

---

**「エネルギーチェーンのシステム最適化」研究会**  
**『炭素生産性を高めるシステムと技術の革新』シンポジウム開催案内**

---

低炭素型製鉄所の実現には技術革新と行動変容が不可欠である。本研究会ではこれまでに討論会を通じて、製鉄所内エネルギーの利用効率の最大化に向けたシステムックアプローチによるシステム技術の適用可能性と、さらには、システムック最適化の概念・定義を議論してきた。

本シンポジウムでは、エネルギー・資源循環の分野で活躍される研究者をお招きし、炭素生産性の向上に貢献するシステムと技術の最前線を共有する。鉄鋼エネルギーチェーンの構築に向けた諸課題を議論し、エネルギーチェーンの本質とシステムック最適化の方法論確立に向けた討論を期待したい。

1. **日時**：2025年9月17日（水）13:30-16:20

2. **場所**：北海道大学 札幌キャンパス 高等教育推進機構2階 E206 （第190回秋季講演大会 会場6）  
〒060-0808 北海道札幌市北区北8条西5丁目  
JR線「札幌」駅 北口改札から構内まで徒歩約7分

3. **プログラム**：

13:30-13:35 開会の挨拶

摂南大学 諏訪 晴彦

座長 富山県立大学 榊原 一紀

13:35-14:20 「脱炭素の背後にある複合的環境問題」(P.2-66)

立命館大学 山末 英嗣

14:20-15:05 「鉄鋼業におけるにおける2つのC (CN・CE)への対応：ライフサイクル思考の活用」  
(P.67-93)

千葉大学 松野 泰也

15:05-15:15 休憩

座長 神戸大学 藤井 信忠

15:15-16:00 「ヒートポンプ技術の期待と課題」(P.94-128)

神戸大学 浅野 等

16:00-16:20 総合討論

4. **資料**：配布資料あり

5. **参加費**：無料

6. **申込方法**：当日申込

【シンポジウムのみに参加される方】

講演大会当日、大会受付にてお申込みください。(WEB申込は不要です)

【講演大会に参加される方】

別途、参加登録が必要です。協会WEBページ (<https://www.isij.or.jp>)をご確認いただき、  
期間内にお申込みください。

7. **問い合わせ先**：

JFE スチール DX 戦略本部 吉成 有介 (研究会企業幹事)

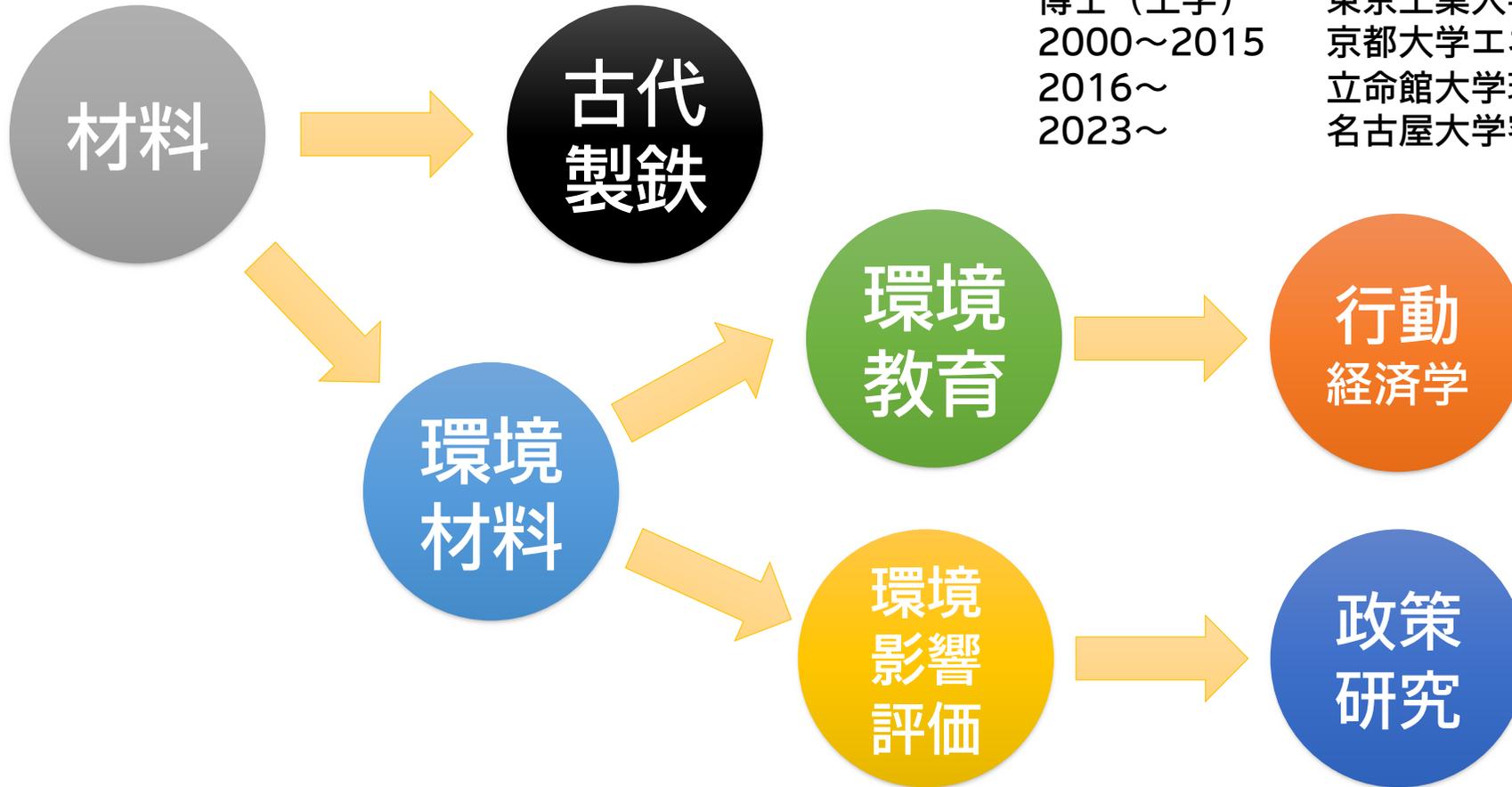
E-mail: y-yoshinari@jfe-steel.co.jp

2025.9.17 於 日本鉄鋼協会 「炭素生産性を高めるシステムと技術の革新」シンポジウム



## 脱炭素の背後にある複合的環境問題

立命館大学 山末英嗣



山末英嗣 (やますえ えいじ)

山口県出身1974年3月生

博士 (工学)

2000~2015

2016~

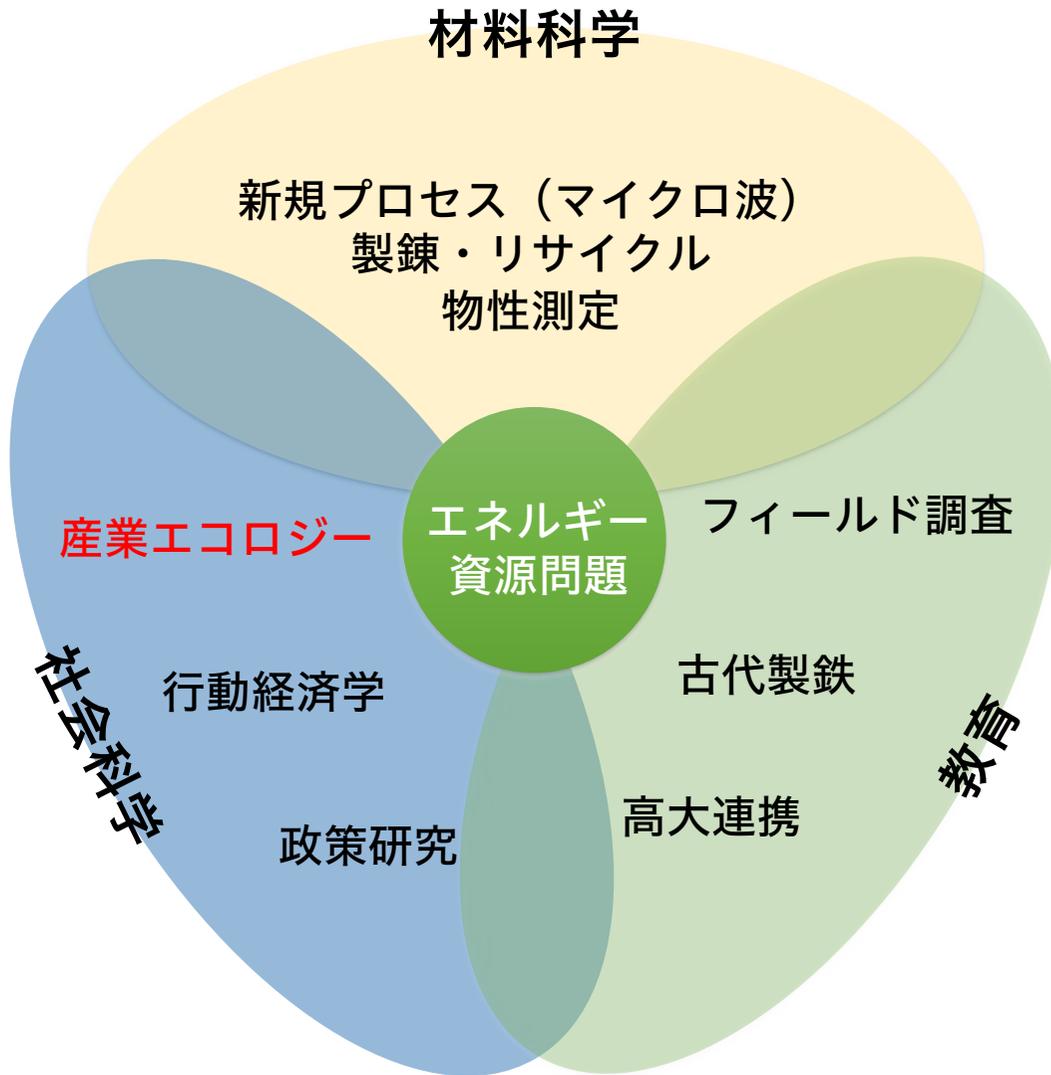
2023~

東京工業大学

京都大学エネルギー科学研究科

立命館大学理工学部

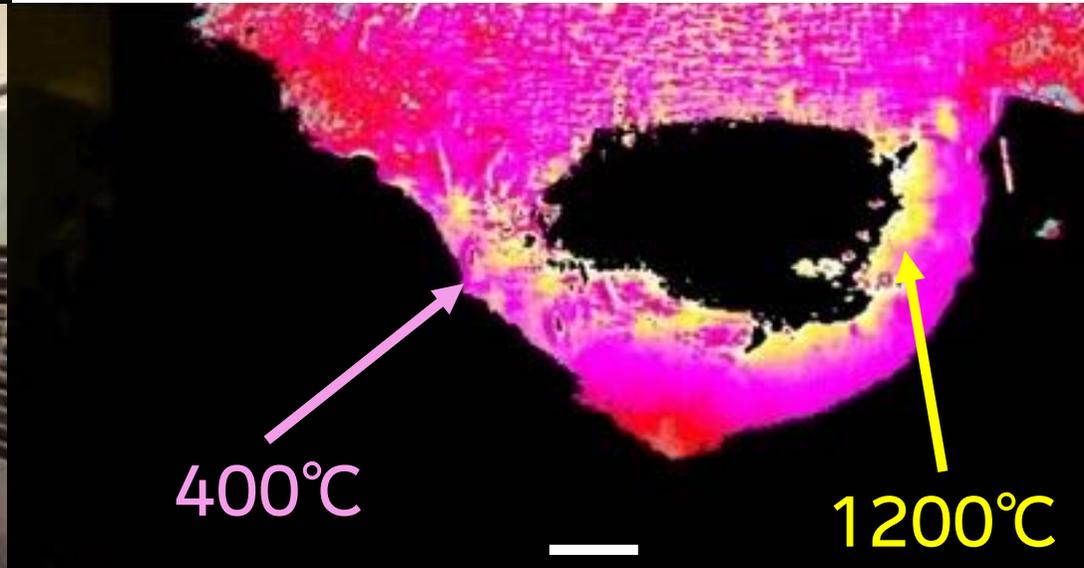
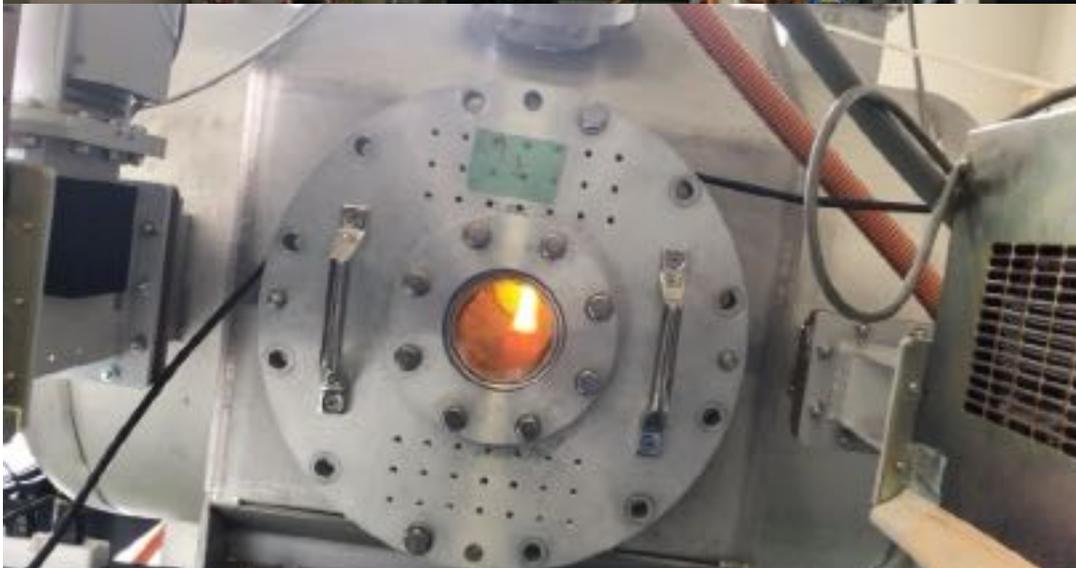
名古屋大学客員教授



# マイクロ波を用いた製錬・リサイクル（マイクロ波メタラジー） 4/51



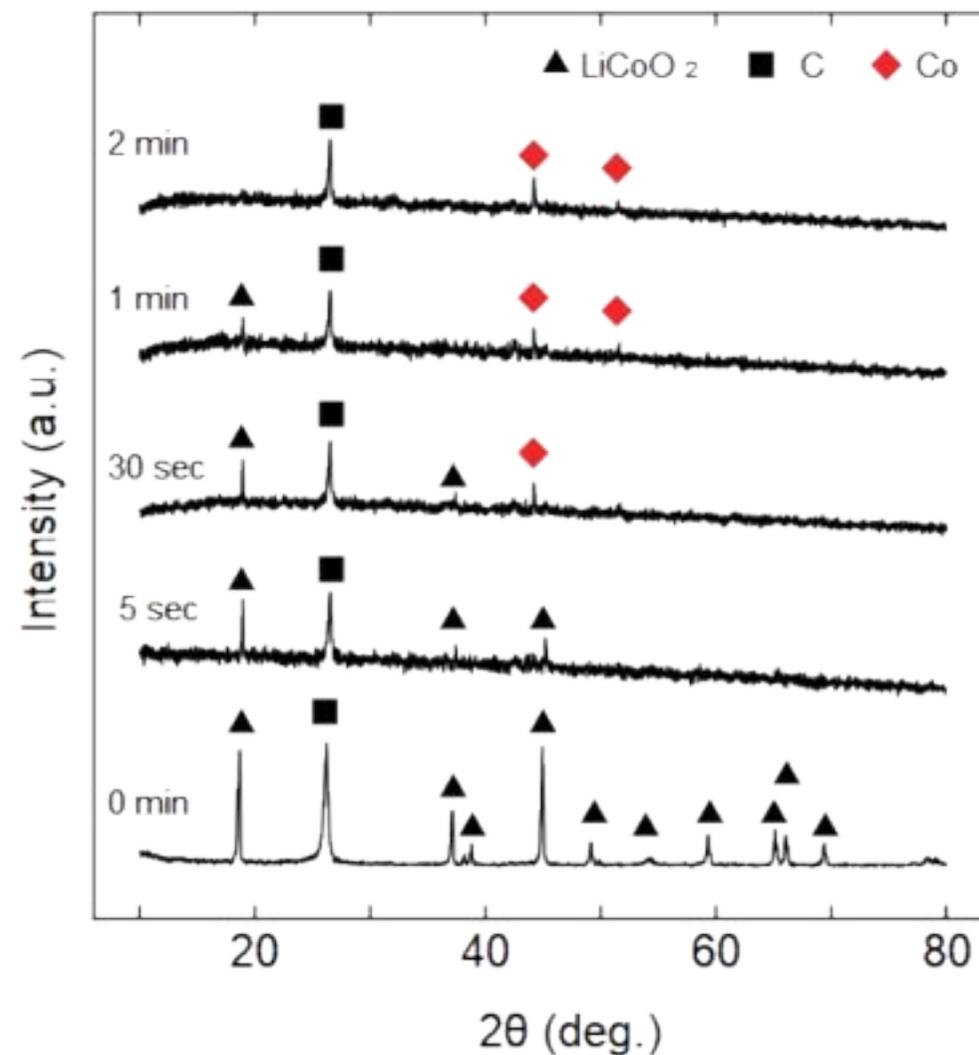
従来より**低温・高速**  
従来とは**異なる反応経路**  
小型化しても**効率が落ちにくい**  
分散型リサイクルへの応用



金属コバルトが

- 空気雰囲気での
- 600°C程度の低温下における
- 30秒程度のマイクロ波処理で得られた

同条件の電熱炉による加熱で実現できない高速性（局所加熱）



問診票：  
食事, 体重, 排泄

方法：  
レントゲン, 血液検査, 心電図, 胃カメラ

⇒ **病気の見える化**

処方箋・治療方針：  
生活指導・お薬

⇒ **病気に対する対策**

問診票：

資源・エネルギー消費, 物質ストック, 廃棄物, 二酸化炭素

方法：

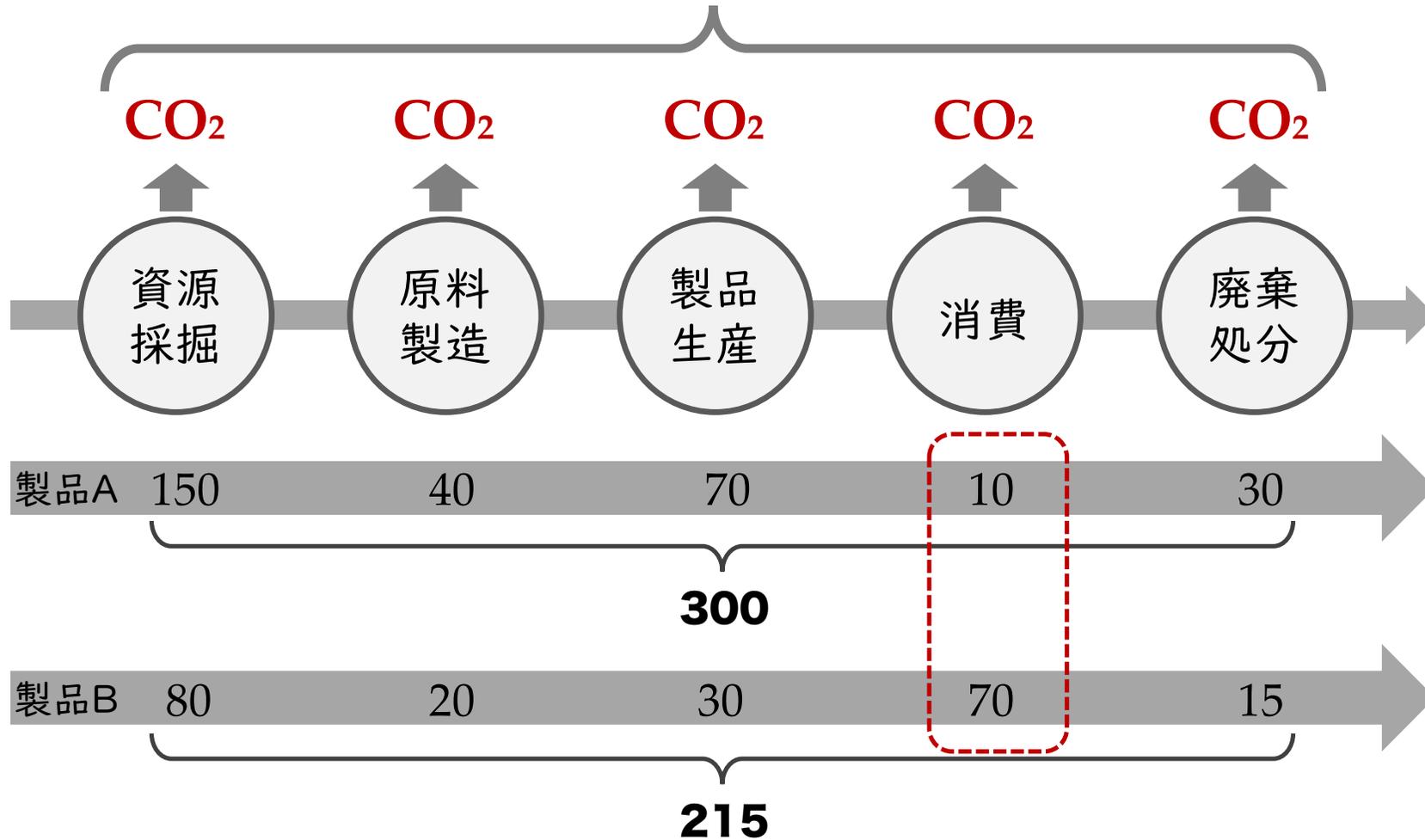
マテリアルフロー分析, ライフサイクル分析

⇒ **社会的病巣の見える化**

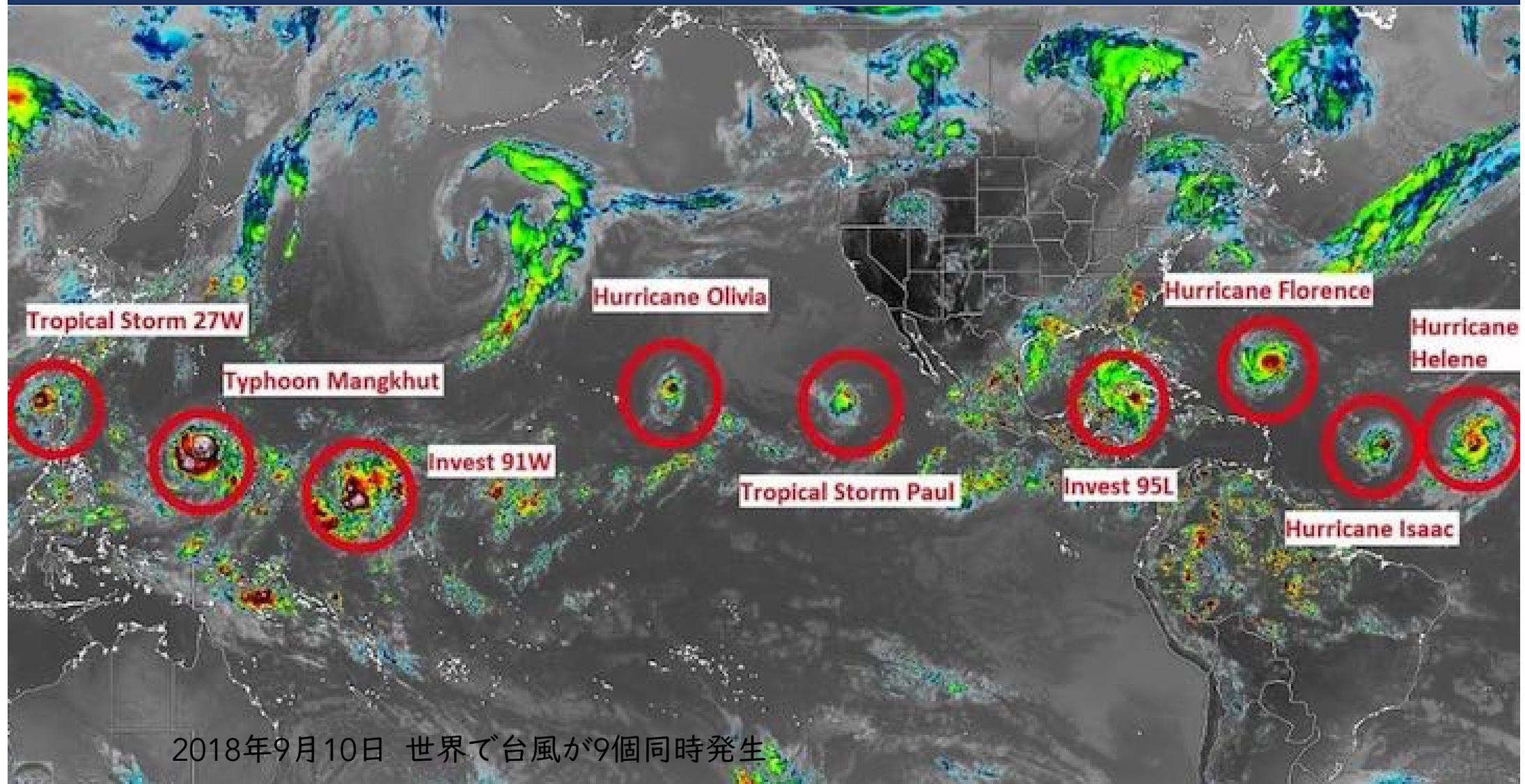
処方箋・治療方針：  
政策, 規制, 技術開発

⇒ **社会的病巣に対する対策**

全てのプロセスの環境負荷を原料採取から処分段階まで含めて評価









# 注目するのは地球温暖化だけでいいのか？

健康診断には色々な指標がある

産業の健康診断はなぜか「地球温暖化」に関するものばかり

経済活動の後（アウトプット）：温室効果ガス

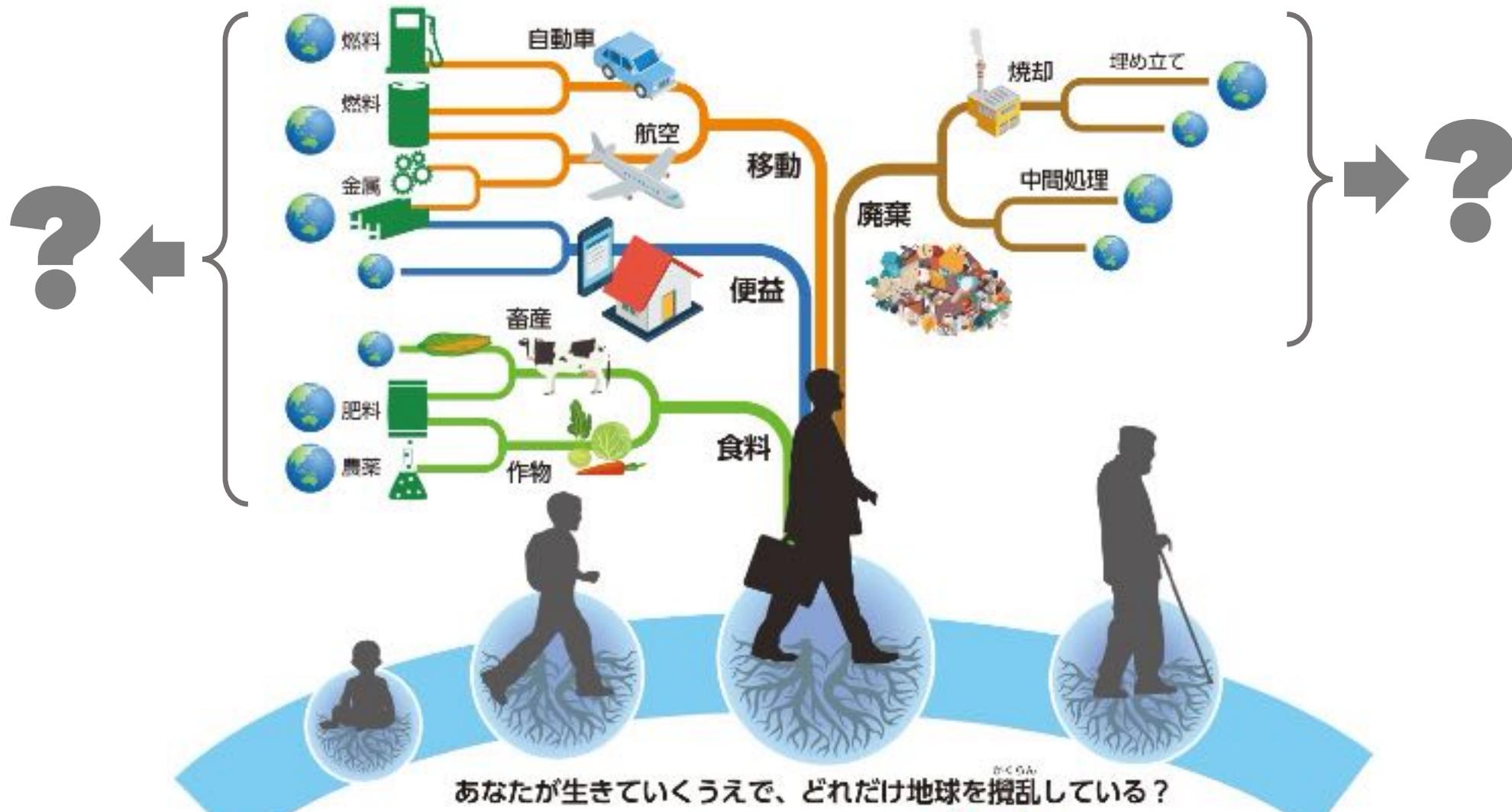
経済活動の前（インプット）：??????

何に注目すべき？



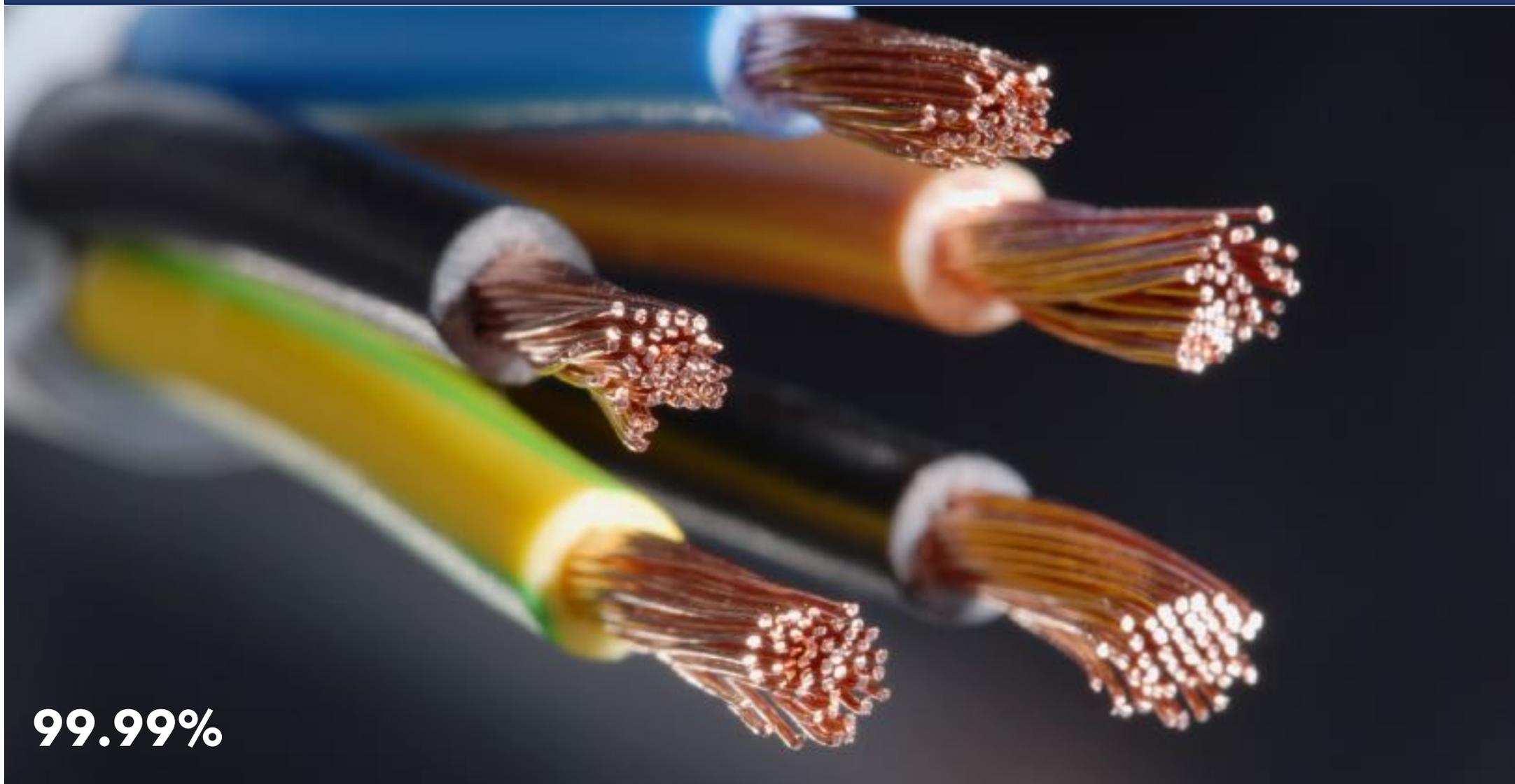
**採掘活動**は資源利用を評価する指標の1つ





# 銅はどうやって作られる??

15



99.99%



$\text{Cu}_2\text{S}$ ,  $\text{CuFeS}_2$ ,  $\text{CuS}$ ,  
 $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$

**0.5~0.8%**

# 銅鉞山



# 銅鉞山

18



こんな風になっている

19



積載量：300t

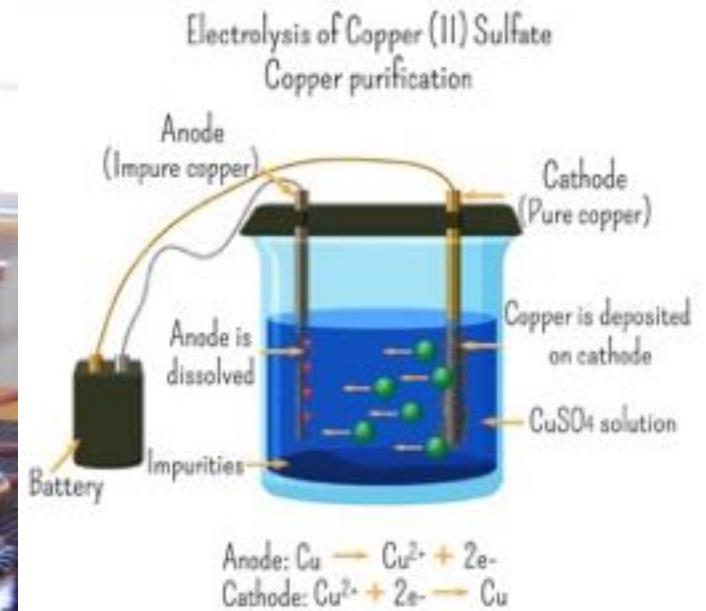
20

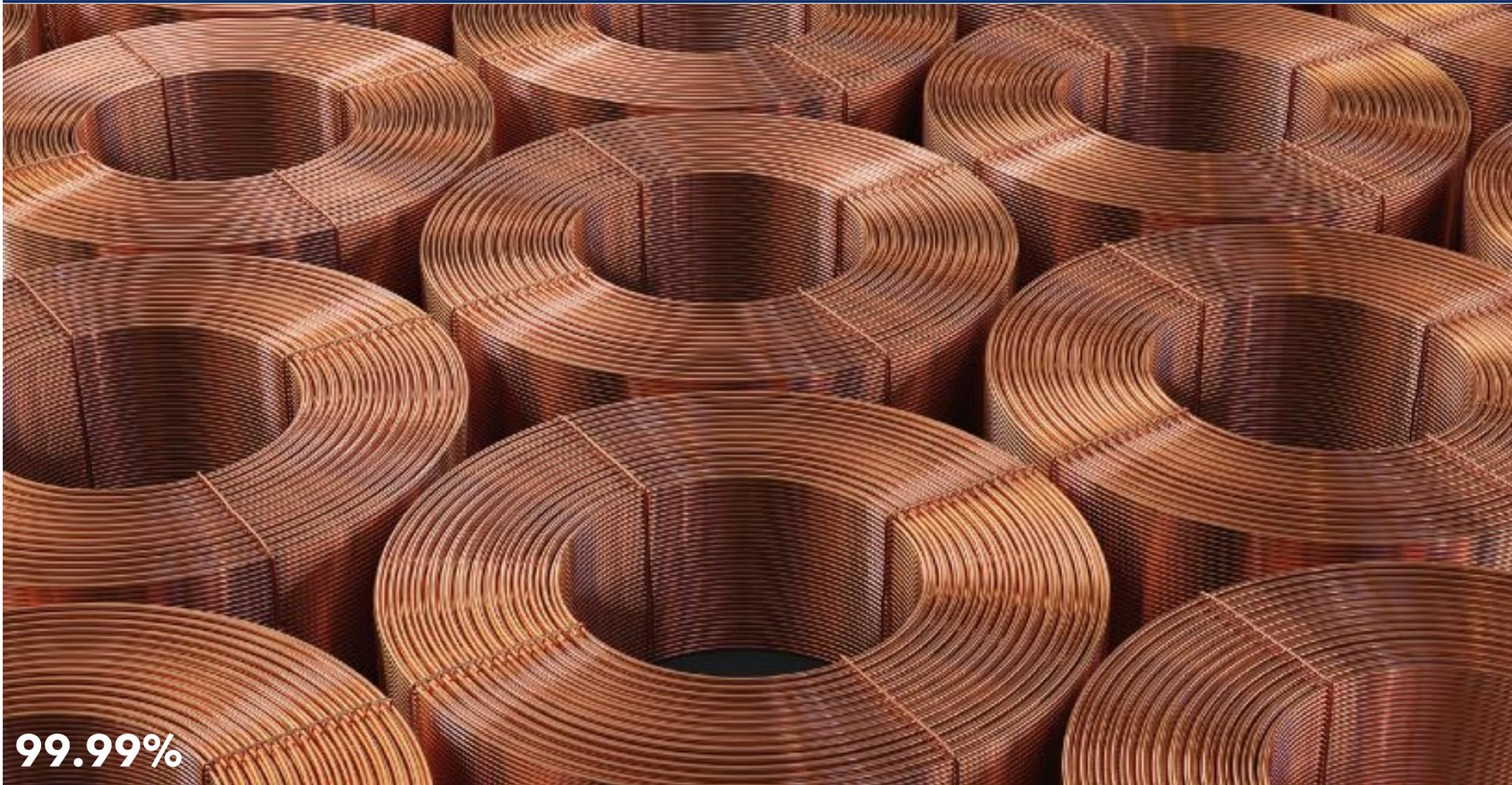






99%





99.99%

## セルビアの銅鉱山





2015年11月にラジル南東部ミナスジェライス州のサマルコ鉄鉱石鉱山で死者19人を出しベント・ロドリゲス村を壊滅

2019年1月25日，ブラジルミナス州ブルマジーニョの鉱山ダム決壊事故．死者259人、行方不明者11人  
ヴァーレの時価総額は約2兆円以上下落

ブルマジーニョ尾鉦ダム決壊事故(2019年1月25日), 死者259人、行方不明者11人

27



# 採掘活動がもたらす影響：生物多様性損失

28/51

ニューカレドニアのニッケル鉱山



ニューカレドニアの固有種（カグー）





六価クロムによるとと思われる皮膚病

フィリピンのニッケル鉱山において、  
テーリングダムの上澄み液を海に流す  
→ 珊瑚礁や海洋生物の死滅

<https://www.chosyu-journal.jp/shakai/23133>

日本の古代製鉄  
(たたら製鉄)



現在の枠組みだと完全な  
カーボンニュートラル



- 砂鉄の採掘に伴う表土の流出
- 河床の上昇による下流域の洪水多発
- 樹木の伐採：たたら1基で年間60haの木材を消費
- 堆積した土砂を用いた新田開発
- 原材料や製品の運搬のための馬生産

**温暖化には影響を与えないが、他の環境要因に対して長期的に影響を与えている可能性**

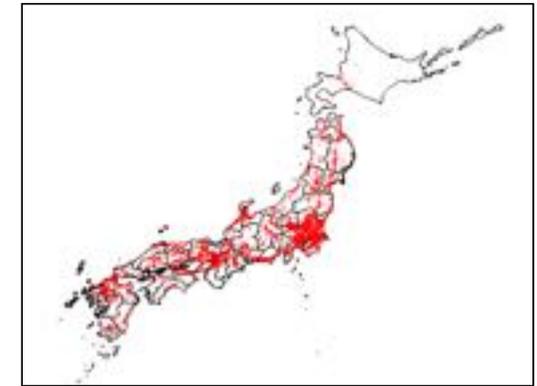
## ■ 遺跡データベース (Morimoto 2006, 2013)

奈良文化財研究所から提供

400,000点を超える遺跡について、

位置、年代、土地利用タイプが記録

## ■ 先史時代からの土地利用パターンの変化を 時代別・土地利用別に推測することができる



日本における遺跡分布



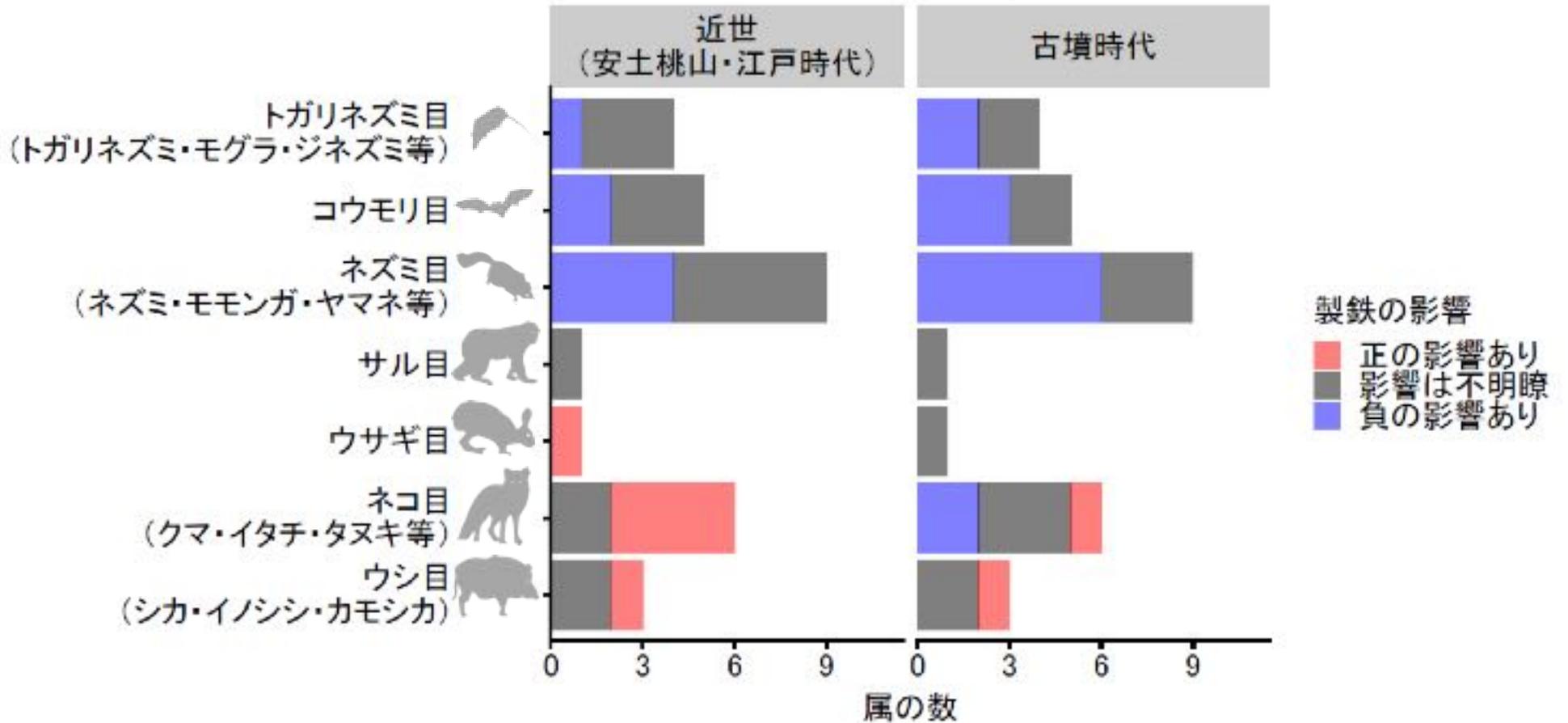
集落



製陶 (窯)



製鉄 (たたら場)



小型哺乳類に対する負の効果が複数の時代で検出  
 近世では中大型哺乳類に対する正の効果



# ムササビは大木に穴を空けて巣を作る

37/51



日本の小動物の生息分布は，現在においても千年前の「たたら製鉄」の影響を受けている

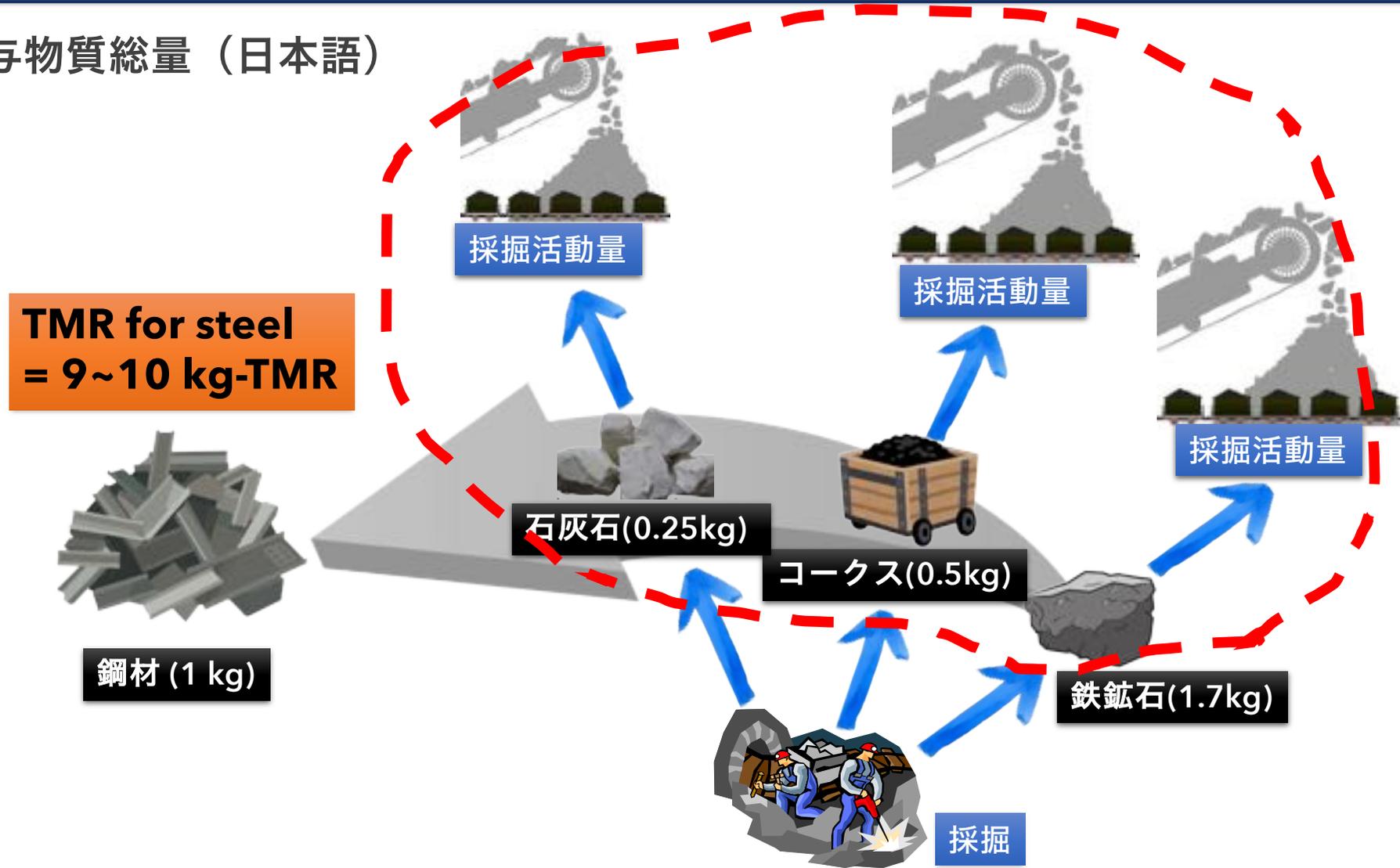


<https://www.nature.com/articles/s41598-019-46809-1>

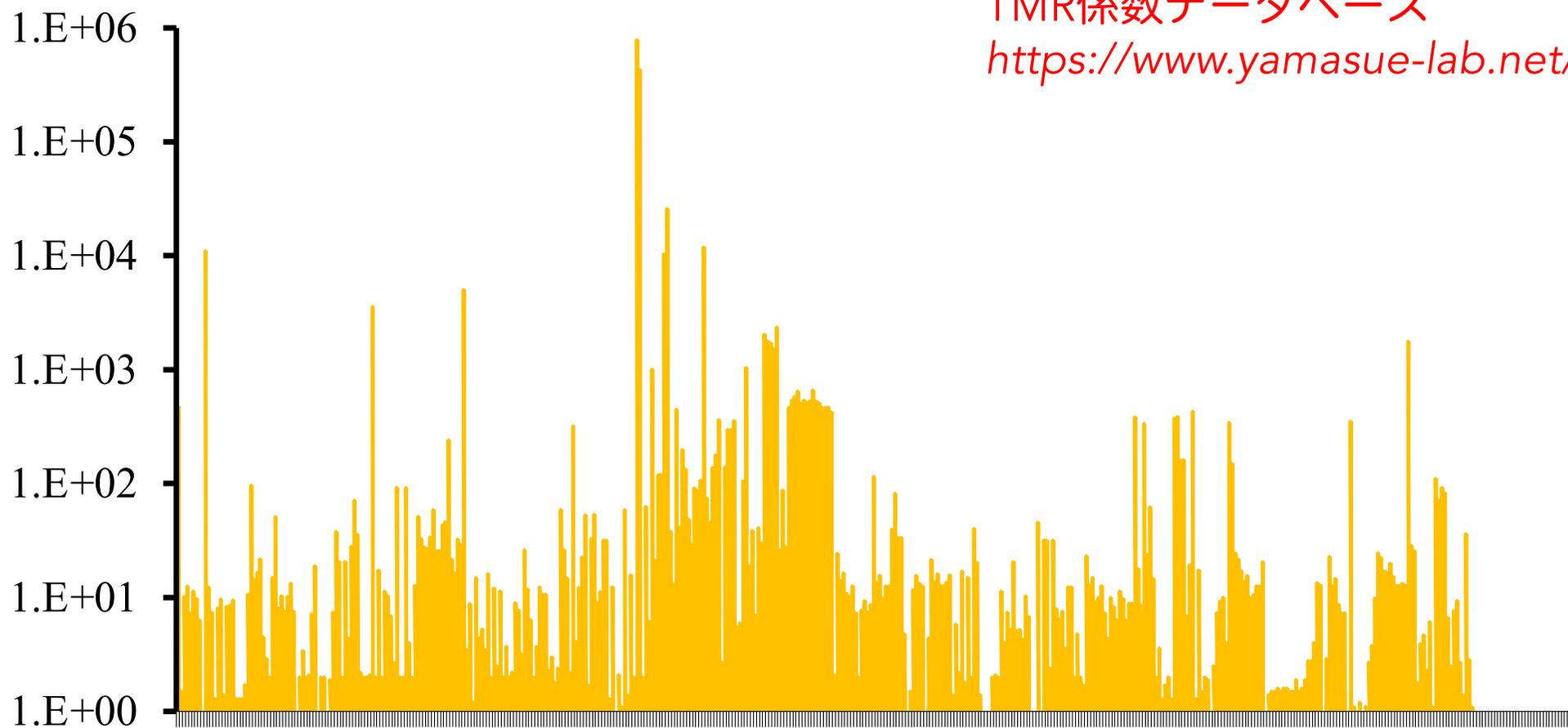
# 採掘活動の定量化：TMR, Total Material Requirement

39/51

関与物質総量（日本語）



1kgを得るために必要な採掘活動



TMR係数データベース

<https://www.yamasue-lab.net/>

材料, エネルギー, 食料, 化学薬品, 等々(1500種以上)

鋼材: 10~40 kg 

プラスチック: 10-70 kg 

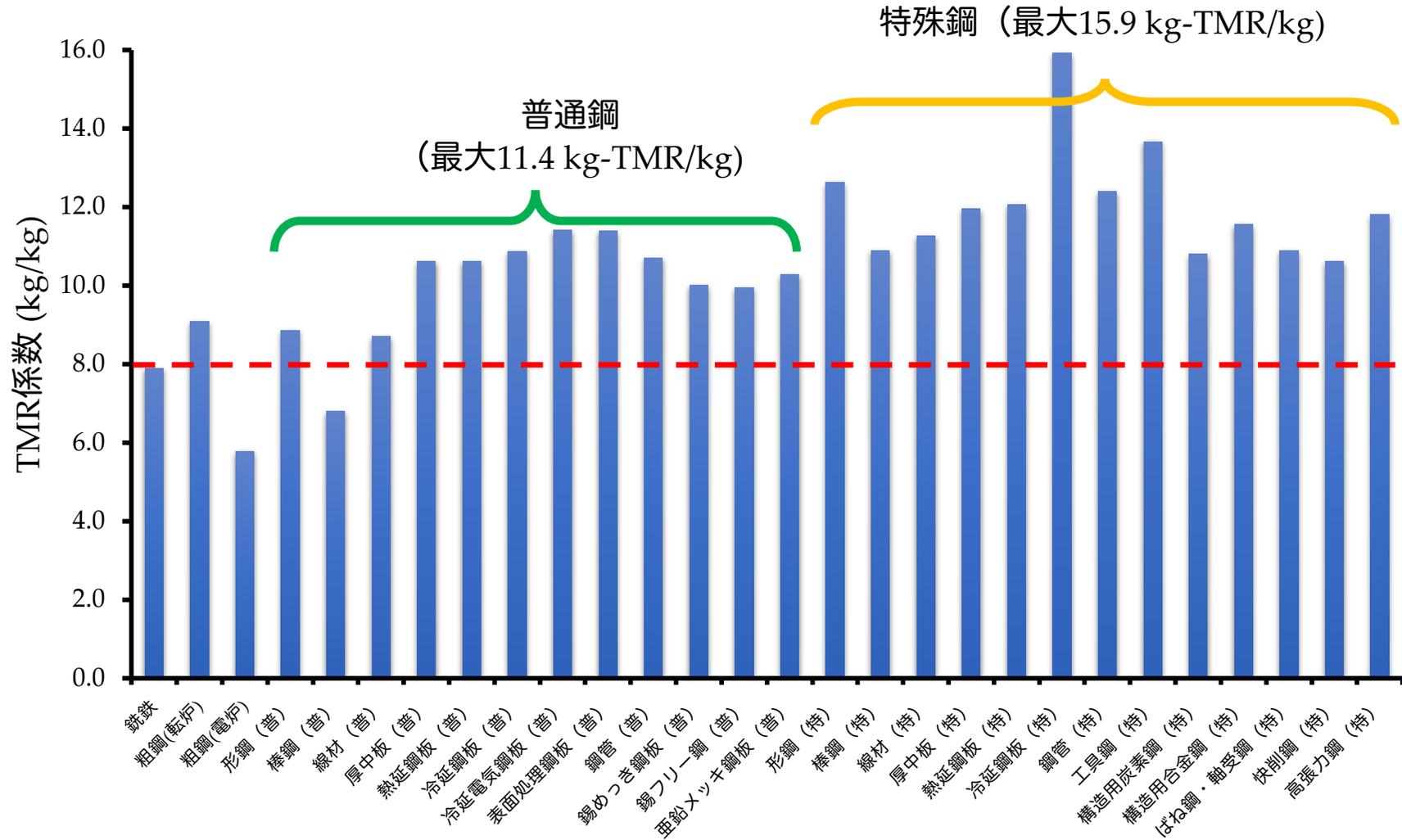
アルミニウム: 55-70 kg 

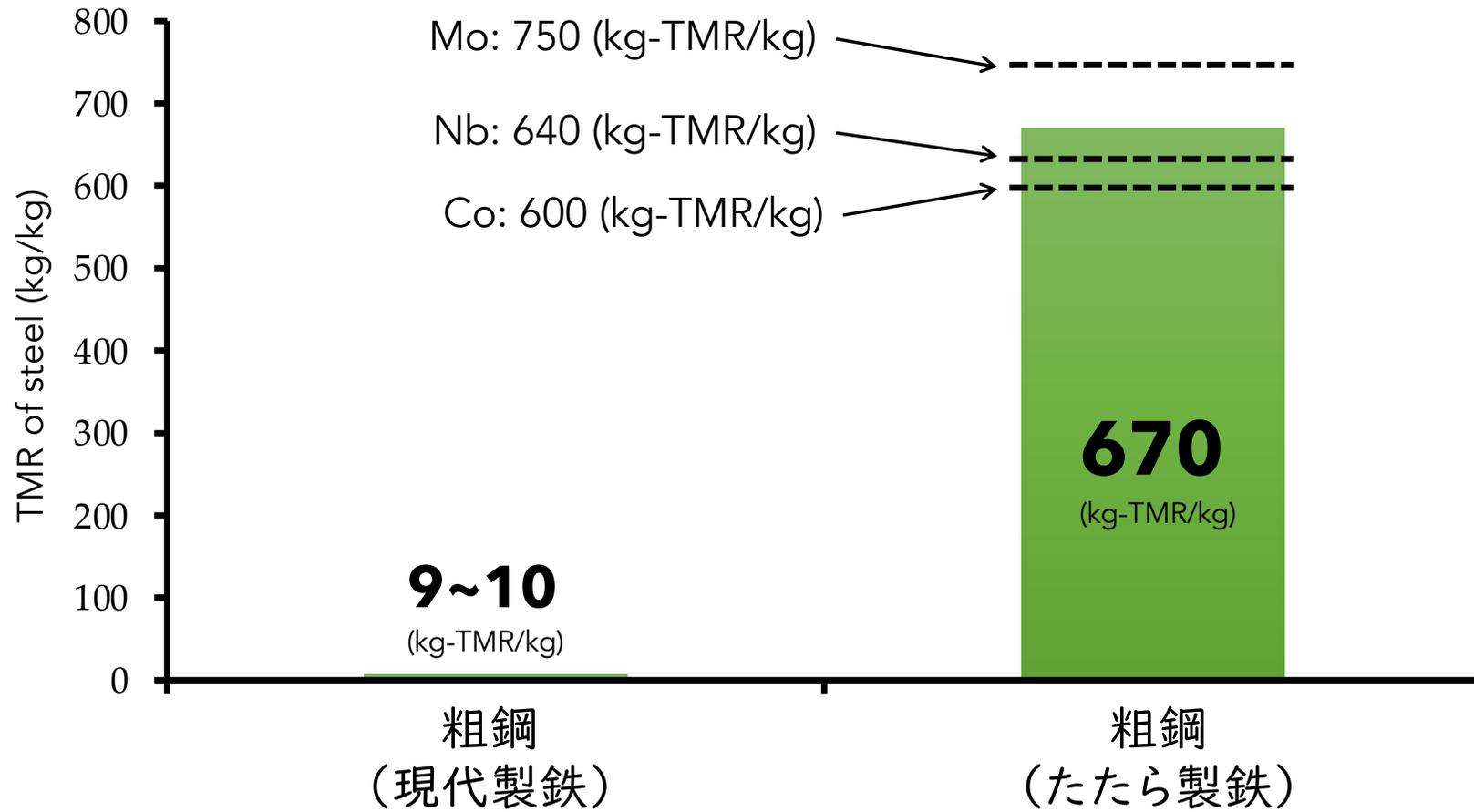
銅: 400~ kg 

金: 1,000,000 kg



# 鋼材の背後にある採掘活動 (TMR係数)







およその重さ:

**100~200** グラム

プラの量:

**50~100** グラム

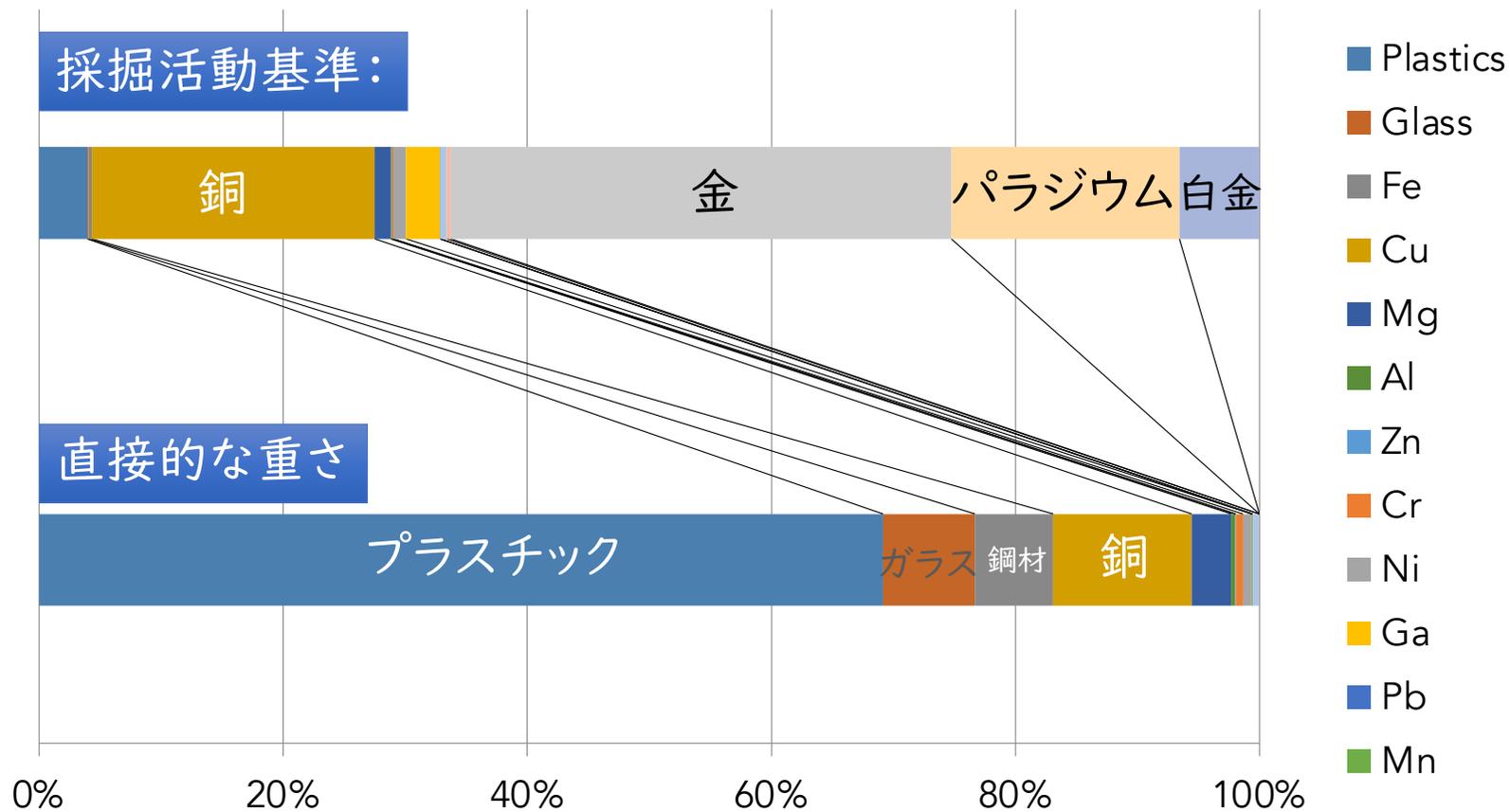
金の量:

**約0.003** グラム

採掘量:

**約40~50** キログラムTMR  
(9割以上が貴金属類)

# スマホの重さの内訳





室内機

66  
kg-TMR/kg



室外機

63  
kg-TMR/kg



従来型自動車

20  
kg-TMR/kg



次世代自動車

50~120  
kg-TMR/kg

エアコンのTMRはおよそハイブリッド車（リチウムイオン電池）と同程度

# The Resource Paradox Problem, 資源パラドックス問題

*Carbon Neutrality*



*Green Innovations*



*Additional Resources*



*Higher Resource Impact*



***New generation vehicles***



***Cu, Li, Nd, Dy, Co, Ni, graphite etc.***

**“資源パラドックス問題”**  
の具体的な事例をいくつか紹介します



**Nation**



Electric  
devices



**Vehicles**



**Electricity**



Foods



**Materials**

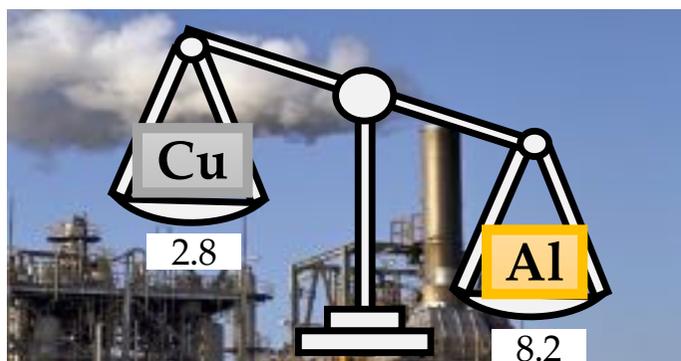
**Cu** 低品位  
還元容易



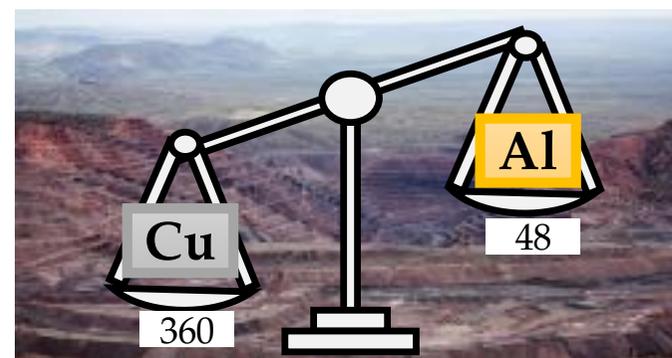
**Al** 高品位  
還元困難



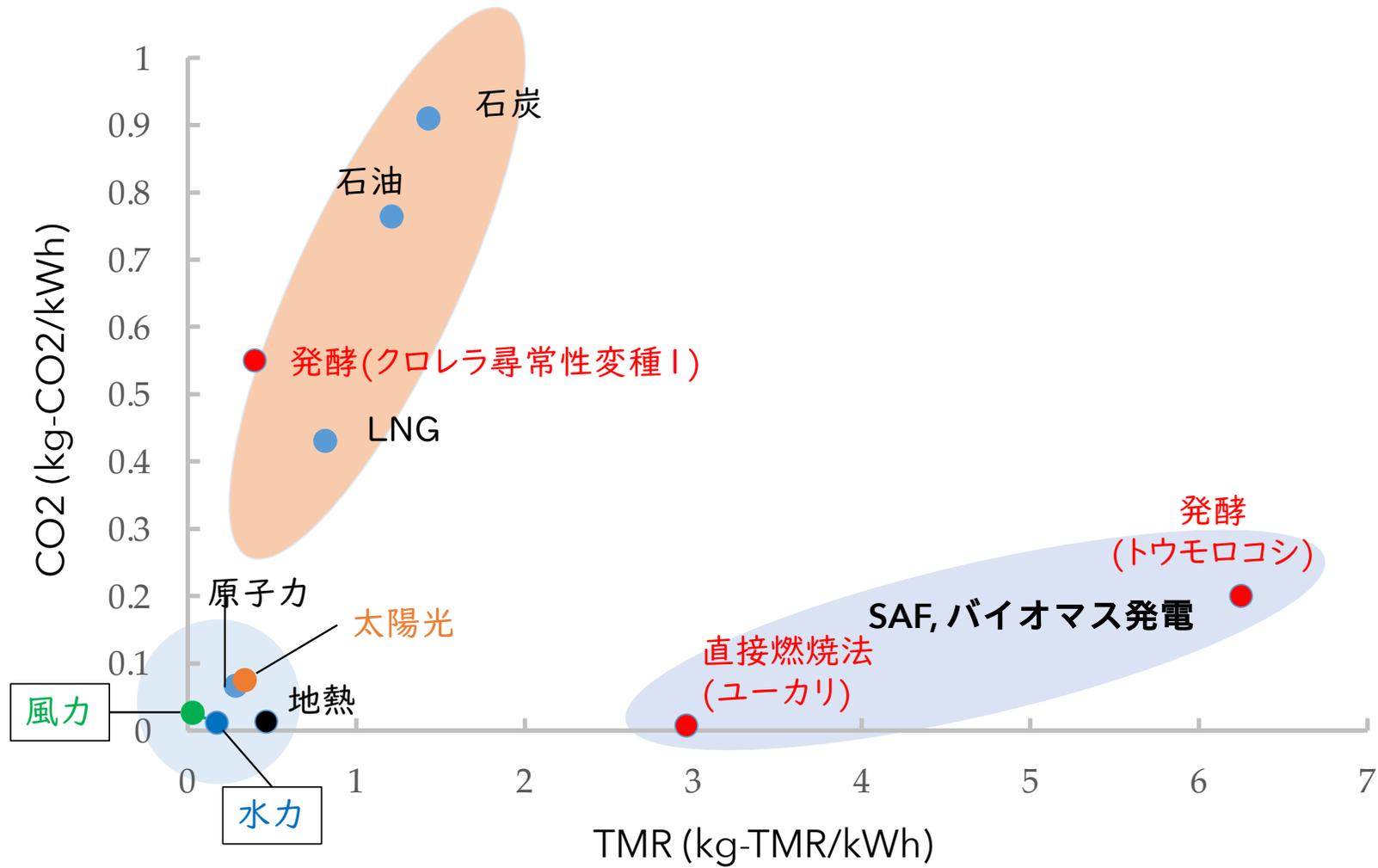
地球温暖化



採掘活動量

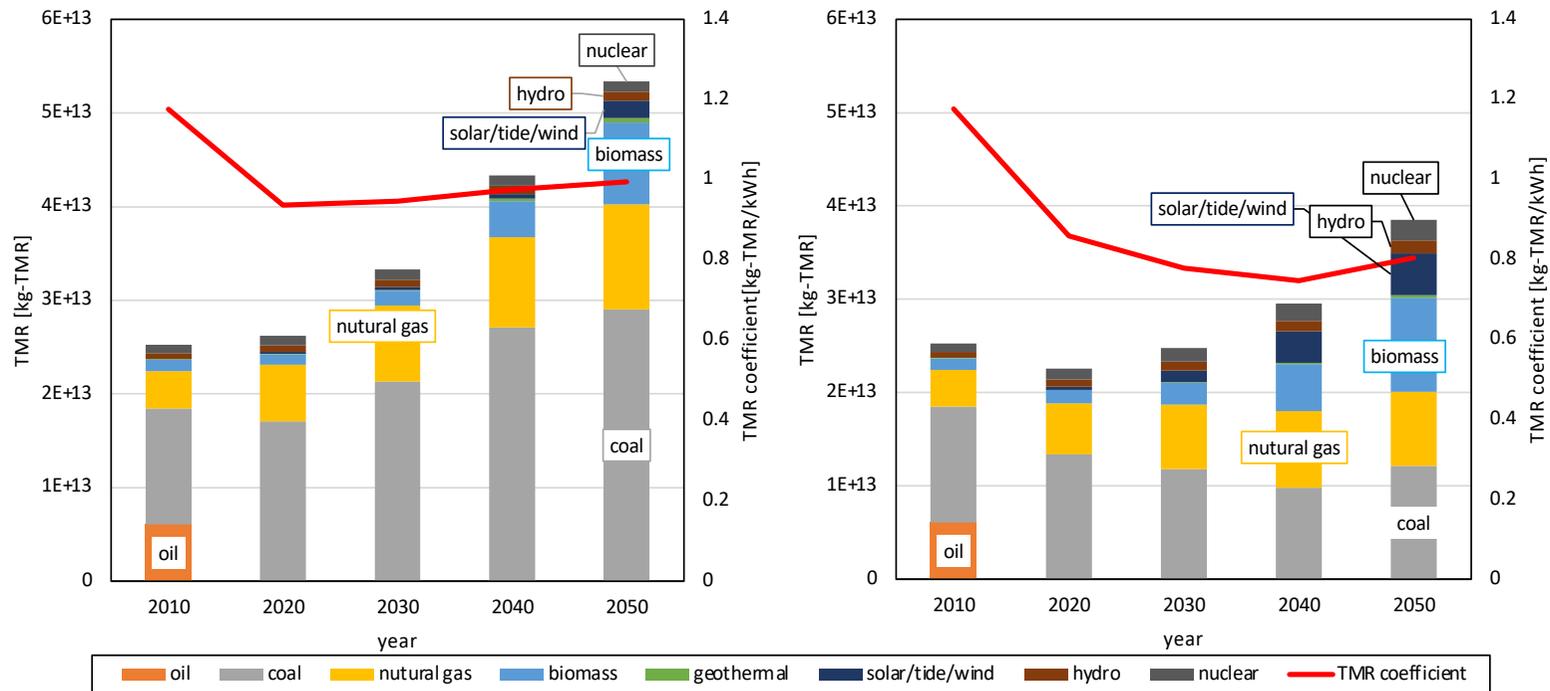


今まではこのような問題は薄々気づかれていたが**定量的に議論されていなかった**



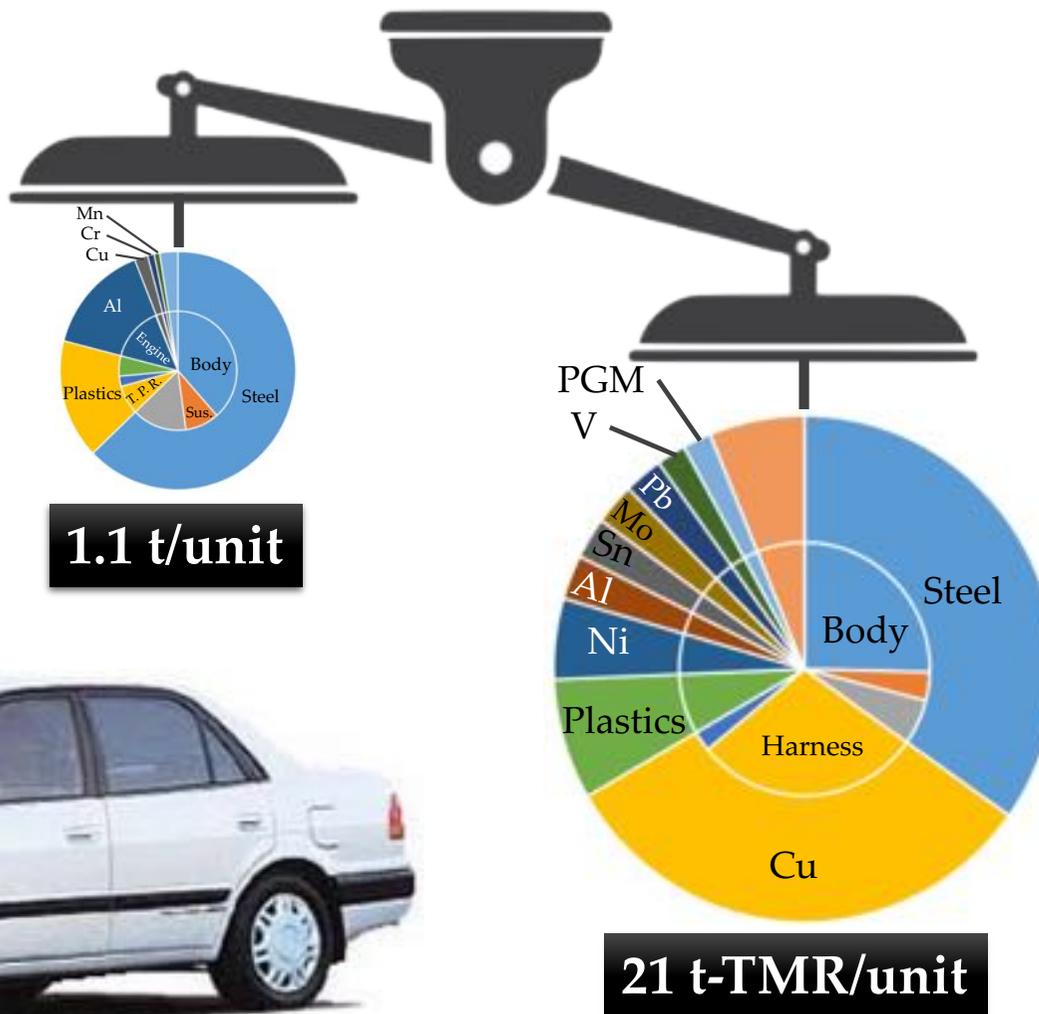
## Jazzシナリオ（経済優先）

## Symphonyシナリオ（環境視点）



1) World Energy Council, "World Energy Scenario, Composing energy future to 2050", 2013  
 2) Roberto Dones et al. Paul Scherrer Institut, Villigen, English version of the ecoinvent report No. 6-VII, ecoinvent, 2009  
 3) Comprehensive evaluation of life cycle CO2 emissions of power generation technology in Japan, center research institute of electric power industry, 2016

従来型自動車 (1992)



## 電気自動車



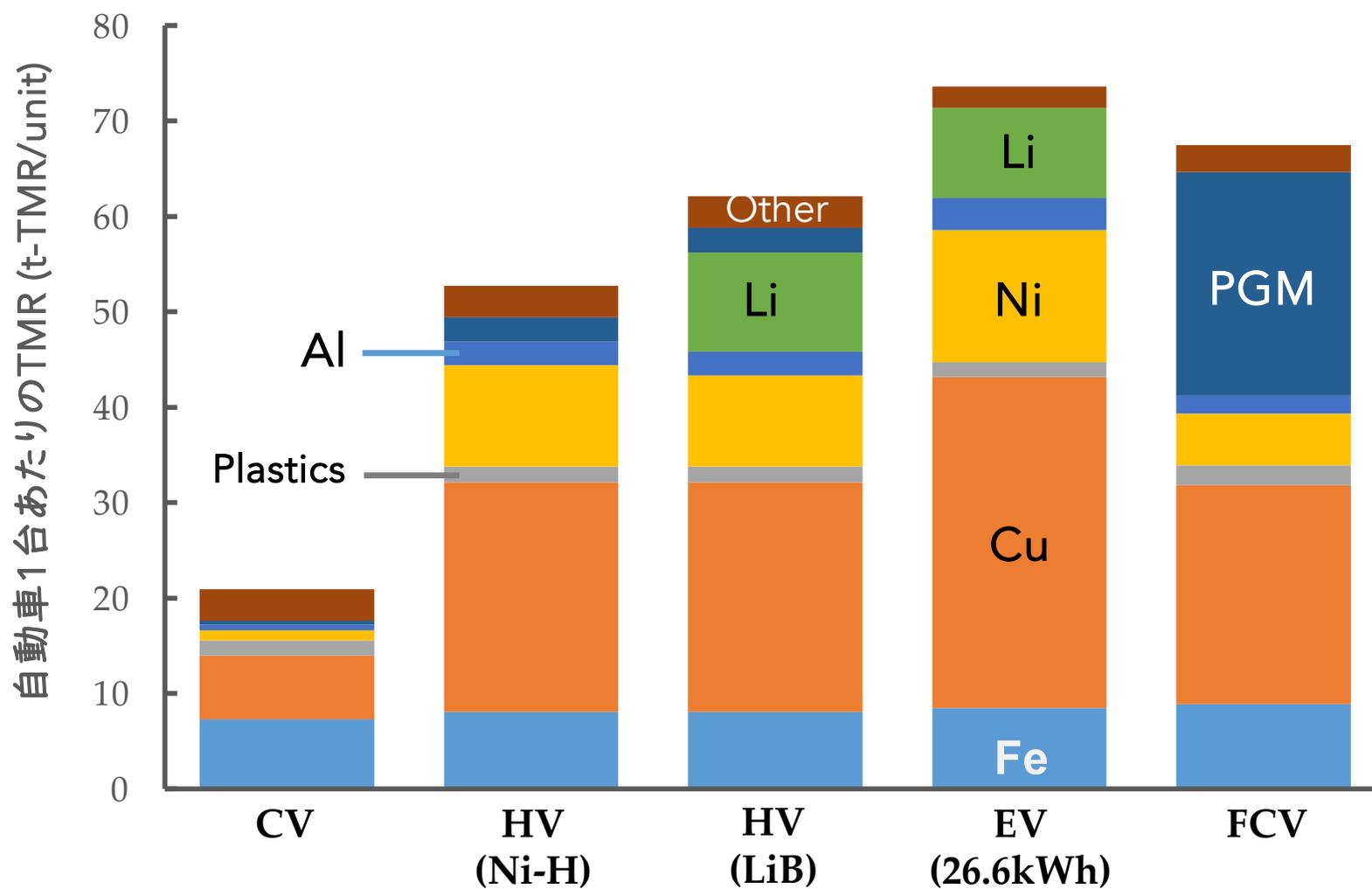
ニッケル, リチウム, コバルト, 銅など

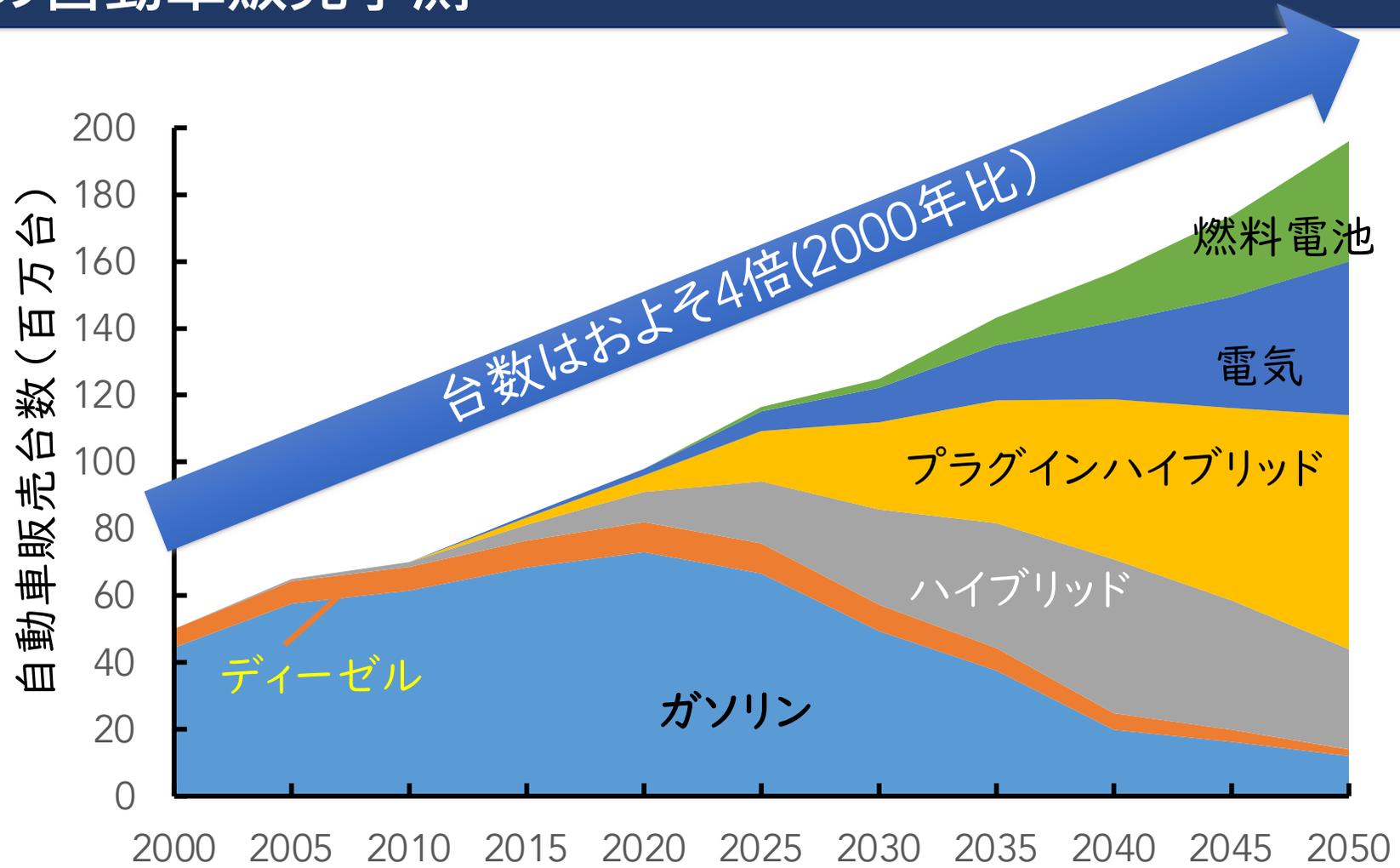
## 燃料電池車



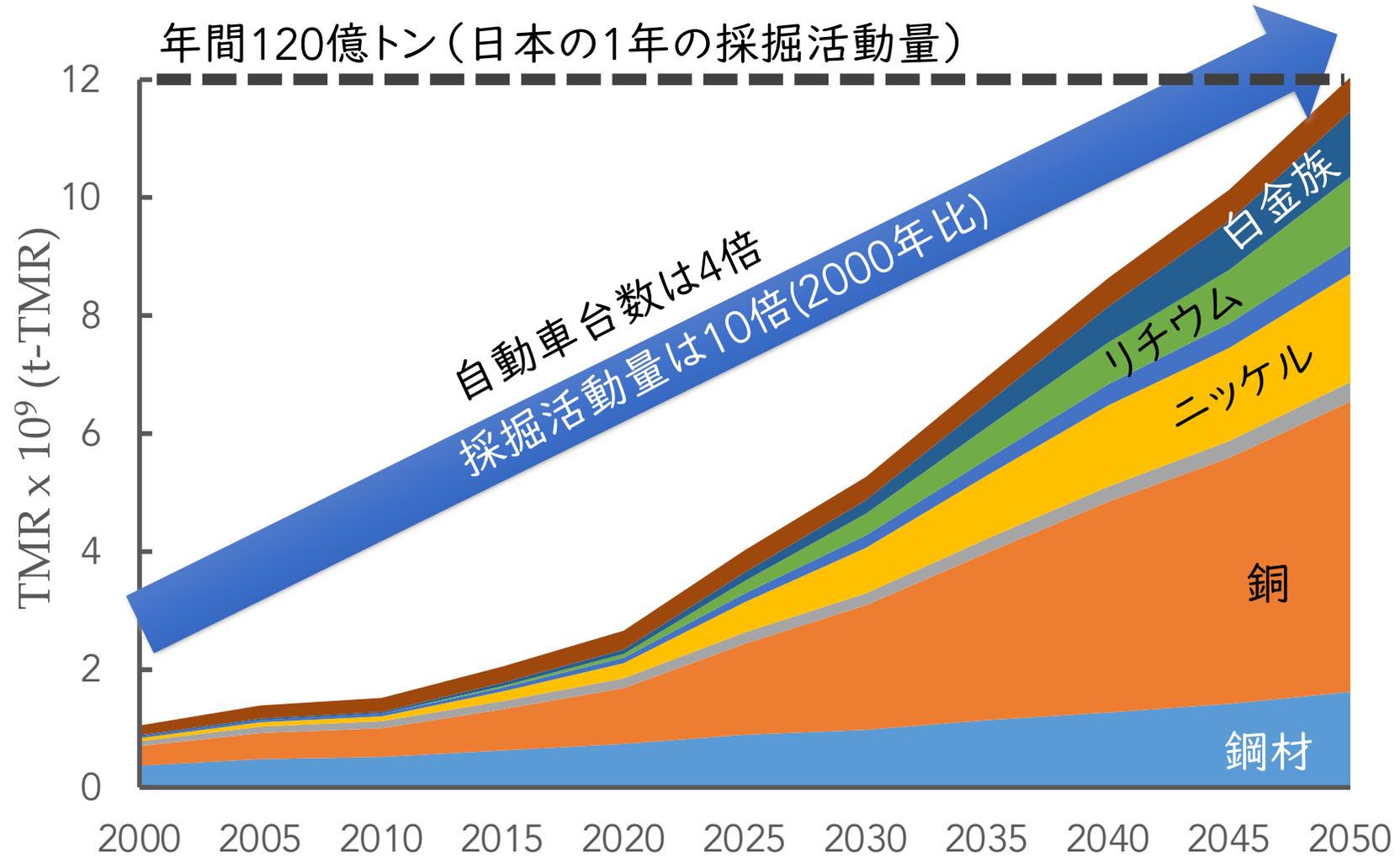
白金族(触媒)

# 次世代自動車の採掘活動量(TMR)





IEA/ETP (Energy Technology Perspective) 2012より



# 960E Komatsu: 327 t capacity

57



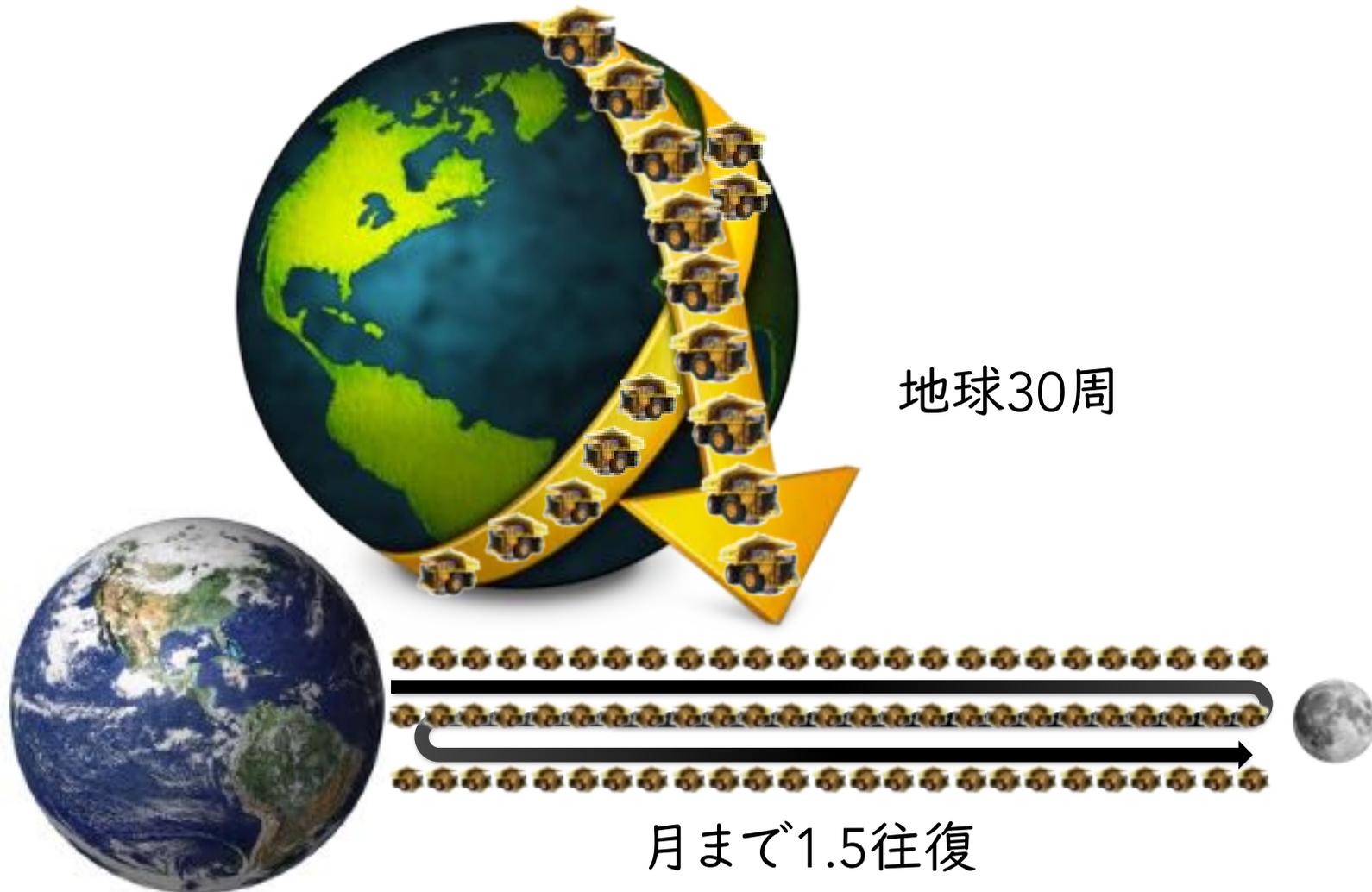
# 120億トンってどれくらい？

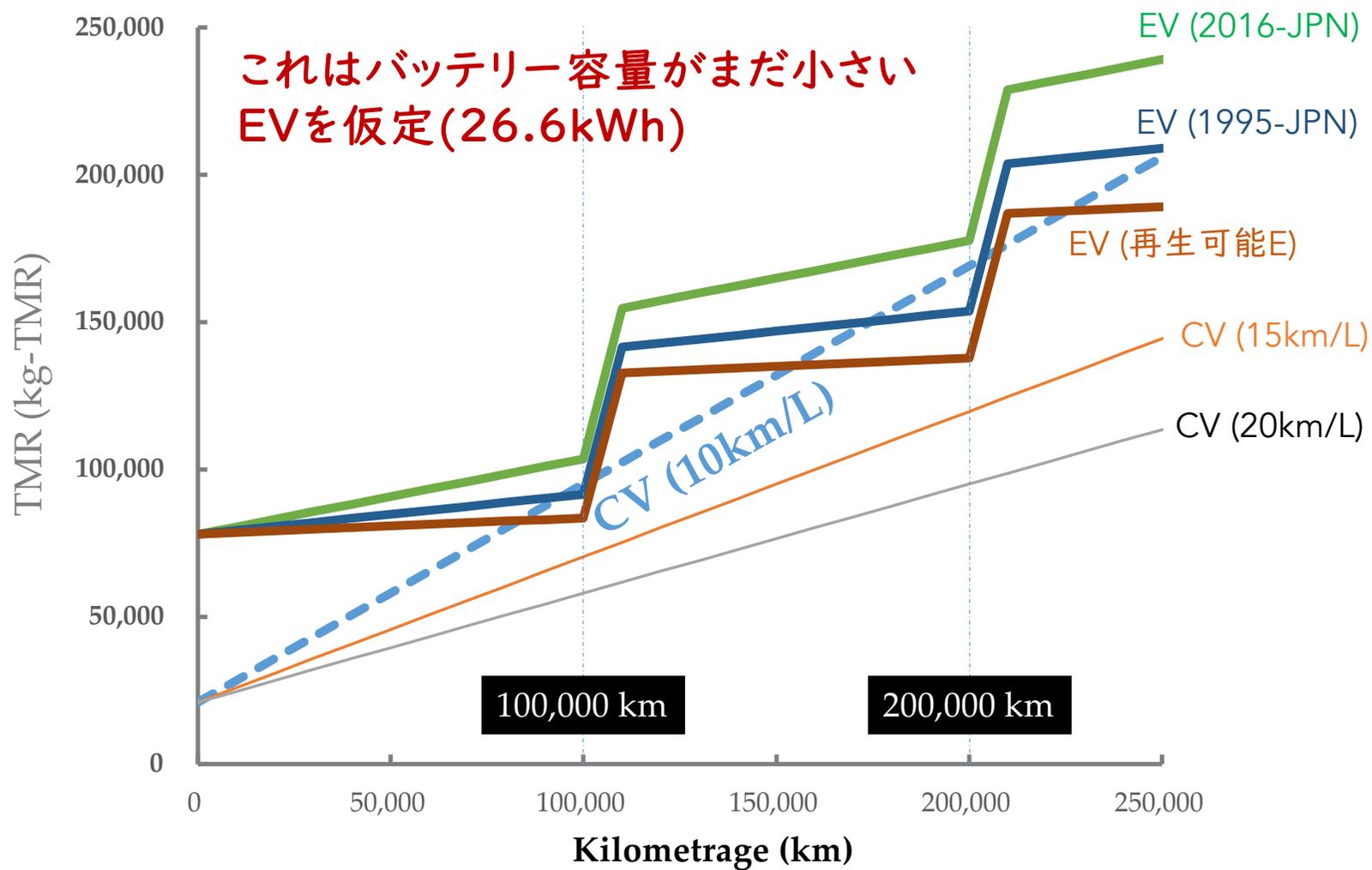


120億トン = 4000万台  
= 120万km

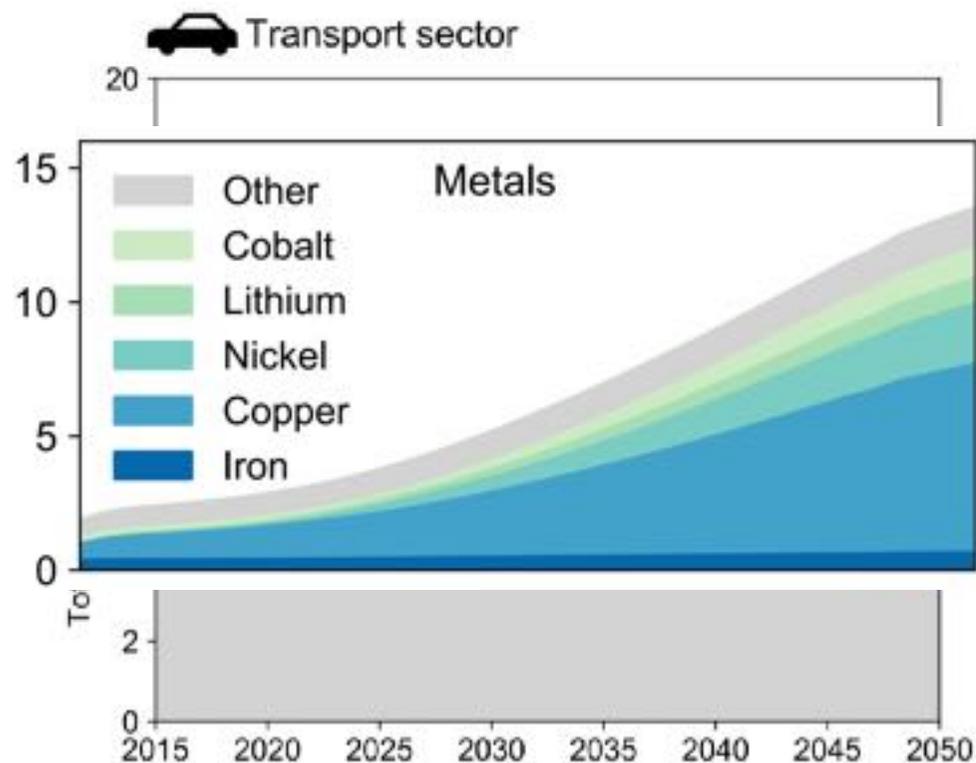


# 120万kmってどれくらい？





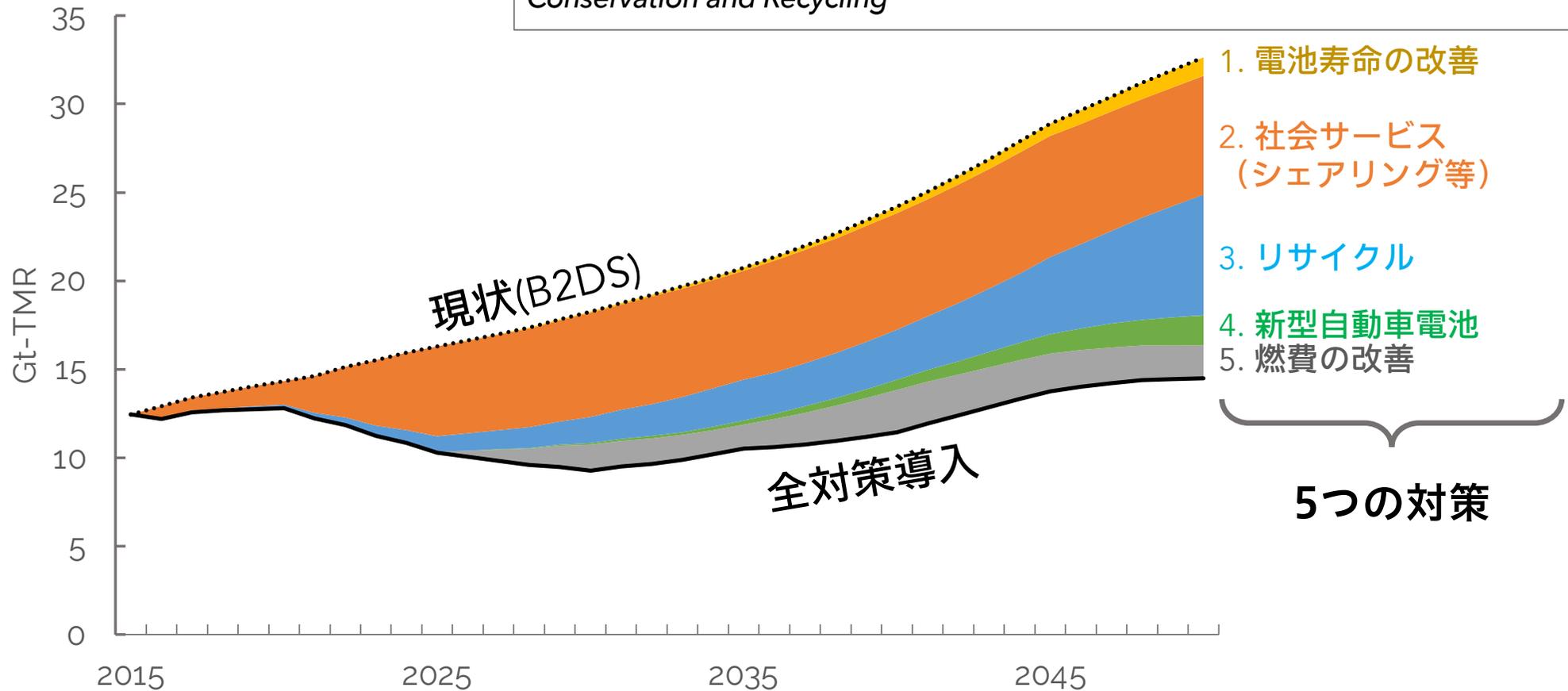
## 世界の自動車部門が誘発する資源採掘量



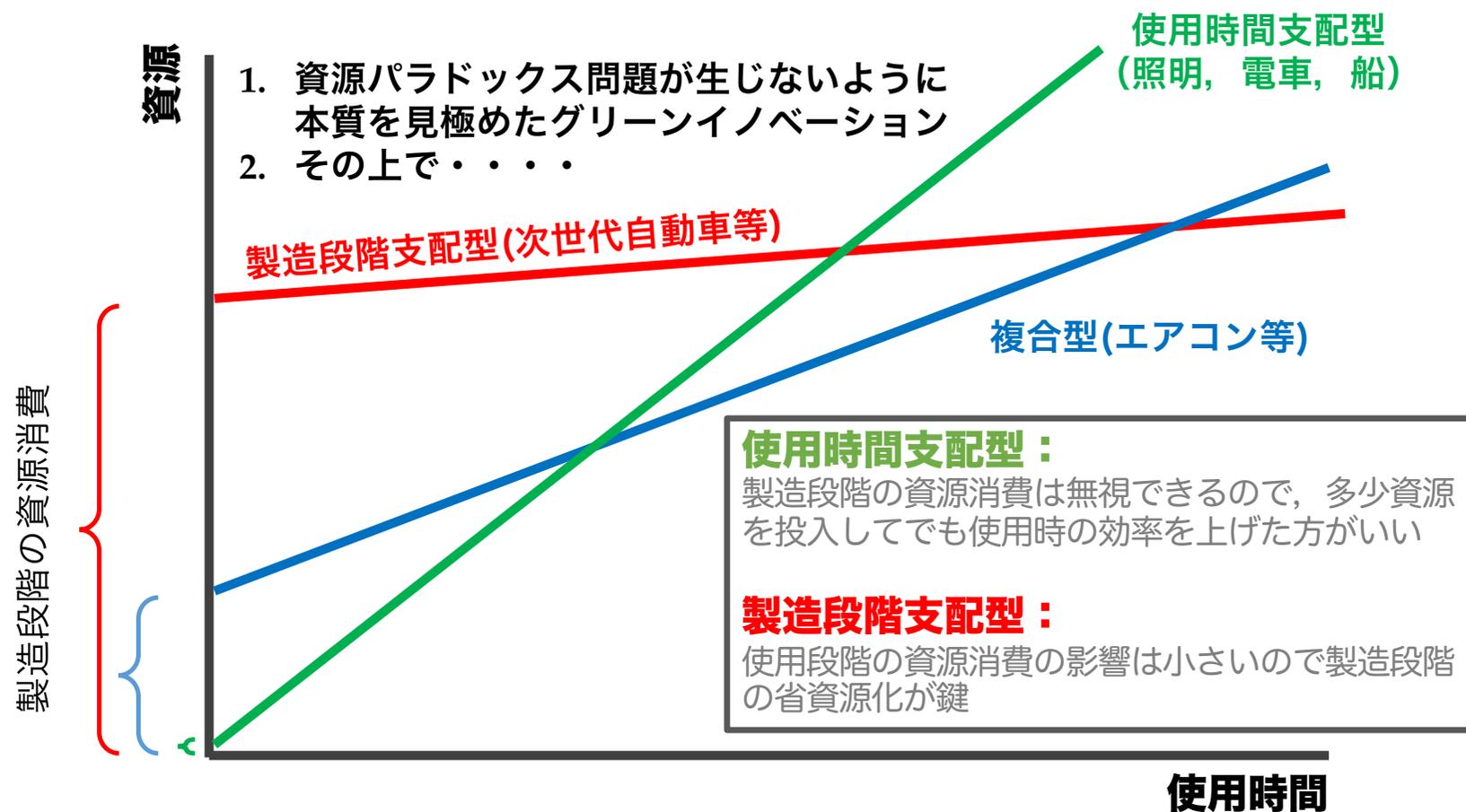
- ✓ 低炭素技術の背後で（金属）資源採掘量が増加。鉄鋼も大きく増加)
- ✓ 資源採掘増加の32-40%が資源ガバナンスの貧弱な国で発生
- ✓ 低炭素技術を支える資源をどこから調達するか、どのようにリスクを下げるかは経済安全保障に関わる問題

Takuma Watari, Keisuke Nansai, Kenichi Nakajima, Damien Giurco: "Sustainable energy transitions require enhanced resource governance", *Journal of Cleaner Production*, Volume 312, 20 August 2021, 127698

Shoki Kosai, Hibiki Takimoto, Takuma Watari, [Eiji Yamasue](#): "Circular economy can mitigate rising mining demand from global vehicle electrification", *Resources, Conservation and Recycling*



EVの急速な普及をコントロールしつつ，その間にリサイクル技術を確認する必要性



製造段階支配型では省資源・エネルギー型プロセスの革新が必要

## ■問題に一つ一つ対応する方式には限界がある

システムが複雑化（自動車は良い例）

対処療法から根本治療へ移行

## ■根本治療のアプローチ

科学技術の革新：革新的な生産技術，リサイクル技術などの開発・普及の加速

経済・社会システムの変革：大量生産・大量消費・大量廃棄を前提とする経済システムからストック型の経済システムへと転換する必要性（ライフサイクル思考，サプライチェーンリスク）

ヒトの意識の変革：現在の物質的な豊かさを追求する価値観に基づく社会システムから，「モノ」から「コト」へとといった人々の価値観やライフスタイルを変革する必要性（行動・意識の変革）

以上を三位一体で解決する必要がある（全ての工学者に産業エコロジー学というリテラシーを）



ご清聴ありがとうございました  
今後ともどうぞよろしくお願い致します

yamasue@fc.ritsumei.ac.jp  
Ritsumeikan University  
Eiji YAMASUE

# 鉄鋼業におけるにおける2つのC (CN・CE) への対応: ライフサイクル思考の活用



CHIBA  
UNIVERSITY

千葉大学 大学院融合理工学府  
先進理化学専攻  
共生応用化学コース  
松野 泰也

# 自己紹介

1990年 東京大学化学工学科卒業

1996年 東京大学大学院工学系研究科

化学システム工学専攻博士課程修了(工学博士)

1996年 通商産業省 工業技術院 資源環境技術総合研究所

2001年 産業技術総合研究所 LCA研究センター

2004年 東京大学大学院工学系研究科

マテリアル工学専攻 准教授

2016年 千葉大学大学院融合理工学府 教授



専門: リサイクル工学、LCA、MFAなど

学会: 日本LCA学会・会長、化学工学会、日本金属学会

委員: NEDO技術委員、京葉臨海コンビナートカーボンニュートラル  
推進協議会委員など

趣味: 登山、ゴルフ、麻雀、お酒

社会(都市)への普及ポテンシャルと影響を評価

俯瞰的視点と先端的要素技術の開発で  
都市鉱山有効活用システムを創成

## 要素技術の開発

湿式製錬(有機王水・  
ヨウ素水溶液)プロセス

乾式製錬(固体王水)  
プロセス

経済性・環境影響評価

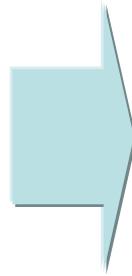
ポテンシャル推計

研究も二刀流

研究・技術開発に必要なニーズのフィードバック

# 2050年に創造すべき社会

再生可能エネルギーの活用促進と  
天然資源使用の極力回避（人工ストック利用へ  
の転換）によるカーボンニュートラル社会



# 今後直面するは「二つのC」

## 循環経済工程表

### 2050年に向けた方向性

- サークュラーエコノミーと2050年カーボンニュートラルの達成

2030年

2050年

現状の評価・点検

第四次循環型社会推進  
基本計画の  
点検結果

例



プラスチック



金属



太陽光パネル



ファッション

循環経済関連ビジネス  
80兆円以上

プラ戦略マイルストーン  
プラ回収量倍増

食品ロス  
400万トン以下

金属リサイクル  
原料処理量倍増

### 2030年に向けた施策の方向性

- 素材ごと（プラスチックや金属等）、製品ごと（太陽光パネルやファッション等）、循環経済関連ビジネス、廃棄物処理システム、地域の循環システム、適正処理、国際的な資源循環促進、各主体による連携・人材育成などの各分野における施策の方向性を提示した

- エネルギー分野
- 包装材への適用



- 社内環境戦略を支援
- 環境報告書等に掲載
  - 商品イメージの向上

LCA黎明期  
~成長期

ISO規格発行 1990年代



新製品・プロセスの  
設計・開発に活用

LCA国家プロジェクト  
(通産省)

20世紀

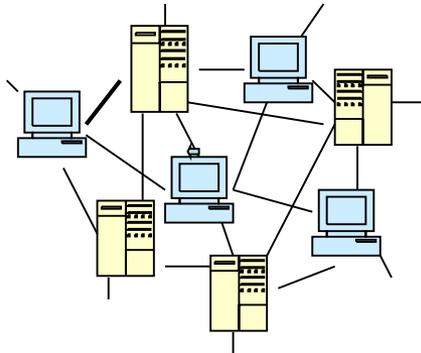
エコリーフ      カーボンフットプリント

21世紀

- Scope 3



大学での教育



社会インフラへの適用  
・グリーンIT



政策決定支援

- 容り法対応
- 改正温対法

ESG投資対応

# 世間でのLCAの注目度合

1996年 ISO規格進捗



2008年 環境元年



2020年:カーボンニュートラル  
改正温対法



2032年？

# 鋼材ストックの例

- 自動車1台： 1 t
- 山手線(103系)1両： 30 t  
出典： 日本アルミニウム協会 軽金属車輛委員会資料
- スカイツリー： 36,000 t  
出典： 日経ものづくり、2012年5月号
- レインボーブリッジ(橋長790 m)： 48,000 t  
出典： 日本鉄鋼連盟(古いかもしれませんが)

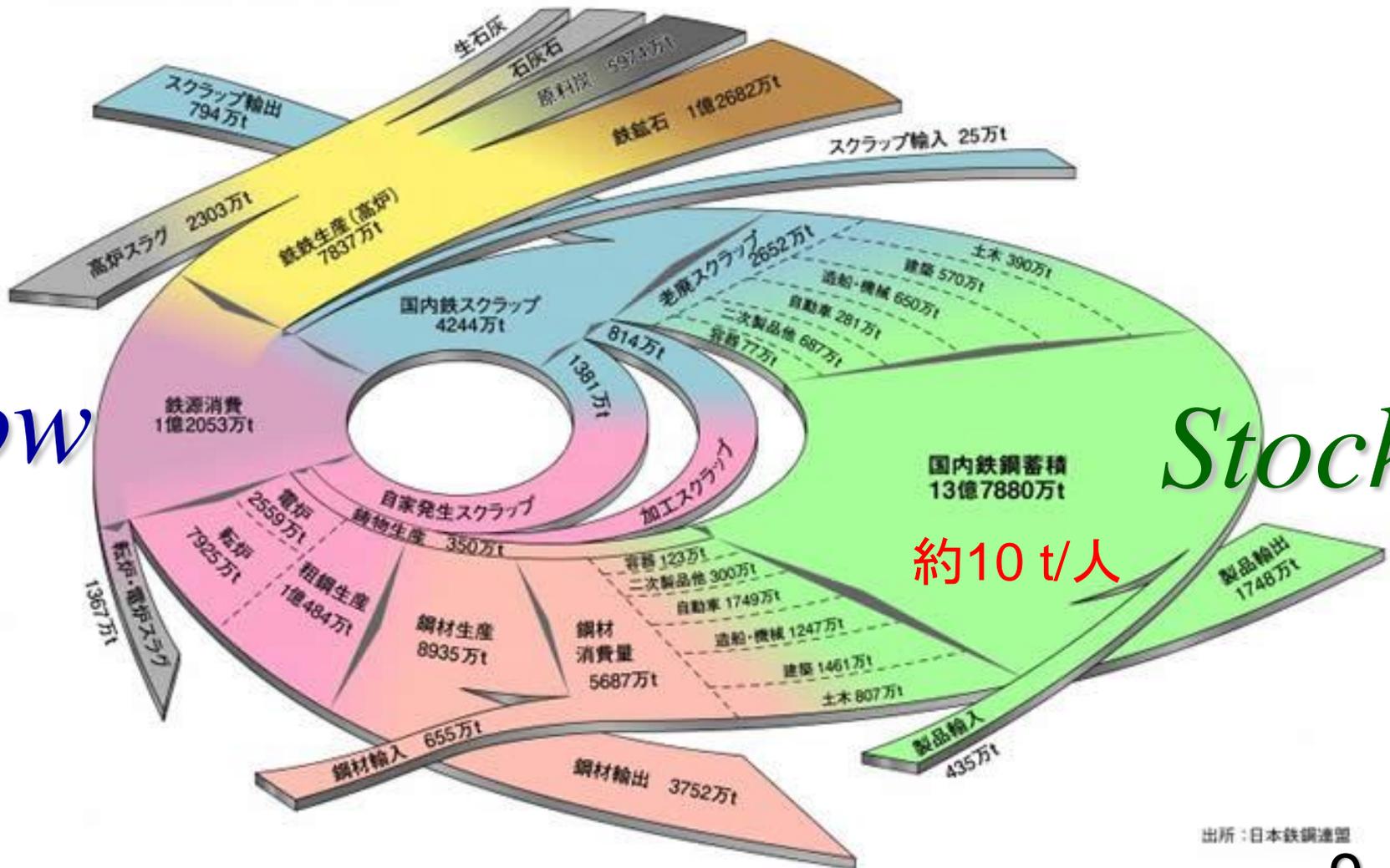


# 社会の中で素材の流れ(Flow)とストック(Stock)を解析するのがマテリアルフロー分析(MFA)

日本の鉄鋼循環図 (2017年度)

*Flow*

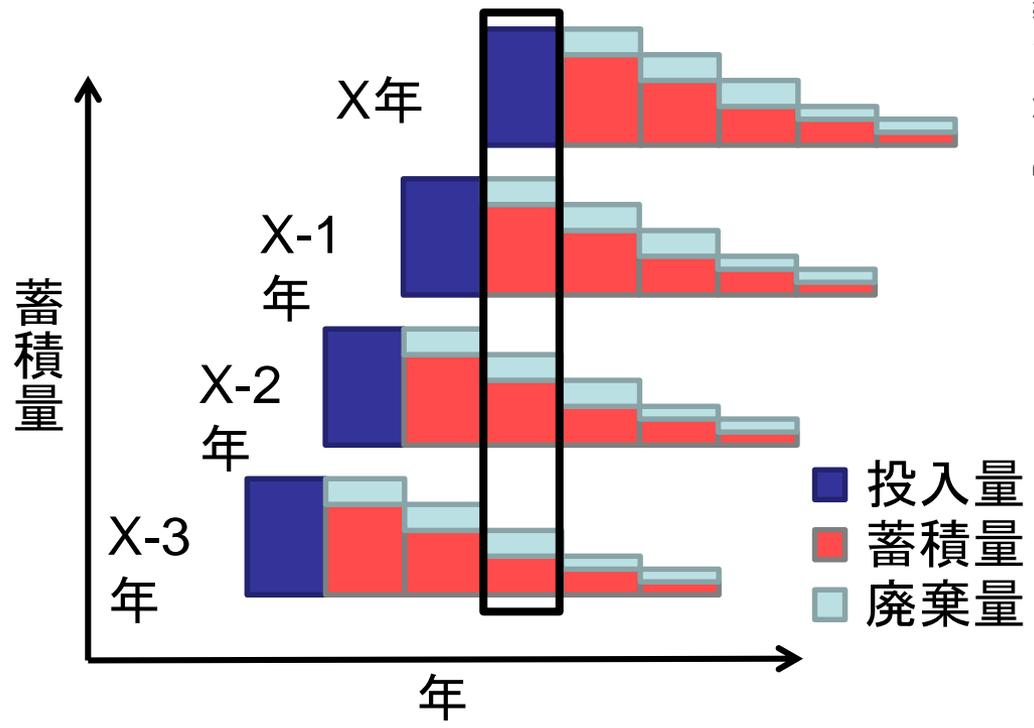
*Stock*



出所: 日本鉄鋼連盟

# 都市鉱山(社会中の素材蓄積量および排出量)はどうやって推計する？

製品寿命のワイブル分布を元に、各年毎の蓄積量・排出量を算出



動的物質フロー解析の概念図

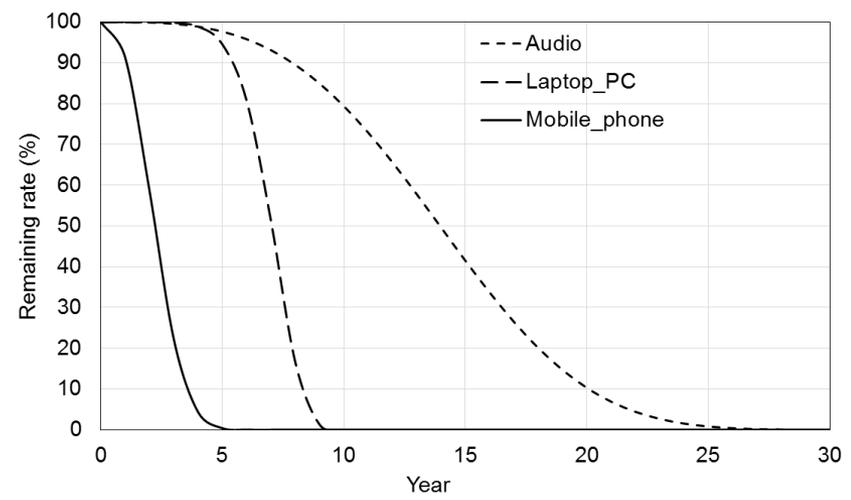


図 ワイブル分布

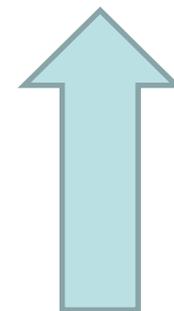
必要なデータ

- 1.用途別の投入量
- 2.用途別の製品寿命

# 世界の国別・用途別の鋼材蓄積状況

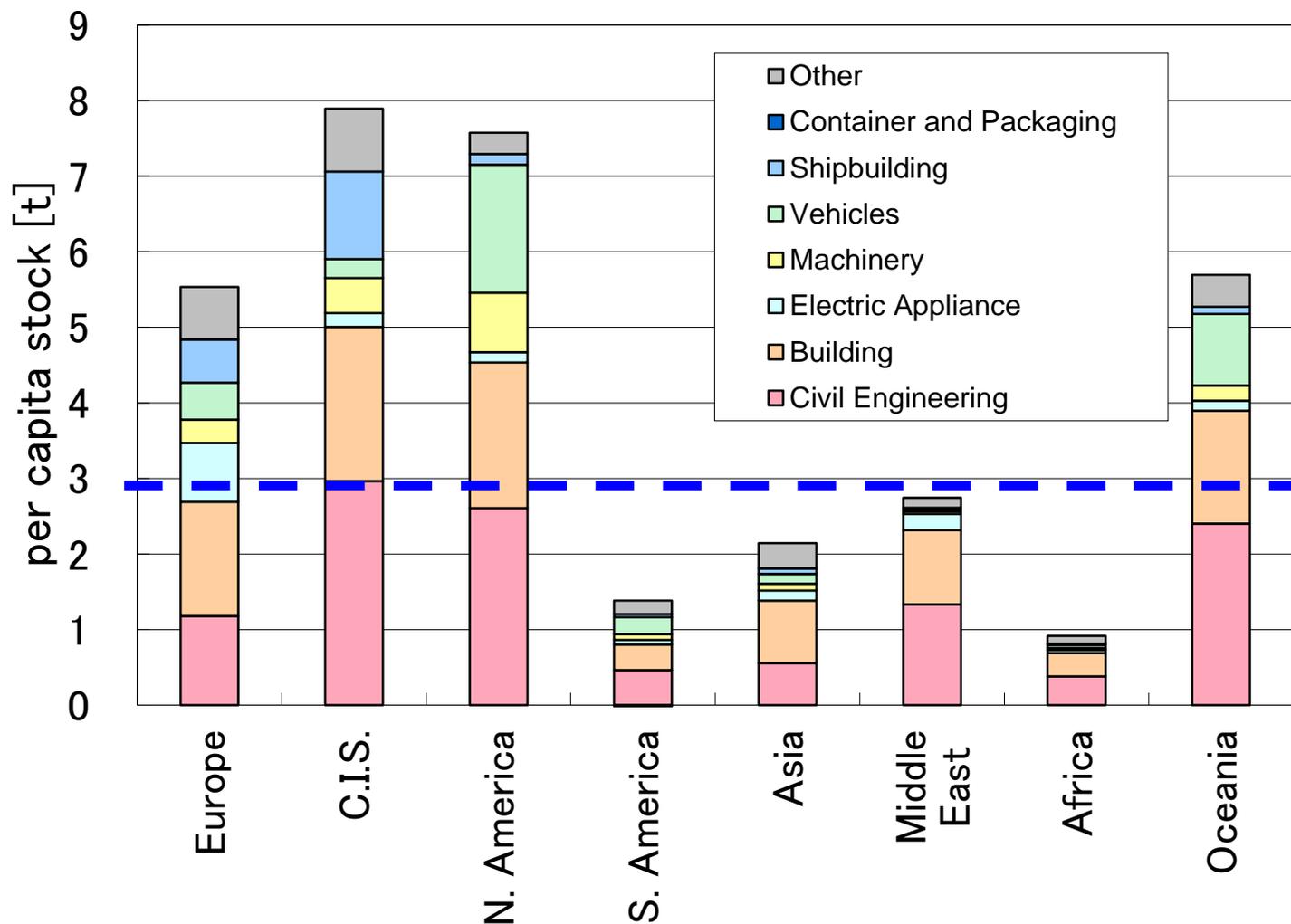
最大

10トン/人

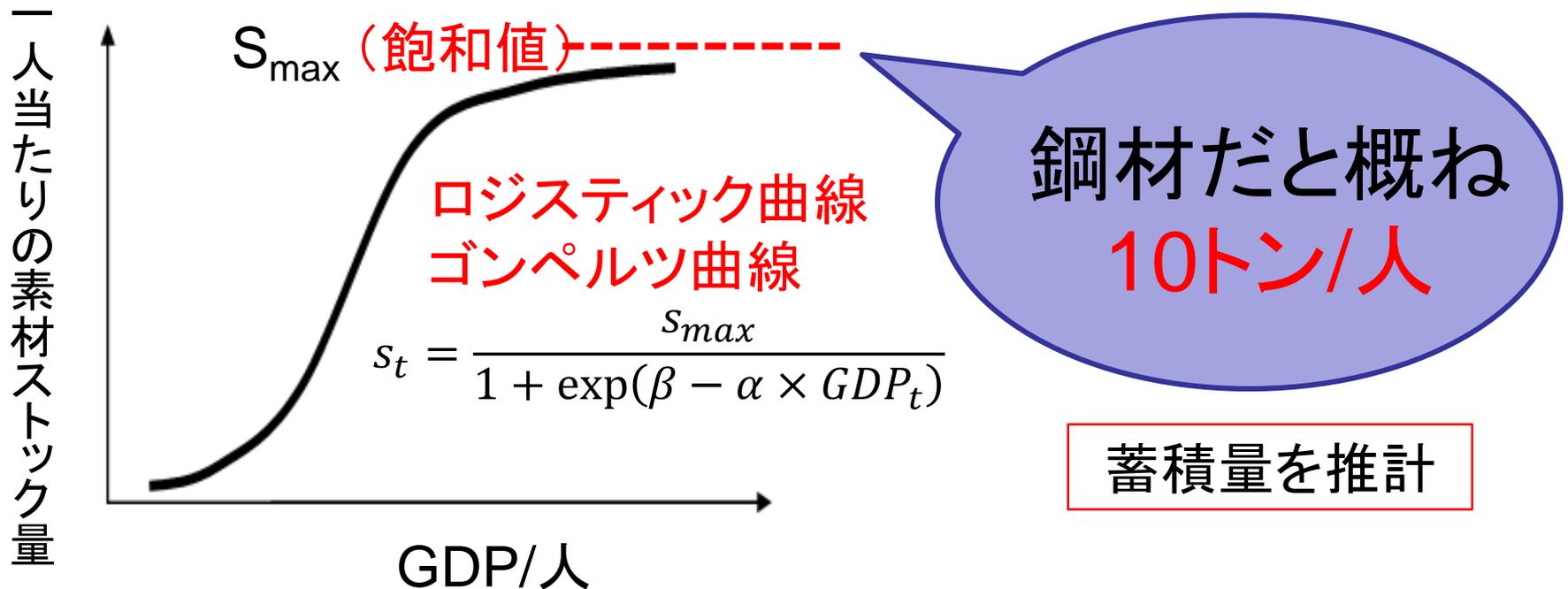


平均

3トン/人



ここがポイント！マテリアルフロー分析  
(MFA)により将来の蓄積量・需要量・  
スクラップ排出量の予測はできる。



# 2050年までの鉄鋼蓄積量の推計

(地域別、土木、建築、自動車用途)

図 世界鋼材の蓄積量の推計結果

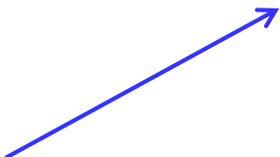
# ストックから消費（需要）を求める式

$$\Delta S(t) = S(t) - S(t-1)$$

$$= \text{消費}(t) - \text{廃棄}(t)$$

$$\text{消費}(t) = \Delta S(t) + \text{廃棄}(t)$$

人口、GDP、 $S_{\max}$



過去の投入量、寿命分布

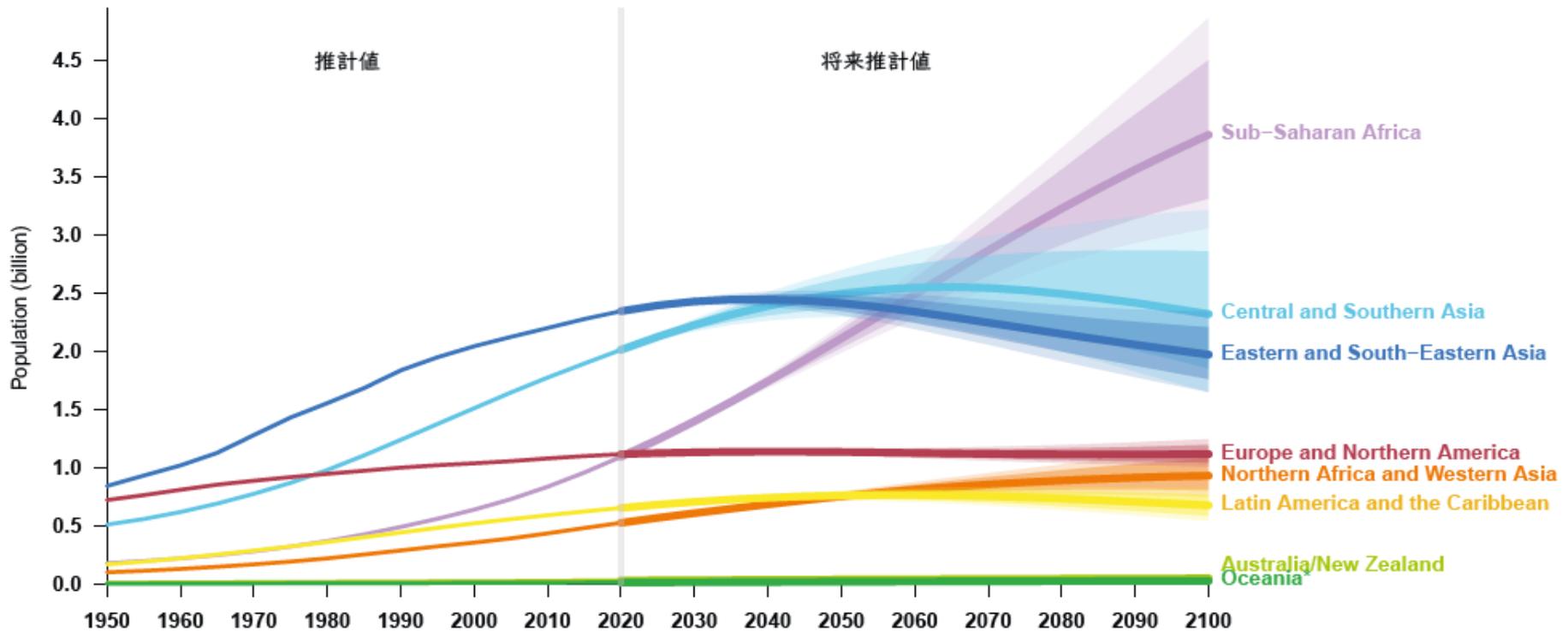


# 2050年までの鉄鋼消費量の予測(地域別)

図 世界鋼材の消費量の推計結果

# 世界の人口の将来予測(2019)

図2. SDG地域別の人口の動向: 1950~2020年の推計値、2020~2100年の中位推計値及び80%・95%予測区間



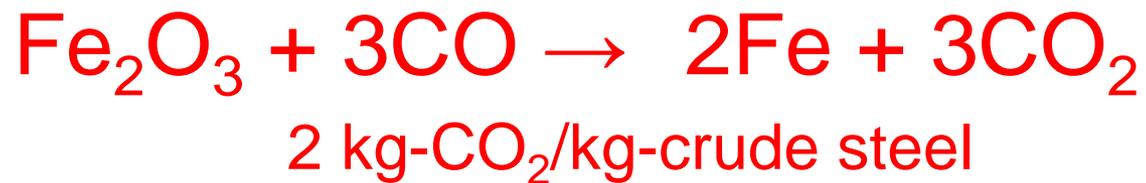
\*ここでは、オセアニアにオーストラリア/ニュージーランドは含まれない

今後数十年間の人口増加の大部分はサブサハラ・アフリカで生じる

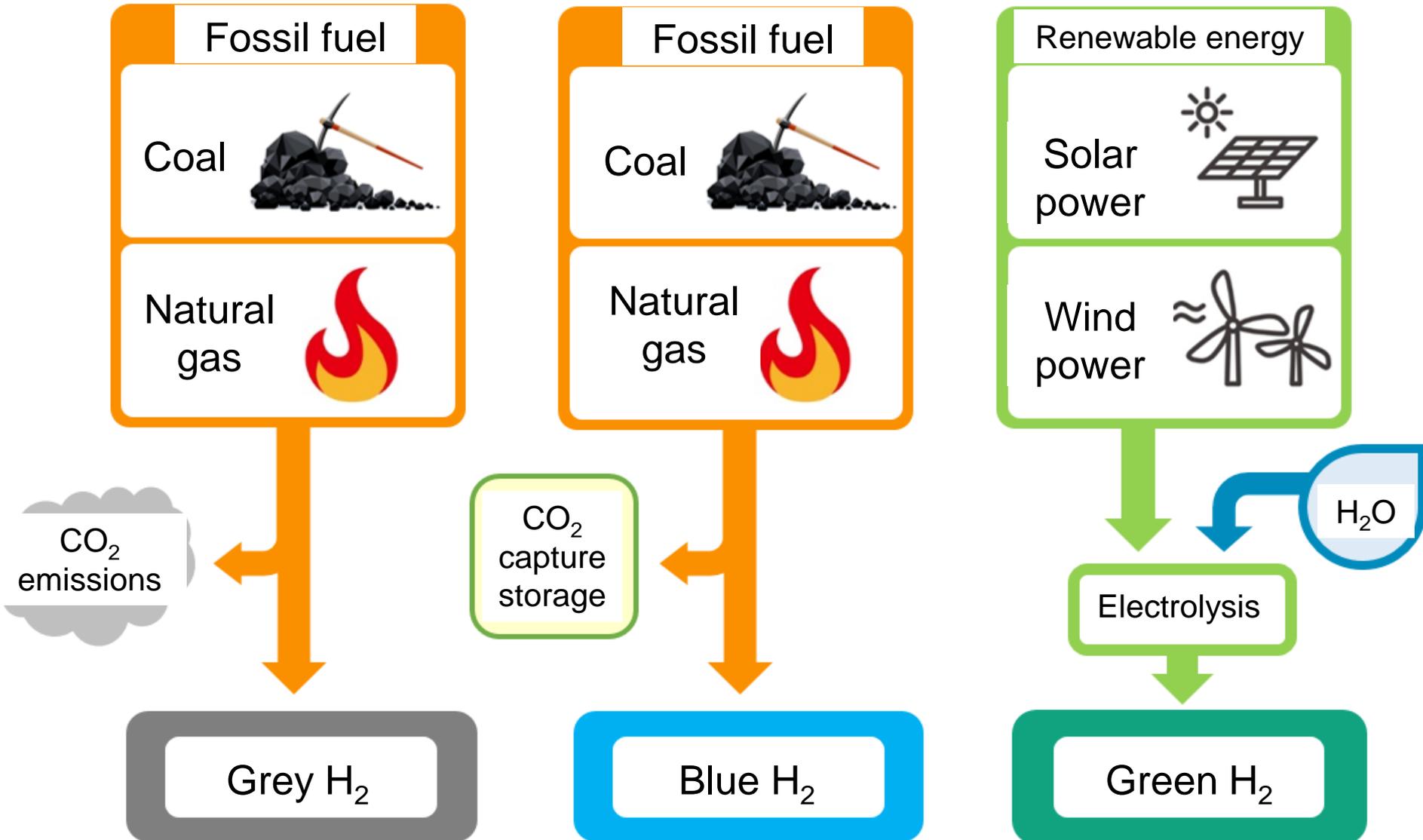
# 2050年には鋼材需要の8割が スクラップで供給可能？

図 世界の鋼材の需要量、スクラップ発生量、  
鉍石から生産の必要量の推計結果

# 水素を活用した製鉄



# 水素製造方法とLCA

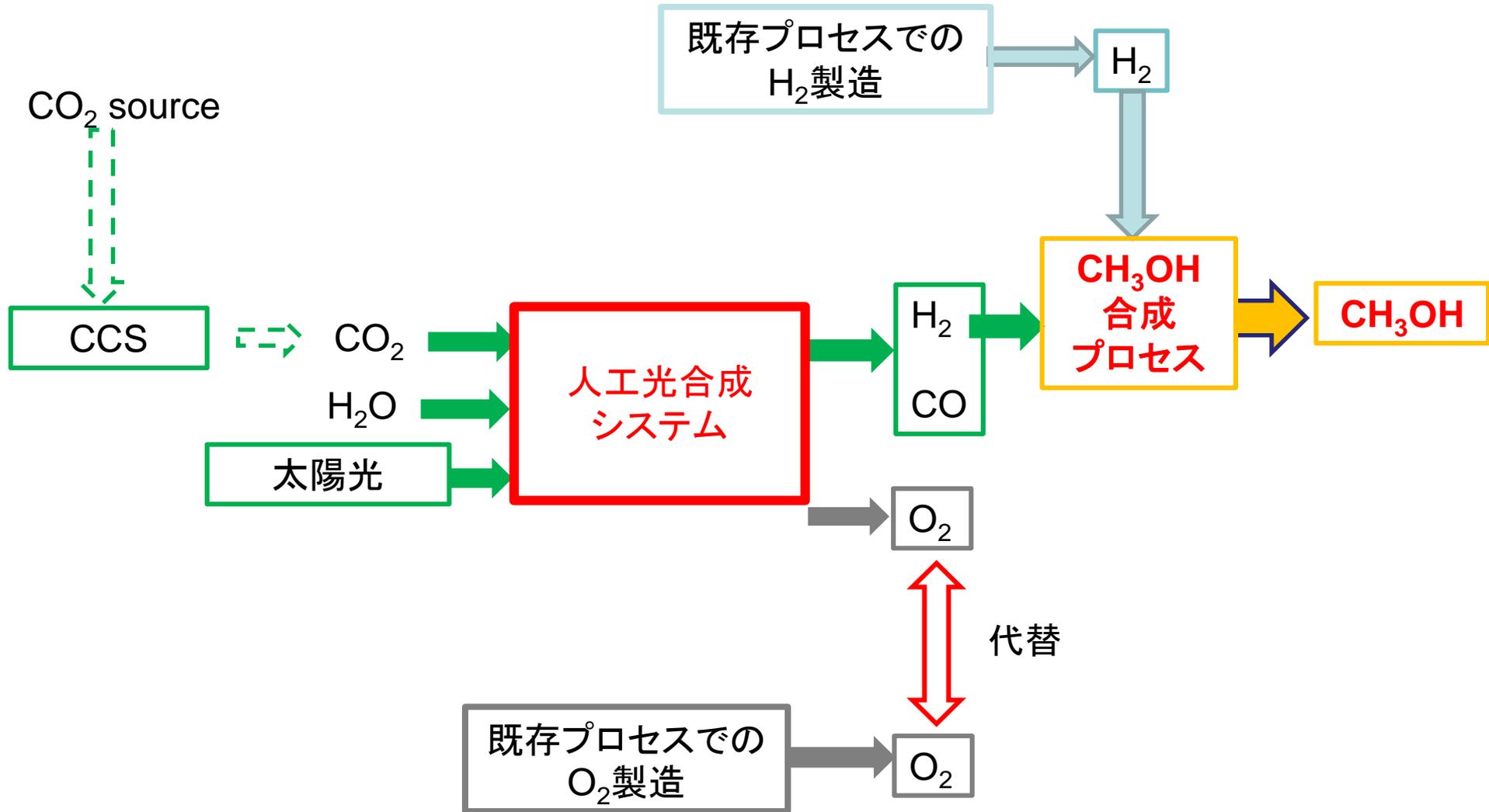


# CN社会構築に向けた 新技術へLCAを適用

- 研究開発段階からLCAを実施し、開発者へフィードバック
- 最適な製品の生成比は？
- バックグラウンドデータ(ベースライン)の設定次第で最適な答えは変わってくる。
- かなりハイレベルなLCA

図 人工光合成システム

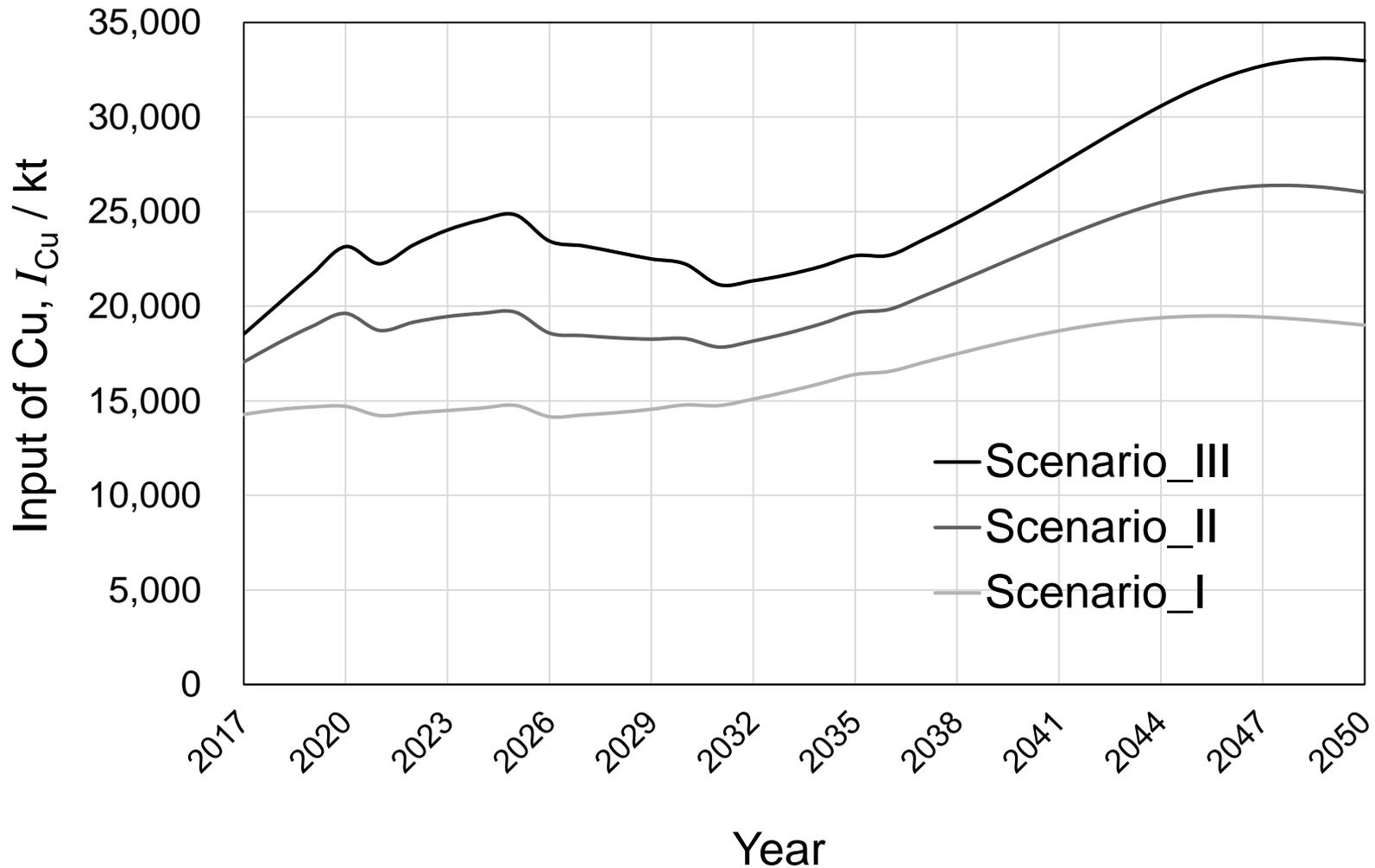
# システム境界設定(例)



# 世界の銅需要に関する予測

	Scenario	In-use stock per capita of copper or copper alloy $w_{Cu} / \text{kg} \cdot \text{capita}^{-1}$				
		Cable / Wire	Civil engineering	Building	Electrical Appliances	Machinery
Copper	I	16.2	06.0	34.0	08.6	02.3
	II	25.9	08.7	52.5	11.3	04.2
	III	35.5	11.4	70.9	14.0	05.1
Copper alloy	I	-	02.1	06.6	01.1	02.6
	II	-	08.5	10.0	01.7	03.6
	III	-	14.8	13.3	02.2	04.5

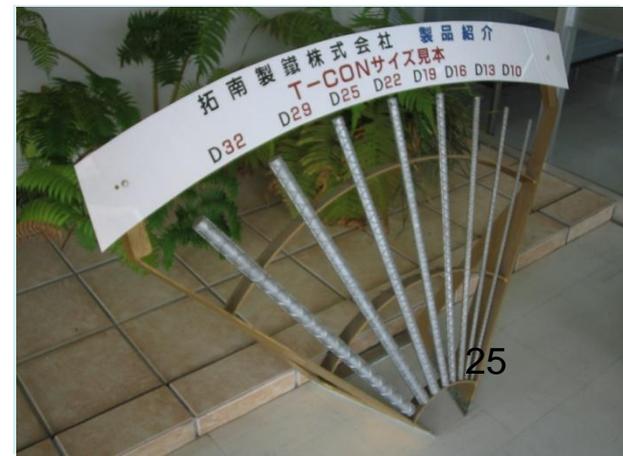
# 世界の銅需要に関する予測結果



# 理想と現実

## 鋼材リサイクルの制約要因 **Cuの混入**





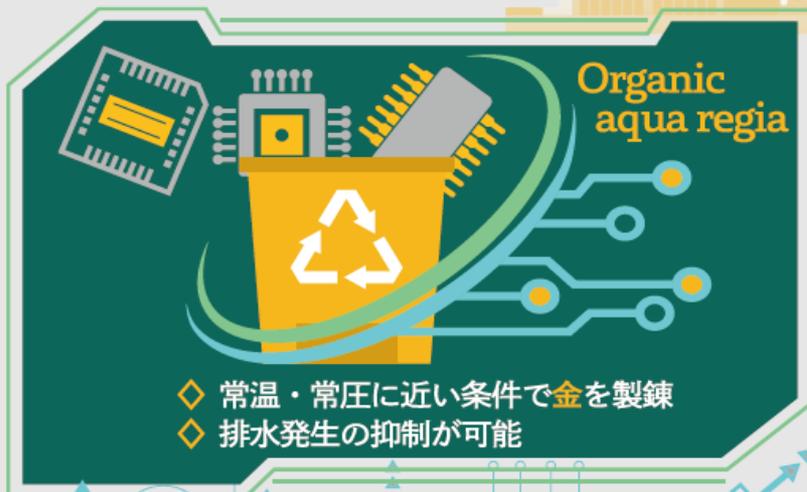
# 都市鉱山の地産地消で実現する資源大国ニッポン

“地産地消型” 都市鉱山リサイクルの達成 ▶▶▶ 100%

千葉大学 大学院工学研究院  
松野 泰也 教授  
吉村 彰大 助教



## 有機王水を用いた金の製錬システム



## ヨウ素・ヨウ化カリウム水溶液を用いた金の製錬システム



## 固体王水(熔融塩)を用いた白金族金属の製錬システム

Needs  
**1** 簡単な操作かつ低環境負荷の金の製錬方法

Needs  
**2** 簡単な操作かつエネルギー消費が小さい白金族金属の製錬方法

Needs  
**3** 「ヨウ素の地産地消による新たな貴金属リサイクル方法」の確立！

Issues  
**1** 金のリサイクル  
王水、シアン化物水溶液の取り扱いが難しく環境負荷が高い

Issues  
**2** 白金やパラジウムなど希少な白金族金属のリサイクル  
塩酸など環境負荷の大きい廃液の発生やエネルギー消費が大きい

Issues  
**3** 千葉県の特産ヨウ素  
千葉県が世界シェア2位、国内シェア8割を誇るヨウ素の高付加価値化技術の不在

ご清聴ありがとうございました。

連絡先: matsuno@chiba-u.jp

Google

千葉大学 松野



# ヒートポンプ技術の期待と課題

神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻

浅野 等

1990年3月 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻 修了  
1990年4月～1993年9月 ダイキン工業(株) 機械技術研究所  
1993年10月～ 神戸大学大学院工学研究科機械工学専攻  
2001年10月～2002年12月 アレクサンダー・フォン・ホルト財団(ドイツ)研究員

### □ 熱から電気をつくる : 熱機関を利用 熱⇒動力

原子力発電, 火力発電(ランキンサイクル)  
地熱利用, 太陽熱利用, 排熱利用

### □ 熱を低温から高温に移動する : 動力⇒熱

ヒートポンプ, 冷凍・冷蔵装置  
(逆ランキンサイクル) 給湯機やエアコンで利用

### □ 熱の操作で温度を制御する : 電力⇒熱

電子機器, 電力機器の冷却

### □ 熱を利用する : 熱の搬送

排熱をユーザーへ. 工場内の熱供給  
熱エネルギーの取り扱いの高度化が求められている

小温度差熱移動, 高密度熱移動(高熱流束除熱), 高密度熱搬送(潜熱利用)



## 熱力学

熱 (heat) を物理量の一つとしてとらえ、「温度」、「熱」と「物理変化」との関係を調べ、科学として体系づけたもの。

### 熱力学

- 熱力学第一法則  
エネルギー保存則
- 熱力学第二法則  
熱は温度が高いものから低いものへ  
水は高いところ(圧力, 高度)から低いところへ  
自然界の変化の方向は決まっている **不可逆性**

### 熱, 流体の移動

- 伝熱工学, 熱移動学  
温度差に対する熱の移動量を計算
- 流体工学  
対流伝熱の理解, 圧力損失の計算

### サイクル設計

#### 熱機関

冷凍機, ヒートポンプ

性能評価と改善  
平衡状態を仮定

### 機器設計

ボイラ, 復水器

タービン, ポンプ

要求能力に対する  
大きさを設計

## 可逆変化 (reversible change)

流体が状態X から状態Y へ変化したのち、この過程を逆に進んではじめの状態Xへ戻った時の状態が、全くはじめの状態と同じであって、熱や仕事などの影響が全く外界に残らない変化を可逆変化という。

力学的にも熱的にも平衡状態を保つ

## 不可逆変化 (irreversible change)

現実の変化は全て不可逆変化

元の状態に戻す場合、外界に何らかの影響が残る変化

### 自発的に起こる変化

- 熱の移動 温度が高いものから低いものへ
- 流体の移動 圧力が高いところから低いところへ
- 拡散 濃度が高いところから低いところへ

全て不可逆変化

示量性状態量エントロピーで不可逆性を定量評価

$$dS = \frac{\delta Q}{T}$$

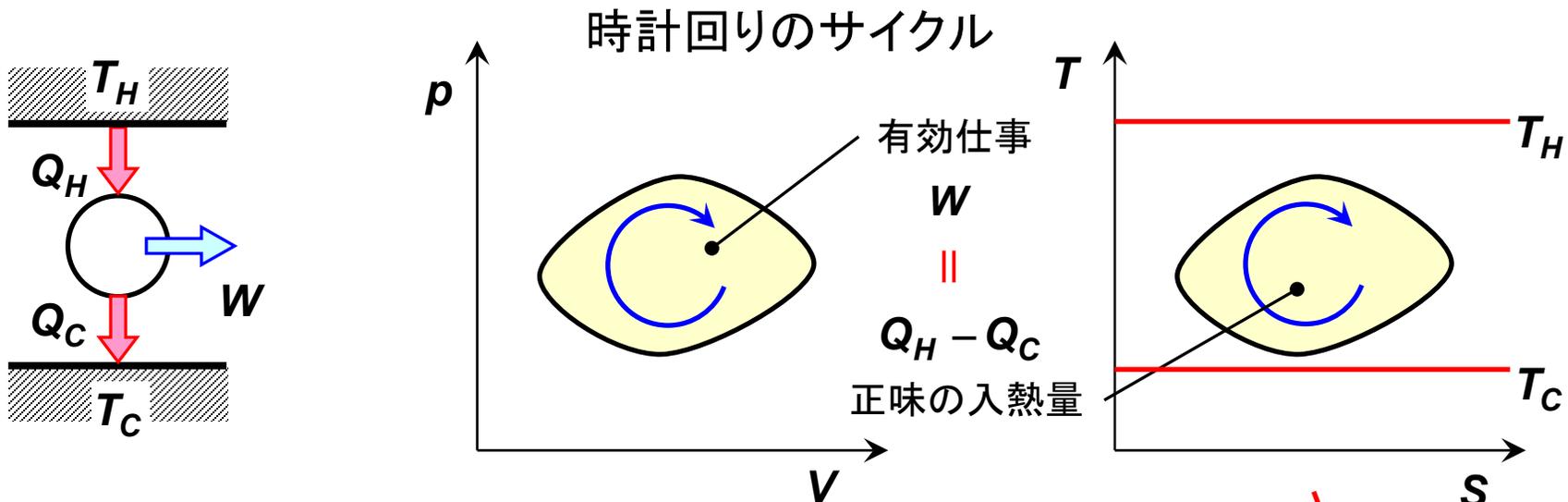
## 熱エネルギー

- ✓ 総量は保存されるが、熱の移動は温度が高いものから低いものへ
- ✓ 全ての熱エネルギーを他のエネルギーに変換できない  
束縛エネルギーの存在

### エントロピー増大則

不可逆性があればエントロピーは増大する

$$dS \geq 0$$



◎ サイクルでのエネルギー保存

$$Q_H - Q_C = W$$

◎ サイクルの性能評価

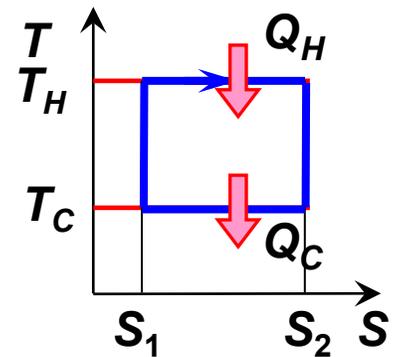
熱効率

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$$

最大仕事を得られるサイクル

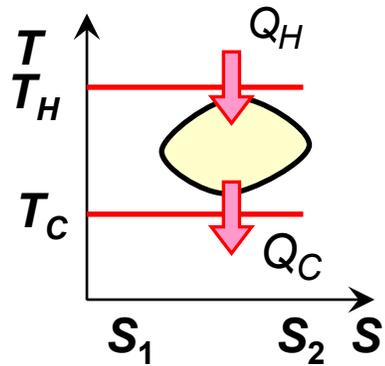
## 可逆熱機関

### カルノーサイクル



2つの等温過程  
 2つの断熱過程

## 熱機関

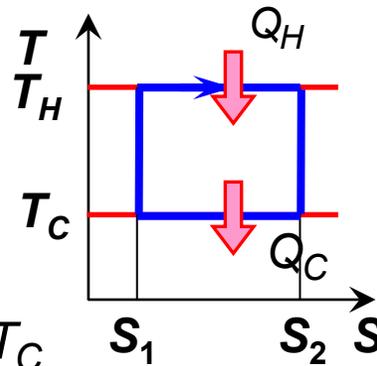


熱源と同じ温度で熱移動させることで有効仕事を最も大きくできる。



## 可逆熱機関

### カルノーサイクル



2つの等温過程  
2つの断熱過程

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H}$$

熱効率  $\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} = 1 - \frac{Q_C}{Q_H}$

$$= 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

カルノーの定理

カルノーの定理を超える熱効率の熱機関は存在しない。  
熱エネルギーを仕事に変換するには上限が存在する。  
熱源温度  $T_H$  が高いほど、大きな動力が得られる。

熱エネルギーを仕事に変換するには上限が存在.  
**不可逆プロセス**によって得られる仕事は低下する.

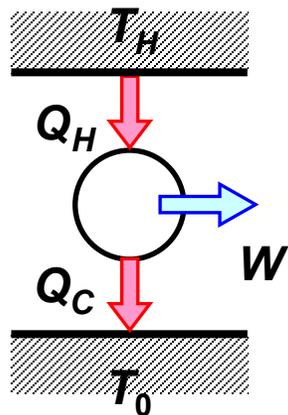
## エクセルギー (exergy)

環境(圧力  $P_0$ , 温度  $T_0$ ) と非平衡にある系が, 環境と平衡状態になるまでに成し得る最大仕事.

**熱エネルギーの質を評価**

### □ 温度 $T$ の熱量 $Q$

$$E = \eta_{\text{rev}} Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \qquad Q = \eta_{\text{rev}} Q + (1 - \eta_{\text{rev}}) Q = E + \frac{T_0}{T} Q$$



例: 熱効率  $\eta (< \eta_{\text{rev}})$  の熱機関

$$Q_H = W + Q_C = (E - LW) + \frac{T_0}{T} Q$$

↓  
**不可逆性に伴うロス**

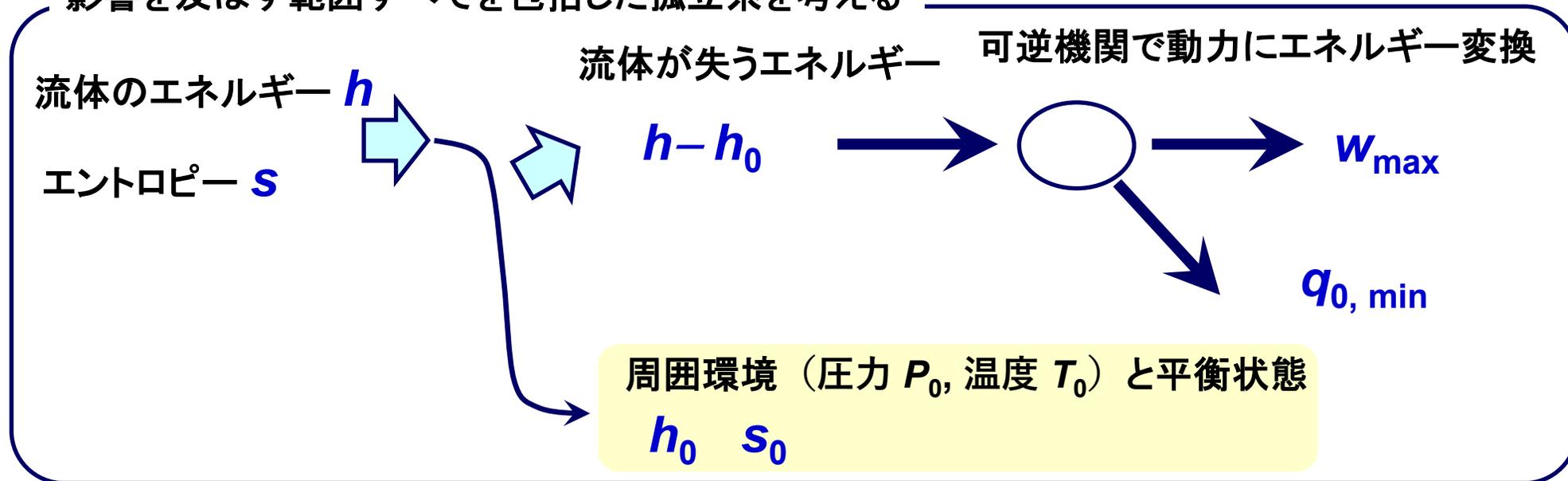
□ 流れ系にある流体のエクセルギー

単位質量の流体のエネルギー

$$\frac{1}{2}w^2 + gz + \underbrace{Pv + u}_{= h} \approx h$$

$w$ : 流速,  $z$ : 高さ,  $P$ : 圧力,  $v$ : 比体積  
 $u$ : 比内部エネルギー  
 $h$ : 比エンタルピー

影響を及ぼす範囲すべてを包括した孤立系を考える



可逆プロセス(全体のエントロピー変化がない)が理想であり, 最大仕事(エクセルギー)が得られる.

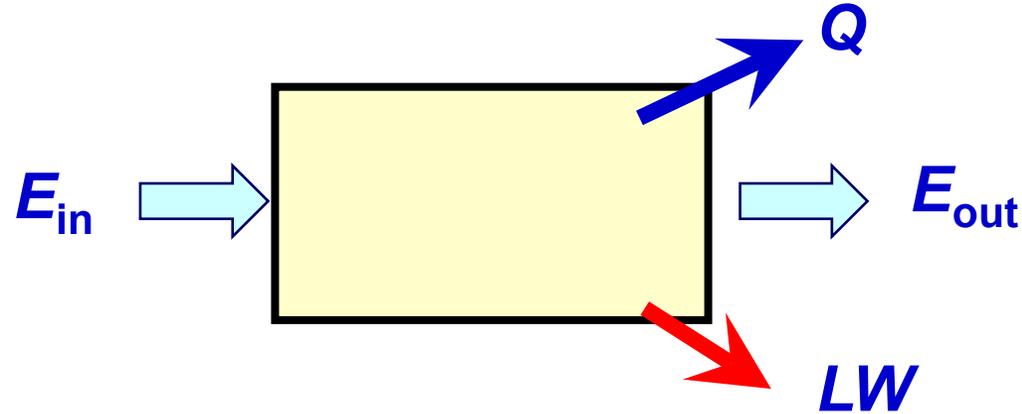
$$\Delta s = (s_0 - s) + \frac{q_{0,\min}}{T_0} = 0$$

$$q_{0,\min} = T_0(s - s_0)$$

$$e = (h - h_0) - T_0(s - s_0) \quad [\text{J/kg}]$$

$$E = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad [\text{J}]$$

目的: **不可逆プロセス**による損失の定量評価



エクセルギー率

$$\varepsilon = \frac{\text{エクセルギー}}{\text{利用可能な全エネルギー}}$$

□ 温度  $T$  の熱量  $Q$

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{E}{Q} = \eta_{\text{rev}} \\ &= 1 - \frac{T_0}{T} \end{aligned}$$

□ 流れ系にある流体

$$\varepsilon = \frac{e}{h - h_0}$$

➤ 可逆プロセス

$$E_{\text{in}} = Q + E_{\text{out}}$$

➤ 不可逆変化を含むプロセス

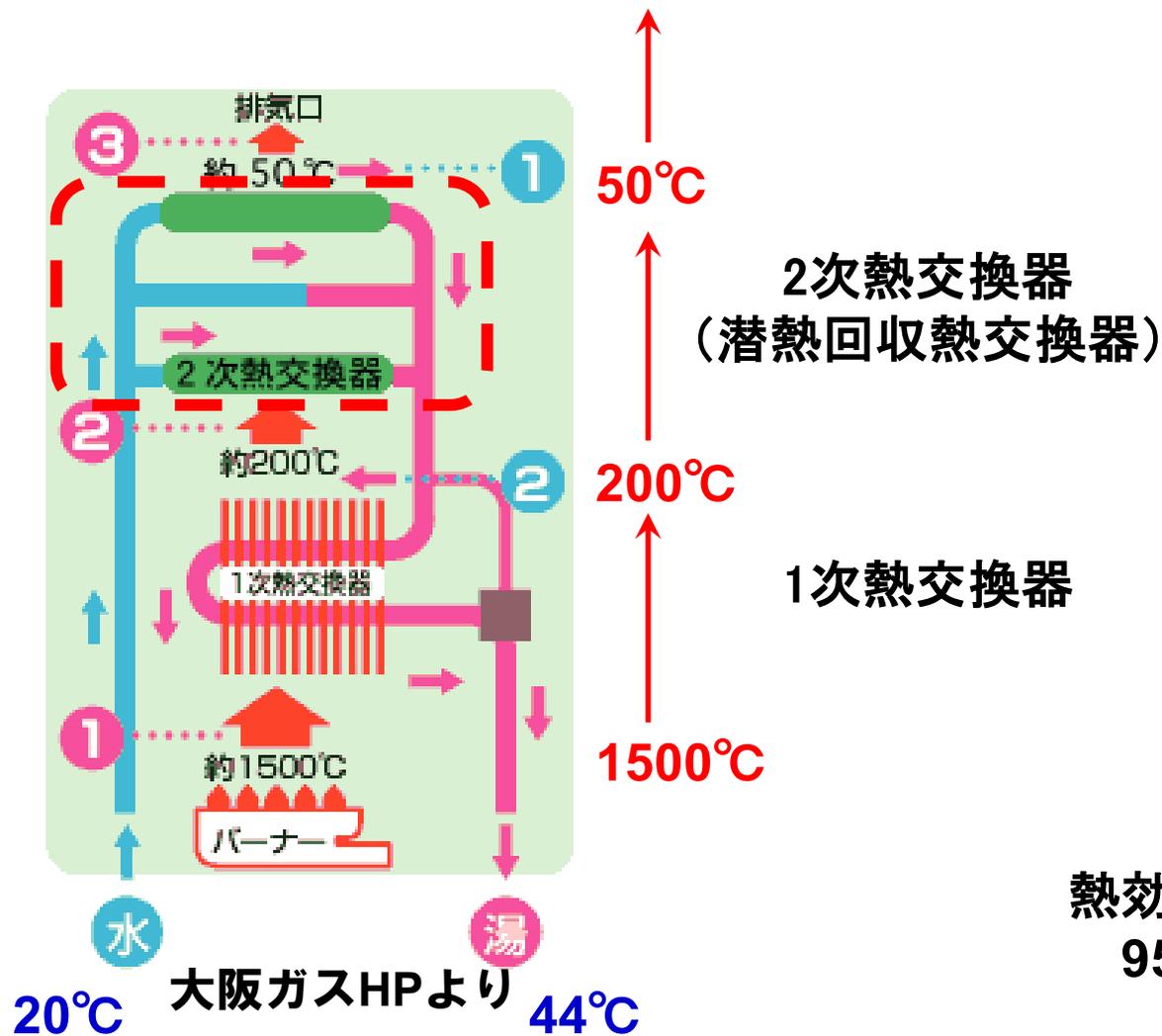
$$E_{\text{in}} = Q + E_{\text{out}} + LW$$

$LW$ : エクセルギー損失  
Loss of available work

燃料のエクセルギー

Fuel	エクセルギー MJ/kmol	高位発熱量 MJ/kmol	エクセルギー率 %
H <sub>2</sub>	237.2	285.8	83.0
CH <sub>4</sub>	818.0	890.3	91.9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2108.4	2220.1	95.0
C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	4026.7	4195.0	96.0
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1235.2	1299.6	95.0

## 潜熱回収家庭用ガス給湯器

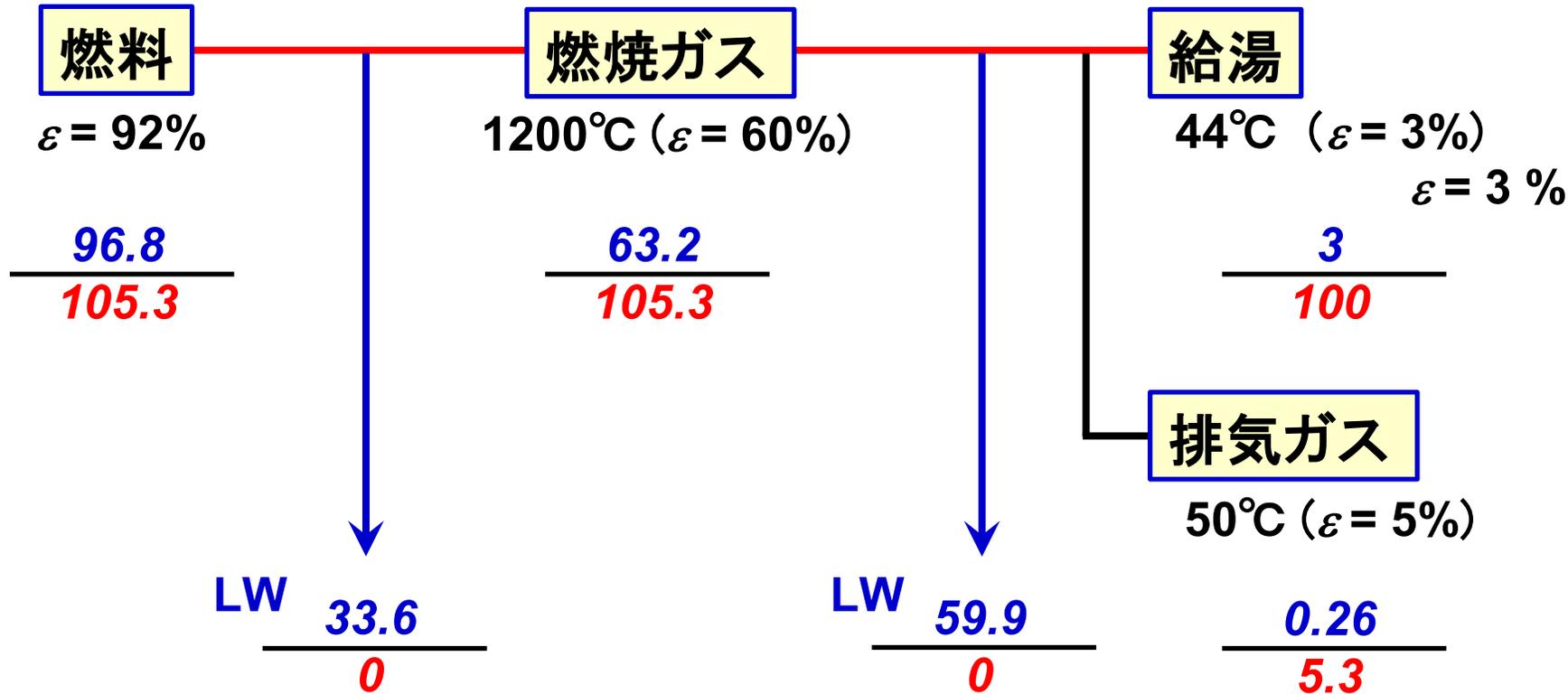


エネルギー源

天然ガス

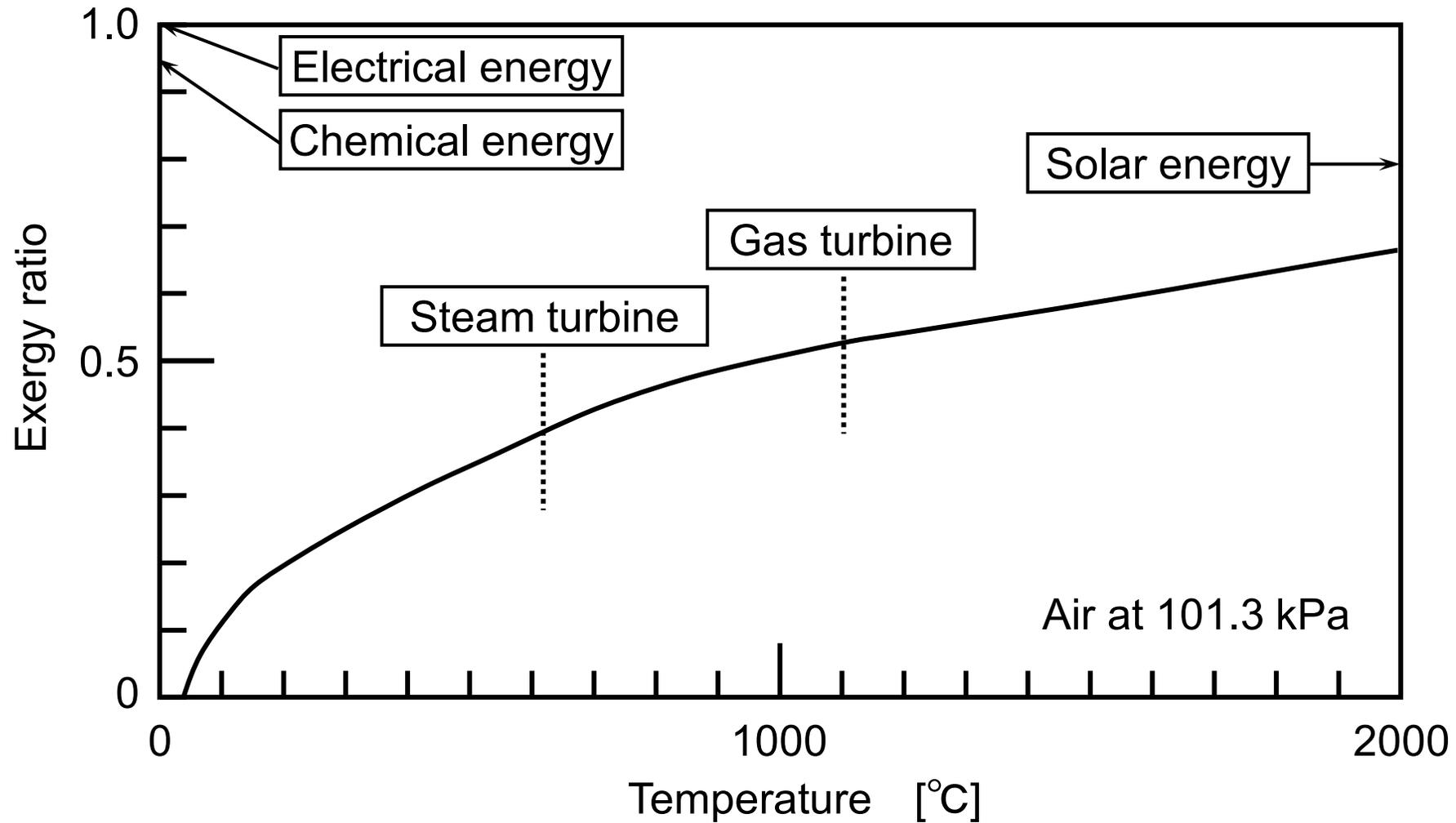
エクセルギー率 :  $\varepsilon = 92\%$

エクセルギー  
エネルギー



熱効率 = 95%

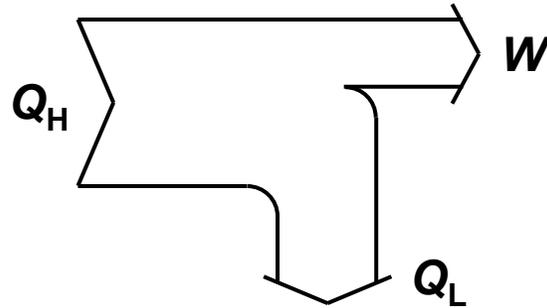
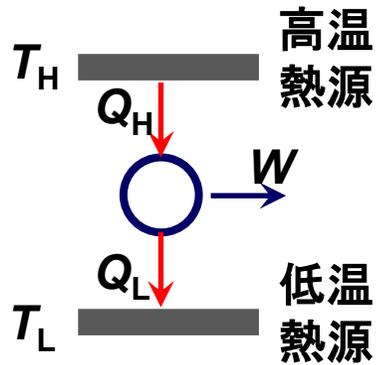
エクセルギー効率 = 3.1%



「エクセルギー工学」，吉田邦夫編，共立出版 より抜粋

## 熱機関

水車のイメージ



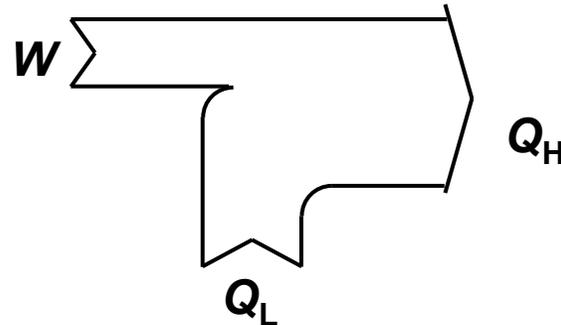
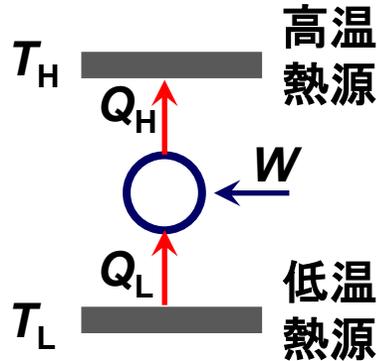
## 熱効率

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} \leq 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

熱源の温度差が大きいほど効率が高い

## 冷凍機／ヒートポンプ

ポンプのイメージ



## 成績係数

冷凍機 :  $\eta = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_L}{T_H - T_L}$

ヒートポンプ :  $\eta = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} \leq \frac{T_H}{T_H - T_L}$

冷凍機 :  $T_H \cong T_0$   $Q_L$  が有効エネルギー

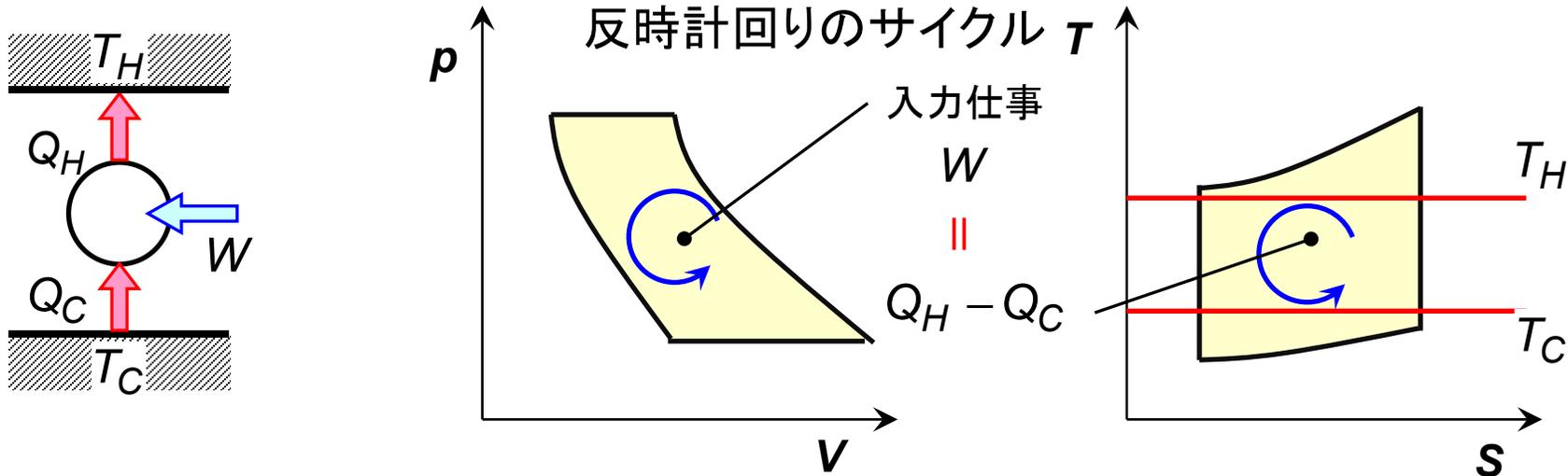
ヒートポンプ :  $T_L \cong T_0$   $Q_H$  が有効エネルギー

$T_0$  : 環境温度

真空ポンプのイメージ

水の汲み上げポンプのイメージ

熱源の温度差が小さいほど高い性能



- ◎ サイクルでのエネルギー保存

$$Q_H - Q_C = W$$

- ◎ サイクルの性能評価

成績係数 (COP)      Coefficient of Performance

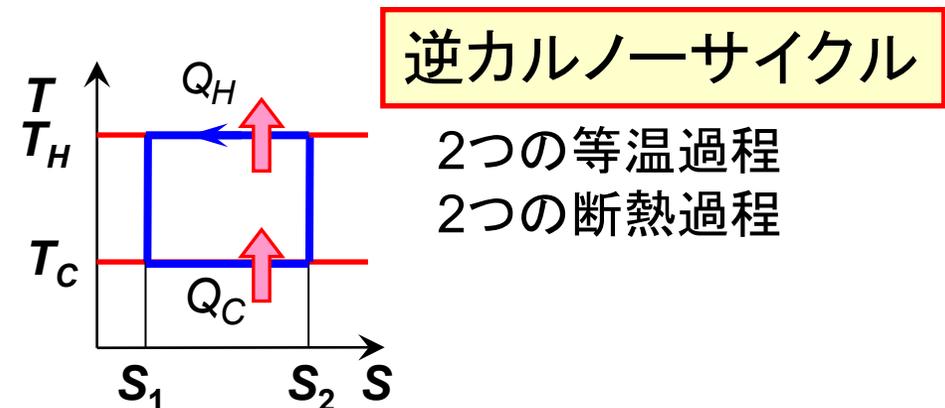
- 冷凍サイクル

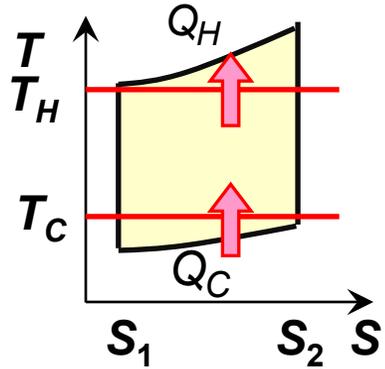
$$(\text{COP})_R = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C}$$

- ヒートポンプ

$$(\text{COP})_H = \frac{Q_H}{W} = 1 + (\text{COP})_R$$

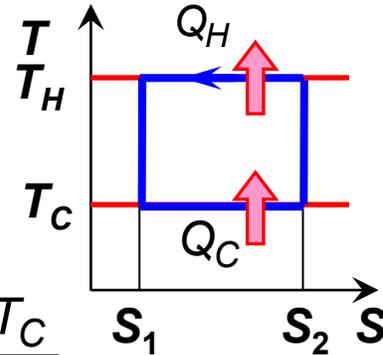
理想的なヒートポンプ





熱源と同じ温度で熱移動させることで入力仕事を最も小さくできる。

### 逆カルノーサイクル



2つの等温過程  
2つの断熱過程

$$\frac{Q_C}{Q_H} = \frac{T_C}{T_H}$$

### 成績係数 (COP)

#### 冷凍サイクル

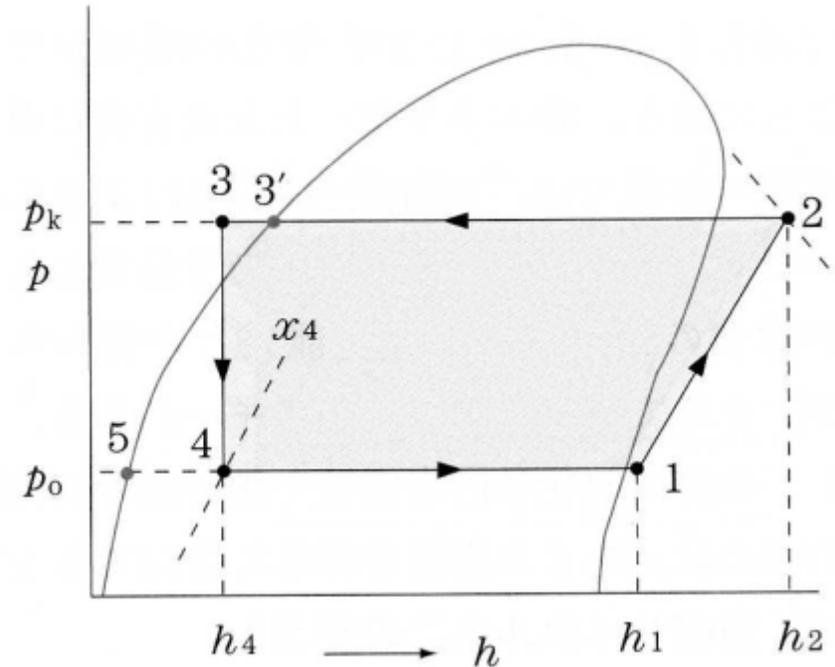
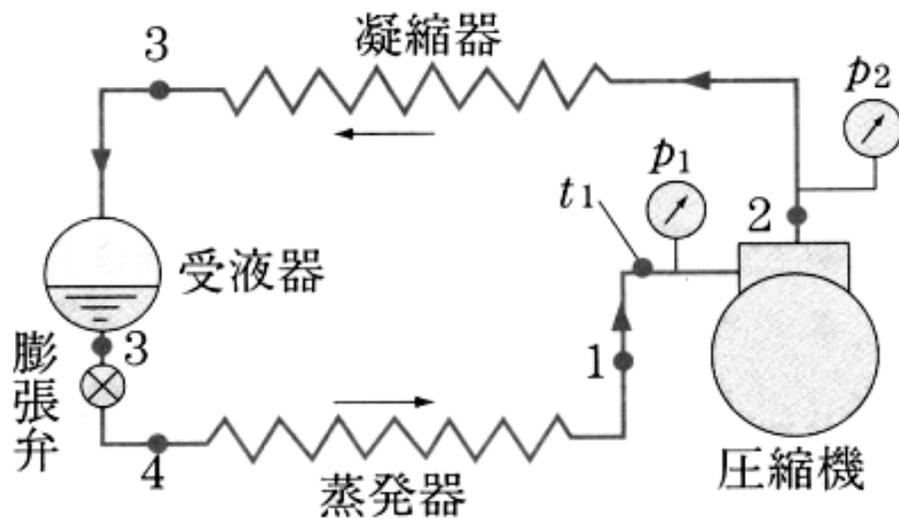
$$(COP)_R = \frac{Q_C}{W} = \frac{Q_C}{Q_H - Q_C} = \frac{T_C}{T_H - T_C}$$

#### ヒートポンプ

$$(COP)_H = \frac{Q_H}{W} = \frac{T_H}{T_H - T_C}$$

成績係数は熱源温度および温度差に強く依存する

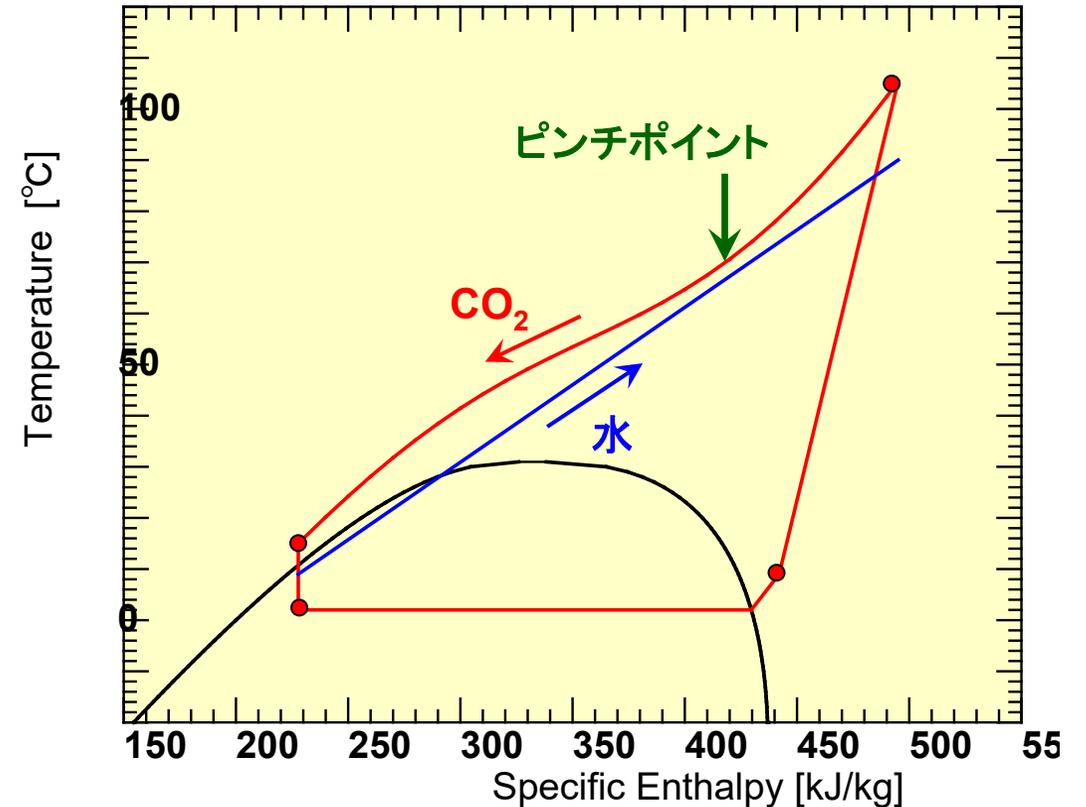
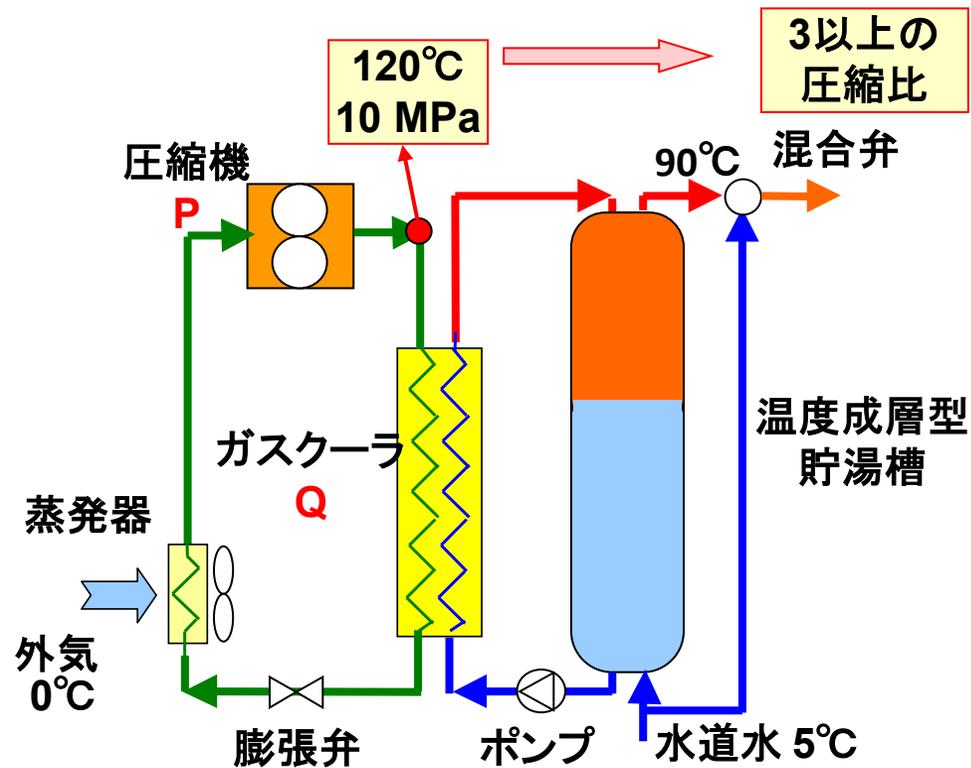
- **圧縮機** 過熱蒸気もしくは乾き飽和蒸気を蒸発圧力から凝縮圧力に圧縮昇圧  
理想：可逆断熱圧縮
- **凝縮器** 外部へ放熱凝縮し，飽和液もしくは過冷却液にする  
理想：熱源温度一定の場合，等温過程
- **蒸発器** 外部から吸熱蒸発し，過熱蒸気にする  
理想：熱源温度一定の場合，等温過程
- **膨張弁** 絞り過程で冷媒圧力を低下させる 等エンタルピー変化，不可逆過程



冷媒 : CO<sub>2</sub>

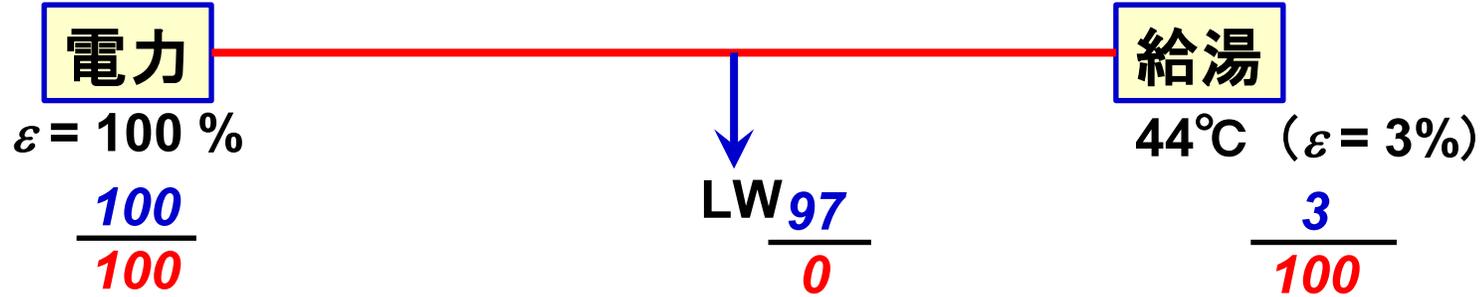
上水を約90°Cまで加熱

夜間電力使用, 蓄熱タンク容量の低減



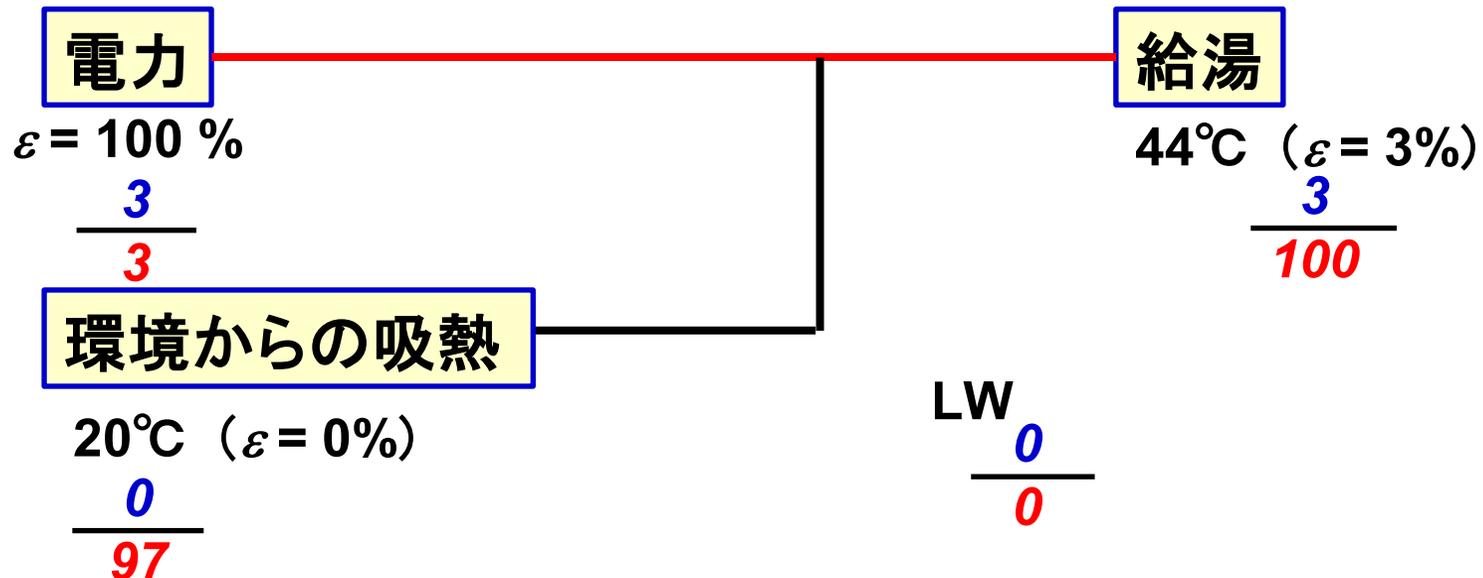
## 電気温水器

エネルギー源 : 電力 エクセルギー率 :  $\varepsilon = 100\%$



## 可逆サイクルの場合

エネルギー源 : 電力 エクセルギー率 :  $\varepsilon = 100\%$



成績係数  
 $COP = 33.3$

## 実用システムの場合

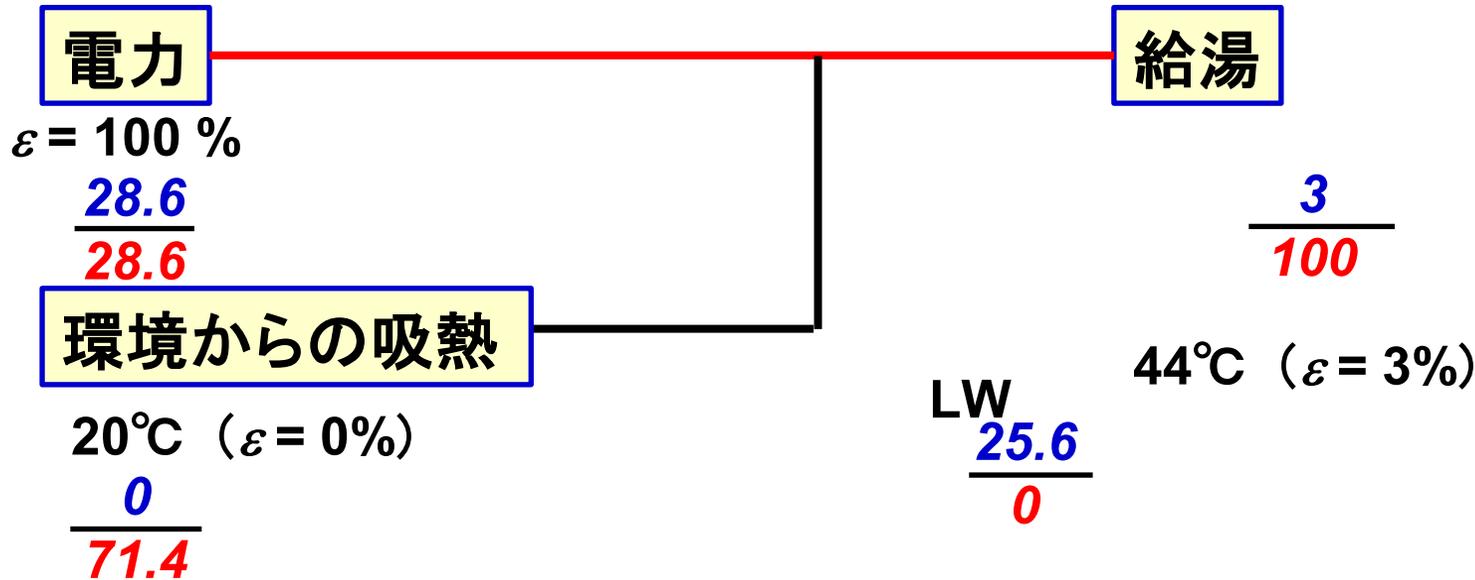
圧縮機での不可逆ロス, 熱交換器での熱輸送に伴う不可逆ロス,  
膨張弁での断熱膨張における不可逆ロス

エネルギー源 : 電力 エクセルギー率 :  $\varepsilon = 100\%$

成績係数

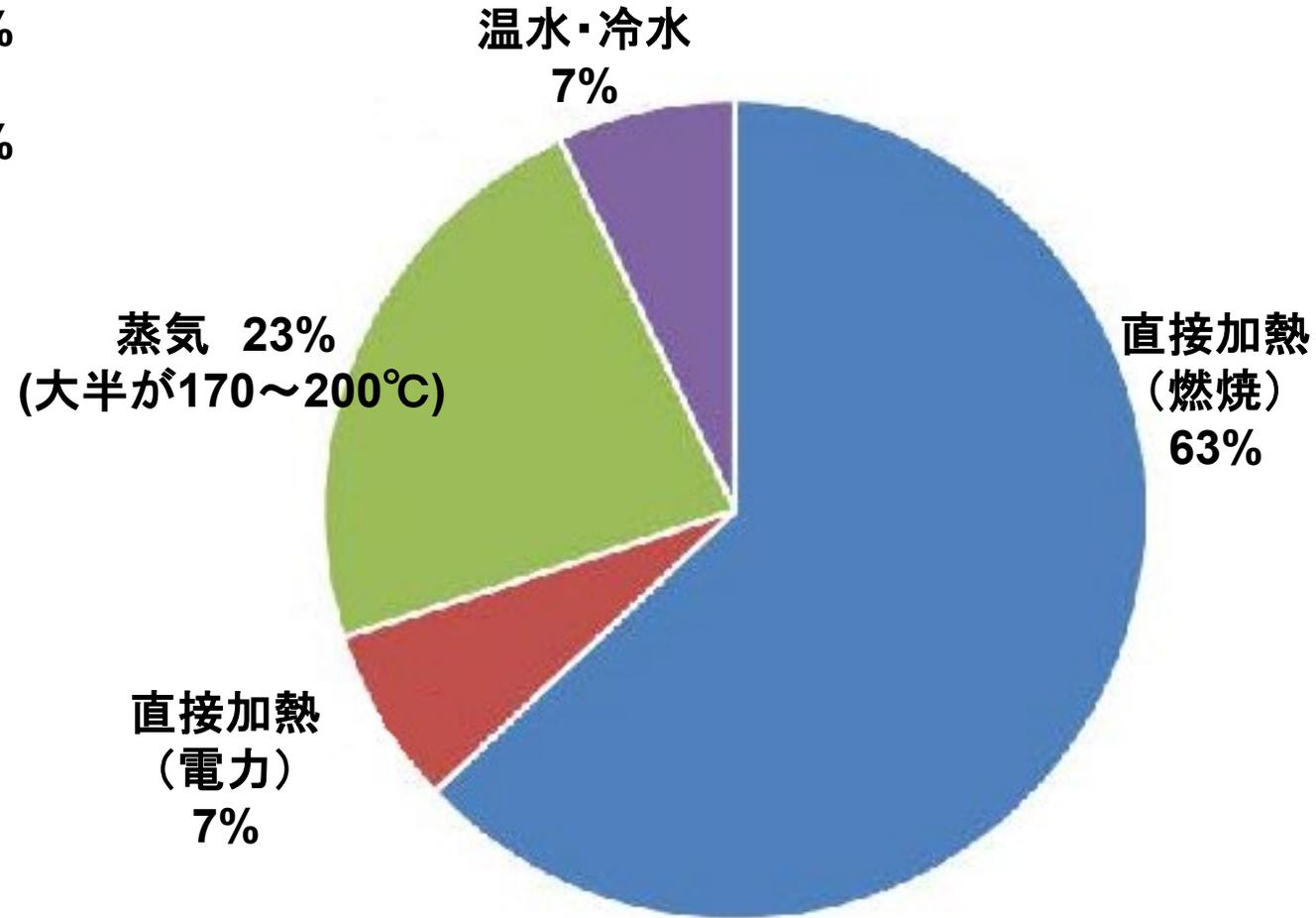
[トップラナー基準  
(寒冷地仕様以外)]

$COP = 3.5$

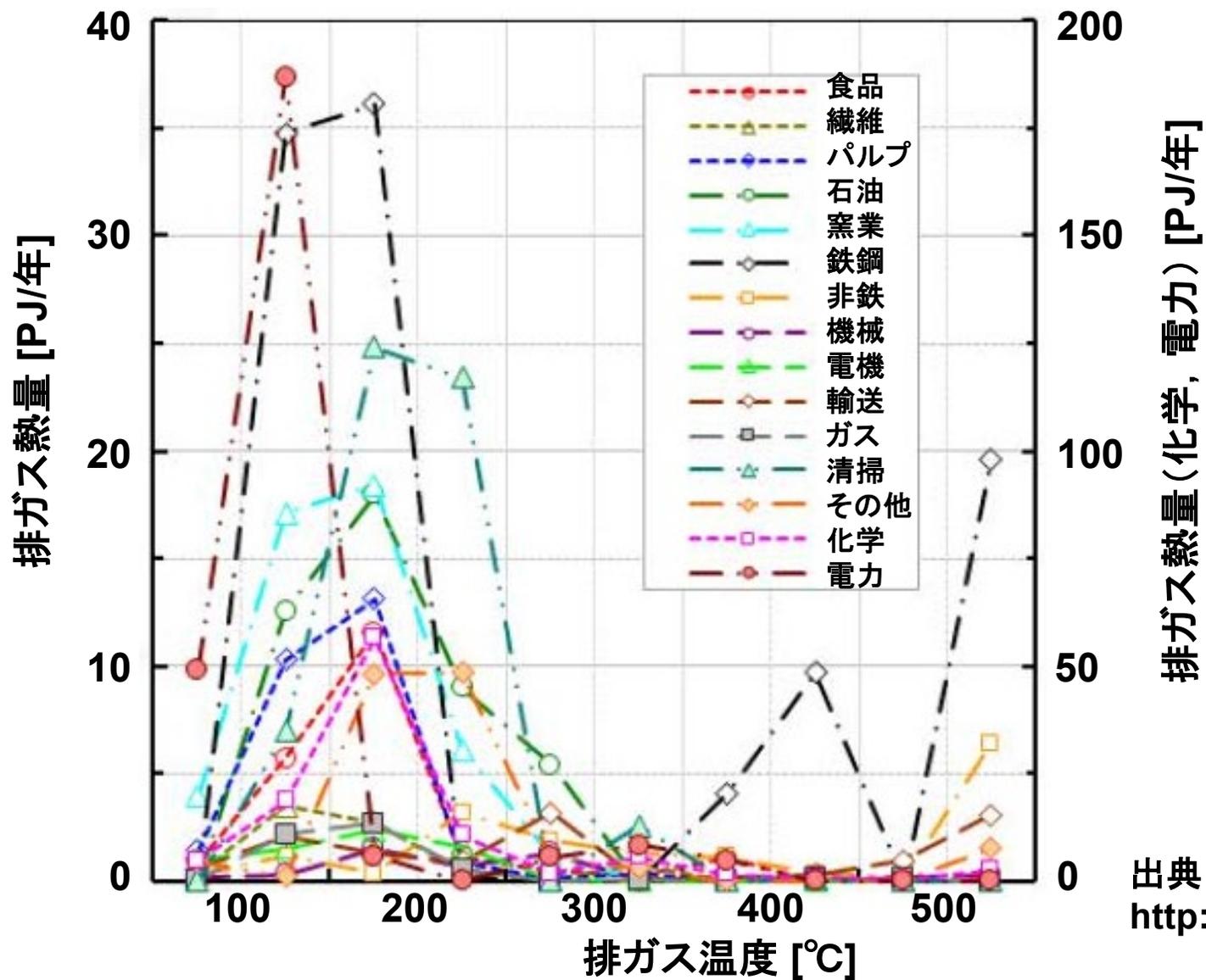


エクセルギー効率 = 10.5%

ボイラー	71%
コージェネ	8%
その他排熱回収	21%

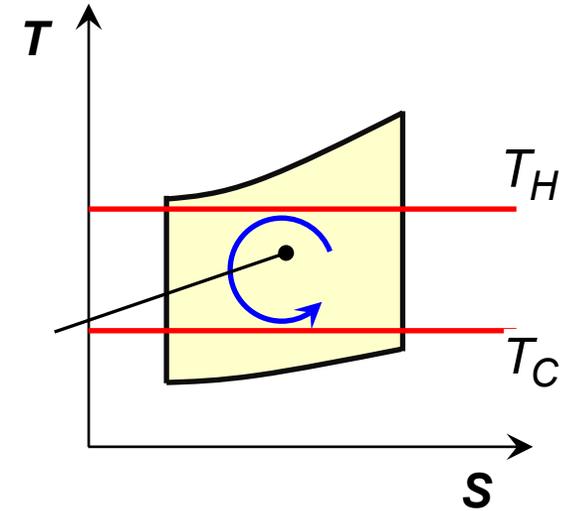


出典:「第15回エレクトロヒートシンポジウム」  
経済産業省資源エネルギー庁 基調講演資料

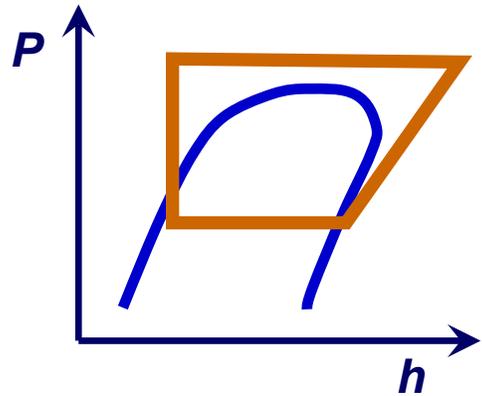


出典: 産業分野の排熱実態調査 調査報告書  
<http://www.thermat.jp/HainetsuChousa/>

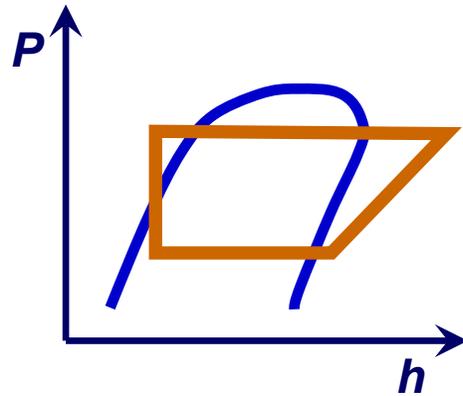
- ✓ 温度リフト(熱源温度⇒供給温度)が大きいほど成績係数は低下する
- ✓ 熱交換温度差が大きいほど成績係数は低下する  
⇒ 熱交換器の大型化
- ✓ 使用冷媒の選定  
地球環境(ODP=0, 低GWP), 毒性なし, 燃焼性
- ✓ 大容量化
- ✓ 熱源および熱供給先の温度変化



## Trans-critical cycle



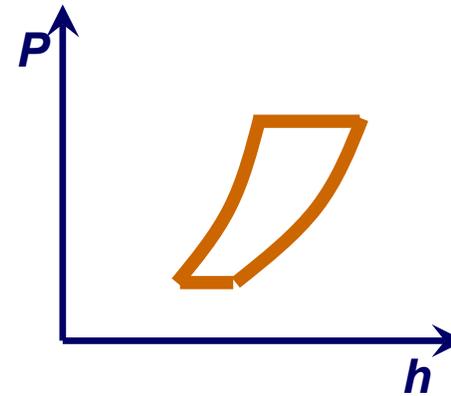
## Sub-critical cycle



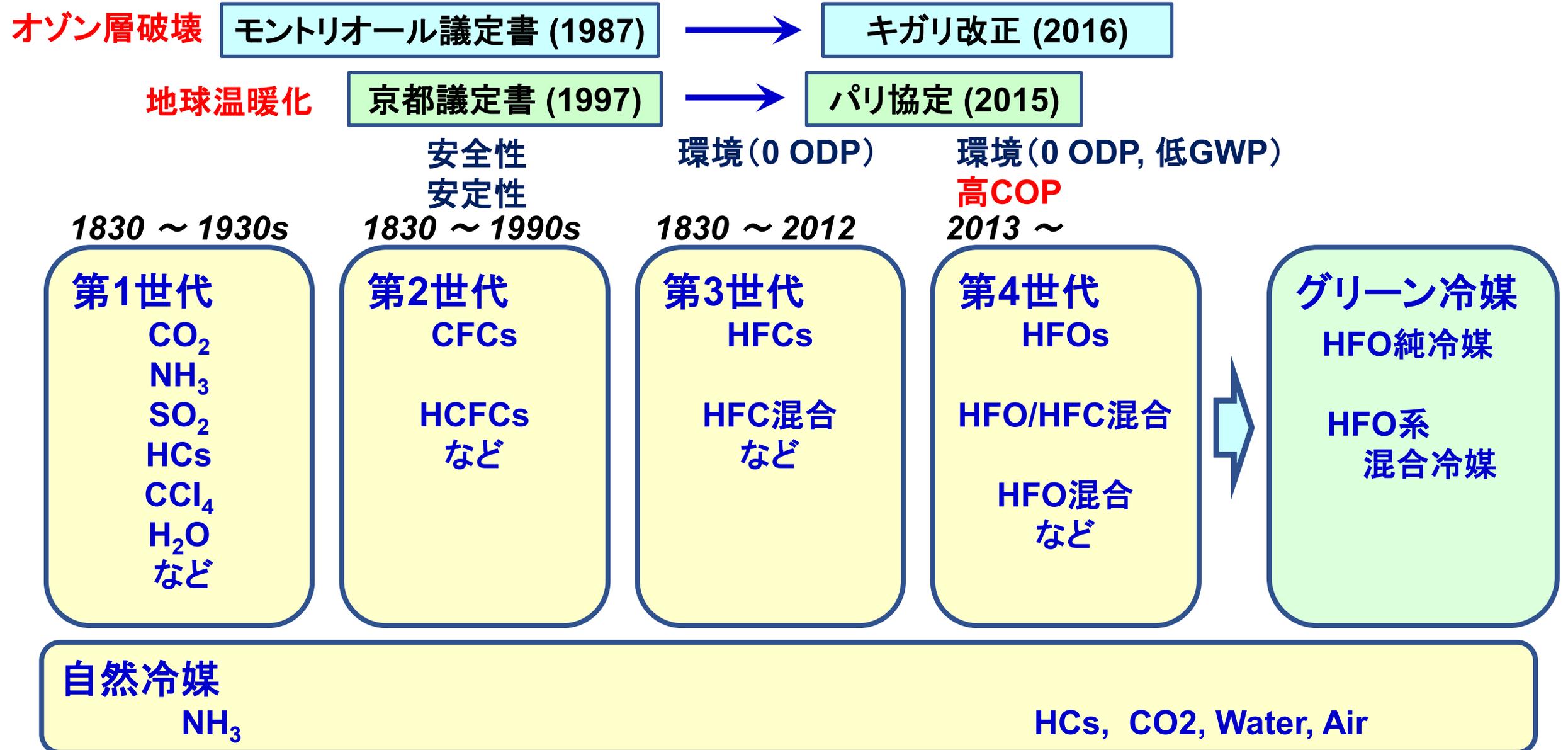
蒸気供給の場合、  
蒸気の断熱圧縮(MVR)で高温化

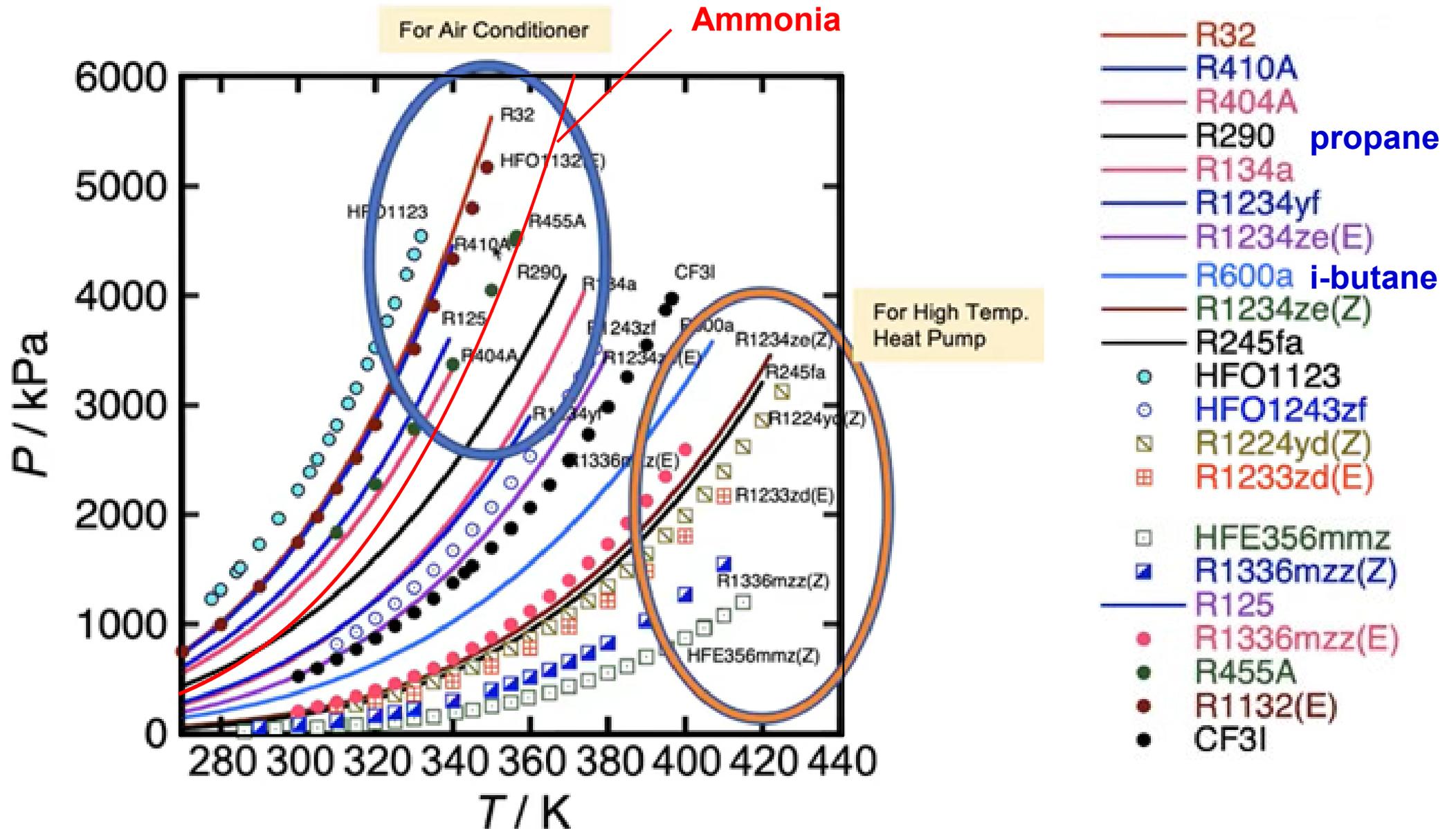
MVR:  
Mechanical Vapor Recompression

## Reversed Brayton cycle

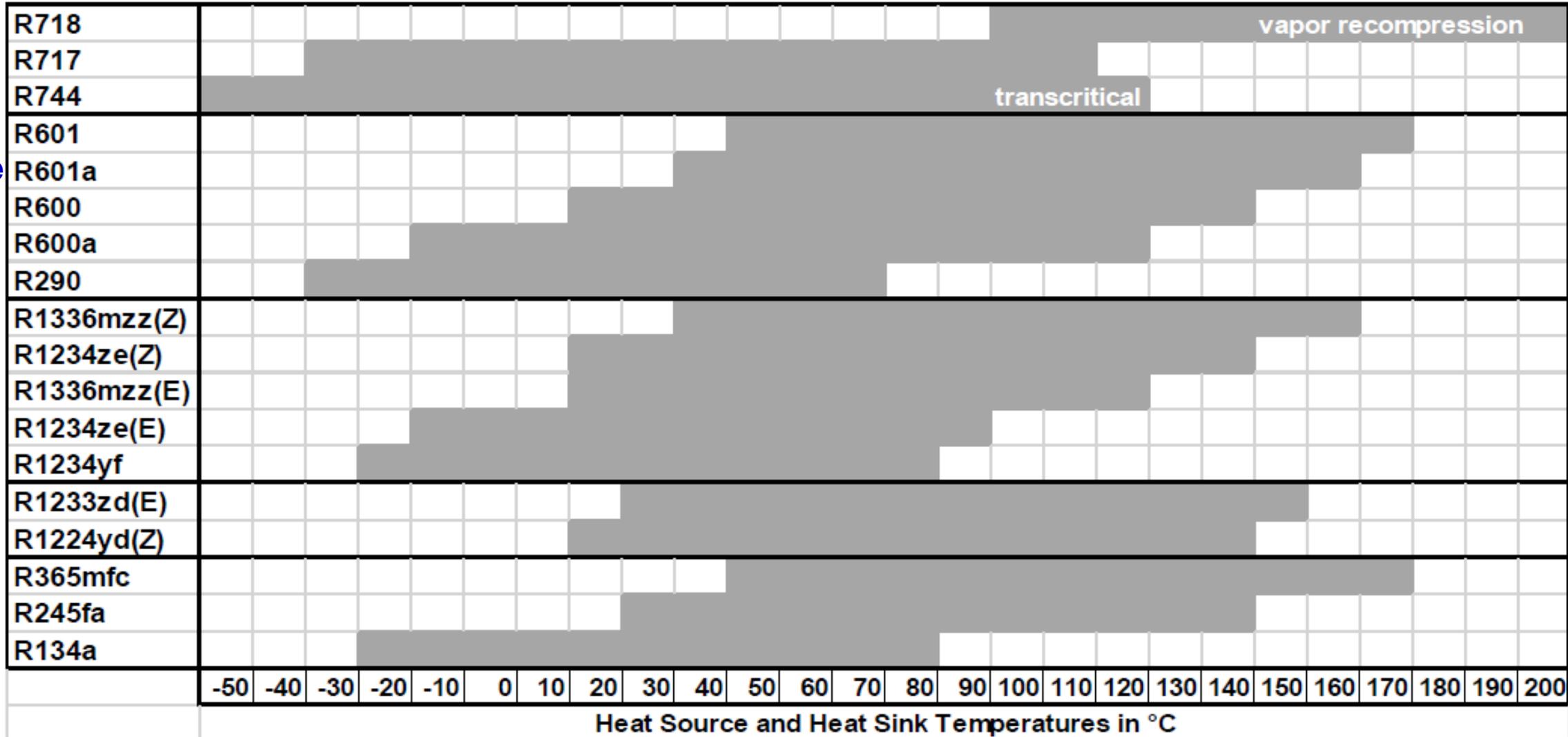


## Compression + absorption hybrid

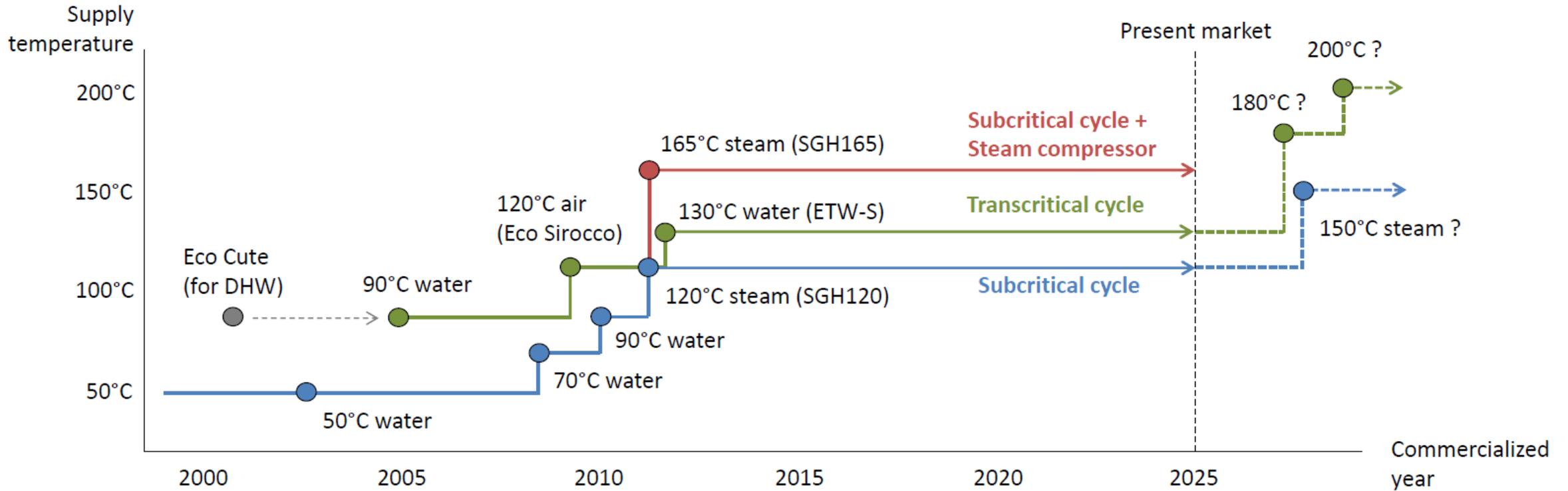


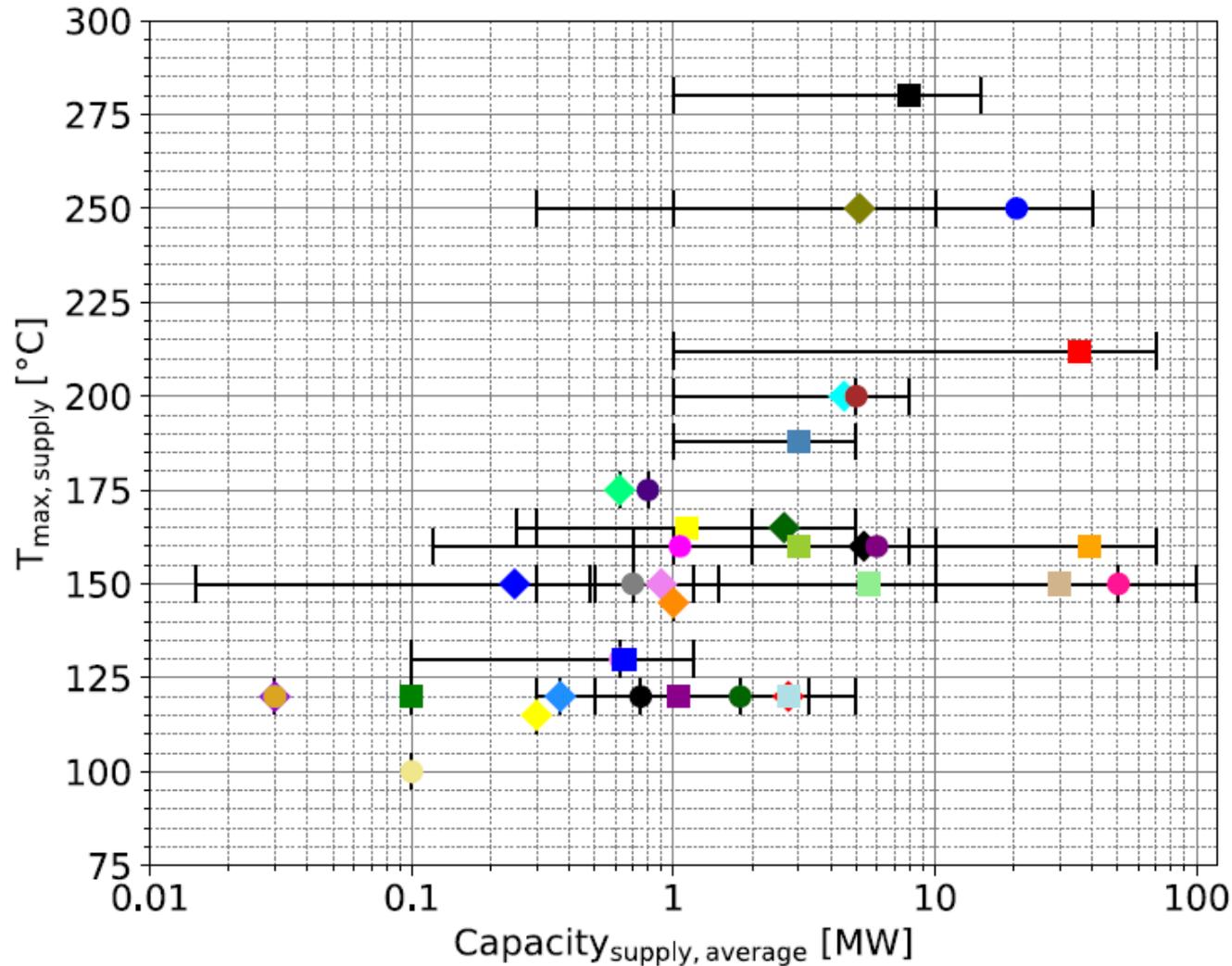


water  
ammonia  
CO<sub>2</sub>  
n-pentane  
isopentane  
n-butane  
isobutane  
propane



Note: The lower limit is defined by the boiling temperature at 1 bar and the upper limit is 15 K below the critical temperature for subcritical condensation. Exceptions are R744 (transcritical up to 120 °C) and R718 (vapor recompression).





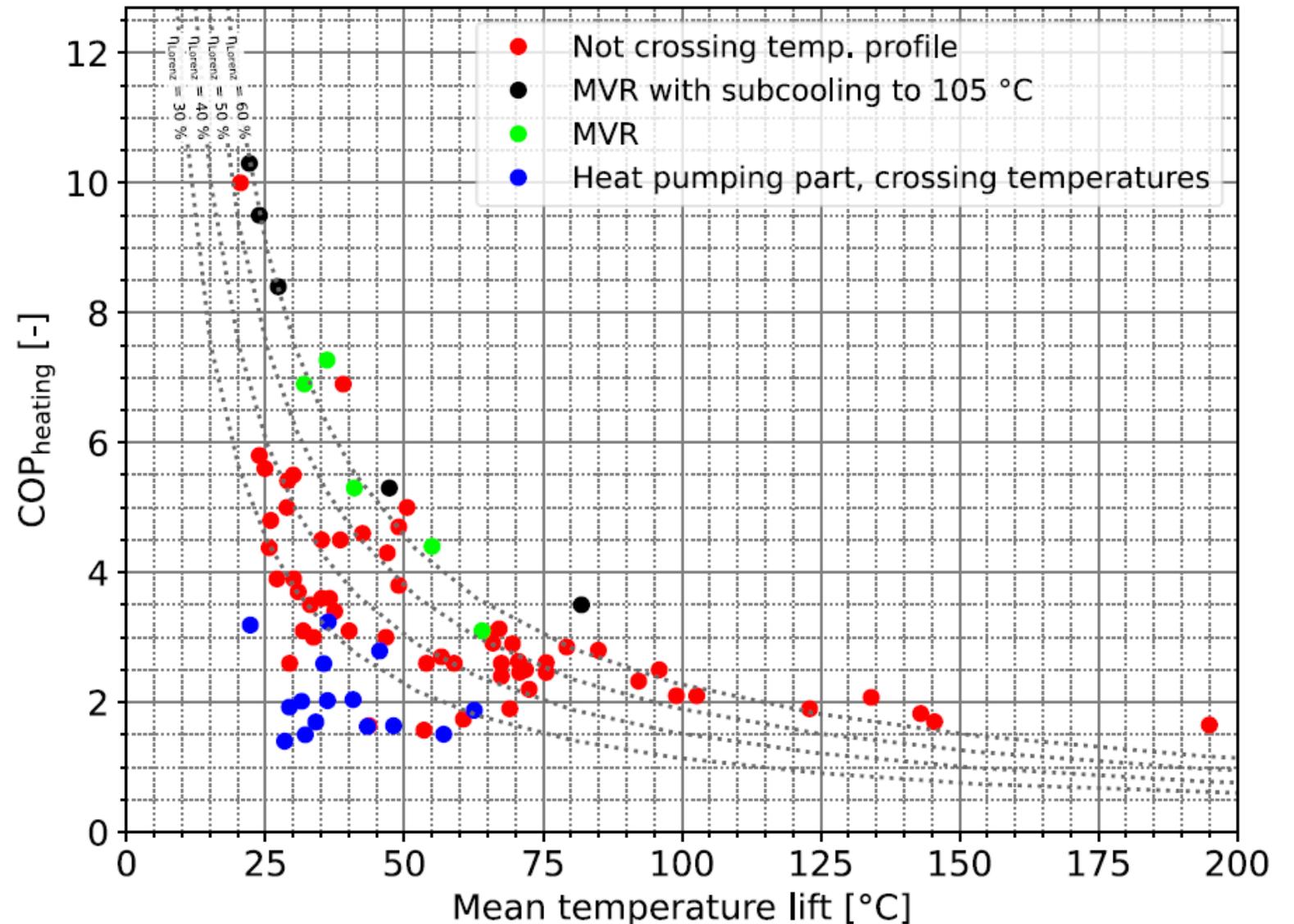
- Spilling
- ◆ Enerin
- Turboden
- Piller
- ◆ Heaten
- Olvondo
- ToCircle
- ◆ Kobelco (SGH-165)
- Kobelco (MSRC)
- SRM
- ◆ SPH
- Rank
- Weel & Sandvig
- ◆ AGO Energie
- Enertime
- Siemens Energy
- ◆ Pars Markina
- ecop
- Aneo Industry
- ◆ Futraheat
- Epcon
- MAN Energy Solutions
- ◆ Mayekawa Europe (FC comp.)
- Mitsubishi
- GEA Refrigeration Netherlands
- ◆ Fuji Electric
- Emerson
- Mayekawa (EcoSirocco)
- ◆ Kobelco (SGH-120)
- Mayekawa Europe (HS comp.)
- Fenagy
- ◆ Hybrid Energy
- COMBITHERM GmbH
- Johnson Controls
- ◆ Skala Fabrikk
- Mayekawa (EcoCircuit)

- Higher max. supply temperatures for higher capacities

# 温度リフトに対する成績係数(開発品の調査)

成績係数

COP : coefficient of performance



- ✓ 成績係数は熱力学第1法則に基づく評価であり、可逆サイクルで最大となる.
- ✓ 成績係数は運転条件に強く依存する.
- ✓ 所定の運転条件に対する性能評価が重要であり、不可逆性による性能低下で性能評価することが重要である.

## 可逆サイクルでの成績係数に対する比率で評価

### □ 熱源温度一定の場合

逆カルノーサイクル

$$COP_{\text{Carnot}} = \frac{T_H}{T_H - T_L}$$

### □ 熱源温度が変化する場合

ローレンツサイクル

$$COP_{\text{Lorenz}} = \frac{\bar{T}_H}{\bar{T}_H - \bar{T}_L}$$

$$\bar{T} = \frac{T_2 - T_1}{\ln \frac{T_2}{T_1}}$$

### 第2法則効率

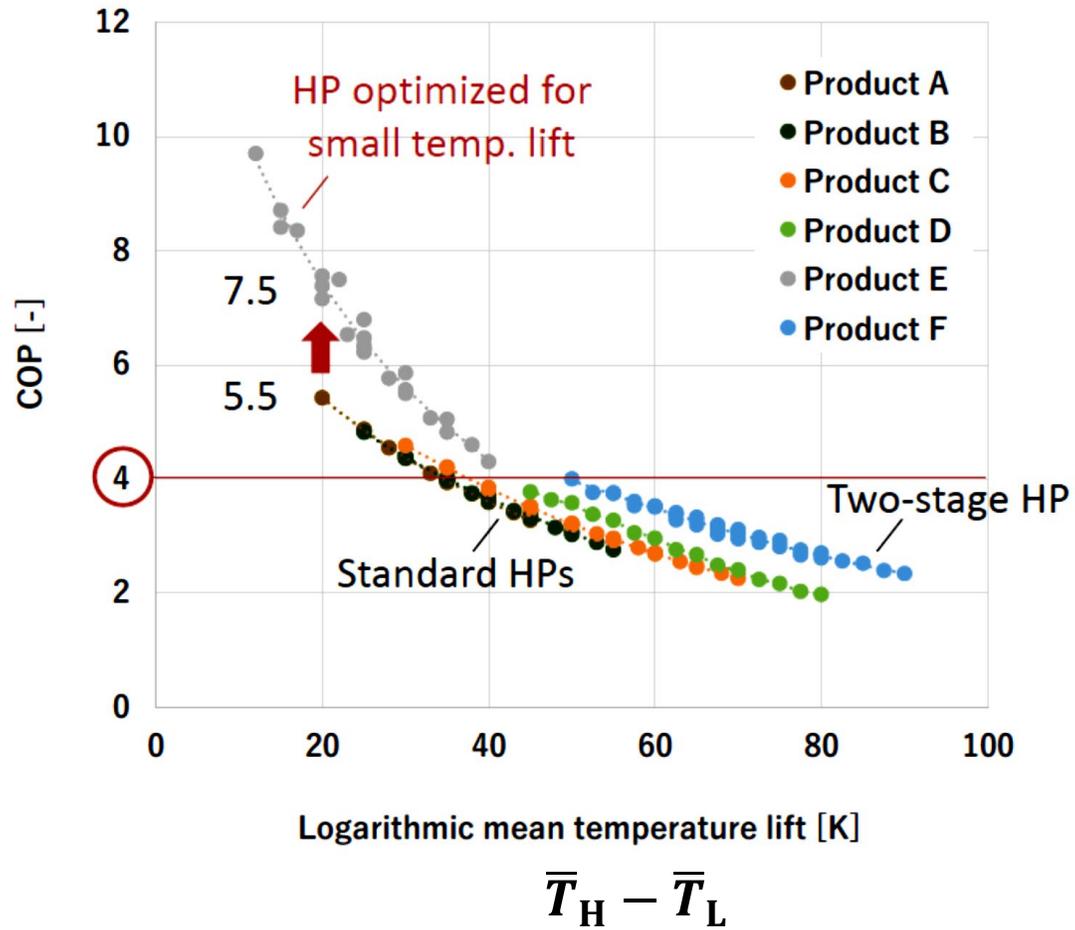
Carnot 効率

$$\eta_{\text{Carnot}} = \frac{COP}{COP_{\text{Carnot}}}$$

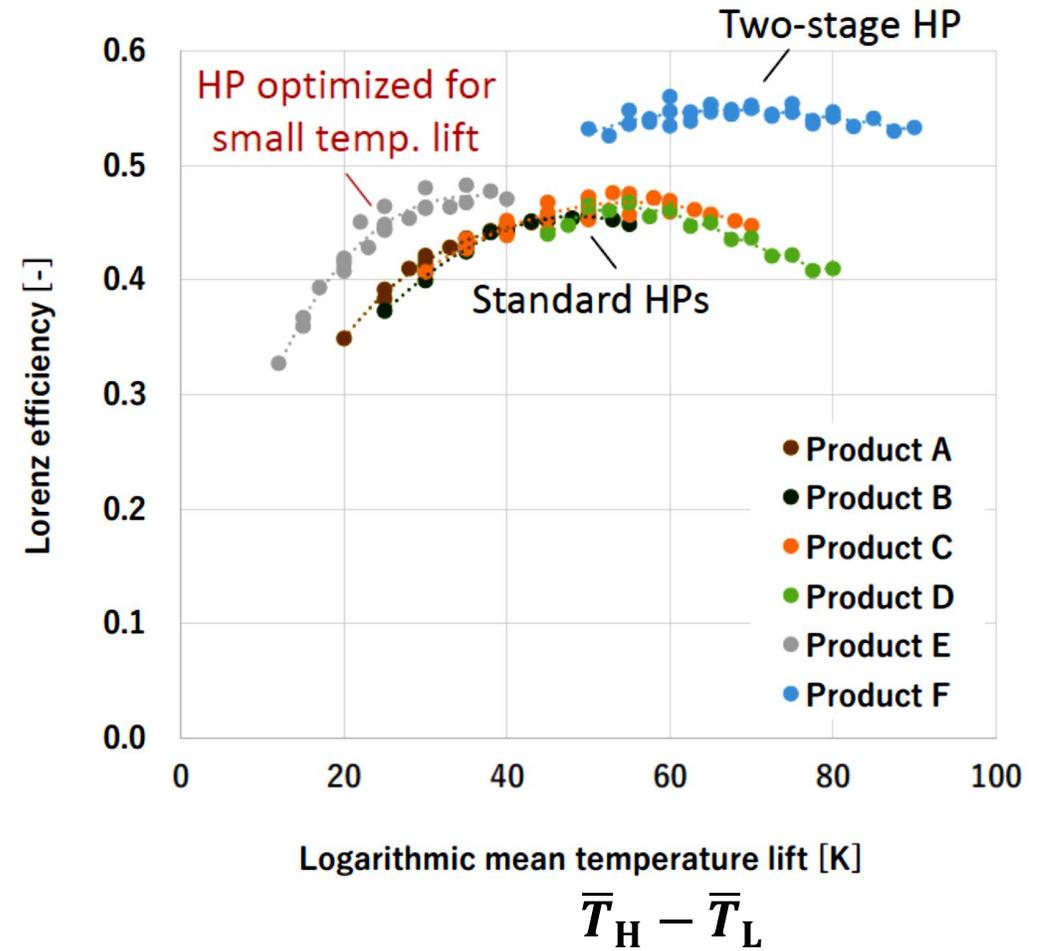
Lorenz 効率

$$\eta_{\text{Lorenz}} = \frac{COP}{COP_{\text{Lorenz}}}$$

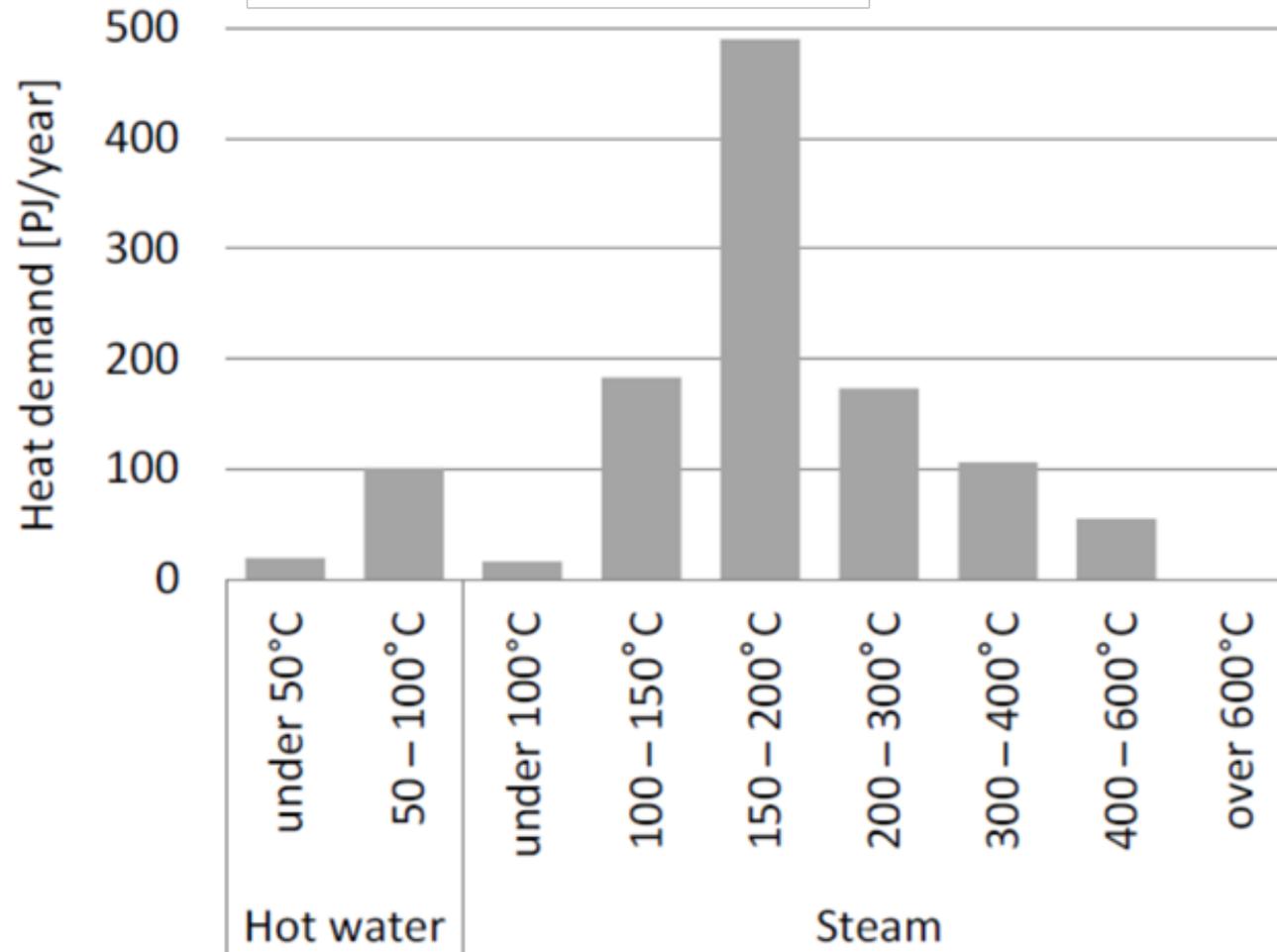
## □ 成績係数



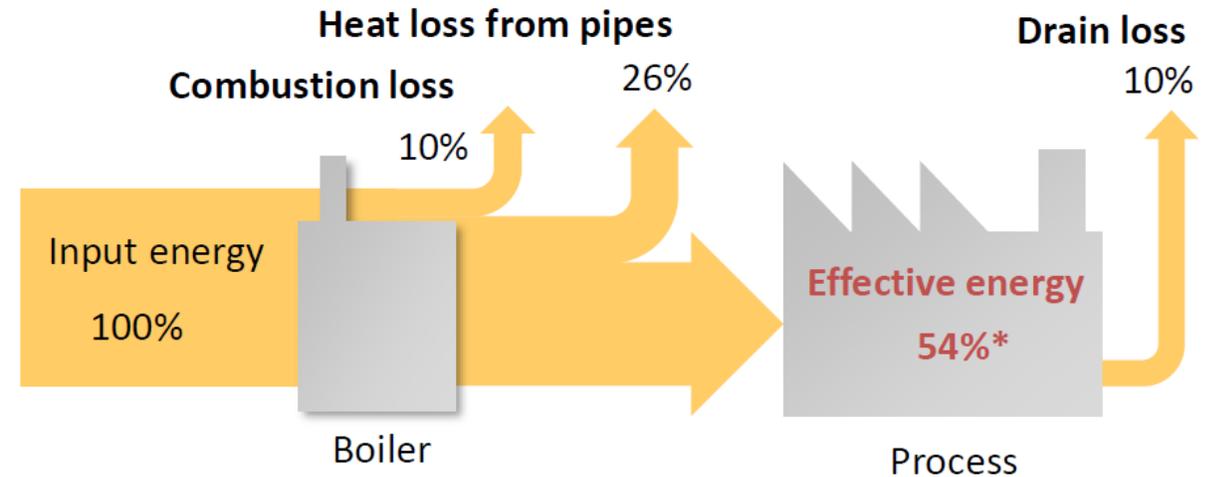
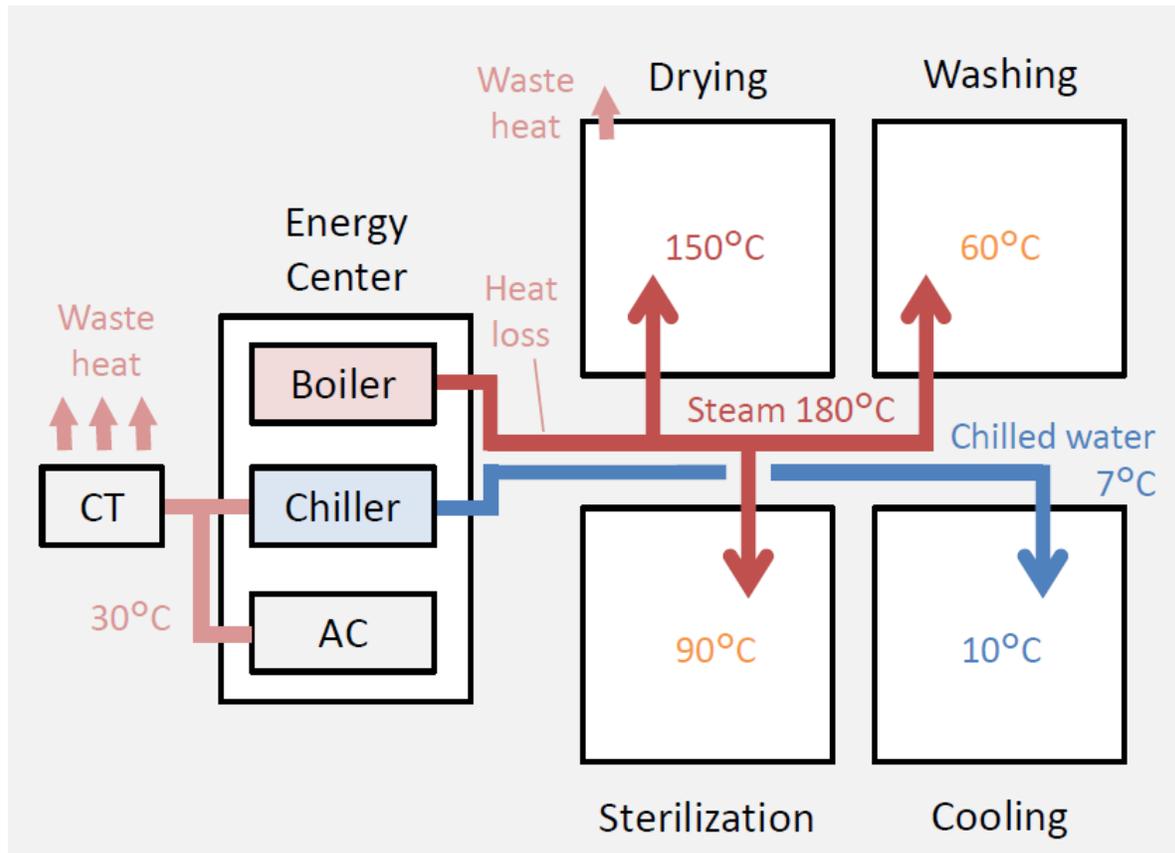
## □ Lorenz 効率



- ✓ 供給温度の増大
- ✓ 熱利用温度の低下とヒートポンプの適用

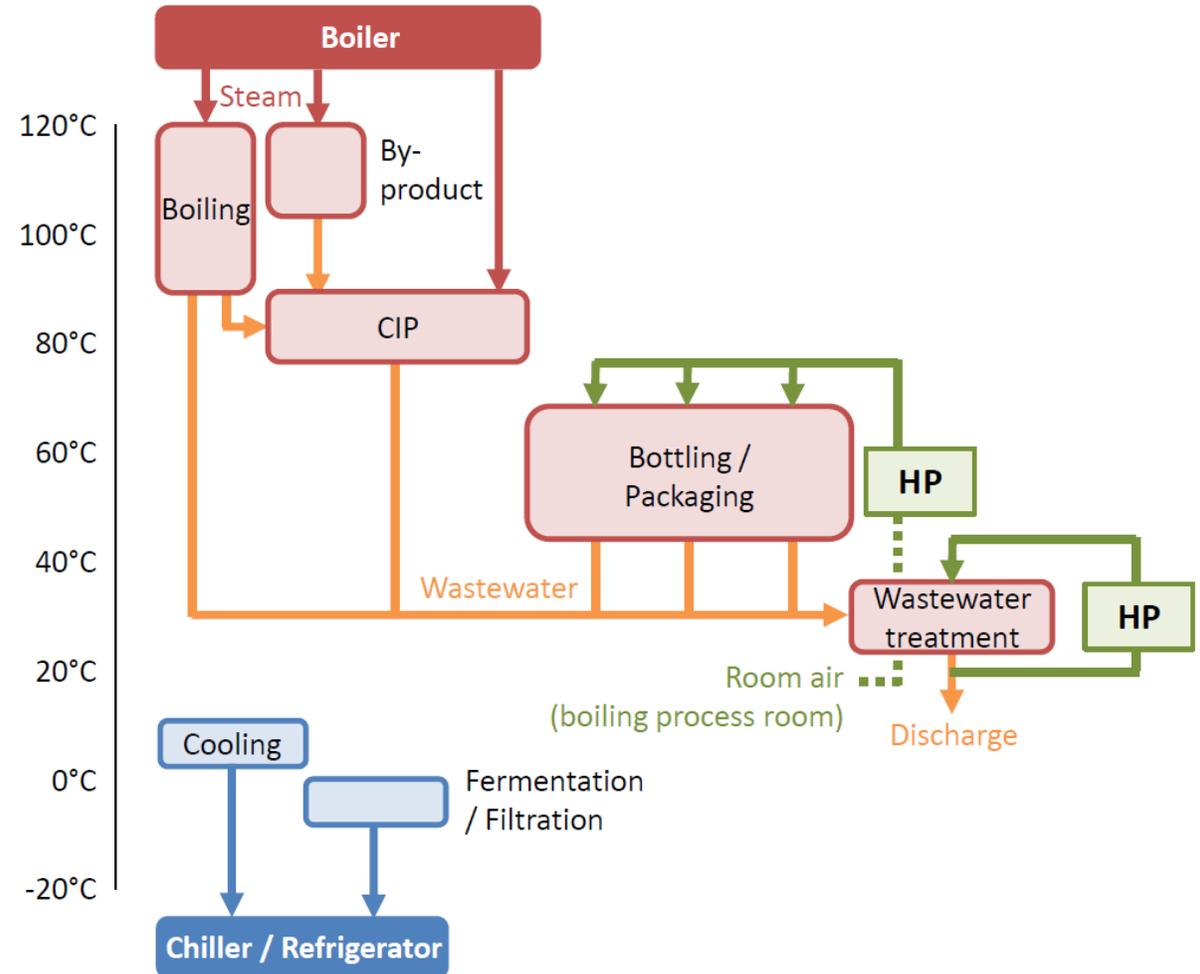
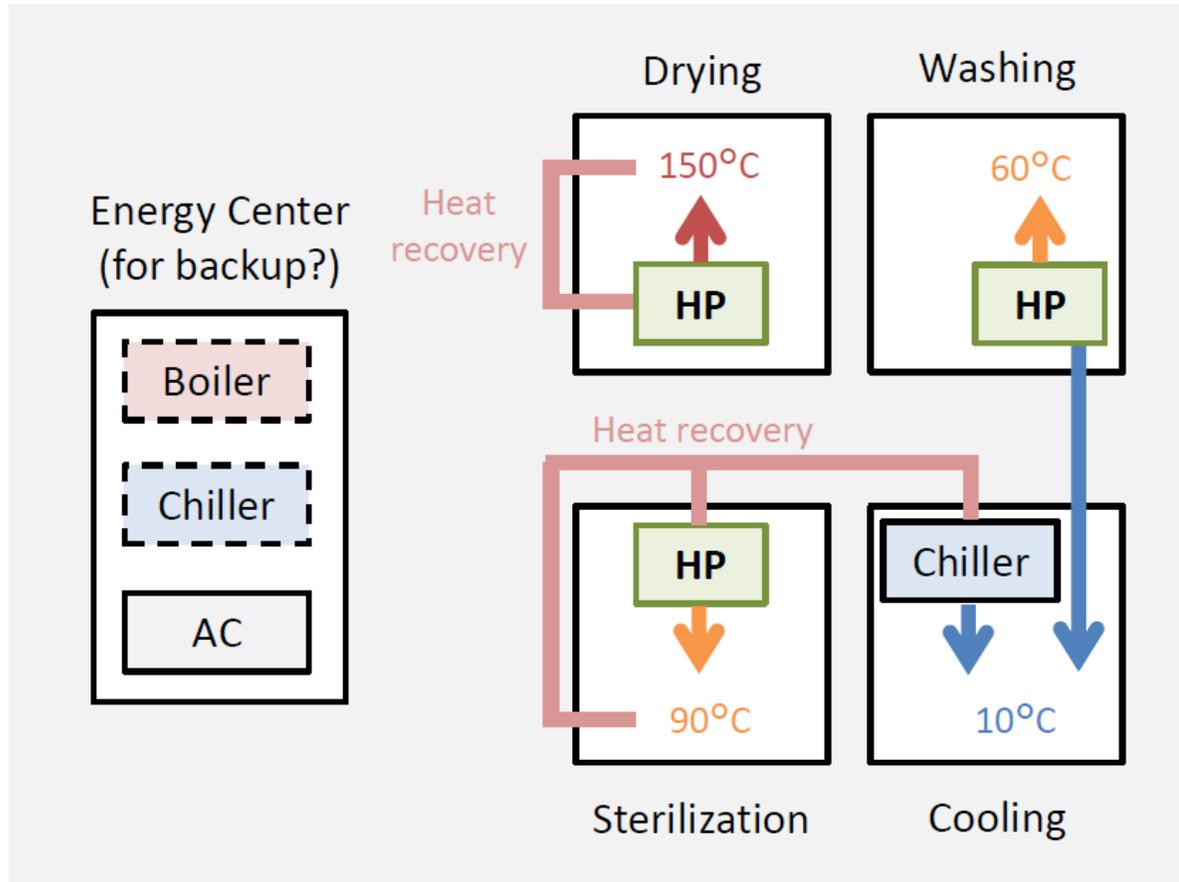


- ✓ エネルギーセンターから蒸気でエネルギー供給
- ✓ 利用温度より高い温度で供給
- ✓ 大きな配管での熱ロス



\* Averaged value of 29 factories by actual survey

- ✓ 比較的低温の熱需要はヒートポンプで供給
- ✓ 蒸気は供給を変更することで熱ロスの低減



- カーボンニュートラルのためには熱供給の電化, もしくは燃料の非炭素化が必須
- ヒートポンプの成績係数は熱源温度およびその熱容量(温度変化)に強く依存する
- 排熱回収と熱供給の組み合わせが必須
- 冷媒は, PFAS問題があり世界の動向を注視する必要がある.
- 日本では産業用として比較的中容量(< 1 MW)が多い.  
供給温度 200°Cをターゲットとした研究開発が進められている.
- 欧州では地域熱供給も対象としており大容量(< 50 MW)が多い.  
ETES(Electro-Thermal-Energy-Storage), カルノーバッテリーの開発も進められている.