Deloitte.
デロイト トーマツ



Next Stage Vol. 29

Strategy insight for Metals industry

金属スクラップのリサイクルチェーン動向 ～日本の目指すべき姿：仮説～

金属素材生産を取り巻くマクロトレンド

2050年に地球温暖化の原因となるCO_2排出量0を目指し、各産業が取り組みを強化している。とりわけ金属素材生産はその生産過程においてCO_2を大量に排出（図1）するため、従前の事業モデルの変革が必要となるほどの大きな技術的、商業的挑戦を強いられている。これは、現状の金属素材生産は鉄鉱石やボーキサイトなどの天然資源を原料とするプロセスが主流であり、種々の金属元素に応じて、採掘・製造（製鋼・製錬／精錬）などのプロセスにおいて大量のCO_2を排出しているためである。

例えば鉄鋼においては、現在の主流を占める高炉プロセス（乾式プロセス）では、天然資源である鉄鉱石中に含まれる酸化鉄を炭素で還元するため、大量のCO/CO_2が排出される一方で、還元反応が発熱反応となり、排出されたCOを下工程で燃焼させるなどエネルギー効率がよく合理的な生産プロセスである。またアルミは、鉄鋼のように原料起因のCO/CO_2は発生しないものの、電解製錬工程にて大量の電力を消費する。アルミニウムは電気の缶詰と言われる所以であり、結果として、火力発電が中心である現在において、大量のCO_2が排出されているとみなされる。

その他の金属元素においても、鉱石採掘時や電解精製時等、多量のエネルギーが必要とされ、結果として大量のCO_2が排出されたとみなされるケースが多い。さらにコロナウイルス禍、グローバルにおける政情不安等の外部要因によって、鉄・非鉄問わず金属価格の乱高下も発生している。

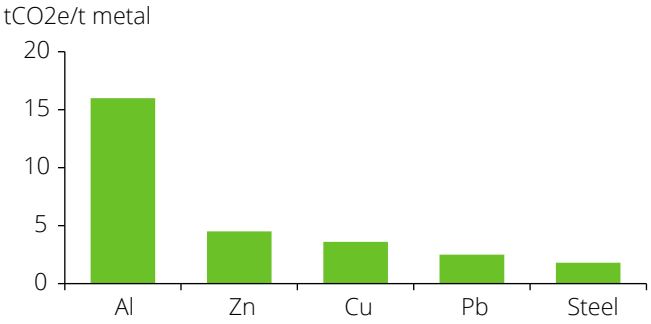
昨今、特に顕著であった例は白金族であるパラジウム（Pd）、ロジウム（Rh）であり、様々な要因から、短期間の間にて数倍もの乱高下が発生した（図2）。このような状況下、金属素材を供給・利用する企業のみならず、国家としても、金属資源の確保がより重要なイシューとなり始めている。

天然資源由来とスクラップ由来の金属素材生産

金属素材の生産には、現在主流となっている天然資源を原料にする方法に加え、スクラップを原料とする方法も存在する。

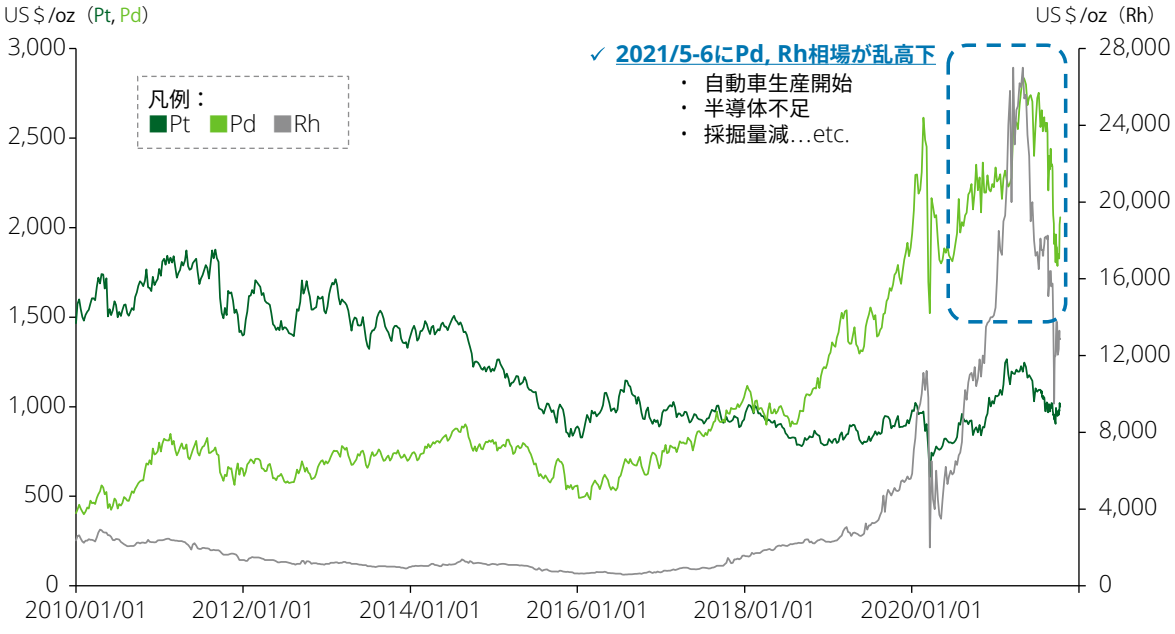
スクラップを原料とする生産形態は多種の金属元素において研究開発が進められているが、まだ一部の製品に限られ、世界的な金属素材の需要を満たすためには、天然資源に頼らざるをえない状況である。これは鉄、アルミ、銅、ニッケルなどの大量生産・大量消費される金属はもちろんの事、コバルトや希土類といった、EV・その他先端材料に必要となる金属についても当てはまる。

図1. 主要金属における単位重量当たりのCO_2排出量概算値（鉱石採掘／製錬／精製プロセスの合計値）



出所：公知情報よりデロイト算出

図2. 昨今起きた白金族：Pd、Rhの相場乱高下



出所：公知情報よりデロイト算出

各種金属素材における天然資源由来の製錬とスクラップ由来の製錬の特徴比較を図3に示す。

天然資源由来の製錬は歴史を辿れば、鉄・非鉄共に紀元前から近代に到るまで技術的観点・コスト的観点の双方にて改善に改善を重ねられ、現状においてプロセス自体は成熟化していると考えらえる。課題感としては、『製造プロセスから発生するCO/CO_2をどうやって削減するか?』、『地政学的問題にどう対処すべきか?』、『省エネ対策をどうすべきか?』等が主となっている。対して、スクラップ由来の製錬の難しさは、主に原料であるスクラップが不均一なごみであることに起因する。スクラップは工場端材、建築・自動車廃材などが主ではあるが、人間の活動で廃棄された使用済み家電や携帯電話、廃自動車の制御系基板、パソコン等を由来とし、貴金属やレアメタルを多く含む、いわゆる都市鉱山、E-waste、E-scrapと呼ばれる金属スクラップも存在する（以下、E-scrapと統一して表記）。もう少し詳しく二つの製錬を取り巻く環境の違いを説明する。

天然資源由来の製錬においては、原料となる鉱石中の有価物濃度の低品位化が叫ばれて久しい。現状、鉱山の所有権が基本的に外資の資源メジャーに握られている日本の製錬事業者は、低品位化、すなわちガサ量当たりの収益減に対応する必要がある。次に地政学的要素について、貴金属やレアメタルといった天然資源は一部の国やエリアに限られる為、当該国・エリアの政略的な施策や、宗教、その他要因等にて供給がストップした場合、関連する金属素材／製品の製造ストップや遅延等、多大な影響を及ぼす。昨今の極端な事例として、2022/1、オーストラリアに本部を持つ資源メジャーA社のセルビアにおけるリチウム開発について、セルビア政府が許可を急遽取り消した。この理由は、セルビア出身のトップテニスプレーヤーが新型コロナウイルス対策の入国規定を巡り、オーストラリアから国外退去処分を受けたことで、セルビアの対オーストラリア感情が悪化したことに起因する。

これらとの対比においては、スクラップ由来の製錬にはポジティブな要素が存在する。原料における有価物濃度について、これはE-scrapにおいて特に顕著であり、例えば金は鉱石と比べ数十倍～数百倍の高濃度で含有されるケースも多い。またエネルギー消費の面でも製造プロセスでは天然資源由来の製錬では必要となる工程の一部がスキップされることが多く、結果として省エネルギー化が期待される。この影響が特に顕著な例はアルミニウムであり、

図3. 天然資源由来の製錬とスクラップ由来の製錬の特徴比較

●：ポジティブ要素 ▲：ネガティブ要素		天然資源由来の製錬	スクラップ由来の製錬
内部要因	原料	● 構成要素が安定している	▲ 構成要素が不安定 ● 何が入ってくるか分からない為 ● 事前の破砕・選別に依存 ● 鉱石より、一般的に有価物濃度が高い
	製造プロセス	● プロセスが成熟している ▲ スクラップ由来の製錬と比べ、消費エネルギー高い、CO_2排出量が多い	▲ 未成熟なプロセスが多い ● 不測の事態への対応が必要な為（例：不純物混入による品質不良、有害ガス発生による設備損傷等） ● 天然資源由来の製錬と比較し、省エネが期待される
外部要因	原料調達に関する要素	● 鉄・非鉄共に、大手製錬事業社は、安定調達可能なチャネルを確保している ▲ 有価物濃度の低品位化が始まっている	▲ “ごみ”である為、安定調達可能なチャネルの確保が比較的困難である ● 上記に関連し、調達経路確保に伸びしろ有（E-scrap例：欧州は約55%、アメリカは約85%が回収されず、埋め立てに）
	地政学的要素	▲ 貴金属、レアメタルに代表される原料は、一部の国・エリアに限られる ▲ 上記に関連し、資源保有国の政策の変化によって、様々な影響が発生する	● 天然資源由来の製錬と比較し、地政学的要素の影響が薄い（例：希土類鉱石は中国集中、希土類磁石スクラップは世界中に存在）

例えばアルミ地金の場合、原料を100%スクラップとした場合、必要なエネルギー量が10%以下となる（図4）。

さらに回収チャネルについては伸びしろが十分に有り、かつ国内循環をさせることで地政学的要素の影響を受けにくく、結果として金属資源の国内備蓄強化と同義になり、全ての金属素材を必要とするコモディティ品～先端技術製品の安定生産に寄与する。つまりスクラップ由来の製錬の拡大は、国家としての金属資源の安定確保に直結するのである。

一方で、スクラップ由来の製錬の更なる拡大に向けては天然資源由来の製錬とは異なった課題が存在する。

まず原料となるスクラップには、天然資源と比べて想定外の構成要素の混入の可能性があり、バリューチェーン全体でこれに対処する必要がある。想定される悪影響として以下のようなものがある。

- 品質不良：鉄スクラップ中におけるコイル（銅分）混入による、鉄鋼製品の品質不良
- 設備損傷：家電スクラップ中の基板（臭素分）による、ハロゲンガス起因の設備腐食
- 安全：E-scrap中のリチウムイオンバッテリー（以降、LiB）混入による、爆発事故による労働災害

これら課題をクリアする為には、取引されるスクラップの精査（インボイスに合致したスクラップか否かの分析等）、入念な破砕・選別（人的コスト、先進設備導入）、さらにプロセスの改善（不測の事態を予測し、どれだけ対応出来るか）の全てが必要となり、生産コスト増となりうる。そのため、現時点では天然資源由来の製錬の方が、経済合理性の観点から優位であるケースが多い。

アルミ缶リサイクルは世界中で確立されているが、これは一度『空き缶のみを回収するプロセス』さえ確立すれば、原料の構成要素、及び調達量は安定的となり、上述の品質不良／設備損傷／安全に関与する問題も起きにくい為である。これは、スクラップ全体のリサイクルとしては稀有な例である。

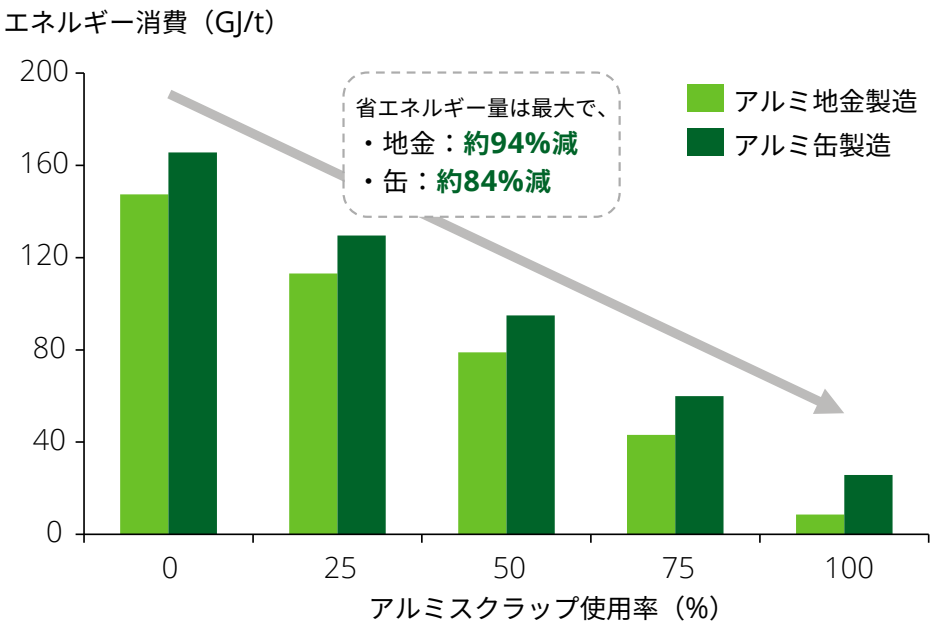
本レポートにおいては、経済合理性・生産性で優位である天然資源由来の製錬プロセスにおける課題を補い、将来の金属生産において重要な位置づけを占めると思われるスクラップ由来の製錬にフォーカスをあて、その課題や施策を分析する。

スクラップ処理の現状

先進国における実態として、スクラップの中でも、一定のガサ量が有り、かつ極力そのままの形で再原料化しやすい、すなわち複雑な破砕・選別が不要なものは、直接製錬にまわされることも多く、リサイクルも進んでいる。この一例として、アルミ缶や建築用鋼材、銅電線などが挙げられる。特に前述したアルミ缶は顕著で、日本国内においては94%（2020年度、アルミ缶リサイクル協会調査）がリサイクルされている。

一方、E-scrapのように自動車の制御基板や小型精密機器の銅配線など、金、銀、銅、ニッケルのような有価金属が多く含まれているものの、プラスチックやゴム等、他素材との混合度合いが強く、複雑な破砕・選別が必要となるスクラップは、処理コストが高くなり経済的な間尺に合わず、産業廃棄物として埋め立てられるケースがグローバルにて未だに多い。しかし、日本のように国土の狭い国だけでなく、昨今の環境保護政策トレンドから、アメリカや欧州といった国土の広い国においても最終処分量削減の政策が施行され最終処分コストの増大が起こっている。過去には、最終処分に回されるような収益の見込めないスクラッ

図4. アルミリサイクルにおける省エネルギー効果

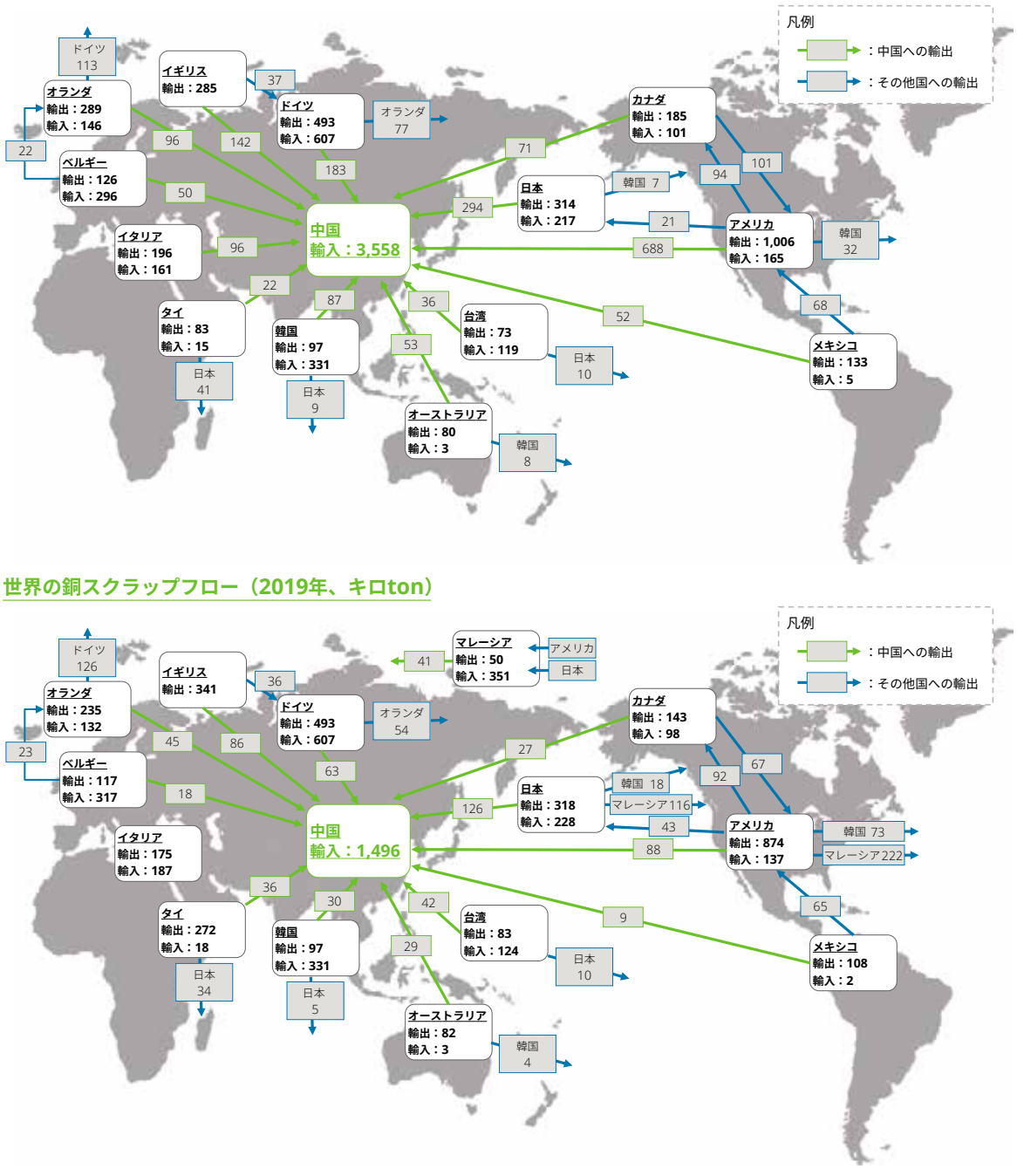


出所：一般社団法人 日本アルミニウム協会

プの世界的な受け皿を、広大な土地や安価な労働力を持つ中国が担っていた。これは、中国が処理費用としての純粋な収益を上げるとともに、各種金属の国内需要を満たすためであった。しかし近年、環境や労働安全衛生重視の観点、さらに資源の自国内循環の推進を受け、複雑な破砕・処理を必要とするような雑多なスクラップの受け入れを規制し始め、スクラップ全体の輸入量が急激に減少している。

一例として、銅スクラップの輸入量は、2017年から2019年において半分以下となっている（図5）。これは2020年前の状況であり、コロナウイルスによる影響は関与しない。従って、これまで国内処理を忌避していたスクラップの処理は、前章で言及したスクラップ由来の製錬におけるメリットの追求だけでなく、義務としての側面をも持ち始めている。

図5．世界の銅スクラップフローの変化



出所：調査会社レポートよりデロイト作成

スクラップのリサイクルチェーンの概要

スクラップのリサイクルチェーンは、元素やスクラップ種類により若干異なる部分はあるものの、基本的には、『回収』／『破砕・選別』／『製錬・精製』を軸とし構成されている（図6）。

まず『回収』機能は廃棄物となった製品をスクラップとして回収し、ある程度（≒スクラップ加工会社が受け入れ、値決めがしやすい状況）のパッケージ化を行い、次工程の『破砕・選別』機能に販売する。現在は一部の製品メーカーが担っている部分もあるが、基本的には小規模なスクラップ回収事業者から、大手の専門商社が介在するケースまで多岐にわたる。

次の『破砕・選別』機能は、スクラップを再生原料として原料へと転換する機能であり、スクラップ加工会社の規模によって、部材・素材への選別、製錬・精製効率を踏まえて原料を微細化する破砕、不要な成分を取り除き有価物である金属元素を濃縮するプロセス等を有する。具体的には、建築廃材などを単純な人手による目視での選別のみを行うところから、ある程度の大規模設備を持ってリサイクルを行っているところまで、幅広く多くのプレーヤーが存在する。この『破砕・選別』機能を経て、次プロセスの『製錬・精製』に販売されるが、この間に専門商社が入り、在庫としての保管や、取引を仲介するケースも多い。

最後に『製錬・精製』機能がある。これは、天然資源由来の製錬事業者が、そのプロセスを用いてスクラップ由来の製錬を並行して実施するケースもあれば、スクラップ由来の製錬に特化した事業者も存在する。これらを経て、再生地金が『製品製造』機能（製造メーカー）によって製品製造・販売され、各種製品として世に回る。

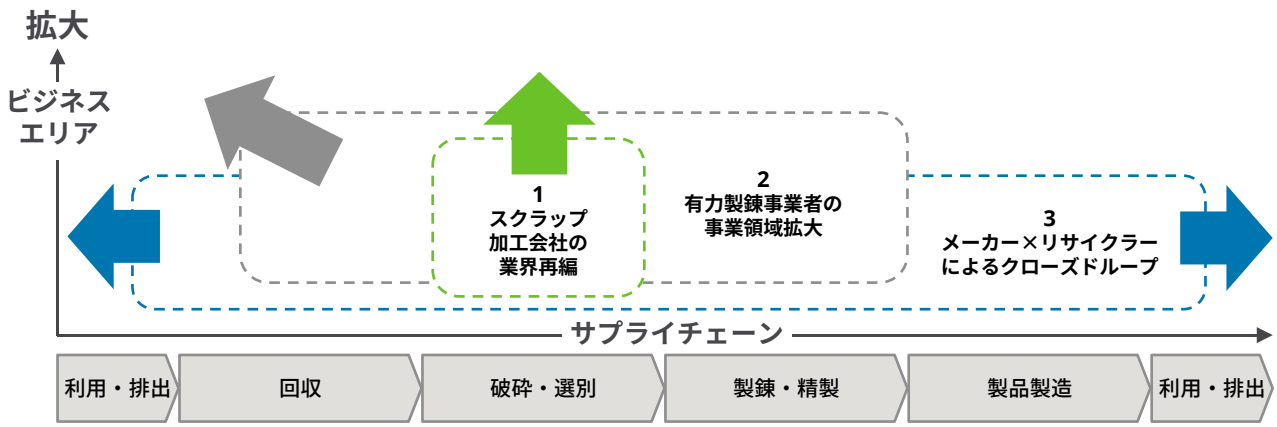
スクラップリサイクルチェーンにおける昨今のトレンド

近年は、グローバルのマクロトレンドとして存在するカーボンニュートラル、サーキュラーエコノミー社会への関心の高まりに加え、AIやIoT等の先端技術を活用した高度な破砕・選別技術の台頭、さらに産学共同研究等を経た製錬・精製プロセスの高度化によって、スクラップ由来の製錬全体が活況を示し始めており、特に有価物濃度の高いE-scrapは大手製錬事業者間で奪い合いの状況となっている。しかしその反面、有価物濃度の低いE-scrapや、収益性の薄い鉄スクラップ、銅スクラップ等は、中国の受け入れ減も関連し、スクラップ相場によっては行き場を失うケースも依然として多い。つまり、スクラップのリサイクルチェーン全体において依然、効率化・高度化に寄与する打ち手が必要とされているという理解になる。足元では、従来の個社レベルの営業力・技術力の強化だけではない取り組みが散見されるようになってきた。これら取り組み例を図7のように整理し、各々の事例を紹介する。

図6. 金属スクラップのリサイクルチェーン概要



図7. 金属スクラップリサイクルチェーンにおける昨今のトレンド



1）スクラップ加工会社の業界再編

一つ目の事例は、スクラップ加工会社における業界再編である。スクラップ加工会社は図６における『破砕・選別』機能を担うプレーヤーであるが、従来、グローバルにおいては各国、各地域をカバーする巨大なリサイクル会社が存在し、それに比べ日本においては比較的小規模の企業が各地域に点在している状態であった。しかし、利益率の観点では巨大企業と小規模の企業の間に大きな差異はなく、営業利益率は5%前後に留まっている（図8）。

つまり、企業規模の大小を問わず、更なる業務の効率化や高度化が必要とされていると解釈できる状況である。このような背景からか、業界全体にて再編が進行しており、日本におけるＢ社のM&A推進、海外における業界大手Ｃ社による買収（2021/12、EU合併規則に基づき承認）するなど、規模の追求の動きも生まれている。このような業界再編にて『破砕・選別』機能に属するプレーヤーの収益性が上がり、さらなる追加投資にて、経済合理性の合うスクラップがより多くサルベージされ、『製錬・精製』に販売され、さらなるリサイクル率向上が見込まれる。

2）有力製錬事業者の事業領域拡大

二つ目の事例は、有力製錬事業者（図６における、『製錬・精製』機能）による、事業領域の拡大である。スクラップ由来の製錬ビジネスの拡大の為、有力製錬事業者は新規事業立ち上げやM&Aなど、様々な施策を打ち始めている。こちらのケースは目的別に次のように大別される。

- スクラップ由来の製錬ケイパビリティ獲得／増強
  Ｄ社：タイの電炉大手２社を買収（2021/12）
- スクラップ原料の調達販路拡大
  Ｅ社：Ｆ社と共同出資で欧州にE-scrap受入・サンプリング拠点設立（2016/7）、廃基板スクラップ売買プラットフォーム展開（2022/1）

Ｇ社：欧州系非鉄大手Ｇ社が、アメリカにスクラップ処理設備建設を発表（2021/11）

上記いずれにおいても、『製錬・精製』機能に該当するプレーヤーがスクラップを貴重な原料として定義し、処理量を稼ぐことで、再原料化のコストを抑制しつつ、自社の金属素材生産のための原料を確保しようという動きである。前述のよう、カーボンニュートラルや戦略的な資源備蓄の観点から、再生原料の確保に向けたグローバルレベルでの競争激化が予想され、経済合理性を満たしつつ、スクラップを安定調達・安定処理できることが、『製錬・精製』機能における競争力の源泉となりうると考えられる。

また単純な事業領域の拡大だけでなく、リサイクル後進国へいち早く進出し回収のための拠点、商流を確立させてしまおうという動きであるようにも見える。これは上記の日本製鉄の事例だけでなく、アメリカにおけるスクラップ処理の伸びしろ（未だに、欧州に比べ最終処分が多い）に期待するＧ社の動向にも当てはまると推察される。

図8. 代表的なスクラップ加工会社の営業利益率（2020年）

国	企業名	売上（M US$）	営業利益(M US$)	営業利益率(%)	備考
アメリカ	Waste management	15,218	2,478	**16**	■全体では**高利益率だが、リサイクル事業は売上高比率6%** ■ゴミ回収／中間処理／埋め立てが84% ⇒リサイクル事業の寄与薄い可能性高い
	Schnitzer Steel Industries	1,712	20.7	**1.2**	2020は例年より悪い（2019：3.9%、2018：6.2%）
	Sims※1 （本社はオーストラリア）	4,259	69	**1.6**	2017～2020と、同様のトレンド （2020は赤字、2017～2019は1.7～2.5%）
	Republic service	10,154	1,841	**18**	■全体では**高利益率だが、リサイクル事業は売上高比率3%** ■スクラップ回収業者／公のごみ回収業者等に対する、 貸しコンテナ業が74%⇒リサイクル事業の寄与薄い可能性高い
EU	Veolia Environment※2	30,691	1,355	**4.4**	■水事業：スクラップ事業：エネルギー事業 ＝ 42:37:21 ■個別の利益率は非公表
	Suez Group※2	20,306	991	**4.9**	■水事業：スクラップ事業 ＝ 42:58 ■個別の利益率は非公表
	BIFFA※3	1,414	53.5	**3.8**	例年と同様のトレンド（2019：3.2%、2018：5.7%、2017：3.8%）
	European metal Recycling※3	3,369	41.4	**1.2**	例年と同様のトレンド（2019：0.4%、2018：1.7%、2017：1.4%）
日本	YAMANAKA※4	204	7.9	**3.9**	例年と同様のトレンド（2019：3.5%）
	リバーHD※4	362	39	**11**	2020は例年と比べ、特筆して良い ・2017～2019：3.4～3.8% ・『理由=資源価格上昇』としている
	日本磁力選鉱※4	122	5.2	**4.3**	例年と同様のトレンド（2019：8%）
	エンビプロHD※4	409	21	**5.1**	■例年よりやや良いが、同様のトレンド （2016～2019：2.3～2.7%） ■2026年：700億円を目指しつつ、経常利益設定は40億円

US$変換式（現地通貨、変換係数）：※1（豪州$、×0.72）　※2（ユーロ、×1.18）　※3（英ポンド、×1.38）　※4（円、×0.01）

出所：各社公式ウェブサイトよりデロイト作成

3) メーカー×リサイクラーによるクローズドループ

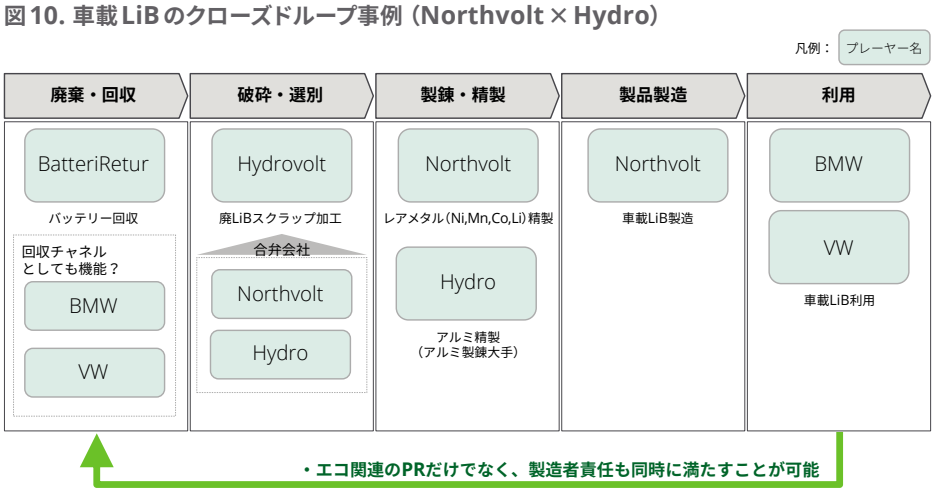
最後の事例としては、素材生産メーカー～製品メーカーが協力し、特定部材に関するクローズドなリサイクルループを形成する形である。図６における全てのプレーヤーが関与するが、イニシアチブは『製錬・精製』機能（製錬事業者）か、『製品製造』機能（製品メーカー）が握ることが多い。このクローズドループの概要は、まず製品メーカーが製品を製造し、それが利用・廃棄された当該製品がループ内にて回収され、破砕・選別と製錬・精製を経て、製品メーカーに再度、当該製品の原材料や部材として納入される…といった、サーキュラーエコノミーの理想形のようなループが形成される。これは、ループ参加者いずれにもメリットがある形でのコラボレーションとなる。各プレーヤーの代表的なメリットを図９に整理する。

このように、理想形と思われるクローズドループであるが、実現するにあたっては、『当該スクラップを、当該ループにどう戻すか?』という課題が存在する。例えばドライヤー、マウス、電子タバコといった小さな電気製品の場合、そのトレース自体が非常に困難であるため同様のクローズドループを形成することは非常に難しい。こちらの形が現時点で成立する条件としては、金属素材～製品～スクラップのトレーサビリティ確保の目処が立つか否かであり、対象製品・素材が限定的となる。現時点でこのクローズドループが達成されている例として、LiBにおける例が複数存在する。本レポートでは、LiB製造大手であるNorthvoltと、アルミ製錬大手であるHydroがイニシアチブを握る車載

図9. クローズドループにおける各プレーヤーの代表的なメリット

プロセス		クローズドループにおける代表的なメリット
利用・排出	一般人、官民	■（民間人の場合）当該製品を利用することで、**エコ活動に参加**できる ■（企業の場合、将来的な可能性として）カーボンオフセット等の観点より、**何かしらのインセンティブを享受できる可能性**がある
回収	スクラップ回収事業者	■**素性の知れたもの**を回収する為、**値決めが容易であり、回収作業が効率化**される （雑多なスクラップの場合のような、人手選別＋値決め、等が不要である）
破砕・選別	スクラップ加工会社	■**素性の知れたもの**を回収する為、**破砕・選別工程の自動化がしやすく、業務効率化が比較的容易**である （雑多なスクラップの場合、スクラップ毎へのマニュアル対応が必要である）
製錬・精製	製錬・精製事業者	■**素性の知れたもの**を処理できる為、**製錬・精製工程におけるトラブル・リスクをあまり気にせず、業務効率化が比較的容易**である （雑多なスクラップの場合、投入することで工程内を損傷したり、品質不良に関与する要素に注意しなくてはならず、事前の選別や複雑な操業コントロールが必要に）
製品製造	二次加工事業者、製品メーカー	■**当該製品を製造する為の原料を、安定的に確保**することが出来る （仮に地政学的な要因で当該原料が入手困難になっても、ループ内で確保されている為である）

図10. 車載LiBのクローズドループ事例（Northvolt × Hydro）



出所：各社公式ウェブサイト情報よりデロイト作成

LiBのクローズドループを紹介する（図10）。

このクローズドループは、NorthvoltとHydroが、Northvolt製の廃LiBの『破砕・選別』機能であるHydrovoltを設立し、成立した。Hydrovoltはほぼ自動で廃LiBを解体し、『製錬・精製』機能としてNorthvoltがニッケル、コバルト、マンガンを、Hydroがアルミをリサイクルし、その原料を用いてNorthvoltが『製品製造』機能としてLiBを製造し…といったループで成り立っている。さらに、大手自動車OEMであるVW、BMWがNorthvoltとの協業を発表しており、本ループへの関与も想定される。

スクラップリサイクルの促進に必要な要素の仮説

前章までにてスクラップのリサイクルを取り巻く環境と、直近のトレンドをご紹介した。ここでスクラップのリサイクル促進に必要な要素について総括すると、以下2要素が同時に存在することだと考える。

1. 環境保護や原料安定供給の為に、スクラップのリサイクルが促進されるべきである、と言う認知
2. 各プロセスの事業者における経済合理性の担保

つまり1.のみを目標に掲げて、例えば政府補助金の積極導入等でのリサイクル促進では、おそらくどこかで頭打ちになると推測する。

本章では上記1.を前提とした上で、2.の経済合理性を得る為に必要となる要素について考察したい。経済合理性は、規模の追求によって一定程度のコスト削減は見込めるものの、天然資源由来の製錬品と比較し、「スクラップ由来の製錬品の価格競争力がどこまで強くなるか」については、まだ不明瞭な点も多い。またスクラップ由来の製錬品使用によってCO_2発生量削減は期待されるものの、そのコスト増分を製品メーカー、もしくは一般消費者に転嫁できるか？という課題に対しても、まだまだ未知の領域である。

ここで課題感を考察するにあたり、スクラップリサイクルのサプライチェーンにおけるそれぞれのプロセスにおいて、促進に好ましい状況と、それに必要な要諦の仮説を整理した（図11）。さらに要約すると、以下3点が重要となる。

- 『利用・排出』：簡単に捨てられる
- 『回収』／『破砕・選別』／『製錬・精製』：利益の出る処理が出来る
- 『製品製造』：スクラップ由来の金属を利用するメリットが分かる

これら3点は同時に存在する必要があり、どれかが欠ければ、『回収』～『製品製造』における何かしらのプロセス

図11. 金属スクラップリサイクルの促進に必要な要素の仮説

プロセス		リサイクル促進において、好ましい状況	好ましい状況を満たす要諦
利用・排出	一般人、官民	■ 早く、楽に捨てられる ・一般人：複雑なプロセスを経ずに、早く、楽に捨てられる ・官民：有償・逆有償問わず、売買が簡単で早く、（主に売買価格の妥当性について）納得感がある	■ 廃棄物別に回収プロセスが存在し、それが簡易
回収	スクラップ回収事業者	■ 低コスト処理で、次段の『破砕・選別』向けのスクラップを準備出来る ・スクラップ購入時：安定的な調達経路が存在し、かつ何かしらの判断材料が存在し妥当性のある見積もりが可能である ・スクラップ販売時：妥当な条件で販売可能な、安定的な販売先が存在する	■ 安定的な調達、販売経路 ■ 有償・逆有償問わず、売買時の何かしらの判断材料
破砕・選別	スクラップ加工会社	■ 低コスト処理で、次段の『製錬・精製』向けの再生原料を製造できる（高コストで処理した場合、購入時⇔販売時の利益が減り、結果として最終処分増加） ・スクラップ購入時：安定的な調達経路が存在する ・破砕・選別時：次段の『製錬・精製』が処理可能な、再生原料を製造できる ・再生原料販売時：妥当な条件で販売可能な、安定的な販売先が存在する	■ 安定的な調達、販売経路 ■ スクラップの事前情報の獲得（手解体等を容易化） ■ 優れた破砕・選別設備
製錬・精製	製錬・精製事業者	■ リスクを取らず、製錬・精製が出来る再生原料を、安定的に調達できる ・製品の品質に悪影響を及ぼす要素が少ない（例：製鉄におけるコイル起因の銅、等） ・製造工程に悪影響を及ぼす要素が少ない（例：銅製錬における廃基板起因のハロゲンガスによるボイラー管腐食、等） ■ スクラップ由来の製錬品を、安定的に販売できる需要家がいる	■ 安定的な調達、販売経路 ■ 品質／工程への悪影響リスクが存在しない再生原料
製品製造	二次加工事業者、製品メーカー	■ 天然資源由来の製錬品と変わらず利用出来る品質を前提とし、以下2点のより多くを満たす 1. 地政学的リスク等を気にせず、安定的に原料を調達可能 2. 何かしらの付加価値（例：低CO_2排出量、高リサイクル率）が定量的に把握可能	■ 安定的な調達経路 ■ 当該スクラップ由来の製錬品の、付加価値情報の可視化

にて経済合理性の観点で矛盾が生じ、破綻する。

これらの要諦は、特定のスクラップ属性に絞られるようなクローズドループであれば満たしやすい。これは先に述べたような、特定の車載LiBリサイクルの場合、上記3点がそれぞれ以下のようになる為である。

- 『利用・排出』：専門の業者が簡単に引き取ってくれる
- 『回収』／『破砕・選別』／『製錬・精製』：素性が分かるスクラップであり、余計なリスクを負わない処理プロセスを設計できる為、比較的低コストで、安定的に処理が可能である
- 『製品製造』：量と品質の担保に加え、CO_2排出量やリサイクル率等の付加価値を把握可能である

しかし上記例も、あらゆるLiBのリサイクルを対象とした場合、全てがゼロベースになる。つまりE-scrap、建材スクラップ、ミックスメタル…といった、構成要素が雑多となるスクラップ（以降、雑品スクラップ）に対して、別途考察する必要がある

これはスクラップ全般に言えることではあるが、『利用・排出』を担う消費者にとって「早く、楽に捨てられる」は前提条件となる為である。例えばリサイクルの進んでいるアルミ缶は、町中の外・施設内問わず存在する回収容器の設置に留まらず、各自治体が回収を基本的に毎週実施しており、消費者はどこでも簡単に捨てることができる。またクローズドループ事例についても車載LiBの回収業者が存在し、排出する業者は負担なく捨てることができる。「ある程度の量を、安定的に取りまとめることが容易」という条件を満たすものであれば良いが、大抵のスクラップ（＝ごみ）はこれを満たすことが難しく、「早く、楽に捨ててしまう」ため、一括りにされてしまい雑品スクラップとして取り扱われることにならざるを得ない。この雑品スクラップについて、図11における好ましい状況を満たす要諦の獲得は難易度が高く、こちらに関しては特に『回収』と『破砕・選別』機能がいかに効率的に達成されるかがカギとなる。

日本国内におけるスクラップ由来の製錬を中核とした資源循環促進に向けた打ち手仮説

次に、日本のスクラップのリサイクルチェーンの目指すべき姿について考察したい。まず日本における『回収』～『製品製造』機能について、その概要を図12に整理する。

このように、日本は『製錬・精製』・『製品製造』機能が海外と比較して優れている一方、『回収』・『破砕・選別』機能において企業数が非常に多く、更に、国土の狭さから、海外大手スクラップ加工会社のような「港に大型の破砕機（シュレッダー等）を設置し、大量輸入して大量破砕する」といった手法が採りにくいため、『回収』・『破砕・選別』機能の大企業化は難易度が高いと考える。そのため、製品メーカーまで含めたサプライチェーン上の大小多様な事業者の協力関係が日本国内の資源循環促進に必要不可欠であり、これを実現・促進する仕組みとして“金属リサイクルプラットフォーム”構想を提言したい。

このプラットフォーム構想の概要を図13に示す。この構想は多くの事業者が存在する金属スクラップリサイクルチェーンにおいて、各企業が自社の利益を追求するだけでなく、機能間で価値を提供し合うことで産業の全体最適を

図12. 日本における金属スクラップリサイクル関連プレーヤーの概要

プロセス		日本における概要
回収	スクラップ回収事業者	■ 多用なケイパビリティを持つ企業が多く存在し、海外にスクラップ調達・販売チャネルを持つ企業も多い ■ **企業数が非常に多く、結果として大規模投資や規模の経済を目指しやすい企業が少ない（海外のような、売上1000億円以上のような大企業が存在しない：参考、図8）**
破砕・選別	スクラップ加工会社	
製錬・精製	製錬・精製事業者	■ グローバルにて存在感のある大企業が多数存在し、かつ大抵の金属元素について、天然資源由来／スクラップ由来の製錬が可能である ■ 海外に製錬・精製機能を持つ企業も多い
製品製造	二次加工事業者、製品メーカー	■ グローバルにて存在感のあり、先端技術を持つメーカーが多い（結果として、各種金属を欲する企業が多い）

志向するものであり、ITシステムのみを指すのではなく参加企業の協力関係そのものを指す。プラットフォーム実現のイニシアチブを持つのはチェーン内で相対的に規模の大きい『製錬・精製』機能及び『製品製造』機能が想定されるが、川上の『回収・破砕・選別』機能もメリットを享受できる仕組みとすることが肝要であると考える。

本プラットフォームにおいて、金属スクラップのリサイクルチェーンの各機能が果たす役割及び、他機能への提供価値について説明する。

『製錬・精製』機能：再生原料受け入れ時に必要となる要素（有価金属濃度、有害物質許容量、原料の形態、単位ロットあたりのガサ量…etc.）を明確化した上で、それを達成するにあたり必要となる情報を提供し、さらに必要に応じて設備投資にも協力する。併せて、安定的な再生原料の調達を約束する。これによって『回収・破砕・選別』機能は、自社で処理するプロセスのゴール（どのようなものを、どの位…etc.）が明確になり、他社から呼び込んだ設備投資による処理プロセスの効率化・高度化も相まって、スクラップ処理のコスト削減が実現可能となる。

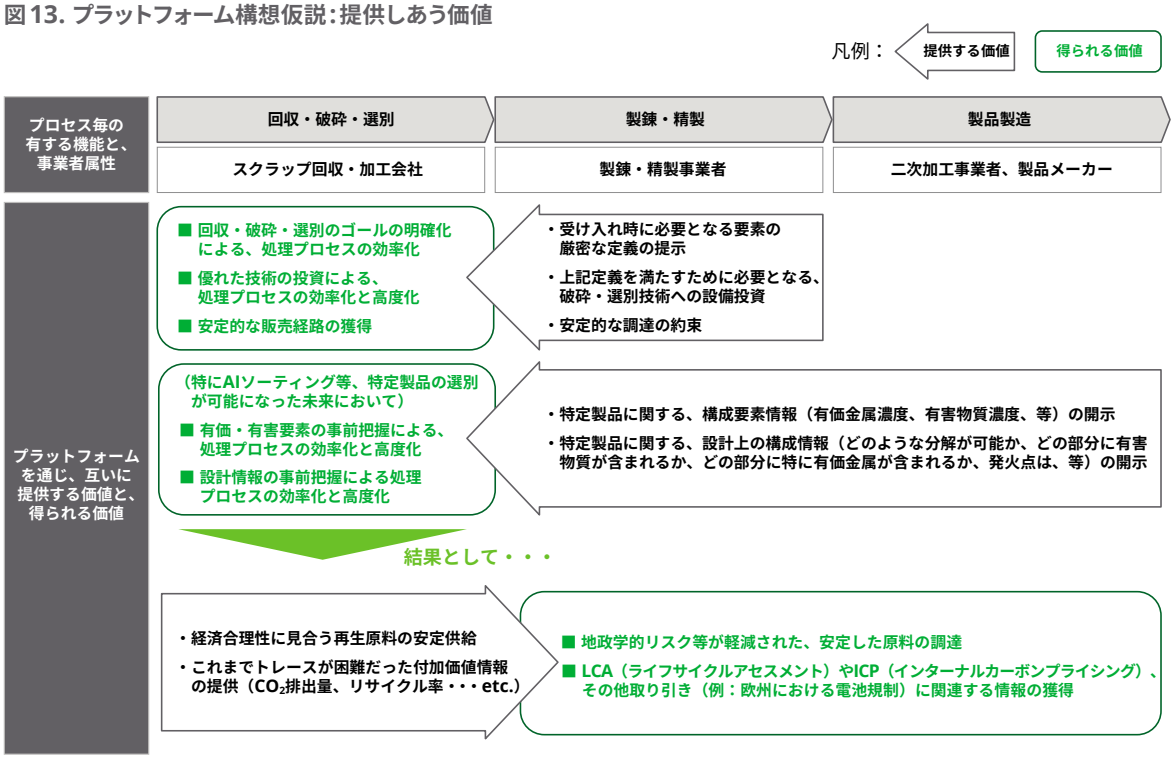
『製品製造』機能：自社製品に関する構成要素情報（有価金属濃度、有害物質濃度、等）と、設計上の構成情報（どのような分解が可能か、どの部分に有害物質が含まれるか、どの部分に特に有価金属が含まれるか、発火点は、等）をプラットフォーム参加者に出来る限り開示する。これによって『回収・破砕・選別』機能は、AI画像診断等の次世代ソーティング技術を積極的に導入しやすくなり、事前分解や有価金属の濃縮、有害金属の除去の処理プロセスが効率化・高度化を達成し、さらなるスクラップ処理のコスト削減が実現になると見られる。

『回収・破砕・選別』機能：『製錬・精製』・『製品製造』機能からの価値享受と、業界再編の進行に伴い、大きく2つの価値提供が可能になる。一点目は経済合理性に見合う再生原料の安定供給であり、コスト競争力が担保された再生金属素材が一層流通されることで、国内における資源循環がより強化される。二点目は、これまでは分断されていた各企業は保有する情報が連携され、『製錬・精製』や『製品製造』機能にとってトレースが困難であった付加価値情報（CO_2排出量、リサイクル率…etc.）の提供が可能になる点である。この提供価値が今後のゼロカーボン時代に不可欠かつ重要な要素となると考える。

まずLCA（ライフサイクルアセスメント）について、これはある製品や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環境負荷を定量的に評価する手法である。ISOによる環境マネジメントの国際規格の中で、ISO規格が作成されており、こうした流れを受けて、日本企業でもCSR報告書などでLCAが取り入れられ始めている。しかし、リサイクルプロセスの『回収・破砕・選別』領域はトレースが出来ないことも多く、スクラップ由来の製錬品を用いた製品のLCA算出は従来困難であった。これが、本プラットフォームの稼働によって、解決される可能性がある。

次にICP（インターナルカーボンプライシング）について、これは企業内部で見積もる炭素の価格であり、企業の低

図13. プラットフォーム構想仮説：提供しあう価値



炭素投資・対策を推進する仕組みである。気候変動関連目標（SBT/RE100）に紐づく企業の計画策定に用いる手法であり、省エネ推進へのインセンティブ、収益機会とリスクの特定、あるいは投資意思決定の指針等として活用され、環境省の2020/3報告によると、世界のICP導入予定企業数は2,000社超で増加傾向、日本でも約250社が導入予定とされている。これも前段LCAと類似した観点より、スクラップ由来の金属を用いた製品を扱う場合の算出は従来困難と想定されたが、本プラットフォームにより、解決される可能性がある。

また製品取引においても、昨今はトレーサビリティの観点がグローバルで重要視され始めている。本プラットフォームが提供するトレーサビリティには、「だれから買い、どの位のリサイクル率で、どの位のCO_2排出量で、等々」といった、多様な情報が含まれる。特に欧州ではこのトレーサビリティが義務化の方向に進んでおり、トレーサビリティ担保がサプライチェーンの必須条件となりつつある。この一例として欧州における新電池規則がある（図14）。この新電池規則ではCO_2排出量だけでなく再利用された原材料の使用量等、トレーサビリティが重要となる情報が極めて多い。これら、現状の日本の金属スクラップサプライチェーンではチェーン全体での可視化が困難であるが、本プラットフォームにより、この問題は解決される可能性が高い。

上記のようなプラットフォームを実現するためには、特定の業界だけではなく、サプライチェーン全体に関与するプレーヤーが一体となり、短期的な利害関係を乗り越えて協調していく必要があり、そのために官・学の協力も必要になると思われる。ゼロカーボン時代を迎えるにあたって、大局的視点から取り組むべき課題であり、時間的な猶予も少なくなりつつあるという認識である。

最後に

昨今サーキュラーエコノミーに関するISOとしてリサイクルを促進するTC323が設置、第一回総会が2019/5に実施されていることにみられるように、グローバルにおけるリサイクル促進の流れは、より加速すると考える。またリサイクル全般に当てはまるが、最終処分を減らす為に十分な選別作業が必要となる事が多いため、ケースによってはエネルギー消費量が増え（＝CO_2排出量が増え）、結果としてゼロカーボンとゼロエミッションが相反することもあり、考察が非常に難しい領域である。私どもデロイト トーマツ コンサルティングでは各企業の支援をしながら大局観をもった意見発信を続けていく所存である。

図14. 欧州における新電池規則の概要

EU：循環型経済に向けた電池規制の改正

- ■ 欧州委員会は、資源循環の促進を目的とし、**電池規制の改正案を発表**（2020/12/10）
- ■ 2050年までの温室効果ガスの排出実質ゼロを掲げる欧州委員会の、**『循環型経済行動計画』における取り組みの第1弾**に
  - ●『循環型経済行動計画』とは？
    - ・ 2020/3/11に発表
    - ・ 環境に優しい経済活動実現、競争力と環境保護の両立、消費者の権利強化を、主たる目的とする
- ■ 本件に関連し以下のような施策も打ち出されており、**EU市場における電池規制は、今後加速度的に強化される傾向**である

例1：持続可能なスマートモビリティー戦略
- ・ 2020/12/9に発表
- ・ 温室効果ガス排出量の90%削減／2050年迄を大目的としている

例2：欧州バッテリー同盟
- ・ 2017/10/11より開始
- ・ EV用電池等、EU域内産業の競争力強化が大目的
- ・ 現在までに、官民一体となり、EU域内企業によるEV用電池の生産プロジェクトが相次いで立ち上がり

“新”電池規制で強化される多数の項目

- ■ 今回の改正案では、**あらゆる種類のバッテリー**を対象とし、製品設計～生産プロセス～再利用～リサイクルに至る、**ライフサイクル全体を適用範囲**としている
- ■ **製品設計**では、EVバッテリーや産業用充電池を対象に、以下のような項目が義務化（規則案第7条）
  1. **製造者や製造工場の情報**、バッテリーとそのライフサイクルの各段階での**CO_2総排出量**、独立した**第三者検証機関の証明書などを含むカーボン・フットプリント**の申告（2024/7/1より）
  2. ライフサイクル全体での**CO_2排出量の大小の識別**を容易にするための**性能分類の表示**（2026/1/1より）
  3. ライフサイクル全体での**カーボン・フットプリントの上限値**の導入（2027/7/1より）
- ■ Co、Pb、Li、Niを含むEV用、産業用等のバッテリーの**生産プロセス**に関して、以下のような項目が義務化（規則案第8条）
  1. 原材料のうち**再利用された原材料の使用量**の開示（2027/1/1より）
  2. 再利用された同原材料、各々の**使用割合の最低値**の導入（2030/1/1より）

トレーサビリティの必要性：大

出所：ジェトロ情報より、デロイト作成

執筆者



永長 正丈　Nagaosa Masatake
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
マネジャー

大手非鉄金属メーカーの製錬／精製／化学分析に関する技術部門、日系ITコンサルティング会社のIT戦略部門（主にBtoB-EC、RPAに関連するビジネス策定）を経て、現職。主に金属リサイクル／サーキュラーエコノミー／製造プロセス改善に関連する戦略立案、実行支援業務に従事。



羽場 隆介　Ryusuke Haba
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
マネジャー

大手鉄鋼メーカーでのプラントエンジニアリング職を経て現職。主に化学メーカーにおける新規事業創出、市場調査等に従事。



浅野 長仁　Nagahito Asano
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
シニアマネジャー

鉄鋼会社技術スタッフ、プラントエンジニアリング会社、外資系IT会社コンサルティング＆SI部門を経て現職。製造業における生産／品質／設備管理領域の業務改革を中心に営業改革、ビッグデータ活用等の構想策定に関する経験が豊富。

発行人



柴田 雄一　Yuichi Shibata
デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
執行役員パートナー
（プロセスユニット メタルチームリーダー）

外資系IT会社コンサルティング＆SI部門を経て現職。鉄鋼業を中心とするプロセス・インダストリー業界における業務改革からソリューション導入を多数実施。鉄鋼協会等での講演を多数実施。近年ではグローバル経営管理、M&Aを含む海外戦略を主に担当。

Next Stage バックナンバー

バックナンバー送付をご希望の方はご連絡ください。

Vol.1　日系鉄鋼関連企業におけるグローバル経営管理についての一考察

Vol.2　アフリカ市場における日系鉄鋼企業の参入機会考察

Vol.3　自動車素材としてのアルミの可能性と鉄との比較

Vol.4　金属セクターのグローバルM&Aのマクロトレンド
～アフターリーマンショック～

Vol.5　IT革新によるオペレーショナルエクセレンスの追求
10年後も「ものづくりのトップランナー」であり続けるために

Vol.6　金属業界のアナリティクス最前線 ～アナリティクスが現場を変える～

Vol.7　アルミは自動車ボディー素材の主役になるのか？ ーその展望と課題ー

Vol.8　金属セクターにおけるイノベーションを進化させるオープンプラットフォーム戦略

Vol.9　TPP・AECなどのメガFTAに素材産業はどのように向き合うべきか
※化学業界向けニュースレター「扉」Vol.20との合併号

Vol.10 Global Stainless Steel Industry 日本ステンレスメーカー発展に向けての提言

Vol.11 金属業界のE-commerce戦略 ～ECは鋼材販売の武器となりえるか？～

Vol.12 鉄鋼業の「天使と悪魔」を考える
～ドローン・アナリティクスは「ご安全に」の精神を継承できるか～

Vol.13 マテリアルズ・インフォマティクスによる材料開発の未来

Vol.14 電動化の進む中国自動車市場に勝機はあるか？ ～金属素材産業への提言～

Vol.15 素材産業における次世代オペレーションプラットフォームの構築
～RPAは変革のカギになりえるか～
※化学業界向けニュースレター「扉」Vol.25との合併号

Vol.16 AIを制す者は、世界を制す
～AIに乗り遅れる者（企業）は市場から消える。AIに乗り遅れる国（文化）が衰退する～

Vol.17 マクロトレンドから読み解く鉄鋼業界の経営環境変化

Vol.18 静脈産業に求められる変革 ～金属スクラップ市場への提言～

Vol.19 Future of Mining ～The “low-hanging fruit” has gone～

Vol.20 素材産業における次世代オペレーションプラットフォームの構築
～RPA最新状況と更なる拡大に向けた考察～
※化学業界向けニュースレター「扉」Vol.26との合併号

Vol.21 グローバル・サプライチェーン・プラットフォーム
～金属業界のサプライチェーンの未来を描く～

Vol.22 金属業界の経営管理 ～景気後退に備える損益実態見える化～

Vol.23 量子コンピュータによるビジネスモデル変革 ～素材業界の未来を描く～
※化学業界向けニュースレター「扉」Vol.27との合併号

Vol.24 鉄鋼業界の未来への道標 ～DX銘柄への変貌～

Vol.25 COVID-19の脅威と金属業界への影響 ～不確実な未来へのSign～

Vol.26 気候変動に対する金属業界の新たな挑戦

Vol.27 ゼロカーボン・スチール実現に向けた論点と鉄鋼業界が歩むべき道

Vol.28 グリーンスチール最前線
～欧州の現在地と“ネットゼロ”を左右する5つの論点～

デロイト トーマツ コンサルティング　プロセスユニット

デロイト トーマツ コンサルティング（DTC）は、“グローバルでNO.1を達成する日本企業を創るために能動的に提言・発信する”ため、デロイトが持つ150カ国、20万人超のネットワークとコンサルティングのみならず、監査、税務、法務、ファイナンシャル・アドバイザリーの総合力を活かし、国内のみならず海外においても、戦略とその導入・実現に至るまで一貫したサービスを提供するコンサルティングファームです。

プロセスユニットメタルチームは、鉄鋼および非鉄金属業における業務改革への取り組み経験を基に、業界が直面している経営課題に対し、各クライアント企業での解決をご支援します。また、鉄鋼・非鉄金属業の重要ユーザーである自動車、産業機械、エネルギー業界等を専門とするチームとも連携・協働することによって、より高い付加価値を生み出すことに、強くコミットします。

デロイト トーマツ コンサルティング合同会社
プロセスユニット
〒100-8361 東京都千代田区丸の内3-2-3 丸の内二重橋ビルディング
Tel 03-5220-8600　Fax 03-5220-8601
www.deloitte.com/jp/dtc

デロイト トーマツ グループは、日本におけるデロイト アジア パシフィック リミテッドおよびデロイトネットワークのメンバーであるデロイト トーマツ合同会社ならびにそのグループ法人（有限責任監査法人トーマツ、デロイト トーマツ コンサルティング合同会社、デロイト トーマツ ファイナンシャルアドバイザリー合同会社、デロイト トーマツ税理士法人、DT弁護士法人およびデロイト トーマツ コーポレート ソリューション合同会社を含む）の総称です。デロイト トーマツ グループは、日本で最大級のプロフェッショナルグループのひとつであり、各法人がそれぞれの適用法令に従い、監査・保証業務、リスクアドバイザリー、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザリー、税務、法務等を提供しています。また、国内約30都市以上に1万5千名を超える専門家を擁し、多国籍企業や主要な日本企業をクライアントとしています。詳細はデロイト トーマツ グループWebサイト（www.deloitte.com/jp）をご覧ください。

Deloitte（デロイト）とは、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）、そのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人（総称して“デロイトネットワーク”）のひとつまたは複数を指します。DTTL（または“Deloitte Global”）ならびに各メンバーファームおよび関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体であり、第三者に関して相互に義務を課しまたは拘束させることはありません。DTTLおよびDTTLの各メンバーファームならびに関係法人は、自らの作為および不作為についてのみ責任を負い、互いに他のファームまたは関係法人の作為および不作為について責任を負うものではありません。DTTLはクライアントへのサービス提供を行いません。詳細は www.deloitte.com/jp/about をご覧ください。
デロイト アジア パシフィック リミテッドはDTTLのメンバーファームであり、保証有限責任会社です。デロイト アジア パシフィック リミテッドのメンバーおよびそれらの関係法人は、それぞれ法的に独立した別個の組織体であり、アジア パシフィックにおける100を超える都市（オークランド、バンコク、北京、ハノイ、香港、ジャカルタ、クアラルンプール、マニラ、メルボルン、大阪、ソウル、上海、シンガポール、シドニー、台北、東京を含む）にてサービスを提供しています。

Deloitte（デロイト）は、監査・保証業務、コンサルティング、ファイナンシャルアドバイザリー、リスクアドバイザリー、税務、法務などに関連する最先端のサービスを、Fortune Global 500®の約9割の企業や多数のプライベート（非公開）企業を含むクライアントに提供しています。デロイトは、資本市場に対する社会的な信頼を高め、クライアントの変革と繁栄を促し、より豊かな経済、公正な社会、持続可能な世界の実現に向けて自ら率先して取り組むことを通じて、計測可能で継続性のある成果をもたらすプロフェッショナルの集団です。デロイトは、創設以来175年余りの歴史を有し、150を超える国・地域にわたって活動を展開しています。“Making an impact that matters”をパーパス（存在理由）として標榜するデロイトの約345,000名のプロフェッショナルの活動の詳細については、（www.deloitte.com）をご覧ください。

本資料は皆様への情報提供として一般的な情報を掲載するのみであり、デロイト トウシュ トーマツ リミテッド（“DTTL”）、そのグローバルネットワーク組織を構成するメンバーファームおよびそれらの関係法人（総称して“デロイト・ネットワーク”）が本資料をもって専門的な助言やサービスを提供するものではありません。皆様の財務または事業に影響を与えるような意思決定または行動をされる前に、適切な専門家にご相談ください。本資料における情報の正確性や完全性に関して、いかなる表明、保証または確約（明示・黙示を問いません）をするものではありません。またDTTL、そのメンバーファーム、関係法人、社員・職員または代理人のいずれも、本資料に依拠した人に関係して直接または間接に発生したいかなる損失および損害に対して責任を負いません。DTTLならびに各メンバーファームおよびそれらの関係法人はそれぞれ法的に独立した別個の組織体です。

Member of
Deloitte Touche Tohmatsu Limited

© 2022. For information, contact Deloitte Tohmatsu Consulting LLC.