

「金属資源開発の現状と方向性」

第2回成長志向型の資源自律経済デザイン研究会にて
2022年10月27日(木) 8:00-10:00

早稲田大学 理工学術院 教授
創造理工学部 環境資源工学科
所 千晴

tokoro@waseda.jp

所千晴 自己紹介

早稲田大学理工学部卒業。
東京大学大学院工学系研究科にて博士(工学)を取得。
専門は資源循環工学・化学工学・粉体工学。

早稲田大学理工学術院助手、専任講師、准教授を経て2015年より教授。

早稲田大学では創造理工学部教務主任、理工学術院長補佐、ダイバーシティ推進室長を歴任。

クロスアポイントメントにて東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻教授、東京大学生産技術研究所特任教授も兼任。
JX金属株式会社社外取締役を兼任。

日本学術会議第24期・第25期会員。
経済産業省、環境省、東京都等の各種委員を歴任。
化学工学会、粉体工学会、資源・素材学会、環境資源工学会、エコデザイン推進機構理事。

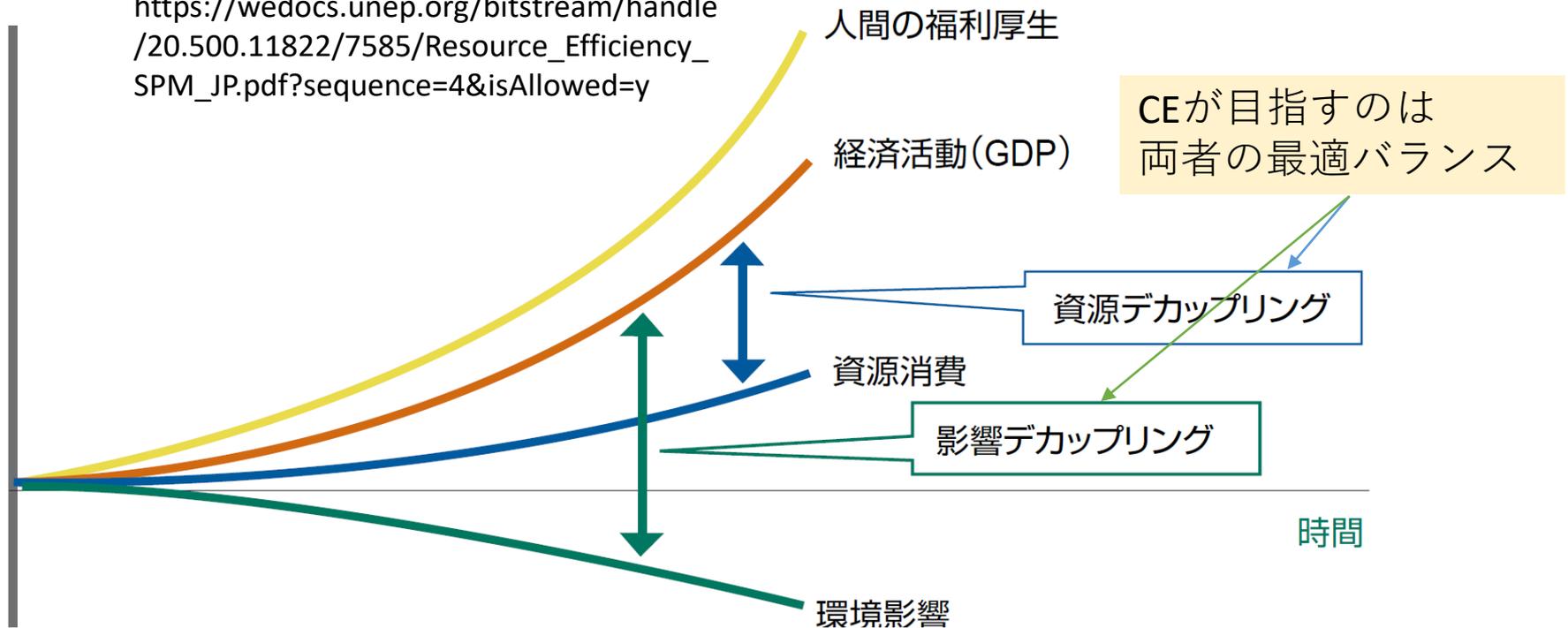
現在、JST未来社会創造事業等の研究代表者、20を超える企業との共同研究実施中。



資源需要増加の傾向

UNEP (2011)

https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7585/Resource_Efficiency_SPM_JP.pdf?sequence=4&isAllowed=y



GHG削減に対する所要資源増への懸念を示すレポート多数（参考資料P.13-19参照）

- ・ UNEP-IRP（2016）：エネルギー供給側の試算
- ・ UNEP-IRP（2017）：エネルギー需要側の試算
- ・ IEA（2021）：カーボンニュートラル推進政策による鉱物資源増の試算
- ・ レアメタルのみならず、銅などベースメタルの供給不足も懸念

（例えばAyman Elshkaki et al., Environmental Science & Technology, 2018 52 (5), 2491-2497

日本のものづくりを支える高純度素材

銅ができるまで

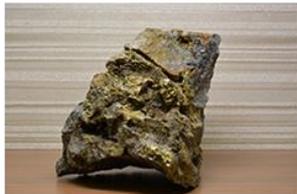
出典：JX金属HP

今後の課題

- ・リサイクル率の向上
- ・難処理鉱石化への対応（参考資料P.20参照）
- ・カーボンニュートラル，環境負荷低減への対応（参考資料P.15-17参照）



採鉱



銅鉱石（硫化鉱）
銅品位1%以下



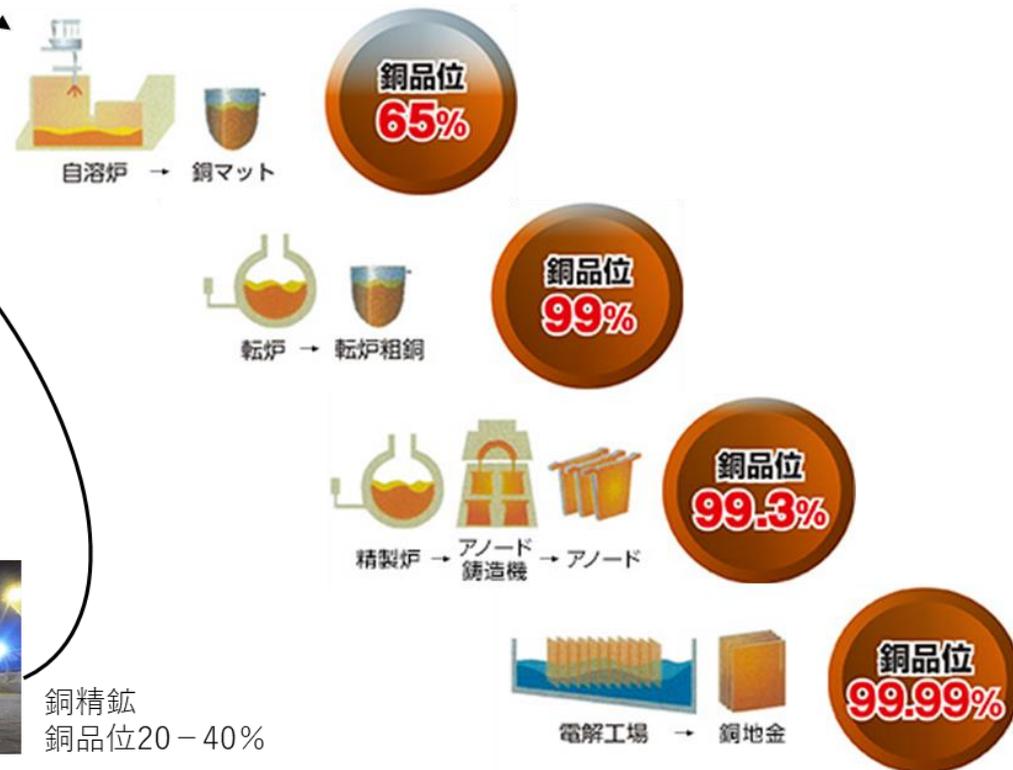
粉碎



浮選



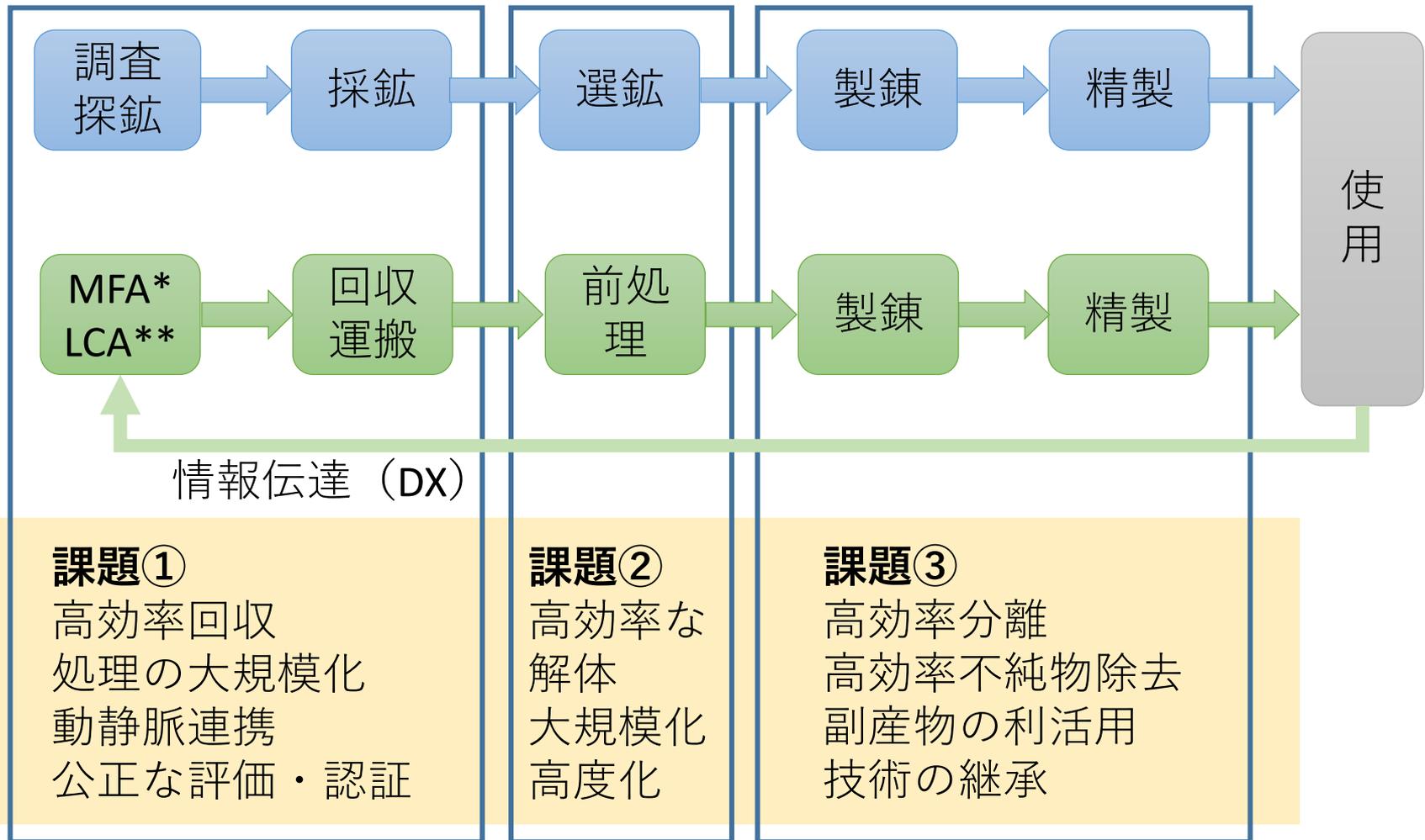
銅精鉱
銅品位20-40%



高純度素材へ 高リサイクル率を求める動き

- 責任ある素材生産への認証化. 例えばカッパーマーク. (参考資料P.21参照)
- メーカーによる環境配慮をアピールするブランディング戦略. (参考資料P.22参照)
- **EU**等のサーキュラーエコノミー推進政策のための規制化. 例えばリチウムイオン電池に関するEU法の改正案. (参考資料P.23,24参照)
- 土地利用の変化, 生物多様性など, 多様な環境負荷配慮への要望. 例えば**TMR (Total Materials Requirements)**による環負荷評価. (参考資料P.25参照)

リサイクル率向上への課題



*MFA：Material Flow Analysis
**LCA：Life Cycle Assessment

マテリアルフロー解析
ライフサイクル評価

(参考資料P.26-28)

資源開発の優先順位

1. 天然資源



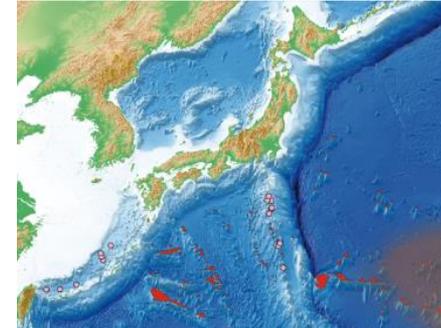
<https://www.nmm.jx-group.co.jp/company/industry/resource/process02.html>

2. 人工資源



著者撮影

3. 海洋資源

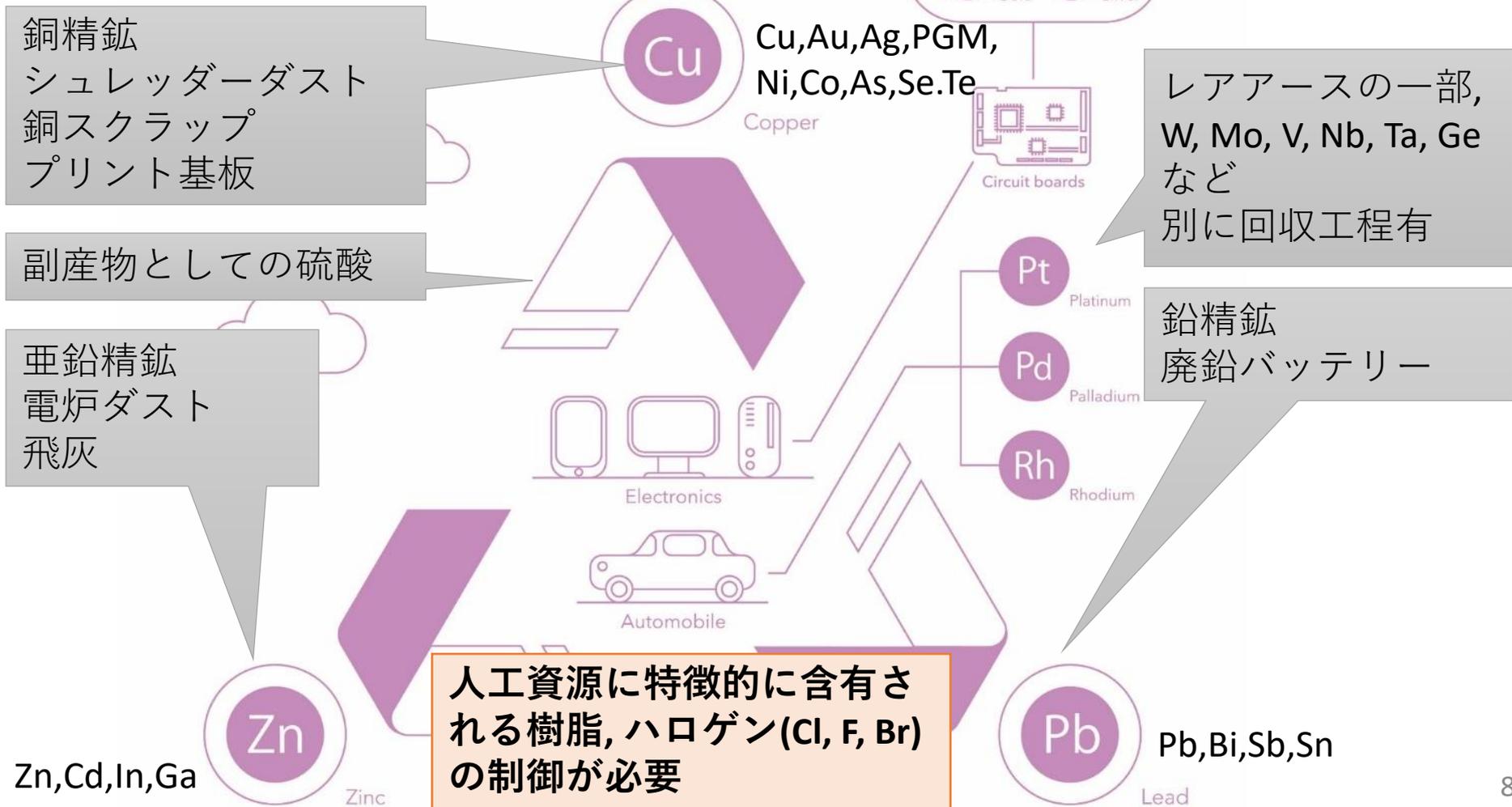


JOGMEC

- ✓ 常に、天然資源と人工資源の**ベストミックス**が必要。
- ✓ 「環境負荷」「持続可能な開発」に対する考え方の変遷にしたがって、世相が要求する人工資源の割合が増え、場合によっては天然資源と徐々に逆転する可能性がある。ただし、分離・不純物除去には常にエネルギーが必要であり、鉱石によってはそのエネルギー源も内包している場合があることを正確に理解する必要がある。
- ✓ 海洋資源はその「難処理性」「環境負荷」を考えると、現状での優先順位は下がるが、資源セキュリティー、技術の高度化、人材育成の点において、継続的な技術開発は重要。

不純物制御の例

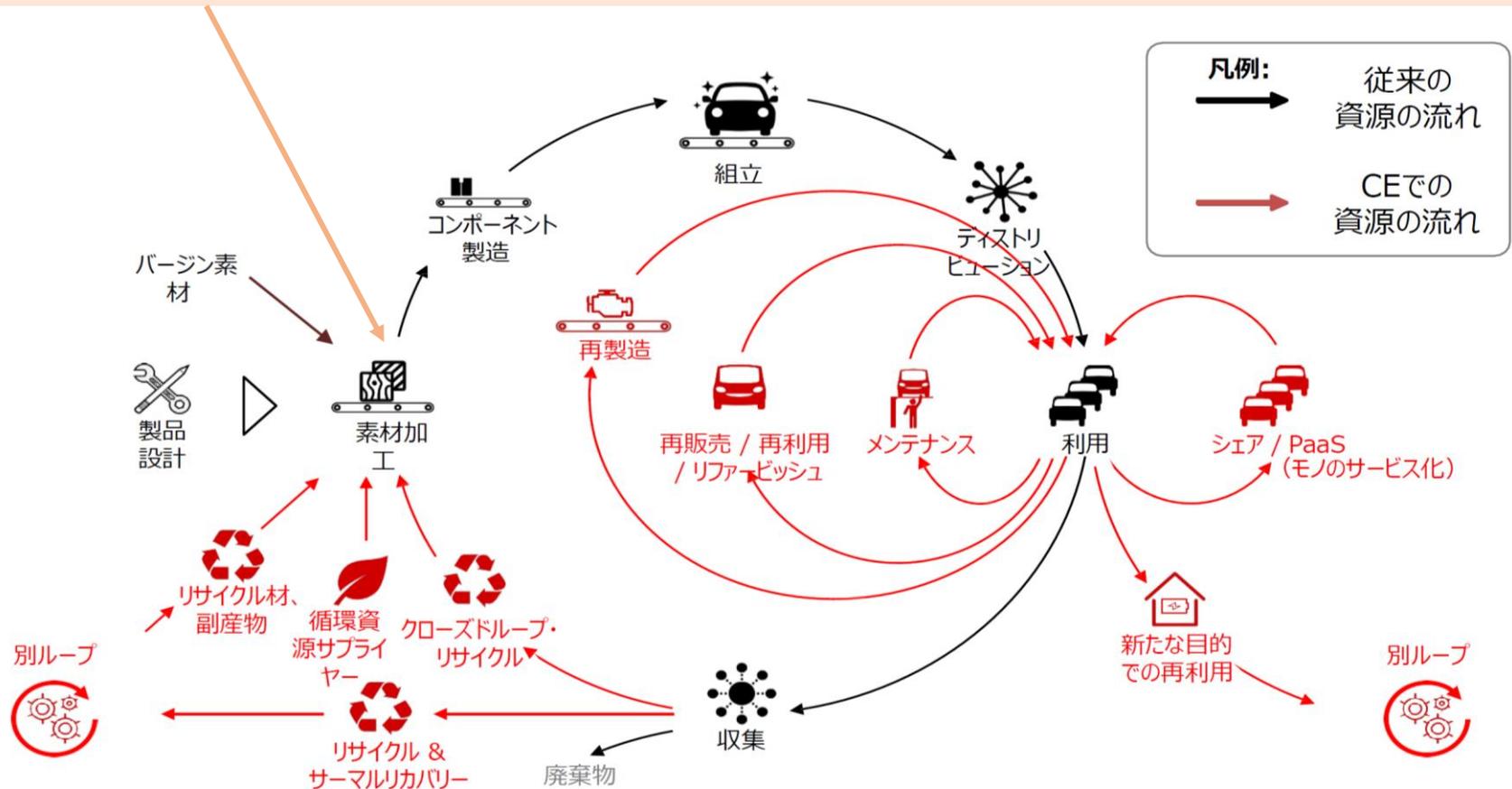
東京大学生産技術研究所
非鉄金属資源循環工学寄付研究部門パンフレット
<http://www.metals-recycling.iis.u-tokyo.ac.jp/>



金属資源から見たCEの方向性

外側のループは、資源制約対応と環境制約対応（特にGHG削減以外）をしながら、高度モノづくりを支えるためのインフラである。

- ・モノづくりを支える高純度素材を維持しながらリサイクル率アップ，カーボンニュートラル対応
- ・不純物の高度制御・管理が必要だが，そのためにはエネルギーが必要であることを適切に認識する
- ・不純物制御技術の継承と人材育成，低コスト化へのたゆまぬ努力が必要
- ・低コスト化のために，内側のループが外側のループへの不純物除去の負荷を下げる協力・仕組みも必要
- ・物質によって資源制約対応と環境制約対応の境界が連続的でありまいなことを適切に認識する必要がある

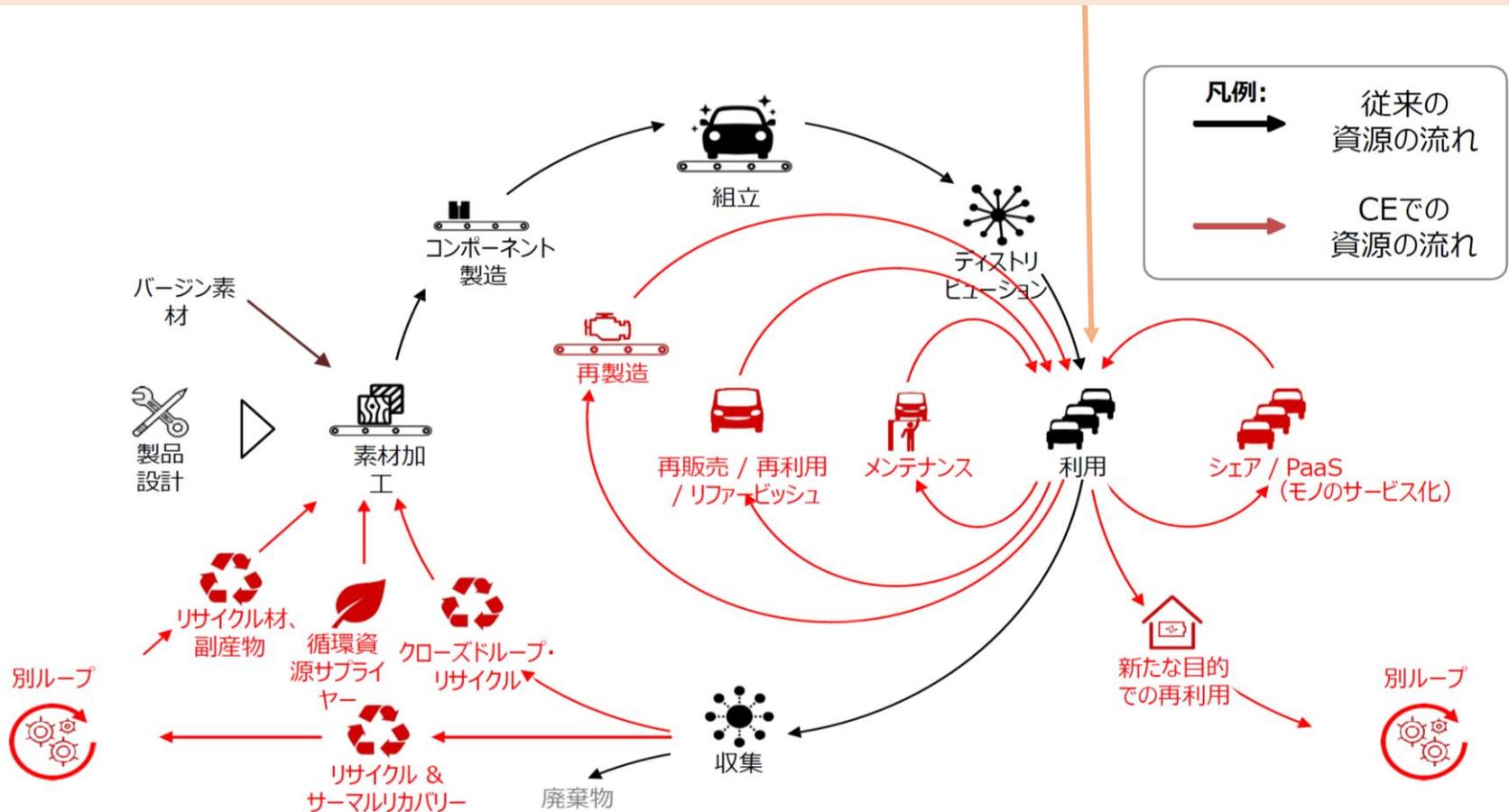


金属資源から見たCEの方向性

内側のループは、環境制約対応（特にGHG削減）に大きな効果がある。

（参考資料P.29参照）

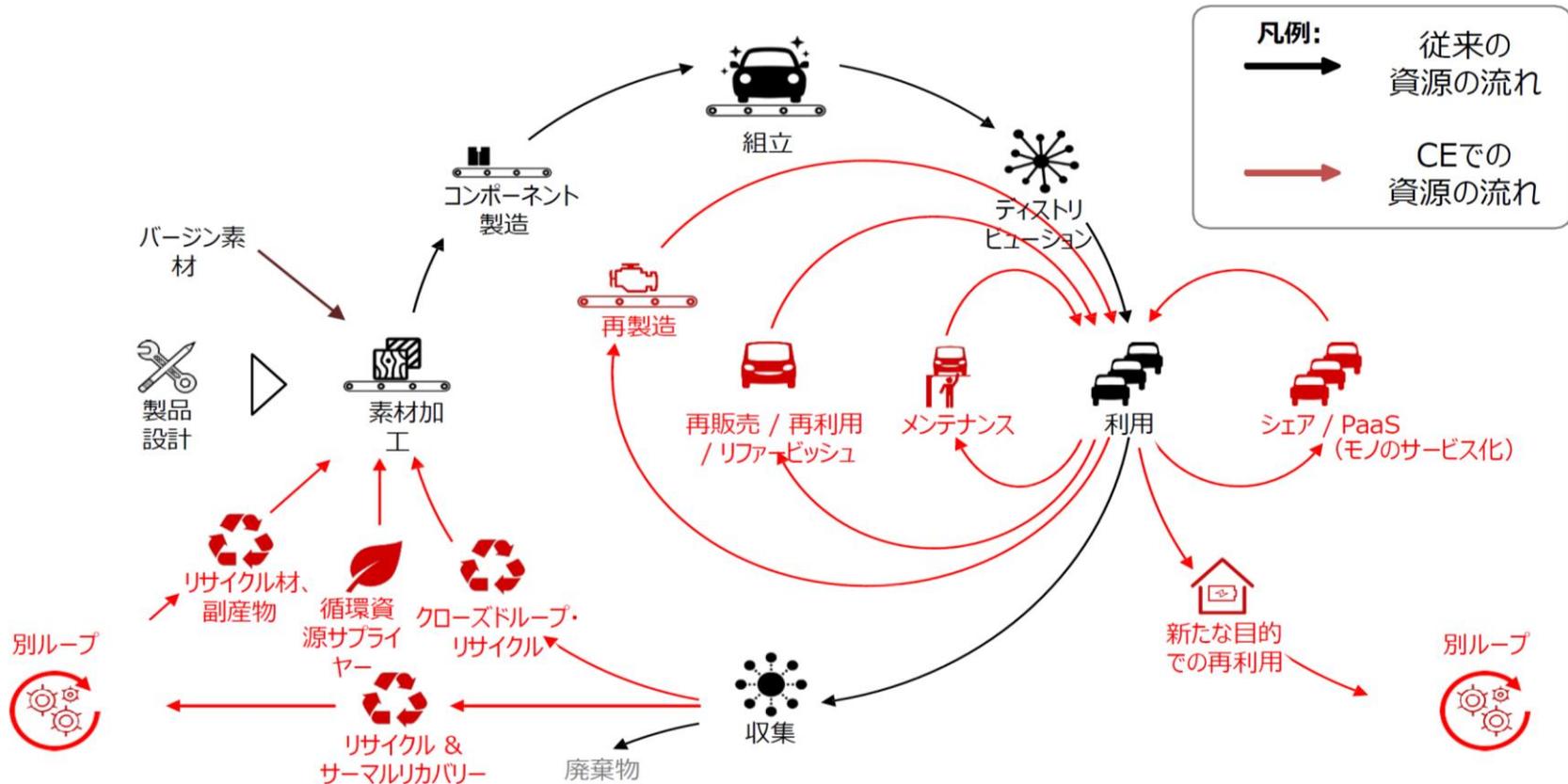
- ・消費者でモノと情報の流れを分断しないビジネス形態への移行
- ・Well-beingへの訴え：ナッジ，プロセスエコノミー
- ・新たな価値観の創成：地域活性とも相補的
- ・資源循環や環境負荷低減だけでなくプラスの価値創造を真剣に考える
- ・ビジネス，消費者の行動変容を必要とする



金属資源から見たCEの方向性

全体に共通した課題：

- ・ 公正な評価（CFP/資源効率）と認証，その可視化による推進
- ・ 時間軸が異なる多重ループの最適化管理（LCS：ライフサイクルシミュレーション）
- ・ 動静脈全体を意識した易分解設計，低環境負荷設計
- ・ LCA・MFAの高度化：DXにも期待
- ・ 適正なコスト負担
- ・ 全体最適を促す仕組みづくり，機関づくり，人材育成（参考資料P.30参照）



參考資料

資源需要増加の傾向

Table 1: Overview of the impacts of low-carbon technologies for electricity generation on climate, human health, ecosystems and resources, comparing state of the art power plants at well-suited locations.

The reference is the current global mix, which has high impacts compared to the levels indicated in this table.

	Climate		Human health		Ecosystem health		Resources	
WIND	Low GHG	(++)	Reduced particulate exposure	(++)	Bird and bat collisions	(+)	High metal consumption	(+)
			Potentially reduced human toxicity	(-)	Low ecotoxicity	(-)	Low water use	(=)
					Low eutrophication	(-)	Low direct land use	(=)
PHOTOVOLTAICS	Low GHG	(=)	Low particulate matter	(+)	Low eutrophication	(+)	High metal use	(+)
			Low human toxicity	(-)	Low ecotoxicity	(+)	High direct land use for ground-based systems	(++)
CONCENTRATED SOLAR POWER	Low GHG	(=)	Low particulate matter	(-)	Concern about heat transfer fluid	(+)	High water use	(++)
			Low human toxicity	(-)	Low eutrophication	(+)	High land use	(++)
					Low ecotoxicity	(+)		
HYDROPOWER	Low fossil GHG	(++)	Low air pollution impacts	(=)	Riparian habitat change (reservoir and downstream)	(++)	High water use due to evaporation	(+)
	High biogenic GHG from some dams	(=)					High land use for reservoirs	(+)
GEOTHERMAL POWER	Low fossil GHG	(+)	Air and water pollution from geofluid flow in some sites	(=)	Aquatic habitat change/pollution	(+)	High water use for cooling	(+)
	Geogenic GHG for some types	(=)						
COAL WITH CCS	Low GHG	(++)	Solvent-related emissions	(=)	High eutrophication	(++)	Increased fossil fuel consumption	(++)
GAS WITH CCS	Substantial fugitive methane emissions	(=)	High particulate matter	(=)	High ecotoxicity	(+)	Limited CO ₂ storage volume	(++)
	Concern about CO ₂ leakage	(-)	High human toxicity	(++)				

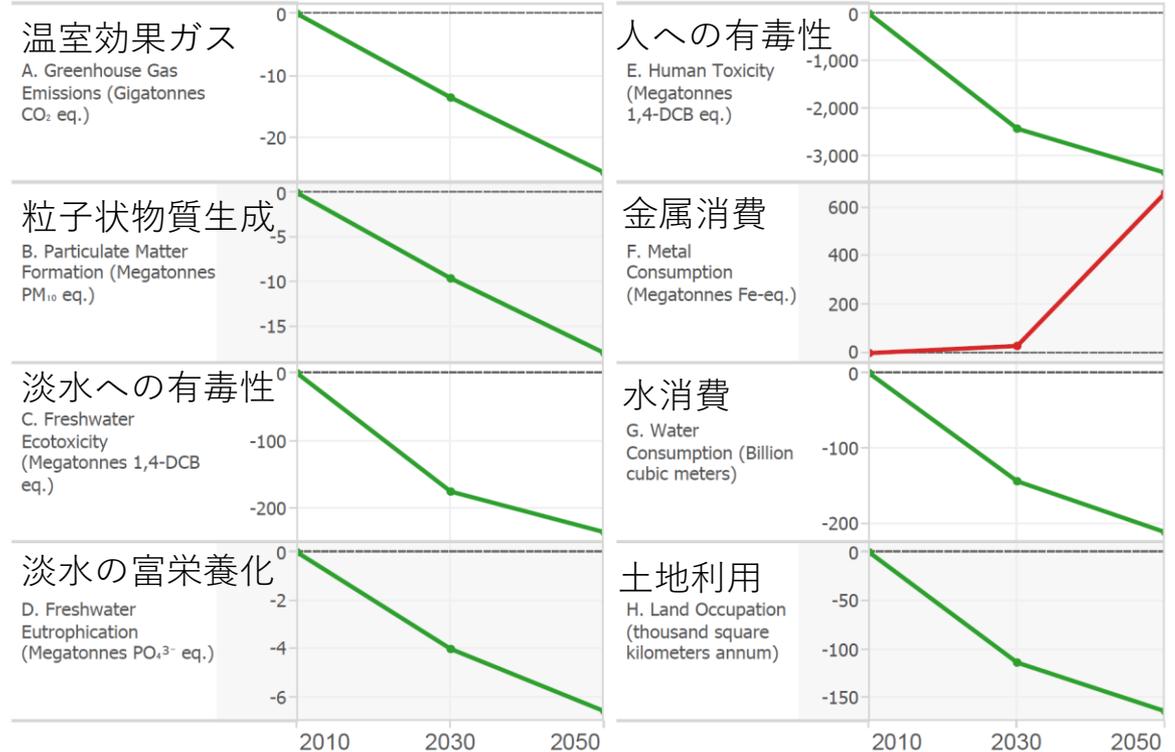
KEY:

First symbol (+) high agreement among studies (=) moderate agreement (-) low agreement
 Second symbol (+) robust evidence (many studies) (=) medium evidence (-) limited evidence

資源需要増加の傾向

UNEP-IRレポートで選定されたエネルギー需要側の技術

部門	技術
建築	高効率照明 (LED等)
	断熱材
	制御システム (BEMS*)
	情報通信技術 (ICT**)
工業	高効率銅製造
	コージェネレーション
輸送	ヒト (電気自動車等)
	貨物



*BEMS: Building and Energy Management System

**ICT: Information and Communication Technology

UNEP-IRP: Green Energy Choice, The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies, Report of International Resources Panel, (2017).

カーボンニュートラルによる 資源需要増加の傾向



空飛ぶクルマ



多目的EV自動運転車



二次電池、蓄電池



電気自動車



航空機

高機能材

製品の小型軽量化・省エネ化・環境対策

特殊鋼

電子部品
(IC, 半導体, 接点等)

希土類磁石

リチウムイオン電池

超硬工具

排気ガス触媒

展伸材

↑
ニッケル、
クロム、
タングステン、
ニオブ 等

↑
タンタル、
ガリウム 等

↑
レアアース
(ネオジム、
プラセオジム、
テルビウム) 等

↑
リチウム、
コバルト、
ニッケル 等

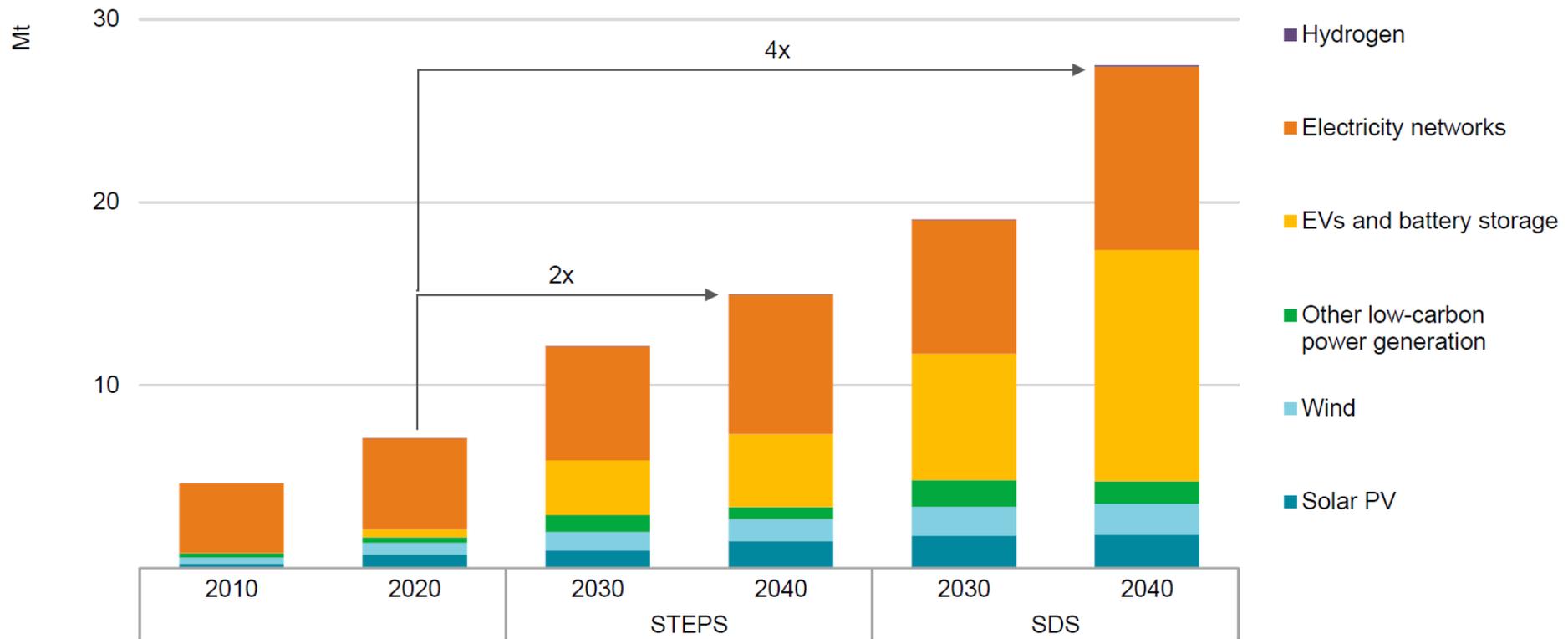
↑
タングステン、
バナジウム 等

↑
白金族
(プラチナ、
パラジウム、
ロジウム) 等

↑
チタン 等

2021年2月15日 経済産業省資源エネルギー庁資源・燃料部作成
第7回鉱業小委員会資料より

カーボンニュートラルによる 資源需要増加の傾向



IEA. All rights reserved.

Notes: Includes all minerals in the scope of this report, including chromium, copper, major battery metals (lithium, nickel, cobalt, manganese and graphite), molybdenum, platinum group metals, zinc, REEs and others, but does not include steel and aluminium (see Annex for a full list of minerals). Mt = million tonnes.

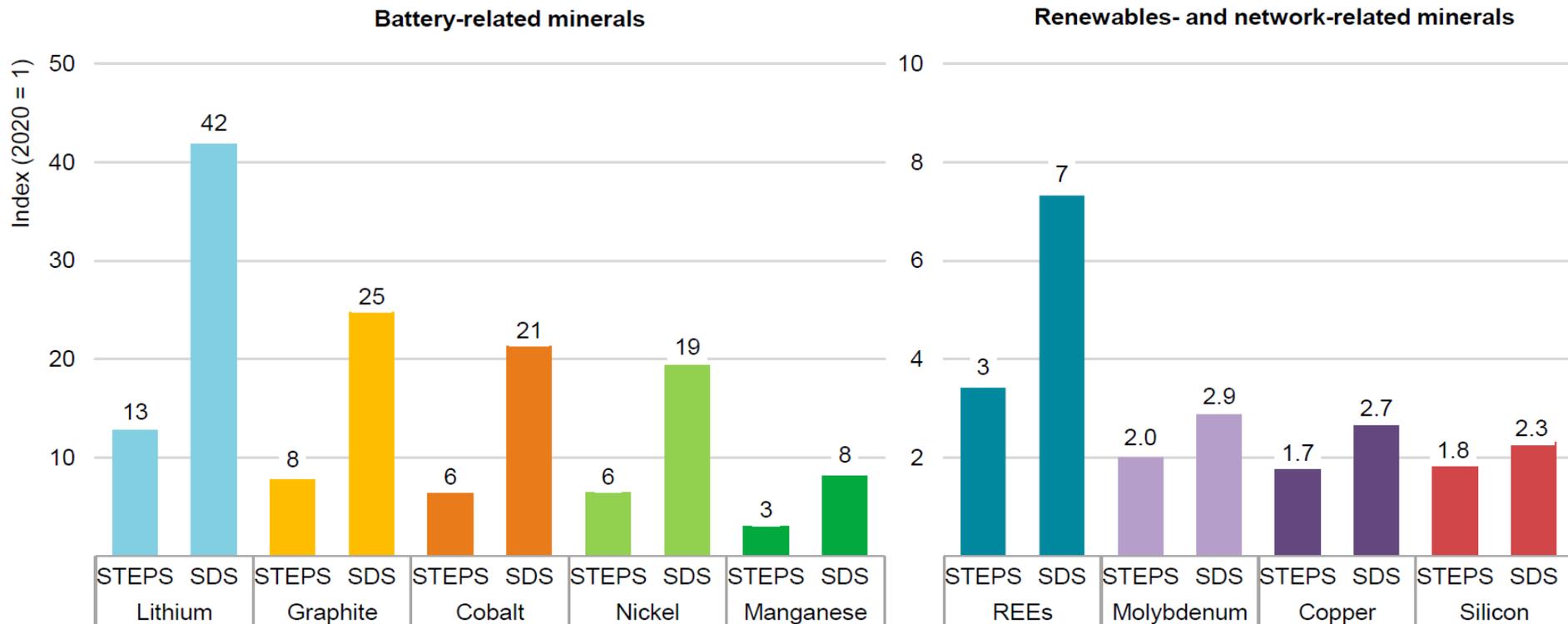
国際エネルギー機関（IEA）による試算

IEA, World Energy Outlook Special Report, IEA Publications, 2021.

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

カーボンニュートラルによる 資源需要増加の傾向

Growth in demand for selected minerals from clean energy technologies in 2040 relative to 2020 levels



IEA. All rights reserved.

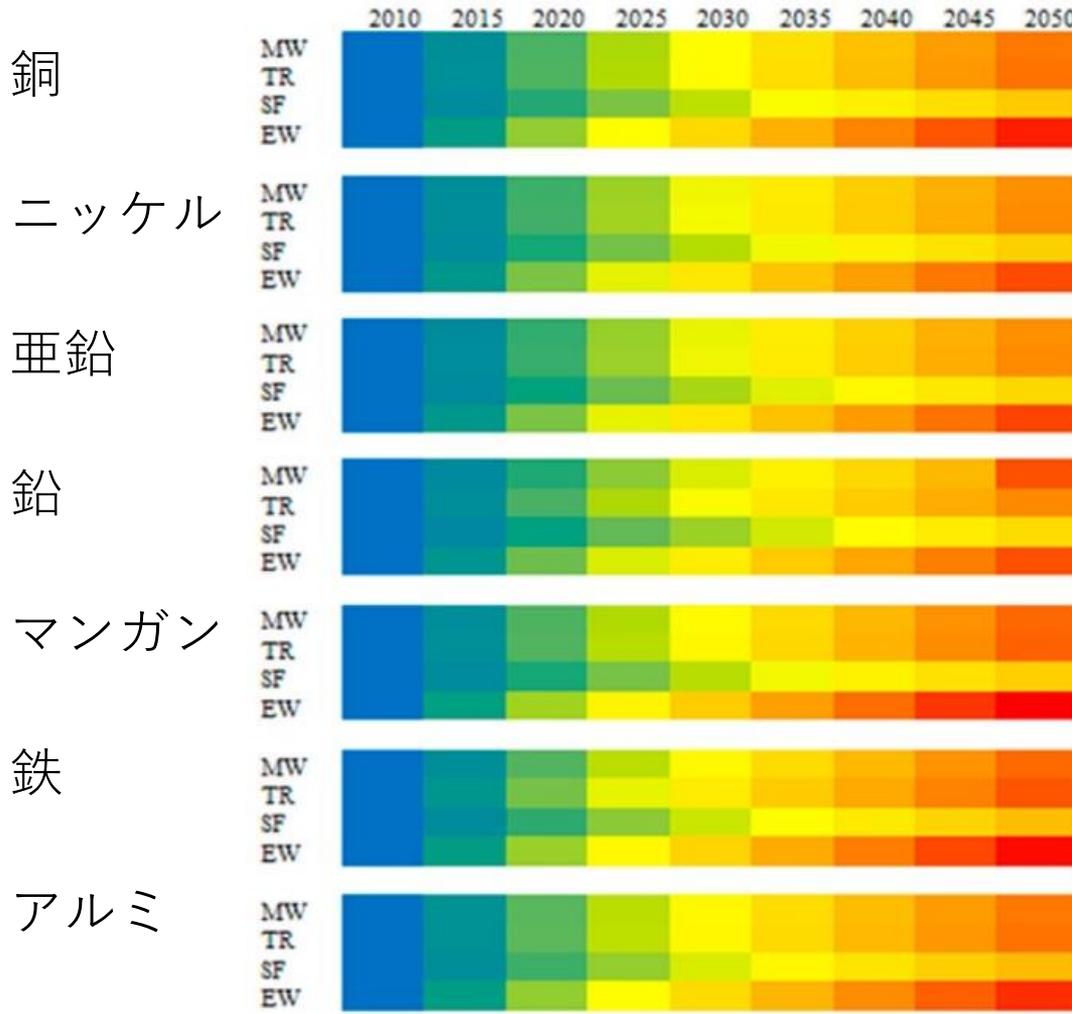
国際エネルギー機関（IEA）による試算

IEA, World Energy Outlook Special Report, IEA Publications, 2021.

<https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

資源需要増加の傾向

2010年を基準(1)とした金属消費増加予測



MW :Market World シナリオ
(世界中が先進国と同様の成長を望む)

TR :Toward Resilience シナリオ
(各国政府が環境対策を重視する)

SF :Security Foremost シナリオ
(自国のセキュリティーを重視し
国際協調しない)

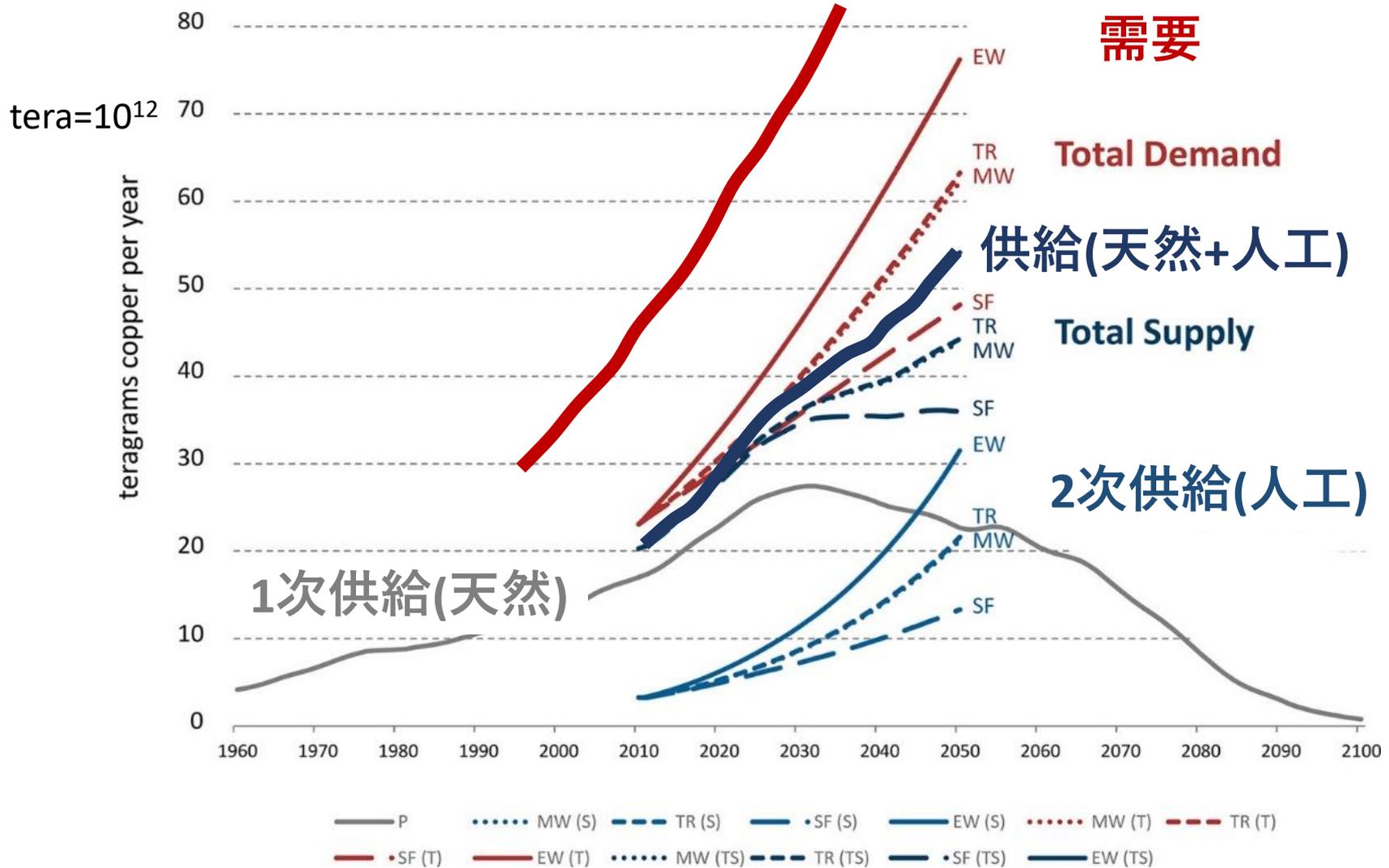
EW :Equitability World シナリオ
(国際協調が進む)

Ayman Elshkaki et al.,
Environmental Science & Technology,
2018 52 (5), 2491-2497



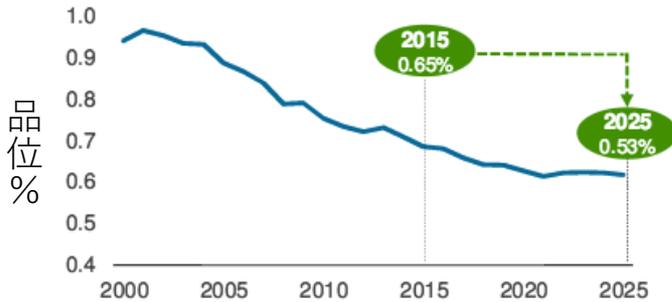
資源需要増加の傾向

銅の需要と供給の予測



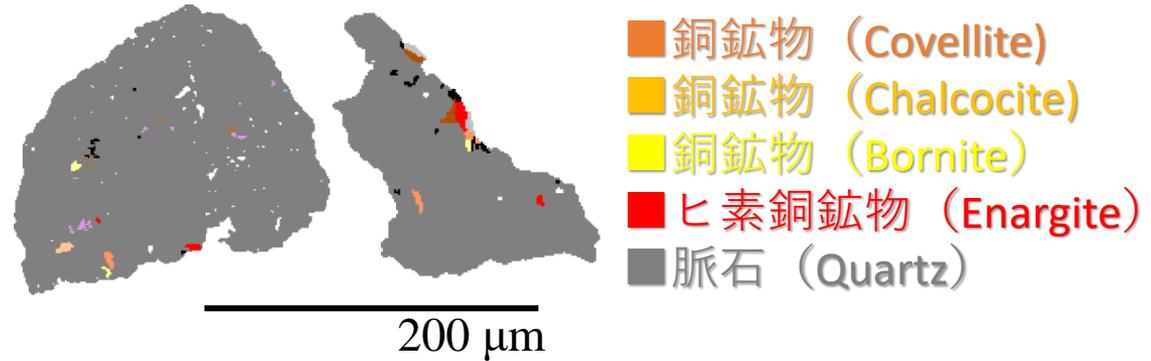
天然鉱物資源の難処理化

銅鉱石品位の低下



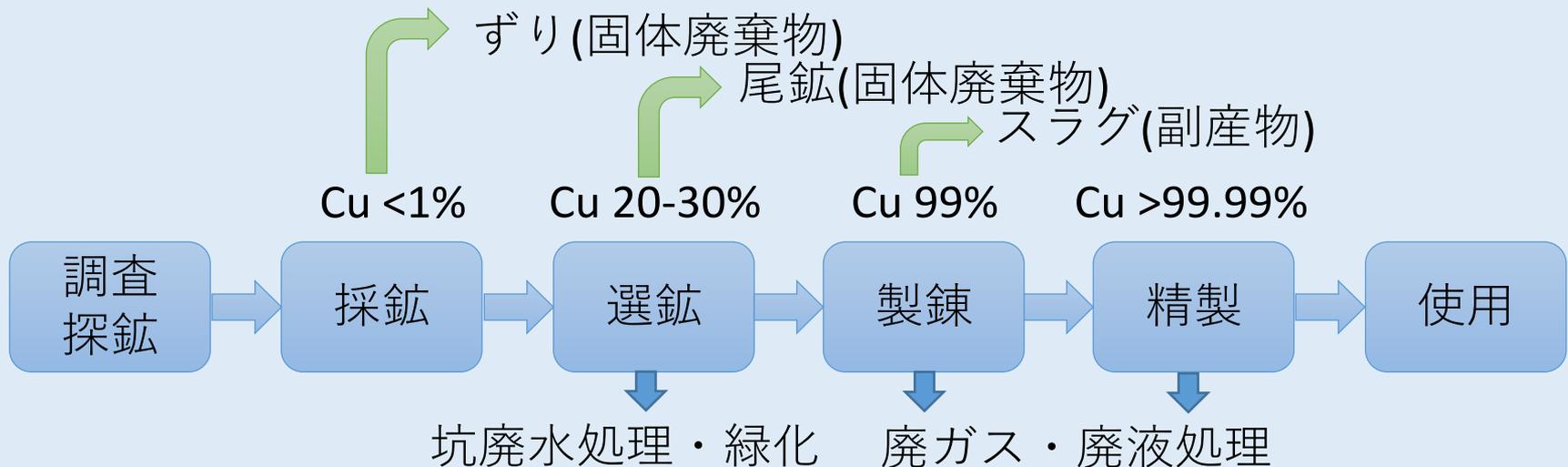
※Copper Investing 2016
(Energy & Capital)

鉱物粒子径の減少・不純物の増加



銅鉱石のMineral Liberation Analysis画像

一般的な資源開発の流れ



人工資源利活用への要請



責任ある素材生産

カッパーマーク

- ✓ 国際銅協会（International Copper Association, ICA）によるトレーサビリティシステム
- ✓ 銅産業の「責任ある生産」を認証
- ✓ 2019年に設立
- ✓ 人権、ガバナンス、環境、労働環境、コミュニティに関連する32の基準に基づいて評価



<https://coppermark.org/>

人工資源利活用への要請

製品の環境配慮によるブランディング

外資メーカーA社：以下を宣言

- ✓2030年までにすべての製品をカーボンニュートラル
- ✓すべての製品とパッケージに100%リサイクルされた素材と再生可能な素材を使用
- ✓すべての製品を100%再生可能エネルギーで製造
- ✓そのための製品解体ロボットを開発



2020年度実績報告

希土類、錫、アルミニウムを100%リサイクル
プラスチックを30-70%リサイクル

人工資源利活用への要請

リチウムイオン電池に対するEU法の改正案提出（2020年12月）

✓EU内のすべての電池を対象

✓回収率目標

産業用・自動車用・電気自動車用は完全回収

ポータブルは2025年には65%、2030年には70%回収率

✓コバルト、ニッケル、銅のリサイクル率目標

2025年までに90%、2030年までに95%

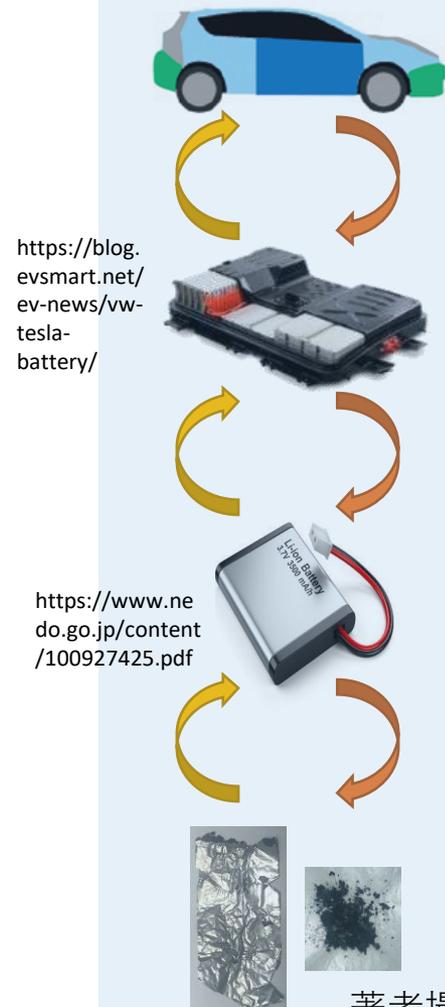
✓リチウムのリサイクル率目標

2025年までに35%、2030年までに70%

✓カーボンフットプリント*申告の義務化

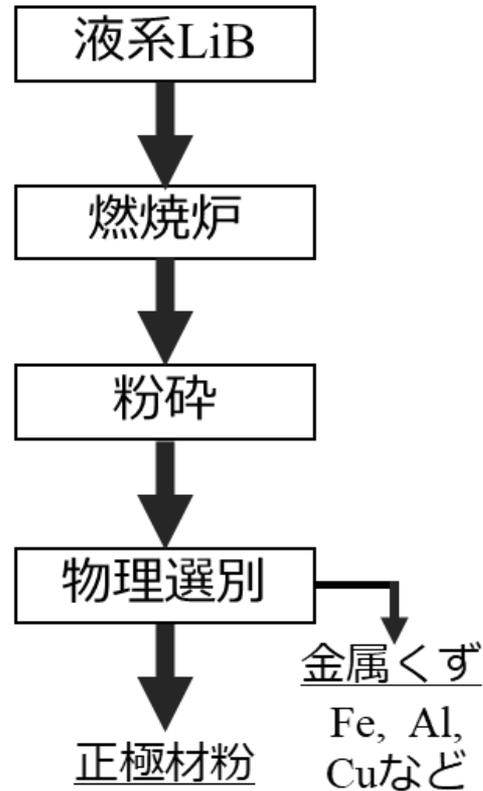
カーボンフットプリント申告を済ませた充電可能なもののみEU市場に導入を可能とする。

*カーボンフットプリント：製品のライフサイクルを通じたCO2の排出量

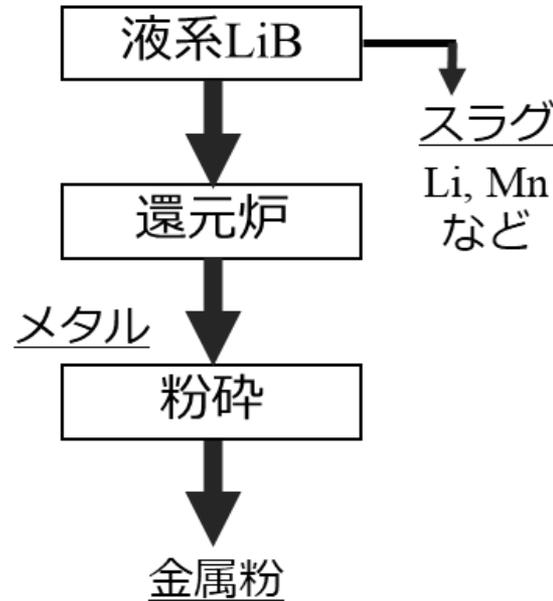


例：リチウムイオン電池処理の現状

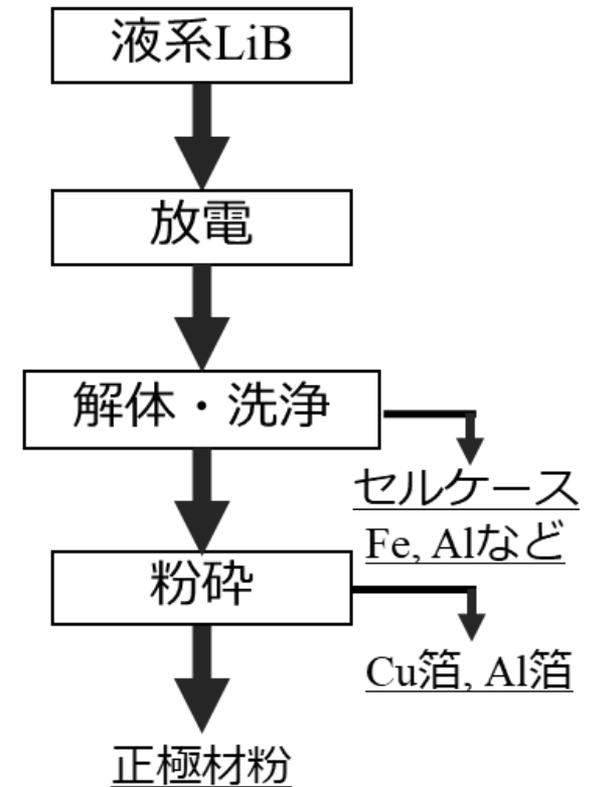
(ア)：焼却・加熱炉の利用



(イ)：還元炉の利用



(ウ)：湿式処理の利用

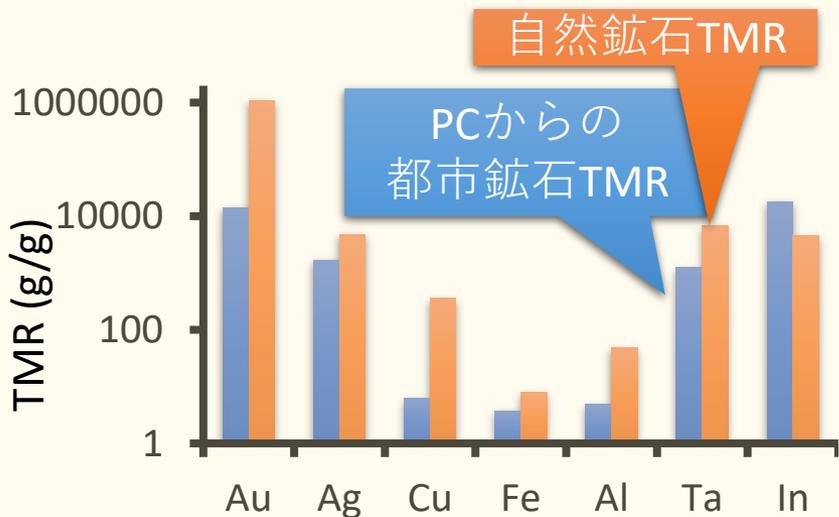


- ✓ 大手企業は長年の技術蓄積を用い高温処理炉を主軸とした大量処理プロセスを構築。
- ✓ スタートアップは小型・迅速な立ち上げを目指して湿式処理を乱立（日本では目立った動きなし）。
- ✓ それぞれ独自のLCA合戦によって正当性を主張。
- ✓ 投資家からの注目を集めつつある一方、正極材粉2次資源市場が国内に安定して形成されるかは未知数（高リスク）。

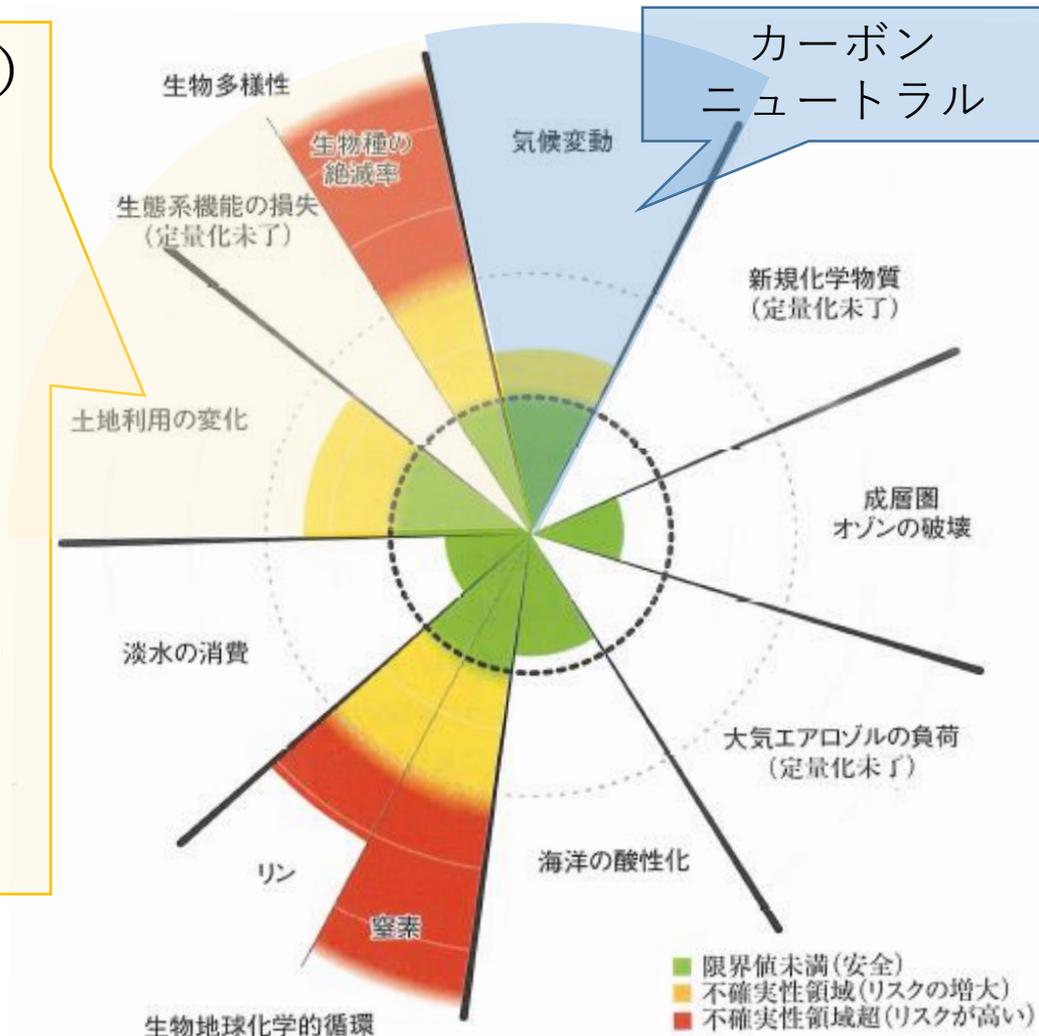
環境負荷低減への要請

プラネタリーバウンダリー（人類が生存できる限界）

TMR (Total Materials Requirements)
関与物質総量



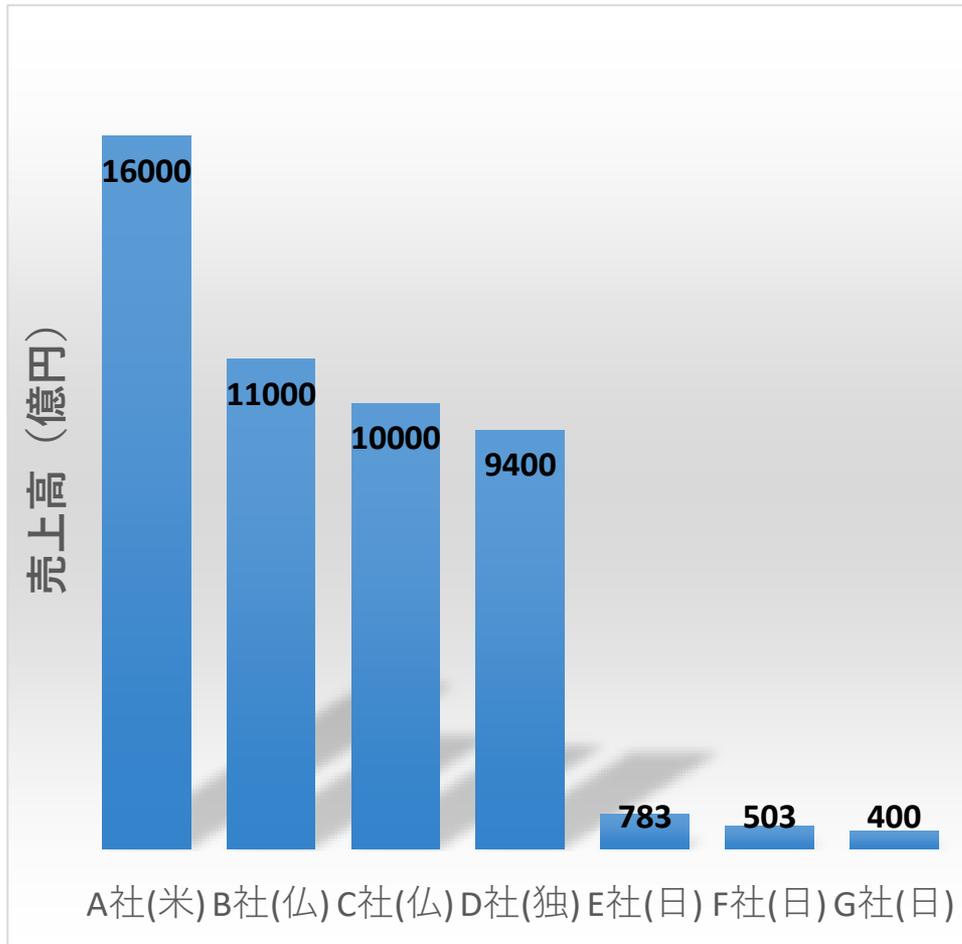
南埜良太・山末英嗣ら、
日本LCA学会誌、6 (2010)、pp.251-258



J.ロックストローム/M.クルム「小さな地球の大きな世界」丸善出版、2018年より

処理の規模

欧米・日本における廃棄物・リサイクル産業の状況（2020年）



- ✓ MFA, LCAを戦略的・俯瞰的にデータ収集する機関・仕組みの不足
- ✓ 日本の廃棄物・リサイクル産業は総じて規模が小
- ✓ 動静脈連携への課題

解体・分離の効率化

現状の解体技術には、破碎・粉碎または手解体しか実用化されておらず、リユース/高度リサイクルに柔軟に対応できる高度分離技術が確立されていない。

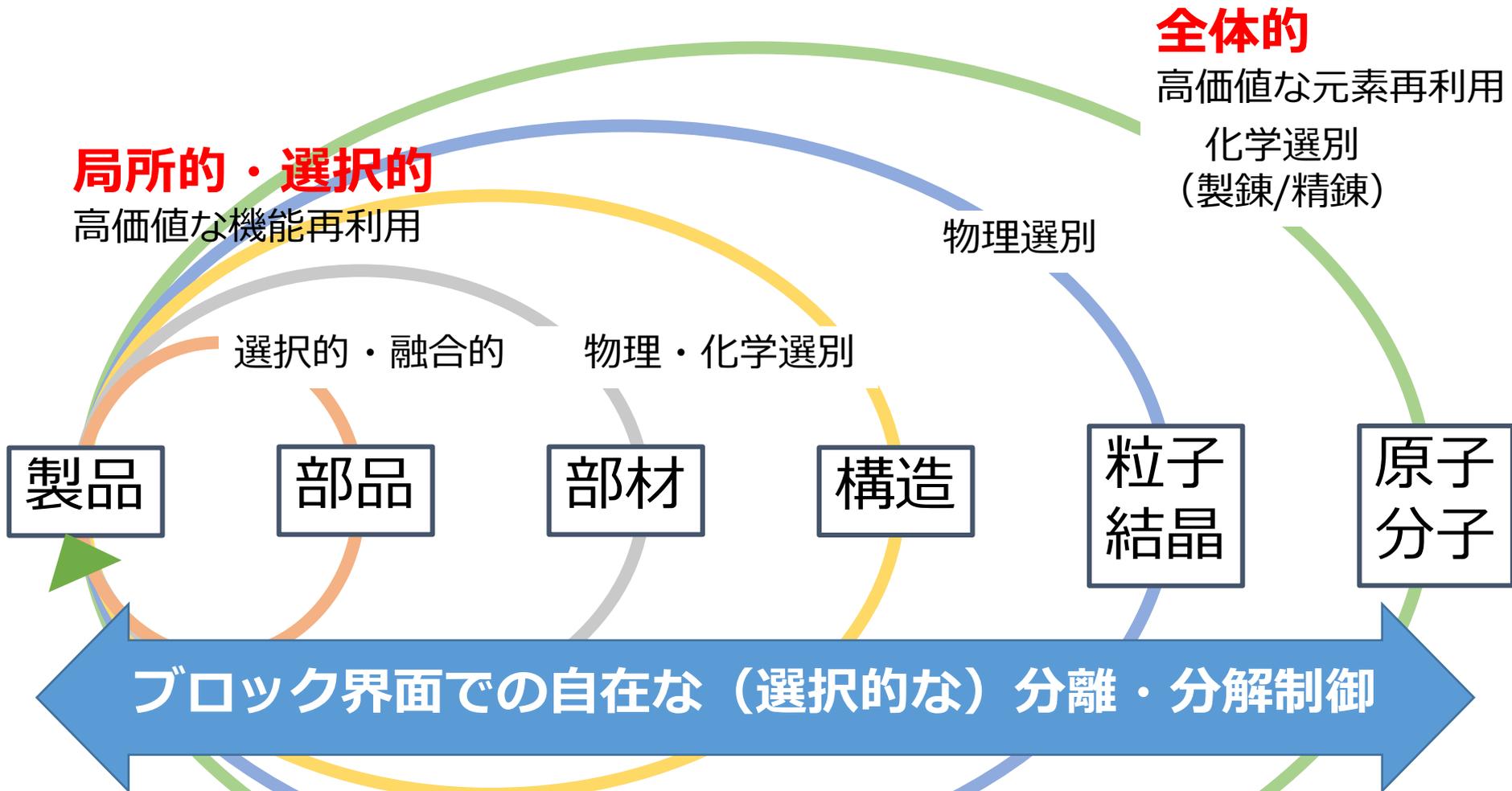


- **破碎・粉碎**：機械的弱部を利用した選択性の低い処理法。
- **人力解体**：リサイクル技術が労働集約的で、効率化されておらず、大量処理に対応できない。

製品から得たい部位を選択的に取り外すことを可能とする
革新的な解体・分離技術の確立が必要



解体・分離の多様化



- ・ 再利用すべきブロックの界面のみを分離・分解
- ・ その界面のみが分離できるように、製造の段階から設計

GHG削減に対する資源循環の効果

図6. G7における住宅に対する物質効率性戦略による潜在的GHG削減量 (2016年～2060年)

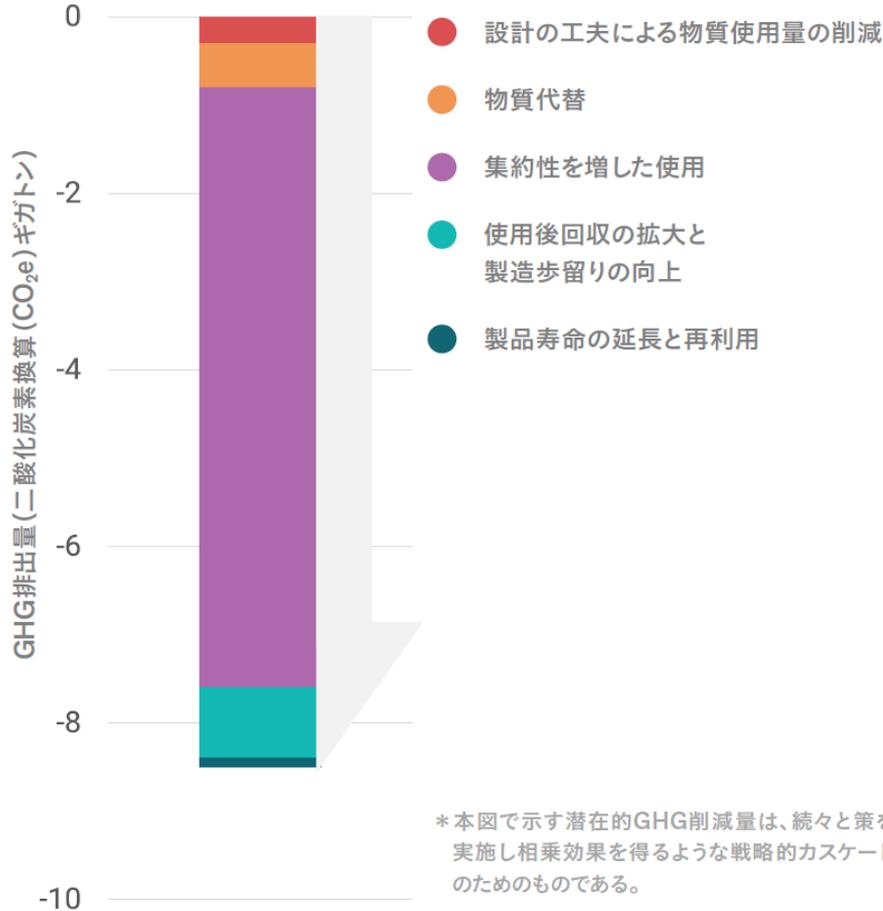
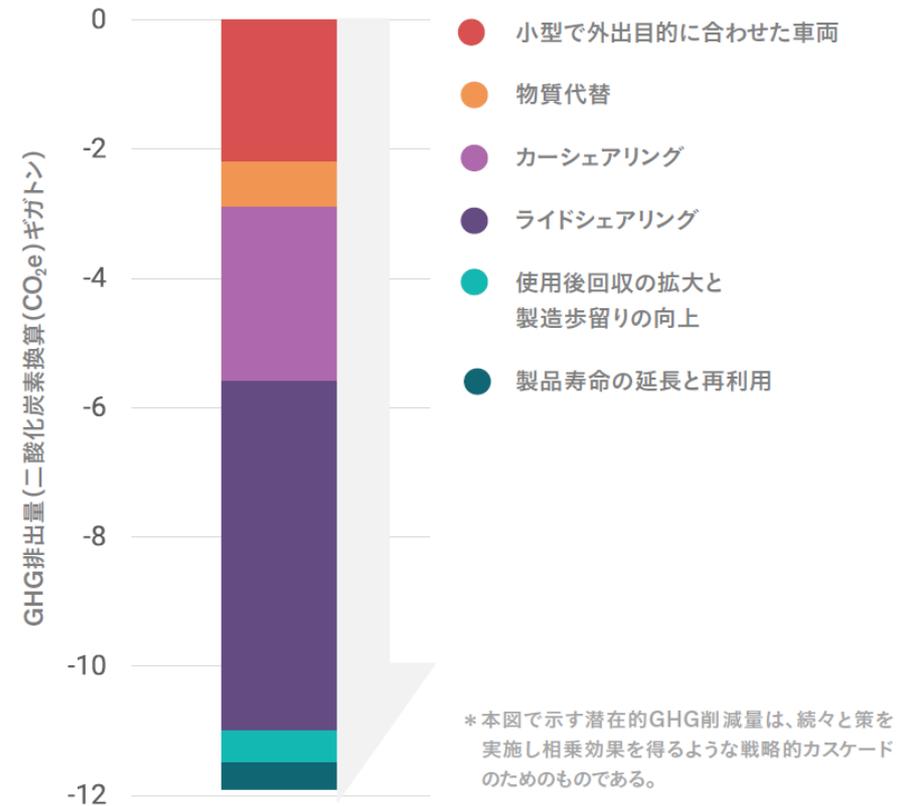


図8. G7における自動車に対する物質効率性戦略による潜在的GHG削減量 (2016年～2060年)



UNEP-IRP: Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future, Report of International Resources Panel (2020).

連携と人材育成の重要性： EIT Raw Materials

EIT (European Institute of Innovation and Technology)



Funded by the
European Union

INNOVATION THEMES



EXPLORATION



MINING



PROCESSING



RECYCLING



SUBSTITUTION



CIRCULAR ECONOMY

- ✓ 教育、研究から新技発、起業術開、事業化、地域・国際連携まで、385のプロジェクトを実施
- ✓ 120を超える企業、大学、研究機関がコアパートナーとして参画、プロジェクト参画機関は180を超える

<https://eitrawmaterials.eu/>