



International  
Resource  
Panel



社会の中の鉱物資源の評価：



# 人為的金属フロー およびサイクルの 環境リスクと課題

# 謝辞

Copyright©United Nations Environmental Programme, 2013

編集：国際資源パネル・グローバル金属フロー作業部会

本要約版資料はM.Buchert, C.Merz（ともにOeko-Institut e.V.）およびE.van der Voetが作成を担当した。

Tomas Marques（UNEP）とPhilip Strothmannが監修し、貴重な指摘とコメントを提供した。

国際資源パネル共同議長のErnst Ulrich von WeizsaeckerおよびAshok Khoslaの両氏、国際資源パネルおよび運営委員会のメンバー諸氏による実り多い論考に謝意を表する。

主執筆者：Ester van der Voet, University of Leiden, Netherlands

章ごとの執筆者：Ester van der Voet, Leiden University, Netherlands; Reijo Salminen, Geological Survey Finland, Finland; Matthew Eckelman, North Eastern University, Boston, USA; Gavin Mudd, Monash University, Australia; Terry Norgate, CSIRO Minerals Down Under Flagship, Australia; roland Hischier, EMPA, Switzerland; 協力執筆者：Job Spijker, National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands; Martina Vijver, Leiden University, Netherlands; Olle Selinus, Linneaus University Sweden; Leo Posthuma, National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands; Dick de Zwart, national Institute for Public Health and the Environment, Netherlands; Dik van Meent, Radboud University Nijmegen, Netherlands; Markus Reuter, Outotec Oyj, Espoo, Finland; Ladji Tikana, German Copper Development Association, Germany; Sonia Valdivia, UNEP, France; Patrick Waeger, EMPA, Switzerland; Michael Hauschild, Technical University of Denmark; Arjan de Koning, Leiden University, Netherlands

以下の諸氏より、草稿のレビューおよび貴重な情報と意見を提供いただいた（アルファベット順）：John Atherton, International Council on Mining and Metals; Caroline Braibant, European Precious Metals Federation; Clare Broadbent, World Steel Association; Peter Campbell, Universite du Quebec, Institut National de la Recherche Scientifique, Canada; Sandra Carey, International Molybdenum Association; Grant Darrie, International Chromium Development Association; Katrien Delbeke, European Copper Institute; Johannes Drielsma, Euromines; Alain Dubreuil, Natural Resources Canada, Canada; Maria Amelia Enriques, Federal University of Para State, Brazil; Kevin Farley, Manhattan College, USA; Thomas Graedel, Yale University, USA; Edgar Hertwich, Norwegian University of Science and Technology, Norway; Paola Kistler, Rio Tinto, Switzerland; Christian Leroy, European Aluminium Association; Eirik Nordheim, European Aluminium Association; Jerome Nriagu, University of Michigan, USA; Jozef M. Pacyna, Norwegian Institute for Air Research, Norway; Claudia Pena, Chilean Research Centre for Mining and Metallurgy, Chile; Patrick van Sprang, Arche

Consulting Brussels, Belgium; Sangwon Suh, University of California, USA; Frans Vollenbroek, European Commission, Belgium; Pia Voutilainen, Scandinavian Copper Development Association, Finland、その他、以下の機関：Codelco, Euromines, European Aluminium Association, European Precious Metals Federation, International Chromium Development Association, International Copper Association, International Council on Mining and Metals, International Molybdenum Association, International Zinc Association, Rio Tinto, and World Steel Association

写真：istockphoto.de: @githes[cover\_1, p.3], @Jonceclearvision[cover\_2], @Milos Peric[cover\_3], @JDNY59[cover\_4], @Marco Hegener[cover\_5], @HuchenLu[p.2, p.15\_1], @Daniel Schoenen[p.7\_1], @WoodenDinosaur[p.7\_2], @Cliff Parnell[p.7\_4], @Bart van der Dikkenberg[p.11\_1], @Ugur Bariskan[p.16], @Zview[p.19\_7], @iofoto[p.19\_8,p.28], @Pete Saloutos[p.19\_10], @ricardoazoury[p.20, p.26\_1], @Zsolt Biczó[p.21\_1], @Tobif82[p.21\_2], @Ugurhan Betin[p.22], @Tobias Machhaus[p.24], @Alexey Dudoladov[p.25\_1], @Ivan Stevanovic[p.25\_2], @deepblue4you[p.26\_2], @design56[p.26\_3], @Ermin Gutenberge[p.31]; Wikipedia[p.7\_3]; Mining Legacies[p.8]; Gavin M.Mudd[p.11\_2, p.11\_3]; Outokumpu Mining Museum[p.13,p.19\_11]; www.barrick.com[p.15\_2]; RaBoe[p.18\_1]; PhotoDisc.com[p.18\_2, p.18\_3,p.18.4,p.19\_1~6]

デザイン&創案：www.3fdesign.de

お断り：本資料で用いた表現や言及は、各国、領域、都市、司法域、または国境や境界等の限界などの法的状況に関するUNEPの見解を示唆するものではありません。また、本資料の見解は、必ずしもUNEPの決定や明示された政策を反映するものではなく、商標名または商業的プロセスの引用は、それらを是認していることを表わすものではありません。

ISBN:978-92-807-3266-5  
Job Number: DTI/1534/PA

UNEPは地球規模で環境保全上適切な活動を進め、自機関でも実践しています。この資料は、リサイクル繊維80%のFSC認定紙に、環境に優しい方法で印刷しています。我々の配布に関するポリシーはカーボンフットプリントを削減することを目指しています。



International  
Resource  
Panel

この資料は、グローバル金属フロー作業部会の報告書3

## 人為的金属フローと サイクルの環境リスクと課題 の要約版です。

完全版報告書はCD-ROM版で配布されています  
(本要約版資料の裏表紙内側に同封)

## 序文



金属の環境影響について述べる本報告書は、国際資源パネルのグローバル金属フロー作業部会による6部構成の報告書の一つで、グローバルな金属フローに関する信頼性の高い科学的評価を通じて、金属のリサイクル、持続可能な採鉱、および利用の改善のための慣例にとらわれない政策オプションを明らかにすることを狙いとしている。

金属の使用に由来する影響について科学的な基礎となる知識を提供し、影響軽減のためのオプションを提示することは、金属需要の急増に伴って将来的な金属の環境影響が増大し、金属のライフサイクル全体を通じての環境と人間の健康に対する圧力が高まると予測される状況に鑑みて、喫緊の課題である。たとえば、金属の採鉱と製錬は、地下水と地表水へ有毒物を放出して地域的な環境と健康問題を引き起こす恐れがある。さらに、これらのプロセスは極めてエネルギー集約的な活動であり、現在、全地球のエネルギー供給総量の約8%を消費していることから、地球規模の環境問題についても責の一端を担っている。

その他に、化石燃料やリン酸肥料などの非金属の資源に関連したもの、または最終的な廃棄物に含まれる金属の流れに由来する環境への金属排出の増加は、環境と人間の健康に重大な脅威となっている。環境影響を最小限に抑えつつ持続可能な発展を推進するために金属を利用する持続可能な金属管理は、刺激的な社会的課題である。

金属リサイクルの拡大により、金属の使用と生産に起因する環境悪影響は部分的に軽減され得ると期待される。しかしながら、リサイクル率改善だけでは不十分であり、金属需要の上昇カーブを抑える方策を平行して進める必要がある。地域的には、先進的な資源開発企業を手本とした悪影響防止のための相応な取り組みが今後も引き続き非常に重要である。

**Dr. Ashok Khosla**  
国際資源パネル共同議長

**Prof. Thomas E. Graedel**  
グローバル金属フロー作業部会部長

**Prof. Ester van der Voet**  
筆頭執筆者

# 序文



金属は、インフラや製品製造の中核的原材料として経済の根幹に位置している。発展途上国では急速な工業化の進展により、また、先進国では現代の技術が金属の使用を必要とすることから、金属需要は将来も強固であり続けよう。一方、インクルーシブ（包摂的、包括的）なグリーン経済への移行の一環として注目される再生可能エネルギー技術は、一般的に化石燃料よりも金属を必要とする。

UNEP国際資源パネルの作成した本報告書は、水、食糧生産、エネルギーなど他の資源利用と関連付けつつ、金属の様々なライフサイクル段階における潜在的環境影響を浮き彫りにするものである。

一例をあげると、採鉱は、鉱山廃棄物や地下水・地表水の汚染などによって、その地域の生態系と景観に甚大な影響を及ぼす可能性がある。

一方、より見えにくい形ではあるが、エネルギーを大量消費する金属生産活動は、温室効果ガス排出によって地球環境に多大な圧力を加えている。

こうした金属の複雑な環境フットプリントに加え、不適切な最終廃棄物処理が、製品ライフサイクルの最後（EoL、／使用済み段階）での問題を。

本報告書では、金属リサイクルが、統合型アプローチの効果を示す好例であると結論づけている。例えば、鉱石からの金属生産（一次生産）は、リサイクルによる生産（二次生産）と比較して、生産される金属1kgあたり2桁大きいエネルギーを必要とする。

金属リサイクル率向上と二次生産の拡大ひいては資源効率の向上には、多くの可能性が存在する。金属の持続可能な取扱いは、経済的な現実、課題と必要性にこたえるだけでなく、さらに、公平性・雇用・繁栄という社会的課題への応答でもある。

包括的で、低炭素で、そして資源効率の高いグローバルな「グリーン経済」への移行を進める上で、持続可能な発展や持続可能な金属管理といった課題に対応できるのは、唯一、体系的アプローチのみである。

## Achim Steiner

国連事務次官兼UNEP事務局長

# UNEP国際資源パネルの金属関連の活動

## 国際資源パネル (IRP)

2007年、UNEPは、天然資源の持続可能な利用と天然資源利用のライフサイクル全体での環境影響について首尾一貫して信頼性ある、独立した科学的評価を実施するため国際資源パネル (IRP) を設置した。

IRPは、最新の情報と手にすることのできる最高の科学的知見を提供し、人為的開発と経済成長を環境悪化から切り離す（デカップリング）方策のより良い理解に貢献している。IRP報告書に含まれる情報は政策に関連し、政策の枠組み検討や政策・計画立案をサポートし、政策の効果に関する評価とモニタリングに役立つことを意図したものである。

## グローバル金属フロー作業部会

IRPは、金属のリユースとリサイクルの推進、ひいては健全な国際規模でのリサイクル社会の実現に貢献すべく、グローバル金属フロー作業部会を設置した。同作業部会は、地球規模の金属フローについて、科学的で信頼性の高い一連の評価報告書の作成に取り組んでいる。この取り組みを通じて、各国レベルと国際レベルの双方での資源効率向上のための潜在的な可能性（ポテンシャル）が明らかとなることが期待される。本資料は、Ester van der Voet以下の執筆陣による報告書3「人為的金属フローおよびサイクルの環境リスクと課題」の概要である。

## 持続可能な発展における金属の重要性

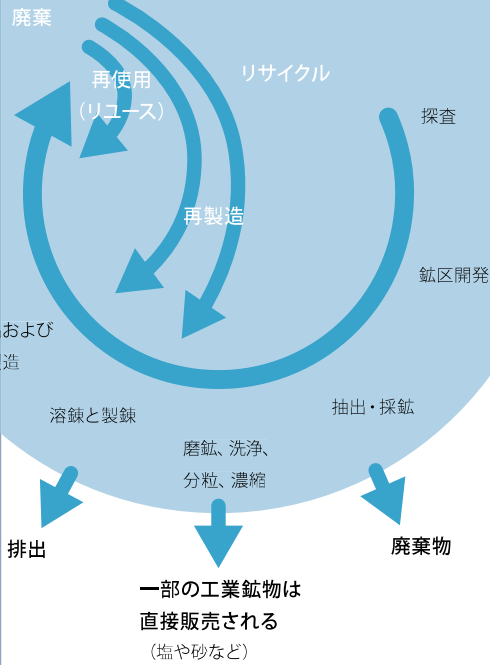
経済発展は、金属の利用と深く結び付いている。金属は、建物やインフラ、自動車、電子電機機器など多量の重要な用途において必須の材料である。また、高価値の資源であり、原則的には容易にリユース・リサイクルが可能である。特に金属では、リユースとリサイクルを通じて物質ループの環を閉じることは大きな便益をもたらす——すなわち、一次資源への圧力が減少し、エネルギー使用量と環境影響が軽減される。加えて、金属リサイクルは、金属の安定供給に寄与し、金属価格を抑えや関係経済セクターにおける雇用推進にも貢献する。



# 報告書3の目的

鉱物サイクル  
(IIED&WBCSD, 2002)

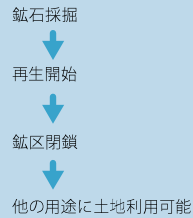
環境へ戻る



## 背景と目的

金属は、その特性から、多くの用途に必須材料として使われている。特に、将来的なグローバル金属需要の増大と絡んで、3つの重要な傾向が認められる。第1に、急成長する（新興）経済圏におけるインフラ構築は、鉄鋼はじめ各種ベースメタルに対する右肩上がりの需要を引き起こしている。

### 鉱区の閉鎖と再生





第2に、スマートフォン、薄型TV、USBメモリなどの製品に代表されるエレクトロニクス革命は、多種の特殊金属・貴金属の需要を押し上げている。第3に、風力発電や太陽電池など再生可能エネルギー技術へのシフトは、今後、グローバルな金属需要を増大させるであろう。このような需要増大が予想される中、影響を大幅に削減する戦略が成功しなかった場合、地球全体の鉱山開発、製錬、製造業、そして金属の使用と蓄積に起因する環境圧力は、今後数十年の間に激増する可能性がある。

関連して、UNEP国際資源パネルの報告書3は、金属と、その製造および使用の環境影響と影響緩和手段に焦点を合わせている。金属の経済・社会的側面や希少性に関する議論など、その他の関連テーマは、他の報告書にて取り上げる。金属の生産に関連した影響は、鉱物のライフサイクルのすべての段階——採鉱に始まり、使用済み製品中の金属のリユースまたは最終処分まで——で生じる。したがって、環境影響と対応する軽減策を明らかにする上では、全ての段階についての考慮が必要となる。

### 人為的金属サイクルの重要性

我々が資源開発を行うことによって金属の移動量は大幅に増加するので、金属の自然な生化学的サイクルは人為的な影響が大きい。報告書3は、生物地球化学的サイクルとの比較を通じて人為的な金属サイクルの規模とその環境影響を明らかにする。化石燃料やリン酸肥料といった非金属資源も含めて、すべての重要な金属排出源を取り上げる。

### 金属生産のエネルギー需要と環境影響

グローバルな金属需要の高まりを受け、金属のライフサイクルを通じたエネルギー使用量と環境影響は持続可能な発展の重要な課題となっている。影響緩和策を明らかにするため、報告書3は、影響を分析し、ローカルとグローバルの双方の規模において、金属のライフサイクルにおける最重要な要素を明らかにした。

# 金属の人為的サイクルと自然サイクル

## 環境への金属の排出

本来、金属はその鉱体の一部という形で地中に存在しており、自然の地質学的変化（風化や火山活動など）や人為的活動を通じて、地上環境に入る。環境中の金属は、土壌や堆積物中に蓄積する傾向があり、地表および地下水系に浸入する可能性がある。金属は食物連鎖によりしばしば蓄積する。環境中の金属濃度は、自然のプロセスの結果と人為的活動の結果の双方が影響し、地域や地方での差が大きい。

## 人為的影響

人為的活動は、地上の金属サイクルを大幅に増加させてきた。採鉱により流動化した金属の殆どは、製品やインフラの形で技術圏に蓄積する。とはいえ、環境中金属濃度は数世紀前に比して一般的に上昇しており、これは人為的関与の結果と考えられる。大陸規模で見ると、人為的影響と自然因的なバックグラウンドのばらつきは区別しがたいものであった。しかしながら、地域規模では、人為的点源（鉱山、貯蔵所など）からの金属排出に起因する環境中の金属濃度上昇が証明されている。

## 金属と人間の健康

金属は植物の取込と生物蓄積によって食物網に入る。食物連鎖を通じて濃縮され、連鎖のトップに位置するヒトや動物による摂取時には濃度が高まることがある。多くの金属は生命に必須だが、望ましい摂取量があり、それ以下では欠乏症となり、過剰の場合は悪影響が生じる。人間の健康への影響は、殆どの場合地域的（局所的）な規模で発生する。一方、生態系影響はより広域的である。依然として未知の変数が多いものの、環境中の金属が生物多様性に影響する可能性が高くなりつつある。この分野では研究が進んでいるが、金属の分散や毒性学的作用については未解明な部分がある。特に、金属混合物への曝露影響や、地球環境における金属の分布と長期にわたる環境中での挙動には不明な部分が多い。



マウント・アイザ (オーストラリア、クィーンズランド州) の鉛 (左) および銅 (右) 製錬所、市街地からの眺め



ウェストランド金鉱地 (ヨハネスブルグ) の砂捨場20: 手前のパイプから尾鉱 (選鉱くず) ダストと大量の酸性坑廃水 (AMD) を含む水が排出されることに注意



# 金属の人為的サイクルと自然サイクル

## 人為的な金属の排出源

大気への排出、水系への放出、土壌への拡散放出を含めて社会活動による金属の環境排出は、おおよそ、風化や火山活動など自然の環境排出とほぼ同程度と推測されている。人為的排出に絞ると、化石燃料の燃焼やリン酸肥料など非金属排出源からの割合が圧倒的に高い。過去には金属産業が重要な排出点源であったが、多くの場所で環境規制により対策が取られた。

## グローバルな金属排出の傾向

非金属源からの排出は、今後も増加が予想される。主な牽引力となるのは、予想される人口増と社会の繁栄や快適な生活の拡大で、これにより食糧やエネルギー需要が高まり、関連して肥料や化石燃料の消費につながっていくと考えられる。

尾鉱やズリなど一次金属生産からの廃棄物と埋め立てられた使用済み製品を含めて、金属が含まれる廃棄物の処理も金属排出源の一つである。廃棄物フローは穏やかな上昇が予想され、金属排出源としての重要性は比較的小さい。将来的には、EoL（製品寿命後）リサイクル率が高まれば、一次金属生産関連の人為的排出は軽減されるであろう。

需要が増加している金属の大半は、EoLリサイクル率（消費最終段階でのリサイクル率）も伸びている。とはいえ、時間差があるため、総需要が伸び続けている限りは、二次生産量の比率は低いままである。このことは、採鉱・生産・使用関連の排出量も、生産量よりは穏やかな速度であるにせよ、増大し続けることを意味する。使用量が減少している金属（ヒ素、カドミウム、水銀、鉛の一部）については、既存ストックからの排出が大部分を占める。これらの金属については、サイクルを閉じて循環的に使用するのみでなく、不要な廃棄物の流れを貯めることにも焦点を当てた、最終段階での管理が必要である。

- 金属産業からの局地的な金属の排出を削減すること
- 非金属源からの排出を削減すること
- 特定の金属については最終的な貯留を確保すること

政策メッセージ



閉鎖後再生された鉱区（ケレティ、フィンランド）。現在はゴルフコースが広がる。

# 金属生産とエネルギー使用

## グローバルな金属生産のエネルギー使用量

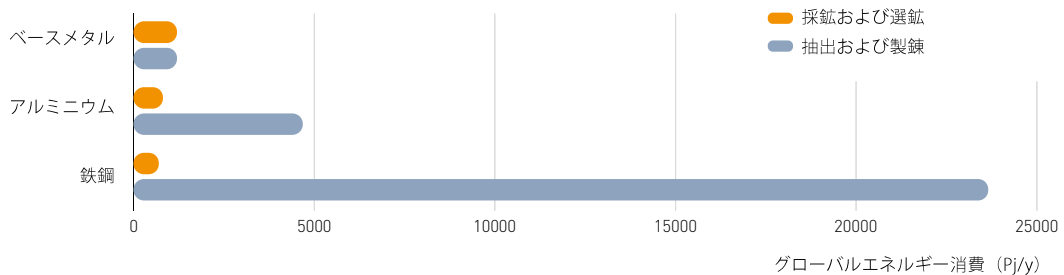
金属セクターは世界のエネルギー消費に非常に大きく影響している。一次金属生産のエネルギー消費は、グローバルなエネルギー使用量全体の7~8%を占めており、エネルギー必要量は、生産される金属1kgあたり、20MJ（鉄鋼）から200,000MJ（白金）まで金属種により差が大きい。とはいえ、鉄鋼、アルミニウムなどベースメタルは生産量が多いことで、絶対的量は最大の比率を占める。

## 一次金属生産

鉱石からの金属生産は、数段階の工程から構成される。各段階で不純物が分離され、製品中の金属含有率が高まる。したがって、各段階はエネルギー使用と結びついており、熱源としての（化石）燃料の直接燃焼、または大半が化石燃料由来の電力が使用される。また様々な段階で化学物質が使用され、その製造にもエネルギーが必要である。

鉱石の採鉱必要量や地上までの輸送距離、ひいてはエネルギー必要量は、鉱石品位（鉱石中の対象金属の濃度）や採掘対象である鉱床の深度などの物理パラメーターによって決まる。化学的には、自然界に存在する金属はほぼすべて、安定した鉱物の形であり、製品に使用するために分離し高純度にするにはエネルギーが必要である。これらの物理化学パラメーターは、エネルギー必要量の理論的な下限値を与える。実際のエネルギー必要量は、この理論値の数倍高くなる。しかしながら、今日利用できる中で最善の技術（BAT）の普及により、エネルギー需要は大幅削減可能であり、また将来的な技術進化により理論的にはエネルギー効率の2~20倍向上もされ得る。

一次金属生産の  
グローバル  
エネルギー消費  
(単位:Pj/y)、  
「Norgate an  
Jahanshahi,  
2010」



### 採鉱および選鉱

金属関係のエネルギー使用は、採鉱で始まる。露天掘は剥土を伴うが、坑内掘では立坑の掘削を伴う。また、鉱石の地上への搬出が必要である。続く選鉱工程では、金属を含まない岩石を取り除く必要があるが、そこでは鉱石の粉碎と浮選が行われる。磨鉱は細粒化のために行われるが、要求される粒径が非常に小さいためエネルギー消費量の大きい工程である。



### 抽出および製錬

選鉱に続く金属抽出は、熱を利用する乾式製錬工程または化学薬品による溶出による湿式製錬工程を用いて行われる。金属の種類と用途によっては、さらに製錬工程が続く。アルミニウムなどの場合は、酸化物の還元により金属とするため実に大量のエネルギーが必要となる。



### 製造

製錬によって地金となった金属は、製作・製造施設に送られ、まず板材、コイル、棒材、パイプなど半製品となった後、さらに最終製品（例：洗濯機）の製造に使用される。



# 金属生産とエネルギー使用

## 鉱石品位の低下

金属ライフサイクルの最初の2段階つまり採鉱と選鉱工程におけるエネルギー需要は、鉱石品位によって定まる。選鉱を経て一定の精鉱（選鉱プロセスを経た鉱石）品位とするため、これ以降の工程は粗鉱（採掘され選鉱プロセスに回される前の鉱石）の品位に左右されることはないが、最初の2工程では低品位鉱石の場合、エネルギー使用量が指数関数的に高くなる。これはより多くの鉱石の採鉱が必要になり、要求される粒度が小さくなり、必要となる濃縮の程度が大きくなるためである。

20世紀を通じて、地球全体の採鉱業のほぼすべての金属部門では、歴史的な長期間の傾向として鉱石品位の大幅な低下が続いた。理由は様々であるが、第1には品位が高く採鉱が容易な鉱床はある程度採掘されたこと、第2に技術の進化により低品位鉱でも採算がとれるようになったこと、第3に金属需要が急増したことが挙げられる。資源の希少性と市場価格の関連は今後のUNEP IRP報告書で取り上げられる。この状況は今後も続き、鉱石品位の低下は続くと思われる。

## リサイクル

金属の二次生産は、関係する工程が少ないこともあり、生産される金属1kgあたりのエネルギー使用量は大幅に少なくて済む。明らかに、採鉱、粉碎、選鉱、製錬所への輸送のためのエネルギーは不要である。加えて、大半の場合、使用済み製品の回収対象金属の初期濃度は、天然鉱石を遥かに上回る。さらに大きな利点として、スクラップ金属はすでに金属の形をとっており、還元のためのエネルギーが不要である。一方、リサイクルは収集、分別、スクラップの分離が必要である点が課題であり、これが、特に消費者由来のスクラップリサイクルに対するエネルギー需要を押し上げる理由となっている。

一次生産との比較での二次生産関連のエネルギー削減は、鉄鋼や亜鉛では60~75%、アルミニウムや白金族では90%以上と報告されている。したがってリサイクルは、持続可能な金属管理のきわめて重要部分となっている。

- 持続可能な金属管理のカギとしてリサイクル率を向上すること
- 地球全体での一次金属産業のエネルギー効率化は、今後数十年にわたって「必須課題」であること

政策メッセージ

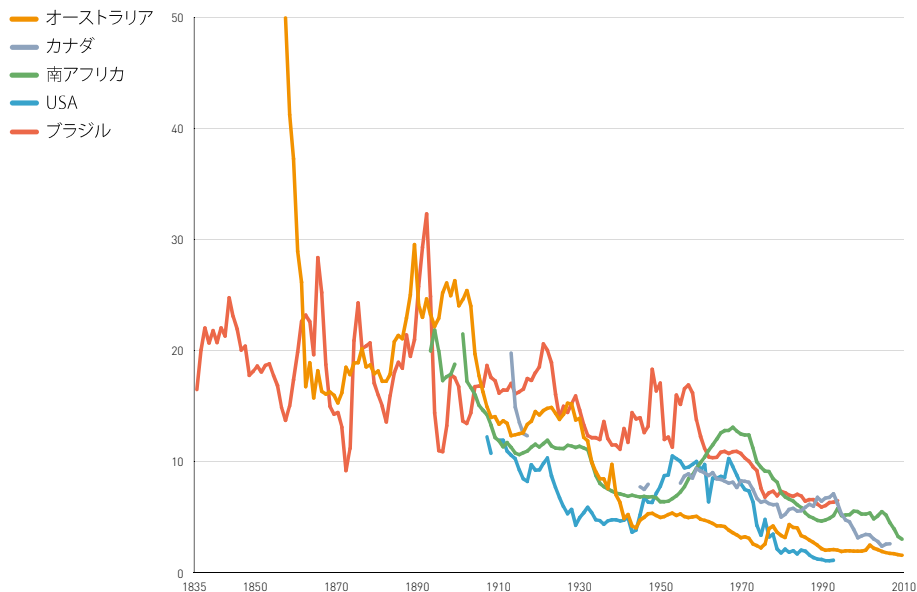


## 金属関連エネルギー使用の将来動向

将来の金属生産のためのエネルギー必要量は、主として次の要因に左右される：

- 拡大し続ける需要は、エネルギー必要量を増大させる。
- 低品位鉱石の利用により、エネルギー必要量が増大する。
- 鉱床が遠隔地になり、輸送エネルギー必要量が増大する。
- 技術改善により必要なエネルギーが削減される。
- 二次供給の比率が高まり、エネルギー必要量が低下する。

現時点および将来のBAT活用によるエネルギー効率改善可能性は大きいものの、鉱石品位の低下と需要増があいまって、将来の金属生産関連のエネルギー需要は増大すると予想されている。



## 主要国の金鉱石品位 (g/t Au) の推移

(出典：CMSA, 2010; Craig&Rimstidt, 1998; Machado&Figueiroa, 2001; Mudd, 2007; Natural Resources Canada, var., オーストラリアについては2010年までの更新データを含む)

# 金属の環境影響



持続可能な金属管理のための主要な結論として、本資料「展望」の章では、報告書3で明らかとなった、注意を要する重要4分野を提示している。

## ライフサイクルという視点

人為的金属フロー関連の環境影響を考えるうえで、ライフサイクルという視点が不可欠である。環境影響は、金属のライフサイクル全体――すなわち一次生産から、金属や金属含有製品の使用段階、そして使用後（EoL）にわたって生じるからである。

## 一次生産の環境影響：採鉱と抽出

金属の重大な環境影響は、ライフサイクルの初期、すなわち採鉱、選鉱、一次抽出、製錬の段階で生じる。言い換えれば、これらの影響は一次金属生産でのみ生じる。得られる金属1kgあたりの影響は、鉱石品位が低い金属（PGMなど）で最大であることは明らかだが、最大の環境影響を引き起こすのは、生産量が膨大なバルク金属（鉄鋼、続いてAl、Cr、Cu、Ni、Zn）である。

金属の環境影響は、関連するあらゆる環境分野で長期的である：

**地圏**―鉱区や必要な補助的インフラ（道路、建物）のための用地確保は、植生喪失や土地の浸食と結びつく。鉱山廃棄物（尾鉱やズリ）は大規模な埋立処分場や尾鉱ダムを必要とし、貯蔵のための用地は数平方キロメートルにも達する。

**水圏**―水圏への環境影響は選鉱、粉塵抑制、搬送目的で大量の水が使用されることによる。さらに、採鉱と抽出段階では毒性物質の浸出や強酸性の酸性坑排水（AMD）による地下水・地表水の汚染の可能性がある。

**気圏**―大気への排出はエネルギー源の使用（ディーゼル燃料など直接的なものや石炭火力電力など間接的なものの双方）、発破作業や各工程からの排出に起因する。地球規模の問題である温室効果ガス排出に加えて、主として二酸化硫黄、重金属や放射性金属を含むダストや粒状物質は生態系や人間の健康への有害性から、地域レベルで問題となっている。

**生物多様性**―景観と生態系の破壊は、局地的な生物多様性消失と関連する。

主な環境要素と一次  
金属生産の環境影響

### 影響を受ける環境要素



### 採鉱段階

探査



開発



採鉱・選鉱



製錬



製錬



閉山



# 金属の環境影響

## 金属使用の影響

金属の使用から直接的に生じる影響は、唯一、使用中の腐食による排出である。その他の使用段階における影響は、大半がエネルギーに関するものである。金属の使用はエネルギー消費を伴うが、同時に金属使用によって持続可能性や資源効率化が実現される場合もある。

## リサイクルの影響

リサイクルによって一次金属生産の必要が低減し、一次金属生産関連の影響が削減されることが最も重要である。大規模なエネルギー節減となり、一部の採鉱関連リスクが回避され、ある製品の製造に至るまでの過程でのエネルギー消費量も減少する。一方で、リサイクルは回収インフラの必要性や再生プロセス、つまりエネルギーと、場合によっては化学薬品による処理が使用されることに起因する環境影響を生み出すことも事実である。

## 廃棄物の最終的な処分の影響

環境保全型金属管理では、資源効率が高く、製品利用後の資源回収に最適化された製品設計、ならびに消費者の行動改善による使用済み製品回収率引き上げや、リサイクルのためのBAT導入によって、金属サイクルからの損失を最小限に抑えることを目指す必要がある。

とはいえ、回収利益が回収による活動の負担を下回る場合には、損失が生じることは避けがたいであろう。主な損失ルートは、埋立と焼却の2通りあり、金属はスラグ中に存在するか、または排ガス清浄化後の煙塵中に含まれる。埋立の主な影響は、滲出による土壌や水圏の汚染である。現在の埋立処分場には、この問題を最小化するための対策を設計に組み込んでいる。

- 採鉱および抽出プロジェクトについて厳密な環境影響評価 (EIA) を義務付けること
- 鉱区管理および管理実践についての地域的な政策を推進すること
- BAT導入を推進すること
- 全段階での適切な環境モニタリング・評価の実施を確実にすること

## 一次金属生産の影響削減措置

一次金属生産関連の影響削減には、採鉱活動の全段階（開発、採鉱、閉鎖、閉鎖後）と一次抽出で、多数の対策を実施することが可能である。たとえば、金属含有土壌の処理と安定化、汚染水の拡散防止と浄化、大気への排出量と処理対策等により排出状況の管理、および閉鎖後の生物多様性回復を含めた開発後の土地再生などが挙げられる。

## EoL段階での影響削減措置

→ 廃棄物発生抑制、リサイクル、および最終処分におけるBAT活用をサポートすること

製品設計、BAT、リサイクルシステムの複雑な相互作用からEoL段階での金属使用影響を削減する措置が生まれる。金属など物質の環境影響を最小限にとどめつつ、最大の資源効率を実現するためには、これらの相互作用について総

体的な評価を行う必要がある。これらの問題は、UNEPのIRP報告書2bで詳細に論じられている。

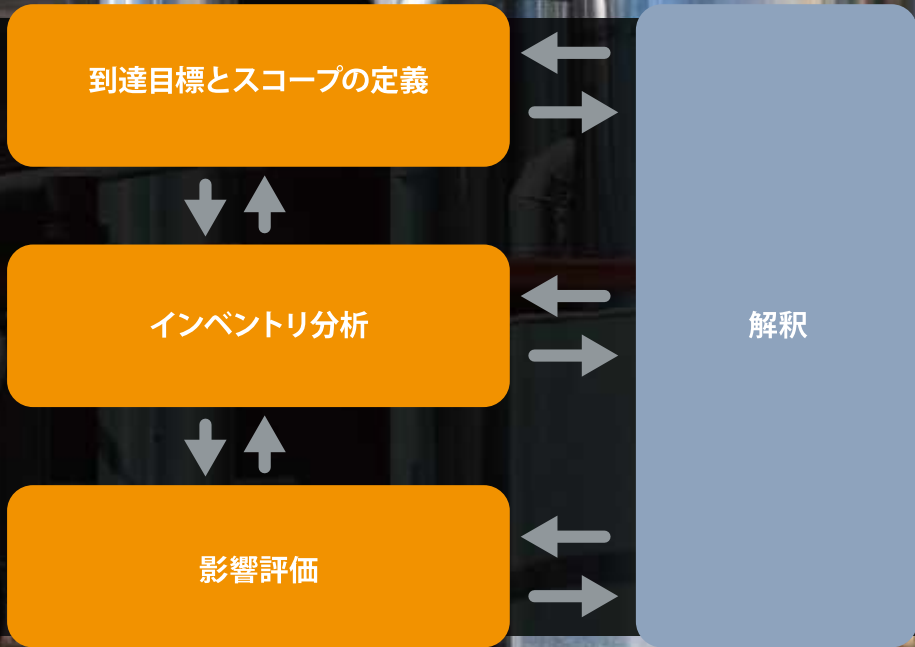
削減措置として効果があると考えられる措置の具現化には、全ての関係者（生産者、供給者、消費者、政策立案者）の協働が必要である。有望なイニシアチブとして、供給者と消費者の新たな関係作りや製品の交換や代替サービスやデポジット制度が挙げられる。指令や法律は、生産側（EUエコ設計指令）またはEoLレベル（EU WEEE指令）どちらでも規制枠組みとなる。今後の報告書は、この点に触れる必要がある。

原則として、まず取り組むべきことは廃棄物の発生抑制である。その上で、できる限りリユースとリサイクルの可能性を追求し、最終的な廃棄物処理は、金属の環境排出を最小限にとどめる方法で計画すべきである。





ISO 14040/14044  
シリーズに基づく  
LCA枠組み  
(ISO、2006a)



# 金属のライフサイクルアセスメント

ライフサイクル思考（LCT）とは、意思決定においてライフサイクルとの関連を可能な限り考慮するプロセスである。たとえば製品ライフサイクルに関しては、消費される全ての資源や全ての環境・健康影響を、資源抽出、生産、使用、リユース、輸送、リサイクル、そして最終的廃棄物処理までを視野にいれる（JRC、2007）。

## なぜLCA（ライフサイクルアセスメント）か？

ライフサイクルアプローチは、生産（一次生産による単体金属製品および金属含有製品）、使用、およびEoL（リユース、リサイクル、または廃棄）まで、金属のライフサイクル全体の分析を基にした情報を提供する。今日すでに、ライフサイクル思考（LCT）の様々な実際の応用が存在し、そのなかでライフサイクルアセスメント（LCA）は実施と応用の成否を握ることが証明されている。このコンテキストにおいて、UNEPは、UNEP/SETACライフサイクル・イニシアチブへのコミットメントを通じて多大なサポートを提供している。ライフサイクル情報は、政治やビジネスの場で意思決定に不可欠である。金属では重要性は特に高い。なぜなら特定用途でのLCAにより、エネルギー集約度の高さからLCA情報はライフサイクルの影響を大きく左右することが明らかになっているからである。

LCAの到達目標によっては、どのEoL処理法が製品に適切か否かの判定など、ある特定の段階でのみ関係する。他の例としては、いわゆる「ゆりかごからゲートまで」型LCAは、環境保全の視点から優先される金属を見出すことを狙いとして「工場のゲートにおける」製品製造のためのインプットとしての一定量の金属の影響把握に使用される。しかしながら最も包括的なLCAの適用は、同一の機能を持つ製品またはサービスとの比較であり、同一ライフサイクル内でのある段階での負担が別段階へ転嫁されるのを避けるため全段階の評価を基盤としたものである。

## 製品ライフスパン、材料効率、置換

寿命、材料効率、および置換の真の影響を把握するためには、特に比較評価が必要である。一例をあげると、長寿命化の正の作用（製品製造頻度が低下）は、製造要件がより厳しくなるという負の作用を併せ持つ。また、材料効率は生産段階での環境影響を削減するが、小型化傾向はリサイクル面で難度を上げる。さらに、金属はセラミックやプラスチックなど概ねエネルギー集約性の低い材料による置換が可能だが、寿命が短い、またはEoL段階での回収が難しいなど、一長一短である。このことから、全体システムの最適化にはケースバイケースのLCAによる研究が必要なが明らかである。

# 金属のライフサイクルアセスメント

## 生産段階と使用段階のトレードオフ

金属は生産段階での影響が大きい一方、他の段階での節減をもたらす場合、金属の使用はライフサイクル全体での排出削減に寄与する。このため、最善ソリューションを明らかにするためには、すべての段階を統合的に評価する必要がある。現代技術に関する顕著な例は、自動車とエネルギーセクターである。

**CCS**：現時点（2007）でのミックスを化石燃料発電所において炭素回収・貯留（CCS）が導入されるものに拡大

**非化石燃料**：太陽光、風力、水力の混合

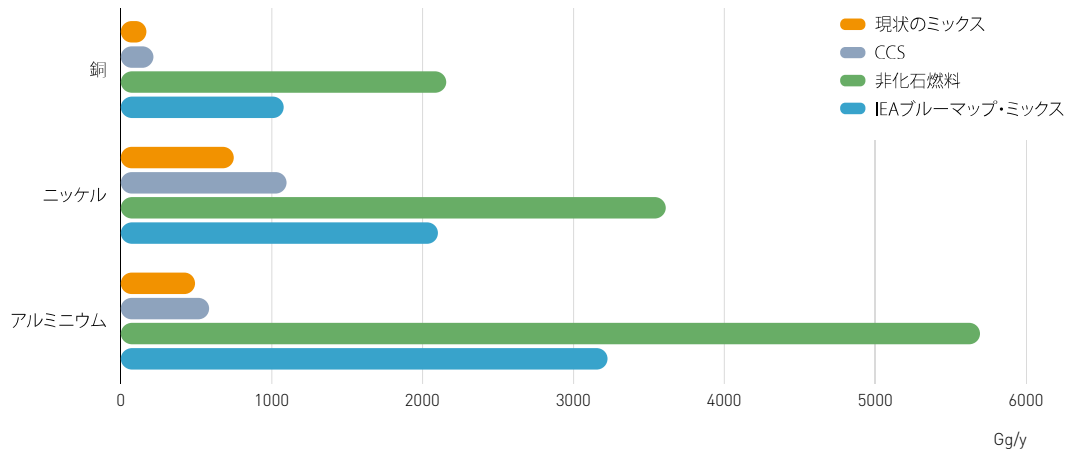
**IEAブルーマップ**：Shell Blue Mapシナリオに基づくミックス、再生可能エネルギー源のほか化石燃料を含む

## 自動車産業における金属

自動車産業のカーボンフットプリント引き下げは、ライフサイクルを通じてエネルギー消費の削減をもたらす車体重量の軽量化を牽引力として進めることができる。複合材料の採用や鉄鋼に代えてより軽量のアルミニウムの使用から、さらに新たな種類の鉄鋼の使用まで様々なイニシアチブがある。その他重要な効果が期待できるのは、再生可能エネルギーをベースとするエレクトロモビリティ（EVやハイブリッド車）である。しかしながら、これらは、生産サイドにおいてバッテリーや電動機用にコバルト、リチウムなどの特殊金属や希土類金属（レアアース）が必要となる。したがって全ての価値の高い材料物質、特にこれらの車両に含まれる金属のリサイクル率向上が必須課題である。

各種シナリオの想定における地球規模発電システムの金属需要

(Kleijn et al., 2011)





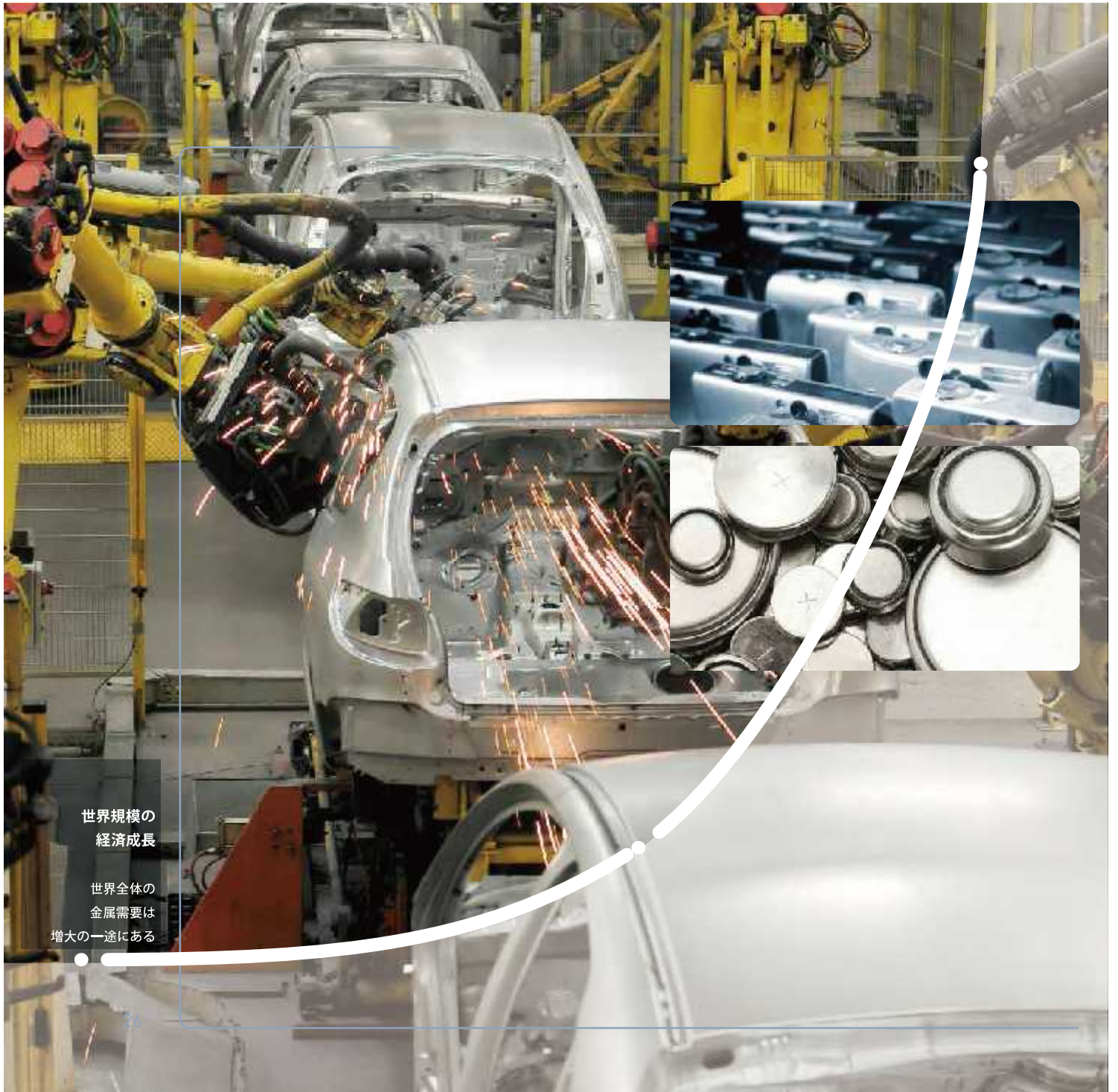
## エネルギーセクターの金属

エネルギーセクターでは、レアアース、インジウム、銅など、いわゆる「持続可能性を可能にする」金属によって、主として化石燃料ベースの発電に、風力や太陽光など炭素集約度の小さい技術が加わったエネルギー・ミックスが可能となっている。再生可能エネルギーシステムへのシフトでは、エネルギー生産集約度が大幅に増大する物質、特に金属の使用が随伴する。このことは、各種技術シナリオにおけるグローバルな電力供給のための銅、ニッケル、アルミニウムの需要を示した次ページのグラフにおいて明らかである。これらの例は、製品中の物質含有率を考慮するだけでなく、システムのアウトプットや、物質の使用／機能の持続可能性への寄与についても考慮しなければならないことを明示している。金属を多種多様な用途において賢明に使用することで、世界全体のエネルギー需要は確実に削減される。それゆえ、コンセプト、製品、設計、プロセッシングシステムなどの「持続可能性の高さ」を最もよく評価するためには、システムティックな全体像の把握が必要である。



## 方法論に関する留意事項

LCAが信頼性の高い指針となるためには、適切なインプットデータと並んで、方法論の選択が決定的に重要である。特に金属に関しては、その顕著な例がアロケーション（配分）である。殆どの鉱石からは2種類以上の金属が抽出されることから、LCAにおいては、上流チェーンの排出と抽出をどのように各種金属アウトプットに割り当てるかを決定する必要がある。この決定は、結果に多大な影響を及ぼす可能性があり、したがって複数のケーススタディの結果の互換性を確保するための最重要事項である。



世界規模の  
経済成長

世界全体の  
金属需要は  
増大の一途にある

# 展望

## 金属のライフサイクルという視点

グローバル規模で金属需要は高まる一方にあり、環境影響増大につながっている。全地球的課題に適切に対処するための持続可能な金属管理の実現には、金属のライフサイクルという視点が必要である。

- 鉱山開発の地域的な影響
- 非金属排出源
- 最終貯留する場所の必要性
- ライフサイクル全体でのエネルギー使用

## 鉱山開発の地域的な影響

現在、金属の採鉱・抽出は、しばしば毒性物質、ときには放射性物質の地下水・地表水への滲出や生態系悪化などローカル規模で甚大な環境影響を引き起こしている。数年前のハンガリーの例のように、災厄を引き起こしかねないさらなる重大リスク（尾鉱ダム決壊関連のリスクなど）も存する。影響をゼロにすることは不可能であるとしても、先進的な採鉱コンセプトは、鉱山開発、採鉱活動、および閉山後の各段階を通じた環境影響やリスクを大幅に削減する可能性を秘めている。持続可能な金属採鉱に関する多国間交渉・協定を推進する上で、今後、UNEPは重要な役割を担う必要がある。

## 非金属排出源

金属を排出するのは金属産業だけではない。環境への金属排出全体の中で、化石燃料やリン酸肥料など非金属源の占める比率が増しており、一部の金属では非金属源からの排出が主要となっている。特に農業分野では、閉鎖系における蓄積により、土壌中の金属濃度が高まり得る。したがって、持続可能な金属管理を行うには、これらの非金属排出源について評価・定量化を行い、対策を確立する必要がある。再生可能エネルギーへのシフトや、農業における化学肥料使用削減の拡大は、持続可能な金属管理に大きく貢献するであろう。



# 展望

## ライフサイクル全体でのエネルギー使用

地球全体の一次金属セクター（採鉱・抽出・製錬）は、グローバルな一次エネルギー消費全体の7~8%を占めている。現状のシナリオでは、グローバル金属需要はさらに大幅に増大し、エネルギー使用や地球温暖化の問題をいっそう悪化させる。BATの導入を早め、エネルギー・ミックスにおける再生可能エネルギー比率を高め、二次金属生産の比率を伸ばすことで、環境影響の増大をある程度押しとどめることが可能である。それにもかかわらず、今日の予測では、将来的に金属生産のためのエネルギー使用量は総量ベースで増加するとされる。こうした課題は、UNEPは金属に関わる問題に注力し、中長期には、成長し続ける金属関連部門のからの環境影響削減のための政治・社会・産業による可能なあらゆる対策遂行をサポートする重大な責任があることを意味する。対策としてはBATの導入と適切な法的枠組みによる定着、ならびに必要なインフラ、特に使用済み製品の最適回収体制確立の支援を通じた金属EoLリサイクル率の改善推進などが挙げられる。

## 結論

都市化の進展や途上国におけるインフラ構築、またエネルギーや産業の新規技術導入を受けて、金属需要は今後数十年にわたりグローバル規模で伸び続けると予想される。これに伴い、一次金属の採鉱・抽出・製錬に起因する環境影響も増大する可能性がある。消費最終段階（EoL）でのリサイクル率の改善は、市場へとより多くの二次金属を供給し、そのことで全体的な金属生産による環境影響削減をもたらす。しかしながら、二次生産が金属供給量全体のなかで有意な比率を占めるようになるのは、グローバル需要が安定した後である。すなわち、途上国におけるインフラ建設が一段落する遠い将来のこととなる。今後数十年については、一次生産が供給の主要部分を占めるという図式は変わらないであろう。このため、グローバル一次金属部門における環境影響削減は、今後数十年の「必須課題」であり、そのため重要な政策課題として継続的に焦点を置かれるべきである。

LCAなど持続可能な金属管理戦略の支援に必須の重要ツールは、生産プロセスおよび関連の必要インプット（エネルギー資源と原材料資源）およびアウトプット（製品、廃棄物、そしてそれ以外の排出）に関する情報の利用可能性に左右される。現時点ですでに多種の金属についてデータが利用可能であるが、データ源により相当に大きなばらつきがある。産業基盤の透明性の高い総合的データ資料の確立のため、すべてのステークホルダーがさらに尽力する必要がある。

# 金属の分類

## 鉄鋼関連金属

**V** - バナジウム  
**Cr** - クロム  
**Mn** - マンガン  
**Fe** - 鉄  
**Ni** - ニッケル  
**Nb** - ニオブ  
**Mo** - モリブデン

## 非鉄金属

**Mg** - マグネシウム  
**Al** - アルミニウム  
**Ti** - チタン  
**Co** - コバルト  
**Cu** - 銅  
**Zn** - 亜鉛  
**Tin** - スズ  
**Pb** - 鉛

## 貴金属

**Ru** - ルテニウム  
**Rh** - ロジウム  
**Pd** - パラジウム  
**Ag** - 銀  
**Os** - オスミウム  
**Ir** - イリジウム  
**Pt** - 白金  
**Au** - 金

## 特殊金属

**Li** - リチウム  
**Be** - ベリリウム  
**B** - ホウ素  
**Sc** - スカンジウム  
**Ga** - ガリウム  
**Ge** - ゲルマニウム  
**As** - ヒ素  
**Se** - セレン  
**Sr** - ストロンチウム  
**Y** - イットリウム  
**Zr** - ジルコニウム  
**Cd** - カドミウム  
**In** - インジウム  
**Sb** - アンチモン  
**Te** - テルル  
**Ba** - バリウム  
**La** - ランタン  
**Ce** - セリウム  
**Pr** - プラセオジウム  
**Nd** - ネオジウム  
**Sm** - サマリウム  
**Eu** - ユウロピウム  
**Gd** - ガドリニウム  
**Tb** - テルビウム  
**Dy** - ジスプロシウム  
**Ho** - ホルミウム  
**Er** - エルビウム  
**Tm** - ツリウム  
**Yb** - イッテルビウム

**Lu** - ルテチウム  
**Hf** - ハフニウム  
**Ta** - タンタル  
**W** - タングステン  
**Re** - レニウム  
**Hg** - 水銀  
**Tl** - タリウム  
**Bi** - ビスマス



[www.unep.org](http://www.unep.org)

United Nations Environment Programme  
P.O. Box 30552, Nairobi, Kenya  
Tel: +254 (0)20 762 1234  
Fax: +254 (0)20 762 3927  
E-mail: [unep@unep.org](mailto:unep@unep.org)



**この小冊子は、**グローバル金属フロー作業部会の報告書3「人為的金属フローとサイクルの環境リスクと課題」の要約版(サマリー)である。完全版報告書はCD-ROM版として配布されている(本資料の31ページを参照)。UNEP国際資源パネルは、包括的な観点から金属リサイクル問題に取り組んでいる。

グローバル金属生産は、世界のエネルギー消費に多大な影響を及ぼしている。一次金属生産は地球全体の総エネルギー使用量の7~8%を占めており、加えて、地下水汚染、鉱山廃棄物、温室効果ガスや二酸化硫黄などの大気への排出、土地利用、生物多様性消失など、地域的に甚大な環境影響を引き起こしている。一次金属生産の環境影響削減のためには、BAT(利用可能な最善の技術)の活用をより進める必要がある。最終消費段階(使用後)におけるリサイクル率の改善により、二次金属市場の形成が促され、全体的な金属生産の環境影響緩和につながる。しかしながら、金属供給量全体の中で二次生産が有意な比率を占めるのは、グローバルな金属の需要が低く安定した後のことであり、かなり遠い将来と考えるべきである。今後数十年については、一次金属生産が供給の主要部分を占めるという図式は変わらない。すなわち、地球規模での一次金属セクターがより「グリーン」となることは今後も「必須課題」である。