

業務成果報告書

平成 25 年度

大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験

平成 26 年 3 月

公益財団法人 核物質管理センター

平成 25 年度「大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験」

要 旨

本報告書は、原子力規制庁との平成 25 年度エネルギー対策特別会計委託事業「大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験」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 25 年 5 月 21 日より平成 26 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 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、平成 25 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において、平成 22 年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、平成 24 年度の統合性能確認試験で得られた測定の管理限界を踏まえ、中性子検出器、ガンマ線検出器及びロードセルの長期管理限界の妥当性を確認するため、放射線源（標準線源）及び標準重錘を使用し長期管理限界に収まっているか否かを確認する試験を行った。

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 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、平成 25 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、平成 24 年度統合性能確認試験の結果得られた測定精度及び各検出器の検出効率を踏まえ、PWR 用検出器を使用し、燃料集合体の単位長さ当たり Pu 質量（gPu/cm）及び有効長（cm）を測定する性能に係る確認試験を行った。

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 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 機器であり、平成 25 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、平成 24 年度統合性能確認試験で得られた測定精度及び検出器の正確度の最適化の結果を踏まえ、MOX 原料粉末、製品富化度 MOX 粉末、添加剤入り MOX 粉末、焼結ペレットなど JMOX で査察用試料として採取する予定の核物質を対象として、Pu 質量を測定する性能に係る確認試験及び評価を行った。

④ データ収集・評価システムの機能評価

昨年度までは、理想的な計量管理モデルを想定した測定シミュレーションを行ったが、平成 25 年度は、事業者が検討している計量管理を反映したより現実に近い計量管理モデルを想定し、そのシミュレーションを行い、得られた結果の検討を行った。

また、MOX 原料粉末缶のヒールの評価方法に関する検討を行った。原料 MOX 粉末は、原料 MOX 粉末缶から全量工程に投入され、空缶は再処理工場へ返送される。この時、微量の MOX 粉末が缶に付着して残留（ヒール）し、再処理工場へ返送されることが考えられる。

原料 MOX 粉末缶にある割合の MOX 粉末が残留することを仮定して、その量が、物質収支の評価にどのような影響を与えるか、シミュレーションを実施して検討した。

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試験	2
1.2.1. 中性子検出器	2
1.2.2. ガンマ線検出器.....	6
1.2.3. 重量測定装置 (ロードセル)	15
1.2.4. 考察.....	17
1.3. 測定手順書	18
1.4. その他	18
1.4.1. ガンマ線検出器の Cd フィルター	18
2. 燃料集合体測定機器 (AFAS) の性能確認試験	19
2.1. はじめに.....	19
2.2. 性能確認試験実施場所.....	20
2.2.1. バックグラウンド測定.....	21
2.3. 試験配置.....	22
2.3.1. PWR 用 AFAS の配置	22
2.3.2. システム構成	23
2.3.3. 集合体の仕様	24
2.4. MOX 燃料集合体を使用した性能確認試験	26
2.4.1. 測定時間と測定精度の関係	26
2.4.2. バックグラウンド中性子の増減が測定結果へ与える影響測定条件関連	28
2.4.3. 測定の繰返し精度	31
2.4.4. バックグラウンド中性子の増減と検出限界の関係	33
2.5. 燃料集合体の有効長の測定精度の確認試験	35
2.6. 各検出器の測定可能性及び測定限界の検討	45
2.7. 測定手順書	45
2.8. その他	45
2.8.1. AFAS の Collar 検出器の検出効率	45
2.8.2. AFAS の Collar 検出器の不感時間補正パラメータ	46
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	48

3.1.	はじめに.....	48
3.2.	性能確認試験実施場所.....	49
3.3.	使用した核燃料物質 (MOX 試料) 及び測定配置.....	49
3.3.1.	使用した核燃料物質 (MOX 試料)	49
3.3.2.	測定配置 (システム構成を含む)	52
3.4.	MOX 試料を使用した性能確認試験.....	56
3.4.1.	Known-alpha 法及び Raw double 法による解析に係る較正曲線パラメータ ρ_0 (増倍補正係数) 及び bka の評価.....	57
3.4.2.	Multiplicity 法、Known-alpha 法及び Raw double 法による解析結果の比較.....	61
3.4.3.	測定時間と測定精度の関係.....	66
3.4.4.	バックグラウンド中性子の増減が測定結果へ与える影響.....	69
3.4.5.	測定の繰返し精度 (標準偏差より偶然誤差を確定)	74
3.4.6.	バックグラウンド中性子の増減と検出限界の関係.....	84
3.4.7.	Pu 質量と測定精度の関係.....	87
3.5.	測定手順書.....	89
3.6.	その他.....	89
3.6.1.	収去 MOX 試料の測定試験.....	89
4.	データ収集・評価システムの機能評価.....	93
4.1.	目的及び本年度までの実施概要.....	93
4.2.	データ収集・評価システムの概要.....	96
4.3.	モデル工程等の設定条件.....	100
4.3.1.	モデル工程.....	100
4.3.2.	製造キャンペーン.....	104
4.3.3.	物質収支区域及び測定拠点.....	105
4.3.4.	シミュレーション実行に係る設定.....	106
4.4.	シミュレーション計算.....	108
4.4.1.	計算妥当性の検証.....	108
4.4.2.	物質収支の確定頻度の違いによる物質収支への影響.....	110
4.5.	より現実に近い計量管理モデルの検討.....	115
4.5.1.	σ_{MUF} 値へのサンプリング誤差設定の影響 (PWR 燃料製造キャンペーン)	115
4.5.2.	σ_{MUF} 値へのサンプリング誤差設定の影響 (BWR 燃料製造キャンペーン) ..	124

4.5.3.	OMUF 値への分析誤差の影響 (BWR 燃料製造キャンペーン)	127
4.5.4.	OMUF 値へのホールドアップ未測定の影響 (BWR 燃料製造キャンペーン) ..	129
4.6.	原料 MOX 粉末缶のヒールによる物質収支への影響の検討	131
4.6.1.	原料 MOX 粉末缶ヒールの模擬	131
4.6.2.	ヒールの物質収支への影響の検討	132
4.6.3.	ヒール計上の有無の影響のまとめ	136
4.7.	計算結果のまとめ	137
付録 1.	139
付録 2.	148
付録 3.	152

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、大型 MOX 燃料加工施設の 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 1.1-1 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。

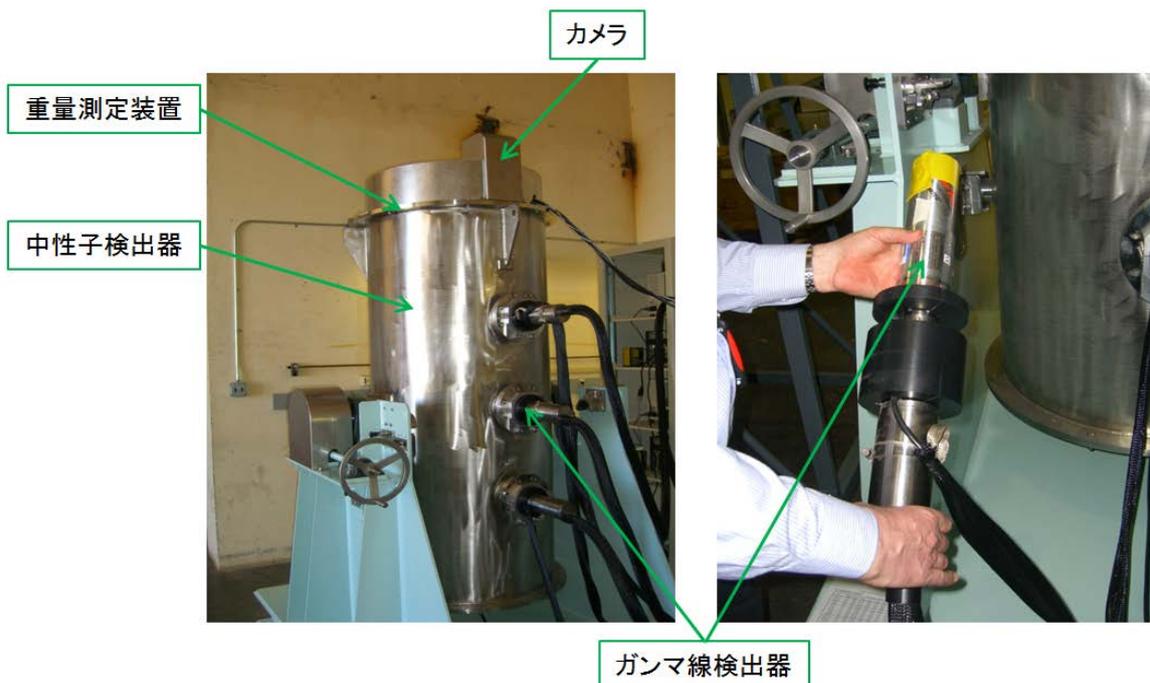


図 1.1-1. (左) LANL に仮設置中の IPCA の外観 (右) ガンマ線検出器の本体部分

平成 25 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（以下、「LANL」と称す。）において、平成 22 年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、IPCA に設置される各種測定装置（中性子検出器、ガンマ線検出器、ロードセル）

を用いた測定を実施し、得られた測定値が平成 24 年度の統合性能確認試験で設定した各種測定装置の管理限界に収まっているか否かを確認した。なお、被測定体は、LANL が所有するものを使用した。

また、平成 24 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、長期性能確認試験の結果を分析し反映した。

1.2. 長期管理限界の妥当性確認試験

1.2.1. 中性子検出器

Pu 線源及び AmLi 線源を用いて検出効率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。

表 1.2-1 に Pu 線源（FCZ-158）の測定について平成 24 年度に設定した管理限界（ $\pm 2\sigma$ ）を、表 1.2-2 に本年度 Pu 線源（FCZ-158）を用いて測定した検出効率の結果を示す。管理限界（ $\pm 2\sigma$ ）に収まっているか否かは Yes/No で表記した。10 月は、測定を繰り返し行ったが、測定値が管理限界に収まらなかった。11 月以降は、10 月に管理限界に収まらなかった原因を調査するため、月一回の頻度で検出効率の測定を継続したが、1 月の測定結果を除いては管理限界に収まらなかった。

表 1.2-2 のデータを図示すると図 1.2-1 となる。この図において、破線は管理限界（ $\pm 2\sigma$ ）を示す。この図から、今年度実施した検出効率の測定結果は、管理限界の設定のために実施した測定の平均値（7.25%）を超える値が多いことがわかる。今年度の測定結果の平均値は 7.35%（標準偏差は 0.07%）であった。この 7.35%を平均値として、管理限界（ $\pm 2\sigma$ ）を定めたのが図 1.2-2 の赤色破線である。この赤色破線を管理限界とすると、今年度の測定結果は、管理限界に収まる測定データ数が増える。7 月及び 1 月の測定結果は依然として管理限界に収まっていない。

図 1.2-1 及び図 1.2-2 の比較から、表 1.2-2 において 10 月以降の測定結果が管理限界に収まらない原因として、管理限界に偏りがあることが考えられる。また、今年度の測定結果の平均値を基準に管理限界を設定した場合においても、 $\pm 2\sigma$ に収まらない測定結果が存在するため、 σ を過小評価している可能性がある。

表 1.2-1 Pu 線源（FCZ-158）の管理限界

	-2 σ （下限）	+2 σ （上限）
管理限界	7.17	7.33

表 1.2-2. Pu 線源 (FCZ-158) の測定値

Date	Efficiency [%]	<2 σ ?
5/16/2013	7.32	Yes
6/24/2013	7.29	Yes
7/25/2013	7.26	Yes
9/9/2013	7.55	No
9/9/2013	7.29	Yes
10/16/2013	7.36	No
10/16/2013 #2	7.36	No
10/16/2013 #3	7.38	No
10/16/2013 #4	7.37	No
10/16/2013 #5	7.35	No
10/16/2013 #6	7.44	No
10/17/2013	7.34	No
10/17/2013 #2	7.35	No
11/27/2013	7.34	No
12/9/2013	7.40	No
12/9/2013 #2	7.35	No
1/14/2014	7.21	Yes
2/11/2014	7.34	No

(検出効率の平均値=7.35、標準偏差=0.07)

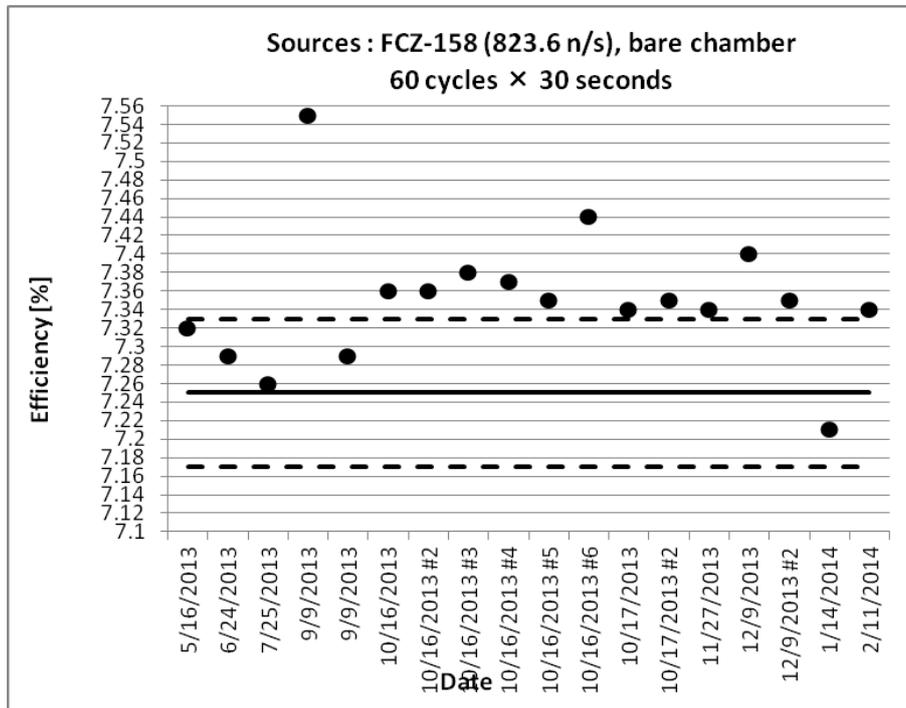


図 1.2-1. Pu 線源の測定値 (破線は 2 σ の管理限界を示す。)

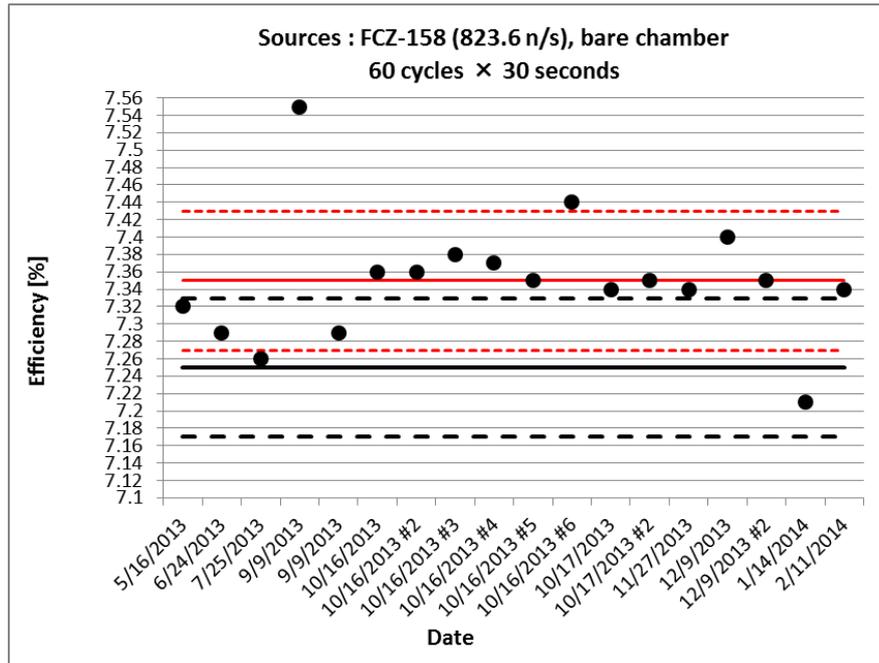


図 1.2-2. Pu 線源の測定値

(赤の実線は測定値の平均、赤の点線は測定値の平均から $\pm 2\sigma$ の位置を示す。)

表 1.2-3 に AmLi 線源の測定について設定した管理限界 ($\pm 2\sigma$) を、表 1.2-4 に AmLi 線源を用いて測定したシングル値 (ここで、シングル値は検出効率と等価な物理量となる。) の結果を示す。9 月、12 月、1 月及び 2 月の測定結果が管理限界に収まらなかった。ただ、表 1.2-2 に示した Pu 線源 (FCZ-158) の測定で管理限界に収まらなかった 10 月に、管理限界に収まっている。

表 1.2-4 のデータを図示すると図 1.2-3 となる。この図において、破線は管理限界 ($\pm 2\sigma$) を示す。この図から、今年度実施したシングル値の測定結果は、管理限界の設定のために実施した測定の平均値 (24647) を下回る値が多いことがわかる。今年度の測定結果の平均値は 24594 (標準偏差は 44) であった。この平均値を基準として、管理限界 ($\pm 2\sigma$) を定めたのが図 1.2-4 の赤色破線である。この赤色破線を管理限界とすると、今年度の測定結果は、管理限界に収まる測定データ数が増える。しかしながら、1 月及び 2 月の測定結果は管理限界には依然として収まっていない。

図 1.2-3 及び図 1.2-4 の比較から、表 1.2-4 において管理限界に収まらない測定結果が存在する原因として、管理限界に偏りがある (管理限界が低めに設定されている) ことが考えられる。

表 1.2-3 AmLi 線源の管理限界

	-2 σ (下限)	+2 σ (上限)
管理限界	24594	24698

表 1.2-4 AmLi 線源の測定値

Date	Singles [cps]	<2 σ ?
5/17/2013	24629	Yes
6/24/2013	24639	Yes
7/25/2013	24631	Yes
9/9/2013	24627	Yes
9/15/2013	24583	No
10/16/2013	24598	Yes
11/27/2013	24604	Yes
12/9/2013	24586	No
1/14/2014	24538	No
2/11/2014	24504	No

(計数値の平均値=24594、標準偏差=44)

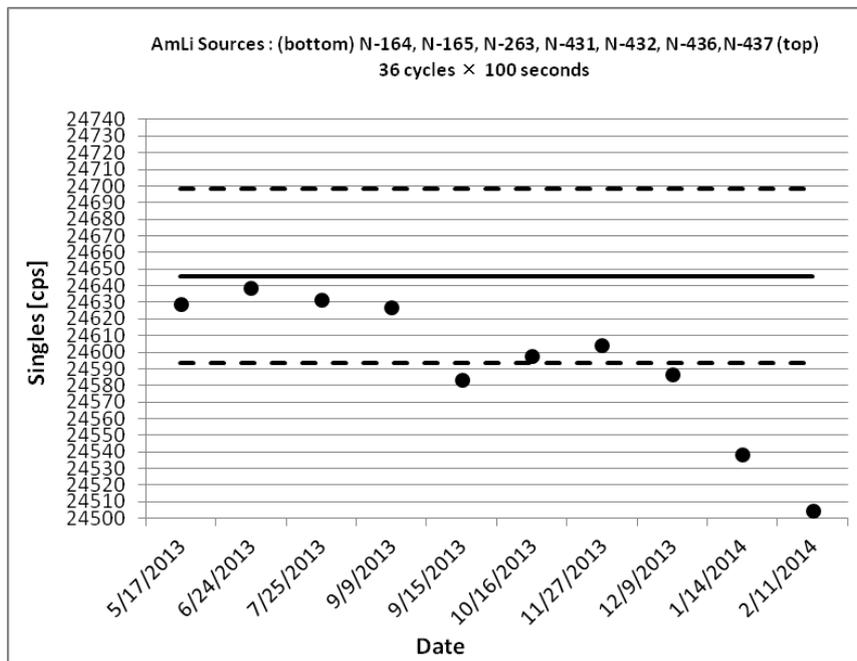


図 1.2-3. AmLi 線源の測定値 (破線は 2 σ の管理限界を示す。)

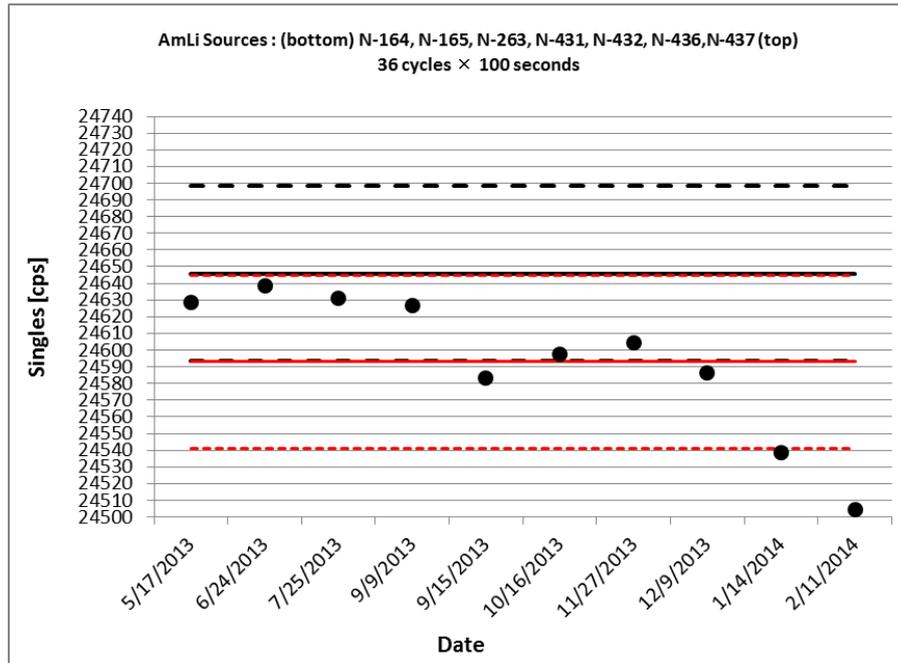


図 1.2-4. AmLi 線源の測定値

(赤の実線は測定値の平均、赤の点線は測定値の平均から $\pm 2\sigma$ の位置を示す。)

1.2.2. ガンマ線検出器

1.2.2.1. 下部のガンマ線検出器

Pu 線源 (CBNM61) を用いて 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、管理限界に収まっているか否かの確認を行った。

表 1.2-5 にガンマ線検出器 (下部) による Pu 線源 (CBNM61) の測定について設定した管理限界 ($\pm 2\sigma$) を、表 1.2-6 にガンマ線検出器 (下部) で Pu 線源 (CBNM61) を用いて測定した Pu 同位体比の結果を示す。管理限界 ($\pm 2\sigma$) に収まっているか否かは Yes/No で表記した。

$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、一年を通じて測定結果は管理限界に収まった。一方、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、10月から2月の間、測定結果は管理限界に収まらなかった。

表 1.2-6 のデータを図示すると図 1.2-5 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) 及び図 1.2-6 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) となる。これらの図において、破線は管理限界 ($\pm 2\sigma$) を示す。図 1.2-6 から、今年度ガンマ線検出器 (下部) で測定した $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の結果は、管理限界の設定のために実施した測定の平均値 (0.030) を下回る値が多いことがわかる。今年度の測定結果の平均値は 0.029 (標準偏差は 0.000) であった。この平均値を基準として、管理限界 ($\pm 2\sigma$) を定めたのが図 1.2-7 の赤色破線である。この赤色破線を管理限界とすると、今年度の測定結果は、管理限界に収まる測定データ数が増える。しかしながら、7月及び2月の測定結果は管理限界に依然として収まっていない。

図 1.2-6 及び図 1.2-7 の比較から、表 1.2-2 において測定結果が管理限界に収まらない原因とし

て、管理限界に偏りがあることが考えられる。また、今年度の測定結果の平均値を基準に管理限界を設定した場合においても、 $\pm 2\sigma$ に収まらない測定結果が存在するため、 σ を過小評価している可能性がある。

表 1.2-5 ガンマ線検出器（下部）の管理限界

		-2σ （下限）	$+2\sigma$ （上限）
管理限界	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.36	0.44
	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.029	0.030

表 1.2-6. ガンマ線検出器（下部）の測定値

Date	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$<2\sigma?$	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$<2\sigma?$
5/29/2013	0.411	Yes	0.029	No
5/29/2013 #2	0.360	Yes	0.029	Yes
6/25/2013	0.419	Yes	0.029	Yes
7/26/2013	0.427	Yes	0.030	Yes
9/10/2013	0.432	Yes	0.029	No
9/10/2013 #2	0.394	Yes	0.029	Yes
10/18/2013	0.436	Yes	0.028	No
10/18/2013	0.404	Yes	0.029	No
11/26/2013	0.390	Yes	0.029	No
12/10/2013	0.394	Yes	0.029	No
1/14/2014	0.385	Yes	0.028	No
2/11/2014	0.395	Yes	0.028	No

($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の平均値=0.404、標準偏差=0.020)

($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の平均値=0.029、標準偏差=0.001)

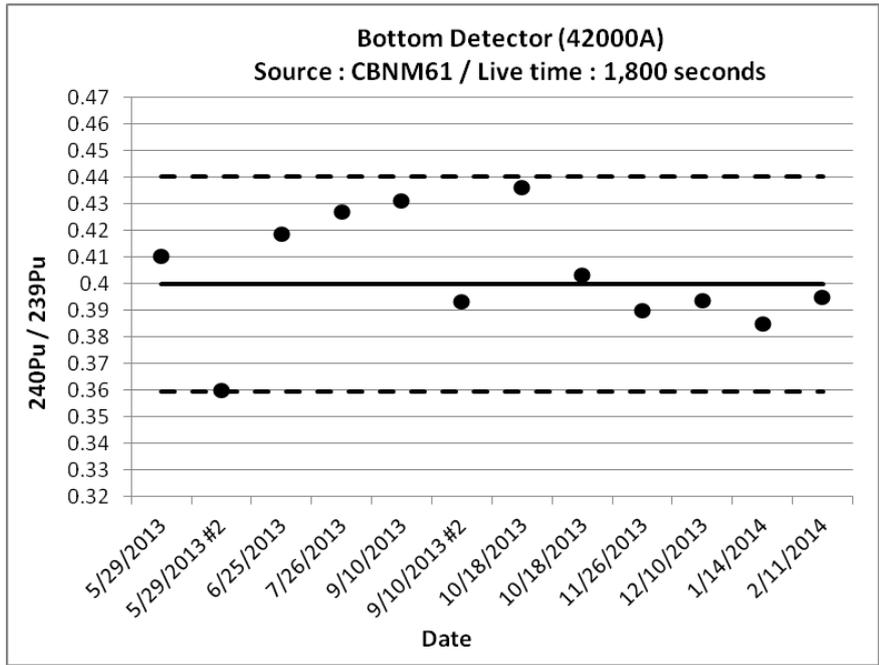


図 1.2-5. ガンマ線検出器（下部）の測定値 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) (破線は 2σ の管理限界を示す。)

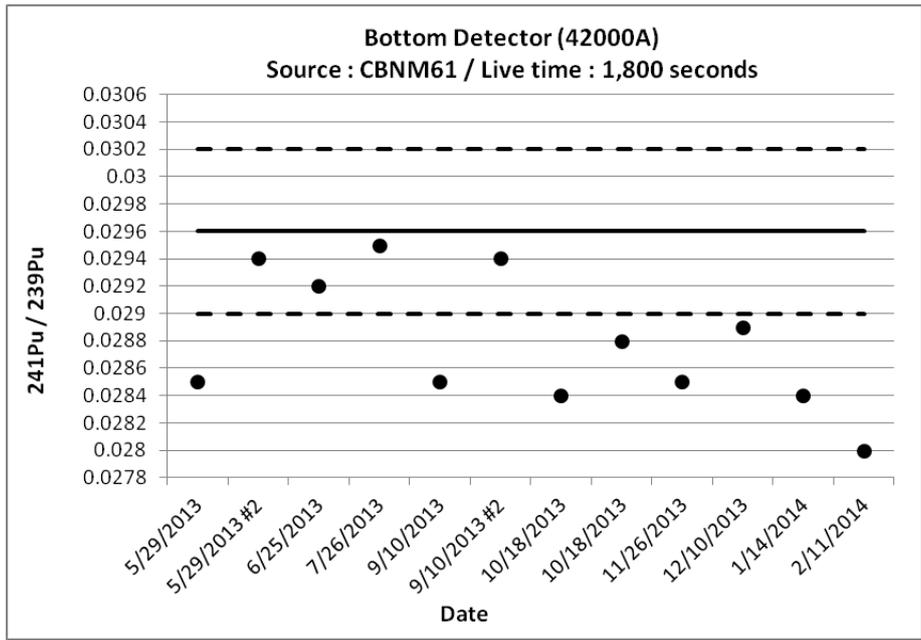


図 1.2-6. ガンマ線検出器（下部）の測定値 ($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) (破線は 2σ の管理限界を示す。)

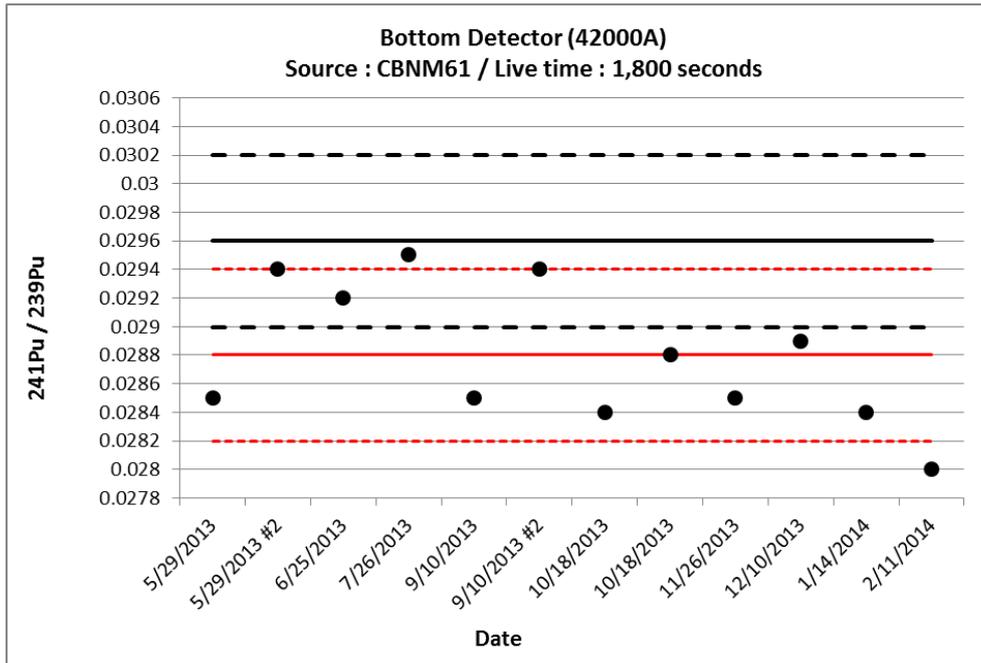


図 1.2-7. ガンマ線検出器（下部）の測定値 ($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$)

(赤の実線は測定値の平均、赤の点線は測定値の平均から $\pm 2\sigma$ の位置を示す。)

1.2.2.2. 中央部のガンマ線検出器

表 1.2-7 にガンマ線検出器（中央部）による Pu 線源（CBNM61）の測定について設定した管理限界 ($\pm 2\sigma$) を、表 1.2-8 にガンマ線検出器（中央部）で Pu 線源（CBNM61）を用いて測定した Pu 同位体比の結果を示す。管理限界 ($\pm 2\sigma$) に収まっているか否かは Yes/No で表記した。

$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、12 月を除くと一年を通じて管理限界に収まった。一方、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、5 月を除くと一年を通じて管理限界に収まった。

表 1.2-8 のデータを図示すると図 1.2-8 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) 及び図 1.2-9 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) となる。これらの図において、破線は管理限界 ($\pm 2\sigma$) を示す。図 1.2-9 から、今年度ガンマ線検出器（中央部）で測定した $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の結果は、管理限界の設定のために実施した測定の平均値 (0.030) を下回る値が多いことがわかる。今年度の測定結果の平均値は 0.0285 (標準偏差は 0.000) であった。この平均値を基準として、管理限界 ($\pm 2\sigma$) を定めたのが図 1.2-10 の赤色破線である。この赤色破線を管理限界とすると、今年度の測定結果は、全て管理限界に収まる。

図 1.2-9 及び図 1.2-10 の比較から、表 1.2-8 において $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の測定結果が管理限界に収まらない原因として、管理限界に偏りがあることが考えられる。

表 1.2-7 ガンマ線検出器（中央部）の管理限界

		-2 σ (下限)	+2 σ (上限)
--	--	------------------	------------------

管理限界	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.35	0.45
	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.028	0.030

表 1.2-8. ガンマ線検出器（中央部）の測定値

Date	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$<2\sigma?$	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$<2\sigma?$
5/29/2013	0.423	Yes	0.0278	No
6/25/2013	0.420	Yes	0.029	Yes
7/26/2013	0.385	Yes	0.029	Yes
9/10/2013	0.432	Yes	0.029	Yes
10/18/2013	0.380	Yes	0.029	Yes
11/26/2013	0.409	Yes	0.028	Yes
12/10/2013	0.656	No	0.028	Yes
1/14/2014	0.406	Yes	0.028	Yes

($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の平均値=0.439、標準偏差=0.089)

($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の平均値=0.029、標準偏差=0.000)

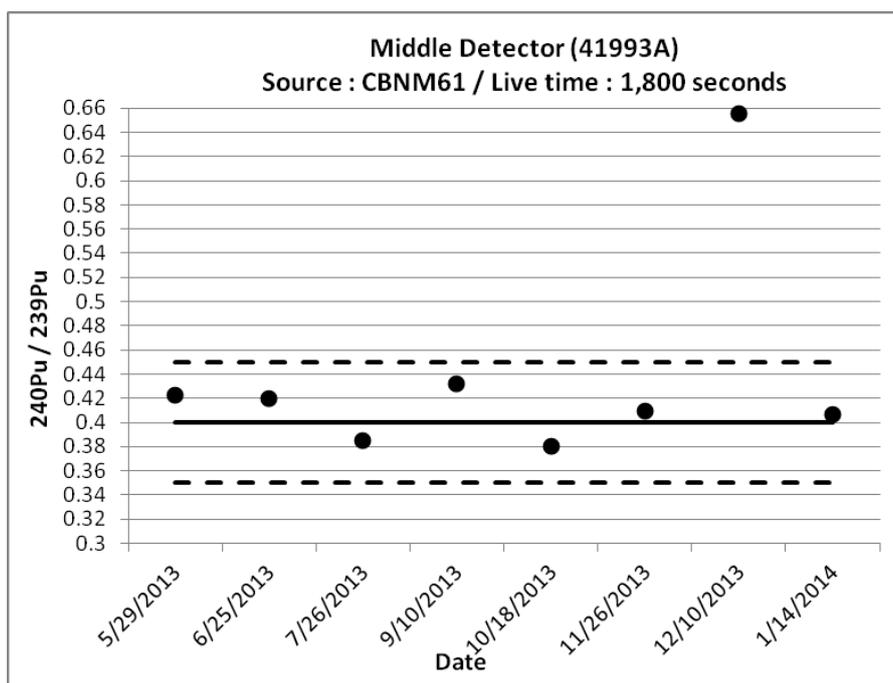


図 1.2-8. ガンマ線検出器（中央部）の測定値 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) (破線は 2σ の管理限界を示す。)

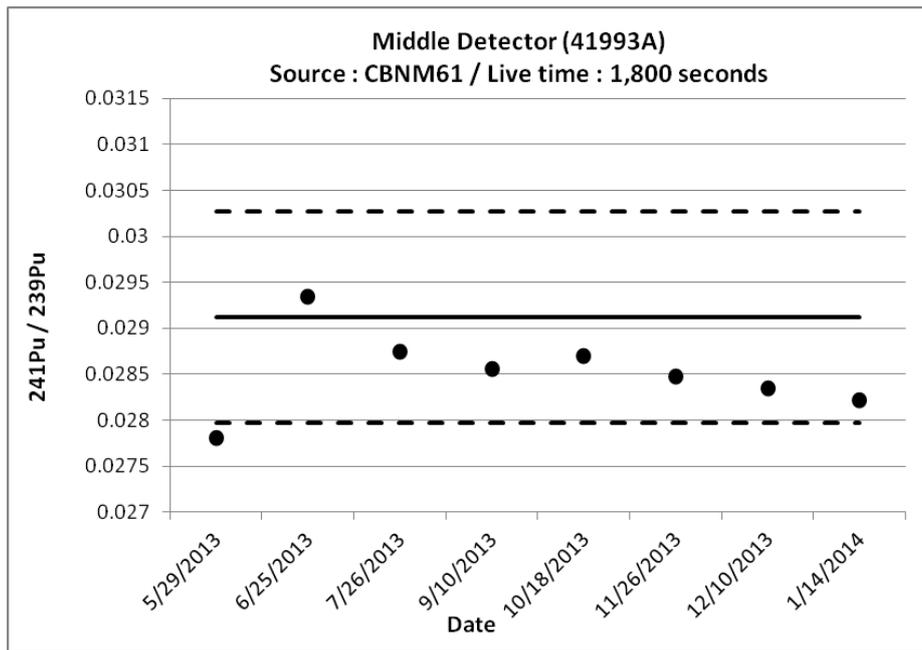


図 1.2-9 ガンマ線検出器（中央部）の測定値 ($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) (破線は 2σ の管理限界を示す。)

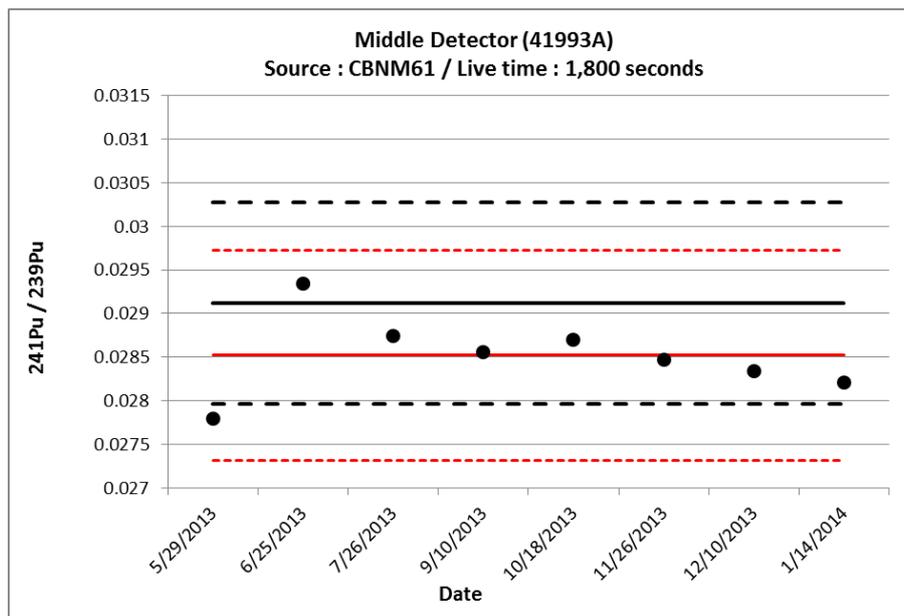


図 1.2-10. ガンマ線検出器（中央部）の測定値 ($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$)

(赤の実線は測定値の平均、赤の点線は測定値の平均から $\pm 2\sigma$ の位置を示す。)

1.2.2.3. 上部のガンマ線検出器

表 1.2-9 にガンマ線検出器（上部）による Pu 線源（CBNM61）の測定について設定した管理限界 ($\pm 2\sigma$) を、表 1.2-10 にガンマ線検出器（上部）で Pu 線源（CBNM61）を用いて測定した Pu 同位体比の結果を示す。管理限界 ($\pm 2\sigma$) に収まっているか否かは Yes/No で表記した。

$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、10月及び11月に管理限界に収まらない結果が得られた。一方、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比は、1月及び2月に管理限界に収まらない結果が得られた。

表 1.2-10 のデータを図示すると図 1.2-11 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) 及び図 1.2-12 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) となる。これらの図において、破線は管理限界 ($\pm 2\sigma$) を示す。図 1.2-11 から、今年度ガンマ線検出器 (上部) で測定した $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の結果は、管理限界の設定のために実施した測定の平均値 (0.388) を上回る値が多いことがわかる。今年度の測定結果の平均値は 0.404 (標準偏差は 0.021) であった。この平均値を基準として、管理限界 ($\pm 2\sigma$) を定めたのが図 1.2-13 の赤色破線である。この赤色破線を管理限界とすると、今年度の測定結果は、管理限界に収まる測定データ数が増える。しかしながら、7月の測定結果は管理限界に依然として収まっていない。

また図 1.2-12 から、今年度ガンマ線検出器 (上部) で測定した $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比の結果は、管理限界の設定のために実施した測定の平均値 (0.029) を下回る値が多いことがわかる。今年度の測定結果の平均値は 0.029 (標準偏差は 0.001) であった。この平均値を基準として、管理限界 ($\pm 2\sigma$) を定めたのが図 1.2-14 の赤色破線である。この赤色破線を管理限界とすると、今年度の測定結果は、11月を除いて管理限界に収まる。

図 1.2-11 と図 1.2-13 の比較、また、図 1.2-12 と図 1.2-14 の比較から、表 1.2-10 において測定結果が管理限界に収まらない原因として、管理限界に偏りがあることが考えられる。また、今年度の測定結果の平均値を基準に管理限界を設定した場合においても、 $\pm 2\sigma$ に収まらない測定結果が存在するため、 σ を過小評価している可能性がある。

表 1.2-9 ガンマ線検出器 (上部) の管理限界

		-2 σ (下限)	+2 σ (上限)
管理限界	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.36	0.42
	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	0.028	0.031

表 1.2-10. ガンマ線検出器（上部）の検出器の測定値

Date	$^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$<2\sigma?$	$^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$	$<2\sigma?$
5/29/2013	0.401	Yes	0.0293	Yes
6/25/2013	0.389	Yes	0.029	Yes
7/26/2013	0.442	No	0.029	Yes
7/26/2013	0.365	Yes	0.029	Yes
9/10/2013	0.422	No	0.028	No
9/11/2013	0.425	No	0.028	No
9/11/2013 #2	0.400	Yes	0.029	Yes
10/18/2013	0.423	No	0.029	Yes
11/26/2013	0.000	No	0.030	Yes
12/2/2013	0.415	Yes	0.029	Yes
12/10/2013	0.389	Yes	0.028	No
1/14/2014	0.389	Yes	0.028	No
2/11/2014	0.393	Yes	0.028	No

($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の平均値=0.404、標準偏差=0.021)

($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$ の平均値=0.029、標準偏差=0.001)

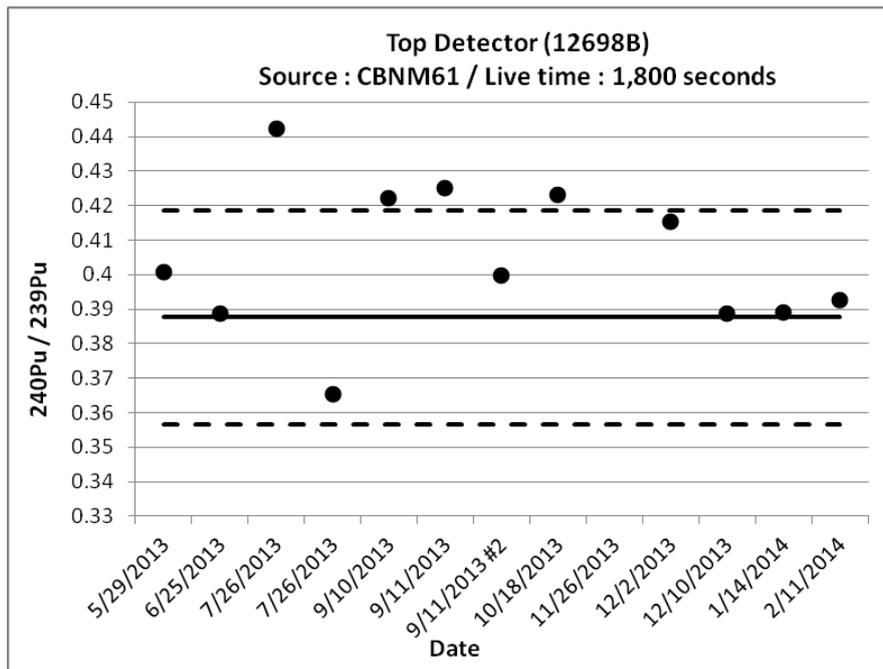


図 1.2-11. ガンマ線検出器（上部）の測定値 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) (破線は 2σ の管理限界を示す。)

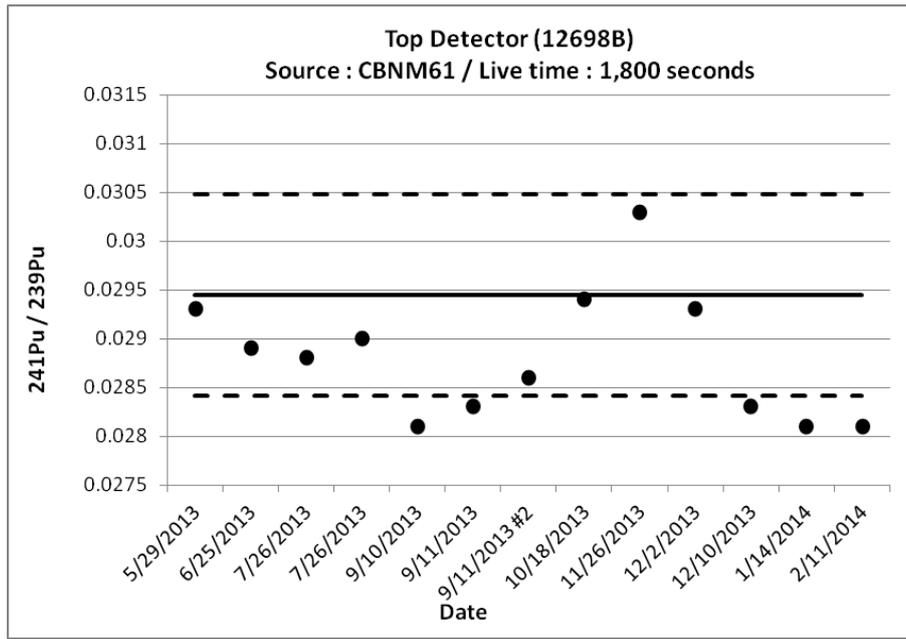


図 1.2-12. ガンマ線検出器（上部）の測定値 ($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$) (破線は 2σ の管理限界を示す。)

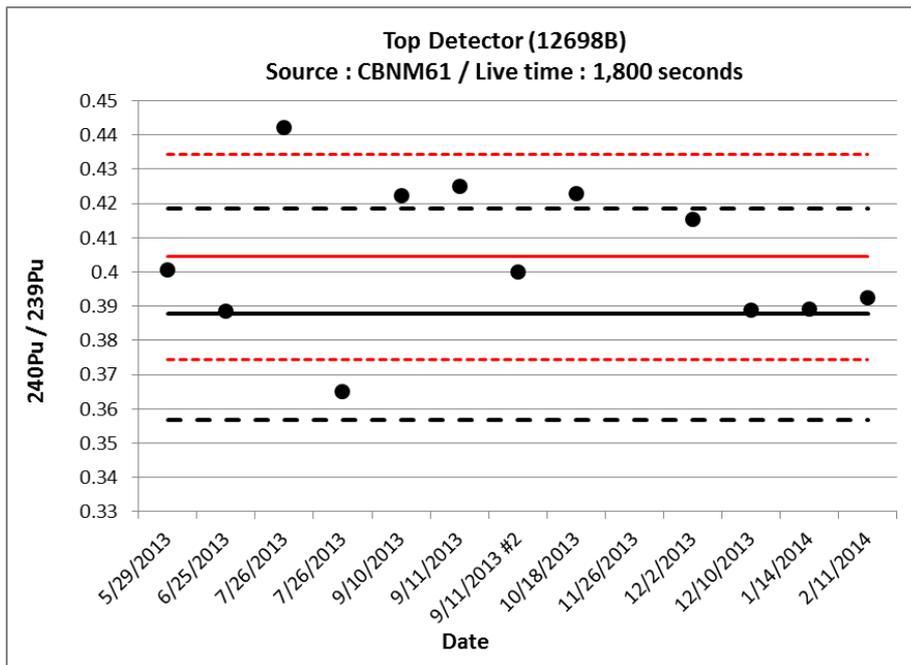


図 1.2-13. ガンマ線検出器（上部）の測定値 ($^{240}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$)
(赤の実線は測定値の平均、赤の点線は測定値の平均から $\pm 2\sigma$ の位置を示す。)

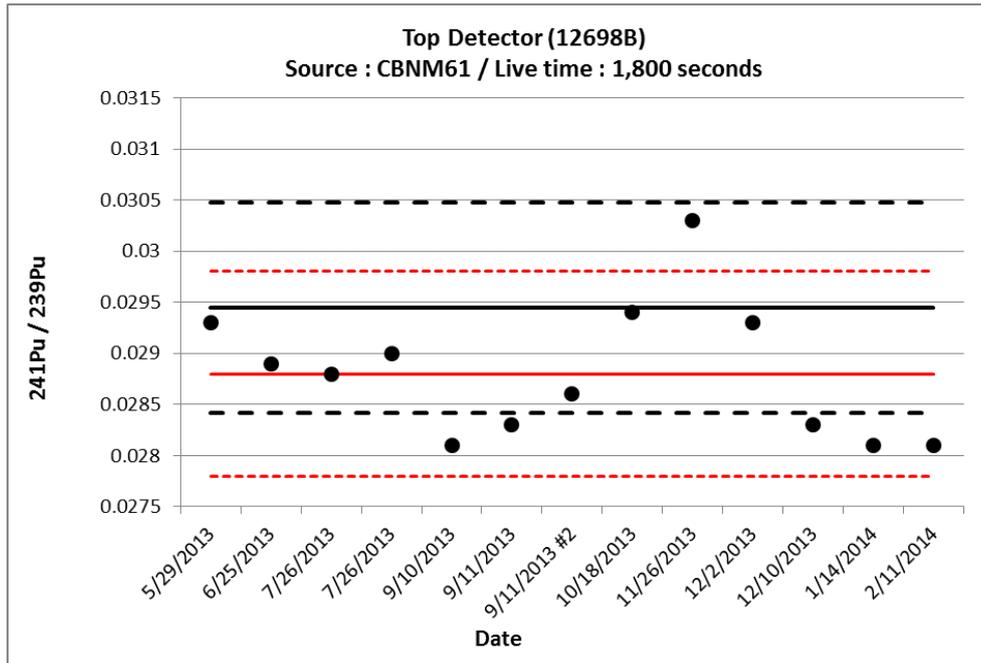


図 1.2-14. ガンマ線検出器（上部）の測定値 ($^{241}\text{Pu} / ^{239}\text{Pu}$)

(赤の実線は測定値の平均、赤の点線は測定値の平均から $\pm 2\sigma$ の位置を示す。)

1.2.3. 重量測定装置（ロードセル）

MOX 粉末貯蔵容器の重量測定を行い、測定値が管理限界内に収まっているか否かの確認を行った。

表 1.2-11 にロードセルによる MOX 粉末貯蔵容器の測定について設定した管理限界 ($\pm 2\sigma$) を、表 1.2-12 に MOX 粉末貯蔵容器の重量をロードセルで測定した結果を示す。ロードセルの設定を変更し、測定結果の小数点以下第二位まで表示（手順については、取扱説明書 WGA-710C シリーズ p.14 を参照）できるようになってからは、標準重錘（50 lb = 22.68 kg）の重量を測定した。表 1.2-13 にロードセルによる標準重錘の測定について見直した管理限界 ($\pm 2\sigma$) を、表 1.2-14 に標準重錘（50 lb = 22.68 kg）の重量をロードセルで測定した結果を示す。

表 1.2-12 及び表 1.2-14 のデータを図示すると、それぞれ図 1.2-15 及び図 1.2-16 となる。測定結果は管理限界に収まった。

表 1.2-11 ロードセルの管理限界値（MOX 粉末貯蔵容器）

	-2 σ （下限）	+2 σ （上限）
管理限界	162.7	165.9

表 1.2-12. ロードセルによる測定値（小数点以下 1 桁まで測定）

Date	weight
6/24/2013	163.8
7/29/2013	164.3
9/10/2013	164.4

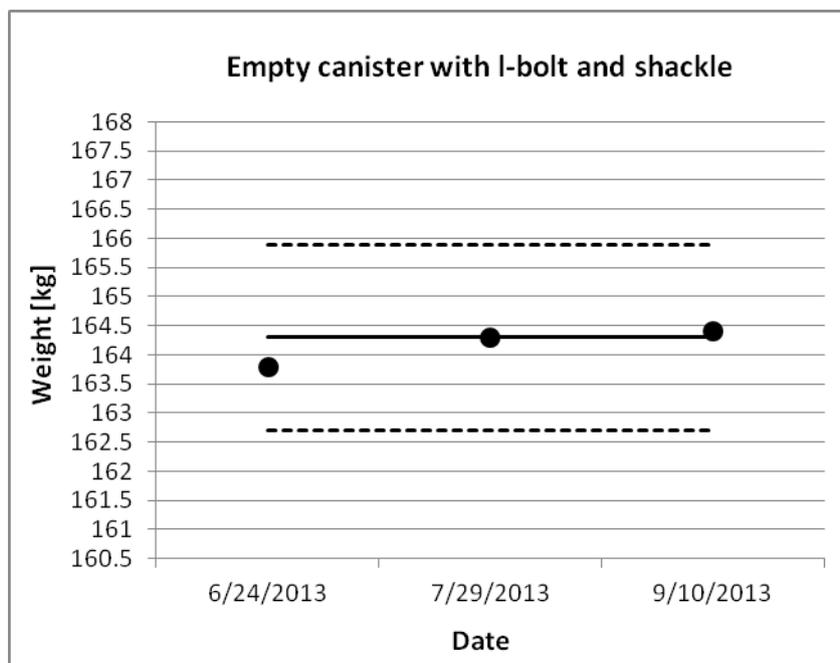


図 1.2-15. ロードセルによる測定値（小数点以下 1 桁まで測定）

表 1.2-13 ロードセルの管理限界値（標準重錘）

	-2 σ （下限）	+2 σ （上限）
管理限界	22.46	22.92

表 1.2-14. ロードセルによる測定値（小数点以下 2 桁まで測定）

Date	weight
11/25/2013	22.77
12/11/2013	22.69
1/14/2014	22.69
2/11/2014	22.69

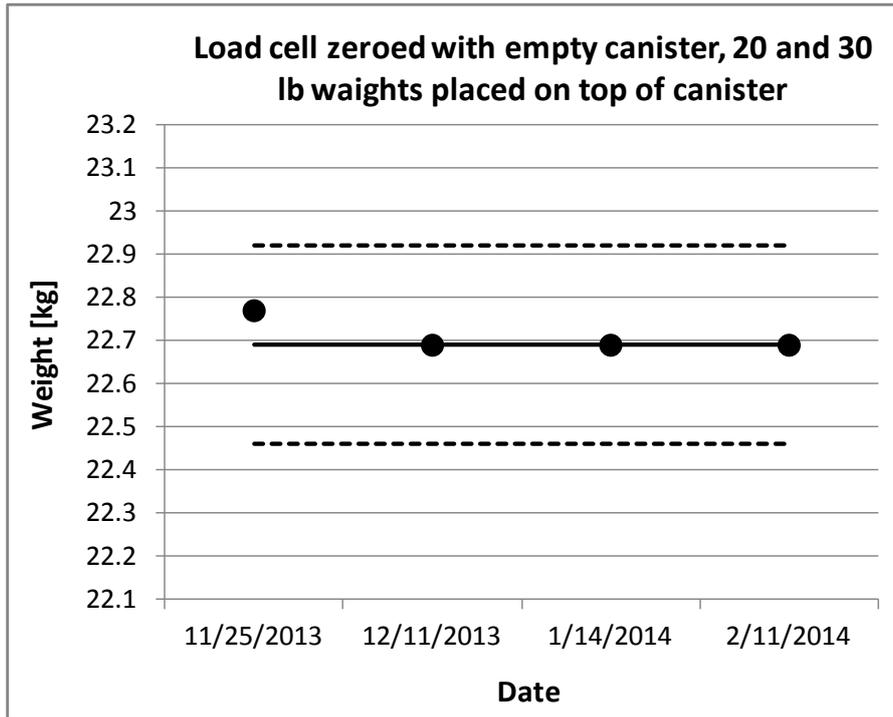


図 1.2-16. ロードセルによる測定値（小数点以下 2 桁まで測定）

1.2.4. 考察

今年度の長期性能確認試験において、管理限界に収まらない中性子検出器及びガンマ線検出器の測定結果が得られた。今年度の測定結果から算出した検出効率及び Pu 同位体比の平均値を基準として管理限界を設定すると、管理限界に収まるデータ数は増加した。このことから、管理限界に偏りがある可能性がある。管理限界が偏りを含む理由として、現在使用している管理限界に季節的変動が加味されていないことが考えられる。管理限界に収まらない測定結果が得られた他の原因としては、線源の配置の誤差も考えられる（図 1.2-2 中の 9 月の第一回目及び 1 月の測定結果。図 1.2-4 中の 2 月の測定結果）。また、 σ の過小評価の原因として、季節的変動の影響等、測定値をばらつかせる要素が（平成 24 年度設定の）管理限界に含まれていないことが考えられる。

中性子検出器の検出効率の管理限界を設定するために実施した測定結果の平均値は 7.25%であった。一方、今年度の測定結果の平均値は 7.35%であった。この 2 つの平均値の相対誤差は 1.4%程度になる。この値は、IAEA が示す User Requirements にある要求精度 0.85%より大きい。

今年度の長期性能確認試験において管理限界に収まらない測定結果が得られた原因が、平成 24 年度に設定した管理限界に季節的変動が考慮されていないことにあるか否かの調査が必要である。今年度一年を通じて行った測定結果を用いて、季節的変動が考慮した管理限界を設定し、月一回程度の頻度で、その管理限界に収まるか否かを確認する長期性能試験を実施する必要がある。試験を実施する際は、季節的変動する要素として温度が挙げられるので、測定環境の温度を記録しておく。

また測定値の誤差を示すのは必須である。

1.3. 測定手順書

平成 25 年度においては、付録 1 に示す項目について測定手順書をまとめた。

測定手順書の作成にあたり、中性子検出器の異常の発見の仕方を確認することなどを目的として、平成 25 年 12 月に米国ロスアラモス国立研究所への出張を実施した。この中性子検出器の異常の発見の仕方については、米国ロスアラモス国立研究所の Menlove 氏より手順案が示された。この案についても別添 1 に示す。この手順を有効とするために、検出器の健全状態でのプラトー曲線を測定しておく必要がある。

1.4. その他

1.4.1. ガンマ線検出器のCdフィルター

一般的に、カドミウム (Cd) フィルターは ^{241}Am が放出する低エネルギーガンマ線を遮蔽するために用いられている。低エネルギーガンマ線の遮蔽材として、IPCA にも Cd フィルターが設置されているが、IAEA は、Cd フィルターの代わりに、スズ (Sn) フィルターを用いることを期待している。

Cd は中性子を捕獲すると 651.2 keV のガンマ線を放出する。この捕獲反応からのガンマ線が検出されることで、そのエネルギーの付近に位置する ^{240}Pu から放出されるガンマ線のエネルギーピークのベースラインの計算精度が悪化する。そのため Cd を取り除くことで等価 ^{240}Pu 同位体組成比 f の測定結果の精度の向上が期待されると IAEA は考えている。

本件は、日本原燃の六ヶ所再処理工場に導入されている IPCA と同型の測定機器の運用経験 (MOX 原料粉末が充填されているキャニスタの測定経験) を参考にし、Cd フィルターを Sn フィルターに置き換える必要性を検討する必要がある。

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、大型 MOX 燃料加工施設の 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。図 2.1-1 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。単位長さ当たりの Pu 質量に有効長を乗じて集合体中の総 Pu 質量を求め、申告値を検証する。AFAS に要求されている主な性能は表 2.1-1 のとおりである。

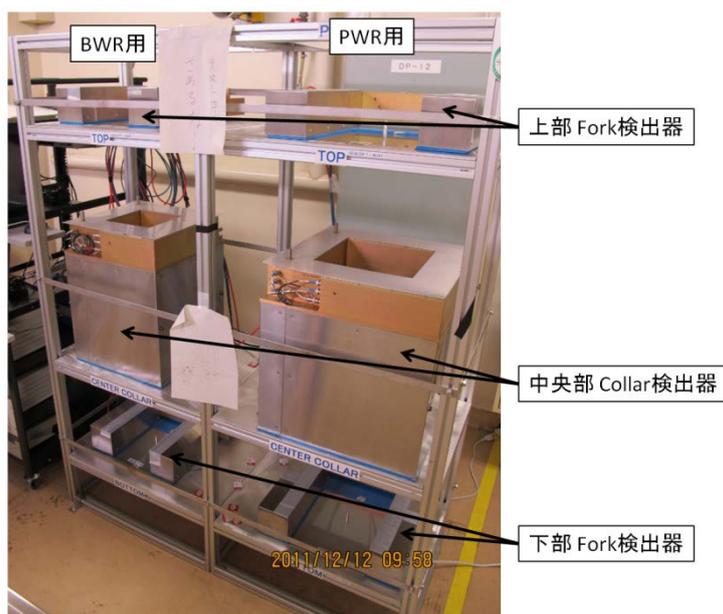


図 2.1-1. AFAS の外観（左：BWR 用、右：PWR 用）

表 2.1-1. 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 25 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、平成 24 年度統合性能確認試験の結果得られた測定精度及び各検出器の検出効率を踏まえ、PWR 用検出器を使用し、燃料集合体の単位長さ当たり Pu 質量(gPu/cm)及び有効長(cm)を測定する性能に係る確認試験を行った。なお、燃料集合体は、JAEA が所有するふげん型 MOX 燃料集合体を使用した。

また、平成 24 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、校正手順、測定手順）に対して、本年度実施した性能確認試験で得られた結果を分析し反映した。

2.2. 性能確認試験実施場所

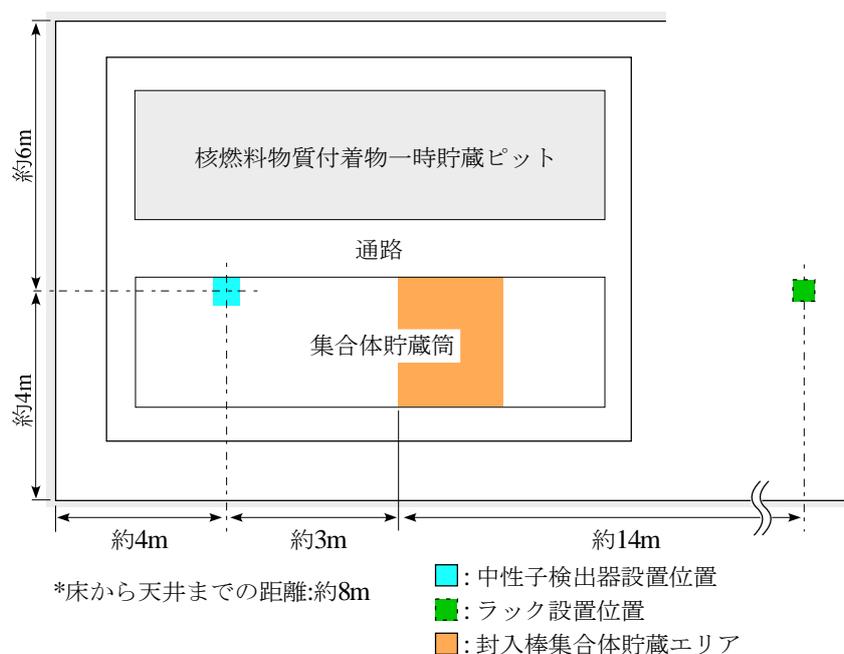


図 2.2-1. 本性能確認試験における PWR 用 AFAS 設置状況

本性能確認試験は、平成 24 年度と同様に、プルトニウム燃料第二開発室集合体貯蔵室（JAEA 東海研究開発センター核燃料サイクル工学研究所プルトニウム燃料技術開発センター）で実施した。貯蔵室内における PWR 用 AFAS の設置位置（水色）を図 2.2-1 に示す。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約 9 kg、集合体貯蔵筒内（橙色）に約 40 kg の Pu 在庫があり、AFAS 設置位置におけるバックグラウンド中性子線量は、大型 MOX 施設加工施設での設置環境に比べて高い。中性子計数装置（AMSR）及び制御用 PC 等を収納したラックは、測定作業員の被ば

く低減を考慮し、中性子検出器から約 17m 離れた位置（緑色）に設置した。（平成 24 年度に LANL より提供された長さ 20 m の信号ケーブル、HV ケーブル及び+12V ケーブルを使用した。）

2.2.1. バックグラウンド測定

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 41kg の核物質在庫があるため、空間の中性子線量が高い。バックグラウンド中性子の影響を集合体測定結果から高精度に差し引くために長時間バックグラウンド測定を行い、その結果を 2.4 節で述べる試験項目に適用した。

長時間バックグラウンド測定の結果を表 2.2-1. 長時間バックグラウンド測定の結果に示す。本計数率計数値は、検出器設置位置の集合体貯蔵筒に集合体がなく、全ての封入棒集合体が所定の場所に貯蔵されている状態で長時間測定したものである。本試験期間中、バックグラウンドの変動要因となるような、試験に使用する封入棒集合体以外の核物質の移動等の行為は行わなかった。

表 2.2-1. 長時間バックグラウンド測定の結果

測定日	測定時間 (分)	検出器							
		Collar				Top fork		Bottom fork	
		Singles (cps)	σ (Singles)	Doubles (cps)	σ (Doubles)	Singles (cps)	σ (Singles)	Singles (cps)	σ (Singles)
2013/5/28	210	5,278.68	0.73	-4.80	0.37	450.20	0.19		
2013/5/29	170							453.28	0.21

(注) σ (Singles)及び σ (Doubles)は、シングル値とダブル値の標準偏差。

2.3. 試験配置

2.3.1. PWR用AFASの配置



図 2.3-1. PWR 用 AFAS (Collar 検出器及び Fork 検出器) の配置

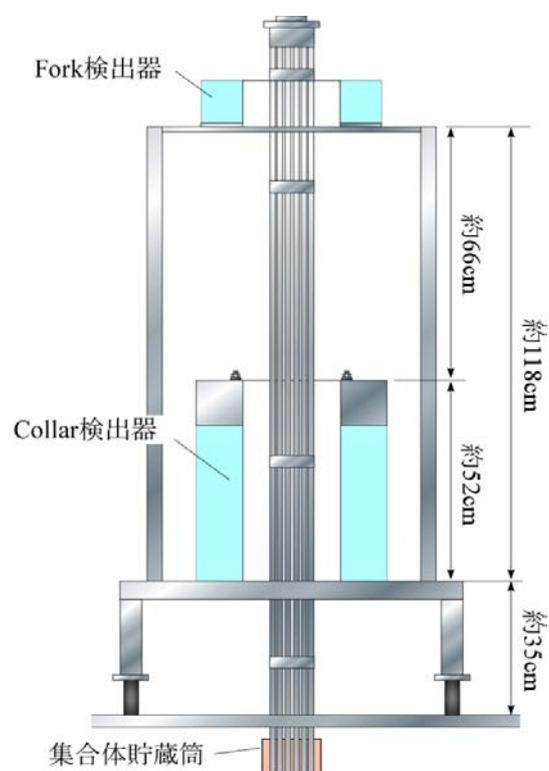


図 2.3-2. Collar 検出器及び Fork 検出器の設置位置の床面からの高さ

本性能確認試験における PWR 用 AFAS（下部 Fork 検出器は除く。）の配置を図 2.3-1 に示す。床面からの各検出器の設置位置の高さは図 2.3-2 のとおりである。平成 23 年度に製作した架台に Collar 検出器及び上部 Fork 検出器を載せることで、実施設での設置状態を模擬した。

検出器設置位置の真下の集合体貯蔵筒から集合体をクレーンで引き上げ、集合体は測定位置で静止させた（測定位置の誤差は 1 mm 程度）。

2.3.2. システム構成

Collar 検出器及び上部 Fork 検出器を用いた測定システムの構成図を図 2.3-3 に示す。各検出器の検出信号は、INTERCONNECT BOX 及び DIFF RECEIVER/REDUNDANCY を経由して計数装置 AMSR150 に入力し、計数される。AMSR150 は PC にインストールしているソフトウェア INCC5.12 から制御（AMSR150 に対し高電圧の印加や測定の開始を指示）する。本性能確認試験では、測定を補完するために、AMSR150 をもう一台使用した。この AMSR150 の制御には MIC (Multi-Instrument Collect)を用いた。LANL が提供した約 20 m の長さの差動信号、HV 及び +12V の 3 本のケーブルは INTERCONNECT BOX と DIFF RECEIVER/REDUNDANCY の接続に使用した。

本性能確認試験では、表 2.3-1 に示す各種パラメータを用いて測定を実施した。

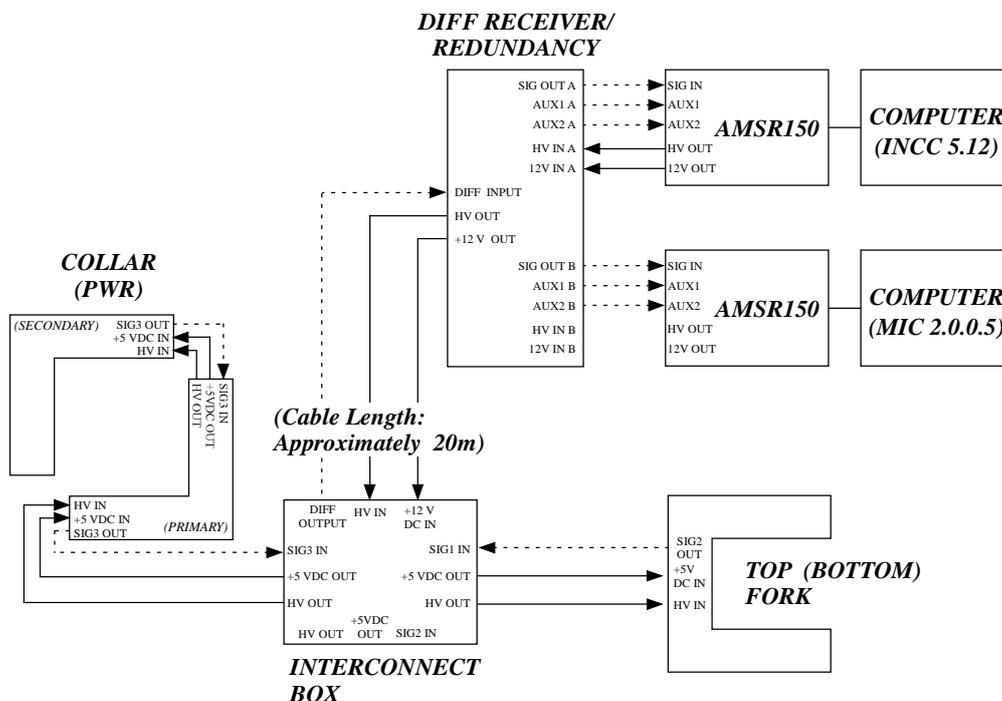


図 2.3-3. Collar 検出器及び上部 Fork 検出器を用いた測定システムの構成図

表 2.3-1. PWR 用 AFAS のパラメータの設定値(LANL の評価値)

測定及び解析に係るパラメータ		PWR 用 AFAS		
		Collar 検出器	上部 Fork 検出器	下部 Fork 検出器
計数装置		AMSR	AMSR	AMSR
不感時間補正 パラメータ	a (μs)	0.3458	0.0000	0.0000
	b (μs) ²	0.02989	0.0000	0.0000
	同時計測不感時間 (ns)	86.5	0.0000	0.0000
プレディレイ P (μs)		1.5	1.5	1.5
中性子検出効率 ε (Cf 線源)		0.675	0.0126 (暫定)	0.0126 (暫定)
ダイアウエイタイム τ (μs)		50.0	50.0	50.0
同時中性子計測用ゲート時間幅 G (μs)		64.0	64.0	64.0
印加電圧 (V)		1,720	1,720	1,720

2.3.3. 集合体の仕様

本性能確認試験には、プルトニウム燃料第二開発室集合体貯蔵室に貯蔵されている集合体を使用した。この集合体は、プルトニウム燃料第二開発室において、同開発室等の残存核燃料物質の処理のために平成 22 年より製造している「ふげん」タイプの集合体の 1 つである。同心円上に内層、中間層及び外層にそれぞれ封入棒を 4 本、8 本及び 16 本配列した 3 層クラスタ構造を持ち、全長は 4.4 m である。集合体の概略図を図 2.3-4 に示す。

本性能確認試験で使用した 3 体の集合体の仕様及び Pu 同位体組成比を表 2.3-2 及び表 2.3-3 にそれぞれ示す。集合体は、残存するふげん用燃料棒、製品ペレットを充填した封入棒、原料粉末及びスクラップ等の混合粉末を原料とするペレットを充填した封入棒などを組み合わせて組み立てられている。そのため、実際に原子炉に装荷される集合体と異なり、一つの集合体を構成する各封入棒の仕様 (Pu 含有率、ペレット直径等) は必ずしも同一ではない。本性能確認試験に使用する集合体の選定にあたっては、各集合体の仕様を比較し、可能な限り同等の性状・組成の核物質で構成され、単位長さあたりの Pu 質量が一定となる集合体を選択した。

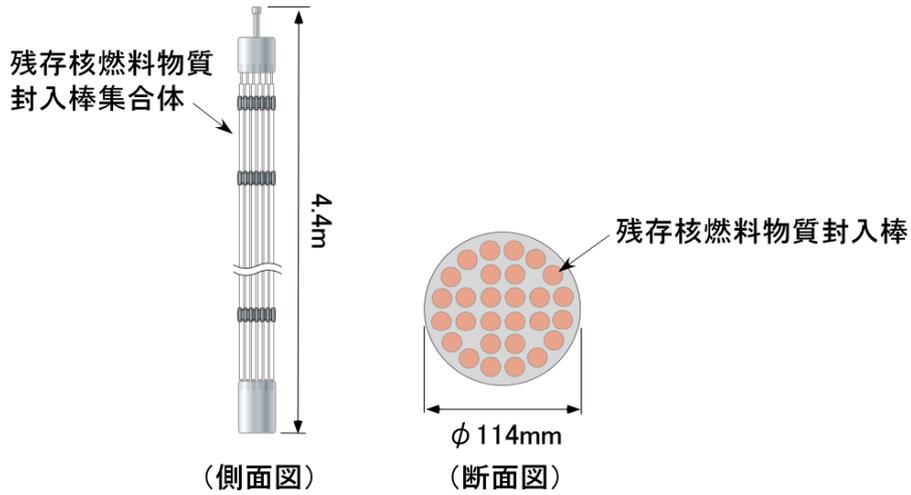


図 2.3-4. 本性能確認試験に使用した集合体の概略図

表 2.3-2. 本性能確認試験で使用した集合体の仕様

集合体 No.	Pu量 (g)	Pu含有率 (%)	有効長 (m)	内容
P1	3533.991	2.1	3.7	残存核燃料物質 (製品ペレット)
P2	3139.806	1.96	3.7	残存核燃料物質 (製品ペレット) 過去に製造したふげん取替燃料棒 (5本)
S1	1983.007	1.36	3.8	残存核燃料物質 (原料粉末・スクラップ)

表 2.3-3. 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							
	²³⁸ Pu (%)	²³⁹ Pu (%)	²⁴⁰ Pu (%)	²⁴¹ Pu (%)	²⁴² Pu (%)	Pu Date	²⁴¹ Am (%)	Am Date
P1	1.3233	61.4933	27.8411	3.8401	5.5022	2013/1/30	6.3855	2013/1/30
P2	1.2638	62.3620	27.3883	3.7397	5.2462	2013/1/30	6.4546	2013/1/30
S1	0.8404	68.9247	24.2715	2.4621	3.5013	2013/1/30	6.2192	2013/1/30

2.4. MOX燃料集合体を使用した性能確認試験

AFAS の燃料集合体の Pu 質量 (gPu/cm) を測定する性能に関連し、表 2.4-1 にあがる 4 項目について試験及び評価を行った。各試験結果は、2.4.1 から 2.4.4 に記載する。

表 2.4-1. Pu 質量 (gPu/cm) 測定に関する評価項目

	評価項目
(1)	測定時間と測定精度の関係
(2)	バックグラウンド中性子の増減が測定結果へ与える影響測定条件関連
(3)	測定の繰返し精度 (標準偏差より偶然誤差を確定)
(4)	バックグラウンド中性子の増減と検出限界の関係

2.4.1. 測定時間と測定精度の関係

(a) 目的

IAEA が示す User Requirements では、AFAS の測定時間は 10 分以内と要求されている。本評価試験では、この要求される測定時間 10 分における AFAS の測定精度 (^{240}Pu 実効質量の相対誤差) の詳細な検討を実施した。

(b) 方法

平成 24 年度に受託した業務 (件名:平成 24 年度大型 MOX 燃料加工施設保障措置試験研究) (以下、「平成 24 年度受託業務」という。) では、集合体 P2 について放出される中性子の 30 秒間の測定を連続して実施し、合計で 141 分 (30 秒×281 回) の測定を実施した。本評価試験では、この測定データの測定開始から 10 分間 (30 秒×20 回) のものを用いることにより、要求される測定時間 10 分での ^{240}Pu 実効質量の相対誤差 (^{240}Pu 実効質量の測定誤差を ^{240}Pu 実効質量で除したもの) を計算する。中性子増倍を考慮した中性子計数値の補正には Known-alpha 法を用いる。また、測定開始から 5 分間~15 分間の 30 秒ごとの ^{240}Pu 実効質量の相対誤差も、同様の方法で算出する。

(c) 結果

それぞれの測定時間における ^{240}Pu 実効質量の相対誤差の計算結果を図 2.4-1 に示す。 ^{240}Pu 実効質量の相対誤差は、測定時間が増加するほど減少する傾向にある。これは、測定時間が大きいほど ^{240}Pu 実効質量の計算に用いるデータ数が多くなるためである。

測定時間 10 分での ^{240}Pu 実効質量の相対誤差は 0.102% となった。

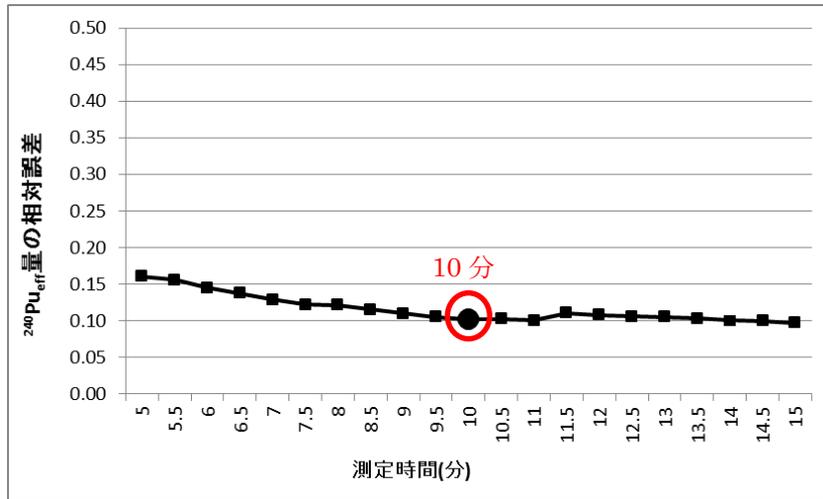


図 2.4-1. 測定時間と測定精度の相関評価試験の結果

(d) 考察

測定時間 10 分において、集合体 P2 の測定で得られた ^{240}Pu 実効質量の相対誤差は、IAEA が示す User Requirements にある ^{240}Pu 実効質量測定精度(<2.0%)と比較して十分小さい値である。また、前後 5 分間の測定時間においても、集合体 P2 の測定で得られた ^{240}Pu 実効質量の相対誤差は 2.0%より小さい。以上のことから、測定時間 10 分での AFAS の測定精度は、要求されている ^{240}Pu 実効質量測定精度 2.0%を満足していると言える。

実際に大型 MOX 燃料加工施設で製造する PWR 用燃料集合体は、単位長さあたりの Pu 質量がペレットの外径、集合体燃料棒の数及び平均 Pu 含有率を考慮して本性能試験で使用した集合体と比較すると大きくなる。そのため、中性子の計数値をより確保できるようになり、より良好な精度の測定結果が得られると考えられる。

2.4.2. バックグラウンド中性子の増減が測定結果へ与える影響測定条件関連

(a) 目的

バックグラウンド中性子が AFAS 測定値に与える影響を評価する。

(b) 方法

以下に評価手順を示す。

- 1) バックグラウンドを変動させるため、 ^{252}Cf 中性子線源（線源番号：H4-694）を図 2.4-2 に示す Collar 検出器近傍（検出器と線源の距離：0cm、5cm、15cm、30cm の計 4 箇所）のいずれかに配置する。
- 2) バックグラウンドの中性子の 30 秒間の測定を連続して実施し、合計で 10 分間（30 秒×20 回）の測定を行う。
- 3) 集合体 P1 を AFAS に配置し、10 分間（30 秒×20 回）の測定を行う。
- 4) 1)～3)を繰り返し、様々なバックグラウンドにおける P1 の測定値を得る。
- 5) 上記にて取得した、各バックグラウンドにおける集合体の単位長さ当たりの Pu 質量 m_{Pu} 及び Pu 質量の標準偏差 $\sigma_{m_{\text{Pu}}}$ を数式(2-1)に代入し、Pu 質量の相対標準偏差 %RSD を求める。

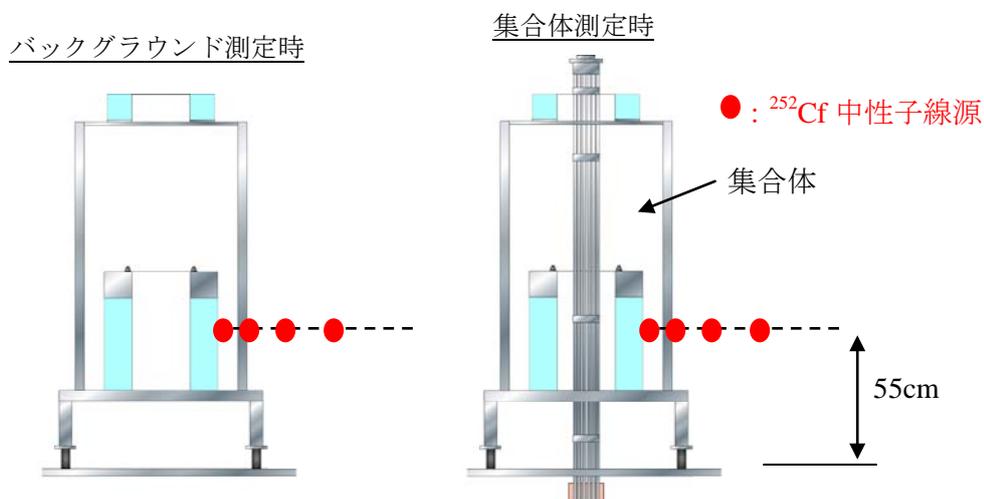


図 2.4-2. ^{252}Cf 中性子線源配置位置

数式(2-1)

$$\%RSD = \frac{\sigma_{m_{\text{Pu}}}}{m_{\text{Pu}}} \times 100$$

但し、 m_{Pu} : Pu 質量 (g/cm)

$\sigma_{m_{\text{Pu}}}$: Pu 質量の標準偏差

(c) 結果

測定結果を図 2.4-3～図 2.4-5 に示す。図 2.4-3 に示した通り、 ^{252}Cf 中性子線源の位置が検出器に近い程、バックグラウンドのシングル値及びダブル値は増加した。

各バックグラウンドにおいて集合体を測定した結果、図 2.4-4 に示した通り、Pu 質量の相対標準誤差%*RSD* は、バックグラウンドのシングル値の増加に伴い大きくなった。また、図 2.4-5 に示した通り、各バックグラウンドにおける Pu 質量測定値は、誤差 (2σ) の範囲で一致した。

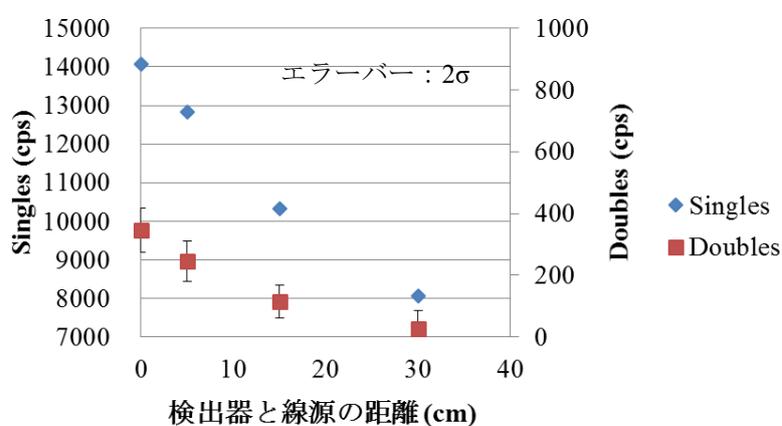


図 2.4-3. ^{252}Cf 中性子線源配置によるバックグラウンドの変動

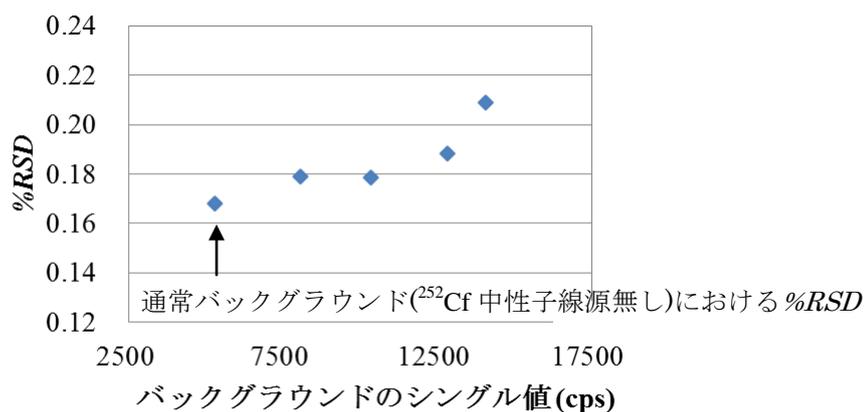


図 2.4-4. バックグラウンドのシングル値と Pu 質量の %*RSD* との相関

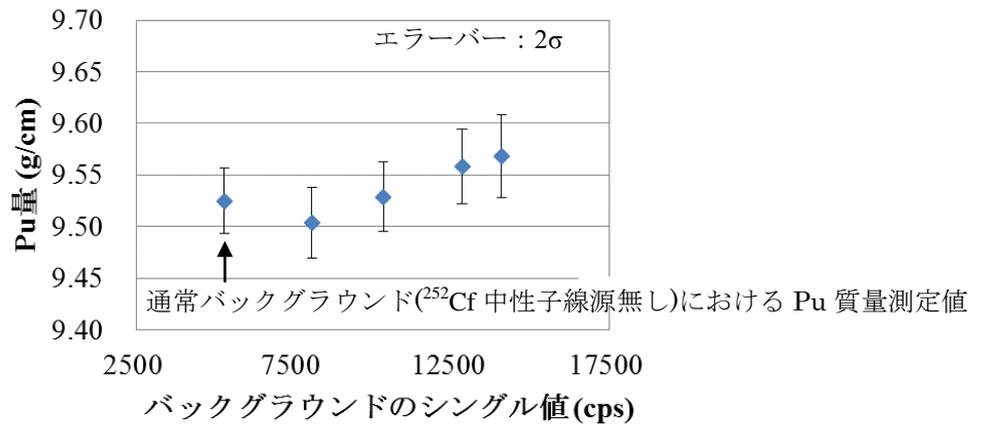


図 2.4-5. バックグラウンドのシングル値と Pu 質量の相関

(d) 考察

図 2.4-4 に示した通り、バックグラウンドのシングル値の増加に伴い、Pu 質量の%RSD は増大したが、図 2.4-5 に示した通り、バックグラウンドが増加した場合でも、各バックグラウンドにおける測定値に計数誤差を超える差はみられなかったことから、バックグラウンドの変動が測定値に与える影響は小さいものと考えられる。

JMOX において AFAS は、燃料製造工程及び貯蔵設備から隔離された部屋に設置されるため、バックグラウンドは本試験環境と比較して低いと考えられ、また、集合体測定中に核物質等の中性子源が接近することも無いため、バックグラウンドの変動が AFAS 測定精度へ与える影響はより小さいものになると考えられる。

2.4.3. 測定の繰り返し精度

(a) 目的

同一集合体を繰り返し測定した場合、Collar 検出器の測定結果がどの程度ばらつくかは、測定性能の重要項目の一つである。大きくばらつくような場合は、Collar 検出器の測定結果に対する信頼性は低くなる。

本評価試験では、同一集合体の測定を繰り返し、要求される測定時間 10 分における機器の安定性及び測定配置の再現性に起因する誤差（以下、「繰り返し精度」という）を評価する。

(b) 方法

平成 24 年度受託業務では、集合体 P1 の 50 分間(30 秒×100 回)の中性子測定を 1 日 3 回、3 日間連続で実施した。本評価試験では、50 分間の測定で得られた 30 秒ごとの中性子計数値を 10 分ずつ 5 つの組に分け、それぞれの組の中性子計数値から ^{240}Pu 実効質量を計算することにより、要求される測定時間 10 分での ^{240}Pu 実効質量の繰り返し精度を評価する。測定は 1 日 3 回、3 日間連続で実施したので、45 件の ^{240}Pu 実効質量のデータが得られる。中性子増倍を考慮した中性子計数値の補正には Known-alpha 法を用いる。

(c) 結果

10 分間の測定で得られた ^{240}Pu 実効質量について、45 組の測定結果の平均は 3.860 [g/cm]、標準偏差は 0.004 [g/cm]となった。測定結果は表 2.4-2 に示す。

表 2.4-2. ²⁴⁰Pu 実効質量

1 日目	1 回目	3.856	2 日目	1 回目	3.855	3 日目	1 回目	3.862
		3.866			3.863			3.861
		3.858			3.862			3.855
		3.851			3.854			3.865
		3.863			3.863			3.855
	2 回目	3.858		2 回目	3.860		2 回目	3.866
		3.860			3.861			3.866
		3.861			3.866			3.856
		3.857			3.862			3.859
		3.860			3.861			3.864
	3 回目	3.863		3 回目	3.855		3 回目	3.850
		3.859			3.868			3.855
		3.855			3.861			3.854
		3.863			3.862			3.867
		3.862			3.858			3.862

(d) 考察

上記の結果から、10 分間の測定での繰り返し精度は 0.112% (0.004 [g/cm] / 3.860 [g/cm]) となる。この値は、要求精度(<2%)と比較して十分小さく、繰り返し精度は良いと言える。

2.4.4. バックグラウンド中性子の増減と検出限界の関係

(a) 目的

AFAS の ^{240}Pu 実効質量検出下限値を評価する。

(b) 方法

長時間のバックグラウンド測定を実施し、計数率の標準偏差の 3 倍を検出限界として、Collar 検出器の検出下限値を評価する。本測定は、周辺に核物質が無く低バックグラウンド環境であるプルトニウム燃料第二開発室試験検査室にて行う。

以下に評価手順を示す。

- 1) Collar 検出器を試験検査室に設置する。
- 2) 1)の検出器を用いて 20 時間のバックグラウンド測定を行う。
- 3) 上記にて取得したダブル値 D_{bkg} を数式(2-2)に代入し、 ^{240}Pu 実効質量の検出下限値 $d(m_{240e})$ を評価する。

数式(2-2)

$$d(m_{240e}) = \frac{3}{a} \cdot \sqrt{\frac{D_{bkg} + a \cdot d(m_{240e})}{t}}$$

但し、 $d(m_{240e})$: ^{240}Pu 実効質量(g)の検出下限値

D_{bkg} : バックグラウンドのダブル値

a : スロープ b (cps/ m_{240e}) (8.609406E+002)

t : 測定時間 (20 時間)

(c) 結果

検出下限値の評価結果を図 2.4-6 及び図 2.4-7 に示す。図 2.4-6 に示した通り、 ^{240}Pu 実効質量の検出下限値 $d(m_{240e})$ は、測定時間の平方根にほぼ反比例して減少した。また、図 2.4-7 に示した通り JMOX と同様の測定時間 10 分の場合、検出下限値は約 $0.03\text{g}^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ であった。

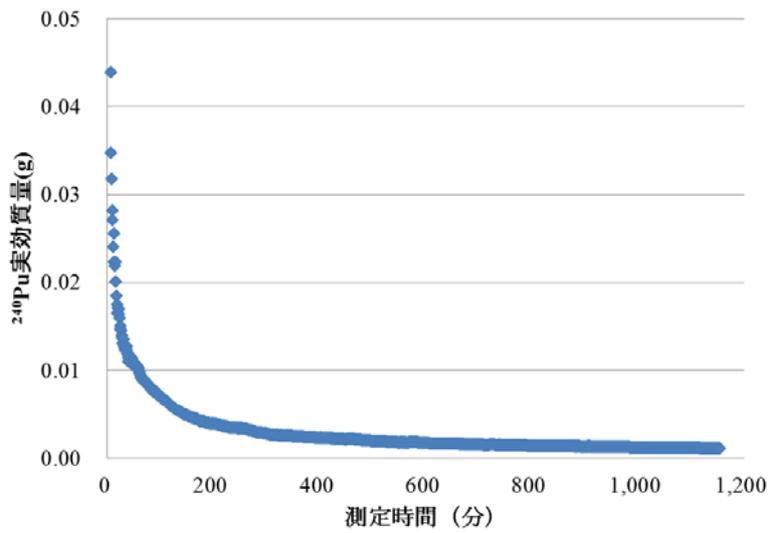


図 2.4-6. 測定時間と ^{240}Pu 実効質量(g)検出下限値の相関

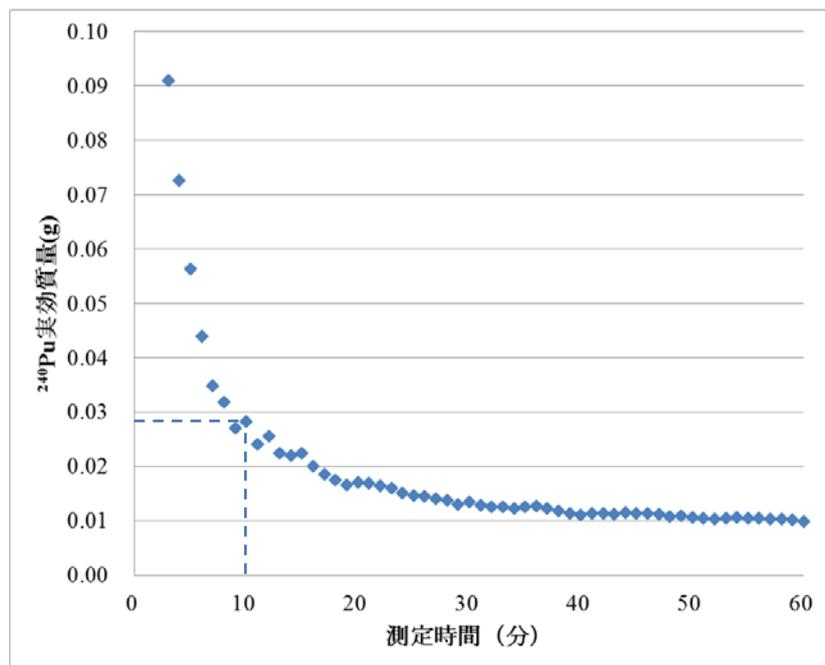


図 2.4-7. 測定時間と ^{240}Pu 実効質量(g)検出下限値の相関 (0~60 分)

(d) 考察

JMOX で AFAS が測定対象とする燃料集合体は最大で約 $2,000 \text{ g}^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ であるので、今回の試験で評価された検出下限値を大きく上回り検出可能である。

2.5. 燃料集合体の有効長の測定精度の確認試験

(a) 目的

集合体有効長の測定精度を評価する。

(b) 有効長測定原理

JMOX では、図 2.5-1 に示すように、Top Fork 及び Bottom Fork 検出器は、集合体有効長の上端及び下端位置に、Collar 検出器は、その中間位置に配置される。これらの検出器で取得したシングル値から下記の数式(2-3)を用いて算出できる ratio [(Top Fork+Bottom Fork) / Collar] は、測定される集合体の有効長のみ依存し、Pu 質量には依存しない。この原理を利用することで、ratio [(Top Fork+Bottom Fork) / Collar] から有効長を求めることができる。

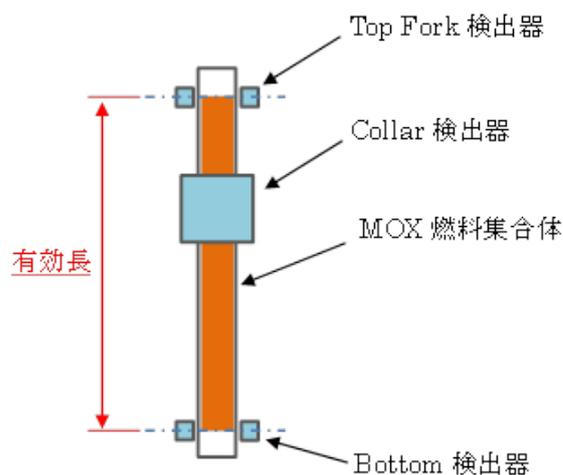


図 2.5-1. JMOX における MOX 燃料集合体と AFAS 検出器の配置

数式(2-3)

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

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

S_B : Bottom Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)

S_C : Collar 検出器で取得したシングル値 (cps)

(c) 試験方法

本試験では、クレーンにて集合体を吊り上げ、図 2.5-2 に示すいずれかの測定位置に配置

して Fork 検出器及び Collar 検出器のシングル値を測定する。測定は、各測定位置で 30 秒間の測定を連続して実施し、合計で 5 分間（30 秒×10 回）実施する。取得した Fork 検出器及び Collar 検出器のシングル値を用いて、(d)に示す①～③の評価を行う。

本試験環境では、天井高の制約により、JMOX における実環境のように Top Fork 検出器と Bottom Fork 検出器を同時に設置することはできないため、図 2.5-2 に示すように「Top Fork+Collar」または「Bottom Fork+Collar」のいずれかの組み合わせにより測定を行う。

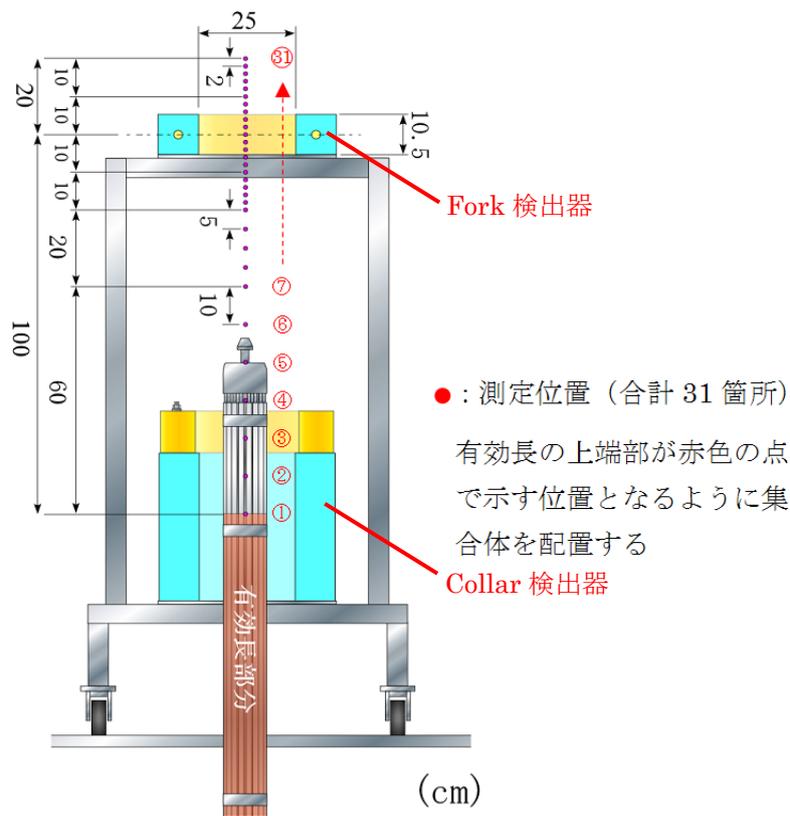


図 2.5-2. 集合体測定位置

測定は、Pu 質量の異なる 3 体の集合体 P1、P2 及び S1 について実施する。集合体 P1 については、「Top Fork+Collar」及び「Bottom Fork+Collar」の 2 通りの組み合わせにて測定を行う。Top Fork 検出器と Bottom Fork 検出器は、ほぼ同一の形状、性能^(*)であるため、それぞれの測定結果も同等となることが予想される。集合体 P2 及び S1 については、「Top Fork+Collar」での測定のみ行い、「Bottom Fork+Collar」による測定は省略する。

* : Top Fork 及び Bottom Fork 検出器の中性子検出効率及び検出効率プロファイルの確認試験は、平成 23 年度の性能確認試験において実施している。

(d) 評価方法

① 各測定位置における計数誤差の評価

Fork 検出器及び Collar 検出器で取得した各集合体の各測定位置におけるシングル値を比較する。また、これらシングル値 S 及びシングル値の標準偏差 σS を数式(2-4)に代入し、シングル値の相対標準偏差% RSD を求める。

数式(2-4)

$$\%RSD = \frac{\sigma S}{S} \times 100$$

但し、 S : シングル値 (cps)

σS : シングル値の標準偏差

② ratio [(Top+Bottom) /Collar] と有効長の相関の評価

Fork 検出器及び Collar 検出器で取得した各集合体の各測定位置におけるシングル値 S 及びシングル値の標準偏差 σS を数式(2-5)及び数式(2-6)に代入し、ratio [(Top+Bottom) /Collar] 及びその誤差 σ ratio [(Top+Bottom) /Collar] を求め、有効長上端位置との相関を比較する。

ratio [(Top+Bottom) /Collar] 及びその誤差 σ ratio [(Top+Bottom) /Collar] の計算において、Bottom Fork 検出器のシングル値は一定（有効長端が Bottom Fork 検出器の中心にある状態のシングル値）とする。集合体 P2 と S1 については Bottom Fork 検出器による測定を行わないので、数式(2-7)に示す通り、集合体 P1 から得られる Top 及び Bottom Fork 検出器のシングル値の比と集合体 P2 及び S1 から得られる Top Fork 検出器のシングル値から、集合体 P2 及び S1 を測定した際の Bottom Fork 検出器のシングル値を推定する。

数式(2-5)

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

数式(2-6)

$$\sigma \text{ratio} [(Top + Bottom) / Collar] = \sqrt{\left(\frac{1}{S_C} \cdot \sigma S_T\right)^2 + \left(\frac{1}{S_C} \cdot \sigma S_B\right)^2 + \left(\frac{S_T + S_B}{S_C^2} \cdot \sigma S_C\right)^2}$$

但し、 S_T : Top Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_B : Bottom Fork 検出器で取得したシングル値 (cps)
 S_C : Collar 検出器で取得したシングル値 (cps)
 σS_T : Top Fork 検出器で取得したシングル値の標準偏差
 σS_B : Bottom Fork 検出器で取得したシングル値の標準偏差
 σS_C : Collar 検出器で取得したシングル値の標準偏差

数式(2-7)

$$S_B = S_T \cdot \frac{S_{B(P1)}}{S_{T(P1)}}$$

但し、 S_T : Top Fork 検出器で取得したシングル値(cps)
 S_B : Bottom Fork 検出器で取得するシングル値の推定値 (cps)
 $S_{T(P1)}$: Top Fork 検出器で取得した P1 のシングル値 (cps)
 $S_{B(P1)}$: Bottom Fork 検出器で取得した P1 のシングル値 (cps)

③ 有効長の測定精度の評価

上記②にて求めた σ_{ratio} [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と $ratio$ [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] の単位長さ当たりの増加率 $\Delta ratio(cm^{-1})$ を数式(2-8)に代入し、有効長の測定精度 $\sigma AL(cm)$ を求める。 σ_{ratio} と $\Delta ratio(cm^{-1})$ の概念を図 2.5-3 に示す。

数式(2-8)

$$\sigma AL(cm) = \frac{\sigma_{ratio}[(Top + Bottom) / Collar]}{\Delta ratio[(Top + Bottom) / Collar]} \quad (cps) \quad (cps / cm^{-1})$$

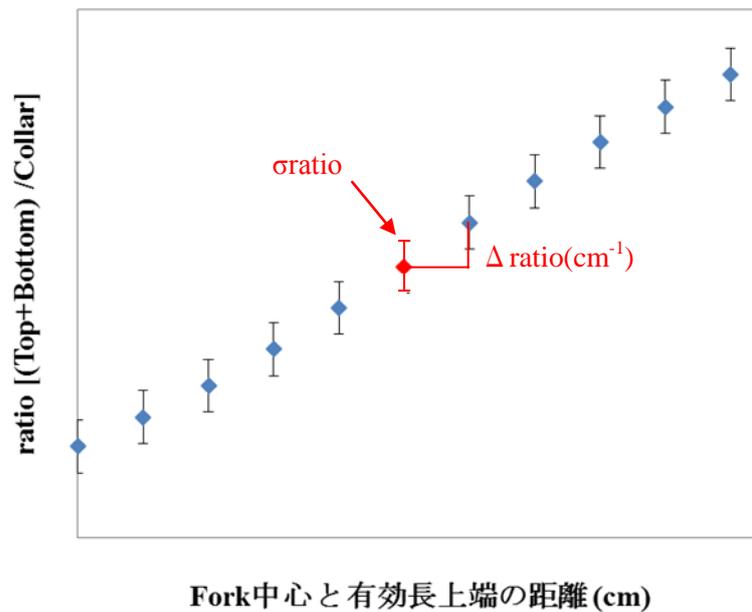


図 2.5-3. ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関（概念）

(e) 結果

① 各測定位置における計数誤差の評価

Fork 及び Collar 検出器による各集合体 (P1、P2 及び S1) のシングル値の測定結果を図 2.5-4 及び図 2.5-5 に示す。また、それぞれの検出器のシングル値の相対標準偏差%RSD の評価結果を図 2.5-6 及び図 2.5-7 に示す。

Fork 検出器のシングル値は、図 2.5-4 に示した通り、有効長上端と Fork 検出器中心との距離が短くなるに従い増加し、有効長上端が Fork 検出器中心付近にある場合にその増加率が最も高くなった。集合体 P2 及び S1 の各測定位置における Fork 検出器のシングル値は、それぞれの集合体に含まれる Pu 質量が P1 より少ないことから、P1 よりも低くなったが、シングル値の増加傾向は P1 と同様であった。

また、Collar 検出器のシングル値も、図 2.5-5 に示した通り、集合体の上昇に従い増加したが、各集合体共に有効長上端が Fork 検出器中心から -20cm 以上 (Collar 検出器上部から 53cm 以上) に達するとほぼ一定となった。

Fork 検出器のシングル値の相対標準偏差%RSD は、図 2.5-6 に示した通り、各集合体共に、集合体上昇による計数率の増加に伴い小さくなった。集合体 S1 の %RSD は、S1 の Pu 質量が P1 及び P2 よりも少なくシングル値の計数率が低いため、P1 及び P2 より全体的に大きくなった。

Collar 検出器のシングル値の相対標準偏差%RSD は、図 2.5-7 に示した通り、各測定位置に

おいてほぼ一定となった。Fork 検出器の結果と同様に S1 の %RSD は、S1 のシングル値の計数率が低いため、P1 及び P2 よりも全体的に大きくなる結果となった。

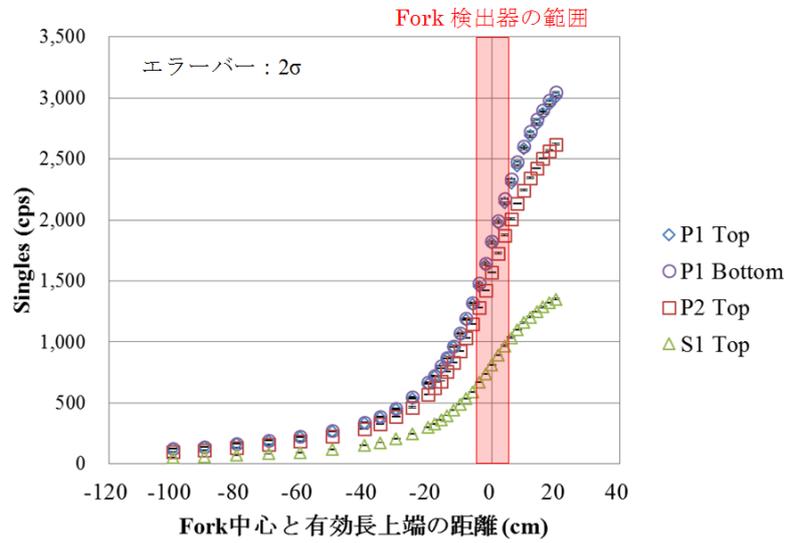


図 2.5-4. Fork 検出器のシングル値測定結果 (P1、P2、S1)

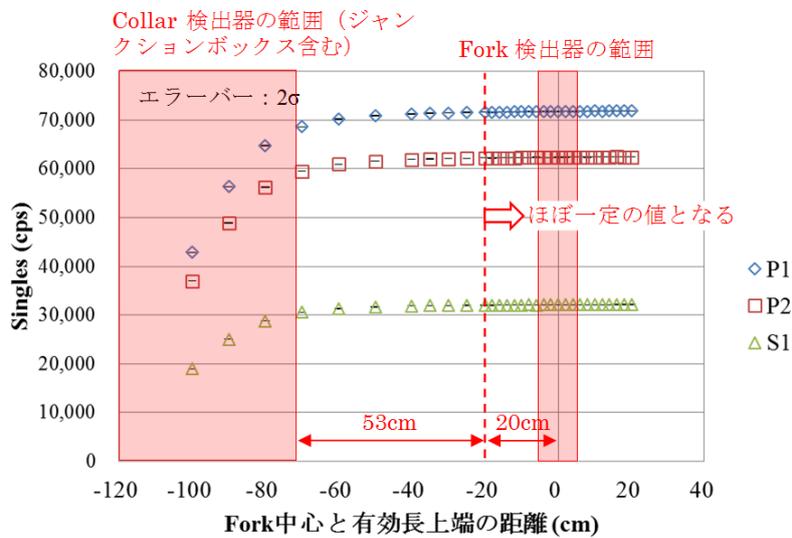


図 2.5-5. Collar 検出器のシングル値測定結果 (P1、P2、S1)

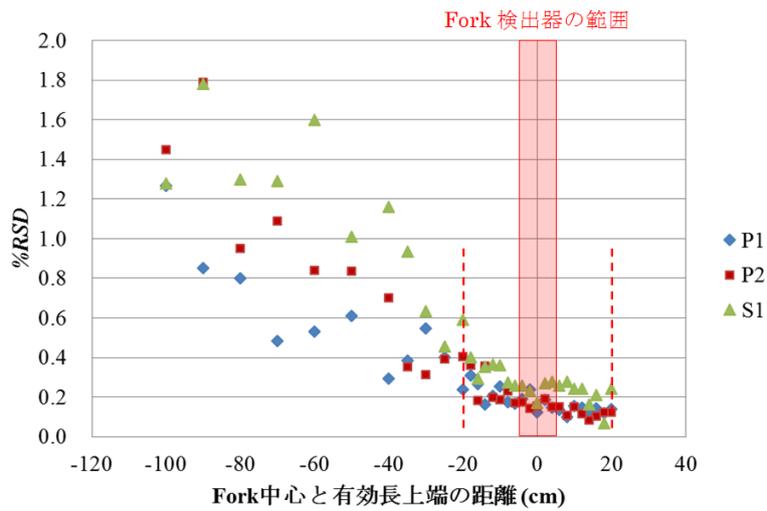


図 2.5-6. Top Fork 検出器のシングル値の%RSD (P1、P2、S1)

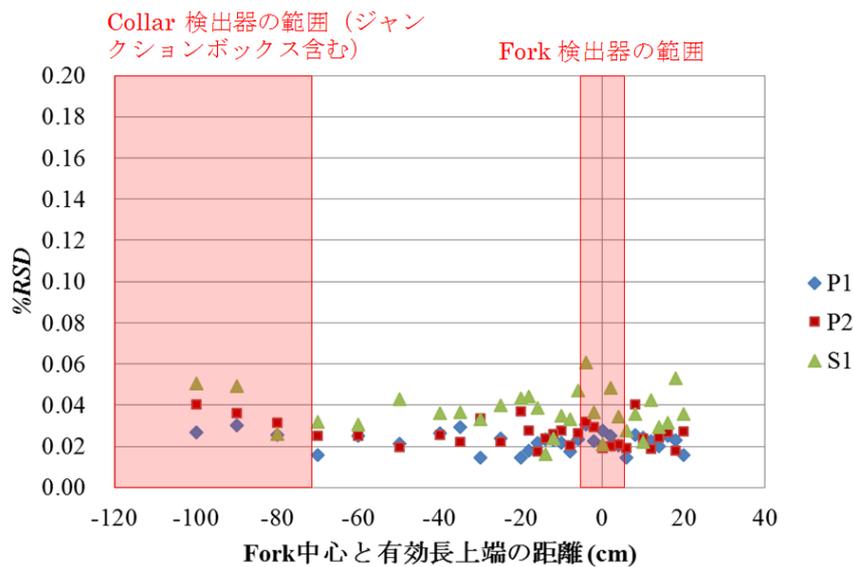


図 2.5-7. Collar 検出器のシングル値の%RSD (P1、P2、S1)

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

集合体 P1、P2 及び S1 の Top 及び Bottom Fork と Collar 検出器のシングル値の比 ratio [(Top+Bottom) /Collar] 及びその誤差 σ ratio [(Top+Bottom) /Collar] と有効長上端位置の相関を図 2.5-8 及び図 2.5-9 に示す。

ratio [(Top+Bottom) /Collar] について、図 2.5-8 に示した通り、距離が-60cm~20cm の範囲では、有効長上端と Fork 検出器中心との距離が離れるのに従い、Fork 検出器で得られるシ

シングル値が減少するため、小さくなったが、距離が-100cm~-60cmの範囲では、Collar 検出器で得られるシングル値も大きく減少するため、大きくなる結果となった。また、各集合体の各測定位置における ratio $[(\text{Top}+\text{Bottom}) / \text{Collar}]$ はほぼ一致し、最大でも約 1%の差であった。

誤差 σ ratio $[(\text{Top}+\text{Bottom}) / \text{Collar}]$ は、図 2.5-9 に示した通り、集合体 S1 の誤差が P1、P2 の誤差と比較し全体的に大きくなる結果となった。これは、S1 に含まれる Pu 質量が少ないため Fork 及び Collar 検出器による計数誤差が共に大きくなり、その誤差が伝播したためと考えられる。

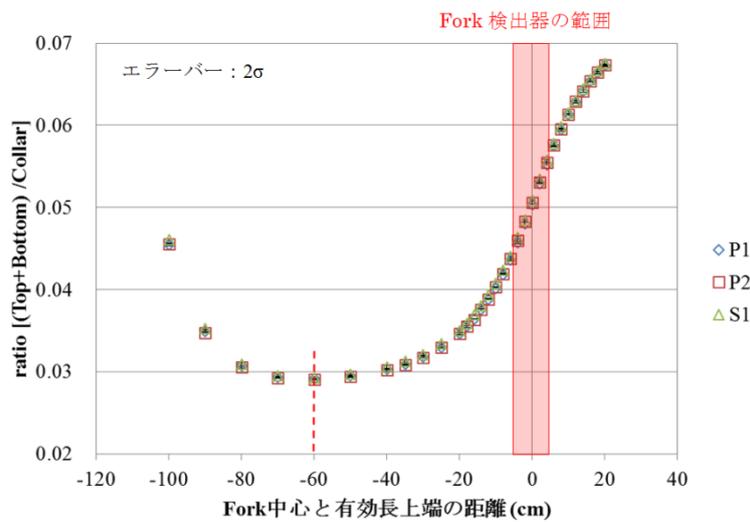


図 2.5-8. ratio $[(\text{Top}+\text{Bottom}) / \text{Collar}]$ と有効長の相関 (P1、P2、S1)

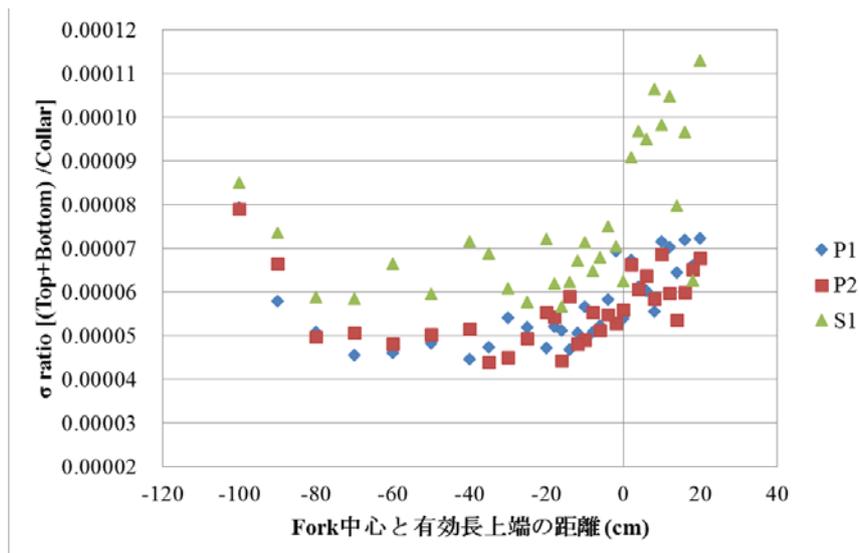


図 2.5-9. σ ratio $[(\text{Top}+\text{Bottom}) / \text{Collar}]$ と有効長の相関 (P1、P2、S1)

③ 有効長の測定精度

有効長の測定精度の評価結果を図 2.5-10 に示す。

有効長の測定精度 $\sigma_{AL}(\text{cm})$ は、有効長上端が Fork 検出器中心付近にある場合が最もよく、中心から $\pm 10\text{cm}$ の範囲では 0.1cm 以下であった。

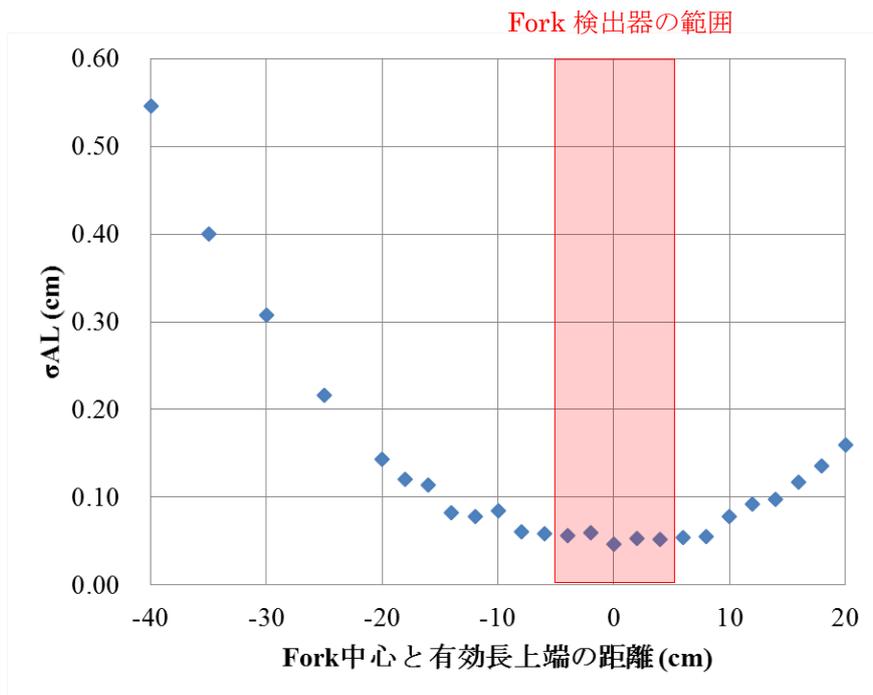


図 2.5-10. 有効長の測定精度 (-40cm~20cm) (P1)

(f) 考察

① 各測定位置における計数誤差の評価

集合体 P1 の各測定位置における Bottom Fork 検出器の計数率は、Top Fork より全体的に 1% 程度高くなった (図 2.5-4 参照)。その理由は、Bottom Fork の検出効率が 1% 程度 Top Fork より高いためと考えられる。(Top Fork 検出効率: 0.914%、Bottom Fork 検出効率: 0.923% (平成 23 年度性能確認試験報告書参照))

なお、本試験では、Fork 検出器のデッドタイム補正を考慮せず (デッドタイム補正係数 a 及び $b=0$) 測定及び評価を行ったが、結果としてその影響は見られなかった。しかし、JMOX で測定される BWR 及び PWR 用の MOX 燃料集合体に含まれる Pu 質量は、本試験で使用した封入棒集合体の 2 倍以上であることから、Fork 検出器によって検出される中性子数は本試験よりも増大することが予想される。このため、JMOX において AFAS を使用する際は、Fork

検出器に関してもデッドタイム補正の必要性を事前に検討する必要があると考える。

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

Pu 質量の異なる各集合体における ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] と有効長の相関が一致したことから、同一のタイプの集合体であれば、集合体に含まれる Pu 質量に依存することなく ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] により有効長を求めることが可能であるものと考えられる。本試験では、各集合体における ratio [(Top Fork+Bottom Fork) /Collar] に最大で約 1% の差があったが、クレーンによる集合体の垂直方向の配置精度 (±約 1mm) を考慮するとよく一致していると考えられる。仮に Fork 検出器中心において ratio [(Top+Bottom)/Collar] が 1% 変動した場合、有効長の測定精度は約 0.1% (誤差 0.4cm/有効長 370cm) 変動することになるが、これは IAEA が示す User Requirements に記載されている要求精度である 2% と比較し十分に低いものである。

③ 有効長の測定精度

IAEA が示す User Requirements では、有効長の測定精度は 10 分測定で 2% とされている。本試験で使用した集合体 P1 の場合、有効長 370cm に対する 2% は 7.4cm であり、本試験結果 (有効長上端が Fork 検出器中心付近にある場合 0.1cm 以下) は、これと比較し非常に小さく、IAEA の要求精度を十分満足するものであった。

本試験の測定時間は 5 分であったが、JMOX における集合体検認の測定時間は 10 分であり、かつ測定対象である MOX 燃料集合体は Pu 質量が多く Fork 及び Collar 検出器で得られるシングル値の計数誤差はさらに小さくなるため、JMOX における実際の有効長測定精度は、より向上するものと考えられる。

2.6. 各検出器の測定可能性及び測定限界の検討

性能確認試験の評価結果から、AFASがIAEAのUser Requirementsの性能要件（測定時間：10分、Pu測定精度：<2.0%）を満たすか否かの検討を行うため、AFASによる集合体²⁴⁰Pu実効質量の測定精度、同一集合体を繰り返し測定したときの測定値間のばらつき（繰り返し精度）、及び集合体有効長の測定精度について評価した。

集合体²⁴⁰Pu実効質量の測定精度については、集合体P2の測定で得られた精度が0.102%（測定時間10分）となり、要求される測定精度2%と比べて十分小さい値であった。実際に大型MOX燃料加工施設で製造される集合体は、Pu質量が本評価試験で使用した集合体より大きいと考えられるので、より測定精度がよいと考えられる。

繰り返し精度については、集合体P1を複数回測定して得られた精度が0.112%（測定時間10分）となり、要求される測定精度2%と比べて十分小さい値であった。

集合体有効長の測定精度については、有効長が370cmの集合体で有効長の測定を実施した結果、有効長の両端がFork検出器の位置にある場合の測定値の誤差が0.1cmより小さくなった。これは要求される測定精度2%（有効長が370cmならば誤差7.4cmに相当する）と比べて十分小さい値である。

2.7. 測定手順書

付録2に示すように、平成24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、性能確認試験の結果（³He管の不具合事象）を分析し反映した。

2.8. その他

2.8.1. AFASのCollar検出器の検出効率

これまでの統合性能確認試験で、表2.8-1に示すとおり、PWR用AFASのCollar検出器の検出効率が中性子線源強度に依存して値が異なっている可能性が確認されている。JAEAが実施したPWR用AFASのCollar検出器の検出効率の測定において、3%程度の差異（16.2%と16.7%）が確認されている。本件について、平成26年2月24～26日の間、IAEAと議論を行った。

表 2.8-1. AFAS の Collar 検出器の検出効率

Collar	Institute	Source	Intensity (n/s)	Efficiency	Date
AFAS-PWR	LANL	CF-12	2.10×10^5	16.2%	2008.3.12
	JAEA	WW-906	1.89×10^4	16.7%	2011.9.7
		H4-694	3.35×10^5	16.2%	2011.9.7
AFAS-BWR	LANL	CF-12	1.44×10^5	20.5%	2009.8.2
	JAEA	WW-906	2.29×10^4	19.7%	2010.12.9
		H4-694	4.06×10^5	19.8%	2010.12.9

議論の中で、測定結果の差異の原因を特定するため IAEA は試験を提案した。

- 線源強度の弱い線源と強い線源を用いて、PWR 用及び BWR 用 AFAS の Collar 検出器に対して検出効率の測定試験を定期的（3 ヶ月毎程度）に行う。
- AFAS が測定する線源強度の弱い線源と強い線源は、参考情報として、検出効率が既に決定されている他の中性子検出器（ENMC もしくは AVIS）を用いて測定する。
- 参考情報のために実施する他の中性子検出器による検出効率の測定は、Cf 線源の崩壊計算の誤差を取り除くため、可能であるならば AFAS の測定を実施した日と同じ日に行う。
- これまでの統合性能確認試験で使用したシフトレジスターを利用する。

IAEA は本件について原因を調査するよう提案している。なお、Cf 線源の測定においては、LANL より線源の設置向きにより測定値が変わるとの指摘があるため、設置向きに留意する必要がある。

2.8.2. AFASのCollar検出器の不感時間補正パラメータ

これまでの統合性能確認試験で、表 2.8-2 に示すとおり、PWR 用 AFAS の Collar 検出器の不感時間補正パラメータの評価結果が LANL と JAEA の間で異なることが確認されている。本件について、平成 26 年 2 月 24～26 日の間、IAEA と議論を行った。

表 2.8-2. AFAS の Collar 検出器の不感時間補正パラメータ

Institute	Source	Intensity (n/s)	Method	Results
LANL	A7-868	1.33×10^6	Paired Source Method	a= 0.3458 us
	A7-869	1.64×10^6		
	A7-868&A7-869	2.97×10^6		
JAEA	G4-652	2.22×10^5	Least Squares Method	a= 0.1872 us
	I7-106	3.92×10^5		
	G4-652&I7-106	6.14×10^5		

不感時間補正パラメータの評価結果の違いは、LANL と JAEA の間で強度の異なる Cf 線源を使用したためであると考えられる。このことを確かめるために、Reference Manual “Characterization of Neutron Detector Systems” (SG-EQ-NDA-RM-0002)に記載されている決定方法や LANL の Paired Source Method を JAEA の測定データに適用してみることが提案された。

不感時間補正パラメータの評価にあたっては、理想的には、幅広いレンジの放出数をカバーできる 8 個程度の Cf 線源を用意し、(線源を組み合わせて放出数を上げることなく)測定を行うのが良いとされる。IAEA も同様に、ISPRA で高い放出数の Cf 線源を使用できないため、JAEA と同程度の放出数の Cf 線源を用いて評価している。LANL が用いた Cf 線源は強度が強いため LANL が決めたパラメータを採用することを IAEA より推奨された。

不感時間補正の式に出てくるパラメータ a は、検出器全体のアナログ回路 (チューブからプリアンプまで) に依存し、パラメータ b はロジック回路に依存する。例えば b は、プリアンプの数に依存して a の 1 乗や 2 乗になることが確認されている。あつたりする。線源強度が強い場合には、シフトレジスタを JSR15 か AMSR を使うかによってクロック数 (JSR-12: 2MHz, AMSR: 4 MHz, JSR-15: 20 MHz, PTR-32: 20 MHz) が異なるので b の値も多少異なってくるのがわかっている (JAEA が使っている線源の強度ではシフトレジスタのクロック数は影響はないであろう)。Derandomizer が回路に組み込まれていれば、ロジック回路側で不感時間による検出損失はなくなるため、 b はほぼ 0 に等しくなる。

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、大型 MOX 燃料加工施設（以下、「JMOX」と称す。）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 3.1-1 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 3.1-1 のとおりである。



図 3.1-1. AVIS の外観

表 3.1-1. 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 25 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、平成 24 年度統合性能確認試験で得られた測定精度及び検出器の正確度の最適化の結果を踏まえ、MOX 原料粉末、製品富化度 MOX 粉末、添加剤入り MOX 粉末、焼結ペレットなど JMOX で査察用試料として採取する予定の核物質を対象として、Pu 質量を測定する性能に係る確認試験及び評価を行った。なお、MOX 試料は、JAEA が所有するものを使用した。

3.2. 性能確認試験実施場所

本性能確認試験は、プルトニウム燃料第一開発室燃料要素組立室で実施した。

3.3. 使用した核燃料物質（MOX試料）及び測定配置

3.3.1. 使用した核燃料物質（MOX試料）

本性能確認試験で使用した核燃料物質（MOX 試料）を表 3.3-1 に示す。AVIS のさまざまな性状の MOX 試料に対する測定適用性を確認するため、多様な Pu 含有率の試料を使用した。

表 3.3-1. AVIS の性能確認試験で用いた核燃料物質

サンプルの性状	Pu 含有率 (%)	サンプル ID	Pu 質量 (g)
MH-MOX 粉末	41.305	N02-01	0.99
		N02-02	1.98
		N02-03	5.00
		N02-04	10.00
強制篩分後粉末	24.276	N03-01	7.20
		N03-02	7.52
		N03-03	7.98
		N03-04	7.49
		N03-05	7.57
二次混合後粉末	6.095	N04-01	1.92
		N04-02	1.85

		N04-03	1.93
		N04-04	1.93
		N04-05	2.00
潤滑剤混合後粉末	6.095	N05-01	1.93
		N05-02	1.92
		N05-03	1.95
		N05-04	1.88
		N05-05	1.93
成形後ペレット (グリーンペレット)	6.095	N06-01	0.57
焼結ペレット 1	6.193	N07-01	0.57
焼結ペレット 2	11.175	N08-01	3.34
	11.159	N08-02	0.69
焼結ペレット 3	6.542	N01-01	0.57
		N01-02	1.11
		N01-03	2.14

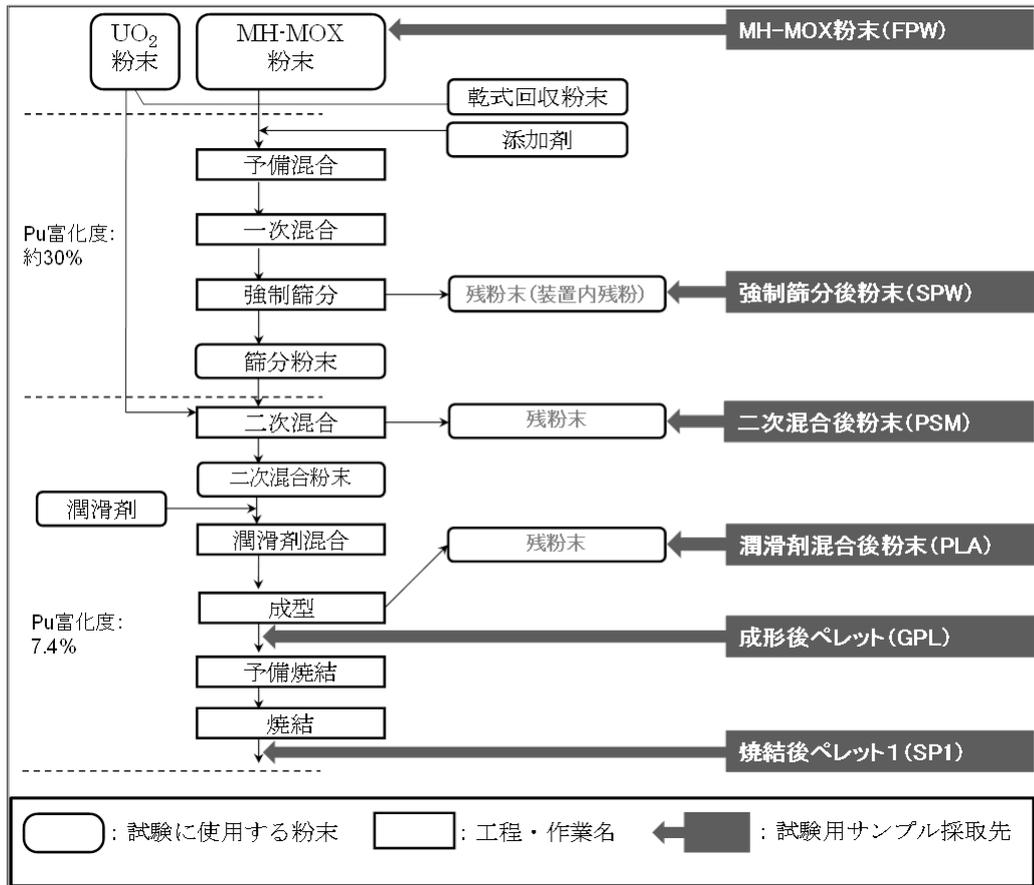


図 3.3-1. MOX 試料を採取した燃料製造試験のフロー

採取したサンプルは、耐放射線性に優れたポリスチレンバイアル (SPEX 社製 12ml Polystyrene Grinding Vial with Slip-On Cap) に入れた (図 3.3-2 に示す)。

本性能確認試験では、MOX 試料を AVIS 設置箇所まで移動させるため、MOX 試料をグローブボックス雰囲気外で取り扱う必要があった。そのため、図 3.3-3 に示す通り、MOX 試料の入ったバイアルを 2 重ビニルバッグで包蔵した。この状態で MOX 試料をグローブボックスからバッグアウトし、AVIS のサンプルホルダに設置し測定を実施した。なお、実施設では AVIS はグローブボックス真下に設置され、MOX 試料入りのバイアルはビニルバッグで包蔵していない状態で測定される。



図 3.3-2. 採取した MOX 試料を入れた容器



図 3.3-3. ビニルバッグで梱包されたバイアル

3.3.2. 測定配置（システム構成を含む）

本性能確認試験で用いた AVIS のシステム構成は図 3.3-4 のとおりである。平成 23 年度に Cf 線源を用いて実施した基礎的な性能確認試験の結果を踏まえ、本性能確認試験では、LANL が評価・設定した測定及び解析に係るパラメータ（表 3.3-2）を採用した。また、図 3.1-1 に示すように AVIS の中性子検出器には、実施設での測定状況を可能な範囲で再現するために、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 3.3-5）を取付け、MOX 試料を測定箇所へ設置するためのサンプルホルダも大型 MOX 燃料加工施設と同仕様にて製作したもの（図 3.3-6）を使用した。MOX 試料を測定配置に設置したときの中性子検出器及びガンマ線検出器との位置関係は図 3.3-7 のとおりとなる。

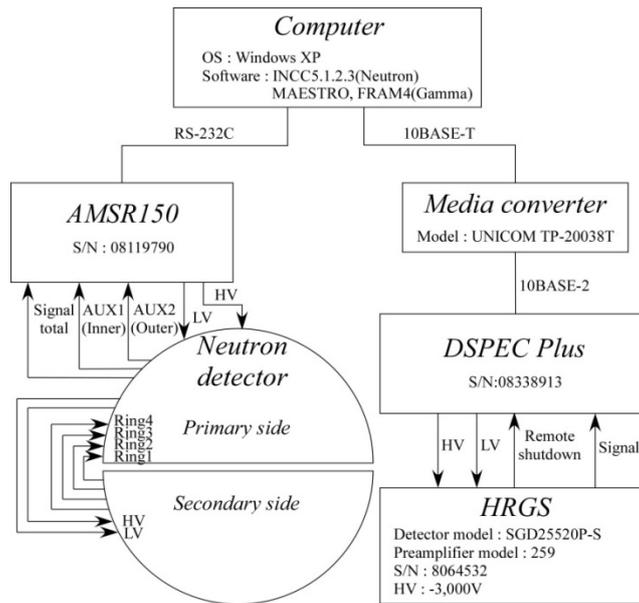


図 3.3-4. AVIS のシステム構成のブロックダイアグラム

表 3.3-2. 性能確認試験で用いる AVIS のパラメータの設定値 (LANL の評価値)

検出器	測定及び解析に係るパラメータ	設定値	
中性子検出器	計数装置	AMSR	
	不感時間補正 パラメータ	a (μs)	0.2904
		b ($\mu\text{s})^2$	0.0211
		同時計測不感時間 (ns)	72.60
		プレディレイ P (μs)	1.5
		中性子検出効率 ϵ (^{240}Pu 線源)	0.675
		ダイアウエイタイム τ (μs)	30.0
		同時中性子計測用ゲート時間幅 G (μs)	64.0
		ダブルゲートフラクション (Cf 線源)	0.7930
		トリプルゲートフラクション (Cf 線源)	0.6225
	印加電圧 (V)	+1,740	
ガンマ線検出器	印加電圧 (V)	-3,000	

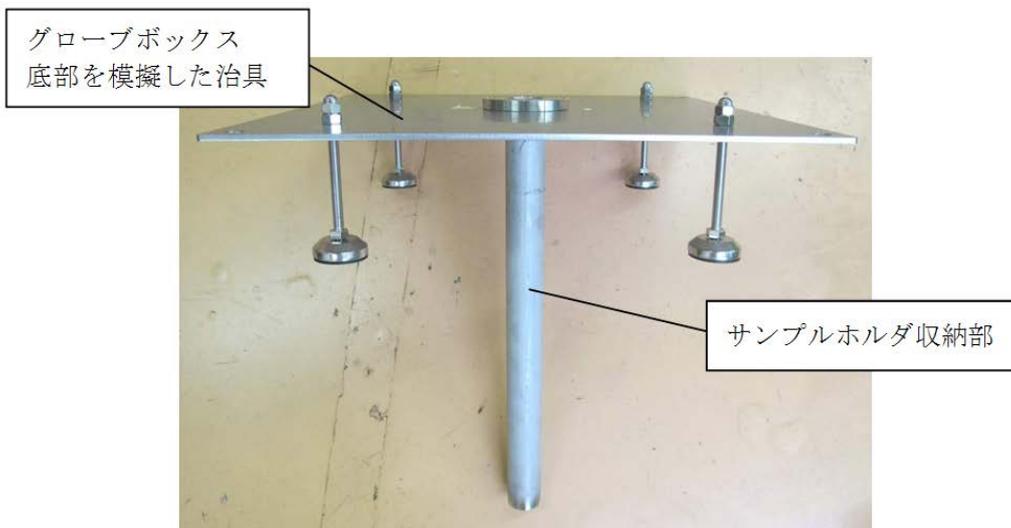


図 3.3-5. AVIS の設置が予定されているグローブボックス底部を模した治具

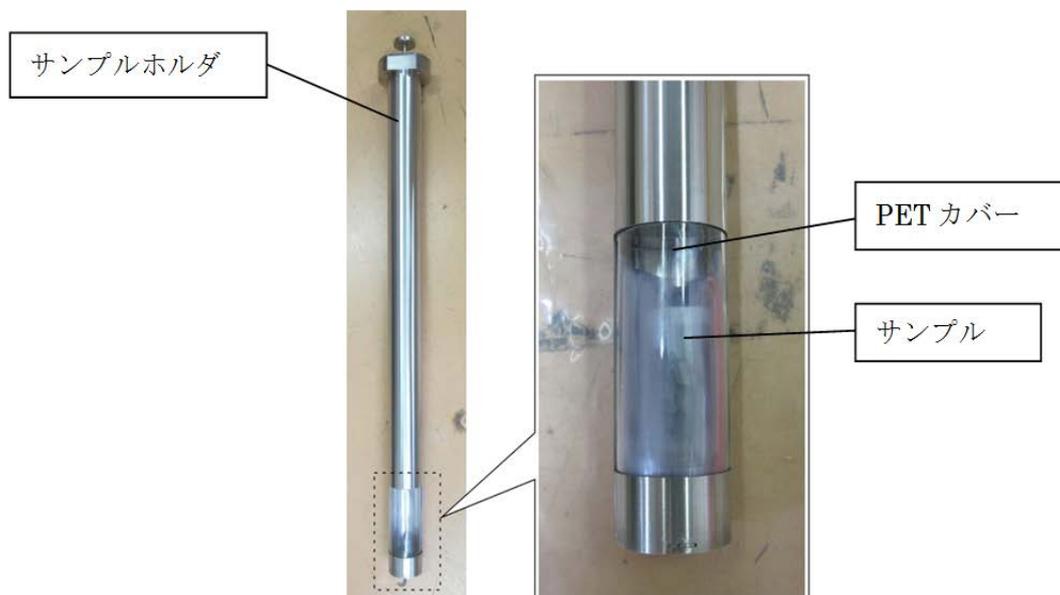


図 3.3-6. 実施設で使用が予定されているサンプルホルダ

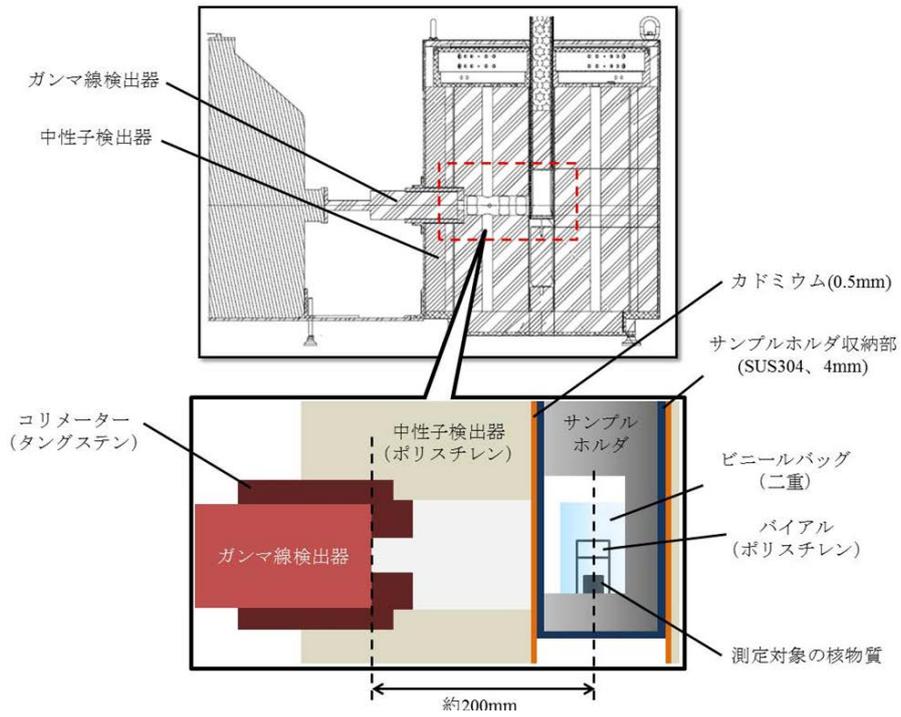


図 3.3-7. 中性子検出器及びガンマ線検出器と測定対象物との位置関係

3.4. MOX試料を使用した性能確認試験

AVIS の MOX 試料中の Pu 質量 (gPu) を測定する性能に関連し、表 3.4-1 にあがる 7 項目について試験及び評価を行った。各試験結果は、3.4.1 から 3.4.7 に記載する。

表 3.4-1. AVIS の試験項目一覧

分類	評価対象項目	
解析手法関連	(1)	Known-alpha 法及び Raw double 法による解析に係る較正曲線パラメータ ρ_0 (増倍補正係数) 及び $b_{k\alpha}$ の評価
	(2)	Multiplicity 法、Known-alpha 法及び Raw double 法による解析結果の比較
測定条件関連	(3)	測定時間と測定精度の関係
	(4)	バックグラウンド中性子の増減が測定結果へ与える影響
	(5)	測定の繰返し精度 (標準偏差より偶然誤差を確定)
	(6)	バックグラウンド中性子の増減と検出限界の関係
サンプルの形状・質量・密度関連	(7)	Pu 質量と測定精度の関係

3.4.1. Known-alpha 法及び Raw double 法による解析に係る較正曲線パラメータ

ρ_0 (増倍補正係数) 及び $b_{k\alpha}$ の評価

(a) 目的

MOX 試料を測定して得られた中性子計数データを使い、Raw double 法及び Known-alpha 法による解析に必要な較正曲線パラメータ ρ_0 (増倍補正係数) 及び $b_{k\alpha}$ の評価を行う。

(b) 方法

表 3.4-2. ρ_0 及び $b_{k\alpha}$ の Multiplicity 法による評価結果

MOX試料 (Pu含有率)	Item ID	測定時間(分)	S	D	M (MLT法)	α (MLT法)	S_c	D_c	m_{240e} (^{240}Pu)	b_{ka}	ρ_0
焼結ペレット3 (6.5%)	N01-02	30	568.468	145.922	1.012	0.954	561.727	135.911	0.417	325.925	0.473
MH-MOX粉末 (41%)	N02-03	30	2,867.992	628.969	1.009	1.264	2,842.410	592.888	1.823	325.227	0.472
	N02-04	30	5,692.064	1,272.875	1.012	1.256	5,624.569	1,177.155	3.622	325.002	0.472
強制篩分粉末(24%)	N03-01	30	4,278.425	955.333	1.012	1.257	4,227.693	883.472	2.721	324.686	0.472
二次混合粉末(6.1%)	N04-01	30	1,120.908	248.451	1.007	1.217	1,113.116	237.412	0.729	325.668	0.473
潤滑剤混合粉末(6.1%)	N05-01	30	1,132.167	249.763	1.008	1.232	1,123.182	237.085	0.731	324.330	0.471
成形ペレット(6.1%)	N06-01	30	331.050	73.277	1.007	1.217	328.749	70.021	0.215	325.680	0.472
焼結ペレット1 (6.1%)	N07-01	50	298.834	73.142	1.008	1.010	296.462	69.675	0.214	325.586	0.472
焼結ペレット2 (11%)	N08-01	30	1,817.852	457.447	1.014	1.013	1,792.753	420.469	1.294	324.937	0.472
平均値										325.227	0.472

表 3.4-3. ρ_0 及び $b_{k\alpha}$ の評価結果

ρ_0		b_{ka}	
理論式を用いて評価	MLT法の解析結果から評価	理論式を用いて評価	MLT法の解析結果から評価
0.471	0.472	324.112	325.227

平成 24 年度に実施した評価では、さまざまな性状の MOX 試料を測定し、平均値を算出した。その測定結果を表 3.4-2 に示す。ここで、 S 及び D はシングル値とダブル値の計数値の測定結果であり、増倍率 M 及び α 値は Multiplicity 法による解析から得た。 S_c 及び D_c は、増倍試料を測定して得られた S 及び D に増倍補正を加えたもの（もしくは、仮想的には無増倍試料を測定したときに得られる $S (=S_c)$ 及び $D (=D_c)$ ）である。 m_{240e} は ^{240}Pu 実効質量であり、Multiplicity 法の解析結果である。これらの物理量を用いて、増倍補正係数 ρ_0 及び $b_{k\alpha}$ は、

数式(3-1)

$$\rho_0 = \frac{D_c}{S_c} (1 + \alpha) = \frac{D}{\frac{M^2 \{k_\alpha (1 + \alpha) M + (1 - k_\alpha (1 + \alpha))\}}{S}} (1 + \alpha) = \frac{D}{\frac{C_f}{S}} (1 + \alpha),$$

数式(3-2)

$$D_c = b_{k\alpha} m_{240e}$$

と表わされる。ここで、

数式(3-3)

$$C_f = M^2 \{k_\alpha(1 + \alpha)M + (1 - k_\alpha(1 + \alpha))\}$$

とおく。これらの式を用いて平成 24 年度に評価した結果を表 3.4-3 に示す。

本年度は、表 3.4-2 に示すデータを用いて最小自乗法 (LSM) により評価を行った。LSM により、平均値を用いるよりもさまざまな性状の MOX 試料に対して最小の誤差を与える較正曲線パラメータの導出が期待される。LSM を適用するために数式(3-1)及び数式(3-2)を以下のように変形し、

数式(3-4)

$$\frac{D}{S} M(1 + \alpha) = \rho_0 C_f \rightarrow y = \rho_0 x + c_1,$$

数式(3-5)

$$D_c = b_{k\alpha} m_{240e} \rightarrow y = b_{k\alpha} x + c_2,$$

線形関係 $y = ax + c$ を適用し、較正曲線パラメータ ρ_0 及び $b_{k\alpha}$ を傾きとして導出する。

(c) 試験

平成 24 年度に実施した試験によって取得したデータ (表 3.4-2) を用いた。

(d) 結果

LSM を適用した結果、増倍補正係数 ρ_0 は 0.4722、 $b_{k\alpha}$ は 324.9 となった。数式(3-4)及び数式(3-5)のグラフを、それぞれ図 3.4-1 及び図 3.4-2 に示す。

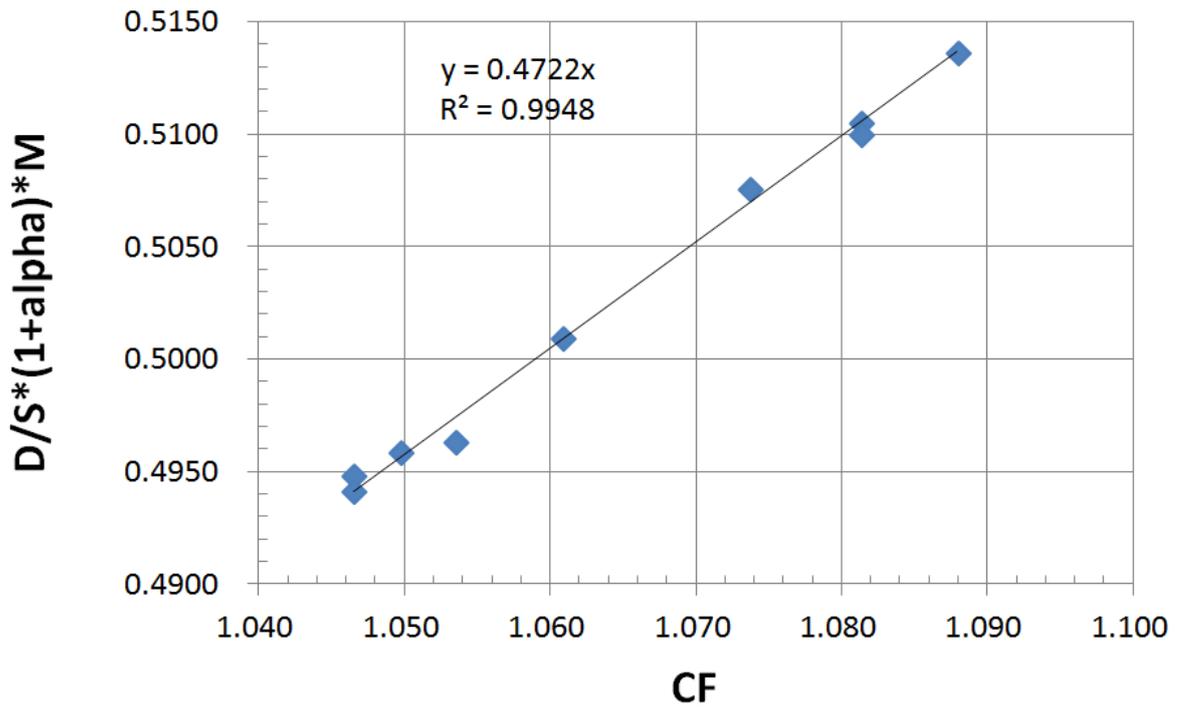


図 3.4-1. 増倍補正係数 ρ_0 の LSM の結果

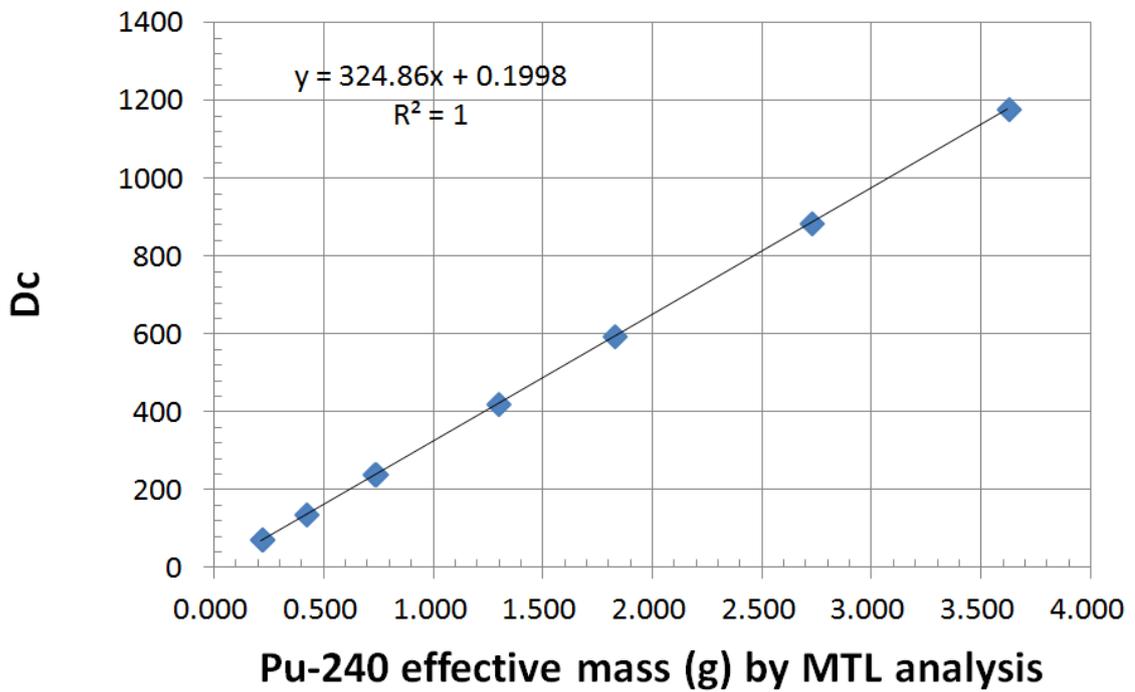


図 3.4-2. $b_{k\alpha}$ の LSM の結果

(e) 考察

増倍補正係数 ρ_0 及び $b_{k\alpha}$ の評価結果を平成 24 年度の評価結果と共に表 3.4-4 に示す。両パラ

メータとも一致し ($b_{k\alpha}$ は 0.1%程小さい)、平均による評価と LSM による評価はほぼ同じ評価値を与えた。JMOX に設置後の試験では、較正用試料に対して最小の誤差を与えるパラメータの評価方法として LSM が適当であると考えられる。

表 3.4-4. ρ_0 及び $b_{k\alpha}$ の評価結果

ρ_0		$b_{k\alpha}$	
平均値(平成24年度)	LSM(平成25年度)	平均値(平成24年度)	LSM(平成25年度)
0.4722	0.4722	325.2	324.9

3.4.2. Multiplicity法、Known-alpha法及びRaw double法による解析結果の比較

(a) 目的

本試験は、性状の異なるサンプルを測定し、Known-alpha法、Multiplicity法、Raw Double法の各解析手法で評価したPu質量と計量管理値のPu質量の差(%Difference)を評価し、サンプルの性状ごとに最適な解析手法を評価する。本適用性評価試験においてPu質量を評価するとき使用する各解析手法の特徴を表3.4-5に示す。

表 3.4-5 解析手法の特徴

解析手法	Knownα法	Raw Double法	Multiplicity法
中性子増倍の補正	可	不可	可 (測定値から評価)
(α,n)中性子の影響の補正	可 (破壊分析等により得られたPu同位体組成比及び ²⁴¹ Am含有率より評価)	不可 (中性子増倍の影響が無視できる場合、(α,n)中性子は影響しない)	可 (測定値から評価)
計数誤差	小さい	→ 大きい	

*Knownα法=Known-alpha法

(b) 方法

以下の手順によりそれぞれの解析手法によりPu質量を評価した結果と計量管理値のPu質量の差を評価する。

- 1) バックグラウンドの中性子の60秒間の測定を連続して実施し、合計で10分間(60秒×10回)の測定を行う。
- 2) サンプルホルダ内にサンプルを配置し、50分間(60秒×50回)の測定を行う。
- 3) 上記にて取得した各計数率を各解析手法により評価したときのPu質量と、計量管理値のPu質量の差%Differenceを数式(3-6)より求める。

数式(3-6)

$$\% \text{Difference} = \frac{m_{Pu_NDA} - m_{Pu_MA}}{m_{Pu_MA}} \times 100$$

但し、 m_{Pu_NDA} : 測定により得られたPu質量

m_{Pu_MA} : 計量管理値のPu質量

(c) 使用対象のサンプル

測定に使用したサンプルを表3.4-6に示す。

表 3.4-6. 使用サンプル一覧

サンプル ID	サンプルの性状	Pu 質量(g)
N01-03	焼結後ペレット	2.144
N07-01		0.566
N08-01		3.342
N02-04	MH-MOX 粉末	10.017
N03-01	強制篩分後粉末	7.228
N04-01	二次混合後粉末	1.929
N05-01	潤滑剤混合後粉末	1.937
N06-01	グリーンペレット	0.570

(d) 結果

式 3.1 より求めた焼結後ペレット、粉末及びグリーンペレットの%Differenceを表 3.4-7、図 3.4-3 及び図 3.4-4 に示す。

図 3.4-3 に示した通り、焼結後ペレットの測定値を Raw Double 法で解析した場合、計量管理値に対して 2~8%程度の差が確認され、Pu 質量の増加に伴いその差が増加する傾向が確認された。また、Known-alpha 法及び Multiplicity 法を適用した場合、それぞれ約 0.6%及び 1.5%のバイアスが生じた。

図 3.4-4 に示した通り、粉末及びグリーンペレットの測定値を Known-alpha 法または Raw Double 法で解析した場合、計量管理値に対して 2~6%程度の差が確認され、Pu 質量の増加に伴いその差が増加する傾向が確認された。また、Multiplicity 法を適用した場合、約 2.8%のバイアスが生じた。

表 3.4-7 測定値と計量管理値の Pu 質量の差

		Pu量(g)	Known α		Multiplicity		Raw Double	
			%Difference	%RSD	%Difference	%RSD	%Difference	%RSD
焼結後 ペレット	N07-01	0.566	0.354	0.142	-1.947	0.311	3.009	0.379
	N01-03	2.144	-1.279	0.106	-1.563	0.204	6.679	0.216
	N08-01	3.342	-0.785	0.070	-0.935	0.193	8.600	0.189
粉末及び グリーンペレット	N06-01	0.570	1.406	0.423	-3.866	0.331	1.406	0.423
	N04-01	1.929	2.750	0.196	-2.283	0.224	2.750	0.196
	N05-01	1.937	2.739	0.176	-2.739	0.225	2.739	0.176
	N03-01	7.228	5.610	0.142	-2.383	0.204	5.610	0.142
	N02-04	10.017	6.433	0.158	-2.657	0.211	6.433	0.158

*Known α =Known-alpha 法

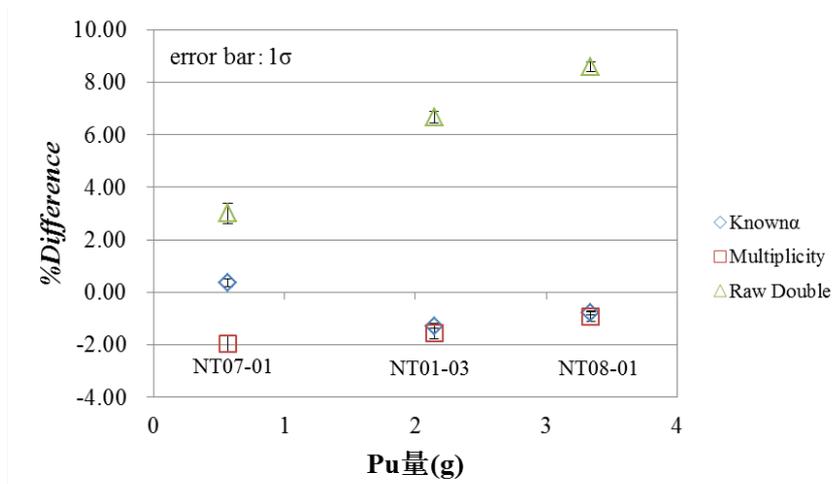


図 3.4-3. 測定値と計量管理値の Pu 質量の差（焼結後ペレット）

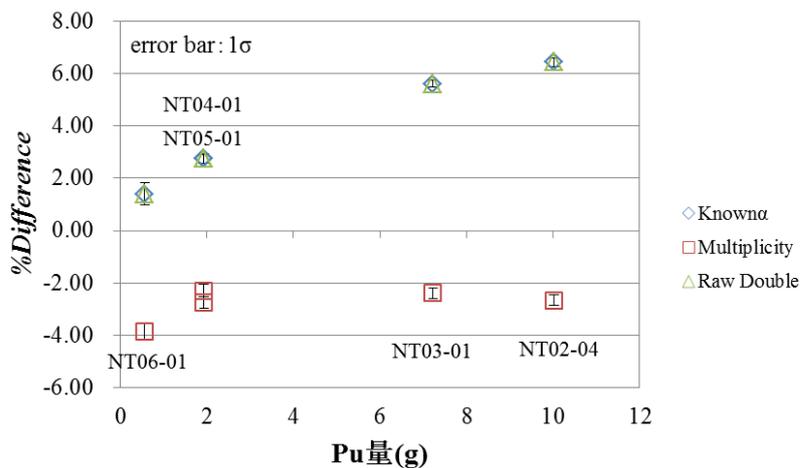


図 3.4-4. 測定値と計量管理値の Pu 質量の差（粉末及びグリーンペレット）

(e) 考察

上記の通り、Raw Double 法を適用したとき、また、粉末及びグリーンペレットに対して Known-alpha 法を適用したときにサンプル中の Pu 質量の増加に伴い計量管理値と Pu 質量の評価結果の差が増大した。

これらの結果より、焼結後ペレットに対しては Knownα 法または Multiplicity 法、粉末及びグリーンペレットに対しては Multiplicity 法を解析手法として適用することが適当であると考ええる。ただし、この場合でも、Pu 質量の評価結果は、計量管理値に対して一定のバイアスを有しているため、JMOX に設置後、再キャリブレーション（解析用パラメータの評価）が必要になるものと考ええる。

Raw Double 法を適用したときに計量管理値との間に差が生じた理由は、この差が Pu 質量の増加に伴い増加していることから、中性子増倍の影響であると考えられる。

粉末及びグリーンペレットに対して Known-alpha 法による Pu 質量の評価結果と計量管理値との間に差が生じた原因は、Known-alpha 法に与える α 値 ((α,n) 反応により生じる中性子数を自発核分裂により生じる中性子数で割った値) が適切に評価できていないためと考える。Known-alpha 法に与える α 値は、酸素対金属原子数比 (O/M) が 2.0 を前提として、プルトニウム同位体比及びアメリシウム含有率から算出される (式 3.2)。しかしながら、粉末及びグリーンペレットの段階では O/M は調整されないことから、 α 値算出の前提条件である O/M=2.0 を逸脱し、これが原因で、 α 値が適切に算出されていない可能性がある。これを確認するため、数式(3-7)により算出した α 値と、サンプルの計数率のみから α 値の評価が可能な解析手法である Multiplicity 法により評価した α 値を比較評価した。その結果を図 3.4-5 に示す。図 3.4-5 に示した通り、粉末及びグリーンペレットに関しては、両者の α 値に差が生じていることから、Known-alpha 法における O/M =2.0 の前提条件を満たしていないものと考えられる。なお、焼結後ペレットに関しては、両者の α 値がほぼ一致していることから Known-alpha 法における α 値算出の前提条件である O/M =2.0 程度であると考えられる。

数式(3-7)

$$\alpha = \frac{13400 {}^{238}\text{Pu} + 38.1 {}^{239}\text{Pu} + 141 {}^{240}\text{Pu} + 1.3 {}^{241}\text{Pu} + 2 {}^{242}\text{Pu} + 2690 {}^{241}\text{Am}}{1020(2.54 {}^{238}\text{Pu} + {}^{240}\text{Pu} + 1.69 {}^{242}\text{Pu})}$$

但し、 ${}^{238}\text{Pu}$: ${}^{238}\text{Pu}$ の同位体組成比

${}^{239}\text{Pu}$: ${}^{239}\text{Pu}$ の同位体組成比

${}^{240}\text{Pu}$: ${}^{240}\text{Pu}$ の同位体組成比

${}^{241}\text{Pu}$: ${}^{241}\text{Pu}$ の同位体組成比

${}^{242}\text{Pu}$: ${}^{242}\text{Pu}$ の同位体組成比

${}^{241}\text{Am}$: ${}^{241}\text{Am}$ の含有率

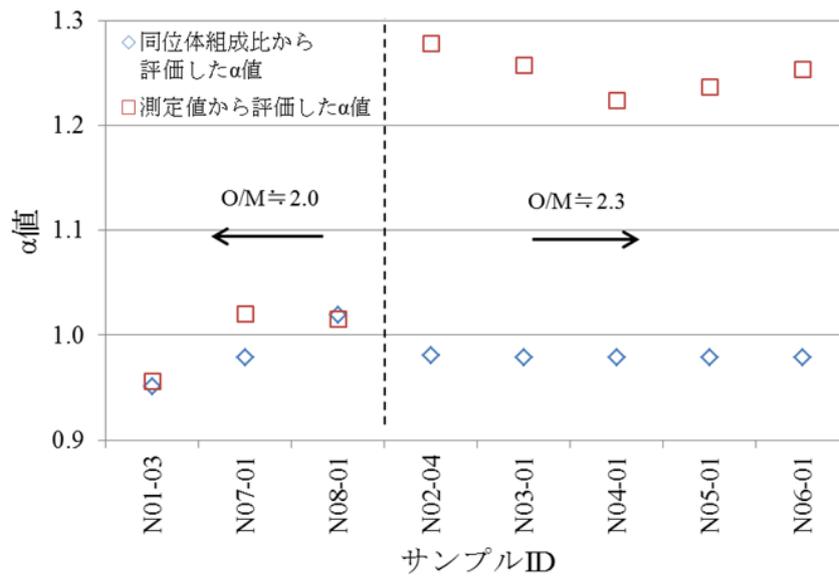


図 3.4-5 Known-alpha 法（ひし形点）と Multiplicity 法（四角点）の α 値の測定評価
 （各サンプルの性状は表 3.4-6 を参照）

3.4.3. 測定時間と測定精度の関係

(a) 目的

本評価試験は、AVIS を用いた MOX 試料中の Pu 質量の測定について、サンプルの性状に応じた最適な解析手法を適用した場合の測定時間と測定精度の相関の評価を行う。また、AVIS の User Requirements に示されている ^{240}Pu 実効質量測定精度 0.5% を満たす測定時間の評価を行う。

(b) 方法

平成 24 年度受託業務では、N02 (MOX 原料粉末) から採取した 1 サンプル及び N01 (焼結ペレット) から採取した 3 サンプル (表 3.3-1 参照) を用いて、放出される中性子の 60 秒間の測定を連続して合計 30 分 (60 秒×30 回) 以上実施した。本評価試験では、この測定データの測定開始から 30 分間 (60 秒×30 回) のものを用いることで、AVIS の User Requirements に示されている測定時間 15 分間付近での ^{240}Pu 実効質量の相対誤差 (^{240}Pu 実効質量の測定誤差を ^{240}Pu 実効質量で除したもの) を評価する。MOX 粉末には Multiplicity 法を、ペレットには Known-alpha 法を適用する。

(c) 結果

本性能評価試験結果を図 3.4-6 (N02) 及び図 3.4-7 (N01) に示す。 ^{240}Pu 実効質量の相対誤差は、測定時間が増加するほど減少する傾向にある。これは、測定時間が大きいほど ^{240}Pu 実効質量の計算に用いたデータ数が多くなり、統計誤差が減少するためである。

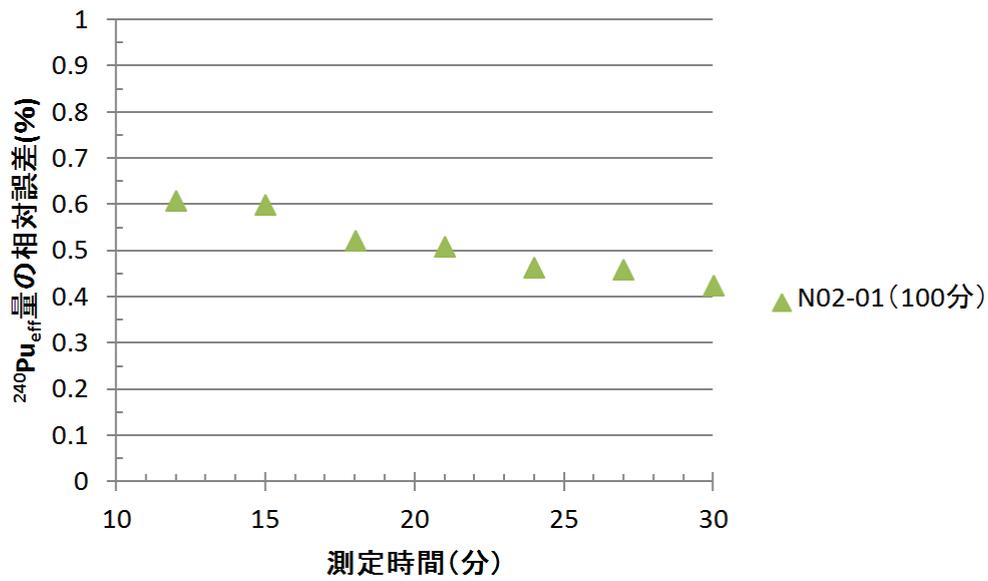


図 3.4-6. 測定時間と測定精度の相関 (N02-01 (MOX 原料粉末)、Multiplicity 法)

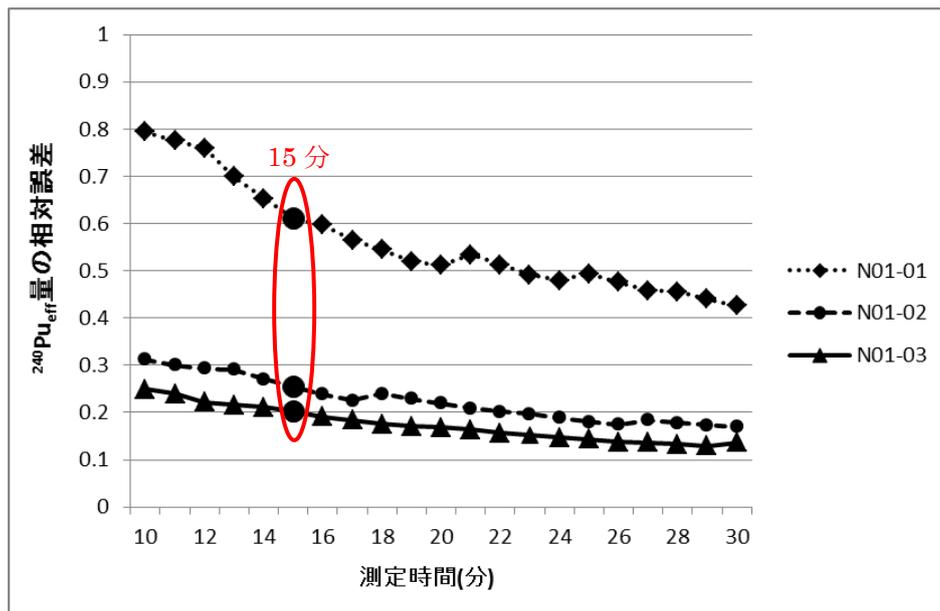


図 3.4-7. 測定時間と測定精度の相関 (N01 (焼結ペレット)、Known-alpha 法)

(d) 考察

MOX 原料粉末 (N02-01) を 100 分間測定して得られたデータを用いて、測定時間 30 分までの ^{240}Pu 実効質量の相対誤差の推移を図 3.4-6 の三角点で示す。この三角点で示した相対誤差の推移より、測定時間 21 分程度で 0.5%程度となっている。

焼結ペレットについて、N01-02 及び N01-03 の ^{240}Pu 実効質量の相対誤差は要求される測定精度 0.5%と比較して十分小さい値であるが、N01-01 は要求される測定精度より大きくな

っている。この N01-01 について、本試験では測定時間 23 分以上を確保すると 0.5%未満の誤差が得られている。

測定時間 15 分で要求精度 0.5%を満たすためには、測定試料の Pu 質量を増やす必要がある。図 3.4-24 より、Multiplicity 法による MOX 原料粉末の測定では、10 g 程度を増やす必要がある。一方、Known-alpha 法による焼結ペレットの測定では、図 3.4-25 より 1 g 程度を増やす必要がある。

3.4.4. バックグラウンド中性子の増減が測定結果へ与える影響

(a) 目的

バックグラウンド中性子が AVIS 測定値に与える影響を評価する。

(b) 方法

以下に評価手順を示す。

- 1) バックグラウンドの中性子の 60 秒間の測定を連続して実施し、合計で 15 分間 (60 秒×15 回) の測定を行う。
- 2) サンプルホルダ内にサンプルを配置し、15 分間 (60 秒×15 回) の中性子の測定を行う。測定終了後、サンプルを取り出す。
- 3) バックグラウンドを変動させるため、図 3.4-8 に示す通り、²⁵²Cf 中性子線源を中性子検出器近傍 (バックグラウンドのシングル値が 100cps または 1000cps になる位置) に配置し、15 分間 (60 秒×15 回) のバックグラウンド測定を行う。
- 4) ²⁵²Cf 中性子線源を配置した状態でサンプルホルダ内にサンプルを配置し、15 分間 (60 秒×15 回) の中性子の測定を行う。測定終了後、サンプルを取り出す。
- 5) 上記のサンプルの測定にて取得した中性子計数率を各解析手法 (Known-alpha 法、Multiplicity 法、Raw Double 法) により評価して得られた ²⁴⁰Pu 実効質量(g) $^{240}m_{Pu_eff}$ 及びその標準偏差 $\sigma^{240}m_{Pu_eff}$ を、数式(3-8)に代入し、相対標準偏差%RSD を求める。

数式(3-8)

$$\%RSD = \frac{\sigma^{240}m_{Pu_eff}}{^{240}m_{Pu_eff}} \times 100$$

但し、 $^{240}m_{Pu_eff}$: ²⁴⁰Pu 実効質量(g)

$\sigma^{240}m_{Pu_eff}$: ²⁴⁰Pu 実効質量(g)の標準偏差

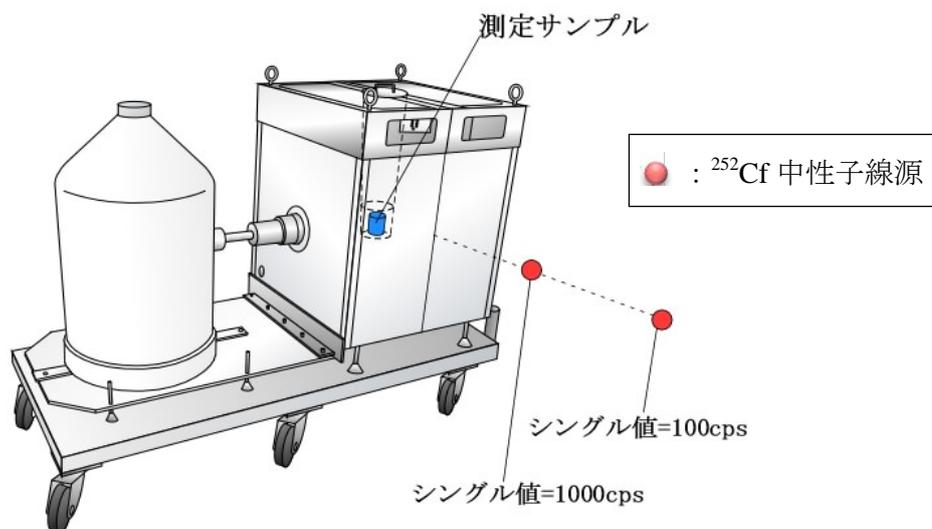


図 3.4-8. ^{252}Cf 中性子線源の配置位置

(c) 試験

測定に使用したサンプルを表 3.4-8 に示す。

表 3.4-8. 使用サンプル一覧

サンプル ID	サンプルの性状	Pu 質量(g)
N01-01	焼結後ペレット	0.575
N01-03		2.144

(d) 結果

測定結果を表 3.4-9 及び図 3.4-9 (Known-alpha 法)、図 3.4-10 (Multiplicity 法)、図 3.4-11 (Raw Double 法) に示す。

各バックグラウンドにおいてサンプルを測定した結果、 ^{240}Pu 実効質量(g)の相対標準誤差%*RSD* は、バックグラウンドのシングル値の増加に伴い大きくなった。また、表 3.4-10、図 3.4-12 及び図 3.4-13 に示した通り、各バックグラウンドにおける Pu 質量測定値は、誤差(2 σ)の範囲で一致した。

表 3.4-9 バックグラウンド中性子の与える影響の測定結果

	Background (cps)	%RSD($^{240}\text{Pu}_{\text{eff}} \text{ mass(g)}$)		
		Known α	Multiplicity	Raw Double
N01-01	4.914	0.350	0.564	0.787
	101.623	0.455	0.606	0.605
	1010.659	0.648	1.203	1.062
N01-03	4.914	0.168	0.373	0.434
	101.623	0.239	0.385	0.454
	1010.659	0.212	0.553	0.544

*Known α =Known-alpha 法

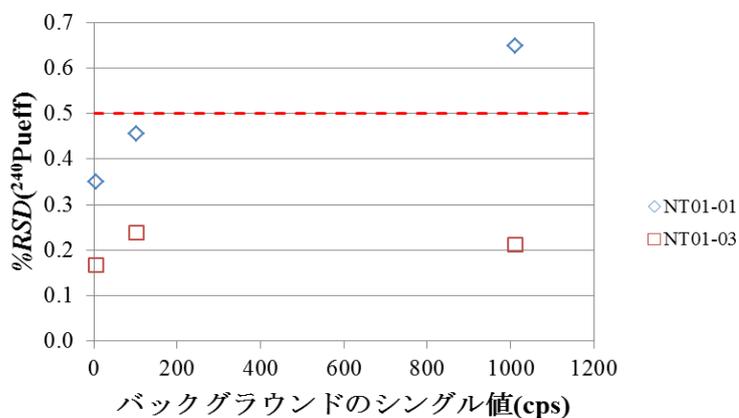


図 3.4-9. Known-alpha 法の測定結果

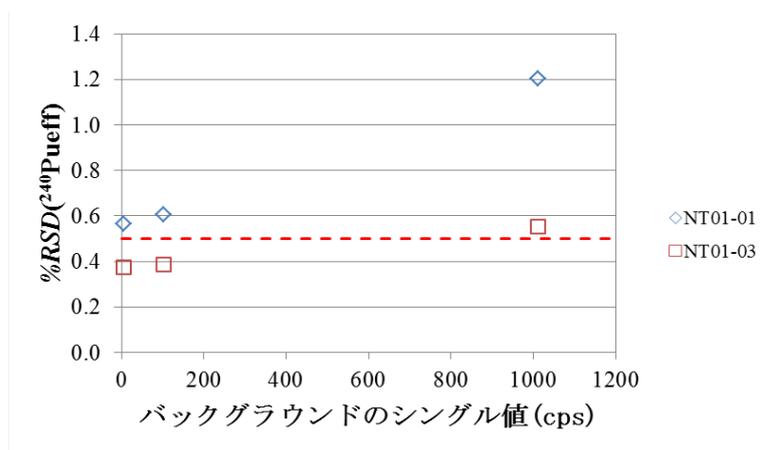


図 3.4-10. Multiplicity 法の測定結果

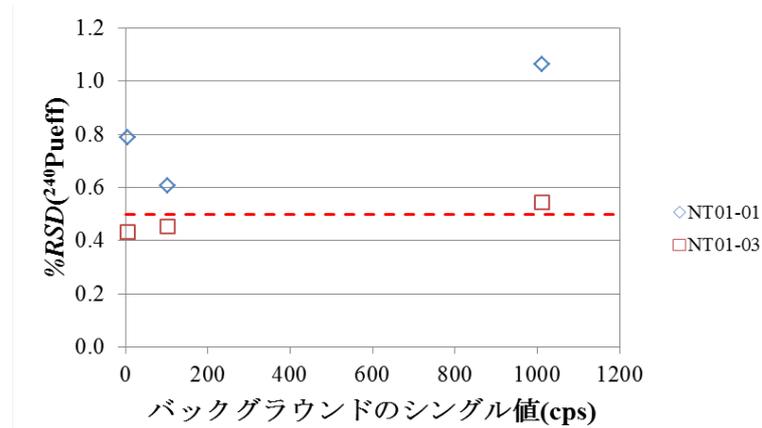


図 3.4-11. Raw Double 法の測定結果

表 3.4-10 バックグラウンド中性子のシングル値と Pu 質量の相関

	Background (cps)	Known α		Multiplicity		Raw Double	
		Pu mass (g)	σ Pu (g)	Pu mass (g)	σ Pu (g)	Pu mass (g)	σ Pu (g)
N01-01	4.914	0.560	0.002	0.557	0.003	0.593	0.004
	101.623	0.560	0.003	0.560	0.003	0.593	0.003
	1010.659	0.563	0.004	0.557	0.007	0.592	0.006
N01-03	4.914	2.081	0.004	2.064	0.008	2.239	0.009
	101.623	2.084	0.005	2.080	0.008	2.236	0.010
	1010.659	2.097	0.004	2.065	0.012	2.257	0.011

*Known α =Known-alpha 法

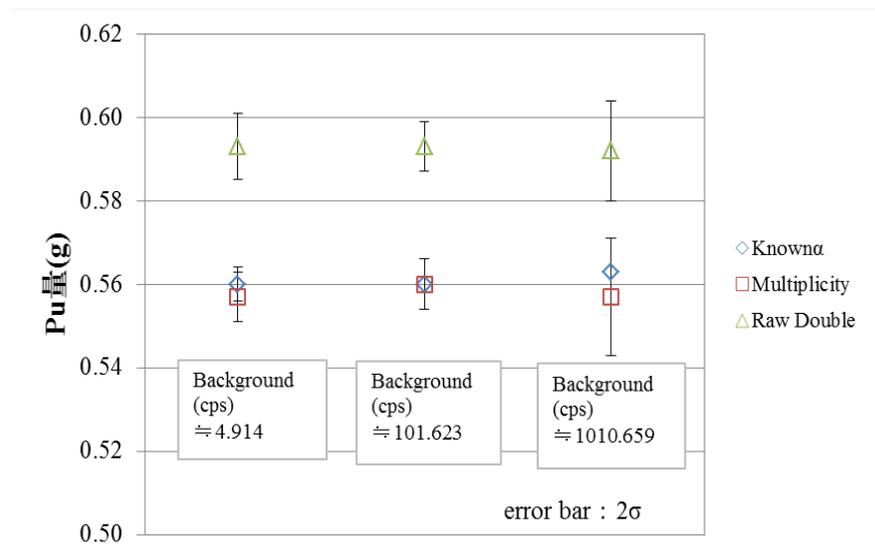


図 3.4-12. N01-01 の Pu 質量の相関

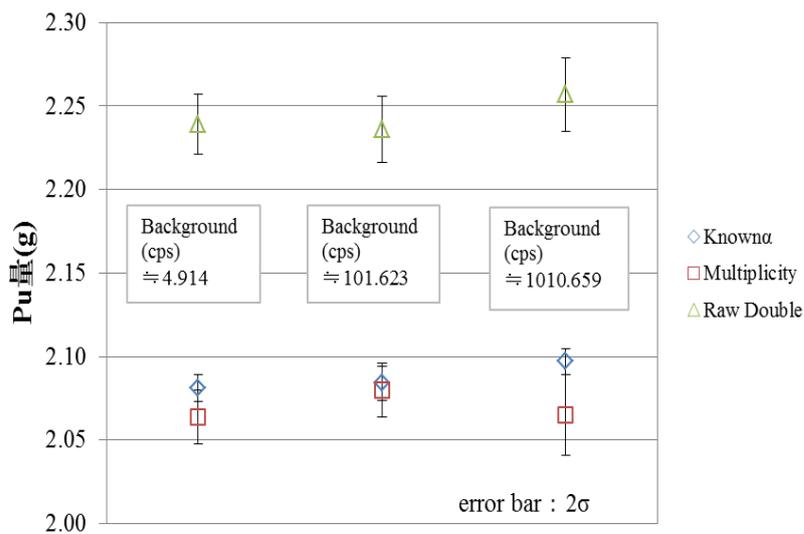


図 3.4-13. N03-01 の Pu 質量の相関

(e) 考察

上記の通り、いずれの解析手法においても、バックグラウンドのシングル値の増加に伴い、 ^{240}Pu 実効質量(g)の%RSDは増大した。

JMOXにおいてAVISは、核物質を取り扱うグローブボックスの下部に設置されることから、バックグラウンドは高くなることが予想される。JMOXにおいて高バックグラウンド下でAVISを使用する場合、AVISの測定精度はバックグラウンド中性子の増加により低下していることから、バックグラウンド低減のための対策（遮へい等）が必要であると考えられる。

3.4.5. 測定の繰り返し精度（標準偏差より偶然誤差を確定）

同一サンプルを繰り返し測定した場合、測定結果がどの程度ばらつくかは測定性能の重要項目の一つである。大きくばらつくような場合は、測定結果に対する信頼性は低くなる。

本評価試験では、中性子検出器またはガンマ線検出器による同一の MOX 試料の測定を繰り返し実施し、機器の安定性及び測定配置の再現性に起因する誤差（以下、「繰り返し精度」という）を評価する。

3.4.5.1. 中性子検出器の繰り返し精度

(a) 目的

本評価試験では、AVIS の中性子検出器について、その繰り返し精度を評価する。

(b) 方法

同一サンプルを 1 日 3 回×3 日間測定することにより、本試験における中性子検出器の繰り返し精度を評価する。以下に評価手順を示す。

- 1) AVIS を測定位置に設置する。
- 2) バックグラウンドの中性子の 60 秒間の測定を連続して実施し、合計で 10 分間（60 秒×10 回）の測定を行う。
- 3) サンプルホルダ内にサンプルを配置し、50 分間（60 秒×50 回）の中性子の測定を行う。
- 4) 測定終了後、サンプルホルダからサンプルを取り出す
- 5) 3) ～4) を 1 日 3 回行う。
- 6) 1) ～5) を 3 日間に渡り実施する。
- 7) 上記にて取得したそれぞれの測定日における日内の 3 回の Pu 質量の測定値 (m_{Pu}) 及びそれらの測定誤差 (σm_{Pu}) から、それぞれの測定日における日内の測定値の有意な差の有無を評価する。また、測定値から繰り返し精度を計算する。
- 8) それぞれの測定日における日内の 3 回の測定の平均値及びそれぞれの σm_{Pu} を数式(3-9) に代入することにより求めた測定誤差 (σm_{Pu_total}) から、日間の測定値の有意な差の有無を評価する。

数式(3-9)

$$\sigma m_{Pu_total} = \frac{\sqrt{(\sigma m_{Pu_1})^2 + (\sigma m_{Pu_2})^2 + (\sigma m_{Pu_3})^2}}{3}$$

但し、 σm_{Pu_n} : n 回目の測定における σm_{Pu}

(c) 試験

測定に使用したサンプルを表 3.4-11 に示す。

表 3.4-11. 使用サンプル一覧

サンプル ID	サンプルの性状	Pu 質量(g)
N02-04	MH-MOX 粉末	10.017
N08-01	焼結後ペレット	3.342

(d) 結果

N02-04 の測定結果を表 3.4-12 及び図 3.4-14 に示す。図 3.4-14 に示した通り、N02-04 の各測定日における 3 回の測定値は、誤差の範囲で一致した。また、N02-04 の各測定日における 3 回の測定の平均値及び σm_{Pu_total} を表 3.4-13 及び図 3.4-15 に示す。図 3.4-15 に示した通り、N02-04 の 3 回の測定の平均値は、誤差の範囲で一致した。

N08-01 の測定結果を表 3.4-14 及び図 3.4-16 に示す。図 3.4-16 に示した通り、N08-01 の各測定日における 3 回の測定値は、誤差の範囲で一致した。また、N08-01 の各測定日における 3 回の測定の平均値及び σm_{Pu_total} を表 3.4-15 及び図 3.4-17 に示す。図 3.4-17 に示した通り、N08-01 の 3 回の測定の平均値は、誤差の範囲で一致した。

表 3.4-12 (N02-04) 及び表 3.4-14 (N08-01) の結果を用いて測定値の誤差 (繰返し精度) を求めたところ、それぞれ 0.244%、0.185%となった。これらの値は AVIS の User Requirements に示されている ^{240}Pu 実効質量測定精度 0.5%と比べて小さい値である。

表 3.4-12. N02-04 の測定結果

日	測定回数	測定値	
		Pu(g)	$\sigma\text{Pu(g)}$
1	1	9.231	0.020
	2	9.270	0.020
	3	9.267	0.020
2	4	9.271	0.020
	5	9.290	0.020
	6	9.280	0.020

3	7	9.226	0.020
	8	9.247	0.020
	9	9.280	0.020

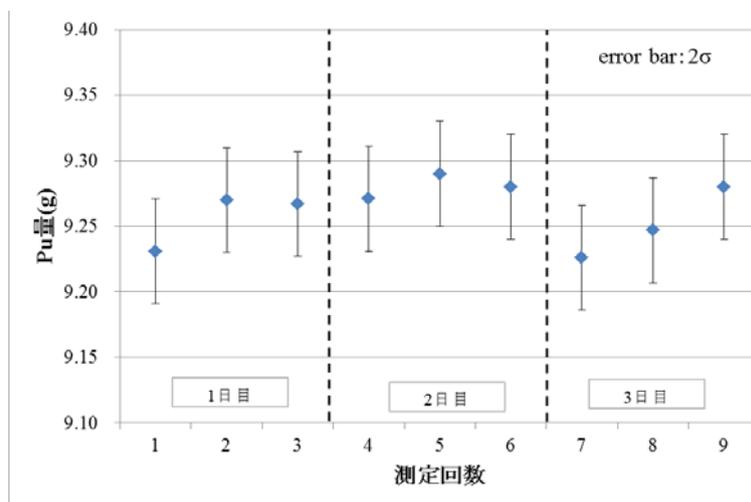


図 3.4-14. N02-04 の測定結果の比較（日内）

表 3.4-13. N02-04 の各測定日における測定結果の平均値と誤差

測定日	Pu(g)	σ Pu(g)
1	9.256	0.012
2	9.280	0.012
3	9.251	0.012

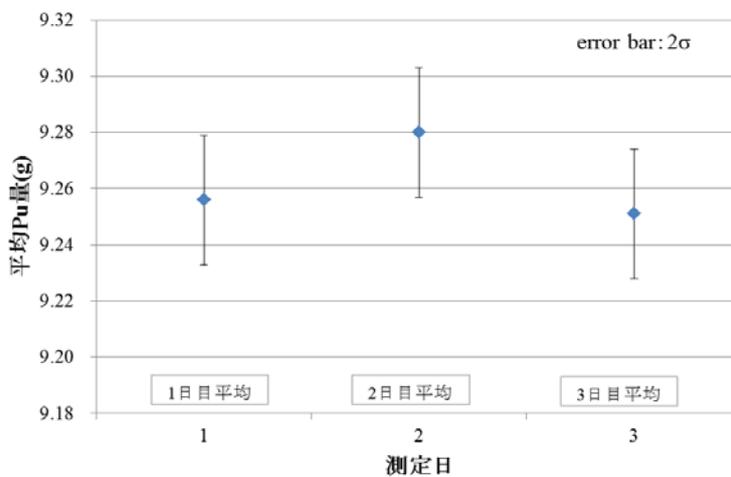


図 3.4-15. N02-04 の各測定日における測定結果の平均値の比較（日間）

表 3.4-14. N08-01 の測定結果

日	測定回数	測定値	
		Pu(g)	σ Pu(g)
1	1	3.283	0.006
	2	3.281	0.006
	3	3.285	0.006
2	4	3.274	0.006
	5	3.283	0.006
	6	3.278	0.006
3	7	3.286	0.006
	8	3.296	0.006
	9	3.281	0.006

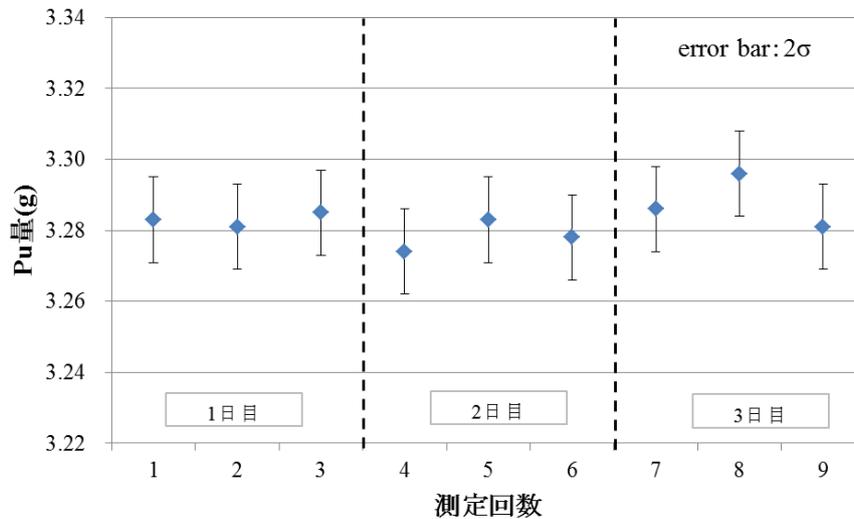


図 3.4-16. N08-01 の測定結果の比較（日内）

表 3.4-15. N08-01 の各測定日における測定結果の平均値と誤差

測定日	Pu(g)	σ Pu(g)
1	3.283	0.003
2	3.278	0.003
3	3.288	0.003

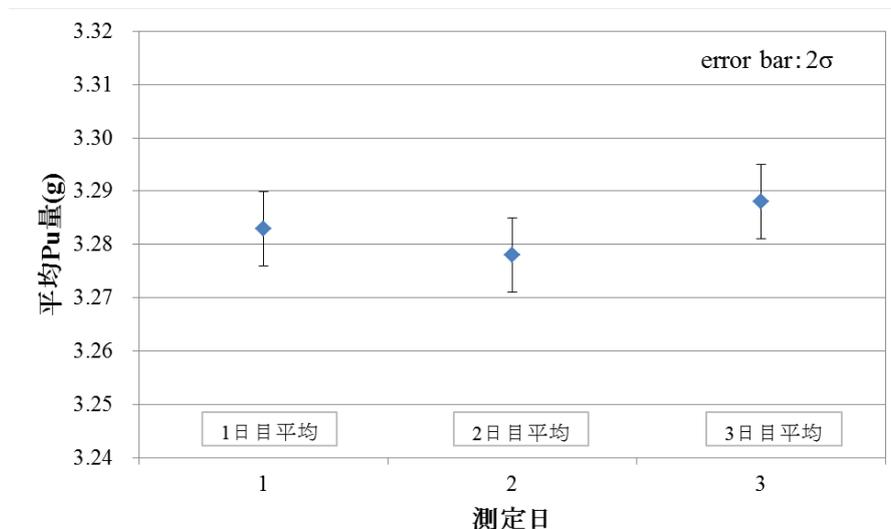


図 3.4-17. N08-01 の各測定日における測定結果の平均値の比較

(e) 考察

上記の通り、日内の各測定値及び日内の 3 回の測定の平均値が誤差の範囲で一致したことから、本試験体系における繰返し精度の Pu 質量評価結果への有意な影響はないものと考えられる。

3.4.5.2. ガンマ線検出器の繰返し精度

(a) 目的

本評価試験では、AVIS のガンマ線検出器について、その繰り返し精度を評価する。

(b) 方法

同一サンプルを 1 日 3 回×3 日間測定することにより、本試験におけるガンマ線検出器の繰返し精度を評価する。以下に評価手順を示す。

- 1) AVIS を測定位置に配置する。
- 2) サンプルをサンプルホルダに配置し、50 分間のガンマ線測定を行う。
- 3) 測定終了後、サンプルホルダからサンプルを取り出す。
- 4) 2) ～3) の測定を 3 回行う。
- 5) 1) ～4) を 3 日間に渡り実施する。
- 6) 上記にて取得したスペクトルデータを FRAM5.1 で解析する。
- 7) 上記にて取得したそれぞれの測定日における日内の 3 回の ^{240}Pu 実効質量(%)の測定値

($^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$) 及びそれらの測定誤差 ($\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$) から、それぞれの測定日における日内の測定値の有意な差の有無を評価する。

- 8) それぞれの測定日における日内の 3 回の測定の平均値及びそれぞれの $\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ を数式 (3-10) に代入することにより求めた測定誤差 ($\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff_total}}$) から、日間の測定値の有意な差の有無を評価する。

数式(3-10)

$$\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff_total}} = \frac{\sqrt{(\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}} - 1)^2 + (\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}} - 2)^2 + (\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}} - 3)^2}}{3}$$

但し、 $\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}_n}$: n 回目の測定における $\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$

(c) 使用対象のサンプル

測定に使用したサンプルを表 3.4-16 に示す。

表 3.4-16. 使用サンプル一覧

サンプル ID	サンプルの性状	Pu 質量(g)
N02-04	MH-MOX 粉末	10.017
N08-01	焼結後ペレット	3.342

(d) 結果

N02-04 の測定結果を表 3.4-17 及び図 3.4-18 に示す。図 3.4-18 に示した通り、N02-04 の各測定日における 3 回の測定値は、誤差の範囲で一致した。また、N02-04 の各測定日における 3 回の測定の平均値及び $\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff_total}}$ を表 3.4-18 及び図 3.4-19 に示す。図 3.4-19 に示した通り、N02-04 の 3 回の測定の平均値は、誤差の範囲で一致した。

N08-01 の測定結果を表 3.4-19 及び図 3.4-20 に示す。図 3.4-20 に示した通り、N08-01 の各測定日における 3 回の測定値は、誤差の範囲で一致した。また、N08-01 の各測定日における 3 回の測定の平均値及び $\sigma^{240}\text{Pu}_{\text{eff_total}}$ を表 3.4-20 及び図 3.4-21 に示す。図 3.4-21 に示した通り、N08-01 の 3 回の測定の平均値は、誤差の範囲で一致した。

表 3.4-17. N02-04 の測定結果

日	測定回数	測定値
---	------	-----

		$^{240}\text{Pu eff}(\%)$	$\sigma^{240}\text{Pu eff}(\%)$
1	1	39.658	0.357
	2	39.049	0.348
	3	39.231	0.352
2	4	39.546	0.354
	5	39.589	0.362
	6	39.320	0.359
3	7	39.566	0.361
	8	39.765	0.349
	9	39.434	0.377

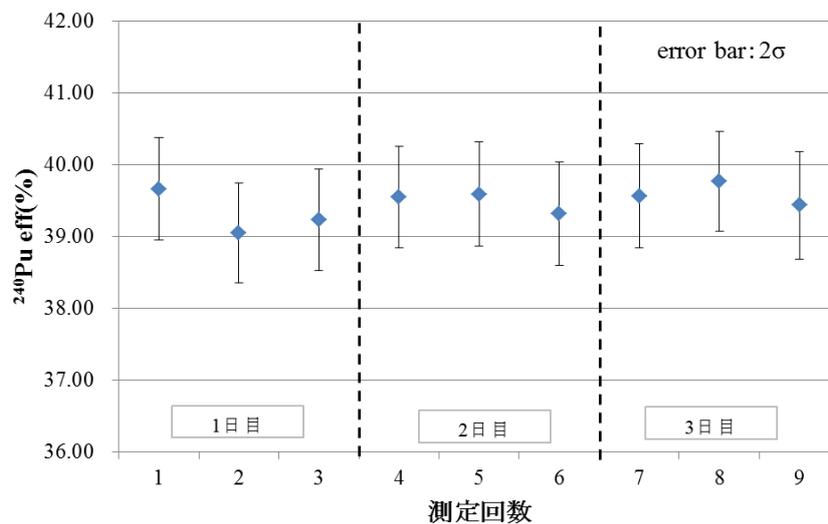


図 3.4-18. N02-04 の測定結果の比較（日内）

表 3.4-18. N02-04 の各測定日における測定結果の平均値と誤差

測定日	$^{240}\text{Pu eff}(\%)$	$\sigma^{240}\text{Pu eff}(\%)$
1	39.313	0.203
2	39.485	0.207
3	39.588	0.209

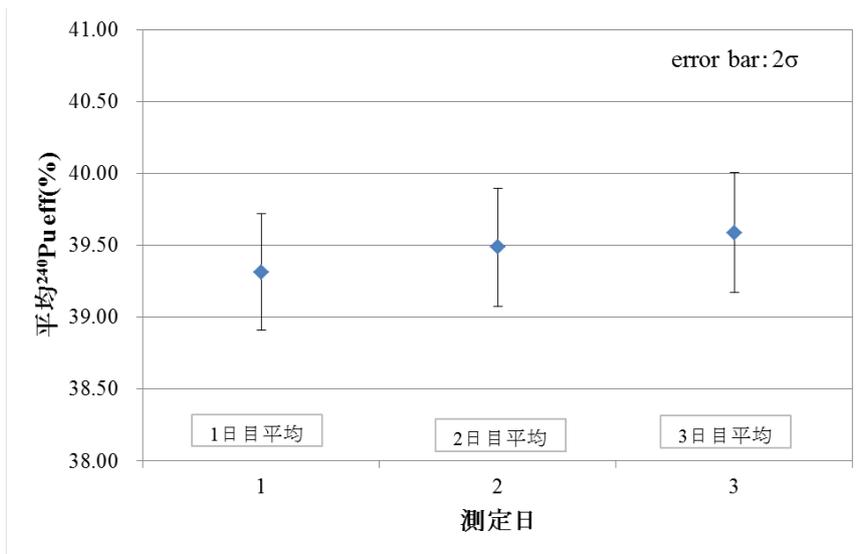


図 3.4-19. N02-04 の各測定日における測定結果の平均値の比較（日間）

表 3.4-19. N08-01 の測定結果

日	測定回数	測定値	
		$^{240}\text{Pu eff}(\%)$	$\sigma^{240}\text{Pu eff}(\%)$
1	1	41.660	0.807
	2	40.086	0.777
	3	40.318	0.760
2	4	42.246	0.820
	5	39.624	0.791
	6	40.479	0.762
3	7	40.176	0.812
	8	41.536	0.860
	9	39.956	0.833

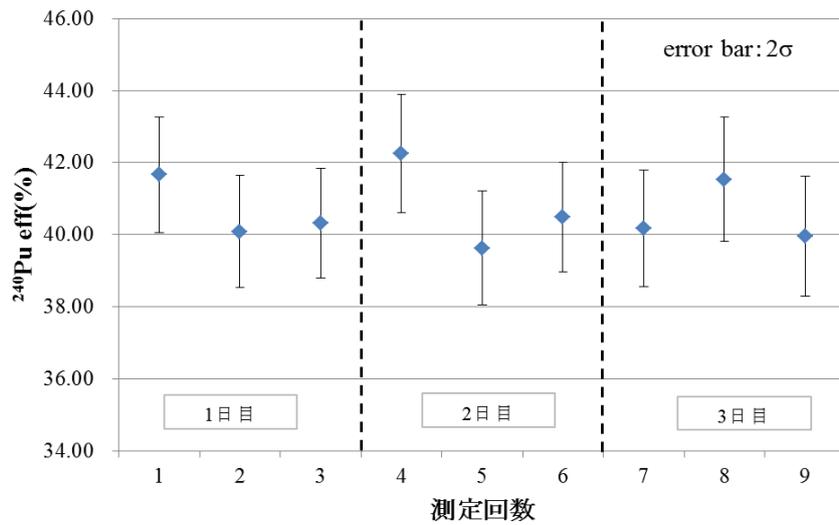


図 3.4-20. N08-01 の測定結果の比較 (日内)

表 3.4-20. N08-01 の各測定日における測定結果の平均値と誤差

測定日	$^{240}\text{Pu eff}(\%)$	$\sigma^{240}\text{Pu eff}(\%)$
1	40.688	0.451
2	40.783	0.457
3	40.556	0.482

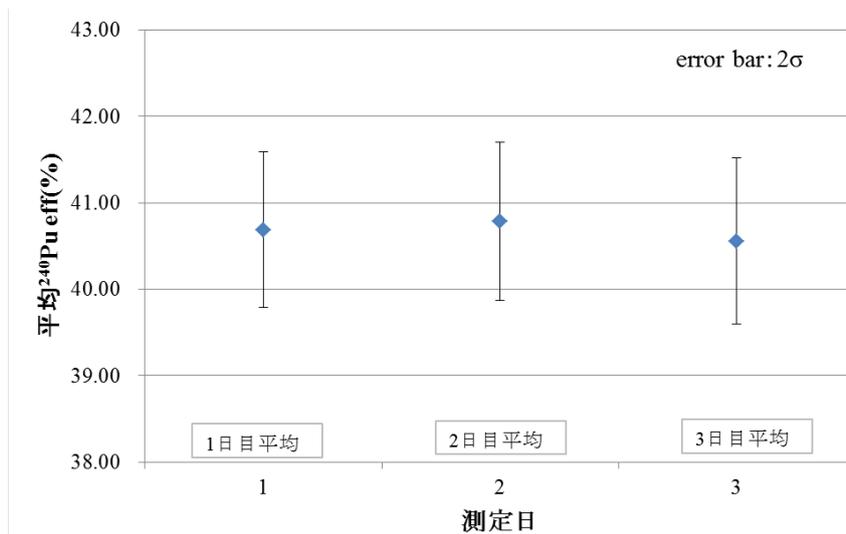


図 3.4-21. N08-01 の各測定日における測定結果の平均値の比較 (日間)

(e) 考察

上記の通り、日内の各測定値及び日内の3回の測定の平均値が誤差の範囲で一致したことから、本試験体系における繰返し精度の²⁴⁰Pu実効質量(%)評価結果への有意な影響はないものと考えられる。

3.4.6. バックグラウンド中性子の増減と検出限界の関係

(a) 目的

AVIS の中性子検出器の検出下限値を評価する。

(b) 方法

バックグラウンド測定を実施し、計数率の標準偏差の3倍を検出限界として、AVIS の中性子検出器の検出下限値を評価する。また、JMOX における AVIS の設置箇所は、プルトニウムを在庫するグローブボックス下部となるため、バックグラウンド中性子が増加した場合を想定した検出下限値についても評価する。以下に評価手順を示す。

- 1) バックグラウンドの中性子の 60 秒間の測定を連続して実施し、合計で 50 分間 (60 秒 × 10 回) の測定を行う。
- 2) バックグラウンドを変動させるため、図 3.4-22 に示す通り、²⁵²Cf 中性子線源を中性子検出器近傍 (バックグラウンドのシングル値が 100cps または 1000cps になる位置) に配置し、それぞれ 50 分間 (60 秒 × 50 回) のバックグラウンド測定を行う。
- 3) 上記にて取得したバックグラウンドのダブル値 D_{bkg} を数式(3-11)に代入して、²⁴⁰Pu 実効質量(g)の検出下限値 $d(m_{240e})$ を評価する。

数式(3-11)

$$d(m_{240e}) = \frac{3}{a} \cdot \sqrt{\frac{D_{bkg} + a \cdot d(m_{240e})}{t}}$$

但し、 $d(m_{240e})$: ²⁴⁰Pu 実効質量 (g) の検出下限値

D_{bkg} : バックグラウンドのダブル値

a : スロープ b (3.240449E+02)

t : 測定時間 (3000 秒で評価)

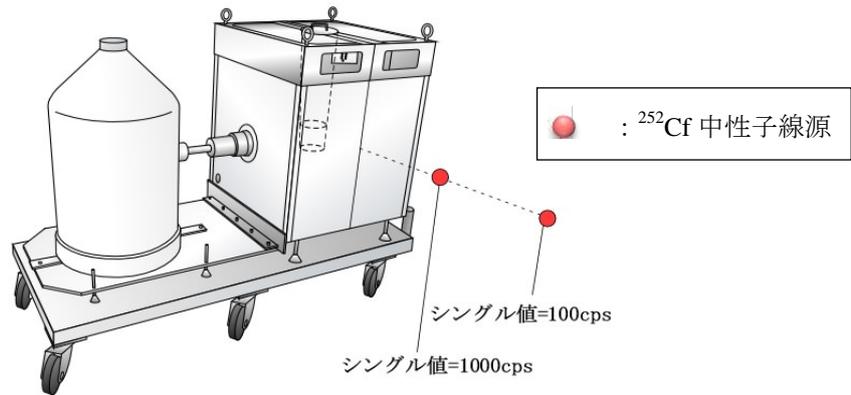


図 3.4-22. 検出下限値の評価試験における ^{252}Cf 中性子線源の配置位置

(c) 結果

検出下限値の測定結果を図 3.4-23 に示す。

要求される測定時間 15 分の場合の ^{240}Pu 実効質量(g)の検出下限値は、バックグラウンドのシングル値が約 5cps (JAEA の通常の試験環境) のとき $0.073\text{mg}^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ 、約 100cps のとき $0.137\text{mg}^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ 、約 1000cps のとき $0.758\text{mg}^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ であった。

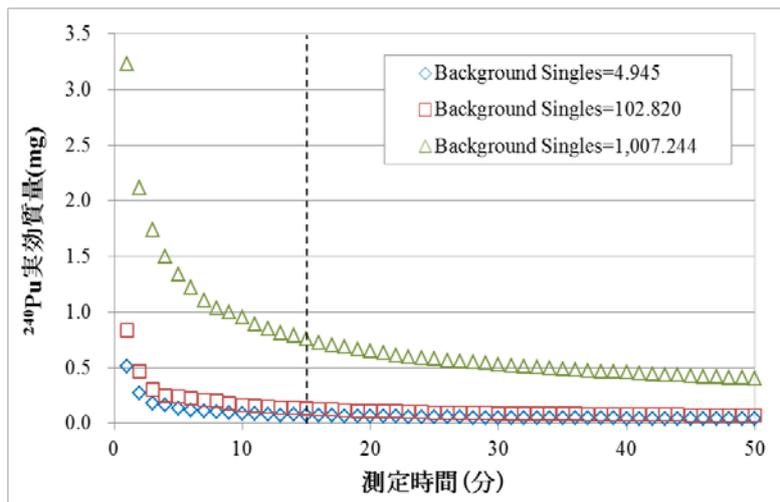


図 3.4-23 測定時間と ^{240}Pu 実効質量の検出下限値の相関

(d) 考察

AVIS の User Requirements に示されている Pu 質量の測定範囲は $1\text{g} \sim 20\text{g}$ となっている。今回の試験のバックグラウンドでは、最も大きいとき (約 1000cps) でも 15 分間測定による検出下限値は $0.758\text{mg}^{240}\text{Pu}_{\text{eff}}$ であるので、JMOX で測定が想定されているサンプルは検出可能であると考えられる。

3.4.7. Pu質量と測定精度の関係

(a) 目的

AVISの User Requirements にて、AVISは測定時間15分以内を要求されている。本評価試験では、この要求される測定時間15分におけるPu質量と測定精度の相関について評価を行う。

(b) 方法

平成24年度受託業務では、N02 (MOX原料粉末) から採取したPu質量の異なる4サンプル及びN01 (焼結ペレット) から採取したPu質量の異なる3サンプル (表3.3-1参照) を用いて、放出される中性子の60秒間の測定を連続して合計15分 (60秒×15回) 以上実施した。本評価試験では、この測定データの測定開始から15分間 (60秒×15回) までを用いることで、要求される測定時間15分での ^{240}Pu 実効質量の相対誤差 (^{240}Pu 実効質量の測定誤差を ^{240}Pu 実効質量で除したものを) を計算し、Pu質量との相関を確認する。中性子増倍を考慮した中性子計数値の補正について、MOX原料粉末ではMultiplicity法を、ペレットではKnown-alpha法を用いる。

(c) 結果

本性能評価試験結果を図3.4-24 (N02) 及び図3.4-25 (N01) に示す。図3.4-24は、MOX原料粉末で異なるPu質量をもつ4つの試料 (0.99 g、1.98 g、5.00 g、10.0 g) を測定して得られたデータを用いて作成した。それぞれの測定データは50分間の測定データであるが、最初の15分間のデータを用いて15分測定における相対誤差をMultiplicity法にて求めた。試料中のPu質量と ^{240}Pu 実効質量の相対誤差の相関は、Pu質量が大きいほど相対誤差が小さくなる結果となった。これは、Pu質量が大きいほど放出される中性子数が多く、計数値をより確保できるためである。

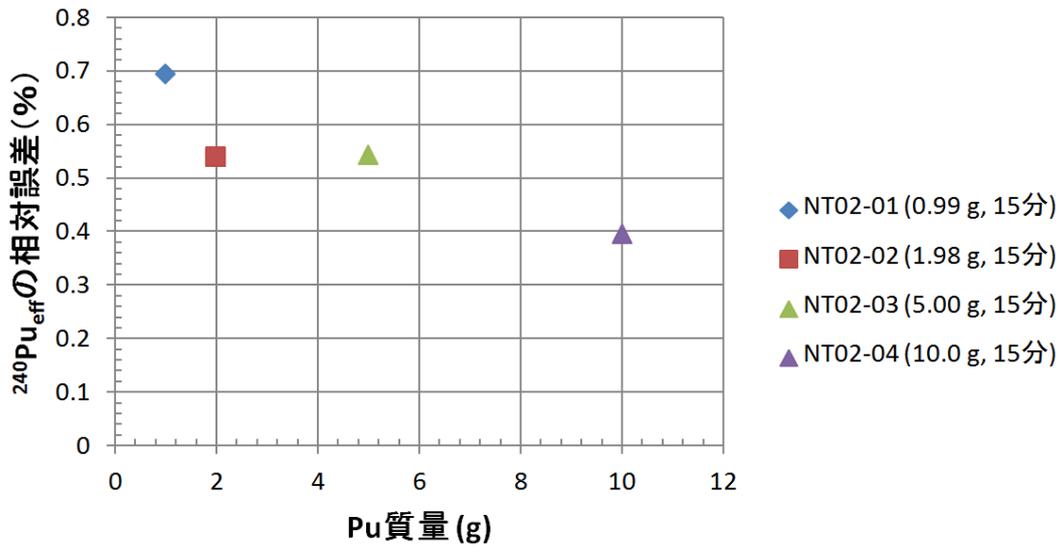


図 3.4-24. Pu 質量と測定精度の相関 (N02、Multiplicity 法)

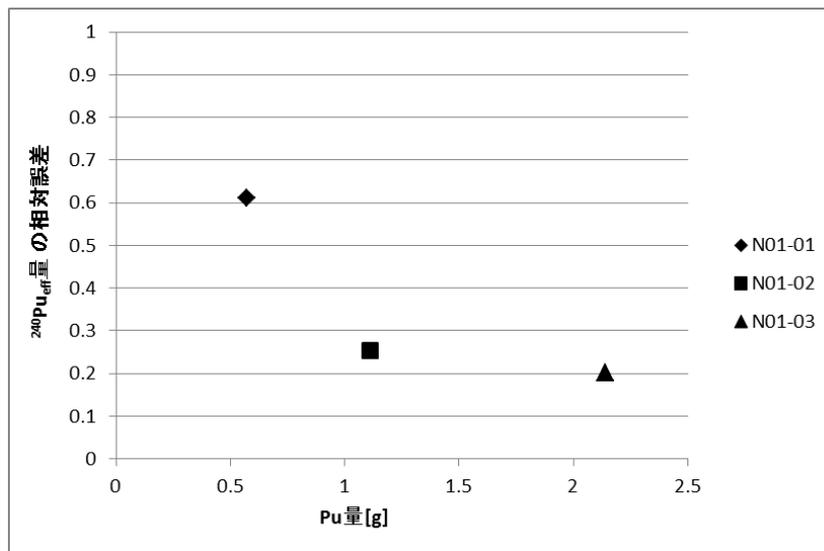


図 3.4-25. Pu 質量と測定精度の相関 (N01、Known-alpha 法)

(Pu 質量 : N01-01 は 0.57g、N01-02 は 1.11g、N01-03 は 2.14g)

(d) 考察

MOX 原料粉末の結果を表す図 3.4-24 において、Pu 質量が 1.98 g における相対誤差は 5 g におけるそれに比べ大きくなった。これは、Pu 質量が増加することで中性子増倍に関する誤差が大きくなるためと考えられる。

焼結ペレットについて、N01-01 の ^{240}Pu 実効質量の相対誤差が要求される精度 0.5% より大きくなっている。ただし、AFAS の User Requirements に示されている Pu 質量の測定範囲は 1~20g であり、N01-01 の Pu 質量(0.57g) より大きい。Pu 質量が 1g に近い N01-02(1.11g)

の相対誤差は 0.5%より十分小さい値が得られている。

3.5. 測定手順書

付録 3 に示すように、平成 24 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、校正手順、測定手順を含む）に対して、性能確認試験の結果（ ^3He 管の不具合事象）を分析し反映した。

3.6. その他

3.6.1. 収去MOX試料の測定試験

本測定試験は、大型 MOX 燃料加工施設の JTC 会合において IAEA から提案され、プルトニウム燃料第二開発室（PPFF）に対する査察活動で破壊分析用に収去された MOX 試料を AVIS で測定し、本機器の測定の正確度を確認するものである。

本測定試験は、IAEA 及び JSGO の査察官立会の下、平成 24 年 10 月 23 日にプルトニウム燃料第一開発室燃料要素組立室（R-120）で実施された。AVIS で測定した収去サンプルは 3 つで、ペレット及び MOX 粉末であった。測定時間は 50 分とした。

AVIS の ^{240}Pu 実効質量の測定結果を施設側の申告値との相対誤差で図 3.6-1 に示す。サンプル番号の 1~3 は、今回と同様に平成 23 年 10 月 2 日に査察収去試料を測定した結果であり、4~6 が今回の結果を示している。4 は焼結ペレットであり、5 及び 6 は MOX 粉末である。MOX 試料番号 5 及び 6 では、相対誤差は 4%程度となった。この相対誤差について IAEA から、平成 25 年 11 月 28 日に開催された JTC において、MOX 試料の測定配置に係る誤差が原因ではないかという見解が示された。AVIS の測定結果を破壊分析の結果と比較する必要がある。

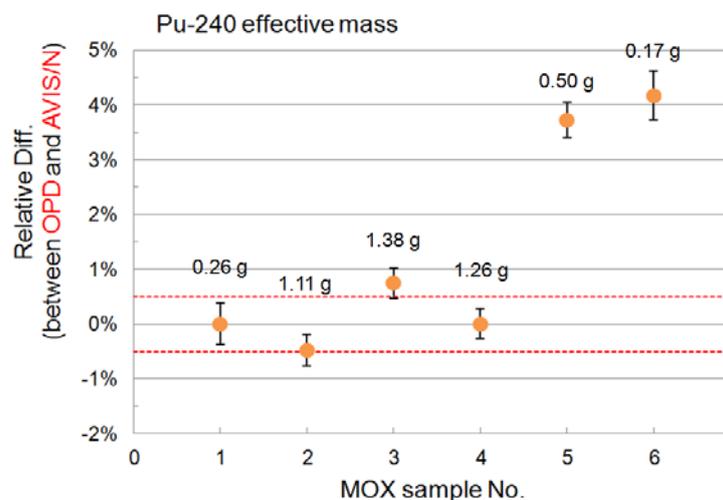


図 3.6-1. 査察収去試料の ^{240}Pu 実効質量の測定結果（申告値との相対誤差で表示）

図 3.6-2 から図 3.6-5 にガンマ線測定による Pu 同位体比 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比及び $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比) の結果を申告値との比較で示す (赤色破線は、AVIS の User Requirements に記載されている 2%を示す)。測定データの解析には、FRAM5.1 及び MGA10 を使用した。図 3.6-2 及び図 3.6-3 から、MGA10 は、FRAM5.1 と比較して、 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比に小さい誤差を与えている。このことは、図 3.6-3 及び図 3.6-4 から、 $^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 比についても同様である。正確度の検討のため、中性子測定結果と同様に、破壊分析の結果と比較する必要がある。

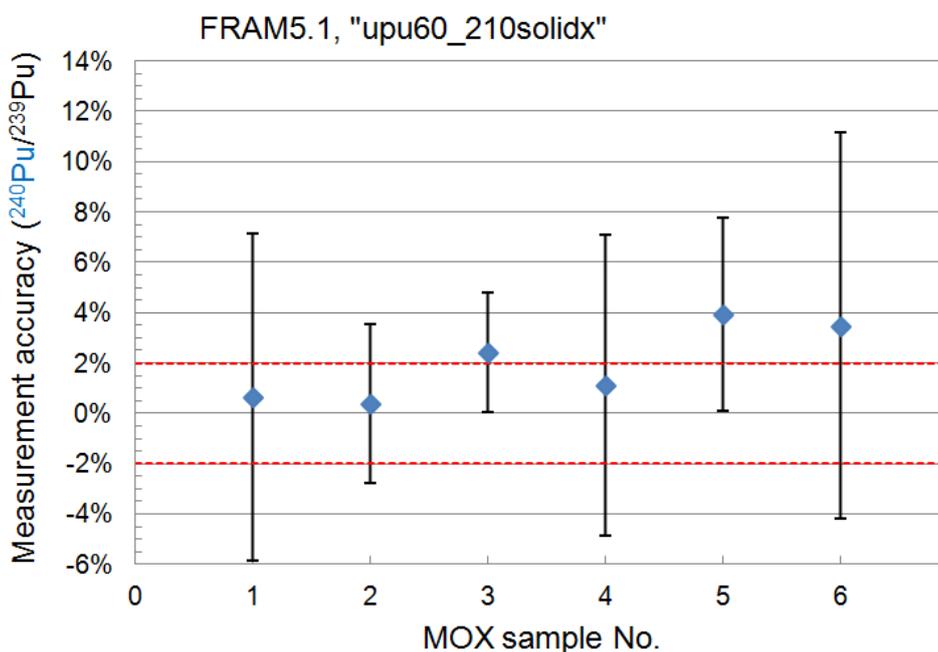


図 3.6-2. 収去 MOX 試料のガンマ線測定結果 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, FRAM5.1)

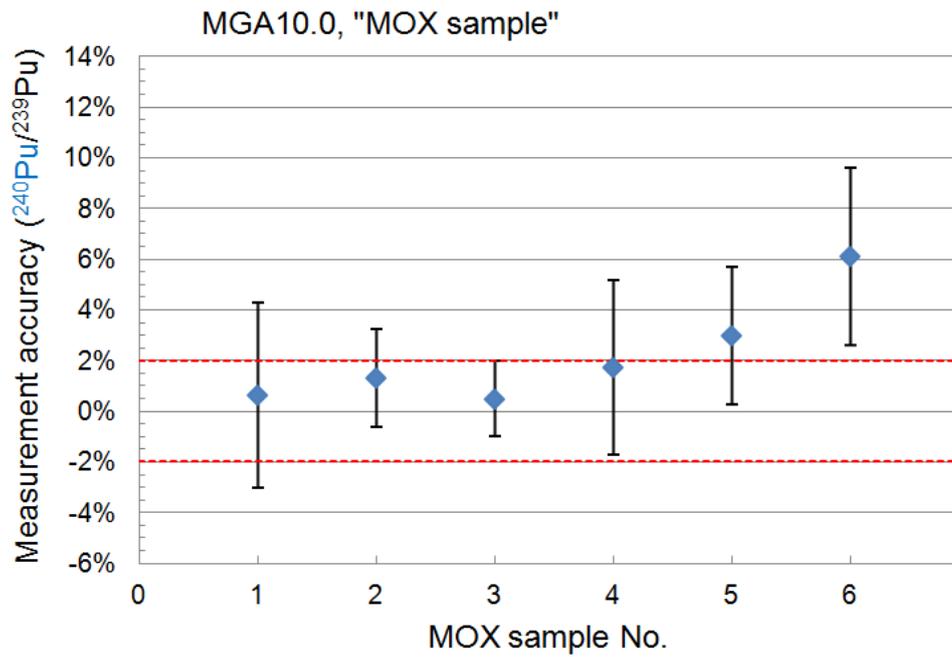


図 3.6-3. 収去 MOX 試料のガンマ線測定結果 ($^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, MGA10)

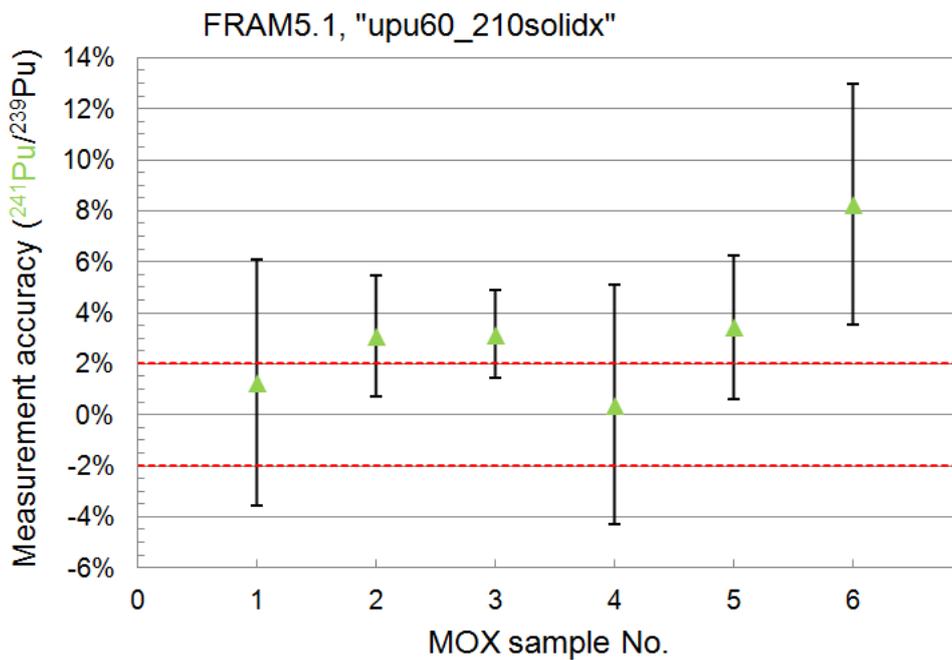


図 3.6-4. 収去 MOX 試料のガンマ線測定結果 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, FRAM5.1)

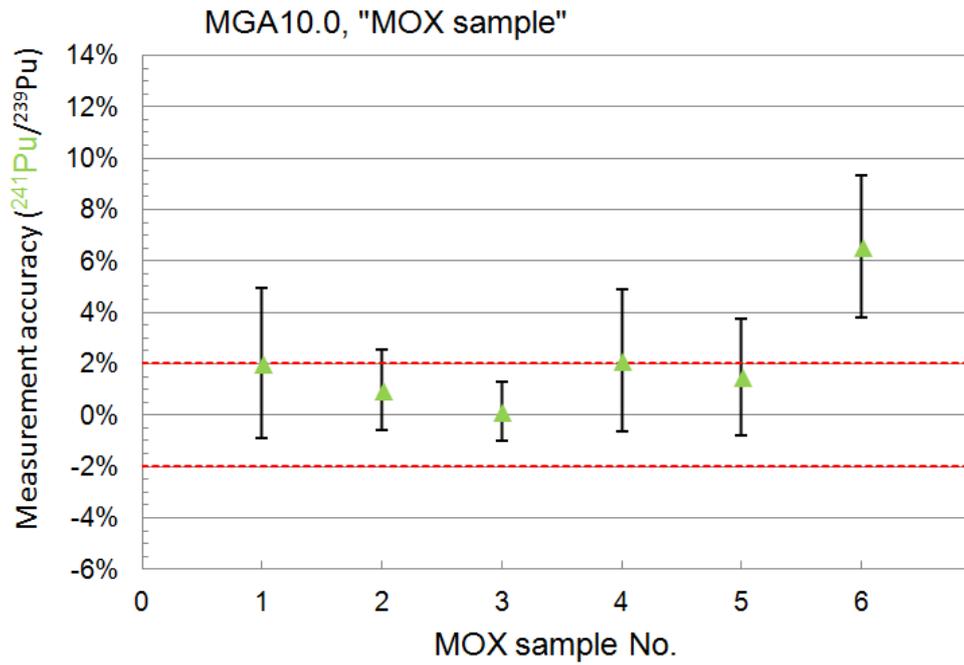


図 3.6-5. 収去 MOX 試料のガンマ線測定結果 ($^{241}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$, MGA10)

4. データ収集・評価システムの機能評価

4.1. 目的及び本年度までの実施概要

MOX 燃料加工施設の保障措置アプローチに基づき設置される査察側の非破壊測定機器から取得する核物質の移動データ及びランダム中間査察時に取得する在庫検認データにより施設側からの申告データの妥当性を評価するための「データ収集・評価システムのソフトウェア」を平成 22 年度までに開発した。本システムは燃料加工工程や計量管理の特性を把握するためのツールとして、施設的设计情報に基づく核燃料物質の物流（フロー、滞留、保管等）及び測定を模擬するシミュレータに、各種統計量の検定機能を有する NRTA 評価プログラム、及びランダム中間査察時に取られた在庫検認データの統計処理を行うランダム査察時在庫検認プログラムを統合したものである。

平成 23 年度は、BWR 用 MOX 燃料製造を想定した大型 MOX 燃料加工施設のモデル工程をデータ収集・評価システム上に構築し、同システムの工程シミュレータを用いて核物質の工程内在庫および流れのシミュレーションを実行し、物質収支区域やセクターに存在する核物質の在庫量変化について整合性がとれていることを確認することにより、システムの機能評価を行った。シミュレーションの実行にあたっては、工程パラメータ（クリーンスクラップ等の工程内残留率など）や保障措置の測定精度に関する国際基準（ITV）等を用い、工程パラメータおよび測定パラメータを変化させることによる工程内在庫量の変動の傾向を確認した。

平成 24 年度は、PWR 用 MOX 燃料製造を想定した場合の核物質の在庫及び流れのシミュレーションを実行し、物質収支区域やセクターに存在する核物質の在庫量変化について整合性がとれていることを確認するとともに、施設側計量管理に基づく物質収支の不確かさに関するシミュレーション計算を実行し、以下の項目について評価を行った。

i) 設定条件の妥当性の確認

検討の基礎となるフローシミュレーションの有効性及び妥当性を検証するため、シミュレーション計算により①MOX の受払いが工程間で整合性が取れていること、②富化度の変更設定が指定時刻に変化していること、③測定誤差を全てゼロに選択した場合に在庫差 (MUF) がゼロとなることを確かめた。

ii) 物質収支の不確かさの計算結果の分析

MOX 粉末調整工程であるセクターF、MOX ペレット製造工程であるセクターG、およびセクターF及びGを一纏めとしたセクター(F+G)について、これらセクター毎に物質収支の不確かさ (σ_{MUF}) を計算した。計算の結果、大量の高富化度の MOX 粉末を在庫するセクターF の σ_{MUF} はセクターG のそれに比べて大きいこと、また、セクター(F+G)の σ_{MUF} はセクターF の σ_{MUF} の大きさにより、ほぼ決定されることが分かった。なお、平成 25 年度に、計量管理モデルを変更してシミュレーションを行った。

iii) 欠損検知能力の評価

セクターFにおけるプルトニウム 8kg (有意量) に対する損失シナリオ (一括損失及び分割損失) を想定し、測定シミュレーションにより生成された MUF の時系列データを統計検定することによる、工程内プルトニウムの損失に対する検知能力について評価を行った。結果として、どの様な損失シナリオにおいても、プルトニウム 8kg の一括損失は評価システムに組み込まれた統計検定により検知可能であることが分かった。一方、分割損失については、分割した1回の損失量が大きく、測定対象物 (受入れ、在庫のプルトニウム量) が少ない操業の早い段階では損失を検知できるが、損失発生タイミング、損失の継続期間、1回あたりの損失量といった損失の態様により、損失の検知能力が影響を受けることを確認した。

平成 25 年度は、測定シミュレーションで作成される測定値が意図したとおりにランダムに分布することを、多数回の測定シミュレーションを行い、妥当性を確認した。

また、平成 24 年度のシミュレーションにおいて、物質収支確定頻度により σ_{CUMUF} の大きさが影響される結果となり、物質収支の計算プログラムの不具合が疑われたことから、平成 25 年度にプログラムの再検討を行ったところ誤りが発見された。プログラムの修正を行い、昨年度と同じパラメータ設定によりプログラムの検証を行った。結果として、 σ_{CUMUF} の大きさは物質収支の確定頻度に影響されないことが確認された。修正して、検証を行ったシミュレータを用いて以下の検討を行った。

i) より現実に近い計量管理モデルによる測定シミュレーション

昨年度までは、理想的な計量管理モデルを想定した測定シミュレーションを行ったが、平成 25 年度は、事業者が検討している計量管理を反映したより現実に近い計量管理モデルを想定し、そのシミュレーションを行い、得られた結果の検討を行った。

測定シミュレーションにおける理想的な計量管理モデルは、すべての測定ポイントにおいて、別々の装置により重量測定、サンプリング、化学分析が行われているとしたものであった。この時、 σ_{MUF} の要素として、サンプリング誤差が大きな部分を占めていた。このような測定ポイントの設定は、大型 MOX 燃料加工施設で計画されている計量管理とは異なっている。計量管理においてサンプリングが計画されているのは製品ペレットだけであり、工程内の Pu 質量は基本的には MOX の重量測定と Pu 濃度の計算値から計算により求められる推定値である。

平成 25 年度に実施する測定シミュレーションは、 σ_{MUF} の大きさに最も寄与していたサンプリングの設定について、種々のケースの測定シミュレーションを、平成 24 年度までに妥当性を検証したフローシミュレーション結果を使用して行い、 σ_{MUF} の値を比較検討し、

より現実に近い設定を選定した。

ii) 原料 MOX 粉末缶のヒールによる物質収支への影響の検討

MOX 原料粉末缶のヒールの評価方法に関する検討を行った。原料 MOX 粉末は、原料 MOX 粉末缶から全量工程に投入され、空缶は再処理工場へ返送される。この時、微量の MOX 粉末が缶に付着して残留（ヒール）し、再処理工場へ返送されることが考えられる。ヒールは重量測定誤差と同程度であることが考えられ、0g として扱われる場合がありうる。原料 MOX 粉末缶にある割合の MOX 粉末が残留することを仮定して、その量が、物質収支の評価にどのような影響を与えるか、シミュレーションを実施して検討した。

平成 25 年度も昨年と同様に「データ収集・評価システム」を用い、特にフローシミュレーションについては、平成 23 年度及び 24 年度の設定を使用して機能評価を行った。システム及び設定の概要説明については昨年度報告書を以下の 4.2 節及び 4.3 節として再録する。

4.2. データ収集・評価システムの概要

データ収集・評価システムは、①モデル工程に従い核物質のフローを時系列に模擬するフローシミュレータ、及び工程内に配置した測定機器の測定および分析試料のサンプリングを模擬し、核物質の在庫量及び移動量の測定データを生成させる測定シミュレータ、②生成した測定データを用いて計算された物質収支を統計量として統計解析を行う NRTA 評価プログラム、③ランダム中間査察 (RII) 時に取られた在庫検認データの統計処理を行う RII 時在庫検認プログラムという 3 つの機能で構成されている (図 4.2-1)。これら 3 つの機能に関する説明は以下のとおりである。

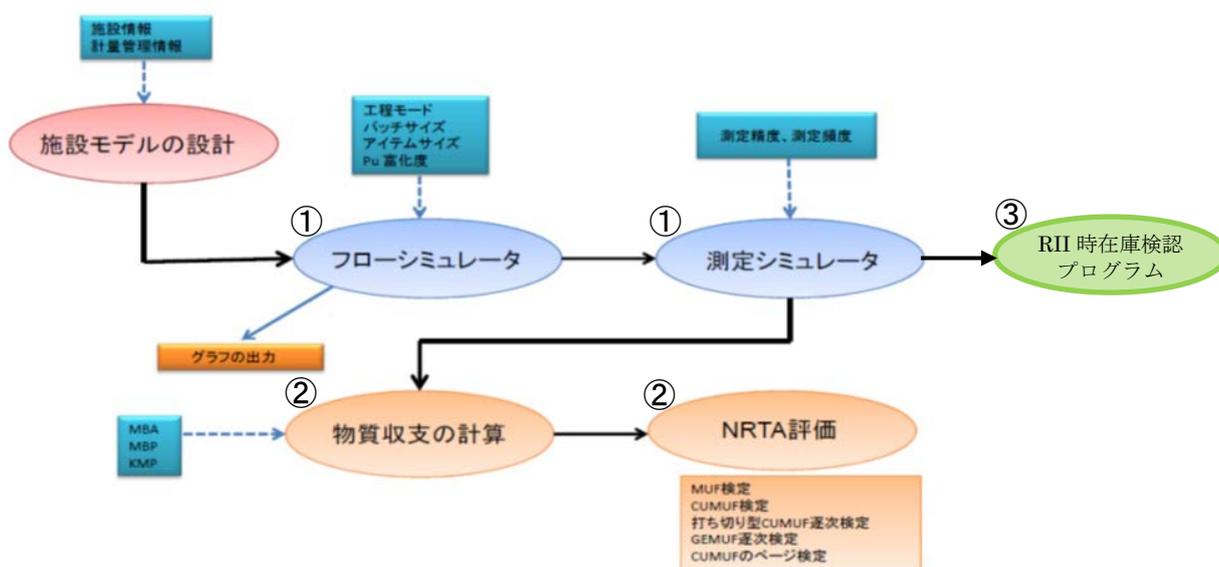


図 4.2-1. データ収集・評価システムの構成

(1) フローシミュレータ

フローシミュレータでは、加工工程全体を作業工程ユニットに分割し、各ユニットを核物質の量および受入れと払出しを制御するモジュールとして設定し、連結することによって全体工程を再現している (図 4.2-2)。

この設計概念により、各作業工程ユニットは、グローブボックス単位など、着目する工程水準に応じた設定が可能である。我々のモデル工程は、MOX 粉末予備混合工程やペレット焼結工程などの作業工程 (グローブボックス単位) を工程ユニットとしてそれぞれ定義した。シミュレータでは、ユニット毎に運転時間、受入先のユニット番号、受入の形態及びタイミング、払出先のユニット番号、払出しの形態及びタイミング、在庫の最大量/最小量、払出重量、初期在庫量等のパラメータ

を設定画面に入力する。また、シミュレータでは、ユニット内機器への核物質付着など、作業中の核物質の状態を考慮し、通常の在庫以外に滞留を設定できる。滞留は、①ホールドアップ、②集塵回収、③スクラップ、④廃棄物、⑤サンプルという5種類に区分し、各ユニットにおいて滞留種類毎に核物質の受入量に対する割合を設定することができる。このうち、クリーンスクラップ(CS)は毎日作業終了後に、ダーティスクラップ(DS)及び廃棄物はクリーンアップ時に、サンプルは採取直後に作業工程ユニットから払い出されるよう設定する。また、ホールドアップはPIT時のクリーンアップ後のユニット内の核物質残量と通常のクリーンアップ後の核物質残量が設定可能である。フローシミュレータでは、シミュレーション期間及びその計算時間間隔(時間を単位とする)を設定画面上で任意に指定できるようになっている。

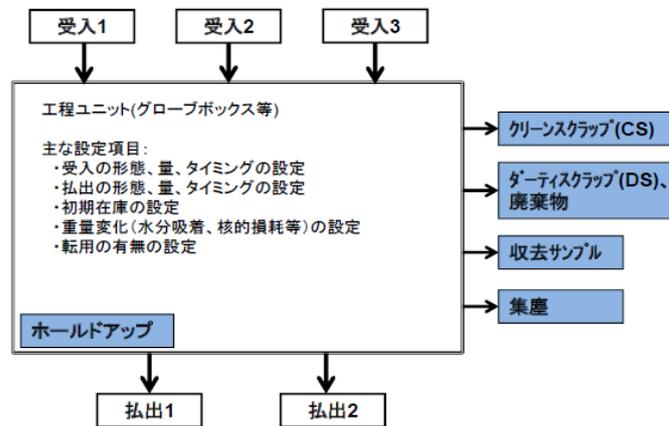


図 4.2-2. 工程ユニットの設定

(2) 測定シミュレータ

測定シミュレータでは先ず物質収支区域(MBA)を設定する必要があるため、フローシミュレータで設定したモデル工程に在庫及びフローの測定枢要点(KMP)を最初に設定する。KMPの設定では測定方法及びそれらの測定誤差が割り当てられ、フローシミュレータから生成された在庫量及び受払量の真値に測定シミュレータで生成された測定誤差が掛け合わされることにより、各KMPにおける測定値が生成される。測定シミュレータでは測定値を生成するために数式(4-1)に示した測定誤差モデルを用いている。MOX燃料加工工程におけるプルトニウム重量は、各アイテムにおけるMOXの重量測定および化学分析におけるPu重量比で決定される。従って、測定時の測定誤差は重量測定、サンプリング、化学分析の各測定における偶然誤差と系統誤差の2つの要素から発生する。MOX重量およびPu重量比の真値をそれぞれ W_T 、 P_T とすると、測定誤差モデルでのPu重量測定値 W_{pu} は次式により表される。

$$W_{pu} = W_T \times (1 + \varepsilon_w + \omega_w) \times P_T \times (1 + \varepsilon_s + \omega_s + \varepsilon_a + \omega_a)$$

ここで、 $(\varepsilon_w, \omega_w)$ 、 $(\varepsilon_s, \omega_s)$ 、 $(\varepsilon_a, \omega_a)$ は重量測定、サンプリング、化学分析のそれぞれの(偶然誤差, 系統誤差)を表す。測定シミュレーションでは、各 KMP における測定方法の偶然誤差及び系統誤差を設定画面に入力する。測定方法毎の誤差はそれぞれ平均 0 及び分散 σ_i (i は各測定方法) を持つ正規乱数から生成される。偶然誤差は測定毎に生成され、系統誤差は最初の MBP の前に生成され、全ての測定が完了するまで同一の誤差値が用いられる。

生成された測定誤差値は、MBP、KMP、測定方法、誤差の種類(偶然誤差、系統誤差)といったインデックスが付されてデータベースに格納されているため、関心のあるインデックスを単位として測定誤差を分解、集計することが可能となっている。測定シミュレータでは MBP(時間単位)、物質収支の開始及び終了時間(時間単位)、誤差発生のための乱数初期値が任意に設定できるようになっている。

(3) NRTA 評価プログラム

NRTA 評価プログラムでは、測定シミュレータにより生成された核物質量の測定値データが読み込まれ、設定した MBA での物質収支に基づく在庫差(MUF_d)及び MUF_dの分散・共分散値が MBP 毎に算出される。MUF_dの分散・共分散値は各種の統計検定を実行する際の統計量を計算するために使用される。

NRTA 評価プログラムが備える統計検定法は、IAEA の MUF 統計解析プログラム「PROSA」で使用されている統計検定法に準拠しており、以下の 5 種類の統計検定が実行できる。

- ①MUF 検定
- ②累積 MUF(CUMUF)検定
- ③Truncated CUMUF 逐次検定
- ④GEMUF 逐次検定
- ⑤CUMUF ページ検定

NRTA 評価プログラムでは、GEMUF 検定およびページ検定に用いる閾値を決定するためのシミュレーション回数(n)、CUMUF 逐次検定・GEMUF 検定・ページ検定に用いる誤警報確率(α)、ページ検定の統計量調節パラメータ(K)が設定できるようになっており、ユーザーはこれらパラメータに対し画面上で任意の数値を入力できる。統計検定の結果は画面上でグラフ表示される。

(4)RII 時在庫検認プログラム

RII 時在庫検認プログラムは、RII 時に在庫検認としてバイアス欠損検認目的でサンプリングした試料の査察側 NDA データと施設側申告データの差の累積値に対して逐次検定法により評価する方法を検討するためのプログラムである。RII 時在庫検認プログラムは、測定シミュレータからセクターの在庫に関するデータを読み込み、RII 毎のサンプル数とそれに応じた査察側 NDA による測定値を生成し、施設側申告との差の累積を逐次統計検定する。

4.3. モデル工程等の設定条件

PWR 用 MOX 燃料集合体の製造及び BWR 用 MOX 燃料集合体の製造の 1 キャンペーンを想定し、工程内の MOX 中プルトニウムのフローのシミュレーションを行った。

シミュレーションの実行にあたっては、基礎となるモデル工程と製造キャンペーンに関する条件を設定するほか、下記条件を設定した。

- MOX 処理時に発生するクリーンスクラップ(CS あるいは回収粉)、ダーティスクラップ(DS)、ホールドアップ(HU)等の工程内滞留物
- 測定枢要点(KMP)の設定
- 各 KMP での測定方法及び測定誤差の設定
- シミュレーション実行時間、物質収支の確定時間、データ収集時間間隔

以下では上記の設定条件について説明する。

4.3.1. モデル工程

(1)モデル工程

フローシミュレーションを計算する際に基礎となる大型 MOX 燃料加工施設のモデル工程は平成 23 年度及び平成 24 年度に設定したモデル工程と同一のものを用いる。このモデル工程を図 4.3-1 に示す。本モデル工程は 2 段階の MOX 粉末混合調整工程から成る製造工程を想定している。即ち、50%MOX (1:1MOX) 粉末を CS 及びウラン粉末等と混合・調整することにより Pu 富化度を 30% に下げる工程、及び 30%MOX 粉末をさらにウラン粉末と混合・調整して最終 Pu 富化度の MOX 粉末とする 2 段階の混合・調整工程を有する工程である (MIMAS 法)。なお、Pu 富化度の調整に使用される CS の回収処理はフローシミュレーションにおいて次のように設定している。

① 各工程の CS は 24 時間目 (1 日の作業終了時) 毎に、30%MOX 粉末用スクラップ貯蔵設備 (No.36)、最終富化度 MOX 粉末用スクラップ貯蔵設備 (No.37)、CS 回収粉末処理装置-1 (No.41) に回収される (図 4.3-1 を参照)。これらの 3 工程は CS を以下のとおり処理する。CS 回収粉末処理装置-2 (No.42) はこれら 3 箇所から回収された CS を纏めて受け入れるバッファ工程である。

- No.36 : 富化度 30% の MOX 粉末。最終富化度に希釈され、作業終了時に全量の CS が工程 No.41 に払い出される。
- No.37 : 最終富化度の MOX 粉末。80kgMOX を超えた時点で作業終了時に全量が No.41 に払い出される。
- No.41 : (U38-2) ペレット一時保管以降の工程から発生する CS である。処理時間後に全

量工程 No.42 に払い出す。

- No.42 : 処理時間後に全量の CS を No.8 (CS 一時保管)へ払出す。(リサイクル)
- ② シミュレーション開始時は、No.8 (CS 一時保管) にリサイクル CS が存在していないため、工程 No.7 のスクラップダミータンクから CS を受け入れ、予備混合を行う。リサイクルが行われ、1 回の予備混合で必要なリサイクル CS がある場合は、スクラップダミータンクからは受け入れずに、CS を使用する。足りなければ、スクラップダミータンクから受入れる。

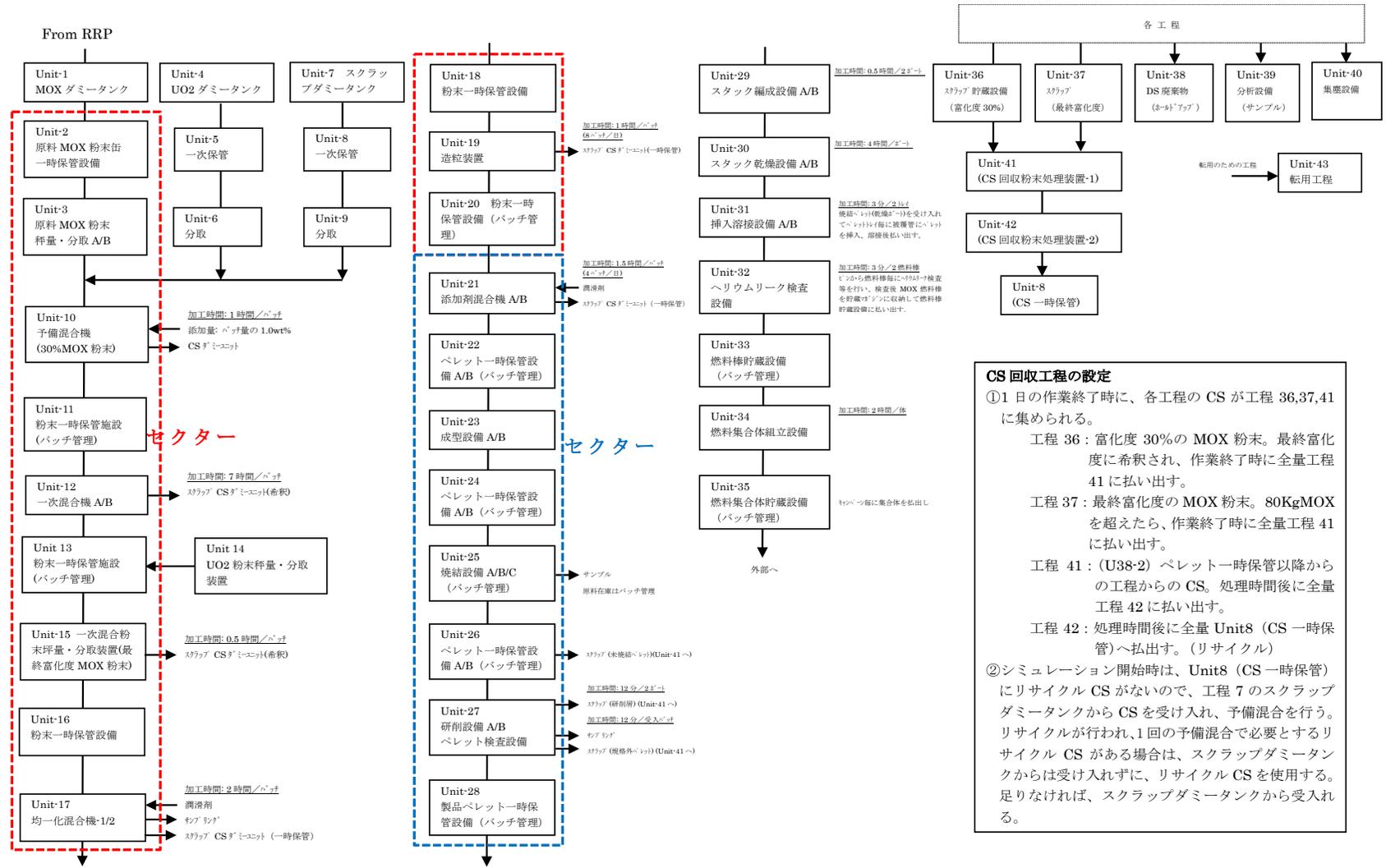


図 4.3-1.大型 MOX 燃料加工施設のモデル工程

(2)工程内滞留

MOX 燃料の製造は原料 MOX 粉末缶の開封から挿入・溶接設備工程までがグローブボックス (GB)内で行われることから、MOX を処理するには GB 内に HU 等の滞留物が存在することが予想される。このため、工程シミュレーションでは工程内滞留の設定として、HU、CS、DS 等の工程内滞留も各工程の処理量に対する滞留率として設定している。本システムでは 7 種類の工程内滞留パラメータを設定できる(表 4.3-1)。

表 4.3-1. 工程内滞留の設定パラメータ

酸化等係数率	MOX 粉末重量に対する MOX 粉末の酸化等による重量変化。MOX 処理量に対する係数率。
HU 発生率	MOX 処理量に対するホールドアップ残留重量の割合。
HU0	積極的な工程クリーンアップ時の、MOX 処理量に対する HU 残留量の割合。
HU1	通常の工程クリーンアップ時の、MOX 処理量に対する HU 残留量の割合。
CS 発生率	MOX 処理量に対するクリーンスクラップの発生率。
DS 発生率	MOX 処理量に対するダーティスクラップの発生率。
サンプル分取率	収去サンプルの発生率。

本シミュレーション計算では、工程内滞留パラメータの数値を表 4.3-2 のとおり設定した。但し、これらの数値は、実施設の運転特性により適宜変更することができる。

表 4.3-2. 工程内滞留率の設定値 (単位 : %)

工程 No.	ユニット No.	工程名称	酸化等係数率	HU 発生率	HU0	HU1	CS 発生率	DS 発生率	サンプル分取率
3	U8+U9	原料 MOX 粉末秤量・分取装置 A/B			0.040	0.100	0.001		0.028
10	U10	予備混合機	1.010	0.001	0.500	0.800	0.010		
12	U12/U13	一次混合機 A/B	1.000		0.200	0.400	0.003		
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	1.000		0.300	0.800	0.002	0.042	
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	1.004		0.300	0.800	0.002		0.182
19	U20	造粒装置	1.000	0.001	0.500	0.800	0.010		
21	U21/U22	添加剤混合機 A/B	1.004	0.008	1.000	1.600	0.075	0.042	
23	U35/U36	成型設備 A/B	1.000	0.030	1.000	1.600	0.700	0.200	
25	U39/U41/U43	焼結設備 A/B/C	1.000						
26	U38-2	ペレット一時保管設備					3.000		
27	U45/U46-1、-2	研削設備 A/B、検査設備 A/B	1.000	0.050	1.000	1.600	15.000	0.200	0.009
30	U52/U53	スタック乾燥設備 A/B	1.000						
34	UX2	燃料集集体組立設備	1.000						
41	U24	CS 回収粉末処理装置-1		0.010	0.300	0.800	0.100		
42	U25	CS 回収粉末処理装置-2		0.010	0.300	0.800	0.100		

4.3.2. 製造キャンペーン

モデル工程において加圧水型軽水炉（PWR）用 MOX 燃料集合体の製造を 1 キャンペーン及び沸騰水型軽水炉（BWR）用 MOX 燃料集合体の製造を 1 キャンペーンとして行うよう設定した。PWR 用燃料集合体は 1 体あたり、3.9%、5.2%、8.6%の 3 種類の異なる燃料ピンで構成されると想定した。BWR 用燃料集合体は 1 体あたり、2.0%、3.1%、4.1%、7.3%の 4 種類の異なる燃料ピンで構成されると想定した。この想定により、一次混合粉末・秤量工程（工程 No.15）において下記富化度の MOX 粉末調整が行われるよう設定している。

	PWR 用燃料製造キャンペーン	BWR 用燃料製造キャンペーン																		
i) 製造時間（1 キャンペーン）	2,400 時間	1500 時間																		
ii) 最終 Pu 富化度（1 キャンペーン）	<table border="1"> <thead> <tr> <th>MOX 富化度</th> <th>製造時間</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3.9 (%)</td> <td>55 ～ 155 (時間)</td> </tr> <tr> <td>5.2 (%)</td> <td>155 ～ 825 (時間)</td> </tr> <tr> <td>8.6 (%)</td> <td>825 ～ 2,400 (時間)</td> </tr> </tbody> </table>	MOX 富化度	製造時間	3.9 (%)	55 ～ 155 (時間)	5.2 (%)	155 ～ 825 (時間)	8.6 (%)	825 ～ 2,400 (時間)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>MOX 富化度</th> <th>製造時間</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2.0 (%)</td> <td>55 ～ 150 (時間)</td> </tr> <tr> <td>3.1 (%)</td> <td>150 ～ 330 (時間)</td> </tr> <tr> <td>4.1 (%)</td> <td>330 ～ 830 (時間)</td> </tr> <tr> <td>7.3 (%)</td> <td>830 ～ 1,500 (時間)</td> </tr> </tbody> </table>	MOX 富化度	製造時間	2.0 (%)	55 ～ 150 (時間)	3.1 (%)	150 ～ 330 (時間)	4.1 (%)	330 ～ 830 (時間)	7.3 (%)	830 ～ 1,500 (時間)
MOX 富化度	製造時間																			
3.9 (%)	55 ～ 155 (時間)																			
5.2 (%)	155 ～ 825 (時間)																			
8.6 (%)	825 ～ 2,400 (時間)																			
MOX 富化度	製造時間																			
2.0 (%)	55 ～ 150 (時間)																			
3.1 (%)	150 ～ 330 (時間)																			
4.1 (%)	330 ～ 830 (時間)																			
7.3 (%)	830 ～ 1,500 (時間)																			
iii) 原料 MOX 粉末の供給	原料 MOX 粉末缶一時保管設備（No.2）における原料 MOX 粉末の次工程への供給（払出し）は 1,800 時間で終了する。	原料 MOX 粉末缶一時保管設備（No.2）における原料 MOX 粉末の次工程への供給（払出し）は 1,500 時間で終了する。																		

また、MOX 処理工程の運転モードの設定条件については下記 i) から iv) のとおりとした。

i) 稼働時間

- ペレット焼結工程(工程 No.25)以外の工程ユニット 16 時間
- ペレット焼結工程(工程 No.25) 24 時間

ii) 稼働していない時間帯の MOX 取扱い

第 3 シフト（16～24 時間）の運転停止時には全ての核物質が一時保管設備に払出し・保管されるため、加工工程ユニット内に仕掛品としての核物質は存在しない。

iii) キャンペーン前の前提条件

製造キャンペーンの開始前は、主工程においてどのような核物質も工程内に存在しないこととする。即ち、キャンペーン前には核物質の完全なクリーンアウトが行われている。

iv) 工程の稼働

1 キャンペーン中は運転を中断することなく連続して運転を行う。

4.3.3. 物質収支区域及び測定拠点

測定シミュレーションのために物質収支区域（MBA）を設定する。MBAはその区域への核物質受入量並びに区域からの払出量、および区域内の在庫量を測定する箇所（測定拠要点(KMP)）を設定することにより定まる。今回の測定シミュレーションでは、主工程の NRTA 対象区域で特に重要と考えられる MOX 粉末調整区域（以降、セクターFと呼ぶ）及びペレット製造区域（セクターG）、セクターFとGを一つのMBAとした区域（セクター（F+G））の3種類のMBAを検討の対象とした。

- セクターF : 原料 MOX 粉末缶一時貯蔵区域 (No.2) ~ 粉末一時保管設備 (No.20)
- セクターG : 添加剤混合機 A/B (No.21) ~ 製品ペレット一時保管設備 (No.28)
- セクター (F+G) : 原料 MOX 粉末缶一時貯蔵区域 (No.2) ~ 製品ペレット一時保管設備 (No.28)

平成 24 年度までの測定シミュレーションでは、保障措置上理想的という意味において最も保守的な計量管理が MOX 燃料加工工程に適用されているものと想定した。即ち、MBA 内の全ての工程において重量測定と破壊分析(DA)を実施し、かつ、MOX 滞留物 (HU/CS/DS) に対して測定を実施することで設定した。

適用される測定手段の測定誤差値には IAEA の International Target Value 2010 (ITV2010)で採用されている数値を用いた (表 4.3-3)。また、工程毎に設定された測定方法及び測定誤差の一覧を表 4.3-3 に示す。システムでは各測定機器に割当て番号に相当する測定 ID を付与し、各 ID に対して偶然誤差と系統誤差を設定する。

表 4.3-3. 測定シミュレーションで設定した測定誤差値

測定方法	核物質の形態	誤差の要素(%rel.)		全誤差要素(%rel.)
		偶然	系統	
電子天秤	バルクの核物質	0.05	0.05	0.07
サンプリング	MOX 粉末、MOX ペレット	0.7	—	0.7
分析	MOX 粉末、MOX ペレット	0.15	0.1	0.18

表 4.3-4. 各工程に設定される測定方法及び測定誤差

工程番号	ユニット番号	工程名称	工程モデル	測定対象	重量測定 ID	偶然誤差	系統誤差	サンプルID	偶然誤差	系統誤差	分析 ID	偶然誤差	系統誤差
1		MOXダミータンク	保管1										
2	U5	原料MOX粉末缶一時保管設備	保管2	全体在庫	2	0.0005	0.0005	2	0.007	-	2	0.0015	0.001
2	U5	原料MOX粉末缶一時保管設備	保管2	受入	2	0.0005	0.0005	2	0.007	-	2	0.0015	0.001
3	U8・U9	原料MOX粉末秤量・分取装置A/B	分取	全体在庫	3	0.0005	0.0005	3	0.007	-	3	0.0015	0.001
3	U8・U9	原料MOX粉末秤量・分取装置A/B	分取	CS払出	3	0.0005	0.0005	3	0.007	-	3	0.0015	0.001
9	U11-1	ウラン粉末・回収粉末秤量・分取装置	分取	払出	5	0.0005	0.0005	5	0.007	-	5	0.0015	0.001
10	U10	予備混合機	混合1	全体在庫	6	0.0005	0.0005	6	0.007	-	6	0.0015	0.001
10	U10	予備混合機	混合1	HU	7	0.0005	0.0005	7	0.007	-	7	0.0015	0.001
10	U10	予備混合機	混合1	DS在庫	7	0.0005	0.0005	7	0.007	-	7	0.0015	0.001
10	U10	予備混合機	混合1	CS払出	7	0.0005	0.0005	7	0.007	-	7	0.0015	0.001
11	U23-1	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	8	0.0005	0.0005	8	0.007	-	8	0.0015	0.001
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	全体在庫	9	0.0005	0.0005	9	0.007	-	9	0.0015	0.001
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	HU	10	0.0005	0.0005	10	0.007	-	10	0.0015	0.001
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	DS在庫	10	0.0005	0.0005	10	0.007	-	10	0.0015	0.001
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	CS払出	10	0.0005	0.0005	10	0.007	-	10	0.0015	0.001
13	U23-2	粉末一時保管設備	分取	全体在庫	11	0.0005	0.0005	11	0.007	-	11	0.0015	0.001
14	U16	UO2粉末秤量・分取装置	保管1										
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	全体在庫	12	0.0005	0.0005	12	0.007	-	12	0.0015	0.001
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	HU	13	0.0005	0.0005	13	0.007	-	13	0.0015	0.001
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	DS在庫	13	0.0005	0.0005	13	0.007	-	13	0.0015	0.001
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	CS払出	13	0.0005	0.0005	13	0.007	-	13	0.0015	0.001
16	U23-3	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	14	0.0005	0.0005	14	0.007	-	14	0.0015	0.001
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	全体在庫	15	0.0005	0.0005	15	0.007	-	15	0.0015	0.001
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	HU	16	0.0005	0.0005	16	0.007	-	16	0.0015	0.001
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	DS在庫	16	0.0005	0.0005	16	0.007	-	16	0.0015	0.001
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	CS払出	16	0.0005	0.0005	16	0.007	-	16	0.0015	0.001
18	U23-4	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	17	0.0005	0.0005	17	0.007	-	17	0.0015	0.001
19	U20	造粒装置	加工1	全体在庫	18	0.0005	0.0005	18	0.007	-	18	0.0015	0.001
19	U20	造粒装置	加工1	HU	19	0.0005	0.0005	19	0.007	-	19	0.0015	0.001
19	U20	造粒装置	加工1	DS在庫	19	0.0005	0.0005	19	0.007	-	19	0.0015	0.001
19	U20	造粒装置	加工1	CS払出	19	0.0005	0.0005	19	0.007	-	19	0.0015	0.001
20	U23-5	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	20	0.0005	0.0005	20	0.007	-	20	0.0015	0.001
20	U23-5	粉末一時保管設備	保管2	払出	20	0.0005	0.0005	20	0.007	-	20	0.0015	0.001
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	全体在庫	21	0.0005	0.0005	21	0.007	-	21	0.0015	0.001
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	HU	22	0.0005	0.0005	22	0.007	-	22	0.0015	0.001
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	DS在庫	22	0.0005	0.0005	22	0.007	-	22	0.0015	0.001
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	受入	21	0.0005	0.0005	21	0.007	-	21	0.0015	0.001
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	CS払出	22	0.0005	0.0005	22	0.007	-	22	0.0015	0.001
22		ダミー設備	保管2	全体在庫	23	0.0005	0.0005	23	0.007	-	23	0.0015	0.001
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	全体在庫	24	0.0005	0.0005	24	0.007	-	24	0.0015	0.001
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	HU	25	0.0005	0.0005	25	0.007	-	25	0.0015	0.001
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	DS在庫	25	0.0005	0.0005	25	0.007	-	25	0.0015	0.001
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	CS払出	25	0.0005	0.0005	25	0.007	-	25	0.0015	0.001
24	U38-1	ペレット一時保管設備	保管4	全体在庫	26	0.0005	0.0005	26	0.007	-	26	0.0015	0.001
25	U39/U41/U43	焼結設備A/B/C	焼結	全体在庫	27	0.0005	0.0005	27	0.007	-	27	0.0015	0.001
26	U38-2	ペレット一時保管設備	保管2	全体在庫	28	0.0005	0.0005	28	0.007	-	28	0.0015	0.001
27	U45/U46-1,-2	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	全体在庫	30	0.0005	0.0005	30	0.007	-	30	0.0015	0.001
27	U45/U46-1,-2	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	HU	31	0.0005	0.0005	31	0.007	-	31	0.0015	0.001
27	U45/U46-1,-2	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	DS在庫	31	0.0005	0.0005	31	0.007	-	31	0.0015	0.001
27	U45/U46-1,-2	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	CS払出	31	0.0005	0.0005	31	0.007	-	31	0.0015	0.001
28	U47	製品ペレット貯蔵設備	保管3	全体在庫	32	0.0005	0.0005	32	0.007	-	32	0.0015	0.001
28	U47	製品ペレット貯蔵設備	保管3	払出	32	0.0005	0.0005	32	0.007	-	32	0.0015	0.001

4.3.4. シミュレーション実行に係る設定

フローシミュレーション及び測定シミュレーションの実行時間は下記時間を設定した。これらの実行時間は、燃料集合体の製造キャンペーン終了時までの物質収支の不確かさを観察するため、製造キャンペーン時間と同一とした。フローデータのサンプリングタイム（データ採取の時間幅）は0.25時間（15分）間隔とした。

(a)フローシミュレーション

- ・ PWR 燃料製造キャンペーン

シミュレーション時間 = 2,400 時間

- ・ BWR 燃料製造キャンペーン

シミュレーション時間 = 1,500 時間

(b)測定シミュレーション

- ・ MBP = 120 時間 (在庫データ収集時間=24 時間毎)

- ・ 在庫差等の定義

i 期の MBP における MUF_{di} は次の物質収支式で計算される。

数式(4-2)

$$MUF_{di} = I_{i-1} + R_i - S_i - I_i \quad (i=1, 2, \dots, n)$$

ここで、 MUF_d は NRTA において確定されるダイナミックな MUF であり、通常の実在庫検認 (PIV: Physical Inventory Verification) で確定される MUF と区別している。 I_{i-1} は (i-1) 期の期末在庫量 (i 期の期首在庫量と等しい)、 R_i 及び S_i はそれぞれ i 期の総増加量 (受入れ、核的生成、免除の取消し、受入れの修正等) 及び総減少量 (払出し、核的損耗、免除、測定済廃棄等)、 I_i は i 期の期末在庫量である。従って MUF_{di} は i 期末の在庫差である。n は MBP の総期間数であり、物質収支が確定される頻度である。i 期の MBP における MUF 分散 σ_{MUF_i} は数式(4-2)に関わる全ての測定誤差を合計して算出される。累積 MUFd (CUMUF) は i に関する MUF の累積である。即ち、i 期の CUMUF は次式で計算される。

数式(4-3)

$$CUMUF_i = \sum_{k=0}^i MUF_{dk}$$

また、 σ_{MUF_i} は i 期目の MUF 標準偏差を、 σ_{CUMUF_i} は i 期目の CUMUF 標準偏差を表すこととする。特に、本シミュレーションにおいて σ_{CUMUF_i} は次の計算式に従って計算している。

数式(4-4)

$$\sigma_{CUMUF_i}^2 = \sum_{k=1}^i \sum_{l=1}^i \sigma_{kl}$$

ここで σ_{kl} は MUF_i と MUF_k の間の共分散を表している。(4-4)式は、第 i 期までの MBP の σ_{MUF}

に関する分散共分散行列の全ての行列要素の和をとることを意味している。

4.4. シミュレーション計算

4.4.1. 計算妥当性の検証

上記のモデル工程およびモデル測定システムに関する設定を行ったうえで、測定シミュレーションの計算結果に対する妥当性を確認した。

測定シミュレーション計算結果について小数点以下 4 桁目はプログラムによる計算誤差を含んでいることから、計算精度としては小数点以下 3 桁 (1 gPu 以上) の数値を有効数字とした。従って、以下に記載するシミュレーション計算の数値は小数点以下 2 桁または 3 桁で表示することとする。

測定誤差を生成する計算に使用する乱数の初期値を毎回変更して、多数回の測定シミュレーションを実施した結果の MUF 及び CUMUF は、模擬した測定値の測定誤差により、 σ_{MUF} あるいは σ_{CUMUF} に相当して変動することが期待される。これを確かめるため、BWR 燃料製造の 1 キャンペーン (1500 時間) の測定シミュレーション (MBP120 時間) を 100 回実施した。得られた 1200 個の MUF のヒストグラムを階級間隔 50 gPu で図 4.4-1 に作図した。また、その結果を表 4.4-1 に示す。

100 回の測定シミュレーションにより得られた MUF データの標準偏差は、296 gPu であり、1 回の測定シミュレーション及び NRTA 評価結果の σ_{MUF} (平均 285 gPu) の大きさと整合している。平均値は、ゼロから約 11 gPu プラス側にずれているが、大きな偏りもなく平均値に近いほど度数が多く分布していることがヒストグラムからみられる。この結果より、測定シミュレータは、偏りの少ないランダムな測定誤差を作成していることが推測される。

表 4.4-1. 100 回の測定シミュレーションによる MUF 計算結果

項目	計算結果
MUF データの総数	1200
平均	0.011kgPu
分散	0.088kgPu ²
標準偏差	0.296kgPu
最小値	1.043kgPu
最大値	0.944kgPu
中央値	0.007kgPu

MUF そのものの値は、乱数の初期値を変えた測定シミュレーションの模擬測定値が変わることにより変動するが、NRTA 評価プログラムによって計算される MUF の不確かさである σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} の値は、その計算に測定誤差の標準偏差を用いているのでほぼ変化しない。したがって、測定シミュレーションの場合には、 σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} の値を利用することにより、少数回のシミュレーションにより結果を評価することができる。

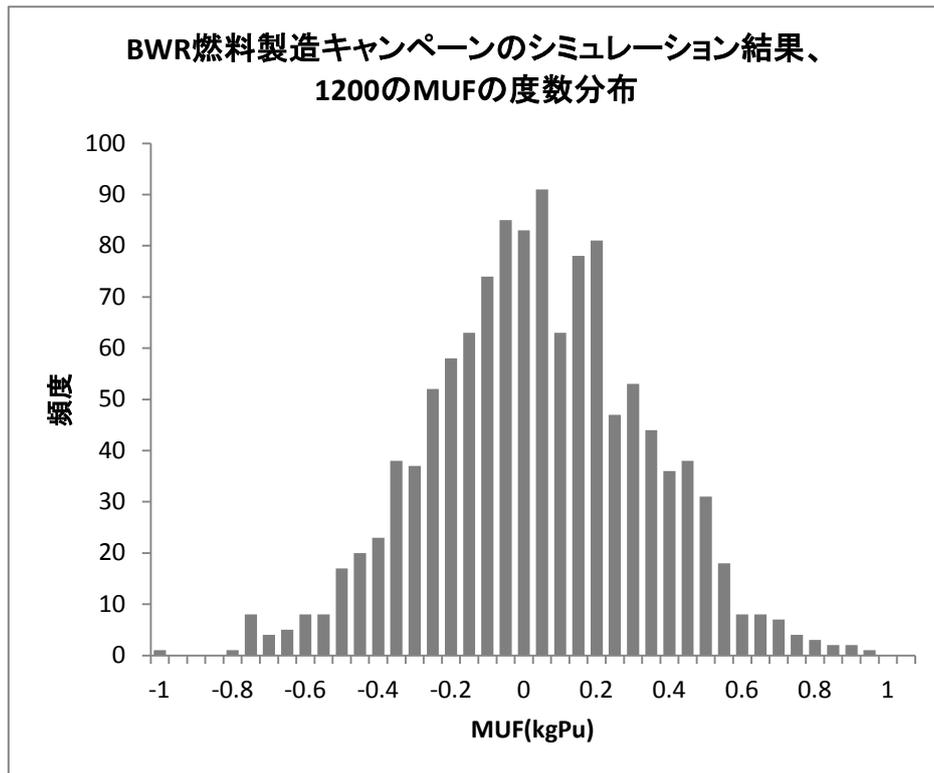


図 4.4-1. 100 回の測定シミュレーションによる MUF のヒストグラム
(BWR 燃料製造キャンペーン、1500 時間、MBP:120 時間)

4.4.2. 物質収支の確定頻度の違いによる物質収支への影響

(1) 昨年度の検討結果

昨年度は、異なる MBP の時間幅($\Delta t = t_i - t_{i-1}$)のもとでの物質収支の不確かさを計算することにより、物質収支の確定頻度が物質収支の不確かさに影響を与えるのかどうか、影響があるとすればどの程度影響があるのかを確かめた。

対象とするセクターはセクターFとし、MBP(Δt)をパラメータとし、異なる MBP に基づきシミュレーションで計算される物質収支(ここでは σ_{CUMUF})の時間的な変動の影響について観察した。例えば、測定データを 24 時間毎に取得することを条件とした場合、24 時間毎(毎日)に物質収支を確定する場合と 48 時間(2 日)毎に物質収支を確定した場合では両者の σ_{MUF} 等の値に違いが生ずるかどうかを観察する。表 4.4-2 のようにパラメータを変化させた時の σ_{CUMUF} を計算し、それぞれの計算値を図 4.4-2 にプロットした。

表 4.4-2. シミュレーションで用いたパラメータ設定値 (単位: 時間)

データ取得頻度(d)	MBP 時間幅(Δt)
24	24
	48
	72
	120
	240
	360

図 4.4-2 より、異なる MBP 時間幅に対し、 Δt が増加する程に σ_{CUMUF} は低減する傾向が観察された。MBP=24 時間が最も σ_{CUMUF} が大きく、2,400 時間での値は 10.45kgPu であった。

異なる MBP 幅に対して異なる σ_{CUMUF} 値が算出される原因として、MBP 回数または物質収支頻度が低下するに従い、 σ_{MUF} 共分散の個数が減少するため、数式(4-3)を計算する際に共分散の個数も少なくなり、 σ_{CUMUF} 値が小さく見積もられたと考えられる。

昨年度の計算に使用した数式(4-4)が、保障措置の伝統的な誤差モデルから導出される σ_{CUMUF} を正確に表現した計算式かどうかは不明確であったため、この課題について今年度に測定シミュレーションのプログラムを再検証し、不具合部分が見つかったので修正を行った。

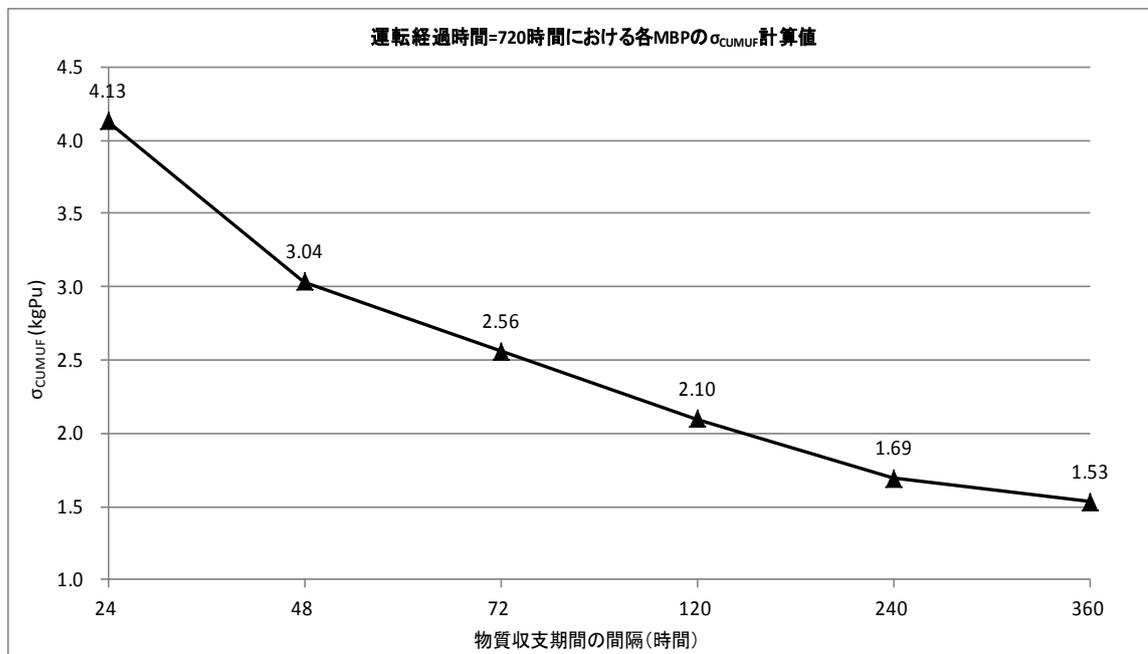
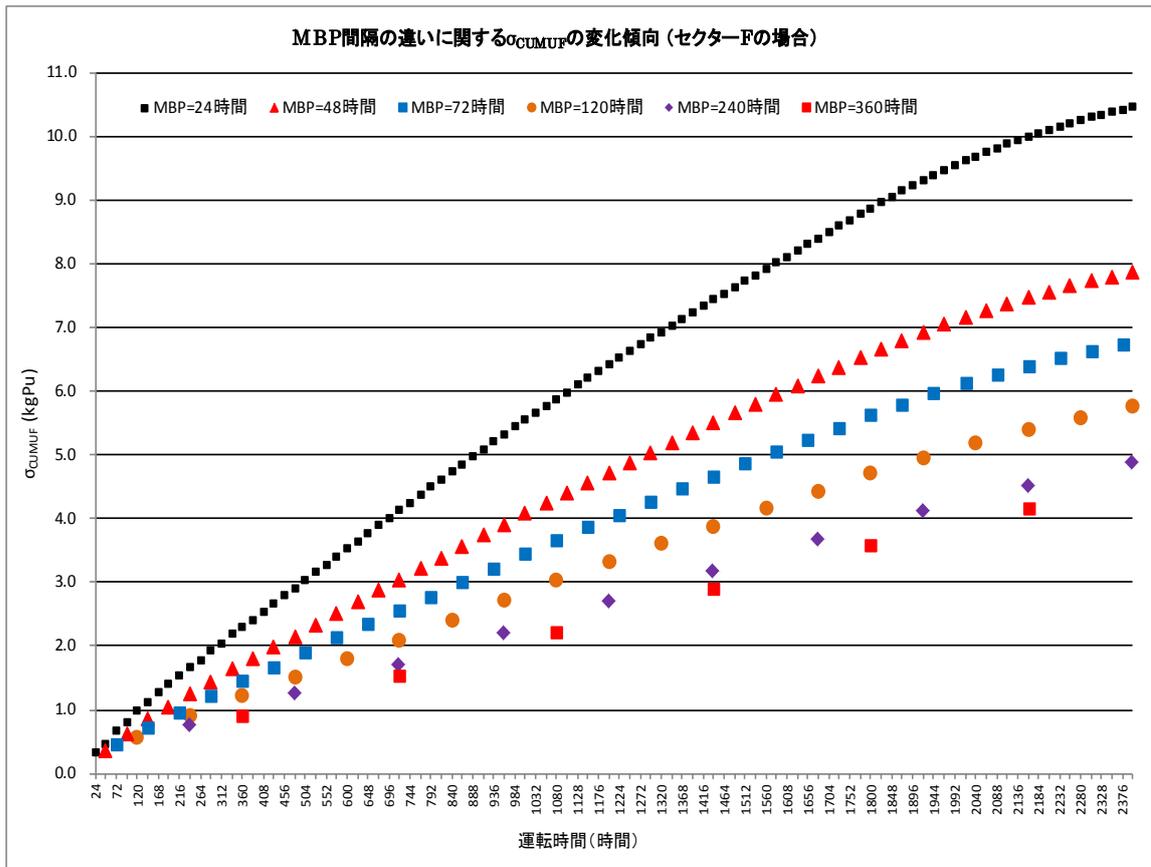


図 4.4-2. MBP 間隔の違いによる σ_{CUMUF} の変動傾向（上図）および異なる MBP 間隔の σ_{CUMUF} 計算値（下図）

(2) σ_{CUMUF} 計算プログラム修正後の確認

平成 24 年度の物質収支確定頻度が長くなるほど、 σ_{CUMUF} が小さくなる現象は、想定していた結果（ σ_{CUMUF} の大きさは、MBP の時間間隔に影響を受けない）とは違うものであった。本年度に、プログラムの計算手順の調査を行い、不具合が確認されたので、修正を行い（JMOX_DATA_E,2013/06/12 8:28 版）、計算結果が適切であることを確認した。

本システムにおける累積 MUF (CUMUF_i) は、数式(4-3)に定義されたとおり。 CUMUF_i の分散の数式(4-4)を、以下のように表すと、

数式(4-5)

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{CUMUF}_i}^2 &= \sum_{j=1}^i \sum_{k=1}^i \sigma_{j, k} \\ &= \text{COV}(\text{MUF}_1, \text{MUF}_1) + \text{COV}(\text{MUF}_1, \text{MUF}_2) + \dots \oplus \text{COV}(\text{MUF}_1, \text{MUF}_i) \\ &+ \text{COV}(\text{MUF}_2, \text{MUF}_1) + \text{COV}(\text{MUF}_2, \text{MUF}_2) + \dots \oplus \text{COV}(\text{MUF}_2, \text{MUF}_i) \\ &\vdots \\ &+ \text{COV}(\text{MUF}_i, \text{MUF}_1) + \text{COV}(\text{MUF}_i, \text{MUF}_2) + \dots \oplus \text{COV}(\text{MUF}_i, \text{MUF}_i) \end{aligned}$$

となる。この様に、 CUMUF_i の分散は、MUF の分散・共分散行列から求められる。ここで、物質収支期間 i における CUMUF_i を、

数式(4-6)

$$\text{CUMUF}_i = \sum_{n=1}^i \text{MUF}_n = I_1 + \sum_{p=1}^i R_p - \sum_{q=1}^i S_q - I_{i+1}$$

$\sum_{p=1}^i R_p$: 物質収支期間 1 から i までの受入れの合計。
 $\sum_{q=1}^i S_q$: 物質収支期間 1 から i までの払出しの合計。

I_i : 物質収支期間 i の期首在庫。

で計算すると、 CUMUF_i の値は、数式(4-4)と数式(4-6)で同じ値となる。

CUMUF_i の定義は、式(4-3)であるので、各物質収支期間における期末在庫の測定誤差も含めた分散計算を行う。よって、プログラムでは、 CUMUF の分散は MUF の分散・共分散行列より、数式(4-5)で求めることとした。

平成 24 年度に使用したプログラム(旧プログラム)では、偶然誤差同士の共分散はない、との認識で共分散の計算を行っていた。しかし、今回の検討により、隣り合った MBP の前期の期末在庫と次期の期首在庫の偶然誤差成分が同じユニーク ID となることから、共分散が発生することがわかった。平成 24 年度に使

用したプログラムではその共分散が計算されないのでゼロとなっていたため、マイナスの共分散が、CUMUFの分散計算で使用されずに分散値が大きくなっていました。

この点を修正して、旧プログラム及び修正した新プログラムを用い、PWR 燃料製造キャンペーンの測定シミュレーションを同条件で行った σ_{CUMUF} の計算結果を図4.4-3に示す。新プログラムでは隣り合う物質収支間の在庫測定の偶然誤差成分の共分散が考慮され、 σ_{CUMUF} の値が旧プログラムに比べ小さくなった。

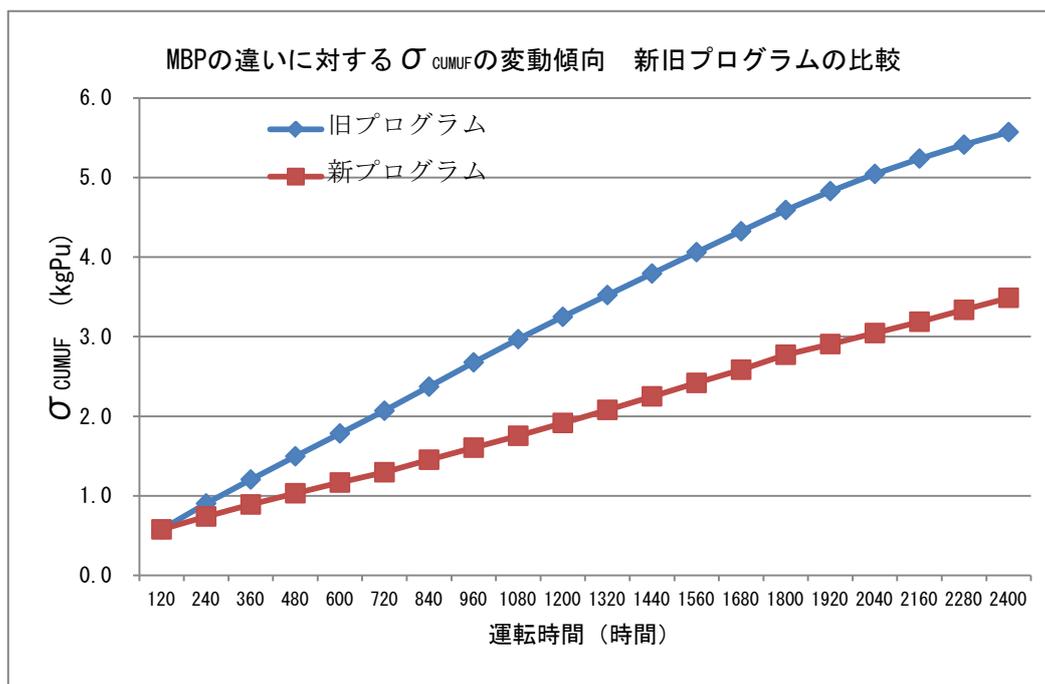


図 4.4-3. 新旧プログラムによる計算結果の比較

新しいプログラムにより計算した σ_{CUMUF} がMBPの時間間隔により影響されないことを確認するため、MBP=24時間とMBP=120時間について σ_{CUMUF} の計算を行い、結果を図4.4-4示した。 σ_{CUMUF} は時間間隔に影響されることなく同じ値となった。修正したプログラムの計算結果の妥当性が確認できたので、今後、この新しいプログラムを使用することとした。

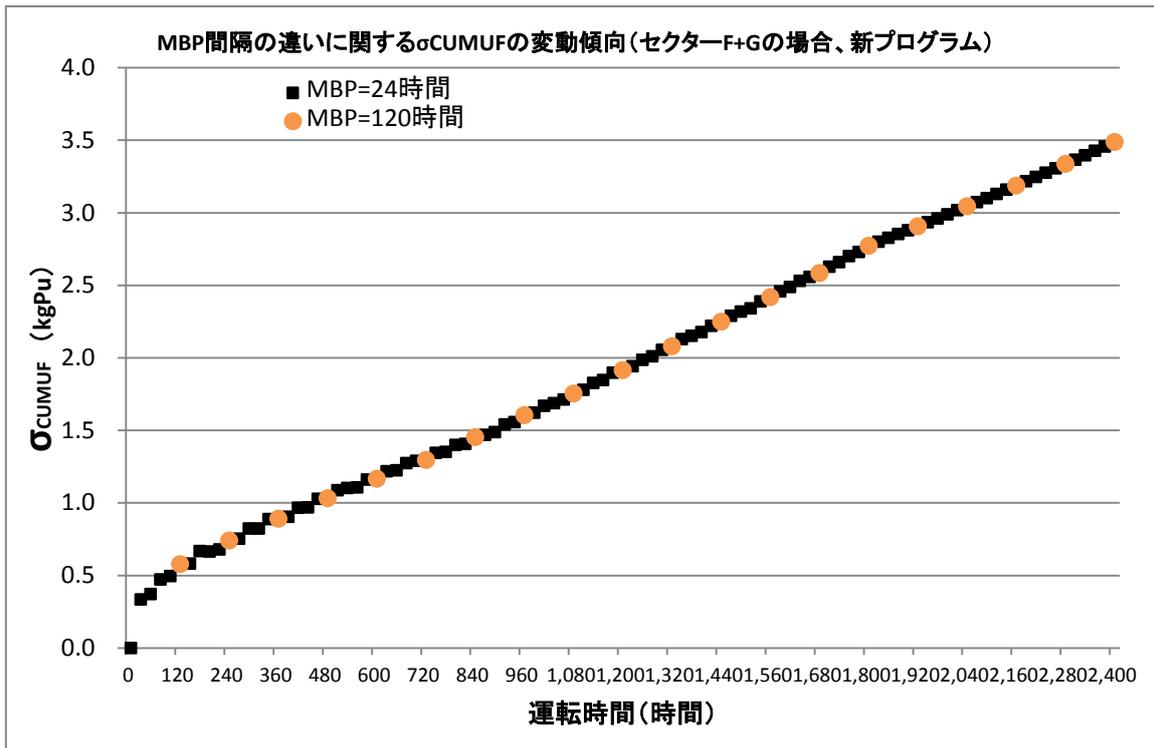


図 4.4-4. 新プログラムによる MBP 間隔の違いに対する σ_{CUMUF}

4.5. より現実に近い計量管理モデルの検討

4.5.1. σ_{MUF} 値へのサンプリング誤差設定の影響（PWR燃料製造キャンペーン）

σ_{MUF} は核物質量の測定値に付随する偶然誤差及び系統誤差という誤差成分により構成される。平成 24 年度の測定シミュレーションにより計算された σ_{MUF} に対するこれらの誤差成分の構成比について、セクター(F+G)における第 7 期 MBP における MUF 分散を誤差要素に分割した計算結果を表 4.5-1 に示した。

在庫及びフロー測定の偶然誤差分散が MUF 分散の殆どを占めているということができる。

表 4.5-1. MUF 分散の誤差要素一例（セクターF+G、MBP7）

在庫		フロー		合計
偶然誤差	系統誤差	偶然誤差	系統誤差	
0.994(kgPu)	0.023(kgPu)	0.205(kgPu)	0.063(kgPu)	1.285(kgPu)
77.4(%)	1.8(%)	15.9(%)	4.9(%)	100.0(%)

測定誤差分散のほとんどを占める偶然誤差の原因について分析すると、偶然誤差はほぼサンプリングによる偶然誤差で構成されていた。期首在庫の偶然誤差の分散に注目した場合、重量測定、サンプリング、破壊分析の各測定方法による誤差の寄与はそれぞれ 0.5%、95.2%、4.4%であった。これはどの MBP についても同様な傾向であった。

平成 24 年度は設定したすべての測定ポイントにおいて別々の装置により重量測定、サンプリング、化学分析が行われていると仮定した（表 4.3-4）。この仮定の時は、 σ_{MUF} の要素として、サンプリング誤差が大きな部分を占めていた。

大型 MOX 燃料加工施設の計量管理において、MOX 粉末を工程へ投入する時に施設者がサンプリングをする計画は今のところない。したがって、Pu 濃度について試料を化学分析することもなく、Pu 質量は MOX の重量測定と Pu 濃度の計算値から計算により求められる推定値である。この部分が、昨年度実施した測定シミュレーションと設定が違っており、 σ_{MUF} 値に対するサンプリング誤差の寄与が大きいことから、サンプリング誤差の設定により測定シミュレーション及び物質収支の結果に影響が出ると考えた。

平成 25 年度に実施する測定シミュレーションは、「より現実に近い計量管理を設定」することとしているので、 σ_{MUF} の大きさに最も寄与していたサンプリングの設定について、上記計量管理方法を模擬できる設定を探るため、表 4.5-2 に示すケースの測定シミュレーションを PWR 燃料製造のフローシミュレーション結果を使用して実施し、 σ_{MUF} の値を比較検討した。

物質収支区域に受入れる Pu 質量の推定値に含まれる誤差は、重量測定の誤差と MOX 原料粉の受入れ値の誤差である。MOX 原料粉の受入れ値に含まれる誤差は、RRP における MOX 製品粉末

に対する重量測定、サンプリング及び分析の誤差であり、偶然誤差及び系統誤差の両方を含んでいる。

測定シミュレーションの物質収支区域への受入れにおいては推定値（RRP の払出し値）といえども測定に基づく値であり、RRP における測定の偶然及び系統誤差成分を含んでいる。しかし、その値を計算に使用することにより、偶然誤差成分及び系統誤差成分が合成されて計算値に含まれることになる。

このため、セクターF では、受入れ値と払出し値の推定値に同じ誤差を含んでいるので、MUF 分散の計算において相殺されることになる。

セクターG では、受入れは推定値であり、セクターF の受入れ値に含まれる誤差とリサイクル粉の測定誤差がこの推定値に含まれている。払い出し値は製品ペレットのサンプリング及び分析が行われるので、受入れ推定値と払い出し測定値は別々の誤差で構成され、MUF 分散の計算において相殺することはない。

表 4.5-2. サンプリング影響評価の測定シミュレーションケース

ケース No.	サンプリングの設定内容
ケース 1	全測定点でサンプリング
ケース 2	MOX 原料粉受入、製品ペレット払出しのみサンプリング(偶然誤差)
ケース 3	製品ペレット払出しのみサンプリング (偶然誤差)
ケース 4	受入れ及び在庫の測定点が同じサンプリング(偶然誤差)
ケース 5	受入れ及び在庫の測定点が同じサンプリング(系統誤差)

(1) シミュレーション結果

① ケース 1

MBP20 における σ_{CUMUF} は、セクターF+G:3.67 kgPu、セクターF:4.07 kgPu 及びセクターG:3.34 kg であった。それぞれのセクターの σ_{CUMUF} 及び σ_{MUF} を図 4.5-1 に示す。

セクターF の σ_{MUF} はセクターF 内の在庫量の増減と同様に増減した。誤差成分として在庫のサンプリング偶然誤差が大半を占めている。セクターF の σ_{CUMUF} は原料 MOX 受入れが停止した MBP16 から増加量が小さくなる。受入れ測定 of 誤差分散の寄与がなくなり、さらに、セクターF の在庫量が減少することにより在庫測定 of サンプリング偶然誤差が減少したと考えられる。

セクターF とセクターG を一つの物質収支区域とした場合 (以下「F+G」) よりもセクターF 単独の σ_{CUMUF} が大きいのは、アウトプットの測定単位がセクターF 単独のほうが F+G よりも大きく、セクターF のアウトプット測定 of サンプリング偶然誤差の寄与が大きいためと考えられる。

セクターG の σ_{MUF} はセクターF に比べ小さいが、製品富化度の増加とともに増加している。これは、セクターG の受入れ of サンプリング偶然誤差が大きく寄与している。セクターG の σ_{CUMUF} は、製品富化度の増加とともに増加量が大きくなり MBP20 まで増加している。

F+G では、セクターF の寄与がセクターG に対して大きいため、F 単独の場合とほぼ一致している。

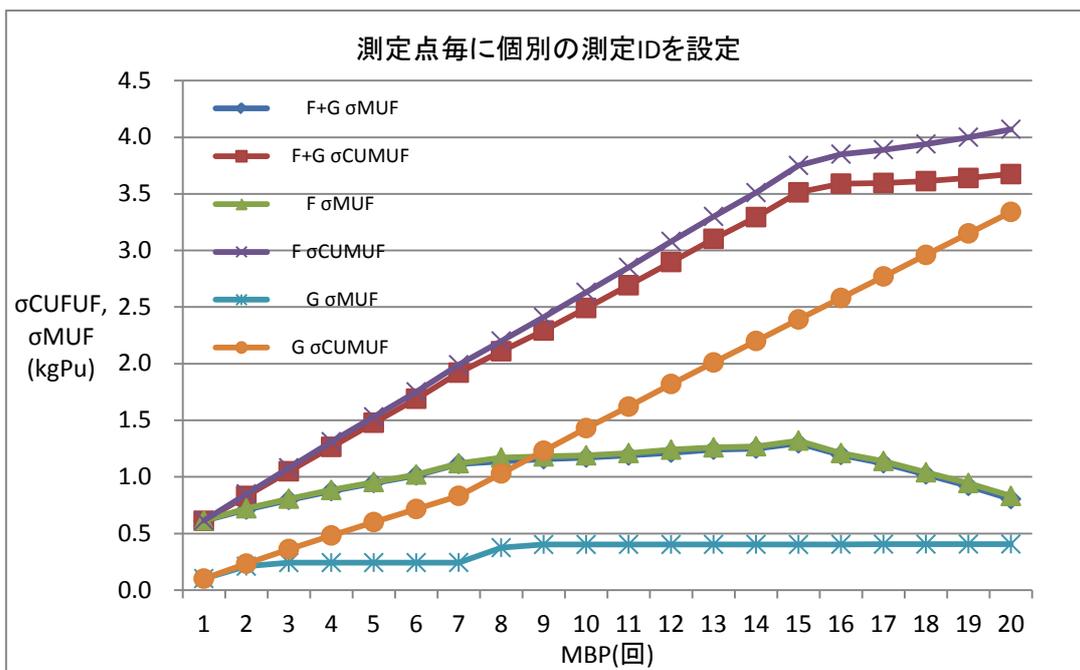


図 4.5-1. 測定点毎に個別の測定 ID を設定した場合 (昨年度と同じ設定)

② ケース 2

MBP20 における σ_{CUMUF} は、F+G:3.18 kgPu、セクターF:2.20 kgPu 及びセクターG:2.82 kg であつた。それぞれのセクターの σ_{CUMUF} 及び σ_{MUF} を図 4.5-2 に示す。

セクターF の σ_{MUF} は受入れ量と同様に増減している。MOX 原料の受入れが停止する MBP16 以降は急激に σ_{MUF} の値が減少している。セクターF の在庫及び払出しのサンプリング偶然誤差はゼロと設定しているので、受入れのサンプリング誤差が σ_{MUF} の大半を占めている。MBP16 以降は在庫の分析誤差の寄与が大きくなる。

セクターG の σ_{MUF} は、製品富化度の増加とともに増加した。セクターG の受入れのサンプリング誤差はゼロに設定したので、製品ペレットの払出しのサンプリングの偶然誤差が σ_{MUF} の値に大きく寄与している。セクターG の σ_{CUMUF} は、製品富化度の増加とともに増加量が大きくなり MBP20 まで増加している。

F+G では、 σ_{MUF} はセクターF と同様に受入れ量と同様に増減して、MBP16 以降は減少している。これは MOX 原料粉末の受入れの停止によるものである。F+G の σ_{CUMUF} も同様に MBP16 以降は増加量が減少している。前半は MOX 原料粉末受入れのサンプリング誤差が寄与している。後半の MBP16 以降は、期首、期末在庫の分析誤差の寄与が大きくなった。

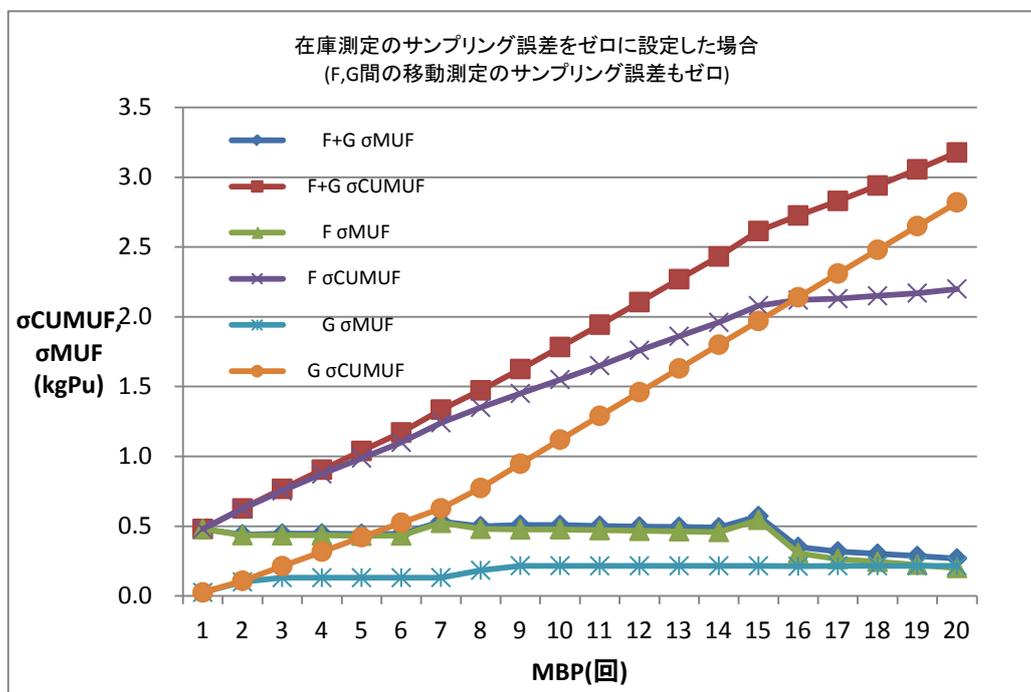


図 4.5-2. 在庫測定のサンプリング誤差をゼロに設定した場合 (F,G 間の移動測定のサンプリング誤差もゼロ)

③ ケース 3

MBP20 における σ_{CUMUF} は、F+G:2.83 kgPu、セクターF:1.66 kgPu 及びセクターG:2.83 kg であつた。それぞれのセクターの σ_{CUMUF} 及び σ_{MUF} を図 4.5-3 に示す。

受入、在庫測定のスプリング誤差がゼロの場合、セクターFの σ_{MUF} は、在庫量の増減とともに同様に増減したが、受入れのスプリングを行ったときと比べて σ_{MUF} の値は小さい。在庫量の分析誤差の σ_{MUF} 値への寄与が大きい。セクターFの σ_{CUMUF} は、MBP16以降はMOX原料粉末の受入れが停止して在庫量が減少し始めるため、増加量が小さくなる。

セクターGの σ_{MUF} は、製品富化度の増加とともに増加している。インプットのスプリング誤差をゼロに設定したので σ_{MUF} の値は小さく、分析誤差と、製品ペレット払出しのスプリングの偶然誤差が大きく寄与している。セクターGの σ_{CUMUF} は、製品富化度の増加とともに増加量が大きくなり MBP20 まで増加している。これには、製品ペレット払出しの分析の系統誤差の寄与が大きい。

F+G では、 σ_{MUF} はセクターFと同様に在庫量の変動とともに増減しており、MBP16以降は減少している。これはMOX原料粉末受入れの停止による受入れの分析誤差の寄与がなくなることと、在庫量の減少によるものであろう。 σ_{CUMUF} も同様に MBP16 以降は増加量が減少している。 σ_{CUMUF} の構成要素としては受入れ及び払い出しの分析誤差が支配的である。

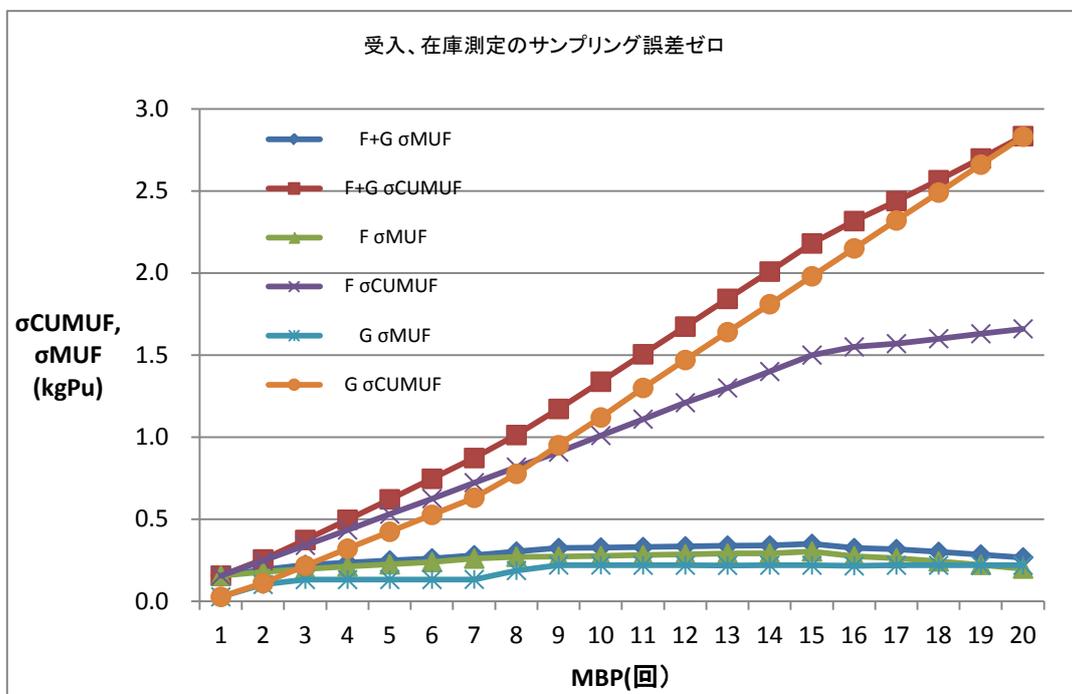


図 4.5-3. 受入及び在庫測定のスプリング誤差ゼロ

④ ケース 4

MBP20 における σ_{CUMUF} は、F+G:3.22 kgPu、セクターF:2.51 kgPu 及びセクターG:3.05 kg であつた。それぞれのセクターの σ_{CUMUF} 及び σ_{MUF} を図 4.5-4 に示す。

セクターF の σ_{MUF} の値は、在庫の増減とともに増減しており、在庫測定のスAMPLING 偶然誤差の寄与が大きい。 σ_{CUMUF} は MBP16 から MOX 原料粉末の受入れがなくなり、受入れのスAMPLING 誤差がなくなったことと、在庫量が減少し始めたことから MBP16 から増加量が減少している。

セクターG の σ_{MUF} は富化度の増加とともに増加する。これは、セクターF からの受入れのスAMPLING 偶然誤差の寄与が大きい。 σ_{CUMUF} は製品富化度の増加とともに増加率が変化する。

F+G の σ_{MUF} はセクターF と同様の変動傾向を示している。前半は MOX 原料粉末の受入れのスAMPLING 偶然誤差の寄与が大きく、中盤、後半は在庫のスAMPLING 偶然誤差の寄与が大きい。MBP16 以降は MOX 原料粉末の受入れがなくなり、さらに在庫が減少するため σ_{MUF} が減少する。F+G の σ_{CUMUF} は、MBP16 から増加量が小さくなっている。

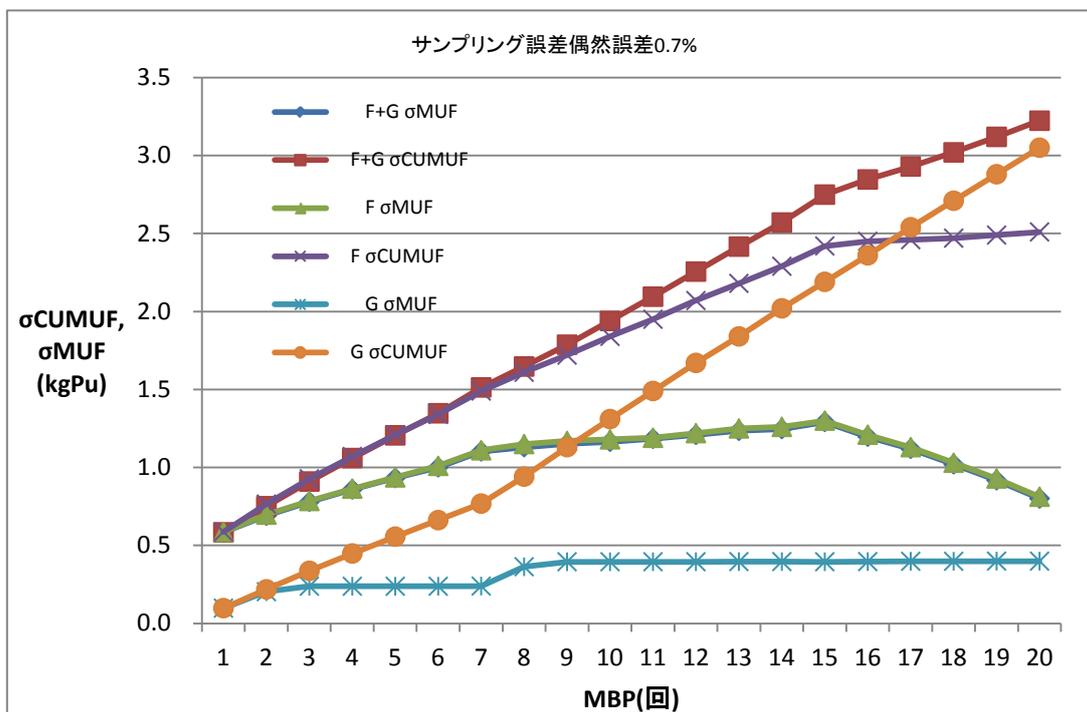


図 4.5-4. サンプル誤差を偶然誤差 0.7%に設定

(受入れ、在庫が同じサンプル ID、分析 ID を設定)

⑤ ケース 5

MBP20 における σ_{CUMUF} は、F+G:11.7 kgPu、セクターF:1.66 kgPu 及びセクターG:12.3 kg であつた。それぞれのセクターの σ_{CUMUF} 及び σ_{MUF} を図 4.5-5 に示す。

セクターF の σ_{MUF} の値は MOX 原料粉末受入れの分析誤差と在庫の分析誤差の偶然誤差成分が寄与している。 σ_{CUMUF} は受入れが無くなる MBP16 から増加量が小さくなつている。セクターF の受入れと払い出しのサンプリング及び分析誤差は測定 ID がすべて同じであるため、それぞれ相殺されて σ_{CUMUF} の値に寄与しない。 σ_{CUMUF} の値は、サンプリング誤差をゼロに設定したときと同じ値になつた。

セクターG の σ_{MUF} は製品富化度の増加とともに増加している。セクターG のセクターF からのインプットのサンプリング系統誤差の寄与が大きい。偶然誤差成分については、セクターF からのインプットの分析誤差及び製品ペレットの払出しのサンプリング偶然誤差の寄与が大きい。しかし、偶然誤差は系統誤差に比べて非常に小さい。セクターG の σ_{CUMUF} は製品富化度が高くなるとともに増加率が大きくなつている。セクターG の σ_{CUMUF} は、F+G の σ_{CUMUF} よりも常に大きくなつた。

F+G の σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} はセクターG と同様に、MOX 原料粉の受入れの系統誤差の寄与が大きい、MBP16 以降は受入れがなくなるので、セクターG よりも σ_{MUF} が小さくなつた。

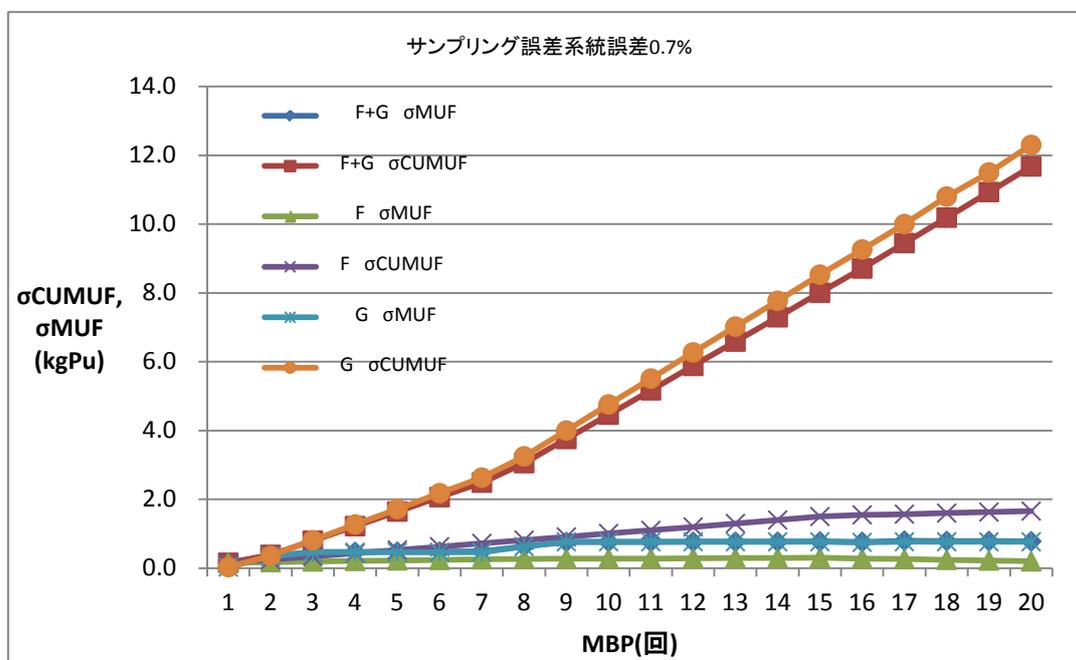


図 4.5-5. サンプリング誤差を系統誤差 0.7% に設定

(G のアウトプットを除き、サンプリング誤差及び分析誤差に同じ測定 ID を設定した場合)

(2)測定シミュレーションのまとめ (PWR 燃料製造キャンペーン)

ケース 1 からケース 5 までの各セクターについての σ_{CUMUF} の計算結果を表 4.5-3 にまとめた。

セクターFについては、サンプリング誤差をゼロに設定した時と、サンプリング誤差を系統誤差 0.7%に設定した時の σ_{CUMUF} がともに 1.66 kgPu となり、サンプリング誤差が σ_{CUMUF} に含まれていないことが判った。

セクターFのPu質量受入れ値には、RRPにおける混合ロットごとのサンプリング及び分析に係る誤差が含まれており、製品ペレットのサンプリング及び分析が行われるまでは、受入れ値を使用してPu質量を計算により求めるので、その計算値には受入れ値と同じ誤差が含まれる。この誤差は系統誤差として振る舞い、物質収支区域の受入れ、払い出しのPu質量計算において、その誤差はキャンセルアウトされ、サンプリング及び分析の誤差をゼロに設定した時と同じ σ_{CUMUF} の値になる。

そのため、セクターFについての測定シミュレーションにおいてはサンプリング及び分析の誤差をゼロに設定することにより実際の計量に整合したものになる考え、重量測定誤差のみを設定する。

セクターGについても受入れはセクターFの払い出し値であるので、セクターFの受入れ値の誤差が含まれることになる。ところが、セクターGの払い出し値は製品ペレットのサンプリング分析に基づき計算されるので、受入れ値の誤差を含んでいない。そのため、セクターGの測定シミュレーションにおいては、受入れは重量測定誤差、サンプリングの偶然誤差及び分析誤差を設定して、払い出しは、重量測定誤差、サンプリングの偶然誤差及び分析誤差を設定する。在庫測定は、重量測定誤差のみを設定する。

F+Gについても、同様に、F+Gの測定シミュレーションにおいては、受入れは重量測定誤差、サンプリングの偶然誤差及び分析誤差を設定して、払い出しは、重量測定誤差、サンプリングの偶然誤差及び分析誤差を設定する。在庫測定は、重量測定誤差のみを設定する。

今年度の測定シミュレーションの測定機器ID、測定誤差の一覧を表 4.5-4 にまとめた。

表 4.5-3. PWR 燃料製造 1 キャンペーン 各条件における MBP20 の σ_{CUMUF} (kgPu)

測定シミュレーションケース	F+G	セクターF	セクターG
ケース 1 個別測定 ID	3.67	4.07	3.34
ケース 2 在庫サンプリングゼロ	3.18	2.20	2.82
ケース 3 受入在庫サンプリングゼロ	2.83	1.66	2.83
ケース 4 サンプリング r	3.22	2.51	3.05
ケース 5 サンプリング s アウトプットは r	11.7	1.66	12.3

r: 偶然誤差、s: 系統誤差

表 4.5-4. 今年度の測定シミュレーションの測定機器 ID、測定誤差

工程番号	ユニット番号	工程名称	工程モデル	測定対象	重量測定ID	偶然誤差	系統誤差	サンプリングID	偶然誤差	系統誤差	分析ID	偶然誤差	系統誤差
1		MOXダミータンク	保管1										
2	U5	原料MOX粉末缶一時保管設備	保管2										
2	U8+U9	原料MOX粉末秤量・分取装置A/B	分取	受入	3	0.0005	0.0005	3	0.007	0	3	0.0015	0.001
3	U8+U9	原料MOX粉末秤量・分取装置A/B	分取	全体在庫	3	0.0005	0.0005						
3	U8+U9	原料MOX粉末秤量・分取装置A/B	分取	CS払出	3	0.0005	0.0005						
9	U11-1	ウラン粉末・回収粉末秤量・分取装置	分取	払出	5	0.0005	0.0005	5	0.007	0	5	0.0015	0.001
10	U10	予備混合機	混合1	全体在庫	10	0.0005	0.0005						
10	U10	予備混合機	混合1	HOLDUP									
10	U10	予備混合機	混合1	DS在庫	10	0.0005	0.0005						
10	U10	予備混合機	混合1	CS払出	10	0.0005	0.0005						
11	U23-1	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	11	0.0005	0.0005						
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	全体在庫	12	0.0005	0.0005						
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	HOLDUP									
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	DS在庫	12	0.0005	0.0005						
12	U12/U13	一次混合機A/B	加工1	CS払出	12	0.0005	0.0005						
13	U23-2	粉末一時保管設備	分取	全体在庫	13	0.0005	0.0005						
14	U16	UO2粉末秤量・分取装置	保管1										
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	全体在庫	15	0.0005	0.0005						
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	HOLDUP									
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	DS在庫	15	0.0005	0.0005						
15	U14	一次混合粉末秤量・分取装置	混合2	CS払出	15	0.0005	0.0005						
16	U23-3	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	16	0.0005	0.0005						
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	全体在庫	17	0.0005	0.0005						
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	HOLDUP									
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	DS在庫	17	0.0005	0.0005						
17	U19/U17	均一化混合機-1/2	加工1	CS払出	17	0.0005	0.0005						
18	U23-4	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	18	0.0005	0.0005						
19	U20	造粒装置	加工1	全体在庫	19	0.0005	0.0005						
19	U20	造粒装置	加工1	HOLDUP									
19	U20	造粒装置	加工1	DS在庫	19	0.0005	0.0005						
19	U20	造粒装置	加工1	CS払出	19	0.0005	0.0005						
20	U23-5	粉末一時保管設備	保管2	全体在庫	20	0.0005	0.0005						
20	U23-5	粉末一時保管設備	保管2	払出	20	0.0005	0.0005						
セクターFとGの境界													
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	全体在庫	22	0.0005	0.0005						
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	HOLDUP									
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	DS在庫	22	0.0005	0.0005						
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	受入	21	0.0005	0.0005	21	0.007	0	21	0.0015	0.001
21	U21/U22	添加剤混合機A/B	加工1	CS払出	22	0.0005	0.0005						
22		ダミー設備	保管2	全体在庫	23	0.0005	0.0005						
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	全体在庫	24	0.0005	0.0005						
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	HOLDUP									
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	DS在庫	25	0.0005	0.0005						
23	U35/U36	成型設備A/B	加工2	CS払出	25	0.0005	0.0005						
24	U38-1	ペレット一時保管設備	保管4	全体在庫	26	0.0005	0.0005						
25	U39/U41/U	焼結設備A/B/C	焼結	全体在庫	27	0.0005	0.0005						
26	U38-2	ペレット一時保管設備	保管2	全体在庫	28	0.0005	0.0005						
27	U45/U46-1	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	全体在庫	30	0.0005	0.0005						
27	U45/U46-1	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	HOLDUP									
27	U45/U46-1	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	DS在庫	31	0.0005	0.0005						
27	U45/U46-1	研削設備A/B、検査設備A/B	加工1	CS払出	31	0.0005	0.0005						
28	U47	製品ペレット貯蔵設備	保管3	全体在庫	32	0.0005	0.0005						
28	U47	製品ペレット貯蔵設備	保管3	払出	32	0.0005	0.0005	32	0.007	0	32	0.0015	0.001

4.5.2. σ_{MUF} 値へのサンプリング誤差設定の影響（BWR燃料製造キャンペーン）

BWR 燃料加工キャンペーンにおける σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} へのサンプリング誤差（偶然誤差）の影響について測定シミュレーションにより調査した。

BWR 燃料加工の 1 キャンペーン 1500 時間のフローシミュレーション結果を利用し、1MBP を 120 時間とした測定シミュレーションを実施し、MBP1 から MBP12 の σ_{CUMUF} を計算した結果を表 4.5-5 に示す。ケース 1 は、昨年度と同様に理想的な計量を実施できるとして個別測定 ID を設定した。ケース 2 は在庫測定誤差のサンプリング誤差をゼロとした。ケース 3 は受入れ及び在庫のサンプリング誤差をゼロに設定した。分析誤差についてはケース 2、3 ともにケース 1 と同様の設定とした。サンプリングをしない設定とすれば、 σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} は小さくなる。

表 4.5-5. BWR 燃料製造キャンペーン 各条件における MBP12 の σ_{CUMUF} (kgPu)

測定シミュレーションケース	F+G	セクターF	セクターG
ケース 1 個別測定 ID	1.58	1.77.	1.44
ケース 2 在庫サンプリングゼロ	1.54	1.63	1.30
ケース 3 受入在庫サンプリングゼロ	1.35	1.45	1.30

どのケースにおいても σ_{CUMUF} については、セクターFが F+G、セクターG の計算結果よりも大きくなった。これは、セクターF の受入れ、払い出しの測定単位がセクターG、F+G の払出しの測定単位に比して大きいことにより、偶然誤差の影響度合いが異なるためと考えられる。図 4.5-6 にセクターF、セクターG の受入れ及び払い出しの測定単位の特徴を示す。セクターF、F+G の受入れは、原料 MOX 粉末缶であるため、測定単位が大きく、サンプリングの偶然誤差の分散が大きくなったことによると考えられる。

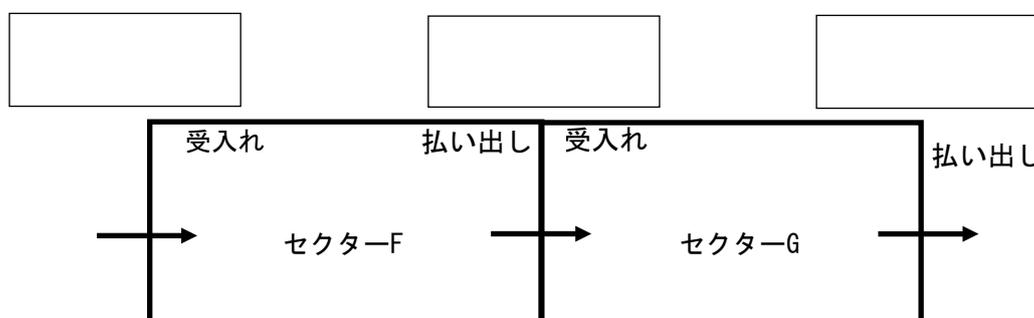


図 4.5-6. セクターF、セクターG の受入れ及び払い出しの測定単位の特徴

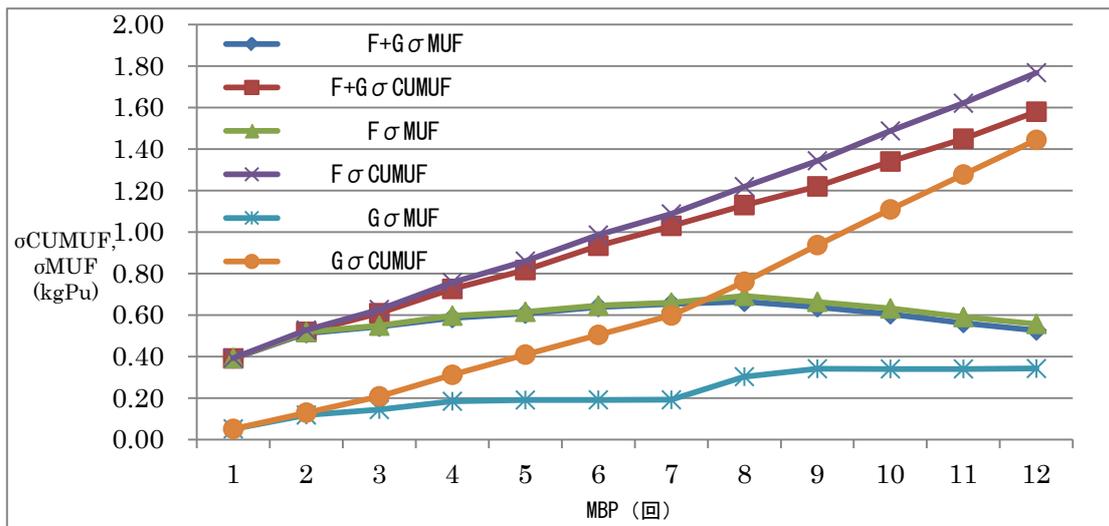


図 4.5-7. 測定点に個別の ID を設定した場合

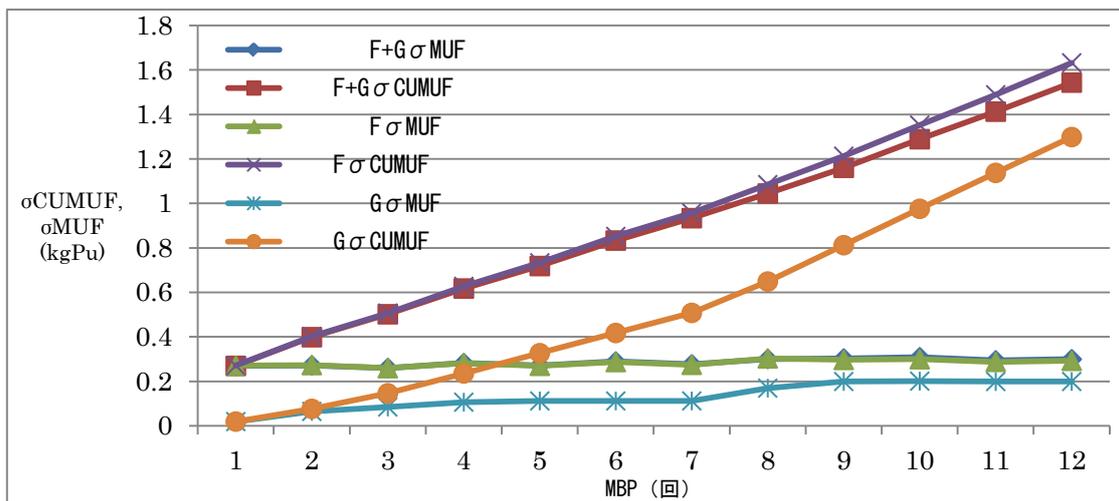


図 4.5-8. サンプル誤差を受入れ及び払い出しに設定した場合

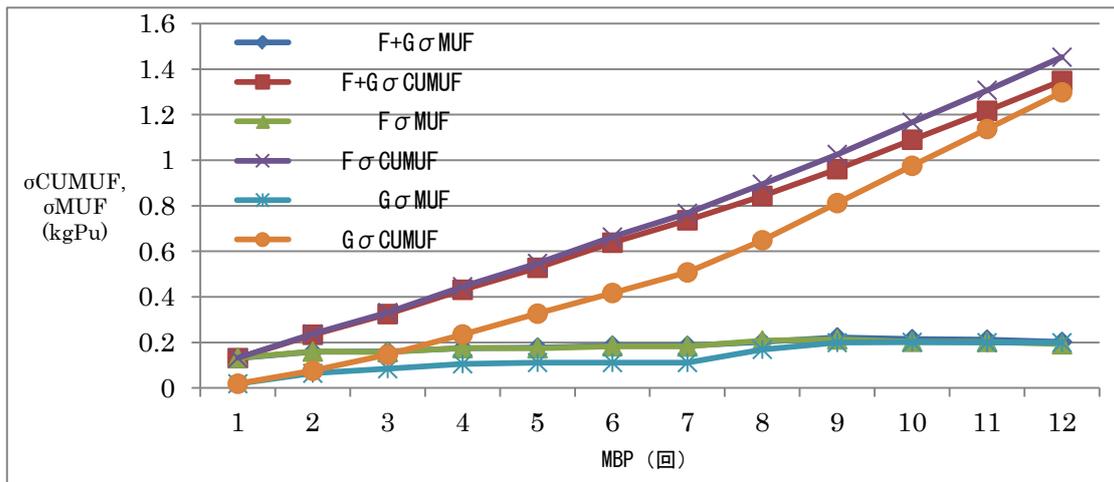


図 4.5-9. サンプル誤差を抽出しただけに設定した場合

4.5.3. σ_{MUF} 値への分析誤差の影響（BWR燃料製造キャンペーン）

BWR 燃料加工キャンペーンにおける σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} へのサンプリング及び分析誤差の影響について測定シミュレーションにより調査した。

セクターFはMOX粉末の重量測定しか行わない。MOX粉末中のプルトニウム含有量はセクターFへの受入れ値のプルトニウム含有率をセクター内の測定点で使用してMOX粉末重量測定値とから計算により求める。このため、セクターFにおいては受入れ値に含まれる誤差が、在庫、払い出しに引き継がれている。サンプリング誤差を受入れ、払い出しにおいて同じ測定IDとして系統誤差を設定した場合と、サンプリング誤差をゼロとした場合では σ_{CUMUF} に対して同じ効果があり、サンプリング誤差が物質収支計算において相殺され、セクターFの σ_{CUMUF} を計算する場合は、重量測定の誤差だけで計算することが妥当であることが4.5.1項の測定シミュレーションにより判っている。

セクターFとセクターGを1つの物質収支区域とした場合のF+Gでは、受入れ、払い出しは別々の測定であるのでセクターFの受入れについてサンプリング、分析の誤差を設定する。また、セクターG単独の場合は、セクターFからの受入れについてサンプリング、分析の誤差を設定する。

この設定について、BWR 燃料製造キャンペーンにおいても確認するため、以下の3ケースの測定シミュレーションを実施した。

ケース1：各測定点において個別の測定IDを設定した場合（昨年度と同様）

ケース2：回収粉受入れ及び製品ペレット払出しをサンプリング、分析すると設定した場合

ケース3：受入れ（セクターGの受入れ含む）、製品ペレットの払い出し時にサンプリング、分析すると設定した場合

表4.5-6に3ケースについて、 σ_{CUMUF} のシミュレーション計算結果を示す。本結果から、セクターFについては、ケース2の設定を使用し、F+G及びセクターGについてはケース3の設定を使用することにより、実際の測定により近い測定シミュレーションが実施できると考えられる。

表 4.5-6. σ_{CUMUF} のシミュレーション計算結果

ケース	F+G (kgPu)	セクターF (kgPu)	セクターG (kgPu)
1	1.58	1.77	1.44
2	0.952	0.646	0.936
3	1.55	0.646	1.43

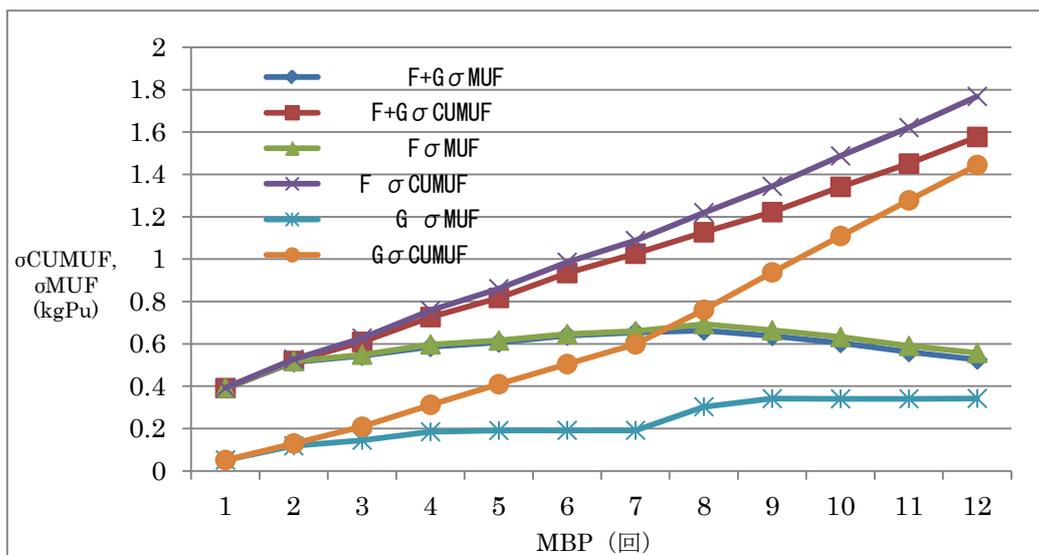


図 4.5-10. 個別に測定 ID を設定した場合

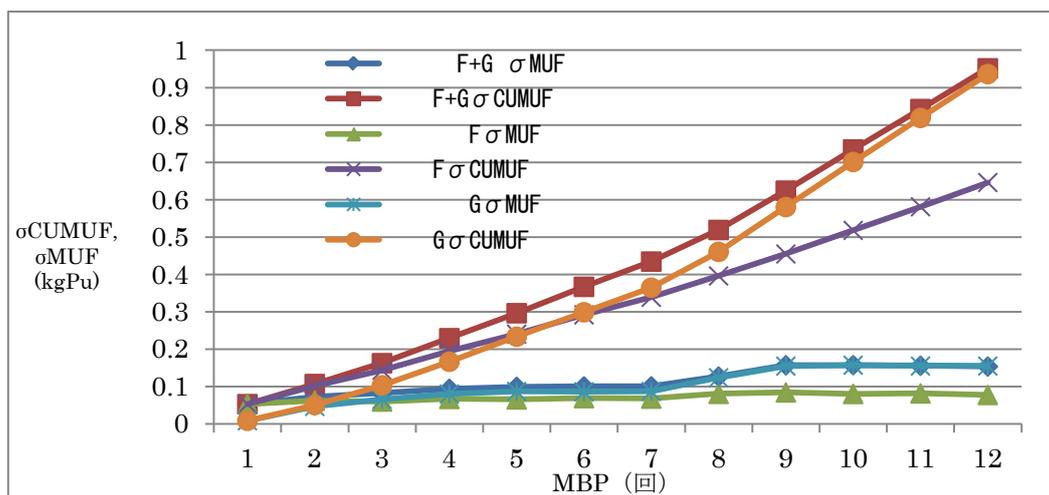


図 4.5-11. 回収粉受入れ、製品ペレット払出しのみ分析値

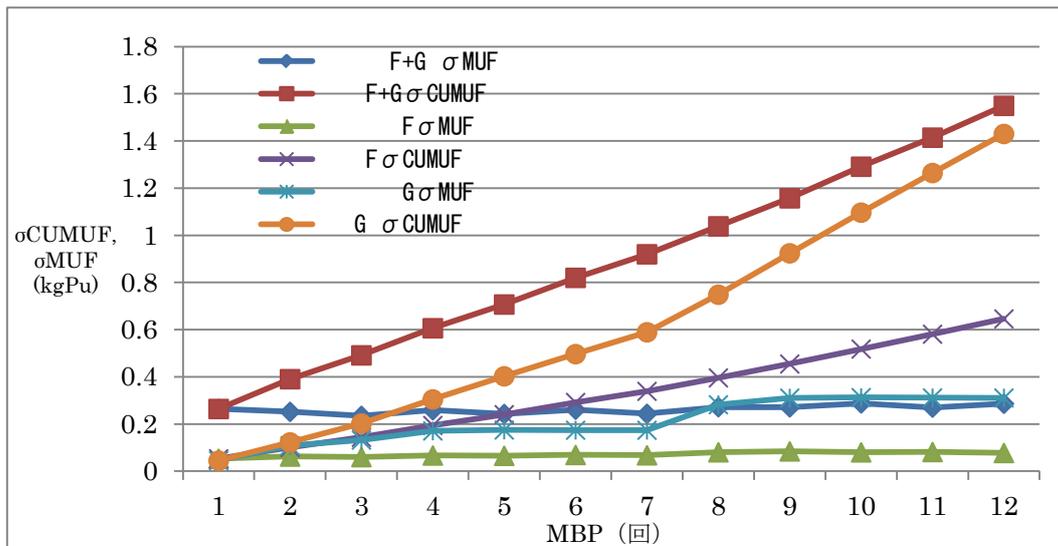


図 4.5-12. 受入れ及び払い出しは分析値

4.5.4. σ MUF値へのホールドアップ未測定の影響（BWR燃料製造キャンペーン）

前項の3ケースでは、フローシミュレーションで模擬したホールドアップを測定シミュレーションにおいて重量測定したとして測定値を模擬した。しかし、ホールドアップは、測定できないものなので、推定値として扱うほうがより現実的である。推定値は、グローブボックスの受入れ払い出し重量測定の差の累積であり、重量測定の誤差が含まれている。測定シミュレーションにおいてはその推定値を模擬することができないため、ホールドアップを未測定在庫として扱うこととして、他は前項の3ケースと同様の設定にて測定シミュレーションをケース4,5,6として実施した。結果を表4.5-7に示す。ホールドアップを未測定とした場合でも、工程全体の取扱量に比べてホールドアップ量がきわめて少量のため σ CUMUFの値は変わらない。この結果は平成24年度のホールドアップに関する検討結果と一致している。

MBP12におけるCUMUFの値を表4.5-8に示した。個々のシミュレーションでCUMUFの計算結果は変動するので、ホールドアップを測定した場合と、未測定とした場合のCUMUFの差と発生したホールドアップの量は一致しないが、全体的には増加傾向である。

このことから、 σ CUMUFを評価する場合には、ホールドアップを測定する設定と未測定にする設定とに差はないが、統計検定を実施する場合には、CUMUF値が大きくなる傾向が結果に影響を及ぼすので、未測定の設定が適しているといえる。

表 4.5-7. σ CUMUFのシミュレーション計算結果

ケース	F+G (kgPu)	セクターF (kgPu)	セクターG (kgPu)

4	1.58	1.77	1.44
5	0.952	0.646	0.936
6	1.55	0.646	1.43

表 4.5-8. CUMUF(MBP1-12) () 内はホールドアップ測定と未測定の場合の CUMUF の差

ケース		F;G (kgPu)	セクターF (kgPu)	セクターG (kgPu)
1	測定	1.924	0.428	0.480
4	未測定	2.158 (0.234)	2.620 (2.192)	0.077 (-0.403)
2	測定	-1.681	0.819	0.793
5	未測定	-0.355 (1.326)	1.331 (0.512)	1.581 (0.788)
3	測定	-0.725	0.819	-0.755
6	未測定	0.735 (1.460)	1.331 (0.512)	0.558 (1.343)

4.6. 原料MOX粉末缶のヒールによる物質収支への影響の検討

4.6.1. 原料MOX粉末缶ヒールの模擬

原料 MOX 粉末は、原料 MOX 粉末缶から全量工程に投入され、空の缶は再処理工場へ返送される。この時、微量の MOX 粉末が缶に付着して残留し、再処理工場へ返送されることも考えられる。施設側は、空になった MOX 粉末缶を重量測定した全重量から缶の風袋重量を差し引いて、缶に残留した MOX 粉末重量を計算するが、それぞれに重量測定の誤差があるため、その差があらかじめ決めた範囲内であれば、原料 MOX 粉末の残留量を 0 g として扱う。

ITV における重量測定精度は、0.05%である。例えば、3 標準偏差を 0 g とする基準値と設定して、測定対象の全重量が 10 kg 程度の場合には、全重量マイナス風袋重量の正味重量は、プラスマイナス 15 g までの場合は 0 g として扱われることになる。

実際には MOX 粉末缶にどの程度の MOX 粉末が残留するかは、現在は知ることができないが、ある割合が残留することを仮定して、その量が、物質収支の評価にどのような影響を与えるか、シミュレーションを実施して検討した。フローシミュレーションで模擬した残留量は、受入れ量の 0.05%、0.1%、0.2%及び 0.4%の割合で、一定しているものとした。それぞれの残留量は、プルトニウムで約 3 g、6 g、12 g 及び 24 g である。

BWR 用燃料製造の 1 キャンペーン（約 1500 時間）のフローシミュレーションを行い、セクターF とセクターG を合わせた物質収支区域とした測定シミュレーションを行った。物質収支区域への原料 MOX 粉末の受入れは、セクターF の UNIT3 の原料 MOX 粉末秤量・分取装置で行う。空の原料 MOX 粉末缶に残留したプルトニウムは、UNIT3 から物質収支区域外へ払い出される。フローシミュレータには、容器への残留量を模擬する機能がないので、UNIT3 においてクリーンスクラップが発生して、1 日 1 回物質収支区域外へ払い出すシミュレータの機能を用いて、複数の原料 MOX 粉末缶への残留量として模擬した。

BWR 用燃料製造の 1 キャンペーン（1500 時間）に約 1tPu を受入れている。120 時間（1MBP）の平均では約 80 kgPu を受入れる。それぞれに、想定する原料 MOX 粉末缶への残留量は表 4.6-1 に示すとおりである。

表 4.6-1. 残留率及びプルトニウム受入れ量に対する想定される残留量

残留率 受入れ量	0.05%	0.1%	0.2%	0.4%
1tPu	0.5kgPu	1kgPu	2kgPu	4kgPu
80kgPu	40gPu	80gPu	160gPu	320gPu

4.6.2. ヒールの物質収支への影響の検討

ヒールは、物質収支計算においては、通常 0 g として扱われるが、実際的には缶への残留量があり、1 キャンペーンあるいは 1 年を通してこれらが考慮されない場合には、物質収支が取れなくなり、在庫差 (MUFd) の原因となる。残留量の割合による在庫差の変動について、残留率を変動させてシミュレーションを実施した。なお、シミュレーション回数は、それぞれ 1 回であるので、別のシミュレーションにおいて測定値を作成するための乱数を変更すれば、在庫差の大きさは異なった結果となる。

表 4.6-2 にヒールを模擬したシミュレーション結果 (BWR 用燃料製造 1 キャンペーン 1500 時間各ケース 1 回) を示す。1500 時間を 120 時間(1MBP)毎に物質収支を計算して、それぞれの残留率に対して MUFd を示した。また、残留率 0 の MUFd を①として、それぞれの残留率の MUFd との差及びその差の平均を示した。残留量は物質収支に計上しなと MUFd に含まれることとなり、MUFd はプラス側に移行して、増加量は表 4.6-1 で想定した残留量と整合している。

表 4.6-2. MBP (120 時間) 毎の MUFd (残留量及びホールドアップは未測定、単位: gPu)

残留率 MBP	① 0%	② 0.05%	②-①	③ 0.1%	③-①	④ 0.2%	④-①	⑤ 0.4%	⑤-①
1	145	773	628	812	667	889	744	1043	898
2	-397	-112	285	-73	324	4	401	159	556
3	-141	263	404	302	443	380	521	536	677
4	174	-117	-291	-78	-252	-0	-174	156	-18
5	219	354	135	393	174	471	252	627	408
6	98	258	160	297	199	644	546	799	701
7	159	350	191	389	230	428	269	584	425
8	62	-54	-116	-15	-77	-147	-209	735	673
9	-144	-97	47	-58	86	182	326	21	165
10	489	-228	-717	-189	-678	458	-31	322	-167
11	236	70	-166	109	-127	-38	-274	213	-23
12	-165	292	457	331	496	901	1066	591	756
MUFd 増加量			1017		1485		3437		5051
MBP の 平均			85		124		286		421

図 4.6-1 に MUFd の標準偏差 (σ_{MUFd}) を示す。左側がヒールを測定しない場合で右側が測定した場合である。残留率が増加しても σ_{MUFd} はほとんど変化しなかった。これは、残留量が受入れ量に対して非常に小さいため、ヒールを測定した場合にもヒール測定に関する誤差のばらつきが相対的に小さいためであると考えられる。ヒールの測定精度は、他の重量計の測定精度と同様に偶然 0.05%、系統 0.05%として、正味残留量を測定するシミュレーションを行ったが、実際の測定は風袋重量を含めた総重量の測定であるため、誤差のばらつきはここに示した結果よりも大きくなるものと考えられる。

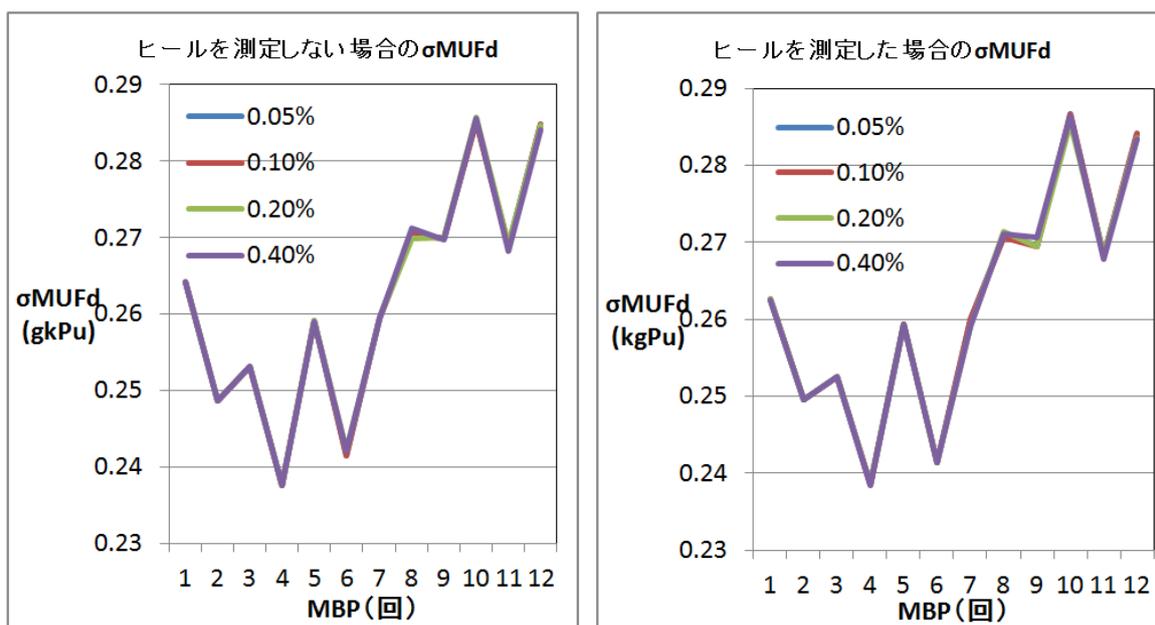


図 4.6-1. 原料 MOX 粉末缶への残留率を変化させた場合の σ_{MUFd}

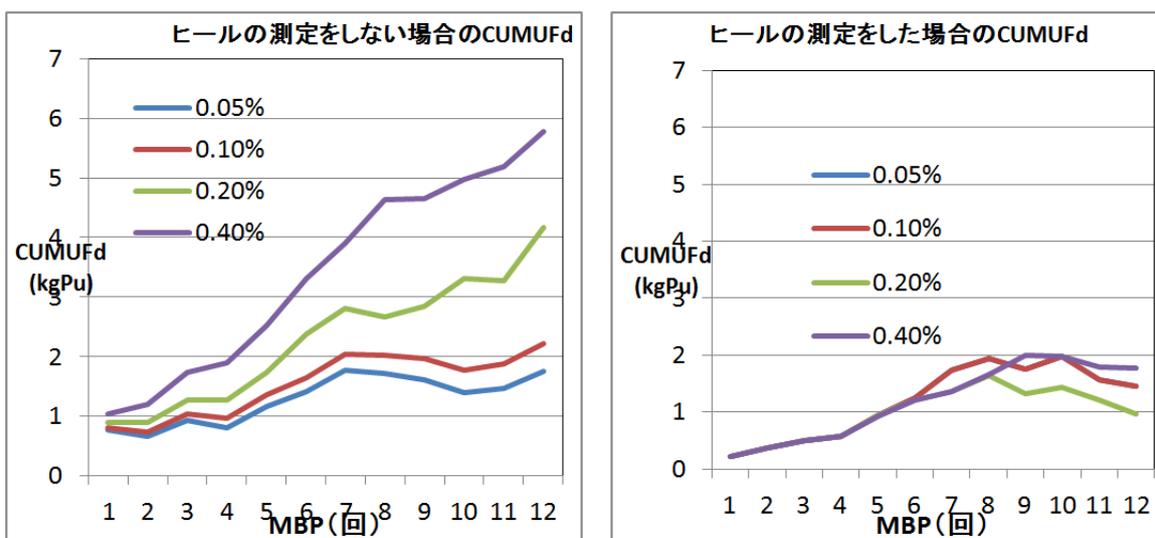


図 4.6-2. 原料 MOX 粉末缶への残留率を変化させた場合の CUMUFd

図 4.6-2 にヒールを模擬したシミュレーションの CUMUFd の計算結果を示す。1500 時間まで 120 時間(1MBP)毎に物質収支期間を延長して物質収支を計算して、それぞれの残留率についての CUMUFd を示した。どの残留率についても CUMUFd は時間とともに増加する傾向がある。左側の図に示すように残留量は物質収支に計上しなと物質収支期間が長くなればなるほどヒールとして収支に計上されない量が増加して CUMUFd を増加させる。残留率が大きくなれば CUMUFd の増加率も大きくなる傾向がある。なお、このシミュレーションではホールドアップ量についても物質収支に計上していないので、ヒールだけが CUMUFd を増加させているわけではなく、工程内における未測定 of ホールドアップもその増加に寄与している。

ヒールを物質収支に計上した場合の残留率に対する CUMUFd を図 4.6-2 の右側に示した。ヒールを物質収支に計上した場合には CUMUFd の大きさは、残留率の大小に依存しなかった。

図 4.6-2 の左右を比較すると、残留率が 0.05% ではヒールを計上しない場合と測定して計上した場合の大きな違いは見られない。ヒールが少量の場合には、測定して計上する効果が少ないと考えられる。

図 4.6-3 は残量率 0.05% でヒールを計上しなかった場合の統計検定(MUF 検定、CUMUF 検定、GEMUF 逐次検定、CUMUF 逐次検定及びページテスト) 結果の一例である。MBP1 の時に MUF 及び CUMUF 検定の時に Threshold (しきい値) を超えて警報が出ているが、その後の MBP では警報は現れていない。

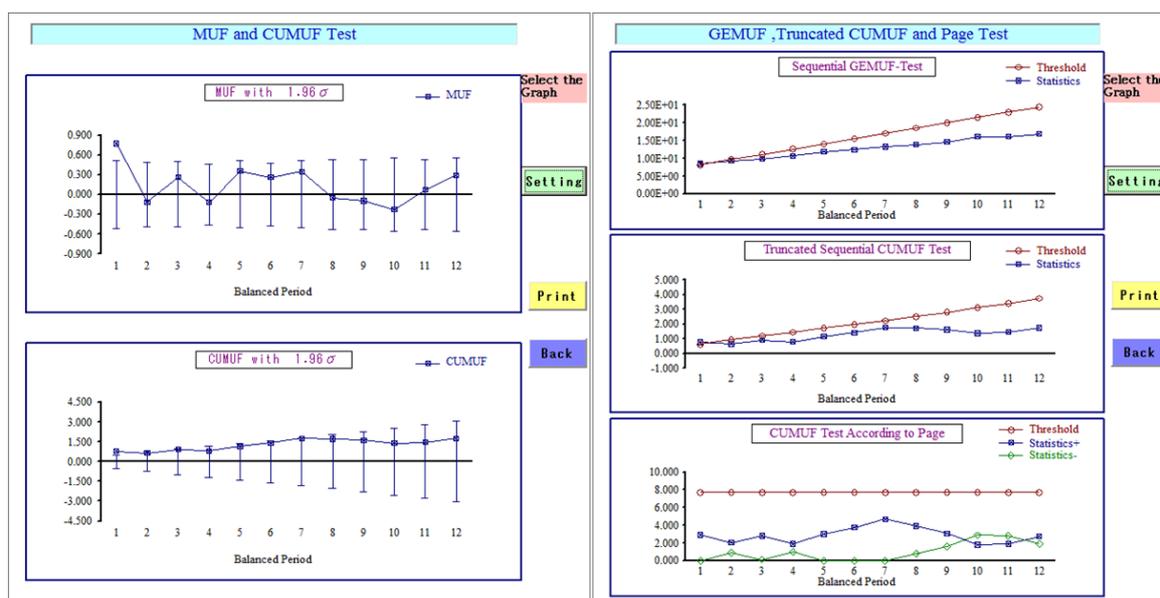


図 4.6-3. 統計検定結果 (BWR 用燃料製造 1 キャンペーン 1500 時間、MBP:120 時間、残留率 0.05%、ヒール未計上)

図 4.6-4 は残量率 0.2%でヒールを計上しなかった場合の統計検定結果の一例である。MBP1 以外にもキャンペーン期間全体に亘って 5 種類の統計検定で警報が現れている。

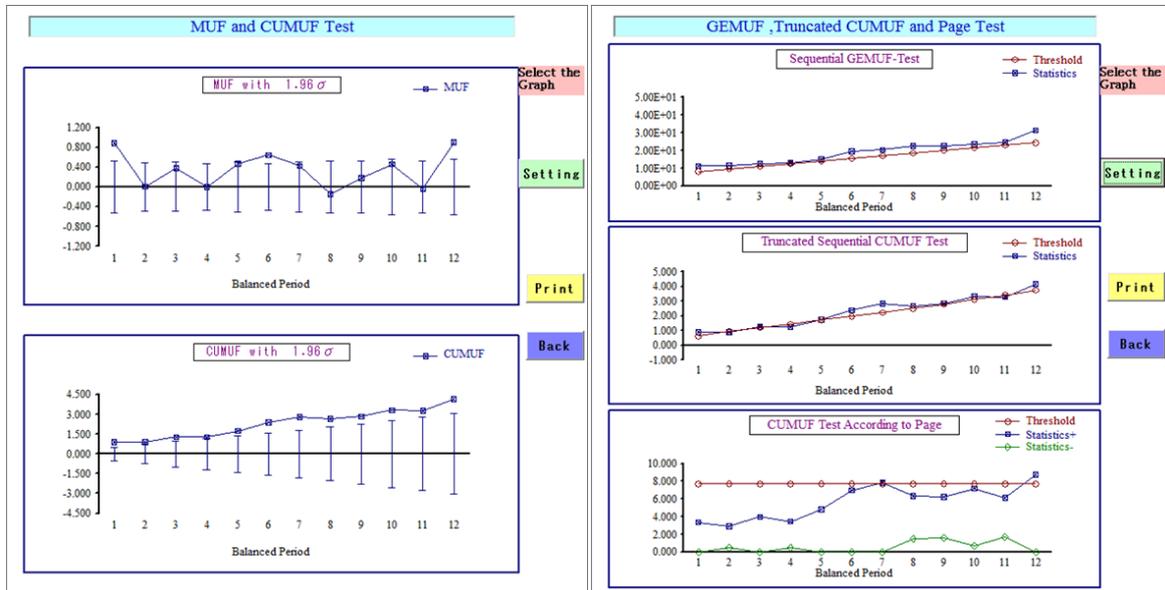


図 4.6-4. 統計検定結果 (BWR 用燃料製造 1 キャンペーン 1500 時間、MBP:120 時間、残留率 0.2%、ヒール未計上)

図 4.6-5 は残量率 0.2%でヒールを測定し計上した場合の統計検定結果の一例である。5 種類の統計検定においてキャンペーン期間全体に亘って警報は現れていない。

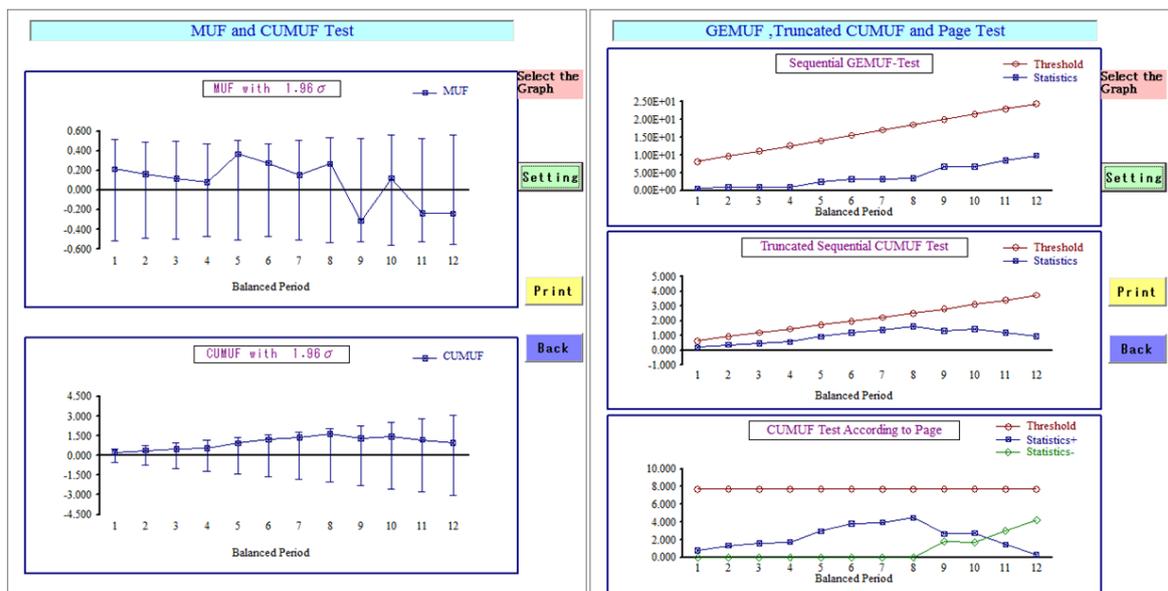


図 4.6-5. 統計検定結果 (BWR 用燃料製造 1 キャンペーン 1500 時間、MBP:120 時間、残留率 0.2%、

ヒール測定計上)

図 4.6-3、図 4.6-4 及び図 4.6-5 の統計検定結果の比較から、ヒールを物質収支に計上しない場合には、ヒール量の影響を受けて統計検定に警報がでてしまうと考えられるが、残留量が 0.05% よりも少ないような場合には、ヒールを物質収支に計上しなくても統計検定に与える影響は少ないと考えられる。

4.6.3. ヒール計上の有無の影響のまとめ

前述の残留率と CUMUFd の関係及び残留率と統計検定結果の関係から、ヒールを測定し物質収支に計上すれば、CUMUFd の変動及び統計検定結果に影響を与えないが、ヒールを計上しない場合には、統計検定において警報が現れる傾向がある。しかし、残留率が小さくなれば、その影響は顕在化しなくなると考えられる。

4.7. 計算結果のまとめ

今回のシミュレーション計算の結果に基づき、MOX 燃料製造工程に関するシミュレーションの結果について次のようにまとめることができる。

- (1) 物質収支の確定頻度の違いが与える物質収支の不確かさへの影響については、MBP の時間間隔が大きくなるにつれ、 σ_{CUMUF} が減少する傾向がみられた。この理由として、 σ_{CUMUF} の計算式である数式(4-4)において、MBP の時間幅が大きくなるほど、計算対象となる共分散行列の行列要素の個数が減少するため、結果的に σ_{CUMUF} 値も減少したと考えられた。平成 25 年度にプログラムを検証したところ、隣り合う MUF の期末在庫と期首在庫の偶然誤差共分散がゼロとして扱われていたため、マイナスの共分散になるようにプログラムを修正した。修正したプログラムを使用して昨年度と同様の設定の測定シミュレーションを実施して σ_{CUMUF} の大きさが物質収支の確定頻度に依存しないことが確認できた。
- (2) 平成 24 年度の物質収支に関するシミュレーション計算では、セクターFにおける σ_{MUF} はセクターG のそれと比べて大きいという結果が得られた。また、セクター(F+G)の $\sigma_{\text{MUF}} / \sigma_{\text{CUMUF}}$ はセクターF での値とほぼ同等であったことから、セクター(F+G)の $\sigma_{\text{MUF}} / \sigma_{\text{CUMUF}}$ はセクターF における $\sigma_{\text{MUF}} / \sigma_{\text{CUMUF}}$ により、ほぼ決まるという結論であったが、本年度のシミュレーションでは、セクターF は重量測定と計算値から物質収支を取る設定へ変更したため、セクターF のセクターF の大量の Pu 在庫の測定誤差の寄与が小さくなり、 $\sigma_{\text{MUF}} / \sigma_{\text{CUMUF}}$ は相対的に小さくなった。測定シミュレーションにおける計量管理の設定により、物質収支の不確かさは大きく変化するということができる。
- (3) 平成 24 年度に行った工程内のホールドアップを測定しない場合の物質収支の計算では、今回設定した HU 発生率の場合であれば各工程のホールドアップの発生量は極く少量であり、特にセクターF の σ_{MUF} に隠れてしまう。このため、ホールドアップを測定した場合の $\sigma_{\text{MUF}} / \sigma_{\text{CUMUF}}$ と比較しても特に相違は見られなかった。この特徴は平成 25 年度に行ったシミュレーションでも同様であった。しかし、本年度の設定ではセクターF の $\sigma_{\text{MUF}} / \sigma_{\text{CUMUF}}$ は昨年度に比べ小さくなっているため、ホールドアップを測定しない場合には統計検定の結果に影響が出やすい傾向があった。
- (4) 原料 MOX 粉末缶のヒールを物質収支に計上しない場合には、ヒール量の累積が CUMUFd を増加させ統計検定結果に警報が現れる傾向がある。しかし、残留率が小さくなれば、その影響は顕在化しなくなると考えられる。また、残留率が小さい場合には、その量が重量測定の誤差に紛れてしまい、ヒール量を特定できないことが考えられる。③及び④の結果より、CUMUFd 及びその検定を未測定のホールドアップ及びヒール量のモニターとみることができると考えられる。

昨年のシミュレーションは、各工程で重量測定及び破壊分析を適用して Pu 質量を測定するとともに、ホールドアップ等の未測定在庫量も物質収支期間毎に測定するという極めて理想的な計量管理を想定して、「データ収集・評価システムの機能評価」を実施した。

実際の計量管理にシミュレーション上の計量管理を近づけるにあたっては、測定手段の選択、適用方法、測定精度といった測定手段に関わる要素に加え、ホールドアップ発生量、原料 MOX 粉末缶のヒールなど MOX 処理工程に関わる要素を考慮する必要がある。

この観点から、より現実に近い計量管理を設定した測定シミュレータで作成されたデータを用いて、データ収集・評価システムの機能の 1 つである施設者申告データから計算される MUFd/CUMUFd に対しての統計検定を行った。より現実に近い計量管理の設定においても、統計検定において設定以上の誤警報がでることもなく、また、未測定在庫が多く発生した場合にはその警報を発することができ、将来、施設者申告データに対して適用可能であると思われる（施設者申告データのデータ収集・評価システムへの入力を行うインターフェースの開発が別途必要である）。

今後は、①査察側機器の配置及び精度を考慮した σ_{MUF} 及び σ_{CUMUF} の評価、④査察側機器の測定データを用いた NRTA の検知能力の評価、⑤RII 時における d-統計を用いた在庫検認データ評価方法についてを検討項目としてデータ収集・評価システムの検証を進めていく必要がある。

MOX 原料粉末貯蔵容器測定機器 (IPCA) の測定手順書 (案)

1. はじめに

IPCA は、大型再処理施設 (RRP) から大型 MOX 燃料加工施設 (JMOX) へのフィードのキャニスター (3 缶の MOX 缶を収納したキャニスター) を受け入れ時に、非立ち合いで測定し、かつ査察時にも立ち合いで測定する NDA 機器である。

IPCA は、中性子測定器 (^3He チューブベース)、3 本のガンマ線測定器 (HPGe)、重量測定器 (ロードセル) 及び ID を記録するためのカメラ (2013 年現在、JMOX に設置時に IAEA が NGSS を提供予定) で構成され、フィードのキャニスター (MOX 原料粉末容器) の受入時、査察時及び空になった MOX 缶 (ヒールが付着しているもの) を収納し JMOX から RRP に払い出す際にも、非立ち合いで測定を行う。これらの測定は、JNFL のキャニスターの移動方法が、受入時及び払出時に IPCA で測定することを想定したものになっているためでもある。なお、JNFL は受入時の測定には約 30 分、払出時の測定には約 15 分の測定時間を取っている。

求められる技術的な要件及び測定時の精度などについては、参考資料 1 : User requirements (SG-EM-IPCA-UR-0001) を参照。なお、本資料は、IAEA がドラフトを作成し、IAEA、JSGO、JNFL 及び NMCC で構成される、JMOX の JTC (Joint Technical Meeting) において議論され、承認された文書である。

IPCA は、米国ロスアラモス国立研究所 (LANL) において製作され、基本的には MOX 原料粉末容器内の Pu 質量を測定することを目的としている。(現在のところ、ヒールの測定についての要求はない)

IPCA は以下の項目について測定を行う。

- 再処理施設からの受入 MOX 原料粉末容器内の Pu 質量を部分欠損レベルの精度で測定
- 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
- 査察時の検認のための測定

IPCA の測定対象物は、MOX 粉末が充填された MOX 原料粉末容器であり、測定対象物の詳細は参考資料 1 (20 ページ参照) に記載されている。

2. システム構成

2.1. 中性子検出器

^3He チューブを 2 重のリング状に構成したシステムで内側のリング (短い 6 本の ^3He チューブ) はポリエチレンにより減速されておらず、外側のリング (24 本の ^3He チューブで構成されているが、そのうち 2 本は短い) はポリエチレンで減速されている。これらの ^3He チューブは内側のリングは 4 気圧、外側のリングは 7.5 気圧で、受け入れ MOX 粉末の中性子数を考慮し、RRP に設置されている類似の装置 i-PCAS (Improved Plutonium Canister Assay System) よりも検出効率を下げている。また、外側のチューブは、カドミウム板を設置し、検出効率の平坦

化を図っている（平成 23 年度の報告書に設置状況の説明あり）。内側のチューブと外側の短い 2 本のチューブは MOX 原料粉末の湿度を測定し、本システムに与える湿度の影響評価などに利用可能である。

本検出器からのデータは将来的には、現在 IAEA で開発中の同時計数装置と PC の両方の機能を兼ね備えたシステム UNAP (The Universal NDA Data Acquisition Platform) に送られることになるが、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。(UNAP を使用する場合は、本箇所は修正)

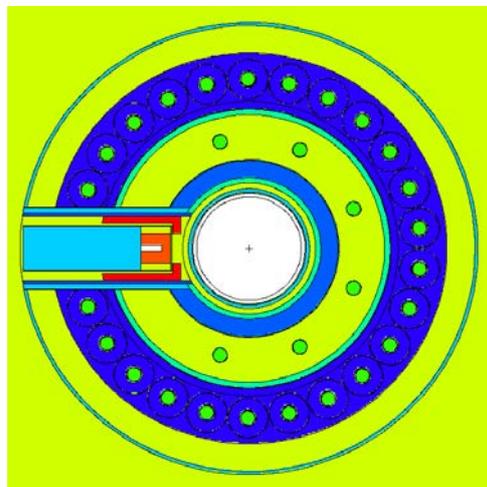


図 1. ^3He チューブの配置図

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 $a=0.2065 \mu\text{s}$ 、 $b=0.0426 \mu\text{s}$ と設定する。ダイアウェイタイムは $20-40 \mu\text{s}$ に設定し、ゲート幅は $24 \mu\text{s}$ と設定する。(参考資料 2 の 22~23 ページ参照)

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 3 台使用し、非立ち合いでの使用が前提であるため、3 台の電気冷却装置 X-Cooler II (空冷の冷却装置) を設置している。

ただし、IPCA のシステムとして統合した際に、電気的なノイズの影響などを低減するため、IPCA 本体には特殊な静電気防止プラスチックの設置も行われている。

各検出器からのデータは、それぞれ ORTEC 社製の計数装置 DSPEC Plus Digital

Gamma-Ray Spectrometer に集められ (3 台)、その後 1 台の評価用の PC で解析される。

ガンマ線検出器のデータに使用されるソフトウェアについては、現在、MGA (Gamma-ray Multi-Group Analysis) コード、FRAM (Fixed-Energy Response-Function Analysis with Multiple Efficiency) コードのバージョン 4 及び 5 が試験されており、最終的に最適なものを IAEA と合意し、使用されることになる。また、非立ち合いでの使用のために必須のガンマ線検出器の冷却のための X-Cooler II については、現在 (2013 年現在)、そのシステムの不安定さが IAEA との間で問題になっており、今後、システムの変更等が要請される可能性がある。

2.3. ロードセル

ロードセルは共和の LTZ-500KA というモデル 3 台により構成されている。

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. IPCAシステム全体

IPCA の設置される場所におけるメンテナンスの可能性を考慮し、IPCA 本体を回転可能な架台に設置している。なお、回転時には、中性子検出器部分のみで行う。



図 2. 架台に設置された IPCA (中性子検出器、ガンマ線検出器、ロードセルの一部及び仮の ID カメラ)

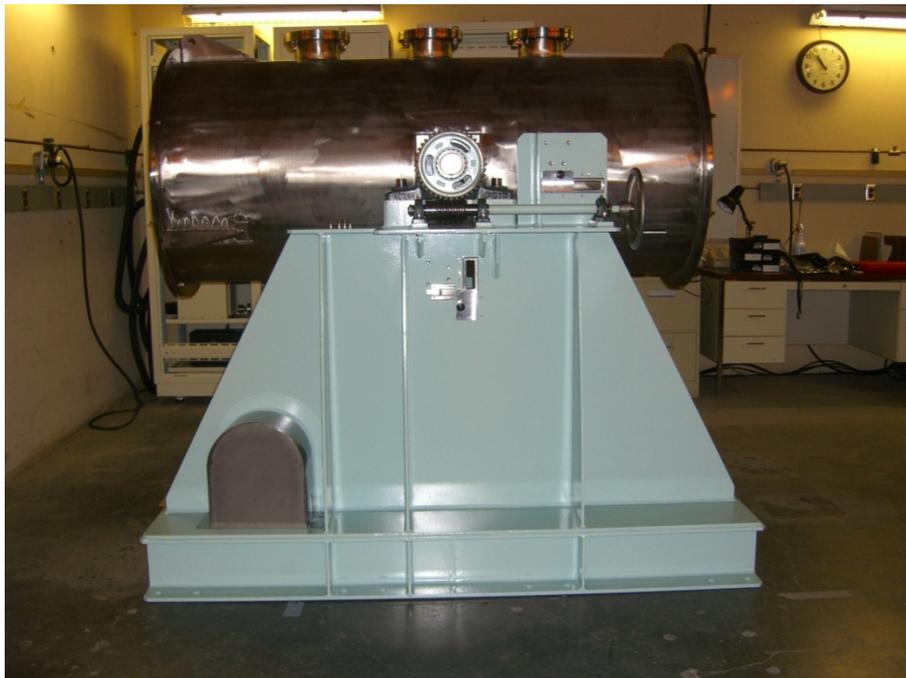


図 3. 回転時の IPCA（中性子検出器のみ）

通常、IPCA は測定場所に設置した際には、すべてのシステムを組み上げた状態で、バックグラウンドの測定、Cf 線源を使用した測定（中性子検出器及びガンマ線検出器）を行い、その後構成された重錘でロードセルの動作確認を行い、LANL でのデータと比較し、正常な運転を行っていることを確認する。（正常な運転を行っているかどうかの確認には、参考文献 2 の 25 ページ（中性子検出器）、使用する線源により 27～30 ページ（ガンマ線検出器）を基準として評価する）

なお、設置後は、非立ち合いモードで常時測定を行っており、RRP における IAEA との議論を参考にすると定期的なメンテナンスは不要である可能性が高いが、年に一度の Cf 線源を使用した中性子及びガンマ線検出器の較正及びロードセルの較正（PIV 時）及び IAEA が要求する場合は、実際に MOX 原料粉末が入った MOX 原料粉末容器での測定を行う（現在、通常運転を行っていない RRP の i-PCAS では、IAEA は毎月一度、同じ MOX 原料粉末容器を繰り返し測定し較正としている。）

ただし、機器の不具合等によるメンテナンスが必要になった、もしくは IPCA の構成検出器の取り外し（特にガンマ線検出器）等が起こった場合には、必要に応じて、本動作確認を行い、IPCA の機能が設計通りであることを確認してから、使用する。

3. 較正手順

ここでは、一番最初に施設に設置する場合及び構成機器の取り外しを伴う修理等を伴うような機器のメンテナンスを行った後に、IPCA を測定可能状態とするような動作確認を行うための較

正手順について記述する。

4. ノーマリゼーション

ノーマリゼーションとは、一定期間に一度実施することにより、ノーマリゼーションとノーマリゼーションとの間の測定結果を保証するために行う確認行為のことである。

4.1. 中性子検出器

まずは、年に一度 (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)、必ず実施すべきノーマリゼーション手順については、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) を使い、 ^{252}Cf 線源 (LANL 推奨) を MOX 原料粉末容器の収納箇所に入れ、測定を行う。基本的には、参考文献 2 の 25 ページの管理限界との比較により、評価を行う。なお、この線源を使用する較正については、IAEA 及び日本側が立ち合って行う。

次に IAEA が要求する可能性のある較正についてであるが、JMOX においては、MOX 原料粉末貯蔵区域は、当該キャンペーンに必要な MOX 原料粉末を必要に応じて RRP の MOX 原料粉末貯蔵庫から地下トレンチを経由して、運び込まれる。そのため、JMOX 側での貯蔵量は必要最小限を想定しており、現在、RRP に対して要求しているようなスタンダードとなるようなフルに充填された MOX 原料貯蔵容器を置いておくスペースはない。そのため、本要求があった場合は、参考文献 1 の 17 ページにあるように、IAEA、日本政府及び施設が共同で必要なスタンダードの準備を行わないといけない。

4.2. ガンマ線検出器

年に一度、 ^{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)

4.3. ロードセル

較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、較正を行う。

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、較正された重錘を使用し、参考文献 2 の手順に従い、再較正する。

4.4. IDカメラ

ID カメラについては、その映像の状況を確認し、ID が読み取れるかどうか、視野などの確認を行う。

5. 非立ち合いでの測定

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 UNAP、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 カメラはそれ本体、そして、ロードセルは IAEA に確認が必要）により暗号化され、ネットワーク経由で IAEA のサーバーに自動的に保管される。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、日本側にも送られる (参考資料 3)。ただし、当該データネットワークについては、まだ完全に設計が済んでいないため、今後、IAEA との議論が必要。

そのため、日本側では、日本側の査察官室において本データの解析を行う。

中性子測定器では 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。

6. 査察時の測定

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、MOX 原料粉末容器の測定時には、被爆の観点から立ち合いが難しい。

そのため、RRP の i-PCAS の査察時の測定のように、データをネットワーク経由で IAEA のサーバーに送り、その後、IAEA 及び日本側の評価ステーションに送り評価する。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。

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 チューブに直接関連する部分においては過去の経験からプリベンティブ・メンテナンスなどは機器の故障につながる可能性が高いために行わない。

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

ロード・セルについても基本的には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、設置状況の狂い（接地面が床面と水平化どうか）が測定に影響を与えることもあるため、測定精度に注意を払う。

参考資料：

- [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 にて)

中性子検出器の異常の発見手順

目的：

機器の故障の発見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. 1200V から 1900V の間で 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の計数は、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）を与える。
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点滅の頻度が上がる。
6. 印加電圧を掛けなければ点滅はせず、湿気による故障がある場合は、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. 1200V から 1900V の間で 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. 中性子線源の計数は、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 より低い電圧での、及び適切なチャンネル (LED ライト) より前のチャンネルでの早い点滅の頻度を示す。
6. 圧力の低下にともなう利得の増加は、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）。こうしてガンマ線源なしで問題を診断することができる。
7. 前置増幅器の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) で低下した、または不安定な信号を出す。

8. 信号ケーブルの問題により、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。

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、大型 MOX 燃料加工施設の 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。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、申告値を検認する。

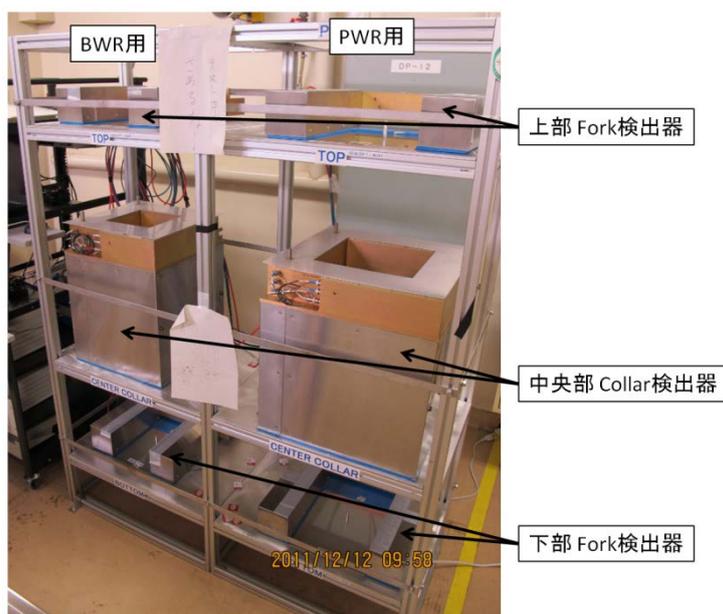
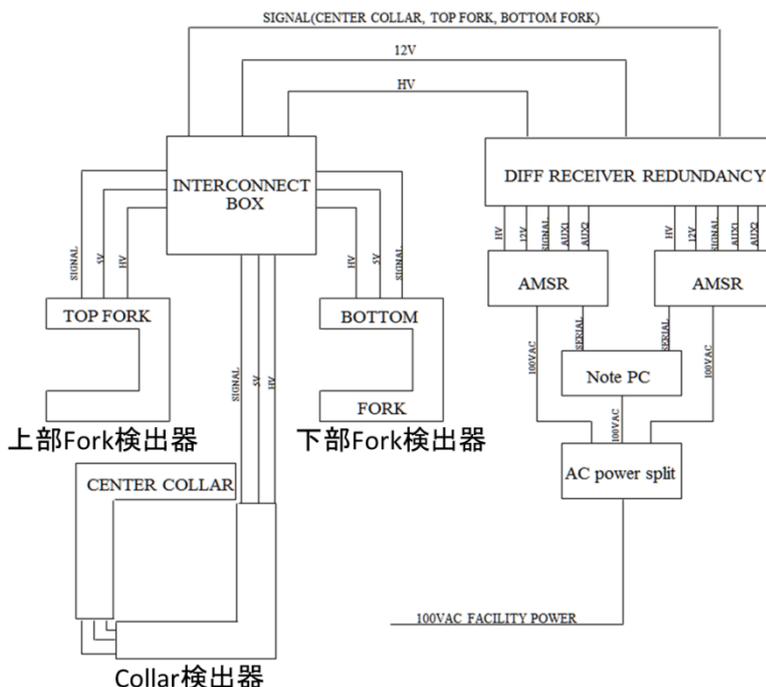


図 1. AFAS の外観（左：BWR 用、右：PWR 用）



INTERCONNECT BOX	HV及び前置増幅器用電源を分岐させ各検出器に供給する。
DIFF RECEIVER REDUNDANCY	信号系統を分岐させシステムの冗長化を図る装置。
AMSR	計数装置。信号処理及び電源供給を行う。

図 2. AFAS のシステム構成のブロックダイアグラム

2. セットアップ手順

AFAS のシステム構成を図 2 に示す。図 2 にあるとおりに AFAS を組み立てる。(JAEA から JNFL へ輸送し、組み立て直すことを想定して、各機器を接続するケーブルの配線等の写真をカメラで撮影し掲載する予定)

3. 中性子測定装置の使用前点検手順

組み立て後、中性子測定装置は、²⁵²Cf 線源を用いた健全性確認を行う。(ソフトウェア上での操作画面を掲載予定)

(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) 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

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

- i. ^{252}Cf 線源を Collar 検出器中心部に設置する。
- ii. 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。
- iii. ^{252}Cf 線源を上部 Fork 検出器中心部に設置する。
- iv. ii を行う。
- v. ^{252}Cf 線源を下部 Fork 検出器中心部に設置する。
- vi. ii を行う。

4. 検認測定手順

検認測定の前に 3 の (1) - (4) の手順に従い、ノーマリゼーション測定を実施する。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

5. ^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. 1200V から 1900V の間で 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の計数は、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) を与える。
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点滅の頻度が上がる。
6. 印加電圧を掛けなければ点滅はせず、湿気による故障がある場合は、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. 1200V から 1900V の間で 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. 中性子線源の計数は、通常のプロトー曲線と同じ形（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 より低い電圧での、及び適切なチャンネル (LED ライト) より前のチャンネルでの早い点滅の頻度を示す。
6. 圧力の低下にともなう利得の増加は、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）。こうしてガンマ線源なしで問題を診断することができる。
7. 前置増幅器の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) で低下した、または不安定な信号を出す。
8. 信号ケーブルの問題により、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。

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、大型 MOX 燃料加工施設で収去される 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。大型 MOX 燃料加工施設では、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

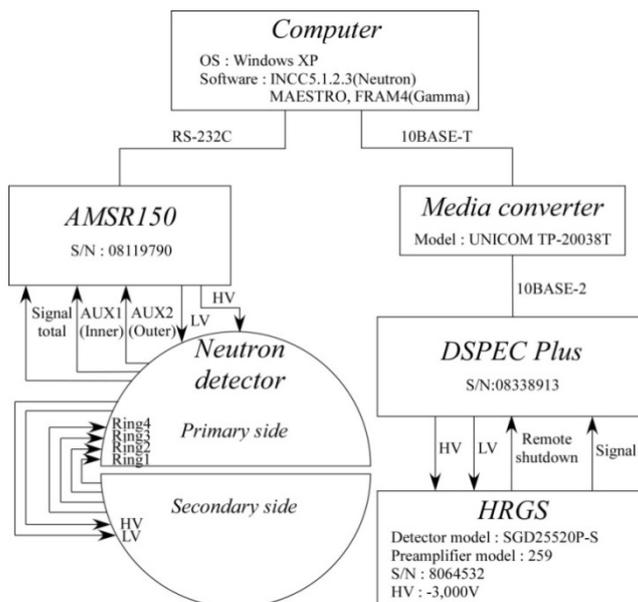


図 2. AVIS のシステム構成のブロックダイアグラム

表 1. 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. セットアップ手順

AVIS のシステム構成を図 2 に示す。システムを構成する各機器の説明を表 1 に示す。図 2 にあるとおりに AVIS を組み立てる。(JAEA から JNFL へ輸送し、組み立て直すことを想定して、各機器を接続するケーブルの配線等の写真をカメラで撮影し掲載する予定)

3. 中性子測定装置の使用前点検手順

組み立て後、中性子測定装置は、 ^{252}Cf 線源を用いた健全性確認を行う。(ソフトウェア上での操作画面を掲載予定)

(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

- i. ^{252}Cf 線源を挿入棒に装着し、図 3 のように中性子測定装置下部にある挿入口へ挿入する。
- ii. 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 3. ^{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 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

i. 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。

ii. DSPEC Plus の電源ボタンを押し、電源を投入する。

iii. 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

i. MAESTRO の Property から HV の操作画面を表示する。

ii. HV を -3000V に設定し、ON にする。

4. 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

5. ^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. 1200V から 1900V の間で 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の計数は、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）を与える。
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点滅の頻度が上がる。
6. 印加電圧を掛けなければ点滅はせず、湿気による故障がある場合は、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. 1200V から 1900V の間で 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. 中性子線源の計数は、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 より低い電圧での、及び適切なチャンネル (LED ライト) より前のチャンネルでの早い点滅の頻度を示す。
6. 圧力の低下にともなう利得の増加は、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）。こうしてガンマ線源なしで問題を診断することができる。
7. 前置増幅器の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) で低下した、または不安定な信号を出す。
8. 信号ケーブルの問題により、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。