ミニ特集 環境毒性学クロストーク—分子から集団・社会まで—

基準値設定の体系化と今後の展望： 非定常時の基準設定に向けて

村 上 道 夫

福島県立医科大学医学部健康リスクコミュニケーション学講座

Systemization of the Establishment of Standards and Future Prospects: Toward the Establishment of Standards in Nonstationary States

Michio MURAKAMI

Department of Health Risk Communication, Fukushima Medical University School of Medicine

Abstract Although public interest on safety standards is increasing, the evidence and protocols associated with the standards are not known well to the public and even experts. Discussing the evidence of standards is essential for risk communication, and interdisciplinary and systematical understanding on how to establish standards are also beneficial for considering the set-up of new standards. In this article, on the basis of examples in environmental science, industrial health and safety, and radiological protection, I overview and systemize the establishment of the standards from the perspectives of three principles of risk management: 1) “zero-risk-like” standards, 2) “acceptable-risk-based” standards, and 3) “cost-balanced” standards. In this view, I point out the differences in uncertainty factors or acceptable-risk levels among individual standards and demonstrate the role of the “as low as reasonably achievable (ALARA)” concept. Then, on the basis of the problem on lack of environmental standards in nonstationary states such as disasters, I summarize elements necessary for establishing the standards. As perspectives for further study, I suggest the needs for risk assessment of chemicals having a threshold, full considerations of risk trade-offs and ethical aspects, and applications of processes to the establishment of standards through stakeholder consensus.

Key words: ALARA, disaster (災害), risk communication (リスクコミュニケーション), standard (基準値), uncertainty factor (不確実係数)

1. はじめに

産業分野（労働安全分野）、環境分野、食品安全分野、放射線防護分野など、化学物質や放射性物質などの安全に関する基準値の科学は様々な分野にまたがっている。これらの基準値は、職業人や一般公衆が安全に暮らして

いくために必要不可欠であり、基準値を超過した事故が発生した際にはその安全性についてしばしば議論の対象となる。しかし、基準値がどのように定められているのかについては広く市民に知られているとはいえない。また、専門家であっても、基準値の数字だけを深く考えずに使いまわすこともある。市民が行政や専門家に基準値の根拠を尋ねたり、行政や専門家がその根拠を説明したり、ステークホルダー間でよりよい基準値やその運用方法を議論することはリスクコミュニケーションの本質であろう。そのような背景と意識から、著者らは環境分野、食品安全分野、放射線防護分野、防災分野などの基準値の根拠を紹介する「基準値のからくり—安全はこうして数字になった（講談社ブルーバックス）」を執筆し

受付 2016 年 8 月 22 日, 受理 2016 年 9 月 15 日

Reprint requests to: Michio MURAKAMI

Department of Health Risk Communication, Fukushima Medical University School of Medicine, 1 Hikarigaoka, Fukushima City 960-1295, Japan

TEL: +81(24)547-1320, FAX: +81(24)547-1244

E-mail: michio@fmu.ac.jp

た (1)。基準値は概して個別事例的であるが、基準値を分野横断的・体系的に理解することは、新たな基準値の導入を検討する上で有用である。そこで、本論文では、まず、文献 (1) でも紹介した環境分野の基準値を中心に、産業分野や放射線防護分野の事例も挙げながら、リスク管理の観点からその設定方法の体系を概観する。次に、現在、災害などの非定常時における環境基準値が設定されていないという問題意識から、非定常時における環境基準値設定を想定し、放射線防護に関する基準値事例や原子力発電所事故後の課題と教訓を踏まえた上で、設定の上で必要な要素を整理し、今後の展望を述べる。

2. リスク管理の三原則に基づく基準値設定の体系化

リスク管理には三原則があり (2)、その三原則の観点から著者の言葉で基準値を分類すると、①ゼロリスク的

な基準値、②受け入れられるリスクに基づく基準値、③費用との兼ね合いで決められる基準値 (広い意味で ALARA (As Low As Reasonably Achievable) の適用を含む) (3)、となる。原則的には、閾値ありを想定した基準値 (化学物質では、遺伝子損傷をもたらす発がん性物質以外が該当する) は①ゼロリスク的な基準値、閾値なしを想定した基準値 (化学物質では、遺伝子損傷をもたらす発がん性物質が該当する) は②受け入れられるリスクに基づく基準値と③費用との兼ね合いで決められる基準値のいずれかに分類される (Table 1)。

ゼロリスク的な基準値では、疫学研究や動物実験から毒性が観察されなかった量 (No Observed Adverse Effect Level: NOAEL) あるいは最小毒性量 (Lowest Observed Adverse Effect Level: LOAEL) に不確実係数 (安全係数) を加味しながら基準値を算定する。日本の水道水質基準値 (4) を例に挙げる。硝酸態窒素および亜硝酸態窒素は、

Table 1 基準値設定の 3 分類とその事例

分類	基準	項目	基準値・ガイドライン値など	根拠
ゼロリスク的な基準値	水道水質基準 (日本)	硝酸態窒素および亜硝酸態窒素	10 mgN/L	疫学研究, NOAEL, 不確実係数なし
		セレン	0.01 mg/L	疫学研究, NOAEL, 不確実係数なし
		四塩化炭素	0.002 mg/L	動物実験, NOAEL, 不確実係数 1000 (種間差 10×個体差 10×短期試験による因子 10)
		ホルムアルデヒド	0.08 mg/L	動物実験, NOAEL, 不確実係数 1000 (種間差 10×個体差 10×気化による吸引 10)
	飲料水水質ガイドライン第 3 版 (WHO)	ホルムアルデヒド	0.9 mg/L	動物実験, NOAEL, 不確実係数 100 (種間差 10×個体差 10)
	微小粒子状物質に係る環境基準 (日本)	PM _{2.5} (年平均値)	15 µg/m ³	疫学研究, LOAEL, 不確実係数なし
	日本産業衛生学会許容濃度 (日本)	セレン	0.1 mg/m ³	疫学研究, NOAEL, 不確実係数なし
		四塩化炭素	31 mg/m ³	疫学研究, NOAEL, 不確実係数なし
		ホルムアルデヒド	0.12 mg/m ³ (最大許容濃度 0.24 mg/m ³)	動物実験, LOAEL, 不確実係数なし
		アトラジン	2 mg/m ³	疫学研究, NOAEL および LOAEL, 不確実係数なし
受け入れられるリスクに基づく基準値	有害大気汚染物質 (ベンゼン等) に係る環境基準 (日本)	ベンゼン	3 µg/m ³	生涯発がんリスク 10 ⁻⁵ 相当
	水道水質基準 (日本) 日本産業衛生学会許容濃度 (日本)	臭素酸	0.01 mg/L	生涯発がんリスク 10 ⁻⁵ 相当
		ベンゼン	1 ppm (生涯発がんリスク 10 ⁻³) 0.1 ppm (生涯発がんリスク 10 ⁻⁴)	生涯発がんリスク 10 ⁻³ および 10 ⁻⁴
		ベンゼン	1 ppm	生涯発がんリスク 10 ⁻³
	作業環境評価基準管理濃度 (日本)	ベンゼン	1 ppm	生涯発がんリスク 10 ⁻³
	公衆被ばく (ICRP)	実効線量	1 mSv/年	ラドンを除く自然線量の地域差
	職業被ばく (ICRP)	実効線量	20 mSv/年 (5 年間の平均。任意の 1 年に 50 mSv を超えない)	65 歳における年間死亡リスクが 10 ⁻³ を超えない
費用との兼ね合いで決められる基準値	水道水質基準 (日本)	ヒ素	0.01 mg/L	飲料水から除去することが現実的に困難であることなど
	飲料水基準 (米国 EPA)	ヒ素	0.01 mg/L	費用便益分析など

急性毒性（乳幼児のメトヘモグロビン血症）の観点から基準値が設定されている。基準値の根拠となったのは疫学研究（1940 年代後半における報告数 278 件以上）(5) であり、NOAEL から不確実係数を加味せず基準値が算定された。セレンは、慢性毒性の観点から基準値が設定されており、同様に疫学研究に基づいて、NOAEL から不確実係数を加味せずに基準値が算定された（なお、文献 (4) で得られた値は文献 (6) からの引用とされており、文献 (6) は疫学研究 (7) の結果に基づいている。この疫学研究の総被検者数は 142 人である）。一方、四塩化炭素もまた慢性毒性の観点から基準値が設定されているものの、その根拠となったのはラットへの経口投与実験（1 グループ 15 ～ 16 匹、曝露期間 12 週間）(8) であり、NOAEL に不確実係数として 1,000 倍（種間差 $10 \times$ 個体差 $10 \times$ 短期間試験による因子 10）を加味している。不確実係数を 1,000 倍と設定することで、不確実係数を加味しなかった場合よりも基準値は 1,000 倍厳しい値になる。このように、ゼロリスク的な基準値の事例の特徴として、不確実係数の設定次第で基準値が大きく異なることが挙げられ、とりわけ疫学研究がない場合において顕著である。

不確実係数の設定は、国、分野、曝露対象（職業人・一般公衆）によっても異なる。例えば、日本のホルムアルデヒドの水道水質基準値は、慢性毒性の観点から設定されており、その根拠はラットへの投与実験（1 グループ 70 匹、試験期間 2 年間）(9) における NOAEL に不確実係数として 1,000 倍（種間差 $10 \times$ 個体差 $10 \times$ 気化による吸引 $10 \times$ ）を加味している。これに対し、World Health Organization (WHO) の飲料水水質ガイドライン第 3 版 (10) では、同じ投与実験の NOAEL を用いているものの、不確実係数は気化による吸引を加味せずに 100 倍であるため、日本の水道水質基準値と WHO の飲料水水質ガイドライン値は 1 桁異なる（なお、WHO の飲料水水質ガイドライン第 4 版 (11) では、ガイドライン値を設定する必要なしと判定されている）。日本の大気中の微小粒子状物質 ($\text{PM}_{2.5}$) の基準値については、閾値を見出すのが困難ではあるが、健康影響が生じることが確からしい濃度水準を見出すという方針がとられ、日本および米国の疫学研究における死亡リスクとの関連が見られた濃度（実質的に LOAEL に相当する）に基づいて年平均値 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と設定された (12)。産業分野では、日本産業衛生学会がセレン、四塩化炭素、ホルムアルデヒドのいずれについても、主としてヒトを対象としたデータに基づいて許容濃度を勧告しており、不確実係数は設定されていないが (13–15)、動物実験のデータを用いる場合は、一般に、NOAEL に種差の不確実係数 10 倍を加味して許容濃度を算定しており（例えばアトラジンなど (16)）、個体差に関する不確実係数は含まれないか 10 より小さい値を用いる (17)。これは、職業人を対象としており、高感受性の人への影響に関する因子を考慮しないためである。

ゼロリスク的な基準値の事例のもう一つの特徴は、社会的ゼロリスクを担保しないことである。一般に、数十匹程度の動物実験、あるいは数百人から数千人程度の疫学研究で得られた NOAEL や LOAEL に不確実係数を加味して基準値が算定されたもので、万人にとってのゼロリスクを担保するものではない。いいかえれば、これらの基準値は、多くの人にとってはゼロリスクだが、高感受性の一部の少数にとってはリスクがありうる状況を意味している。また、「その一部の少数」がどのくらいの人数かについては不明確である。なお、放射線防護分野における確定的影響は閾値ありを想定するが、様々な臓器と組織に対するしきい線量を 1% の出現頻度をもたらず線量と定義しており (18)、リスクの大きさは明示的である。

受け入れられるリスクに基づく基準値では、受け入れられるリスク（あるいは許容リスク）を決定し、それに相当する濃度を基準値として算定する。日本では、環境分野における受け入れられるリスクとし一般に一媒体（例えば大気など）中の一つの化学物質に対して生涯発がんリスク 10^{-5} が用いられる。例えば、大気中のベンゼンの環境基準であれば、工場での疫学調査 (1,165 人) (19, 20) に基づいて、生涯発がんリスク 10^{-5} に相当する濃度が $1 \sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と算定され (21)、環境基準値は $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ と設定された。同様に、臭素酸の水道水質基準値は、ラットへの投与実験における生涯発がんリスク 10^{-5} に相当する摂取量 $0.000357 \text{ mg}/\text{kg}$ 体重/日 (22) より、体重を 50 kg、水道水摂取量を 2L/日と仮定することで $0.01 \text{ mg}/\text{L}$ と算定された (4)。

受け入れられるリスクレベルも不確実係数の設定と同様に、国、分野、曝露対象（職業人・一般公衆）によって異なる。米国における大気環境や飲料水の基準値・目標値は概して生涯発がんリスク $10^{-5} \sim 10^{-6}$ に基づいて定められる。産業分野では、日本産業衛生学会が生涯発がんリスク 10^{-3} と 10^{-4} に相当する許容濃度を勧告し、厚生労働省が定めた法的拘束力のある管理濃度として 10^{-3} に相当する濃度が概して採用されている。放射線防護分野では、公衆被ばくの線量限度 $1 \text{ mSv}/\text{年}$ はラドンを除く自然線量の地域差を根拠とし、職業被ばくの線量限度 $20 \text{ mSv}/\text{年}$ は、65 歳における年間死亡リスクが 10^{-3} を超えないというベンチマーク（Royal Society の受け入れられるリスクレベル (23)）から定められた (24)。職業被ばくに関する受け入れられるリスクレベルが他の職業上の事故死のリスクなどと比較して定められてきた (23, 25) のに対し、環境分野の受け入れられるリスクレベルは、米国デラニー条項（1958 年制定、1996 年廃止）による加工食品への発がん性物質の使用禁止を契機に生涯発がんリスク 10^{-8} からスタートし (26)、その後の裁判などを経て $10^{-4} \sim 10^{-6}$ が相場観として醸成された (27)。日本では、1996 年の大気環境基準値に関する中央審議会ですべて生涯発がんリスク 10^{-5} が明示的に示された。その根拠として、中央環境審議会大気部会健康

リスク総合専門委員会は、日常生活で遭遇するリスクとの比較 (落雷: 2.2×10^{-6} ~ 交通事故: 6.0×10^{-3} (生涯死亡リスク)), 諸外国における大気環境分野の目標リスクレベル, 大気環境分野以外の目標リスクレベル, 関係者からの意見聴取 (生活者, 企業研究者, ジャーナリスト, 地方公共団体職員など) を挙げている (28)。なお, 放射線防護での受け入れられるリスクは, 飲食物や呼吸由来の内部被ばくや外部被ばくの線量を総合的に管理するのに対し, 環境分野などの化学物質に対する受け入れられるリスクは, 一般的に一媒体一物質に対して用いられることに注意が必要である。また, 前述のように, リスクの大きさについて明示的ではないものの, $PM_{2.5}$ のように疫学研究で関連性が見られる濃度にはほぼ相当する基準値が設定されている事例もあるため, 各分野のリスクレベルを単純に比較することは適切ではない。

費用との兼ね合いで決められる基準値では, 例えば飲料水のヒ素が相当する。日本の水道水質基準値は, 生涯発がんリスク 10^{-5} に相当する濃度を算定するのではなく, 飲料水からヒ素を除去することが現実的に困難であることなどから, 0.01 mg/L と設定されている (4)。実行可能性を加味して定められているという意味で, ALARA の概念に則った基準値といえる。一方, 米国 Environmental Protection Agency (EPA) では, 飲料水中のヒ素の基準値を 0.05 mg/L から 0.01 mg/L へと規制強化をする際に, 費用と便益 (リスク削減に対する支払い意志額) の比較を基準値設定の正当化の理由の一つとして位置付けており (29), 費用との兼ね合いについて定量性のある根拠を提示している。

以上のように, リスク管理の三原則に合わせて基準値設定の体系を分類し, 便宜的に ALARA の適用に伴う基準値を費用との兼ね合いで決められる基準値に含まれるとしたが, ゼロリスク的な基準値, 受け入れられるリスクに基づく基準値についても, ALARA の概念は部分的に適用されていると見なす方が実態に即している。例えば, ゼロリスク的な基準値では, 実行可能性から大きな不確実係数を設定できないこともありえるし, 逆に, 極めて大きな不確実係数が設定されることもある (詳しくは, 文献 (1) の 5 章参照)。受け入れられるリスクに基づく基準値の例として上述した大気中ベンゼンの環境基準値の設定の際にも ALARA の概念が考慮されている。生涯発がんリスク 10^{-6} ではなく 10^{-5} を当面の目標のベンチマークとしたこと, ならびに, 生涯発がんリスク 10^{-5} に相当する濃度 $1 \sim 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ から上限の $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ が基準値として設定されたのは, 実環境中のベンゼン濃度 (当時の幾何平均値として一般環境: $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 工場などの周辺環境: $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) を考慮したため (30) である。また, そもそも, 飲食物中の自然由来・非意図的な物質 (例えばアクリルアミド, 無機ヒ素, 自然起源放射性物質) など, 生涯発がんリスク 10^{-5} を超えるリスク (31) でも, 基準値そのものを設定することが困難な場合もある。ALARA 適用の概念には, 金銭的費用のみならず, 文化

的, 社会的価値観も含まれており, 客観的に評価することは難しい。基準値の設定において ALARA の概念が全面に出ざるを得ないという状況に対し, 岸本は, ALARA をエビデンスベースに運用するための手法や指針の必要性を指摘している (32)。

3. 非定常時の環境基準

放射線防護分野では原発事故時における放射線被ばく線量の避難基準などが設定されているのに対し, 環境分野では, $PM_{2.5}$ の外出自粛や火山噴火後の三宅島への帰島に伴う SO_2 濃度の目安といった一部例外を除き, 現在, 日本では災害などの非定常時を想定した基準値は設定されていない。しかし, 過去には, セベソ事故やボパール事故など, 工場からの化学物質の飛散による甚大な健康被害の事例がある。非定常的な事故を事前に想定し, 避難, 退避, 帰還に関する基準値を設定する必要があるだろう。

これらの事故を想定した際の基準値の設定には, 平時の環境基準とは異なるリスク管理方法の学術が求められる。閾値のない発がん性物質の場合は, ベンチマークとなる発がんリスクレベルの設定が必要となるであろう。一方で, 閾値のある化学物質については, それに加えて, リスク評価の方法論そのものを構築する必要がある。「2. リスク管理の三原則に基づく基準値設定の体系化」で述べたように, 閾値のある化学物質は NOAEL 以下でも社会的ゼロリスクを意味せず, そのリスクの値は不明確である。一つの方法は, 平時とは異なる不確実係数を設定することで対応することであろう。もう一つの方法は, 曝露量や感受性の分布を考慮してリスクを定量化することである。これらの学術的知見はまだ十分に得られているとはいいがたい。

避難, 退避, 帰還に関する基準値を設定する際には, 閾値のない物質でも, 閾値のある物質でも, ベンチマークとなる受け入れられるリスクレベルの設定方法に関する学術の蓄積が求められる点は共通である。放射線防護分野では, International Commission on Radiological Protection (ICRP) の勧告において, 緊急時被ばく状況 (不測または悪意の行為から発生された予期せぬ状況) として急性ないし年間の線量として $20 \sim 100 \text{ mSv}$ の範囲が管理上の参考として提案されている。 20 mSv/年 は職業被ばくの線量限度に相当する値であり, 100 mSv は確定的影響 (男性の一時的な不妊など) や発がんの明確な増加に相当する値である (18)。福島第一原子力発電所事故後には 20 mSv/年 を避難の基準として用いたが, そのルーツは職業被ばくの線量限度であり, さらにその値は Royal Society の受け入れられるリスクレベル (23) を根拠としたものであった。職業被ばくと避難では, 対象者 (職業人と一般公衆) の違いと積算線量 (年間線量と年数の積分) の違いという 2 点において意味合いが異なるが, 様々な被ばく管理の値がある中で整理されてきた

(18). 環境中化学物質に対して同様のベンチマークを用いる必要性はないものの、一つの参考にはなるであろう。ただし、避難、退避、帰還に関する基準値を設定する際には、避難に伴うリスクトレードオフを考慮することも重要であることが近年明らかになってきた。2011 年の福島第一原子力発電所事故では、避難後に老人施設の居住者の死亡率が有意に上昇し (33)、回避した被ばく量よりも大きなリスクをもたらしたことが指摘されている (34)。さらに、避難に伴い、糖尿病などの生活習慣病の悪化 (35)、精神的ストレスの増加 (36) も報告されている。また、リスクトレードオフの考慮に加えて、倫理的側面の観点からの配慮と議論も必要だろう。すなわち、リスクの程度を理解し、取りうる低減策を実施した上で、慣れ親しんだ居住地に住むという便益を選択したいという価値観を持つ個人に対して、強制的な避難を命じてよいのかという問題である。基準値がなく、リスクが正確に定まらない緊急時には避難指示の意思決定は困難であるが、基準値を事前に設定する際には、どのくらいのリスクにおいて避難を命ずるべきか、また、命じてよいか整理する必要がある。福島第一原子力発電所事故の避難の基準の 20 mSv/年のベンチマークの根拠のルールである Royal Society の受け入れられるリスクレベルは、「年間死亡率 10^{-2} は受け入れられないが、 10^{-3} の場合は、その個人が状況について知っていて、リスクに匹敵する恩恵を受けていて、リスク低減のための手段が講じられているならば、全く受け入れられないとはいえない」との判断によるものであった (23)。これは、パターンナリズムの観点から 10^{-2} を「受け入れられない」とし、自由主義の観点から 10^{-3} を「全く受け入れられないとはいえない」と見なした、と考えることができよう。

避難、退避、帰還に関する基準値を設定する際には、リスクの大きさのみならず、自由と安全に対する価値観と倫理的配慮への洞察に根差したものでなければならない。その一つの方法論として、著者は、パターンナリズム的指向の伝統的な基準値 (Standard I: 客観的リスク評価を礎に、合理的な安全の保障の担保やリスク低減を目的とする基準値) の設定に加えて、ステークホルダー間の合意形成による基準値 (Standard II: 主観的・社会的価値観の評価を礎に、満足感や誇りの獲得や生きたい世界を実現する基準値) の設定に向けたプロセス導入の重要性を言及した (37)。これは、チェルノブイリ事故、福島第一原子力発電所事故などの後に、当該地域においてステークホルダー間で合意された基準値やリスク管理方法が求められてきた、という経験に裏付けされたものである。ここでは、数字そのものよりも、基準値設定に関与するプロセスとフレームの意義が大きい。Standard I の設定は必要不可欠である。しかし、災害などの社会的インパクトの大きい事象に関する基準値については、これまでの教訓から Standard II の役割が大きいことが示されている。著者の知る限り、災害や事故などが発生する前に、ステークホルダー間で基準値設定に向けた議論

や合意形成に向けたプロセスが導入された事例はない。災害などの非定常時を想定した基準値設定では、Standard II のアプローチは、倫理的側面という点においても、ALARA の指針という意味においても、機能する可能性があるだろう。

謝 辞

本総説は、一部 JSPS 科研費 JP16H05894, JP15H01774 の助成を受けて行われた。

利益相反なし

文 献

- (1) 村上道夫, 永井孝志, 小野恭子, 岸本充生. 基準値のからくり—安全はこうして数字になった—. 東京: 講談社ブルーバックス, 2014.
- (2) 中西準子. 原発事故と放射線のリスク. 東京: 日本評論社, 2014.
- (3) 村上道夫. 基準値の科学—放射線防護分野と環境分野のレギュラトリー・サイエンス—. *Isotope News* 2015;739:44-47.
- (4) 厚生労働省. 水質基準 (案) 根拠資料一覧 <http://www.mhlw.go.jp/topics/bukyoku/kenkou/suido/kijun/konkyo.html> (2016.8.18)
- (5) Walton G. Survey of literature relating to infant methemoglobinemia due to nitrate-contaminated water. *Am J Publ Health Nations Health* 1951;41:986-996.
- (6) World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality-2nd ed. Vol. 2. Health criteria and other supporting information. 1996.
- (7) Longnecker MP, Taylor PR, Levander OA, Howe M, Veillon C, McAdam PA, Patterson KY, Holden JM, Stampfer MJ, Morris JS, Willett WC. Selenium in diet, blood, and toenails in relation to human health in a seleniumiferous area. *Am J Clin Nutr* 1991;53:1288-1294.
- (8) Bruckner JV, MacKenzie WF, Muralidhara S, Luthra R, Kyle GM, Acosta D. Oral toxicity of carbon tetrachloride: Acute, subacute, and subchronic studies in rats. *Fundam Appl Toxicol* 1986;6:16-34.
- (9) Til HP, Woutersen RA, Feron VJ, Hollanders VHM, Falke HE, Clary JJ. Two-year drinking-water study of formaldehyde in rats. *Food Chem Toxicol* 1989;27:77-87.
- (10) World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality-3rd ed, 2004.
- (11) World Health Organization. Guidelines for drinking-water quality-4th ed, 2011.
- (12) 環境省. 中央環境審議会大気環境部会微小粒子状物質環境基準専門委員会 (第 9 回) <http://www.env.go.jp/council/former2013/07air/y078-09.html> (2016.8.25)
- (13) 日本産業衛生学会許容濃度等に関する委員会. セレンおよびセレン化合物 (水酸化セレン, 六フッ素化セレンを除く). *産業衛生学雑誌* 2000;42:157-161.
- (14) 日本産業衛生学会許容濃度等に関する委員会. 四塩化

- 炭素. 産業医学 1991;33:310-312.
- (15) 日本産業衛生学会許容濃度等に関する委員会. ホルムアルデヒド. 産業衛生学雑誌 2007;49:175-181.
- (16) 日本産業衛生学会許容濃度等に関する委員会. アトラジン. 産業衛生学雑誌 2015;57:173-178.
- (17) 中西準子, 花井莊輔, 蒲生昌志, 吉田喜久雄. 不確実性をどう扱うか データの外挿と分布 (リスク評価の知恵袋シリーズ 2). 東京: 丸善, 2007.
- (18) ICRP. ICRP Publication 103. Ann ICRP 2007;37(2-4).
- (19) Rinsky RA, Smith AB, Hornung R, Filloon TG, Young RJ, Okun AH, Landrigan PJ. Benzene and leukemia. An epidemiologic risk assessment. N Engl J Med 1987;316:1044-1050.
- (20) Paxton MB, Chinchilli VM, Brett SM, Rodricks JV. Leukemia risk associated with benzene exposure in the Pliofilm cohort: I. mortality update and exposure distribution. Risk Anal 1994;14:147-154.
- (21) 中央環境審議会大気部会環境基準専門委員会. 大気環境学会誌 1997;32(4-2):17-33.
- (22) DeAngelo AB, George MH, Kilburn SR, Moore TM, Wolf DC. Carcinogenicity of potassium bromate administered in the drinking water to male B6C3F1 mice and F344/N rats. Toxicol Pathol 1998;26:587-594.
- (23) The Royal Society. Risk assessment: Report of a Royal Society study group. 1983.
- (24) ICRP. ICRP Publication 60. Ann ICRP 1991;21(1-3).
- (25) ICRP. ICRP Publication 27. Ann ICRP 1977;1(4).
- (26) 藤井健吉, 森田 修. 10 の -8 乗から -5 乗まで ~ negligible なリスクレベルの歴史と変遷. 日本リスク研究学会第 28 回年次大会講演論文集 2015:A-6-3.
- (27) 中西準子. 環境リスク学—不安の海の羅針盤. 東京: 日本評論社, 2004.
- (28) 中央環境審議会大気部会健康リスク総合専門委員会. 大気環境学会誌 1997;32(4-2):1-7.
- (29) US EPA. Arsenic in drinking water rule economic analysis. 2000.
- (30) 中央環境審議会. 今後の有害大気汚染物質対策のあり方について (第二次答申). 1996. <http://www.env.go.jp/air/kijun/toshin/02.pdf> (2016.8.20)
- (31) 村上道夫, 永井孝志. 微量化学物質の発がんリスクとその受容レベル. 水環境学会誌 2013;36A:322-326.
- (32) 岸本充生. 「10 のマイナス 5 乗」の過去・現在・未来. 安全工学シンポジウム 2016 講演予稿集: 250-251.
- (33) Nomura S, Gilmour S, Tsubokura M, Yoneoka D, Sugimoto A, Oikawa T, Kami M, Shibuya K. Mortality risk amongst nursing home residents evacuated after the Fukushima nuclear accident: A retrospective cohort study. PLoS One 2013;8:e60192.
- (34) Murakami M, Ono K, Tsubokura M, Nomura S, Oikawa T, Oka T, Kami M, Oki T. Was the risk from nursing-home evacuation after the Fukushima accident higher than the radiation risk?. PLoS One 2015;10:e0137906.
- (35) Satoh H, Ohira T, Hosoya M, Sakai A, Watanabe T, Ohtsuru A, Kawasaki Y, Suzuki H, Takahashi A, Kobashi G, Ozasa K, Yasumura S, Yamashita S, Kamiya K, Abe M. Evacuation after the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident is a cause of diabetes: Results from the Fukushima Health Management Survey. J Diabetes Res 2015;2015: 627390.
- (36) Suzuki Y, Yabe H, Yasumura S, Ohira T, Niwa S, Ohtsuru A, Mashiko H, Maeda M, Abe M. Psychological distress and the perception of radiation risks: the Fukushima health management survey. Bull World Health Organ 2015;93: 598-605.
- (37) Murakami M. Risk analysis as regulatory science: Toward the establishment of standards. Radiat Prot Dosim 2016: doi:10.1093/rpd/ncw211.