

日本産業衛生学会関東地方会 第295回例会 第45回 関東産業衛生技術部会研修会

当番幹事：山野優子 (関東産業衛生技術部会・昭和大学)

**日時：2022年2月19日(土)13時から
(ZOOM ウェビナーによるオンライン開催)**

**申し込み方法：関東産業衛生技術部会の web ページより
<http://ohe-kanto.umin.jp/event.html>**

日本産業衛生学会関東地方会 第295回例会 第45回 関東産業衛生技術部会研修会

当番幹事：山野優子 (関東産業衛生技術部会・昭和大学)

発がん性分類の新しい動きー溶接ヒュームを含むー

プログラム

座長：山野優子 (昭和大学), 齊藤宏之 (安衛研)

「従来の発がん分類の経緯と実績」

山野優子 (昭和大学)

「IARCと産衛の発がん性分類(動物実験、メカニズムから)」

長野嘉介 (長野毒性病理コンサルティング)

「溶接ヒュームの発がん性評価」

森本泰夫 (産業医科大学)

「溶接ヒューム中の発がん性金属などのばく露評価」

鷹屋光俊 (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)

日時：2022年2月19日(土) 13:00

会場：ZOOM Webinarによるオンライン開催

参加費：無料

事前登録：関東産業衛生技術部会のwebページより

<http://ohe-kanto.umin.jp/event.html>

注意：オンライン開催のため、日本医師会認定産業医制度の研修対象
ではありません。

参加者の皆様へ

- * 本研究会は現地開催ではなく、Zoomによるオンライン開催で行います。
- * PC本体にカメラ、マイク、スピーカーが内蔵あるいは接続されているかをご確認ください。
- * 参加費は無料です。
- * 講演の発表時間は、約30分、質疑応答5分の計35分です。
- * 前もって録音されたスライドを共有させていただくことになります。
- * 質疑応答は、オンタイムでできるように演者は参加いたします。
- * 質問はQ & Aで受け付けます。ご所属とご氏名、質問内容をQ & Aに書き込んでください。座長が質問を読み上げ演者に回答いただきます。
- * 事務局から、連絡事項がある場合は、チャットでお知らせいたします。「チャット」をクリックして内容をご確認ください。
- * 講演動画、スライド等の録画・録音・撮影や画面をスクリーンショット等でキャプチャーする行為、また無断転用・複製は一切禁止いたします。

プログラム

13:00-13:05 : 関東地方会長および当番幹事挨拶

諏訪園 靖 (関東地方会 地方会長)

山野 優子 (当番幹事, 関東産業衛生技術部会 部会長)

講演

座長 : 山野優子 (昭和大学)、齊藤宏之 (労働安全衛生総合研究所)

1. 13:05-13:40 : 「従来の発がん分類の経緯と実績」
山野優子 (昭和大学)
2. 13:40-14:15 : 「IARC と産衛の発がん性分類 (動物実験、メカニズムから)」
長野嘉介 (長野毒性病理コンサルティング)
- 14:15-14:30 : 休憩
3. 14:30-15:05 : 「溶接ヒュームの発がん性評価」
森本泰夫 (産業医科大学)
4. 15:05-15:40 : 「溶接ヒューム中の発がん性金属などのばく露評価」
鷹屋光俊 (労働安全衛生総合研究所)
5. 15:40-16:00 : 総合討論

閉会の挨拶 : 齊藤宏之 (関東産業衛生技術部会 副部会長)

従来の発がん分類の経緯と実績

山野優子（昭和大学保健医療学部/医学部衛生学公衆衛生学講座）

【はじめに】

日本産業衛生学会（以下、産衛）では、1959年に本学会内に許容濃度委員会を設置し、1963年には17物質について許容濃度を勧告している。現在は、化学物質に限らず、物理環境因子なども含め、生物学的許容値、感作性物質や生殖毒性物質についても評価している。

発がん性分類小委員会（以下、小委員会）は、この許容濃度委員会内において2013年に再編成された。そのきっかけの一つとしては、2012年、1,2-ジクロロプロパンによるオフセット印刷工程で起きた胆管癌の発生であったと思われる。当時この物質には、許容濃度も発がん性分類もなかった。

本講演では、産衛における発がん性分類の経緯やルール作り、発がん性分類の実績と今後の活用などについて報告する。

【発がん性評価の経緯】

産衛では、1983年より発がん性分類を産衛誌に掲載している。当初は“職業性発がん物質”として、石綿やベンジジンなど13物質が掲載された。1986年には、IARCに準じて発がん物質を3群に分け、“産業化学物質及び関連物質”として44物質を、“医薬品”として40物質を掲載している。

その後、「ヒトにおける疫学的証拠を最も重要な拠り所として、動物実験の結果およびその解釈と併せて検討を行い、発がん性分類を行う。本分類は、ヒトに対する発がんの証拠の確からしさにより分類するものであり、発がん性の強さを示すものではない。」と定義し、許容濃度委員会で審議され、毎年総会時に新規提案または継続などを報告し、承認されれば暫定として許容濃度等の勧告」で発がん性分類表に掲載されることになっている。

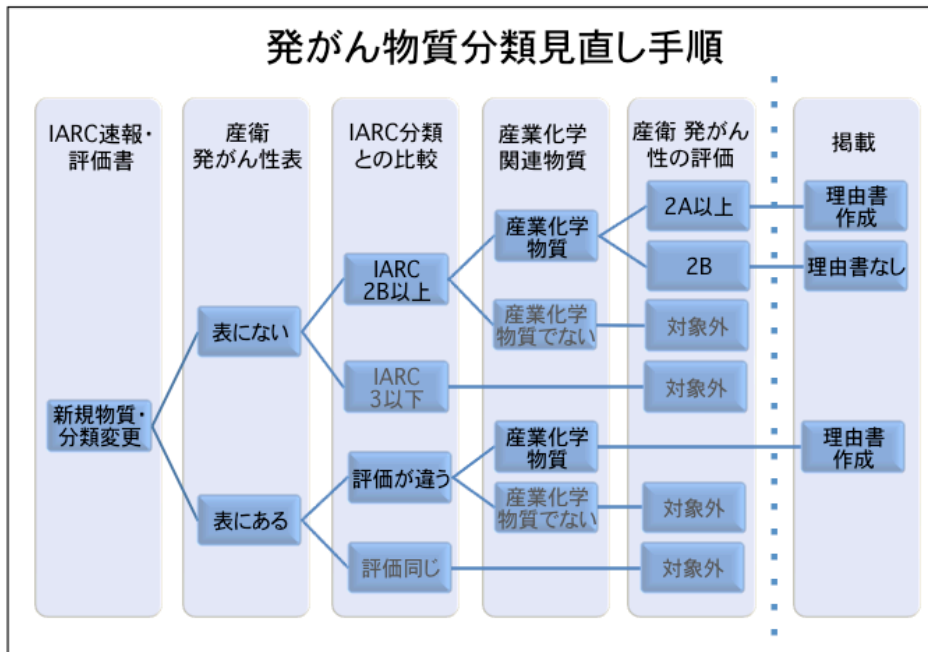
【発がん性分類のルール】

発がん性の分類は、国際がん研究機関（IARC）によるものが最もよく知られている。しかし、このうち産業化学物質については、産衛のほか米国ACGIHなど諸機関がそれぞれのクライテリアに基づいて評価を行っており、対象物質や評価が必ずしも一致しないことも多い。そこで、小委員会発足後（2013.11～）は、従来のデータを整理し、評価法やこれからの進め方などについて検討してきた。

まず2014年の時点で、IARC(1040物質)と産衛の許容濃度等の勧告(400物質)とACGIH(654物質)の資料を基に各評価をリンクさせ違い等を明らかにし、検討すべき物質の優先順位づけや作業のタイミングなど、発がん性分類の検討を効率的に進めるために必要な枠組みを作っていた。

見直し手順としては、IARCが評価を行っている物質について、1.産衛にのみ発がん性分類がない、2.産衛に発がん性分類はないが、許容濃度値は勧告されている、3.産衛にも発がん性分類はあるが、IARC（Group 2A以上）と評価が異なる、4. IARCにのみ発がん性分類

(Group 2B以上)がある、の順で検討した。IARCの発がん性分類情報は、速報値から既知物質の評価の変更と新規物質の有無を確認して検討対象物質候補を選定した上で、モノグラフのフルドキュメント公表後に検討することとした。また、基本的な対象物質は、現在、わが国の産業現場で使用または生産されているものに限定し、非意図的に発生する物質や医薬品、試薬、食品、製造工程や職業も除外した。下図にこれらの手順の概要を示した。



【発がん性分類の実績】

2014年以降(IARC. vol. 111-129)、IARCは110物質の発がん性分類を出してきたが、小委員会としてはうち85物質(77%)を検討対象物質候補とし、その結果、新規で第1群(2)、第2群Aから第1群への分類変更物質(5)、第1群変更なし(1)、新規で第2群A(10)、第2群A変更なし(5)、第2群BからA(3)、新規で第2群B(73)、第2群B変更なし(12)として産衛誌に理由書などを掲載してきた。

従って、産衛では、1986年当時44物質(第1群13物質、第2群A8物質、第2群B23物質)であったのが、小委員会が評価を開始した2014年には175物質(第1群28物質、第2群A28物質、第2群B119物質)となり、現在2021年度では237物質(第1群35物質、第2群A33物質、第2群B169物質)まで分類することができた。

【発がん性分類の活用】

前述したように、産衛の発がん性分類は、発がんの強さではなく、ヒトに対する発がんの証拠の確からしさで評価した分類である。また、発がん性はあるが、発がん以外の健康影響を指標として許容濃度を設定している物質には、許容濃度表の方に「ψ」表示を付け、注意を喚起している。ただし、発がんが観察される濃度レベルが、発がん以外の健康影響がみられる濃度レベルよりも十分高いという明らかな証拠がある物質については「ψ」表示を付し

ていない。

また、発がん性分類が第1群で、かつ量反応関係が明らかとなる妥当性の高い疫学研究があり、定量評価に耐えられるデータがある物質については、過剰発がん生涯リスクレベルと対応する評価値を算出し掲載している。しかし、あくまでも医学生物学的に求められた数値であり、労働者が受容しうるリスクとして勧告するものではない。

【終わりに】

我々は、随時、検討の必要性のある物質を抽出し、見直しや分類を進めてきた。しかし、わが国では、新規の化学物質の届け出が年間約1000件程度もある。当然、新規の物質は疫学研究報告がない。これらをどう評価するか、また動物実験データや発がんのメカニズムをどう外挿するか、構造活性相関なども含め、発がん分類には、非常に苦慮してきたのも事実である。

2019年、IARCが発がん性分類について、特にメカニズムを積極的に利用するという考え方を取り入れた。これを受けて、我々も分類のルールについて検討を加えた。この内容については、次演者の長野博士が解説する。

今後、職場における化学物質等の管理のあり方が大きく変わり、法令準拠型から事業者が自らの判断で管理方法を決定する自律的管理に移行することになる。そこで、我々が、どのようなことを期待されているのか、また貢献していけるのかも考える時期にきていると思う。

本発表内容は、許容濃度委員会及び発がん分類小委員会の先生方によって蓄積されてきたデータを基にしており、関係者の皆様に感謝いたします。

IARC と産衛の発がん性分類（動物実験、メカニズムから）

長野嘉介（長野毒性病理コンサルティング）

【はじめに】

日本産業衛生学会（産衛）は、産業化学物質および関連物質・因子について発がん性分類を行い、産業衛生学雑誌に掲載される許容濃度等の勧告の中で「III 発がん性分類」として公表してきた。その前文に記載されているように、産衛の発がん性分類は国際がん研究機関（International Agency for Research on Cancer, IARC）が発表している分類を参考としている。IARC では年に2から3回開催される検討会議で各国から召集した専門家により化学物質やその他の因子（生活習慣や微生物など）について発がん性分類を行い、その結果を検討会議ごとにモノグラフ（IARC のホームページから入手できる）として公表している。IARC の発がん性分類のルールは、各モノグラフに前文（Preamble）として記述されている。この IARC の発がん性分類のルールである Preamble が 2019 年 1 月に改定された。本講演では IARC の発がん性分類のルールの変更点と産衛の対応について解説する。

【IARC の発がん性分類のルールの変更の背景とポイント】

IARC、産衛とも発がん性分類の原則はヒトにおける疫学的証拠と動物実験（発がん性試験）の証拠であり、両者の情報をもとに総合評価（IARC はグループ 1、2A、2B、3、4、産衛は第 1 群、第 2 群 A、第 2 群 B）を行ってきた。また、IARC では、メカニズムやその他の情報（発がんメカニズムや代謝等）を用いて、動物実験の結果がヒトに外挿できるという強い証拠があればグループ 2A から 1、あるいはグループ 2B から 2A に評価を上げ（アップグレード）、ヒトに外挿できないという強い証拠があればグループ 2A から 2B、あるいはグループ 2B から 3 に評価を下げてきた（ダウングレード）。しかし、従来の Preamble ではメカニズムやその他の情報を利用した分類の修正は例外的な分類とされ、2018 年以前に IARC が分類を行った 1013 物質・因子の中で 63 物質（6%）にとどまっていた。今回の IARC の Preamble の変更の背景には、発がん性分類の原則として使用してきた疫学と動物実験の証拠についての新しい情報が年々少なくなっているのに対し、遺伝毒性試験など発がんに関連したメカニズムの情報は豊富に存在するという現状がある。このメカニズムの情報を発がん性分類に利用しやすくするために、利用するための具体的なルール、すなわち分類に使用するメカニズムの証拠の種類と総合評価への利用の方法を追加したのが今回の Preamble 変更のポイントである。

【メカニズムの証拠】

今回変更された Preamble では、発がん性分類に使用するメカニズムの証拠の種類は、1) 既知の発がん物質との類縁物質であるか？ 2) 発がん物質の重要な特徴（key characteristics）を持つか？ 3) 動物実験の結果がヒトに外挿できないという証拠があるか（例えば $\alpha 2 \mu$ グロブリンによる腎臓腫瘍）？という情報である。1) と 3) は従来の Preamble にも記載されてい

た項目であり、今回の Preamble の変更の目玉は 2) の「発がん物質の重要な特徴 (key characteristics) を持つか?」という項目の追加である。新しい Preamble では発がん物質の重要な特徴として下記の 10 種類の特徴を記載し、分類を行う化学物質・因子がこれらの特徴の中の 1 つでも持つことを示す一貫性のある証拠があれば「メカニズムの強い証拠」があると評価するとしている。また、発がん物質の重要な特徴についての証拠は研究の種類によって 3 つのクラス (曝露を受けたヒトでの証拠、ヒトの初代細胞や組織での証拠、実験系での証拠) がある。例えば、曝露されたヒトでの証拠は「その物質に曝露された労働者のリンパ球に染色体異常が検出された」、ヒトの初代細胞や組織での証拠は「ヒトから採取したリンパ球にその物質を曝露した実験で染色体異常が検出された」、実験系での証拠は「培養細胞や細菌にその物質を曝露した実験で染色体異常が検出された」というような情報である。発がん性分類に利用するうえでの重要性は曝露されたヒトでの証拠が最も高く、ヒトの初代細胞や組織での証拠、実験系での証拠の順になる。

	発がん物質の重要な特徴の種類	
1	その物質または代謝物が求電子性である	その物質または代謝物が DNA やたんぱく質と結合する (付加体を形成)
2	遺伝毒性がある	<ul style="list-style-type: none"> ➤ DNA の損傷 (DNA 鎖切断、不定期 DNA 合成など) ➤ 遺伝子突然変異 ➤ 細胞遺伝学的変化 (染色体異常、小核形成)
3	DNA の修復を変化させる、またはゲノムの不安定化の原因になる	DNA の複製や損傷した DNA を修復する能力を変化させる
4	エピジェネティックな変化を誘発する	DNA のメチル化や染色体を構成するヒストンの修飾 (DNA の塩基配列に影響しない変化)
5	酸化ストレスを誘発する	活性酸素を発生させ、DNA に酸化的損傷を与える
6	慢性炎症を誘発する	炎症が持続する (炎症は、酸化ストレスやゲノムの不安定化と強い関連がある)
7	免疫抑制作用を持つ	免疫監視機能の低下や免疫系の機能障害 (発生した腫瘍細胞の免疫システムによる排除機能の抑制)
8	レセプター介在性の作用を変化させる	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 内因性リガンドの修飾 (ホルモン療法など) ➤ レセプター (AhR など) の活性化や不活性化
9	細胞の不死化の原因となる	老化が抑制された細胞の出現 (ヒトパピローマウイルス : 子宮頸がんの発生など)
10	細胞増殖や細胞死、栄養供給を変化させる	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 細胞増殖の増加 ➤ アポトーシスの低下 ➤ 細胞の複製や細胞サイクルの調節に関連した成長因子、シグナル伝達経路などの変化 ➤ 血管増生の変化

総合評価	疫学的証拠	動物実験（発がん性試験）の証拠	メカニズムの証拠
Group 1 （ヒトに対し発がん性があるもの）	十分		
	限定的/ 不適切	十分	曝露されたヒトにおいてその物質が発がん物質の重要な特性を示すという強い証拠
Group 2A （ヒトに対し恐らく発がん性があるもの） （probably）	限定的	十分	
	不適切	十分	ヒトの初代細胞や組織を使用した試験においてその物質が発がん物質の重要な特性を示すという強い証拠がある
	限定的	十分未満	曝露されたヒト、ヒトの初代細胞や組織を使用した試験あるいはその他の実験系において、その物質が発がん物質の重要な特性を示すという強い証拠がある
	限定的/ 不適切		メカニズムの考慮に基づいてその物質が属する物質のグループのうち 1 つ以上の物質が Group 1 あるいは Group 2A に分類されているという「強い証拠」（既知の発がん物質との類縁物質）
Group 2B （ヒトに対し発がん性があるかもしれないもの） （possibly）	限定的	十分未満	
	不適切	十分	
	不適切	十分未満	曝露されたヒト、ヒトの初代細胞や組織を使用した試験あるいはその他の実験系において、その物質が発がん物質の重要な特性を示すという強い証拠がある
	限定的	十分	実験動物における発がんメカニズムがヒトでは起きないという強い証拠
Group 3 （ヒトに対し発がん性があるとは分類できないもの）	不適切	十分	実験動物における発がんメカニズムがヒトでは起きないという強い証拠
	他のグループに分類できないもの		

【総合評価への利用】 今回変更された Preamble では、発がん性分類の総合評価は疫学的証拠、動物実験（発がん性試験）の証拠およびメカニズムの証拠を組み合わせる前ページのように記載されている。今回の Preamble の変更以降（2019 年 6 月～2021 年 10 月）に IARC が発がん性分類を行った物質・因子は 24 物質・因子であり、その中でメカニズムの証拠を利用して分類の修正を行っている物質は 7 物質（29%）であり、2018 年以前の 6%に比較して増加している。今後の IARC の発がん性分類は下記のようなケースが多くなる可能性が高く、IARC がこれまで発がん性分類を行ってきた約 1000 種類の物質・因子との間に分類基準の不整合性が生じる恐れがある。

- 動物での証拠が無く、疫学が限定的な証拠の場合：原則的には Group 2B であるが、メカニズムのデータに陽性の文献があれば 2A になる
- 疫学、動物とも証拠が無い場合：原則的には Group 3 であるが、メカニズムのデータに陽性の文献があれば 2B になる。また、既知の発がん物質との類縁物質であれば 2A になる。

【産衛の対応】

- 発がん性分類の前文に「メカニズムからの証拠も考慮する」ことを記載した。
- しかし、今回の IARC の Preamble の変更を全面的に受け入れるものではない。
（今後の IARC の動向を見極める必要がある）
- 個々の物質について検討し、必要と認めれば「メカニズムからの証拠」も考慮する。

溶接ヒュームの発がん性評価

森本泰夫（産業医科大学 産業生態科学研究所 呼吸病態学）

【はじめに】

溶接ヒュームとは、溶接時に熱によって溶かされた金属が、蒸気になりやがて冷やされて微細な粒子となったものである。日本産業衛生学会では、溶接ヒュームに対する発がん性分類は行っていなかったが、2017年3月 International Agency for Research on Cancer (IARC)（国際がん研究機関）の評価にて溶接ヒュームは Group1（ヒトに対して発がん性がある）に分類された。これを受けて、日本産業衛生学会許容濃度委員会でも溶接ヒュームの発がん性の検討を行った。同委員会では、発がん性分類を発がん性の確からしさから3つに分類している。すなわち、第1群はヒトに対して発がん性があると判断できる物質・要因であること、第2群はヒトに対しておそらく発がん性があると判断できる物質・要因であり、さらに2つに細分類され、第2群Aは、証拠が比較的十分な物質・要因、第2群Bは証拠が比較的十分でない物質・要因である。これらの発がん性分類には、ヒトの発がんに関する知見（疫学的知見）と動物発がんに関する知見、メカニズムとその関連データからの知見を総合的に勘案して評価する。溶接ヒュームの発がん性分類においてもこれらの知見を評価して発がん性分類を行った。

【ヒト発がん性】

まずヒトの発がんに関しては、溶接ヒュームと肺がんに関する疫学研究として、症例対照研究もコホート研究が行われ、いずれも溶接曝露による肺がんのリスクの増加を認めた。

症例対照研究に関しては、症例対照研究のプール解析や多施設症例対照研究を含む20以上の研究が報告されており、ほとんどの研究で、溶接工またはヒュームに曝露された労働者における肺がんのリスクの増加を認めた。

コホート研究に関して、20以上の職業性曝露によるコホート研究および人口ベースの6コホート研究において、溶接と肺がんの関連を認めた。

これらの結果から、溶接によるヒュームの発がん性は、疫学研究から十分な証拠があると判断した。

【動物発がん性】

動物発がんに関しては、1件の咽頭吸引試験と1件の吸入曝露試験において、いずれの試験も2段階発がんモデルであるが、ガスマタルアークステンレス鋼（6価のクロムとニッケルを含有する）溶接ヒュームが3-methylcholanthrene 誘発肺腫瘍を促進した。

これらの結果から、溶接ヒュームの発がん性は、動物実験から限定的な証拠があると判断した。

【発がんメカニズム】

さらに発がんメカニズムとその関連データの知見についても、ヒトへの発がん性に関連する要因として、溶接ヒュームの慢性炎症性、免疫抑制性では強い証拠、遺伝毒性については中程度の証拠、酸化ストレス、細胞増殖、細胞死の誘発に関しては、いずれも中程度の証拠と判断した。

表1 溶接ヒュームの発がん性の証拠

カテゴリー	試験名	所見	発がん性の証拠
ヒトの発がん性	症例対照研究	肺がんのリスク増加	十分な証拠
	コホート研究	肺がんのリスク増加	
動物の発がん性	吸入曝露試験 (2段階発がんモデル)	肺腫瘍の促進作用	限定的な証拠
	咽頭吸引試験 (2段階発がんモデル)	肺腫瘍の促進作用	
メカニズムとその 関連データ	慢性炎症・免疫抑制：(+) 遺伝毒性：所見(+)(-) 酸化ストレス, 細胞増殖, 細胞死：(+)(-)		強い証拠 中程度の証拠 中程度の証拠

以上より、溶接のヒュームにおいて、症例対照研究のプール解析や多施設症例対照研究、コホート研究などヒトに発がん性に関する結果から、溶接ヒュームが肺がんを誘発する十分な発がん性の証拠があると判断した。以上より溶接ヒュームの発がん性分類を第1群（ヒトに対して発がん性があると判断できる物質・要因）とした。

【溶接に伴う紫外放射】

IARC では溶接に伴う紫外放射においても発がん性分類を検討して、Group1（ヒトに対して発がん性がある）と分類した。上記と同様に、日本産業衛生学会許容濃度委員会でも発がん性分類の検討を行った。（時間があれば、紹介します）

表2 溶接に伴う紫外放射の発がん性の証拠

カテゴリー	試験名	所見	発がん性の証拠
ヒトの発がん性	症例対照研究	眼内黒色腫のリスク増加	十分な証拠
	コホート研究	眼内黒色腫の有意なリスク増加なし	
動物の発がん性	なし	なし	なし

ヒトにおける発がんの知見が中心で、同委員会では、眼内黒色腫の発症リスクに関する疫学的調査では、症例対照研究の8報告と国勢調査に基づくコホート研究の2報告の結果を中心に評価した。2つのコホート研究では眼内黒色腫発症リスクの有意な増加は認めなかったものの、ほとんどの症例対照研究は、眼内黒色腫の発症リスクが2倍から10倍増加すること、溶接工としての雇用期間と眼内黒色腫の死亡リスクに正の傾向を示した。

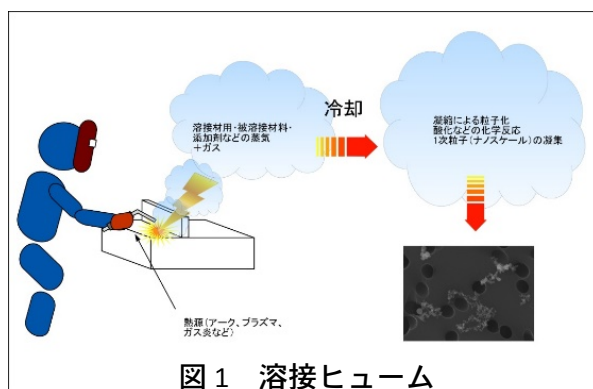
以上よりヒトの発がん性の知見として、十分な証拠があると判断し、溶接に伴う紫外放射の発がん性分類は、第1群（ヒトに対して発がん性があると判断できる物質・要因）とした。

溶接ヒューム中の発がん性金属などのばく露評価

鷹屋光俊（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
化学物質情報管理センターばく露評価研究部）

1. はじめに

IARCは、2017年3月に溶接の発がん性を再評価し溶接ヒュームをヒトへの発がん性あり（Group 1）とした。これをうけて厚生労働省は金属アーク溶接ヒュームを特定化学物質（管理第2類物質）とした。この政省令改正の説明を示した厚生労働省資料では、ヒューム中の発がんの原因物質等の知見が明らかになった時点で特別管理物質とするかどうか再度検討することとしている。また、通常の作業環境測定による管理区分設定とは異なり、個人サンプリング方法を用い、ヒューム中のマンガン濃度を測定し、そのマンガン濃度とマンガンの管理濃度から、呼吸保護具の選択など対策を行うこととされている。このように溶接ヒュームの法令上の管理方法は、通常の化学物質の管理とは異なる。それは、溶接ヒュームが通常の化学物質とは異なるものであるからである。



溶接ヒュームには「溶接作業に伴い発生する金属蒸気が凝集したもの」という明確な定義が存在する。しかし、その定義は、その物質が溶接ヒュームであるか否かを規定しても、溶接ヒュームがどのような化学物質であるかまでは規定しない。溶接ヒュームは単一の化学物質ではなく、溶接時に発生した様々な化学物質

の混合物であるとともに、その組成は、溶接材料、溶接方法、溶接条件により、多岐にわたる。そのため、溶接ヒュームのリスク管理は一筋縄ではいかない。本発表では、溶接ヒュームのリスク管理を行うための一助となるように、溶接ヒュームに含まれている可能性がある金属の種類、その評価方法等を紹介する。

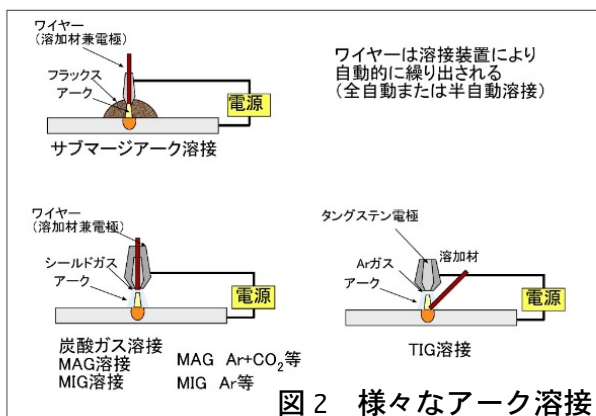
2. 溶接方法

溶接とは、「材料に応じて、接合部が連続性を持つように、熱又は圧力もしくはその両者を加え、さらに、必要があれば適当な溶加材を加えて、部材を接合する方法。」の事である。

溶接法は、被溶接材料（母材）を加熱し、母材や溶加材を融合させる融接、接合部に機械的圧力を加えて行う圧接に分けられる。さらに広義の溶接には、母材を溶融させずより低い融点の溶加材を溶融させて接合面にゆきわたらせて接合するろう付け（半田付けもこのろう付けの一種）もある。

圧接は被溶接材料を電極で挟み込み大電流を流し、融解させて接合する。抵抗溶接はその代表的な溶接法である。

融接には熱源として、化学炎（アセチレンバーナー等）、プラズマアーク、レーザー等を用いる方法があるが、産業でもっとも多く（関係する労働者が多い）のは電気アークを用いた各種のアーク溶接である。溶接する材料の成分（鉄系の材料か、非鉄金属材料か）や溶接する部材の大きさなどによって最適の溶接方法が異なるため、アーク溶接だけでも様々な方法があり、電極自身が溶加材となり電極が溶けてゆく溶極式溶接（被覆アーク溶接、炭酸ガス溶接、MAG (Metal Active Gas) 溶接、MIG (Metal Inert Gas) 溶接、サブマージ溶接等）と、電極は溶けずに別の溶加材を加えてゆく非溶極式溶接（TIG (Tungsten Inert Gas) 溶接等）などに分けられる。融接では、母材が解けている部分（溶接池）が空気中の酸素などと反応して溶接品質を劣化するのを防ぐために、外気から遮断する必要がある。溶接電極の被覆材が融解して溶接部分を覆う被覆アーク溶接や、粒状のフラックスで溶接部分を覆いその中で溶接を行うサブマージアーク溶接、そして各種のガスで覆うガスシールドアーク溶接（図2）などがある。



このように多数存在する溶接の方法によって、ヒュームの発生量は大きく異なる。同じガスシールドアーク溶接であっても、一般に TIG 溶接は比較的ヒュームの発生量は少ないのに対し、MAG や炭酸ガスアーク溶接のヒューム発生量は多くなる。

また、ガスシールドアーク溶接は、ガス流でアークを覆い空気を遮断している。

このガス流が乱れるとブローホールと呼ばれる溶接欠陥が生じて溶接品質に大きな影響を与える。そのため、気流によるヒュームばく露軽減策は非常に難しい。

3. ヒュームに含まれている物質

前項で述べたように、溶接ヒュームの組成はまちまちであるが、IARC が発がん性ありとしたのは「溶接ヒューム」であり、ヒューム中のどの物質が発がん性の原因かということとは不明である。従って、どのような溶接ヒュームであっても、ばく露防止対策を行う必要がある。一方で、その対策をどの程度まで行えば良いのかは悩ましい問題である。安衛法令上はヒューム中のマンガンを着目し、マンガンの濃度を測定し、マンガンの管理濃度に応じて対策を行う事が求められている。その他に、溶接対象物質によっては、既にハザードが判明している物質を含む場合がある、例えば、ベリリウム、ニッケルやコバルト等を含む材料の溶接ヒュームでは、それらの金属元素がヒュームに含まれている。そのような場合はそれらの物質のハザードをもとにリスク管理を行う事も有用であり、例

例えば日本溶接協会が発行している日本溶接規格（WES）の WES9009（溶接の安全衛生に関わる指針を示した規格）の WES9009-2などを参考にリスク管理を行うのも一案だと思われる。

溶接ヒュームに含まれている物質は母材あるいは、溶加材、フラックスといった溶接材料由来のものである。当然鉄系の溶接ヒュームと、アルミニウムやマグネシウムといった軽合金の溶接ヒュームとでは成分構成が大きく異なる。ヒュームの成分は溶接材料に大きく依存するが、溶接材料とヒュームの成分組成は一致しない。なぜならヒュームは蒸発、再凝縮というプロセスを経て生成するため、母材や溶加材に含まれる成分とは成分が異なる。最も典型的な例はマンガンである。マンガンは沸点が低い（Mn： 2061℃， Fe： 2862℃， Ni： 2730℃）そのため溶接ヒュームではマンガンの含有量が母材より大きくなる傾向がある。逆に沸点の高いニッケルは含有率が低くなる傾向がある。

金属蒸気が凝縮する過程で空気中の酸素と反応すれば酸化物となる。溶接条件によっては、アルカリ金属を含むフラックスを使用する場合があります金属蒸気からヒュームが生成する「場」がアルカリ性の状態になる場合がある。そのような場合に金属類がより酸化数の高い状態にまで酸化され得る。一般に酸化数の高い金属化合物は典型的な例としては、ステンレス鋼の溶接時に発生するクロムのヒュームのうち一定の割合が六価クロム（Cr(VI)）となる。

4. ヒュームのサンプリング

ヒュームのサンプリングの方法については、日本産業規格 JIS Z3950:2021 やその基となった ISO10882-1:2011 が参考となる。JISZ3950:2021 は、ISO10882-1:2011 の完全な翻訳 JIS ではなく、日本の実情を踏まえた追加事項なども含んでる。

ヒュームは、定点でのサンプリングも可能ではあるが、ヒュームは溶接作業者の手元で高濃度に生成するものであるから、個人サンプリング法や個人ばく露測定を行った方がよい。その際、サンプラーの取り付け位置には注意が必要である。溶接作業時は、強い紫外線や高温のスパッターから眼や顔を守るために保護面を使用するが、その保護面の内外でヒューム濃度が大きく異なるため、サンプラーの捕集口が保護面の外側にならないようにする。

ヒュームのハザードは様々なものがあるが、発がん性に着目した場合は、IARC は肺がんについて発がん性ありとしているため、肺胞にまで到達する吸入性粉じんを捕集するための分粒装置を使用することになる。吸入性粉じんを捕集するための分粒装置は、通常のじん肺対策のための粉じん測定に使用するものと同じものであり、インパクター型やサイクロン型のものがある。

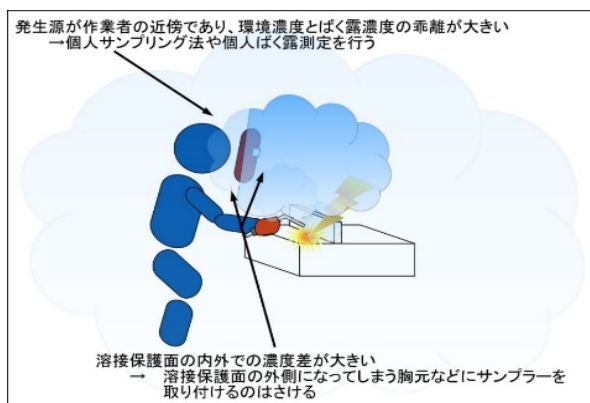


図3 ヒュームの個人サンプリング

ヒュームそのものの一次粒子は数～数十 nm の粒径を持つ微小粒子だが、凝集が進み、吸入性 (50% カットオフ径 $4\mu\text{m}$) よりも大きな粒径を持つ粒子となっている可能性がある。肺以外の臓器への健康影響を考えると場合にはソラシック (咽頭透過性、50% カットオフ径 $4\mu\text{m}$) やインハラブルのサンプラーを使用する必要がある。

サンプリングを行う際に使用するフィルターについて、ヒューム全体の質量濃度も知りたい場合は、粉じんの質量濃度測定に適したテフロンバインダー付きガラス繊維フィルターを用いることが多い。ただし、テフロンバインダー付きガラス繊維フィルターのガラス部分には垂鉛やバリウムなどの金属類を含むものがあり、測定の対象元素によっては使用を避ける必要がある。金属類の分析だけのことを考えるなら混合セルロースエステル (MCE) フィルターが最適である。Cr (VI) の分析については、捕集中に Cr (VI) がフィルターと反応を起こさないように塩化ビニールあるいはテフロンメンブランフィルターを使用する必要がある。

5. ヒュームの金属類の測定

ヒュームの各成分 (金属元素およびの分析は、日本産業規格 JIS Z3920:2011¹⁾ によるか、あるいは労働環境中の粒子状金属元素の分析法として ICP-AES を使用する ISO15202-1-3 や ICP-MS を使用する ISO30011 による。

ヒュームの分析には、金属類の分析方法として代表的な機器分析法である原子吸光、ICP-AES, ICP-MS の何れでも分析可能であるが、それぞれの方法は一長一短がある。ヒュームが含む多種類の金属元素についての情報を全て把握するには、多元素同時分析が可能な ICP-AES や ICP-MS の方が原子吸光より優れている。その際に ICP-AES は多くの元素を含んでいることによる分光干渉について注意を払う必要がある。また ICP-MS については、特に鉄系の材料の溶接ヒュームによく含まれる鉄、マンガン、ニッケル、クロムなどが、アルゴン由来の分子イオン干渉を受けやすい (例えば ^{56}Fe は $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$ の分子イオンと同じ m/z をもつ) ので注意が必要となる。

分析法が求められる感度は、個別の金属元素の許容濃度から判断することになる。ヒュームの組成などにより前処理方法や干渉が異なるので、一概には言えないが、許容濃度がもっとも低いベリリウムを除き ICP-AES で対応が可能であると考えられる。

6. Cr(VI)分析

ステンレス鋼等、クロムを含む材料を溶接した場合、ヒューム中にクロムが含まれ、溶接条件によっては一部のクロムがCr(VI)となる。筆者らが以前実施した実験では、炭酸ガスアーク溶接ではワイヤーのフラックスの有無で異なるが、ヒューム中の0.2-0.5%程度、アルカリ分の多い被覆溶接棒では4%程度のCr(VI)が検出された。労働環境も含めCr(VI)分析法としてはジフェニルカルバジド(DPC)を検出試薬として吸光光度法が広く用いられている。この方法は、非常に鋭敏な方法であり、妨害元素の影響も少ない分析方法として知られている。しかし溶接ヒュームでは、他に多くの金属類が妨害物質として存在していることと、六価クロムが非常に低い(ACGIHは2018にCr(VI)のTLV(8h TWA)を0.0002mg/m³に改訂)濃度まで管理する必要があるため、他の方法が必要となっている。NIOSHではイオンクロマトグラフを用いてニクロム酸イオンを他の物質と分離した後に、DPC溶液とpH調整の硫酸を加えるポストカラム発色方法を用いた分析方法をN10Hマニュアルで公開しており、ISO規格にもなっている(ISO16740)。ポストカラム発色システムそのものは、水道法におけるハロゲンの分析方法等に採用されているため、市販の装置が入手可能である。ただし、ヒューム中のCr(IV)の溶解にはアルカリが必要となるため、イオンクロマトグラフのカラムのpH使用限度、分離の確認が必要である。

DPCを用いる方法の他に、炭酸アルカリを利用したアルカリ抽出方法がある。アルカリ性溶液に対して3価のCr(III)は水酸化物を作り不溶になるのに対し、Cr(VI)はクロム酸となる。クロム酸は多くの金属と不溶性の塩を作るが、高濃度の炭酸ナトリウムを加えることにより金属類は炭酸塩として沈殿し、Cr(VI)は水溶性のクロム酸ナトリウムとなる。この溶液を原子吸光などで測定する方法である。作業環境ガイドブックにおけるクロム酸およびその塩の分析方法にも採用されている。Thomsenらは抽出液として7%の炭酸ナトリウム溶液を使用しておりガイドブック法³⁾もそれに従っているが、ヒュームなど鉄を多く含む試料については2%水酸化ナトリウム-3%ナトリウムの方がより抽出効率が良いとされている。開発された当時は主にフレイム原子吸光分析を行っていたが、現在は、低濃度まで分析する必要があるのでプラズマが消灯しない程度に希釈をした上でICP-AESやICP-MSで分析することとなる。実際の分離効率であるが、かつて筆者が追試を行ったところ、Cr(III)溶液を加えてもCr(VI)の測定結果に影響はなかった。ただし、現在ではCr(VI)をより低濃度まで管理する必要があり、現在のTLVの濃度レベルについてこの方法が有用かどうかについては再度検証が必要である。

7. おわりに

溶接ヒュームのリスクアセスメントは、基本的には、気中の有害金属類の評価方法と同様であるが、一部、溶接ヒューム固有の注意点がある。ヒュームの組成、性質の多様性は非常に大きいので、それぞれ対象となる現場でどのような溶接がなされ、どのようにヒュームが発生している事をまず知ることが重要である。それを踏まえて、どのようにばく露評価を進めるのかについて、本稿で紹介した内容が役に立てれば幸甚である。