

本資料は 年 月 日付で登録区分、
変更する。

[技術情報室]

廃棄物コンテナ非破壊測定装置 (WCAS) 1号機の開発

—特性試験及びIAEAアクセプタンステスト報告—

(技術報告)

2002年2月

核燃料サイクル開発機構
東 海 事 業 所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

本資料は、核燃料サイクル開発機構の開発業務を進めるために作成されたものです。したがって、その利用は限られた範囲としており、その取扱には十分な注意を払ってください。この資料の全部または一部を複写・複製・転載あるいは引用する場合、特別の許可を必要としますので、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)





廃棄物コンテナ非破壊測定装置 (WCAS) 1号機の開発

—特性試験及びIAEA アクセプタンステスト報告—

(技術報告)

館野久夫, 小林茂*, 土居健二*, 高橋進吾*, 大村憲次**, 後藤安志

要 旨

プルトニウム燃料センターでは、コンテナに収納された放射性固体廃棄物に含まれるプルトニウム量を測定するため、1996年、廃棄物収納コンテナ用の非破壊測定装置を第3開発室 (PFPF) へ導入し、本装置を計量管理機器として使用するための特性試験を1998年11月から2000年1月まで実施した。

次いで2000年3月にIAEAによるアクセプタンステストを受検し、2000年6月に査察機器としての使用を開始した。

WCAS#1の主な特性は次のとおりである。

- (1) 測定誤差と検出下限値は、測定時間が長くなると小さくなる傾向にある。
- (2) 実廃棄物コンテナ1基の測定時間は、3600秒(コンテナ:1800秒+AAS:1800秒)とする。
- (3) 測定誤差は、実廃棄物コンテナ1基の測定時間3600秒(コンテナ:1800秒+AAS:1800秒)では、約5%(1 σ)以下であった。
- (4) 検出下限値は、コンテナ測定時間1,800秒では、約5mg(²⁴⁰Pu-eff)であった。

プルトニウム燃料センター 環境保全部 環境管理課

* 原子力技術株式会社

** 現プルトニウム燃料センター 技術支援Gr.



Development of Waste Container Assay System(WCAS) #1
— Calibration and IAEA Acceptance Test for WCAS#1 —
(Technical Document)

Hisao TATENO Shigeru KOBAYASHI* Kenji DOI* Singo TAKAHASHI*
Kenji OHMURA** Yasushi GOTO

Abstract

The Plutonium Fuel Center at Tokai Works has developed Waste Container Assay System to assay the amount of plutonium in a waste container. The Center has installed this equipment at PFPF in 1996 and had also calibrated this equipment to use as an accountancy control device since November of 1998 to January of 2000.

Acceptance test for WCAS#1 was performed by IAEA in March of 2000, it has been used at safeguard inspection since June of 2000.

The main characterization of WCAS#1 are as follows:

- (1) The assay error and the lower limits of detection decreases with a long time determination.
- (2) A suitable time of the determination for the WCAS#1 is 3600 seconds (waste container:1800 sec+AAS:1800sec).
- (3) The assay error with this assay time is about 5%(1 σ).
- (4) The calculated lower limits of detection for WCAS#1 is about 5mg(²⁴⁰Pu-eff.)for 1800 seconds.

Plutonium Fuel Center Waste Management Division Waste Management Section

* Nuclear Technology & Engineering Co. LTD

** Plutonium Fuel Center Technical Assistance Group

目 次

1. はじめに	1
2. 装置の概要	2
2.1 概略構造	2
2.2 測定原理	5
3. 試験スケジュール	6
4. 標準試料	8
4.1 MOX 標準試料	8
4.2 中性子線源	10
5. 供試体	11
5.1 模擬廃棄物コンテナ	11
5.2 試験治具	12
5.3 模擬廃棄物	13
6. 特性試験	14
6.1 高電圧プラトー特性	14
6.1.1 概要	14
6.1.2 試験方法	14
6.1.3 試験結果	14
6.2 中性子検出効率	17
6.2.1 概要	17
6.2.2 試験方法	17
6.2.3 試験結果	17
6.3 コンテナ内感度分布 (プロファイル)	20
6.3.1 概要	20
6.3.2 試験方法	20
6.3.3 試験結果	20
6.4 Pu キャリブレーション(検量線の作成)	26
6.4.1 概要	26
6.4.2 試験方法	26
6.4.3 試験結果	26
6.5 AAS キャリブレーション(中性子吸収曲線の作成)	31
6.5.1 概要	31
6.5.2 マトリックスの調整	31

6.5.3	試験方法	32
6.5.4	試験結果	32
6.6	測定誤差評価	37
6.6.1	概要	37
6.6.2	試験方法	37
6.6.3	誤差(error)の定義	38
6.6.4	試験結果	39
6.7	検出下限値	51
6.7.1	概要	51
6.7.2	試験方法	51
6.7.3	試験結果	51
7.	IAEA アケプ タンテスト	56
8.	おわりに	74
9.	参考文献	75

目 次

図 2.1	WCAS1 号機外観	3
図 4.1	MOX 標準試料	9
図 6.1	高電圧プラトー特性	16
図 6.2	中性子検出効率線源位置	18
図 6.3-1	コンテナ内感度分布線源位置	21
図 6.3-2	水平方向の応答性 (X-X')	23
図 6.3-3	水平方向の応答性 (Y-Y')	23
図 6.3-4	水平方向の応答性 (α - α')	24
図 6.3-5	水平方向の応答性 (β - β')	24
図 6.3-6	垂直方向の応答性 (Z-Z')	25
図 6.4-1	Pu キャリブレーション線源位置	28
図 6.4-2	検量線	30
図 6.5-1	AAS キャリブレーション線源位置	33
図 6.5-2	AAS キャリブレーションカーブ	36
図 6.6-1	測定誤差評価試験線源位置 (空コンテナ)	41
図 6.6-2	測定誤差評価試験線源位置 (マトリックスコンテナ)	42
図 6.6-3	Pu 真の値と測定値	47
図 6.6-4	測定時間と誤差の相関	48
図 6.6-5	測定時間と系統誤差の相関	49
図 6.6-6	測定時間と偶然誤差の相関	50
図 6.7-1	検出下限値とサンプル測定時間の相関	54

図 6.7-2	検出下限値とリアルバックグラウンドの相関	55
図 7.1	チェンバ内中性子線源位置	65
図 7.2	チェンバ内中性子検出応答試験 (Bottom to Top)	66
図 7.3	チェンバ内中性子検出応答試験 (Front to Back)	66
図 7.4	チェンバ内中性子検出応答試験 (Left to Right)	67
図 7.5	MOX キャリブレーション線源位置	69
図 7.6	MOX キャリブレーション	70
図 7.7	測定誤差評価試験線源位置	71

表 目 次

表 3.1	試験スケジュール	7
表 4.1-1	短尺ピン番号	8
表 4.1-2	燃料ペレットの分析結果	8
表 5.1	模擬マトリックス	13
表 6.1-1	高電圧プラトー特性試験条件	14
表 6.1-2	高電圧プラトー特性計数率	15
表 6.2-1	中性子検出効率試験条件	17
表 6.2-2	検出効率	19
表 6.3-1	コンテナ内感度分布試験条件	21
表 6.3-2	プロファイル測定結果 (水平方向)	22
表 6.3-3	プロファイル測定結果 (垂直方向)	22
表 6.4-1	Pu キャリブレーション試験条件	26
表 6.4-2	Pu キャリブレーション Pu 標準試料測定結果	29
表 6.5-1	模擬マトリックス	31
表 6.5-2	AAS キャリブレーション試験条件	32
表 6.5-3	AAS キャリブレーション測定データ(1)	34
表 6.5-4	AAS キャリブレーション測定データ(2)	34
表 6.5-5	AAS キャリブレーション結果	35
表 6.6-1	測定誤差評価試験条件	38
表 6.6-2	測定誤差評価試験結果(1)	43
表 6.6-3	測定誤差評価試験結果(2)	44
表 6.6-4	測定誤差評価試験結果(3)	45
表 6.6-5	誤差及びその内訳	46
表 6.7-1	バックグラウンド測定条件	51
表 6.7-2	検出下限値とサンプル測定時間の相関	53
表 7.1	アクセプタンステストのスケジュール	57
表 7.2	アクセプタンステスト実施項目及び結果	58
表 7.3	バックグラウンド測定及び測定条件	59
表 7.4	AAS(FTC-CF-737)初期値及び測定条件	60
表 7.5	Normalization 初期設定値及び測定条件	61
表 7.6	AAS Authentication 初期設定比及び測定条件	62

表 7.7	検出効率試験結果	62
表 7.8	PSMC による Certification 試験結果	63
表 7.9	不感時間係数算出結果	63
表 7.10	ダイアウェイタイム試験結果	64
表 7.11	キャリブレーション測定結果	70
表 7.12	総合誤差評価試験結果	72

写 真 目 次

写真 2.1	WCAS1 号機外観	4
写真 2.2	コンテナ配置	4
写真 5.1	模擬廃棄物コンテナ外観	11
写真 5.2	試験治具外観	12

1. はじめに

放射性固体廃棄物に含まれるプルトニウム量(以下、「Pu量」という。)の測定は、核物質の計量管理及び保障措置上必要である上に、取扱い時の安全性及び処理・処分にかかわる安全評価の上でも重要である。

放射性固体廃棄物の収納容器は、200ℓドラム缶、ミニコンテナ及びコンテナに大別される。ドラム缶及びミニコンテナに収納した放射性固体廃棄物に含まれるPu量を測定する廃棄物ドラム非破壊測定装置(Waste Drum Assay System; 以下、「WDAS」という。)は、既に実用化している¹⁾。

東海事業所プルトニウム燃料センターでは、WDASの使用実績を踏まえ、コンテナに収納した放射性固体廃棄物に含まれるPu量の測定用として、廃棄物コンテナ非破壊測定装置(Waste Container Assay System; 以下、「WCAS」という。)の開発を行った。

WCAS1号機(以下、「WCAS#1」という。)は、英国AEA Technologyが製作したものであり、1996年7月にプルトニウム燃料第三開発室に導入し、その後、1998年11月より特性試験を開始し、2000年3月に国及びIAEAのアクセプタンステストを経て、計量管理機器及び査察機器として運用を開始した。

本報告書は、WCAS#1の概要、特性試験の方法・結果とIAEAが実施したアクセプタンステストについてまとめたものである。

2. 装置の概要

WCAS#1は、WDASの知見・経験を基に中性子測定（パッシブ中性子同時計数法）と、 γ 線測定（高分解能 γ 線スペクトル分析法）が同時に行われるハイブリット型測定装置である²⁾。

WCAS#1は、Pu量の測定精度向上のため、廃棄物母材（以下、「マトリックス」という。）による中性子散乱・吸収（以下、「マトリックス効果」という。）を補正する線源付加（Add-A-Source；以下、「AAS」という。）法を組み込んだ。³⁾

なおAAS法とは、廃棄物コンテナの外側表面近くに配置した²⁵²Cf中性子線源からの中性子測定データによる未知のマトリックス効果を補正する方法である。

2.1 概略構造

WCAS#1は、測定チェンバを有する本体と、コンピュータ等を収納した操作キャビネットからなり、その外観を図2.1、写真2.1及び写真2.2に示す。

測定対象廃棄物コンテナの測定チェンバへの出し入れは、機器側面に取付けたドア開閉制御スイッチの操作で行う。測定チェンバ内には、廃棄物コンテナの総重量を量るロードセルを組み込んでいる。

チェンバ内6面に設置された高密度ポリエチレンの中には、³Heが4気圧で充填された径50.8mmの比例計数管計64本（上下面24本、側面40本）が埋め込まれている。チェンバの内側には高密度ポリエチレンの損傷を防ぐためアルミニウム板が内張されている。

機器本体左右の側面には、Pu同位体組成を測定する高純度ゲルマニウム（以下、「HPGe」という。）検出器4台及び検出器を冷却するための30ℓ液体窒素デューワー4台を据付けている。HPGe検出器は、コンテナからの γ 線を効率よく測定するために、高さ方向で底面から1/2、奥行き方向で手前から1/3及び2/3の距離に配置している。

²⁵²Cf線源は、テレフレックス製のケーブル先端に取付け、機器本体上部に設置した線源貯蔵箱からフライト管を通して、予め指定されているコンテナの側面位置及び底面位置にコンピュータ制御で移動できるようになっている。

²⁵²Cf線源の制御及び測定データを収集するためのコンピュータシステム、中性子計数機器及び γ 線計数機器は、装置から離れた操作キャビネットに収納している。

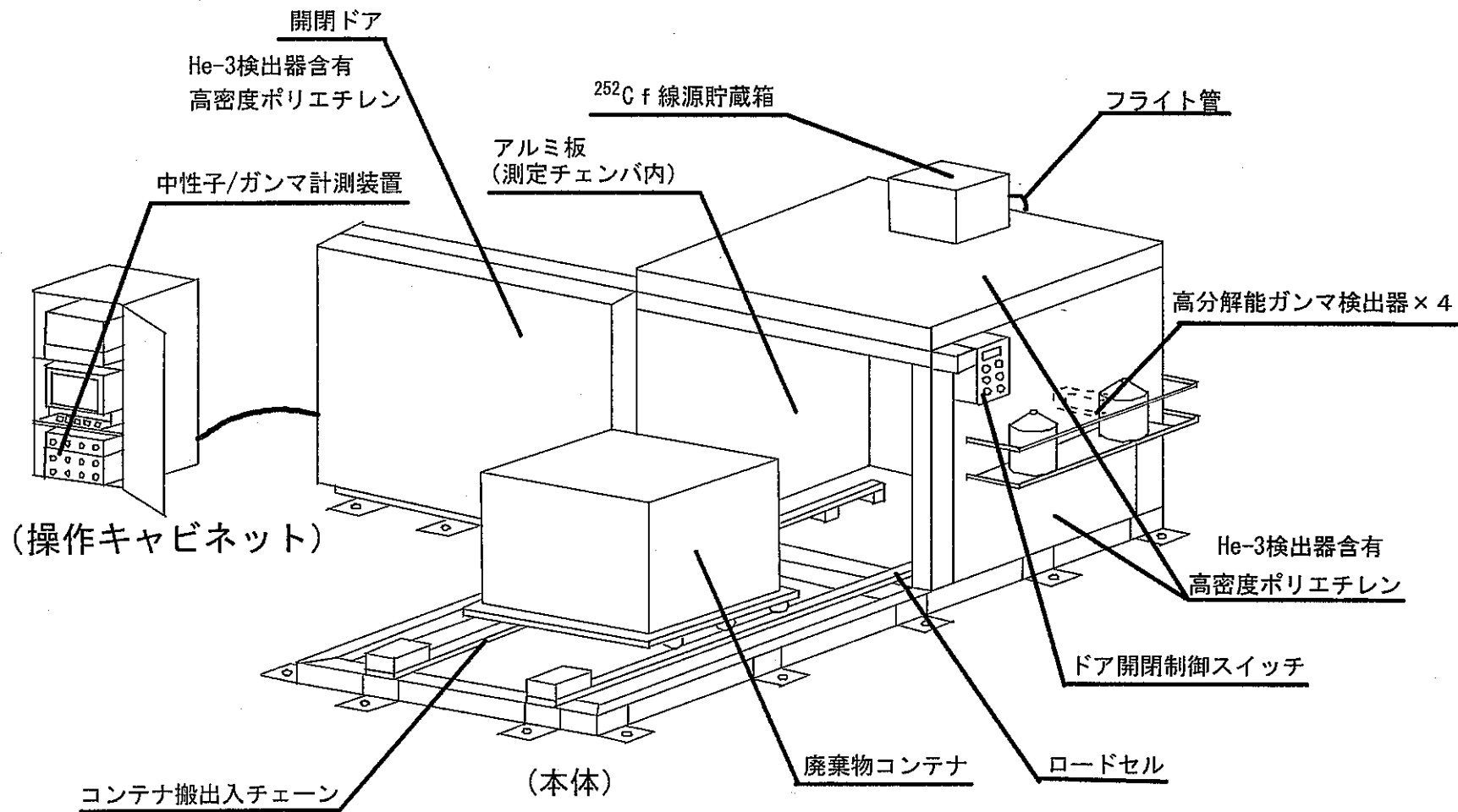


図2.1 WCAS1号機外観

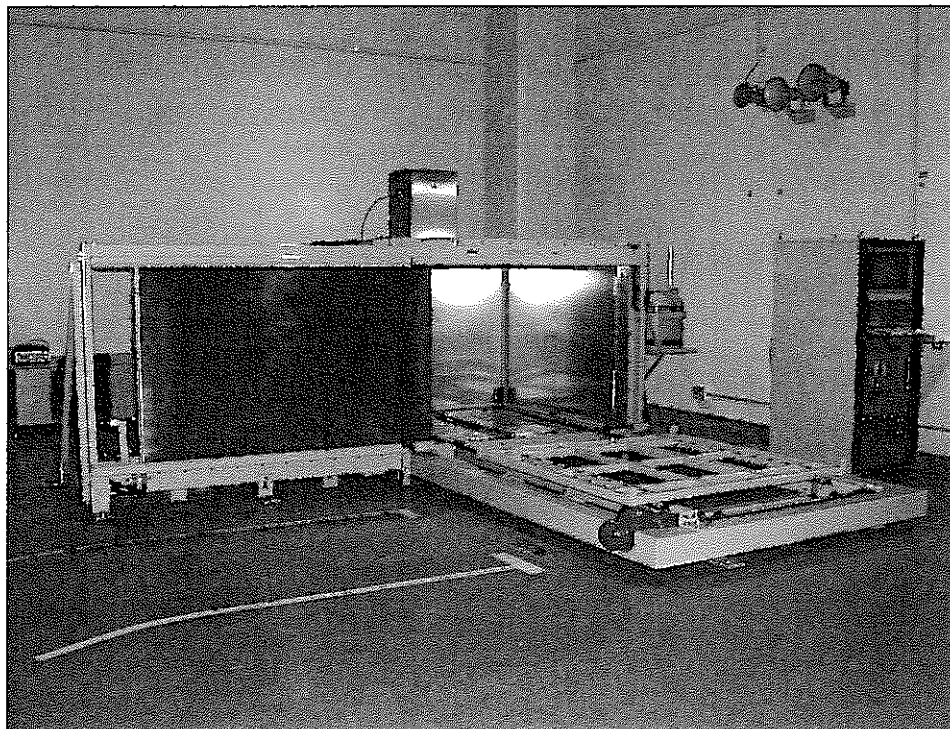


写真2.1 WCAS1号機外観

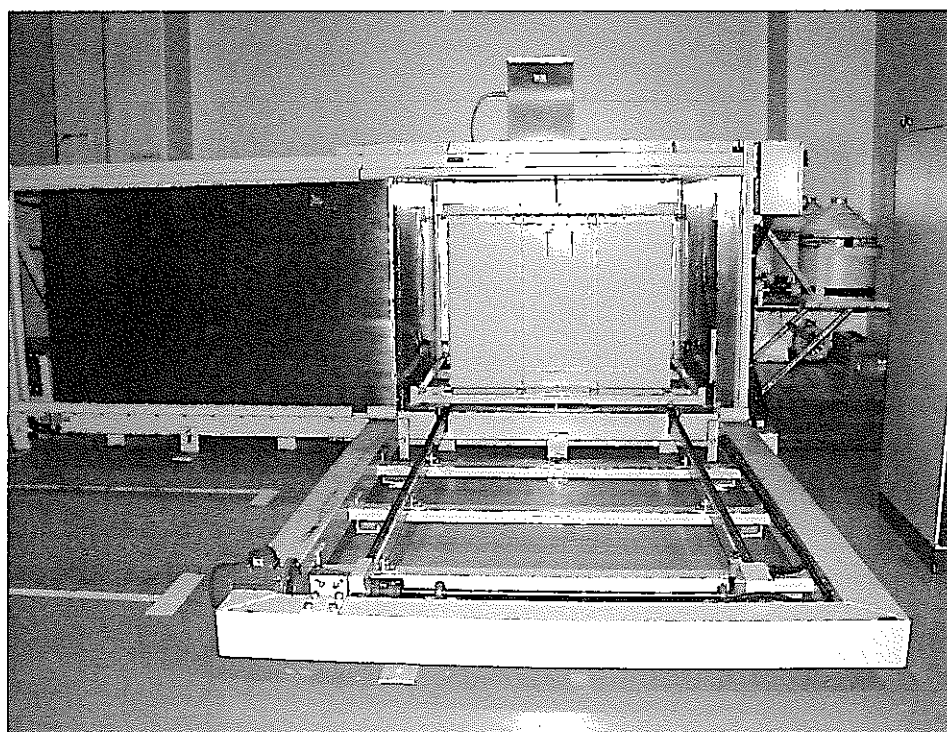


写真2.2 コンテナ配置

2.2 測定原理

廃棄物コンテナ内の偶数番 Pu 核種(^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu)から発生した自発核分裂性中性子 (同時に 2 個以上の中性子が発生)及び (α , n) 反応で生じる単一中性子は、高密度ポリエチレン中で減速され熱中性子となる。この熱中性子は ^3He 比例計数管内で ^3He 原子と反応し、その結果電気パルスを発生させる。これらのパルスは増幅器/弁別器で計数可能な形状に成型されたあと中性子計数器へ送られる。中性子計数器の同時計数回路では全計数パルスから同時性中性子パルスを分別し、分別された Real Count がコンピュータに送られ Real Rate に変換される。

Real Rate は、AAS 法によって得られる AAS 補正係数(Correction Factor ; 以下、「CF」という。)でマトリックス効果が補正される。

補正後の Real Rate は検量線を使って Pu 実効質量 (以下、「 $^{240}\text{Pu-eff.}$ 」という。)に換算される。 $^{240}\text{Pu-eff.}$ は、中性子発生割合から ^{240}Pu 以外の核種を ^{240}Pu 量に換算したものである⁴⁾。

また、同時に HPGe 検出器で得られた γ 線スペクトルにより Pu 同位体組成比が計算され $^{240}\text{Pu-eff.}$ から Pu 量に変換する。

3. 試験スケジュール

試験のスケジュールを表 3.1 に示す

表3.1 試験スケジュール

項目	年		1999 (H11)												2000 (H12)			
	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4
1 高電圧プラト特性	■																	
2 中性子検出効率		■																
3 コンテナ内感度分布 (プロファイル)					■	■												
4 Puキャリブレーション (検量線の作成)						■	■											
5 AASキャリブレーション ・中性子線源 ・MOX標準試料 ・AAS駆動装置修理							■	■	■	■	■	■						
6 測定誤差評価試験 ・空コンテナ ・マトリックスコンテナ		■	■	■	■	■								■	■	■		
7 検出下限値													■					
8 IAEAアクセプタンステスト (2/28~3/3)																	■	

4. 標準試料

4.1 MOX 標準試料

MOX 標準試料については、NDA(Non-Destructive Assay)機器の校正用として、1996年に製造加工部加工課が製造した燃料ピンを用いた。⁶⁾ 使用材料は、高速増殖炉 実験炉「常陽」燃料用の部材及び燃料ペレットで、形状は全長 420mm 短尺ピンに、燃料ペレット 33 個入りの A タイプと燃料ペレット 3 個入りの B タイプを使用した。図 4.1 に MOX 標準試料の概略図を示す。

本試験で使用した標準試料の短尺ピン番号及び燃料ペレットの分析結果を表 4.1-1 及び表 4.1-2 に示す。

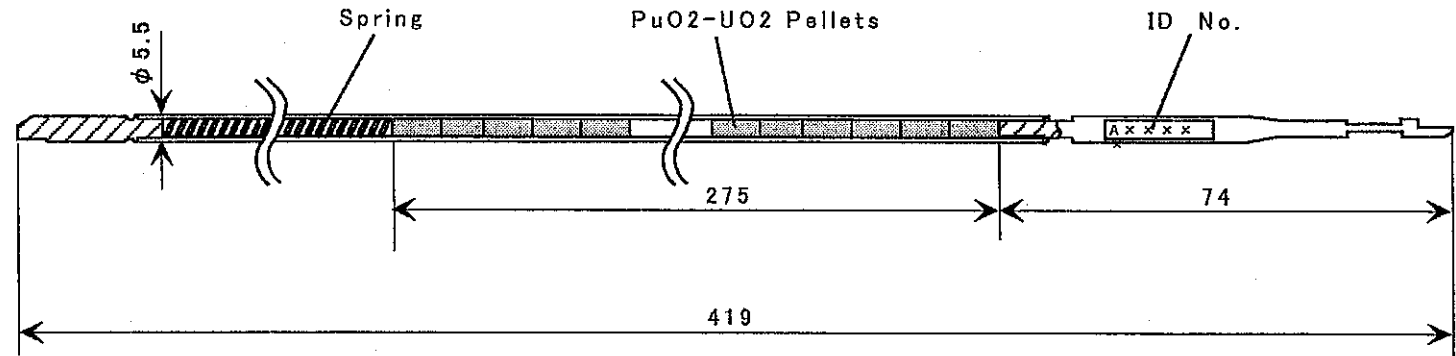
表 4.1-1 短尺ピン番号

タイプ	A
ピン番号	A60654, A60655, A60656, A60657, A60658, A60659, A60660, A60661, A60662, A60663 (計 10 本)
タイプ	B
ピン番号	B66301, B66302, B66303, B66304, B66305, B66306, B66307, B66308, B66309, B66310, B66311, B66312, B66313, B66314, B66315, B66316, B66317, B66318, B66319, B66320, B66321, B66322, B66323, B66324, B66325, B66326, B66327, B66328, B66329, B66330, B66331, B66332 (計 32 本)

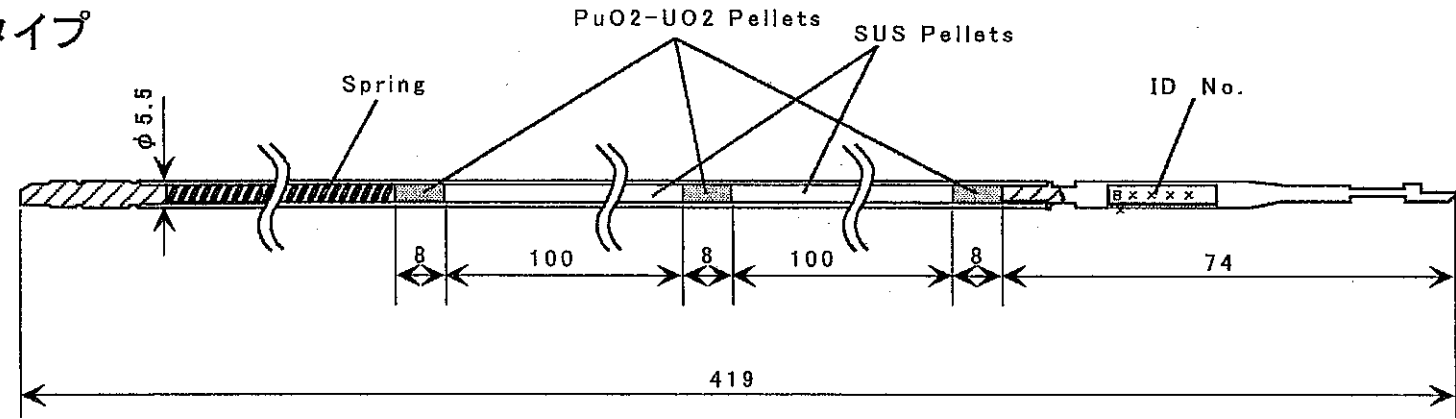
表 4.1-2 燃料ペレットの分析結果

製造ロット番号	L2CA0211
プルトニウム含有率 (1996.7.19)	26.11 wt%
ウラン含有率	61.74 wt%
プルトニウム同位体組成 (1996.7.19)	^{238}Pu 1.245 wt% ^{239}Pu 60.604 wt% ^{240}Pu 25.451 wt% ^{241}Pu 8.169 wt% ^{242}Pu 4.531 wt%
ウラン濃縮度	18.629 wt%
アメリカウム (1996.7.24)	5,900ppm

Aタイプ



Bタイプ



: mm

図4.1 MOX標準試料

4.2 中性子線源

^{252}Cf (No. FTC-CF-736)

中性子発生率 : 120,400 n/s (1996.2.5)

5. 供試体

5.1 模擬廃棄物コンテナ

試験に使用した模擬廃棄物コンテナは、定型コンテナ(外寸：1280mm^L×1280mm^W×1056mm^H)で、プルトニウム燃料センターで発生するコンテナの大部分はこの形状である。外観を写真 5.1 に示す。



写真5.1 模擬廃棄物コンテナ外観

5.2 試験治具

試験治具は、MOX 標準試料を指定された箇所配置するためのものである。コンテナを上面方向から見て 16 分割し、その中心に MOX 標準試料が挿入できるように、パイプを配置したもので、今回の試験用に製作したものである。試験治具の外観を写真 5.2 に示す。

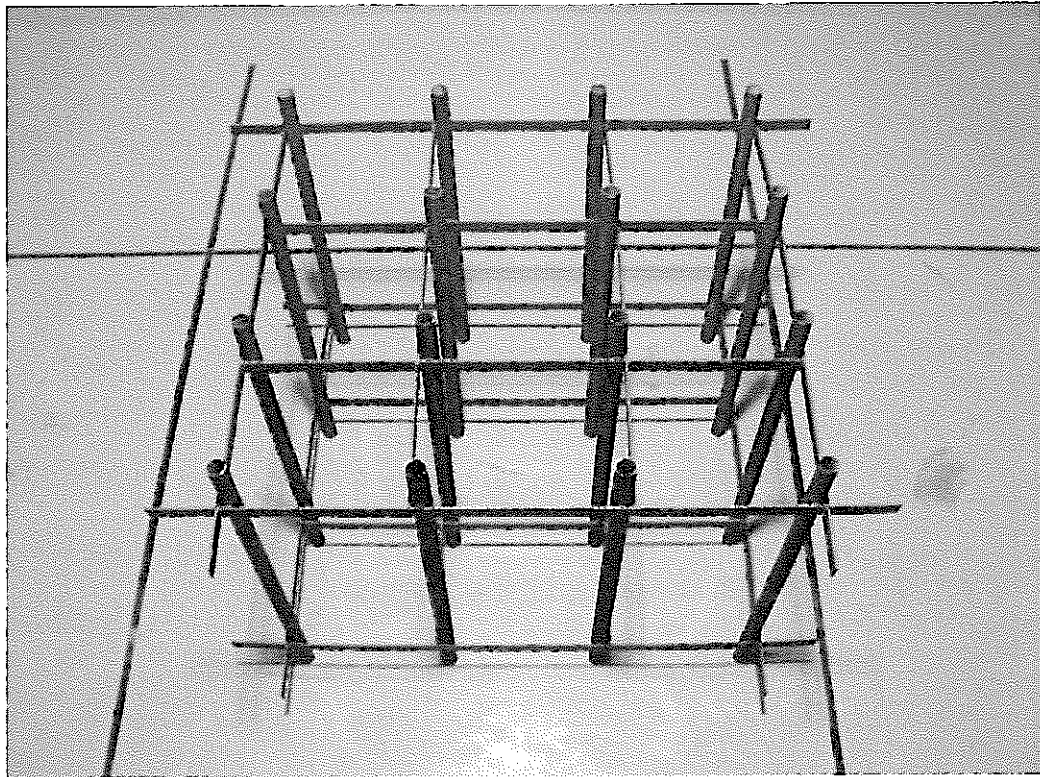


写真5.2 試験治具外観

5.3 模擬廃棄物

実廃棄物コンテナに収納される放射性固体廃棄物は、木片類・プラスチック類・ポリ塩化ビニル(PVC)類及び金属類に分類される。

試験において、マトリックス効果をパラメータとするために7種類の模擬マトリックスを作製した。

試験で使用した模擬マトリックスの種類を表 5.1 に示す。

模擬マトリックスの作成にあたっては、高密度ポリエチレン、ポリウレタン、ビニルバック、酢酸ビニル及び鉄を選択し、それらの混合体をコンテナ内に均一に分布するようにアレンジした。

本報告で模擬廃棄物を使った試験は、「6.5 AAS キャリブレーション試験(中性子吸収曲線の作成)」及び「6.6 測定誤差評価試験」に示す。

表 5.1 模擬マトリックス

コンテナ	マトリックス					
	高密度ポリエチレン	ポリウレタン	ビニルバック	酢酸ビニル	鉄	
					鋼材	試験器具
A	無	無	無	無	無	○
B	無	無	○	○	○	○
C	無	○	○	○	○	○
D	無	○	○	○	○	○
E	無	○	○	○	○	○
F	○	○	○	○	○	○
G	○	○	○	○	○	○

6. 特性試験

6.1 高電圧プラトー特性

6.1.1 概要

WCAS#1 購入時に設定されている³He 比例計数管の作動高電圧 1750V が、プラトー領域内であることを確認する。

6.1.2 試験方法

中性子線源を装置チェンバ中心に配置し、³He 比例計数管の印加電圧を 1300 V から 2380 V まで 20 V 毎に変化させ、全計数率（以下、Total Rate）を測定する。試験条件を表 6.1-1 に示す。

表 6.1-1 高電圧プラトー特性試験条件

線源位置	チェンバ中心
測定時間	各 180 秒(60 秒×3 回)
評価	計数率(Total Rate)

6.1.3 試験結果

³He 比例計数管にかける印加電圧 20 V 毎の Total Rate 測定結果を表 6.1-2 に、プラトー特性を図 6.1 に示す。

図 6.1 から、プラトー領域は約 1700~2000V であり、WCAS#1 購入時に設定されている³He 比例計数管の印加電圧は 1750V で、プラトー領域内であることが確認された。これは、プラトーの下限值の約 50V 高い値であった。

なお、一般的には、印加電圧をより高い値に設定した場合、同時計数が高計数率となり、高線量のレベルにおいて、ガンマ線に対する感度が増加するといわれている。

表6.1-2 高電圧プラトー特性計数率

印加電圧 (V)	Total Rate (cps)	印加電圧 (V)	Total Rate (cps)
1300	1.344	1860	6676.960
1320	4.567	1880	6693.059
1340	15.300	1900	6687.683
1360	43.107	1920	6694.331
1380	130.183	1940	6730.177
1400	442.068	1960	6765.046
1420	951.672	1980	6768.114
1440	1432.428	2000	6812.821
1460	2021.751	2020	6848.186
1480	2504.502	2040	6886.233
1500	2943.292	2060	6934.803
1520	3306.453	2080	6956.209
1540	3784.180	2100	7007.286
1560	4319.488	2120	7039.105
1580	4881.209	2140	7091.576
1600	5296.962	2160	7145.315
1620	5733.044	2180	7186.038
1640	6054.363	2200	7283.679
1660	6297.030	2220	7369.350
1680	6483.747	2240	7418.626
1700	6561.191	2260	7503.784
1720	6599.898	2280	7591.917
1740	6638.681	2300	7661.223
1760	6653.821	2320	7752.813
1780	6648.953	2340	7800.112
1800	6681.272	2360	7833.915
1820	6674.337	2380	7840.792
1840	6673.003		

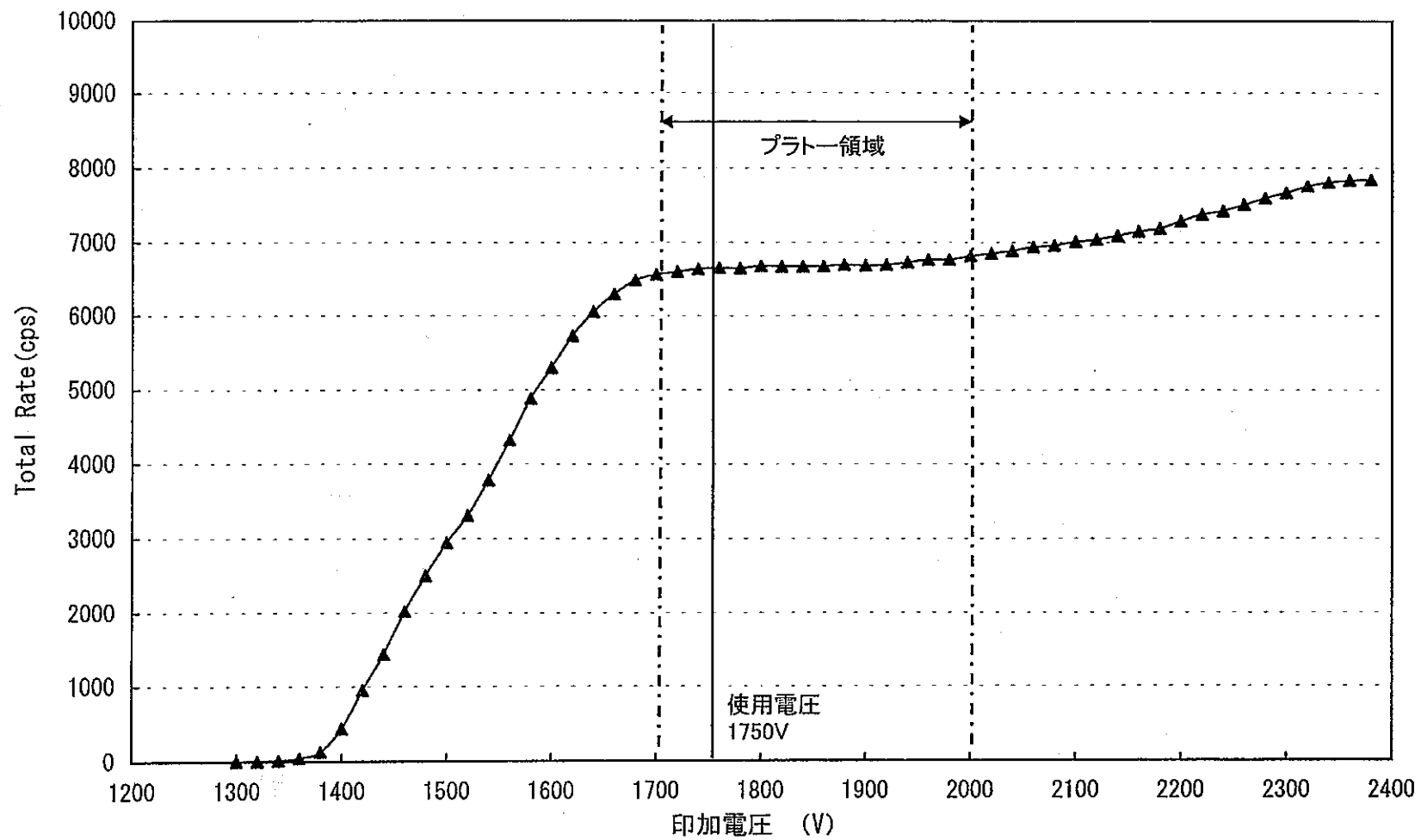


図6.1 高電圧プラトー特性

6.2 中性子検出効率

6.2.1 概要

検出器が線源から放出される中性子を実際に捕らえてカウントできる割合(検出効率)を測定する。

6.2.2 試験方法

中性子線源を装置チェンバ内の空コンテナ内指定箇所に配置し、Total Rate を測定する。試験条件を表 6.2-1 に示す。

表 6.2-1 中性子検出効率試験条件

線源位置	図 6.2 参照 コンテナ垂直方向 3 段, 水平方向 13 箇所の計 39 箇所
測定時間	1000 秒(100 秒×10 回)/1 箇所
評価	検出効率(%)=(Total Rate/ ²⁵² Cf 期待値)×100

6.2.3 試験結果

検出効率の測定結果及び壊変計算後の²⁵²Cf期待値を表 6.2-2 に示す。コンテナ内の最大効率は C8 位置で 13.59%, 最小効率は B11 位置で 12.70%, コンテナ内平均は 13.17%となった。これは WDAS#1 の検出効率 18.60%と比べ低い値となっている。

³He 比例計数管から最も離れているコンテナ中心の B7 位置は 12.85%と低く, 最小効率 B11 を含むドア側右の 11 ライン(A11, B11, C11 位置)が低いのは,³He 比例計数管が内蔵されているドアが, 多少左側に設置されているため WCAS#1 の構造上によるものと考えられる。

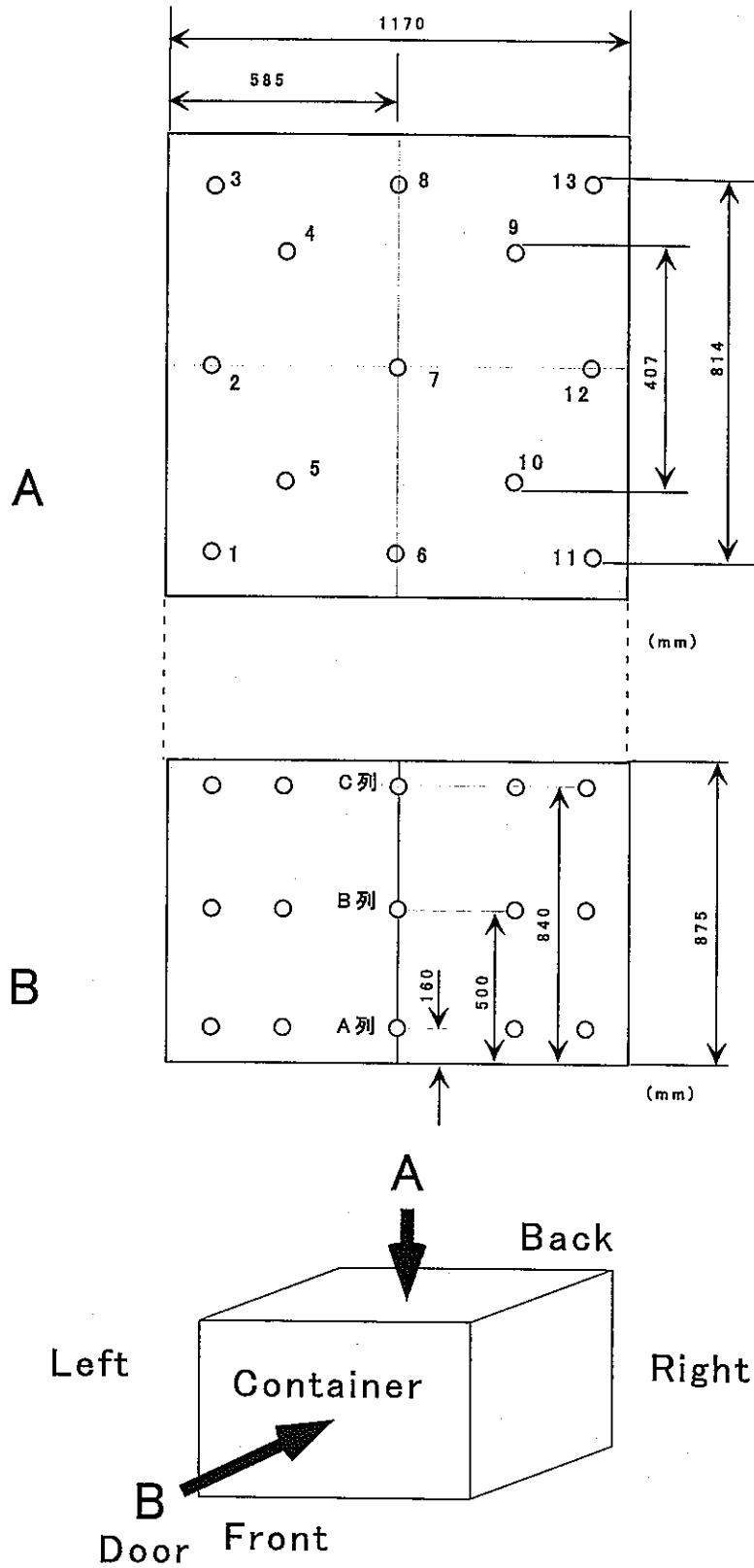


图6.2 中性子検出効率線源位置

表 6.2-2 検出効率

標準線源位置	Total Rate(cps)	Real Rate(cps)	²⁵² Cf 期待値 (n/s)	検出効率 (%)	
A	1	6815.615	879.710	51978.46	13.11
	2	6884.668	902.111	51978.46	13.25
	3	6856.849	898.724	51978.46	13.19
	4	6871.667	896.355	51978.46	13.22
	5	6833.798	887.155	51978.46	13.15
	6	6833.841	889.362	51941.18	13.16
	7	6826.931	888.945	51941.18	13.14
	8	6927.595	920.828	51941.18	13.34
	9	6847.815	894.561	51941.18	13.18
	10	6755.035	866.302	51941.18	13.01
	11	6614.960	816.424	51941.18	12.74
	12	6824.353	887.326	51941.18	13.14
	13	6845.992	886.329	51941.18	13.18
B	1	6797.823	870.670	51978.46	13.08
	2	6810.611	880.895	51978.46	13.10
	3	6838.017	883.046	51978.46	13.16
	4	6750.964	869.927	51978.46	12.99
	5	6716.536	856.694	51978.46	12.92
	6	6751.025	867.954	51941.18	13.00
	7	6669.444	838.513	51903.94	12.85
	8	6845.794	891.444	51903.94	13.19
	9	6741.152	864.425	51903.94	12.99
	10	6651.257	829.546	51903.94	12.81
	11	6594.085	809.278	51903.94	12.70
	12	6761.187	871.052	51903.94	13.03
	13	6843.206	889.667	51903.94	13.18
C	1	6861.418	884.826	51978.46	13.20
	2	7021.199	929.717	51978.46	13.51
	3	6960.401	922.170	51978.46	13.39
	4	7010.767	928.561	51978.46	13.49
	5	6943.082	905.563	51978.46	13.36
	6	6914.574	902.101	51941.18	13.31
	7	6985.574	923.413	51941.18	13.45
	8	7039.466	949.203	51792.36	13.59
	9	6970.537	929.754	51792.36	13.46
	10	6875.882	880.687	51792.36	13.28
	11	6703.105	823.797	51792.36	12.94
	12	6932.381	913.440	51903.94	13.36
	13	6938.428	919.486	51903.94	13.37

MIN

MAX

検出効率 (%) AVE 13.17

6.3 コンテナ内感度分布（プロファイル）

6.3.1 概要

WCAS は、WDAS とは異なり装置チェンバ及び廃棄物コンテナの体積が大きいことから、廃棄物中 Pu の偏在の影響は大きいと考えられる。そこで、中性子線源を装置チェンバ内の空コンテナ内指定箇所に配置し、水平方向及び垂直方向の感度分布を確認する。

6.3.2 試験方法

中性子線源を装置チェンバ内の空コンテナ内指定箇所に配置し、Total Rate と実計数率（以下、Real Rate）を測定する。試験条件を表 6.3-1 に示す。

表 6.3-1 コンテナ内感度分布試験条件

線源位置	水平方向:コンテナ底面から 500mm の位置において 41 箇所 垂直方向:コンテナ中央において7段 図 6.3-1 参照
測定時間	1000 秒(100 秒×10 回)/1 箇所
感度分布 評価	チェンバ内の中心(D6)を 1.0 としたときの各測定点における相 対比

6.3.3 試験結果

コンテナ内感度分布の測定結果及びチェンバ内の中心（D6）を 1.0 としたときの各測定点における相対比を表 6.3-2 及び表 6.3-3 に、水平方向の応答性を図 6.3-2～図 6.3-5 に、垂直方向の応答性を図 6.3-6 に示す。

水平方向の感度分布の最大点はポジション D11 で、Total が 1.073、Real が 1.154 であり、最小点はポジション D22 で、Total が 0.965、Real が 0.903 であった。これによる水平方向の感度分布の幅は、Total で±5.4%、Real で±12.6%となり、全体的にコンテナの中央より³He 比例計数管に近い壁側が大きい傾向にあるが、D22（ドア右）の側壁角側だけが小さくなる傾向にある。

これは、中性子入射角度の影響によるものと考えられ、ドア右の側壁角側だけが小さくなるのは、³He 比例計数管が内蔵されているドアが、多少左側にあるため、WCAS#1 の構造上によるものと考えられる。ただし、実際の廃棄物コンテナでは、D22 位置(角)へ多量の Pu が偏在していることは考えにくいいため、測定値への影響は少ないものと思われる。

垂直方向の感度分布の幅は、Total で±2.9%、Real で±6.4%となる。なお、Real の感度分布幅が大きくなるのは、同時計数法の検出効率が全中性子法の検出効率の 2 乗に比例するためである⁵⁾。

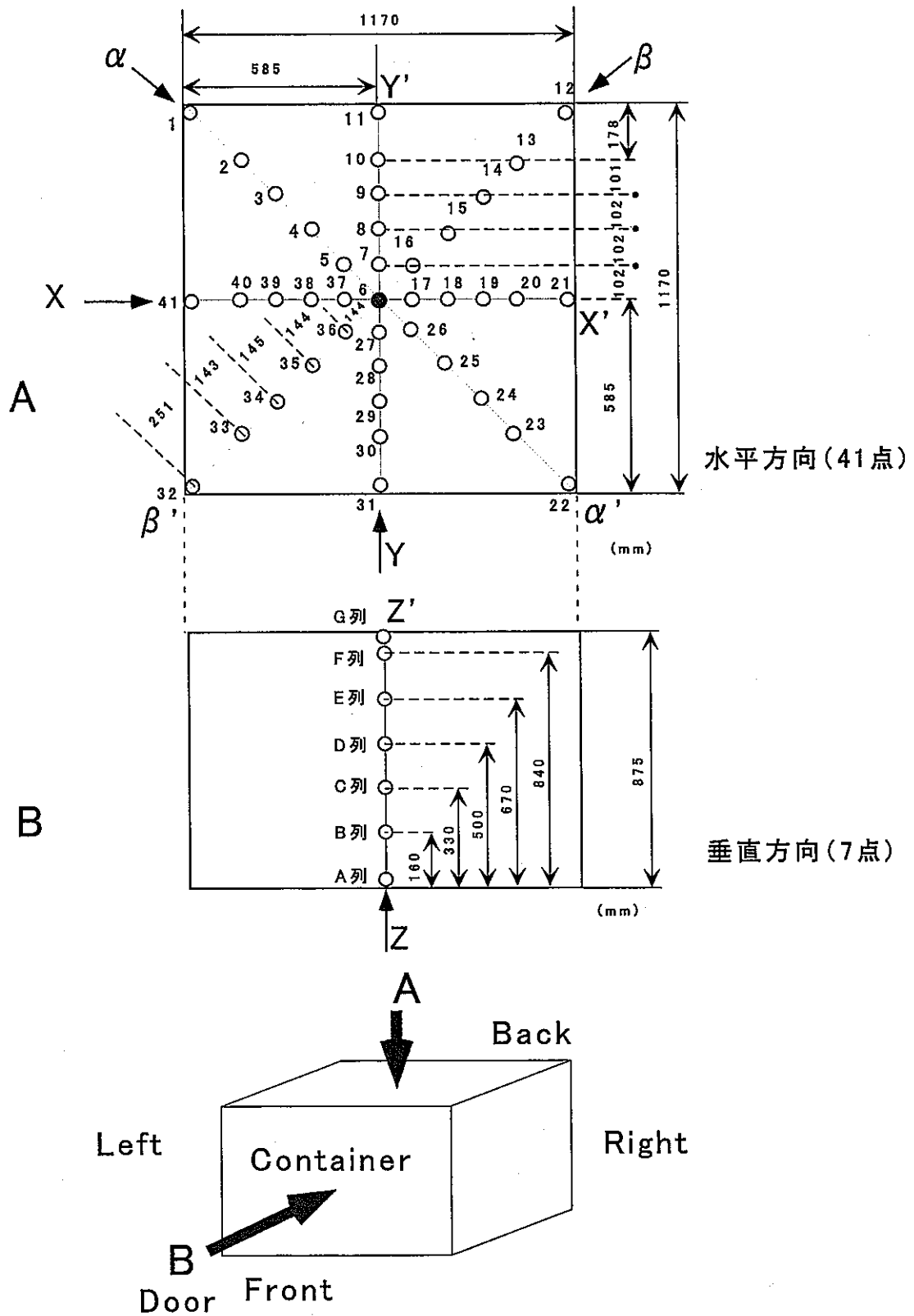


図6.3-1 コンテナ内感度分布線源位置

表6.3-2 プロファイル測定結果
(水平方向)

Measurement time 1000s(100s×10time)

Position	Total Rate (cps)	/ center	Real Rate (cps)	/ center
D 1	6488.351	1.026	832.300	1.047
D 2	6475.209	1.024	836.190	1.052
D 3	6447.631	1.019	838.510	1.055
D 4	6392.775	1.011	823.770	1.036
D 5	6376.125	1.008	808.740	1.017
D 6	6324.647	1.000	795.160	1.000
D 7	6370.701	1.007	815.980	1.026
D 8	6396.587	1.011	826.030	1.039
D 9	6427.731	1.016	829.370	1.043
D 10	6491.880	1.026	845.360	1.063
D 11	6785.989	1.076	917.590	1.164
D 12	6564.622	1.038	854.090	1.074
D 13	6489.426	1.026	843.670	1.061
D 14	6458.325	1.021	835.800	1.051
D 15	6392.648	1.011	819.740	1.031
D 16	6370.364	1.007	811.720	1.021
D 17	6350.628	1.004	815.520	1.026
D 18	6351.945	1.004	807.490	1.016
D 19	6370.329	1.007	798.210	1.004
D 20	6411.647	1.014	826.020	1.039
D 21	6681.438	1.056	887.700	1.116
D 22	6103.971	0.965	717.990	0.903
D 23	6253.184	0.989	767.440	0.965
D 24	6307.872	0.997	784.060	0.986
D 25	6307.401	0.997	786.660	0.989
D 26	6336.615	1.002	802.960	1.010
D 27	6342.206	1.003	813.300	1.023
D 28	6346.237	1.003	810.760	1.020
D 29	6353.291	1.005	798.160	1.004
D 30	6397.420	1.012	822.490	1.034
D 31	6689.731	1.058	888.810	1.118
D 32	6482.338	1.025	823.070	1.035
D 33	6437.148	1.018	824.470	1.037
D 34	6412.330	1.014	811.380	1.020
D 35	6360.174	1.006	811.240	1.020
D 36	6354.248	1.005	811.030	1.020
D 37	6358.187	1.005	810.560	1.019
D 38	6376.161	1.008	805.820	1.013
D 39	6407.211	1.013	828.050	1.041
D 40	6449.257	1.020	834.160	1.049
D 41	6740.268	1.066	918.530	1.155
Ave.	6420.348		822.92	
σ	126.859		35.53	
CV(%)	1.98		4.32	

CV:変動係数(=σ/Ave.×100)

表6.3-3 プロファイル測定結果
(垂直方向)

Measurement time 1000s(100s×10time)

Position	Total Rate (cps)	/ center	Real Rate (cps)	/ center
A 6	6692.400	3.416	896.840	1.128
B 6	6469.350	1.023	842.380	1.059
C 6	6388.640	1.010	816.380	1.027
D 6	6324.650	1.000	795.160	1.000
E 6	6482.370	1.025	828.930	1.042
F 6	6619.680	1.047	875.050	1.100
G 6	6665.180	1.054	871.570	1.096
Ave.	6520.324		846.616	
σ	141.500		36.162	
CV(%)	2.17		4.27	

CV:変動係数(=σ/Ave.×100)

■:最大値

■:最小値

感度分布の幅=(|最大点-1| + |最小点-1|)/2

水平方向の感度分布の幅

Total Rate ±5.4%

Real Rate ±12.6%

垂直方向の感度分布の幅

Total Rate ±2.9%

Real Rate ±6.4%

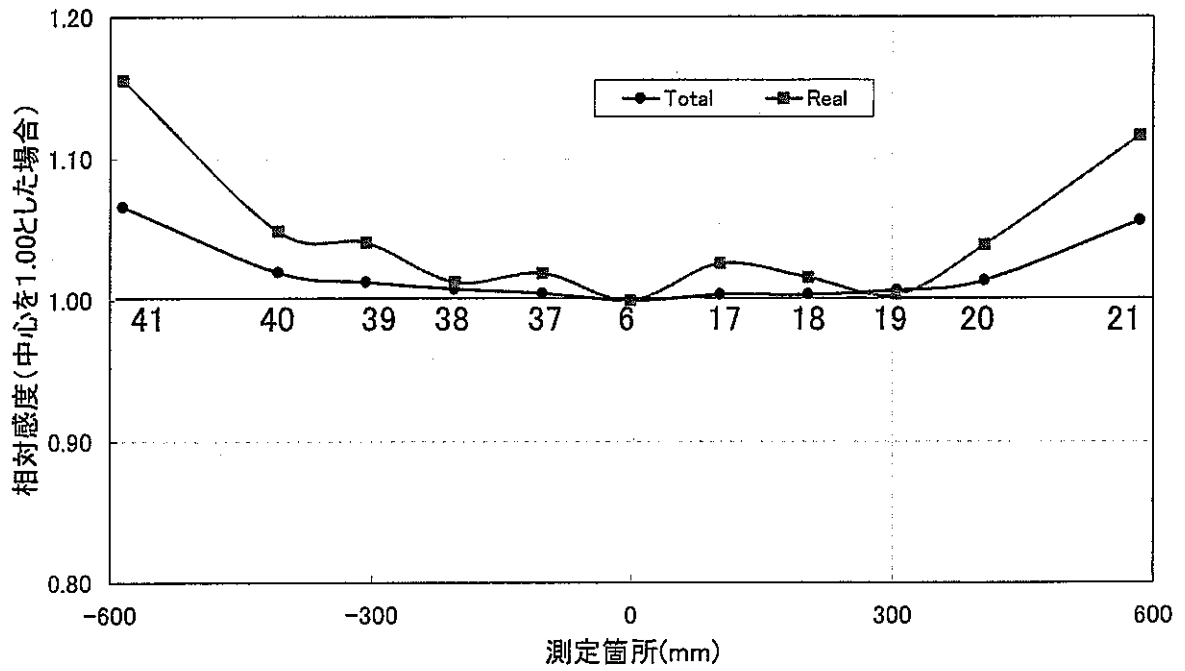


図6.3-2 水平方向の応答性 (X-X')

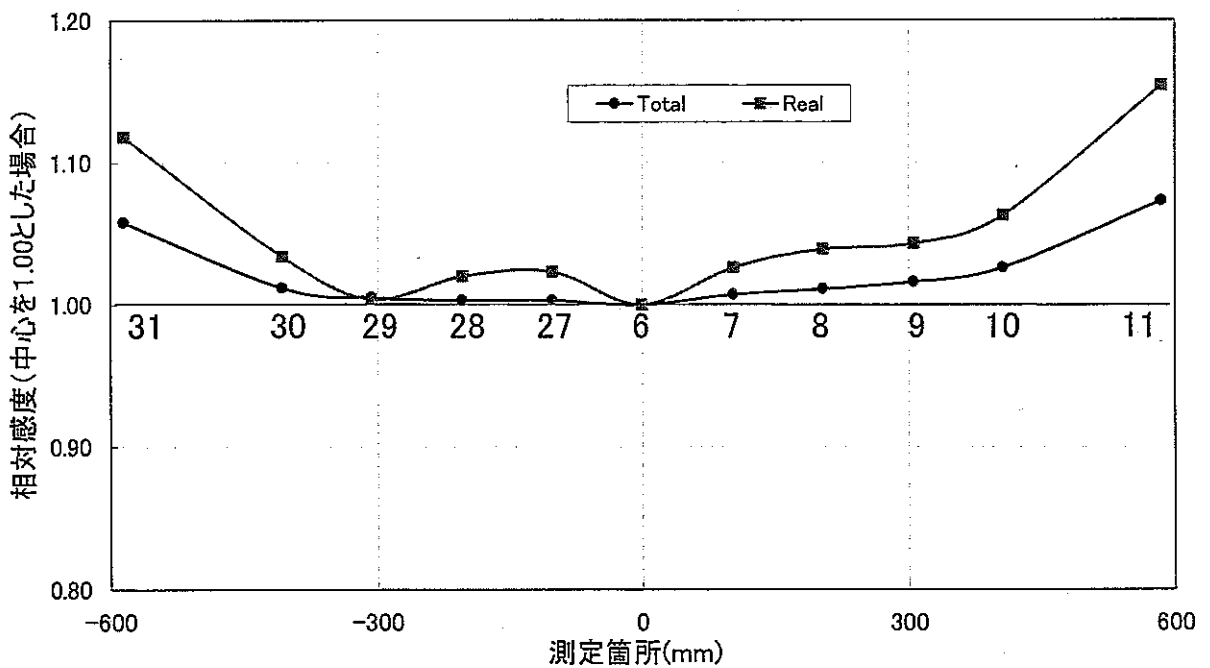


図6.3-3 水平方向の応答性(Y-Y')

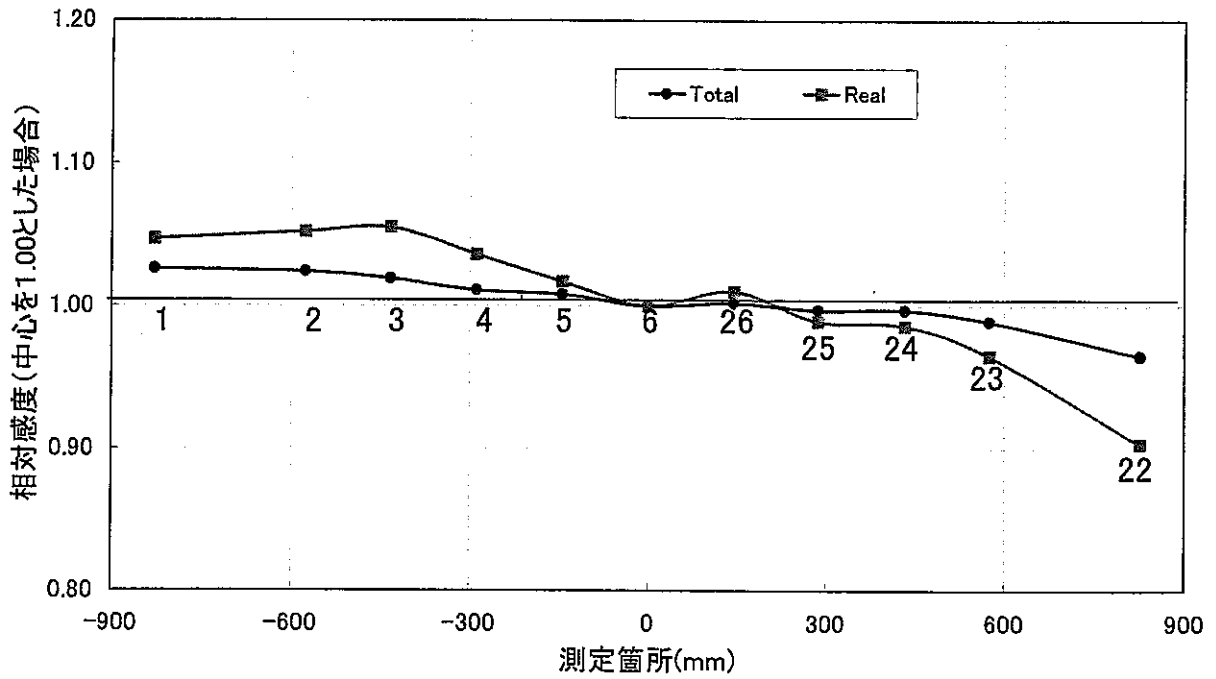


図6.3-4 水平方向の応答性 ($\alpha - \alpha'$)

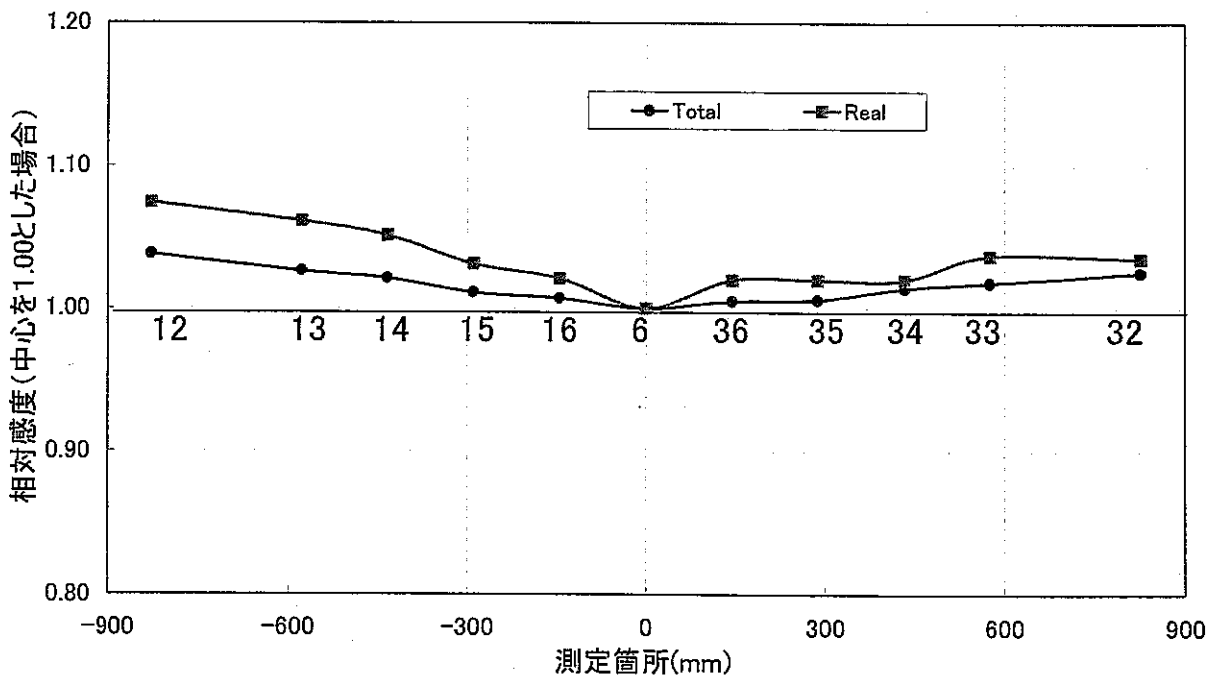


図6.3-5 水平方向の応答性 ($\beta - \beta'$)

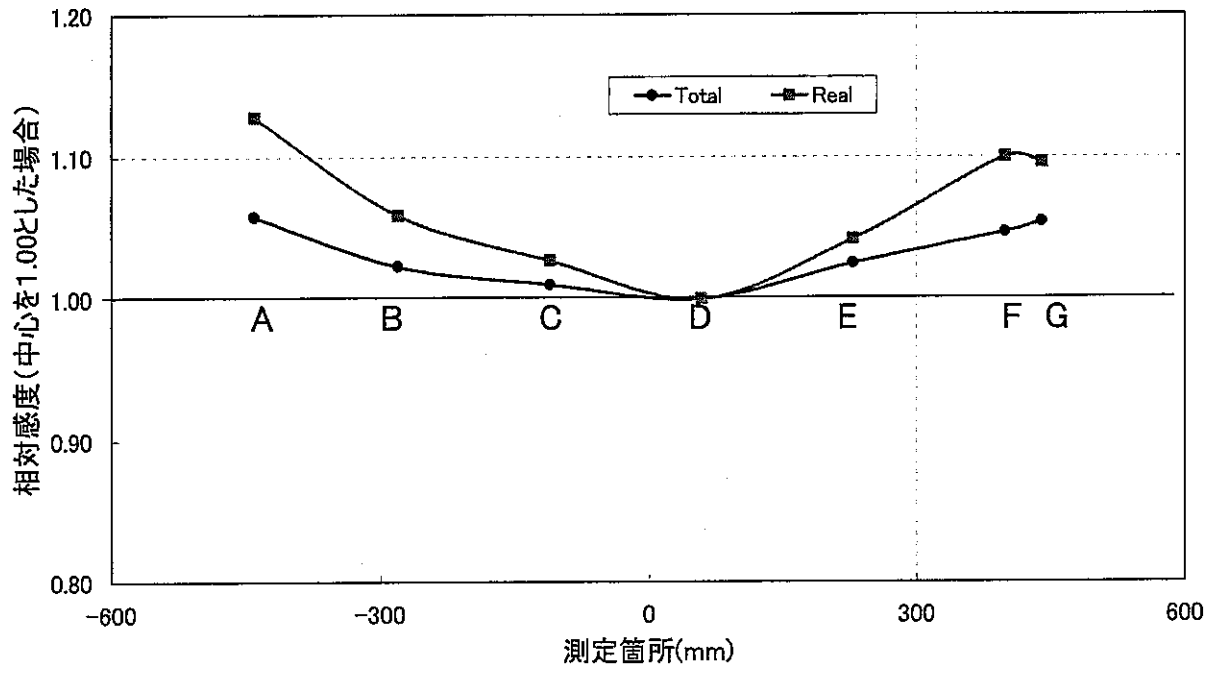


図6.3-6 垂直方向の応答性 (Z-Z')

6.4 Pu キャリブレーション(検量線の作成)

6.4.1 概要

検量線は、同時計数法によって計測された値を $^{240}\text{Pu-eff}$ に変換するために必要なもので、MOX 標準線源を用いた Pu キャリブレーションにより、 $^{240}\text{Pu-eff}$ と計数率の関係を取得する。

一般的に検量線は、マトリックスがない容器に線源を配置して取得するが、実廃棄物マトリックスは種々雑多であるため、それらによるマトリックス効果補正は「6.5 AAS キャリブレーション」の結果を用いることとした。

6.4.2 試験方法

空コンテナを使用し、MOX 標準線源の数量に応じて、コンテナ水平方向は 16 分割及び 4 分割しその中心位置に、またコンテナ垂直方向についてもその中心位置に MOX 標準線源を配置し Real Rate を測定した。試験条件を表 6.4-1 に示す。

表 6.4-1 Pu キャリブレーション試験条件

線源の種類 (Pu 重量)	① 16g-Pu(1g-Pu × 16 本) ② 48g-Pu(12g-Pu × 4 本) ③ 96g-Pu(12g-Pu × 8 本) ④ 120g-Pu(12g-Pu × 10 本)
線源位置	図 6.4-1 参照
測定時間	1200 秒(60 秒 × 20 回)
評価	$^{240}\text{Pu-eff}$ と計数率(Real Rate)

6.4.3 試験結果

Pu キャリブレーションの結果を表 6.4-2、検量線を図 6.4-2 に示す。検量線は、MOX 標準線源の実効質量($^{240}\text{Pu-eff}$)と Real Rate の相関図で表される。

$^{240}\text{Pu-eff}$ は、Pu 同位体の自発核分裂によって発生する中性子、即ち ^{238}Pu , ^{240}Pu , ^{242}Pu から実際に放出される中性子数と同じ数の中性子を放出するような仮想式であり、(6-1)式で表される。

$$^{240}\text{Pu-eff} = 2.52 \times ^{238}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + 1.68 \times ^{242}\text{Pu} \quad (6-1)$$

2.52: ^{240}Pu に対する ^{238}Pu の自発核分裂中性子発生数の比

1.68: ^{240}Pu に対する ^{242}Pu の自発核分裂中性子発生数の比

本試験において使用した MOX 標準試料は、最大が 12g であり、また

細長い形状のため中性子増倍はないものとした。したがって、検量線は(6-2)式で表され、傾きは 10.57 が得られた。

$$R = a \times m \quad (6-2)$$

R=Real Rate(cps)

m=²⁴⁰Pu の実効質量 (g ²⁴⁰Pu-eff)

a=比例定数(検量線の傾き)

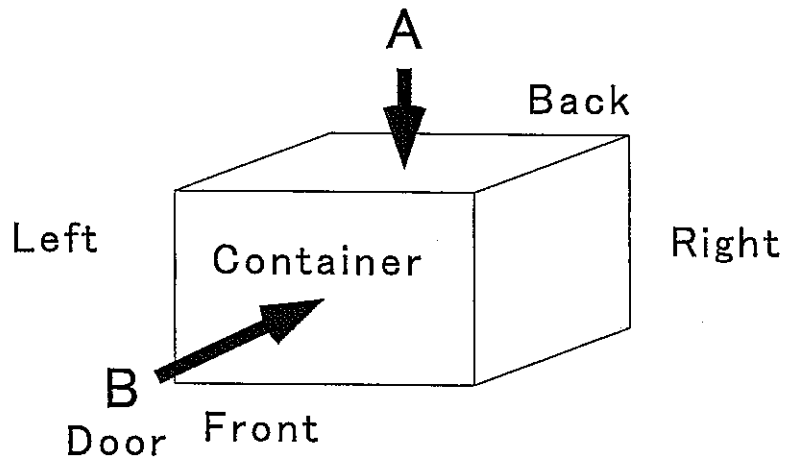
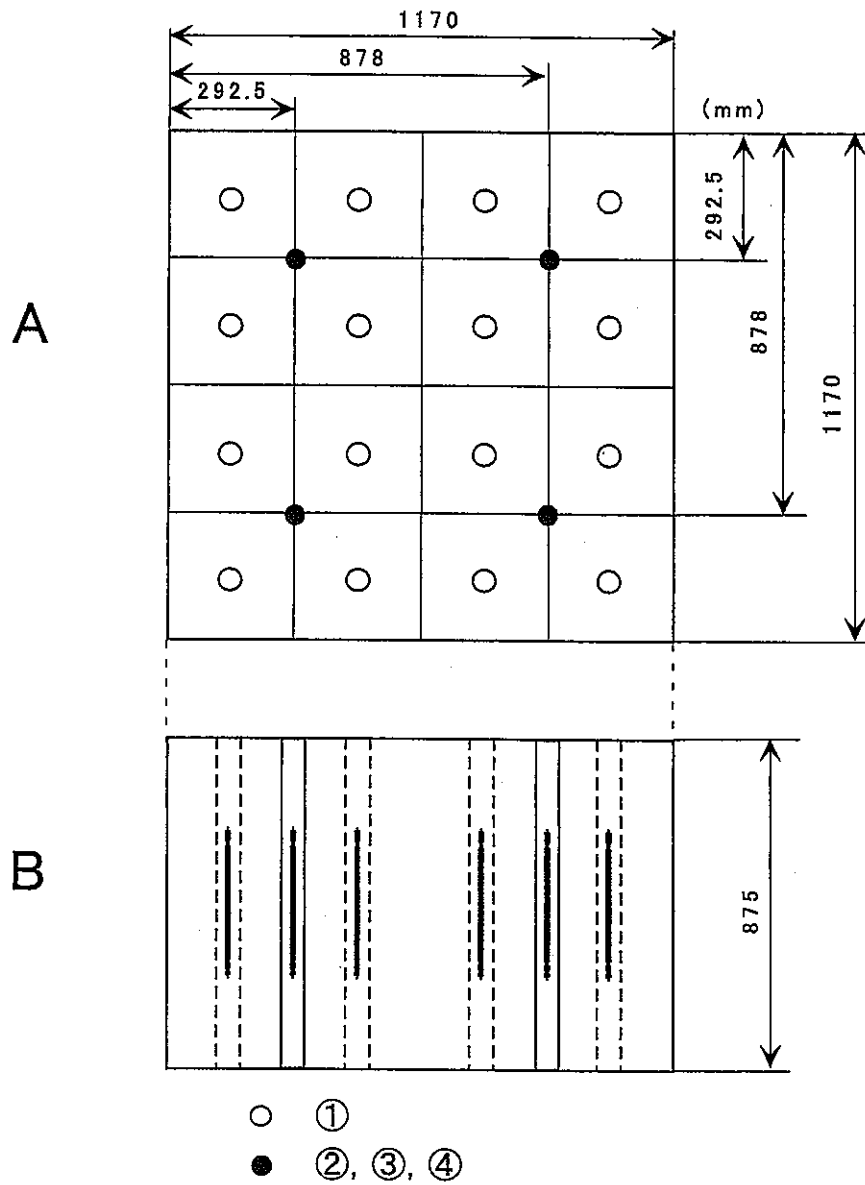


図6.4-1 Puキャリブレーション線源位置

表 6.4-2 Pu キャリブレーション Pu標準試料測定結果

標準線源	Pu量(g) (LN補正後)	²⁴⁰ Pu-eff. (g)	Real Rate (cps)	σ
120g-Pu	122.45	44.777	475.383	± 7.410
96g-Pu	97.90	35.800	376.573	± 5.761
48g-Pu	49.02	17.925	189.027	± 3.919
16g-Pu	17.41	6.366	65.617	± 1.121

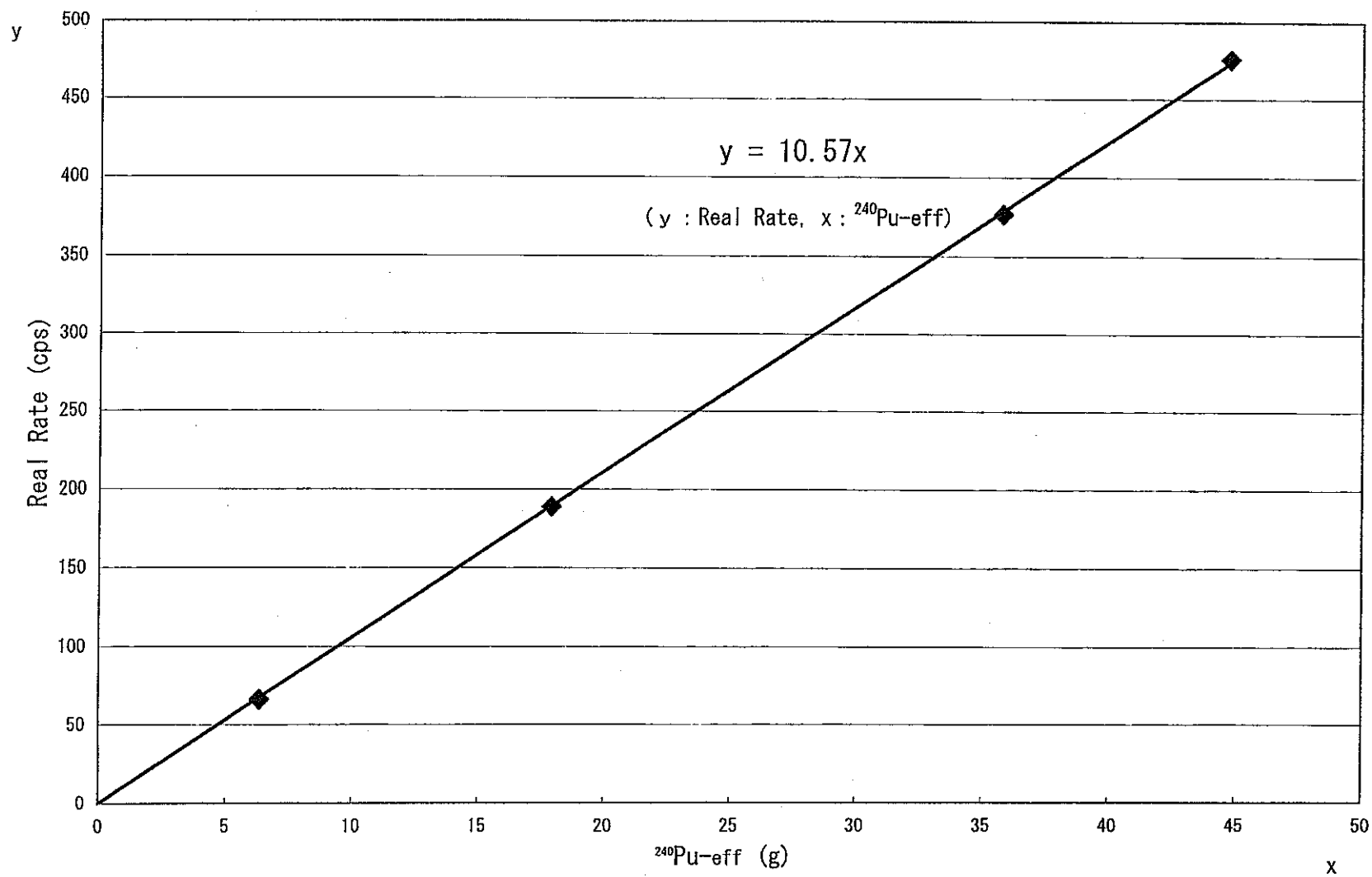


図6.4-2 検量線

6.5 AAS キャリブレーション(中性子吸収曲線の作成)

6.5.1 概要

WCAS の測定対象物である廃棄物コンテナは、容量がドラム缶の約 5 倍、廃棄物の重量は約 20 倍と多く、そのマトリックスは種々雑多である。

廃棄物コンテナ内で発生する中性子の中には、マトリックスに含まれる水素等による散乱・吸収で計数されないものがある。このマトリックス効果の度合いが、マトリックスの種類・密度等に依存することから模擬廃棄物を使って、これらマトリックス効果の補正式を求める。

6.5.2 マトリックスの調整

コンテナの AAS Perturbation (以下, AAS Pert.) をパラメータに 7 基のコンテナを作製した。模擬マトリックスの種類を表 6.5-1 に示す。

マトリックスサンプルは、表 6.5-1 に示す高密度ポリエチレン、ポリウレタン、ビニルバック、酢酸ビニル及び鉄で構成されており、均一分布になるようにアレンジした。

AAS Pert. は、AAS²⁵²Cf 線源の既知の計数率及びマトリックス効果の影響を受けた計数率から算出され、値が大きいほどマトリックス効果の影響があることを示している。

なお、コンテナ C, D, E 及び F, G は、マトリックスの種類をそろえ、各マトリックスの重量を変化させることにより、コンテナ毎の水素の割合を変化させ、マトリックス効果の度合いが異なるように調整したため AAS Pert. 値が異なっている。

表 6.5-1 模擬マトリックス

コンテナ	マトリックス						AAS Pert.
	高密度ポリエチレン	ポリウレタン	ビニルバック	酢酸ビニル	鉄		
					鋼材	試験治具	
A	無	無	無	無	無	○	0.000
B	無	無	○	○	○	○	0.179
C	無	○	○	○	○	○	0.266
D	無	○	○	○	○	○	0.418
E	無	○	○	○	○	○	0.451
F	○	○	○	○	○	○	0.764
G	○	○	○	○	○	○	0.870

6.5.3 試験方法

コンテナ水平方向は 16 分割した中心位置に、またコンテナ垂直方向についてもその中心位置に 1g-Pu の MOX 標準試料を配置し Real Rate を測定した。試験条件を表 6.5-2 に示す。

表 6.5-2 AAS キャリブレーション試験条件

線源の種類 (Pu 重量)	16g-Pu(1g-Pu×16 本)
線源位置	図 6.5-1 参照
測定時間	MOX 標準試料 :1000 秒(100 秒×10 回) AAS(×2 Position) :500 秒(100 秒×5 回)
繰り返し測定回数	各測定時間×3 回
評価	MOX 標準試料及び AAS の計数率(Real Rate)

6.5.4 試験結果

7 基のコンテナを用いて測定したデータを表 6.5-3 及び表 6.5-4 に示し、7 個の AAS pert. x と Volume Average Perturbation (以下, Vol. Ave. pert.) y を整理し表 6.5-5 に示す。なお, 表 6.5-5 の AAS pert. は表 6.5-3 の AAS Position 1 及び AAS Position 2 の計 6 データを平均したものである。

表 6.5-5 のデータをデミングコードを使用してプロットしたところ、図 6.5-2 及び(6-3)式の中性子吸収曲線(マトリックス効果補正式)が得られた。

$$y=0.5074x^3+3.2620x^2+0.1306x \quad (6-3)$$

x : AAS Perturbation

y : Volume Average Perturbation

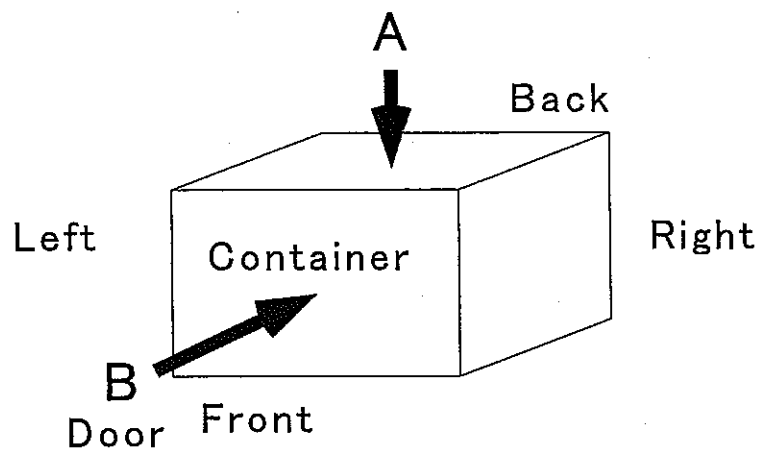
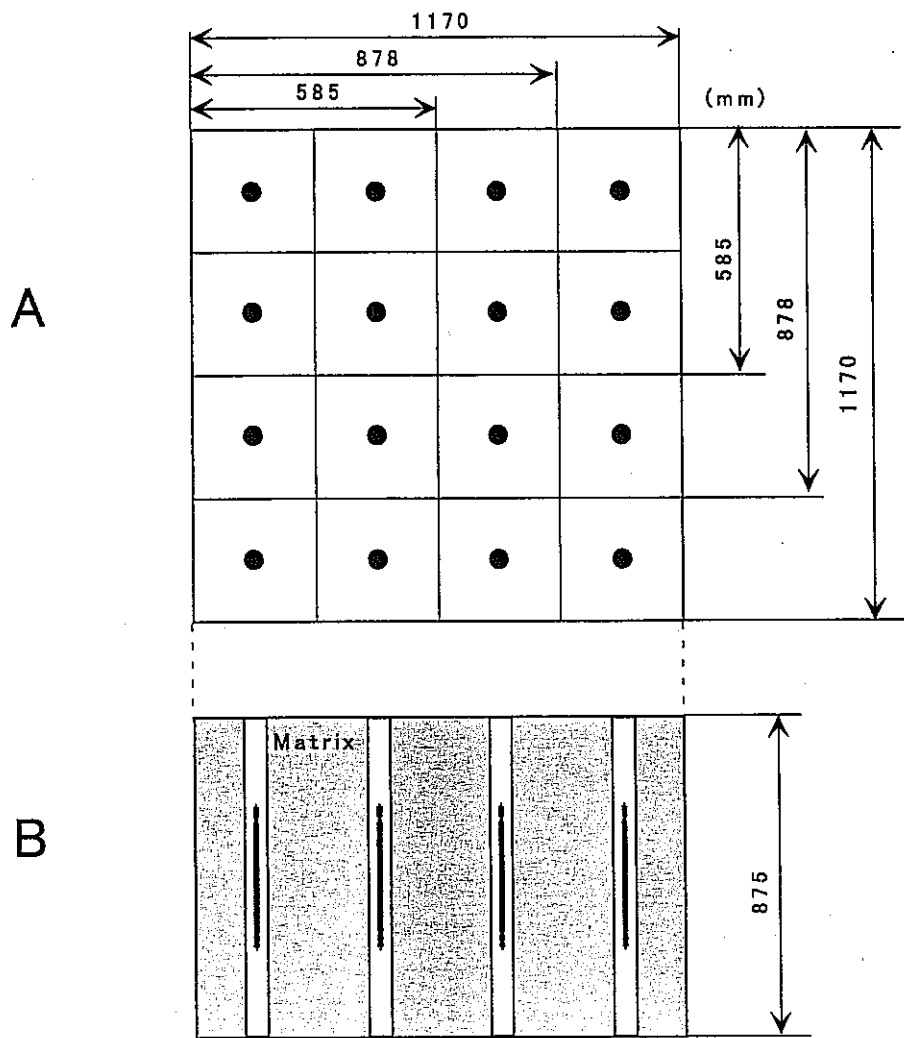


図6.5-1 AASキャリブレーション線源位置

表6.5-3 AASキャリブレーション測定データ(1)

AAS Perturbation		Container		AAS Position1(side)						AAS Position2(bottom)						(Average)			
Container		R _s	σ	RA	σ	RA-Rs	σ	RA ₀ expected	X=RA ₀ -RA-i	σ	RA	σ	RA-Rs	σ	RA ₀ expected	X=RA ₀ -RA-i	σ	AAS Perturbation	
A	1	65.357	1.741	883.829	13.108	798.472	13.221	794.700	-	-	665.757	5.795	800.400	5.985	790.413	-	-	0.000	0.0038
	2	64.810	0.658	859.902	10.113	791.192	10.149	-	-	642.676	3.987	777.988	4.059	-	-	-	-	-	-
	3	66.688	1.272	861.103	10.793	794.435	10.868	-	-	659.840	6.862	792.972	6.953	-	-	-	-	-	-
B	1	57.194	1.348	782.206	9.788	705.012	9.878	792.991	0.125	0.018	707.423	4.579	650.229	4.773	788.713	0.213	0.009	0.179	0.0038
	2	58.357	1.021	751.820	2.821	663.263	2.813	-	0.144	0.005	697.602	6.243	639.245	6.326	-	0.234	0.012	-	-
	3	59.046	0.825	780.590	9.785	702.544	9.901	-	0.129	0.016	700.992	8.813	642.616	8.852	-	0.227	0.017	-	-
C	1	50.772	1.292	707.203	5.125	658.431	5.285	792.991	0.208	0.010	659.845	7.025	609.073	7.143	788.713	0.285	0.015	0.286	0.0050
	2	53.064	1.092	690.294	7.174	637.230	7.257	-	0.244	0.014	648.182	7.258	595.118	7.338	-	0.325	0.017	-	-
	3	51.073	1.119	698.410	7.289	645.337	7.355	-	0.229	0.014	660.621	3.839	609.548	3.999	-	0.294	0.009	-	-
D	1	38.995	0.759	677.819	4.094	639.824	4.164	791.854	0.240	0.008	532.499	3.035	493.503	3.128	787.582	0.599	0.011	0.418	0.0041
	2	38.719	0.718	674.272	4.886	635.553	4.936	-	0.246	0.010	535.084	3.454	498.345	3.528	-	0.587	0.012	-	-
	3	40.981	0.711	677.953	4.071	638.992	4.133	-	0.243	0.008	534.208	4.253	493.247	4.312	-	0.597	0.014	-	-
E	1	36.726	0.641	637.276	4.389	600.550	4.436	792.422	0.319	0.010	639.403	4.338	502.677	4.385	788.147	0.568	0.014	0.451	0.0058
	2	37.577	1.289	635.727	5.523	598.150	5.671	-	0.325	0.013	640.083	3.786	602.486	3.980	-	0.598	0.013	-	-
	3	36.608	1.099	627.118	10.285	590.309	10.324	-	0.342	0.024	635.020	5.786	488.211	5.870	-	0.592	0.019	-	-
F	1	19.392	0.640	499.583	4.253	480.191	4.301	791.286	0.648	0.015	444.435	3.815	425.043	3.871	787.017	0.852	0.016	0.764	0.0056
	2	20.665	0.825	499.389	3.471	477.674	3.527	-	0.657	0.013	442.333	3.992	421.638	4.041	-	0.867	0.016	-	-
	3	20.620	0.873	480.117	2.847	469.497	2.787	-	0.665	0.010	439.729	2.818	419.109	2.950	-	0.878	0.014	-	-
G	1	17.009	0.508	450.599	3.220	433.590	3.280	790.718	0.824	0.014	430.168	2.988	413.149	3.031	786.453	0.804	0.015	0.870	0.0082
	2	16.520	0.384	447.426	2.897	430.906	2.912	-	0.835	0.013	424.348	3.076	407.828	3.100	-	0.828	0.015	-	-
	3	16.816	0.587	450.672	4.275	433.955	4.315	-	0.823	0.018	429.086	3.704	412.270	3.760	-	0.908	0.018	-	-

表6.5-4 AASキャリブレーション測定データ(2)

Volume Average Perturbation		Container		²⁴⁰ Pu-eff(g)	R _a / ²⁴⁰ Pu-eff	σ/ ²⁴⁰ Pu-eff	Average		RSU		(Average)			
Container		R _s	σ				R _a / ²⁴⁰ Pu-eff	σ/ ²⁴⁰ Pu-eff	RSU	σ	Vol.Ave.Perturbation			
A	1	65.357	1.741	6.366	10.266	0.273	10.306	0.103	10.306	0.103	0.000	0.0377		
	2	64.810	0.658										10.181	0.135
	3	66.688	1.272										10.472	0.200
B	1	57.194	1.348	6.366	8.984	0.211	9.090	0.091			0.134	0.0409		
	2	58.357	1.021										9.167	0.160
	3	59.046	0.825										9.118	0.130
C	1	50.772	1.292	6.366	7.975	0.203	8.111	0.105			0.271	0.0474		
	2	53.064	1.092										8.335	0.172
	3	51.073	1.119										8.023	0.178
D	1	38.995	0.759	6.366	6.125	0.119	6.214	0.086			0.659	0.0553		
	2	38.719	0.718										6.082	0.113
	3	40.981	0.711										6.434	0.112
E	1	36.726	0.641	6.366	5.789	0.101	5.818	0.080			0.771	0.0567		
	2	37.577	1.289										5.903	0.202
	3	35.909	1.099										5.782	0.173
F	1	19.392	0.640	6.366	3.046	0.101	3.179	0.063			2.242	0.1429		
	2	20.665	0.825										3.251	0.098
	3	20.620	0.873										3.239	0.137
G	1	17.009	0.508	6.366	2.672	0.090	2.638	0.043			2.910	0.1538		
	2	16.520	0.384										2.595	0.080
	3	16.816	0.587										2.642	0.092

表6.5-5 AASキャリブレーション結果

	AAS Perturbation		Volume Average Perturbation	
A	0.000	± 0.004	0.000	± 0.038
B	0.179	± 0.004	0.134	± 0.041
C	0.266	± 0.005	0.271	± 0.047
D	0.418	± 0.004	0.659	± 0.055
E	0.451	± 0.006	0.771	± 0.057
F	0.764	± 0.006	2.242	± 0.143
G	0.870	± 0.006	2.910	± 0.154

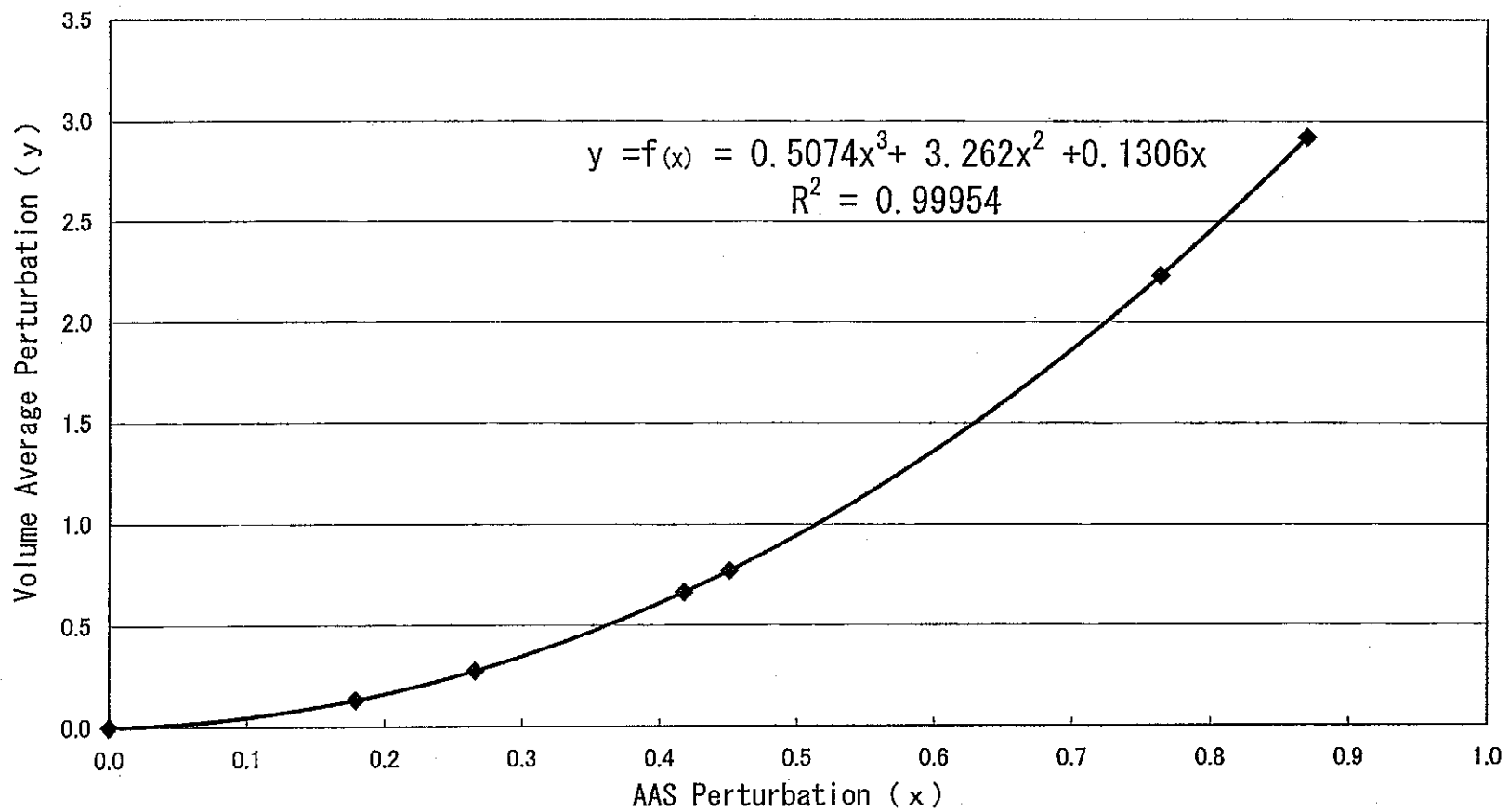


図6.5-2 AASキャリブレーションカーブ

6.6 測定誤差評価

6.6.1 概要

WCAS#1におけるPu量の測定精度について、既知Pu量を用いて測定誤差を統計的に評価する。

Puの定量は、付属のHPGe検出器で測定した γ 線スペクトルから計算されるPu同位体組成比と、同時に行われた中性子測定で求めた ^{240}Pu -effから算出する。しかし、本試験に先立ち実施した予備試験において、付属のHPGe検出器が、 γ 線の線量の高低や、マトリックスによる遮蔽の影響を受けるなど、検出能力に限界を生じたことが判明したため、測定誤差評価試験に供するMOX標準試料のPu同位体組成比は、表4.1-2に示す分析結果を使用することとした。

6.6.2 試験方法

試験には空及びマトリックスの異なる2種類のコンテナを用いた。

空コンテナを用いた試験は図6.6-1に示すように1g-Puと24g-PuのMOX標準試料はコンテナの中心に、96g-PuのMOX標準試料は2本ずつコンテナの4箇所配置した。なおMOX標準試料は中性子計測に影響が少ない紙製の箱に固定し転倒を防いだ。

マトリックスコンテナを用いた試験は図6.6-2に示すように水平方向に16分割した中心に、またコンテナ垂直方向の中心にMOX標準試料を配置してPu重量を繰り返し測定した。なおMOX標準試料の配置は写真5.2の試験治具を用いた。

試験条件を表6.6-1へ示す。

表 6.6-1 測定誤差評価試験条件

線源の種類 (Pu 重量)	空コンテナ測定時			
	① 1g-Pu (1g-Pu×1本)② 24g-Pu(12g-Pu×2本) ③ 96g-Pu(12g-Pu×8本)			
	マトリックスコンテナ測定時			
	① 16g-Pu(1g-Pu×16本)② 32g-Pu(1g-Pu×32本)			
線源位置	図 6.6-1, 2 参照			
マトリックス (AAS Pert.)	① 空(AAS Pert. 0) ② 金属マトリックス (AAS Pert. 約 0.2) ③ 難燃物マトリックス(AAS Pert. 約 0.4)			
測定時間	空コンテナ 測定時	MOX 標準試料		AAS(×2 Position)
		①	500 秒(50 秒×10 回)	250 秒(50 秒×5 回)
		②	1000 秒(100 秒×10 回)	500 秒(100 秒×5 回)
		③	2000 秒(200 秒×10 回)	1000 秒(100 秒×10 回)
	マトリックス コンテナ 測定時	④	3000 秒(300 秒×10 回)	1500 秒(150 秒×10 回)
		①	600 秒(60 秒×10 回)	300 秒(60 秒×5 回)
		②	1000 秒(100 秒×10 回)	500 秒(100 秒×5 回)
	③	2000 秒(100 秒×20 回)	1000 秒(100 秒×10 回)	
繰り返し測定 回数	各測定時間×5 回			
評価	Pu mass			

6.6.3 誤差(error)の定義

誤差は、JIS Z 8103:2000(計測用語)で、「測定値から真の値を引いた値」と定義している。ある量の測定で生じる誤差には、系統誤差(systematic error)と偶然誤差(random error)があり広義の誤差は、系統誤差と偶然誤差をあわせたものでその体系を以下に示す。

誤差	}	系統誤差 → かたより → 母平均-真の値
		偶然誤差 → ばらつき → 母集団の標準偏差

系統誤差は「測定結果にかたより(bias)を与える原因によって生じる誤差」、偶然誤差は「突き止められない原因によって起こり、測定値のばらつき(dispersion)となって現れる誤差」である。

WCAS #1 で測定を行った場合の誤差の体系を以下に示す。

誤差 { 系統誤差 → 繰り返し測定 (N=5) した各測定相対誤差の平均
偶然誤差 → 繰り返し測定 (N=5) した各測定相対誤差の標準偏

各測定における相対誤差は、(6-4)式で算出する。

$$\text{相対誤差 (\%)} = \{(\text{測定値} - \text{真の値}) \div \text{真の値}\} \times 100 \quad (6-4)$$

WCAS1 号機の測定誤差は、(6-5)式で算出する。

$$\text{測定誤差 } \sigma_T = \sqrt{\text{系統誤差 } \sigma_S^2 + \text{偶然誤差 } \sigma_R^2} \quad (6-5)$$

6.6.4 試験結果

繰り返し測定試験結果をコンテナ別に表 6.6-2 から表 6.6-4 に、各試験条件における誤差 σ_T 及びその内訳(系統誤差 σ_S 及び偶然誤差 σ_R)を表 6.6-5 に示す。

本試験で測定した Pu 標準線源の真の値と 150 個の測定値を図 6.6-3 に示す。測定値は図 6.6-3 からわかるように線形性を示し、Pu 量の少ないもの及び測定時間の短い条件を除き真の値の $\pm 10\%$ 以内で測定された。

測定時間と誤差の相関を図 6.6-4 に示す。誤差は、測定時間が多くなるに伴い若干小さくなり 2000 秒当たりから変化が小さくなる。誤差の最大は 9.54%(系統誤差:-6.40%, 偶然誤差:7.07%)で、測定時間 600 秒・16g-Pu で発生しているが、本試験条件での測定誤差は、10%以内であることが確認された。

また、測定時間が誤差に与える影響をその成分から評価するため、「測定時間と系統誤差」及び「測定時間と偶然誤差」の各相関を図 6.6-5 及び図 6.6-6 に示す。

図 6.6-5 から、系統誤差と測定時間の相関はなく、図 6.6-6 から、偶然誤差は測定時間が多くなるに伴い小さくなる傾向が顕著にある。このこ

とから誤差の測定時間による影響は、偶然誤差によるものと考えられる。

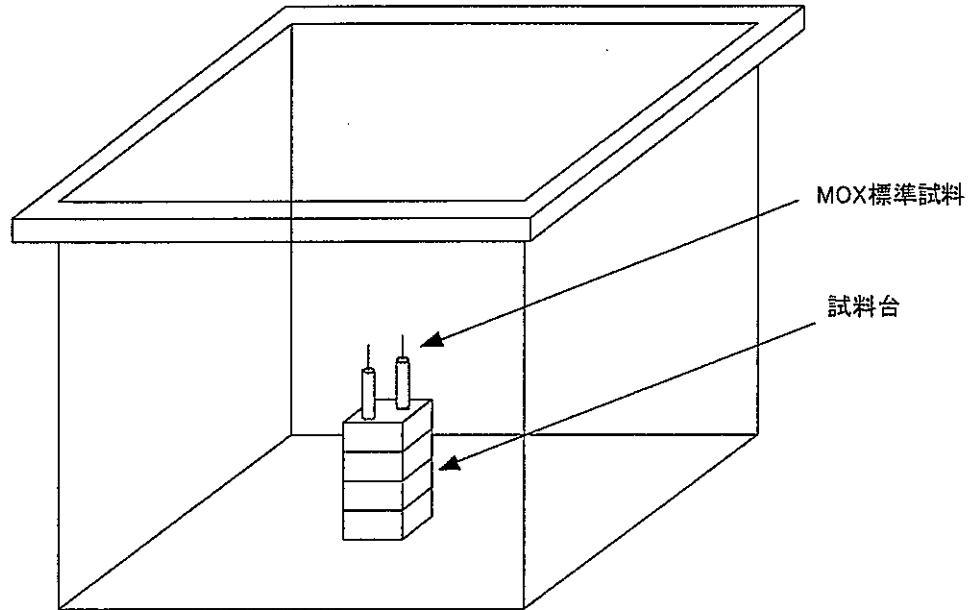
WCAS#1 の実廃棄物コンテナ測定時間を誤差の観点(目標測定誤差:5~10%)から求めると、図 6.6-4 に示すように 2000 秒を超えてもあまり変化しないため 2000 秒前後の測定時間が妥当と考えられる。したがって、実廃棄物コンテナを測定する場合は、2000 秒付近であり、しかもコンテナ測定部分と AAS 測定部分との両方において、各々 60 秒で割り切れる測定時間を設定することとした。実廃棄物コンテナ測定時間を以下に示す。

コンテナ測定時間 : 1800 秒(60 秒×30 回)

AAS 測定時間 : 900 秒 (60 秒×15 回) ×2 Position

本試験条件における誤差の最大は 9.54%(系統誤差:-6.40%, 偶然誤差:7.07%)で、測定時間 600 秒・16g-Pu で発生しているが、実際に廃棄物コンテナを測定する際(測定時間 1800 秒)の測定誤差は、図 6.6-4 から約 5%(1 σ)以下と考えられる。

- ①1g-Pu/コンテナ(1g-Pu×1本)
- ②24g-Pu/コンテナ(12g-Pu×2本)



- ③96g-Pu/コンテナ(12g-Pu×8本)

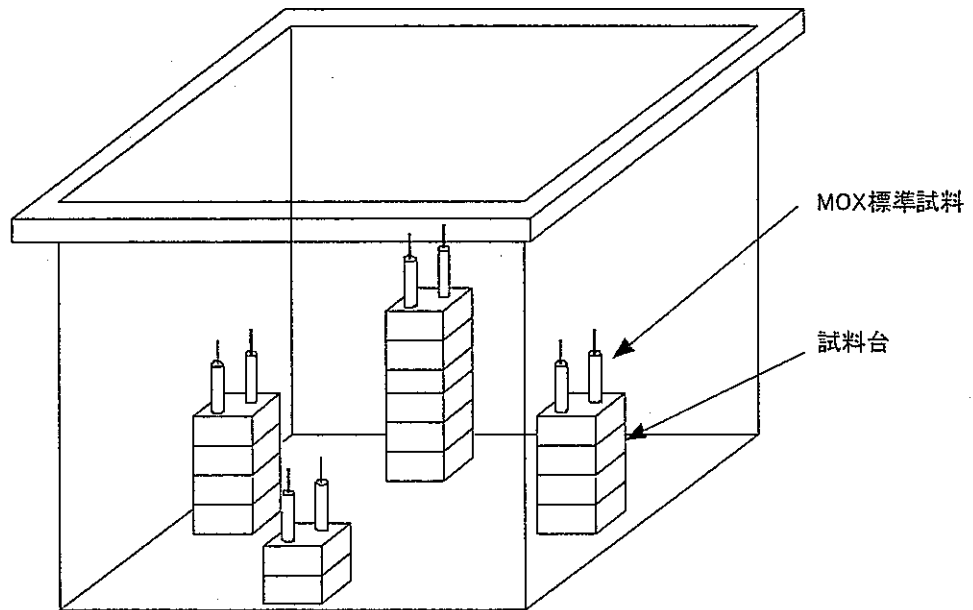


図6.6-1 測定誤差評価試験線源位置
(空コンテナ)

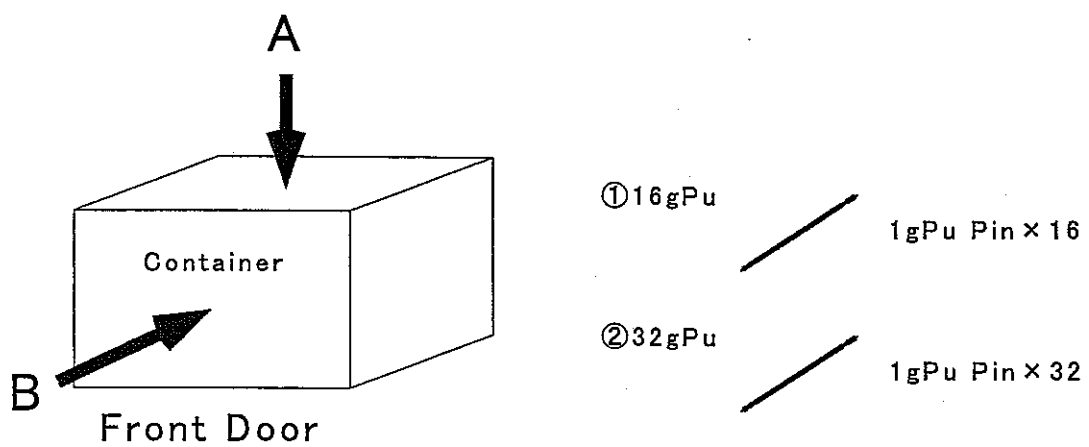
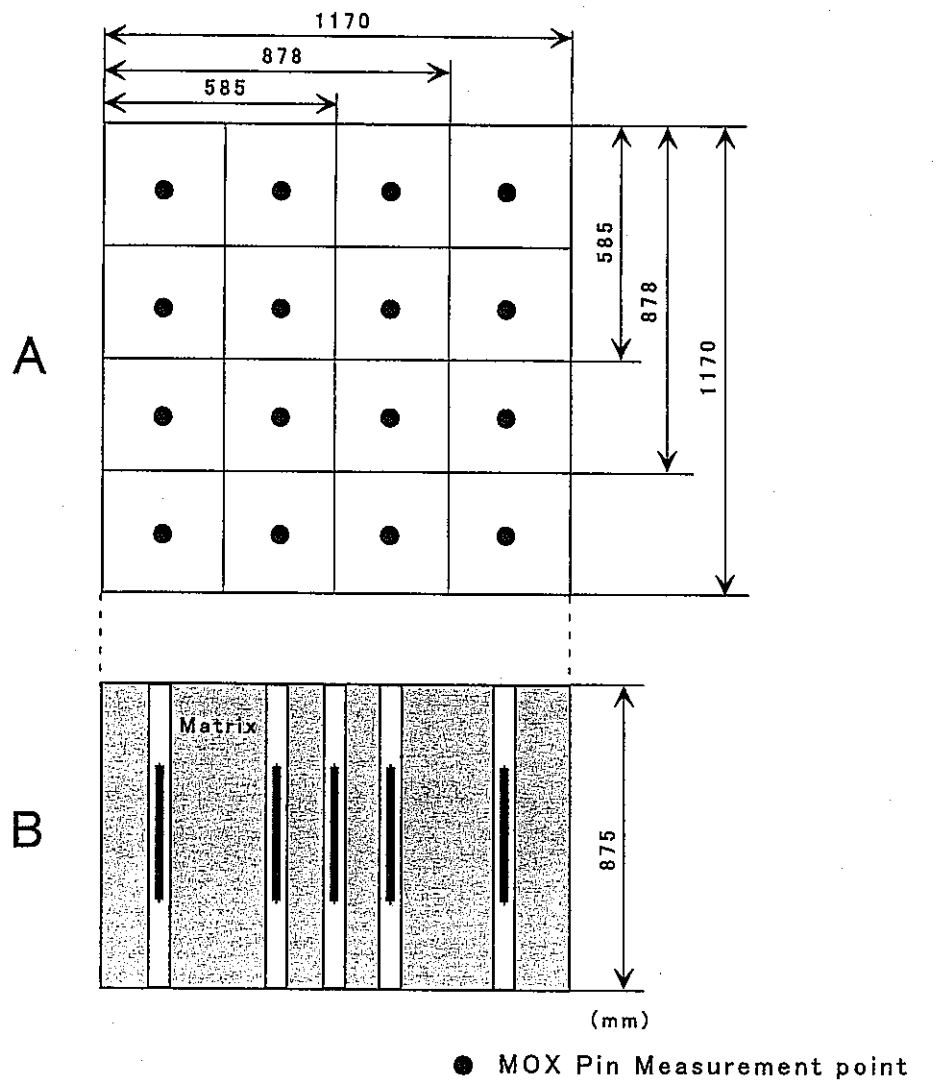


図6.6-2 測定誤差評価試験線源位置 (マトリックスコンテナ)

表6.6-2 測定誤差評価試験結果(1)

AAS Pert. 0.0

Sample	n	500 sec (AAS 50s × 5time × 2po)			1000 sec (AAS 100s × 5time × 2po)			2000 sec (AAS 200s × 5time × 2po)			3000 sec (AAS 300s × 5time × 2po)		
		Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)
1g	1	0.958	-8.76	3.69	1.013	-3.52	3.90	0.997	-5.05	3.84	1.019	-2.95	3.93
	2	1.085	3.33	4.18	0.986	-6.10	3.80	1.006	-4.19	3.88	1.031	-1.81	3.97
	3	1.056	0.57	4.07	0.986	-6.10	3.80	1.027	-2.19	3.96	1.064	1.33	4.10
	4	0.960	-8.57	3.70	0.926	-11.81	3.57	1.054	0.38	4.06	1.042	-0.76	4.02
	5	1.061	1.14	4.09	0.928	-11.62	3.58	1.061	1.05	4.09	0.997	-5.05	3.84
	AVG.	1.024	-2.46	3.95	0.968	-7.83	3.73	1.029	-2.00	3.966	1.031	-1.85	3.97
	σ	0.060	5.76	0.23	0.039	3.70	0.15	0.028	2.70	0.109	0.025	2.39	0.097
σ_T		6.26			8.68			3.36			3.02		
24g	1	24.009	-2.53	92.61	24.138	-2.09	93.05	24.257	-1.54	93.56	24.323	-1.27	93.81
	2	25.173	2.20	97.10	23.718	-3.79	91.43	24.253	-1.55	93.54	24.376	-1.04	93.55
	3	25.038	1.65	96.58	24.149	-2.04	93.09	23.517	-4.54	90.70	24.158	-1.93	93.19
	4	24.919	1.17	96.12	24.210	-1.79	93.33	24.389	-1.00	94.07	24.332	-1.22	93.86
	5	24.786	0.63	95.61	24.682	0.12	95.15	24.316	-1.30	93.79	24.041	-2.40	92.73
	AVG.	24.785	0.62	95.61	24.179	-1.92	93.21	24.146	-1.99	93.13	24.246	-1.57	93.43
	σ	0.457	1.85	1.76	0.342	1.39	1.32	0.356	1.45	1.373	0.141	0.57	0.470
σ_T		1.96			2.37			2.46			1.67		
96g	1	98.552	0.38	380.0757	100.972	2.79	389.24	96.633	-1.57	372.68	99.268	1.11	382.84
	2	101.055	2.93	389.73	96.940	-1.31	373.70	98.132	-0.04	378.4585	96.167	-2.05	370.8768
	3	98.600	0.43	380.26	98.276	0.05	378.85	99.672	1.52	384.40	99.868	1.72	385.1536
	4	99.349	1.19	383.15	98.952	0.74	381.45	98.478	0.31	379.80	97.208	-0.98	374.90
	5	96.502	-1.71	372.17	103.315	5.22	398.40	98.968	0.83	381.75	98.232	0.06	378.8484
	AVG.	98.812	0.65	381.08	99.691	1.50	384.33	98.377	0.21	379.42	98.149	-0.03	378.52
	σ	1.641	1.67	6.33	2.495	2.55	9.66	1.133	1.16	4.381	1.502	1.53	5.794
σ_T		1.79			2.96			1.18			1.53		
GRAND TOTAL	σ_S		-0.40			-2.75			-1.26			-1.15	
	σ_R		3.68			4.71			2.05			1.75	
	σ_T		3.70			5.46			2.41			2.10	

σ_S : 系統誤差 σ_R : 偶然誤差 σ_T : 誤差

表6.6-3 測定誤差評価試験結果(2)

AAS Pert. 0.2

※ Real/CF

Sample	n	600 sec (AAS 100s × 3time × 2po)					1000 sec (AAS 100s × 5time × 2po)					2000sec (AAS 100s × 10time × 2po)				
		Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Real※ (cps)	AAS Pert.	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Real※ (cps)	AAS Pert.	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Real※ (cps)	AAS Pert.
16g	1	18.87	8.44	73.36	64.36	0.185	18.58	6.78	72.24	64.09	0.175	18.16	4.36	70.60	63.40	0.165
	2	17.74	1.96	68.98	62.64	0.155	18.05	3.74	70.18	63.39	0.159	18.18	4.49	70.69	64.27	0.153
	3	17.51	0.64	68.08	61.33	0.162	17.86	2.62	69.42	62.42	0.163	18.18	4.47	70.68	63.34	0.167
	4	18.35	5.47	71.36	64.37	0.161	17.72	1.81	68.88	62.29	0.158	18.24	4.83	70.92	63.56	0.166
	5	18.42	5.85	71.61	63.79	0.172	18.64	7.13	72.47	64.67	0.170	18.34	5.42	71.32	63.61	0.171
	AVG.	18.178	4.47	70.68	63.30	0.17	18.17	4.42	70.64	63.37	0.17	18.22	4.71	70.84	63.64	0.16
	σ	0.548	3.15	2.13	1.30	0.01	0.42	2.42	1.64	1.03	0.01	0.08	0.43	0.29	0.37	0.01
σ_T		5.47					5.04					4.73				
32g	1	36.23	3.38	140.88	127.36	0.159	38.09	8.67	148.10	129.17	0.189	36.01	2.74	140.00	127.14	0.154
	2	36.47	4.05	141.79	127.16	0.166	35.70	1.86	138.81	126.62	0.150	36.74	4.81	142.83	127.48	0.170
	3	38.69	10.39	150.43	129.42	0.200	37.10	5.86	144.27	129.90	0.162	36.81	5.01	143.11	127.39	0.172
	4	37.09	5.81	144.19	128.86	0.169	37.27	6.34	144.92	131.22	0.157	35.83	2.21	139.29	124.60	0.168
	5	38.57	10.03	149.95	128.90	0.200	36.65	4.56	142.49	126.91	0.172	35.88	2.36	139.50	125.86	0.160
	AVG.	37.409	6.73	145.45	128.34	0.18	36.96	5.46	143.72	128.77	0.17	36.25	3.43	140.95	126.49	0.16
	σ	1.157	3.30	4.50	1.02	0.02	0.88	2.50	3.41	1.97	0.02	0.48	1.37	1.87	1.24	0.01
σ_T		7.50					6.00					3.69				
GRAND TOTAL	σ_S	5.60					σ_S	4.94				σ_S	4.07			
	σ_R	3.27					σ_R	2.38				σ_R	1.17			
	σ_T	6.5					σ_T	5.5				σ_T	4.2			

 σ_S : 系統誤差 σ_R : 偶然誤差 σ_T : 誤差

表6.6-4 測定誤差評価試験結果(3)

AAS Pert. 0.4

※ Real/CF

Sample	n	600 sec (AAS 100s × 3time × 2po)					1000 sec (AAS 100s × 5time × 2po)					2000sec (AAS 100s × 10time × 2po)				
		Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Real※ (cps)	AAS Pert.	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Real※ (cps)	AAS Pert.	Assay Pu (g)	Diff(%)	Real (cps)	Real※ (cps)	AAS Pert.
16g	1	18.27	5.00	71.02	40.753	0.442	16.69	-4.07	64.89	39.498	0.411	17.19	-1.19	66.839	41.072	0.406
	2	15.67	-9.93	60.93	38.788	0.387	16.09	-7.55	62.53	40.148	0.382	17.33	-0.40	67.367	40.687	0.415
	3	16.43	-5.59	63.86	40.679	0.387	16.47	-5.32	64.04	39.835	0.399	16.86	-3.10	65.547	40.173	0.407
	4	16.08	-7.61	62.49	39.289	0.394	17.01	-2.23	66.13	41.290	0.397	16.64	-4.38	64.679	40.118	0.401
	5	14.99	-13.86	58.27	37.877	0.376	16.70	-4.03	64.92	40.543	0.397	16.45	-5.46	63.949	40.414	0.391
	AVG.	16.287	-6.40	63.31	39.477	0.397	16.593	-4.64	64.50	40.263	0.397	16.894	-2.91	65.676	40.493	0.404
	σ	1.231	7.07	4.78	1.239	0.026	0.342	1.97	1.33	0.692	0.010	0.369	2.12	1.432	0.394	0.009
σ_T		9.54					5.04					3.60				
32g	1	31.18	-11.03	121.23	78.270	0.379	33.50	-4.41	130.25	80.694	0.401	34.81	-0.69	135.320	81.855	0.414
	2	33.97	-3.09	132.05	83.318	0.392	35.02	-0.09	136.14	80.640	0.425	34.40	-1.87	133.712	81.269	0.412
	3	30.75	-12.27	119.54	73.779	0.403	33.71	-3.82	131.06	80.285	0.407	33.40	-4.70	129.864	81.330	0.396
	4	35.58	1.50	138.30	83.613	0.414	32.26	-7.97	125.40	78.713	0.394	33.62	-4.09	130.692	81.619	0.397
	5	34.68	-1.06	134.82	80.087	0.424	35.62	1.62	138.47	84.191	0.411	34.36	-1.98	133.569	81.137	0.412
	AVG.	33.231	-5.19	129.188	79.813	0.402	34.021	-2.94	132.26	80.90	0.408	34.117	-2.66	132.631	81.442	0.406
	σ	2.150	6.13	8.358	4.049	0.018	1.325	3.78	5.15	2.006	0.012	0.585	1.67	2.274	0.290	0.009
σ_T		8.03					4.79					3.14				
GRAND TOTAL	σ_s		-5.79				σ_s	-3.79				σ_s	-2.78			
	σ_R		6.27				σ_R	2.98				σ_R	1.80			
	σ_T		8.5				σ_T	4.8				σ_T	3.3			

σ_s : 系統誤差 σ_R : 偶然誤差 σ_T : 誤差

表6.6-5 誤差及びその内訳

(%)

AAS Pert.	Pu mass	Meas. Time														
		500s			600s			1000s			2000s			3000s		
		σ_S	σ_R	σ_T	σ_S	σ_R	σ_T	σ_S	σ_R	σ_T	σ_S	σ_R	σ_T	σ_S	σ_R	σ_T
0	1g	-2.46	5.76	6.26				-7.83	3.73	8.66	-2.00	2.70	3.36	-1.85	2.39	3.02
	24g	0.62	1.85	1.96				-1.92	1.39	2.37	-1.99	1.45	2.46	-1.57	0.57	1.67
	96g	0.65	1.67	1.79				1.50	2.55	2.96	0.21	1.16	1.18	-0.03	1.53	1.53
0.2	16g				4.47	3.15	5.47	4.42	2.42	5.04	4.71	0.43	4.73			
	32g				6.73	3.30	7.50	5.46	2.50	6.01	3.43	1.37	3.69			
0.4	16g				-6.40	7.07	9.54	-4.64	1.97	5.04	-2.91	2.12	3.60			
	32g				-5.19	6.13	8.03	-2.94	3.78	4.79	-2.66	1.67	3.14			

 σ_S : 系統誤差 σ_R : 偶然誤差 σ_T : 誤差

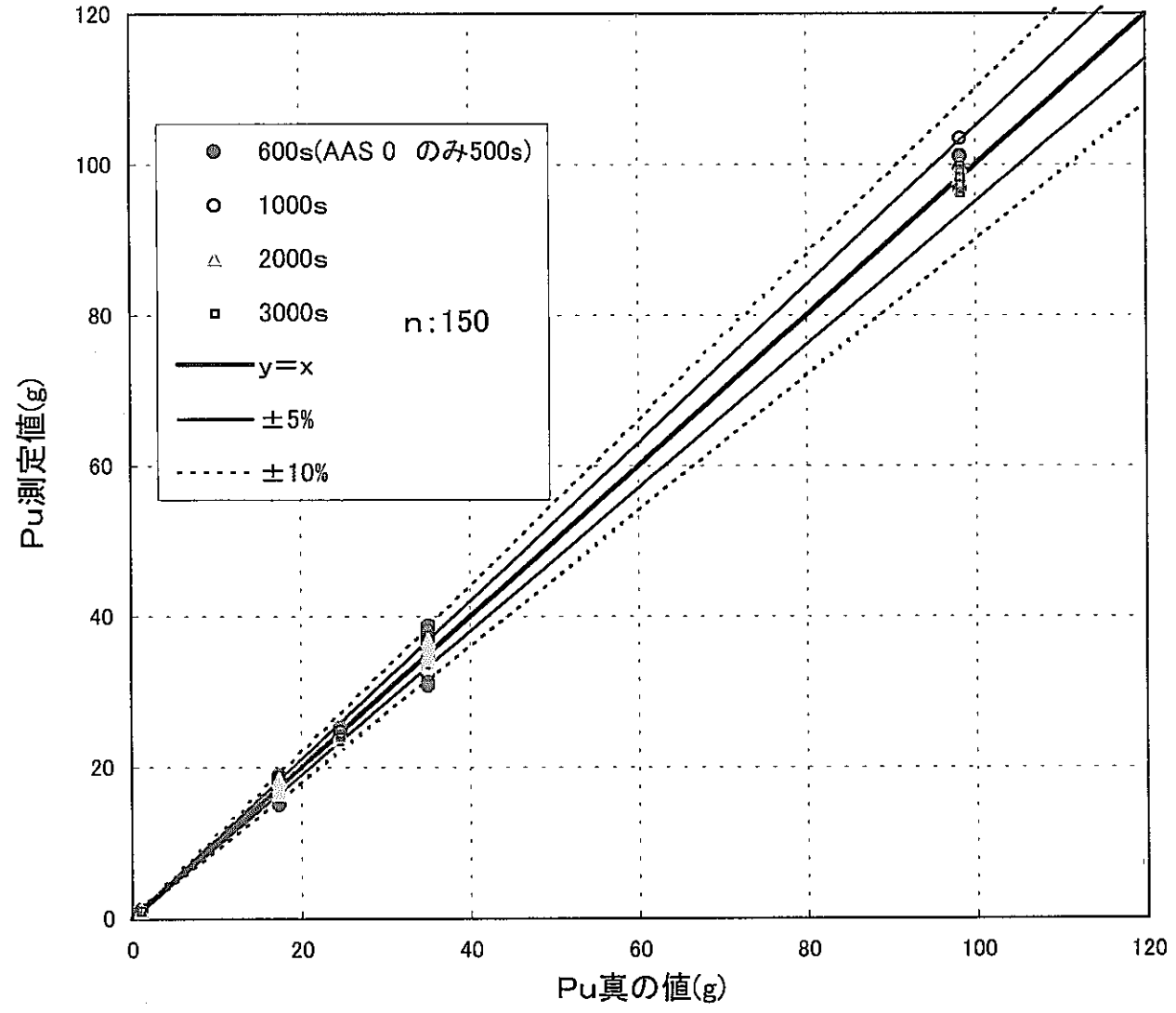


図6.6-3 Pu真の値と測定値

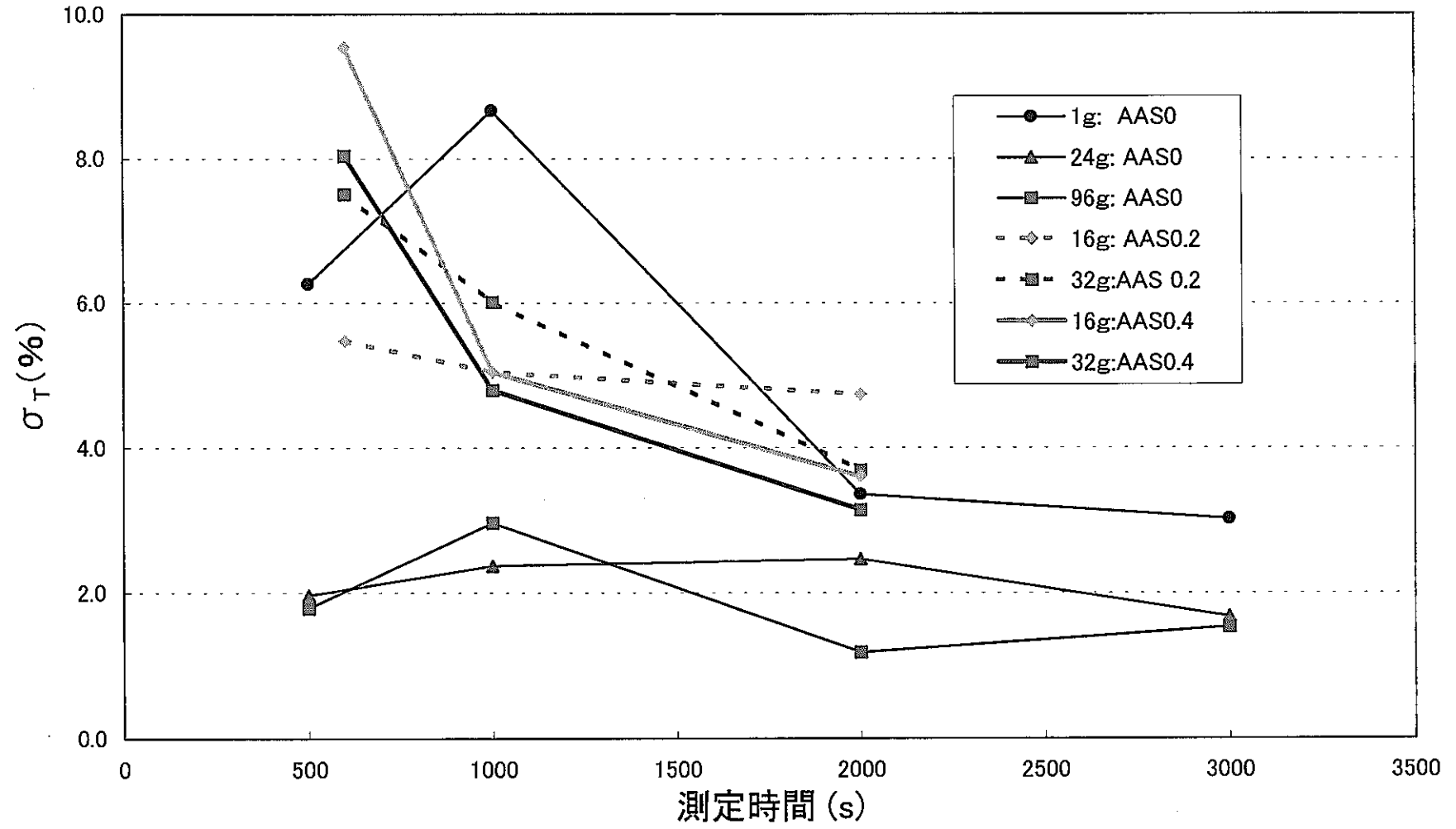


図6.6-4 測定時間と誤差の相関

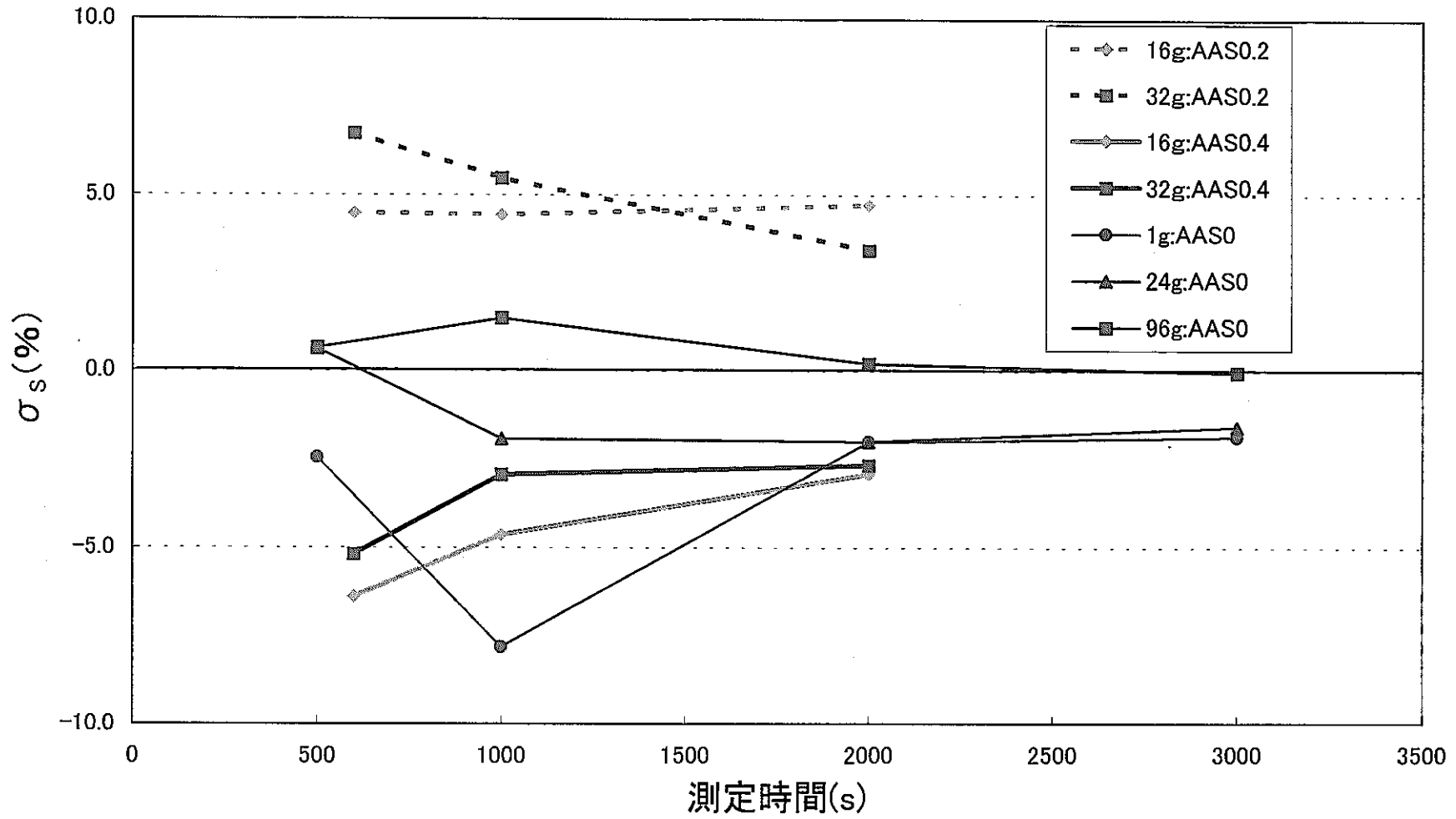


図6.6-5 測定時間と系統誤差の相関

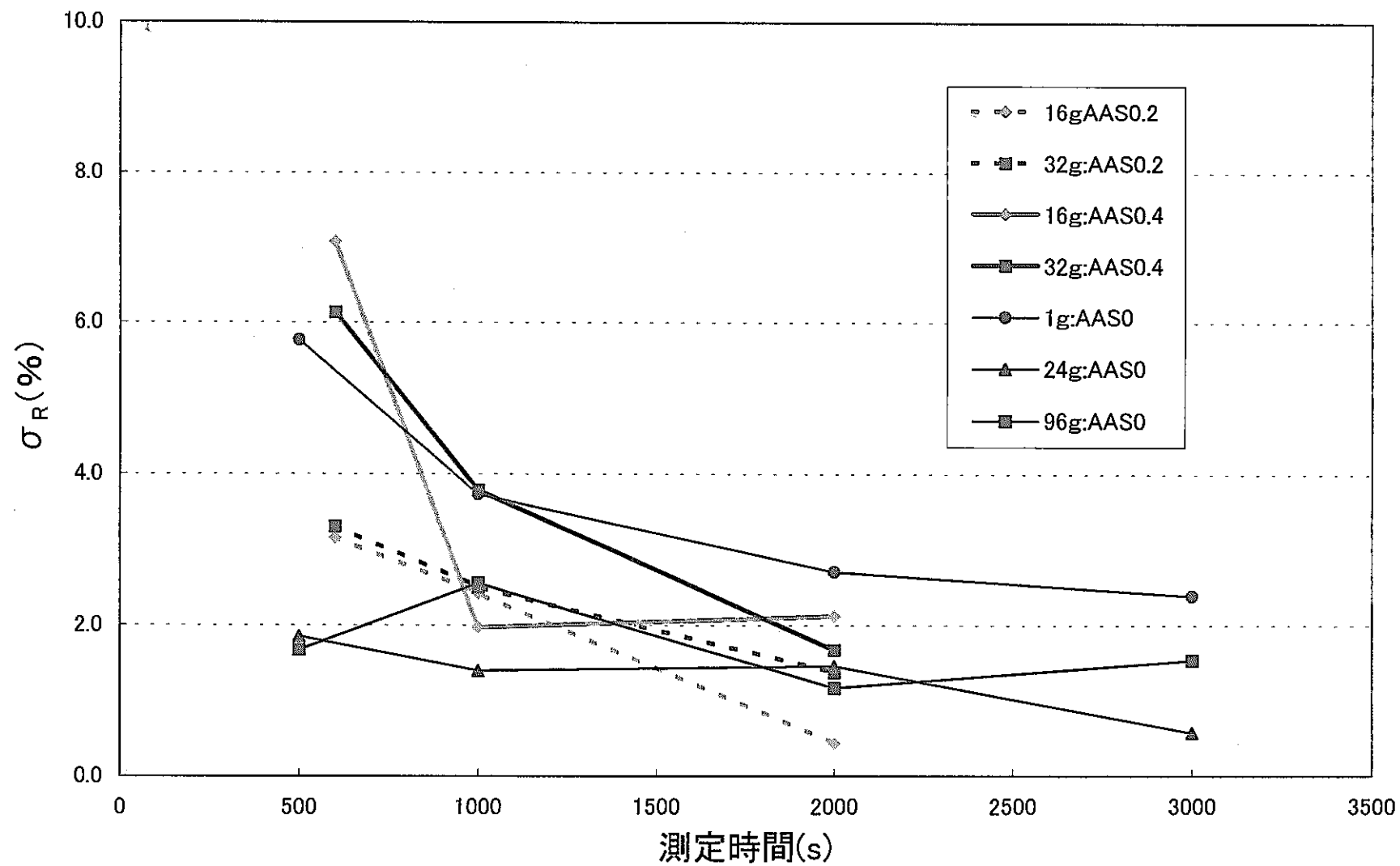


図6.6-6 測定時間と偶然誤差の相関

6.7 検出下限値

6.7.1 概要

検出下限値は、JIS K-0211 において検出できる最小量(値)と定義されており、WCAS# 1はバックグラウンドの 3σ 法で求める。

バックグラウンドは、通常測定において測定対象物がない場合、計測系の電気ノイズ、自然界及び施設に存在する線源等から計測され、ランダムではあるがほぼ一定の値である。このバックグラウンドに比較して、放射性廃棄物中のPuからのカウントが少ない場合、バックグラウンドからのカウントを区別して測定できる限界(検出下限値)を統計的に求める。

6.7.2 試験方法

空コンテナをチェンバ内に配置しバックグラウンドを測定した。試験条件を表 6.7-1 へ示す。

表 6.7-1 バックグラウンド測定条件

測定時間	49500 秒(500 秒 × 99 回)
評価	計数率(Real Rate 及び Total Rate)

6.7.3 試験結果

検出下限値は、(6-5)式の近似式で算出した。この式は、LANLで作成され、WDASにおいて使用実績を有しているものであり、バックグラウンドにバックグラウンド計数率の標準偏差(σ)の3倍を加え検出下限値としている。³⁾

$$d \cong \frac{3}{a} \times \left(\frac{B + a d}{t} \right)^{1/2} \quad (6-5)$$

d : 検出下限値 ($g^{240}\text{Pu-eff}$)

a : 比例定数(検量線傾き)(cps/ $g^{240}\text{Pu-eff}$)

B : 室内バックグラウンド (Bの測定時間はtよりも相当長い時間で計測)

$$B = B_c + A$$

B_c : 宇宙線バックグラウンド=リアルバックグラウンド計数率 (cps)

A : 室内アクシデンタル同時計数率 = T²G

T : トータルバックグラウンド計数率 (cps)

G : ゲート幅(s)

t : サンプル測定時間 (s)

検出下限値の計算結果及び検出下限値とサンプル測定時間の相関を表 6.7-2 及び図 6.7-1 に示す。

バックグラウンドの測定時間については、計測系の電気ノイズ、自然界及び施設に存在する線源等からの計数値の影響を抑え、室内バックグラウンドの真値へより近づけるため、49500 秒とサンプル測定時間より相当長い時間で測定を行った。

検出下限値は図 6.7-1 からわかるようにサンプル測定時間が増加すると小さくなる傾向にある。WCAS # 1 で通常測定する時間 1800 秒では、表 6.7-2 から 4.93mg($^{240}\text{Pu-eff}$)という結果が得られた。

表 4.1-2 に示す WCAS # 1 特性試験に使用した MOX 標準試料の燃料ペレット Pu 同位体組成分析結果から Pu 重量を算出すると、(6-6)式から 13.62mg(Pu)という結果となる。

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{{}^{240}\text{Pu} - \text{eff}}{(2.52 \times {}^{238}\text{Pu} + {}^{240}\text{Pu} + 1.68 \times {}^{242}\text{Pu})} \\
 &= \frac{0.00493}{(2.52 \times 0.01245 + 0.25451 + 1.68 \times 0.04531)} \quad (6-6) \\
 &= 0.013619(\text{g})
 \end{aligned}$$

また、検出下限値はバックグラウンドの関数であることから、遮蔽などを考慮し、バックグラウンド値を下げることにより、検出下限値を下げる事が可能である。図 6.7-2 に検出下限値とバックグラウンドの相関を示す。

表6.7-2 検出下限値とサンプル測定時間の相関

サンプル測定時間 t (s)	検出下限値 d (m ²⁴⁰ Pu-eff)
500	9.79
1000	6.73
1500	5.43
1800	4.93
2000	4.67
2500	4.15
3000	3.78
3500	3.49
4000	3.25
4500	3.06
5000	2.90
5500	2.76
6000	2.64
6500	2.53
7000	2.44
7500	2.35
8000	2.28
8500	2.21
9000	2.14
9500	2.09
10000	2.03
10500	1.98
11000	1.94
11500	1.89
12000	1.85

B : 0.4913 (cps)

a : 10.57 (R/s · ²⁴⁰Pu-eff)

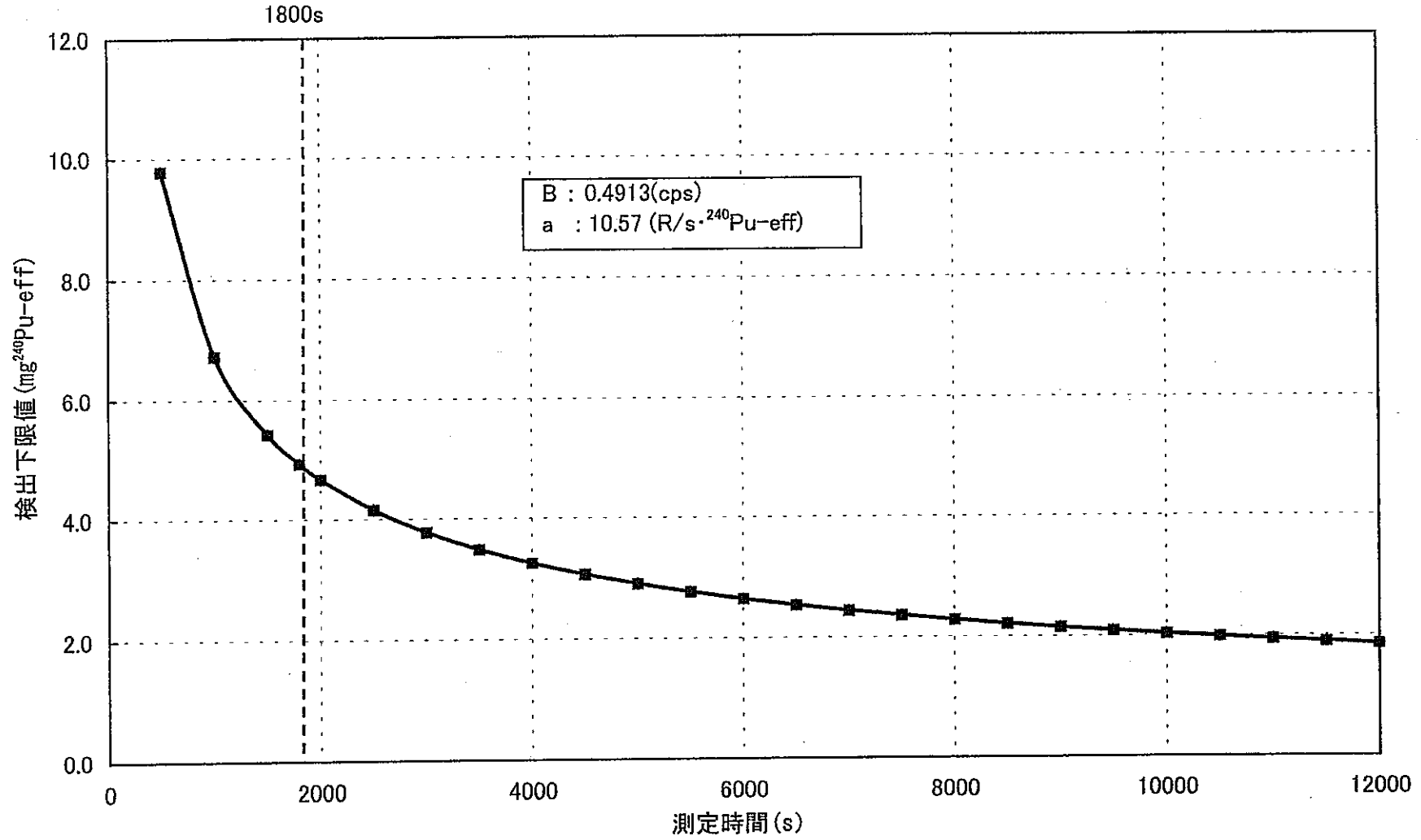


図6.7-1 検出下限値とサンプル測定時間の相関

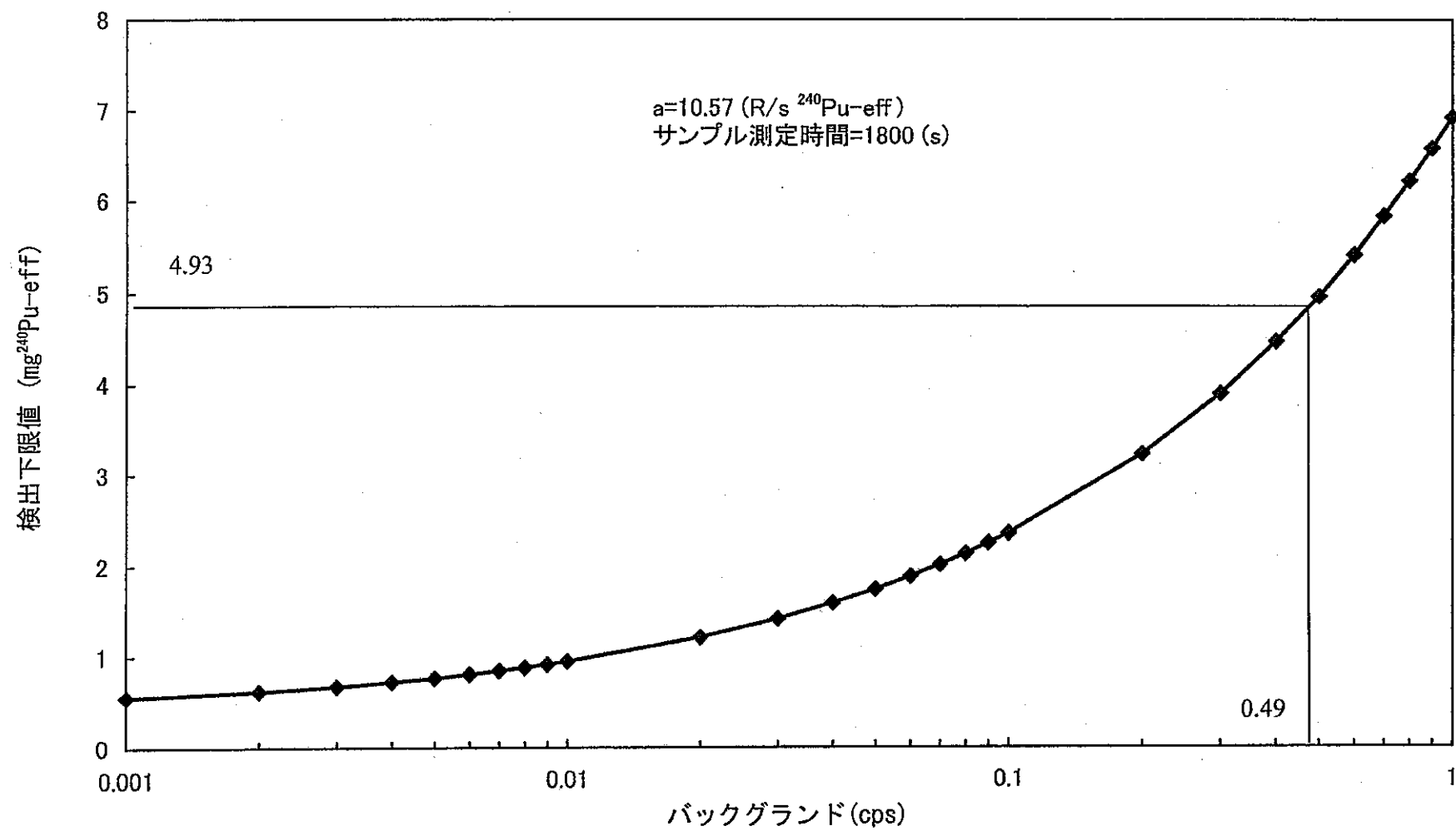


図6.7-2 検出限界値とリアルバックグラウンドの相関

7. IAEA アクセプタンステスト

7.1 概要

核燃料サイクル開発機構(以下 JNC)が所有する WCAS#1 を保障措置査察で使用できるか否かを検証するため、科学技術省(以下 JAEB)査察官立会いのもと IAEA の検査官により実施された WCAS#1 のアクセプタンステストについてその概要を報告する。

7.2 アクセプタンステスト期間

平成 12 年 2 月 28 日～平成 12 年 3 月 3 日

7.3 対応者

JAEB) : 宮西査察官 核管センター(NMCC) : 安氏
IAEA : NOVRUZAJ, BARRY K.BARNES, ABDEL-HALIM
JNC 環境管理課 : 大村、柴田、後藤、舘野、中川、高橋
核物質管理室 : 浅野、小林、佐藤、丸山

7.4 アクセプタンステストの内容及び結果

7.4.1 提出図書

- ① User Requirements (IAEA 作成)
- ② Functional Specifications
- ③ Design specification
- ④ Safety evaluation
- ⑤ Operating manual
- ⑥ Maintenance manual
- ⑦ Software documentation
- ⑧ ³He acceptance test record

7.4.2 スケジュール

アクセプタンステストのスケジュールを表 7.1 に示す。

7.4.3 試験内容及び結果

アクセプタンステストの試験項目及び結果の一覧を表 7.2 に示す。

表7.1 アクセプタンステストのスケジュール

2000.

JNC TN8410 2002-002











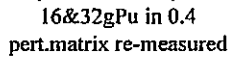




Date \ Test Items	2/28 (Mon)	2/29 (Tue)	3/1 (Wed)	3/2 (Thu)	3/3 (Fri)
Meeting / Data Evaluation			 Data Evaluation		 Final meeting
Functional Test	 Visual & Dimension check  Initial & Normalization  Neutron Efficiency	 Axial & Radial profiles  Deadtime & Dieawaytime			
Mox Calibration (with Empty container)			 FPAS  16, 32, 120gPu and slope check by 32gPu		 16&32gPu in 0.4 pert.matrix re-measured
Overall Performance (Confirmation of matrix effect)				 16&32gPu in 0.2 pert.matrix  16&32gPu in 0.4 pert.matrix	 DA sampling for pin
Others					

表 7.2 アクセプタンステスト実施項目及び結果

試 験 項 目	試 験 結 果
(1) 目視検査及び寸法検査 <ul style="list-style-type: none"> ・ システム構成の説明 ・ Add-A-Source の ID と位置 ・ 寸法検査 	提出図面と相違ないことを確認
(2) 機能試験 <ul style="list-style-type: none"> ・ バックグラウンド測定 ・ Add-A-Source 初期値 ・ Normalization 測定 ・ 中性子検出効率 ・ 不感時間及びダイアウェイ時間測定 ・ チャンバー内中性子検出応答測定 	$T=26.02, R=0.17$ $R_{\text{posi1}}=698.23, R_{\text{posi2}}=700.12$ $R_{\text{exp}} / R_{\text{meas}}=1.0035$ 13.6% $D_T = A:4.9e-6\text{sec}, B:1.6e-12 \text{ sec}$ $\tau = 205e-6\text{sec}$ 平均値からの差が 6%以下 (Total) を確認
(3) キャリブレーション <ul style="list-style-type: none"> ・ 16g ピン測定 ・ 32g ピン測定 ・ 120g ピン測定 (校正式確認試験) ・ 16g ピン測定 	$y=bx$ $b=10.00 \pm 0.046$ 誤差 -1.1%
(4) 総合誤差評価試験 <ul style="list-style-type: none"> ・ 低密度マトリックス内 <ul style="list-style-type: none"> 16g ピン測定 32g ピン測定 ・ 高密度マトリックス内 <ul style="list-style-type: none"> 16g ピン測定 32g ピン測定 	誤差 -2.6% 誤差 -4.5% 誤差 13.3% (平均) 誤差 7.5% (平均)
(5) 標準試料の検認 <ul style="list-style-type: none"> ・ FPAS 測定 ・ DA サンプルング 	最大誤差 1.9% ピン No.B66306 (1gPu)

<試験内容>

(1) 目視検査及び寸法検査

① 構成機器の確認

JNC は一通り WCAS#1 の構成機器について説明し, IAEA は図面等 WCAS#1 の構成機器に相違のないことを目視で確認した。

② Add-A-Source(AAS)の位置

WCAS#1 検出器背面にある AAS ポジション表示と AAS のポジションが同等であることを目視で確認した。

③ AAS ID の確認

AAS ID が FTC-CF-737 であることを目視で確認した。

④ 寸法検査

IAEA は,検出器厚さを測り,提出図面寸法と相違ないことを目視で確認した。

(2) 機能試験

① バックグラウンド測定

IAEA は,JNC が提案した測定パラメータを使用し,査察側シフトレジスタ (JSR-12) から IAEA ジャンクションボックスの SUM ヘシグナルケーブルを接続しバックグラウンドを測定した。

その結果を表 7.3 に示す。

表 7.3 バックグラウンド測定及び測定条件

Totals	:26.02±0.15cps
Reals	:0.17±0.02cps
測定時間	:60s × 10
Predelay	:4 μs
Gate length	:232 μs
HV	:1750V
Dead time Coefficient A	:3.9E-06
Dead time Coefficient B	:5.0E-12

② AAS の初期値設定

IAEA は,AAS 法の初期値(R_0)を得るため,空コンテナに AAS を付加した状態でポジション1(サイド)及び2(ボトム)におけるリアルカウントを測定した。

AAS 法におけるマトリックス補正の概念を以下の式で示す。

$$\left(\frac{R_0 e^{-\lambda t}}{R_{net}} \right) - 1 = x$$

ここで

$R_0 e^{-\lambda t}$ = AASの初期値を測定日まで崩壊計算した値

R_{net} = AASの測定値

補正係数(CF) = $1 + f(x)$

$R_{corrected} = R_{measured} \cdot CF$

ここで

$R_{corrected}$ = マトリックス補正後のリアルカウント

$R_{measured}$ = マトリックス補正前のリアルカウント

また、AAS 初期値及び測定条件を表 7.4 に示す。

表 7.4 AAS (FTC-CF-737)初期値及び測定条件

$R_{0 \text{ position1}}$ (空コンテナ有)	: 698.23 ± 3.67cps (00.03.02)
$R_{0 \text{ position2}}$ (空コンテナ有)	: 700.12 ± 3.67cps(00.03.02)
測定時間	: 60s × 30
Predelay	: 4 μs
Gate length	: 232 μs
HV	: 1750V
Dead time Coefficient A	: 3.9E-06
Dead time Coefficient B	: 5.0E-12

③ Normalization 試験

Normalization は、 ^{252}Cf 中性子線源の実測定値($R_{measured}$)と $R_{expected}$ (初期設定値を測定日まで崩壊計算した値) との有意差から主に ^3He チューブ、増幅器等の検出部の不具合を検知するため測定の都度実施されるものである。

本試験では、専用治具に固定した IAEA の ^{252}Cf 中性子線源(PP-127)を測定チェンバ中心で 2 回測定し、

$$Normalization = \frac{R_{expected}}{R_{measured}} = 1.0035 \pm 0.01 \text{ が得られた。}$$

また、Normalization 初期設定値を正確に設定するため、PP-127 の長時間測定が実施された。

PP-127 の Normalization 初期設定値及び測定条件を表 7.5 に示す。

表 7.5 Normalization 初期設定値及び測定条件

Source No.	:PP-127 (IAEA)
Totals	:13009.28±1.24cps
Reals	:1388.697±3.31cps (00.03.02)
測定時間	:60s × 199
Predelay	:4 μs
Gate length	:232 μs
HV	:1750V
Dead time Coefficient A	:3.9E-06
Dead time Coefficient B	:.5.0E-12

④ AAS の Authentication (証明) 試験

AAS の Authentication 手法として WDAS と同様の手法が導入された。本手法は、²⁵²Cf 線源貯蔵箱 (図 2.1 参照) に対し査察封印等の封じ込め監視が不可能なことから編み出された手法である。本手法の目的は、“PP-127” 線源と “AAS+PP127” 線源をそれぞれ測定し、得られた両線源のリアルカウントの比が既知の比に対する有意差を確認することにより、例えば不正に AAS を入れ替えた等の事象を検知する。また、AAS Authentication のポジション (1, 2) については、実施都度査察官が任意に選択することとした。

AAS Authentication の初期設定比を表 7.6 に示す。

表 7.6 ASS Authentication 初期設定比及び測定条件
 表 7.6 AAS Authentication 初期設定比及び測定条件

Source No.	:PP-127 (IAEA)+ AAS(FTC-CF-737)
Totals(Position1)	:18776.33±1.80cps
Reals(Position1)	:2072.82±5.9cps (00.03.1)
測定時間(Position1)	:60s×134
PP-127 単独との比	:1388.697/2072.82=0.67
Totals(Position2)	:18770.91±1.48cps
Reals(Position2)	:2054.64±4.8cps (00.02.29)
測定時間(Position2)	:60s×199
PP-127 単独との比	:1388.697/2072.82=0.676

⑤ 中性子検出効率(Efficiency)

IAEA は,WCAS#1 の中性子検出効率(ϵ)を算出するため,専用冶具に固定した ^{252}Cf 中性子線源(FTC-CF-736)をチェンバ中心で測定した。一般的な検出効率(ϵ)は以下の式で定義される。

$$\epsilon = \frac{\text{記録されたパルスの数}}{\text{線源より放出された放射線量子の数}}$$

FTC-CF-736 の測定結果及び検出効率算出結果を表 7.7 に示す。

表 7.7 検出効率試験結果

検出効率	:13.6%
Source No.	:FTC-CF-736
Totals	:5652.496±2.574
測定時間	:60s×19
Certified n-emission	:1.204×10 ⁵ (96.02.05 現在)
	:1.204×10 ⁵ × e ^{-0.693/2.645×4.066}
	:41492.5 (00.02.29 現在)

なお、本試験において JNC の中性子線源 (FTC-CF-736) を使用したため 検出効率が既知で査察機器として実績のある Plutonium Scrap Multiplicity Counter (PSMC) により当該線源を測定し得られた Total から PSMC の検出効率を算出した。その結果、本機器の検出効率期待値と測定値の相対誤差は約 1.4% と良好な値を示したことにより当該線源の Certification (“保証” に相当) が立証された。

PSMC による Certification 試験結果を表 7.8 に示す。

表 7.8 PSMC による Certification 試験結果

Source No.	: FTC-CF-736
検出効率の期待値	: 54.3%
検出効率の測定値	: 52.9%
差	: 約 1.4%

⑥ 不感時間(Dead time) 試験

IAEA は、機器の不感時間の補正に関する評価試験を実施した。不感時間係数 AB については既に JNC から提案済みであり、本試験では JNC が提案した不感時間係数 A, B の妥当性を確認するために実施された。

不感時間係数算出結果を表 7.9 に示す。

IAEA が使用する不感時間補正式は、以下の通りである。

$$T_{corr.} = T \cdot \exp^{\delta T / 4}$$

$$R_{corr.} = R \cdot \exp^{\delta T}$$

$$\delta = (A + BT \times 10^{-6})$$

$$T = TOTAL(cps)$$

$$R = REAL(cps)$$

表 7.9 不感時間係数算出結果

JNC が提案した不感時間係数	
A:	3.9 E-06
B:	5.0 E-12
IAEA が算出した不感時間係数	
A:	4.9 E-06
B:	1.59E-12

IAEA の評価結果により、JNC 提案の値を使用することとなった。

⑦ ダイアウェイタイム(Dieaway time)試験

IAEA は、ダイアウェイタイムに関する評価試験を実施した。ダイアウェイタイムは、中性子同時計数法におけるゲート幅を決定するうえで重要な値である。本試験では、JNC が提案した値の妥当性を確認するため簡易的に実施されたものである。ダイアウェイタイム試験結果を表 7.10 に示す。

ダイアウェイタイム及びゲート幅(G)は以下の式に従う。

$$R \propto (1 + e^{-G/\tau}), \quad G = \tau (e^{G/\tau} - 1)/2 \approx 1.257 \tau$$

$$\tau = -G_{64\mu s} / \ln(R_2/R_1 - 1)$$

ここで

G = ゲート幅

R₁ = ゲート幅 64 μs におけるリアルカウント

R₂ = ゲート幅 128 μs におけるリアルカウント

表 7.10 ダイアウェイタイム試験結果

$$R_1 = 312.923 \pm 2.696 \text{ cps (測定時間: } 60\text{s} \times 20)$$

$$R_2 = 542.051 \pm 4.036 \text{ cps (測定時間: } 60\text{s} \times 20)$$

$$\tau = 205.34$$

JNC が提案した WCAS#1 のゲート幅は、232 μs ($\tau = 186 \mu\text{s}$) であるが、本試験結果では、205.34 μs でありこれをゲート幅(G)に換算すると $G \approx 258 \mu\text{s}$ と若干大きな値となる。IAEA は、本試験方法が簡易的であり、リアルカウントの統計的ばらつき等も考慮して JNC の値を使用することとなった。

⑧ チェンバ内中性子検出応答試験

プロファイル試験が、チェンバ内 27 箇所では IAEA ソース PP-127 を使用して実施された。測定された Singles (Total に相当) の平均値及びその標準偏差 (1σ) の百分率は、最大で約 3.4% であり、3 方向の同平均においても約 2.9% の良好な値を示した。本試験の測定位置については、図 7.1、測定結果については図 7.2～図 7.4 参照のこと。

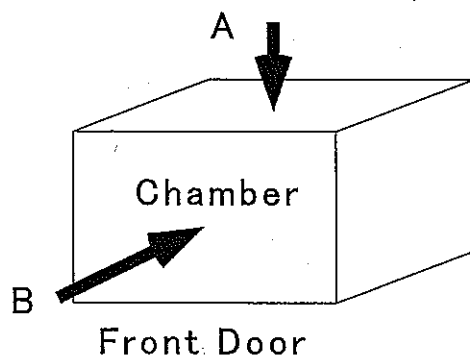
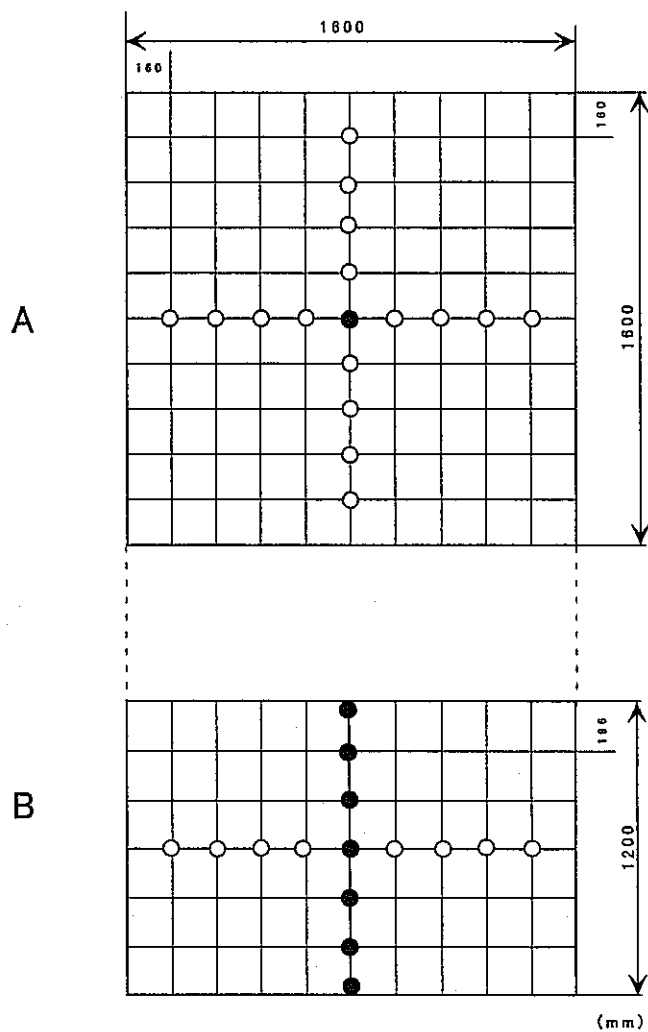


図 7.1 チェンバ内中性子線源位置

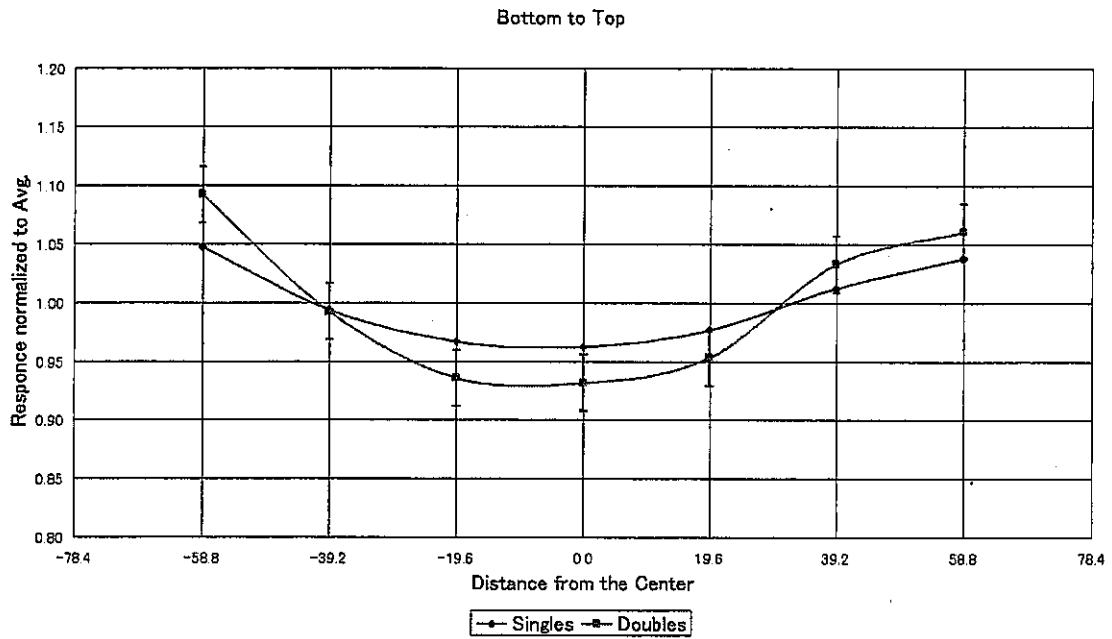


図 7.2 チェンバ内中性子検出応答試験 (Bottom to Top)

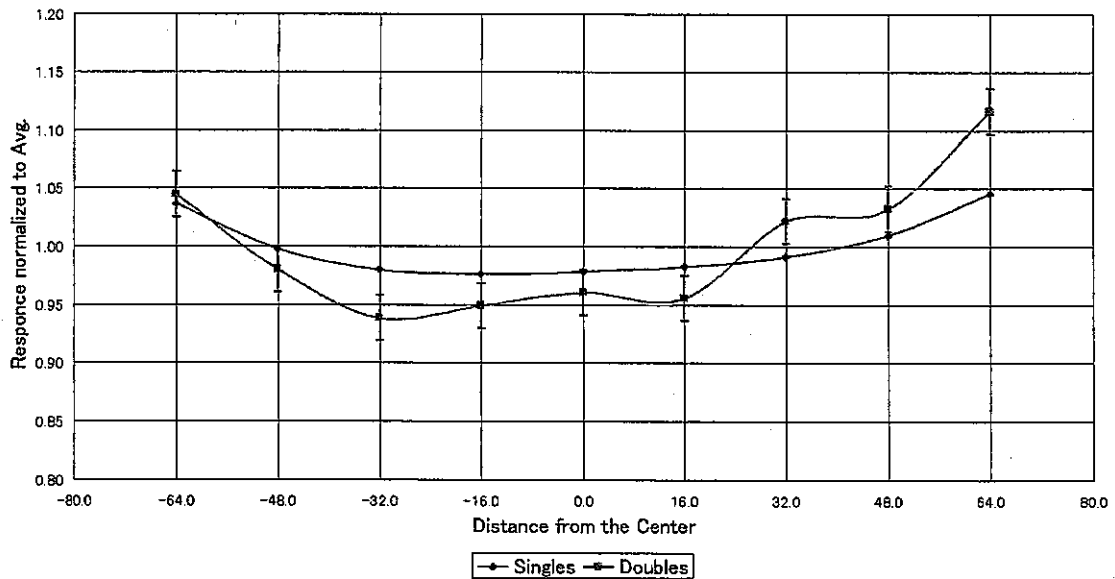


図 7.3 チェンバ内中性子検出応答試験 (Front to Back)

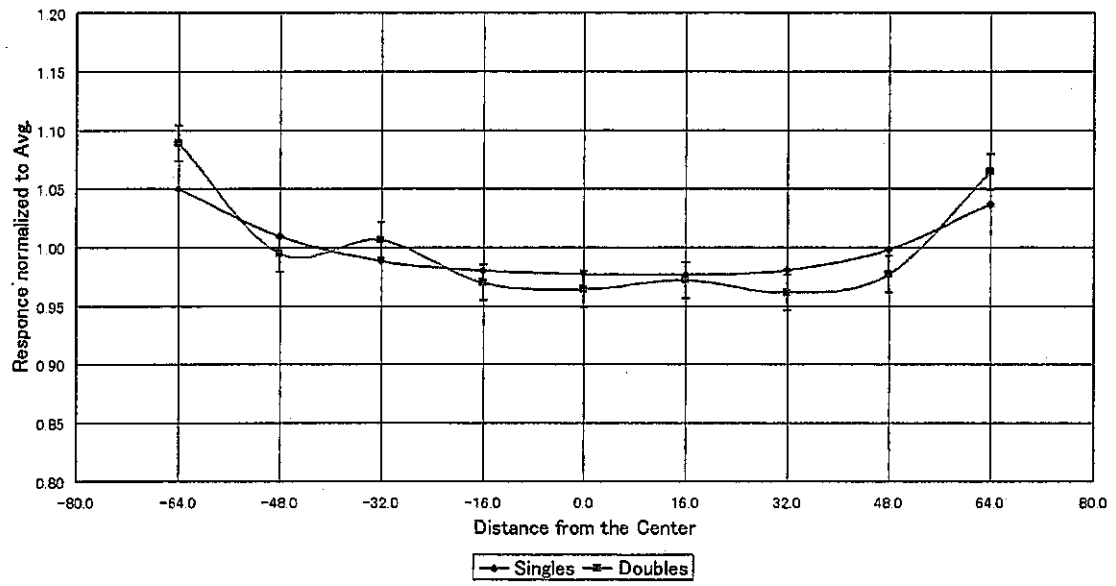


図 7.4 チェンバ内中性子検出応答試験 (Left to Right)

(3) MOX キャリブレーション

MOX 標準試料の短尺ピン(本文 4 参照)を使用したキャリブレーションが、空
コンテナ内 4 箇所において 1g ピン×16 (16gPu), 1g ピン×32 (32gPu), 12g ピン
×10 (120gPu)の 3 点で実施され (ピン配置を図 7.5 に示す) $y=10.00x$ (デミン
グソフトによるフィッティング)の校正式が得られた (図 7.6, 表 7.11 参照)。

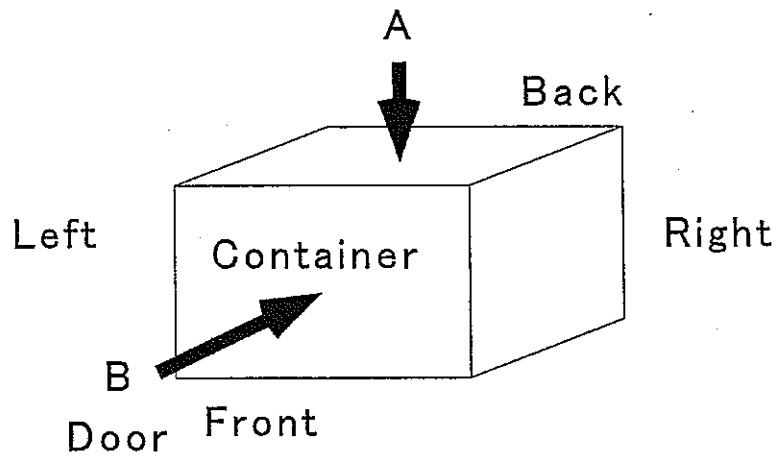
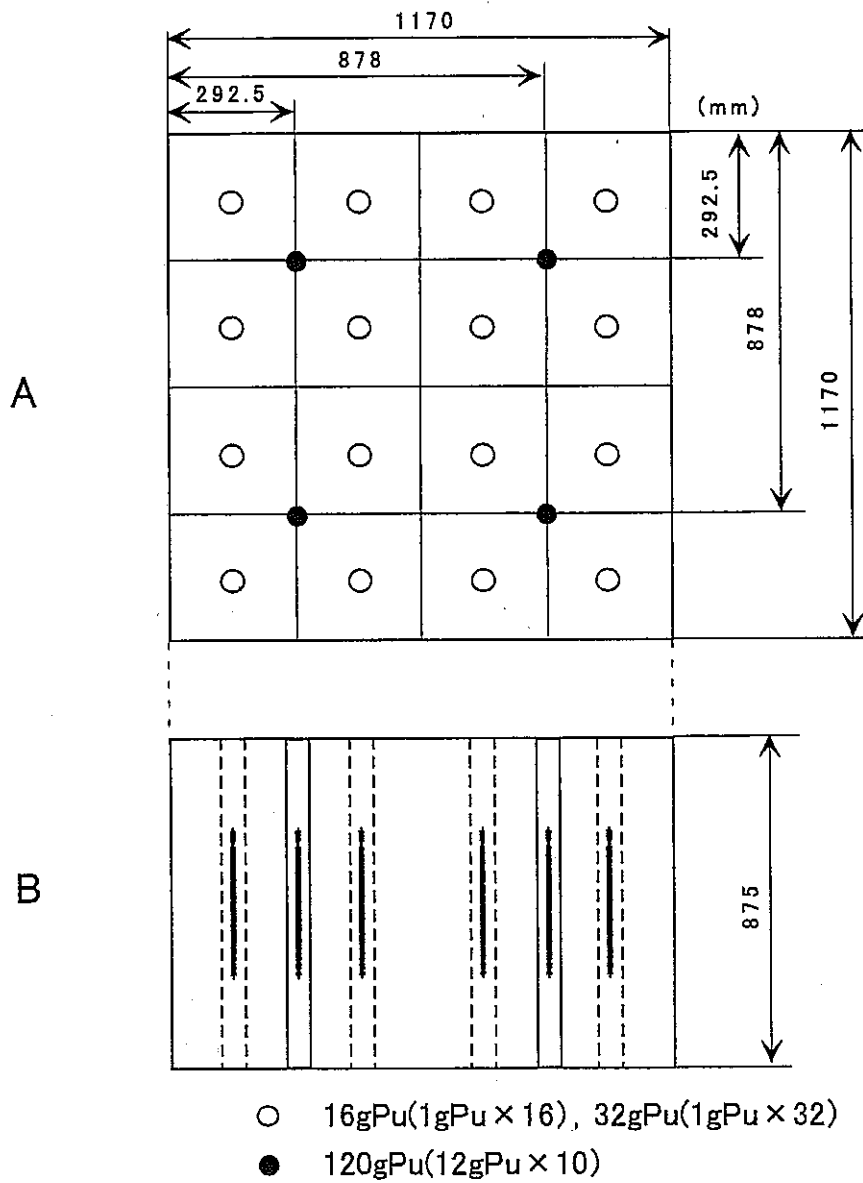


図7.5 MOXキャリブレーション線源位置

(校正式確認試験)

また、この校正式を使用し 1g ピン×16 (16gPu)を空コンテナ内で同条件のもと測定したところ、相対誤差約-1.1%を得た。これにより本キャリブレーションの妥当性が確認された。

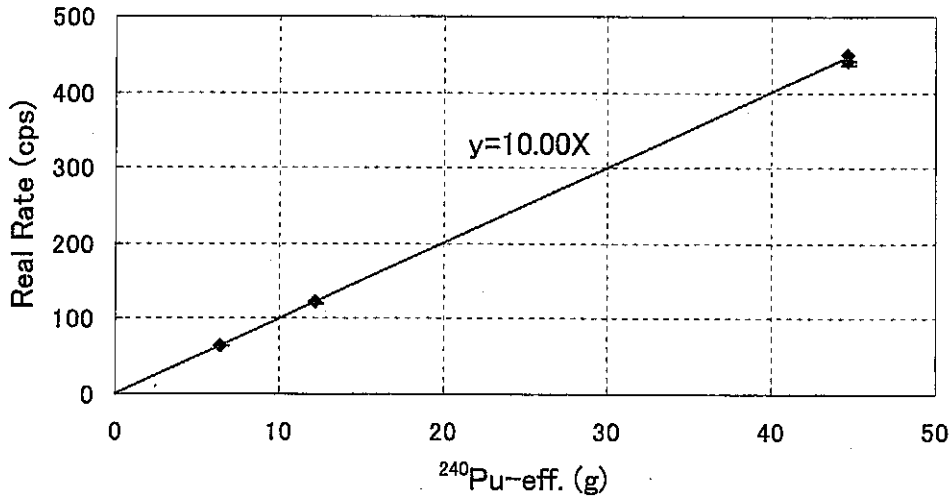


図7.6 MOXキャリブレーション

表 7.11 キャリブレーション測定結果

²⁴⁰ Pu-eff. (g)	Real rate	Real rate/ ²⁴⁰ Pu-eff
0	0	—
6.37	64.35	10.11
12.21	121.72	9.97
44.77	442.78	9.89
44.77	448.64	10.02

(4) 総合誤差評価試験

WCASの誤差を総合的に評価する試験を、低及び高密度2種類のマトリックスコンテナにMOX標準試料の短尺ピンを用いて実施した。本試験で使用したAASパラメータ(マトリックスの補正式)は、JNCが提案したものである。本試験における短尺ピンの配置を図7.7に示す。また、総合誤差評価試験結果を表7.12に示す。

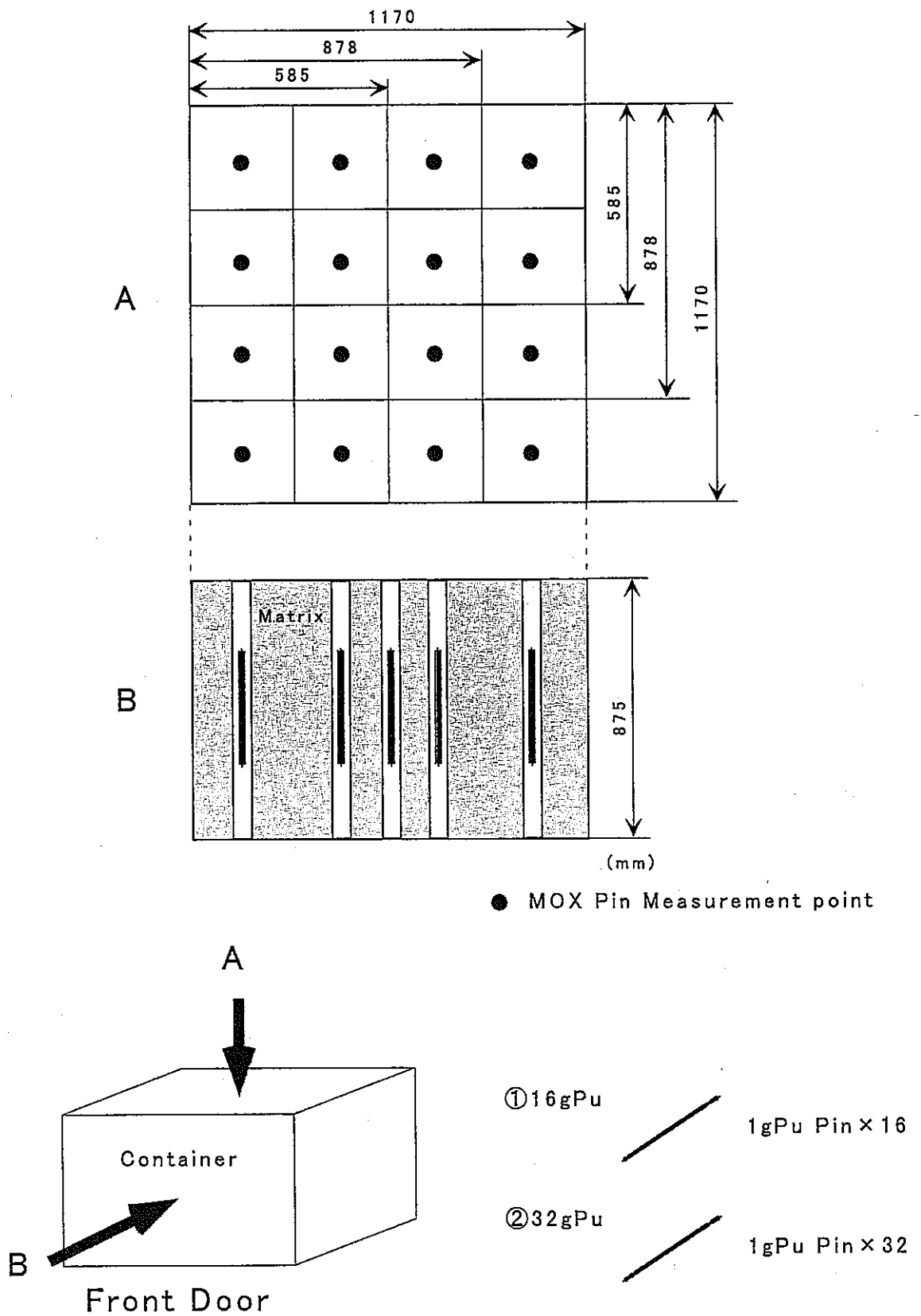


図7.7 測定誤差評価試験線源位置

JNC が提案した AAS パラメータ

$$f(x) = a + bx + cx^2 + cx^3$$

$$a = 0$$

$$b = 1.306 e - 01$$

$$c = 3.262 e + 00$$

$$d = 5.074 e - 01$$

本試験の高密度マトリックス測定において申告値と測定値間に若干大きな差が生じた。そのため,IAEA は,JNC 提案の AAS パラメータを補正し以下のマトリックス補正式を作成した。

IAEA が補正した AAS パラメータ

$$f(x) = a + bx + cx^2 + cx^3$$

$$a = 0$$

$$b = 1.6491 e - 01$$

$$c = 4.11884 e + 00$$

$$d = 6.4068 e - 01$$

表 7.12 総合誤差評価試験結果

マトリックス 種類	サンプル	AAS Perturbation	Diff (%)	CF
低密度 (AAS Pert.0.2)	16g-Pu	0.138	-2.639	1.081
	32g-Pu	0.140	-4.461	1.084
高密度 (AAS Pert.0.4)	16g-Pu	0.335	13.142	1.428
	16g-Pu	0.350	13.448	1.467
	32g-Pu	0.381	5.648	1.550
	32g-Pu	0.345	9.423	1.455

(5) MOX 標準試料の検認

① MOX 標準試料の FPAS 測定

本アクセプタンステストにおいて MOX 標準試料として使用した全短尺ピンの検認を Fuel Pin Assay System (FPAS) で実施した。

② DA サンプルング

本試験で使用した全 MOX 標準試料からサンプルングされた短尺ピンの No. は, B66306A であり, 計量 UNIT No. UFA-5 でペレットのサンプルングが実施された。本ペレットは, DA 処理前 INVS/HRGS を用いて検認測定が行われた。

7.5 まとめ

アクセプタンステストは、IAEA 本部において評価・解析後、2000年5月に正式に容認された。これを受け国及びIAEAは、同年6月から査察機器としてWCAS#1の使用を開始した。

8. おわりに

今回の特性試験は、AAS の駆動部のトラブルや、MOX の標準試料を用いた試験を追加するなどの理由により、約1年半という非常に長い期間となってしまったが、試験の結果としては、概ね良好な結果が得られたと思われる。

以下に主な特性試験の結果を示す。

- (1) 測定誤差は、測定時間が長くなると小さくなる傾向にあるが、本試験条件では、10%(1 σ)以下であった。

測定時間については、誤差範囲を目標 5~10%と設定し算出したところ、3600 秒(コンテナ:1800 秒+AAS: 1800 秒)で、測定誤差が、約 5%(1 σ)以下となった。

- (2) 検出下限値についても、測定時間を長くなると小さくなる傾向にあるが、本装置における検出下限値は、測定時間 1800 秒で約 5mg (4.93mg ²⁴⁰Pu - eff)となった。

9. 参考文献

- 1) 寺門茂, 他: “プルトニウムの非破壊測定技術の開発(1)”
原子力学会「1996 春の年会」要旨集 P.704(1996)
- 2) 寺門 茂, 他: “廃棄物コンテナ非破壊測定装置の開発 (1)”
—WCAS (Waste Container Assay System)の設計・製作—
PNC ZN8410 97-011 (1997)
- 3) H.O.Menlove,J.Baca,et.al, : “WDAS Operation Manual Including the
Add-A-Source Function”, LA-12292-M, (1992)
- 4) N.Ensslin : “Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials,
Chapter 16: Principles of Neutron Coincidence Counting”,
NUREG/CR-5550, LA-UR-90-732, (1991)
- 5) J.E.Stewart : “Passive Nondestructive Assay of Nuclear Materials,
Chapter 14: Principles of Total Neutron Counting” ,
NUREG/CR-5550,LA-UR-90-732,(1991)
- 6) 沢山武夫, 他: “NDA 用標準試料製造報告書, PNC ZN8410 97-009,
(1996)