

令和元年度
化学物質による労働者の健康
障害防止措置に係る検討会
報告書

(マンガン及びその化合物並びに溶接ヒューム)

令和2年2月10日

目次

| | | |
|-----|---|----|
| I | 開催要綱及び参集者 | 3 |
| II | 検討の経緯 | 5 |
| III | 検討結果 | 6 |
| 第1 | マンガン及びその化合物並びに溶接ヒュームへの健康障害防止対策の基本的考え方 | 6 |
| 第2 | マンガン及びその化合物の管理濃度等 | 8 |
| 第3 | 溶接ヒュームばく露防止措置等 | 9 |
| 第4 | 今後のスケジュール等 | 15 |
| IV | 別紙 | 16 |
| 別紙1 | マンガン及びその化合物（塩基性酸化マンガンを含む）による健康影響等に関する文献 | 16 |
| 別紙2 | マンガン及びその化合物のばく露限度値に関する測定対象の粒径に関する文献等 | 25 |
| 別紙3 | マンガンのばく露限度値に関するACGIHとECの提案理由の比較 | 28 |
| 別紙4 | フェロマンガン合金製造等における空气中マンガンの粒径分布に関する文献等 | 31 |
| 別紙5 | 金属アーク溶接における溶接ヒュームに係るばく露低減対策に関する文献等 | 33 |
| 別紙6 | 個人サンプリングによる測定の方法に関する文献等 | 38 |
| 別紙7 | 呼吸用保護具の指定防護係数に関する文献等 | 40 |

I 開催要綱及び参集者

1 趣旨・目的

職場における化学物質の取扱いによる健康障害の防止を図るため、国は、重篤な健康障害のおそれのある有害化学物質について、労働者のばく露状況等の関係情報に基づきリスク評価を行っている。

健康障害発生のリスクが高い化学物質、作業等については、リスクの程度に応じて、特別規則による規制を行う等の健康障害防止措置を講じる必要がある。また、こうした特別規則等による規制については、対策の実現可能性等も考慮して導入する必要がある。

このため、学識経験者、健康障害防止措置の関係者から成る検討会を開催し、労働者への健康障害のリスクが高いと認められる化学物質に関し、ばく露防止措置等の健康障害防止措置について検討することとする。

2 検討事項

- (1) 労働者への健康障害のリスクが高いと認められる化学物質に係るばく露防止措置
- (2) 労働者への健康障害のリスクが高いと認められる化学物質に係る作業環境中の濃度の測定及び評価の基準
- (3) その他

3 構成等

- (1) 本検討会は、別添の参集者により構成するものとする。また、検討会の下に対策の分野に応じた小検討会を開催することができるものとする。
- (2) 本検討会及び小検討会には座長を置き、座長は検討会又は小検討会の議事を整理する。
- (3) 本検討会及び小検討会には必要に応じ、別添参集者以外の有識者の参集を依頼できるものとする。
- (4) 本検討会及び小検討会は、必要に応じ関係者からヒアリングを行うことができるものとする。

4 その他

- (1) 本検討会及び小検討会は、原則として公開するものとする。ただし、個別企業等に係る事案を取り扱うときは非公開とする。
- (2) 本検討会及び小検討会の事務は、厚生労働省労働基準局安全衛生部化学物質対策課において行う。

(参集者)

- 上野 晋 産業医科大学 産業生態科学研究所 職業性中毒学研究室 教授
大前和幸 慶應義塾大学 名誉教授
○小野真理子 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所研究員
唐沢 正義 労働衛生コンサルタント
小西 淑人 一般社団法人日本繊維状物質研究協会 専務理事
田中 茂 十文字学園女子大学 名誉教授
藤間 俊彦 A G C株式会社 環境安全品質本部環境安全部 マネージャー
中明 賢二 麻布大学 名誉教授
名古屋俊士 早稲田大学 名誉教授
保利 一 産業医科大学 産業保健学部 環境マネジメント学科 教授
松村芳美 公益社団法人産業安全技術協会 T I I Sフェロー

(特別参集者)

- 圓藤吟史 中央労働災害防止協会 大阪労働衛生総合センター所長
小嶋 純 独立行政法人労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所
作業環境研究グループ
櫻井治彦 慶應義塾大学 名誉教授
清水英佑 東京慈恵会医科大学 名誉教授

(50音順、敬称略、○は座長)

Ⅱ 検討の経緯

以下のとおり、マンガン及びその化合物並びに溶接ヒュームのばく露による健康障害防止措置等について、管理濃度等検討会において計4回、本検討会において計5回の検討を行った。このほか、関係団体からの意見聴取及び溶接ヒュームの実態調査も行った。

1 管理濃度等検討会

- (1) 平成28年8月30日
- (2) 平成29年1月10日
- (3) 平成29年5月23日
- (4) 平成30年3月12日（化学物質による労働者の健康障害防止措置に係る検討会と同時開催）

2 化学物質による労働者の健康障害防止措置に係る検討会

- (1) 平成30年3月12日（管理濃度等検討会と同時開催）
- (2) 平成30年8月3日
- (3) 令和元年8月5日
- (4) 令和元年12月16日
- (5) 令和2年1月21日

Ⅲ 検討結果

第1 マンガン及びその化合物並びに溶接ヒュームへの健康障害防止対策の基本的考え方

1 報告書の趣旨等

マンガン及びその化合物（塩基性酸化マンガンを除く。）は、特定化学物質に指定され、その管理濃度は、マンガンとして $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ （総粉じん）である。米国産業衛生専門家会議（ACGIH）と欧州委員会科学委員会（EC）（※）で、粒径別のマンガン及びその化合物のばく露限界値が勧告されたことを踏まえ、平成28年8月から、管理濃度等検討会において、その管理濃度の見直しに向けた検討を行い、平成30年8月から、本検討会において、マンガン及びその化合物並びに溶接ヒュームに関する管理濃度及び健康障害防止対策の検討を行った。さらに、関係団体からの意見聴取及び溶接ヒュームのばく露実態調査を実施した。本報告書は、これらの検討結果をとりまとめたものである。

※ 2017年に、ECから勧告されたばく露限界値が強制力のあるEU委員会指令（2017/164）として公布された。

（参考）欧米の粒径別のばく露限界値

| ACGIH（2013年 設定） | EC 科学委員会（2011年 設定） |
|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $0.02\text{mg}/\text{m}^3$ （レスピラブル） | $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ （レスピラブル） |
| $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ （インハラブル） | $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ （インハラブル） |

2 塩基性酸化マンガンの有害性について

- (1) 文献によれば、溶接ヒューム及び溶解フェロマンガン・ヒュームのいずれにも、塩基性酸化マンガンが含まれているとされる。文献によれば、塩基性酸化マンガンを含む溶接ヒューム及び溶解フェロマンガン・ヒュームへのばく露による神経機能障害が多数報告され、その多くには、ばく露量-作用関係が認められた。また、塩基性酸化マンガンに関する特殊健康診断において、一定の有所見者（2.4%）が認められる（別紙1参照。）。
- (2) 以上から、従来の第2類特定化学物質である「マンガン及びその化合物（塩基性酸化マンガンを除く。）」から、「（塩基性酸化マンガンを除く。）」を削除し、「マンガン及びその化合物」とすることが妥当である。

3 溶接ヒュームの特定化学物質としての位置付けについて

- (1) 溶接ヒュームのばく露による有害性については、マンガンによる神経機能障害のほか、肺がんのリスクが上昇していることが報告され、ばく露量－作用関係もいくつかの大規模研究で確認されたとされている（別紙1参照）。
- (2) このため、「溶接ヒューム」と「マンガン及びその化合物」の毒性や健康影響は異なる可能性が高いことから、「溶接ヒューム」を独立した特定化学物質（管理第2類物質）として位置付けることが妥当である。
- (3) 発がん性に伴う特別管理物質への位置付けについては、溶接ヒュームは、疫学研究によって発がん性があることが示されたが、原因物質は特定されず、じん肺を機序とする原発性肺がんとの区別もついていない（別紙1参照）。このため、当面、特別管理物質としては位置付けず、発がんの原因物質等の知見が明らかになった時点で、再度検討を行うことが妥当である。

4 溶接ヒュームの特殊健康診断の項目

- (1) 溶接ヒュームに含まれるマンガンばく露による神経機能障害に対する特殊健康診断項目としては、現行の「マンガン及びその化合物（塩基性酸化マンガンを除く。）」の項目と同様とすることが妥当である。なお、当該特殊健康診断の対象となるのは、他の物質と同様、溶接ヒュームにばく露される作業に常時従事する者とすべきである。
- (2) 肺がんについては、じん肺を機序とする原発性肺がんとの区別がついていないことから、現時点では、金属アーク溶接作業従事者に対するじん肺健診のうち、結核以外の合併症にかかっているおそれのある者に対する肺がん検査で対応することが妥当である。今後、溶接ヒュームに含まれる物質の毒性や発がん性が明らかになった場合には、特殊健康診断の項目を再検討するべきである。

第2 マンガン及びその化合物の管理濃度等

1 検討内容

ACGIH及びECの提案文書に引用されている文献等をレビューし、マンガン及びその化合物に係る作業環境測定の対象粒子及び管理濃度を検討した。

2 作業環境測定の対象粒子について

ACGIHの提案理由書及びそれに引用されている文献等をレビューした結果及び作業環境測定の趣旨等を踏まえ、作業環境測定の対象粒子は、レスピラブル粒子とすべきである（別紙2参照）。

3 マンガン及びその化合物の管理濃度について

ACGIH及びECの提案理由書及びそれに引用されている文献等をレビューした結果を踏まえ、マンガン及びその化合物の管理濃度は、マンガンとして $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ （レスピラブル粒子）とすべきである（別紙3及び別紙4参照）。

第3 溶接ヒュームばく露防止措置等

1 検討内容

溶接作業等における溶接ヒュームばく露対策として、工学的対策等、呼吸用保護具の選択及び使用、作業管理等について検討した。検討に当たっては、溶接作業による溶接ヒュームのばく露について実態調査を行った。

2 溶接作業に対する工学的対策等

- (1) 粉じん障害防止規則においては、金属をアーク溶接する作業及び屋内等においてアークを用いて金属を溶断し、又はガウジングする作業（以下「金属アーク溶接等作業」という。）は、呼吸用保護具の使用が義務付けられる作業（同規則別表第3）には該当するが、局所排気装置の設置等及び作業環境測定が求められる特定粉じん作業（同規則別表第2）には該当しない。特定粉じん作業は、有効な発散源対策が可能な作業（原則として固定した設備を使用して行う粉じん作業）が列挙されている。このため、金属アーク溶接等作業は一般的には、粉じん発散源の場所が一定しないことから特定粉じん作業から除外されていると考えられる。（別紙5参照。）
- (2) ガスアーク溶接では、溶接不良を避けるため、溶接点での風速が0.5m毎秒以下となるよう管理する必要がある。実態調査でのB測定値が0.2mg/m³以上という高い濃度の単位作業場所が4割を占めていること、第3管理区分に相当する作業場所が6割程度を占めることなどを踏まえると、仮に、局所排気装置等の設置が可能である場合であっても、全ての事業場において、局所排気装置等の措置のみによってマンガンを濃度を0.05mg/m³（レスピラブル粒子）まで一律に低減させることは困難と見込まれる。（別紙5参照。）
- (3) 一方で、実態調査の結果、25%程度の事業場は、現状で第1管理区分となっていることから、全体換気等の措置によって、第1管理区分を実現することが可能である事業場は一定程度存在すると見込まれる。（別紙5参照。）
- (4) 以上から、従来作業環境測定の実施及びその結果に基づく管理区分の決定を義務付けないこととするが、現状を悪化させることなく、事業場の状況に応じた対策を促すため、次に掲げる段階的な規制を設けるべきである。
 - ① 事業者は、金属アーク溶接等作業を行う屋内作業場については、当該作業にかかる溶接ヒュームを減少させるため、全体換気装置による換気の実施又はこれと同等以上の措置（※1）を講ずること。
 - ② 事業者は、金属アーク溶接等作業を継続して行う屋内作業場（※2）

について、金属アーク溶接等作業を新たに採用し、又は変更する（※3）ときに、個人サンプリングによる空気中の溶接ヒューム濃度を測定すること（※4）。

- ③ 事業者は、②による空気中の溶接ヒュームの濃度の測定の結果に応じて、換気装置の風量の増加その他必要な措置を講ずること（※4）（※5）。
- ④ 事業者は、③による措置を講じた時は、その効果を確認するため、個人サンプリングによる空気中の溶接ヒュームの濃度を測定すること。
- ⑤ 事業者は、金属アーク溶接等作業に労働者を従事させるときは、作業場所が屋内、屋外であるに関わらず、有効な呼吸用保護具を当該労働者に使用させること（※6）。さらに、金属アーク溶接等作業を継続して行う屋内作業場については、④の測定による溶接ヒュームの空气中濃度が基準値を超える場合は、当該作業場についての④による空気中の溶接ヒュームの濃度の測定の結果に応じて、労働者に有効な呼吸用保護具を使用させること。
- ⑥ 溶接ヒュームの空气中濃度の基準値は、マンガン及びその化合物の管理濃度と同じ値（マンガンとして $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ （レスピラブル粒子））とすべきである（※7）。

(5) (4) の措置に加え、次に掲げる規定も設けるべきである。

- ① 事業者は、(4) ②及び④による測定及び(4) ③及び⑤による測定結果の評価を行ったときは、その都度、必要な事項を記録して、測定対象作業を継続している間及び当該作業を終了した後3年間保存すること。
- ② 事業者は、金属アーク溶接等作業に労働者を従事させるときは、粉じんの飛散しない方法によって、毎日1回以上掃除すること。

※1 「同等以上の措置」には、プッシュプル型換気装置及び局所排気装置が含まれる。なお、屋内作業場に類似する場所（例：通風が不十分な船舶の内部、タンク等の内部等）においてシールドガスを用いたアーク溶接等作業を行う場合は、シールドガスによる酸欠のおそれがあることから、全体換気装置等によって酸素濃度を18%以上に保つか、労働者に空気呼吸器等を使用させなければならない（酸素欠乏症等防止規則第21条）。この措置は、アーク溶接等によって発生する一酸化炭素による中毒等の防止のためにも重要である。

※2 個人サンプリングによる空気中の溶接ヒューム濃度の測定は、屋内作業場における作業環境改善のための測定でもあることから、金属アーク溶接等作業を継続して行う屋内作業場に限定して義務付けることとする。

※3 「アーク溶接等作業を変更する」場合には、溶接方法が変更された場合、溶

接材料、母材や溶接作業場所の変更が溶接ヒュームの濃度に大きな影響を与える場合を含む。

※4 (4)に規定する空気中の溶接ヒューム濃度の測定とその結果に基づく作業環境の改善は、労働安全衛生法第65条及び65条の2に基づく作業環境測定及びその結果の評価等に係る委任省令事項ではなく、同法第22条に基づく健康障害を防止するための措置に係る委任省令事項として規定される。

※5 ③の規定は、②の測定結果が⑥の基準値を下回る作業場や、同一事業場の類似の溶接作業場において②の結果に応じて十分に環境改善措置を検討し、その措置をあらかじめ実施している作業場に、さらなる改善措置を求める趣旨ではないこと。

※6 従来、粉じん障害防止規則により、金属アーク溶接等作業については、有効な呼吸用保護具の使用が義務付けられている。

※7 測定対象となる物の種類は溶接ヒュームであるが、その濃度の評価は、マンガンとして行う。

3 個人サンプリングによる溶接ヒューム濃度測定の方法

2(4)②又は④の個人サンプリングによる溶接ヒューム濃度測定の方法については、以下のとおりとするべきである。(別紙6参照)

(1) 測定における試料空気の採取等は、作業に従事する者の身体の適切な箇所(※1)に装着する試料採取機器等を用いる方法によること。

(2) 試料空気の採取等の対象者数、時間等については以下のとおりとする

① 試料採取機器等の装着は、労働者にばく露される溶接ヒュームの量がほぼ均一であると見込まれる作業(均等ばく露作業※2)ごとに、それぞれ、適切な数の労働者(※3)に対して行うこと。ただし、測定の精度を担保する観点から、その数は、それぞれ、2人を下回ってはならないこと(※4)。

② 試料空気の採取等の時間は、①の労働者が一の作業日において金属アーク溶接等作業に従事する全時間(※5)とし、短縮を認めないこと。

③ 要求防護係数を算定する観点から、均等ばく露作業における測定値のうち最大のものを評価値とすること。

(3) 試料採取方法及び分析方法は、マンガン及びその化合物に係る測定基準に定める方法(試料採取方法については、ろ過捕集方法、分析方法については、吸光光度分析方法又は原子吸光分析方法)と同様の方法とすること。

※1 試料採取機器の吸気口は、労働者の呼吸域に装着すること。その際、吸気口が溶接面体の内側となるように留意すること。

- ※2 均等ばく露作業は、溶接方法が同一であり、溶接材料、母材や溶接作業場所の違いが溶接ヒュームの濃度に大きな影響を与えないことが見込まれる作業とする必要がある。
- ※3 「適当な人数」は、原則として均等ばく露作業に従事する全ての労働者であるが、作業内容等の調査を踏まえ、均等ばく露作業におけるばく露状況の代表性を確保できる抽出方法を用いて対象労働者を抽出することができる。
- ※4 均等ばく露作業に従事する労働者の数が1人の場合は、当該者に対する測定を2作業日について行う。
- ※5 溶接作業の準備作業、溶接の合間に行われる研磨作業等、溶接後の片付け等の関連作業は一連の溶接作業として測定の対象とする。なお、組立や塗装作業等、溶接と関係のない作業は、測定時間を含めない。測定値は、測定時間に対する時間加重平均値とする。

4 呼吸用保護具の選定及び使用

金属アーク溶接等作業を継続して行う屋内作業場における呼吸用保護具の選定及び使用について、以下の事項を定めるべきである（別紙7参照）。

(1) 要求防護係数の算定

事業者は、2(4)④で規定により測定されたマンガン濃度の値を2(4)⑥で規定する基準値で除した値（以下「要求防護係数」という。）により評価すること（※1）。

(2) 要求防護係数に基づく有効な呼吸用保護具の選定及び使用

事業者は、算定された要求防護係数を上回る指定防護係数（※2）を有する呼吸用保護具を選定し、労働者にそれを使用させること。

(3) 呼吸用保護具の使用方法

事業者は、選定された呼吸用保護具（※3）を労働者が適切に使用できるように、当該労働者に初めて呼吸用保護具を使用させるとき、及びその後1年以内ごとに1回、定期的に、当該労働者における当該呼吸用保護具の防護係数等を適切な方法（定量的フィットテスト※4）により確認し、その結果が防護係数の基準値（※5）を下回らないようにすること。

※1 屋内作業場に加え、屋内作業場に類似する場所（例：通風が不十分な船舶の内部、タンク等の内部等）においてアーク溶接等作業を行う場合は、これら場所のうち代表的な場所における空气中マンガン濃度を個人サンプリングにより測定し、屋内作業場の要求防護係数で対応可能であることを確認する必要がある。

※2 指定防護係数とは、訓練された着用者が、正常に機能する呼吸用保護具を正しく着用した場合に、少なくとも得られるであろうと期待される防護係数をいう。

※3 ルーズフィット形の電動ファン付き呼吸用保護具は、面体形と異なり、顔面と

の装着性（フィットネス）に防護係数が依存しないため、定量的フィットテストの対象は面体型に限る。

※4 定量的フィットテストの方法は、JIS T8150 で定める方法を含み、同 JIS に定める定量的な評価が可能な定性的フィットテストを含む。

※5 防護係数の基準値（フィットファクター）は、米国 OSHA 規則（半面形の呼吸用保護具：100、全面形の呼吸用保護具：500）、ISO 16975-3 や JIS T8150 の規定との整合性を踏まえて大臣告示で規定する。

5 特定化学物質（管理第2類物質）としての作業管理等

2から4に掲げる措置のほか、溶接ヒューム及び塩基性酸化マンガンを特定化学物質（管理第2類物質）に位置付けることに伴い、以下の作業管理等に関する規定が適用となる。

- (1) 労働衛生教育（雇入れ時・作業内容変更時）（安衛則第35条）
- (2) ぼろ等の処理（特化則第12条の2）
- (3) 不浸透性の床（特化則第21条）
- (4) 特定化学物質作業主任者の選任（特化則第27条）（※）
- (5) 関係者以外の立ち入り禁止措置（特化則第24条）
- (6) 運搬貯蔵時の容器等の使用（特化則第25条）
- (7) 休憩室の設置（特化則第37条）
- (8) 洗浄設備の設置（特化則第38条）
- (9) 飲食等の禁止（特化則第38条の2）
- (10) 有効な保護具の備え付け（特化則第43条、第45条）

※ 特定化学物質作業主任者には特定化学物質作業主任者技能講習の修了者等を選任する必要があるが、溶接の資格ではないため、金属アーク溶接等作業に従事する者全員が技能講習を修了する必要はない。なお、建設作業や設備の補修作業等において、毎回異なる場所で短時間の金属アーク溶接等作業を実施する場合であっても、その作業には特定化学物質作業主任者の選任が必要であることに留意する必要がある。

6 作業管理等の実施の留意事項

以下の事項を通達等により定めるべきである。

- (1) 特定化学物質作業主任者の職務のうち、「作業方法の決定」については、2（4）の措置を含むこととし、「保護具の使用状況の監視」については、4による保護具の選択等を含むこととする。
- (2) 呼吸用保護具の適切な選択及び使用を図るため、雇入れ時等教育の「保護具の性能及びこれらの取り扱い方法」について、2の要求防護係数を満たす呼吸用保護具の選択及び使用等に関する事項を含めて教育を行うこ

と。

- (3) 2(4)②及び④の試料採取及び試料の分析については、その内容に応じ、十分な知識及び経験を有する者（第一種・第二種作業環境測定士等）に実施させるか、十分な能力を持つ機関（作業環境測定機関等）に委託すること。

第4 今後のスケジュール等

1 法令改正のスケジュール

- (1) 政令（労働安全衛生法施行令）、省令（特定化学物質障害予防規則等）及び厚生労働大臣告示（作業環境評価基準等）の改正については、令和2年4～5月頃の公布・告示を目途に、手続きを進める。
- (2) 測定及び保護具の選定に関連する厚生労働大臣告示については、令和2年7月頃の告示を目処に手続きを進める。

2 施行・適用期日

政令、省令及び告示の改正の施行・適用期日は、令和3年4月1日（予定）とする。

3 経過措置

- (1) 改正政令のうち特定化学物質作業主任者に関する改正規定については、施行後1年程度適用を猶予する。
- (2) 改正省令及び改正告示のうち、溶接ヒュームの空气中濃度の測定及びその結果に基づく保護具の選択に関する改正規定については、施行後1年程度適用を猶予する。
- (3) 改正省令のうち、溶接ヒュームの空气中濃度の測定に関する改正規定の施行日における適用について、必要な経過措置を設ける。

IV 別紙

別紙 1 マンガン及びその化合物（塩基性酸化マンガンを含む）による健康影響等に関する文献

1 マンガン及びその化合物の化学的特性及び溶接ヒュームの化学組成等

- (1) ACGIH が TLV を引き下げる際の提案書(ACGIH(2013))によると、マンガン及びその無機化合物は多くの産業で使用され、最も多く用いられているのは金属マンガンとその化合物であり、Mn(II)、Mn(III)、Mn(IV)の形（主に MnCl_2 、 MnSO_4 、 MnPO_4 、 MnO_2 、 Mn_2O_3 として） で存在しているとしている。
- (2) ACGIH(2013)によれば、溶融フェロマンガン・ヒュームには、X回折分析法により、多量の酸化マンガン（II、III）が含まれる。また、酸化マンガン（IV）(MnO_2)を空气中で強く加熱すると、ヒュームが形成されるとしている。なお、一般的に、酸化マンガン(II、III) (MnO 、 Mn_2O_3) は塩基性酸化物、酸化マンガン(IV) (MnO_2)は両性酸化物、酸化マンガン(VI) (Mn_2O_7) は酸性酸化物に分類される。
- (3) Villaume ら(1979)によると、酸化マンガン（IV）(MnO_2) は、シールドアーク溶接棒のコーティングにフラックス剤として使用され、電極の合金元素としても使用されており、Moreton (1977)によると、溶接ヒューム中には、高濃度の酸化マンガン（IV）(MnO_2) が存在しているとしている。
- (4) 小林ら (1983) は、X線回折法により、被覆アーク溶接ヒュームの結晶組成を分析した。 MnO_2 を溶接棒の被覆材として使用している場合のヒュームの主成分は、 MnFe_2O_4 であり、低水素系溶接棒からのヒュームには、 MnFe_2O_4 のほか、酸化マンガン（III）(Mn_2O_3) のピークが明確に示された (Fig. 5)。なお、化学組成には SiO_2 が含まれるが、結晶質シリカ(SiO_2)は検出されていない。
- (5) 山根 (2006) によれば、溶接ヒューム中のマンガン以外の元素の化学組成（結晶組成ではない）は、 Fe_2O_3 など、多数の元素の酸化物が含まれる（表 3）。

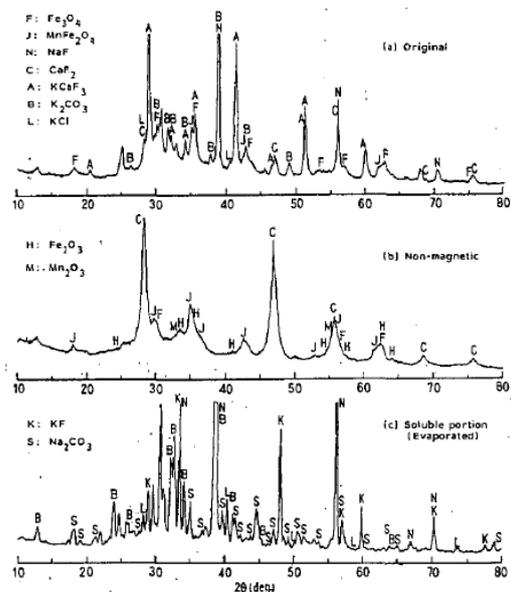


Fig. 5 X-ray diffraction pattern of the fume emitted from lime type electrode.

表3 溶接ヒュームの化学組成の一例 (%)

| 溶接方法 | 溶接材料の種類 | 径 mm | 溶接条件 | Fe ₂ O ₃ | SiO ₂ | MnO | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | CaO | MgO | BaO | Na ₂ O | K ₂ O | F |
|-----------------------|---------------------------|---------|---------|--------------------------------|------------------|------|------------------|--------------------------------|------|------|------|-------------------|------------------|------|
| CO ₂ アーク溶接 | YGW11 (フリットワイヤ) | 1.2 | 280A30V | 75.5 | 10.5 | 15.1 | 0.37 | - | - | - | - | - | - | - |
| | YFW-C50DR (フラックス入りワイヤ) | 1.2 | 280A31V | 54.7 | 10.6 | 16.1 | 6.74 | 0.55 | 0.71 | 2.42 | - | 5.17 | 2.27 | 2.55 |
| セーフシートアーク溶接 | YFW-S500G (フラックス入りワイヤ) | 2.4 | 300A28V | 25.4 | 1.25 | 3.10 | - | 15.7 | 20.7 | 27.8 | - | 2.33 | 1.55 | 9.84 |
| 被覆アーク溶接 | D4301 (鉄けい素系) | 4.0 | 170A | 52.5 | 16.6 | 12.2 | 2.31 | 0.42 | 2.10 | 0.51 | - | 5.57 | 4.97 | - |
| | D4303 (鉄けい素系) | 4.0 | 170A | 48.3 | 21.2 | 6.18 | 1.87 | 0.43 | 1.47 | 1.32 | - | 5.73 | 7.65 | - |
| | D4313 (高酸化チタン系) | 4.0 | 170A | 41.8 | 29.5 | 5.38 | 3.40 | 0.52 | 0.95 | 0.32 | - | 5.60 | 7.56 | - |
| | D4316 (低水素系) | 4.0 | 170A | 16.9 | 6.20 | 5.06 | 0.45 | 0.31 | 14.1 | 0.35 | 3.44 | 10.2 | 19.6 | 17.1 |
| | D4327 (鉄粉酸化鉄系) | 4.0 | 170A | 47.2 | 31.6 | 7.84 | 1.20 | 0.27 | 1.17 | 0.22 | - | 4.65 | 3.25 | - |

(6) 日本溶接協会(2019)によると、3事業場の各溶接作業（ガスアーク、サブマージアーク、被覆アークの3溶接法と溶接材料の組み合わせによる計5種類）によって発生したヒュームについて、X線回折分析の結果、ヒューム中の結晶成分はほとんどが Fe_3O_4

あるいは MnFe_2O_4 であ

ったとしている。また、X線光

電子分光法を用いて各溶接

ヒューム粉末のスペクトル

と酸化マンガン標準試料

(Mn(II)と Mn(III)につい

ては Mn_3O_4 粉末、Mn(IV)につ

いては MnO_2 粉末)のスペク

トルを比較したところ、ヒ

ューム試料では鋭敏なピー

クが得られず、Mn の価数毎

の分析値について信頼性の

高い値を得ることはできな

かったとしている (図 3.20 参照)。

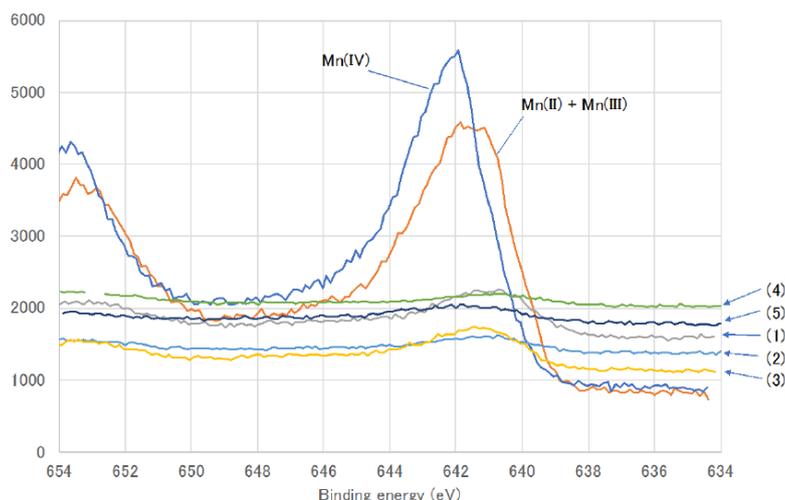


図 3.20 採取試料および標準試料の XPS スペクトル (Narrow scan)

2 溶接ヒュームに含まれるマンガンによる健康影響について

(1) 溶接ヒュームのばく露による健康影響について、ACGIH(2013)が提案書で根拠として代表的な4つの報告 (Bowler ら(2007)、Ellingsen ら(2008)、Laohaudomchok ら(2011)、Sen ら(2011)) をレビューした。

(2) Bowler ら(2007)は、閉鎖空間で溶接を行っていた 43 人の溶接工の時間平均のマンガン濃度 (全粉じん) が 0.11-0.46mg/m³ であり、マンガンの 累積ばく露指標 (CEI) と神経機能作用との間に、統計的に有意な、ばく露反応関係があったと報告している。

溶接工が訴えた神経機能作用の症状としては、震え(tremors, 41.9%)、感覚障害(numbness, 60.5%)、著しい疲労感、(excessive fatigue, 65.1%)、不眠(sleep disturbance, 79.1%)、性不能(sexual dysfunction, 58.1%)、幻覚(toxic hallucinations, 18.6%)、うつ(depression, 53.5%)、不安(anxiety, 39.5%)が上げられている。このうち、性不能(p<0.05)、疲労(p<0.05)、うつ(p<0.01)、頭痛(p<0.05)については、累積ばく露指標 (CEI) と統計上有意な関連があった。この報告に関連し、ACGIH(2013)は、このグループのばく露レベルが全般的に高いため、ばく露限界を確立するには役立たないとしつつ、「0.2 mg Mn/m³ 全粉塵のばく露上限は、マンガンの有害作用から溶接作業者を保護するには高すぎることは明白である。」としている。

- (3) Ellingsen ら(2008)は、ロシアの重機械工業と造船業における 96 人の溶接作業者 (0.007-2.23 mgMn/m³、幾何平均濃度 0.12mgMn/m³ (レスピラブル)) と同数の対照被験者に神経心理学的検査を実施したところ、フィンガータッピングについて、マンガンばく露濃度 (幾何平均) との間で有意なばく露反応関係が観察された(Fig.2)。
- (4) Laohaudomchok ら(2011)は、46 人の溶接作業者を対象に、過去 12 ヶ月と過去の全てのマンガン累積ばく露指標 (Mn-CEI) を空気中のマンガン濃度測定を作業記録で計算し、それと神経機能作用のテスト結果を比較した。さらに、24 人の作業者については、作業前と後でのテスト結果を比較した。ばく露濃度 (レスピラブル) の中央値は 0.012mg/m³ であり、Mn-CEI と有意な関連があった神経機能作用の項目は、連続パフォーマンステスト(continuous performance test, CPT)における反応時間の低下、感情状態(profile of mood state, POMS)の指標 (混乱、疲労感等) の悪化であった。過去 12 ヶ月の Mn-CEI と感情状態指標の悪化には、ばく露反応関係が認められた。高いマンガンばく露があった場合の作業前後の比較では、反応時間の低下に有意な差があった。
- (5) Sen ら(2011)は、7人の溶接作業者と7人の対照被験者に対して、MRI スキャンによる脳内のマンガンの沈着部位の評価と、神経行動学検査を行った。その結果、マンガンは嗅球 (OB)、前頭葉白質 (FWM)、被殻(GP)に蓄積していた。溶接作業者の微細運動テスト(grooved pegboard test)の結果は有意に利き手と非利き手の両方で悪く、利き手のスコアは FWM, GP のマンガン蓄積と有意な関連があり、非利き手のスコアは FWM と有意な関連があった。この結果は、マンガンの脳内の沈着が運動機能に影響を与えることを示唆している。ばく露については、報告されている平均累積ばく露レベル($0.88 \pm 0.57 \text{mgMn/m}^3 \text{年}$)を平均ばく露機関 ($24.1 \pm 15.5 \text{年}$) で除すと、0.037mgMn/m³ (レスピラブル) となる。

3 マンガン合金製造等におけるマンガンによる健康影響について

ACGIH(2013)の提案書で根拠として引用されている、マンガン合金製造、マンガン精錬作業等におけるマンガン曝露による神経機能作用を報告している論文のうち主なもの

は以下のとおり。

- (1) Iregren(1990)は、スウェーデンの2つの鋳造所(foundry)の労働者 30 人を評価した(平均 0.25 mg Mn/m³ ; 中央値 0.14 mg Mn/m³、範囲 : 0.02-1.40 mg Mn/m³。いずれも全粉塵濃度)、ばく露期間 1-35 年 (平均 9.9 年))。その結果、神経行動機能の同じ 3 つの評価尺度が、ばく露労働者と対照労働者の間で異なっていた。(p.13-14)
- (2) Mergler ら (1994) は、マンガン合金の製造従事労働者 74 名と対照労働者を調べた結果を報告した。エリアサンプラーを用いた幾何平均ばく露濃度は、0.035 mg Mn/m³ (レスピラブル) (範囲 : 0.001-1.27 mg Mn/m³) ならびに 0.225 mg Mn/m³ (全粉塵) (範囲 : 0.014-11.48mg Mn/m³) であった。神経行動学的検査の結果からは、マンガン合金労働者は、対照労働者と、臨床所見や感情状態、特定の運動機能、手の安定性、嗅覚、認知柔軟性の点で異なっていた。この研究のそれぞれの幾何平均を使って、U.S. EPA(1993)は LOAEL レベル 0.035 mg Mn/m³ (呼吸域エアロゾル) を導き出した。(p.14-15)
- (3) Bouchard ら (2007)は、Mergler ら (1994) が調査対象とした後、1990 年に閉鎖されたマンガン合金等の製造プラントの元労働者について調査した。生存していた曝露群の 78%、対照群の 67%が 2004 年に再検査を受けた。その結果、前マンガン労働者では、対照労働者と比較して、うつと不安の平均スコアが一貫して高かった。累積マンガンばく露レベルを三分位値で分類し、対照労働者と比較すると、ばく露量-応答関係が、うつ、不安、憎悪、身体化の症状に関して認められた。これらのデータは、マンガンばく露に伴って、一連の神経行動学的変化や神経心理学的変化が生じ、そのうちの一部は、職業性ばく露が終了して長年経過しても継続する場合がありますを示している。(p.15)
- (4) Young ら(2005)では、南アフリカのマンガン精錬 (smelter) 作業従事者 509 人と、対象用の非ばく露労働者 67 人の分析を行った。310 人のインハラブル粉じん測定、98 人のレスピラブル粉じん測定、34 の環境測定の結果から、それぞれの作業での平均ばく露に作業に従事した期間を乗じて、レスピラブル粉じんの累積ばく露指標 (CEI) を計算した (中央

表1. 呼吸域微粒子量(mg Mn/m³)で表現した平均マンガンばく露強度(INT)と関連付けた、南アフリカの精錬労働者でのばく露-応答関係

| | 歌唱 | 符号化課題 | Santa Ana | 平均反応時間 (ms) | タッピング (優位側手) | タッピング (反対側手) | 持続性 |
|----------------------------|--------|-------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------|
| 非ばく露対照群、平均スコア | 15.6 | 33.8 | 49.4 | 266.4 | 59.4 | 54.6 | 337.1 |
| 暴露群vs.対照群 | -2.1§ | -2.1† | -4.3§ | 10.3 | -3.6‡ | -1.9* | -14.1† |
| 残りの暴露群vs.内部対照 | -1.1‡ | -1.5* | 0.2 | 7.0 | -1.8† | -1.4* | 8.1* |
| 全体のトレンド | -4.5§ | -8.4‡ | -4.5* | 35.2* | -11.8‡ | -8.9‡ | 46.0† |
| ばく露 応答カテゴリ : | | | | | | | |
| 0 < INT < 0.01 (N= 115) | -1.4† | -1.2 | -4.2‡ | 5.3 | 2.4* | 1.0 | 8.6 |
| 0.01 < INT < 0.04 (N= 108) | -1.9‡ | -2.2* | -4.6§ | 12.9* | -3.4‡ | -1.7 | -13.1 |
| 0.04 < INT < 0.1 (N=117) | -2.7 § | -2.0 | -4.0‡ | 10.4 | 4.0‡ | 2.3* | 17.3* |
| 0.1 < INT < 0.2 (N=86) | -2.3§ | -3.2† | -4.2‡ | 11.5* | 4.3‡ | 2.6* | -17.5† |
| INT≥0.2 (N=86) | -3.0§ | -3.7‡ | -4.6‡ | 19.9† | -7.2§ | -4.6‡ | -27.0‡ |

Young et al. (2005)のデータをもとにしたもの。値はそれぞれ、非ばく露対照群の平均スコアとの差を示している。二項差、全体のトレンド、ばく露サブカテゴリーの統計表記は、外部対照と比較したもの : * 0.1 > P ≥ 0.05 ; † 0.05 > P ≥ 0.01 ; ‡ 0.01 > P ≥ 0.001 ; § P < 0.001

値：0.92mgMn 年/m³、範囲：0.015-13.26)。さらに、CEI を全就労期間で除して、レスピラブル粉じんの全就労期間平均ばく露強度 (INT) を計算した (中央値：0.058mgMn/m³、範囲：0.003-0.51)。このレスピラブル粉じんの INT と、神経行動学テスト結果 (数唱、符号化課題、Santa Ana、平均反応時間、タッピング、持続性) には、統計上有意な量反応関係が認められた (表 1)。さらに、参照群との二項比較結果 (性行為頻度、いらつき、臨床試験等) においても、量反応関係が認められた。(Table 5)。(p.18-19)

Table 5
Selected dichotomous test results panels for exposure intensity (INT)^a

| Analysis | Proportion abnormal | Sex less frequently than peers | | Irritation | | Clinical test | | Luria-Nebraska test IR | |
|--|---|--------------------------------|--------|------------|-------|---------------|-------|------------------------|--------|
| | | OR | p | OR | p | OR | p | OR | p |
| Unexposed referents | | 0.02 | | 0.21 | | 0.02 | | 0.30 | |
| Dichotomous comparisons | All exposed vs. external referents | 36.1 | 0.001 | 2.5 | 0.009 | 3.8 | 0.23 | 0.9 | 0.73 |
| | Rest of exposed vs. internal referents ^b | 1.8 | 0.03 | 1.7 | 0.05 | 5.1 | 0.03 | 2.4 | 0.001 |
| Overall trend | INT ^c | 1.4 | <0.001 | 1.01 | 0.02 | 1.5 | 0.001 | 1.4 | <0.001 |
| Exposure-response by INT categories ^d | 0 < INT < 0.01 | 23.4 | 0.003 | 1.7 | 0.21 | 0.9 | 0.93 | 0.5 | 0.07 |
| | 0.01 ≤ INT < 0.04 | 28.8 | 0.001 | 2.9 | 0.008 | 2.5 | 0.43 | 0.7 | 0.34 |
| | 0.04 ≤ INT < 0.1 | 45.5 | <0.001 | 2.4 | 0.03 | 5.3 | 0.15 | 0.9 | 0.87 |
| | 0.1 ≤ INT < 0.2 | 41.8 | <0.001 | 3.2 | 0.005 | 2.4 | 0.46 | 1.5 | 0.36 |
| | INT ≥ 0.2 | 61.8 | <0.001 | 3.3 | 0.005 | 10.8 | 0.04 | 2.5 | 0.03 |

^aIn the table, row one shows the proportion abnormal for the baseline external referents. The column headings in row two are the (adjusted) exposure odds ratios (OR) for the group in that row compared with the baseline, and the level of significance (p) of this change from baseline (OR = 1).

^b Comparison of the rest of the exposed vs. the first exposed group in Table 2 (i.e. the exposed internal referents).

^c OR for a 0.1 mg/m³ change.

^d Comparison for each category of exposure intensity is relative to external referents as baseline.

4 溶接ヒュームの発がん性について

国際がん研究機構 (IARC) は、2017 年、溶接ヒュームをグループ 1 (ヒトに対する発がん性) に分類した (IARC (2017))。20 程度の症例対照研究、30 程度のコホート研究において、溶接作業員等溶接ヒュームにばく露する者の肺がんのリスクが上昇していることが報告されている。累積ばく露に関するばく露反応関係も、いくつかの大規模研究で確認されたとしている (tMannetje ら(2012)、Matrat ら(2016)、Sorensen ら(2007)、Siew ら(2008))。ただし、ヒュームへのばく露は、間接的な評価による (溶接工程や材料、業種、職種、専門家の評価又は事故申告)。原因物質や発生機序についての報告はない。

5 特殊健康診断結果について

(1) マンガン及びその化合物 (塩基性酸化マンガンを除く。) の製造又は取り扱い業務については、特化則により特殊健康診断の実施が義務付けられている。また、塩基性酸化マンガンについては、特殊健康診断の実施が指導勧奨されている。健診の項目は、業務歴の調査と、せき、たん、仮面様顔、手指の振戦等の神経機能作用の有無に関する問診である。義務健診の有所見率は 0.8% (H30、42,843 人受診)、指導勧

奨健診の有所見率は2.4%(H30、910人受診)であった(厚生労働省(2019))。

- (2) 金属アーク溶接作業等については、じん肺法で規定する粉じん作業に該当し、じん肺健診の実施(3年に1回、管理2と3は年1回)が義務付けられている。さらに、じん肺健診有所見者のうち、結核以外の合併症にかかっている疑いがある者については、肺がんに関する検査を行う(じん肺法第3条第1項第3項及びじん肺法施行規則第7条)。溶接作業従事者が多いと見込まれる製造業の業種(金属製品、一般機械、電気機械器具、造船、その他輸送用機械器具)における新規有所見者は117人(受診者数150,208人)となっている。

6 考察(塩基性酸化マンガンの有害性)

- (1) 溶融フェロマンガ・ヒュームには、多量の酸化マンガ(Ⅱ、Ⅲ)が含まれ(ACGIH(2013))、被覆アーク溶接のヒュームには、 $MnFe_2O_4$ のほか、酸化マンガ(Ⅲ)が含まれる(小林ら(1983))。最近の文献(日本溶接協会(2019))も、これら結果と矛盾しない。以上から、溶接ヒューム及び溶融フェロマンガ・ヒュームのいずれにも塩基性酸化マンガが含まれると判断される。
- (2) 溶接ヒュームに含まれるマンガの空气中濃度は、溶接作業中、B測定値が $0.2mg/m^3$ (レスピラブル)以上の単位作業場が4割を占め、 $1mg/m^3$ (レスピラブル)に達する単位作業場もある(中央労働災害防止協会 2019)。マンガ合金プラント等におけるマンガの空气中濃度は、平均で $0.03mg/m^3$ (レスピラブル)、 $0.30mg/m^3$ (インハラブル)であるが(Bast-Pettersenら(2004))、ばらつきが大きく、 $1mg/m^3$ (レスピラブル)に達する場合もある(Ellingsen(2003))。
- (3) このような濃度のマンガにばく露した労働者には、溶接ヒューム、溶融フェロマンガヒュームいずれについても、神経機能作用が多数報告され、その多くに、ばく露反応関係が認められた(Bowlerら(2007)、Youngら(2005)、Myersら(2003b)など)。さらに、塩基性酸化マンガに関する特殊健康診断において、一定の有所見者(2.4%)が認められる。
- (4) 以上から、塩基性酸化マンガは、他のマンガ無機化合物と同様、ばく露による神経機能作用を引き起こすおそれが認められる。さらに、塩基性酸化マンガの有害性を否定する報告も認められない。このため、従来の特化物(第2類)としての「マンガ及び化合物(塩基性酸化マンガを除く)」から「(塩基性酸化マンガを除く)」とする規定を削除し、「マンガ及びその化合物」として位置づけることが妥当である。

7 考察(溶接ヒュームの特定化学物質としての位置付け)

- (1) 溶接ヒュームにばく露する労働者の神経機能作用としては、マンガによる神経機能作用が多数報告されている。一方で、50程度の調査において、溶接ヒュームにば

く露する者の肺がんのリスクが上昇していることが報告され、累積ばく露に関するばく露反応関係も、いくつかの大規模研究で確認されたとしている (tMannetje ら(2012)、Matrat ら(2016)、Sorensen ら(2007)、Siew ら(2008))。ただし、これら報告は、ばく露を間接情報により推定しているため、肺がんの原因物質は特定されておらず、発生機序も不明である。しかし、マンガンばく露による肺がんの発生は報告されていないことから、マンガンによる化学毒性以外の要因が推定される。

- (2) 一方で、じん肺の有所見者から原発性肺がんが発生するおそれがあることは広く知られており、じん肺健康診断において、結核以外の合併症の疑いがある者には肺がん検査の実施が義務付けられている (じん肺法第3条第1項第3項及びじん肺法施行規則第7条)。アーク溶接作業は、粉じん作業としてじん肺健康診断の対象となっている。
- (3) 以上から、「溶接ヒューム」と「マンガン及びその化合物」の毒性や健康影響は異なる可能性が高いことから、「溶接ヒューム」を独立した特定化学物質(第2類)として位置付けることが妥当である。
- (4) 発がん性に伴う特別管理物質への位置付けについては、溶接ヒュームは、疫学研究によってヒトに対する肺がんの発がん性があることが示されたが、その原因物質は特定されておらず、また、一般的なじん肺を機序とする原発性肺がんとの区別もついていない。このため、当面、特別管理物質として規定せず、発がんの原因物質等の知見が明らかになった時点で、再度検討を行うことが妥当である。

8 考察 (溶接ヒュームの特殊健康診断の項目)

- (1) 溶接ヒュームによる健康障害としては、マンガンばく露による神経機能作用が報告されている ((Bowler ら(2007)、Ellingsen ら(2008)、Laohaudomchok ら(2011)、Sen ら(2011))。神経機能作用については、現行の特化則の「マンガン及びその化合物(塩基性酸化マンガンを除く。)」に対する特殊健康診断項目が該当する。
- (2) さらに、肺がんに対するリスクを有意に上昇させるとして、IARC(2017)により溶接ヒュームはグループ1(ヒトに対する発がん性)に分類されているが、その原因物質や発生機序については明確になっていない。なお、アーク溶接作業については、じん肺法によるじん肺健康診断が義務付けられており、結核以外の合併症にかかっているおそれのある者に対しては、肺がんに関する検査が行われている (じん肺法第3条第1項第3項及びじん肺法施行規則第7条)。
- (3) 以上から、当面、溶接ヒュームの取り扱い作業については、引き続きじん肺健診の対象とするとともに、特化則の特殊健康診断としては、従来のマンガン及びその化合物と同様の項目を実施し、今後、溶接ヒュームに含まれる化学物質の毒性等について新たな知見が明らかになった場合に、必要な項目を追加することとするのが妥当である。

参照文献

- ACGIH (2013), "Manganese, elemental and inorganic compounds." Documentation of Threshold Limited Value and Biological Exposure Indices.
- Bast-Pttersen R., Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2004) Neuropsychological Function in Manganese Alloy Plant Workers. *Int Arch Occup Environ Health* Vol.77, pp.277-287
- Bouchard M. et.al (2007) Neuropsychiatric Symptoms and Past Manganese Exposure in a Ferro-alloy Plant. *NeuroToxicology* Vol.28, pp. 290-297
- Bowler, R.M., et al(2006) "Manganese exposure: neuropsychological and neurological symptoms and effects in welders." *Neurotoxicology* 27: 315-326
- Bowler, R.M., et al. (2007). "Dose - effect relationships between manganese exposure and neurological, neuropsychological and pulmonary function in confined space bridge welders." *Occup Environ Med* 64(3): 167 - 177.
- Code of Federal Regulations. Part 1915, subpart D- Welding, Cutting and Heating
- NIOSH (1988), "Criteria for a Recommended Standard: Welding, Brazing, and Thermal Cutting"
- Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2003) Manganese air exposure assessment and biological monitoring in the manganese. *J. Environ Monit* Vol. 5, pp.84-90
- International Agency for Research on Cancer (2017) Volume 118: welding, indium tin oxide, molybdenum trioxide. IARC Monogr Eval Carcinog Risk Hum. IARC Working Group.
- Iregren A. (1990) Psychological Test Performance in Foundry Workers Exposed to Low Level of Manganese. *Neurotoxicology and Teratology*. Vol.12 pp.673-675
- Marat M, Guida F, Mattei F, et al. (2016) Welding, a risk factor of lung cancer: the ICARE study. *Occup Environ Med*. Vol. 73, pp. 254-61
- Mergler D.M, et.al (1994) Nervous System Dysfunction among Workers with Long-Term Exposure to Manganese. *Environmental Research* Vol.64, pp. 151-180
- Penniall, K. Rotich and P. Brown, W. (2018), "Manganese Exposures during Welding and Hot Work Tasks." Oil & Gas Safety and Health Conference.
- Sorensen A.R., Thulstrup A.M., Hansen J, et al. (2007) Risk of lung cancer according to mild steel and stainless steel welding *Scand J Work Environ Health*. Vol. 33, pp. 379-386
- Siew S.S., Kauppinen T, Kyyronen P, Heikkila P, Pukkala E. (2008) Exposure to iron and welding fumes and the risk of lung cancer. *Scand J Work Environ Health*. Vol. 34, pp. 444-450
- Taube, F. (2013) "Manganese in Occupational Arc Welding Fumes—Aspects on Physiochemical Properties, with Focus on Solubility." *Ann. Occup. Hyg.*, Vol. 57,

No. 1, pp. 6-25

't Mannetje A, Bennan P, Zaridze D, et al. (2012) Welding and lung cancer in entral and Eastern Europe and the United Kingdom M J Epidemiol. Vol. 175, pp.706-714

Young T., Myers J.E., Thompson M. (2005) The Nervous System Effects of Occupational Exposure to Manganese – Measured as Respirable Dust – in a South African Manganese Smelter. Neurotoxicology, Vol.26 pp. 993-1000

小嶋純(2011)「低ヒュームワイヤによるばく露低減効果の検証」労働安全衛生研究, Vol. 4, No.1, pp. 39-41

小林実、堤伸介(1983)「被覆アーク溶接ヒュームの結晶組成に関する研究」溶接学会論文集 Vol.1(3), pp.311-317

厚生労働省(2019) 特殊健康診断結果調

中央労働災害防止協会 (2019)「令和元年度 溶接ヒュームに含まれるマンガンのばく露実態調査 (速報)」

日本溶接協会(2019)「溶接ヒューム中のマンガンに関する調査研究報告書」2019年3月

別紙2 マンガン及びその化合物のばく露限度値に関する測定対象の粒径に関する文献等

1 ACGIH 提案書におけるマンガンの TLV 設定の考え方

- (6) ACGIH(2013)では、TLV-TWA 0.02mg/m³ (レスピラブル粒子) をマンガン及びその無機化合物に対して推奨している。この値は、Bast-Pettersen(2004)、Luchini ら(1999)、Mergler ら(1994)、Roels ら(1992)の報告から得られた LOAEL 値が 0.03-0.04mg/m³ (レスピラブル粒子) の範囲でよく一致していることを考慮している。Young ら(2005)や Park ら(2006)のデータも同程度であったとしている。
- (7) この値は、観察されている LOAEL の 1/1.5~1/2 であり、Young ら(2005)が示した下限値に近い。Roels ら(1992)の統計モデルによると、TLV-TWA 0.02mg/m³ (レスピラブル粒子) は、労働者の 2.5%に手の安定性障害 (敏感な試験で検出されるが、臨床上の所見はない) が生じるレベルである。

2 ACGIH 提案書におけるインハラブル粒子に係る TLV 設定の考え方

- (1) ACGIH(2013)では、「ほぼ全てのマンガンが、肺の微細なガス交換領域に沈着した粒子から吸収される」とし、「最も懸念される粒子は、微細レスピラブル粒子である (ほとんどが<4μm)」としている。一方で、ACGIH(2013)では、消化器からの吸収や鼻咽頭に付着した溶解性の高い粒子からの吸収のセーフガードの観点から、4μmD よりも大きな粒子の存在が予想される条件では、インハラブル粒子の TLV-TWA(0.1mgMn/m³)も推奨されるとしている。
- (2) この値は、レスピラブルの TLV-TWA (0.02Mn/m³) に、インハラブルとレスピラブルの比のばらつき (1:1 (溶接)、10:1 以上 (フェロアロイ等)) の中間値(5:1)を踏まえ、レスピラブル粒子の TLV を 5 倍したものとしている。
- (3) ACGIH(2013)では、インハラブル粒子の TLV を用いる場合は、レスピラブル粒子の TLV と併せて用いる必要があるとしており、インハラブル粒子の TLV を単独で使用することは認めていない。
- (4) ACGIH(2013)では、インハラブル粒子とレスピラブル粒子によるばく露を評価している報告を比較し、ばく露因子にレスピラブル粒子の全就労期間平均ばく露強度 (INT) を用いると、より明確にばく露-応答関係が認められたとしている (表 1)。累積ばく露指標 (CEI) で示される インハラブル粒子の結果(Myers et al., 2003)と INT で示されるレスピラブル粒子のデータ(Young et al., 2005) (表 1) を比較すると、後者のほうが、より有意水準が高く一貫したばく露-応答関係をいくつか示していることがわかったとしている。

表1. 呼吸域微粒子量(mg Mn/m³)で表現した平均マンガンばく露強度(INT)と関連付けた、南アフリカの精錬労働者でのばく露-応答関係

| | 数値 | 符号化課題 | Santa Ana | 平均反応時間 (ms) | タッピング (優位側手) | タッピング (反対の手) | 持続性 |
|----------------------------|-------|-------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------|
| 非ばく露対照群、平均スコア | 15.6 | 33.8 | 49.4 | 266.4 | 59.4 | 54.6 | 337.1 |
| 暴露群vs.対照群 | 2.1§ | 2.1† | 4.3§ | 10.3 | 3.6‡ | -1.9* | -14.1† |
| 残りの暴露群vs.内部対照 | 1.1‡ | 1.5* | 0.2 | 7.0 | 1.8† | 1.4* | 8.1* |
| 全体のトレンド | 4.5§ | 8.4‡ | 4.5* | 35.2* | 11.8‡ | 8.9‡ | 46.0† |
| ばく露 応答カテゴリー: | | | | | | | |
| 0 < INT < 0.01 (N= 115) | 1.4† | 1.2 | 4.2‡ | 5.3 | 2.4* | -1.0 | -8.6 |
| 0.01 < INT < 0.04 (N= 108) | 1.9‡ | 2.2* | 4.6§ | 12.9* | 3.4‡ | -1.7 | -13.1 |
| 0.04 < INT < 0.1 (N=117) | 2.7 § | 2.0 | 4.0‡ | 10.4 | 4.0‡ | -2.3* | -17.3* |
| 0.1 < INT < 0.2 (N=86) | 2.3§ | 3.2† | 4.2‡ | 11.5* | 4.3‡ | -2.6* | -17.5† |
| INT ≥ 0.2 (N=86) | 3.0§ | 3.7‡ | 4.6‡ | 19.9† | 7.2§ | -4.6‡ | -27.0‡ |

Young et al. (2005)のデータをもとにしたもの。値はそれぞれ、非ばく露対照群の平均スコアとの差を示している。二項差、全体のトレンド、ばく露サブカテゴリーの統計表記は、外部対照と比較したもの:* 0.1 > P ≥ 0.05; † 0.05 > P ≥ 0.01; ‡ 0.01 > P ≥ 0.001; § P < 0.001

4 管理濃度等について

- (1) 管理濃度は、作業環境測定結果を評価し、管理区分を決定するための基準値である。管理区分の結果により、事業者¹に法令上の措置義務を課すものであるため、その管理区分決定の方法は、事業者にとってわかりやすいものでなければならない。
- (2) 従来、同一の物質について、複数の粒径別の管理濃度を示した例はない。これは、複数の管理濃度を示した場合、複数の測定値を評価した管理区分が一致しないことが想定されるが、そのような複雑な仕組みを最低基準である法令として規定することが望ましくないためと考えられる。また、二つの粒子を同時に測定するためには、サンプラーを複数使用する必要があり、事業者の負担を増やすことも懸念される。
- (3) なお、レスピラブル粒子については、従来の粉じん測定で使用する分粒装置を使用することで測定可能である。インハラブル粒子については、法令で定められた分粒装置がないため、分粒装置の法令基準の検討が必要となる。

5 考察（測定対象の粒径について）

- (1) ACGIH は、TLV の設定において、各報告の信頼性評価に基づき、レスピラブル粒子に関する LOAEL を主な根拠としている。このため、インハラブル粒子の TLV は、レスピラブル粒子の TLV の 5 倍として計算されている。この 5 倍という値は、インハラブル：レスピラブル比のばらつき（溶接で 1：1、フェロアロイ等で 10：1）の中間値とされている。このため、インハラブル粒子の TLV は、溶接においては過度に緩く、フェロアロイ合金製造等においては過度に厳しい基準値となる。これらの理由から、ACGIH は、インハラブル粒子の TLV を単独で使用することを認めてい

ない。

- (2) 仮に、複数の粒径について管理濃度を設定する場合、得られた複数の測定結果による管理区分が一致しない場合、単位作業場の作業環境を評価する方法について、現状と比較して複雑な仕組みが必要となる。また、インハラブル粒子を測定するための分粒装置の基準も必要となる。
- (3) 以上から、義務規定の基準であるマンガン及びその化合物に関する管理濃度としては、より確実な根拠を持つレスピラブル粒子のみを測定対象とすることが妥当である。
- (4) なお、全就労期間で曝露したマンガンの量を示す指数である CEI よりも全就労期間の平均ばく露の濃度を示す指数である INT の方が明確な量反応関係を有するということは、全就労期間で曝露量とともに、全就労期間の平均ばく露の濃度が健康影響に関連することを示している。このことは、労働時間を減少することによってマンガンの総曝露量を減少させても、ばく露の平均濃度が高ければ、マンガンによる健康影響の防止の効果が見込めないことを示唆している。

参照文献

- ACGIH (2013), “Manganese, elemental and inorganic compounds.” Documentation of Threshold Limited Value and Biological Exposure Indices.
- Bast-Pttersen R., Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2004) Neuropsychological Function in Manganese Alloy Plant Workers. Int Arch Occup Environ Health Vol.77, pp.277-287
- Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2003) Manganese air exposure assessment and biological monitoring in the manganese. J. Environ Monit Vol. 5, pp.84-90
- Luchini R, Apostoli P, Perrone C et al (1999) Long-term exposure to “low levels” of manganese oxides and neurofunctional changes in ferroalloy workers.
- Mergler D.M, et.al (1994) Nervous System Dysfunction among Workers with Long-Term Exposure to Manganese. Environmental Research Vol.64, pp. 151-180
- Young T., Myers J.E., Thompson M. (2005) The Nervous System Effects of Occupational Exposure to Manganese – Measured as Respirable Dust – in a South African Manganese Smelter. Neurotoxicology, Vol.26 pp. 993-1000
- Park RM, Bowler RM, Eggerth DE et al. (2006) Issues in neurological risk assessment for occupational exposures: the Bay Bridge welders. Neurotoxicology Vol.27 pp.373-384
- Roels H, Ghyselen P, Buchet JP, et al. (1992) Assessment of the permissible exposure level to manganese in workers exposed to manganese dioxide dust. Br J Ind Med Vol.49 pp.25-34

別紙3 マンガンのばく露限度値に関するACGIHとECの提案理由の比較

1 ACGIH 提案書におけるマンガンの TLV 設定の考え方

- (8) ACGIH(2013)では、TLV-TWA 0.02mg/m³ (レスピラブル粒子) をマンガン及びその無機化合物に対して推奨している。この値は、Bast-Pettersen(2004)、Luchini ら(1999)、Mergler ら(1994)、Roels ら(1992)の報告から得られた LOAEL 値が 0.03-0.04mg/m³ (レスピラブル粒子) の範囲でよく一致していることを考慮している。Young ら(2005)や Park ら(2006)のデータも同程度であったとしている。
- (9) この値は、観察されている LOAEL の 1/1.5~1/2 であり、Young ら(2005)が示した下限値に近い。Roels ら(1992)の統計モデルによると、TLV-TWA 0.02mg/m³ (レスピラブル粒子) は、労働者の 2.5%に手の安定性障害 (敏感な試験で検出されるが、臨床上の所見はない) が生じるレベルである。

2 EC 提案文書における職業ばく露限度値(IOELV)設定の考え方

- (5) 欧州連合事務局(EC)の職業ばく露限度科学委員会 (SCOEL) は、マンガンのばく露限度として、レスピラブル粒子として 0.05mg/m³を推奨している(EC(2011))。この値は、Roels ら(1992)が LOAEL (レスピラブル) 0.730mg/m³を示し、Mayers ら(2003)が LOAEL (レスピラブル) 0.871mg/m³、Young ら(2005)が LOAEL (レスピラブル) 0.010-0.040mg/m³、Lucchini ら(1999)が LOAEL (レスピラブル) 0.050mg/m³、Bast-Pettersen ら(2004)が LOAEL (レスピラブル) 0.036mg/m³、Ellingsen ら(2008)が LOAEL (レスピラブル) 0.338mg/m³を示したことを主な根拠としている。同時に、Gibbs ら(1999)が平均 0.040mg/m³ (レスピラブル) のばく露を受けた労働者に神経機能作用を検出しなかった(NOAEL)ことも明示的に記載している。
- (6) EC(2011)は、研究によって示された LOAEL を評価する際に考慮すべき点として、LOAEL を示した調査のほとんどが断面調査であることを上げている。つまり、これら調査で報告された神経機能作用は、調査以前に受けたばく露によって発生したことを示すもので、調査時点でのばく露測定結果を反映したものではないとしている(用量-作用関係を評価する際のバイアス(left shift bias)。それを補足する事実として、EC(2011)は、神経機能作用に可逆性がない (一旦神経機能作用が発生するとそれが持続する)ことを示す報告(Roels ら(1999)があることを強調している。

3 考察

- (5) ACGIH(2013)も EC(2011)も、ほぼ同じ報告を評価した上で、異なる限度値を推奨している。ただし、0.05mg/m³を下回る LOAEL を報告しているのは Young ら(2005)が 0.010-0.040mg/m³、Bast-Pettersen ら(2004)が 0.036mg/m³を示した2つに限

られる。ACGIH は、Young ら(2005)の最小値とほぼ同じ値として 0.02mg/m³を推奨している。

- (6) EC(2011)は、LOAEL を示した報告のほとんどが断面調査であることを踏まえ、Gibbs ら(1999)の報告から 0.040mg/m³ (レスピラブル粒子) を NOAEL として重視して、0.05mg/m³を推奨している。その前提として、EC(2011)は、Gibbs ら(1999)の調査を良好な調査方法を有するものと評価している。
- (7) 以上から、ECの推奨値は妥当なものであり、ACGIHの推奨値は、良好な方法論をもつと評価された報告が示した 0.040mg/m³ (レスピラブル粒子) を NOAEL として評価していない値であるといえる。管理濃度はそれを上回った場合に必要な措置を義務付けるための法令上の最低基準であることから、可能な限り確実な根拠を持つべきものである。その観点からは、ECの推奨値(0.05mg/m³)を採用することが妥当である。

参考文献

- ACGIH (2013), "Manganese, elemental and inorganic compounds." Documentation of Threshold Limited Value and Biological Exposure Indices.
- Bast-Pttersen R., Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2004) Neuropsychological Function in Manganese Alloy Plant Workers. Int Arch Occup Environ Health Vol.77, pp.277-287
- European Commission (2011) Recommendation from the Scientific Committee on Occupational Exposure Limits for manganese and inorganic manganese compounds. SCOEL/SUM/127.
- Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2003) Manganese air exposure assessment and biological monitoring in the manganese. J. Environ Monit Vol. 5, pp.84-90
- Gibbs JP, Crump KS, Houck DP et al (1999) Focused medical surveillance: a search for subclinical movement disorders in US workers exposed to low levels of manganese dust. Neurotoxicology Vol.20, pp. 299-314
- Luchini R, Apostoli P, Perrone C et al (1999) Long-term exposure to "low levels" of manganese oxides and neurofunctional changes in ferroalloy workers. Neurotoxicology Vol.20, pp. 287-298
- Park RM, Bowler RM, Eggerth DE et al. (2006) Issues in neurological risk assessment for occupational exposures: the Bay Bridge welders. Neurotoxicology Vol.27 pp.373-384
- Roels H, Ghyselen P, Buchet JP, et al. (1992) Assessment of the permissible exposure level to manganese in workers exposed to manganese dioxide dust. Br J Ind Med Vol.49

pp.25-34

- Mayers JE, Thompson ML, Ramushu S, et al. (2003) The nervous system effects of occupational exposure of workers in a South African manganese smelter. *Neurotoxicology* Vol. 24, pp. 885-894
- Mergler D.M, et.al (1994) Nervous System Dysfunction among Workers with Long-Term Exposure to Manganese. *Environmental Research* Vol.64, pp. 151-180
- Young T., Myers J.E., Thompson M. (2005) The Nervous System Effects of Occupational Exposure to Manganese – Measured as Respirable Dust – in a South African Manganese Smelter. *Neurotoxicology*, Vol.26 pp. 993-1000

別紙4 フェロマンガ合金製造等における空气中マンガンの粒径分布に関する文献等

1 マンガン合金製造プラントにおける空气中の粒径別のマンガンの濃度に関する文献

(1) Bast-Pettersen ら(2004)は、Mn 合金の製造労働者での吸入可能粒子状物質の幾何平均ばく露レベルは 0.30 mg Mn/m^3 であり、そのうち 10.6% (0.03 mg Mn/m^3) が、レスピラブルであることを示した。

(2) Ellingsen ら(2003)は、マンガン合金の製造労働者で、吸入可能な(inhalable)量と呼吸可能な(respirable)量との比は算術平均では 11.6:1、幾何平均では 8.4:1であることを示した。レスピラブルとインハラブルの粉じんに含まれるマンガンの量の相関係数は高く、直線関係を示した ($r=0.70$, $p<0.001$, $n=153$) (Fig. 1)。

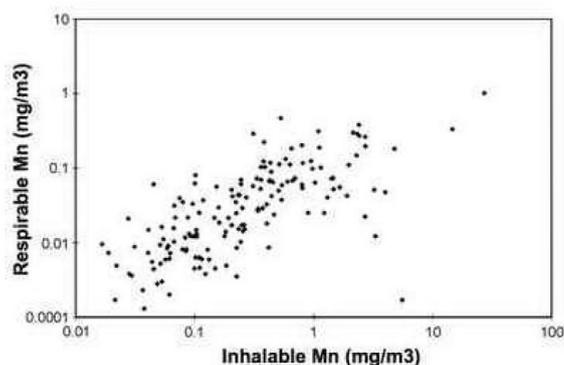
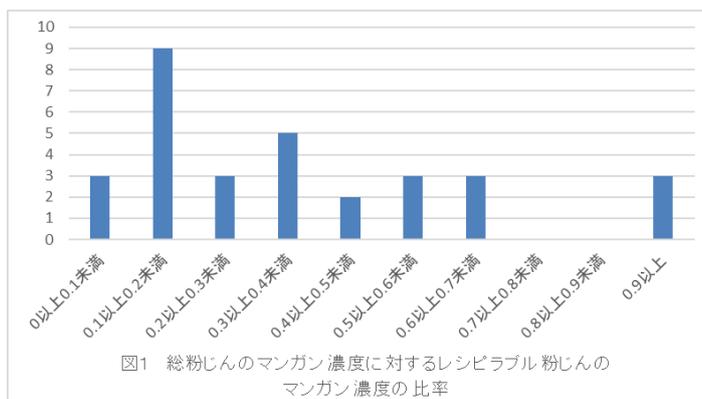


Fig. 1 The association between Mn in the respirable and the inhalable aerosol fractions ($n = 153$; Pearson's $r = 0.70$; $p < 0.001$).

(3) 厚生労働省は、フェロアロイ合金製造業及び製鉄業の事業者団体に対して、過去のマンガンの濃度測定結果（1社2測定値を除き、B測定結果）の提供を求めたところ、4社（合金2社、高炉2社。計30測定値）から回答があった(厚生労働省(2019))。これによると、レスピラブル粉じんの濃度は、総粉じん濃度の5.8%~163%とばらついた。総粉じん濃度に対するレスピラブル粉じん濃度の比率の分布をみると、「0.1以上0.2未満」が最も多かった。(図1)。



2 考察（フェロアロイ合金製造等におけるレスピラブル粉じんの濃度について）

(1) 一般的に、総粉じん濃度は、インハラブル濃度よりも高い値を示す。このため、マンガン合金製造プラント等における環境中のレスピラブル粉じんのマンガンの濃度は、現在測定されている総粉じん濃度に含まれるマンガンの濃度の10分の1程度になることが想定される。

- (2) 厚生労働省（2019）の結果は、1社2データを除き、B測定結果であり、測定時間が短時間であるため、ばらつきが大きいと考えられる。この結果は、総粉じん濃度に対するレシピラブル粉じん濃度の比率の最頻値が「0.1以上0.2未満」となっていることから、過去の文献と矛盾しないといえる。

参照文献

Bast-Pttersen R., Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2004) Neuropsychological Function in Manganese Alloy Plant Workers. Int Arch Occup Environ Health Vol.77, pp.277-287

Ellingsen D.G., Hetland S.M., Thomassen Y. (2003) Manganese air exposure assessment and biological monitoring in the manganese. J. Environ Monit Vol. 5, pp.84-90

厚生労働省（2019）「マンガン合金製造工程等におけるマンガン濃度測定について」

別紙5 金属アーク溶接における溶接ヒュームに係るばく露低減対策に関する文献等

1 粉じん障害防止規則における金属アーク溶接作業に関する規定

- (7) 金属アーク溶接作業は、粉じん障害防止規則においては、呼吸用保護具の使用が義務づけられる作業（同規則別表第3）に該当するが、局所排気装置等の粉じん発散防止措置や作業環境測定が必要な特定粉じん作業（第2条第1項第2号及び別表第2）には該当しない。
- (8) 特定粉じん作業に関する解釈例規では、「「特定粉じん発散源」は、粉じん作業にかかる粉じん発生源のうち、作業工程、作業の態様、粉じん発生の態様等からみて一定の発生源対策を講ずる必要があり、かつ、有効な発生源対策が可能であるものであり、具体的には、屋内又は坑内において固定した機械又は設備を使用して行う粉じん作業にかかる発生源が原則として列挙されたものであること。」（昭和54年7月26日付け基発第382号）と示されている。

2 溶接時の空気中のマンガンの濃度について

- (1) 小嶋(2011)は、炭酸ガスアーク溶接ヒュームのレシピラブル粉じん濃度として、溶接用面体の内側の濃度として、70-90mg/m³ (90秒間の時間平均濃度)と報告している。また、溶接工業会(2019)は、溶接ヒューム中のマンガ含有率が軟鋼系溶接棒を用いた被覆アーク溶接では、2.56-2.77%であると報告している。また、ACGIHでは、溶接ヒュームについては、レスピラブルとインハラブルの比が1:1であるとしている（ACGIH(2013) p.3）。
- (2) Taube(2013)による溶接ヒューム中のマンガ濃度等に関する論文レビューの結果では、レスピラブル域のマンガ濃度（8時間平均の個人曝露濃度）は、溶接方法に応じて大きな幅があるが、0.04-0.56mg/m³となっている。

3 溶接ヒュームばく露実態調査結果

- (1) 中央労働災害防止協会は、28事業場（のべ61単位作業場所）に対して実態調査を実施した（中央労働災害防止協会(2019)）。作業環境測定に準じて溶接ヒューム中のマンガ濃度を測定し、そこで得られたA測定値の第2評価値及びB測定値（質量濃度測定方法による。サンプリング時間が10分間を相当超えるものがあり、通常の

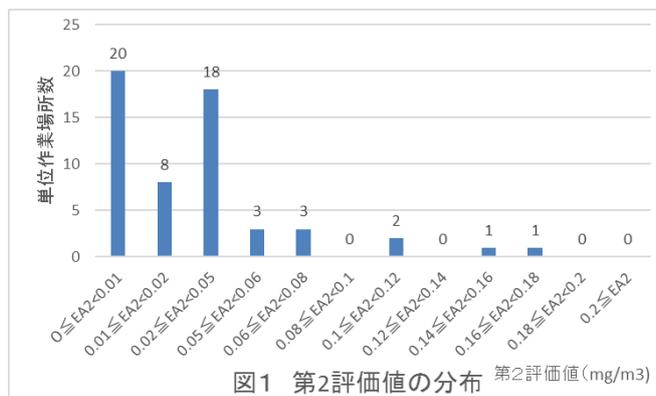
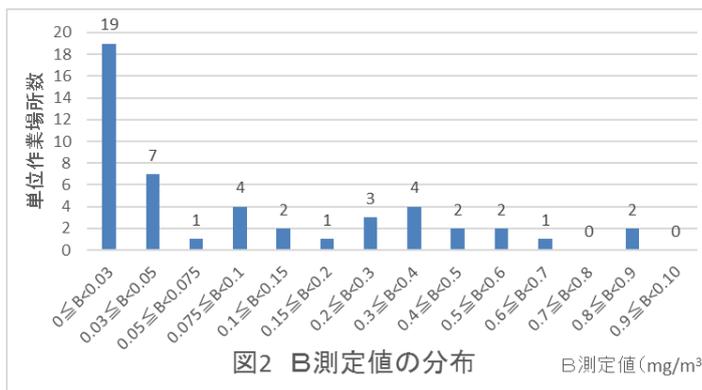


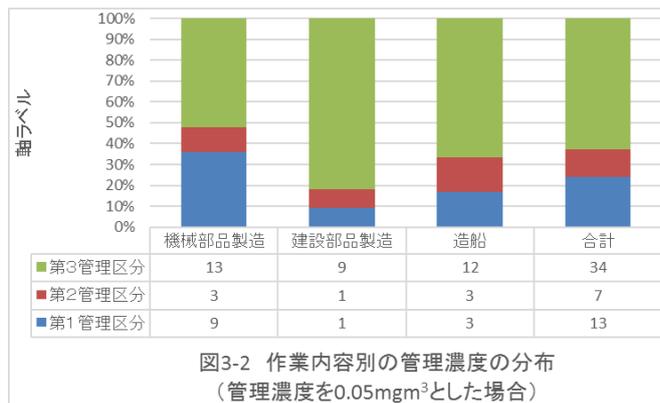
図1 第2評価値の分布 第2評価値(mg/m³)

B 測定値よりも低い値となっている可能性がある。以下実態調査の B 測定値について同じ。)の分布を図 1、2 に示す (測定値はいずれもレスピラブル粒子のマンガン濃度。以下実態調査について同じ。)。B 測定値が 0.03mg/m³ 未満の単位作業場所の割合は 34.5% (19 作業場所)、0.075mg/m³ (0.05mg/m³ の 1.5 倍)



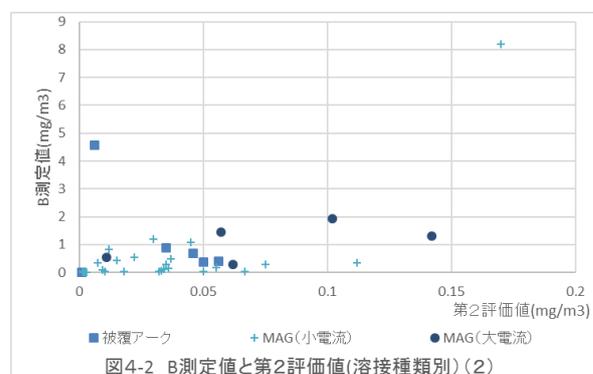
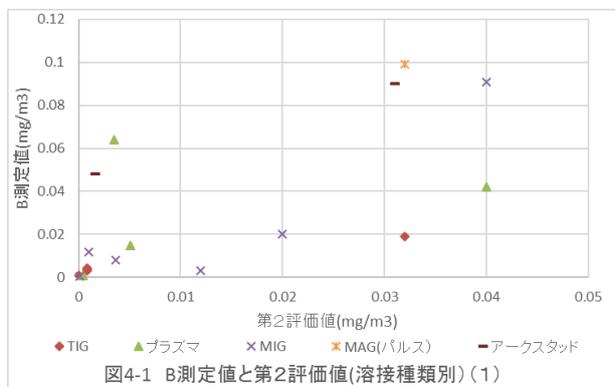
未満は 49.1% (27 作業場所) であったが、0.05mg/m³ の 4 倍以上となる 0.2mg/m³ 以上の単位作業場数が 40% (21 作業場所) を占めている状況である。第2評価値が 0.02mg/m³ 未満の割合は 50% (28 作業場所)、0.05mg/m³ 未満は 82% (46 作業場所) であった。

- (2) 仮に、管理濃度を 0.05 mg/m³ とした場合、第1管理区分：13 (24%)、第2管理区分：7 (13%)、第3管理区分：34 (63%) であった。作業内容別の管理区分を図 3-2 に示す。管理区分の分布は作業内容によって違いがあるが、いずれも第3管理区分が過半数を占める。



- (3) 溶接の種類別の B 測定値と第2評価値

の分布を図 4-1、4-2 に示す。被覆アーク、MAG 溶接 (小電流、大電流) については、同一の溶接方法でも測定値には大きなばらつきがあり、これらの溶接方法と測定値に関連は見られない (図 4-2)。なお、TIG 溶接、プラズマ溶接、MAG (パルス) 溶接、アークスタッドについては、上記の3溶接方法と比較して低い濃度に分布しているが、ばらつきが大きい (図 4-1)。



(4) 作業内容別のB測定値と第2評価値の分布を図5に示す。同じ作業であっても、測定値には大きなばらつきがあり、作業内容と測定値に関連は見られない。造船は、他の作業と比較して低い濃度に分布している。

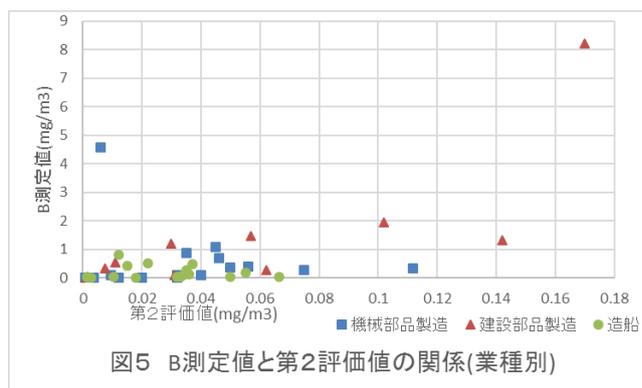


図5 B測定値と第2評価値の関係(業種別)

(5) 単位作業場の換気手法としては、全体(61 作業場所)に占める全体換気の割合は 65.6% (40 作業場所)、局所排気装置が 11.4% (7 作業場所)、その他(集塵機、ポータブルファン等)が 13.1% (8 作業所)、無しが 9.8% (6 作業場所)であった。換気の種類(局所排気、その他、無し)別のB測定値と第2評価値の分布を図6に示す。局所排気装置やその他換気装置を設置している作業場所のマンガンの濃度は、換気装置無しの作業場と比較して低くなっているようには見えない。

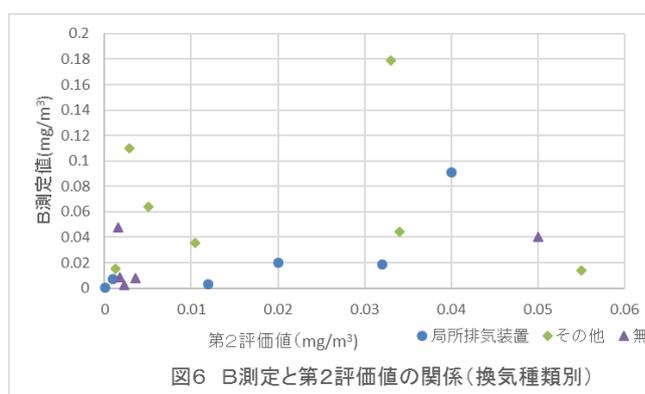


図6 B測定と第2評価値の関係(換気種類別)

(6) 個人ばく露測定値(質量濃度測定方法、時間加重平均値)の分布を図7に示す。全体(56 作業場所)に占める 0.02mg/m³未満の割合は 26.8% (15 作業場所)、0.05mg/m³未満が 48.2% (27 作業場所)であり、0.05mg/m³以上が 51.8% (29 作業場所)を占めた。1mg/m³を超えた作業場所も8.9% (5 作業場所)あった。

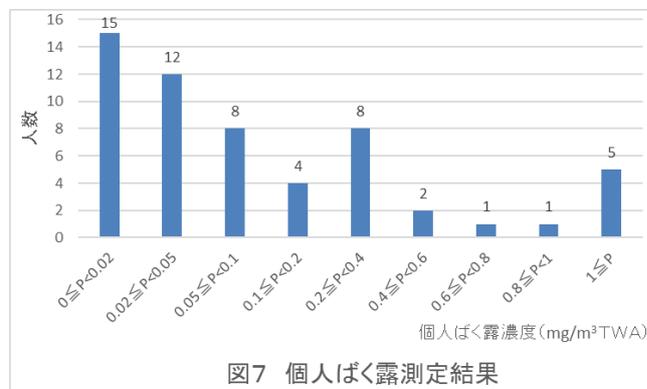


図7 個人ばく露測定結果

(7) 個人ばく露測定値をマンガンのばく露に関する基準値(0.05 mg/m³)で除した「要求防護係数」の作業別の分布を図8-2に示す。要求防護係数が 1以上 (防塵マスクが必要) となった割合は 51.8% (29 作業場所)、1以上10未満 (半面マスクが使用可能)が 35.7% (20 作業場所)、10以上50未満 (全面マスク又は半面型電

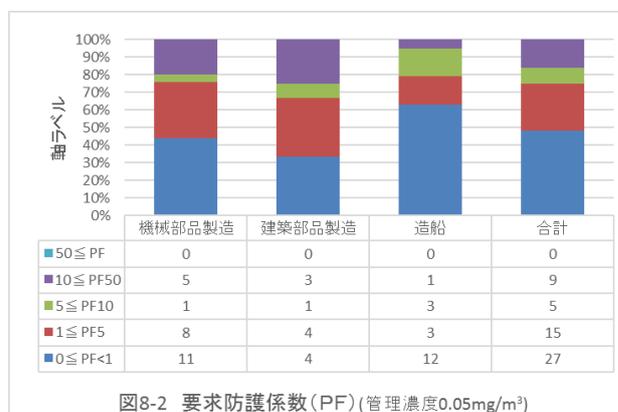


図8-2 要求防護係数(PF)(管理濃度0.05mg/m³)

動ファン付きマスクが使用可能)が 16.0% (9 作業場所)、50 以上 (全面型の電動ファン付きマスクが必要)が 0% (0 作業場所) となった。作業の種類により、要求防護係数の分布に違いが見られた。

4 溶接の品質確保のための風速の制限

- (1) 日本溶接協会によれば、被覆アーク溶接については 4m/sec 以上で、MAG 溶接では 2 m/sec 以上で靱性が低下し、それぞれ、4 m/sec 以上、2 m/sec 以上で溶接作業性が低下することが報告されている (神戸製鋼所 (1985))。
- (2) 最近の文献 (溶接協会(2009)) では、ガスシールドアーク溶接については、0.5m/sec 以上とならないように管理すべきとされている。
- (3) 一方、化学物質のばく露による健康障害を防止するため、特定化学物質障害予防規則における局所排気装置の制御風速は、粒子状のものについては 1.0m/secとされている (特定化学物質障害予防規則の規定に基づく厚生労働大臣が定める性能 (昭和 50 年労働大臣告示第 75 号))。

5 考察

- (1) 粉じん障害防止規則においては、従来、有効な発生源対策が可能である、固定した設備を使用して行う作業に対して、局所排気装置等の設置及び作業環境測定を義務付けている。金属アーク溶接については、作業箇所が一定しないことが通常であり、その場合には、有効な局所排気装置等を設置することは困難である。
- (2) 中央労働災害防止協会 (2019) の結果からも、管理濃度を $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ とした場合、第 3 管理区分に分類される単位作業場所の割合が 63%と高い割合を占めている。しかも、B 測定値が $0.2\text{mg}/\text{m}^3$ 以上という高い濃度の作業場所が 40%を占めている。個人ばく露測定値が基準値の何倍であることを示す要求防護係数についても、基準値を $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ とした場合、1 以上 (防じんマスクの着用が必要) の作業場所の割合は 52%となり、第 3 管理区分の割合とほぼ一致する。要求防護係数が 10 以上 (全面マスク又は半面型電動ファン付きマスクが必要) な割合も、16%を占めた。
- (3) このような高い濃度の作業場所に対して、局所排気装置等の措置によって第 2 管理区分を実現することは困難と見込まれる。まず、局所排気装置等については、溶接作業場所が一定しない屋内作業場において有効な局所排気装置等を設置することは困難である。仮に溶接作業場所が一定である場合であっても、局所排気装置等には、抑制濃度を実現できる風速を有するものが必要となる。制御風速の最低値は、粒子状物質については、1.0m/sec (局所排気装置) 又は 0.2m/sec (プッシュプル型換気装置)とされている。しかし、B 測定の測定値や要求防護係数を踏まえると、濃度を 10 分の 1 まで減少させる必要がある作業場所も多く、これをはるかに上回る高い風速が求められることが予想される。溶接作業においては、被覆アーク溶接で 4m/sec、ガスシ

ールドアーク溶接で 0.5m/sec を超える風速が発生すると溶接不良や溶接作業性の低下が発生することを踏まえると、換気装置によって抑制濃度を実現することは現実的ではない。中央労働災害防止協会（2019）の結果からも、局所排気装置や集塵機といった措置を行っても、マンガン濃度を十分に低減できていない作業場所が多数見られる。

- (4) 以上から、金属アーク溶接又は溶断作業を行う作業場について、作業環境測定の実施及び局所排気装置等の設置を一律に義務付けても、その実効性を担保することは困難であることが見込まれる。ただし、現に第1管理区分である作業場所もあることから、現状を悪化させることなく、作業場所の状況に応じた対策を促すため、段階的な規制を設けることが妥当である。この場合、測定結果に応じた換気措置の実施のほか、マンガンばく露を防止するための最低限の措置として、個人サンプリングによるマンガン濃度測定の結果により算定される要求防護係数を満たす有効な呼吸用保護具を使用させることを義務付けることが必要である。

参照文献

中央労働災害防止協会（2019）「令和元年度 溶接ヒュームに含まれるマンガンのばく露実態調査（速報）」

日本溶接協会(2009)「ガスシールドアーク溶接のシールド性に関する研究報告（第4回）風速の影響（前編）」溶接技術 57(8) pp.129-134

別紙6 個人サンプリングによる測定の方法に関する文献等

1 JIS Z3950 改訂（案）における測定箇所の規定

JIS Z3950 改訂（案）においては、個人ばく露粉じん測定を行う場合の試料採取機器等の装着等に関する留意事項を以下のとおりとしている。

「個人ばく露粉じん質量濃度は、呼吸域で測定する。個人ばく露粉じん質量濃度測定用のサンプリングは、作業者の作業状態を代表するように設定する。限界値と比較する目的で、試料空気の時間加重平均粉じん質量濃度を求めるには、通常の作業活動を妨げることなく、サンプリング時間を通して、ろ過材保持具又は粉じん濃度計の吸引口を作業者の呼吸域に保持されるよう装着する。個人ばく露粉じん質量濃度測定は、次による。

- a) 個人ばく露粉じん質量濃度測定における試料空気のサンプリング方法は、作業者及びその正常な作業に対する妨害が最小になるように設定しなければならない。測定する時期及び時間は、溶接作業の実施頻度、時間、測定目的などを考慮して設定する。
- b) ろ過材保持具又は粉じん濃度計の吸引口は、呼吸域に設置する。呼吸域に直接設置できない場合は、小口径の採気管を通して呼吸域から試料空気を吸引する。
- c) 個人ばく露粉じん質量濃度は、サンプリング期間にわたる時間加重平均粉じん質量濃度として算出する。」

2 個人サンプリングを活用した作業環境測定に関するパブリックコメントの内容

厚生労働省（2019）では、作業環境測定基準（昭和51年労働省告示第46号）の改正案として、個人サンプリングを活用した作業環境測定における試料空気の採取等の対象者数、時間等を次のとおりパブリックコメントで公表している（抜粋）。

- (1) 測定における試料空気の採取等は、単位作業場所において作業に従事する者の身体に装着する試料採取機器等を用いる方法により行うこと。
- (2) (1)の試料採取機器等の装着は、単位作業場所において、労働者にばく露される測定対象物質の量がほぼ均一であると見込まれる作業ごとに、それぞれ、適切な数の労働者に対して行うこと。ただし、その数は、それぞれ、5人を下回ってはならない。
- (3) (1)の試料空気の採取等の時間は、(2)の労働者が一の作業日のうち単位作業場所において作業に従事する全時間とすること。ただし、当該作業に従事する時間が2時間を超える場合であって、同一の作業を反復する等労働者にばく露される測定対象物質の濃度がほぼ均一であることが明らかなきときは、2時間を下回らない範囲内で、当該採取等の時間を短縮することができる。
- (4) 単位作業場所において作業に従事する労働者の数が5人を下回る場合にあつては、(2)のただし書及び(3)（ただし書の規定を除く。）の規定にかかわらず、一の労働者が一の作業日において単位作業場所で作業に従事する時間を分割し、2以上の(1)に定める試料空気の採取等が行われたときは、当該試料空気の採取等は、当該2以上の採取

された試料の数と同数の労働者に対して行われたものとみなすことができること。

5 考察

- (8) 溶接ヒュームの試料採取機器の装着箇所については、JIS Z3950 改定案を踏まえる必要がある。
- (9) 個人サンプリングを用いた溶接ヒュームの測定の試料空気の採取等の対象者数、時間等については、改正予定の作業環境測定基準（以下「測定基準」という。）に準ずる必要があるが、以下の点では違いがある。
- (ア) 測定基準では、「単位作業場所」における「労働者にばく露される測定対象物質の量がほぼ均一であると見込まれる作業（以下「均等ばく露作業」という。）」を測定単位としているが、溶接ヒュームの濃度測定の場合は、単に、「均等ばく露作業を測定単位」とすることが妥当である。
- (イ) 測定基準では、作業時間が2時間を超える場合で繰り返し作業がある場合は、2時間を下回らない範囲で測定時間の短縮を認めている。これは、同じ作業場で作業環境測定を6月に1回繰り返すことを前提としているため、溶接ヒュームの濃度測定の場合は短縮を認めないことが妥当である。
- (ウ) 測定基準では、測定結果を統計処理し、第1評価値、第2評価値を算定するが、溶接ヒュームの濃度測定の場合は、要求防護係数を算定する観点から、均等ばく露作業における測定値のうち最大のものを評価値とすることが妥当である。
- (エ) 測定基準では、均等ばく露作業における測定対象者の数は、適切な人数について行うが、統計処理を行うことを前提に5人を下回ってはならないとし、下回る場合は測定時間を分割するとしている。しかし、溶接ヒュームの濃度測定の場合、統計処理は行わないため、均等ばく露作業に従事する者のうち適切な数の者に対して測定を行うことが妥当である。ただし、測定の精度を担保する観点から、複数人に対して（作業者が1人の場合は、当該者に対する測定を複数回）測定を実施することを原則とする必要がある。
- (10) 試料採取及び分析方法は、測定基準に定める方法（試料採取方法：ろ過捕集方法、分析方法：吸光光度分析方法又は原子吸光分析方法）と同様の方法とすべきである。
- (11) これらの違いを踏まえ、測定方法の詳細について検討を行うべきである。

参考文献

厚生労働省（2019）作業環境測定基準等の一部を改正する告示案に関するパブリックコメント

JIS Z 3950 溶接作業環境における浮遊粉じん濃度測定方法

別紙 7 呼吸用保護具の指定防護係数に関する文献等

1 呼吸用保護具に関する構造規格における規定

- (1) 防じんマスクの規格（昭和 63 年労働省告示第 19 号）では、第 6 条（性能に関する試験）の粒子捕集効率試験の試験条件として、取り替え式、使い捨て式それぞれについて、マスクの捕集効率の等級を RS1/DS1/RL1/DL1 : 80.0%、RS2/DS2/RL2/DL2 : 95.0%、RS3/DS3/RL3/DL3 : 99.9%の 3 等級に区分している。
- (2) 電動ファン付き呼吸用保護具の規格（平成 26 年厚生労働省告示第 455 号）では、第 6 条（性能に関する試験）の粒子捕集効率試験の試験条件として、フィルタの捕集効率の等級を PS1/PL1 : 95.0%、PS2/PL2 : 99.0%、PS3/PL3 : 99.97 の 3 等級に区分している。さらに、同第 6 条は、電動ファン付き呼吸用保護具の漏れ率試験の試験条件として、指定のフィルタを装着したマスクからの漏れ率を等級ごとに S 級 : 0.1%、A 級 : 1.0%、B 級 : 5.0%の 3 等級に区分している。

2 日本工業規格における規定等

- (1) JIS T8150:2006 の付表 2 は、指定防護係数（訓練された着用者が、正常に機能する呼吸用保護具を正しく着用した場合に、少なくとも得られるであろうと期待される防護係数）について、ろ過式の動力なしの呼吸用保護具の指定防護係数は、半面形が 4～50、全面計が 4～100となっており、ろ過式の動力付きの呼吸用保護具の指定防護係数は、半面形で 4～50、全面形で 4～100、フード形で 4～25、フェイスシールド形で 4～25としている。さらに、付表 2 の注では、ろ過式の防護係数は、面体等の漏れ率[Lm(%)]及びフィルタの透過率[Lf(%)]から、 $100/(Lm+Lf)$ によって算出すると規定している。
- (2) JIS T8150:2006 の解説では、付表 2 に示した防護係数は、米国国家規格（ANSI）及び米国職業安全衛生研究所（NIOSH）、英国安全衛生部（HSE）等に示された指定防護係数を参照し、我が国の呼吸用保護具の種類に適した数値について安全性を考慮して決めたものであるとしている。さらに、同解説では、欧米の指定防護係数の根拠は、実験室において被験者が呼吸用保護具を実際に着用し、一定の動作及び発声を行ったときの実測値を集計し、その代表値として帰納した値であり、着用者間のばらつきに対して安全側に設定した値であるとしている。

3 米国の法令等における規定

- (1) 米国安全衛生庁（USOSHA）の規則（29 CFR 1910.134(d））「呼吸用保護具の選択」においては、各種類の呼吸用保護具の指定防護係数(assigned protection factor)を

Table 1 において規定しており、ろ過式の呼吸用保護具については、半面形で10、全面形で50とされている。電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR) については、半面形で50、全面形で1,000、ヘルメット形で25、フード形で1000、ルーズフィッティング形で25としている。

(2) OSHA の指定防護係数

は、米国産業規格 (ANSI) Z88. 2:1992 の指定防護係数を根拠の一つとしている (Steelnack (2007))。ANSI の原案作成委員会では、指定防護係数の根拠としていくつかの文献をあげている (Nelson (1996))。半面形 PAPR については、鉛溶融炉における 高性能フィルタ (HEPA) を備えた半面形 PAPR を着用した作業者の防護係数を実測した結果、防護係数の幾何平均が 431、5%パーセンタイルの推定値が 58であったことを主な根拠としている (Lenhart and Campgell (1990))。全面形 PAPR については、鉛溶融炉における全面形 PAPR を着用した作業者 (定量的フィットテストの結果、最小のフィット係数は 500であった。) の防護係数を実測した結果、5%パーセンタイルの防護係数が 1400であったこと (Colton et al. (1990))、ヘルメット・フード形の PAPR の防護係数実測値の 5%パーセンタイルの防護係数が 1470であった

| Type of Respirator ^{1,2} | Quarter mask | Half mask | Full facepiece | Helmet/Hood | Loose-fitting facepiece |
|---|--------------|-----------------|----------------|-----------------------|-------------------------|
| 1. Air-Purifying Respirator | 5 | 10 ³ | 50 | — | — |
| 2. Powered Air-Purifying Respirator (PAPR) | — | 50 | 1,000 | 25/1,000 ⁴ | 25 |
| 3. Supplied-Air Respirator (SAR) or Airline Respirator | | | | | |
| • Demand mode | — | 10 | 50 | — | — |
| • Continuous flow mode | — | 50 | 1,000 | 25/1,000 ⁴ | 25 |
| • Pressure-demand or other positive-pressure mode | — | 50 | 1,000 | — | — |
| 4. Self-Contained Breathing Apparatus (SCBA) | | | | | |
| • Demand mode | — | 10 | 50 | 50 | — |
| • Pressure-demand or other positive-pressure mode (e.g., open/closed circuit) | — | — | 10,000 | 10,000 | — |

Notes:

¹ Employers may select respirators assigned for use in higher workplace concentrations of a hazardous substance for use at lower concentrations of that substance, or when required respirator use is independent of concentration.

² The assigned protection factors in Table I are only effective when the employer implements a continuing, effective respirator program as required by this section (29 CFR 1910.134), including training, fit testing, maintenance, and use requirements.

³ This APF category includes filtering facepieces, and half masks with elastomeric facepieces.

⁴ The employer must have evidence provided by the respirator manufacturer that testing of these respirators demonstrates performance at a level of protection of 1,000 or greater to receive an APF of 1,000. This level of performance can best be demonstrated by performing a WPF or SWPF study or equivalent testing. Absent such testing, all other PAPRs and SARs with helmets/hoods are to be treated as loose-fitting facepiece respirators, and receive an APF of 25.

⁵ These APFs do not apply to respirators used solely for escape. For escape respirators used in association with specific substances covered by 29 CFR 1910 subpart Z, employers must refer to the appropriate substance-specific standards in that subpart. Escape respirators for other IDLH atmospheres are specified by 29 CFR 1910.134(d)(2)(ii).

TABLE III. Workplace Protection Factors—Powered Air Purifying Respirators

| Studies | N | Geometric Mean | Geometric Standard Deviation | Best Estimate 5th Perct. |
|---|----|----------------|------------------------------|--------------------------|
| <i>Half mask</i> | | | | |
| Lenhart ⁽²⁶⁾ | 25 | 431 | 3.4 | 58 |
| Myers & Peach ⁽⁸⁾ | 7 | 49 | 2.5 | 11 |
| daRoza (simulated work data) ⁽¹⁰⁾ | — | 5000 | — | — |
| Skaggs (simulated work data) ⁽¹¹⁾ | — | 14300–20000 | — | — |
| <i>Full facepiece</i> | | | | |
| Ayer (simulated work data) ⁽¹²⁾ | — | — | — | — |
| Myers & Peach ⁽⁸⁾ | 3 | 66 | 3.6 | 8 |
| Subsequent data | | | | |
| Colton (13) | 55 | 10300 | 3.4 | 1400 |
| <i>Helmet/hood</i> | | | | |
| Decision based on analogy to atmosphere supplied helmet/hood data | | | | |
| Subsequent data | | | | |
| Keys ⁽¹⁴⁾ | 60 | 10400 | 3.3 | 1470 |
| <i>Loose-fitting facepiece</i> | | | | |
| Myers (battery) ⁽¹⁵⁾ | 47 | 127 | 2.3 | 32 |
| Gosselink ⁽¹⁶⁾ | 7 | 199 | 2.6 | 41 |
| Myers (smelter) ⁽¹⁷⁾ | 43 | 184 | 3.3 | 27 |
| Que Hee ⁽¹⁸⁾ | — | — | — | — |
| daRoza (simulated work data) ⁽¹⁰⁾ | — | — | — | — |
| Skaggs (simulated work data) ⁽¹¹⁾ | — | — | — | — |
| Dixon (program protection factor) ⁽¹⁹⁾ | — | 230 | — | — |
| Subsequent data | | | | |
| Gaboury ⁽²⁰⁾ | 20 | 1410 | 2.5 | 306 |
| Stokes ⁽²¹⁾ | 39 | 1530 | 5.8 | 85 |

こと (Keys et al. (1990)) を主な根拠としている (Table III 参照)。半面型、全面型のろ過式マスクの指定防護係数も、同様に 5 パーセントの防護係数の実測値に基づいて設定されている (Table II 参照)。

- (3) さらに、同規則 1910.134(d)(3)(iv) において、事業者は、米国安全衛生研究所 (USNIOSH) に認証された高捕集効率フィルタ (HEPA) か、42CFR part 84 によって NIOSH が認証したフィルタを使用することを求めている。42CFR part 84 では、試験粒子別に、最低フィルタ捕集効率別に型式を定めており、その捕集効率の種類は、N100/R100: 99.97%、N99/R99: 99%、N95/R95: 95%の3段階となっている。

- (4) 同規則 1910.134(f) においては、事業者は、同規則の付属書 A に従って

フィットテストを実施することを義務付けている。フィットファクター (マスク外の濃度をマスク内の濃度で除したもの) としては、半面型マスクは 100、全面型マスクでは 500 を達成することが求められている。フィットテストの実施時期は、新たなマスクを使用する前、マスクを変更する前や、労働者のフィッティングに影響があること (大幅な体重の増減等) が発生した時に実施するとされている。フィットテストの方法は、定量的テスト (測定器を使用してフィットファクターを計算する方法) と定性的テスト (外部のガスがマスク内に入ってきたことを嗅覚等で検知する方法) があり、定性的テストは、フィットファクターが 100 以下の場合にしか実施できないこととされている。

4 フィットテストに関する ISO の規定

- (1) ISO 16975-3:2017 においては、フィットテストの実施方法と頻度等を定めている。実施時期については、新しいマスクの使用前やマスクの変更の前に実施することとされている。さらに、少なくとも年 1 回実施することが推奨されるとしている。

TABLE II. Workplace Protection Factors—Negative Pressure Air Purifying Respirators

| Studies Available to Committee | N | Geometric Mean | Geometric Standard Deviation | Best Estimate 5th Perct. |
|---|-----|----------------|------------------------------|--------------------------|
| <i>Half mask</i> | | | | |
| Dixon ⁽²⁴⁾ | 42 | 3360 | 4.8 | 254 |
| Reed ^{(25),A} | 19 | 18 | 3.17 | 2.7 |
| Lenhart ⁽²⁶⁾ | 25 | 166 | 3.8 | 18 |
| Nelson ⁽²⁷⁾ | 76 | 258 | 5.2 | 17 |
| <i>Subsequent data</i> | | | | |
| Gosselink ⁽²⁸⁾ | 44 | 96 | 2.3 | 24 |
| Gaboury ⁽²⁰⁾ | 18 | 47 | 2.5 | 10 |
| Colton (welding) ⁽²⁹⁾ | 32 | 147 | 2.5 | 33 |
| Myers ⁽³⁰⁾ | 153 | 346 | 7.2 | 14 |
| Johnston ^{(31),B} | 18 | 44.8 | 2.85 | 8 |
| Colton (brass foundry) ^{(32),B} | 42 | 469 | 3.87 | 50 |
| Colton (Al smelter) ^{(33),B} | 38 | 28.2 | 2.06 | 8.6 |
| Galvin ^{(34),B} | 63 | 75 | 3.1 | 11.7 |
| Wallis ^{(35),B} | 70 | 50 | 3.5 | 7.5 |
| <i>Full facepiece</i> | | | | |
| No WPF studies available; since no new data, no change from 1980 standard | | | | |
| <i>Subsequent data</i> | | | | |
| Colton(7) | 32 | 4790 | 7 | 194 |

^AANSI and Nelson concluded that sampling bias may have been a factor in the WPF measured

^BNelson concluded that sampling bias may have been a factor in the WPF measured

5 考察

- (1) 構造規格においては、防護係数の直接の規定はない。OSHA 規則の指定防護係数の根拠となる文献が、それぞれ、高性能フィルタ (HEPA) を使用し、又は、フィットファクターが 500 あるなど、フィルタからの漏れ率をほぼ無視できる状態での実測値であることから、OSHA の指定防護係数は、面体からの漏れ率の逆数と考えるのが妥当 (全面形で 0.1%、半面形で 2%) である。したがって、この漏れ率と構造規格のフィルタ等級に応じたフィルタからの漏れ率を JIS T8150 の防護係数の計算式 ($100/(L_m+L_f)$) に当てはめて防護係数を計算した結果を表 1 及び 2 に示す。なお、99.9% のフィルタ漏れ率は 0 として計算している。
- (2) 現在、JIS T 8150 は改訂作業中であり、それと連携を図りつつ、指定防護係数を明確にしていく必要がある。
- (3) フィットテストについては、従来、定量的フィットテストによる防護係数の確認を実施することを通達等によって指導している。溶接ヒュームについては、局所排気装置等によるマンガンの濃度の低減が困難であることを踏まえ、定期的に、定量的フィットテストを確実に実施することが必要である。

表 1 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 ($PF_1=50$) | $PF_{total}=14.3$ | $PF_{total}=47.6$ |
| 半面形 ($PF_1=10$) | $PF_{total}=6.7$ | $PF_{total}=9.9$ |

表 2 電動ファン付き呼吸用保護具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% の フィルタ ($PF_2=100$) | 捕集効率 99.9% のフィルタ ($PF_2=1,000$) |
|---------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|
| 全面形 ($PF_1=1000$) | $PF_{total}=19.6$ | $PF_{total}=90.9$ | $PF_{total}=1000$ |
| 半面形 ($PF_1=50$) | $PF_{total}=14.3$ | $PF_{total}=33.3$ | $PF_{total}=50$ |

PF_1 : 面体と顔の隙間からの漏れ率に対応する防護係数

PF_2 : フィルタからの漏れ率に対応する防護係数

PF_{total} : 全体の防護係数

(参照文献)

29 CFR 1910.134 Respiratory Protection Standard, US OSHA

- 42 CFR Part 84 Respiratory Protective Devices, NIOSH
OSHA (2009) Assigned Protection Factors for the Revised Respiratory Protection Standard, US OSHA
- Colton, C.E., Mullis, H.E., Rhoe, C.R.(1990) Workplace Protection Factor for a Powered Air-Purifying Respirators. Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference Orland, FL, May 1990.
- Keys, D.R., Guy, H.P., Axon, M. (1990) Workplace Protection Factors of Powered, Air-Purifying Respirators. Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference Orland, FL, May 1990.
- Lenhart, S.W. and Campbell, D.L. (1984) Assigned protection factors for two respirator types based upon workplace performance testing. Ann. Occu. Hyg. Vol.28, pp.173-182
- Nelson, T.J. (1996) The Assigned Protection Factor According to ANSI, AIHA Journal, Vol.57. pp.735-740
- Steelnack, J. (2007) Assigned Protection Factor (APF) Table Added to OSHA's Respiratory Protection Standard 29 CFR 1910.134. Paper presented at the American Industrial Hygiene Conference, June 2007.
- JIS T8150:2006 呼吸用保護具の選択、使用及び保守管理方法・同解説