

モンゴル国北部における重金属汚染とリスク管理 -予報-

村尾 智、川辺能成、世良耕一郎¹、後藤祥子²、高橋千衣子²
Tumenbayar Baatar³、Uramгаа Jambardorj³

(独) 産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門
305-8567 つくば市 東 1-1-1

¹岩手医科大学サイクロトロンセンター
020-0173 岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-58

²日本アイソトープ協会滝沢研究所
020-0173 岩手県岩手郡滝沢村滝沢字留が森 348-1

³ Sans Frontiere Progres
P. O. Box 46/468, Ulaanbaatar-46, Mongolia

1 はじめに

1990年に共産主義を放棄し市場経済に移行したモンゴル国は、一時、国内が混乱し、高い失業率*を記録した。たとえば、1991年には6.5%、1994年には8.7%となっている¹⁾。このような状況を受けて、政府が法令を整備、国の発展に努めた結果、失業率は低下する傾向にあった。しかし、2001年以降「ゾド」と呼ばれる大寒波が国土をくり返し襲い²⁾、遊牧民が多量の家畜を失って貧困層に転落、一部は失業者となったため、劇的な失業率改善には至っていない。

雇用が不安定な国情を背景として、生計を維持するために鉱産地帯に流入し、金をはじめ有用鉱物の狸掘りを行う人々が、モンゴルで急増している(図1、2)。背中に鹽をしょって歩く姿が日本のアニメ「忍者タートルズ」を連想させる事から、ニンジャと呼ばれる彼らは、鉱石の精錬に水銀を用いる事が多い。モンゴルでは水銀を用いた精錬は違法であるため、抜き打ちの検査を政府機関が行って、水銀を没収する事もあるが、その使用は依然として続いており、事故事例も報告されている³⁾。また、金鉱には鉛や砒素の鉱物が随伴する事から、他の重金属汚染のリスクもあると考えられる。事実、すでに、金採掘場近辺に住む人々の毛髪からは高い砒素濃度が報告されている^{4,5)}。

筆者らは、ニンジャの採鉱と精錬 -いわゆるスモールスケールマイニング- について、モンゴル側研究者と情報交換および協力を10年以上行っているが^{6,7)}、分析値を出すだけでは汚染の全体像をつかむ事ができないので、リスク管理の考手法を導入する事とした。本稿では、NMCCのPIXEを用いて分析した全試料のうち、水に着目して行ったリスク評価について、簡単に報告する。

*ここで言う失業率とは労働力人口(15歳以上)に占める失業者の割合である。

2 調査地域と試料

今回の調査は、トブ、ダルハンウール、セレンゲの3アイマク（アイマクは日本の県に似た行政単位）にまたがる産金地帯で、モンゴル国の首都ウランバートルから北西に約の100kmの場所において行った。特に、ボルヌールおよびスンバー村の周辺を中心として、情報収集とサンプリングを行った。



図1 典型的なニンジャの採掘現場



図2 ある程度利益を出して機械化された現場

サンプリングに際しては、環境リスクを総合的に推定するため、鉱石、土壌、雑草、農作物、食品、井戸水、河川水等、できるだけ多様な試料をカバーするよう心がけ、カテゴリーごと30点前後を目処に採取を行った。井戸については、所有者を特定・面会し、趣旨を説明して、同意を得た上で採水した。また、井戸水および河川水については、硝酸を添加してpH=1に調整し、試料瓶に封入した。

さらに、有害元素に対する曝露経路を推定するため、地元医師の協力を得て、地域住民から聞き取り調査も行った。聞き取り調査の結果を表1に示す。なお、同意を得られた住民からは毛髪の提供も受けたが、その分析については、本稿では触れない。

表1 地元住民のインタビュー概要

飲料水は全員井戸水か湧水。
朝食から夕食までお茶と揚げパン、麺類、乳製品の質素な食事。たまに肉類。
乳製品をよく摂取。
昼食は抜く人もいる。
鉱夫は飲酒しない。あるいはできない人が多数。
粉塵の吸入程度は不明だが可能性は高い。

3 測定方法

3.1 前処理と試料調製

測定試料を表2に示す。水、アルヒ（モンゴルのウオツカ）、ミルク、ミルクティはマイクロチューブに1mL分取し、内部標準試薬を加えて攪拌均一化後、マイラーフィルムに10~30 μ L滴下、自然乾燥または赤外線ランプを用いて乾燥させた後に測定した。バターは湯煎にかけて溶解した後、同様の方法で調製した。チーズ、肉類、植物、小麦粉は105°Cで1時間程度乾燥させた後、粉末化して一定量秤量し、内部標準試薬を加え硝酸灰化した後、マイラーフィルムに5 μ L滴下して乾燥後に測定した。土壌は105°Cで1時間程度乾燥させた後、メノウ乳鉢で粉末化、さらに500 μ mメッシュのふるいを用いて夾雑物を除去した。これに内

部標準として 5% Pd-C を試料中 Pd 濃度 10,000 ppm となるように加え⁸⁾、極微量をマイラーフィルムに置き、1% コロジオン 3 μL で固定し測定した。鉍石は粉碎後、土壌と同様の方法で調製した。

3.2 測定条件

測定は通常真空 PIXE で行われたが、ビームの熱により溶融し揮発する可能性の高いバターに関しては大気 PIXE が用いられた。

真空条件での分析では、島津製作所小型サイクロトロンより引き出した 2.9 MeV の陽子ビームを、グラファイト製コリメータにより 6 mm ϕ に整形し、真空チャンバー内に置いた試料を照射した。試料より発生した X 線は、2 台の Si (Li) 検出器により同時に測定した。1 台は 500 μm マイラー吸収体とともに使用、K-K α 以上のエネルギーの X 線を測定した。もう 1 台は、吸収体を用いず、グラファイト製コリメータにより計数率を調整、Na から K までの軽元素を測定した⁹⁾。鉄濃度が突出する土壌試料に関しては、鉄のピークを減弱させ重元素の感度を 2 桁向上させる「特殊吸収体¹⁰⁾」も 500 μm マイラーと共に使用し、Cu 以上の重元素の分析を行った。

大気 PIXE を行う場合は、真空散乱槽通過後の陽子ビームを bending magnet により 45 度下方に偏向させ、6 mm ϕ のグラファイト製コリメータで成形のうえ、7.5 μm Kapton (Polyimide) foil を通して大気中に導出した。発生した X 線は、Si(Li)検出器 (PGT LS10138HT; 分解能 = 137 eV at 5.98 keV) により測定した。ビーム電流は最大 3 nA である¹¹⁾。これらの計測システムにより得られたスペクトルは、解析プログラム SAPIX により解析した¹²⁾。

表 2 試料調製法、内部標準および吸収体の一覧

	調製法	内部標準元素	内部標準濃度	吸収体(mm Mylar)
水	液体内部標準法	In	10 $\mu\text{g/mL}$	500
アルヒ	液体内部標準法	In	10ppm	500
ミルク	液体内部標準法	In	100~200 $\mu\text{g/g}$	500
ミルクティ	液体内部標準法	In	20~100 $\mu\text{g/g}$	500
チーズ	硝酸灰化法	In	1000 ppm	500
バター	溶解→液体内部標準法	Y	100~200 $\mu\text{g/g}$	200
肉類	硝酸灰化法	In	1,000 $\mu\text{g/g}$	500
植物	硝酸灰化法	In	1,000 $\mu\text{g/g}$	500
鉍石	粉碎→粉末内部標準法	Pd	10,000 $\mu\text{g/g}$	500 & 特殊吸収体
土壌	粉末内部標準法	Pd	10,000 $\mu\text{g/g}$	500 & 特殊吸収体
毛髪	無標準法	-	-	300
小麦粉	硝酸灰化法	In	1,000 $\mu\text{g/g}$	500

4 結果

分析の結果、多くの試料に鉛が含まれる事、一部の試料に砒素や水銀が含まれる事が判明した。ニンジャは水銀を使用する事から、筆者らは水銀汚染が最も深刻ではないかと考えて分析を進めたが、予想に反して、試料中の水銀濃度は低く、むしろ鉛が高い傾向が認められた。たとえば、水試料における鉛濃度の範囲は 0-57 $\mu\text{g/L}$ で (表 3)、わが国における地下水基準 (1 リットルにつき鉛 0.01mg 以下) を上回る試料が多数あった。アルヒやバターからも鉛が検出された。

最終的には全試料について重金属類のリスク評価をすべきだが、最初の作業として、井戸水・河川水中の鉛を扱う事とした。飲料水は住民が体内に取り込む量として、他の試料より、桁違いに大きいと思われるためである。

まず、鉛に対する曝露量の試算を行った。大人および小人の曝露量 (ExR [$\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$]) は Cpb を鉛測定値とすると、以下の式で表すことができる。

$$\text{ExR} = \text{Cpb} \times \text{IW} / \text{W} \quad (1)$$

ここに IW [L/d] は1日あたりの水摂取量であり、算出には大人 2L/d、小人 1L/d を用いた。W[kg]は体重であり大人 50kg、小人 15kg と仮定した。また、生涯曝露量 (ExRlife [$\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$])を大人の期間 Ta [y]、小人の期間 Tc [y]および人の生涯の期間を TL [y]として次式により算出した。

$$\text{ExRLife} = (\text{ExRa} \cdot \text{Ta} + \text{ExRc} \cdot \text{Tc}) / \text{TL} \quad (2)$$

表3 井戸水、河川水のリスク評価例

Sample number	Pb [$\mu\text{g}/\text{L}$]	Exposure rate [$\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$]			Risk (Exposure rate / TDI)		
		Adults	Children	Lifetime	Adults	Children	Lifetime
MW-01	0.0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
MW-02	0.0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
MW-04	14.0	0.56	0.93	0.59	0.156	0.259	0.164
MW-05	57.0	2.28	3.80	2.41	0.633	1.056	0.670
MW-06	27.0	1.08	1.80	1.14	0.300	0.500	0.317
MW-07	0.0	0.00	0.00	0.00	0.000	0.000	0.000
MW-08	12.0	0.48	0.80	0.51	0.133	0.222	0.141
MW-09	49.0	1.96	3.27	2.07	0.544	0.907	0.576
MW-10	32.0	1.28	2.13	1.35	0.356	0.593	0.376
MW-11	24.0	0.96	1.60	1.01	0.267	0.444	0.282
MW-12	16.0	0.64	1.07	0.68	0.178	0.296	0.188
MW-13	14.0	0.56	0.93	0.59	0.156	0.259	0.164
MW-14	8.0	0.32	0.53	0.34	0.089	0.148	0.094
MW-15	27.0	1.08	1.80	1.14	0.300	0.500	0.317
MW-16	57.0	2.28	3.80	2.41	0.633	1.056	0.670
MW-17	73.0	2.92	4.87	3.09	0.811	1.352	0.857
MW-18	19.0	0.76	1.27	0.80	0.211	0.352	0.223
MW-19	39.0	1.56	2.60	1.65	0.433	0.722	0.458
MW-20	18.0	0.72	1.20	0.76	0.200	0.333	0.211
MW-21	18.0	0.72	1.20	0.76	0.200	0.333	0.211
MW-22	16.0	0.64	1.07	0.68	0.178	0.296	0.188
MW-23	15.0	0.60	1.00	0.63	0.167	0.278	0.176
MW-24	8.0	0.32	0.53	0.34	0.089	0.148	0.094
MW-25	12.0	0.48	0.80	0.51	0.133	0.222	0.141

推定では大人の期間を 64 年、小人の期間を 6 年、人の生涯を 70 年間とした場合の生涯曝露量を算出した。

次いで、WHO (世界保健機関) のデータをもとに、許容摂取量について計算した。WHO による Pb の PTWI (1 週間当りの許容摂取量) 25 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{w}$ を 1 日当りに換算し、3.6 $\mu\text{g}/\text{kg}/\text{d}$ という値を得た。このような値は耐用 1 日許容摂取量(TDI)と呼ばれる。鉛曝露量の TDI に対する比が大きいほどリスクは大きいと考えられ

る。表3に生涯曝露量およびTDIに対する曝露量の割合を示す。

5 考察

まず、曝露量では、小人の方が多くの曝露を受けることがわかった。1日当りの井戸水摂取量は少ないものの、体重が大人に比べて軽いためである。次にTDIに対する割合をみると、生涯曝露量でTDIの10%を超過する場所は25箇所中20とかなり多かった。また、生涯曝露量でTDIの50%を超える場所が4箇所あり、小人の曝露量で100%を超過する場合も認められた。TDIについては安全率が考慮されているので、TDI値を超えると何らかの健康影響が出現するとは考えにくい。食品や土壌など他の曝露経路からも鉛を摂取するものと考えられ、この地域における鉛の健康リスクは大きいものと推定される。

当該地域では、飲料水は井戸から供給されており、水道水やペットボトル入りミネラルウォーターは使われていない。したがって、井戸水の鉛汚染は深刻な問題である。また、その他の試料にも、鉛がかなりの割合で含まれている。場所によっては、ミルクティ（スーテーツァイと呼ばれるモンゴル風乳茶）から砒素と水銀が検出された。分析値をさらに増やし、リスクアセスメントをより精緻にする事、大きな重金属曝露をもたらす経路を遮断する事、食生活に関して適切な助言を行う事が、緊喫の課題と思われる。

追悼の辞：筆者らの旅行に最初から最後まで同行し、道路が整備されていない丘陵地帯における調査を成功に導いた、レンツェンチュルン運転手が昨年未急逝された。この場をお借りして哀悼の誠を捧げたい。

参考文献

- 1) IMF (2012) "World Economic Outlook Database", Retrieved May 17, 2012 from <http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2012/01/weodata/weorept.aspx?sy=1990&ey=2012&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&c=948&s=LUR&grp=0&a=&pr.x=63&pr.y=12>
- 2) Mongolia-web (2010) "Six million heads of livestock died in Mongolia", Retrieved May 17 from <http://www.mongolia-web.com/2689-six-million-heads-livestock-died-mongolia>
- 3) Joint UNEP/OCHA Environment Unit (2007) "Sodium cyanide and mercury pollution and mining related environmental emergencies in Mongolia", Geneva, 11pp.
- 4) Murao, S., Tumenbayar, B., Sera, K., Futatsugawa, S. and Waza, T. (2004) "Finding of high level arsenic for Mongolian villagers' hair", *Int'l Journal of PIXE* 14, 125-131.
- 5) Murao, S., Sera, K., Tumenbayar, B., Saijaa, N. and Uramгаа, J. (in print) "High level of arsenic reaffirmed for human hairs in Mongolia", *Int'l Journal of PIXE*.
- 6) Murao, S., Naito, K., Hamasaki, S., Sie, S. H. and Dejidmaa, G. (2006) "Bismuth content of electrum from Mongolian artisanal/small-scale mining sites", *Int'l Journal of PIXE* 16, 145-147.
- 7) Murao, S., Naito, K., Dejidmaa, G. and Sie, S. H. (2006) "Mercury content in electrum from artisanal mining site of Mongolia", *Nuclear Instruments and Methods B249*, 556-560.
- 8) Sera, K. and Futatsugawa, S. (1998) "Quantitative Analysis of Powdered Samples Composed of High-Z Elements.", *Int'l Journal of PIXE* 8, 185-202
- 9) Sera, K., Yanagisawa, T., Tsunoda, H., Futatsugawa, S., Hatakeyama, S., Saitoh, Y., Suzuki, S. and Orihara, H., (1992) "Bio-PIXE at the Takizawa facility (Bio-PIXE with a baby cyclotron)", *Int'l Journal of PIXE* 2, 325-330.
- 10) Sera, K. and Futatsugawa, S. (1995) "Effects of X-ray absorbers designed for some samples in PIXE analyses", *Int'l Journal of PIXE* 5, 181-193.
- 11) Sera, K., Terasaki, K., Itoh, J., Saitoh, Y. and Futatsugawa, S. (2007) "Physical quantitative analysis in in-air PIXE", *Int'l Journal of PIXE* 17, 1-10.
- 12) Sera, K. and Futatsugawa, S. (1996) "Personal computer aided data handling and analysis for PIXE", *Nucl. Instr. and Meth.*, B 109/110, 99-104.

Heavy metal contamination and the risk management in northern part of Mongolia

S. Murao, Y. Kawabe, K. Sera¹, S. Goto², C. Takahashi²,
B. Tumenbayar³ and J. Uramгаа³

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology
1-1-1 Higashi, Tsukuba, Japan 305-8567

¹Cyclotron Research Center, Iwate Medical University
348-58 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

²Takizawa Institute, Japan Radioisotope Association
348-1 Tomegamori, Takizawa, Iwate 020-0173, Japan

³Sans Frontiere Progres
P. O. Box 46/468, Ulaanbaatar-46, Mongolia

Abstract

Japan-Mongolia joint investigation was carried out in some local communities involved in or affected by artisanal gold mining in northern part of Mongolia. Environmental specimens were collected and analyzed at NMCC through PIXE method. The authors expected high mercury values for specimens because artisanal miners *Ninjas* often use mercury. However lead and arsenic showed anomaly instead of mercury in many samples. Thus the authors calculated the health risk of lead in water, and concluded that the risk is high in the study area.