

**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(2)
露光条件及び解析条件変更による影響評価**

Application of Imaging Plate to the Radiation Protection
in the MOX Fuel Fabrication Facility (2)
The Effect of Changing Exposure Conditions and Analysis Conditions

佐川 直貴 井崎 賢二 水庭 春美

Naoki SAGAWA, Kenji IZAKI 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

November 2013

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 (<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, 2013

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(2) 露光条件及び解析条件変更による影響評価

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, 井崎 賢二, 水庭 春美*

(2013年6月12日 受理)

積分型放射線位置検出器の一種であるイメージングプレート(IP)を用いたプルトニウム(Pu)の α 線のオートラジオグラフィ手法に関する研究が近年行われた。これは、測定対象物から放射された α 線によって受けた線量に比例してIPが発するPhoto Simulated Luminescence(PSL)の分布が写真フィルムで言う「潜像」に相当することに着目したものである。

これまでMOX燃料製造施設におけるIPの基本的な取扱方法や解析方法、Puの検出及び定量方法が報告されたが、露光条件や解析条件が一定であることが条件であった。しかし、現場で汚染が発生した場合、汚染試料はPuのみの状態ではなく、RnTnやPo-210(Pb-210)が含まれている場合もある。また、IP操作をしている同室で他作業を行っている場合には、室内を暗くすることが困難なため、IP露光面に光が当たりPSLの減少が起こる。

本研究では、MOX燃料製造施設におけるIPの適用についてさらに検討するため、(1)Pu露光時に金属資材等に含まれる鉛が混在した場合、(2)IP露光面に光が照射されPSLの減衰が起きた場合、さらに(3)解像度を変更して解析した場合のそれぞれについて測定に与える影響を調査した。

Application of Imaging Plate to the Radiation Protection in the MOX Fuel Fabrication Facility (2)
The Effect of Changing Exposure Conditions and Analysis Conditions

Naoki SAGAWA, Kenji IZAKI 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 June 12, 2013)

Recently, an imaging plate (IP) has been developed that is an integrating type radiation detector. Photo stimulated luminescence (PSL) of IPs is proportional to the intensity of alpha ray from radioactive substances. This also corresponds to the latent image of the conventional photographic film.

Study on application of the IP system to alpha surface contamination monitoring at the JAEA Mixed Oxide fuel fabrication facility was initiated and methods of alpha-ray detection, quantification, handling and analysis with IPs were preliminarily reported. However, in previous studies, all the measurements were performed under idealized conditions where exposure and analysis conditions were preset in a laboratory.

The objectives of the present study are to confirm the alpha detection performance of IPs under the extended exposure and analysis conditions likely in workplace and to determine the optimal measurement conditions. To do this, the following tests were performed: (1) discrimination capability of alpha images formed both by plutonium and lead, (2) PSL reduction by light, and (3) variation of the detection limits caused by changes of resolution in the image analysis software.

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

* PESCO Company Ltd.

目 次

1. はじめに-----	1
2. 試験機材-----	2
3. Pu 露光時に鉛が混在した場合の影響-----	3
3.1 鉛の測定方法-----	3
3.2 鉛の測定結果-----	4
4. 光による PSL の減衰-----	5
4.1 光照射後の測定-----	5
4.2 光照射後の測定結果-----	5
5. 解像度変更による検出下限放射能の変化-----	6
5.1 解像度を変更して測定-----	6
5.2 解像度を変更して測定した結果-----	6
5.2.1 解像度変更時の BG 評価-----	6
5.2.2 解像度変更時の Pu 評価-----	7
5.2.3 Image J で解像度を変更した場合の Pu 評価-----	8
6. まとめ-----	9
謝辞-----	11
参考文献-----	11

Contents

1. Introduction -----	1
2. Equipment of examination -----	2
3. Influence by alpha particles from lead-containing materials -----	3
3.1 Method of exposure to lead-containing materials -----	3
3.2 Results -----	4
4. Decrease of PSL by light -----	5
4.1 Method of exposure to light -----	5
4.2 Results -----	5
5. Variation of the detection level by the change of resolution -----	6
5.1 Method of the change of resolution -----	6
5.2 Results -----	6
5.2.1 Evaluation of BG -----	6
5.2.2 Evaluation of Pu -----	7
5.2.3 Evaluation of Pu in the case of changing the resolution in the Image J -----	8
6. Summary -----	9
Acknowledgements -----	11
References -----	11

表リスト

Table 2.1	IP(BAS-MS2325)の仕様-----	12
Table 2.2	IP 読取装置(BAS-1800 II)の仕様-----	12
Table 2.3	IP 消去器(IP Eraser 3)の仕様-----	13
Table 3.1	鉛測定時における BG 評価エリアの BG 平均 PSL と閾値 -----	13
Table 3.2	Pu 試料の放射能一覧 -----	14
Table 4.1	Pu 試料の放射能一覧(2) -----	14
Table 5.1	解像度毎の Pu 検出条件 -----	14
Table 5.2	解像度毎の放射能-----	14
Table 5.3	解像度毎の放射能比-----	15
Table 5.4	粉末状の Pu 試料一覧 -----	16
Table 5.5	解像度 100 μ m の検出下限放射能-----	16
Table 5.6	解像度 200 μ m の検出下限放射能-----	17

図リスト

Fig.2.1	QL 値と PSL 値の関係 -----	18
Fig.3.1	ウラン系列の壊変図-----	18
Fig.3.2	IP 評価エリア -----	19
Fig.3.3	鉛ドラム缶蓋の写真-----	19
Fig.3.4	鉛を Pu の検出条件で抽出した場合の面積のヒストグラム -----	20
Fig.3.5	Pu 検出条件で抽出した鉛の面積と平均 PSL -----	20
Fig.3.6	Pu と鉛における面積と平均 PSL の比較-----	21
Fig.4.1	蛍光灯の照度比較写真-----	21
Fig.4.2	光への感光時間と放射能の関係(Pu 試料 No12)-----	22
Fig.4.3	光への感光時間と放射能の関係(Pu 試料 No13)-----	22
Fig.5.1	BG 評価エリアの例-----	23
Fig.5.2	解像度 50 μ m における PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%) -----	24
Fig.5.3	解像度 100 μ m における PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%) -----	24
Fig.5.4	解像度 200 μ m における PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%) -----	24
Fig.5.5	解像度 100 μ m における PSL 累積頻度 99%の BG スポットのピクセル数-----	25
Fig.5.6	解像度 200 μ m における PSL 累積頻度 99%の BG スポットのピクセル数-----	25
Fig.5.7	Pu 試料 No11 の解像度毎の IP 画像 -----	26
Fig.5.8	解像度 50 μ m における Pu クラスターの断面 -----	26
Fig.5.9	解像度 100 μ m における Pu クラスターの断面-----	27
Fig.5.10	解像度 200 μ m における Pu クラスターの断面-----	27
Fig.5.11	Image J による 解像度変更時の Pu クラスターの変化-----	28

1. はじめに

MOX 燃料製造施設の放射線管理においてプルトニウム等の α 線放出核種による汚染状況を把握することは重要である。日本原子力研究開発機構(以下、「JAEA」と記す)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 ZnS(Ag)オートラジオグラフィ技術¹⁾(以下、「ZnS-ARG」と記す)を開発し、プルトニウム(以下、「Pu」と記す)汚染と天然放射性核種の判別等に使用してきた。また、ポラロイドフィルムの代わりに TV カメラを使用した α 放射能分布画像モニタ装置を開発し、汚染の位置と放射能強度の両分布を同時に評価する試みも行われた²⁾。

一方、これらの方法とは別に、積分型放射線位置検出器の一種であるイメージングプレート(以下、「IP」と記す)を用いた Pu の α 線のオートラジオグラフィ手法に関する研究が近年行われた³⁾。これは、測定対象物から放射された α 線によって受けたエネルギーに比例して IP が発する Photo Simulated Luminescence(以下、「PSL」と記す)の分布が写真フィルムで言う「潜像」に相当することに着目したもので、原理は異なるが上述した α 放射能分布画像モニタ装置と同様の測定が市販の IP 並びに IP 読取装置で実現できることを示した。この研究成果を基に、MOX 燃料製造施設の放射線管理の現場に本手法を適用するための検討が行われ、その成果は二編の報告書⁴⁾⁵⁾としてとりまとめられた。JAEA-Technology 2008-028⁴⁾では、IP が従来の ZnS-ARG と同様に α 線への適用が可能であること、 β γ 線にも適用可能であること、カラーに画像処理することにより従来よりも明瞭に分布の状態を把握することが可能であること等が報告された。さらに画像解析が Pu 粒子の検出に極めて有効であることが報告された。しかし、 α 線のスペクトルが自己吸収等によって著しく低エネルギー側へシフトした場合に、PSL での放射能評価が過小評価になる恐れがあることも指摘された。JAEA-Technology 2010-051⁵⁾では、IP の外縁 10mm を除く中央部の領域(210mm×230mm)を測定に使用することとし、Pu 汚染を含むエリアとバックグラウンド(以下、「BG」と記す)エリアの PSL 値を比較することによって Pu の判別を試みた。ここで BG とは、宇宙線や IP 固有のノイズを指し、ラドン等の自然放射性物質による影響は含んでいない。そして、BG の約 99%を含む PSL 値を閾値として Pu と思われるスポットをまず抽出し、次に 40 ピクセル以上に広がる領域を抽出することによって Pu スポットを特定した。抽出された Pu スポットの放射能は、フェーディングを考慮した評価式によって定量された。

これら二編の報告書において、IP は、温湿度が一定で、かつ露光終了後から潜像読取までのフェーディングが一定になるような条件で測定された。また、1 ピクセル当たりの解像度を 50 μ m に固定して解析した。

本研究では、MOX 燃料製造施設における IP の適用についてさらに検討するため、(1)Pu 露光時に金属資材等に含まれる鉛が混在した場合、(2)IP 露光面に光が照射され PSL の減衰が起きた場合、さらに(3)解像度を変更して解析した場合のそれぞれについて測定に与える影響を調査したので、その結果を報告する。

2. 試験機材

今回の試験で使用した IP は BAS-MS2325(富士フィルム社; 230 mm wide × 250 mm high)、IP 読取装置は BAS-1800 II(富士フィルム社)である。Table 2.1~2.3 に IP、IP 読取装置及び IP 消去器の仕様をそれぞれ示す。

IP の発光強度は IP 読取装置で QL(Quantum Level)値として記録される。これは、読み取った発光強度を濃度階調で分割し、さらにそれを 5 桁ものダイナミックレンジに及ぶ情報を少ない容量で格納するために対数圧縮したデータである。エネルギーに比例する発光強度すなわち PSL 値には、次式を用いてこの QL 値を再変換することによって得られる。

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

ここで、

P_{Size} : 1 ピクセルのサイズ(=50 μm , 100 μm 又は 200 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、QL 値が 0 の場合、PSL 値は例外的に 0 として処理される。1 ピクセルのサイズ毎(解像度)における QL 値と PSL 値の関係を Fig.2.1 に示す。

本研究では、潜像を構成する個々のピクセルの PSL 値の解析に、米国国立衛生研究所(National Institute of Health : NIH) から公開されている画像解析ソフトウェア Image J⁹⁾を利用した。(1)式を用いた QL 値から PSL 値への変換は、Image J の calibration 機能によって行った。本機能での QL 値から PSL 値への変換は、1 ピクセルのサイズが 50 μm として計算されるため、解像度を変更した場合の PSL 値は Fig.2.1 に示した関係を利用して換算した。

IP は測定前に IP 消去器で 60 分間光を照射して BG 等を消去し、初期化を行った。初期化した IP に試料を露光する際は、密閉された専用のカセットの中または暗い室内で試料を IP に密着させて行った。試験で用いた Pu 試料は施設の保守管理で得られたもので、JAEA-Technology 2008-028 ⁴⁾や JAEA-Technology 2010-051 ⁵⁾で使用した Pu 試料と同じである。なお、全ての Pu 試料をポリカーボネートフィルム(厚さ : 0.45 mg $\cdot\text{cm}^{-2}$)で養生した。

3. Pu 露光時に鉛が混在した場合の影響

管理区域内で有意な α 汚染が見つかった場合、 α 線エネルギースペクトル測定を行い、それがPuによるものか天然放射性核種によるものかの判別を行う。このとき、測定対象物が遮へいブロックのように鉛を含有する物質である場合、鉛(Pb-210)の壊変生成物であるPo-210の α 線の影響を受ける可能性がある。Pb-210とPo-210はウラン系列に属し、Pb-210の壊変によってBi-210が生成され、さらにBi-210が壊変することによってPo-210が生成される。これらの壊変系列に属する放射性物質は、ある一定の時間が経過すると放射平衡に達する。ウラン系列の壊変図をFig.3.1に示す。Po-210の α 線エネルギー5.3MeVはPu同位体の α 線エネルギー領域(3.5~5.5MeV)に近いので、エネルギー分解能の優れた測定器でないとスペクトルによる弁別は難しい。この場合、 γ 線エネルギースペクトルを測定し、Pu-241の娘核種であるAm-241の γ 線(約60keV)の検出の有無によりPu汚染の有無を判断する。そのため、核種を特定するまでに時間がかかり迅速な判断ができない場合がある。また、測定対象物の大きさや形状によっては測定が困難な場合もある。

これに対してIPは、Po-210を含むさまざまな天然放射性核種の影響を受けるものの、天然レベルのPo-210と汚染レベルのPuとでは α 線の比放射能が大きく異なるため、IP画像中のクラスタ(数個の連続したピクセルの集団)を比較することで面積や平均PSLの違いから両者を識別できると考えられる。

そこで本章では、測定対象物にPo-210が含まれている場合であっても、Puとの識別が可能かどうかを確認した。また、測定対象物には、鉛がライニングされているドラム缶の蓋を用いた。

Po-210からの α 線とBGを分離するため、IP露光時に紙とプラスチックシートでIP接触面の一部を遮へいし、BG評価エリアをあらかじめ設けた。さらに、感度が良好な領域(IP外縁の10mmを除く中央部領域)をIP評価エリアとした(Fig.3.2参照)。鉛と接触させた領域のIP評価エリアにおける表面密度は、 α 線用サーベイメータで直接測定を行ったところ、約0.074Bq/cm²(面積は70cm²)であった。

3.1 鉛の測定方法

IPを鉛ドラム缶の蓋のあらかじめ定めた場所に一定時間(5,10,15,30,60,120,180,360,960及び1440分)設置し、露光させた。Fig.3.3に鉛ドラム缶の蓋の写真を示す。露光時には室内の照明を消灯し、室内光による潜像の減少が起きないようにした。そして、潜像の読み取りはフェーディングの影響を考慮し、露光終了後直ちに行った。鉛の影響によるクラスタの抽出は、JAEA-Technology 2010-051⁵⁾で報告されたPuの検出条件(BG評価エリアのPSLの頻度分布に基づき累積分布で99%に相当するPSLとして定めた閾値を超え、かつクラスタの面積が40ピクセル以上)を適用した。

3.2 鉛の測定結果

各露光時間における BG 評価エリアの平均 PSL 及びそれらの 99%を削除する閾値を Table 3.1 に示す。鉛との接触エリアに対してこの閾値を適用することによって抽出されたクラスタの面積の頻度分布を露光時間別に Fig.3.4 に示す。前述したように、典型的な Pu スポットの場合、クラスタ面積 40 ピクセル以上がその判別条件となる。しかしながら、Fig.3.4 からわかるように、この測定では Pu が混入していないにも関わらず面積 40 を超えるクラスタが抽出された。特に露光時間が長くなると、面積の小さなクラスタの数が多くなり、また、それらが重なり合うことによって面積が大きくなるなどの理由によって、面積 40 を超えるクラスタがより増加した。このことは、BG を削除する閾値とクラスタ面積だけでは Po-210 と Pu を判別することが困難であることを示す。なお、Fig.3.4 には露光時間 960 分及び 1440 分のデータが含まれていないが、これは BG や Po-210 のクラスタの頻度があまりにも多すぎたためここでは除外した。

Fig.3.5 に、抽出されたクラスタ(面積 \geq 40 ピクセル)について、クラスタの面積とその面積にわたる平均 PSL の関係を示す。一般に露光時間が長くなるにつれてクラスタ面積と平均 PSL はともに増加するが、Fig.3.5 からはそうした傾向はあまり見られない。この理由として、Po-210 の比放射能は低いので単位時間当たりの PSL の増加がそもそも小さいこと、露光中のフェーディングによってその増加が相殺されたことが考えられる。Fig.3.5 から、十分に長い露光時間(1440 分)であっても Po-210 によるクラスタの平均 PSL は 0.18(Pu の積算放射能 4.18Bq \cdot min に相当)を超えないことが確認された。Fig.3.5 の結果を、典型的な Pu 試料の測定と比べたものを Fig.3.6 に示す。比放射能の高い Pu 試料の場合、露光時間に比例してクラスタ面積が増加するとともに、平均 PSL が急増する。これに対して、Po-210 の平均 PSL の上昇はあまり見られないことから、平均 PSL の違いに着目することによって Pu と Po-210 の判別が可能になると考えられる。また、Fig.3.6 に示した Pu 試料の測定データ点のうち、平均 PSL0.18 を下回る、すなわち Po-210 との区別がつかないものについては、露光時間を変えるなどの工夫が必要になる。

解像度 50 μ m で Pu 試料を接触測定した場合の検出下限放射能は、JAEA-Technology 2010-051⁵⁾に示されている通り、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。使用した Pu 試料の放射能一覧を Table 3.2 に示す。この検出下限放射能で検出された Pu のクラスタに対し、平均 PSL0.18 の条件を付加すると、検出される Pu スポットの数が減少した。これは、積算放射能が不十分であったことにより、平均 PSL0.18 を超えることができなかったことによる。

今回使用した鉛ドラム缶の蓋における測定条件として、鉛の放射能が約 0.074Bq/cm² であることから、これ以上の放射能を有する鉛が存在する場合の影響についても今後調査が必要である。鉛中に含まれる Pb-210 の同位体組成比は極微量であり、Pb-210 が 100% の状態で壊変した場合において、Po-210 は約 2.2 年で放射平衡に達する⁷⁾ことから、MOX

燃料製造施設で遮へい等に用いられている鉛はほぼ放射平衡に達していると考えられる。このため、鉛含有物質を事前に調査することで今後の放射線管理において迅速な対応が可能となる。

4. 光による PSL の減衰

これまで IP の使用条件は、温湿度が一定で、かつ試料露光時から潜像読み取りまで暗い場所(室内の照明消灯)で取り扱うというものであった。IP 読取装置を設置している JAEA プルトニウム燃料第三開発室は、空調管理されているため温湿度はほぼ一定である。しかし、照明の消灯については、IP 露光後に潜像読取りのためカセットから読取装置に IP を移動する際、同室内で他の作業が行われている時もあるため室内の照明を消灯することが必ずしもできない場合がある。そこで、潜像を読取る際の室内照明の影響を確認するため、光を照射した場合にどの程度潜像が変化するかを検証する。

4.1 光照射後の測定

IP を IP 消去器で初期化後、放射能が異なる 2 つの Pu 試料を 10 分間露光し、続いて潜像読取り前に光(室内照明)を一定時間(5,10,15 及び 30 秒)照射した。そして光を照射していない状態で潜像を読取って定量した放射能と光を一定時間照射した放射能を比較した。光の照度は 190lx、460lx 及び 630lx の 3 パターンであり、写真(Fig.4.1)に示すように天井に据え付けられた蛍光灯の点灯を間引くことで調節された。また、使用した Pu 試料の放射能を Table 4.1 に示す。

4.2 光照射後の測定結果

二種類の Pu 試料について、光への感光時間と潜像から求めた PSL 強度を換算した放射能の関係を調べた結果を Fig.4.2 及び Fig.4.3 にそれぞれ示す。

IP に放射線照射後、光を照射することで PSL が減少することが確認された。減少の度合は、照度が大きいほど、また、光照射時間が長いほど大きかった。

190lx という薄暗い部屋においても IP を光に 5 秒間照射すると、PSL 値から換算した放射能が約半分にまで減少した。このため、IP 読取りは暗室などの暗い場所でなければならないと言える。従って、これまでの IP を取扱う作業環境で他の作業が行われている場合において、照明消灯できない使用条件下における使用方法について検討が必要である。

5. 解像度変更による検出下限放射能の変化

これまで解像度を 50 μm に固定して測定が行われた。プルトニウム燃料第三開発室で使用している IP 読取装置の場合、解像度は 50 μm のほかに 100 μm と 200 μm に変更可能である。解像度を変更すると、潜像の読取時間が短縮したり、Pu の検出下限放射能が変化したりする。したがって、必要とする検出下限放射能に応じて解像度を変更することで、適切な作業時間を設定できると考えられる。なお、IP 読取時間は、解像度 50 μm で約 3 分 30 秒、解像度 100 μm 及び 200 μm で約 2 分である。

解像度を変更するには 2 種類の方法がある。一つ目は、IP 読取り時に解像度を変更し潜像を読取る方法である。二つ目は、通常通り解像度 50 μm で潜像を読取り、後に Image J で解像度を変更する方法である。後者の場合、読取り時間の短縮は図れない。また、解像度を変更すると IP 上のピクセル数も変わる。解像度 50 μm で読取った場合、IP は 23,000,000 ピクセルに分割されるが、解像度 100 μm の場合 5,750,000 ピクセル、解像度 200 μm の場合 1,437,500 ピクセルとなる。そのため、解析段階においてもデータ処理の時間を短縮することが可能である。

5.1 解像度を変更して測定

解像度を変更すると IP 上のピクセル数も変わることから BG の影響調査をはじめに行った。IP 初期化後、一定時間(5,10,15,30,60,180,360 及び 1440 分)IP を放置し BG を露光した。Fig.5.1 に BG 評価エリアの例を示す。ここで黄色い線で囲まれているエリアが BG 評価エリアである。ピクセル数の変化に応じて、BG 評価エリアの指定座標は、解像度 50 μm [X:400、Y:400、W:3800、H:400]から解像度 100 μm で[X:200、Y:200、W:1900、H:200]、解像度 200 μm で[X:100、Y:100、W:950、H:100]に変更された。そして、解像度毎にそれぞれの測定時間における BG 識別条件を求めた。

次に Table 3.2 に示した Pu 試料 No 1 ~ No11 を使用し、解像度毎に Pu 試料の露光を一定時間(5,10,15,30,60,180,360 及び 1440 分)行った。得られた潜像画像は上記した解像度毎の識別条件を用いて解析を行った。

5.2 解像度を変更して測定した結果

5.2.1 解像度変更時の BG 評価

解像度 50 μm 、100 μm 及び 200 μm のそれぞれの条件について、BG 評価エリア内で観測された PSL の頻度分布に基づき累積頻度で 90%、99%及び 99.9%に相当する PSL 値をそれぞれ算出し、それらを BG との弁別のための閾値とした。閾値に満たないピクセルを除外して得られた Pu スポット周りの PSL 分布画像を、解像度 50、100 及び 200 μm のそれぞれについて、Fig.5.2 から Fig.5.4 に示す。ここで、Fig.5.2 から Fig.5.4 に示した画像は Pu 試料 No.11 の拡大画像である。

閾値を累積頻度 90%に相当する PSL 値に設定した場合、画面中央の Pu スポットの周辺に、それ以外の要因によって生じるスポット(BG スポット) が無数に検出される。閾値を 99%、99.9%にそれぞれ相当する値に上げるにつれて、BG スポットの数と大きさはともに減少する。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 スポットとして見逃す可能性が増加する一方で、閾値を下げ過ぎると BG スポットがあまりにも多く検出され Pu 汚染の定量が困難となる。そこで、解像度 100 μm 及び 200 μm についても、Pu 検出条件を解像度 50 μm のときと同様に PSL 累積頻度 99%に相当する値にすることとした。

解像度 100 μm 及び 200 μm の BG 潜像画像において、BG 評価エリアの PSL 累積頻度 99%レベルの閾値を使用して抽出した場合に検出される BG スポットを構成するピクセル数を Fig.5.5 及び Fig.5.6 にそれぞれ示す。解像度 100 μm の場合、PSL 累積頻度 99%レベルの閾値で抽出すると、BG スポットの面積は 15 ピクセルを越えることがなかった。また、解像度 200 μm においては、PSL 累積頻度 99%レベルを閾値として抽出すると、BG スポットの面積は 8 ピクセルを越えることがなかった。これらのことから、それぞれの解像度における Pu 検出条件を Table 5.1 に示すように定めた。この BG スポットの発生は、JAEA-Technology 2010-051⁵⁾で報告したように解像度 50 μm と同様に、ピクセル数が多くなるにつれて発生頻度が減少する傾向を示した。なお、ここで注意しなければならないのが、上記した Pu 検出条件を超えない Pu スポットが存在しないとは言えないことである。しかし、長時間露光することで PSL 値が増加するため閾値を超えて検出可能になると思われる。

5.2.2 解像度変更時の Pu 評価

それぞれの解像度において Pu を露光した潜像画像に前節で求めた Pu 検出条件を適用した。解像度 100 μm に 5.2.1 で求めた Pu 検出条件を適用すると、解像度 50 μm と比べ積算放射能の小さい Pu クラスターの検出される数が減少した。これは解像度が大きく(粗く)なったことによって 1 ピクセルの最大 PSL が低く見積もられるピクセルが発生すること、また、Pu クラスターとして検出されるクラスターのピクセル数が減少したことにより、Pu 検出条件を超えるピクセルが減ったことによる。解像度 200 μm においても同様に、5.2.1 で求めた Pu 検出条件を適用すると解像度 100 μm よりも積算放射能の小さい Pu クラスターの検出される数が減少した。Pu 試料 No11 の解像度毎の IP 画像とその断面図を Fig.5.7 から Fig.5.10 に、定量値を Table 5.2 にそれぞれ示す。解像度が大きく(粗く)なるにつれて検出される Pu スポットのピクセル数が減少していること、ピクセル毎の PSL 値が低くなっていることが確認できる。定量値が低く見積もられるのは、検出されている Pu クラスターのピクセル数が減少していることに加え、解像度が大きく(粗く)なることで 1 ピクセルの最大 PSL が低く見積もられている影響である。当然ではあるが他の Pu 試料においても検出された Pu クラスターを定量すると放射能が

過小評価された。このため、定量する場合には解像度毎に補正が必要である。

解像度 50 μm で定量した Table 3.2 の Pu 試料の放射能を 1 とした場合に、解像度 100 μm 及び 200 μm で定量した放射能を比較すると Table 5.3 のようになる。Table 5.3 に示している平均値から、解像度毎における PSL 値から換算した放射能の過小評価は、露光時間の変化によって起こっているのではなく、解像度の変更によって起こっていることがわかる。このことから解像度によって換算係数を変更する必要があると言える。解像度を 100 μm 又は 200 μm に変更すると、放射能がそれぞれ 0.47、0.11 低く見積もられることから、解像度 100 μm では換算係数が 2.13、解像度 200 μm では 9.09 になる。なお、データを解析する際には、1 ピクセルの測定上限である 79.04PSL を超えているもの、試料状態の変化(ポリカーボネートフィルムのしわやごみ等の混入による放射能の変化)があったデータは評価から外している。

さらに解像度 100 μm 及び 200 μm のときにおける検出下限放射能の検討を行った。Table 5.4 に示す粉末状の Pu 試料を解像度毎に一定時間(5,10,15,30,60,180 及び 1440 分)露光した。そして、5.2.1 で求めた解像度毎の Pu 検出条件で抽出し、さらに解像度が 100 μm の場合は面積が 15 ピクセル、解像度が 200 μm の場合は面積が 8 ピクセルのクラスタのみ抽出することで、解像度毎の検出できる最小放射能を確認した。定量するにあたり、上記した放射能の換算係数は考慮している。

Table 5.5 及び Table 5.6 それぞれに解像度 100 μm の場合は面積 15 ピクセル、解像度 200 μm の場合は面積 8 ピクセルのクラスタ情報を示す。解像度 100 μm における Pu のスポットの検出下限放射能は、5 分間の接触測定で約 0.21Bq、60 分で約 0.026Bq、1440 分(24 時間)で約 0.0023Bq である。解像度 200 μm の場合は 5 分間の接触測定で約 0.20Bq、60 分で約 0.039Bq、1440 分(24 時間)で約 0.0036Bq である。また、今回の評価方法でスポットが検出されなかった場合の検出限界下限放射能は信頼区間の上限値であることが期待される。

5.2.3 Image J で解像度を変更した場合の Pu 評価

解像度 50 μm で読取った IP 画像を Image J を使用して解像度 200 μm に変更する方法も確認した。解像度を 50 μm から解像度 200 μm に Image J で変更すると、初めから解像度 200 μm で読取った場合よりも検出される Pu クラスタの面積が小さく、定量値も低かった。これは、潜像読取り時に解像度を変更するよりも PSL が平均化され閾値を超えるピクセルが減少したためと考えられる。Fig.5.11 に Image J で解像度を変更した場合の Pu クラスタ例を示す。Image J で解像度を変更すると作業効率の向上も図れず、Pu の検出も悪くなることから Image J による解像度の変更は行わないこととする。

6. まとめ

今回の調査で得られた露光条件や解析条件について以下にまとめる。

(1) Pu 露光時に鉛が混在した場合の影響

鉛の影響がある IP 画像について Pu の検出条件を使用すると、露光時間が長くなるにつれ面積の小さなクラスタの数が多くなり、また、それらが重なり合うなどの理由によって面積 40 ピクセルを超えるクラスタの検出も増え、面積による判別が困難になる。一方、平均 PSL で鉛と Pu を比較すると、Pu の平均 PSL は露光時間に比例して増加するが、鉛の平均 PSL はほぼ一定である。この理由として、鉛の比放射能は低いので単位時間当たりの PSL の増加がそもそも小さいこと、露光中のフェーディングによってその増加が相殺されたことが考えられる。鉛の平均 PSL は露光時間が 1440 分以内の場合、0.18 を超えることはなかった。そのため、平均 PSL0.18 で Pu と鉛を判別することが可能である。

今回の調査で使用した鉛の放射能が約 $0.074\text{Bq}/\text{cm}^2$ であることから、これ以上の放射能を有する鉛が存在する場合の影響についても今後調査が必要である。

(2) 光による PSL の減少

IP に放射線照射後、光を照射すると PSL が減少した。この PSL の減少の割合は、照度が高いほど、また、光の照射時間が長いほど PSL の減少が大きかった。190lx という薄暗い部屋においても IP を光に 5 秒間照射すると PSL 値から換算した放射能が約半分に減少してしまった。このため、IP 読取りは暗室などの暗い場所でなければならないと言える。従って、これまでの IP を取扱う作業環境で他の作業が行われている場合において、照明消灯できない使用条件下における使用方法について検討が必要である。

(3) 解像度変更による検出下限放射能の変化

IP の解像度は $50\mu\text{m}$ のほかに、 $100\mu\text{m}$ 及び $200\mu\text{m}$ に変更可能であり、解像度を変更することによって潜像の読取時間や Pu の検出下限放射能に影響する。

解像度を変更すると IP 上のピクセル数も変わり、解像度 $50\mu\text{m}$ で読取った場合は 23,000,000 ピクセル、解像度 $100\mu\text{m}$ の場合 5,750,000 ピクセル、解像度 $200\mu\text{m}$ の場合 1,437,500 ピクセルとなる。ピクセル数の変化に応じて、BG 評価エリアの指定座標は、解像度 $50\mu\text{m}$ [X:400, Y:400, W:3800, H:400] から解像度 $100\mu\text{m}$ で [X:200, Y:200, W:1900, H:200]、解像度 $200\mu\text{m}$ で [X:100, Y:100, W:950, H:100] に変更された。

上記の条件で Pu の検出条件を設定すると、解像度 $100\mu\text{m}$ における Pu 検出条件は PSL 累積頻度 99% 及び面積 15 ピクセルとなる。また、解像度 $200\mu\text{m}$ においては、PSL 累積頻度 99% 及び面積 8 ピクセルとなる。

各解像度の Pu 検出条件で定量すると放射能が過小評価されるため、定量する場合には

解像度毎に補正が必要である。解像度毎の放射能の過小評価は、解像度が大きく(粗く)なるにつれて検出される Pu スポットのピクセル数が減少していること、また、1ピクセルの最大 PSL が低く見積もられている影響によって起こっていることから、解像度毎によって換算係数を変更する必要がある。それぞれの換算係数は、解像度 100 μm で 2.13、解像度 200 μm で 9.09 になった。

解像度 100 μm における Pu のスポットの検出下限放射能は、5 分間の接触測定で約 0.21Bq、60 分で約 0.026Bq、1440 分(24 時間)で約 0.0023Bq であった。解像度 200 μm の場合は 5 分間の接触測定で約 0.20Bq、60 分で約 0.039Bq、1440 分(24 時間)で約 0.0036Bq である。また、今回の評価方法でスポットが検出されなかった場合の検出下限放射能は 95%信頼区間の上限値であることが期待される。そして、放射線測定上で必要とされる検出下限値に応じて解像度を変更することで、潜像の読取時間やデータ処理の時間を短縮することができ、適切な作業時間を設定できると考えられる。

謝辞

本報告をまとめるにあたり、ご指導、ご協力いただいた放射線管理部内の関係者の方々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 α 放射性粒子の粒子径測定」, PNC TN841-78-47(1978).
- 2) 高崎 浩司,大西 俊彦,佐川 憲明 ; 「 α 放射能管理技術の開発」, 動燃技報 No.81, pp.63-68.
- 3) 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.
- 4) 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 ; 「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-」,JAEA-Technology 2008-028,(2008).
- 5) 佐川 直貴,山崎 巧,黒澤 重行,井崎 賢二,水庭 春美, 高崎 浩司 ; 「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」,JAEA-Technology 2010-051,(2011).
- 6) National Institute of Health; Image J, available from <http://rsb.info.nih.gov/ij/> (accessed 2007-12-15).
- 7) M. SC. Lena Yvonne Johansson, “Determination of Pb-210 and Po-210 in aqueous environmental samples”, Gottfried Wilhelm Leibniz Universidad, Doctor’s thesis, 28.07.2008.

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の支持体上に高密度塗布
サイズ	23 cm× 25 cm
対応核種	14C, 32P, 33P, 35S, 125I, 131I などの放射性アイソトープ, X線

Table 2.2 IP 読取装置(BAS-1800 II)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 0.39μW 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	14C, 32P, 33P, 125I 等
読取 IP サイズ	200mm×250mm, 230mm×250mm
画素サイズ	50μm/100μm/200μm 選択
最大画像容量	47MB(50μm)/12MB(100μm)
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 (50μm 読み), 2分 (100μm 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 消去器(IP Eraser 3)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 3.1 鉛測定時における BG 評価エリアの BG 平均 PSL と閾値

露光時間(分)	BG 平均 PSL	閾値(PSL)
5	0.00104	0.01444
10	0.00108	0.01560
15	0.00127	0.01755
30	0.00236	0.02383
60	0.00217	0.02739
120	0.00369	0.03148
180	0.00505	0.03490
360	0.00857	0.04383
960	0.02136	0.07034
1440	0.03161	0.08807

Table 3.2 Pu 試料の放射能一覧

試料 No	試料種類	付着状況	全 α 放射能(Bq)
1	スミヤろ紙	スポット	0.23
2	スミヤろ紙	スポット	0.24
3	スミヤろ紙	スポット	0.38
4	スミヤろ紙	スポット	0.46
5	スミヤろ紙	スポット	0.37
6	スミヤろ紙	スポット	0.48
7	スミヤろ紙	スポット	1.07
8	スミヤろ紙	スポット	1.30
9	スミヤろ紙	スポット	0.29
10	スミヤろ紙	スポット	2.47
11	ラミクリーン	スポット	11.79

Table 4.1 Pu 試料の放射能一覧(2)

試料 No	試料種類	付着状況	全 α 放射能(Bq)
12	スミヤろ紙	スポット	29.22
13	スミヤろ紙	スポット	23.21

Table 5.1 解像度毎の Pu 検出条件

解像度	PSL 累積頻度値	面積(pixel)
100 μ m	99%	15
200 μ m	99%	8

Table 5.2 解像度毎の放射能

解像度	放射能(Bq)
50 μ m	11.57
100 μ m	3.72
200 μ m	0.96
50 μ m から 200 μ m へ変更	0.80

Table 5.3 解像度毎の放射能比

露光時間(分)	解像度 100 μ m /解像度 50 μ m	平均	解像度 200 μ m /解像度 50 μ m	平均
5	0.51	0.45	0.06	0.07
	0.40		0.08	
10	0.77	0.47	0.19	0.12
	0.48		0.10	
	0.36		0.10	
	0.29		0.07	
15	0.73	0.45	0.19	0.11
	0.54		0.16	
	0.29		0.05	
	0.31		0.07	
	0.41		0.09	
30	0.75	0.46	0.13	0.11
	0.31		0.10	
	0.75		0.19	
	0.30		0.06	
	0.29		0.08	
	0.35		0.09	
60	0.73	0.50	0.21	0.12
	0.42		0.12	
	0.68		0.11	
	0.34		0.08	
	0.31		0.10	
180	0.82	0.44	0.19	0.12
	0.32		0.09	
	0.68		0.17	
	0.11		0.07	
	0.36		0.09	
	0.37		0.09	

Table 5.3 解像度毎の放射能比 続き

露光時間(分)	解像度 100 μ m /解像度 50 μ m	平均	解像度 200 μ m /解像度 50 μ m	平均
360	0.76	0.45	0.18	0.11
	0.36		0.09	
	0.78		0.18	
	0.11		0.06	
	0.35		0.08	
	0.37		0.09	
1440	0.71	0.54	0.18	0.14
	0.36		0.10	
平均		0.47		0.11

Table 5.4 粉末状の Pu 試料一覧

試料 No	試料種類	付着状況	全 α 放射能(Bq)
14	エアスニファろ紙	パウダー	4.40
15	エアスニファろ紙	パウダー	7.53
16	エアスニファろ紙	パウダー	17.51
17	エアスニファろ紙	パウダー	20.32

Table 5.5 解像度 100 μ m の検出下限放射能

解像度	露光時間 (分)	面積 15 の スポット数	平均放射能 (Bq)	95%信頼区間 (Bq)
100 μ m	5	5	0.2137	0.1761~0.2513
	10	17	0.1169	0.0892~0.1446
	15	18	0.0938	0.0742~0.1134
	30	23	0.0611	0.0460~0.0762
	60	32	0.0257	0.0195~0.0320
	180	55	0.0108	0.0092~0.0125
	360	42	0.0059	0.0048~0.0070
	1440	43	0.0023	0.0020~0.0026

Table 5.6 解像度 200 μm の検出下限放射能

解像度	露光時間 (分)	面積 8 の スポット数	平均放射能 (Bq)	95%信頼区間 (Bq)
200 μm	5	17	0.2010	0.1630~0.2391
	10	43	0.1113	0.0902~0.1324
	15	29	0.1025	0.0729~0.1320
	30	55	0.0512	0.0403~0.0622
	60	62	0.0390	0.0285~0.0495
	180	67	0.0150	0.0122~0.0177
	360	59	0.0104	0.0084~0.0124
	1440	45	0.0036	0.0028~0.0043

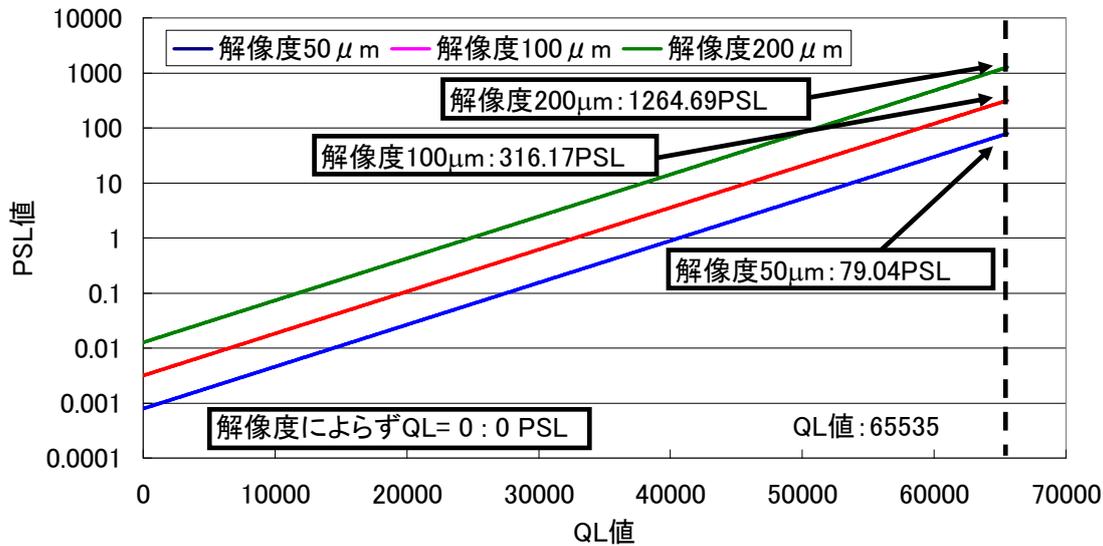


Fig.2.1 QL 値と PSL 値の関係

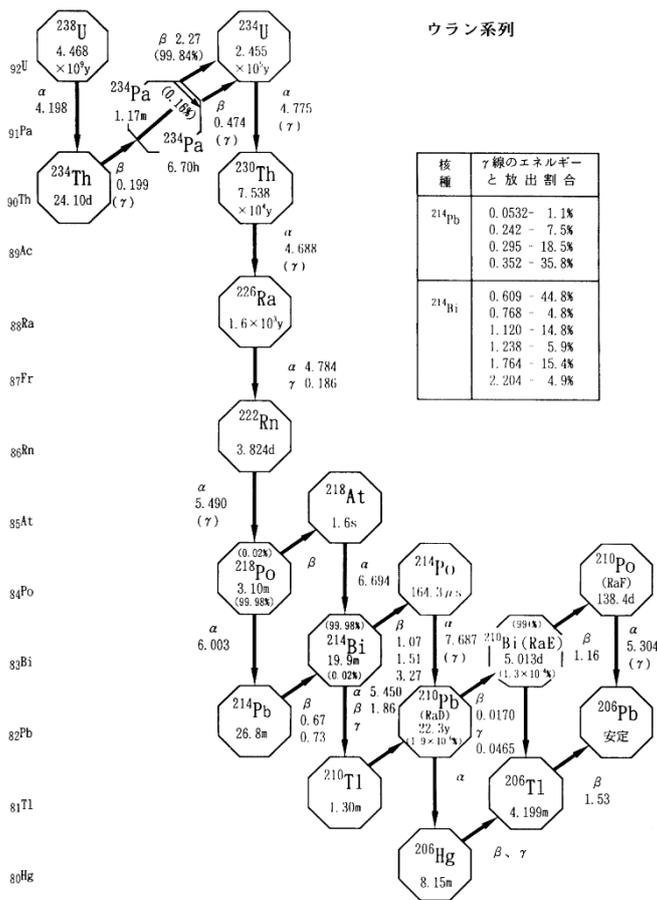
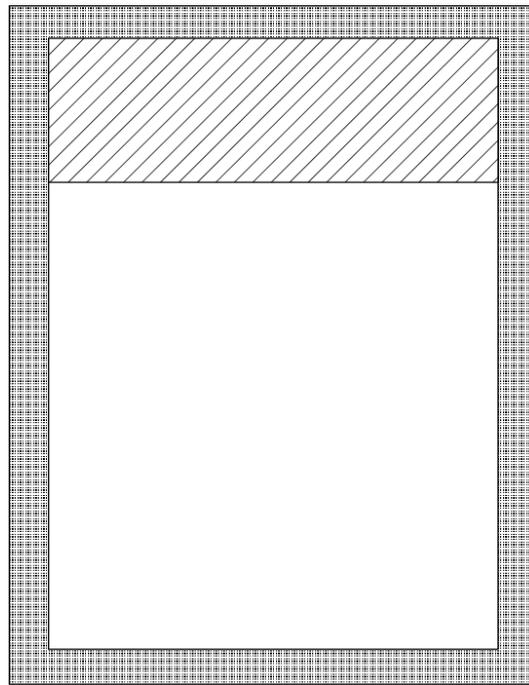


Fig.3.1 ウラン系列の壊変図



-  : IP周辺の10mm(評価エリア外)
-  : BG評価エリア

Fig.3.2 IP 評価エリア



Fig.3.3 鉛ドラム缶蓋の写真

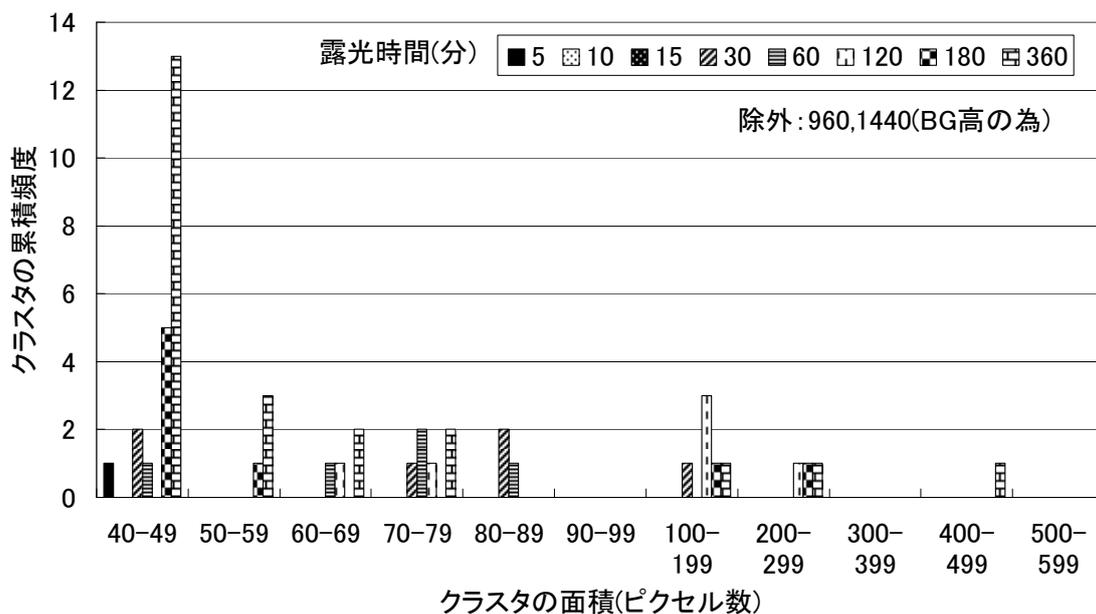


Fig.3.4 鉛を Pu の検出条件で抽出した場合の面積のヒストグラム

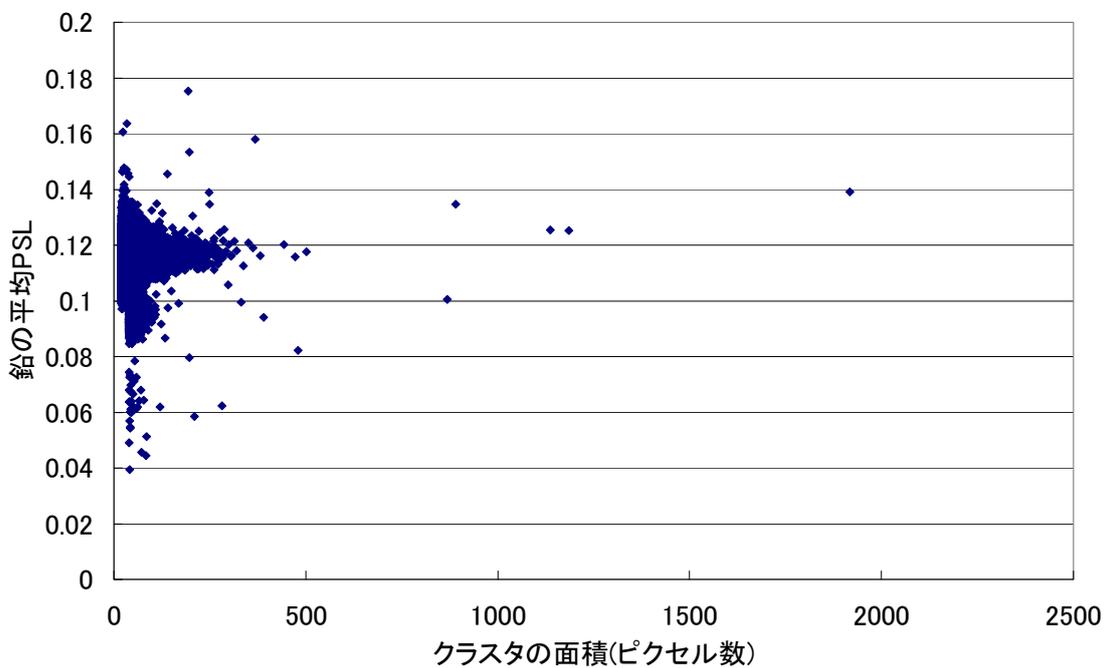


Fig.3.5 Pu 検出条件で抽出した鉛の面積と平均 PSL

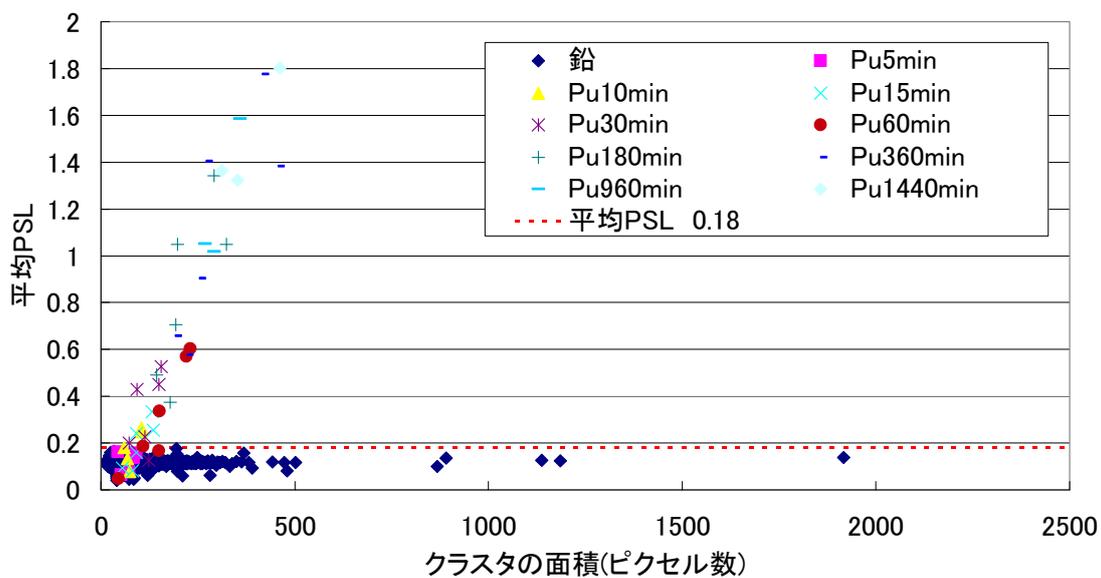


Fig.3.6 Pu と鉛における面積と平均 PSL の比較



Fig.4.1 蛍光灯の照度比較写真

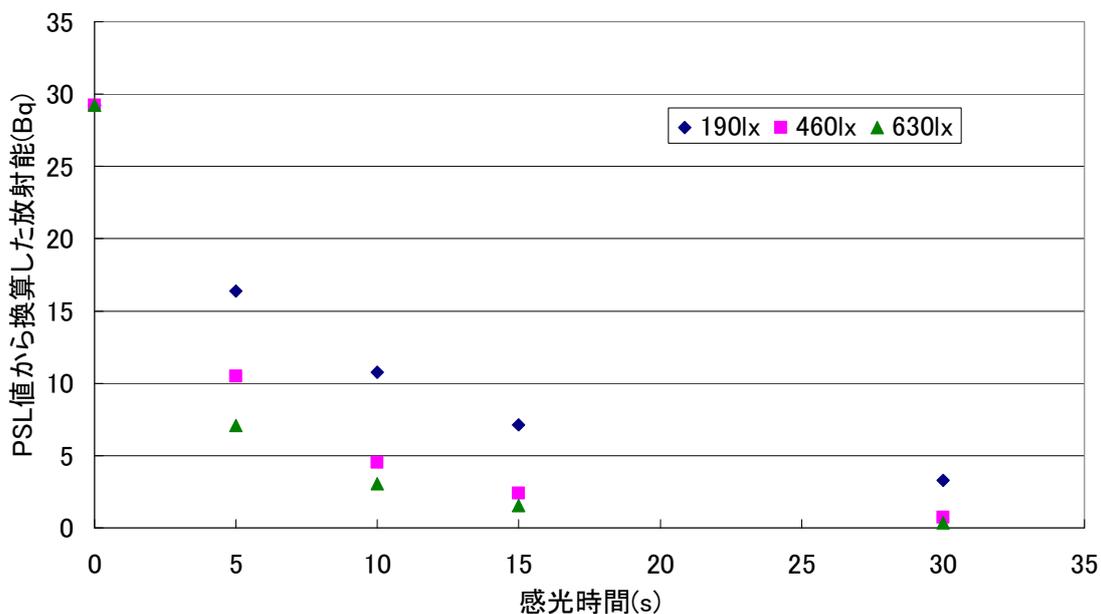


Fig.4.2 光への感光時間と放射能の関係(Pu 試料 No12)

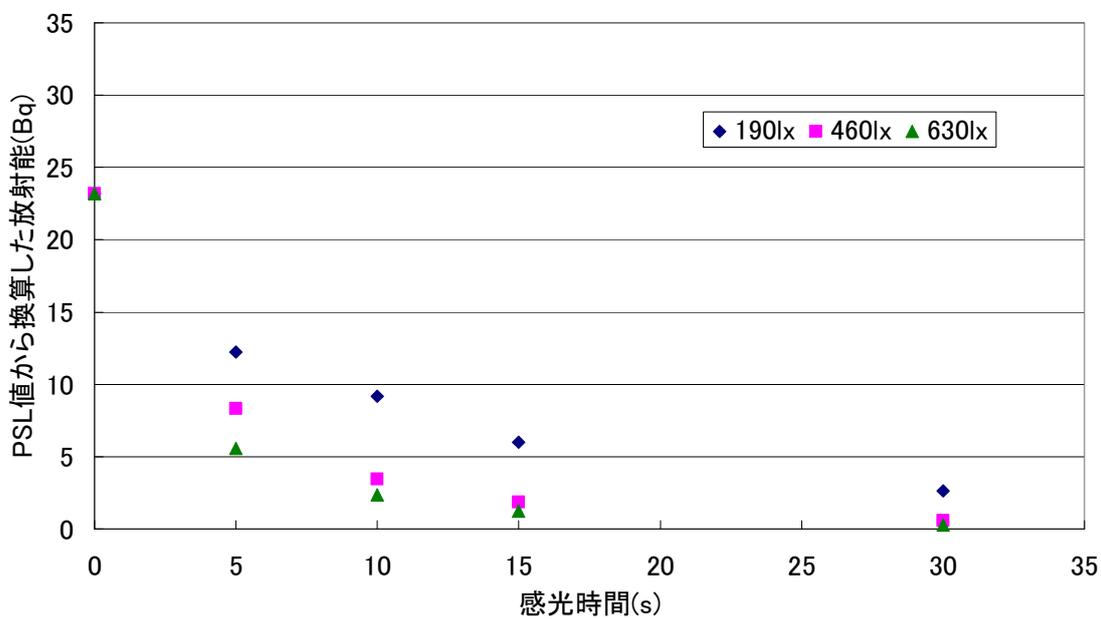


Fig.4.3 光への感光時間と放射能の関係(Pu 試料 No13)

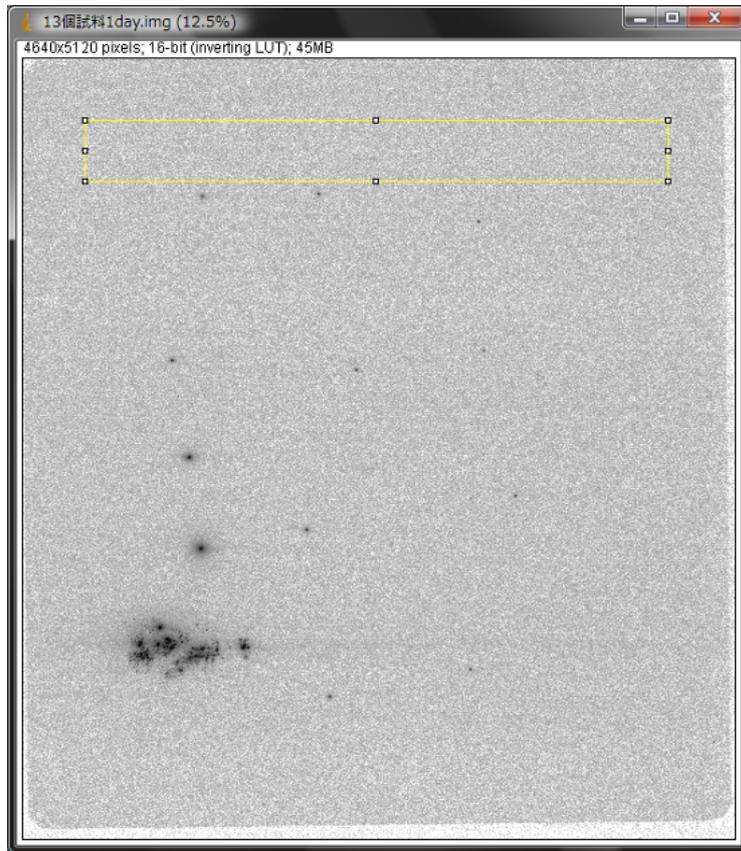


Fig.5.1 BG 評価エリアの例

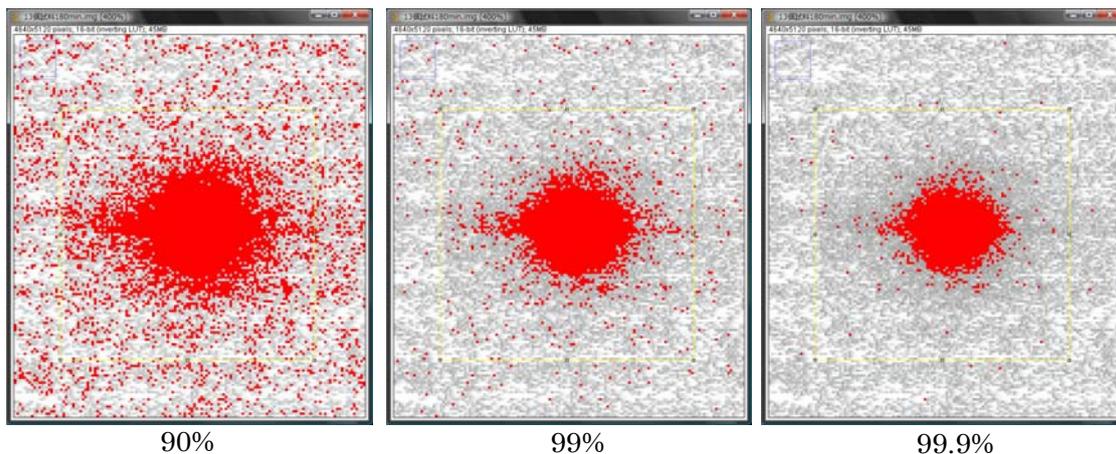


Fig.5.2 解像度 50 μ m における PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%)

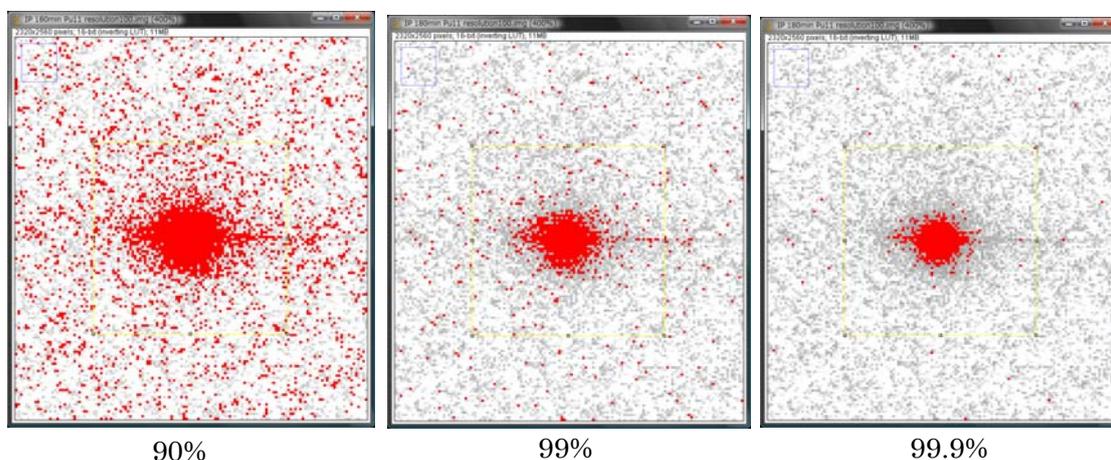


Fig.5.3 解像度 100 μ m における PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%)

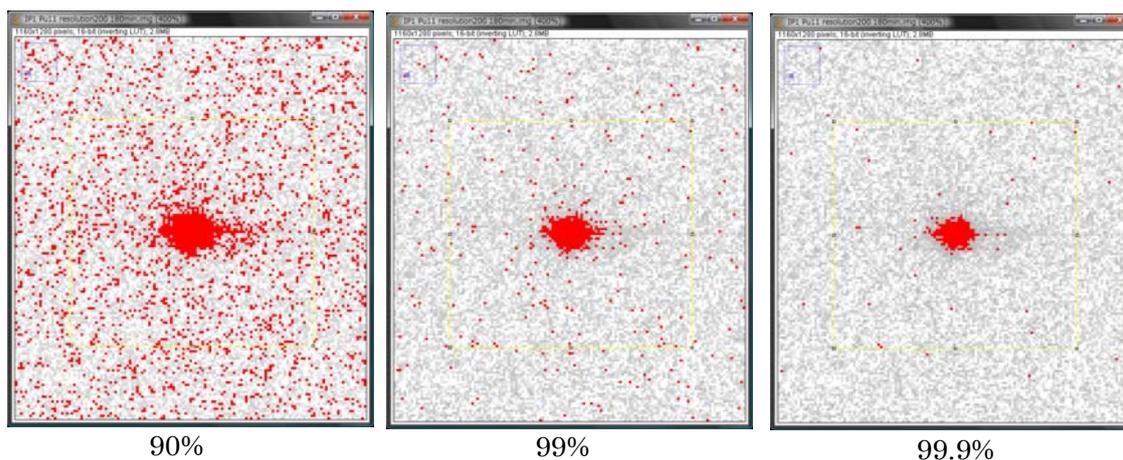


Fig.5.4 解像度 200 μ m における PSL 累積頻度値(90%、99%及び 99.9%)

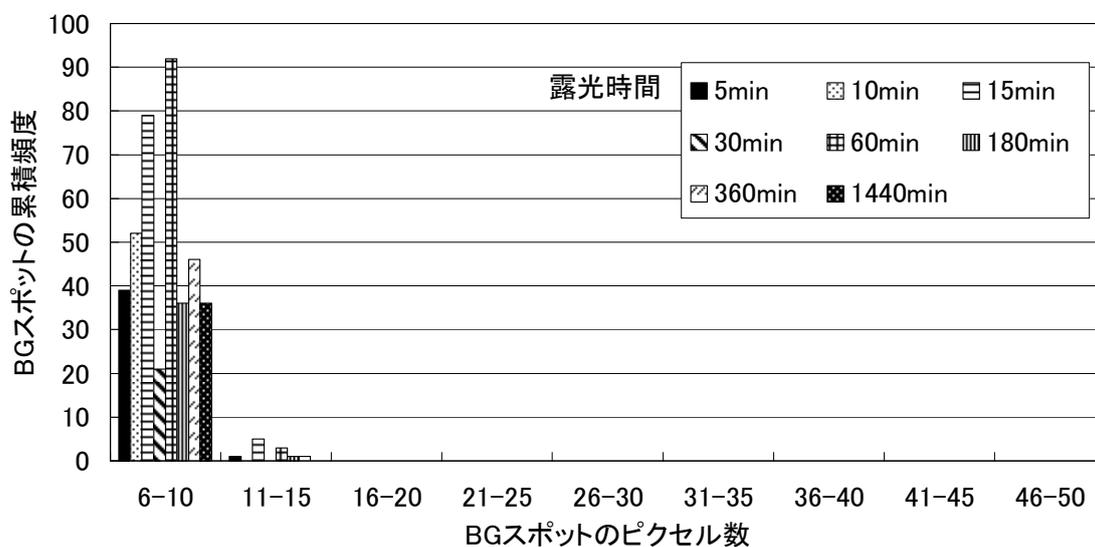


Fig.5.5 解像度 100 μm における PSL 累積頻度 99%の BG スポットのピクセル数

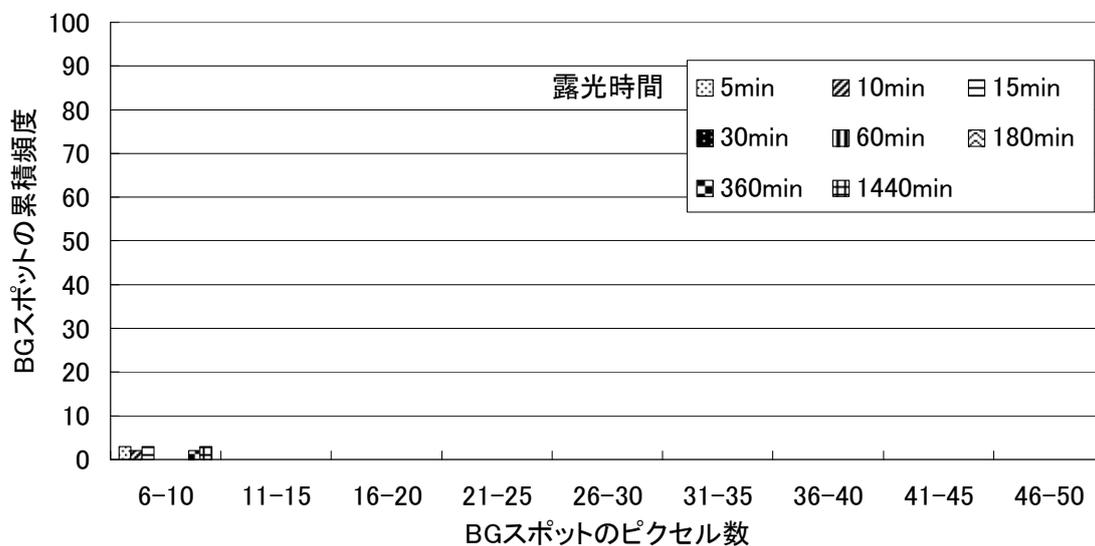


Fig.5.6 解像度 200 μm における PSL 累積頻度 99%の BG スポットのピクセル数

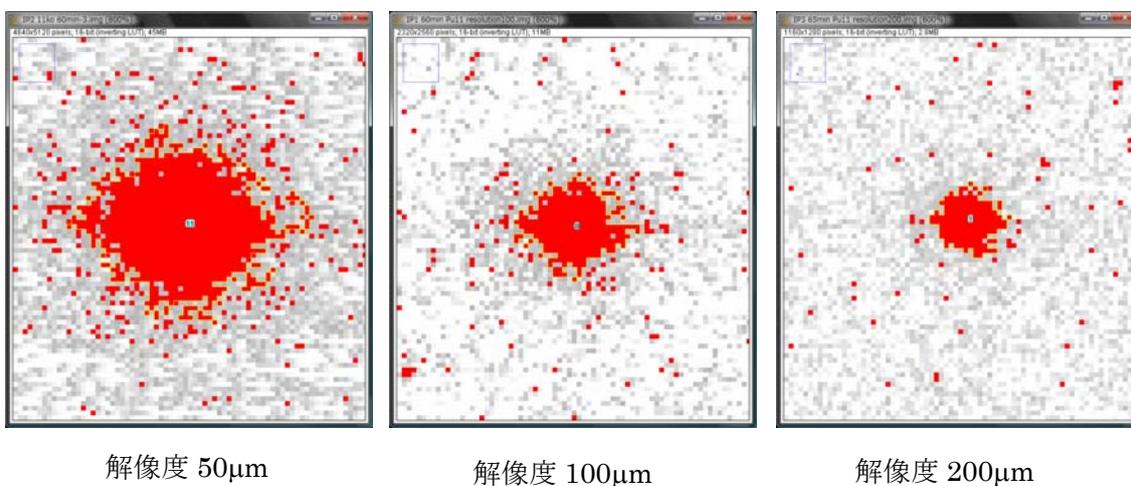


Fig.5.7 Pu 試料 No11 の解像度毎の IP 画像

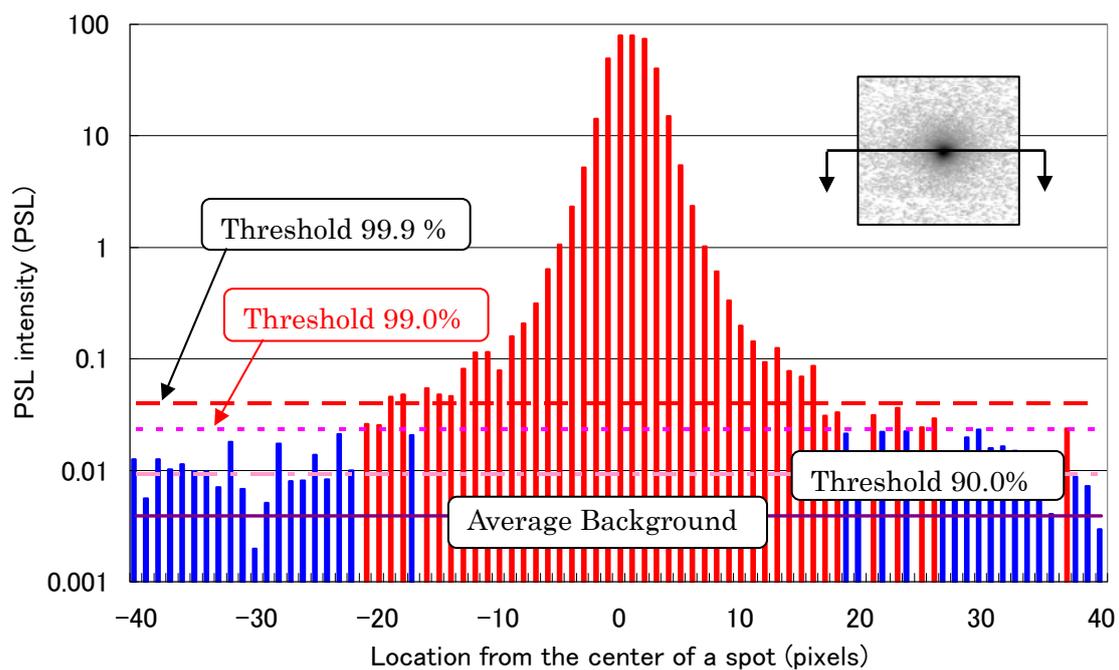


Fig.5.8 解像度 50 μ m における Pu クラスターの断面

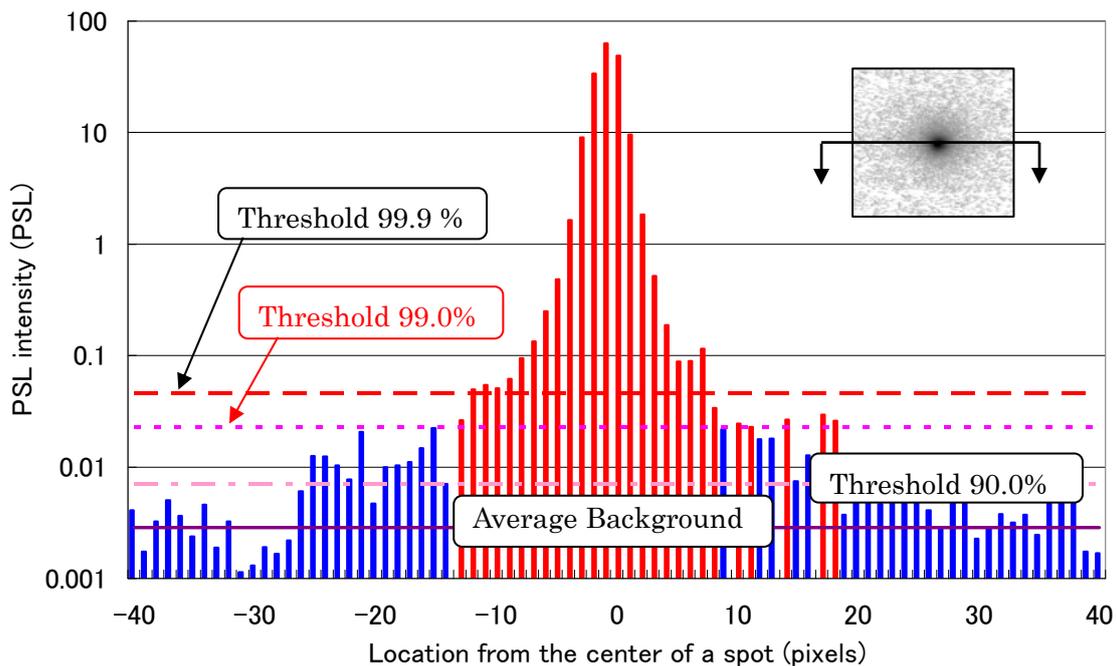


Fig.5.9 解像度 100 μm における Pu クラスターの断面

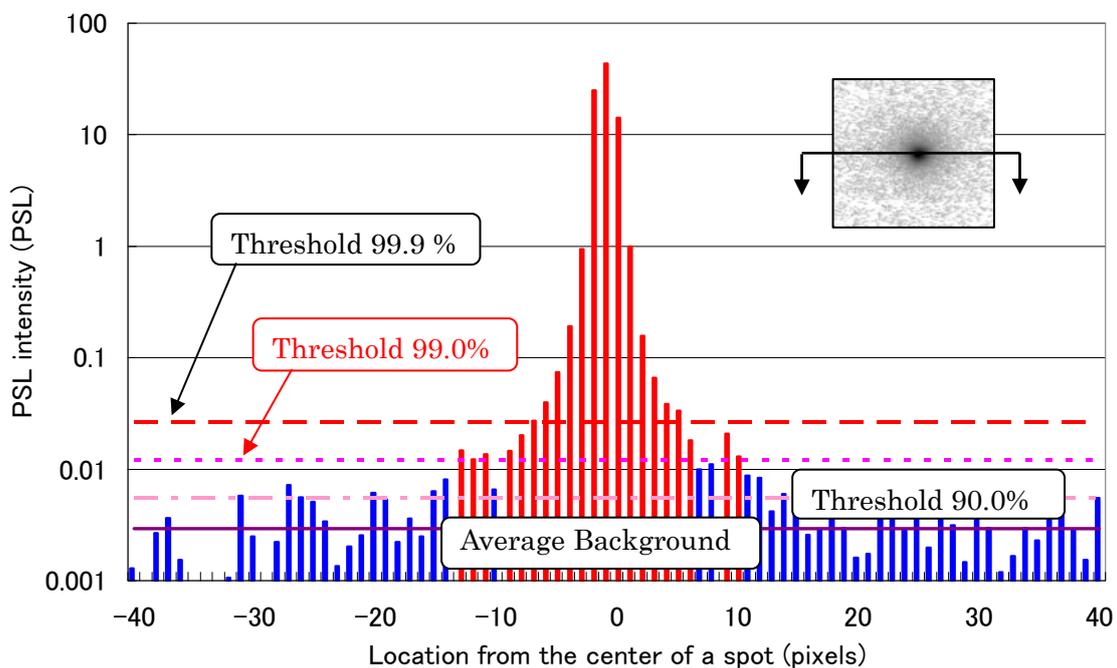
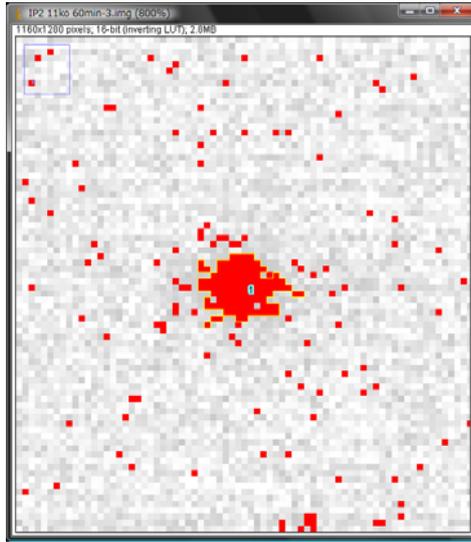


Fig.5.10 解像度 200 μm における Pu クラスターの断面



解像度 50 μm から解像度 200 μm に変更

Fig.5.11 Image J による 解像度変更時の Pu クラスタの変化

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
物質の量	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	立法メートル	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
面積密度	キログラム毎平方メートル	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	アンペア毎平方メートル	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	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	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
比透磁率 ^(b)	(数字の)	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

組立量	SI組立単位			
	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
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(c)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	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
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	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	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	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 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(c)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
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, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	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、ベクレルは放射性核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。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (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

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
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
角加速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加減	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度、放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量、エン트로ピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量、比エン트로ピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
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
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面電荷	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度、電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² 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트로ピー、モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	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
	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	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	1 h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d = 24 h = 86 400 s
度	°	1° = (π/180) rad
分	'	1' = (1/60)° = (π/10800) rad
秒	"	1" = (1/60)' = (π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha = 1 hm ² = 10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L = 1 dm ³ = 10 ³ cm ³ = 10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t = 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単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV = 1.602 176 53(14) × 10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da = 1.660 538 86(28) × 10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u = 1 Da
天文単位	ua	1 ua = 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
バール	bar	1 bar = 0.1 MPa = 100 kPa = 10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg = 133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å = 0.1 nm = 100 pm = 10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M = 1852 m
バイン	b	1 b = 100 fm ² = (10 ¹² cm) ² = 10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn = (1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	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	erg	1 erg = 10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn = 10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P = 1 dyn s cm ⁻² = 0.1 Pa s
ストークス	St	1 St = 1 cm ² s ⁻¹ = 10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb = 1 cd cm ⁻² = 10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph = 1 cd sr cm ⁻² = 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal = 1 cm s ⁻² = 10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx = 1 G cm ² = 10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G = 1 Mx cm ⁻² = 10 ⁻⁴ 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 = 1 cGy = 10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem = 1 cSv = 10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ = 1 nT = 10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ = 1 fm = 10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 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	1 cal = 4.1858 J (「15°C」カロリ)、4.1868 J (「IT」カロリ)、4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ = 1 μm = 10 ⁻⁶ m

