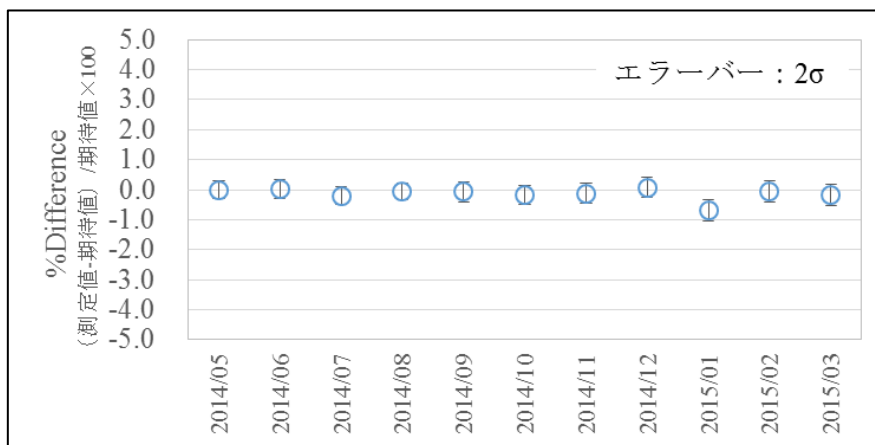


図 2-9 AFAS-B Top Fork 検出器 ^{252}Cf 中性子線源測定結果

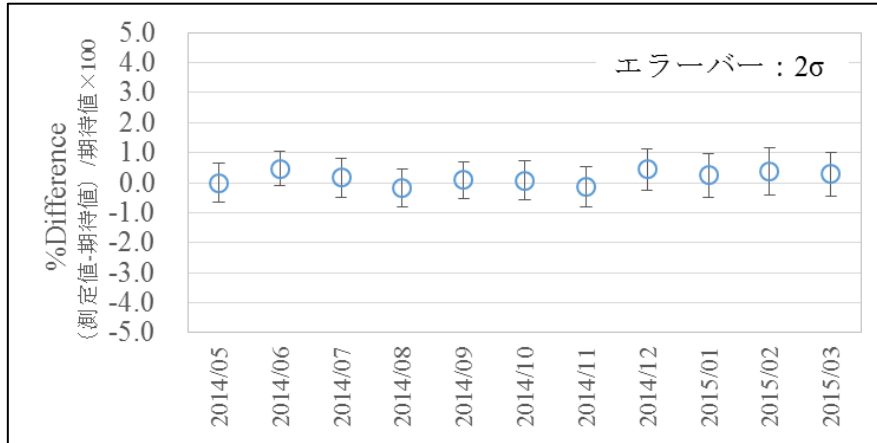


図 2-10 AFAS-B Collar 検出器 ^{252}Cf 中性子線源測定結果

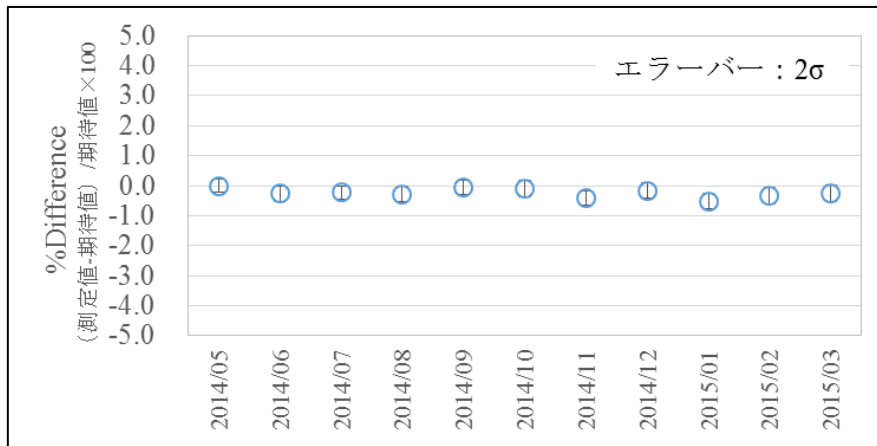


図 2-11 AFAS-B Bottom Fork 検出器 ^{252}Cf 中性子線源測定結果

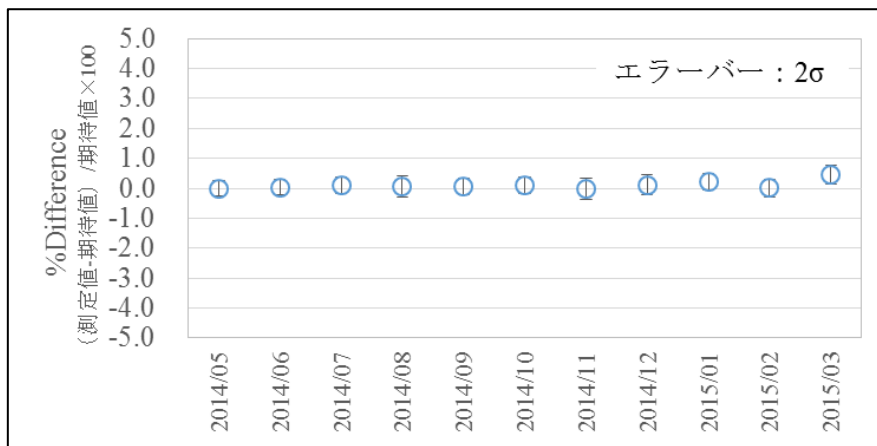


図 2-12 AFAS-P Top Fork 検出器 ^{252}Cf 中性子線源測定結果

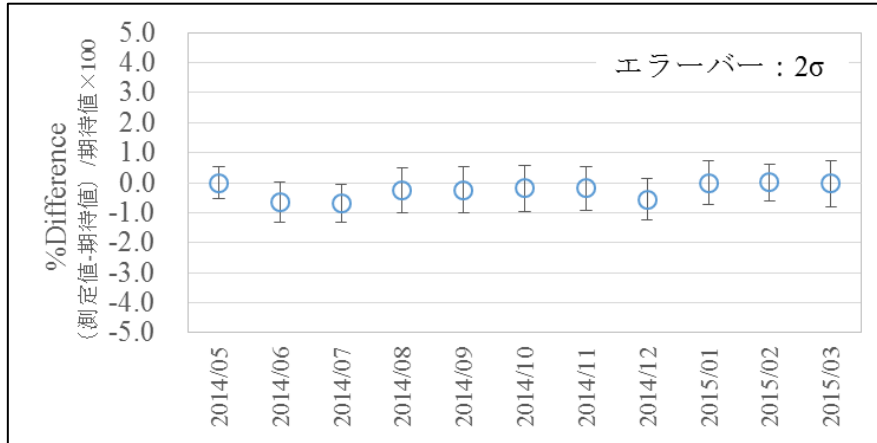


図 2-13 AFAS-P Collar 検出器 ^{252}Cf 中性子線源測定結果

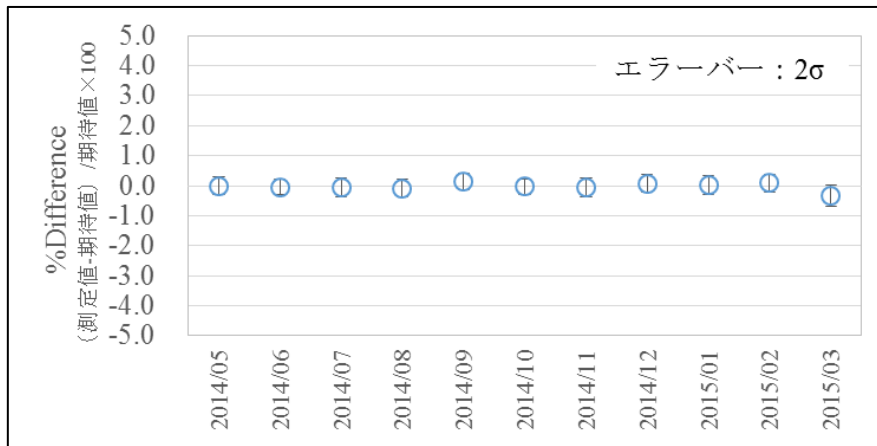


図 2-14 AFAS-P Bottom Fork 検出器 ^{252}Cf 中性子線源測定結果

表 2-9 AFAS-B 信号パルス測定結果

日付	Collar				Top Fork				Bottom Fork			
	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference
2014/5	3.2		14.0		3.2		48.8		3.2		48.8	
2014/6	3.2	0.0	13.6	-2.9	3.1	-0.6	49.6	1.6	3.2	0.0	48.8	0.0
2014/7	3.1	-1.3	14.0	0.0	3.1	-0.6	48.0	-1.6	3.2	0.0	48.8	0.0
2014/8	3.1	-0.6	13.6	-2.9	3.1	-0.6	48.0	-1.6	3.2	0.0	48.8	0.0
2014/9	3.1	-0.6	14.0	0.0	3.1	-0.6	48.0	-1.6	3.2	0.0	48.8	0.0
2014/10	3.1	-0.6	14.0	0.0	3.2	0.0	48.8	0.0	3.2	0.0	48.8	0.0
2014/11	3.1	-1.3	14.0	0.0	3.2	0.0	48.8	0.0	3.2	0.0	48.8	0.0
2014/12	3.1	-0.6	14.0	0.0	3.1	-0.6	48.0	-1.6	3.2	0.0	48.0	-1.6
2015/1	3.1	-0.6	14.0	0.0	3.2	0.0	48.8	0.0	3.2	0.0	48.0	-1.6
2015/2	3.2	0.0	14.0	0.0	3.2	0.0	48.8	0.0	3.2	0.0	49.6	1.6
2015/3	3.1	-1.3	14.0	0.0	3.1	-1.3	48.8	0.0	3.1	-0.6	48.8	0.0

表 2-10 AFAS-P 信号パルス測定結果

日付	Collar				Top Fork				Bottom Fork			
	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference
2014/5	3.2		14.8		3.5		48.0		3.5		48.8	
2014/6	3.2	1.9	14.4	-2.7	3.5	0.0	47.2	-1.7	3.5	0.6	49.6	1.6
2014/7	3.2	1.9	14.8	0.0	3.5	0.0	48.0	0.0	3.5	0.6	48.8	0.0
2014/8	3.2	1.3	14.4	-2.7	3.5	0.0	48.0	0.0	3.5	0.0	48.8	0.0
2014/9	3.2	0.6	14.8	0.0	3.5	0.0	48.0	0.0	3.5	0.0	48.8	0.0
2014/10	3.2	1.3	14.8	0.0	3.5	0.6	48.0	0.0	3.5	0.6	48.8	0.0
2014/11	3.1	-1.3	14.8	0.0	3.1	-10.3	48.0	0.0	3.1	-10.3	49.6	1.6
2014/12	3.1	-2.5	14.8	0.0	3.1	-10.3	48.0	0.0	3.1	-10.3	48.8	0.0
2015/1	3.1	-1.3	14.8	0.0	3.1	-10.3	47.2	-1.7	3.1	-10.3	48.8	0.0
2015/2	3.1	-1.9	14.8	0.0	3.1	-10.9	48.0	0.0	3.1	-10.3	49.6	1.6
2015/3	3.1	-0.6	14.4	-2.7	3.1	-10.3	48.0	0.0	3.1	-10.3	49.6	1.6

(d) 考察

²⁵²Cf 中性子線源の定期的な測定の結果、本試験環境では、各検出器共に測定値のばらつきも小さく、毎月安定した結果を得ることができた。J-MOX における AFAS 設置場所は、燃料集合体が一時貯蔵されるエリアに隣接していることから、本試験環境よりも空間のバックグラウンド中性子が比較的高いことが予想されるが、本試験のように線源を検出効率の高い検出器中央に配置できる場合、その影響は少ないと考えられる。しかし実際には、AFAS 検出器内側には燃料集合体の保護管が設置される可能性があるため、本試験の方法で線源を検出器に配置することができない。AFAS の性能を確認するには、

- (1) 線源を吊るして保護管の上部入口から検出器中央に配置する。
- (2) 線源を保護管の外の検出器の近くに配置する。
- (3) ロッドを測定するシステムで得られたロッド中の Pu 質量から計算される燃料集合体全体の Pu 質量と、AFAS で測定した燃料集合体中の Pu 質量との整合性を確認する。
- (4) 保護管に線源挿入用の開口部を設ける。

といった方法が考えられる。

信号パルスについては、AFAS-P の Collar 及び Fork 検出器のパルス高さが 2014 年 11 月以降に若干低下した以外はほとんど変動することはなく、ほぼ同一の結果が試験期間を通じて得られた。この AFAS-P 検出器のパルス高さが低下した明確な理由は不明であるが、2014 年 11 月の信号パルス測定前に、2.4 項に示す AFAS-P Collar 検出器の検出効率の確認に係る試験及び 2.6 項に示す ³He 比例計数管の故障検知に係る試験を実施するにあたり、頻繁に各検出器の信号及び電源ケーブルの抜き差しを行ったこと、また Collar 検出器のプリアンプの電源を ON/OFF したこと等が、本パルス高さの変動の一因になった可能性がある。このように、信号パルスは、わずかな測定環境の変化や NDA システムの不具合（プリアンプの故障、ケー

ブルの劣化等)を検知することができる重要な情報のひとつであり、定期的にこれを測定し、その変動を観察することは、機器の健全性を確認する有用な手段のひとつであると考ええる。

信号パルスの測定結果について、LANLより Collar 検出器の信号パルスの幅が小さいというコメントがあった(通常は Fork 検出器で得られた幅と同程度になる)。これはデランダマイザに異常がある可能性が考えられ、LANL から新しいデランダマイザが送られてくることになった。

2.4. PWR 用 MOX 新燃料集合体向け AFAS 中央部検出器の検出効率の確認

(a) 目的

これまでの統合性能確認試験の結果を踏まえ、AFAS-P の Collar 検出器にて、線源強度の異なる中性子線源 (^{252}Cf 線源) を用いた場合の検出効率の差異(*)について確認、検討を行った。

* : H23 年度性能確認試験において、線源強度が高い線源の測定結果から評価した検出効率と、低い線源の測定結果から評価した検出効率に約 0.5%の差があった。

(b) 方法

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器を対象に、線源強度の異なる 3 つの ^{252}Cf 中性子線源を用いた検出効率の測定試験を定期的実施する。

試験日における各線源の中性子放出率は、ENMC (熱外中性子測定装置) による測定結果から算出する。各検出器の配置及び配線、線源の配置位置は、2.3 項の「維持管理手法の検討」に係る試験と同様とする。

以下に試験手順を示す。

① ENMC による ^{252}Cf 線源の中性子放出率の評価

- 1) INCC の Background モードにより、60 秒×10 回 (10 分間) のバックグラウンド測定を行う。
- 2) ^{252}Cf 中性子線源を専用の治具を用いて検出器中央に配置する。
- 3) INCC の Rate-only モードにより 60 秒×10 回 (10 分間) の測定を行い、シングル値を取得する。
- 4) 得られたシングル値を ENMC の ^{252}Cf に対する中性子検出効率 (0.625) で除することで、試験日における ^{252}Cf 線源の中性子放出率の期待値 (Y) を算出する。
- 5) 2)~4)を強度の異なる 3 つの ^{252}Cf 線源 (線源番号 : WW-906、H4-694、K7-436) について行う。

② Collar 検出器の検出効率の評価

- 1) INCC の Background モードにより、30 秒×20 回(10 分間)のバックグラウンド測定を行う。
- 2) ^{252}Cf 中性子線源を専用の治具を用いて検出器に配置する。
- 3) INCC の Rate-only モードにより 30 秒×20 回 (10 分間) の測定を行い、シングル値を取得する。
- 4) 式 2-3 に示すように、得られたシングル値 (S) を、ENMC で求めた試験日における ^{252}Cf 中性子線源の中性子放出率 (Y) により除することで、中性子検出効率 (e) を評価する。

$$\varepsilon = \frac{S}{Y} \dots \dots \dots (2-3)$$

- 5) 2)~4)を強度の異なる 3 つの ²⁵²Cf 線源 (線源番号 : WW-906、H4-694、K7-436) について行う。
- 6) 以上を AFAS-B 及び AFAS-P について 1 回/3 ヶ月の頻度で実施する。

(c) 結果

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器の検出効率の評価結果を表 2-11 及び表 2-12 に示す。

AFAS-B Collar 検出器の検出効率については、いずれの試験日においても線源強度に依存した検出効率の変動はみられなかった。

一方で、AFAS-P Collar 検出器の検出効率については、過去の性能確認試験結果と同様に、線源強度が低い線源 (WW-906) から評価した検出効率は、いずれの試験日においても強い線源 (H4-694、K7-436) から評価した検出効率よりも高くなる結果となり、その差は約 0.8% であった。

表 2-11 AFAS-B Collar 検出器の検出効率の評価結果

線源	試験日	中性子放出率 (n/s)	AFAS-B Collar			
			Singles	±	検出効率	検出効率 (平均)
WW-906	2014/05/14	9472.90	1872.680	2.105	19.77%	19.77%
	2014/08/26	8828.06	1741.851	2.251	19.73%	
	2014/12/15	8161.79	1615.171	1.180	19.79%	
	2015/02/09	7835.62	1551.582	1.982	19.80%	
H4-694	2014/05/14	165822.42	32756.311	8.744	19.75%	19.76%
	2014/08/26	153964.70	30407.817	9.988	19.75%	
	2014/12/15	142061.69	28107.394	9.700	19.79%	
	2015/02/09	136554.55	26989.599	9.685	19.76%	
K7-436	2014/05/14	354625.79	70204.948	15.944	19.80%	19.79%
	2014/08/26	329231.62	65156.985	14.118	19.79%	
	2014/12/15	303950.62	60198.691	14.946	19.81%	
	2015/02/09	292280.58	57825.018	13.61	19.78%	

表 2-12 AFAS-P Collar 検出器の検出効率の評価結果

線源	試験日	中性子放出率 (n/s)	AFAS-P Collar			
			Singles	±	検出効率	検出効率 (平均)
WW-906	2014/05/14	9472.90	1620.689	1.948	17.11%	17.07%
	2014/08/26	8828.06	1503.881	3.039	17.04%	
	2014/12/15	8161.79	1392.196	1.799	17.06%	
	2015/02/09	7835.62	1339.195	2.118	17.09%	
H4-694	2014/05/14	165822.42	27058.642	6.693	16.32%	16.32%
	2014/08/26	153964.70	25106.686	12.275	16.31%	
	2014/12/15	142061.69	23211.843	5.611	16.34%	
	2015/02/09	136554.55	22297.159	6.050	16.33%	
K7-436	2014/05/14	354625.79	57680.59	13.048	16.27%	16.25%
	2014/08/26	329231.62	53482.578	13.385	16.24%	
	2014/12/15	303950.62	49430.428	12.626	16.26%	
	2015/02/09	292280.58	47477.297	9.587	16.24%	

(d) 考察

定期的な検出効率測定を実施した結果、AFAS-P Collar 検出器の中性子検出効率の線源強度に依存した差異の傾向は、試験期間を通じて変化することはない。

そこで、AFAS-P Collar 検出器の検出効率の差異の更なる原因究明のため、図 2-15 に示すように、Collar 検出器を Primary 検出器と Secondary 検出器の 2 つに分割し、それぞれの検出効率測定を行った。その結果、表 2-13 に示すように、線源強度に依存した検出効率の差異は、Secondary 検出器にはなく、Primary 検出器にあることを確認した。このことから、次に Primary 検出器内にあると思われる原因箇所を特定するために、Primary 検出器内にある 5 個のプリアンプ (図 2-16 参照) それぞれについて検出効率測定を行った。しかし、表 2-14 に示すように、プリアンプ毎の検出効率評価結果に線源強度に依存した差異は確認できなかった。したがって、プリアンプ及びそれに付随する ^3He 比例計数管は健全である可能性が高いと考えられることから、次に各プリアンプからの信号を一時的に集約する機能のあるデランダマイザ (図 2-16 参照) の不具合を疑い、Primary 検出器のデランダマイザを Secondary 検出器のデランダマイザと交換し検出効率測定を行った。その結果、表 2-15 に示すように、Primary 検出器のデランダマイザ交換前後での検出効率評価結果に変化はなく、デランダマイザにも原因がないことが確認された。

LANL による AFAS-P の Collar 検出器の中性子検出効率の評価値は 16.2%であった。このことから、線源強度が低い線源を測定した時の中性子検出効率が過大になっていると考えられ

る。実運用においては燃料集合体を測定し、線源強度の低い線源を測定することはないので、影響はないと考えられる。

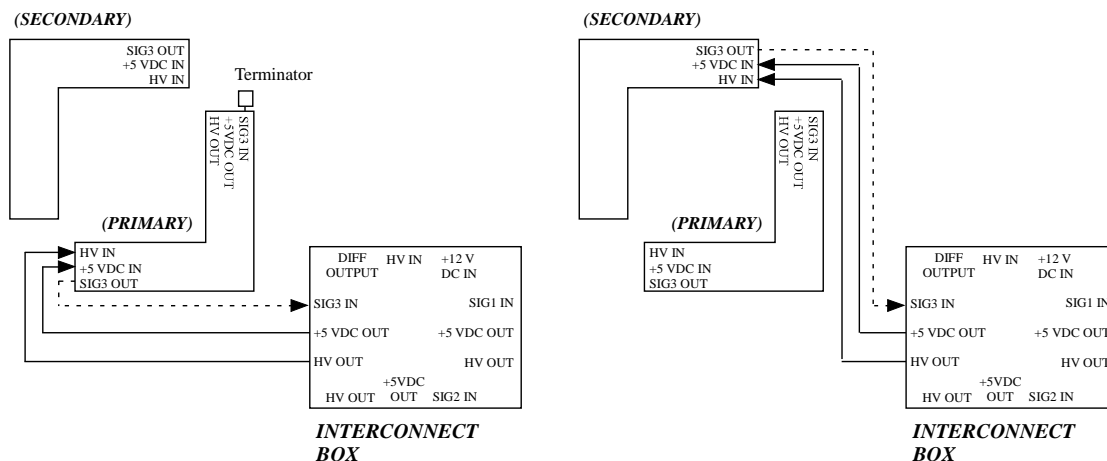


図 2-15 AFAS-P Collar Primary 検出器と Secondary 検出器の検出効率測定時の検出器と INTERCONNECT BOX 間の配線図

表 2-13 AFAS-P Collar Primary 検出器と Secondary 検出器の検出効率の評価結果

線源	中性子放出率 (n/s)	Primary 検出器			Secondary 検出器		
		Singles	±	検出効率	Singles	±	検出効率
WW-906	8828.06	794.522	0.790	9.00%	710.870	1.351	8.05%
H4-694	153964.70	12696.041	5.356	8.25%	12459.805	4.689	8.09%
K7-436	329231.62	27151.360	8.428	8.25%	26708.011	8.049	8.11%

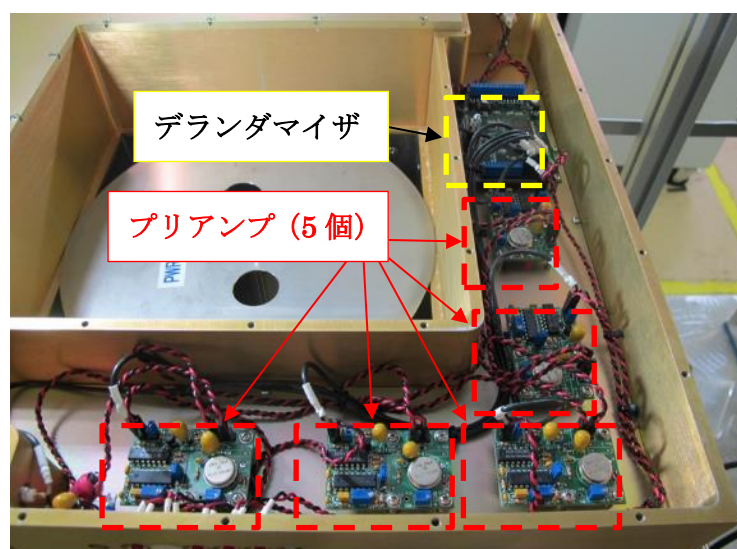


図 2-16 AFAS-P Collar Primary 検出器内のプリアンプ及びデランダムマイザ

表 2-14 AFAS-P Collar Primary 検出器のアンプ毎の検出効率の評価結果

線源	中性子放出率 (n/s)	検出効率				
		アンプ①	アンプ②	アンプ③	アンプ④	アンプ⑤
WW-906	8450.35	1.76%	1.29%	1.42%	1.92%	1.57%
K7-436	315727.97	1.77%	1.29%	1.44%	1.93%	1.61%

表 2-15 AFAS-P Collar Primary 検出器のデランダマイザ入れ替え前後の検出効率の評価結果

線源	デランダマイザ交換前				デランダマイザ交換後			
	中性子放出率(n/s)	Singles	±	検出効率	中性子放出率(n/s)	Singles	±	検出効率
WW-906	8828.06	794.52	0.79	9.00%	7821.22	697.80	1.46	8.92%
K7-436	329231.62	27151.36	8.43	8.25%	291562.90	24002.32	6.17	8.23%

2.5. 短尺燃料棒を有する燃料集合体の有効長測定に係る検討

これまでの統合性能確認試験の結果から得られた測定精度及び各検出器の検出効率を踏まえ、9×9A型燃料集合体（8本の短尺燃料棒を有する。）の部分欠損レベルでの有効長測定可能性について、シミュレーション評価及び評価結果の妥当性確認試験を実施した。

通常の燃料集合体は、全て同一有効長の燃料棒により構成されるため、集合体の有効長範囲内のPuは均一に分布している。よって、図2-17の左図に示すように、集合体を所定の測定位置に10分間静止させ取得したCollar検出器の測定値から求めた単位長さあたりのPu質量 m に、Top Fork及びBottom Fork検出器の測定値から求めた有効長 L をかけることにより集合体中の合計Pu質量を算出することができる。

一方、9×9A型燃料集合体は、集合体を構成する合計74本の燃料棒のうち8本が通常の燃料棒よりも短い短尺燃料棒により構成される。そのため、集合体の有効長範囲内の単位長さあたりのPu質量は、短尺燃料棒を含む部位と含まない部位で異なる。短尺燃料棒の有効長は約216cmであり、本寸法を考慮すると、J-MOXにおける本集合体の測定の際には、図2-17の右図に示すように、AFAS-B Collar検出器の下部約32cm付近に短尺燃料棒の有効長上端が位置することが予想される。よって、9×9A型燃料集合体中のPu質量の評価には、通常の燃料集合体中のPu質量の定量に必要な静止状態における計数値に加えて、短尺燃料棒を含む部位の有効長 L_{A1} 及びその範囲の単位長さあたりのPu質量 m_{A1} を評価するために、燃料集合体が移動中の計数値も必要となる。

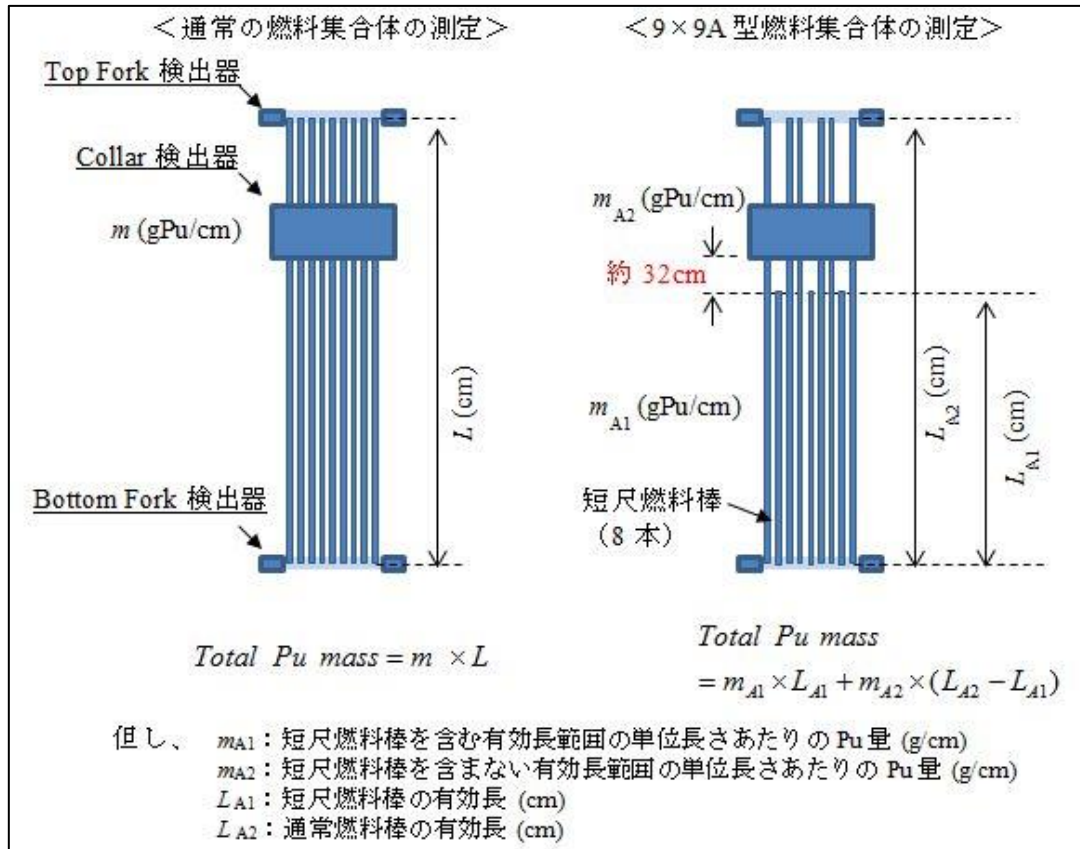


図 2-17 9×9A 型燃料集合体測定概略図

J-MOX では、図 2-18 の上の図に示すように、集合体は AFAS 上部よりクレーンにて所定の測定位置（図の(E)の位置）まで降ろされる。集合体が上部より降下し、Top Fork 検出器、Collar 検出器を通過し、測定位置（有効長上端及び下端が Top Fork 検出器及び Bottom Fork 検出器の中心となる位置）に達し停止するまでの、それぞれの検出器の測定値（シングル値 S、ダブル値 D）の変動を図 2-18 に示す。

2.5.1. 9×9A 型燃料集合体の検認測定方法

LANL によって提案された 9×9A 型燃料集合体の検認測定方法は、所定の測定位置で静止した状態で取得した測定値（図 2-18 の S_{c2} 、 D_{c2} 、 S_{t3} 、 S_{b1} ）に加え、短尺燃料棒を含む有効長範囲が Collar 検出器を通過した際の測定値（ S_{c1} 、 D_{c1} ）も用いるものである。9×9A 型燃料集合体の合計 Pu 質量 Total Pu mass を算出するための計算式を式 2.4～2.7 に示す。

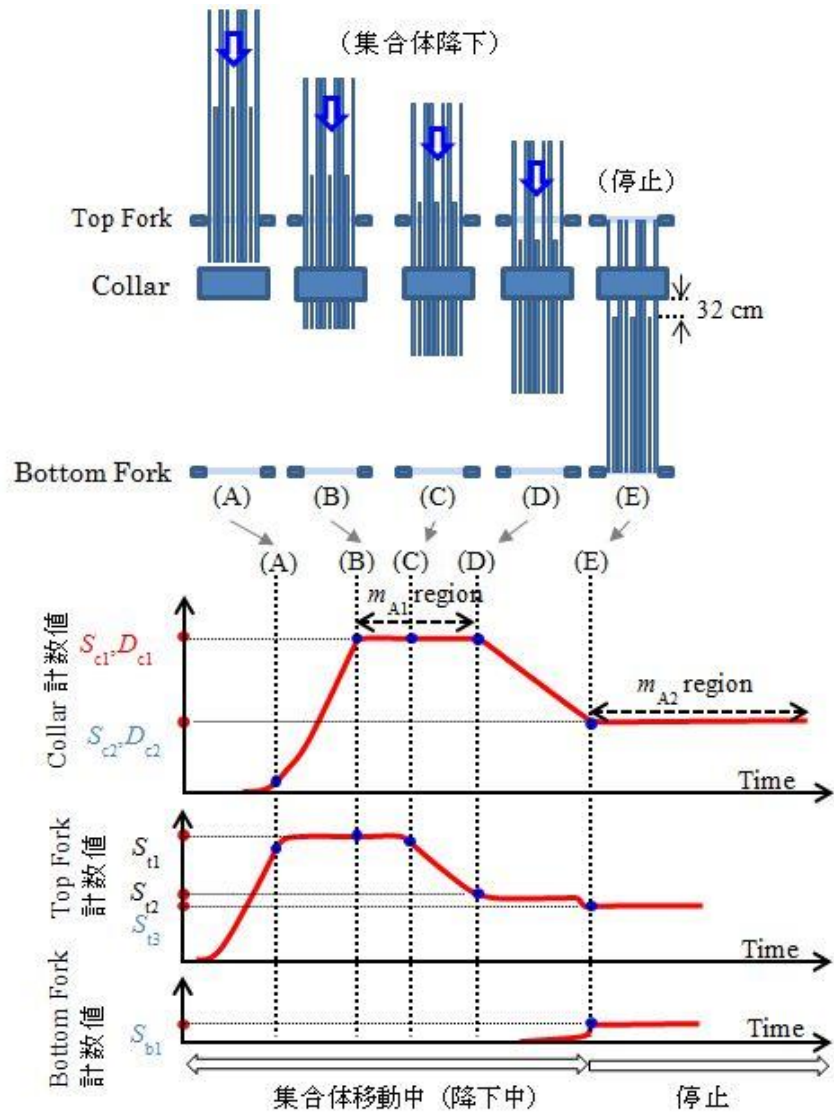


図 2-18 集合体移動中の Collar 及び Fork 計数值の変動

$$m_{A1} = \frac{m_{A2}}{D_{mc_c2}} \times D_{mc_c1} \quad \dots \dots \dots (2.4)$$

m_{A2} : S_{c2} 及び D_{c2} から Knowna 法にて算出

$$L_{A1} = F \left(\frac{S_{c2}}{S_{c1}} + \frac{S_{b1}}{S_{c1}} \right) + L_{cb} \quad \dots \dots \dots (2.5)$$

$$L_{A2} = F \left(\frac{S_{t3}}{S_{c2}} + \frac{S_{b1}}{S_{c1}} \right) + L_{tb} \quad \dots \dots \dots (2.6)$$

$$Total \ Pu \ mass = m_{A1} \times L_{A1} + m_{A2} \times (L_{A2} - L_{A1}) \quad \dots \dots \dots (2.7)$$

但し、 m_{A1} ：短尺燃料棒を含む有効長範囲の単位長さあたりの Pu 質量 (g/cm)
 m_{A2} ：短尺燃料棒を含まない有効長範囲の単位長さあたりの Pu 質量 (g/cm)
 L_{A1} ：短尺燃料棒の有効長 (cm)
 L_{A2} ：通常燃料棒の有効長 (cm)
 D_{mc_c1} ：集合体が移動中に Collar 検出器で取得した増倍補正後のダブル値 (cps)
 D_{mc_c2} ：集合体が停止中に Collar 検出器で取得した増倍補正後のダブル値 (cps)
 D_{c1} ：集合体が移動中に Collar 検出器で取得したダブル値 (cps)
 D_{c2} ：集合体が停止中に Collar 検出器で取得したダブル値 (cps)
 S_{c1} ：集合体が移動中に Collar 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_{c2} ：集合体が停止中に Collar 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_{t3} ：集合体が停止中に Top Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_{b1} ：集合体が停止中に Bottom Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)
 L_{cb} ：Collar 検出器下端と Bottom Fork 検出器中心の間の距離 (cm)
 L_{tb} ：Top Fork 検出器中心と Bottom Fork 検出器中心の間の距離 (cm)
 F ：校正によって求めた有効長算出のための関数

短尺燃料棒を含む有効長範囲が Collar 検出器を通過しているときに得られる測定値 (S_{c1} 、 D_{c1}) は、通過時間及び正味の測定時間が短ければ統計誤差が大きくなり測定精度が確保できない可能性がある。また、Collar 検出器が短尺燃料棒を含まない有効長範囲の単位長さあたりの Pu 質量 (g/cm) を測定するとき (集合体は静止状態) に、短尺燃料棒から放出される中性子によって当該測定に影響与える可能性がある。前者について評価するために集合体を用いた性能確認試験を行い、後者について評価するためにシミュレーション評価及びその評価結果の妥当性確認試験を行った。

2.5.2. シミュレーション評価

シミュレーション評価は、LANL が開発した MCNP コード (Monte Carlo N-Particle Transport Code) を用いて行った。図 2-19 は本コード上に模擬した 9×9A 型燃料集合体の上断面図である。模擬にあたっては、図 2-20 に示す 9×9A 型燃料集合体の仕様を参照した。集合体中の MOX ペレット中のプルトニウム及びウランの同位体組成比は表 2-16 のとおりとした。短尺燃料棒が存在しない高さでの断面図 (図 2-19 右図) から短尺燃料棒の配置がわかる。

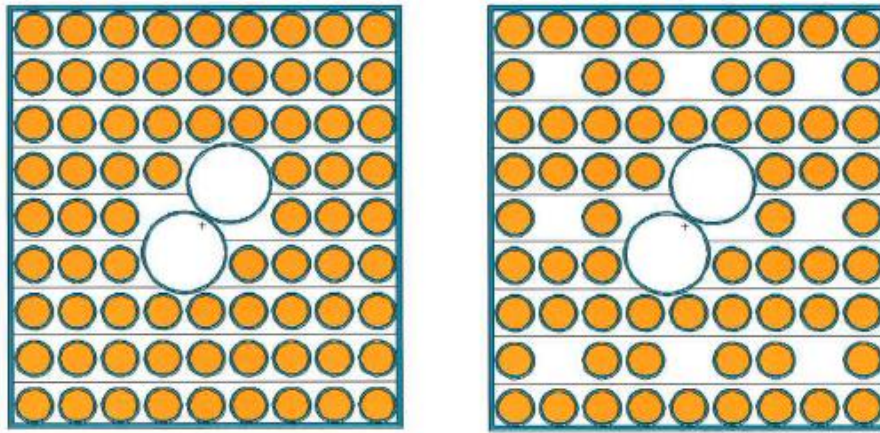


図 2-19. MCNP 上に模擬した 9×9A 型燃料集合体の上断面図

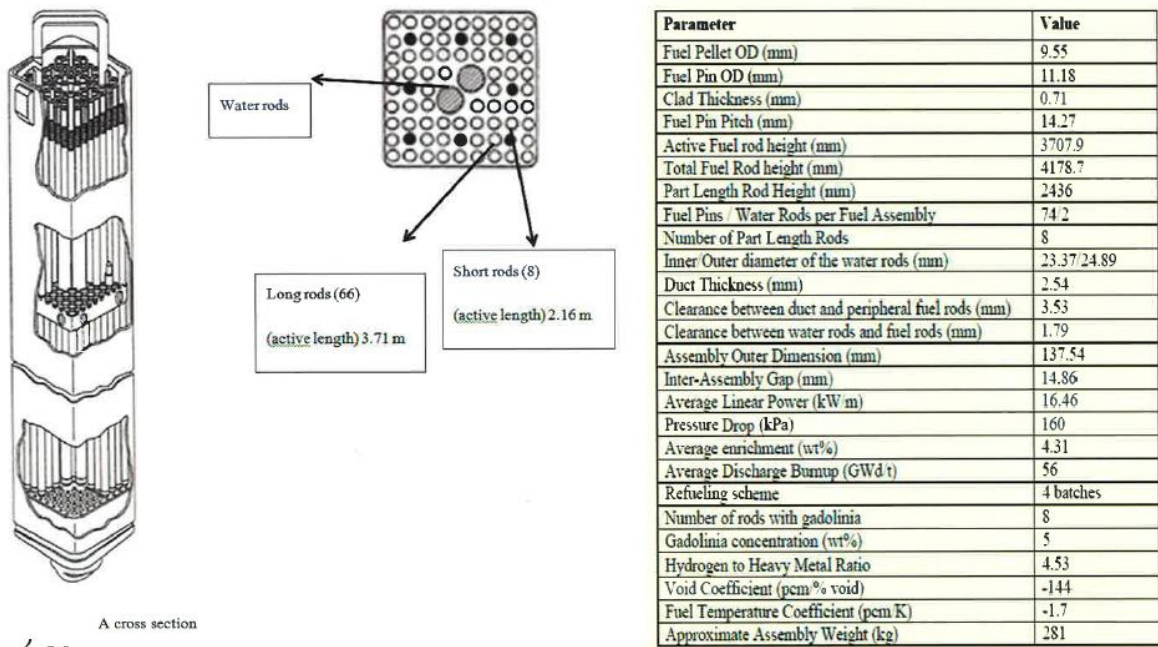


図 2-20. シミュレーション上で 9×9A 型燃料集合体を設定するとき参照した仕様

表 2-16. シミュレーションで用いたプルトニウム及びウランの同位体組成比

	Fraction by weight	Fraction of Total Pu (or U)
Pu 238	0.00075	0.0127
Pu 239	0.03561	0.6037
Pu 240	0.01502	0.2547
Pu 241	0.00492	0.0833
Pu 242	0.00268	0.0455
$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$		0.363
Pu	0.059	
U234	4.44e-05	0.000054
U235	0.00822	0.01
U236	0.0	0.0
U238	0.8142	0.99
U	0.822	
Pu/(U+Pu)	0.0669	
O16	0.119 UNCLASSIFIED	

MCNP 上に模擬した 9×9A 型燃料集合体は、図 2-21 に示す AFAS 及び集合体の配置を集合体の移動距離が 0 cm の点とし、図 2-22 に示すように -180 cm ~ 180 cm の範囲で移動させた。

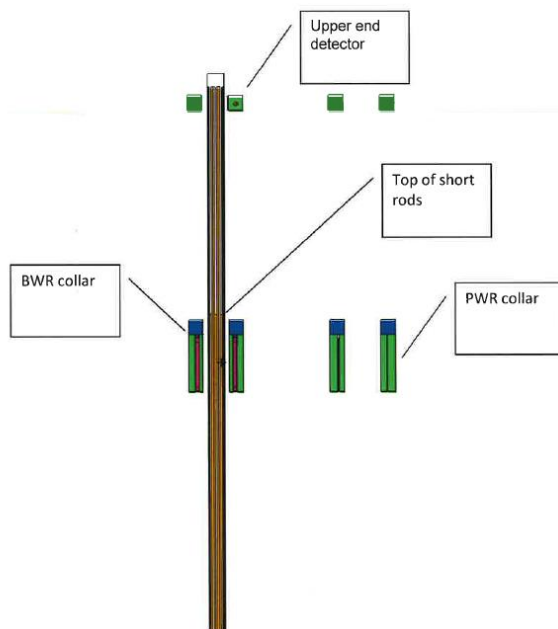


図 2-21. シミュレーション上での集合体の移動範囲の原点（集合体の移動距離が 0 cm の点）

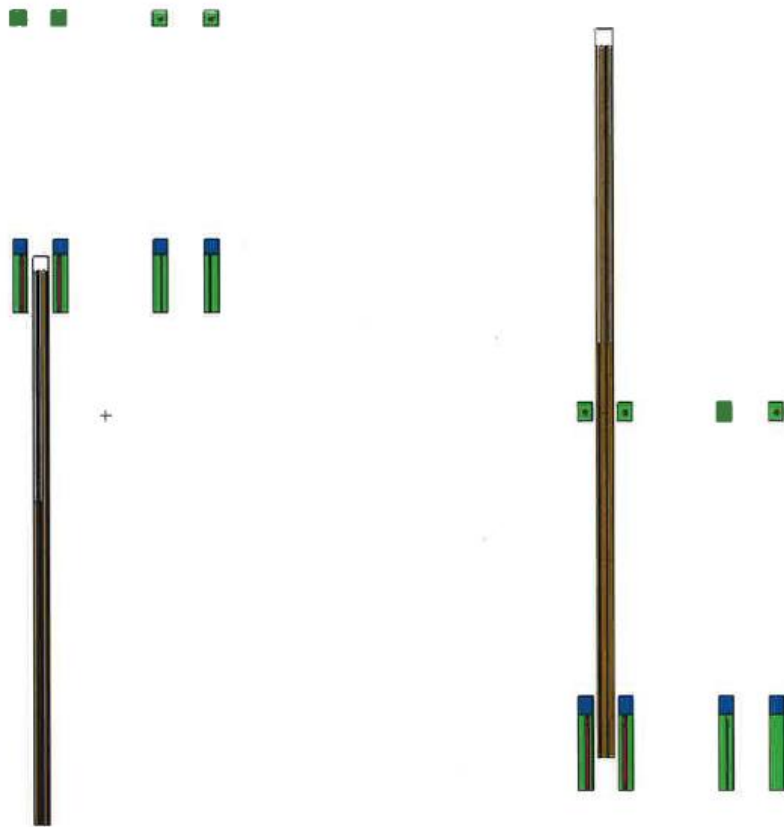


図 2-22. シミュレーション上での集合体の移動範囲（-180 cm~180 cm）

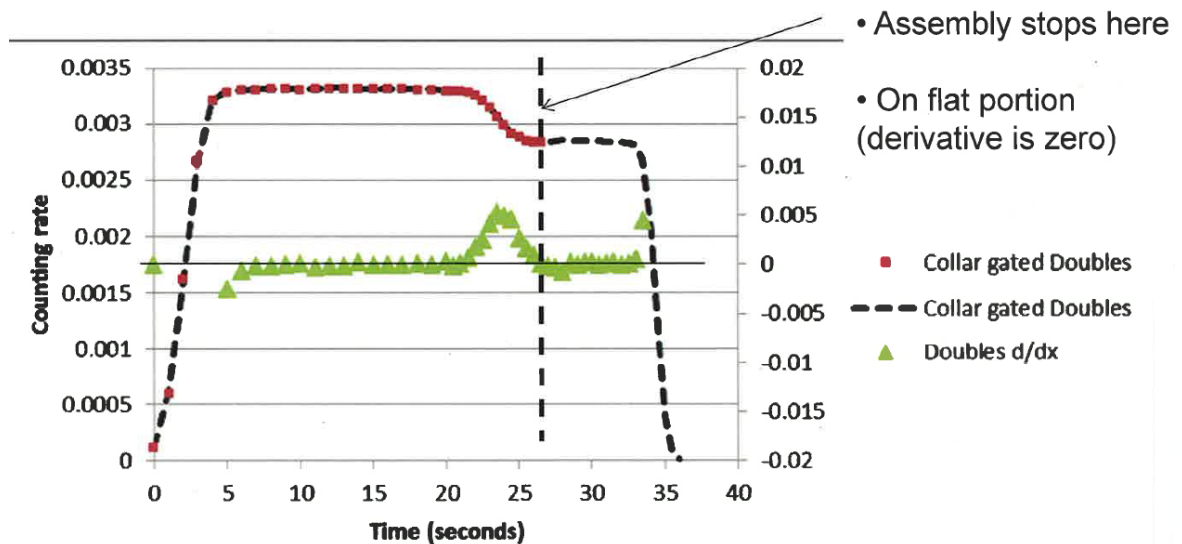


図 2-23. 集合体移動時における Collar 検出器のダブル値の推移

シミュレーションで得られた集合体移動時における Collar 検出器のダブル値の推移を図 2-23 の黒色破線の曲線で示す。集合体が静止状態となり、10 分間の検認測定に入る状態が同

図の黒色破線の直線で示す時刻である（ただし、シミュレーション上では同時刻以降も集合体は移動を続ける）。同時刻におけるダブル値は、その後のダブル値のほぼ一定となる領域におけるダブル値とほぼ同じ値となっている。このことから、Collar 検出器が短尺燃料棒を含まない有効長範囲の単位長さあたりの Pu 質量 (g/cm) を測定するとき（集合体は静止状態）に、短尺燃料棒から放出される中性子によって当該測定が受ける影響は小さいと言える。

2.5.3. 9×9A 型燃料集合体の検認測定精度の確認に係る試験項目

実際の集合体（封入棒集合体）を用いて、集合体移動状態における Collar の測定精度評価、及びシミュレーションの結果を妥当性を確認するため Collar 検出器下部に位置する短尺燃料棒が Collar 計数値に与える影響の評価試験を行った。なお、9×9A 型燃料集合体は BWR 用燃料集合体であり、AFAS-B で測定されるものであるが、上記の封入棒集合体を用いた試験は、封入棒集合体をクレーンで吊る際使用する集合体上部を把持するための器具が、AFAS-B の検出器内壁と干渉することから、代替として AFAS-P で実施した。よって AFAS-P で行った試験の妥当性を確認するため、²⁵²Cf 中性子線源を用いて AFAS-B と AFAS-P の検出効率プロファイル比較評価試験を行った。

表 2-17 に 9×9A 型燃料集合体の検認測定精度の確認に係る試験項目を示す。各試験項目の詳細については、2.5.5 項以降に示す。

表 2-17 9×9A 型燃料集合体の検認測定精度の確認に係る試験項目

試験項目
集合体移動状態における Collar の測定精度評価
短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響評価
Collar 検出器の検出効率プロファイル比較評価

2.5.4. バックグラウンド測定

封入棒集合体を用いた試験場所であるプルトニウム燃料第二開発室集合体貯蔵室には、核燃料物質付着物一時貯蔵ピット内に Pu 質量で約 9kg、集合体貯蔵筒内に約 51kg の核物質在庫があるため、空間の中性子線量が高い。したがって、本試験体系におけるバックグラウンドを高精度に評価するため、集合体を用いた試験開始前に長時間のバックグラウンド測定を行い、同室で行った全ての試験項目でその測定値を適用した。集合体貯蔵室における AFAS 設置位置を図 2-24 に示す。また、バックグラウンド測定結果を表 2-18 に示す。

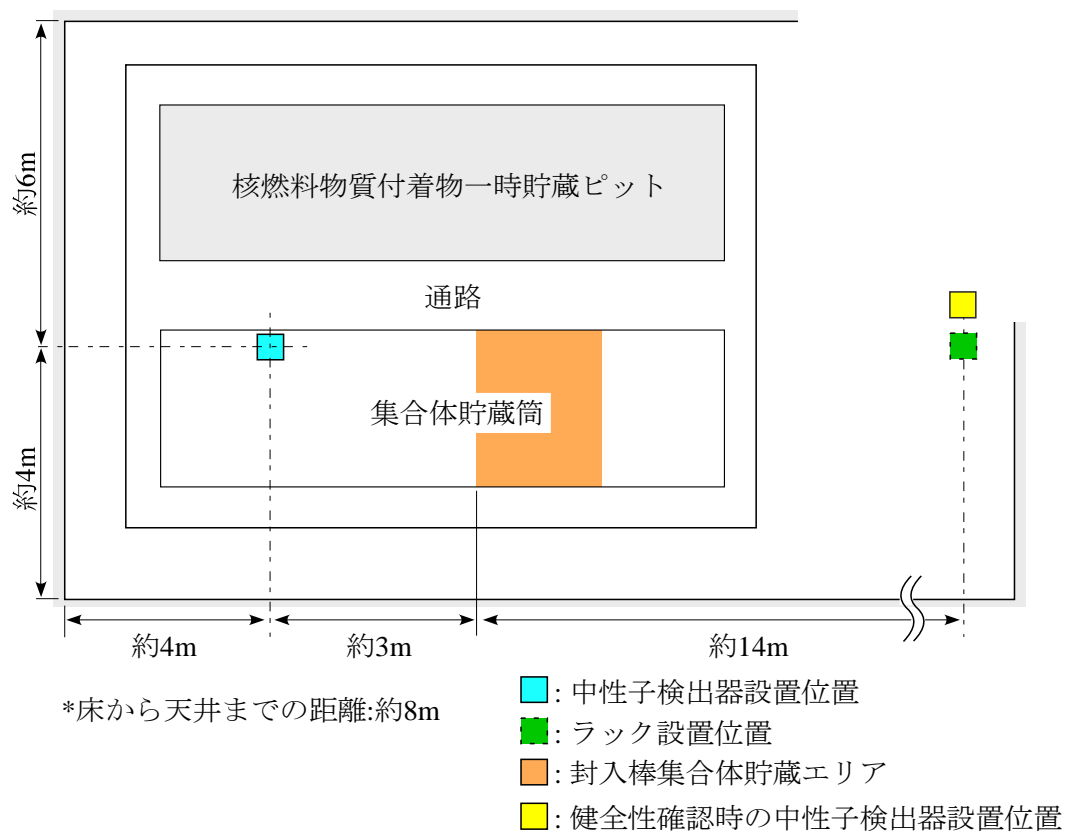


図 2-24 集合体貯蔵室における AFAS 設置位置

表 2-18 集合体貯蔵室におけるバックグラウンド測定結果

測定時間 (分)	Collar 検出器			
	Singles (cps)	σ (Singles)	Doubles (cps)	σ (Doubles)
204	8,536.480	0.824	-8.175	0.626

(シフトレジスターは AMSR を使用)

2.5.5. 集合体移動状態における Collar 検出器の測定精度評価

(a) 目的

集合体の移動状態における Collar 検出器のシングル値及びダブル値の変動及び計数誤差を評価する。

(b) 方法

クレーンで封入棒集合体の上昇/下降を繰り返し行い、Collar 検出器で集合体移動中のシングル値及びダブル値を取得し、それぞれの計数値の変動の傾向及び計数誤差を評価する。

本試験における機器構成を図 2-25 に示す。本試験では、使用するシフトレジスター及び測定ソフトウェアの違いによる計数誤差等の差異を確認するため、表 2-19 に示すように、AMSR、JSR-12 及び JSR-15 の 3 種類のシフトレジスターと、MIC (Multi-Instrument Collect) 及び INCC (IAEA Neutron Coincidence Counting) の 2 種類の測定ソフトウェアを組み合わせ、試験を行う (JSR-15 と MIC を組み合わせた試験は、MIC2.02 が JSR-15 に未対応のため実施しない)。AFAS は、システム冗長性担保のため、2 台のシフトレジスター及び PC が接続可能であるが、本試験では、そのうちの 1 系統に任意の組み合わせのシフトレジスター及び測定ソフトウェアを接続し、もう 1 系統には常に JSR-12 と MIC を接続し連続的に測定を行うことで本試験期間中の測定環境に変化がないことを確認する。また、検出器に印加する電圧を一定とするため、HV と LV は常に同一の AMSR から供給する。

測定時間は、MIC 及び INCC 共に 1 秒/サイクルとし、連続的に測定を行う。(AMSR と MIC の組み合わせでは 1 秒の設定が不可であるため最小の 3 秒とする)

集合体の移動範囲及び移動時間を図 2-26 に示す。本試験では、集合体をクレーンで集合体下限位置から 360cm 上昇させ、一旦停止し、再度集合体下限位置まで下降させる操作を、各シフトレジスターと測定ソフトウェアの組み合わせにつき 5 回繰り返す。クレーンの速度は一定で約 7cm/秒であるため、集合体下限位置から上限位置まで移動するのにかかる時間は 51 秒である。

以下に試験手順を示す。

- 1) 任意のシフトレジスター (AMSR、JSR-12 または JSR-15) を接続する。
- 2) MIC または INCC の Rate-only モードによる測定を開始し、Collar 検出器でシングル値 S_c とダブル値 D_c を連続的に取得する。
- 3) 図 2-26 に示すように、クレーンで封入棒集合体 P1 を集合体貯蔵筒収納位置から上部 360cm の位置まで吊り上げる。
- 4) 集合体を 1 分停止させた後、集合体貯蔵筒収納位置へ戻す。
- 5) MIC または INCC による測定を停止する。
- 6) 2)~5) を 5 回繰り返す。
- 7) 1)~6) をシフトレジスターとソフトウェアの組み合わせを変更し繰り返す。
- 8) 以上の測定データから以下について評価する。

① 集合体上昇に伴うシングル値 S_c とダブル値 D_c の変動の傾向

② シングル値 S_{c1} 及びダブル値 D_{c1} の計数誤差及び繰り返し精度

集合体上昇中に Collar 検出器の計数値が一定となった範囲のシングル値 S_{c1} 及びダブル値 D_{c1} 、またそれらの誤差 σS_{c1} 及び σD_{c1} から、式 2-8 及び式 2-9 に示すように、相対誤差 %RSD を評価する。また式 2-10 及び式 2-11 に示すように、変動計数 %CV を求め 5 回の測定の繰り返し精度を評価する。

$$\%RSD (S_{c1}) = \frac{\sigma S_{c1}}{S_{c1}} \times 100 \dots \dots \dots (2-8)$$

$$\%RSD (D_{c1}) = \frac{\sigma D_{c1}}{D_{c1}} \times 100 \dots \dots \dots (2-9)$$

$$\%CV (S_{c1}) = \frac{S_{c1_SD}}{S_{c1_AVE}} \times 100 \dots \dots \dots (2-10)$$

$$\%CV (D_{c1}) = \frac{D_{c1_SD}}{D_{c1_AVE}} \times 100 \dots \dots \dots (2-11)$$

但し、 S_{c1_AVE} : 5回測定した S_{c1} の平均

D_{c1_AVE} : 5回測定した D_{c1} の平均

S_{c1_SD} : 5回測定した S_{c1} の標準偏差

D_{c1_SD} : 5回測定した D_{c1} の標準偏差

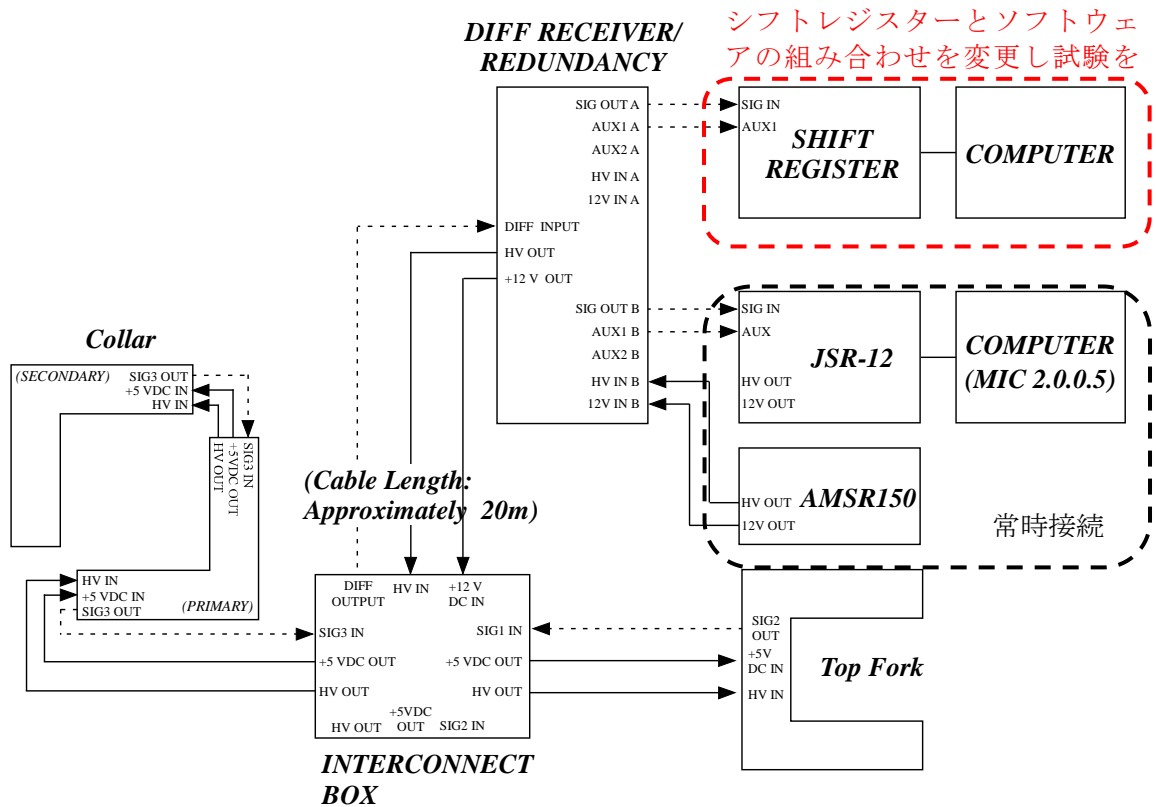


図 2-25 機器構成図

表 2-19 シフトレジスタ及びソフトウェアの組み合わせ及び測定時間

No.	シフトレジスタ	測定ソフトウェア	測定時間 (秒) / サイクル
1	AMSR	MIC 2.02	3 (*)
2	AMSR	INCC 5.12	1
3	JSR-12	MIC 2.02	1
4	JSR-12	INCC 5.12	1
5	JSR-15	INCC 5.12	1

*: 3 秒未満に設定不可

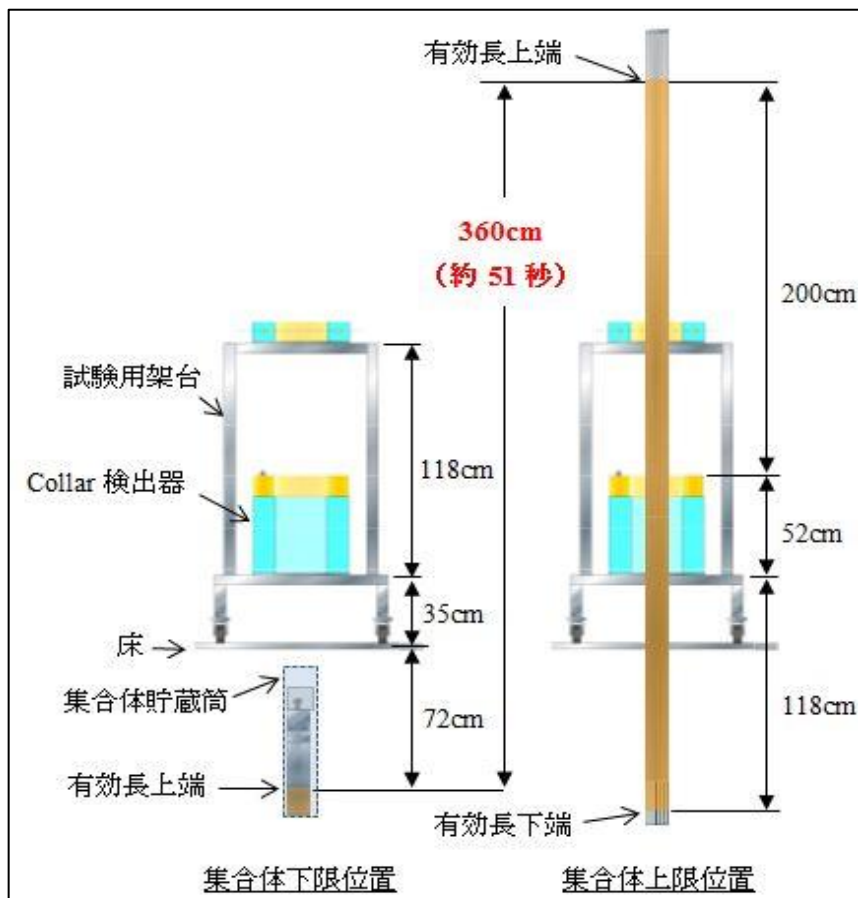


図 2-26 集合体の移動範囲及び移動時間 (クレーン速度約 7cm/秒)

(c) 結果

① 集合体上昇に伴うシングル値 S_c とダブル値 D_c の変動の傾向

各シフトレジスタとソフトウェアの組み合わせで取得した、集合体上昇中におけるシングル値 S_c とダブル値 D_c の変動傾向を図 2-27～図 2-32 に示す。いずれの組み合わせにおいても、シングル値 S_c とダブル値 D_c は、集合体上昇に伴い徐々に増加し、約 30 秒後に集合体有効長上部が Collar 上部約 50cm の位置に達すると、その後はほぼ一定となった。

AMSR と MIC による測定では、図 2-28 に示す通り、ダブル値が大きく変動する際、計数値が上昇する事象（角の発生）が見られた。これは、同様の組み合わせ（AMSR+MIC）を適用した他の査察官非立会い NDA システム（PFPP の PCAS（プルトニウムキャニスター測定システム）等）でも同様の事象が起きることが分かっているが、この上昇した計数値は Pu 質量の評価には用いないため問題ないとされている。

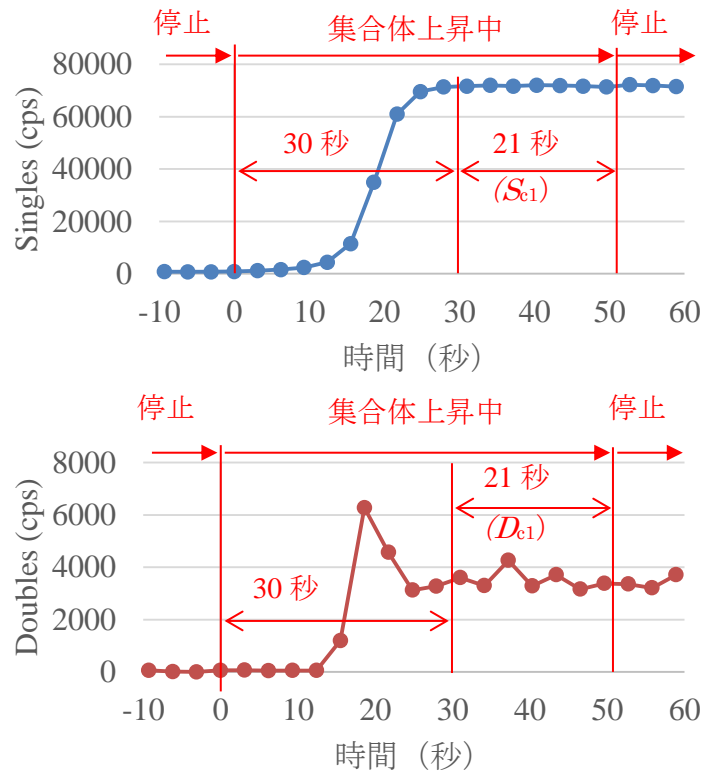


図 2-27 集合体上昇中の Collar 検出器のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の変動傾向 (AMSR+MIC)

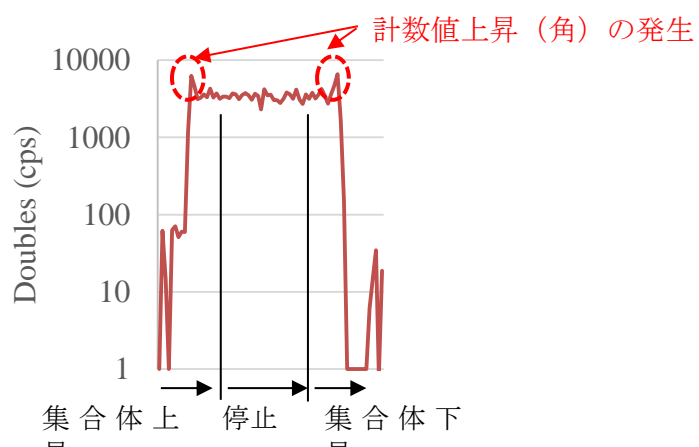


図 2-28 AMSR+MIC によって測定したダブル値 D_c の計数値上昇

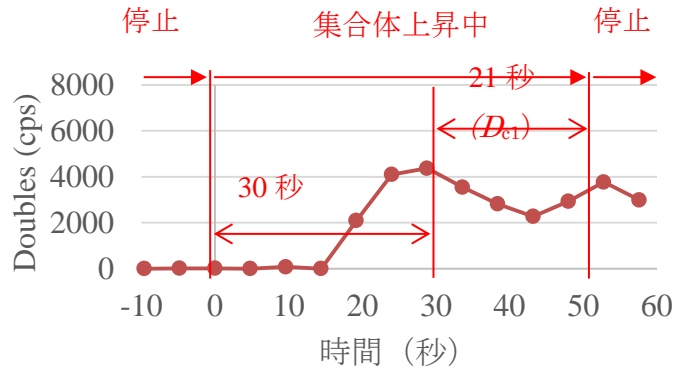
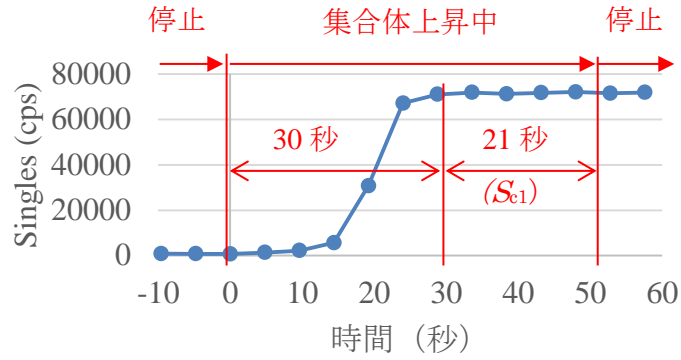


図 2-29 集合体が上昇中の Collar 検出器のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の変動傾向 (AMSR+INCC)

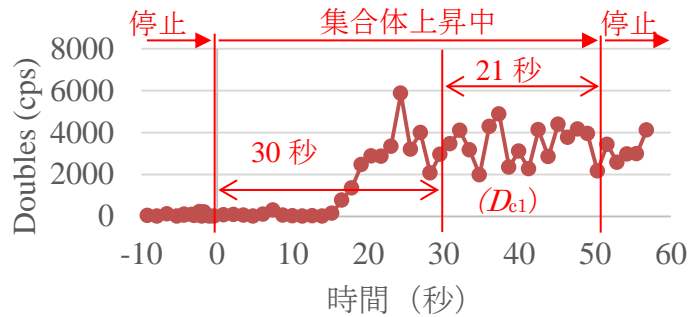
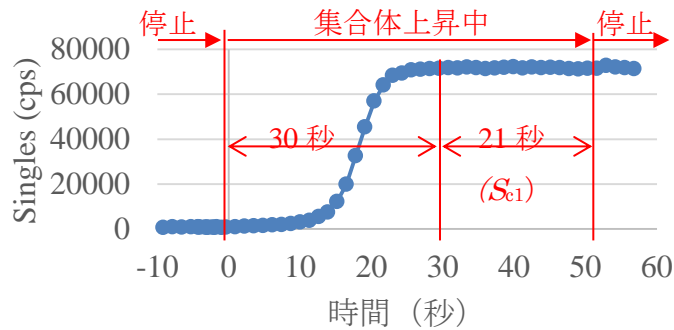


図 2-30 集合体が上昇中の Collar 検出器のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の変動傾向 (JSR-12+MIC)

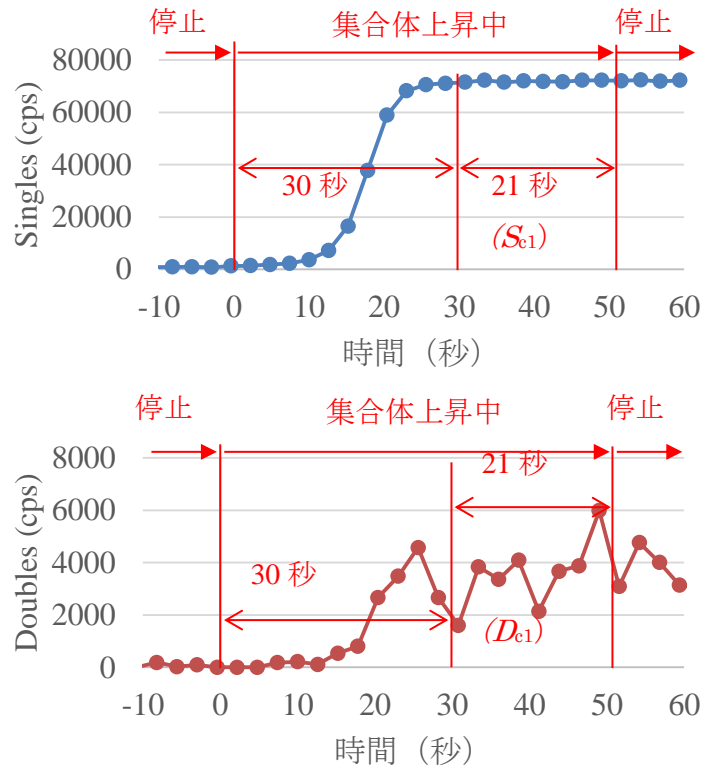


図 2-31 集合体が上昇中の Collar 検出器のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の変動傾向 (JSR-12+INCC)

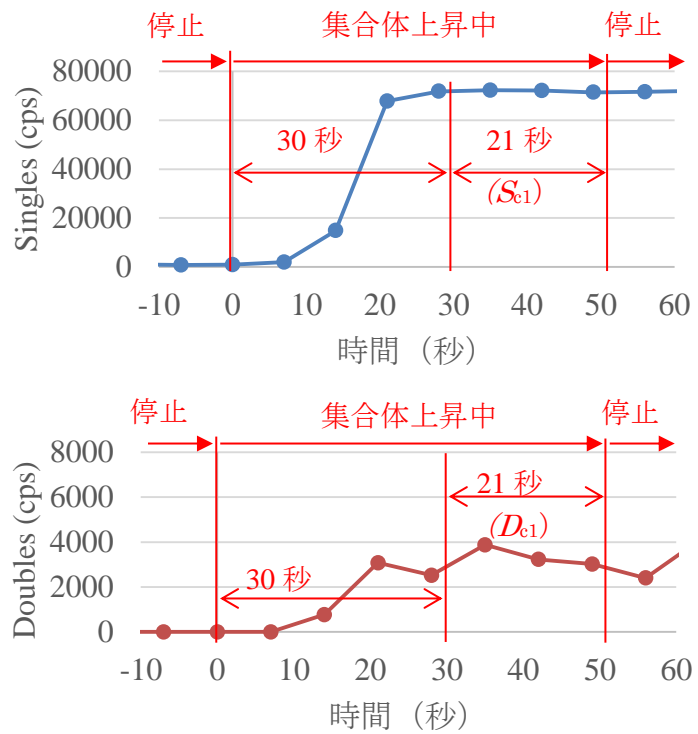


図 2-32 集合体が上昇中の Collar 検出器のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の変動傾向 (JSR-15+INCC)

②シングル値 S_{c1} 及びダブル値 D_{c1} の計数誤差及び繰り返し精度

図 2-27～図 2-32 に示した結果から分かるように、集合体上昇中に Collar 検出器の計数値が一定となった範囲は、集合体上昇から 30 秒後～51 秒後の 21 秒間であった。この間に各シフトレジスタとソフトウェアの組み合わせによって Collar 検出器が取得したシングル値 S_{c1} 及びダブル値 D_{c1} 及びこれらの誤差 σS_{c1} 及び σD_{c1} を図 2-33～図 2-34 に示す。またこれらの測定値から評価した相対誤差%RSD 及び変動係数%CV を表 2-20 に示す。

表 2-20 に示したとおり、シングル値の%RSD (S_{c1})は、いずれのシフトレジスタとソフトウェアの組み合わせにおいても約 0.1%～0.3%であった。ダブル値の%RSD (D_{c1})は、各組み合わせによって差があったが、AMSR と MIC の組み合わせの場合が%RSD が最も小さく、約 5.2%であった。また、各組み合わせにおける 5 回の測定の繰り返し精度 (%CV) については、シングル値の%CV(S_{c1})は、どの組み合わせにおいても約 0.2%～0.3%であった。ダブル値の%CV(D_{c1})は、各組み合わせによって差があったが、AMSR と MIC を組み合わせた場合が最も小さく約 4.7%であった。

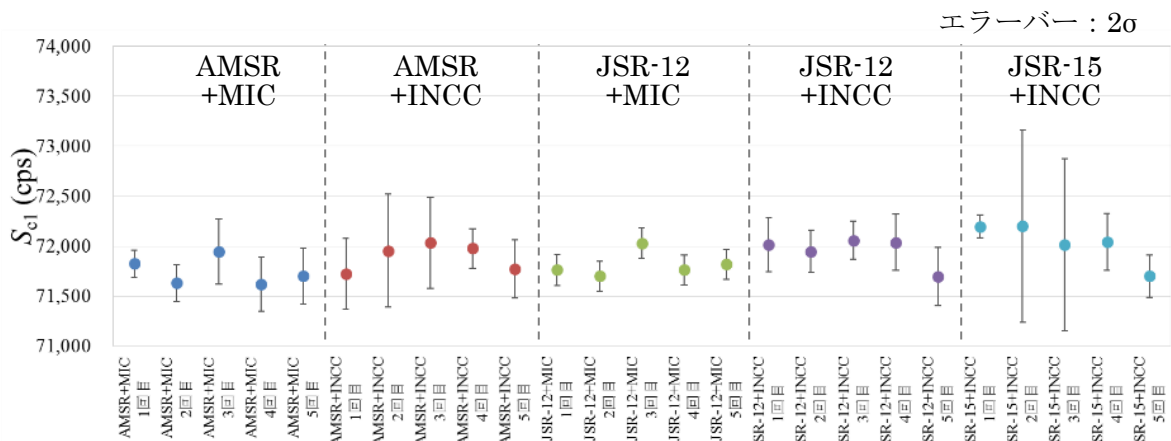


図 2-33 S_{c1} 測定結果

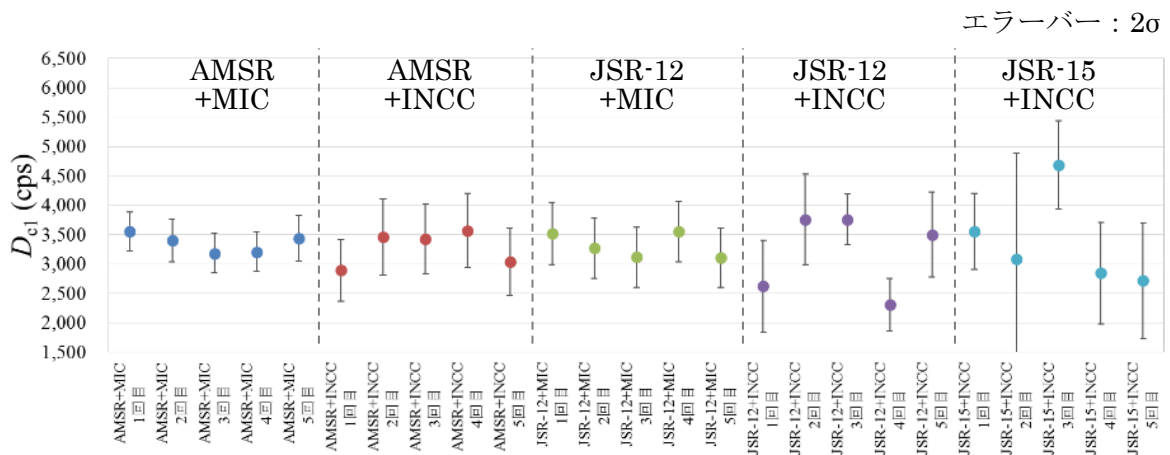


図 2-34 D_{c1} 測定結果

表 2-20 S_{c1} 及び D_{c1} の相対計数誤差%RSD 及び変動係数%CV

シフトレジスタ ソフトウェア	AMSR		JSR-12		JSR-15
	MIC	INCC	MIC	INCC	INCC
合計測定時間 (測定時間×サイクル)	18 秒 (3 秒×6 回)	4 秒 (1 秒×4 回)	16 秒 (1 秒×16 回)	8 秒 (1 秒×8 回)	2 秒 (1 秒×2 回)
%RSD (S_{c1}) (5 回測定 of 平均)	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
%RSD (D_{c1}) (5 回測定 of 平均)	5.2	9.1	7.8	10.2	15.9
%CV (S_{c1})	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3
%CV (D_{c1})	4.7	9.0	6.5	21.3	23.7

(d) 考察

集合体が上昇し、集合体有効長上部が Collar 上部約 50cm 以上の位置になると、Collar の計数値がほぼ一定となる傾向は、前年度実施した AFAS 有効長測定精度の確認試験結果と一致しており、妥当な結果といえる。

集合体上昇中に値が一定となった範囲のシングル値 S_{c1} 及びダブル値 D_{c1} の相対誤差%RSD 及び変動係数%CV は、AMSR と MIC を組み合わせた場合に最小となった。これは、表 2-20 に示すように、各シフトレジスタとソフトウェアの組み合わせのうち、AMSR と MIC を組み合わせた場合の合計測定時間が 18 秒と最も長かったことによるものと考えられる。

MIC は、査察官非立会い非破壊測定装置用に開発された連続データ収集ソフトウェアであり、表 2-21 に示すように、測定サイクル間のタイムラグが小さい。一方で INCC は、査察官立会いによる非破壊測定装置用のソフトウェアであり、1 回の測定サイクル毎に計数値の妥当性確認等の処理を行うため、測定サイクル間のタイムラグが大きい。したがって、集合体移動中の限られた時間内に可能な限り長い時間の測定を行うためには、現状では MIC を使用することが最良の選択であると考えられる。

シフトレジスタの違いによる計数誤差の差については、AMSR の方が JSR-12 よりも精度良く測定できることが確認できた(表 2-20 参照)。JSR-15 については、現状 MIC が JSR-15 に対応しておらず、今回の試験では INCC との組み合わせによる評価のみであり、その結果は合計測定時間が 2 秒と短かったため、各組み合わせのうち最も測定精度が悪かった。しかしながら JSR-15 は最新のシフトレジスタであり、その性能は他のシフトレジスタと比較し最も優れていることから、今後 MIC と組み合わせた測定が可能になれば、高精度の測定ができる可能性がある。

本試験で使用したクレーンの速度は一定で約 7cm/秒であったが、J-MOX において現状想定

されているクレーン速度は最大で約 8cm/秒である。仮に 8cm/秒の一定の速度で 9×9A 型燃料集合体を移動させた場合、短尺燃料棒を含む有効長の領域が Collar 検出器を通過した際に計数値が一定となる時間は約 14 秒となり、本試験よりも合計測定時間は 7 秒程度少なくなるため、計数誤差は、本試験の評価結果よりも大きくなる。一方で、9×9A 型燃料集合体に含まれる Pu 質量は最大で 10.4kg と本試験で用いた封入棒集合体の約 3 倍であり、またその形状(四角柱)から検出器と集合体の距離もより近くなり計数値が増大することから、計数誤差は、本試験の評価結果よりも小さくなるものと考えられる。

参考に、Pu 質量が約 3.8kg の封入棒集合体を AMSR と MIC の組み合わせで、15 秒間 (3 秒×5 サイクル)測定した場合の計数値を式 2-12～式 2.17 により評価した、Pu 質量が約 10.4kg の燃料集合体を 15 秒間測定した場合の S_{c1} 及び D_{c1} の測定誤差 %RSD (S_{c1}) 及び %RSD (D_{c1}) の推定値を表 2-22 に示す。本評価は概算ではあるが、J-MOX における当該集合体の測定では、おおよそこの程度の測定誤差となる可能性がある。

表 2-21 本試験における測定サイクル間のタイムラグ

No.	シフトレジスター	測定ソフトウェア	測定サイクル間のタイムラグ (秒)
1	AMSR	MIC 2.02	約 0.1
2	AMSR	INCC 5.12	約 3.8
3	JSR-12	MIC 2.02	約 0.3
4	JSR-12	INCC 5.12	約 1.6
5	JSR-15	INCC 5.12	約 6.0

表 2-22 Pu 質量と測定誤差 %RSD の相関 (概算)

集合体全体の Pu 質量	約 3.8kg (封入棒集合体)	約 10.4kg (BWR 用燃料集合体)
S_{c1}	71800.8	196507.4
σS_{c1}	118.0	195.2
%RSD (S_{c1})	0.2	0.1
D_{c1}	3326.8	9104.9
σD_{c1}	178.7	295.6
%RSD (D_{c1})	5.4	3.2

$$S_{c1}(10.4kg) = S_{c1}(3.8kg) \times \frac{10.4}{3.8} \quad \dots \dots \dots (2-12)$$

$$\sigma S_{c1}(10.4kg) = \sigma S_{c1}(3.8kg) \times \sqrt{\frac{10.4}{3.8}} \quad \dots \dots \dots (2-13)$$

$$\%RSD (S_{c1}) = \frac{\sigma S_{c1}}{S_{c1}} \times 100 \dots \dots \dots (2-14)$$

$$D_{c1}(10.4kg) = D_{c1}(3.8kg) \times \frac{10.4}{3.8} \dots \dots \dots (2-15)$$

$$\sigma D_{c1}(10.4kg) = \sigma D_{c1}(3.8kg) \times \sqrt{\frac{10.4}{3.8}} \dots \dots \dots (2-16)$$

$$\%RSD (D_{c1}) = \frac{\sigma D_{c1}}{D_{c1}} \times 100 \dots \dots \dots (2-17)$$

2.5.6. 短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響評価

(a) 目的

9×9A 型燃料集合体の短尺燃料棒が、Collar 検出器の計数値に与える影響を確認し、Collar 検出器と Bottom 検出器による短尺燃料棒を含む部位の有効長 L_{A1} 評価の実現性を評価する。また、短尺燃料棒が、known α 法による短尺燃料棒を含まない有効長範囲の単位長さあたりの Pu 質量 m_{A2} の測定に及ぼす影響を評価する。

(b) 方法

Collar 検出器の下部に有効長上端がある場合に Collar 検出器が取得するシングル値及びダブル値とその計数誤差を確認する。また、有効長上端が Collar 検出器の下部 32cm に位置した場合の測定値と通常の場合（有効長上端が Top Fork 検出器中心）における測定値から、短尺燃料棒を含む集合体の測定値を模擬評価し、短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響を評価する。

本試験における機器構成を図 2-35 に示す。

以下に試験手順を示す。

- 1) 図 2-36 の左図に示すように、クレーンで封入棒集合体 P1 を有効長上端が Collar 検出器下部 32cm 及びそれを中心とした±20cm の範囲の数点（5cm 間隔）に位置するように配置する。
- 2) INCC の Rate-only モードにより 30 秒×20 回（10 分間）の測定を行い、Collar 検出器でシングル値 S_c 及びダブル値 D_c を取得する。
- 3) 1)～2)を繰り返す。
- 4) 図 2-36 の右図に示すように、クレーンで封入棒集合体 P1 を有効長上端が Top Fork 検出器の中心に位置するよう配置する。
- 5) INCC の Rate-only モードにより 30 秒×20 回（10 分間）の測定を行い、Collar 検出器でシングル値 S_c 及びダブル値 D_c を取得する。

6) 1)~5)にて取得した測定データから、以下について評価する。

① Collar 検出器下部 32cm 付近に有効長上端がある場合の S_c 及び D_c

有効長上端が Collar 検出器下部の各測定位置 ($32\text{cm}\pm 20\text{cm}$) にある場合の Collar 検出器のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の変動傾向を確認する。またそれらの誤差 σS_c 及び σD_c から、式 2-18 及び式 2-19 に示すように、それぞれの相対誤差 %RSD を評価する。

$$\%RSD (S_c) = \frac{\sigma S_c}{S_c} \times 100 \dots \dots \dots (2-18)$$

$$\%RSD (D_c) = \frac{\sigma D_c}{D_c} \times 100 \dots \dots \dots (2-19)$$

② 短尺燃料棒が Collar 検出器の計数値に与える影響

以下の通り評価を行う。

(a) 図 2-37 に示すように、有効長上端が Collar 検出器の下部 32cm に位置した場合の Collar 検出器のシングル値 $S_{c_①}$ 及びダブル値 $D_{c_①}$ を燃料棒 66 本分の測定値と仮定し、式 2-20 及び 2-21 に示すように、短尺燃料棒 8 本分の測定値 $S_{c_②}$ 及びダブル値 $D_{c_②}$ を算出する。

$$S_{c_②} = S_{c_①} \times \frac{8}{66} \dots \dots \dots (2-20)$$

$$D_{c_②} = D_{c_①} \times \frac{8}{66} \dots \dots \dots (2-21)$$

(b) 通常の測定位置 (有効長上端が Top Fork 検出器中心) における Collar 検出器のシングル値 $S_{c_③}$ 及びダブル値 $D_{c_③}$ と (a) で求めた $S_{c_②}$ 及び $D_{c_②}$ を合算し、短尺燃料棒を含む集合体のシングル値 $S_{c_④}$ 及びダブル値 $D_{c_④}$ を推定する。

(c) $S_{c_③}$ と $S_{c_④}$ 及び $D_{c_③}$ と $D_{c_④}$ を比較し、短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響を評価する。

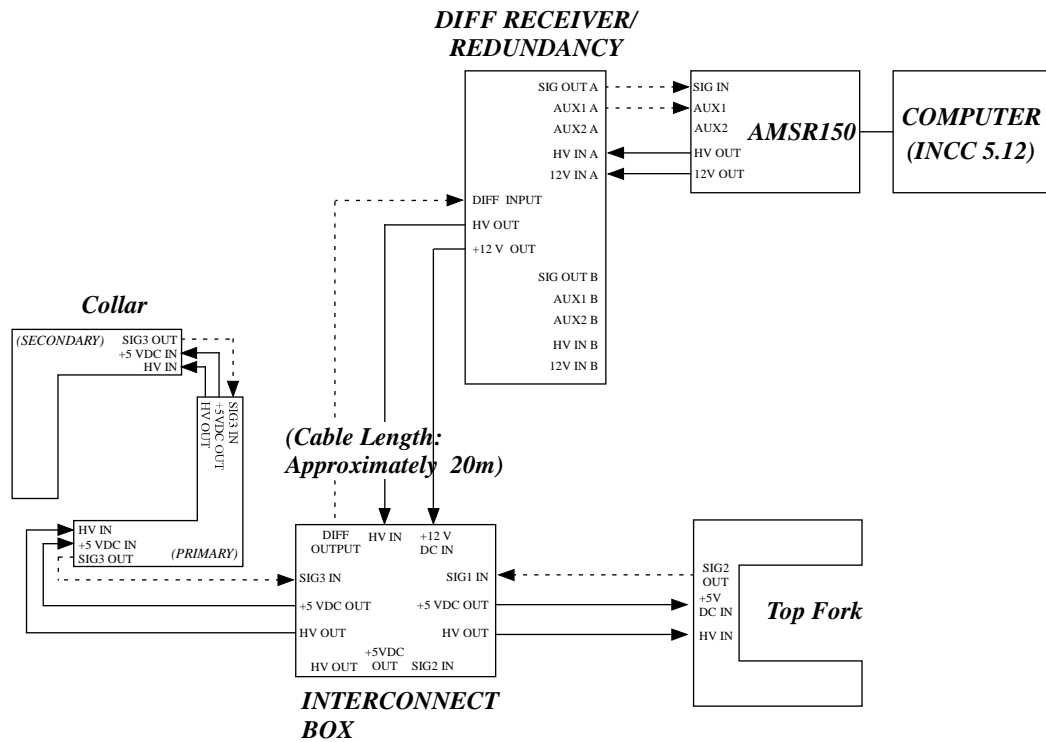


図 2-35 機器構成図

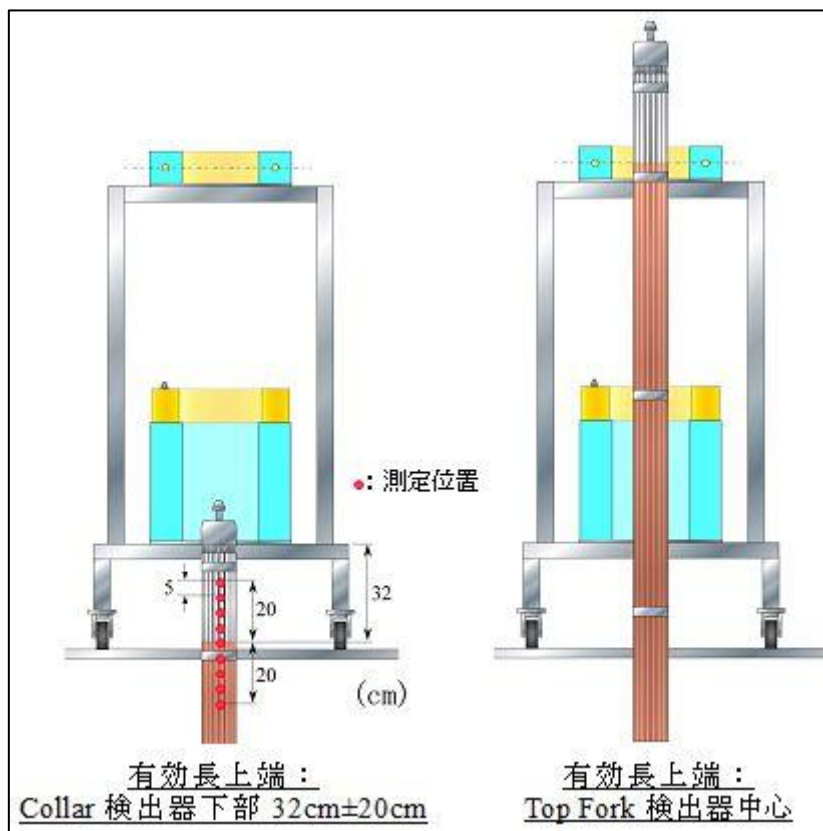


図 2-36 封入棒集合体の配置

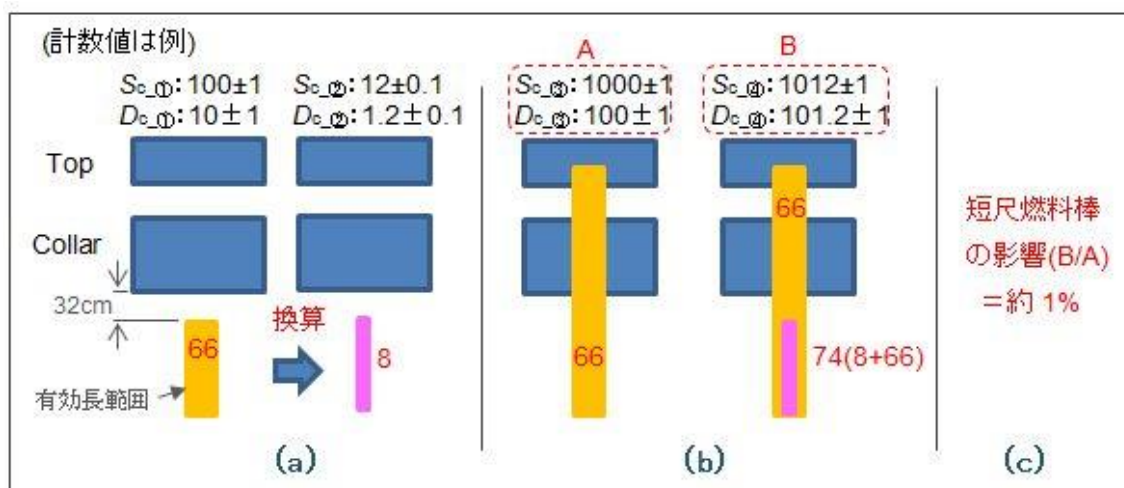


図 2-37 短尺燃料棒を含む集合体の計数值の評価方法 (例)

(c) 結果

有効長上端が Collar 検出器下部 32cm 付近にある場合のシングル値 S_c 及びダブル値 D_c の測定結果を図 2-38 及び図 2-39 に示す。

シングル値 S_c については、図 2-38 に示すように、有効長上端が Collar 検出器に近づくのに伴い計数值は上昇し、いずれの測定位置においても相対誤差 %RSD は約 0.2% であった。ダブル値 D_c については、図 2-39 に示すように、有効長上端が Collar 検出器の下部から 22cm 以上離れるとほとんど計数されることはなく、ほぼ 0 であった。

短尺燃料棒が Collar 検出器の計数值に与える影響の評価結果を表 2-23 に示す。Collar 検出器下部にある短尺燃料棒が Collar 検出器のシングル値に与える影響は約 0.5% であった。ダブル値への影響については、有効長上端が Collar 底面から 32cm 下部にある場合のダブル値がほぼ 0 であることから、短尺燃料棒が Collar 検出器のダブル値に与える影響はなかった。このことにより、シミュレーション結果の妥当性が確認された。

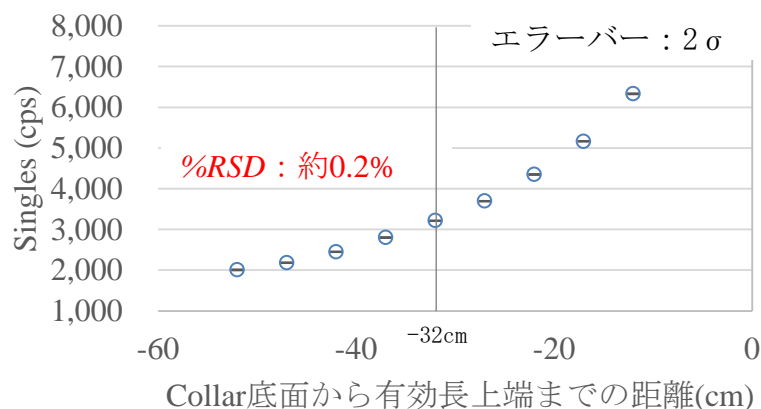


図 2-38 AFAS-P Collar 検出器下部 32cm 付近におけるシングル値測定結果

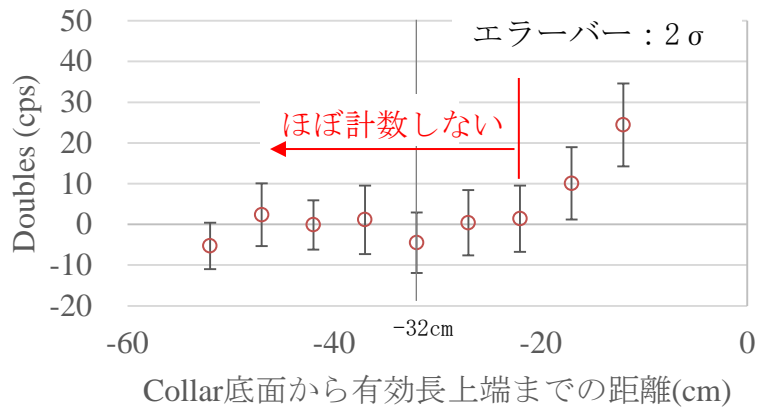


図 2-39 AFAS-P Collar 検出器下部 32cm 付近におけるダブル値測定結果

表 2-23 短尺燃料棒が Collar 検出器の計数値に与える影響の評価結果

	S_c (cps)	D_c (cps)
有効長上端が Collar 下部 32cm にある場合の計数値 $S_{c-①}$ 、 $D_{c-①}$	3,214.0	0.0
短尺燃料棒 8 本分の計数値 $S_{c-②}$ 、 $D_{c-②}$	389.6	0.0
通常測定位置における計数値 $S_{c-③}$ 、 $D_{c-③}$	71,959.9	3,471.7
短尺燃料棒を含む集合体の計数値 $S_{c-④}=S_{c-②}+S_{c-③}$ 、 $D_{c-④}=D_{c-②}+D_{c-③}$	72,349.5	3,471.7
短尺燃料棒の影響	$S_{c-④}/S_{c-③}$	$D_{c-④}/D_{c-③}$
	1.005	1.000

(d) 考察

本試験の結果、短尺燃料棒の有効長上端が Collar 検出器の下部 32cm にある場合、Collar 検出器のシングル値は約 0.5%の影響を受けることを確認した(表 2-23 参照)。このことから、Collar 検出器と Bottom Fork 検出器のシングル値を利用した短尺棒を含む部位の有効長評価は、実現可能であるものとする。

一方で、AFAS 測定において適用されている Knowna 法は、測定によって取得したシングル値及びダブル値から、Pu 質量と相関のある中性子増倍の影響を補正したダブル値 D_{mc} を求めるものであるが、シングル値が短尺燃料棒の影響により 0.5%増加した場合、中性子増倍補

正後のダブル値 D_{mc} 及び Pu 質量も約 0.5%増加することとなる。したがって、短尺燃料棒を含まない有効長範囲の単位長さあたりの Pu 質量を算出する際には、本シングル値の影響補正が必要となるものとする。

J-MOX において実際の 9×9 型燃料集合体を測定する際には、AFAS-B を使用するが、本試験は AFAS-P で実施していること、また J-MOX では検出器及び周囲設備の設置環境が本試験環境と異なること等から、短尺燃料棒によるシングル値への影響の割合については、J-MOX へ設置後に再度評価し確認する必要があると考える。

2.5.7. Collar 検出器の検出効率プロファイル比較評価

(a) 目的

実際の 9×9A 型燃料集合体は AFAS-B で測定されることから、AFAS-P による試験（集合体移動状態における Collar の測定精度評価試験及び短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響評価試験）結果の AFAS-B への適用性を確認する。

(b) 方法

図 2-40 に示すように、 ^{252}Cf 中性子線源を AFAS-B 及び AFAS-P の各 Collar 検出器の上下 50cm の範囲の数点（10cm 間隔）に配置し測定を行い、AFAS-B と AFAS-P の Collar 検出器の上下垂直方向の検出効率プロファイルを比較する。

本試験における各検出器の配置及び配線は、2.3 項の「維持管理手法の検討」に係る試験と同様とする。

以下に試験手順を示す。

- 1) INCC の Background モードにより、30 秒×20 回（10 分間）のバックグラウンド測定を行う。
- 2) ^{252}Cf 中性子線源（線源番号：H4-694）を図 2-40 に示すように Collar 検出器外側の上下 50cm の範囲の数点（10cm 間隔）に配置する。
- 3) INCC の Rate-only モードにより 30 秒×10 回（5 分間）の測定を行い、シングル値を取得する。
- 4) 2)～3)を各測定点について繰り返す。
- 5) 以上を AFAS-B 及び AFAS-P で行う。

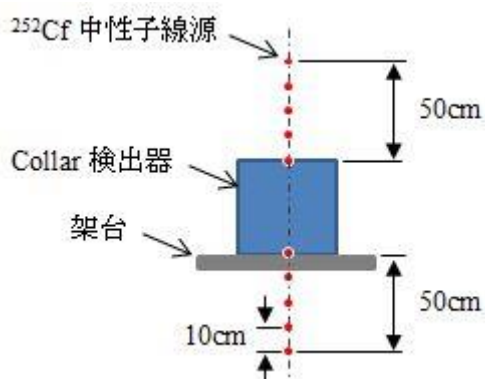


図 2-40 Collar 検出器のプロファイル試験における中性子線源の配置箇所

(c) 結果

AFAS-B と AFAS-P の Collar 検出器の上部垂直方向の検出効率プロファイル測定結果を図 2-41 に、下部垂直方向の検出効率プロファイル測定結果を図 2-42 に示す。また、Collar 検出器上部におけるシングル値の減少割合を図 2-43 に、下部におけるシングル値の減少割合を図 2-44 に示す。

Collar 検出器の上下垂直方向における AFAS-B と AFAS-P のシングル値は、図 2-41 及び図 2-42 に示すように、AFAS-P の方が全ての測定点において AFAS-B よりも計数値が高かった。

また、AFAS-P 及び AFAS-B の Collar 検出器上部または下部 0cm の位置に線源を配置し取得したシングル値を 100%とした場合の、各測定位置におけるシングル値の減少率を比較すると、図 2-43 及び図 2-44 に示すように、Collar 検出器と線源間の距離が近い位置 (10cm~20cm 程度) では AFAS-B の方が AFAS-P よりも減少率が大きかったが、Collar 検出器と線源間の距離が 50cm 程度まで離れると、減少率はほぼ同等となった。

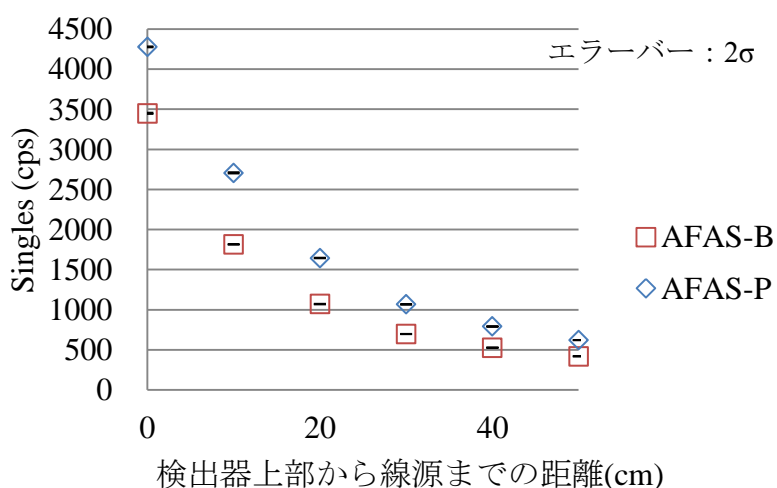


図 2-41 Collar 検出器上部垂直方向のプロファイル測定結果

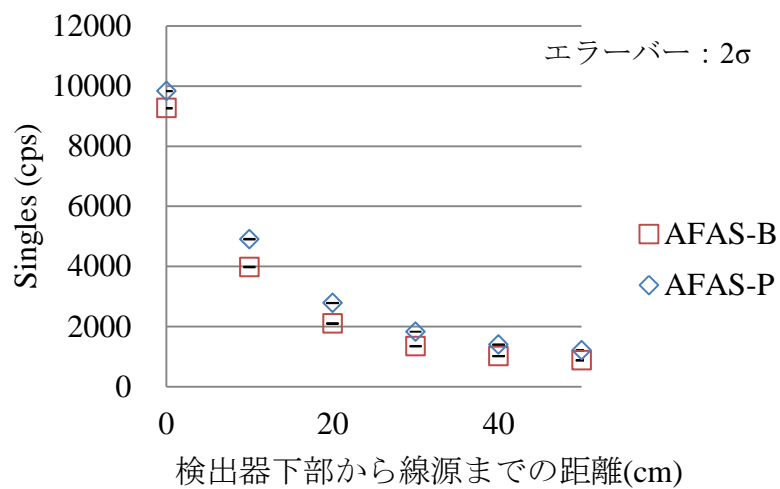


図 2-42 Collar 検出器下部垂直方向のプロファイル測定結果

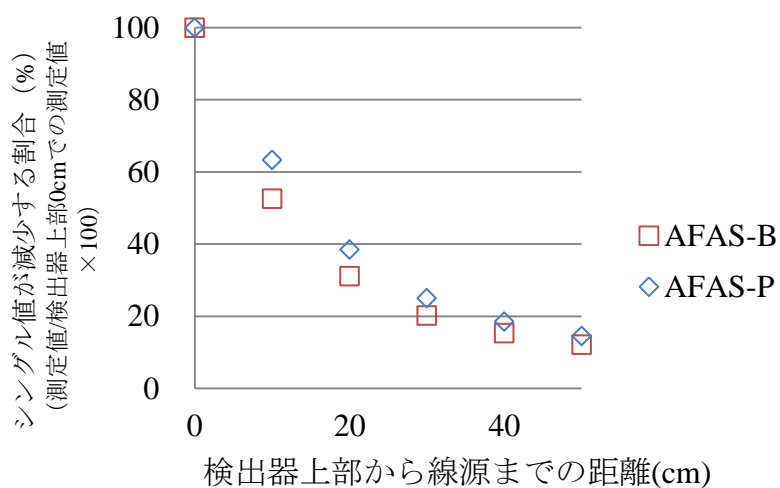


図 2-43 Collar 検出器上部垂直方向におけるシングル値の減少割合

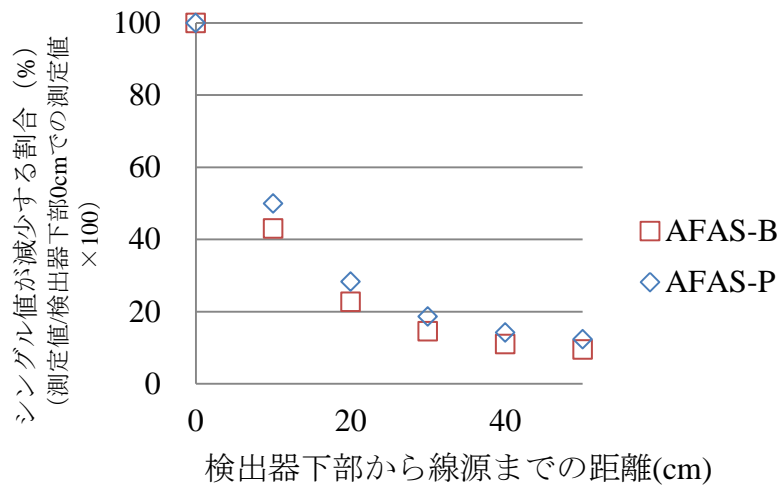


図 2-44 Collar 検出器下部垂直方向におけるシングル値の減少割合

(d) 考察

AFAS-P で実施した、短尺燃料棒が Collar 検出器の測定値に与える影響評価試験では、Collar の下部 32cm に位置する短尺燃料棒の影響により、Collar 検出器のシングル値は約 0.5% 増加するとの結果を得た (表 2-23 参照)。本プロファイル確認試験の結果では、Collar 検出器下部 30cm 程度の位置では、AFAS-P よりも AFAS-B の方がシングル値の減少率が若干大きい (図 2-44 参照)。このことから、短尺燃料棒が Collar 検出器の計数値に与える影響は、AFAS-B の方が小さくなることが予想される。

また、同試験では、AFAS-P Collar の下部 32cm の位置を中心とした ±20cm の範囲内に集合体の有効長上端があるとき、Collar が検出する集合体からの中性子のシングル値は集合体の位置によって大きな変動が見られた (図 2-38 参照)。本プロファイル確認試験の結果では、AFAS-B Collar の下部においた線源の位置ごとの Collar が検出したシングル値の変動は、AFAS-P Collar が検出したシングル値の変動と同程度であった (図 2-42 参照)。このことから、AFAS-B についても、Collar の下部 32cm の位置を中心とした ±20cm の範囲内に集合体の有効長上端があるとき、Collar が検出する集合体からの中性子のシングル値は集合体の位置によって大きく変動すると思われる。

2.6. ^3He 比例計数管の故障の検知に係る試験

(a) 目的

平成 25 年度に AVIS を構成する中性子検出器の ^3He 比例計数管 (1 本) に封入された ^3He ガスの漏洩が発生したこと及び当該機器に不具合が発生しやすいという懸念があることから、不具合が発生時の判断材料となる高電圧下におけるプラトー曲線について月一回程度の頻度で測定し、健全状態におけるプラトー曲線のデータ蓄積を行った。

* ^3He 比例計数管に封入された ^3He 混合ガスが高圧の場合、当該ガスの一部が比例計数管から漏洩し、測定機器の測定結果に影響を及ぼす懸念がある。充填ガスが漏出した ^3He 比例計数管は、図 2-45 に示すように、正常な ^3He 比例計数管より低い印加電圧で中性子を検出し始める。

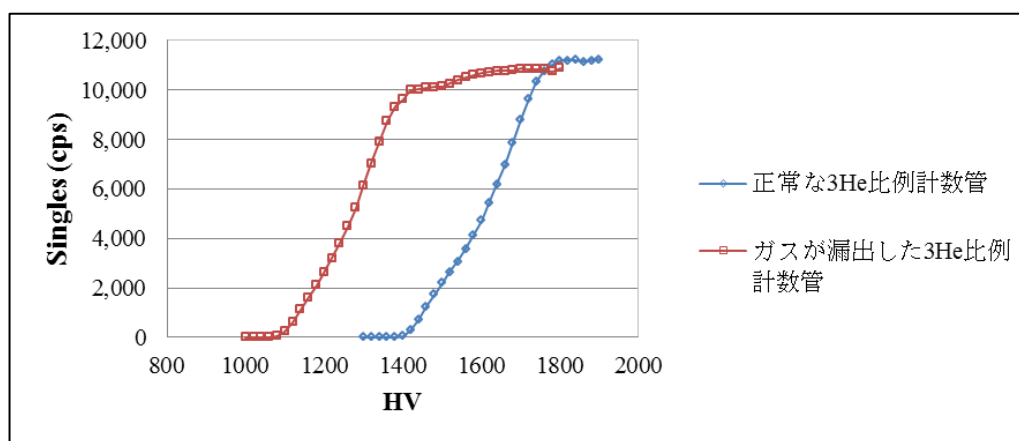


図 2-45 正常な ^3He 比例計数管とガスが漏出した ^3He 比例計数管の HV プラトー曲線

(b) 方法

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器及び Fork 検出器のプラトー曲線を定期的に取得する。各検出器の配置及び配線、線源の配置位置は、2.3 項の「維持管理手法の検討」に係る試験と同様とする。

以下に試験手順を示す。

- 1) ^{252}Cf 中性子線源 (線源番号: H4-694) を専用の治具を用いて検出器中央に配置する。
- 2) INCC の Measure High voltage Plateau モードにより、検出器に印加する HV を 1000V ~ 2000V の範囲で 20V ずつ上昇させ測定を行い、各電圧におけるシングル値を取得する。測定時間は、Collar 検出器は 30 秒、Fork 検出器は 100 秒とする。本測定における設定値を表 2-24 に示す。
- 3) 2) で取得した各電圧のシングル値から、プラトー曲線 (グラフ) を作成する。
- 4) 1) ~ 3) を AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器について行う。

5) 以上を1回/月の頻度で実施する。

表 2-24 Measure High voltage Plateau 設定値

対象機器	Minimum voltage	Maximum voltage	Voltage step size	Count time (s)
Collar 検出器 (AFAS-B、AFAS-P)	1000	2000	20	30
Top Fork 検出器 (AFAS-B、AFAS-P)	1000	2000	20	100
Bottom Fork 検出器 (AFAS-B、AFAS-P)	1000	2000	20	100

(c) 結果

AFAS-B 及び AFAS-P の Collar 検出器及び Fork 検出器のプラトー曲線測定結果を図 2-46 から図 2-51 に示す。なお、各測定日の測定値を比較するため、本結果の各シングル値は、全て同一の日付に合わせて崩壊計算したものである。

AFAS-B 及び AFAS-P の全ての検出器において、各測定日に取得したプラトー曲線はほぼ一致する結果となった。

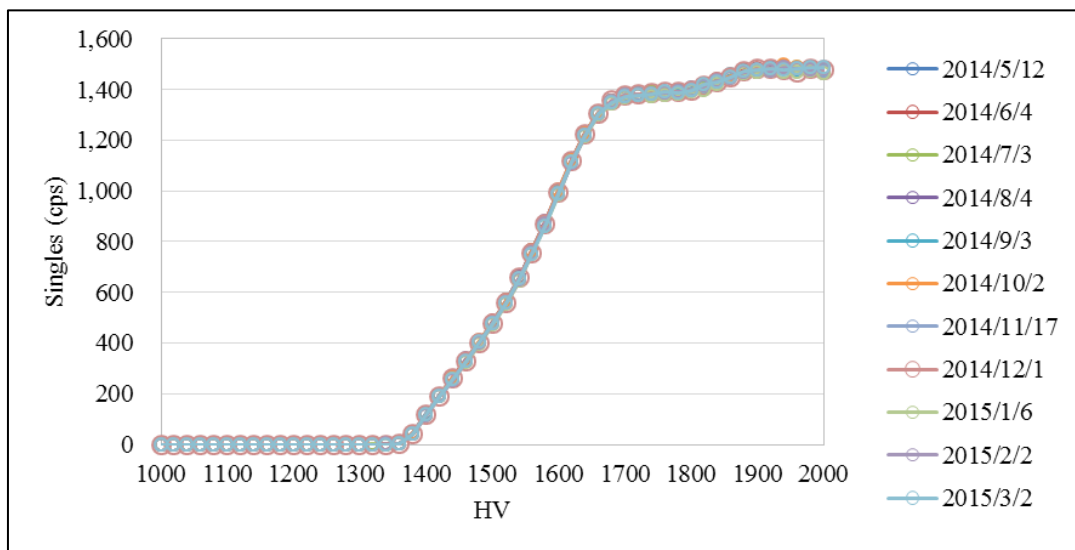


図 2-46 AFAS-B Top Fork 検出器 HV プラトー曲線測定結果

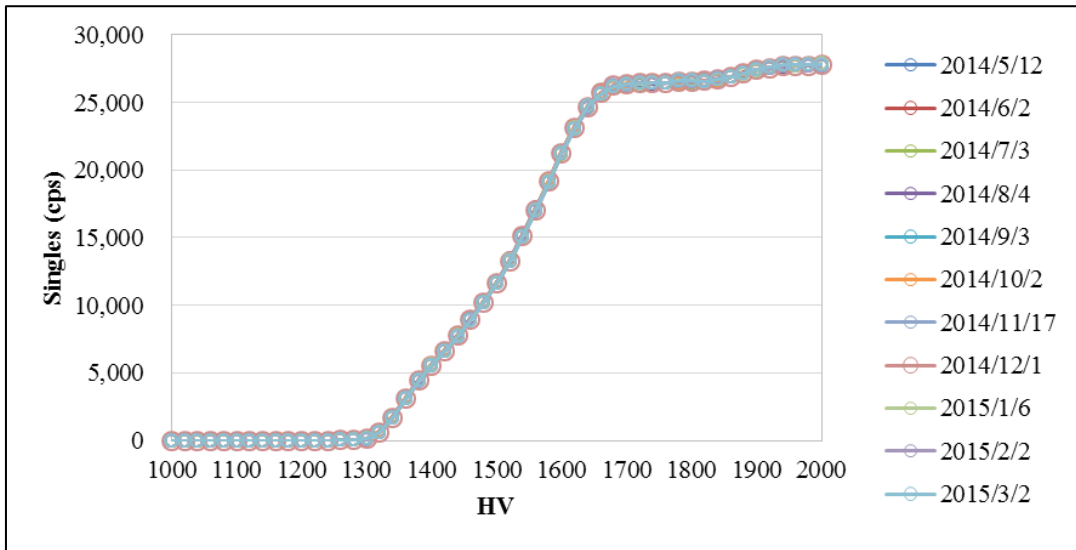


図 2-47 AFAS-B Collar 検出器 HV プラトー曲線測定結果

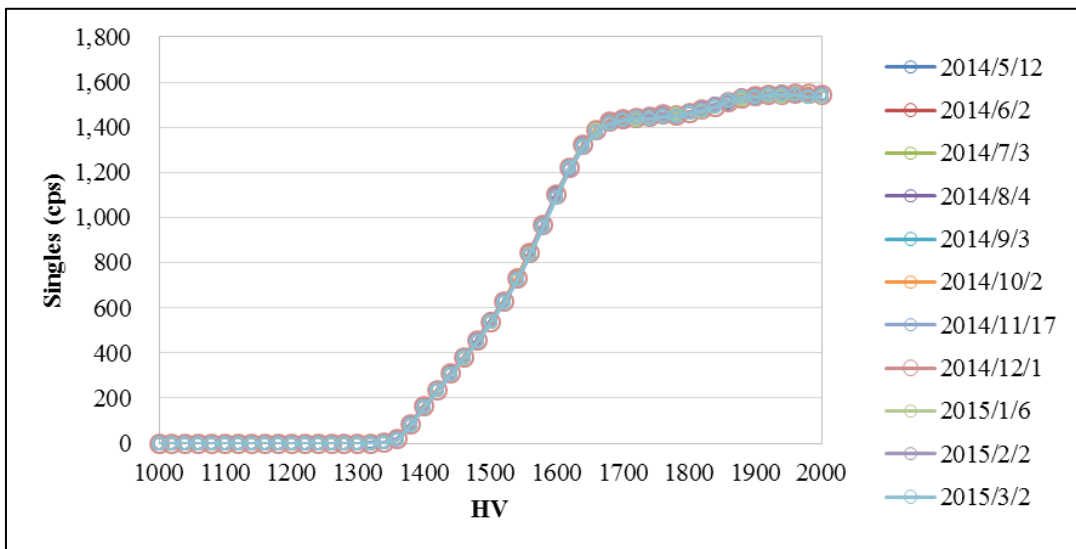


図 2-48 AFAS-B Bottom Fork 検出器 HV プラトー曲線測定結果

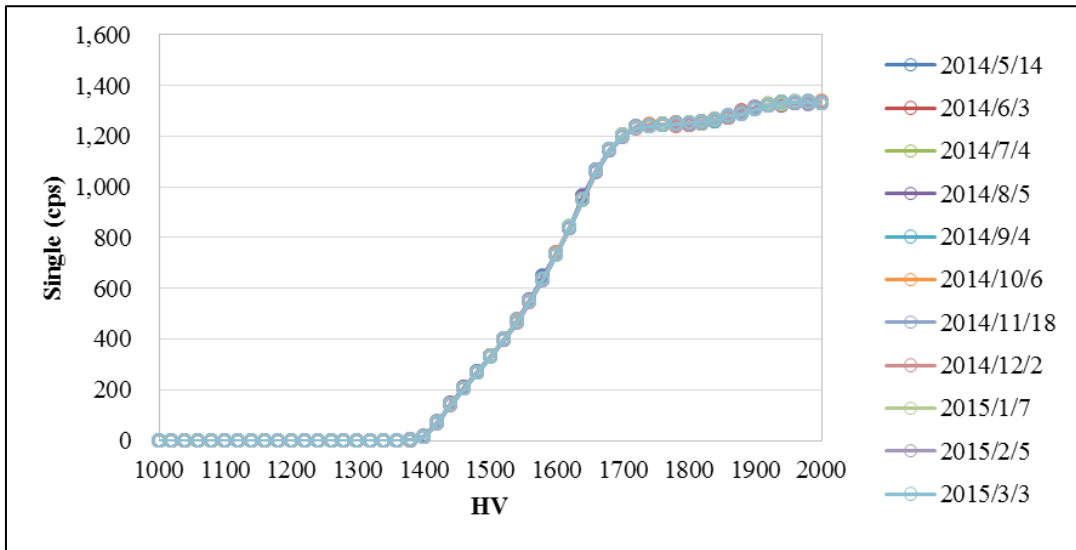


図 2-49 AFAS-P Top Fork 検出器 HV プラトー曲線測定結果

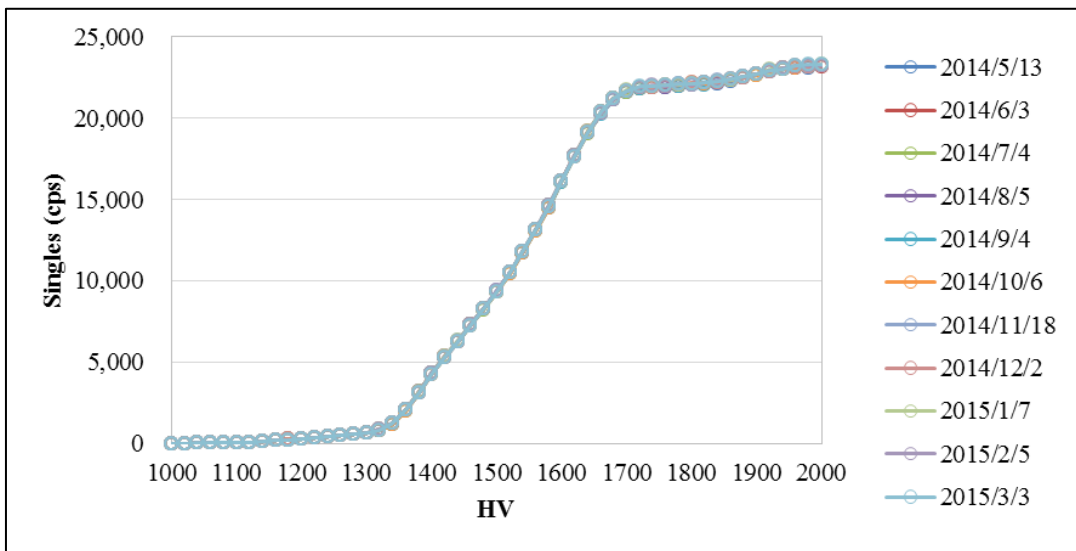


図 2-50 AFAS-P Collar 検出器 HV プラトー曲線測定結果

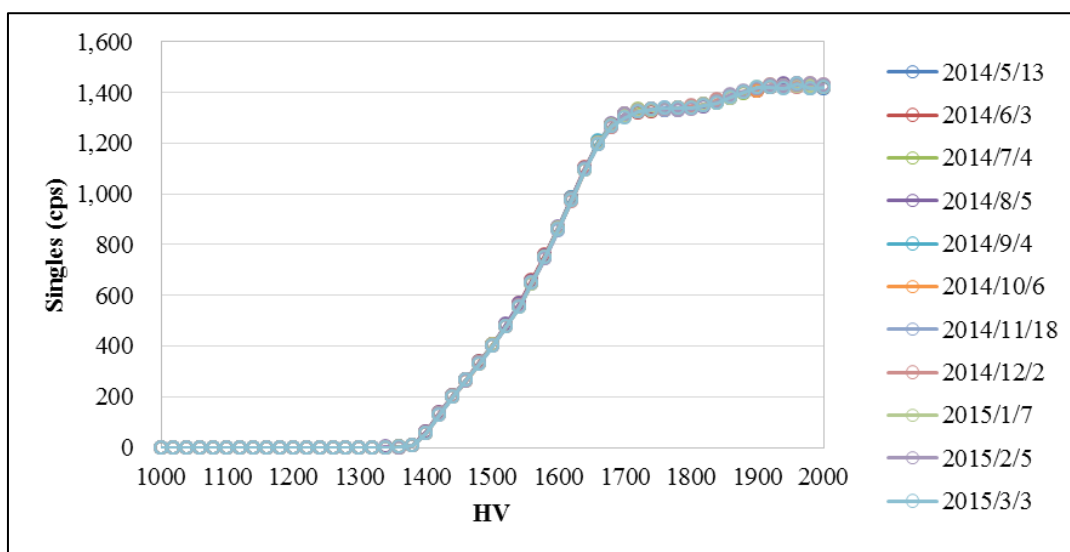


図 2-51 AFAS-P Bottom Fork 検出器 HV プラトー曲線測定結果

(d) 考察

定期的な HV プラトー測定を実施した結果、AFAS-B 及び AFAS-P の各検出器のプラトー曲線は、試験期間を通じてほとんど変動しないことが確認できた。このことから、本試験期間中、 ^3He ガス漏出に起因する不具合は発生しなかったものと考えられる。

参考に、ガス漏出を起こした ^3He 比例計数管の過去の HV プラトー測定結果(図 2-45 参照)の計数値を用いて評価した、AFAS-P の ^3He 比例計数管 28 本のうち、1 本に ^3He ガス漏出が発生した場合の HV プラトー曲線を図 2-52 に示す。この図から分かるように、たとえ 28 本うち 1 本でもガス漏出が発生すると、その ^3He 比例計数管は通常よりも低い電圧から中性子を検出し始めるため、明確に検知できると考えられる。

本年度の試験のように定期的にプラトー曲線を測定しそのデータを蓄積し、初期の正常な値と比較することは、検出器の ^3He ガス漏出を検知するための有用な方法であると考えられる。

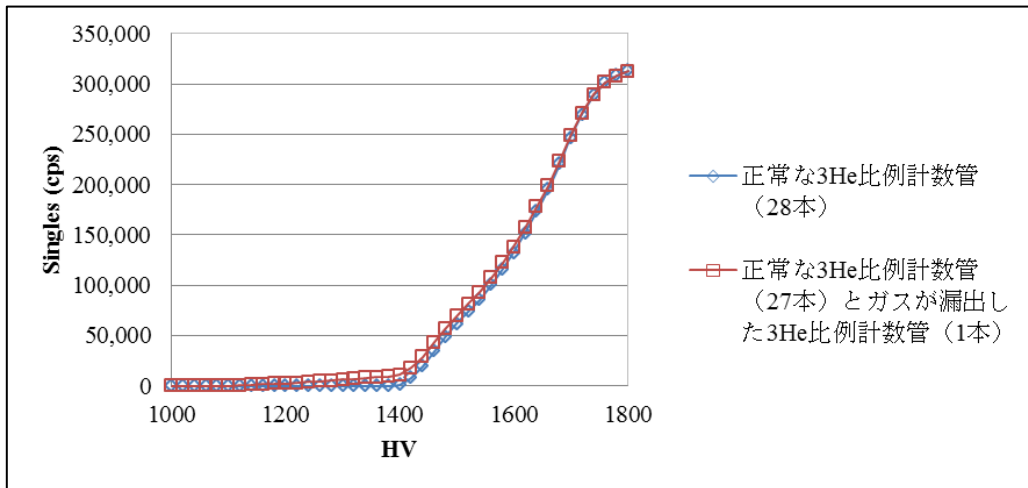


図 2-52 ^3He 比例計数管 1 本にガス漏出が発生した場合の AFAS-P の HV プラトー曲線

2.7. 測定手順書の作成（継続）

付録 2 に示すように、平成 25 年度までに作成した測定手順書（システム構成、セットアップ手順、較正手順、測定手順を含む）に対して、平成 26 年度の結果を分析し反映した。

3. バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器（AVIS）の性能確認試験

3.1. はじめに

バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器（AVIS : Advanced Verification for Inventory Samples system）は、JMOX で収去される DA サンプルの処理・分析のためにかかる六ヶ所保障措置分析所への負荷を軽減するために、加工工程内 MOX バルク物質（原料粉末、混合粉末及び回収粉末並びにグリーンペレット及び焼結ペレット）中のバイアス欠損を探知し得る精度及び正確度をもつ機器を開発することを目的に設計・製作された。図 3-1 に示すように、本機器は、 ^{240}Pu 実効質量測定用の中性子検出器及び Pu 同位体組成比測定用のガンマ線検出器で構成され JMOX では MOX スクラップ取扱い・分析区域にあるグローブボックス下側に設置される予定である。AVIS に要求されている主な性能は表 3-1 のとおりである。



図 3-1. AVIS の外観

表 3-1. AVIS に要求される主な性能

NDA機器	AVIS
モード	立会モード
測定対象物	MOX粉末及びMOXペレット
測定精度	バイアス欠損レベル
具体的機器性能	<ul style="list-style-type: none"> ・ ^{240}Pu実効質量測定精度：0.5% (1σ) ・ $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$比：2% ・ $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$比：2%
測定時間	15分以内
Pu質量の測定範囲	1~20 gPu

平成 26 年度は、原子力規制庁が指定した場所（JAEA 東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所）において、平成 22 年度より文部科学省で開始した長期性能確認試験の継続試験として、平成 24 年度に着手した統合性能確認試験を継続した。

具体的には、表 3-2 に示す試験を実施した。各試験項目の詳細については、3.3 項以降に示す。

表 3-2 試験項目一覧

試験項目
維持管理手法の検討に係る試験
プルトニウム同位体組成比評価の性能確認
^3He 比例計数管の故障検知に係る試験

3.2. 試験の概要

AVIS の核物質等を用いた性能確認試験の試験対象のシステム、試験用測定パラメータ、試験に使用した線源、サンプル及び試験の測定体系を以下に示す。

3.2.1. 試験の概要

本試験における AVIS のシステム構成を、図 3-2 に示す。本試験における中性子検出器によるデータ収集には INCC (IAEA Neutron Coincidence Counting) を使用した。また、ガンマ線検出器によるデータ収集には MAESTRO (マルチチャンネルアナライザー) を使用し、ガンマ線スペクトルデータの解析には FRAM5.1 及び MGA9.63 (Pu 同位体組成比評価用ソフトウェア) を使用した。

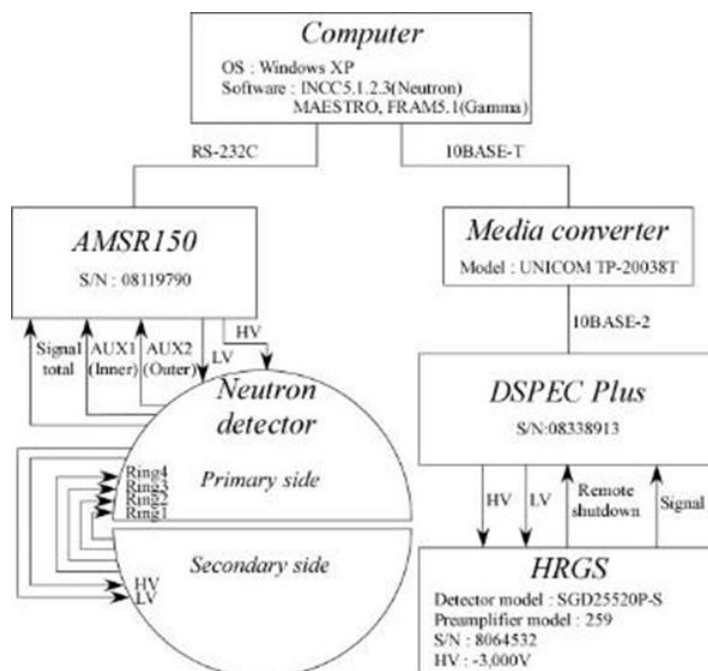


図 3-2 本試験における AVIS のシステム構成図

3.2.2. 試験用測定パラメータ

AVIS のキャリブレーション報告書³に記載されている米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) において評価された AVIS の中性子検出器のパラメータを表 3-3 に示す。また、AVIS のガンマ線検出器のパラメータを表 3-4 に示す。本試験では、これらのパラメータを使用して測定及び解析を行った。

3 : [参考文献] M. T. Swinhoe, H. O. Menlove and C. D. Rael, "Calibration Test Report for the Advanced Verification for Inventory Sample System (AVIS)" (2008) (LA-CP-08-0570)

表 3-3 中性子検出器パラメータ

パラメータ	設定値等
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 b	3.240449×10^2
Alpha weight	1.000
ρ_0	4.707231×10^{-1}
K	2.166

表 3-4 ガンマ線検出器パラメータ

パラメータ	設定値等
印加電圧(V)	-3,000
解析コードの種類	FRAM5.1 MGA9.63
FRAM 解析用パラメータセット	upu60_210solidX

3.2.3. 試験に使用した線源

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 3-5 に示す。表中の中性子放出率及びその評価日は、線源証明書値である。

表 3-5 中性子検出器を対象とする試験の使用に関する線源

線源番号	中性子放出率(n/s)	評価日
I6-106	3.97×10^5	2012/1/15

3.2.4. 試験に使用したサンプル

本試験で使用したサンプルの性状及び同位体組成比を表 3-6 及び表 3-7 に示す。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、図 3-3 に示す通り、サンプル採取後のバイアルを 2 重のビニールバッグで包蔵して測定を実施した。

表 3-6 サンプルの性状

サンプル ID	Pu 量(g)	Pu含有率(%)	サンプルの性状
N02-01	1.033	41.305	MH-MOX粉末
N02-02	2.034		
N02-04	10.017		
N01-01	0.575	6.542	焼結後ペレット
N01-02	1.113		
N01-03	2.144		
N08-01	3.342	11.175	

表 3-7 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(%)	Pu 同位体崩壊計算日	²⁴¹ Am(%)	Am-241崩壊計算日
N02-01	1.333	59.284	25.592	8.799	4.992	1995/8/21	0.8169	1995/8/21
N02-02								
N02-04								
N01-01	1.275	61.641	26.782	5.294	5.008	2006/11/9	4.1100	2006/11/9
N01-02								
N01-03								
N08-01	1.347	61.857	26.809	4.730	5.257	2009/9/24	5.5000	2009/7/27

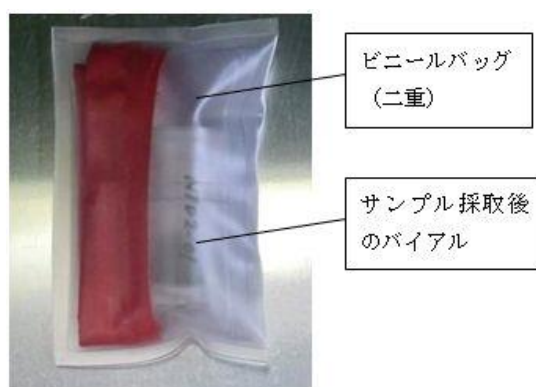


図 3-3 試験に使用するサンプルの外観

3.2.5. 試験の測定体系

JMOX における AVIS の測定環境を可能な範囲で模擬するために、J-MOX と同様に AVIS 設置予定のグローブボックスの底部を模擬した治具 (図 3-4) 及びサンプルホルダー (図 3-5) を使用した。また、中性子検出器の上部に治具をボルトで固定し、サンプルホルダーに前項に示したサンプルを収納して測定を実施した。

以上の方法でサンプルを配置したときの中性子検出器及びガンマ線検出器の測定体系を図 3-6 に示す。

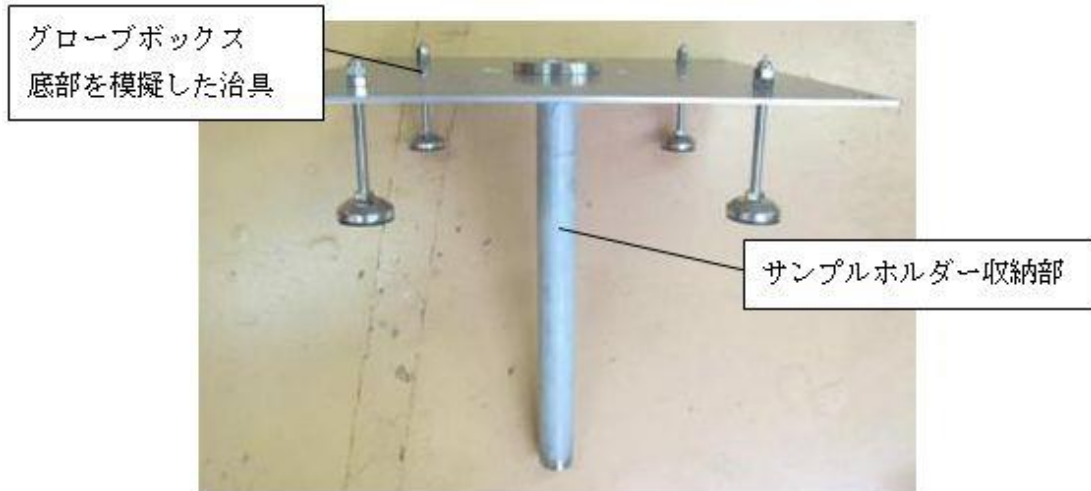


図 3-4 J-MOX の AVIS 設置予定のグローブボックス底部を模擬した治具



図 3-5 サンプルホルダー（拡大：サンプル収納部）

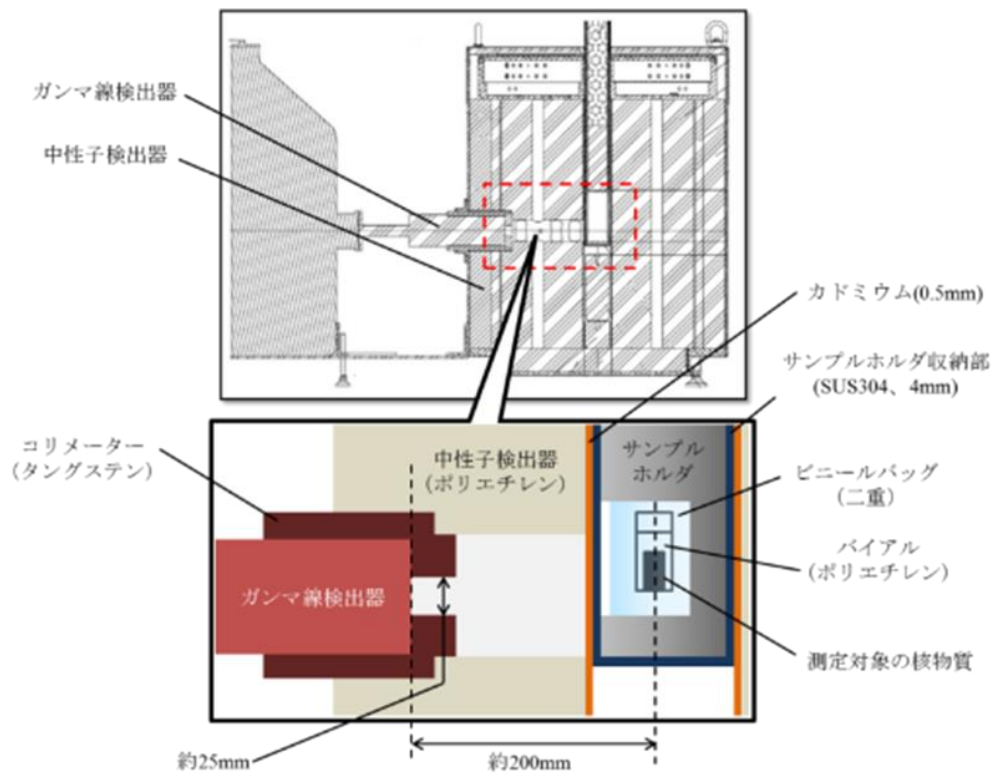


図 3-6 中性子検出器及びガンマ線検出器の測定体系

3.3. 維持管理手法の検討

(a) 目的

これまでの統合性能確認試験の結果を踏まえ、同機器の性能が保持されていることを確認するため、月一回程度の頻度で MOX 試料（焼結ペレット）及び放射線源（ ^{252}Cf 線源）（表示付認証機器であるものを使用。）の測定試験を行い、それにより得られたデータ（検出器出力信号パルス、計数值、エネルギー分解能）を評価することにより、JMOX への設置後の維持管理手法を検討した。

(b) 方法

AVIS の中性子検出器を対象に定期的な測定を実施し、得られたデータを評価する。以下に評価手順を示す。

(^{252}Cf 線源測定)

- 1) INCC の Background モードにより、60 秒×10 回（10 分間）のバックグラウンド測定を行う。
- 2) ^{252}Cf 中性子線源を専用の治具を用いて AVIS の中性子検出器内に配置し、INCC の Normalization モードにより、60 秒×10 回（10 分間）の測定時間で、ダブル値の測定を行う。 ^{252}Cf 中性子線源は、サンプルホルダー内 (Top)、中性子検出器底部 (Bottom)、HRGS 挿入部 (Side) のいずれか 1 箇所配置する。なお、HRGS 挿入部における線源の測定は 6 月より行った。各測定位置を図 3-7～図 3-9 に示す。

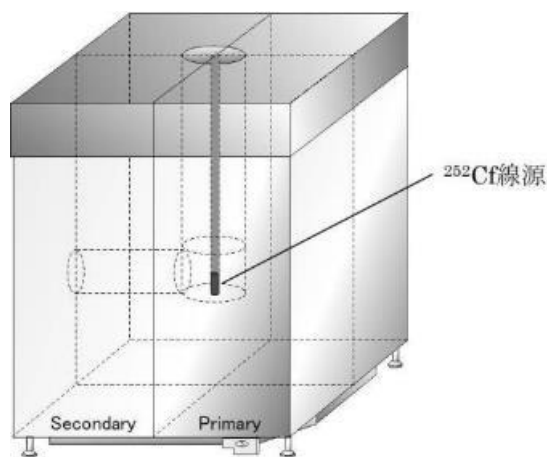


図 3-7 サンプルホルダー内 (Top)

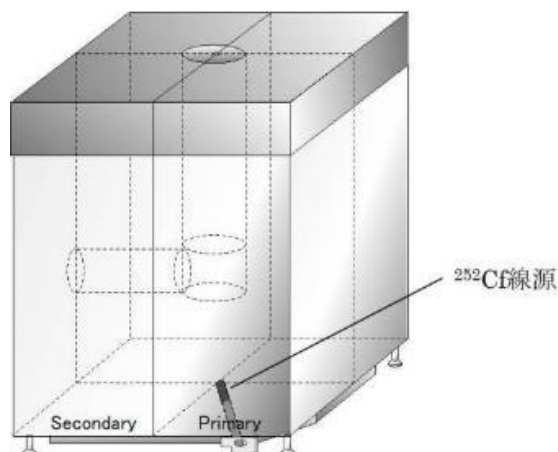


図 3-8 中性子検出器底部 (Bottom)

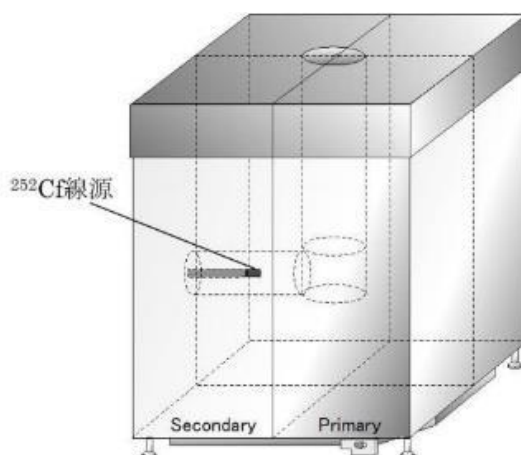


図 3-9 HRGS 挿入部 (Side)

- 3) 2)にて取得した各測定位置における測定値 m_{meas} と初期値から崩壊計算して求めた測定日の期待値 m_{exp} を式 3-1 に代入し、測定値と期待値の差%Difference を求める。本試験で Top 及び Bottom は 2014 年 5 月に取得した測定値を初期値とし、Side は 2014 年 6 月に取得した測定値を初期値とする。各測定位置における初期値を表 3-8 に示す。

表 3-8 各測定位置における線源測定の初期値

測定位置	測定日	測定値(ダブル値)
Top	2014/5/14	124069.90
Bottom		3959.41
Side	2014/6/5	60985.74

$$\%Difference = \frac{m_{meas} - m_{exp}}{m_{exp}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3-1)$$

但し、 m_{meas} ：それぞれの測定位置における測定値（ダブル値）
 m_{exp} ：初期値より崩壊計算して求めた期待値（ダブル値）

(MOX 試料測定)

- 4) INCC の Background モードにより、60 秒×10 回（10 分間）のバックグラウンド測定を行う。
- 5) サンプルホルダー内に MOX サンプルを配置し、INCC の Verification モードにより、60 秒×10 回（10 分間）の測定時間で、Pu 量の測定を行う。なお、MOX サンプルの測定は 5 月から行った。
- 6) 5) にて取得した Pu 量の測定値 Pu_{meas} と 5 月に測定した Pu 量を初期値として崩壊計算した測定日の Pu 量の期待値 Pu_{exp} を式 3-2 に代入し、Pu 量の差を評価する。初期値とする Pu 量の測定結果を表 3-9 に示す。

表 3-9 MOX 試料測定 of 初期値

測定日	解析手法	Pu 量(g)
2014/5/15	Known α	3.279
	Multiplicity	3.296

$$\%Difference = \frac{Pu_{meas} - Pu_{exp}}{Pu_{exp}} \times 100 \quad \dots \dots (3-2)$$

但し、 Pu_{exp} ：Pu 量の期待値（初期値を測定日で崩壊補正した値）

Pu_{meas} ：それぞれの測定日における Pu 量の測定値

(出力パルス測定)

- 7) オシロスコープを、検出器出力信号ケーブルに接続し、Total、AUX1 及び AUX2（図 3-2 参照）から出力される信号パルスを取得する。AVIS の 3He 比例計数管は同心円状に 4 層に渡って配列されており、AUX1 は最内円の 3He 比例計数管の信号を取得し、AUX2 では最外円の信号を取得している。Total は全ての 3He 比例計数管からの信号を取得している。
- 8) 7) にて取得した測定値 m_{p_meas} と初期値 m_{p_ini} を式 3-3 に代入し、測定値と初期値との差%Difference を求める。本試験では 2014 年 5 月に取得した測定値を初期値とする。

$$\%Difference = \frac{m_{p_meas} - m_{p_exp}}{m_{p_exp}} \times 100 \quad \dots \dots (3-3)$$

但し、 m_{p_meas} ：Total、AUX1 及び AUX2 出力パルスのパルス幅又は高さ

m_{p_exp} ： m_{p_meas} の初期値

9) 1) ~8) を1ヶ月に1回の頻度で実施する。

(c) 試験に使用した ^{252}Cf 中性子線源及び MOX サンプル

本試験には、 ^{252}Cf 中性子線源 (I7-106) 及び MOX サンプル (N08-01) を使用した。それらの中性子放出率、試料の性状及び Pu 同位体組成比は、表 3-5、表 3-6 及び表 3-7 に示した通りである。

(d) 結果

① ^{252}Cf 中性子線源測定

各測定位置における ^{252}Cf 中性子線源の各測定日の測定値、期待値、%Difference 及び $\sigma(\%)$ を表 3-10 に示す。また、各測定位置における %Difference(測定日毎)を図 3-10~図 3-12 にそれぞれ示す。表 3-10 に示した通り、各測定位置における線源測定の %Difference の標準偏差及び $\sigma(\%)$ の平均値は、それぞれ、Top で 0.48 及び 0.12、Bottom で 0.95 及び 0.49、Side で 0.39 及び 0.21 であった。

表 3-10 各測定位置における測定値、期待値、%Difference 及び $\sigma(\%)$

日付	Top				Bottom				Side			
	測定値	期待値	%Difference	$\sigma(\%)$	測定値	期待値	%Difference	$\sigma(\%)$	測定値	期待値	%Difference	$\sigma(\%)$
2014/05/14	124069.90	124069.90	0.00	0.09	3959.41	3959.41	0.00	0.55				
2014/06/05	122097.29	122126.84	-0.02	0.11	3843.09	3897.40	-1.39	0.50	60985.74	60985.74	0.00	0.25
2014/07/01	119238.38	119869.70	-0.53	0.15	3779.80	3825.37	-1.19	0.43	59785.53	59858.61	-0.12	0.21
2014/08/06	115956.31	116813.13	-0.73	0.10	3651.48	3727.83	-2.05	0.47	58282.71	58332.27	-0.08	0.21
2014/09/01	114498.12	114654.20	-0.14	0.12	3573.50	3658.93	-2.33	0.47	57087.59	57254.17	-0.29	0.24
2014/10/07	111423.80	111730.62	-0.27	0.13	3519.80	3565.63	-1.29	0.54	55669.98	55794.24	-0.22	0.21
2014/11/19	106954.90	108336.11	-1.27	0.16	3475.46	3457.30	0.52	0.46	53665.74	54099.15	-0.80	0.21
2014/12/03	106360.77	107253.33	-0.83	0.13	3428.45	3422.75	0.17	0.53	53116.88	53558.45	-0.82	0.20
2015/01/08	104656.47	104518.47	0.13	0.11	3294.05	3335.47	-1.24	0.49	52222.42	52192.75	0.06	0.20
2015/02/05	102415.21	102439.66	-0.02	0.15	3264.96	3269.13	-0.13	0.49	51154.67	51154.67	0.00	0.21
2015/03/04	99443.887	100474.26	-1.03	0.09	3200.80	3206.41	-0.18	0.46	49696.33	50173.22	-0.95	0.20
標準偏差			0.48	—			0.95	—			0.39	—
平均			—	0.12			—	0.49			—	0.21

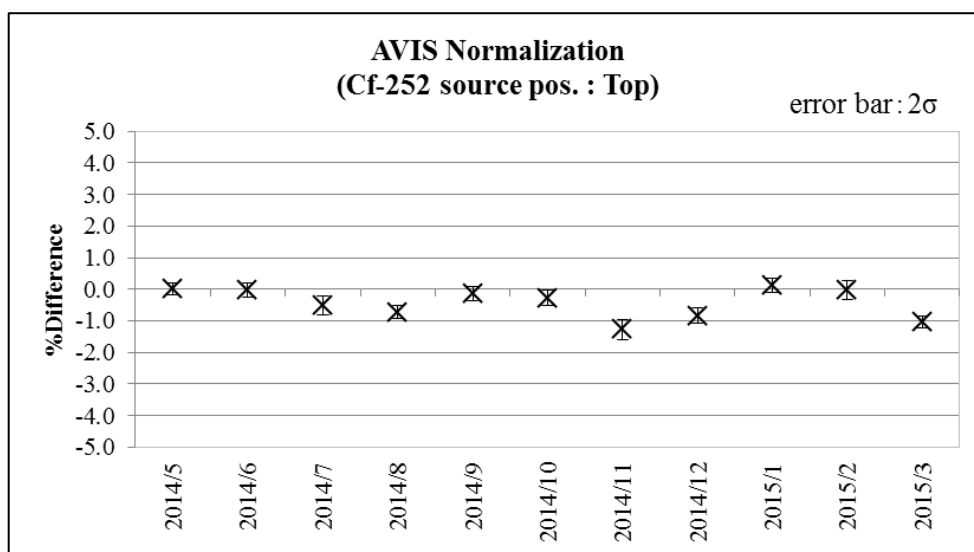


図 3-10 サンプルホルダー内(Top)に ^{252}Cf 線源を配置したときの各測定日の%Difference

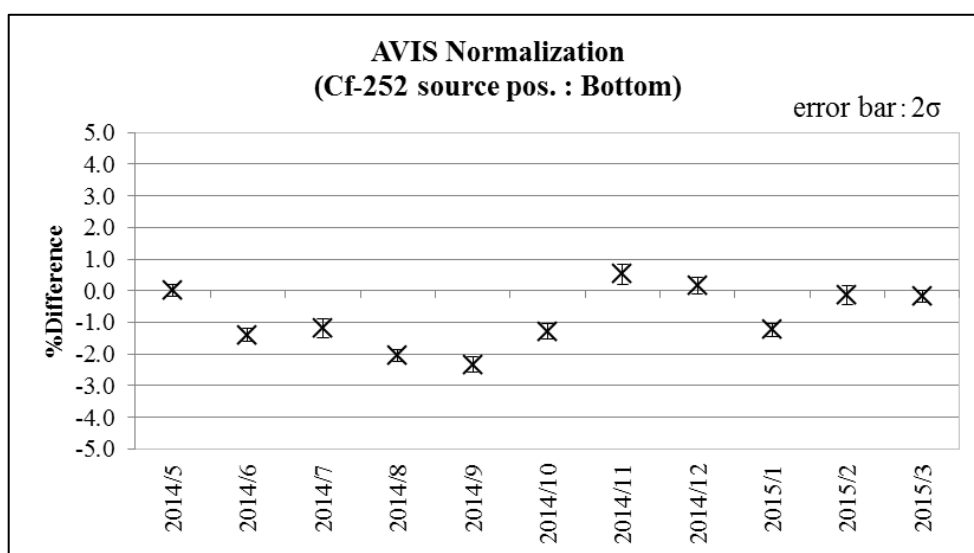


図 3-11 中性子検出器底部(Bottom)に ^{252}Cf 線源を配置したときの各測定日の%Difference

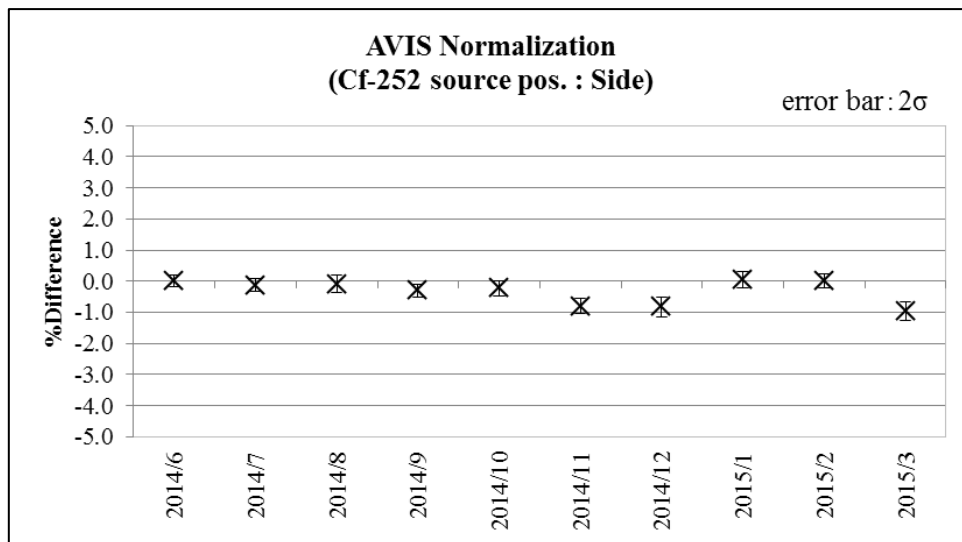


図 3-12 HRGS 挿入部(Side)に ²⁵²Cf 線源を配置したときの各測定日の%Difference

②MOX サンプル測定

各測定日における MOX サンプルの Knownα 法及び Multiplicity 法の測定値、期待値、%Difference 及び σ(%)を表 3-11 に示す。また、各測定日における%Difference を図 3-13 に示す。表 3-11 に示した通り、5月に測定した Pu 量と各測定日の測定値の%Difference の標準偏差、及び各測定日の測定値の σ(%)の平均値は、Knownα では 0.16%及び 0.18%、Multiplicity では 0.48%及び 0.46%であった。

表 3-11 MOX 試料の測定値、期待値、%Difference 及び σ(%)

Date	Knownα				Multiplicity			
	測定値 (g)	期待値 (g)	%Difference	σ(%)	測定値 (g)	期待値 (g)	%Difference	σ(%)
2014/5/15	3.279	3.279	0.00	0.17	3.296	3.296	0.00	0.60
2014/6/6	3.282	3.279	0.09	0.17	3.286	3.296	-0.30	0.44
2014/7/2	3.282	3.278	0.12	0.22	3.301	3.295	0.18	0.44
2014/8/7	3.280	3.278	0.06	0.20	3.309	3.295	0.42	0.44
2014/9/2	3.274	3.277	-0.09	0.17	3.280	3.294	-0.43	0.44
2014/10/8	3.280	3.276	0.12	0.17	3.274	3.293	-0.58	0.44
2014/11/20	3.273	3.276	-0.09	0.17	3.266	3.293	-0.82	0.44
2014/12/5	3.271	3.275	-0.12	0.20	3.270	3.292	-0.67	0.44
2015/1/20	3.286	3.275	0.34	0.17	3.296	3.292	0.12	0.44
2015/2/4	3.285	3.274	0.34	0.20	3.261	3.291	-0.91	0.47
2015/3/5	3.275	3.274	0.03	0.17	3.258	3.291	-1.00	0.44
標準偏差				0.16				0.48
平均				—				0.46

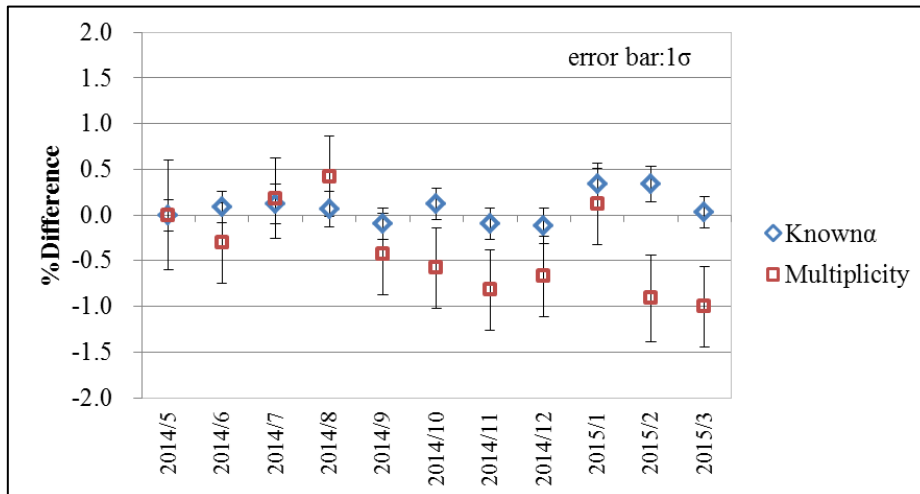


図 3-13 各測定日における MOX サンプルの%Difference

③信号パルス測定

各測定日における Total、AUX1 及び AUX2 の信号パルスの高さ及び幅の測定結果を表 3-12 に示す。試験期間中における各信号パルスの高さ及び幅の変動は、Total では約 2%及び 4%以内、AUX1 及び AUX2 では約 2%であった。

表 3-12 各信号パルスの%Difference

日付	Total				AUX1				AUX2			
	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference	高さ (V)	%Difference	幅 (ns)	%Difference
2014/5/14	2.96	—	18.80	—	2.96	—	18.80	—	2.86	—	18.80	—
2014/6/5	2.94	-0.68	19.20	2.13	2.90	-2.03	19.20	2.13	2.86	0.00	19.20	2.13
2014/7/1	2.98	0.68	19.20	2.13	2.96	0.00	18.80	0.00	2.90	1.40	18.40	-2.13
2014/8/6	2.92	-1.35	19.20	2.13	2.94	-0.68	18.80	0.00	2.88	0.70	18.80	0.00
2014/9/1	2.92	-1.35	19.20	2.13	2.90	-2.03	18.80	0.00	2.86	0.00	18.40	-2.13
2014/10/7	2.94	-0.68	19.20	2.13	2.94	-0.68	18.80	0.00	2.86	0.00	18.80	0.00
2014/11/19	2.96	0.00	19.20	2.13	2.96	0.00	18.80	0.00	2.90	1.40	18.80	0.00
2014/12/3	2.96	0.00	19.60	4.26	2.98	0.68	19.20	2.13	2.86	0.00	18.80	0.00
2015/1/8	2.92	-1.35	19.20	2.13	2.94	-0.68	18.80	0.00	2.88	0.70	18.80	0.00
2015/2/3	2.98	0.68	19.20	2.13	2.96	0.00	18.80	0.00	2.90	1.40	18.40	-2.13
2015/3/4	2.96	0.00	19.20	2.13	2.98	0.68	19.20	2.13	2.92	2.10	18.80	0.00

(e) 考察

Top ポジションに ^{252}Cf 中性子線源を配置したときの計数値（ダブル値）は、他の位置に配置したときの計数値と比較して高く、 $\sigma(\%)$ も小さいため、測定精度の観点から、 ^{252}Cf 中性子線源の配置箇所として理想的である。また、このとき、 ^{252}Cf 中性子線源は、検出器のほぼ中心の位置に配置されるため、全ての ^3He 比例計数管に対して一定の感度が期待される。このため、Top ポジションは、 ^3He 比例計数管の感度に対する観点からも理想的である。しかしな

がら、J-MOX における AVIS 設置場所上部にはサンプルを取り扱うためのグローブボックスが存在するため、AVIS を設置場所に配置したまま Top ポジションに ^{252}Cf 中性子線源を配置することが出来ない。そのため、Top ポジションでノーマリゼーションを行う場合は、AVIS を干渉物が存在しない他の位置に移動させる必要がある。

Bottom ポジションに ^{252}Cf 中性子線源を配置したときの計数值（ダブル値）は、Top ポジションに配置したときの計数值と比較して低く、 $\sigma(\%)$ も大きいため、測定精度の観点からは、 ^{252}Cf 中性子線源の配置箇所としては適当ではないと考える。しかしながら、 ^{252}Cf 中性子線源は、検出器の底面のほぼ中心の位置に配置されるため、全ての ^3He 比例計数管に対して一定の感度が期待される。このため、Bottom ポジションは、 ^3He 比例計数管の感度に対する観点からは、適当である。

Side ポジションは、 ^{252}Cf 中性子線源を配置したときの計数值（ダブル値）は、Bottom ポジションに配置したときの計数值と比較して高く、 $\sigma(\%)$ も小さい。しかしながら、Side ポジションは ^{252}Cf 中性子線源を検出器の中心位置に配置することができない（配置位置は ^3He 比例計数管の 3 層目付近）ため、線源から離れた位置にある ^3He 比例計数管の計数率は線源付近の ^3He 比例計数管と比較して減少するものと考えられる。よって、線源から離れた位置にある ^3He 比例計数管に異常が発生した場合の検知が困難になるものと考えられる。このため、Side ポジションは、 ^3He 比例計数管の感度に対する観点からは、適当ではない。

また、Pu 量が約 3.3g の MOX サンプルを用いて定期的に Pu 量測定を実施した結果、Knowna 及び Multiplicity の %Difference の標準偏差はそれぞれ 0.16% 及び 0.48%、 $\sigma(\%)$ の平均値はそれぞれ 0.18% 及び 0.46% であり（表 3-11 参照）、AVIS に要求される ^{240}Pu 実効質量の測定精度 0.5% よりも小さかった。よって、MOX サンプルをノーマリゼーションに使用することは有効な選択肢の一つであると考えられる。さらには、MOX サンプルは、 ^{252}Cf 中性子線源と比較して中性子放出強度の変化が小さく、長期間使用可能であること、また、Pu 量を評価することにより解析パラメータを含めた確認までもが可能であることから、維持管理に MOX サンプルを使用することは有効であると考えられる。ただし、MOX サンプルは、 ^{252}Cf 中性子線源と異なり、グローブボックス外で取り扱うことが困難であることから、査察において使用するためには、グローブボックス内における MOX サンプルの知識の連続性を担保するための方法について考慮する必要がある。

上記の通り、それぞれについて有利な点及び不利な点があるため、ノーマリゼーションに必要な測定精度、及び実運用時の維持管理の容易さなどを考慮して、適切なノーマリゼーション方法を決定する必要があるものとする。

信号パルスは、本試験期間中その波形はほとんど変化することなくほぼ同一の結果が得られた。よって、検出器の異常を検知するための手段の一つとなる可能性がある。

3.4. プルトニウム同位体比評価の性能確認（継続）

(a) 目的

前年度に引き続き、プルトニウムの同位体評価について、試料量及び測定時間をパラメータとして、解析ソフト（MGA 10、FRAM V5.0 等）を用いて性能確認を行った。

(b) 評価項目

表 3-13 に示す MOX サンプルを表に示した測定時間により取得したスペクトルデータを FRAM 及び MGA を用いて解析し、①測定時間と測定精度の相関、②Pu 量と測定精度の相関、③測定値と計量管理値の ^{240}Pu 実効質量(%)の差、④ $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比、 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の測定精度についてそれぞれの結果を比較する。なお、本試験では平成 24 年度に実施した大型 MOX 燃料加工施設保障措置システムのパフォーマンス確認試験における AVIS 測定試験で取得したスペクトルデータを使用する。

表 3-13 測定試験に使用したサンプル及び測定時間

サンプル ID	サンプルの性状	Pu 量(g)	測定時間(分)
N01-01	焼結後ペレット	0.575	100
N01-02		1.113	10,20,50,100
N01-03		2.144	100
N02-01	MH-MOX 粉末	1.033	10,20,50,100
N02-02		2.034	100
N02-04		10.017	100

(c) 方法

- 1) AVIS のガンマ線検出器で取得したスペクトルデータを FRAM5.1 及び MGA9.63 を用いて解析する。
- 2) 上記にて取得した解析結果を用いて、以下の①～④に示す評価を行う。

① 測定時間と測定精度の相関（N01-02、N02-01）

測定時間をパラメータとして取得したスペクトルデータをそれぞれの解析コードにより解析した結果から、 ^{240}Pu 実効質量(%)の相対標準偏差%RSD を式 3-4 及び 3-5 により評価する。

$$^{240}\text{Pu}_{\text{eff}} = 2.52 \times ^{238}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + 1.68 \times ^{242}\text{Pu} \quad \dots \dots \dots (3-4)$$

但し、 $^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$: ^{240}Pu 実効質量(%)

$^{238}\text{Pu} : ^{238}\text{Pu}(\%)$

$^{240}\text{Pu} : ^{240}\text{Pu}(\%)$

$^{242}\text{Pu} : ^{242}\text{Pu}(\%)$

$$\%RSD = \frac{\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}}{^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3-5)$$

但し、 $^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$: ^{240}Pu 実効質量(%)

$\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$: ^{240}Pu 実効質量(%)の標準偏差

② Pu 量と測定精度の相関 (表 3-13 の全サンプル)

Pu 量をパラメータとして取得したスペクトルデータをそれぞれの解析コードにより解析した結果から、 ^{240}Pu 実効質量(%)の相対標準偏差%RSD を式 3-4 及び 3-5 により評価する。

③ 測定値と計量管理値の Pu 同位体組成比の差 (表 3-13 の全サンプル)

スペクトルデータをそれぞれの解析コードにより解析して求めた ^{240}Pu 実効質量(%)と、計量管理値から求めた ^{240}Pu 実効質量(%)の差%Difference を式 3-6 により評価する。

$$\%Difference = \frac{^{240}\text{Pu}_{\text{eff_NDA}} - ^{240}\text{Pu}_{\text{eff_MA}}}{^{240}\text{Pu}_{\text{eff_MA}}} \times 100 \quad \dots \dots \dots (3-6)$$

但し、 $^{240}\text{Pu}_{\text{eff_NDA}}$: 測定から求めた ^{240}Pu 実効質量(%)

$^{240}\text{Pu}_{\text{eff_MA}}$: 計量管理値から求めた ^{240}Pu 実効質量(%)

④ $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比、 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の測定精度 (表 3-13 の全サンプル)

測定時間及び Pu 量をパラメータとして測定し取得した各スペクトルデータの解析結果から、 $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比、 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の相対標準偏差%RSD を評価する。

(d) 結果

① 測定時間と測定精度の相関

FRAM 及び MGA により評価した ^{240}Pu 実効質量(%)の%RSD と測定時間の相関を図 3-14

(焼結後ペレット) 及び図 3-15 (MH-MOX 粉末) に示す。FRAM 及び MGA による評価の結果、焼結後ペレットと MH-MOX 粉末の ^{240}Pu 実効質量(%)の %RSD は測定時間の増加に従って減少した。

MH-MOX 粉末の %RSD は、10 分測定では MGA の方が FRAM より小さかったが、20 分以上の測定では FRAM の方が小さく、測定時間が長くなるほど FRAM と MGA の差が大きくなった。

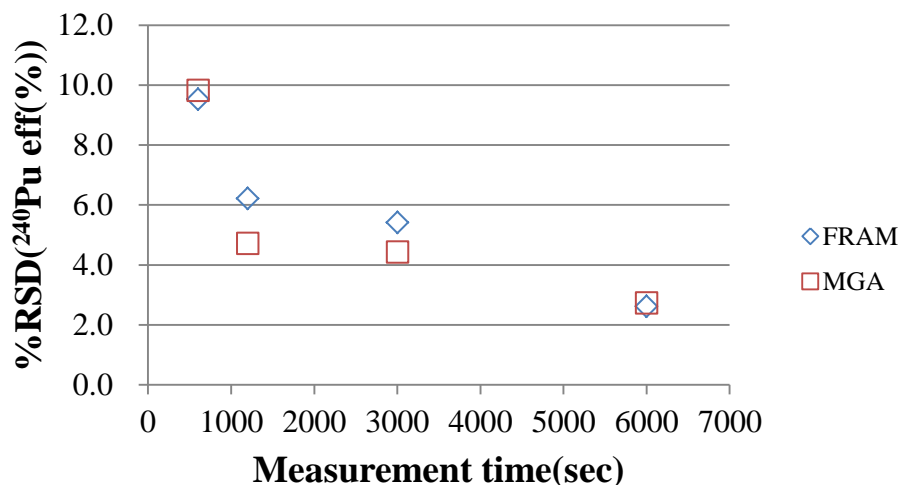


図 3-14 測定時間と測定精度の相関 (焼結後ペレット、1.113gPu)

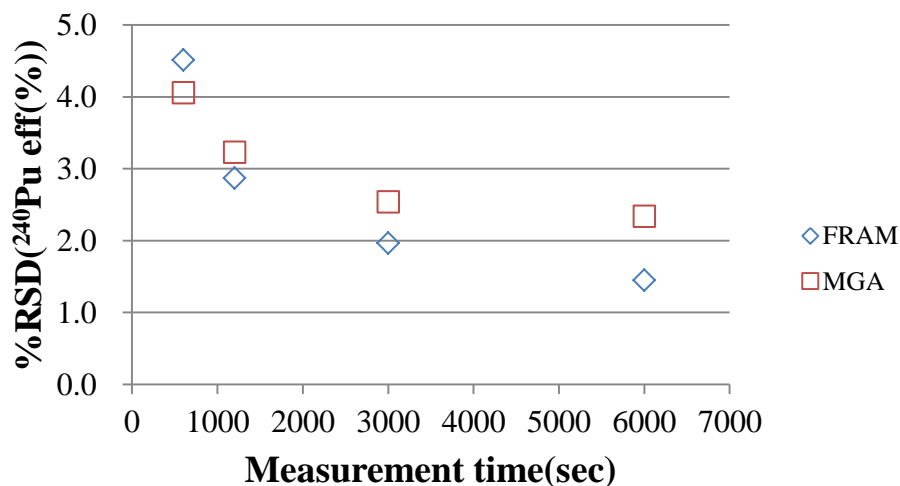


図 3-15 測定時間と測定精度の相関 (MH-MOX 粉末、1.033gPu)

② Pu 量と測定精度の相関

FRAM 及び MGA により評価した ^{240}Pu 実効質量(%)の %RSD と Pu 量(g)の相関を図 3-16 (焼結後ペレット) 及び図 3-17 (MH-MOX 粉末) に示す。FRAM 及び MGA による評価の

結果、焼結後ペレットと MH-MOX 粉末の ^{240}Pu 実効質量(%)の%RSD は Pu 量(g)の増加に従って減少した。

MH-MOX 粉末の%RSD は、Pu 量(g)が同一の場合でも、MGA と比較して FRAM のほうが小さかった。

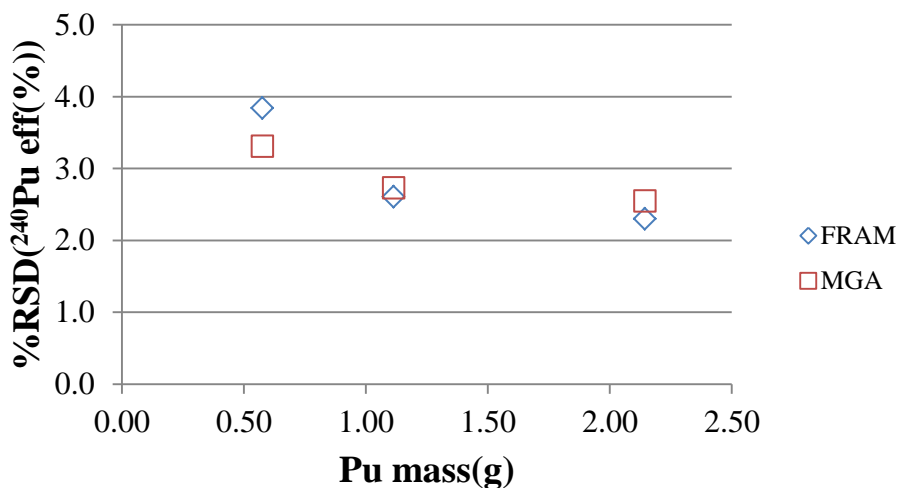


図 3-16 Pu 量と測定精度の相関 (焼結後ペレット、測定時間 100 分)

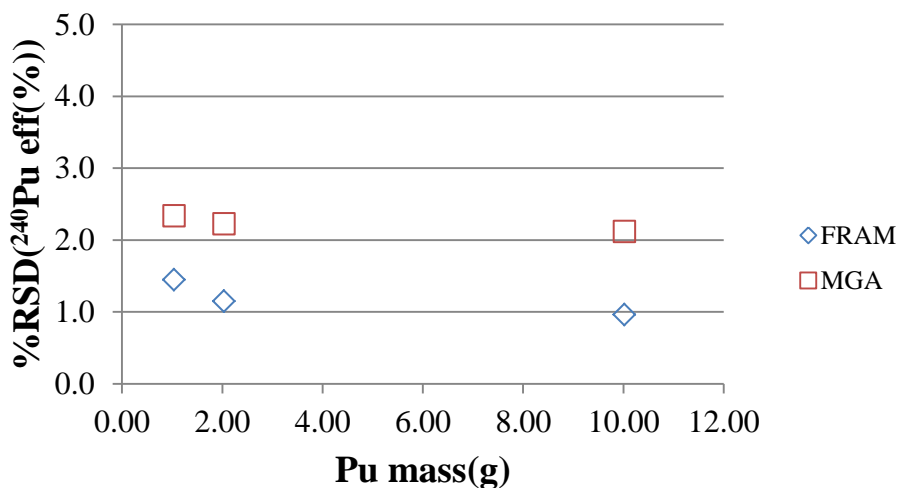


図 3-17 Pu 量と測定精度の相関 (MH-MOX 粉末、測定時間 100 分)

③ 測定値と計量管理値の ^{240}Pu 実効質量(%)の差

FRAM 及び MGA により評価した ^{240}Pu 実効質量(%)と計量管理値から求めた ^{240}Pu 実効質量(%)の差%Difference を図 3-18 (焼結後ペレット) 及び図 3-19 (MH-MOX 粉末) に示す。

焼結後ペレットの FRAM と MGA による解析結果の%Difference の平均値は、それぞれ

3.313%及び-3.581%であった。また、MH-MOX 粉末の FRAM と MGA による解析結果の % Difference の平均値は、それぞれ 0.836%及び-2.320%であった。

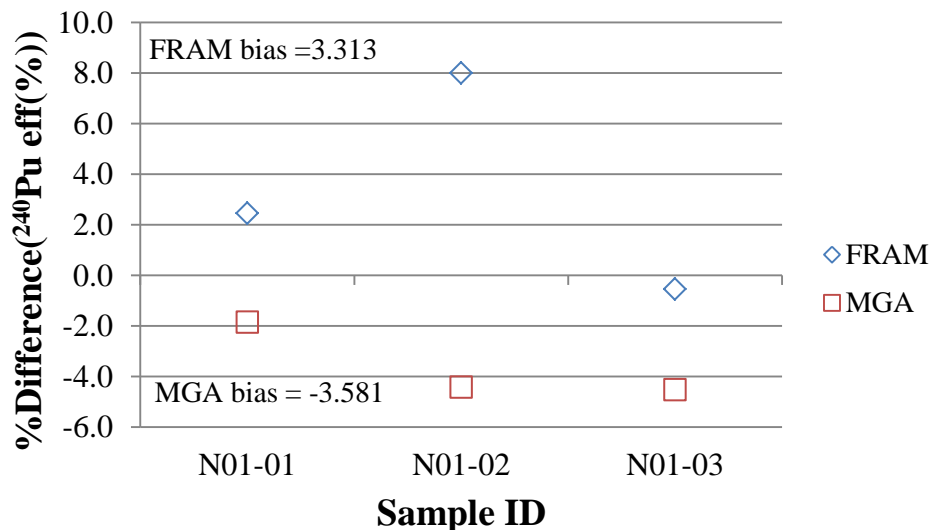


図 3-18 測定値と計量管理値の Pu 同位体組成比の差 (焼結後ペレット、測定時間 100 分)

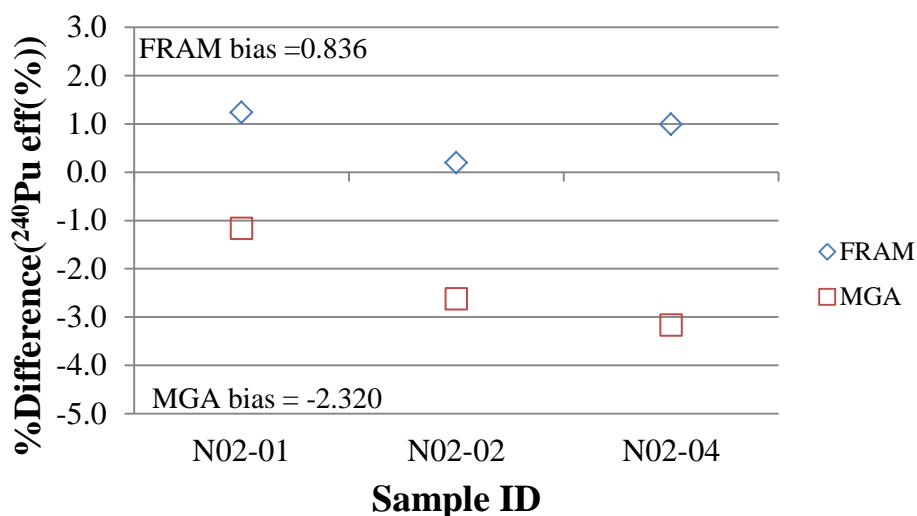


図 3-19 測定値と計量管理値の Pu 同位体組成比の差 (MH-MOX 粉末、測定時間 100 分)

④ $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比、 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の測定精度

FRAM 及び MGA により評価した $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比、 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の相対標準偏差%RSD と、Pu 量又は測定時間の相関を、

図 3-20 ($^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、焼結ペレット、測定時間 100 分)

図 3-21 ($^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、焼結ペレット、測定時間 100 分)

図 3-22 ($^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、焼結ペレット、測定時間 100 分)

図 3-23 ($^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関、焼結ペレット、N01-02)

図 3-24 ($^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関、焼結ペレット、N01-02)

図 3-25 ($^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関、焼結ペレット、N01-02)

図 3-26 ($^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、MH 粉末、測定時間 100 分)

図 3-27 ($^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、MH 粉末、測定時間 100 分)

図 3-28 ($^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、MH 粉末、測定時間 100 分)

図 3-29 ($^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関、MH 粉末、N02-01)

図 3-30 ($^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関、MH 粉末、N02-01)

図 3-31 ($^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関、MH 粉末、N02-01)

に示す。

各図に示した通り、MGA 及び FRAM とともに、測定時間及び Pu 量の増加に伴い $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比、 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の相対標準偏差%RSD は減少した。同一の測定条件の場合、 $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比及び $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の相対標準偏差%RSD は、MGA の方が小さかったが、 $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比の相対標準偏差%RSD は、FRAM のほうが小さかった。

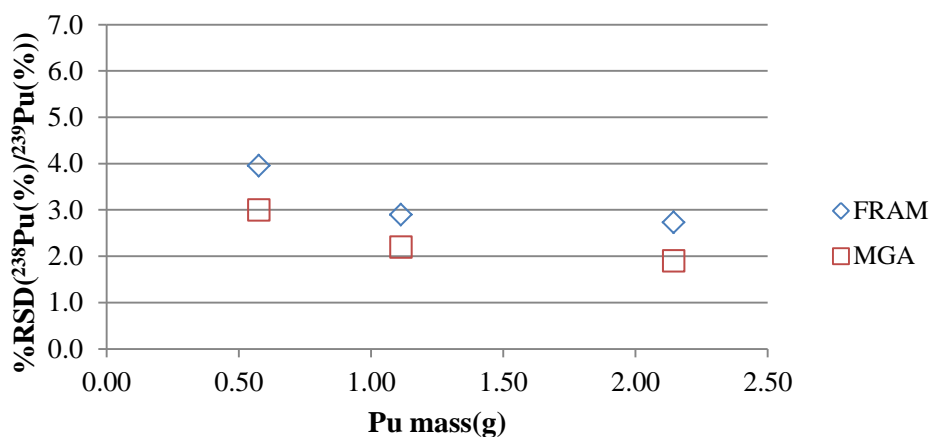


図 3-20 $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関 (焼結ペレット、測定時間 100 分)

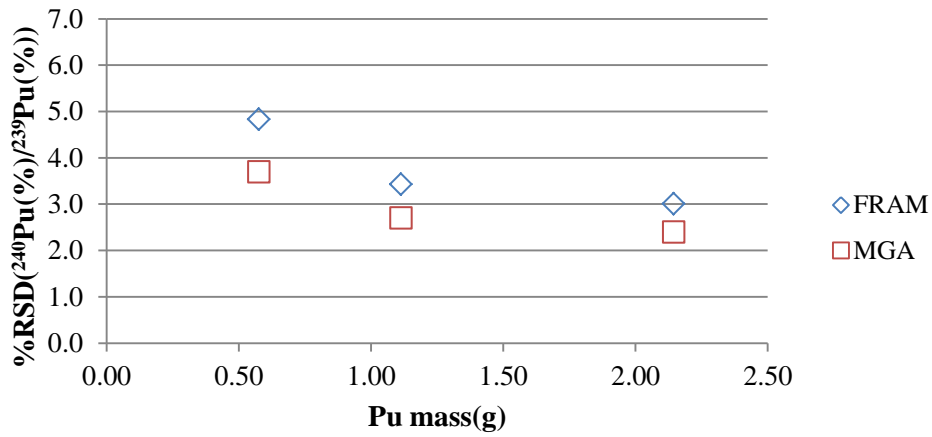


図 3-21 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関 (焼結ペレット、測定時間 100 分)

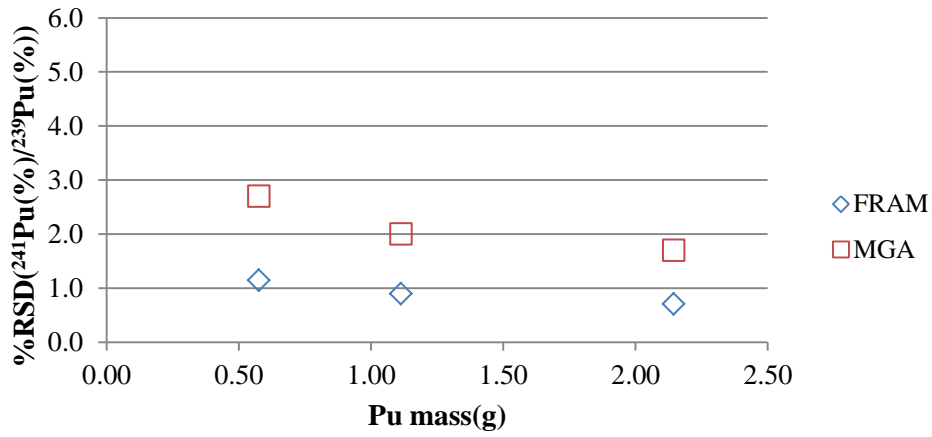


図 3-22 $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関、焼結ペレット、測定時間 100 分)

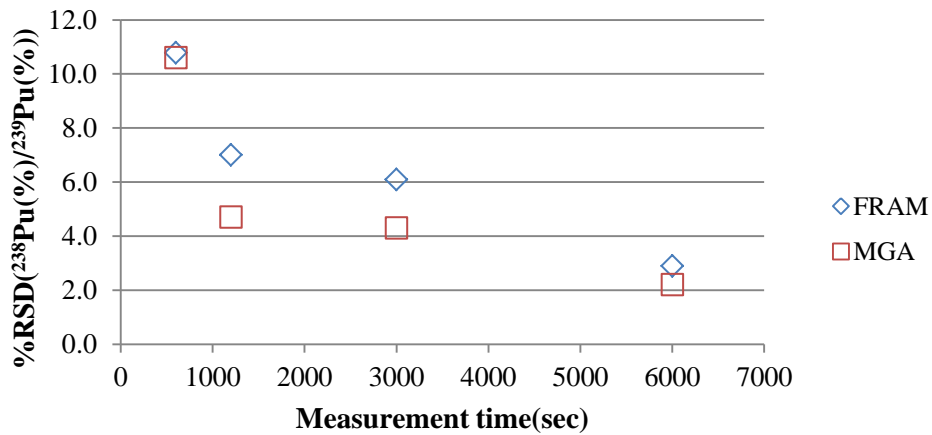


図 3-23 $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関 (焼結ペレット、N01-02)

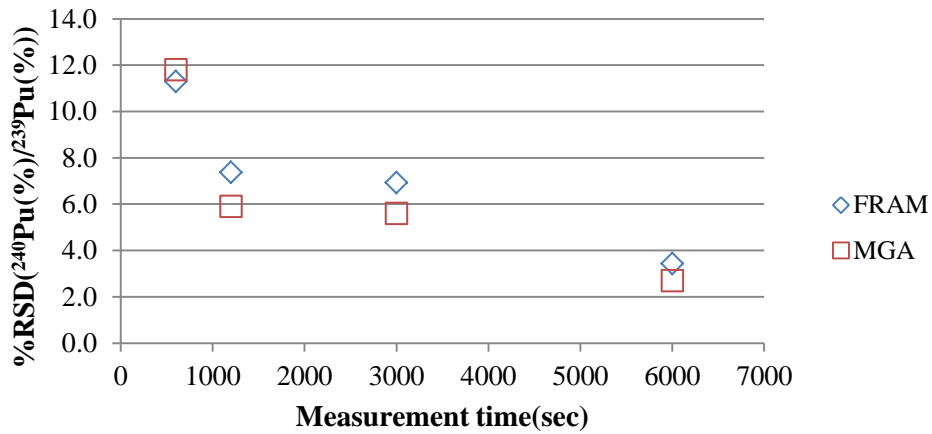


図 3-24 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関 (焼結ペレット、N01-02)

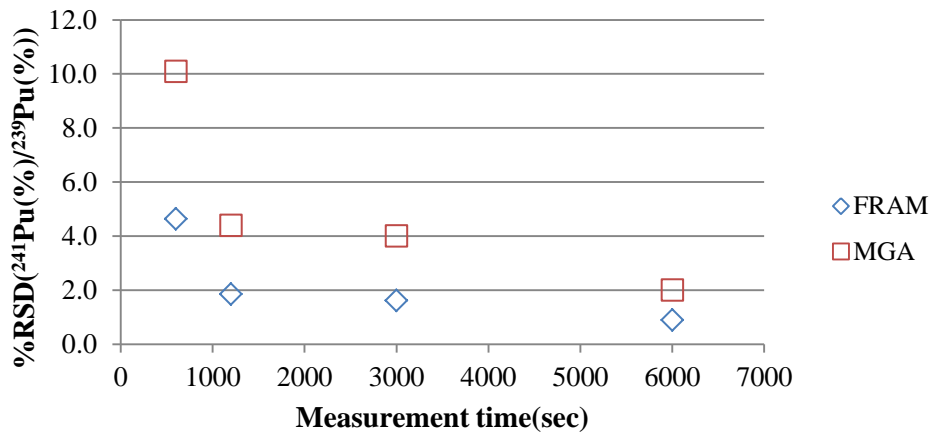


図 3-25 $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関 (焼結ペレット、N01-02)

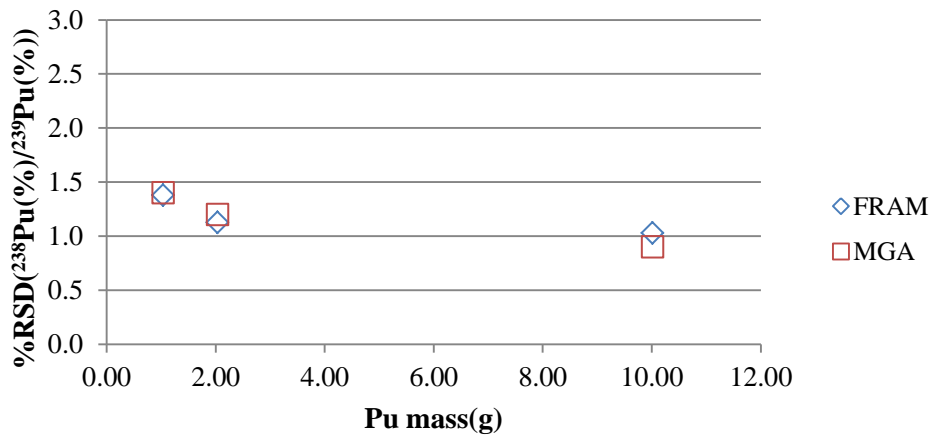


図 3-26 $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関 (MH 粉末、測定時間 100 分)

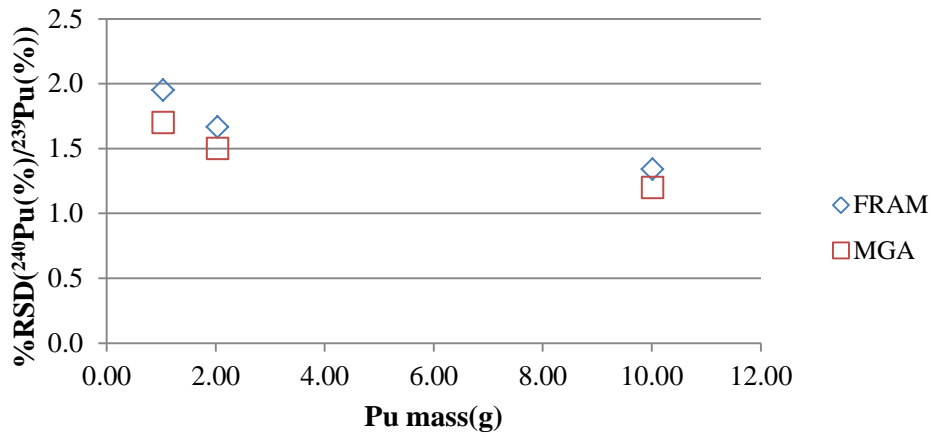


図 3-27 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関 (MH 粉末、測定時間 100 分)

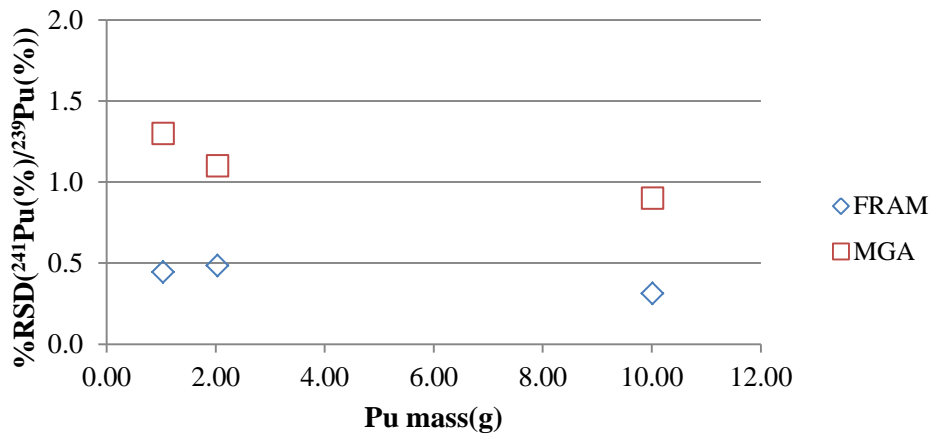


図 3-28 $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と Pu 量の相関 (MH 粉末、測定時間 100 分)

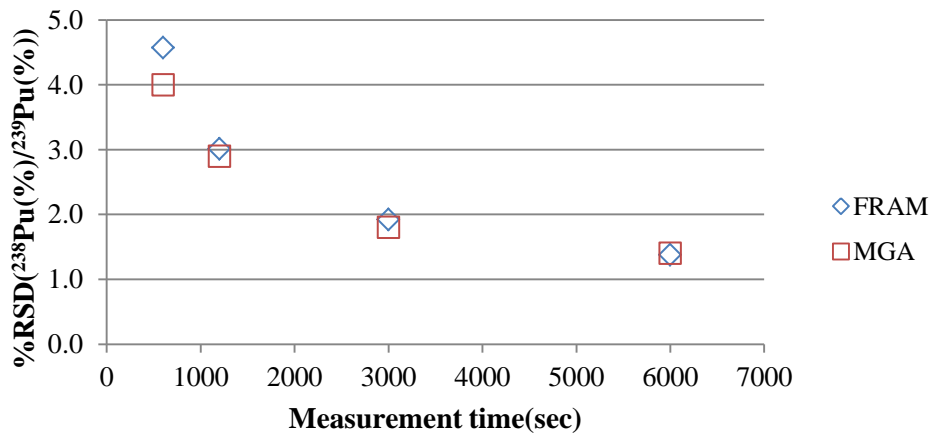


図 3-29 $^{238}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関 (MH 粉末、N02-01)

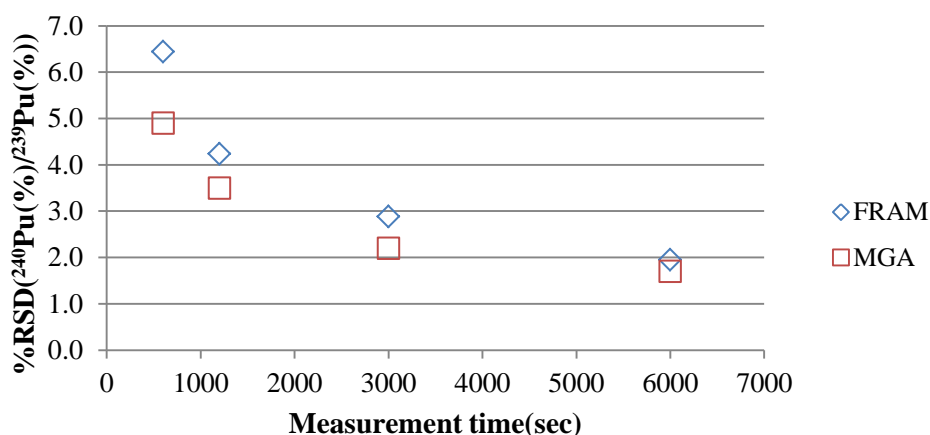


図 3-30 $^{240}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関 (MH 粉末、N02-01)

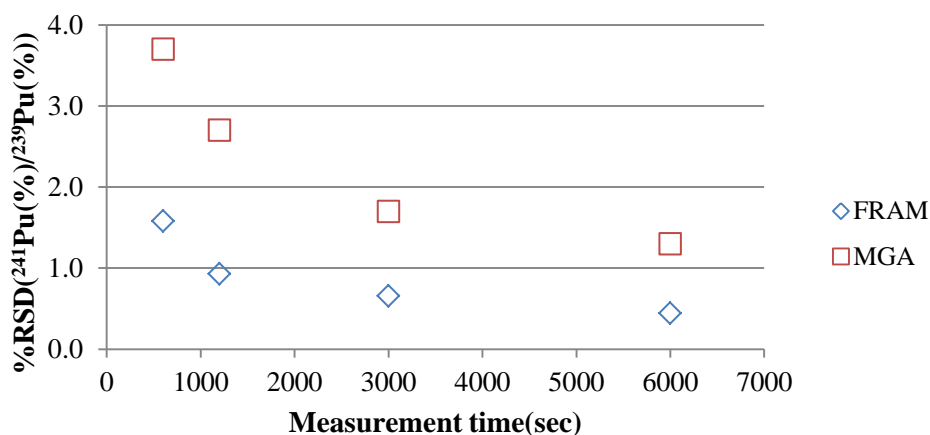


図 3-31 $^{241}\text{Pu}(\%)/^{239}\text{Pu}(\%)$ 比と測定時間の相関 (MH 粉末、N02-01)

(e) 考察

プルトニウム同位体組成比解析コードである MGA と FRAM の性能を比較するために上記の通り測定試験を行った。その結果、測定時間と測定精度の相関については、焼結後ペレット及び MH-MOX 粉末ともに、FRAM と MGA はほぼ同等の関係を示した。Pu 量と測定精度の相関については、焼結後ペレットに対しては、FRAM と MGA は、ほぼ同等の関係を示したが、MH-MOX 粉末については、FRAM のほうが測定精度が高かった。

一方、両コードで解析したプルトニウム同位体組成比と計量管理値から評価した ^{240}Pu 実効質量(%)の差を比較した結果、両コードとも一定のバイアスがあった (図 3-18 及び図 3-19 参照)。

よって、プルトニウム同位体組成比評価の性能について、FRAM と MGA は、ほぼ同等であるものとする。

3.5. ^3He 比例計数管の故障の検知に係る検討

(a) 目的

平成 25 年度に中性子検出器の ^3He 比例計数管（1 本）に封入された ^3He ガスの漏洩が発生したこと及び当該機器に不具合が発生しやすいという懸念があることから、不具合の検出方法及びその影響を取り除くための測定結果の補正手法の確立を目的として、評価、検討（高電圧下におけるプラトー曲線について測定を含む。）を行った。

* ^3He 比例計数管に封入された ^3He 混合ガスが高圧の場合、当該ガスの一部が比例計数管から漏洩し、測定機器の測定結果に影響を及ぼす懸念がある。充填ガスが漏出した ^3He 比例計数管は、図 3-32 に示すように、正常な ^3He 比例計数管より低い印加電圧で中性子を検出し始める。

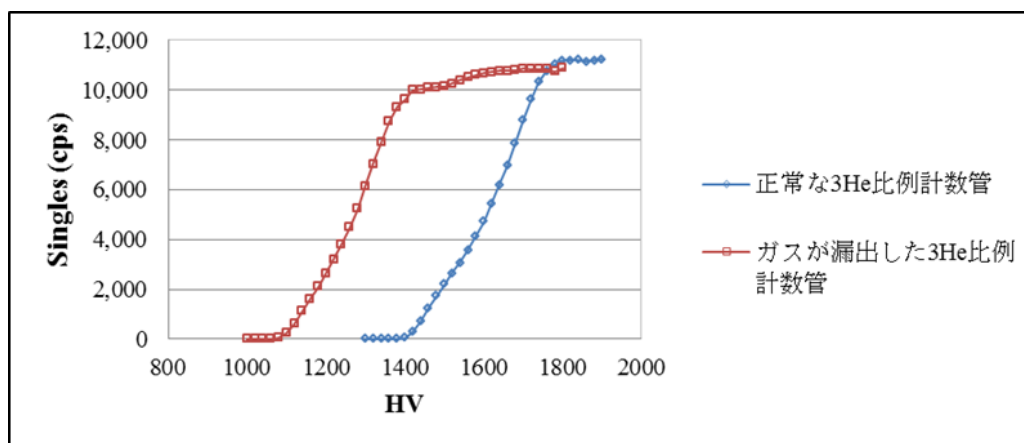


図 3-32 正常な ^3He 比例計数管とガスが漏出した ^3He 比例計数管の HV プラトー曲線

(b) 方法

AVIS 中性子検出器のプラトー曲線を定期的を取得する。以下に手順を示す。

- 1) ^{252}Cf 中性子線源（線源番号：I7-106）を専用の治具を用いて AVIS サンプルホルダー内（図 3-7）に配置する。
- 2) INCC の Measure High voltage Plateau モードにより、検出器に印加する HV を 1000V~2000V の範囲で 20V ずつ上昇させ測定を行い、各電圧におけるシングル値を取得する。測定時間は 30 秒とする。
- 3) 2) で取得した各電圧のシングル値から、プラトー曲線（グラフ）を作成する。
- 4) 以上を 1 回/月の頻度で実施する。

(c) 結果

プラトー曲線測定結果を図 3-33 に示す。なお、各測定日の測定値を比較するため、本結果

の各シングル値は、全て同一の日付に合わせて崩壊計算したものである。各測定日に取得したプラトー曲線はほぼ一致する結果となった。

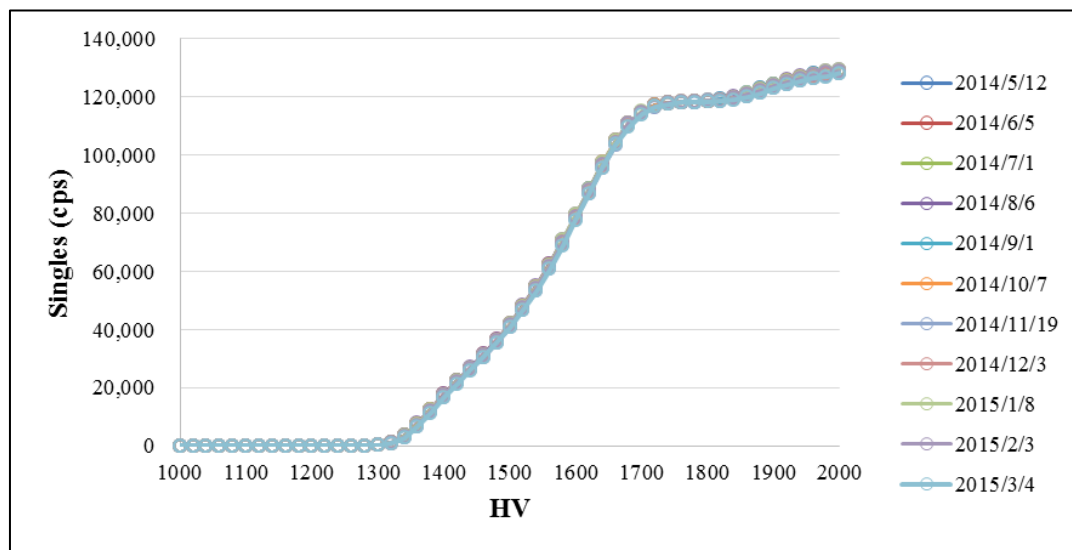


図 3-33 HV プラトー曲線測定結果

(d) 考察

定期的な HV プラトー測定を実施した結果、検出器のプラトー曲線は、試験期間を通じてほとんど変動しないことが確認できた。このことから、本試験期間中、 ^3He ガス漏出に起因する不具合は発生しなかったものと考えられる。

参考に、ガス漏出を起こした ^3He 比例計数管の過去の HV プラトー測定結果(図 3-32 参照)の計数値を用いて、AVIS の ^3He 比例計数管 74 本のうち、1 本に ^3He ガス漏出が発生した場合の HV プラトー曲線を評価した(図 3-34)。図中の赤線で示した異常な ^3He 比例計数管を 1 本含んだプラトー曲線は、ガス漏出を起こした ^3He 比例計数管 1 本の計数値と、正常な ^3He 比例計数管 1 本の計数値を 73 で乗じた値の和である。なお、ガス漏出を起こした ^3He 比例計数管は、AVIS の内側から 3 層目 (Ring3) の計数管であった。この図から分かるように、AVIS のように ^3He 比例計数管の本数が多い場合、1 本の ^3He 比例計数管のガス漏出による低い電圧域での計数率の上昇は、AFAS と比較して小さくなるが、正常な ^3He 比例計数管では計数しない低い HV から計数値が上昇するため、十分に検知可能であると考えられる。

よって、本年度の試験のように定期的にプラトー曲線を測定しそのデータを蓄積し、初期の正常な値と比較することは、検出器の ^3He ガス漏出を検知するための有用な方法であると考えられる。

また、 ^3He 比例計数管のガスが漏出し、ガンマ線に対する感度が増加した場合、AVIS の中性子計数値のうち、全中性子計数率を示すシングル値は、ガンマ線による影響により増加するものと考えられる。一方で核分裂により放出された同時性のある中性子が検出された事象数を

示すダブル値については、ガンマ線の影響による増加は生じないものとする。この理由は、核物質から同時性のあるガンマ線が放出されたとしても、その速度は中性子と比較して高速であり、プリディレイより非常に短い時間間隔で ^3He 比例計数管に到達するためである。トリプル値についてもダブル値と同様とする。よって、 ^3He 比例計数管のガスが漏出した場合は、シングル値のみが補正対象となるものとする。

AVIS には、4 層 (Ring1~4) の ^3He 比例計数管のシングル値を出力する Total、最内周のみのシングル値を出力する Ring1、及び最外周のみのシングル値を出力する Ring4 といった出力が存在し、また、測定結果にはそれぞれから出力されたシングル値 (T、R1、R4) が記録されている。

よって、Ring2 又は Ring3 に不具合がある場合は、(R1+R4)シングル値に、検出器に異常が無いときのシングル値の比($T/(R1+R4)$)を乗じることによりガンマ線の影響を除去したシングル値を得ることができ、また、Ring1 又は Ring4 に不具合がある場合は、シングル値 T から異常がある層のシングル値(R1 又は R4)を減じ、検出器に異常が無いときの($T/(T-R1)$) (R1 に異常がある場合) 又は($T/(T-R4)$) (R4 に異常がある場合) を乗じることによりガンマ線の影響を除去したシングル値を得ることができるものとする。

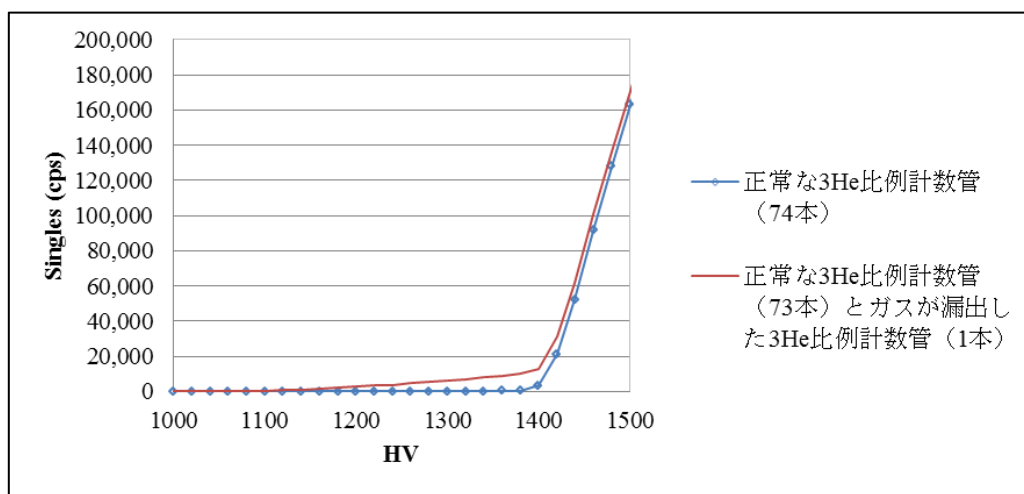


図 3-34 ^3He 比例計数管 1 本にガス漏出が発生した場合の AVIS の HV プラトー曲線

3.6. 測定手順書の作成

付録 3 に示すように、平成 25 年度までに作成した測定手順書 (システム構成、セットアップ手順、較正手順、測定手順を含む) に対して、平成 26 年度の結果を分析し反映した。

3.7. その他

3.7.1. MOX 試料の 3 者（施設者/NMCC DA/AVIS）の比較

(a) 目的

AVIS は MOX 粉末及び MOX ペレットの Pu 量を検認する機器である。この AVIS の測定精度が下表に示す IAEA の User Requirements にある要求精度を満たすかを評価する。

表 3-14 User Requirements の要求精度

	要求精度 (1σ)
中性子測定	0.5 % 以下
同位体測定 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ 、 $^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$)	2 % 以下

(b) 方法

独立行政法人日本原子力研究開発機構のプルトニウム燃料施設（PPFF）にて実施された PIV で採取された試料（MOX 粉末または MOX ペレット）を AVIS で測定し、得られた値を NMCC で実施した当該試料の破壊分析（DA）値と比較することで、AVIS 測定値の測定精度を評価する。

比較評価は、 ^{240}Pu 実効質量（全ての中性子が ^{240}Pu から放出されるとして求めた ^{240}Pu の重量）と、 $^{240}\text{Pu}(\%)$ と $^{239}\text{Pu}(\%)$ の比 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) について実施した。DA 値（Pu 濃度、Pu 同位体組成比）から ^{240}Pu 実効質量を計算する方法は、以下のとおりである。

i) DA で得られた Pu 同位体組成比より、以下の式で等価 ^{240}Pu 同位体組成比を計算する。

$$\begin{aligned} \text{等価 } ^{240}\text{Pu} \text{ 同位体組成比} &= 2.52 \times ^{238}\text{Pu}(\%) \\ &+ ^{240}\text{Pu}(\%) \\ &+ 1.68 \times ^{242}\text{Pu}(\%) \end{aligned}$$

ii) DA で得られた Pu 濃度と試料の正味重量より、以下の式で試料中の Pu 量を計算する。

$$\text{Pu 量} = \text{Pu 濃度} \times \text{正味重量}$$

iii) 1 の等価 ^{240}Pu 同位体組成比と 2 の Pu 量より、以下の式で ^{240}Pu 実効質量を計算する。

$$\text{ } ^{240}\text{Pu} \text{ 実効質量} = \text{等価 } ^{240}\text{Pu} \text{ 同位体組成比} \times \text{Pu 量}$$

(c) ^{240}Pu 実効質量の評価

・結果

表 3-15 に、本試験で使用した 6 件の試料の ^{240}Pu 実効質量の施設者値、NMCCDA 値及び AVIS 測定値と、NMCC DA 値と AVIS 測定値の差を示す。

表 3-15 ²⁴⁰Pu 実効質量の比較

試料番号	1	2	3	4	5	6	
AVIS 測定日	2012/10/2			2013/10/23			
物質形態	MOX 粉末 (ATR)	MOX 粉末	MOX 粉末	MOX ペレット (ATR)	MOX 粉末	MOX 粉末 (ATR)	
Pu 濃度 施設者値[wt%]	1.4	21.3	41.9	3.3	16	1.2	
²⁴⁰ Pu _{eff} 量	施設者値(DA)[g]	0.079	0.420	0.535	0.411	0.161	0.048
	NMCC DA 値[g]	0.077	0.419	0.526	0.422	0.160	0.046
	AVIS 測定値[g]	0.079	0.422	0.531	0.411	0.155	0.046
絶対差[g] NMCC DA-AVIS	0.002	-0.003	-0.005	0.011	0.005	-0.000	
相対差[rel.%] NMCC DA-AVIS	-2.029	-0.679	-0.922	2.602	2.868	-0.888	
相対差の標準偏差(2σ) ^{*1} 施設者-NMCC DA[rel.%]	10.37	4.63	4.63	1.55	4.63	10.37	

*1 : 相対差の標準偏差は、過去に PPF 採取された試料の施設者値と NMCC 値から推定した。

・考察

- 試料 4 について、NMCC DA-AVIS 間の相対差が 2σ_dを超えている。施設者値と AVIS 測定値はほぼ同じ値であった。
- 6 つの試料の測定値より、NMCC DA-AVIS 間の差の標準偏差は約 0.006g であった。
 - NMCC DA-AVIS 間の相対差が施設者と NMCC の DA 値から推定した相対標準偏差 (2σ_d) の範囲内にあることから、AVIS の測定不確かさは DA と同等であると言える。表 3-16 に、Pu 量の NMCC DA 値の測定不確かさをストラータごとに示す。MOX 粉末の NMCC DA 値の測定不確かさはおよそ 2-3%であり、AVIS 測定値が User Requirements にある要求精度 0.5%を満たしているか評価するのは困難である。一方、ペレットは要求精度 0.5%の確認が可能である。

表 3-16 PPF 採取した試料の Pu 量の NMCC DA 値の測定不確かさ

ストラータ	Pu 量の NMCC DA 値の測定不確かさ
MOX 粉末 (平均 Pu 濃度 30%)	1.63 rel.%
ATR 用 MOX 粉末 (平均 Pu 濃度 1.5%)	3.73 rel.%
ATR 用 MOX ペレット (平均 Pu 濃度 1.5%)	0.59 rel.%

(d) ^{240}Pu 同位体組成比と ^{239}Pu 同位体組成比の比 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) の評価

・結果

表 3-17 に、本試験で使用した 6 件の試料の ^{240}Pu 同位体組成比と ^{239}Pu 同位体組成比の比 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) について、その NMCC DA 値、AVIS 測定値及びそれらの相対差を示す。同位体比の AVIS 測定値及びその誤差の計算には、FRAM と MGA の 2 つのソフトウェアを用いた。

表 3-17 $^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の比較

			1	2	3	4	5	6
FRAM	$^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$	NMCC DA 値[%]	0.335	0.422	0.431	0.360	0.360	0.294
		AVIS 測定値[%]	0.339	0.423	0.417	0.366	0.378	0.287
		相対差[rel.%]	-1.093	-0.423	3.226	-1.597	-5.029	2.405
		AVIS 誤差値[%]	6.561	3.165	2.396	5.972	3.829	7.662
MGA	$^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$	NMCC DA 値[%]	0.335	0.422	0.431	0.360	0.360	0.294
		AVIS 測定値[%]	0.339	0.429	0.429	0.353	0.374	0.278
		相対差[rel.%]	-1.049	-1.843	0.607	1.995	-3.913	5.732
		AVIS 誤差値[%]	3.632	1.932	1.472	3.462	2.723	3.496

・考察

- AVIS 誤差値は、FRAM よりも MGA の方が小さい。
- 試料 2 及び 3 の AVIS 誤差値は User Requirements にある要求精度 2% よりも小さいが、他の試料の AVIS 誤差値は 2% より大きい値となった。

(e) IAEA からのコメント

2014 年 6 月 4 日に開催された J-MOX Joint Technical Committee において、NMCC より本比較評価の結果を発表した。IAEA より本発表に対し、使用した試料の重量は J-MOX での測定において要求されている下限値 1g より小さい。当施設において DA 用に 1gPu 以上の試料を採取する事は出来ないため、本試験には限界があるとのコメントがあった。

(f) まとめ

- ・ AVIS の測定不確かさは、3 者比較の結果より DA と同等であった。
- ・ 測定不確かさの確認には、User Requirements に記載されている 1g 以上の Pu 量を持つ試料を用いる必要がある。

4. データ収集・評価システムの機能評価

大型 MOX 燃料加工施設の燃料製造工程に設置される各保障措置機器からの査察側 NDA データと施設側申告データをデータベースに管理し、ニア・リアルタイム計量管理(NRTA)により検認評価するシステム「データ収集・評価システム」は、①施設側申告データの評価機能、②査察側 NDA データの評価機能、③ランダム中間査察の在庫検認データ評価機能から構成されている。

平成 26 年度は、前年度に引き続き、事業者が検討している計量管理を反映した計量管理モデル設定により前年度と同様なシミュレーションを行い②及び③の機能の評価を行った。

シミュレーションの実施に当たっては NDA の測定精度及びサンプリング数の検討を合わせて行った。

(1) 査察側 NDA データの評価機能 (②) の評価

査察側 NDA 機器による測定対象、測定点、測定精度をそれぞれ測定シミュレータに設定してシミュレーションを実施した。その結果を使って物質収支とその不確かさの計算、各種統計検定を行い、その結果を各設定について整理して比較し、妥当なシミュレータの設定を検討した。

検討した設定に基づく各種統計検定のプルトニウムの損失検知能力（検知までの時間、検知できる量）を検討するために、プルトニウムの損失を模擬してフローシミュレーションを行い、その結果について各種統計検定を行った。損失の模擬は、発生の時期、損失量を変えてケースを設定してシミュレーションを行った。

(2) 在庫検認データ評価機能 (③) の評価

保管庫等の在庫量、滞留期間をフローシミュレーションの設定により調整し、その結果を各計量ユニットで整理した。このシミュレーション結果をさらに測定シミュレーションにより施設側在庫測定模擬データとして作成して、これを、在庫検認評価プログラムの評価に用いた。在庫検認プログラムではプルトニウム含有率のデータも利用するので、測定シミュレーションにおいては在庫に関しても濃度測定値を模擬した。

在庫検認プログラムでは、想定するバイアス欠損率、RII の対象セクターの選択、RII 時のサンプル数及び査察側の測定精度の設定を行い対応する査察側測定値を作成し、施設側申告値（プルトニウム含有率）との差を計算し、累積して逐次統計検定を行った。

逐次統計検定を査察側測定値作成のための乱数を変更して多数回実施し、バイアス欠損率に対してしきい値を超えるサンプル数を記録して、サンプル数の平均を求め、バイアス欠損率、測定精度及びしきい値を超えるまでのサンプル数の平均値の関係を検討、評価した。

4.1 査察側測定データを用いた物質収支の評価

4.1.1 シミュレーション条件

平成 24 年度に施設側の計量測定データと査察側 NDA 測定機器による測定データを測定シミュレーションで模擬して計算した物質収支の不確かさ (σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF}) を計算した。本年度は平成 25 年度に実施した測定シミュレーション設定を用いて施設側計量測定データを模擬し、査察側の NDA 測定機器については、平成 24 年度に設定した測定精度及び NDA 機器の性能確認試験の試験結果を反映した測定シミュレーション設定を行い、 σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} を評価した。

NDA 測定機器は、原料 MOX 粉末缶一時保管設備(UNIT2)から払い出されるプルトニウム富化度 50%の MOX 粉末缶中のプルトニウム重量を測定する IPCA 及び各セクターから払い出される MOX 中のプルトニウム重量を測定する AMGB が図 4.1-1 のとおりモデル MOX 処理工程に設置されていると想定し、これら測定機器により取得された Pu 移動量のデータを用いて査察者の MUF 等を算出した。

NDA 測定機器の測定誤差については表 4.1-1 に示したように設定した。ケース 1 およびケース 2 は、平成 24 年度と同じ設定として、本年度の計算結果と比較することとした。ケース 2 は AMGB のランダム誤差をケース 1 に対し低く設定する一方、システムティック誤差は高く設定している。ケース 2 の AMGB に関するトータルの測定誤差は 4.0%である。ケース 3 及びケース 4 は、IPCA のトータル誤差を User Requirements の値(中性子測定の不確かさ 0.85%、同位体比測定の不確かさ 2%であるが、同位体比測定の測定誤差について本検討では考慮しなかった。)に設定した。AMGB のシステムティック誤差については、ITV を参考にして、測定対象のプルトニウム富化度が 10%より小さい場合の 1.5%、10%より大きい場合の 0.5%の 2 つのケースに分け、システムティック誤差が査察者の σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} (以下「査察者の」は省略する。)の計算に与える影響について比較した。

表 4.1-1 査察側測定機器の測定誤差設定シナリオ (単位 : %rel)

測定事例	測定精度	ランダム誤差	システムティック誤差	トータル
ケース 1	IPCA	2.00	0.50	2.06
	AMGB	4.00	1.50	4.27
ケース 2	IPCA	2.00	0.50	2.06
	AMGB	3.00	2.65	4.00
ケース 3	IPCA	0.70	0.50	0.86
	AMGB	4.00	1.50	4.27
ケース 4	IPCA	0.70	0.50	0.86
	AMGB	4.00	0.50	4.03

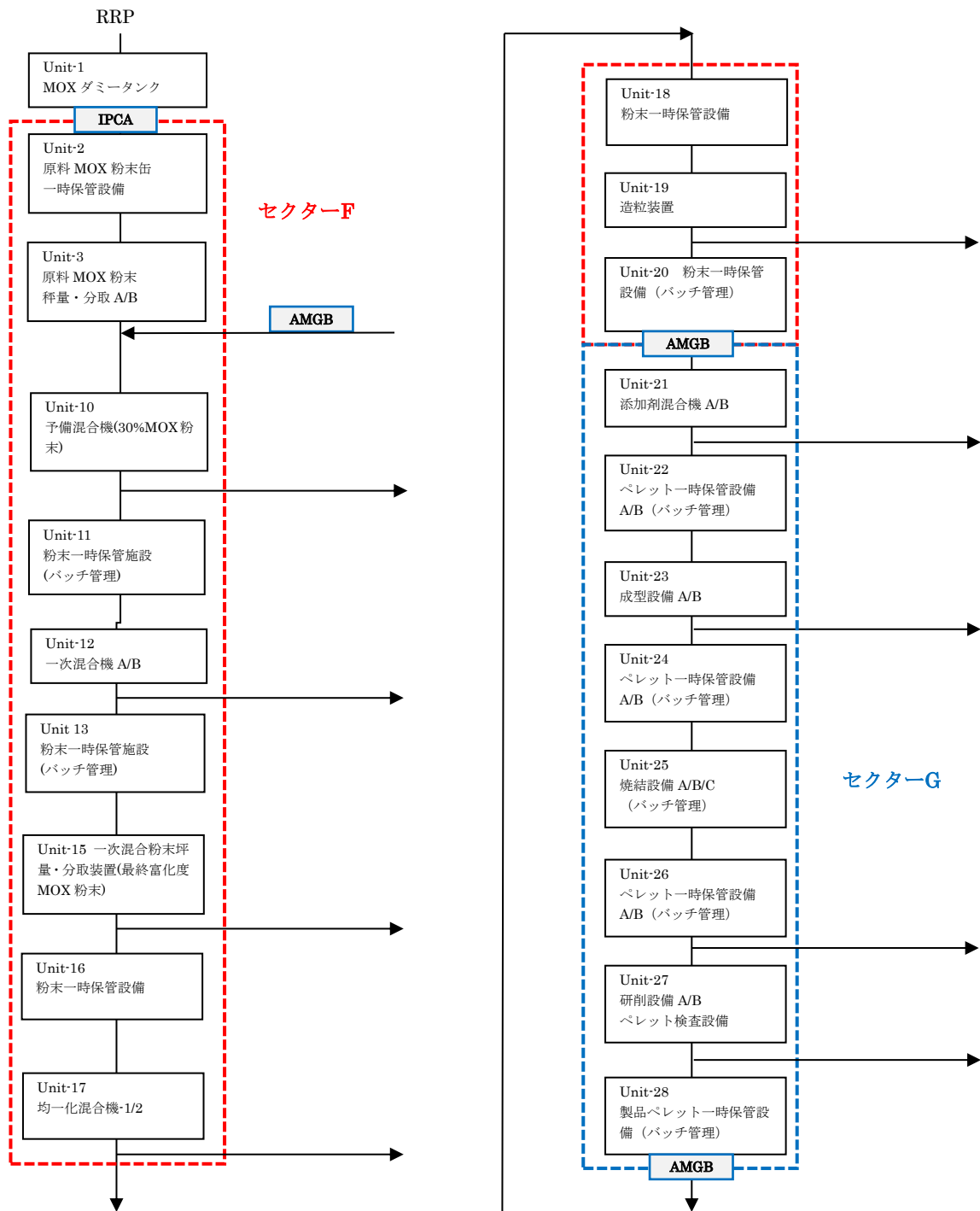


図 4.1-1 査察側 NDA 機器の配置

4.1.2 シミュレーション結果

(1) 平成 24 年度と平成 26 年度計算結果の比較

各ケースに対するセクターF、セクターG、セクター(F+G)における CUMUF 及び σ_{CUMUF} の計算結果の概要を表 4.1-2 (平成 24 年度 PWR)、表 4.1-3 (平成 26 年度 PWR) 及び表 4.1-4 (平成 26 年度 BWR) に示す。CUMUF 及び σ_{CUMUF} は 120 時間の物質収支期間 (MBP)

の BWR では 12 回目、PWR では 20 回目の値を示す。比較したグラフを図 4.1-2 に示す。

表 4.1-2 平成 24 年度計算結果の概要 PWR

		セクター (単位 : kgPu)					
		F+G		F		G	
		CUMUF ₂₀	σ CUMUF ₂₀	CUMUF ₂₀	σ CUMUF ₂₀	CUMUF ₂₀	σ CUMUF ₂₀
基本ケース		-0.055	5.570	2.399	5.761	0.173	3.109
N D A	ケース 1	6.181	34.305	-12.526	36.398	-6.815	7.017
	ケース 2	5.955	57.080	-11.168	68.687	-5.065	5.464

表 4.1-3 平成 26 年度計算結果の概要 PWR

		セクター (単位 : kgPu)					
		F+G		F		G	
		CUMUF ₂₀	σ CUMUF ₂₀	CUMUF ₂₀	σ CUMUF ₂₀	CUMUF ₂₀	σ CUMUF ₂₀
基本ケース		3.655	3.610	-1.427	1.610	2.617	3.211
N D A	ケース 1	25.632	28.167	-1.105	34.701	23.972	41.106
	ケース 2	49.563	45.509	2.477	58.003	43.424	71.608
	ケース 3	22.472	27.898	-0.133	34.491	23.972	41.106
	ケース 4	1.463	14.782	-4.658	16.579	7.487	14.619

表 4.1-4 平成 26 年度計算結果の概要 BWR

		セクター (単位 : kgPu)					
		F+G		F		G	
		CUMUF ₁₂	σ CUMUF ₁₂	CUMUF ₁₂	σ CUMUF ₁₂	CUMUF ₁₂	σ CUMUF ₁₂
基本ケース		0.406	1.536	0.017	0.646	1.115	1.349
N D A	ケース 1	-0.199	11.499	24.275	14.110	-20.237	16.677
	ケース 2	4.643	22.035	-7.207	27.281	43.192	28.749
	ケース 3	1.949	11.330	23.200	13.966	-20.237	16.677
	ケース 4	0.362	6.050	8.387	6.961	-7.011	6.225

これらの計算結果より、NDA 機器の測定データから計算された σ CUMUF は、施設側計量管理からの測定データを用いて計算された σ CUMUF (「基本ケース」と表示) を大きく上回ることが確認された。また、理想的な計量管理モデルにより計算した平成 24 年度の基本ケースと、重量測定及び受入値に基づく受入量と在庫量の計算値、製品ペレットのサンプリング及び分析に基づく測定値により物質収支を計算した平成 26 年度の計算結果は異なっており、セクター

Fでは平成26年度の結果は大幅に小さくなったが、セクターGでは平成26年度結果が若干大きくなった。セクターF+Gについても平成26年度結果が小さくなった。

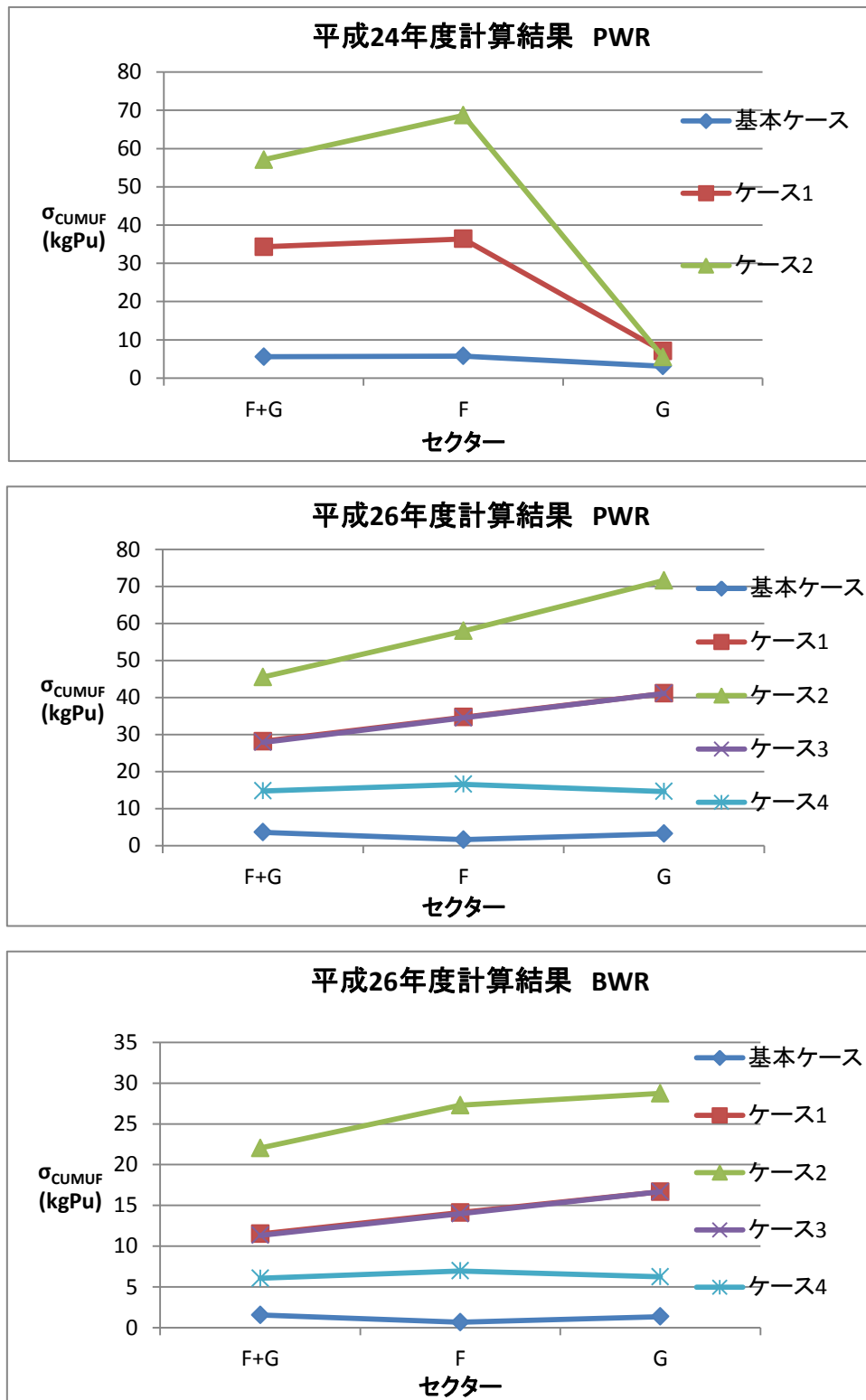


図 4.1-2 σ_{CUMUF} のセクターおよびケース毎の値

平成 26 年度に計算した PWR の査察側測定データを用いた各ケースについての σ_{CUMUF20} の値と施設側計量管理による基本ケースの σ_{CUMUF20} の値に対する比は、以下のものであった。カッコ内は平成 24 年度に計算した結果である。

セクターF： ケース 1 については施設側計量管理による数値の 21.6(6.3)倍
 ケース 2 については施設側計量管理による数値の 36.0(11.9)倍
セクターG： ケース 1 については施設側計量管理による数値の 12.8(2.3)倍
 ケース 2 については施設側計量管理による数値の 22.3(1.8)倍
セクター(F+G)： ケース 1 については施設側計量管理による数値の 7.8(6.2)倍
 ケース 2 については施設側計量管理による数値の 12.6(10.2)倍

各セクターの計算結果を比較した図 4.1-2 からわかるように、基本ケースにおいてセクターF は 24 年度に比べ 26 年度は小さくなっている。逆にセクターG は、どのケースにおいても 26 年度のほうが大きくなっているという特徴がある。

これに対応して、セクターF 及びセクターG の各ケースの基本ケースに対する倍率が 26 年度は高くなっている。セクターF+G では 24 年度及び 26 年度の結果に大きな変化は認められない。

24 年度に対して 26 年度のセクターG の σ_{CUMUF} の値が大きくなっている。これは、24 年度のセクターG の受け入れ及び製品ペレットの払い出しの測定点において同一の AMGB を使用する設定となっていたため、受入れと払い出し測定のシステムティック誤差が相殺されて σ_{CUMUF} の値への影響が小さくなったためである。このことは、24 年度のケース 1 よりもシステムティック誤差を大きくしたケース 2 の σ_{CUMUF} の値が小さくなっていることから推測できる。平成 26 年度は、セクターG の受入れ及び払い出しの測定点にそれぞれ別の AMGB が設置されるとした設定に変更したことにより、受入れの測定のシステムティック誤差と払い出しの測定のシステムティック誤差が独立していることになり、それぞれ、 σ_{CUMUF} に加算されることになるので、システムティック誤差の影響を大いに受け、セクターG の σ_{CUMUF} の値が大きくなったと考えられる。

セクターG については、26 年度のケース 1 とケース 3 の AMGB の測定不確かさは同じであるので、 σ_{CUMUF} の値は同じ結果となった。AMGB の測定不確かさのランダム誤差を小さくし、システムティック誤差を大きくした 26 年度ケース 2 の場合にはシステムティック誤差を大きくしたことにより σ_{CUMUF} の値が増加し、ランダム誤差を 1 パーセント下げた効果は見られなかった。

(2) シミュレーション計算結果 (MUF 及び σ_{MUF})

各セクターの各 MBP の MUF 及び σ_{MUF} の計算結果を表 4.1-5(1) (平成 24 年度 PWR)、表 4.1-5(2) (平成 26 年度 PWR) 及び表 4.1-5(3) (平成 26 年度 BWR) に示す。

① セクターの特徴

表 4.1-5 の施設側及び査察側測定値による σ_{MUF} 計算値は、セクターにより変動傾向が異なっている。セクターF では、受入れ量及び在庫量の多い MBP の σ_{MUF} が最大となった。セクターG では、プルトニウム富化度の切り替えがあった MBP でセクターへの受け入れプルトニウム量及び払い出しプルトニウム量の変動するので σ_{MUF} の値も変動した。

セクターF+G の結果は、セクターF と同様の傾向を示したが、セクターG で発生するスクラップにより、AMGB で測定する製品の払い出し量が減少するため、払出し測定のシステムティック誤差が減少することにより、 σ_{MUF} の値は、セクターF よりもセクターF+G の方が小さくなったと考えられる。

② PWR 燃料製造キャンペーン

PWR 燃料製造キャンペーンの施設側及び査察側による MUF 及び σ_{MUF} の比較を示した表 4.1-5(2)の σ_{MUF} の最大値は、セクターF のケース 1 : 2.767kg、ケース 2 : 3.852kg、ケース 3 : 2.516kg、ケース 4 : 1.751kg となり、AMGB のシステムティック誤差を大きく設定したケース 2 が最も大きくなった。システムティック誤差が小さいケース 4 が最も小さくなった。受入れ測定のランダム誤差を小さくしたケース 3 ではケース 1 に比べて小さい値を示した。セクターF の受け入れ測定の場合は測定バッチが大きいためランダム誤差の寄与が大きいと考えられる。払い出し測定のランダム誤差を小さくしたケース 2 ではシステムティック誤差の影響を受けランダム誤差の効果は確認できなかった。セクターF の場合には払出し測定の AMGB のシステムティック誤差が最も σ_{MUF} の大きさに影響することが分かった。

セクターG については、ケース 1 : 2.810kg、ケース 2 : 4.448kg、ケース 3 : 2.810kg、ケース 4 : 1.571kg となり、AMGB のシステムティック誤差を大きく設定したケース 2 が最も大きく、セクターF のケース 2 よりも大きくなった。セクターG の受け入れ及び払い出し測定はどちらも AMGB で測定するため、AMGB のシステムティック誤差の影響をセクターF よりも強く受けたためと思われる。逆に、システムティック誤差が小さいケース 4 の σ_{MUF} が最も小さくなり、セクターF よりも小さくなった。これは、セクターF の払い出しバッチの大きさに比べセクターG の払い出しバッチが小さいためセクターG の払出し測定のランダム誤差が小さくなっているためと考えられる。

セクターF+G については、ケース 1 : 2.329kg、ケース 2 : 3.170kg、ケース 3 : 2.028kg、ケース 4 : 1.423kg となり、セクターF 及びセクターG に比べて最も小さい値になった。ケース間の比較については、セクターF と同様であった。

③ BWR 燃料製造キャンペーン

BWR 燃料製造キャンペーンの施設側及び査察側測定値による MUF 及び σ_{MUF} の比較を示した表 4.1-5(3)の σ_{MUF} の最大値は、どのケースにおいても表 4.1-5(2)の PWR の場合より小さい値となった。これは、PWR 燃料製造キャンペーンに比べて BWR 燃料製造キャンペーン

の MBP あたりのプルトニウム取扱量が少ないためである。

(3) シミュレーション計算結果 (CUMUF 及び σ_{CUMUF})

各セクターの各 MBP の CUMUF 及び σ_{CUMUF} の計算結果を表 4.1-6(1) (平成 24 年度 PWR)、表 4.1-6(2) (平成 26 年度 PWR) 及び表 4.1-6(3) (平成 26 年度 BWR) に示す。

表 4.1-6 の施設側及び査察側測定値による CUMUF 及び σ_{CUMUF} 計算値の比較結果の内、平成 24 年度の PWR 燃料製造キャンペーンの運転時間に対する σ_{CUMUF} の変動を図 4.1-3 に示す。また、平成 26 年度の PWR 燃料製造キャンペーンの運転時間に対する σ_{CUMUF} の変動を図 4.1-4 に示す。どのケースにおいても σ_{CUMUF} は運転時間とともに増加する傾向を示す。図 4.1-3 のセクター F 及びセクター F+G においてはケース 2 が最も大きい値を示した。セクター G ではケース 1 が最も大きい、その値は、セクター F 及びセクター F+G に比して 1 桁小さい値であった。平成 26 年度の結果をまとめた図 4.1-4 においては、どのセクターも同じ傾向を示し、ケース 2 が最大で、ケース 1、ケース 3、ケース 4 の順に小さくなった。 σ_{CUMUF} の値は、セクター F+G、セクター F、セクター G の順に大きくなった。セクター G において平成 24 年度と平成 26 年度の結果が違っているのは、前述したように、平成 24 年度にセクター G の受け入れ測定と払い出し測定に同じ AMGB が使われていることによりシステムティック誤差の相殺が起こったためである。平成 26 年度の結果から、受入れ、払い出し測定に関しては、ランダム誤差よりもシステムティック誤差が σ_{CUMUF} の値に大きく影響することを示した。

(3) まとめ

施設側申告データによる Pu 在庫データ、原料 MOX 粉の受入れ測定に IPCA、製品ペレットの払出し測定及びセクター F とセクター G 間の移動測定に別々の AMGB を用いて測定して取得された Pu 移動量のデータを用いて σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} を計算した結果、ケース 2 が最大で、ケース 1、ケース 3、ケース 4 の順に小さくなった。これは査察側 NDA のシステムティック誤差の大きさが σ_{CUMUF} の値に大きく影響することを示した。

物質収支の評価においては、 σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} が重要な指標であるので、査察側 NDA のデータを用いる場合には、そのシステムティック誤差を小さく管理することが重要である。

表 4.1-5 (1) 施設側及び査察側による MUF 及び σ_{MUF} 計算値の比較 (PWR、MBP=120 時間の場合) H24 年度結果 (単位: kgPu)

		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																				MUF/ σ_{MUF} の最小値	MUF/ σ_{MUF} の最大値	MUF/ σ_{MUF} の平均値
セクターF		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)	2400 (100)			
	①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	MUF	-0.309	-0.291	0.655	0.803	0.073	-0.438	0.370	-0.204	-1.048	0.872	-0.017	-1.284	1.157	0.706	0.209	0.198	0.644	-1.522	1.371	0.453	-1.522	1.371
σ_{MUF}		0.581	0.701	0.790	0.866	0.939	1.007	1.110	1.162	1.177	1.188	1.208	1.234	1.260	1.271	1.314	1.224	1.146	1.049	0.948	0.834	0.581	1.314	1.050
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	MUF	-0.326	-0.433	-0.127	-4.103	0.742	3.267	2.317	1.552	-3.092	-1.961	-0.320	-4.571	-3.292	-0.144	-5.667	4.420	-1.858	0.355	-1.982	2.697	-5.667	4.420	-0.626
	σ_{MUF}	2.785	2.591	2.760	2.702	2.739	2.811	3.311	3.476	3.511	3.470	3.519	3.479	3.553	3.542	3.883	2.749	2.792	2.694	2.716	2.621	2.591	3.883	3.085
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	MUF	-0.514	-0.670	0.309	-4.233	0.499	3.007	2.298	1.788	-2.680	-1.993	-0.018	-4.512	-2.507	-0.059	-5.300	3.835	-1.361	0.033	-1.506	2.415	-5.300	3.835	-0.558
	σ_{MUF}	4.162	3.589	3.814	3.729	3.770	3.859	4.848	4.812	4.860	4.808	4.866	4.808	4.894	4.887	5.600	3.767	3.828	3.734	3.773	3.683	3.589	5.600	4.305

		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																				MUF/ σ_{MUF} の最小値	MUF/ σ_{MUF} の最大値	MUF/ σ_{MUF} の平均値
セクターG		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)	2400 (100)			
	①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	MUF	-0.041	0.023	0.081	-0.035	0.014	-0.160	-0.165	0.085	-0.305	-0.214	0.217	-0.205	0.219	0.188	-0.250	0.289	0.050	0.230	0.129	0.020	-0.305	0.289
σ_{MUF}		0.103	0.209	0.236	0.236	0.236	0.236	0.237	0.372	0.392	0.391	0.392	0.392	0.392	0.392	0.391	0.394	0.394	0.394	0.394	0.395	0.103	0.395	0.329
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	MUF	-0.299	1.470	0.905	-2.009	-0.594	1.905	-0.299	-1.463	1.225	-2.651	1.701	-1.777	0.670	-0.772	-2.147	-0.955	-2.280	0.257	-1.377	1.676	-2.651	1.905	-0.341
	σ_{MUF}	0.566	0.985	1.086	1.064	1.080	1.103	1.082	1.729	1.806	1.799	1.800	1.800	1.801	1.784	1.774	1.802	1.770	1.801	1.779	1.808	0.566	1.808	1.511
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	MUF	-0.220	1.086	0.710	-1.511	-0.452	1.440	-0.269	-1.050	0.869	-1.933	1.243	-1.352	0.528	-0.579	-1.605	-0.715	-1.739	0.194	-0.988	1.279	-1.933	1.440	-0.253
	σ_{MUF}	0.666	0.793	0.817	0.804	0.813	0.829	0.814	1.397	1.356	1.357	1.353	1.353	1.354	1.344	1.339	1.355	1.336	1.354	1.342	1.358	0.666	1.397	1.157

		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																				MUF/ σ_{MUF} の最小値	MUF/ σ_{MUF} の最大値	MUF/ σ_{MUF} の平均値
セクター(F+G)		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)	2400 (100)			
	①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	MUF	-0.249	-0.142	0.354	0.627	-0.600	1.646	-0.115	0.097	-0.827	0.619	1.036	-0.286	-0.178	-1.465	-0.337	-0.341	0.160	-0.547	-0.646	1.140	-1.465	1.646
σ_{MUF}		0.578	0.689	0.777	0.856	0.929	0.998	1.101	1.135	1.153	1.166	1.185	1.210	1.236	1.247	1.292	1.201	1.122	1.022	0.920	0.804	0.578	1.292	1.031
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	MUF	0.086	0.771	-1.960	0.840	0.881	2.397	1.074	0.068	1.611	0.695	-0.506	-1.633	0.740	-1.395	1.421	1.288	-0.541	-0.840	-0.338	1.521	-1.960	2.397	0.309
	σ_{MUF}	1.706	1.662	1.878	1.932	1.964	1.983	2.316	2.346	2.655	2.681	2.668	2.674	2.682	2.669	2.912	2.325	2.348	2.300	2.249	2.200	1.662	2.912	2.307
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	MUF	0.099	0.635	-1.979	0.859	0.790	2.323	1.043	0.086	1.658	0.709	-0.244	-1.440	0.740	-1.589	1.439	0.898	-0.400	-0.732	-0.370	1.431	-1.979	2.323	0.298
	σ_{MUF}	1.706	2.074	2.511	2.554	2.575	2.568	2.857	3.243	3.832	3.889	3.849	3.851	3.849	3.833	4.013	3.551	3.630	3.597	3.559	3.526	1.706	4.013	3.253

表 4.1-5 (3) 施設側及び査察側による MUF 及び σ_{MUF} 計算値の比較 (BWR、MBP=120 時間の場合)H26 年度結果 (単位: kgPu)

物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)

セクターF		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	MUF/ σ_{MUF} の最小値	MUF/ σ_{MUF} の最大値
①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	MUF	-0.014	0.055	0.005	0.060	-0.063	-0.038	0.077	-0.036	0.008	-0.015	-0.052	0.029	-0.063	0.077
	σ_{MUF}	0.053	0.061	0.058	0.066	0.064	0.068	0.067	0.079	0.083	0.079	0.080	0.076	0.053	0.083
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	MUF	-0.086	1.433	0.718	2.514	1.716	1.794	2.477	2.558	4.261	2.139	1.371	3.380	-0.086	4.261
	σ_{MUF}	0.859	1.019	1.045	1.281	1.241	1.286	1.238	1.909	1.966	2.012	2.014	1.996	0.859	2.014
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	MUF	-1.782	-0.515	-1.227	-0.098	-0.650	-0.715	0.001	-0.518	0.846	-1.107	-1.315	-0.128	-1.782	0.846
	σ_{MUF}	1.590	1.756	1.739	2.154	2.044	2.159	2.042	3.109	3.183	3.275	3.238	3.256	1.590	3.275
④査察側測定機器を使用した場合(ケース3)	MUF	0.026	0.887	0.899	2.345	1.842	1.764	2.440	2.222	3.971	2.310	1.051	3.445	0.026	3.971
	σ_{MUF}	0.585	0.825	0.893	1.136	1.116	1.142	1.111	1.814	1.888	1.925	1.937	1.907	0.585	1.937
⑤査察側測定機器を使用した場合(ケース4)	MUF	-0.154	0.244	0.124	1.313	0.810	0.734	1.414	0.500	2.126	0.466	-0.792	1.602	-0.792	2.126
	σ_{MUF}	0.562	0.625	0.628	0.778	0.744	0.781	0.742	1.153	1.176	1.210	1.204	1.200	0.562	1.210

物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)

セクターG		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	MUF/ σ_{MUF} の最小値	MUF/ σ_{MUF} の最大値
①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	MUF	0.044	0.061	0.075	0.138	0.251	0.091	0.100	0.336	-0.090	-0.172	-0.010	0.291	-0.172	0.336
	σ_{MUF}	0.034	0.087	0.109	0.140	0.144	0.144	0.145	0.229	0.257	0.257	0.256	0.257	0.034	0.257
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	MUF	-0.304	-1.431	-0.898	-2.364	-1.973	-1.071	-0.826	-2.392	-0.736	-3.007	-2.288	-2.947	-3.007	-0.304
	σ_{MUF}	0.242	0.776	1.004	1.275	1.327	1.321	1.326	2.054	2.366	2.356	2.350	2.345	0.242	2.366
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	MUF	-0.024	2.446	2.451	1.930	3.447	3.132	3.362	3.282	6.842	6.314	5.355	4.656	-0.024	6.842
	σ_{MUF}	0.340	1.245	1.578	1.991	2.091	2.070	2.084	3.210	3.734	3.788	3.705	3.689	0.340	3.788
④査察側測定機器を使用した場合(ケース3)	MUF	-0.304	-1.431	-0.898	-2.364	-1.973	-1.071	-0.826	-2.392	-0.736	-3.007	-2.288	-2.947	-3.007	-0.304
	σ_{MUF}	0.242	0.776	1.004	1.275	1.327	1.321	1.326	2.054	2.366	2.356	2.350	2.345	0.242	2.366
⑤査察側測定機器を使用した場合(ケース4)	MUF	-0.101	-0.832	-0.207	-1.436	-1.059	-0.155	0.087	-0.827	0.890	-1.386	-0.662	-1.321	-1.436	0.890
	σ_{MUF}	0.180	0.447	0.563	0.721	0.744	0.744	0.744	1.180	1.328	1.316	1.318	1.314	0.180	1.328

物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)

セクター(F+G)		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	MUF/ σ_{MUF} の最小値	MUF/ σ_{MUF} の最大値
①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	MUF	0.047	-0.084	-0.081	-0.308	-0.239	0.213	-0.230	0.182	0.035	-0.042	0.330	0.583	-0.308	0.583
	σ_{MUF}	0.265	0.250	0.235	0.257	0.241	0.261	0.242	0.271	0.270	0.285	0.269	0.285	0.235	0.285
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	MUF	0.158	-0.159	-0.250	-1.117	-0.006	-1.496	-0.296	1.074	-1.415	0.553	1.893	0.861	-1.496	1.893
	σ_{MUF}	0.830	0.859	0.909	1.035	1.065	1.091	1.060	1.306	1.597	1.661	1.590	1.623	0.830	1.661
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	MUF	-1.312	-0.723	-0.349	-1.182	0.424	-1.268	0.052	1.540	0.188	1.974	3.204	2.094	-1.312	3.204
	σ_{MUF}	1.562	1.515	1.518	1.758	1.746	1.835	1.737	2.153	2.539	2.682	2.538	2.626	1.515	2.682
④査察側測定機器を使用した場合(ケース3)	MUF	-0.064	-0.059	0.220	-0.114	-0.105	-0.638	-0.108	0.961	-0.551	0.307	1.360	0.739	-0.638	1.360
	σ_{MUF}	0.535	0.625	0.732	0.861	0.913	0.926	0.910	1.164	1.506	1.551	1.490	1.512	0.535	1.551
⑤査察側測定機器を使用した場合(ケース4)	MUF	-0.042	-0.103	0.136	-0.218	-0.223	-0.751	-0.220	0.804	-0.769	0.084	1.143	0.522	-0.769	1.143
	σ_{MUF}	0.535	0.516	0.509	0.591	0.577	0.616	0.576	0.714	0.826	0.867	0.820	0.853	0.509	0.867

表 4.1-6(1) 施設側及び査察側による CUMUF 及び σ CUMUF 計算値の比較 (PWR、MBP=120 時間の場合)H24 年度結果 (単位: kgPu)

セクターF		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																			CUMUF/ σ CUMUF の最小値	CUMUF/ σ CUMUF の最大値	
		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)			2400 (100)
①施設側計量管理の場合(測定誤差-TV)	CUMUF	-0.309	-0.600	0.055	0.858	0.931	0.493	0.863	0.658	-0.389	0.483	0.466	-0.818	0.339	1.045	1.254	1.453	2.097	0.575	1.945	2.399	-0.818	2.399
	σ CUMUF	0.581	0.916	1.224	1.520	1.811	2.099	2.406	2.724	3.027	3.318	3.602	3.883	4.163	4.437	4.714	4.962	5.192	5.399	5.588	5.761	0.581	5.761
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	CUMUF	-0.326	-0.759	-0.886	-4.989	-4.247	-0.980	1.337	2.889	-0.203	-2.163	-2.483	-7.054	-10.346	-10.491	-16.158	-11.738	-13.596	-13.241	-15.223	-12.526	-16.158	2.889
	σ CUMUF	2.785	4.096	5.512	6.882	8.265	9.673	11.379	13.338	15.355	17.362	19.408	21.437	23.522	25.584	27.842	29.481	31.199	32.898	34.660	36.398	2.785	36.398
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	CUMUF	-0.514	-1.184	-0.875	-5.107	-4.608	-1.602	0.696	2.484	-0.196	-2.189	-2.207	-6.719	-9.226	-9.284	-14.584	-10.749	-12.110	-12.077	-13.583	-11.168	-14.584	2.484
	σ CUMUF	4.162	6.832	9.779	12.700	15.670	18.713	22.672	26.506	30.433	34.356	38.355	42.319	46.369	50.420	55.167	57.715	60.381	63.071	65.875	68.687	4.162	68.687

セクターG		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																			CUMUF/ σ CUMUF の最小値	CUMUF/ σ CUMUF の最大値	
		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)			2400 (100)
①施設側計量管理の場合(測定誤差-TV)	CUMUF	-0.041	-0.018	0.063	0.028	0.043	-0.117	-0.282	-0.197	-0.502	-0.716	-0.499	-0.703	-0.484	-0.296	-0.546	-0.256	-0.206	0.024	0.153	0.173	-0.716	0.173
	σ CUMUF	0.103	0.247	0.377	0.494	0.605	0.712	0.818	1.009	1.199	1.382	1.562	1.738	1.913	2.086	2.258	2.430	2.601	2.771	2.940	3.109	0.103	3.109
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	CUMUF	-0.299	1.171	2.076	0.066	-0.528	1.377	1.078	-0.385	0.840	-1.811	-0.110	-1.887	-1.217	-1.989	-4.136	-5.091	-7.371	-7.114	-8.491	-6.815	-8.491	2.076
	σ CUMUF	0.566	1.188	1.615	1.927	2.208	2.479	2.705	3.263	3.736	4.131	4.512	4.855	5.181	5.479	5.755	6.035	6.286	6.540	6.776	7.017	0.566	7.017
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	CUMUF	-0.220	0.867	1.577	0.066	-0.386	1.054	0.785	-0.265	0.605	-1.328	-0.085	-1.438	-0.910	-1.489	-3.095	-3.810	-5.549	-5.355	-6.344	-5.065	-6.344	1.577
	σ CUMUF	0.666	1.200	1.467	1.656	1.843	2.058	2.213	2.815	3.145	3.374	3.655	3.889	4.127	4.339	4.531	4.748	4.924	5.112	5.280	5.464	0.666	5.464

セクター(F+G)		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																			CUMUF/ σ CUMUF の最小値	CUMUF/ σ CUMUF の最大値	
		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)			2400 (100)
①施設側計量管理の場合(測定誤差-TV)	CUMUF	-0.249	-0.391	-0.037	0.590	-0.010	1.636	1.521	1.618	0.790	1.409	2.446	2.159	1.981	0.517	0.179	-0.162	-0.002	-0.549	-1.195	-0.055	-1.195	2.446
	σ CUMUF	0.578	0.904	1.205	1.497	1.784	2.069	2.372	2.677	2.969	3.249	3.523	3.793	4.062	4.324	4.592	4.829	5.045	5.238	5.412	5.570	0.578	5.570
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	CUMUF	0.086	0.858	-1.103	-0.262	0.618	3.015	4.089	4.157	5.768	6.463	5.957	4.324	5.064	3.669	5.090	6.378	5.837	4.997	4.660	6.181	-1.103	6.463
	σ CUMUF	1.706	2.712	3.955	5.292	6.656	8.019	9.661	11.337	13.322	15.353	17.381	19.417	21.456	23.484	25.716	27.349	29.063	30.798	32.545	34.305	1.706	34.305
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	CUMUF	0.099	0.734	-1.244	-0.386	0.405	2.728	3.770	3.857	5.514	6.224	5.979	4.539	5.279	3.689	5.129	6.027	5.627	4.895	4.525	5.955	-1.244	6.224
	σ CUMUF	1.706	3.000	4.947	7.056	9.204	11.338	13.699	16.497	19.904	23.391	26.849	30.312	33.771	37.217	40.801	43.948	47.217	50.500	53.786	57.080	1.706	57.080

表 4.1-6(2) 施設側及び査察側による CUMUF 及び σ_{CUMUF} 計算値の比較 (PWR、MBP=120 時間の場合) H26 年度結果(単位: kgPu)

セクターF		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																	CUMUF/ σ_{CUMUF}		CUMUF/ σ_{CUMUF}		
		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)	2400 (100)	の最小値	の最大値
①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	CUMUF	-0.023	-0.200	-0.214	-0.219	-0.359	-0.413	-0.578	-0.673	-0.744	-0.853	-0.973	-0.987	-1.099	-1.237	-1.207	-1.330	-1.326	-1.422	-1.454	-1.427	-1.454	-0.023
	σ_{CUMUF}	0.100	0.192	0.286	0.381	0.477	0.572	0.667	0.761	0.853	0.950	1.049	1.148	1.248	1.343	1.443	1.497	1.518	1.544	1.575	1.610	0.100	1.610
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	CUMUF	0.249	-1.693	-3.621	-1.976	-2.343	-2.378	-5.644	-5.218	-6.431	-4.013	-4.961	-4.088	-6.946	-5.431	-5.920	-6.440	-5.415	-2.752	-2.331	-1.105	-6.946	0.249
	σ_{CUMUF}	1.715	2.856	4.178	5.521	6.859	8.203	9.788	11.720	13.717	15.695	17.706	19.715	21.761	23.780	25.980	27.698	29.423	31.146	32.921	34.701	1.715	34.701
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	CUMUF	0.348	-1.406	-2.739	-0.932	-1.338	-1.413	-4.440	-3.913	-4.774	-2.724	-3.460	-2.633	-4.855	-3.407	-3.703	-3.660	-2.349	0.160	1.010	2.477	-4.855	2.477
	σ_{CUMUF}	1.776	3.462	5.557	7.688	9.822	11.965	14.287	17.597	21.011	24.389	27.813	31.231	34.700	38.125	41.674	44.934	48.186	51.421	54.713	58.003	1.776	58.003
④査察側測定機器を使用した場合(ケース3)	CUMUF	-0.843	-2.029	-4.090	-3.869	-3.923	-3.863	-5.930	-5.605	-6.444	-4.195	-4.590	-3.624	-5.774	-4.622	-4.948	-5.468	-4.443	-1.780	-1.359	-0.133	-6.444	-0.133
	σ_{CUMUF}	1.254	2.434	3.785	5.137	6.485	7.837	9.417	11.373	13.390	15.380	17.403	19.421	21.477	23.500	25.699	27.435	29.175	30.912	32.700	34.491	1.254	34.491
⑤査察側測定機器を使用した場合(ケース4)	CUMUF	-0.853	-2.169	-4.380	-4.299	-4.480	-4.535	-6.715	-6.635	-7.725	-5.728	-6.374	-5.660	-8.061	-7.160	-7.738	-8.563	-7.896	-5.589	-5.526	-4.658	-8.563	-0.853
	σ_{CUMUF}	1.209	2.051	2.901	3.733	4.553	5.371	6.501	7.463	8.433	9.392	10.355	11.316	12.283	13.242	14.492	14.883	15.286	15.698	16.133	16.579	1.209	16.579

セクターG		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																	CUMUF/ σ_{CUMUF}		CUMUF/ σ_{CUMUF}		
		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)	2400 (100)	の最小値	の最大値
①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	CUMUF	0.075	0.173	0.288	0.452	0.761	0.867	0.800	1.215	1.092	0.873	0.845	1.172	1.074	1.197	1.884	2.462	2.135	2.162	2.482	2.617	0.075	2.617
	σ_{CUMUF}	0.066	0.181	0.303	0.420	0.535	0.649	0.762	0.944	1.139	1.331	1.521	1.711	1.900	2.089	2.277	2.463	2.650	2.837	3.024	3.211	0.066	3.211
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	CUMUF	-0.074	-0.333	0.824	0.485	0.648	1.931	3.641	4.826	8.366	9.270	10.982	11.917	11.813	13.951	17.136	16.271	18.868	21.226	21.609	23.972	-0.333	23.972
	σ_{CUMUF}	0.483	1.724	3.225	4.719	6.217	7.707	9.209	11.502	13.999	16.482	18.954	21.418	23.888	26.355	28.820	31.241	33.717	36.182	38.634	41.106	0.483	41.106
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	CUMUF	-0.133	0.342	2.165	2.867	3.946	5.833	8.017	10.100	14.326	16.637	19.502	21.786	23.287	26.475	30.443	31.324	34.852	38.200	40.069	43.424	-0.133	43.424
	σ_{CUMUF}	0.664	2.779	5.380	7.989	10.607	13.210	15.837	19.817	24.158	28.496	32.815	37.127	41.447	45.765	50.081	54.330	58.662	62.980	67.280	71.608	0.664	71.608
④査察側測定機器を使用した場合(ケース3)	CUMUF	-0.074	-0.333	0.824	0.485	0.648	1.931	3.641	4.826	8.366	9.270	10.982	11.917	11.813	13.951	17.136	16.271	18.868	21.226	21.609	23.972	-0.333	23.972
	σ_{CUMUF}	0.483	1.724	3.225	4.719	6.217	7.707	9.209	11.502	13.999	16.482	18.954	21.418	23.888	26.355	28.820	31.241	33.717	36.182	38.634	41.106	0.483	41.106
⑤査察側測定機器を使用した場合(ケース4)	CUMUF	-0.024	-0.714	-0.175	-1.132	-1.587	-0.902	0.190	0.612	3.129	2.977	3.666	3.579	2.452	3.568	5.730	3.876	5.451	6.786	6.146	7.487	-1.587	7.487
	σ_{CUMUF}	0.354	0.923	1.504	2.041	2.565	3.081	3.596	4.436	5.331	6.204	7.064	7.916	8.764	9.609	10.450	11.273	12.115	12.951	13.782	14.619	0.354	14.619

セクター(F+G)		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)																	CUMUF/ σ_{CUMUF}		CUMUF/ σ_{CUMUF}		
		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	1560 (65)	1680 (70)	1800 (75)	1920 (80)	2040 (85)	2160 (90)	2280 (95)	2400 (100)	の最小値	の最大値
①施設側計量管理の場合(測定誤差=ITV)	CUMUF	0.420	0.745	0.900	1.088	2.034	2.080	1.906	2.671	2.876	2.301	2.899	2.711	2.936	2.935	3.063	3.109	3.324	3.452	3.491	3.655	0.420	3.655
	σ_{CUMUF}	0.504	0.706	0.900	1.090	1.279	1.465	1.716	1.904	2.097	2.291	2.489	2.686	2.884	3.080	3.339	3.396	3.443	3.495	3.550	3.610	0.504	3.610
②査察側測定機器を使用した場合(ケース1)	CUMUF	-0.295	2.167	3.113	2.286	2.767	5.175	5.624	6.300	7.228	8.773	10.551	12.216	11.606	12.345	12.550	14.914	17.387	21.018	23.123	25.632	-0.295	25.632
	σ_{CUMUF}	1.640	2.531	3.590	4.698	5.843	6.986	8.420	9.791	11.404	13.067	14.717	16.378	18.039	19.717	21.588	22.830	24.131	25.444	26.797	28.167	1.640	28.167
③査察側測定機器を使用した場合(ケース2)	CUMUF	-0.326	2.709	4.603	4.689	6.137	9.290	10.644	12.512	15.062	18.185	21.427	24.553	25.436	27.747	29.297	33.028	37.012	41.875	45.542	49.563	-0.326	49.563
	σ_{CUMUF}	1.641	2.721	4.279	5.956	7.689	9.405	11.367	13.581	16.278	19.057	21.791	24.537	27.285	30.049	32.932	35.362	37.874	40.387	42.943	45.509	1.641	45.509
④査察側測定機器を使用した場合(ケース3)	CUMUF	-0.926	0.259	0.640	0.562	0.737	1.944	1.782	2.523	3.214	4.454	5.733	7.189	7.657	8.481	9.390	11.754	14.227	17.858	19.963	22.472	-0.926	22.472
	σ_{CUMUF}	1.157	2.027	3.109	4.241	5.397	6.543	7.968	9.357	10.991	12.671	14.333	16.004	17.678	19.363	21.236	22.497	23.816	25.146	26.514	27.898	1.157	27.898
⑤査察側測定機器を使用した場合(ケース4)	CUMUF	-0.886	-0.262	-0.648	-1.484	-2.055	-1.562	-2.453	-2.721	-3.304	-3.372	-3.367	-3.185	-3.991	-4.441	-4.806	-3.736	-2.642	-0.391	0.334	1.463	-4.806	1.463
	σ_{CUMUF}	1.156	1.912	2.693	3.471	4.252	5.032	6.147	6.968	7.835	8.711	9.584	10.458	11.330	12.207	13.394	13.640	13.905	14.182	14.476	14.782	1.156	14.782

表 4.1-6(3) 施設側及び査察側による CUMUF 及び σ CUMUF 計算値の比較 (BWR、MBP=120 時間の場合)H26 年度結果 (単位: kgPu)

		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)												CUMUF/ σ CUMUFの	
セクターF		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	最小値	最大値
①施設側計量管理の場合 (測定誤差=ITV)	CUMUF	-0.014	0.040	0.046	0.106	0.043	0.005	0.082	0.046	0.054	0.040	-0.012	0.017	-0.014	0.106
	σ CUMUF	0.053	0.101	0.143	0.194	0.240	0.292	0.339	0.396	0.455	0.518	0.581	0.646	0.053	0.646
②査察側測定機器を使用 した場合(ケース1)	CUMUF	-0.086	1.346	2.064	4.578	6.295	8.089	10.566	13.124	17.385	19.524	20.895	24.275	-0.086	24.275
	σ CUMUF	0.859	1.543	2.266	3.219	4.150	5.128	6.069	7.600	9.189	10.831	12.476	14.110	0.859	14.110
③査察側測定機器を使用 した場合(ケース2)	CUMUF	-1.782	-2.297	-3.523	-3.621	-4.271	-4.986	-4.985	-5.503	-4.657	-5.764	-7.079	-7.207	-7.207	-1.782
	σ CUMUF	1.590	3.125	4.654	6.609	8.464	10.471	12.357	15.208	18.119	21.183	24.202	27.281	1.590	27.281
④査察側測定機器を使用 した場合(ケース3)	CUMUF	0.026	0.913	1.812	4.156	5.998	7.762	10.202	12.424	16.395	18.704	19.755	23.200	0.026	23.200
	σ CUMUF	0.585	1.275	2.021	2.993	3.939	4.923	5.872	7.419	9.023	10.674	12.327	13.966	0.585	13.966
⑤査察側測定機器を使用 した場合(ケース4)	CUMUF	-0.154	0.089	0.213	1.526	2.337	3.070	4.484	4.984	7.111	7.577	6.784	8.387	-0.154	8.387
	σ CUMUF	0.562	1.062	1.509	2.054	2.537	3.065	3.539	4.232	4.893	5.600	6.267	6.961	0.562	6.961

		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)												CUMUF/ σ CUMUFの	
セクターG		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	最小値	最大値
①施設側計量管理の場合 (測定誤差=ITV)	CUMUF	0.044	0.105	0.180	0.318	0.569	0.660	0.760	1.096	1.006	0.834	0.824	1.115	0.044	1.115
	σ CUMUF	0.034	0.100	0.174	0.268	0.362	0.453	0.544	0.692	0.860	1.024	1.187	1.349	0.034	1.349
②査察側測定機器を使用 した場合(ケース1)	CUMUF	-0.304	-1.734	-2.633	-4.996	-6.969	-8.040	-8.866	-11.259	-11.995	-15.002	-17.290	-20.237	-20.237	-0.304
	σ CUMUF	0.242	0.930	1.821	2.961	4.141	5.311	6.485	8.304	10.415	12.512	14.598	16.677	0.242	16.677
③査察側測定機器を使用 した場合(ケース2)	CUMUF	-0.024	2.421	4.873	6.803	10.249	13.381	16.743	20.025	26.867	33.181	38.536	43.192	-0.024	43.192
	σ CUMUF	0.340	1.530	3.053	4.996	7.031	9.048	11.079	14.205	17.849	21.541	25.154	28.749	0.340	28.749
④査察側測定機器を使用 した場合(ケース3)	CUMUF	-0.304	-1.734	-2.633	-4.996	-6.969	-8.040	-8.866	-11.259	-11.995	-15.002	-17.290	-20.237	-20.237	-0.304
	σ CUMUF	0.242	0.930	1.821	2.961	4.141	5.311	6.485	8.304	10.415	12.512	14.598	16.677	0.242	16.677
⑤査察側測定機器を使用 した場合(ケース4)	CUMUF	-0.101	-0.933	-1.140	-2.577	-3.636	-3.791	-3.704	-4.531	-3.641	-5.028	-5.690	-7.011	-7.011	-0.101
	σ CUMUF	0.180	0.506	0.858	1.301	1.732	2.147	2.557	3.243	4.017	4.765	5.500	6.225	0.180	6.225

		物質収支期間 (上段は経過時間、下段は経過日数)												CUMUF/ σ CUMUFの	
セクター(F+G)		120 (5)	240 (10)	360 (15)	480 (20)	600 (25)	720 (30)	840 (35)	960 (40)	1080 (45)	1200 (50)	1320 (55)	1440 (60)	最小値	最大値
①施設側計量管理の場合 (測定誤差=ITV)	CUMUF	0.047	-0.038	-0.119	-0.427	-0.666	-0.453	-0.683	-0.501	-0.466	-0.508	-0.178	0.406	-0.683	0.406
	σ CUMUF	0.265	0.390	0.491	0.605	0.704	0.817	0.916	1.033	1.150	1.281	1.402	1.536	0.265	1.536
②査察側測定機器を使用 した場合(ケース1)	CUMUF	0.158	0.000	-0.250	-1.368	-1.374	-2.870	-3.166	-2.091	-3.506	-2.953	-1.060	-0.199	-3.506	0.158
	σ CUMUF	0.830	1.354	1.929	2.658	3.435	4.255	5.057	6.091	7.400	8.791	10.127	11.499	0.830	11.499
③査察側測定機器を使用 した場合(ケース2)	CUMUF	-1.312	-2.034	-2.383	-3.565	-3.140	-4.409	-4.357	-2.817	-2.629	-0.655	2.549	4.643	-4.409	4.643
	σ CUMUF	1.562	2.868	4.151	5.716	7.259	8.942	10.522	12.500	14.749	17.226	19.564	22.035	1.562	22.035
④査察側測定機器を使用 した場合(ケース3)	CUMUF	-0.064	-0.123	0.097	-0.017	-0.121	-0.759	-0.867	0.094	-0.457	-0.149	1.211	1.949	-0.867	1.949
	σ CUMUF	0.535	1.041	1.638	2.391	3.186	4.018	4.831	5.875	7.206	8.608	9.952	11.330	0.535	11.330
⑤査察側測定機器を使用 した場合(ケース4)	CUMUF	-0.042	-0.145	-0.009	-0.227	-0.450	-1.202	-1.422	-0.618	-1.387	-1.303	-0.160	0.362	-1.422	0.362
	σ CUMUF	0.535	0.975	1.376	1.849	2.282	2.766	3.199	3.729	4.277	4.888	5.444	6.050	0.535	6.050

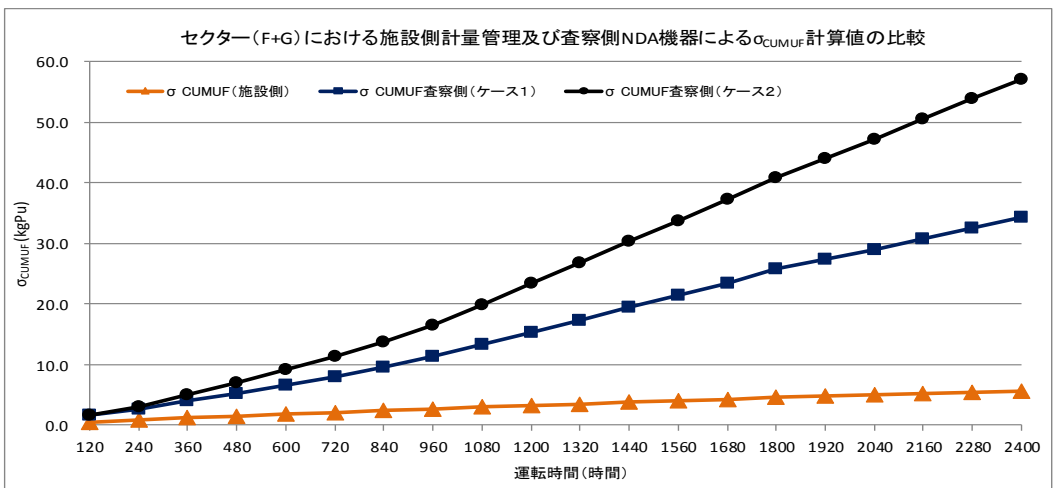
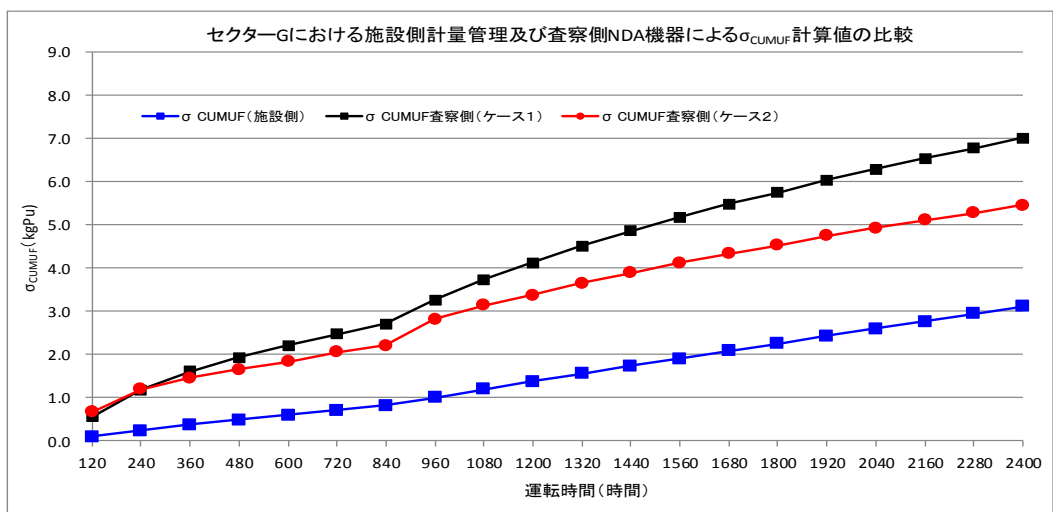
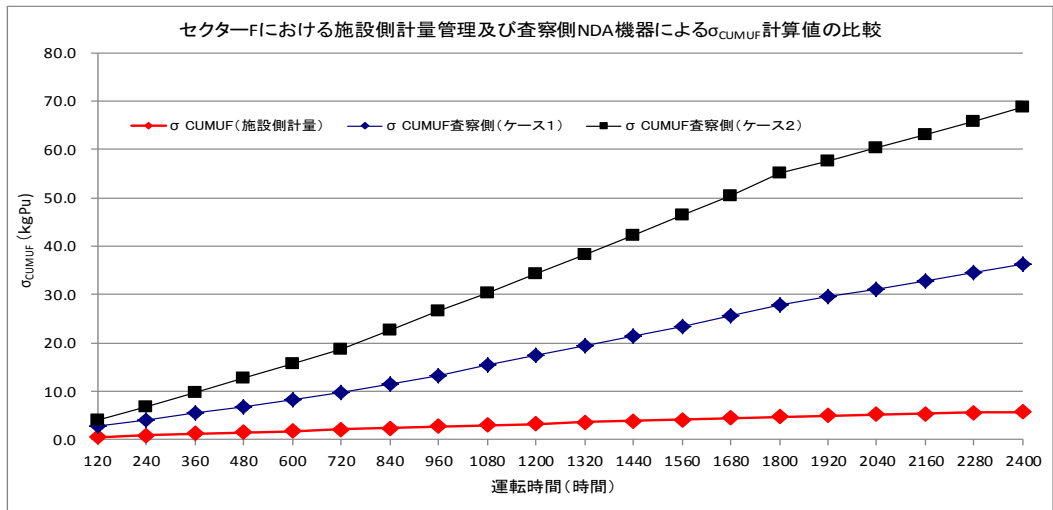


図 4.1-3 施設側計量管理データ及び査察側 NDA 機器測定データに基づく σ_{CUMUF} 平成 24 年度の結果

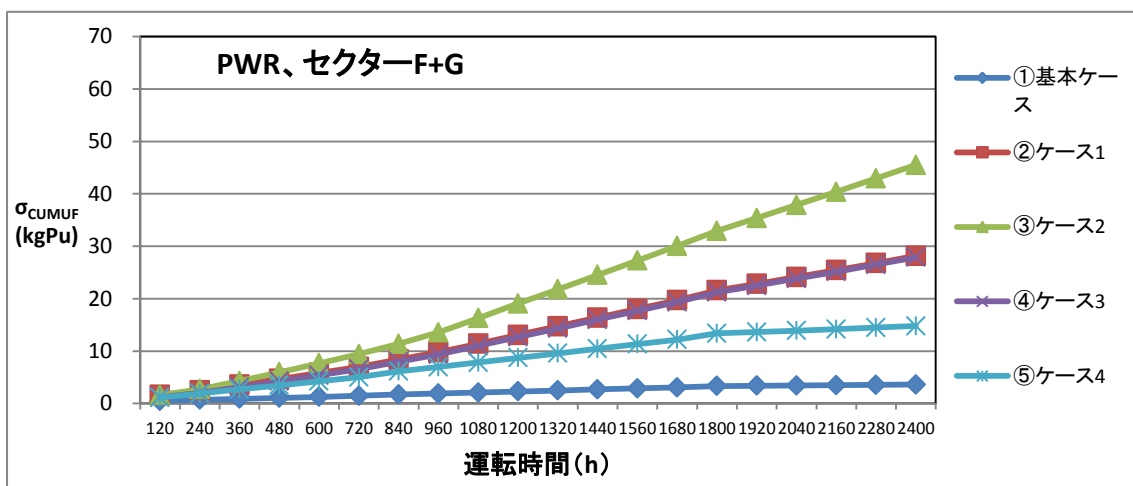
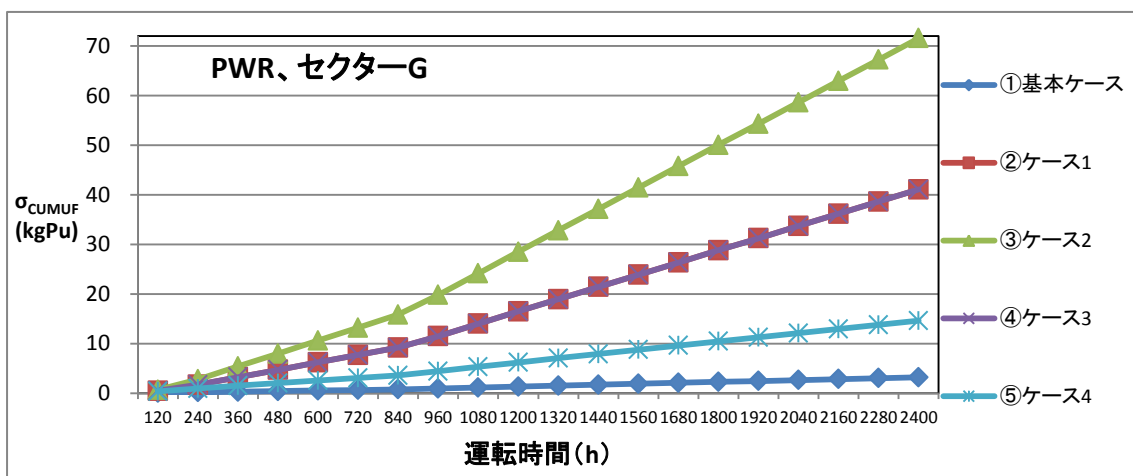
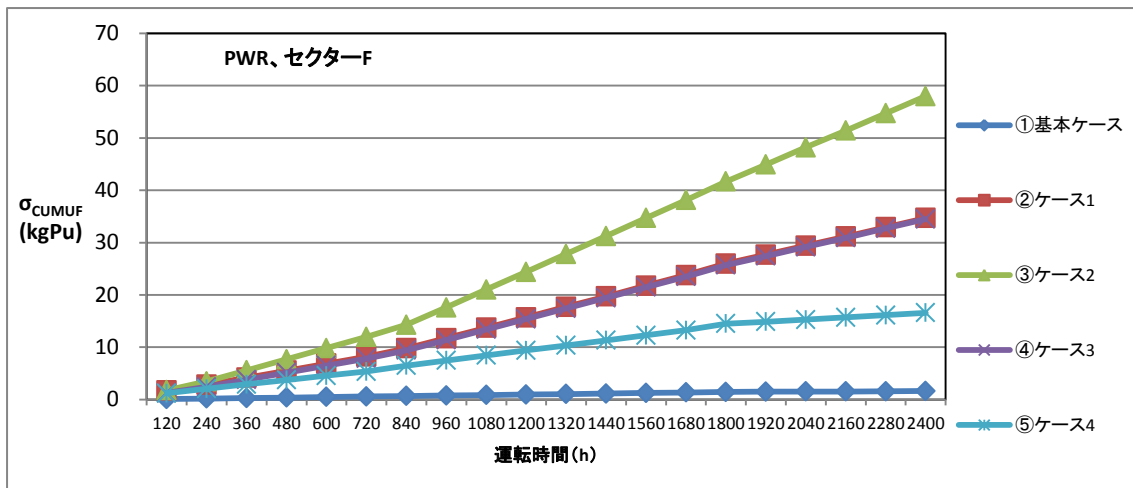


図 4.1-4 施設側計量管理データ(基本ケース)及び査察側 NDA 機器測定データに基づく σ_{CUMUF} 平成 26 年度の結果

4.2 査察側測定データを用いた物質収支による損失検知能力

4.2.1 シミュレーション条件

4.1 で検討した測定シミュレーション設定に基づき、各種統計検定のプルトニウムの損失検知能力（検知までの時間、検知できる量）を検討するために、プルトニウムの損失を模擬してフローシミュレーションを行い、その結果について各種統計検定を行った。損失の模擬は、発生 of 時期、損失量を変えてケースを設定してシミュレーションを行った。

損失は、以下のように模擬した。

損失発生箇所：セクターFのUnit19（造粒装置）の払出しからの損失

損失総量：8kgPu

損失モード：一括（MBP（5日）内に8kgPuを損失）

2分割（連続する2MBP（10日）にそれぞれ4kgPuを損失）

3分割（連続する3MBP（15日）にそれぞれ2.67kgPuを損失）

4分割（連続する4MBP（20日）にそれぞれ2kgPuを損失）

6分割（連続する6MBP（30日）にそれぞれ1.33kgPuを損失）

損失時期：1 キャンペーンの前半（120時間後～）、中盤（720時間後～）、後半（PWR燃料製造キャンペーン1440時間後～、BWR燃料製造キャンペーン1320時間後～）に発生（Unit15以降の工程では、PWR燃料製造キャンペーンでは、運転開始から150時間及び820時間にプルトニウム富化度を変更した。BWR燃料キャンペーンでは、150時間、330時間及び830時間にプルトニウム富化度を変更した。）

統計検定は以下を行った。

a：MUF検定

b：CUMUF検定

c：GEMUF検定

d：Truncated CUMUF 逐次検定

e：CUSUM ページ検定

なお、4.2.2 及び 4.2.3 の結果において検定方法を明示せず「検知した」と表現する場合、

a から e のすべてまたはいずれかで警報を発したことを現すものとする。

物質収支区域は、セクターF 及びセクターF+G とした。測定シミュレーションの査察側 NDA の測定不確かさの設定は、4.1 で検討したのと同様として、基本ケース、ケース 1 からケース 4 について検討した。

物質収支期間（物質収支の計算間隔）は、120時間（5日）としたが、モデル工程は1週間に5日運転として、運転休止日については模擬していないことから、5日間隔の物質収支計算とその評価は、1週間（7日）間隔の評価と同義である。

4.2.2 PWR 燃料製造キャンペーンの結果

(1) 一括損失

PWR 燃料製造キャンペーンのセクターFの統計検定結果を表 4.2-1 に示す。統計検定で警報を発生した場合に○印を記入した。警報がなかった場合には－印を記入した。

査察側 NDA 測定データを含まない基本ケースでは、検討したすべての場合に損失を検知することができた。

査察側 NDA データを用いたケース 1 からケース 4 において、一括損失の場合には発生時期が前半、中盤及び後半のどの場合にも検知できた。しかし、CUMUF を統計量とする検定では、前半の場合にだけ損失を検知できた。これは、運転時間とともに処理量が増加するため、受払量を測定する査察側 NDA の不確かさが累積し増加していくため、CUMUF の不確かさの 1.96 倍で検定する CUMUF 検定では検出しにくくなったものと考えられる。

この結果から、検討した測定条件における査察側 NDA データを用いた物質収支の評価により、8kgPu の一括損失は 120 時間以内に検知できるといえる。

PWR 燃料製造キャンペーンのセクターF+Gの統計検定結果を表 4.2-2 に示す。

査察側 NDA 測定データを含まない基本ケースでは、検討したすべての場合に損失を検知することができた。査察側 NDA データを用いたケース 1 からケース 4 において、一括損失の場合には発生時期が前半、中盤及び後半のどの場合にも検知できている。しかし、CUMUF 検定では、セクターFの場合と同様に前半の場合にだけ損失を検知できた。セクターF 単独とセクターF+G の場合において大きな変化はなく、8kgPu の一括損失を 120 時間以内に検知できた。

(2) 運転期間中盤の分割損失

運転期間の中盤に分割損失が発生した場合のセクターFの統計検定結果を、表 4.2-3 に示す。ケース 1、ケース 2 では分割損失を検知できなかった。ケース 3 及びケース 4 では検知できる場合があった。3 分割では検出できなかったため、一般的にさらに条件が厳しくなる 4 分割及び 6 分割での検出結果は、偶然に検出されたと考えるべきである。この結果から、測定条件がケース 3 あるいはケース 4 の場合には、5 日間に 4kgPu を連続する物質収支期間に 2 回損失した時には GEMUF 検定により検知することができると考えられる。

表 4.2-4 に示したセクターF+Gの統計検定において、損失期間が中盤の分割損失については、2 分割、3 分割まではすべてのケースで検知することができた。4 分割はケース 3 及びケース 4 だけが検知できた。6 分割ではすべてのケースで検知することができなかった。

物質収支区域をセクターF 単独にした時に比べてセクターF+G と大きくした方が損失を検知する機会が多い。セクターF の場合もセクターF+G の場合も区域からの払出しの測定は AMGB であるが、セクターF+G の払出し測定の単位は小さく、測定回数が多いため、ランダムの不確かさが小さくなっているものと考えられる。さらにセクターG のスクラップ発生率が大きく、NDA

測定対象がセクターFの払出し量よりも少ないので、AMGBによる払出し測定の不確かさが小さくなるためと考えられる。運転期間の中盤には工程内の在庫量が多いため σ_{MUF} がキャンペーンの前半及び後半に比較して大きいので、MUF検定によっては損失を検知しにくいと考えられる。

(3) 運転期間前半の分割損失

表 4.2-5 には、損失発生時期を工程運転開始直後からとした場合（前半）の、セクターFの結果を示した。2分割はすべてのケースで検知することができた。3分割、4分割及び6分割ではどのケースも検出することはできなかった。中盤に比べて、ケース1及び2では、検出能力が上がったが、逆にケース3及び4では2分割しか検知できず、検出能力は変わらない。

表 4.2-6 には、損失発生時期を工程運転開始直後からとした場合（前半）の、セクターF+Gの統計検定結果を示した。2分割、3分割及び4分割までは、すべてのケースで検出することができた。6分割では、検出することはできなかったが、中盤に比べて検出能力は上がった。また、セクターF単独と比較して検知能力は上がっている。

(4) 運転期間後半の分割損失

表 4.2-7 には、損失発生時期を工程運転開始 1440 時間後からとした場合（後半）の、セクターFの統計検定結果を示した。2分割はすべてのケースで検知することができた。3分割、4分割及び6分割では、ケース3及び4でページ検定により検知することができた。

表 4.2-8 には、損失発生時期を工程運転開始 1440 時間後からとした場合（後半）の、セクターF+Gの統計検定結果を示した。6分割まで、すべてのケースでMUF検定により検出することができた。キャンペーン後半では原料粉末の受け入れが終了して、在庫量も減少するため、120時間毎の σ_{MUF} は1800時間以降減少傾向にあり、MUF検定で検知しやすくなる。ただし、MUF検定の場合には120時間毎の検定の誤警報確率を5%に設定しているため、1キャンペーンを通じた誤警報確率は大きくなる。

(5) まとめ

シミュレーション計算において、8kgPuの一括損失は、セクターF、セクターF+Gのどちらでも、発生時期がキャンペーンのどの時点であっても、検討した測定条件において120時間以内に検出できるといえる。8kgPuの分割損失は、セクターFの場合、測定条件がケース3及びケース4の場合に、2分割損失を検知することができた。セクターF+Gの場合は、測定条件がケース3及びケース4の場合に、2分割から4分割損失がキャンペーン中のどの時点で起きても検出できた。物質収支区域をセクターF単独時に比べてセクターF+Gと大きくした方がより小さい損失を検知できた。この違いはAMGB払出し測定の対象物のバッチサイズ（ランダム誤差）と測定対象物の総量（システムティック誤差）がセクターF+Gが小さいためと考えられる。

表 4.2-1 損失の検知能力（セクターF、PWR、一括損失）

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース 1					ケース 2					ケース 3					ケース 4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
一括前半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
一括中盤	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
一括後半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○

表 4.2-2 損失検知能力（セクターF+G、PWR、一括損失）

セクターF+G 検定種類 損失モード	基本					ケース 1					ケース 2					ケース 3					ケース 4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
一括前半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
一括中盤	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
一括後半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	-	○	-	○	-	-	○	-	○	-	-

表 4.2-3 損失の検知能力（セクターF、PWR、分割損失中盤）

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース 1					ケース 2					ケース 3					ケース 4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2 分割中盤	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	-	-
3 分割中盤	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4 分割中盤	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	-	-
6 分割中盤	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	○	-	-

表 4.2-4 損失検知能力（セクターF+G、PWR、分割損失中盤）

セクターF+G 検定種類 損失モード	基本					ケース 1					ケース 2					ケース 3					ケース 4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2 分割中盤	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	○	-	○	-	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
3 分割中盤	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	○	-	-
4 分割中盤	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	-
6 分割中盤	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4.2-5 損失検知能力 (セクターF、PWR、分割損失前半)

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	○	○	○	-	-	○	○	○	-	-	○	○	○	○	○
3分割前半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4分割前半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6分割前半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4.2-6 損失検知能力 (セクターF+G、PWR、分割損失前半)

セクターF+G 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○
6分割前半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

表 4.2-7 損失検知能力 (セクターF、PWR、分割損失後半)

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割後半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	-	-	○	-	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
3分割後半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	○	○	-	○	-	○
4分割後半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○
6分割後半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	-	-	-	○

表 4.2-8 損失検知能力 (セクターF+G、PWR、分割損失後半)

セクターF+G 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割後半	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	○	-	-
3分割後半	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
4分割後半	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	○	-	-	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
6分割後半	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	○	-	-	-	-	○	-	-	-	○	○	-	-	-	○

4.2.3 BWR 燃料製造キャンペーンの結果

(1) 一括損失

BWR 燃料製造キャンペーンのセクターFの統計検定結果を表 4.2-9 に示す。査察側 NDA 測定データを含まない基本ケースでは、検討したすべての場合に損失を検知することができた。

査察側 NDA データを用いたケース 1 からケース 4 において、一括損失の場合には発生時期が前半、中盤及び後半のどの場合にも検知できた。この結果から、検討した測定条件における査察側 NDA データを用いた物質収支の評価により、8kgPu の一括損失は 120 時間以内に検知できるといえる。

BWR 燃料製造キャンペーンのセクターF+Gの統計検定結果を表 4.2-10 に示す。

査察側 NDA 測定データを含まない基本ケースでは、検討したすべての場合に損失を検知することができた。査察側 NDA データを用いたケース 1 からケース 4 において、一括損失の場合には発生時期が前半、中盤及び後半のどの場合にも検知できている。しかし、CUMUF 検定では、前半の場合にだけ損失を検知できた。セクターF 単独とセクターF+G の場合において大きな変化はなく、8kgPu の一括損失を 120 時間以内に検知できた。

(2) 運転期間前半の分割損失

表 4.2-11 には、損失発生時期を工程運転開始直後からとした場合（前半）の、セクターFの結果を示した。ケース 2 を除き、2 分割、3 分割、4 分割及び 6 分割を検出することができた。ケース 2 では、2 分割の 8kgPu を 240 時間内に損失した 2 分割だけが検知できた。ケース 2 は他のケースに比べ系統誤差を大きく設定しているために物質収支の不確かさが大きくなり検知力が落ちたものと思われる。

表 4.2-12 には、損失発生時期を工程運転開始直後からとした場合（前半）の、セクターF+Gの統計検定結果を示した。ケース 2 を除き、2 分割、3 分割、4 分割及び 6 分割まで、検出することができた。ケース 2 では 3 分割の損失まで検知することができたが、△印で示した 2 分割の検知までの時間は損失発生時期に対して遅れがあった。セクターF 単独と比較して検知能力はわずかに高くなっている。

(3) 運転期間中盤の分割損失

表 4.2-13 には、損失発生時期を工程運転開始 720 時間後からとした場合（中盤）の、セクターFの統計検定結果を示した。ケース 2 を除き、2 分割、3 分割、4 分割及び 6 分割まで、検出することができた。ケース 2 では、3 分割まで検知でき、損失発生が前半の時と比較して検知しやすくなっている。ケース 2 の△印で示した 4 分割の検知までの時間は損失発生時期に対して遅れがあった。

表 4.2-14 には、損失発生時期が中盤の場合の、セクターF+Gの統計検定結果を示した。どの

ケースも6分割まで、検出することができた。ケース1の△印で示した6分割の検知までの時間は損失発生時期に対して遅れがあった。

(4) 運転期間後半の分割損失

BWR 燃料製造キャンペーンのシミュレーションの運転期間は1500時間であり、最終のMBPが1440時間であるため、1320時間から始まる後半の分割損失の模擬は実施できなかった。

(5) まとめ

シミュレーション計算において、8kgPuの一括損失は、セクターF、セクターF+Gのどちらでも、発生時期がキャンペーンのどの時点であっても検討した測定条件において120時間以内に検知できた。

8kgPuの分割損失は、セクターF、セクターF+Gのどちらでも、測定条件がケース1、3及びケース4の場合に、発生時期がキャンペーンのどの時点であっても6分割損失まで検知することができた。

表 4.2-9 損失検知能力 (セクターF、BWR、一括損失)

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中盤	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
後半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○

表 4.2-10 損失検知能力 (セクターF+G、BWR、一括損失)

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
中盤	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
後半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○

表 4.2-11 損失検知能力（セクターF、BWR、分割損失前半）

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○
4分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-
6分割前半	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○

表 4.2-12 損失検知能力（セクターF+G、BWR、分割損失前半）

セクターF+G 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	△	-	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
6分割前半	○	○	○	○	○	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△

表 4.2-13 損失検知能力（セクターF、BWR、分割損失中盤）

セクターF 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	-	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
3分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	○	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
4分割前半	○	○	○	○	○	○	○	○	-	○	-	-	△	-	-	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
6分割前半	○	○	○	○	○	○	○	-	-	○	-	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○

表 4.2-14 損失検知能力（セクターF+G、BWR、分割損失中盤）

セクターF+G 検定種類 損失モード	基本					ケース1					ケース2					ケース3					ケース4				
	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e	a	b	c	d	e
2分割前半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
3分割前半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
4分割前半	○	○	○	○	○	○	-	○	-	○	-	-	○	-	○	○	-	○	-	○	○	-	○	-	○
6分割前半	○	○	○	○	○	-	-	-	-	△	-	-	○	-	○	-	-	○	-	○	○	-	○	-	○

4.3 在庫検認データ評価機能の評価

在庫検認データ評価機能の評価としてフローシミュレーションにより作成した大型 MOX 燃料加工モデル施設の模擬在庫データを用いた以下の機能評価を行った。

保管庫等の在庫量、滞留期間をフローシミュレーションの設定により調整し、その結果を各計量ユニットで整理した。このフローシミュレーション結果を、さらに測定シミュレーションにより施設側在庫測定模擬データとして作成して、これを、在庫検認プログラムの評価に用いた。在庫検認プログラムではプルトニウム含有率のデータも利用するので、機能評価用データを得るために、通常は個々の在庫箇所では測定していないプルトニウム含有率を、測定シミュレーションの在庫測定においてサンプリング及び分析を行うこととして模擬した。

在庫検認プログラムでは、RII の対象セクターの選択、想定するバイアス欠損率、サンプルサイズ及び測定精度の設定を行い対応する査察側測定値を作成し、施設側申告値（プルトニウム重量）との差を累積して逐次統計検定を行うことができる。

設定したバイアス欠損率を損失した場合に逐次検定にて規定限界を超えるまでの累計サンプルサイズを記録して、模擬測定値作成のための乱数を変更した逐次検定を多数回実施し平均サンプルサイズを計算し、バイアス欠損率、測定精度及び平均サンプルサイズの関係を検討、評価した。

4.3.1 システム概要

統合保障措置においては、大型 MOX 燃料加工施設の同一ストラータを取り扱う箇所をセクターとして設定し、そのセクターの全ての核物質の出入りを非立ち会い NDA にて検認する。この結果からセクター内の核物質の帳簿在庫が更新でき、高頻度で事業者から申告されるセクター内在庫量との比較による在庫検認が可能となる。査察側が更新した帳簿在庫と事業者の申告在庫の間に有意な差異が見られない場合には、非立ち会い NDA にて得られたセクターの核物質の出入り量と事業者の申告在庫量とから、高頻度な NRTA 手段を適用することが可能となる。しかし、この手段において、採用される在庫量は、独立検認により得られた(非立ち会い NDA の測定結果) 出入り量に基づく帳簿在庫との比較は行われているとしても、事業者の申告値であり、査察側としては、何らかの独立した在庫検認が必要となる。

そこで在庫検認を含むランダム中間査察(RII)は、統合保障措置における査察手段として重要であり、従来の月毎に計画された中間在庫検認(IIV)に代わって導入されている。RII は、物質収支期間のランダムに選択された日に、施設内の検認対象となるセクターからランダムに 1 ないしは複数のセクターを選択し、選択されたセクター内に在庫される核物質を母集団としてランダムサンプリングによって選択された核物質を検認するというものである。この時の検認は、大量欠損、少量欠損、及び、バイアス欠損の検知を目的とした測定手段が採用される。

在庫検認データ評価機能は、それぞれの独立した測定手段による査察側の測定値と事業者の在庫

申告値との差異 d を計算し、その有意性を統計学的に評価することによって在庫検認データを評価するものである。

(1) 事業者申告値と検認値との間の差異 d とその累積 D の計算と統計学的評価

それぞれのセクターにおける RII の結果の概念図を図 4.3-1 に示す。それぞれのストラータにおいてランダムな時間軸(時間間隔は一定でない)で、当該物質収支期間にそれぞれ n 個の核物質が選択され測定されたとする。この時に統計量は、以下の通り。

$$\text{統計量 } d = \text{事業者の申告値} - \text{査察側の測定値}$$

ただし、この時の統計量 d は、査察側の測定手段によって複数計算される。

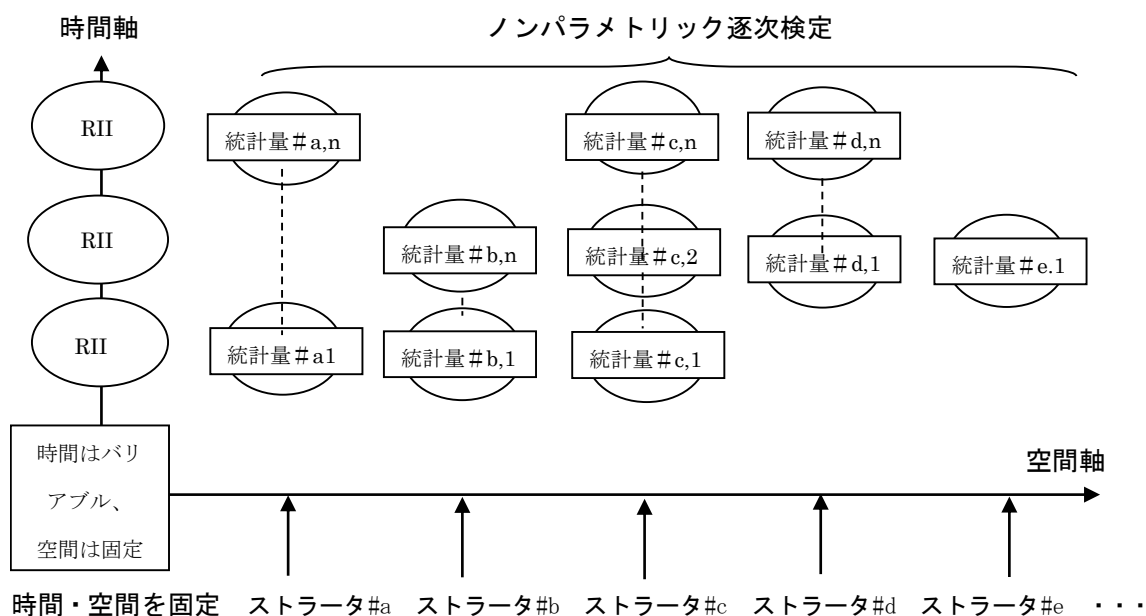


図 4.3-1 RII の在庫検認の概念図

この統計量 d の累積 D を、ISO8423「計量値検査のための逐次抜取方法」を参照して逐次検定する。

$$D = \sum_{i=1}^n d_i$$

ISO8423 規格は、離散的アイテム(個数が数えられるもの)の計量値検査のための逐次抜取方法及び逐次抜取手順を規定している。この規格の目的は、検査結果の逐次審査のための手順を与える(査察結果の逐次検定のための手順を与える)ことである。この手順を使用すれば、悪い品質のロットの不合格という経済的、心理的圧力(転用の検知という抑止効果)を通じて、高い合格の確率が得られるような良い品質のロットの供給(転用を示す兆候が見られないという結論を高い確率で導出する)方向へ、供給者(事業者)を誘導できる。同時に消費者(査察者)は、悪い品質のロットに対しては合

格の確率(転用が発生したロットを見逃してしまう確率)の上限値を規定することによって保護される(検知限界を知ることができる)。

この規格に規定される逐次抜取方法は、次の条件で行われる。

- a) 検認手順が適用されるのは、離散的アイテム(単位体化された核物質)の連続的在庫の同一ストラータであって、たとえ同一のセクターに在庫されていたとしても、生産キャンペーンが異なり、異なる組成の核物質には適用しない(同一組成の核物質にのみ適用)。
- b) 対象統計量は、 D とする。 D は連続的に計算が可能。
- c) 工程は安定しており(ほぼ統計的に管理状態にある)、対象統計量 d の標準偏差は既知($\sigma^2 = \sigma_0^2 + \sigma_1^2$: σ_0^2 は事業者の測定値の分散、 σ_1^2 は査察者の測定値の分散)であり、正規分布または正規分布に近い分布になっていると仮定する。
- d) 差異の累積 D の許容範囲は、上限規定限界、下限規定限界が決まっており、上限を超えた場合、あるいは下限を下回った場合に、警報を発報する。

検認活動は、物質収支期間を通して連続的に(ただし、間隔は一定ではない)実施され、それぞれの時に d_i を得、それまでに得られた d_i の累積 D を逐次検定する。

警報発報の境界条件を決めるために、 ZU (上限規定限界)と ZL (下限規定限界)を計算する。 d_i が正規分布すると仮定するとその確率密度関数は、一般に次の関数で示すことができる。

$$f_{\theta}(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{-\frac{(d_i - \theta)^2}{2\sigma^2}\right\}$$

ここで、 $\sigma = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma_1^2}$

σ_0^2 : 申告値の分散

σ_1^2 : 査察値の分散

として、 d_i に対するそれぞれの尤度を計算し、尤度比 L_{n,θ_0,θ_1} を求めて、第1種の過誤 α 及び、第2種の過誤 β を設定して検定する。

帰無仮説の採択域、棄却域は設定した α 及び β より、

$$\frac{\beta}{1-\alpha} < L_{n,\theta_0,\theta_1} < \frac{1-\beta}{\alpha}$$

として、尤度比がこの間にある時は、検定を続行する。

$f_{\theta}(d)$ の尤度比関数は

$$L_{n,\theta_0,\theta_1} = \prod f_{\theta_1}(d_i) \prod / f_{\theta_0}(d_i) = \exp[\{(\theta_1 - \theta_0) / \sigma^2\} \sum d_i - n(\theta_1^2 - \theta_0^2) / (2\sigma^2)]$$

この対数を取って、

$$Z_{n,\theta_0,\theta_1} = \ln L_{n,\theta_0,\theta_1} = \{(\theta_1 - \theta_0) / \sigma^2\} \sum d_i - n(\theta_1^2 - \theta_0^2) / (2\sigma^2)$$

$$ZL < \sum d_i = D < ZU$$

$$\text{ここで } ZU = n(\theta_1 + \theta_0) / 2 + \{\sigma^2 / (\theta_1 - \theta_0)\} \ln \{(1 - \beta) / \alpha\}$$

$$ZL = n(\theta_1 + \theta_0) / 2 + \{\sigma^2 / (\theta_1 - \theta_0)\} \ln \{\beta / (1 - \alpha)\}$$

$$\theta_1 = (Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta}) \sigma$$

$$\theta_0 = 0$$

$Z_{1-\alpha}$ 、 $Z_{1-\beta}$ はそれぞれ第 1 種の過誤、第 2 種の過誤のパーセント点

上側既定値 ZU 、下側既定値 ZL 及び D を、図 4.3-2 のように表示して、 D が ZU を超えた時、警報を発報して、検定を終了する。

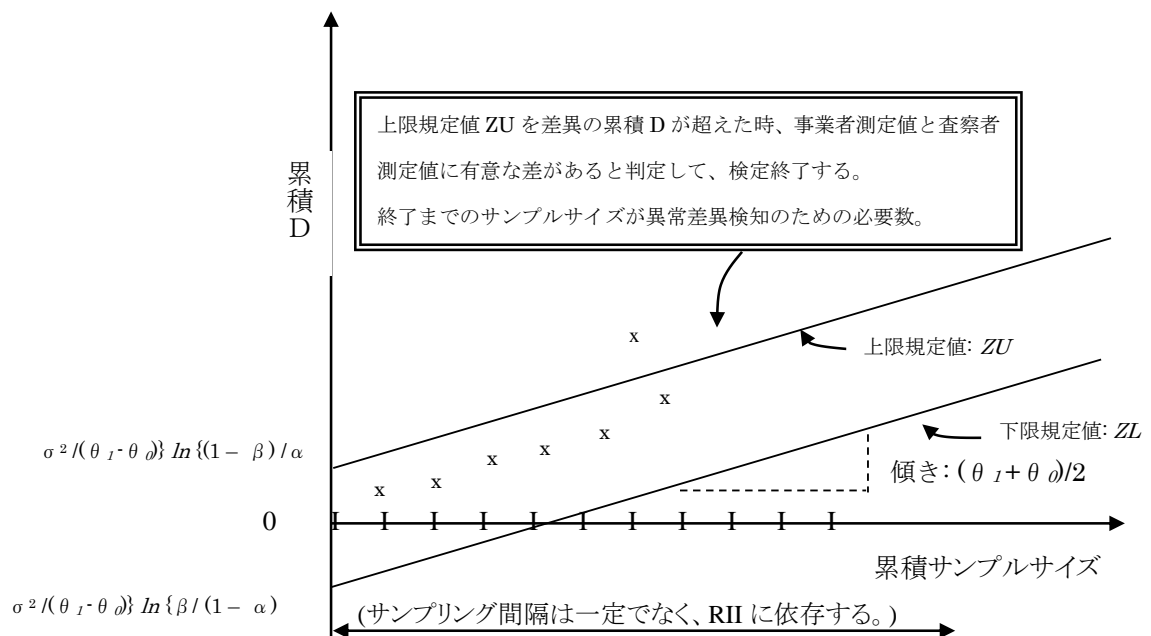


図 4.3-2 逐次検定の事例図

4.3.2 計量ユニットの在庫量分布

工程内の一時保管庫等の在庫量、滞留期間をフローシミュレーションの設定により調整し、その結果を各計量ユニットで整理した。

BWR 燃料製造キャンペーンの運転開始から 1500 時間までの、工程内で一時保管する計量ユニットの保管 Pu 量推移を図 4.3-3 に示した。また、一時保管計量ユニットの工程休止中(平日の午前 0 時から午前 8 時までの期間)の在庫バッチ数を図 4.3-4 に示した。

UNIT2 原料 MOX 粉末缶一時保管設備に保管する MOX 粉末は 50%Pu 富化度であり、運転期間を通じて富化度の変化はない。UNIT11 及び UNIT13 粉末一時保管設備に保管する MOX 粉末は 30%Pu 富化度であり、運転期間を通じて富化度の変化はないが、後工程では UO_2 粉末により製品富化度に希釈するので、後工程で製造する製品富化度に依存して、30%Pu 富化度の MOX 粉末の使用量が変わるため、UNIT13 の MOX 及び Pu 在庫量は、運転期間を通じて変動する。BWR 燃料製造キャンペーンのフローシミュレーションモデルでは 4 種類の製品富化度の燃料を製造するので、あらかじめ設定した運転時間に富化度の切り替えを行い、富化度を高くしているため、UNIT16 の粉末一時保管設備から後の計量ユニットは、富化度の切り替えにより Pu 在庫量が増加していく。在庫バッチ数は富化度の変化による変動はない。UNIT13 までは、運転時間による富化度の変更がないので 1 日(24時間)当たりの平均プルトニウム取扱量を UNIT11 から UNIT12 への移動量から計算すると 15.85kgPu/日であり、BWR 燃料製造キャンペーンでは、62 日間で 982.7kgPu であった。

UNIT28 の製品ペレット一時保管設備の今までのフローシミュレーションモデル設定では、滞留期間を 0.5 時間としており、運転休止中に製品ペレットの保管がされていなかった(図 4.3-3)ので、製品ペレット一時保管設備における製品ペレットの滞留期間を 120 時間に調整してフローシミュレーションを行った。結果を図 4.3-5 に示す。滞留期間を調整したことにより、保管 Pu 量が 1 日 9 バッチ増加して、最大で 45 から 46 バッチの保管バッチ数で推移し、Pu 量では約 100kgPu まで増加した。

モデル工程のフローシミュレーションにおける UNIT13 の粉末一時保管設備の 30%Pu 富化度 MOX 粉末の最大在庫量は、アイテム数が 12 バッチ、Pu 総量が 190kgPu であった。

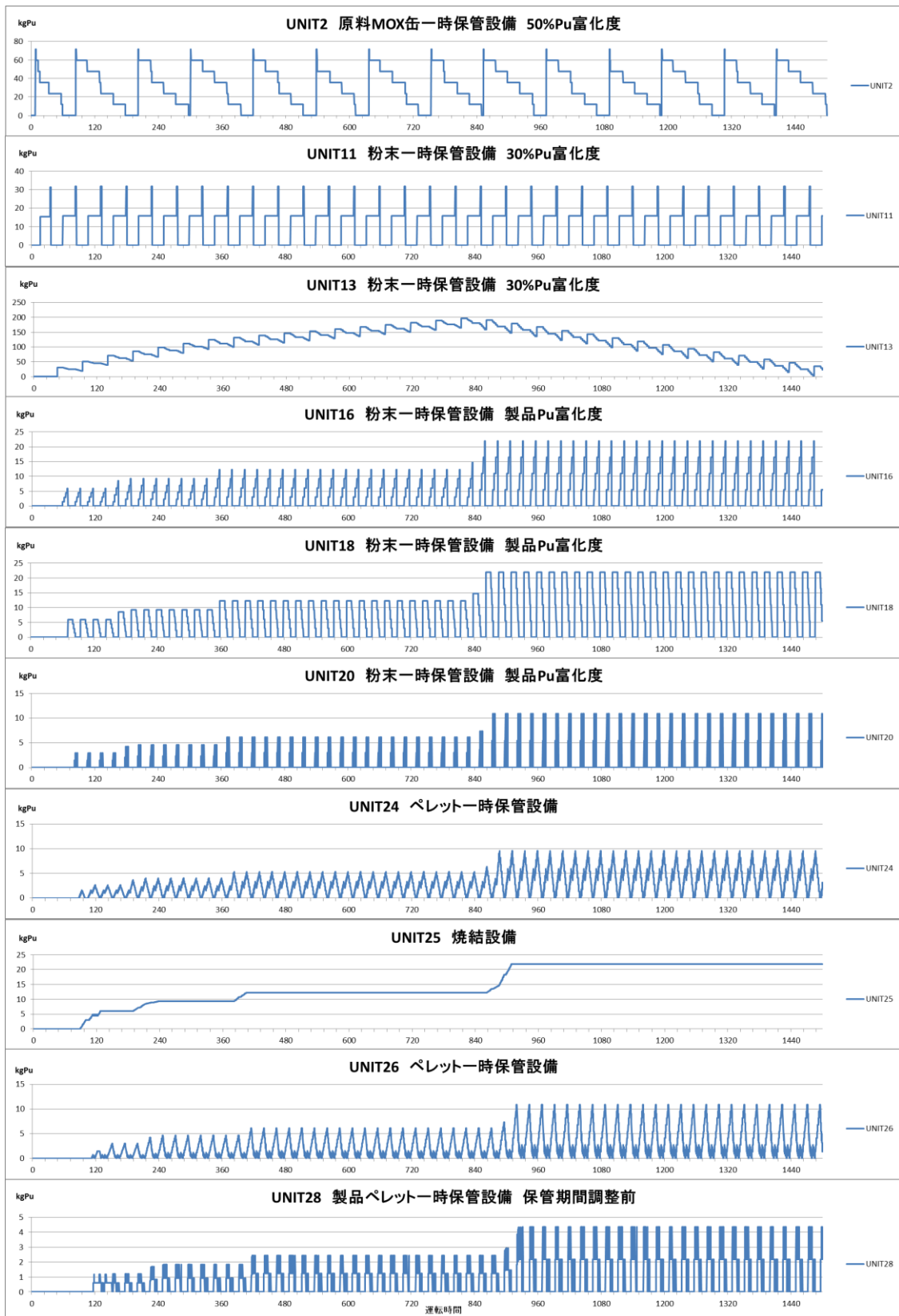


図 4.3-3 各計量ユニットの保管 Pu 量推移

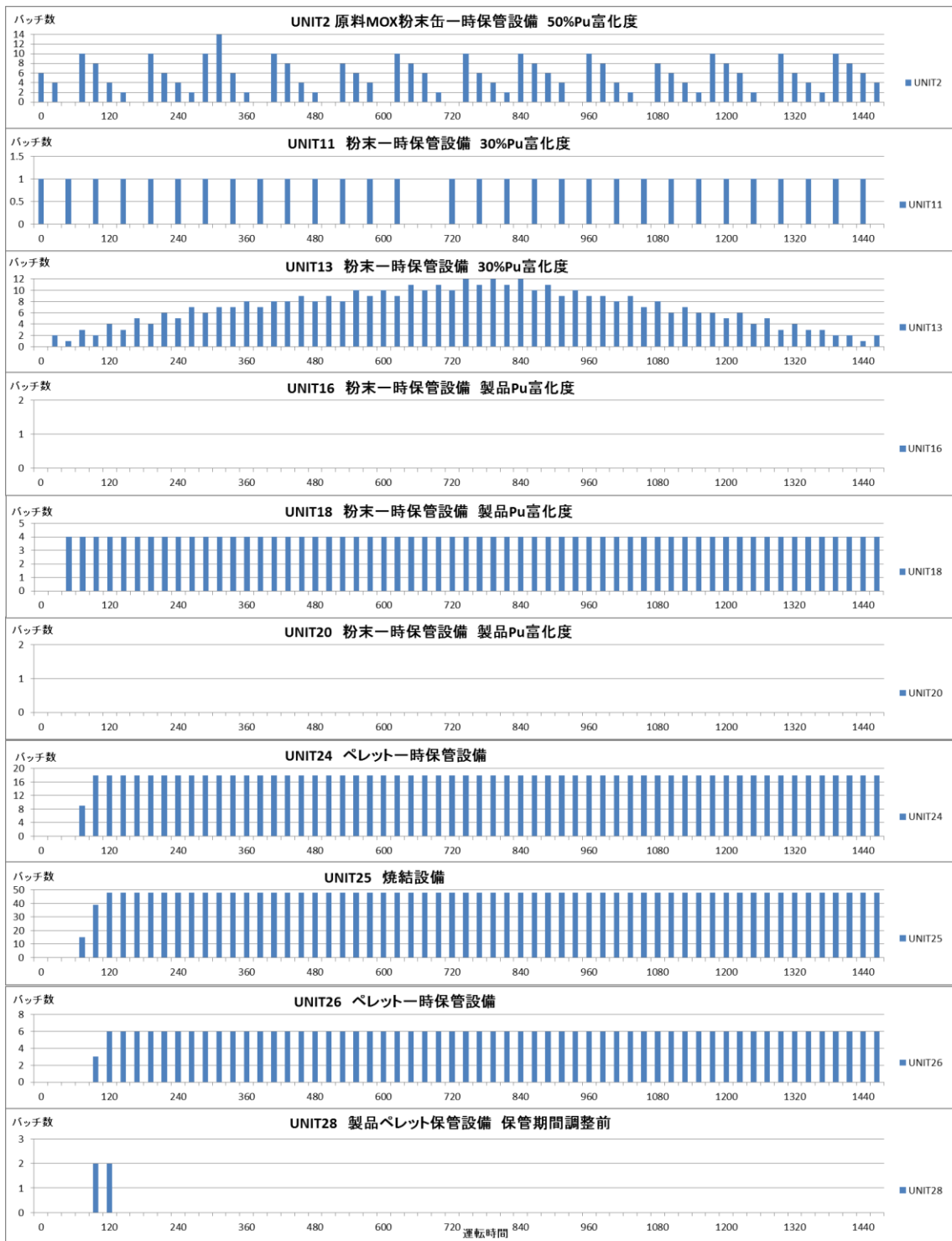


図 4.3-4 各計量ユニットの運転休止中の在庫バッチ数

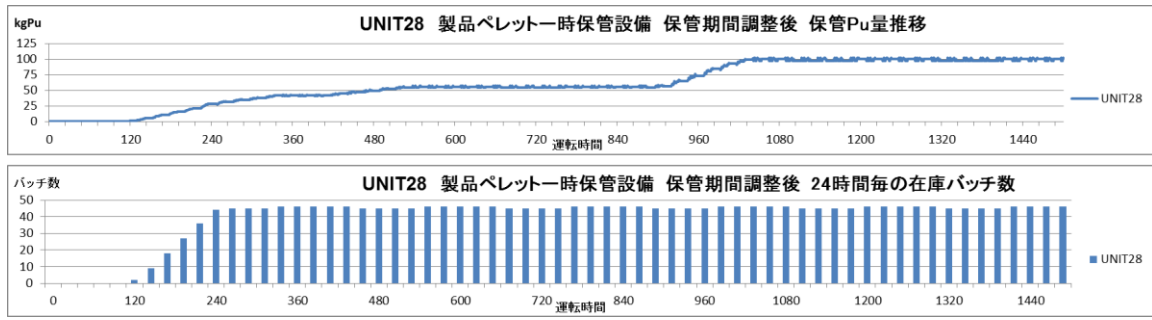


図 4.3-5 保管期間調整後の保管 Pu 量の推移と在庫バッチ数 (製品ペレット一時保管設備)

4.3.3 シミュレーションによる機能の評価

在庫検認プログラムの機能評価として、バイアス欠損率、サンプルサイズ及び測定精度の設定を行い、フローシミュレーションにより模擬した施設側在庫申告値から対応する査察側測定値を作成し、RIIの対象セクターを選択して、施設側申告値との差を累積したDの逐次統計検定を行った。

逐次検定結果について、バイアス欠損率に対して規定限界を超えるサンプルサイズを記録した。査察側測定値作成のための乱数を変更して多数回測定値を作成し、それら測定値の逐次統計検定を繰り返し、規定限界を超えるサンプルサイズの平均値を計算した。計算結果により、バイアス欠損率、測定精度及びサンプルサイズの関係を検討、評価した。

Pu 富化度 30%MOX 粉末を取り扱うセクターにおける RII の回数を、1 キャンペーンに 13 回と想定し、1 回目の RII では 1 個のサンプルを選択し（キャンペーン開始直後は保管量が少ないため）、2 回目以降の RII では 2 個のサンプルを選択することとして、最大 25 個のサンプルを選択した。

選択したアイテムは、施設側の重量計にて重量測定を行い、少量をサンプリングして AVIS で測定することを想定した。

(1) シミュレーションケースの予備検討

バイアス欠損率は、1%、1.5%及び2%の3ケース及び損失の無い場合を検討した。

AVIS のランダム誤差を 0.5%として、システムティック誤差を 1.5%、0.5%、0.1%、0%とした4ケース（査察側測定精度 σ_I : 1.58%、0.71%、0.51%及び0.5%）と、DAの測定精度のターゲットバリューを参照した（ランダム誤差 0.15%、システムティック誤差 0.1%）0.179%の1ケースについて検討した。

シミュレーション結果を図 4.3-6 に示す。全体的な傾向として、欠損率が大きいほど、バイアス欠損を検知するサンプルサイズは少なくなった。また、精度がよくなるほど欠損検知に必要なサンプルサイズは少なくなった。しかし、システムティック誤差が 1.5%のケースでは、欠損率によらず必要なサンプルサイズは 2 となり、他の測定精度の場合と傾向が異なっている。

シミュレーションは各ケース 50 回実施して、50 組の施設申告値及び査察側測定値を作成しているが、この時に計算し直しているのはランダム誤差の大きさだけであり、システムティック誤差については同じ値を使っている。このため、たまたまマイナス側に大きなシステムティック誤差が割り当てられた場合には大きなマイナスのバイアスを持つことになり、施設側申告値と査察側測定値の差がバイアス欠損量以上に大きくなり、1 回目あるいは 2 回目の Σd でバイアス欠損を検知したものと考えられ、欠損を検出したとは考え難い。

これを確かめるため、1.5%のシステムティック誤差を 10 回振り直し、それぞれについて 50 回ランダム誤差を振りなおして 500 回のシミュレーションを各欠損率について実施した結果を表 4.3-1 に示す。500 回のシミュレーションにおけるバイアスを検出した割合は欠損率（1%、1.5%及び2%）に依存し

ていない。欠損が無い場合（欠損率 0%）でも、1.6%の誤警報を發した。また、検出する場合の平均サンプルサイズも 2 未満であり、測定バイアスの影響が大きいと考えられる。このことから査察側 NDA のシステマティック誤差が 1.5%ある場合には、2%程度の欠損を検出することは困難で、検出した場合も誤りである可能性が高い。

バイアス欠損を検知するためには、査察側測定器のシステマティック誤差を小さく管理する必要がある。

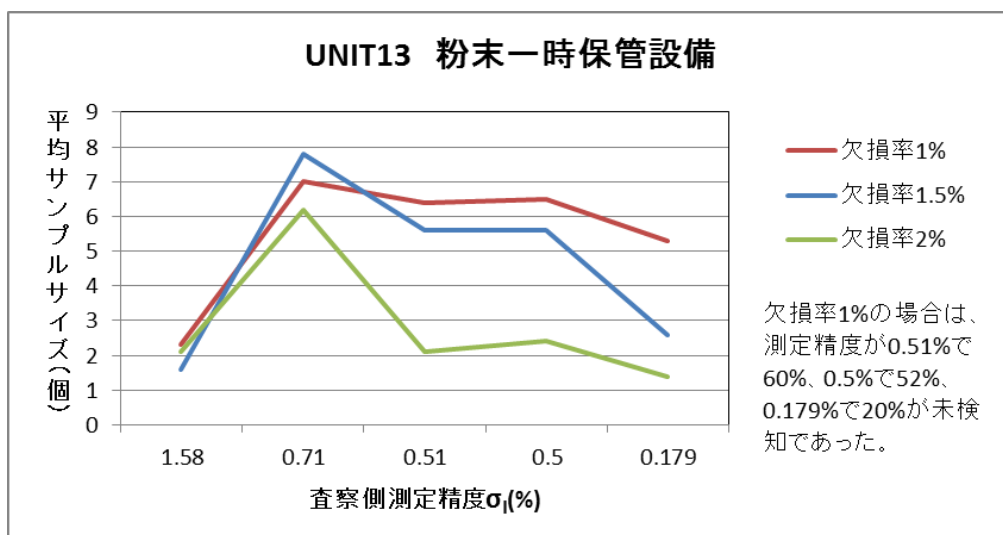


図 4.3-6 シミュレーション結果

表 4.3-1 500 回のシミュレーションにおける検出した回の割合

欠損率	検出率	平均サンプルサイズ
0	1.6%(誤検出率)	1.5
1%	36.2%	1.7
1.5%	14.6%	1.7
2%	30.0%	1.3

システマティック誤差の検討範囲として、ITV を参照した。AVIS と類似の NDA 機器として INVS 及び ENMC の Pu 元素濃度測定の不確かさを参照すると、どちらも 1%である。なお、同位体比測定はどちらの場合も質量分析計を使用している。

また、AVIS を開発した LANL の技術仕様書によれば、システマティック誤差は 0.166%、ランダム誤差は 0.187%で、Total Measurement Uncertainty は 0.25%である。

この 2 種類の参考値から、測定誤差の検討範囲を表 4.3-2 のように設定した。MOX 重量測定については、施設側重量測定器を用いることとして、ランダム誤差 : 0.05%、システマティック誤差 0.05%を用いた。

検討する損失率については、8kgPuの損失量を1か月以内に検知することを目安として、表4.3-3に示したように1日当たりの処理量とそれに対する損失率から損失量を試算して設定した。逐次統計検定で用いる α （見誤る確率）及び β （見過ごす確率）は、 $\alpha=0.05$ 、 $\beta=0.1$ とした。帰無仮説は、 $H_0: \theta_0=0$ 、対立仮説は、 $H_1: \theta_1 > (Z_{1-\alpha} + Z_{1-\beta}) \sigma_D$ とした。

表 4.3-2 測定誤差の検討範囲、ランダム誤差とシステマティック誤差の組み合わせ

検討ケース 番号	AVIS 測定不確かさ			σ_I (kgPu) *1	σ_D (kgPu) *1
	ランダム誤差	システマティック誤差	TMU		
ケース 1-1	1.0 %	1.0 %	1.41 %	0.225	0.253
ケース 1-2	1.0 %	0.5 %	1.12 %	0.178	0.212
ケース 1-3	1.0 %	0.2 %	1.02 %	0.162	0.199
ケース 2-1	0.5 %	1.0 %	1.12 %	0.178	0.212
ケース 2-2	0.5 %	0.5 %	0.71 %	0.113	0.161
ケース 2-3	0.5 %	0.2 %	0.54 %	0.056	0.128
ケース 3-1	0.2 %	1.0 %	1.02 %	0.162	0.199
ケース 3-2	0.2 %	0.5 %	0.54 %	0.056	0.128
ケース 3-3	0.2 %	0.2 %	0.28 %	0.046	0.124

*1：UNIT13の平均アイテム重量を15.85kgPuとした場合の標準偏差

表 4.3-3 損失率の検討範囲（Pu8kgの損失を1か月以内に検知することを目安とする）

損失率 (1日の処理量 15.85kgPu)	1月が22日（1週5 日）操業とした場合の 損失量	1月が30日間の損 失量	1キャンペーンの 損失量
0.814%損失	2.84kgPu	3.87kgPu	8.00kgPu
1%損失	3.49kgPu	4.76kgPu	9.83kgPu
1.5%損失	5.23kgPu	7.13kgPu	14.74kgPu
2%損失	6.97kgPu	9.51kgPu	19.65kgPu
2.5%損失	8.72kgPu	11.89kgPu	24.57kgPu

注：塗りつぶしの欄は損失量が8kgPuを超えている。

(2) シミュレーションによる検討結果

①誤検出

表 4.3-4 及び図 4.3-7 に欠損量が0の場合の各ケースの誤検出率を示す。システマティック誤差が1%のケース（1-1、2-1、3-1）では、誤検出率が20%程度となる傾向があった。これは

(1)の予備検討でも述べたように、マイナス側に大きなシステムティック誤差がシミュレーションで割り当てられた場合に検出されたと考えられる。また、ランダム誤差が小さい0.2%のケース3(3-1、3-2、3-3)でも、誤検出が他のケースよりも高くなった。逐次検定の上側規定限界の設定には査察側測定精度と施設側測定精度が用いられるので、査察側測定精度が小さくなれば上側規定限界も低くなる。これにより、施設側測定精度、特にサンプリングのランダム誤差(0.7%)が、シミュレーションにより計算した累積Dの支配的な要素となる。サンプリングのランダム誤差がプラス側に大きい場合に、累積Dが大きくなり、それを欠損として誤検出するものと考えられる。

表 4.3-4 各ケースの欠損検出率 (各ケース 500 回シミュレーションの内、上限規定値を超えた回の百分率)

欠損率	欠損検出率(%) (欠損率 0 の場合は誤検出率)								
	ケース 1-1	ケース 1-2	ケース 1-3	ケース 2-1	ケース 2-2	ケース 2-3	ケース 3-1	ケース 3-2	ケース 3-3
0	20	6	1	18	8	12	25	20	12
0.814 %	43	32	22	61	57	57	38	52	68
1.0 %	41	42	24	43	67	66	33	62	81
1.5 %	61	59	71	33	78	96	56	82	99
2.0 %	62	90	97	59	95	100	71	98	100
2.5 %	95	100	100	81	100	100	83	100	100

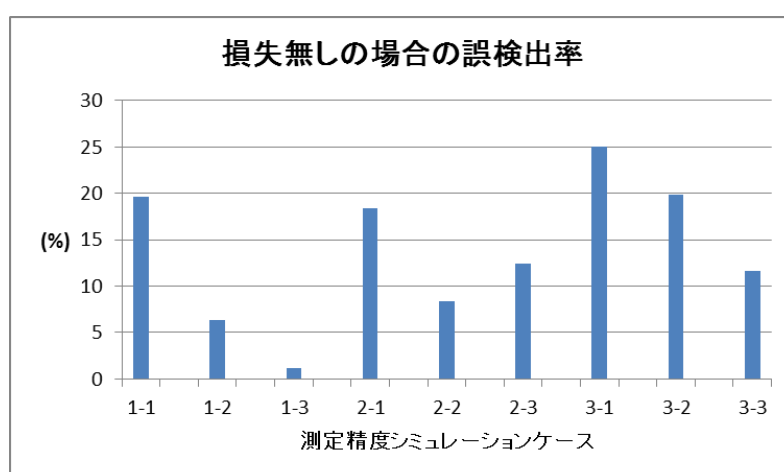


図 4.3-7 損失無しの場合の誤検出率

②欠損率と検出率

表 4.3-4 に欠損率に対する各ケースの検出率を示す。ここで、検出とは1連の逐次統計検定において 25 個目までのサンプルに対する累積 D が上限規定限界を超えたことを意味する。欠損率の 0.814%は表 4.3-3 に示したように 1 キャンペーンの期間に 8kgPu の欠損量があるのと同等である。査察側測定 of ランダム誤差及びシステムティック誤差がそれぞれ 0.5%以下であれば 50%以上の検出率で 0.814%以上の欠損を検知することができた。

ランダム誤差が 1%のケース 1 (1-1、1-2、1-3) の欠損率と検出率の関係を図 4.3-8 に示す。システムティック誤差が 1%のケース 1-1 では、欠損率の増加と検出率の増加がはっきりとした相関を示していないが、システムティック誤差が 0.5%及び 0.2%のケース 1-2 及びケース 1-3 においては、欠損率が増加するにしたがって検出率は増加した。2%以上の欠損率では検出率は 90%以上であった。

ランダム誤差が 0.5%のケース 2 (2-1、2-2、2-3) の欠損率と検出率の関係を図 4.3-9 に示す。システムティック誤差が 1%のケース 2-1 では、欠損率の増加と検出率の増加がはっきりとした相関を示していない。システムティック誤差が 0.5%及び 0.2%のケース 2-2 及びケース 2-3 においては、欠損率が増加するにしたがって検出率は増加した。システムティック誤差が 0.5%より小さい場合には、2%以上の欠損であれば 90%以上の検出率が得られた。

ランダム誤差が 0.2%のケース 3 (3-1、3-2、3-3) の欠損率と検出率の関係を図 4.3-10 に示す。システムティック誤差が 1%のケース 3-1 では、欠損率 1%以上を見れば欠損率の増加とともに検出率が増加している。システムティック誤差が 0.5%及び 0.2%のケース 3-2 及びケース 3-3 においては、欠損率が増加するにしたがって検出率は増加した。システムティック誤差が 0.5%より小さい場合には、2%以上の欠損であれば 98%以上の検出率が得られた。

システムティック誤差 0.2%、ランダム誤差 0.5%以下の場合には、1.5%の欠損を 96%以上で検出することができた。1.5%の欠損は、30 日間に 7.13kgPu の損失に相当する。

上記結果を、同じシステムティック誤差毎にプロットし直して、図 4.3-11、図 4.3-12 及び図 4.3-13 に示した。繰り返しになるが、図 4.3-11 のシステムティック誤差 1%の場合には、欠損率が 2.5%では欠損率の増加により検出率が増加しているが、欠損率が 2%以下では、その傾向は明確ではない。システムティック誤差が大きい場合には、バイアス欠損を高い確率で検知することができない。

図 4.3-12 及び図 4.3-13 に示したように、システムティック誤差が小さい場合には、欠損率の増加とともに検出率は増加し、バイアス欠損を 90%以上の確率で検出することができる。

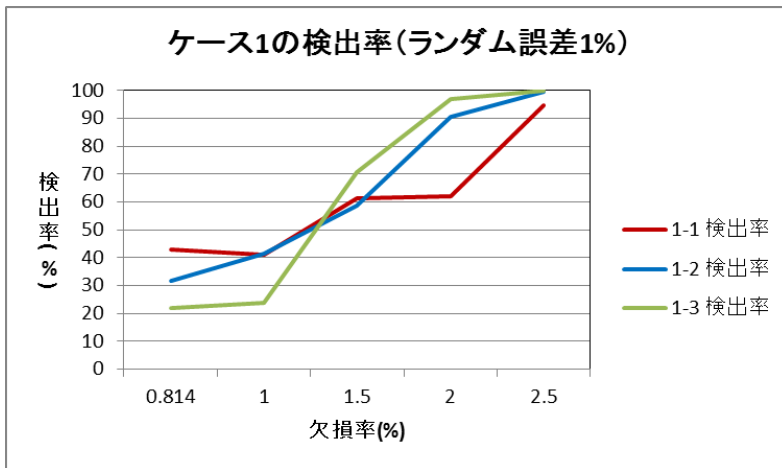


図 4.3-8 ケース 1 (ランダム誤差 1%) の欠損率に対する検出率

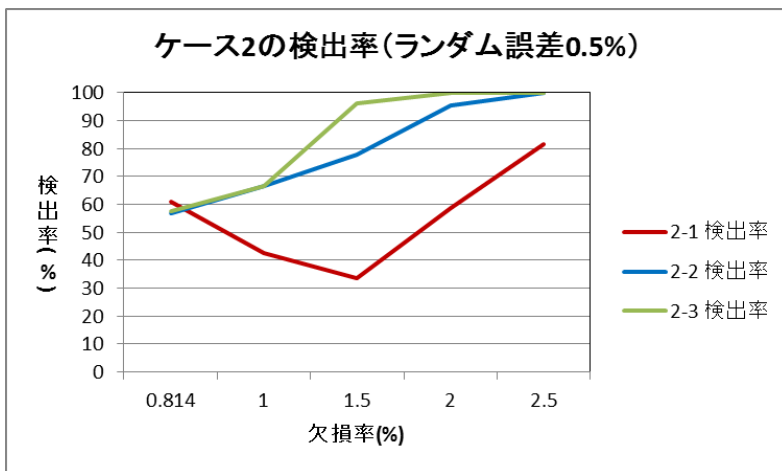


図 4.3-9 ケース 2 (ランダム誤差 0.5%) の欠損率に対する検出率

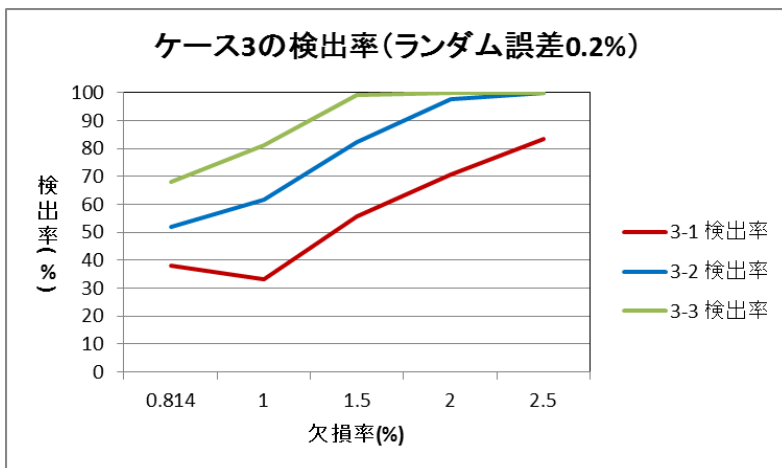


図 4.3-10 ケース 3 (ランダム誤差 0.2%) の欠損率に対する検出率

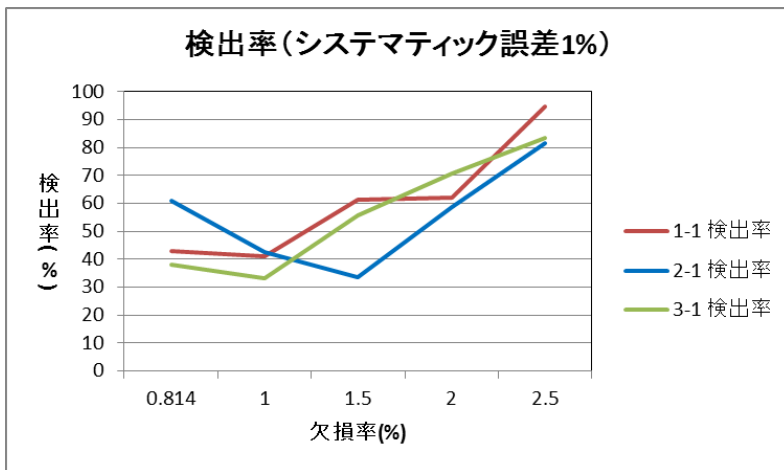


図 4.3-11 システマティック誤差 1%の場合の欠損率に対する検出率

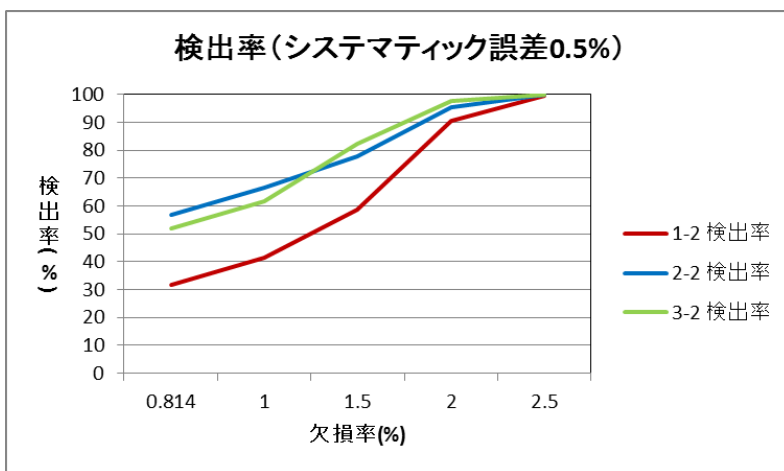


図 4.3-12 システマティック誤差 0.5%の場合の欠損率に対する検出率

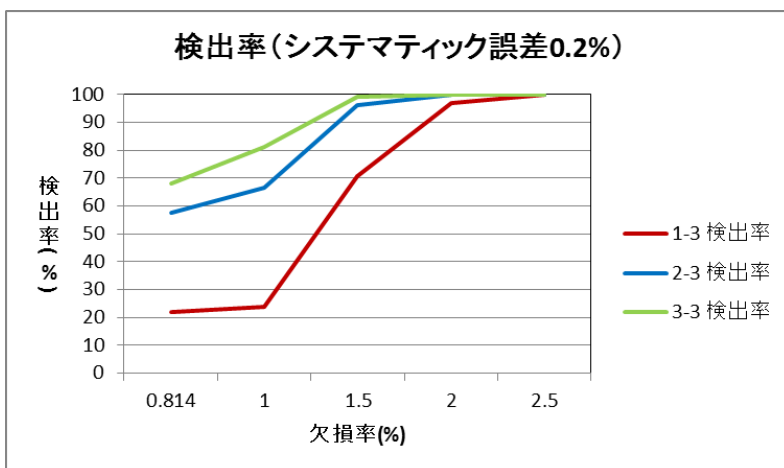


図 4.3-13 システマティック誤差 1%の場合の欠損率に対する検出率

③欠損率と平均サンプルサイズ

表 4.3-5 に欠損率に対する各ケースの平均サンプルサイズを示す。平均サンプルサイズは、1 連の逐次統計検定において 25 個目までのサンプルに対する累積 D が上側規定限界を超えるまでのサンプル数の平均であり、25 個目までに上側規定限界を超えなかった場合、つまり、検知しなかった場合には平均算出には使用していない。

ランダム誤差が 1% のケース 1 (1-1、1-2、1-3) の欠損率と平均サンプルサイズの関係を図 4.3-14 に示す。ケース 1 の場合は 25 回までの検出率が低いことも関係して、検出した場合だけの平均サンプルサイズは、欠損率とはっきりとした相関を示していない。

ランダム誤差が 0.5% のケース 2 (2-1、2-2、2-3) の欠損率と平均サンプルサイズの関係を図 4.3-15 に示す。ケース 2 の場合は、検出率が低かったシステムティック誤差が 1% のケース 2-1 を除き、欠損率の増加とともに平均サンプルサイズは小さくなった。

ランダム誤差が 0.2% のケース 3 (3-1、3-2、3-3) の欠損率と平均サンプルサイズの関係を図 4.3-16 に示す。ケース 3 の場合は、検出率が低かったシステムティック誤差が 1% のケース 2-1 を除き、欠損率の増加とともに平均サンプルサイズが減少する傾向が見られた。

上記結果を、同じシステムティック誤差毎にプロットし直して、図 4.3-17、図 4.3-18 及び図 4.3-19 に示した。繰り返しになるが、図 4.3-17 のシステムティック誤差 1% の場合には検出率が低いため、欠損率と平均サンプルサイズとの相関は見られないので、検出目標に対する必要サンプルサイズを設定する参考にならない。

図 4.3-18 及び図 4.3-19 に示したように、システムティック誤差が 0.5% 以下、ランダム誤差も 0.5% 以下の場合には、欠損率の増加とともに平均サンプルサイズが小さくなる傾向が見られた。このことから、システムティック誤差及びランダム誤差がともに 0.5% 以下で査察側が測定できるのであれば、検出目標の欠損率に対する必要サンプルサイズの設定に平均サンプルサイズを参考に用いることができる。

表 4.3-5 各ケースの平均サンプルサイズ (損失を検知した回の累積サンプルサイズの平均個数)

欠損率	平均サンプルサイズ (個)								
	ケース 1-1	ケース 1-2	ケース 1-3	ケース 2-1	ケース 2-2	ケース 2-3	ケース 3-1	ケース 3-2	ケース 3-3
0	2.0	2.1	2.0	5.1	4.9	1.2	1.5	1.7	1.2
0.814 %	2.0	3.7	3.4	4.5	5.4	2.5	1.5	1.8	2.5
1.0 %	1.9	4.3	2.9	3.0	4.5	2.5	1.6	2.2	2.6
1.5 %	2.2	4.2	4.9	3.8	3.4	2.3	1.5	1.8	1.9
2.0 %	2.2	4.2	4.3	3.3	2.0	1.4	1.5	1.7	1.2
2.5 %	3.0	2.9	2.4	3.2	1.4	1.1	1.5	1.2	1.1

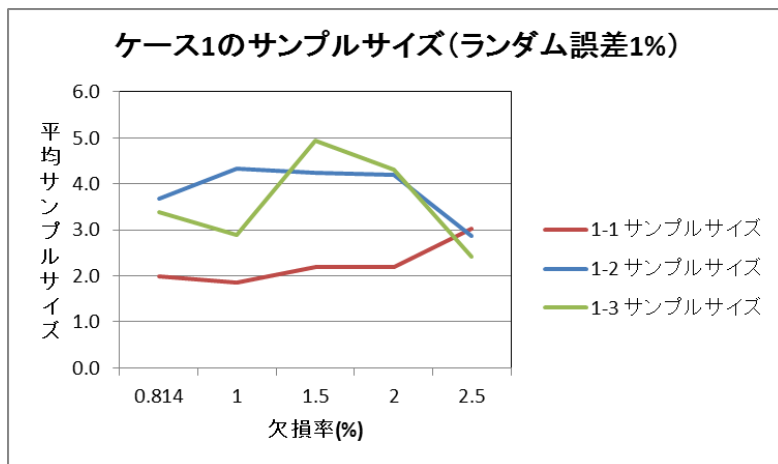


図 4.3-14 ケース 1 (ランダム誤差 1%) の欠損率に対する平均サンプルサイズ

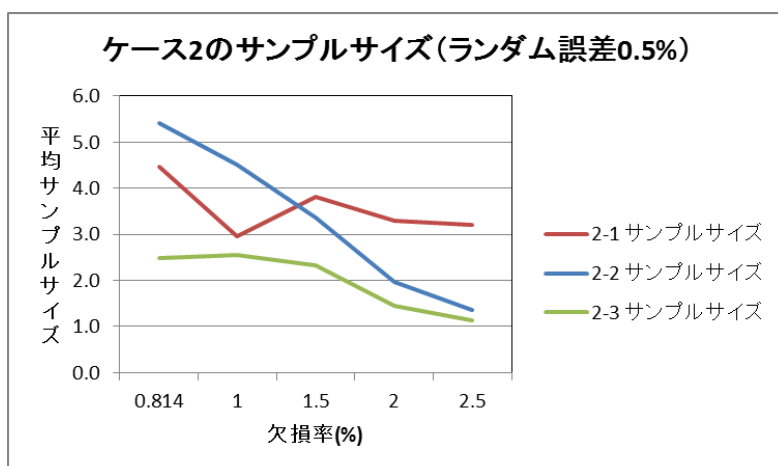


図 4.3-15 ケース 2 (ランダム誤差 0.5%) の欠損率に対する平均サンプルサイズ

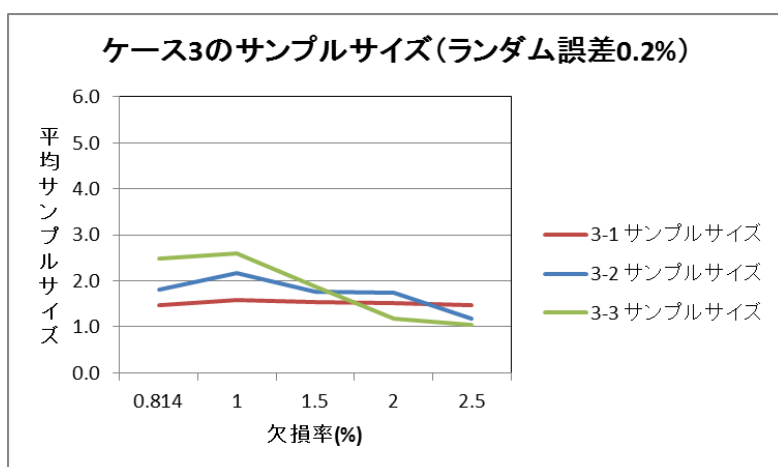


図 4.3-16 ケース 3 (ランダム誤差 0.2%) の欠損率に対する平均サンプルサイズ

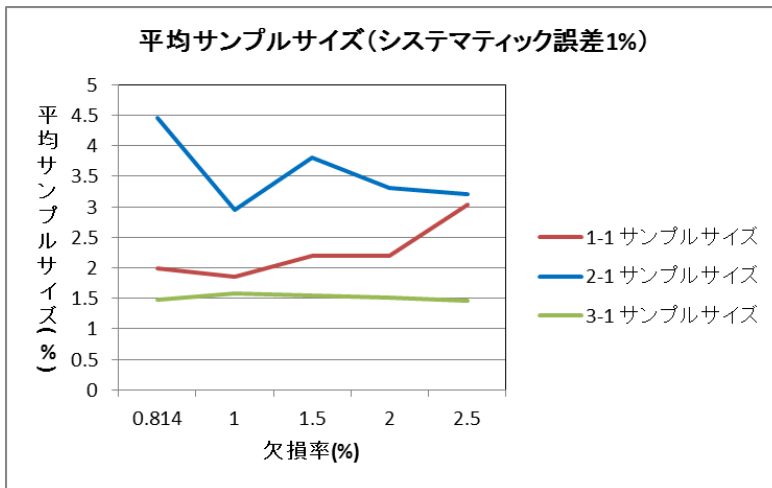


図 4.3-17 システマティック誤差 1%の場合の欠損率に対する平均サンプルサイズ

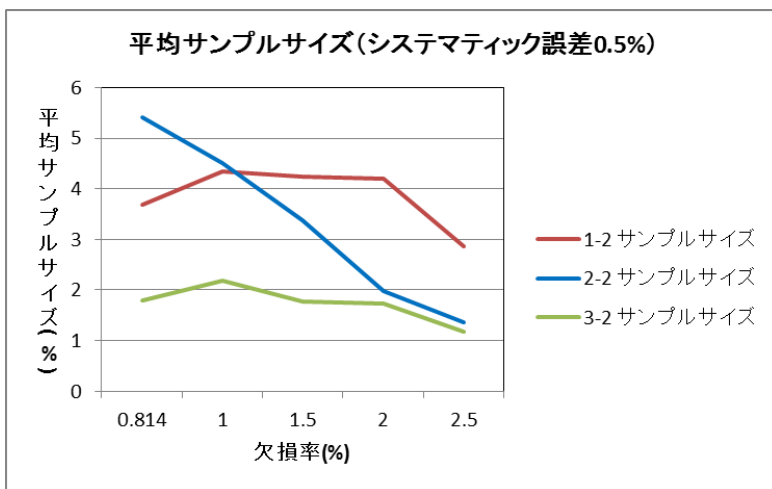


図 4.3-18 システマティック誤差 1%の場合の欠損率に対する平均サンプルサイズ

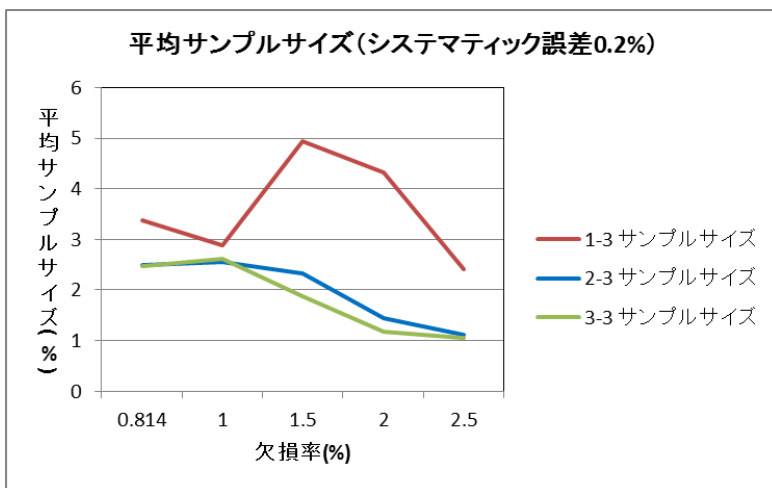


図 4.3-19 システマティック誤差 1%の場合の欠損率に対する平均サンプルサイズ

(4) まとめ

- ① システマティック誤差が大きい場合 (1%以上) は、誤検出率が 20%程度となる傾向があった。また、査察側測定 of ランダム誤差が小さいケースでも、逐次検定の上側規定限界が低くなり、サンプリング of ランダム誤差 (0.7%) を欠損として誤検出する場合があった。
- ② システマティック誤差が 1% のケースでは、欠損率の増加と検出率の増加は明確な相関を示さなかった。システマティック誤差が大きい場合には、欠損率が大きくても、検討した範囲ではそれを高い確率で検知することはできなかった。
- ③ システマティック誤差が小さい場合 (0.5%以下) には、欠損率の増加とともに検出率は増加し、バイアス欠損を高い確率で検出することができる。システマティック誤差 0.2%、ランダム誤差 0.5% 以下の場合には、1.5% の欠損 (30 日間に 7.13kgPu の損失に相当) を 96% 以上で検出することができた。
- ④ システマティック誤差 1% の場合には検出率が低いため、欠損率と平均サンプルサイズとの相関は見られないので、検出目標に対する必要サンプルサイズを設定する参考にならない。システマティック誤差が 0.5% 以下、ランダム誤差も 0.5% 以下の場合には、欠損率の増加とともに平均サンプルサイズが小さくなる傾向が見られることから、査察側がこのような精度で測定できるのであれば、検出目標の欠損率に対する必要サンプルサイズを設定する時に、平均サンプルサイズを参考にすることができる。
- ⑤ 在庫検認データ評価機能をモデル施設のフローシミュレーションによる模擬在庫データを用いて評価した結果、査察側測定器のシステマティック誤差が 0.5%、ランダム誤差が 0.5% よりも良い測定精度で、1 キャンペーン中 (1500 時間) に 6 サンプル以上測定すれば、BWR の 1 キャンペーン (モデル施設のフローシミュレーションにおいて) を通じたバイアス欠損を 50% 以上の確率で検知することが可能であった。このような条件下では、RII 時の在庫検認サンプルの現場における測定結果について、逐次検定の手法を用いた評価が可能であると考えられる。

付録 1 MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の測定手順書 (案)

MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の測定手順書 (案)

1. MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA)

MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA : Improved Plutonium Canister Assay System) は、大型 MOX 燃料加工施設 (以下、「JMOX」という。) の MOX 原料粉末貯蔵区域において、以下にあげる機能を有する査察官非立会型の非破壊測定機器の開発を目的に設計・製作された。

- ① 原料粉末が充填された MOX 缶入りの MOX 原料粉末容器 (充填キャニスター) 内のプルトニウム質量をバイアス欠損レベルの精度で測定する。
- ② 六ヶ所再処理施設 (RRP) に払い出されるキャニスターに MOX 原料粉末が充填されていないこと (空であること) を確認する。

IPCA は、中性子検出器 (^3He 管)、3 台の電気冷却式高純度ゲルマニウム検出器 (ガンマ線検出器)、荷重変換器 (ロードセル) 及びキャニスター ID 確認用のカメラ (JMOX に設置時に IAEA が NGSS : New Generation Surveillance System を提供予定) で構成される。RRP から充填キャニスターを受け入れたとき、RRP への空キャニスターを返還するとき、及び査察時 (PIV 及び RII) に測定を実施する。RRP に返還される MOX 缶には、JMOX の工程へ払い出した後の残留粉が缶内壁面に付着している可能性がある。なお、キャニスター受入時には 30 分間、払出時には 15 分間の測定時間が確保される予定である。

以上述べた IAEA が要求する技術的な要件及び測定精度の詳細は、User Requirements (SG-EM-IPCA-UR-0001) (参考資料 1) に記載されている。なお、同文書は、IAEA が作成し、IAEA、JSGO、JNFL 及び NMCC で構成される JMOX の JTC (Joint Technical Meeting) において議論・承認されたものである。

2. システム構成

2.1. 中性子検出器

中性子検出器は、キャニスター中の MOX 原料粉末の水分量を検知することを目的として、図 1 に示すように ^3He 管の 2 重リング状構造をもつ。内側リングにはポリエチレンが配置されておらず、外側リング (24 本の ^3He 管で構成) にはポリエチレンが配置されている。内側リングの ^3He 管のガス圧は 4 気圧、外側リングでは 7.5 気圧である。受け入れ MOX 粉末中のアメリシウムによる中性子放出増加を考慮し、RRP に設置されている類似の装置 i-PCAS (Improved Plutonium Canister Assay System) よりも検出効率が低くなるように設計されている。また、外側リングの ^3He 管にはカドミウム薄板を設置し、検出効率の垂直方向の平坦化を行っている。

本検出器からの測定データは将来的には、現在 IAEA で検討中の同時計数装置 (PTR-32 が有力候補として 2014 年 11 月時点で IAEA から報告された) と PC の両方の機能を兼ね備えたシス

テムに送られる。当初は IAEA が開発していた UNAP (The Universal NDA Data Acquisition Platform) を使用予定であったが、コスト面の問題から使用が中止となった。本試験用には JSR-15 を同時計数装置として PC に接続して使用している。そのため、本測定手順書案では、現在使用している JSR-15 使用時の解析について説明する。(PTR-32 等を使用する場合は、該当箇所を修正)

中性子検出器のデータ解析には解析ソフトウェア INCC (the LANL International Neutron Coincidence Countin) が使用されるが、デッド・タイムパラメータは $a = 0.2065 \mu\text{s}$ 、 $b = 0.0426 \mu\text{s}^2$ と設定する。ゲート幅は $24 \mu\text{s}$ と設定する。(参考文献 2 の 22~23 ページ参照)

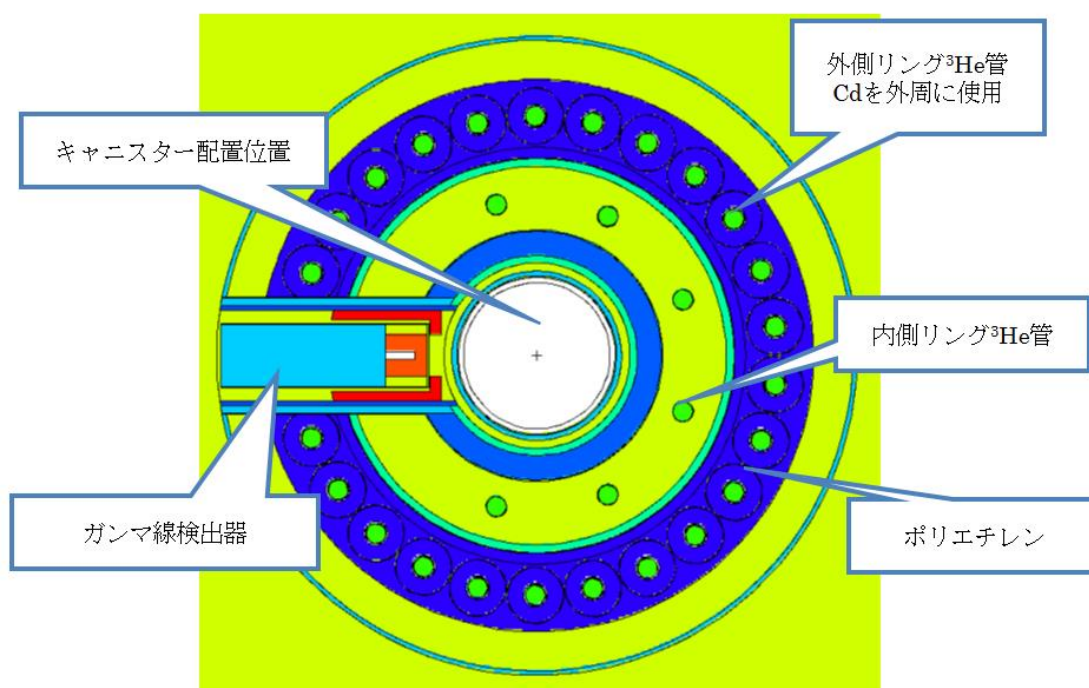


図 1. ^3He 管の配置図

2.2. ガンマ線検出器

ガンマ線検出器は ORTEC 社製の SGD-GEM-5050P4 シリーズの検出器を使用し、非立ち合いでの使用が前提であるため、同社製の電気冷却装置 X-Cooler II を採用している。電氣的なノイズの影響などを低減するため、IPCA 本体にガンマ線検出器を取り付ける際は特殊な静電気防止プラスチックを用いている。

検出器からの信号は、ORTEC 社製の計数装置 DSPEC Plus Digital Gamma-Ray Spectrometer で処理され、PC 上に波高スペクトルが描写される。波高スペクトルの解析には、MGA (Gamma-ray Multi-Group Analysis) コード及び FRAM (Fixed-Energy Response-Function Analysis with Multiple Efficiency) コードが用いられており、最終的には IAEA と合意したソフトウェアが使用されることになる。また、X-Cooler II については、現在

2015年3月現在、そのシステムの不安定さが問題になっており、今後、IAEAはシステムの変更を要請してくる可能性がある。

2.3. ロードセル

ロードセルは共和電業の引っ張り型ロードセルLTZ-500KA(定格容量5kN)を採用している。

2.4. IDカメラ

本カメラについては、IAEAから提供されるNGSSを利用する。なお、オーセンティケーション及びカメラのポジションの関係から、カメラの設置後に取り付けるカバーがある。

2.5. 不正開封防止(Tamper-Proof)

IPCAは非立会型であるので、IAEAから、不正開封防止のための措置をIPCAに講ずる必要があるとの見解が示されている。中性子検出器、ロードセル、IDカメラは円柱の筐体とセキュリティカバーによって包含され不正開封防止措置が講じられている。一方、ガンマ線検出器は、カバー等に覆われておらず容易にアクセスが可能な状態になっている。そのため、図2左図のような不正開封防止用の金属製の箱の設置を検討することがIAEAと合意されている。この箱の設計はIAEAがガンマ線検出器の仕様を決定した後に開始する。

IPCAの各装置とローカルキャビネット内の計数装置等の信号処理端末をつなぐ電源ケーブル及び信号線(暗号化されているものは除く)には保障措置用コンジットを取り付けることをIAEAは要求している。このため、図2右上図のように、円柱筐体の底蓋(ボトムプレート)の内側とセキュリティカバー内にコンジット取付用支持盤が設置されている。ガンマ線検出器への不正開封防止用の箱を設計するときには、このコンジット取付用支持盤の設置を考慮する必要がある。電気冷却装置の冷媒ホースに対してはコンジット導入が要求されていない。

IPCAの各装置及びケーブルに講じる不正開封防止用措置は、代替措置(例えば、装置が設置されている部屋に封印を取り付ける)が事業者及びIAEAとの合意の上で可能となれば不要になると考えられる。

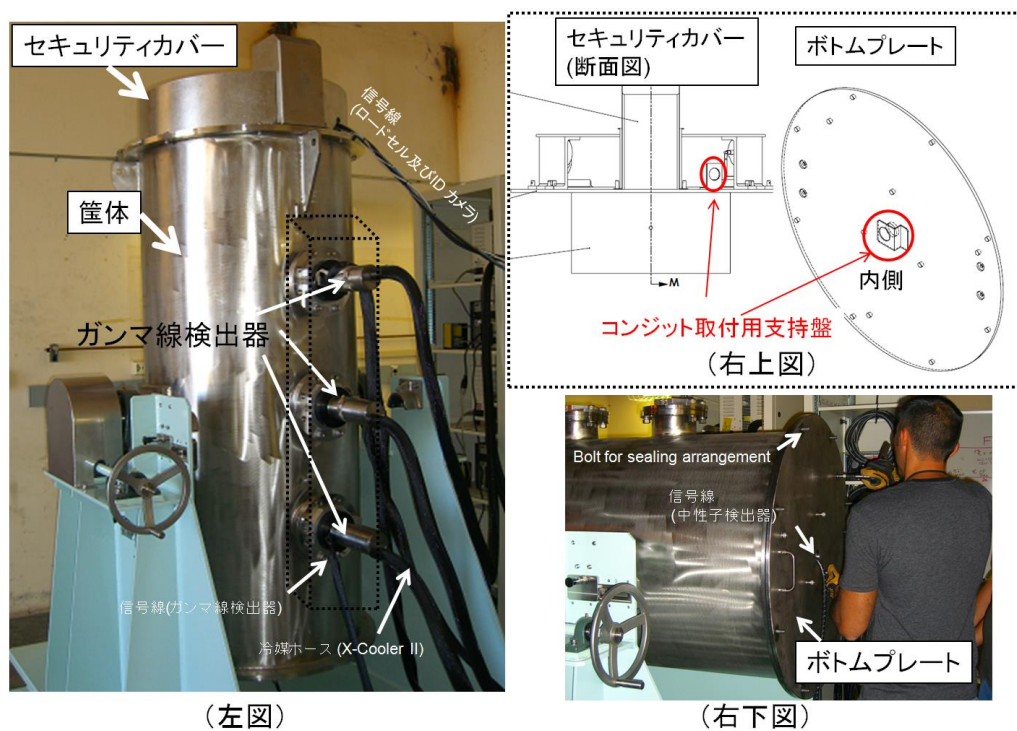


図 2. IPCA の外観

2.6. 回転機能

IPCA の中性子検出器に使用されている ^3He 管の長さは、長いもので約 1.6 m ある。 ^3He 管の交換が必要な場合には当該管を引っ張り出すことになるが、検出器の上側か下側かにその長さ分だけ空間を確保することは困難である。そのため、IPCA 本体が回転（図 2 左に示す立起し状態から図の横倒し状態に）できるよう設計されている。

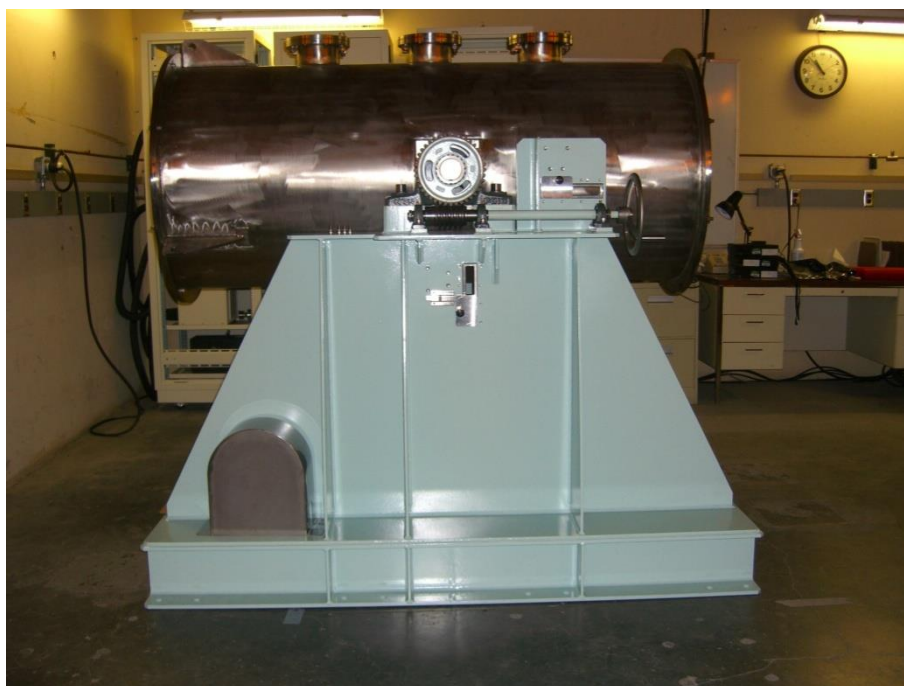


図 3. 回転時の IPCA (中性子検出器のみ)

3. 点検手順

施設設置後に本機器が適切に組み上げられた否かを確認するため動作確認を行う。中性子検出器については、まずバックグラウンド測定を行い、次に Cf 線源を測定し検出効率の確認を行う。Cf 線源を検出器内に配置するために、LANL が製作・使用している専用治具を提供してもらい使用する。ガンマ線検出器についても Cf 線源を測定することで動作確認を行う。ロードセルについては、IAEA が認定する重錘で動作確認を行う。(中性子検出器の正常な動作を行っているか否かの確認には、参考文献 2 の 25 ページを参照する。)

なお、設置後は、以下の定期メンテナンス管理が想定される。

- ✓ 年 1 回程度(PIV 時等)の Cf 線源を使用した中性子及びガンマ線検出器の健全性確認
- ✓ 年 1 回程度(PIV 時等)の重量計(ロードセル)の健全性確認
- ✓ 月 1 回程度の定期的な校正用の MOX 原料粉末による確認(校正用の MOX 粉末確保については関係者間の調整が必要)

4. 校正手順

IPCA 設置後に、初期校正式の作成を実施する。必要な校正式は、中性子数からプルトニウム量に変換する校正式とガンマ線からプルトニウム同位体組成比を算出する校正式の 2 つである。これらの校正式を作成するために、プルトニウム量と同位体組成比が既知の標準サンプルを使用する。この既知の標準サンプルは、実際に測定するプルトニウム量の範囲のものを使用する。標準サンプル数は、可能ならば、統計的な観点から 5 つ以上が望ましい。校正式の作成手順は以下

のとおりである。

- ① 複数の標準サンプルを約 30 分×3 回をそれぞれ中性子数(増倍補正済みダブル値)のデータを取得する。
- ② ①のデータを用いて最少 2 乗法による単回帰式を作成する。
- ③ 作成した単回帰式の回帰係数の検定等により性能評価を実施する。同時に回帰式の計数に係わる測定誤差を計算する。

5. 定期的な健全性確認(ノーマリゼーション)

ノーマリゼーションとは、月 1 回程度の定期的な NDA 機器及び校正式の健全性を確認するものである。具体的には、初期校正時に使用した標準サンプルを使用して定期的に健全性確認を実施する。そのため、使用する標準サンプルの確保が事前に関係者間で議論をする必要がある。

5.1. 中性子検出器

年に一回 (LANL の推奨頻度であり、施設の運転等を考慮し IAEA との合意が必要) 以上の頻度で実施すべきノーマリゼーション手順は、LANL が設計・製作した、線源を IPCA の測定のために MOX 原料粉末容器を収納する場所へ入れるための道具 (参考文献 2 の 56 ページ参照) を使用して、 ^{252}Cf 線源 (LANL 推奨) を IPCA の収納箇所に設置し、測定を行う。初期校正時のデータから算出した測定誤差を使用して有意水準 1%程度で評価を行う。なお、この線源を使用する健全性確認は、IAEA 及び日本側の査察官の立会いの下で実施する。

可能であれば、RRP の iPCAS で月に一回健全性確認で使用している標準 MOX 粉末を使用して JMOX の IPCA の確認をすることが望ましい。

5.2. ガンマ線検出器

年に一回、 ^{57}Co などのガンマ線源を使用し、半値幅 (FWHM) のパラメータの確認を行う (参考文献 2 の 27 ページ参照)。施設に設置後は、リファレンスキャニスター (査察側が検認し、その後知識の連続性 (CoK) が維持されたもの) を定期的に測定し、Pu 同位体組成比の測定結果が初期測定の結果と比べて大きく値が異なっていないことを確認する。

5.3. ロードセル

校正された重錘を使用し、参考文献 2 の 30~31 ページの手順に従い、校正を行う。

ロードセル自身の再設定が必要になった場合には、ロードセルのマニュアルに従い再設定し、再度、校正された重錘を使用し、参考文献 2 の手順に従い、再校正する。

5.4. ID カメラ

ID カメラについては、その映像の状況を確認し、キャニスターの ID が読み取れるかどうかの確認を行う。

6. 非立会測定

IPCA 及び査察用キャビネットが設置されている場所は、線量が高く、被爆の観点から立ち合いが難しく、MOX 原料粉末容器の測定は非立会で実施される。

非立会で実施された測定のデータは、IAEA が提供する機器（中性子検出器では同時計数装置、ガンマ線検出器にはデジタルスペクトルアナライザ LYNX、ID カメラは NGSS、ロードセルは IAEA に確認が必要）により電子署名付きで暗号化され、インターネット経由で IAEA のサーバーに保管される。暗号化されたデータを復号するために電子署名や公開鍵の交換が必要になる。そのため、事前に IAEA と日本との間で暗号化に関する事前合意が必要となる。これらの測定データは、IAEA とのデータ共有ポリシー（Data Sharing Policy）に基づき施設側の申告提出後、日本側の評価ステーションに査察データが送付される。査察時の評価のためのデータの転送方法については、IAEA のサーバーの設定による。今後の議論により、具体的な手順を IAEA と合意する必要がある。

日本側に送付されたデータは、中性子検出器では INCC によりデータ解析を行い、ガンマ線検出器は IAEA と合意した解析ソフトを使用し、データ解析を行う。

7. メンテナンス

中性子検出器部分については、基本的には測定のパフォーマンスをモニタリングすることが重要であり、そのモニタリング結果により必要に応じてメンテナンスを行う。特に、 ^3He 管のメンテナンスのために吸湿剤の交換を行うにはジャンクションボックスの開閉が必要であり、この開閉により機器の故障につながる可能性が高いため、吸湿剤の交換は行わないことを LANL は推奨している。

ガンマ線検出器については、X-Cooler II などの電気製品の寿命(約 3 年)などを考慮して、メンテナンス計画を策定し、メンテナンスを行う。

ロードセルについても機器の寿命を考慮して、メンテナンス計画を策定する。特に、設置状況による測定誤差（接地面が床面と水平かどうか）が影響を与えることもあるため、測定精度に注意を払う。

上述したとおり、IPCA の中性子検出器、ガンマ線検出器及びロードセルの信号及び電源ケーブルは、各測定装置とローカルキャビネットの間で、IAEA が非立会型測定装置（UMS）に採用している保障措置用コンジット（SG コンジット）の中を通すことになっている。以下に、想定

される実施設でのメンテナンスの手順（組み上がった状態から中性子ジャンクションボックスを取り出し、元の組み上がった状態に戻すまで）について記す。手順の大きな流れは、

- (1) ガンマ線検出器の IPCA 本体からの取り外し
- (2) ID カメラ及びロードセルの IPCA 本体からの取り外し
- (3) IPCA の立起し状態から横倒し状態への回転
- (4) 中性子検出器ジャンクションボックスの IPCA 本体からの取り出し
- (5) 中性子検出器ジャンクションボックスの IPCA 本体への挿入
- (6) IPCA の横倒し状態から立起し状態への回転
- (7) ID カメラ及びロードセルの IPCA 本体への取付
- (8) ガンマ線検出器の IPCA 本体への取付

となる。但し、例えばガンマ線検出器のみのメンテナンスが必要な場合は(1)から(8)へ飛び、(1)から(8)までの全ての手順に従う必要があるのは、 ^3He 管の交換作業等の中性子検出器ジャンクションボックスを IPCA 本体から完全に抜き出す必要があるときとなる。(1)から(4)までの手順に従って、中性子検出器ジャンクションボックスを IPCA 本体から取り外し、メンテナンス作業が終了したら、(5)から(8)までの手順に従って、IPCA を組み上げる。

(1) ガンマ線検出器の IPCA 本体からの取り外し

- ① ガンマ線検出器のセキュリティカバーのワイヤーシールを切る。(セキュリティカバーの設計は決定されていない。概念図を図 4 に示す。)
- ② ワイヤーシールを通してあるボルトのナットを工具を使って取り外す。
- ③ セキュリティカバーを開ける。

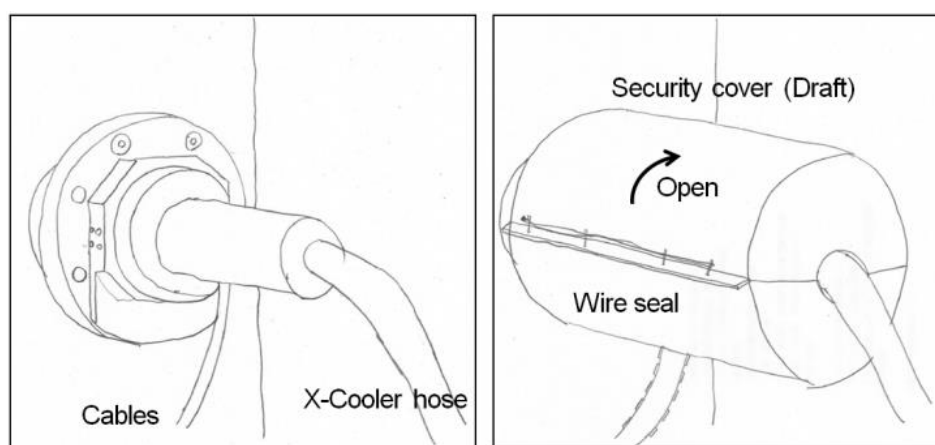


図 4. (左) IPCA のガンマ線検出器の模式図 (右) ガンマ線検出器のセキュリティカバーの概念図

- ④ ケーブル (HV、LV、信号及びバイアスシャットダウンの計 4 本) の端子接続を取り外す (図 5 参照)。

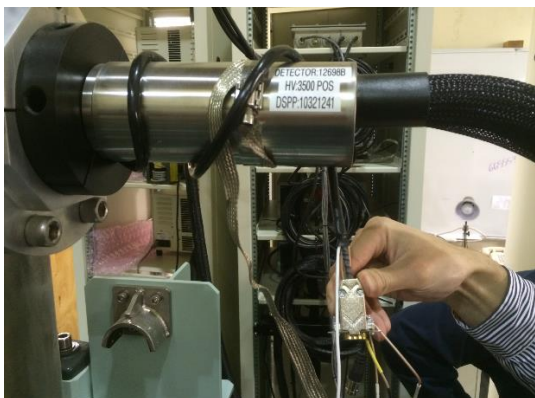


図 5. ケーブル（HV、LV、信号及びバイアスシャットダウンの計 4 本）の端子接続を取り外した後の様子（ただし、施設ではこの状態にセキュリティカバーが取り付けられる）

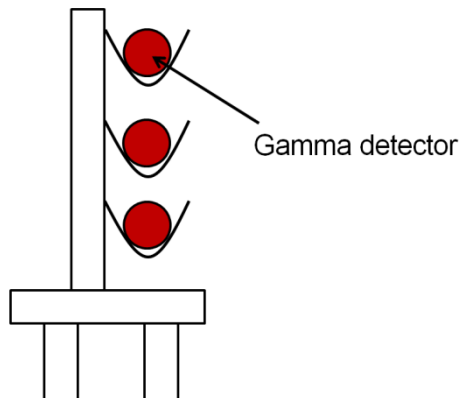


図 6. IPCA 本体から抜き出したガンマ線検出器を置くラックの概念図

- ⑤ ガンマ線検出器を IPCA 本体から抜き出し、ラックに置く（ラックは未設計。その概念図を図 6 に示す）。
- ⑥ セキュリティカバーを IPCA 本体のフランジから取り外す。（このとき、SG コンジットはセキュリティカバーに取り付けたままの状態にする。）

（参考）

LANL に IPCA を仮設置したときのガンマ線検出器と X-Cooler II の床からの高さを表 に示す。また、X-Cooler II 及び X-Cooler II 用 UPS の設置状況を図 7 に示す。耐用年数から施設に設置されるときには X-Cooler III（図 10 及び図 11 参照）に置き換えられる予定である。

表 1. LANL に IPCA を仮設置したときのガンマ線検出器と X-Cooler II の床からの高さ

ガンマ線検出器	高さ 1（ガンマ線検出器）	高さ 2（X-Cooler II）	高さ 1 と高さ 2 の差	高さ 3（施設への設置のために製作された X-Cooler 用ラック）（図 8 及び図 9 を参照）
Top	184 cm	179 cm	5 cm	105 cm
Middle	144 cm	114 cm	30 cm	60 cm
Bottom	104 cm	49 cm	55 cm	14 cm

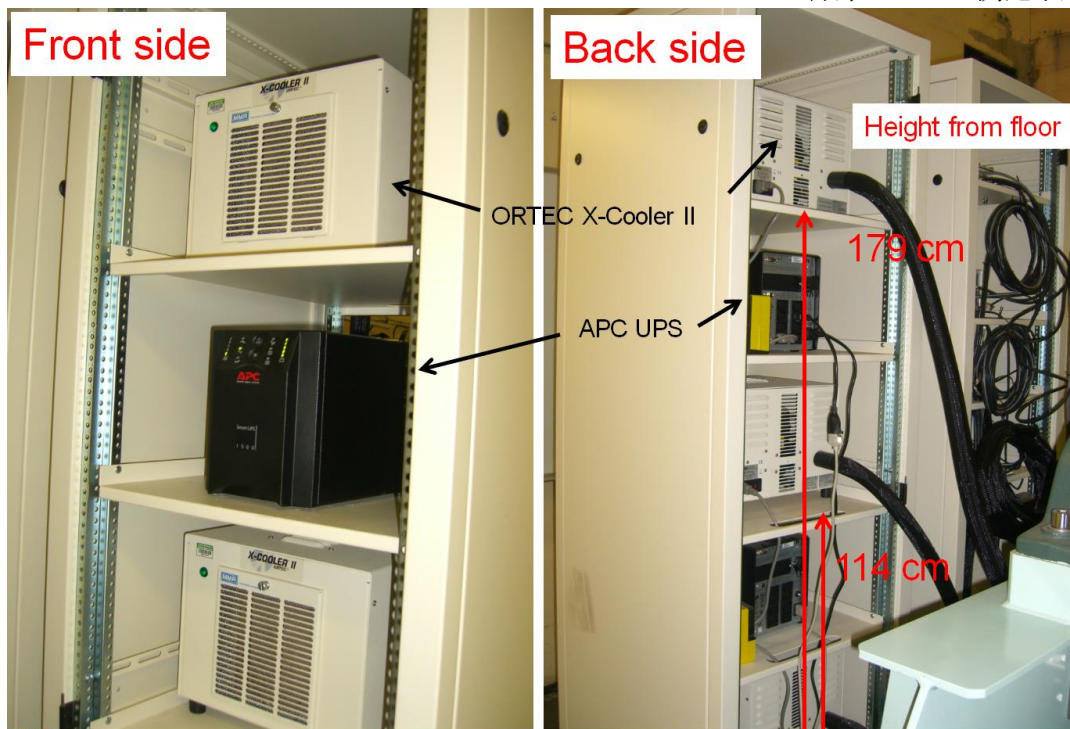


図 7. X-Cooler II 及び UPS の LANL での仮設置状況 (2013 年 3 月)

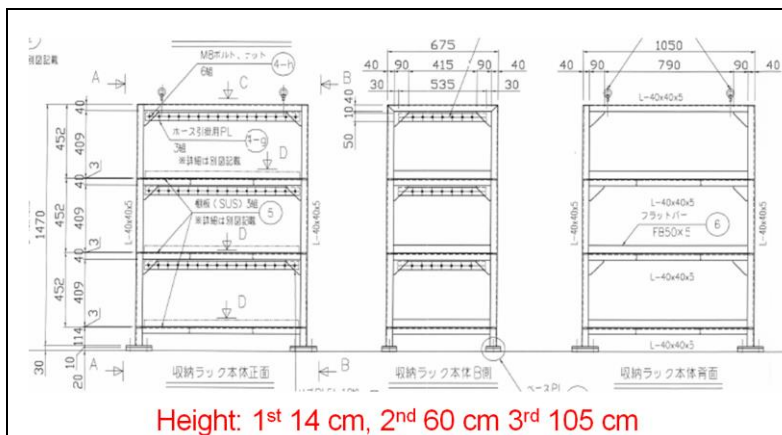


図 8. 冷却機動力部 (X-Cooler II) 用ラック外形図



図 9. ラックの写真 (倉庫にて保管)



図 10. X-Cooler III の写真（表側）



図 11. X-Cooler III の写真（裏側）

(2) ID カメラ及びロードセルの IPCA 本体からの取り外し

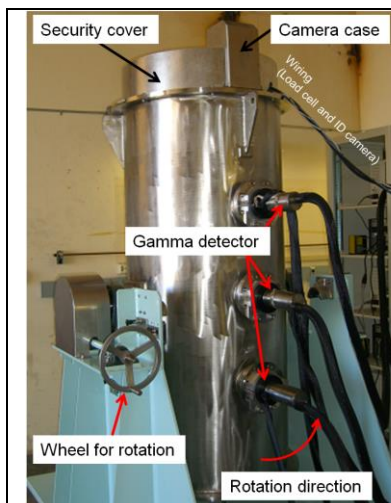


図 12. IPCA のセキュリティカバーとカメラケース

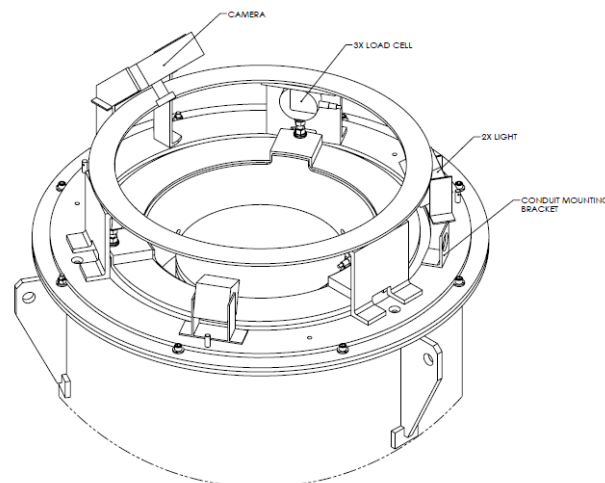
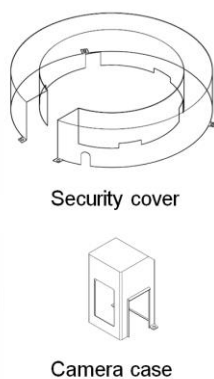


図 13. ID カメラ及びロードセルの取付状態（設計図）

- ① ロードセルのセキュリティカバー及びカメラケース（図 12 参照。取り外したときの様子は図 13 参照。）を取り外せるよう可動式階段を設置する。
- ② 可動式階段を上り、セキュリティカバーに取り付けてあるワイヤーシールを切る。
- ③ ワイヤーシールを通してあるボルトのナットを工具を使って取り外す。
- ④ セキュリティカバーを 20 cm 程度上に持ち上げ IPCA 本体から取り外す。
- ⑤ カメラケースを数 cm 上に持ち上げ IPCA 本体から取り外す。
- ⑥ ロードセルのケーブルの端子接続（3 箇所）を取り外す。
- ⑦ ロードセルのケーブルの SG コンジットのフィッティングを取り外し、SG コンジットを IPCA

本体から取り外す。

- ⑧ カメラ取り付け台及び LED 照明取り付け台をそれぞれ装置が取り付けられた状態のまま IPCA 本体から取り外す。
- ⑨ ロードセルを IPCA 本体に取り付けてあるねじ（3箇所）を取り外す。
- ⑩ ロードセルの横荷重による破損が起これる場合は、ロードセルウェルごと持ち上げて IPCA 本体から取り外す。 そうでない場合は、IPCA 本体から取り外さずに回転作業に入る。

（参考）

2015 年 3 月時点でロードセルのケーブルは端子接続になっていない。以下のプラグ（図 14）とソケット（図 15）を用いて端子接続が可能である。

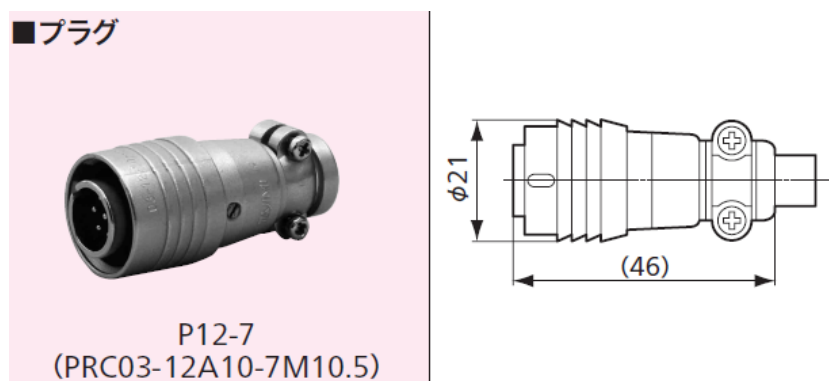


図 14. ロードセルのケーブルを端子接続するためのプラグ P12-7

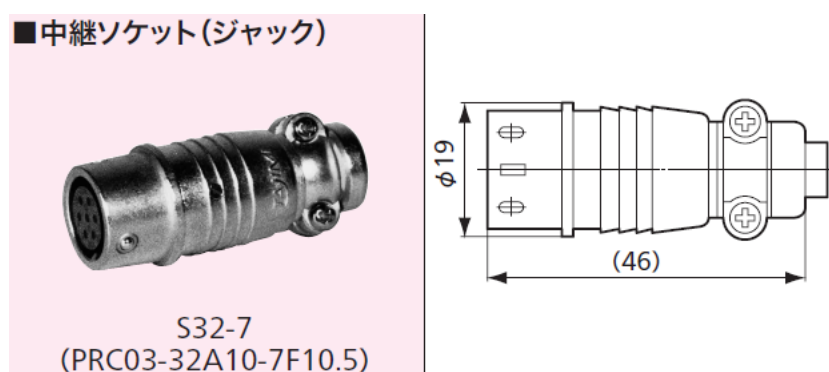


図 15. ロードセルのケーブルを端子接続するためのソケット S32-7

（参考）

IPCA の設置箇所における天井の高さの設計値は 2800 mm である（図 16 参照）。天井には 1200 mm 四方の穴が開けられる。

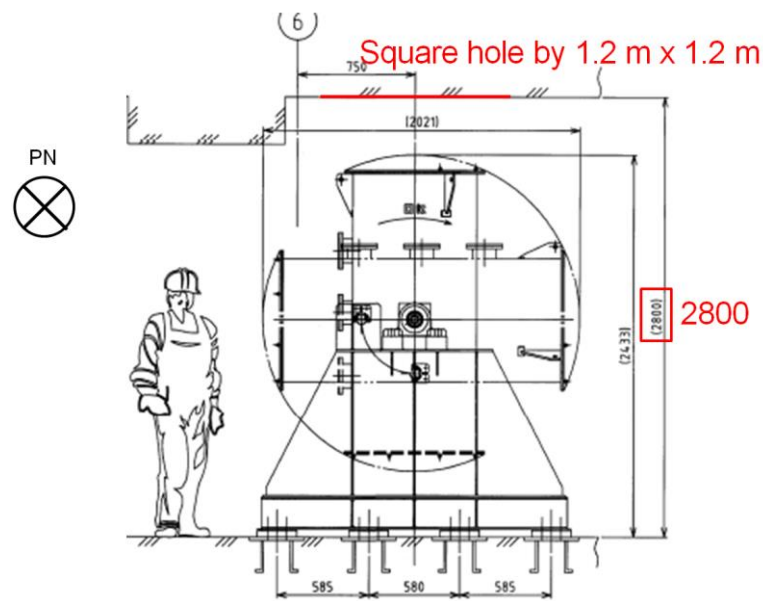


図 16. IPCA の設置箇所における天井の高さ

(参考)

ロードセルをロードセルウェルごと IPCA 本体から取り外すには、ロードセルウェルをその高さ 289 mm 以上持ち上げて横方向にずらす必要がある (図 17 参照)。中性子検出器筐体上部の床面からの高さは 2334 mm、その高さからロードセルが取り付けられている環状板上面までの高さが 155 mm (図 17 参照) であるので、ロードセルウェルの高さ分 289 mm だけ持ち上げた時の環状板上面と天井の隙間は、 $2800 - (2334 + 155 + 289) = 22 \text{ mm}$ となる (図 18 参照)。中性子検出器筐体上面にはナットが締め付けられているのでその高さも考慮する必要がある。

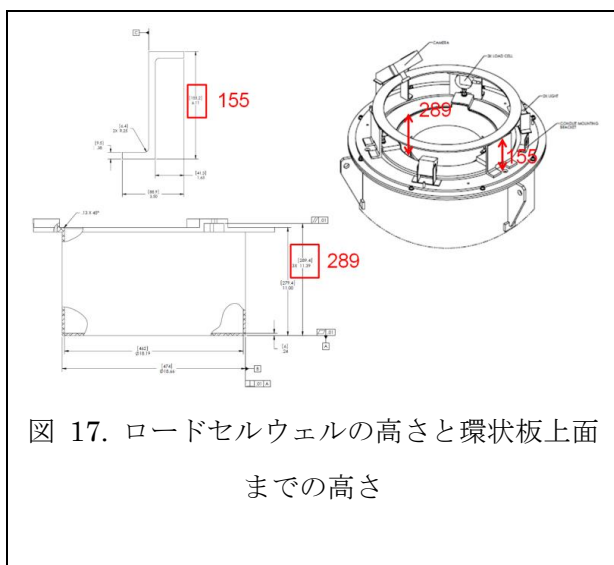


図 17. ロードセルウェルの高さ
と環状板上面
までの高さ

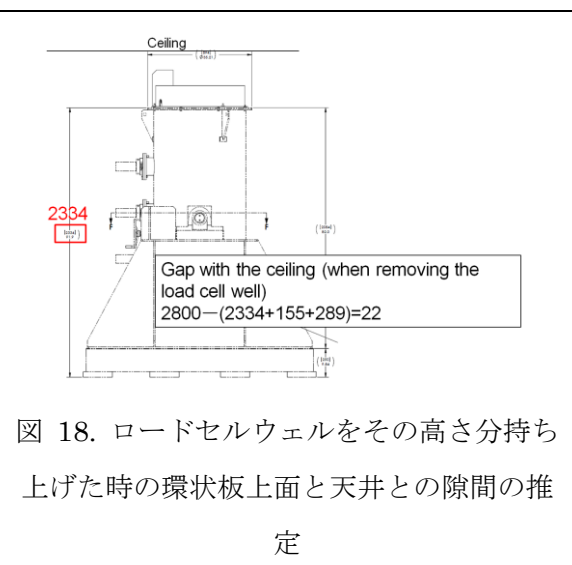


図 18. ロードセルウェルをその高さ分持ち
上げた時の環状板上面と天井との隙間の推
定

(3) IPCA の立起し状態から横倒し状態への回転

- ① ストッパー（2箇所）を外す。
- ② ホイールを回し 90 度回転させる（立起しの状態から図 19 のように横倒しの状態にする）。
- ③ ストッパー（2箇所）をかける。



Rotated position

図 19. IPCA を横倒しさせたときの様子

(4) 中性子検出器ジャンクションボックスの IPCA 本体からの取り出し

- ① 中性子検出器筐体の底板（ボトムプレート、重さ約 48 kg）を載せる台（未設計）をボトムプレート下に設置する。（台の概念図は図 20 を参照）

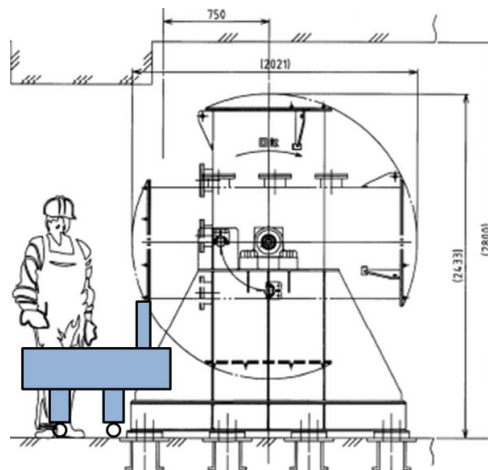


図 20. ボトムプレートを載せる台の概念図

- ② ボトムプレートに取り付けてあるワイヤーシールを切る。

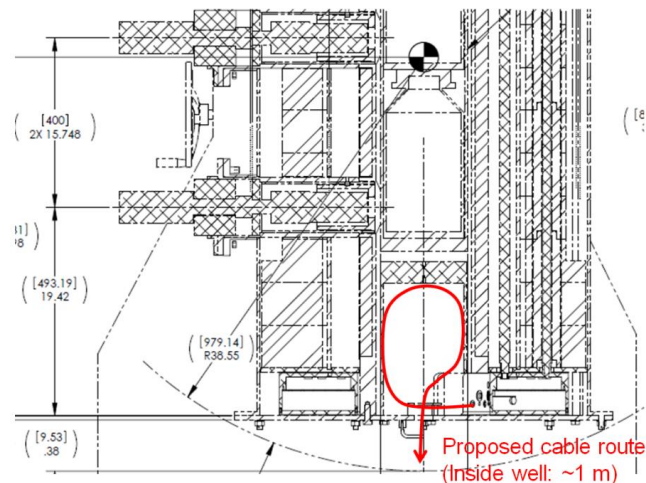


図 21. ボトムプレート内のケーブルの這わせ方の概念図

- ③ ワイヤースールを通してあるボルトのナットを工具を使って取り外す。
- ④ ボトムプレートを台の上に載せ、20 cm 程度 IPCA 本体から引き離す。(SG コンジットが取り付けてあるので、ボトムプレートを引き離せるように、その内側で図 21 の赤色曲線で示すようにケーブルを 1 m 程這わせておく。)
- ⑤ ボトムプレートと IPCA 本体の間にできた隙間から手を差し入れ、ジャンクションボックスに接続しているケーブル接続 (HV 線 1 本、LV 線 1 本及び信号線 3 本の計 5 本) を外す。
- ⑥ ボトムプレートが載った台を、ジャンクションボックスを引き出すのに妨げとならない適切な場所に移動させる。
- ⑦ ジャンクションボックスに取り付けてある絶縁用のプラスチックシートを取り外す。(ここでジャンクションボックスへのアクセスが可能となり、ジャンクションボックスの蓋を取り外せば増幅器の交換が可能であると考えられる。)
- ⑧ ジャンクションボックスを載せる台を設置する。
- ⑨ ジャンクションボックスを IPCA 本体から引き出す。この時、図 22 のように台の上に載せて徐々に引き出す。(ジャンクションボックスの高さ程度だけ引き出せば、デシカントの交換は可能と考えられる。)
- ⑩ 図 23 のように ^3He 管の長さだけジャンクションボックスを引き出せたら、ジャンクションボックスを立てて置く (図 24 参照)。(ここで ^3He 管の交換作業が可能となる。)

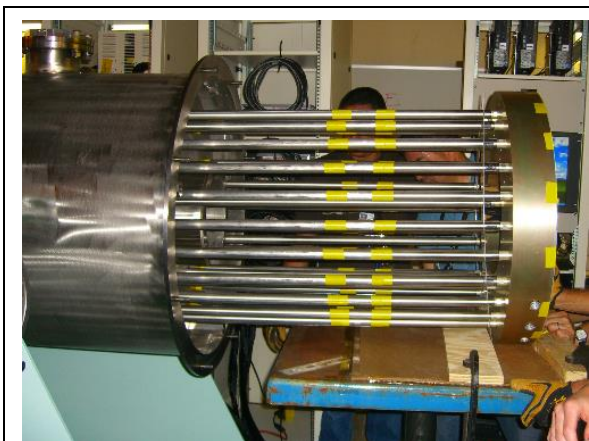


図 22. ジャンクションボックスを引き出している時の様子

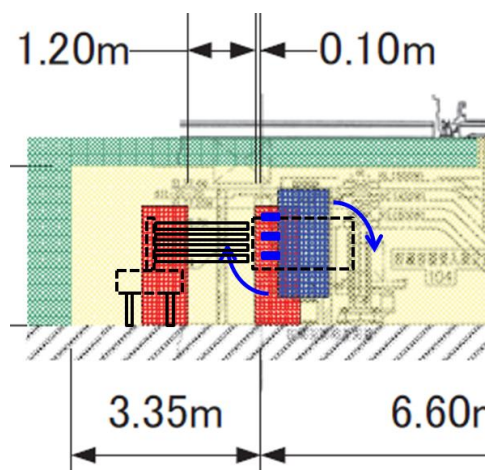


図 23. ^3He 管の交換作業が必要な時はその長さ分 (約 1.6 m) の空間が必要



図 24. ジャンクションボックスを立てて置いた時の様子

(5) 中性子検出器ジャンクションボックスの IPCA 本体への挿入

- ① ジャンクションボックスの台を移動させながらを IPCA 本体に挿入する。(^3He 管を一斉に各挿入口に入れるには、細い棒で軽く押しながら微調整が必要である。)
- ② プラスチックシートをジャンクションボックスに貼り付ける。
- ③ ボトムプレートが載った台を、ケーブルをジャンクションボックスに取り付けられる距離の

ところまで持ってくる。

- ④ ケーブルをジャンクションボックスに接続する。
- ⑤ ケーブルの余裕を IPCA 内部に這わせながらボトムプレートを IPCA 本体底面に取り付ける。
(ケーブルの余裕は、IPCA 上面の底まで通じている穴から長いフックを挿入し、引っ掛けて内部に引き込むことも可能である)
- ⑥ ボトムプレートをナットで締め付ける。
- ⑦ ワイヤーシールを取り付ける。

(6) IPCA の横倒し状態から立起し状態への回転

- ① ストッパー（2箇所）を外す。
- ② ホイールを回し 90 度回転させる（横倒しの状態から立起しの状態にする）。
- ③ ストッパー（2箇所）をかける。

(7) ID カメラ及びロードセルの IPCA 本体への取付

- ① ロードセルをロードセルウェルごと IPCA 本体に取り付ける。(ロードセルの横荷重による破損の恐れがない場合は、IPCA を回転させる前に、つまり横倒し状態のときに本体に取り付ける。)
- ② ロードセルを IPCA 本体にねじ（3箇所）で固定する。
- ③ カメラ取り付け台及び LED 照明取り付け台をそれぞれ装置が取り付けられた状態のまま IPCA 本体に取り付ける。
- ④ ロードセルのケーブル用 SG コンジットのフィッティングを IPCA 本体に取り付ける。
- ⑤ ロードセルのケーブル端子（3箇所）を接続させる。
- ⑥ カメラケースを IPCA 本体に取り付ける。
- ⑦ セキュリティカバーを IPCA 本体に取り付ける。
- ⑧ ワイヤーシールを通すボルトにナットを工具を使って取り付ける。
- ⑨ ワイヤーシールを取り付け、セキュリティカバー及びカメラケースを封印する。

(1) ガンマ線検出器の IPCA 本体への取付

- ① ガンマ線検出器を挿入口に挿入する。
- ② セキュリティカバーを IPCA 本体のフランジに固定する。
- ③ ガンマ線検出器から伸びているケーブル（HV、LV、信号及びバイアスシャットダウンの計 4 本）をクーリングヘッドに巻き付ける。
- ④ 巻き付けたケーブルをセキュリティカバー側のケーブルと端子接続する。
- ⑤ セキュリティカバーを閉める。

- ⑥ セキュリティカバーの封印用ボルトにナットを取り付け、閉める。
- ⑦ ワイヤーシールを取り付けセキュリティカバーを封印する。

8. ^3He 管のガス漏出等の故障検知手順

目的：

機器の故障の検知及び問題の原因の診断

^3He 管中性子検出器のための手順

(1) 湿気によるノイズ、ケーブルのノイズ、及びグラウンドループのノイズを検知するため、中性子線源を使用せずに以下の手順を実施する。

- ① 印加電圧を 1200V から 1900V の間で上昇し、20V 間隔で 10 秒間の測定を行う。
- ② 印加電圧の上昇時の LED の点滅の頻度を目視で観察する。
- ③ バックグラウンド中性子を測定したプラトー曲線は、中性子線源を使用して測定したプラトー曲線と同じ形（計数値が立ち上がり始めたり、計数値が飽和し始める印加電圧が同じ）となる。
- ④ 通常 1280V 付近で計数値が立ち上がり始める。
- ⑤ 電源が故障している場合は、印加電圧が上昇するとともに LED の点滅の頻度が上がる。
- ⑥ 湿気による故障がある場合は、印加電圧を掛けなければ点滅はせず、800V 付近で点滅を始める。
- ⑦ グラウンドループノイズは、印加電圧を掛けなくても点滅が起こり、接地や接触によって変化する。

(2) 前置増幅器の故障、 ^3He ガスのリーク、低下した低電圧の電力 (+5V)、及びケーブルの接続不全などを検知するため、中性子線源 (^{252}Cf または MOX) を使用して以下の手順を実施する。

- ① 印加電圧を 1200V から 1900V の間で上昇し、20V 間隔で 10 秒間の測定を行う。
- ② 印加電圧の上昇時の LED の点滅の頻度を目視で観察する。
- ③ 中性子線源を使用した測定は、通常のプラトー曲線と同じ形（計数値が立ち上がり始めたり、計数値が飽和し始める印加電圧が同じ）を与える。
- ④ 通常 1280V 付近で計数値が立ち上がり始める。
- ⑤ ガスのリークは、1280V より低い電圧において、適切なチャンネルより前のチャンネルでの LED ライトの早い点滅を示す。

- ⑥ 圧力の低下に伴う利得の増加は、ガンマ線への感度を増加させ、より低い高電圧で計数値が立ち上がり始める（例えば 1280V から 1200V へ）。この手順によりガンマ線源を使用せずに問題を診断することが可能である。
- ⑦ 前置増幅器への印加低電圧の低下により、前置増幅器は通常の使用レベル（1700V 付近）で計数が低下、または不安定となる。
- ⑧ 信号ケーブルに問題がある場合、点滅している LED ライトは点滅しなくなるか、中性子線源なしで点滅が早くなる。

参考文献：

- [1] User Requirements (SG-E-IPCA-UR-0001)
- [2] Improved Plutonium Canister Assay System 2 Manual (LA-UR-13-21981)
- [3] Data Acquisition Components for JMOX, IAEA 発表資料 (2013 年 6 月開催の Joint Technical Committee の配布資料)

付録 2 燃料集合体測定機器 (AFAS) の測定手順書 (案)

燃料集合体測定機器 (AFAS) の測定手順書 (案)

1. 燃料集合体測定機器 (AFAS)

燃料集合体測定機器 (AFAS : Advanced Fuel assembly Assay System) は、JMOX の MOX 燃料集合体貯蔵区域において、燃料集合体中の Pu 質量 (g) を部分欠損レベルで検知可能な測定機器の開発を目的に設計・製作された。本機器は 2 台製作され、それぞれ沸騰水型原子炉 (BWR) 用及び加圧水型原子炉 (PWR) 用燃料集合体測定に使用する。図 1 に示すように、本機器は、上部及び下部の Fork 検出器並びに中央部の Collar 検出器の計 3 台の中性子検出器から構成される。燃料集合体の有効長 (燃料ペレットが充填されている部位の長さ) の単位長さあたりの Pu 質量 (gPu/cm) を Collar 検出器で測定し、有効長 (cm) を 3 台の検出器を用いて測定する。単位長さあたりの Pu 質量に有効長を乗じて集合体中の総 Pu 質量を求め、申告値の正確性を検認する。

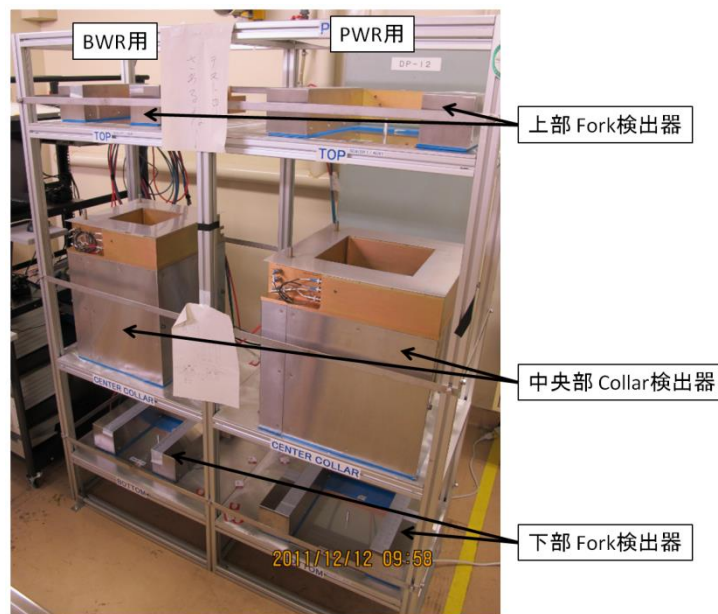


図 1. AFAS の外観 (左 : BWR 用、右 : PWR 用)

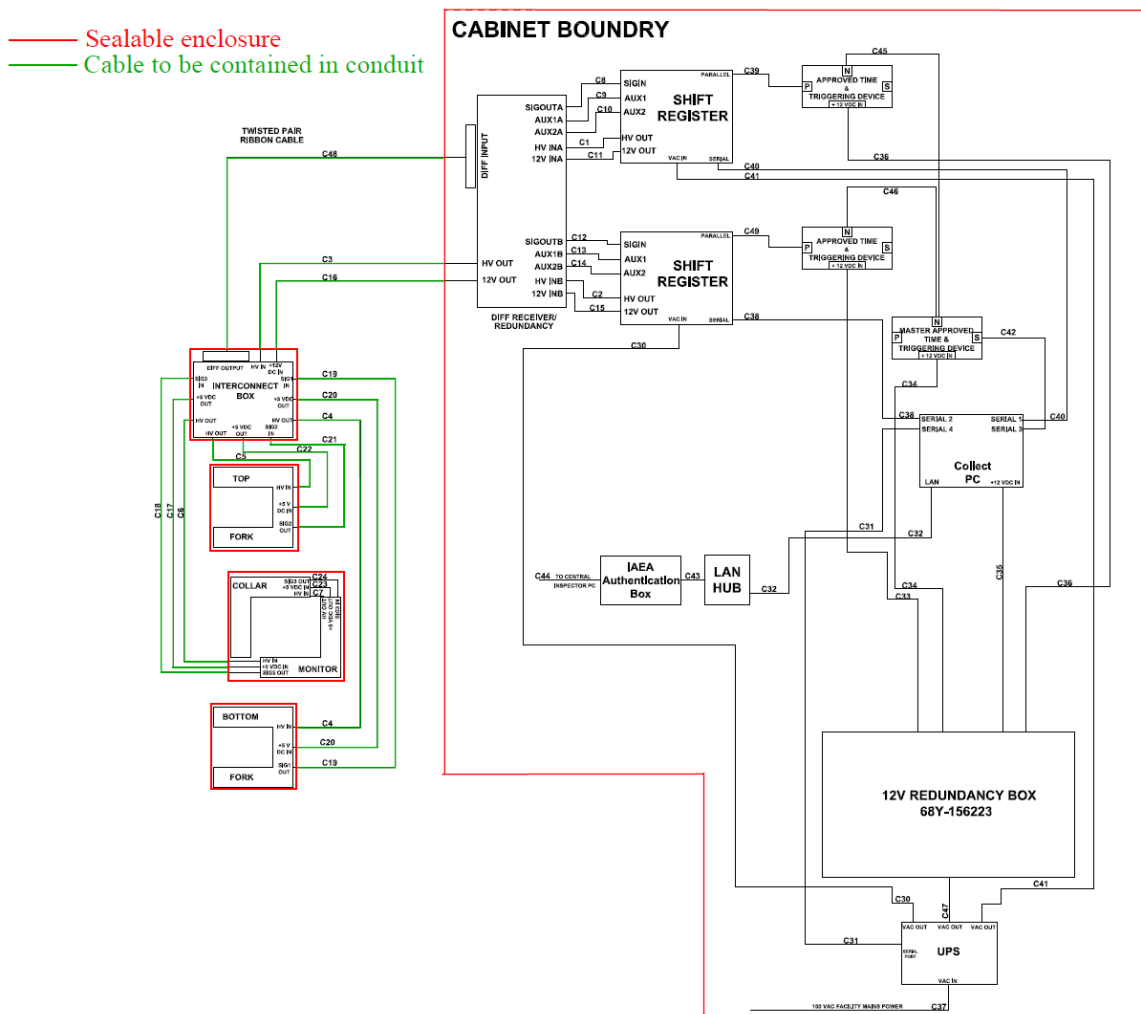


図 2. AFAS のシステム構成のブロックダイアグラム

2. システム構成

2.1. 中性子検出器

AFAS は、上部及び下部の Fork 検出器並びに中央部の Collar 検出器の計 3 台の中性子検出器からなる装置で、そのすべてに ^3He 管が採用されている。AFAS のシステム構成及び配線を図 2 に示す。ここでインターコネクトボックス (Interconnect Box : IB) は、上部及び下部 Fork 検出器並びに Collar 検出器から中性子を検出した際に発信する TTL (Transistor-transistor logic の略でデジタル信号の一種。) 信号を受け取り、それを微分して出力する。これは、施設設置時、ケーブル長が長くなると推測される IB とディファレンシャルレシーバーリダンダンシー (Differential Receiver Redundancy : DRR) の間で信号の形状が劣化するのを防ぐ措置である。DRR は微分信号を受信し、それを積分し TTL 信号へ変換し、シフトレジスターへ送信する。

AFAS が施設へ設置されるときの実際の配置は図 3 のとおりになる。燃料棒の有効長に合わせて上部及び下部 Fork 検出器が配置され、有効長中心より上側に Collar 検出器が配置される。BWR 用 AFAS の上部 Fork 検出器の設置台は上下に可動し、異なる有効長をもつ BWR 燃料集合体に対応する。

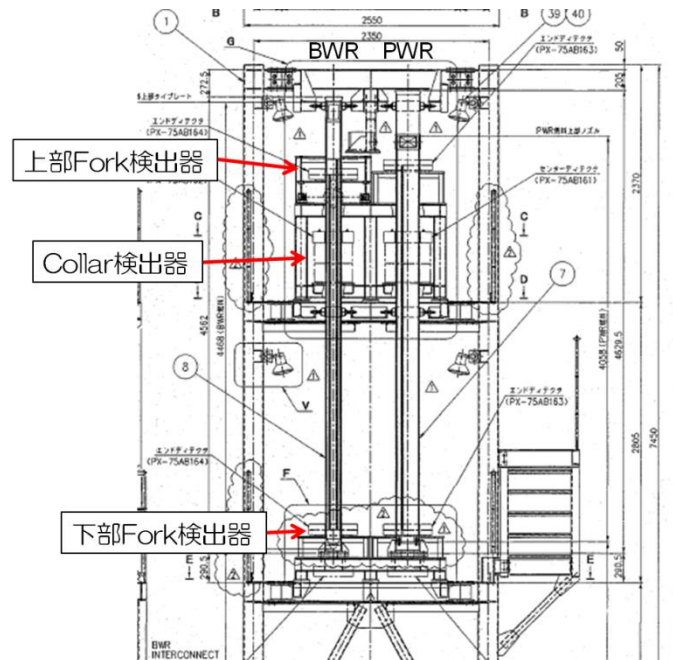


図 3. 施設へ設置されたときの BWR 用及び PWR 用 AFAS の配置

2.2. 不正開封防止(Tamper-Proof)

AFAS は非立会型であるので、IAEA から、不正開封防止のための措置を AFAS に講ずる必要があるとの見解が示されている。各検出器は、図 4 に示すように、セキュリティカバーによってジャンクションボックスが包含され不正開封防止が図られている。セキュリティカバーには封印が取り付けられる。また、図 2 の緑色で示すケーブルは、施設据付時、SG コンジットの中を這わす計画である。各検出器は、この SG コンジットを取り付けるための盤がジャンクションボックスに設置されている（図 4 の右下図を参照）。各検出器からの TTL 信号を微分する IB（図 2 参照）もセキュリティボックスの中に設置し、不正開封防止のための措置を講ずる必要がある。

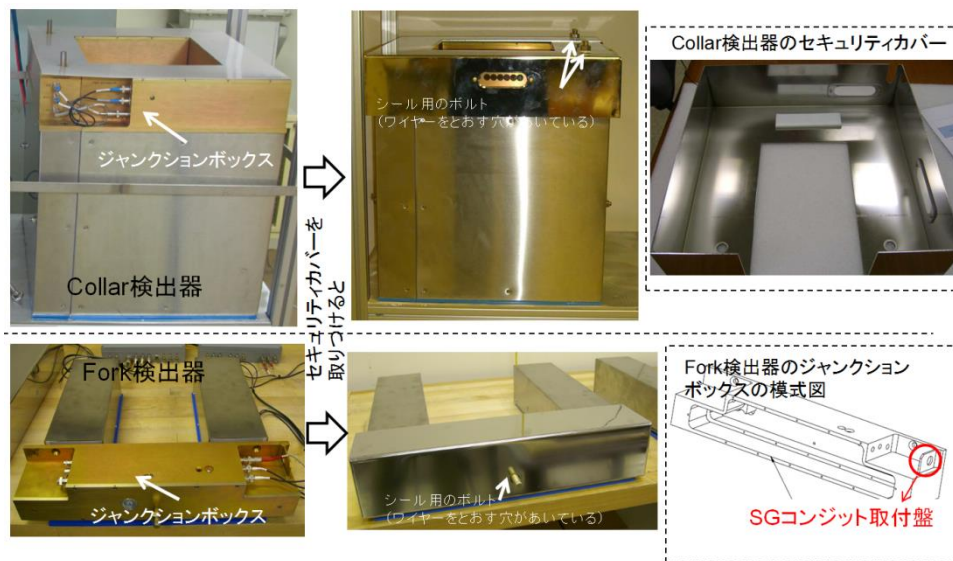


図 4. Collar 検出器及び Fork 検出器にセキュリティカバーを取りつけたときの様子

3. 点検手順

施設設置後、 ^{252}Cf 線源を用いた動作確認を行い、燃料集合体測定に備える。まずバックグラウンド測定を行い、次に Cf 線源を測定し検出効率の確認を行う。

(1) 電源投入する

PC と計数装置の電源ボタンを押し、電源を投入する。PC 起動後に INCC (PC にインストール済の中性子測定制御用ソフトウェア) を起動させる。

(2) 電圧を印加する

INCC から電圧を印加する。印加電圧は 1720V である。

(3) バックグラウンド測定の開始 (10 分間、30 秒間測定を 20 回繰り返し)

INCC から“Rate Only (Background)”モードで 10 分間測定 (30 秒間測定を 20 回繰り返し) を行う。

(4) ^{252}Cf 線源測定の開始

- ① ^{252}Cf 線源を Collar 検出器に配置する。
- ② INCC から“Rate Only”モードで 10 分間測定 (30 秒間測定の 20 回の繰り返し) を行う。
- ③ ^{252}Cf 線源を上部 Fork 検出器に配置する。
- ④ ②を行う。
- ⑤ ^{252}Cf 線源を下部 Fork 検出器に配置する。
- ⑥ ②を行う。

4. 校正手順

AFAS を使用するにあたり、有効長及び Pu 密度(単位長さあたりの Pu 質量)の 2 つの校正式を作成する必要がある。校正式を作成するために、有効長と Pu 密度が既知の標準集合体を使用する。この既知の標準集合体は、実際に測定するプルトニウム量の範囲のものを準備する事が望ましい。校正式の作成手順は以下の通りである。

- ① 複数の標準集合体の測定データを取得する。
- ② ①のデータを用いて最少 2 乗法による単回帰式を作成する。
- ③ 作成した単回帰式の回帰係数の検定等により性能評価を実施する。同時に回帰式の計数に係わる測定誤差を計算する。

5. 定期的な健全性確認(ノーマリゼーション)

ノーマリゼーションとは、月 1 回程度の定期的な NDA 機器及び校正式の健全性を確認するものである。具体的には、初期校正時に使用した標準サンプルを使用して定期的に健全性確認を実施する。そのため、使用する標準サンプルの確保が事前に関係者間で議論をする必要がある。

6. 非立会測定

非立ち合いでの測定時のデータは、IAEA が提供する機器(中性子検出器では同時計数装置)により電子署名付きで暗号化され、インターネット経由で IAEA のサーバーに保管される。暗号化されたデータを復号するために電子署名や公開鍵の交換が必要になる。そのため、事前に IAEA と日本との間で暗号化に関する事前合意が必要となる。これらの測定データは、IAEA とのデータ共有ポリシー(Data Sharing Policy)に基づき施設側の申告提出後、日本側に査察データが送付される。送付後、中性子検出器では INCC により、データ解析を行う。

7. メンテナンス

中性子検出器については、基本的には測定のパフォーマンスをモニタリングすることが重要であり、そのモニタリング結果により必要に応じてメンテナンスを行う。特に、 ^3He 管のメンテナンスのために吸湿剤の交換を行うにはジャンクションボックスの開閉が必要であり、この開閉により機器の故障につながる可能性が高いため、吸湿剤の交換は行わないことを LANL は推奨している。

増幅器の交換が必要な場合には、該当する検出器の封印を取り外しセキュリティカバーを取

り外せばジャンクションボックスにアクセスでき作業が可能となる。 ^3He 管の交換が必要な場合には、検出器に接続しているケーブルの端子接続及び SG コンジットのフィッティングを取り外せば、ジャンクションボックスを引き上げることで検出器本体から ^3He 管を抜き出すことができる。

8. ^3He 管のガス漏出等の故障検知手順

(1) 湿気によるノイズ、ケーブルのノイズ、及びグラウンドループのノイズを検知するため、中性子線源を使用せずに以下の手順を実施する。

- ① 印加電圧を 1200V から 1900V の間で上昇し、20V 間隔で 10 秒間の測定を行う。
- ② 印加電圧の上昇時の LED の点滅の頻度を目視で観察する。
- ③ バックグラウンド中性子を測定したプラトー曲線は、中性子線源を使用して測定したプラトー曲線と同じ形（計数値が立ち上がり始めたり、計数値が飽和し始める印加電圧が同じ）となる。
- ④ 通常 1280V 付近で計数値が立ち上がり始める。
- ⑤ 電源が故障している場合は、印加電圧が上昇するとともに LED の点滅の頻度が上がる。
- ⑥ 湿気による故障がある場合は、印加電圧を掛けなければ点滅はせず、800V 付近で点滅を始める。
- ⑦ グラウンドループノイズは、印加電圧を掛けなくても点滅が起こり、接地や接触によって変化する。

(2) 前置増幅器の故障、 ^3He ガスのリーク、低下した低電圧の電力 (+5V)、及びケーブルの接続不全などを検知するため、中性子線源 (^{252}Cf または MOX) を使用して以下の手順を実施する。

- ① 印加電圧を 1200V から 1900V の間で上昇し、20V 間隔で 10 秒間の測定を行う。
- ② 印加電圧の上昇時の LED の点滅の頻度を目視で観察する。
- ③ 中性子線源を使用した測定は、通常のプラトー曲線と同じ形（計数値が立ち上がり始めたり、計数値が飽和し始める印加電圧が同じ）を与える。
- ④ 通常 1280V 付近で計数値が立ち上がり始める。
- ⑤ ガスのリークは、1280V より低い電圧において、適切なチャンネルより前のチャンネルでの LED ライトの早い点滅を示す。

- ⑥ 圧力の低下に伴う利得の増加は、ガンマ線への感度を増加させ、より低い高電圧で計数値が立ち上がり始める（例えば 1280V から 1200V へ）。この手順によりガンマ線源を使用せずに問題を診断することが可能である。
- ⑦ 前置増幅器への印加低電圧の低下により、前置増幅器は通常の使用レベル(1700V 付近)で計数が低下、または不安定となる。
- ⑧ 信号ケーブルに問題がある場合、点滅している LED ライトは点滅しなくなるか、中性子線源なしで点滅が早くなる。

付録 3 バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS) の測定手順書 (案)

バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS) の測定手順書 (案)

1. バルク工程内 MOX 粉末・ペレット測定機器 (AVIS)

AVIS は、JMOX で収去される DA サンプルの処理・分析のためにかかる六ヶ所保障措置分析所への負荷を軽減するために、加工工程内 MOX バルク物質 (原料粉末、混合粉末及び回収粉末並びにグリーンペレット及び焼結ペレット) 中のバイアス欠損を探知し得る精度及び正確度をもつ機器を開発することを目的に設計・製作された。本機器は立会型査察用機器であり、 ^{240}Pu 実効質量測定用の中性子検出器及び Pu 同位体組成比測定用のガンマ線検出器で構成される (図 1)。外観を図 1 に示す。JMOX では、MOX スクラップ取扱い・分析区域にある査察用グローブボックス下側に設置される予定である。



図 1. AVIS の外観

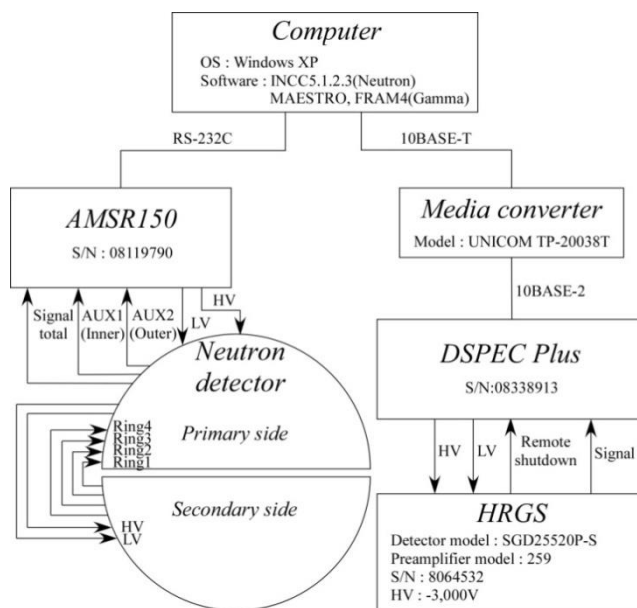


図 2. AVIS のシステム構成のブロックダイアグラム

表 2. 図 2 に示す各機器の説明

分類	機器	装置の説明
共通	Computer	OSはWindows XP。測定を実施するためにINCCとMAESTROをインストールしておく。INCCはWindows 7でも互換モードで起動可能であるが、推奨されない。
中性子検出器	Neutron detector	^3He 比例計数管中性子検出器。
	AMSR150 (ORTEC) (→UNAP)	中性子検出器用計数装置。HV及び前置増幅器用電源を検出器へ供給する。
	INCC (PCにインストール済)	AMSR150を制御するソフトウェア。本ソフトウェアを起動計数装置からデータを取得し、解析を行う。
ガンマ線検出器	HRGS	高純度ゲルマニウム半導体検出器。
	DSPEC Plus (ORTEC) (→LYNX)	ガンマ線検出器用計数装置。
	Media convertor	信号変換装置。
	MAESTRO (PCにインストール済) (→LYNXのソフトウェア)	DSPEC Plusを制御するソフトウェア。本ソフトウェアを起動させ、電圧の印加、測定の開始・停止を行う。
	FRAM (PCにインストール済)	MAESTROで取得したガンマ線スペクトルデータを用いて(オフライン)解析を行うソフトウェア。

2. システム構成

2.1. 中性子検出器

AVIS のシステム構成を図 2 に示す。AVIS の中性子検出器は、円状に ^3He 管が配置された井戸型検出器である。本検出器は、グローブボックス下側に設置されるため、半分（プライマリーとセカンダリー）に分解できる。システムを構成する各機器の説明を表 2 に示す。2015 年 3 月時点では、計数装置に AMSR150 が使用されているが、施設での査察活動に本検出器が使用されるときには、IAEA が提供する計数装置が使用される予定である。本検出器は、使用時には図 3（横断面図）に示すような配置でグローブボックス下に設置される予定である。

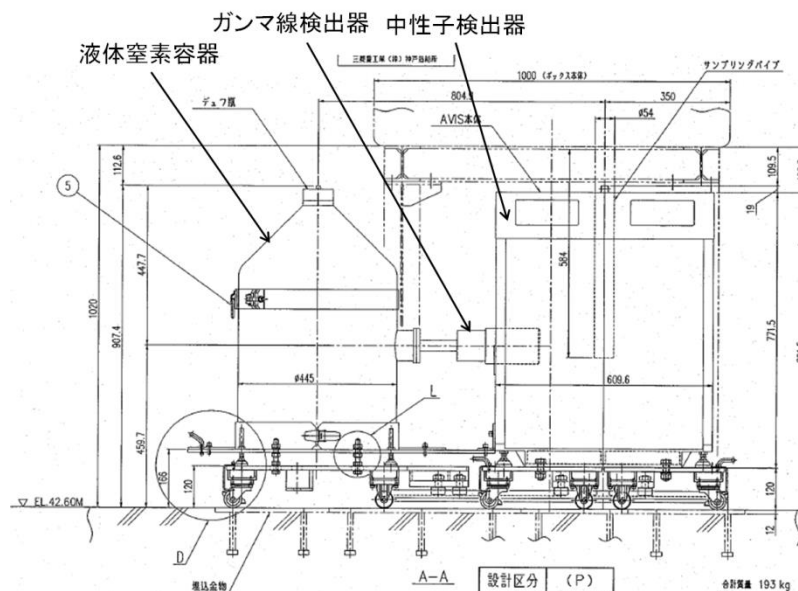


図 3. 計画されているグローブボックス下での AVIS 取付配置の様子（横断面図）

2.2. ガンマ線検出器

AVIS のガンマ線検出器は、ORTEC 社製 プレナ型の高純度ゲルマニウム検出器である。AVIS は査察官立会の下で使用されるため、本検出器の検出部の冷却には液体窒素が使用される。本検出器は、使用時には、図 4 に示すように図中中性子検出器左側に配置され、未使用時には同下側の位置に収納される。

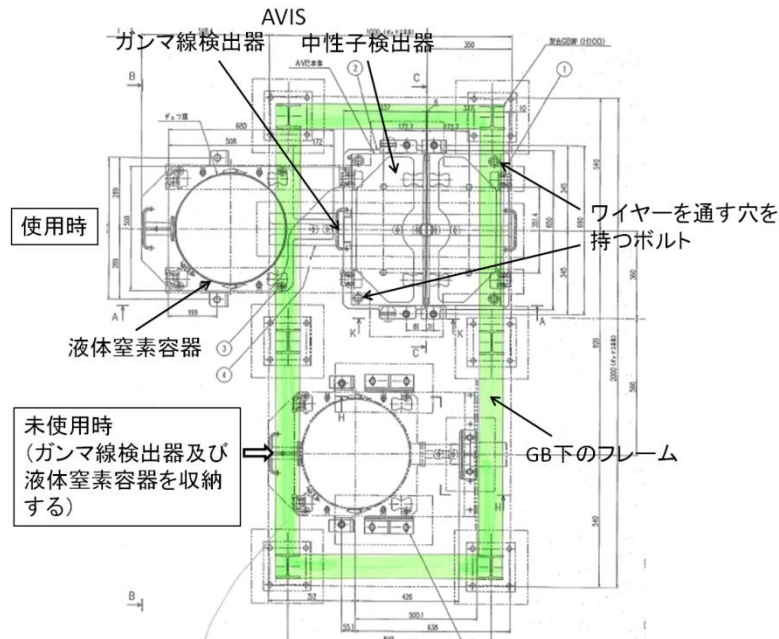


図 4. 計画されているグローブボックス下での AVIS 取付配置の様子（上面図）

3. 使用前点検手順

組み立て後及び検認測定前に、中性子測定装置は、 ^{252}Cf 線源もしくは MOX 試料を用いた健全性確認を行う。

^{252}Cf 線源を用いた場合は、

MOX 試料を用いた場合は、Pu 同位体組成比の測定結果を比較することで、ガンマ線検出器の健全性確認も同時に行うことができる。また、線源をサンプルホルダーに設置できるので、中性子検出器中央に配置することができ、効率良く線源を測定（もっとも検出効率が高い配置）が可能となる。ただ、MOX 試料を用いる場合には、当該試料のグローブボックス中での知識の連続性（CoK）を如何に維持するかが問題となる。IAEA の所有する遠隔操作機器（リモコン）でのみしか開閉しない自動開閉箱をグローブボックス内で用いる

（中性子測定装置）

(1) 電源投入する

PC と AMSR の電源ボタンを押し、電源を投入する。PC 起動後に INCC（PC にインストール済の中性子測定制御用ソフトウェア）を起動させる。

(2) 中性子測定装置へ電圧を印加する

AMSR の全面パネルにある HV スイッチを ON にし、INCC から電圧を印加する。印加電圧は 1740V である。

(3) バックグラウンド測定の開始（10 分間、30 秒間測定を 20 回繰り返す）

INCC から“Rate Only (Background)”モードで 10 分間測定（30 秒間測定を 20 回繰り返す）を行う。

(4) ^{252}Cf 線源測定の開始

- ① ^{252}Cf 線源を挿入棒に装着し、図 5 のように中性子測定装置下部にある挿入口へ挿入する。
- ② INCC から“Rate Only”モードで 10 分間測定（30 秒間測定の 20 回の繰り返し）を行う。



図 5. ^{252}Cf 線源を挿入棒に装着し、中性子測定装置下部に挿入したときの様子

（ガンマ線測定装置）

(1) 液体窒素の充てん量は十分であるか確認する

HPGe (High Purity Germanium) が十分冷却されていない状態では電圧は印加してはならない。

(2) 電源投入する

- ① PC（中性子測定制御用 PC と共通）の電源ボタンを押し、電源を投入する。
- ② DSPEC Plus の電源ボタンを押し、電源を投入する。
- ③ PC 起動後に MAESTRO（PC にインストール済のガンマ線測定制御用ソフトウェア）を起動させる。

(3) ガンマ線測定装置へ電圧を印加する

- ① MAESTRO の Property から HV の操作画面を表示する。
- ② HV を -3000V に設定し、ON にする。

4. 校正手順

AVIS を使用するにあたり、Pu 質量及び同位体組成比の計算のための 2 つの校正式を作成する

必要がある。校正式を作成するために、Pu 質量及び同位体組成比が既知の標準サンプルを使用する。この既知の標準サンプルは、実際に測定するプルトニウム量の範囲のものを複数使用する。校正式の作成手順は以下のとおりである。

- ① 複数の標準サンプルの測定データを取得する。
- ② ①のデータを用いて最少 2 乗法による回帰式を作成する。
- ③ 作成した回帰式の回帰係数の検定等により性能評価を実施する。同時に回帰式の計数に係わる測定誤差を計算する。

なお、作成した Pu 質量の校正式は、破壊分析 (DA) の結果と照合することでその適切性を確認することが可能であると考えられる。DA が求められる MOX サンプル試料は、DA の前処理を実施する前に AVIS で測定し、DA の結果が得られたら比較を行う。

5. 検認測定手順

(中性子測定装置)

検認測定前のノーマリゼーション測定を実施していない場合は、3 の (1) - (3) の手順を行う。

その後は、

- (1) サンプルを設置する
- (2) INCC から“Verification”モードで測定を開始する
- (3) MAESTRO から測定を開始する

6. メンテナンス

^3He 管のメンテナンスのために吸湿剤の交換を行うにはジャンクションボックスの開閉が必要であり、この開閉により機器の故障につながる可能性が高いため、吸湿剤の交換は行わないことを LANL は推奨している。AVIS は査察官立会の下使用されるので、検出器とローカルキャビネット内の電子機器とをつなぐ HV、LV 及び信号線は保障措置用コンジットを通す必要はないとの見解を IAEA は示している。中性子検出器のジャンクションボックス内の電子部品の交換作業や ^3He 管の交換作業を行う必要がある場合は、グローブボックス下から本機器を取り出し上で当該作業を実施する。

7. ^3He 管のガス漏出等の故障検知手順

- (1) 湿気によるノイズ、ケーブルのノイズ、及びグラウンドループのノイズを検知するため、中性子線源を使用せずに以下の手順を実施する。

- ① 印加電圧を 1200V から 1900V の間で上昇し、20V 間隔で 10 秒間の測定を行う。

- ② 印加電圧の上昇時の LED の点滅の頻度を目視で観察する。
 - ③ バックグラウンド中性子を測定したプラトー曲線は、中性子線源を使用して測定したプラトー曲線と同じ形（計数値が立ち上がり始めたり、計数値が飽和し始める印加電圧が同じ）となる。
 - ④ 通常 1280V 付近で計数値が立ち上がり始める。
 - ⑤ 電源が故障している場合は、印加電圧が上昇するとともに LED の点滅の頻度が上がる。
 - ⑥ 湿気による故障がある場合は、印加電圧を掛けなければ点滅はせず、800V 付近で点滅を始める。
 - ⑦ グランドループノイズは、印加電圧を掛けなくても点滅が起こり、接地や接触によって変化する。
- (2) 前置増幅器の故障、 ^3He ガスのリーク、低下した低電圧の電力 (+5V)、及びケーブルの接続不全などを検知するため、中性子線源 (^{252}Cf または MOX) を使用して以下の手順を実施する。
- ① 印加電圧を 1200V から 1900V の間で上昇し、20V 間隔で 10 秒間の測定を行う。
 - ② 印加電圧の上昇時の LED の点滅の頻度を目視で観察する。
 - ③ 中性子線源を使用した測定は、通常のプラトー曲線と同じ形（計数値が立ち上がり始めたり、計数値が飽和し始める印加電圧が同じ）を与える。
 - ④ 通常 1280V 付近で計数値が立ち上がり始める。
 - ⑤ ガスのリークは、1280V より低い電圧において、適切なチャンネルより前のチャンネルでの LED ライトの早い点滅を示す。
 - ⑥ 圧力の低下に伴う利得の増加は、ガンマ線への感度を増加させ、より低い高電圧で計数値が立ち上がり始める（例えば 1280V から 1200V へ）。この手順によりガンマ線源を使用せずに問題を診断することが可能である。
 - ⑦ 前置増幅器への印加低電圧の低下により、前置増幅器は通常の使用レベル（1700V 付近）で計数が低下、または不安定となる。
 - ⑧ 信号ケーブルに問題がある場合、点滅している LED ライトは点滅しなくなるか、中性子線源なしで点滅が早くなる。