



イメージングプレートによるプルトニウム試料の 画像解析法の開発

—MOX燃料製造施設のプルトニウム試料の測定—

Development of Image-Analysis Method of Plutonium Samples by Imaging Plate
-Measurement of Plutonium Samples in Mixed Oxide Fuel Fabrication Facility-

高崎 浩司 佐川 直貴 黒澤 重行* 塩谷 聡
鈴木 一教 堀越 義紀 水庭 春美

koji TAKASAKI, Naoki SAGAWA, Shigeyuki KUROSAWA*, Satoshi SHIOYA
Kazunori SUZUKI, Yoshinori HORIKOSHI and Harumi MIZUNIWA

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 2008

Japan Atomic Energy Agency

日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

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 (<http://www.jaea.go.jp>)
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, 2008

イメージングプレートによるプルトニウム試料の画像解析法の開発 —MOX 燃料製造施設のプルトニウム試料の測定—

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

高崎 浩司, 佐川 直貴, 黒澤 重行*, 塩谷 聡, 鈴木 一教, 堀越 義紀, 水庭 春美

(2008 年 2 月 18 日 受理)

近年, 積分型二次元放射線検出器としての機能を有するイメージングプレートが開発され, 各種の放射能測定への応用が研究されている。日本原子力研究開発機構においても先行工学基礎研究(平成 14 年～平成 17 年)でイメージングプレートによるプルトニウム分析が実施され, プルトニウムの検出評価及びラドン子孫核種弁別の有効性が示された。本研究は, これらの研究成果を基に MOX 燃料製造施設の放射線管理現場への適用として, イメージングプレートによるプルトニウムの放射能評価, ラドン子孫核種とプルトニウムの弁別, プルトニウム粒子の空気力学的放射能中央径の簡便な評価等の実用化を目的とするものである。

従来の ZnS シンチレータとポラロイドフィルムによるオートラジオグラフィでは目視によるプルトニウムの判定及び汚染状態の把握のみであるが, イメージングプレートでは位置毎の放射線に比例した数値データが得られることから, プルトニウム粒子の定量的な検出及び個々の放射エネルギーの評価が可能となる。

本研究の結果, イメージングプレートは従来オートラジオグラフィと同様に α 線への適用が可能であるとともに, β γ 線のオートラジオグラフィにも適用可能であった。また, プルトニウム粒子の測定では, Image J (汎用画像解析ソフト) の解析機能は非常に有効であった。 α スペクトルによる感度の影響が見られたものの, プルトニウムの放射エネルギーの評価が可能であった。

**Development of Image-Analysis Method of Plutonium Samples by Imaging Plate
- Measurement of Plutonium Samples in Mixed Oxide Fuel Fabrication Facility -**

Koji TAKASAKI, Naoki SAGAWA, Shigeyuki KUROSAWA *, Satoshi SHIOYA, Kazunori SUZUKI,
Yoshinori HORIKOSHI and Harumi MIZUNIWA

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

(Received February 18, 2008)

Recently, an imaging plate was developed, that is a storage type two-dimensional radiation detector, and the applications to various fields of radioactivity measurement are studied. Plutonium analysis by an imaging plate was studied in the JAEA Cooperative Research Scheme on the Nuclear Fuel Cycle (2002- 2004), and the availability about detection of plutonium and discrimination between radon progenies and plutonium was shown. In order to apply these results of researches to the radiation control of the Mixed Oxide Fuel Fabrication Facility, this research aims at evaluation of plutonium radioactivity, discrimination between radon progenies and plutonium, and evaluation of the activity median aerodynamic diameter of plutonium particles by an imaging plate.

In the conventional autoradiography by a zinc sulfide scintillator and Polaroid film, Contamination of plutonium is only grasped by viewing. Since the digital data proportional to the radiation in each location is obtained by an imaging plate, plutonium particles can be detected quantitatively and radioactivity can be evaluated.

As a result of this research, the image of alpha emitter on an imaging plate is the same as that of the conventional autoradiography, and is able to be applied also to the autoradiography of beta and gamma emitter. In measurement of plutonium samples, the image-analysis function of Image J (general-purpose software) is very available. Although the energy spectrum of alpha ray influences sensitivity, plutonium radioactivity can be evaluated by an imaging plate.

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

* Inspection Development Company Ltd.

目 次

1. 序論 -----	1
2. イメージングプレートによるプルトニウムの測定 -----	2
2.1 測定機材 -----	2
2.2 測定試料 -----	2
2.3 測定方法 -----	2
2.4 画像のデータ処理 -----	3
3. イメージングプレートによるオートラジオグラフィ -----	6
3.1 従来のオートラジオグラフィ画像との比較 -----	6
3.2 オートラジオグラフィとしてのデータ処理 -----	6
3.3 β 線, γ 線のオートラジオグラフィ -----	6
3.4 ラドン・トロン子孫核種のオートラジオグラフィ -----	7
4. プルトニウムの検出及び放射エネルギーの評価 -----	8
4.1 イメージングプレートのバックグラウンドの評価 -----	8
4.2 プルトニウムの検出 -----	9
4.3 プルトニウムの放射エネルギーの評価 -----	9
4.4 プルトニウム評価のまとめ -----	10
5. 結論 -----	12
5.1 イメージングプレートによるオートラジオグラフィの結果 -----	12
5.2 イメージングプレートによる放射エネルギー評価の結果 -----	12
5.3 今後の課題及び予定 -----	12
謝辞 -----	13
参考文献 -----	13
付録 1 プルトニウム試料のデータ -----	57
付録 2 プルトニウム試料の ARG 画像と IP 画像 -----	71

Contents

1. Introduction -----	1
2. Measurement of Plutonium by Imaging Plate -----	2
2.1 Device -----	2
2.2 Samples of Plutonium -----	2
2.3 Method of Measurement -----	2
2.4 Data Processing of Image -----	3
3. Autoradiography by Imaging Plate -----	6
3.1 Comparing Imaging Plate with ZnS and Polaroid film -----	6
3.2 Data Processing of Autoradiography -----	6
3.3 Autoradiography for β and γ Emitter -----	6
3.4 Autoradiography for Radon progenies -----	7
4. Evaluation of Plutonium by Imaging Plate -----	8
4.1 Background of Imaging Plate -----	8
4.2 Detection of Plutonium -----	9
4.3 Evaluation of Plutonium Activity -----	9
4.4 Summary -----	10
5. Conclusion -----	12
5.1 Summary of Autoradiography by Imaging Plate -----	12
5.2 Summary of Evaluation of Plutonium Activity by Imaging Plate -----	12
5.3 Future Tasks and Plan -----	12
Acknowledgements -----	13
References -----	13
 Appendix 1 Energy spectrum of alpha ray for Samples -----	 57
Appendix 2 Images of Samples by Polaroid Film and Imaging Plate -----	71

表リスト

Table 2.1	IP (BAS-MS2325) の仕様	14
Table 2.2	BAS-1800 II IP Reader(画像読取装置)の仕様	14
Table 2.3	IP Eraser 3 (IP 消去器) の仕様	15
Table 2.4	測定試料の放射エネルギー及び性状	15
Table 2.5	INF ファイルの構造	16
Table 2.6	IMG ファイルの構造	16
Table 2.7	画像処理における階調変換曲線	17
Table 4.1	IP での放射性物質の検出条件	17
Table 4.2	検出条件 A での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No.12)	18
Table 4.3	検出条件 B での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No.12)	22

図リスト

Fig.2.1	イメージングプレート及び読み取り装置の構成	26
Fig.2.2	プルトニウム試料 (No.1~No.12) の配置	27
Fig.2.3	階調処理における Sigmoid 曲線 (Brightness/Contrast)	28
Fig.2.4	QL 値-PSL の換算曲線	28
Fig.2.5	Image J による粒子検出の処理フロー	29
Fig.3.1	照射時間における ARG・IP 画像の比較 (試料 No.13) 【5,20min】	31
Fig.3.2	照射時間における ARG・IP 画像の比較 (試料 No.13) 【30,60,180min】	32
Fig.3.3	IP 画像 (試料 No.13) 【32 色擬似カラー】	33
Fig.3.4	IP 画像 【Sr-90(Y-90)】	33
Fig.3.5	IP 画像 【Am-241】	35
Fig.3.6	IP 画像 【U ₃ O ₈ 面線源】	37
Fig.3.7	IP 画像 【エアスニファろ紙：ラドン・トロン子孫核種】	39
Fig.4.1	バックグラウンドの IP の拡大画像	41
Fig.4.2	バックグラウンドの全ピクセルの PSL のヒストグラム	43
Fig.4.3	バックグラウンドのクラスタの面積のヒストグラム	43
Fig.4.4	0.02PSL 以上でのクラスタの面積と平均 PSL	44
Fig.4.5	0.04PSL 以上でのクラスタの面積と平均 PSL	44
Fig.4.6	バックグラウンドにおける面積の特異なクラスタの PSL 分布	45
Fig.4.7	バックグラウンドにおける PSL の特異なクラスタの PSL 分布	45
Fig.4.8	Pu 及びバックグラウンドのクラスタの面積と平均 PSL	47
Fig.4.9	Pu 試料における PSL と積算放射エネルギーの比	47
Fig.4.10	Pu 試料における PSL と積算放射エネルギー	49

Fig.4.11	Pu 試料における面積と積算放射エネルギー	49
Fig.4.12	Pu 試料 No.12 と Pu 試料 No.11 の PSL 分布	50
Fig.4.13	積算放射エネルギーと PSL から評価した放射エネルギーの比較	51

写真リスト

Photo 2.1	イメージングプレート，読取装置，消去器	53
Photo 2.2	測定試料及び配置	53
Photo 4.1	No.12 試料	55

1. 序論

日本原子力研究開発機構では ZnS シンチレータとポラロイドフィルムを組み合わせた α 線用のオートラジオグラフィ（以下、ARG という。）によりプルトニウム（Pu）の放射能分布を画像化・視覚化している。画像化された Pu の放射能分布の情報は汚染状況の把握などの放射線管理に使用されている。また、これまでも画像解析による Pu とラドン・トロン(Rn-Tn)子孫核種との弁別や Pu 粒子径の分析を目的とした画像処理が試みられてきた¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

近年、積分型二次元放射線検出器としての機能を有するイメージングプレート（以下、IP という。）が開発され、X 線フィルムの代替として医療用 X 線撮影やバイオサイエンス、中性子イメージング等の各種の放射能測定への応用が研究されている。核燃料サイクル工学研究所放射線管理部においても先行工学基礎研究（平成 14 年～平成 17 年）で IP による Pu の分析が研究され、Pu 粒子の検出及び Rn-Tn 子孫核種弁別の有効性が示された。⁸⁾

本研究は、これらの研究成果を基に MOX 燃料製造施設の放射線管理現場への適用として、IP による Pu の放射能評価、Rn-Tn 子孫核種と Pu の弁別、Pu 粒子の空気力学的放射能中央径（AMAD）の簡便な評価等の実用化を目的とするものである。

従来のポラロイドフィルムによる ARG では、画像は数値化されておらず、得られる情報は目視による Pu の判定及び汚染状態の把握のみである。これまでも原子核乾板等による放射能量の評価が検討されたが、簡便な方法がなく、現場適用は困難であった。しかしながら、IP は高解像度の位置情報と放射線に比例した数値データが直接得られることから、これまで目視では判別できなかった微弱なレベルの検出や空気サンプリング試料での Rn-Tn 子孫核種と Pu の弁別など定量的な解析が可能となる。また、Pu 粒子の個々の放射能量評価が可能となれば、内部被ばく線量の評価において重要な Pu の粒子径の簡易評価も期待できる。

今回の研究では、従来の ARG と IP の比較、汎用画像解析ソフト（Image J）による IP 画像データの処理方法の検討及び Pu の放射能量評価方法についての検討を行った。

検討の結果、IP は従来の ARG と同様に Pu 等の α 線への適用が可能であるとともに、 β γ 線の ARG にも適用可能である。また、IP による Pu の放射線管理現場試料の測定においては、Image J は十分な画像解析機能を有しており、Pu 粒子の検出処理は非常に有効である。試料測定では試料状態による α 線スペクトルによる感度の変化が見られたものの、バックグラウンドと Pu を弁別できること及び放射能量の評価ができることを確認した。

本報告では、IP の ARG 機能及び Pu 放射能量評価方法に係る検討及び評価結果を述べるとともに、Pu 取扱施設の放射線管理への IP 適用の課題についてまとめた。

2. イメージングプレートによるプルトニウムの測定

IP は、ポリエステルの支持体上に放射線に感度がある輝尽発光体（バリウムフッ化ハライド）が高密度に塗布されたものである。輝尽発光体に放射線が当たると電子が励起され、放射線情報が蓄積記憶される。これに光線（波長 633nm）を当てると放射線情報に比例した蛍光（波長 400 nm）が放出される。IP 読取装置では、レーザビームで IP をスキャンすることによりプレートの位置毎の蛍光を検出することで放射線量を 2 次元画像として計測している。⁹⁾

IP はほとんどすべての放射線に対応しているとともに、従来の X 線フィルムに比べ高感度、優れた位置分解能、広いダイナミックレンジ、光で消去しての繰り返し使用などの多くの優れた点があるが、薄暗い環境での取り扱いや時間とともに発光強度が低下するなど使用上注意を要する点がある。

2.1 測定機材

本研究で使用した IP は BAS-MS2325, IP 読取装置は BAS-1800 II である。Fig. 2.1 に構成図, Photo 2.1 に概観写真, Table 2.1 から Table 2.3 に IP 及び IP 読取装置等の仕様をそれぞれ示す。IP は測定前に IP 消去器でバックグラウンド等を消去し、初期化を行う。初期化した IP に放射線を照射した後、IP 読取装置で放射線に比例した値 (PSL: photo stimulated luminescence) を読み取る。読み取ったデータは PC に記録するとともに、画像解析ソフトで処理する。

2.2 測定試料

今回の試験に使用した試料は過去の保守作業等で採取した Pu 試料から選定した。Table 2.4 に測定試料の放射エネルギー及び性状等を, Fig.2.2 に測定試料の配置, Photo 2.2 に試料写真を示す。No.1～No.10 の試料は Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜で密封処理したもの、No.11～No.13 はマイラ膜と粘着シートを組み合わせたシート（以下、ラミクリーンという。）の粘着シートに直接 Pu 粒子を付着させマイラ膜で密封処理したものである。それぞれの試料表面のマイラ膜の厚さは 4 μm である。

試料の選定に当たっては、粒子状 Pu の放射能評価のために、ARG でスポット状の汚染を確認して選定した。各試料の放射エネルギーは α 線用放射能測定装置 (ZnS), β (γ) 線用放射能測定装置 (GM 管) により 30 分測定により得られた値である。アメリカシウム (Am) の放射エネルギーは γ 線用核種分析装置 (Ge) の分析結果 (4 時間) から評価した。また、 α 線スペクトルについても α 線用核種分析装置 (SSD) により 4 時間測定した。

付録 1 に各試料の写真, IP の PSL 分布, α 線スペクトルを示す。また、付録 2 に No.1～No.12 の ARG 及び IP の画像を示す。

2.3 測定方法

IP は、測定開始前に消去器で 60 分間光に当てて、蓄積されたバックグラウンドを消去したのち、プルトニウム燃料第三開発室に運び、一定時間 (5 分, 10 分, 15 分, 30 分, 60 分, 180 分, 1020 分) 照射した。IP の読取は、読取装置 BAS-1800 II により IP の全範囲 (23 cm

×25cm) を 65536 階調 (16bit), 50 μm の解像度で読み取った。

2.4 画像のデータ処理

2.4.1 画像データ及び PSL

IP 読取装置で読み取った後、データは、INF ファイル (“~.inf”) と IMG ファイル (“~.img”) の 2 つのファイルに記録される。INF ファイルは画像の読取条件をテキスト形式で記録したもの。IMG ファイルは 1 ピクセル (画素) の生データを記録した画像データであり、8bit (0~255) 又は 16bit (0~65535) の階調に応じてバイナリー形式で記録されたものである。Table 2.5 及び Table 2.6 に IP ファイルのデータ構造を示す。

IMG ファイルにバイナリー形式で記録された個々のピクセルの生データは QL (Quantum Level) 値と呼ばれる。IP 読取装置は広いダイナミックレンジを持つため、発光量を出来る限り少ないデータ量で記録するために読取装置内のアナログ信号処理の段階で対数に変換され、QL 値として記録される。したがって、放射線量に比例する発光量に換算するためには、以下の換算式で PSL (Photo Stimulated Luminescence) 値に換算する必要がある。IP 読取装置に付属する画像解析ソフトウェア Multi Gauge (富士フイルム社製) 等では、PSL への換算は自動的に行われるが、他の画像解析ソフトウェアを使用する場合は、QL 値から PSL 値に換算する必要がある。¹⁰⁾

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

P_{Size} : 1 ピクセルのサイズ (50, 100, 200 μm)

S : IP の感度 (4000)

L : 1 ピクセルのダイナミックレンジ (5)

B : 濃度階調 (8, 16bit)

なお、BAS-1800 II の場合は、 $S=4000$, $L=5$ に固定されている。従って、BAS-1800 II で、 $P_{\text{Size}}=50$, $B=16\text{bit}$ で読み取った場合の PSL 値を指数関数で表すと以下のとおりとなる。

$$PSL = 7.90569 \times 10^{-4} \times \exp \left(1.75673 \times 10^{-4} \times QL \right) \quad (2)$$

注) 係数の有効数字により PSL の数値に影響があるため、有効数字 6 桁で記載。

2.4.2 画像解析ソフトウェア

IP 画像解析ソフトウェアには、IP 読取装置に付属する Multi Gauge と Colony がある。¹⁰⁾ 一方、フリーの汎用画像解析ソフトウェアである Image J¹¹⁾ においても IP 画像の処理が可能であることを確認した。今回の試験では、Pu の ARG 処理には Multi Gauge, Pu 粒子検

出処理には Image J を使用した。

(1) Multi Gauge (富士フイルム社製)

Multi Gauge は IP 画像データをカラー等の階調に変換すること、選択した範囲の面積や PSL 値を合計するなどの処理、他の画像形式への変換が可能である。階調変換の機能は強力であり、選択した範囲の放射エネルギーを評価することが可能である。

(2) Colony (富士フイルム社製)

Multi Gauge と同様に階調の変換及び他の画像形式への出力等の機能を持つとともに、円形の範囲で囲って任意の PSL 密度、面積及び真円度以上のピクセル群を検出する機能がある。生物関連のコロニーを抽出する用途のものであり、この機能は放射性物質粒子の検出には有効と思われる。

しかしながら、富士フイルムに問い合わせたところ、濃度については、最も薄いものを「0」、最も濃いものを「100」として、指定数値以上の濃さを持つピクセルを抽出するため、濃度差で、抽出結果が変わること。同様に面積においても選択した領域の面積の、1/10,000を「100」、1/1,000,000を「1」として、指定数値以上の面積を持つピクセル群を抽出することから、領域の大きさによって、結果が変わることが分った。すなわち、相対的な検出処理であり、放射性物質の定量的な評価への使用は困難である。

(3) Image J (米国国立衛生研究所)

Image J は米国国立衛生研究所 (NIH: National Institute of Health) が開発した汎用画像解析ソフトウェアである。医療用の画像解析ソフトウェアとして開発されたマッキントッシュ用の NIH Image の後継で、Java 言語で記載されており、Windows 以外の OS 版もある。

Image J はフリーソフトウェアであり、オープンソースで拡張機能が開発可能なことから、多くの公開されたマクロ及びプラグインが利用できるとともに、ソフトの開発も容易である。Image J はホームページからダウンロード可能である。また、Image J 日本語版も廉価で販売されている。

IP 画像ファイルの読み込みは、プラグインソフトで可能である。また、QL 値から PSL 値への変換も、Image J の Calibration 機能で可能である。ただし、表示画像の濃淡は、QL 値を画像化したものであるため、Multi Gauge の PSL 値での表示とは印象が異なる。

汎用画像解析ソフトウェアである Image J には、多くの画像データ解析の機能があるとともに、多くの解析用プラグインソフトも充実している。特に粒子解析機能は IP 画像中の Pu クラスターの検出及び放射エネルギー評価に極めて有効である。

2.4.3 画像処理

(1) Multi Gauge での階調変換処理

IP を読取装置で読み取った画像は、Multi Gauge で画像処理することができる。ARG として画像処理する場合、画像の濃淡は階調変換により見やすくすることが可能である。

Multi Gauge では Table.2.7 に示す階調変換曲線が利用できる。Fig.2.3 に示す Sigmoid 曲線は視覚的にバックグラウンドを目立たなくし、濃いピクセルを強調する。また、フィルムに近い画像への処理であることから、従来の ARG との画像に近い。

(2) Image J での粒子解析処理

IP 画像ファイル読み込みのプラグインソフト “Open/Save ISAC image”は、Image J Web サイトで公開されている。プラグインソフトは Image J の Plugins フォルダ内にコピーすることで使用可能となる。

Image J での IP の読み込み画像は QL 値のグレー階調（16bit の場合、0～65535 の値）であるため、データ処理には PSL 値への換算が必要である。PSL 値への換算は Image J の Calibration 機能で Exponential 関数を選択し、(2)式で計算した値を入力することで行う。Fig.2.4 に Image J での QL 値－PSL の換算曲線を示す。この機能は Macro による自動化も可能である。その他、ピクセル（pixel）の単位も mm 等に変換する機能もある。

Pu のクラスタの検出には、Image J の “Analyze Particles” 機能を使用する。Fig.2.5 に処理フローを示す。選択する PSL の範囲を “Threshold” で設定し、次に “Analyze Particles” で面積と真円度を設定して、条件に合うピクセルの集合をスキャンし、抽出する。

3. イメージングプレートによるオートラジオグラフィ

IP により Pu 試料の照射を行ない、画像をソフトにて処理し、ARG の機能及び Pu 粒子の付着分布が確認可能であるかを比較検討した。

3.1 従来のオートラジオグラフィ画像との比較

Pu のパウダー状の試料（試料 No.13）を用い ARG, IP により照射時間経過による画像の比較を行った。Fig.3.1 及び Fig.3.2 に画像を示す。

比較の結果、IP においても ARG と同様の照射時間にて Pu 粒子の付着分布画像が得られた。画像は、ARG 同様、照射時間を長時間にするほど低強度の Pu 粒子の付着分布を確認することが可能である。

3.2 オートラジオグラフィとしてのデータ処理

IP 画像は、Multi Gauge にて画像を処理することにより表示色や階調変換が可能である。ARG の画像は、白黒フィルムを使用し、ポジ表示として処理される。これと同様の画像を IP で表現するには、表示色をポジ表示、階調変換を Sigmoid に設定することで十分に表現することが可能である。

また、表現色を 32 色擬似カラー表示にすることにより光の強弱が表現され、階調の設定値を調整することによりバックグラウンドを除いた画像も作成でき ARG 以上の画像データ処理が可能である。Fig.3.3 に画像を示す。

ただし、バックグラウンドを除去した場合、低強度の Pu 粒子画像についても削除されてしまうため設定には注意が必要である。

3.3 β 線, γ 線のオートラジオグラフィ

IP は、材質によって各種の放射線（ α 線, β 線, γ 線, 中性子線等）に感度を有し、放射性物質の付着分布確認が可能（対象線種によって IP を選定）であり、これまでの α 線用 ARG では出来なかった機能を有する。

例えば、Sr-90 (Y-90) のように β 線放出核種についても付着分布が確認される。Fig.3.4 に画像を示す。Am-241 のように α 線と γ 線を放出する核種の場合、両線種について画像化される。測定方法の応用として α 線, γ 線等混合線種放出核種の場合、IP に入射する α 線を紙等で遮へいすることで γ 線放出核種のための付着分布確認も可能である。Fig.3.5 に画像を示す。しかし、 β 線, γ 線は透過力が大きく、エネルギーが吸収され難いため α 線より照射時間が長時間となり、紙（遮へい物）無しの画像に比べ分布範囲が若干、広く写し出されたため注意が必要である。同様に Fig.3.6 にウラン線源の画像を示す。

ただし、混合線種放出核種における α 線のための付着分布確認は IP では不可能であるため、 α 線用 ARG の使用が有効である。

データ処理についても 32 色擬似カラー表示にすることで放射能強度差による強度分布をはっきり区別し確認することができた。

IP は、多線種に感度があるためバックグラウンドの影響が大きい。このため、使用前に IP に蓄積されたバックグラウンドのデータを消去する必要がある、測定時間設定時や定量等基準を定める場合には、組成を確認し放出線種毎の強度や線量率を考慮し、総合的に評価する必要がある。そして、IP を用いることで濡れた試料等 α 線が検出し難い場合でも、 β 線、 γ 線により付着分布を確認することが出来る。

3.4 ラドン・トロン子孫核種のオートラジオグラフィ

ラドン・トロン子孫核種における画像を確認するため 100l/分のサンプリング率で 3 時間エアスニファろ紙 (HE-40T) に捕集した。強度は、採取直後全 α で 143.9Bq であり、強度確認後 IP により 60 分照射した。Fig.3.7 に画像を示す。

IP によりラドン・トロン子孫核種付着分布についても十分確認され、画像処理についても表現色を 32 色擬似カラー表示にすることにより鮮明に写し出されることを確認した。

しかし、Pu 粒子混在の有無を視覚のみで判別することは、ある程度の放射エネルギーの Pu 粒子の場合は可能であるが、放射エネルギーの低い Pu 粒子の場合は困難である。今後 PSL 値による定量的な判別方法を検討する。

4. プルトニウムの検出及び放射エネルギーの評価

4.1 イメージングプレートのバックグラウンドの評価

Pu 画像とバックグラウンド画像との識別のため、バックグラウンドについて調査した。IP による Pu 測定においては、初期化後、管理区域内への搬入・照射、管理区域外への搬出・読み取りがあり、運用上 1 時間程度のバックグラウンドの照射があることから、IP 消去器で 15 分間の初期化後、70 分間放置した IP のバックグラウンドについて評価を行った。

Fig.4.1 にバックグラウンドの IP 拡大画像の例を示す。1 ピクセル（画素）は $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ の最小の正方形であり、各ピクセルの PSL 値は 16 ビットグレー階調の濃度で表される。バックグラウンド放射線の蓄積により 70 分程度でも無数の濃淡が記録されている。バックグラウンドの濃淡によって、ある PSL 値で区分すると 1 個から数個の連続したピクセルのクラスタができる。Fig.4.1 の 0.02PSL で区分した例では、1 個から 5 個のクラスタが見られる。ここで n 個のピクセルのクラスタについて、 n をクラスタの面積と呼ぶ。区分する PSL の値を低くするほど対象となる赤の部分は増え、クラスタも増加する。

このバックグラウンドの IP について、全ピクセルの PSL 値の分布、クラスタの面積及び平均 PSL について調べる。

(1) バックグラウンドの PSL の分布

Fig.4.2 にバックグラウンドの全ピクセル (4640×5120) の PSL のヒストグラムを示す。バックグラウンドでは、0.02PSL 未満のピクセルは 99.9%、0.04PSL 未満のピクセルが 99.99%を占めている。

(2) クラスタの面積の分布

IP 画面上の面積 1 以上のクラスタは、Image J の粒子分析機能で自動的に抽出することができる。0.02 PSL 以上のクラスタについて、面積のヒストグラムを Fig.4.3 に示す。バックグラウンドでは 0.02 PSL 以上を抽出した場合、約 90%が 1 個のピクセルであり、面積の増加とともにクラスタの数は急激に減少する。

(3) クラスタの面積と平均 PSL の分布

Fig.4.4 に 0.02PSL 以上の面積と平均 PSL の散布図を示す。PSL の平均値で評価したのは、バックグラウンド放射線の偶然の重なりにより平坦な PSL のクラスタが多いためである。Fig.4.4 より IP でのバックグラウンドのクラスタの面積が 5 ピクセル以上で平均 PSL が 0.1PSL を超えるものはない。したがって、面積が 5 ピクセル以上かつ平均 PSL が 0.1PSL 以上のクラスタは Pu 等のバックグラウンド以外の放射線の可能性が高い。

同様に、0.04PSL のクラスタについても評価した。Fig.4.5 に 0.04PSL 以上でのクラスタの面積と平均 PSL の散布図を示す。0.04PSL 以上を抽出した場合は、Fig.4.5 より IP でのバックグラウンドではクラスタの面積が 5 ピクセル以上、平均 PSL が 0.15 を超えていない。

以上のことから、IP による放射性物質の検出について、Table 4.1 に示す 2 通りの Pu の検出条件を設定した。

なお、Fig.4.4 及び Fig.4.5 の散布図で見られる面積又は平均 PSL の極端に高い 2 つのクラスについて、Fig.4.6 及び Fig.4.7 に 3 次元で表した PSL 分布をそれぞれ示す。形状より 2 点についてはバックグラウンド放射線が偶然に重なったものとは考えにくく、宇宙線やラドンなどの自然放射線の影響によるものと思われる。

4.2 プルトニウムの検出

Table 4.1 の検出条件により Pu 測定試料をそれぞれ評価した。Table 4.2 及び Table 4.3 に検出条件 A 及び B で検出した場合の Pu 試料の放射エネルギー毎の PSL 値、面積等を示す。

照射時間が短く積算放射エネルギーが十分ではない場合、検出条件を超えず、バックグラウンドと見分けがつかないものが見られた。Fig.4.8 に検出条件 B での 5 分間照射の場合の面積と平均 PSL の散布図を示す。No.1, No.3, No.4, No.6 及び No.10 は判定条件以下であった。一方、積算放射エネルギーが大き過ぎる場合は、最大値が PSL 値の上限の 79.043 に達し、IP は飽和状態となっていた。

また、Table 4.2 に示すとおり検出条件 A の場合、バックグラウンドが検出条件を超えてしまう場合があった。ただし、それらの面積は 3 時間以内の照射で 5 ピクセル、1020 時間照射でも 6 から 11 ピクセルであり、面積による Pu の区別は可能であるが、Pu の確実な判定では、検出条件 B が適当である。

4.3 プルトニウムの放射エネルギーの評価

検出条件 B での放射エネルギー評価について検討する。放射エネルギー評価では、検出条件未満のものや測定範囲を超えたデータは除外する。

PSL 値を積算放射エネルギーに換算するため、PSL と積算放射エネルギーとを比較した。Fig.4.9 に Pu 試料における PSL と積算放射エネルギーの比を示す。図より No.1～No.11 の試料については、2.0 値の付近でばらつき、時間とともに低下の傾向が見られる。一方、No.12 試料は系統的に低いことが分る。

イメージングプレートは時間による PSL 値の減衰の特性があり、1020 分間照射した試料の PSL 値が低い傾向であるのはフェーディングの影響が考えられる。ばらつきについては、現場のスミヤ試料などであることから、各試料状態における α 線エネルギーの減衰の影響が考えられる。

以上のことから、放射エネルギー換算においては、No.1～No.11 と No.12 を分けて評価するとともに、通常 3 時間以内の施設放射線管理の使用としてフェーディングの影響を考慮し、今回の評価では 180 分までのデータを使用する。

4.3.1 PSL 値と放射エネルギーの比較

Fig.4.10 に積算放射エネルギーと PSL の値の関係を示す。No.1～No.11 については、比は約 1.9 であることから、PSL-Pu 放射エネルギー換算係数は 0.53 Bq/PSL となる。

$$a = 0.53P/T$$

a : 放射能量 (Bq)

P : PSL 値 (PSL)

T : 時間 (分)

この値はデータ処理方式が異なるものの小嵐ら¹⁾の換算係数とほぼ同じ値となった。一方、No.12 に対してこの換算係数を適用すると、約半分の放射能量の評価となる。

4.3.2 No.12 の Pu 試料について

No.12 の試料について、No.1 ～No.11 の試料と比較すると、放射能測定器で測定した放射能量に対して、IP で測定した PSL 値は半分程度である。一方、面積は他の試料に比べて逆に大きい。Fig.4.11 に積算放射能量と面積の関係を示す。また、No.12 と No.11 の PSL 分布を Fig.4.12 に示す。No.11 は山が鋭いのに対し、No.12 は山の形がなだらかで、PSL の高い部分が広い。

Photo 4.1 に No.12 の表面の写真を示す。ラミクリーンのしわ（マイラ膜によれ）が多く見られる。SSD で α 線のエネルギースペクトルを測定した結果、No.12 については、他の試料と異なり α 線スペクトルのピークが極端に低エネルギー側へシフトしている。また、 α 線測定で評価した放射能量と γ 線で評価したアメリシウムの放射能量はほぼ同じとなっている。

以上のことから、No.12 の試料については、 α 線のエネルギースペクトルが減衰し、低エネルギー側に極端にシフトしていることから、放射能量に比べ PSL 値が低いものと推測される。更にアメリシウムの放射能量の割合からも全 α の放射能量も低く評価されている可能性もある。これらの原因については、ラミクリーンのしわ（マイラ膜がよれて多重化）等の試料の状態などが考えられる。 α 線スペクトルや試料の状態による PSL への影響については、今後、検討が必要である。

4.3.3 放射能量の評価結果について

1 スポットの Pu について、PSL-Pu 放射能換算係数 (0.53 Bq/PSL) を用いて PSL より放射能量を評価した値と α 線用放射能測定装置 (ZnS) による放射能量の比を Fig.4.13 に示す。PSL からの放射能量評価の値は 0.3～2.2 倍のばらつきがあり、積算放射能量が低い範囲ほどばらつきが大きい。積算放射能量が 100Bq・分以上では、No.12 を除いて 0.5～1.5 の範囲内である。Pu 粒子径の簡易評価においては、ばらつきが±50%であれば問題ない範囲と考える。

4.4 プルトニウムの評価のまとめ

IP による現場 MOX 試料の Pu の検出及び放射能量評価について検討を行った。測定結果を Image J で解析することにより、Pu の検出が可能である。Pu の放射能量の評価では、試料の α 線スペクトルによって、PSL 値への影響が見られたことから、実用化においては α 線スペクトルの確認も必要である。以下に Pu の放射能評価についてまとめる。

(1) 検出下限レベル

Pu の 1 スポットの積算放射エネルギーが 2~7Bq・分において判定基準の平均 PSL を超えておらず、他のバックグラウンドとの区別が困難である。したがって、IP の 1 スポットの Pu の検出下限は約 7Bq・分である。

(2) 測定上限レベル

長時間照射した積算放射エネルギーが約 500Bq・分を超えるものについては、最大点が IP 測定上限の 79.04PSL を超えており、IP の 1 スポット測定上限は約 500Bq・分である。

(3) 連続したピクセルの面積

Pu での連続したピクセルの面積は 0.02PSL 以上では 26 ピクセル以上、0.04PSL 以上では 11 ピクセル以上であった。このことから、判定基準として 1 スポットの面積を 11 ピクセル以上とすることにより Pu の確実な検出が可能と考える。

(4) PSL-積算放射エネルギー

積算放射エネルギーと PSL 値の比については、No.1~No.11 の試料より約 0.5Bq・分/PSL である。No.12 の試料のみ α 線スペクトルの低エネルギー側へのシフトにより比が異なっていたことから、換算においては、試料の状態や α 線スペクトルの確認が必要である。 α 線スペクトル等による補正については今後の検討が必要である。

(5) 試料の測定時間

IP での Pu の測定範囲が 1 スポット当たり 7Bq・分~500Bq・分であること、積算放射エネルギーが低い範囲で、ばらつきが大きいことから、放射エネルギーを評価する場合、照射時間は 100 Bq・分程度を目安とすれば、十分な画像データが得られるものとする。ただし、IP はフェーディングの影響があり、今回の PSL-放射能の換算係数は 3 時間までのデータを基にしていることから、3 時間以内の測定が望ましい。

5. 結論

現場の実際の Pu 試料を測定し、ARG の適用及び Pu の放射エネルギー評価について検討を行った。検討の結果、IP は従来の ARG と同様に α 線への適用が可能であるとともに、 β γ 線の ARG への適用も可能であった。また、Pu の放射エネルギー評価において、Image J の解析機能は有効であり、放射エネルギーの評価が可能であることを確認した。

5.1 イメージングプレートによるオートラジオグラフィの結果

IP について、評価条件を設定し、従来の ZnS シンチレータ・ポラロイドフィルム式 ARG との比較を行った。その結果、IP は従来のポラロイドフィルム式 ARG と同様に汚染の状況を画像化できるとともに、カラーに画像処理することにより、従来よりも分布を把握しやすくすることが可能であった。また、従来の ZnS シンチレータ・ポラロイドフィルム式の ARG よりも取り扱いが簡単で、面積が広く、 β ・ γ 線核種の ARG も可能なメリットがある。

5.2 イメージングプレートによる放射エネルギー評価の結果

IP による Pu の放射エネルギー評価において、Image J は十分な画像解析機能を有しており、Pu 粒子の検出処理は極めて有効であった。現場のスミアろ紙等の放射線管理試料の測定では 100Bq・分以上で約±50%の範囲内での放射エネルギーの評価が可能であり、Pu 粒子径の簡易評価においては問題ない範囲と考える。しかしながら、 α 線スペクトルが著しく低エネルギー側へのシフトしている場合は PSL での放射エネルギーは過小評価となるおそれがあるため、 α 線スペクトルの確認が必要である。

5.3 今後の課題及び予定

本研究は、MOX 燃料製造施設の放射線管理への IP の適用として、Rn-Tn 子孫核種との弁別による迅速な Pu の評価、内部被ばく線量の評価に係る Pu 粒子径の簡便な評価を目標としている。これらへの適用に向けた今後の課題として、以下の事項の検討が挙げられる。

- ・ IP のバックグラウンドの時間変化の評価
- ・ IP での Pu 放射エネルギー評価の α 線スペクトル、面積等による補正の検討
- ・ Pu と Rn-Tn 子孫核種との弁別条件の検討
- ・ MOX 燃料製造施設の Pu 同位体組成及び放射エネルギーからの Pu 粒子径の計算
- ・ IP での Pu 粒子径とカスケードインパクトでの粒子径評価の比較

今後の予定として、Rn-Tn 子孫核種と Pu の弁別については、Rn-Tn 試料の測定データを蓄積し、Pu 画像との比較評価を行う。また、Pu 粒子径については、現在計画中的のカスケードインパクトによるサンプリング試験結果との比較により評価する。その他バックグラウンド及び放射エネルギーの補正等については、測定データの蓄積を図り、検討を継続する。

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環境監視課小嵐淳氏、その他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

- 1) 斉藤 節子, 小泉 勝三, 大高 正 ; 「ZnS(Ag)増感オートラジオグラフ法によるアルファ放射性粒子の粒子径測定」, PNC-TN841 78-47 (1978)
- 2) 関 昭雄, 小泉 勝三 ; 「オートラジオグラフ法によるプルトニウムの粒度分布測定および性状把握」 PNC-TN841 82-04 (1982)
- 3) 関 昭雄, 小泉 勝三 ; 「プルトニウム粒子検出用アルファ線イメージング装置」, PNC-TN841 84-12 (1984)
- 4) 金盛 正至, 関 昭雄 ; 「放射線位置検出器による放射性粒子の粒径測定」, PNC-TN841 81-57 (1985)
- 5) 関 昭雄, 大西 俊彦, 岩月 恒信, 秋山 聖光 ; 「現場放射線管理用のアルファ線イメージング装置によるプルトニウム資料撮影例集」, PNC-TN8450 87-008 (1987)
- 6) 江花 稔, 松本 盛雄, 伊東 康久, 岡崎 良仙 ; 「プルトニウム粒子径迅速測定評価法の開発」, PNC-TN8410 95-250 (1995)
- 7) 石田 順一郎, 二之宮 和重, 猿田 順一, 田崎 隆 ; 「放射能画像解析手法を用いた Rn-Tn 娘核種弁別測定法の開発」, PNC-TN8410 95-078 (1995)
- 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) FUJIFILM; available from <http://fujifilm.jp/business/lifescience/simaging/> (accessed 2007-12-15).
- 10) FUJIFILM; Multi Gauge Ver3.0 操作ガイド 第4版 (2007)
- 11) National Institute of Health; available from <http://rsb.info.nih.gov/ij/> (accessed 2007-12-15).

Table 2.1 IP(BAS-MS2325)の仕様

特徴	高感度・耐水性
材質	揮発性蛍光体 (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支持体上に高密度塗布
サイズ	23 cm× 25 cm
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

Table 2.2 BAS-1800 II IP Reader(画像読取装置)の仕様

使用レーザー	半導体レーザー, 波長 635nm, クラスⅢb
安全規格	米国連邦基準(21 CFR, Chapter I. Subchapter. J) のレーザー放射線安全要件に適合
レーザー安全	レーザー漏れ光 0.39 μW 以下
温度条件	動作時 15℃～30℃ 保管時 -25℃～60℃
湿度条件	動作時 35%～70(RH) (結露なきこと) 保管時 結露なきこと
対応核種	¹⁴ C, ³² P, ³³ P, ¹²⁵ I 等
読取 IP サイズ	200mm×250mm, 230mm×250mm
画素サイズ	50 μm / 100 μm / 200 μm 選択
最大画像容量	47MB(50 μm) / 12MB(100 μm)
階調数	65536 階調 / 256 階調
ダイナミックレンジ	L5
感度	S4000
読取時間	3 分 30 秒(50 μm 読み), 2 分(100 μm 読み)
画像サイズ	約 47MB / 1 枚
電源条件	AC100V±10% (50/60Hz)
電源容量	1.2A(100V), 0.6A(200V)
外形寸法	830(W)×590(D)×450mm(H)
重量	65kg

Table 2.3 IP Eraser 3(IP 消去器)の仕様

使用蛍光灯	15W(FL15W)
使用蛍光灯数	5 本
消去時間	15 分以上
温度条件	動作時 15℃～35℃ 保管時 -25℃～70℃
湿度条件	動作時 35%～70 (RH) (結露なきこと) 保管時 結露なきこと
電源条件	AC100V (50/60Hz)
電源容量	2.0 A
外形寸法	610(W)×167(D)×515mm(H)
重量	15kg

Table 2.4 測定試料の放射能量及び性状

試料 No.	全 α (Bq)	Am- α (Bq)	Am/全 α (%)	全 β (Bq)	付着分布	試料種類
1	0.22	0.11	51.0%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
2	0.23	0.19	81.4%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
3	0.31	0.28	90.1%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
4	0.38	0.23	60.7%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
5	0.44	0.27	61.8%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
6	0.50	0.29	57.2%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
7	0.80	0.31	38.6%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
8	1.26	0.74	59.1%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
9	1.47	0.90	61.4%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
10	2.65	0.98	36.9%	検出下限値未満	スポット	スミヤろ紙 ^{*1}
11	13.8	6.60	47.8%	検出下限値未満	スポット	ラミクリーン ^{*2}
12	36.0	38.50	107.0%	0.46	スポット	ラミクリーン ^{*2}
13	310	—	—	2.24	パウダー	ラミクリーン ^{*2}

※ 1 Pu 粒子が付着したスミヤろ紙をマイラ膜でシールしたもの。

※ 2 ラミクリーン(マイラ膜と粘着シートを組み合わせたシート) : 粘着シートに Pu 粒子を付着させマイラ膜でシールしたもの。

Table 2.5 INF ファイルの構造

	例	内容
0/	BAS_IMAGE_FILE	BAS のファイルの表示
1/	IP2 1hr	ファイル名
2/	23*25	読み取り領域 (IP の大きさ cm)
3/	50	Pixel Size (例:50 μ m)
4/	50	Pixel Size (例:50 μ m)
5/	16	Bit (例 : 16 Bit→65536 階調→0~65535)
6/	4640	ピクセル数 X 方向
7/	5120	ピクセル数 Y 方向
8/	4000	Sensitivity (感度), BAS-1800 II は 4000 のみ
9/	5.0	Latitude (ダイナミックレンジ), BAS-1800 II は 5 のみ
10/	Thu Aug 09 11:58:26 2007	読取の日時
11/	1186628306	UNIX 時間 (解析には不要)
12/	IPR1800II	読み取りソフト名

Table 2.6 IMG ファイルの構造

	例	内容
0/	05	バイナリー形式。8 Bit ならば 1 つで 1 ピクセルの値, 16 Bit であれば, 2 つで 1 ピクセルの値を表す。 (例 : 8 Bit の場合, 0, 0 の位置の QL 値は 05→5 16 Bit の場合, 0, 0 の位置の QL 値は 05 C7→1479)
1/	C7	
2/	04	
3/	9A	
		
*****/	6F	Bit 数, ピクセル数でデータ数は変わる。(例 : 16 Bit でピクセル数が 4640×5120 の場合, 番号は 0~47513599 となる。)

Table 2.7 画像処理における階調変換曲線

Exponential	対数曲線による階調変換。バックグラウンドが抜けた画像を作成するのに効果的。
Linear	直線による階調変換。濃淡の段階がある画像に効果的。
Sigmoid	S字曲線による階調変換。フィルムに近い画像。
Bezier	ベジエ曲線で自由に設定した階調変換。
Triangular	周期を持たせた階調変換。
Freehand	自由に設定した階調変換。

Table 4.1 IP での放射性物質の検出条件

検出条件 A	PSL : 0.02 PSL 以上 面積 : 5 ピクセル以上 平均 PSL : 0.1 PSL 以上
検出条件 B	PSL : 0.04 PSL 以上 面積 : 5 ピクセル以上 平均 PSL : 0.15 PSL 以上

Table 4.2 (1) 検出条件 A での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No. 12) 【5 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	5	1.10	45	4.13	0.092	0.31	3.75	判定レベル未満
2	0.23	5	1.15	26	1.40	0.054	0.18	1.22	判定レベル未満
3	0.31	5	1.55	41	2.37	0.058	0.15	1.53	判定レベル未満
4	0.38	5	1.90	36	2.79	0.077	0.25	1.47	判定レベル未満
5	0.44	5	2.20	50	5.89	0.118	0.50	2.68	
6	0.50	5	2.50	30	2.52	0.084	0.27	1.01	判定レベル未満
7	0.80	5	4.00	100	13.80	0.138	0.59	3.45	
8	1.26	5	6.30	71	9.40	0.132	0.71	1.49	
9	1.47	5	7.35	86	20.73	0.241	2.03	2.82	
10	2.65	5	13.3	127	17.99	0.142	0.60	1.36	
11	13.8	5	69.0	235	153.90	0.655	11.81	2.23	
12	36.0	5	180	556	170.67	0.307	3.06	0.95	

Table 4.2 (2) 検出条件 A での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No. 12) 【10 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	10	2.20	59	8.46	0.143	0.68	3.85	
2	0.23	10	2.30	48	5.40	0.113	0.53	2.35	
3	0.31	10	3.10	55	5.38	0.098	0.40	1.74	判定レベル未満
4	0.38	10	3.80	65	8.45	0.130	0.63	2.22	
5	0.44	10	4.40	66	10.13	0.153	0.88	2.30	
6	0.50	10	5.00	32	1.85	0.058	0.17	0.37	判定レベル未満
7	0.80	10	8.00	127	23.82	0.188	0.83	2.98	
8	1.26	10	12.6	105	19.20	0.183	1.24	1.52	
9	1.47	10	14.7	122	46.13	0.378	4.87	3.14	
10	2.65	10	26.5	161	41.52	0.258	1.35	1.57	
11	13.8	10	138	332	299.65	0.903	24.72	2.17	
12	36.0	10	360	928	325.53	0.351	5.42	0.90	
				5	2.27	0.454	1.846		バックグラウンド

Table 4.2 (3) 検出条件 A での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No. 12) 【15 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	15	3.30	89	14.60	0.164	0.94	4.42	
2	0.23	15	3.45	59	5.81	0.098	0.43	1.68	判定レベル未満
3	0.31	15	4.65	78	9.17	0.118	0.59	1.97	
4	0.38	15	5.70	99	16.74	0.169	1.22	2.94	
5	0.44	15	6.60	99	15.16	0.153	1.18	2.30	
6	0.50	15	7.50	64	4.98	0.078	0.47	0.66	判定レベル未満
7	0.80	15	12.0	165	31.34	0.190	1.00	2.61	
8	1.26	15	18.9	134	33.77	0.252	2.76	1.79	
9	1.47	15	22.1	187	76.03	0.407	8.90	3.45	
10	2.65	15	39.8	224	68.88	0.308	2.33	1.73	
11	13.8	15	207	513	435.53	0.849	39.24	2.10	
12	36.0	15	540	1433	520.84	0.363	8.92	0.96	バックグラウンド
				5	1.16	0.233	0.91		

Table 4.2 (4) 検出条件 A での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No. 12) 【30 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	30	6.60	108	22.07	0.204	1.49	3.34	
2	0.23	30	6.90	92	14.41	0.157	1.13	2.09	
3	0.31	30	9.30	91	17.59	0.193	0.96	1.89	
4	0.38	30	11.4	95	21.15	0.223	1.64	1.86	
5	0.44	30	13.2	117	31.76	0.271	2.39	2.41	
6	0.50	30	15.0	72	9.81	0.136	0.90	0.65	
7	0.80	30	24.0	196	61.82	0.315	1.89	2.58	
8	1.26	30	37.8	176	61.46	0.349	4.09	1.63	
9	1.47	30	44.1	208	143.27	0.689	17.76	3.25	
10	2.65	30	79.5	257	148.13	0.576	5.43	1.86	
11	13.8	30	414	617	869.40	1.409	78.93	2.10	
12	36.0	30	1080	2065	1023.56	0.496	16.68	0.95	

Table 4.2 (5) 検出条件AでのPu測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【60 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSLと放射能の比 (PSL /Bq・分)	備考
1	0.22	60	13.2	132	40.80	0.309	2.78	3.09	
2	0.23	60	13.8	104	24.36	0.234	2.14	1.77	
3	0.31	60	18.6	137	35.23	0.257	1.68	1.89	
4	0.38	60	22.8	134	43.52	0.325	3.27	1.91	
5	0.44	60	26.4	132	48.20	0.365	3.81	1.83	
6	0.50	60	30.0	160	70.77	0.442	6.43	2.36	
7	0.80	60	48.0	255	107.18	0.420	3.21	2.23	
8	1.26	60	75.6	249	117.32	0.471	7.65	1.55	
9	1.47	60	88.2	324	256.02	0.790	26.20	2.90	
10	2.65	60	159	375	277.92	0.741	9.35	1.75	
11	13.8	60	8280	1036	1466.14	1.415	79.04	1.77	測定範囲オーバー
12	36.0	60	2160	3310	1954.79	0.591	34.85	0.90	

Table 4.2 (6) 検出条件AでのPu測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【180 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSLと放射能の比 (PSL /Bq・分)	備考
1	0.22	180	39.6	208	113.402	0.545	8.611	2.86	
2	0.23	180	41.4	189	66.719	0.353	4.64	1.61	
3	0.31	180	55.8	213	88.371	0.415	4.517	1.58	
4	0.38	180	68.4	235	112.537	0.479	8.393	1.65	
5	0.44	180	79.2	250	159.711	0.639	10.917	2.02	
6	0.50	180	90.0	285	215.711	0.757	16.902	2.40	
7	0.80	180	144	396	313.94	0.793	10.426	2.18	
8	1.26	180	227	462	336.359	0.728	23.828	1.48	
9	1.47	180	265	541	619.619	1.145	76.839	2.34	
10	2.65	180	477	719	765.876	1.065	24.442	1.61	
11	13.8	180	2480	2194	2828.516	1.289	79.043	1.14	測定範囲オーバー
12	36.0	180	6480	5839	4326.307	0.741	79.043	0.67	測定範囲オーバー
				5	0.59	0.118	0.415		バックグラウンド

Table 4.2 (7) 検出条件 A での Pu 測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【1020 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射エネルギーの比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	1020	224	598	561.12	0.938	38.80	2.50	
2	0.23	1020	235	656	328.70	0.501	24.84	1.40	
3	0.31	1020	316	790	469.85	0.595	22.97	1.49	
4	0.38	1020	388	754	546.19	0.724	37.08	1.41	
5	0.44	1020	449	932	798.32	0.857	64.63	1.78	
6	0.50	1020	510	1099	1021.12	0.929	79.04	2.00	測定範囲オーバー
7	0.80	1020	816	1481	1578.19	1.066	47.15	1.93	
8	1.26	1020	1285	1785	1628.15	0.912	79.04	1.27	測定範囲オーバー
9	1.47	1020	1500	2128	2174.32	1.022	79.04	1.45	測定範囲オーバー
10	2.65	1020	2700	3085	3572.98	1.158	79.04	1.32	測定範囲オーバー
11	13.8	1020	14080	8011	6999.68	0.874	79.04	0.50	測定範囲オーバー
12	36.0	1020	36700	25055	12879.81	0.514	79.04	0.35	測定範囲オーバー
				6	1.74	0.290	1.31		バックグラウンド
				5	1.27	0.254	0.93		バックグラウンド
				11	1.12	0.102	0.70		バックグラウンド
				6	0.87	0.145	0.65		バックグラウンド

Table 4.3 (1) 検出条件 B での Pu 測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【5 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	5	1.10	27	3.591	0.133	0.313	3.26	判定レベル未満
2	0.23	5	1.15	11	1.004	0.091	0.183	0.87	判定レベル未満
3	0.31	5	1.55	24	1.901	0.079	0.153	1.23	判定レベル未満
4	0.38	5	1.90	19	2.278	0.120	0.246	1.20	判定レベル未満
5	0.44	5	2.20	34	5.445	0.160	0.502	2.48	
6	0.50	5	2.50	20	2.224	0.111	0.266	0.89	判定レベル未満
7	0.80	5	4.00	74	13.019	0.176	0.587	3.25	
8	1.26	5	6.30	46	8.649	0.188	0.711	1.37	
9	1.47	5	7.35	59	19.909	0.337	2.031	2.71	
10	2.65	5	13.3	88	16.866	0.192	0.603	1.27	
11	13.8	5	69.0	168	151.86	0.904	11.811	2.20	
12	36.0	5	180.0	369	164.794	0.447	3.056	0.92	

Table 4.3 (2) 検出条件 B での Pu 測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【10 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	10	2.20	43	8.024	0.187	0.678	3.65	
2	0.23	10	2.30	30	4.872	0.162	0.531	2.12	
3	0.31	10	3.10	40	4.924	0.123	0.397	1.59	判定レベル未満
4	0.38	10	3.80	44	7.891	0.179	0.632	2.08	
5	0.44	10	4.40	45	9.484	0.211	0.88	2.16	
6	0.50	10	5.00	18	1.444	0.080	0.173	0.29	判定レベル未満
7	0.80	10	8.00	102	23.048	0.226	0.832	2.88	
8	1.26	10	12.6	70	18.233	0.260	1.24	1.45	
9	1.47	10	14.7	80	44.865	0.561	4.873	3.05	
10	2.65	10	26.5	124	40.466	0.326	1.346	1.53	
11	13.8	10	138	224	296.449	1.323	24.719	2.15	
12	36.0	10	360	539	313.345	0.581	5.42	0.87	

Table 4.3 (3) 検出条件BでのPu測定結果 (試料No. 1～No. 12) 【15分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSLと放射能の比 (PSL/Bq・分)	備考
1	0.22	15	3.30	56	13.66	0.244	0.939	4.14	
2	0.23	15	3.45	34	5.093	0.150	0.433	1.48	
3	0.31	15	4.65	51	8.364	0.164	0.592	1.80	
4	0.38	15	5.70	59	15.477	0.262	1.215	2.72	
5	0.44	15	6.60	61	14.127	0.232	1.181	2.14	
6	0.50	15	7.50	33	4.184	0.127	0.469	0.56	判定レベル未満
7	0.80	15	12.0	113	29.798	0.264	1.002	2.48	
8	1.26	15	18.9	95	32.715	0.344	2.763	1.73	
9	1.47	15	22.1	111	73.803	0.665	8.895	3.35	
10	2.65	15	39.8	157	66.968	0.427	2.33	1.68	
11	13.8	15	207	283	428.306	1.513	39.236	2.07	
12	36.0	15	540	772	499.344	0.647	8.917	0.92	

Table 4.3 (4) 検出条件BでのPu測定結果 (試料No. 1～No. 12) 【30分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSLと放射能の比 (PSL/Bq・分)	備考
1	0.22	30	6.60	72	21.07	0.293	1.493	3.19	
2	0.23	30	6.90	58	13.473	0.232	1.125	1.95	
3	0.31	30	9.30	67	16.92	0.253	0.963	1.82	
4	0.38	30	11.4	66	20.27	0.307	1.644	1.78	
5	0.44	30	13.2	82	30.77	0.375	2.385	2.33	
6	0.50	30	15.0	44	8.994	0.204	0.904	0.60	
7	0.80	30	24.0	147	60.421	0.411	1.893	2.52	
8	1.26	30	37.8	120	59.795	0.498	4.085	1.58	
9	1.47	30	44.1	151	141.565	0.938	17.757	3.21	
10	2.65	30	79.5	186	145.937	0.785	5.433	1.84	
11	13.8	30	414	404	862.98	2.136	78.932	2.08	
12	36.0	30	1080	1194	996.146	0.834	16.683	0.92	

Table 4.3 (5) 検出条件 B での Pu 測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【60 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	60	13.2	86	39.376	0.458	2.777	2.98	
2	0.23	60	13.8	72	23.422	0.325	2.14	1.70	
3	0.31	60	18.6	97	33.973	0.350	1.681	1.83	
4	0.38	60	22.8	98	42.457	0.433	3.271	1.86	
5	0.44	60	26.4	89	46.892	0.527	3.81	1.78	
6	0.50	60	30.0	115	69.483	0.604	6.43	2.32	
7	0.80	60	48.0	180	104.88	0.583	3.208	2.19	
8	1.26	60	75.6	153	114.56	0.749	7.654	1.52	
9	1.47	60	88.2	201	252.246	1.255	26.203	2.86	
10	2.65	60	159	260	274.503	1.056	9.345	1.73	
11	13.8	60	8280	599	1452.333	2.425	79.043	1.75	測定範囲オーバー
12	36.0	60	2160	1928	1910.208	0.991	34.848	0.88	

Table 4.3 (6) 検出条件 B での Pu 測定結果 (試料 No. 1～No. 12) 【180 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	180	39.6	136	111.273	0.818	8.611	2.81	
2	0.23	180	41.4	116	64.575	0.557	4.64	1.56	
3	0.31	180	55.8	136	85.958	0.632	4.517	1.54	
4	0.38	180	68.4	158	110.325	0.698	8.393	1.61	
5	0.44	180	79.2	174	157.397	0.905	10.917	1.99	
6	0.50	180	90.0	196	213.086	1.087	16.902	2.37	
7	0.80	180	144	269	310.089	1.153	10.426	2.15	
8	1.26	180	227	278	330.716	1.190	23.828	1.46	
9	1.47	180	265	318	612.72	1.927	76.839	2.32	
10	2.65	180	477	464	757.977	1.634	24.442	1.59	
11	13.8	180	2480	1186	2795.394	2.357	79.043	1.13	測定範囲オーバー
12	36.0	180	6480	3226	4238.571	1.314	79.043	0.65	測定範囲オーバー

Table 4.3 (7) 検出条件 B での Pu 測定結果 (試料 No. 1 ~ No. 12) 【1020 分間照射】

No.	放射エネルギー (Bq)	照射時間 (分)	積算放射エネルギー (Bq・分)	面積 (PIXEL)	PSL 合計 (PSL)	平均値 (PSL/PIXEL)	最大値 (PSL)	PSL と放射能の比 (PSL / Bq・分)	備考
1	0.22	1020	224	313	552.194	1.764	38.804	2.46	
2	0.23	1020	235	322	318.369	0.989	24.841	1.36	
3	0.31	1020	316	400	457.317	1.143	22.973	1.45	
4	0.38	1020	388	382	534.273	1.399	37.084	1.38	
5	0.44	1020	449	444	782.782	1.763	64.63	1.74	
6	0.50	1020	510	533	1002.771	1.881	79.043	1.97	測定範囲オーバー
7	0.80	1020	816	789	1556.384	1.973	47.15	1.91	
8	1.26	1020	1285	925	1600.159	1.730	79.043	1.25	測定範囲オーバー
9	1.47	1020	1500	1019	2138.458	2.099	79.043	1.43	測定範囲オーバー
10	2.65	1020	2700	1558	3523.223	2.261	79.043	1.30	測定範囲オーバー
11	13.8	1020	14080	4150	6870.438	1.656	79.043	0.49	測定範囲オーバー
12	36.0	1020	36700	12288	12447.79	1.013	79.043	0.34	測定範囲オーバー

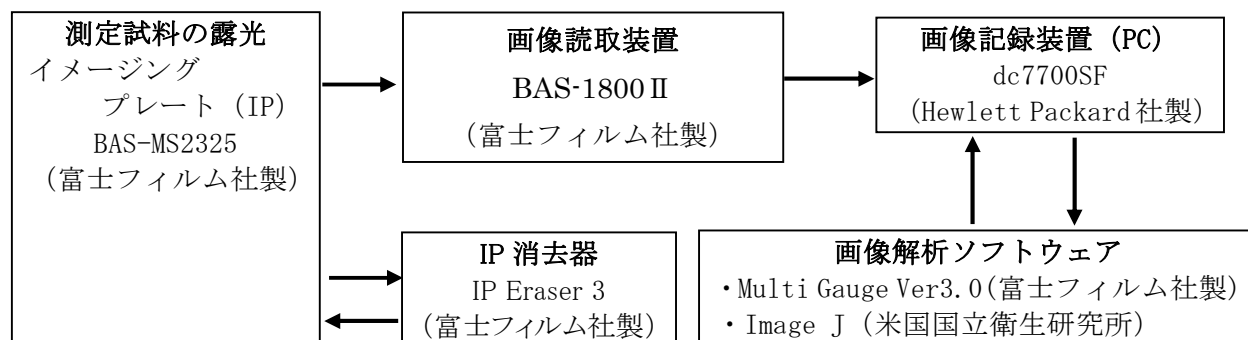
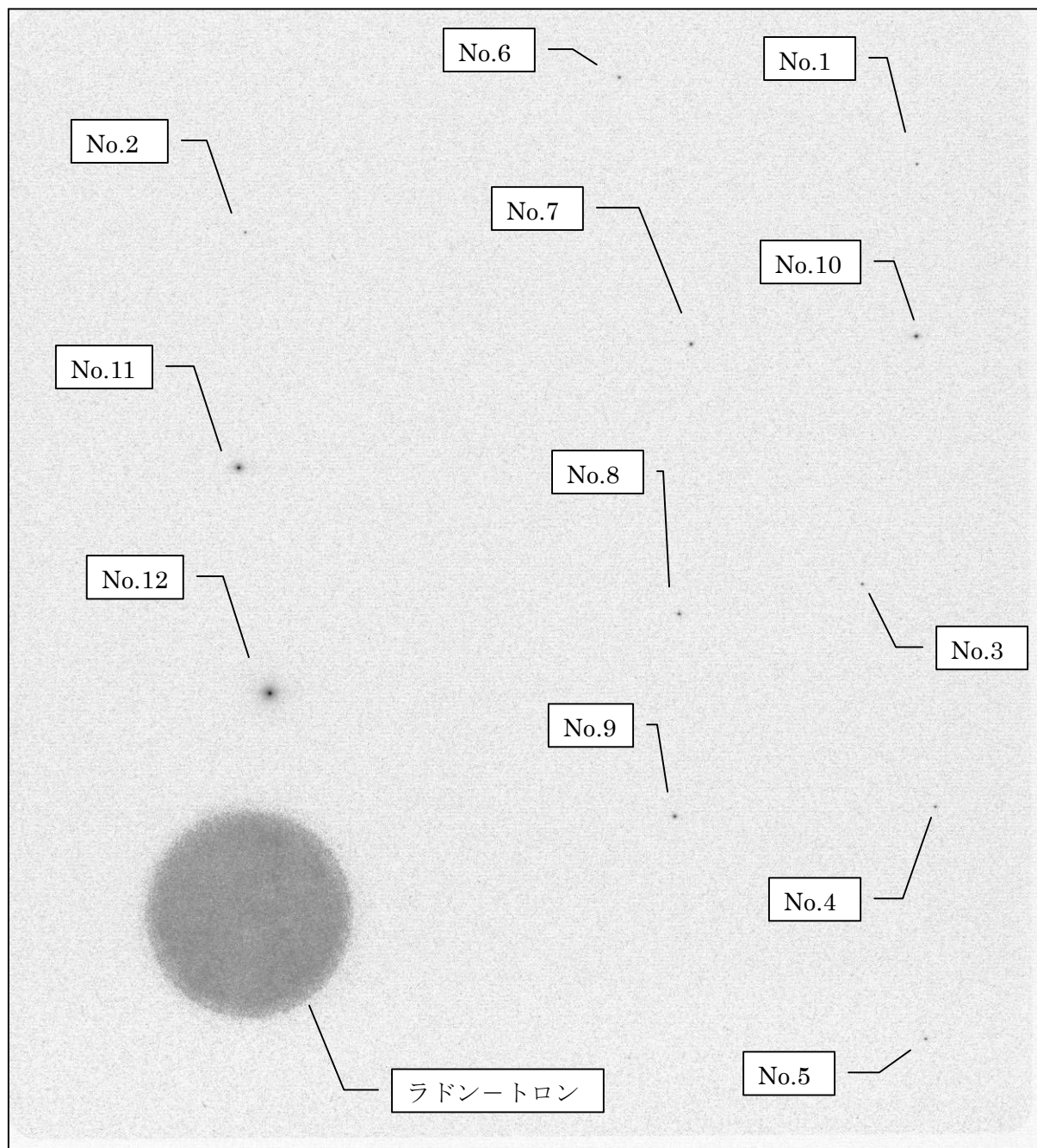


Fig.2.1 イメージングプレート及び読み取り装置の構成



No. 1 ～No. 12 の試料の Image Jでの IP 画像（16 Bit グレー階調，60 分間照射）
 注）試料番号は放射エネルギーの順に付けている。No. 2 と No. 10 は番号順に並んではいない。

Fig.2.2 プルトニウム試料（No. 1～No.12）の配置

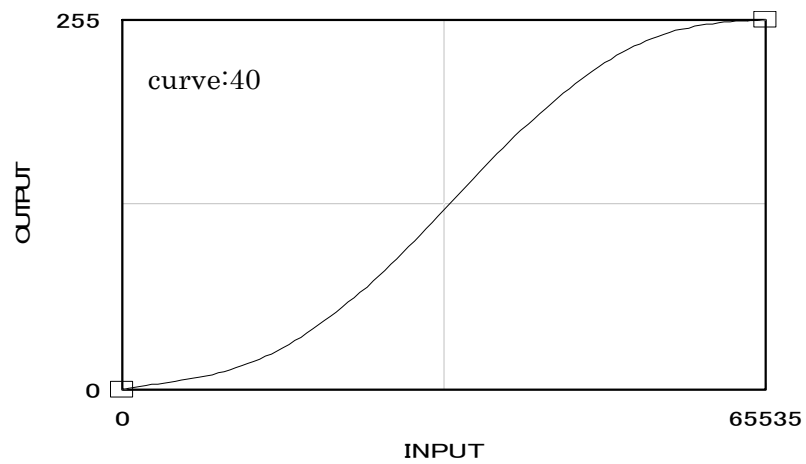


Fig.2.3 階調処理における Sigmoid 曲線 (Brightness/Contrast)

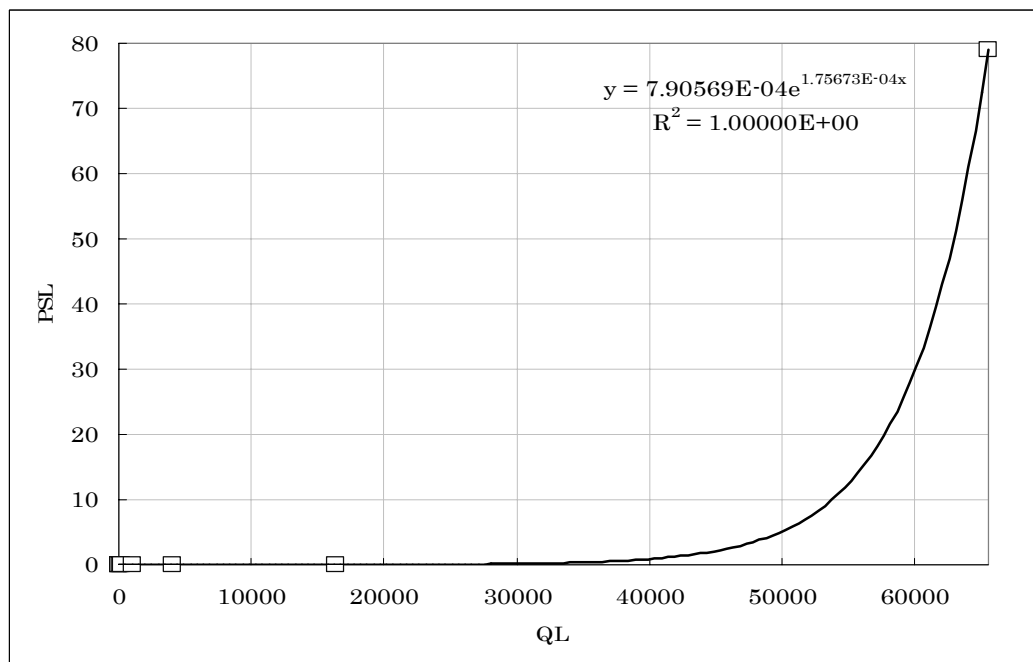


Fig.2.4 QL 値－PSL の換算曲線

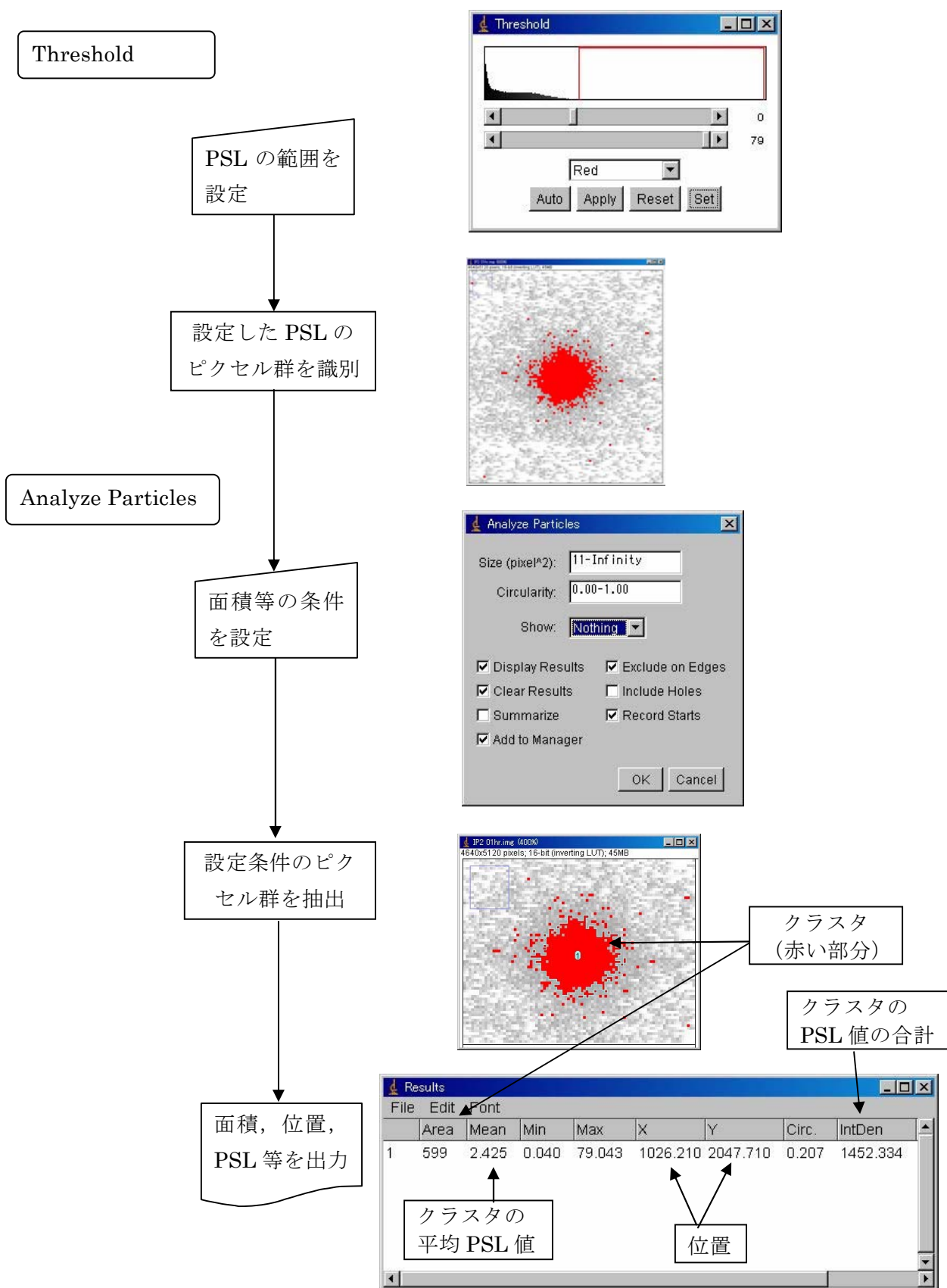
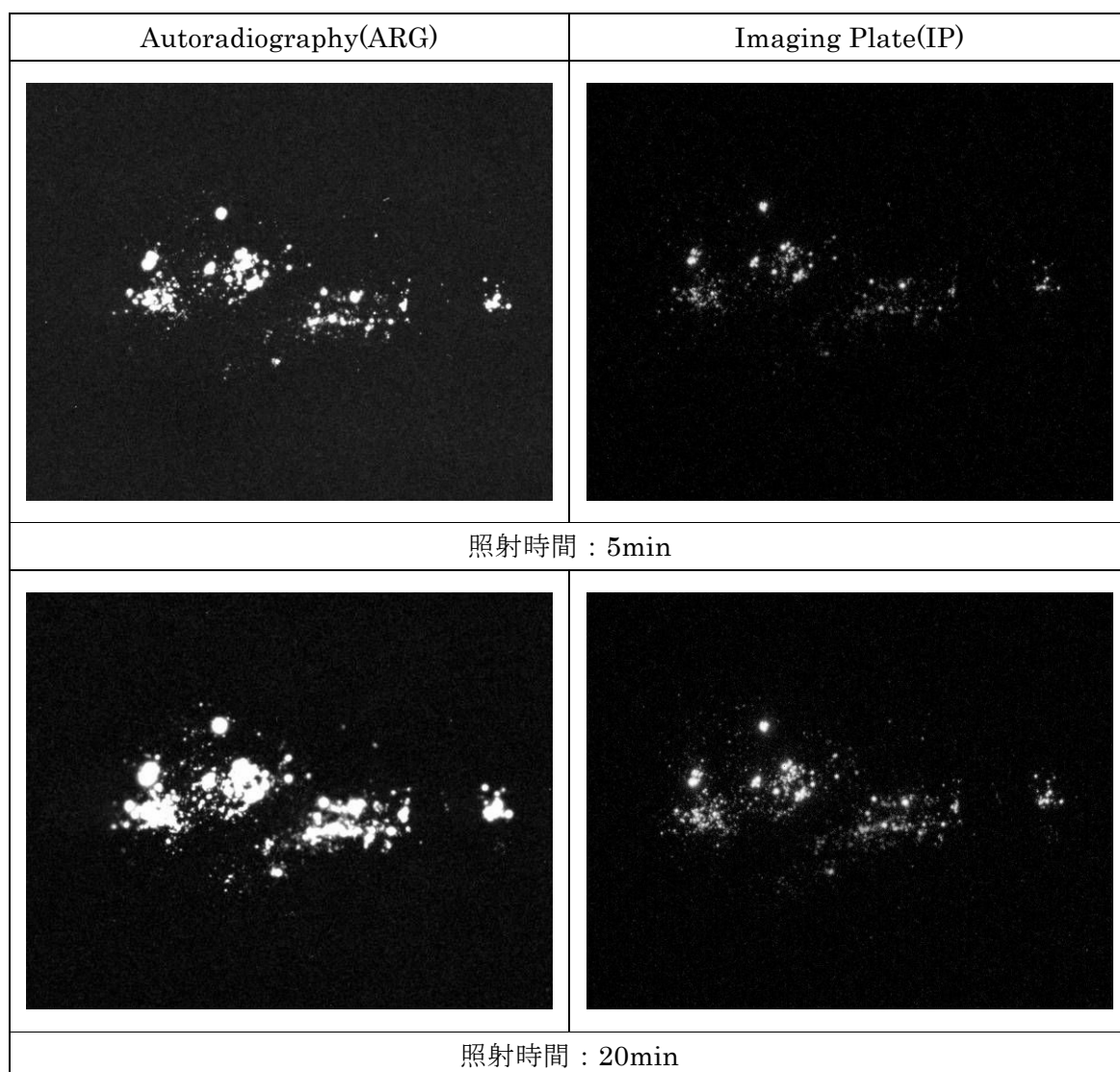


Fig.2.5 Image J による粒子検出の処理フロー

This is a blank page.

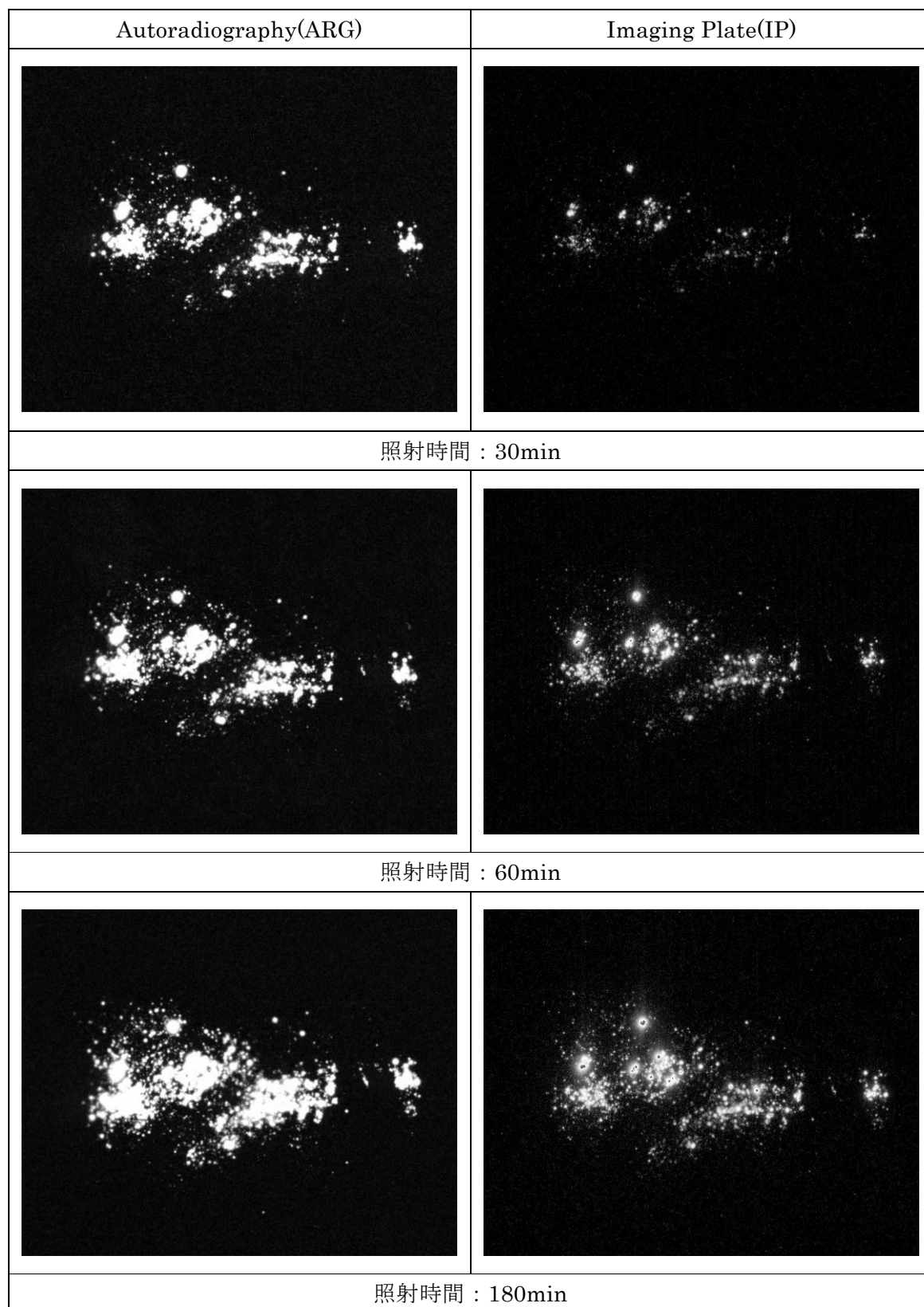


【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト : Multi Gauge Ver3.1

設定条件 : 表示色 (ポジ)

諧調変換曲線 (Sigmoid) ,Range Low:0 High:65535, curve:40

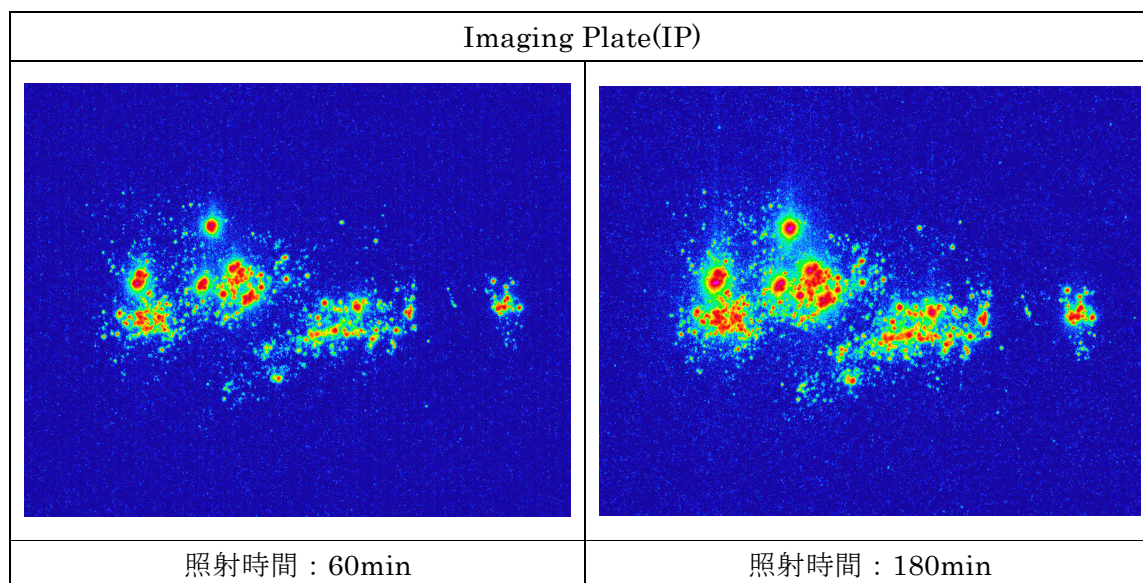
Fig.3.1 照射時間における ARG・IP 画像の比較 (試料 No.13) 【5,20min】



【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色（ポジ），諧調変換曲線（Sigmoid），Range Low:0 High:65535, curve:40

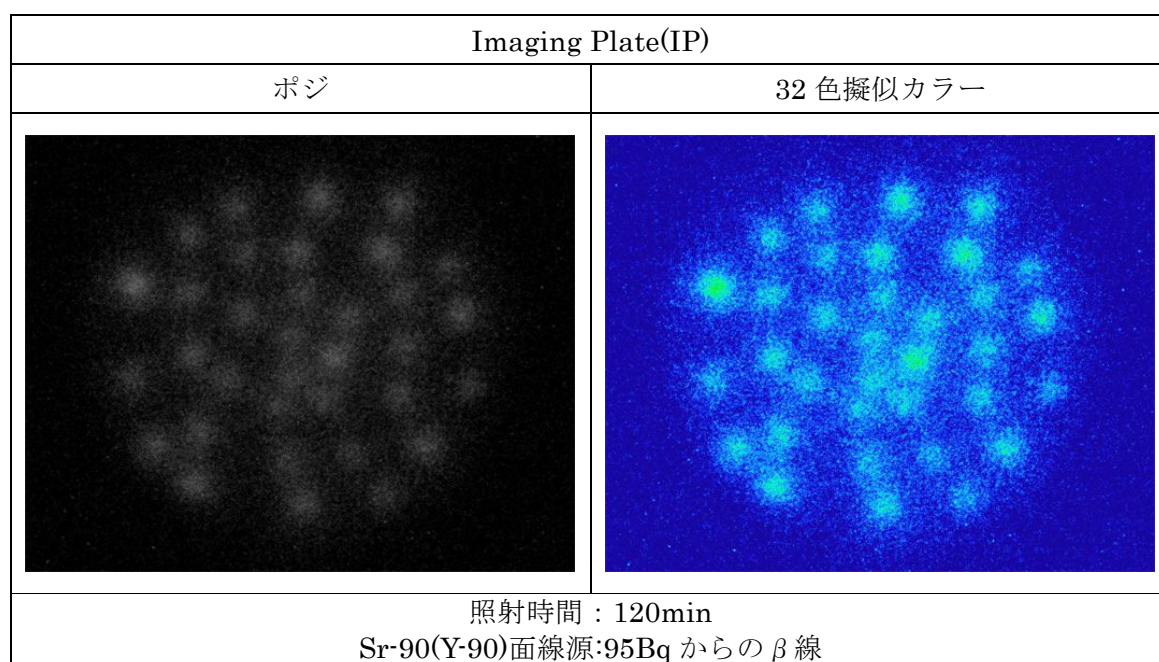
Fig.3.2 照射時間における ARG・IP 画像の比較（試料 No.13）【30,60,180min】



【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色（32色擬似カラー），諧調変換曲線（Sigmoid）,Range Low:0 High:65535,
curve:40

Fig.3.3 IP 画像（試料 No.13）【32色擬似カラー】

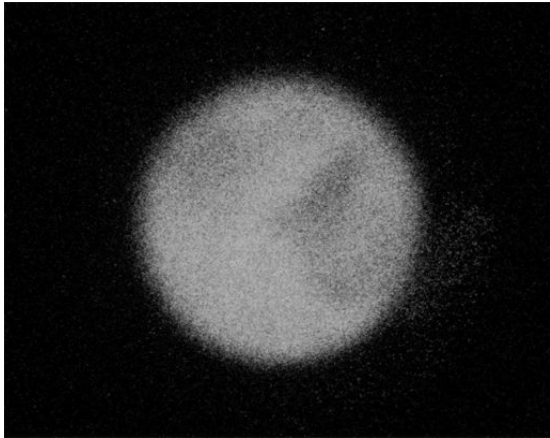
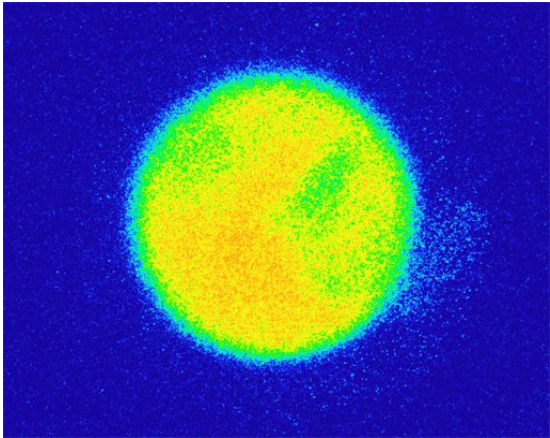
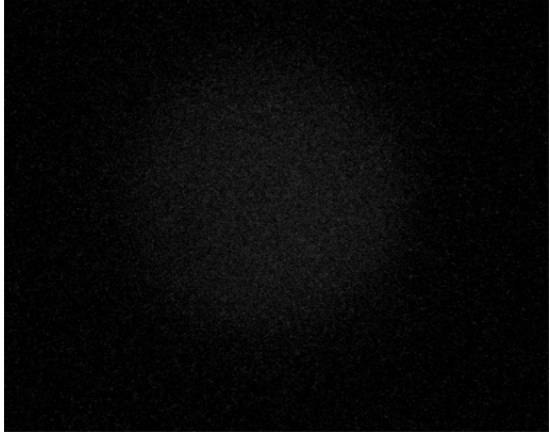
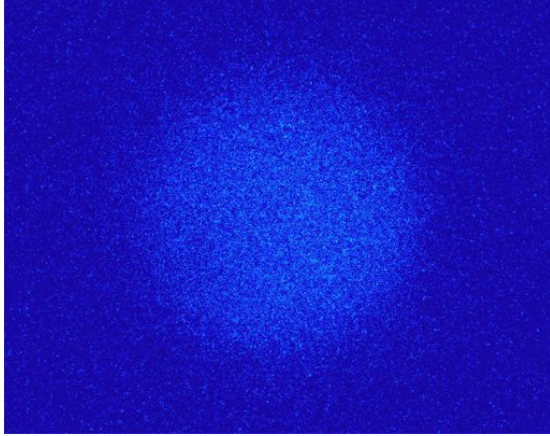


【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色（ポジ），表示色（32色擬似カラー），諧調変換曲線（Sigmoid）,Range Low:0
High:65535, curve:40

Fig.3.4 IP 画像【Sr-90(Y-90)】

This is a blank page.

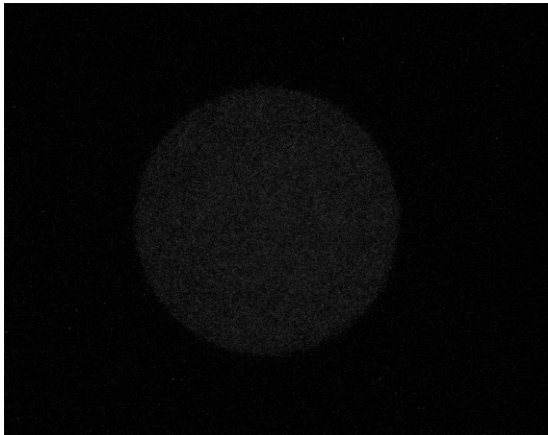
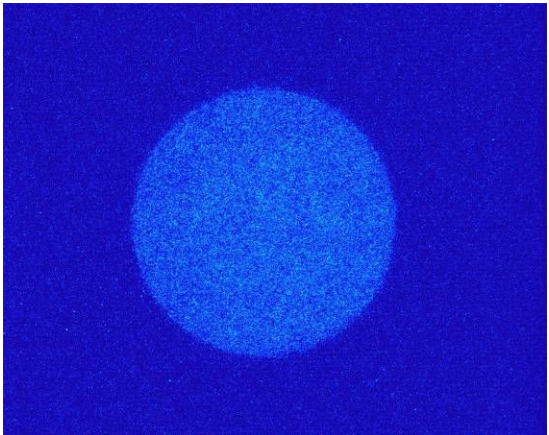
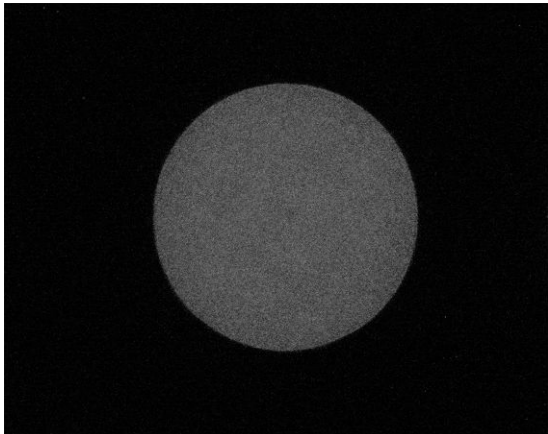
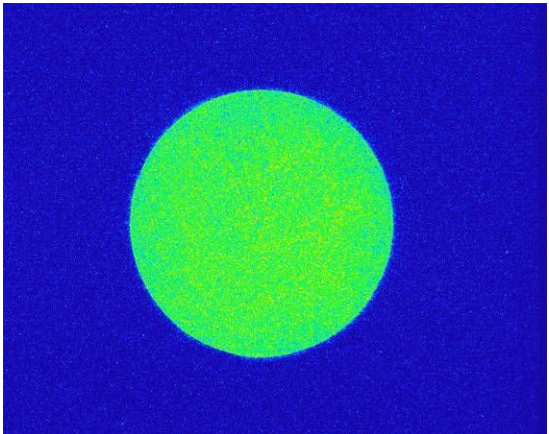
Imaging Plate(IP)	
ポジ	32 色擬似カラー
	
照射時間：120min Am-241 面線源:166Bq からの α , γ 線	
ポジ	32 色擬似カラー
	
照射時間：120min Am-241 面線源:166Bq からの γ 線 (α 線を紙で遮へい)	

【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色 (ポジ), 表示色 (32 色擬似カラー), 諧調変換曲線 (Sigmoid) ,Range Low:0
High:65535, curve:40

Fig.3.5 IP 画像【Am-241】

This is a blank page.

Imaging Plate(IP)	
ポジ	32 色擬似カラー
	
露光時間 : 60min 94Bq ウラン線源からの β , γ 線(アルミ膜有)	
ポジ	32 色擬似カラー
	
露光時間 : 60min 324Bq ウラン線源からの α , β , γ 線	

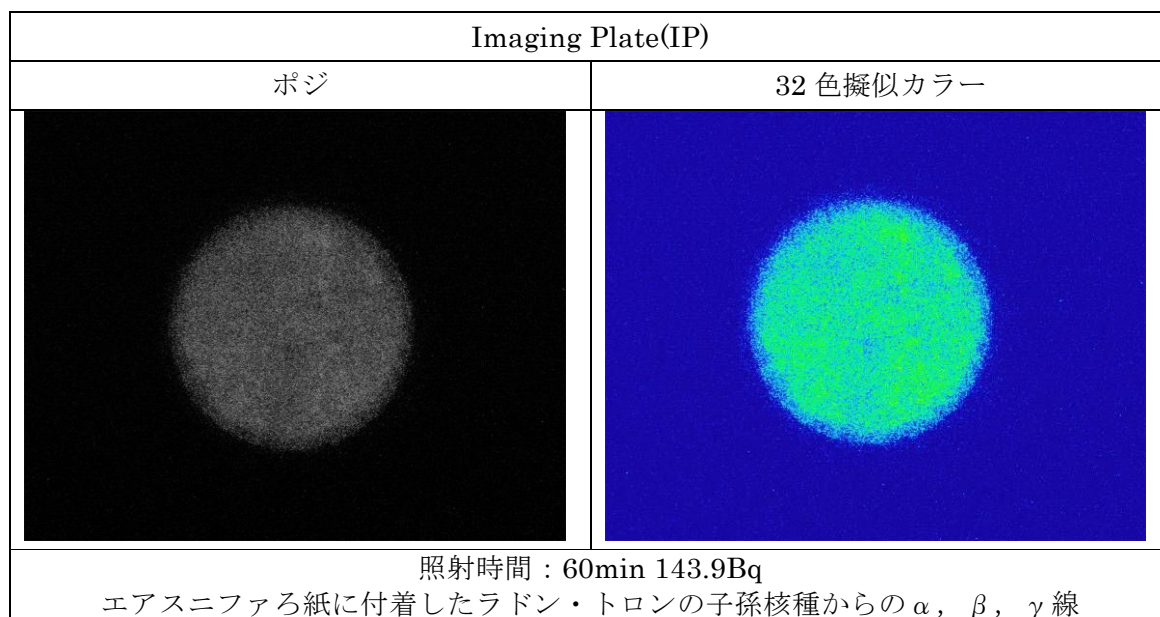
【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト : Multi Gauge Ver3.1

設定条件 : 表示色 (ポジ) 表示色 (32 色擬似カラー)

諧調変換曲線 (Sigmoid) ,Range Low:0 High:65535, curve:40

Fig.3.6 IP 画像 (U_3O_8 面線源)

This is a blank page.



【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色 (ポジ), 表示色 (32 色擬似カラー), 諧調変換曲線 (Sigmoid) ,Range Low:0
 High:65535, curve:40

Fig.3.7 IP 画像【エアスニファろ紙：ラドン・トロンの子孫核種】

This is a blank page.

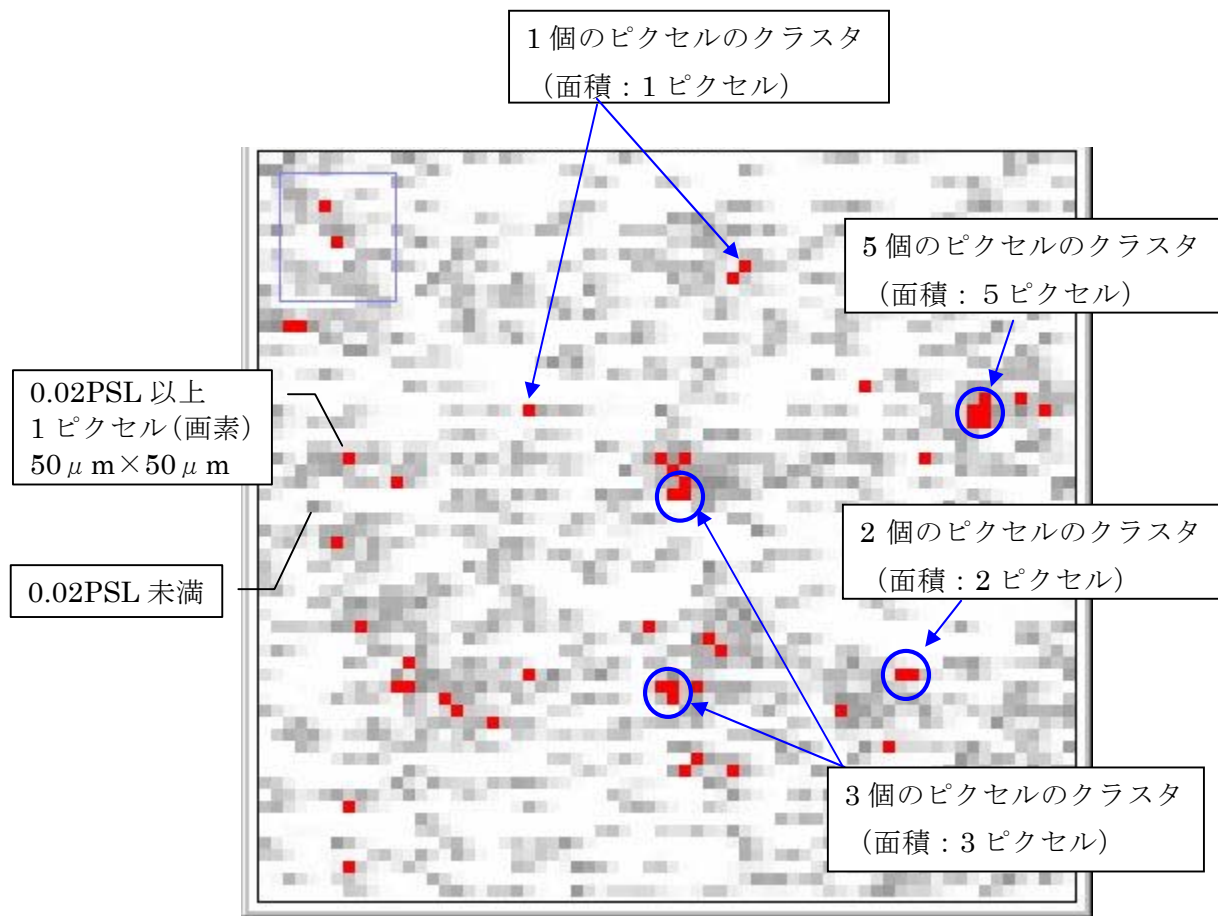


Fig.4.1 バックグラウンドの IP の拡大画像

Image J により 0.02PSL 以上のクラスター (赤いピクセル) を抽出
 クラスターの平均 PSL は、赤い n 個の連続したピクセルの PSL の
 合計をピクセルの個数 n で割った値となる。

This is a blank page.

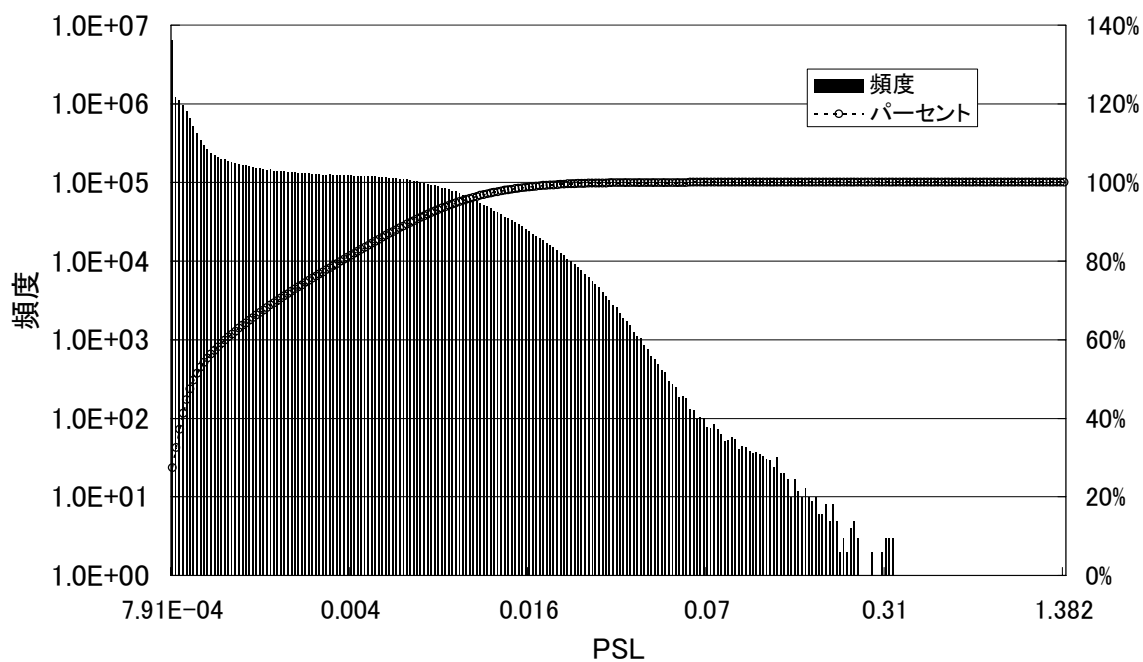


Fig.4.2 バックグラウンドの全ピクセルの PSL のヒストグラム
 ピクセル総数は 23, 756, 800 個 (4640×5120)。縦軸及び横軸は対数表示。

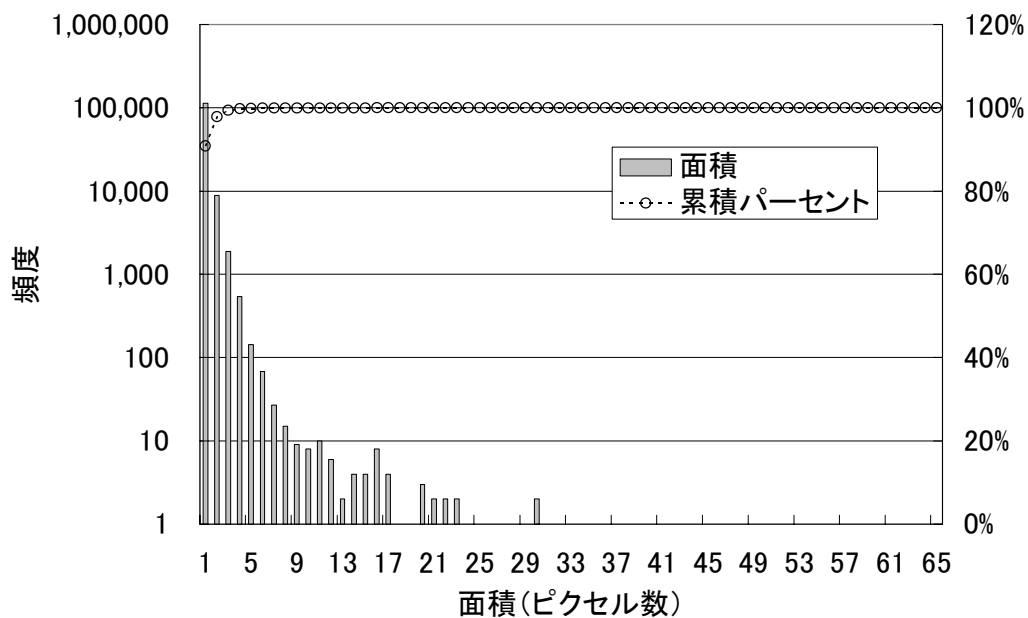


Fig.4.3 バックグラウンドのクラスタの面積のヒストグラム
 頻度是对数表示

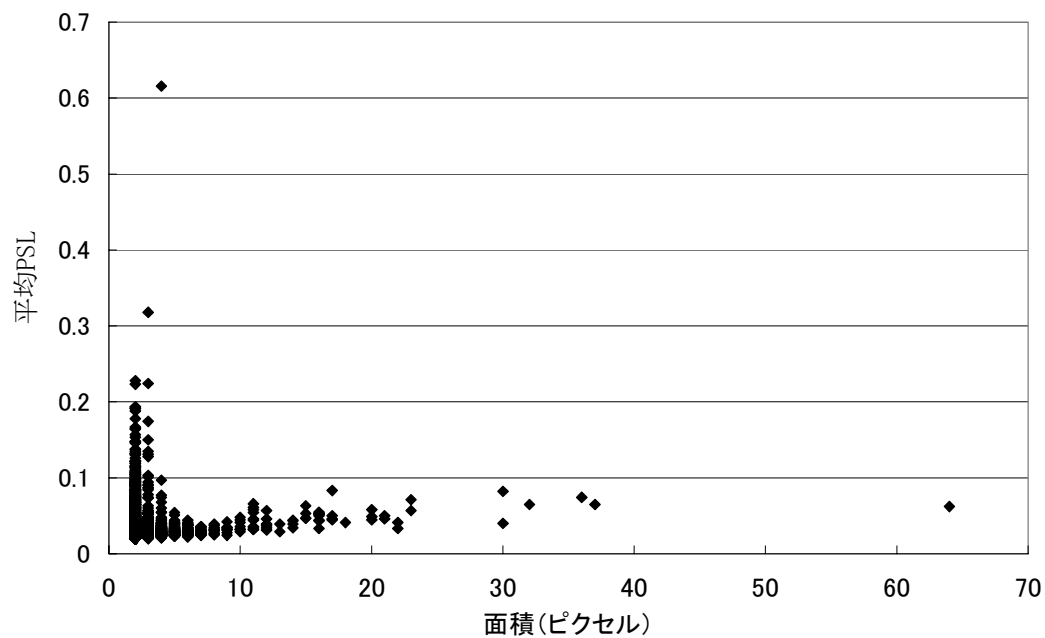


Fig.4.4 0.02PSL 以上のクラスタの面積と平均 PSL

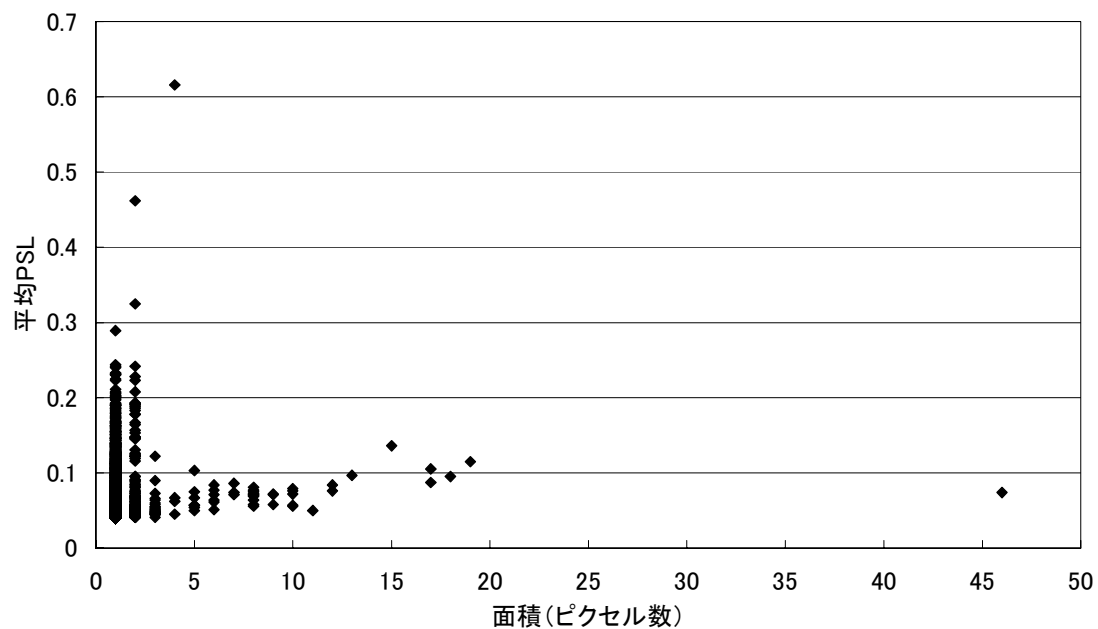


Fig.4.5 0.04PSL 以上のクラスタの面積と平均 PSL

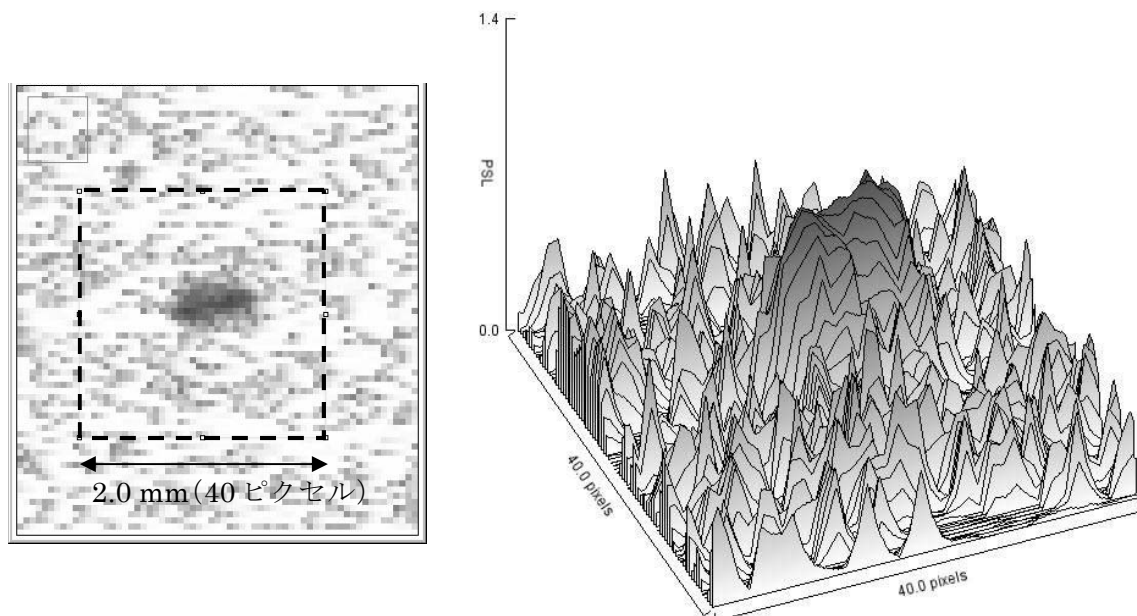


Fig. 4.6 バックグラウンドにおける面積の特異なクラスタの PSL 分布
 最大値 : 0.15 PSL, 面積 : 46 ピクセル (0.04PSL 以上の範囲)

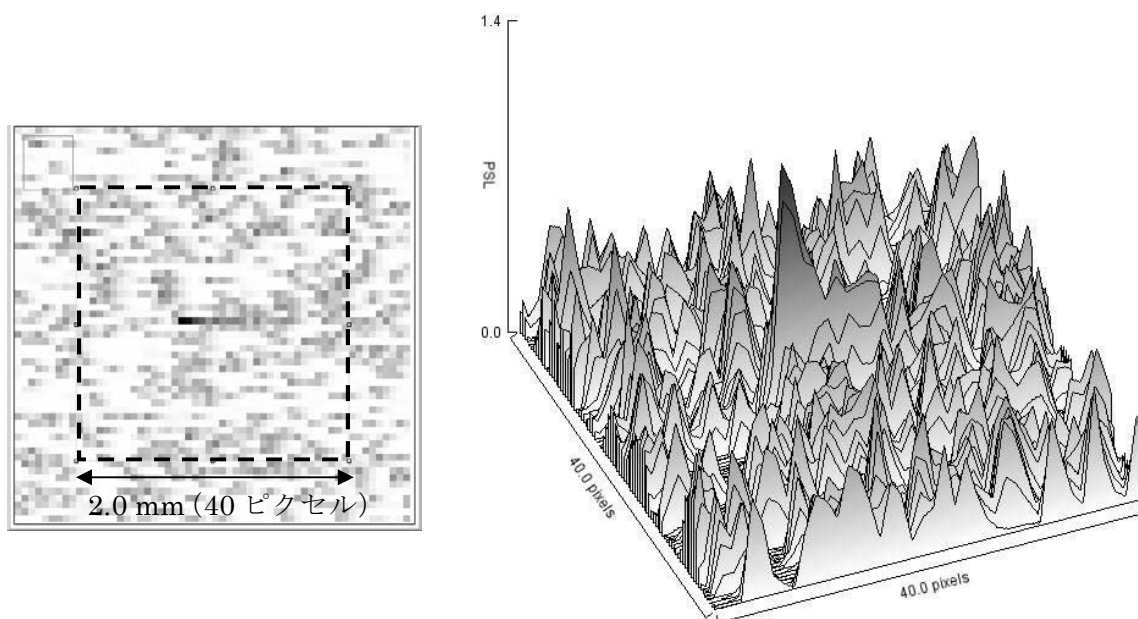


Fig. 4.7 バックグラウンドにおける PSL の特異なクラスタの PSL 分布
 最大値 : 1.42PSL, 面積 : 5 ピクセル (0.04PSL 以上の範囲)

This is a blank page.

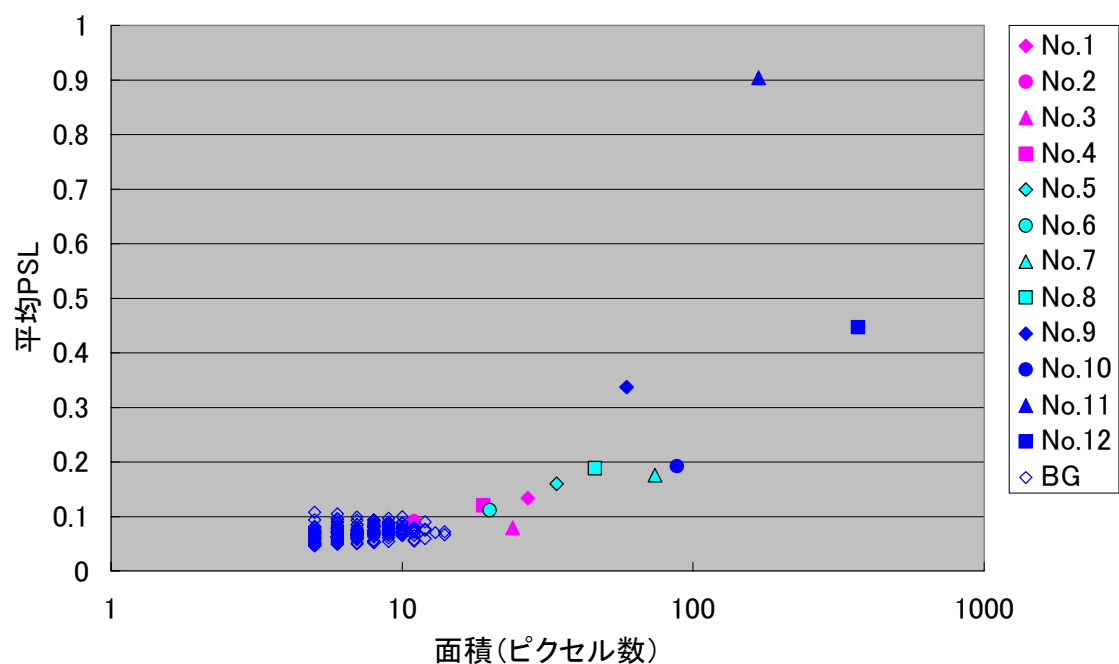


Fig.4.8 Pu 及びバックグラウンドのクラスターの面積と平均 PSL
(5 分間測定, 0.04PSL 以上)

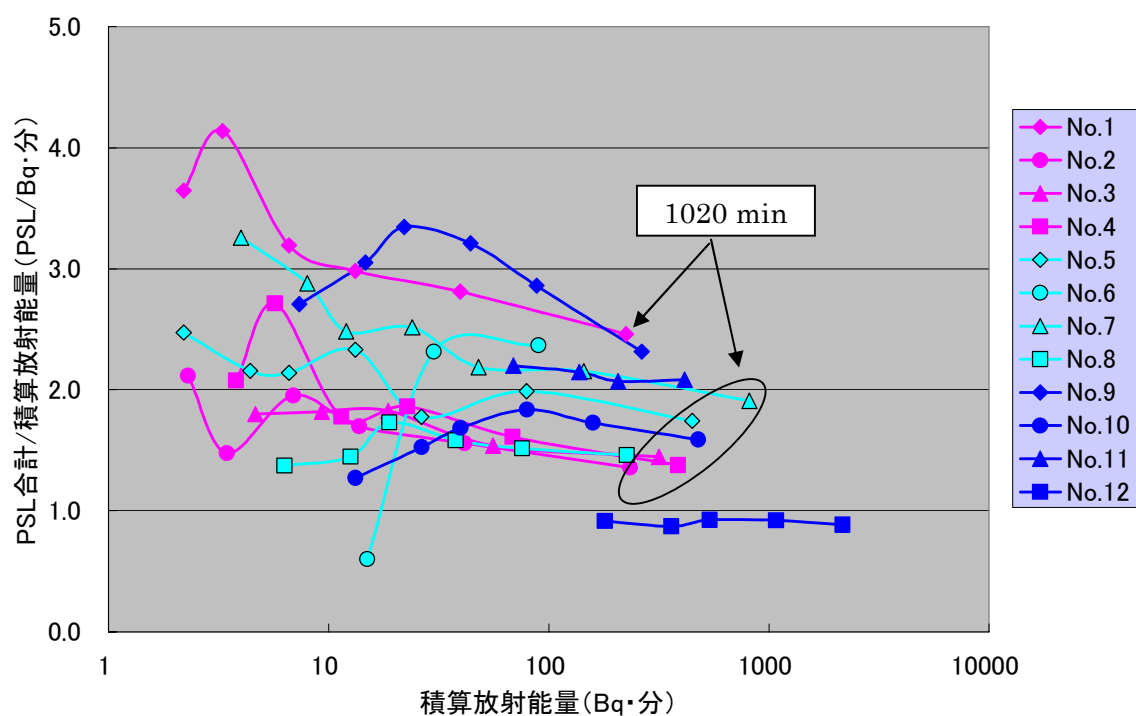


Fig.4.9 Pu 試料における PSL と積算放射エネルギーの比

This is a blank page.

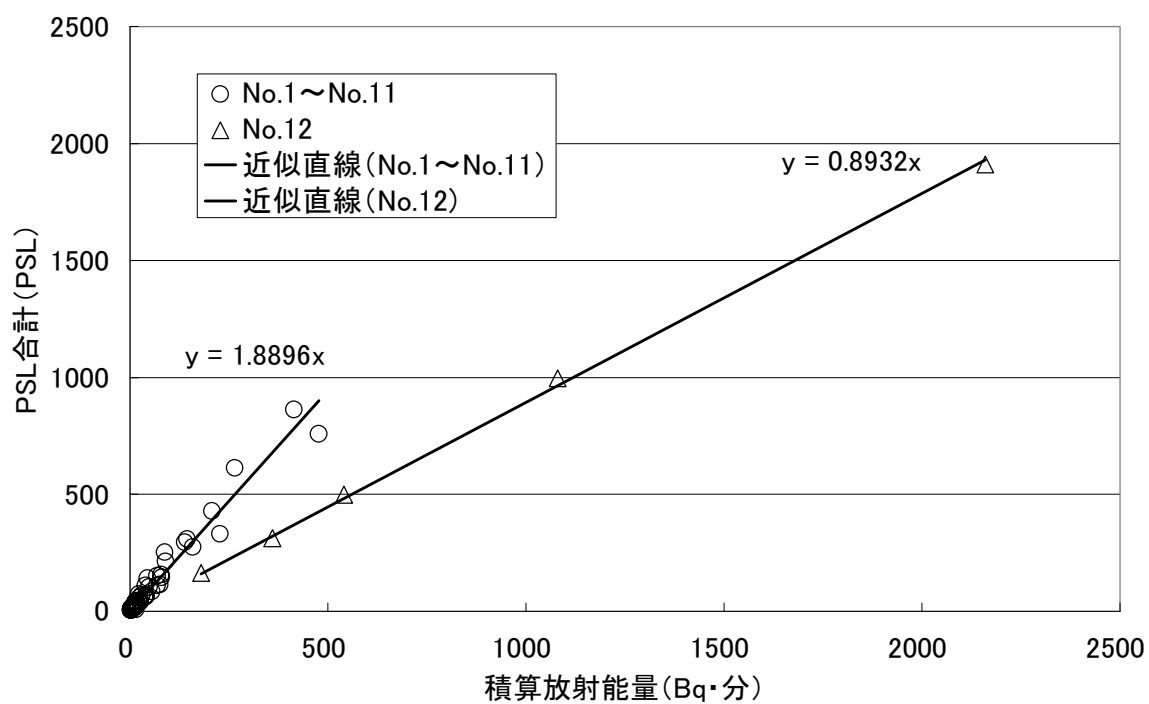


Fig.4.10 Pu 試料における PSL と積算放射能量

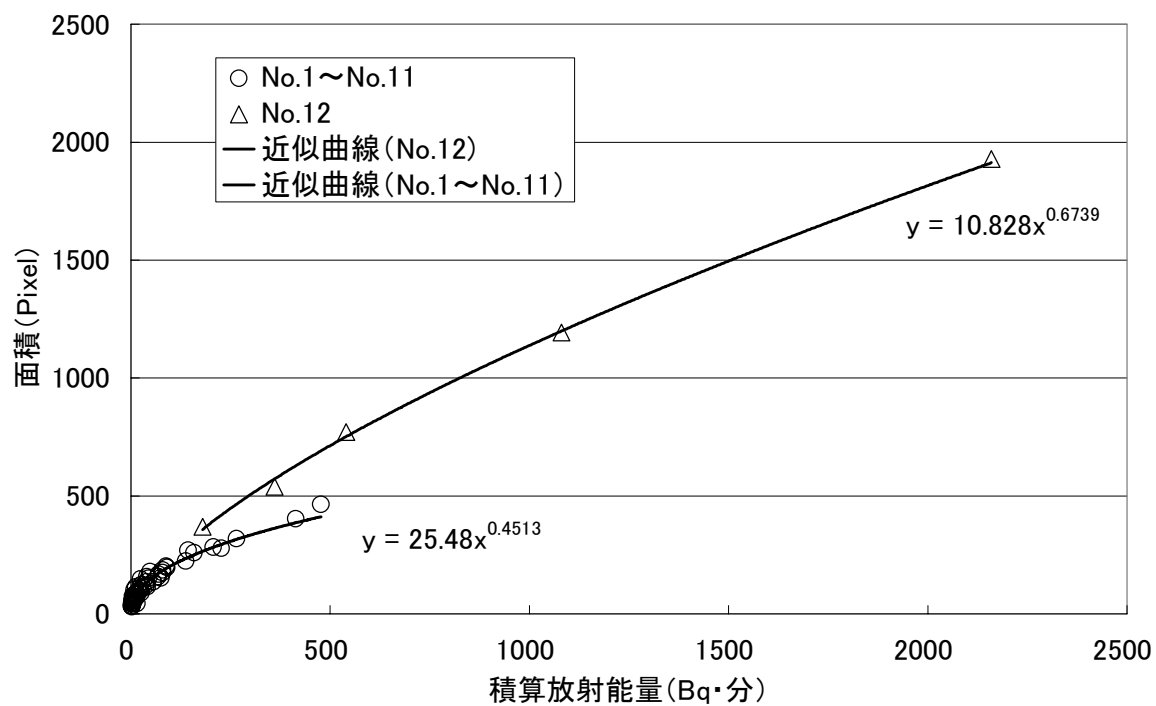


Fig.4.11 Pu 試料における面積と積算放射能量

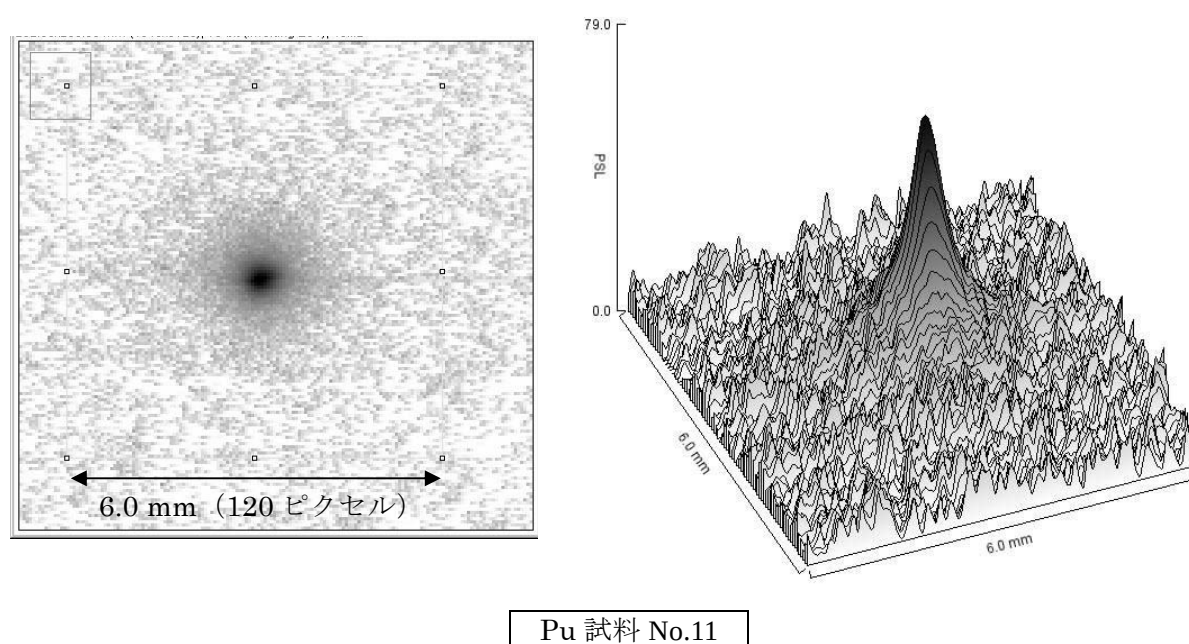
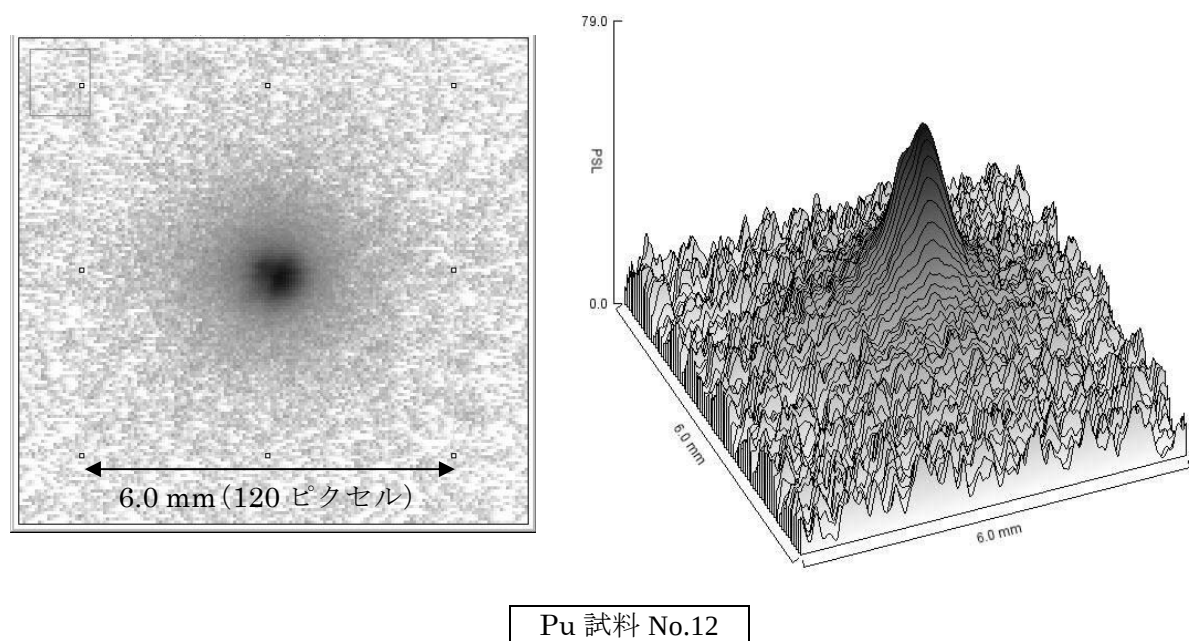


Fig.4.12 Pu 試料 No.12 と Pu 試料 No.11 の PSL 分布

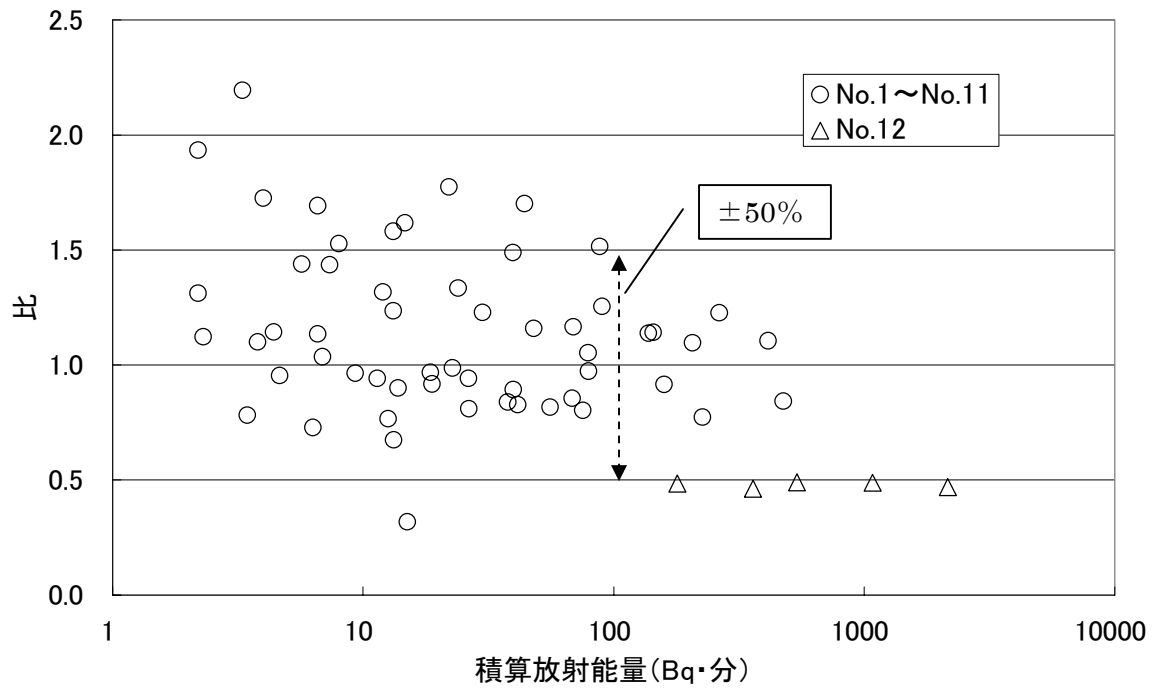


Fig.4.13 積算放射エネルギーと PSL から評価した放射エネルギーの比較

This is a blank page.



Photo 2.1 イメージングプレート，読取装置，消去器

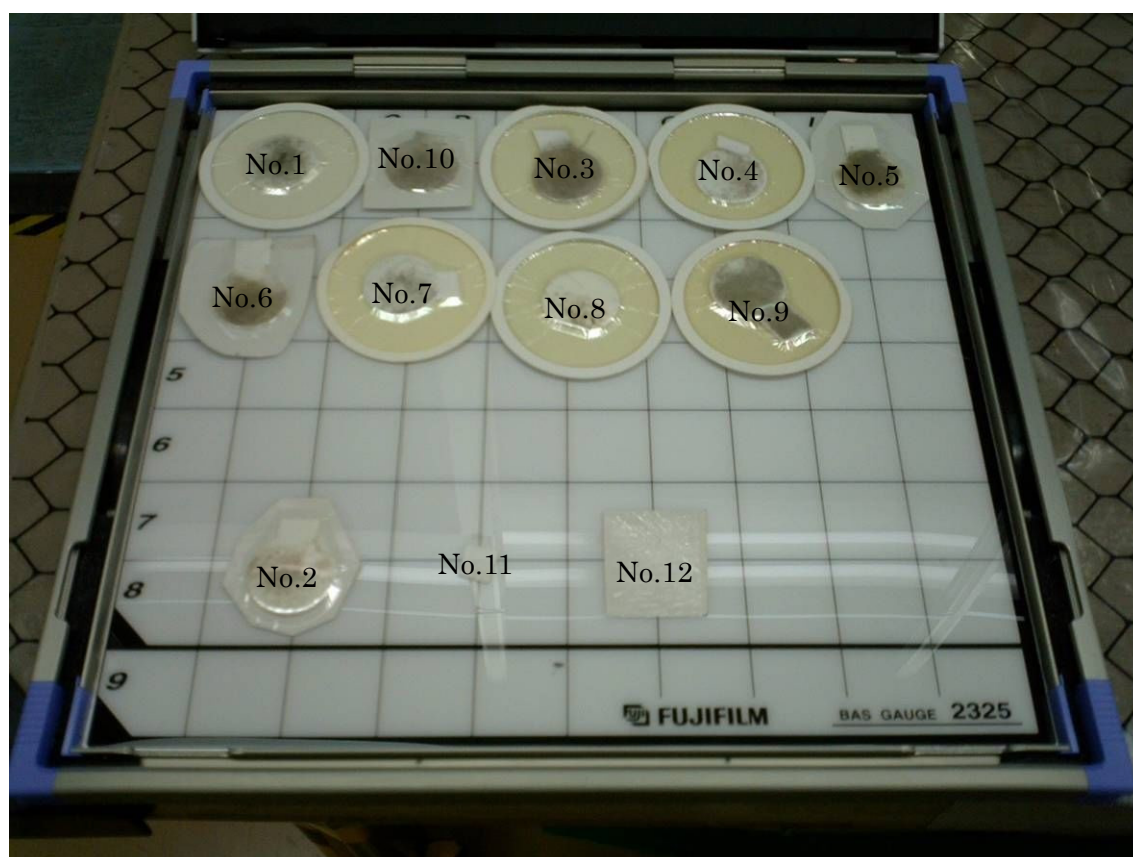


Photo 2.2 測定試料及び配置

This is a blank page.



Photo 4.1 No.12 試料

This is a blank page.

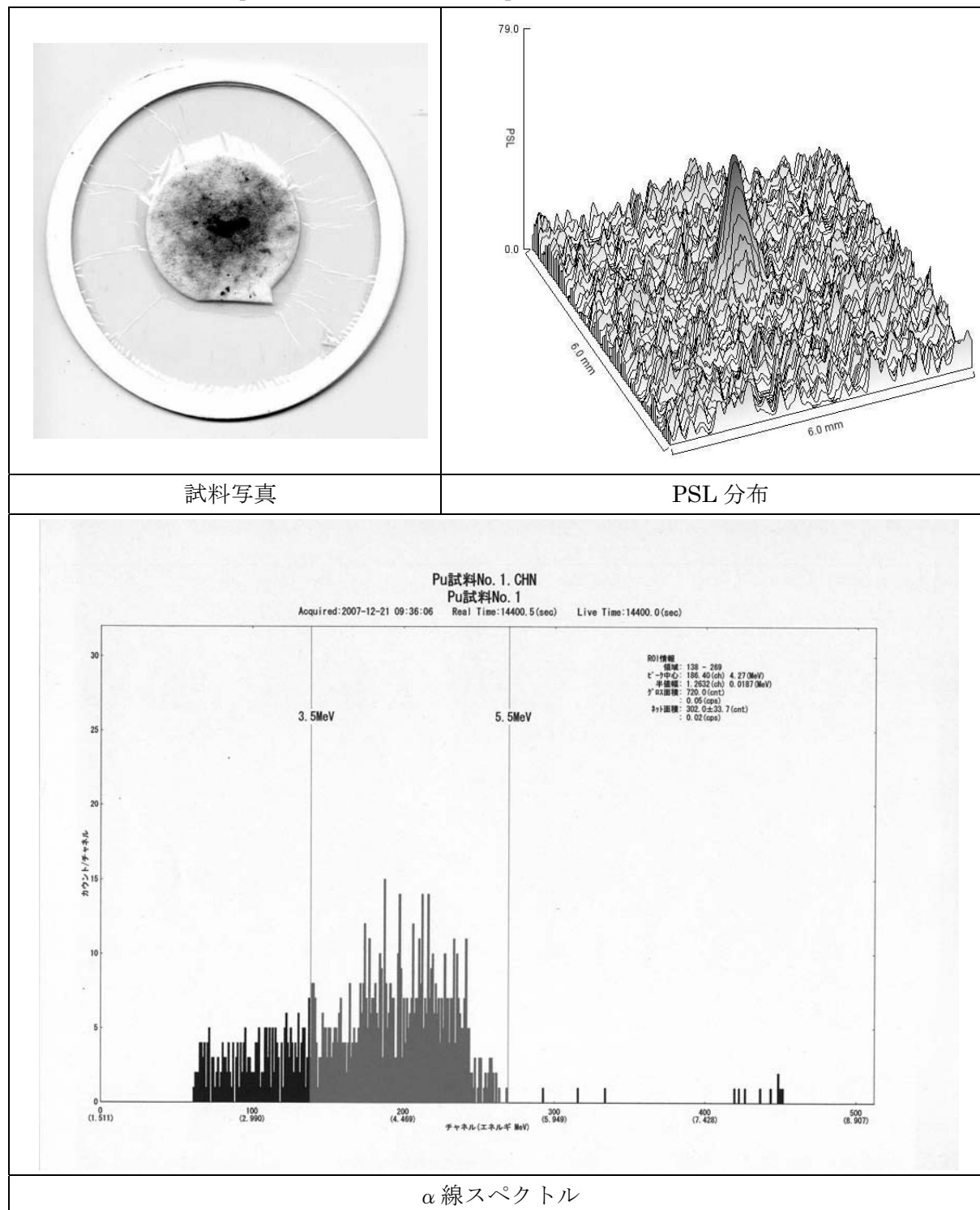
付録1 プルトニウム試料のデータ

試料 No. 1

試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

全 α 放射能 : 0.22 Bq, Am- α 放射能 : 0.11 Bq, 全 β : 検出下限値未満

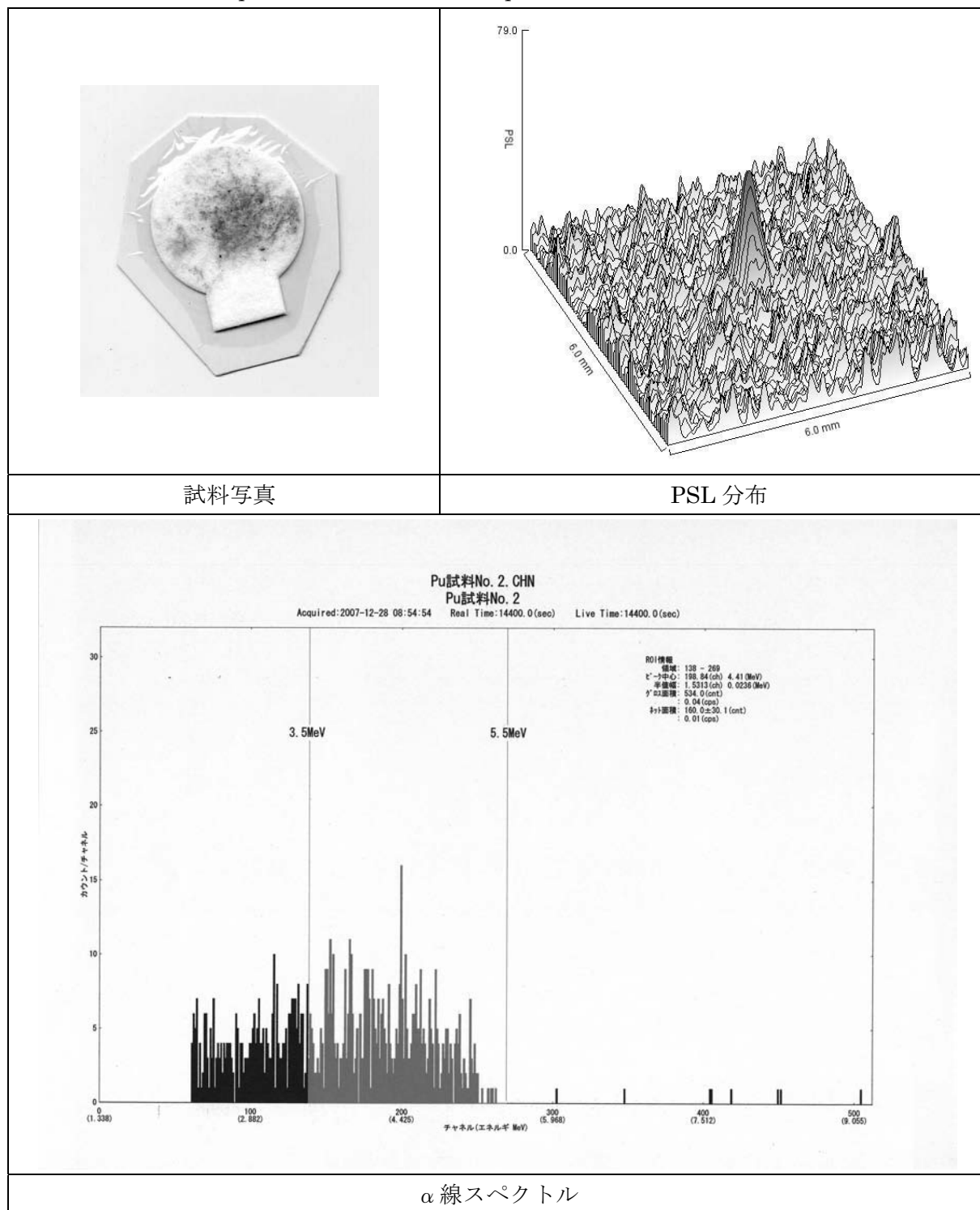


試料 No. 2

試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

全 α 放射能 : 0.23 Bq, Am- α 放射能 : 0.19 Bq, 全 β : 検出下限値未満

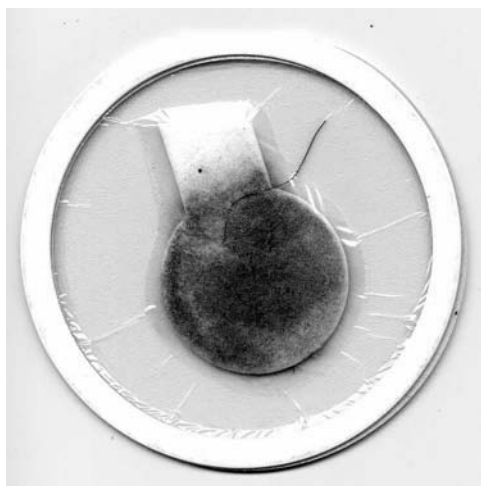


試料 No. 3

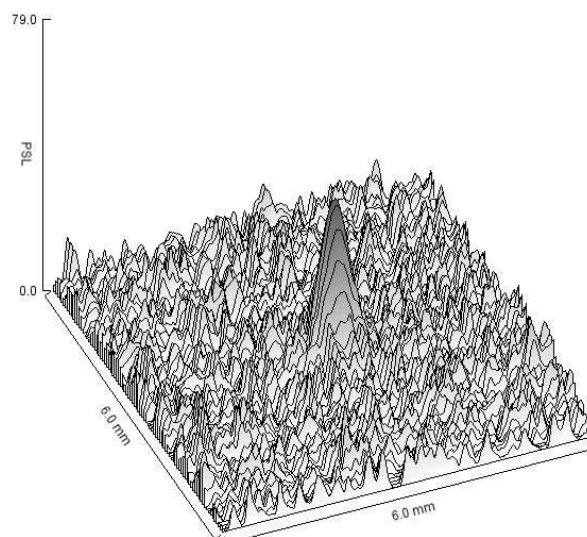
試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

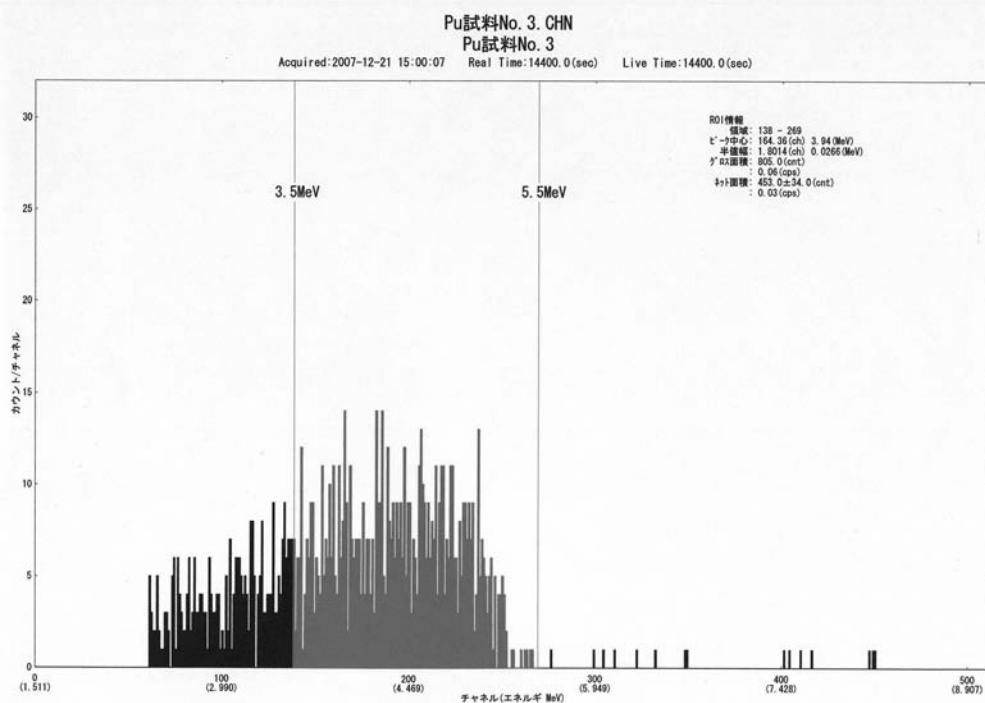
全 α 放射能 : 0.31 Bq, Am- α 放射能 : 0.28 Bq, 全 β : 検出下限値未満



試料写真



PSL 分布



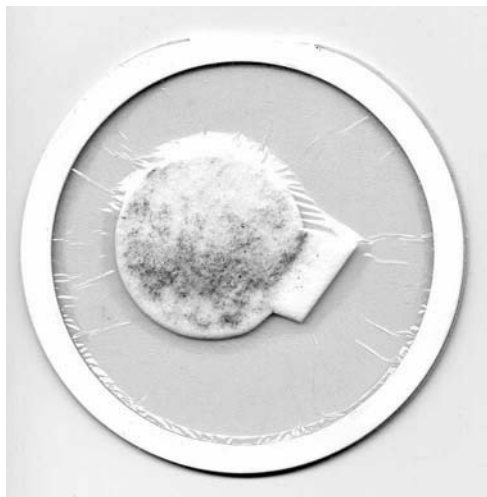
α 線スペクトル

試料 No. 4

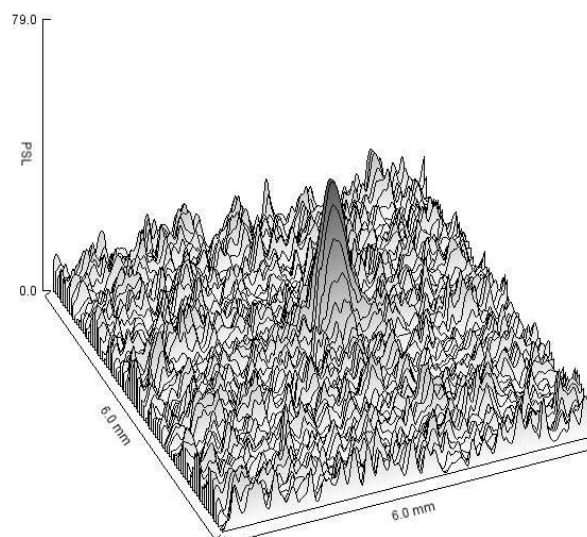
試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

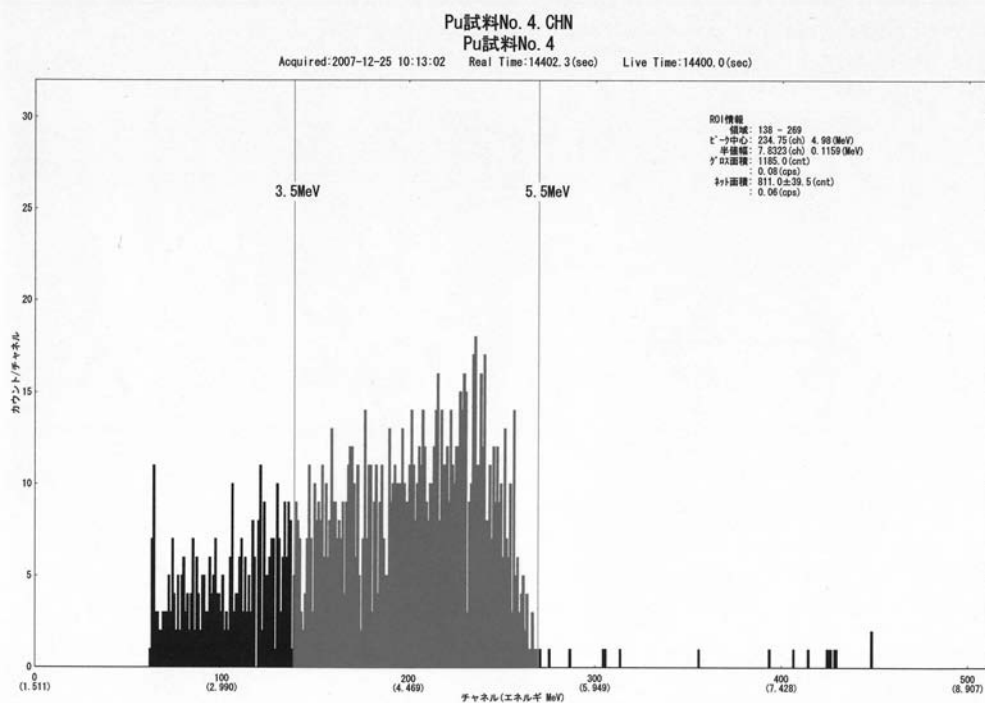
全 α 放射能 : 0.38 Bq, Am- α 放射能 : 0.23 Bq, 全 β : 検出下限値未満



試料写真



PSL 分布



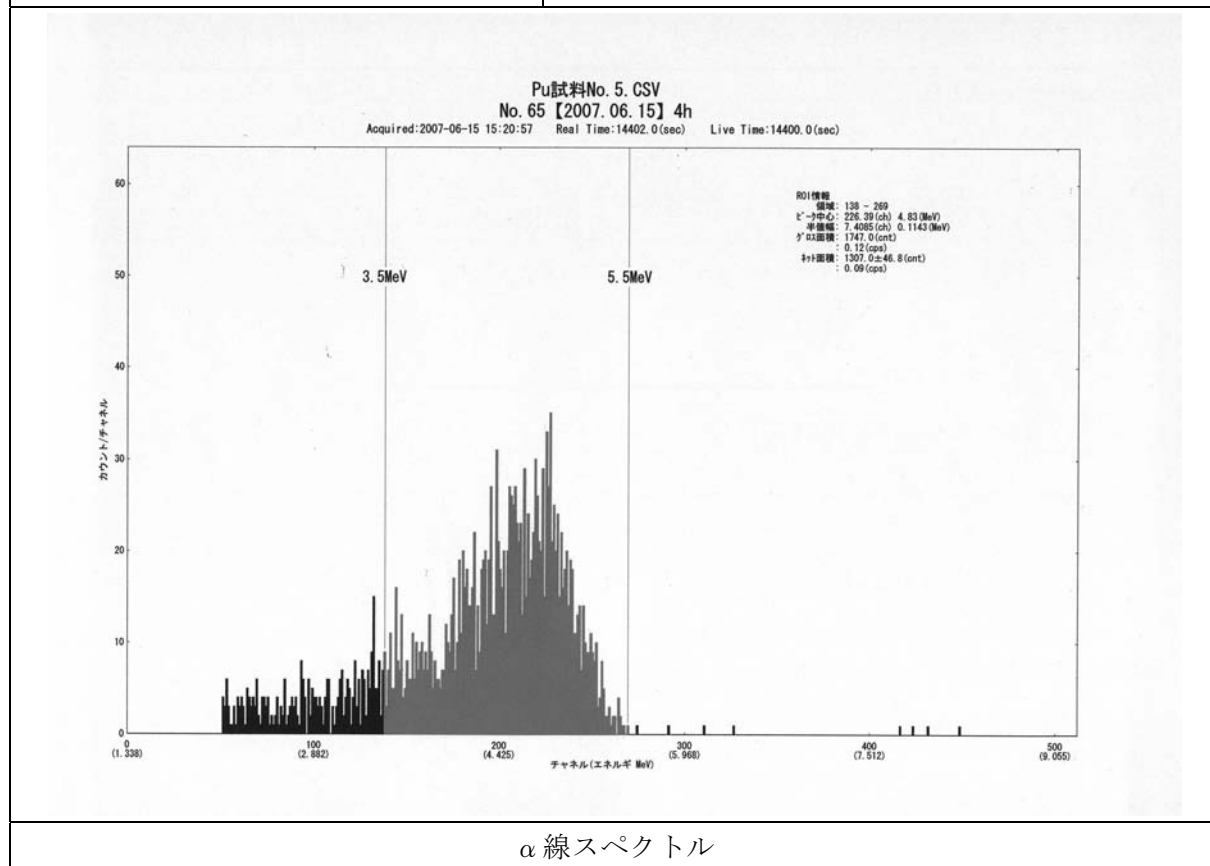
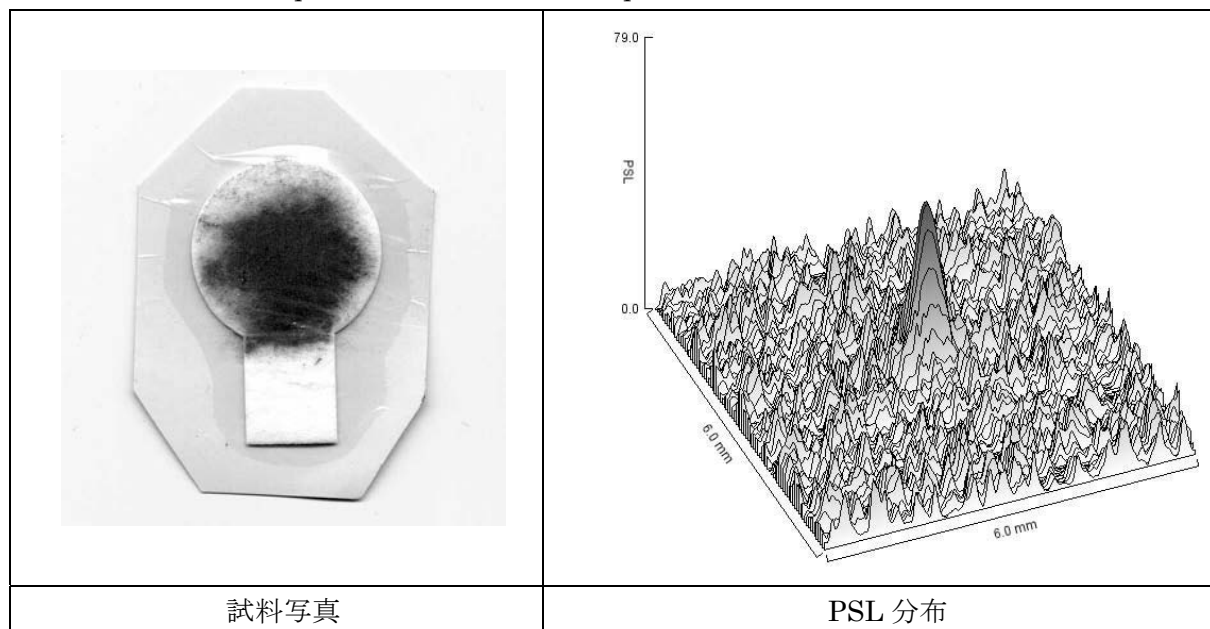
α 線スペクトル

試料 No. 5

試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

全 α 放射能 : 0.44 Bq, Am- α 放射能 : 0.27 Bq, 全 β : 検出下限値未満

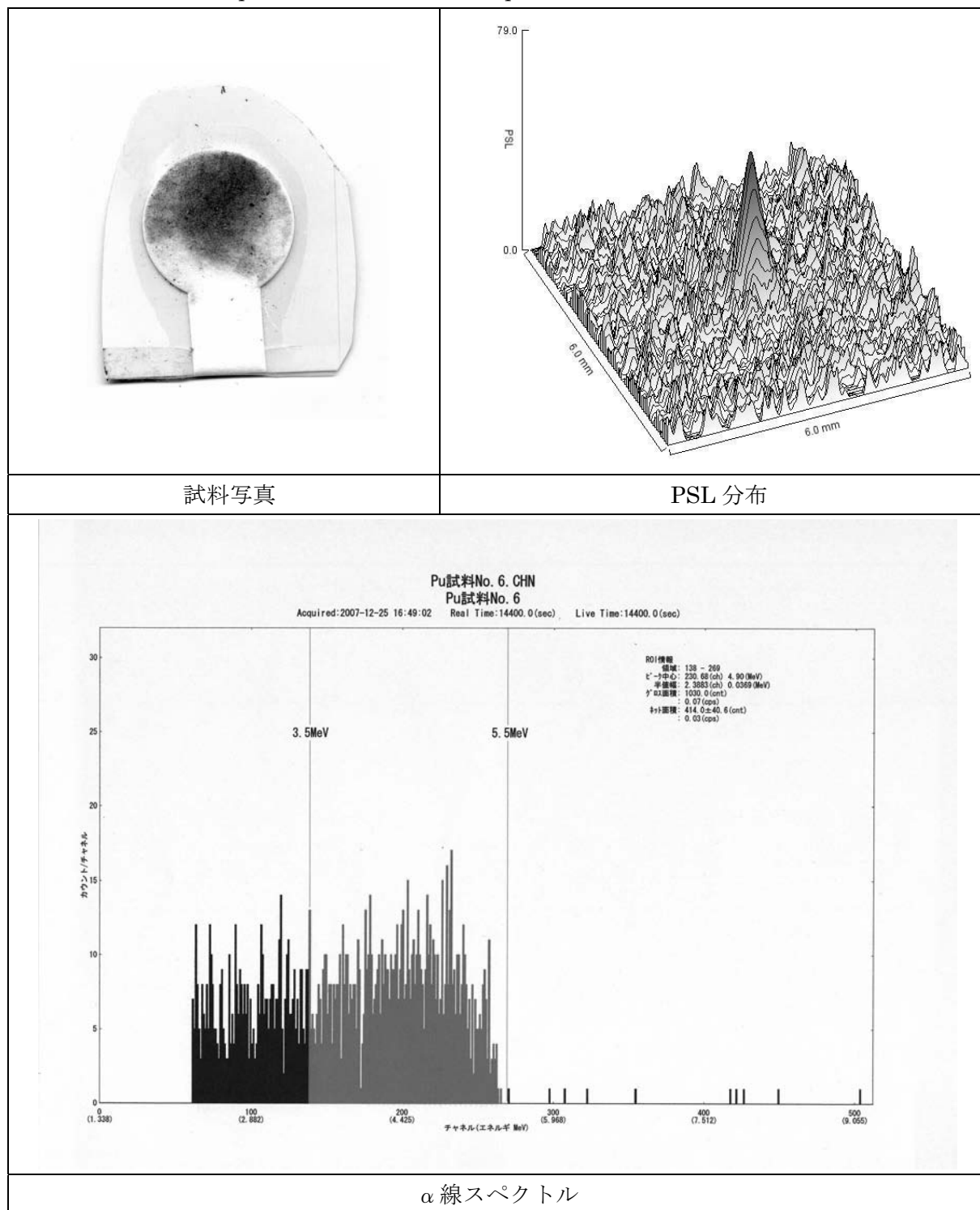


試料 No. 6

試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

全 α 放射能 : 0.50 Bq, Am- α 放射能 : 0.29 Bq, 全 β : 検出下限値未満

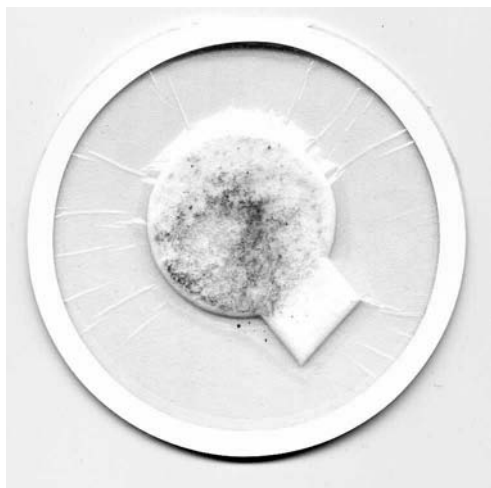


試料 No. 7

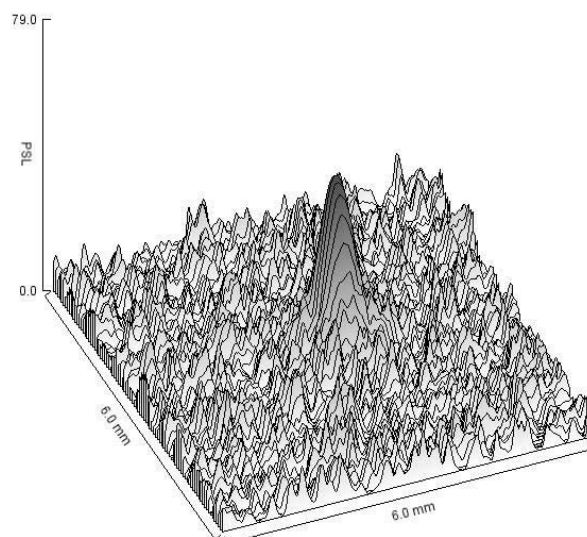
試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

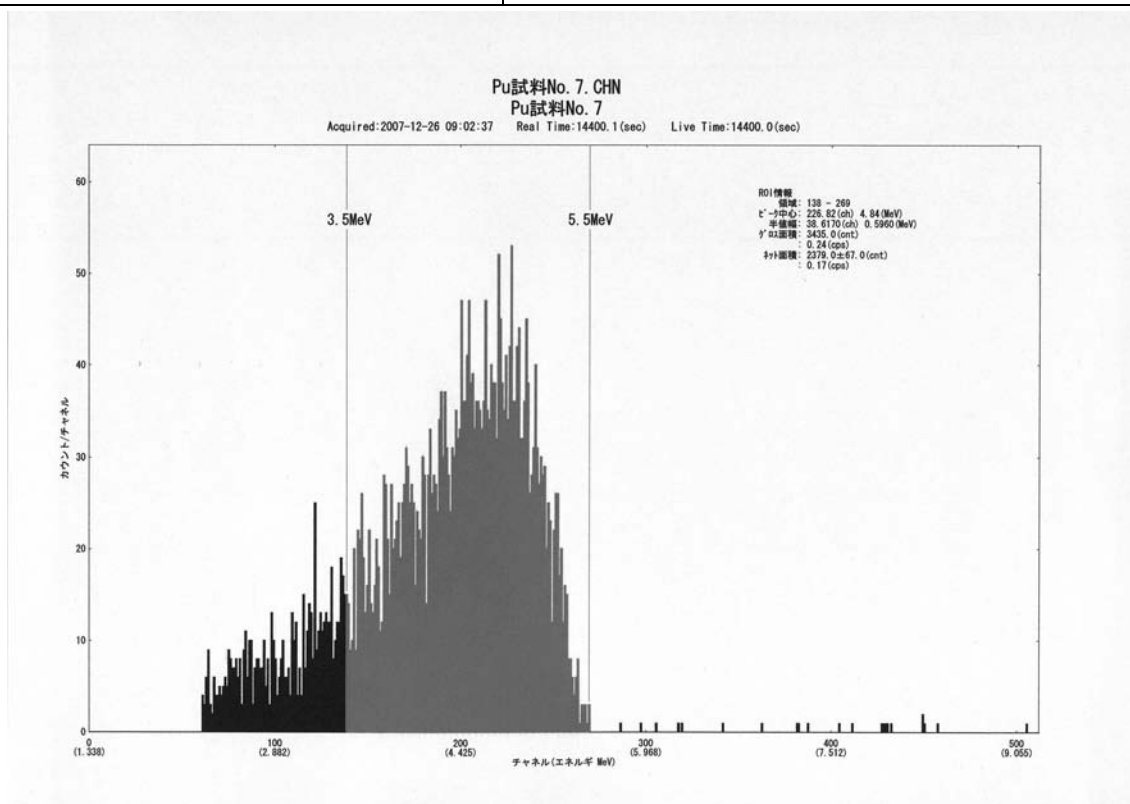
全 α 放射能 : 0.80 Bq, Am- α 放射能 : 0.31 Bq, 全 β : 検出下限値未満



試料写真



PSL 分布



α 線スペクトル

試料 No. 8

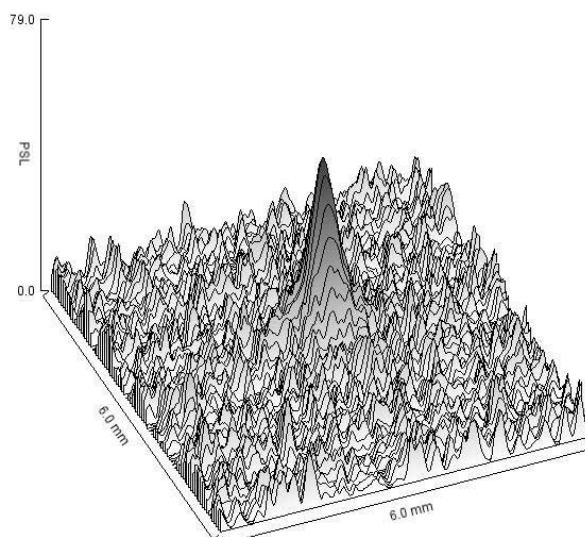
試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

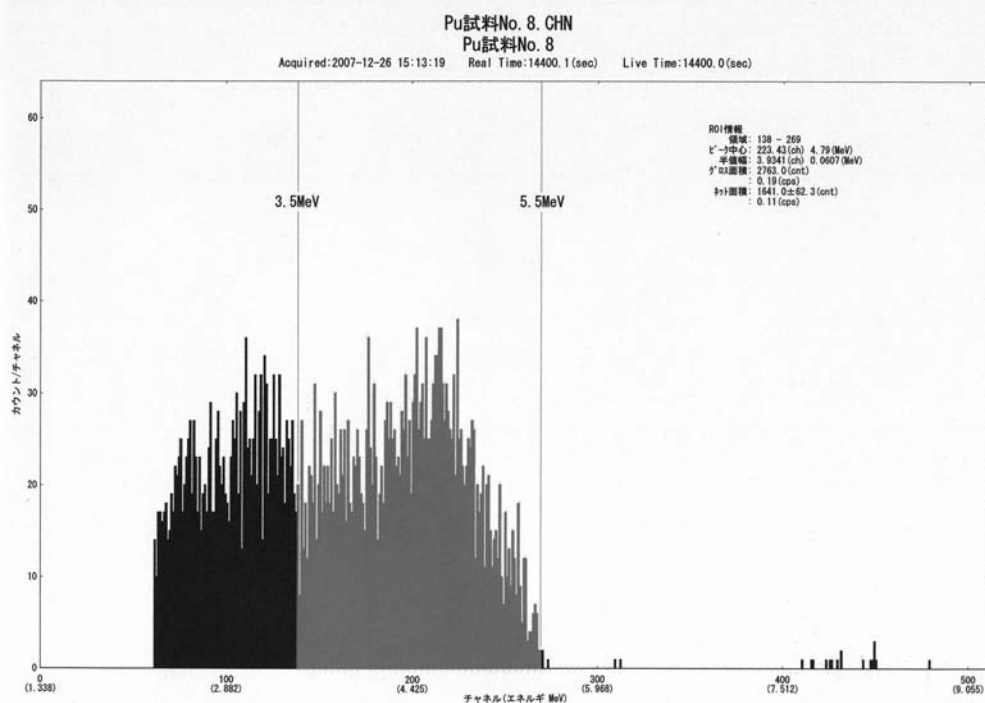
全 α 放射能 : 1.26 Bq, Am- α 放射能 : 0.74 Bq, 全 β : 検出下限値未満



試料写真



PSL 分布



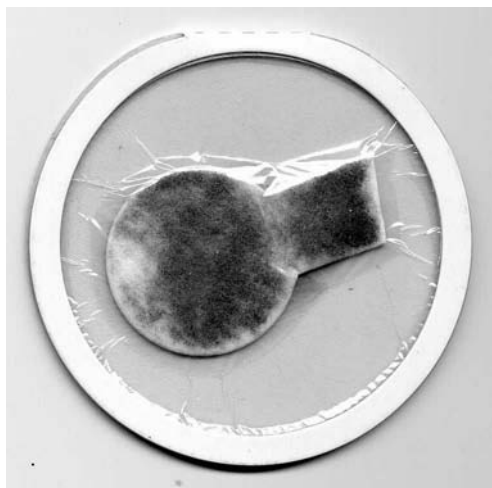
α 線スペクトル

試料 No. 9

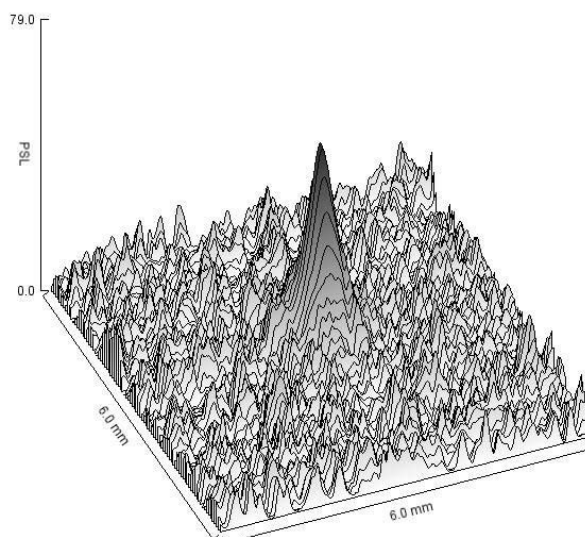
試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

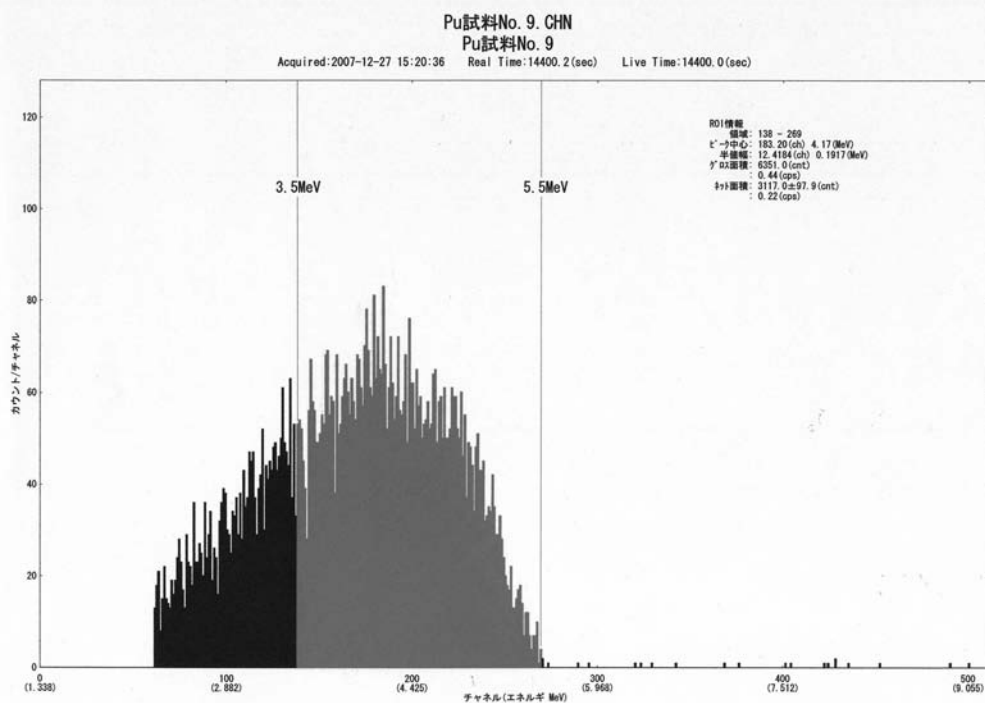
全 α 放射能 : 1.47 Bq, Am- α 放射能 : 0.90 Bq, 全 β : 検出下限値未満



試料写真



PSL 分布



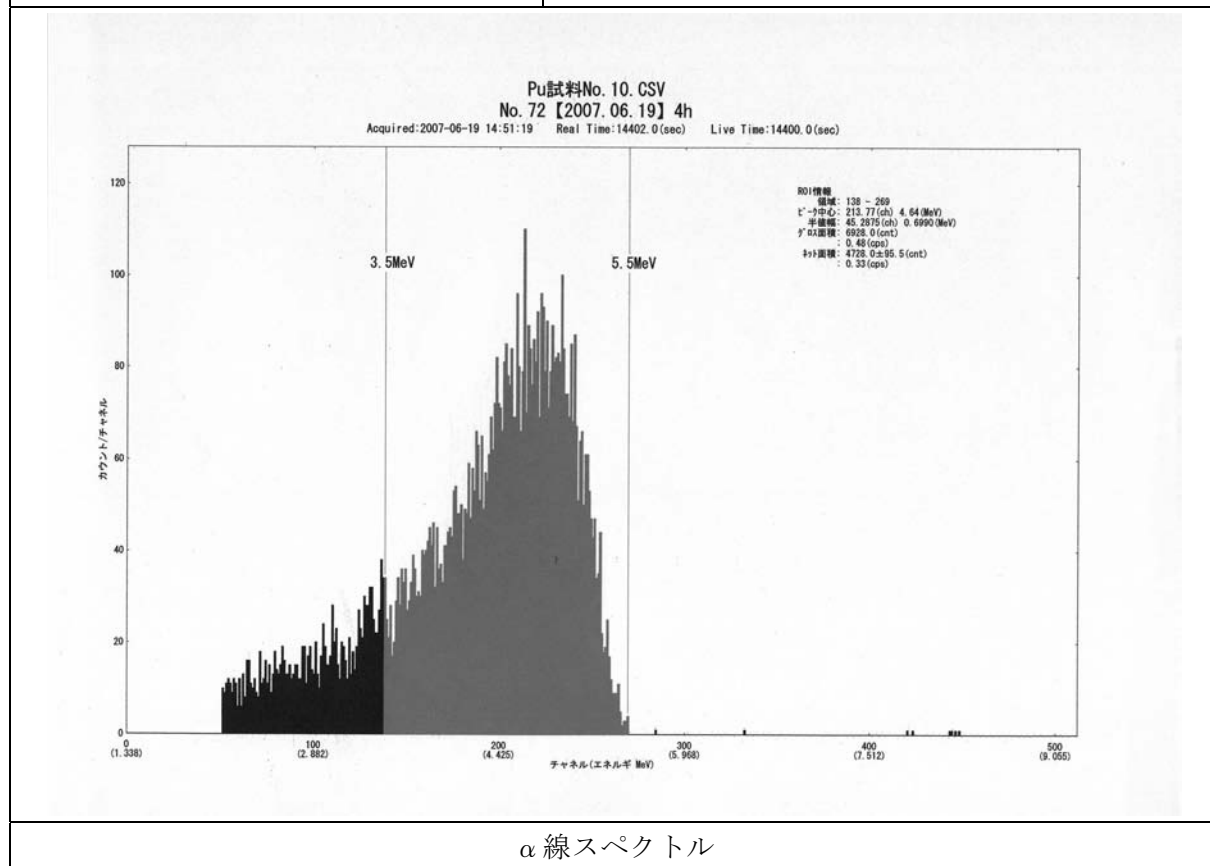
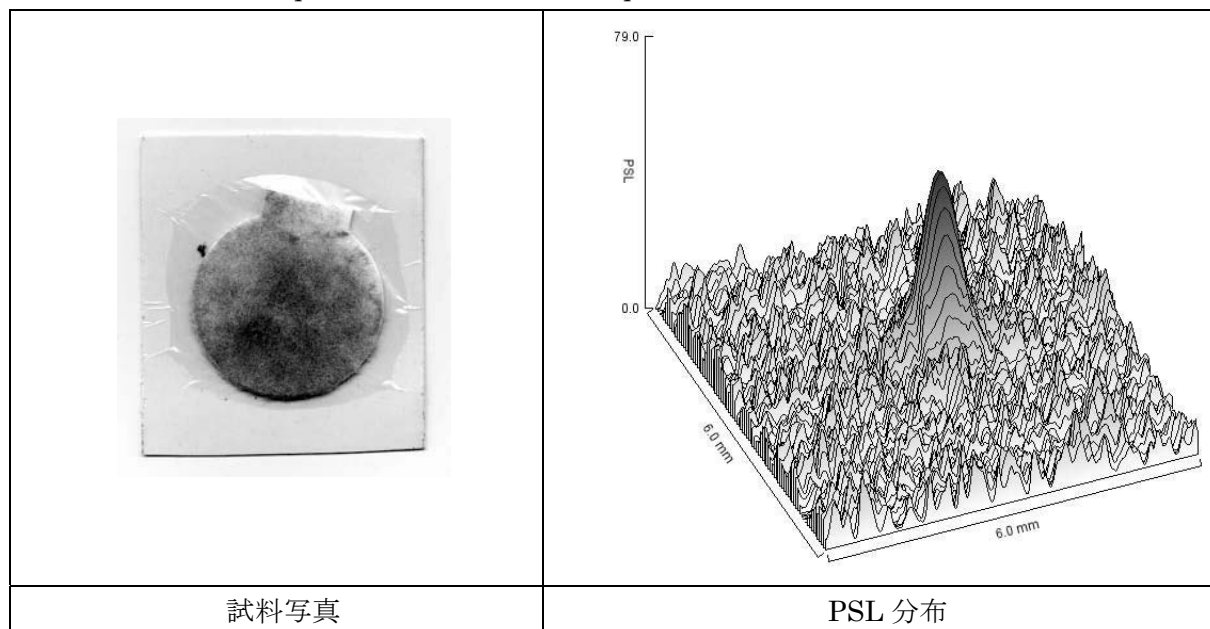
α 線スペクトル

試料 No. 10

試料 (Pu 粒子が付着したスミアろ紙をマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布 : スポット

全 α 放射能 : 2.65 Bq, Am- α 放射能 : 0.98 Bq, 全 β : 検出下限値未満

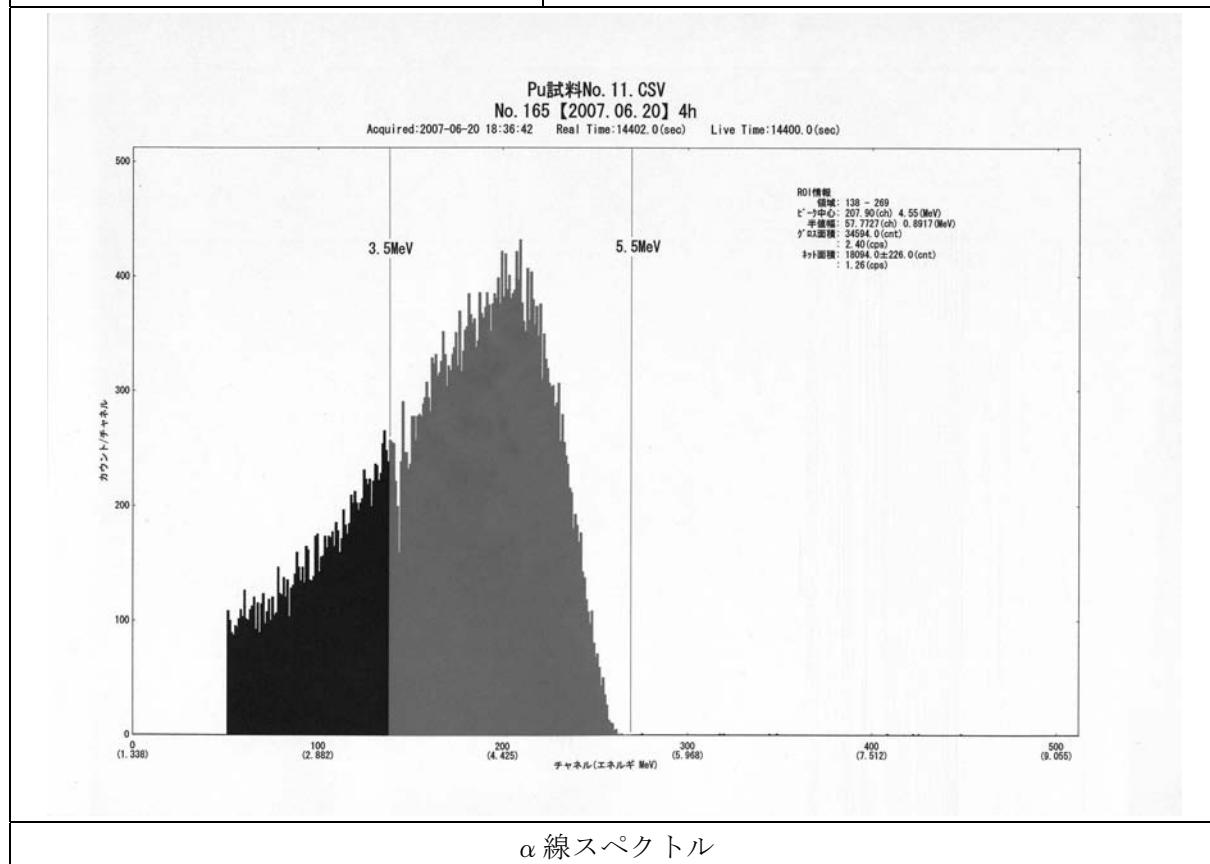
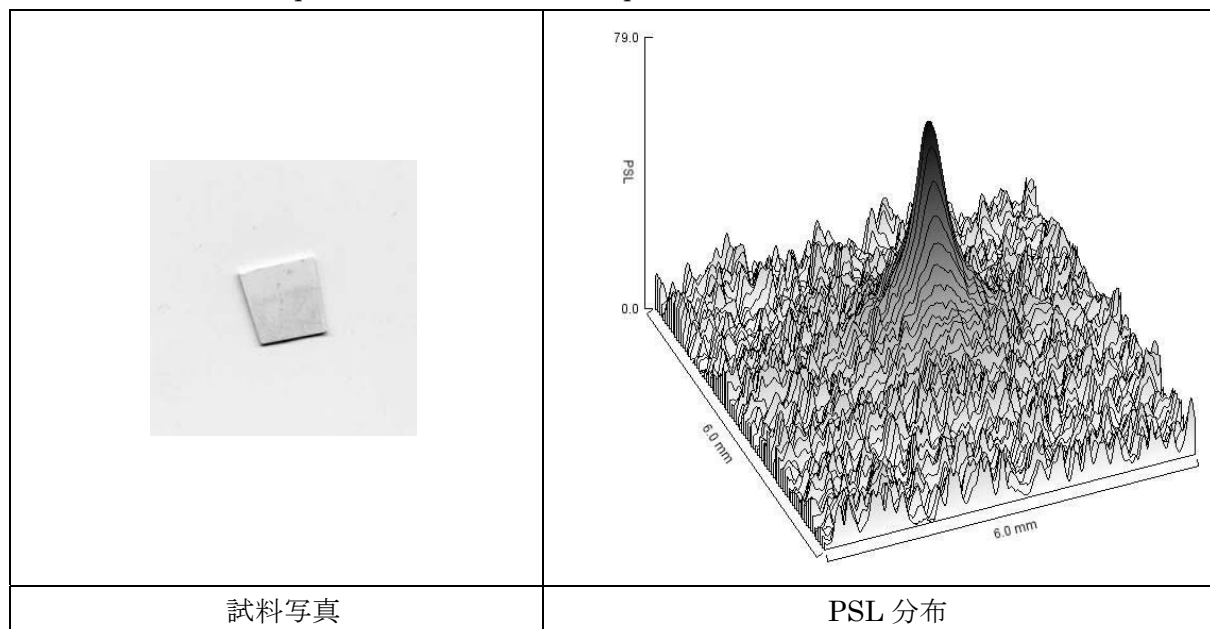


試料 No. 11

試料（ラミクリーン：粘着シートに Pu 粒子を付着させマイラ膜でシール）

Pu 等の付着分布：スポット

全 α 放射能：13.8 Bq, Am- α 放射能：6.60 Bq, 全 β ：検出下限値未満



試料 No. 12

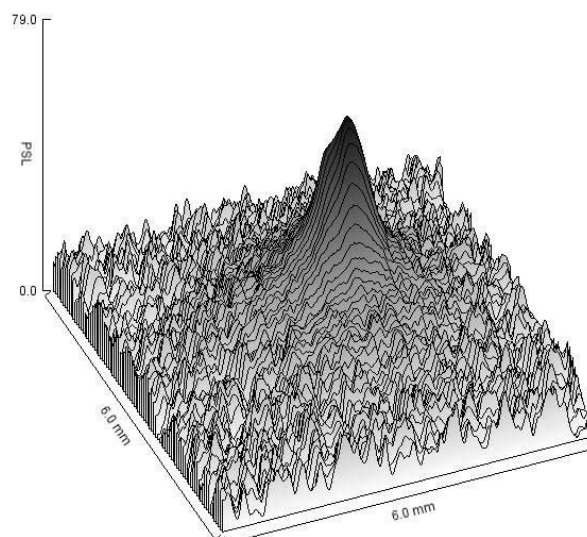
試料 (ラミクリーン：粘着シートに Pu 粒子を付着させマイラ膜でシール)

Pu 等の付着分布：スポット

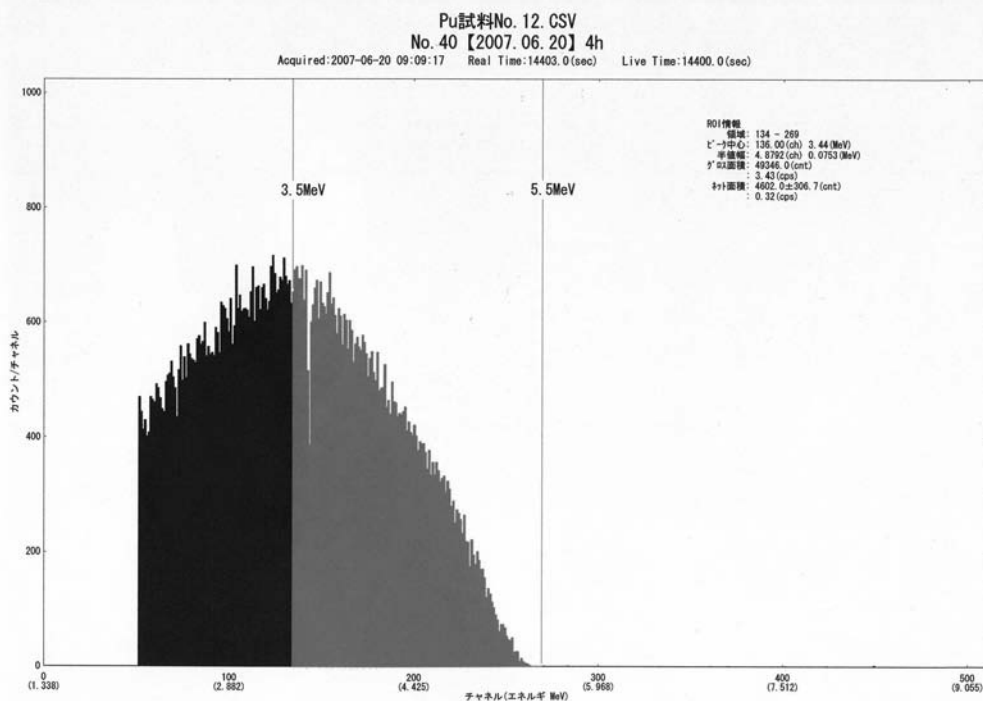
全 α 放射能：36.0 Bq, Am- α 放射能：38.5 Bq, 全 β ：0.46 Bq



試料写真



PSL 分布



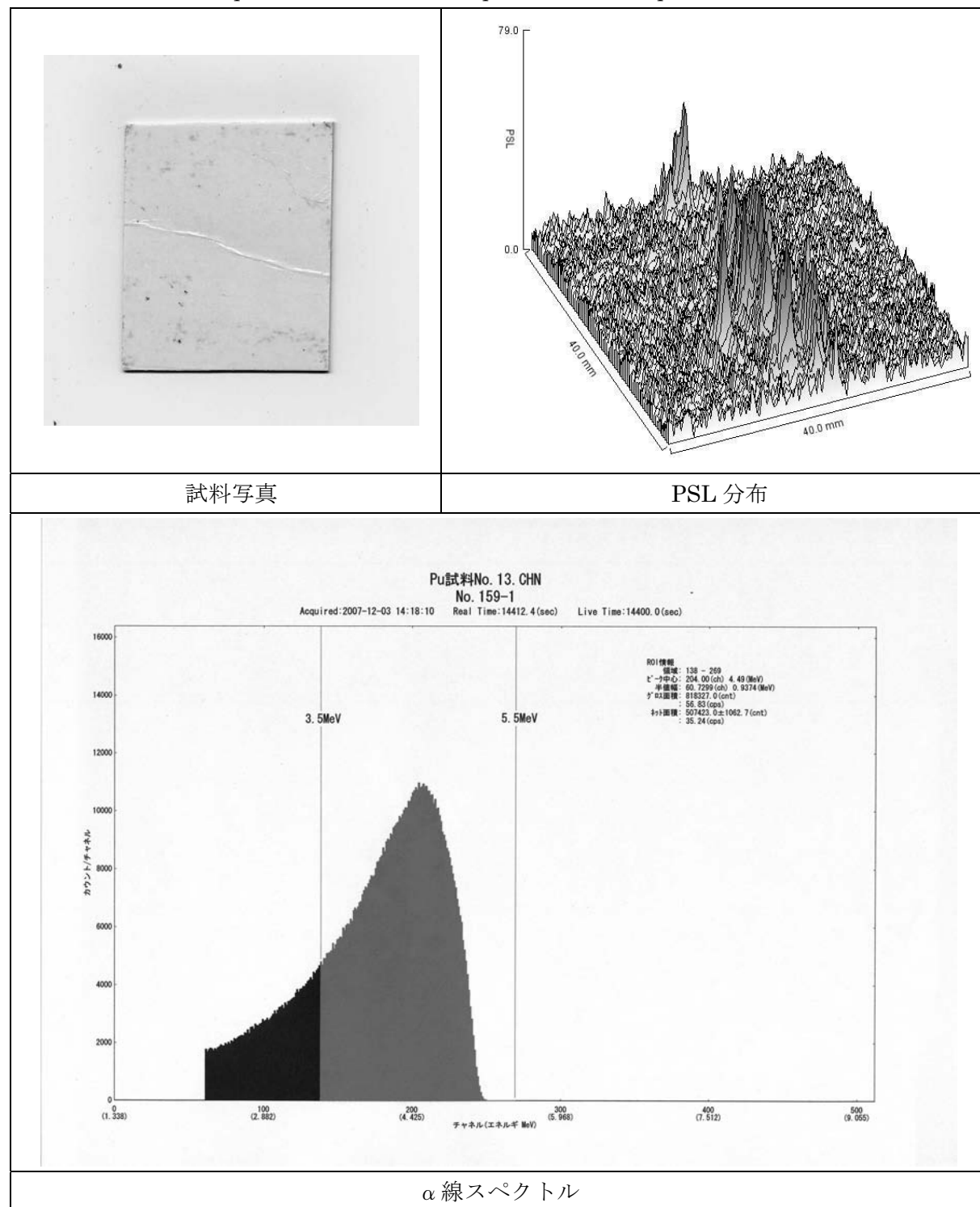
α 線スペクトル

試料 No. 13

試料（ラミクリーン：粘着シートに Pu 粒子を付着させマイラ膜でシール）

Pu 等の付着分布：パウダー

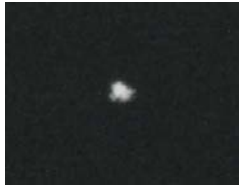
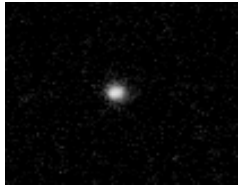
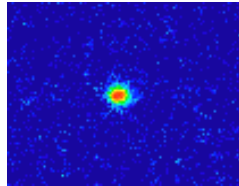
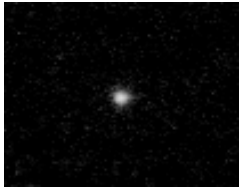
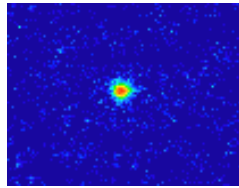
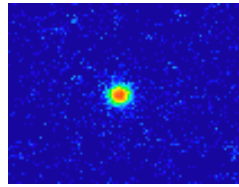
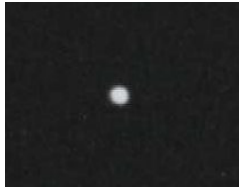
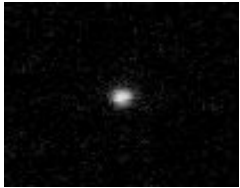
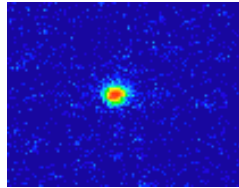
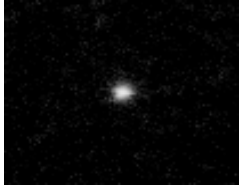
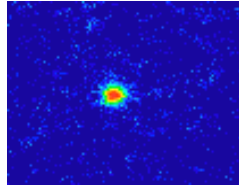
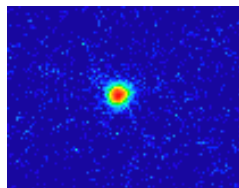
全 α 放射能：310 Bq, Am- α 放射能：— Bq, 全 β ：2.24 Bq



This is a blank page.

付録2 プルトニウム試料の ARG 画像と IP 画像

Pu 試料 (No.1~12) の ARG 画像と IP 画像を Fig.A2.1 及び FigA2.2 に示す。

試料 No.	Autoradiography (ARG)	Imaging Plate(IP)	
		ポジ	32 色擬似カラー
1			
2			
3			
4			
5			
6			

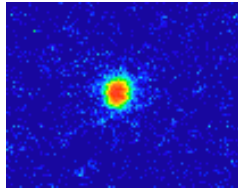
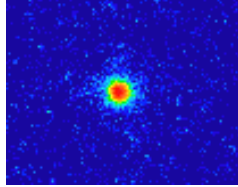
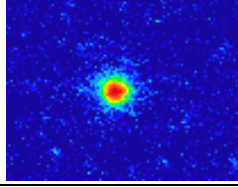
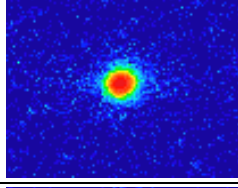
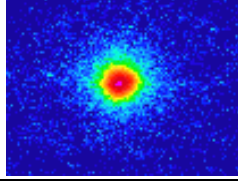
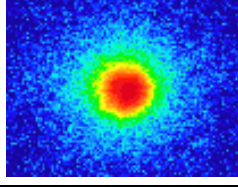
【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色（ポジ）表示色（32 色擬似カラー）

諧調変換曲線（Sigmoid）,Range Low:0 High:65535, curve:40

Fig.A2.1 Pu 試料（試料 No.1~6）の ARG 画像と IP 画像

This is a blank page.

試料 No.	Autoradiography (ARG)	Imaging Plate(IP)	
		ポジ	32 色擬似カラー
7			
8			
9			
10			
11			
12			

【Imaging Plate(IP)画像処理設定】 画像処理ソフト：Multi Gauge Ver3.1

設定条件：表示色（ポジ）表示色（32 色擬似カラー）

諧調変換曲線（Sigmoid）,Range Low:0 High:65535, curve:40

Fig.A2.2 Pu 試料（試料 No.7～12）の ARG 画像と IP 画像

This is a blank page.

国際単位系（SI）

表1. SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	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	A
熱力学温度	ケルビン	K
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

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立方メートル	m ³
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
質量体積（比体積）	立法メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
（物質量の）濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率	（数の）1	1

表5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ⁻¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位		他のSI単位による 表し方	SI基本単位による 表し方
	名称	記号		
平面角	ラジアン ^(a)	rad		m・m ⁻¹ =1 ^(b)
立体角	ステラジアン ^(a)	sr ^(c)		m ² ・m ⁻² =1 ^(b)
周波数	ヘルツ	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m・kg・s ⁻²
圧力，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
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	C		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	ジーメンズ	S	A/V	m ⁻² ・kg ⁻¹ ・s ³ ・A ²
磁束	ウェーバ	Wb	V・s	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg・s ⁻² ・A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² ・kg・s ⁻² ・A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(d)	°C		K
光照度	ルーメン	lm	cd・sr ^(c)	m ² ・m ⁻² ・cd=cd
（放射性核種の）放射線量	グレイ	Gy	lm/m ²	m ² ・m ⁻⁴ ・cd=m ² ・cd
吸収線量，質量エネルギー分与，カーマ線量当量，周辺線量当量，方向性線量当量，個人線量当量，組織線量当量	シーベルト	Sv	J/kg	s ⁻¹

- (a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なった性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの用例は表4に示されている。
- (b) 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“1”は明示されない。
- (c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。
- (d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		SI 基本単位による表し方
	名称	記号	
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa・s	m ¹ ・kg・s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N・m	m ² ・kg・s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg・s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m・m ⁻¹ ・s ⁻¹ =s ⁻¹
熱流密度，放射照度	ラジアン毎平方秒	rad/s ²	m・m ⁻¹ ・s ⁻² =s ⁻²
熱容量，エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg・s ⁻³
質量熱容量（比熱容量），質量エントロピー（比エネルギー）	ジュール毎平方メートル	J/K	m ² ・kg・s ⁻² ・K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg・K)	m ² ・s ⁻² ・K ⁻¹
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m・K)	m・kg・s ⁻³ ・K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ ・kg・s ⁻²
体積電荷	ボルト毎メートル	V/m	m・kg・s ⁻³ ・A ⁻¹
電気変位	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ ・s・A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² ・s・A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ⁻³ ・kg ⁻¹ ・s ⁴ ・A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m・kg・s ⁻² ・A ⁻²
モルエントロピー	ジュール毎モル	J/mol	m ² ・kg・s ⁻² ・mol ⁻¹
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 ・s・A
吸収線量	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

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1 °=(π/180) rad
分	'	1 '=(1/60) °=(π/10800) rad
秒	"	1 "=(1/60) '=(π/648000) rad
リットル	l, L	1 l=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg
ネーパ	Np	1 Np=1
ベル	B	1 B=(1/2) ln10(Np)

表7. 国際単位系と併用されこれに属さない単位でSI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.60217733(49)×10 ⁻¹⁹ J
統一原子質量単位	u	1 u=1.6605402(10)×10 ⁻²⁷ kg
天文単位	ua	1 ua=1.49597870691(30)×10 ¹¹ m

表8. 国際単位系に属さないが国際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里		1 海里=1852m
ノット		1 ノット=1 海里毎時=(1852/3600)m/s
アール	a	1 a=1 dam ² =10 ² m ²
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
バール	bar	1 bar=0.1MPa=100kPa=1000hPa=10 ⁵ Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1nm=10 ⁻¹⁰ m
バーン	b	1 b=100fm ² =10 ⁻²⁸ m ²

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エルグ	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ボアズ	P	1 P=1 dyn・s/cm ² =0.1Pa・s
ストークス	St	1 St =1cm ² /s=10 ⁻⁴ m ² /s
ガウス	G	1 G ≙10 ⁴ T
エルステッド	Oe	1 Oe ≙(1000/4π) A/m
マクスウェル	Mx	1 Mx ≙10 ⁻⁸ Wb
スチルブ	sb	1 sb =1cd/cm ² =10 ⁴ cd/m ²
ホト	ph	1 ph=10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal =1cm/s ² =10 ⁻² m/s ²

表10. 国際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R = 2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1cGv=10 ⁻² Gv
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
X線単位	IX unit	1 IX unit=1.002×10 ⁻⁴ nm
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
ジャンスキー	Jy	1 Jy=10 ⁻²⁶ W・m ⁻² ・Hz ⁻¹
フェルミ	f	1 fermi=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1 metric carat = 200 mg = 2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリ	cal	
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

