

# LCAが変わる!

システム境界の任意性からの解放と  
ネイチャーポジティブのためのTMR

サーキュラーエコノミー・広域マルチバリュー循環研究会 代表

(一社)サステナビリティ技術設計機構 代表理事

(国研)物質・材料研究機構 名誉研究員

日本LCA学会 元会長

原田 幸明

### •1960年代: 環境影響評価の初期段階

- 環境問題への関心が高まり、資源消費や汚染排出の評価が始まる。
- 米国で「エネルギー分析」として発展。飲料容器のエネルギー消費比較研究が代表例。

### •1970年代: エネルギー分析からの発展

- エネルギー危機を背景に、製品やプロセスのエネルギー効率が重視される。
- 原材料や製品寿命の観点を含めた「リソース分析」「エネルギーフロー分析」が登場。

### •1980年代: ライフサイクル概念の確立

- ヨーロッパで「ライフサイクルの視点」を重視した研究が進む。
- 製品の製造から廃棄までの環境影響を包括的に捉えるアプローチが注目される。
- 「ライフサイクルインベントリー(Life Cycle Inventory, LCI)」の考え方が登場。

### •1990年代初頭: LCAの体系化と国際的認知

- 欧州環境庁(EEA)やSETAC(Society of Environmental Toxicology and Chemistry)がLCA手法を体系化。
- SETACの会議で「ライフサイクルインパクト評価(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)」が提唱される。
- アルミ缶やプラスチックの包装材など、製品の環境負荷比較にLCAが利用され始める。

### •1990年代中盤: 標準化への動き

- ISO(国際標準化機構)がLCAを標準化するための検討を開始。
- ISO/TC207(環境管理技術委員会)の下で、LCAに関する具体的な標準化作業が進む。

### •1997年: ISO 14040シリーズの最初の発行

- LCAの国際標準化として、ISO 14040シリーズが初めて発行される。
- ライフサイクルアセスメントの枠組みや基本原則が規定される。

# 科学的手法としてのL C Aの限界と適用

科学技術庁金属材料技術研究所 原田幸明

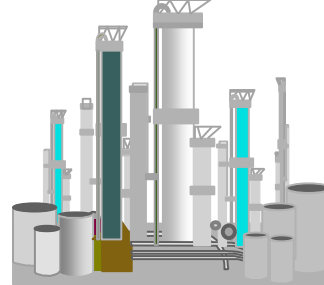
[www.nrim.go.jp:8080/ecomat/](http://www.nrim.go.jp:8080/ecomat/)

L C Aは持続可能社会へ向けた評価ツールとして着実に定着しつつある。しかし同時に絶対的評価やスクリーニングの基準などの過大な期待をもって捕らえられている側面もある。ここでは、科学的方法論としての視点から「L C Aとは何か」に立ち返り、L C Aで言えること、言えないこと、さらには、L C Aでこそ主張しうること、について述べる。

- ・ ライフサイクルシンキングの位置をとらえる
- ・ L C Aにおける単純化された論理構造
- ・ L C Aの限界と誤解
- ・ L C A適用のポイントは何か
  - 循環型システムを正當に評価するために

1950s

# 公害問題



1970s

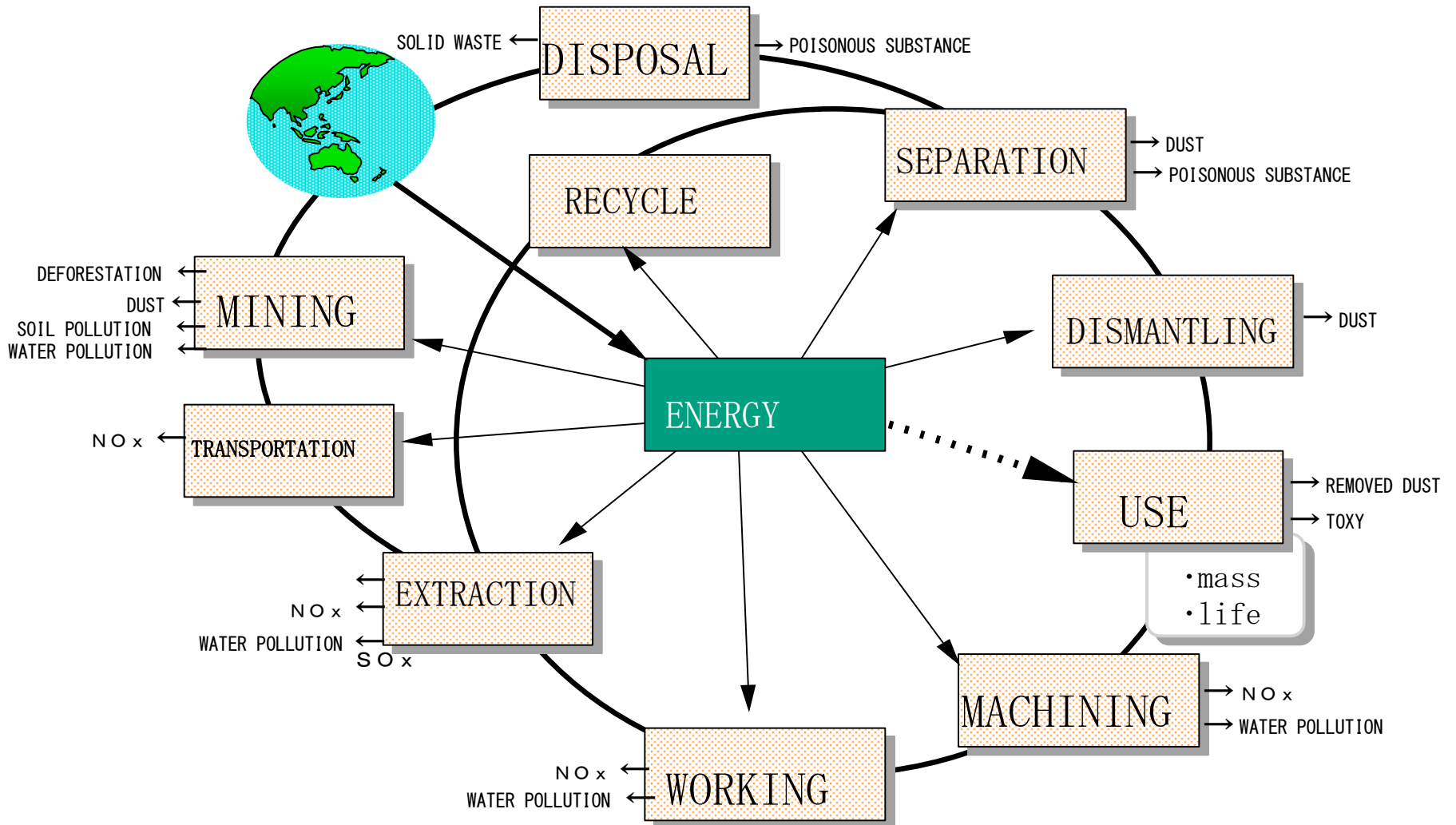
# 限りある地球



1990s

# 限りある環境

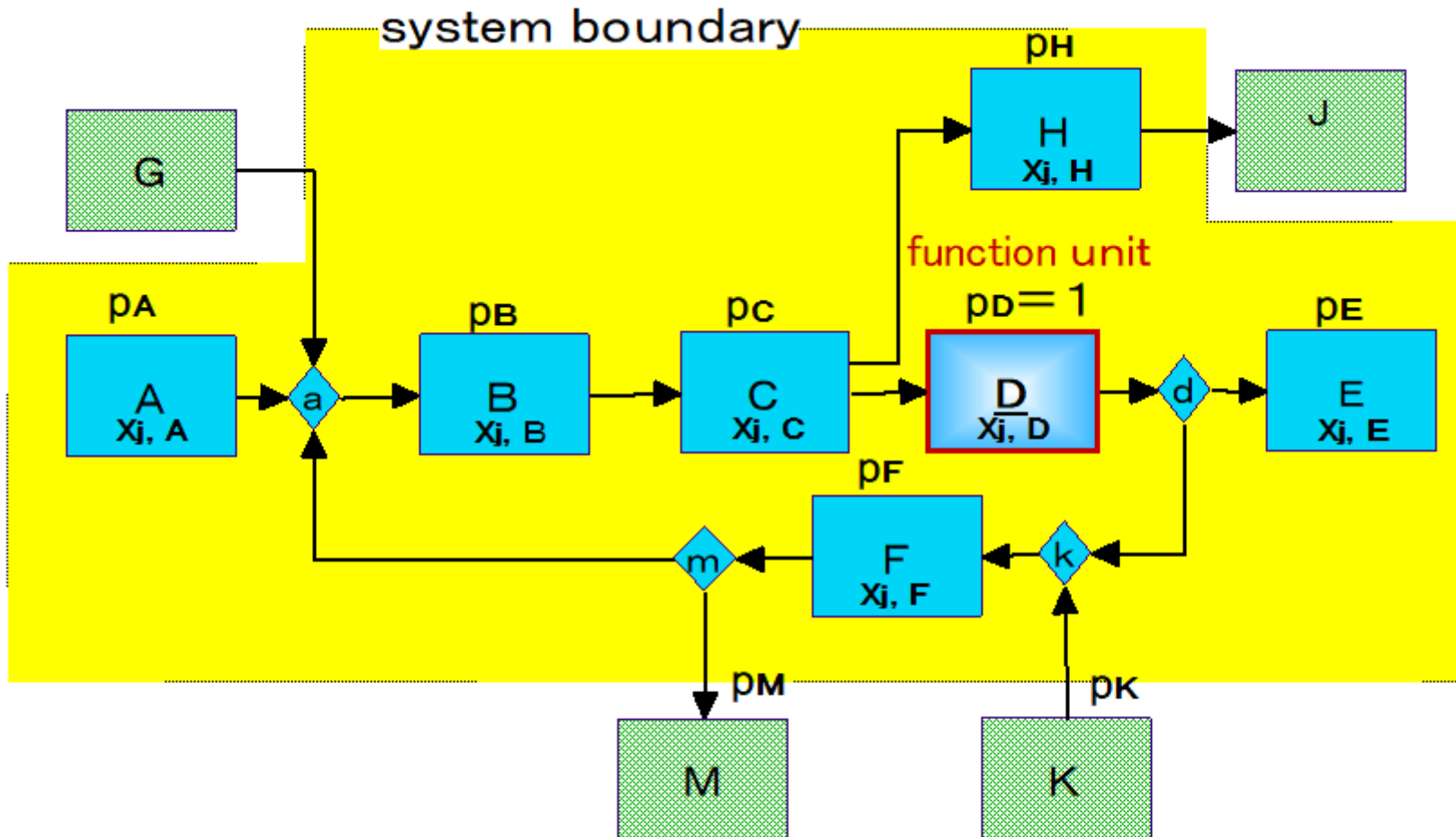
- ひとつひとつの小さな環境への負荷の積み重なり
- 個々の発生源での負荷抑制の努力
- 人間活動総ての分野をおおっている
- 罪の認識なく行われている場合も多い



Life Cycle of Materials

LCAは単純な論理構造だから  
世の中に受け入れられる

- ・ データさえ集めれば環境の専門家知識不要
- ・ 足し算と掛け算の単純計算

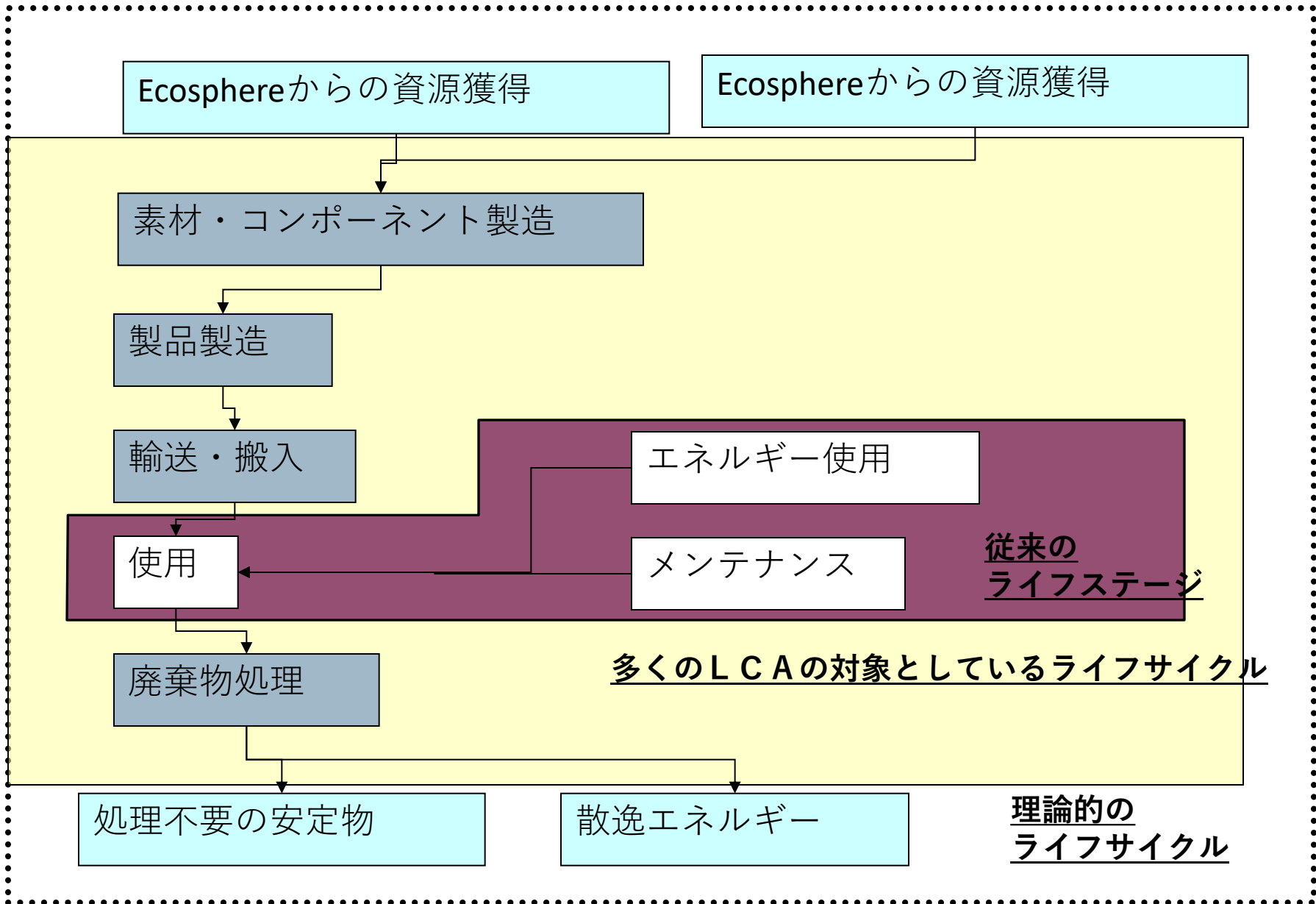


## インベントリーツリーの基本例

A, E, G, J, K, M: material、B, C, D, H, F: process、a, d, k, m: select、  
 点線で囲んだ部分: システム境界、Dの単位操作を規準値(=1)とすると、  
 Dの単位操作(消費・使用も含む)の機能がfunction unitになる。

$$Z_k = \sum_i (p_i \cdot X_{k,i}) / p_D \quad (i = A, B, C, \dots, F \in \text{systemboundary})$$

# ライフサイクルの範囲

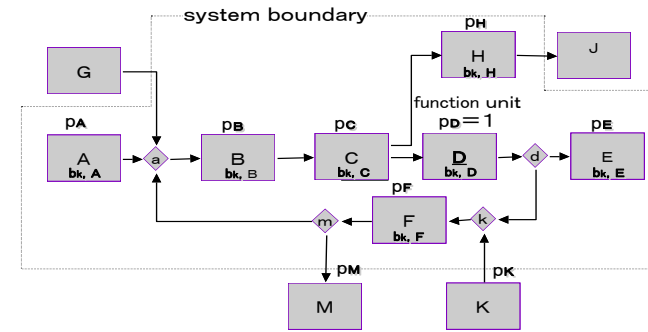




# インベントリーは足し算

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ \vdots \\ z_k \\ \vdots \\ z_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_{1,1} \\ b_{2,1} \\ b_{3,1} \\ \vdots \\ b_{n,1} \end{pmatrix} \cdot p_1 + \begin{pmatrix} b_{1,2} \\ b_{2,2} \\ b_{3,2} \\ \vdots \\ b_{n,2} \end{pmatrix} \cdot p_2 + \begin{pmatrix} b_{1,3} \\ b_{2,3} \\ b_{3,3} \\ \vdots \\ b_{n,3} \end{pmatrix} \cdot p_3 + \cdots + \begin{pmatrix} b_{1,r} \\ b_{2,r} \\ b_{3,r} \\ \vdots \\ b_{n,r} \end{pmatrix} \cdot p_r$$

$$= \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \cdots & b_{1,r} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \cdots & b_{2,r} \\ \vdots & \vdots & b_{k,j} & \vdots \\ b_{n,1} & b_{n,2} & \cdots & b_{n,r} \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_j \\ \vdots \\ p_r \end{pmatrix} = [B] \cdot p$$



$z_k$ : システムの環境ストレス因子kの総和

$b_{k,j}$ : j プロセスの単位当たりのkストレス因子量

$p_j$ : j プロセスのプロセス量(occurrence)

# インパクトは掛け算

特性値化

$$\mathbf{u} \equiv \begin{pmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_l \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} = [\mathbf{C}] \cdot \mathbf{z} \quad [\mathbf{C}] = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} & \cdots & c_{1,n} \\ c_{2,1} & c_{2,2} & \cdots & c_{2,n} \\ \vdots & \vdots & c_{l,k} & \vdots \\ c_{m,1} & c_{m,2} & \cdots & c_{m,n} \end{bmatrix}$$

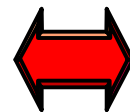
ストレス因子  $k$  の  
カテゴリー  $l$  に対する  
特性値化係数

$$\mathbf{v} = \mathbf{w} \cdot \mathbf{u} = \begin{pmatrix} w_1 & w_2 & \cdots & w_l & \cdots & w_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_l \\ \vdots \\ u_m \end{pmatrix} = \mathbf{w}[\mathbf{C}]\mathbf{z} = \mathbf{w}[\mathbf{C}][\mathbf{B}]\mathbf{p}$$

カテゴリー  $l$  の重み係数

カテゴリー  $l$  の特性値

LCAはgoal orientedである

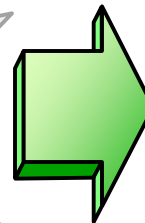


procedure oriented  
ではない

目的に応じて

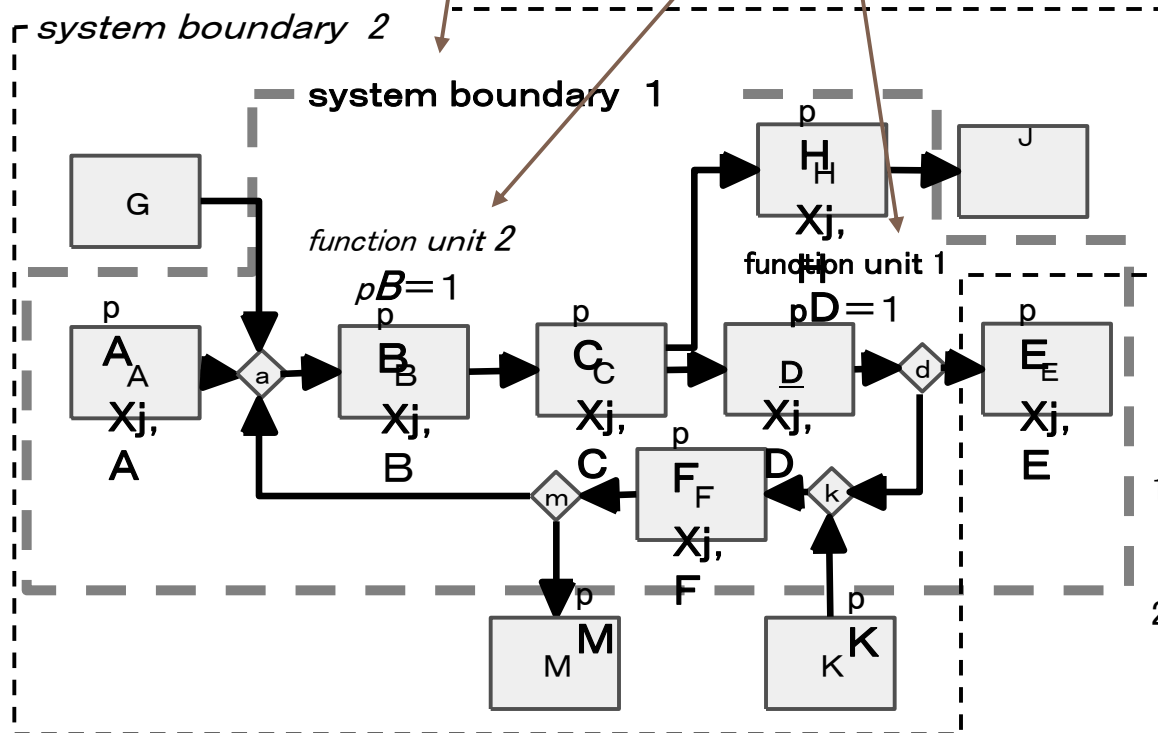
システム  
境界が  
変わり

標準単位  
が変わる



異なるLCA間の比  
較は無意味

絶対的数値は  
与えられない



$$1: (P_A X_A + P_B X_B + P_C X_C + P_D X_D + P_E X_E + P_F X_F + P_H X_H)$$

$$2: (P_A X_A + P_B X_B + P_C X_C + P_D X_D + P_F X_F + P_H X_H + P_G X_G + P_M X_M + P_K X_K + P_J X_J)$$

図 14

LCAを行って

環境にやさしい行為が見つかるのではなく

環境にやさしいと思う行為を

LCAで表現し、説明する。

LCAは、自らの環境パフォーマンスを正当化する弁護（理）士

結果そのものではなく、

その論理（システム境界、機能単位の設定）で

LCA結果の信頼性の社会的評価にかけられる。

LCAもできない企業は環境行為を説得する意欲のない企業とみなされる

# × データさえ集めればLCAができる。

環境負荷などのデータは重要ではあるが、LCAの方法自体がまだ未開発な部分が多いため、実施者が対象とするシステムの分析が適切に行なえるような教科書的ガイドは存在していない。

まず、対象システムをよく検討し、目的に応じた方法を探索していくところからLCAは始まる。

エンジニアの間ではISO化という成分や形状、試験方法、処理方法などの整理や画一化による規格化のイメージが強く、ISOに決められた手順をふめばLCAの数値が出てくるというふうに錯覚しがちだが、ISO14040台では教科書的手順を定めることは考えられていない。

- ・ データ自体も重要であるが

## システムバウンダリーの設定

## ファンクションユニットの設定

にこそ、環境への取り組みの意識が問われる

# × LCAは客観的な評価を与える

LCAは数値を用いた定量的な議論が可能となるためにあたかも客観的な評価が下されるかのような錯覚を与えることがある。

LCAの評価はあくまで**実践者の目的に応じた評価指標**であり、同一製品に関するシステムでも分析目的が異なれば異なる結果となる。

このことはLCAの有効性を排除するものではなく、異なった結果のLCA間で、

目標の設定、ファンクションユニットやシステム境界の設定、データの信頼性などが議論され、

**より説得力のあるもの**が世の中に受け入れられていくというプロセスでLCAの高度化がすすめられていくことになる。

# × LCAは製品を比較する

この間違いはかなり根強く浸透している。ライフサイクルで評価されるのは製品そのものではなく製品のライフサイクルシステムなのである。

**同一の製品でも使用方法や廃棄処分のされかたが異なれば結果は自ずと違ったものになる。**

それゆえ、使用や廃棄のプロセスも考慮せずにLCAで製品の優劣がつけられるかのような発想は改めるべきである。 使い方も問われているのだ。

さらにproductという表現の中には、「製品システム」と「サービスシステム」があり、サービスもLCAの対象として捉えられていることにも注意しておく必要がある。

Ex.生分解性のプラスチックのパッケージを、

本来管理して処分することのできる、飲料缶のパッケージに使うのと

深海などで処理不能な状態でのケーブルの一時的な梱包に使うのとでは

**これまでの LCAは、**

**その出自であるエネルギー分析のような「科学」ではなく**

**科学的手法を用いたコミュニケーションツールである。**



# LCA ここが問題!



- 異なったシステム境界で計算した数値が独り歩きする。
- 真面目にLCAをやるほど、環境負荷が大きな数字になる。
- エセ・グリーンでも、数値の集め方次第で、グリーンなLCA結果が出せる・

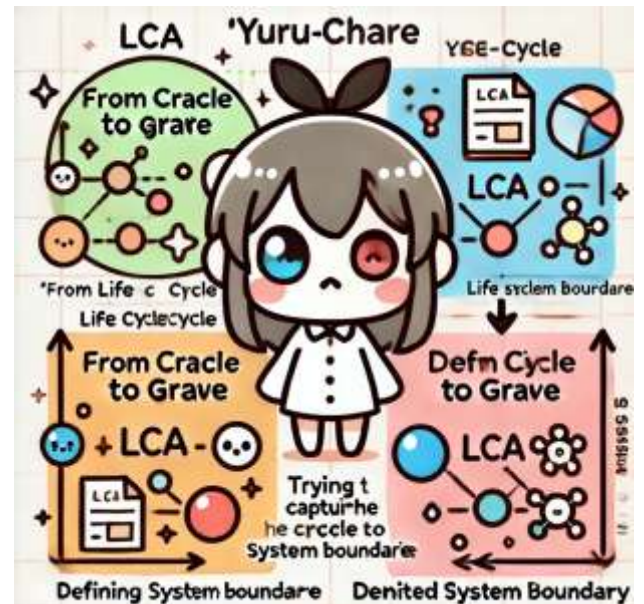


# 理想 と 現実 の狭間で

揺り籠から墓場まで、すべての環境負荷を

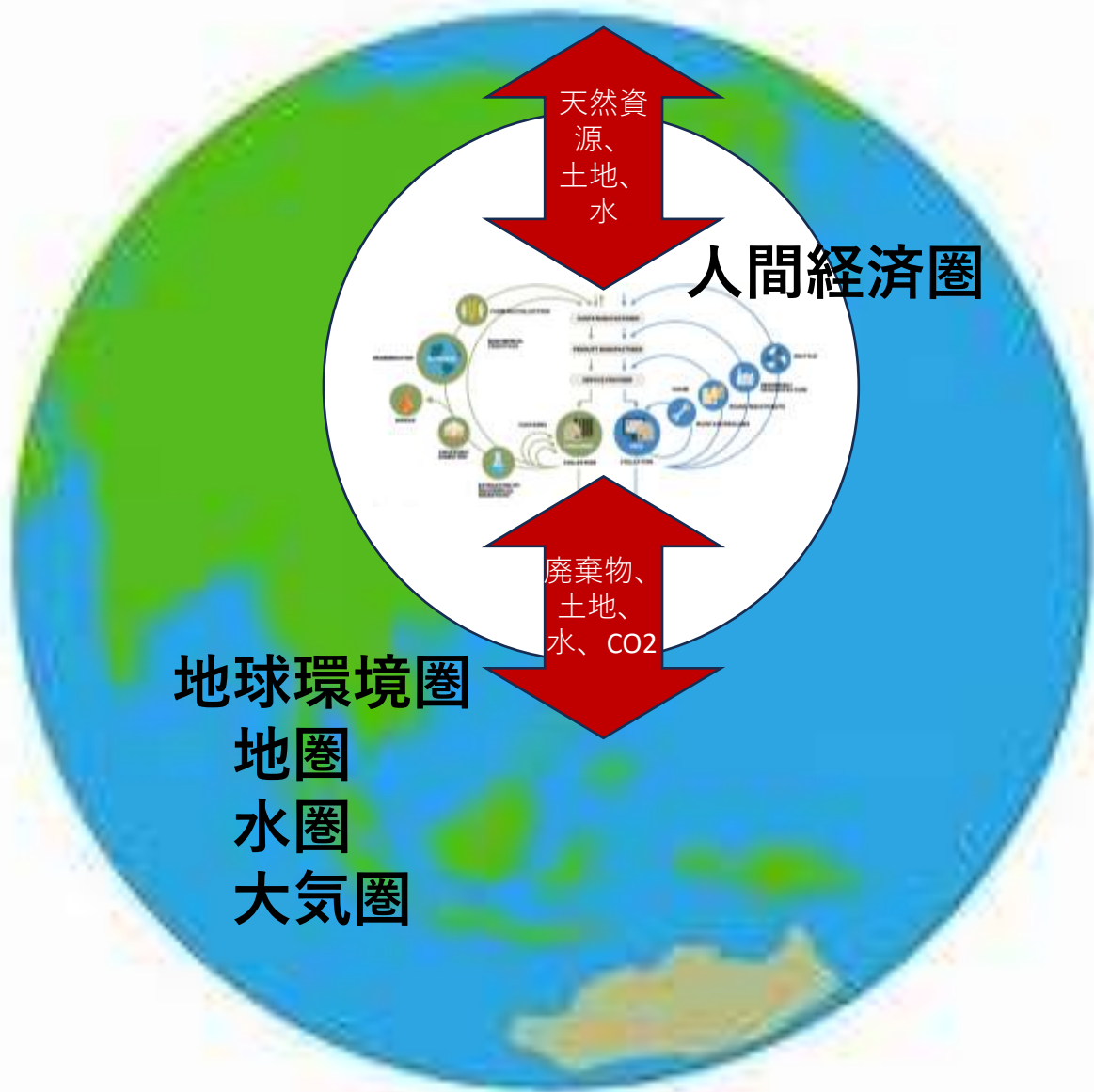
v.s.

システム境界で議論の範囲を定義



適切なシステム境界とはなにか、そこまで行けるのか





天然資源、  
土地、  
水

人間經濟圈

廢棄物、  
土地、  
水、CO<sub>2</sub>

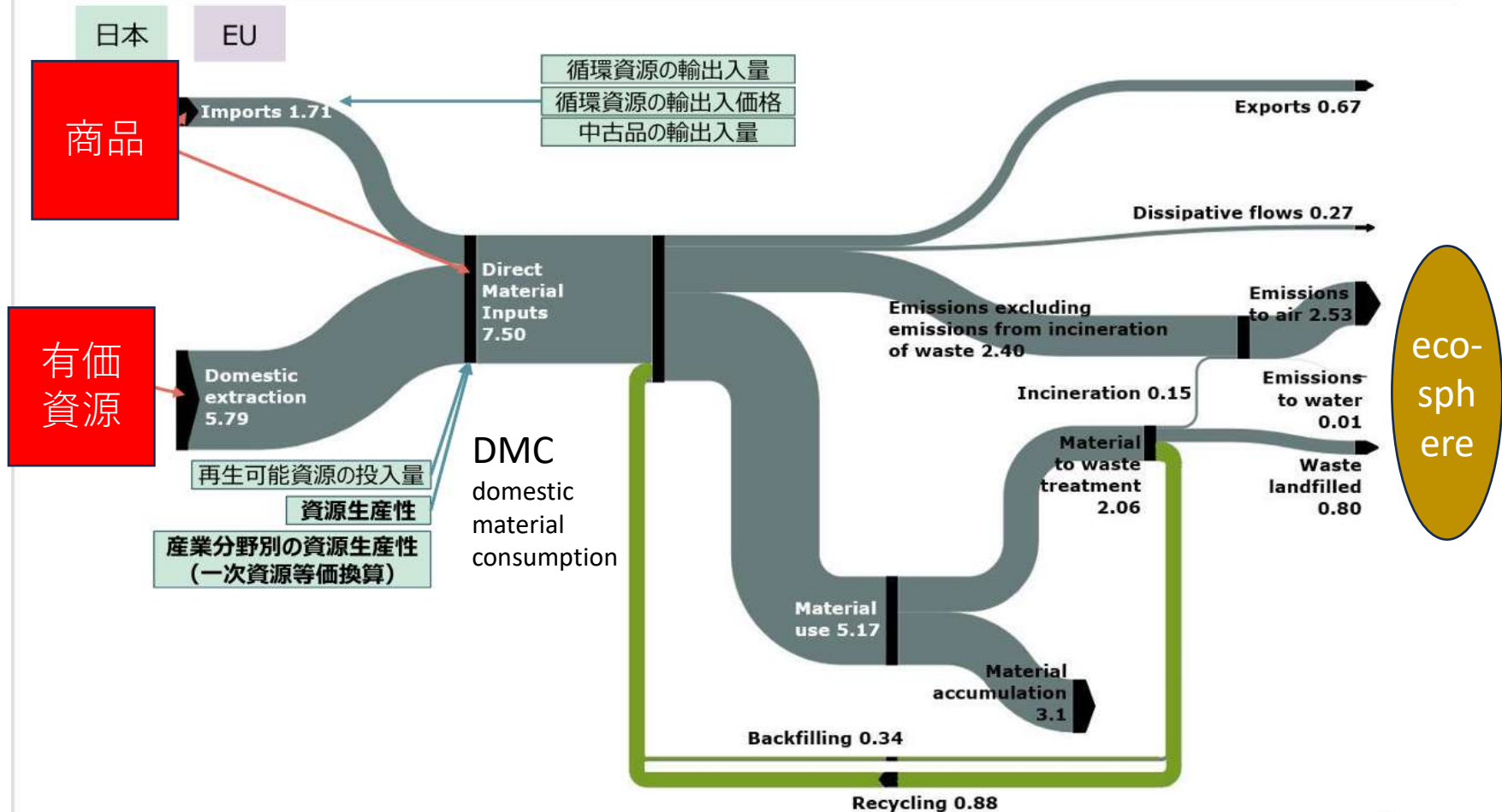
地球環境圈

地圈

水圈

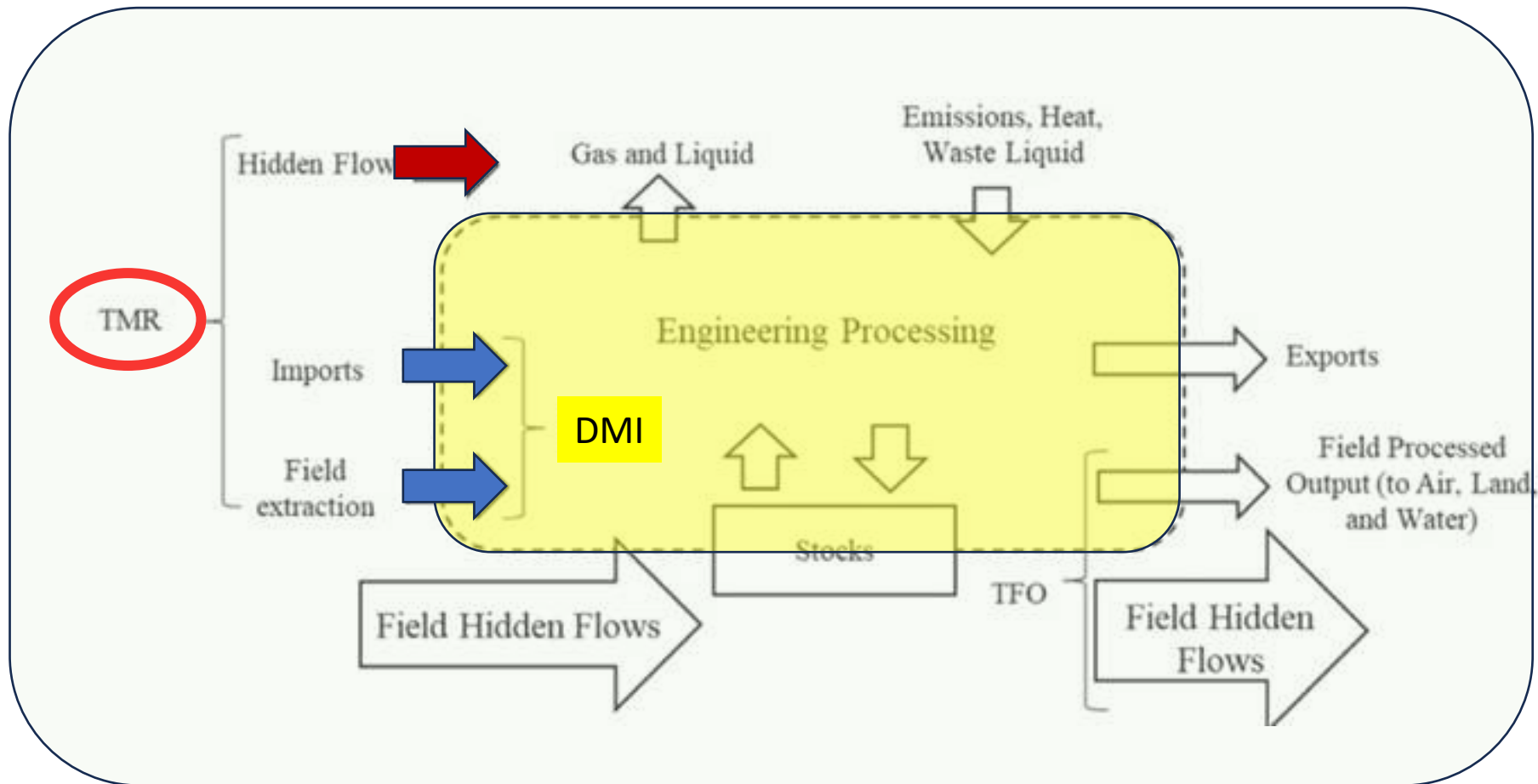
大氣圈

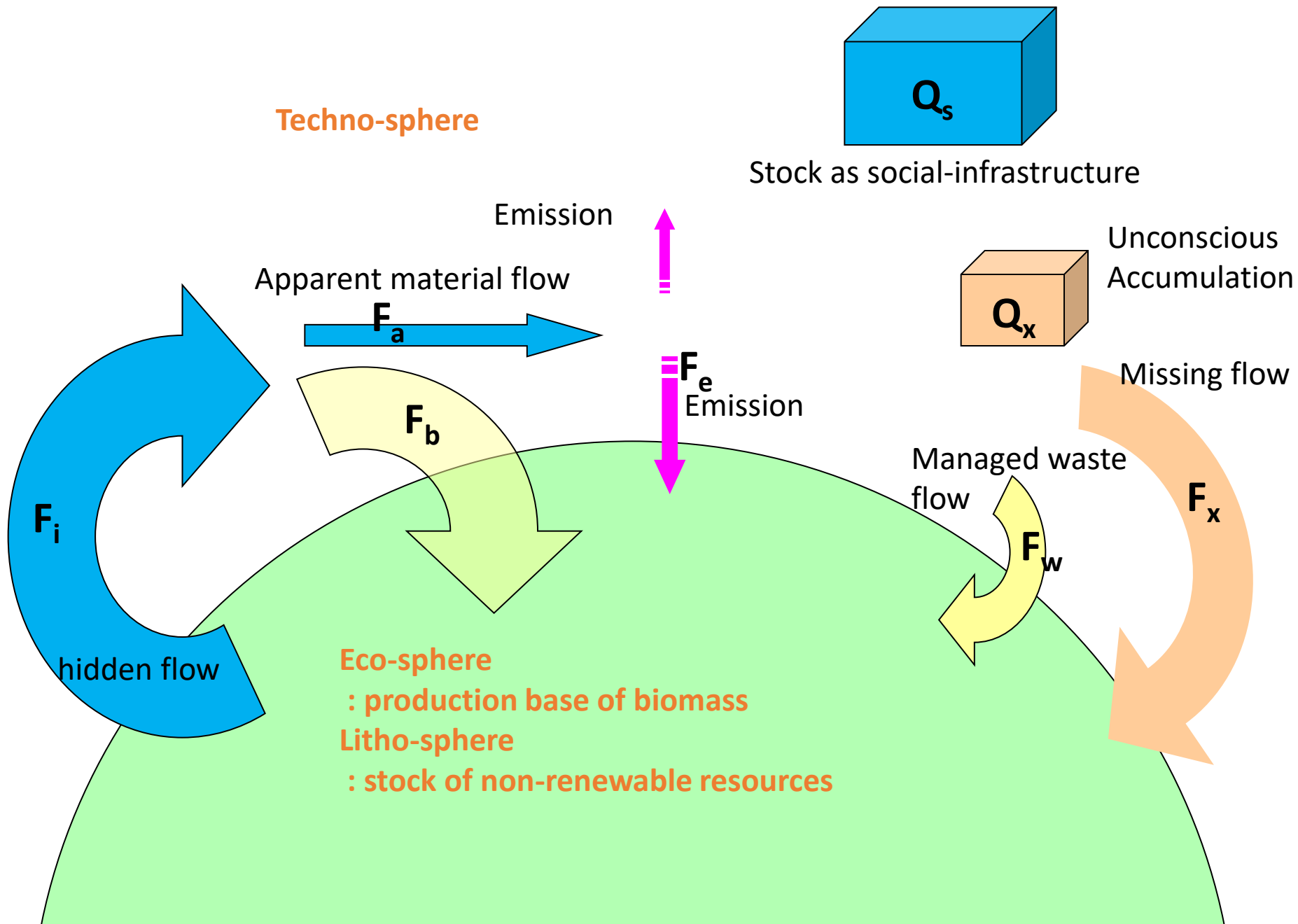
# マテリアルフローにおける指標の比較（投入）



引用 : eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat/web/circular-economy/material-flow-diagram>)

[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/junkai\\_keizai/pdf/007\\_05\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/junkai_keizai/pdf/007_05_00.pdf)





# 理想的「システム境界」

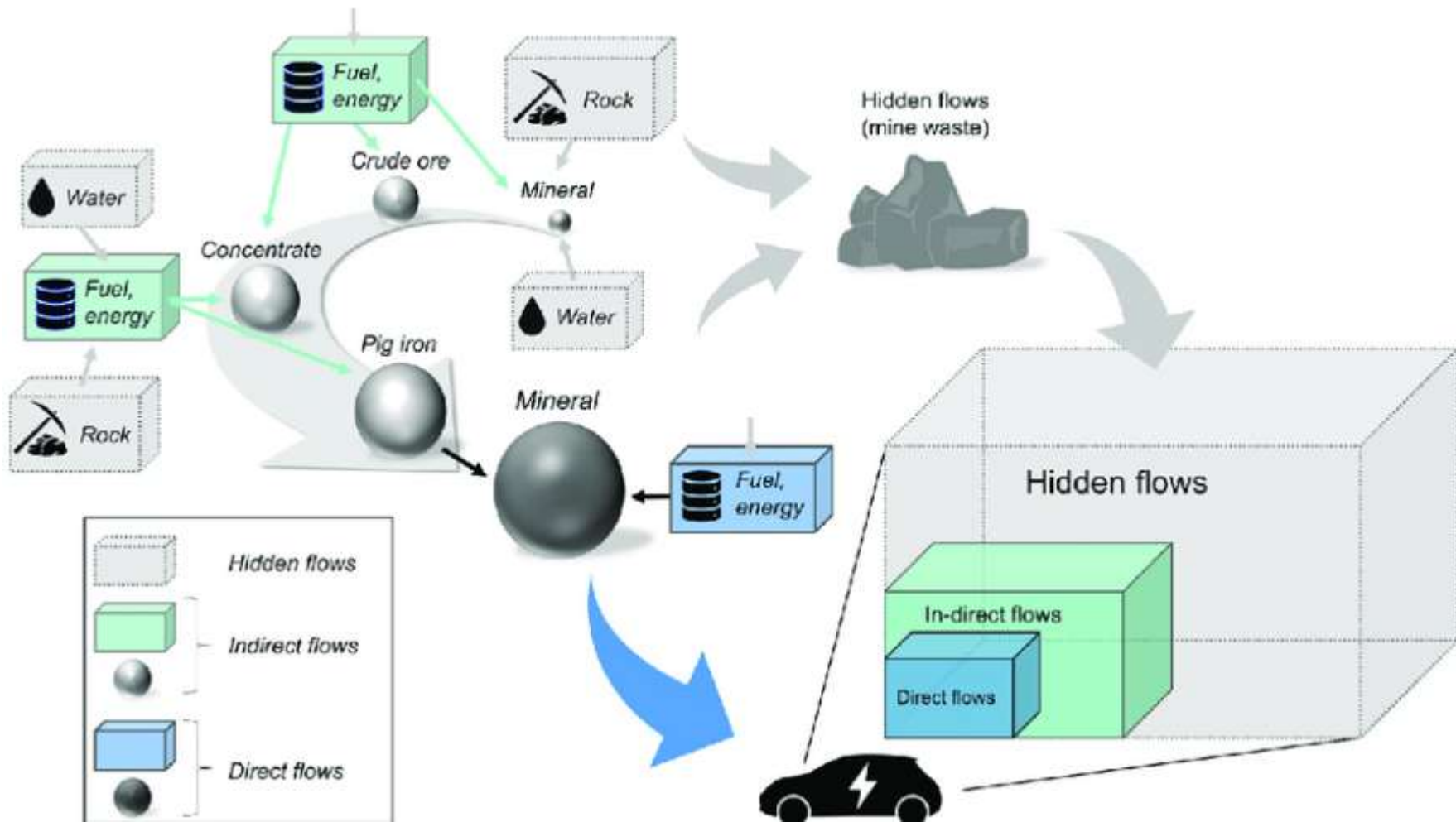
- 地球環境圏と人間経済圏の境界
- 「資源端」 resource edge
- 「資源端」からの取り込みを境界フロー





## 関与物質総量（TMR）

- 定義TMRは、「隠れた」物質フローを含め、経済を支えるために自然から抽出される物質の総量を定量化する。
- **目的**：天然資源への人間の依存度を測定し、持続可能性を評価するために開発された。
- **1990年代に開発**：エコリュックサック」として紹介され、素材採取が環境に与える隠れた影響を表現した。
- **目標**：「目に見えない」資源利用を強調し、環境負荷全体に対する意識を高める。
- **フットプリント概念のパイオニア**：直接的な環境影響よりも資源依存に着目し、さまざまな「フットプリント」測定基準を提唱。



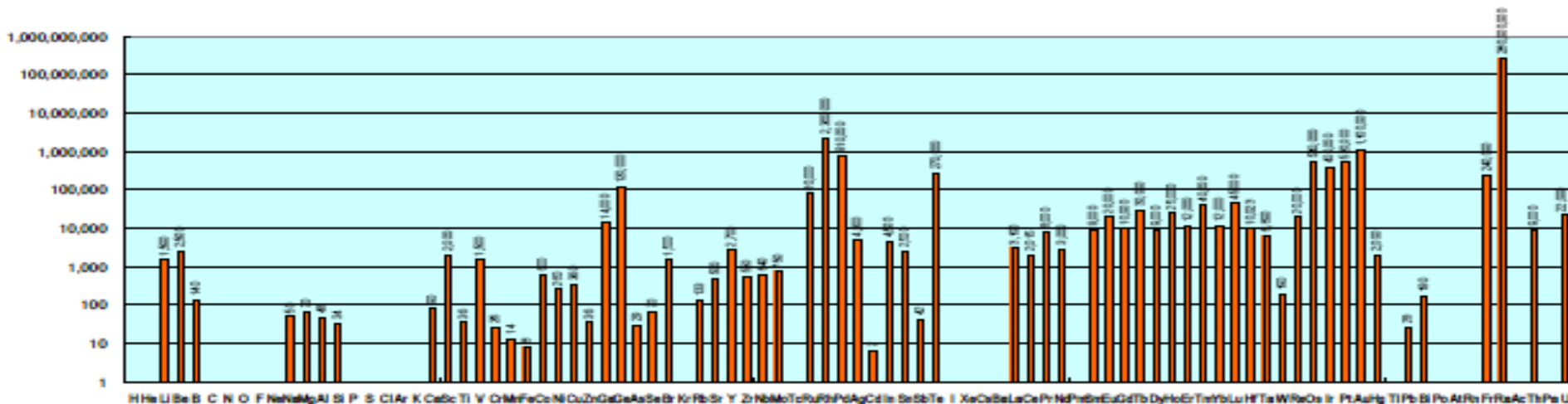
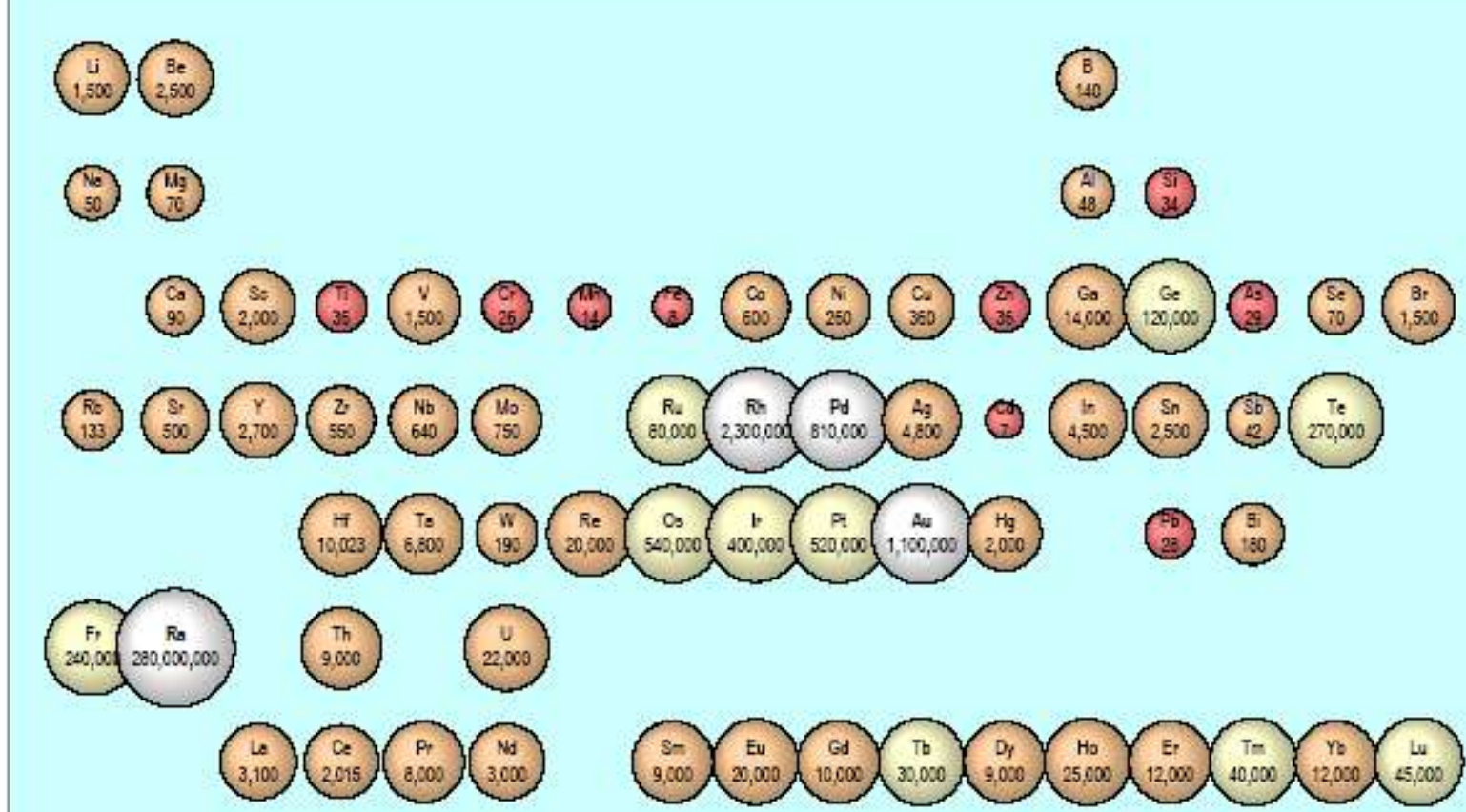
Full length article

**Total material requirement for the global energy transition to 2050: A focus on transport and electricity**

Takuma Watari<sup>a,b,c,\*</sup>, Benjamin C. McLellan<sup>a</sup>, Damien Giurco<sup>b</sup>, Elsa Dominish<sup>b</sup>, Eiji Yamasue<sup>c</sup>, Keisuke Nansai<sup>d,e</sup>

# 関与物質総量係数

=資源端量



# 総物質所要量（TMR）の進化と現在の妥当性

## •TMR構想の遺産

- ドイツのヴッパータール研究所が発祥で、NIMSのハラダなどの研究者がさらに発展させた。
- TMRの数値は数値化され、日本の環境基本計画の補足指標として盛り込まれた。

## •環境要因から経済要因への焦点のシフト

- 資源の利用とリサイクルに関する議論は、人間経済における利用可能性と効率的な利用へと向かっていった。
- TMRは、毒物学的影響とは直接関係のない、環境要因のひとつとみなされるようになり、政策や学術的な議論では重視されなくなった。

## •サーキュラー・エコノミー時代の注目度の低下

- 循環型経済に関する議論において物質強度の重要性が高まっているにもかかわらず、TMRの概念は、一部の熱心な研究者を除いて、ほとんど注目されなくなっている。

---

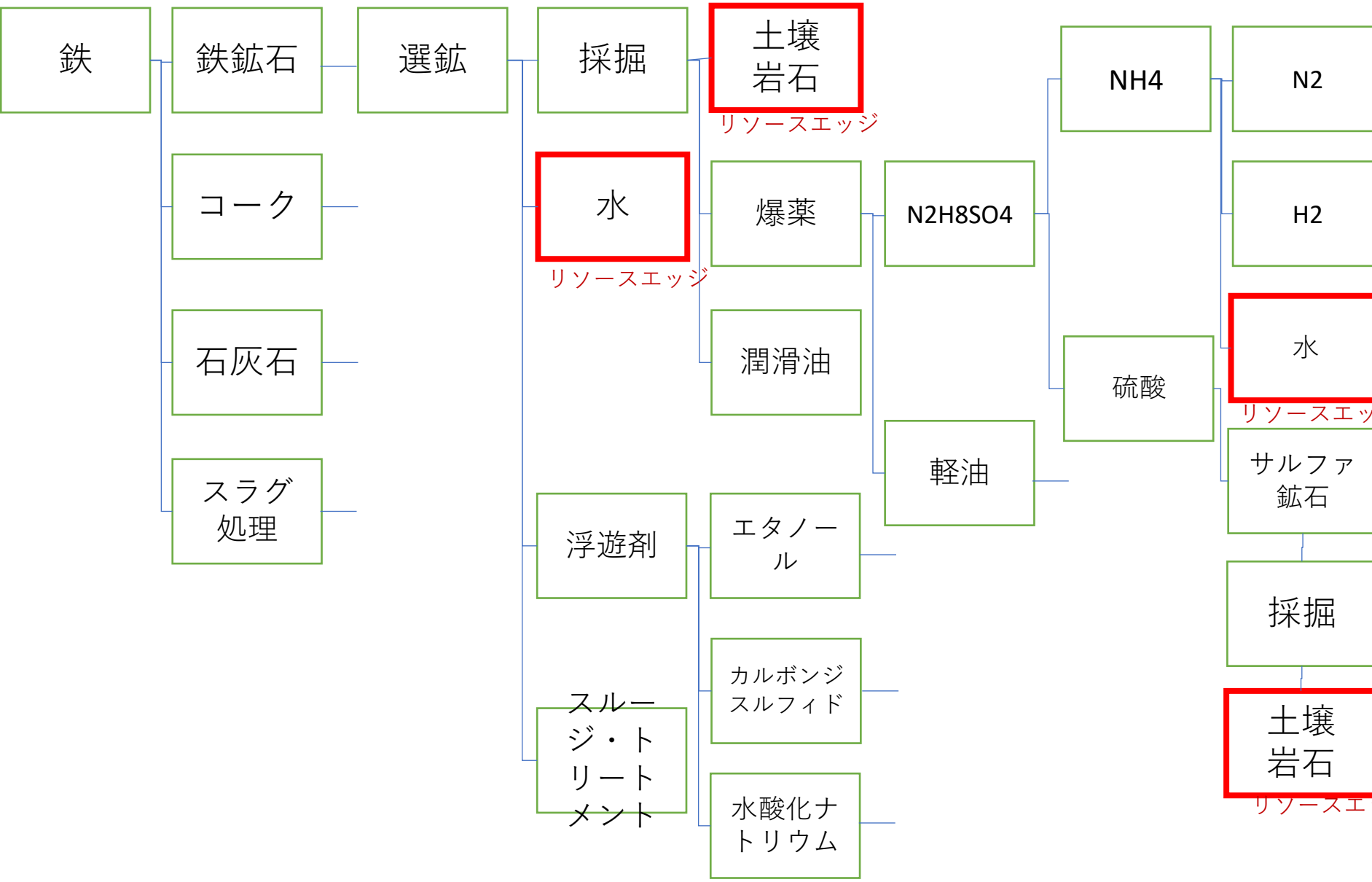
TMRは資源への影響を理解するための貴重な概念であることに変わりはないが、資源のエッジポイントとして、より広範な循環経済の視点の影に隠れてしまっている。



# ネイチャー・ポジティブな世界における 位置づけ



- 高まるネイチャー・ポジティブ・ゴールの重要性**：ネイチャー・ポジティブ・アプローチが注目されるにつれ、私たちが天然資源に与える真の影響、すなわち**資源エッジ**・アプローチを評価し、管理することが不可欠となっている。
- 包括的な指標としてのTMR**：TMRは、隠れたフローを含む**総物質依存度**を把握し、直接的な排出や廃棄物以外の資源使用の全体像を提供する。
- TMRと自然保護に積極的な行動を一致させる**：TMRを削減することで、**生物多様性**を直接支援し、**生息地の破壊**を減らし、**持続可能な資源管理**を促進する。
- 政策と産業を導くTMR**は、バランスの取れた持続可能な未来のために資源が責任を持って使用されることを保証する、自然肯定的な戦略に沿った政策やビジネス慣行のためのデータを提供します。



- 資源端までのシステム境界設定が理想的境界
- ネイチャーポジティブなどでそれが求められている
- で、資源端まで、到達可能なのか？
- それは、環境ストレス因子(CO2など)に適用可能か



A311

f NFO2-29

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	出展		鉱山	埋蔵量Kt	Au	Ag	Cu	Zn	Pb	Mo	Sn	Co	Ni
2					g/t		%						
3													
4													
5		地殻存在度ppm			0.003	0.08	75	80	8				
6					1.120346	126.96	0.841267	5.535148	1.330515	0.099641	4.647793	0.229735	1.0
7		price(¥/kg)			1385000	19950	300	150	100				
292	Barrick Go	USA	Betze-Pos	116400	4.8								
293			Meikle	14100	14.2								
294		canada	Bouquet	1800	5.4								
295			Holt-McDe	2100	6								
296		Peru	Pierina	92900	1.9								
297		Chili	ElIndio	1400	4.2								
298			Pascua-La	314000	1.7								
299	Teck	canada	Williams	22800	4.9								
300			David Bell	3700	10.4								
301		Australia	Tarmoola	30800	1.7								
302			Carosue D	18800	1.9								
303		canada	Highland V	389000			0.42						
304			Louvicourt	5600			3.18	1.73					
305		Peru	Antamina	559000			1.24						
306		canada	Polaris	1400				12.1	2.9				
307			Sullivan	1800				6.6	3.2				
308		USA	Red Dog	98000				17.7	4.6				
309		canada	Niobec	11500									
310													
311	NFO2-29	Ecuador	Junin	318000			0.71			0.026			
312	NFO2-24	Chili	Coderco	200000	0.12		1			0.07			
313	NFO2-16	Peru	Magistra	105000			3.9	0.74		0.052			
314	NFO1-47	Peru	Quellaveco	947000			1.74	0.94		0.014			

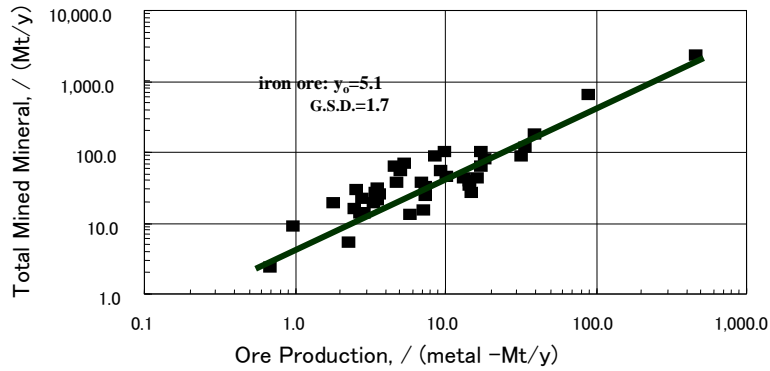


Fig.4 Total mined minerals v.s. non ore production of each mining site

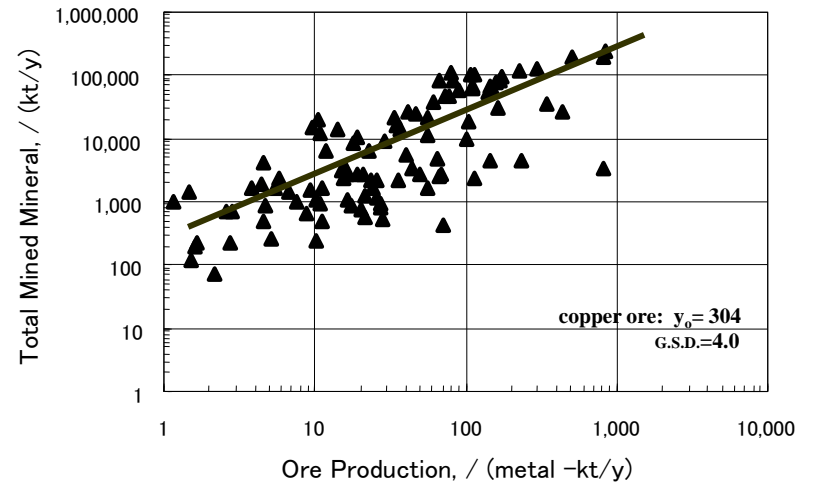


Fig.5 Total mined minerals v.s. copper ore production of each mining site

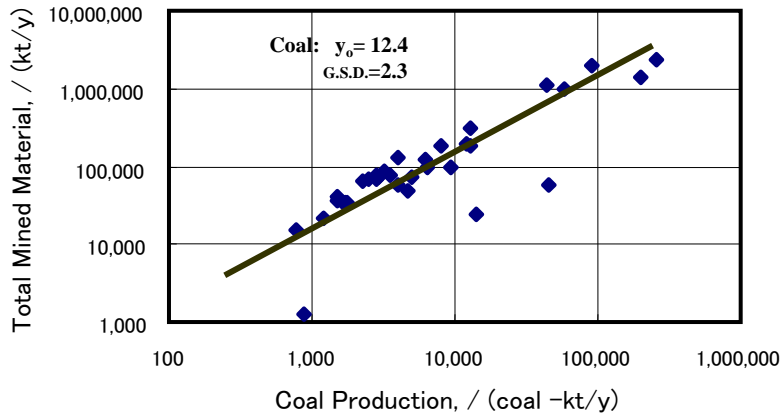


Fig.3 Total mined minerals v.s. coal production of each mining site  
Total mined mineral of each mining site are plotted to the coal production of each site. Total mined minerals consist of crude ore, overburden, gangue mineral and others. The liner line with unit slope and intercept  $y_0=12.4$  shows that total mined minerals are in 12.4 times proportion to coal production. G.S.D. means geological standard deviation.

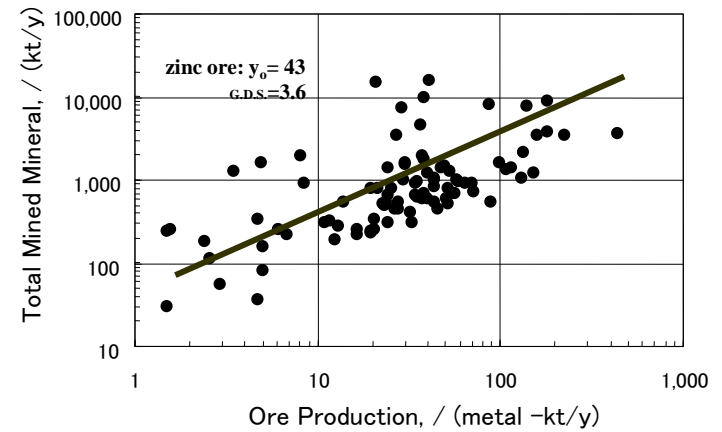


Fig.6 Total mined minerals v.s. zinc ore production of each mining site

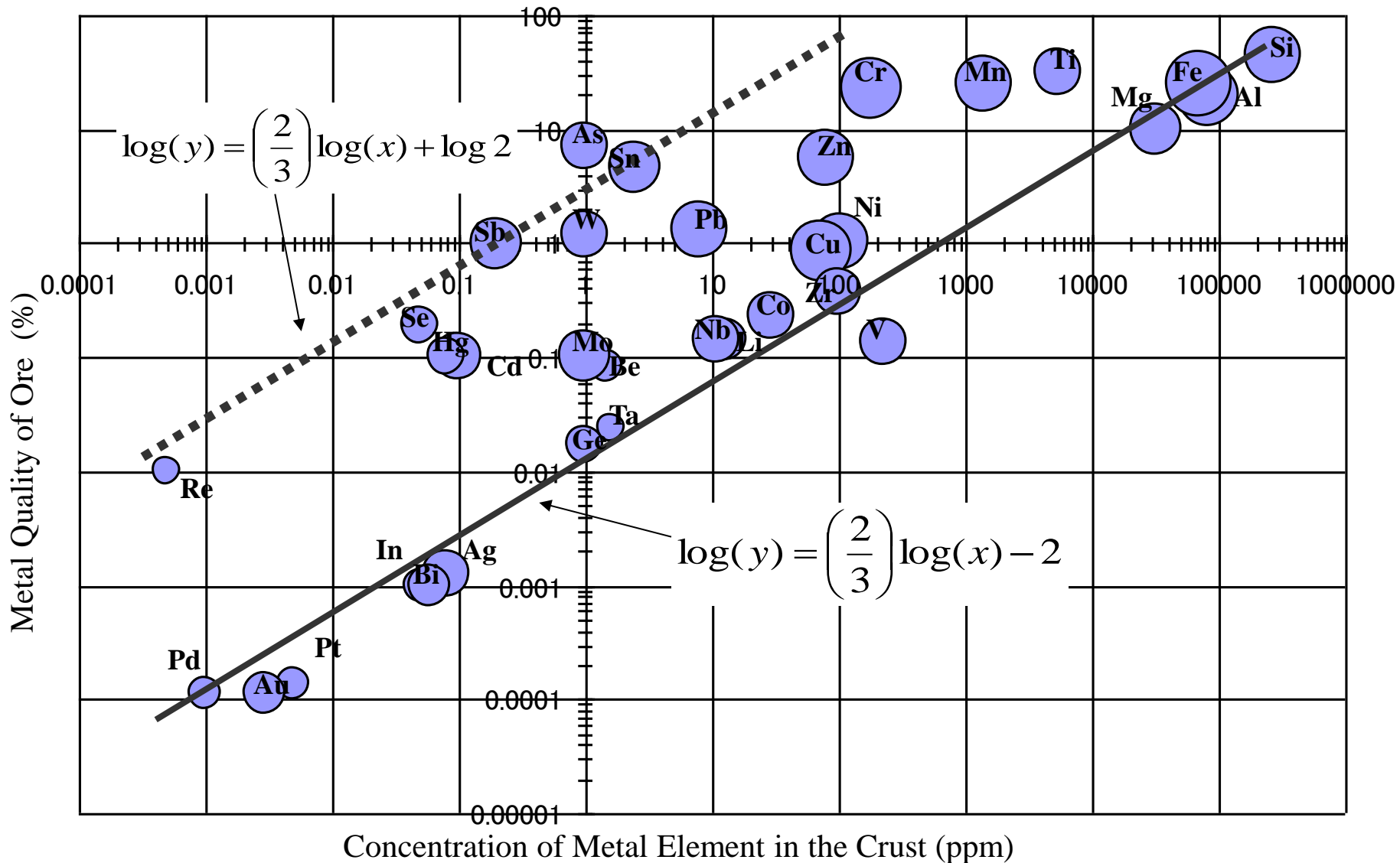
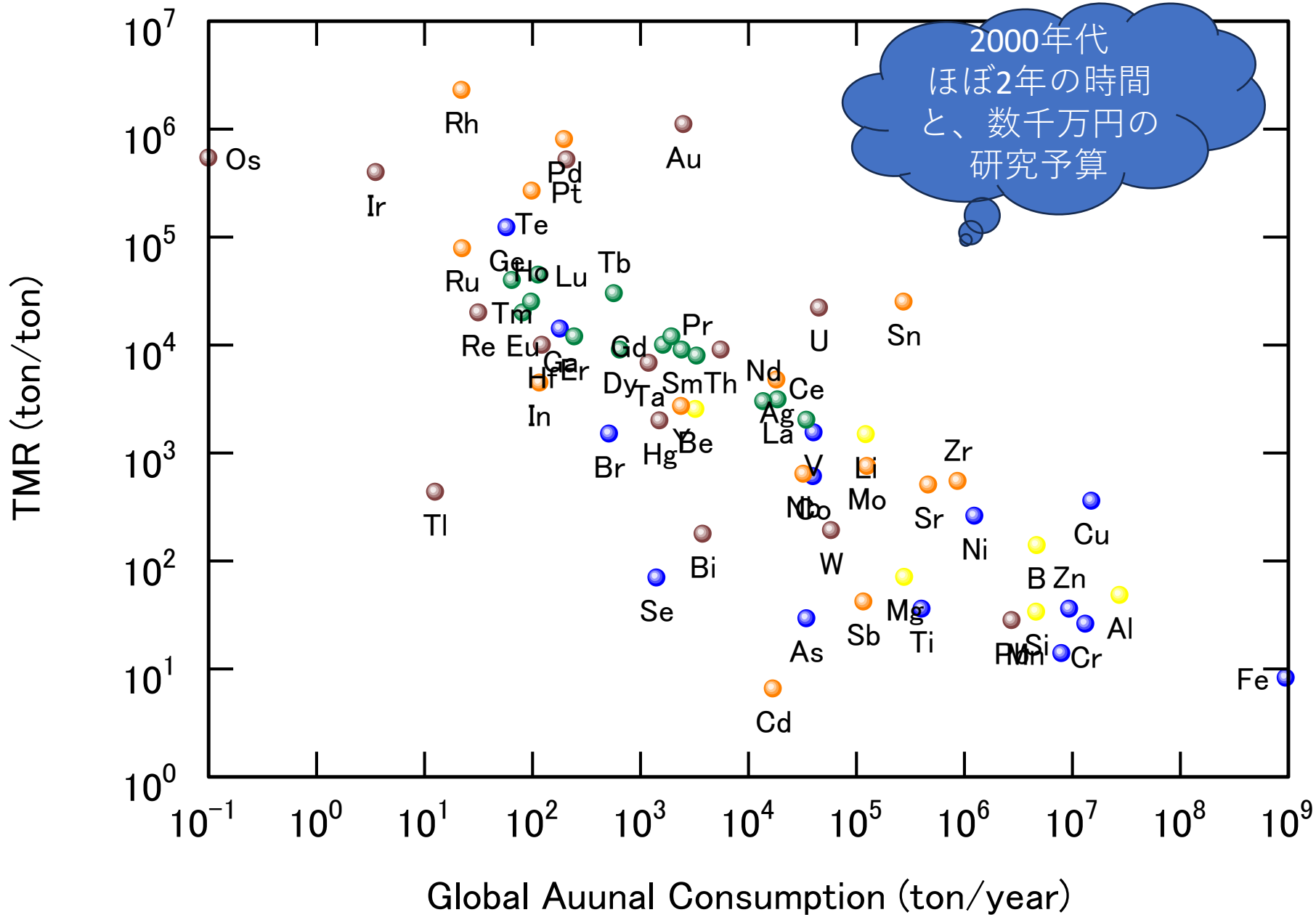


Fig.9 2/3 power relation between metal quality and concentration in the crust  
 The size of circle is proportional to the log amount of world production of the year  
 2000. Almost metals are plotted between the linear lines of the intercept 2 and 0.01  
 with the slope of 2/3.



# 環境情報開示拡大の歴史的流れ

## 1990年代: 環境報告と持続可能性基準の導入

1992年: 地球サミット（リオデジャネイロ）「アジェンダ21」や「気候変動枠組条約」が採択され、環境情報開示が推進される。環境情報が企業活動の中で重要視されるようになる。ISO 14000シリーズの制定（1996年）環境マネジメントシステムの国際規格が整備され、企業の環境情報開示の基準が形成される。トリプルボトムラインの概念経済・環境・社会の3側面を考慮した情報開示が注目され始める。

2000年代: **グローバルな基準の形成** 2000年: GRI（Global Reporting Initiative）ガイドラインの登場持続可能性報告の標準化を目指し、企業が環境、社会、経済に関する情報を一貫性を持って開示するためのフレームワークを提供。2003年以降: カーボンフットプリント（CFP）の概念が普及製品ライフサイクル全体でのCO<sub>2</sub>排出量の透明化が進む。EUの持続可能性指令環境負荷に関するデータ公開が法的義務化される国が増加。

2010年代: **ESG投資の台頭と環境データの重要性拡大** パリ協定（2015年）温室効果ガス排出削減目標が各国に課され、企業の環境データ開示が強化される。ESG（環境・社会・ガバナンス）投資の急成長投資家が環境情報を含む非財務データを重視するようになる。環境情報開示が資本市場での重要な評価軸となる。CDP（Carbon Disclosure Project）活動の拡大企業が環境情報を公開し、スコア評価を受ける仕組みが普及。

2020年代: **情報開示基準の国際統一** 2021年: 国際サステナビリティ基準審議会（ISSB）の設立IFRS財団が主導し、企業が環境情報を財務情報と同等の重要性で開示することを求める動き。EUのCSRD（企業サステナビリティ報告指令）大企業に持続可能性に関する詳細な情報開示を義務付け。デジタルトランスフォーメーション（DX）の推進環境データの収集・分析が効率化され、リアルタイムでの開示が可能に。

# 技術情報の開示の進展の要因

## 1. 知的資産経営の重要性の認識

- **無形資産の評価:** 企業価値の源泉が有形資産から無形資産、特に技術や知的財産へとシフトし。投資家やステークホルダーは、企業の技術力や研究開発活動に関する情報を重視する傾向が強まっている。

## 2. オープンイノベーションの推進

- **外部連携の必要性:** 技術革新のスピードが加速する中、企業単独での研究開発には限界があり、外部の技術や知識を取り入れるオープンイノベーションが重要視されてきた。これに伴い、技術情報の適切な開示と管理が求められている。

## 3. 情報開示に関する国際的な基準の整備

- **知的財産情報開示指針:** 企業が技術・特許情報を適切に開示するための指針を策定し、透明性の向上をすすめる試作が各国で進められている。これにより、投資家や市場からの信頼性が高まるけいきとなる。

## 4. デジタルトランスフォーメーション（DX）の進展

- **データ管理の高度化:** DXの推進により、技術情報の収集・分析・共有が容易になり、情報開示の効率性と精度が向上しており、それをういて企業は自社の技術力を効果的にアピールできるようになっている。

## 5. 企業の競争優位性の確保

- **技術力のアピール:** 技術情報の開示は、企業の競争優位性を示す手段としても機能している。適切な情報開示により、企業は市場での地位を強化し、投資家やパートナーからの信頼を獲得できる。

# TMRデータ収集の課題と大規模言語モデルAIの役割

## • TMR普及の課題

- データの複雑さ：.
- バウンダリーデータの制限：

## • ゲームチェンジャー生成AIの出現（大規模言語モデル）

- しばしば「生成的」と呼ばれるこれらのAIシステムは、基本的には大規模なデータマイニングに基づいた大規模な言語処理を行う。
- 入念なプロンプトによって、これらのAIモデルは、ターゲットを絞ったデータマイニングを行うように誘導され、特定のサイトごとの特定の採掘や廃棄物管理情報など、以前はアクセスできなかったデータにアクセスできるようになる。

## • データマイニングAIによる新たな可能性

- ジェネレーティブAIのデータマイニング能力を活用することで、これまで手の届かなかったTMR計算に不可欠なデータを得ることができる。
- データマイニングAIと呼ばれるこのアプローチは、TMR研究を推進し、資源効率評価を改善するための強力なツールである。

# 大規模言語処理AIの役割

- 大規模言語処理AI（Large Language Models, LLM）は、自然言語処理（NLP）の能力を活かして、膨大な公開データの収集・解析を効率化する技術として注目されています。以下のような役割があります：

## 1. データ収集の効率化

1. ウェブ上の膨大な情報をスキャンし、特定のキーワードや文脈に基づいて必要なデータを迅速に収集。
2. 例：環境データ、技術情報、学術論文、企業の年次報告書。

## 2. 情報の要約と抽出

1. 長文のドキュメントから、重要なポイントや特定の数値データを要約し、簡潔に提供。
2. 例：LCAインベントリーデータの抽出。

## 3. 異種データの統合

1. 異なる形式（テキスト、表、グラフなど）のデータを解析し、統合的な知見を生成。
2. 例：環境報告書と学術論文から一致するデータポイントの特定。

## 4. リアルタイム解析

1. インターネット上の更新情報を継続的に収集・分析し、最新の情報を提供。
2. 例：規制の変更や新しい研究結果の把握。

## 5. 高度なデータ補完と推論

1. 欠損データを既存の情報やパターンに基づいて補完し、不完全な情報を補強。



# 大規模言語処理型AIを用いたLCAインベントリーデータのマイニングの課題

- **1. データバイアス (Data Bias)**
  - AIモデルは学習データに依存しており、学習データが偏っていると、収集されるデータにもバイアスが含まれる可能性があります。
  - 例: 環境報告書が欧米企業のデータに偏っている場合、他地域 (例: アフリカやアジア) のデータが欠落する可能性が高い。
- **2. 意味的曖昧性 (Semantic Ambiguity)**
  - LLMは自然言語の文脈を理解するが、専門用語や同音異義語などで誤解を招く場合があります。
  - 例: 「廃棄物処理」という文脈が「再利用」なのか「最終埋め立て」なのか、文脈依存で異なる解釈がされる場合がある。
- **3. 正確性の欠如 (Hallucination)**
  - 大規模言語モデルは存在しないデータや事実を生成することがあります。
  - 例: 実際に存在しない製造プロセスの排出量データを生成してしまう。
- **4. モデルの透明性不足 (Black Box Nature)**
  - LLMは学習プロセスやデータソースが不透明であり、生成されたデータの信頼性や再現性を評価するのが難しい。
  - 例: AIが生成したインベントリーデータの根拠を検証できない。
- **5. プロンプト依存性 (Prompt Dependency)**
  - モデルの出力結果はプロンプト設計に大きく依存し、不適切なプロンプトでは望む結果が得られない。
  - 例: 「電力消費量」のデータを取得したいが、曖昧なプロンプトにより「総エネルギー消費量」のデータが返される。
- **6. データの最新性 (Data Staleness)**
  - LLMのトレーニングデータが古い場合、最新の技術や規制が反映されていない。
  - 例: 新しい環境規制や技術革新が反映されていないデータを取得してしまう。
- **7. スケーラビリティ (Scalability)**
  - 膨大なデータ収集・処理の際に計算リソースが不足する可能性がある。
  - 例: 大規模なサプライチェーン全体を解析する際に、処理時間やコストが過大になる。

# LCAデータマイニングにおける生成AI活用の考察と課題

## 1.AIの予測精度

- ジェネレーティブAIは過去のデータに依存して予測を行うが、**精度はデータの質**に大きく依存する。
- LCAに必要なプロセスデータは業界によって**大きく異なり**、最新の技術やオペレーションを追跡することは難しい。
- AIの予測を検証し、信頼性を確保するためには、**人間の専門知識が不可欠**である。

## 2.透明性と解釈可能性

- AIモデルはしばしば「**ブラックボックス**」として機能するため、その意思決定プロセスを理解するのは難しい。
- LCAには**透明性と再現性**が必要であり、AIのアウトプットが明確でないことは結果の信頼性を損ないかねない。

## 3.バイアスの可能性

- AIの予測は、**学習するデータセット**に依存する。偏りがあれば、AIの結果は歪むかもしれない。
- その結果、特定の国や企業にとって**不公平な結果**がもたらされたり、真の環境影響が過小評価されたりする可能性がある。

# LCAデータマイニングにおける生成AIの課題

## •機会と課題のバランス

- LCAデータマイニングにジェネレーティブAIを使用することは、新たな機会をもたらすが、精度、透明性、バイアスに関する課題も生じる。
- これらの課題に効果的に対処するためには、AIの限界を理解し、**人間の専門知識との連携**を強化することが極めて重要である。

## •AIを効果的に活用するための戦略

### 1.不確実性を考慮した**データ範囲**の設定

- AIは単一の推定値だけでなく、上下限も提供する。
- これにより、LCAの計算は不確実性を考慮し、最良の結果と最悪の結果の両方のシナリオを提供することができる。

### 2.AI推定値の**専門家による検証**

- LCAと生産プロセスの専門家は、AIが導き出したデータを検証し、不適切な結果を破棄または調整する。
- 例スペシャリストがAIによるレアメタル使用量の見積もりを、過去のデータや現在の技術トレンドと照らし合わせて検討する。

### 3.迅速な**エンジニアリング**でバイアスを減らす

- AIには**多様なデータ**ソースが**供給**され、単一の視点への依存を防ぐ。

# hydrogen

## Substance(s) input:.

- **Natural Gas (Methane)**: Approximately 4.5 to 5.0 kg of methane is required.
- **Water vapor (H<sub>2</sub>O)**: Requires about 9 kg of water (used as steam).

## Type and amount of energy:.

- It is mainly supplied as **thermal energy**; it takes **7.2-10 kWh** of energy to produce 1 kg of hydrogen. Natural gas itself is also used as an energy source, emitting about 9-11 kg of CO<sub>2</sub> as a byproduct.

## Solvents and their recirculation rates

- **\*\*Water (steam)\*\*** is used as a reactant, but the circulation rate is typically 0%. Water used in the reaction is consumed.

# rust inhibitor

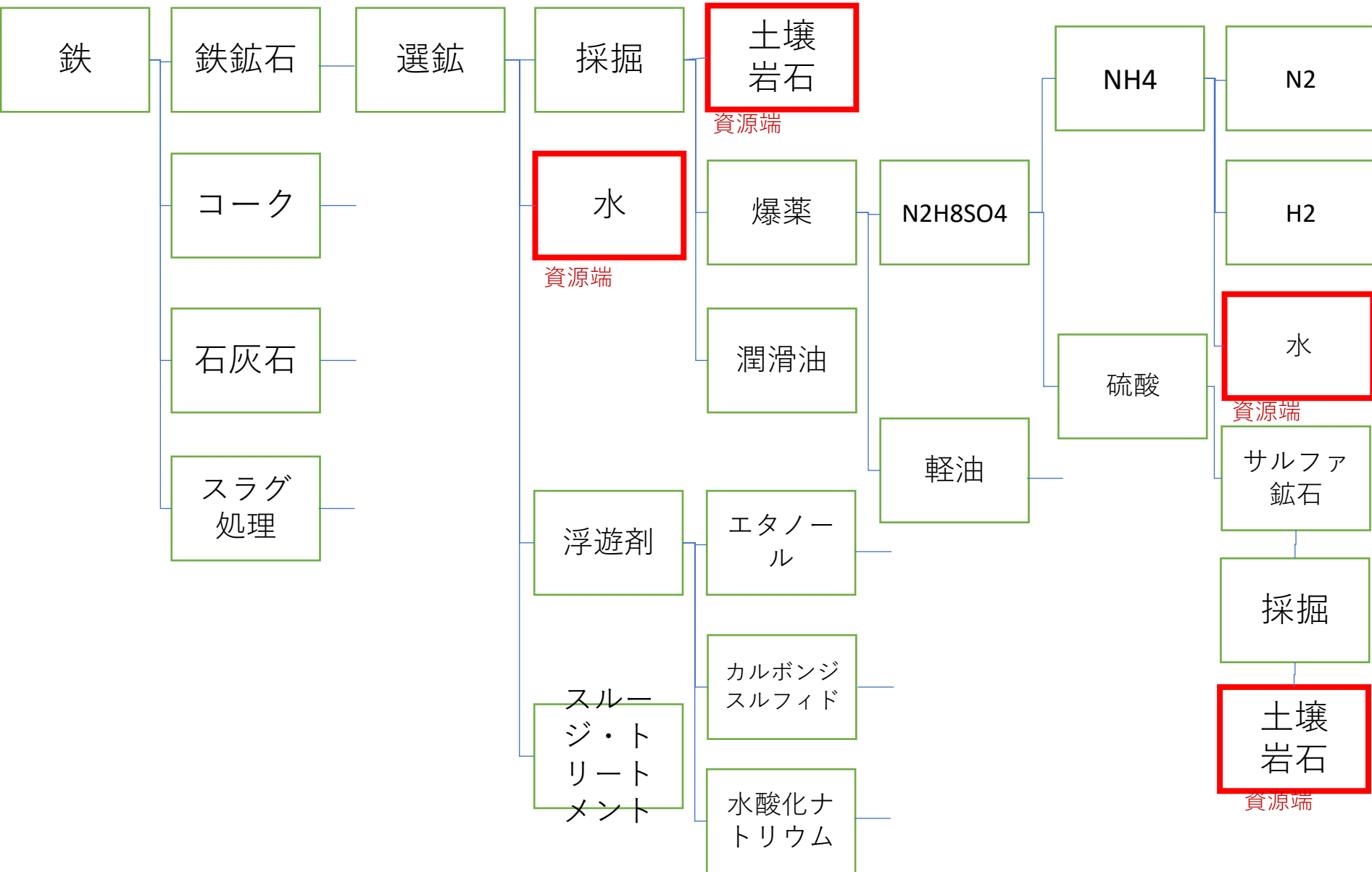
<b>Input Item Name</b>	<b>Suggested input amount</b>
<b>Phosphoric acid (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>, 85% concentration)</b>	0.4 to 0.5 kg
<b>Zinc sulfate (ZnSO<sub>4</sub>, 98% concentration)</b>	0.6 to 0.7 kg
<b>Water (for reaction adjustment and dilution)</b>	0.1 to 0.2 kg

<b>Solvents and other process substances Name</b>	<b>Approximate amount used (kg)</b>	<b>Cycloparametric rate</b>
<b>Catalyst (acidic or basic catalyst)</b>	0.005 to 0.01 kg	Almost 100%.
<b>coolant</b>	5-10 kg	80-90% (reused)
<b>Solvent for cleaning (e.g., methanol)</b>	0.05 to 0.1 kg	70-85% of the total

<b>Type and amount of energy</b>	<b>Approximate consumption (kWh/kg)</b>
<b>electric power</b>	0.2 to 0.4 kWh

A	H	J	K	L	M	T	W	X	Y	AB	AC	AD
element number	Configurat ion Number	element name	Configuration Name	factor weight	element unit	electric energy	Fuel CO2	fuel type	Fuel quantity	TMRofFuel	CO2 emissions	Basic unit CO2
1		hydrogen		0	1		0	0	0	0	12	
	2		methane		4.743416	0	13.0444	natural gas	4.743416	7.636901	0	
	3		water vapor		9	0	0	0	0	0	0	
2		methane		0	1	2.828427	0.194454	natural gas	0.070711	0.113844	0	
	4		natural gas		1.195826	0	0	0	0	0	0	
	5		air		0.1	0	0	0	0	0	0	
	6		water (esp. cool, fres		1.549193	0	0	0	0	0	0	
	7		amine solution		0.049497	0	0	0	0	0	0	
	8		dimethyl ether		0.027111	0	0	0	0	0	0	
	9		Sulfur Sludge Treatn		0.014142	0	0	0	0	0	0	
3		water vapor		0	1	0.022361	0.245967	natural gas	0.089443	0.144003	0	
	6		water (esp. cool, fres		1.098863	0	0	0	0	0	0	
	10		coolant		0.353553	0	0	0	0	0	0	
	11		rust inhibitor		0.01	0	0	0	0	0	0	
	12		oxygen scavenger		0.01	0	0	0	0	0	0	
4		natural gas		0	0.999	0.387298	0.086963	natural gas	0.031623	0.050913	0	
	13		gas field gas		1.341641	0	0	0	0	0	0	
	7		amine solution		0.00495	0	0	0	0	0	0	
	14		glycol		0.00495	0	0	0	0	0	0	
	15		methanol		0.003354	0	0	0	0	0	0	
	6		water (esp. cool, fres		0.632456	0	0	0	0	0	0	
5		air		0	1		0	0	0	0	0	
6		water (esp. cool, fres		0	1		0	0	0	0	0	
7		amine solution		0	1		0	0	0	0	0	
	16		monoethanolamine		1	0	0	0	0	0	0	
8		dimethyl ether		0	1	0.282843	0.194454	natural gas	0.070711	0.113844	0	
	15		methanol		1.997498	0	0	0	0	0	0	

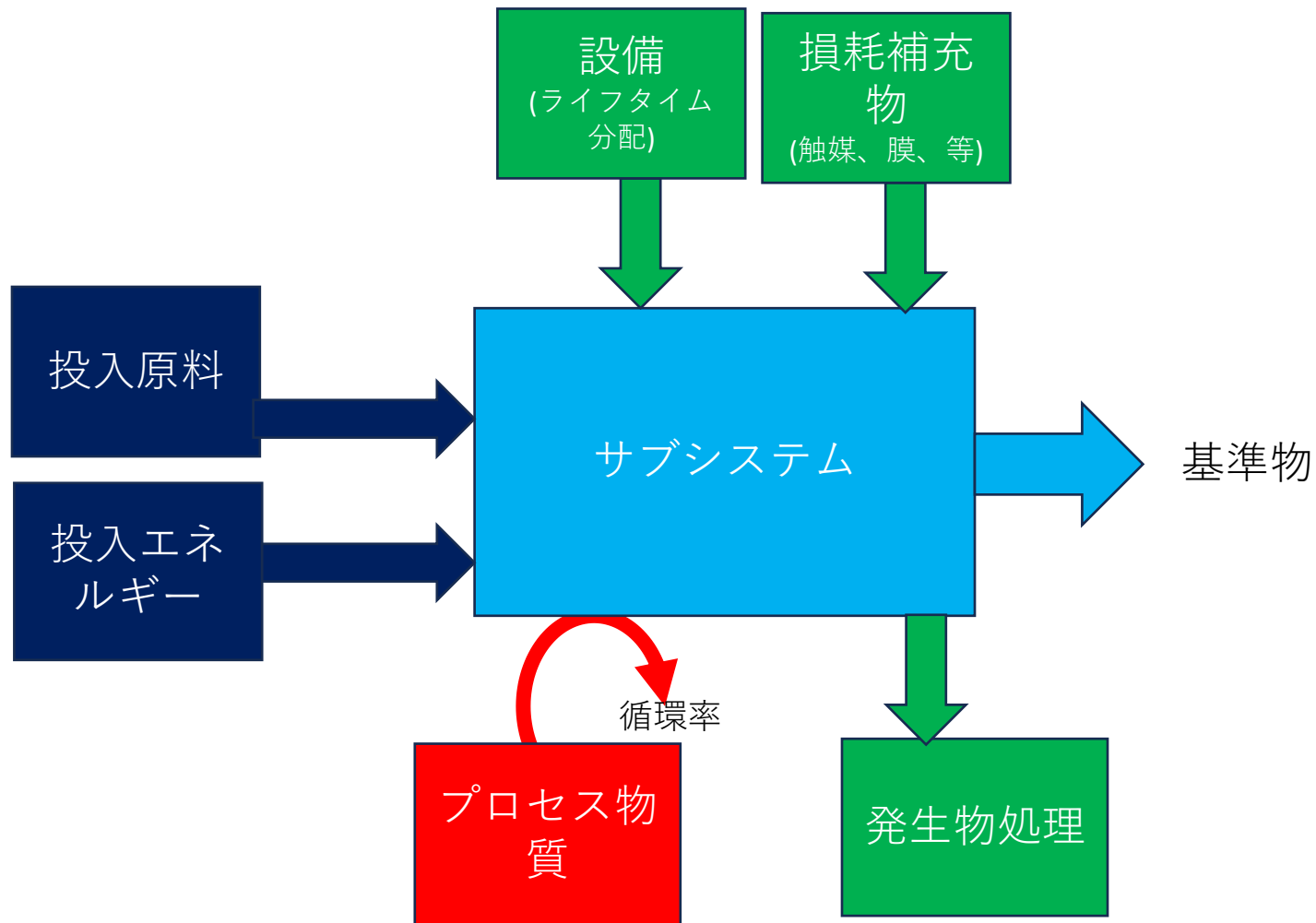
A	H	J	K	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	BR	BS	BT	
element number	Configurat ion Number	element name	Configuration Name	Power FP	CO2FP	TCPF	Electricit y TMR	Fuel TMR	Resource TMR	TMR		TCFP	TMR	
1		hydrogen		0	41.69681	39.97782	59.95059	41.69681	12.39129	613.6438	704.8421	hydrogen	59.95059	704.8421
	2		methane		39.93399	24.64637	43.77475	39.93399	10.31318	583.1306	668.919			
	3		water vapor		1.762817	3.331453	4.175842	1.762817	2.078113	30.51319	35.92303			
2		methane		0	8.418825	5.19591	9.228528	8.418825	2.174209	122.9347	141.0205	methane	9.228528	141.0205
	4		natural gas		5.387193	4.580928	7.161393	5.387193	1.939441	115.6747	127.7959			
	5		air		0	0	0	0	0	0.1	0.1			
	6		water (esp. cool, fres		0	0	0	0	0	1.549193	1.549193			
	7		amine solution		0.140358	0.296227	0.363458	0.140358	0.103982	2.98971	3.358969			
	8		dimethyl ether		0.052662	0.121061	0.146286	0.052662	0.015281	2.585581	2.700394			
	9		Sulfur Sludge Treatm		0.010185	0.003241	0.008119	0.010185	0.00166	0.035552	0.056462			
3		water vapor		0	0.195869	0.370161	0.463982	0.195869	0.230901	3.390355	3.991448	water vap	0.463982	3.991448
	6		water (esp. cool, fres		0	0	0	0	0	1.098863	1.098863			
	10		coolant		0	0	0	0	0	0.353553	0.353553			
	11		rust inhibitor		0.063231	0.050836	0.081124	0.063231	0.072898	1.095783	1.288188			
	12		oxygen scavenger		0.110277	0.073358	0.126181	0.110277	0.014	0.842155	1.064579			
4		natural gas		0	4.504997	3.830764	5.988658	4.504997	1.621842	96.73204	106.8683	natural ga	5.988658	106.8683
	13		gas field gas		4.084938	3.689413	5.646098	4.084938	1.549102	95.46209	104.7317			
	7		amine solution		0.014036	0.029623	0.036346	0.014036	0.010398	0.298971	0.335897			
	14		glycol		0.012791	0.014856	0.020983	0.012791	0.009527	0.109969	0.143671			
	15		methanol		0.002694	0.007156	0.008447	0.002694	0.000736	0.158997	0.164825			
	6		water (esp. cool, fres		0	0	0	0	0	0.632456	0.632456			
5		air		0	0	0	0	0	0	1	1	air	0	1
6		water (esp. cool, fres		0	0	0	0	0	0	1	1	water (es	0	1
7		amine solution		0	2.835664	5.984684	7.342968	2.835664	2.100758	60.40125	67.86142	amine sol	7.342968	67.86142



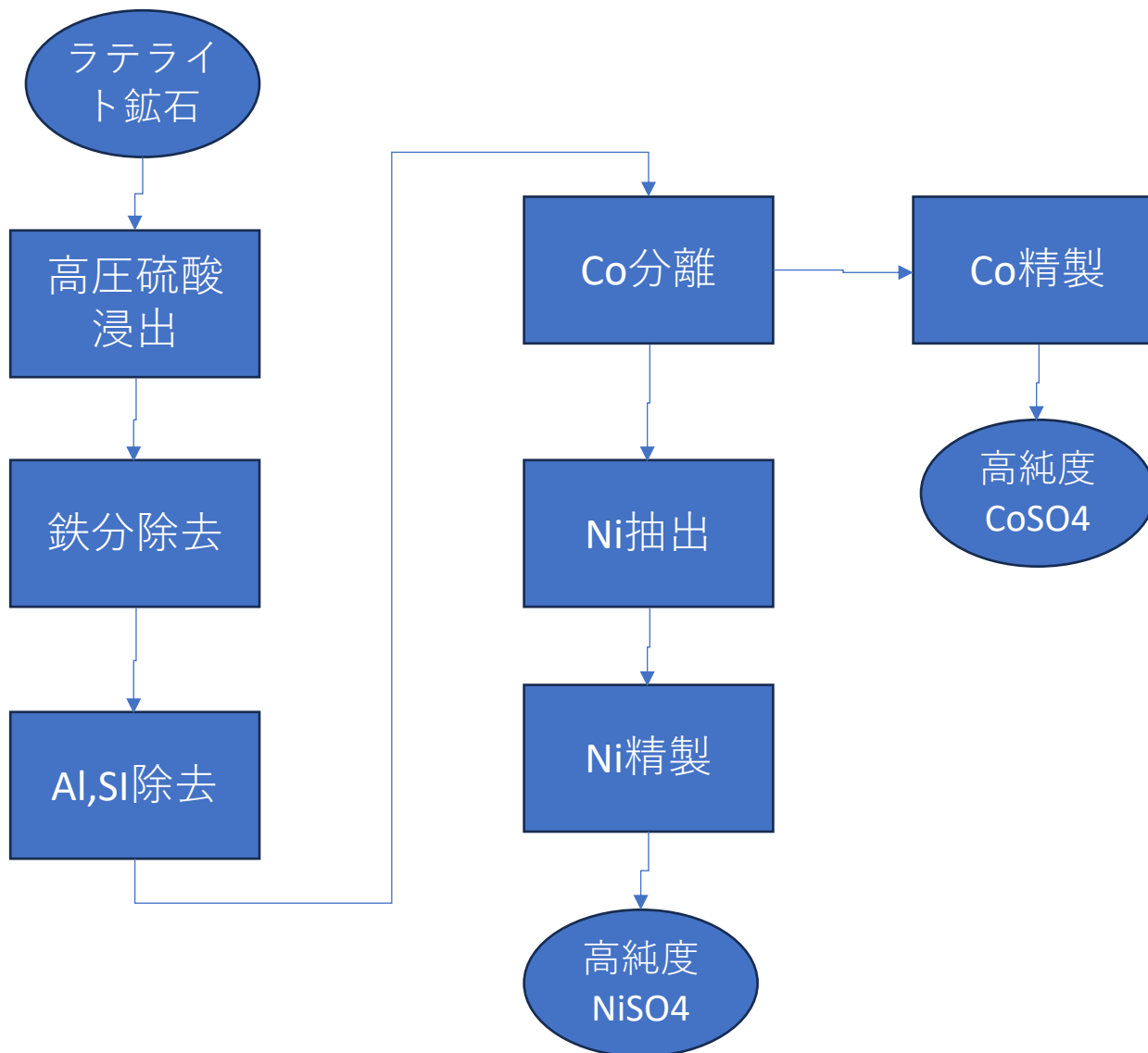
資源端まで追いかける

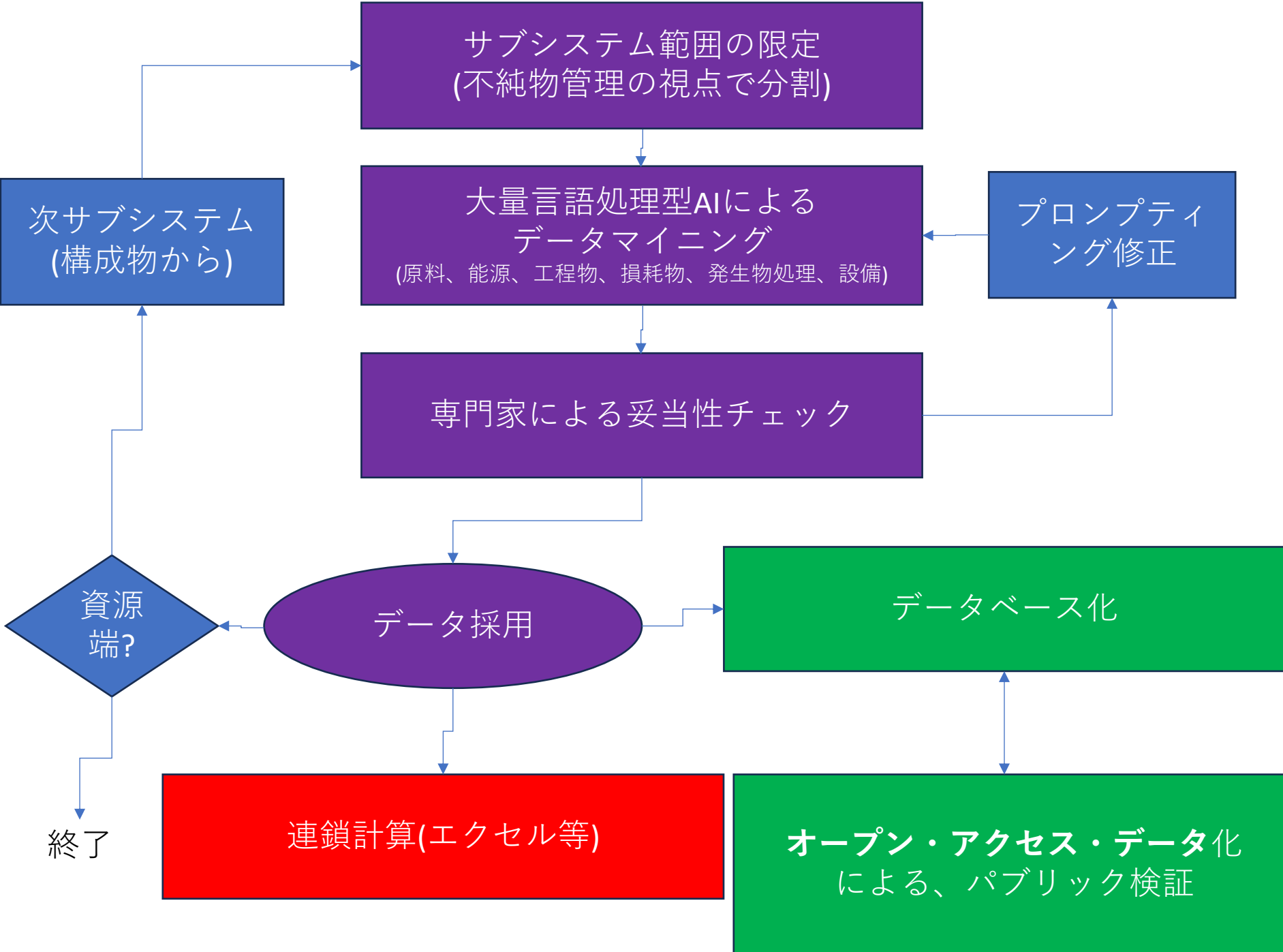


# 一つのサブシステムも、より深いデータ収集



# 物質製造は、合成+不純物除去





サブシステム範囲の限定  
(不純物管理の視点で分割)

大量言語処理型AIによる  
データマイニング  
(原料、エネルギー、工程物、損耗物、発生物処理、設備)

プロンプティ  
ング修正

次サブシステム  
(構成物から)

専門家による妥当性チェック

データ採用

データベース化

オープン・アクセス・データ化  
による、パブリック検証

連鎖計算(エクセル等)

資源  
端?

終了



## Excel Sheet for TMR and TCFP

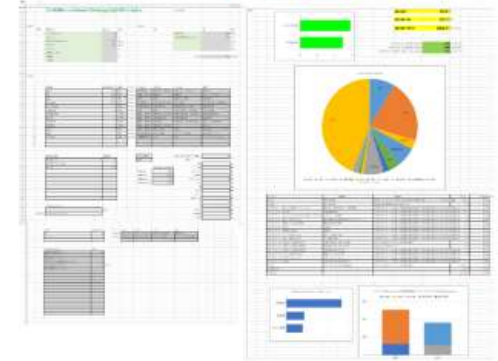
The Excel sheet for calculation of TMR and TCFP

	A	F	H	J	K	
1	element number	reference	configuration	element name	Configuration Name	factor weight
2	1	#DIV/0!			0	0
3	2	3	2	he		0
4		6	3		natural gas	
5		7	4		liquid nitrogen	
6	3	4		natural gas		0
7	4	5		liquid nitrogen		0
8		9	5		air	
9	5	8		air		0
10	6	10	6	Ne		0
11		9	5		air	
12		13	7		nitrogen (N)	
13	7	12		nitrogen (N)		0
14	8	14	8	argon (Ar)		0
15		9	5		air	
16		7	4		liquid nitrogen	
17	9	17	9	krypton (Kr)		0
18		9	5		air	
19		7	4		liquid nitrogen	
20	10	20	10	xenon (Xe)		0
21		9	5		air	
22		7	4		liquid nitrogen	
23		24	11		water (esp. cool, fresh water, e.g. drinking)	

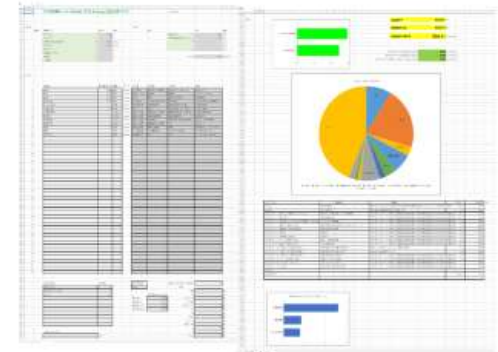
Sheet1 Sheet2 +

The sheet consists of "element name J" and "configuration name K" and data from L to AH, where all elements forming the system are described.

Japanese



scat123plus



SCAT123

<https://lca.sdgoods.net/scat123/>



要素名	構成名	係数重み	最終数量	電力	燃料タイプ	燃料量
事務机		1	1	20.5	軽油	0
	スチール		15	0		0
	MDF板		8	0		0
	塗装材		0.5	0		0
	プラスチック		0.3	0		0
	潤滑油		0.1	0		0
	溶接材		0.2	0		0
	接着剤		0.3	0		0
				0		0
スチール		1	1	1.774824	天然ガス	0.031623
	鉄鋼(高炉・転炉)		1.074709	0		0
	潤滑油		0.014142	0		0
	塩酸		0.024495	0		0
	亜鉛		0.014142	0		0
	廃酸処理		0.014142	0		0
	圧延装置		0.022417			
	メッキ装置		0.009083			
				0		0
MDF板		1	1	0.774597	バイオマス	0.244949
	木片		1.341641	0		0
	接着剤		0.122474	0		0
	硬化剤		0.007071	0		0
	水		0.244949	0		0
	バイオマス残渣処理		0.070711	0		0
	廃ガス処理		0.070711	0		0
	MDF製造装置		0.007906	0		0

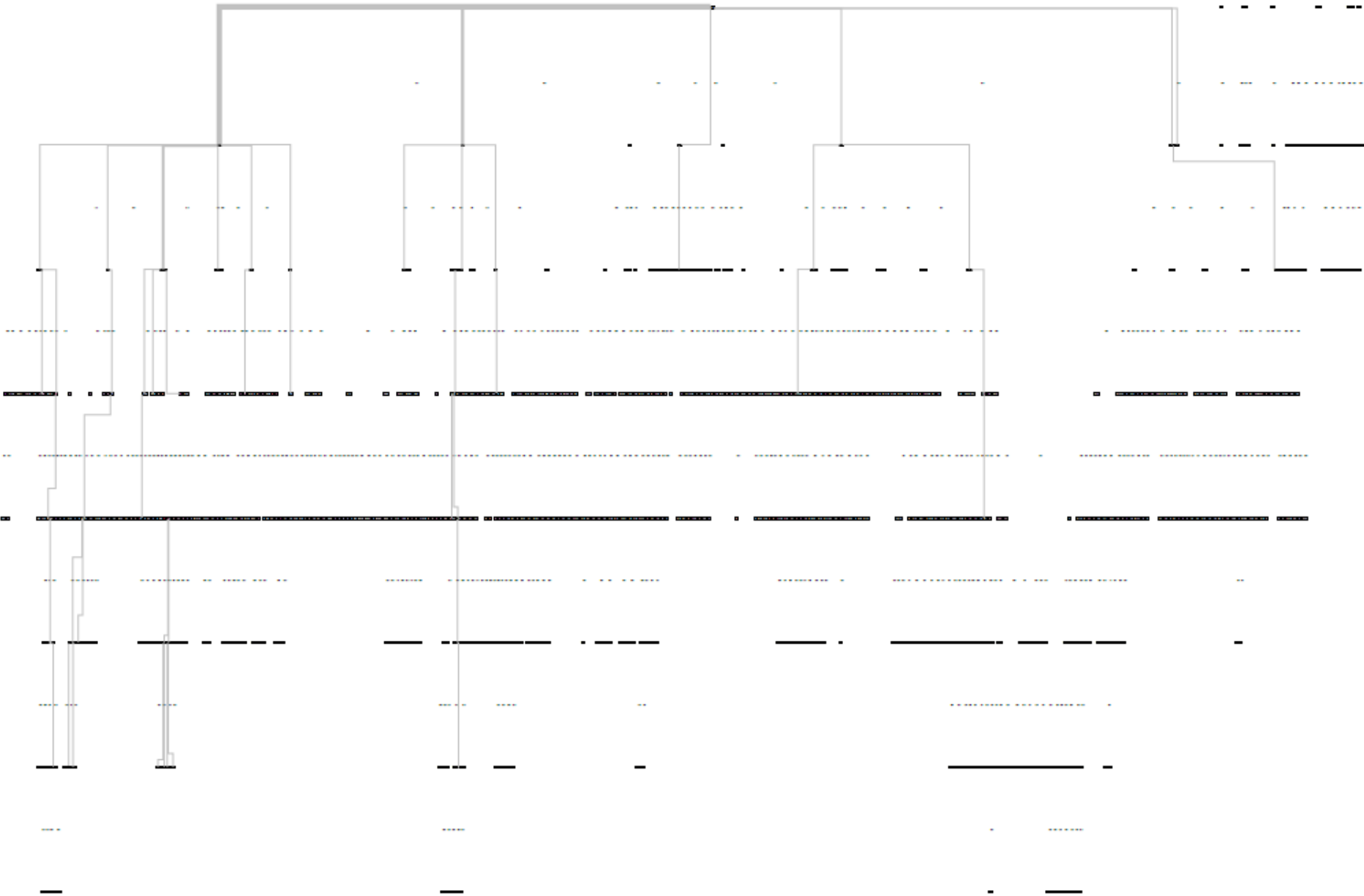
ポリエチレン		1	1	1.095445	天然ガス	0.52915
	ナフサ		3	0		0
	ジーグラー・ナッタ触媒		0.003162	0		0
	工業用水		0.707107	0		0
	廃水処理		0.707107	0		0
	プラスチック製造プラント		0.01	0		0
				0		0
ポリプロピレン		1	1	0.916515	天然ガス	0.387298
	プロピレン		1.039952	0		0
	ジーグラー・ナッタ触媒		0.003162	0		0
	工業用水		0.290474	0		0
	廃水処理		0.5	0		0
	プラスチック製造プラント		0.01	0		0
				0		0
ポリ塩化ビニル		1	1	1.549193	天然ガス	0.387298
	エチレン		0.4	0		0
	塩素		0.6	0		0
	過酸化ベンゾイル		0.007071	0		0
	工業用水		0.316228	0		0
	廃水処理		0.5	0		0
	PVC製造装置		0.0125	0		0
				0		0
ポリスチレン		1	1	1.095445	天然ガス	0.387298
	スチレンモノマー		1.039952	0		0
	過酸化ベンゾイル		0.003162	0		0
	工業用水		0.244949	0		0
	廃水処理		0.3	0		0
	PS製造装置		0.0111	0		0

圧延装置		1	1
	鋳鉄		0.547723
	炭素鋼		0.273861
	クロムモリブデン鋼		0.070711
	電磁鋼板		0.014142
	銅		0.03873
	ステンレス		0.031623
メッキ装置		1	1
	ポリプロピレン		0.447214
	ステンレスSUS316L		0.141421
	炭素鋼		0.070711
	アルミニウム合金		0.03873
	錫		0.070711
	チタン		0.031623
	銅		0.031623
	電磁鋼板		0.017321
	ポリ塩化ビニル		0.070711
	ABS		0.017321
MDF製造装置		1	1
	炭素鋼		0.447214
	ステンレス		0.244949
	高クロム鋳鋼		0.173205
	工具鋼		0.070711
	耐摩耗鋼		0.070711
	ポリ塩化ビニル		0.031623

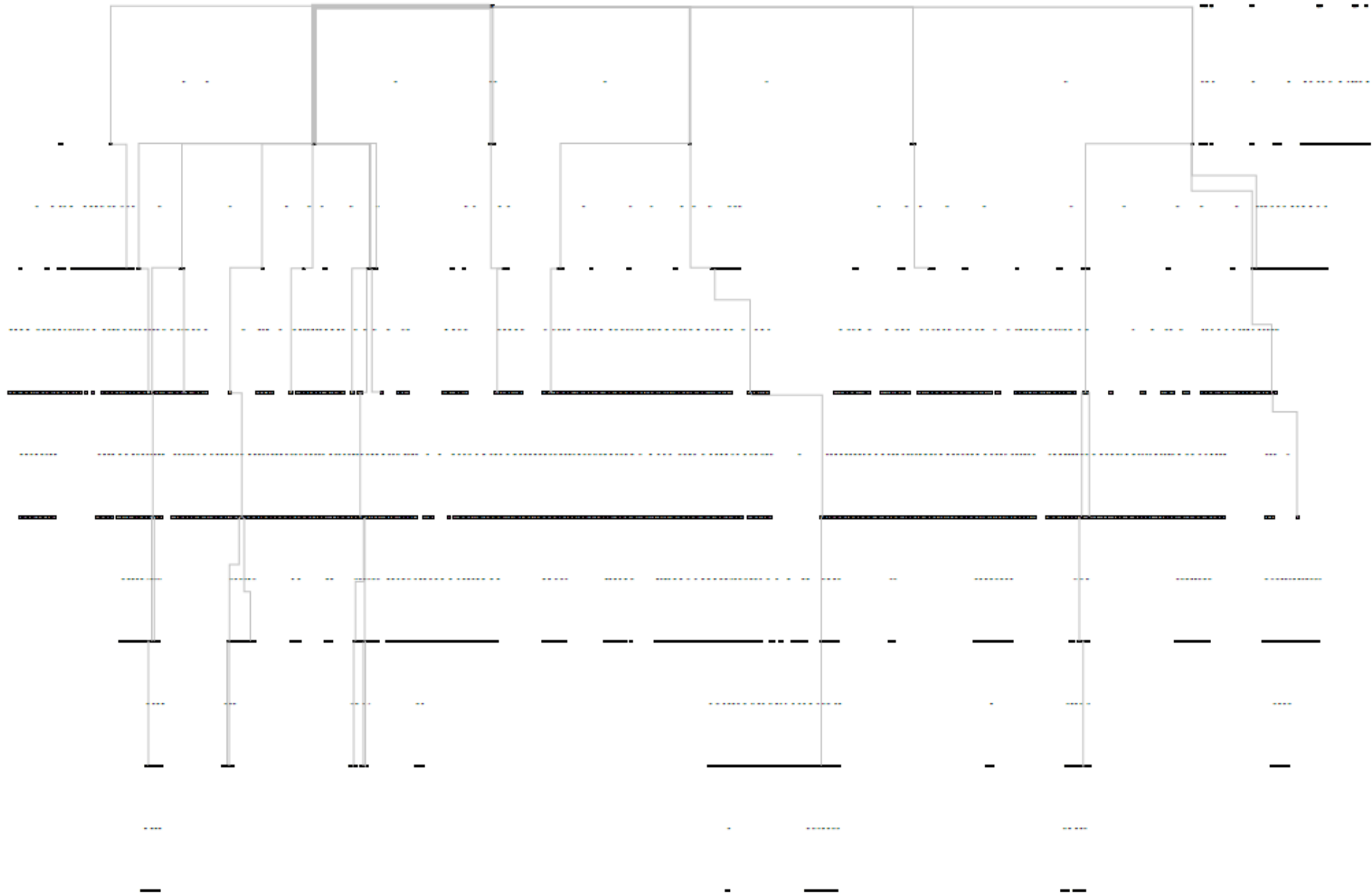


輸送(単体・20km)		1	1	0	軽油	1.56
	トラック		0.12	0		0
				0		0
トラック		5000	5000	0		0
	高張力鋼		2200	0		0
	鋼板		1800	0		0
	アルミニウム鋳物		250	0		0
	ガラス繊維強化プラスチック		120	0		0
	天然ゴム		450	0		0
	ポリプロピレン		80	0		0
	ポリウレタン		70	0		0
	銅線		25	0		0
	半導体シリコン		15	0		0
	金		0.002	0		0
	白金		0.005	0		0
	塗料		25	0		0
	ネオジム		0.01	0		0
	ジスプロシウム		0.005	0		0

# 事務机 TCFP



# 事務机 TMR





# ライフサイクル・シナリオでの議論

- 例: 事務機の「売り切り」「リマン」「リファービッシュ」「シェアリング」の効果の環境側面(CFPやTMR)からの検討

寿命10年、実使用5年として

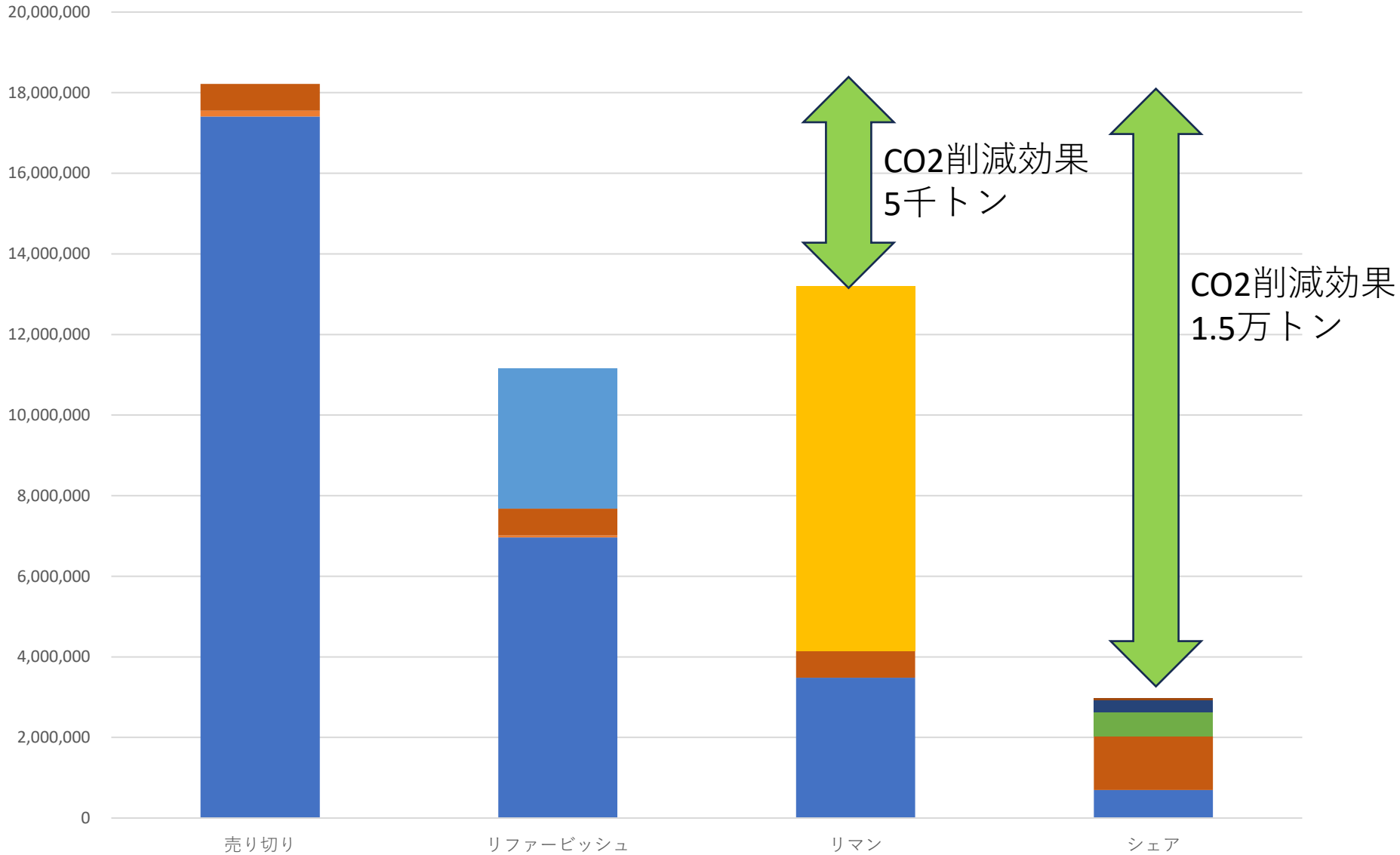
- Sold out: 初期1万 5年 需要を満たさない所有 5年  
5年後 1万 新規買い  
10年後 1万新規買い 1万廃棄  
15年後 1万新規買い 1万廃棄  
20年後 1万新規買い 1万廃棄
- Refurbish: 初期1万 5年後 Rf1万  
10年後 Rf1万  
15年後 1万新規 1万廃棄  
20年後 Rf1万
- Remanufacturing: 初期1万 5年後 Rm1万 10年後 Rm1万 15年後 rm1万 20年後 Rm1万 計Rm4万
- Sharing: (1台で5人分の需要を満たすとして)  
新規 2000、10年ごとにリフレッシュ 2回で 4000  
修理 3年に一回 6回 で 12000  
清掃 利用者交代 (2年に一回)10回 20000

事務机1万人20年売り切り	1	1
事務机		50000
事務机使用后処理		30000
輸送(単体・20km)		50000
事務机1万人20年リファービッシュ	1	
事務机		20000
事務机使用后処理		10000
事務机リファービッシュ		30000
輸送(単体・20km)		50000
事務机1万人20年リマン	1	
事務机		10000
事務机リマン		40000
輸送(単体・20km)		50000
事務机1万人1台5人分シェア	1	
事務机		2000
事務机シェアリングリフレッシュ		4000
事務机シェアリング修理		12000
事務机シェアリング清掃		20000
輸送(単体・20km)		100000

事務机リファービッシュ		1	1	8	天然ガス	1
	スチール部品		2.44949	0		0
	MDF板		3.162278	0		0
	塗装材		0.387298	0		0
	接着剤		0.1	0		0
	スチール部品		0.2	0		0
	潤滑油		0.05	0		0
	溶接材		0.1	0		0
	廃液処理		0.1	0		0
				0		0
事務机リマニュファクチャリング		1	1	15	軽油	2.5
	スチール部品		4.898979	0		0
	MDF板		6.324555	0		0
	塗装材		0.632456	0		0
	プラスチック部品		0.316228	0		0
	潤滑油		0.1	0		0
	溶接材		0.244949	0		0
	接着剤		0.2	0		0
	廃液処理		0.2	0		0
				0		0
				0		0
事務机シェアリング清掃		1	1	0.3		0
	清掃剤		0.1	0		0
	清掃クロス		0.007071	0		0
	圧縮空気		0.06	0		0
				0		0
				0		0
事務机シェアリング修理		1	1	3		0
	スチール部品		1.414214	0		0
	接着剤		0.1	0		0

# 事務機20年1万人使用TCFP

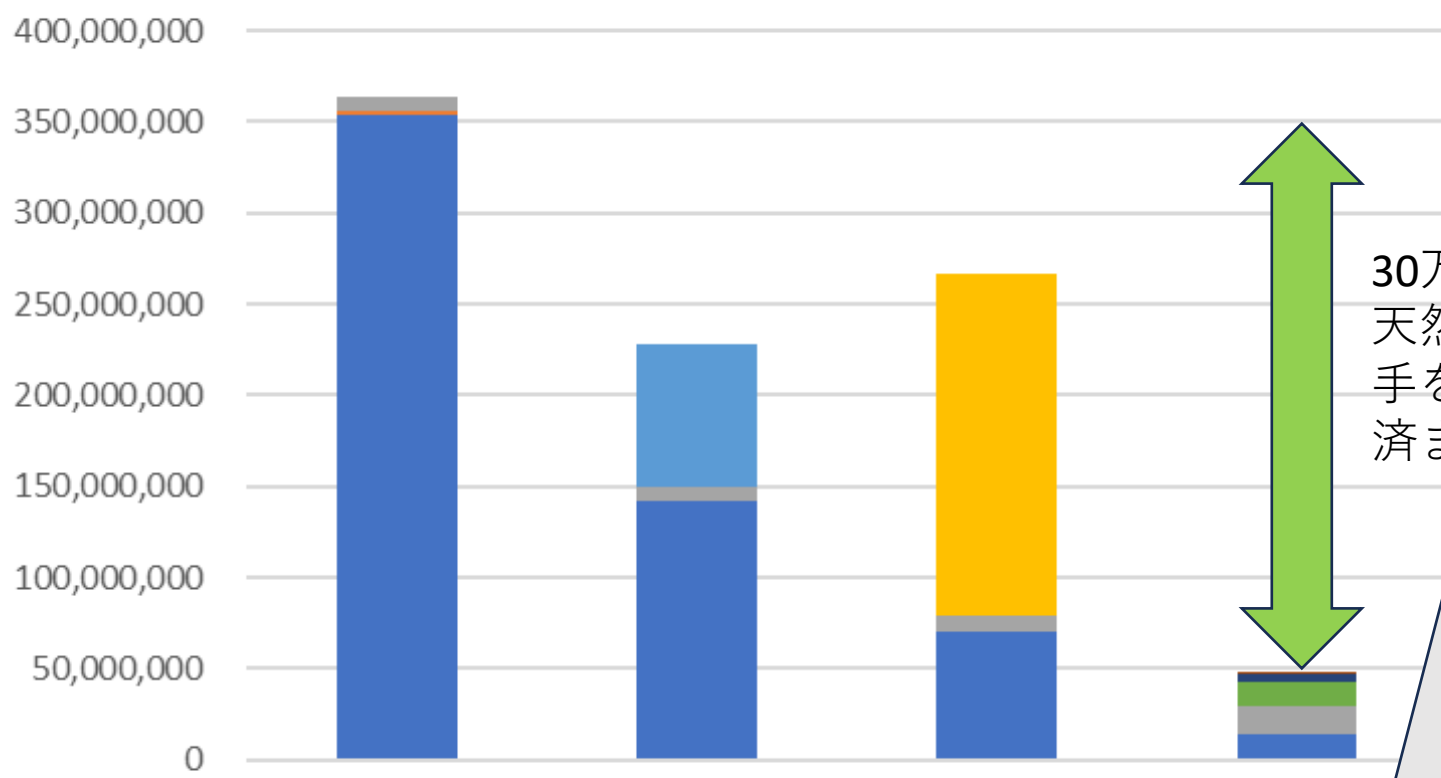
■ 事務機 ■ 使用後処理 ■ 輸送 ■ リマニュファクチャリング ■ リファービッシュ ■ リフレッシュ ■ 修理 ■ 清掃





# 事務機20年1万人使用TMR

■ 新規 ■ 処理 ■ 輸送 ■ リマン ■ リファーピッシュ ■ リフレッシュ ■ 修理 ■ 清掃



30万トンの天然資源に手を付けずに済ませる

直接扱うのは延べ500トン

これからがLCA

- サプライチェーン履歴遡及のLCAから
- 使用方法・ライフサイクル管理のシナリオ分析へ
- 過去の反省ではなく、未来志向のディスカッション



# 市民のためのLCA

- みんなが使えて、みんながチェックできるLCAへ
- ISO-SEATAC型LCAの「約束事」からの解放
- LCAの数値が、科学的な数値(誰もが検証可能で、客観性のある)として、みんなが共通の議論ができる。

# 市民の使い方

- 購買品の選択
- 日常生活のグリーン度のチェック
- 入手・使用・処理システムの検討  
(どのバリューチェーンを利用するか)
- より環境負荷の少ない社会システムの発案と実践

# これからのLCA

- LCAをあやつめる特殊な人だけでなく
- 様々な分野の専門家がLCAを使う時代
- pythonのgraphic処理や、パワーポイントをみんながつかいこなすように
- 市民が容易にLCAのデータを手にして、議論できるようになる。

# 資源端からのTMR算定における革新的手法

- 基本1: **多言語処理型AI**を活用したデータマイニング

スモールモジュール化によるプロセス分割  
総合的フローの資源端までの追跡

- 基本2: **専門家知識**とのコラボレーションによるチェック
- 基本3: **オープン・アクセス・データ**化によるパブリック検証と修正

新時代だ!



# HALADA's ZOOMroom 9:30-11:30

## ZOOM ID 627325485 open

1月	<	>			
日	火	水	木	金	土
		1	2	3	4
	7	8	9	10	11
3	14	15	16	17	18
0	21	22	23	24	25
7	28	29	30	31	



2025年2月	<	>				
日	月	火	水	木	金	土
						1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	

<https://www.jicoo.com/t/57G>

[f7fXEfAn/e/uR-\\_wev8r3yl](https://www.jicoo.com/t/57Gf7fXEfAn/e/uR-_wev8r3yl)

からご都合のよい時間をお  
選びください。

# サステナビリティ周期表

ver41204

関与物質総量 & トータルカーボンフットプリント編

He

4.16E4  
2.38E3

H

TMR  
7.05E2  
TCFP  
6.00E1

- 関与物質総量 (TMR:)
- トータルカーボンフットプリント (資源端基準CFP)

Li

Li2CO3  
1.39E2  
8.56E0

Be

1.14E4  
7.42E2

Na

NaOH  
1.59E2  
1.89E1

Mg

1.25E3  
8.54E1

K

KCl  
1.57E3  
1.21E2

Ca

CaO  
4.31E1  
4.43E0

Sc

7.87E2  
4.23E3

Ti

3.14E3  
2.14E2

V

V2O5  
6.27E2  
2.41E1

Cr

1.60E3  
7.17E1

Mn

3.16E2  
3.46E1

Fe

9.52E1  
5.97E0

Co

5.77E3  
2.78E2

Ni

3.02E3  
1.76E2

Cu

1.14E3  
4.65E1

Zn

3.61E2  
1.76E1

Ga

1.04E4  
6.57E2

Ge

8.45E4  
5.24E3

As

1.67E3  
9.81E1

Se

7.12E4  
2.73E3

Br

1.20E5  
5.30E3

Kr

1.28E4  
3.23E1

Rb

RbCl  
3.34E4  
1.10E3

Sr

SrCO3  
4.40E2  
3.14E1

Y

Y2O3  
3.84E4  
3.34E3

Zr

1.19E3  
8.51E1

Nb

7.58E2  
5.65E1

Mo

5.72E3  
5.04E2

Tc

-

Ru

4.77E7  
2.51E6

Rh

4.77E7  
2.51E6

Pd

1.44E6  
1.03E5

Ag

1.91E5  
7.90E3

Cd

8.30E5  
5.15E4

In

8.35E5  
5.18E4

Sn

1.70E4  
5.80E2

Sb

1.04E2  
6.02E0

Te

2.08E5  
7.66E3

I

3.46E5  
7.48E3

Xe

1.83E4  
6.15E1

Cs

CsCl  
2.06E4  
7.53E2

Ba

BaSO4  
2.30E2  
2.06E1

(Ln)

-

Hf

1.28E4  
1.04E3

Ta

5.18E3  
3.57E2

W

1.04E3  
8.24E0

Re

6.11E4  
5.46E3

Os

9.68E7  
5.09E6

Ir

9.68E7  
5.09E6

Pt

1.59E7  
8.36E5

Au

1.85E8  
1.78E6

Hg

1.12E3  
5.86E1

Tl

4.95E3  
2.72E2

Pb

1.32E2  
8.03E0

Bi

3.02E2  
1.61E1

Po

-

At

-

Rn

9.86E6  
6.73E5

Fr

-

Ra

1.08E6  
4.70E4

La

La2O3  
2.75E4  
2.39E3

Ce

CeO2  
1.38E4  
1.20E3

Pr

1.24E5  
1.08E4

Nd

3.06E4  
2.61E3

Pm

-

Sm

3.93E5  
3.41E4

Eu

Eu2O3  
3.83E5  
3.33E4

Gd

Gd2O3  
1.92E5  
1.67E4

Tb

1.24E6  
1.07E5

Dy

3.06E5  
2.66E4

Ho

Ho2O3  
7.81E6  
6.78E5

Er

Er2O3  
9.58E5  
8.31E4

Tm

Tm2O3  
3.17E7  
2.57E6

Yb

Yb2O3  
5.52E6  
4.80E5

Lu

Lu2O3  
5.52E7  
4.79E6

Ac

-

Th

9.23E4  
2.84E3

Pa

-

U

U2O3  
8.69E4  
7.51E3



サステナビリティ技術設計機構

代表: 原田幸明

物剤機構名誉研究員

contact; office@susdi.org

算定根拠データはオープンアクセスです。

<https://lca.sdgoods.net/tmr-tcfp-jp/>

