



International
Resource
Panel

社会の中の鉱物資源の評価：

金属リサイクル— 機会・限界・ インフラ



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およびグローバル金属フロー作業部会部長Thomas E. Graedelの両氏、IRP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。

報告書「金属リサイクル—機会・限界・インフラ」の筆頭執筆者：Markus Reuter

共同執筆者：Markus Reuter, Outotec Oyj, Finland and Aalto University, Finland; Christian Hudson, DIW, Germany; Antoinette van Schaik, MARAS, Netherlands; Kari Heiskanen, Aalto University, Finland; Christina Meskers, Umicore, Belgium, Christian Hagelueken, Umicore, Germany

協力者（アルファベット順）：Helmut Antrekowitsch, University Leoben, Austria; Diran Apelian, WPI, USA; Bo Bjorkman, Lulea University of Technology, Sweden; Bart Blanpain Leuven University, Belgium; Francoise Bodenan, BRGM, France; Mieke Campforts, Umicore, Belgium; Amelia Enriques, UNEP, Brazil; Bernd Friedrich RWTH Aachen, Germany; Stefan Goessling-Reisemann, University of Bremen, Germany; Daniel Froelich, ENSAM, Chambery, France; Tom Jones, Leuven University, Belgium; Yasushi Kondo, Waseda University, Japan; Jinhui Li Tsinghua University, China; Hans-Rainer Lotz, Volkswagen, Germany; Stefan Luidold, University Leoben, Austria; Elisabeth Maris, ENSAM, Chambery, France; Kazuyo Matsubae, Tohoku University, Japan; Nourredine Menad, BRGM, France; Shinsuke Murakami, Tokyo University, Japan; Kenichi Nakajima, NIES, Japan; Tetsuya Nagasaka, Tohoku University, Japan; Shinichiro Nakamura, Waseda University, Japan; Sheraz Neffati, ICDA, France; Shuji Owada, Waseda University, Japan; Jim Petrie, University of Cape Town, South Africa; Georg Rombach, Hydro Aluminium, Germany; Sussane Rotter, University of Berlin, Germany; Mathias Schlupe, EMPA, Switzerland; Guido Sonnemann, University of Bordeaux, France; Philip Strothmann, UNEP, France; Pia Tanskanen, Nokia, Finland; Karel van Acker, Leuven University, Belgium; Jacques Villeneuve, BRGM, France; Harro von Blottnitz, University Cape Town, South Africa; Patrick Waeger, EMPA, Switzerland; Philippe Wavrer, BRGM, France; Rolf Widmer, EMPA, Switzerland; Patrick Wollants, Leuven University, Belgium; Guomei Zhou, Ministry of Environmental Protection, China

完全版報告書への学術的および語学的（英語）編集サポートを行っ

た、Christian HudsonとMarinus Kluijverの両氏に謝意を表す。

Photos: istockphoto.de: ©Harrie Marinus [cover_1, p.3], ©Jonceclearvision[cover_2], ©Milos Peric[cover_3], ©JDNY59[cover_4], ©Marco Hegener[cover_5], ©zora zhuang[p.7_1], ©Morton Photographic[p.7_3], ©JohnnyG[p.7_4], Sergei Devyatkin[p.9_6], ©deepblue4you[p.10], ©iSci[p.12_1], ©assalve[p.12_2], ©urbancow[p.13], ©ugur bariskan[p.14], ©Joerg Reimann[p.15], ©Rob Belknap[p.18], ©Caboclin[p.19_1], ©Dejan Ristovski[p.19_2], ©studio9[p.19_3], ©Ivan Stevanovic[p.22_1], ©Richard Clark[p.22_2], ©Pete Saloutos[p.23], ©sturti[p.24_1], ©lrochka[p.24_3, p.28_3], ©Stefanie Angele[p.24_4], Oeko-Institut e.V.[p.9_3, p.9_4, p.9_5, p.11_2, p.11_3, p.11_4], photocase.de: ©Norman Bates[p.9_1], pixelio.de: ©Marcus Stark[p.2], ©Oliver Moosdorf[p.7_2], Fotolia.com; ©HandmadePictures[p.16], ©Stefanie angele[p.24_3], ©Tobif82[p.31], Shutterstock.de©Tobias Machhaus[p.26], Umicore Precious Metals Refining[p.22_3, p.24_2, p.28_1]

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:978-92-807-3267-2
Job Number: DTI/1535/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

本資料は、グローバル金属フロー作業部会の報告書2b

「金属リサイクル— 機会・限界・インフラ」 から抜粋した要約版である。

完全版報告書はCD-ROM版として配布される
(本要約版資料の裏表紙に同封)

序文



金属需要が増大する中、経済成長と資源利用および環境悪化のデカップリングを促進する上で金属資源はますます重要性を帯びてきている。金属資源のリサイクルは、有効なデカップリング・アプローチとして強く認知されつつあるが、リサイクルの実態に関する体系的な情報は少なく、実現可能なリサイクル率やリサイクルシステム改善方法に関する情報は殆どない。前者のリサイクルの実態については、国際資源パネルの過去の報告書がテーマとして取り上げた。本報告書は、リサイクルのシステム改善について取り上げ、製品を複雑な「designer minerals（人造鉱物）」として捉えることで、製品リサイクルアプローチの便益および必要性について論じる。

製品に焦点を合わせたアプローチは、現代の製品の複雑さ（その複雑さのレベルは、しばしば、天然鉱物を遙かに上回る）、および過去に例のない元素の組み合わせが今日では一般的になっていることを考慮に入れる。このアプローチは、伝統的な製錬技術や冶金学的経験を踏まえて行うものである。

現代技術システムは、EoL（end of life、使用済み）製品の回収実現だけでなく、回収後の効果的な選別および最適な物理的分離、最新の冶金技術、およびリサイクル材からの採算性のある金属回収のための統合型インフラを必要とする。本報告書は、リサイクルの各段階における技術、知識、インフラの不備が、リサイクル性の限界となること、ならびに金属・非金属材料の組み合わせによっては、基礎的な熱力学的、技術的、および経済的制約が冶金学的な金属回収の支障となることを明らかにする。

報告書第1で提示された補完的な物質に焦点を合わせたリサイクルの視点は、リサイクル必要量については答えを出すことが可能であるが、金属のリサイクル率向上が必要とされる理由やそのために必要な具体策を示すものではない。本報告書は、すべての金属の回収率を改善する方法に注目し、特に技術的重要性が高いにも関わらずリサイクル率が低迷している元素に光を当てる。物理学に基づくDfRE（Design for Resource Efficiency、リサイクルと資源効率化を目指した設計）のアプローチを提示し、リサイクルの機会と限界を明らかにする。本報告書で提示される様々な技術は、意思決定の場において、リサイクル率向上を実現する方法を支援するものとなる。

Prof. Ernst U. von Weizsaecker

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. Markus Reuter

筆頭執筆者

序文



21世紀初頭における持続可能な発展という挑戦的課題は、環境、社会、経済的な次元に等しく重心をかけた体系的な課題となっている。UNEPとUNEP傘下の国際資源パネルは、資源効率化、材料リサイクル推進、ライフサイクルの視点の導入など体系的なコミットメントの重要性を認識している。本報告書は、持続可能な金属管理への動きを受けた製品ライフサイクルに添って、経済的・技術的な基盤の上に金属リサイクルの最適化をいかにして実現するかについて、科学的根拠を踏まえた知見を政策立案者に提供する。

本報告書は、持続可能な金属管理には主要金属のリサイクル率改善だけでは十分でないことを明らかにする。金属リサイクルに対する考え方は全面的に変え、物質を起点とするアプローチから製品に焦点を合わせたアプローチへと転換する必要がある。今日、製品が複雑化し、リサイクルシステム内部の相互作用が複雑になっており、リサイクルの難度はますます高くなっている。その結果、リサイクルの過程で実は多くの有用物が失われている。

このため、製品に含まれる個々の物質に重点を置くのではなく、製品のEoL段階で製品全体のリサイクルを最適化することに焦点を合わせる必要性がある。こうしたシフトの実現可能性は、バリューチェーン内のあらゆる関係者、金属の一次生産事業者や金属を含む製品製造者から、リサイクルおよび回収業者、そして消費者までを動員できるか否かにかかっている。リサイクルは経済産業活動の一部であるため、たとえば現時点では回収が採算性を欠くとしても将来の用途のためにクリティカルメタル（重要金属）資源を保全するなど、経済的要因を長期経済的目標と整合させる必要

がある。

将来的に増大の一途をたどる金属需要に持続可能な方法で対処するためには、すべての関係者を巻き込まなくてはならない。リサイクルの牽引力となる産業・経済的要因について深い理解を踏まえた窓口の広い体系的なアプローチが必要である。こうした知識基盤により、私たちがインクルーシブ（包摂的、包括的）で、低炭素かつ資源効率の高いグローバルな「グリーン経済」に向けて進む上で、一貫性のある規制枠組みとすべての関係者が参画するための強力なインセンティブが必要であることが明らかになるだろう。

Achim Steiner

UN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。

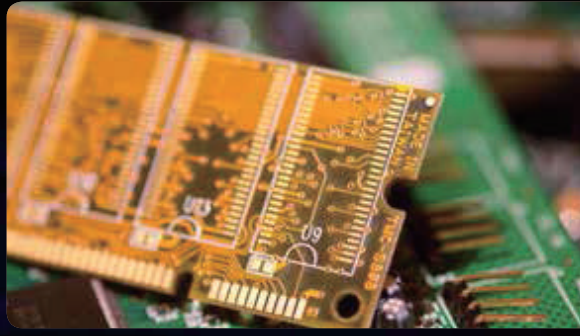
IRPは、最新の情報と手にすることのできる最高の科学的知見を提供し、人為的開発と経済成長を環境悪化から切り離す（デカップリング）方策のより良い理解に貢献している。IRP報告書に含まれる情報は政策に関連し、政策の枠組み検討や政策・計画立案をサポートし、政策の効果に関する評価とモニタリングに役立つ一ことを意図したものである。

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、報告書2b「金属リサイクル—機会・限界・インフラ」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。金属需要の高まりは、地球資源への恒久的な圧力となっている。金属は高価値の資源であり、原理的には容易にリユース・リサイクル可能である。世界規模で金属のリユース・リサイクルが実現すれば、廃棄物が資源に姿を変え、物質循環の環が閉じる。金属の一次生産に伴う環境影響の軽減、金属利用可能性の確保、金属価格の低下、さらには関連経済セクターの雇用促進も期待される。



本報告書の目的

背景と目的

金属リサイクルは長い歴史を持つ。使用後の金属を廃棄して、再び新たな鉱石の採掘と一次金属の生産を行うよりも、リサイクルしたほうが資源効率が高くコスト効果が高いことが判明して以来、金属はリサイクルされてきた。近年まで殆どの製品の構成は比較的単純であり、リサイクルの対象は、鉄鋼、銅、アルミニウムなどベースメタルが中心であった。複合材料あるいは複数種の材料を組み合わせた製品が増えた結果、21世紀の金属リサイクルは、厳しいビジネスとなっている。

過去のUNEP報告書から、使用済み製品の回収が不完全、リサイクル方法が不適切であったる、あるいはある種の使用済み製品中に含まれる金属は適切なリサイクル技術が未確立であったりするなど回収・再資源化プロセスに構造的な不備があるために、今日、貴重な金属が実に大量に失われていることが明らかになっている。

金属リサイクル率の伸び

UNEP国際資源パネルの報告書2b（本資料は、その要約版である）は、現時点での金属リサイクルの機会と限界を浮かび上げ、廃棄物中の有用資源回収を最大化するために必要なインフラの構想を提示した。この目的に鑑み、現代の製品が複数種の材料から構成されていることを考慮し、天然鉱物（geological minerals）からの金属回収の複雑な技術的ノウハウを、これらの「人造鉱物（designed minerals）」すなわち製品に応用する「製品に焦点を合わせた」アプローチが推奨されている。人造鉱物リサイクルにおける特徴

的な課題は、40種以上の元素が含まれている可能性があるという点にある。天然鉱物は、たとえば1種類の金属を主成分とし、副成分として15種類ほどの金属が微量ずつ含まれるものもあるが、人造鉱物における金属元素の組み合わせは、しばしばこれを大きく上回る。今日の多種の金属が含まれる複雑な製品は、経済的に採算の取れる方法で金属、合金、化合物などに分離し、原材料として再び製品生産工程に戻すためには、複雑な熱力学的知識を必要とする。このため、金属リサイクル率の引き上げでは、製品設計者の役割が天然鉱物の製錬技術者と同様に重要なものとなる。

質・量の両面で金属リサイクル率——すなわち資源効率性——を向上させる方法は、非常に困難な課題である。リサイクルのインプット側の量と組成、特定地域において必要とされる技術インフラ、そしてグローバルなリサイクルの経済性が、問題克服のカギを握る。

本資料は、次の点に力点を置く：

- リサイクルの経済性と法制化
- リサイクル・製錬施設および技術
- リサイクルシステムの一部としての回収
- 資源利用効率の向上を目指した設計（DfRE）
- 物質・資源効率性の目標設定
- 啓蒙教育、情報、R&D、およびシステム&プロセス・シミュレーション

天然 (geological)

銅鉱物
黄銅鉱

15 種類以上の稀少金属
例: Au, As, Pd, Se, その他

人造 (designed)

銅「ミネラル」

40 種類以上の元素
製品中で特定機能を果たすため、合金や化合物などとして複雑に結合



天然鉱物
としての結合

製品設計および材料組み合わせにより
新しい「鉱物」が生成

材料としての
つながり

複合的材料

製品に焦点を合わせたりサイクル:天然鉱物から
金属を回収するノウハウを活用し、
採算性のある技術と方法の適用により、
回収・再資源化プロセスの中で、
人造「鉱物」すなわち複雑な相関結合状態にある
製品内部にある金属を抽出すること

リサイクルの経済性、技術、法律

環境に優しいリサイクルのための政策枠組み

金属のリサイクルでは、経済性、技術、法律が3本の芯柱である。金属種によるリサイクル率の格差を広げないためにも、多種の金属のリサイクル率を同時並行的に引き上げる方法が必要である。法と取締が未整備な場合、回収・再資源化プロセスでは価値の高い成分は抽出されるが、その他は安易に廃棄処分されかねないことから、この同時並行性は重要である。というのは、しばしば貧困に根差し、またリサイクル材（recyclate）の特性に関する知識不足が原因であるが、低価値の物質のなかには、処理・処分に注意が必要な危険物もあり、軽率な処理・処分が人と環境に害を引き起こす恐れがあるからだ。

稀少金属という課

製品機能の必要から多種の材料が複雑に組み入れられる結果、稀少金属の回収が難しくなる。法定のEoLリサイクル（消費最終段階でのリサイクル）目標は重量規定のみであることも、含有量の少ない金属の回収難度をさらに押し上げている。パラジウムやインジウムなどは、携帯電話やノートパソコン、あるいは車両に、使用済み製品中の含有率100万分の1から10億分の1という微量が存在する。正規の回収・再資源化プロセス以外のルートでは、これら稀少金属は回収されないこともしばしばである。稀少金属のリサイクルについては、BAT（利用可能な技術のうちで最善のもの）の要件を満たす大型中央施設への透明な越境輸送を推進するための国際的取り決めが必要である。これに対して、鉄鋼やアルミニウムなど、使用済み製品からまとまった量の回収が可能な金属は、ローカルレベルでのリサイクルが可能である。この点と関連して、たとえばアフリカ諸国において鉄鋼やアルミのリサイクル産業を育成できる可能性もある。

複雑な使用済み製品は不適切な処理がなされることが非常に多く、結果として、健康と環境に危険をもたらし、貴重な金属が回収されずに失われてしまっている。グローバルレベルでの効率的な回収&解体・分離インフラの確立、知識移転、および途上国の非正規リサイクル産業との適切な連携化、および国際協力のための新しいビジネスモデルを創出することが課題である。

政策 メッセージ

- すべての関係者が関わることのできるグローバルレベルな活動環境を整える
- BATに基づくリサイクルのための適正な法的枠組みを推進する
- 製錬施設が金属リサイクルのカギを握る

→ 政策と法規制は、熱力学と現実社会の経済原則に裏打ちされる必要がある

公平な活動環境の創出

外部コストの内部化によって、リサイクル産業部門内に公平な活動環境を創出する必要がある。場合によっては、人間の健康と環境に有害なリサイクルを阻止するため、現時点では採算性がなくとも、有望な回収法の導入を支援することも必要である。

前処理および製錬工程／施設に関して、共通の国際基準を定義し合意する必要がある。このことで、リサイクルシステムのステークホルダーは「ベストプラクティス」に基づいた活動が可能となり、社会、環境、技術、経済面も考慮される。この点で、リサイクル結果の向上を狙いとする政策や法規制の策定に、熱力学と現実主義経済学の視点を盛り込む必要がある。

BATの推進

まず第一に、BATの利用を拡大し金属回収率を引き上げる必要がある。そのためには、BATを、材料効率の最大化を可能とすると共に、回収・再資源化プロセスの各段階および全体的な環境影響を軽減材料効率を可能とするプロセスとして位置づける。



リサイクルの各段階（回収、前処理、リサイクル）で必要となる技術は多種多様である。たとえば、前処理段階には人力による精緻な解体方式が最大の回収率を実現する。一方、特殊金属部分からのクリティカルメタルの回収には大規模なハイテク製錬・精製施設が最適である。この種の施設は、一次金属（バージン金属）と二次金属の双方に豊富な冶金学的知見を持つ企業の施設となっていることが多い。

官民を問わず廃棄物回収については、廃棄物処理プロセスに流入するすべての成分が回収および処理されるよう保証する経済的誘因が必要である。このための対策は、生産者責任の拡大、デポジット計画、高価値部材のリサイクルで得られた収益を回収・再資源化プロセスの関係者全員で構成に分配することなどである。



適応力のあるインフラと技術

リサイクルのインフラと技術

現代の製品は、ますます複雑になっている：多種多様な新機能を実現するため、多種多様な材料が緊密に組み合わせられる。このような複雑な製品のリサイクルは、カップのコーヒーを十分にかき混ぜた後で、最初の成分——コーヒー粉、水、牛乳、砂糖に分別するようなものだ。

適切なリサイクルシステムの原則は、製品に焦点を合わせたアプローチから確立可能である：使用済み製品に含まれるすべての元素の全体論的観点に基づき、複雑な多種材料リサイクル材から高品質の金属を取り出すため、精巧な物理的・冶金学的な処理設備を維持

し改良する。このためには、回収・再資源化プロセスのすべての関係者（製品設計、回収、処理の関係者）が、システム全体および個々の設備を理解し、変容する使用済み製品の組成に対する適応力を備える必要がある。言い換えれば、一層、複雑さを増す状況に対処するための専門知識が必要である。加えて、リサイクル技術は柔軟性を備え、各種の、しばしば化学的性状が大きく異なる金属や各種元素の回収を同時に最大化することができなくてはならない。

製品に焦点を合わせたアプローチ

出発点となる一般的疑問

製品を資源として利用するにはどうしたらよいか？



使用済み製品



前処理



スチール (Fe)



アルミニウム (Al)



コバルト (Co) | ニッケル (Ni)



貴金属 | 銅 (Cu)



その他、インジウム (In) など

製錬



より少ない廃棄物量

現代の製品は多種材料の複合物であることを考慮し、製品に焦点を合わせたアプローチによって、資源効率最大化を実現するための最適なリサイクル方法を模索する。

→ 製品に焦点を合わせたアプローチを基盤としたリサイクルシステムの推進に効果的な環境を整える

→ リサイクル材から金属を回収するためには、複雑な冶金学を理解し活用する



前処理

前処理は、複雑な製品を、適切な回収・再資源化プロセスに乗せられるような単位に分解することである。したがって、使用済み製品は、機械的に分離・選別される。この段階における分離と選別の程度が、その後のリサイクル材の品位を決定する。それゆえ、製品設計における二つの重要な発展—小型化と製品／製品組成の多様性—には、適切な解体と選別を行うこと、ならびに強固で適応力ある高度な冶金学的な抽出設備（湿式・乾式の双方）を備えることが必要である。人力による手解体・選別は非常に適応力にすぐれており、リサイクルシステムにおいて必要とされる柔軟性を保証するための要件の典型例とみなされる。

リサイクルと製錬

前処理を経た金属片は、二次金属産業に送られ、経済価値のある個々の金属元素や合金としての回収が行われる。最大限の回収を実現するために、類比性のある特性を持つ金属混合物が、それぞれのリサイクルルートに送り込まれるはよう注意する必要がある。そうする事によってのみ、冶金学的な処理を施し採算の取れる形態で分離することが可能となる。金属の特徴はその物理化学的な性状によって定まることから、リサイクルプロセスの改良には、一次製錬の知識も重要な要件となる。

メタルホイール

各種金属の回収を最大化するためのリサイクルシステムの設計については、各種の金属の回収を最大化するためのリサイクルシステムの設計においては、一次製錬の知見から導き出された「メタルホイール(Metal Wheel)」から貴重な教訓が得られる。まず最初に、使用済み製品を主成分の金属いわゆるキャリア金属によって分別する〔図「メタルホイール」を参照〕。図に示す通り、メタルホイールの各切片は各々、キャリア金属についての生産・製錬設備全体を表わしている。製錬過程でキャリア金属が回収された後、残った随伴金属（合金、化合物、選別が不十分な遊離物）の辿る運命は様々である。最適なケース（緑色の円）では、キャリア金属との親和性を有する随伴金属は、プロセスにおいてキャリア金属と同時に回収されるか、後工程のプロセスにおいて、副産物・副生物(ダスト、スラグなど)から回収可能である。そうでない場合は、黄色や赤色の円で示す通り、随伴金属は回収されないか、またはセメント用途原料など低品質製品としての回収に留まる。決定的に重要な例として、銅と貴金属（プラチナ属、金、銀）を鉄処理ルートで処理することは可能な限り回避すべきである。なぜなら、鉄処理ルートでは、これらの高価値の金属が失われてしまうからである。これに対して、銅をキャリア金属とする処理ルートでは、貴金属類を高率で回収可能である。

一次製錬で扱われる天然鉱物との対比において、使用済み製品を人造鉱物とみなすことができる。複雑な現代製品のリサイクルには、金属採鉱の専門知識の必要性が増している。

キャリア金属ルートの例

キャリア金属
スチール (Fe)

Fe

W

Mn

Nb

Mo

Si

~~Au~~

~~Ag~~

~~Pt~~

~~Pd~~

~~Rh~~

~~Cu~~

鉄鋼のリサイクルルート

鉄鋼は、鉄を主成分とし他の合金化元素を含み、地球上でもっとも使用量が多く、リサイクルのインフラは数世紀の歴史を持つ。今日、寿命の尽きた鉄鋼の90%近くがリサイクルされている。しかしながら、不完全な分離、混合リサイクル材、複雑な製品設計などにより、鉄鋼リサイクルルートに入ってしまった鉄鋼との相性の悪い金属は回収不能となっている。回収不能となっても、合金元素としてリサイクルされたスチールの機能性に貢献する場合もある（例えば、シリコン、モリブデン、ニオブ、マンガン、タングステンなどで、熔融して酸化スラグや揮発によって失われない場合）。しかし、銅や白金族金属（PGM）など他の金属は失われて、リサイクル後の製品の品質に悪影響を及ぼすことすらある。

PMとPGMリサイクル過程に特定すると、溶媒として鉄を使用し、その後、銅ルートに移して貴金属を回収することができる。溶媒として使用された少量の鉄はスラグとなる。

Cu

Au

Ag

Pt

Pd

Rh

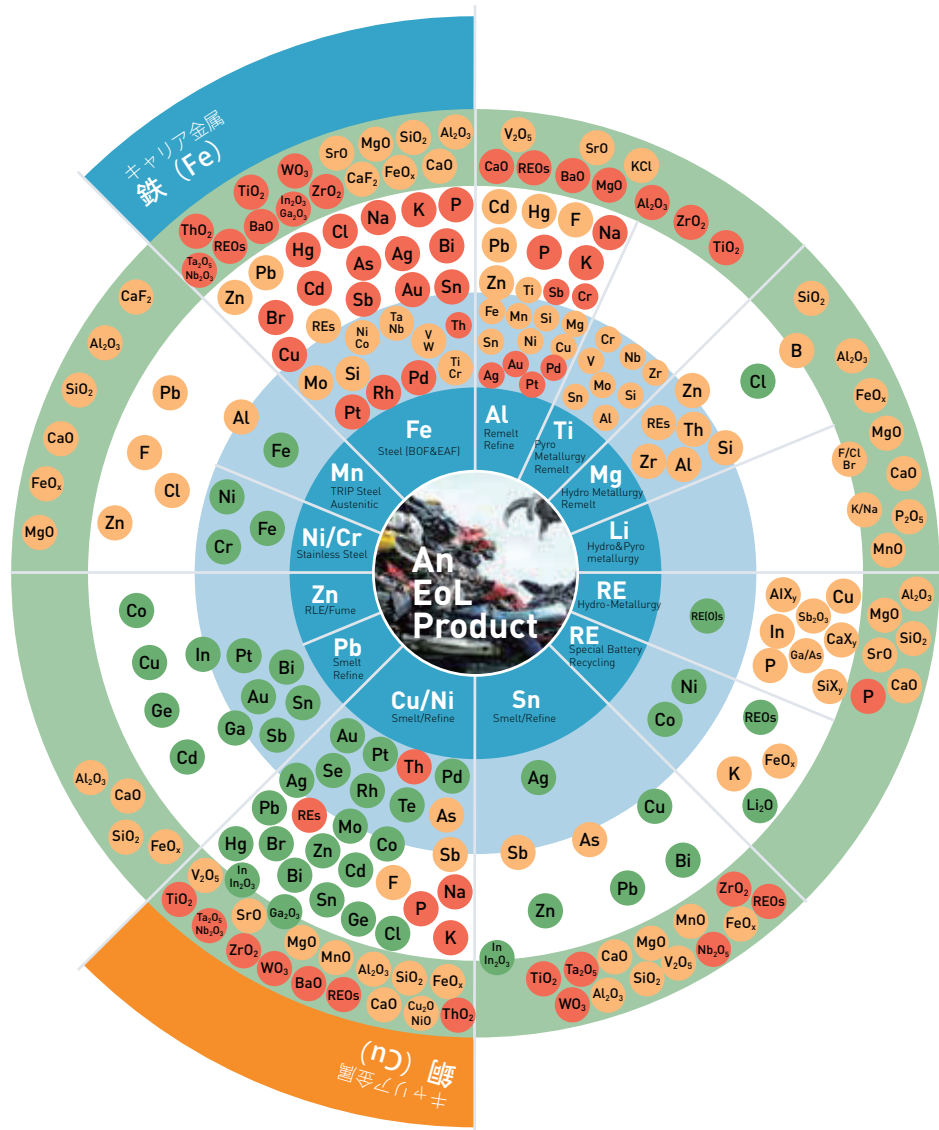
FeO_x

キャリア金属
銅 (Cu)

銅のリサイクルルート

銅は物理化学的な性状から、乾式製錬工程（金属溶錬）で多種の貴金属（金、銀、プラチナ、パラジウム、ロジウムなど）のコレクターとなる。プリント配線基板やエレクトロニクス部品など複雑な製品やリサイクル材中に含まれる貴金属は、価値は高いものの一般商品中の含有率は概ね微量に留まるが、溶錬で銅相に濃縮され、その後、湿式・乾式製錬技術を用いて回収することができる。また、ニッケルも、銅に熔融した後、湿式製錬法で回収可能である。アルミニウム、希土類金属（レアアース）、リチウムは、スラグ中に酸化物として蓄積し、通常はプロセスの手間がかかりすぎて回収されない。乾式製錬では大量のスラグが産生し、今日では主として道路舗装など低品位製品としての再生に留まっている。銅製錬は、複雑なリサイクル材に含まれる多種金属のリサイクルのカギを握る。したがって、9ページに示す通り、リサイクル材のしっかりした処理が可能な銅製錬設備とノウハウは、持続可能な社会のための必須要件である

「メタルホイール」
 一次製錬に
 基づく概念だが、
 金属リサイクルにも
 等しく有効。
 ベースメタルの
 原料鉱物に
 含まれるの
 各種元素の
 辿る運命を、
 関連する冶金学的な
 処理技術に応じて
 表わす。
 各切片は、
 ベースメタル
 (キャリア金属) 製錬の
 一連の設備を表わす。



- 基本的なキャリア金属
- 金属相: 主にキャリア金属に溶解、(主として乾式製錬で) 金属としてリサイクルされるもの
- 主にダスト、スライム、スパイス、スラグから(主として湿式精錬で) 回収される化合物
- ダスト、スライム、スパイス、スラグに由来するが回収されない化合物。ただし、主として無害な低価値製品としてリサイクルされる
- EL 主として回収される元素
- EL 主として合金または酸化物製品中に含まれる化合物。別途独立には回収されないが、悪影響は有さず、機能的貢献する可能性もある。
- EL 主として失われる元素。必ずしもキャリア金属や製品と相溶性がない。

リサイクルシステムの一部としての回収

すべてのステップが関連

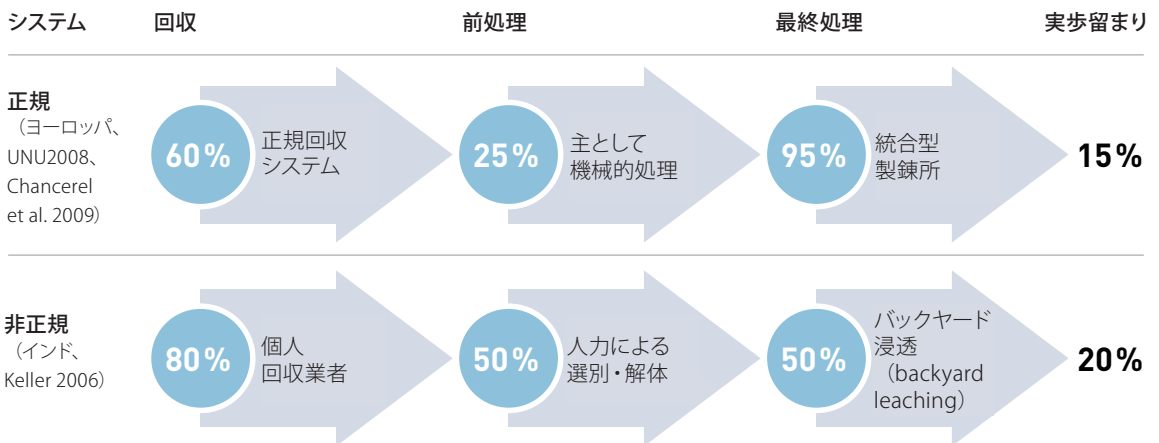
リサイクルは、回収、前処理（分離・選別）、最終処理（リサイクル&製錬）の活動チェーンである。個々の物質の総合的な回収効率、各段階の効率の積として得られる。したがって、最適化には、回収効率と環境適性の両面での最高性能技術の組み合わせが必要である。

回収がカギ

回収は回収・再資源化プロセスの出発点である。回収なしに、後続の活動は存在しえない。さらに、特に先進工業国では、回収・再資源化プロセス全体の中での弱点となっている。それゆえ、資源効率の改善のための重要問題であるにもかかわらず、適切な回収インフラの確立は主に経済性の観点から依然として難題で

ある。加えて、消費者サイドの受入れも重要な要素となっている。

消費者による使用済み製品となる主要な金属含有品目は、自動車、電子機器、包装材、各種小型金属製品（玩具やバイク）である。主要な回収方法は、地方政府や民間による回収、個別生産者・小売業者による回収、非正規ルートによる回収である。慈善事業としてのイニシアチブ、小規模パイロットプロジェクト、またはイベントとしての回収も、廃電気・電子機器（WEEE）の回収に貢献しており、金属回収という点で高価値な物流となっている（貴金属含有率に左右される）。



物質に焦点を合わせた回収・再資源化プロセス全体の回収効率には、回収・再資源化プロセスを構成する全段階が関係する一図は、ヨーロッパの正規システムとインドの非正規産業それぞれの、プリント配線基板からの金リサイクルの例

リサイクルシステムの一部として回収

回収ルート間のバランスは、各国の政策と経済に左右される。すなわち、OECD諸国では概ね正規セクターが中心、途上国では非正規セクターの比率が高い。例として、ヨーロッパでは消費者が回収費用を負担するが、途上国では通常は廃品回収業者が廃家電や金属スクラップを消費者から買い取る。途上国の場合、貧困層が廃棄物価格安定策からの収入に依存することで、回収率は極めて高くなることが多い。このことは、回収に対する強力な経済刺激がカギを握る要素となることを示唆する。

回収の質的側面

回収物の性状はばらつきが大きく、このことが製品の質と回収に悪影響を及ぼし、後段の処理段階での散逸増大につながる。相性の悪い物質や化合物が混在すると、処理は採算性が失われる可能性すらある。原則として、リサイクルされる製品は分離、遊離、選別等の上で、適切なBAT製錬施設で経済的に処理可能な再資源化プロセスに入るようにしなければならない。製品中心アプローチによってリサイクル材混合物がキャリア金属と相性が良い場合は、発生源分離（source-segregate）式回収により後段の工程に最も適した品質が確保される。ストリーム価値と回収コストおよび労力による制約を受けるが、全般に経済的および環境的に実現可能性が得られる。最適分離範囲は、政策と回収制度、およびリサイクル技術、経済性、および製錬施設に左右される。

いずれにせよ、使用済み製品に適した廃棄物処理プロセスの識別には、製品の成分組成や構造に関するデータが必要である。現時点では、製品の成分組成に関する情報は不十分なままであるが、完全な回収・再

資源化プロセスを描くための適切な処理シミュレーションツールを用いたリサイクルシステムの最適化には不可欠である。

回収の量的側面

リサイクルの経済性は、前処理とリサイクル施設に到達する量に左右される。供給は、適切な回収システムによって保証する必要があり、量的に十分で、かつ経済的信頼性が得られるよう安定供給されなければならない。多くの途上国では、回収対象となる廃棄物は、高価格で買い取る非正規セクターに流れがちなため、操業の経済性が得られる十分な量が確保できないという事実が、正規セクターの確立を阻んでいる。

→ 製品の材料組成に関する情報の利用可能性を拡充する

→ すべての関係者が製錬を理解しなければならない

リサイクルシステムの一部としての回収

非正規リサイクル活動は、価値の高い成分だけを廃棄物から抽出することでコストを抑える傾向があり、このために市場に出る廃物を高価で買取ることが可能になっている。しかしながら、回収されなかった成分が適切に処理されなかった場合、人間と環境に大きな害をもたらしかねない。ここに、正規リサイクル産業にコスト増を強いる環境基準順守を義務付けられる理由がある。

WEEE中に含まれるものなど一部のクリティカルメタルは、ハイテク産業施設において高率で回収することが可能である。材料効率を顧慮すると、この種の含有量は少ないもののBATによる回収が可能なクリティカルメタルは、十分な回収・再資源化能力を備えた施設に仕向けることが望ましい。しかしながら、これらの施設は、多額の初期投資コストを相殺するために大規模なことが多い。したがって、地球全体でも少数に留まり、それらの施設で各国からの大量の貯蔵を集中的に処理することになるであろう。

回収システムは、廃棄物回収プロセスに取り込まれたすべてのコンポーネントが、適切な前処理、および最終的なリサイクルルートに送られ、物質回収率の引き上げと環境影響の軽減を同時に達成可能となるよう設計しなければならない。



回収インフラ

回収インフラは、政府当局、製品製造者や小売業者（拡大生産者責任に応じて）、または企業、個人、慈善団体など、廃棄物から金銭を得ること、または環境影響を減らすことを望む関係者によって確立される。インフラ確立のための重要要素には、知識基盤、動機、そして回収物を取り扱う物理的インフラの利用可能性がある。もう一つの重要要素が誘因構造である。倫理的または環境保護の意識から回収に関わるケースもあるが、殆どの場合は、回収が金銭収入になる、または回収しないと料金が課されるという理由で回収している。

→ 適切な回収のための誘因を促進する

→ 既存の消費財流通構造を活用して回収スキームを設計する

政策
メッセージ

消費者行動

家庭系一般廃棄物（産業廃棄物に対応する消費者使用後の廃棄物をいう）の回収は、特にロジスティクス面で難題となっている。廃棄物が回収・再資源化工程に取り込まれる入口サイドには回収業者がいるものの、何十億もの消費者が使用後は製品を廃棄処分している。回収率を上げるための要素の一つが、消費者レベルの回収率引き上げである。すなわち個人の教育と行動変化を促すことが、リサイクル改善につながる。

カギとなるのは、便利さと意識である。機会とインフラは、透明でアクセス性が高いことが必要である。例として、発生源分離において消費者の適正行動による貢献を高めるには、使用済み製品の成分組成と、対応する（分離後の）廃棄物再資源化プロセスにおいて資源がどのような運命をたどるのか、消費者へのガイダンスが必要である。マーケティングとソーシャルメディアを活用して、個人の考え方に影響力を発揮し、個人レベルでリサイクルへの動機付けを行うことができよう。

消費者への周知、誘因提供、動機付けは、各国各様の方法が確立されている。リサイクルはグローバルな問題であるとはいえ、ローカルレベルでの行動が必要である。



- 消費者のリサイクル意識を高める
- 便利な回収体制を作る（便利なところに回収ポイントを設置するなど）

資源効率化を目指した設計 (DfRE)

リサイクルの出発点は製品設計

資源効率化を目指した設計 (DfRE) は、総合的な技術主導および経済主導の概念で、製造と完全な回収・再資源化プロセスの複合能力を活用して資源効率の最大化を図ることを狙いとする。DfREは、製品の複雑さを考慮に入れ、含まれる要素すべての最適化された回収を可能とする製品に焦点を合わせたアプローチを必要とする。一つの要素の最適化は他の要素を考慮することなしには不可能であり、ライフサイクルという視点が必要になる：使用済み製品の回収および処理の関係者だけでなく、製品の設計者も全システムを意識しなければならない。現代の製品設計は、多種材料製品のリサイクルの複雑さを考慮に入れ、リサイクルに支障となる設計は回避すべきである。もっとも、第一義的に優先されるのは常に製品の主たる機能であり、前述の姿勢は常に可能とは限らないが、必要とあれば政策による強化を図るべきである。さらに、製品の設計者は、製品の機能面の必要性について現実的な範囲内で設計を精査すべきである。

解体しやすい設計

解体しやすい設計はDfRE設計の1要素であり、相溶性のある種類の金属を1グループにまとめ、一括して適切な冶金学的処理に振り分けられるよう解体しやすいことを狙いとする。言い換えると、たとえば各コンポーネントは、機械による前処理段階で分離可能な方法で接続・結合する。技術的な設計のほか、経済性も重要な要素となる。人件費が解体されるコンポーネントの回収価値を上回るような解体コストが高すぎる状況では、十分な経済的誘因が提供されない限り、手間のかかる解体はリサイクル率の改善を進める上で決定的な障害となる。

リサイクルしやすい設計

リサイクルしやすい設計は、リサイクル・製錬の技術的・経済的可能性に加えて、冶金学的な物性・化学性状を考慮する。この視点に立ち、様々な金属資源の流れにおける様々な元素が、BATによって、高純度の金属または合金として回収可能となるよう、相性の悪い物質の混入を回避する必要がある。このアプローチには、当然ながら製品の機能性要件による制約があり、相性の悪い金属と物質の組み合わせが回避不能な場合もある。接続部／構造は解体性能を左右し、したがって物質分離可能性を決定する。結合した材料は、製錬における個々の回収に影響を及ぼす。

政策決定支援ツール

冶金学的現実「メタルホイール」に簡潔に示されており、多種の金属元素の複合的金属リサイクル・製錬・回収の可能性がみてとれる。物理学を基盤とするリサイクル・シミュレーションツールは、リサイクル過程での製品の分解や分離を踏まえ、設計／材料選択や接合法がリサイクルにおよぼす影響を明らかにする。重要問題に的を絞り、わかりやすい形で情報提供するこれらのツールは、製品設計にも補助ツールとして使用すべきである。ある製品について、これらのツールを用いてリサイクル法を識別し、成分組成データに基づいて達成可能なリサイクル率を割り出すことができる。最善の工程を特定するためには、提案されたプロセスを評価する為に、ライフサイクル思考に基づく環境評価（ライフサイクルアセスメント／LCA）と経済性評価とをインタラクティブに接続させる必要がある。このように、DfREは、BATベースのリサイクルシステムの牽引力となる。

既存の
フローシート設計
ソフトの例。
製品組成データに
基づいて
資源効率
シミュレーションデータ
を提供し、
このデータから
環境分析に基づく
リサイクル可能性指数
が得られる。
製錬施設が存在が
前提となる。



製品の成分組成

設計&機能性
すべての物質の詳細
成分組成

解体 & 物理的分離

物理学、経済学、フロー
シートによる損失軽減
接続法および材料分離
がスクラップ品質に影響

冶金学的回収

熱力学、技術、経済学
非線形相互作用が回
収率を決定

**= リサイクル可能性指標
& リサイクル可能性**

すべての元素&物質
の回収率の合計
GaBiへのリンクが真
の環境影響を決定

- リサイクルしやすい製品設計のサポート: 適切なCADを使用し、処理シミュレーションツールとリンクさせる
- 製造者におけるライフサイクルマネジメントの導入を支援する
- 製造・リサイクルシステムに関する物理学ベースの対話型シミュレーションに基づく、現実的なリサイクル目標を設定する

バルク材料

(スチール、
ステンレス鋼、
プラスチック、
ガラス、銅)

電子部品

(特殊金属・
貴金属)



洗濯機などの使用済み製品は、鉄鋼、ステンレス鋼、銅、ガラス、プラスチックが全重量の95%以上を占め、電子部品は僅か5%以下である。このため、現行の重量ベースのリサイクル目標では、電子部品のリサイクルは軽視されがちである。しかし、電子部品には特殊金属や貴金属が含まれており、これらの回収率を引き上げる必要がある。リサイクル目標を、製品中心アプローチに照らして改訂する必要がある。

全体的な材料効率目標

材料効率目標

政策は、物理学・経済学を基盤とした材料効率目標の策定を通じて、使用済み製品からの有用資源の回収率向上を図っている。これらの目標により、責任を負う業界は、所定量の物質（金属と金属以外）の回収を義務付けられる。ただし、この制度の有効性については異論もある。

重量ベースの回収率とクリティカルメタル

現行の重量ベースのEoLリサイクル目標は、複合製品に含まれるクリティカルメタルに関しては回収率向上を阻むものとなっている。これらのクリティカルメタルは、通常EoLフロー中の量が少なく、重量ベースのEoLリサイクル率目標の下では、量が多いため全体回収率への影響も大きいスチール、アルミ、銅などと異なり、使用済み製品全体のリサイクル率向上への貢献度は微々たるものである。回収・再資源化プロセス内のステークホルダーは、EoLリサイクル率の最低目標を達成するためバルク物質の回収に注力しがちで、インジウム、ガリウム、レアアースなどクリティカルメタルのリサイクルは軽視される傾向にある。



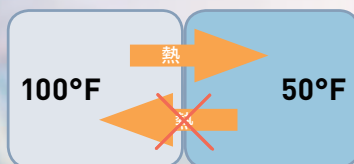
主要パフォーマンス指標

上述のボトルネックを克服するため、経済性ベースで環境保全型の主要パフォーマンス指標（KPI）を策定することが提案されている。KPIは、製品に焦点を合わせたアプローチの視点に立ち、クリティカルメタルは量的には少ないが重要性が高いことを考慮に入れて、付加的誘因を提供するものとなる必要がある。KPIは、技術・経済・環境の視点からリサイクルプロセス案をモデル化した対話型シミュレーションツールを用いて計算可能である。その後、KPIを用いたBATプロセスの定義を行うべきであろう。

→ 物理学・技術・経済学を基盤として**主要パフォーマンス指標（KPI）**を定義する

→ 法的枠組みを適応させる

金属とエネルギーの回収



熱力学



技術



製錬



経済

教育、情報とR&D

リサイクルの基盤

金属の総合的なリサイクル率を向上するためのグローバルな取り組みにおける中心的課題は、教育、情報、R&Dである。学際的で体系的な教育のアプローチ、研究の推進、先進技術分野に潜在する金属量の把握は、目標達成のための基本的な要素である。

学際的な教育

製品中心アプローチを受けて、熱力学、プロセスエンジニアリング、物理学、化学、そして社会科学、経済学、法律について深い理解に基づく学際的で体系的な教育を進める必要がある。既存のツールや一次冶金から得られる知識を、リサイクルループの環を閉じるために首尾一貫性のある方法で適用しなければならない。この野心的なアプローチは、ますます複雑になる使用済み製品の成分組成に対処できる金属リサイクルの最適化を成功させるための中心課題となる。金属代替および将来の材料の組み合わせの影響については、厳密なシミュレーションツールによる連続的評価が必要である。

研究の推進

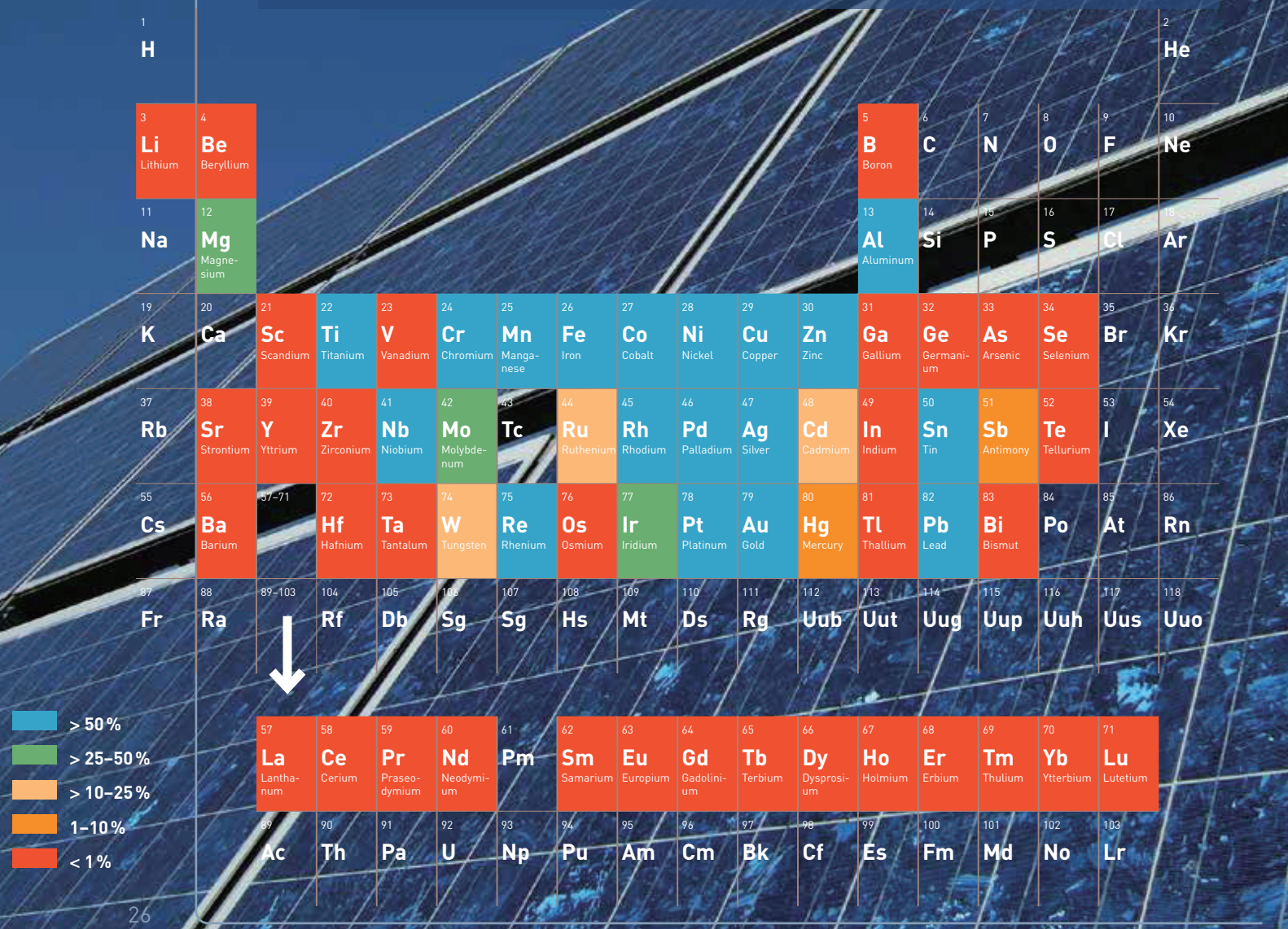
主要金属の処理とイノベーション推進には、研究促進が決定的に重要である。ノウハウ、特に主要金属の処理に関するノウハウの保全や、資源効率最大化のためのイノベーションを促進する必要がある。物理学を基盤とするシステムシミュレーションアプローチをリサイクルに応用することは、真に重要なR&D、製品設計、システムイノベーションのニーズ識別に必要である。

都市鉱物資源の定量

「都市鉱物資源」とは、社会のなかの製品備蓄——人造鉱物——である。都市鉱物資源として備蓄されている金属の定量化、それら資源の廃棄物フロー中の位置と運命の特定は、資源回収効率引き上げのために重要であり、金属インフラ・技術分野のR&D活動や投資決定をサポートする前提条件となる。このコンテキストにおいて、一次冶金学由来の地質学的アプローチを基盤とした政策策定が必要である。厳密なプロセスシミュレーションが可能な鉱物処理に使用されるものと類似構造のデータベースを確立する必要がある。

- 学際的で体系的な**工学教育**の実施
- 金属および市販製品中の**金属の「鉱物」**の定量
- リサイクルと持続可能な社会のために、**冶金学と技術**についての深い知識が必要

図は、リサイクルが行われている金属（形態は、高純度、合金などすべて）に関する情報である。データや推定の信頼性を確保するため、リサイクル率は5段階（>50%、>25~50%、>10~25%、>1~10%、<1%）で示す。専門家の推定によれば、EoLリサイクル率が50%を超える金属は60種のうち18種に留まる点に注意されたい。そのほか、25~50%が3種、10~25%が3種であり、その他の多種金属については、EoLリサイクルは殆どまたは全く行われていない。この物質ベースのリサイクル率を引き上げるには、物理的分離、生産冶金、製錬設備、製品設計と成分組成/鉱物学、および経済学についての深い理解が必要である。本報告書で述べた製品に焦点を合わせたアプローチは、プロセスシミュレーションをはじめ高度な技術的ノウハウを活用しリサイクル率を向上させる可能性を示している。



展望

資源効率：産業、学術、政策の合同ミッション

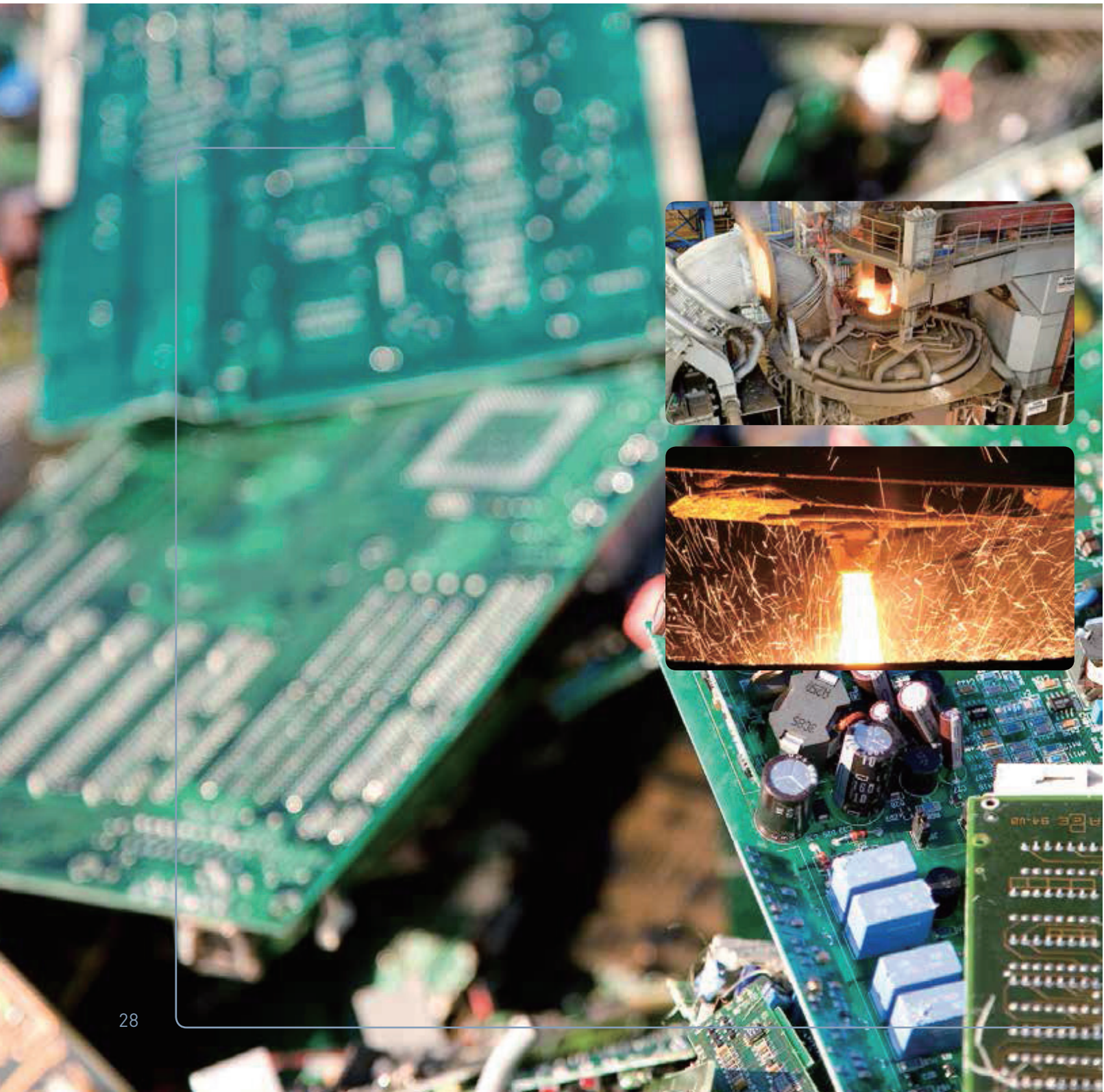
21世紀の製品はいつそう複雑なものとなり、多くの金属のリサイクルを促すには製品に焦点を合わせたアプローチが必要である。先のUNEP報告書2a「金属リサイクル率」では、主として多くの特殊金属について、物質に焦点を合わせた現在のEoLリサイクル率が非常に低く、殆どゼロに近いことが確認された。本資料報告書2b「金属リサイクル—機会・限界・インフラ」も同じく、金属のリサイクル率は製品による差があり、リサイクル率向上には製品に焦点を合わせたアプローチが必要であることを明らかにしている。各種の介入のなかでも、冶金学の深い知識と関連の現実に応じた製品設計は、リサイクル率を許容可能なレベルまで引き上げる上で役立つであろう。ベースメタルや貴金属でさえも、リサイクル率向上の余地は実に大である。

多種のベースメタル、特殊金属、貴金属が含まれる（40種以上）複雑な製品は、リサイクル材とキャリア金属の製錬方法が適合しない場合、現在の前処理法ではBAT（利用可能な最善の技術）要件を満たせない。製品が複雑化の一途をたどる今日のリサイクルの課題は、政策、法律、研究、教育、そして製錬業の協力によって対処する必要がある。

製錬業の役割

将来の全体的金属リサイクル率向上において、製錬業は2つの役割を持つ。1つは、これまでの長い複雑な天然鉱物の取扱いで培われた総合的な経験に基づき、この必須知識を活用し、回収・再資源化プロセス内のステークホルダーに伝え、複雑化する使用済み製品（または「人造鉱物」）の回収と選別に関する正しい決定のための能力構築に貢献することである。メタルホイールの教訓を考慮し、キャリア金属に関する知識など重要な冶金学的情報を広め、最適な金属リサイクルインフラを推進することである。

2つめとして、製錬業は将来的に新しい物質組成を可能とするR&D推進および新しい製錬プロセスに関する投資決定を通じて、多くの金属——特に重要金属——のEoLリサイクル率向上に貢献可能である。例として、廃棄されたネオジム・鉄・ホウ素磁石からの希土類リサイクルやリチウムイオン電池からのコバルト、リチウムなどのリサイクルは、興味深いものがある。



展望

研究と教育の役割

研究と教育は、増大する製品の多様性と複雑さへの対処、ひいては将来の（金属）リサイクルを左右するカギである。「都市鉱物資源」の定量化と製品中の「鉱物学」には、製錬業で使用される厳密なシミュレーション基盤を適用する必要がある。そして、その結果を物理学ベースのリサイクル可能性指数を提示するリサイクルツールの設計にリンクさせる必要がある。熱力学、反応速度論、製錬プロセス工学に加えて、物理学的分離や各プロセスの経済性を深く理解することが、リサイクル率向上の前提要件となる。

政策と法律の役割

政策と法律によって、すべてのステークホルダーのためのグローバルな活動環境を創出し、製品に焦点を合わせたアプローチ（天然鉱物の処理に基づく知見から得られた処理方法に相当するもの）、複合材料／金属システムの経済学、および効率的回収システムに対してBAT（利用可能な技術のうちで最善のもの）の適用を推進する必要がある。加えて、内在するすべての物質と金属の関係および非線形性（ライフサイクルマネジメントの採択によって）を踏まえたDfRE（資源効率化のための設計）、ならびに資源効率を最大化する複合材料の相互関係を踏まえたリサイクルに関する適切な主要パフォーマンス指標が、必須要素である。

現時点でリサイクルの最適化を阻んでいるボトルネックの克服には、全地球的な政策アクションが必要である。これはつまり、現行の廃棄物管理とリサイクルに関する法体系について、多種金属、特に、甚大な環境影響を呈するレアアース（一次生産ルートにおい

て、放射性廃棄物の生成や危険物の大気・土壌・地下水への放出によって）などクリティカルメタルについて、EoLリサイクル拡大の余地という観点から監視する必要があることを意味する。

製品の物質組成に関する情報の利用可能性を高めることも、その一つである。リサイクルしやすい製品設計のサポート、さらに物理学に基づく対話型の製造・リサイクルシステムシミュレーションを基盤とする、現実に即したリサイクル目標を設定することが必要である。市販製品に含まれる金属の量的把握を進めることも、リサイクル推進に必要とされる政策アクションの一つである。

学際的で体系的な教育や、金属リサイクルに不可欠な、しっかりした体系的な製錬施設の整備を推進することにも、政策アクションのコミットメントが必要である。

→ 工学系大学の高度な製錬知識や技術知識を維持することは、リサイクルと持続可能な社会にとって決定的に重要である。

金属の分類

鉄鋼関連金属

V ーバナジウム
Cr ークロム
Mn ーマンガン
Fe ー鉄
Ni ーニッケル
Nb ーニオブ
Mo ーモリブデン

非鉄金属

Mg ーマグネシウム
Al ーアルミニウム
Ti ーチタン
Co ーコバルト
Cu ー銅
Zn ー亜鉛
Tin ースズ
Pb ー鉛

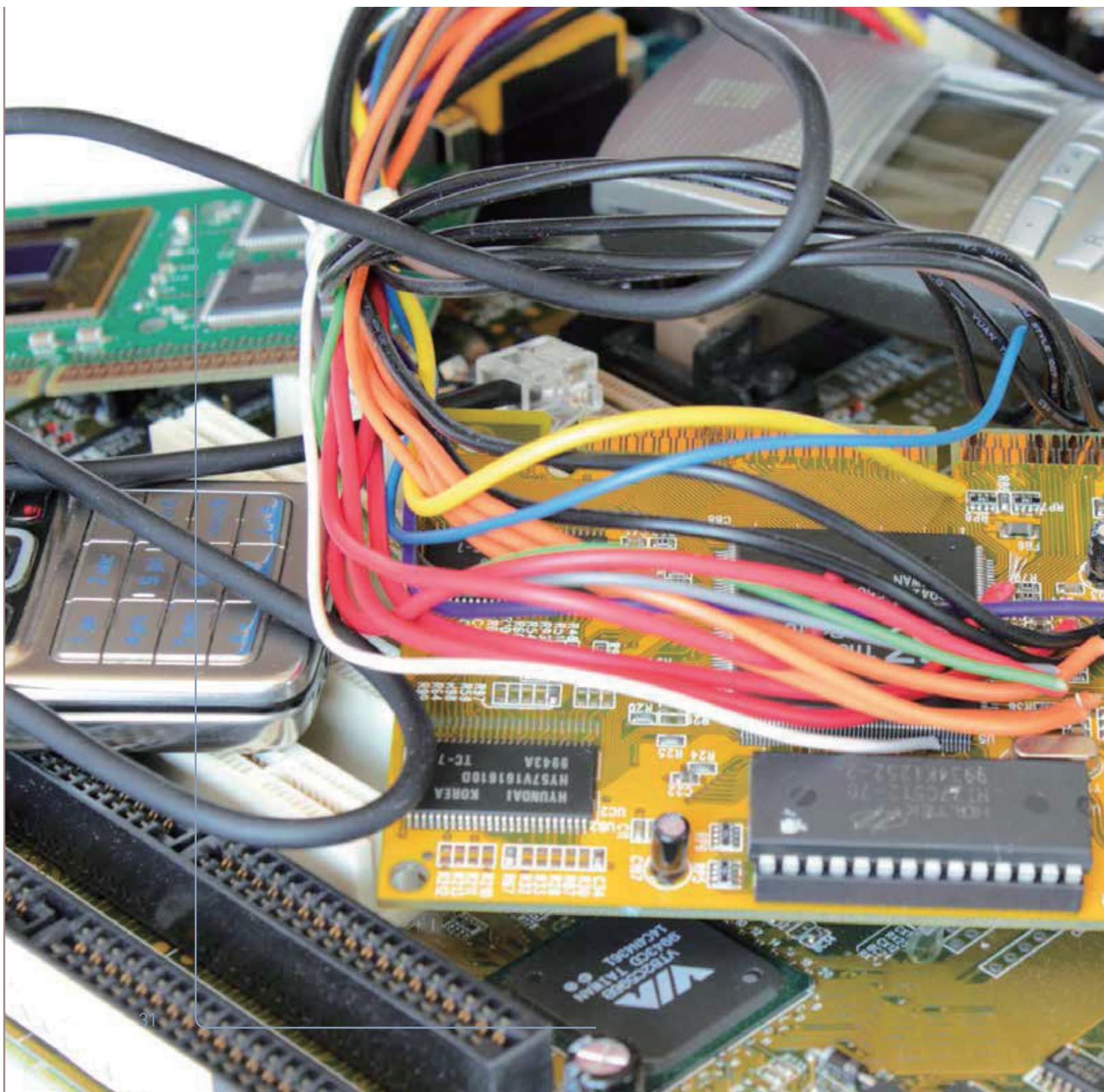
貴金属

Ru ールテニウム
Rh ーロジウム
Pd ーパラジウム
Ag ー銀
Os ーオスミウム
Ir ーイリジウム
Pt ー白金
Au ー金

特殊金属

Li ーリチウム
Be ーベリリウム
B ーホウ素
Sc ースカンジウム
Ga ーガリウム
Ge ーゲルマニウム
As ーヒ素
Se ーセレン
Sr ーストロンチウム
Y ーイットリウム
Zr ージルコニウム
Cd ーカドミウム
In ーインジウム
Sb ーアンチモン
Te ーテルル
Ba ーバリウム
La ーランタン
Ce ーセリウム
Pr ープラセオジウム
Nd ーネオジウム
Sm ーサマリウム
Eu ーユウロピウム
Gd ーガドリニウム
Tb ーテルビウム
Dy ージスプロシウム
Ho ーホルミウム
Er ーエルビウム
Tm ーツリウム
Yb ーイッテルビウム
Lu ールテチウム
Hf ーハフニウム

Ta ータンタル
W ータングステン
Re ーレニウム
Hg ー水銀
Tl ータリウム
Bi ービスマス



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



本資料は、グローバル金属フロー作業部会の報告書2b「金属リサイクル—機会・限界・インフラ」の要約版である。完全版は、CD-ROM版として配布される（本資料の31ページを参照）。UNEP国際資源パネルは、金属のリサイクル問題に包括的観点から取り組んでいる。

21世紀の金属リサイクル推進には製品に焦点を合わせたアプローチが必要である。これは、経済的に採算の取れる技術と方法を、回収プロセス全体を通じて適用し、「人造鉱物」つまり製品中の複雑に結合した物質から金属を抽出することであり、天然性鉱物から金属を取り出すための膨大なノウハウが基盤になっている。現代の製品は「人造鉱物」とみなすことができ、天然性鉱物から金属が取り出されるように、「人造鉱物」は金属リサイクルの鉱床となる。リサイクルの経済的成功と求められる資源効率化には、深い知識に加えて、適応性が高くロバストなリサイクルならびに製錬施設、システム、および技術が 必須要素である。このため、既存の十分な採算性のある製錬プロセスの知識とインフラを活用し進化させることが不可欠である。知識もインフラも、一次および二次金属製錬産業に確立されており、したがってますます複雑になる使用済み製品を最大の資源効率でリサイクル可能となるために、これらの技術を維持していく必要がある。