

報告

資源循環とカーボンニュートラルの両立に
向けた課題と日本が取り組むべきサーキュ
ラーエコノミー対策



令和5年（2023年）9月15日

日 本 学 術 会 議

材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同

SDGsのための資源・材料の循環使用検討分科会

この報告は、日本学術会議材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同SDGsのための資源・材料の循環使用検討分科会での審議結果を取りまとめ公表するものである。

日本学術会議材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同
SDGsのための資源・材料の循環使用検討分科会

委員長	所 千晴	(第三部会員)	早稲田大学理工学術院教授 東京大学大学院工学系研究科教授
副委員長	森田 一樹	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
幹 事	岡部 徹	(連携会員)	東京大学生産技術研究所所長・教授
幹 事	笹木 圭子	(連携会員)	九州大学大学院工学研究院教授
	安達 毅	(連携会員)	秋田大学大学院国際資源学研究科教授
	伊藤 公久	(連携会員)	早稲田大学理工学術院教授
	大和田秀二	(連携会員)	早稲田大学理工学術院教授
	岡村 好子	(連携会員)	広島大学大学院統合生命科学研究科教授
	齋藤 公児	(連携会員)	日本製鉄株式会社フェロー
	月橋 文孝	(連携会員)	東京大学名誉教授
	中村 崇	(連携会員)	東北大学名誉教授
	平尾 雅彦	(連携会員)	東京大学先端科学技術研究センター教授
	松八重一代	(連携会員)	東北大学大学院環境科学研究科教授
	森口 祐一	(連携会員)	国立研究開発法人国立環境研究所理事
	村上 進亮	(連携会員(特任))	東京大学大学院工学系研究科教授
	中谷 隼	(連携会員(特任))	東京大学大学院工学系研究科准教授

この報告の作成にあたり、以下の方々にご協力いただいた。

柴田 悦郎	東北大学多元物質科学研究所教授
醍醐 市朗	東京大学先端科学技術研究センター准教授
室井 桂	早稲田大学研究補助員

本報告の作成にあたり、以下の職員が事務を担当した。

事務	松室 寛治	参事官(審議第二担当)(令和4年7月まで)
	佐々木 亨	参事官(審議第二担当)(令和4年8月から)
	高橋 直也	参事官(審議第二担当)付参事官補佐(令和5年3月まで)
	柳原 情子	参事官(審議第二担当)付参事官補佐(令和5年4月から)
	藤田 崇志	参事官(審議第二担当)付専門職付専門職(令和5年4月から)

要 旨

1 報告の背景

資源循環の重要性は、海外では 15 年以上前から国連資源パネルを中心に議論されており、昨今ではサーキュラーエコノミーが欧州政策の中心的存在になっている。しかし、昨今やはり社会からの要望が高まっているカーボンニュートラルとは必ずしも自然と両立できる概念ではない。また、日本では、多くの資源を輸入に頼りながらも素材産業に基盤があり、さらに最終処分場のひっ迫などからリサイクルを推進してきたが、改めてサーキュラーエコノミーの背景と概念を正確に理解した上で、日本に最適なサーキュラーエコノミー対策を認識して推進する必要がある。

2 現状及び問題点

サーキュラーエコノミーが重要視されている背景には、資源循環の重要性のみならず、多様な環境負荷との関係性、天然資源開発の課題、資源安全保障、廃棄物処理などに至る多岐にわたる現状と課題が存在することを正確に認識する必要がある。また、その実現のためには、素材によって多種多様に異なる循環への技術的・システムの課題解決に加えて、社会に受容されるための課題解決に至るまで、プロセス技術のみならずシステム技術やデジタル技術をも駆使した多岐にわたる対応が必要となる。現状では、上記の複雑な背景と課題、それを解決する方向性について整理されておらず、広く正確に認識されていないことも大きな課題である。

3 報告の内容

(1) サーキュラーエコノミーをとりまく社会的背景

カーボンニュートラルへの社会的要請が強まっているが、資源循環と両立させるには相当な工夫が必要である。カーボンニュートラル促進のためには、現状以上の資源需要が生じ、土地改変など他の環境負荷を増加させる可能性が懸念されている。さらに、資源循環には回収・運搬や分離にエネルギーを要するため、必ずしも資源循環の促進が、カーボンニュートラルに直結しない。サーキュラーエコノミーは、循環に経済性を持たせることによって、資源循環とカーボンニュートラルを両立させることを志向する経済政策であるが、そのためにはこれまで日本で促進されてきた 3R（リユース、リデュース、リサイクル）政策にとどまらず、資源の投入量や消費量を減らしつつ経済を活性化させ Well-being^③を確保する新たな価値観の創造も必要となる。また、日本版サーキュラーエコノミーを議論する際には、資源安全保障や廃棄物削減の重要性も背景にあることを理解する必要がある。

(2) 各素材の資源循環技術・プロセスの方向性

サーキュラーエコノミーの実現や、カーボンニュートラルと資源循環の両立に対する技術やプロセス上の課題は、素材によって大きく異なるため、素材ごとに、その現状と課題を適切に認識する必要がある。本報告では、特にサーキュラーエコノミーへの影響や貢献が大きい無機素材として、プラスチック、鉄、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛、クリティカルメタル①、貴金属、ガラス、土木・建築素材、バイオ素材を選定し、その現状と課題を述べた。日本のモノづくり産業は、高純度で高性能な素材産業によって支えられてきたが、そのような素材づくりを実現してきた背景には、時代によって要請が変遷してきた環境負荷削減への高精度な対応技術を開発するとともに、高効率な生産を実現してきたことにある。昨今のカーボンニュートラルなどに代表されるように、環境負荷への考え方が、さらに広範で多様となった現在においては、さらに新たな技術やプロセスの研究開発が必要となる。ただし、その際においても、素材によって、その開発に伴う環境負荷は多種多様であり、何を環境負荷ととらえるかによって、技術やプロセス上の研究開発課題は異なることに注意が必要である。

(3) 社会システムとしての資源循環の方向性

サーキュラーエコノミー実現のためには、社会システム上の課題も多く存在する。資源循環や蓄積量、環境負荷を、定量的に把握するためには、マテリアルフロー解析やライフサイクルアセスメントが重要である。また、システム思考に基づいて、デジタル技術をも駆使した俯瞰的な視野が必要となるほか、資源循環や環境負荷低減に向けた、行動変容やビジネスモデル構築に資する新たな価値創造につながる分野横断的な連携も必要となる。さらに、歴史的には公衆衛生・生活環境保全の観点から、廃棄物の適正な処理を確保するために構築されてきた日本の法律や制度についても、新たな価値認識のもとに再考する必要がある。以上は、必ずしも既存の学術分野のみには収まらない横断的・境界的な領域であり、新たな人材育成も含めた活性化が必要である。

目 次

1	はじめに	1
2	サーキュラーエコノミーをとりまく社会的背景	2
(1)	サーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルの関係	2
(2)	環境負荷の多様性	3
(3)	鉱物資源の現状と課題	4
(4)	サーキュラーエコノミーの課題	5
(5)	資源安全保障とサーキュラーエコノミーの関係	6
(6)	日本の廃棄物・循環政策とサーキュラーエコノミーの関係	7
3	各素材の資源循環技術・プロセスの方向性	10
(1)	プラスチック	10
(2)	鉄	10
(3)	アルミニウム	11
(4)	銅	11
(5)	亜鉛	12
(6)	鉛	12
(7)	クリティカルメタル	13
(8)	貴金属	14
(9)	ガラス	14
(10)	土木・建築素材	15
(11)	バイオ素材	16
4	社会システムとしての資源循環の方向性	18
(1)	マテリアルフロー解析・ライフサイクルアセスメント	18
(2)	システム・デジタル技術	19
①	システムとしての資源循環	19
②	デジタル技術の活用	20
(3)	文理連携の必要性	20
(4)	法律・制度上の課題	21
5	おわりに	24
	<用語の説明>	25
	<参考文献>	28
	<参考資料1> 審議経過	35
	<参考資料2> 付録	37
	<付録における用語の説明>	49

1 はじめに

カーボンニュートラル推進のための新技術には、新たな資源が必要となり、いわゆるクリティカルメタルなどと呼ばれる一部鉱種などでは、将来的な供給不足も懸念されている。したがって、カーボンニュートラルなどの環境負荷削減には、資源循環を併せて議論する必要がある。カーボンニュートラルと資源循環は、短期的に考えると必ずしも目的が一致せず、相反する行動になる可能性もあるが、人類がこの限られた地球で持続可能な発展を遂げるためには、その調和が求められる。そのための一つの考え方として、ヨーロッパを中心に提案されているのがサーキュラーエコノミーである。これは、製品の長寿命化、リユースならびに最終的な素材の高度なリサイクルを経済ベースで成立させるために、人間の行動様式の変化をも要求する概念である。炭素排出や土地改変などの資源調達に関わる環境負荷、不適正な雇用や健康影響などの社会的な負の影響の低減と経済発展とを両立させる有力な手段の1つであると考えられている。さらに、資源採取時の自然破壊の削減により、生物多様性②を担保する活動としても期待されている。日本では古くから3R（リデュース、リユース、リサイクル）政策が進んでいるが、それを基にしてさらに発展させることにより、日本が取り組むべきサーキュラーエコノミーの方向性を確立する必要がある。その重要性は、近年広く認識されつつあり、国の動きとしては、2022年9月に環境省が「循環経済工程表」を取りまとめ、2050年を見据えて目指すべき方向性と2030年に向けた施策の方向性を打ち出したことや、2022年10月に経済産業省が「成長志向型の資源自律経済デザイン研究会」を立ち上げ、2023年3月には「成長志向型の資源自律経済戦略」を策定したことなどからも確認できる。また、経済界でも検討が始められており、2021年3月に、経団連・環境省・経済産業省が、サーキュラーエコノミーの実現を促進するための官民連携プラットフォームである「循環経済パートナーシップ」を創設したほか、2023年2月に経団連は「サーキュラーエコノミーの実現に向けた提言」を公表している。

資源循環の重要性は、海外では学術的にも産業的にも大きなうねりとなって議論されている。15年前から国連資源パネルを中心に議論されてきた資源生産性の向上に端を発するが、現在では欧州政策の中心的存在となっている[1]。サーキュラーエコノミーでは、廃棄物の発生抑制も重要課題としていることから、現在国際的な課題になっているプラスチックの海洋汚染にも、直接的に貢献し得る。

以上の背景から、本報告では、資源・材料の循環利用について分野横断で議論してきた分科会として、日本におけるサーキュラーエコノミー対策の方向性を審議した内容を報告する。

2 サークュラーエコノミーをとりまく社会的背景

(1) サークュラーエコノミーとカーボンニュートラルの関係[2]

資源循環と環境負荷、そして経済性との関係は、10年以上前から様々な機関で議論されてきたことである。例えば、国連資源パネルが2011年に公表した報告書では「デカップリング」という概念が示されている[3]。デカップリングとは「切り離し」という意味であり、ここでは、経済成長と資源消費、経済成長と環境負荷とを、切り離す必要性が示されている。すなわち、資源を使用せずに、なおかつ環境へ悪影響を与えることなく、経済成長とWell-beingを両立させようということである。

一方、その後の国連資源パネルの報告書では、世界人口は2050年には97億人に達する見込みであり、世界の物質採掘量は2050年に現在の2倍以上の1830億トンに達すると予測し、カーボンニュートラル政策推進によって、さらにこのデカップリングが困難となることを予想している[4, 5]。また、国際エネルギー機関も再生可能エネルギーや、電気自動車の導入に伴う将来的な金属資源の鉱物所要量について、2つのシナリオに基づいて試算しており、2040年の鉱物所要量は2020年比の2倍から4倍になるとしている[6]。

このように、カーボンニュートラルを世界中で推進した場合、各種資源の供給と需要のバランスがくずれ、デカップリングどころか資源不足に陥ることが懸念されている。その経済的な解決策の一つとして提唱されているのがサーキュラーエコノミーである。サーキュラーエコノミーとカーボンニュートラルとの関係を図1に示す。上述の通り、カーボンニュートラル実現のためには多くの資源が必要となるが、国連資源パネルは、2020年に新たな報告書を出し、適切な資源循環策を講じれば、住宅や自動車の分野において、カーボンニュートラルと資源効率向上の両立が見込まれるとしている[7]。資源循環には、回収や運搬、分離精製が必要となり、それらには少なからずエネルギーを要するため、それらのプロセスを必要最低限としつつ、限られた資源の中で循環使用を考える必要がある。

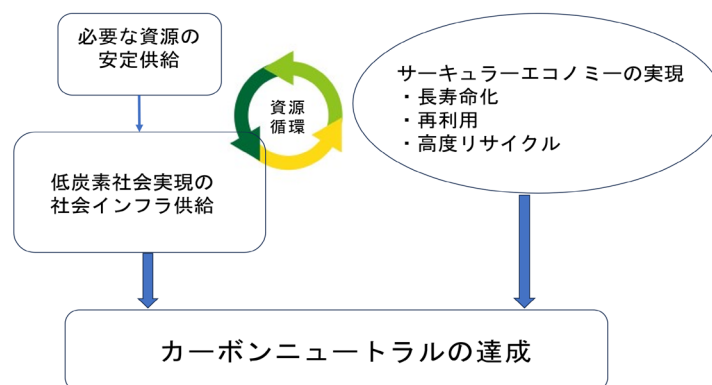


図1 サークュラーエコノミーとカーボンニュートラルの関係

(出典) SDGsのための資源・材料の循環使用検討分科会にて作成

EUが打ち出した経済政策であるサーキュラーエコノミーには、限りある地下資源の徹底した循環利用、有効利用を進め、これまで行われてきた資源採取時の環境負荷の低減を目指す概念が含まれている。特にカーボンニュートラルの達成には、クリティカルメタルの利用を基にした新技術の促進が期待されており、サーキュラーエコノミーは、間接的にはカーボンニュートラルを支えるものである。一方、カーボンニュートラルは、温暖化防止を達成するために実現しなくてはならない目標であり、大きな意味では両者ともSDGsを実現するための将来にわたって実行すべき考え方といえる。カーボンニュートラルの実現には、二酸化炭素を化石エネルギー消費の際の経済的に負の価値である廃棄物として認識し、それを経済の中に織り込むためのカーボンプライシングの導入が検討されている。サーキュラーエコノミーにおいても、それらの導入を検討し、合理的な対応を目指すべきである。カーボンニュートラルには、その上位概念として気候変動を緩和するための温暖化の防止があることを忘れてはいけないが、メタンやその他温暖化に大きな影響を及ぼす物質の飛散防止にもサーキュラーエコノミーは貢献する。さらに、技術的には大変難易度が高いものの、サーキュラーエコノミーは、バイオ素材の循環も大きな柱としてとらえており、光合成により再生が期待されるバイオ圏と限りある地下資源の循環を結び付けることで、SDGsの達成を実現できる可能性もある。

(2) 環境負荷の多様性

環境負荷の中でも温暖化に関する影響物質への関心は、国内外で大きな高まりを見せている。パリ協定の温度目標の達成のためには、化石燃料の利用を大幅に削減するとともに、再生可能エネルギーや省エネ・高効率機器の普及拡大を進めるエネルギー転換が求められる。一方で、低炭素技術の急速な普及拡大は、それらの導入に必要な鉱物資源の需要を増大させ、資源調達に関わる多様なリスクの増大を引き起こすことが危惧される。Vidal et al.によれば、2050年25,000TWhの電力を再エネで供給しようとする、構造材需要と太陽光パネルなどを構成する素材の需要が、大幅に拡大することが指摘されている[8]。

鉱物資源調達においては、資源採掘活動に必要な重機の稼働に伴うエネルギー資源消費と温室効果ガス排出以外にも、掘削による土地改変、採掘活動に伴い発生する土砂や選鉱過程で発生するズリ④などの鉱山廃棄物の発生や、酸性度が高く重金属を含む坑廃水の発生など、大気圏・水圏・土壌圏への大きな負荷が発生する。直接投入物質以外の、間接的な投入物質、資源採掘・精錬に伴い発生する鉱山廃棄物や精錬残渣などの総計は、関与物質総量（Total Material Requirement: TMR）と定義される[9]。TMRは、ある製品やサービスの背後にある環境攪乱量⑤の代理指標と位置づけられ、これに基づきKosai et

a1. では、ガソリン車に比べ、電気自動車や水素燃料電池車のTMRは、2倍から3倍になることが指摘されている。資源需要に伴う環境攪乱量において、次世代自動車は、環境負荷が高い点に注意を払う必要がある[10]。電気自動車のTMRのうち、大きなシェアを占めるのは銅、ニッケル、リチウムの3種の金属であり、モータ、電池材料の需要増大は、これらの資源需要の拡大を引き起こし、結果として資源国における鉱山周辺地域の土地改変や環境攪乱の増加により、生物多様性条約の保全対象である、健全な生態系や、遺伝資源の多様性などが損なわれることが懸念される。

電気自動車以外にも、高効率な発電やタービンなどに用いられる耐熱鋼や、耐腐食性により製品などの長寿命化に貢献が大きいステンレス鋼などでも需要拡大が見込まれるニッケルに着目すると、世界的な供給の4割、埋蔵量の7割以上を占めるラテライト鉱床は、インドネシアやフィリピン、マダガスカルなどに存在しており、近年生産量が増大傾向にある[11]。Myers et al.によれば、赤道周辺に生物多様性損失が危機的状況にある国々が多く存在していることが指摘されているが、ラテライト鉱床を有する資源国の多くは生物多様性損失が懸念される地域に含まれることから、資源調達に関わる土地改変や植生変化による生態系への影響を最小化する努力はますます必要とされる[12]。

金は、宝飾品や投資、資産保有のみならず、情報基盤インフラ整備において重要な素材の一つであるが、その供給には質量の100万倍の土砂を採掘する必要がある。さらに小規模金鉱山（Artisanal Small Gold Mining: ASGM）における素材供給量は全世界の金供給量の15%を占めると推計されており、アマルガム製錬による不適正な水銀排出の主な要因の一つになっていることが指摘されている[13]。

低炭素社会の実現は世界において急務であるが、低炭素技術導入の背後で需要が拡大する鉱物資源の採掘・精錬に関わる多様な環境攪乱にも慎重な配慮と、影響最小化のためのシステム設計が求められる。

(3) 鉱物資源の現状と課題

日本では、鉄、ベースメタル⑥、貴金属、レアアースをはじめとするレアメタル⑦など、様々な鉱物資源が産業において使用されているが、非資源産出国であるため、対外的な課題が多い。自動車関連産業などの特に国際競争力の高い製品に鉱物資源は重要な需要があり、供給変動に備えた備蓄は、多かれ少なかれの金属においても課題がある。一方、鉱山では、鉱石品位の低下、鉱山の深部化、奥地化、燃料価格の高騰、製錬所では、東日本大震災後の電気料金の高騰、開発コストと加工コストが高騰している。鉱物資源確保に向けた強化策として、対外的には資源外交、国内ではリサイクルの推進、省資源・代替材料(新材料)の開発、レアメタル備蓄、海洋資源開発などが挙げられる。

鉄は、比較的資源偏在性の少ない金属であるものの、日本は鉄鉱石資源を西豪州に大きく依存しており、今後もこの傾向は変わらないとみえる。社会インフラや耐久消費財の構成素材として不可欠で、日本の鉄鋼業界では「COURSE50」プロジェクトによりCO₂排出削減を目指す革新的製鉄プロセス技術開発に取り組んでいる[14]。コークスの代替還元剤として廃プラスチックの約3%を鉄鋼業で活用していることは、循環型社会への貢献意義が大きい。水素還元法に転換するには経済的にハードルが高い[15, 16]。アルミニウムについては、日本はオイルショック以降電気料金の高騰により、製錬事業から撤退しており、資源調達も製錬も海外で行われている。一方で、アルミニウム製品については、国内リサイクル率の高いものもあるが、スクラップの海外流出も課題となっており、信頼できる完全な統計データが得ることが困難となっている。

ベースメタルの需要動向は世界的に増加し、特に中国の需要急増が世界を牽引し、銅をはじめとした資源確保競争を激化させている。銅、鉛、亜鉛のベースメタルは、チリ、ペルー、豪州、米国から精鉱を調達し、日本国内で製錬を行っているが、需要はやや減少傾向にある。海外からの精鉱を受け入れている非鉄製錬所は、臨海部に位置し、リサイクル拠点としての役割も徐々になくなってきている。

レアメタルは、ベースメタルに比べて、供給国に限られ、特にプラチナは供給国南アフリカの生産が制限されており、マーケットが小さいので価格変動も大きい。レアメタルでは、製品開発動向により需要が影響を受けやすい。他の鉱物の副産物として生産供給されるレアメタルは、主生産物の供給に左右される特徴を持ち、資源の偏在性による地政学的リスクを特に受けやすい。

世界共通の課題としては、①資源ナショナリズムの先鋭化（中国のレアアース輸出規制、インドネシアの鉱石輸出規制など）、②紛争鉱物⑧の規制、③採取産業透明性イニシアティブ（EITI）[17]による資金の流れの透明化により紛争を予防、④水銀規制により人の健康を守ること、⑤鉱石海上輸送にかかわる国際規制による海洋への廃棄物排出の禁止、⑥人材育成が挙げられている。特にSDGs資源・材料の循環使用検討分科会としては、リサイクル技術の研究開発推進、省資源化、代替材料開発、資源人材育成を、国際法や世界経済の研究者の意見も取り入れながら、新型コロナウイルスのまん延、ウクライナ侵攻の長期化など国際地政学的な情勢もにらみつつ、持続的な資源の安定供給のガイドラインを作っていく必要がある。

(4) サーキュラーエコノミーの課題

サーキュラーエコノミーとは、日本がこれまでの目指してきた循環型社会の形成や、3Rの取組では強調されてこなかった資源循環の経済面に焦点を当てたコンセプトである。つまり環境政策が先行する従来のコンセプトから、成長戦略の一つとして循環型社会を経済政策としてもとらえ直そうとする動き

である。可能な限り資源の投入量・消費量を抑え、廃棄物の発生を抑制することに加えて、資源循環のサービス化を通じて、より大きな付加価値を創造する仕組みとするために、高い価値を保って製品や材料を循環させることを目指すことで、新しいビジネスモデルの創出が期待される。資源効率性⑨の向上や、環境配慮型製品設計⑩の推進といった内容も含まれてくる。循環経済が活発になることで、経済効果の高まりと雇用の創出がなされ、デジタル技術の活用によって廃棄ロスの低減を目指すことも含めて、より高度化され先進的なイメージを資源循環市場に与えるものでもある。

サーキュラーエコノミーの概念は、ヨーロッパを起点としており、2015年に欧州委員会が定めたサーキュラーエコノミーパッケージ（Circular Economy Action Planとこれと連動した各種の廃棄物指令の改正）[18]が、本格的な出発点であった。そこでは「2030年に向けて、資源リスクからのビジネス保護と新しいビジネスの創造、SDGsの達成」がうたわれ、経済効果と雇用創出を目指すようになった。2020年には新サーキュラーエコノミー行動計画[19]が示され、消費者の修理する権利や環境配慮型製品の設計促進など、より具体的な提案がなされた。日本では、経済産業省から2020年に循環経済ビジョン2020[20]が出され、その中で、「「循環性」の高いビジネスモデルへの転換・事業活動の「資源効率性」の向上を図ることで、中長期的視点から、日本の産業競争力を強化し、環境と成長の好循環を実現するための方向性をここに示す。」としている。

今後、日本でサーキュラーエコノミーが浸透していくためには、相対的に高コスト化していた循環産業を、付加価値の高い産業として構造的に変化させなければならない。その方策は、未知の大きな課題である。今後、製品の原材料にリサイクルされた材料を使用しなければならないなど、リサイクル材料の価値が高まるようなシステムが導入されれば、サーキュラーエコノミーの原動力になる可能性がある。

(5) 資源安全保障とサーキュラーエコノミーの関係

安全保障とは、その対象となるかけがえのないものを脅威に晒されないように守ることを指し、国家安全保障、昨今では人間の安全保障などという言葉で用いられる。これを踏まえ、本項でいう資源安全保障とは、経済社会にとって必要不可欠な資源の安定供給が脅威に晒されないようにすることであると定義しておく。

資源安全保障において、想定される脅威はいくつか考えることができるが、安定供給を脅かす要素としては、物理的な供給途絶リスクと、価格側面でのリスクであると考えられる。例えばDewulf et al. はこうした要素をTERP（T: Technical, physical, and geological factors, E: Economic, strategic, and market supply risk factors, R: Regulatory and social factors, P:

Political stability and governance factors) に4分類することで整理している[21]。Tは埋蔵量や生産能力に関するものを、Eにはいわゆる偏在性や、これと連動する産出国のカントリーリスクなど、Rには規制や社会受容性など、そしてPには供給国、企業の安定性とガバナンスを含むこととしている。その中でRの中に資源循環政策の欠如という項目が、リスクとして掲げられている。

このように、サーキュラーエコノミーの社会実装が遅れていること自体が、資源供給のリスク、すなわち資源安全保障を脅かす要素として考えられているほどだが、逆にいえばそれを持って資源安全保障に貢献できるとも考えられる。まず、サーキュラーエコノミーの結果、期待される天然資源投入量の削減効果は、そもそもリスクの高い資源投入を減らすという意味で先の4分類でいうTに分類されるリスクを減らすという大きな貢献を果たす。

そして日本のように様々な天然資源供給を輸入に頼っている国であれば尚更であるが、サーキュラーエコノミーの実践は、循環資源（リサイクルだけではなくリユース、リマニュファクチャリングなども含む）という形態の国産資源利用を意味する。古典的にも資源安定供給の大きな指標であった自給率が上昇することになる。これは先ほどの分類のEやR、Pにかかる供給国の特性に由来するリスクを減らすことに役立つ。

ただし、人工資源（もしくは都市鉱山）は採掘したいときにできるわけではない、人工物由来であるがゆえに天然資源とは異なる鉱物組成のものの再利用に取り組まねばならないなどといった、資源循環には天然資源とは異なる意味でのリスクがあることは忘れてはいけない。

また、地球温暖化に代表される環境制約は、資源安全保障にも密接に関わる。例えば、カーボンフットプリントが大きな資源を使い続けることは、社会的に許容されにくく、また、資源が劣化すればフットプリントは更に増大するかも知れない。もしサーキュラーエコノミーの実践が社会全体のフットプリントを下げるのであれば、より望ましい資源利用という意味で一つの貢献になる。天然資源採掘には、他にも酸性坑廃水、土地改変とそれに由来する生物多様性の損失などの環境問題や、児童労働などの倫理的な調達にかかる問題もある。こうした問題を含まない原料を使えるようになること、そしてトレーサビリティの向上を持ってそれを可視化できるならば、資源安全保障に貢献するばかりか、日本のアドバンテージともなり得る。経済産業省は2023年3月に「成長志向型の資源自律経済戦略」を策定したが、この「資源自律経済」というキャッチフレーズも同じようなことを意図しているものと考えられる。

(6) 日本の廃棄物・循環政策とサーキュラーエコノミーの関係

「循環経済」という語を冠した国家政策は、2015年12月に欧州委員会が、政策パッケージを発表するよりかなり前に、中国の循環経済促進法（2008年可決、2009年施行）として実現しており、日本の循環型社会形成推進基本法（循環基

本法)は、さらに数年早い2000年公布、2001年施行である。

中国の循環経済促進法は、3Rや生産、流通、消費のライフサイクルを基本理念に取り入れている。廃棄物のリサイクル、リユースなどもむろん対象としているが、エネルギーや水の使用の合理的利用も含めており、資源全般をカバーしている。経済政策、産業政策という色彩も濃い欧州型のサーキュラーエコノミーや、中国の循環経済政策に比べて、先行した日本の循環型社会政策は、廃棄物・リサイクル政策という性格の強いものであったと言える。

サーキュラーエコノミーの概念を表現する際、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も呼ばれる図がよく用いられる[22]。枯渇性資源の技術的な繰り返し利用(リユース・リサイクル)を右の羽、バイオマスなどの再生可能な資源の利用を左の羽で表現し、経済社会システム内部にとどまらず、自然システムとの間での物質循環も含めて循環をとらえているといえる。再生可能資源の利用をはじめ、自然システムと経済社会システムの間での物質循環に着目することは、日本の1990年代初期の循環型社会概念と共通する。

こうした日本の「循環」政策の世界的な位置づけに関しては、欧州の循環経済政策パッケージが発表された翌年、2016年版環境白書の「自然の循環と経済社会システムの循環の調和に向けて」と題する章において、バタフライダイアグラムの引用を含めた欧州の動向や、日本の政策との対比について、かなりの紙幅を割いて記載されている。1990年に当時の環境庁が開催した検討会[23]における定義を引き、「自然の循環」「経済社会システムにおける物質循環」「二つの循環の調和」というキーワードを挙げ、循環基本法では理念としては二つの循環を念頭におきつつも、具体的政策については、当時の喫緊かつ中心的課題であった廃棄物・リサイクル対策に力点が置かれていたことを述べている。その上で、「「国際的には資源効率・循環経済といった新たな視点・取組が進展する中で、従来から循環型社会を提唱し、世界をリードしてきた日本としては、こうした取組に後れを取ることがないようにしなければなりません。」という認識を示していた。この白書が刊行された2016年に日本はG7議長国として環境大臣会合を開催し、富山物質循環フレームワークの採択、国連環境計画国際資源パネルによる資源効率に関する報告書の公表などで国際的なリーダーシップを発揮している。その後、2018年に経済産業省リサイクル推進課が資源循環経済課と改称されたことは、この流れに沿ったものといえる。ただし、その後海洋プラスチック問題が世界的な課題となる中で、G20議長国となった2019年の大阪ブルーオーシャンビジョン^⑪に見られるように、プラスチック廃棄物問題という喫緊の課題に重点が移った感もある。カーボンニュートラルを目指す上では、再生可能資源の利用、ライフサイクル全体にわたる資源効率性の向上など、理念上は取り入れられつつも、政策に落とし切れていなかった循環経済の基本的な枠組みを再構築すべき時期であろう。

素材の水平リサイクルは、サーキュラーエコノミーが提唱される前から重要課題であった。水平リサイクルに対する金属素材とプラスチック素材では、かなり考え方が異なるが、どちらも検討が進みつつある。特に、サーキュラーエコノミーの概念が入ることで、循環しやすい素材、製品、回収方法と一貫して考えることが主流になると思われ、この分野の前進が進むことも期待されている。

3 各素材の資源循環技術・プロセスの方向性

素材の対象となる物質は幅広いが、ここでは無機物質を主体に資源循環技術やプロセスの方向性についてまとめる。特にカーボンニュートラルへの貢献や影響が大きく、戦略的な素材である鉄、アルミニウム、銅、亜鉛、鉛、貴金属、クリティカルメタルについて述べる。また、無機素材として大きな割合を占める砂、石で構成されるセメント、セラミックス、さらに海洋汚染で重要である高分子材料としてプラスチックについても述べる。

(1) プラスチック

廃プラスチックの発生量は、世界で3.53億トンと見積もられている[24]。プラスチックの資源循環技術は、ポリマーとして循環利用する「マテリアルリサイクル」、化学的にモノマーや低分子の炭化水素、または一酸化炭素及び水素を主成分とする合成ガスに分解する「ケミカルリサイクル」、燃料として利用する「エネルギー回収」に分類される。国内では、2021年において廃プラスチックの総排出量824万トンのうち、マテリアルリサイクルが21%、ケミカルリサイクルが4%、エネルギー回収が63%を占め、それ以外は単純焼却または埋立によって処理処分されている[24]。環境中への流出がゼロとは言えないものの、すでに適正回収及び適正処理は相当程度に達成されている。そのため、日本におけるプラスチックのサーキュラーエコノミーは、適正処理されていた廃プラスチックを、より高度な循環的な利用に仕向けることを意味する。特に、(1) 適材適所の循環利用、(2) 動脈産業の脱炭素化との調和、(3) 混合プラスチックの循環利用の高度化、といった観点が重要である。あらゆる廃プラスチックが単一種類のポリマーとして回収・選別できるといった楽観的な想定ではなく、より現実的かつ社会全体を俯瞰した広い視野でプラスチック資源循環の役割を検討すべきである。

(2) 鉄

日本では1970年頃より約1億トンの粗鋼生産量が維持されつつ、より高度な特性が追求され、不純物・介在物の除去や組織制御を通してめざましい品質改善が図られてきた[25]。高性能化のためにプロセスの追加が必要になり、多少カーボンフットプリントでは不利になっているが、使用される製品の長寿命化に大きな貢献をしていることを考慮すべきである。その約3割を占める電気炉鋼においても清浄な鋼の製造技術は進歩しているものの主たる原料である鉄スクラップの品質、特に鉄に混入すると通常の精錬技術では除去できない不純物元素（トランプエレメント）の蓄積が深刻である。それらの上限濃度はJIS規格で定められていないものの、トランプエレメントの代表である銅の建設用電気炉棒鋼中の平均濃度は、実質的上限と想定される0.4重量%に近づきつつある。一方、転炉鋼においても鉄スクラップは鉄源の1～2割を占

めており、鉄の循環利用促進という観点では同トランプエレメントの濃化抑制は重要な課題である。現時点では製品寿命を終え、鉄スクラップとして回収される段階で他金属の混入抑制を徹底することが肝要である。鉄スクラップ利用の促進は、鉄鉱石を主原料とする転炉鋼製造に伴うCO₂の排出抑制をもたらすため、水素利用技術の開発、非化石燃料の利用促進とともにカーボンニュートラル実現のための重要な指針の一つである。

(3) アルミニウム

アルミニウムは、他金属に比べて密度や融点が低いため軽くて加工しやすく、また各種の添加剤を加えて合金化することによってその強度を増すなどの様々な特性を得ることができ、工業用・家庭用として広く使用されている。

アルミニウム合金は大きく分類すると、容器やサッシなどに使用される圧延加工された高品質の展伸材、及び、ガソリン自動車エンジンなどに使用される熔融したアルミニウム合金を鋳型に流し込んだ多種の合金元素を含む比較的質の低い鋳造材の2種類があり、その各分類中にも数多くのアルミ合金種が存在する。現状のアルミニウムのリサイクル率は各種データから推定すると70～80%程度だが、そのリサイクルの多くは、多種の使用済み展伸材スクラップが混合された状態で鋳造材として利用するカスケードリサイクルである[26]。将来的に展伸材の需要は漸増傾向、鋳造材の主たる利用先であるガソリン自動車エンジンの需要は減少傾向と予想され、現状のカスケードリサイクルの持続性には大いなる懸念があり、アルミニウム資源の水平リサイクルが求められている[26]。

アルミニウム合金類の成分分離は、熔解した状態では（特に重金属類については）困難であり、先進的な固相状態でのセンサー選別技術の開発が必要である。2010年時点での試算では、水平リサイクルプロセスが日本のアルミニウム製造プロセスに20・50・70%適用された際の省エネルギー効果は、原油換算でそれぞれ14万、47万、163万kL/yとされており[27]、サーキュラーエコノミーがカーボンニュートラルに大きく貢献する事例としても注目される。

(4) 銅

2020年に日本国内に輸入された銅精鉱は1,342千トン、電解精製により生産された電気銅生産量は1,583千トンである。電気銅生産量のうち、スクラップ由来の生産量は192千トンとなっている[28]。

二次原料の中でも故銅と呼ばれる銅線などの比較的純度が高く嵩張るものは、銅製錬工程の転炉で処理されて再生されるが、昨今、世界的に処理量が増している二次原料としてE-scrap^⑫が挙げられる。代表的なE-scrapであるプリント基板は銅箔とともに集積回路などに金が多く使用されていることから、銅原料というよりは貴金属原料として重要視されている。国内では、年間16万

トンから20万トンのE-scrapが銅精鉱とともに銅製錬原料として使用されている[29, 30]。また、E-scrapや製錬残渣などの二次原料のみで銅製錬を行っている例もある[31]。

基本的に国内でのE-scrapの処理は破砕とサンプリング分析を経た後、自溶炉－転炉法の製錬所では、前処理として焼却処理により樹脂成分が除去されて、基本的に転炉に焼却灰が装入されて銅や貴金属が回収される[32]。S炉やTSL炉など、塊状のE-scrapを直接装入できるように工夫された炉が国内外に導入されている。近年ではカナダや中国、スウェーデン、アメリカでも積極的に二次原料を炉に直接装入するプロセス開発が活発である。

(5) 亜鉛

2021年の亜鉛の鉱石生産量は12,797千トン、金属生産量は13,853千トン、使用量は14,948千トンである[33]。その用途は約60%が鉄鋼材料の防食用メッキであるため、リサイクルは鉄鋼材料と一緒に行われることが多い。メッキに使用した亜鉛も徐々に汚染されてくるので、メッキ浴に使用された亜鉛のリサイクルも行われる。亜鉛メッキ浴のリサイクルでは、発生する鉄・亜鉛系ドロス（溶融付着物）を固液分離して、さらにアルミニウムとの置換反応を利用して亜鉛を回収する。一方、亜鉛メッキ鋼板は電炉でリサイクルされ、その際に発生する電気炉ダスト（微粒子）を処理して粗ZnOを作り、それを乾式製錬法⑬であるISFもしくは湿式製錬法⑭である亜鉛電解採取の原料として、亜鉛をリサイクルする。ダストからの粗ZnOを精製する方法には多くのプロセスがあり、日本でも異なった5つのプロセスが実用化されている。最も多いのはウェルツキルン法で、ロータリーキルン内で粗ZnOにコークスとフラックスを添加し、ZnOを還元揮発させ、再度酸化しながら回収し、高濃度のZnOを得るプロセスである[34]。亜鉛濃縮のために高温での炭素還元を行う必要があるため、現在のようにカーボンニュートラルを目指す社会では課題が多い。そのために湿式で処理する方法も種々検討されており、一部実用化されている。電炉ダストをリサイクルすれば残渣は鉄もしくは酸化鉄となる場合が多く、その利用も含めて鉄の循環と同時に考える必要がある。

(6) 鉛

2021年の鉛の鉱石生産量は4,563千トン、金属生産量は12,382千トン、使用量は12,346千トンである[35]。鉛はベースメタルの中でも珍しく鉱石から製造されるよりもリサイクルされている量の方が多い金属である。約6割弱がリサイクルでカバーされている。

使用先は車載用のバッテリー電極が主体で、その他に化成品がある。15年以上前には半田合金としての使用が問題となっていたが、現在は特殊な半田以外は錫系に替わっている。以前は、ブラウン管の電子銃の部分に覆うガラス

に高濃度鉛ガラスが使用されていたため、ブラウン管のリサイクルはその鉛ガラスの処理が重要であった。現在はブラウン管そのものの使用がほとんどないために、鉛ガラスのリサイクルの問題も顕在化しなくなった。

鉛半田やブラウン管の処理が必要な時代には、前処理後、もしくは直接、鉛製錬の原料として非鉄製錬所で回収されていた。製錬所内に設置されている溶錬炉の原料の一部として投入できれば粗鉛が得られるので、その後、電解精製されて高純度鉛が回収される。この回収法は、現在でも低レベルの鉛含有廃棄物の処理法として有効である。

鉛蓄電池の資源循環では、診断技術の確立によるリユースも重要であるが、リサイクルでは大型の非鉄製錬設備で粗鉛を製造し、電解で精製する場合と、乾式製錬で車載用蓄電池として使用できる程度に精製する技術とが存在する。

鉛はその中毒性を指摘され使用禁止の方向に進んでいる。しかし注意して使用すれば大変使い勝手のいい金属である。車載用鉛蓄電池の回収率は非常に高く、そのために使用しても環境汚染が広がることは少ない。さらに鉛製錬プロセスは、他の貴金属やクリティカルメタルの回収にも大きく貢献している[36]。したがって、鉛の循環を維持しながら、その技術を有効に利用することが重要である。

(7) クリティカルメタル

クリティカルメタルとは、(1)材料や素材としてなくてはならない必須金属、(2)需要の伸びが大きくて供給不安がある金属、(3)価格が高騰しても代替材料がない金属の総称である[37]。言い換えれば、供給リスクが高く、また産業における重要性が高い金属の総称である。我が国ではレアメタル[38]と称されることが多いが、米国、EU においてはクリティカルメタル、ミネラルと称し、各国や地域の産業構造によって指定し、それぞれの事情に応じた安定供給について種々の方策を取っている。特に EU は、サーキュラーエコノミーの提案とリンクして、循環使用の重要性を打ち出している。

需要増加や価格高騰、資源ナショナリズム、戦争などの変動要因によって、クリティカルメタルに該当する金属は変化する。また、クリティカルメタルは日本のハイテク産業に不可欠な金属元素であるだけでなく、豊かな生活を支える上で全世界に必要な金属材料であり、その需要は今後も増大する。

日本は、資源確保や安定供給のために、資源外交や十分な量の備蓄を進めるべきである。また、クリティカルメタルを代替する新しい材料の開発だけでなく、効率的な回収・リサイクル技術の開発なども推進して、クリティカルメタルの多角的な資源戦略を進める必要がある。

カーボンニュートラルの実現に必要な元素として、リチウムイオン電池に使用されるリチウム、ニッケル、コバルトや、高効率モータで使用される希土類元素、特に高温使用下での性能保持力維持に効果的なジスプロシウム、テル

ビウムの重要性が世界共通に認識されている。そのほかレアメタルではないが、再生可能エネルギーは電気で供給されることが多いので、電気の良導体である銅についても注目されている。

ただ、国や地域によってその各元素に対する戦略は多様である。我が国においては経済安全保障法案が作られ、その法案の下、元素に応じた対応がとられつつある。例えば希土類磁石の供給については、そのための原材料安定供給について検討されつつある。

(8) 貴金属

貴金属とは、金属のうち化合物をつくりにくく、希少性のある金属の総称である[39]。元素としては、金、銀と白金族元素を指す。白金族元素は、白金、パラジウム、ロジウム、イリジウム、ルテニウム、オスミウムの6元素の総称である。

貴金属のうち、金、銀、白金は、宝飾品の主材料として利用されることが多い。化学的安定性が高く、さらには、元素固有の触媒活性を示すため、白金、パラジウム、ロジウムなどは、自動車排ガス浄化触媒には不可欠である。また、貴金属は高い耐腐食性を有するため、各種電子機器の電極材料としても利用される。

金の生産量が4,000トン／年・世界、銀の生産量が27,000トン／年・世界であるのに対し、白金やパラジウムの生産量は、それぞれ200トン前後である[40、41]。ロジウムやイリジウムは、白金やパラジウムの副産物として生産されるため、それぞれ20トン／年・世界、5トン／年・世界前後しか生産できない。これらの副産物の貴金属は、仮に需要が増えても、増産ができないのも特徴の一つである[42]。

パラジウムは、ロシアと南アフリカがそれぞれ世界生産の約40%を占めている[43]。ウクライナへのロシアの侵攻によって、ロシアからのパラジウムの供給が途絶する可能性が生じたため、2022年は、パラジウム価格が暴騰し、10,000円/gを超え、史上最高値を更新した。

白金族金属は、南アフリカとロシアが生産量の大半を占めているため、供給リスクが大きな金属の代表格である。また、特殊な鉱山から産出されるため、現時点ではサプライチェーンを変更するのが現実的に困難である。したがって、今後は、白金族金属の代替材料の開発、使用量の削減技術の開発、効率の良いリサイクル技術の開発が不可欠である。

(9) ガラス

現在の日本のガラスの年間生産量は、約300万トン程度である[44]。ガラスは、生産統計の単位が換算箱や面積の重量以外の単位があることと、その用途の多様さから最終用途が明確でないものがあることから、その需給を正確に

把握することが困難である。また、資源循環を考えると、ガラスの化学組成は重要であり、それら需給の中でソーダ石灰が主要なガラス製品であるものの、アルミノケイ酸塩、ホウケイ酸塩、シリカ（石英）などがある。用途に応じて必要な特性が異なるため、排出源となる廃製品別に選別すれば多くの場合、異なる種類のガラスは区別して回収できるものの、例えば太陽光パネル用カバーガラスでは、同じ用途であっても異なる種類のガラスが用いられている。

ガラスは、廃製品や解体現場から回収される際には、カレット（ガラス屑）として流通する。例外としてリターナブルびんがあり、今後発生量の増加が課題と考えられている使用済み太陽光パネルからも、回収したカバーガラスのリユースが検討されている。カレットとなったガラスは、洗浄や選別を経るものの、混入する異物を完全に除去されていない。これは、天然資源からガラスを生産する際の原料コスト以上に、カレットの処理にコストをかけられないことが要因であると考えられる。このリサイクルコストの課題に加え、ガラスは2つの材料特性の面で、リサイクルを困難にしていると考えられる。1つは、その主要な特性である光透過性である。異物の混入により、着色したり、光の屈折の違いにより像が歪んだりして、異物が主要な特性の劣化に直結することになる。特に、ガラスを通した像の歪みが安全に関わる用途では、異物の混入は避けられる。もう1つは、脆性である。一定以上の大きさと結晶相として残るなど粒状欠点を形成すると破壊靱性を大きく低下させることとなる。場合によっては、熱膨張率の違いから冷却時に割れてしまうこともある。

ガラスの資源循環においては、異物の混入などに対して溶解後にできることがないため、溶解前に異なる種類のガラスを含む異物の混入を避けることが望まれる。ただし、先述のように混入物を除去する場合には、かけられるコストには限界があるため、安価な異物除去技術の開発が望まれる。また、発生源から回収する際に、そのガラスの種類や化学組成の情報を保ったまま、異物を混入させることなくガラスカレットとして回収し、流通する仕組みの整備が重要である。

(10) 土木・建築素材

土木・建築に用いられる素材は、国内物質フローの大きな割合を占める。社会の成熟化に伴って、新規のインフラ建設は低下傾向にあり、この需要変化が全体としてはCO₂排出量を下げる方向に働いている。

セメント生産時には、原料である石灰石を熱分解することで必然的にCO₂が発生する。これに石炭など焼成燃料起源の排出を加えると、日本のCO₂排出量の約4%を占める[45]。なお、焼成時にセメント1トンあたり500kg程度の多様な廃棄物を副原料、副燃料として利用していることは、資源循環の好事例であるが、需要減とともにセメント生産量が低下する中で、廃棄物の原燃料としての利用量をさらに増やすことは厳しい[45]。

最終処分場の逼迫の中で埋立量の低減が求められた結果、建設廃棄物のリサイクル率は最近では約 97%に達している。その用途は主に路盤材や骨材であったが、近年は廃コンクリートからカルシウム分を分離して再利用し、石灰石を代替するカーボンリサイクルの技術開発も進められている。CO₂を回収して利用する CCU では、多くの場合に水素が必要であるが、セメント生産ではこれを要しない。

このほか、木材は再生可能資源としてその利用拡大に期待がかかる。CO₂排出量の計算では、バイオマス由来の炭素は木材の成長段階での吸収と相殺されるので、「カーボンニュートラル」とみなす考え方がとられる場合が多い。しかし、伐採した木材を、バイオマス燃料として燃焼させれば大気中に CO₂が排出されることは化石燃料の燃焼と変わりなく、温室効果として寄与する。これに対して、伐採された木材を、土木・建築素材として、長期間にわたって利用すれば、炭素は構造物中に固定され、長期にわたって腐朽したり、寿命を終えた後に燃焼用途に利用されるとしても、使用期間中、炭素は固定される。したがって、「サーキュラー」「循環」という語に拘泥して短期間で循環させるのではなく、長期間使用して炭素を固定することで、炭素排出を抑制する効果も考慮すべきである。

建設、特に建築分野からの廃棄物のうち、建設混合廃棄物は、施工現場での細かな分別・選別が十分になされずに「混合」して廃棄されるが、施工の遅れを避けるため、余裕をもった量の資材を調達する結果、未使用の資材が廃棄される状況もみられ、その再利用に着目したビジネスも始まりつつある。土木・建設分野の素材は、素材自身の価格が低いわりに輸送費が嵩むことや、輸送に伴うエネルギー消費も勘案する必要があり、地理的な需給のマッチングも考慮すべき課題である。

なお世界的には、経済発展により多くの構造物が建設され、その原料となる骨材と砂が争奪戦となり、自然から採取されることによる環境破壊も無視できない状態まで至っている。したがって、骨材や砂、碎石の再利用は大変有効である。我が国においては建設リサイクル法の施行以来、その分野のリサイクルは高く維持されている。

(11) バイオ素材

炭酸固定（光合成を含む）は CO₂を有機物に変換できるバイオプロセスである。バイオマスは再生可能資源として、枯渇資源である石油原料の代替を期待されており、CO₂排出削減政策の面からもバイオマス利用が推進されている。ここでは、バイオ素材を「バイオマスを原料とする素材」と定義し、化学合成法と生物合成法とに分類し、炭素循環についても記述する。

化学的合成法では、バイオナフサ、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、レブリン酸などが生成される。セルロースやヘミセルロースを酵素によって

糖化し、さらに触媒プロセスや発酵プロセスを使用し、アルコールや有機酸類に変換される。

発酵は微生物の呼吸プロセスであり代謝変換産物が得られる。このバイオプロセスを利用して、光合成産物を二次的変換でアルコール、有機酸、アミノ酸を製造することが可能となる。生物合成法が化学合成法より優位なのがコハク酸発酵及びアクリルアミド生産である[46]。

発酵微生物は、出発原料は糖以外、すなわち有機物でも発酵生産が可能である。メタン発酵菌叢を例にとると、菌叢は加水分解菌・有機酸生成菌・水素生成菌・メタン生成菌の混合菌叢であり、複合有機物、つまり、食品廃棄物や農業廃棄物、生ゴミを原料に酢酸・水素・メタンを合成する。さらに、近年、CO₂削減やカーボンリサイクルの観点から、CO₂直接変換の発酵技術が開発されている[47]。このように、全ての炭素源がバイオプロセスで、化学物質に変換できるようになっている。また、近年の代謝工学研究や遺伝子組換え技術によって、発酵で製造できる化学物質は多様になっている[48]。

4 社会システムとしての資源循環の方向性

(1) マテリアルフロー解析・ライフサイクルアセスメント

マテリアルフロー解析 (Material Flow Analysis、以下「MFA」という。) やライフサイクルアセスメント (Life Cycle Assessment、以下「LCA」という。) は、資源循環を支える基礎情報収集・分析技術として必要不可欠である。MFA は産業エコロジーと呼ばれる学分野の一つの中心的な技術であるが、その産業エコロジーとは、産業や消費者の活動におけるマテリアル、エネルギーのフローと、これらのフローの環境への影響、また経済、政治、規制そしてその他の社会的な要素の資源のフロー、使い方、また変換に対する影響を研究する学問である、と定義される[49]。ここでこれらのフローを人間の代謝に倣って、産業の代謝 (Industrial Metabolism) などと呼ぶケースも多い。言い換えれば我々の社会を資源利用というレンズを通して見る行為が MFA である。よって MFA によって把握され分析される資源の流れは色々な情報を我々に与えてくれるわけだが、他方で資源の流れ自体も重要な情報である。

サーキュラーエコノミーの社会実装を考えていく際、線形経済から循環経済への移行を把握するために循環性 (Circularity) と呼ばれる概念を用いることが増えつつある[50]。これは評価対象のシステムが、サーキュラーエコノミーの概念にどの程度整合的かを測るものだが、まず資源が循環的に流れているかどうかを評価することが基本となり、その手法の多くは MFA に軸をおくものになる。

日本は MFA 研究においては先進国の一つであり、特に金属素材に関する調査や研究は非常に多い。独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) による定期的なレポート[51]は、世界に類を見ないものであるし、研究論文もプラスチックのような素材[52]から製品の循環と素材を関連するようなもの[53]に至るまで極めて多い。これは日本が依然として強い素材産業を持つこととも関連すると思われるが、MFA から得られる情報は例えば素材産業の原料調達や、逆にサプライチェーンの下流にあたる顧客を理解することに役立つ。さらに、最終ユーザーがどの程度の資源を含有した製品を使っているか、という情報は将来的な循環資源の入手可能量の上限値を与える。このように使用中の製品や、そこに含まれる資源を社会蓄積量 (In Use Stock) などと呼び[54]、これに関する研究もまた日本では非常に多い。

ここで述べた社会蓄積量の研究は、将来の循環資源の供給可能量を示唆するという意味で、天然資源にとっての探査の結果のような情報である。天然資源開発にとって探査が重要であるのと同様に、資源循環における MFA やその発展としての社会蓄積量の研究は、これは対象がストックであるがゆえにしばしばマテリアルストック分析 (Material Stock Analysis) などとも呼ばれ、非常に重要である。このストックがどのように排出されるかは、製品の機械的故障、陳腐化から、ユーザーの意図による相対的陳腐化など様々な要因に

よるもので、後者については別項で述べる文理融合、行動科学などとの融合領域の研究が欠かせない。

また、昨今ではクリティカルメタルの将来需要を予測するような研究にも、MFA から得られたデータやマスバランスアプローチ^⑮という基本概念が、動学的なモデルと組み合わせるような形で多く用いられている[55]。

資源の流れを捉えた上で、これに関連する環境影響を捉えるとき、LCA はもう一つの分析技術として必要不可欠なものになる。そもそも LCA とは原材料の取得から製造、使用及び使用後の処理、リサイクル及び最終処分(すなわち、ゆりかごから墓場まで)に至るまでの製品のライフサイクルの全体を通じた、資源の投入と産出(ライフサイクルインベントリ)と潜在的な環境影響(ライフサイクルインパクト)を取り扱うものである。いうまでも無くインベントリデータは MFA データと密接に関連することになる。

サーキュラーエコノミーとは、できるだけ価値の高い状態で資源を循環的に利用し続けることを求めるものである一方、当然持続可能性に負の影響を与えるような方法は許容されない。よって、そこに含まれる全ての活動は、常に LCA 的な視点から評価される必要がある。あるレビュー[56]によれば、全てのサーキュラー戦略が低炭素に寄与するとは限らないことが既に明らかになっている。

日本は LCA 研究においても特にケーススタディにおいて多くの蓄積を持ち、実社会がこれを用いている。ただし資源循環については、リサイクルだけを見ても統一された手法はなく[57]、さらに製品サービスシステム評価を行うとなればより難しいことになるであろう。

別項で触れる資源循環に関する DX(情報の自動収集、蓄積、共有など)は、資源循環における MFA や LCA の援用をより容易なものとする。昨今のトレーサビリティへの高い要求を見れば、その発展は不可避であることから、こうした情報を使いこなしつつ、資源循環を適切に評価するためのさらなる分析手法開発と、産官学連携によるケーススタディの蓄積が日本のサーキュラーエコノミーの実装を後押しすることとなる。

(2) システム・デジタル技術

① システムとしての資源循環

資源循環を実現するシステムの要素技術である使用済製品・材料の回収、解体、選別、洗浄、流通、再生材利用などを、適切に連携させる必要がある。技術要素に加え、組織や消費者を含む主体の連携が必須である。また、法制度や経済制度も欠かせない要素である。

特に、システム内の要素間で連携する技術が求める品質、流通量、処理量、需要量の整合が重要である。品質としては、不純物や添加物の種類や量が挙げられ、金属における分離困難不純物元素の混入、プラスチックの多層化や

添加剤のように、技術的に分離困難な物質の混合、有害化学物質管理で規制される物質の混合は、循環の大きな障害となる。これらの障害は、製品設計・生産段階での易解体性の考慮、単一素材採用、材質表示などの環境配慮設計、回収段階での適切な分別、情報伝達などによって改善される。再生材利用側では、要求品質と継続的供給の保証が求められる。有害廃棄物の国境を越える移動及びその処分の規制に関するバーゼル条約や各国個別政策による使用済製品・材料の越境フローの制約も、資源循環システムの安定な運用に大きな影響を与える。製品のリースやレンタル、シェアリングのようなサービス化には、非所有による資源消費量削減の可能性に加え、製品の所有権を消費側に移行させないという特徴があり、サービス提供側が使用状況を把握し、使用後の流れを制御できるという循環に対する優位性がある。

このように、資源循環をシステムとして捉え、技術と主体の連携と運用を考慮した技術開発、ビジネスモデル設計、制度設計を行うべきである。

② デジタル技術の活用

資源循環システムにおいて製品・材料の所在地、状態、在庫量・流通量を把握できれば、適切な時点で適切な連携先に製品・材料を流通させることができる。プロセスインベントリを含むサプライチェーン情報をクラウド技術によって共有できれば、前節のMFAやLCAの実施や環境配慮設計・生産[58]も容易になる。このためにデジタル技術の活用は大いに期待される。

すでに、日本においても廃棄物マニフェスト管理の電子化、製品含有化学物質情報の伝達スキームの標準化などが進んでいるが、IoT（モノのインターネット）とセンサー技術の組み合わせ、製品へのQRコードやRFIDタグの添付による製品状態の個別監視により、製品の長寿命化や次のプロセスへの引き渡しの適正化が図れる。回収物の画像や分光データのAIやニューラルネットワーク⑩による選別の高度化、さらにロボティクスとの融合による解体・選別の自動化が可能となる。材料流通の最適化・自動化のためのブロックチェーン（情報の分散管理）の応用も検討されている[59]。

このように、資源循環における要素技術の高度化に加え、物流と情報伝達の高度化によるシステム最適化のための技術開発や社会実装が求められる。

(3) 文理連携の必要性

鉱物資源の調達には、採掘活動に伴う土地改変をはじめとする環境攪乱のみならず、多様な社会的負の影響の懸念も存在する。コンゴ民主共和国ならびにその周辺国で調達される3TG（Tin, Tantalum, Tungsten, Gold）と呼ばれる紛争鉱物の使用については、産業界の関心は高く、その調達・使用についてサプライチェーンを通じた社会的責任は広く認識されている。しかしながら“More than 3TG”と呼ばれる3TG以外の紛争鉱物も多岐にわたる[60]。食に

とって欠かせないリン鉱石も、その埋蔵量の 7 割を有するモロッコの鉱山周辺での現地住民との鉱山所有をめぐる紛争や、反政府勢力などにより違法に採掘された鉱石販売による不適正な資金の流れは、懸念材料の一つである[61]。

さらに、温暖化をはじめとする環境負荷排出は、その原因たる排出者と、影響を受ける被害者には、多くの場合、国・地域、世代について偏りがあり、経済的・社会的弱者がより多く負の影響を受けやすいという不公正が発生する。環境正義や気候正義という言葉で示される概念は、そのような状況は望ましくないとする概念である[62]。例えば、国際 NGO Oxfam の調査によれば、世界人口の 10%に当たる高所得層が、個人消費による温室効果ガスの約半分を排出していることが指摘されている[63]。

その他の資源利用に伴う負の社会的影響としては、先住民の文化破壊、人権抑圧なども挙げられる。Rio Tinto が 2020 年 5 月に豪州の鉄鉱石鉱山で行った試掘作業の際に、アボリジニの先住民遺跡を破壊したことは、先住民コミュニティから非難を受けただけにとどまらず、株主や投資機関などによる投資引き上げや同社の採掘認可停止にまで広がり、大きな波紋を呼んだ[64]。このような資源採掘に伴う紛争や健康被害、人権抑圧についての事象は、世界的な研究ネットワークや人権団体による情報集積と共有が行われている[65, 66]

LCA の研究分野では、経済活動に伴う資源需要やエネルギー消費が引き起こすサプライチェーンを通じた環境影響を定量評価し、土地改変量や生態系への影響など、各領域へのインパクトは、エコロジカル・フットプリント⑬や関与物質総量など指標化されている。社会的影響についての可視化・定量評価は社会的 LCA (Social LCA) として手法発達が進みつつある[67]。しかしながら、まだ温暖化影響物質やその他の化学物質の排出追跡と比較すると、社会的な影響についての情報集積は十分ではない。貧困や人権抑圧などの事象については、社会科学者の積極的な情報整理が求められる。文化財や宗教的遺跡などへの配慮については、宗教学や文化人類学などの分野からの知が必要とされる。紛争鉱物の市場からの排除や、資源利用に関わる不適正な資金の流れを止めようとするとならば法学や会計学の分野からの協力も不可欠であろう。世界人口の増加は、食料需要を増大させ、農業生産に必要な栄養塩類資源の需要を増加させる。さらに、脱炭素の機運により導入される様々な技術は新たな希少資源の需要を生み出す。温暖化リスクの軽減のトレードオフとして、新たな鉱物資源の需要拡大が引き起こす環境への負の影響を最小化し、社会全体で持続的な資源管理と保全の重要性について意識共有することが、今後ますます必要である。

(4) 法律・制度上の課題

日本における資源循環に関する法体系の最上位に位置するのは、2000 年制

定の循環型社会形成推進基本法（循環基本法）である。この基本法は廃棄物の適正な処理と、資源の有効利用・再生利用を両立させるため、両分野の法律に傘をかける位置にある。廃棄物の処理及び清掃に関する法律（廃棄物処理法）は、1900年の汚物掃除法を起源とし、1954年の清掃法を経て1970年のいわゆる公害国会で制定され、その後、度々改正されてきた長い歴史をもつ法律である。公衆衛生、生活環境保全の観点から、廃棄物の適正な処理を確保するための施設整備や許認可について定めることが、当初からの骨格であるが、1991年の法改正において、第1条の目的の条文に排出抑制、分別・再生が新たに位置づけられ、国民にも排出抑制、廃棄物の分別・再生への協力という責務が定められた。廃棄物量の増大や最終処分場の逼迫により、適正処理のためには処理・処分量の抑制が必要との背景があった。

この廃棄物処理法の改正と同じ1991年に新たに制定されたのが、「再生資源の利用の促進に関する法律（再生資源利用促進法）」であり、循環基本法の制定時に、「資源の有効な利用の促進に関する法律（資源有効利用促進法）」に改正された。循環基本法が定められた2000年は循環型社会元年と位置付けられるが、その9年前の1991年の法改正と新法制定が、3R政策の重要な出発点である。

再生資源利用促進法その後の資源有効利用促進法は、3Rの取組が特に求められる業種、品目を指定するが、リサイクルを総合的に推進するための法律であり、「ラージリサイクル法」と呼ばれることもある。これに対し、製品分野ごとのリサイクルについて定めたものが通称「個別リサイクル法」であり、循環基本法と前後する時期に容器包装（1995）、家電（1998）、建設資材（2000）、食品（2000）、自動車（2003）の5法が制定された（各々、周知期間の後に施行）。小型家電リサイクル法が2012年に追加され、さらに世界的な廃プラスチック問題への関心の高まりの中、プラスチック資源循環促進法（プラ新法）が2021年に制定された。個別リサイクル法はとりまく社会情勢の変化に適応できるよう、定期的な評価、見直しが行われ、一部改正されながら今日に至っている。

総じていえば、日本の資源循環の法制度は、経済社会システムの下流での廃棄物処理の課題解決を主たる動機として発展し、次第に上流側での取組へと拡大してきた。消費者、事業者、行政など複数の主体の複雑な役割分担のもとでの課題が長年論じられてきた容器包装リサイクル法をはじめ、各法が対象とする品目や主体ごとの責務の理解は関係者以外には難解な面があることも否めない。一方、本報告で第1章や第2章にて記載しているように、最近のEUの傾向は、廃棄物処理からの脱却によって資源循環を実現し、さらに新たな経済価値を見出すことに舵を切っている。これらの変化は真の持続可能性を検討し、環境と経済の両立を図るために行われたといえる。廃棄物の最終処分量の低減という下流側での喫緊の課題への対処という面では、成果を挙げて

きたといえるが、輸入依存度の高い稀少資源をはじめ、資源の有効利用、再生利用に関して、コスト低減や原料調達源の確保といった上流側での意義の浸透が十分とはいえない。廃 PET ボトルの価値の大きな変動にも見られるように、二次資源の輸出入や一次資源価格の変動など、国際的な情勢の影響を受けやすいだけに、国内の法制度の安定的な運用と、経済面での実益の確保の両立が重要課題である。さらに、本報告の課題であるカーボンニュートラルに関し、リサイクルなど 3R による温室効果ガスの削減効果にも関心が高まる中、従来の廃棄物処理面での効果と、温室効果ガス削減効果の両面で効果の高い技術的選択肢を支援する法制度面での対応が求められよう。

5 おわりに

本報告では、日本におけるサーキュラーエコノミー対策の方向性を審議した内容を報告した。第2章ではサーキュラーエコノミーをとりまく国内外の社会的背景をまとめ、資源循環のみならず、カーボンニュートラルも含む多種多様な環境負荷や、資源安全保障、廃棄物処理など、多くの観点との関係を整理し、調和を図る必要があることを示した。第3章では、具体的な各素材の資源循環の方向性について整理した。また、第4章では、日本が取り組むべきサーキュラーエコノミーの方向性を議論する際に重要な、システム解析やデジタル技術、文理連携、法律・制度などについて、現状と課題をまとめた。

以下については紙面の都合上、本報告にまとめることができなかったが、これからの日本のサーキュラーエコノミーの方向性を議論する際には重要である。

- ・天然バイオ系資源の循環とカーボンニュートラルの関係
- ・資源循環による生物の遺伝子資源の保全効果
- ・海洋資源を考慮した資源循環
- ・地球が本質的に持つ元素循環機能に及ぼす人工的な元素循環の影響
- ・資源循環の地政学の現状
- ・サーキュラーエコノミー国際標準化

また、地球上の大きな物量を占める物質である水の取り扱いについても課題がある。このテーマは非常に大きいため、本報告とはまた別に議論すべきである。

本報告は、「材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同 SDGs のための資源・材料の循環使用検討分科会」を中心に、サーキュラーエコノミーに関して議論された内容をまとめたものであり、本文中でも多様な視点の重要性や文理連携の重要性について述べたものの、それらはまだ不十分であることは否めない。次期の活動においては、さらなる幅広い分野や立場の方々との議論が必要であり、特に法制度などの観点では人社系の委員会とも議論することが重要である。

日本学術会議は、カーボンニュートラルに関して連絡会議を持ち、そこではすべての部から 82 委員会・分科会が参集している[68]。多くは、それぞれの研究分野の立場からカーボンニュートラルをどのように捉え、その実現のためにどのように対応するかが検討され、報告されている。ただし、資源循環と関係して議論されている例は、ほとんど見受けられないことから、今回の報告を第一歩として、SDGs の達成に向けて資源循環、サーキュラーエコノミー、そしてカーボンニュートラルの関係が総合的にさらに議論されることが重要である。

<用語の説明>

①クリティカルメタル

材料や素材としてなくてはならない必須金属、需要の伸びが大きくて供給不安がある金属、価格が高騰しても代替材料がない金属の総称である。いい換えれば、供給リスクが高く、また産業における重要性が高い金属の総称である。希少金属の総称として一般的に使われるレアメタルの多くも、供給リスクと産業における重要性が高いため、クリティカルメタルと同義に使われることが多い。ただし、クリティカルメタルには、レアメタル以外にも一部のベースメタルも含まれる。例えば、亜鉛は、レアメタルには含まれないが、資源問題や環境問題などを考慮したクリティカルメタルに分類される。レアメタルをはじめとするクリティカルメタルの多くは、生産量が小さいため、一部の国や特定の地域から全世界に供給されている場合が多い。このため、社会情勢が変化すると供給に障害が生じることがあり、供給リスクが高い場合が多い。

②生物多様性

地球上に存在する生物の多様性や種の豊富さ、遺伝的な多様性、生態系の多様性などを指す。具体的には、生物の種類や種の違い、個体数、生息地の多様性、生物の形態、遺伝子情報の多様性、生物とその生息環境との相互作用の多様性などを含む。

③Well-being

人々が肉体的、精神的、社会的に健康で幸福である状態を表す。具体的には、健康、安全、幸福感、人生の充足感、自己実現、社会的つながり、個人の成長や発展などを含む。

④ズリ

鉱山で鉱石などと一緒に運び出される回収対象とならない岩石や土砂などのこと。

⑤環境攪乱量

人為的・非人為的にかかわらず、大気・水・土壌圏に一時的に変化をもたらし、既存の生態系や環境を変えた量を指す。

⑥ベースメタル

埋蔵量・産出量が多く、社会で大量に使用され、精錬が簡単な金属で、鉄・銅・亜鉛・錫・アルミニウムなどを指す。

⑦レアメタル

資源的に希少、あるいは、需要が小さい金属、技術的・経済的な理由で生産が困難な金属の総称。ベースメタル・コモンメタル（汎用金属）の対義語である希少金属のこともさす。現在日本では 34 鉱種（55 元素）が該当する。白金、パラジウム、ロジウムなどの貴金属もレアメタルに分類される。資源的には豊富に存在するにもかかわらず、鉱石から金属を抽出するのが困難な金属もレアメタルに分類される。希土類金属、リチウム、チタンなどがその代表例である。海外では、Less-common metals、minor metals、specialty metals などとも呼ばれる。

⑧紛争鉱物

コンゴ民主共和国とその隣接国で採掘されるスズ、タンタル、タングステン、金の 4 鉱物を指す。その頭文字から「3TG」とも呼び、武装集団の資金源となって人権侵害や紛争を助長している懸念がある。

⑨資源効率性

資源利用の技術的効率や資源生産性（資源消費による経済的付加価値）の向上、資源の開発・利用による環境負荷の低減を網羅した概念。

⑩環境配慮型製品設計

製品の生産から使用、再資源化にわたるライフサイクル全般において、環境負荷低減を考慮して製品を設計すること。

⑪大阪ブルーオーシャンビジョン

2019 年に開催された G20 大阪サミットにおいて、「2050 年までに海洋プラスチックごみによる追加的な汚染をゼロにまで削減することを目指す」ことについて、G20 首脳が共通のグローバルなビジョンとして共有したもの。

⑫E-scrap

プリント基板などの貴金属を含有する電子機器スクラップの総称。

⑬乾式製錬法

鉱石などの原料を高温で加熱処理して金属製錬を行う方法。

⑭湿式製錬法

鉱石などの原料を水溶液中での浸出や晶析などの反応を利用して金属製錬を行う方法。

⑮マスバランスアプローチ

ある製品のライフサイクルの中で複数の原料を用い何かのアウトプットを得

たとき、それぞれの原料がもつ特性をそれぞれの原料の投入量に応じて、アウトプットに割り当てる手法。例えばこれまでバイオマス原料を利用してこなかったあるプロセスの投入原料の1割をバイオマス由来に置き換えたとき、このプロセスからのアウトプットの1割がバイオマス由来であると認められる。

⑩ニューラルネットワーク

神経細胞のネットワーク構造を模した数理モデルである。入力情報に対する正しい出力を多数学習させることにより、未知の入力に対して出力を予測することができる。

⑪エコロジカル・フットプリント

人間活動が環境に与える負荷を、資源調達に関わる面積と排出物の浄化に必要な面積に換算し、陸地と水域面積として示した数値。農作物の生産に要した耕作地など5種類の土地の面積に、排出されたCO₂の吸収に必要とされる森林面積を加える手法が広く用いられている。

<参考文献>

- [1] 日本貿易振興機構ブリュッセル事務所海外調査部、「EU の循環型経済政策（第1回）2022 年政策パッケージ第1弾において EU が目指すものとは」、2022 年
<https://www.jetro.go.jp/world/reports/2022/01/60d6edca66cfec17.html>
- [2] S. Murakami, K. Shimizu, C. Tokoro, T. Nakamura, Role of Resource Circularity in Carbon Neutrality. *Sustainability*, 14(24), 2022, Article number 16408.
DOI: 10.3390/su142416408
- [3] M. Fischer-Kowalski, M. Swilling, E.U. von Weizsäcker, Y. Ren, Y. Moriguchi, W. Crane, F. Krausmann, N. Eisenmenger, S. Giljum, P. Hennicke, P. Romero Lankao, A. Siriban Manalang, S. Sewerin, Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth, A Report of the Working Group on Decoupling to the International Resource Panel. UNEP, 2011.
- [4] E. G. Hertwich, J. Aloisi de Larderel, A. Arvesen, P. Bayer, J. Bergesen, E. Bouman, T. Gibon, G. Heath, C. Peña, P. Purohit, A. Ramirez, S. Suh, (eds.), Green Energy Choices: The benefits, risks and trade-offs of low-carbon technologies for electricity production, Report of the International Resource Panel. UNEP, 2016.
- [5] S. Suh, J. Bergesen, T. J. Gibon, E. Hertwich, M. Taptich, Green Technology Choices: The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies, A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. UNEP, 2017.
- [6] IEA, World Energy Outlook Special Report. IEA Publications, 2021.
- [7] E. Hertwich, R. Lifset, S. Pauliuk, N. Heeren, Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya. UNEP, 2020.
- [8] V. Olivier, B. Goffé, N. Arndt, Metals for a low-carbon society. *Nature Geoscience*, 6(11), 2013, pp.894-896.
- [9] F. Schmidt-Bleek, Factor 10: The future of stuff, *Sustainability: Science, Practice and Policy*, 4(1), 2008, pp. 1-4.
DOI: 10.1080/15487733.2008.11908009
- [10] S. Kosai, K. Matusi, K. Matsubae, E. Yamasue, T. Nagasaka, Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles

- considering land disturbances. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 2020, p.105256.
DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.105256
- [11] USGS, Mineral Commodity Summaries, 2022.
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-nickel.pdf>
- [12] N. Myers, R. Mittermeier, C. Mittermeier, et al., Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403, 2000, pp.853-858.
DOI: 10.1038/35002501
- [13] UNEP, Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM).
<https://www.unep.org/globalmercurypartnership/what-we-do/artisanal-and-small-scale-gold-mining-asgm>
- [14] COURSE 50, <https://www.course50.com/>
- [15] 日本容器包装リサイクル協会、「プラスチック製容器包装 ケミカルリサイクル製品（再商品化製品利用製品）内訳」
<https://www.jcpra.or.jp/recycle/recycling/tabid/433/index.php>
- [16] プラスチック循環利用協会、「2021 年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図」、2022
- [17] EITI, <https://eiti.org/>
- [18] European Commission, Closing the loop – An EU action plan for the Circular Economy, Brussels, 2015
- [19] European Commission, A new Circular Economy Action Plan: For a cleaner and more competitive Europe, Brussels, 2020
- [20] 経済産業省、「循環経済ビジョン 2020」、2020.
- [21] J. Dewulf, G.A. Blengini, D. Pennington, P. Nuss, N.T. Nassar, Criticality on the international scene: Quo vadis?. *Resources Policy*, 50, 2016, pp.169-176.
DOI: 10.1016/j.resourpol.2016.09.008
- [22] Ellen MacArthur Foundation, The butterfly diagram.
<https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> (2023 年 3 月 9 日閲覧)
- [23] 環境庁リサイクル研究会編、「リサイクル新時代、環境保全のための循環型社会に向けて」、中央法規出版、1991 年
- [24] プラスチック循環利用協会、「2021 年 プラスチック製品の生産・廃棄・再資源化・処理処分の状況 マテリアルフロー図」、2022
- [25] 日本鉄鋼連盟、「鉄鋼統計要覧 2022(令和 4 年版)」、2020
- [26] 日本アルミニウム協会、「アルミニウム圧延業界の温暖化対策長期ビジョン (2050 年)」、2020、pp. 1-8
https://www.aluminum.or.jp/environment/pdf/followup_03_2021.pdf

- [27] S. Owada, K. Tsuchiya, A. Takasugi, Y. Kato, T. Funakoshi, H. Tanno, XRT and XRF Sorting for the Mutual Separation of Aluminum Alloys to Achieve “Sash to Sash” Recycling. 11th Int. Symp. on East Asian Resources Recycling Tech. (Kaohsiung), 2011, pp.52-55.
- [28] JOGMEC、「1.銅 (Cu)」『鉱物資源マテリアルフロー2021』
- [29] 三菱マテリアル株式会社、「統合報告書 2022」
- [30] 佐々木康勝、大塚教正、日本金属学会誌、85、2021、pp.274-278
- [31] JOGMEC、「金属資源レポート 2015. 9」、45(3)
- [32] 赤城進、青木示威尚、米田寿一、成迫誠、日野順三、Journal of MMIJ、123、2007、pp.763-767
- [33] International lead and zinc study group, ILASG-statistics
<http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=2>
- [34] T. Nakamura, Zinc Recycling Technology Now And In The Future. Lead & Zinc '05, Japan, Kyoto, 2005 年 10 月 17-19 日
- [35] International lead and zinc study group, ILASG-statistics
<http://www.ilzsg.org/static/statistics.aspx?from=2>
- [36] T. Nakamura, The Role of the Metallurgical Industry in the Recycling-Based Society. International Conference on the Sustainable Processing of Materials, Australia, Cares, 2002, pp.21-27.
- [37] 東北大多元物質研、「「クリティカルメタル」の最新見解を公表へ」、2008 年 6 月 20 日
<https://xtech.nikkei.com/dm/article/NEWS/20080620/153592/>
- [38] 足立吟也 監修、「レアメタル便覧 第 1 版」、丸善株式会社、東京、2011
- [39] <https://ja.wikipedia.org/wiki/貴金属>
- [40] Johnson Matthey、PGM market report、<https://matthey.com/en/products-and-markets/pgms-and-circularity/pgm-markets/pgm-market-reports>
- [41] GFMS、Gold Survey、<https://gold.tanaka.co.jp/statistics/index.html>
- [42] 岡部徹、「白金族金属の現状とリサイクル技術」、まてりあ(日本金属学会会報)、46(8)、2007 年、pp.522-529.
- [43] 岡部徹、「ウクライナ問題で「パラジウムショック」再び 露の供給に不安」、日経クロステック、2022 年 3 月 14 日
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00001/06621/>
- [44] 環境省低炭素型 3R 技術・システムの社会実装に向けた素材別リサイクル戦略マップ検討会、「マテリアルリサイクルによる天然資源消費量と環境負荷の削減に向けて～素材別リサイクル戦略マップ策定に向けた調査・検討の中間報告～」、2016 年、p.20、<https://www.env.go.jp/content/900506594.pdf>
- [45] 経済産業省製造産業局・資源エネルギー庁、「コンクリート・セメントのカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について」、2020 年、

https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/011_04_00.pdf

- [46] 経済産業省バイオ小委員会報告書、「バイオテクノロジーが拓く『第五次産業革命』」、2021 年
- [47] 加藤淳也、中島田豊、「ガス発酵による化学品の生産技術」、オレオサイエンス、21、2021 年、pp.417-424
- [48] U. S. Department of Energy, Top Value Added Chemicals from Biomass, Volume I-Results of Screening of Potential Candidate from Sugars and Synthesis Gas.
<https://www.nrel.gov/docs/fy04osti/35523.pdf> (2023 年 2 月 22 日閲覧)
- [49] National Academy of Engineering, The Greening of Industrial Ecosystems. Washington, DC., The National Academies Press, 1994.
DOI:10.17226/2129
- [50] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, A. Kendall, A taxonomy of circular economy indicators. *J. Clean. Prod.*, 207, 2019, pp.542-559.
DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.014
- [51] 独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構、「鉱物資源マテリアルフロー」、2020 年
https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2021/06/material_flow2020.pdf
- [52] J. Nakatani, T. Maruyama, Y. Moriguchi, Revealing the intersectoral material flow of plastic containers and packaging in Japan. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 117, 2020, pp.19844-19853.
DOI: 10.1073/pnas.2001379117
- [53] S. Nakamura, Y. Kondo, S. Kagawa, K. Matsubae, K. Nakajima, T. Nagasaka, MaTrace: Tracing the fate of materials over time and across products in open-loop recycling. *Environ. Sci. Technol.*, 48, 2014, pp.7207-7214.
<https://doi.org/10.1021/es500820h>
- [54] 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 (2)、2010 年、pp.76-82
DOI: 10.3370/lca.6.76
- [55] T. Watari, K. Nansai, K. Nakajima, Review of critical metal dynamics to 2050 for 48 elements. *Resour. Conserv. Recycl.*, 155, 2020, 104669.
DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.104669
- [56] R. Koide, S. Murakami, K. Nansai, Prioritising low-risk and high-potential circular economy strategies for decarbonisation: A meta-

- analysis on consumer-oriented product-service systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 155, 2022, 111858.
DOI: 10.1016/j.rser.2021.111858
- [57] 醍醐市朗、「材料を評価対象とする LCA」、鉄と鋼、108(11)、2022 年、pp. 811-822
DOI: 10.2355/tetsutohagane.TETSU-2022-058
- [58] K. Nakano, M. Hirao, Collaborative activity with business partners for improvement of product environmental performance using LCA. *Journal of Cleaner Production*, 19(11), 2011, pp.1189-1197.
- [59] みずほリサーチ&テクノロジーズコンサルティングレポート、「資源循環におけるブロックチェーンの活用動向と課題」、1、2021 年
- [60] Centre for Research on Multinational Corporations, There is more than 3TG. SOMO Paper, 2015.
<https://www.somo.nl/wp-content/uploads/2015/02/There-is-more-than-3TG.pdf>
- [61] K. Matsubae, E. Yamasue, H. Ohtake, ADVANCED MANUFACTURING AND HIGH QUALITY MATERIALS Phosphorus, In *Routledge Handbook of the Extractive Industries and Sustainable Development*. Taylor and Francis, 2022, pp. 311-322.
<https://doi.org/10.4324/9781003001317-19>
- [62] D. Schlosberg, L.B. Collins, From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice. *WIREs Clim Change*, 5, 2014, pp.359-374.
<https://doi.org/10.1002/wcc.275>
- [63] Extreme Carbon Inequality, Oxfam, 2015.
https://s3.amazonaws.com/oxfam-us/www/static/media/files/extreme-carbon-inequality-021215-en_UPDATED.pdf
- [64] JOGMEC、「カレント・トピック」、2021 年
<https://mric.jogmec.go.jp/reports/current/20210205/152968/>
- [65] Human rights watch
<https://www.hrw.org/>
- [66] L. Temper, D.D. Bene, J. Martinez-Alier, Mapping the frontiers and front lines of global environmental justice: The EJAtlas. *Journal of Political Ecology*, 22, 2015.
DOI: 10.2458/v22i1.21108.
- [67] UNEP, Guidelines for social life cycle assessment of products, 2009.
<https://www.unep.org/resources/report/guidelines-social-life-cycle-assessment-products>

- [68] 日本学術会議、「カーボンニュートラル(ネットゼロ)に関する連絡会議」,
https://www.scj.go.jp/ja/member/iinkai/carbon_n/index.html
- [69] OECD, Global Plastics Outlook: Economic drivers, environmental impacts and policy options. 2022.
<https://www.oecd.org/environment/plastics/>
- [70] PETボトルリサイクル推進協議会、「PETボトルリサイクル年次報告書2022」、2022
- [71] 日本容器包装リサイクル協会、「プラスチック製容器包装再商品化手法に関する環境負荷等の検討」、2007
- [72] 経済産業省、「トランジション・ファイナンス推進のためのロードマップ」、2021-2022
https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/transition_finance.html
- [73] European Commission, A circular economy for plastics - Insights from research and innovation to inform policy and funding decisions. 2019.
- [74] S. Owada, K. Tsuchiya, A. Takasugi, Y. Kato, T. Funakoshi, H. Tanno, Novel Process of Aluminum Recycling by Combining XRT and XRF Sorting. Sensor Based Sorting 2012 (Aachen), 2012, pp. 1-7.
- [75] M. Harita, S. Owada, S. Koyanaka, Y. Kato, A. Takasugi, M. Kuzuya, Mutual Separation of Aluminum Alloys by combining ARENNA and LIBS Sorters. Sensor Based Sorting & Control 2016 (Aachen), 2016, pp. 1-9
- [76] S. Owada, T. Hatano, R. Togawa, K. Wagatsuma, S. Kashiwakura, T. Nakamura, Influence of Various Parameters in LIBS for the Application to Sorting. Sensor Based Sorting & Control 2016 (Aachen), 2016, pp. 1-10.
- [77] 日本アルミニウム協会、「アルミニウムとは」、2018、p. 15
<https://www.aluminum.or.jp/basic/aluminumtoha/pdf/AboutAluminum.pdf>
- [78] International Copper Study Group, THE WORLD COPPER FACTBOOK 2022.
- [79] 林庄作、『廃棄物資源循環学会誌』、22、2011、pp. 453-456
- [80] 小坂製錬株式会社ホームページ、パンフレット
https://dowa-kosaka.co.jp/sys/wp-content/themes/dowa-kosaka/file/kosakasr_brochure_202111.pdf
- [81] Outotec ホームページ、AUSMELT® TSL PROCESS
<https://www.mogroup.com/portfolio/ausmelt-tsl-process/>
- [82] C. Hagelúken, *World of Metallurgy-ERZMETALL*, 59, 2006, pp. 152-161.
- [83] G.R.F. Alvear Flores, S. Nikolic, P.J. Mackey, *JOM*, 66, 2014, pp. 823-832.

- [84] M.E. Schlesinger, M.J. King, K.C. Sole, W.G. Davenport, Extractive metallurgy of copper, 5th ed., Chapter 7. Elsevier, Oxford, 2011.
- [85] Glencore Canada ホームページ、Metal recycling
<https://www.glencore.ca/en/horne/nos-innovations/le-recyclage-des-metaux>
- [86] B.Zhao, J.Liao, *Metals*, 12, 2022, p.190.
- [87] Outotec ホームページ、PM KALDO FURNACE
<https://www.mogroup.com/portfolio/pm-kaldo-furnace/>
- [88] Boliden ホームページ、Largest electronic material recycler in the world
<https://www.boliden.com/sustainability/case-studies/largest-electronic-material-recycler-in-the-world>
- [89] F. Tesfaye, D. Lindberg, J. Hamuyuni, P. Taskinen, L. Hupa, *Minerals Engineering*, 111, 2017, pp.209-221.
- [90] Aurubis ホームページ、Aurubis Richmond
<https://www.aurubis.com/en/richmond>
- [91] SMS group ホームページ、Converters for non-ferrous metals
<https://www.sms-group.com/plants/converters-for-non-ferrous-metals>
- [92] 山口周、「亜鉛のリサイクルプロセス」、まてりあ、35(12)、pp.1998-1302
- [93] 大石敏雄、「鉛のリサイクルプロセス」、まてりあ、35(12)、1996、pp.1303-1306
- [94] 清水孝太郎、「「レアアース・ショック」はなぜ起きたのか?」、2010 年 9 月 27 日 https://www.murc.jp/library/column/sn_100927_1/
- [95] NEDO、「バイオマスからの化学品製造分野の技術戦略策定に向けて」、TSC Foresight、22
<https://www.nedo.go.jp/content/100870192.pdf> (2023 年 2 月 22 日閲覧)

＜参考資料 1＞審議経過

材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同・SDGs のための資源・材料の循環使用検討分科会

【第 24 期】

平成 30 年

2 月 19 日 第 1 回委員会

役員の選出、今期の活動方針について

7 月 30 日 第 2 回委員会

公開シンポジウム企画案について、意思の表出のまとめ方について

7 月 30 日 公開シンポジウム「SDGs 時代における資源開発後の鉱山環境対策のあり方」

平成 31 年

1 月 15 日 第 3 回委員会

公開シンポジウム企画案について、意思の表出の構成案について

令和元年

8 月 5 日 公開シンポジウム「SDGs のための資源・材料の循環使用に関するシンポジウム」

令和 2 年

8 月 20 日 第 4 回委員会

活動報告、次期の分科会運営について、意思の表出について

【第 25 期】

令和 2 年

12 月 21 日 第 1 回委員会

役員の選出、今期の活動方針について、意思の表出案について

令和 3 年

3 月 31 日 第 2 回委員会

公開シンポジウム企画案について、意思の表出案について

11 月 26 日 第 3 回委員会

公開シンポジウム企画案について、意思の表出方法について

11 月 26 日 公開シンポジウム「なぜ SDGs?—資源・材料循環における SDGs—」

令和 4 年

2 月 17 日 意見交換会

7 月 26 日－8 月 4 日メール審議 第 4 回委員会
公開シンポジウム企画案について

11 月 18 日 第 5 回委員会

公開シンポジウム企画案について、意思の表出方法について

11 月 18 日 公開シンポジウム「なぜ SDGs? ～資源・材料循環における SDGs
とカーボンニュートラル～」

令和 5 年

8 月 25 日 日本学術会議第三部役員会

報告「資源循環とカーボンニュートラルの両立に向けた課題
と日本が取り組むべきサーキュラーエコノミー対策」承認

＜参考資料 2＞付録

以下に第3章に記載した各素材の資源循環技術・プロセスの方向性に関する詳細を示す。

(1) プラスチック

プラスチックは、2019年には世界全体で化石資源からの一次生産4.29億トンに対してバイオマスからの一次生産は0.02億トン、廃プラスチックの発生量は3.53億トンと見積もられている。リサイクル目的で回収されている廃プラスチックは発生量の16%に過ぎず、それに焼却及び衛生埋立を加えた適正処理は78%であり、残りは不適正に燃焼または投棄されるか、海洋を含む水環境や土壌といった環境中に流出していると推定されている[69]。世界的に見れば、特に発展途上国などにおいて廃プラスチックの適正処理にも循環利用にも改善の余地は大きく、サーキュラーエコノミーによって両者の同時解決を目指すことが求められている。

プラスチックの資源循環技術は、ポリマーとして循環利用する「マテリアルリサイクル」、化学的にモノマーや低分子の炭化水素、または一酸化炭素及び水素を主成分とする合成ガスに分解する「ケミカルリサイクル」、燃料として利用する「エネルギー回収」に分類される。国内では、製鉄プロセスにおける高炉の還元剤またはコークス炉の原料として利用する技術もケミカルリサイクルに分類されている。いずれについても、効率的に化石資源を代替できれば脱炭素化に貢献することが可能である。

国内では、2021年において廃プラスチックの総排出量824万トンのうちマテリアルリサイクルが21%、ケミカルリサイクルが4%、エネルギー回収が63%を占め、それ以外は単純焼却または埋立によって処理処分されている[24]。環境中への流出がゼロとはいえないものの、すでに適正回収及び適正処理は相当程度に達成されている。そのため、日本におけるプラスチックのサーキュラーエコノミーは、適正処理されていた廃プラスチックを、より高度な循環的な利用に仕向けることを意味する。そこでは、適正回収や適正処理も確保されていない状態から社会システムを構築することとは異なる、既存の社会システムの再構築という課題が障壁となる可能性もある。

日本のプラスチック資源循環に固有の特徴としては、特定の品目の高度なリサイクルがある。ペットボトルについては、2021年度のリサイクル率は86%で、欧州や米国と比較しても相当に高い水準にあり[70]、ペットボトルの原料としての循環利用など国内循環がリサイクルの75%を占めている。他にも、食品用トレイがスーパーなどの店頭で回収され、食品用トレイの原料として循環利用されている。これらに共通するのは、単一種類のポリマーとして回収・選別しやすいように設計されていることと、消費者の分別によって他のプラスチックとは混合せずに回収されていることである。

さらに、廃プラスチックが様々な動脈産業において利用されてきたことも特

徴である。政府によるカーボンニュートラル実現に向けた技術ロードマップにおいても、石油及び化学分野における廃プラスチックのケミカルリサイクルだけでなく、鉄鋼、セメント、紙・パルプの各分野においても廃プラスチックの活用が低炭素・脱炭素技術として位置づけられている[71]。

欧州におけるサーキュラーエコノミーでは、「より内側のループ」の循環利用が優先されるという中心的原理が示されており、プラスチックについてはマテリアルリサイクルがケミカルリサイクルよりも内側のループと見なされる[72]。この原理は、単一種類のポリマーとして回収できる廃プラスチックについては脱炭素化とも整合する。一方で、混合プラスチックについては、製鉄プロセスにおけるケミカルリサイクルや、セメント生産や製紙プロセスにおけるエネルギー回収が、マテリアルリサイクルよりもCO₂排出の削減効果が大きい場合もある[73]。高分子重合体であるプラスチックは、同じ素材を永久には循環できないことも考慮すれば、あらゆるプラスチックに欧州サーキュラーエコノミーの原理を硬直的に当てはめることが、必ずしも脱炭素化にとって最善とは限らないことに注意が必要である。

以上より、日本におけるカーボンニュートラルの実現に貢献するプラスチック資源循環として、特に、(1)適材適所の循環利用、(2)動脈産業の脱炭素化との調和、(3)混合プラスチックの循環利用の高度化、といった観点が重要である。あらゆる廃プラスチックが単一種類のポリマーとして回収・選別できるといった楽観的な想定ではなく、より現実的かつ社会全体を俯瞰した広い視野でプラスチック資源循環の役割を検討するべきである。

(2) 鉄

日本では1970年頃より約1億トンの粗鋼生産量が維持されつつ、より高度な特性が追求され、不純物・介在物の除去や組織制御を通してめざましい品質改善が図られてきた[25]。高性能化のためにプロセスの追加が必要になり、多少カーボンフットプリントでは不利になっているが、使用される製品の長寿命化に大きな貢献をしていることを考慮すべきである。その約3割を占める電気炉鋼においても清浄な鋼の製造技術は進歩しているものの主たる原料である鉄スクラップの品質、特に鉄に混入すると通常の精錬技術では除去できない不純物元素（トランプエレメント）の蓄積が深刻である。それらの上限濃度はJIS規格で定められていないものの、トランプエレメントの代表である銅の建設用電気炉棒鋼中の平均濃度は、実質的上限と想定される0.4重量%に近づきつつある。一方、転炉鋼においても鉄スクラップは鉄源の1～2割を占めており、鉄の循環利用促進という観点では同トランプエレメントの濃化抑制は重要な課題である。

ガス成分や硫黄以外の鉄中不純物の多くは、酸素ガスの吹錬や酸化鉄の添加により精錬スラグ中に酸化除去されるが、鉄よりも酸化されにくい元素は同原理により除去することはできない。硫黄との親和力が鉄よりも大きい銅につい

ては、硫化反応によりスラグ中に除去する研究や試験も実施が重ねられ、原理的・技術的な脱銅精錬の可能性は実証されているものの、増大する脱硫プロセスの負荷により経済合理性が伴わず、実機化には至っていない。また、赤熱脆性^⑱など鋼中の銅がもたらす影響を抑制する元素を添加する研究も進められてきたが、鉄の循環利用という観点からハイエントロピー化^⑲は促進すべき方向性ではないと考えられる。

現時点では製品寿命を終え、鉄スクラップとして回収される段階で他金属の混入抑制を徹底することが肝要である。シュレッダー・ギロチンのメッシュ細小化、自動車解体の工程管理による品質担保などにより、投入スクラップ中のトランプエレメント含有量を下げる手法はあるが、コストに見合う価格のプレミアムの提供が困難なため、一般的技術としては浸透していない。

また、鉄スクラップとして循環利用される鉄鋼材料の鋼種によって、必要成分元素として添加される場合など、鋼材中のトランプエレメント含有量もさまざまであり、特にスクラップによる高級鋼製造ニーズが本格化すれば、高級鋼に適した品質のスクラップが市場に供給される必要性が高まる。これは、市場における鉄スクラップの取り扱いを大きく変えるパラダイムシフトであり、鉄スクラップ母材の品質管理によるトランプエレメントの濃化抑制が極めて重要な視点となりつつある。その実現には、主原料となる鉄スクラップの簡易な評価分別技術の革新が求められている。鉄スクラップの想定銅含有量の異なる鋼種（棒鋼、形鋼など）ごとの質量を、計量することなく画像解析から同定し、投入鉄スクラップの平均銅含有量をその場で推定するための基礎的な研究が進められている。例えば、画像から得られる情報は、鉄スクラップの空隙も含めた体積であるため、嵩密度の推定により鉄スクラップの質量に換算する必要がある。

以上のように、資源循環の観点から鉄スクラップ利用の促進は、鉄鉱石を主原料とする転炉鋼製造に伴うCO₂の排出抑制をもたらし、水素利用技術の開発、非化石燃料の利用促進とともにカーボンニュートラル実現のための重要な指針の一つである。

(3) アルミニウム

アルミニウムは、他金属に比べて密度や融点が低いため軽くて加工しやすく、また各種の添加剤を加えて合金化することによってその強度を増すなどの様々な特性を得ることができ、工業用・家庭用として広く使用されている。

アルミニウム合金は大きく分類すると、容器やサッシなどに使用される圧延加工された高品質の展伸材、及び、ガソリン自動車エンジンなどに使用される熔融したアルミニウム合金を鋳型に流し込んだ多種の合金元素を含む比較的質の低い鋳造材の2種類があり、その各分類中にも数多くのアルミ合金種が存在する。現状のアルミニウムのリサイクル率は各種データから推定すると70～80%程度だが、そのリサイクルの多くは、多種の使用済み展伸材スクラップが混合され

た状態で鑄造材として利用するカスケードリサイクルである[26]。将来的に展伸材の需要は漸増傾向、鑄造材の主たる利用先であるガソリン自動車エンジンの需要は減少傾向と予想され、現状のカスケードリサイクルの持続性には大いなる懸念があり、アルミニウム資源の水平リサイクルが求められている[26]。

日本ではアルミニウム新地金（展伸材）供給はすべて輸入に頼っており、使用後は各種のアルミニウム合金（展伸材）が混合された状態で熔解され鑄造材となる。この混合アルミニウム合金類を元の種類別に相互分離することができれば、「展伸材 to 展伸材」の水平リサイクルを実現することができる。しかし、各種アルミニウム合金類の特性は互いに類似しており、従来の物理選別技術ではそれらを分離することが困難である。

近年、各種の非接触固体センサーを用いたセンサー選別技術の進展が目覚ましく、例えば、密度や化学組成を精緻に検知する、XRT（透過 X 線）・XRF（蛍光 X 線）・LIBS（レーザー誘起ブレークダウン分光）などのシステムを搭載したセンサー選別機がこのアルミニウム合金類相互分離の目的で開発されており[74-76]、特に LIBS 選別を用いれば、展伸材と鑄造材の分離のみならず、各種の展伸材類の相互分離も可能であり、アルミニウム資源の水平リサイクルを実現する可能性が高まってきた。

アルミニウム合金類の成分分離は、熔解した状態では（特に重金属類については）困難であり、こうした先進的な固相状態でのセンサー選別技術の開発が必要である。一般的に、アルミニウムのリサイクルに要するエネルギーは、ボーキサイトからのアルミニウム製造のそれに比べて約 3 % [77]といわれており、こうした高度センサー選別技術の開発による水平リサイクルプロセス開発による省エネルギー効果は、新地金生産量の削減効果を含めて考えると絶大である。2010 年時点での試算では、このような水平リサイクルプロセスが日本のアルミニウム製造プロセスに 20・50・70%適用された際の省エネルギー効果は、原油換算でそれぞれ 14 万、47 万、163 万 kL/y とされており[27]、サーキュラーエコノミーがカーボンニュートラルに大きく貢献する事例としても注目される。

(4) 銅

2021年の銅鉱石の世界生産量は銅純分ベースで21.2百万トンであり、国別ではチリが最も多く5.6百万トンである。製・精錬された銅地金の世界生産量は24.8百万トンであり、国別では中国が最も多く世界全体の生産量の42%を占めている。銅地金の消費も中国が最も多く、2021年の消費量は13.9百万トンである。銅地金は硫化銅精鉱のマット溶錬工程⑳を経た電解精製、ならびに低品位酸化銅鉱を主な対象とするSX-EW法㉑での電解採取により電気銅（純度99.99%以上）として生産される。2021年の銅地金の世界生産量のうち、スクラップなどの二次原料由来の銅地金の生産量は4.1百万トンと集計されている[78]。

国内の状況を見ると、2020年に国内に輸入された銅精鉱は1,342千トン、電解

精製により生産された電気銅生産量は1,583千トンである。電気銅生産量のうち、スクラップ由来の生産量は192千トンとなっている[28]。

二次原料の中でも故銅と呼ばれる銅線などの比較的純度が高く嵩張るものは、銅製錬工程の転炉で処理されて再生されるが、昨今、世界的に処理量が増している二次原料としてE-scrapが挙げられる。代表的なE-scrapであるプリント基板は銅箔とともに集積回路などに金が多く使用されておることから、銅原料というよりは貴金属原料として重要視されている。国内では、年間16万トンから20万トンのE-scrapが銅精鉱とともに銅製錬原料として仕様されている[29, 30]。また、E-scrapや製錬残渣などの二次原料のみで銅製錬を行っている例もある[31]。

基本的に国内でのE-scrapの処理は、破碎とサンプリング分析を経た後、自溶炉－転炉法の製錬所では、前処理として焼却処理により樹脂成分が除去されて、基本的に転炉に焼却灰が装入されて銅や貴金属が回収される[32]。バススメルティング②方式で攪拌力の高いS炉と呼ばれる炉では、塊状のスクラップも銅精鉱とともに処理が可能となるように工夫されている[79]。また、溶体に浸漬ランス③を通して化石燃料を燃やした火炎を吹き込む形式のTSL (Top Submerged Lance) 炉と呼ばれる炉では、攪拌力が強く塊状の二次原料を直接挿入することが可能である[80, 81]。欧州でもTSL炉は利用されており、ブラックカッパー（高不純物粗銅）を生成した後のプロセスは、貴金属濃度が高い場合には酸浸出・電解採取[80, 82]、低い場合には酸化精製・電解精製[83]によって電気銅が生産される。

このように塊状のE-scrapを直接処理する場合は、S炉やTSL炉などの攪拌が強いバススメルティング形式の溶錬炉が有効であり、カナダではNoranda炉を使用してE-scrapなどの二次原料を年間約110千トン処理しているという報告がある[84, 85]。また中国ではNoranda炉と同様の形式の底吹炉が開発され、その利用を広がっていることから[86]、今後さらに二次原料の直接装入量の増大が予想される。また、スウェーデンでは、TBRC (Top Blown Rotary Converter) 炉の一種であるKaldo炉[87]を導入してE-scrapの処理しており、その処理能力は年間約120千トンと報告されている[88, 89]。アメリカでもTBRC炉を用いてE-scrapなどの二次原料の直接溶錬され、副産物からは貴金属やマイナーメタル④の回収などを行う計画が発表されている[90, 91]。

(5) 亜鉛

2021年の亜鉛の鉱石生産量は12,797千トン、金属生産量は13,853千トン、使用量は14,948千トンである[33]。その用途は約60%が鉄鋼材料の防食用メッキであるため、リサイクルは鉄鋼材料と一緒に行われることが多い。メッキに使用した亜鉛も徐々に汚染されてくるので、メッキ浴に使用された亜鉛のリサイクルも行われる。以下に、どぶ付けメッキ（熔融亜鉛メッキ）に使用された亜鉛のリサイクル技術と鉄のリサイクル時に発生する粗酸化亜鉛のリサイクル法

について簡単にまとめる。

① 亜鉛メッキ浴のリサイクル

亜鉛メッキ浴は使用すると必ず鉄の汚染が起こり、Fe-Zn系ドロスが発生する。これらのドロスは固形物であるから浴と分離し、Alとの置換反応でZnを回収する。反応後に含まれる過剰のAlを含む亜鉛メッキ浴はカスケード利用されるか一部はフラックスによる脱Alで再利用される。なお、ハンドリング中に発生するZnO主体のドロスは、後述の製鋼ダスト処理で粗ZnOとし、その後ISFもしくは亜鉛電解採取原料となり、回収される[92]。

② 電気炉ダストのリサイクル

亜鉛のリサイクルの中心は、亜鉛メッキ鋼板を電炉でリサイクル際に発生する電気炉ダストの処理によって粗ZnOを作り、それを乾式製錬法であるISFもしくは湿式製錬法である亜鉛電解採取の原料として、リサイクルされている。ダストからの粗ZnOの精製法は多くのプロセスがあり、日本でも異なった5つのプロセスが実用化されている。最も多いのはウェルツキルン法で、粗ZnOとコークス、フラックスを添加し、ZnOを還元揮発させ、再度酸化しながら回収し、高濃度のZnOを得るプロセスである[34]。亜鉛濃縮のために高温での炭素還元を行うために現在のようにカーボンニュートラルを目指していく社会では課題が多い。そのために湿式で処理する方法も種々検討されており、一部実用化されている。電炉ダストをリサイクルすれば残渣は鉄もしくは酸化鉄となる場合が多く、その利用も含め、鉄の循環と同時に考える必要があると考えられる。

(6) 鉛

2021年の鉛の鉱石生産量は4,563千トン、金属生産量は12,382千トン、使用料は12,346千トンである[35]。鉛はベースメタルの中でも珍しく鉱石から製造されるよりもリサイクルされている量の方が多い金属である。約6割弱がリサイクルでカバーされている。

使用先は車載用のバッテリーが主体で、その他に化成品がある。15年以上前には半田合金としての使用が問題となっていたが、現在は特殊な半田以外は錫系に替わっている。以前は、ブラウン管の電子銃の部分を覆うガラスに高濃度鉛ガラスが使用されていたため、ブラウン管のリサイクルはその鉛ガラスの処理が重要であった。現在はブラウン管そのものの使用がほとんどないために、鉛ガラスのリサイクルの問題も顕在化しなくなった。

鉛はんだやブラウン管の処理が必要な時代には、前処理後、もしくは直接、鉛製錬の原料として非鉄製錬所で回収されていた。製錬所内に設置されている溶錬炉の原料の一部として投入できれば粗鉛が得られるので、その後、電解精製されて高純度鉛が回収される。この回収法は、現在でも低レベルの鉛含有廃棄物の処理法として有効である。

鉛蓄電池は再生使用が可能であるが、永久に再生使用が可能なのではなく、いずれ蓄電池としての働きが低下する。車載用蓄電池は使用条件が厳しいので、車載用蓄電池として再利用できなくても、別用途のリユースも存在する。したがって、車載用鉛蓄電池は、フォークリフトや定置用として再利用されることがある。その場合、重要となるのは、残存価値を速やかに正確に把握する診断技術である。

最終的にはリサイクルすることになるが、この場合も大型の非鉄製錬設備で粗鉛を製造し、電解で精製する場合と、乾式製錬で車載用蓄電池として使用できる程度に精製する技術が存在する。乾式製錬の場合は、粗鉛の不純物の程度次第では、硫黄を利用して銅を除去する溶離法や、NaOH 系フラックスを利用するハリス法などが存在する。詳細は大石の解説[93]が参考になる。

最後に鉛の循環使用について注意すべき点を示しておく。鉛はその中毒性を指摘され使用禁止の方向に進んでいる。しかし注意して使用すれば大変使い勝手のいい金属である。車載用鉛蓄電池の回収率は非常に高く、そのために使用しても環境汚染が広がることは少ない。さらに鉛製錬プロセスは、他の貴金属やクリティカルメタルの回収にも大きく貢献している[36]。したがって、鉛の循環を維持しながら、その技術を有効に利用することが重要である。

(7) クリティカルメタル

クリティカルメタルとは、(1)材料や素材としてなくてはならない必須金属、(2)需要の伸びが大きくて供給不安がある金属、(3)価格が高騰しても代替材料がない金属の総称である[37]。いい換えれば、供給リスクが高く、また産業における重要性が高い金属の総称である。希少金属の総称として一般的に使われるレアメタル[38]の多くも、供給リスクと産業における重要性が高いため、クリティカルメタルと同義に使われることが多い。しかし、クリティカルメタルには、レアメタル以外にも一部のベースメタルも含まれる。例えば、亜鉛は、レアメタルには含まれないが、資源問題や環境問題などを考慮したクリティカルメタルに分類される。このように、銅や亜鉛などのようなベースメタルでも、その供給リスクが高い場合は、クリティカルメタルとみなされる。

我が国ではレアメタルと表現されることが多いが、米国、EU においてはクリティカルメタル、ミネラルと称し、各国や地域の産業構造によって指定し、それぞれの事情に応じた安定供給について種々の方策を取っている。特に EU は、サーキュラーエコノミーの提案とリンクして、循環使用の重要性を打ち出している。

クリティカルメタルの大部分を占めるレアメタルは、多種多様な金属の総称であるため、一概に説明することはできない。資源的に希少な金属は、レアメタルに分類され、白金、パラジウム、ロジウムなどの貴金属もその代表例である。これらの元素は、自動車の排ガスを浄化する触媒として利用され、自動車産業に

としては不可欠なレアメタルである。資源的には豊富に存在するにもかかわらず、鉱石から金属を抽出するのが困難な金属もレアメタルに分類される。希土類金属、リチウム、チタンなどがその代表例である。ネオジムやジスプロシウムなどの希土類金属は、高性能モータの製造に必要な超高性能永久磁石の主原料である。また、リチウムはリチウムイオン電池の製造に欠かせない。さらにチタンは航空機産業の需要が大きい。

クリティカルメタルの多くは、生産量が小さいため、一部の国や特定の地域から全世界に供給されている場合が多い。このため、社会情勢が変化すると供給に障害が生じることがあり、供給リスクが高い場合が多い。

その代表的な事例が 2010 年に起きた「レアアースショック」である[94]。尖閣諸島の領有問題に端を発した政治問題が日中間で起こり、中国が突如希土類金属（レアアース）の輸出を停止した。この結果、日本のハイテク産業は、一時的にパニックとなり、深刻な産業問題としてクローズアップされ、広く一般にも社会問題、産業リスクとして認識された。中国からの希土類金属の供給が止まれば、高性能磁石を使用する高性能モータを製造できなくなるため、日本の多くのハイテク産業が深刻な打撃をうける。近年は、レアアースショックのようなリスレアアースショック希土類金属のサプライチェーンを見直し、中国以外の供給ルートを確保しようとする努力がなされている。しかし、希土類金属に関しては、依然として、中国が供給の大半を担っているのが実情である。最近の事例としては、ウクライナ危機によって、パラジウムとチタンの供給障害のリスクが顕在化した。パラジウムについては、次項(8)貴金属の項目で説明する。

現在、レアメタルの中では最も生産量が大きいチタンは、世界で約 20 万トン程度生産されている。チタン合金は金属材料の中で、比強度（単位重量あたりの強度）が最も大きく、また、チタンは抜群の耐食性を有するため、その多くが、航空機産業や化学プラント産業などのハイテク分野で消費されている先端材料である。一般には意外と知られていないが、日本は今もチタンの生産大国であり、世界の約 20%の生産シェア（第 2 位）を有している。最大生産国は、中国（世界シェア約 55%）であり、他は、ロシア（同 15%、3 位）、カザフスタン（同 5%、4 位）となっている。

ウクライナ危機に端を発したロシアからの輸入制限、さらには、台湾有事を想定する中国からの供給途絶を考えると、現状では、西側諸国でチタンを供給できるのは、日本のみとなる。このため、近年の世界情勢の変化によって、チタンは、クリティカルメタルの代表格としてクローズアップされることが多くなった。今後、仮に東西分断が進むと、レアメタルのサプライチェーンが大きく変化する可能性があり、チタンについては、西側諸国で唯一の供給国である日本が果たす役割は大きくなる可能性が高い。

需要増加や価格高騰、資源ナショナリズム、戦争などの変動要因によって、ク

リティカルメタルに該当する金属は変化する。また、クリティカルメタルは日本のハイテク産業に不可欠な金属元素であるだけでなく、豊かな生活を支える上で全世界に必要な金属材料であり、その需要は今後も増大する。

日本は、資源確保や安定供給のために、資源外交や十分な量の備蓄を進めるべきである。また、クリティカルメタルを代替する新しい材料の開発だけでなく、効率的な回収・リサイクル技術の開発なども推進して、クリティカルメタルの多角的な資源戦略を進める必要がある。

カーボンニュートラルの実現に必要な元素として、リチウムイオン電池に使用されるリチウム、ニッケル、コバルトや、高効率モータで使用される希土類元素、特に高温使用下での性能保持力維持に効果的なジスプロシウム、テルビウムの重要性が世界共通に認識されている。そのほかレアメタルではないが、再生可能エネルギーは電気で供給されることが多いので、電気の良導体である銅についても注目されている。

ただ、国や地域によってその各元素に対する戦略は多様である。我が国においては経済安全保障法案が作られ、その法案の下、元素に応じた対応がとられつつある。例えば希土類磁石の供給については、そのための原材料安定供給について検討されつつある。

(8) 貴金属

貴金属とは、金属のうち化合物をつくりにくく、希少性のある金属の総称である[39]。元素としては、金、銀と白金族元素を指す。白金族元素は、白金、パラジウム、ロジウム、イリジウム、ルテニウム、オスミウムの6元素の総称である。

貴金属のうち、金、銀、白金は、宝飾品の主材料として利用されることが多い。化学的安定性が高く、さらには、元素固有の触媒活性を示すため、白金、パラジウム、ロジウムなどは、自動車排ガス浄化触媒には不可欠である。また、貴金属は高い耐腐食性を有するため、各種電子機器の電極材料としても利用される。

金の生産量が4,000トン／年・世界、銀の生産量が27,000トン／年・世界であるのに対し、白金やパラジウムの生産量は、それぞれ200トン前後である。[40、41]ロジウムやイリジウムは、白金やパラジウムの副産物として生産されるため、それぞれ20トン／年・世界、5トン／年・世界前後しか生産できない。これらの副産物の貴金属は、仮に需要が増えても、増産ができないのも特徴の一つである[42]。

パラジウムは、ロシアと南アフリカがそれぞれ世界生産の約40%を占めている[43]。ウクライナへのロシアの侵攻によって、ロシアからのパラジウムの供給が途絶する可能性が生じたため、2022年は、パラジウム価格が暴騰し、10,000円/gを超え、史上最高値を更新した。

白金族金属は、南アフリカとロシアが生産量の大半を占めているため、供給リスクが大きな金属の代表格である。また、特殊な鉱山から産出されるため、現時点

ではサプライチェーンを変更するのが現実的に困難である。したがって、今後は、白金族金属の代替材料の開発、使用量の削減技術の開発、効率の良いリサイクル技術の開発が不可欠である。

(9) ガラス

現在の日本のガラスの年間生産量は約 300 万トン程度である[44]。ガラスは、生産統計の単位が換算箱や面積の重量以外の単位があることと、その用途の多様さから最終用途が明確でないものがあることから、その需給を正確に把握することが困難である。また、資源循環を考えると、ガラスの化学組成は重要であり、それら需給の中でソーダ石灰が主要なガラス製品であるものの、アルミノケイ酸塩、ホウケイ酸塩、シリカ（石英）などがある。用途に応じて必要な特性が異なるため、排出源となる廃製品別に選別すれば多くの場合、異なる種類のガラスは区別して回収できるものの、例えば太陽光パネル用カバーガラスでは、同じ用途であっても異なる種類のガラスが用いられている。

ガラスは、廃製品や解体現場から回収される際には、カレットとして流通する。例外としてリターナブルびんがあり、今後発生量の増加が課題と考えられている使用済み太陽光パネルからも、回収したカバーガラスのリユースが検討されている。カレットとなったガラスは、洗浄や選別を経るものの、混入する異物を完全に除去されていない。これは、天然資源からガラスを生産する際の原料コスト以上に、カレットの処理にコストをかけられないことが要因であると考えられる。このリサイクルコストの課題に加え、ガラスは 2 つの材料特性の面で、リサイクルを困難にしていると考えられる。1 つは、その主要な特性である光透過性である。異物の混入により、着色したり、光の屈折の違いにより像が歪んだりして、異物が主要な特性の劣化に直結することになる。特に、ガラスを通した像の歪みが安全に関わる用途では、異物の混入は避けられる。もう 1 つは、脆性である。一定以上の大きさで結晶相として残るなど粒状欠点を形成すると破壊靱性を大きく低下させることとなる。場合によっては、熱膨張率の違いから冷却時に割れてしまうこともある。

ガラスの資源循環においては、異物の混入などに対して溶解後にできないことがないため、溶解前に異なる種類のガラスを含む異物の混入を避けることが望まれる。ただし、先述のように混入物を除去する場合には、かけられるコストには限界があるため、安価な異物除去技術の開発が望まれる。また、発生源から回収する際に、そのガラスの種類や化学組成の情報を保ったまま、異物を混入させることなくガラスカレットとして回収し、流通する仕組みの整備が重要である。

(10) 土木・建築素材

土木・建築に用いられる素材は、物質フローの大きな割合を占める。社会の成熟化に伴って、新規のインフラ建設は低下傾向にあり、建設用鉱物の投入量は

1990年代から2000年頃にかけては、日本の物質フロー総量の約半分、年間10億トンあるいはそれを上回っていたのに対し、2020年では5億トン弱と半減以下の水準まで減少している。重量としての割合が大きいのはコンクリート原料としてセメントと混合される骨材（岩石）や砂であり、これら自身の生産段階でのCO₂排出への寄与は小さいが、これらの量が低下していることは、生産時に化石燃料由来だけでなく原料由来のCO₂の排出を伴うセメントや鉄鋼の使用量も低下していることを意味し、需要変化が、CO₂排出量を下げる方向に働いている。

セメント生産時には、原料である石灰石を熱分解することで必然的にCO₂が発生する。これに石炭など焼成燃料起源の排出を加えると、日本のCO₂排出量の約4%を占める[45]。なお、焼成時にセメント1トンあたり500kg程度の多様な廃棄物を副原料、副燃料として利用していることは、資源循環の好事例であるが、需要減とともにセメント生産量が低下する中で、廃棄物の原燃料としての利用量をさらに増やすことは厳しい[45]。

建設廃棄物のリサイクル率は1990年代には60%程度であったが、最近では約97%に達している。これは最終処分場の逼迫の中で、埋立量の低減が求められてきたことによるところが大きい。用途は路盤材や骨材であり、生産段階でのCO₂排出が大きいセメントを直接に代替することは困難であった。廃コンクリートからカルシウム分を分離し、セメント焼成、特に予熱段階の熱分解で発生するCO₂を回収して、人工原料を生産し、これで石灰石を代替するカーボンリサイクルの技術開発が進められている。CO₂を回収して利用するCCUでは、多くの場合、炭化水素とするための反応相手となる水素が必要であるが、セメント生産ではこれを要しない。一方、水、セメント、骨材による一般的なコンクリートの生産法ではなく、これに石灰石と特殊混和材を加え、CO₂を吸収させて炭酸化させながらコンクリートとする技術も実用化されている。大気中のCO₂は、炭酸化・中性化はコンクリートを劣化させるが、この技術では生産段階で積極的に炭素化を進めつつ、コンクリートの物性を確保するものである。

鉄の生産プロセスにおけるカーボンニュートラルは別途(2)で詳述されているが、一般論として、土木・建築用途の鉄鋼材料は、高品質が求められる自動車用薄板などに比べて、多様な鉄源の利用が可能であり、電力のカーボンニュートラル化が進めば電炉鋼生産に伴うCO₂排出の低下が見込めることも含め、鉄スクラップの利用機会が広がる。

このほか、土木・建築素材としては、「土木」という語自身にも含まれる木材は、再生可能資源としてその利用拡大に期待がかかる。CO₂排出量の計算では、バイオマス由来の炭素は、木材の成長段階での吸収と相殺されるので、「カーボンニュートラル」とみなす考え方がとられる場合が多いが、これは、伐採された木材中の炭素は、やがてはCO₂となって大気中に戻るという考え方に基づく。しかし、伐採した木材を、バイオマス燃料として燃焼させれば大気中にCO₂が排出されることは化石燃料の燃焼と変わりなく、温室効果として寄与する。これに対

して、伐採された木材を、土木・建築素材として、長期間にわたって利用すれば、炭素は構造物中に固定され、長期にわたって腐朽したり、寿命を終えた後に燃焼用途に利用されるとしても、使用期間中、炭素は固定される。したがって、「サーキュラー」「循環」という語に拘泥して短期間で循環させるのではなく、長期間使用して炭素を固定することで、炭素排出を抑制する効果も考慮すべきである。

建設、特に建築分野からの廃棄物のうち、建設混合廃棄物は、施工現場での細かな分別・選別が十分になされずに「混合」して廃棄されるが、施工の遅れを避けるため、余裕をもった量の資材を調達する結果、未使用の資材が廃棄される状況もみられ、その再利用に着目したビジネスも始まりつつある。土木・建設分野の素材は、素材自身の価格が低い割に輸送費が嵩むことや、輸送に伴うエネルギー消費も勘案する必要がある、地理的な需給のマッチングも考慮すべき課題である。

(11) バイオ素材

炭酸固定(光合成を含む)はCO₂を有機物に変換できるバイオプロセスである。バイオマスは再生可能資源として、枯渇資源である石油原料の代替を期待されており、CO₂排出削減政策の面からもバイオマス利用が推進されている。ここでは、バイオ素材を「バイオマスを原料とする素材」と定義し、化学合成法と生物合成法とに分類し、炭素循環についても記述する。

化学的合成法では、バイオナフサ、セルロース、ヘミセルロース、リグニン、レブリン酸などが生成される。セルロースやヘミセルロースを酵素によって糖化しC6糖・C5糖を得て、さらに触媒プロセスや発酵プロセスを使用し、アルコールや有機酸類に変換される。酵素や発酵については、次の生物合成法に記述する。企業別の化学製品生産量など詳細は、NEDO TSC Foresight[95]が参考になる。

発酵は微生物の呼吸プロセスであり代謝変換産物が得られる。このバイオプロセスを利用して、光合成産物を二次的変換でアルコール、有機酸、アミノ酸を製造することが可能となる。生物合成法が化学合成法より優位なのがコハク酸発酵及びアクリルアミド生産である[46]。コハク酸発酵は280円/kgの製造コストであり、化学合成法の309円/kgより安価であること、また、CO₂吸収反応である点でも優位である。アクリルアミドはニトリルヒドラターゼ利用により工程の簡便化に成功し、CO₂排出量も削減できた。2015年の生産量(98万トン)のうち70%が生物合成法であった。

発酵微生物は、出発原料は糖以外、すなわち有機物でも発酵生産が可能である。メタン発酵菌叢を例にとると、菌叢は加水分解菌・有機酸生成菌・水素生成菌・メタン生成菌の混合菌叢であり、複合有機物、つまり、食品廃棄物や農業廃棄物、生ゴミを原料に酢酸・水素・メタンを合成する。さらに、近年、カーボン

リダクション・カーボンリサイクルの観点から、CO₂直接変換の発酵技術が開発されている[47]。それが合成ガス発酵であり、炭酸固定細菌を使用する。H₂、CO、CO₂を主成分とする合成ガスを原料として、例えば嫌気性酢酸生産菌はCO₂を酢酸にする。合成ガスはバイオマスや高分子ポリマー（プラスチック）をガス化することでも得られる。以上のように、全ての炭素源がバイオプロセスで、化学物質に変換できるようになった。

発酵で製造できる化学物質もまた、近年の代謝工学研究や遺伝子組換え技術で多様になっている。C3 化合物（プロパノール、アセトン、プロピオン酸、乳酸）、C4 化合物（ブタノール、ブタンジオール、3-ヒドロキシ酪酸、コハク酸）、C5 化合物（3-ヒドロキシ吉草酸）、C6 化合物（3-ヒドロキシヘキサン酸）は、バイオプラスチック原料でもある。米国エネルギー省が定めた12のバイオリファイナリーの基幹物質（C4 ジカルボン酸、フランジカルボン酸、3-ヒドロキシプロピオン酸、アスパラギン酸、グルカル酸、グルタミン酸、イタコン酸、レブリン酸、3-ヒドロキシ-γ-ブチロラクトン、グリセロール、ソルビトール、キシリトール）は、ほぼ全てのバイオ素材合成を可能とする[48]。

＜付録における用語の説明＞

⑱赤熱脆性

1000℃付近の高温で鋼の粒界に、Feより酸化しにくいCuやSnなどのトランブエレメントやSなどの不純物が偏析し脆くなり、亀裂などを生じる現象をいう。

⑲ハリエントロピー化

純粋な物質に、他の成分を添加していくと、また成分数を増やすとエントロピーは増大する。精錬の基本である高純度化とは逆に、成分元素を添加することを混合のエントロピーの観点から表現したもの。

⑳マット溶錬工程

硫化鉱を熔融処理して目的の金属成分をマット（熔融硫化物）中に濃縮、同時に鉄などの不純物成分をスラグとして酸化分離する製錬工程。

㉑SX-EW法

酸化銅鉱などの銅鉱石の硫酸浸出液から溶媒抽出（SX）により不純物を除去ならびに銅を濃縮し、得られた硫酸銅溶液から電解採取（EW）により電気銅を得る方法。

㉒バスメルティング

銅溶錬法の一つであり、強制攪拌状態のマット浴中で鉱石などの原料の溶融ならびに酸化反応が進行する方法。

②③浸漬ランス

TSL (Top Submerged Lance) 炉で使用する燃料や酸素を溶体に直接吹き込むための金属パイプ。

②④マイナーメタル

銅、鉛、亜鉛などのベースメタル以外の金属の総称（「(4)銅」では、原料中に付随するベースメタル以外の回収対象の金属を意味）。