

# 放射線管理区域における作業環境測定の合理化の検討 —表面汚染と空気汚染の関係に着目して—

山岡聖典, 澁谷光一, 永松知洋<sup>1)</sup>, 川崎祥二

## 要 約

放射線管理区域において業務従事者の放射線防護が正確に実施されていることを確認するために放射性同位元素の環境測定が行われている。しかし、実際の測定においては、濃度が低いなど実測困難な場合が多いこと、多くの人手と経費を要していることから、より合理的な測定の実施ができないかということについての検討が期待されている。このため本総説では、まず大学などの放射線管理区域における作業環境測定方法の現状についてまとめた。次に、放射線管理区域の床、作業台などにおける放射性同位元素の表面汚染と空気汚染に着目し、汚染粒子の移行など表面汚染と空気汚染の関係機構について、また、スミア法や直接測定法などの各種表面汚染測定法の汚染採取効率などを指標とした特性とこれら測定法の改良の試みについてまとめた。さらに、実際の作業場所において、作業内容、換気、表面材料などが表面汚染と空気汚染の关系到及ぼす影響について、その検討例を紹介した。得られた知見をまとめるとともに、測定箇所・測定頻度の適性化やそれぞれの測定箇所に適した測定法の選定など作業環境測定の一層の合理化に向けて、今後どのような検討が必要なのかについて提案した。

キーワード：放射線管理区域, 作業環境測定, 表面汚染測定法, スミア法, 採取効率

## はじめに

放射線安全管理は、線源管理、環境管理、個人管理に区分される。放射線安全管理の目的は放射線業務従事者の放射線障害を防止し、公共の安全を確保することである。それを達成するために最も基本的かつ優先順位が高いのは線源管理である。次いで優先順位の高い作業環境の管理は、線源管理が確実に行われていることを確認するために必要であり、その評価の手段として環境モニタリングが行われる。また、個人管理は教育訓練をはじめ被曝線量の評価、健康の保持などのために重要である。

この放射線安全管理に関する法令のうち最も基本になるのは、「放射線同位元素等による放射線障害の防止に関する法律(以下、放射線障害防止法と略す)」である。この放射線障害防止法のもとには、その具体的な施行、運用のために「同施行令(政令)」、「施行規則(総理府令)」ならびに各種数値を定めるため

の「告示(科学技術庁告示)」がある。他方、放射線の取扱いなどの業務に従事する者であって、そのうち管理区域に立ち入る者は「放射線業務従事者」と言われる。この放射線業務従事者のうち、例えば、国立の大学などに所属する教職員に対しては国家公務員法の中の「職員の放射線障害の防止(人事院規則)」が適用され、公立・私立の大学などに所属する教職員に対しては労働安全衛生法の中の「電離放射線障害防止規則(労働省令)」が適用される。従って、大学などの教職員は放射線障害防止法関係法令の他、これらの法令に従う必要がある。通常、法令の内容は放射線障害防止法と同様であるが、異なっている場合もあり、この場合は、厳しい法に従わなければならない。

環境管理の対象となる管理区域は、放射線や放射性物質を取り扱う区域(作業室、使用施設、貯蔵施設、廃棄施設、汚染検査室など)を一般の環境から

物理的に隔離し、出入りの規制をするとともに、立ち入る人の放射線安全を確保するために設定されている。この管理区域は法令により主に次の値を超える恐れのある場所と定義されている。即ち、外部放射線に係る1cm線量当量が1週間につき $300\mu\text{Sv}$ 、1週間についての空気中の放射性同位元素（以下、RI）の平均濃度が告7条に規定する濃度の3/10、およびRIによって汚染されるものの表面のRIの密度が告8条に規定する密度の1/10である。

この放射線管理区域におけるRIの作業環境測定は、業務従事者の放射線防護が正確になされていることを確認するために行われる。しかし、後述するように、実際の測定においてはRIの使用量、飛散率、部屋の排気量より算出したRI濃度の値は低く、実測困難な場合が多い。また、多くの人手と経費がかかっている<sup>1)</sup>ことから、より合理的な測定の実施ができないかということについての検討が期待されている。他方、測定対象としては線量当量率、表面汚染、および空気中のRI濃度（以下、空気汚染）などがあるが、この内、放射能汚染の状況を直接情報として把握できるのは表面汚染と空気汚染である。このため本総説では、放射線管理区域におけるRIの表面汚染と空気汚染に着目し、測定方法の現状、両者の関係機構、各種表面汚染測定法の特性とその改良、および実際の作業場所における両者の関係についてまとめる。さらに、これらを踏まえ、作業環境測定の一層の合理化に向けて、今後どのような検討が必要なのかについても触れる。

## 1. 作業環境測定方法の現状の概要

まず、放射線管理区域における作業環境のRI測定方法の現状の概要について述べる。

### 1) 表面汚染の測定方法

非密封RIを取り扱う作業室、廃棄作業室および汚染検査室の表面汚染（表面のRI密度）の日常的測定点は、次のように分類・選択されている。これにより通常の作業状況における汚染の状況・分布が把握されている<sup>1)</sup>。

- 実験台、フード、流し、貯蔵庫、廃棄物保管容器などの周辺の床など、最も汚染の起こり得る箇所。
- 部屋の入口、人がよく通る通路など、汚染の広がりを最もよく検出できる箇所。
- 汚染検査室など、管理区域の出入口付近。
- 測定室など、汚染を低く保つ必要のある場所。

測定法としては直接法（サーベイメータ法）と間接法（主にスミア法）がある（詳細は、後述する）。定期的な検査としては遊離性汚染の状況の把握が管理上は重要であり、また、精度などの観点より、多くの場合、スミア法で環境測定が行われている。

さらに、必要に応じて、次の方法による採取も行われ、その後、放射能測定されている<sup>1)</sup>。

- 表面のRI密度を算出することは不可能であるが、定点で測定するスミア法では見逃すような床汚染を効率よく検知できる粘着マットシートを用いた方法。
- 対象箇所が狭くて測定機器や用具で拭き取ることが困難な場合、また汚染物が粉体で通常の方法では汚染を拡大する恐れのある場合などに有効な粘着テープを用いたガムドテープ法。
- 汚染の拡大および汚染箇所が不明になる可能性はあるが、拭き取り面積がスミア法に比較して大きいいため、拭き取り効率が低くても微量の汚染が検出でき、かつ汚染の見逃しの少ない不織布製化学雑きんを用いたテストサーフィス法。

### 2) 空気汚染の測定方法

業務従事者の内部被曝を評価するため、作業室などRIを吸入する恐れのある場所における空気中のRI濃度が測定されている。しかしRIの使用量、飛散率、部屋の排気量より計算したRI濃度の値は低く、実測困難な場合が少なくない。さらに人手および経費を要するため、大学などにおける中小規模の事業所では直接測定を行わず、使用量より1か月あるいは3か月の平均濃度を計算で求めているのが実状である。その結果を基に内部被曝による実効線量当量が計算されている<sup>1)</sup>。

空気汚染は気体状の場合と粒子状の場合に分けられ、両者が合わせて評価されている<sup>1)</sup>。RI標識化合物の合成実験など比較的多量のRIを用い、かつRIが飛散しやすい取扱いの場合には、相対的に多量の気体状の空気汚染を生じる危険性がある。例えば、放射性ヨウ素は活性炭含浸濾紙または活性炭カートリッジなどを用いる固体捕集法により、トリチウムガスはガス捕集用電離箱を用いた直接捕集法や触媒などによりトリチウム水に転化・捕集する装置を用いた酸化捕集法などにより、それぞれ捕集され放射能測定されている。一方、粒子状の空気汚染の測定はダストサンプラを用いた濾紙捕集法により得られた試料について放射能測定されている。

## 2. 空気汚染と表面汚染の関係機構

### 1) 汚染粒子の移行および付着ならびに飛散特性

床、作業台などの表面を汚染している粒子は、表1(a), (b)に示すような機構によって空気中に移行し、空気汚染をもたらす<sup>2)</sup>。作業環境における床、作業台などの表面は鋼、塗装処理したコンクリートなど浸




透しにくい材質からなっている上、作業開始前にビニールシートなどで汚染を防止する機会が多い。このため、汚染粒子は表面に吸着している状態で保存されている場合が多いものと推定できる。表1(c)に、汚染粒子が表1(b)の状態での床、作業台などに保持されている場合の付着力の性質を示す<sup>3)</sup>。同表から、い

表1 汚染の機構

#### (a) 汚染粒子の運搬の機構<sup>2)</sup>

作用	物理学的意味
重力	汚染粒子が自重により落下する。
拡散	汚染粒子が空気拡散により運搬される。
空気流	空気が移動すればその付近の汚染粒子も移動する。この空気を阻止するものがあれば、この汚染粒子は衝突する。衝突が多ければ、この部分が他よりも多く汚染される。
材料表面温度	材料表面に温度差があり室内空気より壁面の温度が低い場合、その付近の細かい汚染粒子は壁面に付着する。
流速低下	ある速度で移動していた空気が急に広いところに出ると減速する。その速度の変化で運びきれなくなった重さの汚染粒子は落下し、その場に蓄積される。
静電気	建築材料の中には摩擦や衝撃によって静電気を帯びるものが多く、この静電氣的引力により汚染粒子は吸引される。

#### (b) 汚染粒子保持の機構<sup>2)</sup>

状態	図	物理学的意味
付着		材料の表面にほこりが降下したときのように、重力により乗っているだけの状態。従って、風などの力が加われば、汚染粒子は飛散する。
吸着		静電気や磁力により汚染粒子が引きつけられている状態。多少の力が加わっても汚染粒子は飛散しない。圧力や摩擦力が加わると、材料内部にまで汚染が達し除去しにくい。
浸透		汚染粒子が液体とともに吸い込まれる。吸水性のない材料であっても、表面にごく小さな穴や傷のある場合、汚染はこの中に入り、除去されない。

#### (c) 汚染粒子の付着力<sup>3)</sup>

力の種類	式	備考
F <sub>v</sub> : van der Waals 力	$F_v \propto d/x^2$	d : 粒径 (μm) x : 表面と粒子の分離距離
F <sub>e</sub> : 静電気力	$F_e \propto d/xq^2$ (低温の場合)	d : 粒径 (0.1μm以上) xq : 表面と異電荷をもつ粒子との距離
F <sub>s</sub> : 吸着液体の被膜による表面張力	$F_s = 2\pi r d$	d : 粒径 r : 液体の表面張力
F : 室温25℃での清浄な表面をもつ硬い物質について求められた付着力	$F = 1.5 \times 10^{-2} \times d \times (0.5 + 0.0045 \times RH)$	d : 粒径 RH : 相対湿度 (%)

ずれの種類の付着力も汚染粒子の粒径に比例して大きくなるのがわかる。しかし、これらの付着力は粒子が平滑な平面に付着する条件に対して算出された結果であるため、その絶対量を知るためには表面材質の粗さが影響する度合いを明確にすることが必要である。

粒子の主要な付着力は表面材質の性状などによりそれぞれの影響の度合いが異なるが、表1(c)に示したように、一般的に粒径に比例して全体の吸着力は増大するものと考えられる。これに対して、粒子を表面から分離し飛散させる力となる振動や遠心力では粒径の3乗に、また気流の場合には粒径の2乗に比例することが知られている<sup>3)</sup>。

これらの関係を示す1例として、表1(c)の最下欄の実験式から求めた粒子の付着力と気流による分離力の粒径に対する関係を、図1に示す<sup>3)</sup>。この図から、粒径が小さくなる程付着力の影響が分離力に比べて大きくなり、具体的には粒径が10 $\mu$ m未満の粒子が空气中に飛散することは少ないことが示唆される。

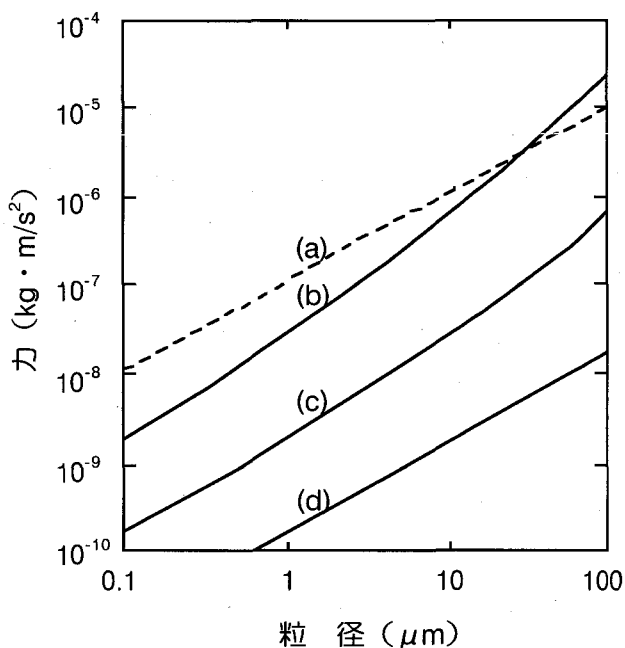


図1. 粒径と付着力・分離力の関係例<sup>3)</sup>

(a)付着力, (b)気流100m/sによる分離力, (c)気流10m/sによる分離力, (d)気流1 m/sによる分離力

注) ・付着力は表1(c)中の

$F = 1.5 \times 10^{-2} \times d \times (0.5 + 0.0045 \times RH)$  で算出され、相対湿度50%とした場合の力。

・分離力は、粒子が気流中に単独で存在している場合の気流による抗力と等しいと仮定。

このように、10 $\mu$ m未満の個々の粒子は外力により空气中に飛散する可能性は少ないと考えられるが、

粒子がお互いに接触しサイズの大きな凝集体に変化する、あるいは別のダストに付着して見かけ上のサイズが大きくなった場合には、比較的小さな外力で飛散する可能性が生じる。さらに、このようにして空气中に飛散した大粒子が分裂し、小粒子を空气中に発生させる原因となる可能性も否定できない。

## 2) 空気汚染と表面汚染の関係に係るパラメータ

図2に空気汚染と表面汚染の関係の概念図を示す<sup>2),3)</sup>。空气中の汚染粒子が床、作業台などへ沈着する特性を表すパラメータの一つとして、沈着速度がある。沈着速度とは、重力、分子拡散、静電気などによって粒子が表面へ移動する時のみかけの移動速度を意味する。床、作業台などに沈着した汚染は、明確な区別はできないが、その性状から、固着して取れにくい固着性汚染と比較的取れやすい遊離性汚染に大別される<sup>4),5)</sup>。遊離性汚染の一部は、空気の流れや人間、および物の動きなどの影響を受けて飛散する。

空気汚染と表面汚染の相関関係を示すパラメータとして、空气中放射能濃度を表面汚染密度で除した再浮遊係数がある。即ち、再浮遊係数  $K$  ( $m^{-1}$ ) は空气中の放射能濃度  $C$  ( $kBq/m^3$ ) と表面汚染密度  $S$  ( $kBq/m^2$ ) によって次式で定義される。

$$C(kBq/m^3) = K(m^{-1}) \times S(kBq/m^2)$$

空气中の汚染粒子は沈着、飛散を繰り返しており、空気汚染と表面汚染の関係は経時的に変化する関数として与えられる。しかし、再浮遊係数は特定の条件に対して一義的に決定されているため、空気汚染と表面汚染の瞬間的な関係を示すものと言える。

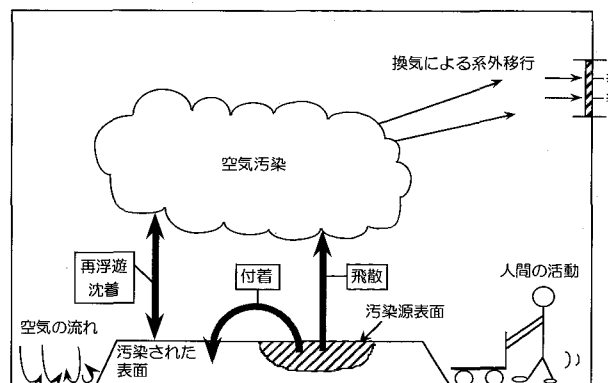


図2. 汚染の拡散の概念図<sup>2),3)</sup>

なお、実際の作業場所における沈着速度と再浮遊係数の検討例については、4章で述べる。

### 3. 各種表面汚染測定法の特性とその改良

粒子状の空気汚染の RI 濃度は直接の表面汚染がない床面などの RI 濃度と比例関係にあるため、人が歩かない床面などについてはスミア法によりある程度空気汚染が推定できる。従って、空気汚染の日常モニタリングとして表面汚染モニタリングを主体に行うことは、特に中小規模の放射線管理区域では合理的と見なされている。このため、表面汚染の測定法の現状を調査するとともに、現場管理に適用する上での改良の試みについても調査、検討した。

#### 1) 各種表面汚染測定法の特性

##### (1) 各種表面汚染測定法の特徴

表面汚染測定法には、スミア法、ガムドテープ法、スミア法、テストサーフィス法、直接測定法がある。これら各種表面汚染測定法の概念図を図3に示し、特徴を表2にまとめた<sup>4)~9)</sup>。

スミア法は、最も広く普及している表面汚染測定法である。これは、測定対象表面の一定面積を試料採取用濾紙で拭き取り、濾紙面に付着した RI が放射線計測器で測定する方法である<sup>6)</sup>。

ガムドテープ法は、1~2 cm<sup>2</sup>の粘着テープを汚染面に張り付け、遊離性の汚染物質を粘着面に付着させ、その放射能濃度を測定する方法である<sup>4),5)</sup>。このため、表面材が剥離性の塗膜面などの場合には、スミア法では採取しえない汚染物も表面材に付着させたまま採取できる利点がある。

スミア法は、図3(c)に示したようなスミアサンプラーと呼ばれる装置を用いて測定対象表面に空気を吹き付けることにより、遊離性の汚染物質を表面か

ら遊離させ、これを濾紙に捕集してその放射能濃度を測定する方法である<sup>7),8)</sup>。従って、この方法は空気汚染を人為的に発生させ、それを採取していることになり、遊離性汚染の内、飛散しやすい汚染のみを識別して測定できる利点がある。

テストサーフィス法は、23mm φ のビニール製両面粘着円板の片面にナイロン系不織布を張ったものを、測定対象表面に一定期間貼っておき、これを回収してナイロン系不織布に付着した汚染の放射能濃度を測定する方法である<sup>4),5),9)</sup>。そのため、この方法では当該期間内において発生した全表面汚染を採取することが可能である。

直接測定法は、スミア法と並んで広く普及している表面汚染測定法で、測定対象表面を直接サーベイメータで走査しながら測定する方法である。この方法は、通常、管理区域内から区域外への物質搬出時によく利用されている。

##### (2) 汚染採取効率の変動

床、作業台などの表面汚染の測定には、現在、ス

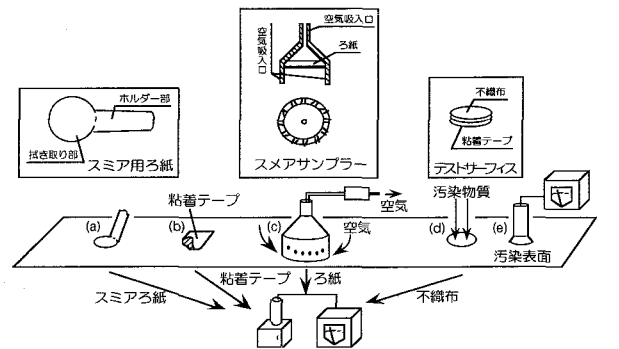


図3. 汚染検査法の概念図<sup>4)~9)</sup>

表2 各種表面汚染測定法の特徴<sup>4)~9)</sup>

項目 \ 測定法	スミア法	ガムドテープ法	スミア法	テストサーフィス法	直接測定法	
汚染測定方法	間接的				直接的	
測定対象となる表面汚染	各種汚染採取法により剥離可能な表面汚染			全表面汚染		
使用上の課題	表面汚染密度に換算する際に汚染採取効率が必要			動力源が必要 サンプラ形状により適用上制限あり	設置点における定点観測が必要	空間線量率の高い所では使用不可

表3 表面の材質による汚染採取効率の変動例<sup>9)</sup>

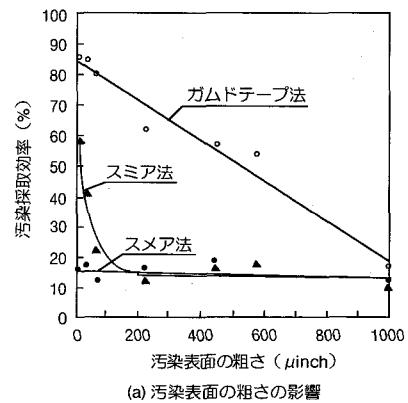
表面の材質	汚染採取効率 (%)		
	スミア法	ガムドテープ法	スメア法
ポリエチレン	56.6	70.3	10.9
ガラス	64.6	75.0	27.2
フレキシガラス	71.3	78.0	15.8
ポリマーMで処理した建築用繊維板	44.3	53.8	10.2
磨いた建築用繊維板	23.5	56.9	9.0
未処理の建築用繊維板	23.5	73.4	6.6
耐熱プラスチック板	70.6	73.4	26.5
塗装したアルミニウム	50.3	70.0	24.8
未処理の床用アスファルトタイル	48.5	58.6	14.6
ワックスを塗装した床用アスファルトタイル	74.5	74.5	30.3
未処理のコンクリート	39.5	55.5	22.0
ワックスを塗装したコンクリート	59.5	62.2	24.0
グリースを塗装したコンクリート	37.5	43.5	1.3
ステンレス	50.5	67.7	10.5
平均値	51.1	65.2	16.7
相対標準偏差	31	15	52

ミア法が一般的な方法として用いられている。スミア法、ガムドテープ法、スメア法については、表面汚染密度に換算するためには汚染の採取効率を知る必要があり、この採取効率の変動特性を把握しておく事は重要である。以下に、スミア法を中心に汚染採取効率の変動について調べた結果を述べる。

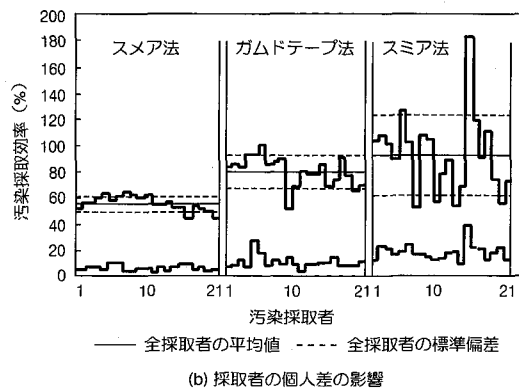
表3に、スミア法、ガムドテープ法、スメア法における汚染表面の材質による汚染採取効率の変動例を示す<sup>9)</sup>。いずれの測定法についても、材質表面をワックスなどで処理し表面の小さい凸凹をなくした方が採取効率は高くなる傾向が認められる。また、測定結果のばらつきを考慮すれば、ガムドテープ法が汚染表面の材質の影響を受けることが少ない測定法であると言える。

図4(a)にスミア法、ガムドテープ法、スメア法における汚染表面の粗さによる汚染採取効率の変動例を示す<sup>9)</sup>。スミア法、ガムドテープ法では汚染表面が粗くなると採取効率は大きく減少するが、スメア法ではほとんど変動しない。また、図4(b)にスミア法、ガムドテープ法、スメア法における採取者の個人差による汚染採取効率の変動例を示す<sup>9)</sup>。採取者の個人差はスミア法が最も顕著で、スメア法が最も小さい。しかし、スメア法の汚染採取効率はスミア法、ガムドテープ法に比べて低い。

さらに、表4にスミア法における汚染核種による汚染採取効率の変動例を示す<sup>10),11)</sup>。汚染表面の材質が平滑、非浸透性の場合、実験方法に起因する差異



(a) 汚染表面の粗さの影響



(b) 採取者の個人差の影響

図4. 表面汚染の粗さおよび採取者個人差の汚染採取効率への影響例<sup>9)</sup>

表4 スミア法における汚染核種による汚染採取効率の変動例<sup>10),11)</sup>

汚染核種	汚染採取効率 (%)				
	平滑・非浸透性材質		浸透性材質		
	ビニールシート	ステンレス	ワックス塗装した合成樹脂	コンクリート	木
<sup>90</sup> Sr- <sup>90</sup> Y	50.9	—	16.5	—	—
<sup>60</sup> Co	66.5	—	1.7	—	—
<sup>137</sup> Cs	62.0	—	8.7	—	—
<sup>32</sup> P	54.6	—	11.3	—	—
total U	45.8	—	37.3	—	—
<sup>241</sup> Am	88	82	—	0.3	3.3
total U	64	67	—	1.6	1.9

は多少あるが、汚染核種に起因する差異はほとんどない。しかし、材質が変わり浸透現象の無視できないような場合については未だ十分な検討はなされていない。

図5(a)にスミア法における拭き取り回数による汚染採取効率の変動例を示す<sup>10)</sup>。この例は剝離可能な汚染物について検討した結果であるが、1回の拭き取りでは汚染の全てを採取できず、約30%の拭き残しが認められる。この結果は、図4(b)の採取者の個人差による変動にも反映していると推定できる。図5(b)にスミア法における拭き取り時の圧力による汚染採取効率の変動例を示す<sup>10)</sup>。通常の拭き取り時に加えられる圧力、即ち、0.5~1.0kg/5cm<sup>2</sup>の範囲内では、採取効率に変動はほとんど認められない。

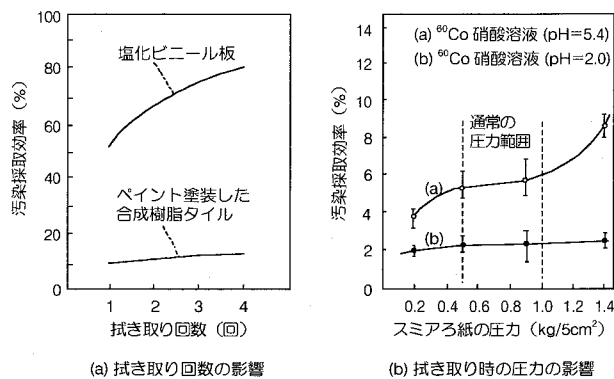


図5. 拭き取り回数および拭き取り圧力の汚染採取効率への影響例<sup>10)</sup>

表5に、以上の検討結果として、スミア法、ガムドテープ法、スミア法における汚染採取効率の変化特性をまとめて示した<sup>8)</sup>。

## 2) 表面汚染測定法の改良の試み

スミア法は、前述の通り、作業環境の表面汚染測定法として最も広く普及しているが、汚染採取を人が行うために個人差による測定結果の相違が無視できず、また多大な労力を必要としている<sup>12)</sup>。このような人的誤差の要因を排除するとともに省力化をするためにスミア法における試料採取の自動化が進められている<sup>12)</sup>。この方法の適用により、試料採取が簡略化され、1試料採取に必要なとされる時間の短縮が図れるとされている。

表面汚染の採取法の一つとして、最近、塗膜剝離除染法の利用が考えられている。この方法は、図6にその概要を示すように、液体状の薄膜をコーティングし、乾燥させた後、汚染物とともに剝離する方法である<sup>13),14)</sup>。この除染法を表面汚染測定のための試料採取法として適用するためには、除染剤の乾燥時間の短縮、除染剤による $\alpha$ 線あるいは $\beta$ 線の自己吸収補正などの問題を解決する必要がある。

また、既述のテストサーフィス法の粘着テープの改良に役立つものとして、クリーンルーム除塵用粘着フロアマットとして開発された「ソールマット(住友スリーエム株)」の利用が考えられる。このマットは、汚染を採取した粘着フィルムを剥がすと、次の新しいフィルムが出てくるため、多数の試料の採取に対して効果的である。

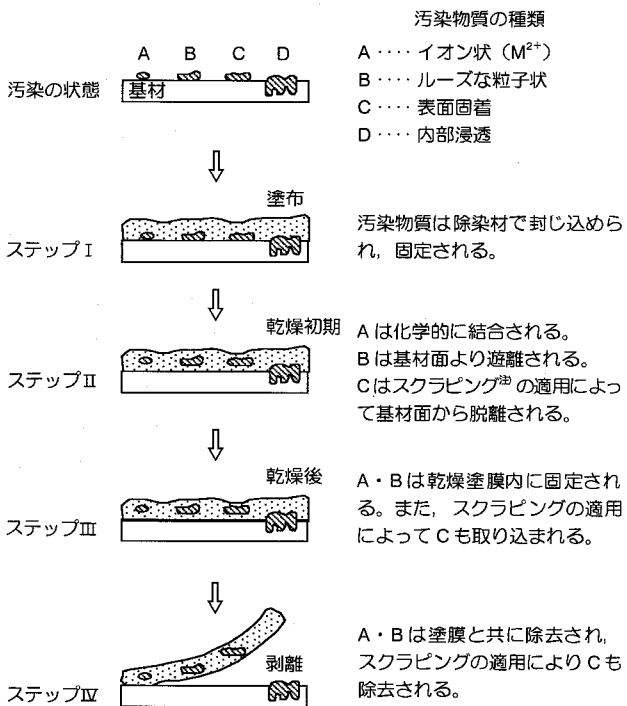
このように、表面汚染の測定および試料採取方法の改良を図る研究が進められているが現時点において表面汚染の程度を的確に評価できる確立した方法はなく、今後の検討が必要である。

## 4. 実際の作業場所における表面汚染と空気汚染の関係

RIを使用する作業場所としては、医療施設、研究

表5 各種表面汚染測定法における汚染採取効率の変化特性<sup>8)</sup>

測定法	スミア法	ガムドテープ法	スメア法
変動要因			
汚染表面の塗装状態	ワックス塗装：高効率		
	未処理：低効率		
	グリース塗装：低効率		グリース塗装：極低効率
汚染表面の粗さ	汚染表面滑らか：高効率 粗い：低効率		依存しない
汚染採取の個人差	変動大	変動小	変動極小
汚染核種	汚染表面が平滑非浸透性の場合、依存しない		
拭き取り回数	重複：高効率 1回：低効率		
拭き取り時の圧力	通常の濾紙に加えられる圧力の範囲内では依存しない		



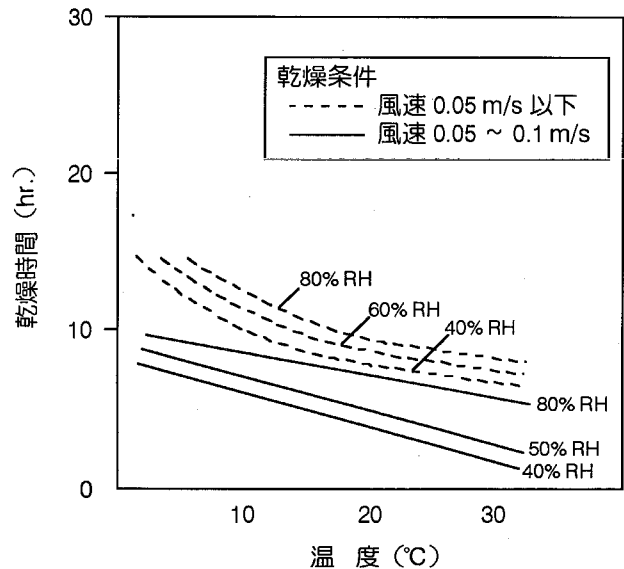
注) スクラビング：ブラシ等により機械的な力を加えること。

(a) 除染機構

図6. 塗膜剥離除去法<sup>13),14)</sup>

注) 膜厚0.5mmにおける乾燥特性。RHは相対湿度を示す。

施設、原子力施設などがある。しかし、このような実際の作業場所における表面汚染と空気汚染の関係について、本格的に調査研究を実施した報告例は皆



(b) 乾燥特性

無に近く、後述するように、今後の検討課題となっている。ここでは、数少ない報告例として、原子力施設などにおいて実施された基礎的な検討例の概要について述べる。

1) 作業内容と飛散率

作業内容と飛散率について、原子力発電所の定期検査時における調査結果の報告例を表6(a)に示す<sup>15)</sup>。作業内容を作業1(摺合せ・削り)、作業2(研磨・手入)、作業3(除染)、および作業4(吊上げ・取



出し)の4種類に分類し、それぞれの飛散率を調査した結果、作業内容により飛散率は大きく異なり、 $10^{-2} \sim 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ の幅で変化していることがわかった。

同様に、作業内容を作業1(機器の分解・移動)、作業2(機器の手入・除染)、作業3(機器の組立・復旧)の3種類に分類してそれぞれの機器表面汚染密度と飛散率との関係を調査した結果の報告例を表6(b)に示す<sup>15)</sup>。作業1と作業2はほぼ同様の相関性を示したが、作業3はこれらに比べ相関性が少し悪く、飛散率も低かった。これは、作業3に比べ作業1と作業2は機器の表面を擦ったり、磨いたりする作業であり、剥離し易い力が表面に加わり付着している放射性物質がより多く空气中に飛散したことによると推定されている。

## 2) 換気と空気汚染

作業場所における空气中放射能濃度を求める際に

表6 作業内容と飛散率の関係例<sup>15)</sup>

(a) ケース1

作業内容		飛散率 ( $\text{m}^{-1}$ )
1	摺合せ・削り	$10^{-2}$
2	研磨・手入	$10^{-3}$
3	除染	$10^{-4}$
4	吊上げ・取出し	$10^{-5}$

(b) ケース2

作業内容	飛散率 ( $\text{m}^{-1}$ )	飛散率と表面汚染密度の相関係数
1 機器の分解・移動	$10^{-6} \sim 10^{-1}$	-0.96
2 機器の手入・除染	$10^{-6} \sim 10^{-1}$	-0.96
3 機器の組立・復旧	$10^{-5} \sim 10^{-3}$	-0.92

は、RIの発生量、換気量など多くの要因を考慮する必要がある。しかし、これらの要因は常に変動し、一定でないため、RIは、①発生量が一定であり、一様に拡散する、②粒度、密度が一定である、③吸着がないとの前提に、空气中放射能濃度が算出できる次の簡易計算式が利用されている<sup>6)</sup>。

$$C = [G + C_i \cdot Q_i (1 - \eta)] / (Q_i + Q_r \cdot \eta)$$

ここで、C：空气中放射能濃度、G：発生量、

$C_i$ ：外気濃度、 $Q_i$ ：外気導入量、

$Q_r$ ：換気量、 $\eta$ ：除塵効率

ここで、換気回数を4段階に分類し、それぞれの表面汚染密度と飛散率の関係を調査した結果例を表7に示す<sup>15)</sup>。これより、換気回数が増えるに従い飛散率が小さくなり、従って空气中放射能濃度が減少する傾向にあることがわかった。

表7 換気と空気汚染の関係例<sup>15)</sup>

換気回数 (回/時)	飛散率 ( $\text{m}^{-1}$ )	換気回数と飛散率の相関係数	
1	0.5~5	$10^{-3} \sim 10^{-1}$	-0.94
2	6~13	$10^{-4} \sim 10^{-1}$	-0.98
3	16~17	$10^{-5} \sim 10^{-2}$	-0.94
4	24	$10^{-6} \sim 10^{-3}$	-0.77

## 3) 表面材料と空気汚染

2章2節で述べた通り、空气中放射能濃度と表面汚染密度の関係については、前者を後者で除して得られる再浮遊係数を用いて議論できる。

静的な環境において成立する再浮遊係数の値については、Chamberlainらの報告<sup>16)</sup>を基にDunsterが採用した $2 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ <sup>17)</sup>が用いられてきた。しかし、

表8 汚染物質・表面材料と再浮遊係数の関係例<sup>18)-22)</sup>

汚染物質	表面材料	再浮遊係数 ( $\text{m}^{-1}$ )
酸化プルトニウム	紙・塩化ビニール・ リノリウムの平均	$2 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-5}$
硝酸プルトニウム		$2 \times 10^{-8} \sim 5 \times 10^{-6}$
プルトニウム施設の $\alpha$ 線放出核種	塗装した コンクリート	$1.6 \times 10^{-4} \sim 1.0 \times 10^{-2}$
ウラン施設の $\alpha$ 線放出核種	コンクリート	$1.9 \times 10^{-3} \sim 4.6 \times 10^{-3}$
ZnS	アスファルト タイル	$9.4 \times 10^{-6} \sim 1.9 \times 10^{-3}$
CuO		$7.1 \times 10^{-3}$
$\alpha$ 線放出核種	花崗岩質 コンクリート	$1.2 \times 10^{-3}$

この値は作業員が動き回り、換気が行われる特殊な条件の下では適用できないため、その後、表8に示すように、種々の条件下で再浮遊係数を求める試みが多くなされた<sup>18)~22)</sup>。

再浮遊係数は $2.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{ m}^{-1}$ で、実験条件によって大きく異っている。一般に再浮遊係数は、空気の流れと汚染表面上での人間および物の活動の度合いが増す場合や表面材料が汚染物質を比較的除去し易い材質の場合、著しく増大する傾向にある。

#### 4) 沈着速度と粒径別放射能分布

2章2節で述べた沈着速度について、実測値<sup>23)~27)</sup>、および重力沈降、拡散、静電気力による沈着速度の理論値<sup>3),28)</sup>を図7に示す。粒径が $1 \mu\text{m}$ 以上になると重力沈降による沈着の割合が大きくなり、 $0.1 \mu\text{m}$ 以下では拡散、静電気力による沈着の割合が大きくなることわかる。粒径が $10 \mu\text{m}$ を越えると沈着速度は約 $10 \text{ mm/sec}$ 以上になるため、粒径が $10 \mu\text{m}$ 以上の汚染粒子が、空气中に比較的長い時間に亘って多量に存在する作業環境は少ないものと推定される。

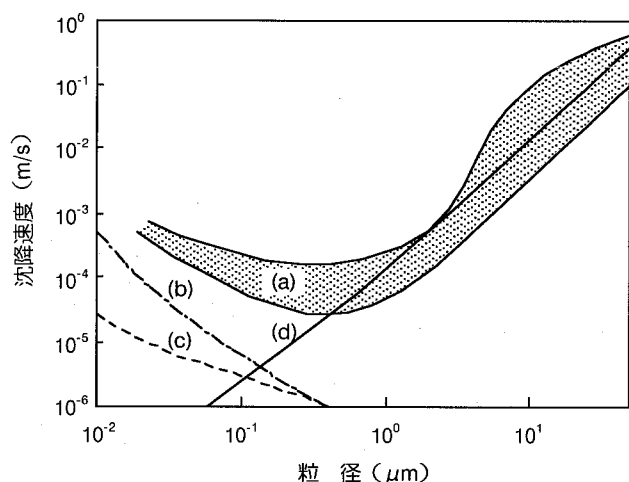


図7. 沈着速度例<sup>3),23)~28)</sup>

(a)屋外環境における沈着速度の実測値の範囲、(b)静電気力による沈着速度の理論曲線(通常の大気中の磁場の強さ $180 \text{ V/m}$ より算出)、(c)拡散による沈着速度の理論曲線(初期状態から100秒後の沈着率より算出)、(d)重力沈降による沈着速度の理論計算

実作業環境において測定された空气中粒子の粒径別放射能分布例を図8に示す<sup>29)</sup>。この例では、放射能濃度のピークが粒径 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 付近と $0.1 \sim 0.5 \mu\text{m}$ 付近の二つの領域に存在し、粒径が $10 \mu\text{m}$ 以上の汚染粒子は少ないとする、上述の推定を裏付ける結果となっている。

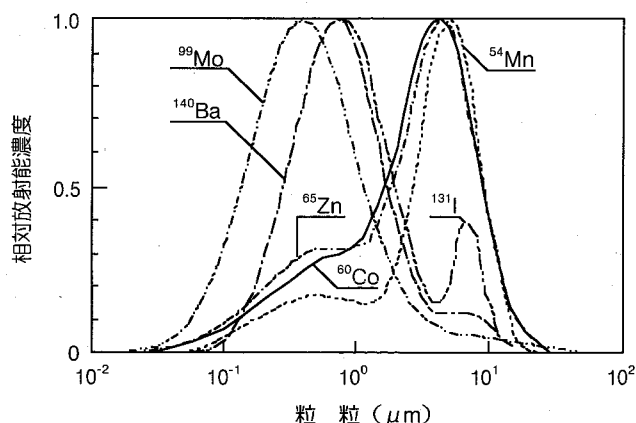


図8. 粒径と放射能濃度の相対値例<sup>29)</sup>

このように、実際の作業場所における表面汚染と空気汚染の関係は、作業環境の諸因子・諸条件に依存した複雑な関係を示すことがわかった。

#### 5. 作業環境測定の合理化に向けての検討課題

以上の知見を基に、実際の作業環境における床、作業台などの表面汚染が空気汚染に及ぼす影響などを解明し、作業環境測定の一層の合理化に役立てるためには、今後、次に挙げた研究を実施する必要があると考える。

- 表面汚染と空気汚染の生じる作業項目、作業内容を現状調査し、取扱うRIの種類、濃度、化学形なども考慮し、作業環境測定の軽減化に向けて最適な測定の箇所と頻度などを選定する。
- 現場毎の表面汚染と空気汚染の関係を調査し、表面汚染測定を実施することで、どの程度、空気汚染が把握できるかを検討する。これにより、作業環境測定の簡素化に向けて空気汚染測定法の代替法として表面汚染測定法がどの程度有効なのか検証する。
- 各種表面汚染測定法の特徴を活かした測定法の改良を試み、採取効率、精度、感度の向上を図ることで、より信頼度の高い測定法の開発と簡便化を図る。
- 各現場に最適な表面汚染測定法の選択を行い、不必要な測定法の省略化を図る。

このように、表面汚染と空気汚染の関係を明確にすることが作業環境測定のより一層の効率化に繋がる要因と言える。

#### まとめと提案

- 床、作業台などの表面上の粒径が $10 \mu\text{m}$ 未満の汚染粒子は、気流あるいは振動などによる分離力に

- よって表面から飛散することは少ない。
- b) 粒径が $10\mu\text{m}$ 以上の粒子の沈着速度が $10\text{mm/sec}$ よりも速いことを考慮すれば、作業開始後、急激に増加する空気中のRI濃度は、比較的短時間で減少する事が推定される。
- c) 実験で得られた再浮遊係数は $2.0 \times 10^{-8} \sim 1.0 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ であり、環境条件によって広い範囲でばらついている。従って、人の移動が激しい作業環境においては、空気汚染の発生量を床、作業台などの汚染量から一義的に決定することは困難と言える。
- d) 表面汚染測定法には広く普及しているスミア法、直接測定法の外に、ガムドテープ法、スミア法、テストサーフィス法がある。ガムドテープ法、テストサーフィス法は、スミア法と比較して測定者の違いによる誤差が少なく、表面汚染密度測定の高信頼化には有効な方法と評価できる。また、スミア法は、表面汚染の内、空気中に飛散しやすいものを識別して測定する方法であるため、作業開始前に空気汚染発生量を予測するための一手段として利用が期待される。ただし、汚染採取効率が低いという難点もある。

以上の知見を踏まえ、実際の作業環境における放射能測定の合理化に資するため、今後の検討課題として、以下を提案した。

- ・表面汚染と空気汚染の生じる作業項目、作業内容の現状調査
- ・現場毎の表面汚染と空気汚染の関係調査
- ・各種表面汚染測定法の特性を活かした測定法の改良の試み
- ・各現場に最適な表面汚染測定法の選択

## 謝 辞

本総説をまとめるにあたり、一部について御助言を戴きました財団法人電力中央研究所の関係各位に心よりお礼申し上げます。

## 文 献

- 1) 大学放射線施設協議会編：'94大学等における放射線安全管理の実際、グバプロ：東京、1994。
- 2) ㈱日本空気清浄協会編：空気清浄ハンドブック、オーム社：東京、1981。
- 3) Hinds, W. C., 早川一也監訳：エアロゾルテクノロジー、井上書院：東京、1985。
- 4) ㈱日本アイソトープ協会編：作業環境の放射線モニタリング一計画立案から評価まで一、丸善：東京、1985。
- 5) 日本保健物理学会編：現状における放射線管理測定技術、日本保健物理学会：東京、1975。
- 6) 通商産業省編：日本工業規格Z4504、ふきとり式放射性表面汚染測定方法、通商産業省：東京、1975。
- 7) IAEA編：Technical Reports Series No. 120, Monitoring of radioactive contamination on surface. IAEA: Vienna, 1970。
- 8) Royster, G. W. Jr. and Fish, B. R.: Techniques for assessing removable surface contamination; Surface Contamination I. Pergamon Press: New York, 1964。
- 9) Anzai, I. and Kikuchi, T.: A new monitoring technique of surface contamination; The test surface method. Health Phys., 34: 271-273, 1978。
- 10) 吉田芳和, 佐々木幸男, 村田幹夫, 井沢庄治, 池沢芳夫：スミア法による表面汚染密度の測定に関する実験、日本原子力学会誌6:77-81, 1964。
- 11) 小西恵美子, 吉沢康雄：アルファ放出核種の表面汚染測定—大学における経験から、保健物理21:161-166, 1986。
- 12) 野沢克郎, 橋本弘士, 篠原洋太郎, 岩本清高：原子力施設における床面自動スミヤサンプラーの開発、火力原子力発電31:845-850, 1980。
- 13) 生田目康二, 泉溪鹿：塗膜剥離除染法、原子力工業31:51-54, 1985。
- 14) 藤倉電線(株)・藤倉化成(株)・(株)日本環境調査研究所編：塗膜剥離除染法、同社技術資料No584004, 1989。
- 15) 伊藤幸彦：放射線作業下における放射性物質の汚染拡大プロセスの拡大、日本原子力学会昭和63年度年会予稿集, 1988。
- 16) Chamberlain, A. G. and Stanbury, G. R.: The hazards from inhaled fission products in rescue operations after an atomic bomb explosion. AERE HP/R737, 1961。
- 17) Dunster, H. J.: Surface contamination measurements as an index of control of radioactive materials. Health Phys. 8: 353-356, 1962。
- 18) Jones, I. S. and Pond, S. F.: Some experiments to determine the resuspension factor of plutonium from various surfaces; Surface Contamination II. Pergamon Press: New York, 1964。
- 19) Glauberman, H., Bootman, W. R. and Breslin, A. J.: Studies of the significance of surface contamination; Surface Contamination III. Pergamon Press: New York, 1964。
- 20) Fish, B. R., Walker, R. L., Royster, G. W. Jr. and Thompson, J. L.: Redispersion of settled particulates; Surface Contamination IV. Pergamon Press: New York, 1964。
- 21) Brunskill, R. T.: The relationship between surface and airborne contamination; Surface Contamination V, Pergamon Press: New York, 1964。
- 22) 岡本利夫：ホットラボにおける放射性空気汚染の管理経験1 ケーブ内表面汚染の再浮遊係数、日本保健物理学会第10回大会講演要旨, 1975。
- 23) Chamberlain, A. G.: Transport of gases to and from grass and grasslike surfaces. Proc. Rad. Soc., London: England, Ser. A 290: 236-265, 1966。
- 24) Clough, W. S.: Transport of particles to surfaces. J. Aerosol Sci. 4: 227-234, 1973。
- 25) Moller, U. and Schumann, G.: Mechanisms of transport from the atmosphere to the earth's surface. J. Geophys. Res. 75: 3013-3019, 1970。
- 26) Sehmel, G. A. and Sutter, F. L.: Particle deposition rates on a water surface as a function of particle

- diameter and air velocity. *J. de Rech Atmos.* 3 : 911-918, 1974.
- 27) Slinn, W. G. N. : Parameterizations for resuspension and for wet and dry deposition of particles and gases for use in radiation dose calculation. *Nucl. Safety* 19 : No. 2, 1978.
- 28) 高橋幹二：基礎エアロゾル工学。養賢堂：東京，1982.
- 29) Becker, K. H. and Reineking, A. : Measurements of activity size distribution of radioactive aerosoles from a nuclear power plant. *Proc. 6th IRPA, Berlin : Germany*, 936, 1984.

(Review article)

# Rationalization of measures to protect the working environment in radiation controlled areas from the perspective of the relationship between surface and airborne contamination

Kiyonori YAMAOKA, Koichi SIBUYA,  
Tomohiro NAGAMATSU<sup>1)</sup> and Shoji KAWASAKI

## Abstract

In radiation controlled areas, measures have been taken to assess the radiation dose to workers, but these efforts are limited due to high labor and cost factors in extremely low dose radiation controlled areas. And so they have been expected to be rationalized. Therefore, we first reviewed the present conditions of these working environment measurements and elucidated the relationship between surface and airborne contamination in radiation controlled areas. Second, we reviewed the qualities of several surface contamination measurements such as smear test and possibilities for their improvement. As a result, we developed some future programs for rationalization of the working environment measurements, for example, an algorithm for selecting the proper surface contamination measurement for each measurement area based on the conditions specific to that area.

---

**Key words :** radiation controlled area, working environment measurement, surface contamination measurement, smear test, collecting efficiency

---

Faculty of Health Sciences, Okayama University Medical School

1) Radioisotope Center, Okayama University