

物質利用の革新的変化からカーボンニュートラル社会の 実現に迫る

南 齋 規 介・渡 卓 磨



【特集：資源循環と脱炭素】

物質利用の革新的変化からカーボンニュートラル社会の
実現に迫る

南 齋 規 介*・渡 卓 磨*

【要旨】日本はパリ協定に基づく温室効果ガス（GHG）の排出削減目標を引き上げ、2030年には総排出量を約7.6億tonに抑制し、2050年のカーボンニュートラル社会の達成を目指すと言明した。日本のGHG排出の約20%を占める素材産業は、生産プロセスを再生可能エネルギー由来の電力導入により脱炭素化を図るのが難しい。昨今、物質効率戦略や物質バジェット戦略と称する、素材生産量の削減を通じてGHGの排出削減を狙うアプローチが注視される。物質消費の徹底的な効率化は高い排出削減効果を潜在的に有するが、気候2℃目標の達成に見合う物質消費は現状の半減が条件との推計もある。一方で、電気自動車等の脱炭素技術の普及によるクリティカルメタルと呼ばれる金属需要の高まりが予想され、物質利用の革新的な縮減と安定的増加の二面性に対処することがカーボンニュートラル社会の実現を近づける。

キーワード：素材産業、質効率戦略、物質バジェット、クリティカルメタル、資源ガバナンス

1. はじめに

2021年11月に英国グラスゴーで開催された第26回気候変動枠組条約締約国会議（COP26: the 26th Conference of the Parties to the United Nations Framework Convention on Climate Change）では、世界の平均気温の上昇を産業革命以前と比較し1.5℃未満に抑える長期目標が各国に共有された。その実行に向け、2030年には世界の温室効果ガス（GHG: Greenhouse gases）排出量を2010年と比較し45%削減すること、2050年頃には実質ゼロにする、つまりカーボンニュートラルの必要性の認識についても合意された。2021年10月22日に日本のパリ協定におけるGHGの自主的削減目標（NDC: Nationally determined contributions）は更新され、2030年までに2013年比で46%の削減と目標を引きあげた。具体的には、2013年度に14.08億tonであっ

た総排出量を7.6億tonにまで減少させることを目指す。2019年度の排出量は12.12億tonと2013年度よりも縮減しているが、さらに4.52億tonの削減を捻出する必要がある。

2019年度の日本のGHG排出の91.4%はCO₂起源であり、その第一の排出源は発電所等のエネルギー転換部門である¹⁾。当該部門からのCO₂排出は4.33億tonに上るが、実用化されている技術的な削減手段が存在する。たとえば、太陽光、水力、風力、地熱等の再生可能エネルギーによる発電技術の普及は着実に排出量を減らす。しかし、仮にすべての発電が再生可能エネルギーに転換され、排出量がゼロとなったとしても、目標とする4.52億tonの削減量に及ばない。加えて、電気自動車も実用化が進む排出削減技術である。運輸部門からの排出は1.99億tonと3番目に大きく、特に自動車（旅客）が1.02億tonを占めるため、再生可能エネルギーによる電力供給と一体となれば、運輸からの排出の実質的な半減が見通せる。

しかしながら、2.79億tonのCO₂を排出する2番目に大きい排出源である製造業は、発電や自動車と異なり再生可能エネルギーを基軸とした排出削減が難しい。とりわけ、鉄鋼、化学工業、窯業・土石製品、パルプ・紙・

原稿受付 2022.1.24

* 国研 国立環境研究所 資源循環領域 国際資源持続性研究室
連絡先：〒305-8506 茨城県つくば市小野川16-2

(国研) 国立環境研究所 資源循環領域 国際資源持続性研究室
南齋 規介

E-mail: nansai.keisuke@nies.go.jp

紙加工品に代表される素材生産では、化石燃料を高温の熱源や原材料として利用することが多い。またセメント生産では石灰石等の非化石燃料由来のCO₂の排出も大きい。これらの特性が化石燃料を動力源として用いる発電や自動車との顕著な相違であり、生産プロセスの電化を通じて排出削減を実施することを困難にしている。そのため、素材生産に伴うCO₂の排出削減には化石燃料に依存しない生産技術の開発だけでなく、社会における素材利用の効率を飛躍的に高め、素材の生産量自体を減少に導くことで排出抑制を図ることが重要となる。呼応するように、経済社会の物質代謝を研究対象とする産業エコロジー学の中では、物質効率戦略 (Material efficiency strategy) と総称し、物質利用の徹底的な効率化がもたらすCO₂の削減効果の定量化が進んでいる。一方、再生可能エネルギーや電気自動車の大規模な導入には生産量の増加が不可欠な金属が存在し、その重要性和供給の不安定性に対する懸念からクリティカルメタルと呼ばれる金属もある。すなわち、社会が脱炭素化する過程においては、素材を中心とした物質利用は縮小と増大の両方向の変化を適切に成しとげる必要がある。そこで本稿では、素材生産とGHG排出との関係について理解を深めると同時に、物質利用の転換からGHG削減を狙う戦略を紹介する。さらに、クリティカルメタルの将来需要を論文のレビューを通じて概説し、資源ガバナンスに対する影響に言及する。

2. 素材生産に起因する温室効果ガス排出量

2.1 世界の現状

2015年の素材生産に起因するGHG排出量は世界全体で110億tonと推計されており、この値は世界の総排出量の23%に相当する。1995年は15%を占め、50億tonであった排出量から大きく増加しており、気候変動対策における物質利用管理の重要性が増したことを裏づけている²⁾。素材生産にかかわる排出の約50%は精錬・加工プロセスによる排出であり、続いて生産プロセスで使用する燃料や電力生産に伴う排出が残りの40%程度を占める。排出の内訳を素材別にみると、鉄鋼がおおよそ32%、セメントが25%と大部分を占めるが、化石燃料の燃焼による排出に加え、製鉄によるコークスの還元剤利用やセメントの石灰石利用に伴うCO₂の発生も加味されている。次にはプラスチックとゴムが13%、非鉄金属が10%、紙・パルプが5%、ガラスが4%と続く。素材を利用する産業別に排出をみると、鉄とセメントの利用の大きい建設が約50%を占め、機械が12%、金属製品と輸送機器が各6%程度となる。

こうしたプロセス別、素材種別、素材使用産業別の内訳には1995年から2015年にかけて極端な変化はみられず、社会における物質利用の構造が根本的に変化したことが排出増加の要因ではない。増加の要因は、中国の消費と固定資本形成が誘引する素材利用がGHG排出を4倍程度の押しあげた結果である。特に固定資本形成に起因する素材利用のGHGは世界の70%ほどが中国需要であり、経済成長と素材を軸とした物質利用が一体となっていたことを論証する。

2.2 日本の現状とサプライチェーンの視点

日本の4つの素材産業 (鉄鋼、化学工業、窯業・土石製品、紙パルプ) が直接排出するGHG排出量は、日本の総排出量のそれぞれ約11.4%、4.3%、4.2%、0.8%を占める (3EID (産業連関表による環境負荷データブック)^{3,4)} における2015年値)。この約20%の排出が再生可能エネルギーの導入による削減が難しい排出に該当する。なお、事業用発電と自家発電からの排出は全体の約39%、その他の業種からの排出が約31%の寄与がある。

この4つの素材産業からの排出はあらゆる製品やサービスの生産サプライチェーンと繋がっている。企業のGHG排出を、現場からの直接排出を指すスコープ1、電力使用と輸送による排出を指すスコープ2、それ以外のバリューチェーンで生じる排出をスコープ3と区分した排出量の管理や開示が定着している。

カーボンニュートラルを宣言した日本の企業活動の脱炭素化には、RE100⁵⁾のような使用電力の100%再生可能エネルギー化と並行して、素材産業からの直接・間接的な排出を抑えこむ取り組みを加速化させる必要がある。図1は国内の製品やサービスの生産サプライチェーンを通じて発生するGHG排出量のうち、4つの素材産業からの排出が占める割合を示す。なお、製品やサービスの種類 (390部門) は総務省の発行する産業連関表の定義に準ずる。

紙類 [部門番号 (以下、同様) 86-94]、化学品 [95-123]、窯業土石 [132-143]、鉄鋼金属 [144-162] は、スコープ1の排出として素材産業からの排出割合が多いのはいうまでもないが、産業機械 [177-200]、精密・電子機械 [201-236]、輸送機械 [237-251] 建築土木 [262-273] では50%を超える部門も散見される。おおむね鉄鋼の寄与が高いが、建築土木では窯業土石への関与が顕著である。農林水産食品 [1-64] と衣類・家具 [65-85] は、農薬、肥料、プラスチック、化学繊維の使用を通じた化学工業に対する誘発が大きい。直接的な物質消費の少ない運輸・通信 [292-325]、教育・医療 [328-356]、その他サービス [357-390] では5%から10%

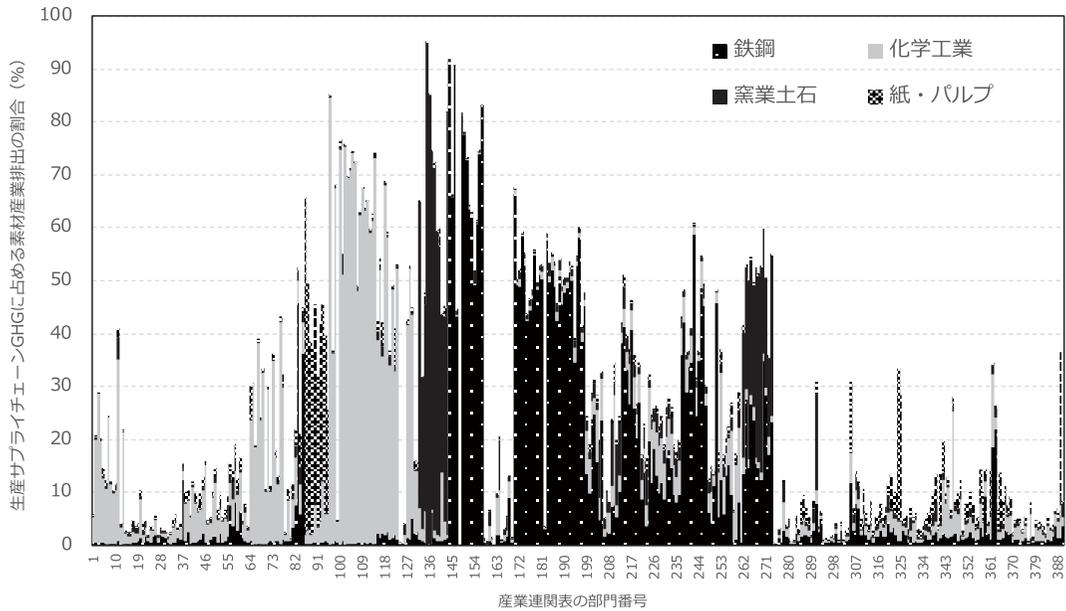


図1 日本の製品・サービスの生産サプライチェーンを通じた温室効果ガス排出に占める素材産業（鉄鋼，化学工業，窯業土石，紙・パルプ）からの排出割合（2015年値）；部門名の詳細は文献3, 4）を参照のこと

程度である。しかし同時に、脱炭素電力の利用だけではサービス業であってもカーボンニュートラルは実現しないことを示唆する。

3. 脱炭素社会が求める物質利用の革新的変化

3.1 物質効率戦略（物質利用の究極の効率化）

素材利用に伴うGHGの排出削減を物質利用の効率化から実施する方法として、次の6つの項目が「物質効率戦略」として整理される⁶⁾。物質効率とは、単位物質あたりの物理的なサービス提供量という指標である。戦略の1つ目は、“更なる集約的利用”である。同じサービスを提供するために、より少ない製品を利用する、たとえば、よりスペース効率の良い建物の設計やガジェットの多機能化、あるいは共有等を通じて高い製品利用率を達成することを目指す。2つ目は、“製品の長期使用（修理、再利用、再製造を含む）”であり、既存の製品により多くのサービスが提供できるよう使用期間を伸ばす。3つ目は、“軽量化と材料選択”であり、製品の生産における材料の削減、GHG排出量の少ない材料の選択を行う。4つ目に“部品の再利用、再製造やモジュール化”をあげ、5つ目として“リサイクル、アップサイクル、カスケード”が定義されている。6つ目は、“生産、加工、廃棄物処理における歩留まりの向上”である。

住宅と自動車については物質効率戦略の効果推計が行われ、国レベルで導入した場合のGHG削減量について

見積りが行われている。UNEP-IRPがG7各国（カナダ、フランス、ドイツ、イタリア、日本、英国、米国）と中国とインドについて行なった分析では、エネルギーの低炭素化と効率化に加えて、物質効率戦略をとることで生じる追加的GHG削減効果が示されている⁷⁾。具体的には、2016年の住宅のライフサイクルにかかわるGHG排出量はG7合計で1,450 Mtonであるが、住宅のエネルギー効率の改善と低炭素エネルギーの供給が進むことで、2050年には730 Mtonにまで減少可能と推定する。これに物質効率戦略を追加すれば、さらに35%削減に相当する250 Mtonの減少が見込まれ、465 MtonにまでGHGの排出を下げるができる。物質需要の増加が著しい中国とインドでは、物質効率戦略の導入による効果はさらに高いと指摘されている。2016年では、中国とインドの住宅関連のライフサイクル排出は1,680 Mtonである。エネルギー系の対策によって、2050年には780 Mtonまで削減することが可能であり、物質効率戦略の付加はさらに60%の減少をもたらし、330 Mtonにまで排出を抑制する。

自動車については電気自動車の普及と低炭素エネルギーの導入の組み合わせにより、G7全体で2016年には1,810 Mtonであったライフサイクル排出量が770 Mtonに縮小される。同時に物質効率戦略を打つことで、30%相当の305 Mtonの排出がさらに回避される。中国とインドでは2016年の排出量は700 Mtonであるが、2050年には電化とエネルギー系の対策があっても1,640

Mton に増加すると予測され、G7 の排出量の 2 倍程度となる。物質効率戦略は 35 % に相当する 550 Mton の排出を抑制する効果があり、中国とインドへの着実な戦略導入は国際的にも支援する体制作りが肝要となる。

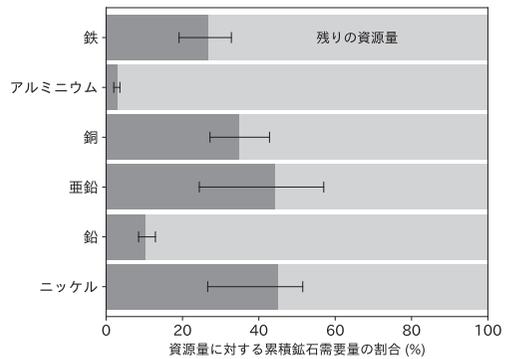
3.2 物質バジェット戦略 (GHG 削減目標に沿う物質利用)

物質の利用効率を向上することで削減できる GHG 排出量を推計する研究と対極的なアプローチがある。物質利用に伴う GHG 排出を 1.5℃ や 2℃ の気候安定化目標に沿うように設定し、その許容される GHG 排出の中で利用可能な最大の物質量を同定する方法である。気候安定化に許容される GHG 排出量をカーボン・バジェットと呼ぶことに準えて、筆者らは許容される物質量を物質バジェットと称している⁸⁾。具体的には、物質バジェットの算定は、動的最適化モデルである物質フロー・ストックモデルを開発し、金属・半金属の生産活動に伴う GHG 排出量の約 95 % を占める 6 種の主要金属 (鉄鋼、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛、ニッケル) を対象に行なった。

2℃ 目標に沿う GHG 排出量全体の 2100 年までの削減率を各種金属の生産に要する GHG 排出についても適用する場合、金属生産の年間生産量は最大で図 2 の経路を辿る。2030 年までに天然鉱石からの生産量がピークに達し、2100 年までの累積での鉱石需要量は現在確認さ

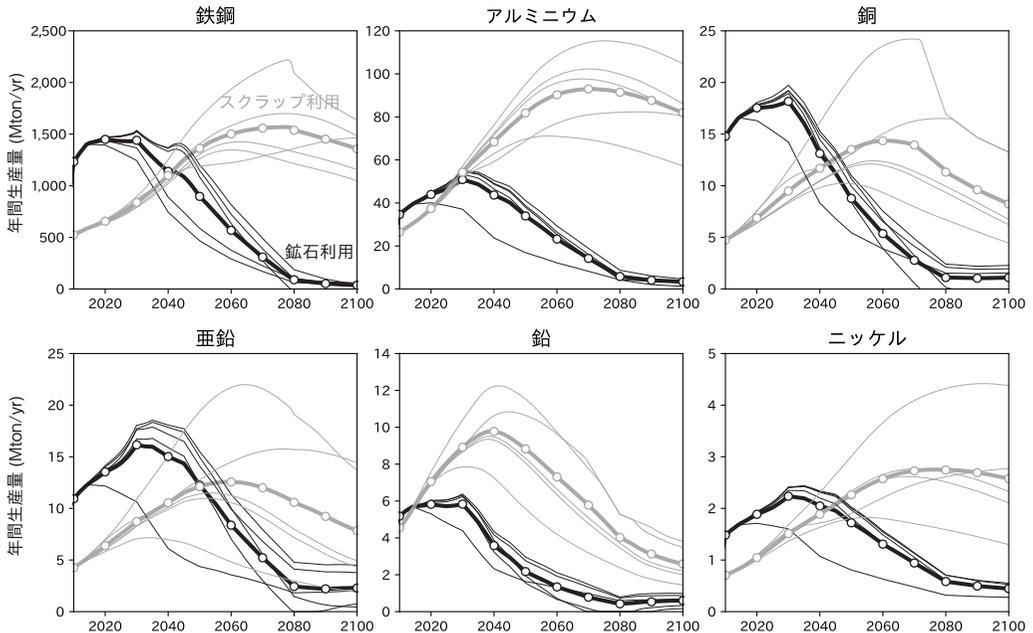
れている資源量のおおむね 50 % 以下に留まると推計された (図 3)。これは、物理的な資源枯渇を懸念した資源管理方策では時間的に不十分な可能性があり、GHG 排出削減目標に基づく金属管理を新たに立てる重要性を示唆する。一方、スクラップを原料とした生産量は徐々に増加し、2050 年までには天然鉱石からの生産量を上回るものの、利用可能なスクラップの量的限界によって、21 世紀後半にかけてその増加は徐々に緩やかになることが読み取れる。

現在、日本を含む高所得国は 1 人あたり約 12 ton の



資源量は現在確認されている資源の総量を示し、現状では経済的に採掘不可能な量も含む。エラーバーはシナリオの最小値と最大値を示す

図 3 2020 年から 2100 年までの累積での天然鉱石需要量と資源量の比較



細線はさまざまな対策を想定した各シナリオを示し、太線はシナリオの平均値を指す

図 2 気候 2℃ 目標に沿った排出削減率を仮定した場合の主要金属の年間生産量 (天然鉱石とスクラップ利用別)

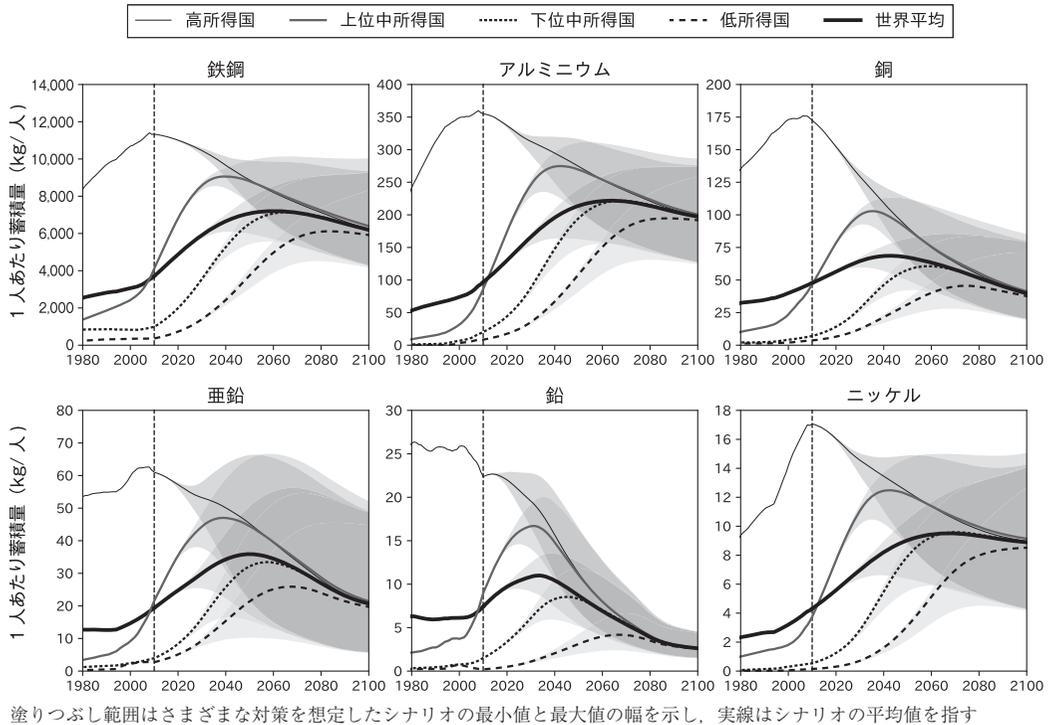


図4 気候2℃目標に沿った排出削減率を仮定した場合の主要金属の1人あたり社会蓄積量の推移

主要金属を社会に蓄積している。世界平均は1人あたり約4 ton、低所得国は1 tonにも満たず、高所得国の人々は低所得国の人々よりも10倍以上多くの金属を利用して日常生活を営んでいる⁹⁾。図2の生産量の変化に従う場合、世界の1人あたりの社会蓄積量はシナリオ平均で約7 tonに収束する(図4)。この値は世界平均の現状より高い値だが、高所得国においては現状の約6割の金属蓄積で成立する社会への転換が求められる。ただし、7 tonという値はさまざまな技術的対策を考慮したシナリオの平均値である。脱炭素電力の利用やエネルギー効率改善、水素還元技術の普及、リサイクル率向上、製品長寿命化等のさまざまな対策を野心的に実装した場合の利用可能性は1人あたり約10 tonまで上昇する。これらの結果は、革新的な生産技術の開発や循環利用の重要性とともに需要側での対策の必要性を示唆する。

4. 脱炭素社会が生む新たな資源管理

—— クリティカルメタルと資源ガバナンス

GHG排出削減に付合して物質利用の効率化と縮小が要求される一方で、脱炭素の要である再生可能エネルギー技術や電気自動車の普及に伴い需要増加が予測される金属もある。一般にレアメタルと呼ばれる金属が該当

するが、その需要予測について多様な見方がある。そこで筆者らは学術論文を網羅的に調査し、48種の金属に対する全546の将来需要データを整理し、将来需要の方向性を確認した¹⁰⁾。その一例として、2050年までのリチウム、コバルト、ガリウム、インジウム、テルル、タantal、プラチナ、ジスプロシウム、ネオジムの需要を図5に示す。

いずれの金属とも将来需要の推計値の不確実性は大きいものの、おおむね現在からの大幅な増加傾向を示している。また、太陽光発電や風力発電、電気自動車を含む脱炭素技術がその主要な要因であることも明らかである。これらの結果は、カーボンニュートラルを牽引する技術がレアメタルの調達を今後さらに困難にする可能性を示唆し、国内採掘をもたない日本では二次資源を活用する技術的社会的準備の喫緊性を強調している。

レアメタルの調達について注視すべき視点の一つとして、元素間の連鎖がある。レアメタルの多くはそれ独自の鉱山を有さず、アルミニウムや銅、亜鉛等のベースメタルの副産物として生産される。たとえば、ガリウムとインジウムはそのほぼ全量がそれぞれアルミニウムと亜鉛製錬の副産物として生産されるほか、コバルトの90%近くは銅とニッケル製錬に付随する。主産物である金属の生産が将来にかけて減少した場合、副産物として

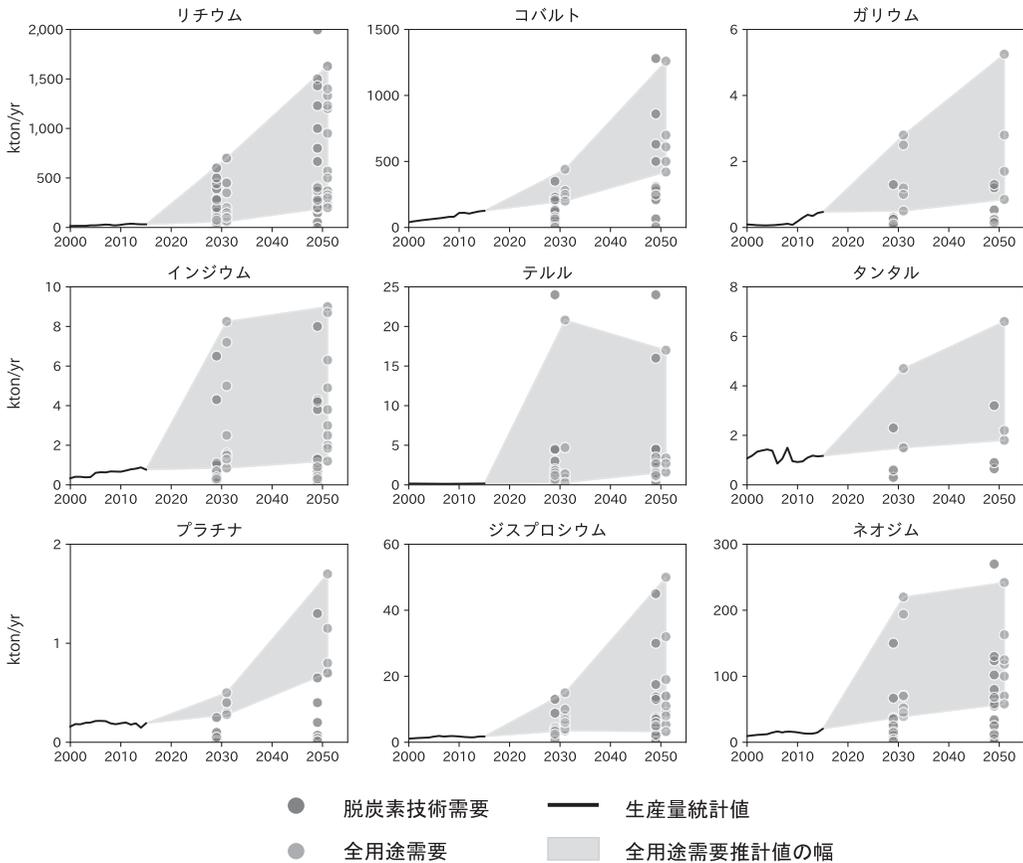
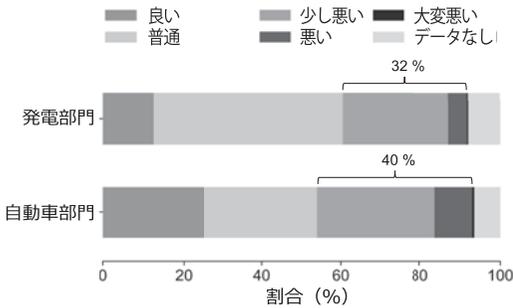


図5 世界規模での主要なレアメタルの将来需要推計値



資源採掘量は関与物質総量として表現されている

図6 金属生産に伴う資源採掘のガバナンスレベル別発生地域割合（2015年から2050年の累積）

生産されるレアメタルの供給可能量が制約される可能性がある。しかし調査した学術論文のうち、このような元素間連鎖を考慮したものはわずか13%に留まっており、定量的な理解が深まっているとはいえない。主産物の金属利用の削減と副産物としてのレアメタルの需要急増という二面性をカーボンニュートラル社会の物質管理は克服しなければならない。

上述した金属がクリティカルメタルと呼ばれるゆえんでもあるが、採掘国のガバナンスリスクも注目すべき視点である。ガバナンスが不十分な国での採掘活動の急増は、環境破壊や劣悪な労働環境、児童労働、汚職等に繋がる危険性が高まるとの指摘がある。そのため、需要の長期的な傾向に留まらず、カーボンニュートラルに必要な金属の採掘活動がいかなる地域で行われ、それがどのような社会面、環境面での帰結を生むのか、という視座が重要になる。筆者らは独自のモデル計算によって、電力部門と自動車部門のカーボンニュートラルに必要な金属採掘の3~4割程度が、採掘産業のガバナンスが不十分な国で発生する可能性があることを確認した¹¹⁾ (図6参照)。具体的には、コンゴ共和国やグアテマラ、イラン、ベネズエラ、キューバ、マダガスカル、ジンバブエ等が該当する。この結果は、世界規模でのGHG排出の削減が特定の採掘現場における社会・環境的犠牲のもとに成り立つ可能性がある、という倫理的課題を提起する。

5. おわりに

本稿では世界および日本の GHG 排出量に対する素材生産の寄与を確認した。発電に起因する排出量より寄与は少ないが、高熱源や原料として化石燃料を利用するため電化と再生可能エネルギーによる排出削減は容易ではない。しかしながら、この排出の早急な削減対策なしには、2050年のカーボンニュートラル社会の達成は厳しい。技術的には素材産業における炭素の分離貯留技術と再生可能エネルギー由来の水素利用の実現が削減の道であるが、これは素材産業にカーボンニュートラルへの先導を社会が託すことに等しい。

今回、素材生産技術の大転換ではなく、物質利用の変革を基礎とする「物質効率戦略」と「物質バジェット戦略」と称した2つのGHG排出抑制策を紹介した。いずれも利用効率の向上、再利用、長期使用、二次資源活用等、従来から循環経済対策として提唱される術を極限まで導入することをテコとし、社会と物質利用の大規模な分離（デカップリング）を要求する。デカップリングの具現化には、物質の生産から廃棄に至るライフサイクルに関与する生産者と消費者の貢献の集積が不可欠である。この点が先の素材産業の技術革新への一任と条件が異なる。本稿で再認したように、農業からサービス製品まですべての生産者がサプライチェーンを通じて素材起源のGHG排出に関与し、製品の最終需要者は一般の消費者である。この事実は、物質利用の革新的転換に口火を切る機会と責任は誰にでも存在することを意味する。今こそ、多様な立場から物質利用の変革に向けた目標設定とその進捗を開示し合うという潮流を社会に築くときと考える。

参考文献

- 1) 温室効果ガスインベントリオフィス (GIO) : 日本国温室効果ガスインベントリ報告書 2021 年, 環境省 地球環境局 総務課 脱炭素社会移行推進室 監修, CGER-REPORT (2021)
- 2) E. G. Hertwich: Increased Carbon Footprint of Materials Production Driven by Rise in Investment, *Nat. Geosci.*, Vol. 14, pp. 151-155 (2021)
- 3) K. Nansai, J. Fry, A. Malik, W. Takayanagi and N. Kondo: Carbon Footprint of Japanese Health Care Services from 2011 to 2015, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 152, Article ID:104525 (2020)
- 4) 南斉規介: 産業連関表による環境負荷原単位データブック (3EID), 国研国立環境研究所 (2019)
- 5) Climate Group and CDP: RE100 (2022) <https://www.there100.org/> (accessed 2022-January-24)
- 6) E. G. Hertwich, S. Ali, L. Ciacci, T. Fishman, N. Heeren, E. Masanet, F. N. Asghari, E. Olivetti, S. Pauliuk and Q. Tu: Material Efficiency Strategies to Reducing Greenhouse Gas Emissions Associated with Buildings, Vehicles, and Electronics — A Review, *Environ. Res. Lett.*, Vol. 14, No. 4, Article ID:043004 (2019)
- 7) International Resource Panel (IRP): Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, UNEP (2020)
- 8) T. Watari, K. Nansai and K. Nakajima: Contraction and Convergence of In-use Metal Stocks to Meet Climate Goals, *Global Environmental Change*, Vol. 69, Article ID:102284 (2021)
- 9) T. Watari and R. Yokoi: International Inequality in In-use Metal Stocks: What it Portends for the Future, *Resour. Policy*, Vol. 70, Article ID:101968 (2021)
- 10) T. Watari, K. Nansai and K. Nakajima: Review of Critical Metal Dynamics to 2050 for 48 Elements, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 155, Article ID:104669 (2020)
- 11) T. Watari, K. Nansai, K. Nakajima and D. Giurco: Sustainable Energy Transitions Require Enhanced Resource Governance, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 312, Article ID:127698 (2021)

Innovative Changes in Material Use for Transition to a Carbon-neutral Society

Keisuke Nansai* and Takuma Watari*

* Global Resource Sustainability Research Section, Material Cycles Division,
National Institute for Environmental Studies

† Correspondence should be addressed to Keisuke Nansai:
Global Resource Sustainability Research Section, Material Cycles Division,
National Institute for Environmental Studies
(16-2 Onogawa, Tsukuba 305-8506 Japan)

Abstract

With the aim of achieving a carbon-neutral society by 2050 and in response to the Paris Agreement, Japan has raised its targets for greenhouse gas (GHG) emission reductions and declared that it will limit its total emissions to approximately 760 million tonnes by 2030. The materials industry, which accounts for about 20% of Japan's GHG emissions, is finding difficulties in decarbonising its production processes with the introduction of renewable electric energy. In recent years, much attention has focused on material efficiency strategies and material budget strategies, which aim to reduce GHG emissions while reducing material production itself. Extensive efficiency improvements in material consumption have the potential for high emission reductions, but some estimates suggest that the material consumption required to meet the 2°C climate target is conditional on cutting the current level in half. On the other hand, the demand for critical metals is expected to increase due to the spread of decarbonisation technologies, such as electric vehicles, which could mean that addressing the duality of innovative reduction and stable increase in material use will bring us closer to achieving a carbon-neutral society.

Keywords: materials industry, material efficiency strategy, material budget, critical metals, resource governance