

(案)

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  
報告書

平成20年10月

## 目次

第1部 はじめに

第2部 ナノマテリアルの用途、生産量及び性状について

第3部 ばく露防止の予防的対策の検討の視点、範囲等について

第4部 ばく露防止の予防的対策に係る検討結果について

第5部 おわりに

## 第1部 はじめに

### 1 経緯

ナノマテリアルとはナノレベル ( $10^{-9}$  m) のサイズの大きさの材料を指す呼称である。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により、ナノマテリアル特有の物性を示すことが知られており、従来材料にはない優れた性質を有する新素材を得られる可能性が高いことから、国際的に積極的な研究開発が進められている。ナノマテリアルについては既にカーボンブラック、シリカ、酸化チタン、酸化亜鉛等が生産されており、使用用途もタイヤ、シリコーンゴム、化粧品、医薬品等に幅広く使われている。さらに、近年カーボンナノチューブを中心に研究開発が積極的に実施されており、今後更に多くの種類のナノマテリアルが様々な用途に用いられていくことが予想される。

一方、ナノマテリアルの生体影響に関する研究は世界各地で行われているものの、十分な知見が得られているものではなく、生体へは有意な影響を与えない等の報告がなされている一方で、一部の学術論文において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等もなされているところである。

今後、ナノマテリアルの生産・利用の拡大に伴い、その製造、取扱等に従事する労働者が増加することが予想される中で、当該労働者の健康障害を未然に防止する観点から、現在、化学物質管理に関する基本的な考え方として国際的に広く知られている「予防的考え方」に基づき対策を講じることとし、厚生労働省では労働現場におけるナノマテリアルに対する当面のばく露防止のための予防的対応について取りまとめ、平成20年2月7日に通達「ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面のばく露防止のための予防的対応について」を発出し、関係団体に会員その他関係事業場に対して広く情報提供することを求めるとともに、行政として通達が広く周知されるよう努めているところである。

労働現場におけるナノマテリアル対策の実効を上げるためには、作業現場の実態を踏まえた、より具体的な管理方法を示すとともに、ばく露防止対策上の現状と課題についても検討していく必要があることから、今般、学識経験者等を参集し、「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」(座長：福島昭治 中央労働災害防止協会・日本バイオアッセイ研究センター所長)を設置し、ナノマテリアルのばく露防止対策について検討を行い、本報告書を取りまとめた。

2 「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」 参集者名簿 (敬称略)

- 大前和幸 慶應義塾大学医学部衛生学公衆衛生学教室教授  
小川康恭 独立行政法人労働安全衛生総合研究所研究企画調整部長  
唐沢正義 労働衛生コンサルタント  
小西淑人 (社) 日本作業環境測定協会調査研究部長  
庄野文章 (社) 日本化学工業協会 REACH タスクフォース事務局長兼化学物質管理部長  
田中茂 十文字学園女子大学人間生活学部食物栄養学科衛生学公衆衛生学研究室教授  
名古屋俊士 早稲田大学理工学術院教授  
○福島昭治 中央労働災害防止協会・日本バイオアッセイ研究センター所長

(臨時参集者・ナノテク関係)

- 小川順 ナノテクノロジービジネス推進協議会社会受容・標準化委員会委員  
蒲生昌志 独立行政法人産業技術総合研究所化学物質リスク管理研究センターリスク管理戦略研究チーム長  
菅野純 国立医薬品食品衛生研究所安全性生物試験研究センター毒性部長  
甲田茂樹 独立行政法人労働安全衛生総合研究所有害性評価研究グループ上席研究員  
高田礼子 聖マリアンナ医科大学予防医学教室講師  
明星敏彦 学校法人産業医科大学産業生態科学研究所労働衛生工学研究室准教授

○：座長

### 3 検討会開催状況

#### 第1回 平成20年3月3日（月）

- ・ 検討会の設置について
- ・ ナノマテリアルについて
- ・ 厚生労働省等におけるこれまでの取り組みについて
- ・ 検討会の進め方等について

#### 第2回 平成20年4月4日（金）

- ・ ナノマテリアルの範囲について
- ・ ナノマテリアルの開発状況について
- ・ ナノマテリアルの計測技術の開発について

#### 第3回 平成20年5月2日（金）

- ・ ナノマテリアルの健康影響について

#### 第4回 平成20年5月30日（金）

- ・ ナノマテリアル取扱いに関する労働衛生の現状と対策について－アンケート結果から
- ・ 通達への対応について
- ・ 検討課題について

#### 第5回 平成20年7月9日（水）

- ・ ばく露防止の予防的対策について

#### 第6回 平成20年7月30日（水）

- ・ ばく露防止の予防的対策について

#### 第7回 平成20年8月28日（木）

- ・ ばく露防止の予防的対策について

#### 第8回 平成20年10月1日（水）

- ・ 報告書（案）について

#### 第9回 平成20年10月31日（金）

- ・ 報告書（案）について

## 第2部 ナノマテリアルの用途、生産量及び性状について

### 1 我が国におけるナノマテリアルの用途・生産量

厚生労働省が平成19年度に実施した委託調査によると、ナノマテリアルの用途・生産量は図表1及び図表2のとおりである。

この調査においては、粒子径（又は構造の一边）が概ね1~100nmのナノマテリアルを対象とし、対象物質は経済協力開発機構（OECD）工業ナノ材料作業部会において代表的ナノマテリアルとして検討されている14物質及び調査の過程で把握された7種類、計21種類のナノマテリアルについて、用途・生産量の調査が行われた。粒子径は、炭素系のナノマテリアルが最も小さく、フラーレンでは粒子径が1nm以下であり、単層カーボンナノチューブでも、その径は1nmほどであった。

用途としては、家電・電気電子製品、化粧品、塗料・インクに多くのナノマテリアルが使用されている。種類別では、シリカ、銀+無機微粒子、酸化チタン、ナノクレイ、酸化亜鉛が多くの分野で使用されている（図表1参照）。

使用量については、使用量が多い順に、カーボンブラック、シリカ、酸化チタン、ニッケル、顔料微粒子、アルミナ、酸化亜鉛となっている（図表2参照）。

主なナノマテリアルの使用状況は次のとおりである。

#### (1) カーボンブラック

2006年の国内使用量は約83万トンであり、ゴムや樹脂に混練して使用されている。全体の95%がタイヤに使用されている。利用のメリットとしては導電性、着色性が挙げられる。

#### (2) シリカ

2006年の国内使用量は約13,500トンであり、シリコーンゴム、FRP、塗料等に使用されている。利用のメリットとしては、強度向上、絶縁性、耐水性が挙げられる。

#### (3) 酸化チタン（ルチル型結晶）

結晶形の違いによりルチル型とアナターズ型があり、ルチル型の方が生産量が多い。2006年の国内使用量は約1,250トンであり、化粧品、トナー、自動車塗料等に使用されている。利用のメリットとしては、紫外線カット、電荷調整剤、光触媒が挙げられる。

#### (4) 酸化亜鉛

2006年の国内使用量は約480トンであり、化粧品等に使用されている。利用のメリットとしては、紫外線カット、透明性向上が挙げられる。

(5) 単層カーボンナノチューブ

2006年の国内使用量は約100キログラムであり、樹脂やセラミックスに混練して使用されるが、用途としては研究開発中である。利用のメリットとしては、軽量化、導電性付与が挙げられる。

(6) 複層カーボンナノチューブ

2006年の国内使用量は約60トンであり、半導体トレイ等に使用されている。利用のメリットとしては、導電性付与、高強度、電磁シールドが挙げられる。

(7) フラーレン

2006年の国内使用量は約2トンであり、スポーツ用品に使用されている。利用のメリットとしては、反発性能の向上、軽量化、強度向上が挙げられる。

(8) デンドリマー

デンドリマーとは、中心から規則的に分岐した構造を持つ樹状高分子のことである。コアと呼ばれる中心部分と、デンドロンと呼ばれる側鎖部分から構成される。コアはデンドロンによって覆われており、外界と遮断された環境にあるために、特異な発光挙動や反応性を示すことが明らかとなり、現在、新しい機能物質として期待されている。

2006年の国内使用量は、紙用途として約50トン、化粧品用途として数トンであり、紙用途での使用が多い。紙用途の使用形態としては紙コーティング剤がある。利用のメリットとしては、紙用途ではレオロジー（流動特性）コントロール、化粧品用途としては、撥水性、撥油性が挙げられる。

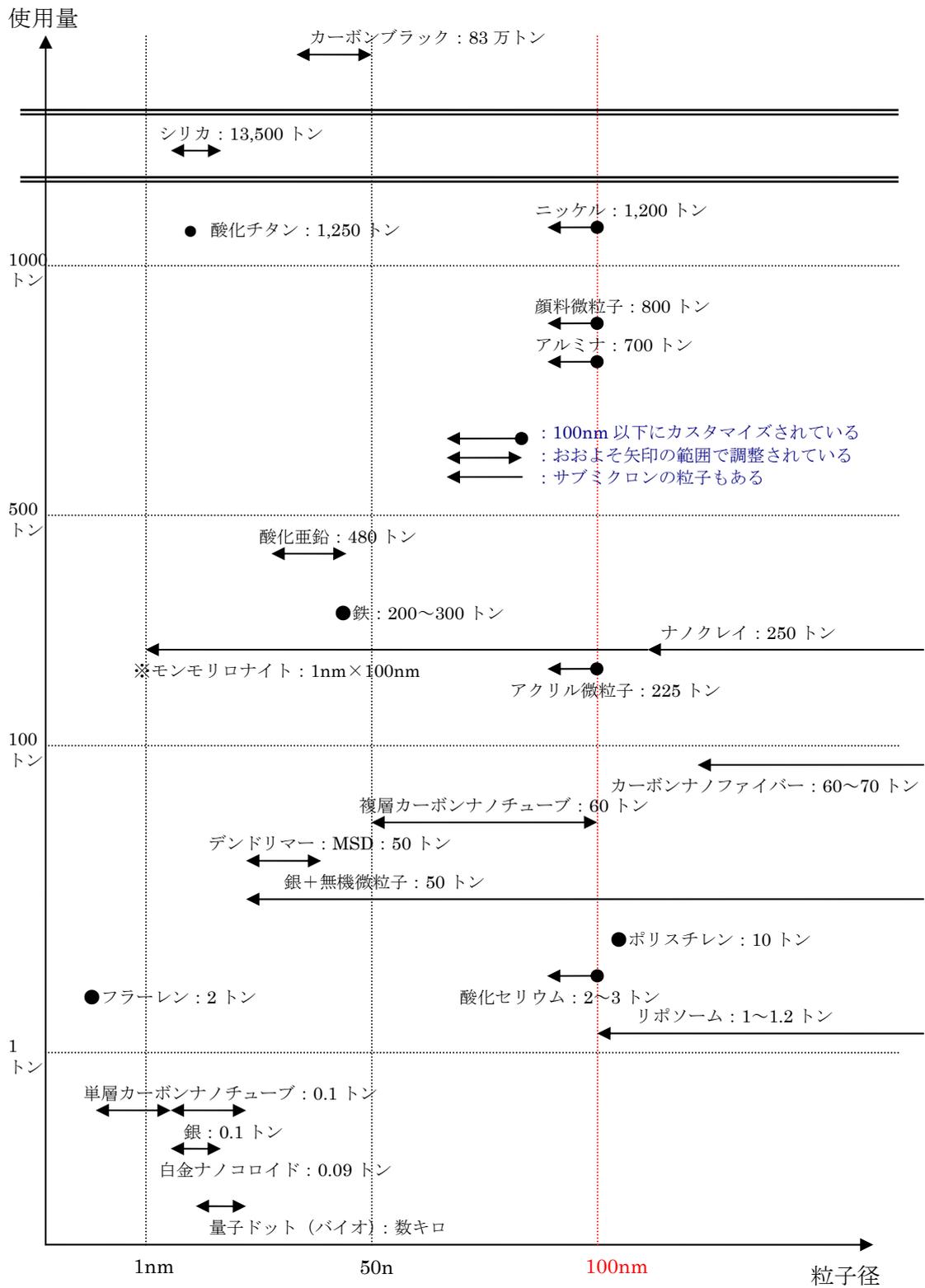
図表1 ナノマテリアル別の用途の状況

	医薬品	食品・ パッケージ	化粧品	繊維	家庭用 品・ス ポーツ	家電・ 電気電 子製品	塗料・ インク	その他 紙加工	○の 素材 別計	△の 素材 別計	素材 別計 合計
フラーレン	△		○		○	△			2	2	4
SWCNT						○			1	1	2
MWCNT	△			△		○	○		2	2	4
銀	△					○△		△触媒	1	3	4
銀+無機		○	○	○	○	○	○		6	-	6
鉄						○			1	-	1
カーボンブ ラック			○			○△	○	△高品 質タイ ヤ	3	2	5
酸化チタン			○	○	○	○	○△	○	6	1	7
アルミナ						○△	△		1	2	3
酸化セリウ ム			△			○			1	1	2
酸化亜鉛	○		○	○	○	△	○		5	1	6
シリカ	○	○	○	○		○	○	○	7	-	7
ポリスチレ ン			○			○	○△		3	1	4
デンドリマ ー	△		○			△		○	2	3	5
ナノクレイ	○	○	○			○	○	○農薬	6	1	7
カーボンナ ノファイバ ー					○	○		△風力 発電	2	2	4
顔料微粒子							○		1	-	1
アクリル微 粒子			○			○	○		3	1	4
リポソーム	○	△	○						2	1	3
白金ナノコ ロイド		○	○			△		○触媒	3	1	4
量子ドット	△					△		○研究 用試薬	1	2	3
ニッケル						○			1	-	1
○の用途別 計	4	4	12	4	5	15	10	-			
△の用途別 計	5	2	2	1	0	10	4	-			
用途別合計	9	6	14	5	5	25	14	-			

※○：現状の用途、△：将来可能性のある用途、○△：将来用途分野が拡がる領域

((株) 東レリサーチセンター／(株) 東レ経営研究所 (TRC/TBR) 調べ。)

図表2 主要ナノマテリアルの使用量と粒子径



((株) 東レリサーチセンター / (株) 東レ経営研究所 (TRC/TBR) 調べ。)

## 2 ナノマテリアルの性状

### (1) ナノマテリアルの物性

物質の諸特性（電氣的、光学的、磁氣的等の性質）の多くは、その物質中の電子の挙動を反映したものである。ナノマテリアルでは結晶のサイズが小さくなることにより、電子の状態が変化し、通常の大きな物質にはないような現象が生ずる。

化学的な性質としては、ナノサイズになると反応性が高まる。これは、化学反応は、基本的には物質の表面で起こるものであるが、ナノサイズになるにしたがって単位質量当たりの表面積である比表面積が大きくなることから、比表面積の増大により反応性が高まる。

力学的な性質としては、ナノサイズになると単位サイズあたりの強度が高まる。これは、材料のサイズを小さくすると欠陥が少なくなるためである。また、結晶粒径が小さくなるほど、硬度が増す。例えば単層カーボンナノチューブは鋼ワイヤーの5～20倍の強度であり、弾性率は鋼ワイヤーの約20倍である。

電氣的な性質としては、通常、物質に電圧をかけると電流が電圧に比例して連続的に流れるが、ナノサイズになると電流の値は不連続の値を取るようになる。

磁氣的性質としては、通常使用している磁石は小さな磁区の集まりであるが、ナノサイズになると、ナノマテリアルそのものが1つの磁区に相当する物質にかわり、それが非常に高い保持力を持つ。

光学的性質としては、金属光沢として観察されるような物質も、小さくすると着色するという現象が起き、サイズによって色の出方も変わってくる。

### (2) ナノマテリアルの生体への影響

ナノマテリアルは、一部を除き、近年急速にその利用が進んでいるものであり、あわせて生体への影響についても調査研究が進められているものの、ナノマテリアルの生体への影響については十分解明されているものではない。これまでに、カーボンブラック、カーボンナノファイバー、フラーレン、カーボンナノチューブ、二酸化チタン、金属微粒子、金属酸化物等のナノマテリアルについて、マウスやラットを用いた試験等が行われており、一部の物質により炎症反応等が生じることが判明している。また、多層カーボンナノチューブのマウスへの腹腔内注入試験や同様の試料によるラットの陰嚢腔内投与により中皮腫が発生したとの研究報告もなされているが、小動物を用いた長期の吸入ばく露試験はまだ実施されておらず、人に対する健康影響を評価するためには、さらなる研究が必要である。

## 第3部 ばく露防止の予防的対策の検討の視点、範囲等について

### 1 規制及び対策の現状

ナノマテリアルはナノサイズの微細な粒子または繊維状のものとして存在し、一般環境下では粉状を呈する。一部のナノマテリアル、例えば、カーボンブラック、酸化チタンなどの製造・取扱い作業は粉じん作業に該当する場合があります、その場合には、じん肺法、粉じん障害防止規則の労働安全衛生上の適用を受けることとなり、法令に基づき、所要の設備対策、作業管理、健康管理等が求められる。しかし、これらの法令の適用はナノマテリアルであることを理由としたものではなく、あくまでも物質名とその取扱いが粉じん作業に該当することから、法令が適用されるものである。

ナノマテリアルへのばく露の実態や人への健康影響は未解明な点が多いものの、小動物を用いた実験で生体への影響が示唆されるとともに、近年、ナノマテリアルの利用が急速に進み、今後、ナノマテリアルの製造・取扱い作業に従事する労働者が増加することが見込まれるため、現行の労働安全衛生関係法令では、ナノマテリアルであることに着目した規制はないが、予防的観点から、平成20年2月に労働基準局長名の通達「ナノマテリアル製造・取扱い作業現場における当面のばく露防止のための予防的対応について」を発出し、関係事業場におけるばく露防止対策の実施を求めている。

### 2 検討の範囲

厚生労働省の当面の対応として、上記局長通達が発出されているところであるが、ナノマテリアルについては、人への健康影響を含めて解明されていないことが多い中で、予防的観点から適時適切な対応を図っていくことが重要であることから、本検討会においては、ナノマテリアルに係る海外を含めた対策の状況、最新の科学的知見、製造・取扱い事業場での管理の状況等を踏まえ、次の事項を検討することとした。

- (1) 管理の対象とすべきナノマテリアルの範囲について
- (2) ナノマテリアルに係る当面のばく露防止対策及び今後の課題について
- (3) ナノマテリアルに係る労働安全衛生の観点からの規制のあり方について

### 3 検討の視点

- (1) ナノマテリアルについては、いわゆる許容濃度等のばく露管理の目安となる数値が存在しないため、ばく露量やばく露濃度に基づいて管理を行うという従来の手法を採用することができない。このため、近年、化学物質管理を巡って世界的に広く知られている「予防的考え方」に基づいて対策

を検討することとした。

- (2) 対策の検討に当たっては、最新の科学的知見、事業場での管理の実態、技術の進歩等を踏まえ、実行可能性のある最善の方法を求めることとした。
- (3) ナノマテリアルは一般環境下では粉状で存在すること、ナノサイズとなることによって同様の電氣的、化学的、物理的特徴を示すことに加え、現時点ではナノマテリアル毎の有害性も明確になっていないことから、ナノマテリアルの当面のばく露防止対策としては、個別の物質毎に固有の対策を検討するのではなく、ナノマテリアルに共通したばく露防止対策について検討することとした。

#### 脚注。 予防的考え方

予防的な取組方法の考え方としては、平成4年（1992年）の環境と開発に関する国連会議における環境と開発に関するリオ宣言の第15原則で「予防的方策は、各国により、その能力に応じて広く適用されなければならない。深刻な、あるいは不可逆的な被害のおそれがある場合には、完全な科学的確実性の欠如が、環境悪化を防止するための費用対効果の大きな対策を延期する理由として使われてはならない。」と規定されている。

また、2002年のヨハネスブルクサミットで、2020年までに、人や環境への影響を最小限にする方法での化学物質の製造・取扱いを可能にするような化学物質管理を達成するという目標が国際的に合意され、それを実現するための方策として2006年に採択されたSAICM（国際的な化学物質管理のための戦略的アプローチ）において、予防的考え方の採用が謳われている。

## 第4部 ばく露防止の予防的対策に係る検討結果について

### 1. 基本的事項に係る検討結果

#### (1) 対策の対象とするナノマテリアルの範囲について

通達においては、対象とするナノマテリアルを「元素等を原材料として製造された固体状の材料」としており、人工的に製造したものに対象範囲を限定している。自然界には人工的に製造されたもの以外にも様々なナノレベルのサイズの物質が存在していると考えられるが、現在労働衛生上、このような物質による問題は特段懸念されていないことから、自然界に存在するナノレベルのサイズの物質は対象外として差し支えないと判断する。また、通常の製造等の過程で非意図的にナノレベルのサイズの物質が発生している可能性はあるものの、これについても同様に対策の対象外として差し支えないと判断する。なお、ナノマテリアルの非意図的な発生について特段の知見が明らかとなった場合には対策の対象とすることが適当である。

次に、対策の対象とするナノマテリアルの大きさについては、通達では、「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。」としているが、諸外国での定義もほぼこれと同様であり、現行の範囲でよいと考える。

なお、通達ではナノ粒子の凝集体も対策の対象としているが、凝集したナノ構造体は生体外 (in vitro) での試験では容易に分離しないものの、体内に入った場合には生体の強い作用を受け、マクロファージによる作用や酸化還元作用によって分離することがフラーレン等の試験により分かってきており、通達に示すように、凝集したナノ構造体の大きさが 100nm を超えていても、それを構成する内部のナノ粒子の大きさが 100nm より小さい場合には、対象に含めることが適当である。

対象とするナノマテリアルについては、研究開発の発展により今後増加していくと思われるが、次の 14 物質については OECD が検討対象としているものであることから、少なくともこれらの物質は管理の対象に含まれるべきである。

- ① フラーレン (C60)
- ② 単層カーボンナノチューブ (SWCNTs)

- ③ 多層カーボンナノチューブ (MWCNTs)
- ④ 銀ナノ粒子
- ⑤ 鉄ナノ粒子
- ⑥ カーボンブラック
- ⑦ 二酸化チタン
- ⑧ 酸化アルミニウム
- ⑨ 酸化セリウム
- ⑩ 酸化亜鉛
- ⑪ 二酸化ケイ素
- ⑫ ポリスチレン
- ⑬ 樹状高分子 (dendrimers)
- ⑭ ナノクレイ

## (2) 対象とする労働者について

ナノマテリアルにばく露する可能性があるのは、ナノマテリアル又はナノマテリアルを含有する製剤等を製造し、又は取り扱う作業である。ナノマテリアルが使用された製品を取り扱う場合、当該製品中にナノマテリアルが練り込まれる等、安定的な状態で存在し、製品から容易に遊離しない状態が保たれるのであれば、ばく露する可能性はほとんどないと考えてよいが、当該製品を廃棄する際等には、製品内部からナノマテリアルが放出され、従事する作業者がばく露する可能性が否定できない。そのため、対象とする労働者はナノマテリアルを製造し若しくは取り扱う作業（設備、機器等の修理、点検等を含む。また、研究目的で製造等をする場合も含む。）又はナノマテリアルを含む製品の廃棄やリサイクル作業に従事する労働者（監督者を含む。）とする。

## (3) ナノマテリアルへのばく露の経路について

ナノマテリアルへのばく露の可能性のある経路としては、次のような経路が想定される。

- ア. 作業環境中の浮遊粒子の最も一般的なばく露経路である、吸入 (inhalation) による、肺へのばく露
- イ. 吸入による別のばく露経路である、鼻腔の神経の末端からの体内への侵入
- ウ. 皮膚を通しての体内への侵入
- エ. 目の粘膜からの体内への侵入

オ. 経口摂取による体内への侵入

(4) ナノマテリアルに関する製造・取扱い作業及びばく露の可能性について製造・取扱い作業に該当する作業の例としては、次のものがある。

- ・ 製造、
- ・ 荷受け、
- ・ 原材料や製品の秤量、
- ・ 装置への投入（樹脂等との混練や原材料の投入等）、
- ・ 製造・加工装置からの回収、容器などの移し替え（原材料の投入、中間品の移し替え等）、
- ・ 装置や容器の清掃・メンテナンス、
- ・ その他（ナノマテリアル含有製品の廃棄、リサイクル等）

これら全ての作業において労働者のばく露する可能性が否定できない。

（独）労働安全衛生総合研究所が（独）産業技術総合研究所と共同で平成19年9月から平成20年2月に実施したアンケート調査の結果（以下、「アンケート結果」という。）では、荷受けの工程では他の工程と比較して若干低くなっているものの、全ての作業工程で労働者がばく露の可能性を感じていると回答している。この他、ナノマテリアルを含む製品をリサイクルする作業（ばらす作業）においても労働者へのばく露の可能性が考えられる。

なお、粉体の場合、液体中に分散した状態の場合、樹脂等の固体に練り込まれている場合等、ナノマテリアルの形態・状態により、人のナノマテリアルへのばく露の可能性が異なる。ナノマテリアルの形態・状態によりばく露の状況がどのように異なるかについては、個々の作業内容にもよる。液体中に分散した状態であり、且つ、蒸発等により気中に放出される可能性を抑えた場合や、樹脂等に練り込まれバルク材料に固定化された状態では、その取扱いにおけるばく露リスクは極めて小さくなるものと考えられる。逆に、粉体の取扱いの場合は、ばく露のリスクは高くなると考えられる。

## 2. 個別対策に係る検討事項及び検討結果

### (1) 作業環境管理について

#### ア ばく露状況の計測評価（ばく露評価）

ナノマテリアルの作業環境中への発散状況の把握やナノマテリアルの

ばく露防止対策の有効性を確認するためには、作業環境中のナノマテリアルの濃度を測定することが必要であるが、ナノサイズの粒子等を測定するには課題が多い。

ナノサイズの粒子の測定機器としては、粒径別に個数濃度を測る SMPS (走査型電気移動度粒径分析器 (Scanning Mobility Particle Sizer))、粒子の総個数を測る CPC (凝縮粒子計数器 (Condensation Particle Counter))、粒子の総表面積を測る DC (粒子表面積計 (Diffusion Charger-based Surface-Area Monitor))、また、捕集した粒子の電子顕微鏡観察等が用いられる。ナノマテリアル、特に溶解性の低いナノサイズの粒子では同じ物質、同じ量であっても比表面積が大きな微小粒子ほど生体影響が大きいことが指摘されていることから表面積濃度を測ることも検討されている。これらの他に、ナノサイズの粒子を測る機器ではないけれども、粒子状物質を測定する方法として、パーティクルカウンター、粉じん計、フィルターでの捕集分析がある。

ナノサイズの粒子の測定用機器は大型で高価なものが多く、SMPS は高価であるうえ、作業環境での計測に十分な耐久性があるとは言えない。CPC や総表面積を測る機器については、最近では作業現場に持ち込めるほど小さな機器もできているが、耐久性は不明である。測定機器の耐久性が低い場合、測定に伴って頻繁に機器のメンテナンスが必要とされることから、測定実施上の障害となる可能性が高い。また、作業場の現状を十分に把握するうえで、各測定機器の性能上の制約により、単一の測定機器では不十分な場合があり、その場合は数種類の測定機器が必要となる。測定機器に関しては、耐久性が高く、小型で作業現場に持ち込み易く、操作も容易な機器が求められている。

なお、現在、ナノサイズの粒子測定用に用いられる機器は大型のため、欧米においても一般的な個人曝露を測定する方法は用いられておらず、海外の論文でも環境中の空気をサンプリングして測定するような方法が実施されている。

測定結果の数値からだけでは、対象のナノマテリアルを測定したのかは分からず、客観的に判断する場合には成分を分析することが必要となる。例えば、ナノマテリアルが製造されているクリーンルーム内での測定であれば、何を測定したものであるか分かるが、外気の流入がある一般の作業場では、大気中のナノサイズの粉じんの影響を受けるため、測定値がナノマテリアルであるか、大気じんであるかは分からない。

作業場の環境を管理する観点からは、何かの指標で環境中の粉じんを測定し管理していくことも考えられる。

このようなナノマテリアルの測定の現状に鑑みると、当面、一般的に利用可能な測定器を使って、ナノサイズより大きな粒子を計測することにより、作業環境を管理していくことが実行可能な対応であると考える。

#### イ 密閉構造とすべき箇所及び要件

機器類等の定義としては、ナノマテリアルの製造工程のうちの1つの工程で使用される機械を製造装置といい、一連の製造装置をまとめて製造設備という。また、製造設備に加えて製造に関連した作業設備を施設といい、施設を内部に含む建築物を建屋という。

ばく露防止対策として、まず、ナノマテリアルの発生する製造装置は原則として密閉構造とする必要がある。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必要がある。なお、密閉系の装置であっても、メンテナンス等のために開放する必要がある箇所については、当該箇所に局所排気装置等を設置するか、又はグローブバッグを用いて作業することが必要である。

また、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（混練を含む）、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ようにする必要がある。ただし、これが困難な場合には局所排気装置等を設置する必要がある。アンケート結果では、懸濁液と混ぜる混練作業において、100%の労働者がナノマテリアルへのばく露を懸念していた。そのため、特に、懸濁液と混ぜ合わせたり、混練する作業は密閉化ないしグローブボックス内で作業する必要がある。

さらに、廃棄物の処理やリサイクルの作業においても、原則密閉構造とし、困難な場合には局所排気装置等を使用する必要がある。

#### ウ 局所排気装置等を設置すべき場所及び要件

ナノマテリアルの発生する製造・取扱い装置で密閉構造にできない箇所については、ナノマテリアルの飛散の防止のため、局所排気装置等を設置する必要がある。ナノマテリアルの製造・作業工程で、密閉化あるいは自動化ができず、局所排気装置等を設置することとなる具体的な工程としては次のものが挙げられる。

- ・ ナノマテリアル製造事業場において、ドライなナノマテリアルを作業者が直接取り扱わなければならない次の工程

合成したナノマテリアルの回収工程（連続化・自動化されているものを除く）

製品の秤量・梱包・袋詰め工程

- ・ ナノマテリアル取扱い事業場においては、入手したドライなナノマテリアルを加工・処理するために梱包等を開封したり装置に投入する次の工程

開封工程（搬入時に梱包されてきたナノマテリアルを装置に投入できるように梱包等を解く工程・作業）

小分け・秤量工程（一定量を装置に投入するために一部を計り取る作業）

投入工程（加工工程（ホッパーなど）に投入する工程）

なお、密閉されている製造装置や閉鎖系での作業であっても、補修・点検のために開放する箇所には、局所排気装置等を設置するか、又はグローブバッグを用いて作業する必要がある。

局所排気装置の型式としては囲い式フードが望ましい。また、装置が大きいと囲い式フードの設置が難しい場合があり、作業者の作業性を考慮するとプッシュプル型換気装置が望ましい場合もある。

更に必要な事項として、局所排気装置等を設置した後は、定期的な保守点検を行うことが重要である。

## エ 排気における除じん措置の方法

局所排気装置等の排気口は直接外気に向かって開放する必要がある。また、その際、排気からナノマテリアルが放出されないよう、ナノマテリアルを捕集できる高性能フィルターを局所排気装置等に設けることが必要である。

使用するフィルターについては、排気の最終的なろ過には HEPA フィルター又はこれと同等以上の性能を有するフィルターを設置すること。ナノマテリアルの粒径及び凝集の状態にもよるが、通常ナノマテリアルについては HEPA フィルターの捕集効率は充分であると思われる。

なお、HEPA フィルターは高性能であるが、使い捨てで、圧力損失が大きく、発じんの多い作業ではフィルターの頻繁な交換が必要となるとともに、大規模な設備に使用するには適していない。このため、HEPA フィルターを用いる場合は、HEPA フィルターの前に別のフィルターを設け、大きな粒子をそこで捕集し、HEPA フィルターの交換頻度を少なくすることが重要である。

また、ナノマテリアルは凝集している場合が多く、凝集体としてミクロの粒子になっている場合には、HEPA フィルター以外のフィルターでも捕集できる可能性がある。この場合、ナノマテリアルの大きさ、凝集の程度を勘案し、必要であれば粒径を分析し、捕集可能なフィルターを適切に選定する必要がある。バグフィルターのほか、導電性の低い物質の場合は、電気集塵機の使用も考えられる。

## (2) 作業管理

### ア 作業規程の内容

ナノマテリアルへのばく露等が生じないように適切に作業を実施するためには、ナノマテリアルの取扱いに関する作業規程を作成し、労働者を十分教育し、作業規定の内容を遵守させなければならない。当該作業規程には、取り扱うナノマテリアルの有害性についての情報、作業環境に係る情報などを含める必要がある。

### イ 床等の清掃方法

作業場の床や作業台等の清掃については、普通の掃除機や箒で掃除をすると逆にナノマテリアルを飛散させてしまう可能性が高い。そのため、HEPA フィルターを備えた掃除機による吸引、又はこれが困難若しくは適当でない場合には、湿った布による拭き取りによって行う必要がある。この場合、与湿のため、あらかじめ堆積したナノマテリアルを濡らして拭き取ることも有効である。なお、拭き取りに使用した布は袋に封入し適切に廃棄する必要がある。

### 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、その間に除染区域を設ける等により、作業衣等に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必要がある。

また、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必要がある。

### エ 呼吸用保護具を使用すべき場合

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、非定常時や非常時等での使用も考慮し、必要な数量備え、有効かつ清潔に保持する必要がある。

その上で、ナノマテリアル製造・取扱い作業に労働者を従事させる場

合には、労働者に有効な呼吸用保護具を使用させなければならない。

なお、ばく露防止対策の実施においては、安易に呼吸用保護具に頼るのではなく、まず設備的対策を優先すべきであり、それで充分除去できない有害物を除去するために呼吸用保護具を使用すべきである。

#### 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

労働者に使用させる有効な呼吸用保護具については、送気マスク等給気式呼吸用保護具、粒子捕集効率が 99.9%以上の防じんマスク又は JIS T8157 に適合した面体形、フェイスシールド形又はフード形の粒子捕集効率が 99.9%以上の電動ファン付き粉じん用呼吸用保護具とすること。これらのうち、防じんマスクについては、国家検定に合格したものを使用することが望ましい。

なお、呼吸用保護具の選択に当たっては、防護係数を考慮して行うこと。また、防暴の措置の必要な職場、暑熱の職場、職場が狭隘な場合等、各職場の状況に適合した呼吸用保護具を選択することが望ましい。

防じんマスクの使用に際しては、面体と顔面のフィットチェックを行い、良好な面体を選び、毎回の装着時にも同様にフィットチェックを実施すること。加えて、呼吸用保護具のメンテナンス、点検、掃除と適切な保管に努めることが望ましい。

#### カ 保護手袋の要件及び使用上の留意事項

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。保護手袋は、洗濯等により清潔な状態を保持することができるのであれば使い捨てでないものを使用することも可能であるが、有効かつ清潔な状態を保持するため、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が必要である。

さらに、保護手袋の脱着時等において、ナノマテリアルが皮膚に付着し、又はそのおそれが高い場合には、石けんで洗うかクレンジングクリームで拭き取ること。

#### キ ゴーグル型保護眼鏡の使用すべき場合及び使用上の留意事項

ナノマテリアルが目の粘膜から体内へ入り込む可能性も考えられるところであり、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が必要である。

#### ク 作業衣の使用上の留意事項及び脱着時等の管理方法

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、ナノマテリアルを直接取り扱う労働者は専用の保護衣を着用するとともに、ナノマテリアルの付着した保護衣は、施設外に持ち出さないこととする必要がある。また、保護衣は、その材質は不織布のものが望ましく、洗濯等により有効かつ清潔な状態を保持する必要がある。

#### ケ 作業記録の保管等

誰が、いつ、どのような作業に従事したかについて、作業記録を作成し、保管しておくことが望ましい。

### (3) 健康管理

ナノマテリアルのヒトへの健康影響については現時点では不明であり、引き続き労働者の健康管理に関する知見の収集に努める必要がある。

なお、現時点では、関係労働者の健康管理について、事業者が一般定期健康診断等により健康状況の把握に努めるべきである。

### (4) 労働安全衛生教育

ナノマテリアルのばく露防止対策の実効を上げるためには、ライン及びスタッフによる労働安全衛生管理の実施に加え、作業に従事する労働者自身にナノマテリアルの物理的・化学的特性、健康影響の可能性、作業環境管理対策、個人用保護具の使用等について理解させ、作業手順等のマニュアルを遵守させることが重要である。

特に、呼吸用保護具については、作業環境や作業の態様に合わせた適切な呼吸用保護具の選定が重要であり、また装着による漏れをなくすためにフィットネスを適切にすることが重要であることから、呼吸用保護具の適切な選択、装着方法、マスク面体と顔面との密着性による漏れ率の測定方法とフィットチェックの方法及び保管・管理について教育訓練を実施すること。

なお、呼吸用保護具の選択・使用に関する資料を参考のため、添付する。

### (5) 廃棄物処理等における対応

ナノマテリアルを含む製品の廃棄物としての処理及びリサイクル処理においては、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ようにする必要がある。ただし、これが困難な場合には局所排気装置を設置する必要がある。

また、呼吸用保護具等の必要な保護具を使用する必要がある。

さらに、カーボンナノチューブは750～850℃で分解することにより焼却処理できることが分かっており、このように各ナノマテリアルの物性に合った方法により適切に処理する必要がある。

#### (6) 非定常作業時（設備の補修等）の対応

ナノマテリアルの生産あるいは加工に使用した製造装置の保守管理、製造装置や作業場の清掃等の非定常作業時にはナノマテリアルにばく露する可能性が高くなるので、まず局所排気装置等でのばく露防止対策を徹底すべきであるが、それが困難な場合には、個人用保護具を使用して防護対策を実施する必要がある。

また、清掃時等の非定常作業においては作業の記録をとっておくこと。

#### (7) 爆発火災防止対策

物体がナノサイズとなることにより、比表面積が大きくなり、最小点火エネルギーが減少するため、比較的不活性な物質でも燃えやすくなる。ナノ材料が空気中に分散すると、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。

ナノマテリアルについては気中濃度の抑制、静電気の発生防止に留意する必要がある。また、反応炉等ナノマテリアルの製造工程においては、装置の起動、停止等において爆発することのないように注意する必要がある。

#### (8) 緊急事態への対応

緊急事態への対応については、緊急事態の判定基準を策定し、対策を策定しておくことが重要である。例えば、少量漏洩、大量漏洩の基準を定め、そのような事態が発生した場合に警報を出し、周囲の労働者に分かるようにすること、また、その場合、労働者が漏洩したナノマテリアルにばく露しないような作業手順を策定することが必要である。

ばく露した場合の応急措置としては、クリーンエア中での除じんのほか、眼に入った場合には水で十分に洗い、吸入した場合にはうがい又は口内を洗浄し、飲み込んだ場合には可能ならばはき出し、うがいし、口内を洗浄することが必要である。

### 3 更なる研究・検討課題

#### (1) 生体への影響に関する研究

ナノマテリアルの生体影響については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が、未だ知見が不十分な状況である。特に、労働現場での主要なばく露経路として考えられる吸入による呼吸器等への長期的な影響については、解明されていない。このため、小動物を用いた試験の実施等により有害性の情報を収集していく必要がある。実験の方法としては、基本的に労働衛生の面から見て、労働者がばく露する場合を想定して決めていく必要があり、吸入毒性、経皮毒性等に関する調査研究が中心となる。

なお、調査研究の実施に当たっては、ばく露装置の開発、キャラクターゼーション等試験の手法について困難が予想され、十分な検討が必要である。

また、現時点では、国内でのナノマテリアルの製造・取扱い作業に従事する労働者数は少ない一方で、ナノマテリアルの種類は多いことから疫学調査の実施は難しいところであるが、将来ナノマテリアルとの関係が懸念される疾病が発生した場合に疫学調査が実施できるよう、関係労働者の把握、作業の記録の保存等の措置を講じておく必要がある。

## (2) ナノマテリアルのばく露防止に係る工学的対策に関する研究

### ア ナノマテリアルの作業環境での挙動に関する研究

ナノマテリアルは凝集することが知られているが、実際の製造・取り扱い作業において、作業環境中ではどの程度のサイズで凝集し、浮遊しているのか、どの程度の粒度分布であるか、その場合の濃度はどの程度であるか等、ナノマテリアルの挙動については研究が進んでいない。これらはナノマテリアルの種類によっても、異なっているものと思われるが、これらを解明することは、正確な測定分析のためにも、適切なばく露防止対策のためにも必要であり、国際的な連携を含めて、研究を進めていく必要がある。また、得られた知見、情報は共有され、各国のばく露防止対策に活用されるべきである。

### イ ナノマテリアルの測定方法、測定機器及び推計手法の開発

事業場において簡易に実施できるナノマテリアルの測定方法及び測定機器の開発は今後の検討課題とする必要がある。

また、ナノマテリアルの測定が難しい現状であるので、ばく露状況についてシミュレーションで計算により推測する手法の開発も有効と思われる。

### ウ 発散、ばく露防止のための工学的対策

ナノマテリアルの製造・取り扱い作業には局所排気装置等の設置が必要であるが、どのような作業に、どのような型式・性能のものが有効で

あるかについて研究が必要である。また、作業環境の測定手法が確定した後には、全体換気装置の有効性についても確認すべきである。

#### エ 除じん装置の性能評価に関する研究

局所排気装置等からの排気の除じんに用いられるフィルターや除じん装置に関して更に研究等が進められるべきと思われる。フィルターのうち、HEPA フィルターの性能については比較的調べられており、ナノマテリアルの捕集は可能であると思われるが、ナノマテリアルの種類、サイズ毎の詳細な知見は十分とは言えない。その他のフィルターや除じん装置についてはさらにデータが不足している。ナノマテリアルは種類によってサイズが異なるうえ、電気的性質も様々である。また、凝集して存在することも多く、フィルター等での捕集に当たって不明な点が多い。そのため、有効な除じん装置の選択が可能となるよう、ナノマテリアルの種類、状態毎に除じん装置の性能を明らかにするための実証的な研究を進める必要がある。

#### オ 呼吸用保護具の性能評価

ナノマテリアルに対する防じんマスクのフィルタの実験室レベルでの捕集効率の結果が報告され始めていることより、今後、必要な知見が得られた段階で、各作業に対応し使用するフィルタのランクについて再度検討することが望ましい。

なお、今後の知見に基づき、ナノマテリアルに対応したマスクが具備すべき要件の基準、マスクの試験方法の基準の策定について検討すべきである。

また、マスク面体と顔面との漏れ率については通常の粉じんとナノマテリアルで異なる可能性があるので、漏れ率の測定試験はナノマテリアルで行う必要がある。

### (3) 情報の収集及び提供

既に、(独)労働安全衛生総合研究所のホームページを用いてナノマテリアル関係情報の発信がなされているところであるが、利用者が必要な情報を引き出しやすいように、集中的に研究情報等を収集し、検討し、再加工して、発信するとともに、全般的な情報をリンク等により関連づけて検索できるようホームページの充実が必要である。

なお、インターネットでの情報発信以外に、リーレットの活用や関係団体の広報誌等を通じて幅広い手段により情報を提供していくことも重要である。

その他、情報の収集に関しては、ナノマテリアルの関係事業場における

各種情報を広く集積し、ばく露防止対策に活用できるような仕組みを整えることも重要と思われる。

#### (4) 関係府省等との連携

関係府省との連携については、現在、内閣府を中心として各省の情報の交換等を実施しているところであるが、今後とも、関係する府省、関係機関等との連携により、ナノマテリアルに関する試験研究の推進及び労働者のばく露防止対策の実施に努めていく必要がある。

### 4. 労働安全衛生の観点からの規制のあり方

ナノマテリアルに対する安全衛生対策を実施するためには、ナノマテリアルに関する情報の共有と伝達が必要である。そのため、既にMSDS交付対象となっている物質についてはナノマテリアルである旨及びそれによる取扱上の注意事項等をMSDSに記載することとし、MSDS交付対象物質でない場合にも、MSDSを交付するよう自主的な対応を促進させることが重要である。

今後、既存化学物質には区分されない、全く新規のナノマテリアルが開発された場合、新規化学物質としての届け出が必要となるが、現在の化学物質の届け出制度ではナノマテリアルであることに着目した届け出とはなっていないことから、所要の整備を行うことが必要である。これについては、別途、専門家による検討が行われるべきである。

また、既存の化学物質であって、新たにナノサイズのもが開発された場合は、現行の体系では既存化学物質としか取り扱われない。ナノマテリアルの取扱については国際機関でも検討が行われており、その検討の動向にも留意する必要があるが、ナノサイズになると、ナノ特有の性質を示すことから、生体影響も既存の化学物質とは異なる可能性があり、当該物質をサイズの観点から区分して扱うことには合理性がある。少なくとも既に開発され、現在、製造・取扱いがなされているものを除き、今後新たに開発されるものについては、新規の化学物質として扱い、有害性の調査を実施することが望ましい。これについても、どのような規制にしていくのか別途専門家による検討を行うべきである。

なお、現行の有害性の調査については、化学物質の物性によっては、適用が難しい場合もあるとの指摘もなされていることから、広く適用可能な試験方法の検討がなされることが望ましい。

## 第5部 おわりに

労働災害防止の面からナノマテリアルの製造・取扱いに当たっての対策を、予防的観点に基づいて、現在において妥当と考えられる内容について検討してきた。

しかしながらナノマテリアルについてはその有害性をはじめとして未知な部分が多く、また、ナノマテリアルはサイズが極端に小さなことから測定方法をはじめとして従前の労働災害防止で活用してきた手法を十分に活かすことができない現状がある。

ナノマテリアルに関する労働災害防止対策としては、今般検討した内容を現在の作業現場に適応させていく努力が必要であるが、それに加えて現在不明な観点及び技術の及ばない面について研究開発等を実施し、これらの進捗に応じて本対策を今後も引き続き見直ししていく必要がある。