

「ヒトに対する有害性が明らかでない化学物質に対する労働者ばく露の予防的対策に関する検討会」における検討課題（通達、Baua、NIOSH 及び経済産業省の委託事業報告書によって取り纏められたガイドライン。以下「経産省委託ガイドライン」という。追加版）

## 1 ばく露防止対策の検討に当たっての問題と対策

### (1) 有害性情報等の不足

#### <総論>

- ナノマテリアルについては、組成単位がごく小さくなることで、もとの状態のときと異なる性状を示すことがあり、一部の学術論文においては一定の条件下でマウス等に影響を与えることを示唆する報告がなされている一方で、逆に有意な影響を与えない等の報告もなされていることから、生体影響について動物実験等の研究を含め、我が国を含めた各国の研究機関及び OECD 等の国際機関がその解明に取り組んでいるところである。（通達）
- 今後、人体への影響については更なる知見の集積が必要であり、現在独立行政法人労働安全衛生総合研究所においてばく露防止対策等の研究を進めている。（通達）
- どんな新しい物質の開発でもそうであるように、暴露された作業者の健康への影響に関する科学的データは、ほとんど手に入らない。ナノ材料の特性は、化学組成が同一のより大きな材料の特性と異なる可能性があるため、ナノ材料の場合は、不確実性が大きい。（NIOSH）
- ナノ粒子の有害性は不確定であるが、ナノ材料の中には、ばく露条件によって有害である可能性が指摘されているものがある。また、同じ物質であっても粒径が大きい粒子に比べて、ナノサイズになると同じ質量で表面積が飛躍的に増大することなどによって、有害性が変化する可能性も議論されている。（経産省委託ガイドライン）

#### <有害性>

- 超微粒子あるいはナノ粒子の毒性は、同様の化学組成を有する同質量のより大きな粒子の毒性よりも強いことが、齧歯動物及び細胞培養での実験的研究から示された。粒子の表面積に加えて、溶解度、形状及び界面化学を含む他の粒子特性が毒性に影響を与える可能性がある。（NIOSH）
- CNTの毒性は、同様の化学組成を有する他のナノ粒子の毒性と異なる可能性があることが示された。たとえば、単層カーボンナノチューブ（SWCNT）は、超微粒カーボンブラックがこれらの有害影響を引

き起こさない質量用量で、マウスとラットの肺の肉芽腫を含む有害影響を引き起こすことが示された。(NIOSH)

- 比較的低質量用量で齧歯動物の肺に観察される SWCNT の特異な毒性があることや暴露した場合の作業員に対する潜在的有害影響に関する不確実性があるため、効果的な工学的対策、作業管理及び個人用保護具を適用することにより浮遊CNTへの作業員暴露を最小化することは賢明である。(NIOSH)

#### <ばく露の経路>

- 作業環境における浮遊粒子への最も一般的な暴露経路は、吸入(inhalation)によるものである。(NIOSH)
- ナノ粒子はまた、職業性暴露の間に、皮膚を通して体内に入り込む可能性があることが、いくつかの研究で示唆されている。(NIOSH)
- ナノ粒子が皮膚を透過するかもしれないけれども、侵入が病気につながることを示唆する研究はほとんどなかった。(NIOSH)
- 経口摂取は、ナノ粒子が体内に入り込む可能性のあるもう1つの経路である。経口摂取は、非意図的に物質を手から口へ運ぶことから起こりうる。このことは、従来の物質でも起こり得ることであり、ナノ粒子を含む物質を取り扱い中にも起こりうると、仮定することは科学的に筋が通っている。(NIOSH)
- ナノ粒子の経口摂取によって起こりうる有害影響についてはほとんど知られていない。(NIOSH)
- 生体への侵入経路としては、エアロゾルの形態からの呼吸による可能性が高い。(経産省委託ガイドライン)

#### <ばく露の生ずる工程・作業>

- 製造過程での労働者のばく露は、主に充填、サンプリング、清掃、及び保守作業のような、工程のつなぎ部分や通常の手順が中断したときに起こりうるものであり、そのときは安全工学上の極めて高度な注意喚起が必要になる。(Baua)
- 液体を扱う作業(沈殿反応、液相での分散)では、通常はエアロゾルの発生を回避できるので、吸入によるばく露は通常考慮しない。(Baua)
- 多くの不溶性ナノ物質に関して、現状ではそれらの物質の化学組成による分類にかかわらず、このような非常に小さい粒子の吸入が職場でのハザードとなる可能性を除外して考えることはできないのである。(Baua)
- 流し込み操作または混合操作中や、あるいは、高攪拌を伴う場合での、

液体媒体中のナノ材料を扱った作業は、吸入可能な (inhalable) 小滴及び呼吸可能な (respirable) 小滴が形成される可能性の増大につながるであろう。(NIOSH)

- 非閉鎖型システムにおける気相でのナノ粒子の生成は、作業環境へのエアロゾル放出の機会を増大させるであろう。(NIOSH)
- ナノ構造パウダーの取扱いは、エアロゾル化の可能性につながるであろう。(NIOSH)
- ナノ粒子捕捉に使用した集じんシステムの清掃は、皮膚暴露及び吸入暴露両方の可能性をもたらすであろう。(NIOSH)
- ナノ材料の飛散物や汚染表面をきれいにする手順を開発するとき、クリーンアップの間、暴露の可能性があることを考慮しなければならない。吸入暴露と皮膚表面暴露は、最も大きな危険をもたらすと考えられる。したがって、個人の保護器材の適切なレベルを考慮する必要がある。(NIOSH)
- ナノ粒子を懸濁液として扱う場合でも液体自体の飛散や反応によるばく露もリスクとして存在することに注意しなければならない。(経産省委託ガイドライン)

## (2) ばく露発生の可能性の評価に基づく対策のランク分け

- 取扱量、ナノマテリアルの形態等による対策のランク分けなど
- 英国の HSE が始めたコントロールバンディングをリスク評価に対する対策の考え方として述べている。(経産省委託ガイドライン)

## 2 対策の対象

### (1) 対象とするナノマテリアルの範囲

<定義等>

- 対象となるナノマテリアルは、元素等を原材料として製造された個体状の材料であって、大きさを示す3次元のうち少なくとも一つの次元が 100nm よりも小さいナノ粒子 (nano-objects) 及びナノ構造体 (nanostructured material) (内部にナノスケールの構造を持つ物体、ナノ粒子の凝集したものを含む) であること。(通達)
- ISO 専門委員会 229 “ナノテクノロジー” が作成し、OECD が仮の定義として採用した案によれば、ナノ物質 (nanomaterials) とは、ナノ-物体 (nano-objects) あるいはナノ構造体 (nanostructured materials) と理解されている。ナノ-物体とは一つ、二つ又は三つの次元がナノスケール (およそ 1-100nm) の物質であり、典型的な例は

ナノプレート (nanoplates)、ナノロッド (nanorods) 及びナノ粒子 (nanoparticles) である。ナノ粒子とはナノスケールの三次元のナノ-物体である。ナノ構造体はナノスケールの内部構造をもつものである。その典型的な例はナノ-物体の凝集塊 (aggregates) 及び凝集体 (agglomerate) である。(Baua)

- ナノ粒子とは、径が 1~100nm の粒子のことである。ナノ粒子は、(ナノエアロゾルとして) 気体中に浮遊したり、(コロイドまたはナノヒドロゾルとして) 液体中に懸濁したり、(ナノコンポジットとして) 基質に埋め込まれている場合がある。「粒径」の厳密な定義は、粒径の測定方法だけでなく、粒子の形状に左右される。(NIOSH)
- 「ナノ材料」とは、エアロゾルになりやすい「ナノ粒子 (固体)」を意味することとする。「ナノ粒子」の定義としては「少なくとも一方向の長さがおおむね 100nm 以下である粒子」とする。なお、自然界に存在するナノ粒子や、非意図的に発生する粒子は含めず、利用を目的として、研究開発においてあるいは工業的に製造される粒子を対象とする。(経産省委託ガイドライン)

#### <形態>

- 最近市販用に大量に製造されている多くの製品では、ナノ粒子は遊離の粒子ではなく、いくつかの粒子の凝集塊又は凝集体となっている。(Baua)
- (上述の) この定義では凝集塊及び凝集体はナノ粒子ではなく、ナノ粒子が互いに結合しているナノ構造体といわれるものである。大きなエネルギーの供給なしでは凝集塊及び凝集体からナノ粒子を遊離させることはほとんど不可能である。(Baua)
- 粒子の形態は、ナノスケールで幅広く変化する可能性がある。たとえば、カーボンフラーレンは、全方向同一寸法、すなわち球状のナノ粒子を表すのに対して、単層カーボンナノチューブ (SWCNT) は、一般的に、径が 100nm 未満のロープ状に入り組んだ、繊維状のナノ粒子を形成する。(NIOSH)

#### (2) 対象とする労働者

- 1 の物 (対象とするナノマテリアル) の製造又は取扱い (修理、点検等を含む。また、研究目的で製造等をする場合も含む。) に従事する労働者 (監督者を含む。) を対象とすること。(通達)

### 3 検討すべき対策事項

## (1) 作業環境管理

### ア ばく露状況の計測評価（ばく露評価）

#### <基本方針>

- 健康影響に基づいた基準値（**health-based limit**）が未だ設けられていないような場合でも、適切な作業手順（**good working practice**）にしたがって妥当性のある対策を導入した後、労働者が受けたばく露を測定しなければならない。（Baua）
- TRGS（有害危険物質に対する技術的規則）900によれば、一般的な粉じんに対する基準値は超微細粉じん（粒子サイズが0.1 $\mu$ m以下の拡散相当径（**diffusion equivalent diameter**）の粉じん分画で、その凝集塊及び凝集体を含む）の評価には適用されない。したがって、ナノ粒子又は一定のナノ物質について特別な基準値が定められるまでは、ばく露を最小限にするよう努力しなければならない。（Baua）

#### <測定・分析技術>

- 測定の際には、工業的かつ意図的に製造されるナノ粒子を、その他の発生源（製造場所のバックグラウンドばく露）からのナノ粒子と区別することはできない。その影響については、ナノ粒子測定の結果を評価する際に考慮しなければならない（例えば、喫煙室の粒子数は1立方センチメートルあたりおよそ100万個、交通量の激しい道路では1立方センチメートルあたりおよそ10万個）。（Baua）
- ナノ粒子を測定する場合、職場の空气中に排出されるナノ粒子の個数濃度や表面積濃度（**surface concentration of nanoparticle emissions**）の測定に固定機器（**stationary equipment**）が使用される。これは高価で作業集約的な対策であり、最新技術に合うものではあるが、まだ標準化されておらず、認証もされていない。（Baua）
- 凝縮粒子計数器（**Condensation Particle Counter (CPC)**）は、ナノメートルの範囲の個数濃度の測定に最も広範に使用されている方法である。光散乱検出器をつけたCPCを用いることで、ナノメートルの範囲またはそれ以上のサイズの粒子数を計測できるが、CPCでは粒子サイズや粒子の化学組成に関するデータを得ることはできない。しばしば、CPCは走査型モビリティ粒径分析器（**Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS)**）のような粒子サイズ計測器と組み合わせて使用される。因みに、段階式モビリティ粒径分析器（**Stepped Mobility Particle Sizer (SMPS)**）は3-800nmの範囲の粒子サイズ分布の測定によく用いられる機器である。SMPS法では移動度又は拡散相当径（**Mobility or diffusion equivalent diameter**）をそれぞれ測定する。

この方法を改良することで広い範囲のサイズの測定も可能になる。しかし、その複雑な性質のために、この方法の使用は限定されたものである。(Baua)

- エアロゾル質量分析法 (Aerosol mass spectroscopy) は、100nm 以上のサイズの粒子及び凝集塊の化学的オンライン分析 (chemical on-line analysis) で広く使用される方法である。電子顕微鏡 (TEM/SEM) は、粒子のサイズ、形態及び構造のオフライン測定法 (off-line method) として利用できる。しかし、これもまたその技術の複雑さが広範囲でルーチンな使用の妨げとなっている。電子顕微鏡と組み合わせて使用するエネルギー分散型蛍光 X 線分析 (Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Analysis) は特殊な元素分布の解析能をもっており、粒子の物質同定に使用できる。現在のところ、この方法では半定量的な分析しかできない。(Baua)
- SMPS 以外に、ナノエアロゾル採取装置 (Nano-Aerosol Sampler (NAS)) は、例えば TEM 用グリット上で 1-1000nm のサイズの粒子の分離に使用できるひとつの方法であり、その後形態及び元素組成に関して TEM/EDX で特性の解析を行うためのものである。しかし、現在のところ半定量的な分析のみが可能である。(Baua)
- 定期的に作業環境測定を実施する。測定はナノ領域をカバーした計器が望ましいが、粉じん計などによって凝集したナノ粒子の存在についてチェックすることも可能。測定の際は、必ずバックグラウンドも測定する。測定結果は、作業状況とともに記録する。(経産省委託ガイドライン)
- ナノ粒子の濃度については、作業環境用に用いてきた従来の機器では測定することが難しく、測定できる専門家も少ない。また、英国の HSE が始めたコントロールバンディングをリスク評価に対する対策の考え方として述べている。(経産省委託ガイドライン)

## イ 密閉構造とすべき箇所及び要件

### <基本方針>

- 製造設備は原則として密閉構造とすること。ただし、これが困難な場合においては局所排気装置を設置すること。(通達)
- 労働者がナノマテリアルを直接取扱うような原材料の荷受け、原材料や製品の秤量、製造・加工装置への投入、製造・加工装置からの回収、容器等への移し替え、製造・加工装置の清掃・点検・補修や容器の清掃等 (の作業については) 密閉化・無人化・自動化によって、労働者

がナノマテリアルにばく露しないことが望ましいが（困難な場合には局所排気装置を設置すること。）（通達）

- 製造装置は完全密閉系を基本とするべきであり、製造法は、原料仕込み、製品回収系も含めて連続プロセスが望ましい。製品回収系が完全密閉でない場合には、回収系において、フード、ドラフト、クローブボックス等を使用する必要がある。（経産省委託ガイドライン）
- ナノ粒子の加工の際は、密閉状態で作業可能とすることが望ましいが、困難な場合は局所排気装置を使用する。（経産省委託ガイドライン）

<対策>

- （保護対策の決定にあたっては、ハザードアセスメントに基づいて次の点を検討しなければならない。） 囲い込み装置（**contained installations**）の使用（及び可能ならば発生源で有害ガス、蒸気及び粉じんの捕集、削減及び除去）（**Baua**）
- 可能ならば、囲い込み型装置（**contained installations**）で作業を行う。（**Baua**）
- 空中でのナノ粒子の運動と挙動の知見に基づくと、発生源の囲い込み（すなわち、発生源を労働者から隔離する）と局所排気システムのような管理技術は空中のナノ粒子を捕集するのに効果的である。（**NIOSH**）

#### ウ 局所排気装置を設置すべき場所及び要件

<設置すべき工程、場所等>

- 空中でのナノ粒子の運動と挙動の知見に基づくと、発生源の囲い込み（すなわち、発生源を労働者から隔離する）と局所排気システムのような管理技術は空中のナノ粒子を捕集するのに効果的である。（**NIOSH**）
- （可能ならば、囲い込み型装置で作業を行う。）それが不可能ならば、粉じんやエアロゾルの発生を回避する。そのために、製造する物質や製造条件に基づいて、その発生源（例えば、充填及び排出工程）で発生する粉じんやエアロゾルを直接取り除く。（**Baua**）
- （保護対策の決定にあたっては、ハザードアセスメントに基づいて次の点を検討しなければならない。）（囲い込み装置（**contained installations**）の使用及び）可能ならば発生源で有害ガス、蒸気及び粉じんの捕集、削減及び除去（**Baua**）
- 製造設備は原則として密閉構造とすること。ただし、これが困難な場合においては局所排気装置を設置すること。（通達）

- 労働者がナノマテリアルを直接取扱うような原材料の荷受け、原材料や製品の秤量、製造・加工装置への投入、製造・加工装置からの回収、容器等への移し替え、製造・加工装置の清掃・点検・補修や容器の清掃等（作業については）密閉化・無人化・自動化によって、労働者がナノマテリアルにばく露しないことが望ましいが、困難な場合には局所排気装置を設置すること。（通達）
- 装置、機器毎に、局所排気装置が必要な場合は取り付ける。全体換気との関係に注意した十分な気流管理を行わなければならない。装置・設備はそのばく露量の程度に応じて、気流を考慮した実験室／作業場内での配置・区分けが必要である。（経産省委託ガイドライン）

＜維持管理＞

- 局所排気装置を設置した後は、定期的な保守点検を行うこと。（通達）
- 除去設備の定期的な保守及び性能検査を確実に実施する。（Baua）

エ 排気における除じん措置の方法

＜基本方針＞

- 局所排気装置の屋外への排気口には高性能フィルターを設け（ること。）（通達）
- 除去した空気を浄化することなしに再利用してはならない。（Baua）

＜フィルターの捕集効率＞

- 高効率粒子捕集フィルター（HEPA）を備えたうまく設計された排気システムはナノ粒子を効果的に除去する。フィルターは、捕らえられる確率が最も低い粒子（典型例として直径 300nm 程度）を使ってテストされる。より小さな粒子の捕集効率はこの粒径での捕集効率を上回る。（NIOSH）
- フィルターが不適當に装着されたならば、ナノ粒子はフィルターをバイパスし、予測したよりはるかに低いフィルター効率になってしまう可能性がある。（NIOSH）

（2）作業管理

ア 作業規程の内容

- ナノマテリアルの取扱いに関する作業規程を作成し、労働者がナノマテリアルにばく露しないようにすること。（通達）
- 操作順序についての適切な時間配分（Baua）
- 作業指示書に必要な情報を含める。（Baua）
- 実験／作業手順等のマニュアルを制定し、実験者、作業者を十分に教

育し、遵守させなければならない。また、実験者、作業者に対して、扱うナノ材料の有害性についての情報、作業環境測定結果などを知らせる。(経産省委託ガイドライン)

#### イ 床等の清掃方法

- 施設の適切な清掃 (Baua)
- 作業場所を定期的に清掃する。堆積した物質又は漏出した物質を除去する唯一の方法は、吸引するか又は湿った布で拭き取る方法であり、吹き払ってはならない。(Baua)
- 作業場の床や作業台等の清掃については、ナノマテリアルを拡散させないよう、高性能フィルターを備えた掃除機による吸引や湿った布による拭き取りによって行うこと。なお、使用した布については袋に封入し適切に廃棄すること。(通達)
- 作業区域は、各シフト終了時(最低限) HEPA フィルター付の掃除機か水拭き法で清掃しなければならない。乾燥掃きや空気のホースは、作業区域の清掃に用いてはならない。清掃は、廃棄物と労働者の接触を防ぐ方法で行われなければならない。全ての廃棄物の処分は、全ての適用される国、州、地方の条例に従わなければならない。(NIOSH)
- こぼれた粉と液体をきれいにする標準的なアプローチは HEPA フィルター付の掃除機の使用、粉を濡らしてふき取る方法、粉を拭くために湿る布を使う方法、吸引力のある材料/液体の使用を含む。(NIOSH)
- 石鹼または掃除油を用いる湿式のクリーニング法は好ましい。掃除布は、きちんと廃棄されなければならない。汚染された布の乾燥再利用は、粒子の再飛散を引き起こす。市販の湿式掃除布や静電マイクロ線維掃除布の使用は、空中への分散を最小にしながら、表面から粒子を取り除くことに効果的である。(NIOSH)
- 乾式掃除機や圧縮空気の使用のような激しい掃除方法は避けるか、或いは掃除によって舞い上がる粒子が HEPA フィルターによって捕捉されることが保証される予防措置を講じたときのみ限定すべきである。電気掃除機での掃除を採用するときは、HEPA フィルターがきちんと装着される、そして、バッグとフィルターをメーカーの推薦に従って交換するという注意を十分払って行わなければならない。(NIOSH)
- 電気掃除機での掃除が多くのケースで効果的であることがわかっているが、以下の点は考慮されなければならない。引力が掃除機で粒子を表面から搬出することを難しくすることがある。粒子の静電荷は、

逆に荷電した表面に引きつけられ、正に荷電された表面から反撥する。反対に荷電された真空ブラシまたはツールは粒子を反撥し、エアロゾルを捕獲することを難しくし、さらに分散することさえする。真空ブラシまたはツールによる荒々しいスクラビングや、真空ホース内の材料または空気の高速度による摩擦は、帯電につながる。これらの問題に対処するために、複写機やプリンタートナーの清掃に用いる掃除機には、帯電防止機能付が推奨される。(NIOSH)

- 床面は、水洗いしやすいか又は真空クリーナーが使いやすいよう配慮する。清掃は湿式拭き又はHEPAフィルタを装着した真空クリーナーによらなければならない。空気吹きつけによる清掃は行ってはならない。(経産省委託ガイドライン)

#### ウ ナノマテリアル作業場所と外部との汚染防止等

- ナノマテリアルを製造・加工する施設や取り扱う施設と外部とを区画し、その間には除染区域を設ける等により、付着したナノマテリアルを外部に持ち出さないように適切に処理すること。(通達)
- ナノマテリアルを製造・加工する施設や取り扱う施設には関係者以外の立ち入りを制限すること。(通達)
- 適切な出入り(及び保管に)に関する規則(Baua)
- ばく露の可能性のある労働者の数を可能な範囲で出来るかぎり少なくする。さらに、指定された作業区域に許可のない者の立ち入りを認めない。(Baua)
- シャワーを浴びて、服を替えるための設備を設置し、衣類と皮膚の上のナノ粒子が移動することに起因する他の地域(持ち帰りのものを含む)の不注意な汚染を防がなければならない。(NIOSH)
- 仕事場での食物または飲料の保管と摂取は、ナノ材料が取り扱われる所を避けなければならない。手洗い設備を設置し、労働者に食べたり、休憩するとき、或いは現場を去る前に利用することを励行させる。(NIOSH)
- 実験室/作業場を居室と分離することを考慮しなければならない。実験室/作業場は、飲食禁止とし、出る際は、作業着を着替え、手洗い、洗眼が可能な場所を設置する。そのような場所の設置が不可能な場合には実験室/作業場内部で区分けしてもよい。(経産省委託ガイドライン)

#### エ 呼吸用保護具を使用すべき場合

- ナノマテリアルを直接取り扱う労働者は適切な保護具（や作業衣）を着用すること。（通達）
- 技術的保護対策が不十分な場合や実行できない場合は、呼吸用保護具（例えば、P2、FFP2、P3、FFP3 の保護レベルのフィルターをハザードアセスメントに基づいて選択する）のような個人用保護対策がひとつの適切な方法である。（Baua）
- 暴露を制御するための処置を開始した後でなお、ナノ粒子への労働者の気中暴露が懸念されるままならば、マスクの使用は労働者暴露をさらに減らすことができる。（NIOSH）

#### オ 呼吸用保護具に求められる性能要件及び使用上の留意事項

##### <呼吸用保護具の性能>

- 粒子サイズが **2-200nm** の粒子については、粒子サイズが小さくなるほどフィルターのろ過効果は高くなる。これは **200nm** 以下の粒子は非常に拡散しやすいため、フィルターの材質の中を通るときに、その粒子がフィルターの繊維に衝突して吸着するためであろう。  
**Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz (BGIA)** による測定値では、**14-100nm** の粒子サイズの塩化ナトリウムに対する 3 種の **P3** フィルターの粒子数による“総数透過率 (total number penetration efficiency)”は **0.011-0.026%** であり、このことを証明している。**P2** フィルターでは粒子数で表される透過率は **0.2%** であった。  
（Baua）
- **NIOSH** は、浄化マスクの空気の濾過性能をテストし、認定する。  
（NIOSH）
- 単層繊維濾過理論によると、**0.3um** より大きな粒子は衝突、さえぎり  
と重力沈降によって最も能率的に集められ、粒子が **0.3um** 未満は拡散  
か静電引力によって最も能率的に集められる。およそ **0.3um** の粒子の  
通過は、これらの粒子が最も通過しやすい範囲にあると考えられるの  
で、最悪のケースを代表する。（NIOSH）
- 単層繊維濾過理論によると、最も通過しやすい粒径以下では、粒径の  
減少に伴い、濾過効率は増加する。この傾向は粒子が極端に小さくなり  
蒸気分子のようにふるまうようになるまで続く。粒子が分子サイズ  
に近づくと、熱的反撥理論の対象になり、粒子はフィルターを通して  
文字通り撥ねる。その結果、粒子通過は増加する。（NIOSH）
- **NIOSH** は、最近、ミネソタ大学と **3-100nm** の範囲の粒子のマスク材  
料の収集効率の研究に資金供給の契約をした。この研究において、研

究者はフィルターを通してのナノ粒子の通過が従来の濾過理論の予想通りに粒子サイズが 3nm まで小さくなるまで減少することを観測した。ナノ粒子の熱反撥の証拠は研究したサイズの範囲では、見られなかった。(NIOSH)

- 呼吸保護の考え方 (2006/11/29 エアロゾルシンポジウム ; 「ナノ粒子と呼吸用保護具」 明星敏彦より引用)
  - 呼吸用保護具 防護係数 =  $1 / \text{全漏れ率}$  (例: 粒子捕集効率 95.0% ならば、20)
  - 作業環境 濃度倍率 =  $\text{環境濃度} / \text{管理濃度、許容濃度等}$  (例: 環境濃度 1.0mg/m<sup>3</sup>、管理濃度 0.1mg/m<sup>3</sup>の場合、10)
  - 防護係数 > 濃度倍率 ならば良好、つまりマスクの中で有害物濃度が許容されるレベル以下になっている。

しかしながら、管理濃度や許容濃度などの労働衛生上のばく露限界濃度は定められていないので、どういう防護係数をもつ呼吸用保護具を選択するかの基準がない。ナノ粒子に対してはできるだけ呼吸用保護具に頼らない管理が必要である。(経産省委託ガイドライン)

<性能要件>

- ナノマテリアルの吸入を防止する適切な呼吸用保護具を、必要な数量備え、有効かつ清潔に保持すること。呼吸用保護具は防じんマスクの規格(昭和63年労働省告示第19号)に基づく国家検定に合格したもので、粒子捕集効率が99.9%以上のもの又はそれと同等以上のものを使用するのが望ましい。(通達)

<使用上の留意事項>

- 呼吸保護具の使用が必要な作業では、その使用制限時間を遵守し(、職業病予防のための健康診断を行わ)なければならない。(Baua)
- マスクが仕事場で使われることが必要であるとき、職業安全衛生管理局(OSHA)の呼吸保護標準(29のCFR1910.134)は以下の要素を含むマスクプログラムの確立を義務付ける。(1)マスクを着用しての作業能力の評価、(2)定期的なトレーニング、(3)定期的な環境モニタリング、(4)マスクのフィッティングテストと(5)マスクのメンテナンス、点検、掃除と保管。標準は、また、マスクの選択が作業場と各タイプのマスクの限界について知識のある人によっておこなわれなければならないことを義務づけている。(NIOSH)

カ 保護手袋の要件及び使用上の留意事項

<要件>

- 保護手袋はナノマテリアルの皮膚への付着を防止する適切な材質のものを使用すること。(通達)
- 保護手袋の選択においては、手袋の材質が適切であることを確認しなければならない。手袋の材質は実際の使用条件下における最大の使用時間に対する要求を満たすものでなければならない。これに関連する重要な基準は浸透時間（手袋の材質とその材質の強度に依存する破過時間（break through time））である。(Baua)

<使用上の留意事項等>

- 保護手袋は有効かつ清潔な状態を保持するために使い捨てとすることが望ましい。なお、使用した保護手袋を廃棄する場合は袋に封入し適切に廃棄すること。(通達)
- 物質の特性を考慮すれば、保護手袋、（隙間のない安全ゴーグル及び保護衣）が必要になることもある。(Baua)
- 適切な保護具（例：手袋）を使用せずに、液体媒体中のナノ材料を扱った作業は、皮膚暴露のリスクを増大させるであろう。(NIOSH)

キ ゴーグル型保護眼鏡の要件、使用すべき場合及び使用上の留意事項

- ゴーグル型保護眼鏡を、必要な数量備え、有効かつ清潔に保持すること。(通達)
- 物質の特性を考慮すれば、（保護手袋、）隙間のない安全ゴーグル（及び保護衣）が必要になることもある。(Baua)

ク 作業衣の要件、使用上の留意事項及び脱着時等の管理方法

- ナノマテリアルを直接取り扱う労働者は適切な（保護具や）作業衣を着用すること。(通達)
- 作業衣からのナノマテリアルのばく露を防止するために、ナノマテリアルを取扱う作業では専用の保護衣を着用すること。保護衣は、その材質は不織布のものが望ましく、有効かつ清潔な状態を保持すること。なお、ナノマテリアルの付着した保護衣は、事業場外に持ち出さないこと。(通達)
- 作業目的以外の衣服の適切な汚染防止 (Baua)
- きれいな作業衣を着用する。作業衣は雇用主の責任で洗濯する。作業衣と個人の衣服を別々に保管する。(Baua)
- 物質の特性を考慮すれば、（保護手袋、隙間のない安全ゴーグル及び）保護衣が必要になることもある。(Baua)

- 手の保護に加えて、その他の部分の皮膚も保護具で保護する必要がある。これには保護衣、保護エプロン及び防護靴が含まれる。(Baua)
- 現在では、皮膚のナノ粒子への暴露防止のために、衣類または服装を選定するための利用可能なガイドラインはない。(NIOSH)

#### ケ 製品後の保管管理

- 適切な（出入り及び）保管に関する規則 (Baua)

### (3) 健康管理

- 呼吸保護具の使用が必要な作業では、(その使用制限時間を遵守し、) 職業病予防のための健康診断を行わなければならない。(Baua)
- 定期的健康診断を行うことが望ましい。検査項目については産業医の指示により、継続し、記録を保存すること。(経産省委託ガイドライン)

### (4) 労働（安全）衛生教育

#### ア 教育訓練の内容

- 労働者にナノマテリアルへの性状やばく露防止のための教育訓練を行うこと（通達）
- 適切な教育訓練及び指示 (Baua)
- 遊離ナノ粒子の物理的特性、特殊な対策の必要性及び粉じんの長期的な影響の可能性について目標を定めて関与する労働者を教育する。(Baua)
- 遊離ナノ粒子の物理的特性、特殊な対策の必要性及び粉じんの長期的な影響の可能性について目標を定めて関与する労働者を教育する。(Baua)
- 実験／作業手順等のマニュアルを制定し、実験者、作業者を十分に教育し、遵守させなければならない。また、実験者、作業者に対して、扱うナノ材料の有害性についての情報、作業環境測定結果などを知らせる。(経産省委託ガイドライン)

### (5) 非定常作業時（設備の補修等）の対応

- ナノ材料の生産あるいは加工に使用した機器及びプロセスの保守管理は、これらの作業を行う作業者に対して潜在的暴露リスクをもたらすであろう。(NIOSH)

## (6) 爆発火災防止対策

- ((事業場の) 情報収集には次のことが含まれる。) 酸化されやすい物質については火災及び爆発のリスクも含むこと。(Baua)
- (ここで述べた粉じんに対する保護対策に加えて、) 物質の特殊な性質に関連する対策を遵守する必要がある。それは、例えば酸化されやすいナノ物質の取扱いに対する特別な爆発防止対策や反応性又は触媒性ナノ物質の取扱いに対する特殊な保護対策である。(Baua)
- ナノスケールパウダーに関連する火事及び爆発のリスクを予測するための情報は不十分であるが、ナノスケールの可燃物は、その独特の特性を与えられた、同様の量の、より粗い物質よりも、リスクがより高い可能性がある。可燃物の粒子サイズの減少は、最小点火エネルギーを減少させ、燃焼可能性及び燃焼率を増加させることができ、比較的不活性な物質が燃えやすくなる可能性につながる。可燃性ナノ材料が空气中に分散すると、同様成分の非ナノ材料が分散するよりも、安全性に対するリスクがより大きくなる可能性がある。ナノ材料の中には、ナノスケールでの反応の進行を通して発熱するように設計されているものがある。こうした物質は、工業ナノ材料に独特の火事の危険性を呈する可能性がある。金属の場合は、粒子サイズが減少するにつれて、爆発リスクが著しく増大するものがある。(NIOSH)
- 径がナノメートルの粒子及びナノ構造をした多孔質物質は、反応速度を増大させるための、あるいは、液体や気体で生じる反応の必要温度を下げるための、有効な触媒として長年使用されてきた。その組成や構造次第で、ナノ材料の中には、その化学組成からだけでは予想されないような触媒反応を起こし、火事や爆発の可能性を増加させるものがある。(NIOSH)

## (7) 緊急事態への対応

- 応急処置
  - ・ 眼に入った場合：水で十分に洗う
  - ・ 吸入した場合：うがいし、口内を洗浄する。クリーンエア中に移動。
  - ・ 飲み込んだ場合：可能ならばはき出す。うがいし、口内を洗浄する。
  - ・ 皮膚に付着した場合：石けんで洗うかクレンジングクリームで拭き取る。(経産省委託ガイドライン)

#### 4 更なる研究・検討課題

(1) 情報の収集及び提供（産業保健関係者への情報伝達を含む。）（職業上のばく露限界値（occupational exposure limit）に関するものを含む。）

- 今後、独立行政法人労働安全衛生総合研究所のホームページに特設のページを設け、当該研究所の研究成果や各国の研究機関のガイドライン等情報発信を行う予定である。（通達）

(2) 有害性の調査（動物実験の実施等）

- 現在の知識では、ナノ物質へのばく露が、より大きなミクロスケールの粒子による影響とは異なる特別な影響を及ぼす可能性を除外することはできない。（Baua）
- ナノ粒子が皮膚を透過するかもしれないけれども、侵入が病気につながることを示唆する研究はほとんどなかった。（NIOSH）

(3) 疫学調査

作業記録の保管等

- 微粒子及び超微粒子を含むエアロゾルに暴露した作業者の疫学的研究では、肺機能の低下、有害な呼吸器症状、慢性閉塞性肺疾患、及び繊維症が報告された。さらに、ディーゼル排出微粒子あるいは溶接フェュームのような特定の微粒子に暴露した作業者の中で肺がんが高まっていることがいくつかの研究で発見されている。異なる粒子特性を有する可能性のある工業ナノ粒子に対するこれらの研究のもたらす影響ははっきりとしていない。（NIOSH）

(4) 測定手法

- ばく露量の測定（dose measurement）として、これまでの研究では、ナノ粒子の構造や組成とともに、比表面積や粒子数濃度のような特性の測定が重要であることが指摘されている。この観点からは、粒子の質量（mass）の重要性は比較的低いものと考えられる。従って、標準的な重量測定法は、ナノ粒子に対するばく露量を測定する際には、付随的な方法としてのみ使用できる。（Baua）
- 現在まで採取した粒子は質量濃度に基づいて評価されている。しかし、質量に基づくナノ粒子の測定は参考程度の価値でしかない。ナノ粒子の総質量は、粒子の個数濃度が高くても比較的低い値にとどまる。とくに、空気中のナノ粒子の個々の測定結果は、ばく露測定法が現状ではまだ完全に標準化されていないために、お互いに比較できないこと

を忘れてはならない。(Baua)

- 標準化されていて一般的に受け入れられる方法は、ダスティネス (dustiness) (吸入性分画) 測定による作業区域の場の測定 (monitoring of work areas) である。科学的な検討では、この方法は不十分とみなされている。標準化された、かつ特に重要なこととして個人 (personal) 測定が可能な、粒子数と粒子サイズの測定方法の開発が必要である。将来、粒子数と粒子サイズ分布の測定に“走査型モビリティ粒径分析器”のような方法が使用できるようになれば、作業場でのばく露についてさらに詳しい情報が得られるだろう。

(Baua)

- 現在、作業環境におけるナノ粒子の測定技術に関して、国内であれ、国際的であれコンセンサスのとれた標準がない。(NIOSH)
- 暴露監視の尺度と方法に関係なく、ナノ材料の生産または処理の前にバックグラウンドデータ採取のため測定を行っておくことが重要である。(NIOSH)
- ナノメートルエアロゾル濃度のリアルタイム (直接読み取り) 測定は、器具の微小粒子検出感度によって制限される。(NIOSH)
- Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS) は、ナノエアロゾルを特徴づける研究ツールとして広く使われているが、作業現場での使用は、その大きさ、価格と放射性源を含むため、制限される。Electrical Low Pressure Impactor (ELPI) は、カスケードインパクト装置とリアルタイムエアロゾル電荷測定を組み合わせた粒径分布を測るためのもう一つの装置である。(NIOSH)

#### (5) HEPA フィルターの性能評価

- 高効率粒子捕集フィルター (HEPA) を備えたうまく設計された排気システムはナノ粒子を効果的に除去する。フィルターは、捕らえられる確率が最も低い粒子 (典型例として直径 300nm 程度) を使ってテストされる。より小さな粒子の捕集効率はこの粒径での捕集効率を上回る。(NIOSH)

#### (6) 発散、ばく露防止のための工学的対策

#### (7) 呼吸用保護具の性能評価

- 高効率粒子捕集フィルター (HEPA) を備えたうまく設計された排気システムはナノ粒子を効果的に除去する。フィルターは、捕らえられ

る確率が最も低い粒子（典型例として直径 300nm 程度）を使ってテストされる。より小さな粒子の捕集効率はこの粒径での捕集効率を上回る。（NIOSH）

- NIOSH は、浄化マスクの空気の濾過性能をテストし、認定する。（NIOSH）
- 単層繊維濾過理論によると、0.3um より大きな粒子は衝突、さえぎり  
と重力沈降によって最も能率的に集められ、粒子が 0.3um 未満は拡散  
か静電引力によって最も能率的に集められる。およそ 0.3um の粒子の  
通過は、これらの粒子が最も通過しやすい範囲にあると考えられるの  
で、最悪のケースを代表する。（NIOSH）
- 単層繊維濾過理論によると、最も通過しやすい粒径以下では、粒径の  
減少に伴い、濾過効率は増加する。この傾向は粒子が極端に小さくな  
り蒸気分子のようにふるまうようになるまで続く。粒子が分子サイズ  
に近づくと、熱的反撥理論の対象になり、粒子はフィルターを通して  
文字通り撥ねる。その結果、粒子通過は増加する。（NIOSH）
- NIOSH は、最近、ミネソタ大学と 3-100nm の範囲の粒子のマスク材  
料の収集効率の研究に資金供給の契約をした。この研究において、研  
究者はフィルターを通してのナノ粒子の通過が従来の濾過理論の予  
想通りに粒子サイズ 3nm まで小さくなるまで減少することを観測し  
た。ナノ粒子の熱反撥の証拠は研究したサイズの範囲では、見られな  
かった。（NIOSH）

（8）労働安全衛生法上の取扱い

（9）関係府省、機関等の連携