

報 告

サーキュラーエコノミーにおける
資源循環を機能させるための学術課題



令和8年（2026年）6月19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
サーキュラーエコノミーのための資源・材料の循環利用
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サーキュラーエコノミーのための資源・材料の循環利用検討分科会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
サーキュラーエコノミーのための資源・材料の循環利用検討分科会

委員長	笹木 圭子	(第三部会員)	早稲田大学理工学術院教授、九州大学名誉教授
副委員長	森田 一樹	(第三部会員)	日本製鉄株式会社顧問、東京大学名誉教授、大阪大学大学院工学研究科特任教授
幹事	岡部 徹	(連携会員)	東京大学執行役・副学長、同生産技術研究所教授
幹事	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
	大塚 直	(第一部会員)	早稲田大学法学学術院教授
	馬奈木俊介	(第一部会員)	九州大学大学院工学研究院教授
	森口 祐一	(第三部会員)	国立環境研究所名誉研究員、東京大学名誉教授
	安達 毅	(連携会員)	秋田大学大学院国際資源学研究科教授
	井上 純哉	(連携会員)	東京大学生産技術研究所教授
	岡本 秀征	(連携会員)	住友金属鉱山株式会社執行役員技術本部長
	沖部奈緒子	(連携会員)	九州大学大学院工学研究院教授
	齋藤 公児	(連携会員)	日鉄テクノロジー(株)テクニカルアドバイザー
	柴田 悦郎	(連携会員)	東北大学多元物質科学研究所教授
	瀬川 浩代	(連携会員)	国立研究開発法人物質・材料研究機構電子・光機能材料研究センター副センター長
	所 千晴	(連携会員)	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
	中村 崇	(連携会員)	東北大学名誉教授
	野口 貴文	(連携会員)	東京大学大学院工学系研究科教授
	林 幸	(連携会員)	東京科学大学物質理工学院教授
	平尾 雅彦	(連携会員)	東京大学名誉教授
	松岡 由貴	(連携会員)	奈良女子大学大学院自然科学系准教授
	醍醐 市朗	(連携会員(特任))	東京大学先端科学技術研究センター教授

本報告の作成にあたり、以下の方々にご協力いただいた。

鈴木 朋子	日本学術会議第三部会員、株式会社日立製作所専門理事／研究開発グループ技師長
梅田 靖	日本学術会議連携会員、東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻教授
高田 昌樹	元日本学術会議連携会員、東北大学多元物質科学研究所国際放射光イノベーション・スマート研究センター教授
江島 広貴	東京大学大学院工学系研究科教授

岡部 朋永 東北大学大学院工学研究科教授
清水孝太郎 三菱UFJリサーチ&コンサルティング株式会社政策研究事業本部経済・産業ユニット長/循環経済協会理事
出口 祥啓 徳島大学大学院社会産業理工研究部教授

本報告の作成にあたり、以下の職員が事務及び調査を担当した。

事務	新田 浩史	参事官（審議第二担当）
	角田美知子	参事官（審議第二担当）付参事官補佐
	重長 聡	参事官（審議第二担当）付審議専門職付
調査	辻 政俊	上席学術調査員

要 旨

1 作成の背景

「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(第25期)」は、2023年9月に、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(CE)対策」をまとめ、発出した。この報告は、当時のCEを取り巻く社会的背景、素材ごとの循環技術、社会システムとしての資源循環の課題をまとめ、非資源国であるわが国独自の資源自給施策のための指針、学術政策、さらに関係省庁、大学をはじめとする研究教育機関等における具体的施策や予算措置、大学などの総合知を基盤とした高等教育に活かされることを期待したものである。その後、ロシアによるウクライナ侵攻の長期化、米国トランプ大統領主導による関税政策の転換(トランプ関税)、中国によるレアアースの供給支配など、国際社会情勢や国際経済に極めて高い不確実性を与えるイベントが続き、資源循環が位置づけられる理想形としての循環経済が国際社会の中で揺らぎを呈している。一方、資源循環はモノの移動距離を最小限にして輸送コストを抑えた地域性の強いビジネスや社会活動になりやすく、異なる技術力や生活習慣・文化を持ちながらも、EU、アジアなどのモノが流通しやすい範囲での仕組みづくりの議論も進んでいる。これらを背景として、このたび「材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同サーキュラーエコノミーのための資源・材料の循環利用検討分科会(第26期)」は、使用済み製品の物流を支える社会システム、モノの価値の標準化、再生技術の向上、再生を見込んだ製品デザインなど、循環経済の軌道から外れないために必要となる学術課題のうち重要なものを抽出してまとめた。

循環利用の対象となりやすい金属材料の分野においては、資源を素材とし材料から製品化するプロセスをあずかる理工学だけでは、非資源国の資源枯渇に由来する社会課題に対して、解を打ち出していくことは困難である。経済学、法学、社会学、環境学の視点から、それぞれの専門分野の研究者が周辺分野の研究者の見方を相互理解し、社会課題に向き合うことによって、新たな課題の発見、アプローチの仕方を見出す潮流を日本学術会議こそが生み出すべきである。したがって、本分科会は、材料工学委員会を主管としながら、総合工学委員会及び環境学委員会との合同で組織され、構成員は日本学術会議の第三部(理工系)及び第一部(人文社会系)の会員・連携会員から成り、本報告の執筆にはこれにとどまらず、非会員の中からも深く関係する専門家を加えてこれにあたった。

2 現状及び問題点

CEを実現するためには、個々の技術開発と実施主体である国や地域、産業界あるいは産業連関の仕組みづくりのいずれもが必要である。モノの流通に関わる産官学民の共通認識も重要であり、モノの循環が国境を越えるルートで顕在化する中、再生における質保証の問題も起きている。さらにこれらを担う専門家の人材育成の仕方については、多岐の学術分野にわたるため、高等教育機関では専門に担当する分野の特定に困難を極めてい

る。金属材料の代表である鉄鋼についていえば、日本の鉄鋼産業はカーボンニュートラル社会の実現に向けての基本方針に立脚し、水素還元製鉄という超革新的技術開発に直面している。これだけをとっても、明日の製鉄事業は、環境、経済、社会と密接につながりを持って、総合的視野から捉えられ、基盤的材料として大量製造から廃棄までのビジョンを描くことが求められている。限りある資源を循環利用していくための裏付けとなるさまざまな学術領域は今以上に相互に関わりあうようになる。特に、スクラップ鉄の再生に起こりうる不純物の濃縮は、鉄の再生段階で顕在化する科学技術的に大きな問題といえる。

3 報告の内容

CE が持続的なものとして社会に根付くためには、生態系を含む地球環境レベルから、人間社会の基盤を支える社会システムレベル、製造産業レベルまでのスケールの異なる場において、それぞれの課題認識が必要である。その上で、本報告では人文社会科学、理工学それぞれの専門的立場から学術課題を抽出した。

CE 実現に向けた仕組みづくりに関する課題としては以下のように要約される。

- 現代のモノの製造や流通、販売様式に合ったリサイクル費用の負担や質の保証、拡大生産者責任の一方で、消費者の修理権の認可、デジタルプロダクトパスポートや情報共有プラットフォームなどの質を保証する制度の整備が必要である。
- 自動車や電池など日本の産業を支えている製品を通じた CE に向けて、金属とプラスチックなどの素材レベルへの解体を推進する分離技術及び分析技術を向上させるとともに、解体しやすいことを製品設計の思想に含めるべきである。
- CE の実践の場には、産官学民の異なる立場、人文社会学、経済学、理工学、生化学など異なる分野の専門家が集う。人材の育成は、大学の既存専攻のカリキュラムで行うよりも、上のような実践の場に若手を巻き込んで、課題解決型のケーススタディを積極的に活用して進めるのが効果的である。

さらに、ものづくり産業の主要素材となっている金属やプラスチックなどの材料別各論の CE 実践のための課題は以下のようにまとめられる。

- 金属資源の循環のうち、鉄については脱炭素に向けての厳しいロードマップを前提としつつ、一方ではスクラップ鉄の再生が繰り返されるほど銅が濃縮し、再生鉄の品質を劣化させる問題が顕著な技術的課題である。鉄源となるスクラップ選別における不純物元素のフローの予測を十分な精度をもって可能とするためには機械学習の活用が期待される。
- アルミニウム資源については、日本国内で製錬を実施していないため、カスケードリサイクルによる再資源化を水平展開し、リサイクル率も高い水準で推移している。この中でスクラップの海外流出は経済安全保障上の問題として指摘される。スクラップの製錬による不純物除去（二次製錬）技術についてはまだ基礎研究段階にある。
- 非鉄資源については、銅鉱石の製錬プロセスとそれに派生するベースメタルや貴金属

の精製プロセスが絡み合う既存技術に、二次資源が対象として加わるようになると、有価金属に環境負荷元素をも含めた総合的多金属製錬が成り立つよう、プロセスの新たなカスタマイズが課題となる。

- 大量生産から大量廃棄への典型的線形フローをなしているプラスチック製品は環境や生態系への影響を顕在化させている。多種多様なプラスチックのうち、再生に向くものは、モノマー化しやすく、固相重合が可能なポリエチレンテレフタレート (PET) に限られ、そのほかは熱としてエネルギー回収にとどまることが多い。使用中には安定で、使用後には環境中で分解されやすい生分解性プラスチックの開発が追求されるべきである。

目 次

1. はじめに	1
2. 日本としての CE のあり方	3
3. 現状の資源循環の障壁を越えるための鍵となる学術課題	6
(1) 循環経済を推進する法整備のための課題	6
① 環境法としての循環管理法制	6
② 環境法以外の法律との関係	7
(2) 社会システムを整備するための学術課題	8
① 資源循環を経済的に成り立たせるために	8
② CE におけるデジタルプロダクトパスポート (DPP) の有用性	8
(3) 産業技術からみた CE システムの現状に潜在する学術課題	9
① 材料ごとのストック・フロー及び付随する環境負荷の可視化	9
② 事業者間連携で取引されるモノの質に関する標準化	10
③ 高付加価値の再生材料を得るための前処理と易分解設計	11
④ 資源循環システムにおける金属材料特性を予測する機械学習 (AI) の活用	12
(4) 材料ごとの産業技術からみた CE の現状に潜在する学術課題	13
① 鉄鋼材料の再生に伴う学術課題	13
② アルミニウム材料の再生における課題	15
③ アルミニウム以外の非鉄金属の二次製錬プロセスにおける学術課題	15
④ プラスチックの再生と生分解性プラスチックへの期待	17
(5) CE 創生に資する人材育成に向けて	19
4. おわりに	20
<用語の説明>	21
<参考文献>	23
<参考資料 1> 審議経過	26
<参考資料 2>	27

1. はじめに

従来の日本における「循環型社会」は、廃棄物管理が出発点であるのに対して、EU が提唱するサーキュラーエコノミー(循環経済、CE)は資源価値の最大化による経済成長を前提としている。CE とは、大量生産・大量消費に付随している一方向の経済(線形経済、リニアエコノミー)に対して、有限なエネルギーや資源、国土、水源を前提とした制約を客観的にとらえ、資源の効率的・循環的利用を進めつつ、その再生資源に付加価値を最大化して、持続的循環利用を促進する社会経済システムのことである。持続性を重視しているところから、廃棄物ゼロの思想を掲げ、リサイクルエコノミーの3Rs(廃棄物の発生抑制: reduce, 製品の再使用: reuse, 再生利用: recycle)とは異なっている。CE がリニアエコノミーやリサイクルエコノミーとは対比的なもう一つの点として、環境負荷を最小化しながらの資源循環を推進し、環境保全と経済成長を両立させることがある。環境負荷には、水・土壌・大気環境への有害汚染物質のほか、CO₂をはじめとした温室効果ガス排出の問題が含まれる。

プラスチックやバイオマスなどのように熱利用が可能で、生態系がもつ長周期による循環速度を前提としなければならないもの、金属資源のようにそのままリユースできるものから湿式分離処理を伴う高度リサイクルまでの多重ループがありえるものなど、素材ごとにCEの目指す方向性、ビジネスモデル、環境配慮設計、制度的対応が異なってくる。人間活動のなかで最大の温室効果ガスを排出する鉄鋼業では、わが国は世界を先導する技術力を誇る一方で、脱炭素社会構築のための取組に対する責務は甚大である。

廃棄物を出さないCEは理想である。とくに非資源国である日本にとっては、CEへのアプローチの仕方は現実の問題として極めて重要で、理想と現状の乖離を十分認識し、解決のための具体的な道筋を見出すための学術の責任は大きい。EUや他のアジア諸国とは異なる日本独自のものづくり技術、日本人が醸成してきた文化や環境意識、これらの先にあるよりよい未来を後世に残すために、叡智を結集した日本版CEのための施策づくりが必要である。一方、国内に目を向けると、人口減少が進む中、首都圏一極集中が加速し歪な姿を呈し、社会、経済、政治にさまざまな不均衡をもたらしている。資源循環を推進することは地方創生につながることも、この問題に歯止めをかける力として期待される。さらに、廃棄物が国境を越えて移動している現状に目を向ければ、国際標準を議論する場や国際間で資源循環人材育成を行う場において、日本が正しいCEの理念のもとに実践アプローチのシナリオを持っていることが国際的な信頼関係を構築することにもつながっていく。

第25期における報告「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(CE)対策」の発出後からこれまでににおいて、CEにおける資源循環を推進させる科学技術や社会システムの考え方には確かに進展が認められる。例えば、2024年にEUにて制度化されたデジタルパスポートプロダクト(DPP)の有用性、新しい金属の分離識別技術である LIBS、複数の非鉄金属の再生概念である multi-metal smelting、AI 導入による再生鉄の微量元素の含有率による材料特性の予測などが展開されている。

以上の背景から、本報告では、CE における資源循環を機能させるための学術課題について、人文社会科学、理工学の関係委員により分野横断で審議した内容を公表する。

2. 日本としての CE のあり方

CE は持続可能な開発目標 (SDGs) を実践するための手段であり、SDGs の構造と対応して考えるべきである。すなわち、CE は持続可能な発展を達成しようとする概念で、その基本は経済にある。Stockholm Resilience Centre の Johan Rockström が提唱した SDGs の概念モデルは3層に分類され、最下層の基礎が生物圏(Biosphere)で、その上が社会圏(Society)、最上層に経済圏(Economy)がある。CE は経済であるため資本主義で私的な利益を追求するが、地球環境を保持するためには、私的な利益を部分的に制限することも出てくる。自由な経済活動と公共的活動のバランスを考えるのが CE の本質ともいえる。このときは社会的行動規範を無視することはできない。

CE の土台を支えるのはエコデザインの考え方で、この場合のデザインは社会システムの設計と製品の設計の両方にその思想が入らなければならない。社会システムの構築には循環のための法律なども必要になるが、きっちりとしたハードローだけでなく、ソフトローと呼ばれる罰則を伴わないガイダンス的なしほりも効果的に使用される。技術的には修理して長期間使用することから易解体設計まで幅広くカバーされる。ただ、長寿命設計と易解体性設計は矛盾する可能性もある。さらに製品の長寿命化を製品構造体の強度で確保しようとすれば、高強度素材が要求される。一般的に高強度素材の製造に多くの手間とエネルギーが必要になることが多く、この場合も寿命の考え方をどうするのかの検討が必要であり、まさに対象物によってバランスが要求される。

日本版 CE を成立させるためには製品に付加価値が求められるが、単純に循環していることに付加価値を求めることは容易でなく、そこに新しいビジネスモデルを導入し、ある意味で市場の拡大が望まれる。またその活動を支えるのは、ESG 投資^{*1}となり、金融の在り方の変化に対応も必要である。最近多少 ESG 投資の在り方に環境対応に傾きすぎではないかとの揺り戻しが見られるが中長期的にはやはり非常に重要な考え方である。

技術として最も重要と考えられているのは情報技術である。サプライチェーン上で物質と同時に関連情報を流すには Digital Product Passport (DPP) と言われる手法が必要になる。DPP とは、2024 年 5 月に EU で成立したエコデザイン規則で規定されている、製品のライフサイクルにわたる情報提供のための仕組みである。DPP は、EU に上市する製品について、最終製造業者が製品販売時点での、その製品に関するデータを公開し、消費者などがデジタルの形式でアクセス可能になる。その用途は、カーボンフットプリント(CFP)^{*2}、消費者が製品を修理したいときに有効な情報、再利用、再製造、リサイクルを実施するために必要な製品情報、規制当局にとって必要な製品情報の提供が想定されている。

これに関しては EU[2]、わが国[3]ともに大型の IT ベンダーを中心にソフトの開発がなされている。ただ、これも枠組みだけができて使えず、対象物を絞り込んで具体的なデータをどう作って、どのようにシステムに乗せ、管理するかが決定的であり、それらが現在議論されている。このシステムが出来上がれば、リサイクラーや廃棄物処理業者に見られる不正についてしっかりと管理が行える他、多くの二次原料の評価もこれに基づいて行えるため、製品の再利用等に関わるいわゆる静脈系のビジネスのあり方が大きく変わると予想

グ、レアメタル循環が代表的対象となる。多くの資源が国の地政学的位置づけに依存し、産出に偏りが見られるが、二次原料は消費国で産出される量が多いと予測されていることから日本における CE の重要な位置づけは容易に想像できる。わが国においても基本鉱物資源は石灰資源を除き、ほとんど掘りつくされている。一方で二次原料はかなり供給ポテンシャルがある[5]。ただし、このポテンシャルを生かすのはそれほど容易ではない。一部のクリティカルメタル⁴等は逆に国内で回収されたものが海外に輸出されており、国内資源としては生かされていない。その最大の原因は、国内の回収コスト及び製錬コストが高いためと考えられる。国内における対象物の回収技術が劣っているのではなく、回収量が少なく、プロセスのマスプロ効果が発揮できないことが原因と言える。これもしっかりした回収システムが構築され、移動についてトレーサビリティが効くようになると変化すると考えられる。システムと技術の調和が日本版 CE 構築にとって大きな課題と言える。

3. 現状の資源循環の障壁を越えるための鍵となる学術課題

CEは、環境問題と資源不足の対策として、限りある資源の効率的な利用を促進することにより世界で約500兆円の経済効果があるとされる成長市場である。このCEの対象としては、プラスチック、繊維、ゴム、金属、水資源、食品など実に多様である。日本ではこのCEの普及を進めるために、使用量が多く、気候変動の問題とも絡みあったプラスチックに関しては、回収・リサイクル・利用削減、海洋プラスチックごみ問題の解決に向けて突出した取組が進められている。これに対して、循環周期が相対的に長い金属資源の循環利用については、喫緊に取り組むべきものとして位置づけられてこなかった。しかし、最近の金属やエネルギー資源を取り巻く資源ナショナリズムや資源経済大国との緊張した国際関係から、日本にとってこれらの持続的供給策を備えておく重要性は経済成長とともに経済安全保障政策上、格段に増してきている。この観点から、対照的なCEの二つの対象として金属資源とプラスチックに注目し、CE推進のための学術課題をまとめた。

(1) 循環経済を推進する法整備のための課題

① 環境法としての循環管理法制

わが国の循環管理法制は、廃棄物対策の面を色濃く残しつつ環境政策を反映した段階に留まっている。今日のCE政策の課題として、いくつかの点を挙げることができる。

第1に、循環型社会形成推進基本法の目的に、資源確保・国内循環を明記し、環境政策と経済安全保障政策等の統合を図る必要がある。重要な金属等については分別回収の義務化も必要である。拡大生産者責任(Extended Producer Responsibility, EPR)はそのための手法の一つとなりうる。EPRとは、製品の廃棄やリサイクルの段階まで生産者(製造者、小売業など)が責任を負う考え方である。

また、廃棄物を含むリサイクル可能物に対して規制緩和をするための措置として、広域認定制度、資源循環高度化法などの仕組みがあるが、未だ十分ではなく、一定の処理を経た金属等は廃棄物から「卒業」する必要がある。

第2に、政策手法としては従来、自主的取組が重視されてきた。この手法のメリットとデメリットを勘案した対応が必要であるが、近年、日本で販売されている製品につき、海外製のシェアが増大しつつあるため、自主的取組の基盤は失われつつある。わが国の循環管理法制の構造的課題として、各サブシステムが分断している点が挙げられるが、再生品に環境価値を付与する政策や消費者に対する環境教育だけでは十分な対応は困難であり、これらの解決には経済的手法ないし規制的手法(認証、規格を含む)が必要である。当面グリーントランスフォーメーション(GX)補助金が用いられるが、補助金は残念ながら持続的ではない。

また従来の政策では、リサイクルにコストがかかることがあまり考慮されず、リサイクルの際の企業間の公正な競争について関心が乏しい。ただ乗り事業者に対する対応の弱さもこれに関連している。解決のためには違反者に対する行政指導・処分、あるいは罰則の活用が必要である。公正な競争のためには、再商品化委託料を支払ったことを示すマークを導入し当該再資源化製品(又は容器包装)について委託料支払の有無を消費者に示す

こと、及び用いられる素材について環境負荷の程度に応じて委託料を決めることが必要である。

第3に、わが国では、リデュース（発生抑制）のための政策が弱く、リユースは横ばいか減少傾向にある。欧州のように消費者の「修理する権利」を認め、発生抑制につながる制度設計が必要である。

第4に、CEを推進するためには、再生資源に関する情報の伝達が重要である。EUで展開を始めているデジタルプロダクトパスポート（DPP）に対応するものをわが国でも展開しつつあるが、その際、再生資源となる製品に含まれている成分等の情報を共有できるようにする法整備が必要である。ただし、DPPの普及には様々な課題がある。

第5に、具体的な制度設計を行う上の新たな課題として、ネット販売の増加に対する対応が十分になされていない点が挙げられる。リサイクル費用の排出時負担を行っている制度においては、ネット販売商品の排出時における費用負担の仕組みが必要となる。また、高齢化に伴う社会関係資本の減退化により、分別収集が困難になることも考慮すべきである。

② 環境法以外の法律との関係

CE政策推進の際に問題となる、環境法以外の法律との関係についても触れておく。CEが自主的取組で行われる場合、企業間での情報交換や共同の取組が必要になる場合があるが、競争法がそれに対する萎縮効果を与える場面が想定される。独占禁止法との関係では、2003年に公正取引委員会から「グリーン社会の実現に向けた事業者等の活動に関する独禁法上の考え方」が出されている。その翌年には改定され、企業間の情報交換が違法とならない場合、共同廃棄が認められる場合等について明確化された[6]。上記ガイドラインでは、事業者等の取組に競争制限効果と競争促進効果がともに見込まれる場合、その取組の目的の合理性と手段の相当性を勘案しつつ、当該取組から生じる両効果を総合的に判断して、独禁法上問題となるか否かを判断するとしている。この点については、第1に、消費者が脱炭素や環境改善の効果を評価・選好している場合には、環境改善の効果が広がることは、商品の品質改善や競争の促進につながる可能性がある。第2に、競争の実質的な制限効果がある場合であっても、競争以外の公益との関係をも考慮して適法とする正当な理由があるかを判断すべきである。CEは脱炭素化とともに、地球環境問題やわが国の経済安全保障に資する取組であり、第1点のようにその競争促進効果を評価し、第2点のように競争以外の公益性を認めつつ独禁法違反になるかを判断することが適当であると思われる。

製造物責任法との関係では、再生品に欠陥がある場合の責任が問題となりうるが、EUの改正製造物責任指令では、CEの進展に対応して、「製造者の管理外で製造物に実質的な変更を加え、その後、それを市場で入手可能にし、又は使用可能にした」者、すなわち再生品の製造者も製造物責任を負いうるが、損害原因となった欠陥が、（再生による）変更の影響を受けない部分に関する場合には免責されるとする。わが国でも同様の法的規律が望まれる。

一般に、各法の目的は尊重されなければならない、特に安全性については、人の生命・健康被害に至ることがないように注意が必要であるが、CE に関しては、それがネットゼロという地球全体の目標や、わが国における経済安全保障達成のための資源確保の目的に資するという新たな社会的利益を実現しようとするものであることを念頭に置いた対応がなされるべきである。

(2) 社会システムを整備するための学術課題

① 資源循環を経済的に成り立たせるために

CE はもともと環境面からのニーズに応えるために掲げられたものであり、経済的に成り立たないため日本では現在まで実現できていないシステムである。製造費用を縮小してリサイクル費用を捻出することは、工業的に困難で、不可能な場合が多い。資源利用効率を向上させ生産性を上げる技術努力も行われているが、主力とはならず、あくまでも付加的な対策である。

一方、これからの製品製造において、製品の設計段階から解体しやすい構造であることの優先度を上げてデザインする考え方は、CE を成り立たせる上で、有望な道筋になっていくと予想される。すなわち、参考資料 2 の図 3 において、より短いループであるリユース、リペア、リファービッシュやリマニュファクチャリングを優先的に検討して、マルチマテリアルの分別を図っていくことが今後ますます生産者に求められていくであろう。これより、例えば金属の再製錬を避け、省コスト、省エネルギー、CO₂ 排出抑制ができる。プラスチックに代表される単体素材製品の場合の適切なリデュース、リユース、リサイクルのためには、消費者行動の変容も重要である。このようにして得られるプロセスの余剰利益を、「より短いループ」では再生できないスクラップを対象にした「より長いループ」であるリサイクルでかかる費用に確実に分配し、トータルで CE に近づけていく経済システムを構築すべきである。

このサイクルが閉じない場合を想定したとき、複数産業による産業連関、複数の CE サイクル間の連携として DPP が有効であり、これをもって社会全体の CE の完成に近づいていくと考える。

② CE におけるデジタルプロダクトパスポート (DPP) の有用性

CE は、素材・生産等技術のイノベーションに加え、ビジネスモデル、ステークホルダーが大きく組み替わる可能性をはらんだ産業構造の移行を伴う。このような移行では、経験に基づく社会システムの構築では限界があり、多くのステークホルダーで共有できるデジタル技術をうまく活用するべきである。

CE 実現のためのブレークスルーとなりうるのはデジタル技術、具体的には様々な情報共有プラットフォームの構築及び運用である。これによって、プロセス間、ステークホルダー間で密な情報のやり取りを実現する。そのためには、循環の各段階での可視化と評価、可視化に基づく生産や冗長な流通経路の回避、ニーズとシーズのマッチング、モノと

情報の対応付け^{*5}が必要である。これらに加えて情報共有プラットフォームの必須機能であるセキュリティ、トラスト、トレーサビリティ、データ主権、情報単位の規格化、相互運用性を実現することが求められる。

2024年にEUにおいて制度化されたDPPはCE実現のための情報共有プラットフォームの全てではなく、製造者側からの情報を製品単位で公開するためのツールである。現状は、まずは(半)公共財としての情報共有プラットフォームの構築を進めている段階であり、これらは将来的に相互接続性を高め、複数の情報共有プラットフォームが並立する社会体系が形成されると考えられる。ただ、DPPのような製品・素材のサプライチェーンを通じた環境・社会的情報共有システムは、製品の流れを把握できる役に立つ指標となるが、生産者側には製造原価が公開され、収益を圧迫する方向に向かいやすく、普及が懸念されていることもある。情報共有プラットフォームを有効に活用し、循環性の向上、ビジネスの拡大につなげるのは、これからの課題である。

この分野での学術課題は、社会普及に向けた課題との絡み合いが大きい。CEは、できるだけ多くの者が参加することで意義が向上するネットワーク効果を持つ社会現象の最たるものであり、そこに至るまでの費用、社会制度、そして、欧州をはじめとする諸外国との相互接続、ルールのすり合わせによる社会普及の促進も課題となる。

(3) 産業技術からみたCEシステムの現状に潜在する学術課題

① 材料ごとのストック・フロー及び付随する環境負荷の可視化

「都市鉱山 (urban mine)」という用語は、南條[7]により「地上に蓄積された工業製品を再生可能な資源と見做し、その蓄積されている場所」を意味するものとして使われ始めたが、いまではその再生可能資源そのものとして認知されている。都市鉱山を開発しようとした場合、都市鉱山の探査に相当するのが、使用済み製品や部品、また材料ごとのストック・フロー推計である。これは、都市鉱山の開発（資源循環）を進める上で、鉱量・品位を把握する重要なプロセスとなる。

ストック・フロー推計は、社会に蓄積されている各種製品の量（現在活用されている製品のストック量）、それら社会ストックに由来する使用済み製品の発生量、使用済み製品に含まれる各種素材（金属、樹脂等）の使用量及び品位、これらを解体、破碎・粉砕、選別して得ることのできる各種素材（二次原料）の生産量やそれらの品位を把握することが必須となる。これらの推計を容易にするような信頼度が高く、また不確実性の低い各種基礎データの整備が進めば、すでに再資源化されている資源、そうではない資源（再資源化されていない使用済み製品、処理後のスクラップ等）を特定できるようになるほか、新たな再資源化の対象候補、そこで必要とされる技術や処理能力等も具体化できるようになる。使用済み製品等の回収、解体・破碎、選別、再資源化を進める条件を具体化できれば、経済性評価につながる。

CEは、資源循環を通じて天然資源の採掘量を抑制するとともに、天然資源の採掘や一次原料の生産に由来する温室効果ガスの排出を抑制するための手段でもある。循環経済

の実現に向けた取組を評価するための指標には、天然資源採掘量、総物質需要量、マテリアルフットプリント^{*6}、エネルギー消費量、温室効果ガス排出量、カーボンフットプリント（CFP）などがあるものの、ストック・フロー推計と併せて活用されることは少ない。各フローに付随する環境負荷を紐づけて可視化できるようになれば、CEの進展状況、及びその実現に向けた（企業等の）貢献度合いを可視化できるようになるので、推進すべき今後の重要な課題である。政府政策の評価や企業による事業活動の評価などにも活用できるだけでなく、政策の改善、企業による自発的な取組を促すことにもつながる。

② 事業者間連携で取引されるモノの質に関する標準化

市場経済では「市場の力では効率的な資源配分を実現できない場合（市場の失敗）」があり[8]、その一例として、需要者と供給者の間における情報の非対称性^{*7}がある[9]。経済取引でマイナスの価格がつけられるモノ（バズ）の取引は、その処理・再資源化を依頼する主体とそれを請け負う主体との間で情報の格差、あるいは情報の非対称性を生じさせやすく、効率的な生産や取引の妨げとなることが指摘されている[10]。代表的な「バズ」は廃棄物であり、しばしば資源循環のボトルネックになる。

使用済み製品や廃棄物等から生み出されるモノの質（使用済み製品の再利用可否、スクラップとしての材料成分の純度や不純物の濃度、品質保証の有無や保証の水準等）が安定し、またその質の情報が需要者に対して明らかになれば、こうした情報の非対称性を軽減できるようになる。また、優れた再資源化技術によって再生材料の機能をコントロールできる場合や、部品・製品で使用する再生材料の受入基準が具体化される場合、前述したモノの質が一定範囲内にあると示すことも同様の効果を期待できる。CEが目指す持続的な資源循環を実現するためには、リマニュファクチャリング、リファービッシュ、リペア、リユース向けでは使用済み製品（部品を含む）の検査と再利用困難なもの選別、リサイクル向けでは材料に混入する不純物の汚染や、物理的な機能劣化を回避することが必須である。一次資源（天然資源）の使用を抑え、二次資源（使用済み製品やスクラップとしての材料）の循環量も増加させるためには、二次資源の品質管理を高度化し、こうした検査や選別、また汚染や劣化を回避するプロセスの確立が課題となる。

しかし、再資源化の対象となる使用済み製品は、様々な型式・年式があり、また材料の組成も様々であり、モノの質は安定せず、また可視化された状態で取引されるには至っていない。社会で大量流通する代表的な二次資源のひとつとして鉄スクラップがある。その検収基準をみても、不純物の成分や品質保証に触れたものはないのが現状である[11]。使用済み製品（部品を含む）を対象とする再利用可否の検査標準についても、現状、公的なものは存在せず、一部のメーカーや製品に限定されるかたちで行われているのが実態である[12]。

そのため、二次資源としてのモノの質の可視化、その次に質の安定を進めることが、高度な資源循環（水平リサイクル等）を進める上での課題となる。モノ（使用済み製品やスクラップとしての材料等）ごとに再生工程（再利用可否の検査、部品交換や加工・補修等）

で再利用可能性の程度を評価したり、また再資源化工程（製錬工程等）で除去や希釈が容易ではない不純物の種類を特定、可視化のうえ、その含有率を一定範囲内に管理、保証したりできれば、商品として取引されるモノが増えるようになる。そうしたモノの質に関する情報を特定し、定量的に整理し、標準化していくことが今後の課題となる。ここには、使用済み製品（部品を含む）の再利用可否に関する検査方法や評価基準、製品の使用状況や補修履歴等に関する記録様式やその伝達・共有方法、再生製品や部品に関する機能や安全性等の保証に関する基準づくり等が含まれる。また、再生材料が発揮する機能を期待どおりにコントロールする再資源化技術や、部品・製品で使用する再生材料の具体的な受入基準が定めれば、モノの質に関する標準化もこれに対応させていく必要がある。

③ 高付加価値の再生材料を得るための前処理と易分解設計

循環されるモノの価値を高めるためには、多様な製品解体が必要であり、それを達成するためには、省エネルギーかつ省コストで異材界面のみを高精度に分離する手法が求められている。従来、機械的な外力によって界面近傍に応力集中を誘導する方法や、化学的手法による材料の溶解・抽出が試みられてきたが、機械的手法では分離精度に限界があり、化学的手法では局所的な制御が困難であり、広範な領域への影響を避けることが難しかった。

こうした背景のもと、誘導加熱、誘電加熱、レーザーや、電気パルス法は局所加熱・局所分離を実現する手法として注目されている。これらの手法は、エネルギーを界面という極小領域に選択的に投入するため、全体としてのエネルギー効率が極めて高い。また、大きな物理的・構造的な物性を保持したまま精緻な解体が可能となるため、その後の選別プロセスの大幅な省エネルギー化に直結する。さらに、選別精度が向上することで、最終的な化学的手法での回収に投入される原料の純度が上がり、化学プロセス全体の負荷低減と省エネルギー化、ひいては再生材料の高付加価値化が実現される。

ここでの学術的な課題は、多様な複合素材において、いかにして界面へのエネルギー集中を制御し、分離の選択性を高めるかという機構の解明とプロセス制御の確立にある。対象材料に応じた最適な分離条件を体系化できれば、これらの分離技術を前提とした「易解体設計」へとフィードバックすることが可能となる。分離技術と設計思想が表裏一体となって展開されることで、リマニュファクチャリングや高度な素材リサイクルを支える、CE実現のための重要な技術基盤が構築されると期待される。

資源循環の分離技術では、特定の元素を高精度かつ迅速に定性・定量できる分析技術の開発も重要となる。分析に時間・コストを要すると、分離に必要なトータルの時間・コストが増加するため、CEを念頭においた効率的な分離技術の観点からも迅速分析のニーズは高い。現状の元素分析では、試料の採取や前処理を経て個別の手法を適用する必要があり、時間と費用がかかることが課題となっている。

近年、レーザーを用いた非接触リアルタイム計測方法としてレーザー誘起ブレイクダウン分光法（LIBS）が注目されている。これは、試料にレーザー光を当てて瞬間的に発生

させた微小な発光を測定し、そこに含まれる元素の種類や量をその場で調べる技術である。気体・液体・固体を問わず、複数の元素を同時に分析できること、前処理がほとんど不要で装置構成が比較的簡単であることが大きな特長である[13]。近年はレーザー装置の小型化・高性能化が進み、手のひらサイズの装置も開発され、金属スクラップの選別など資源リサイクル分野で活用が広がっている。

LIBS には、原理上、全ての元素が分析可能である利点がある。軽元素の検知が容易であるのに対し、重元素では発光線が増加し、各発光線の強度が低下する傾向にあるなど[14]、測定精度の向上には技術的課題も残されているが、近年は機械学習などのデジタル技術を活用した信号解析の高度化が進められており[15]、産業プロセスへの本格導入に向けた研究開発が進展している。LIBS は、分離装置への組み込みも比較的容易であり、資源循環を支える基盤技術として今後の発展が期待されている。

④ 資源循環システムにおける金属材料特性を予測する機械学習(AI)の活用

金属材料において高付加価値の再生材料を実現する上では、二次資源の回収から素材生産に至るプロセスチェーンにおける不純物元素のフローや、それに伴う材料特性や性能の変化を予測することが重要となる。しかし、特に鉄鋼材料をはじめとする構造材料においては、その製造プロセスでは熔融・凝固・相変態・粒成長・析出・再結晶といった様々な非平衡現象が複合・競合して生じる上、マクロな性能は、様々なスケールの構造や現象が複雑に関与して発現するため、極めて予測が困難となる。そのため、回収—プロセス—組織—特性—性能 (Recovery-Process-Structure-Property-Performance, R-PSPP) [35] に要素分割し、その局所的な連関を予測することで、最終的な材料特性や性能を予測する手法が有効となる。特に PSPP に関しては、重要な概念としてその有用性が広く認識されており[36]、その概念に基づくマルチスケール/マルチフィジックス^{*8}なシステム (Integrated Computational Materials Engineering, ICME、統合型計算材料工学)の開発が世界中で活発に進められている。例えば、米国ではノースウェスタン大学を中心とした CHiMaD[37]^{*9}やミシガン大学の PRISMS[38]^{*10}において、そのプラットフォームが開発され、欧州ではマックスプランク研究所を中心とした DAMASK[39]^{*11}や MICRESS^{*12}といった ICME ツールの開発が積極的に進められている。わが国においても、内閣府戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) において、第1期「革新的構造材料/マテリアルズインテグレーション」及び第2期「統合型材料開発システムによるマテリアル革命/逆問題解析」[40]を通して開発が進められ、MInt システム[41]と呼ばれる、疲労強度・クリープ強度・水素脆化・脆性破壊等、様々な問題に対して拡張可能な汎用プラットフォームが構築されている。

しかし、従来の ICME では、個々の現象を支配するメカニズムは既知であることが前提であり、物理モデルを明示的に組み込んだモデル駆動型のアプローチが主流となっている。このようなモデル駆動型の手法は、単純な系においてはその真価が発揮されるものの、高付加価値の構造材料で求められる複雑な微細組織の予測や、化学組成が大きく変動

する二次資源由来の材料特性の予測は難しく、これに代わる新たな手法が望まれる。そのような手法の一つとして期待されているのが、機械学習 (AI) を用いたデータ駆動型のアプローチである。一般にデータ駆動型アプローチでは、多量のデータから複雑なパターンを学習することで、未知のデータに対して高精度な予測を行うことを可能にしている。この特徴を生かすことで、スクラップの化学組成やプロセス条件から、最終的な材料特性を予測することが期待される。しかし、その実現にはまだ多くの課題が残されている。以下にその典型的な課題を「データ」「モデリング」「最適化問題」の観点から記す。

多様なデータの統合と質・量の確保：データ駆動型アプローチを用いて高精度な予測を実現する上では、スクラップからリサイクル、素材生産に至る全過程における多様なデータを確保する必要がある。また、データの品質は機械学習モデルの精度に大きく影響するため、データのクリーニング・ノイズ除去・欠損値補完などの前処理が不可欠となる。また一方で、構造材料の微細組織や特性に関するデータの取得には多大なコストが掛かるため、高精度なモデルの学習に必要となる多量のデータを確保する上では、過去に蓄積されたデータの活用が不可欠となる。そのため、様々な研究機関で蓄積されたデータの活用が有効と考えられるが、特に企業秘密を含むデータを取り扱う際には、機密性保護に配慮したデータ処理が不可欠となる。

複雑なシステムのモデリング：前述のように構造材料の特性は、複数の非線形な現象が競合的・複合的に複雑に絡み合っていて決まっている。この複雑性を正確にモデル化するためには、個々の要素をつなぐ関係を明示的に記述した因果律のネットワークの構築が不可欠であり、それを実現する新たなフレームワークの開発が望まれる。また、資源循環システムは、一般には時間とともに変化する動的なシステムである。この変化をきちんと捉えるためのモデルを作ることも重要である。

最適化問題の解法：スクラップの回収から再生材料生産に至るプロセスチェーンを社会の実情に合わせて最適化する問題は、たくさんの選択肢の中から一番良い組み合わせを見つけ出す、組み合わせ最適化問題として捉えることができる。このような組み合わせ最適化問題は、選択肢がとても多く存在するため、全部の可能性を試すためには膨大な時間が必要になる。そのため、効率よく最適なプロセスを見出す探索手段の開発が不可欠となる。これらの課題を克服する上では、学際的な研究体制の構築、大規模なデータの共有、国際的な協力などが望まれる。

(4) 材料ごとの産業技術からみた CE の現状に潜在する学術課題

① 鉄鋼材料の再生に伴う学術課題

主要な構造材料の一つである鉄鋼材料は、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、より高度な特性が追求されてきた[16]。その結果、現在では世界で年間18億トン生産されており、機能と価格からその代替となる材料は考えにくい。一方、その生産量の多さから生産プロセスから排出されるCO₂量の大きな鉄鋼業では、カーボンニュートラルに向けて、鉄鉱石を主原料とする転炉鋼製造に伴うCO₂の排出抑制の

ために、水素利用技術の開発、非化石燃料の利用促進とともに、鉄スクラップ利用の促進が重要な指針の一つである[16]。

再生鉄鋼材料を生産するプロセスには、3つの特徴があると考えられる。第一には、鉄スクラップを溶解し、不純物を除去するプロセスが酸化精錬であることであり、鉄(Fe)よりも貴な(酸化還元電位の高い)元素は除去できず、不純物として溶鋼中に残る。これらの不純物元素は、トランプエレメントと呼ばれる[16]。その中でも、銅(Cu)が鋼中に濃化すると、熱間圧延時に表面に割れを生じる表面赤熱脆性という現象に代表されるような複数の課題が知られており、リサイクルが促進されることによる不純物元素の濃化は鉄鋼材料の表面及び材質において、顕著な品質劣化を招くと危惧されている。第二には、鉄鋼材の生産に過剰なコストがかけられないことから、鉄スクラップを溶解するのは製鋼時であり、製鋼プロセスにて溶解するまで鉄スクラップの化学組成が確定しないため自動制御が難しいことである[17]。第三には、鉄鋼材が製品を構成する主要な材料の1つであることから、使用済み製品から回収される鉄スクラップには、他種の素材が異物として混入することである[17]。

それら特徴のため、再生鉄鋼材料の課題は、不可避な不純物元素の存在とそれら元素濃度のばらつきに起因する[18-20]。鋼材品種により許容される不純物元素濃度は異なり、最も許容濃度の高い品種は棒鋼であることが知られている[18]。そのため、電炉棒鋼の生産には、他種の素材が混入する鉄スクラップが用いられ、不純物濃度のばらつきも比較的大きい[18-20]。この大きなばらつきは、鉄スクラップの化学組成が溶解するまで不明であることが大きな理由である。鉄鋼材が安価なために、鉄スクラップを事前溶解することはコストに見合わず、固相のまま成分を推定し、製鋼炉に投入することになる。鉄スクラップを構成する鋼材の中には重量物や鋭利な鋼片が含まれるなど、不定形で多様であることから、内容物の同定や異物の除去が困難になっている。内容物の同定ができれば、非溶解での鉄スクラップの化学組成が推定できると考えられ、近年の技術的発展の目覚ましい深層学習を用いた画像解析技術を鉄スクラップの化学組成推定に適用することが期待される。

天然資源を原料とする前提での材料生産システムでは、材料の化学組成を任意に制御できることが前提とされてきた。それに対して、現行の材料生産システムでは二次資源の化学組成が制御できないため、鉄鋼材をより高度に循環(アップサイクル)させるには、材料生産のプロセスチェーンにおいて、不可避な不純物元素の存在とそれら元素濃度のばらつきの課題を解決することが必要になる。この課題の解決は、安定した材料生産を指向した材料科学や、スクラップの回収から再生材料生産までのプロセスチェーンの設計が有効であると考えられる。鉄スクラップ中の不純物元素濃度の大きなばらつきから、引張強度、伸展性、破壊靱性などの目的とする材料特性を実現することが望まれる。言い換えれば、ばらつきを有する複数の不純物元素という複雑で多様な条件に対し安定した材料生産チェーンを担保する学理が必要である。

② アルミニウム材料の再生における課題

わが国では、リーマンショック以来アルミニウムの一次製錬を行っておらず、アルミニウムスクラップも製錬対象ではなく、後述(③)の非鉄金属の中には硫化鉍に付随しないアルミニウムを含めていない。わが国では海外で製錬されたアルミニウムを輸入し、使用済みスクラップはかなりのリサイクル率でカスケードリサイクル(第2章)され、鉄や非鉄とは異なる循環の仕方をしている。この中でアルミスクラップが大量に海外流出(輸出)され、特定国が受皿となっている事実は経済安全保障問題につながるとして一部では問題視されている。一方で、アルミ合金ごとの選別の課題を、軽元素である特徴を生かしてLIBS(第3章(3)③)を活用した選別により克服し、参考資料2の5にみられるような、数社でのコンソーシアムによる新幹線廃車両を加工し新たな車両の部品にカスケードリサイクルする地方創生の好例もみられ、これが他の地域へ水平展開している。この例は、日本国内の加工技術に高い価値を認め、国内資源の有効な循環利用を促すように、行政、消費者、生産者は行動すべきであることを示している。アルミニウムの二次製錬(製錬反応による不純物除去)技術に関しては、様々な取組があるものの、まだ基礎研究の段階といえる。

③ アルミニウム以外の非鉄金属の二次製錬プロセスにおける学術課題

銅、鉛、亜鉛製錬を中心としたわが国の非鉄製錬業では、輸入した精鉱中の対象金属の製精錬のみならず、非鉄製錬の特徴である製錬残渣(副産物)からの各種マイナーメタルや貴金属の回収技術の利点を生かして、様々な複雑組成の二次原料(スクラップや難処理廃棄物)の処理を行なうこと(二次製錬)を社会的な役割としている。

銅をはじめとした非鉄製錬の一次製錬で対象となる主な鉱石は硫化鉍であり、硫化鉍は多成分で構成された鉱石であるため、非鉄製錬では多種類の金属元素を分離・抽出する技術が発展した経緯がある。当然、銅、鉛、亜鉛が主な製錬対象の金属となるが、同時に、各一次製錬所間さらには二次原料や製錬工程で副生する様々な残渣の処理に特化した二次製錬所間との複合的な原料のやり取りにより多種類の金属元素が回収可能である。副産物から回収される金属元素としては、ニッケル、セレン、テルル、スズ、アンチモン、ビスマス、インジウム、ガリウム、ゲルマニウム、貴金属である金、銀、白金などの白金族金属が挙げられる[21, 22]。

昨今、世界的に処理量が増している二次原料としてE-scrap(電気電子機器の廃基板等)が挙げられるが、代表的なE-scrapであるプリント基板は集積回路などに銅箔ととも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。そのため、E-scrapを中心とした二次原料の処理は、精鉱を主な原料として処理する一次製錬所においても、その処理割合が増大している[23, 24]。一方で、わが国のように金属鉱山がほぼ閉山されているような地域では、海外での鉱石確保の困難もあり、二次原料のみを製錬原料とする二次製錬所も金属資源の循環利用において重要な役割を担っている[21, 22]。

基本的に国内の銅一次製錬所での E-scrap の処理は、事前に破碎とサンプリング分析を経た後、前処理として焼却処理により樹脂成分が除去されて銅精鉱とともに製錬されている[25]。バススメルティング方式で攪拌力の高い銅溶錬炉では、不純物総量などの制限はあるものの銅精鉱とともに未焼却の塊状 E-scrap も直接処理が可能である[26]。また、国内外ともに E-scrap を主な原料とする銅二次製錬所では、溶体に浸漬ランスを通して化石燃料を燃やした火炎を吹き込む形式のトップ浸漬ランス (Top Submerged Lance: TSL) 炉の導入が盛んであり、攪拌力が強いいため塊状の二次原料を直接処理することが可能となっている[27-29]。最近では、銅製錬技術と鉛製錬技術を複合化することで、多種類の二次原料を処理しつつ、かつ多種類の金属を回収する Multi-metal smelter の概念のもとで新規二次製錬所の立ち上げや設備投資が活発化している[30]。

CE が志向される中で、中古製品としての再利用や部材ならびに部品としての製品製造への直接的な再利用が困難になったスクラップや難処理廃棄物に対して、上記のような製錬工程を経ることで、多種類の金属を鉱石由来のものと同等の純度を持つ地金へ再生することが非鉄製錬の役割として第一と考えられる。その際に、第3章(3)②においても触れた二次原料由来の不純物や環境負荷元素の増加や環境規制の強化などの社会的な制約に対して継続的な要素技術の開発等で対応しながら、鉱石や二次原料中に含まれるヒ素や水銀、カドミウムなどの環境負荷元素の濃縮回収とその安定固定化、さらにはそれらの管理埋め立て等の最終処分も非鉄製錬業が担うこととなる[31, 32]。このように金属資源の循環利用のみならず環境負荷元素の処理においても非鉄製錬業は社会的に必要不可欠の産業であり、今後、要素技術開発や設備投資などにより、この利点を伸ばすことで循環型社会の達成に向けた中心的な産業としてさらに重要性が増すことが予想される。

歴史的には非鉄製錬業は、亜硫酸ガスによる煙害などの鉱害を抜本的に解決しながら、同時に技術開発により地金の生産効率を大幅に増大させた実績を持っており[33, 34]、一種のデカップリングを近代に成し遂げた産業の一例として数えることが出来る。さらに、最近では、上記のように循環型社会の構築において必要不可欠のみならず中心的な産業として社会的な役割を担っていくこととなるが、一方で、各非鉄製錬工程においては大小あるものの常に何らかのエネルギー投入が必要である。硫化鉱を製錬する一次製錬では大きな硫黄の燃焼熱を利用できることから、鉄鋼製錬に比べると熱エネルギー利用に伴う CO₂ の発生は非常に少ないが、二次製錬では熱エネルギーの利用にともなう地金生産量あたりの CO₂ の発生はある程度大きなものになる。今後は非鉄製錬業においても経済合理性の範囲内で、CO₂ 発生抑制に関して対策していく必要があるが、循環型社会において必須の金属資源の循環利用や環境負荷元素の拡散抑制を妨げないようにする必要がある。非鉄製錬業の循環型社会への貢献を CO₂ 発生の一元的な環境影響評価で妨げないように、難処理廃棄物の処理や金属資源の再生、環境負荷元素の拡散抑制などの多大な貢献を多面的かつ総合的に評価するシステムが必要である。

④ プラスチックの再生と生分解性プラスチックへの期待

プラスチックは、任意の形に成型できる有機高分子物質の総称であり、多くは原油から得られた石油化学基礎製品が原料である。プラスチックの素材としての特性は、高分子の分子構造と結晶構造によって発現されるものであり、さらに添加物質によって特性が付加される。求められる特性に応じて多様なプラスチック材料が開発され、社会で広範に利用されている。2019年の世界のプラスチック生産量は4.31億トンと推計されており、今後とも増加すると予想されている[42]。

日本では輸入原油・ナフサのうちプラスチック原料に利用されるのは1割以下に過ぎない[43]。プラスチックの使用削減(リデュース)は最も優先する施策であるが、原油の9割以上が主に燃料用途であることに留意すると、省エネルギー施策と歩調を合わせて実行することが望ましい。プラスチックリデュース・リサイクルは、製造・廃棄を含むライフサイクルからの温室効果ガス(GHG)排出削減、生産量・消費量の削減による化石資源消費削減、分別・回収制度の構築、廃棄後の土壌や河川・海洋への環境流出・蓄積抑止、添加物質や吸着物質等による化学物質汚染抑止、廃棄物輸出を禁じるバーゼル条約遵守など複数の視点に留意して目指すべきであろう。

リサイクル手法としては、再生材料として利用するマテリアルリサイクル(MR)、解重合、ガス化、液化などの工程を経て化学原料に戻して利用するケミカルリサイクル(CR)、燃焼反応による熱を利用するサーマルリサイクル(TR)に大別される。欧州ではTRはエネルギー回収であり、リサイクルに含まれないという考え方が一般的である。廃棄物発電は、ネットゼロと資源循環を目指すためには低減の方向に向かい、廃棄物発電施設の建設は今後抑制の方向を検討する必要があるが、資源循環過程における残渣の有効利用という観点では高効率のTRは必要である。MRやCRによる再生材料製造では、プラスチック利用製品の設計と製造、使用、廃棄、リサイクル、再利用の過程でどのような操作が行われるかによって再生材料の価値が決まる。飲料用ポリエチレンテレフタレート(PET)ボトルは、業界全体での自主設計ガイドライン[44]によってすべて単一材料、無着色であり、容器包装リサイクル法によって自治体や事業者がPETボトルのみを分別回収し、消費者にも分別排出行動が定着している。水平リサイクルを実現するMRやCRの技術が社会実装されており、業界が再生材料をボトル材料として積極的に採用する他、再生繊維材料としての需要もあり、経済的にも成立している。PETが単体で要求特性を満たし、モノマーに分解しやすく、固相重合^{*13}で物性を復元しやすいという特性を持つことも高付加価値化に欠かせない。また、生産過程で排出されるプラスチックは、材料が一定で、汚染が少なく、MRされている場合も多い。

一方、PETボトル以外のほとんどの容器包装プラスチックは、高付加価値の再生材料化はいまだ困難である。プラスチック軟包装は酸素透過性、光透過性、耐熱性などの機能が高度に融合され、多層の複合材料となっている。消費者排出行動も居住自治体の収集方法によって異なる。このため、混合プラスチックとして回収され、光学分別などの工程を経て一部がMRされるか、可燃ごみとして回収され焼却される。CRによって熱分解ガスや分

解油を原料として再利用することは技術的に可能であるが経済的には成り立っていない。リサイクル手法を議論する上で注意しなければならないのは、MR で再生材とならなかった残渣、CR の製品の一部は燃料となっていることである。再生材料の価値を上げるためには高機能単一素材開発や高度分別技術に加え、残渣などについては高効率 TR も必須である[45]。

プラスチック材料の循環を通じて GHG 排出削減や廃棄後の環境流出・蓄積抑止を推進するには、生産から廃棄までのライフサイクルを俯瞰し課題解決に取り組んでいく必要がある。例えば、バイオマス原料を利用することで化石原料への依存を緩和し、GHG 排出削減が推進されている。廃棄後のリサイクル率向上や環境流出防止のために、回収システムの整備が進められている。

バイオマス原料を利用したプラスチックは主に発酵法及び化学合成法によって生産されている。発酵法ではサトウキビ等の植物原料を発酵させて得られるエタノールからモノマーを合成し、重合することで高分子化合物を得る。化学合成法では糖や油脂などの原料から高分子化合物を化学合成している。経済合理性にかなった最終製品までのバリューチェーン構築や非可食かつ未活用の再生可能なバイオマス原料の探索が課題である。

CO₂等を原料としたプラスチックの直接生産は、化石原料燃料からプラスチック生産を切り離す可能性を秘めた革新的技術である。しかし、熱力学的に安定な CO₂等を高分子化合物に効率的に変換するには、反応性の高い水素や共重合成分が必要である。革新的な重合触媒により CO₂等を原料とした高効率生産が可能になれば、プラスチックの持続可能性を大幅に向上する可能性がある。

回収システムからはずれて環境流出するプラスチック製品による環境影響を削減するためには生分解性プラスチックの開発と活用が求められる。生分解性プラスチックにおいても、回収や処理が管理された条件下では堆肥化やメタン発酵燃料化によるリサイクルが可能である。生分解性による環境影響削減という観点では、陸域、水域の様々な環境下における生分解性に関する理解が進展し、広範な環境条件下における分解性を有するプラスチック種が明らかにされてきている。一方、分解性と長期安定性の両立が課題となっており、使用時は安定であり、使用後に分解が開始する理想的な性質を持つプラスチックが追求されている[46]。

プラスチック製品はグローバルに取引されているため、新規材料やリサイクルに関わる各種要素技術の開発に加えて、国際標準の整備も課題である。環境調和型プラスチックの研究開発と、生産プロセスや含有化学物質、品質に関する公正な認証制度を活用した市場導入促進、政策によるリサイクル制度構築やリデュースや分別に関わる消費者行動変容によって、プラスチックが高度に循環し、経済的・環境的效果をもたらす社会システムの構築が期待される。

(5) CE創生に資する人材育成に向けて

CEを進めるには、国際的な視点を持ちつつ専門知識と実践力を兼ね備えた人材が必要であるが、現状ではその人材不足が顕著である。従来の教育システムでは、新しい循環経済型ビジネスモデルを活用する産業に対応することが難しい。教育機関においてはCEに特化した教育プログラムを導入し、次世代の人材育成を推進することが必要である。

例えば、産業間で産業廃棄物を有価物として資源循環させるルートはCEの実現には大変重要であるが、そのアイデアを持つコーディネーターとしての担い手を養成する機関は存在していない。中長期的な視野に立つと、大学においてCEに関する専攻やプログラムを新設し、学生に対してデジタル科学、材料科学、リサイクル工学、サステナビリティ政策学など多分野を横断する教育を提供するとともに、社会人教育を推進し、企業内の人材を対象にした専門講座を開催することで、次世代の循環経済を支える人材を育成すべきである。

同時に、国の研究機関を議論に含め、科学的データと知見を活用した政策立案と実行の一体化を図るべきである。さらに、国際会議やワークショップを通じて日本の取組を発信し、海外の成功事例を学ぶべきである。大学の中の既存の専攻組織を人材育成の場とするだけでなく、実践の場の中に若手研究者や大学院生の参加を促し、その中で育成することも必要である。

一方で、国際的な視点も不可欠であり、欧州やアジア諸国の先進事例を参考にしながら、日本独自の強みを活かしたモデルを構築することが求められる。特に物理的な距離が近いアジア諸国を中心に多国籍間で協調した資源循環政策や企業の連携を図ることで最適な資源フローを実現することが可能になる。例えばASEAN諸国に、コスト競争力を備えた日本のリサイクル・廃棄物処理技術とそれらの管理システムの導入を推進し、わが国を国際資源循環のハブとして機能させることが期待される。

これら海外の資源生産国・資源消費国との資源循環に関する協調関係を、長期的な視点からさらに高めていくには、大学・企業において将来の資源循環を担える人材を国際的に育成することが不可欠である。特に大学を拠点として国際的に共同で人材育成を行うことで、世界各国の資源循環の現状と課題について俯瞰的な知識の習得と課題の認識ができ、また、人的ネットワークの構築にもつながり、ひいては国際的で持続的なCEにつながる。その際には、コスト競争力を備えた日本のリサイクル・廃棄物処理技術を途上国に展開し、国家間の資源循環の最適なフローを確立させることを目指して、海外の大学や企業との連携を拡大し、人材育成を共同で実施することが重要である。

このための人材育成活動を支える資金の確保も必要である。国際的な人材育成の目的や効果、その範囲など趣旨と展望を明確に示すように大学間で協議したうえで、二次資源を含めた資源循環に関連する政府機関や広範囲の企業に丁寧な説明を繰り返すことで継続的な支援を得る必要がある。さらに国内のみの連携だけでなく、海外で賛同・協力する大学や企業、政府、国際機関等にも資源循環教育の重要性を働きかけ、支援を取り付けることも、相互に協働体制をとるうえで不可欠である。

4. おわりに

本報告では、資源の効率的・循環的な利用を通じて、環境負荷を抑えながら経済成長を目指す社会経済の仕組みであるCEにおいて、資源循環を機能させるための学術課題について、学術フォーラム（2025年11月22日開催）等、諸分科会活動を通して、会員、連携会員、連携会員（特任）により構成される「サーキュラーエコノミーのための資源・材料の循環利用検討分科会」委員を中心に審議した内容がまとめられた。

本文は全4章からなり、第2章ではCEにおいて求められる資源循環のありかたについて、第3章ではその実現のための学術課題を、法整備、社会システム整備、産業技術、人材育成の項目毎にまとめられ、全体概要は以下のようなになる。なお、具体的関連項目については、付随する参考資料として例示されている。

わが国においても持続可能な社会の実現に向けてCEの導入が重要視されており、製品設計、社会制度、技術革新の連携が不可欠であり、特に、環境保全と経済成長の両立を図ることが大きな課題とされている。環境・社会・経済の3つの側面を統合し、循環型の経済構造を構築するためには、単なる資源リサイクルだけでなく、製品の長寿命化や再利用を前提とした設計思想の導入、新たなビジネスモデルの確立、資源の多段階利用などが求められる。また、DPPなどの情報技術の活用により、資源の流通経路や製品情報の可視化を通じて、効率的かつ透明性の高い資源循環が可能となる。

一方で、資源循環の実現には制度的・学術的課題も多く、再生品の環境価値をどのように評価し、経済的価値として位置づけるかという点や、公正な競争を維持しながら資源循環を促進する競争法の運用が課題であり、リサイクル促進政策の整備や、プラスチック資源の高度な再生、化学物質管理の厳格化も必要となる。今後、CEの実現に向けては、産業界、行政、学術界が連携し、人材育成も含め、制度・技術・社会の各側面から総合的に取り組むことが求められる。

これらを踏まえて本報告では、1. CEを推進する法整備のための学術課題、2. 社会システムを整備するための学術課題、3. 産業技術からみたCEシステムの現状に潜在する学術課題、4. 材料ごとの産業技術からみたCEの現状に潜在する学術課題、5. CE創生に資する人材育成に向けて、についてまとめられている。

挙げられた課題の多くは長期的なものであり、報告発出に続くステップが重要となる。他のSDGsに関わる課題、特にカーボンニュートラルに向けた課題との連携を重視し、今後も日本学術会議の活動のみならず産官学に領域を広げ、実践的フォローアップを重ねる必要がある。

<用語の説明>

*1 ESG 投資

環境(Environment)、社会(Society)、ガバナンス(Governance)に配慮した企業に投資する手法。

*2 カーボンフットプリント

ある製品やサービスの提供を対象として、その原材料の採掘から製造、使用、廃棄、再資源化に至るまでのライフサイクル全工程を通じて直接・間接的に排出される温室効果ガス総量を地球温暖化係数で二酸化炭素排出量として換算した指標。

*3 水平リサイクル

使用済み製品やスクラップを同じ種類・品質の製品（や原材料）に再資源化することを指す。当初とは異なる種類の製品（や原料）、また品質が必ずしも高くはない製品（や原材料）への再資源化である「カスケードリサイクル」としばしば対比される。

*4 クリティカルメタル

材料や素材として不可欠な金属、需要の伸びが大きい金属、価格が高騰している金属など。

*5 モノと情報の対応付け

プラットフォーム上に記録された情報と現実世界の実物が矛盾しないように逐次突合する仕組みが必要であること。

*6 マテリアルフットプリント

ある国等において最終消費需要を満たすために採掘された天然資源の総量。

*7 情報の非対称性

ある情報（知識）を一部の主体だけが私的な情報として持ち、他の主体が持たないこと。

*8 マルチフィジクス

複数の物理現象が互いに影響し合う様子をシミュレーションすること。

*9 CHiMaD

Center for Hierarchical Materials Design：階層的材料設計センターの略称。アメリカのノースウェスタン大学を中心とした材料科学の研究機関。複雑な材料構造・材料挙動の理解、データ駆動型材料設計、統合型計算材料工学（ICME）を主眼においた研究を行っている。

*10 PRISMS

Predictive Integrated Structural Materials Science：統合型構造材料科学の略称。アメリカのミシガン大学を中心とした材料科学の研究機関。材料開発の加速を実現するために、材料特性の予測を行う統合予測システムの開発、材料データベースの構築を目標に研究を行っている。

*11 DAMASK

Düsseldorf Advanced Material Simulation Kit : デュッセルドルフ先進材料シミュレーションキットの略称。金属材料の微細構造とマクロな特性の関係をシミュレーションするためのオープンソースのソフトウェア。

*12 MICRESS

MICRostructure Evolution Simulation Software の略称。フェーズフィールド法をベースにした、金属材料の凝固・組織形成過程をシミュレーションするためのソフトウェア。

*13 固相重合

固体状態で樹脂の分子同士を重合させる方法。樹脂の強度（重合度）を高めたり、不純物量を減らしたりする効果がある。

<参考文献>

- [1]<https://stockholmuniversity.app.box.com/s/kptviuiltbejoryhclmluojj3x9iivok>
- [2]<https://gaia-x.eu/>
- [3]https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/digital_architecture/ouranos.html
- [4]<https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram>
- [5]<https://riss.aist.go.jp/research/20230323-2514/>
- [6]https://www.jftc.go.jp/houdou/pressrelease/2024/apr/240424_green/240424_doc06.pdf
- [7]南條道夫、東北大学選鑛製錬研究所彙報、43 (1988) 239-251.
<https://tohoku.repo.nii.ac.jp/records/50735>.
- [8]N・グレゴリー・マンキュー：マンキュー入門経済学（第3版）、東洋経済新報社、2019.
- [9]奥野正寛、ミクロ経済学入門、日本経済新聞出版社、1982.
- [10]細田衛士、グッズとバズズの経済学（第2版）、東洋経済新報社、2012.
- [11]一般社団法人鉄リサイクル工業会「鉄スクラップ検収統一規格」：
<https://www.jisri.or.jp/recycle/specification.html>
- [12]<https://www.densoremani.co.jp/ja/index.html>
- [13]Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), V. K. Singh, D. K. Tripathi, Y. Deguchi, Z. Z. Wang edited, Chapter 2 Elementary Processes and Emission Spectra in Laser-Induced Plasma p. 33, 2023.
- [14]Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), V. K. Singh, D. K. Tripathi, Y. Deguchi, Z. Z. Wang edited, Chapter 24 Application of LIBS to the Analysis of Metals p.533, 2023.
- [15]Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS), V. K. Singh, D. K. Tripathi, Y. Deguchi, Z. Z. Wang edited, Wang Z.Z. edited, Chapter 11 Chemometrics for Data Analysis p.299, 2023.
- [16]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、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」、2023年9月15日
<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-h230915-2.pdf>
- [17]醍醐市朗、「鉄スクラップ品質の現状と今後の展望」、西山記念技術講座（NMS-ISIJ）251st/252nd, pp. 25-41, 2024.05.24.
- [18]I. Daigo, L. Fujimura, H. Hayashi, E. Yamasue, S. Ohta, T. D. Huy, Y. Goto: ISIJ Int. 57 (2017) 388-393.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2016-500>.
- [19]I. Daigo, K. Tajima, H. Hayashi, D. Panasiuk, K. Takeyama, H. Ono, Y. Kobayashi, K. Nakajima, T. Hoshino: ISIJ Int. 61 (2021) 498-505.

- <https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2020-377.
- [20]D. Panasiuk, I. Daigo, T. Hoshino, H. Hayashi, E. Yamasue, D. H. Tran, B. Sprecher, F. Shi, V. Shatokha: J. Ind. Ecol. 26 (2022) 1040-1050.
<https://doi.org/10.1111/jiec.13246>
- [21]柴田悦郎、材料の科学と工学、54(2017) 52-56.
- [22]小坂製錬所パンフレット、https://dowa-kosaka.co.jp/sys/wp-content/themes/dowa-kosaka/file/kosakasr_brochure_202111.pdf
- [23]三菱マテリアル株式会社、統合報告書
2024<https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/ir/library/annual.html>
- [24]JX 金属株式会社 サステナビリティレポート 2024、https://www.jx-nmm.com/sustainabilityreport/pdf/report2024_j_full.pdf
- [25]赤城進、青木示威尚、米田寿一、成迫誠、日野順三、Journal of MMIJ, 123 (2007) 763-767.
<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.123.763>.
- [26]林庄作、廃棄物資源循環学会誌、22(2011) 453-456.
<https://doi.org/10.3985/mcwmr.22.453>.
- [27]Metso Corporation AUSMELT® TSL PROCESS :
<https://www.metso.com/portfolio/ausmelt-tsl-process/?r=3>
- [28]C. Hagelūken: World of Metallurgy-ERZMETALL, 59(2006) 152-161.
- [29]G. R. F. Alvear Flores, S. Nikolic, P. J. Mackey, JOM, 66(2014) 823-832.
- [30]Aurubis Richmond : <https://www.aurubis.com/en/richmond>
- [31]EcoMetales Limited Arsenic and antimony abatement plant (AAA) :
<https://www.ecometales.cl/operaciones-y-proyectos/abatimiento-de-arsenico-como-escorodita-aaa>
- [32]田村詔男、三浦博、Journal of MMIJ、123(2007)、747-750.
<https://doi.org/10.2473/journalofmmij.123.747>.
- [33]JX 金属株式会社 サステナビリティレポート 2020、https://www.jx-nmm.com/information/upload_files/20200930_01_6018119_02.pdf
- [34]住友金属鉱山株式会社、環境保全の取り組みの歴史、
https://www.smm.co.jp/sustainability/activity_highlights/article_05/
- [35]I. Daigo, K. Tajima, H. Hayashi, D. Panasiuk, K. Takeyama, H. Ono, Y. Kobayashi, K. Nakajima, T. Hoshino: ISIJ Int, 61 (2021) 498-505.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational>. ISIJINT-2020-377.
- [36]G. B. Olson: Science, 277 (1997) 1237-1242.
- [37]<http://chimad.northwestern.edu/>
- [38]<http://www.prisms-center.org/#/home>
- [39]<https://damask.mpie.de/>
- [40]出村雅彦、小関敏彦、まてりあ、58 (2019), 489-493.

<https://doi.org/10.2320/materia.58.489>.

[41]<https://www.mintsys.jp/>

[42]OECD, Global Plastics Outlook (2022)

https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2022/02/global-plastics-outlook_a653d1c9/de747aef-en.pdf

[43]プラスチック循環利用協会、プラスチックリサイクルの基礎知識 (2024)、

<https://www.pwmi.or.jp/pdf/panf1.pdf>

[44]PET ボトルリサイクル推進協議会、指定PET ボトルの自主設計ガイドライン (2024)、

https://www.petbottle-rec.gr.jp/guideline/pdf/guideline_05.pdf?20240927

[45]平尾雅彦、金属, 91(2021), 1, 37-44.

<参考資料1>審議経過

2024年3月28日	第1回分科会、日本学術会議にて(対面) 1) 委員会の趣旨説明 2) 委員の紹介 3) 委員長の選出、副委員長及び幹事の指名と承認 4) 分科会活動計画
2024年4月2日	第2回分科会(メール審議) 1) 委員の追加
2024年11月22日	学術フォーラム、日本学術会議にて(ハイブリッド)
2024年11月22日	第3回分科会、日本学術会議にて(対面) 1) 第1回及び第2回材料工学委員会・環境学委員会・総合工学委員会合同分科会議事録の確認 2) 意思の表出に向けた構成のイメージとタイムスケジュール
2025年1月8日	第4回分科会(メール審議) 1) 委員の追加
2025年2月10日	分科会委員会ワーキンググループ会議、早稲田大学理工学術院にて(対面)
2025年2月26日	分科会ワーキンググループ会議、早稲田大学理工学術院にて(対面)
2025年3月17日	分科会ワーキンググループ会議、早稲田大学理工学術院にて(対面)
2025年4月3日	分科会ワーキンググループ会議、早稲田大学理工学術院にて(対面)
2025年4月15日	分科会ワーキンググループ会議、三菱UFJ R & Cにて(対面)
2025年5月8日	分科会ワーキンググループ会議、三菱UFJ R & Cにて(対面)
2025年6月18日	分科会ワーキンググループ会議、東京大学大学院工学系研究科にて(対面)
2025年6月30日	分科会ワーキンググループ会議、早稲田大学理工学術院にて(対面)
2025年7月9日	分科会ワーキンググループ会議(オンライン)
2025年7月25日	第5回分科会、東京大学山上会館にて(ハイブリッド) 1) 第3回及び第4回分科会の議事録確認 2) 参考人からの意見聴取 3) 意思の表出の全文確認 4) 意思の表出後のフォローアップの実施方法の時期と内容
2025年9月26日	第6回分科会(メール審議)
2025年12月12日	第7回分科会、東京大学山上会館にて(ハイブリッド) 1) 第5回及び第6回分科会の議事録確認 2) 学術フォーラムの開催案について 3) 意思の表出の申出書提出後の経過報告 4) 独法化準備経過について
2026年3月3日	分科会ワーキンググループ会議(オンライン)

<参考資料2>

第3章に記載したCEを実践するための学術課題を抽出するための前提となった現状の問題を記す。

1. CE 評価モデル

気候変動対策はじめ、環境への配慮を厳しく求められるこれからの社会においてCEの実現は避けて通ることができない。真に持続可能な社会の実現のためには、最適なエコロジカルガバナンス（生態圏統治）が要となる。これは自然を保護・保存の対象とすることと、経済システムの維持・発展のため回復・保全を前提として活用する対象にすることがあげられる。そして、後者に関しては、国・自治体・企業が科学的な根拠に照らし合わせて政策や活動を実施することが不可欠である。

また、気候変動に起因する激甚災害が多発し、企業の生産活動が影響を受け、経済システムやライフスタイルの変容を余儀なくされ、その結果としてウェルビーイングが低下する相互作用を科学的な合理性を持って定量的に検証して評価・フィードバックする仕組みが欠かせない。加えて、CEは、環境問題への対策だけでなく、企業のコスト削減や新たなビジネスチャンスの創出につながる。

これらのためにもウェルビーイングが低下する相互作用をCEに関わる指標となるよう、数値化し、その進捗や効果を評価できる指標やフレームワークを設定することが重要である。この指標として活用が期待されるものが、持続可能性をフローでなくストックの観点から評価し包括的な富を表す「新国富指標（Inclusive Wealth Index）」である[1-3]。このような指標を活用し、定量的に検証して評価・フィードバックする仕組みは、CEの実現に欠かせない。

新国富指標は、Partha Dasgupta や Kenneth Arrow らが提唱し、国連が中心となって構築された持続可能性指標である[4, 5]。人的資本、人工資本、そして自然資本の3つの資本が社会にもたらす厚生を評価し、さらに気候変動による被害、原油価格の上昇によるキャピタルゲイン、技術進歩などを反映する全要素生産性などで調整することで、それらの価値を金銭に換算して示す。図1は、Inclusive Wealth Report 2023 [1]（包括的な豊かさに関する報告書）に公表されたGlobal capital stocks per capitaをもとに推算した、1990年の一人当たりの富を基準とした世界の新国富指標の経年推移である。この30年間に、経済的豊かさを捉える人工資本は約2倍に、教育や健康の人的資本は若干の上昇傾向、森林、土壌、水、大気、生物資源など、自然によって形成される自然資本は1/2に減少している。

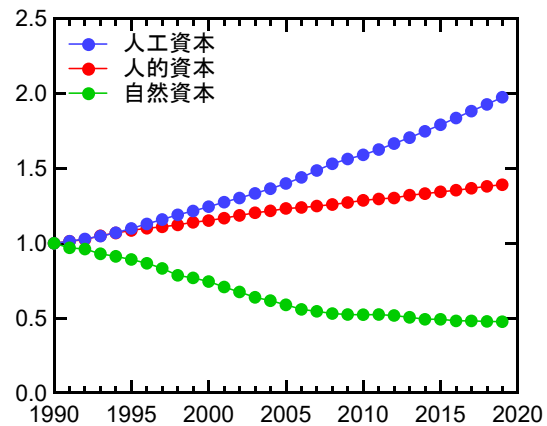


図1 人工資本、人的資本、自然資本に分類した一人当たりの富の経年推移

この指標は、経済成長を測る指標として一般的に使われてきた GDP（国内総生産）だけでは捉えきれない、社会的あるいは環境的な要素を含めたウェルビーイングや持続可能性を評価する。Beyond GDP（GDP を超えて）が提唱されているが、新国富指標は GDP を補完する指標となる[6]。経済的富だけではなく、自然や教育、健康まで取り扱う指標である新国富指標で実態を評価し、真に豊かな地域に近づくことで、少しでも脅威の影響を和らげ地域の持続可能性を高めることを考えたい。

新国富指標によって評価される、人的資本・人工資本・自然資本については、日本にとどまらず多地域間産業連関表などの活用から国際的な展開も見据えられている。CE を考える場合、もはや物質の移動は国内に限らないことから、国際化は必須である。

加えて、レジリエンス性を備えつつ、真に持続可能な社会を実現するためには、他の資本と代替不可能で人々のウェルビーイングにプラスの影響をもたらす、「クリティカル自然資本」について考える必要がある。この資本について科学的合理性をもって特定化し、経済システムから切り離して維持・考慮することも不可欠である。人々の幸福が上がることによって、新国富も増える。経済的富だけではなく、自然、そして教育や健康まで取り扱う新国富指標で実態を評価し、真に豊かな地域に近づくことで、少しでも脅威の影響を和らげることはできるだろう。これからの真に幸福な将来を考えるにあたり、より広い視野で多様な価値も見えるよう指標化し、伸ばしていくことが求められる。自治体の特性を活かされる資本が自然資本であるが近年は減少が懸念され、ネイチャーポジティブ (NP)^{*1}の実現も急がれる。

2. 自然資本と両立を求められる CE

指標は個別の施策、計画、これらを含む政策全般の進捗状況や達成状況を評価するうえで重要なツールである。前項で持続可能な社会としての CE の評価指標としてとりあげた新国富指標は、多数の個別指標の集合体では表現しがたい全体像を俯瞰するものである。一方、製品、技術、計画、施策などを環境面から評価する際にも、多様な指標が用いられており、日本の循環型社会形成推進基本計画でも、初期から導入されてきた。LCA^{*2}では、ライフサイクル影響評価 (LCIA) において、影響カテゴリーごとに環境影響を定量化したうえで、さらに少数の指標に集約することが試行されてきた。日本発の LCIA 手法である LIME^{*3} (伊坪ら) は人の健康、社会資産、生物多様性、一次生産の 4 項目に集約しており、これらを貨幣価値に換算し統合すれば、単一指標となる。

LCIA が扱ってきたこうした負の影響の算定手法の精緻化は、CE に向けた具体策を進めるうえで、依然として必要である。端的な例は、CE の推進により回避が期待される鉱物資源の採取、選鉱、製錬等に伴う環境影響の評価である。土地改変による自然環境の損壊、重金属などによる水系汚染、製錬時の大気汚染、大量の鉱山廃棄物の管理など多岐にわたるが、ほとんどが海外で生じる事象であるため、わが国では情報を得ることが困難である。これに対し国内でのリサイクルはエネルギーを消費し、環境負荷を発生させるため、一国の排出量の削減が求められる温室効果ガスについては、リサイクルが不利となる計算方法となってしまう。輸入される原材料の背後にある環境負荷を近似的に表現する指標として TMR (関与物質総量) があるが、鉱物資源のフットプリントを精緻化し、「高くつく」コストであるこ

とを表現することが、CE の必要性、重要性の共通理解を深めるうえで重要な課題と考えられる。

欧州発の CE では、枯渇性資源の循環的利用・効率的利用と並んで、再生可能な動植物資源の活用がもう一つの柱であり、これは CE や CN とならぶ環境政策の柱である NP とも密接に関連する。新国富指標の自然資本の評価とも表裏一体の課題である。

CN の観点からは、炭素吸収速度の速い樹種が有益だが、その市場価値が一時的に高まったとしても、生物多様性・生態系サービスという面での評価も必要であることはいうまでもなく、適切な再植林等によって森林の持続可能性が担保されなければ、自然資本の価値は低下する。

NP は概念としては浸透しつつあるが、その具体的な定量化手法は開発途上である。また、仮に何を計測すべきかが学術的に合意できたとしても、指標は measurable、実際に計測可能なものでなければ実用に供することができない。大規模な実地調査は現実には困難であり、リモートセンシングなど情報技術の活用が期待される。新国富指標の自然資本の非市場価値の評価の源に、生態系と生物多様性の経済学(TEEB: The Economics of Ecosystem and Biodiversity)プロジェクトがあるが、学術的な知見が政策に活用されるには、IPBES⁴、IRP⁵ など国際科学者パネルの役割も重要であろう。

3. 外部不経済を解消する事業者間連携に向けたルールの策定

CE の実現に向け、(経済主体の活動が、市場取引によらずに第三者に不利益をもたらす)外部不経済を解消するためのルールはどのように設定されるべきか。製品の製造に伴う(環境外部性を中心とする)外部性としては、①環境汚染や生態系の攪乱といった環境問題のほか、②有用物が回収されないという資源問題、③再利用等に向けた静脈での流通の費用が高いという製品連鎖上の問題が挙げられる。これらは、製品の使用が終了した際に、適正な分別収集を通じて、再利用・適正処理が行われないことによって発生する。このような外部性を内部化する手段として、「拡大生産者責任」(EPR)と呼ばれる考え方が重要である。この概念はスウェーデンで生まれ、世界の 350 以上の制度で導入されている。

EPR は、主として、従来市町村が回収・処理をしていた一般廃棄物(都市ごみ)の一部について、回収・リサイクルの責任(費用)を生産者等に負わせる考え方として発展してきた。OECD(経済協力開発機構)は、2000年にEPRに関するガイダンスマニュアルを作成し、その後、2016年にアップデート版が出された[7]。この考え方は、わが国の循環型社会形成推進基本法(循環基本法)でも採用され、容器包装・家電・自動車のリサイクル法に導入され、現在、太陽光パネルのリサイクルに関して採用が検討されている。また、EUではCEに関連する殆どの規則・指令においてEPRが基礎となっており、アメリカでも州や自治体において採用されている。

EPRとは、OECDガイダンスマニュアルによれば、「物理的[及び/又は]金銭的(財務的)、製品に対する生産者の責任を製品のライフサイクルにおける消費後の段階まで拡大させる、という環境政策アプローチ」である。すなわち、EPRには、物理的責任(回収・リサイクル等の実施の責任)と金銭的責任(費用支払責任)の双方が含まれる。循環基本法に定められ

ているように、EPRには、①廃棄物等になることの抑制措置、②表示、設計の工夫、③回収（引取り）・リサイクルの措置、④循環資源を利用できる者の利用が含まれる。②は情報的責任といえる。③及び④には上記の物理的責任と金銭的責任が含まれる。欧州では、元来、EPRの概念は、一物理的責任を課することは当然の前提としつつ—金銭的責任の点に特に重点がおかれてきた。

EPRにおいて生産者等に回収・リサイクルの費用を負わせる根拠は何か。それは、製品システムにおける上記の外部性に対処する費用（廃棄物処理、リサイクル等の費用）を生産者に支払わせることが、製品の設計を通じて、製品のライフサイクル全体でもたらされる環境負荷を最小化するからである。すなわち、生産者等が（リサイクルしやすい素材の選択、有害物質の使用の回避や軽量化、一定割合の再生材の利用などを行い）、最も環境適合的な製品を作り出す（環境配慮設計〔DfE〕を行う）能力・情報をもっているからである。この費用を生産者等に支払わせ製品の販売価格に反映させれば、リサイクルしやすい製品を作った方が生産者等は製品の価格を安くすることができ、製品の販売市場を使って環境適合的な製品を作ることができるのである。

経済学及び法学の分野において、EPRに関しては、①OECD/EUの考え方をわが国でも用いようとする見解と、②わが国において独自の概念として検討しようとする見解とが存在する。もっとも、EPRが問題となる製品を限定すること、EPRが製造者による環境配慮設計（DfE）の向上を目的としていること、社会的費用の低下を目的としていることなどは両見解において共通しており、相違点がそれほど大きいわけではない。

EPRが適用されるための要件としては、経済学の分野において、次の2点があげられることが多い。①製品連鎖中の価格伝達が十分でなく、（廃棄物の量を基準とする）従量制有料化や消費者への製品課税などの非EPR政策と、EPR政策との間で、政策の効率性や有効性に違いがあること、②製品設計の変更などの生産者の対応が使用済み製品の社会的費用を最小化する上で重要であることである。他方、循環基本法等との関係では、第1に、質的又は量的に環境負荷が高く、通常システムではリサイクル困難なものであること、又は、わが国の資源確保の観点から分別収集及び再利用が特に必要なこと、第2に、当該製品等の設計、原材料の選択、循環資源の収集等の観点から、事業者の果たすべき役割が重要であることを要件とすることが必要である。

CEの実現に向けた費用負担に関しては、業界との協議に基づく自主的な対応も用いられ続けると考えられるが、上記の外部性の内部化のためには、第1に、製造者等による素材や物質の再利用に必要な情報の表示等の義務付けが極めて重要であり、その際、製造者等は情報的責任を負うことになる。第2に、引取り・リサイクルを物理的及び／又は金銭的に行うEPRの手法は、特に適正処理困難な製品や、資源確保の必要性が高い物質について重要である。

4. デジタル技術によるサーキュラーエコノミーの実現への取組

CEを実現するための技術開発は様々な機関・事業者が推進している。CEという多様なステークホルダーが関わる社会システムを構築するという観点では、技術は、ステークホルダ

一同士が競争し経済的利益を追求する競争領域と、多くのステークホルダーが関与しともに価値を享受すべき協調領域の二つに大別される。協調領域の典型には、プラットフォームと呼ばれるものがあり、情報システムとしてのプラットフォームが多くに関心を集めている[8]。これらは CE 実現のための両輪といえるが、広く社会に実装されるべきものという意味で協調領域の推進は極めて重要である。

協調領域となる情報システムのプラットフォームでは、循環する製品・部品・材料といった物質資源に関するデータ・情報だけでなく、エネルギーや情報・知識、経済価値などを複数のステークホルダーがアクセス・管理できるシステムが求められている。例えば、文献[9]においては、資源循環に関わる事業者の業務フロー(企画/設計/製造/資源循環サイクル全体管理)の観点から、情報システムプラットフォームの代表的な活用事例を、以下のように挙げている。

- ① 投資家・利用者に向けた資源循環活動の価値を訴求する『ESG レポーティング』
- ② 事業者などの資源循環システム設計者に向けた『循環方法の最適化』
- ③ 製品に関する『環境配慮設計』
- ④ 循環性を定量化する『ライフサイクルアセスメント』
- ⑤ 製造及び、使用済み製品を再度使える状態に作り直す再製造の『最適化』
- ⑥ 製品のライフサイクル全体にわたる『トレーサビリティ』

こうした取組から導出される本質的な課題は二つある。一つ目は、経済合理性があり、環境負荷が少ない循環方法を見出して選択することであり、二つ目は、データを継続的に収集・共有する仕組み、になる。前者は、CE の ToBe 像を探ることと同義であり、複数のステークホルダーが関わる資源循環においては、ステークホルダー間で合意形成を図るためにも有用である。一方、後者は、動き出した CE を潤滑に運用するものといえる。例えば、回収される素材の化学組成や、回収時の混在物の存在に関する情報を共有することにより、素材や物質の再利用に関わるステークホルダーは適切な相手・量・時間でのモノの流通を行うことができ、望ましい循環方法の選択が容易になる。

CE は、素材・生産等技術のイノベーションに加え、ビジネスモデル、ステークホルダーが大きく組替わる可能性をはらんだ産業のトランジションである。このような未知の世界に向かうトランジションでは、経験に多くを頼る社会・システムの構築では効率が悪く、上記事例にあるように、協調領域に着目しデジタル技術をうまく活用することを検討すべきである。

5. 地方創生型 CE 創成への取組

以前より環境問題を解決するための基本的な思考として“Think globally, Act locally”の言葉がある。この言葉は、CE を具体的に実現する際にも適用される。人類が使用する素材は基本的に世界を回りながら製造・使用される。また、多くの汎用的な工業製品も世界規模で流通する。しかしながら循環使用を基本とする CE の活動は、地方で上手く進む事例が多い。CE で上手く循環を進めるには参加するプレイヤーの意思疎通がかなり重要な要素となる。リユースもリサイクルをする場合も対象物の発生元と、それを再利用・再生するもの

との間に信頼関係がないとスムーズに進まない。もちろん世界的に見ればそれをどのような地域でも同じように循環できるようにすることがCEの目的の一つであり、そのために国際標準化機構（ISO）TC323において世界規模で共通的にCEを進めるための作業を行っている[10]。しかし、未完成であり、具体化するのには地方での活動が中心である。ここでは、地域コンソーシアムでアルミニウムの高度な循環を達成している例と、もう一つはバイオ技術を持って廃棄物を処理し、地域のエネルギーと作物の循環を進めてようとしている例を示したい。

まず、富山で行われた新幹線廃材の新幹線への利用でアルミニウムの完全水平リサイクルである[11]。富山のリサイクラーである株式会社ハリタが中心となり、排出元であるJR東海、アルミニウムの加工メーカーの三共立山株式会社、車両メーカーである日本車両、日立でコンソーシアムを結成し、廃車両からどのような素材が発生するのか、それを如何に分別するのか、分別されたスクラップアルミを如何に部品に加工するか、信頼性を担保しながらその部品をどう新車両の一部に使うのか、まさにコンソーシアムの中の企業がそれぞれ協力しながら高度な循環を行った事例である。このコンソーシアムは富山に拠点を置くリサイクラーがそれぞれ地域で活動していたメーカーを上手くまとめて成功した事例である。



図2 新幹線に使用するアルミニウムの高度リサイクルを達成するためのコンソーシアム

もう一つまだ完全に最終ビジネスまでは達していないので具体的な場所、企業名を明確にできないが、考え方のみを示したい。現在検討中のプロジェクトの紹介である。場所は福岡県内でバイオ系廃棄物をメタン発酵している設備を持っている町と、その際に発生する液肥を濃縮できる技術を開発した企業と、その液肥を利用して農作物を高度に利用する農業法人が組んで、農産物を育て販売するバイオ系廃棄物の高度な循環を目指している。メタン発酵で得られたメタンはエネルギーとして回収されている。この事例のポイントは液肥の濃縮である。液肥の利用は、どうしても長距離輸送に適さないため、比較的狭い地域限定の活動となり、典型的な地域型のCEモデルである。ここで開発した液肥の濃縮が普及できれば、バイオ系資源を利用した種々の循環パターンがわが国において多くの場所で進めることができるのではないかと期待できる。

6. 高付加価値の再生材料を得るための前処理と易分解設計

多重の資源循環ループを創成しCEを実現するためには、設計のあり方から見直すことが求められる。新たな価値を生み出すためには用途変更も含めた設計の見直しが必要であり、

リユース (再使用)、リペア (修理)、リマニュファクチャリング (リマンと略されることも。再製造) といったものも重要な CE 取組として位置付けられる。CE を実現するための分離技術も多層的であり、さまざまな単位で価値を回収できる必要がある。図 3 はその概念を模式的に示したものである。分離技術は主に機械的・物理的手法と化学的手法に分類される。物理的分離法には、破碎や粉碎といった単体分離法、及びセンサ選別⁶⁾、磁選⁷⁾、渦電流選別⁸⁾、風力選別、比重選別といった物理選別による相互分離法が含まれる。これらは通常、必要エネルギーが小さいものの、分離精度が低い。一方、化学的分離手法には、酸やアルカリの添加、加熱、加圧による溶解や、溶媒抽出、吸着法による相互分離法が含まれる。

現状では、資源循環の分離技術として、機械的・物理的手法を化学的手法の前処理として用いた後、最終的に化学的手法で高精度な均一分離を行い、バージン材に劣らない素材に戻すプロセスが一般的である。この手法は図中にグレーのラインとして示されており、資源循環における標準的な技術となっている。しかし、CE の概念に基づき、より内側の素材での資源循環ループを実現するためには、分離技術のさらなる進化が不可欠である。

さらに部品や部材での内側の資源循環ループを実現するには、現状の製品形態では分離が困難であるため、易分解設計が不可欠である。これまでは、分離技術の選択肢が限られていたため、易分解設計も単純な概念に留まっていた。しかし、分離技術が多様化すれば、易分解設計の前提となる概念もより広がり、現実的な適用が可能になる。

リサイクル促進は現状における資源循環の要であるが、それより以前にリマニュファクチャリング (リマン) やリファービッシュ、リユースといった手段により製品や部品レベルで可能な限り長く使用することは社会全体の資源利用効率を高める方法として有益である。

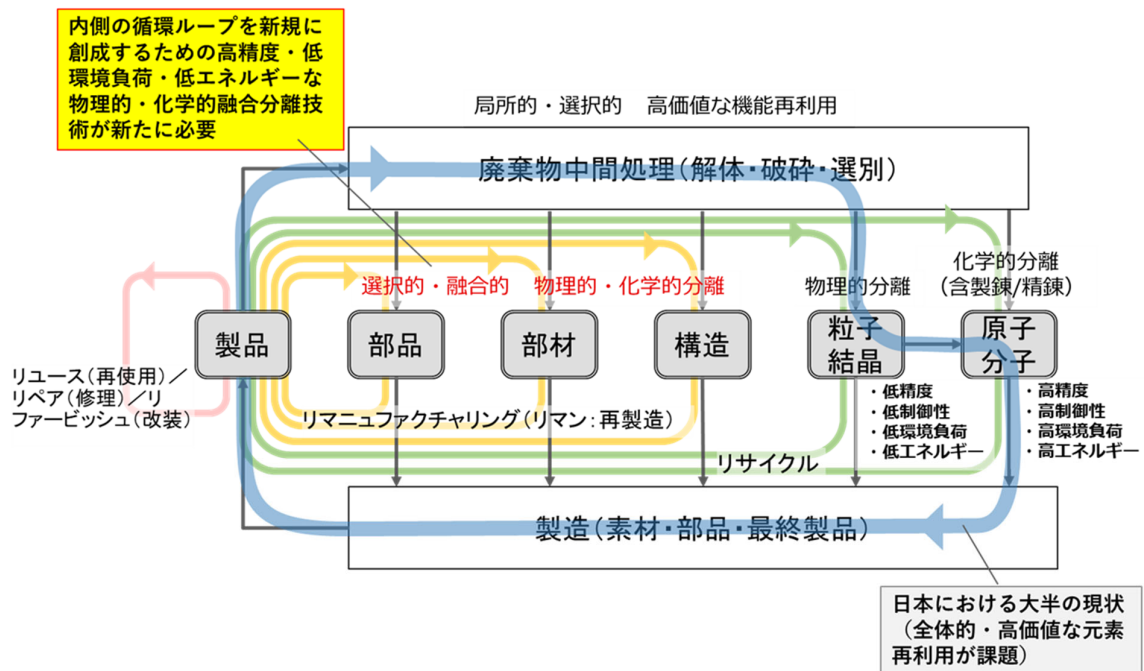


図 3 CE のための分離技術

リマンは、使用済みの製品を解体、洗浄、検査、修復、再組み立ての上、最終検査を行い、新品と同等あるいは、それよりも上の機能をもつ状態にするプロセスを指す。リマンは新品同等以上の機能を付与することが特徴的である。

リマンのプロセスは、まず使用済み製品や材料を適切に回収・分類し、再利用可能なものと廃棄すべきものを選別する。選別された製品や材料に対して、洗浄を行った後、物理的・化学的な検査を行う。洗浄は高コストなプロセスであり、水による通常洗浄以外に有機溶剤を用いた化学洗浄や、ショットブラストなどの機械洗浄などがあり、排水処理などのプロセスそのものの環境対策も重要である。目視による損傷検査の他に非破壊検査をおこない、状態診断の上、信頼性評価に基づき再利用可否を判断する。第三者機関による信頼性評価の確立がマーケットの信頼性を高める上で重要であると言える。修復プロセスにおいては、損傷箇所を溶接や再メッキなどにより状態回復を行う。3D プリンタ技術の普及により複雑形状の部品についても対応が可能になってきている他、熟練者のスキルに依存していた修復作業が安定的かつ即時性をもって部品製造が可能となっている。一方で素材の組織レベルで新品同様の修復には、一定の課題が残されている。例えば、損傷箇所の修復を行った場合、接合部の応力劣化や界面部の欠陥発生抑制などは追加の組織観察や修復後の検査・信頼性評価が必要とされる。

現状の製品製造はリマンを前提としておらず、必ずしも易解体設計、保守、修理を容易にできる構造ではないものもある。電動化、通信技術の高度化は、製品の使用状況のモニタリングを促進し、部品の交換時期を消費者・生産者に共有することで、過度な品質劣化を防ぎ、部品交換を可能にすることで製品寿命の延伸が期待される。また部品回収時期を把握することで、回収部品の在庫管理効率の向上も期待される。

品質保証を適切に行った上で、リマンを促進するために再生部品や素材利用に対して、保険事業の役割も重要である。万が一、製品が不良であった場合でも、保険による補償が受けられる仕組みがあれば、再生部品によるリスク回避につながることから消費者の忌避感回避につながる。

7. 金属製品や材料の再生に関する現状の問題

ベースメタルの一つである鉄は建設用構造材料以外にも自動車用鋼板など、現代の様々な製品を製造するうえで欠かすことができない基礎素材として大量に生産ならびに利用されている[12]。鉄鉱石中の酸化鉄を炭素（コークス）で還元して粗鋼を生産する鉄鋼業では、2050年のカーボンニュートラルに向けて、鉄鋼生産における大幅な二酸化炭素の削減に迫られており、現行の高炉－転炉プロセスから還元剤として水素ガスを利用するプロセスへの転換を図っている[13]。水素ガスを利用するプロセスとしては、シャフト炉等を用いた固体還元鉄の製造とそれに続く電炉での熔融処理による鉄鋼材料の製造とともに、既存高炉の改造等による還元剤の一部を水素ガスに置換える技術の確立が進められている[12,13]。例えば、後述する SUPER COURSE50 (CO₂排出量 50%以上削減プロジェクト) の取組では、カーボンニュートラルの実現に向けて水素還元技術の確立による高炉からの二酸

化炭素排出量の大幅削減と CCUS（二酸化炭素の回収、貯留、利用）技術の 2040 年頃の実用化を目指している[14, 15]。一方で、自動車メーカー等の製造業からのライフサイクル全体での早期の二酸化炭素削減の要望にも応える必要があることから、マスバランス方式によるグリーンスチール[16]の供給とともに、各製鉄所では高炉から大型電炉への転換が進められており、電炉一貫プロセスでの高級鋼の製造も行われている[14, 15, 17]。しかし、水素還元製鉄の実用化には技術の確立とともに安定的かつ安価な水素ガスの大量供給が必須であることから[3]、それまでは電炉化にともなう大量の鉄スクラップ原料の確保が必要となる。安定的なスクラップ原料の確保に向けた高級のみならず低級スクラップの利用には、現行の高炉一貫プロセスに比べて劣る不純物除去技術の向上とスクラップ由来のトランプエレメントへの対応も迫られることとなる[14, 18]。

非鉄製錬業界においてもカーボンニュートラルの実現に向けての対応を迫られており、特に銅地金の製造に関しては、今後の GX 化に伴う大幅な銅需要の増大が見込まれることから、国内においてはリサイクル率増大への取組が各製錬所で行われている [19, 20]。銅製錬におけるリサイクル原料として貴金属の含有量の多さからプリント基板に代表される E-scrap の大量確保が必須であり、各銅製錬会社では国内のみならず海外に E-scrap の集荷拠点を設けることで国内でのリサイクル率の増大を図っている [19, 20]。銅製錬技術として、リサイクル原料の増処理に伴う不純物増大等への対策が必須となるが、今後の銅需要の増大予測に対してはリサイクルの増強のみでは対応できないと考えられている。そのため、低品位（高不純物）鉱石の利用も世界的に進んでおり[21, 22]、特に国内の銅製錬所では、不純物が少ない、例えばヒ素濃度が低い銅精鉱を輸入している現状であることから、今後、高不純物の銅精鉱の国内処理も大きな課題となる可能性がある [23]。

鉛と亜鉛の循環利用も、カーボンニュートラルへの社会的要求に大きな影響を受けるとみられており、鉛に関しては廃鉛バッテリーを主要原料とした二次製錬がすでに活発であり高いリサイクル率で鉛の循環利用は行われている [24]。しかし、主要な鉛二次製錬は溶鉱炉等の化石燃料（炭素還元剤）を利用する技術であり、また各製錬所の規模も鉄鋼に比べて非常に小さいことから、現状、水素ガス等への代替技術の開発は進んでおらず[25]、将来的に鉄鋼業で確立した水素利用技術等を転換導入出来たとしても、経済合理性を持って鉛二次製錬が行えるのかどうか難しいところである。亜鉛に関しては、自動車鋼板等のメッキに多く利用されることから、鉄スクラップの再生利用において電炉で発生するダストの処理が廃棄物処理とともに亜鉛の循環利用において重要である。通常、電炉ダストはウェルツキルン法等の高温での炭素還元により処理されて、粗酸化亜鉛が回収される [26]。粗酸化亜鉛にはフッ素等のハロゲンの混入が多いため、硫酸亜鉛溶液から亜鉛を電解採取する一般的な亜鉛一次製錬所では大量処理が難しく、国内では主に熔鉱炉法である ISP 法にて亜鉛地金が再生されている [27]。しかし、鉛二次製錬と同様に化石燃料（炭素還元剤）が必要なプロセスのため、将来的に水素ガス等への代替技術が求められるが、経済合理性などを鑑みて今後も従来通りの炭素還元法で行うとしても、金属資源循環と環境対策への貢献を二酸化炭素発生の一元的な環境影響評価で妨げないようする必要がある。今後、電炉化を進める鉄鋼業では鉄スクラップの利用拡大により電炉ダストの発生量が増大することが考え

られ、既存の粗酸化亜鉛製造ではなく電炉ダストを直接湿式処理する技術開発も国内で試みられているが[28]、大量の鉄残渣の再生利用や最終処分等の問題も大きいと予想され、今後実用化されるかどうかすぐには判断出来ない状況である。

非鉄金属では、銅、鉛、亜鉛の他に、リチウムイオン電池の正極活物質に利用されるニッケルとコバルト、リチウムの安定的な確保が喫緊の課題となっている[29]。ニッケル鉱物資源としては硫化鉱と酸化鉱が存在しており、製錬プロセスも乾式ならびに湿式と多様であるが、ニッケル製錬ではコバルトも副産物として重要である[30]。国内では、ニッケルとコバルトの一次製錬所が存在しており、正極活物質用の精製化合物の供給と密接に関係付けることでリチウムイオン電池のサプライチェーンの重要部分を担っている[31]。国内のみならず海外においてもニッケル、コバルト、リチウムの回収を目的とした廃リチウムイオン電池のリサイクル技術開発が各リサイクル会社や非鉄製錬会社を中心に活発に進められている[32]。今後、国内でのニッケル、コバルト、リチウムの資源循環を促すためには、まずは自動車会社を中心となり、国内での廃電気自動車／ハイブリット車の処理ならびに資源化を想定した廃リチウムイオン電池の効率的な回収システムを構築することが重要であり[33]、このシステムを活用することで各リサイクル会社や非鉄製錬会社における資源の循環利用が進むと考えられる。

8. CN と相補的な鉄資源循環プロセス

日本のエネルギー起源 CO₂ 排出量(2020 年、電気・熱配分後)において、鉄鋼業はその製造量の多さから日本の産業部門の中で最大の 13%を占めており、その低減は、重要な課題である。

日本鉄鋼連盟では、2021 年 2 月 15 日、わが国の 2050 年 CN に関する日本鉄鋼業の基本方針を発表し[34]、わが国の 2050 年 CN という野心的な方針に賛同し、これに貢献すべく、日本鉄鋼業としても CN の実現に向けて、果敢に挑戦することを宣言している。その概要は以下のとおりである[35]。

① ゼロカーボン・スチールの実現

一直線で実用化に至ることが見通せない極めてハードルの高い挑戦であることから、現在鋭意推進中の「COURSE50^{*9} やフェロコークス等を利用した高炉の CO₂ 抜本的削減+CCUS^{*10}」、更には「水素還元製鉄」といった超革新的技術開発への挑戦に加え、スクラップ利用拡大や中低温等未利用廃熱、バイオマス活用などあらゆる手段を組み合わせ、複線的に推進する。

② 挑戦する超革新的プロセス技術開発[36]

・製鉄プロセスの脱炭素化、ゼロカーボン・スチール実現には、水素還元比率を高めた高炉法 (SUPER COURSE50^{*11}) の下で CCUS 等の高度な技術開発にもチャレンジし更に多額のコストをかけて不可避免的に発生する CO₂ の処理を行うか、CO₂ を発生しない水素還元製鉄を行う以外の解決策はない。

- ・水素還元製鉄は、有史以来数千年の歳月をかけて人類が辿り着いた高炉法とは全く異なる製鉄プロセスであり、まだ姿形すらない人類に立ちはだかる高いハードルである。各国も開発の途についたばかりの極めて野心度の高い挑戦となる。

- ・シャフト炉での水素を利用した固体還元プロセス開発やスクラップや還元鉄を活用した大型電炉プロセスの導入も検討が進んでいる[37]。

- ・実装段階では現行プロセスの入れ替えに伴う多大な設備投資による資本コストや、オペレーションコストが発生するが、これらの追加コストは専ら脱炭素のためだけのコストで、素材性能の向上にも生産性の向上にも寄与しない。

上記のプロセス開発は CN の実現にはどれも必須であるが、現状でどのプロセスが 2050 年に実用されるかには不透明な部分が多い。資源循環の観点から、各プロセスに依って、現行の高炉—転炉プロセスでの資源循環の様相が大きく変化する可能性が高い[38]。現行のプロセスではコークス炉から出る Coke Oven Gas (COG) のエネルギー活用、スクラップ循環、廃プラスチックのリサイクル、副産物であるスラグの有効活用等、非常に効率的な循環が実施されている。対して、水素還元が実現された場合、コークス炉が存在しなくなり、エネルギー循環やプラスチック処理等、新たな問題が顕在化する。また固体還元プロセスに移行した場合には、利用できる良質鉄鉱石資源に限りがあるため、劣質鉄鉱石を利用せざるをえないが、その結果エネルギー効率の低下や次工程の電気炉等での新たな不純物処理が必須となる可能性が高い。また生じるスラグが発生量や組成の変化が予測され、新たな用途開拓が課題となる点が懸念される。更に CCUS の実現には発生した CO₂ をどのように異業種に搬送し活用するか、そのマスマルスをどのように調整するか等の課題もある。違う視点では、水素還元で製造された鉄鋼材料（グリーンスチール）を今までの鉄鋼材料と同じスクラップとして取り扱うかについても議論が必須である。

以上述べたように、鉄鋼業において CN は喫緊の課題であるが、現行プロセスが資源循環の観点で[39]、ある意味でクローズドループリサイクルが実現できているので、プロセスの革新的な変化に依る大幅な変更を余儀なくされる。2050 年の CN の実現に向けて、資源、プロセス、リサイクル、水素や CO₂ のサプライチェーンの検討等の総合的な資源循環の観点で、議論が必須である。鉄鋼業のみでなく、産官学での議論の深化が急務な課題と考える。

9. トレーサビリティ確保のための高度素材分析

「動脈産業」と使用済み製品を回収し、再生利用や適正処分を行う「静脈産業」を繋ぎ循環を円滑に回すためのトレーサビリティの確保にはデジタルプロダクトパスポート (DPP) のための高度素材分析を行う、トレーサビリティプラットフォームが必要不可欠である。そのプラットフォームとして、2024 年に東北大学の青葉山新キャンパスに建設された 3 GeV 高輝度放射光施設 NanoTerasu (ナノテラス) の活用が始まっている。ナノテラスは、世界で 4 番目の低エミッタンス電子ビーム蓄積リングを有する最新鋭の放射光施設である。その光源性能 (輝度) は、軟 X 線領域で、世界最大の放射光施設 SPring-8 (兵庫県佐用郡佐用町) の最大 100 倍となる。2023 年より、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 第 3

期の「サーキュラーエコノミーシステムの構築」が始まり、ナノテラスは、「再生プラスチックの循環性向上のための品質分析データバンク構築」の拠点として高度素材分析の役割を担っている。具体的には、再生材の物性計測とナノテラスによる構造計測を合わせ、計算及びデータ駆動科学との融合により再生材の品質分析・品質改善まで循環性を向上させる再生材品質データバンクを構築している（図4）。

ナノテラスを高度素材計測に活用する最大の利点は、その光源の高輝度性が、DPPに必要な材料のシームレスで精緻な構造情報の計測、解析を可能にすることである。主な構造情報は小角・広角X線回折、X線イメージング^{*12}等により計測する。図5はポリプロピレン（PP）と再生材PPのナノテラスで計測した小角X線散乱^{*13}の計測例である。図に見られるように、0.15 nm（原子サイズ）から0.1 μm（ウイルスサイズ）までのシームレスなサイズデータを、短時間での多点測定（30秒/試料）、短時間での解析（プロファイルデータ化まで1分/試料）を可能にする。図5はその一例である。ナノテラスが、再生材PPでの、無機系の異物、微量の顔料の分散剤を高精度に定量評価できることを示しており、トレーサビリティプラットフォームの高度素材分析の強力なツールであることがわかる。図6のSPring-8との比較からも、ナノテラスは、構造計測データのシームレス性において優れており、トレーサビリティ確保のための高度素材分析の強力なツールであることを示している。

データバンク構築の取組の過程で、ポリエチレン（PE）相の混入（PP/PE界面破壊）が再生材PPの物性低下の一因であることも、明らかになってきた。これらの品質分析結果をリサイクラーにフィードバックすることで個社での品質改善策の指針を提供することが可能になる。また、アカデミア側の品質改善の検討として、バージンPPの添加による物性向上の影響を評価している。バージンPPの特性を汎用グレードから高結晶グレードにすることにより、曲げ特性が向上する知見を得ている。このように、ナノテラスの高度素材分析は、資源循環の推進につながる再生材の質的許容範囲を明らかにしていくであろう。



図4 ナノテラスの高度素材計測を組み込んだ再生プラスチックの循環性向上のための品質分析データバンク構築

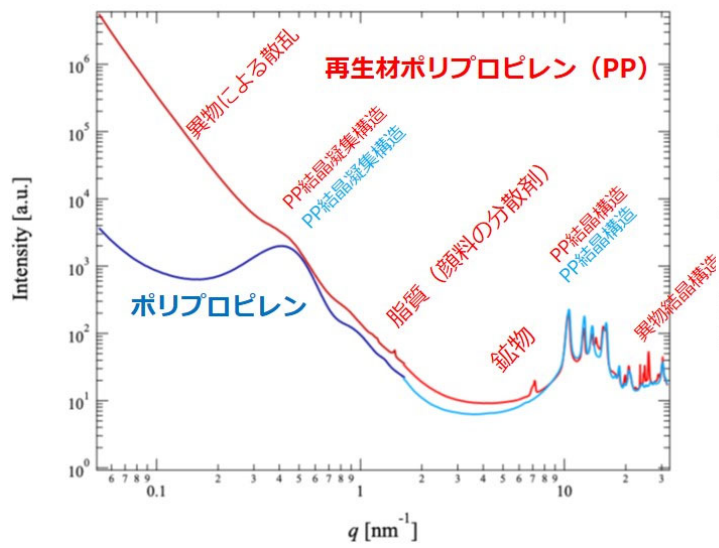


図5 ナノテラスで計測されたバージン材、再生材の小角X線散乱データ

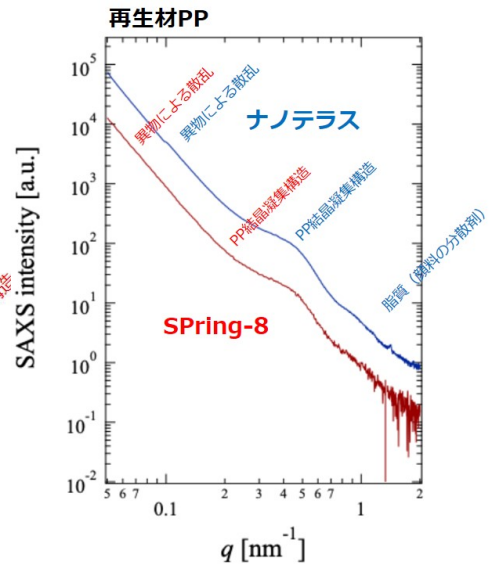


図6 再生材PPのX線小角散乱データのナノテラスとSPring-8の比較

<参考資料2の用語説明>

- *1 ネイチャーポジティブ
生態系多様性の損失を止め、反転させ、自然と共生する社会を達成すること。
- *2 LCA
Life Cycle Assessment の略であり、ある製品・サービスのライフサイクル全体（資源採取—原料生産—製品生産—流通・消費—廃棄・リサイクル）又はその特定段階におけるCO₂排出などの環境負荷を定量的に評価する手法である。
- *3 LIME
Life cycle impact assessment method based on endpoint modeling の略であり、製品の原料調達から廃棄までの環境負荷を評価する「LCA」において、特に環境影響（温暖化、資源枯渇など）を統合化・数値化する、日本発の評価手法。人間の健康、生物多様性などへの被害量を算出できるのが特徴。
- *4 IPBES
The Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services（生物多様性及び生態系サービスに関する政府間科学-政策プラットフォーム）の略で、2012年に設立された「科学的評価」、「能力養成」、「知見生成」、「政策立案支援」の4つの機能を活動の柱とした科学的知見と政策の橋渡しをする国際組織。
- *5 IRP
Integrated Reporting Principles（統合報告原則）の略であり、統合報告は、財務資本（利益、資産）だけでなく、非財務資本（人的資本、知的資本、自然資本など）も含めた、組織の価値創造プロセスを包括的に開示する手法。
- *6 センサ選別
センサを活用してベルトコンベア上の対象物を識別し、自動的に分類する技術。識別には光学式や電磁式などがあり、色や材質、形状、金属の有無などを検出する。
- *7 磁選
磁力を利用して磁性物質と非磁性物質を選別する技術。強磁性や常磁性を持つ物質の選別に適しており、鉄やニッケルなどを選別できる。磁力選別あるいは磁力選鉱とも呼ばれ、リサイクル、鉱物処理、廃棄物選別などに活用される。
- *8 渦電流選別
導電性のある非鉄金属を選別する技術。高速回転する磁界によって渦電流を誘導し、アルミニウムや銅などの非鉄金属を反発力で分離する。
- *9 COURSE50
CO₂ Ultimate Reduction System for Cool Earth 50 Project の略。CO₂排出の抑制と、CO₂の分離・回収により、CO₂排出量を約30%削減する技術を開発するプロジェクト。2030年頃までに技術確立し、2050年までに実用化・普及を目指す。
- *10 CCUS

Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage の略で、分離・貯留した CO₂ を利用しようというもの。経済産業省では、この CCS 及び CCUS に使われる技術開発を支援しており、2020 年頃に、技術の実用化を目指している。

*11 SUPER COURSE50

製鉄所外から購入する水素も活用して COURSE50 よりさらに大量の水素を高炉に吹き込むとともに、直接還元鉄も利用するなどして、高炉からの CO₂ 排出量を極限まで下げる技術。鉄鉱石の一部を直接還元鉄に代替し、現行の高炉法と比較して CO₂ 排出量の 50% 以上削減を達成する技術の実証を目指している。

*12 X 線イメージング

X 線が物体により吸収される程度によりその物体の画像を投影すること。

*13 小角 X 線散乱

X 線を物質に照射して散乱した X 線のうち、 $2\theta < 10^\circ$ 以下の低角領域に現れるものを測定し、物質の構造を評価する分析手法。通常、数 nm～数十 nm 程度の大きさの構造を評価できる。

<参考資料 2 の参考文献>

- [1] UNEP. Inclusive Wealth Report 2023: *Measuring Sustainability and Equity*. United Nations Environment Programme (2023). DOI : 10.59117/20.500.11822/43131
- [2] UNU-IHDP & UNEP. Inclusive Wealth Report 2012 (2012): *Measuring Progress Toward Sustainability*. Cambridge University Press.
- [3] UNU-IHDP, & UNEP. Inclusive Wealth Report 2014 (2014): *Measuring Progress Toward Sustainability*. Cambridge University Press.
- [4] Managi, S. and Kumar, P. "Inclusive Wealth Report 2018 (2018): *Measuring Progress Towards Sustainability*", Routledge (2018).
- [5] 馬奈木俊介、中村寛樹、松永千晶(2019) : . 持続可能なまちづくり : データで見る豊かさ、中央経済社.
- [6] Managi, S., S. Chen, P. Kumar, and P. Dasgupta (2024): "Sustainable Matrix Beyond GDP: Investment for Inclusive Growth", *Humanities and Social Sciences Communications* 11, 185.
- [7] 大塚直、松本津奈子 : 翻訳・OECD (2017) 「拡大生産者責任・効率的な廃棄物管理のためのガイドンス現代化」環境法研究 6 号、信山社, 221.
- [8] 内閣府 科学技術・イノベーション推進事務局、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) サーキュラーエコノミーシステムの構築 社会実装に向けた戦略及び研究開発計画、2024 年 9 月 5 日
https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/circulareconomy.pdf
- [9] 鈴木朋子 : 成長志向型の資源自律経済への転換に向けた日立と産総研の挑戦、学術フォーラム、日本学術会議、2024 年 11 月 22 日
<https://www.scj.go.jp/ja/event/pdf4/368-s-1122-s2.pdf>
- [10] <https://www.iso.org/committee/7203984.html>
- [11] https://www.aluminum.or.jp/sys_img/files/1591338421_0.pdf

- [12] 経済産業省：GX 推進のためのグリーン鉄研究会事務局 鉄鋼業を取り巻く状況について 令和6年10月16日
https://www.meti.go.jp/shingikai/mono_info_service/green_steel/pdf/001_04_00.pdf
- [13] 日本製鉄株式会社：産業構造審議会グリーンイノベーション部会 エネルギー構造転換分野 WG 説明資料 プロジェクト名「製鉄プロセスにおける水素活用」2022年9月12日
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/energy_structure/pdf/010_06_00.pdf
- [14] 柿原敏彦：日本高炉メーカーの生産プロセスの転換－高炉廃止、電炉化の選択－、NPI Commentary 2024年2月22日：
https://www.npi.or.jp/research/data/npi_commentary_kakihara_20240222.pdf
- [15] 日本製鉄株式会社：2023年度3Q決算説明会 2024年2月7日
https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20240207_300.pdf
- [16] 日本鉄鋼連盟：グリーンスチールに関するガイドライン 2025年4月改訂
<https://www.jisf.or.jp/business/ondanka/kouken/greensteel/documents/JISFGSguidelinev3.1final.pdf>
- [17] JFE スチール株式会社：ニュースリリース 革新電気炉（高効率・大型電気炉）の導入決定について 2025年4月10日
<https://www.jfe-steel.co.jp/release/2025/04/250410-1.html>
- [18] 日本製鉄株式会社：日本製鉄カーボンニュートラルビジョン2050, 2021年3月30日
https://www.nipponsteel.com/ir/library/pdf/20210330_ZC.pdf
- [19] 三菱マテリアル株式会社：統合報告書2024
<https://www.mmc.co.jp/corporate/ja/ir/library/annual.html>
- [20] JX 金属株式会社：サステナビリティレポート2024
https://www.jx-nmm.com/sustainability/pdf/report2024_j_full_interactive.pdf
- [21] JOGMEC：令和4年度第5回 JOGMEC 金属資源セミナー カーボンニュートラル社会実現への貢献 銅、コバルト、レアアースの確保に向けた新しい鉱山技術－銅原料からのヒ素低減技術開発事業の成果 2022年12月20日
https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2022/12/mrseminar2022_05_03.pdf
- [22] EcoMetales：Arsenic and antimony abatement plant (AAA)
<https://www.ecometales.cl/operaciones-y-proyectos/abatimiento-de-arsenico-como-escorodita-aaa>
- [23] JOGMEC：平成29年度第4回 JOGMEC 金属資源セミナー 銅原料中の不純物低減技術開発 2022年12月20日
https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2017/08/mrseminar2017_08_05.pdf
- [24] JOGMEC：鉱物資源マテリアルフロー 2022 2. 鉛 (Pb) https://mric.jogmec.go.jp/wp-content/uploads/2024/02/material_flow2022_Pb.pdf
- [25] 日本鉱業協会：カーボンニュートラル行動計画 2022年度実績報告 非鉄金属製錬業界における地球温暖化対策の取組 2024年1月
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/shigen_wg/pdf/2023_001_07_01.pdf
- [26] 永井克彦、松本康弘、渡邊弘志：Journal of MMIJ, 123(2007) 726-729.
- [27] 吾妻伸一：Journal of MMIJ, 123(2007) 661-665.

- [28] 株式会社キノテック：鉄鋼電炉ダスト中の亜鉛を LME Grade の亜鉛地金に、残渣を電気炉に再投入する亜鉛リサイクル技術（亜鉛市場からみたキノテック法）
https://www.kinotech.jp/_files/ugd/a4a1d3_7f113d726dd94e5a9ab0d0d66ee879b8.pdf
- [29] 経済産業省：バッテリーメタルの安定供給確保に向けた方向性 2025 年 3 月 12 日
https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/battery_strategy2/shiryo05.pdf
- [30] 尾崎佳智、岡部 徹、香川 豊：Journal of MMIJ, 130 (2014) 93-103.
- [31] 住友金属鉱山株式会社：統合報告書 2024
https://www.smm.co.jp/ir/library/integrated_report/pdf/2024/2024_All.pdf?241004
- [32] Zsolt Dobó, Truong Dinh, Tibor Kulcsár: Energy Reports, 9 (2023) 6362-6395.
- [33] 日本自動車工業会：自動車メーカー（自工会）の取組みについて 2021 年 10 月
https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/resource_circulation/pdf/005_04_00.pdf
- [34] <https://www.carbon-neutral-steel.com/about/>
- [35] <https://www.jisf.or.jp/news/topics/20210215.html>
- [36] <https://www.scj.go.jp/ja/event/pdf3/316-s-1126-t4.pdf>
- [37] https://www.jfes.or.jp/topic/topic20221205_lecture20221111-1.pdf
- [38] <https://www.iis.u-tokyo.ac.jp/ja/news/3822/>
- [39] <https://ci.nii.ac.jp/ncid/BB29345195>