
要 約

1. 序 論

ニッケルは銀白色の金属で、元素記号 Ni、原子番号 28、原子量 58.69 である。地球上に遍在し、土壌、水、大気中および生体内に存在する (WHO/IPCS 1991)。1751 年に発見されて以来、非鉄合金、ステンレス鋼、耐熱材料やめっき用、化学工業部品材料などさまざまな用途に使用されている非常に利便性の高い金属である。

しかし、ニッケル精錬所の労働者がニッケル粉塵を吸入することによる鼻腔がんと肺がんが 20 世紀に入ってから観察されてきた。動物による吸入試験においても、いくつかのニッケル化合物で発がんが観察されている (シュレーダー 1976)。また、ニッケルめっきのピアスなどの装飾品を人体に付けることにより、皮膚炎などが起こる事例も増えている (日本化学会編 1992)。そのため、日本国内では、ニッケル (以下、金属ニッケルと呼ぶ) およびニッケル化合物が、化学物質排出把握管理促進法の化学物質排出移動量届出制度 (Pollutant Release and Transfer Register ; PRTR) の第 1 種指定化学物質に指定されており、届出義務の要件を満たす事業所から毎年排出移動量に関する報告がある。

1997 年 4 月に施行された改正大気汚染防止法で有害大気汚染物質対策が取り上げられ、優先取り組み 22 物質が指定された。さらに、同法に沿った「事業者による有害大気汚染物質の自主管理促進のための指針」(1996 年制定) では、優先取り組み物質のうち 12 の有害大気汚染物質が対象とされたが、揮発性有機化合物 (Volatile Organic Compounds ; VOC) 11 物質とともに粒子状物質であるニッケル化合物が選ばれている。そして、対象物質を排出する業種の事業者団体によって自主管理計画 (第 1 次 : 1997~1999 年度、第 2 次 : 2001~2003 年度) が作成され、削減対策が進められてきた。

また、水質汚濁に関わる環境基準の中で、ニッケルは要監視項目となっている。1998 年以前は 0.01 mg Ni/L の指針値が存在したが、1999 年以降は指針値が撤廃されている。その一方でいくつかの工業会では自主的な取り組みが行われており、たとえば全国鍍金工業組合連合会では、2000 年 2 月から排水濃度 5 mg Ni/L を自主管理目標として取り組んでいる状況である。一方、2003 年に、水

生生物の保全の観点を中心に据えた化学物質に関する水質目標の設定に関する答申が中央環境審議会よりなされ、同年11月に亜鉛について水生生物保全を目的とする水質環境基準が新たに設定された。そのため、ニッケルについても今後の規制の動きに注意しながら、ニッケルの生産、使用および廃棄段階にいたる国内の産業構造を反映したリスク評価を行い、それを公開するものである。

ただし、有機化学物質のリスク評価と異なり、金属のリスク評価の際に考慮すべき事項が多くある。暴露評価では、多様な製品に使用され、ライフサイクル段階の使用・廃棄段階での排出が大きいというのに、過去長期間にわたって鉱山や自然発生源からの環境中への排出があるため、環境中への排出量の把握が容易でない。また、環境中にバックグラウンドとして多く存在し、環境中で多様な化合物の形態（以下、化学種と呼ぶ）で存在するうえに、蒸気圧がきわめて低いなどの物性上の理由から、既存のマルチメディアモデルで主要な暴露経路を推定することも難しい。また有害性評価では、生物にとって必須な金属があるうえに、化学種や価数によって有害性も大きく異なるため、リスク評価への適用が困難である。さらに、環境中のバックグラウンドの存在がリスク対策による効果の程度の把握を困難にしている。ニッケルについても同様な状況であるので、上記の事項に可能な限り対応することが重要である。

具体的な目標は、以下のとおりである。

第1に、金属ニッケルおよびニッケル化合物の物理化学的特性に関する国内外の情報を提示し、既存のリスク評価と規制に関する情報をまとめることで、リスク評価のための検討に資する情報を提供する。第2に、多様な用途をもつニッケルの物質フローを解析し、ライフサイクルの各段階からの排出量を推定する。また、ニッケルのフローとは別に、バックグラウンドとして金属を含有する化石燃料の燃焼にともなう環境中への排出量を推定する。第3に、環境中濃度および食品中濃度に関する国内のモニタリング情報を提示する。また、環境中の多様な化合物の形態を把握するために、国内の大気中および水中の化学種分析を実施することによって、暴露解析に資する新たな情報を提供する。第4に、生態やヒト健康に対する有害性に関して国内外の知見を収集して、生態およびヒト健康に対する有害性のエンドポイントを提示する。特にヒト健康については、化学種ごとに有害性データを整理することで、行政や業界の有害性調査を支援する。第5に、リスク評価に際しての判断基準の位置づけと評価手法について示し、行政によるリスク評価を支援する。第6に、リスク削減対策による費用効果分析を行い、効率の高い実現可能な方策を示し、業界や事業所の自主管理対策を支援する。

本評価書は2007年12月まで文献調査、情報収集を行って作成した。特に、暴露解析に関しては企業などへのヒアリング情報も活用した。今後、重要なデータが新たに得られた場合には、更新される可能性をもつ。

2. 一般情報と既存のリスク評価の知見と規制の動向

まず金属ニッケルおよびニッケル化合物の物理的・化学的特性について示し、化学種によって特性が大きく異なるため、その特性ごとに金属ニッケル、水溶性ニッケル、ニッケル硫化物とニッケ

ル酸化物に便宜的に分類した。

次に、ニッケルに関する国際機関（国際がん研究機関（IARC）、国際化学物質安全性計画（IPCS））、欧州（欧州化学品局（ECB）、オランダ）、北米（米国環境保護庁（U. S. EPA）、米国毒性物質疾病対策庁（ATSDR）やカナダ）や国内（新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO））の既存のリスク評価書と規制の動向から、着目すべきリスク評価の論点として以下を示した。すなわち、第1に、ニッケルの金属および化合物ごとにヒト健康影響の程度を判断する必要がある、特に大気からの吸入による影響が重要である。第2に、大気の吸入摂取によるヒト健康影響については化学種ごとの発がん性を検討することが重要であるとともに、化学種によって有害性が異なるので、一般大気中における各化学種の存在割合を調査することが必要である。第3に、食品からの経口摂取については、それほど問題視されている状況ではないので、日本国内の食品中濃度、飲料水濃度のモニタリングデータからニッケル一日摂取量を導くことで十分と考える。第4に、水生生物の生態リスクについても検討する必要がある、特に水質については、水中の硬度などのニッケルの生物利用性への影響を検討することが重要である。

3. 物質フロー解析と環境中への排出量の推定

ニッケルの製造、出荷、廃棄にいたる物質フロー解析を行い、国内供給量、市中ストック量、処理量を1970年から2015年まで時系列的に推定した。その結果、将来の2015年には国内廃棄量が国内供給量と同じ200千t/yearレベルにまで増加するが、回収率の向上により物質回収量が増加して、埋立量と焼却量は2015年には2002年の半分程度に低減すると推定された。よって、ニッケルの国内供給量、廃棄物焼却量と埋立量ともピーク時にあたる2000年前後の物質フローによる定常状態での暴露評価を行うことで、もっともリスクの高い安全側に立ったニッケルのリスク評価が可能になると判断した。

一方で、石油中、石炭中の微量金属の中でもニッケルの含有量は大きいと、化石燃料の燃焼による大気中への排出を無視できない。そこで、大気中への排出については、各業種における揮散率

表1 各種発生源の揮散率と集塵効率の設定

業 種	燃 料	揮散率	集塵機種類	集塵効率	
				シナリオ1	シナリオ2
一般廃棄物焼却	—	16%	電気集塵機	90%	99%
			バグフィルター	99%	99.9%
下水汚泥焼却	—	16%	電気集塵機	90%	99%
鉄鋼(自家発電など)	原油、重油など	100%	電気集塵機	90%	99%
	石炭、コークスなど	90%			
石炭火力発電	石炭、コークスなど	—	電気集塵機+湿式脱硫	99.99% (業界実測値)	
石油火力発電	原油、重油など	—	電気集塵機	99.68% (業界実測値)	
その他の業種	原油、重油など	100%	電気集塵機	90%	99%
	石炭、コークスなど	90%			

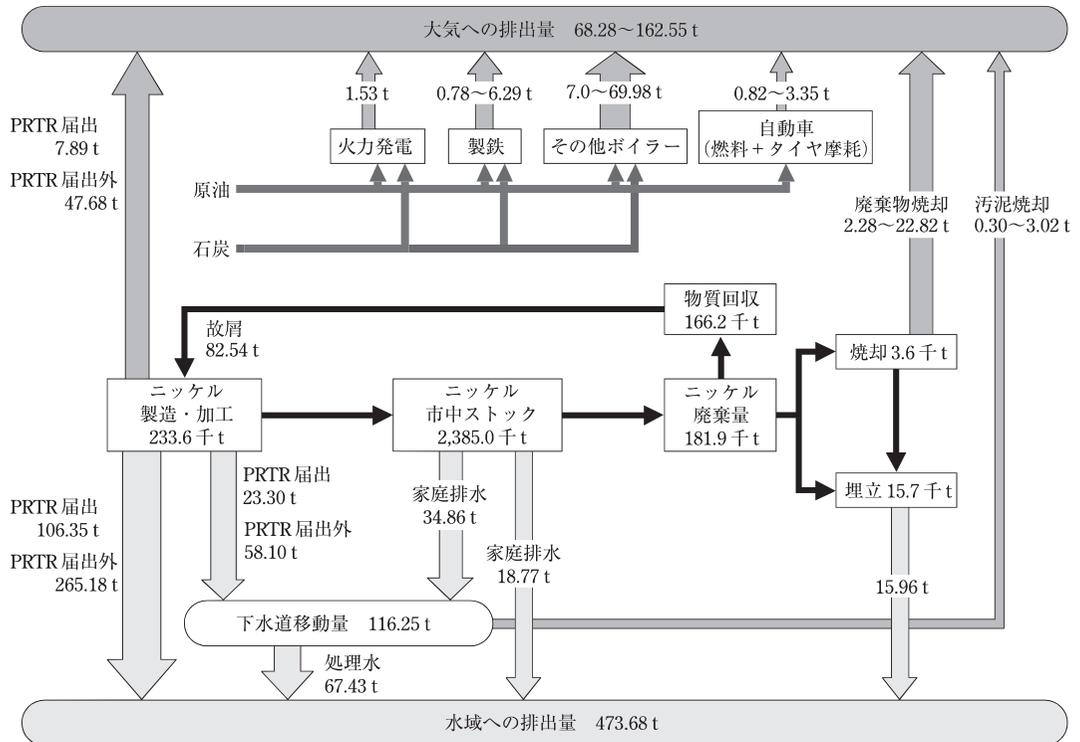


図1 2002年におけるニッケルの物質フローと人為起源の環境中への排出量

と集塵効率を表1のように設定した。特に集塵効率については、実際には同じ集塵機でも効率に差があることが想定されるため、ふたつのシナリオを設定して、集塵効率に幅をもたせた。そのうえで、2002年度におけるニッケルの製造、使用および廃棄のライフステージごとの環境中への排出量推定を行うとともに、ニッケルを含有している石油・石炭の燃焼による大気排出量も推定した。その結果を図1に示す。

国内の排出量について業種別にみると、PRTR すそ切り以下事業所からの排出量が大きいたとも、石油・石炭燃焼にともなう排出量大きい。特に、シナリオ1ではパルプ・紙・紙加工品製造業、化学工業、窯業・土石製品製造業で10t Ni/年以上の排出量が推定された。地域別にみると、関東地域の大気排出量がもっとも大きく、東海、近畿、中国と九州においても排出量が大きかった。都市別にみると、八戸市や安来市では、地域内に立地する大規模事業所であるフェロニッケル製錬所やニッケル合金製造事業所のPRTR届出事業所からの排出量が大きな割合を占める。また、川崎市や倉敷市のような重工業地域をもつ都市では、石油精製、鉄鋼、火力発電に関わる事業所やPRTR すそ切り以下の中小事業所などの、さまざまな事業所からの排出による複合的な影響が示唆された。

また、水域への排出量については、ニッケル製品の製造・加工段階からの排出量が大きく、全体の8割弱を占めた。また、下水処理場からの排出量も大きい状況であることが明らかになった。中小めっき事業所などのPRTR すそ切り以下事業所は大都市圏に立地する傾向があるため、都市を流れる河川に排出が集中する懸念がある。

4. ニッケルのモニタリングデータ

環境中のニッケルのヒトや生物への暴露を推定するためには、暴露に関わる環境媒体および食品・飲料水のニッケル濃度を把握する必要がある。そこで、国内の環境中および食品・飲料水のニッケル濃度について、既存のモニタリングデータをもとに整理し、ヒトや生物の暴露量や暴露濃度を推定するための情報を把握した。

大気中ニッケル濃度については、1997年4月に施行された改正大気汚染防止法にともない、有害大気汚染物質の優先取り組み物質のひとつとして、年平均濃度の指針値 25 ng Ni/m^3 が定められ、全国的なモニタリング体制が整備されている。大気中ニッケルに関する調査結果の経年変化をみると、平均値は減少傾向であるが、最大値は年によってばらつきが大きい。また、最大値は指針値である 25 ng Ni/m^3 を毎年超過している状況である。また、2002年度のモニタリングデータをもとにした大気中ニッケル年間平均濃度の分布を図2に示す。95パーセントイルで約 12 ng Ni/m^3 となり、指針値 25 ng Ni/m^3 を超過している地点数の割合は3%未満と少ない。

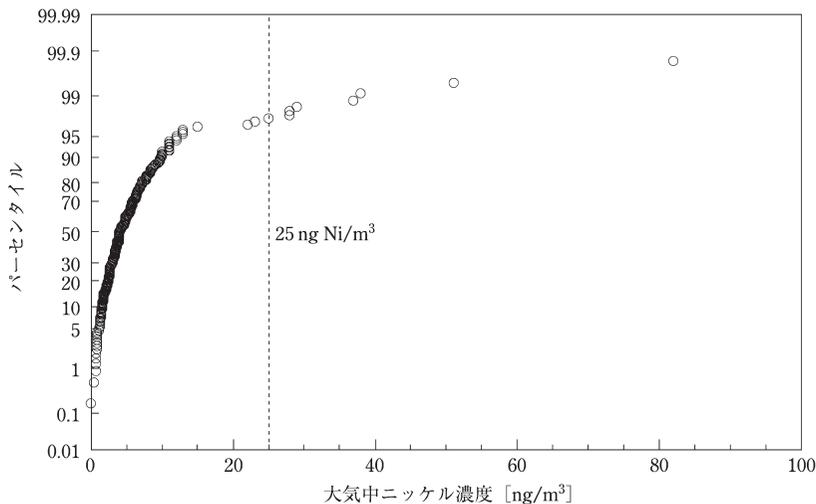


図2 ニッケル大気中濃度の地点別年間平均値の累積分布 (2002年度)

水中ニッケル濃度については、ニッケルは要監視項目の対象物質のひとつであるため、全国の自治体において調査が行われており、1994年～2003年の10年間の各測定点における測定データを集計した。

その結果、海域よりも河川で旧指針値である 0.01 mg Ni/L に対する超過率が高く、検体数が1,000以上の1996年度以降で、超過率は減少傾向にあった。2002年度のモニタリングデータをもとにした水中ニッケル年間平均濃度の分布を図3に示す。多くの河川においてニッケル濃度は低い値で問題のない状況であるが、一部の河川については旧指針値を超過した。同一地点で10年間に複数回 0.01 mg Ni/L を超過する地点を整理すると、埼玉県と大阪府の河川で超過検体数が顕著に多かった。

また、ニッケルは水道法の水質管理目標設定項目に指定され、暫定的な指針値は 0.01 mg Ni/L

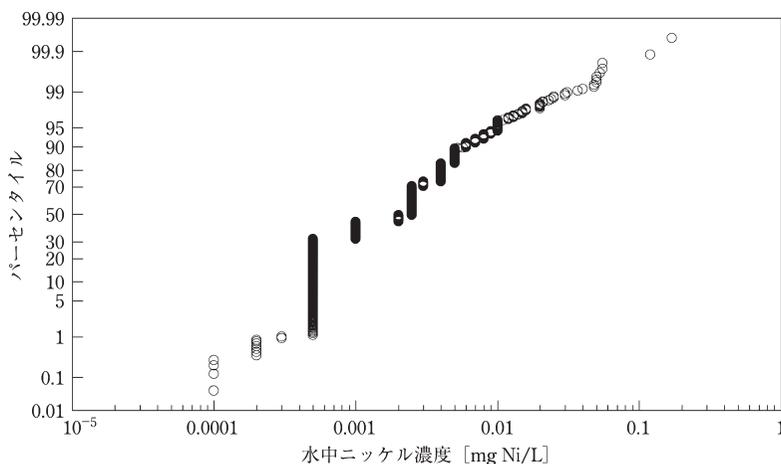


図3 ニッケル水中濃度の地点別年間平均値の累積分布 (2002年度)

である。浄水濃度で暫定指針値を超過する例は1997年以降なかった。給水栓水の濃度は、東京都および埼玉県での調査結果によると、0～0.006 mg Ni/Lの範囲内であった。地下水中濃度の1999～2002年度での年間平均の最大値は0.019 mg Ni/Lであった。家庭排水については、各種データからヒト1人の1日あたりの生活によるニッケル排出量を1.15 mg Ni/day/人と推定した。

食品中濃度については各種の調査があり、国内におけるヒトのニッケル一日摂取量は、およそ190～280 $\mu\text{g Ni/day}$ の範囲と推定された。また、種実類、豆類、調味料類(醤油、味噌)で含有量が大きく、穀類中の米や小麦もやや大きめの含有量であった。

以上のモニタリングデータの結果をもとに、ヒトや生物の暴露量や暴露濃度を推定し、あるいは排出量推定やモデルによる媒体中推定濃度の検証に使用した。

5. 環境中動態と暴露濃度推定

ニッケルの環境媒体中での動態に関して、媒体中での化学種分布を中心にデータを収集した。環境中におけるニッケルの分解および変化については考慮しなかった。ニッケルは粒径1～10 μm 前後の範囲で大気中に存在する傾向があり、10 μm を大幅に超える粒径の存在量は小さいことが想定された。また、大気中の乾性沈着速度を実測値の平均0.5 cm/sとし、洗浄比も実測値の100,000(体積基準)とした。

大気中のニッケルの化学種分布について、既存の調査事例と化学物質リスク管理研究センター(産総研)の調査から、図4のように、地域に立地する事業所の業種によってニッケルの化学種分布に傾向があることがわかった。すなわち、ニッケル精錬所、ニッケル合金製造事業所の建屋内と周辺の両方でニッケル酸化物の濃度が高く、精錬所内ではニッケル硫化物、ニッケル合金製造事業所内では金属ニッケルの割合も少し高いことが、周辺の大気中の化学種分布にも影響を与えていることが示唆された。一方、さまざまな事業所が立地する重工業地域では水溶性ニッケルの濃度の割合が高いところに特徴があり、火力発電所の排ガス、製鉄所周辺の大気ともに水溶性ニッケル濃度が

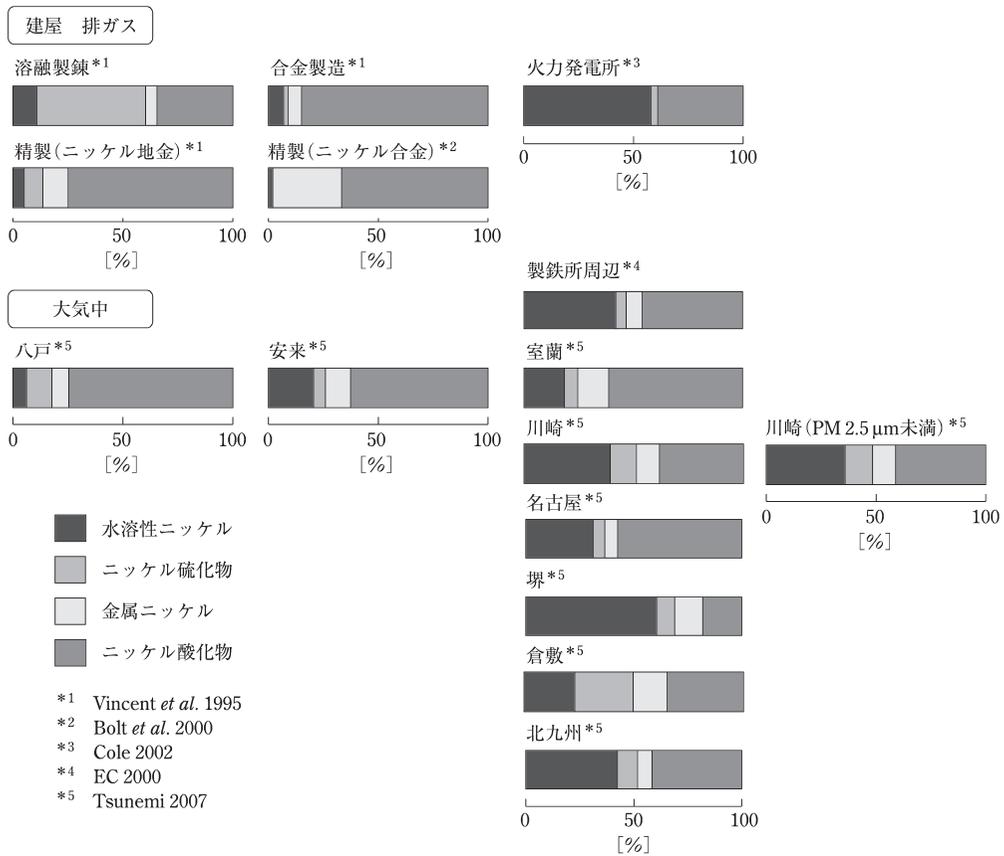


図4 発生源による大気中ニッケルの化学種分布割合の比較

表2 大阪府第二寝屋川と富山県小矢部川の化学種分析結果のまとめ

項目	単位	地点					
		大阪府第二寝屋川			富山県小矢部川		
		城見橋	天王田大橋	金五郎橋	河口	城光寺橋	地子木橋
pH		6.9	7.1	7.3	7.1	7.2	7.2
溶存有機炭素	mg/L	6.8	4.9	4.9	2.9	2.6	3.4
EC	mS/cm	0.5	0.6	0.6	5.0	0.6	0.3
硬度	mg CaCO ₃ /L	90	113	141	411	99	59
全ニッケル	mg/L	0.058	0.133	0.020	0.007	0.005	0.022
溶存態ニッケル	mg/L	0.058 (100%)	0.130 (100%)	0.019 (100%)	0.007 (100%)	0.005 (100%)	0.022 (100%)
生物利用可能なニッケル	mg/L	0.044 (76%)	0.011 (8%)	0.017 (85%)	0.009 (124%)	0.007 (133%)	0.012 (55%)
無機態ニッケル (MINTEQ 推定)	mg/L	0.055 (94%)	0.127 (96%)	0.018 (90%)	0.007 (99%)	0.006 (107%)	0.022 (97%)

注：() は全ニッケル濃度に対する比率を示す。
[永井ら 2007 を加工]

高いことから、石油・石炭燃焼によるニッケル排出の影響の可能性が指摘できた。

また、化学物質リスク管理研究センター（産総研）による河川水中におけるニッケルの化学種分析の結果（表2参照）、ニッケルはほとんど溶存態で存在した。しかし、ニッケルの生物利用性の点では、自然流水の多い郊外河川で、全ニッケルの100%が生物利用可能な濃度であったが、下水処理場からの放流水の割合が高い都市河川では、全ニッケルの85%程度が生物利用可能な濃度であり、下水処理場放流口付近の局所ではその割合が著しく低かった。

ニッケルの生物濃縮性については、魚類は生物濃縮係数が最大でも数百のレベルであったが、藻類や水生植物で係数が数百から数万レベルと大きかった。

推定した排出量をもとに、八戸、川崎、名古屋、安来、倉敷と北九州の各地域を対象に、近傍用拡散モデルであるMETI-LISで大気中濃度を推定した（図5と図6参照）。その結果、フェロニッケル製錬所が立地している八戸、ニッケル合金製造事業所の立地している安来の両地域においては、それらの大規模発生源による寄与が大きいたことが明らかとなった。しかし、推定値は実測値よりも小さくなった。その原因として、各発生源において主要でない工程からの排出が考慮されていないために、PRTR届出排出量が実際よりも小さい可能性があり、特に八戸については、工場敷地内に保管している鉱石やスラグの粉塵が飛散する可能性が指摘できる。また、重工業地域である川崎、名古屋、倉敷と北九州については、いずれも製鉄所や火力発電所だけでなく、他発生源からの寄与も大きいたことが明らかとなった。しかし、その他発生源は多岐にわたった業種であるため、特定が難しいのが現状である。また、推定値は実測値とオーダーレベルでは整合がとれたものの、実測値の半分程度となった。

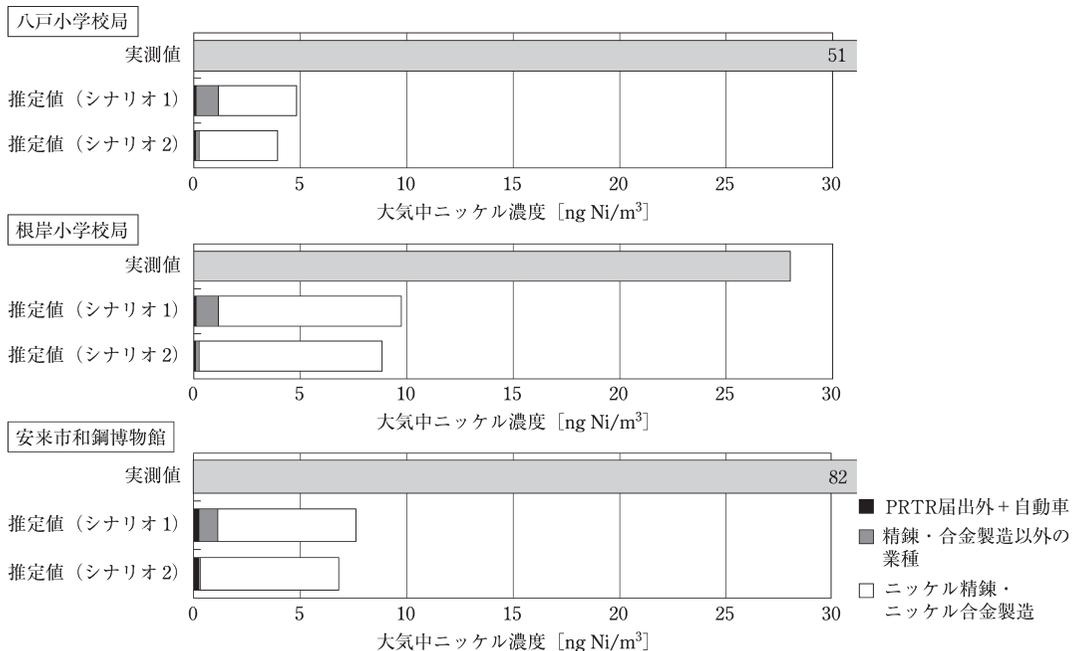


図5 ADMER および METI-LIS 解析により推定された八戸市、安来市の年間平均大気中ニッケル濃度の推定値と実測値の比較（2002年度）

その理由として、PRTR 届出対象事業所の中で 2002 年度段階ではニッケルの排出量を計算せず
にゼロとして届け出ている状況があったこと、業界別の化学物質排出量等算出マニュアルによっ
ては、大気排出する金属は敷地内に沈着して廃棄物として排出されるとの仮定のもとで、大気排出
量をゼロとしている状況があること、その他業種の事業所における集塵効率の幅がシナリオで設定
した以上に大きい可能性などが指摘できた。また、過去数十年間に排出されたニッケルなどの金属が
事業所周辺の土壌に蓄積し、大型車などの走行による粉塵の巻き上げによって、事業所周辺の大
気中ニッケル濃度が高まることも想定された。さらに、大気拡散モデルについても、METI-LIS が粒
子状物質にも対応できる一方、AIST-ADMER は大気中にガス態で存在する有機化学物質に対応
しているが、粒子態特有の沈着現象など考慮していない部分があり、本解析の不確実性が大きく

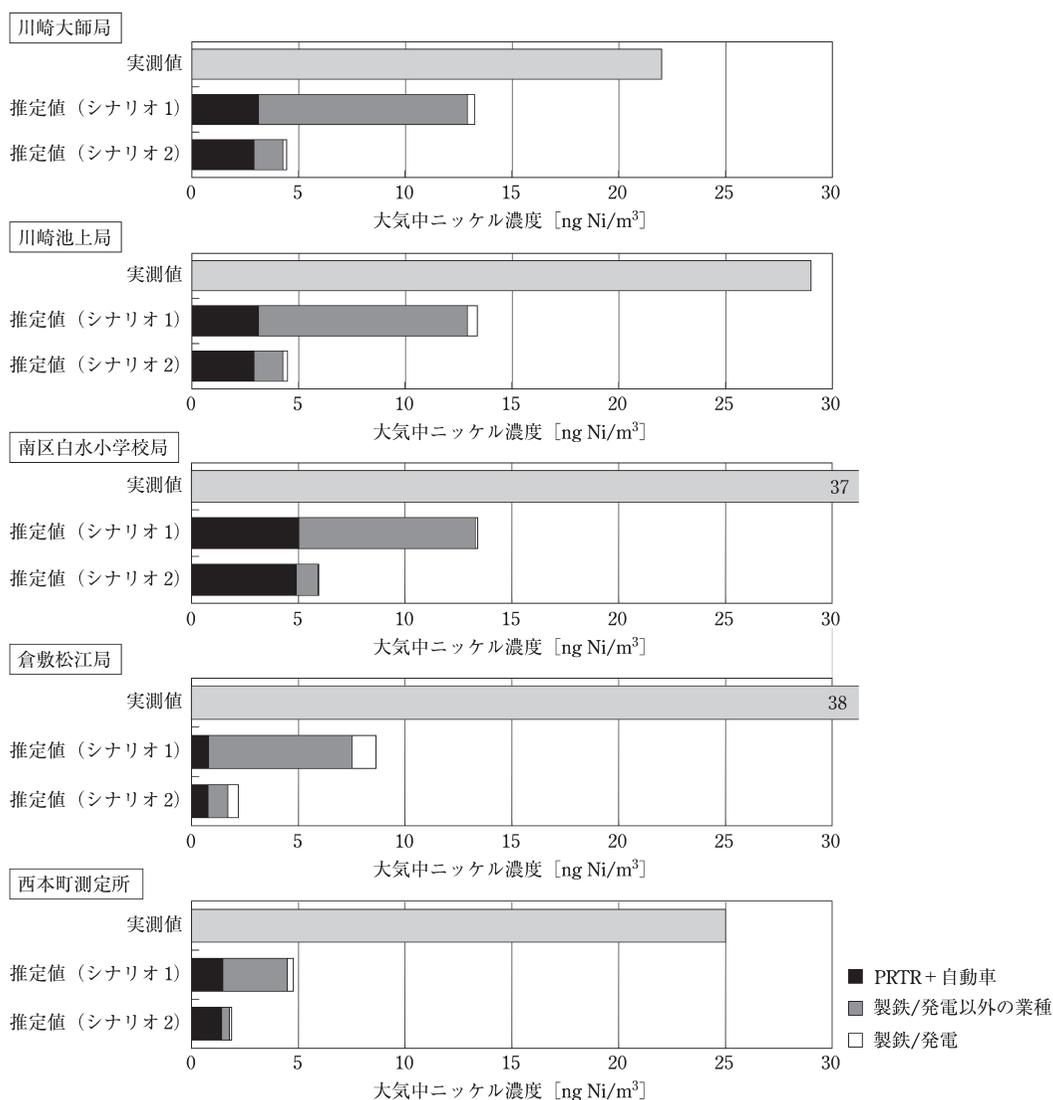


図6 ADMER および METI-LIS 解析により推定された川崎市、名古屋市、倉敷市および北九州市の年間平均大気中ニッケル濃度の推定値と実測値の比較 (2002 年度)

なった可能性もある。

以上から、特に高濃度地点で推定値が実測値に対していずれも低い値となったため、リスク評価の際は実測値を使用した。

6. ヒトに対する暴露評価

環境中および食品・飲料水中のニッケル濃度のモニタリングデータを利用して、ヒトへの暴露濃

表3 リスク評価に使用する高濃度地点の暴露濃度

地 点	全ニッケルと 化学種	大気中濃度 [ng Ni/m ³]	主 要 な 産 業
北海道室蘭市	全ニッケル	42.5	製鉄所，合金製造事業所など多くの工場が立地
	金属ニッケル	6.0	
	水溶性ニッケル	7.9	
	ニッケル硫化物	2.5	
	ニッケル酸化物	26.0	
青森県八戸市	全ニッケル	29.3	フェロニッケル製錬所
	金属ニッケル	2.3	
	水溶性ニッケル	1.8	
	ニッケル硫化物	3.4	
	ニッケル酸化物	21.8	
神奈川県川崎市	全ニッケル	31.6	製鉄所，ステンレス製造事業所など多くの工場が立地
	金属ニッケル	3.3	
	水溶性ニッケル	12.4	
	ニッケル硫化物	3.8	
	ニッケル酸化物	12.1	
愛知県名古屋市	全ニッケル	30.7	製鉄所，合金製造事業所など多くの工場が立地
	金属ニッケル	1.8	
	水溶性ニッケル	9.6	
	ニッケル硫化物	1.7	
	ニッケル酸化物	17.7	
大阪府堺市	全ニッケル	18.5	火力発電所など多くの工場が立地
	金属ニッケル	2.4	
	水溶性ニッケル	11.2	
	ニッケル硫化物	1.5	
	ニッケル酸化物	3.4	
島根県安来市	全ニッケル	35.9	ニッケル合金製造事業所
	金属ニッケル	4.2	
	水溶性ニッケル	7.3	
	ニッケル硫化物	1.9	
	ニッケル酸化物	22.4	
岡山県倉敷市	全ニッケル	34.1	火力発電所，製鉄所など多くの工場が立地
	金属ニッケル	5.3	
	水溶性ニッケル	7.9	
	ニッケル硫化物	9.1	
	ニッケル酸化物	11.9	
福岡県北九州市	全ニッケル	29.5	製鉄所など多くの工場が立地
	金属ニッケル	2.0	
	水溶性ニッケル	12.5	
	ニッケル硫化物	2.8	
	ニッケル酸化物	12.2	

度あるいは暴露量の推定を行った。暴露評価の対象集団は、職業暴露などの特殊な暴露の影響を受けていない一般集団とした。

吸入については、2002年度の大気中ニッケル濃度分布の95パーセンタイルである12 ng Ni/m³を、全国の一般環境でのスクリーニング基準として導出した。また、指針値25 ng Ni/m³を超過する高濃度地点について、1999～2006年度の8年間平均値を生涯に暴露を受ける全ニッケル濃度として扱った。さらに、実測した各地点の化学種の存在割合が一定であると仮定して、各化学種の暴露濃度を導出した（表3参照）。

経口については、食事と飲料水からのヒトの経口摂取によるニッケルの摂取量を推定した。具体的には、食品中・飲料水中ニッケル濃度データと摂取量や体重の分布にもとづいて、ニッケル一日摂取量をモンテカルロ・シミュレーションにより推計し、ニッケルのヒト健康リスクを判定する際に用いるヒトの体重1 kgあたりの平均一日摂取量を年齢別・男女別に求めた（表4と表5参照）。

表4 食事によるヒトの体重あたりのニッケル一日摂取量（単位：μg Ni/kg/day）

年齢群	男 性			女 性		
	平均値	5パーセン タイル	95パーセン タイル	平均値	5パーセン タイル	95パーセン タイル
1～6 歳	11.68	6.35	20.75	11.44	6.26	19.72
7～14 歳	7.79	4.16	13.50	7.48	3.95	13.03
15～19 歳	5.01	2.56	8.96	4.66	2.54	8.14
20～29 歳	4.40	2.27	7.85	4.96	2.50	9.11
30～39 歳	4.33	2.25	7.72	4.90	2.50	8.90
40～49 歳	4.82	2.54	8.72	5.10	2.57	9.41
50～59 歳	5.39	2.77	9.81	5.66	2.91	10.27
60～69 歳	6.04	3.07	11.05	6.06	3.07	11.17
70 歳以上	5.77	2.93	10.55	6.04	2.97	11.30
20～70 歳以上	5.20	2.65	9.68	5.53	2.78	10.42

表5 飲料水によるヒトの体重あたりのニッケル一日摂取量（単位：μg Ni/kg/day）

年齢群	男 性			女 性		
	平均値	5パーセン タイル	95パーセン タイル	平均値	5パーセン タイル	95パーセン タイル
1～6 歳	0.09	0.07	0.11	0.09	0.07	0.11
7～14 歳	0.04	0.03	0.05	0.04	0.03	0.06
15～19 歳	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
20～29 歳	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04
30～39 歳	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
40～49 歳	0.02	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03
50～59 歳	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
60～69 歳	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03
70 歳以上	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.04
20～70 歳以上	0.02	0.02	0.03	0.03	0.02	0.03

7. ヒトへの毒性

金属ニッケルおよび4種類のニッケル化合物（酸化ニッケル，二硫化三ニッケル，硫酸ニッケルおよび塩化ニッケル）のヒト健康への有害性を検討した。その際に，疫学および動物試験データをレビューした。そして，リスク評価に使用する有害性データを，毒性別，経路別，化学種別に以下の表6～表8のように導出した。合わせて，リスク評価に使用する不確実性係数も示している。発がん性については，信頼性の高いヒトの疫学データから算出されるユニットリスクをリスク評価に使用することが適切である。一方，動物試験にもとづくユニットリスクは試算レベルであり，国際的に信頼されているものではないが，大気中の化学種分布を考慮するために動物試験データから算出される各化学種のユニットリスクを補助的に使用する。

表6 リスク評価に使用する吸入の一般毒性データのまとめ

化学種（代表とした化合物）	エンドポイント	データ	不確実性係数 (UF)
金属ニッケル	肺の相対重量増加，タンパク質，乳酸脱水素酵素，好中球の上昇および肺胞タンパク症	雌雄ラットの LOAEL 1 mg Ni/m ³ 13 週間 WIL 2004	2,000 10：種間差 10：個人差 5：LOAEL から NOAEL の外挿 4：亜慢性から慢性への外挿
水溶性ニッケル（硫酸ニッケル六水和物）	肺の慢性炎症，マクロファージ過形成，肺胞タンパク症および線維症，気管支リンパ節のリンパ過形成，鼻部嗅上皮の萎縮	雌雄ラットの NOAEL 0.12 mg/m ³ (0.027 mg Ni/m ³) 2 年間 NTP 1996c	100 10：種間差 10：個人差
ニッケル硫化物（二硫化三ニッケル）	肺の炎症，肺胞上皮過形成および線維症，気管支リンパ節におけるリンパ過形成とマクロファージ過形成，鼻部嗅上皮の炎症と萎縮	ラットとマウスの LOAEL 0.6 mg/m ³ (0.44 mg Ni/m ³) 2 年間 NTP 1996b	500 10：種間差 10：個人差 5：LOAEL から NOAEL の外挿
ニッケル酸化物（酸化ニッケル）	肺の炎症，気管支リンパ節におけるリンパ過形成および色素沈着	雌雄ラットの LOAEL 0.62 mg/m ³ (0.5 mg Ni/m ³) 2 年間 NTP 1996a	500 10：種間差 10：個人差 5：LOAEL から NOAEL の外挿

表7 リスク評価に使用する吸入の発がんデータのまとめ

化学種（代表とした化合物）	エンドポイント	データ	発がんユニットリスク
全ニッケル	肺がんと鼻腔がん	Falconbridge の精錬所での疫学データ Andersen <i>et al.</i> (1996)	$3.8 \times 10^{-4} (\mu\text{g Ni/m}^3)^{-1}$ WHO 2000
ニッケル硫化物（二硫化三ニッケル）	肺胞/気管支腺腫または腺がん	雌ラットへの影響 2 年間 NTP 1996b	$2.2 \times 10^{-2} (\mu\text{g Ni/m}^3)^{-1}$ イカルス/TERA 2006
ニッケル酸化物（酸化ニッケル）	肺胞/気管支腺腫または腺がん（合計）	雌ラットへの影響 2 年間 NTP 1996a	$1.5 \times 10^{-3} (\mu\text{g Ni/m}^3)^{-1}$ イカルス/TERA 2006

表8 リスク評価に使用する経口の一般毒性と生殖発生毒性データのまとめ

毒性	化学種 (代表とした化合物)	エンドポイント	データ	不確実性係数 (UF)
一般毒性	硫酸ニッケル六水和物	生存率低下(雌), 体重増加の低減(雄)	ラットの NOAEL 2.23 mg Ni/kg/day 2年間 CRL 2005	100 10:種間差 10:個人差
生殖発生毒性	硫酸ニッケル六水和物	胎児死亡率の増加	ラットの NOAEL 2.23 mg Ni/kg/day 2年間 SLI 2000	100 10:種間差 10:個人差

8. ヒト健康リスク評価とリスク削減対策

大気中からの吸入と食事・飲料水からの経口のヒト健康リスクを判定した。日本国内全体での吸入のリスクについては、大気中からのニッケル吸入による発がんリスクは 4.8×10^{-6} となり、ほとんどの地域でリスクの懸念はないと判断できた。しかし、指針値を超過した数地点の高濃度地点ではさらに詳細な解析が必要と判断した。

そこで、高濃度地点について以下の評価を実施した。吸入による一般毒性については、各地点の全ニッケルのリスクを求めるためにニッケルを各化学種からなる混合物として扱い、個別の化学種について肺への影響をエンドポイントとするハザード比 (Hazard Quotient; HQ) を求め、それらの総和でハザード指標 (Hazard Index; HI) を算出した。その結果、どの地点においても HI が 1 より十分に小さく、吸入による一般毒性に関して非発がんのリスクを懸念する必要はないと判断した (図7参照)。

発がん性物質のヒト健康リスク評価を行う際のリスクレベルの考え方はいくつかある。第1に、飲料水中の発がん性物質の基準値が、生涯発がん確率でほぼ 10^{-5} のレベルであるのに対応して、大気中の発がん性物質に対しても 10^{-5} を適用する考え方で、国内の有害大気汚染物質におけるニッケル指針値はこの考え方に相当する。第2に、大気環境が水環境と異なることを考慮して、オランダなどで提案されている生涯発がん確率を 10^{-4} に設定して最大許容濃度を求める考え方である。

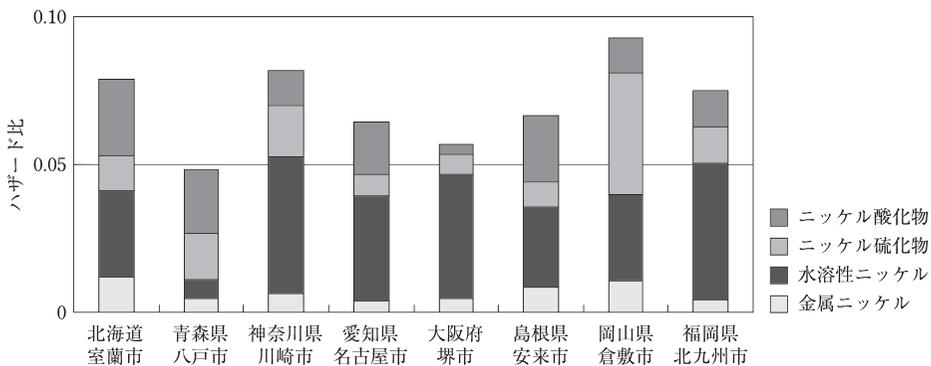


図7 ハザード指標を使用した一般毒性に関する全ニッケルでの吸入リスク評価

ただし、オランダでは最終目標濃度 (Target Value) の生涯発がん確率を 10^{-6} に設定しており、リスク、経済性、対策可能性を考慮して、生涯発がん確率 10^{-6} ~ 10^{-4} の間で限界許容濃度 (Limit Value) を設定することになっている。それから第3に、米国における水道水と大気汚染による1年間あたりの発がん数の比較から、大気経由のリスクの大きさは水道水のそれと比べて3.6~5.6倍となるため、リスク便益原則を適用して大気中の基準値をおよそ 3×10^{-5} で設定する方法がある (中西 1995)。

そこで、吸入による発がんのリスク評価においては、疫学データにもとづいて、全ニッケル濃度に発がんユニットリスクを乗算して発がんリスク (生涯発がん確率) を算出し、各地点の大気中化学種割合に応じて動物試験データにもとづいたユニットリスクで補正した。そして、その値が 10^{-5} あるいは 10^{-4} や 3×10^{-5} を超過しているかないかで判定した。その結果、発がんリスクが 1×10^{-5} を超過する地点は八戸市、川崎市と倉敷市となったが、どの地点においても発がんリスク 3×10^{-5} または 1×10^{-4} を超過しなかった (図8参照)。したがって、上記の3地域においては、実現可能なリスク削減対策を検討する必要があると判断した。

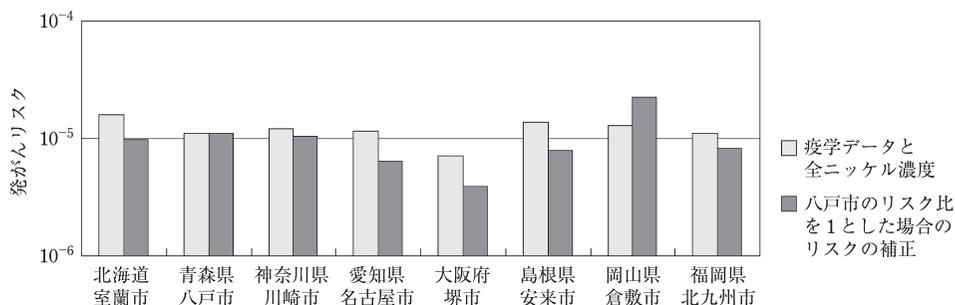


図8 疫学データにもとづく高濃度地点の吸入発がんリスク評価の大気中化学種割合による補正

経口によるヒト健康リスク評価については、ヒト摂取量を確率密度関数的に取り扱い、試験動物でのNOAELを個人差と種間差を考慮したリスク判定時の基準マージンで除した値をヒト摂取量が超える確率として算出した。

一般毒性と生殖発生毒性のリスクの算出結果を表9~表11に示す。男女ともに1~6歳において一般毒性におけるリスク確率が数%程度となったが、20歳~70歳以上の成人では0.17%と低く、慢性毒性によるリスクは生涯の期間において考慮すべきものである。集団全体としてはリスクは小さいと判断した。したがって、一般毒性および生殖発生毒性のいずれにおいても、ニッケルの摂取によってリスクが発現する確率はおおむね低く、食事、飲料水を經由して摂取されるニッケルに特に問題はないと本評価書では判断した。

発がんリスクが 1×10^{-5} を基準とした場合に超過した3地域を中心に、大気中ニッケルのリスク低減対策を検討した。業界団体による有害大気汚染物質に関する自主管理計画の中で実際に行われた排出削減対策とともに、対象業界団体以外の事業所による排出削減対策が行われる場合の対策シナリオを合わせて検討し (表12参照)、全国レベルおよび地域レベルで費用効果分析を実施した。全国レベルでの結果を表13に、高濃度地点の3地域での結果を表14にそれぞれ示す。

その結果、八戸市に立地するフェロニッケル製錬所の対策が、地域の総排出削減量で1.35t Ni/year と効果が大きく、1t削減費用で183百万円/t Ni と費用対効果が高い。よって、フェロニッケル製錬所におけるニッケルの排出削減対策による大気中濃度への効果は大きいことが想定され、これはニッケル合金製造事業所の立地する安来市でも同様の状況と考えられる。

一方で、ほかのシナリオでは地域の総排出削減量が0.1t Ni/year 未満と効果が小さく、費用対効果も1~2桁以上低い。そのため、川崎市や倉敷市のような重工業地域では、大規模事業所の対策は費用対効果の側面からは効率が低く、さまざまな業種、事業所の石油・石炭ボイラーによる複合的な影響のため、大規模事業所の対策による効果は限定的である。

表9 一般毒性に係る経口リスクの算出結果（男性）

年齢群	ニッケル一日摂取量 [$\mu\text{g Ni/kg/day}$]		$Risk_{intake}$ [%]
	平均値	標準偏差	
1~6歳	11.77	5.20	3.95
7~14歳	7.83	3.21	0.47
15~19歳	5.03	2.52	0.18
20~29歳	4.42	2.18	0.08
30~39歳	4.35	2.22	0.09
40~49歳	4.84	2.40	0.08
50~59歳	5.41	2.80	0.29
60~69歳	6.06	3.10	0.43
70歳以上	5.79	2.91	0.33
20~70歳以上	5.22	2.75	0.17

表10 一般毒性に係る経口リスクの算出結果（女性）

年齢群	ニッケル一日摂取量 [$\mu\text{g Ni/kg/day}$]		$Risk_{intake}$ [%]
	平均値	標準偏差	
1~6歳	11.54	4.92	3.27
7~14歳	7.52	3.25	0.50
15~19歳	4.69	2.36	0.14
20~29歳	4.99	2.71	0.25
30~39歳	4.93	2.57	0.20
40~49歳	5.12	2.89	0.34
50~59歳	5.68	2.85	0.32
60~69歳	6.09	3.12	0.44
70歳以上	6.07	3.11	0.42
20~70歳以上	5.56	2.98	0.26

表11 生殖発生毒性に係る経口リスクの算出結果

年齢群	ニッケル一日摂取量 [$\mu\text{g Ni/kg/day}$]		$Risk_{intake}$ [%]
	平均値	標準偏差	
15~19歳	4.69	2.36	0.14
20~29歳	4.99	2.71	0.25
30~39歳	4.93	2.57	0.20
40~49歳	5.12	2.89	0.34
50~59歳	5.68	2.85	0.32

表12 対策シナリオの概要

	対策シナリオ				
	1 (既存)	2 (既存)	3	4	5
対象業種	全国鍍金工業組合連合会、ニッケルめっき事業所	日本鉱業協会、ニッケル精錬所	日本鉱業協会、フェロニッケル製錬所	製鉄所	火力発電所
使用物質	硫酸ニッケル	二硫化三ニッケル	フェロニッケル	石油・石炭	石油・石炭
対策内容	排ガス除去装置（スクラパー）の設置	バグフィルター増設	電気集塵機からバグフィルターへの更新	同左	同左
対象装置数 / 対象事業所数	180 集塵装置 / 180 事業所	2 集塵装置 / 2 事業所	12 集塵装置 / 3 事業所	17集塵装置 / 17 発電所	166ユニット / 74 発電所

したがって、八戸市ではフェロニッケル製錬所の対策が優先すべき事項であるのに対して、川崎市や倉敷市においてはニッケル排出量を削減する効率の高い手段がなかなか存在しない状況がうかがえた。

高濃度地点の大半は発生源周辺か沿道であるため、一般測定局周辺ではリスクが低い可能性がある。しかし、川崎市のように周辺人口の多い地域では暴露人口も大きい可能性があり、リスク削減

表 13 各対策シナリオにおける費用効果分析の結果（全国レベル）

			対策シナリオ				
			1	2	3	4	5
費用	設備投資額 (C_0)	百万円/year	13.2	12.8	500	3,000	3,000
	年間運転経費 (C_2)	百万円/year	2.1	0	20	80	80
	割引率 (r)	百万円/year	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	使用年数 (n)	百万円/year	15	15	15	15	15
	1年あたりの費用 (C_1)	百万円/year	3.2	1.1	61.9	331.3	331.3
	対象装置数	個/国内	180	2	12	17	166
	1年あたりの国内総費用 (TC_1)	百万円/year	577	2.1	743	5,632	54,996
効果	国内の年間ニッケル排出量 (TE_1)	t Ni/year	0.79	0.03	4.60	0.78~6.29	1.48
	排出削減量/率	kg/事業所/year	1.9	18%	90%	90%	90%
	国内の年間ニッケル総排出削減量 (TR_1)	t Ni/year	0.34	0.006	4.14	0.70~5.66	1.33
費用対効果	1t 削減費用 (TC_1/TR_1)	百万円/t Ni	1,687	356	179	995~8,023	41,288

表 14 各対策シナリオにおける費用効果分析の結果（各地域）

地 域			八戸市		川崎市		倉敷市	
			3	5	1	4	4	5
対策シナリオ			3	5	1	4	4	5
費用	設備投資額 (C_0)	百万円/year	500	3,000	13	3,000	3,000	3,000
	年間運転経費 (C_2)	百万円/year	20	80	2	80	80	80
	割引率 (r)	百万円/year	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
	使用年数 (n)	百万円/year	15	15	15	15	15	15
	1年あたりの費用 (C_1)	百万円/year	62	331	3	331	331	331
	対象装置数	個/国内	4	2	47	1	1	8
	1年あたりの地域総費用 (TC_1)	百万円/year	248	663	151	331	331	2,650
効果	地域の年間ニッケル排出量 (TE_1)	t Ni/year	1.50	0.02	0.21	0.03 ~0.27	0.08 ~0.68	0.08
	排出削減量/率	kg/事業所/year	90%	90%	1.9	90%	90%	90%
	地域の年間ニッケル総排出削減量 (TR_1)	t Ni/year	1.35	0.02	0.09	0.03 ~0.24	0.07 ~0.61	0.07
費用対効果	1t 削減費用 (TC_1/TR_1)	百万円/t Ni	183	36,811	1,687	1,363~ 12,270	541~ 4,601	36,811

対策がより重要と考えられる。また、2005年以降は八戸市や倉敷市で濃度が指針値を下回っており、地域や企業のリスク管理によってリスクが低減している可能性があるが、川崎市は指針値を上回る濃度で推移しており、今後も監視を継続する必要がある。そして、地域全体で自主的な排出量削減に取り組める方策を考慮することが望まれる。

9. 生態毒性

ニッケルの生態毒性、特に水生生物への有害性について既存のデータを整理した。そして、種の感受性分布の手法を用いてスクリーニングの基準となる濃度を導出した。その際に、河川水の硬度の毒性への影響を考慮して、日本国内河川の軟水レベルである $150 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ 以下の各水生生物の NOEC のみを使用して、95%の種を守るための基準 HC_5 として 0.0072 mg Ni/L を導出した (図9参照)。

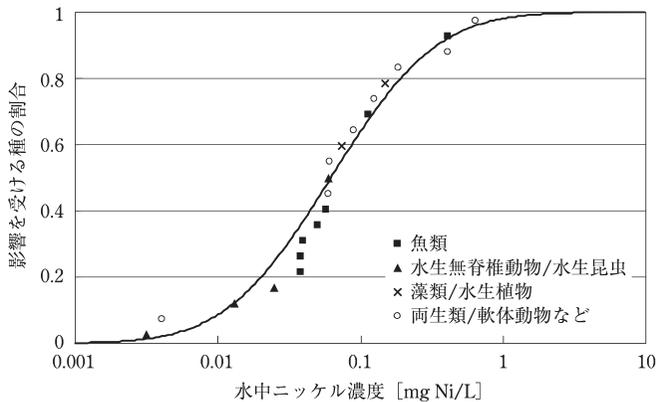


図9 水生生物種の感受性分布 (硬度 $150 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$ 以下の軟水の NOEC のみ使用)

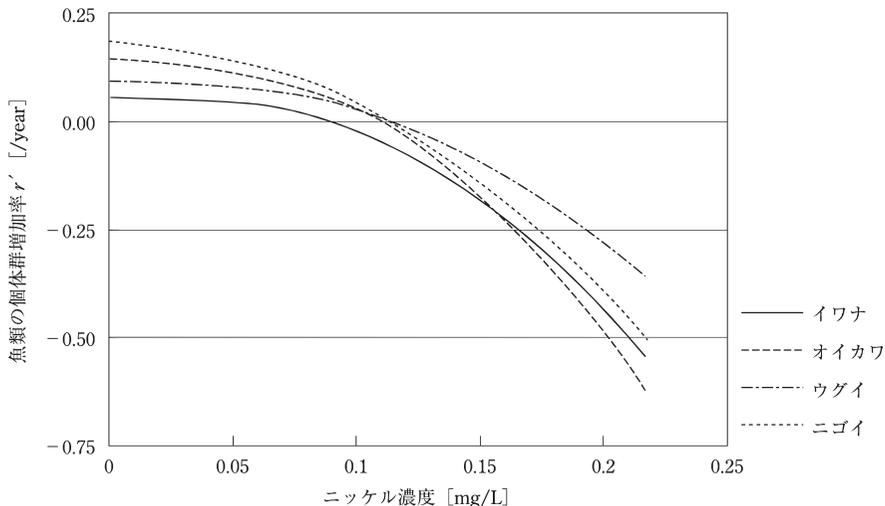


図10 各魚種の個体群増殖率に対するニッケルの影響

また、魚類の地域個体群の存続性を表す個体群レベル濃度を導出するために、イワナ、オイカワ、ウグイ、ニゴイについて、魚類に対するニッケルの慢性毒性データにもとづき得られた用量-反応関係と各種の生活史データより、ニッケルの暴露濃度と個体群増加率 r' との関係性を求めた（図 10 参照）。その結果、イワナ、オイカワ、ウグイおよびニゴイの r' の値が 0 となる濃度は、それぞれ 0.086, 0.13, 0.098, 0.15 mg Ni/L となり、この中で r' の値が 0 となる濃度がもっとも低いイワナの 0.086 mg Ni/L を安全側の措置として、個体群レベル濃度に設定した。

10. 生態リスク評価とリスク削減対策

ニッケルの水生生物への生態リスクについて判定した。まず、種の感受性分布で得られたスクリーニング基準（0.0072 mg Ni/L）をもとに、水生生物種へ影響を及ぼす可能性が低いとはいえない河川をスクリーニングした。その結果、2001 年度で 249 地点（全測定地点数 1,097）、2002 年度で 233 地点（同 1,164）、2003 年度で 230 地点（同 1,147）であった。県別でみると、埼玉県と大阪府で超過地点数が多く、ニッケルめっき事業所などの中小企業が多く点在することの影響が示唆された。

上記のスクリーニングされた地点について、個体群レベル評価を実施した。その結果、ニッケル濃度が 1 回でも個体群レベル（0.086 mg Ni/L）を超過している地点数は 7 地点で、のべ 11 地点あり、7 の水域にあった。また、年間平均値も個体群レベルを超過している地点数は 5 地点で、のべ 7 地点あった。3 年間常に個体群レベルを超過している地点はなかったが、複数年で個体群レベルを超過している地点数は 4 地点あり、新潟県の大通川の 1 地点、福井県の馬渡川の 1 地点、および大阪府の第二寝屋川流域（長瀬川と平野川分水路）の 2 地点であった。

さらに、河川水中におけるニッケルの生物利用性を考慮して、化学種分析結果をもとに、自然流水の多い郊外河川では、全ニッケルの 100 % が生物利用可能な濃度とし、下水処理場からの放流水の割合が高い都市河川では、全ニッケルの 85 % が生物利用可能な濃度として、個体群レベルを超過する河川で生物利用可能なニッケル濃度を推定した。その結果、年間最大濃度に対する生物利用可能なニッケル濃度が個体群レベルを超過している地点数は 4 地点で、のべ 6 地点あり、4 の水域にあった。また、年間平均濃度に対する生物利用可能なニッケル濃度が個体群レベルを超過している地点数はのべ 4 地点あった。

以上のように、リスクが懸念される水域が国内に 4ヶ所存在するため、個体群レベル濃度を超過する地点の多い第二寝屋川流域を中心に、水域への排出量削減による経済性評価を行った。水域への排出で問題となるのはニッケルめっきやアルマイト電解着色の工程においてであるが、現在のところニッケルを他金属に代替する動きはなく、排出削減の努力が行われているのが現状であるため、主要発生源のひとつであるめっき事業所を対象に、現在業界で検討されているリスク対策の費用効果分析を行った（表 15 参照）。この結果、排水処理能力増強の対策は 1 年あたりの費用が大きく、年間売上高 1.5 億円の事業所には初期投資費用が年間売上高の 15 % にも相当するため、大きな経営負担を強いることになる。

表 15 めっき事業所における水域への排出量低減に関する対策間の比較

対策オプション	排水処理能力増強 ろ過設備+キレート 樹脂吸着塔設置	めっき液低濃度化	
		ケース 1： 歩留まりロスなし	ケース 2： 歩留まりロス 0.5%
ニッケルの年間排出削減量 (t Ni/year)	0.030 [4.2, 37.3]	0.026 [3.6, 32.3]	0.026 [3.6, 32.3]
1年あたりの費用(百万円/year)	2.9 [401, 3,586]	-0.6 [-81, -722]	6.9 [962, 8,600]
ニッケル排出量 1t の削減費用 (百万円/Ni t)	96	-22	266

注：[] 内は、寝屋川流域および国内のめっき事業所 139 社と 1,243 社による総費用または総効果。

一方、めっき液低濃度化の対策は、製品の品質安定性レベルによってニッケル排出量の 1t 削減費用が-22~266 百万円と幅が大きく、1t 削減費用を 0 円とするためには、対策による歩留まりロスを 0.04% におさえる必要があると試算できた。それは相当に困難な状況のため、対策による損失の懸念があり、めっき事業者が導入しにくい状況が明らかになった。

また、寝屋川流域に立地する多数の事業所が対応した場合の年間総費用は、最大で約 9.6 億円/year となる。また、日本全国に展開した場合の総費用は最大で約 86 億円/year にもなる可能性があるが、生物利用性を考慮しても個体群レベル濃度を超過する地点は全国に 4 地点しかないので、きわめて効率が低いことが明らかとなった。

11. 結 論

ニッケルのヒト健康リスクについては、以下の結論を得た。吸入のリスクについては、国内のほとんどの地域でリスクを懸念する必要がないと判断した。また、国内の指針値を超過する一部の高濃度地点については、ニッケル化学種の分布も考慮した結果、一般毒性の非発がんに関してリスクが懸念されない結果となった。また、発がん性については、一部の地域で発がんリスク 1×10^{-5} を基準とした場合に超過したが、発がんリスク 3×10^{-5} あるいは 1×10^{-4} を基準とした場合は、どの地点においてもリスクが基準を超過しない結果となった。

また、経口のリスクについては、一般毒性と生殖発生毒性のいずれにおいても、食事、飲料水からのニッケルの摂取によってリスクが発現する確率はおおむね低い結果となった。

発がんリスクが 1×10^{-5} の基準を超過した高濃度地域について、リスク対策の費用対効果を検討した結果、フェロニッケル製錬所で排ガス除去装置を更新する対策の排出量低減の費用対効果が高いことが明らかになった。そのため、八戸市などでは 1 事業所による対策で十分な効果が得られる可能性があるが、川崎市などの重工業地域では、地域全体で自主的な排出量削減に取り組める方策を考慮することが望まれた。

この評価結果から、大気中ニッケル濃度が高い可能性のある重工業地域の近隣において、モニタリングの必要性が指摘される。そして、本評価書で定量化できなかった鉱石・スラグ置場からの粉塵飛散や自動車走行による粉塵巻き上げにともなうニッケル発生量の定量的な解析や、金属の微小

粒子に対応した大気拡散モデルの開発が今後必要である。さらに、発生源の排ガスと周辺的一般環境の化学種分布をそれぞれ把握することで、発生源の寄与がより正確に推定できる。これは、複数の主要発生源をもち複合的な影響がある重工業地域で特に有効な方法である。ニッケルの化学種分析の手法が今後広まる可能性があるため、今後はそのような知見も集まり、より詳細な解析が可能になることが期待できる。

また、リスク管理の観点からは、有害大気汚染物質の自主管理対策を継続するとともに、金属ニッケルや酸化ニッケルを使用する業種や、石油・石炭燃焼に関わる業種における対策も重要である。さらに、重工業地域におけるリスク削減対策の自主計画とその策定が重要である。

本評価書では、大気中のニッケル粒径を考慮した吸入のリスク評価は特に実施しなかった。しかし、ニッケルはその粒径によってヒトへの有害性が本来異なる。体内吸収率や細胞内への取り込みについてニッケルの各化学種に関する定性的な議論はされているが、リスク評価に資する定量的な議論はいまだない。粒径によるヒトの吸収率や有害性に関する定量的な知見が新たに出てくれば、より詳細なリスク評価が可能になるかもしれない。

一方、ニッケルの水生生物に対する生態リスクについては、以下の結論を得た。種の感受性分布で得られたスクリーニング基準を超過する地点が、全測定地点数の2~3割の200数十地点あった。埼玉県と大阪府で超過地点数が多く、めっき事業所などの中小企業が多く点在することの影響が示唆された。次に、個体群レベルを超過する濃度が検出された地点数は7地点で、7の水域にあった。さらに河川水中におけるニッケルの生物利用性を考慮しても、年間平均濃度に対する生物利用可能なニッケル濃度が個体群レベルを超過している地点数は4地点で、4の水域にあった。そして、現在業界などで検討されている排出削減対策に関する費用効果分析の結果、排水処理能力増強およびめっき液低濃度化のいずれの対策によっても、費用対効果の面からは厳しい状況が明らかになり、ニッケルの生態リスク管理のためには、全国の一律基準を設けるのではなく、水中ニッケル濃度の高い地点に限定した対策を考慮する必要性が示唆された。

この評価では、さらに金属の生物利用性を詳細に解析する必要がある。水中の化学種分布の広範囲なモニタリングが望まれるが、実測の限界を補うためにニッケルに関するBLM (Biotic Ligand Model) を開発して適用することで、河川水質の有害性への影響を定量的に示すことが望まれる。しかし、水質の主要なパラメータのひとつである溶存有機炭素について、国内には知見が少ない状況であり、今後系統的な調査が必要である。

また、リスク管理の観点からは、全国の一律基準の設定ではなく、水中ニッケル濃度の高い地点において、事業所の自主管理計画と実施後のモニタリングによって、継続的な検証と見直しによる順応的管理の方策を検討する必要がある。