

平成 23 年 10 月 31 日  
(社)産業安全技術協会 松村芳美

## 空气中浮遊粉じんの推定吸入摂取量と有効なマスクの使用について

### 1) 労働者の呼吸量の推定

平均的な作業強度で作業をしている成人の呼吸量を 30L/min とする。

1 時間当たりの呼吸量は  $1.8\text{m}^3/\text{h}$  となる。

作業の労働強度が高い時は呼吸量は大きくなる。

### 2) 空气中的浮遊粉じん濃度の推定

平成元年に(社)日本作業環境測定協会が実施した「作業環境測定精度管理事業」報告書によれば、鉱物性粉じんの発じんのある作業場 2579 事業場で測定した空气中粉じん濃度の幾何平均濃度のうち、最も出現率の高い濃度範囲は  $0.2\sim 0.5\text{mg}/\text{m}^3$  であり、最高濃度の区分は  $5.0\sim 10\text{mg}/\text{m}^3$  であった。これらの測定値は、粉じん作業のある屋内作業場での濃度であるため、何らかの換気設備がある条件であり、屋外で粉じん濃度を制御する機能がない場所での測定値とは異なる。一方、同じ作業場で最も粉じん濃度が高くなる発じん位置でスポット的に捕集した粉じん濃度 (B 測定値) についてみると、最も出現率の高い濃度範囲は  $0.2\sim 0.5\text{mg}/\text{m}^3$  であり、最高濃度の区分は  $50\sim 100\text{mg}/\text{m}^3$  であった。その測定値の分布を図 1 と図 2 に引用して示す。B 測定値は作業場の換気システムによる影響の少ない濃度であり、屋外で発生源に近い位置の粉じん濃度の参考値になると思われる。

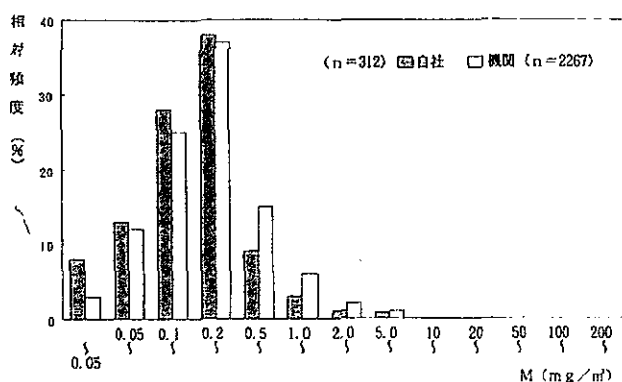
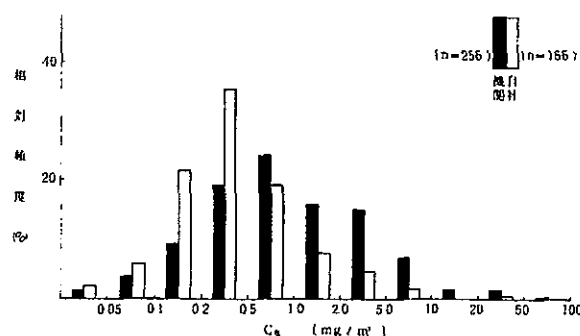


図 2 422 か所の鉱物性粉じん作業場の作業環境測定値 (B 測定値)

図 1 2578 か所の鉱物性粉じん作業場の作業環境測定値 (幾何平均値)



石材業の石材加工場での作業について、木村菊二博士が T-R サンプラーを作業者の呼吸域に装着して捕集した個人ばく露濃度としての粉じん量とマスクに付着した粉じん量の実測値を以下に示す。

T-R サンプラーは、浮遊粉じんを捕集するために用いる捕集装置の一種で、総粉じん量 (Total dust) を粗大粒子と吸入性粉じん (Respirable dust) の2つの区分に分離して同時に捕集するサンプラーである。総粉じん中の吸入性粉じんの境界は、粒子径  $4.0\mu\text{m}$  の粒子を 50% カットし、その前後で粒子径の変化に対する捕集効率の変化が傾斜する特製をもったサンプラーである。

**表 1 石材の乾式研磨作業時の個人ばく露濃度の測定結果**

| 作業者<br>No. | 総 (T) 粉じん<br>濃度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | 吸入性 (R) 粉じん<br>濃度 ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) | (T/R) 比 |
|------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|---------|
| 1          | 12.0                                       | 1.7                                          | 7.2     |
| 2          | 2.9                                        | 1.3                                          | 2.2     |
| 3          | 34.6                                       | 10.6                                         | 3.3     |
| 4          | 1.7                                        | 0.2                                          | 7.6     |
| 5          | 32.3                                       | 9.1                                          | 3.5     |
| 6          | 30.3                                       | 8.7                                          | 5.3     |
| 7          | 28.0                                       | 5.2                                          | 5.4     |
| 8          | 3.9                                        | 0.9                                          | 4.4     |
| 9          | 2.1                                        | 1.2                                          | 1.8     |
| 10         | 9.1                                        | 2.7                                          | 3.4     |

同作業場で労働者が着用していた防じんマスクのろ過材でろ過され、ろ過材表面に堆積した粉じん量は最大  $2.4\text{mg}/\text{日}$  であった。

以上の報告値から推測すると、除染対象地域で、放射性物質で汚染された土壌等から発生する空气中浮遊粉じん（吸入性粒子）の濃度は、可能性のある最高濃度として  $100\text{mg}/\text{m}^3$ 、一般的に出現する濃度範囲は  $30\text{mg}/\text{m}^3$  以下、時間荷重平均値として出現する濃度範囲は  $10\text{mg}/\text{m}^3$  以下と想定することは、妥当な推定であると考えられる。

### 3) 除染作業者が1時間に吸入する粉じん量の推定

上記の1) 及び2) で設定した条件に基づいて計算すると、除染作業者が1時間に吸入する可能性のある粉じん濃度の上限値として表2のとおり計算される。

**表2 除染作業者が吸入する可能性のある粉じん量の上限值**

| 条件           | 計算式                                                               | 時間当たり吸入量 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------|----------|
| 時間荷重平均濃度では   | $1.8\text{m}^3/\text{h}$ (吸引空気量) $\times 10\text{mg}/\text{m}^3$  | 18mg/h   |
| 高濃度粉じん作業では   | $1.8\text{m}^3/\text{h}$ (吸引空気量) $\times 30\text{mg}/\text{m}^3$  | 54mg/h   |
| 可能性のある最高濃度では | $1.8\text{m}^3/\text{h}$ (吸引空気量) $\times 100\text{mg}/\text{m}^3$ | 180mg/h  |

粉じん濃度は時間的、空間的に変動するため、実際に最高濃度の粉じんの中で連続した6時間程度の作業をすることは考えにくい。従って1g/日の粉じんを吸入することはほぼあり得ないと思われる。

#### 4) 放射能を含む粉じんの吸入によって摂取される放射線量の推定

土壌などの除染対象物質が含む放射性核種の最高含有量は、現時点では不明であるため、100万Bq/kg、200万Bq/kg、300万Bq/kgを想定して、次式で計算した。

1時間当たり吸入する放射線量(Bq/h)

$$= (1 \text{ 時間当たり吸入する粉じん量 (mg/h)} \times (\text{粉じんの放射線量 (Bq/kg)}) \times 10^{-6}$$

**表3 除染作業者が吸入する可能性のある1時間当たりの放射線量**

| 粉じん<br>吸入量 | 除染対象物の放射線量 (Bq/kg) |           |           |           |           |           |
|------------|--------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|            | 100,000            | 200,000   | 500,000   | 1,000,000 | 2,000,000 | 5,000,000 |
| 18mg/h     | 1.8 Bq/h           | 3.6 Bq/h  | 9.0 Bq/h  | 18 Bq/h   | 36 Bq/h   | 90 Bq/h   |
| 54mg/h     | 5.4 Bq/h           | 10.8 Bq/h | 27.0 Bq/h | 54 Bq/h   | 108 Bq/h  | 270 Bq/h  |
| 180mg/h    | 18 Bq/h            | 36.0 Bq/h | 90.0 Bq/h | 180 Bq/h  | 360 Bq/h  | 900 Bq/h  |

この吸入による放射性物質の摂取量は農水産物1kgに含有される放射線量の許容レベル(500Bq/kg)と同程度であり、体内に摂取される可能性のある放射線量として深刻な量ではないが、より低く抑制することが望ましい量であると思われる。

表3の放射線量を実効線量に換算すると以下のような数値となる。

対象となる放射性核種はCs-134とCs-137が50%づつ存在するとし、それぞれの核種が吸入により摂取された場合の実効線量計数を以下のように設定する。

Cs-134の実効線量計数:  $9.6 \times 10^{-6}$  mSv/Bq

Cs-137の実効線量計数:  $6.7 \times 10^{-6}$  mSv/Bq

混合Cs(Cs-134(50%)+Cs-137(50%))の実効線量計数:  $8.15 \times 10^{-6}$  mSv/Bq

1時間の除染作業中对象物粉じんを吸入することによる内部被ばく線量

$$= 8.15 \times 10^{-6} \text{ mSv} \times (1 \text{ 時間の吸入粉じん中の放射線量})$$

**表 4 除染作業者が吸入する可能性のある 1 時間当たりの実効線量 ( $10^{-6}$ mSv/h)**

| 粉じん<br>吸入量 | 除染対象物の放射線量 (Bq/kg)         |                            |                            |                            |                            |                             |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
|            | 100, 000                   | 200, 000                   | 500, 000                   | 1, 000, 000                | 2, 000, 000                | 5, 000, 000                 |
| 18mg/h     | 14.7 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 29.3 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 73.4 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 146.7 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 293.4 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 733.5 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  |
| 54mg/h     | 44.0 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 88.0 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 220.1 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 440.1 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 880.2 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 2200.5 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h |
| 180mg/h    | 146.7 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 293.4 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 733.5 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h | 1467 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 2934 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h  | 7335 ×<br>$10^{-6}$ mSv/h   |

実際に除染作業を行う作業者の作業時間と作業日数は不明であるが、標準的な作業時間としている週 40 時間、年間 52 週（年間 2080 時間）の作業をすると仮定した場合、表 4 の 1 時間当たりの実効線量は表 5 のように換算される。

**表 5 除染作業者が吸入する可能性のある 1 年間（週 40 時間、52 週）の実効線量**

| 粉じん<br>吸入量 | 除染対象物の放射線量 (Bq/kg) |                |                |                |                |                 |
|------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
|            | 100, 000           | 200, 000       | 500, 000       | 1, 000, 000    | 2, 000, 000    | 5, 000, 000     |
| 18mg/h     | 0.031<br>mSv/y     | 0.061<br>mSv/y | 0.153<br>mSv/y | 0.305<br>mSv/y | 0.610<br>mSv/y | 1.526<br>mSv/y  |
| 54mg/h     | 0.092<br>mSv/y     | 0.183<br>mSv/y | 0.458<br>mSv/y | 0.915<br>mSv/y | 1.831<br>mSv/y | 4.577<br>mSv/y  |
| 180mg/h    | 0.305<br>mSv/y     | 0.610<br>mSv/y | 1.526<br>mSv/y | 3.051<br>mSv/y | 6.103<br>mSv/y | 15.257<br>mSv/y |

## 5) 呼吸用保護具に期待される役割

除染作業に伴う放射性粉じんの呼吸による吸入摂取量は、表 3 に示す量を最大値とすれば、重大な健康影響を及ぼす程度ではなく、ある程度ばく露を低減することが望ましい程度と推定される。除染作業者は、作業中に吸入ばく露する放射線量の他に、作業環境から発生する放射線による外部被ばく、食品や水などから摂取する生活の中での被ばくの相加的な影響を受けること、生活の中での被ばく量を低減することは容易ではないことを考慮すれば、除染作業から受ける吸入ばく露を防じんマスクによって 1 桁程度、低下させる効果を持つものと位置付けて使用することが考えられる。

## 6) 防じんマスクのろ過材の性能

産業用に使用されている防じんマスクは、厚生労働省が公布する「防じんマスクの規格」（昭和 63 年 3 月 30 日 労働省告示第 19 号、最終改正 平成 15 年 12 月 19

日)に基づいて型式検定が実施されている。この規格による防じんマスクのろ過材(フィルタ)の性能は以下のように区分されている。

表6 防じんマスクのろ過材の性能区分

| 固体微粒子用                                                                                                                                                                                                     |         |             | 固体及び液体微粒子用                                                                                                                                                                                                             |         |             |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-------------|
| ろ過材の粒子捕集効率試験は、以下の条件の塩化ナトリウム粒子を含む試験気流をろ過材に通過させ、ろ過材の前後の粒子濃度により測定される。<br>NaCl 粒子の条件：粒度分布の数量中位径が $0.06 \sim 0.1 \mu\text{m}$ で、幾何標準偏差が 1.8 以下であり、空气中濃度が $50\text{mg}/\text{m}^3$ 以下で、その変動が $\pm 15\%$ 以下であること。 |         |             | ろ過材の粒子捕集効率試験は、以下の条件のフタル酸ジオクチル (DOP) の微粒子を含む試験気流をろ過材に通過させ、ろ過材の前後の粒子濃度により測定される。<br>DOP 粒子の条件：粒度分布の数量中位径が $0.15 \sim 0.25 \mu\text{m}$ で、幾何標準偏差が 1.6 以下であり、空气中濃度が $100\text{mg}/\text{m}^3$ 以下で、その変動が $\pm 15\%$ 以下であること。 |         |             |
| 区分の記号                                                                                                                                                                                                      | 捕集効率    | 通気抵抗        | 区分の記号                                                                                                                                                                                                                  | 捕集効率    | 通気抵抗        |
| DS1/RS1                                                                                                                                                                                                    | 80%以上   | 60Pa/70Pa   | DL1/RL1                                                                                                                                                                                                                | 80%以上   | 60Pa/70Pa   |
| DS2/RS2                                                                                                                                                                                                    | 95%以上   | 70Pa/80Pa   | DL2/RL2                                                                                                                                                                                                                | 95%以上   | 70Pa/80Pa   |
| DS3/RS3                                                                                                                                                                                                    | 99.9%以上 | 150Pa/160Pa | DL3/RL3                                                                                                                                                                                                                | 99.9%以上 | 150Pa/160Pa |

表6の区分の記号のうち、Dは使い捨て式を、Rは取替え式を示す。Sは塩化ナトリウム微粒子で試験した防じんマスクであること、LはDOPエアロゾルで試験した防じんマスクであることを示す。

用途区分は、Sの記号を有するろ過材は固体粉じんのみに使用し、Lの記号を持つろ過材はオイルミストなど液体エアロゾルと固体粉じんの両方に使用できる。

フィルタが微粒子を捕集するメカニズムとして、フィルタの静電的な吸引力、機械的な衝突による微粒子の捕捉、及び微粒子の拡散によるろ過材への付着の3つの要素が作用するとされている。表6に示す捕集効率試験用の微粒子は、静電気的特性の強いフィルタに対しては塩化ナトリウムを、機械的な衝突が有効なフィルタに対してはDOPを使用することを念頭に設定された試験条件であり、どちらも、最も捕集効率が低くなる粒子径を選択している。従って、防じんマスクの実用の場面で試験粒子より大きい粒径の粉じん、又は小さい粒径の粉じんを捕集する場合でも、規格の試験条件で測定した捕集効率より高い捕集効率が得られると考えて差し支えない。

防じんマスクの有効性として、外気中の微粒子の90%以上をろ過することを目的とする場合は95%以上又は99.9%以上のフィルタを選ぶ必要がある。そのためDS1/RS1及びDL1/RL1は対象外となる。一方、捕集効率が最も高いDS3/RS3及びDL3/RL3は通気抵抗が高く、これらのマスクを装着して長時間の作業をすると呼吸の負担が大きく

なる。一般的な除染作業には 95%の区分のろ過材を用いた防じんマスクが適当と思われるが、汚染の高い地域での除染作業では DS3/RS3 及び DL3/RL3 の使用がより安全である。

### 7) 防じんマスクの形状と漏れ率・防護係数

防じんマスクの有効性を決める要素として、フィルタの捕集効率の他に、面体と着用者の顔の接触部分が、隙間なくフィットしているかが問題となる。フィットしない装着をしたことによるマスクの漏れ率は、マスクの外側の空気中粉じん濃度 ( $C_0$ ) に対するマスクの内側の粉じん濃度 ( $C_i$ ) の比率で示される。

$$\text{漏れ率}(\%) = (C_i/C_0) \times 100$$

漏れ率と同様のフィットの程度を示す量として防護係数 (PF) が使用されることがある。防護係数は次の式で示される量である。

$$\text{防護係数 (PF)} = C_0/C_i$$

防じんマスクには、全面形面体を有するもの、半面形面体を有するもの、使い捨て式半面形のものがある。それらの例を図3～図5に示す。これらは面体の構造の種類であり、使用するフィルタの種類は何れについても表2に示す区分の中の一種類を選んで使用する。



図3 全面形防じんマスクの例



図4 半面形防じんマスクの例



図5 使い捨て式半面形の例

一般的に、全面形面体は顔の周辺部で顔に接するためにフィットが得られやすい。それでも顔の寸法と合わないマスクでは、顎や額の部分に隙間ができ易く、また、毛髪や髭がマスクと顔の間に挟まって漏れの原因となることがある。東電福島第一原発の安定化作業に従事した労働者の中にはメガネを掛けた上から全面形マスクを装着したために、メガネの弦の位置で空気漏れが生じたことが分かっている。

これに対して半面形は鼻根でのフィットがやや不確実である。また、着用者が喋っ

たり、顔を動かすことによってフィットが悪くなることがある。使い捨て式マスクは接顔部の弾力性がないことと、長時間使用によって型崩れを生じてフィットが悪くなることもある。

米国では、マスクを装着して作業している状態での漏れ率、又は防護係数 (Working Protection Factor, WPF) の測定が多く行われており、測定値の報告も数多い。これらの報告値を OSHA が収集し、その結果からマスクの種類毎に防護係数の代表値 (指定防護係数) を決めて安全なマスクの選択と使用の指標としている。図 6 は OSHA が米国内の作業場で労働者が半面形面体のマスクを着用して作業している時のマスク内への漏れ率の実測値を収集し、防護係数の分布としてプロットしたものである。横軸は空気中有害物質の濃度を曝露限界濃度との比で示した Hazard Ratio ( $C_0/PEL$ ) である。

この図から、半面形面体は装着のフィットの程度によって、防護係数 100,000 までの高い呼吸保護を達することもできるが、10 を満たさない防護係数となることも示している。防護係数 (PF) が 10 以下のプロットは全プロットの 2.5% 以下である。OSHA は半面形面体を有するろ過式呼吸用保護具 (防じんマスクと防毒マスク、使い捨て式も含む。) に対して指定防護係数 10 を与えた。OSHA が 29CFR1910.134 の中で指定したろ過式呼吸用保護具の種類毎の指定防護係数は表 7 の通りである。

Figure 1. All Half Mask Respirators

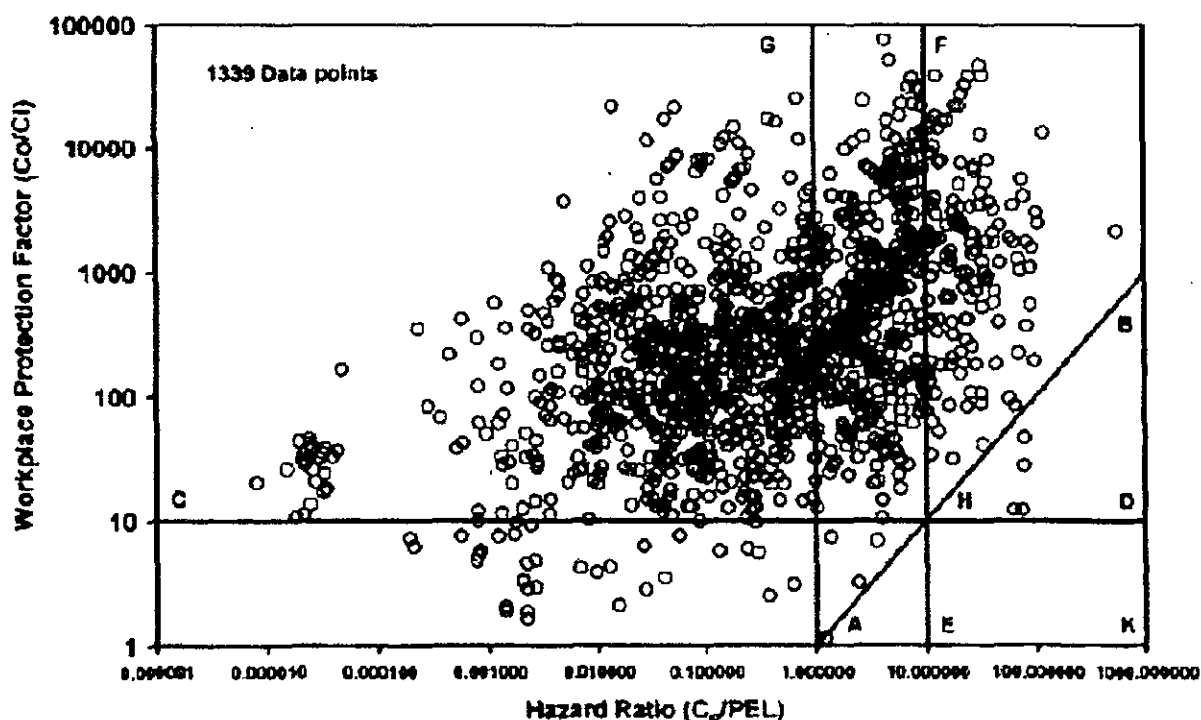


図 6 Workplace Protection Factor と環境の Hazard Ratio の関係プロット

表7 OSHA が指定する種々のろ過式呼吸用保護具の指定防護係数

|                | 1/4 形面体 | 半面形面体 | 全面形面体 | ヘルメット<br>／フード形<br>マスク | ルーズフィ<br>ッティング<br>マスク |
|----------------|---------|-------|-------|-----------------------|-----------------------|
| ろ過式            | 5       | 10    | 50    | .....                 | .....                 |
| 電動ファン付<br>きろ過式 | .....   | 50    | 1,000 | 25/1,000              | 25                    |

注1) この表に示す指定防護係数は、事業主が雇用者にマスク装着に関する法定の訓練と計画的な使用をさせた場合に達成される防護係数である。

注2) 1/4 形面体は、口と鼻を覆うが、顎を覆わない、小型の半面形面体である。

注3) 半面形面体は、口と鼻と顎を覆う面体で、使い捨て式と取替え式を含む。

注4) ヘルメット／フード形の電動ファン付き呼吸用保護具を使用させるときは、マスクのメーカーが示す漏れ率の試験結果により PF1,000 を証明されたときのみ PF1,000 と見なす。

OSHA の規定では、マスクを使用する労働者に対して、事業主がよくフィットするマスクを提供し、OSHA が定める装着法に関する訓練をし、使用計画に従ってマスクを使用させることとしており、これにより表7の防護係数を達することができるとしている。

#### 8) 面体とフィルタの組み合わせによる防じんマスクの防護係数

表7の OSHA の防護係数は、フィルタの粒子透過率を考慮せず、単に面体と顔との隙間からの漏れのみを考慮した漏れに基づく防護係数である。

実際に、面体に捕集効率 95%以上又は 99.9%以上のフィルタを付けた防じんマスクを使用するとき期待される防護係数は以下の式によって計算される。

- 面体と顔の隙間からの漏れ率に対応する防護係数  $PF_1$
- フィルタからの漏れ率に対応する防護係数(捕集効率  $E\%$ とする。)

$$PF_2 = 1 / (1 - E/100)$$

$$\bullet \text{ 全体の防護係数 } PF_{\text{Total}} = \frac{1}{(1/PF_1) + (1/PF_2)}$$

面体として全面形( $PF_1=50$ )及び半面形( $PF_1=10$ )を採用し、これに捕集効率 95% ( $PF_2=20$ )又は 99.9% ( $PF_2=1,000$ )を組み合わせる場合の総合的な  $PF_{\text{Total}}$  を計算すると表8の通りになる。

表8によれば、フィルタとして捕集効率 99.9%以上の RS3 又は RL3 を半面形面体に付けて使用する場合には、全体の防護係数は  $PF_{\text{all}} \div 10$  と見なすことができる。実際に製品としてのフィルタの捕集効率は規格の基準値以上であることと、マスクをよ

くフィットした状態で装着することにより防護係数が指定防護係数より改善されれば、半面形面体で防護係数 10 以上の防護を期待することができる。そのためにはマスクを着けて作業する作業者にマスク装着法の訓練をすることが必要である。

表 8 全面形面体又は半面形面体の防じんマスクの防護係数の計算値

|                       | 捕集効率 95%のフィルタ<br>( $PF_2 = 20$ ) | 捕集効率 99.9%のフィルタ<br>( $PF_2 = 1,000$ ) |
|-----------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| 全面形面体 ( $PF_1 = 50$ ) | $PF_{Total} = 14.3$              | $PF_{Total} = 47.6$                   |
| 半面形面体 ( $PF_1 = 10$ ) | $PF_{Total} = 6.7$               | $PF_{Total} = 9.9$                    |

### 9) フェイスマスクの有効性について

現在、除染作業を行っている作業者の多くが、インフルエンザ用等で使用されるフェイスマスクを着用していると聞いた。フェイスマスクは顔との密着性が悪く、またフィルタの性能についても規格及び性能保証がないものである。インフルエンザなどの感染症患者のクシャミや咳の飛沫を防ぐ効果は期待できるが、空気中の浮遊粉じんに対する防護は殆ど期待できない。平成 21 年に独立行政法人国民生活センターが 15 種類の市販のインフルエンザ用マスク（ウィルスカットを謳っている製品）をそれぞれ 10 名の被験者に装着させて、塩化ナトリウム微粒子を発生させたチャンバー内でマスクの漏れ率を求めた結果を公表している。

この結果から、ブリーツ形及び立体形と呼ばれているフェイスマスクの漏れ率は 50%~100%となるものが殆どであり、空気中の微粒子に対する呼吸保護の役割を期待できないことが分かる。

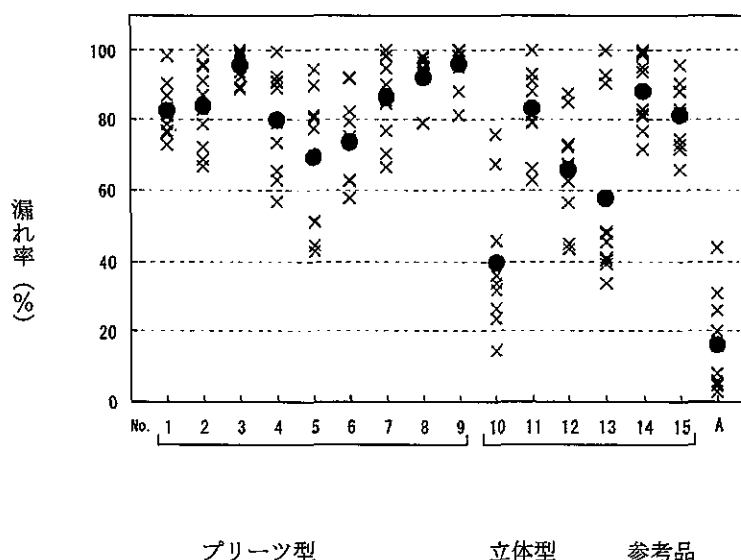


図 7 15 種類のフェイスマスクと 1 種類の N95 マスクの漏れ率試験結果  
(国民生活センター 平成 21 年 11 月 18 日発表)

#### 10) 除染作業における呼吸保護の考え方(松村試案)

除染作業を行う場所は屋外が多く、山野や瓦礫が残る地域であることが多いと思われる。そのような場所での作業に重装備の呼吸用保護具の使用は別の危険を生じることも考えられるため、出来るだけ避けるべきであり、必要な程度を見極めたマスクの種類を選択が必要である。

全面形面体を有するマスクは視野が狭く、頭部の動きも不自由なことを考慮すべきである。また、メガネを必要とする作業者には、フィットのよい装着は期待できない。そのように考えると半面形面体を有する取替え式防じんマスク又は使い捨て式防じんマスクが適当である場合が多いと考える。ろ過材の区分は95%以上の捕集効率を証明されたフィルタが中心となる。汚染の高い場所での作業がある場合には、全面形面体の使用の他に、半面形面体を有する電動ファン付き呼吸用保護具の使用を考えるべきである。

所謂フェイスマスクは有効ではないので、呼吸保護の目的で使用するべきではない。

作業場所の放射能汚染の程度を事前に知ることができれば、その程度によってフィルタの区分を選択することができる。

作業者がマスク着用によって確実に呼吸保護が得られるように、作業を始める前にマスクの装着訓練をすることが必要と思われる。

# 被ばく線量の測定・評価 マニュアル

2000

環境省放射線防護センター

4.3.1  $\gamma$  (X) 線に対する線量評価

## (1) 1 cm線量当量の評価

エネルギーが30keV以上の $\gamma$  (X) 線に対しては、通常、1 cm線量当量率測定用サーベイメータが使用できるので、測定結果をそのまま1 cm線量当量率としてよい。1 cm線量当量は、次式から算定する。

$$H_{1\text{cm}} = P_{1\text{cm}} \cdot K \quad \dots (4.3-1)$$

ここで、 $H_{1\text{cm}}$  : 1 cm線量当量率 ( $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$P_{1\text{cm}}$  : 測定器による1 cm線量当量率の正味指示値 ( $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$K$  :  $^{137}\text{Cs}$ 又は $^{60}\text{Co}$ の基準 $\gamma$ 線源によって校正された校正定数

GM計数管式やエネルギー補償のないNaI (TI) シンチレーション式サーベイメータは、1 cm線量当量率のメータ表示であっても、感度のエネルギー依存性が1 cm線量当量とは大きく異なるものがある。これらのサーベイメータのエネルギー特性は、1 cm線量当量を過大評価する傾向にあるため、上式で評価された1 cm線量当量は安全側の評価値であると言える。なお、校正時に用いた線源（多くの場合、 $^{137}\text{Cs}$ または $^{60}\text{Co}$ ）エネルギー以外の $\gamma$ 線 (X) の測定には、作業環境の実効エネルギーに基づいたエネルギーの違いによる感度差の補正を適切に行うことにより測定精度を向上させることができる。

エネルギーが30keV以下の $\gamma$  (X) 線に対して1 cm線量当量率の評価が必要な場合には、(2)で述べる70  $\mu\text{m}$ 線量当量率の測定方法と同じ方法を用いて、換算係数を1 cm線量当量へのものとすることで評価できる。

(2) 70  $\mu\text{m}$ 線量当量の評価

70  $\mu\text{m}$ 線量当量率の測定は、70  $\mu\text{m}$ 線量当量率が1 cm線量当量率の10倍を超えるおそれのある場合に行えばよい。エネルギーが10keVから30keVの範囲の $\gamma$  (X) 線に対しては、1 cm線量当量よりも70  $\mu\text{m}$ 線量当量の方が大きくなるため、70  $\mu\text{m}$ 線量当量の評価が重要である。このエネルギー範囲で70  $\mu\text{m}$ 線量当量率を直読できる電離箱式の測定器が市販されている

ため、これを用いる場合は、その指示値をそのまま70  $\mu\text{m}$ 線量当量率と解釈することができる。しかし、この測定器は一般的ではないため、そのような測定器やサーベイメータがない場合、10keV程度までの低エネルギーX線に対しても良好な感度を有する照射線量（又は空気吸収線量）対応の電離箱式のサーベイメータや測定器を用いて、以下の方法で測定評価する。

電離箱の薄い窓からX線を入射させ、照射線量率（又は空気吸収線量率）を測定し、次式を用いて70  $\mu\text{m}$ 線量当量率を算出する。

$$H_{70\mu\text{m}} = X \cdot f_{X70\mu\text{m}} \quad \dots (4.3-2)$$

ここで、 $H_{70\mu\text{m}}$  : 70  $\mu\text{m}$ 線量当量率 ( $\text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$X$  : 測定された照射線量率 ( $\text{mR} \cdot \text{h}^{-1}$ )

又は空気吸収線量率 ( $\text{mGy} \cdot \text{h}^{-1}$ )

$f_{X70\mu\text{m}}$  :  $\gamma$  (X) 線の実効エネルギーに対応する照射線量（又は空気カーマ）から70  $\mu\text{m}$ 線量当量への換算係数 ( $\text{mSv} \cdot \text{mR}^{-1}$ ) 又は ( $\text{mSv} \cdot \text{mGy}^{-1}$ ) (表2.3-5参照)

30keV以上の $\gamma$  (X) 線に対しては、1 cm線量当量が合理的に70  $\mu\text{m}$ 線量当量の安全側の評価を与える。したがって、(1)で述べた方法で1 cm線量当量を測定し、70  $\mu\text{m}$ 線量当量の評価とすることができる。

4.3.2  $\beta$ 線に対する線量評価

(1) 表面汚染源（点線源又は点とみなし得る面線源もしくは体積線源<sup>注</sup>）から離れた位置の70  $\mu\text{m}$ 線量当量率の評価

(イ) 70  $\mu\text{m}$ 線量当量率測定用サーベイメータを使用する場合

$\beta$ 線に対して70  $\mu\text{m}$ 線量当量率を直接測定することができるサーベイメータが市販されている。このような70  $\mu\text{m}$ 線量当量率測定用サーベイメータを使用する場合は、指示値に校正定数を乗じて求まる測定結果を

注) 面又は体積線源の場合の直径 (d) と線源から測定点までの距離 (h) の関係が  $h > d$  である場合は、点線源とみなしてよい。

汚染された土壌における $\beta \cdot \gamma$ 線量当量率 (1)測定

Beta and Gamma Dose Equivalent Rates on the Soil Contaminated with Fission Products:

## (1) Measurements

○吉田忠義<sup>1</sup>、辻村憲雄<sup>1</sup> (<sup>1</sup>原子力機構)○T. Yoshida<sup>1</sup>, N. Tsujimura<sup>1</sup> (<sup>1</sup>JAEA-NCL)

## 1. はじめに

東日本大震災によって被災した福島第一原発のサイト内で採取した土壌試料の表面における $\beta$ 線及び $\gamma$ 線線量当量率を電離箱式線量当量率サーベイメータで測定した。また、GM管式表面汚染サーベイメータを用いて線量当量率を求めるための換算係数を求めた。

## 2. 測定試料

2011年3月21～22日にかけて、1, 2号機用スタックから約500～1000 mの地点で採取した土壌試料計5点をプラスチック容器(直径13 cm, 深さ5 cm)に入れ、土壌表面から5 cmの高さにおいて測定を行った。なお、 $\gamma$ 線核種分析によると、土壌試料中に含まれる主な核種は<sup>131</sup>I, <sup>132</sup>Te, <sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Csなどであった。

## 3. 測定方法

$\beta$ 線及び $\gamma$ 線線量当量率の測定には、薄窓平行平板電離箱を用いた応用技研製 AE-133B を用いた。AE-133B は電離箱窓部に 1000 mg cm<sup>-2</sup> キャップを有し、装着時には $\gamma$ 線周辺線量当量率 $H^*(10)$ が、未装着時は $\beta$ 線及び $\gamma$ 線方向性線量当量率 $H'(0.07)$ が測定できる。両者の差分から $\beta$ 線 $H'(0.07)$ が求められる。

表面汚染サーベイメータとして、日立アロカメデ

イカル製 TGS-113 を用いた。 $\beta$ 線と $\gamma$ 線による計数を分離するため、厚さ 10 mm のアクリル板を検出器窓と測定試料の間に設置し、その差分から $\beta$ 線に対する計数を求め、AE-133B の測定で得られた線量当量率を元に換算係数を求めた。

## 4. 測定結果

土壌試料表面から 5 cm における $\gamma$ 線 $H^*(10)$ 及び $\beta$ 線 $H'(0.07)$ と TGS-113 の計数率から線量当量率への換算係数を表 1 に示す。 $\beta$ 線 $H'(0.07)$ は $\gamma$ 線 $H^*(10)$ に比べて高く、その比( $\beta/\gamma$ 比)は 2 ～ 7 程度であった。試料中の放射性物質は、容器への充填の過程である程度均一に分布していると考えられる。一方、現地の土壌に降下した放射性物質は、表層付近に滞在していると考えられるので、 $\beta/\gamma$ 比は更に大きくなる可能性がある。皮膚の等価線量を管理するため、 $\beta$ 線モニタリングにも留意する必要がある。

また、AE-133B の測定値との比較によって得られた TGS-113 の線量当量換算係数は、<sup>204</sup>Ti $\beta$ 線及び<sup>137</sup>Cs $\gamma$ 線校正場を用いて得られた換算係数である、3.6  $\mu\text{Sv h}^{-1} \text{ kcpm}^{-1}$  及び 2.2  $\mu\text{Sv h}^{-1} \text{ kcpm}^{-1}$  とよく一致した。これらの換算係数を用いると、表面汚染サーベイメータであっても、汚染された土壌における線量当量率の測定が可能であろう。

表 1 土壌試料表面から 5 cm における $\gamma$ 線 $H^*(10)$ 及び $\beta$ 線 $H'(0.07)$ と線量当量換算係数  
(2011 年 4 月 12 日測定)

| 試料番号<br>及び採取地点 | かさ<br>密度 | AE-133B 測定値( $\mu\text{Sv h}^{-1}$ ) |                      | $\beta/\gamma$ 比 | TGS-113 <sup>†1</sup> 換算係数( $\mu\text{Sv h}^{-1} \text{ kcpm}^{-1}$ ) |          |                |
|----------------|----------|--------------------------------------|----------------------|------------------|-----------------------------------------------------------------------|----------|----------------|
|                |          | $\gamma$ 線 $H^*(10)$                 | $\beta$ 線 $H'(0.07)$ |                  | $\beta$                                                               | $\gamma$ | $\beta+\gamma$ |
| ①南南西約 750m     | 0.81     | 3.3                                  | 23                   | 7.0              | 3.9                                                                   | 2.4      | 3.6            |
| ②南南西約 500m     | 0.85     | 1.5                                  | 9.4                  | 6.2              | —                                                                     | —        | 3.5            |
| ③北約 500m       | 1.6      | 47                                   | 100                  | 2.2              | 3.5                                                                   | 2.4      | 3.0            |
| ④南南西約 1000m    | 0.77     | 4.9                                  | 17                   | 3.4              | —                                                                     | —        | 3.5            |
| ⑤西北西約 500m     | 1.3      | 21                                   | 59                   | 2.8              | —                                                                     | —        | 3.2            |

<sup>†1</sup> <sup>36</sup>Cl に対する機器効率 は 48% である。

汚染された土壌における $\beta \cdot \gamma$ 線量当量率 (2)計算

Beta and Gamma Dose Equivalent Rates on the Ground Contaminated with Fission  
Products: (2) Monte Carlo Calculations

○辻村 憲雄<sup>1</sup>, 吉田 忠義<sup>1</sup> (<sup>1</sup>原子力機構 核サ研)

○N. Tsujimura<sup>1</sup>, T. Yoshida<sup>1</sup> (<sup>1</sup> JAEA-NCL)

## 1. 目的

福島第一原発事故に伴い環境中に放出された放射性物質によって汚染された大地(土壌)からの $\beta$ 線と $\gamma$ 線による線量当量(率)を計算する。

## 2. 計算方法

図1に示す体系で $\beta$ 線と $\gamma$ 線の輸送計算をMCNP4C3で行った。土壌(1.6 g/cm<sup>3</sup>)は、半径100 m×高さ35 cm、空気(1.2 mg/cm<sup>3</sup>)は、半径100 m×高さ200 mとした。放射性物質によって汚染された領域は、土中の半径 $r$ ×深さ $d$ の円盤とし、 $r=10$  cm, 50 cm, 100 cm, 5 m, 20 m,  $d=0.1$  cm, 1 cm, 5 cmと変化させた。

線源核種は<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Cs(<sup>137m</sup>Ba)とし、 $\gamma$ 線については放出割合が1%を超える成分を、 $\beta$ 線(電子)については連続スペクトルからなる成分と内部転換電子を線源項とした。

線源領域上の空気中に図に示すような円柱領域を設定し、その領域内における電子と光子フルエンスを体積平均タリーで計算し、それぞれに電子フルエンス→方向性線量当量換算係数( $H'(0.07, 0^\circ)/\Phi$ , ICRU Report 57表A.44), 光子フルエンス→周辺線量当量換算係数( $H^*(10)/\Phi$ , ICRU Report 57表A.21)を乗じることによって線量当量を得た。このときタリー領域を高さ10 cm程度に細分することによって線量当量の高さ分布( $h=0\sim 200$  cm)を得た。

一方、上記の計算手順で求めた $\beta$ 線量当量は、「整列場」の概念を拡大適用して求めた量である。そのため、タリー領域内に地面に対して平行な面と垂直な面を別に用意し、当該面に入射する電子の角度分布を計算することによって、上記 $\beta$ 線量当量について、入射角度依存による影響を適切に反映し、修正するための係数を算出した。

## 3. 計算結果

線量当量は、変数 $r, d, h$ の関数として表され

る。 $\beta$ 線量当量は $r$ にあまり依存せず、また $d=0.1$  cmではほぼ飽和することが確認された。一方、 $\gamma$ 線量当量は $r$ と $d$ が増えるにつれて増加した。線量当量の高さ依存についてはともに地表で最大になったが、 $\gamma$ 線については $r$ が広がるにつれ依存の程度が小さくなった。<sup>134</sup>Csと<sup>137</sup>Csが土中にそれぞれ1 Bq/cm<sup>3</sup>含まれると仮定すると、 $\beta$ 線と $\gamma$ 線による線量当量率は、最大となる線源条件でそれぞれ約100 nSv/h, 200 nSv/hであった。

$\gamma$ 線 $H^*(10)$ に対する $\beta$ 線 $H'(0.07)$ の比( $\beta/\gamma$ 比)の一例を表1に示す。表には、 $\beta$ 線量当量を評価する面を地面に対して平行に置いた場合と垂直に置いた場合とを併記した。 $r$ と $d$ がともに小さい場合に限って $\beta/\gamma$ 比が10を超える場合があるが、広い範囲にわたる汚染では $\beta$ 線による線量率寄与は $\gamma$ 線に比べて小さいことが分かった。

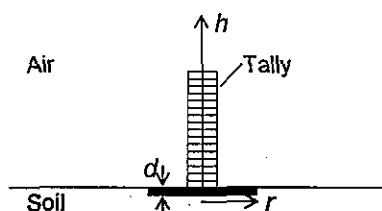


図1 計算体系

表1  $\gamma$ 線 $H^*(10)$ に対する $\beta$ 線 $H'(0.07)$ の比

| r<br>(cm) | d<br>(cm) | 水 平          |               | 垂 直          |               |
|-----------|-----------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|           |           | h=10<br>(cm) | h=100<br>(cm) | h=10<br>(cm) | h=100<br>(cm) |
| 10        | 0.1       | 20           | 4.4           | 5.5          | 1.7           |
|           | 1         | 2.1          | 0.43          | 0.60         | 0.17          |
|           | 5         | 0.60         | 0.10          | 0.17         | 0.038         |
| 500       | 0.1       | 3.9          | 0.60          | 2.0          | 0.33          |
|           | 1         | 0.54         | 0.064         | 0.28         | 0.035         |
|           | 5         | 0.19         | 0.017         | 0.10         | 0.010         |

備考:  $\beta$ 線 $H'(3) \ll \beta$ 線 $H'(0.07)$ である。