

---

---

論文

---

---

## ナノテクノロジーの進展と環境法

勝田 悟

1. はじめに
2. アセンブラー概念による環境規制の変化
  2. 1 LCA
    - (1) 原子、分子レベルの環境制御
    - (2) 資源供給の変化
  2. 2 資源循環規制の見直し
    - (1) 環境デザイン
    - (2) ゼロエミッション
    - (3) 長寿命性
3. 微小制御技術の向上
  3. 1 リスクの解明
    - (1) 新たな技術開発への期待
    - (2) コンセンサスを持った対処
  3. 2 新たなリスク
    - (1) 未知のリスク
    - (2) 予防
4. まとめ

### 1. はじめに

リチャード・ファイマンが1959年にカリフォルニア工科大学で行った講演で、原子レベルの微少な操作が潜在的に非常に大きな可能性を秘めていることを論じ、その後飛躍的に原子レベルの操作が向上した。近年注目される発生工学などバイオテクノロジー、最新の通信機器などに不可欠なナノメート

ルサイズの加工技術など実用化を目指した研究開発が進められ、さらに微小な素粒子の世界の解明に関しても基礎的な研究が始まっている。これら最先端技術は、極めて高度な環境保全を実現する可能性を持たせていることと同時に、生体または生態系へ新たなリスク発生の虞もある。環境法の規制のあり方自体も再検討する必要がある。

本研究では、ナノテクノロジーの進展による環境法の発展と新たなリスクへの対処について検討した。

## 2. アSEMBラー概念による環境規制の変化

### 2. 1 LCA

#### (1) 原子、分子レベルの環境制御

1981年にエリック・ドレクスラーが、米国科学アカデミー会報に分子テクノロジーに関する新しいアイディアを持った専門論文を発表した。ドレクスラーが考えた分子テクノロジーでは、分子や原子をナノテクノロジーを使って、直接あらゆる製品を作り出そうというものである。アSEMBラーという機械に、炭素や酸素、窒素などを入れ、パンや肉など食べ物から自動車、飛行機に至るまで、原子から組み立てて作り出す考え方である。ものを削り超微細なものを作り出すという考え方は、従来の技術の究極の姿であり、その後の半導体開発などで少しずつ実現していった。

アSEMBラーは、われわれの身の回りのものすべての物が約100余りの元素でできていることから、それら元素を組み合わせればどんな複雑なものも製造できるという考えに基づいている。ドレクスラーが論文を発表した同年には、IBM チューリッヒ研究所のゲルト・K・ビニッヒとインリッヒ・ローラーが走査型トンネル顕微鏡を開発した。この顕微鏡は、探針を使って、原子サイズで部分的に化学反応を起こすこともでき、超微細な電子素子の開発への応用が考えられている。ドレクスラーの考えたアSEMBラーに少

し近づいた開発であるともいえる。

その後もナノテクノロジーの研究開発が次々と進み、キセノン (Xe) など原子をつかって文字を描くことが可能となり、100ナノメートル (nm) 以下の3次元構造体も作り出すことも出来るようになった。また、生化学の面でも2ナノメートル (nm) しかないDNAも直接顕微鏡写真によって肉眼で見ることが可能になった。微小な化学物質を操作することで開発の実用化、普及が期待できる分野としては、計測・センサー精度の向上、合成・加工・製造における微細制御、分子構造など制御による新規材料の生成などがある。

バイオテクノロジーでは、10ナノメートル程度の遺伝子の配列操作もできるようになっており、自然の遺伝子配列を化学的に生成することも可能になっている。わが国では1984年から遺伝子バンクプロジェクトが始まり、米国では、1988年に遺伝子組換え操作により創られた動物に特許が認められている。さらにクローン技術も飛躍的に向上し、羊、サルをはじめ動物のクローン誕生に成功している。人のクローンに関してはわが国では倫理面から問題を重視し、2001年6月に施行された「ヒトに関するクローン技術等の規制に関する法律」によって禁止されている。無機物質の面からは、材料の軽量化、強度強化（鉄の約10倍）などで期待されているCFRP（Carbon-Fiber-Reinforced Plastic：炭素繊維強化プラスチック）が実用化、普及の段階に達し、航空機や自動車、コンピュータへと市場に広がりつつある。既に、無機炭素の精密な構造物によって特殊な性質を持つナノチューブ（carbon nanotube）やフラーレン（fullerene）が超強化材料、電子材料などに期待されている<sup>(1)</sup>。

これら製品は、原子レベルで制御され、構造解析が十分になされたものであるため、含有される成分のデータ管理が不可欠である。したがって、製品中に存在する化学物質の種類及びその構造は解析されていると考えられる。

この情報は、インバースマニファクチャリング（逆工場）を実施する際に極めて有効である。使用済製品からマテリアルリサイクルまたはケミカルリサイクルを高い制御のもとで実施できると考えられる。所謂、製造と使用済製品の処理処分がドレクスラーが考えたアSEMBラーに近い概念となる。

## （２）資源供給の変化

ナノテクノロジーを化学物質制御の面から考えると LCA（Life Cycle Assessment）における基礎情報は飛躍的に向上し、使用済製品は資源としての価値が高まり、製造、処理処分工程における環境負荷を減少させる可能性が拡大すると考えられる。この結果、原子レベルで製品の製造が実施されることで、無駄な化学物質（またはコスト）となる廃棄物が減少していくことが期待できる。これまで制定、施行されたりサイクル法のあり方も変化してくることが予想される。「使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律（以下、小型家電リサイクル法とする）」（2012年8月制定、2013年4月から施行）は、リサイクル対象の多くを金属など元素（プラスチックは別）としており、原子レベルのインバースマニファクチャリングといえ、環境保全としての化学物質リサイクル（環境負荷低減）より資源調達としての面が強くなるだろう。アSEMBラーが実現すれば、理想的には汚染物質はなくなる事となる。

しかし、製造工程における化学物質の環境中への放出は減少（理想的にはゼロ）できるが、製品使用時などからの環境中への放出による人または生態系への影響発生の可能性が無くなることはなく、特に微細な構造を持つ化学物質特有の新たな毒性などが生ずる虞がある。すなわち、ナノテクノロジーにおいて新たに生成される化学物質などの SDS（Safety Data Sheet）の事前の整備は予防の観点から非常に重要といえる。製品使用時においてゼロエミッションが可能となっても、予見が困難な事故時の対応における事前の情報整備（シミュレーション分析など）として必要と考えられる。

また、資源政策（資源の安定確保）の面からも廃製品中に含まれる希少な物質を回収することが必要となってきた。経済的に採掘できる資源量は有限であるため何れは資源調達が非常に困難になるためである。近年、貴金属をはじめ資源価格は上昇傾向であり、さまざまな政治的影響で一時的な価格の上下があっても中長期的には高騰することは確実である。

LCA でリスク分析をする場合に整備される曝露量（存在量、または確率）の情報は、回収可能な資源量の算出にとっても重要なデータである。小型家電リサイクル法制定前の2011年におけるわが国の廃棄資源についての推定（環境省試算）では、年間約65.1万トンの廃棄小型家電が発生し、有用な金属などの量は約27.9万トンあり、約844億円に相当するとしている。また、独立行政法人物質・材料研究機構「元素別の年間消費量・埋蔵量等の比較資料」（2008年1月11日発表）に基づき経済産業省が作成した「世界の埋蔵量に占める日本の都市鉱山の蓄積量」（使用中及び廃棄物を総合したわが国の都市鉱山量）では、金が約6,800トン（世界の埋蔵量の約16%）、銀が約60,000トン（世界の埋蔵量の約22%）、リチウムが15万トン、プラチナが2,500トン存在しているとしている。

「小型家電リサイクル法」の目的は、「使用済小型電子機器等に利用されている金属その他の有用なものの相当部分が回収されずに廃棄されている状況に鑑み、使用済小型電子機器等の再資源化を促進するための措置を講ずることにより、廃棄物の適正な処理及び資源の有効な利用の確保を図り、もって生活環境の保全及び国民経済の健全な発展に寄与すること（当該法第1条）」となっている。廃棄物の中に有用なもの、すなわち有価物である資源が存在していることを前提に、再資源化を促している。「小型電子機器等」とは、家電リサイクル法に規定する特定家庭用機器を除くもので、効率的な収集及び運搬が可能であると認められ（第2条1項）、廃棄物となった場合、再資源化に係る経済性の面における制約が著しくないと認められるもの（第2条

2 項)と定められている。なお、「再資源化」とは、「使用済小型電子機器等の全部、又は一部を原材料、又は部品その他製品の一部として利用することができる状態にすること」となっている(第2条3項)。したがって、資源供給政策面からのアプローチが非常に強い。

規制の対象となる具体的な電気機械器具は、施行令第1条に28種類(2013年3月現在)<sup>(2)</sup>が定められている。対象製品は、必ずしも小型家電とは言えないものも含まれている。再資源化の内容の基準としては、「破碎、選別その他の方法により、使用済小型電子機器等に含まれる鉄、アルミニウム、銅、金、銀、白金、パラジウム及びプラスチックを高度に分別して回収し、当該回収により得られた物に含まれる、“鉄、アルミニウム、銅、金、銀、白金、パラジウム、セレン、テルル、鉛、ビスマス、アンチモン、亜鉛、カドミウム、水銀、プラスチック”の再資源化、熱回収又は安定化を自ら行うか、又は当該再資源化等を業として行うことができる者に当該回収物を引き渡すこと。(当該法施行規則第4条4項[2013年3月現在])」となっている。資源として抽出されているものには、金属元素が複数含まれており、原子レベルの分離が必要になっている。

資源がほとんど無いわが国にとっては有望な資源で有り、無駄な資源採掘を防止し環境汚染・破壊を防止することも可能となる。しかし、金(または白金)の回収分離においては、途上国を中心にアマルガム(水銀と他の金属との合金：液体状の金属)を利用して、低い沸点を持つ水銀を熱で気化させる単純な分離方法を行っているため、新たな公害(水俣病)も生み出しており、その対策として2013年には「水銀に関する水俣条約(Minamata Convention on Mercury)」が採択されている。ナノテクノロジーは高度な技術であり、経済力がある国が戦略的に研究開発しているものであるため、物質の取り扱いに関して国際間で大きな格差が開きつつあることも明らかである。資源政策においては経済的視点が重要視される。資源そのものを生産

段階からインバースマニファクチャリングまで原子レベルで操作し、一製品におけるサービス量を増加させる（資源生産性の増加）ことによって、公害を発生させるような低い技術レベルでの資源生産の経済的価値を失わせることが必要である。資源生産性が低い資源供給に経済性がある限り、環境法において規制を実施していかなければ環境保全は極めて困難と考えられる。

## 2. 2 資源循環規制の見直し

### (1) 環境デザイン

資源リサイクルに関した法規制に関しても、前項で述べた「小型家電リサイクル法」をはじめその施行状況の変化に対応した規制の見直しが必要となってくる。ただし、「小型家電リサイクル法」は、廃棄物の減量化を目的とした他のリサイクル法とは異なり、都市鉱山といわれる製品中に含まれる化学物質を回収することに注目しているため、対象製品そのものを変更または拡大していくことになる予想される。

他方、規制対象製品を明確に定めリサイクルを図っているリサイクル法の運営においては、ナノテクノロジーの進展に合わせたリサイクル率の向上が可能となる。法令で定めるリサイクル率の目標も再検討が必要となるだろう。企業サイドの対応としては、LCA データを整備し、環境負荷を最小限にするための設計段階における検討がさらに進展すると考えられ、これには材料など調達する際のサプライヤーからの情報提供が重要となる。あるいは、詳細なグリーン調達基準を示し、設計に対応できる供給者を選択し製品を作っていくことになると考えられる。メーカーにおける LCA の実施及び情報整備に関して、多くが未だ十分でないのが現状であり、企業間格差も大きい。まず、サプライチェーンの管理を合理的に実施することが必要である。

廃棄された後のリサイクルを考えていなかった製品は、リサイクル法の対

象となったことで新たなコストを生じており、企業の大きな経済的な負担となっている。しかし、メーカーでは、設計段階で製品を構成する化学物質の種類を減少させ、リサイクル時に処理が困難な有害物質を極力排除している。生産段階だけでなく、資源採取、及びリユース（修理修繕を含む）、リサイクル、適正な廃棄まで計画することで製品のライフサイクル全体における環境負荷を把握でき、そのコストの推定も可能となる。

「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律」（1995年制定、2000年4月全面施行）、「特定家庭用機器再商品化法」（1998年制定、2001年施行）、「家畜排泄物の管理の適正化及び利用の促進に関する法律」（1999年制定〔7月制定、11月施行〕）をはじめ、2000年の第147国会で制定された「循環型社会形成推進基本法」と関連三法（「建設工事に係る資材の再資源化等に関する法律」、「食品循環資源の再生利用等の促進に関する法律」、「国等による環境物品等の調達等に関する法律」）、及び「使用済自動車の再資源化等に関する法律」（2005年制定）は10年以上が経過し、既に多くの使用済製品の再生が行われている。メーカーでは、回収した使用済製品の解体、分解、分離など設計段階での問題点の整理・改善、再生時の課題、利用などの解析を進めている。この検討は、LCC（Life Cycle Costing）の解析において極めて重要な情報を与えており、将来の製品設計、環境経営戦略に大きな影響を与えている。極めて多くの企業が取り組んでいるISO14000シリーズにおけるEMS（Environmental Management Systems）活動（ISO14001）で行われているシューハートサイクル（PDCA）の点検（Check）部分から取り組んでいることとなる。今後、環境設計をはじめとする製品開発の計画段階（Plan）での詳細な設計の進捗は次世代製品のコストに大きく影響する。この進捗状況は、企業経営にとっても重要となってきたと考えられる。

また、「循環型社会形成推進基本法」の制定に基づき「廃棄物の処理及び

清掃に関する法律」(1970年制定)及び「資源の有効な利用の促進に関する法律」(1991年制定の「再生資源の利用の促進に関する法律」が名称変更)の改正が実施された。当該基本法は、ドイツの「循環経済の促進及び廃棄物の環境保全上の適正処理の確保に関する法律」に影響されている部分が多い。したがって、この法律の考え方を取り入れて使用済製品の資源循環は、リユース、マテリアルリサイクル、サーマルリサイクルの順位で実施されている。「特定家庭用機器再商品化法」などでは、使用済製品に関して固体を固体のまま再利用することが進められている。しかし、「容器包装に係る分別収集及び再商品化の促進等に関する法律」では、ケミカルリサイクルをサーマルリサイクル<sup>(3)</sup>としていないため、製鉄、セメント産業で原料及び熱として扱われている。さらに「電気事業法」の1995年に改正(4月制定、12月施行)で定められたIPP(Independent Power Producer:独立系発電事業者)として一般電気事業者への電気供給事業者となったため、電力供給源としてもエネルギー政策面から期待されている。2011年の東日本大震災による福島第一原子力発電所事故以降、事故リスクが問題となり全国の原子力発電所が停止したため重要な電力供給源となった。<sup>(4)</sup>すなわち、資源循環の見直しとして、廃棄物を固体から固体にリサイクル(マテリアルリサイクル)するのではなく、他の燃料の減量化を目的とした廃棄物の燃料(サーマルリサイクル)として進めることもLCAの面から積極的に検討するべきである。なおその際、燃焼時のダイオキシン類など有害物質の発生の課題があり、ナノテクノロジーを用いた除塵など技術の進展との関係を考慮し規制を調整していくことが重要だろう。

他方、2005年1月に全面施行された「使用済自動車の再資源化等に関する法律」では、自動車自体がエンジン自動車から、燃費性能が高いハイブリット自動車(駆動部分がエンジンとモーター:HV[Hybrid Vehicle])、プラグインハイブリット自動車(プラグ電源から充電機能を持ったHV:PHV

[Plug in Hybrid Vehicle]) が普及し、走行時には排気がほとんど発生しない電気自動車、燃料電池車へ変化が進んでいる。自動車自体の資源循環における新たなLCA情報の分析が重要である。また、駆動のために直接燃料が燃焼されるガソリンから、発電事業者によって作られた電気、または天然ガス（主成分：メタン）などを改質（水素生成過程で二酸化炭素などが発生）して作られる水素を駆動のエネルギーにすることから、排気の規制対象を自動車から燃料生成事業者へと代える必要がある。

## （２）ゼロエミッション

製品の性能を向上させるには、多くの化学物質を複雑に利用し、一般的に反応性が高い有害物質（生体に関しても反応性が高い）が必要になるため、資源循環の促進を難しくしているといえる。リユースにおいても修理修繕を困難にし、リサイクルにおいては有害物質を除外しなければならないことが多く、処理工程を複雑にしている。前記各種リサイクル法が施行されてから、先進的なメーカーでは製品中の化学物質の種類を減らし、必要とされる性能を保ちつつ有害物質を排除する新たな技術開発が進められている。未だLCA情報の整備も十分に整備されていないのが現状であるため、製造における環境デザインへの取り組みの企業間格差は開きつつある。環境配慮に関しては、短期間でその対処の経済的成果が現れないのが現状であり、積極的に取り組める企業は限られているといえる。国家政策的にボトムアップしなければ、ナノテクノロジーを環境政策に利用していくことが困難と考えられる。しかし、ナノテクノロジーに関する研究開発は、国際的に進められており、政府による情報整備は極めて重要になっている。

将来、ナノテクノロジーがさらに進展することによって、有害物質の環境放出を精密な制御で防止し、使用済製品から高度な分離が行われるマテリアルリサイクルが可能になると新たな資源の採掘を減量化するも期待できる。例えば、省エネルギー技術の向上は、現在非常に注目されており、事実上枯

渴しつつある安定的燃料供給に欠かせなくなっている。インバーター、LEDなどは、エネルギー資源の単位当たりのサービス量を著しく向上させている。所謂、資源生産性（サービス生産量／資源投入量当たりの財）の向上が実現している。原子レベルで物質を制御できれば、「エネルギーの使用の合理化に関する法律」の1998年法改正で新たに設けられたトップランナー<sup>(5)</sup>方式のように物質資源消費の効率向上にも規定できる可能性がある。ナノテクノロジーによって使用済製品の化学物質が原子レベルで分解されることによって、廃棄物が資源化される技術が向上し、トップランナーが定められることになるだろう。

### （3）長寿命性

他方、製品の長寿命性そのものが向上することにより、単位資源量のサービス量が急激に増加することも期待できる。具体的には、生産、製造、建築での精密な物質制御が耐久性を上げ、高性能・機能的な材料が開発されることで可能性が拡大する。現在、さまざまに利用されている鉄は、酸化による腐食、所謂さびによってその強度など機能が失われ、廃棄物となる。この現象（酸化反応）は、水（湿気）と塩（塩化物）の存在によって促進される。自然界においては海岸における塩害など、公害においては酸性雨によって酸化による腐食が進行する。

鉄の場合、表面に格子欠陥<sup>(6)</sup>が存在するため、その欠陥部分から酸素の攻撃（侵入）があり、酸化反応が発生し酸化物（錆）が生成される。鉄の酸化の場合一度反応が発生すると内部へ広がっていくため、鉄構造物の強度を低下させ、当初の形状もとどめなくなる。この金属腐食を防止するために格子欠陥を減少させる対処が以前よりナノレベル（ $10^{-9}$ m 程度）で、原子配列を調整する手法が使われている。ステンレスは、クロムを添加することによってクロム酸化物を表面に生成し、酸化腐食を防止している。このようなクロム系ステンレス鋼といい、特にクロムを重量比12%以上加えることによって

常温常圧での環境下でほとんど腐食することはない。さらにニッケルを加えることによってさらに腐食防止性能が高まる。一般的なステンレス鋼は、その他マンガン、窒素も加えられており、電子顕微鏡 (Electron Microscope)<sup>(7)</sup> やエックス線回折装置 (X-ray diffraction analysis)<sup>(8)</sup> などによって原子レベルで構造解析され、意図的に特定の原子を注入し材料の性質を変化させることが行われている。この原子の配合率、配置の操作は以前から行われているナノテクノロジーであり、スプーンをはじめ身の回りの多くのものに利用されている。この表面に酸化皮膜を作り、長寿命性を図ることを不動態 (Passive State)<sup>(9)</sup> といい、酸化しやすいアルミニウムを構造材として使用するはこの原理による。ただし、強い酸で時間をかけて腐食される場合は、この皮膜の不動態としての機能は失われる。ナノテクノロジーの向上によってさらに精密に原子が制御されると、さらに腐食防止機能は高まる。

また、鉄の強度、靱性<sup>(10)</sup> に関しても、従来よりナノレベルでの研究開発が行われている。高炉で鉄鉱石から生産される銑鉄は、大量の炭素が含まれているため鑄造の原料にはなるが、砕けやすい製品しかできないため、製鋼では炭素の含有量を減らした上で、強度、靱性を高くする工程が実施される。<sup>(11)</sup> 一般には酸素で炭素を燃焼 (酸化) させて含有量を減少させる。日本で鉄が生産されたのは、縄文時代 (または弥生時代) といわれており、鉄の基本的な生産方法は、現在も昔と大きくは変わっていない。<sup>(12)</sup> 酸化した鉄を溶解し、酸素及び不純物を分離して作っていた。その後足でふいごを踏んで空気を送り込むたたら鉄へと発展していく。当時は、鉄の性質の違いから木炭による経験的に還元工程などが行われていたと思われるが、現在は原子レベルで分子構造とその性質から製鉄が行われている。大量生産が可能になり、今後は無駄がさらに減少していくと考えられる。近年では、炭素鋼以外にもマンガン、ニッケル、タングステン、コバルト、バナジウム、アルミニウムなどの元素が加わったものを合金鋼、炭素がほとんど含まれない純鉄にその他の元

素が配合されたものを合金鉄といわれている。自動車ボディに使用される鉄鋼材料は、炭素と窒素など極力不純物を減らした深絞り用鋼板である。また、建築物や土木工事に多用される鉄筋材料は、強度や粘りはあるが熱や錆（酸化）には弱い性質がある。この性質による腐食を防止するためにコンクリートはアルカリ性を高くしている。

対して、鉄よりはるかに高い強度を持ったカーボンナノチューブが、ナノテクノロジーによって新たに作り出された次世代の材料として注目されている。無機炭素原子を六角格子状（六員環の格子）に配置・結合し、直径数ナノメートルの円筒形の形状を人工的に作り出している。この円筒の片方が広がって角形となったものは、カーボンナノホーン（Carbon Nanohorn）といわれ同様に開発が行われている。

カーボンナノチューブは、高い強度意外にも、軽い（力学的性質）特性をもち、自動車や飛行機など移動体やビルディングなど構造物（建築材料）などへの利用が期待されている。別途、形状の変化させることで、高い電導性となったり、半導体の性質をもったり、優れた電気的特性をもっている。当該材料が、実用化、普及すれば、工学（建築、土木、機械）分野に大きな変革を及ぼし、これまでの構造物の基礎材料が代替される可能性もある。したがって、生産物の廃棄物のリサイクルに関して規制している「建設工事に係る資材の再資源化等の促進に関する法律」、「特定家庭用機器再商品化法」、「使用済自動車の再資源化等に関する法律」などにおける製造物の寿命、再資源化は、根本的な部分から検討し直さなければならないだろう。現在、既に普及しているカーボンファイバーの利用については、早急に検討すべきであろう。

### 3. 微小制御技術の向上

#### 3. 1 リスクの解明

### (1) 新たな技術開発への期待

ナノテクノロジーの応用として、すでに発生している公害に関しても防止及び汚染状況のモニタリング技術向上が期待されている。精密な技術を可能にするには、より精度の高いコントロール、及びその測定が求められる。ナノテクノロジーの向上は、より微小な加工ができるようになり新たな成型品や性能が実現できるようになったことで、これまで確認できなかった微少な状態を監視または操作することが期待されている。

微小なものが測定可能になったことにより、定量分析の面では、これまで測定できなかった超低濃度の化学物質が量れるようになり、定性分析面では、見つけることができた化学物質を検出できるようになった。環境中における超微量の汚染物質を検出できるようになったことで、環境中での挙動（経路）を把握でき、環境リスク管理が著しく向上した。汚染事件が発生した場合も「汚染者負担の原則」に基づく加害者、及び被害者を技術的に特定する蓋然性が高まった。さらに及び医学、生物学の発展とともに環境汚染による健康被害の対処及び予防の拡大も期待でき、地球温暖化原因物質など地球規模の環境破壊の対策に関しての研究開発が進んでいる。

具体的に環境省が2003年度から2010年度に実施した産学官連携によるナノテクノロジーを環境技術に応用した開発には以下のようなものがある。<sup>(13)</sup>

- ①超小型・高機能環境モニタリング技術
- ②健康・生態影響の多角的評価システム
- ③有害物質の高効率除去膜
- ④環境汚染修復のための新規微生物の迅速機能解析技術の開発
- ⑤新たな炭素材料を用いた環境計測機器の開発
- ⑥環境負荷を低減する水系クロマトグラフィーシステムの開発
- ⑦ホウ素などに対応可能な排水対策技術の開発
- ⑧酸化チタン光触媒担持体による環境水質の浄化技術の開発

これら技術にはすでに実用化されているものもあり、環境法の細則について適宜厳格化が可能になり、環境の浄化、汚染予防は高度化していくと予想される。これまで対処できなかった微少レベルの汚染リスクに対するモニタリング、評価、防止対策を実施することによって自然科学的な解明が進み、社会科学面での対処も進展していくと考えられる。

ダイオキシン類は、ピコグラムオーダーの測定によって検出、定量されており、1970年代から1980年代にかけて公害法によるモニタリング規制の測定下限値を約100万倍も微少にしており、極めて高い技術をもった分析が可能となっている<sup>(14)</sup>。今後さらに精密な測定が可能になると予想され、生体及び生態系への影響評価など複雑な計量・分析が必要なリスク評価においても迅速に行うことができる技術開発が期待される。現在の環境法におけるモニタリング方法、規制対象の増加、強化が行われると考えられる。また、地方の環境保護に必要な条例における横出し規制、上乘せ規制も明確な技術的根拠に基づき拡大していくと思われる。例えば、PM2.5（直径2.5マイクロメートル〔2,500nm〕）のように、これまで環境汚染において直径10マイクロメートル（10,000nm）以下の粒子を対象としていたPM（Particulate Matter）の中でも微粒子のものの検討を行い、新たなハザードに対するリスクを考え、曝露を減らすことも既に検討されている。

## （２）コンセンサスを持った対処

「国連環境と開発に関する会議（United Nations Conference on Environment and Development）」（1992年）で採択された「アジェンダ21（Agenda 21）」の「第19章 有害及び危険な製品の違法な国際的移動の防止を含む、有害化学物質の環境上適正な管理」では、①化学的リスクの国際的アセスメントの拡大及び促進、②化学物質の分類と表示の調和、③有害化学物質及び化学的リスクに関する情報交換、④リスク削減対策の実施、⑤化学物質管理能力の

強化、⑥有害及び危険な製品の違法な国際的移動の防止、⑦国際協力の強化、が示されており、ナノテクノロジーによるリスクに関する解析精度の向上は、今後適正な管理が進展に有効と考えられる。そして序文では、経済的に管理が困難な開発途上国での問題解決において、資金不足と情報不足が取りあげられており、環境問題において国際的な共通の問題である先進国と途上国との経済格差がナノテクノロジーによるリスク解明においてもネックとなることが推測できる。近年では、中国、インド、インドネシア、ブラジル、南アフリカなど新興工業国と、先進国の中でも米国、EU などと対立するロシアもそれぞれ異なった主張を展開していることから、LCA 情報の整備などナノテクノロジーを応用したリスク評価の進展は難しい。また、A “Means of implementation、(a) Financial and cost evaluation 18.” では、「コストの予測は、関連する国連機関の能力強化の必要性を勘案し、また現在の IPCS ((International Programme on Chemical Safety)<sup>(15)</sup>) における経験を基礎とする。(通常のコスト計算には) 含まれておらず、算定することができない相当な費用があることに注意を払う必要がある。」としており、大きなコストが必要となるナノテクノロジーの利用には経済的な障害が大きい。

ただし、ナノテクノロジーは、前述の通り製品そのもののコンセプトも代えてしまう可能性がある。これまでのような濃度規制、総量規制、経済的な誘導を持った規制、情報公開による誘導を持った規制に関し、根本的に規制内容を変更しなければならなくなる可能性もある。原子レベルより微少な素粒子の解明が進めば、汚染メカニズム、生態系への影響防止、リスク評価におけるハザードのあり方などシステム自体から検討しなければならなくとも考えられる。ナノテクノロジー、素粒子学（粒子物理学、量子力学）などの進展と環境における現象との解析が重要だろう。もっとも、地球温暖化による気候変動に関しても国際的、学術的なコンセンサスが未だ明確に得られ

ておらず、対策が進まないことから、先進的な自然科学に基づいて社会科学の対応をするのは限られた分野に限られると思われる。

### 3. 2 新たなリスク

#### (1) 未知のリスク

これまでの環境汚染、環境破壊は、新たな技術や人間活動によって引き起こされており、予見することが極めて難しい。科学技術は、新たな形状をもった化学物質やこれまで地球上に存在しなかった化学物質及び遺伝子操作された生物を生み出すこともできるため、新たな環境汚染や破壊の懸念を生み出す可能性が高まる。所謂未知のハザードが問題となる。そしてその発生頻度、確率も不明である。これらネガティブな面での対処としては、これまでの判明しているハザードを参考にして、化学物質の場合、構造などから推定、生物（微生物など）の場合、対象となる生物の経験的な最も高いハザードを当てはめ、技術的に極力曝露を下げることを前提としてリスク対策が検討される。当初の遺伝子組換えガイドラインや新規物質（半導体など）の取り扱いでは、高度な技術を用い物理的な封じ込め（外部への放出）によるリスクの低下が実施されている。

一般的なりスク管理では、装置・システムに故障または誤操作・誤動作による障害が発生した場合、事故にならないように確実に安全側に機能するような設計思想（フェールセーフ：fail safe）、作業員などが誤って不適切な操作を行なっても正常な動作が妨害されないこと（フルプルーフ：fool proof）、及び誤動作防止・条件がそろわないと操作が行われなくようにすること（インターロック：interlock）ことが実施されている。これらは、研究施設、工場及び原子力発電所などで詳細な解析（フォルトアナリシスなど）に基づき計画される。個々の企業では、CSR（Corporate Social Responsibility）及び経営管理の重要な自主規制として業態に即した形で検

討している。

ただし、原子力発電所では内部事象に関し徹底した対処を行っていたが、2011年に発生した福島第一原子力発電所事故では外部事象に関し十分な検討を行っていなかったことが原因で大きな災害を発生させてしまっている。原子力発電は、ウラン235の原子核に中性子を照射し、核反応（核分裂）を発生させ莫大な熱を得ることによって電気を生み出している。所謂、ナノテクノロジー（または原子の大きさよりも小さいレベルでの操作）に基づいている。高速増殖炉（核分裂）による発電、核融合発電も同様のリスクが存在するため事前の評価と対策が必要である。また、今後、研究が本格化する素粒子研究においてもリスクに関する事前評価は不可欠である。

慢性毒性が問題となっているアスベストによる発ガン、たばこによる人体への有害性などは、物理的な刺激などがハザードとなっていることから微少な物質の生成が可能になると新たな有害性の恐れもあり、適宜検討を行っていく必要がある。

他方、原子レベルの材料（環境省ではナノテクノロジー材料と示している）が引き起こす「ヒトの健康、動植物へ影響をもたらす可能性」について、環境省・ナノ材料環境影響基礎調査検討会『工業用ナノ材料に関する環境影響防止ガイドライン（2009年）』（19-20頁）では、「ナノ材料については、ヒトや動植物に対する影響について一定の条件の下で実施された試験結果が数多く報告されているものの、有害性評価が実施あるいは確定されるまでは至っていない。」と述べている。また、当該ガイドラインでは、U.S.EP（U.S. Environmental Protection Agency）等の機関がレビューした結果に基づいて知見を整理した結果として次の内容が示されている。

#### ①ヒトの健康への影響

ナノ材料のヒトへの影響に関しては、ヒト細胞等を用いた *in vitro* 試験と哺乳類（げっ歯類）を用いた *in vivo* 試験の様々な結果が報告され

ている。なお、ナノ材料に特化した疫学調査は報告されていない。社会的注目も集めているのは、多層カーボンナノチューブを遺伝子変異マウス（アスベストに感受性が高く中皮腫の発生が早いマウス）の腹腔内に注入した試験の事例であり、一定期間にわたる観察により、クロシドライト（青石綿）での発症率を上回る中皮腫の発現が報告されている。

### ②動植物への影響

ナノ材料の動植物への影響に関しては、主に、水生生物を用いた試験の事例がある。動植物へ与える影響については、ヒト影響の研究以上に、得られる情報が少ないのが現状である。ナノ材料を被験生物にばく露する方法についても、そのサイズをどう設定すべきか、それをどう制御すべきか、標準となる試験方法が固まっていない。

### ③ナノ材料の特徴と影響メカニズム

ナノ材料は、ヒトの健康あるいは動植物へ影響を及ぼす可能性を示唆する試験結果が報告されている。一般に化学物質がそれらに影響を及ぼす場合、化学物質そのものが本質的に持つ有害性（個別の物質が固有に持つ化学的性状）の他、分子の形状・サイズや酸性度等の物理的な特徴が生物に影響を及ぼし得ることが知られている。ナノ材料についても、それぞれの化学的組成（炭素、チタン・銀等の金属等）の違いによって影響の種類や程度が決まるだけでなく、「サイズが小さいこと、表面積が大きいこと、及び活性酸素の生成能力の複合作用が、肺損傷の重要な要素になっている（U.S.EPA（2007））」とした報告があるように、ナノ材料がナノスケールであるが故に持つ特性に起因する影響が懸念されることが指摘されている。

以上のように原子レベルの粒子の人体及び動植物へ与えるハザードに関しては、何らかの影響の可能性があるが、十分に自然科学的な解明には至って

いない。また、まだ具体的な症状も不明なことから汚染による被害が発生しても因果関係の証明は極めて難しいといえる。また、事前の対処を図るにもまだ知見が十分でない。

## （２）予防

環境汚染に対する予防に関しては、「国連環境と開発に関する会議（1992年）」で採択された下記の「環境と開発に関するリオ宣言」の第15原則で概念が示されている。

「環境を保護するため、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い対策を延期する理由として使われてはならない。」

当該原則で示されている「完全な科学的確実性」は、理想的な目標であり、自然科学では実現できないといえる。また、「深刻、あるいは不可逆的な被害のおそれ」も慢性的な影響である場合、自然科学的には十分に解析するのは困難である。気候変動に関する検討でこの傾向が強く表れている。したがって、この概念に基づき「予防」を事前検討することは非常に困難である。また、環境汚染または環境破壊による被害は広範囲にわたるため、事前対策費用より大きくなることはこれまでの公害事件、及び福島第一原子力発電所事故で発生した巨額の被害額で示されている。しかし、企業では環境保護への投資は明確な収益又は損失の恐れ防止が理解できなければ、労働者、投資家、融資者等利害関係者から支持を受けることは難しいだろう。

原子力発電所事故を懸念してスウェーデンでは、原子力発電所廃止の世論が高まり、国民投票が行われ、1980年に国会で「原子力は持続可能な社会の電源としてふさわしくない」と決議している。これも一種の予防の原則に近い考え方といえよう。まずデンマークから廃止の要求が強かったバルセベッ

ク原子力発電所1号機が1999年11月に運転を停止した。2005年5月には、バルセバック原子力発電所2号機も運転を停止し、当該原子力発電所は閉鎖している。ただし、2号機の閉鎖には、スウェーデンの産業界や労働組合が「電力不足を懸念して原子力発電所廃止を反対」している現状も踏まえて、国会での審議の際に「省エネルギー、非化石燃料発電等で年間40億 kWh の電力損失が供給できた場合に閉鎖する」との条件があった。したがって経済的な影響も考慮した判断だったともいえる。なお、スウェーデンにおける原子力発電による電力供給は1980年から2010年まで増加しており、原子力発電を廃止した場合、国の経済状態を維持することは現状では難しいのが現状であるともいえる。

また、OECD に設置された WPMN (Working party on manufactured nanomaterials) が優先的に検討を取り組む物質として選定したナノ材料は次の14物質が抽出されている(“LIST OF MANUFACTURED NANOMATERIALS AND LIST OF ENDPOINTS FOR PHASE ONE OF THE OECD TESTING PROGRAMME. ENV/JM/MONO (2008) 13/REV 07-Jul-2008”<sup>(16)</sup>より引用)。

- |                         |                      |
|-------------------------|----------------------|
| ① フラーレン (C60)           | ⑧ 酸化アルミニウム           |
| ② 単層カーボンナノチューブ (SWCNTs) | ⑨ 酸化セリウム             |
| ③ 多層カーボンナノチューブ (MWCNTs) | ⑩ 酸化亜鉛               |
| ④ 銀ナノ粒子                 | ⑪ 二酸化ケイ素             |
| ⑤ 鉄ナノ粒子                 | ⑫ ポリスチレン             |
| ⑥ カーボンブラック              | ⑬ 樹状高分子 (dendrimers) |
| ⑦ 二酸化チタン                | ⑭ ナノクレイ              |

(Clay: 粘土または粘土鉱物)

これら物質は、既に市場に存在しているものも多く、これら物質を取り扱っている作業、研究者の健康状況の調査、または動植物など生態系への影

響を実験することが必要と考えられる。特にカーボンブラックは、炭素の粉末で、3～500ナノメートル（nm）程度で塗料、タイヤ用ゴム、プラスチックの補強剤などに使用されている。数十年前より研究開発されているものである。これらの物質についてヒトへの健康影響及び動植物への影響が調査研究されると、これまでにない微小物質の環境中での挙動が推定でき、事前にハザード及び曝露を分析することにより、リスクを抑制できる可能性がある。

#### 4. まとめ

ナノテクノロジーは、自然科学における複数の学術分野で有望な技術となっており、微少な制御を可能にすることにより、新たな性能を見いだすことが試みられている。この新たな性能は、環境保全を高度化させる可能性を持っているが、人体への健康影響及び生態系へ新たなリスク発生の虞もある。環境法による規制においては、より詳細な環境保護が期待できるが、これまでと異なる汚染形態が発生する場合、新たな規制システムを検討しなければならない。

ナノテクノロジーの進展は新たな性能によるサービスが期待される反面、原子レベル（またはそれより小さい素量子など）が発生させる新たなリスク（ハザードと曝露 [確率]）を事前に評価し、環境影響の予防が図られることが望まれる。また、資源循環社会の推進には、ナノテクノロジーは極めて有望であり、LCA 情報に基づいた原子レベルの操作が実現すれば、合理的な資源供給、消費、廃棄物回収・分離、再資源化が期待できる。

- (1) 日本では、既に2001年8月に科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会に設置されたナノテクノロジー・材料委員会で「ナノテクノロジー・材料分野における当面の研究開発の推進に関する考え方について」を発表し、10～20年後の実用化・産業化を目指した挑戦的な研究として次の研究課題が取り上げられ現在具体化してきている

- ・次世代通信用ナノデバイス
  - ・超集積システム・素子・素材技術の研究
  - ・単一分子素子と集積
  - ・テラビット級メモリーの原理・素材・方式
  - ・新原理・量子デバイスの探索的研究
  - ・次世代フォトニクス基礎
  - ・バイオ分子デバイス
  - ・超高感度知的センサ技術
  - ・IT 化医療：ドラッグデリバリー・ナノマシン
  - ・超分子制御
  - ・ナノソフトマシン
  - ・クラスター・ナノ粒子
  - ・ナノチューブ・フラーレン
  - ・ナノボア系材料
  - ・ナノ構造制御触媒
  - ・ナノ組織エネルギー貯蔵・変換材料
  - ・ナノ組織制御・機能材料
  - ・ナノ制御高機能表面界面材料
  - ・ナノコンポジット構造材料
  - ・ナノスピンエレクトロニクス
  - ・有機・無機融合ナノ構造体構築
  - ・プログラム自己組織化
  - ・ナノ造形
  - ・ナノシミュレーション
  - ・ナノ新計測
- (2) 使用済小型電子機器等の再資源化の促進に関する法律第2条1項の政令(2013年3月施行令)で定める電気機械器具は、次に掲げるもの(一般消費者が通常生活の用に供する電気機械器具であるものに限るものとし、これらの附属品を含む。)である。
1. 電話機、ファクシミリ装置その他の有線通信機械器具
  2. 携帯電話端末、PHS 端末その他の無線通信機械器具
  3. ラジオ受信機及びテレビジョン受信機(特定家庭用機器再商品化法施行令(平成十年政令第三百七十八号)第一条第二号に掲げるテレビジョン受信機を除く。)
  4. デジタルカメラ、ビデオカメラ、ディー・バイ・ディー・レコーダーその他の映像用機械器具
  5. デジタルオーディオプレーヤー、ステレオセットその他の電気音響機械器具
  6. パーソナルコンピュータ
  7. 磁気ディスク装置、光ディスク装置その他の記憶装置
  8. プリンターその他の印刷装置
  9. ディスプレイその他の表示装置
  10. 電子書籍端末

11. 電動ミシン
  12. 電気グラインダー、電気ドリルその他の電動工具
  13. 電子式卓上計算機その他の事務用電気機械器具
  14. ヘルスメーターその他の計量用又は測定用の電気機械器具
  15. 電動式吸入器その他の医療用電気機械器具
  16. フィルムカメラ
  17. ジャー炊飯器、電子レンジその他の台所用電気機械器具（特定家庭用機器再商品化法施行令第一条第三号に掲げる電気冷蔵庫及び電気冷凍庫を除く。）
  18. 扇風機、電気除湿機その他の空調用電気機械器具（特定家庭用機器再商品化法施行令第一条第一号に掲げるユニット形エアコンディショナーを除く。）
  19. 電気アイロン、電気掃除機その他の衣料用又は衛生用の電気機械器具（特定家庭用機器再商品化法施行令第一条第四号に掲げる電気洗濯機及び衣類乾燥機を除く。）
  20. 電気こたつ、電気ストーブその他の保温用電気機械器具
  21. ヘアドライヤー、電気かみそりその他の理容用電気機械器具
  22. 電気マッサージ器
  23. ランニングマシンその他の運動用電気機械器具
  24. 電気芝刈機その他の園芸用電気機械器具
  25. 蛍光灯器具その他の電気照明器具
  26. 電子時計及び電気時計
  27. 電子楽器及び電気楽器
  28. ゲーム機その他の電子玩具及び電動式玩具
- (3) ドイツの1991年6月に制定された「ドイツ包装廃棄物回収に関する政令」では、包装材について再利用において、ケミカルリサイクルをマテリアルリサイクルとして見なすことを定めていたため、鉄鋼業において還元剤としてのコークスの代替品と見なし大量の包装材廃棄物がリサイクルを目的として使用された。その後、「循環経済の促進及び廃棄物の環境保全上の適正処理の確保に関する法律」（1996年施行）でLCAの面から再検討が行われ、包装材廃棄物は熱源（燃料）としてのコークスを代替していると見なされサーマルリサイクルと定められている。
- (4) 1999年5月に再び電気事業法が改正され、2000年3月から大口需要者への

(部分的) 電力小売りが始まり、IPP が PPS (Power Producer and Supplier : 特定規模電気事業者) として法令に定めた大口需用者へ電力を供給する事業に新規に参入することが可能になった。大口需要者とは、契約電力が50kW 以上の需要家をいい、地方公共事業団体、デパート、工場など大量電力消費施設が該当する。

なお、電力供給が必要になった理由は、電気事業法第27条で「経済産業大臣は、電気の需給の調整を行わなければ電気の供給の不足が国民経済及び国民生活に悪影響を及ぼし、公共の利益を阻害するおそれがあると認められるときは、その事態を克服するため必要な限度において、政令で定めるところにより、使用電力量の限度、使用最大電力の限度、用途若しくは使用を停止すべき日時を定めて、一般電気事業者、特定電気事業者若しくは特定規模電気事業者の供給する電気の使用を制限し、又は受電電力の容量の限度を定めて、一般電気事業者、特定電気事業者若しくは特定規模電気事業者からの受電を制限することができる。」との規定の下で節電が強制的に実施したことで通常の電気供給サービスが受けられなくなったことによる。

- (5) 「エネルギーの使用の合理化に関する法律」では、第12条の5に基づいて「電気機器や自動車の燃費の省エネルギー基準を、現在商品化されている個々の製品のうち最も優れている機器の性能以上にする」の勧告、第26条で「命令」、第27条～31条で罰則〔罰金、懲役〕が定められている。
- (6) 現在使われている金属材料には、3次元的に規則正しく配列された完全な状態(完全結晶)は存在せず、実際には何らかの形の原子配列の乱れがある。この乱れを格子欠陥という。格子欠陥には、点欠陥(格子間原子及び原子空隙)、線欠陥による転位、面欠陥による積層欠陥、結晶粒界がある。格子欠陥があると結晶の物理的、機械的性質などが大きく変化する。転位とは、結晶内のずれに起因して線状につながっておきている一連の原子の変位(位置の変化を示すベクトル)のことをいう。
- (7) 電子線を使い、光学レンズのかわりに電子レンズ(電磁石)で物体の拡大像を見ることができる顕微鏡のこと。電子線は光線より波長が短いので、光学顕微鏡より高倍率で分解能の高い画像にすることができる。電子顕微鏡は、材料研究、半導体開発や医学など多くの分野で利用されている。
- (8) 物質の原子配列など結晶構造を解析する方法である。物質同定、格子欠陥、相転移、結晶の大きさの測定などに利用される(回折とは、光や音が障害物などをかすめたとき幾何学的に直進しないで、影の部分にまわりこむ現象である)。

- (9) 酸や空気中の酸素が反応して、酸化金属が表面を被覆する（保護膜となる：被膜）ことによって腐食を防止する性質をいい、「不働態」とも書く。この被覆によって金属や合金の内部に化学的、電気化学的に反応が進行しなくなる状態（活性を抑制）になる。
- (10) 材料が外部からの力によって破壊されにくい性質のことをいい、ねばり強さの定量的な値を示す。
- (11) 鉄と炭素との合金は、鑄鉄（銑鉄）、鍛鉄（鍛鉄）、鋼などに分類され、工業的な分類では、炭素含有量を基準にして、鑄鉄は1.7～6.88%（実際に使用されるものは2.5～4.5%の範囲）、鍛鉄は0～0.1%、鋼は0.035～1.7%、鑄鋼は0.15～0.50%である。純鉄は、炭素やその他の不純物が0.02%以下である。なお、純度の高い鉄は、簡単に変形することができる。鋼（または、はがね）は、鍛造（金属で加熱し金槌または水圧機で打ちのばし靱性を付ける）や焼入れ（熱処理の一つで鉄鋼を高温に加熱しその後急冷し硬さを増す工程）によって強度を増すため、昔は刃物の材料に使用された。鑄鉄は、鑄造で鑄物をつくる材料になるもので、かたくてもろいが、融点が1,130℃程度と低い。鍛鉄や鋼の融点1,400℃程度と比べ低く、鑄型で成形・生産するには適している。
- (12) 原初は、古墳時代（3世紀頃から）で、粘土で作られた簡易な溶鉱炉を作り、木炭を燃料及び還元剤として砂鉄から質の悪い（不純物が分離されないままの）鉄を作っていたとされている。これを、野たたらと呼び、埴輪で作られている武人の鎧や農機具などを作っていたと考えられている。
- (13) 環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発推進事業」（2010年公表資料）より引用。
- (14) 勝田悟「化学分析技術の向上による有害物質規制の進展」最先端技術関連法研究第12号（2014年）PP33-35参照。
- (15) IPCS は、国連環境計画（UNEP）、国際労働機関（International Labour Organization；ILO）、世界保健機構（World Health Organization；WHO）の共同の国連組織で、「アジェンダ21」の第19章で推進が定められた ICSC（International Chemical Safety Card）を積極的に進めている。ICSC は、有害化学物質対策が遅れている開発途上国への安全性情報の提供手段やトレーニング教材にすることも意図されている。
- (16) これらは2007年時点での国際的な商業的利用状況を勘案して選定されている。WPMN（Working party on manufactured nanomaterials）では、ナノ材料は「特殊な特性あるいは特殊な構造を持つように意図的に作成されたナノ物

質」と定義している。

【参考文献】

- (1) 環境省『平成26年版 環境・循環型社会・生物多様性白書』（2014年）
- (2) 勝田悟『グリーンサイエンス』（法律文化社、2012年）
- (3) OECD 編、環境省監訳『OECD レポート 日本の環境政策』（中央法規、2011年）
- (4) 国立水俣病総合センター、水俣病情報センター『水銀と健康 第4版』（環境省、2010年）
- (5) 勝田悟『環境政策—経済成長・科学技術の発展と地球環境マネジネント—』（中央経済社、2010年）
- (6) 環境省・ナノ材料環境影響基礎調査検討会『工業用ナノ材料に関する環境影響防止ガイドライン』（2009年）
- (7) 手代木琢磨、勝田 悟『科学と技術』（中央経済社、2004年）
- (8) 環境庁、外務省監訳『アジェンダ21—持続可能な開発のための人類の行動計画—（'92地球サミット採択文書）』（海外環境協力センター、1993年）
- (9) 国連環境と開発に関する会議『環境と開発に関するリオ宣言』（1992年）
- (10) 勝田 悟「水銀排出抑制の国際条約による規制に関する研究」比較法研究36号（2013年）PP133～167。
- (11) 環境省総合環境政策局総務課環境研究技術室「ナノテクノロジーを活用した環境技術開発推進事業」（2010年公表資料）
- (12) LIST OF MANUFACTURED NANOMATERIALS AND LIST OF ENDPOINTS FOR PHASE ONE OF THE OECD TESTING PROGRAMME. ENV/JM/MONO (2008) 13/REV 07–Jul–2008.
- (13) 科学技術・学術審議会の研究計画・評価分科会・ナノテクノロジー・材料委員会「ナノテクノロジー・材料分野における当面の研究開発の推進に関する考え方について」（2001年公表資料）