



# 人とくるまのテクノロジー展 2023

令和5年7月7日（金）11:00～12:00

## 鉄鋼材料等の基盤材料の LCAの動向と課題

工学系研究科 マテリアル工学専攻  
特任教授 星野 岳穂

1. 氏名： **星野 岳穂** （ほしの たけお）

2. 学歴

1985年3月 東京大学 工学部 金属材料学科卒業  
1987年3月 同大学院 金属材料学専攻 修士課程修了  
1994年6月 スタンフォード大学大学院  
OR学科 修士課程留学)  
2013年3月 東京大学大学院 工学系研究科  
マテリアル工学専攻 博士課程修了



3. 職歴

1987年4月 通商産業省 入省（国家公務員 I 種行政官）  
原子力産業課、航空機武器宇宙産業課、製造産業局鉄鋼課長  
補佐、非鉄金属課長、大臣官房秘書課企画調査官 等を歴任  
2013年2月 復興庁 政策統括官付参事官（福島復興総括担当）  
2015年4月 同 大臣官房審議官（産業技術・基準認証担当）  
2016年7月 同 大臣官房審議官（地域経済産業政策担当）  
2017年7月 同 大臣官房原子力事故災害対処審議官  
兼 資源エネルギー庁国際エネルギー技術統括官  
2018年6月 退職  
2019年4月 東京大学工学系研究科 マテリアル工学科専攻 特任教授  
（基盤材料マテリアル工学講座 担当）  
現在に至る

**進む地球温暖化が  
世界全体の、現実の脅威に！**

**カーボンニュートラルは  
緊急の課題**

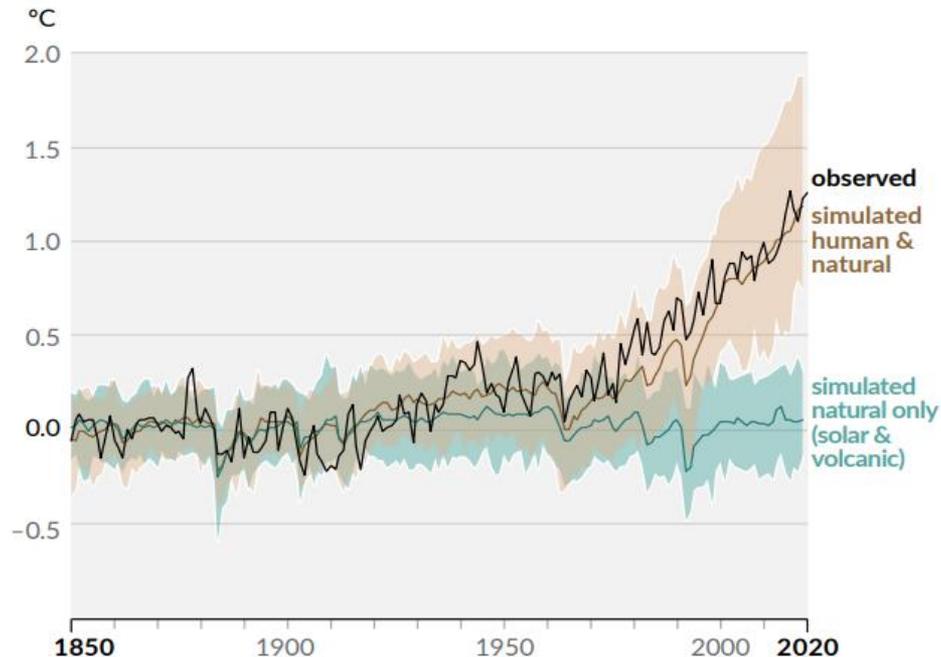




# 気候変動の状況（最新の科学報告書）

- “1850～1900年から2010年～2019年までの人為的な世界平均気温上昇は0.8℃～1.3℃の可能性が高く、最良推定値は1.07℃である”（\*1）

図1. 産業革命前と比較した地表の温度変化（年平均）（\*2）



※実際の観測値

※人為的影響と地球のバイオリズムの影響の両方を考慮したシミュレーション結果。

※太陽や火山の影響など地球のバイオリズムの影響だけを考慮したシミュレーション結果。

(資料) \*1 : IPCC AR6 WG1報告書 政策決定者向け要約 (SPM) 暫定訳 (2022年5月12日版) より (気象庁HP)

\*2 : IPCC Sixth Assessment Report, Working Group 1: The Physical Science Basis, Summary for Policymakers, Figure SPM.1より

2021年 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) **第6次評価報告書**

「**人間の影響**が大気、海洋及び陸域を温暖化させてきたことには**疑う余地がない。**」



# 今や、世界中が「カーボンニュートラル」

- ・ COP25終了時点(2019年12月)では、121ヶ国が2050年までのカーボンニュートラルを表明していたが、EU以外は小国であった。※世界全体のCO2排出量に占める割合は17.9%。G7では、EU・加のみ。
- ・ その後、COP26に向けて野心向上の機運が高まり、中・日・米等が次々とカーボンニュートラル目標を表明し、COP26時点(2021年11月)では、150ヶ国以上（G20の全ての国）が年限付きのカーボンニュートラル目標を掲げている。

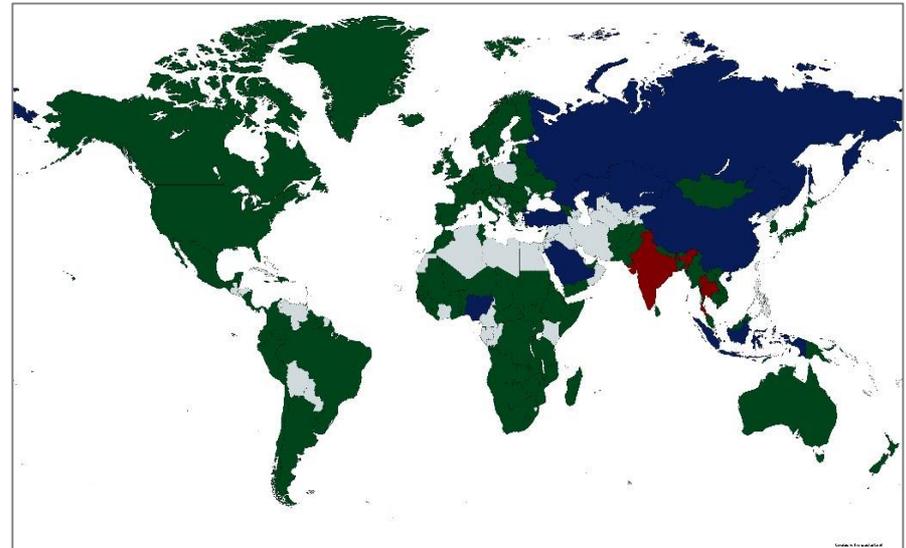
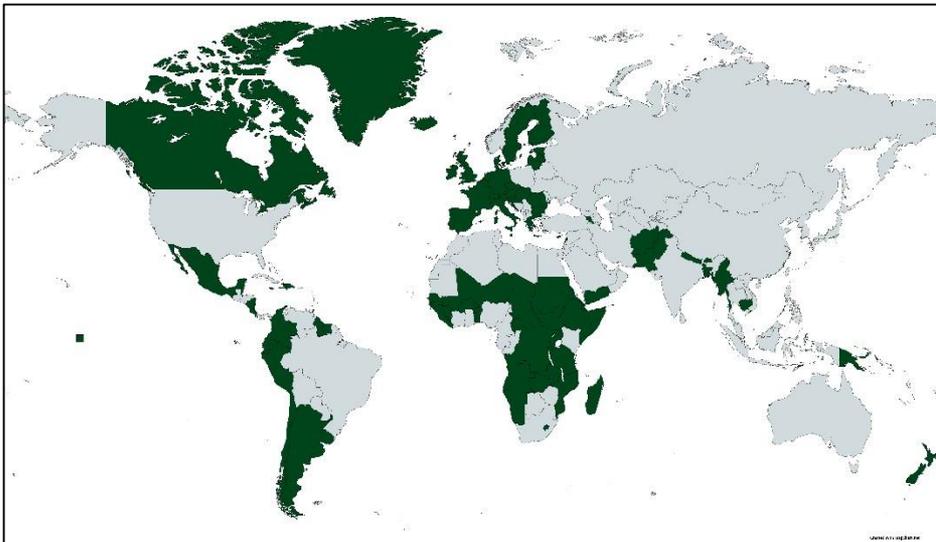
広島サミット：世界のGHG排出量を2019年比で**2030年までに約43%、2035年までに約60%削減**することの緊急性が高まっていることを強調する。

## 年限付きのカーボンニュートラルを表明した国・地域

COP25終了時点（2019年12月）：**121ヶ国**  
※世界全体のCO2排出量に占める割合は**17.9%**

2050年までのCN：144ヶ国（42.2%）  
2060年までのCN：152ヶ国（80.6%）  
2070年までのCN：154ヶ国（88.2%）

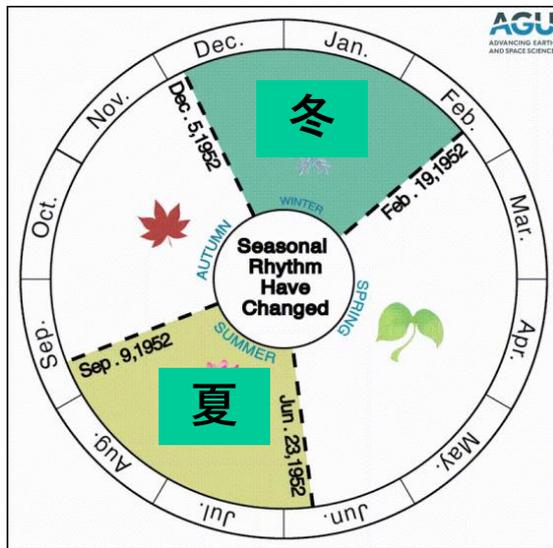
COP26終了時点（2021年11月）：**150ヶ国以上**  
※世界全体のCO2排出量に占める割合は**88.2%**



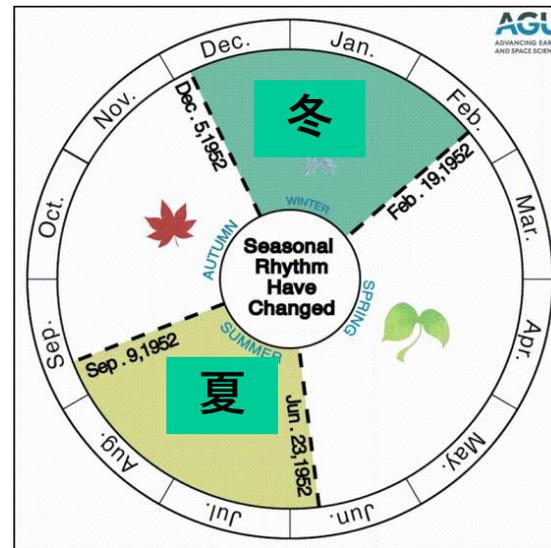
# 地球温暖化が進むと春夏秋冬が夏冬になる？

新たに「気候変動がこのまま進めば、2100年までに**1年の半分が夏**になる」と予測する研究論文がアメリカ地球物理学連合(AGU)の学会誌に掲載された。

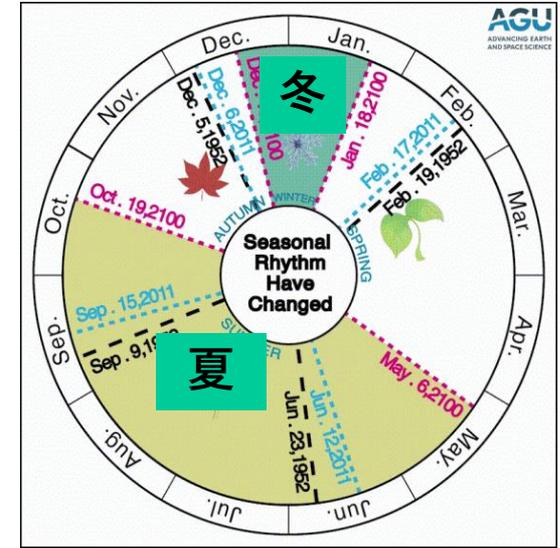
<1952>



<2011>



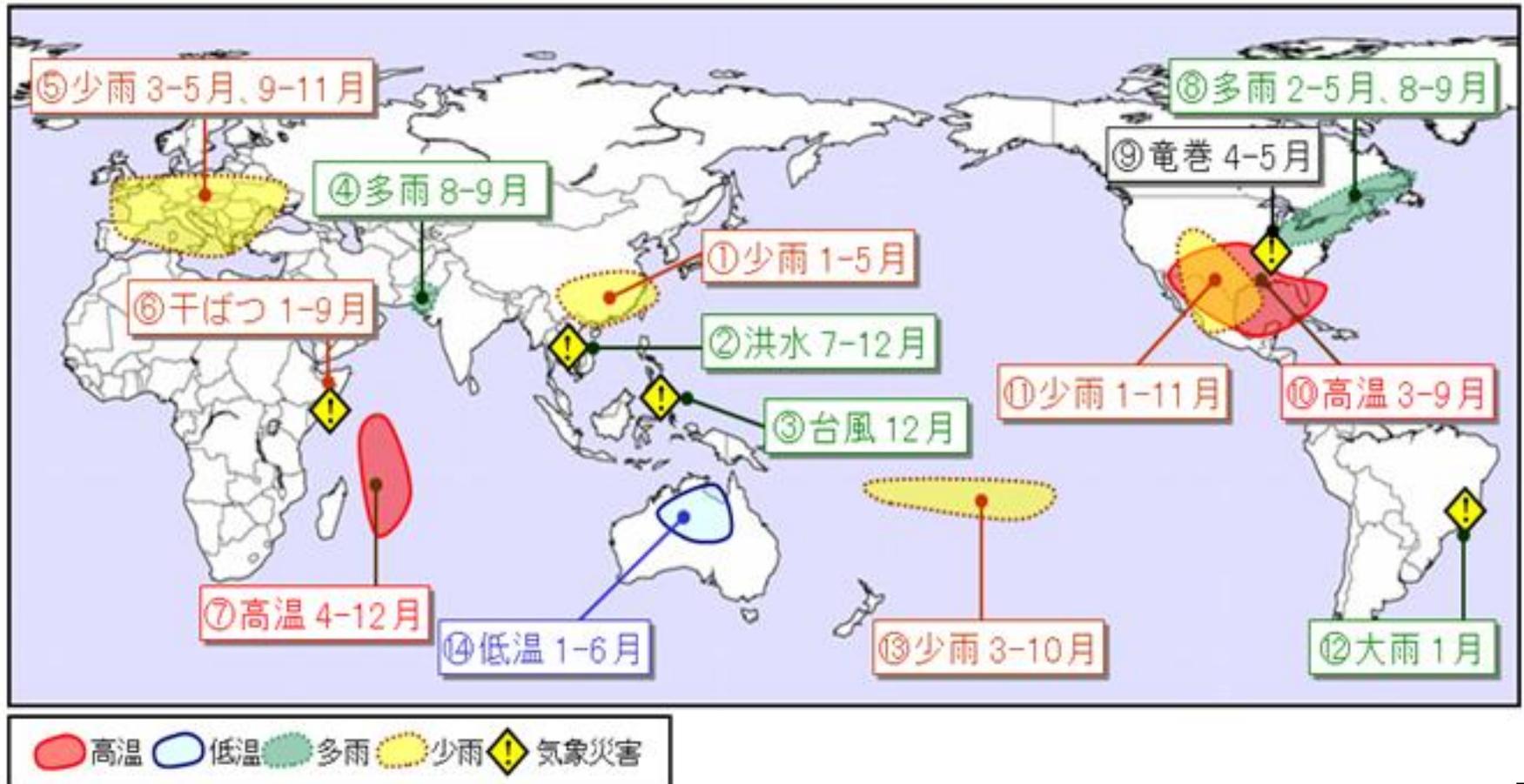
<2100>



# 世界の異常気象の発生状況

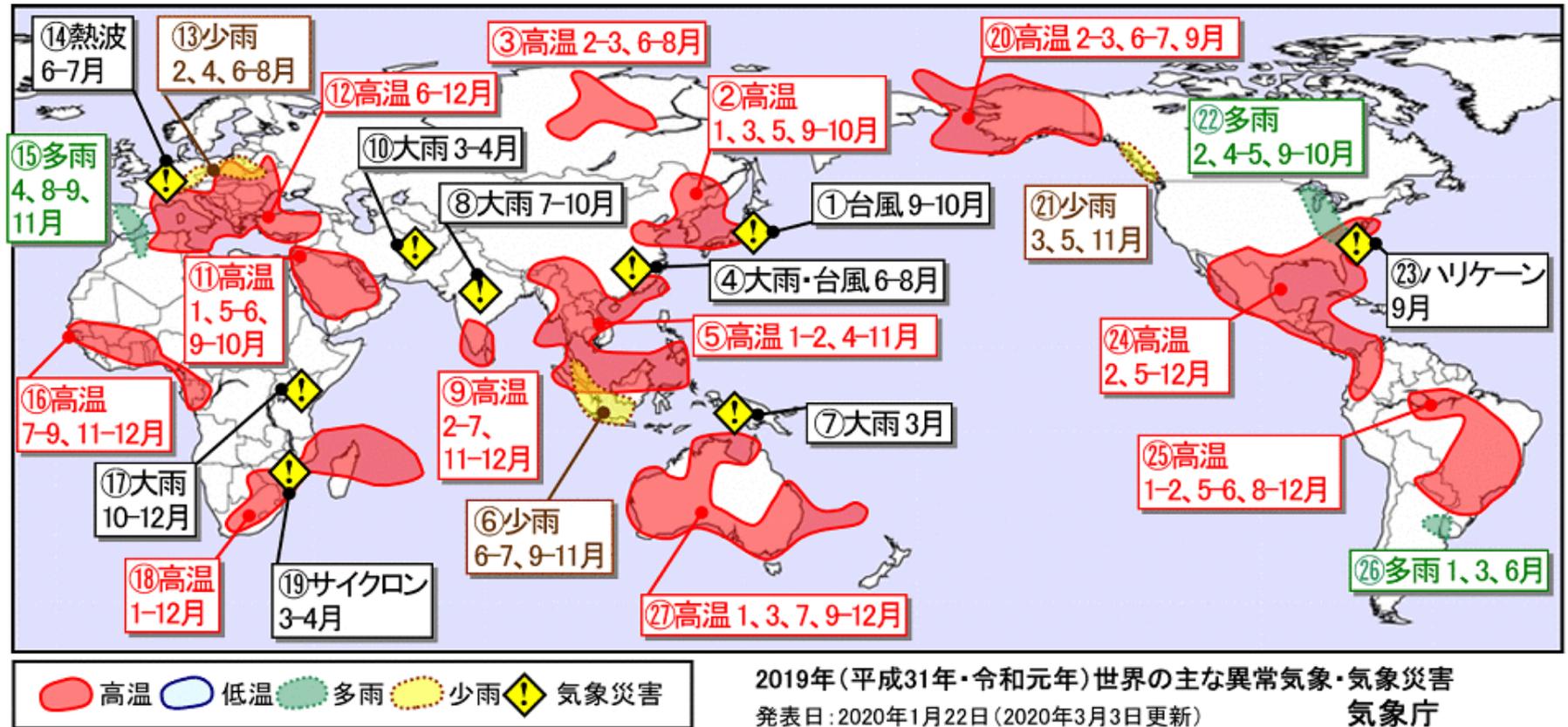
異常気象：「過去25～30年の気候に対して著しい偏りを示した天候」

< 2011年 >



# 世界の異常気象の発生状況

< 2019年 >



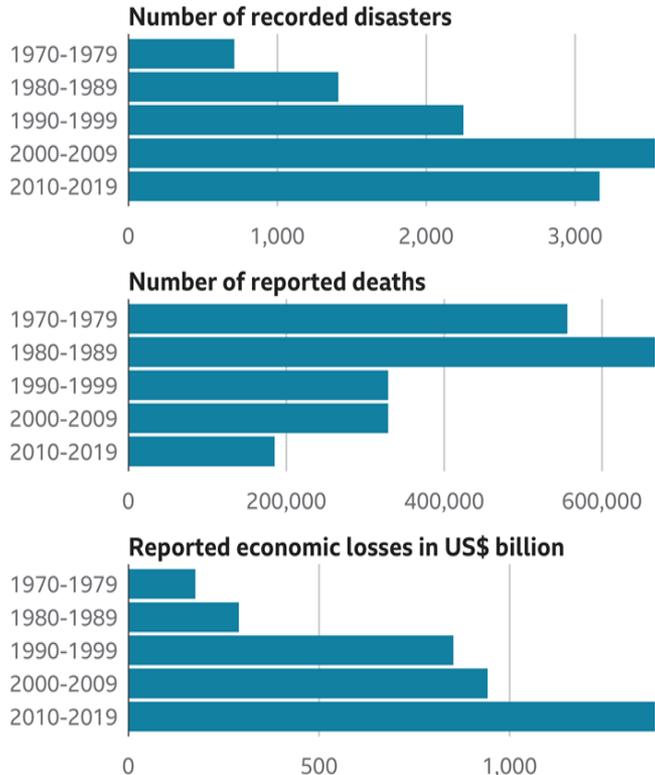
# パキスタンの昨年（2022年）の大規模水害

世界気象機関（WMO）は昨年、暴風雨や洪水、干ばつといった世界の気象災害の数が過去50年間で5倍に増加したと発表した。

パキスタンでは、「国土の3分の1が水の中にある。このような状況は見たことがない」という大規模な史上最悪レベルの大雨災害に見舞われている。

## How weather disasters have changed

Distribution of disasters and impact by decade, 1970-2019



Source: UN World Meteorological Organization 2021 report

BBC



## 2021年3月 オーストラリア、ニューサウスウェールズ州の海岸沿いの町



## 2022年5月 ブラジル南部サンパウロ州



# 2023年梅雨前線による大雨及び台風第2号による被害



道路冠水 = 埼玉県越谷市  
2023年6月3日午前9時30分、



記録的大雨 住宅損壊、浸水相次ぐ 豊橋で1人死亡 / 愛知



大雨で静岡の病院浸水、深さ1.5m



2023年6月3日午前7時35分、愛知  
豊川市平井町、戸村登撮影

# 気象災害リスク世界ランキング

ドイツの研究機関ジャーマンウォッチ((2019年12月)※)の分析によれば、2018年に世界183か国で発生した気象災害や気候リスクを死者数や経済的損失などから総合的に算出したもので、日本は前年(2017年)の32位から世界でワースト1位。



### Climate Risk Index 2020

Ranking 2018 (2017)	Country	CRI score	Death toll	Deaths per 100 000 inhabitants	Absolute losses (in million US\$ PPP)	Losses per unit GDP in %	Human Development Index 2018 Ranking
1 (36)	Japan	5.50	1 282	1.01	35 839.34	0.64	19
2 (20)	Philippines	11.17	455	0.43	4 547.27	0.48	113
3 (40)	Germany	13.83	1 246	1.50	5 038.62	0.12	5
4 (7)	Madagascar	15.83	72	0.27	568.10	1.32	161
5 (14)	India	18.17	2 081	0.16	37 807.82	0.36	130
6 (2)	Sri Lanka	19.00	38	0.18	3 626.72	1.24	76
7 (45)	Kenya	19.67	113	0.24	708.39	0.40	142
8 (87)	Rwanda	21.17	88	0.73	93.21	0.34	158
9 (42)	Canada	21.83	103	0.28	2 282.17	0.12	12
10 (96)	Fiji	22.50	8	0.90	118.61	1.14	92

The Global Climate Risk Index for 2018: the 10 most affected countries

[www.germanwatch.org/en/cri](http://www.germanwatch.org/en/cri)

(出所) <https://germanwatch.org/en/17307>

2020年1月、ドイツの保険会社「ミュンヘン再保険」は2019年の自然災害による被害と損害額をまとめたレポートを発表。それによると、世界の年間被害総額は約1,500億ドル(20兆円)。うち額が最も高かったのは日本(4兆円)。

# CO2排出にかかる日本のポジション

- 日本はCO2排出量で **世界第5位** に位置付け

二酸化炭素排出量の多い国  
(2017年版)

順位	国名	排出量*	割合(%)
1	中国	9,258	28.2
2	アメリカ	4,761	14.5
3	インド	2,162	6.6
4	ロシア	1,537	4.7
5	日本	1,132	3.4
6	ドイツ	719	2.2
7	韓国	600	1.8
8	カナダ	548	1.7
9	インドネシア	496	1.5
10	メキシコ	446	1.4
11	ブラジル	428	1.3
12	オーストラリア	385	1.2
13	イギリス	359	1.1
14	イタリア	321	1.0
15	フランス	306	0.9
	その他	9,382	28.6
	各国の排出量の合計 (世界の排出量)	32,840	

\*排出量の単位は[百万トン・エネルギー起源の二酸化炭素(CO2)]  
四捨五入のため、合計が100%にならない場合があります

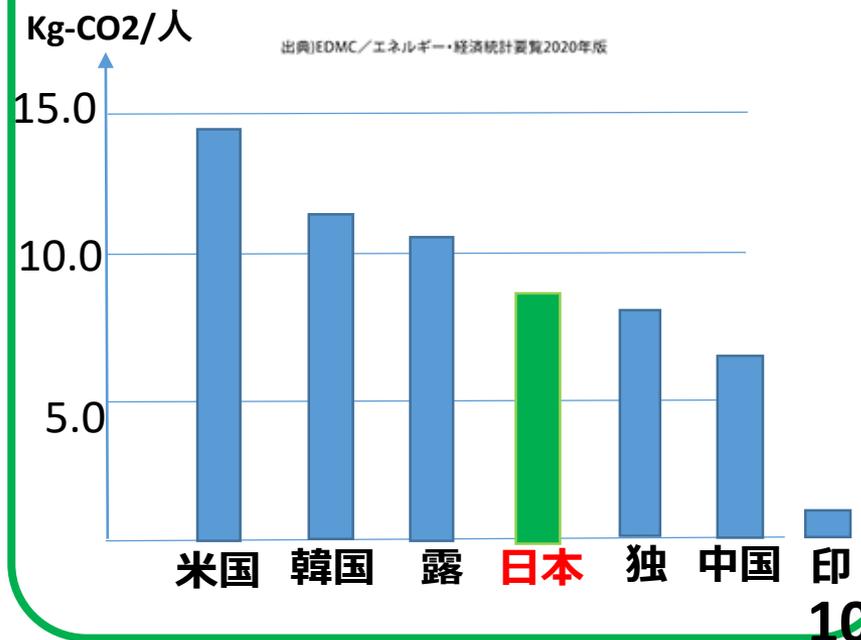
出典)EDMC/エネルギー・経済統計要覧2020年版

## 主要国の1人当たりのCO2排出量の多い国

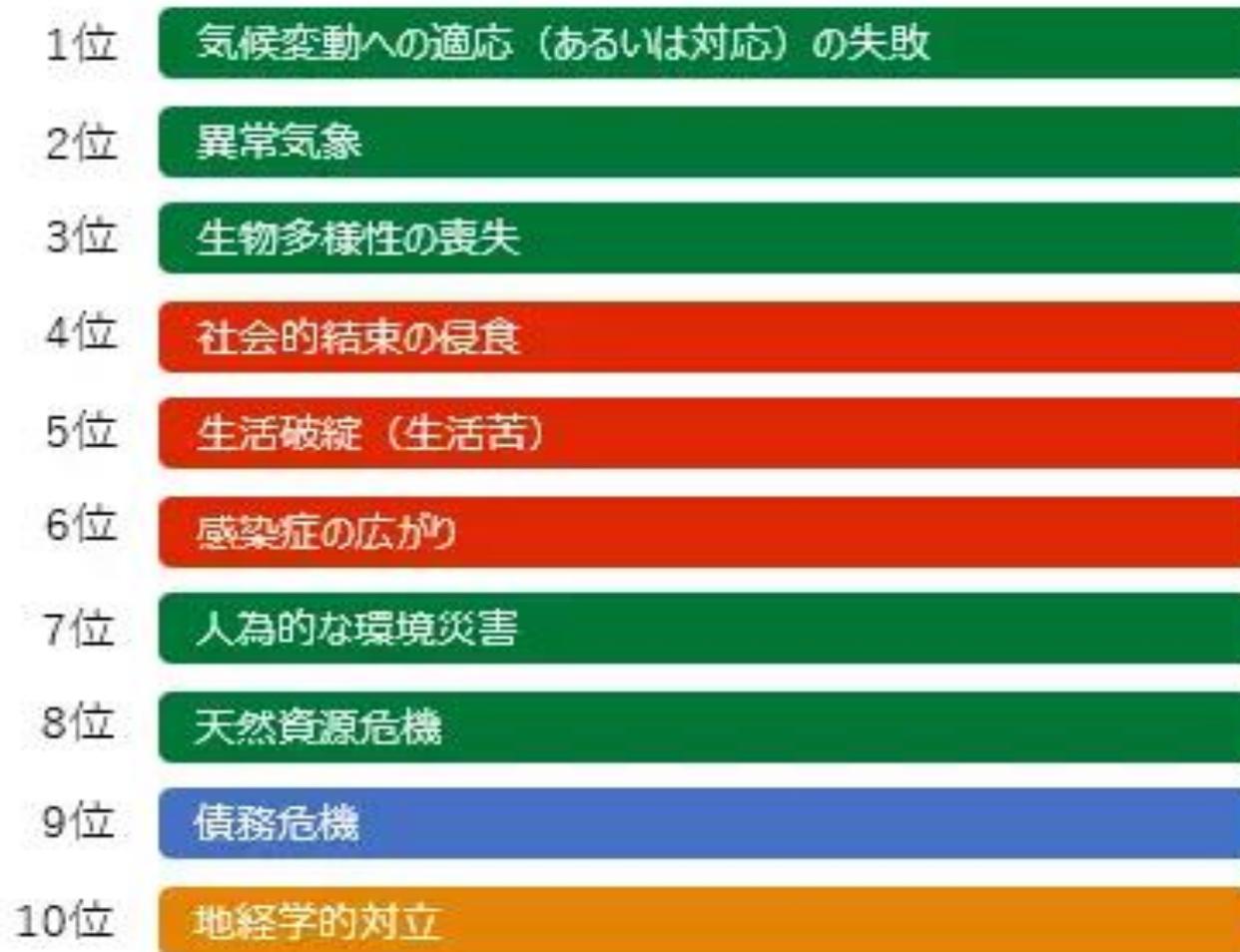
(2017年版) Kg-CO2/人

国名	一人当たり排出量*
中国	6.7
アメリカ	14.6
インド	1.6
ロシア	10.6
日本	8.9
ドイツ	8.7
韓国	11.7
アフリカ合計	0.95

\*排出量の単位は[トン/人・エネルギー起源の二酸化炭素(CO2)]



## 深刻度から見たグローバルリスク



■ 経済 ■ 環境 ■ 地政学 ■ 社会 ■ テクノロジー



# カーボンニュートラル実現は どれほど難しいか

～CO2排出抑制と経済成長の関係～



# CO2と経済・エネルギーとの関係式：茅方程式 (Kaya Identity)

第1回 IPCC エネルギーと産業サブワーキンググループで発表(1989)

$$CO_2 = \frac{CO_2}{Energy} \times \frac{Energy}{GDP} \times GDP$$

<化石燃料依存度> <エネルギー消費効率> <国内経済生産>

↓ 時間で微分すると……

$$CO_2 \text{ 排出量の増加率} = \text{化石燃料依存度の変化率} + \text{エネルギー効率の変化率} + \text{経済成長率}$$

↓  
<再生可能エネルギー等導入率>  
以前の日本のトレンド：  
約**-1.0 %**/年

↓  
<省エネ進展の速度>  
石油危機時の日本：  
約**-2.9 %**/年

< = 合計して、概ね**年率-4%**の進展 >



茅陽一 東京大学名誉教授、公益財団法人・地球環境産業技術研究機構・理事長

# CO<sub>2</sub>排出量削減が経済成長に与える影響

$$\text{CO}_2\text{排出量の変化率} = \text{エネルギー効率の変化率} + \text{化石燃料依存度の変化率} + \text{経済成長率}$$

＜省エネ進展率＞ 石油危機後の日本：約**-3%/年**  
＜非化石エネルギー導入＞ 日本の長期トレンド：約**-1%/年**

＜ = 合せて約**-4%**の進展 ＞

「2050年までにゼロ」  
のためには……

石油ショック時並みの努力

経済成長率:

**-7%/年**

=

**-4%** 毎年の削減努力

+

**-3%/年**

2021年

+ 1.2%

- 0.5%

+ 1.7%

8年ぶりに前年比増+

石油ショック時の2倍以上の努力

**-7%** 毎年削減

=

**-9%** 毎年の削減努力

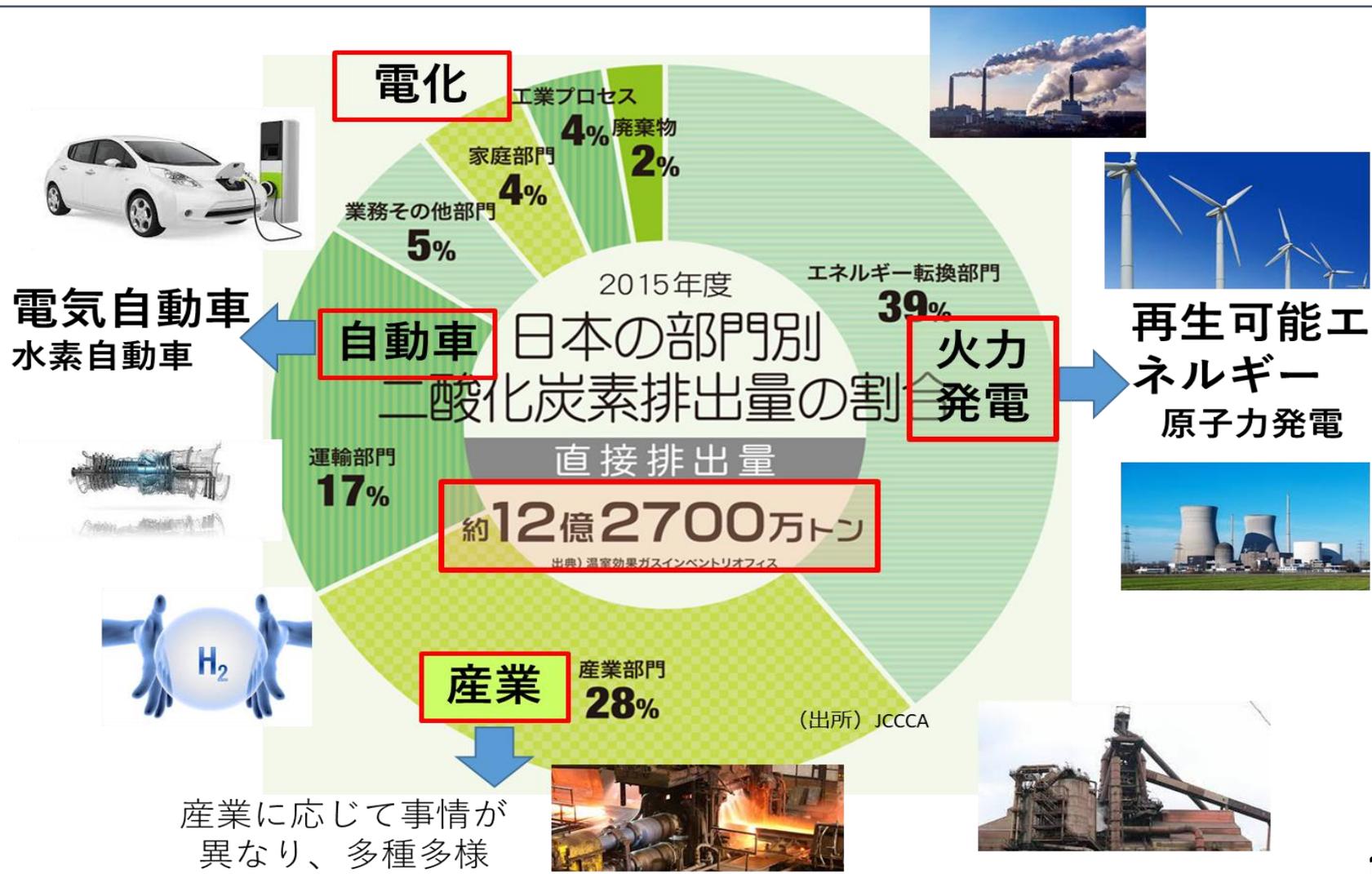
+

**+2%/年**

経済成長とエネルギー消費の  
デカップリングが必要。

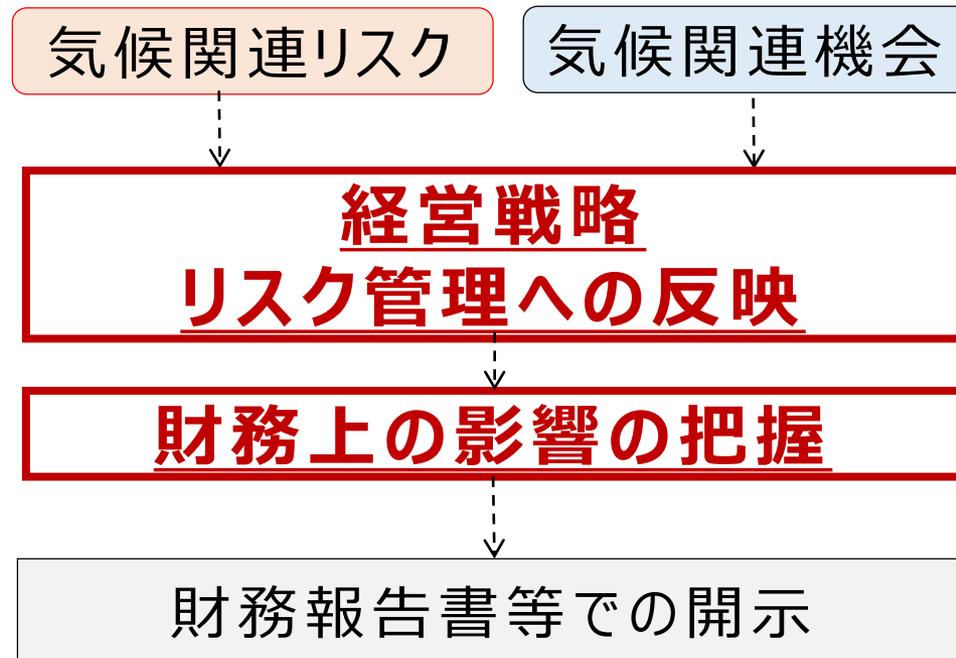
# 日本の部門別CO2排出量の割合

各部門毎に、強引に「電化」を進めている。産業部門だけは各産業毎に事情に応じて戦略・方向を模索している状況。



TCFD※は企業に対して、気候変動の財務影響を把握することを求めている。

(※Task Force on Climate-related Financial Disclosures) 気候関連財務情報開示タスクフォース

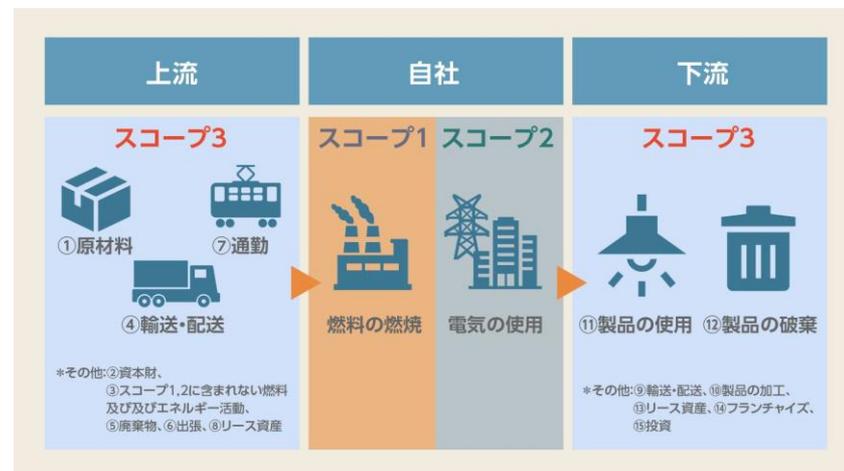


TCFDは、全ての企業に対し、①2℃目標等の気候シナリオを用いて、②自社の気候関連リスク・機会を評価し、③経営戦略・リスク管理へ反映、④その財務上の影響を把握、開示することを求めている

# 温室効果ガス（GHG）プロトコルとは

= 温室効果ガス（CO<sub>2</sub>など）の排出量を算定・報告する際の国際基準。

- 世界資源研究所（World Resources Institute : WRI）
  - 世界経済人会議（World Business Council for Sustainable Development : WBCSD）
- の2団体により1998年に発足したのが、「GHGプロトコルイニシアチブ」という独立機関を発足。GHGプロトコルを策定。



サプライチェーン全体における総排出量（間接排出）を重視。（ライフサイクル的思考）。そのため、上流から下流までバリューチェーン全体の温室効果ガス排出量を対象とする算定・報告基準が設定されている。



**LCA（ライフサイクルアセスメント）の重要性が再認識**された

# CO<sub>2</sub>排出量低減の評価対象（SCOPE3）

近年、企業が直接的に排出する温室効果ガスの排出量（Scope1、Scope2）だけでなく、原材料調達から、物流、製品の廃棄に至る、バリューチェーン全体の温室効果ガス排出量（：サプライチェーン排出量）を把握・管理することが重要視されるようになってきている。（＝LCA評価が重視される）。



# EUの炭素国境調整措置 (CBAM)

- EUは、域外諸国からの輸入について、製品当たり炭素排出量に基づく輸入課金（証書購入）を求める炭素国境調整措置（CBAM）の導入を決定。
- 2023年10月1日から 製品単位あたり排出量や原産国で支払われた炭素価格等の情報を報告する義務が開始。実際の課金は、EU-ETSにおける無償割当廃止のスピードに併せ、2026年から2034年にかけて段階的に導入されていく。



## 課金について（2026年～段階的に導入、2034年以降本格稼働）

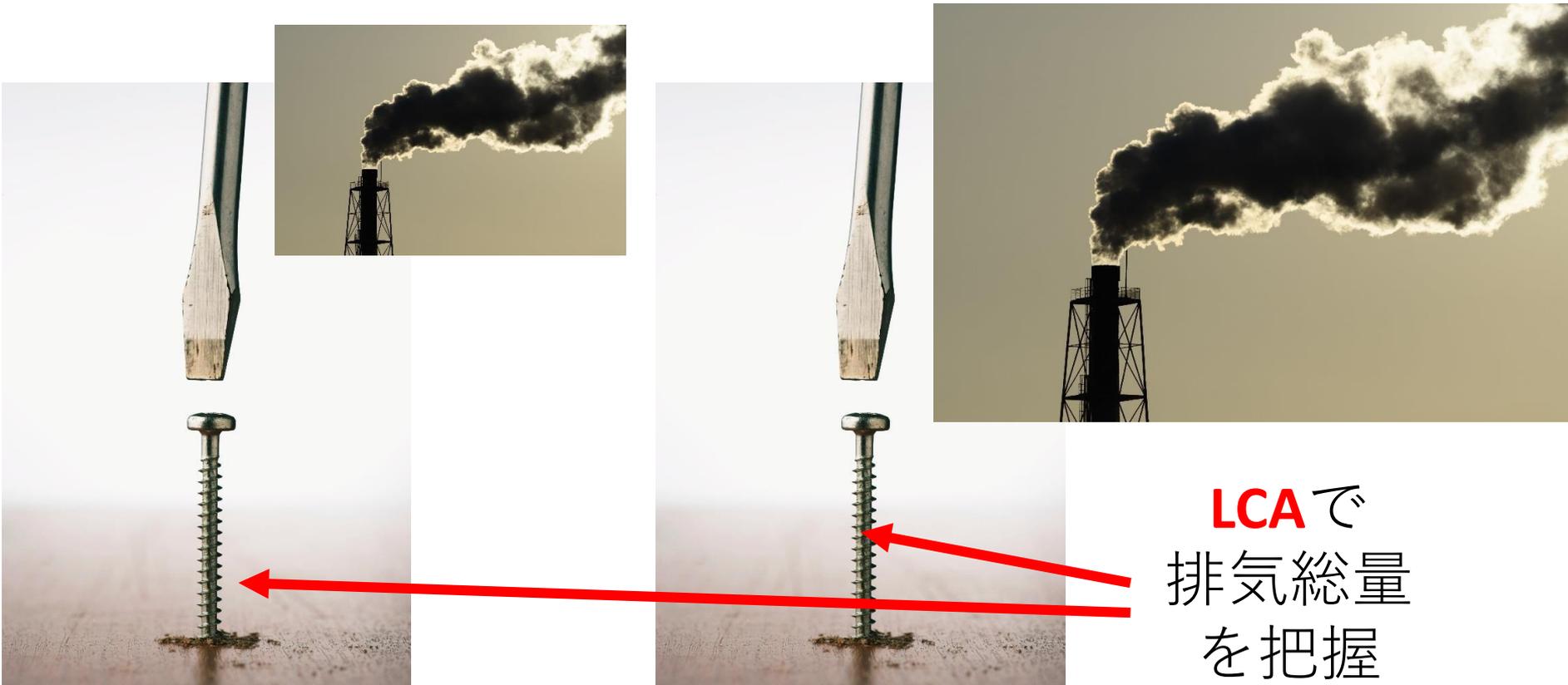
$$\text{輸入課金} = \text{CBAM証書価格 (P/CO}_2\text{-ton)} \times \text{製品単位当たり排出量 (CO}_2\text{-ton/Q)} \times \text{製品輸入量 (Q)}$$

証書価格：  
 ①前週におけるEU-ETSの全入札の平均終値  
 ②EU域外で支払われた炭素価格 (tax or emission allowances) をCBAM証書価格から控除可

製品単位当たり排出量：  
 ①排出範囲： 直接排出 とある特定の条件下での 間接排出 含む。  
 ②排出量：実際の製品排出量  
 ※ デフォルト値の利用：各国毎に輸出国の信用できるデータがない場合等、実際の数値が取得できない場合はデフォルト値を各輸出国の平均排出原単位を活用し、製品ごとに設定可能（ただし電力除く）

# どのぐらいのCO<sub>2</sub>を出して作った製品か

- 自社の製品がどれだけのCO<sub>2</sub>を出しているかを知っている必要がある。ライフサイクルでの排出量、サプライチェーン全体の排出量を把握する必要がある。
- 今後は、同じ機能・同じものであったとしても、製造過程で出したCO<sub>2</sub>の量に応じて価値（税金・価格）に差が出るようになってくる。



**LCA**で  
排気総量  
を把握

# EU-CBAMの対象産業は6つ

- 現時点では、EU-CBAMは、炭素コストが影響しやすい素材・エネルギーに限定されている。

①セメント

②電力

③肥料（アンモニア含む）

④鉄鋼（ネジやボルトなども含む）

⑤アルミニウム

⑥水素（\* 実際はChemicalの分類でHydrogenのみが列挙されている）

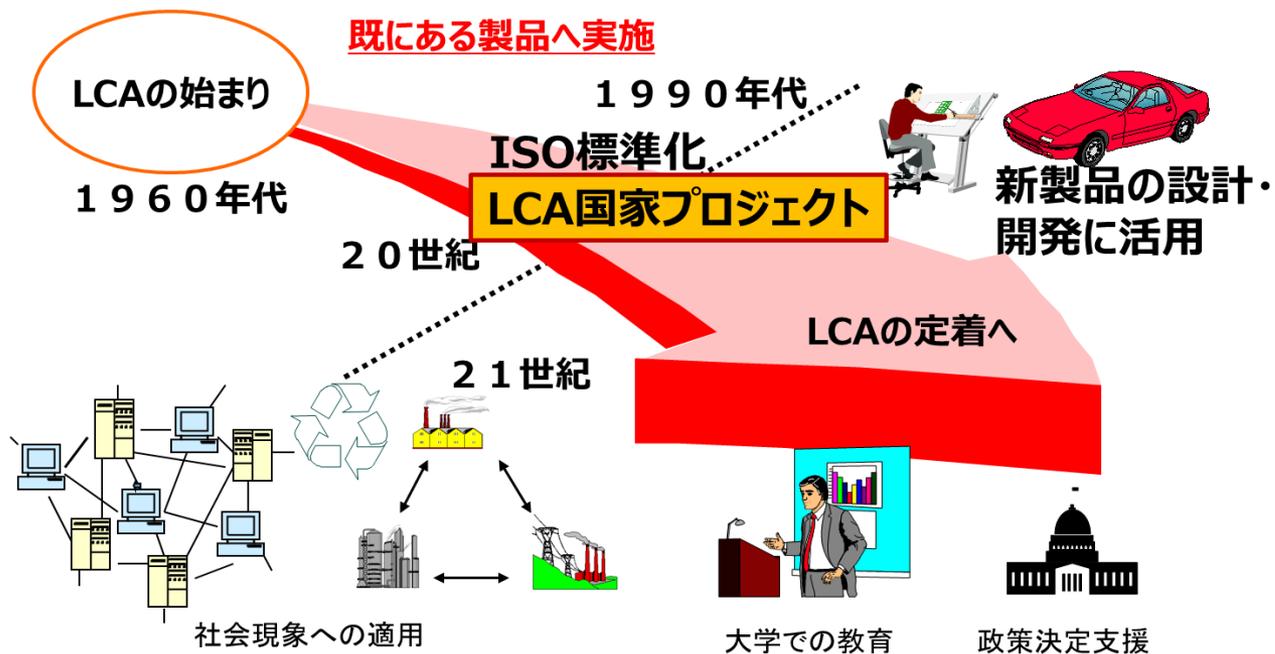
（資料）<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956>

## 【EU-CBAMのスケジュール（EU-ETS※とリンク）】

※EU域内排出量取引制度（EU-ETS：European Union Emissions Trading System）



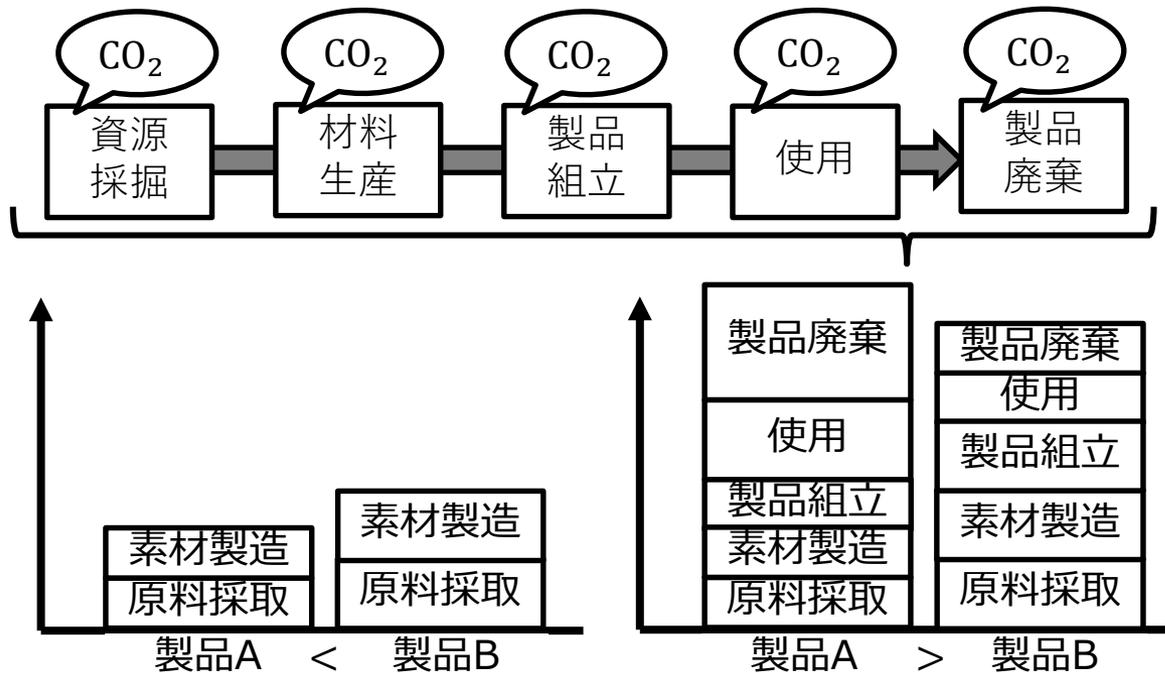
# 脱炭素化社会の構築と LCAの重要性の再認識



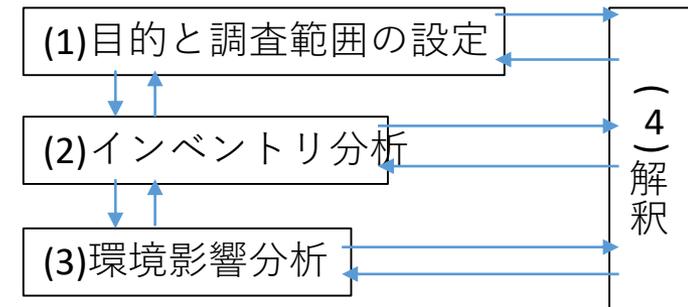
# Life Cycle Assessment (LCA) と Life Cycle Inventory (LCI) 分析

**LCA**: 製品・サービスの持つ環境影響をライフサイクルに渡って評価する手法

**LCI**分析: ライフサイクル全体を通じた入出力(inventory)の定量化を行う段階



## LCAの実施手順

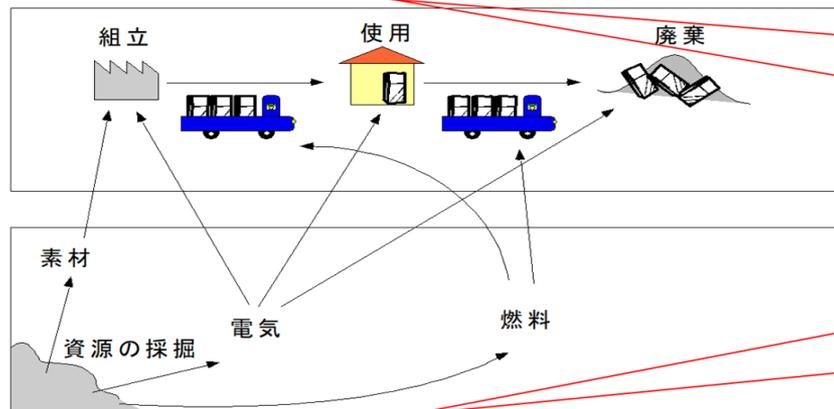


[ISO14040, 2006]

# 実務としてのLCAの実施方法



フォアグラウンドデータ (対象製品に直接関係するデータ)



一次データ：  
自分で調べる

2次データ：  
データベース  
から引用する

バックグラウンドデータ (対象製品に間接的に関係するデータ)

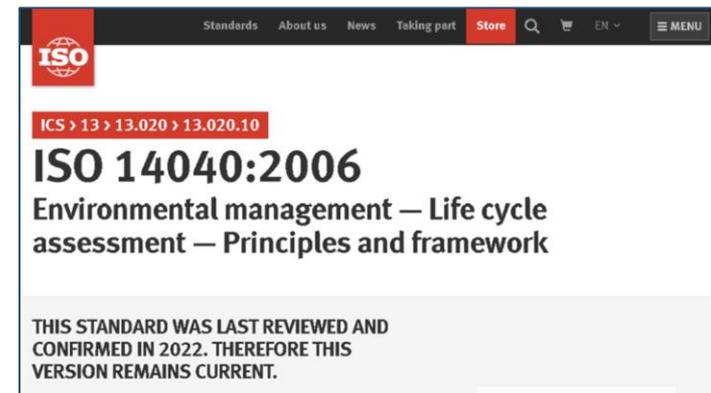
- ・ フォアグラウンドデータ (一次データ) は自分で収集する。
- ・ バックグラウンドデータ (2次データ) はデータベースや文献から引用する。
- ・ LCAの実施とその結果は、バックグラウンドデータの存在と、その質に大きく依存する。

1996年：国際標準化ISO14040（原則及び枠組み）

- LCAは、製品（サービス）に伴った環境側面と潜在的な環境影響を評価する1つの手法
- LCA is a technique for assessing the environmental aspects and potential impacts associated with a product (or service)

ISO-LCA = 「製品」 LCA

「素材」に対するLCAは？



- ISO14040 (JIS Q14040) : 原則及び枠組み
- ISO14041 (JIS Q14041) : 目的及び調査範囲の設定並びにインベントリ分析
- ISO14042 (JIS Q14042) : ライフサイクル影響評価
- ISO14043 (JIS Q14043) : ライフサイクル解釈

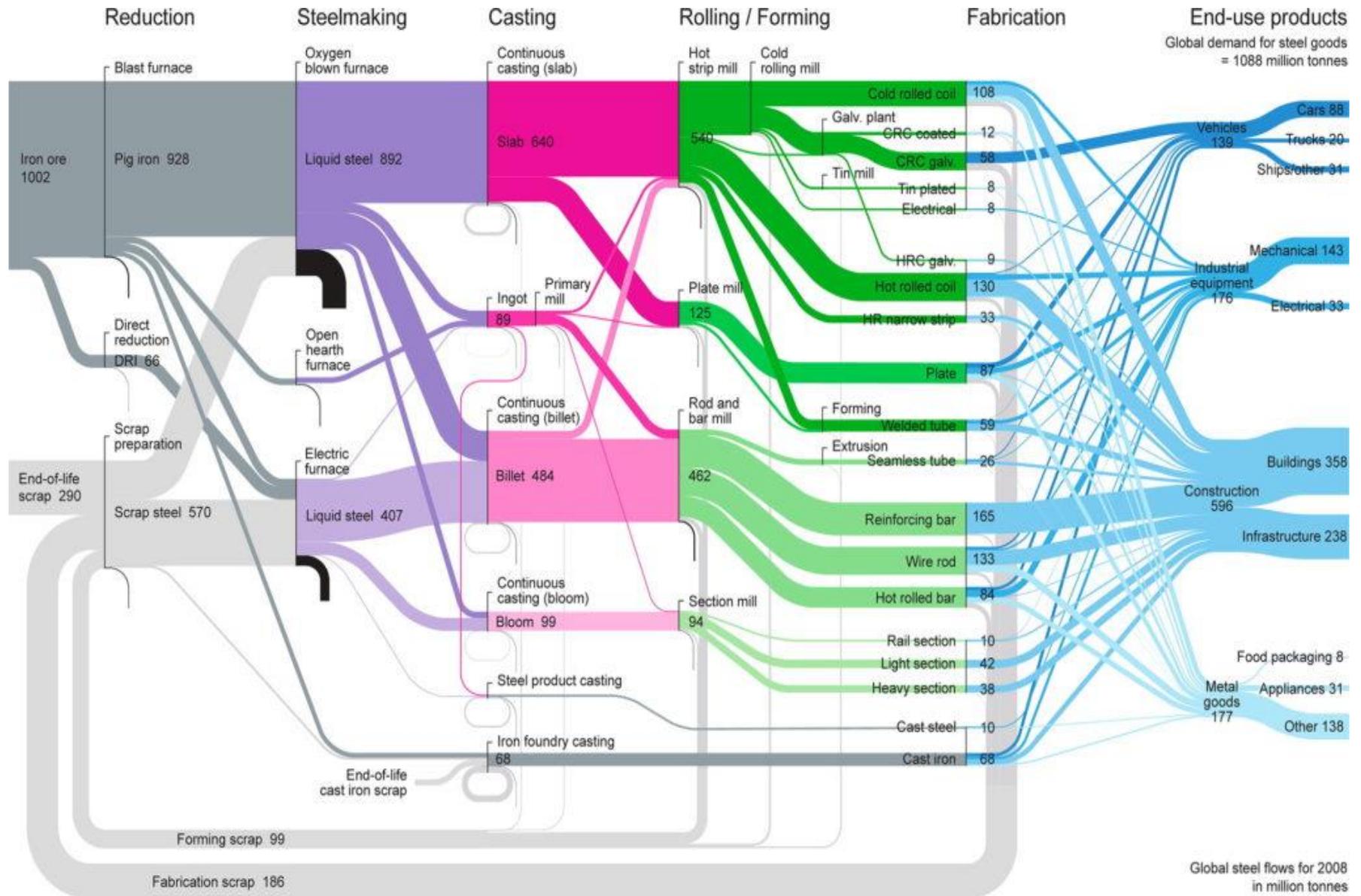
# 多数のLCAの手法、考え方が提案されている

- **Attributional LCA (ALCA) (帰属的LCA)**
- **Consequential LCA (CLCA) (帰結的LCA)**
- **Backcasting LCA (BLCA)**
- **Decision LCA (DLCA)**
- **Integrated LCA (ILCA)**
- **Anticipatory(先行的) LCA (NLCA)**
- ≡ **Pre-emptive(先制的) LCAProspective LCA (PLCA)**
- **Scenario-based LCA (SLCA)**

# 現在のLCAでは検討が必要な課題

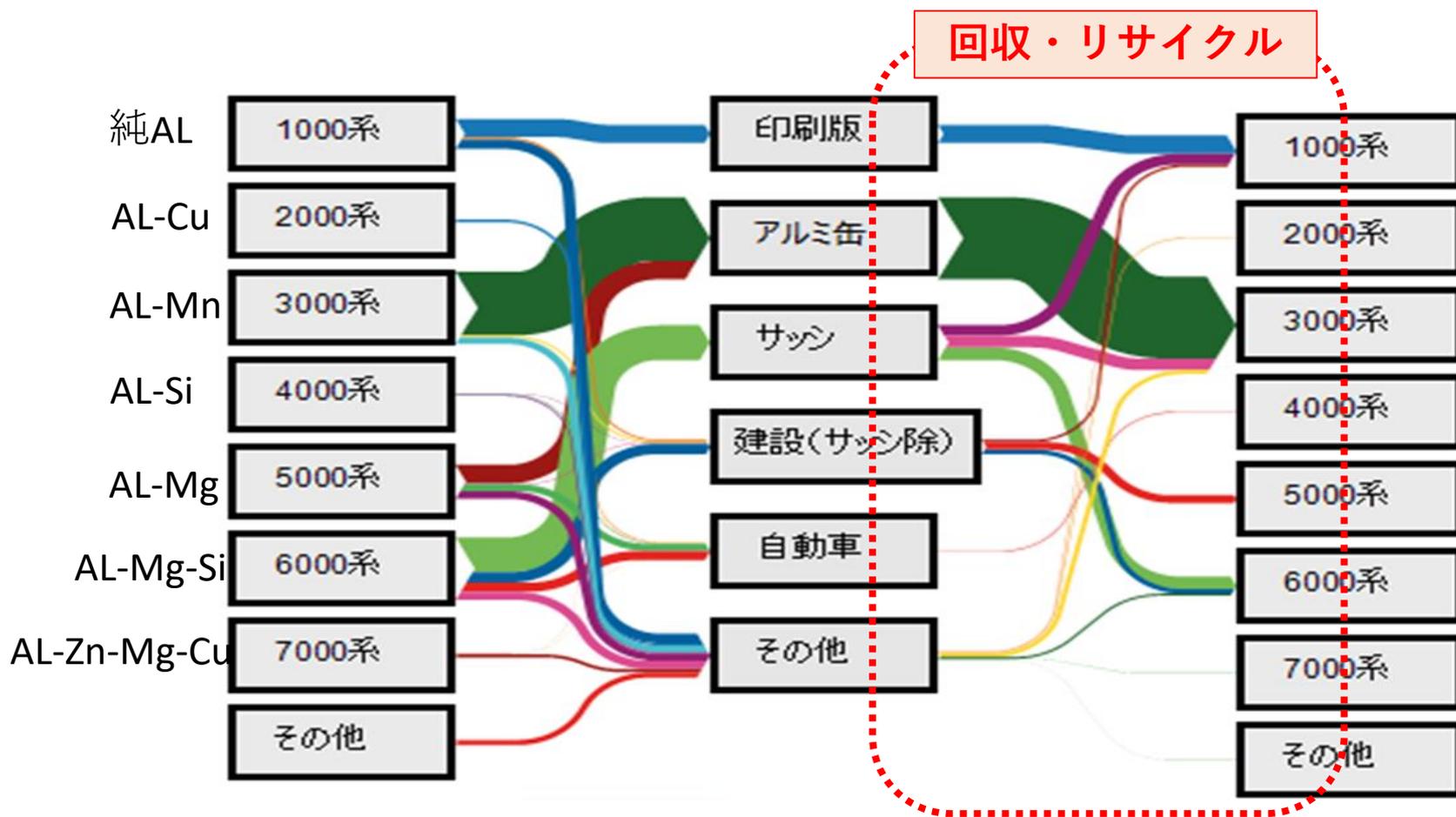
- ◆ 素材は機械製品と異なり、用途／ライフサイクルが多様
- ◆ 製品・使用時・廃棄後のプロセスによって結果は異なる
- ◆ 多機能素材の評価が困難（例：強度は弱いですが、錆びにくく長寿命）
- ◆ **LCAでは機能単位を決めなければいけない（材料の機能を何にするか）**
- **マテリアル・フロー**が機械製品より複雑
- ◆ 素材製造時の連産品生産（ex原油から重油・灯油・ジェット燃料・ガソリン・ナフサなどが連産される）
- **素材は何回もリサイクルされるが、リサイクルを考慮したLCA手法は研究途上**
- ◆ **気軽にLCAで材料間の「比較」をしてはならない（ISOで厳しく規定）**

# 精緻なマテリアルフロー分析例

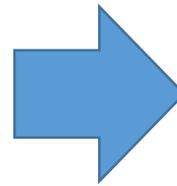


# 合金別のマテリアルフロー分析（リサイクルも含めたフロー分析）

特に、金属材料のマテリアルフローには添加元素による「制約」がある。各合金別の添加元素の量によって、製品使用後の「リサイクルの流れ」制約が生じる。それにより、リサイクルにも制約ができてしまう。



# 素材の資源循環利用の評価 「L C A手法は未だ研究段階」

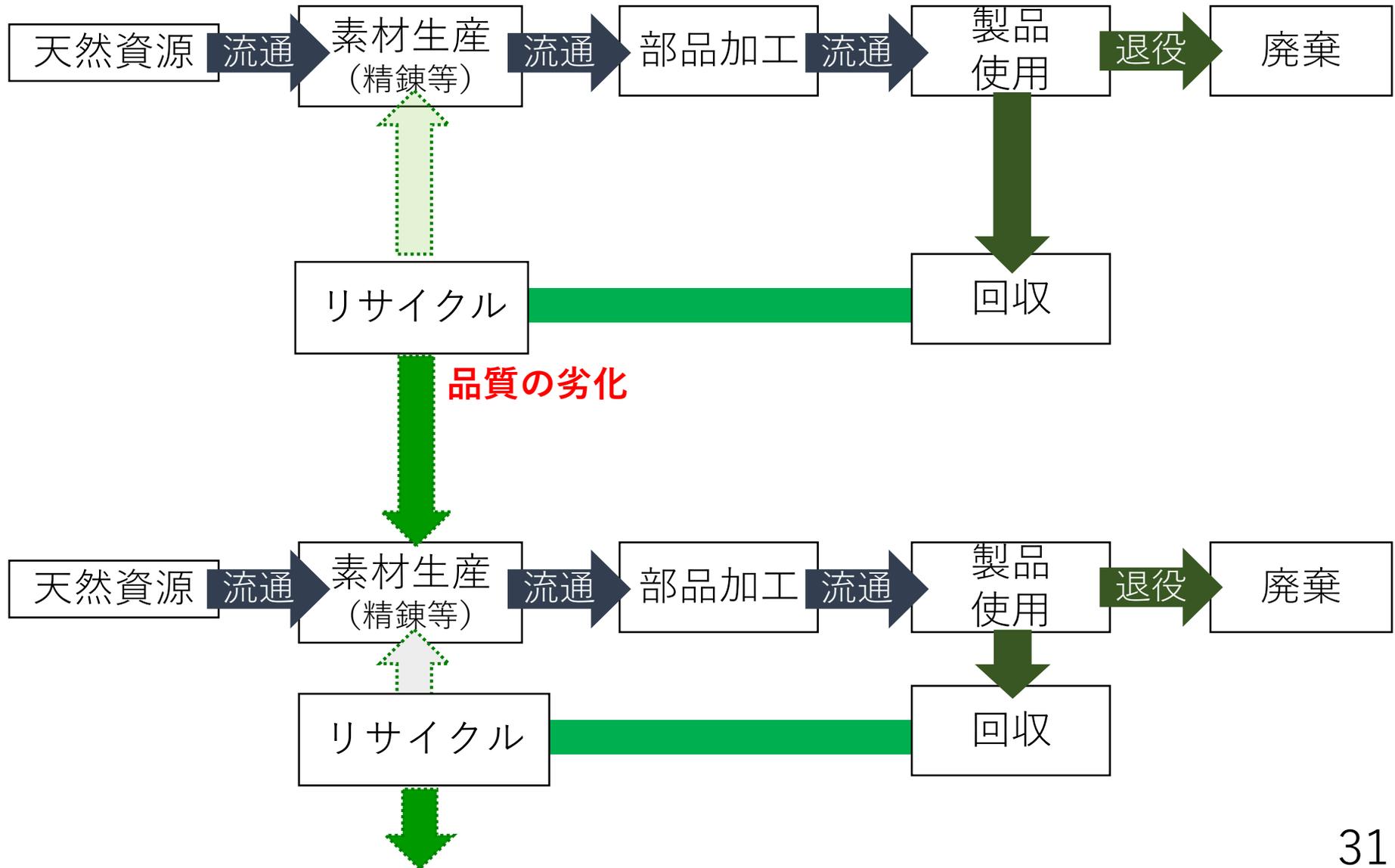


# 素材のLCA評価の課題

【課題①】 「素材」の場合、「製品」と違って、新製品中にリサイクル材が使用され、繰り返しリサイクルされている。材料をリサイクルによって環境負荷が軽減している効果を考慮すべきだが、一般的なLCA分析手法が確立されていない。

【課題②】 素材の場合、LCAでなく「生産プロセス」でのCO<sub>2</sub>排出（だけ注目されてしまう）。「使用時」に環境負荷低減に貢献する「機能」（軽量化等。比強度の改善等）をLCAでどう評価するか。「製品」と素材で環境負担減の貢献の配分をどうするか

# 「カスケード」リサイクルのマテリアルフローの例



# 材料のLCA評価と材料間の比較

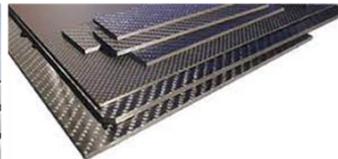
鉄鋼



アルミ



CFRP



LCAでの比較評価の際には、ある製品と同一の  
求める「機能」を持つ競合の製品に対する優越性又は同等性に関して比較すべき。

➔ 素材の「重量」当りの環境負荷の比較は合理的か？  
良く見かける「素材 1 kg生産当りCO2の排出量」で比較して良いのか。構造材料なら「同じ強度当り」「同じ寿命なら」？

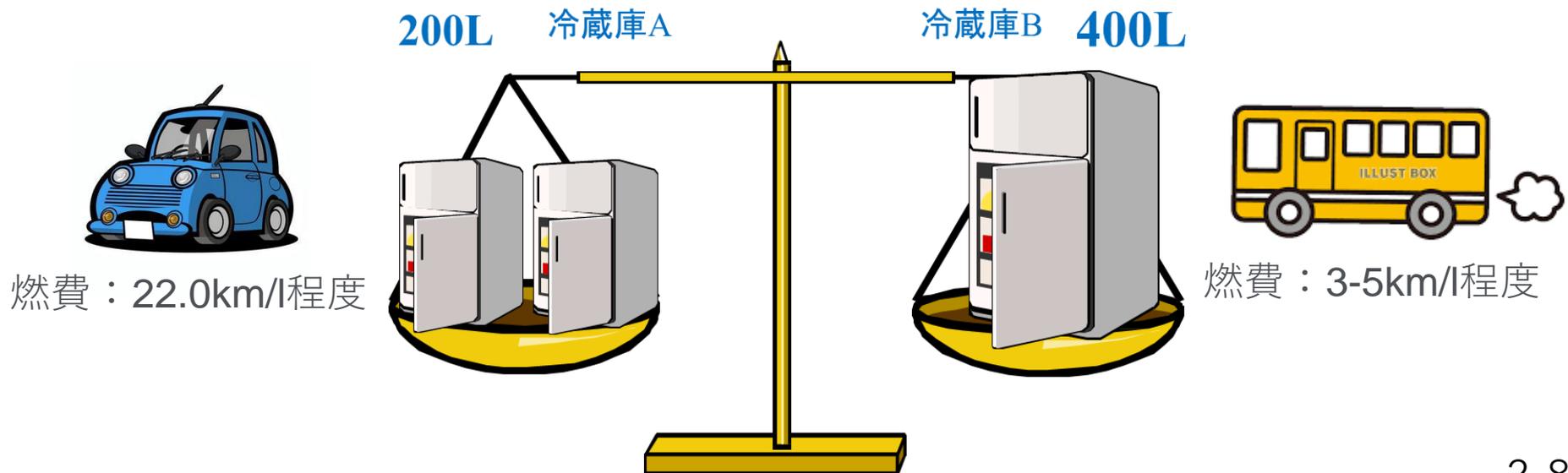
- プロセスの初期段階ですべての利害関係者を明らかにする。
- プロセス全体について第三者（外部）の厳正なレビューを受け、そのコメントに対処する。
- 完全なLCA調査（明らかな機密データを除く）をすべての関係者に公表する（一部の概要だけでなく、すべての結果データを公表すること）。これらの規則に従って比較LCAを実施し、情報を提供することで、あらゆる関係者がその分析結果を受け入れたり、異議を唱えたりできる。
- 特に、ISOでも、比較主張をするにあたり、一方の製品を有利に評価するために勝手なことをしていないか等、第三者が客観的に判断できるよう報告することを求めている。

# 機能同等での比較の原則

- 「機能」単位(functional unit)  
評価する対象の機能（＝素材の物性）を表す単位。
- 機能同等の原則  
LCAでは、製品が発揮する機能を同等にして比較する。  
材料の場合、「機能」を何にして比較するのが公平か。

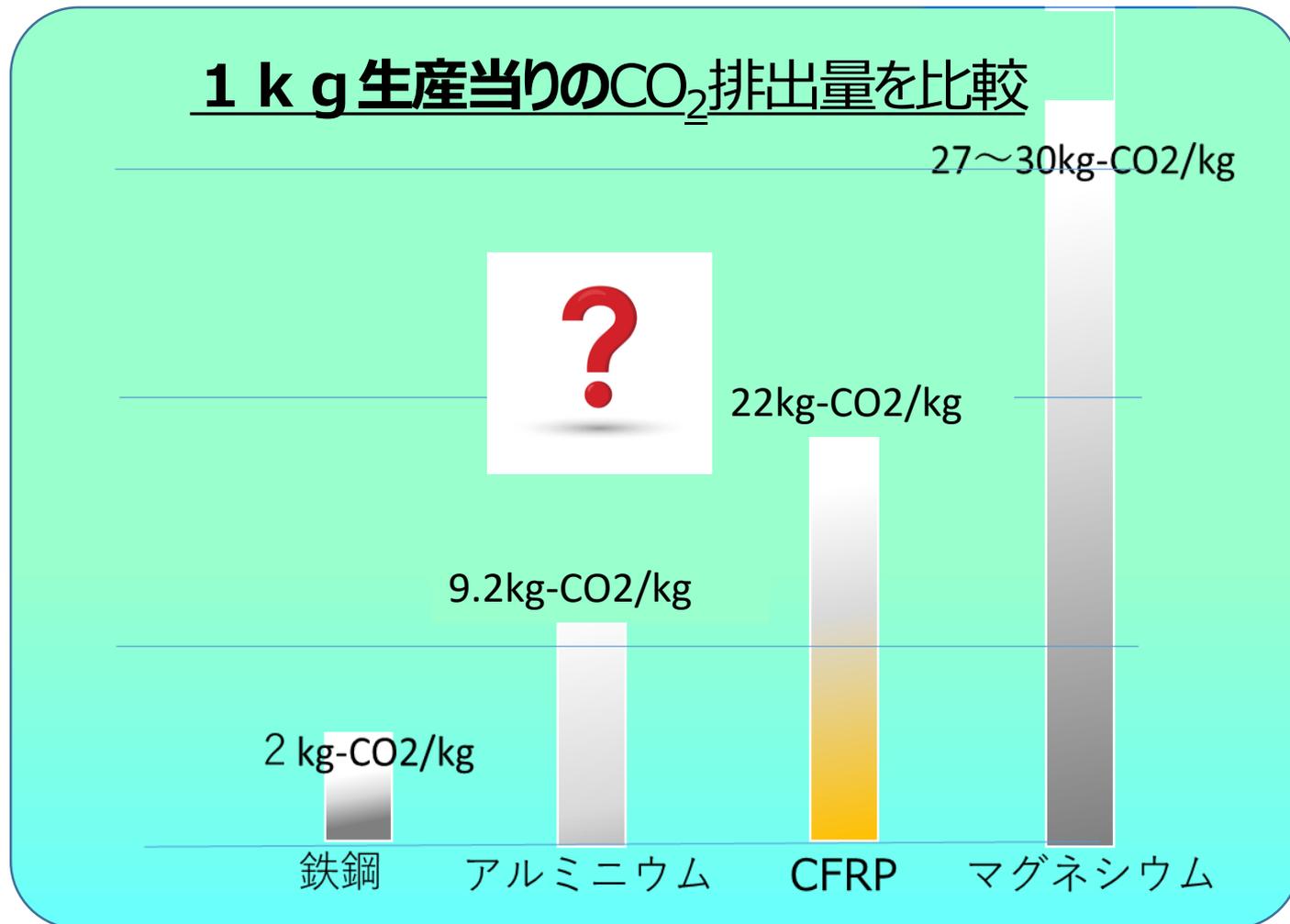
何を同じにして環境負荷を比べるか？

容量？



# 素材製造時CO<sub>2</sub>排出量（重量あたり）

生産重量（1kg）当りのCO<sub>2</sub>排出量を比較すると、鉄鋼は他の素材より圧倒的に少ないが、生産時に、リサイクル材を使用している場合、生産重量当りCO<sub>2</sub>排出量は、LCAではどう評価するのが妥当か。



# 素材製造時CO<sub>2</sub>排出量（等価機能部品あたり）

	1kg生産当たり CO <sub>2</sub> 排出量	同一機能（強度）の 同じ部品を作るのに必 要な重量（kg） =基準部品重量	基準部品当り CO <sub>2</sub> 排出量 CO <sub>2</sub> -kg/部品
普通鋼	2.3	1kg	2.3
ハイテン	1.7	0.75kg	1.3
アルミニウム	9.2	0.67kg	7.4
マグネシウム	30	0.50kg	15
CFRP	22	0.45kg	9.9

鉄鋼の製造時CO<sub>2</sub>排出量は、重量当たりでも  
機能（軽量・強度）当たりで評価しても他素材より少ない。

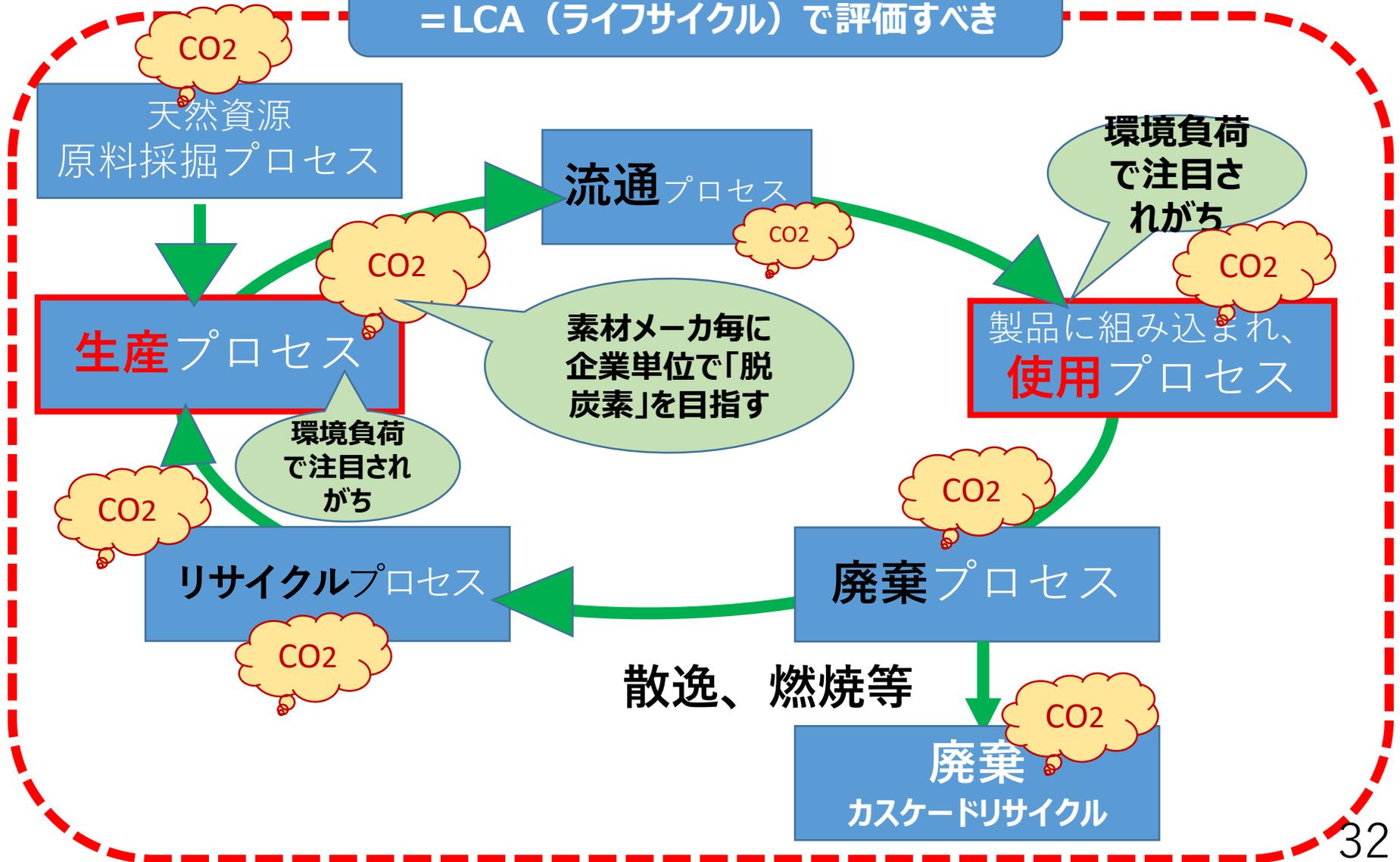
➡製造時だけでなく、リサイクルを含めた素材のライフサイクル  
全体で評価すると、  
CO<sub>2</sub>排出量はどう算出されるのか？

# LCAにおけるリサイクル性の考慮



# 材料循環利用に対して「LCA」ではどう評価するか？

「素材（マテリアル）」の環境負荷評価も  
= LCA（ライフサイクル）で評価すべき



# 金属はリサイクルすると製造エネルギーを大幅に節約

## 各種金属を1トン製造した場合のエネルギー比較

天然資源から再生    リサイクル材で再生    (単位：GJ/t)

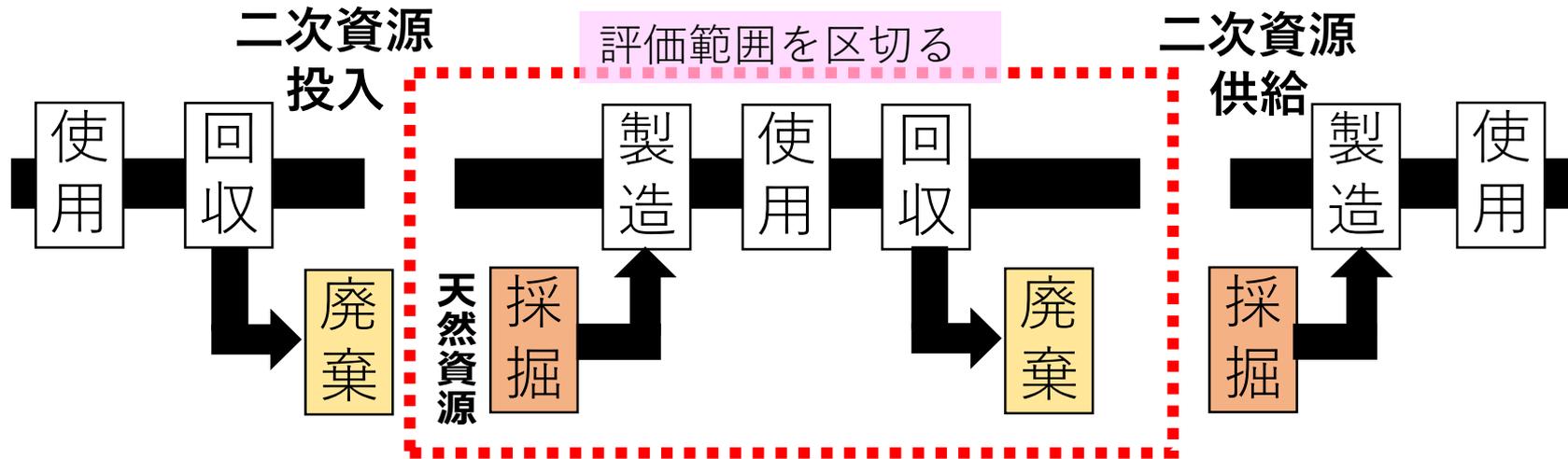
	製錬エネルギー	再生エネルギー	
Mg	372	10	3%
AL	253	13	5%
Ni	150	16	11%
Cu	116	19	16%
Zn	68	19	28%
Fe	33	14	42%
Pb	28	10	36%

97%省エネ

(出所) 増子、原、石田 生産研究 32巻3号(1980)  
UDC 669.71.004.86(1993) より

# LCI分析におけるリサイクル性の考慮

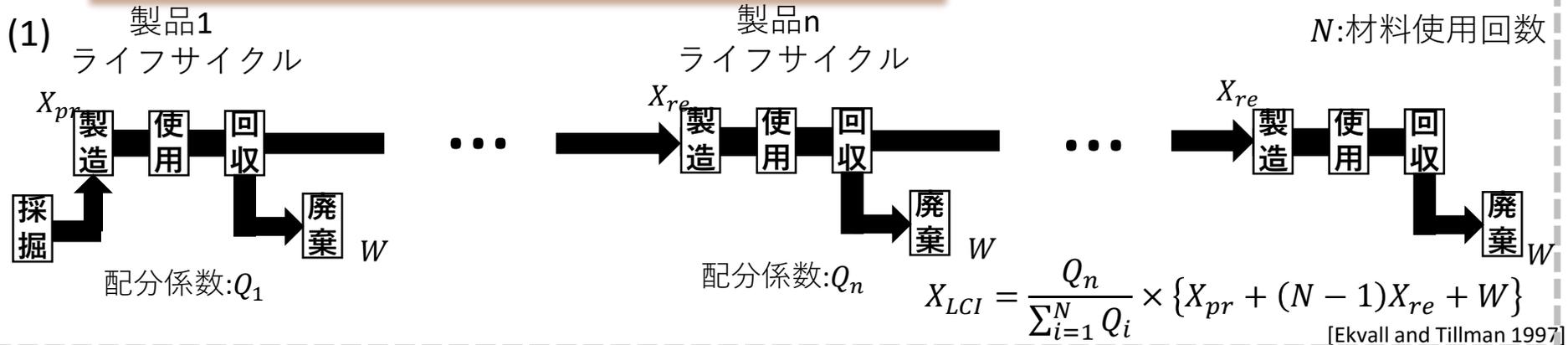
従来の評価手法(Cut-off approach) = 「製品」に着目し、そのライフサイクルで区切る（カットオフする）評価方法



R. Frischknecht: Int J LCA, 15, 2010, pp 666-671.

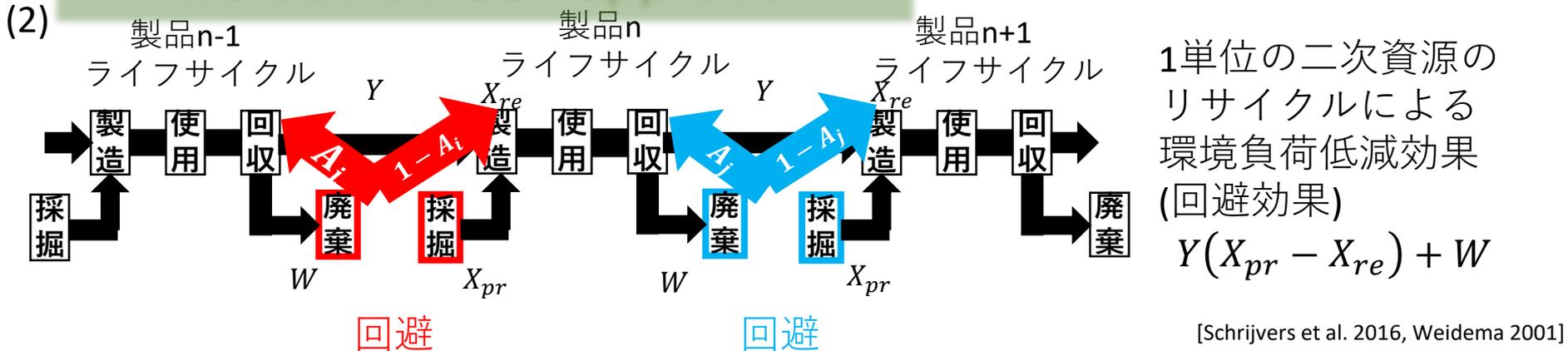
1. 二次資源（スクラップ）を原料として投入するまでの負荷を評価できていない
2. 二次資源をリサイクルで利用することによる環境負荷の低減効果（=回避効果。その分、天然資源利用量、廃棄量が減ること）を一部評価できていない

## Material life cycle approach



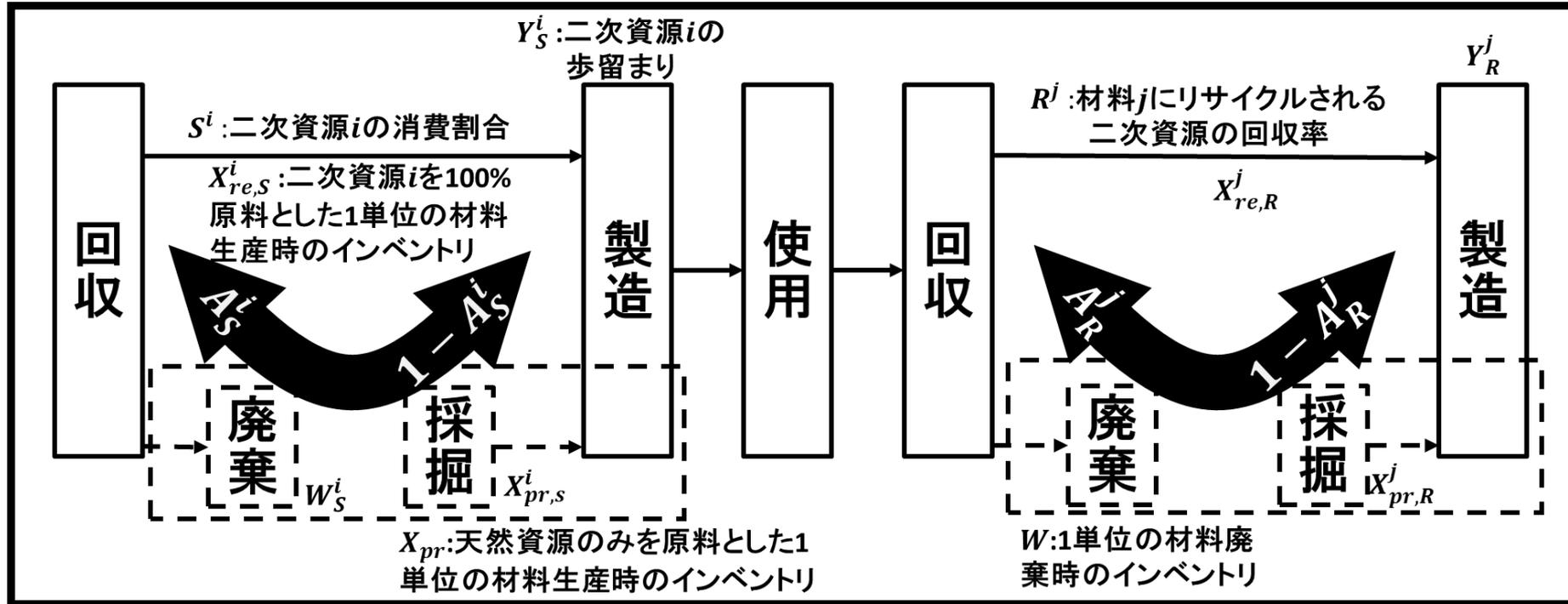
配分係数 $Q_i$ を基準にライフサイクル全体の環境負荷物質の排出量を配分する

## Avoided burden approach



廃棄と一次材料製造プロセスの環境負荷物質の排出量をリサイクル前後の製品ライフサイクルにAと1-Aの割合で配分

# 素材のリサイクルを考慮したLCAでは それによる「回避削減効果分」の配分をどうするかが問題



スクラップ供給側が回避効果分を得る ( $A=1$ ) **end-of-life recycling method**

スクラップ利用側が回避効果分を得る ( $A=0$ ) **waste mining method**

上記2ケース以外 ( $A=0.5$ ) **50/50 method**

# 鉄鋼のLCA評価手法（リサイクルを考慮した） （World Steel）方式の課題

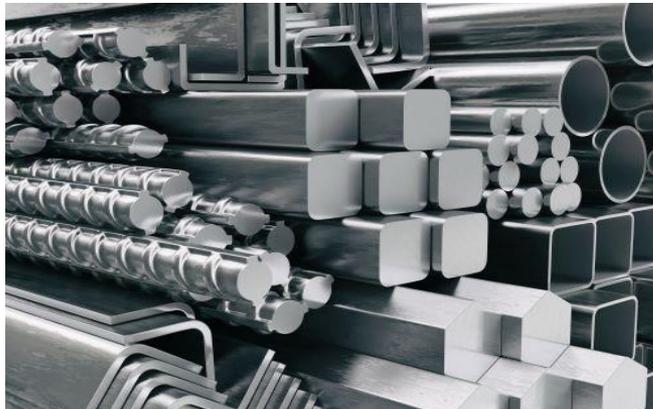
*Worldsteel*（世界鉄鋼連盟）の手法（鉄鋼）の場合

end-of-life recycling methodの考え方を適用

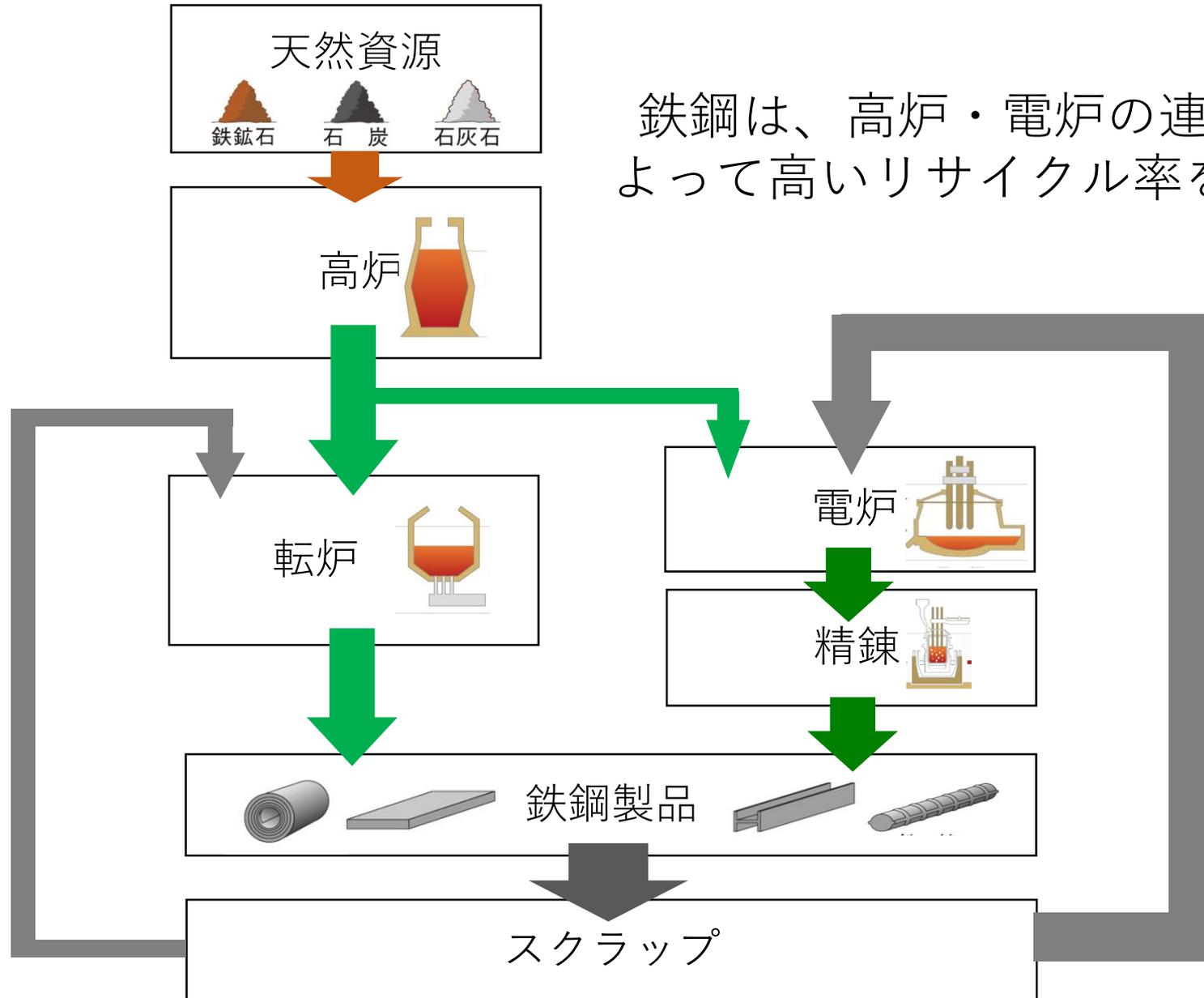
（前提）

- 鉄鋼は何度でも繰り返しリサイクルされる。
- 鉄以外の他の用途には使用されない。

（Closed Recycle）



# 高炉鋼と電炉鋼とのマテリアルフロー関係



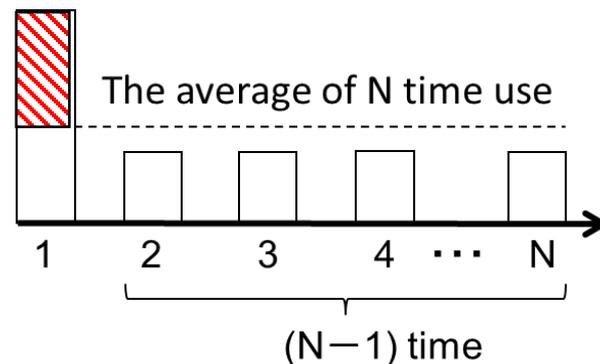
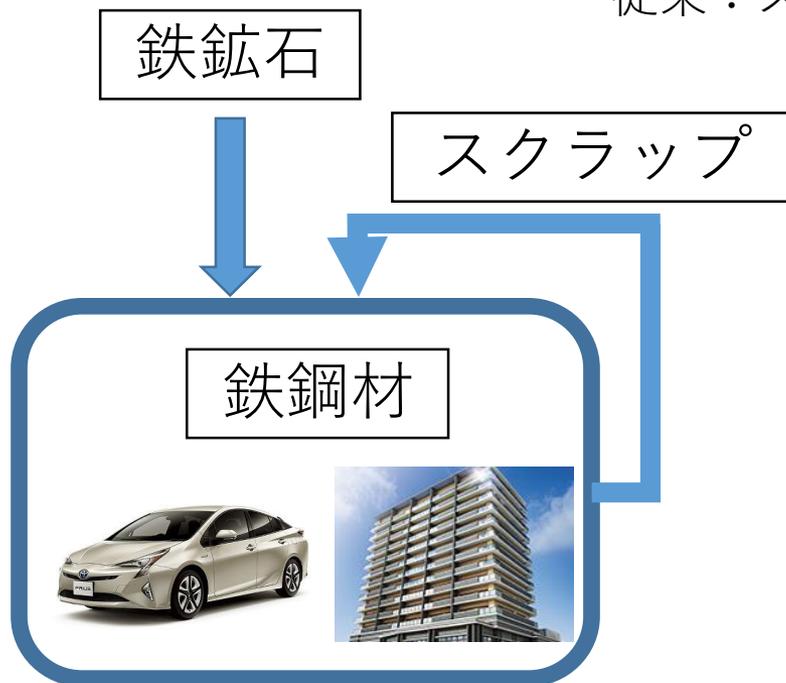
# リサイクル性を考慮したLCA(Life Cycle Assessment)手法

鉄鋼材では、リサイクルを水平(同一材料内)し、リサイクルすると仮定して、LCAを評価する手法を一般化 (ISO化)

end-of-life recycling methodの考え方を適用

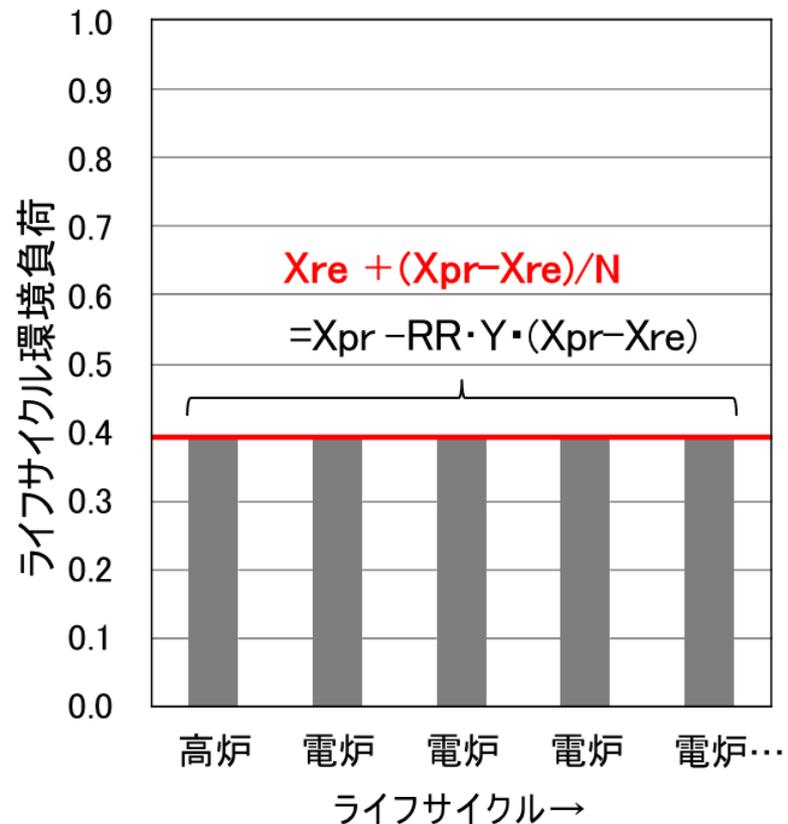
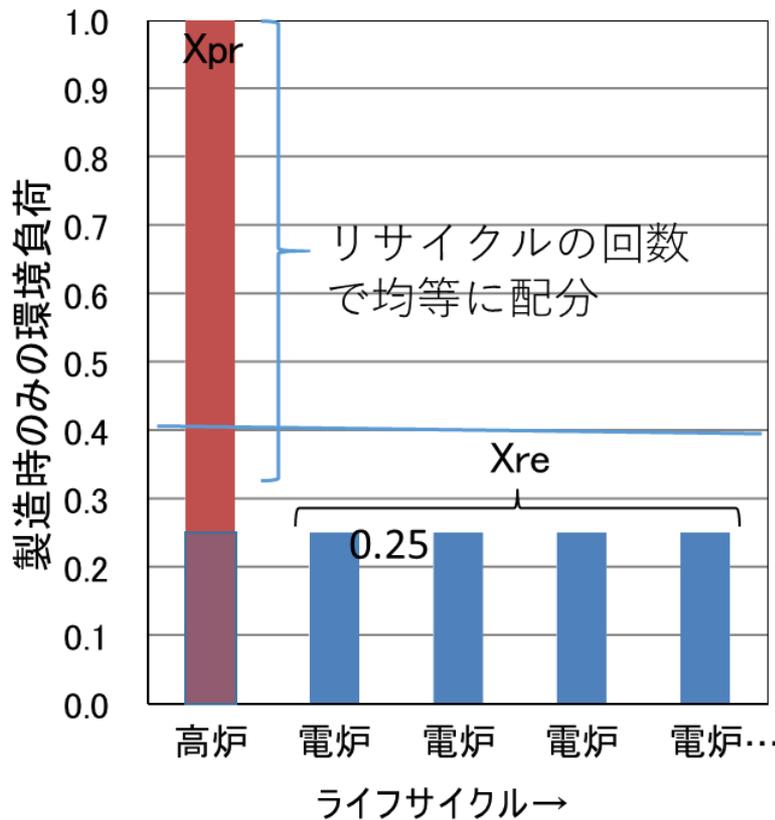
**World steel Association**による,リサイクルを考慮した鉄鋼材のLCA手法

従来：スクラップに初回生産時の環境負荷の負担なし



ライフサイクルでの使用回数で初回生産時の負荷を等分に分配

# リサイクルによって環境負荷を低減(回避) する効果を LCAでどのように評価し、配分するか (初期の生産負荷を素材全体で配分)



金属材料等では、リサイクルで複数回リサイクルしている。

→環境負荷を材料のライフサイクルシステム全体で考える方が合理的。 51

# リサイクルを考慮したLCAでの環境負荷評価方法の考え方<sup>[1]</sup>

$$\text{総製造量} = 1 + r + r^2 + \dots + r^{n-1} = \frac{(1-r^n)}{(1-r)} = N$$

=リサイクルによる繰り返し総利用量 (回数)

$$\begin{aligned}\text{総環境負荷} &= X_{pr} + r X_{re} + r^2 X_{re} + \dots + r^{n-1} X_{re} \\ &= (X_{pr} - X_{re}) + NX_{re}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{総環境負荷/総製造量} &= (X_{pr} - X_{re}) / N + X_{re} \\ &= (X_{pr} - X_{re}) / \frac{(1-r)}{(1-r^n)} + X_{re}\end{aligned}$$

( $r^n \rightarrow 0$  とすると)

$$= X_{pr} - r(X_{pr} - X_{re})$$

$r$  : スクラップ回収率 × 再生歩留

RR : スクラップの回収率

$X_{pr}$  : 天然資源のみから製造する際の環境負荷

$X_{re}$  : 再生材のみで製造する際の環境負荷

[1] A Amato, L Brimacombe, N Howard. (1996)  
Ironmaking and Steelmaking, Vol23, No. 3, 235-241

# リサイクルシステム全体での利用回数

リサイクルによる繰り返し総利用量 =

$$= 1 + r + r^2 + \dots + r^{n-1} = \frac{(1-r^n)}{(1-r)} = N$$

リサイクルによる繰り返し利用回数 =

$$r^n \rightarrow 0 \quad 0 < r < 1$$

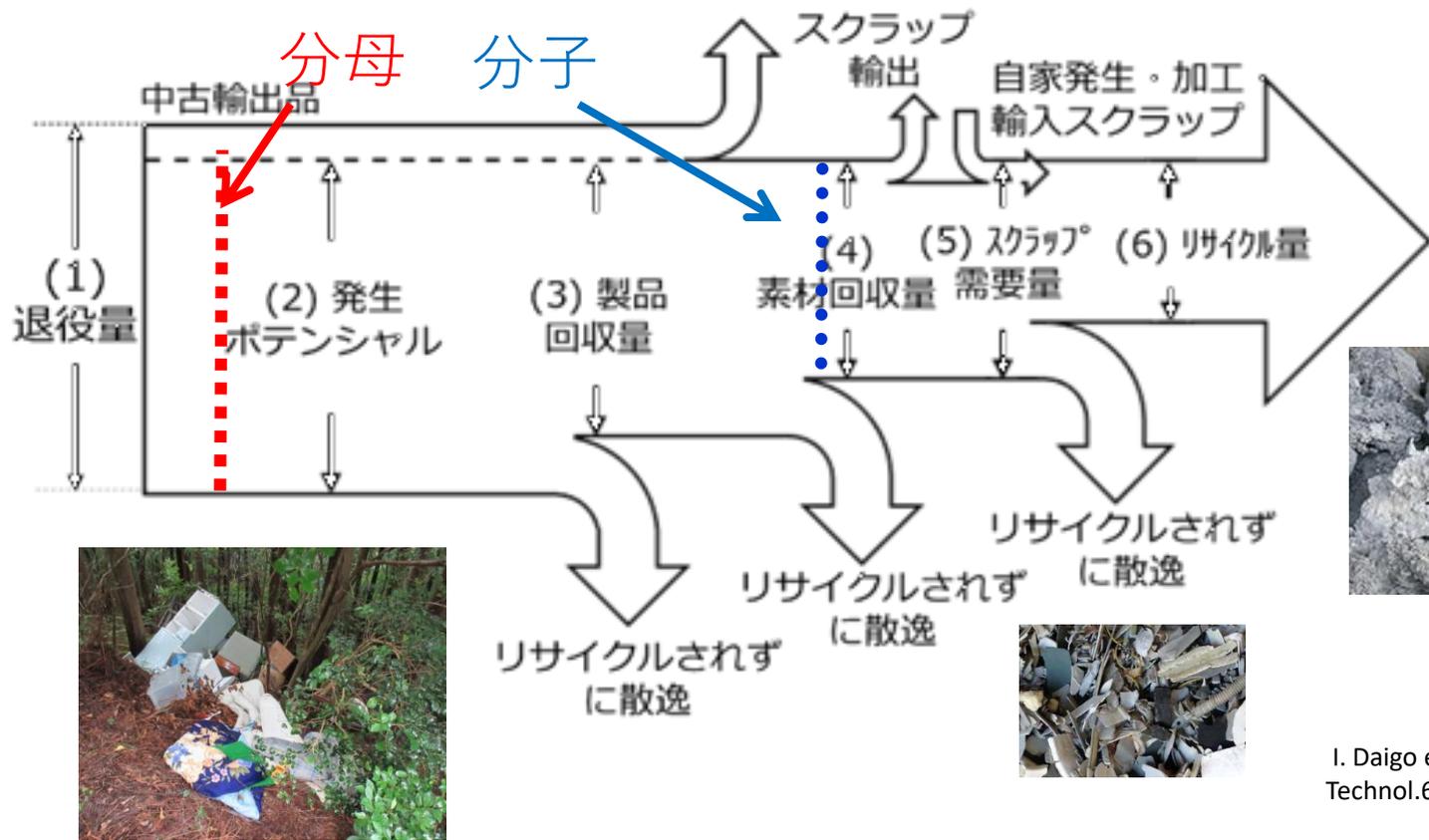
r = リサイクル率 (回収率)	素材の利用回数
0.1	1.1
0.2	1.3
0.3	1.4
0.4	1.7
0.5	2.0
0.6	2.5
0.7	3.3
0.8	5.0
0.9	10.0

概ねこのあたり



# リサイクル率の指標：使用済み素材回収率 (EoL-RR)

$$EoL-RR = \frac{\text{老廃スクラップ発生量}}{\text{(寿命を考慮した)老廃スクラップ発生ポテンシャル量}}$$

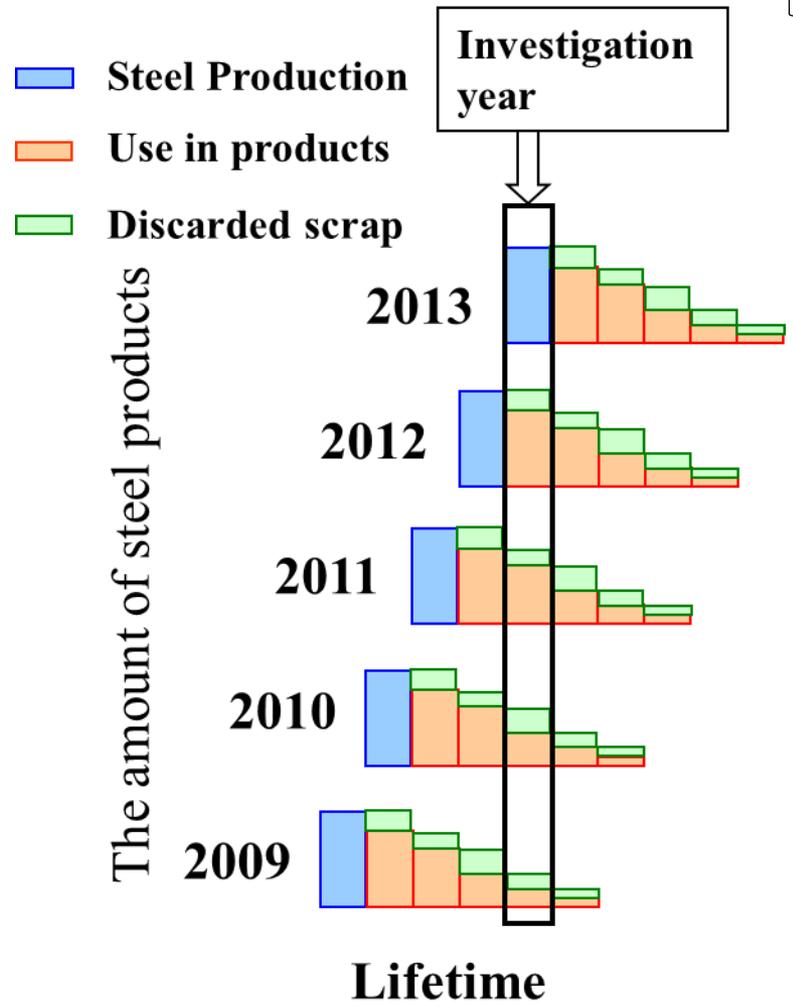


I. Daigo et al.: Environ. Sci. Technol.691 49, (2015), 8691

# 動的マテリアルフロー分析(Dynamic Material Flow Analysis)

$$w_{out}(t) = \sum_a w_{in}(t - a) \times f(a)$$

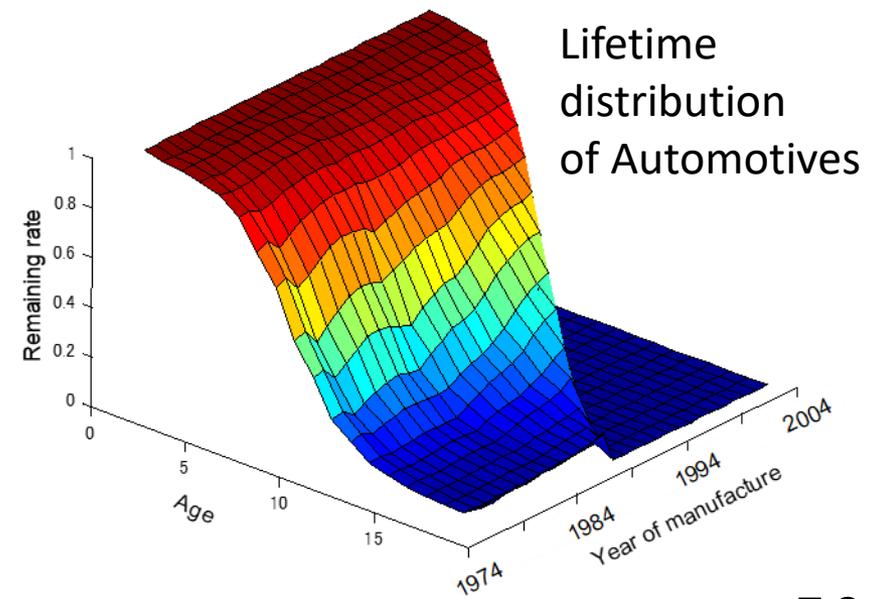
$w_{out}(t)$  Output at at yr t  
 $w_{in}(t)$  Inoput at at yr t  
 $f(a)$  Lifetime function



Weibull分布

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x}{b}\right)^a\right)$$

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x)$$



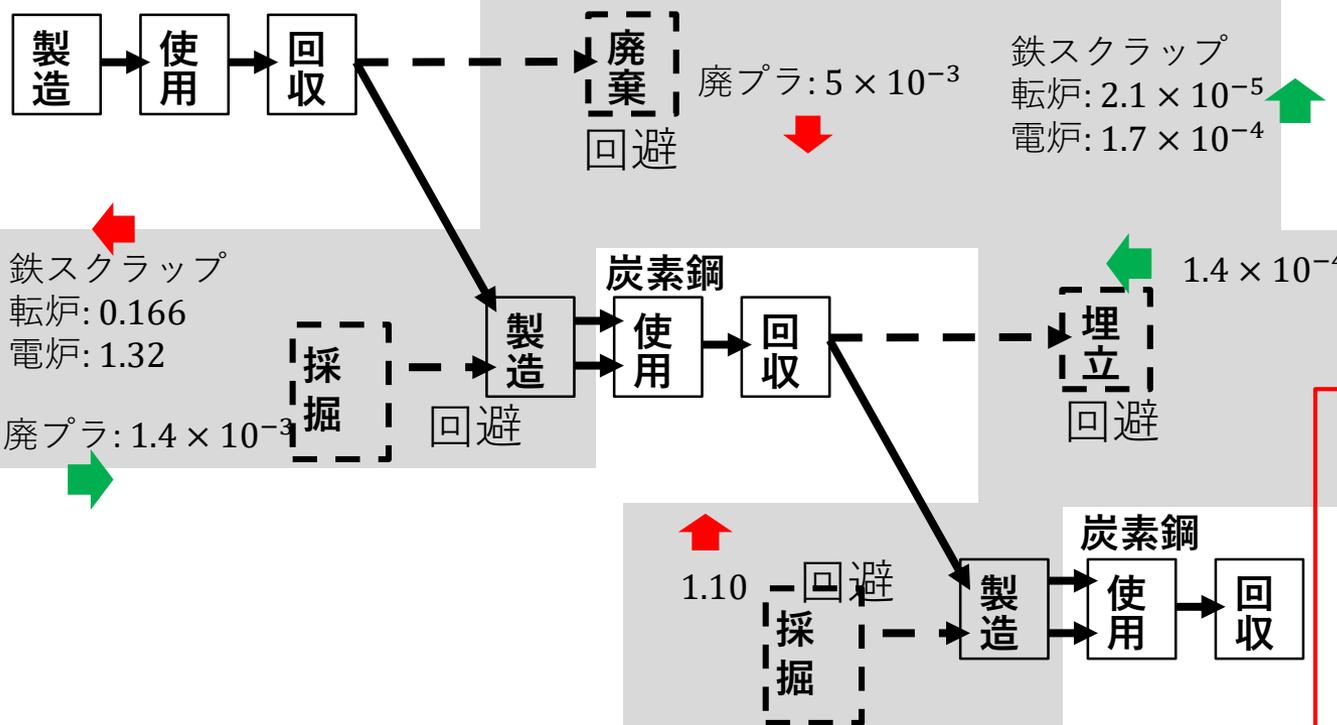
# LCAでリサイクルを考慮した場合の環境負荷評価（試算結果）

	リサイクルを考慮しない場合 のLCAでのCO2排出量	リサイクルを考慮した場合の LCAでのCO2排出量 削減率
鉄鋼	1.8kg-CO <sub>2</sub> /kg (天然素材から1kg作った 場合)	▲50.0%
アルミニウム	9.0kg-CO <sub>2</sub> /kg (天然素材から1kg作った 場合)	▲70%

# 炭素鋼のLCI分析結果

## Cut-off approachとリサイクルを考慮した場合の分析結果の比較

炭素鋼、プラスチック



- ➡ Cut-off approachと同じ配分
- ➡ Cut-off approachと異なる本研究の配分

Cut-off approach:	
転炉	1.79 (kg- CO <sub>2</sub> )
電炉	0.639 (kg- CO <sub>2</sub> )
本手法:	
転炉	0.855 (kg- CO <sub>2</sub> )
電炉	0.855 (kg- CO <sub>2</sub> )

新素材の環境負荷の「削減貢献量」をどう評価するか

# 素材の環境負荷低減効果のLCAでの評価配分問題



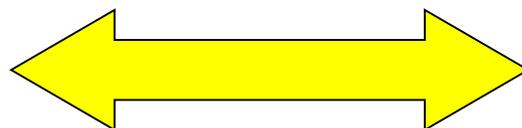
金属材料の  
高性能・高効率化



生産時の  
エネルギー投入量・  
CO<sub>2</sub>排出量の増加



LCA評価



素材と製品のどちらにCO<sub>2</sub>削減効果を配分するのか

使用時の  
エネルギー・CO<sub>2</sub>  
排出量削減

# 削減貢献量とは

グリーン製品・サービスの普及を通じた、企業による社会全体のCO2削減への貢献を評価する新たな価値軸を国際的に構築する。それにより、企業に資金を呼び込む。

## 【問題意識】

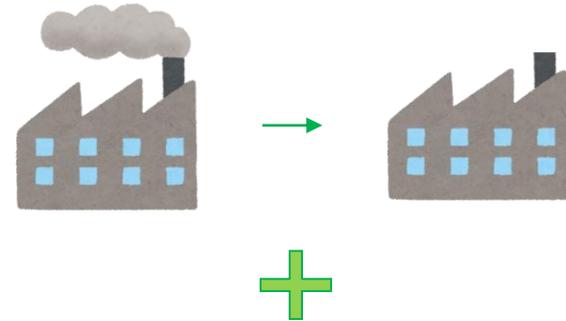
- ・現在は、企業自身の排出するCO2の量を**リスク**として評価し、その削減をいかに促すかが議論が主流。それに基づき、CO2計測の考え方（Scope 1-3）や会計開示ルール（TCFD）などの整備が進められている。
- ・一方で、新たな価値軸として、企業による社会全体のCO2削減を**貢献**として評価する「Avoided Emissions」の議論が民間で始まっている。しかしながら、国レベルでの取り組みはまだ存在していない。



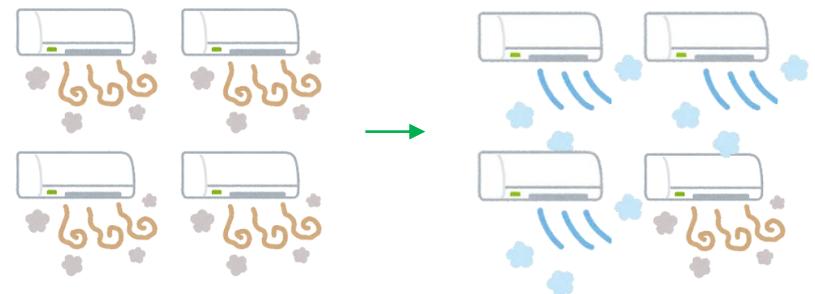
## 【削減貢献の評価】

- ・気温上昇を1.5度に抑えるためには、経済成長と両立する更なる削減策が必要。
- ・企業による社会全体のCO2削減への貢献を評価する新たな価値軸を国際的に構築する。
- ・その価値に対して資金リソースが動員されることにより、経済成長によるネットゼロ排出実現が後押しされる。

①企業自身の排出するCO2の総量を「**リスク**」として評価

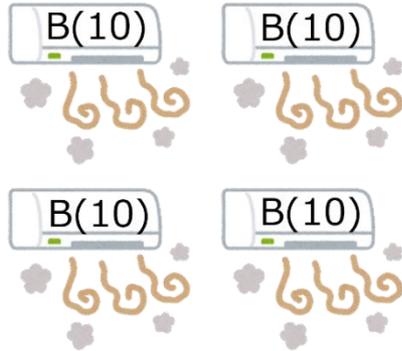


②企業による社会全体のCO2削減分を「**貢献**」として評価



# (参考) 削減貢献量 算出例 (SCOPE3との違い)

【2021】



【2022】



これまでの排出量(40kg-CO2)

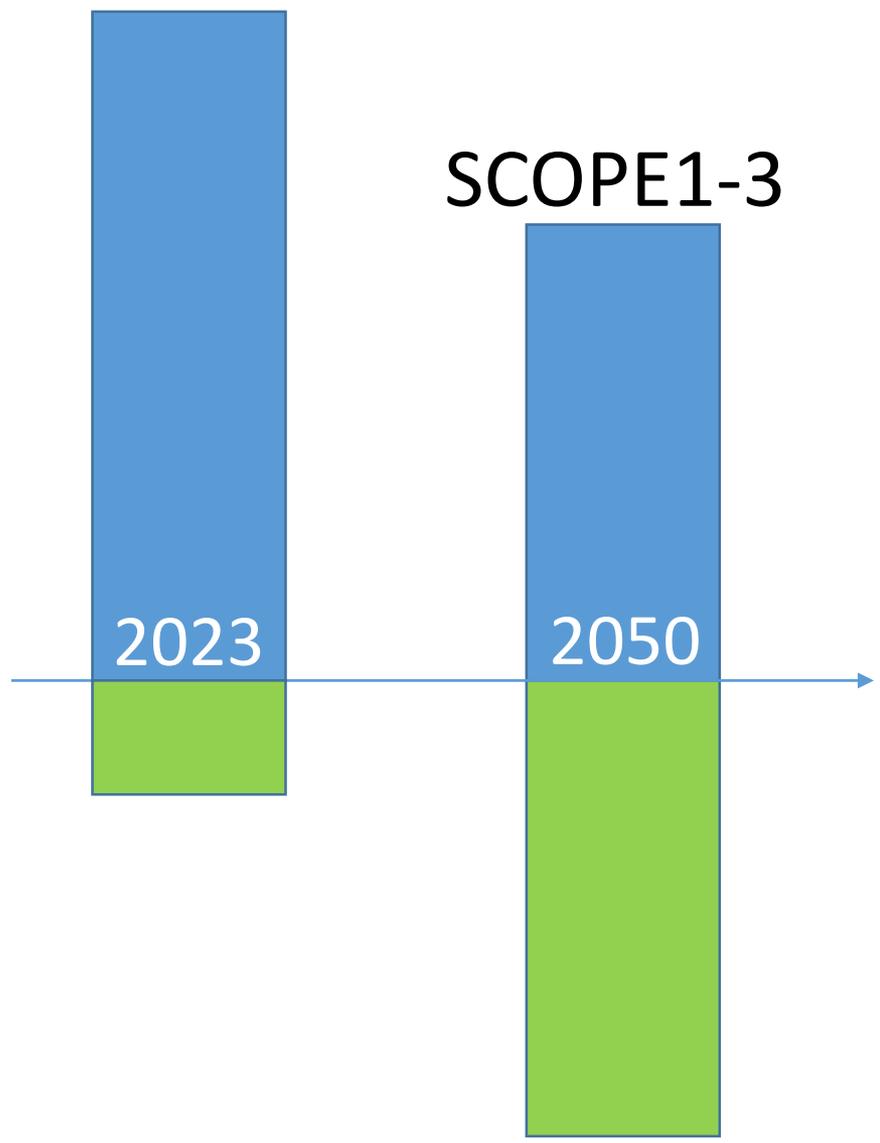
Baseline (40kg-CO2)

	SCOPE3 (2021 →2022)	削減貢献量
ブラウン 企業	40 → 10	-
グリーン 企業	0 → 6	24



24kg-CO2

ソリューション活用後の排出量 (16kg-CO2)



削減貢献量をLCAにどう算入すべき？

ネットゼロの達成！

→ ✗

Avoided Emissions