

国立国会図書館 調査及び立法考査局

Research and Legislative Reference Bureau
National Diet Library

論題 Title	第3章 マテリアル科学と資源
他言語論題 Title in other language	Chapter 3, Materials Science: Resource Related Issues
著者 / 所属 Author(s)	村上 進亮 (MURAKAMI Shinsuke) / 東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻教授
書名 Title of Book	マテリアル科学—最先端と未来への選択肢— 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Materials Science: The State of the Art and Future Options)
シリーズ Series	調査資料 2023-6 (Research Materials 2023-6)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2024-3-27
ページ Pages	41-56
ISBN	978-4-87582-924-9
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	資源問題をマテリアルの ELSI と捉えた上で、資源デカップリングの概念を紹介し、その実現に向けてサーキュラーエコノミーを論じた。マテリアルのライフサイクルの望ましい姿と期待を整理した。

* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

第3章 マテリアル科学と資源

【要旨】

本章では、マテリアル科学に関わる全ての関係者が理解すべきと思われる資源問題について概説した。かつては資源の枯渇や、偏在性に起因する安定供給の問題が資源問題の主たる話題であった。しかし、資源の劣化に伴い同じ量の資源を利用するとしても、環境や社会に対して与える負の影響が拡大し、社会の持続可能性を阻害しかねない現状から、これを回避することが地球規模での持続可能性に対する一つの課題になっている。また社会に対する負の影響としては倫理的な問題などもあり、これらをマテリアル科学に対する ELSI として整理することを試みた。こうした問題を回避する上で、資源デカップリングと呼ばれる概念を紹介し、その実現の一つのアプローチとしてサーキュラーエコノミーを論じた。その上でそこから導かれるマテリアルのライフサイクルの望ましい姿とそこに対するマテリアル科学への期待を整理した。

はじめに

本章ではマテリアル科学に関わる全ての関係者が理解すべき資源問題を概説する。かつては資源の枯渇や、古典的な地政学的な問題に起因する安定供給の確保が資源問題だと考えられてきたが、昨今の資源問題はやや影響範囲の広い問題へと変わっていることを理解する必要がある。

I マテリアル利用の背後にある資源問題を理解する—劣化する資源—

1 資源の定義と分類、そしてその特徴

本章は、マテリアル科学に関わる全てのステークホルダー（新材料開発に従事する研究者、これを支援する産官学全ての関係者を含む。）に、昨今の「資源」問題を正しく理解してもらうことを意図している。

そこで、まず本章でいう「資源」を定義しておく。辞書的な意味は「生産活動の元になる物質・水力・労働力などの総称」⁽¹⁾であるが、ここでは広く何らか生産・サービス活動の投入物として有用なものとしておく。本章では、マテリアル科学のための議論における「資源」であるから、特に断りがない場合には素材の原料となる資源を意味することとし、再生可能と非再生可能に分けられることとする。非再生可能は有機材料の原料としての化石燃料資源と、無機材料の原料としての鉱物資源に分けられることとしよう。本章全体を通して議論の主役は金属鉱物資源である。ただし、化石燃料資源や再生可能資源たるバイオマス資源にも多少は触れねばならない。

こうした非再生可能資源における資源問題の背景にある特徴は、偏在性と有限性であった。前者は持つ者と持たざる者を生み出し、持たざる者がこれを使おうとするとき、しばしば社会問題の火種になった。後者の有限性はグローバルな問題としての資源枯渇への懸念と、より小規模な問題として資源を持つものがいつ採掘をするのかという二つの問題につながる。

* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和5(2023)年11月10日である。

(1) 新村出編『広辞苑 第7版』岩波書店, 2018, p.1267.

その「いつ」という問題は、偏在性と不可逆性によって更に大きなものになる。偏在性があるがゆえに持つ者しかその「いつ」という意思決定者にそもそもなれず、持たざるかつこれを需要している者からみれば、他者の意志決定に従うしかないという意味で供給の不確実性が高まることになる。

もう一つ、枯渇性資源に関して重要になるのが不可逆性である。この種の資源産業というのは、地下（海洋等も含め枯渇性天然資源の鉱床を指す。）から、とあるタイミングで資源を採取し、これを金銭化するというのが主たる活動であり、この過程は不可逆である。ゆえに「いつ、どれだけ」という生産計画の立案は非常に重要で、より詳細に議論をすれば「鉱床のどの部分を」といったことも考える必要がある。資源は有限でかつ不可逆であることから、採取・金銭化によって得られた利益を次の資源を探す探鉱や、既存のプロジェクトの買収に回さねばならない。それでも世界的に見て資源が有限である以上、見つけることは次第に難しくなり、より困難な資源の利用に取り組むことになる。

2 資源の品位と劣化

ここで我々が天然資源、特に金属鉱物資源などを考える際に重要な概念の一つが品位である。品位とは、狭義には欲しい物質の含有濃度であるが、広義にはより多様な質的要素を含み得る。例えば、銅鉱石中に仮に1%の銅が含まれているならばこれが銅品位であるが、金属鉱物はこのような主産物以外にも有用な金属元素を含むことも多い。銅鉱石であれば例えば金が含まれていたりする。銅価格が1kgで千円、金価格が1gで1万円だと仮にすれば、1tの鉱石中の1%すなわち10kgの銅と、1ppm（百万分率）すなわち1gの金は同じ価値である。よって金の含有量は鉱石の価値を大きく左右してしまう。また、プロセスにとっての忌避元素が含まれていれば、下流の素材製造工程においてこれを除去するプロセスが増える、すなわち費用の増加となり、価値は下落する。

鉱石の価値という意味を少し広げておくと、鉱石を採掘するにも掛かる費用が当然ある。昨今採掘現場が大深部化する、また様々な意味で採取しにくい現場、例えば都市から遠いために物流費用が掛かる、現地の住民の反発が大きい、生物多様性のホットスポット⁽²⁾であるなど環境面から開発が非常に困難になる、といった場所からの採掘が必要になる、といった事例も多い。これらは全て採掘関連費用の増加につながるため、鉱石の価値は下落することになる。

ここまで述べてきた全てが広義の品位に関わる要素であるが、その全ての品位には分布がある。固体の鉱物資源は連続的に含有物質濃度の分布を持ち、その幅も大きくなる場合も多い。またこれ以外の要素も当然一定ではない。そして当然ではあるが、我々はこうした分布を持つ資源のうち、使いやすいものから順に使ってきた。これは前項で述べた「いつ、どれだけ、どの部分を」という意志決定の結果である。言い換えれば我々はこれから使いにくい資源を使っていくことになる。つまり、薄い濃度、採取しにくい現場、といった事態と対峙（たいじ）していく必要がある。こうした問題の程度は鉱種によって当然異なり、より問題が顕在化するのが早かった鉱種ほど、これを使う材料に対する代替材料の開発が進んできたと言える。そしてこのように資源が使いにくくなっていくことが、昨今しばしば耳にする資源の劣化である。

ここでもう一つ論点を広げておく。品位の低下を経済的に見ればすなわち利用に関わる費用

(2) この場合、人類による破壊の危機に瀕（ひん）している地域を指す。

の増加だと説明した。例えば同じ量の銅を入手するのに必要な費用が増加するのだから、銅の価格は上昇することになる。採掘技術の進化も少なからず起こっているのだが、それでも費用は増加している。

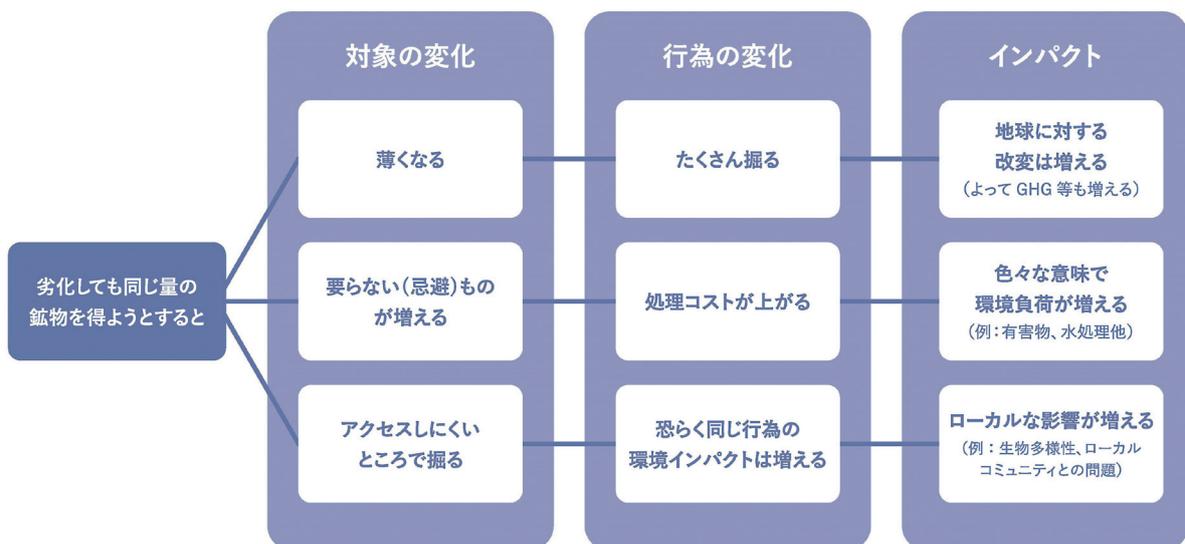
ここでよくある有限性（枯渇性）に対する誤解を解いておきたい。この種の資源が資源であるための必要条件は、下流の素材産業も含め、鉱石として採掘し、素材に変換した時点で利益が生じていることである。よって、需要が不変、技術も不変であると仮定すれば、素材を得るための費用が品位の低下によって増加することになるために、素材の価格は上昇せざるを得ない。こうして素材価格が上昇することで、これまでは費用が見合わなかった低品位の鉱物を、経済性を持った鉱石とみなすことができるようになる。つまり資源になる。よって資源を採掘し使ってしまったも、低品位の鉱物の存在が明らかであってこれに対する需要があるならば、素材価格の上昇を通して資源は増加する。ゆえに資源はなくならないように見える。

資源の賦存量の指標としてよく埋蔵量を用いるが、これは現時点の技術・経済的状況を踏まえ、また十分な確度の地質的情報を持っているがゆえに利用可能だと判断できる地下の鉱物の量を指す⁽³⁾。よって探査により新たな資源が見つかるだけでなく、価格上昇によりこれまで埋蔵量としてみなせなかった鉱物を埋蔵量に含めることが可能になることもある。品位が低下してもよければまだ資源はあるという議論もあるが、それでもどこかのタイミングで頭打ちになるというのが枯渇への道である⁽⁴⁾。ただし、資源量が頭打ちになるまで使ってよいのかを我々は考えねばならない。その理由は劣化によってもたらされる資源利用に伴う様々な負の影響である。これが昨今の資源問題の中で最も意識すべきものである。

3 劣化に由来する問題へのアプローチ—デカップリング—

こうした資源を利用すれば、環境への改変は必ず起こる。それは自然界にある資源を採取している以上不可避である。そして資源が劣化しているがゆえに、同じ量の資源を用いた際に引き起こされる負の影響は必ず拡大する。これを図1に簡単に整理しておく。

図1 資源の劣化の含意



(出典) 筆者作成。

(3) U.S. Geological Survey, *Mineral Commodity Summaries 2023*, 2023, Appendix C. <<https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2023>>

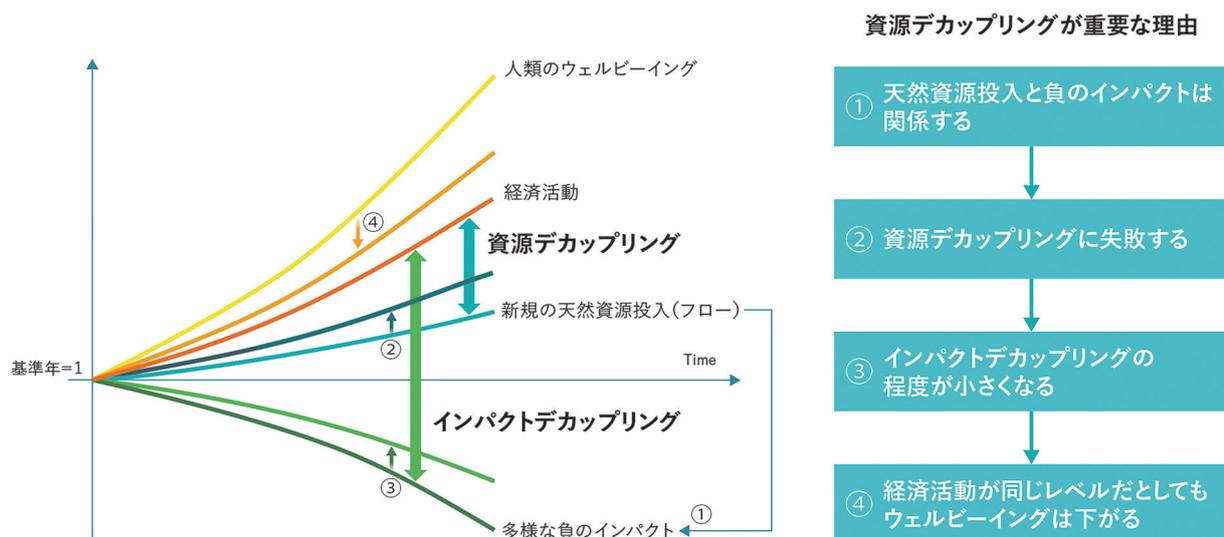
(4) B.J. Skinner, "A second iron age ahead?" *American Scientist*, Vol.64, 1976, pp.258-269.

既に述べたとおり、劣化にも色々なものがあるが、大きなものは1) 濃度の低下、2) 忌避物質含有量の増加、3) 採取条件の悪い現場での採掘、であろう。これによって資源を入手する上での我々の行為がどう変わるかといえば、それぞれ1) 採掘量の増加、2) 処理プロセスの複雑化に伴うコストの増加、3) 同じ量の採掘行為に対する様々なインパクトの増加などが考えられる。その結果引き起こされるインパクトは、1) 環境に対する変化が増加することから、その単位当たりのインパクトが一定であったとしてもインパクトが増える。例えば鉱山機械による温室効果ガスの排出は増える。2) プロセス由来の環境負荷は増える。3) より負の影響が多様に及ぶ。それは生物多様性のホットスポットで採掘するならば、ほかの現場では起こらなかった生物多様性への影響が及び、またローカルコミュニティとの摩擦が増える、場合によっては倫理的に問題になる現場が生まれる、などが考えられる。

こうした事態を踏まえ、我々の取るべき手段はそれぞれの技術を進展させることで当面の負の影響を削減することもあり得るが、やはりそもそも使う量を減らすことが良い。ただし使わなければ良いというものでもなく、こうした議論の中、資源を効率的に使うという発想に至り、昨今声高に叫ばれている考え方がデカップリングである。

その概念を図2に示す。これは国連環境計画の国際資源パネルの報告書⁽⁵⁾にある図を基に本章の趣旨に合わせ一部改良したものである。社会全体のゴールとしてウェルビーイングの向上を目指すこととする。これを支えるために経済活動を欠かすことはできない。これを支えるために資源は投入され、結果それに由来する負の影響が生じる。この四つ、特にウェルビーイング以外の三つの側面をどう考えるかを示した図である。なお、国際資源パネルの原図では最後の「多様な負のインパクト」として示している部分は環境影響に限定されていたが、本章ではこれをより広い意味での、社会的な影響までを含めた多様な負のインパクトとしておく。

図2 資源デカップリング



(出典) United Nations Environment Programme and International Resource Panel, *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*, 2011, p.5 を基に筆者作成。

(5) United Nations Environment Programme and International Resource Panel, *Decoupling Natural Resource Use and Environmental Impacts from Economic Growth*, 2011. <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9816>>

経済活動を行う上で素材の利用は不可避であり、その需要が増える限りリサイクルのみではこれを賄うことができないために、天然資源等の追加的な投入は不可避である。ただし、図2にあるようにその伸び率を経済活動の伸び率より低く抑えることは技術的、社会システミックのアプローチでできると思われる。この二つの伸び率を切り離すことを資源デカップリングと呼ぶ。また、それが目指すところは、単に天然資源消費を削減し枯渇までの時間を延ばすことだけではなく、多様な負のインパクトの削減であるから、インパクトと経済活動はより強く切り離したい、これをインパクトデカップリングと称する。資源デカップリングは、資源の枯渇を回避するためのものというより、インパクトデカップリングを目指すためのツールだとここでは理解しておく。

では仮にこのデカップリングに失敗すると何が起こるのかというと、経済活動の伸びが同じだとして、天然資源投入と負のインパクトが関係しているならば（図中の①）、資源デカップリングに失敗し（②）、インパクトデカップリングの程度も小さくなった（③）とすれば、同じ経済活動レベルに対してウェルビーイングの伸びが落ちる（④）であろうと思われる。よって、この資源デカップリングは我々の社会の持続可能性に対して、枯渇性資源の利用がその阻害要因とならないために重要なアプローチである。

4 もう一つの資源問題—経済安全保障—

我が国のように、天然資源の産出が少なく、製造業がそれなりの地位を占める経済にとっては、その原料資源の安定的な供給は経済を維持する上で最も基本的な事項である。

この側面が大きくなる理由が資源の偏在性であることは既に述べた。ここにもある種の劣化の影響はある。我々にとって利用しやすい、社会経済が安定した国にある資源は使われてしまっているのだと思われる。図1でいう三つ目の劣化の要素はこうした理解も可能である。そして社会経済状況が不安定であったり、貿易パートナーとして不安定であったりする地域が資源供給の主役になると、持たざるものである我々はそうした地域からの供給に頼らざるを得なくなる。

石油ショックの時期に我々が考えていた問題は、単純に市場がひどく寡占化されており、そのバーゲニングパワーが大きい供給者に振り回される、といったものであったが、昨今ではそれに加え、開発現場で倫理的な懸念があり、仮に入手可能であったとしても、その地域由来の資源を使うことがリスクになる場合もある。このような場合、供給者が意図的にこれを途絶しないとしても、これを使うことを社会が拒絶するという形で安定的な供給が途絶える可能性がある。

我が国において、この文脈で循環型社会、サーキュラーエコノミーといったものに期待がかかるのは、循環資源が国産資源であるからにほかならない。経済産業省が「資源自律」⁽⁶⁾という言葉を使っているが、うまい循環を創り出すことで、国内において資源が自律的に流れ続けていく形に到達する、という趣旨でサーキュラーエコノミーを言い換えているとも言えよう。

(6) 経済産業省『成長志向型の資源自律経済戦略』2023.3.31. <https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/shigen_jiritsu/20230331_report.html>

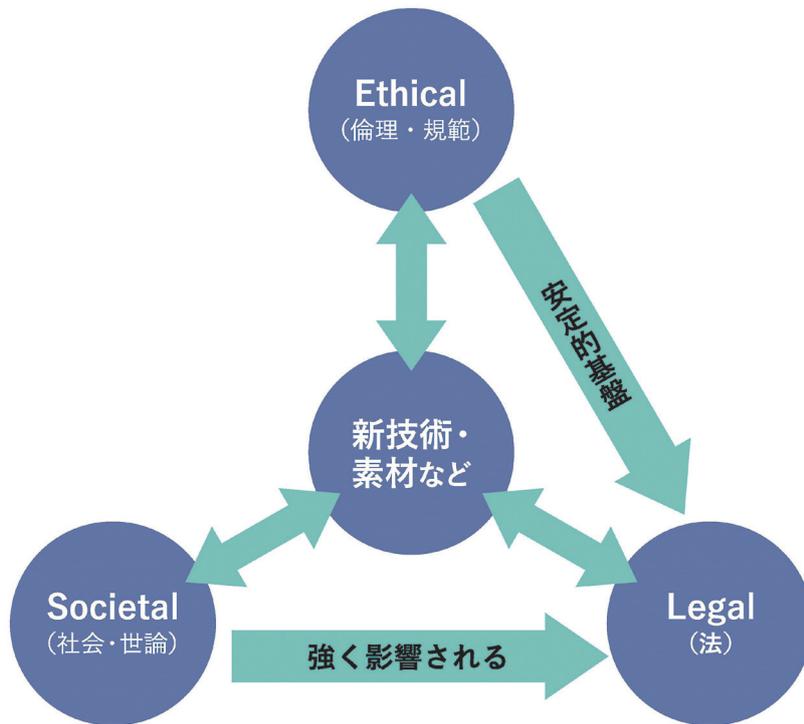
II 資源問題をマテリアル科学にとっての ELSI として理解し直す

1 ELSI (Ethical, Legal, and Social Issues) とは

ELSI に関しては大阪大学の ELSI センターのウェブサイト⁽⁷⁾及び JST の資料⁽⁸⁾が詳しい。これらによれば、ELSI とは上にもあるとおり、倫理的・法的・社会的課題 (Ethical, Legal and Social (Societal)⁽⁹⁾ Issues) の頭文字を取った略語でエルシーと読む。主として新しい科学技術が開発され社会実装される際に生じる、技術的課題以外の全ての課題を包含する概念である。1990 年代にアメリカで始まったゲノム解析プロジェクトの中で ELSI 研究プログラムが含まれて以来、徐々に注目されるようになったもので、生命科学の分野ではよく聞かれ、また昨今では AI に関する分野でもしばしば用いられるようである。

ここでなぜ E, L, S の三つの課題を同時に扱うかについて考えておきたい。倫理 (E) とはすなわち規範である。社会が安定的であるならば、短期的にこれが変化するとは考えがたい。ゆえに法制度 (L) の拠り所となるべきものである。さて社会 (S) はというと、仮に E が安定的であったとしても表面的な S は不安定なものであり、E の要求に完全に応える L というものがあり得たとしても、S からの批判はそう簡単にはなくなるまい。よって、この三つの視点は同時に持つべきものである。こうした関係を図3に示す。

図3 ELSI における E, L, S の関係



(出典) 筆者作成。

(7) 「ELSI とは」大阪大学社会技術共創研究センター (ELSI センター) ウェブサイト <https://elsi.osaka-u.ac.jp/what_elsi>

(8) 国立研究開発法人科学技術振興機構研究開発戦略センター『自然科学系研究者のための ELSI 解説』2021. <<https://www.jst.go.jp/crds/report/CRDS-FY2021-XR-02.html>>

(9) Social と Societal はどちらも使うことがあり、図3の S は Societal としてある。文中は引用文献に基づき Social を主に使っているが、英語圏においてもどちらも使われている。著者としてはより広範囲な対象に使われがちな Societal を同図では用いるべきだと考えこのようにした。

特に新規の科学技術が開発された場合、既存のLが許容できない場合がある。その時新たな倫理的規範（E）とそれに基づく法制度（L）が必要になるが、法制度に従ったとしても依然として社会的に受容されるとは限らず、S的な視点も必要である、といったところがELSIを考える理由であろう。マテリアル科学の文脈で言えば、生命科学寄りの技術であると倫理的懸念とそれに起因する社会的な影響が起り得る。ゆえに、法制度だけを守ったとしても社会に批判されることもあり得るのは理解しやすい。

しかし、古典的な鉱物資源を使う場合においても、先に述べた様々な社会的インパクトや、経済安全保障といった視座から言えば、法令を遵守したとしても社会に受け入れられないマテリアルを開発してしまう可能性はゼロではない。そこで本節では前節で述べた資源問題をマテリアル科学にとってのELSIとして捉え直しておく。

2 資源開発とELSI

資源開発におけるELSIに関連する話題として、ここ10年程度だろうか、SLO（Social License to Operate）という言葉がよく聞かれる。これは、資源開発について法令を遵守する、すなわちLegal Licenseを入手しただけでは不十分で、社会からも受け入れられるという許可、すなわちSLOを取得できなければ不十分だというものであり、鉱山企業もこの概念を明示的に示すケースが増えている。他方で、SLOを取得せよと言われるということはSLOが取得できない現場もあるということで、そうした現場で取得される資源を利用してしまふことは望ましくない。

(1) 倫理的問題

これまでの議論を踏まえ、資源利用における倫理的問題をまずは整理しておく。資源開発における倫理的な問題としてよく知られているものは、児童労働と紛争鉱物に関するものである。資源採掘現場の社会が未成熟で、倫理的に問題のある操業を行ってしまっている例が前者、資源採掘現場の権利を実質的に持っている者が、そこから得られる利益を社会的にみて望ましくない目的に使ってしまっているものが後者である。どちらも国際的な社会システムをもって対処しようとしてはいるが、完全になくなったわけではない。

こうした現場をなくせばよいと単純に割り切れるものではないことに注意が必要である。特に児童労働に関するものなどは、場合によっては違法であるものも含めた小規模採掘に関連することが多いが、これらを単純に停止させることはその労働者が生計を立てる術を奪うことになる。よって、これらが違法操業ならば、適法化させつつもそこにいる労働者の暮らしを守ることも必要である。

また、環境影響そのものは倫理的課題ではないとしても、その影響が現地住民に及んでいるならばこれも倫理的な問題とも言える。現地に適切な環境関連の法制度があるならば、こうした操業もまた違法なものであり、上と同じく適法化させる必要がある。つまり対応の方策としては操業を適法化させることが必要である。

(2) 社会的問題

ここで扱うべき話題は非常に多いが、上の倫理的問題は多くの社会的な議論を呼び起こす。それに加え、資源の劣化がもたらす様々な負の影響のほぼ全てがここに何らかの形で現れることになる。そして個別の経済レベルで言えば経済安全保障としての側面も無視できない。

さらに、これまで述べてこなかった倫理的な背景を持つ社会問題として、これまでの資源利用を歴史的に見たときに地域的な不公平があることにも触れておきたい。資源デカップリングを主張する産業エコロジー (Industrial Ecology) と呼ばれる研究コミュニティは、かつてマテリアルフロー分析と呼ぶ社会の資源利用の姿をスナップショット的に描くことで問題を発見するという分析を行ってきたのだが、これを動学的に拡張することで、社会がこれまでに蓄積してきた資源の量を把握し、その含意を考える分析へと研究対象を広げてきた⁽¹⁰⁾。ここでいう蓄積される資源の量とは、例えば土木構造物に含まれる鉄骨、自動車のボディーの鉄といったものから、同じく自動車に使われるモーターに含まれるレアアースといったものを指す。

当然ながら我々は加速度的に資源投入を増やしてきたというのが、マテリアルフロー分析の積み重ねから分かることだが、これを動学的に拡張することで、社会の中にため込んでいる資源の量はより急激に増加してきたことが既に示されている⁽¹¹⁾。

その中で、国際資源パネル (International Resource Panel: IRP) は経済水準によって一人当たりの素材資源の社会における蓄積量が大きく異なることをこの種の分析のレビューから示している⁽¹²⁾。例えば、銅であれば、先進国は世界平均の5倍強の蓄積を持ち、これ以外の国は世界平均を若干下回る程度の値であることが示されている。すなわち、世界の多くの国が平均値程度の銅資源を社会で使っているのに対し、一部の先進国だけが突出して多量の資源を使っていることが示唆されている。

このことの意味は非常に大きく、現時点で十分な蓄積を持たない国が、多くの蓄積を持つ国と同水準まで経済発展を遂げようとするならば、同じように資源を蓄積する必要があると考えられる。それだけの供給を可能にする天然資源が存在しないのであれば、それを可能にする技術開発が必要であろうし、また既に大量の資源を蓄積している先進国はこれ以上の蓄積を行うべきではない。特に、これから蓄積していく国がそれを主張したときに、既に蓄積済みの国家は代替案を示さずにこれを否定することは難しい。

(3) 制度的な議論

今のところ、例えば脱炭素のように国際合意をもって資源デカップリングを実施するという社会システムを実装するには至っていないが、これが本当に必要になればそのような議論もなされるのかもしれない。ただし、素材の資源は非常に多様であり、代替素材開発が進むことで個別の資源に対する非常に大きなデカップリングが起こる可能性も否定できない。規制的な国際協調を行う前にこれが実現することはマテリアル科学に対する一つの期待である。

また、個別の倫理的な事項に対する対応策としては、トレーサビリティ⁽¹³⁾の向上が一つの施策となり得るが、これを義務的な法制度化まで持ち込むにはそれをしないことによる負の外部性が明確である必要がある。また、資源に関する問題は国際的に協調しないと解決できないものが多い一方、関係する国家間での合意を取ることが難しいことも多い。

(10) 村上進亮・橋本征二「経済社会の物質ストックに関わる研究の意義と現状」『日本LCA学会誌』6巻2号, 2010, 4, pp.76-82. <<https://doi.org/10.3370/lca.6.76>>

(11) Fridolin Krausmann et al., "From resource extraction to outflows of wastes and emissions: The socioeconomic metabolism of the global economy, 1900-2015," *Global Environmental Change*, Vol.52, September 2018, pp.131-140.

(12) United Nations Environment Programme and International Panel for Sustainable Resource Management, *Metal Stocks in Society: Scientific Synthesis*, 2010. <<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/8438>>

(13) 原材料の調達から生産、そして消費又は廃棄まで追跡可能な状態にすること。

よって制度の整備はそう簡単に進むとは思えず、また現在の制度を守るだけでは不十分である可能性も高い。一方、どこかの時点で非常に厳しい制度の導入が行われる可能性も否定できず、資源利用に際してはこうした可能性も念頭に置くべきかもしれない。

3 マテリアル科学にとっての ELSI としての資源問題

前項までで述べてきた資源開発にかかる諸問題は、ほぼ全てがマテリアル科学に対する ELSI として顕在化し得る。例えば倫理的に問題のある供給国が寡占状態にあるようなレアメタルを使った新材料を開発してしまえば、これが社会実装される段になって多くの ELSI が顕在化することになる。また、その供給が不安定ならば、その国の経済にとっては経済安全保障上の懸念材料となりかねないし、環境影響の多い資源採取ならば、社会的課題が大きくなるのしかかることになる。

Ⅲ 一つのアプローチとしてのサーキュラーエコノミー

1 サーキュラーエコノミーの意味

サーキュラーエコノミーは、我が国で循環経済と呼ぶものも含めれば、非常に注目されていると言ってよい。他方で、我が国で言えばこれまでよく使ってきた循環型社会という言葉との違いが理解されていない、またどちらが上位概念なのかといった議論もしばしば聞かれ、恐らく日本語での共通の理解がなされていないと思われる。

ここではとりあえず本章のための定義をしておきたい。サーキュラーエコノミーの話題で必ず引用されるのが、エレン・マッカーサー財団による一連の定義と説明である。それによればサーキュラーエコノミーの三つの原則と呼ばれるものがあり、それは廃棄物と汚染をなくすこと、素材や製品は可能な限り高い価値の状態でも循環の環に載せ続けること、そして自然を再生することである⁽¹⁴⁾。また、サーキュラーエコノミーそのものについては、持続可能性に貢献しつつ、資源を循環の環に載せ続ける経済システムであるといった定義がよく用いられている。いずれにせよサーキュラーエコノミーとは一つの経済システムの形にすぎないことに注意が必要である。

我が国では、脱炭素⁽¹⁵⁾やネイチャーポジティブ⁽¹⁶⁾と並ぶ環境政策の柱などと位置付けることもあるようだが、脱炭素というのはそれ自体が目的である。ネイチャーポジティブについても生物多様性の保全に端を発し、更にこれを拡大させ自然資本を回復させるといった言葉であり、脱炭素に比べれば抽象度が高いもののこれもまた目的そのものである。一方、サーキュラーエコノミーは資源利用に起因する様々な問題を解決するための体系的アプローチである。まずこれを正しく理解する必要がある。また、先ほどの三つの原則と照らし合わせれば、サーキュラーエコノミーは脱炭素、ネイチャーポジティブの双方に対しても貢献しようとしていることが分かる。本章の整理でいえば多様な負のインパクトを減じていこうとするインパクトデカップリングを意図して、資源デカップリングを実現するための一つのアプローチがサー

(14) “What is a circular economy?” Ellen MacArthur Foundation Website <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>>

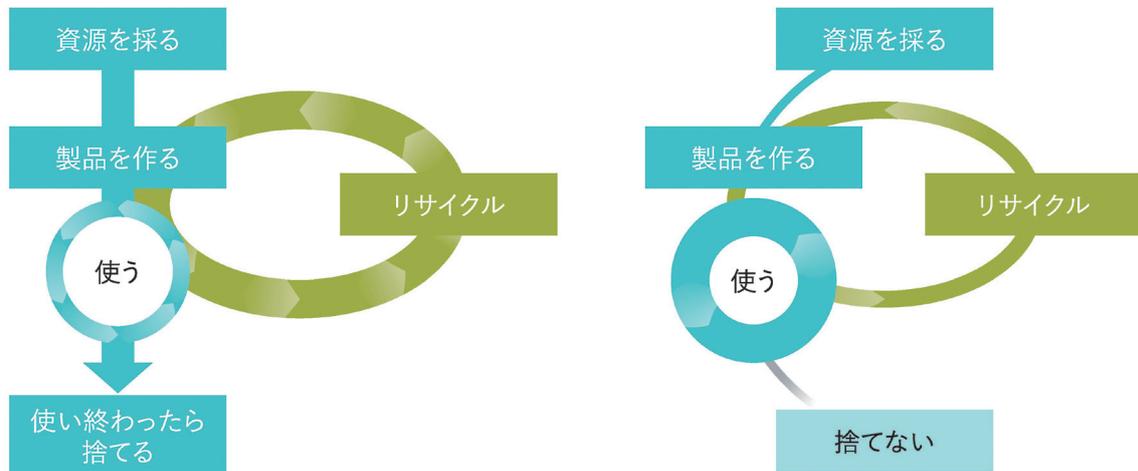
(15) 気候変動を最小限に食い止めるため、温室効果ガスの排出量を実質ゼロにすること。

(16) 自然生態系の損失を食い止め、回復させていくこと（自然再興）。

キュラーエコノミーである。

サーキュラーエコノミーについて日本語でこれまで言ってきた資源循環概念で理解しようとすると図4のようになる。

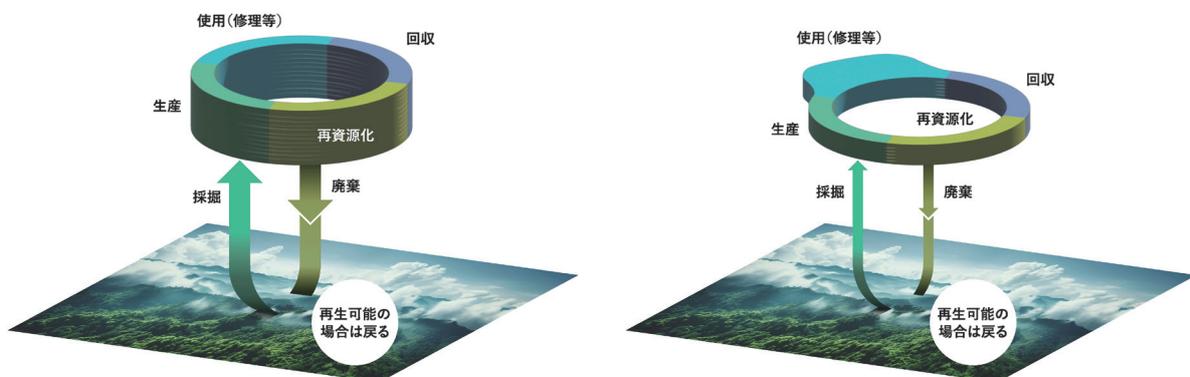
図4 古典的な資源循環からみたサーキュラーエコノミー



(出典) 筆者作成。

基本的に資源を採り製品を作る、それを使い、使い終わったら捨てるという純粋な線形経済とでも呼ぶべきものがかつてあり、そこにとりあえず使い終わったものがリサイクルされるというフローを導入したのが古典的なリサイクル経済であったとして、これを更に推し進めることで図4の左から右へとシフトしていく、すなわち捨てる量を最小化し、結果的に資源採取量も最小化するというものである。循環の環をゆっくりと、細いものへと変革し、最終的には閉じることを目指すなどと解説される。この図においても使う段階について若干の違いを「使う」の周囲の環の太さと速度の形で明示化したものの理解しにくい。そこで、作る、使うといった段階を一つの環に載せてしまったものが図5である。

図5 よりサーキュラーエコノミーらしい資源循環の理解



(出典) 筆者作成。

図に示したように、生産、使用、回収、再資源化は一つの環として捉えるべきであり、ここで使用の段階をできるだけ大きく、残りの部分はそもそも最小化するというのが恐らくサーキュラーエコノミーの本質的に目指す姿である。そうはいつても製品は使用不可能になる時が来るので、回収し、再資源化するという工程は必要になる。またそれぞれの過程でどうしても再資源化の流れに入れない残さのようなものは発生するので廃棄は生じるし、天然資源の投入も最小化するものの必要ではある。

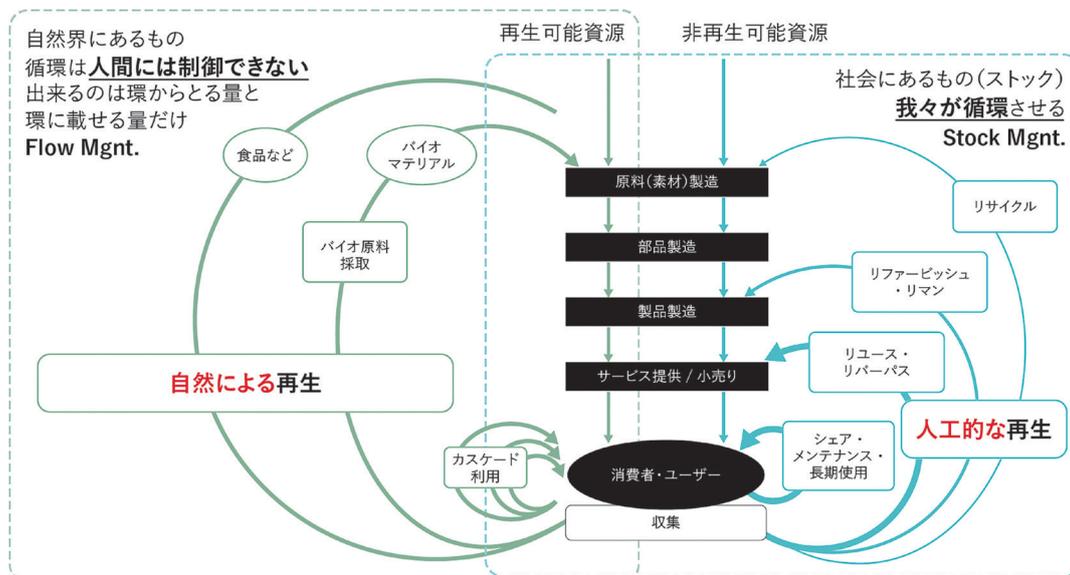
とすれば使用の段階に新しい社会システム的な取組を行うことでこの姿を目指すことが必要なのだが、その社会システム的な取組にマッチする製品設計・製造が必要であり、それに資するための材料開発が必要である。よってマテリアル科学もこうした社会の大きな変化を正しく理解しておく必要がある。また、使用段階におけるサブスクリプションなどの新しいビジネスの導入が必ずしもインパクトデカップリングにつながるわけではないといった辺りにも注意は必要である⁽¹⁷⁾。

我が国で資源循環と呼ぶと、製品が使用済みになってからどう捨てずに回すかというリサイクル、リユースの議論に終始しがちである。その重要性を否定するものではないが、使用段階が重要だという点に注意しない限りサーキュラーエコノミーへの正しい理解はなされない。

2 具体的な施策

より具体的に何を理解する上でよく用いられる図に、本節冒頭で挙げたエレン・マッカーサー財団によるバタフライダイアグラムと呼ばれるものがある。ここではそれを基に著者が一部改変し、また解説を加えたものを図6として示す。

図6 バタフライダイアグラムとその意味



(出典) “The butterfly diagram: visualising the circular economy.” Ellen MacArthur Foundation Website <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>> を基に筆者作成。

(17) Ryu Koide et al., “Circular business cannibalization: A hierarchical Bayes conjoint analysis on reuse, refurbishment, and subscription of home appliances,” *Journal of Cleaner Production*, Vol.422, August 2023, 138580; Ryu Koide et al., “Prioritising low-risk and high-potential circular economy strategies for decarbonisation: A meta-analysis on consumer-oriented product-service systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.155, March 2022, 111858.

エレン・マッカーサー財団による元々のバタフライダイアグラムには素材製造の段階が明示されていないため、ここではそれを明記した。中心部の線形な流れにはステークホルダーが並んでいる。上から順に素材製造業、部品製造業、製品製造業、サービス提供（レンタルやサブスクリプションなどを想定している。）と小売り、そしてユーザーである。

右側には人工的な循環が描かれており、先ほどの言い方でいうと消費段階は消費者だけを含むループ、具体的にはメンテナンスレベルで使い続けたり消費者同士でシェアしたりといったものが含まれ、ここにサービス提供者が介在するとレンタル⁽¹⁸⁾、サブスク⁽¹⁹⁾といったものもあれば、リユース（そのまま使いまわす。）、リパーパス（違う用途に振り向ける。）といったものも含まれてくる。これより大きな環になると、リファービッシュ（新品に準じる状態に整備し直す。）やリマニュファクチャリング（分解、洗浄、再組立などで、新品と同程度、若しくはそれ以上の品質を回復する。略して「リマン」）といった製品を改良して再度使うという再使用が現れ、それを越えればリサイクルとして素材産業までが現れることになる。他方で、左側には自然界による再生の環が描かれている。もう少し正確に言えば自然環境に帰された生分解性の素材などは、そこから得られる栄養素が自然を再生することとなり、その自然が新たな再生可能資源を供給することになる。

右側だけを見ると我が国の循環型社会の議論の中でよく見られたものにも近く、例えば株式会社リコーがコメットサークルと呼んで同じようなコンセプトを披露した⁽²⁰⁾のは1994年のことであり、極めて先進的な概念であり、また実際に取組として行ってきたことも分かる。図6が新しい点は左右の循環を同時に描いたこと、そしてこれを個社やクロズドの企業連合ではなく、社会全体で推し進めようとしている点の一つ挙げられる。

そこで改めて左右同時に描かれている意味を考えておく。右側の循環は人工的な循環だと書いたが、つまり天然資源を採取し、社会の中に蓄積した資源をいかに使いこなすかというストック管理に関するものである。他方で左側の循環は再生する主体は自然界であるから、我々が制御できるのはその環に載せる量とそこから引き出して利用する量だけである。よって我々にとってはフロー管理の問題である。再生可能資源に過剰な期待をかけるような議論を時折見かけるが、持続可能な方法で栽培されたバイオマス資源しか利用してはいけないといった議論こそが正しいものであり、それもここでいうフロー管理しかできないという議論につながるものである。つまり、自然界の再生の容量に合わせてフローを制御しなければならない。その代わりそれが可能になるならば自然界が再生するので資源は枯渇しないということになる。

ここしばらく注目を集めているプラスチック問題であれば、バイオマス由来のプラスチックへの移行が一つの解決策として注目を集めることは分かるが、その入手可能量には制約がある。よって、これまで利用し、社会に既に存在する化石燃料由来のプラスチックの蓄積をどう使いこなしていくべきなのかというのが依然として大きな課題になることが理解できよう。

よって具体的な施策としては、右側の人工的な循環にある全ての環を、そして左側の循環の入口と出口を適切に制御することが求められることになる。そしてこれだと選択肢が多すぎることになりかねないが、ここで前項にあった「できるだけ高い価値で」という原則の2点目が

(18) 賃貸しのこと。代金と引換えに商品を一定期間貸し出すこと。

(19) サブスクリプションの略語。商品を「所有」ではなく、一定期間「利用」するビジネスモデル。

(20) 「コメットサークル」株式会社リコーウェブサイト <<https://jp.ricoh.com/sustainability/environment/management/policy/comet>>

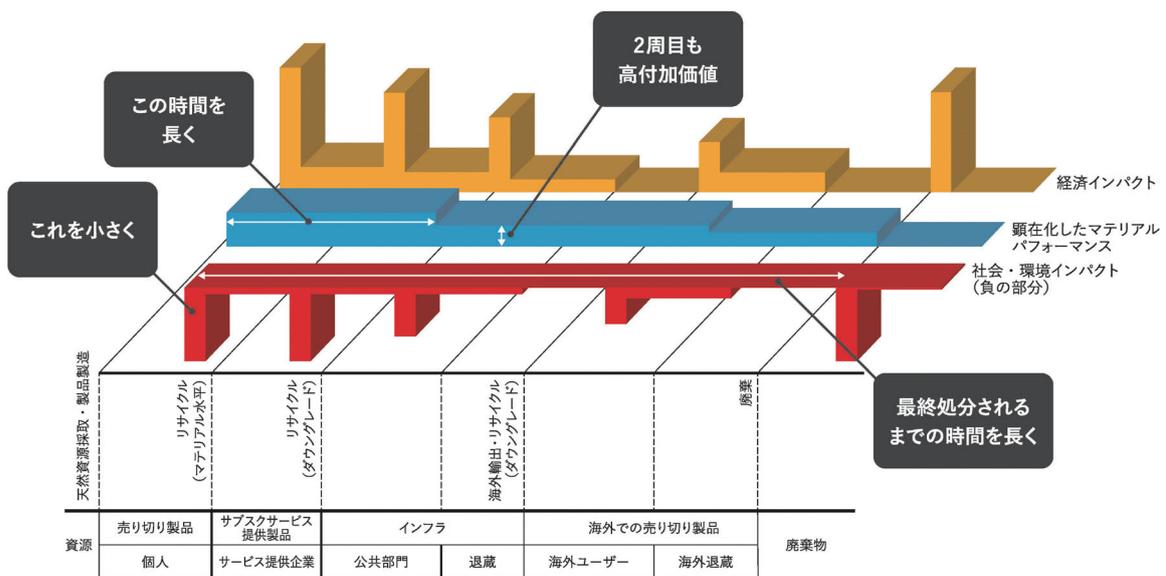
重要になる。これらの選択肢の中で最も高い価値を維持できる形で環の上に載せ続けることが必要である。それを正しく理解して社会はその循環の姿を選ばねばならない。

IV 未来への選択肢—マテリアル科学がデカップリングに対して期待されている貢献、してはいけないこと—

1 資源のライフサイクルをどう変えていくのか

図7に資源、すなわち一度自然界から採取された物質のライフサイクルと、そこで考えるべき価値と負のインパクトをマテリアルのパフォーマンスを介在させる形で示した。製品としての流れは、仮に最初は売り切り製品から、サブスクサービスという形で提供される製品、そしてインフラの一部として使われ、その晩年には製品としての機能は発揮していない退蔵といった段階を経て、海外へスクラップとして流出、海外で製品利用された後に廃棄される、といった流れを仮定した。よって循環の形としては、資源採取・製品製造→利用→水平リサイクル・製品製造→サブスク的な利用→ダウングレードリサイクル→利用→退蔵→海外リサイクル（ダウングレードの可能性あり）→利用→退蔵→最終処分、ということになる。

図7 資源のライフサイクルとマテリアル



(出典) 筆者作成。

ここで、先ほどのサーキュラーエコノミーの原則を考えると、高い付加価値を生んでいる利用段階の時間をできるだけ長く、つまり製品の使用時間を長くすること、またこの間の水平リサイクルをできるだけ容易（たやす）くすることがまず一つの命題である。さらに、ダウングレードリサイクルされた段階ではマテリアルのパフォーマンスが低く、ゆえにそこから得られる経済的な正のインパクトが少ないのであれば、これが極力高くなるリサイクルが、更に言えばそれを可能にする製品設計・素材開発が必要である。また、最終的に処分されるまでができるだけ長く、かつその間は当然ながら退蔵されるのではなく、何らかの意味でマテリアルがパフォーマンスを発揮し、結果として経済的な付加価値を生むようになることも期待される。

つまりダウングレードリサイクルだとしても循環の先にまだ利用価値が残る、息の長いライフサイクルが望ましい。

利用中の負の影響は製品設計によるものだが、リサイクルなどが起こる度に比較的大きな負の影響が出る可能性があることは想像に難くない。当然ながらこれを小さくすることが必要である。

2 期待されるマテリアル科学と期待されないマテリアル科学

前項で述べた資源のライフサイクルへの変化が実現できるならば、マテリアル科学に対する期待は次のようになる。

- ・ 高いパフォーマンスを発揮する形態が長く続くマテリアルの製造。つまり高付加価値型の製品の素材として利用されるものでかつ耐久性の高いもの。
- ・ 高いパフォーマンスをもたらす素材としての利用ができなくなったときに、大幅にそれを落とすことのないダウングレードリサイクルが可能であり、多様なカスケード（多段階）利用を可能にする素材。
- ・ 最終処分を含め循環の各段階における負の影響が最小化されるもの。特にリサイクルを容易にさせるものとして例えば次のようなもの。
 - 解体が容易なもの。例えば特定条件下においてのみ容易に外れる接合技術。金属材料における溶接技術や、樹脂材料における接着剤など。
 - 純度の高い材料の継続利用。資源の劣化に伴い資源供給においては忌避元素などの含有量の多いものが提供されるが、できるだけ高純度化してから循環の環に載せた方が、その後の循環は楽になると考えられる。

そのほかにも色々な期待があると考えられるが、これを議論・検討すること自体がマテリアル科学に期待されている。

他方ですべきでないことは、ここまでに挙げた期待に反すること全てと、ELSIを正しく理解しないで行う全ての行為である。そうした懸念につながる原料を用いる全ての材料開発は望まれていない。

3 マテリアル科学が経済安全保障に対してできること

上で明示的に述べなかった点で重要な点として、経済安全保障的な観点がある。前項は基本的にグローバルな持続可能性の視座から、物質のライフサイクルをどう変えていくのか、そのために期待されること、すべきでないことを挙げた。それ以外に我が国について言えば、資源安全保障に対する懸念が高まっていることもあり、マテリアル科学もこれに関心であることは許されない状況だと考えられる。

例えばコバルトを電極に用いる車載用リチウムイオン電池について考えてみると、まずコバルトの供給に大きな懸念がある。すなわちコンゴ民主共和国を中心とする中央アフリカ地域に天然資源供給が偏っており、倫理的な問題や安定供給に対する懸念もある。中間製品の精製段階を世界的に見れば、中国の寡占状況にある⁽²¹⁾。最終製品としての自動車については、我が

(21) 資源エネルギー庁資源・燃料部鉱物資源課「2050年カーボンニュートラル実現に向けた鉱物資源政策」2021.3.30. <https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shigen_nenryo/kogyo/pdf/008_03_00.pdf>

国は電気自動車生産量のトップだとは言えないが、ハイブリッド自動車は多く、また電気自動車についても十分に成長の余地はあると考えられる。ただし、我が国で既に多く走っているハイブリッド自動車に代表されるリチウムイオン電池利用自動車については、我が国でリサイクルされることなく、中古自動車としての輸出が多いことが知られている⁽²²⁾。ゆえに大規模なりサイクルを実施する社会的環境にない。

さてここでどのような施策が打てるかを考えてみる。まずマテリアル科学に最も強く期待される場所は、コバルト使用量の削減である。また、そもそも全く異なる原料設計の電池の開発も求められていることからそこへの貢献も期待されていよう。また、社会システムとして使用済み電気自動車が我が国にないことに関する対応は必要であるが、リチウムイオン電池のリサイクル価値が低いこともまた一つの問題である。よって極力リユースを行うというのが一つの姿であり、電池の再利用を可能にする電池の製品設計が求められている。そのための材料開発もまた必要である。

資源循環の段階について言うと、リチウムイオン電池からの経済的なりチウム回収の難しさはよく知られている。技術開発は進んでいるが、多くの技術的選択肢がある段階ではない。また、コバルトの回収についても、ブラックマス⁽²³⁾と呼ばれる中間生成物の品質が制御されていないこともあり、素材産業側が中間処理側により能動的に働きかける必要がある。

ここまで述べたように、恐らく経済安全保障について直接的に対応するのは最終製品製造側が主になることが考えられる。それは ELSI 的な見方をすれば、社会的な課題について考えた際に、一般消費者との接点が多く、顕在化した問題に対峙しなければいけない立場にあるということでもある。そこでマテリアル科学に求められているのは、こうした製品製造事業者、つまり素材のユーザーとの密な連携であろう。経済安全保障側面のみならず、資源の劣化に起因する様々な負の影響を回避する意味での期待など、代替材料開発に対する期待はますます高まっていくものと思われる。

もう一つの連携は、いわゆる静脈産業との連携である。回収された使用済み製品は、中間処理業が分離・選別等を行うことが多いが、ここに対して素材産業として適切なアプローチを能動的にする必要がある。それをせずに行えるリサイクルは既に実施されていると考えるべきであり、これ以上の循環的利用を進め、資源自律型と呼ぶべきものを目指すのであれば、こうした働きかけは不可避である。

4 DX に対する期待と懸念

デジタルトランスフォーメーション (DX) に関する議論は第2章に詳しいが、本章での議論に直結する意味での DX に対する期待と懸念は整理しておきたい。サーキュラーエコノミーに関する昨今の議論の中で実は最も大きなものの一つは情報の共有に関するものである。

製品製造に関する情報で本章に直結する内容としては、例えば製品の素材構成などの情報が製品に付帯したままライフサイクルを過ごすことになれば、使用済みになった際の資源循環は恐らく容易になる。また素材構成が開示できないのであれば、例えば最も望ましい中間処理の方法が提供される情報共有の枠組みでもよいかもしれない。

(22) 自動車リサイクル促進センター『自動車リサイクルデータ Book』<<https://www.jarc.or.jp/data/databook/>>

(23) リチウムイオンバッテリーを熱処理した後に残る粉体。正極材に含まれるコバルト、ニッケルなどのレアメタルのほか、リチウム、マンガン、アルミニウム、鉄などの金属及び負極材の炭素などが含まれる。

また、利用段階についても、製品の利用履歴は素材の劣化に関する情報として利用可能になる可能性がある。つまり、使用済み製品中の素材の劣化と利用履歴の情報が多く集まることで、劣化の予測が可能になることが期待できる。そうすると、素材劣化に依存したリユースの可否判断が可能になる、またリサイクル手法が適切に選択されるようになることなども期待される。

他方で、これは AI 利用に関する ELSI の議論を見ればよいが、例えば利用履歴の情報は明らかに個人情報であり、適切な法整備が必要になるという典型的な ELSI を伴う。また、素材構成の情報は開示の程度によっては企業間、場合によっては国家間での競争領域の情報を含むおそれがある。

こうした問題から、情報共有は適切になされる必要があり、現在様々な取組が施行されつつある。マテリアル科学に関わる全てのステークホルダーは、こうした現状を適切に理解しつつ、自らの取組を進める必要がある。

おわりに

天然資源が劣化していく中、その利用に伴う負のインパクトは間違いなく拡大している。こうした資源問題を回避し、我々の社会全体のウェルビーイングを向上させ続け、持続可能な発展を阻害しないようにすることが社会命題であり、マテリアル科学にかかる期待は大きい。

また我が国の事情として、資源安全保障に関わる問題は拡大する一方であり、これを認識した上でのマテリアル科学が望まれている。こうした全ての問題は、マテリアル科学にとっての ELSI となり得るものであり、こうした社会状況を理解した上で、製品製造事業者や静脈産業のプレーヤーなどとも密に情報交換をし、素材開発をし、また資源循環に貢献するといった役割がマテリアル科学には求められている。

執筆：東京大学大学院工学系研究科技術経営戦略学専攻 教授 むらかみ 村上 しんすけ 進亮