

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。

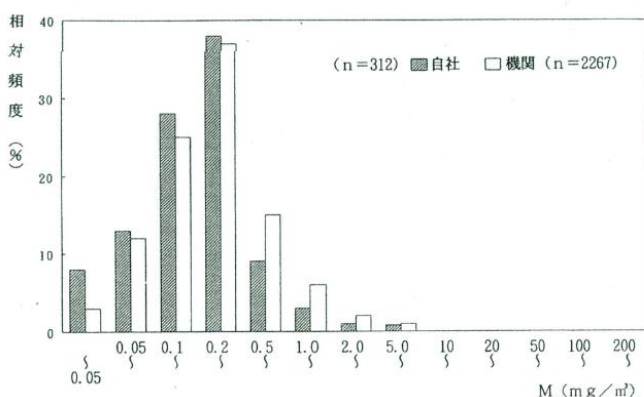
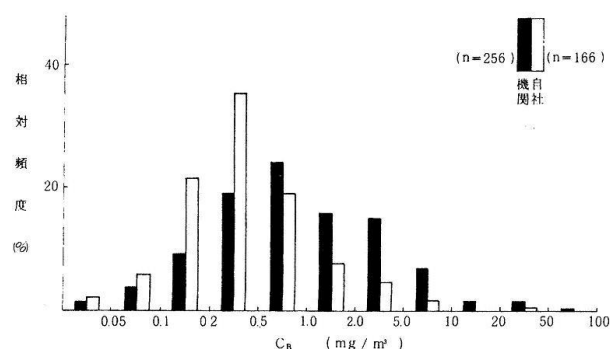


図 1 2578 か所の鉱物性粉じん作業場の作業環境測定値 (幾何平均値)

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)



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 No.	総 (T) 粉じん 濃度 (mg/m^3)	吸入性 (R) 粉じん 濃度 (mg/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気中浮遊粉じん（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 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: 9.6×10^{-6} mSv/Bq

Cs-137の実効線量計数: 6.7×10^{-6} mSv/Bq

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

1時間の除染作業中に対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 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 × 10^{-6} mSv/h	29.3 × 10^{-6} mSv/h	73.4 × 10^{-6} mSv/h	146.7 × 10^{-6} mSv/h	293.4 × 10^{-6} mSv/h	733.5 × 10^{-6} mSv/h
54mg/h	44.0 × 10^{-6} mSv/h	88.0 × 10^{-6} mSv/h	220.1 × 10^{-6} mSv/h	440.1 × 10^{-6} mSv/h	880.2 × 10^{-6} mSv/h	2200.5 × 10^{-6} mSv/h
180mg/h	146.7 × 10^{-6} mSv/h	293.4 × 10^{-6} mSv/h	733.5 × 10^{-6} mSv/h	1467 × 10^{-6} mSv/h	2934 × 10^{-6} mSv/h	7335 × 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 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 mSv/y	0.061 mSv/y	0.153 mSv/y	0.305 mSv/y	0.610 mSv/y	1.526 mSv/y
54mg/h	0.092 mSv/y	0.183 mSv/y	0.458 mSv/y	0.915 mSv/y	1.831 mSv/y	4.577 mSv/y
180mg/h	0.305 mSv/y	0.610 mSv/y	1.526 mSv/y	3.051 mSv/y	6.103 mSv/y	15.257 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。 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。 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、フィルタの静電気的な吸引力、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

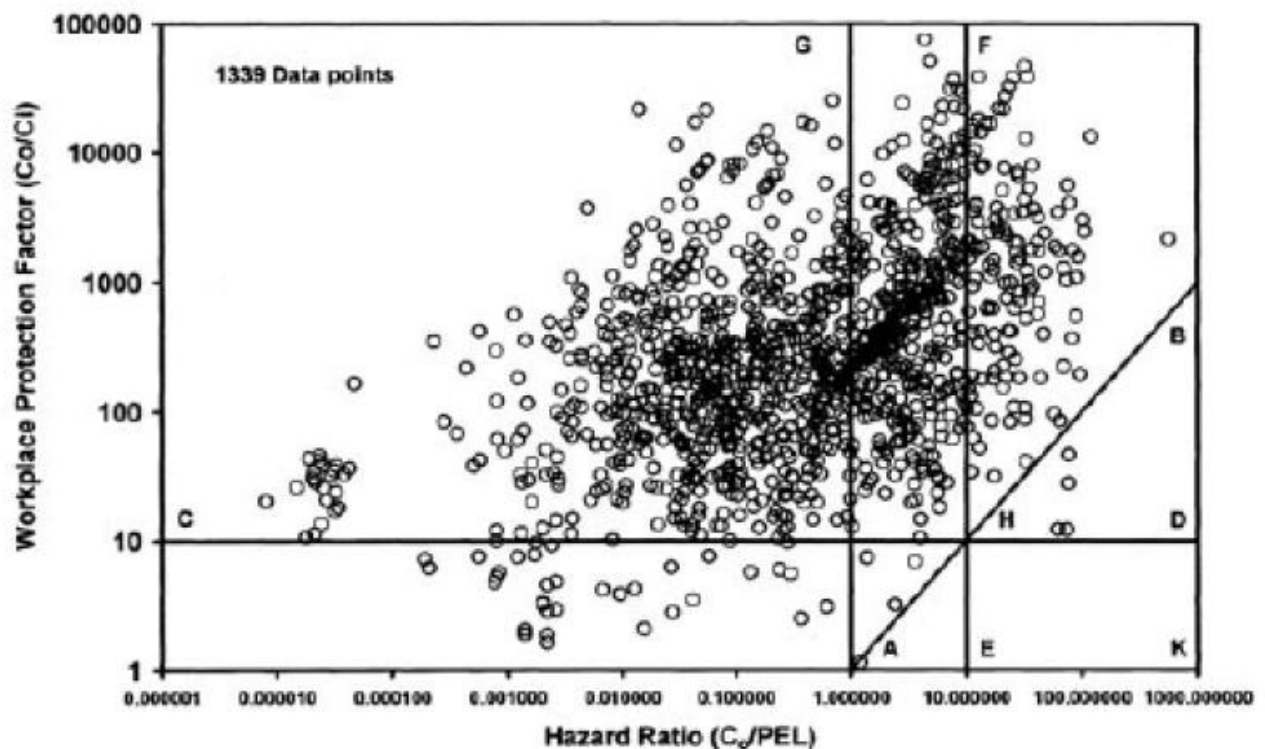


図6 Workplace Protection Factor と環境の Hazard Ratio の関係プロット

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 ／フード形 マスク	ルーズフィ ッティング マスク
ろ過式	5	10	50		
電動ファン付 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に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。)

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

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

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_{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 $PF_{all} \div 10$ 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 ($PF_2 = 20$)	捕集効率 99.9%のフィルタ ($PF_2 = 1,000$)
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、プ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。

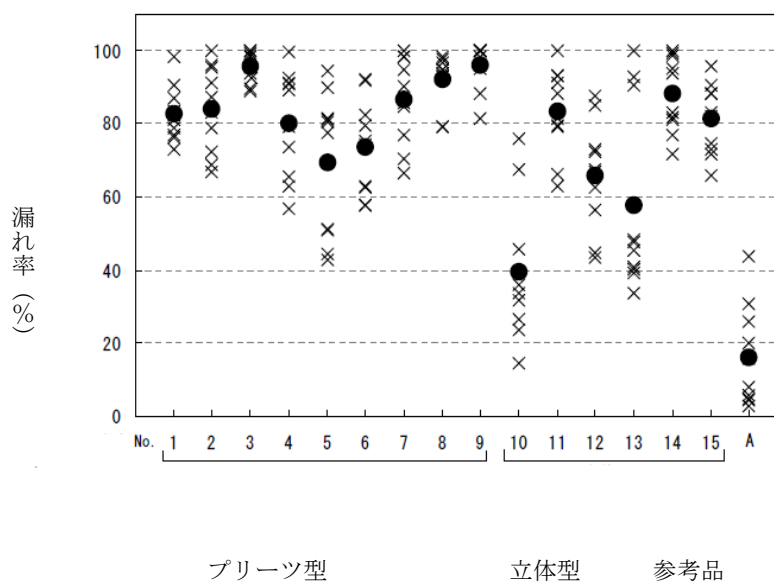


図 7 15 種類のフェイスマスクと 1 種類の N95 マスクの漏れ率試験結果
(国民生活センター 平成 21 年 11 月 18 日発表)

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。