

学位論文

「産業活動で取り扱うインジウムおよびその化合物による職業性  
疾病を予防するためのリスクアセスメントに関する研究」

指導教授名 太田 久吉

申請者氏名 東久保一郎

## 著者の宣言

学位論文は、著者の責任において研究を遂行し、得られた真実の結果に基づいて正確に作成したものに相違ないことをここに宣言する。

## 要 旨

### 研究の背景

我が国では化学物質に起因する業務上疾病は毎年約 500 件程度発生しており、近年では胆管がん、膀胱がんを発症する労働災害も発生している。これらの背景として、有害化学物質のリスクアセスメントが実施されていないために、実効あるリスク低減措置の実施につながっていないことが考えられる。

### 目的

重篤な健康障害を引き起こすインジウムおよびその化合物を取り扱う作業場における化学物質リスク評価事例を通じて、リスクの見積りの手法、ばく露評価とリスク評価、労働衛生対策について考察する。

### 研究方法

インジウム(以下、In と略す)を取り扱っている事業場を対象として、1)～4)の調査を行なった。

#### 1) COSHH essentials を用いたコントロールバンディングによる一般的なリスク評価

13 事業場 55 の In 取扱い作業を対象に、コントロールバンディングによるリスク評価を行った。

#### 2) 総粉じん In ばく露濃度測定によるリスクアセスメント

11 事業場 86 名の総粉じん In ばく露調査を行い、リスク評価を実施した。

#### 3) 吸入性粉じん In ばく露濃度測定によるリスクアセスメント

3 事業場 27 名を対象に、総粉じん In および吸入性粉じん In ばく露調査を同時

に行い、粒子径毎のリスク評価を行った。

#### 4) 吸入性粉じん中 In ばく露濃度と血清 In 値の関係

10 事業場 64 名を対象に吸入性 In ばく露濃度と血清 In 値を調査しその関係を考察した。

### 結 果

インジウム(In)のばく露評価とリスク評価について以下の結果を得た。

#### 1) COSHH essentials を用いたリスク評価

55 作業では 5 種類の異なる In 化合物を取扱い、35 作業(64%)については専門家による対策が必要な CA4、16 作業(29%)は発じんを強く抑制する封じ込めと完全密閉の対策が必要な CA3 となり、外付け式局所排気装置の設置が必要な CA2 は 3 作業、全体換気装置と適切な作業方法でも良いとされる CA1 は 1 作業であった。

#### 2) 総粉じん In ばく露濃度による In リスクアセスメント

86 名の総粉じん In ばく露濃度は対数正規分布を示し、TLV-TWA $0.1\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた作業者は 11 名(13%)、アクションレベル  $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ を超えた作業者は 19 人(22%)となり、95%信頼区間上限値での評価では、11 事業場中 5 事業場でばく露低減措置が必要な管理状態と評価された。

#### 3) 吸入性粉じん In ばく露濃度によるリスクアセスメント

27 名の総粉じん In ばく露濃度は  $0.0004\text{mg In}/\text{m}^3 \sim 1.273\text{mg In}/\text{m}^3$ 、平均値は  $0.095\text{mg In}/\text{m}^3$  となり、27 名中 25 名が TLV-TWA  $0.1\text{mg}/\text{m}^3$  より低い濃度となった。

一方、吸入性粉じん In ばく露濃度は  $0.00038\text{mg In}/\text{m}^3 \sim 0.8173\text{mg In}/\text{m}^3$ 、平均  $0.0589$



mg In/m<sup>3</sup>となり、全作業者がばく露濃度限界値  $3 \times 10^{-4}$  mg In/m<sup>3</sup>より高いばく露濃度となり、総粉じんでの In ばく露と評価の結果に差異があった。また総粉じん／吸入性粉じんインジウム濃度比は 1.01～15.31、平均 1.61 となった。

#### 4) 吸入性粉じん In ばく露濃度と血清 In 値の関係

断面調査に供する事が可能な 39 名のデータは、ITO 研削作業、製錬作業その他のインジウム加工作業の 3 グループに分類された。

In ばく露濃度は、0.004～24.0  $\mu$ g/m<sup>3</sup>、血清 In 値 0.1～8.5  $\mu$ g/L となり、39 名の相関係数は  $r=0.555$ 、単回帰直線は  $\log(\text{In-S}) = 0.322 \times \log(\text{In-E}) - 0.443$  ( $p = 0.0002$ ) で統計的に有意であったが、ITO 研削作業 ( $r=0.082$ ) は強い相関が認められたが、精錬作業者と全作業者はやや相関あり、その他の作業者はほとんど相関なしとなった。

### 総 括

COSHH essentials でのコントロールバンディングは、適切な労働衛生対策を選択することが出来ることを確認した。

インジウム(In)のばく露限界値は粒子径により異なる値が提案されているが、ヒトへの症状とばく露シナリオを考慮すると、より安全側の基準である吸入性粉じんでのばく露評価が妥当と判断され、同評価値でのばく露評価は、全作業場でばく露が高くばく露防止対策が不十分と判断された。

さらに、Inばく露濃度と血清 In 値の関係については、相関がある可能性が示されたが、最終的な結論を導くためにはさらにより多くのデータが必要であった。

## 今後の課題

インジウム(In)のリスクアセスメント評価は、吸入性粉じんインジウムばく露濃度が全員許容できないレベルと判断され、ばく露低減対策が不十分と評価された。したがって、インジウム取扱い作業者は、直ちにばく露調査を通じたリスク評価が必要であり、リスク低減措置の実施が望まれる。また、ばく露限界値の統一をはかるためにはさらなる疫学調査が必要である。

## 目 次

	頁
第 1 章 序論 .....	1
第 2 章 コントロールバンディングによる簡易なインジウムばく露評価.....	6
緒言 .....	6
調査方法 .....	7
調査結果 .....	10
(1) CA4 の評価結果 .....	11
(2) CA3 の評価結果 .....	12
(3) CA2 と CA1 の結果 .....	13
考察 .....	14
小括 .....	20
第3章 総粉じん粒子インジウムばく露評価.....	22
緒言 .....	22
調査方法 .....	24
(1) 調査対象事業場等 .....	24
(2) インジウム測定分析方法 .....	25
(3) 個人ばく露サンプリング方法とばく露濃度算出方法 .....	26
(4) 統計処理 .....	27

調査結果	28
(1) ばく露作業概要	28
(2) 8 時間荷重平均ばく露濃度(TWA-8 h)結果	29
(3)インジウムばく露濃度が最も低かったグループと高かったグループの比較	31
考察	33
小括	38
第4章 総粉じんと吸入性粉じん粒子によるインジウムばく露評価	40
緒言	40
調査方法	41
結果	43
(1)総粉じんと吸入性粉じん濃度とその割合 (T/R 比)	43
(2)総粉じんと吸入性粉じんインジウムばく露調査の評価結果	45
考察	47
小括	49
第5章 吸入性粉じんインジウムばく露濃度と血清中インジウム濃度の関係	52
緒言	52
目的および方法	52
統計分析結果	54
考察	55
小括	58

第6章 総括（労働衛生的課題） .....	60
1.コントロールバンディングによるインジウムばく露の簡易的な評価 .....	61
2. 総粉じん粒子インジウムばく露評価 .....	63
3. 総粉じんと吸入性粉じん粒子によるインジウムばく露評価 .....	65
4. 吸入性粉じんインジウムばく露濃度と血清中インジウム濃度の関係 .....	67
第7章 今後の課題 .....	69
第8章 謝辞 .....	74
第9章 引用文献.....	76
第10章 業績目録 .....	87
第11章 図表 .....	89
第12章 略語表.....	103

## 第1章 序 論

化学物質はありとあらゆる製品に使用され、我々の生活を便利で豊かなものになっている。

現在、アメリカ化学会 (American Chemical Society, ACS) が発行する Chemical Abstracts 誌で使用される化合物番号の CAS 番号 (ケミカル・アブストラクツ・サービス登録番号) によると、2015 年 6 月 29 日に CAS 番号が 1 億件を超えて<sup>1-1)</sup>おり、すでに世界中では1億以上の化学物資が存在している。

一方で、化学物質による事故や災害、疾病等の健康障害も枚挙に暇が無く、多くの化学物質の危険性と有害性(ハザード)について、完全には解明されていないのが現状である。

日本国内に目を向けると製造業等で使用される化学物質の種類は、労働安全衛生法に基づく名称公表規定より推定すると約 6 万種があると考えられており、年間 100Kg を越えて製造または輸入のための新規届出物質は、毎年 1,000 物質を越えている。

また、化学物質に起因する疾病およびじん肺による業務上疾病は毎年約 500 件程度発生<sup>1-2)</sup>し、その他に、石綿により労働災害補償費の支給が認められた件数が毎年 1,000 人程度 (平成 24 年度から平成 28 年度のデータ)<sup>1-3)</sup>となっている。

この様に、化学物質による多くの事故や疾病を経験してきた現在にあっても、産業現場での化学物質による事故や疾病は無くなっていない。

さらに、近年では、2012 年に大阪府の印刷事業場において複数の従業員が高濃度の「1,2-ジクロロプロパン」にばく露したことが原因と結論付けられた胆管がんの発症事例<sup>1-4)</sup>や 2015 年に福井県の「オルト-トルイジン」等の芳香族アミンを原料として染料を製造していた事業場において報告があった、経皮吸収ばく露が発症の要因と思われ

る膀胱がん発症事例<sup>1-5)</sup>のように、重篤な症状を呈する「がん」による職業性疾病も認定されており、また、2016年には有機粉じん(架橋型アクリル酸系水溶性高分子化合物)を製造する化学事業場において、肺疾患の発生機序等は必ずしも明らかになってはいないものの同一作業場で働いていた6名の作業者が肺の繊維化や間質性肺炎など重篤な様々な肺疾患が生じている事例<sup>1-6)</sup>が報告されており、今まで健康障害を経験していない物質での健康障害や経皮吸収ばく露による健康障害が発生している。

なお、オルト-トルイジンについては、労働安全衛生法等での規制物質であったが、ばく露管理が適正に行われておらず、膀胱がんの労働災害が発生したことより、特定化学物質障害予防規則が改正され2017年1月1日より新たに特殊健康診断の対象となる他、経皮吸収対策を含めて法規制が強化された。

一方、1,2-ジクロロプロパンと架橋型アクリル酸系水溶性高分子化合物については法規制されていない物質であったが、化学物質の有害性(ハザード)は当然保有しており、事業場側による法規制の無い物質は安全であるとの思い込みによりばく露防止対策が十分にとられずに引き起こした健康障害であり、法による規制の有無で化学物質のリスクを論じてはならないことを強く示唆している。

なお、1,2-ジクロロプロパンについても平成25年10月1日より労働安全衛生法にて規制されることになったが、一般に労働安全衛生法による規制は化学物質による不幸な災害が生じた後に制定されるために、新規化学物質については科学的なリスク評価を行い、先取りのリスク低減措置を取る事が重要である。

化学物質は多くの優れた機能を有しており、産業現場の様々な場面において利用され社会にとって有益なものではあるが、その反面、絶対安全な化学物質は無いと考

えられる。

そのため、化学物質を取り扱う際には、図 1-1 に示すように前もって危険有害性（ハザード）の調査を行い、それによって起こり得る災害リスク（健康障害リスク）を推定し、災害防止のために行う必要のある対策措置を決定して、優先順位の高い対策より順次対策を実施する、健康障害リスクを低くするためのリスクアセスメントとリスクマネジメントを行うことが重要である。

安全や健康は人が努力して作り上げていくものであり、化学物質については、より安全な物質への転換や作業者のばく露量を少なくする各種対策を実施することで、有益性は享受しつつも健康障害を受けるリスクを許容されるレベル未満に下げる対策が必要となり、健康障害防止のためには化学物質の有害性に基づいた化学物質管理を実施することが望まれている。

本論文は、わが国で重篤な健康障害をひき起こしたインジウムを例として化学物質のリスク管理の具体例について論じることで、労働災害防止のための化学物質労働衛生管理について研究を行ったものである。

具体的には、インジウムは安全な金属であるとの認識のもと 1994 年よりインジウムスズ酸化物（以下、ITO と略す）製造プロセスに約 3 年間従事していた 28 歳の作業者が 1998 年に間質性肺炎と診断され、その後加療中であつたが 2001 年 4 月に両側気胸で死亡した症例<sup>1-7)</sup>が報告され、ITO が健康に重篤な結果をもたらす化学物質であることが判明した。その後、産業分野では同物質のリスクをどの様に評価して、労働現場における労働衛生対策としてどの様な健康障害防止対策（ばく露低減対策）を実施すべきかについて研究したので結果を述べる。



本研究では最初に、インジウムおよびその化合物を取り扱う事業場として電子デバイス製造事業場、インジウムリサイクル事業場および無鉛ハンダ製造事業場を対象とし、机上におけるインジウム取扱量と作業状況のアンケート調査により必要な労働衛生対策を判定することが可能なコントロールバンディングを実施して、適切な労働衛生対策が講じられているかを確認し、続いて実測を伴った現地調査としてインジウム取扱い作業者のばく露調査を行ってインジウムのリスクアセスメントを実施し、現状の労働衛生対策で適切にばく露防止対策が行われているか、さらなる対策が必要かの評価を行った。

具体的な方法としては、化学物質リスクアセスメントにおけるリスクの見積もりとして

- 1) 化学物質等により健康障害を生ずるおそれの程度(重篤度)を考慮するコントロールバンディングによるばく露評価の実施
- 2) 化学物質等への労働者のばく露量を測定する個人ばく露測定

の机上で出来る簡易的なリスクの見積もりと作業現場での実測を伴うより精細なリスクの見積もりの2通りを実施した。

つづいてインジウムばく露評価を行うにあたり、米国産業衛生専門家会議(ACGIH)が提唱しているばく露限界値  $0.1 \text{ mg (In) / m}^3$ <sup>1-9)</sup>と、2010(平成 22)年厚生労働省通達「インジウム - スズ酸化物等の取扱い作業における健康障害防止対策の徹底について」<sup>1-10)</sup>で示された技術指針における「ばく露が許容される濃度  $3 \times 10^{-4} \text{ mg / m}^3$ 」<sup>1-11)</sup>の2つの異なるばく露限界値について、どちらの基準値がよりリスク評価を適切に評価できるかを調査結果より考察した。

さらには、インジウム取扱作業者の吸入性粉じんインジウムばく露濃度と血清インジウム濃度の関係について横断研究調査を実施し、日本産業衛生学会が勧告する生

物学的許容値 3 $\mu$ g/L(血清中インジウムとして)<sup>1-12)</sup>に該当するばく露限界値の推定を試みることにした。

## 第2章 コントロールバンディングによる簡易的なインジウム評価

### 【緒言】

我が国では、2001年にインジウム - スズ酸化物(以下、ITO と略す)を取り扱う作業者が両側気胸で死亡し<sup>2-1)</sup>、その後2011年に、大前らにより日本での難溶性のインジウム化合物による間質性肺炎7例、米国における肺胞蛋白症(PAP)2例と中国でのPAP1例が報告されている<sup>2-2)</sup>。

それらの労働災害を受けて厚生労働省が「インジウム - スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止対策の徹底について」(平成22年12月22日付け基発1222第2号)を通達し、そのなかで示された、インジウム - スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針<sup>2-3)</sup>において作業環境測定として吸入性粉じん粒子径のインジウム測定を義務付け、吸入性粉じん径インジウム濃度の評価基準として、目標濃度を $0.01\text{mg In/m}^3$ 、ばく露が許容される濃度 $3\times 10^{-4}\text{mg In/m}^3$ を用いて作業環境管理が適切であるかどうかを評価することとしている。

宮内ら<sup>2-4)</sup>は、インジウムリサイクル会社におけるインジウム取り扱い作業場の作業環境測定結果について、多くの作業場で作業環境管理が適切でないと判断される第3管理区分に分類され、作業環境管理が適切であると判断される第1管理区分は有効な局所排気装置を発生源に設置することによってのみ達成されることを報告している。

しかしながら、これらの作業環境測定やばく露調査等によるばく露評価については、濃度測定を伴うために専門家の協力が必要となり、事業者がすぐに採るべき労働衛生対策を自ら判断することは難しい。

英国安全衛生庁(HSE)は、1999年 COSSH essentials において、一定の条件内であれば、取り扱っている物質と状況を入力するだけで、専門家が行う濃度測定の調査

を必要とせず、どの様なばく露低減対策が必要であるかを判断できるツールとしてコントロールバンディングツールキット(COSHH essentials control banding toolkit)<sup>2-5)</sup>での判断を提案している。

したがって、まずは我が国におけるインジウム取扱い作業の一般的なリスクを評価するために、実測を伴わない COSHH essentials を用いて、取り扱い物質のハザードレベル、日常的な使用量、職場でのインジウム粉じんの飛散性特性を調査し、インジウム取扱い作業の一般的なリスクを評価し、適切な対策を施すことが出来るかを検証することとした。

なお 本調査は、中央労働災害防止協会の作業環境測定士と認定オキュペイショナルハイジニスト<sup>2-6)</sup>で構成されるインジウムばく露実態調査チームの協力を得て実施した。

## 【調査方法】

本研究は、COSHH コントロールバンディング(COSHH essentials control banding toolkit)<sup>2-5)</sup>を用い、インジウムおよびその化合物へのばく露を評価することを目的として実施した。

調査事業場は、2009 年にインジウムの年間生産・消費量が 500kg を超える 38 インジウム事業場のうち調査に同意した 13 事業場を対象とした。

各会社には 7 項目からなるアンケート用紙を郵送し、回収した。アンケート内容は、インジウム取扱い作業内容、取扱いインジウム化合物名およびそれらの製品、インジウム材料の形態、空気中への飛散のしやすさ、日常使用するインジウム材料の量、局所排気装置等の工学的対策、インジウム取扱い中の呼吸用保護具(RPE; Respiratory

Protection Equipment)の装着状況とし、作業環境測定士やオキュペイショナルハイジニストが現場に赴き、事業者が回答した主観的なアンケート結果を現地で再度確認し、最終的に労働衛生専門家の判定に基づいた結果を研究の評価に用いた。

COSHH essentials では図 2-1 に示すように「健康ハザード」と「ばく露されると思われる濃度バンド (EP バンド)」より必要とされる管理等級を確定する「全体的リスク評価」を行い、CA1 から CA4 に区分された「管理アプローチ」にて適切な管理方法を提示する手法となる。

健康ハザードは有害性に基づき A から E グループおよび皮膚および目の障害の S にグループ分けされる。ハザードグループ A の受け入れ可能なばく露濃度としては  $1 \sim 10\text{mg/m}^3$ 、ハザードグループ B では  $0.1 \sim 1\text{mg/m}^3$ 、ハザードグループ C では  $0.01 \sim 0.1\text{mg/m}^3$ 、ハザードグループ D では  $0.001\text{mg/m}^3$  未満と設定しており、ハザードグループ E では受け入れ可能な濃度範囲については“—”マークとして具体的には示していない。なおハザードグループ S については、皮膚への直接的接触より生じる炎症、腐食性または感作、皮膚吸収より引き起こされる身体内部の有害影響の可能性があり追加的管理措置が必要と判断されてしており、化学手袋やゴーグル等の保護具使用基準を示している。

インジウムおよびその化合物のハザード情報については、インジウム生産者によって発行された安全データシート (SDS)<sup>2-7)</sup> の健康障害情報と日本が批准した GHS (世界調和システム) 分類 (NITE、2015)<sup>2-8)</sup> での CLP-GHS 分類表示に基づいて、A から E までの 5 つのハザードレベルと皮膚に関するハザードレベル S を参照した。

具体的には GHS 分類結果による区分表示と危険有害性等に記載されている H コード (Hazard statement code) を参照して判断し、国際がん研究機関 (IARC)<sup>2-9)</sup>、日本

産業衛生学会(JSOH)<sup>2-10)</sup>、American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)<sup>2-11)</sup>で発表された有害物質の発がん性分類に関する文書も引用して参考とした。

ばく露されると思われる濃度バンド(EP バンド)については、粉じんの発じん飛散性と取扱量の関係より、ばく露予測濃度バンドを4つの Exposure Predictor(EP)バンドのEP1 からEP4 に分類した。

取り扱い時の発じん飛散性は「ペレットの様に発じん性が大きくない“低”」、「結晶や顆粒状のような粒で発じん性がそれほど大きくない“中”」、「微粒子の粉状で非常に発じんしやすい“高”」の3つのカテゴリーに分けて分類し、インジウムおよびその化合物の取扱量は、「グラムレベルで使用される“少”」、「キログラムで使用される“中”」および「トンで使用される“大”」の3つのグループに分類した。

この分類に従うと、微細な固体(比表面積の大きな粉じん)で一定量あたりのかさ高を示すかさ高密度が大きな浮遊しやすい粉じんほど粉じんの飛散性は高いと判定された。具体的な例として、「発じん性が“低”か“中”」の場合で「取扱量が“グラムレベル”」の場合はEP1、「発じん性が“低”」で「使用量が“キログラム”か“トン”レベル」の場合はEP2、「発じん量が“中”か“高”」の粉じんでは「取扱量が“キログラム”」の場合はEP3となり「取扱量が“トン”」レベルの場合はEP4と判定された。

続いて、ハザードレベルと Exposure Predictor(EP)レベルでのマトリクスにより、インジウム取り扱い作業におけるインジウムばく露防止のための適切な管理措置を4つのコントロールアプローチ(CA)に区分した。

コントロールアプローチはCA1 からCA4 に区分され、CA1 は全体換気装置の設置、CA2 は全体換気装置よりも10倍ばく露低減効果のある局所排気装置の設置、CA3 は

CA1 より 100 倍ばく露低減効果のある密閉式排気装置の設置の工学的対策、CA4 は適切な制御手段を選択するためには専門家のアドバイスを求めるレベルとの評価になる。

EP バンドとハザードグループに対する管理アプローチ・粉じんばく露予測濃度の関係を表 2-1 に示す。

## 【調査結果】

表 2-2 に、COSHH essentials<sup>2-5)</sup>を用いた 13 インジウム事業場の 55 インジウム取扱い作業における作業者のインジウムおよびその化合物リスク評価結果を示した。

55 インジウム取扱い作業のうち取り扱われていた化合物は5種類であり、最も取扱いの多かったのはインジウムの 23 取扱い作業場、次は 13 取扱い作業場の ITO、2 取扱い作業場の酸化インジウムとリン化インジウム、1取扱い作業場の硝酸インジウムであった。

5 種類の取扱いインジウムおよびその化学物の性状は、金属インジウムは銀白色の柔らかい金属であり融点が 156.4℃と低く酸には溶けるが水や塩基とは反応しないインジウムであり、ITO は酸化インジウムと酸化スズを約 9:1,95:5 あるいは 80:20 の割合で混合して焼結した黄色、黄緑色、灰黄色、灰色あるいは青色の固体あるいは粉末で水に不溶<sup>2-11)</sup>、酸化インジウムはインジウムの酸化物で黄みがかった緑色の結晶固体で非晶質では水に不溶で酸には溶解するが結晶では水にも酸にも溶解しない性質を有し、硝酸インジウムは 3 水塩として結晶化し、白色の結晶や粉末状で水に溶け、リン化インジウムは砕けやすい固体で銀色から黒色の化合物半導体で単結晶基板として使用される。

これら5種類の GHS 分類によるハザード区分は、ITO、インジウムおよび酸化インジウムの GHS 分類は、特定の標的臓器への慢性毒性(繰り返しばく露)のある区分 1 (呼吸器)であり、ハザードレベル D と判断される<sup>2-7)</sup>。

インジウムリン(InP)も、GHS では発がん性に基づき区分1と判断されハザードレベル E に区分され、硝酸インジウムは、眼に対する重篤な損傷性/眼刺激性において GHS 区分 2A となり、ハザードレベルは C アンド S<sup>2-7)</sup>に区分される。

その結果、55 インジウム取扱い作業におけるコントロールアプローチ(CA)は、必要な管理対策措置のレベルとして比較的軽度な措置の CA1 から専門家のアドバイスが必要な CA4 までの 4 つに分類された。

#### (1). CA4 の評価結果

ハザードレベル D または E とばく露予測レベル EP3 または EP4 の場合は、適切な管理手段として専門家のアドバイスを求めることが必要と判断される最も厳しい管理措置である CA4(専門家のアドバイスを求める)に評価され、55 作業中 35 作業(64%)が CA4 となった。

35 の作業のうち最もインジウムのばく露が少ない発生源の封じ込めの工学的対策を行っていた作業は、E事業場の 1 作業(3%)であり、ショットブラスト作業であった。

全ての作業場のうち 26 作業(74%)は局所排気装置を設置しており、8 作業(23%)全体換気装置を設置していた。

また、ハザードレベル D または E のインジウム化合物を扱う作業者は、毎日の使用量と発じん性より導かれる COSHH コントロールバンディングの結果に応じて、表 2-3 に示されるように、10~2000 の指定保護係数を有する呼吸用保護具の着用を求められる<sup>2-5)</sup>が、表 2-2 の A と H 事業場の 2 名の作業者は、“高発じん性”ITO 粉末を“トン”



レベルに取り扱う CA4 に分類される作業に従事しており、より防じん性能の高い呼吸用保護具として半面形電動ファン付き防じんマスク(PAPR; Powered Air Purifying Respirators)を着用していたものの、半面形 PAPR では COSHH コントロールバンディングの求める指定防護係数 2000 に該当する全面形の送気式(コンプレッサーやエアシリンダー圧力空気)の呼吸用保護具では無いために、規格を満たしていないとの評価になった。

CA4 に分類された 35 作業におけるマスク着用状況は、全面形定流量エアラインマスク(CFA):2 作業(3%)、半面形 PAPR:2 作業(6%)、半面形取替式防じんマスク(RH):25 作業(71%)、使い捨て半面形マスク(DH):3 作業(9%)、半面形ガス/フィルター防じんマスク(RH(g/f))および取替式ガス半面形マスク(GS):1 作業(3%)および未装着 1 作業(3%)であった。

CA4 に分類された作業のうち、指定防護係数の基準を満たさない防じんマスクを着用している作業は 28 作業(80%)であり、ハザードレベルが E に該当するリン化インジウムを扱う 2 作業についても指定防護係数が 20 の取替式半面形防じんマスク(RH)での装着であった。

なお、装着している呼吸用保護具がコントロールアプローチの評価に適合し、適切な呼吸用マスクの着用であると判断された作業は 7 作業(20%)のみであった。

## **(2). CA3 の評価結果**

16 インジウム取扱い作業(29%)はハザードレベル D と EP2 に区分されたことより、CA3(封じ込めと完全密閉)に分類された。

CA3 に分類された作業では、有害物のばく露防止対策として、全体換気装置および外付け式局所排気装置の管理に比べてばく露濃度をそれぞれ 100 倍および 10 倍

低く抑えることができる封じ込めまたは囲い式局所排気装置による厳重な管理措置を講ずる必要があるとされている。

CA3 に分類された 16 のインジウム取扱い作業のうち、外付け式局所排気装置が設置された作業は 10 作業 (63%)、全体換気装置の作業は 6 作業 (38%) であった。

CA3 に分類された作業において、英国 HSE が勧告する指定防護係数 20 の呼吸用保護具である取替式半面形防じんマスク (RH)<sup>2-13)</sup> を装着していた作業は、12 作業 (75%) であり、そのうちの 1 作業 (6%) の熔解炉前作業においては、指定防護係数 40 の全面形防じんマスクが必要であったが取替式半面形防じんマスク (RH) の装着であった。

さらに、半面形ガス/フィルターマスク (RH (g/f)) 装着は取替式半面形防じんマスクよりも指定防護係数が低く、2 インジウム取扱い作業 (13%) において誤用されていた。また CA3 に分類される ITO ボンディング作業 1 例 (6%) では半面形取替式防じんマスク (RH) を着用すべき作業であるにも関わらず、呼吸用保護具を着用することなく作業に従事していた。

### (3)． CA2 と CA1 の結果

CA2 に分類された作業は 3 作業であり、労働衛生工学的対策としては外付け式局所排気装置の設置が必要と評価された。

CA2 に分類された 3 インジウム取扱い作業では、全体換気装置しか設置されていない状況のため、局所排気装置の設置が必要となる。当作業では、1 日当たりグラムレベルの少量の ITO を取り扱う作業であるが、ITO はハザードレベルが D に該当する非常にハザードの高い物質であるために、同評価は妥当性があると考えられる。

COSHH のコントロールガイダンスシート S100 と S101<sup>2-5)</sup> を参照すると、全体換気装

置を局所排気装置に置き換えることで適切な対策を導き出すことができるとされている。

また、B 事業場の硝酸インジウムを取り扱う酸化処理作業は、COSHH コントロールバンディングでの H 判定が呼吸器刺激を引き起こす可能性がある H335 と判定されており、また、GHS 区分は肌および目の損傷を引き起こす区分 2A、ハザードレベル C&S<sup>2-5)</sup>であることより、皮膚および眼の損傷より作業者を保護する適切な個人保護具(化学手袋およびゴーグル等)を着用して作業する必要もあると判定された。

CA1 に分類された ITO をペレット状に粉砕する I 事業場では、全体換気装置と適切な作業方法の対策でも良いの判定であったが、同作業場ではすでに局所排気装置を設置して作業を行なっており、CA1 に評価された 1 作業については十分な対策が施されていた。

CA1 および CA2 の 4 インジウム取扱い作業のうち、HSE の RPE 基準を満たす保護マスク<sup>2-15)</sup>は 2 作業で着用され、残りの 2 作業(インジウム製品粉砕後のサンプリングおよび洗浄の作業)では APF40 による全面形防じんマスクが必要な作業にもかかわらず APF20 の半面形取替え式防じんマスクが着用されていた。

## 【考察】

この COSHH essentials<sup>2-5)</sup>での研究より、13 のインジウムを取り扱う事業場の 55 作業では、厳格な管理措置が必要な CA4(専門家のアドバイスを求める)と CA3(封じ込め)のカテゴリーに 50 件(93%)のインジウム取扱い作業が該当することが判った。

少量のインジウムを取扱う 3 作業は、CA2 の工学的対策が外付け式局所排気装置以上の制御性能を有する対策が必要と判定され、1 作業だけが全体換気装置の工学

的対策と適切な作業方法の対策で良いと判断される CA1 に分類された。

ほとんどすべてのインジウム取扱い作業においては、CA3 および CA4 の嚴重な労働衛生管理措置が必要であった。

これは、発がん性が認められているリン化インジウムを除き、インジウム化合物のハザードが GHS の特定臓器毒性(繰り返しばく露)の区分1(呼吸器)に評価され、ハザード D に分類されることに起因していた<sup>2-7)</sup>。なお、ACGIH<sup>2-11)</sup>は、インジウム化合物をヒトの発がん物質としては分類していない。

一方、日本産業衛生学会は、ITO、酸化インジウム、硝酸インジウム、金属インジウムなどの様々な無機、難溶性のインジウム化合物 (Indium and compounds (inorganic, hardly soluble)) を疫学研究からの証拠は限定的であるが、動物実験からの証拠が十分であると判断できる第 2 群 A の発がん物質として分類している<sup>2-12)</sup>。

仮に、COSHH essentials でのハザードが H コードに従って GHS カテゴリー 1 の発がん性区分に分類することができると、難溶性のインジウム化合物のすべてがハザードレベル E に区分され、CA3 に分類された 15 種以上の作業が、専門家のアドバイスを必要とする CA4 に再分類されこととなる。

したがって、本研究の知見のひとつとしては、労働者の健康に対する多様かつ広範な安全性判断に影響をおよぼすインジウム化合物の発がん性に関する相反するハザード情報が、COSHH essentials での安全性判断の違いを引き起こさせる要因となる事実を指摘する。

また、次に述べる 2 つの研究グループ<sup>2-14,2-15)</sup>の先行研究では、COSHH essentials での 3 つのシンプルな尺度で判断する健康障害予防対策は実際よりも有害物質への職業ばく露防止対策として安全側の判断を行っていることを論じている。

Jones と Nicas<sup>2-14)</sup>は、ハザードレベル D に区分された物質の場合、ハザードレベル B および C に割り当てられた物質よりも、安全性に対するマージンがはるかに大きいことを報告し、橋本ら<sup>2-15)</sup>は、石油産業における 12 のタスクの中から、包括的なリスク評価と比較してコントロールバンディングによる判断が「過剰な管理と判断されるケース」が 7 件、「不十分な管理と判断されないケース」が 8 件、自分たちで判断せずに「専門家の助言を求めるべきであると判断されるケース」が同じく 8 件あったと報告している。

COSHH essentials は、飛散粉じんの許容される濃度範囲を推測することが報告されて<sup>2-5)</sup>おり、例えば表 2-3 に示すようにハザードレベル D に区分された作業者のばく露粉じん濃度は、許容されると思われる  $0.01 \text{ mg/m}^3$  未満( $0.001 \sim 0.01$ )の濃度範囲に維持されるべきであると考えている。

このインジウム粉じんの許容されると思われる安全側に判断された濃度は、ACGIH がハザードは高いものの発がん性なしと判断し勧告した TLV-TWA $0.1 \text{ mg In/m}^3$  にも適用される基準であり、COSHH essentials<sup>2-5)</sup>でのコントロールバンディング判定は、COSHH essentials が予測する粉じんばく露濃度  $0.01 \sim 0.1 \text{ mg/m}^3$ ,  $0.001 \sim 0.01$ ,  $0.001 \text{ mg/m}^3$  未満の非常に低濃度バンドを実現するための対策が必要と判断され、それらが実現できると思われるばく露低減防止対策を示しており、さらにそれを超える極低濃度のばく露防止対策が必要な場合においては専門家の判断を仰いでいる。

したがって、インジウム取扱い作業の大半においても「専門家の助言を求める」ことを推奨し、対策シート G400 (健康診断としての一般原則) および対策シート G409 (空気サンプリングによるばく露測定) として対策についてのアドバイスを指定している。

このことより、インジウム取扱い作業場における COSHH essentials の判定は過度に安全側の判断ではないと推測され、発がん性が疑われるようなハザードの高い物質に

については専門家の介入を依頼することにより、一般的な判断に加えてより専門的な判断でインジウム取り扱い作業の安全性を確保するように設計されていると考えられる。

労働衛生の専門家においては、衛生工学的な対策、個人用保護具などの作業者の健康障害防止に関する最新の情報を事業者に提供することが推奨される。

厚生労働省の技術ガイドライン<sup>2-3)</sup>は、許容される濃度として適当と思われる濃度として、ACGIHが提案しているTLV-TWA 0.1mg In/m<sup>3</sup>(総粉じん粒子インジウム)ではなく、それよりもさらに極低濃度の吸入性粉じん粒子径でのインジウム 3×10<sup>-4</sup>mg In/m<sup>3</sup>を指定した。

この職業ばく露基準は、吸入性 ITO 粉じんに 2 年間ばく露されたラットおよびマウスとの吸入ばく露-発がん性試験結果の包括的なリスク評価データから導かれたもの<sup>2-3)</sup>であり、ヒトを対象としての疫学データではないものの、科学的に承認されるデータと考えられる。

CA3 の工学的管理措置は、密閉封じ込めであるが、ハザードの高いインジウム化合物の取扱い作業を妨げることなく封じ込め装置を設置することは技術的にはかなり難しく、事業者の判断だけで設置するには困難を伴うのが現状である。

全体換気装置と比較した場合の発生源封じ込めの工学的対策の相対的有効性は、ばく露濃度を 100 分の 1 に減少することができる<sup>2-5)</sup>とされているが、囲い式フードを備えた局所排気装置のような発じん抑制効果が高い代替制御技術をもってそれらの効果を発揮する設計は可能であり、粉じん障害予防規則によると粉じんの捕捉速度を 0.7～1.0m/sec 以上に制御することにより、適切に設置された囲い式フードは高い有効性を有し、ばく露対策に有効であることが示されている<sup>2-16)</sup>。

呼吸用保護具でのばく露防止状況は、英国 HSE の呼吸用保護具の基準<sup>2-13)</sup>を満

たす適切な防じんマスクの着用率は 38% (21 作業/55 作業) のみであり、インジウム取扱い作業での呼吸用保護具の選択および適切な使用については、さらに改善が必要であることが明らかとなった。

インジウム取扱い作業場での保護具装着状況を、英国 HSE の指定する個人保護具<sup>2-13)</sup>と COSHH essentials<sup>2-5)</sup>で判定すると、毎日の使用量が中程度で発じん性も中程度のインジウム取扱い作業の場合は、指定防護係数が 40、すなわち全面形防じんマスクやそれ以上に防じん効果の高い全面形電動ファン付き防じんマスク(PAPR)、全面形給気式のマスクを着用しなければならない。

さらに、インジウムの取り扱いで発じん量が「大」や取扱量が「多量」に変更になると、作業者は指定防護係数 2000 の呼吸用保護具、具体的には、潜水作業で用いられるような圧縮空気シリンダーにより空気を供給するスクーバ式呼吸用マスクや新鮮空気をホースにてマスクに供給するデマンドバルブ付き呼吸用マスクの装着が求められる。英国基準における利用可能な指定防護係数 2000 の呼吸用保護具は、BS EN 14593、BS EN 13711 に規格された非常に高い防じん機能を有する呼吸用保護具になる。

表 2-1 に示した調査結果より、インジウムを取扱う 55 の作業において、作業者がデマンドバルブを備えた呼吸装置を着用しなければならない様な非常に防じん性能が高い呼吸用保護具を装着しなければならない作業が実に 5 作業場もあり、半面形取替式防じんマスク(RH)では不十分な管理状況であった。

さらに、呼吸用保護具の管理としては、使用者による呼吸用保護具着用者の適切な使用状況の確認があり、具体的には作業者のばく露レベルが職場ばく露限界値以下のレベルに保護されていることを確認する必要がある。

厚生労働省の技術指針によると、インジウム取扱い作業に対する呼吸用保護具の

選定では、吸入性粉じん粒子径のインジウム作業環境測定結果でインジウム濃度が  $0.03\text{mg}/\text{m}^3$  以上か測定未実施の場合は、指定防護係数 100～1000 レベル以上の防護性能が期待できるものとして粒子捕集効率 99.9%以上のフィルター効率を有する呼吸用保護具を着用することが示されており、全面形電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR)、全面形の一定流量形エアラインマスク (送気マスク)、プレッシャデマンド形エアラインマスクを装着することになり、作業者への負荷がより少ない全面形電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR) を選択することが可能となる。

また、 $0.03\text{mg}/\text{m}^3$  を超えるインジウム取扱い作業者は、全面形電動ファン付き呼吸用保護具 (PAPR)、全面形取替え式防じんマスク (RH) (粒子捕集効率 99.9%以上) の指定防護係数 50～100 レベル以上の呼吸用保護具を着用しなければならない。

この様に、厚生労働省の通達においては英国 HSE の基準とは異なる部分もあり、労働衛生専門家においては、適切な呼吸用保護具を指導する際にインジウムの取り扱い形状と取扱量や指定防護係数についての最新の正確な情報を入手し、職場ばく露限界値を考慮した適切な呼吸用保護具を選択して指導しなければならない。

そのことは、工学的対策と適切な呼吸用保護具の選択・着用を専門家が指導することで、より実効あるばく露防止対策を実施することが容易になり良好なリスク管理につながる事が出来る方策となる。

インジウムのばく露限界値としては、ACGIH の TLV-TWA は  $0.1\text{mg In}/\text{m}^3$ 、厚生労働省の技術指針<sup>2-3)</sup>ではインジウムおよびその化合物の長期吸入ばく露動物実験等のデータを参考にばく露が許容される濃度として  $3\times 10^{-4}\text{mg}/\text{m}^3$  が提案されているが、COSHH essentials が予測する粉じんばく露濃度は  $0.01\sim 0.1\text{mg}/\text{m}^3$  よりも低い濃度バンドを実現するための対策が必要と判断されており、COSHH essentials は ACGIH の



TLV-TWA  $0.1\text{mg In/m}^3$  のばく露限界濃度よりも低いばく露限界値を設定している。さらには、厚生労働省の技術指針  $3\times 10^{-4}\text{mg/m}^3$  の場合は、COSHH essentials の示している  $0.001\text{mg/m}^3$  よりもさらに低い極低濃度でのばく露管理が必要と判断していると考えられる。

この様に COSHH essentials では、一般的な判断が難しいと判断される物質の場合、労働衛生コンサルタントやオキュペイショナルハイジニスト等の専門家による判断をプラスして対策の補強を提示しており、一般的な判断だけで不十分な対策が実施される危険性を防止するために、専門家が加わることで労働災害の危険の芽を摘み取っていると理解できる。

## 【小括】

COSHH essentials によるコントロールバンディングによるばく露評価は、インジウム取り扱い作業の一般的なリスクを比較し、我が国のインジウム取り扱い作業場の作業環境・労働衛生対策の現状を俯瞰する上で有用であった。

インジウムおよびその化合物の危険有害性区分は A から E の 5 段階の区分のうち有害性の高いと考えられる D, E に区分されることより、厳重な労働衛生管理措置が必要な CA4 (専門家の助言を求める) と CA3 (封じ込め) のカテゴリーの区分が 55 作業中 35 (64%) 作業、16 (29%) 作業となり、全体の 93% が封じ込め以上の効果を有する発生源対策が必要と判断された。また、呼吸保護具においても 55 作業中 34 (62%) 作業においては、必要とされる指定防護係数の防じんマスクが着用されていなかった。

これらの結果より、COSHH essentials による化学物質のばく露評価とリスク管理は、事業者が行うことできるリスクセサメントツールとして有用であり、有害性の高いインジウ

ム取り扱い作業場におけるリスクアセスメントに利用出来ることが判った。さらに、一般的な判断において対処できないレベルのばく露防止対策に対しては専門家のアドバイスを求めることでリスクを低く見積もる過ちを防止しており、事業主の自主的な評価が誤った方向に行かないようにしており、専門家による実測による精細なリスク評価の機会を提供している。

しかしながら、COSHH essentials 判定の問題点としては、粉じんの発じん性についての判断基準が「粉状」「結晶状」「ペレット状」と感覚的な判断となり“具体的な尺度”が無いために、事業主の行う一般的な判断として「粉状」と「粒状」で判断が難しい場合があり、発じん性の評価基準としては、取り扱い物質の比表面積やかさたか密度等の数値による判断基準が導入されることが望まれる。

また、COSHH essentials は許容されるばく露濃度をバンドとして示すことで、事業者が行うべき労働衛生対策を提案しているツールであるが、同評価とばく露濃度の実測値の間に乖離があるかどうかの検討については、現地調査を実施して考察する必要がある。

### 第3章 総粉じんインジウム粒子のばく露評価

#### 【緒言】

難溶性インジウム金属粉のばく露による健康障害は、日本では間質性肺炎 7 例、米国では肺胞蛋白症 (PAP) 2 例、中国では PAP 1 例が発生したと報告されている<sup>3-1)</sup>。

産業現場において、インジウムによる健康障害を予防するためには、インジウム取扱作業におけるリスクアセスメントを行い、リスクが少ない状態で作業が実施できているかを確認する必要がある。

化学物質のリスク見積もりには、第 2 章で述べた作業者へのばく露を作業状況等より判断するコントロールバンディングによるばく露評価と、実際に作業者のばく露が許容できているかどうかをばく露濃度調査して判定する実測による 2 通りの方法がある。

さらに、第2章の結果では、インジウムおよびその化合物を取り扱う 55 種の作業においては、CA4(専門家の助言を求める)が 35 (64%) 作業、CA3(封じ込め)のカテゴリーの区分 16 (29%) 作業となり、全体の 93%が封じ込め以上の効果を有する発生源対策が必要とされたが、同評価が適当かどうかの判断は詳細な調査としてばく露状況の実態調査を実施しないと評価できない。

ばく露調査での評価基準は許容濃度を指標として行われ、作業者が 1 日 8 時間、週 40 時間、肉体的に激しくない労働強度で有害物質にばく露される場合に、当該有害物質の平均ばく露濃度がこの数値以下であれば、ほとんどすべての作業者に健康上の悪い影響が見られないと判断される濃度であり、職業性ばく露に関連して有害物質への過度なばく露による作業者への健康障害からの保護を最重要課題として勧告されている。

インジウムについては、いくつかの国際的な労働衛生機関によって異なるばく露限

界が勧告されており、ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) は、インジウムおよびその化合物について  $0.1\text{mg In/m}^3$  の時間荷重ばく露限界値 (TLV-TWA)<sup>3-2)</sup> を勧告し、NIOSH (National Institute of Occupational Safety and Health) はインジウム化合物のばく露限度値 (REL)<sup>3-3)</sup> として同じく  $0.1\text{mg In/m}^3$  を指定した。

厚生労働省は、「インジウム - スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針」<sup>3-4)</sup> を発表し、「許容可能なばく露限界値」 $3\times 10^{-4}\text{mg In/m}^3$  と「目標濃度」 $0.01\text{mg In/m}^3$  を通達しており、これらはいずれも肺胞ガス交換領域に堆積した場合のインジウム粒子への健康障害を防止するために設定された値であり、肺胞に到達する粒子としては PM4.0 ( $4\mu\text{m}\cdot 50\%$  カット) の粒子径である吸入性粉じん粒子径でのインジウム濃度とした。

一方、ACGIH の時間荷重ばく露限界値 TLV-TWA および NIOSH のばく露限界値 (REL; recommended exposure limit) は、インジウム粉の粒子径については指定されておらず、NIOSH が定めた測定分析マニュアル No.0500 におけるサンプリング分析方法は特に分粒装置を用いていないため、分粒を行っていない「総粉じん」としての捕集方法<sup>3-2,3-3,3-5)</sup> と理解される。

第2章での COSHH essentials を用いた日本の 13 インジウム事業場における作業者の健康リスク評価のためのコントロールバンディング評価結果<sup>3-6)</sup> では、インジウム粉じんは作業者の健康に非常に有害であり、13 事業場のインジウム取扱い作業の大部分は COSHH essentials<sup>3-7)</sup> によるコントロールアプローチ CA3 と CA4 に判定され、より発じんを強力に抑制する囲い式局所排気装置や密閉形換気装置の設置や適正な指定保護係数 (APF) を持つ呼吸保護具を適切に選択して着用すること、専門家へのアド

バイスを求めることが必要なことを示した。

しかし、作業場の危険性レベル、日常の使用量、および粉じんの発じん性特性は、単純なスケールで大きく分類されていたため、事業者が一般的な判断によりリスク管理対策を判断するコントロールバンディングの評価は、リスクを見逃さないためにより厳密な対策を推奨する場合もあることも判った。

したがって本研究は、実際に日本のインジウム 11 事業場の 86 名のインジウム取扱い作業における総粉じん中インジウム個人ばく露量を定量的に測定し、ACGIH の TLV-TWA $0.01\text{mg In}/\text{m}^3$  を評価基準に用いて健康障害ばく露リスクを評価することとした。

また、得られたばく露濃度を統計処理し、統計的なばく露指標を用いて 11 事業場における労働衛生管理状況が適切であるかどうかを評価した。

## 【調査方法】

### (1).調査対象事業場等

2009 年に厚生労働省へのインジウムの年間生産・取扱量が 500kg を超える事業場の報告数は 38 事業場であった。

それらの事業場を対象に、アンケート調査、事業場を訪問しての現地調査(事前調査)を行い、事前調査を行った作業環境測定士・認定オキュペイショナルハイジニストが最終的にはばく露が高いと判断し調査の協力が得られた事業場について総粉じんインジウムばく露調査を実施しリスク評価した。

具体的には、38 事業場のうちばく露調査の協力が得られた 13 事業場のインジウム及びその化合物における現地調査については、第 2 章に示したようにまずばく露測定

を伴わないコントロールバンディングによるリスクの見積りと評価を行い<sup>3-6)</sup>、その後、詳細な調査として、ばく露調査について事業場の協力が得られた 11 事業場において個人ばく露実態調査を実施することでインジウムばく露評価を行い、調査事業場におけるリスク評価について評価した。

11 事業場の労働者規模は、300 人以上の従業員数を有する 3 事業場、100～299 人の従業員を有する 4 事業場、50～99 人の従業員を有する 1 事業場、50 人未満の従業員数の 3 事業場で構成されていた。

また当研究は、11 事業場のさまざまなインジウム化合物を取扱っていた合計 279 人の作業者のうちばく露が高いと予測された 86 人の作業者を対象に総粉じん中インジウムの個人ばく露調査を実施した。

## (2).インジウム測定分析方法

インジウム個人ばく露濃度調査のためのサンプリングおよび分析方法を以下に示す。

総粉じん粒子径インジウムについては、NIOSH の測定分析マニュアル 0500<sup>3-8)</sup>に従い、セルロースエステルメンブランフィルター(以下、MCEM ろ紙と略す)(孔径 0.8 $\mu$ m、直径 37mm、日本ミリポア社製)をカセットフィルターホルダー(SK C Inc 製)にセットし、昼食時を除き、携帯型捕集ポンプ Aircheck 2000(SK C Inc)を用いて、少なくとも 6 時間以上の間、1.0 l/min の流速でサンプリングした。

なお、インジウム粉じんのサンプリングに用いた NIOSH の測定分析マニュアル NMAM0500 のサンプリング方法は、全ての粉じんを分粒せずに捕集する方法とされており、一般に「総粉じん」の捕集方法として理解されている方法である。

続いて、インジウムの分析は、誘導結合プラズマ質量分析計(以下、ICP-MS と略

す)(Agilent7500i、Agilent)を用いて、厚生労働省のインジウム技術指針<sup>3-4)</sup>およびNIOSHの測定分析マニュアル No.7301<sup>3-8)</sup>の分析方法を用いた。

ICP-MSの分析条件は、RF電力 1.7V 1,400W、プラズマガス流量 15ℓ/min、キャリアガス 1.0ℓ/min、m/z 値 115 および 118 とした。

前処理としては、インジウム含有する総粉じんが捕集された MFCE ろ紙を(硝酸(和光純薬工業(株))、塩酸(和光純薬工業)、超純水(18MΩcm、Toraypure LV-10T)を1:3:4の比率で混合した溶液 30ml で 60 分間超音波処理を行い、ホットプレート上で 160°C、60 分間灰化した。

検量線は原子吸光分析用のインジウムの標準溶液(関東化学(株))で作製した標準系列を用いた。

その結果、同分析手法でのインジウム定量下限限界値は 0.07ng/ml となり、インジウム濃度の定量限界値は、分析のための溶液の最終容量が 40ml/ろ紙、流速 2ℓ/min、採気時間 480 分での採気量 960ℓ と仮定した場合、最終的な定量下限濃度は 0.003μg/m<sup>3</sup> となった。

### (3).個人ばく露サンプリング方法とばく露濃度算出方法

作業者呼吸域の総粉じん中インジウムを、8 時間荷重平均濃度(TWA-8h)としてインジウムの個人ばく露濃度を算出した。

サンプリングは、カセットフィルターホルダー(SK C Inc)内の MCEM ろ紙(孔径 0.8μm、直径 37mm、日本ミリポア社製)上に携帯型吸引ポンプ(Aircheck 2000、SK C Inc)で作業者の呼吸域の粉じんを捕集した。

サンプリング時間は昼食時を除き、作業中の 6 時間以上のサンプリング時間を確保し、1.0 ℓ/min の流速で作業場空気を採取した。

なお、サンプリング時間を6時間以上とした理由は、“NIOSH Occupational Exposure Sampling Strategy Manual”<sup>3-9)</sup>にて測定結果は8時間のうちの6時間以上のサンプリングを有効とし、またはサンプリングされた時間は全作業時間の少なくとも70%から80%をカバーすべきであるとの規格を満たすためである。

総粉じん中インジウム濃度のTWA-8hの個人ばく露濃度は、以下の式で計算した。

$$TWA_{8時間} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{pi} \times T_{pi})}{480}$$

Cp:測定結果(濃度)、Tp:サンプリング時間(分)

#### (4).統計処理

ばく露濃度の評価として、作業者の個人ばく露濃度を許容濃度と比較する作業者のばく露評価だけではなく、事業場ごとに得られたばく露データをグループとして評価するために、従来の統計データに加えて95%信頼区間上限値(対数正規分布の上位95パーセントタイル値)X<sub>95</sub>を、次の式に従って計算した。

$$\log(X_{95}) = \log(GM) + 1.65 \times \log(GSD)$$

続いて、事業場ごとのグループとしてのX<sub>95</sub>とTLV-TWAを比較して、グループのリスク評価を行った。

ばく露の程度を判定する基準としては、“TLV-TWA < X<sub>95</sub>”の場合をばく露リスクとして“許容できないばく露”と判定した。これらの判定基準については、NIOSH Occupational Exposure Sampling Strategy Manual<sup>3-9)</sup>、Bullock and Ignacio<sup>3-10)</sup>および日本産業衛生学会技術部会で橋本らが「化学物質の個人ばく露測定のガイドライン」において報告されている基準<sup>3-11)</sup>を参考とした。

さらに、個々の作業者のインジウムばく露濃度を、NIOSHによってばく露限界値の



50%として定義されているアクションレベルレベル(AL)<sup>3-9)</sup>(インジウムの場合は 0.05 mg In/m<sup>3</sup>となる)とも比較し、ばく露が許容できるレベルかの判断を行った。なお、ALの評価は、TWA-8h 値が AL を超えると、ばく露低減対策として何らかの対策を実施すべきであると判断された。

統計処理での X<sub>95</sub> は、データ数が 5 以上でないと推定できないため、インジウム取り扱い事業場の作業者が 5 人未満の場合、X<sub>95</sub> の代わりに「AL < 事業場の最大値(Max)」または「TLV < 事業場の算術平均値(AM)」のいずれかの条件で「ばく露改善のための管理措置が必要であるかどうか」の判定を行った。

## 【調査結果】

### (1).ばく露作業概要

調査を行った 11 インジウム事業場の概要を表 3-1 に示した。

インジウム事業場は大きく2つのインジウム産業に分けられた。1つのグループはリサイクル/再生の4事業場であり、2つ目のグループは電子デバイスの製造の7事業場であり、取り扱われていたインジウムは、金属インジウム、インジウム-スズ酸化物(ITO)酸化インジウム、水酸化インジウム、リン化インジウムなどのインジウム材料であった。

インジウム製品の製造取扱作業の概要としては、図 2-2 に示した以下の4作業が代表的なものであるが、その他に秤量作業、袋詰め作業、ITO の蒸着作業や ITO ターゲット等のショットブラスト作業、切断研磨粉じんの清掃(床、作業台等)や機器メンテナンス作業等がある。

#### ●インジウム及びその化合物を原料として他製品を製造する作業

金属インジウム→酸化インジウム→他の原料と混合→焼結→研磨→ITO ターゲット

成型(製品)

●インジウム及びその化合物のリサイクル/再生作業

使用済 ITO やインジウム金属(粉、塊)→粉碎→電気分解や溶融→注湯( casting・  
型込み)→インゴット取り出し(製品)

●ボンディング作業

金属インジウム→溶融→他材料を接着(はんだ)→ヤスリ加工

●リン化インジウム

リン化インジウム結晶(ウエハー)→切断加工, 研磨加工

これらの作業の中で発じんが大きな作業は、 casting および焼結作業であり、発じんの小さな作業は、脱水および電気泳動によるインジウム回収作業であった。

なお、インジウム結晶の研削および切断や ITO 蒸着作業は、作業者がインジウム粉じん<sub>2</sub>に過度にばく露されないように、グローブボックスまたは密閉型フードの局所排気装置内や密閉装置内で実施されており、発生源の密閉化に努めていた。

## (2). 8 時間荷重平均ばく露濃度(TWA-8h)結果

図 3-1 にインジウム取扱い作業<sub>者</sub> 86 名の総粉じん粒子中のインジウム 8 時間荷重平均ばく露濃度(TWA-8h)を、作業<sub>者</sub> A から k までの 11 のインジウム事業場の番号の次に作業<sub>者</sub>番号を付けることで示し、TWA-8h インジウム濃度は対数軸で示した。

総粉じん中インジウム化合物の個人ばく露濃度は、対数正規分布を示す S 字曲線に近い曲線を示し、インジウムばく露濃度が ACGIH の TLV-TWA0.1mg In/m<sup>3</sup>を超えた作業<sub>者</sub>は 86 名中 11 名(13%)となり、作業<sub>者</sub>はリサイクル/再生業の 3 事業場、電子機器製造業の 4 事業場の 7 事業場(64%)に所属しており、インジウム濃度がアクションレベル(AL)を超えた作業<sub>者</sub>は 86 名中 19 名(22%)となり 9 事業場(82%)に所属し

ていた。

さらに表 3-2 に、事業場ごと 11 のインジウム事業場での総粉じん中インジウム個人ばく露濃度の集計結果を示した。

86 名の作業者のインジウム濃度は、最小値(Min)の  $0.0001 \text{ mg In/m}^3$  から最大値(Max)  $1.421 \text{ mg In/m}^3$  までの濃度範囲であり、算術平均値は  $0.098 \text{ In/m}^3$  と TLV-TWA  $0.1 \text{ In/m}^3$  に近似したばく露濃度となった。

11 事業場の TWA-8h のばく露で ACGIH の TLV-TWA  $0.1 \text{ mg In/m}^3$  以上の作業者がいる事業場は 7 事業場、AL 以上のばく露濃度作業者がいる事業場は 9 事業場となり、最も高濃度のばく露濃度は e 事業場の  $1.421 \text{ mg In/m}^3$  となった。

また、86 名のばく露濃度を Kolmogorov-Smirnov 検定(KS 検定)(エクセル統計 2013)にて、帰無仮説として標本分布が正規分布に従うことを有意水準 5%にて検定したところ  $P \geq 0.10$  となり、対数正規分布に適合していると判定され、事業場で 5 名以上の統計的処理が可能な 8 事業場では、1 事業場を除く 7 事業場が対数正規分布に適合していると判定された。

さらに、対数正規性が確認された 7 事業場において 95%信頼区間上限値( $X_{95}$ )と TWA-8h 最大値のどちらがより濃度が高いかを比べたところ、7 事業場のうち 5 事業場(71%)は最大値の濃度が高いとの結果になり、86 名の結果においても同様の結果を得た。

また、統計処理できた 8 事業場のばく露状況を  $X_{95}$  と TLV を用いた評価方法で評価すると、“ばく露低減措置が必要な管理状態”に分類される“ $\text{TLV} < X_{95}$ ”<sup>3-9,3-10,3-11)</sup> の評価は 5 インジウム事業場(A、D、E、G、I)が該当し、現状の労働衛生対策ではばく露低減措置が不適切であると判断された。同様に、“ばく露低減措置は特に必要ない

管理状態”と評価される“TLV < X<sub>95</sub>”の評価は 3 インジウム事業場 (F、H、J) が該当し、現状の労働衛生対策でばく露防止措置が適切に行われていると判断された。

さらに、調査実施作業員数 5 人未満の残りの 3 事業場 (B、C、K) においては、B 事業場は AL < Max、C と K 事業場の場合は TLV < AM のいずれかの条件で“ばく露低減措置が必要な管理状態”と評価され、最終的には、11 事業場のうち 8 事業場 (72%) において“ばく露低減対策が不十分”との評価となった。

### (3).インジウムばく露濃度が最も低かったグループと高かったグループの比較

表 3-3 に、11 インジウム事業場での様々なインジウム取扱い作業のうち個人ばく露濃度が最も高い作業員 5 名のケースと最も濃度が低かった 5 名の 2 グループのばく露作業内容とばく露濃度、労働衛生管理としての局所排気装置の設置状況と呼吸用保護具の装着状況を示す。

ばく露濃度が最も高かった 5 名の高ばく露グループでは、ACGIH TLV-WA0.01mg In/m<sup>3</sup> よりもほぼ 10 倍高いインジウム濃度にはばく露されていたが、作業員が装着していた呼吸用保護具は、指定防護係数 (APF) 10 の半面形取替式防じんマスクであり、局所排気装置等の工学的対策も実施されていなかった。

作業員 e8,e9 は、作業場の集じん機内に集積した酸化インジウム粉をペール缶に回収する作業時に高濃度のばく露を受けており、同作業は常時実施する作業では無いもののインジウムがレアメタルであり高価なことより、定期的に行われる作業である。

また k2 作業員はリサイクル原料の粉砕、焼結作業を行っており外付け式フードの局所排気装置を用いているものが、粉砕・焼結作業時の粉体の取扱い位置発生源対策としては十分な排気気流を形成出来ていない状況であり、ITO ターゲットの切断粉砕作業の i17 作業員、インジウムの充填袋詰め作業の a6 作業員においても、作業位置

(発生源)と局所排気装置フードとの位置関係が適切でない、吸引気流が不足している状況が確認され、十分な補足気流が形成されていない状態での作業であった。

また、防じんマスクは5名ともに半面形取替え式防じんマスクを装着して作業を実施していたが、マスクと顔面の密着性を数値で示すマスクリークテストによるマスク漏れ率の調査は実施したことが無いとの回答であり、適切な装着状況であったかについては確認が必要と思われた。

つづいて最もばく露が少ないグループとして評価された、5名の5作業について述べる。

最もインジウム濃度の低かったF事業場のf6,f5作業者は、局所排気装置は設置されていない場所での作業であったが湿った状態のインジウム残留物の除去作業を行っており、発じん性の低い状態でのインジウム取扱いであった。一方、f3作業者は発じん性の高いショットブラスト作業であったが、密閉型の囲い式局所排気装置<sup>3-7)</sup>(加工品の出し入れ時のみ囲い式フードとなり、ショットブラスト時は密閉装置として機能している)を用いて作業を行っており、リン化インジウム(InP)の研削や切断作業を実施していたi9,i8の2名の作業者也、外付け式フードよりもばく露を1/10以上に低減することのできるグローブボックスや囲い式局所排気装置を設置して、リン化インジウム粉じんへのばく露防止対策を行い有効に活用していた。

上記5名の呼吸用保護具の防じんマスクは、指定防護係数10の半面型取替式防じんマスク、指定防護係数4の使い捨て式防じんマスク、防じん効果が不明な不織布マスクおよび着用無しであった。5名のTWA-8hは、ばく露限界値 $0.1\text{ mg/m}^3$ に対し1/100未満であるので呼吸用保護具の着用の必要性は無いとの判断も可能であるが、インジウム及びその化合物については発がんについての健康障害が危惧されているを考

慮すると使い捨て式防じんマスクかそれ以上の指定防護係数を持つマスクの装着が望ましいと考えられた。

## 【考察】

本研究で行ったインジウム取り扱い作業員 86 名の総粉じん中におけるインジウムばく露濃度の平均ばく露濃度は  $0.098 \text{ mg In/m}^3$  となり、 $0.0001 \text{ mg In/m}^3$  (最小) から  $1.421 \text{ mg In/m}^3$  (最大) の範囲となった。

さらに 86 名中 11 名 (13%) が ACGIH の TLV-TWA  $0.1 \text{ mg In/m}^3$  よりも高いインジウム濃度にばく露されており、直ちにばく露軽減措置が必要な作業があることが明らかとなった。

また、ばく露軽減措置が必要とされる基準には、TLV-TWA の 50% 値であるアクションレベル (AL) を超えているかどうかで判断する基準もあり、86 人中 19 名 (22%) の作業員はインジウム濃度が AL を上回っていた。NIOSH は Occupational Exposure Sampling Strategy Manual<sup>3-9)</sup>において、AL を超えるばく露の場合は、ばく露防止対策とその効果について確認するばく露測定の必要性や実施回数、従業員へのトレーニングおよび健康診断措置などの措置の実施を規定しており、AL を超えた作業員に対してはばく露軽減対策を開始しなければならない。

さらにばく露防止対策が必要な評価基準として、NIOSH, AIHA および日本産業衛生学会において“ばく露限界値  $< X_{95}$ ” という統計処理を用いた評価の条件は、「ばく露軽減措置が必要な管理状態」として定義できると報告している<sup>3-9,3-10,3-11)</sup>。

今回の調査では、8 インジウム事業場が「ばく露軽減措置が必要な管理状態」に分類され、残りの 3 インジウム事業場が「ばく露軽減措置は特に必要ない管理状態」と評

価される状態であったことが明らかになった。

以上より、インジウムを 500kg/年 以上取り扱っている 11 事業場での労働衛生対策は不十分と判断される事業場が大半となり、健康障害を発生するおそれのある状態と判断された。

特に最もばく露濃度が高い作業員 5 名が従事するグループの作業は、粉状の酸化インジウム粉じんの回収、粉砕、焼結作業および ITO ターゲット切断作業などの発じんを伴う様々なインジウム取扱いであり、総粉じん中インジウム濃度は TLV-TWA の 7～14 倍とかなりの高濃度となった。

これらの結果については、Cummings ら<sup>3-12)</sup>の報告と一致しており、彼らは米国における調査において、インジウムばく露の可能性が高い作業としては、無機インジウム化合物 ITO の製造を含む企業の ITO スパッターリング作業、ITO ターゲットの表面処理作業、残留物を除去するための研磨ブラスト作業などであり、ITO ターゲットの圧縮空気をを用いた研磨において呼吸域濃度は最も高くなり、総粉じん中のインジウム濃度が  $3.1\text{mg In/m}^3$  の高濃度ばく露であったことを報告しており、宮内らの報告<sup>3-13)</sup>によれば、インジウムのリサイクル/再生プラントでは、再生用 ITO 破砕作業(TWA として  $0.67\text{mg In/m}^3$ ) および粉砕および溶融加熱作業(TWA として  $7.1\text{mg In/m}^3$ )において、総粉じん中の呼吸域インジウム濃度が高く、湿式である電解精製プロセス(TWA として  $0.043\text{mg In/m}^3$ )は低濃度であったことを報告しており、今回のばく露調査以上に高濃度ばく露の可能性を示唆している。

高濃度ばく露が確認された 5 名について、E 事業場の No.8 作業員(e-8)と No.9 作業員(e-9)の 2 名の作業員は集じん機に集じんされた粉じんをペール缶へ充填する作業を行っており呼吸域インジウムばく露濃度は、 $1.421\text{mg In/m}^3$  と  $1.256\text{mg In/m}^3$  の

TLV-TWA より 14 倍、13 倍高いインジウム濃度となった。しかし、その 2 名の作業者が着用していた防じんマスクは指定防護係数 (APF) が 10 の半面形取替式防じんマスクであり、作業部署には作業頻度の少ない作業のために局所排気装置が設置されていない状態であった。

したがってまずは同作業に対して NIOSH Respirator Selection Logic<sup>3-14)</sup>に示されている呼吸保護具の選択基準に従い、呼吸域インジウム濃度より考察される防護係数 25 の規格の全面形の防じんマスク<sup>3-14)</sup>とばく露濃度を 1/2 に減らすことが期待できる工学的対策として移動式の局所排気装置<sup>3-10)</sup>の設置を提案した。

また、k-2 作業、i-17 作業、a-6 作業も TLV-TWA よりも高いインジウム粉じんにはばく露されており、当作業場でのばく露防止対策は不十分であることが判明し、作業員の装着している防じんマスクも APF10 の半面形取替式防じんマスクであり、局所排気装置の吸引状況も発生源をすべてカバーするだけの捕捉気流が形成されていなかった。

これら局所排気装置はばく露防止対策のために導入されているが、外付けフードの捕捉点における吸引速度が 0.1m / sec 以下であり、上方吸引型キャノピーフードは発生源である破碎装置から離れて設置されていたことより、いずれもその機能を発揮することなく漫然と使用されていた実態が判明した。

このことより、まずは発生源に対し遠くに設置されているフード位置の見直しを行い、所定の制御風速を満たすことが出来ない様であれば、続いて、フードの形状を囲い式へ変更するか密閉化し、ファンの変更による排风量アップ等の捕捉速度を上げるための対策を実施する必要があることを指摘し、そそれをコストの低い対策より順次示して改善行動に移しやすいように指導した。



さらに作業者のばく露防止対策として、NIOSH Respirator Selection Logic<sup>3-14)</sup>に従って半面形防じんマスクより高い防護係数を有する全面形のフルフェイス形防じんマスクを併用することで、より確実なばく露防止対策の実施を求めた。

一方、ばく露濃度が低い作業者インジウム濃度は、 $0.0001 \sim 0.0005 \text{ mg/m}^3$ とTLV-TWAに比べてかなり低い総じん中インジウム濃度となり、f-6, f-5 作業者はウェット状のインジウム粉を取り扱い、f-3, i9, i8 作業者は発じんの大きなショットブラスト作業、リン化インジウムウエハーの切削切断作業に従事していたが、囲い式局所排気装置や密閉装置のグローブボックスを活用して作業を行うことでばく露軽減対策を有効に行っていた。同工学的な対策は、通常の外付け式局所排気装置よりもばく露濃度を1/10に低下させるより厳しい工学的管理であり、ばく露軽減対策として有効であることが実証された。

呼吸用保護具装着状況は、f6, f5, f3 作業者は半面形取替式防じんマスクを装着しており、i9, i8 作業者は防護機能が不明な不織布マスク、1名はマスク未装着であった。

しかしながら、ばく露評価としてのインジウムの有害性評価においては、ACGIHのTLV-TWA<sup>3-2,3-15)</sup>、NIOSHのREL-TWA<sup>3-3)</sup>が提案している値と厚生労働省が「インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止対策の徹底について」(平成22年12月22日付け基発1222第2号)の「インジウム・スズ酸化物取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針」(以下、技術ガイドラインと略す)<sup>3-4)</sup>で示した通達による指標値には、明確な違いが認められる。

ACGIHは、発がん性は考慮せず、総粉じん濃度として吸入したインジウムに関連した有害な骨格および胃腸の影響および肺毒性に基づいて $0.1 \text{ mg In/m}^3$ のTLV-TWA

を勧告し、NIOSH も発がん性は考慮せずにインジウム化合物の総粉じんとして  $0.1 \text{ mg In/m}^3$  のばく露限界値を推奨した。

一方、厚生労働省の技術ガイドラインは、ばく露が許容される濃度をラットにおける ITO 吸入粉じんの 2 年間長期吸入ばく露試験の発がん性動物試験において、気管支-肺胞がんの発生を確認<sup>3-16)</sup>し、無毒性当量より許容濃度と思われる濃度をヒトに外挿して求めた吸入性粉じんインジウム濃度の  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  を「許容される濃度」として通達した。

私たちが以前行った COSHH のコントロールバンディングを用いた研究<sup>3-6)</sup>では、コントロールバンディングによる適切な労働衛生対策(コントロールアプローチ)を行った場合、最も濃度が高くなる濃度として、CA2 の工学的対策や CA3 の密閉対策を実施した場合においても  $0.1 \text{ mg/m}^3$  以下の粉じん濃度が期待されるとされていたが、CA2 と CA3 該当する 21 作業において COSHH essentials が求める工学的対策が実施されていた事業場は無く、ばく露濃度の実測値で  $0.1 \text{ mg/m}^3$  を越える作業者が全体の 13% 確認された。また、COSHH のコントロールバンディングにおけるばく露限界値については、インジウムは発がん性を持つ化合物があり、粉じんの発じん性が“高発じん性”で空気環境中に飛散しやすい粒子であってその取扱い是非常に慎重に行う必要があることが示され、インジウムの許容濃度としては  $0.01 \text{ mg In/m}^3$  未満の範囲で維持されるべきであると結論付けられた。

さらに Cummings ら<sup>3-12)</sup>は、空気力学的中央値の直径が  $4 \mu\text{m}$  未満のインジウム化合物を含有する吸入性粉じん粒子状物質が、肺の深層部まで達し慢性呼吸器疾患および肺がんに関連する障害を引き起こすと報告しており、このことは、ヒトの発がん性に着目したインジウム粉じんのリスク評価では、総粉じん粒子径のみならず吸入性粉じん

粒子径インジウムのばく露評価値が必要であり、ばく露基準値の研究がさらに求められていると考える。

これらの研究を通じて、インジウムにおける健康障害防止のためのリスクの見積りが適切に実施され、必要なばく露防止対策が適宜行われることにより健康障害リスクが低い状態で作業が行われることを強く望むものである。

## 【小括】

我が国におけるインジウムの年間生産量が 500kg を超える 11 のインジウム取り扱い事業場を対象に合計 86 名の作業者の TWA-8h ばく露濃度調査を実施した。ばく露調査は総粉じん径のインジウム対象とし、ICP-MS を用いて分析することで測定し評価した。

その結果、総粉じん中インジウム濃度が ACGIH の TLV-TWA を超え、直ちにばく露低減措置が必要と判断される作業者が 86 名中 11 名 (13%) おり、TLV-TWA の 50% 値の AL を超えている作業者も 19 名 (22%) いた。また、“ばく露限界値 < X<sub>95</sub>” の条件下では、11 事業場中 8 事業場 (73%) が「ばく露低減措置が必要な管理状態」と分類され、過半数の事業場でばく露防止対策が不十分と判断させる結果となった。

最もばく露濃度が高いグループに分類された 5 名の作業者は、TLV-TWA よりも 7～14 倍の高濃度のインジウム粉じんにばく露されており、局所排気装置等の工学的対策と呼吸用保護具の選択も不十分であることが判明した。

一方、TLV-TWA よりもはるかにばく露濃度が低い 5 名の作業者は、工学的対策として密閉式、囲い式フードの局所排気装置や密閉装置を採用し、より厳しい工学的管理対策を行うことでばく露軽減対策を実施しており、有害物の発生源への対策が良好

に実施されていた。

この事例により、有効なばく露軽減対策を適切に実施することでばく露軽減措置が実効性あるものとして評価され、健康障害防止に寄与することが考えられた。

さらに防じんマスクの着用状況については、ほとんどの作業者は半面形取替え式防じんマスクを装着していたが、発じんが低いと感じられる作業では、ばく露濃度に対して指定防護係数が低いマスクの選択や場合によっては未着用が観察された。

防じんマスク着用においては、吸入性粉じん粒径は感覚で測れるものではないため、ばく露濃度調査を実施して必要な防護係数を持ったマスクを選択するか、あらかじめ指定防護係数を参照して有効な保護機能を持ったマスクを選択することが大切である。

またヒアリングの結果、マスクと顔面との密着性を測定するマスク漏れテストを経験した作業者がいなかったことより、今後はマスクの漏れテストを実施し適切な装着方法を体得して作業を実施することが望まれる。

さらに、リスク評価に用いるばく露限度値については、重篤な肺障害を引き起こすターゲットとなる粒子径が吸入性粉じん粒子径であることから、ACGIHの示す総粉じん粒子の大きさでの濃度でいいのか、あるいは発がんに着目した基準値の設定は必要ないか等、リスクを評価するうえでのばく露限界値について議論の余地があると考えられた。

## 第4章 総粉じん粒子と吸入性粉じん粒子測定によるインジウムばく露 評価

### 【緒言】

難溶性のインジウム粒子状物質への職業性ばく露は、インジウム-スズ酸化物(ITO)の湿式表面研磨プロセスに従事する男性作業員において間質性肺炎による死亡を引き起こしたことが報告されており<sup>4-1)</sup>、ばく露限度値を指標としたインジウム粉じんへの過度なばく露防止対策を講じることは、重篤な健康障害より作業員を守るために非常に重要である。

それらの健康障害防止措置の必要性を判断する有害性評価としてばく露限界値が示されており、ACGIH は、「総」粉じんインジウムとして  $0.1\text{mg In/m}^3$  のばく露限界値-時間加重平均 TLV-TWA)<sup>4-2)</sup>を推奨し、NIOSH も同様に、総粉じんについて同じ  $0.1\text{mg In/m}^3$  をばく露限界値 (recommended exposure limit)<sup>4-3)</sup>として勧告している。

一方、厚生労働省は、ITO 取扱い作業に従事する作業員の健康障害の防止に関する技術指針<sup>4-4)</sup>において ITO 等のインジウム化合物について、吸入性粉じん粒子径のインジウム濃度として、許容される濃度(AECL)「 $3\times 10^{-4}\text{mg In/m}^3$ 」および目標濃度(TC)「 $0.01\text{mg In/m}^3$ 」を示した。

ここで示した許容される濃度は吸入性粉じん粒子径<sup>4-4)</sup>のインジウムばく露限界値の推定値と見なすことができる。また、ばく露限界値は作業員の呼吸域での空気をサンプリングした 8 時間荷重平均濃度として示されており、ばく露濃度調査として 6 時間以上のサンプリング時間を必要としている<sup>4-5)</sup>。

そのため現在、空気中のインジウム粉じんを捕集するためには 2 つの異なる方法が用いられており、1 つは、NIOSH に示されている測定分析手法<sup>4-6)</sup>の「総粉じん」と、2

つ目は厚生労働省の指定している「吸入性粉じん」での空気中の粒子状物質のサンプリング基準<sup>44)</sup>である。

第3章で述べた先行研究<sup>47)</sup>では、11 インジウム取扱い事業場の86名の作業者の総粉じん中インジウムに対する個人ばく露濃度の評価について、11人の作業者がばく露限界値よりもインジウム濃度が高く、これらの作業者にはインジウムばく露防止対策が直ちに必要ことを報告した。

しかし、吸入性粉じん粒子径のインジウムばく露濃度については、ばく露調査のデータが無く、総粉じんインジウム濃度と吸入性粉じん粒子径インジウム濃度との比較が出来ない状況であった。

したがって本研究は、我が国の3 インジウム取扱い事業場を対象に「総粉じん」および「吸入性粉じん」中のインジウム個人ばく露濃度を同時に調査するために、作業者の呼吸域に総粉じんサンプラーと吸入性粉じん用のサイクロンサンプラーを同時に装着し、両粒子径におけるインジウムばく露濃度と評価について検討を行ったので報告する。

ばく露評価については、総粉じん粒子インジウムはACGIHのTLV-TWA0.1mg In/m<sup>3</sup>を用い、吸入性粉じん径インジウムについては厚生労働省インジウム許容される濃度(AECL)3×10<sup>-4</sup> mg In/m<sup>3</sup>の値を用いて各々行い、3事業場の労働衛生管理の状況についても考察した。

## 【調査方法】

2009年にインジウムの年間生産量が500kgを超えた日本の38社のインジウム取扱い事業場の中から、総粉じんと吸入性粉じん径インジウムの個人ばく露濃度調査を同

時に実施することに承諾した3事業場の合計27名の作業者を対象にばく露調査を実施した。

27名の作業者のうち、17名の作業者はi事業場のインジウム製品製造作業の各工程でインジウム取扱い作業に従事している作業者であり、j事業場の8名の作業者とk事業場の2名の作業者は、リサイクルによるインジウムの再生作業でインジウムを取り扱っていた。

これらの作業者において、同時に総粉じんおよび吸入性粉じんの2つのサンプラーを呼吸域に装着し、6時間以上のサンプリングを実施してTWA-8h値を求めた。

総粉じん粒子は、NIOSH測定分析マニュアルNo.0500<sup>4-6)</sup>によって指定された「特に分粒していない粒子の合計」として収集された粉じんを示し、吸入性粉じんはACGIHのサンプリング方法基準<sup>4-2)</sup>および厚生労働省のインジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針<sup>4-4)</sup>に従い、PM4.0(4μm50%カット)の浮遊粒子状物質を捕捉する分級装置を有するサイクロンサンプラーによって収集された。

TWA-8hとしての総粉じんまたは吸入性粉じんに対する個人ばく露のインジウム濃度は、以下の式によって算出した。

$$TWA_{8時間} = \frac{\sum_{i=1}^n (C_{pi} \times T_{pi})}{480}$$

ここでのCpは測定結果(濃度)、Tpはサンプリング時間(分)であり、この式より8時間荷重濃度を求めることが出来る。

また、同時に、吸入性粉じんインジウム濃度(RD)に対する総粉じんインジウム濃度(TD)のインジウム濃度比(T/R比)も求めた。

インジウムの分析は、第3章の研究報告<sup>4-7)</sup>に記載された ICP-MS 法によって実施した。

ばく露濃度の評価は、従来の個人ばく露濃度で個人ばく露の可否を判断する評価に加えて、グループとして事業場ごとに対数正規分布の 95 パーセントタイル値 ( $X_{95}$ ) を求める統計処理を行ってばく露濃度がばく露限界値に比べ高いのかを評価した。

$X_{95}$  は、 $\log(X_{95}) = \log(GM) + 1.65 \times \log(GSD)$  によって計算し、評価は、NIOSH Manual<sup>4-5)</sup>, Bullock and Ignacio<sup>4-8)</sup>の方法に従って評価し、評価基準として「ばく露限界値(OEL)  $< X_{95}$ 」をばく露低減措置が必要なレベルと定義した。

調査した事業場のなかでインジウム取扱い作業者が 5 人未満の場合、「アクションレベル(AL)  $<$  ばく露濃度最大値(Max)」または「TLV  $<$  ばく露濃度算術平均値(AM)」のいずれかの条件で「ばく露低減対策が必要なレベル」かどうかを評価した。

## 【結果】

### (1)．総粉じんと吸入性粉じん濃度とその割合(T/R 比)

3 事業場 27 名の呼吸域における総粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんインジウムばく露濃度の統計処理データと、総粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんインジウムばく露濃度比(TR 比)を表 4-1 に示す。

3 事業場でのすべての作業者の総粉じんインジウム濃度の算術平均値は  $0.095 \text{ mg In/m}^3$  となり、 $0.0004 \text{ mg In/m}^3$  (最小値) から  $1.273 \text{ mg In/m}^3$  (最大値) の範囲となり、総粉じんインジウムの濃度が TLV-TWA を超えた作業者は 27 名中 2 名であり、AL を超えた作業者も同一作業者となった。

TLV-TWA を超えた 2 作業者の作業は、テストピース分析のための ITO ターゲット小



片の切断研磨を約 30 分実施していた i17 の作業者とリサイクル用原料の粉碎焼結等を行っていた k2 作業者であった。

一方、吸入性粉じん粒子径インジウム濃度の算術平均値は  $0.0589 \text{ mg In/m}^3$  となり、 $0.00038 \text{ mg In/m}^3$  (最小値) から  $0.82 \text{ mg In/m}^3$  (最大値) の範囲となり、吸入性粉じんインジウム濃度が許容される濃度 (AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  よりも低いばく露濃度値となった作業者はいなかった。

さらに、総粉じん粒子径インジウム濃度と吸入性粉じんインジウム濃度の比率を T/R 比として求めた結果、算術平均値は 1.61 となり、最小値 1.01 より最大値 15.3 倍、95%信頼区間上限値 5.96 倍となった。

TR 比が 15.31 と最も大きくなった作業は、事業場 i の ITO 粉末のプレス作業であり T/R は  $0.0385 / 0.0025$  であった。なお、同作業を行っている別の作業者の T/R 比は  $0.0051 / 0.0022$  で 2.32 となり、粒子径が比較的大きな粉じんが飛散する作業における総粉じんインジウム濃度の揺らぎと同作業での吸入性粉じん粒子インジウム濃度の変動が少ないことが注目された。仮に粉じんの粒径と質量の関係を球で考えると、半径  $r$  に対して球の体積は  $4\pi r^3/3$  となり、半径  $r$  を 10 倍の  $10r$  にすると質量 (密度は 1 と仮定する) は  $1000 (4\pi r^3/3)$  と 1000 倍の質量になり、粒径の大きな粒子を捕集する際の濃度変動の大きさについて考察できる様な調査計画が必要と思われた。

残りの 2 事業場での TR 比が最も大きくなった作業は、j 事業場  $1.29 (0.00143 / 0.00111)$  の回転炉からの原料粉取り出し作業、k 作業場  $1.56 (1.2733 / 0.8173)$  のショット作業に伴うインジウムの取り出し作業であり、k 作業ではばく露濃度も高値となり発じんが多い作業であった。

反対に、T R 比が 1.01 倍と 1 倍に近い作業は、i 事業場の ITO 焼結体の湿式研磨

作業とj事業場のインゴット鑄造作業となった。

i事業場のT/R比は1.01(0.00167/0.00165)となり、j事業場では1.01(0.0257/0.0254)となったが、湿式研磨作業ではインジウム粉じんの飛散が少なく小さな粉じん粒子径が主な作業と考えられ、j事業場ではインジウムの溶解作業に伴いヒュームが発生する作業で粒子径の小さな粉じんが優位な発生であったための結果と考えられた。

## (2)．総粉じんと吸入性粉じんインジウムばく露調査の評価結果

区間推定上側95パーセンタイル値( $X_{95}$ )は、集団における「ばく露の低減措置が必要か否か」の労働衛生管理の評価に用いられる。

総粉じんインジウムばく露濃度を「ACGIH TLV <  $X_{95}$ 」で設定された評価条件<sup>4-5,4-8)</sup>によって評価すると、プラントiとjにおいては「ばく露低減措置が必要なレベル」に分類され、5人未満の事業場kも「ACGIH TLV < 算術平均濃度(AM)」の評価により「ばく露低減措置が必要なレベル」と評価された。

吸入性粉じんインジウムばく露濃度を「許容される濃度  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3 < X_{95}$ 」によって評価すると、i事業場およびj事業場は、「ばく露低減措置が必要なレベル」に分類され、k事業場も「許容される濃度  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3 < \text{AM}$ 」となり、「ばく露低減措置が必要なレベル」と評価された。

表4-2に示すように、i事業場i7作業者は、ITOターゲットの切断および粉砕作業中に総粉じんとして  $0.965 \text{ mg In/m}^3$  の非常に高濃度のインジウムにばく露されており、k事業場k2作業者は、粉砕およびショットブラスト作業中の総粉じんとして  $1.273 \text{ mg In/m}^3$  の高濃度のインジウムにばく露されていた。

これらの2名の作業者は、防護係数が10である半面形使い捨て式防じんマスクを装着し、制御風速0.1m/秒以下の吸引気流が弱い外付け式局所排気装置を用いての

作業であった。

したがって、事業者に対して電動ファン付き呼吸保護具(PAPR)の着用と、発生源封じ込め型の密閉式のフードまたは囲い式の局所排気装置などのより厳しい工学的な管理対策を実施するよう助言した。

なお電動ファン付き呼吸保護具(PAPR)装着の有効性に対しては、LiuらがITO作業者のインジウムばく露を減らすためのPAPR実効性を報告しており<sup>4-9)</sup>、封じ込め型および囲い式局所排気装置は、一般的な換気と比較してばく露濃度を1/100に減少させると報告<sup>4-10)</sup>されている。

一方、6時間以上サンプリングされた吸入性粉じんインジウム濃度については、調査したすべての作業者において、許容されるばく露濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$ を超えていることが判明し、総粉じんインジウム濃度でのACGIH TLVを越える作業者が2名と評価結果が明らかに違う結果となった。

27名の作業者のうちの21名が、外付け式局所排気を用いてインジウムを取扱っていたが、プラントi9作業者については、密閉式のグローブボックスを用いての作業であり、よりばく露防止効果の高い対策を実施していた。

注目すべきことに、密閉式のグローブボックスを活用していたi9作業者のインジウム濃度は全作業者27名の中で最も濃度の低い  $0.00038 \text{ mg In/m}^3$  となったが、吸入性粉じん粒子径での許容されるばく露濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  よりわずかに高い濃度となり許容されるばく露濃度よりもばく露が高いと判定された。

したがって、吸入性粉じん粒子径インジウムばく露濃度は、調査した全員がばく露限界値と推定される  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  を超えており、早急なばく露防止措置が望まれる結果となった。

また、事業者は、発生源の密閉等実効性ある工学的対策を実施するまでの間は、作業者のばく露防止対策として、厚生労働省の技術指針<sup>4-4)</sup>やOSHA保護具規格<sup>4-11)</sup>に従い、指定防護係数が50～100になる電動ファン付き防じんマスクか全面形防じんマスク(RPE)、指定防護係数1000のデマンドマスク式呼吸保護具の装着を義務付け、現在よりもなおばく露防止対策に努めなければならない。

## 【考察】

本研究での3事業場の吸入性粉じん粒子径インジウムばく露濃度では、調査を行った全作業者が許容される濃度(AECL) $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$ より高いインジウムにばく露されており、総粉じん粒子径インジウムばく露濃度では、ほぼすべての作業員(25名/27名)がTLV-TWA  $0.1 \text{ mg In/m}^3$ 以下のばく露濃度であったことが見いだされた。

この評価の差は、2つの異なる粒子径のばく露限界値が存在することに起因するための評価結果の差異と考えられ、異なるばく露限界値が評価に混乱を与えている原因と思われた。

ばく露限界値については、総粉じん粒子径インジウムのACGIH TLV-TWAは、発がん性なしの吸入インジウムに関連する骨格および胃腸の影響および肺毒性に基づいており<sup>4-2,4-12)</sup>、厚生労働省の示す技術指針の許容される濃度(AECL)<sup>4-3)</sup>は、ラットにおける長期吸入発がん性試験における吸入性ITO粉じんの吸入ばく露濃度と肺がん発生の量-反応関係から導かれた濃度であり<sup>4-4,4-13)</sup>、健康障害、発がん性の評価においても差異が見られる値である。

さらに別の要因としては、総粉じんと吸入性粉じん中に含まれるインジウム濃度の違いがあり、空気中に飛散するインジウム粒子径の分布の差異も考えられた。

なお本研究では、許容される濃度(AECL)をばく露限界値として個人ばく露評価の際の基準値として用いたが、厚生労働省技術指針で示された許容される濃度(AECL)および目標濃度(TC)は、本来はインジウムを取り扱う作業環境測定において、吸入性粉じん粒子径のインジウム作業環境測定評価に用いる基準値として指定されている。作業環境測定は、単位作業場所の平均的な濃度を1時間以上、1測定点で10分以上の5点以上の測定値より求める測定<sup>4,4)</sup>であり、作業環境管理が適切であるかどうかを評価するための測定であり、厚生労働省の技術指針<sup>4,4)</sup>は、作業環境測定の結果より作業環境改善に取り組む必要があるかどうかを判断するために、許容される濃度(AECL)を示している。

したがって、作業者の呼吸域で1日の作業のうちの6時間以上捕集する個人ばく露測定のための基準値として示した値ではないが、ラットにおける長期吸入発がん性試験における吸入性ITO粉じんの吸入ばく露濃度と肺がん発生の量-反応関係から導かれた値であり<sup>4,4,4,13)</sup>、許容される濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  を作業者のインジウムばく露濃度が許容されるレベルであるかどうかの評価に用いるための許容濃度と推定することが可能と思われる。

以前私たちが COSHH コントロールバンディングを用いてリスク評価した研究<sup>4,14)</sup>では、ヒトへの発がん性にかかわらず、粉じん状インジウムのばく露限界値は  $0.01 \text{ mg/m}^3$  未満の範囲の値として設定されることが適切であると考えられることを提案しており、Cummings ら<sup>4,15)</sup>は、空気力学的中央値の空気力学的直径が  $4 \mu\text{m}$  未満のインジウム微粒子物質は吸入時に肺胞領域に到達し、総インジウム粉じんに比べて慢性呼吸器疾患および肺がんを含む健康障害に関連すると述べている。

また、総粉じんインジウム濃度と吸入性粉じんインジウム濃度の T/R 比では、大きな

粒子が飛散しやすい作業としてプレス作業や粉碎ショット作業があり、インジウム鑄込み作業のようなヒュームを発生する作業では粒径の小さな粉じんが優位であることが推察され、インジウムばく露濃度の高低だけでは無く、飛散している粒子径についても観察し、より有効な労働衛生管理が必要なことが明らかとなった。

以上、今回の調査において総粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんインジウムばく露濃度を同時に調査することで、どちらのばく露調査結果がよりインジウムのリスクを適切に評価できるかを考察すると、許容される濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  を評価指標とした吸入性粉じんインジウムばく露濃度がより適切と考えられた。

さらに今後の課題としては、よりリスクの高い吸入性粉じんに着目したばく露防止対策を講ずるとともに飛散するインジウム粒子の粒度分布の調査を重ねて知見を得ることが求められ、それらの調査結果と、発がん性評価を詳細に検討し、インジウム粉じんの発がん性およびよりリスクの高い粒子径に対応した、国際的に認められたばく露限界値を確定する必要があると思われた。

## 【小括】

本邦における3 インジウム事業場での27名の作業における呼吸域総粉じんおよび吸入性粉じん中のインジウムばく露濃度調査を同時に実施した。

その結果、総粉じん中インジウムばく露濃度は、27名の作業のうち25名が総粉じんインジウム許容濃度 ACGIH の  $0.1 \text{ mg In/m}^3$  (TLV-TWA) より低いインジウム濃度であったが、同時にサンプリングした吸入性粉じん粒子径インジウム濃度では、すべての作業員において許容される濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  よりも高いインジウム濃度にばく露されているとの結果となった。

このようにインジウムのリスク評価に大きな違いを生じた要因は、総粉じんと吸入性粉じん粒子径での許容濃度が、発がん性無しと発がん性ありで各々設定されていることと、取扱いインジウム化合物の化学種や実施されている作業内容、加工方法によって、総粉じんまたは吸入性粉じん粒子径として測定されるインジウム粉じんサイズに相違があるためであった。

さらに3事業場の個人ばく露調査結果より、使用されている局所排気装置と呼吸用保護具を確認した。

その結果、局所排気装置を設置していても発生源とフードの位置・形状が適切でなくインジウム粉にばく露されている例、ばく露濃度より必要と思われる防護係数の防じんマスクを装着していない例が散見され、囲い式フードや密閉装置のばく露防止対策と防じんマスク面体内を常時陽圧にしてマスク内に汚染空気を導入しない呼吸追従型の電動ファン付き防じんマスク着用を指導した。

以上より、インジウムおよびその化合物のリスク評価として望まれるばく露限界値は、吸入性粉じん粒子径のインジウムを対象とした、許容される濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  を評価指標とするのが妥当であろうと判断された。

また、その場合、労働衛生工学対策として最もインジウム粉じんの発散抑制効果が高いと考えられるグローブボックス密閉装置を導入しての作業であっても許容される濃度(AECL)未満のばく露濃度にすることが難しいことが予見される結果となり、インジウム取扱い作業では、必ず工学的対策に併せて有効な呼吸用保護具を活用してばく露防止対策を講じる必要性があることも判った。

さらに許容される濃度(AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  を評価指標とした場合には、ばく露限界値の濃度が非常に低値であるため、作業終了後に作業空間に飛散している粒子

や加工設備状に堆積した二次発生源等からのばく露についても確認し、残存するリスクについてもリスク調査を行い、更なるばく露防止対策が必要かを検討することが望まれる。



## 第5章 吸入性粉じんインジウムばく露濃度と血清インジウム濃度の

### 関係について

#### 【緒言】

最近の疫学研究では、難溶性のインジウム化合物の吸入が間質性肺気腫や肺気腫性肺疾患を引き起こすことを明らかにしている<sup>5-1,5-2,5-3,5-4)</sup>が、健康障害を生じるばく露濃度と生物学的モニタリングとしての血清インジウム濃度については長期追跡データが無く、十分な情報が得られていないのが現状である。

日本産業衛生学会は、血清中のインジウム(In-S)と間質性肺炎の血清マーカーである Krebs von den Lungen-6 (KL-6) との間の用量効果と用量反応関係に基づいて、インジウムばく露の生物学的ばく露限界値として血清中インジウム濃度 3 µg/l (血清中インジウムとして、試料採集時期は特定せず)<sup>5-5)</sup>を勧告した<sup>5-5)</sup>が、インジウムのばく露許容濃度については勧告していない。

そこで我々は、インジウム取扱作業場において、既に確立している生物学的許容値の血清中インジウム濃度(In-S (µg/ L))と個人ばく露測定より得られた作業期間を加味した累積ばく露濃度を比較検討し、インジウムばく露防止のための許容濃度設定のエビデンスを得ることを目的として、2013 年と2014 年にインジウム金属加工事業場 11 事業場 64 名の作業者の協力を得て血清中インジウム濃度 In-S (µg/ L))とインジウム個人ばく露の 8 時間荷重平均ばく露濃度(In-E (µg/ m<sup>3</sup>))を調査した。

#### 【目的および方法】

本研究の目的は、インジウムばく露濃度 In-E と肺内インジウム負荷量を反映していると思われる血清中インジウム濃度 In-S (µg/ L)) との関係性を評価することにより、許容濃

度と思われるインジウムの 8 時間荷重平均ばく露濃度を推定することにある。また、同研究は、慶應義塾大学医学部倫理委員会(承認番号 20110268)によって承認され、すべての被験者から書面による調査の同意を得た。

調査を実施した 11 事業場 64 名の作業者は、いずれも小規模事業場で作業を実施おり、ITO 研削作業、特定化学物質にて規制されているインジウムおよびその化合物に該当しない金属インジウムを取り扱うリサイクルや歯科補綴作業者を対象とした。

また 64 名の作業者は、排気装置は全体換気装置や自然通風等で特段の労働衛生対策は実施しておらず、呼吸用保護具も着用していないか効果の少ないマスクを装着しての作業であった。

インジウム金属加工事業場のばく露実態調査については、厚生労働省の委託事業「化学物質のリスク評価推進事業(ばく露実態調査)」の「労働者の有害物によるばく露評価ガイドライン」<sup>5-6)</sup>に示された方法でばく露濃度、発生源でのスポット濃度、作業環境測定を実施しインジウムばく露調査を実施した。

サンプリング方法は、流速 2.75 l / 分で吸入性粉じんを分粒するサイクロン型サンプラー(GS-3、SKC Inc)または流速 2l / min で分粒する TR サンプラー(PM4 NWPS-254、柴田科学製)を用いて、吸入性粉じんを選択的に捕集した。サンプリングに使用したポータブルポンプは Air check 2000(SK C, INC), Mini pump MP-Σ3(柴田科学製)で、サンプリング時間は 251 分～483 分であり、その値を 8 時間の時間荷重平均濃度に変換し評価に供した。

In-E の分析は、九州大学<sup>5-2)</sup>または中央労働災害防止協会ら<sup>5-2,5-7)</sup>が厚生労働省通達の「ITO 等の吸入性粉じんの標準測定分析法」<sup>5-8)</sup>に従い分析し、In-S 値は九州大学<sup>5-2)</sup>で行った。また、分析は誘導結合プラズマ質量分析法(ICP-MS)を用いて

測定し、In-S の検出限界は  $0.1\mu\text{g/l}$  であった。

In-E と In-S の両方が測定されたインジウムばく露作業者の数は全体で 64 名であったが、調査対象者のうち、In-S レベルが検出限界未満 ( $<0.1\mu\text{g/l}$ ) であった歯科技工士 ( $n=9$ )、ボンディング作業者 ( $n=1$ )、はんだ製造 ( $n=10$ )、その他のインジウム金属加工 ( $n=3$ )、数年前から ITO 製造に携わってはいるが事業主でもある作業者とサンプリング日の時点で現在は実質的にばく露を受けていない作業者の計 25 名については統計作業から除外し、最終的には被験者 39 名を対象として統計処理を行った。

### 【統計分析結果】

39 名の作業者は、①ITO 研削作業者 ( $n=6$ 、ITO 取扱い作業者)、②高温炉 ( $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ ) を用いたインジウム合金製錬所の作業者 ( $n=7$ 、製錬作業者)、③ 歯科技工士、ボンディング、はんだ製造、その他のインジウム金属加工 (26 名、その他のインジウム取扱い作業者) の 3 つの職業分類に分類された。

3 つのグループの In-S と In-E を比較するために、分析前に値をほぼ正規分布に変換するために数値を対数化し、幾何平均(GM)および幾何標準偏差(GSD)を求めた。

次に In-E と In-S との関係を評価するために、回帰モデル分析を行い相関係数を求めた。なお、統計的有意性は、 $p < 0.05$  で評価し、全ての統計解析は、JMP バージョン 11.0.0 (SAS Institute) を用いて行った。

対象作業者の平均年齢は 38.5 歳 (20-63 歳)、男性は 87.5% を占め、現在の喫煙者は 47.5% であり、インジウムばく露の平均期間は 8.2 年 (範囲 0.7~34.7 年) であった。

In-E のばく露濃度範囲は  $0.004\sim 24.0\mu\text{g/m}^3$  となり、In-S の血清インジウム濃度範囲は  $0.1\sim 8.5\mu\text{g/l}$  であった。

In-E の GM(GSD)は、①製錬作業員では  $0.97(8.68)\mu\text{g}/\text{m}^3$  となり、②ITO 作業員では  $1.22(2.19)\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、③他の作業員では  $0.10(6.49)\mu\text{g}/\text{m}^3$  であった。

製錬作業員 In-E 値は、ITO 作業員の In-E 値よりもわずかに高く ( $p = 0.0709$ )、他の労働者の In-E 値よりも有意に高かった ( $p = 0.0069$ )。

In-S の GM(GSD)は、①製錬作業員が  $0.93(4.50)\mu\text{g}/\text{l}$  となり、②ITO 作業員が  $0.58(3.26)\mu\text{g}/\text{l}$ 、③その他の作業員が  $0.12(1.62)\mu\text{g}/\text{l}$  であった。

製錬作業員と ITO 作業員の In-S 値は他の作業員よりも有意に高かった ( $p = 0.011$  と  $0.022$ )。

In-E 値と In-S 値の分布は 3 つのグループ間で異なっていたので、図 5-1 として各グループについての散布図を示した(図 5-1:(a)全作業員, (b)精錬作業員, (c)ITO 作業員, (d)その他の作業員)。

各作業グループの相関係数は、①製錬作業員(図 b)は  $0.489$  (95%CI:  $-0.417 \sim 0.908$ )、②ITO 作業員は  $0.812$  (95%信頼区間上限値(95%CI):  $0.002 \sim 0.979$ ) (図 c)、③その他の作業員(図 d)は  $0.163$  (95%CI:  $-0.240 \sim 0.518$ ) であった。

また、製錬所および ITO 作業員における In-E および In-S 値の分布は被験者数が少なかったために統計的に有意ではなかったが、線形であるように見えた(図 b, c)。

## 【考察】

インジウムにおける 8 時間荷重平均ばく露濃度 (In-E) と血清インジウム濃度 (In-S) の関係に関する研究報告に関しては本研究が最初の研究報告である。

本研究チームは、In-E と In-S の関係に長い間強い関心を持っており、今回 11 事業場においてばく露調査および作業歴や健康診断によるインジウムによる健康障害の

有無等の詳細な調査を実施する機会に恵まれた。

本研究のの結果、39名の吸入性粉じんインジウム濃度と血清インジウム濃度での単回帰式は  $\log(\text{In-S}) = 0.322 \times \log(\text{In-E}) - 0.443$  となり、回帰係数は統計的に有意 ( $p = 0.0002$ )、相関係数は  $0.555$  (95% CI:  $0.290 \sim 0.741$ ) との結果を得た。

職種ごとの単回帰式、単相関係数は①製錬作業員:  $0.489$  (95% CI:  $-0.417 \sim 0.908$ )、②ITO 作業員:  $0.812$  (95% CI:  $0.002 \sim 0.979$ ) ③その他の作業員:  $0.163$  (95% CI:  $-0.240 \sim 0.518$ ) となり、職種ごとに異なる結果となった。

このことは、職種ごとにばく露するインジウムの化学形態や粒子径が異なり、結果として血清中インジウム In-S 濃度が異なる可能性を示唆していると考えられ、金属インジウムの高温溶解作業については ITO 取扱作業同様、徹底したばく露防止対策が必要と考えられた。

さらに、ばく露濃度の範囲は狭いものの In-S と In-E の間には一定の関連を示すことが出来、In-S が  $3\mu\text{g}/\text{l}$  に相当するばく露濃度は  $8 \sim 9\mu\text{g}/\text{m}^3$  程度と推定された。

しかし、今回の調査結果においては、血清中インジウム In-S は今回の調査以前に吸込んだ肺内のインジウム負荷量を強く反映している可能性があり、その結果、現在の血清中インジウム In-S とばく露調査で得られた 8 時間荷重平均インジウムばく露濃度 In-E との間に相関がなくなった可能性も考えられ、同研究のみで In-S と In-E の関係を明確にすることは難しいと考えられた。

その理由としては、次の(1)から(3)の理由が考えられる。

(1) インジウム化合物は難溶性のために、肺中のインジウム化合物除去率が非常に小さい<sup>5-9)</sup>。

(2) インジウムばく露から完全に除去された以前の露出作業員の In-S の生物学的

半減期は約 8 年である<sup>5-10)</sup>ため、以前のインジウムばく露作業者の In-S レベルは容易に低下しない<sup>5-4)</sup>。

(3) 多くのインジウム加工事業場が労働衛生管理として、多少なりとも防じんマスクを装着しての作業を行っており、呼吸域濃度である In-E と肺内に吸入したインジウム濃度は同じ濃度ではない可能性がある<sup>5-8)</sup>。

本調査では、特段作業環境を改善するための対策を実施していない 11 の事業場で、しかも呼吸保護具の装着がないか簡易のマスクを装着して作業を行っている作業者が対象である。

この調査より、In-S および In-E を対数変換した全作業者のデータにおいては、In-S と In-E の間には有意な正の相関が観察され(図 a)、In-S 濃度が In-E 濃度に依存的に増加し得ることを示した。

また、図 b、c および d の各相関からは、In-E と In-S との間の関係が、インジウム化合物の化学的形態によって異なることを示唆している可能性が考えられた。

ITO、三酸化インジウム、インジウム金属、またはインジウム合金は、①ITO 作業者、②製錬作業者、③その他の作業者が取り扱っている主要なインジウムの化学形態であり<sup>5-11)</sup>、作業者数は少なかったものの、In-E と In-S の間には①ITO 作業者と②製錬作業者と相関があった。しかしながら、③の他の作業者では相関が認められなかった。

このことより我々は、肺内における各インジウムの化学形態の動態の違いに関する情報は無いもののインジウム金属またはインジウム合金については、ITO や三酸化インジウムとは異なる体内動態を示すことがあると結論付けた。

しかし、この研究には次に示すいくつかの限界があり、更なる検討が必要と考えられ

る。

第1として、被験者数が十分に大きくなく、比較的高い In-E レベルの情報が不足していた。これにより、結果を円滑に解釈することが困難となっており、さらに研究を拡大する必要があることが示された。

第2として、In-S および In-E の日内変動、日間変動については、In-S は変動を無視できると考えられるが、In-E については変動を無視できない。そのため、In-E についてより正確な TWA-8h を推定するために、2 日以上の複数日に測定する必要がある。

第3に肺内に累積されたインジウム濃度を推定するためには、防じんマスクを装着した状態でのマスク漏れ率測定を併せて実施して、呼吸域濃度からの肺内吸引インジウム濃度を推察する必要がある。

結論として、当研究では In-E と In-S は正の相関関係にあるが、最終的な結論を導くためにはさらにより多くのデータが必要となり、In-E と In-S との関係を解明するためには、各インジウム化合物の肺内における毒性動態についての研究も必要と考える。

## 【小括】

インジウムおよびインジウム化合物におけるばく露限界値としては、ACGIH, NIOSH より総粉じん粒子径として  $0.1\text{mg In}/\text{m}^3$  が勧告されているものの、肺胞まで達する粒子径としての吸入性粉じん粒子でのばく露限界値としての許容濃度が示されていない。

しかしながら、日本産業衛生学会より生物学的許容値として血清インジウム濃度  $3\mu\text{g}/\text{l}$  (試料採取時期特定せず) が勧告されており、適切な集団でのばく露濃度測定と血清インジウム濃度の調査を行うことでインジウムに関する許容濃度を推定できると考えた。

したがって、インジウムのばく露限界値を推定するために11事業場64名を対象に、各インジウム取り扱い作業場のばく露調査と作業者の血清インジウム濃度調査を行い、生物学的許容値  $3\mu\text{g}/\text{l}$  に該当するばく露濃度を推定した。

調査結果については統計上採用できない25名のデータを除き、39名の①ITO研削作業者 ( $n=6$ 、ITO 取り扱い作業者)、②高温炉 ( $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ ) を用いたインジウム合金製錬所の作業者 ( $n=7$ 、製錬作業者)、③ 歯科技工士、ボンディング、はんだ製造、その他のインジウム金属加工 (26名、その他の作業者) の3つのグループを対象とした。

その結果、①ITO研削作業者 ( $n=6$ 、ITO 取り扱い作業者) と①+②+③の全作業者のデータにおいて血清インジウムとインジウムばく露濃度の間に相関が見られ、In-S が  $3\mu\text{g}/\text{l}$  に相当するばく露濃度は  $8\sim 9\mu\text{g}/\text{m}^3$  程度と推定された。

しかしながら、同調査においては次に点で限界があり、さらに大規模な調査を実施する必要があると認められた。

- (1) 被験者数が十分に大きくなく、比較的高い濃度の In-E 情報が不足している。
- (2) In-S の日内変動、日間変動については無視できるものの、In-E についての変動は無視できず、2日間のばく露調査が必要。
- (3) 呼吸用保護具を装着している作業者の呼吸域濃度 (In-E) と肺内への吸引インジウム濃度が等しくない可能性があり、作業者のマスク漏れテストの調査が必要

以上より、In-E と In-S は正の相関関係にあるが、最終的な結論を導くためにはさらに多くのデータが必要であり、In-E と In-S との関係を解明するための各インジウム化合物の肺内における毒性動態についての研究も必要である。



## 第 6 章 総括(労働衛生的課題)

レアメタルであるインジウムは、電子部品製造事業場で比較的大量に使用され始めたのが 1990 年台からと言われているが、1990 年後半より ITO(インジウムスズ酸化物)粉じんの吸入による肺障害の症例報告が十数例あり、主な所見は、肺の間質性変化(肺胞蛋白症を含む)、肺気腫性変化であり、肺のレントゲン写真で以上の病変が認められる。

また、間質性肺炎を発症した場合は、急な症状の悪化等もあり完治が難しい重篤な疾病となるが、2001 年にはインジウム化合物 ITO を 1994 年より約 3 間従事していた 28 歳の研磨作業員(男性)が両側気胸を併発して死亡する、インジウムによる労働災害が発生している。

しかしながら、その際の労働者の症状等については症例報告として一部作業歴等が公表されたが、作業員が従事していた作業内容、取扱物質、ばく露状況、ばく露防止対策等についての労働衛生管理状況については十分な情報は得られなかった。

この最も大きな要因は、当初、事業場がインジウムは安全な金属であるとの認識のもとで取り扱っており、危険有害性を正しく理解していなかったことにより適切な労働衛生対策が実施されなかったためと推察された。

このように、化学物質を取り扱う際には、当該化学物質のリスクアセスメントを行い、リスクが許容される状態ではじめて作業を実施しても良いと判断する必要がある。

しかしながらインジウムの有害性についてのハザード情報については未だに十分に解明されていないため、リスク評価において十分な情報を提供できていないのが現状である。

したがって本研究は、インジウムを対象にして、産業現場においてどの様にリスクア

セスメントを行い、適切な労働衛生管理の状態をどの様に評価して構築しているかについて実地調査を行い評価した。

具体的には、作業方法、局所排気装置の設置状況のデータを用いて机上でリスクを評価するコントロールバンディング手法でのリスク管理、現地で作業者のばく露濃度を調査することによりリスクを評価する実測によるリスク評価、作業者のインジウムばく露濃度と血清インジウム濃度の関係よりリスクを判断するためのばく露限界値を推定することを試みた研究である。

以下に、各研究の目的と成果、今後の課題について述べる。

## 1. コントロールバンディングによるインジウムばく露の簡易的な評価

化学物質リスクアセスメントにおける COSSHessentials のコントロールバンディングの利点は、労働衛生の専門家では無くても一定の水準の管理対策措置が何であるかを、評価のためのプロトコルに従うだけで判断できる点である。

また、同判断の過程においては、ばく露調査の様な専門的な技術も必要なく、化学物質の持っている有害性についても GHS 分類に従い判断することにより容易に判断ができる利点がある。

本研究においては、インジウム取り扱い事業場での労働衛生上の管理措置が COSSHessentials のコントロールバンディングではどの様に評価されるのか、現在実施されている措置が適当であるかをアンケートと実地確認調査を通じて評価した。

その結果、本邦での 13 インジウム取り扱い事業場における労働衛生対策としては、55 作業中 51 作業の 93% のインジウム取扱い作業において、専門家のアドバイスを求める厳格な管理措置が必要な CA4 と封じ込めの措置が必要な CA3 のカテゴリーに該

当することが明らかとなった。

さらには、CA4 に該当する 35 作業のうち工学的対策が適当とされた作業は、1 作業のみであり、残りの 34 作業 (97%) の作業では対策が不十分と判断された。呼吸用保護具についても 80% の作業で不適合と判断され、対策措置が不十分と評価された。

CA3 に評価された 16 作業においては、工学的対策の局所排気装置率が 63% と全体換気装置設置率の 38% よりも良いものの、封じ込めまでの対策は取られていない状況であったが、呼吸用保護具については 75% において適合する防じんマスクを装着していた。

これらの結果より、インジウムのように有害性が高い物質であっても、コントロールバンディングでの適正なリスク評価を行うことが可能であることが判った。

一方、課題としては、適切なリスク評価のためにはインジウム化合物の有害性、飛散性を適正に選択して評価に用いる必要があるものの、インジウム及びその化学物では、発がん性のある化合物と無いと判断される化合物があり、インジウム化合物の有害性に統一した評価が出来ないおそれが考えられ、今後の研究の進展に期待したい結果となった。

さらに、粉じんの飛散性についても、粉状、粒状、塊状など主観的な判断で判定されており、第 3 者的に判断できる一定の尺度やツールが無く判断に迷うケースがあり、客観的に発じん性を判断できる尺度が求められた。

CA4 の専門家のアドバイスを求める場合には、発がん性を有すかもしれない化学物質の有害性を適切に判断して必要な労働衛生措置を的確に指導できる専門家の指導を仰ぐことになるが、本邦においてはそのような判断が出来る専門家にアクセスでき

る情報が圧倒的に少ないと思われる。

以上より、インジウムのように重篤な障害を引き起こす物質であっても、特別な教育を受けていない事業主がコントロールバンディングでの化学物質リスク評価を行い適切なばく露防止対策の手法を選択することが容易であり、適切な措置を講じることで重篤な労働災害を防止できる手法と思われた。

なお、有害性が高く、専門家のアドバイスが求められる場合の専門家へのアクセスについては今後の課題と考えられた。

## 2. 総粉じん粒子径インジウムばく露評価

化学物質のリスク評価では、リスクの見積もりとしてコントロールバンディングによるリスクの見積もりと当該業務に従事する労働者が化学物質等に曝される程度(ばく露の程度)を実測して評価するリスクの見積もりがあり、ばく露濃度を実施に調査する実測の方がリスクを正確に見積もることが出来るとされている。

インジウム取扱作業者のリスクをばく露濃度で見積もる場合は、ばく露濃度と比較するための基準濃度であるばく露限界値が必要となるが、日本産業衛生学会はインジウム化合物(無機、難溶性)について発がん物質分類 第2群 A、生物学的許容値  $3\mu\text{g}/\text{l}$  (試料採取時期特定せず)は勧告しているものの、許容濃度は示していない。

しかし米国 ACGIH では、インジウムおよびその化合物 TLV-TWA  $0.1\text{ mg In}/\text{m}^3$  を勧告しており、その粒子サイズは分粒を行っていない「総粉じん」が対象である。

したがって、ACGIH の TLV-TWA  $0.1\text{ mg In}/\text{m}^3$  をばく露濃度の判断基準として、インジウム取り扱い 11 事業場 86 名のばく露実態調査を実施し、適切なばく露防止対策を講じているかを判定した。

その結果、作業員 86 名の 8 時間荷重平均ばく露濃度の算術平均値は 0.098 mg In/m<sup>3</sup> となり、0.0001 mg In/m<sup>3</sup> から 1.421 mg In/m<sup>3</sup> の範囲となり、インジウムばく露濃度が TLV-TWA0.1 mg In/m<sup>3</sup> を超えた労働者は 86 名中 11 名、TLV-TWA50% 値のアクションレベル(AL) 0.05 mg In/m<sup>3</sup> を超えた作業員は 19 名であった。

11 事業場のうちばく露濃度の平均値、最大値が TLV-TWA0.1 mg In/m<sup>3</sup> を超えていない事業場は 3 事業場だけであり、他の 8 事業場は超えていた。また、作業員数が 5 名以上で X<sub>95</sub> を計算できた 8 事業場のうち TLV-TWA0.1 mg In/m<sup>3</sup> を超えた作業場は 5 事業場となった。

以上より、ばく露防止対策を講じてばく露濃度が低い作業員も確認されたものの、全体的にはばく露濃度は高濃度であり、労働災害防止のためには局所排気装置を囲い式型や密閉型に改善するなどのさらなる工学的措置、指定防護係数を考慮した保護具の装着の徹底などのばく露防止措置が必要であることが判った。

さらに、ばく露濃度が高値となり労働衛生措置を実施した後には、再度ばく露調査を実施して、ばく露防止対策が有効かどうかを確認する必要がある、ばく露濃度が低いと判定された作業についても、今一度、ばく露濃度の日間変動が無いか、残存するリスクが無いか等の化学物質リスクアセスメントが必要である。

しかしながら、ばく露を評価する指標値については、ACGIH が TLV-TWA 0.1 mg In/m<sup>3</sup> を勧告しているが、発がん性については評価せずに、インジウムによる骨格および胃腸の影響および肺毒性に基づいての勧告である。

一方、厚生労働省は、ラットにおける 2 年間の吸入発がん性試験での結果においての気管支-肺胞癌の発生と動物実験での吸入ばく露濃度と用量-反応関係から導かれ

た値として「インジウム - スズ化合物 (ITO) 取扱い作業に従事する作業者の健康障害の防止に関する技術指針」において吸入性粉じん粒子径のインジウム粒子濃度として、許容される濃度 (AECL) 「 $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$ 」および目標濃度 (TC) 「 $0.01 \text{ mg In/m}^3$ 」を示している。

この様にインジウムおよびその化合物におけるばく露限界値は、総粉じんインジウムと吸入性インジウムでの異なった値が示されており、どちらのばく露限界値を採用していいか迷う状態であり、ばく露評価のための指標値に混乱が認められる。

したがって、インジウムおよびインジウム化合物のリスクアセスメントでは、ACGIH の TLV-TWA のほかに厚生労働省指針による基準濃度での評価もあわせて実施し、よりリスクアセスメントに適するばく露限界値を選択する必要があると考えられた。

### 3. 総粉じんと吸入性粉じん測定によるインジウムばく露評価

インジウムの化学物質リスクアセスメントでは、ばく露程度を評価する基準値として、総粉じんでの TLV-TWA  $0.1 \text{ mg In/m}^3$  と厚生労働省通達の示す吸入性粉じん粒子の許容される濃度 (AECL)  $3 \times 10^{-4} \text{ mg In/m}^3$  の異なるばく露限界値がある。

したがって、どちらの基準値でのリスク評価が適切かを考察するために、3 事業場の合計 27 名の作業者の呼吸域に「総粉じんインジウム」と「吸入性粉じんインジウム」のばく露濃度を同時に知るために、それぞれの2通りの捕集器具を取り付けてサンプリングするばく露実態調査を実施した。

その結果、総粉じん中インジウムばく露濃度で TLV-TWA を超えた作業者は 27 名中 2 名となったが、吸入性粉じん粒子径インジウム濃度は、調査した 27 名すべてにおいて AECL よりも高いインジウム濃度となった。

さらに総粉じん粒子濃度と吸入性粉じん粒子濃度の比率(T/R 比)を3事業場での全データより算出すると、T/R 比の算術平均は1.61(95%信頼区間上限値 5.96)となり、1.01 から 15.31 までの多様な比を有していた。

T/R 比が 1.01 の i, j 作業では ITO の湿式研磨とインジウム金属を溶解する作業が行われており、空気中に発生飛散している状態は粒子の細かな粉じんやヒュームが優位と思われた。一方、T/R 比 15.31 の i 作業は、ITO 粉のプレス作業であり、比較的大きな粒径の粉じんが飛散していると考えられ、作業により粉じん粒子径が違うことが明らかとなった。

T/R 比(1.01~15.31)とばく露限界値の TLV-TWA/AECL 比(333.3)の関係と、インジウムにより引き起こされる健康障害を勘案すると、ばく露低減措置が特に望まれる粒子径は吸入性粉じんを対象とすることが適当と推察される。仮に、インジウムおよびその化合物のリスク評価に総粉じん粒子を選択すると、リスクを低く見積もった評価を行う可能性が高く、がんや肺毒性に対して求められる水準の労働衛生措置が実施されないおそれが高いと考えられた。

これらの混乱が生じる理由は、2つの異なる基準値が存在することであり、インジウムによる健康障害を考慮すると、ばく露限界値としては吸入性粉じんの AECL をばく露評価の指標に用いることが適当であると考えられた。

以上より、適切なリスク評価のためには、インジウムおよびインジウム化合物の有害性についてはリスクを誤って低く見積もらないように発がん性についても考慮された基準値での評価が求められると考えられる。ており、そのためにはヒトに対する疫学研究によりばく露限界値を設定することが求めら、それまでの間は、よりリスクを厳しく見積

っていると思われる厚生労働省通達の AECL 基準値を用いてリスク評価を実施することが妥当と考えられる。

#### 4. 吸入性粉じんインジウムばく露濃度と血清インジウム濃度の関係

インジウムおよびインジウム化合物のばく露防止対策の目安として信頼できる基準値として日本産業衛生学会より、生物学的許容値  $3\mu\text{g}/\ell$  (試料採取時期特定せずの血清インジウム濃度が勧告されているが、ばく露濃度としての許容濃度は勧告されていない。

また、動物実験においては、インジウム砒素で精巣障害、インジウムスズ酸化物 (ITO) では軽度精巣障害、肝臓、腎臓へのインジウム蓄積、発がんが認められており、化学種ごとの水溶性、粒子形状や大きさによって生体影響の発現の程度、期間が異なる等の動物実験による知見は集まりつつある。

しかし、ヒトでは肺以外に明らかな障害は確認されておらず、ばく露作業からの配置転換後、血清インジウム濃度や間質性肺炎の血清マーカーである Krebs von den Lungen-6 (KL-6) の値は数年かけて緩やかに減少すること、肺の深部、肺胞に取り込まれた ITO 粒子の肺からの排泄速度は遅いこと等は判ってきたが、ばく露限界値については知見が集まっていない状態である。

したがって我々は、インジウムのばく露限界値を推定するために、インジウム取り扱い作業場のばく露調査と作業者の血清インジウム濃度調査を行い、生物学的許容値の血清インジウム  $3\mu\text{g}/\ell$  に該当するばく露限界値の推定を試みた。

調査は、64 名を対象としたが、In-S レベルが検出限界未満 ( $<0.1\mu\text{g}/\ell$ ) であった作業者と実質的にばく露が無いと判断された作業者を除いた 39 名の作業者を調査対象と



し、作業者が従事していた作業を①ITO研削作業者(n = 6、ITO 取り扱い作業者)、②高温炉( $\geq 1000^{\circ}\text{C}$ )を用いたインジウム合金製錬所の作業者(n = 7、製錬作業者)、③歯科技工士、ボンディング、はんだ製造、その他のインジウム金属加工(26 名、その他の作業者)の 3 群の職業グループに分類した。

その結果、①ITO 研削作業者と①～③の全 39 名の作業者のデータにおいて血清インジウム(In-S)とインジウムばく露濃度(In-E)の間に相関が見られ In-S が  $3\mu\text{g/l}$  に該当するインジウムばく露濃度は  $8\sim 9\mu\text{g/m}^3$  程度と推定された。

しかしながら、同調査においては次に点において限界があり、さらに大規模な調査を実施する必要が認められた。

- (1) 被験者数が十分に大きくなく、比較的高濃度域の In-E 情報が不足している。
- (2) In-S の排出速度は遅いことより日内変動、日間変動については無視できるが、In-E についての日内変動、日間変動は無視できないため、ばく露調査においては2日間調査が必要である。
- (3) 呼吸用保護具を装着している作業者の呼吸域濃度(In-E)と肺内へ吸引されている濃度が等しくない可能性があり、マスク着用の場合の体内取り入れ量を推定するための作業者マスク漏れテストの調査が必要である。

結論として、当研究では In-E と In-S は正の相関関係にあるが、最終的な結論を導くためにはさらにより多くのデータが必要であり、各インジウム化合物の肺内における毒性動態についてのさらなる研究も必要と考えられた。

## 第7章 今後の課題

化学物質のリスク評価においては、労働衛生についての知識がそれほど無くても、事業者、管理監督者、作業主任者等が一般的な判断をすることで適切なばく露防止対策を講じることが出来るコントロールバンディングが活用出来る。

同手法におけるばく露防止対策は、求められる濃度レベルごとに要求される対策を示すことで行われ、粉じん状物質ばく露濃度の最も低い濃度は、 $0.01\text{mg}/\text{m}^3$  よりもばく露を低くするための具体的な管理対策を示すことで、有害性のある化学物質防止対策を講じることができる様に設計されている。

また、非常に有害性が高い場合、あるいはばく露濃度について  $0.01\text{mg}/\text{m}^3$  よりもさらに低くするための対策が望まれる場合は、専門家のアドバイスが必要としており、一般的な判断だけによる不十分なばく露防止対策を排除する措置を講じている。

しかしながら同手法で化学物質のリスクアセスメントを実施した場合、発じん性の判断のための明確な基準が示されていないために、判断する人によっては発じん量の見積もり違いが生じる可能性がある。

また、アドバイスを求める労働衛生専門家については、一般的に事業者、管理監督者、作業主任者等が直ぐにアクセス出来る状況では無く、今後の課題と考えられた。

実測におけるインジウムのばく露評価については、総粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんインジウムばく露濃度調査結果において、評価に差異が認められた。

総粉じんインジウムばく露濃度では、11 事業場 86 名のうち TLV-TWA $0.1\text{mg}/\text{m}^3$  を越えた作業者は 11 名であり、5 事業場はばく露軽減対策が必要であるとされたが、3 事業場ではばく露低減対策は特に必要ないと判断された。

しかし、上記の 11 事業場のうち 3 事業場 27 名において総粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんインジウムばく露濃度を同時に調査した結果においては、総粉じんインジウム濃度が TLV-TWA を越えた作業者は 27 名中 2 名であったものの、吸入性粉じんインジウムばく露濃度については、厚生労働省通達「インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止対策の徹底について」（平成 22 年 12 月 22 日付け基発 1222 第 2 号）の技術指針に示される「許容される濃度（AECL）」 $3 \times 10^{-4} \text{mg/m}^3$  を全員が越える濃度となり、リスク評価の整合性が保てない状態となり、ばく露低減対策は特に必要ないと判断された 3 事業場についてもさらに調査が必要と判断され、各作業者のばく露濃度についても再度の調査が望まれる結果となった。

したがって、ばく露評価を適正に評価するためには、有害性情報の統一、適切なばく露限界値の設定が必要と思われ、当面はよりハザードを厳しく判断している厚生労働省指針値の許容される濃度（AECL） $3 \times 10^{-4} \text{mg/m}^3$  をばく露限界値として評価することが妥当と思われた。

続いて、ばく露限界値を推定するために、吸入性粉じんインジウム濃度（In-E）と血清インジウム濃度（In-S）の関係について 11 事業場 64 名を対象に作業歴を含めた横断調査を実施した。

調査の結果、39 名、3 群のインジウム取扱い作業者の有効なデータが得られ、39 名全員と ITO 取扱い作業者のグループにおいては In-E と In-S において相関が認められたが、金属インジウムなどを取り扱うグループでは相関が認められなかった。

これは、取り扱う金属種による違いと、比較的高濃度側の In-E データが少なく、全体的に調査対象数が少ないためと考えられた。

したがって、今後の調査計画においては取扱いインジウム化合物と調査数を十分な調査データが得られる様に調整して実施する必要がある。

また、39名の全データでの相関より日本産業衛生学会が勧告するIn-S濃度 $3\mu\text{g}/\ell$ のIn-E濃度を推定すると $8\sim 9\mu\text{g In}/\text{m}^3$ 程度と推定されたが、同推定値は、In-Eが防じんマスクを装着している作業者の呼吸域インジウム濃度であることと、In-Sの濃度が肺内に取り込まれたインジウム濃度を反映していると仮定した場合にインジウムの肺内の排泄は非常に遅く調査前の影響が無視できないことより、正確な推定濃度とは言えないと判断された。

したがって、現時点でインジウムのばく露限界値として最も推奨できるのでは、2年間の吸入ばく露動物試験よりヒトに外挿した「許容される濃度(AECL)」 $3\times 10^{-4}\text{mg}/\text{m}^3$ であると考えられるので、同ばく露限界値を指標として用いての評価が推奨される。

この様に非常に高い有害性を持つ化学物質を取り扱う際には、厳格なばく露防止対策が求められるが、その際にアドバイスを求められる人材は労働衛生専門家である。

労働衛生専門家に求められる資質としては、企業における管理に精通し、化学物質の有害性を判断でき、リスクを的確に見積もることができる人材であり、あわせて生産工程と作業行動を理解して作業方法と工学的ばく露防止対策を提案・構築できる高度な専門性を保持した人材である。

本邦における労働衛生の専門家は、産業医、労働衛生コンサルタント(保健衛生)、労働衛生コンサルタント(衛生工学)、産業保健師、衛生工学衛生管理者、衛生管理者、作業環境測定士の国家資格者が労働衛生について各専門性を持って従事しているが、各国家資格者の専門性を横断的に有する専門家は少ないのが現状と思われ、

労働衛生機関や産業保健推進センターのように複数の専門家が各専門領域を高度にアドバイスして実効あるばく露低減体策を構築することになると思われる。

海外(アメリカ、イギリス、オーストラリア、カナダ、イタリア、オランダ)においては、労働環境において考えられる有害要因を予測(Anticipation)し、調査測定(Recognition)し、評価(evaluation)し、さらには制御(Control)できる能力および技術を有する専門職としてのオキュペイショナルハイジニスト(米国では認定インダストリアルハイジニスト)が上記の業務を担当しており、多くのオキュペイショナルハイジニストは、医学、保健衛生学、理工学の卒業生でオキュペイショナルハイジニストの教育を大学や大学院等で受け3年から5年の実務経験を経て、資格認定され当該業務に就いている。

本邦においても、(公社)日本作業環境測定協会においてオキュペイショナルハイジニストを養成する人材育成事業を平成19年度より行っているが、認定オキュペイショナルハイジニストの人数は平成30年4月現在で今だ42名であり、その絶対数は少ないのが現状である。

産業現場で取り扱われている化学物質は約6万種と言われており、インジウムの様に重篤な健康障害引き起こす化学物質であってもその有害性が十分に調査されていない物質はまだまだ多く、ましてや有害性が未知な状態で取り扱われている物質も多いと予想される。

化学物質については完全に安全な物質は無いことを第一として、すべての物質についてリスクが許容されるレベルで取り扱っているか、実効あるばく露防止対策措置を実施して作業しているかを確認して取り扱うことが重要である。

化学物質による健康障害防止のために、本邦においてもコントロールバンディン

グ、ばく露実態調査によるばく露評価、リスクの評価を行ってリスクが低い状態での作業を望むものである。

また、特に有害性の高い物質についてはオキュペイショナルハイジニストの様な専門家によるリスク評価および指導が容易に出来る体制が整うことを期待するものである。

## 第8章 謝辞

本学位論文にあたり、貴重なご意見、ご助言を賜った主査 北里大学医学部 衛生学 大学院医療系研究科 環境医科学群環境毒医科学教授 堀口兵剛 先生、副査 北里大学医療衛生学部 医療系大学院 医療系研究科 臨床工学教授 理事長 小林 弘祐 先生、 国立研究開発法人 国立環境研究所 環境リスク・健康研究センター フェロー 平野 靖史郎 先生、 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 部長 王 瑞生 先生に深謝いたします。

私は北里大学衛生学部産業衛生学科を平成元年に卒業後、健診機関にて産業現場における健康保持増進業務や健康診断業務（臨床検査技師、第1種衛生管理者、ヘルスケアトレーナー、心理相談員）を経験したのち、平成5年より中央労働災害防止協会にて有害物質を取り扱っている作業場の作業環境測定、労働衛生指導業務（作業環境測定士、労働衛生コンサルタント、衛生管理士、認定オキュペイショナルハイジニスト）の業務に携わり、外部労働衛生機関の職員として企業の労働災害防止業務を手伝って参りました。その間には、熟練した製缶工でありながらじん肺のために仕事を離れざる得なかった方や酸欠の死亡事故現場、一酸化炭素中毒での調査等で不幸な労働災害現場での調査も経験してまいりました。

その様な調査のたびに「幸せになるために一生懸命に働いている人が不幸な災害にあってはならない。どうしたら労働災害防止対策を判り易く自分のこととして捉えて健康でいただけるだろうか？」と考えていました。

この度、出身研究室である北里大学医療衛生学部健康科学科衛生管理学教室にて研修生として労働衛生について再度深く学ぶ機会を得ました。

ご指導いただいた太田 久吉 教授はじめ薮田 十司 講師、大場 謙一 講師には大変感謝しておりますとともに研究の機会を賜り深謝しております。

また、職場では中央労働災害防止協会 労働衛生調査分析センターの歴代所長の櫻井 治彦 先生（慶応大学医学部名誉教授）、清水 英佑 先生（慈恵医科大学名誉教授）にご指導、ご鞭撻を賜りました。さらに、本学位論文をまとめるにあたり、中央労働災害防止協会の多くの職員にご協力ご助言を賜り、実地調査については、作業環境測定士の職員の協力があつて初めて精度の高いデータを得ることが出来ました。深く感謝いたします。

研究結果の公表については、有藤 平八郎 博士、荒木 明宏 博士に多大の援助を賜りました。両博士の多くの貴重なご助言、ご指導を賜ることで本論文をまとめることが出来ました。深謝いたします。



## 第9章 引用文献

- 1-1) 一般社団法人 化学情報協会 CAS プレスリリース 2015 年 7 月 9 日  
[https://www.jaici.or.jp/annai/img/20150709\\_CAS\\_PressRelease.pdf](https://www.jaici.or.jp/annai/img/20150709_CAS_PressRelease.pdf)
- 1-2) 平成 29 年における労働災害発生状況 厚生労働省 労働者死傷病報告  
<http://anzeninfo.mhlw.go.jp/user/anzen/tok/anst00.htm>
- 1-3) 厚生労働省「平成 28 年度石綿による疾病に関する労災保険給付などの請求・決定状況まとめ(確定値)」<https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/0000188608.html>
- 1-4)「印刷事業場で発生した胆管がんの業務上外に関する検討会」報告書  
<https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r9852000002x6at-att/2r9852000002x6zy.pdf>
- 1-5)「芳香族アミン取扱事業場で発生した膀胱がんの業務上外に関する検討会」報告書  
<https://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-11402000-Roudoukijunkyokuroudouhoshoubu-Hoshouka/0000146647.pdf>
- 1-6) 樹脂等を製造する化学工場における肺疾患事案について  
<https://www.mhlw.go.jp/file/04-Houdouhappyou-11305000-Roudoukijunkyokuaneiseibu-Kagakubushitsutaisakuka/0000163635.pdf>
- 1-7) Homma T, Ueno T, Sekizawa K, Tanaka Akio, Hirata M. Interstitial pneumonia developed in a worker dealing with particles containing indium-tin-oxide. J Occup Health 2003; 45(3): 137-139. (doi.org/10.1539/joh.45.137).
- 1-8) 平成 16 年 7 月付け基安化発第 0713001 号「インジウム・スズ酸化物等取扱い作業における当面のばく露防止対策について」

<https://www.jaish.gr.jp/anzen/hor/hombun/hor1-45/hor1-45-20-1-0.htm>

1-9 ) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH).

Documentation of the Threshold Limit Values and Biological Exposure Indices

“Indium and Compounds” (2001) : ACGIH TLV(R) Chemical Substances 7th-

Edition Documentation. ACGIH, Cincinnati Ohio, 2001

1-10) 「インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止対策の徹底につ

いて」(平成22年12月22日付け基発1222第2号)

<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei42/>

1-11) インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針

<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei42/dl/02.pdf>

1-12) 日本産業衛生学会許容濃度. インジウムおよびその化合物 In. 産衛誌 49 巻,

2007、p.196-202

[https://www.sanei.or.jp/images/contents/290/Indium\\_and\\_compounds\\_OEL\\_B.pdf](https://www.sanei.or.jp/images/contents/290/Indium_and_compounds_OEL_B.pdf)

2-1) Homma T, Ueno T, Sekizawa K, Tanaka A, Hirata M. Interstitial pneumonia

developed in a worker dealing with particles containing indium-tin oxide. J Occup

Health 2003; 45: 137 – 9.

2-2) Omae K, Nakano M, Tanaka A, Hirata M, Hamaguchi T, Chonan T. Indium

lung-case reports and epidemiology. Int Arch Occup Environ Health 2011; 84(5):

471-477. (doi.10.1007/s00420-010-0575-6).

2-3) The Technical Guideline for Preventing Health Impairment of Workers Engaged in

the Indium-Tin-Oxide-Handling Processes Issued on December 22, 2010 as the

Notification of Labour Standards Bureau No.1222-3 by Japan Ministry of Labour, Health and Welfare, Bureau of Labour Standards, Division of Industrial Safety and Health. <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei42/dl/03.pdf>

2-4) Miyauchi H, Minozoe A, Tanaka S, Hirata M, Nakaza M, Arito H, et al. Assessment of workplace air concentrations of indium dust in an indium-recycling plant. J Occup Health 2012; 54(2): 103-111. (doi.org/10.1539/joh.11-0233-OA).

2-5) Health and Safety Executive (HSE), UK. The Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) Essentials: Controlling Exposure to Chemicals-a Simple Control Banding Approach. <http://www.hse.gov.uk/pubns/guidance/COSHH-technical-basis.pdf>.

2-6) 日本作業環境測定協会認定オキュペイショナルハイジニスト規程  
<http://www.jawe.or.jp/kosyu/ohstipulation.htm>

2-7) Safety Data Sheet for Indium Nitrate Supplied by Indium Corporation of America.  
<http://www.indium.com/technical/safetydatasheets/english/>

2-8) National Institute of Technology and Evaluation, Japan (NITE) GHS Classification Results.2015.  
<http://www.safe.nite.go.jp/ghs/06-imcg-0219.html> for indium oxide,  
[/ghs/06-imcg-0651.html](http://www.safe.nite.go.jp/ghs/06-imcg-0651.html) for indium tin oxide, [/ghs/06-imcg-0218.html](http://www.safe.nite.go.jp/ghs/06-imcg-0218.html) for indium,  
and [/ghs/09-mhlw-0247.html](http://www.safe.nite.go.jp/ghs/09-mhlw-0247.html) for indium phosphide.

2-9) International Agency for Research on Cancer (IARC). Carcinogenicity of welding, molybdenum trioxide, and indium tin oxide. News. <http://www.theLancet.com/oncology>. published online April 10, 2017. (doi.org/10.1016/51470-2045(17))

30255-3).

- 2-10) Japan Society for Occupational Health (JSOH). Recommendation of Occupational Exposure Limits (2017-2018). J Occup Health 2017; 59(5): 436 - 469.  
(doi.org/10.1539/johROEL2017).
- 2-11) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2016 Threshold Limit Values for Chemical Substances in the Work Environment. Cincinnati, OH, USA (2016).
- 2-12) 日本産業衛生学会許容濃度. インジウムおよびその化合物（無機、難溶性）  
In. 産衛誌 55 巻, 2013、p.228-233  
[https://www.sanei.or.jp/images/contents/290/Indium\\_and\\_compounds\\_carcinogenicity.pdf](https://www.sanei.or.jp/images/contents/290/Indium_and_compounds_carcinogenicity.pdf)
- 2-13) Health and Safety Executive (HSE). Respiratory protective equipment at work. A practical guide. <http://www.hse.gov.uk/pUbns/priced/hsg53.pdf>.
- 2-14) Jones RM, Nicas M. Margins of safety provided by COSHH essentials and the ILO chemical control kit. Ann Occup Hyg 2006; 50(2): 149-156.  
(doi:10.1093/annhyg/mei053).
- 2-15) Hashimoto H, Goto T, Nakachi N, Suzuki H, Takebayashi T, Kajiki S, et al. Evaluation of the control banding method-comparison with measurement-based comprehensive risk assessment. J Occup Health 2007; 49(6): 482-492.  
(doi.org/10.1539/joh.49.482).
- 2-16) 平成 12 年 12 月 25 日労働省告示第 120 号「粉じん障害防止規則第 11 条第 1

項第 5 号の規程に基づく厚生労働大臣が定める要件」

- 3-1) Omae K, Nakano M, Tanaka A, Hirata M, Hamaguchi T, Chonan T . Indium lung-case reports and epidemiology. Int Arch Occup Environ Health 2011; 84: 471–477. (doi: 10.1007/s00420-010-0575-6.)
- 3-2) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Threshold Limit Values for Chemical Substances in the Work Environment. Cincinnati, OH, USA. 2016.
- 3-3) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. Indium Compounds. NIOSH, Cincinnati, OH, USA. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0341.html>.
- 3-4) 「インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止対策の徹底について」(平成 22 年 12 月 22 日付け基発 1222 第 2 号) <https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei42/>  
インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針  
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzenisei42/dl/02.pdf>
- 3-5) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Manual of Analytical Methods No.0500 Issue 2 (15 August 1994) Particulates not otherwise regulated, total. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003>
- 3-6) Higashikubo I, Arito H, Ando K, Araki A, Shimizu H, Sakurai H. Control banding assessment of workers' exposure to indium and its compounds in 13 Japanese indium plants. J Occup Health. 2018; 25, 60(3): 263-270 (doi.org/10.1539/joh.

2017-0261-BR.)

- 3-7) Health and Safety Executive (HSE), UK. The Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) Essentials: Controlling Exposure to Chemicals. A Simple Control Banding Approach. <http://www.hse.gov.uk/pubns/guidance/coshh-technica-basis.pdf>.
- 3-8) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Manual for Analytical Methods No.7301 (15 March 2003) for Indium. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7301.pdf>.
- 3-9) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). Occupational Exposure Sampling Strategy Manual. DHEW (NIOSH) Publication No. 77-173. US. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, NIOSH, Cincinnati, OH. USA. January 1977.
- 3-10) Bullock WH, Ignacio JS. A Strategy for Assessing and Managing Occupational Exposures. 3rd Ed. Fairfax. American Industrial Hygiene Association. 2006
- 3-11) 橋本晴男, 山田憲一, 熊谷信二、中原浩彦、名古屋俊士, 保利一、他.  
化学物質の個人ばく露測定ガイドライン. 産衛誌 2015, 57: pA13 - pA60
- 3-12) Cummings KJ, Virj MA, Park JY, Stanton ML, Edwards NT, Trapnell BC, et al.  
Respirable indium exposures, plasma indium, and respiratory health among indium-tin oxide (ITO) workers. Am J Ind Med 2016; 59: 522 – 531 (doi:10.1002/ajim.22585)
- 3-13) Miyauchi H, Minozoe A, Tanaka S, Tanaka A, Hirata M, Nakaza M, et al.

- Assessment of workplace air concentrations of indium dust in an indium-recycling plant. *J Occup Health* 2012; 54: 103 – 111. ([doi.org/10.1539/joh.11-0233-OA](https://doi.org/10.1539/joh.11-0233-OA)).
- 3-14) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Respirator Selection Logic. DHHS (NIOSH) Publication No.2005-100. NIOSH, Cincinnati, OH, USA. 2004.
- 3-15) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Indium and Compounds. In: Documentation of the Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs). [CD-ROM 2001], Cincinnati, OH, USA; 2001.
- 3-16) Nagano K, Nishizawa T, Umeda U, Kasai T, Noguchi T, Gotoh K, et al. Inhalation carcinogenicity and chronic toxicity of indium-tin-oxide in rats and mice. *J Occup Health* 2011; 53, 173 - 187. ([doi:org/10.1539/joh.10.0057-OA](https://doi.org/10.1539/joh.10.0057-OA)).
- 4-1) Honma T, Ueno T, Sekizawa K, Tanaka A, Hirata M. Interstitial pneumonia developed in a worker dealing with particles containing indium-tin oxide. *J Occup Health* 2003; 435: 231 - 9. ([doi.org/10.1539/joh.45.137](https://doi.org/10.1539/joh.45.137))
- 4-2) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2017 TLVs and BEIs based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. Cincinnati, OH, USA. 2017,p36
- 4-3) The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards. Indium Compounds. NIOSH, Cincinnati, OH,

USA. <https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0341.html>.

4-4) Japan Ministry of Health, Labour and Welfare (MHLW). The Technical Guideline for Preventing Health Impairment of Workers Engaged in the Indium-tin oxide Handling Processes issued on December 22, 2010 as the Notification of Labour Standards Bureau No.1222-3 by MHLW, Bureau of Labour Standards, Division of Industrial Safety and Health.

4-5) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) Occupational Exposure Sampling Strategy Manual. DHEW (NIOSH) Publication No. 77-173. January 1977. US. Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, Cincinnati, OH. USA.

4-6) National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH). NIOSH Manual of Analytical Methods No.0500 Issue 2 (15 August 1994) Particulates not otherwise regulated, total. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2003-154/pdfs/7301.pdf>.

4-7) Higashikubo I, Arito H, Eitaki Y, Araki A, Ando K, Shimizu H, et al. Quantitative assessment of occupational exposure to total indium dust in Japanese indium plants. Ind Health 2018; 56 (6), 553 - 560. (doi:10.2486/indhealth.2018-0099.)

4-8) Bullock WH, Ignacio JS (2006) A strategy for assessing and managing occupational exposures. 3rd ed. Fairfax: American Industrial Hygiene Association.

4-9) Liu H-H, Chen C-Y, Lan C-H, Chang C-P, Peng C-Y. Effects of a powered air-purifying respirator intervention on indium exposure reduction and indium



- related biomarkers among ITO sputter target manufacturing workers. *J Occup Environ Hyg*. 2016; 13: 346 – 355. (doi.org/10.1080/15459624.2015.1125487).
- 4-10) Health and Safety Executive (HSE), UK. The Control of Substances Hazardous to Health (COSHH) Essentials: Controlling Exposure to Chemicals. A Simple Control Banding Approach. <http://www.hse.gov.uk/pubns/guidance/coshh-technical-basis.pdf>
- 4-11) US. Occupational Safety and Health Administration (OSHA) (2009). OSHA Assigned Protection Factors for Revised Respiratory Protection Standard. OSHA, Department of Labor, Washington DC, USA.
- 4-12) American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). Indium and Compounds. In: Documentation of the Threshold Limit Values (TLVs) and Biological Exposure Indices (BEIs). [CD-ROM 2001], Cincinnati, OH, USA; 2001.
- 4-13) Nagano K, Nishizawa T, Umeda U, Kasai T, Noguchi T, Gotoh K, et al. Inhalation carcinogenicity and chronic toxicity of indium-tin-oxide in rats and mice. *J Occup Health* 2011; 53, 173 - 187. (doi.org/10.1539/joh.10.0057-OA).
- 4-14) Higashikubo I, Arito H, Ando K, Araki A, Shimizu H, Sakurai H. Control banding assessment of workers' exposure to indium and its compounds in 13 Japanese indium plants. *J Occup Health* 2018; 60( 3): 263-70. ( doi.org/10.1539/joh.2017-0261-br.).
- 4-15) Cummings KJ, Virj MA, Park JY, Stanton ML, Edwards NT, Trapnell BC, Carey

B, Stefaniak AB, Kreiss K . Respirable indium exposures, plasma indium, and respiratory health among indium-tin oxide (IT) workers. Am J Ind Med 2018; 59: 522 - 531. (doi:10.1002/ajim.22585).

5-1) Chonan T, Taguchi O, Omae K. Interstitial pulmonary disorders in indium -processing workers. Eur Respir J. 2007; 29, 317–24.

5-2) Hamaguchi T, Omae K, Takebayashi T, Kikuchi Y, Yoshioka N, Nishiwaki Y, et al. Exposure to hardly soluble indium compounds in ITO production and recycling plants is a new risk for interstitial lung damage. Occup Environ Med. 2008; 65: 51–5.

5-3) Nakano M, Omae K, Tanaka A, Hirata M, Michikawa T, Kikuchi Y, et al. Causal relationship between indium compound inhalation and effects on the lungs. J Occup Health. 2009; 51: 513–21.

5-4) Nakano M, Omae K, Uchida K, Michikawa T, Yoshioka N, Hirata M, et al. Five-year cohort study: emphysematous progression of indium-exposed workers. Chest 2014;146, 1166–75.

5-5) 日本産業衛生学会許容濃度. インジウムおよびその化合物. 産衛誌 49 巻, 2007、 p.196-202

[https://www.sanei.or.jp/images/contents/290/Indium\\_and\\_compounds\\_OEL\\_B.pdf](https://www.sanei.or.jp/images/contents/290/Indium_and_compounds_OEL_B.pdf)

5-6) 厚生労働省 職場における化学物質のリスク評価推進事業(ばく露実態調査), 労働者の有害物によるばく露評価ガイドライン. 化学物質のリスク評価検討会ばく露評価小検討会 平成 21 年 12 月編 <https://www.mhlw.go.jp/shingi/2010>

/01/dl/s0115-4a.pdf

- 5-7) Miyauchi H, Minozoe A, Tanaka S, Tanaka A, Hirata M, Nakaza M, et al. Assessment of workplace air concentrations of indium dust in an indium-recycling plant. J Occup Health. 2012; 54: 103–11.
- 5-8)厚生労働省通達:インジウム・スズ酸化物等の取扱い作業による健康障害防止対策徹底について(平成22年12月22日付け基発1222第2号) 別添1 インジウム・スズ酸化物の取扱い作業による健康障害防止に関する技術指針.  
<https://www.mhlw.go.jp/bunya/roudoukijun/anzeneisei42/>
- 5-9) National Toxicology Program (NTP) Toxicology and carcinogenesis studies of indium phosphide (CAS No. 22398-80-7) in F344/N rats and B6C3F1 mice (inhalation studies). NTP Tech Rep Ser 2001; 499: 7–340.
- 5-10) Amata A, Chonan T, Omae K, Nodera H, Terada J, Tatsumi K. High levels of indium exposure relate to progressive emphysematous changes: a 9-year longitudinal surveillance of indium workers. Thorax. 2015;70(11):1040-6. (doi: 10.1136/thoraxjnl-2014-206380.)
- 5-11) Nakano M, Tanaka A, Hirata M, Iwasawa S, Omae K. Pulmonary effects in workers exposed to indium metal: A cross-sectional study. J Occup Health. 2015; 57: 346–52.

## 第 10 章 業績目録

◎は主論文、○は副論文を示し、本学位論文に用いた論文には\*を示す。

### ( I ) 原 著

- \*1. Higashikubo I, Arito H, Eitaki Y, Araki A, Kenji A, Shimizu H, Sakurai H :

Evaluation of personal exposure of workers to indium concentration in total dust and its respirable fraction at three Japanese indium plants. Ind Health. Accepted 2018 Jul 18. “in press” (doi: 10.2486/indhealth.2018-0116).

- ◎\*2. Higashikubo I, Arito H, Eitaki Y, Araki A, Ando K, Shimizu H, Sakurai H :

Quantitative assessment of occupational exposure to total indium dust in Japanese indium plants. Ind Health. 2018; 56 (6), 553 - 560. (doi: 10.2486/indhealth.2018-0099).

- \*3. Higashikubo I, Arito H, Ando K, Araki A, Shimizu H, Sakurai H :

Control banding assessment of workers' exposure to indium and its compounds in 13 Japanese indium plants. J Occup Health 2018; 60: 263-270. (doi.org/10.1539/joh.2017-0261-BR)

- 4. Higashikubo I, Miyauchi H, Yoshida S, Tanaka S, Matsuoka M, Arito H, Araki A,

Shimizu H, Sakurai H : Assessment of Workplace Air Concentrations of Formaldehyde during and before Working Hours in Medical Facilities. Ind Health 2017; 55: 192～198.

- \*5. Iwasawa S, Nakano M, Miyauchi H, Tanaka S, Kawasumi Y, Higashikubo I,

Tanaka A, Hirata M, Omae K :

Personal indium exposure concentration in respirable dusts and serum indium level. Ind Health 2017;55 : 87～90

6. Ohnishi M, Suzuki M, Yamamoto M, Kasai T, Kano H, Senoh H, Higashikubo I, Araki A, Fukushima S : A Improve method for measurement of multi-walled carbon nanotubes in rat lung. Journal of Occupational Medicine and Toxicology 2016;11(44) :1～5
7. 東久保一朗、吉田哲、山本忍、大石茂美、今泉敬七郎：生石灰（消石灰）製造作業場の労働衛生管理について（第1報）. 作業環境、2011; 32(5): 65～70.
8. 東久保一朗、竹内靖人、八杉友次郎：有機溶剤作業環境測定分析の効率化（直接捕集方法）の試みについて. 作業環境 2007; 28(1) :67～69.
9. 東久保一朗、吉田哲、竹内靖人、八杉友次郎、大石茂美、今泉敬七郎、小堀衛、櫻井治彦：吹付け石綿除去作業における有機溶剤ばく露事例について. 労働衛生工学、2007; 46:41～47.

## (Ⅱ) 著 書

な し

## (Ⅲ) 総説・講座

1. 東久保一朗：解説 委託事業「職場における化学物質のリスク評価推進事業（ばく露実態調査）」について 労働衛生工学、2013;53:3～10.

## (Ⅳ) 症例・臨床治験・その他

な し

## 第 11 章 図表

### 第 1 章 図表

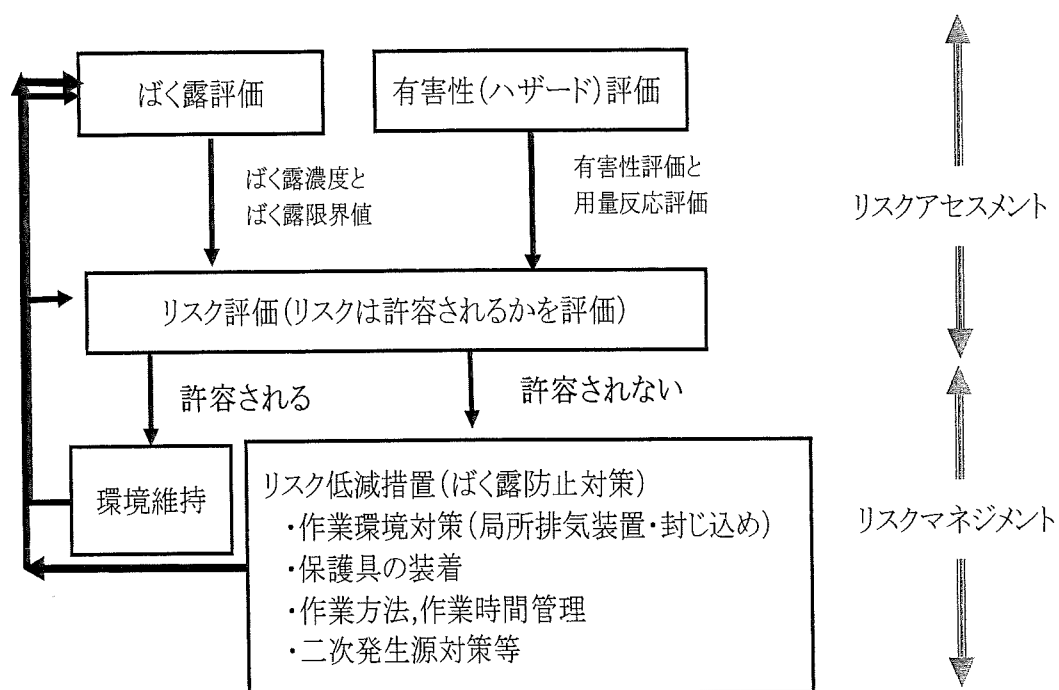


図1-1. 化学物質のリスク管理の流れ

化学物質のリスク管理は、化学物質の有害性(ハザード)評価とばく露評価より許容できるリスクかどうかを評価するリスクアセスメントと、許容できるリスクレベルよりも高いばく露を受けていた場合には、リスク低減対策として環境管理として工学的対策、作業管理として適切な保護具の使用、ばく露時間の管理等のリスクマネジメントを実施する。

また、リスク管理が適切になされているかの確認のためには、ばく露評価を行う必要があり、化学物質のリスク管理の流れを図示した。

## 第2章 図表

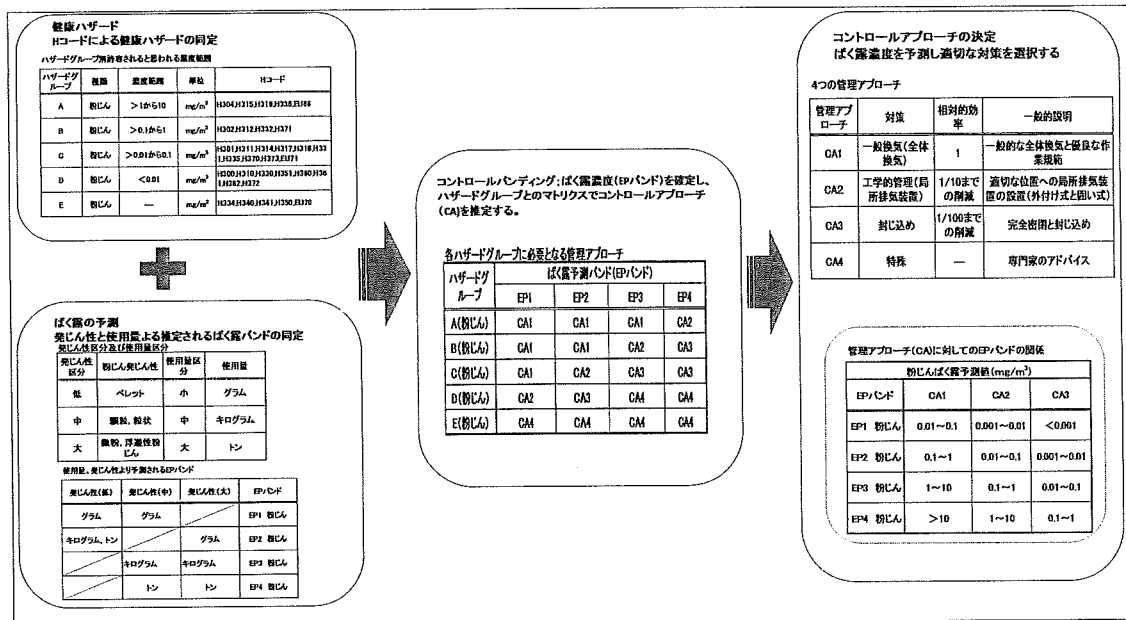


図 2-1. COSHH essentials によるコントロールバンディングの流れ

COSHH essentials では、取扱い化学物質のハザードと発ガン性と取扱  
い量より適切な管理アプローチである CA1 から CA4 までの労働衛生措置を選択  
する。その際の評価手順と粉じんばく露予測値を示す。

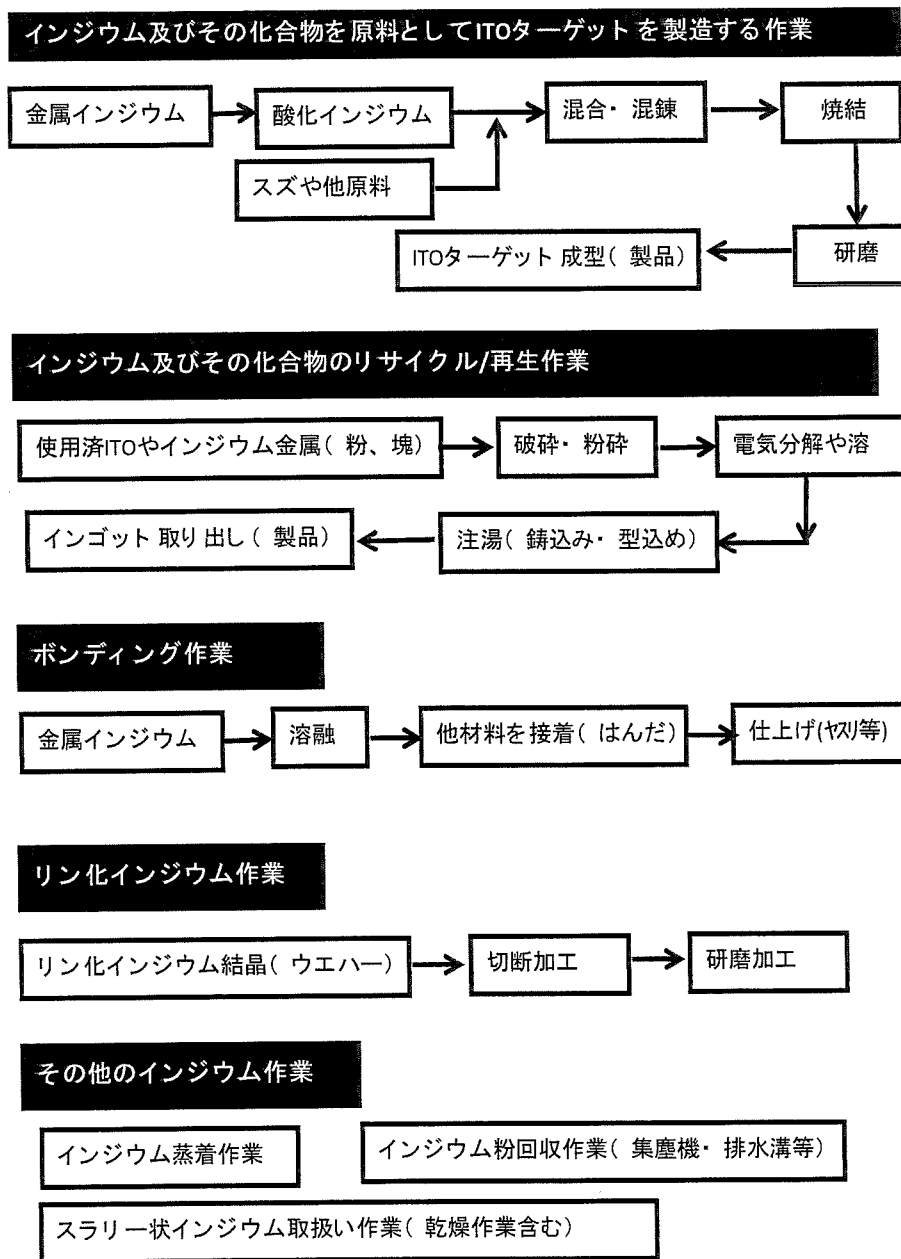


図 2-2. インジウム取扱い作業

インジウム取扱い作業の概略を示す。これらのインジウム取扱い時にインジウム粉飛散の可能性があった。



表 2-1. EP バンドとハザードグループに対する管理アプローチの関係について

EPバンド	粉じんばく露予測濃度 (mg/m <sup>3</sup> )			
	管理アプローチ			
	CA1	CA2	CA3	CA4
EP1 粉じん ハザードグループ	0.01～0.1 A,B,C	0.001～0.01 D	<0.001 —	—
EP2 粉じん ハザードグループ	0.1～1 A,B	0.01～0.1 C	0.001～0.01 D	—
EP3 粉じん ハザードグループ	1～10 A	0.1～1 B	0.01～0.1 C	D
EP4 粉じん ハザードグループ	>10 —	1～10 A	0.1～1 B	C,D

ばく露が低い考えられる EP1 からばく露が高いと思われる EP4 までの各バンドでは、有害性の違い(ハザードバンド)により、ばく露が許容されと思われる濃度が違う。それらの粉じんばく露予測濃度は CA1 から CA3 の管理アプローチを実施することで実現できると判断される。なお、CA4 は専門家のアドバイスによる専門的な対策のため、粉じんばく露予測濃度は示されていない。

表2-2. COSHH Essentialsによる13インジウム取扱い事業場のコントロールバンディング評価について

事業場	産業項目	インジウム取扱い作業	取扱いインジウム 化学種	GHS ハ ザードグ ループ	取扱い性状	発じん性	1日当たりの 取扱い量	IPバンド	コントロールア プローチ(実施内容)	排気装置設 置状況	対策で予測 される粉じ んばく露濃 度mg/m <sup>3</sup>	呼吸用保護 具装着状況
A	リサイクル/再生	金属インジウム製造	ITO	D	粉状	高	1,600 kg	EP4	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	PAPR*
		酸化インジウム製造	酸化インジウム	D	粉状	高	1,600 kg	EP4	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
B	電子デバイスの 製造(インジウム スズ酸化物 (ITO))	インジウム溶解処理	インジウム	D	固体(インゴ ット)	低	400 kg	EP2	CA3 (Containment)	GV*	0.001-0.01	RH
		酸化処理	硝酸インジウム	C&S	固体状	低	400 kg	EP2	CA2 (Engineering control)	GV*	0.01-0.1	RH
		ドラム缶充填	ITO	D	粉状	高	100 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
C	電子デバイス の製造(イン ジウムスズ酸 化物 (ITO))	インゴット移送	インジウム	D	金属状	低	18 kg	EP2	CA3 (Containment)	GV*	0.001-0.01	RH†
		水酸化インジウム回 収	ITO	D	乾燥後ペレ ット	低	10 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH†
		インジウム乾燥焼結	ITO	D	乾燥ペレット	低	10 kg	EP2	CA3 (Containment)	GV*	0.001-0.01	RH†
		インジウム原料の破 砕	ITO	D	粉状	高	10 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH†
		計量および袋詰め	ITO	D	粉状	高	10 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH†
D	電子機器(電極、 パネル)の製造	インジウム配合	インジウム	D	固体(粉状)	高	150 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	DH*
		インジウム形成	ITO	D	固体(インゴ ット)	低	75 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	DH
		プロセス処理	ITO	D	固体状	低	40 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH
		ボンディング	ITO	D	固体状	低	630 kg	EP2	CA3 (Containment)	GV*	0.001-0.01	None*
		仕上げと出荷	ITO	D	固体(粉状)	高	25 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
E	電子機器(電極、 パネル)の製造	浸出	インジウム	D	粉状	高	600 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	DH*
		焼結	酸化インジウム	D	微粉状	高	125 g	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH*
		充填および包装	インジウム	D	微粉状	高	700 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		電気分解プロセス	インジウム	D	結晶状	中	500 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH*
		湿潤工程	インジウム	D	粉状	中	100 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH*
		ショットブラスト	インジウム	D	微粉状	高	960 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	Containm ent*	-	RH*
		原材料の溶解	インジウム	D	固体状	低	3,000 kg	EP2	CA3 (Containment)	GV*	0.001-0.01	RH
		溶解およびキャス ティング	インジウム	D	微粒子	高	40 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH*
F	電子デバイスの 製造(スパッタ リングターゲット)	原料検査	ITO	D	フレーク状	中	140 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*†
		袋付けおよび計量	ITO	D	フレーク状	中	140 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH*†
G	リサイクル/再生	インジウム回収	ITO	D	粉砕粉	高	320 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		铸造インゴット	ITO	D	微粒子	高	320 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		金属インジウムの溶 出	インジウム	D	微粒子	中	680 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		濾過および乾燥	インジウム	D	インジウム ケーキ	低	680 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH*

表 1. (続き)

事業場	産業項目	インジウム取扱作業	取扱いインジウム化学種	GHS ハザードグループ	取扱い性状	発じん性	1日当たりの取扱い量	EPバンド	コントロールアプローチ(実施内容)	排気装置設置状況	対策で予測される粉じんばく露濃度mg/m <sup>3</sup>	呼吸用保護具装着状況
H	フィルム製造	粉末混合調整作業	ITO	D	粉状	高	1,800 kg	EP4	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	PAPR*
		原材料粉準備作業	ITO	D	粉状	高	700 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
	電子機器の製造 (スパッタリング ターゲット、半導体、表面材)	金属材料移送	ITO	D	粉状	高	820 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		調合投入	ITO	D	インジウムケーキ	低	2,400 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH
		サンプリング	ITO	D	粉状	高	40 g	EP1	CA1 (Engineering control)	GV*	0.001-0.01	RH*
		充填および包装	ITO	D	インジウムケーキ	低	2,900 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH
		微粉砕作業	ITO	D	インジウムケーキ	低	220 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH
		不純物除去と調整	リン化インジウム	E	インジウムケーキ	低	35 kg	EP2	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH
		移動	ITO	D	粉状	高	2,050 kg	EP4	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		微粉砕	ITO	D	ペレット状	低	110 g	EP1	CA1 (GV)	LEV	0.001-0.01	RH
		粉砕後の洗浄	ITO	D	粉状	高	20 g	EP2	CA2 (Engineering control)	GV*	0.001-0.01	RH*
		残渣材の回収	リン化インジウム	E	インジウムケーキ	低	270 kg	EP2	CA4 (Expert advice)	LEV*	0.001-0.01	RH
J	リサイクル/再生	乾燥	ITO	D	粉状	高	134 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		ウェーハ製造	ITO	D	結晶状	中	2.5 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	None*
		前処理	インジウム	D	粉状	中	130 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	CFA
		還元鋳造	インジウム	D	金属状	低	200 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH(g/l)*
		電解インジウムの精製	インジウム	D	金属状	低	200 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH(g/l)*
		鋳造インジウムの精製	インジウム	D	微粒子状	高	500 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		鋳造インゴット	インジウム	D	金属ヒューム	高	500 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	None*
		材料シート、フィルム製造	インジウム	D	金属シート状	低	500 kg	EP2	CA3 (Containment)	GV*	0.001-0.01	RH
		酸浸出作業	インジウム	D	微粒子状	高	125 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	GS*
		原料の粉砕	ITO	D	ペレット状	低	150 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH
K	リサイクル/再生	鋳造インゴット	インジウム	D	微粒子状	高	150 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH*
		金属精錬	インジウム	D	固体(ヒューム)	高	6 kg	EP3	CA4 (Expert advice)	GV*	-	RH(g/l)* †
M	ハンダ製造	移送、浸出作業	インジウム	D	金属状	低	500 kg	EP2	CA3 (Containment)	LEV*	0.001-0.01	RH
		18 L容器への充填	インジウム	D	微粒子状	高	1,000 Kg	EP4	CA4 (Expert advice)	LEV*	-	RH

GHSによる危険有害性:DおよびSは区分1の特定臓器毒性(反復暴露)および眼および皮膚への損傷を与える区分1または2を示す。Eはリン化インジウムのカテゴリ-1Bと1  
排気装置:局所排気装置;LEV GV;全体換気装置

RPE呼吸用保護具:DH;使い捨てハーフマスク、RH(g/l);気体/蒸気フィルターを用いた半面型マスク、PAPR;電動ファン付き防じんマスク CFA;定流エアラインマス;

\*は、工学的対策または呼吸用保護具がCOSHH Essentials基準を満たさないことを示します。

†は労働者が有害なインジウム化合物を取り扱っている間だけマスクが着用されたことを示している

13 事業場 55 作業場におけるインジウム取扱作業、化学種、ハザード評価、取扱形状、発じん性、1日の取扱量、EPバンド、排気装置の設置状況、管理アプローチおよび予測される粉じんばく露バンド、呼吸用保護具装着状況を一覧表として示した。ハザードグループはC&S,D,E、EPバンドはEP1からEP4まで分布し、コントロールアプローチはCA2からCA4に評価された。

表2-3. COSHHエッセンシャルにおける呼吸用保護具の選定基準

ハザードグループ	使用量	発じん性(低)	発じん性(中)	発じん性(大)
A	小	-	-	-
	中	-	APF=4	APF=10
	大	APF=4	APF=10	APF=20
B	小	-	APF=4	APF=4
	中	-	APF=10	APF=20
	大	APF=10	APF=20	APF=40
C	小	-	APF=4	APF=4
	中	APF=10	APF=10	APF=20
	大	APF=20	APF=20	APF=40
D	小	APF=10	APF=20	APF=40
	中	APF=20	APF=20	APF=40
	大	APF=20	APF=40	APF=2000
E	小	APF=10	APF=20	APF=40
	中	APF=20	APF=40	APF=40
	大	APF=20	APF=40	APF=2000

APF:指定防護係数(英国基準EZ529に基づく)

COSHH essentials における呼吸用保護具の選定は、マスクの性能を評価する指標である指定防護係数を基に行われる。指定防護係数は呼吸用保護具が正常に機能している場合に期待される最低の防護係数であり、フィルターの透過率と面体等の漏れ率を勘案した係数となり、4 から 2000 までとなる。

### 第3章 図表

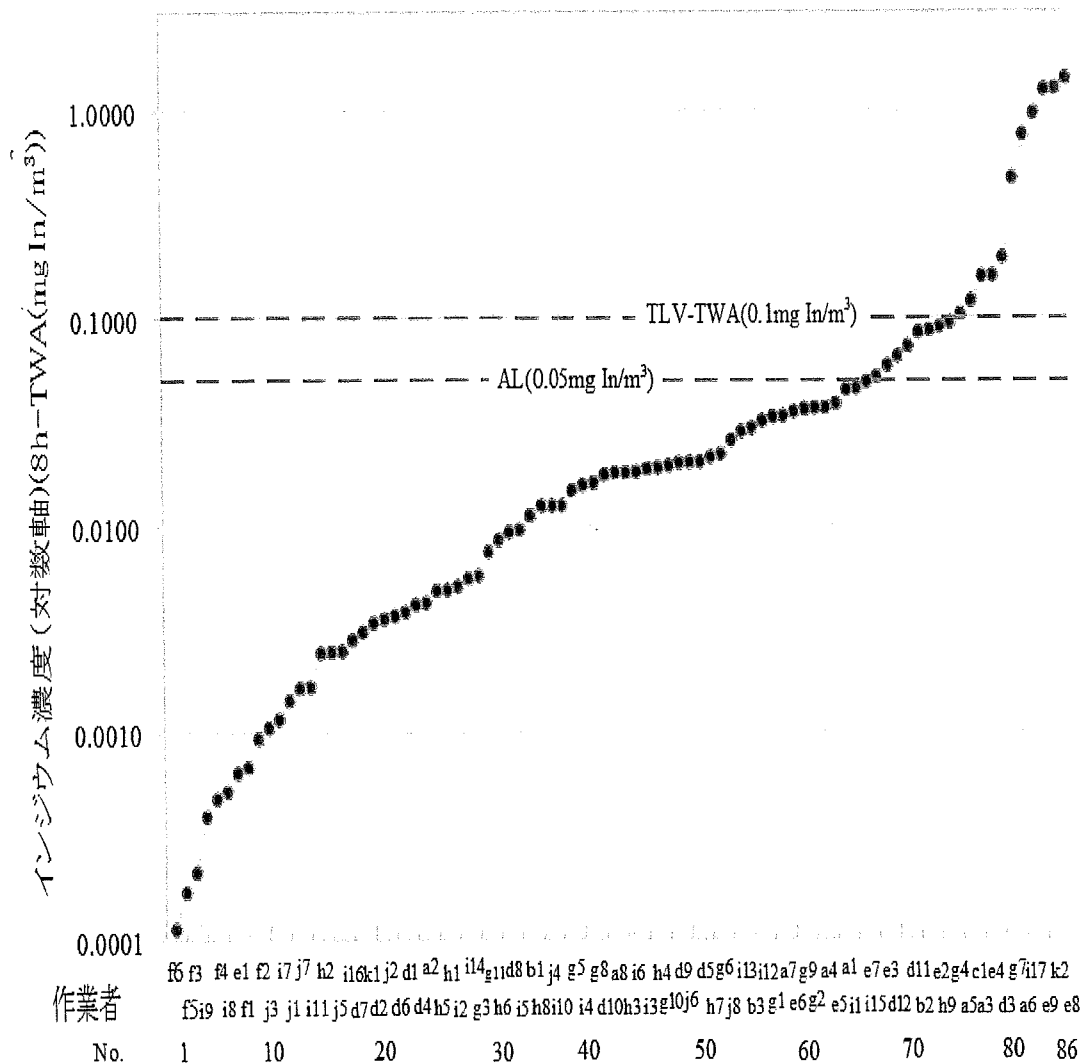


図 3-1. インジウム取扱い86名のばく露濃度(8h-TWA)

作業員は事業場アルファベットと番号で示し、インジウムばく露濃度を対数軸で示す。また2つの破線は、TLV-TWA(0.1mg In/m<sup>3</sup>)およびAL(0.05 mg In/m<sup>3</sup>)を示す。

表 3-1. 総粉じんインジウムばく露濃度を調査した11事業場の概要

事業場	製造内容等	従業員数	取扱いインジウム	インジウム取扱い作業	ばく露調査者数/ ばく露作業者数
a	リサイクル/再生	21	ITO、金属インジウム、水酸化インジウム	粉碎原料、充填および袋詰め、インジウム材料の溶解	8/14
b	ITOを含む電子デバイスの製造	118	水酸化インジウム、ITO	酸化インジウム秤量、可溶化、乾燥および粉碎、ITO粉充填	3/18
c	ITOを含む電子デバイスの製造	135	ITO	ペレット粉碎、粉体充填、焼成	1/2
d	透明電極およびパネルを含む電子デバイスの製造	486	水酸化インジウム、ITO	秤量と粉体充填、調合、乾燥、粉碎と洗浄	12/33
e	透明電極およびパネルを含む電子デバイスの製造	150	水酸化インジウム、ITO	太陽電池セルへの成膜蒸、集じん機、成膜機メンテナンス、集じんカス18ℓ容器への充填	9/14
f	スパッタリングターゲットを含む電子デバイスの製造	70	ITO	ショットブラスト、清掃	6/10
g	リサイクル/再生	579	酸化インジウム、水酸化インジウム	濾過および乾燥、粉碎、粉末充填	11/32
h	スパッタリングターゲットを含む電子デバイスの製造	192	ITO	インゴット秤量、溶融、研磨、ボンディング、粉碎および粉末充填	9/14
i	スパッタリングターゲット、表面材料、半導体を含む電子デバイスの製造	318	金属インジウム、ITO、水酸化インジウム、リン化インジウム	半導体ウェハープレス、ボンディング(塊状金属)、乾燥、充填、粉碎、塵じん除去	17/114
j	リサイクル/再生	45	金属インジウム、ITO	インゴット溶解および溶解化、電気泳動、鋳込み	8/11
k	リサイクル/再生	25	金属インジウム、ITO	粉碎、溶解、焼結インゴット鋳込み	2/3
計 2,139(平均194.5)					86/265(平均7.8/24.1)

総粉じんインジウムばく露濃度を調査した 11 事業場でのインジウム取扱状況および事業場規模、ばく露作業者の人数を一覧表とした。

表 3-2. 総粉じんインジウムばく露濃度 (mg In/m<sup>3</sup>)

項目	事業場	作業者数	TLV-TWA (0.1 mg In/m <sup>3</sup> ) 超え 作業者数	AL (0.05 mg In/m <sup>3</sup> ) 超え 作業者数	最小値 (mg In/m <sup>3</sup> )	最大値 (mg In/m <sup>3</sup> )	算術平均 値 (mg In/m <sup>3</sup> )	幾何平均 値 (mg In/m <sup>3</sup> )	幾何標準 偏差	X <sub>95</sub> (mg In/m <sup>3</sup> )	正規性 (Kolmogorov- Smirnov test P≥ 0.10)
総粉じんイ ンジウムば く露濃度	a	8	3	4	0.004	0.760	0.146	0.052	4.864	0.701	*P≥0.10
	b	3	0	1	0.011	0.085	0.044	NC	NC	NC	NC
	c	1	1	1	0.120	0.120	0.120	NC	NC	NC	NC
	d	12	1	2	0.002	0.194	0.033	0.013	4.137	0.131	*P≥0.10
	e	9	3	5	0.001	1.421	0.345	0.073	9.693	3.047	P=0.0924
	f	6	0	0	0.0001	0.001	0.000	0.0003	2.321	0.001	*P≥0.10
	g	11	1	3	0.006	0.469	0.069	0.028	3.403	0.209	*P≥0.10
	h	9	0	1	0.002	0.090	0.020	0.012	2.894	0.067	*P≥0.10
	i	17	1	1	0.0004	0.965	0.071	0.010	6.668	0.220	*P≥0.10
	j	8	0	0	0.001	0.026	0.009	0.005	3.497	0.035	*P≥0.10
	k	2	1	1	0.002	1.273	0.638	NC	NC	NC	NC
Total		86	11	19	0.0001	1.421	0.098	0.014	7.610	0.393	*P≥0.10

AL: アクションレベル, X<sub>95</sub>: 95%信頼区間上限値, NC: 該当なし

11 事業場における総粉じんインジウムばく露濃度結果を一覧表として示した。一覧表では TLV-TWA および AL を越えた作業者の数と事業場ごと統計処理した濃度を示した。

表 3-3. インジウムばく露濃度が最も高かった上位5作業者と低かった5作業者の労働衛生対策

総粉じんインジウムばく露濃度			労働衛生管理	
最もばく露濃度の高いグループと低いグループ	インジウム取扱い作業 (作業時間)	ばく露濃度 8h-TWA (mg In/m <sup>3</sup> )	局所排気装置設置状況	呼吸保護具(RPE)装着状況
高ばく露グループ 作業者 e8	18ℓペール缶への酸化インジウム残渣の投入作業 (44 分)	1.421	無し	半面型防じんマスク
作業者 k2	粉碎(5分)、焼結(25分)	1.273	Hood-type LEV	半面型防じんマスク
作業者 e9	18ℓペール缶への酸化インジウム残渣の投入作業 (44 分)	1.256	無し	半面型防じんマスク
作業者 i17	ITOターゲットの切断と粉碎 (30分)	0.965	外付け式局所排気装置	半面型防じんマスク
作業者 a6	計量および袋詰め (120分)	0.760	外付け式局所排気装置	半面型防じんマスク
低濃度 グループ 作業者 f6	溝内のインジウム残留物の回収 (16分)	0.0001	無し	半面型防じんマスク
作業者 f5	溝からのインジウム残渣の回収と移動 (13分)	0.0002	無し	半面型防じんマスク
作業者 f3	ショットブラスト (380分)	0.0003	囲い式局所排気装置	半面型防じんマスク
作業者 i9	InP結晶の研削および切断 (360分)	0.0004	グローブボックス	使い捨て式防じんマスク、不織布マスク
作業者 i8	InP単結晶の研削および切断 (360分)	0.0005	囲い式局所排気装置	無し

総粉じんインジウムばく露濃度が最も高いグループとして上位5作業者、最も低いグループとして濃度の低い順に5作業者を抽出し、作業内容等について一覧表とした。



## 第 4 章図表

表 4-1. インジウム取扱い3事業場(i,j,k)の総粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんインジウムばく露濃度およびT/R比結果

項目	事業場	インジウムばく露作業 者数	*ACGIH'sTLV- TWAまたは OEL-TWAを超 えた作業者数	最小値 (mg In/m <sup>3</sup> )	最大値 (mg In/m <sup>3</sup> )	算術平均値 (mg In/m <sup>3</sup> )	幾何平均値 (mg In/m <sup>3</sup> )	幾何標準偏 差	95%信頼区間 上限値 (mg In/m <sup>3</sup> )
総粉じんイン ジウムばく露 濃度	i	17	1	0.0004	0.96	0.071	0.0097	6.67	0.220
	j	8	0	0.0011	0.026	0.0086	0.0045	3.50	0.035
	k	2	1	0.0025	1.27	0.638	NC	NC	NC
	Total	27	2	0.0004	1.27	0.095	0.009	7.02	0.217
吸入性粉じん インジウムばく 露濃度	i	17	17	0.00038	0.57	0.0415	0.00563	5.74	0.100
	j	8	8	0.00099	0.025	0.0082	0.00409	3.65	0.0344
	k	2	2	0.0023	0.82	0.410	NC	NC	NC
	Total	27	27	0.00038	0.82	0.0589	0.00595	6.23	0.121
項目	事業所	N数	-	最小値	最大値	算術平均値	幾何平均値	幾何標準偏 差	95%信頼区間 上限値
TR比 (TD/RD)	i	17	-	1.01	15.3	2.64	1.48	2.15	9.28
	j	8	-	1.01	1.29	1.11	1.01	1.10	1.28
	k	2	-	1.08	1.56	1.32	NC	NC	NC
	Total	27	-	1.01	15.3	1.61	1.28	1.89	5.96

NC: 計算不能

\*: 総粉じんインジウムばく露ACGIH'sTLV-TWAは0.1mg/m<sup>3</sup>あり、吸入性粉じんインジウムばく露の許容される濃度(推定OEL-TWA)は3×10<sup>-4</sup>mg/m<sup>3</sup>である。

インジウム取扱い3事業場において、吸入性粉じんインジウムばく露濃度と吸入性粉じんばく露濃度測定を同時に行い、その結果を一覧表とした。また、総粉じんインジウム濃度と吸入性粉じんインジウム濃度の関係について T/R 比を示した。

表 4.2. インジウム取扱い事業場j,yでのばく露濃度(呼吸域濃度)が高濃度の作業者と低濃度の作業者2例ずつの労働衛生管理実施状況について

総粉じんインジウム個人ばく露濃度				労働衛生管理				吸入性粉じん粒子径インジウム個人ばく露濃度				労働衛生管理			
最高濃度、低濃度 ばく露作業者	インジウム取扱い作業 (取扱い時間)	インジウムばく露濃度 8h-TWA(mg In・m <sup>3</sup> )	局所排気装置	呼吸用保護具	最高濃度、低濃度 ばく露作業者	インジウム取扱い作業(取扱い時間)	インジウムばく露濃度8h-TWA(mg In・m <sup>3</sup> )	局所排気装置	呼吸用保護具	最高濃度、低濃度 ばく露作業者	インジウム取扱い作業(取扱い時間)	インジウムばく露濃度8h-TWA(mg In・m <sup>3</sup> )	局所排気装置	呼吸用保護具	最高濃度、低濃度 ばく露作業者
高濃度ばく露作業 作業者 i17	ITOターゲットの切断と 粉砕(30分)	0.96	外付け式局 所排気装置	半面形取 替え式防 じんマスク	高濃度ばく露作業 作業者 i17	ITOターゲットの切断と粉砕 (30分)	0.57	外付け式 局所排気 装置	半面形取 替え式防 じんマスク	高濃度ばく露作業 作業者 k2	ITOターゲットの切断と粉砕 (30分)	0.82	外付け式 局所排気 装置	半面形取 替え式防 じんマスク	高濃度ばく露作業 作業者 i17
作業者 k2	粉砕(5分)、焼結(25分)	1.27	外付け式局 所排気装置	半面形取 替え式防 じんマスク	作業者 k2	粉砕(5分)、焼結(25分)	0.82	外付け式 局所排気 装置	半面形取 替え式防 じんマスク	低濃度ばく露作業 作業者 j9	ITOターゲットの切断と粉砕 (30分)	0.00038	外付け式 局所排気 装置	半面形取 替え式防 じんマスク	低濃度ばく露作業 作業者 j9
低濃度ばく露作業 作業者 j9	インジウムリン(InP)結晶 研削(240分)および湿 式切断作業(120分)	0.00040	グローブ ボックス	使い捨て 式防じん マスク、不 織布マス	低濃度ばく露作業 作業者 j9	InP結晶研削(240分)および 湿式切断(120分)	0.00038	グローブ ボックス	使い捨て 式防じん マスク、不 織布マス	低濃度ばく露作業 作業者 j3	ITOターゲットの切断と粉砕 (30分)	0.00099	外付け式 局所排気 装置	半面形取 替え式防 じんマスク	低濃度ばく露作業 作業者 j3
作業者 j3	溶解、湿式浄化、還元 処理および濾過(480 分)	0.00106	囲い式局所 排気装置	半面型防 毒防じん マスク	作業者 j3	溶解、湿式浄化、還元処理 および濾過(480分)	0.00099	囲い式局 所排気装 置	半面型防 毒防じん マスク						

3 事業場 27 作業者を対象とした総粉じんインジウムと吸入性粉じんインジウムばく露調査における、高濃度ばく露作業者 3 名と低濃度ばく露作業者 3 名を各々抽出し、作業内容とばく露濃度および労働衛生体策を比較した。

## 第5章 図表

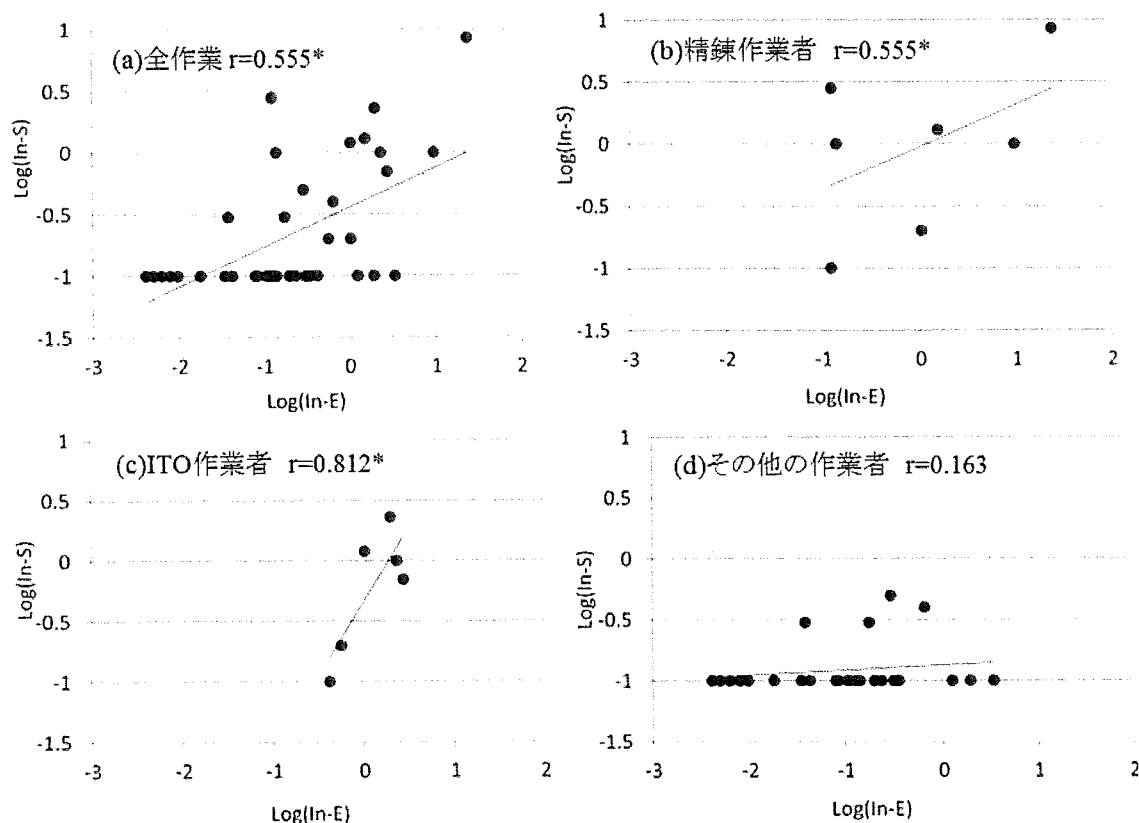


図 5-1.  $\log(\ln-E)$ と $\log(\ln-S)$ の散布図

図 5-1 にて、 $\log(\ln-E)$  および  $\log(\ln-S)$  の散布図を示す。

(a) での回帰式は  $\log(\ln-S) = 0.322 \times \log(\ln-E) - 0.443$  であり、回帰係数は統計的に有意 ( $p = 0.0002$ ) であり、相関係数は  $0.555$  (95%CI  $0.290-0.741$ ) となった。

また、ITO 作業者の相関がもっと高く、精錬作業者と全作業者には相関が確認されたが、その他のインジウム等を取り扱う作業群では相関が確認されなかった。

## 第 12 章 略語表

英略語	正式英語名	和訳
ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists	米国労働衛生専門家会議
ACS	American Chemical Society	アメリカ化学会
AECL	The Acceptable Exposure Concentration Limit	許容される濃度限界
AL	Action Level	アクションレベルレベル;ばく露限界値の 50%値
AM	Arithmetic Mean	算術平均値
APF	Assigned Protection Factor	指定防護係数
CA	Control Approach	管理アプローチ
CI	Confidence Interval	信頼区間
CLP	Classification Labelling and Packaging Regulation	EU における化学品の分類表示包装に関する規則
COSHH	Control of Substances Hazardous to Health	英国安全衛生庁が提案した化学物質の簡易リスク評価システム
COSHH essentials	COSHH essentials control banding toolkit	HSE が運営するばく露低減対策アドバイスの提供システム
EP band	Exposure Predictor Band	ばく露予測バンド
GHS	Globally Harmonized System of Classification and Labelling of Chemicals	化学品の分類および表示に関する世界調和システム
HSE	Health and Safety Executive	英国安全衛生庁
H code	Hazard Statement Code	GHS 分類結果において、それぞれ「危険有害性情報」、「注意書き」に個別に割り当てられている H と 3 つの数字から構成されたコードであり、国連 GHS 文書によって規定されている。
IARC	International Agency for Research on Cancer	国際がん研究機関
ICP-MS	Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry	誘導結合プラズマ質量分析計
In-E	Exposure indium concentration	インジウムばく露濃度
In-S	Serum indium concentration	血清中インジウム濃度
ITO	Indium Tin Oxide	インジウム-スズ酸化物
JSOH	Japan Society for Occupational Health	日本産業衛生学会
KL-6	Krebs von den Lungen-6	シアル化糖鎖抗原 KL-6

NIOSH	National Institute for Occupational Safety and Health	米国国立労働安全衛生研究所
NITE	National Institute of Technology and Evaluation	独立行政法人 製品評価技術基盤機構
NMAM	NIOSH Manual of Analytical Methods	NIOSH 測定分析マニュアル
OSHA	Occupational Safety and Health Administration	米国労働安全衛生庁
PAP	Pulmonary alveolar proteinosis	肺胞蛋白症
PAPR	Powered Air Purifying Respirators	電動ファン付き防じんマスク
PEL	Permissible Exposure Limit	OSHA が定めたばく露限界値
REL	Recommended Exposure Limit	NIOSH が定めたばく露限界値
RH	Reusable half mask - particle filter	取替式半面形防じんマスク
RH (g/f)	Reusable half mask - gas/vapour filter	半面形ガス/フィルターマスク
RPE	Respiratory Protection Equipment	呼吸用保護具
SDS	Safety Data Sheet	安全データシート
TC	Target Concentration	目標濃度
TLV-TWA	Threshold Limit Value - Time Weighted Average	ACGIH が定めた時間荷重平均許容濃度
TWA-8h	Time-Weighted Average-8 hour	8 時間荷重平均濃度
X95	95% Confidence Interval	95%信頼区間上限値