

【報文】

ナノテクノロジーの社会的影響に関する欧米の取り組み Activities on Societal Implications of Nanotechnology of the USA and Europe

竹村 誠洋

独立行政法人 物質・材料研究機構

ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター

主幹研究員

Masahiro Takemura

Senior Researcher

Nanotechnology Researchers Network Center of Japan

National Institute for Materials Science

要旨：ナノ材料の人体・環境影響、倫理的・社会的側面など、ナノテクノロジーの社会的影響に関して、米国では国家ナノテクノロジー戦略のもと、各省庁が分担・連携してプログラムを実行している。一方、欧州においても NANOSAFE などの EU のプログラムおよび各国の調査がある。ナノ材料のリスク評価・管理に関してはまだ顕在化したリスクの指摘はなく、体系的な知見やデータの量が不十分である一方、国際的議論は活発に行われており、専門用語の定義など、リスク評価の基本事項に関する合意が徐々に得られ、積み上げられている。

Abstract: On societal implications of nanotechnology, or health, environmental, ethical, and societal issues of nanotechnology, the activities of the USA and Europe and international discussions are introduced. In the USA, the government institutes responsible for health and safety work in an organized way under the control of the National Nanotechnology Initiative (NNI). In Europe, they have both EU programs such as NANOSAFE and programs coordinated by each country such as the report of the Royal Society and the Royal Academy of Engineering. In international discussions, although there are neither actual risks pointed out nor enough systematic experimental data and knowledge, agreements on basic issues on risk assessments such as the definition of the terminology are being obtained and accumulated.

Key words: nanotechnology, nanomaterials, societal implications, risk assessment, National Nanotechnology Initiative

1 はじめに

ナノテクノロジーは 21 世紀の社会に広範囲にわたって莫大な利益をもたらすと期待され、多くの国において国家科学技術政策の重点分野として掲げられ、研究開発が精力的に進められている。1 ナノメートルは 10^{-9} m、10 億分の 1 メートルであり、代表的なナノ材料であるフラーレン、カーボンナノチューブの直径がおおの 1nm (ファンデルワールス半径を含む) 数 nm である。ナノスケール領域では、ミクロンオーダーからの延長上にはない諸特性が期待される。それは主に、比表面積 (単位質量あたりの表面積) が非常に大きく化学的活性が高いこと、量子効果が発揮されることによる。ナノスケール構造の直接的な制御によりその諸特性を狙いどおりに発揮させる技術がナノテクノロジーである。ナノテクノロジーは言うまでもなく最先端の科学技術であると同時に、あらゆる科学技術分野のナノスケール領域に位置するものである。

日本では第二期科学技術基本計画 (総合科学技術会議, 2001a) の中で 4 つの重点分野の一つとして「ナノテクノロジー・材料」が挙げられている。それに従い、IT、バイオ、環境、基盤技術、材料を主な適用分野として (総合科学技術会議, 2001b)、文部科学省、経済産業省が中心に公的研究資金を投じ、様々な研究プログラムを推進している。2004 年度のナノテクノロジー・材料分野への公的研究資金は 940 億円であり (総合科学技術会議, 2004)、米国、EU と肩を並べる金額である (Roco, 2004a, EC, 2004b)。

一方、革新的なテクノロジーは産業を通して社会に様々な影響を与える。それが意図された利益だけでなく、時として予測しない効果、さらにそれがリスクである場合がある。ナノテクノロジーについても然りであり、現時点で顕在化したリスクの指摘はないが、懸念、警告は少なくない。例えば Drexler は 1986 年、ナノテクノロジーの出現を予言した書 “Engines of Creation” (邦題「創造する機械」) (Drexler, 1986) において自己複製し続けるロボットを描き、「グレイ・グー (Grey Goo)」と名づけた。カナダの NGO、ETC Group はその著書 “The Big Down: Atomtech - Technologies Converging at the Nano-scale” (ETC Group, 2003) で 政府はナノ材料工業生産の即刻停止 (モラトリアム) を宣言し、透明な国際的評価体制を作るべき、と提案した。また小説の世界でも、自己増殖して人間を襲うナノ粒子ロボットの群れを描いた Michael Crichton の近未来 SF 小説 “Prey” (邦題「プレイ - 獲物 -」) (Crichton, 2002) は米国でベストセラーとなった。

欧米では多くのナノテクノロジー政策に関わる者が、これらの懸念を無視することなく、できる限りの予測を行い、利益を最大化してリスクを最小化すべく、評価・管理を継続して行うことが不可欠と考えている。本稿では、ナノテクノロジーが健康、安全、環境、倫理、社会に及ぼしうる諸影響、総称して「社会的影響」に関する欧米政府の取り組みの概要を紹介する。

2 米国のナノテクノロジー研究開発政策および社会的影響に関する取り組み

(1) 国家ナノテクノロジー戦略 (National Nanotechnology Initiative, NNI)

現在の世界的なナノテクノロジー研究開発の気運の高まりは、2000 年の米国の NNI に始まったと言ってよい。米国の NNI の活動の枠組みは下記の 5 つから成る (Roco, 2004a)。

- ・ 基礎的研究 (Long-term fundamental nanoscience and engineering research)
- ・ グランドチャレンジ (挑戦的研究) (Grand challenges -potential breakthrough-)
- ・ COE およびネットワークの構築 (Centers and networks of excellence)
- ・ 研究基盤整備 (Research infrastructure)

- ・ 社会、倫理、法整備および教育・訓練(Ethical, legal, and societal implications, and workforce education and training)

NNI にはほとんど全ての政府機関が参加している。各政府機関の年間予算の推移を表 1 に示す(Roco, 2004a, 佐藤, 2004)。2004 年の NNI 全体の予算は 961 百万ドル(約 1000 億円)である。これに加えて、州、地方から NNI の約 50%の公共資金、企業から NNI とほぼ同額の投資がある。NNI の最初の 3 年間の成果について全米科学財団(National Science Foundation (NSF))の Roco が述べたことをまとめると、表 2 のようになる(Roco, 2004a)。

表 1 米国国家ナノテクノロジー戦略(NNI)の年間予算 単位:百万ドル(Roco, 2004a)

Federal Department or Agency	FY 1997 Actual	FY2000 Actual	FY2001 Actual	FY2002 Actual	FY2003 Actual	FY2004 Enacted Congress	FY2005 Request
NSF	65	97	150	204	221	254	305
DOD	32	70	125	224	322	315	276
DOE	7	58	88	89	134	203	211
NIH	5	32	40	59	78	80	89
NIST	4	8	33	77	64	63	53
NASA	3	5	22	35	36	37	35
EPA	-	-	6	6	5	5	5
TSA	-	-	-	2	1	1	1
USDA	-	-	1.5	0	1	1	5
DOJ	-	-	1.4	1	1	2	2
Total	116	270	465	697	862	961	982
(% of 2000)	(43%)	(100%)	(172%)	(258%)	(319%)	(356%)	(363%)

National Science Foundation (NSF), Department of Defense (DOD), Department of Energy (DOE), National Institute of Health (NIH), National Institute of Standards and Technology (NIST), National Aeronautics and Space Administration (NASA), Environmental Protection Agency (EPA), Homeland Security (TSA), Department of Agriculture (USDA), Department of Justice (DOJ).

(2) 21 世紀ナノテクノロジー研究開発法 (21st Century Nanotechnology Research and Development Act)

21 世紀ナノテクノロジー研究開発法(Congress of the USA, 2003)が上院本会議を通過後、2003 年 11 月 20 日に下院本会議で承認された。本法では国家ナノテクノロジー研究計画(National Nanotechnology Program)により国家政策が具体化されている。その概要は下記のとおりであり、関連省庁、関連委員会および国家ナノテクノロジー調整事務局(National Nanotechnology Coordination Office (NNCO))を通じて実行される。

- ・ 基礎・先端研究から実用化研究までを幅広く推進
- ・ 共通研究施設の整備、ネットワークの構築、学際研究センター設置
- ・ 学際的な教育の実施
- ・ 長期的研究活動への安定資金投入による生産性・産業競争力の増進
- ・ 倫理面、法律面、環境面等の社会的な事項に関する考慮

- ・ 外部機関: 全米研究評議会(National Research Council, NRC)による 3 年ごとの評価

NRC による第 1 回審査においては「責任ある研究活動」を行う上で、基準、指針、戦略を設ける必要があるか否かが審査され、その検討対象として下記の項目が挙げられている。

- ・ 自己増殖するナノレベルマシンの機構または装置
- ・ 上記マシンの自然環境への放出

- ・ 暗号化
- ・ 国防技術の開発
- ・ 人間の知能強化におけるナノテクノロジーの利用
- ・ 人工知能の開発におけるナノテクノロジーの利用

表 2 米国国家ナノテクノロジー戦略(NNI)の最初の3年間の主な成果(Roco, 2004a)

分野	成果
研究	約 2,500 のプロジェクトを支援(大学、公的機関: 300、民間企業: 200)。予想以上の開発のスピードアップ(試作品完成までの所要時間の飛躍的短縮)
教育	2003 年には 7,000 人の学生、教師を教育。全ての理工学系大学がナノテク関連コースを導入。より若年層への教育。
共用インフラ	60 以上の大学が利用可能。5 大ネットワーク(NCN、NNIN、OKN、DOE、NASA)を確立。約 40,000 人の職員。
産業	中長期 R&D に NNI と同レベルの投資。大企業も参入。1000 以上の起業。米国は 2003 年に 5,300 以上の特許を保有(全世界の 2/3)
経済効果	2015 年には全世界で 1 兆ドルに到達見込み。年成長率は 25% 以上。
連邦 - 州の連携	20 以上の州が投資、22 以上の地域ネットワーク。代表例: California Nanosystems Institute (CNSI)
学協会	主要学協会がナノテク専門の部会、ワークショップ、教育を開始。
公的投資	全世界の投資は 6 年間で 7 倍、2003 年度は 30 億ドルに到達。全米: 7.7 億ドル、NSF: 2.2 億ドル。
社会的影響	NNI 開始当初からの活動(2000 年にワークショップを開催)。NSF のプログラムは 2000 年に開始。活動の拡大、立法・司法機関も参画。
法律	“ Nanotechnology R&D Act of 2003 ”、“ 21st Century Nanotechnology R&D Act ”、5 year “ National Nanotechnology Program ”。
巨大連立の創出	ナノテクノロジーコミュニティを創出。

(3) ナノテクノロジーの社会的影響 (Societal Implications of Nanotechnology) に関する取り組み

ナノテクノロジーが健康、安全、環境、倫理、社会に及ぼしうる影響に関して、米国は前述のとおり、2000 年の NNI の開始時点で社会、倫理、法整備を重要課題として掲げている。具体的な問題として、当面最も重要視されるのはナノ材料が健康、安全、環境に及ぼす影響である。ただしこれらは全体の中では相対的に短期的な課題として位置づけられる。長期的には、国家ナノテクノロジー研究計画の第 1 回審査における検討対象にあるように、自己増殖、国防技術、人間の能力向上に関わる問題が挙げられている(Roco 2004c)。

米国が社会的影響に取り組む理由の一つとして、米国のナノテク関係者に紹介されることが多いのが、遺伝子組み換え作物 (Gene Modified Organics, GMO) の事例である(平川, 2003, 三澤, 2004)。遺伝子組み換え作物の場合、最初にリスクの可能性を指摘された時点で、供給側がそれに対応する十分な実験データを示すことなどができなかつたために、大変な不信を招いた。米国内にはその後実験データの蓄積により、最終的に遺伝子組み換え作物固有のリスクは存在しないと判断された。しかし多くの人を知るとおり、日本および欧州では十分な信頼を得ることはできていない。ナノテクノロジーで同様の失敗を繰り返したくない、という強い想いが彼らから感じられる。

米国の最初の重要な取り組みは「ナノサイエンスとナノテクノロジーの社会的影響 (Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology)」(Roco & Bainbridge, 2001) というワークショップである。これは2000年9月、NNI 始動とほぼ同時期に開催され、産官学から自然科学者、社会科学者、政策担当者が集まり、討論が行われた。なお、「societal implication」は「社会的影響」と訳したが、米国では予想した効果に対してアプリケーション(application)、予想できない効果に対してインプリケーション(implication)という単語をあてはめている、とナノテクノロジー政策に関わる数名の米国政府関係者から聞いている。ただしインプリケーションはリスクのようなネガティブなものには限定されていない。

このワークショップの結論を受けた形で、各種プログラムが開始された。現在はNACOが全体調整を行いながら、下記のように、各省庁が担当の製品・技術の安全性に関する研究プログラムを推進している(Roco, 2003, Meridian Institute, 2004, Roco, 2004b, Karn, 2004, Bond, 2004)。

- ・ 労働環境： 米国労働安全衛生局
(Occupational Safety & Health Administration (OSHA))
米国国立労働安全衛生研究所
(National Institute of Occupational Safety & Health (NIOSH))
- ・ 医薬品： 米国食品医薬品局(Food & Drug Agency (FDA))
- ・ 食品： FDA, 米国農務省(US Department of Agriculture (USDA))
- ・ 消費財： 米国消費者製品安全委員会(Consumer Product Safety Commission (CPSC))
- ・ 環境： 米国環境保護庁(Environmental Protection Agency (EPA))
- ・ 標準化・計測： 米国国立標準技術研究所
(National Institute of Standard & Technology (NIST))

NSF、米国エネルギー省(Department of Energy (DOE))、米国国防総省(Department of Defense (DOD))は研究センターを支援している。さらに省庁連携プログラムとして、National Toxicology Program (NTP)、Interagency Working Group on Nanotechnology Environmental & Health Implications (NEHI)などがある。NTPは米国国立衛生研究所(National Institute of Health (NIH))の米国国立環境健康科学研究所(National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS))、FDAの米国国立毒性学研究センター(National Center for Toxicological Research (NCTR))、NIOSHを主要メンバーとし、カーボンナノチューブ、量子ドット、二酸化チタン、フラーレンのリスク評価を目的とする。NEHIはEPA、FDA、CPSC、OSHA、NIOSH、USDAを主要メンバーとし、ナノテクノロジー産業化に対して、既存の規制等またはその延長の適用が適切か否かを評価することを目的とする。以上の活動の具体例として、NNI支援の安全性評価研究および人文・社会学研究を表3、表4に、EPA支援の環境影響研究を表5に、NSF支援の環境センターおよび環境影響研究を表6、表7、表8に示す。2004年のNNIは環境に2000万ドル強、社会・教育に2000万ドル強、健康に8000万ドル強、計約1.3億ドルの資金を投入している(環境、健康はアプリケーション、インプリケーション両方を含む)。

米国の紹介の最後として、全米標準協会のナノテクノロジー標準化パネル(American National Standard Institute (ANSI)-Nanotechnology Standard Panel(NSP))(2004年9月発足)(ANSI, 2004)、NSFが支援するRice Universityのナノテクセンター(Center for Biological and Environmental Nanotechnology (CBEN))を中心とするInternational Council on Nanotechnology (ICON)(2004年10月発足)(Lafranconi, 2004)の発足を付け加える。いずれも産官学連携による推進であり、特に後者はNGOもメンバーとして含むことである。

表3 米国国家ナノテクノロジー戦略(NNI)が支援する安全性評価研究の例(Roco, 2004b)

Project	Agency, Institution
National Toxicology Program	NIH/NIEHS, FDA/NCTR, NIOSH
Particle Characterization for Health and Safety	NIOSH
Nanotechnology Characterization Laboratory	National Cancer Institute
Multidisciplinary University Research on Nanoparticle Toxicity	DOD Supported Center
Molecular Function at the Nano-Bio Interface (component on nanostructures and cell behavior)	NSF/NSEC Univ. of Pennsylvania
Nanomanufacturing Center for Enabling Tools (component on safe manufacturing)	NSF/NSEC Northwestern Univ.
Size Dependent Neural Translocation of Nanoparticles	NSF/SGER Rochester Univ.
Reverse Engineering Cellular Pathways from Human Cells Exposed to Nanomaterials	NSF/SGER

表4 米国国家ナノテクノロジー戦略(NNI)が支援する人文・社会学研究の例(Roco, 2004b)

Project	Agency, Institution
Nanotechnology and its Publics	NSF, Pennsylvania St. Univ.
Public Information, and Deliberation in Nanoscience and Nanotechnology Policy (SGER)	Interagency, North Carolina St. Univ.
Social and Ethical Research and Education in Agrifood Nanotechnology (NIRT)	NSF, Michigan St. Univ.
From Laboratory to Society: Developing an Informed Approach to NSE (NIRT)	NSF, Univ. of South Carolina
Social and Ethical Dimensions of Nanotechnology	NSF, Univ. of Virginia
Undergraduate Exploration of Nanoscience, Application and Societal Implications (NUE)	NSF, Michigan Technological Univ.
Ethics and Belief inside the Development of Nanotechnology	NSF, Univ. of Virginia
All centers, NNIN and NCN have societal implications components.	NSF, DOE, DOD, NIH All nano centers and networks

表5 米国環境保護庁(EPA)が支援する環境影響研究(Karn, 2004)

Topics	Lead Investigator, University
Transformation of Biologically Conjugated CdSe Quantum Dots Released into Water and Biofilms	P. Holden, UC-Santa Barbara
Iron Oxide Nanoparticles-Induced Oxidative Stress and Inflammation	A. Elder, Univ. Rochester
A Focus on Nanoparticulate Aerosol and Atmospherically Processed Nanoparticulate Aerosol	V. Grassian, Univ. Iowa
Physical and Chemical Determinants of Nanofiber/Nanotube Toxicity	R. Hurt, Brown Univ.
Short-Term Chronic Toxicity of Photocatalytic Nanoparticles to Bacteria, ALgae, and Zooplankton	C. Huang, Univ. Delaware
Responses of Lung Cells to Metals in Manufactured Nanoparticles	J. Veranth, Univ. Utah
Repercussion of Carbon Based Manufactured Nanoparticles on Microbial Processes in Environmental Systems	R. Turco, Purdue Univ.
Health Effects of Inhaled Nanomaterials	K. Pinkerton, UC-Davis
Chemical and Biological Behavior of Carbon Nanotubes in Estuarine Sedimentary Systems	P.L. Ferguson, Univ. South Carolina
The Fate, Transport, Transformation and Toxicity of Manufactured Nanomaterials in Drinking Water	P. Westerhoff, Arizona State Univ.
Evaluated Nanoparticles Interactions with Skin	N. Monteiro-Reviere, North Carolina State Univ.
Absorption and Release of Contaminants onto Engineered Nanoparticles	M. Tomson, Rice Univ.

表6 全米科学財団(NSF)の環境センター(Roco, 2004b)

Center	Institution
Fundamental Studies of Nanoparticles Formation in Air Pollution	Worcester Polytechnic Institute (\$2.7M)
Center for Advanced Materials for Water Purification	Univ. of Illinois at Urbana (\$20.1M)
Center for Environmentally Responsible Solvents and Processes	Univ. of North Carolina at Chapter Hill (\$25.0M)
Nanoscience in Biological and Environmental Engineering	Rice Univ. (\$11.8M)
Environmental Molecular Science Institute	Univ. of Notre Dame (\$5M)
NIRT: Investigating Nano-carbon Particles in the Atmosphere: Formation and Transformation	Univ. of Utah (\$1.7M)
NIRT: Nanoscale Processes in the Environment - Atmospheric Nanoparticles	Harvard Univ. (\$1.6M)
Center for Advanced Computational Environment	SUNY Buffalo (\$5.5M)
NIRT: Nanoscale Sensing Device for Measuring the Supply of Iron to Phytoplankton in Marine Systems	Univ. of Maine (\$0.9M)

表7 全米科学財団 (NSF) が支援する環境におけるナノスケールプロセスに関する研究 (影響の理解) の例(Roco, 2003)

Topics	University (lead investigator)	Interval
Nanoparticles in the environment, agriculture and technology	UC Davis (A. Novrotski), IGERT	1999-2004
Nanoparticles formation in air pollution	WPI (B.E. Wyslouzil)	2000-2005
Nanoparticles science and engineering	U. of Minnesota (U. Kortshagen), IGERT	2001-2006
Nano-colloids (metals, actinides) in aquatic systems	TAMU (P. Santchi), NIRT; U. Notre Dame (J.B. Fein, Environmental Molecular Science Institute)	2001-2005
Surface reactivity of nanostructures in environment	UCB (J.F. Banfield), U. Vanderbilt (P.T. Cummins), TX Tech U. (M.K. Ridley), NIRT	2001-2005
Application of quantum dots to environment and cell biology	Lehigh U. (A.K. Sengupta)	2001-2004
Molecular minerals-microbial interactions in the environment	U. Oklahoma (M. Nanny), (NIRT); U. Virginia (M.F. Hochella)	2001-2005
Biological and environmental nanotechnology	Rice U. (V. Colvin), NSEC	2001-2006

表8 全米科学財団 (NSF) が支援する環境におけるナノスケールプロセスに関する研究 (影響の改善) の例(Roco, 2003)

Topics	University (lead investigator)	Interval
Sequestration of volatile organic nanocompounds in environment	U. Vanderbilt (E.J. Leboeuf), CAREER	2000-2004
Nanoscale photocatalyst for destruction of environmental pollutants	MTU (J.C. Crittenden), NER	2001-2002
Environmental Friendly processing of metal oxide suspensions	R.M. Davis, VPI	2001-2003
Nanoscale metal particles: Remediation in groundwater	Lehigh U. (W. Zhang), CAREER	2000-2004
Nanobiosensor using dynamic atomic force microscopy	CMU (J.W. Schneider), NER	2002-2003
Magnetic separation for environmentally benign processing	USC Columbia (J.A. Ritter)	2000-2002
Environmentally responsible solvents	UNC Chapel Hill (J.M. De Simone)	2000-2004

3 欧州のナノテクノロジー研究開発政策および社会的影響に関する取り組み

(1) ヨーロッパのナノテクノロジー戦略に向けて (Towards a European Strategy for Nanotechnology)

欧州の最近の動きで最も注目すべきことは、2004年5月に European Commission (EC) が発表した「ヨーロッパのナノテクノロジー戦略に向けて (Towards a European Strategy for Nanotechnology)」(EC, 2004b)である。ここではナノテクノロジーの重要性、研究開発にお

ける世界の中での EU の位置付け、さらに「責任ある取り組み」として次の課題が挙げられている。

- ・ 研究開発の加速（研究投資額を 2010 までに 3 倍に）
- ・ 研究インフラ：ヨーロッパの「中核機関」の形成
- ・ 人材育成への投資
- ・ 産業の革新：知識からテクノロジーへ
- ・ 社会的側面との融合
- ・ 公衆衛生、安全、環境・消費者の保護
- ・ さらなる前進：国際協力

2003 年度の EU 全体の公的研究資金は 11.5 億ユーロ（約 1500 億円）である。このうち EC からの資金は 3.5 億ユーロ、残り 8 億ユーロは各国政府からの資金である。彼らの主張で興味深いことの一つは国民一人あたりの研究投資額を算出し、将来の研究資金目標を設定している事である。これによれば 2003 年、日本は第 1 位で 6.2 ユーロ/人、米国は 3 位で 3.6 ユーロ/人、EU（新規加盟国含めた 25 カ国）は 12 位で 2.4 ユーロ/人である。2010 年までに研究資金 3 倍という目標はここから来ていると聞いている。

EC の支援による研究プログラムは現在、第 6 次フレームワークプログラム（FP6）の中で推進されている。これは 2002～2006 年の 5 年プログラムであり、2004 年秋には 2007 年に始まる第 7 次フレームワークプログラム（FP7）に向けたヒアリングが開始されたと聞いている。

（2）EU の社会的影響に関する取り組み

EU の社会的影響に関するプログラムとして、下記の 3 つのプログラムがある（Dürrenberger, Höck & Höhener, 2004）。

- ・ NANO-PATHOLOGY Project：診断法・機器の開発、病理メカニズムの解明、病理学上の重要性の検証。2001 年 12 月 1 日開始、期間 3 年、資金約 100 万ユーロで、主幹機関は Italian Institute for the Physics of Matter である。
- ・ NANODERM Project：ナノ材料の皮膚への影響に関する研究。2003 年 1 月 1 日開始、期間 3 年、資金約 110 万ユーロで、主幹機関は University of Leipzig である。
- ・ NANOSAFE Project：生産プロセスから消費者に至るまでのナノ材料のリスクアセスメント。2003 年 4 月 1 日開始、期間 15 ヶ月、資金約 30 万ユーロで、主幹機関は NANOGATE Technologies GmbH である。

NANOSAFE については 2004 年 6 月に第 1 期が完了し、現在第 2 期の立ち上げを準備中である。ここで第 1 期の概要を紹介したい（Naß, 2004, Hoet, 2004）。本プロジェクトの目的はナノ粒子に関して下記の活動を行う事である。

- ・ ハザードの可能性に関する既存の情報の収集
- ・ 労働者、消費者および環境に及ぼすリスクの評価
- ・ 人体に及ぼすリスクのメカニズムの検討
- ・ 危険をできるだけ未然に防ぐための指針の構築
- ・ 規制対策のためのガイドラインの勧告

活動においては、WG1（粒経・形状、生産・出荷プロセス）、WG2（産業・消費者による利用）、WG3（粒子が放出される環境および条件）、WG4（人体に及ぼす危険性、人体組織との反応メカニズム）、WG5（推奨される防止策）、WG6（基準・規制に関する勧告）の 6 つのワーキンググループが作られ、ナノ粒子に関して、計測機器に求められる性能、リスク評価の項目、労働者の安全対策、リスク評価のフローチャート、人体への影響、規制のフレームワーク・方法について議論された。人体への影響に関しては、肺、腸から吸収される可能性がある、それと比較して皮膚の透過は起こりにくい、体内のどこに分布するかはナノ粒子の表面性状に

依存する、普遍的なナノ粒子は存在せず個々の材料は個別に評価されなければならない、などの結論が得られた。本プロジェクトの成果は、ドイツ技術者協会(Verein Deutscher Ingenieure (VDI))が編集した「ナノマテリアルの産業への適用 - チャンスとリスク、テクノロジー分析(Industrial application of nanomaterials - chances and risks, Technology analysis)」(2004年8月)(VDI, 2004)の中にもまとめられている。

上記のプログラム以外にも、EUの調査・ワークショップ活動をまとめた報告書が刊行されている。例えば「第4回ナノフォーラム報告書：ナノテクノロジーの利益、リスク、倫理的・法的・社会的側面(4th Nanoforum Report: Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of NANOTECHNOLOGY)」(2004年6月)(Nanoforum 2004)、および「ナノテクノロジー：ブリュッセルでのワークショップによる予備リスク解析(NANOTECHNOLOGIES: A PRELIMINARY RISK ANALYSIS ON THE BASIS OF A WORKSHOP ORGANIZED IN BRUSSELS ON 1-2 MARCH 2004)」(2004年3月)(EC, 2004a)などが代表的である。前者はナノフォーラム(nanoforum、EUのナノテクノロジーネットワーク)による、2004年6月時点での欧州の議論の総括であり、後者はEC主催のワークショップのレポートであり、17人の専門家による討論、提言がまとめられている。

(3) 英国王立協会・王立工学アカデミーの調査報告書「ナノサイエンスとナノテクノロジー：機会と不確実性(Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties)」

欧州各国についても、研究開発と同様、社会的影響に関する活動がある。ここでは報告書として国内外から大きな反響を呼んだ、英国の「ナノサイエンスとナノテクノロジー：機会と不確実性(Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties)」(2004年7月)(Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2004)を紹介する。これは英国政府の委託を受けて行われた英国王立協会および英国工学アカデミーによる調査の報告書である。数回のワークショップを経て、延べ221人の専門家、大学、企業など151機関から意見を聴取し、さらに一般市民の意識調査も行われた。報告書のまとめとして、ナノテクノロジーの産業利用、健康・安全・環境への悪影響の可能性、規制問題、社会・倫理的問題、ステークホルダーおよび市民との対話、責任ある研究開発の観点から21の勧告(Recommendations)が提言された(小澤, 2004, Welland, 2004)。

ナノテクノロジーの産業利用の現状については、まだ既存製品の改良の段階としている。健康・環境への影響については、ナノ粒子・ナノチューブの製造過程における労働者の吸入や環境汚染が問題とされているとしている。これに対して勧告では、第三者によるリスク評価、研究協議会の資金援助、リスク情報が不足している段階での有害物質としての取り扱い、ライフサイクル全体にわたるリスク評価、情報公開、規制における新規化学物質としての取り扱い、などが提言されている。

また一般市民の意識調査では、ナノテクノロジーについて聞いたことがあると答えた人は29%、何らかの形でナノテクノロジーの定義について言及した人は19%という結果であった。そのうち68%は将来ナノテクノロジーが生活を豊かにしてくれると感じており、悪化すると思う人は4%であった。これに対して勧告では、ナノテクノロジーに関する公開討論会および総合的・定量的な社会科学研究が提言されている。

3 ナノテクノロジーの社会的影響に関する国際会議

社会的影響に関する国際会議も多く開催されている。以下にその代表例を紹介する。

(1) 責任あるナノテクノロジー研究開発に関する国際対話：International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology (2004年6月16～18日、米国、ヴァージニア州アレキサンドリア)

NSF の Roco の呼びかけにより、世界 25 カ国および EC の科学技術政策関係者が集まった。各国のナノテクノロジー政策を紹介するとともに、1) 環境、2) 健康および安全、3) 社会、経済、倫理的側面、4) 発展途上国におけるナノテクノロジー、の4つのトピックスについてのワークショップ、および国際的枠組み作りに向けた討論を行った(Meridian Institute, 2004)。この会議は毎年1回行われることになり、次回はブリュッセルで行われる予定である

(2) 第7回ナノマテリアル国際会議 (NANO 2004)：7th International Conference on Nanostructured Materials (2004年6月20～24日、ドイツ、ヴィースバーデン)

「ナノテクノロジーのチャンスとリスク(Chances and Risks of Nanotechnology)」という題目でパネルディスカッションおよび講演セッションが行われた(DECHEMA, 2004)。パネルディスカッションでは Roco、Tomellini など米国、欧州の代表者およびグリーンピースの代表者などがパネリストとして参加した(竹村, 2004)。また先に紹介した EU のプログラム NANOSAFE の報告会も併行して行われた。

(3) ナノマテリアルが労働衛生に及ぼす影響に関する第1回国際シンポジウム：First International Symposium on Occupational Health Implications of Nanomaterials (2004年10月12～14日、英国、ダービシャー州バクストン)

この会議の最大の特徴は、英国安全衛生研究所(HSL)と米国国立労働安全衛生研究所(NIOSH)の共同開催という、労働安全衛生を担当する研究所が主催する世界で初めてのナノテクノロジーの国際会議であること、とあってよい(HSL, 2004)。科学技術政策関係者、毒性学者、安全衛生機関の講演に引き続き、4つのグループに分かれて計測、管理、規制等に関するワークショップが行われた。

(4) 環境ナノテクノロジー国際シンポジウム 2004：International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004 (2004年12月1～3日、台湾、台北)

台湾の行政院環境保護署(Taiwan Environmental Protection Administration (TEPA))、經濟部(Ministry of Economic Affairs (MEA))が主催し、工業技術研究院(Industrial Technology Research Institute (ITRI))の環境・安全衛生技術開発センター(Center for Environmental, Safety and Health Technology Development)およびナノテクノロジー研究センター(Nanotechnology Research Center)が実行した、環境への適用・影響評価両側面に関する海外の招待講演および彼らの研究成果を中心とするシンポジウムであった(TEPA & MEA, ROC, 2004)。Roco, Karn, Oberdorster, Kreyling, Colvin など、欧米からの招待講演者が多く、彼らの活動における欧米、特に米国との関係の強さを感じた。

ここで台湾のナノテクノロジーの環境影響に関する取り組みを簡単に紹介する。2003年に開始した TEPA の環境ナノテクノロジープロジェクト Nanotechnology - Applications of Nanotechnology to Environmental Protections, Safety, and Implications の資金は19万米ドルから2004年25万米ドルに増加した(Roam, 2004)。さらに2005年には5プロジェクト、資金38万米ドル、2006年には50万米ドルへと着々と増加する予定である。提案するプロジェクトは以下のとおりである(4.7万米ドル=1500万台湾ドル)。

- ・ Advanced Nanotechnology and Environmental Implications (4.7万米ドル)
- ・ Promotion of Responsible Nanotechnology in Research Laboratories and Industrial

Manufacturing Processes (21 万米ドル)

- Nanotechnology and International Environmental Protection Issues Analysis, Responses and Development (4.7 万米ドル)
- Nanotechnology and Societal Participation (4.7 万米ドル)
- Environmental Protection and Application of Nanotechnology (4.7 万米ドル)

4 ナノ材料のリスク評価・管理に関する議論の現状

前述のとおり、現時点でトピックとして取り上げられることが最も多いのが、ナノ材料のリスク評価・管理である。現時点では顕在化したリスクは知られていないし、供試材料、試験方法ともに標準化されたものはない。したがって体系的なデータの量が不十分であり、まだ具体的なリスク判断を行える段階にはない。個別の研究としては、毒性を示唆するような実験結果の報告もある(例; Oberdörster E., 2004)。しかしこれらをすぐにリスク判断に結びつけることは不適切である。今後、体系的・戦略的な研究が必要とされている(Colvin, 2004a, Kreyling, 2004, Oberdörster G., 2004)。

これまでに紹介した会議、報告書によると、概ね関係者の間に以下のような合意が得られている。

- ほとんどの議論はナノ材料の定義に始まる。その代表寸法(粒子ならば直径、繊維ならば断面直径、膜ならば膜厚)は100 ナノメートル以下であるものをナノ材料とする。
- 安全衛生の専門家にとってよりなじみのある「超微粒子(ultra fine particles)」に関する知見は十分に活かされるはずである。
- ナノ材料がバルク材料のようにマトリックス中に完全に固定されているか、コーティングのように剥離する可能性があるか、あるいは自由に動き回れるか、ということも評価を行う上で重要な分類である。
- 人体・環境への影響という観点からは、医療用、例えばドラッグ・デリバリー・システム(DDS)のように、意図的に人体に入れるものと、粉塵のように、不可避免的に人体に取り込まれるものに大きく分類される。
- 化学式は同じでもバルク材料とナノ材料は異なるものとして扱うべきである。
- ディーゼル排ガス粒子のような非意図的に生成・放出されるナノ粒子と、工業用ナノ粒子の区別も適宜必要とされる。
- 暴露に関して優先的に検討しなければならないのは、図1に示すように、1)ナノ材料に触れる可能性が最も高い労働者の安全衛生、2)製品・技術の受け手である消費者の安全衛生、3)生態系・環境の保全である。ナノ材料はプロセスの上流から下流に向かうに従い、サイズは凝集等により増加する傾向にある反面、蓄積、変質の可能性が大きくなる。
- ナノ材料のリスク評価・管理・コミュニケーションの基本的な考え方は、従来の化学物質、食品に適用されるものをベースにできる(新しい概念を導入すべきである、という意見もあるが、具体的にそれが必要である場合について著者は聞いたことがない)。
- ナノ材料のハザード評価のフローチャートの例として図2を示す。これは「ナノ材料としての評価・管理の必要度」を判定するものであり、絶対的なリスクの大小を意味するものではない。対象とする材料が水溶性であれば、従来の評価方法が適用可能であるので、新たな評価・管理方法の必要性は小さい。アスペクト(縦横)比の増加によりアスベストと同様に肺などに刺さる可能性が高くなる。さらにハザードが確認された場合には毒性、サイズの影響、用量反応関係などを把握する必要がある。
- リスク評価・管理・コミュニケーションの関係を図3に示す。リスクはハザードと暴露のかけ算であり、ハザードを有する場合でも曝露の可能性が低ければリスクは小さい。市民

とのコミュニケーションはリスク評価・管理の各段階で必要である。

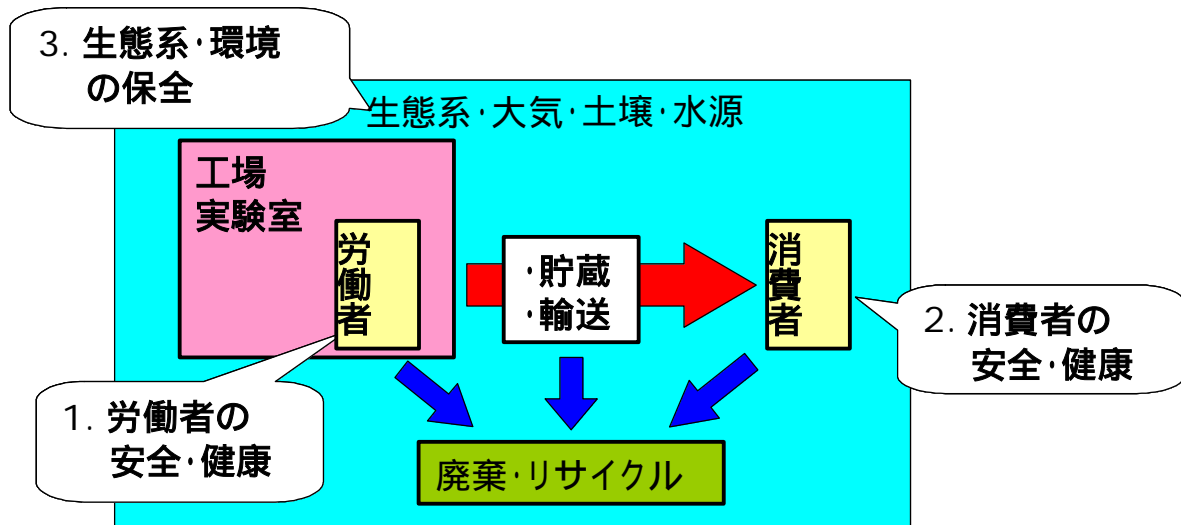


図1 ナノ材料のリスク評価・管理において優先されるべき課題
(Royal Society & Royal Academy of Engineering, 2004)

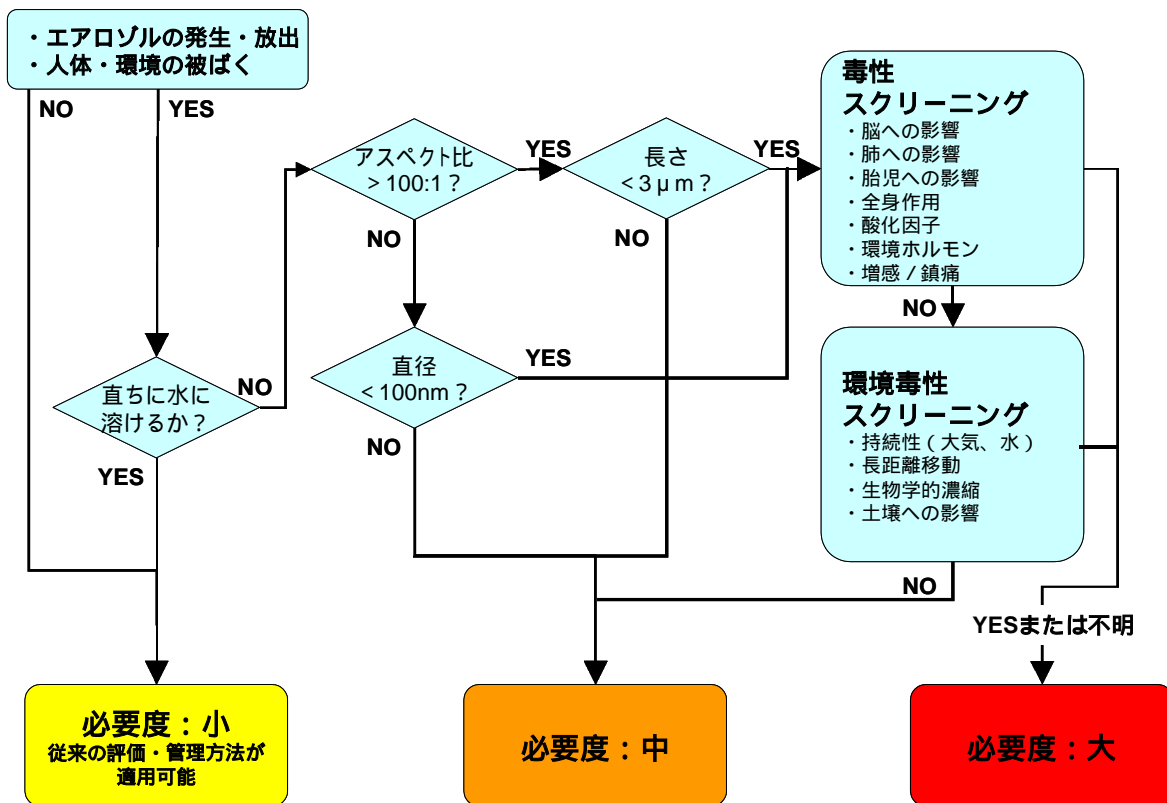


図2 ナノ材料リスク評価・管理の必要度判定のフローチャートの提案例
(EC, 2004a, Naß, 2004)

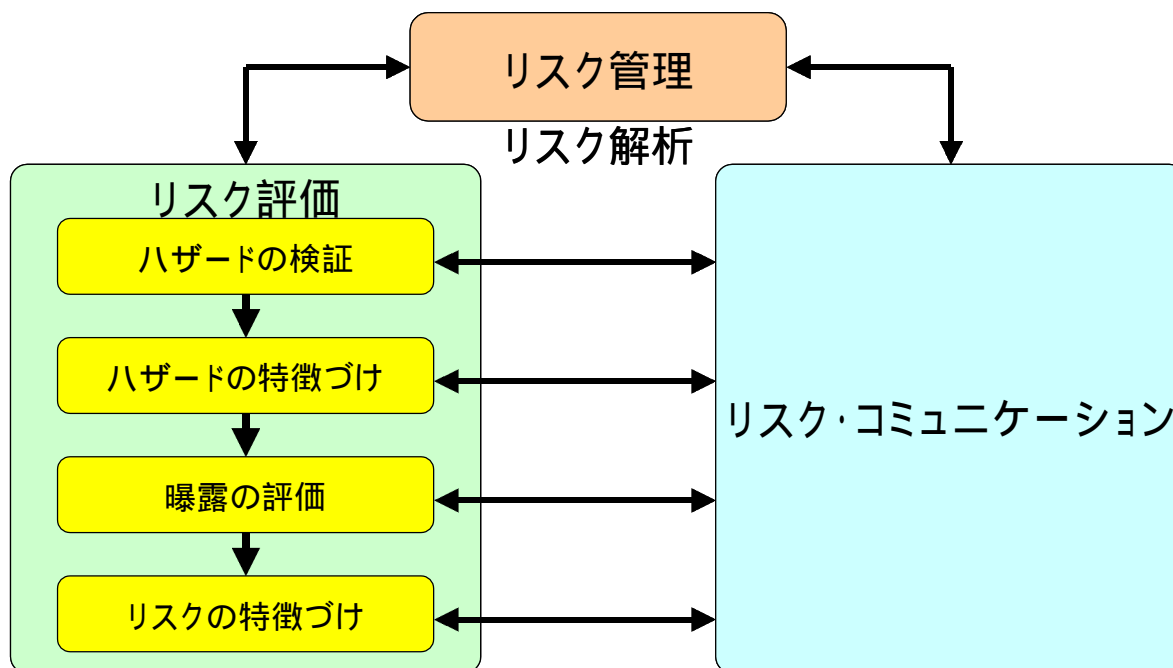


図3 リスク評価・管理・コミュニケーションの関係(EC, 2004a)

なお個人的な印象であるが、「予防原則(precautionary principle)」については、それを重視するEU(英国を除く)と、英国、米国の間に温度差が感じられた。評価方法に関しても総じて言えば、前者があらゆるナノ材料を対象とする評価手法の確立を目指す一方、後者は万能な評価方法は存在せず、おのこの材料と作用条件の組み合わせについて最適な方法を見いだすべき(Marburger, 2004)、という考え方のようなのである。

5 おわりに

ナノテクノロジーの社会的影響に関する欧米の取り組みの概要を紹介した。著者は毒性学、社会学の専門家ではないので、本稿では全体観を伝えることに留まり、個々のデータに言及することは避けた。専門家による科学データの蓄積とそれに基づく議論を強く希望する。いずれの分野においても継続的な実験と議論を要するであろうが、国際的議論は活発に行われており、専門用語の定義など、リスク評価の基本事項に関する合意が徐々に得られ、積み上げられている。わが国もそれに積極的に参加し、貢献することがナノテク先進国としての努めと考える。

謝辞

本稿は文部科学省「ナノテクノロジー総合支援プロジェクト」で実施している調査にもとづいて執筆された。調査においては情報の収集とその解釈を行う上で、(独)産業技術総合研究所の田中一宜氏、阿多誠文氏、三澤雅樹氏、根上友美氏、お茶の水女子大学の増田優教授、堅尾和夫教授、名古屋市立大学の津田洋幸教授、豊橋技術科学大学の大澤映二名誉教授(現(有)ナノ炭素研究所)、名古屋大学の黒田光太郎教授、(財)化学物質評価研究機構の高月峰夫氏、フロンティアカーボン株式会社の村山英樹氏、末村耕二氏、また米国ではNSFのM.C. Roco氏、EPAのB.P. Karn氏、NIOSHのA.D. Maynard氏、Rice UniversityのV.L. Colvin教授、ECではE. Andreta教授、英国ではUniversity of CambridgeのM. Welland教授、ド

イツでは VDI の G. Bachmann 氏、カールスルーエ研究センター (Forschungszentrum Karlsruhe (FZK)) の H.F. Krug 氏、ベルギーではルーベン・カトリック大学 (K.U.Leuven) の P. Hoet 教授、B. Vermylen J, Nemery 教授、スイスでは TEMAS AG の K. Höhener 氏、J. Höck 氏に多大なるご協力をいただきました。この場をもちまして、深く感謝の意を表します。

参考文献

- American National Standards Institute (ANSI) (2004), ANSI Nanotechnology Standards Panel Holds First Meeting.
http://www.ansi.org/news_publications/news_story.aspx?menuid=7&articleid=783
- Bond P.J. (2004), Responsible Development of Nanotechnology. Conference on nanotechnology “Small size-large impact”. Swiss Re. 2004. 12 (slides)
- Colvin V.L. (2003), The potential environmental impact of engineered nanomaterials, NATURE BIOTECHNOLOGY 21(10): 1166-1170
- Colvin V.L. (2004a), Engineered nanomaterials and risks: One perspective. NANOTECHNOLOGIES: A PRELIMINARY RISK ANALYSIS ON THE BASIS OF A WORKSHOP. European Commission: 49-50
- Colvin V.L. (2004b), Environmental Impacts of Engineered Nanomaterials: A new kind of pollution? Conference on nanotechnology “Small size-large impact”. Swiss Re. 2004. 12 (slides)
- Congress of the U.S.A (2003), S. 189, 21st Century Nanotechnology Research and Development Act.
- Crichton M. (2002), Prey.
- DECHEMA (2004), Proceedings of 7th International Conference on Nanostructured Materials. 2004. 6
- Drexler K.E. (1986), Engines of Creation.
- Dürrenberger F., Höck J. & Höhener K. (2004), Overview of completed and ongoing activities in the field: Safety and Risks of Nanotechnology, TEMAS AG.
- Environmental Protection Agency (TEPA) & Ministry of Economic Affairs (MEA), ROC (2004), International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004. 2004. 12
- ETC Group (2003), The Big Down: Atomtech - Technologies Converging at the Nano-scale.
- European Commission (EC) (2004a), NANOTECHNOLOGIES: A PRELIMINARY RISK ANALYSIS ON THE BASIS OF A WORKSHOP. 2004. 3
- European Commission (EC) (2004b), Towards a European Strategy for Nanotechnology. Communication from the Commission COM (2004) 338. 2004.5
- Health & Safety Laboratory (HSL) (2004), Proceedings of First International Symposium on Occupational Health Implications of Nanomaterials. 2004.10
- 平川秀幸(2003), バイオセイフティと国際関係 - 科学技術ガバナンスとしての争点と課題. 2003年度日本政治学会研究大会発表原稿改訂版. 2003.10
- Hoet P. (2004), Present knowledge of health effects of nanoparticles and future implications for workers and consumers. NANO2004 Satellite Workshop - The European Project “NANOSAFE”. 2004. 6 (slides)
- Karn B. (2004), Nanotechnology and the Environment: What We Have Learned Since Last Year. International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004. EPA & MEA, ROC. 2004. 12 (slides)

- Kreyling W.G. (2004), Health Implication of Nanoparticles, International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004. EPA & MEA, ROC. 2004. 12: 93-110
- Lafranconi M. (2004), Addressing nanotechnology risk in an innovative and proactive manner. Conference on nanotechnology "Small size-large impact". Swiss Re. 2004. 12 (slides)
- Marburger J. (2004), Statement in International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology. 2004. 6
- Meridian Institute (2004), Proceedings of International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology. 2004. 6
- NanoForum (2004), 4th NanoForum Report: Benefits, Risks, Ethical, Legal and Social Aspects of NANOTECHNOLOGY.
- Naß R. (2004), Risk Assessment, Toxicological and Health Issues - Results of the EU Funded Project NANOSAFE. NANO2004 Satellite Workshop The European Project "NANOSAFE". 2004. 6 (slides)
- Oberdörster E. (2004), Manufactured Nanomaterials (fullerenes, C₆₀) Induce Oxidative Stress in the Brain of Juvenile Largemouth Bass. Environmental Health Perspectives 112(10): 1058-1062
- Oberdörster G. (2004), Nanotoxicology: an Emerging Discipline. International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004. EPA & MEA, ROC. 2004. 12: 71-91
- 小澤英一 2004, 英国王立協会、王立工学アカデミー調査報告: Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. Japan Nanonet Bulletin 73. ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター.
<http://www.nanonet.go.jp/japanese/mailmag/2004/073c.html>
- Roam G. 2004, Nanotechnology Pushes Environmental Management to the Next Level. International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004. 2004. 12
- Roco M.C. & Bainbridge W.S. (2001), Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology (Eds.)
- Roco M.C. (2003), Broader societal issues of nanotechnology. Journal of Nanoparticle Research 5: 181-189
- Roco M.C. (2004a), The National Nanotechnology Initiative: Plans for the Next Five Years. National Nanotechnology Initiative: From Vision to Commercialization. 2004. 4
- Roco M.C. (2004b), Nanotechnology in U.S. - Research and education and risk governance. First International Symposium on Occupational Health Implications of Nanomaterials. Health & Safety Laboratory. 2004. 10 (slides)
- Roco M.C. (2004c), Converging Technologies and Their Societal Implications. International Symposium on Environmental Nanotechnology 2004. EPA & MEA, ROC. 2004. 12: 1-10
- Royal Society & Royal Academy of Engineering (2004), Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties.
- 佐藤哲治(2004), 米国ナノテクノロジー関連 2005 年度予算要求情報. Japan Nanonet Bulletin 61. ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター.
<http://www.nanonet.go.jp/japanese/mailmag/2004/061c.html>
- 総合科学技術会議(2001a), 科学技術基本計画(案). 2001. 3
- 総合科学技術会議(2001b), 分野別推進戦略(案). 2001. 9

- 総合科学技術会議(2004), 平成16年度の科学技術関係施策について. 2004. 1
- 竹村誠洋(2004), 7th International Conference on Nanostructured Materials (NANO 2004)その2:パネルディスカッション「ドイツおよびヨーロッパのナノテクノロジー政策」. Japan Nanonet Bulletin 71. ナノテクノロジー総合支援プロジェクトセンター. <http://www.nanonet.go.jp/japanese/mailmag/2004/071c.html>
- Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (2004), Industrial application of nanomaterials - chances and risks, Technology analysis.
- Welland M. (2004), Nanotechnology - Origins and Issues. Conference on nanotechnology "Small size-large impact". Swiss Re. 2004. 12 (slides)