

日時： 2025年9月19日（金）午前
場所： 名古屋大学 東山キャンパス

二次資源の循環のための分離技術の考慮

東北大学大学院環境科学研究所
白鳥寿一

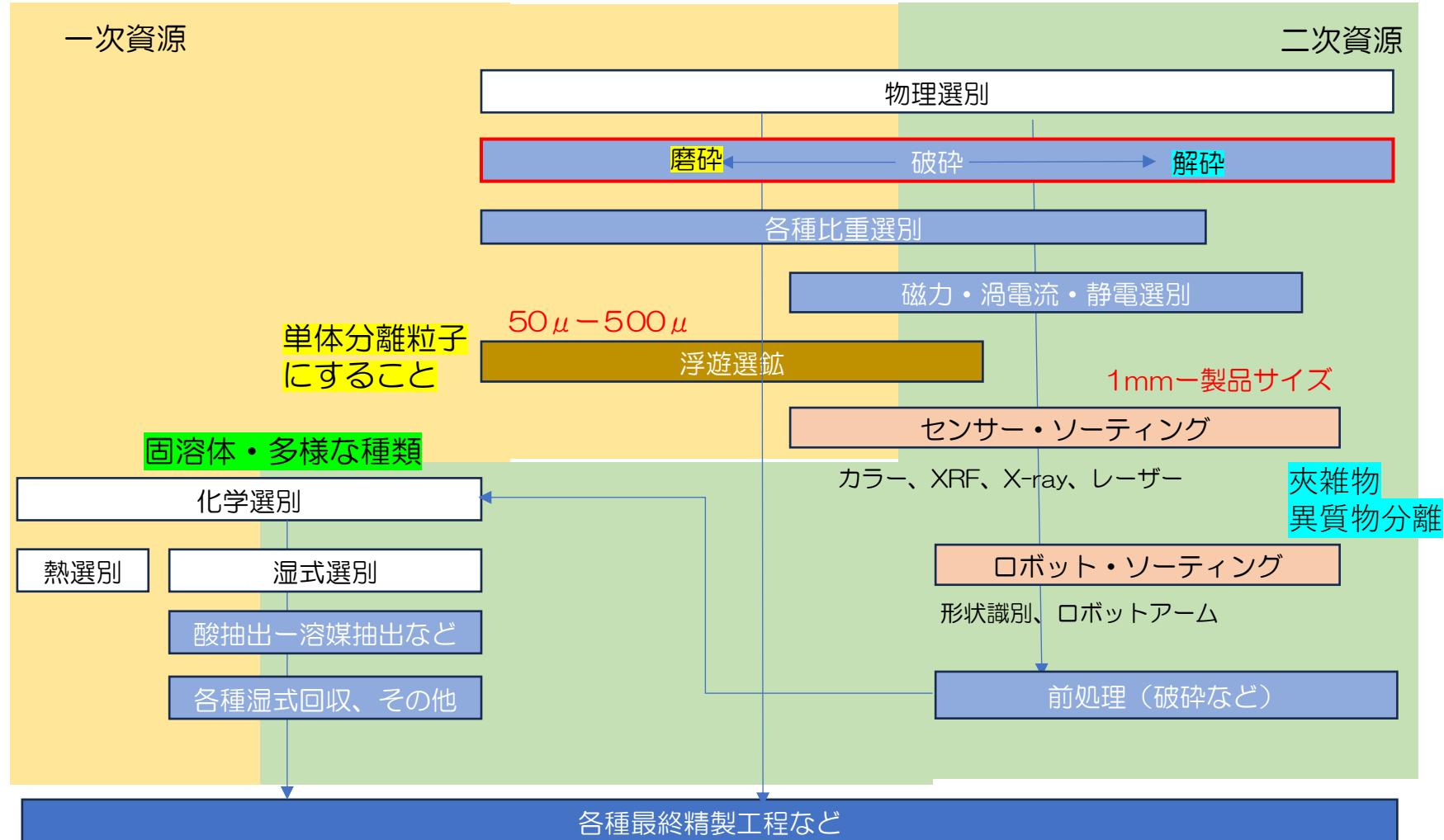
資源側からの資源循環への視点

- ✓ 資源とは、社会が「価値がある」と認めるものであって、「一定品質」と「一定量」が確保できることが条件
- ✓ 例えば、鉱物資源（地球が濃縮した）を例にとれば、採掘して有用鉱物の分離を行うことがその時々の経済合理性に則っていることから「天然の一次資源がこのような特性を持っている」ではなく、「このような特性を持ったものの（質と量）を発見して資源とみなしている」ということが現実である。
- ✓ 二次資源をリサイクルで得ることは経済合理性がないと指摘されるが、それは必ずしも資源の条件としての特性をもっていないからである。二次資源は、多くの場合、集約できる条件がなく「量」が欠落する。（プラスチックは二次資源ニヴァージンプラスチックでないもの、と考えると同じ）
- ✓ 製品で使われた資源は既に社会的に価値はあるから使われたもので、多くの場合は品質も高いため、この「量」という問題を解決すれば、一次資源にも対抗できる二次資源が現れる。しかし、量を集約するためには、革新技術というより、一定の社会的な制度などの工夫と適切な費用が必要である。
- ✓ 現在は、価格が高いもの、たまたま均一で一定量集まった集団だけを選んでリサイクルされることが多く（得た人は利益になる）、量を集約する部分に費用があまり積極的に配分されていない。

一次資源の分離と二次資源の分離

- ✓ 一次資源（天然資源）は、鉱床・鉱石（石油：プラスチック）を意味するが、一般に**一力所に膨大な量**があり、採掘一分離一精製の方法はその鉱石の特性に合わせ検討され、設備が投資され運転される
- ✓ 二次資源（人口資源）は、製品からの廃棄物を意味するが、**一力所ごとの発生量が少なく、定期的な量の集約が不確実**な場合が多く、専用の設備は作りにくい。特に製造業に原料を供給する精製工程の建設投資は、**品質や量の供給責任**も考えると二次資源専用はあまりない（例外あり）。
- ✓ そのため、既存の**一次精製に入るような原料グレードまでを分離工程で仕上げて**買い取ってもらうことが、リサイクラー側の一つの目標になっている事が多い。
- ✓ 技術的に、金属の一次資源の分離は、鉱石と脈石の物理分離で**精製工程への金属濃度を上げること**である。二次資源は、電化製品の例では、金属・樹脂の多くが固溶体となっており、物理選別は**部品の種類ごとに分ける**ことが一応の目標となり（次の処理工程にまわす）。プラスチックやガラスはなるべく**夾雜物を少なくする**事が目標。そのため、選別の前処理の考え方方が異なる。
- ✓ 日本では手選別などで先に良いものは分離して選別、良いものはリサイクル、その後破碎で物理選別。EUなどでは一括で集めて破碎して物理選別、使えるレベルでリサイクルしていくというようなWEEE（電子電気廃棄物）などの社会制度がソーター（既にガラスなどではよく使っていたが）などの普及と**技術の進展と考え方の分岐**を生んでいると感じる。

資源選別技術の俯瞰



選別に関する単位技術は非常に古くから多種あって行われている。最近だと思われているソーティング技術もかなり昔からあり、一次資源にはあまり使われなかつたが、カラス・プラスチックなどの二次資源の選別から脚光を浴びてきた。

ソーターは手選別作業同等の実行、人が見えない成分を判別、人が困難な細粒の分離、といった人が時間をかけければ可能な作業の代替が多い。最終的に資源として使うのは次の一段（数段）が必須。

ソーティング技術

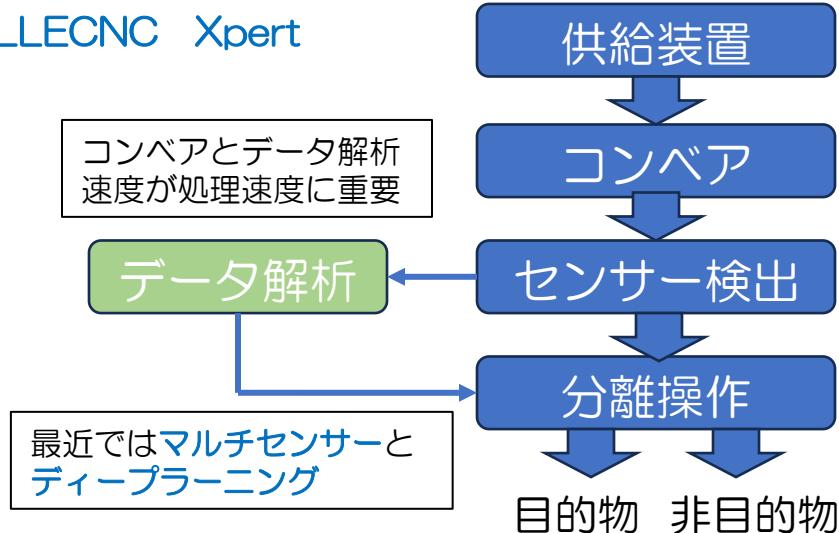


PELLECNC Xpert

通常破碎品は1mm-300mm
製品そのものの形状認識はより大きい



TOMRA X-TRACT™ for Metal



センシング方法（目的物による）
可視および近赤外線法、近赤外線法、紫外線-
可視光線法、蛍光X線法、X線透過法、レーザー
誘起ブレークダウン分光法、ラマン分光法、テ
ラヘルツ法、電磁波法、静電コロナ放電法
形状認識解析法

分離方式（対象の大きさ、反応速度）
空気圧式
フラップ式
グリッパー、吸引アーム、ロボットアーム

- 一般的には、目的物は非目的物より少ない場合が多い（そこまで供給物を調整の必要あり）
- 貴重なものをピュアに取るか、忌避物を完璧に除去するか、など目的により設定が変化（実収率も変化）
- 処理量と選別品質は通常反比例

当初は、

カラーソーター等（ガラスカレット・農業分野）
近赤外線ソーター等（プラスチック類）
XRFソーター（元素の判別）

最近は、

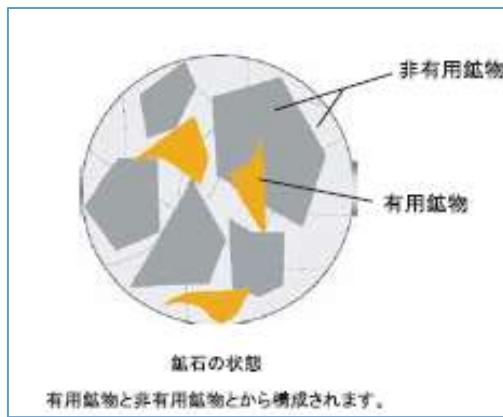
AI技術とロボットアーム等で手選別の代わりを行う例も

} 基本的に単体分離物の分離

} 製品の種類の判別

単体分離と二次資源

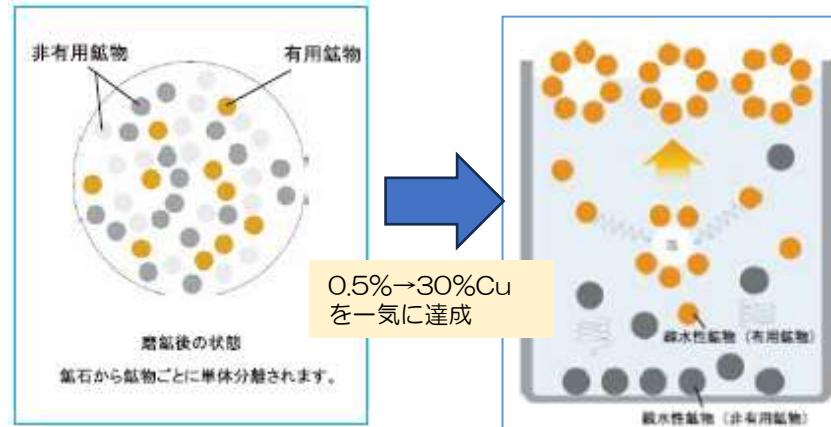
一次資源の単体分離からの選別



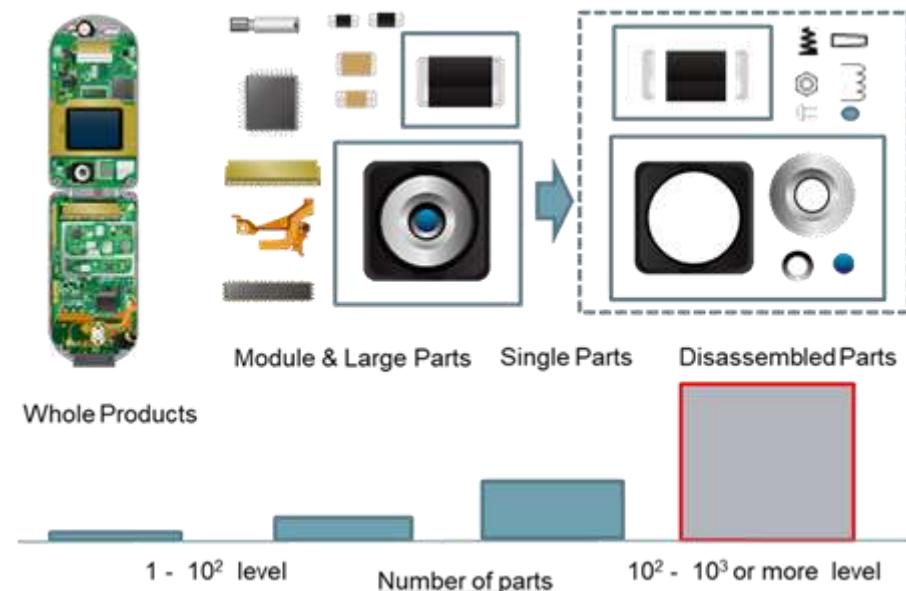
単体分離 (Liberation)
一つの粒子が一つの目的物になっている事

鉱石の場合は種類にもよるが-400mesh (37ミクロン) 程度まで粉碎
破碎は非常に高コスト

浮遊選鉱法 (Flotation)：
界面化学を利用した微粒子の浮上分離



二次資源の選別のための処理



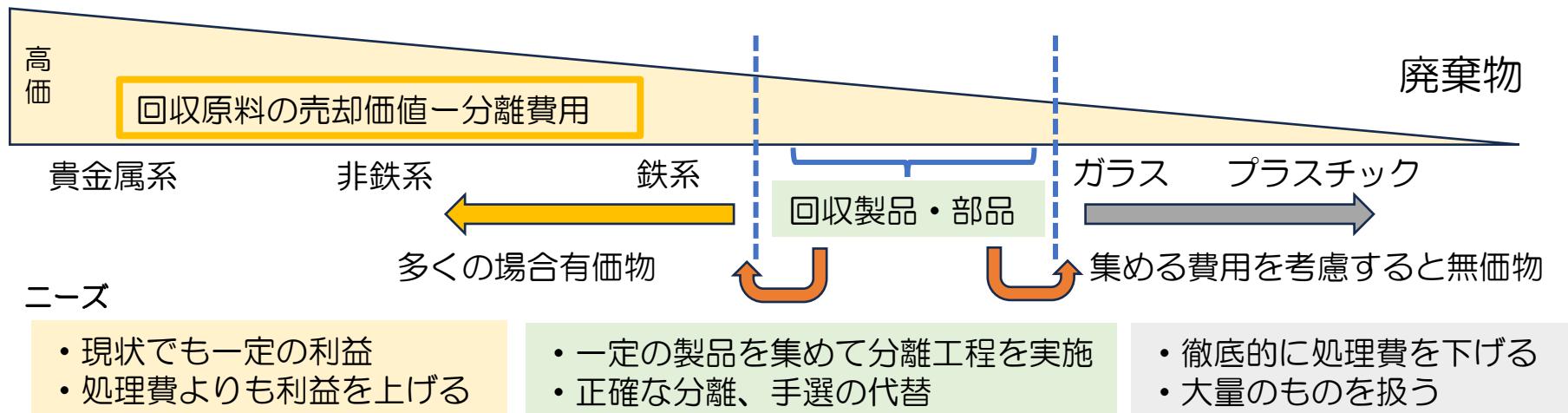
- ・分離は部品レベルまで（単体かは個々に違う）
- ・部品のほとんどは固溶体
- ・何100種類もの異なる大きさ・形状・物理的性質の部品

↓
分離目的は行うセクターの意思により異なる

- ・最も金銭的価値が高いもの（貴金属）
- ・CRMなどのある程度濃縮に意味があるもの（レアメタルなど）
- ・部品レベルで精製工程に入れられるもの（電子基板まるごと）

プラスチックも複合材料が問題、大きさも揃えたい

二次資源の違いによる技術の考え方



方向性（ソーターでいえば）

品位を上げれば高価なソーターも導入できる

前処理の工夫（解碎方法など）
AIの積極利用、判別後分離方法開発

汎用型の投資の安価なソーターをフル稼働させるなど

例えば（ソーターでいえば）

LIBS、XRF、マルチセンサー

※ 10tのCuを含む混合破碎産物から実収率95%を1%あげるとC-Levelの銅でも約950万→960万円と利益が上昇する

AIイメージセンス・ロボットアーム

カラー、IRセンサー

※ ソーターは時間数10tの処理を可能なものもある（比重に左右されるが）。機械の価格も安価である

技術以前の問題

資源価格高騰の中、最大利益追求になりがち（社会制度からは離れて個社だけで利益を出してしまえるので、CFPや資源循環のインセンティブを目指さない）

収集方法と量・一次分別方法・解碎方法などの周辺条件設定が重要
社会システムの変更は單一リサイクラーだけでは解決できない。

サプライチェーン全体を考慮した考え方へ

処理費用を社会システムに依存し、二次原料の使用先も増やさないと成り立たない場合も出てくる

変化の契機 エコデザイン規則 (ESPR)

Ecodesign for Sustainable Products Regulation

- 過去からあったエコデザイン指令 (Directive) を廃止して新たな規則 (Regulation) とした
- 製品範囲をエネルギー危機からほぼすべての製品に拡大 (生産段階における人権問題、循環性の可能性は設計段階で80%決まるといった、サプライチェイン全体を考慮)
- エコデザイン要件の更新 (有害物質対応、資源循環はもとより、リペア・リファービッシュ・リユースなどの長期使用も推奨)
- 製品デジタルパスポート (DPP)の導入 (電池に続き他の製品も波及)

製品が市場に出されるために又は使用されるために満たさなければならないエコデザイン要件

- (a) 製品の耐久性および信頼性。
- (b) 製品の再使用可能性。
- (c) 製品のアップグレード性、修復性、メンテナンスおよび改修。
- (d) 製品中の懸念物質の存在。
- (e) 製品のエネルギー効率および資源効率。
- (f) 製品中の再生含有物。
- (g) 製品の再製造およびリサイクル。
- (h) 製品の炭素および環境フットプリント。
- (i) 製品から発生することが予想される廃棄物。

Information flow in a linear economy

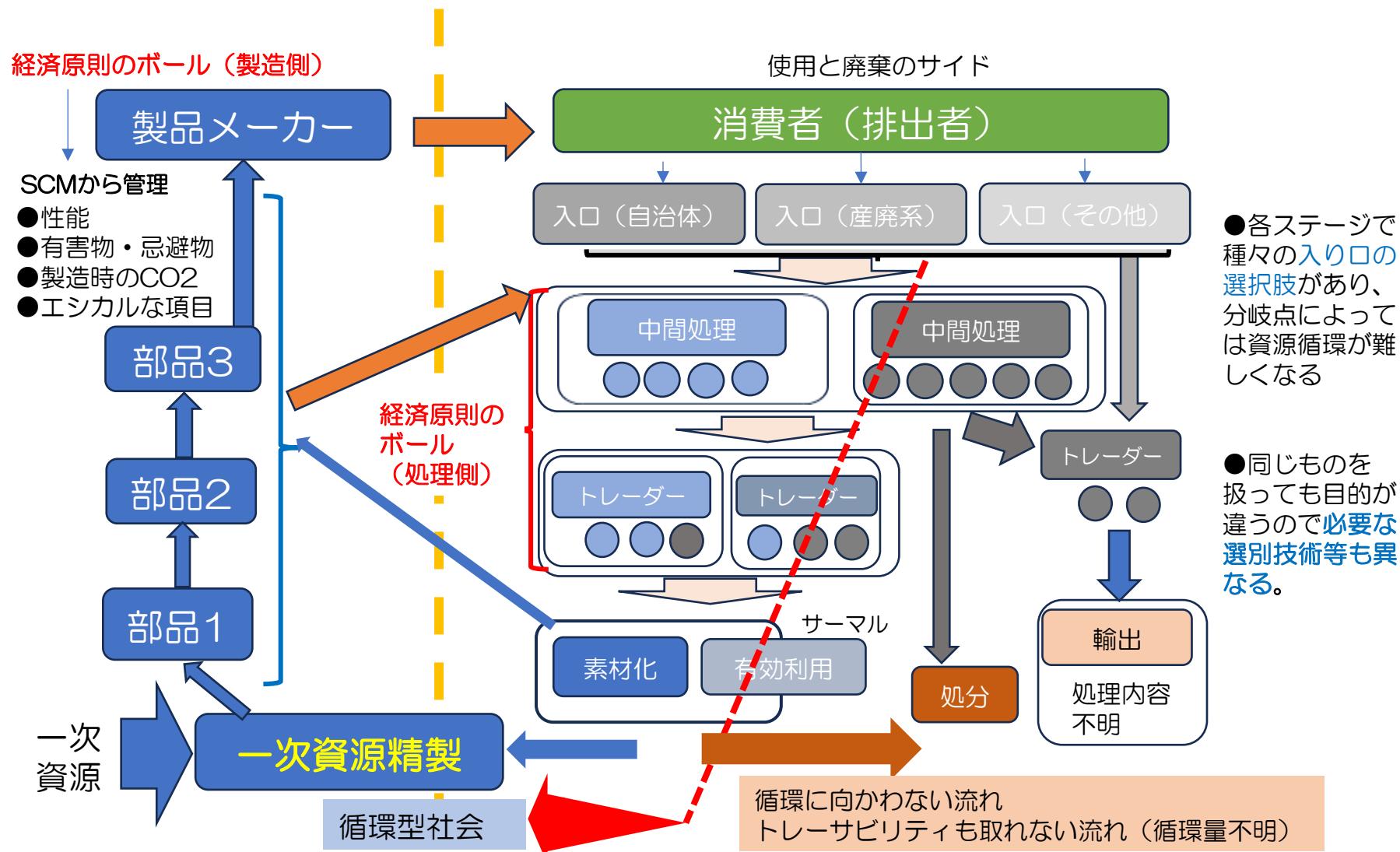


Citation: Mulhall, D.; Ayed, A.-C.; Schroeder, J.; Hansen, K.; Wautelet, T.
<https://doi.org/10.3390/en15093397>

- ✓ リニアエコノミーからサーキュラーを目指し今までの設計がリサイクル側に伝わっていないことから変更が行われる事になった。
- ✓ 電池の場合などは既に電池規則でも始まっているが、廃棄物を収集する目標、回収率の目標の他、新規の製品への二次原料の使用割合も規定されている
- ✓ EUの規則は全世界に影響するが・・・EUの収集などの社会システムにあわせたDPPや情報伝達になっていく

これをきっかけに、世界の製品には、今までなかった情報が付加される事になっていく。ただ、この変化で多くのエリアの資源循環が革新的に進むわけでもない。このDPPがあることを前提に、EU以外のそれぞれの国々の廃棄物システムを考慮した利用法で技術の進展をうまく利用することが重要。

サプライチェーンから処理と改善点の考慮



国全体の目標（CHP・循環型社会など）を目指すには、適切な社会システムによる制御が必要（日本はまだ不足では）。ルートと目的がはっきりすることで技術の選択も開発の目標もはっきりする

まとめ（私見）

- 資源（特に一次資源）の分離濃縮技術は、古くから各種あり、対象に応じて低濃度からで精製工程まで濃縮できる。ただ、単体分離のための破碎や、化学処理などのコストは安価ではないし、最後に製品原料としては要求品質まで精製することが必須。これら全てについて行う設備投資も大きい
- **資源の条件（質と量）**を満たしていない二次資源を利用するためには、各所に散らばる多くの種類の性状から、**同じものを多く集める事**（精製の前処理）がまず重要である。そして、一次資源の精製に合流させる事が一般的
- 技術的には、精製の工程にまでの過程で、他の方法より安価な物理選別ではソーター技術などが急速に進歩しているが、決して万能ではなく、有効な使い方は全体を見て考慮すべきである
- 我が国の場合、既に細かい分別や有害情報の伝達など（家電での金属やプラスチックなどで）はかなりできている部分もあるので、これらの知見を活かしつつ、それを最大限に利用できる社会システムやエコデザインなどを率先して進めていく事を第一に考えたい。その際も、重要なのは**量を多く集める事ができる仕組みを意識したい**（**分離技術はその条件にマッチさせる**）。
- このような整備ができ、日本人としての繊細さが加われば、本質的に一次資源のない国として、低投資コストで多くの資源循環が可能になるのではないかと考える