JAEA-Technology 2010-051



MOX 燃料製造施設の放射線管理への イメージングプレートの適用

Application of Imaging Plate to the Radiation Protection in the MOX Fuel Fabrication Facility

> 佐川 直貴 山崎 巧 黒澤 重行 井﨑 賢二 水庭 春美 高崎 浩司

Naoki SAGAWA, Takumi YAMAZAKI, Shigeyuki KUROSAWA, Kenji IZAKI Harumi MIZUNIWA and Koji TAKASAKI

> 東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部

Radiation Protection Department Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories Tokai Research and Development Center

March 2011

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。 本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。 なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ(<u>http://www.jaea.go.jp</u>) より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2番地4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department, Japan Atomic Energy Agency 2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

MOX 燃料製造施設の放射線管理へのイメージングプレートの適用

日本原子力研究開発機構 東海研究開発センター 核燃料サイクル工学研究所 放射線管理部

佐川 直貴, 山崎 巧, 黒澤 重行*, 井﨑 賢二、水庭 春美, 高崎 浩司+

(2010年12月20日 受理)

MOX 燃料製造施設などでは粉末状のプルトニウム(Pu)をグローブボックス等で取り扱って いる。Pu は内部被ばくによる影響がウランに比べて大きく、軽水炉燃料製造施設よりも厳しい 汚染管理が要求される。このため MOX 燃料製造施設では作業環境中の表面密度及び空気中の 放射性物質濃度をより厳重に管理しなければならない。汚染の可視化及びその数値化は汚染状 況の迅速な把握において作業環境の汚染管理に有効である。

従来のフィルムなどによるプルトニウムの可視化技術は数値化が困難であった。イメージン グプレート(IP) は化学処理などの手間がなく簡便であり、高感度である。IP に潜像として記録 された Photo Simulated Luminescence (PSL)の強度は放射線量に比例しており、高い位置分解 能でデジタル値として得られる。いくつかの Pu の測定に係る研究が IP を使ってなされてきた が、表面汚染などの粉末状の汚染にまで適用できる評価方法は確立されていなかった。

本研究では、MOX 燃料製造施設の放射線管理で採取された Pu 試料を IP に照射し、得られた IP 画像を Image J を用いて解析することにより、バックグラウンドや IP 読取り時に発生する ノイズの中から Pu 汚染を画像上で精度よく識別する最適条件を探査した。また、IP で Pu 汚染を定量するため、1 スポット状の汚染を有する多数の Pu 試料を IP 及び ZnS(Ag)シンチレーション式スケーラによって測定し、換算係数(Bq・PSL⁻¹)を求めた。さらに、多数スポット状の汚染を有する Pu 試料では、個々の汚染スポットの放射能を IP で定量し、ZnS(Ag)シンチレーション式スケーラで得られた試料全体の放射能と一致することを確認した。

本研究で開発した評価法により、従来の放射線検出器では困難であった、複雑な汚染状況に 対する定量的な放射能分布の評価が可能となり、MOX 燃料製造施設における放射線管理の高 度化が期待される。

核燃料サイクル工学研究所:〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

+ 大洗研究開発センター 安全管理部

* 検査開発株式会社

Application of Imaging Plate to the Radiation Protection in the MOX Fuel Fabrication Facility

Naoki SAGAWA, Takumi YAMAZAKI, Shigeyuki KUROSAWA*, Kenji IZAKI, Harumi MIZUNIWA and Koji TAKASAKI⁺

Radiation Protection Department,

Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, Tokai Research and Development Center, Japan Atomic Energy Agency Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received December 20, 2010)

A large amount of unsealed plutonium (Pu) has been handled at mixed uranium and plutonium oxides (MOX) fuel fabricating facilities of the Japan Atomic Energy Agency (JAEA), Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories. At these facilities, workplace monitoring has been performed to prevent possible internal exposure events due to Pu compounds. A conventional technique that visualize the Pu contamination by means of an autoradiography method has been employed on the site; however this technique has a distinct disadvantage in radioactivity quantifications of Pu or other artificial nuclides.

An Imaging Plate (IP) is a passive, time-integrating, two dimensional radiation detector that is based on the photo-stimulated luminescence (PSL) phenomenon. The PSL intensity recorded in the IP has a good proportionality to the radiation intensity in a wide dynamic range. The IP has also excellent properties of the spatial resolution (50 µm squares at the minimum).

The purpose of the present study is to develop a new algorism that implements both the identification and the quantification of each Pu contamination spot in various radiation control samples by using the IP. Characterization was conducted for PSL clusters induced by background radiations and those by Pu contaminants on an IP image of the samples taken at the MOX facilities in order to distinguish each other by several threshold items for the clusters. Conversion factors to the radioactivity from PSL values were also determined for different exposure periods, showing a significant fading effect.

The proposed algorism showed a successful performance for Pu measurements, and would be a method for improving the radiation control at facilities handling Pu compounds.

Keywords: Imaging Plate, Autoradiography, MOX, Plutonium, Image J, Image-analysis

⁺ Health and Safety Department, Oarai Research and Development Center

^{*} Inspection Development Company Ltd.

目 次

1.	は	じめに	1
2.	試	験方法及び機材	3
2	.1	試験試料	- 3
2	.2	イメージングプレート等の試験機材	3
3.	プ	ルトニウムの画像識別の最適条件の探査	- 5
3	.1	プルトニウム試料の IP 測定	5
3	.2	PSL 閾値によるスポットの抽出	5
3	.3	スポットのサイズによるプルトニウムの識別	6
4.	PS	L 強度に基づくプルトニウムスポットの放射能定量	7
4	.1	プルトニウムスポットの放射能換算係数の導出	7
4	.2	試験データの解析	7
5.	多	数のスポットの試料の評価	10
5	.1	試料の画像及び放射能の推定	10
5	.2	検出レベルの検討	11
6.	結	<u>款</u> 珊	12
6	.1	プルトニウム評価法のまとめ	12
6	.2	おわりに	- 12
謝話	辛 -		- 14
参考	今 文	'献	15

JAEA-Technology 2010-051

Contents

1.	Introduction	- 1
2.	Method and Instrumentation of examination	- 3
	2.1 Samples of Plutonium	- 3
	2.2 Instrumentation	3
3.	Identification of the plutonium spot	- 5
	3.1 Measurement of Plutonium using an Imaging Plate	- 5
	3.2 Classification of spots on the PSL image by threshold	- 5
	3.3 Extraction of a Plutonium spot by spot-size	· 6
4.	Evaluation of one spot shaped Plutonium	- 7
	4.1 PSL intensity of Plutonium spot	- 7
	4.2 Data Analysis	- 7
5.	Evaluation of many spots shaped Plutonium	10
	5.1 Evaluation of Plutonium radioactivity by PSL intensity	10
	5.2 Detection level of Plutonium	11
6.	Conclusion	12
	6.1 Summary of Autoradiography using Imaging Plate	12
	6.2 Summary	12
A	cknowledgements	14
Re	eferences	15

表リスト

Table 2.1	プルトニウム試料(1粒子状)	16
Table 2.2	プルトニウム試料(多数粒子状)	16
Table 2.3	IP の資機材の仕様	17
Table 4.1	フェーディングの評価	18
Table 4.2	5 分間露光の場合の換算係数	18
Table 4.3	5分間接触測定の放射能推定値と放射線測定器による放射能の比較	18
Table 4.4	10 分間以上のデータの最小二乗法による解析結果	19
Table 4.5	60 分間接触測定の放射能推定値と放射線測定器による放射能の比較	19
Table 5.1	試料 No.16 の個々に識別されたスポットの PSL 値の例	20
Table 5.2	IP によって推定された複数スポット試料の放射能	21
Table 5.3	照射時間毎の 40 ピクセルのスポットの推定された放射能	21

図リスト

Fig.2.1	典型的な放射線管理試料の外観	22
Fig.2.2	IP 及び読取装置等の構成	22
Fig.2.3	QL 値と PSL 強度の関係	23
Fig.3.1	1 スポットの PSL 画像	24
Fig.3.2	試料 No.10の PSL 画像及び 3 次元グラフ	25
Fig.3.3	試料 No. 10 のスポットの断面の PSL 強度	25
Fig.3.4	閾値の区分の効果	26
Fig.3.5	バックグラウンドのスポットサイズの分布	26
Fig.3.6	試料 No. 10 のスポットの解析画像例	27
Fig.4.1	露光時間による IP のフェーディングの影響	28
Fig.4.2	PSL 強度と放射能の関係 (露光時間 5 分間)	28
Fig.4.3	IP によって推定されたスポットの放射能と ZnS シンチレーション検出器で	
	測定された放射能の比較(露光時間5分間)	29
Fig.4.4	露光時間と放射能当たりの PSL 強度の関係 (露光時間 10 分間以上)	29
Fig.4.5	IP によって推定されたスポットの放射能と ZnS シンチレーション検出器で	
	測定された放射能の比較(露光時間 10 分間以上)	30
Fig.5.1	多数スポットのスミヤ試料の PSL 画像	31
Fig.5.2	多数スポットの粘着シートの PSL 画像	32
Fig.5.3	多数スポットの空気試料の PSL 画像	33
Fig.5.4	試料 No.16 の識別されたプルトニウムのスポット	34
Fig.5.5	多数スポット試料の ZnS シンチレーション検出器で測定された放射能と	
	IP の PSL 強度から推定された放射能の比較	35

1. はじめに

MOX(Mixed Oxide)燃料製造施設などのプルトニウム取扱い施設では、グローブボックスなど のさまざまな閉じ込め容器内でプルトニウム及びウランが取り扱われる。プルトニウムの吸入 摂取は内部被ばく線量への影響が大きく¹⁾、プルトニウムは軽水炉燃料のウランよりも比放射 能が高いことから軽水炉燃料製造施設よりも厳しい汚染管理が要求される。プルトニウムの吸 入から作業者を防護するため、プルトニウム取扱い施設では作業環境中の表面密度及び空気中 の放射性物質濃度が常に監視される。これらの汚染管理では、α線測定用サーベイメータなど の放射線測定機器を用いて、様々な放射線管理試料中のプルトニウム放射能の評価が行われて いる。

汚染の可視化及びその定量化は、作業環境の汚染管理において、汚染状況の迅速な把握に極めて有効である。これまで、エッチングや乳剤など²⁾³⁾を利用したさまざまな放射性物質の可視化技術が開発された。日本原子力研究開発機構 (Japan Atomic Energy Agency: JAEA)・核燃料サイクル工学研究所では、ZnS(Ag)シンチレータとポラロイドフィルムを組み合わせたオートラジオグラフィ技術を開発し、プルトニウム汚染の画像化に運用してきた。しかしながら、この方法では画像の数値化が困難であり、放射能の定量ができないという欠点があった。

イメージングプレート(IP)⁴⁾⁵⁾は、医療用 X 線フィルムの代替として、富士フィルム社によっ て開発された、光輝尽発光現象(Photo Simulated Luminescence: PSL)を利用した二次元積分型放 射線検出器である。IP に記録された潜像は、レーザースキャニング装置によってデジタル画像 として得られる。IP は、従来の X 線フィルムに比べて、幅広いダイナミックレンジと高い位置 分解能を有する。こうした IP の放射線検出器としての優れた特性から、多くの研究者が放射線 管理への応用を試みている⁶⁾⁷⁾⁸⁾。その中でも、IP によるα線検出に関する研究としては、以下 の 2 つの研究が代表的である。

Zeissler et al.⁶⁰⁷⁾ は、IP の画像上において"カウント"と呼ばれる概念を導入して、α線、β 線及びγ(X)線の識別及び放射能の評価が IP で可能であることを示した。1 カウントは、IP へ の1回の放射線入射イベントによって生じた、複数の画素 (ピクセル)の集合体である。Zeissler et al は、1 ピクセル 25 μ m の解像度で IP 画像を取得し、カウントに含まれるピクセルの PSL 強度分布を解析した。プルトニウムから放出されるα線(約 5.1 MeV)では、この PSL 強度分 布は、平均して 50~60 μ m の半値幅 (Full Width at Half the Maximum: FWHM)を持つことが解 った。β線やγ線は、1 カウント当たりの PSL 強度が低い又はカウントが現れないため、カウ ントの画像解析による線種弁別の可能性が示唆された。

Koarashi et al.⁸⁾ は、1 ピクセル 50μmの解像度で空気サンプリング試料の IP 画像を取得し、 試料上のプルトニウムとラドン子孫核種の弁別及びプルトニウムの放射能を IP 画像から定量 した。Koarashi et al の研究では、IP 画像上でα線の入射イベントが複数のピクセルに及ぶこと から、周囲のピクセルに比べて PSL 強度の最も高いピクセルを中心として、5×5 ピクセルの正 方形エリアを単位とし、PSL 強度の解析を行った。その結果、ラドン子孫核種に起因する正方 形エリア内の PSL 強度は、測定時間やラドン子孫核種の濃度にもよるが、一定の条件下では 4.0 PSL を超えないことが示された。一方、α線が継続的に放出されるプルトニウムでは、PSL 強 度が測定時間とともに増加してゆくため、これに閾値を設定することで、プルトニウムとラド ン子孫核種の弁別が可能となる。また、プルトニウムの PSL 強度は、その放射能に比例するこ とが示されている。しかしながら、放射線管理を目的とした Pu 計測におけるイメージングプ レートのフェーディングの補正はこれまでに十分に研究がなされてこなかった。

MOX 燃料製造施設の汚染の主体となるのは、燃料ペレットの原料となる MOX 粉末である。 管理区域内の作業環境モニタリングで採取される主な試料としては、スミヤ、空気フィルタ、 汚染拡大防止のための粘着シートなどがある。これらの試料中では、汚染が1スポットに留ま るものから、複数のスポットにわたるものまで様々である。ZnS(Ag)シンチレーション式スケ ーラや Si 半導体検出器などを用いた、通常行われる α線計測では、1 サンプル全体の放射能を 定量しており、試料中の放射能分布は特に考慮されない。しかし、試料中の個々の汚染スポッ トを識別し、それらを定量することによって、放射線計測の精度向上が図れる他、内部被ばく 線量評価で重要となる MOX 粉末の粒径を評価できる可能性があり、放射線管理において非常 に有益である。このような放射線計測を行うことができる、実用的な手法は未だ開発されてい ない。

本研究では、MOX 燃料製造施設における更なる放射線防護の高度化を図るため、上述した 放射線計測手法を、IP を活用して開発することを目的とした。作業環境モニタリングにおいて、 MOX 粉末による汚染の可視化、放射能分布の定量的な評価は、汚染トラブル対応の迅速化や 除染の効率化、引いては、放射線防護の向上に繋がる。

- 2 -

2. 試験方法及び機材

2.1 試験試料

MOX 燃料製造施設(プルトニウム燃料第三開発室)の放射線管理を通じて、プルトニウム が付着した 20 個の放射線管理試料(表面密度検査用スミア:12 試料、汚染拡大防止用粘着シ ート:4 試料、空気ダスト捕集フィルタ:4 試料)を採取した。Fig.2.1 に、これらの試料の外 観を示した。試料は,付着した Pu 汚染の剥離を防ぐため、ポリカーボネートフィルム(厚さ: 0.45 mg·cm⁻²)によって養生した。試料中の Pu によるα放射能は、ラドン子孫核種の放射能が 十分に減衰した後、ZnS(Ag)シンチレーション式スケーラによる 30 分間の計測によって定量し た。同スケーラの計数効率は²⁴¹Am 標準線源で求め、その際、ポリカーボネートフィルムによ るα線減衰の効果を考慮した。Pu 同位体の 1 つである²⁴¹Pu はβ放射体であるため、定量した 試料のα放射能には含まれない。なお、MOX 粉末として、Pu と同伴する U 同位体もα放射体 であるが、双方の比放射能から、試料全体のα放射能に対する U 同位体の寄与は無視できると 考えられる。

前述した 20 試料は、ZnS(Ag)シンチレータシートとポラロイドフィルムを組み合わせた従来 型のオートラジオグラフィ法²⁾によって、試料中の放射能分布を把握した。その結果、1 スポ ットに汚染が局在する試料と、2 スポット以上の複数の箇所に汚染が点在する試料があること が確認された。1 スポット及び 2 スポット以上の汚染を有する試料は、それぞれ 10 試料ずつで あった。Table 2.1 及び Table 2.2 に、ZnS(Ag)シンチレーション式スケーラで定量した各試料の α放射能及びその統計不確かさ(1σ)を示す。

2.2 イメージングプレート等の試験機材

2.1 で述べた放射線管理試料を、IP (BAS-MS2325, FUJIFILM Co; 230 mm wide ×250 mm high) 及び IP 読取装置(BAS-1800II, FUJIFILM Co.) などで構成されるシステムによって測定した。 Fig. 2.2 に IP 及び読取装置等の構成、Table 2.3 に IP 及び IP 読取装置等の仕様をそれぞれ示す。 放射線管理試料を IP に露光する事前に、IP を IP 消去器によって 60 分間可視光を照射して初期 化した。放射線管理試料の露光は、密閉された専用のカセッテの中で、試料を IP に密着させて 行った。露光後速やかに IP の潜像を読み取った。IP 全体を読取までに要した時間は、約 3 分 30 秒であった。IP は可視光によって潜像の減少が生じることから、IP をカセッテから取り出 して IP 読取装置にセットする間は、一時的に室内の照明を落とした。

IP に記録された潜像は、1 画素(ピクセル) 50μ m 角の解像度、16 bit (0~65535) スケール の量子レベル (Quantum Level :QL) 値として読取した。QL 値は、読取った潜像を濃度階調で 分割したもので、5 桁ものダイナミックレンジに及ぶ潜像を少ない容量で格納するために、対 数圧縮した潜像データである。PSL 値は、この QL 値を放射線量に比例する発光量に換算した ものである。QL 値と PSL 値の関係は、次式で与えられる。

$$PSL = \left(\frac{P_{\text{Size}}}{100}\right)^2 \times \frac{4000}{\text{S}} \times 10^{\text{Lx}\left(\frac{\text{QL}}{2^{\text{B}}} - \frac{1}{2}\right)}$$
(1)

ここで、

P_{Size}:1ピクセルのサイズ (= 50 μm)
S:IPの感度設定値 (= 4000)
L:QL値のダイナミックレンジ (= 5)
B:濃度階調設定値 (= 16)

上式中の各パラメータは、IP を読取る際に決定される。今回決定したパラメータ条件では、 16 bit の QL 値の範囲に対応する PSL 値の範囲は、7.9071×10⁻⁴ PSL (QL=1) から 79.046 PSL (QL=65535) となる。QL 値が 0 の場合、PSL 値は例外的に 0 として処理される。Fig.2.3 に QL 値と PSL 値との関係を示した。

潜像を構成する個々のピクセルの PSL 値の解析には、米国国立衛生研究所(National Institute of Health:NIH)から公開⁹⁾されている Image J と呼ばれる画像解析ソフトウェアを利用した。 Image J は、無料で提供されるパブリックドメインとして開発されたソフトウェアであり、プラ グインと呼ばれる拡張機能のため追加のパッケージが多くのユーザによって開発、公開されて いる。潜像の QL データの Image J への取り込みの際も、プラグイン(ISAC)を利用して行っ た。(1) 式を用いた QL 値から PSL 値への変換¹⁰⁾は、Image J の Calibration 機能によって行っ た。 3. プルトニウムの画像識別の最適条件の探査

3.1 プルトニウム試料の IP 測定

Fig.3.1 に露光時間 60 分間で得られた Table 2.1 の放射線管理試料(従来法のオートラジオグ ラフィで1スポット状の汚染が確認された試料)の PSL 画像を示す。各試料の PSL 画像は1 辺 100 ピクセル(5 mm 角)であり、青色から赤色になるほど高い PSL 値となる色調で表現し ている。PSL 画像の中央には、比較的 PSL 値の高い、複数のピクセルから構成される領域が拡 がっており、従来型のオートラジオグラフィで得られた画像と同様である。しかし、中央のス ポットの周囲には、無数の比較的小さなスポットも同時に観察される。中央のスポットは、試 料の放射能が高いほど大きくなる傾向がある。

Fig.3.2 には、試料(No.10)の PSL 画像(Fig.3.2 (a))及びそれを構成するピクセルの PSL 値 を 3 次元グラフとしたもの(Fig.3.2 (b))を示す。同図中央のスポットは、試料を露光している 間、Pu から放出される α 線が IP に継続的に照射されたために生じたものと考えられる。一方、 このスポット周辺に点在する無数の比較的小さなスポットは、主に自然放射線や IP 固有のバッ クグラウンドノイズによる、PSL 値の統計的変動の中で形成されたものと推察される。画像解 析において、Pu からの α 線に起因するスポットを選択的に抽出するためには、スポットの大き さや PSL 値に関して適当な閾値を設定する必要があり、その方法を次項以降に述べる。

3.2 PSL 閾値によるスポットの抽出

Pu 汚染により生じる IP 画像上のスポット(以下、Pu スポット)を、それ以外の要因により 生じるスポット(以下、BGスポット)と適切に弁別するため、個々のピクセルの PSL 値に閾 値を設定する方法を以下に述べる。Fig.3.3 に、試料(No.10)中に確認された Pu スポットにつ いて、ある直径方向に対する PSL 分布を示した。同図には、Pu スポットの外側に属するピク セルの PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%)のレベルを示した。これらのレベルを、画像 解析において検出可能なピクセルに対する閾値に設定し、Pu スポットの領域及び Pu スポット と BG スポットの識別に及ぼす影響を Fig.3.4 に例示した。閾値を前述した PSL 累積頻度値 (90%)に設定した場合、Puスポット周囲には無数のBGスポットが検出される。閾値が上が るに従い(99%、99.9%)、BG スポットの個数、大きさともに減少してゆく。Pu スポット内の PSL 値の合計は、二つの閾値(99%、99.9%)間で、差は 1%以内であった。当然ながら、閾値 を上げることによって、低い放射能で生じる Pu スポットを BG スポットとして見落とすことが 考えられる。閾値を下げれば、BG スポットが多く検出され、Pu 汚染の定量が困難となる。こ の点に関して、目標とする Pu 汚染の検出下限放射能(MDA: Minimum Detectable Activity)を 定め、閾値を実験的に求める必要がある。以降は、PSL 累積頻度値(99%)を閾値に設定し、 IP 画像の解析を行った。この条件における Pu スポットの MDA は,5 章でその評価結果を述べ た。

3.3 スポットのサイズによるプルトニウムの識別

次に、Pu スポットと BG スポットの識別を、それぞれのスポットの大きさによって行うこと を検討した。Fig.3.4 に示すように、BG スポットの大部分は数ピクセルで構成される様に見え る (PSL 累積頻度値 99%を検出可能なピクセルの閾値とした場合)。それに比べて、IP 画像中 央の Pu スポットは、数百以上のピクセルから構成される。

潜像を IP 消去器により消去した IP を放射線管理試料に露光することなく、一定時間(10, 30, 60, 180, 360 及び 1440 分間) 放置して得られた IP 画像から閾値を用いて BG スポットを 抽出した。Fig.3.5 に、BG スポットを構成するピクセル数の相対割合を示した。この相対割合 は露光時間によって変化を受けず、ピクセル数が多くなるにつれて頻度が減少する傾向も共通 であった。40 ピクセル以上の BG スポットは、試験した露光時間では確認されなかった。

以上のことから、本研究では、IP 画像上の Pu スポットを抽出するための条件として、①1 ピクセル当たりの PSL 値、②スポット内のピクセル数の双方について、BG スポットとの識別 を効率良く行うための閾値と設定することを提案した。Image J では、このような画像解析の条 件を容易に行うことができ、識別したスポットの PSL 強度やピクセル数等の情報を個々にリス ト化することができる。②の閾値は、前述した BG スポットの解析から 40 ピクセルとした。こ れを超えない Pu スポットが存在しないとは言い切れない。しかし、長時間露光することで PSL 値が増加するため、①の閾値を超えて検出可能になると思われる。Fig.3.6 に示すのは、提案し た抽出条件で求めた Pu スポットである。従来型のオートラジオグラフィで得た画像と同様、IP 上でも 1 個の Pu スポットとして表示し、周囲の小さな無数のスポットは BG スポットとして排 除している。同図において、水色の線で囲まれた領域が Pu スポットに対応するものであり、 スポット内のピクセル数は 794 ピクセル、これらの PSL 値の合計は 1460 PSL と評価された。 注意しなければならないのは、ここで決定した Pu スポットの抽出条件が、MOX 燃料製造施設 で得られた典型的な放射線管理試料に対して決められたことである。他の Pu 取扱施設(例え ば、再処理施設など)や特殊な条件で得られた放射線管理試料では、必ずしも適当でない可能 性がある。 4. PSL 強度に基づくプルトニウムスポットの放射能定量

4.1 プルトニウムスポットの放射能換算係数の導出

PSL 画像上で検出されたプルトニウムスポットを定量的に取扱うため、プルトニウムスポット内に含まれる全ピクセルの PSL 値の合計値を求めた。プルトニウムスポットの領域は、前章で述べた方法で決定している。自然放射線や機器ノイズなどに起因する PSL 値の平均的な増加分は、PSL 画像の試料を配置していない領域から評価し、元の PSL 値から差し引いた。

プルトニウム汚染の α 放射能を IP で定量するため、プルトニウムスポットが1スポット 状であることが確認された 10 試料(Table 2.1)を選定し、これらの試料の ZnS(Ag)シンチ レーション式スケーラによる α 放射能値とプルトニウムスポットの PSL 値を比較し、換算 係数(Bq・PSL⁻¹)を評価した。PSL 値はフェーディングの影響があることから、同一試料を 様々な露光時間で露光し換算係数を求めた。露光試験は 2 回実施し、露光終了から潜像読み 取りまでに生じるフェーディングについては、これに要する時間が比較的短く一定であるこ とから、本研究では特に考慮しなかった。露光時間 10 分間以上の条件で得た換算係数につ いては、IP の露光中におけるフェーディングの評価を行っている。以上のことから、フェー ディングは露光時間のみによる影響を受けると仮定し、これを評価した。

4.2 試験データの解析

IP の感度には温度依存性があり、IP に記録された潜像は時間経過とともに減衰(フェー ディング現象)することが知られている。IP のフェーディングに関する多くの報告があるが、 フェーディングの理論式¹¹⁾は温度及び時間の関数となっている。一方、MOX 燃料製造施設 内の作業環境は換気・空調されており、作業環境の温度は一定(約24℃)である。また、IP は試料の露光後に直ちに読み取りを行うため、露光時間のみのフェーディングを評価した。

長時間の露光により IP の PSL 上限(79.043 PSL)に達したピクセルを含むスポットがあったが、それらは評価のデータから除いた。また、第2回試験のデータについては、No.8 は PSL 値が1回目に比べて有意に減少したため、このデータを評価から除いた。この原因として、2回の露光試験の間に同試料にゴミなどの不純物が混入したと推察される。他の試料については大きな変化はなかった。フェーディングの評価においては、第1回試験では10から1020分間までのデータがある6試料のデータ(No.1~No.6)を、第2回試験では10から360分間までのデータがある8試料(No.1~No.7及び No.9)の測定データを使用した。

Fig.4.1 にプルトニウムスポットの PSL 値と積算放射能量の比 $(\frac{I}{At})$ について、露光時間 t での変化のグラフを示す。Table 4.1 には、各露光時間の同比の平均値と標準偏差を示す。こ れらの結果から、露光時間 10 分間以上のデータでは、緩やかではあるものの、フェーディングの効果が有る様に思われる。露光時間 5 分間のデータでは、他の露光時間のデータと比べて大きなばらつきが生じている。この理由の一つとして、露光時間が短い(~10 分間以内)

場合に顕著となるフェーディングの急激な変化が考えられる¹¹⁾¹²⁾。したがって、以下の解析では、露光時間 10 分間以上のデータを利用し、フェーディングの露光時間を変数とする関数を得るために回帰分析を行った。

10 分間以上の露光のデータにおいて、回帰分析を行うと $\frac{I}{At}$ は相関係数は低いものの、露 光時間 t の指数でわずかに減少傾向があり、これは露光時間中のフェーディングを示している。

これらの結果から、プルトニウムのスポットについては、以下の関係式でフェーディング を近似して解析する。ここで、*I*は試料のスポットの PSL 強度(PSL)、*A* は放射能 (Bq)、 *t* は露光時間(min)、*a*及び*b*は係数である。

 $I = a A t^b \tag{1}$

4.2.1 短時間露光における換算係数

5 分間のデータについては、露光時間が決まっているため、(1)式から以下の式に置き換え て解析する。ここで*c*は定数である。

A = c I

(2)

第1回試験の10試料の測定データ及び第2回試験の9試料の測定データについて、(2)式から換算係数c(=*A*/*I*)の平均及び標準偏差を求めた。Table 4.2 に評価結果及び放射能 *A*の換算 式を示す。換算係数cは誤差の範囲内で一致している。また、Fig.4.2 にデータと換算係数cの 直線を実線、誤差の範囲を点線でそれぞれ示す。

Fig.4.3 及び Table4.3 には PSL 強度から推定した 5 分間の測定の放射能と ZnS シンチレーション検出器で測定された放射能との比較を示す。ばらつき及び誤差は大きいものの標準偏差の 2 σ の範囲内で一致している。

4.2.2 任意時間露光における換算係数

Σ

露光時間 10 分間以上のデータの解析では、(1)以下の評価式について最小二乗法で解析した。ここで*f*はプルトニウムスポットのα放射能の換算係数(Bq·PSL⁻¹)に対応する。

$$f = \frac{I}{A} = a t^b \tag{3}$$

(3)式の両辺の対数をとると以下の式となり、線形一次方程式に置き換えて、最小二乗法で係数を評価することができる。

$$y = k + b x$$
(4)
こで $y = \ln f, k = \ln a, x = \ln t$ である。放射能 A は(3)式及び(4)式から
$$A = \frac{I}{a t^{b}} = I e^{-y}$$
(5)

となる。

次に誤差について評価する。誤差の伝搬によりyの誤差 σ_y は、

$$\sigma_{y} = \pm \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial k}\right)^{2}} \sigma_{k}^{2} + \left(\frac{\partial y}{\partial b}\right)^{2} \sigma_{b}^{2} = \pm \sqrt{\sigma_{k}^{2} + \sigma_{b}^{2} (\ln t)^{2}}$$
(6)

となる。誤差 σ_f は、

$$\sigma_f = \frac{\partial f}{\partial y} \sigma_y = \pm a t^b \sqrt{\sigma_k^2 + \sigma_b^2 (\ln t)^2}$$
⁽⁷⁾

となる。また、(5)式から σ_A は、

$$\sigma_{A} = \frac{\partial A}{\partial y} \sigma_{y} = \pm A \sqrt{\sigma_{k}^{2} + \sigma_{b}^{2} (\ln t)^{2}}$$
(8)

である。誤差 σ_A は照射時間 t とともに $\ln t$ で増加することとなり、照射時間に依存するフェ ーディングも誤差に影響していると考えられる。

(3)式を基に最小二乗法により解析を行った。第1回試験については10分間から1020分間までのデータがある6試料のデータ(No.1~No.6)を使用した。また、第2回目試験については10分間から360分間までのデータがある8試料(No.1~No.7及びNo.9)の測定データを使用した。 最小二乗法での解析結果をTable 4.4に示す。また、Fig.4.4に最小二乗法による解析結果を示す。 近似曲線を実線、誤差の範囲を点線で示す。第1回及び第2回試験において*a*及び*b*の係数は 誤差範囲内で一致している。

Table 4.5 に PSL 強度から推定された 60 分間接触測定の放射能と ZnS シンチレーション検出 器で測定された放射能の結果を示す。また、Fig.4.5 に PSL 強度から推定された放射能と ZnS シンチレーション検出器で測定された放射能との比較結果を示す。PSL 強度から推定された放 射能は標準偏差の 2 σ の範囲内で一致している。

5. 多数のスポットの試料の評価

5.1 試料の画像及び放射能の推定

複数のスポットを含む Table 2.2 の 10 個の試料を IP によって接触測定を行った。スミヤ試料、 粘着シート及び空気フィルタの PSL 画像を Fig.5.1 から Fig.5.3 にそれぞれ示す。それぞれの試 料の PSL 画像でプルトニウムの分布を見ることができる。表面密度を評価するスミヤ試料及び 粘着シートでは、試料によって粒子のサイズや、分布が異なっている。一方、空気中の放射性 物質濃度を評価する空気フィルタでは、さまざまなサイズのプルトニウム粒子の均一な分布が 見られる。

これらの試料は閾値とスポットサイズによってプルトニウムが識別された。接触測定時間は α放射能から考慮して選択した。Fig.5.4 に試料 No.16 の識別されたプルトニウムのスポット例 を示す。試料 No.16 の粘着シートについて、10 分間の接触測定を行った。あらかじめ定めてお いたバックグラウンド領域のデータから平均バックグラウンドは約 0.0007 PSL/pixel、バックグ ラウンドの 99.0%となる閾値は 0.0097 PSL と評価された。この閾値と 40 ピクセル以上のスポ ットサイズで識別した結果、91 個のプルトニウムのスポットが識別された。Fig.5.4 において、 複数の粒子が集まっている 31 番や 66 番は、1 つの大きなスポットの集合として識別されてい る。それぞれのスポットの PSL 強度から平均バックグラウンド分を差し引き、個々のスポット の PSL 強度を求めた。Table 5.1 に個々のスポットの PSL 強度の例を示す。これら 91 個のスポ ットの PSL 強度の合計は 6392 PSL であった。

試料のプルトニウムの放射能 *A*_Tは、個々のスポットの PSL 強度から(2)または(5)式により計算される放射能 *Ai* の合計となる。

$$A_T = \sum A_i$$

Fig.4.1 で見られるように、スポットの放射能 Ai は対数表示において正規分布である。したがって、合計の放射能の誤差の評価においても、

(9)

$$Y = \ln A_T = \ln \left(\sum A_i\right) \tag{10}$$

として評価する。10分間接触測定の場合、(5)式より(10)式は、

$$Y = \ln A_T = \ln \left(\sum I_i e^{y} \right) = \ln \left(e^{y} \sum I_i \right) = \ln \left(\sum I_i \right) - y$$
(11)

となる。したがって、誤差σΥは、

$$\sigma_Y = \frac{\partial Y}{\partial y} \sigma_y = -\sigma_y \tag{12}$$

となる。 $A_T = e^Y \mathcal{D} \mathcal{U}(12)$ 式より、

$$\sigma_{AT} = \frac{\partial A_T}{\partial Y} \sigma_Y = e^Y \sigma_Y = -\sigma_y \sum A_i = \sigma_R \sum A_i$$
(13)

となる。誤差については 5 分間接触測定についても同様となる。IP によって推定された α 放射能及び標準誤差を Table 5.2 及び Fig.5.5 に示す。IP と ZnS シンチレーション検出器による α 放射能評価値の比は 0.8 から 1.4 の範囲であった。相対誤差は 5 分間接触測定で 40%、15 分間 接触測定で 22%、及び 180 分間接触測定で 25%である。 施設内の汚染管理に係る汚染状況の把握においては、プルトニウムの識別及び位置分解能が 重要である。放射能の定量において相対誤差は、約 21%(10分間接触測定)~40%(5分間接 触測定)あるが、放射線防護における汚染状況の把握に対してサーベイメータなどの従来の放 射線測定器との併用により、汚染管理に有効であると考えられる。誤差の主な要因は、試料か ら放出されるα線の減衰やプルトニウム粒子の自己吸収、フィルタなどへの潜り込みがあり、 試料の状態の改善によって誤差を小さくすることも可能と考えられる。

5.2 検出レベルの検討

本研究の評価方式におけるプルトニウムの検出下限レベルについて検討した。Table 2.2 の試料 No.17~No.20 の空気フィルタについて、5, 10, 15, 30, 60, 180, 360 及び 1440 分間の接触測定 を行った。閾値で区分し、40 ピクセルのスポットのみ抽出して照射時間毎の放射能を比較した。 Table 5.3 に PSL 強度から推定した 40 ピクセルの放射能を示す。また、それぞれの照射時間に おけるスポットの個数、最小、最大、平均値を示すとともに、相対誤差から推定した両側 95% 信頼区間を示す。観測された最大及び最小値はほぼ信頼区間の範囲内であった。

本評価法におけるプルトニウムのスポットの検出下限レベルは、5分間の接触測定で約0.07 Bq、60分間で約0.02 Bq、1440分間(24時間)で約0.002 Bq である。また、本評価方式でスポッ トが検出されなかった場合の検出限界は信頼区間の上限値であることが期待される。

一方、本実験で約 500 Bq·min のスポットにおいて、79.043 PSL の上限に達した。接触測定における照射時間は試料の放射能と IP の上限値を考慮して選択されるべきである。

6. 結論

6.1 プルトニウム評価法のまとめ

本研究の結果から得られた PSL 画像からのプルトニウム評価法について以下にまとめる。

(1) IP による試料の接触測定

IP への試料の配置は、IP 感度の均一性を考慮し、IP の周囲の 10 mm を除く中央部の領域 (210 mm×230 mm)を使用する。また、試料を配置しないバックグラウンドの評価領域をあらかじめ定めておく。

試料と IP との接触測定は、温度変化の小さな場所で実施し、IP は接触測定後に直ちに 読み取る。照射時間は、目標とする検出レベルとともに、試料の放射能から IP の測定の上 限を超えないよう選定する。さらに照射時間は、10 分以上が望ましいが、試料の放射能に よって IP の測定の上限を超える場合は、5 分間の接触測定での評価も可能とする。

(2) プルトニウムの識別

バックグラウンド領域の評価結果からバックグラウンドの約 99.0%を含む PSL 強度を閾値として、PSL 画像のスポットを抽出する。さらに 40 ピクセル以上のスポットを抽出することにより、プルトニウムのスポットを特定する。

(3) プルトニウムスポットの放射能の推定

識別したプルトニウムのスポット領域の PSL 強度から平均バックグラウンドを差し引き、 プルトニウムのスポットの PSL 強度 *li* を評価する。プルトニウムのスポットの放射能 *Ai*、 相対誤差 σ*R* 及び合計の放射能 *AT* は以下の式で推定する。

(a) 照射時間 t が 5 分間の場合の 1 スポットの放射能 Ai

 $A_i = 0.1 I_i \qquad , \quad \sigma_R = \pm 0.4$

(b) 照射時間 t が 10 分間以上の場合の 1 スポットの放射能 Ai

$$A_i = 0.33 I_i t^{-0.92}, \quad \sigma_R = \pm \sqrt{4 \times 10^{-2} + 9 \times 10^{-4} (\ln t)^2}$$

(c) 複数のスポットの合計の放射能 AT $A_T = \sum A_i$, O_R (相対誤差は1スポットの場合と同じ)

6.2 おわりに

IP によるプルトニウム評価法は、Photo Simulated Luminescence (PSL) 強度の潜像として IP に記録された画像 (PSL 画像) からプルトニウムのスポットを識別し、個々のスポットの放射 能を推定する方法である。今回、日本原子力研究開発機構 (JAEA) の MOX 燃料製造施設で 採取された放射線管理試料を用い、付着したプルトニウム粉末から放出されるα線によって生 じた PSL 画像を定量的に解析した。

本研究では閾値によって PSL 画像からスポットを抽出し、さらにそのスポットのサイズから プルトニウムの識別を行った。閾値はバックグラウンドを 99.0%除外する PSL 強度で設定した。 IP によるプルトニウムの粒子の放射能は、識別したプルトニウムのスポットの PSL 強度と照 射時間よりフェーディングを考慮した評価式により推定した。フェーディングの影響は5分間 の接触測定の場合と10分間以上の接触測定の場合で試料毎の測定時間に対する PSL 強度が異 なっていたため、評価式は5分間の接触測定の場合と10分間以上の接触測定の場合について それぞれ求めた。この差異は、短時間照射における PSL 値の統計的変動及びフェーディングの 急激な変化の相乗した結果と考えられる。相対誤差は接触測定時間が5分間で約40%、10分 間で約21%、1020分間で約29%と評価された。IP に記録される潜像の PSL 強度はα線エネ ルギーに依存する。さらに評価式を複数スポットのプルトニウム試料に適用し、PSL 画像から 放射能を推定した結果、推定された放射能は ZnS シンチレーション検出器で測定された放射能 と誤差の範囲内で一致した。

本研究の成果によって、IP によるプルトニウム評価法を MOX 燃料製造施設の汚染管理に適 用することにより、従来の放射線検出器では困難であった汚染分布の可視化及び個々の粒子の 汚染レベルの把握による汚染対応の迅速化、除染の効率化など作業環境の安全性の向上が期待 できる。また、運用コストが低い積算型の IP の特徴を生かして、施設から発生する大量の廃 棄物の汚染判定へ適用させることも考えられる。

今後、内部被ばく線量評価に必要なプルトニウムの粒子径の簡便な評価法、ラドン子孫核種 とプルトニウムの識別、汚染箇所の直接測定法などの開発により更なる適用研究が考えられる。

謝 辞

本研究をまとめるにあたり、イメージングプレートに関して多くの貴重なアドバイスを頂い た放射線管理部内関係者に心から感謝申し上げます。

参考文献

- International Committee on Radiation Protection, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, ICRP Publication 68, 9 and 77, Pergamon Press, Oxford (1994)
- 2) K. Koizumi et al.; "Size determination of airborne plutonium by autoradiography using intensifier screen", Japanese Journal of Health Physics, 14(1979) PP.163-170 [Japanese]
- T.S. Rao et al.; "Quantitative estimation of plutonium-rich areas in thorium-based MOX fuels using alpha autoradiography technique", Radiation Measurements 36 (2003) PP.747–750T.
- 4) J. Miyahara et al.; "A new type of X-ray area detector utilizing laser stimulated luminescence", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 246 (1986) PP.572-578
- K. Nishizawa and T. Saze; "The Status Quo Concerning Application of Imaging Plate to Radiation Protection Measurements and Problems to Solved", Japanese Journal of Health Physics, 34, No.1 (1999) PP.29-35 [Japanese]
- C. J. Zeissler et al.; "Detection and Characterization of Radioactive Particles", Applied Radiation and Isotopes, 49 No.9 (1998) PP.1091-1097
- 7) C. J. Zeissler et al.; "Radioactive particle analysis by digital autoradiography", Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 248, No.2 (2001) PP.407-412
- 8) J. Koarashi et al.; "A new digital autoradiographical method for identification of Pu particles using an imaging plate", Applied Radiation and Isotopes 65 (2007) PP.413-418
- 9) National Institutes of Health; available from http://rsb.info.nih.gov/ij/ (accessed 2009-12-15)
- 10) Fujifilm Co.; Multi Gauge Ver. 3.0 Operating Guide, Fujifilm Co. (2007) 14
- H. Ohuchi, A. Yamadera; "Dependence of fading patterns of photo-stimulated luminescence from imaging plates on radiation, energy, and image reader", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 490, PP.573-582(2002)
- 12) T. Bücherl et al; "Quantitative measurements on thermal neutron detectors based on storage phosphors", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 333, PP.502-506 (1993)

No.	Form	α-radioactivity (Bq)
1	Smear sample	0.22 ± 0.02
2	Smear sample	0.23 ± 0.02
3	Smear sample	0.31 ± 0.03
4	Smear sample	0.39 ± 0.03
5	Smear sample	0.44 ± 0.03
6	Smear sample	0.80 ± 0.04
7	Smear sample	1.26 ± 0.05
8	Smear sample	1.47 ± 0.05
9	Smear sample	2.65 ± 0.07
10	Adhesive sheet	13.8 ± 0.2

Table 2.1 プルトニウム試料(1粒子状)

Table 2.2 プルトニウム試料(複数粒子状)

No.	Form	α-radioactivity (Bq)
11	Smear sample	7.6 ± 0.1
12	Smear sample	13.4 ± 0.2
13	Smear sample	52.1 ± 0.3
14	Adhesive sheet	19.4 ± 0.2
15	Adhesive sheet	87.9 ± 0.5
16	Adhesive sheet	191.4 ± 0.6
17	Air filter	5.8 ± 0.1
18	Air filter	9.5 ± 0.1
19	Air filter	21.8 ± 0.2
20	Air filter	27.0 ± 0.2

Table 2.3 IPの資機材の仕様

(1) IP (BAS-MS2325)

特徴	高感度·耐水性
材質	揮尽性蛍光体(BaFBr:Eu ²⁺ ;バリウムフッ化ハライド[ユーロ ピウム付活])の微結晶をポリエステルの支持体上に高密度塗布
サイズ	230 mm× 250 mm
対応核種	¹⁴ C, ³² P, ³³ P, ³⁵ S, ¹²⁵ I, ¹³¹ I などの放射性アイソトープ, X 線

(2) IP Reader (BAS-1800 Π)

使用レーザ	半導体レーザ, 波長 635nm, クラス IIIb
温度条件	動作時 15 ℃~30 ℃
湿度条件	動作時 35%~70%(RH)(結露のないこと)
対応核種	¹⁴ C, ³² P, ³³ P, ¹²⁵ I 等
読取可能 IP サイズ	200 mm × 250 mm, 230 mm × 250 mm
画素サイズ	50 µm/100 µm/200 µm を選択
最大画像容量	47 M byte (50 μm)/12 M byte (100 μm)
階調数	65536 階調(16 bit)/256 階調(8 bit)を選択
ダイナミックレンジ	10 ⁵ (1画素の持つ濃度の幅)
IP を使用した場合の感度	S4000
読取時間	3分30秒(50µm 読み取り),2分(100µm 読み取り)
画像サイズ	約 47 M byte/1 枚
電源条件	AC 100V \pm 10 % (50/60Hz)
電源容量	1.2A (100V), 0.6A (200V)
外形寸法	$830 (W) \times 590 (D) \times 450 \text{ mm} (H)$
重量	65 kg

(3) IP Eraser 3(IP 消去器)

使用蛍光灯	15 W (FL15W) × 5 本
消去時間	15 分以上
温度条件	動作時 15 ℃~35 ℃
湿度条件	動作時 35% ~70%(RH) (結露のないこと)
電源条件	AC100V (50/60Hz)
電源容量	2.0 A
外形寸法	$610 \text{ (W)} \times 167 \text{ (D)} \times 515 \text{ mm (H)}$
重量	15 kg

	時間(分)	5	10	15	30	60	180	360	1020
	平均	2.3	2.5	2.5	2.3	2.1	2.0	-	1.7
第1回試験	標準偏差	1.1	0.7	0.9	0.6	0.5	0.5	-	0.4
	回帰分析	-	<i>y</i> = <i>a x</i> ^{<i>b</i>} ; <i>a</i> = 3.0±0.8, <i>b</i> =-0.08±0.03,相関関数 0.24						
	平均	2.6	2.5	2.5	2.5	2.3	2.1	1.8	-
第2回試験	標準偏差	1.3	0.5	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	-
	回帰分析	-	y= 0	$a x^{b}; a =$	3.0±0.7,	<i>b</i> =-0.08	±0.04,相	関関数().10

Table 4.1 フェーディングの評価

Table 4.2 5分間露光の場合の換算係数

	ゴーク料	換算係数 標準偏差		放射能量A	放射能量A	
	リーク奴	cの平均	σ_c	の換算式	の誤差 σ_A	
第1回試験	10	0.10	± 0.4	0.10 <i>I</i>	$\pm 0.04 I$	
第2回試験	9	0.08	± 0.5	0.08 I	± 0.04 I	

Table 4.3 5分間接触測定の放射能推定値と放射線測定器による放射能の比較

N	Exposure time	PSL intensity	a-radio	a-radioactivity		α-radioactivity	Patio	
NO.	(min)	of spots (PSL)	deduced	by I	P (Bq)	of samples (Bq)	natio	
1	5	4.0	0.4	±	0.2	0.22	1.8	
2	5	1.4	0.14	±	0.05	0.23	0.6	
3	5	2.3	0.23	±	0.09	0.31	0.7	
4	5	2.7	0.3	±	0.1	0.39	0.8	
5	5	5.8	0.6	±	0.2	0.44	1.4	
6	5	13.5	1.4	±	0.5	0.80	1.8	
7	5	9.2	0.9	±	0.4	1.26	0.7	
8	5	20.0	2.1	±	0.8	1.47	1.4	
9	5	17.6	1.8	±	0.7	2.65	0.7	
10	5	153.3	15	±	6	13.8	1.1	

	データ 数	k (= ln <i>a</i>)	σ_k	b	σ_b	放射能量A の換算式	放射能量 A の誤差 σ_A
第1回試験	6	1.1	± 0.2	0.92	± 0.03	$0.33 I t^{-0.92}$	$\pm A\sqrt{4\times10^{-2}+9\times10^{-4}(\ln t)^2}$
第2回試験	8	1.1	± 0.3	0.92	± 0.03	$0.33 I t^{-0.92}$	$\pm A\sqrt{9 \times 10^{-2} + 9 \times 10^{-4} (\ln t)^2}$

Table 4.4 10分間以上のデータの最小二乗法による解析結果

Table 4.5 60 分間接触測定の放射能推定値と放射線測定器による放射能の比較

No.	Exposure time (min)	PSL intensity of spots (PSL)	α-radioactivity deduced by IP (Bq)		α-radioactivity of samples (Bq)	Ratio	
1	60	40.4	0.32	±	0.09	0.22	1.5
2	60	24.0	0.19	±	0.05	0.23	0.8
3	60	34.8	0.28	±	0.07	0.31	0.9
4	60	43.0	0.34	±	0.09	0.39	0.9
5	60	47.7	0.4	±	0.1	0.44	0.9
6	60	106.3	0.8	±	0.2	0.80	1.0
7	60	116.3	0.9	±	0.2	1.26	0.7
8	60	254.9	2.0	±	0.5	1.47	1.4
9	60	276.4	2.2	±	0.6	2.65	0.8
10	30	867.9	13	±	3	13.8	0.9

Number of	Area	Average	Minimum	Maximum	Total	Net
identified spot	(pixel)	(PSL)	(PSL)	(PSL)	(PSL)	(PSL)
1	60	0.065909	0.010142	0.293286	3.95452	3.907345
2	46	0.065238	0.010309	0.343764	3.000934	2.964766
3	40	0.046566	0.009855	0.171691	1.862648	1.831198
4	46	0.073052	0.010449	0.383389	3.360394	3.324226
5	48	0.057712	0.009778	0.275893	2.770194	2.732454
6	51	0.047072	0.009785	0.168731	2.400685	2.360586
7	75	0.101006	0.009934	0.718692	7.575445	7.516476
8	76	0.116964	0.010037	0.842685	8.889289	8.829534
9	43	0.06645	0.0108	0.263483	2.857355	2.823546
10	70	0.058544	0.010044	0.317245	4.098097	4.043059
•	•	•	•	•	•	:

Table 5.1 試料 No. 16 の個々に識別されたスポットの PSL 値の例

N	Exposure time	PSL intensity of	α-radi	oact	ivity	α-radioactivity	D
INO.	(min)	spots (PSL)	deduced	l by	IP (Bq)	of samples (Bq)	Katio
11	15	252.7	7	±	2	7.6	0.9
12	15	589.2	16	±	4	13.4	1.2
13	15	1588.6	44	±	9	52.1	0.8
14	5	283.0	28	±	11	19.4	1.2
15	5	1093.8	110	±	40	87.9	1.0
16	5	2997.5	300	±	120	191.4	1.4
17	180	2033.3	6	±	1	5.8	1.0
18	180	4350.9	12	±	3	9.5	1.3
19	180	9699.8	27	±	7	21.8	1.2
20	185	11031.9	30	±	8	27.0	1.1

Table 5.2 IP によって推定された複数スポット試料の放射能

Table 5.3 照射時間毎の 40 ピクセルのスポットの推定された放射能

Exposure	The number	Minimum	Manimum	Arrows me	Relative	Two-side 95 %
time	of spots of	(D _a)	(D _a)	Average	error	Confidence
(min)	40 pixels	(Бф)	(Dq)	(Бф)	(%)	Interval (Bq)
5	10	0.05	0.11	0.07	40	0.01 - 0.12
10	7	0.04	0.09	0.06	21	0.04 - 0.09
15	11	0.03	0.07	0.05	22	0.03 - 0.07
30	20	0.01	0.04	0.02	22	0.01 - 0.03
60	25	0.01	0.04	0.02	23	0.01 - 0.03
180	27	0.005	0.013	0.007	25	0.004 - 0.011
360	25	0.003	0.007	0.004	27	0.002 - 0.007
1440	15	0.001	0.004	0.002	29	0.001 - 0.003



Fig. 2.1 典型的な放射線管理試料の外観



Fig. 2.2 IP 及び読取装置等の構成



Fig. 2.3 QL 値と PSL 強度の関係



Fig. 3.1 1スポットの PSL 画像

画像サイズ: 5 mm×5 mm, ピクセルサイズ: 50 μm×50 μm, 照射時間: 60 分間



Fig. 3.2 試料 No. 10 の PSL 画像及び 3 次元グラフ

画像サイズ: 5 mm×5 mm, ピクセルサイズ: 50 μm×50 μm, 照射時間: 60 分間



Fig. 3.3 試料 No. 10 のスポットの断面の PSL 強度



(a) 0.0083 PSL (90.0%)
 (b) 0.0203 PSL (99.0%)
 (c) 0.0348 PSL (99.9%)
 Fig. 3.4 閾値の区分の効果



Fig. 3.5 バックグラウンドのスポットサイズの分布



(a) PSL 閾値で区分された多数のスポット

(b) 面積識別されたスポット

Fig. 3.6 試料 No. 10 のスポットの解析画像例

閾値: 0.0213 PSL, 面積 40 ピクセル

スポットサイズ: 794 ピクセル, PSL 強度: 1460 PSL



Fig. 4.1 露光時間による IP のフェーディングの影響



Fig. 4.2 PSL 強度と放射能の関係(露光時間 5 分間)









Fig. 4.4 露光時間と放射能当たりのPSL強度の関係(露光時間 10 分間以上)



Fig. 4.5 IP によって推定されたスポットの放射能と ZnS シンチレーション検出器で 測定された放射能の比較(露光時間 10 分間以上)





画像サイズ: 30mm×30mm, ピクセルサイズ: 50 μm×50 μm





画像サイズ:35 mm×35 mm, ピクセルサイズ:50 µm×50 µm



Fig. 5.3 多数スポットの空気試料の PSL 画像

画像サイズ:50mm×50mm, ピクセルサイズ: 50 μm×50 μm



Fig. 5.4 試料 No.16 の識別されたプルトニウムのスポット 照射時間:10分間,画像サイズ:35 mm×35 mm, 閾値::0.0097 PSL,スポットサイズ:40 ピクセル以上, スポット数:91 個,スポットの合計 PSL 強度:6392 PSL





測定された放射能とIPの PSL 強度から推定された放射能の比較

This is a blank page.

表 1. SI 基本単位						
甘大昌	SI 基本ì	単位				
巫平里	名称	記号				
長さ	メートル	m				
質 量	キログラム	kg				
時 間	秒	s				
電 流	アンペア	А				
熱力学温度	ケルビン	Κ				
物質量	モル	mol				
光 度	カンデラ	cd				

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例						
_{知力是} SI 基本	5単位					
和立重 名称	記号					
面 積平方メートル	m ²					
体 積 立法メートル	m ³					
速 さ , 速 度 メートル毎秒	m/s					
加速 度メートル毎秒毎秒	m/s^2					
波 数 毎メートル	m ^{·1}					
密度, 質量密度キログラム毎立方メ	ートル kg/m ³					
面 積 密 度キログラム毎平方メ	$- \vdash \nu = kg/m^2$					
比体積 立方メートル毎キロ	グラム m ³ /kg					
電 流 密 度 アンペア毎平方メ・	$- h \mu A/m^2$					
磁界の強さアンペア毎メート	ル A/m					
量濃度(a),濃度モル毎立方メート	$\nu mol/m^3$					
質量濃度 キログラム毎立法メ	ートル kg/m ³					
輝 度 カンデラ毎平方メ・	ートル cd/m ²					
屈 折 率 ^(b) (数字の) 1	1					
比 透 磁 率 (b) (数字の) 1	1					

(a) 量濃度(amount concentration)は臨床化学の分野では物質濃度(substance concentration)ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

		SI 組立単位			
組立量	名称	記号	他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方	
平 面 隹	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m	
· 体 催	ステラジア、(b)	er ^(c)	1 (b)	m^{2/m^2}	
周 波 数	ヘルツ ^(d)	Hz	1	s ¹	
力 力	ニュートン	N		m kg s ⁻²	
压力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²	
エネルギー、仕事,熱量	ジュール	J	N m	$m^2 kg s^2$	
仕事率,工率,放射束	ワット	w	J/s	$m^2 kg s^{-3}$	
電荷,電気量	クーロン	С		s A	
電位差(電圧),起電力	ボルト	V	W/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-1}$	
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2} kg^{-1} s^4 A^2$	
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2 kg s^{-3} A^{-2}$	
コンダクタンス	ジーメンス	s	A/V	$m^{-2} kg^{-1} s^3 A^2$	
磁東	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2 kg s^{-2} A^{-1}$	
磁束密度	テスラ	Т	Wb/m ²	$kg s^{2} A^{1}$	
インダクタンス	ヘンリー	Н	Wb/A	$m^2 kg s^2 A^2$	
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K	
光東	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd	
照度	ルクス	lx	lm/m^2	m ⁻² cd	
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹	
吸収線量,比エネルギー分与,	グレイ	Gv	J/kg	m ² s ⁻²	
カーマ		, and	ong		
線量当量,周辺線量当量,方向	SUNCE (g)	Sv	J/kg	m ² a ⁻²	
性線量当量, 個人線量当量		50	orkg	III 8	
酸素活性	カタール	kat		s ⁻¹ mol	

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはや コヒーレントではない。
 (b)ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性抜種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。
 (e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度で表すために使用される。
 (f)数単位を通の大きさは同一である。したがって、温度差や温度問隔を表す数値はとちらの単位で表しても同じである。
 (f)数単性核種の放射能(activity referred to a radionuclide)は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g)単位シーベルト(PV,2002,70,205)についてはCIPM勧告2(CI-2002)を参照。

表4.単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

	SI 組立単位			
組立量	名称	記号	SI 基本単位による 表し方	
粘质	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹	
カのモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2 kg s^2$	
表 面 張 九	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²	
角 速 度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ =s ⁻¹	
角 加 速 度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m m^{-1} s^{-2} = s^{-2}$	
熱流密度,放射照度	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³	
熱容量、エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2 kg s^{2} K^{1}$	
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2 s^{-2} K^{-1}$	
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^{2} s^{-2}$	
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹	
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²	
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	m kg s ⁻³ A ⁻¹	
電 荷 密 度	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ sA	
表 面 電 荷	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² sA	
電 束 密 度 , 電 気 変 位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	m ⁻² sA	
誘 電 卒	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3} kg^{-1} s^4 A^2$	
透 磁 率	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²	
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2 kg s^2 mol^1$	
モルエントロピー,モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^{2} kg s^{2} K^{1} mol^{1}$	
照射線量(X線及びγ線)	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ sA	
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^{2} s^{-3}$	
放射 強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4 m^{-2} kg s^{-3} = m^2 kg s^{-3}$	
放射輝 度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2 sr)$	m ² m ⁻² kg s ⁻³ =kg s ⁻³	
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ⁻³ s ⁻¹ mol	

表 5. SI 接頭語							
乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号		
10^{24}	э 9	Y	10^{-1}	デシ	d		
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	с		
10^{18}	エクサ	Е	10^{-3}	ミリ	m		
10^{15}	ペタ	Р	10^{-6}	マイクロ	μ		
10^{12}	テラ	Т	10^{-9}	ナーノ	n		
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピョ	р		
10^{6}	メガ	М	10^{-15}	フェムト	f		
10^3	キロ	k	10^{-18}	アト	а		
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z		
10^1	デ カ	da	10^{-24}	ヨクト	У		

表6.SIに属さないが、SIと併用される単位					
名称	記号	SI 単位による値			
分	min	1 min=60s			
時	h	1h =60 min=3600 s			
日	d	1 d=24 h=86 400 s			
度	۰	1°=(п/180) rad			
分	,	1'=(1/60)°=(п/10800) rad			
秒	"	1"=(1/60)'=(п/648000) rad			
ヘクタール	ha	1ha=1hm ² =10 ⁴ m ²			
リットル	L, 1	1L=11=1dm ³ =10 ³ cm ³ =10 ⁻³ m ³			
トン	t	$1t=10^{3}$ kg			

_

表7.	SIに属さないが、	SIと併用される単位で、	SI単位で
	まとわて粉は	ぶ 中 瞬時 ほう や て そ の	

衣され	衣される数値が美敏的に待られるもの				
名称	記号	SI 単位で表される数値			
電子ボルト	eV	1eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J			
ダルトン	Da	1Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg			
統一原子質量単位	u	1u=1 Da			
天 文 単 位	ua	1ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m			

表8.SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位							
	名称		記号	SI 単位で表される数値			
バ	バール			1 bar=0.1MPa=100kPa=10 ⁵ Pa			
水銀	柱ミリメー	トル	mmHg	1mmHg=133.322Pa			
オン	グストロー	- 4	Å	1 Å=0.1nm=100pm=10 ⁻¹⁰ m			
海		里	М	1 M=1852m			
バ	-	\sim	b	1 b=100fm ² =(10 ⁻¹² cm)2=10 ⁻²⁸ m ²			
1	ツ	ŀ	kn	1 kn=(1852/3600)m/s			
ネ	-	パ	Np	ar送佐1			
ベ		ル	В	▶ 51 単位との 叙 値的 な 阕徐 は 、 対 数 量の 定 義 に 依 存.			
デ	ジベ	N	dB -				

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位						
名称	記号	SI 単位で表される数値				
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J				
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N				
ポアズ	Р	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1Pa s				
ストークス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^2 \text{ s}^{\cdot 1} = 10^{\cdot 4} \text{m}^2 \text{ s}^{\cdot 1}$				
スチルブ	$^{\mathrm{sb}}$	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd} \text{ cm}^{-2} = 10^4 \text{ cd} \text{ m}^{-2}$				
フォト	ph	1 ph=1cd sr cm ^{-2} 10 ⁴ lx				
ガル	Gal	$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm s}^{-2} = 10^{-2} \text{ ms}^{-2}$				
マクスウェル	Mx	$1 \text{ Mx} = 1 \text{ G cm}^2 = 10^{-8} \text{Wb}$				
ガウス	G	$1 \text{ G} = 1 \text{Mx cm}^{-2} = 10^{-4} \text{T}$				
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe ≙ (10 ³ /4π)A m ⁻¹				

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ▲ 」 は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例						
名称					記号	SI 単位で表される数値
キ	ユ		IJ	ĺ	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
$\boldsymbol{\nu}$	\sim	ŀ	ゲ	\sim	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラ				ド	rad	1 rad=1cGy=10 ⁻² Gy
$\boldsymbol{\nu}$				ム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガ		$\boldsymbol{\mathcal{V}}$		7	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フ	I		N	"		1フェルミ=1 fm=10-15m
メー	- トル	/系	カラゞ	ット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
\mathbb{P}				ル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標	準	大	気	圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
力			IJ	1	cal	1cal=4.1858J(「15℃」カロリー), 4.1868J (「IT」カロリー)4.184J(「熱化学」カロリー)
Ξ	ク		П	\sim	μ	$1 \mu = 1 \mu m = 10^{-6} m$

この印刷物は再生紙を使用しています