

持続可能な社会を目指すものごとの考え方： ライフサイクル思考

東京大学 未来ビジョン研究センター

菊池 康紀

兼担：大学院工学系研究科化学システム工学専攻

兼務：「プラチナ社会」総括寄付講座

兼務：未来戦略LCA連携研究機構

兼務：地域未来社会連携研究機構

ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp



東京大学未来ビジョン研究センター
Institute for Future Initiatives, The University of Tokyo



2024年7月29日(月)

将来社会に向けたビジョンとシナリオ

パリ協定 (2015採択、2020～)

DEVELOPMENT GOALS



持続可能な開発目標
(2015採択、2030目標)



Society 5.0
(2016～)

地域循環共生圏
(2018～)

2015

2022

短期的対策

2030

2040

中期的
ビジョン

2050

長期的
ビジョン

超長期的
ビジョン

ゼロカーボン宣言
気候非常事態宣言
温室効果ガス実質ゼロ

フォアキャスト
ステイディング

研究・開発
に合わせた
技術評価と
シナリオ計画

バックキャスト
ステイディング

ビジョン

- ・ 持続可能な社会
- ・ 循環型社会

多様なビジョンが提案され、
アクションが検討されている

- 「宣言」や「計画」の発信は進みつつある
- では、具体的には、いつまでに、何をすればよいのか？
- 何ができるか？

- ・ カーボンニュートラル
- ・ ネイチャーポジティブ
- ・ サーキュラーエコノミー



化学産業のカーボンニュートラル(CN)化

世界経済・マテリアルフローモデルにおいて
“2050年に化学産業がカーボンニュートラルになっている”ことを制約条件として解析

カーボンニュートラル化後の社会における 化成品向け炭素源

化石資源 由来炭素

- カーボンニュートラルが前提となり、常に等量の炭素を回収する**CCSが必要**
- コスト大幅増

リサイクル 由来炭素

- 原料となる廃棄物の**発生量/調達量に限界**

バイオ 由来炭素 (含CO₂資化)

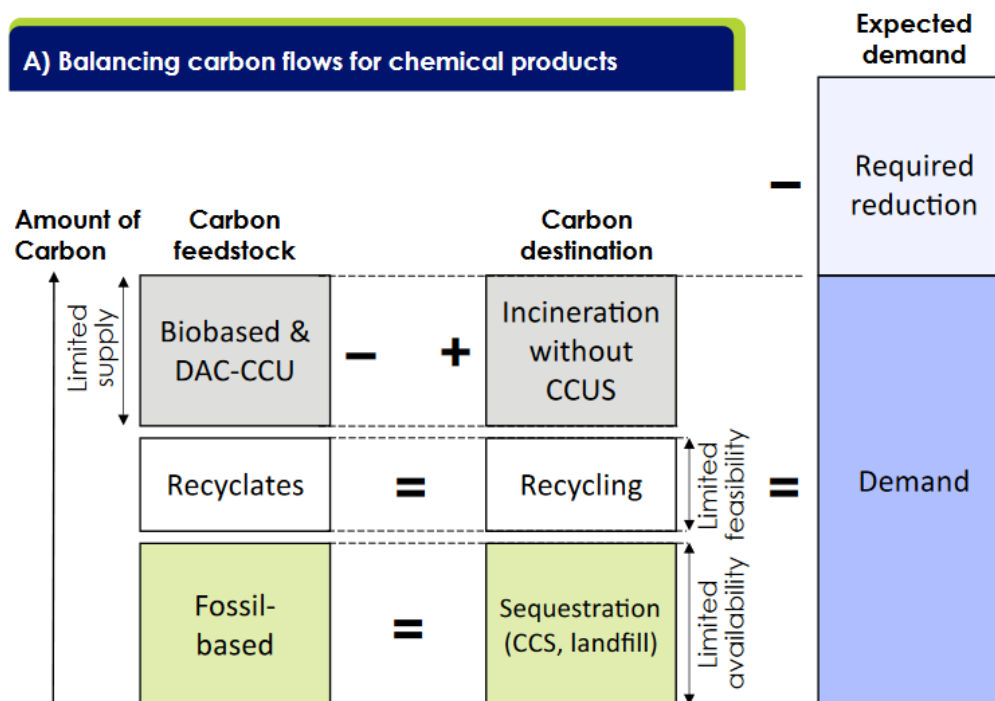
- 原料となる植物資源の**調達量に限界**
- 適用可能な原料と生産可能な製品の幅を広げることが重要

Meng, F., Wagner, A., Kremer, A.B., Kanazawa, D., Leung, J.J., Gault, P., Guan, M., Herrmann, S., Speelman, E., Sauter, P., Lingeswaran, S., Stuchtey, M.M., Hansen, K., Masanet, E., Serrenho, A.C., Ishii, N., Kikuchi, Y., Cullen, J.M., Planet compatible pathways for transitioning the chemical industry, PNAS, 120 (8) (2023) e2218294120, <https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>

<https://cgic.ifi.u-tokyo.ac.jp/topics/20220913-2/>



A) Balancing carbon flows for chemical products



シナリオ別の化成品需給構造

<https://doi.org/10.1073/pnas.2218294120>

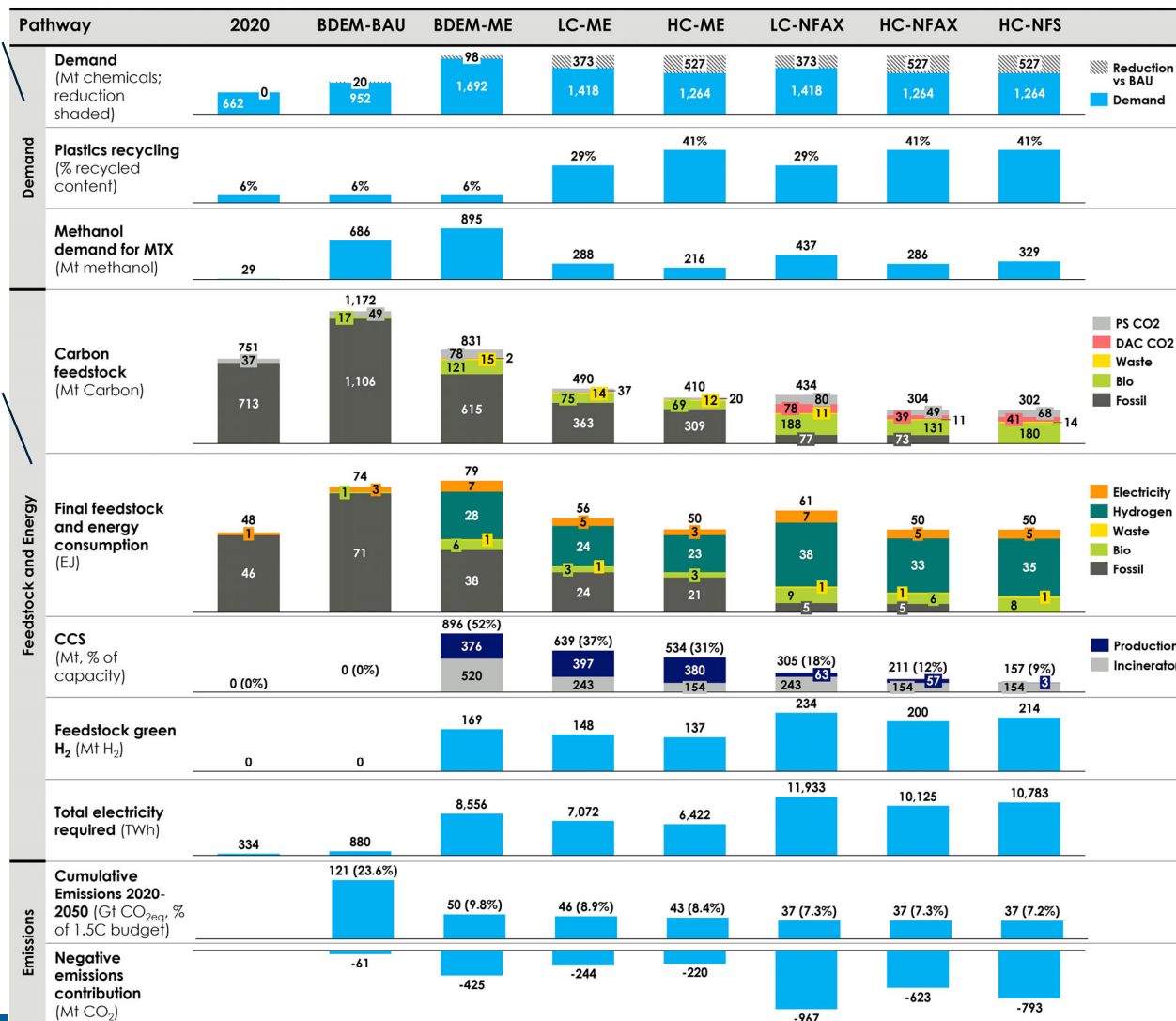
需要側・供給側のシナリオによって
化学物質の必要量が変化

BAU/BDEM: Business As Usual in supply/demand
ME: Most Economic
NFAX: No fossil new-build after 2030
NFS: No fossil strict
HC/LC: High/Low circularity

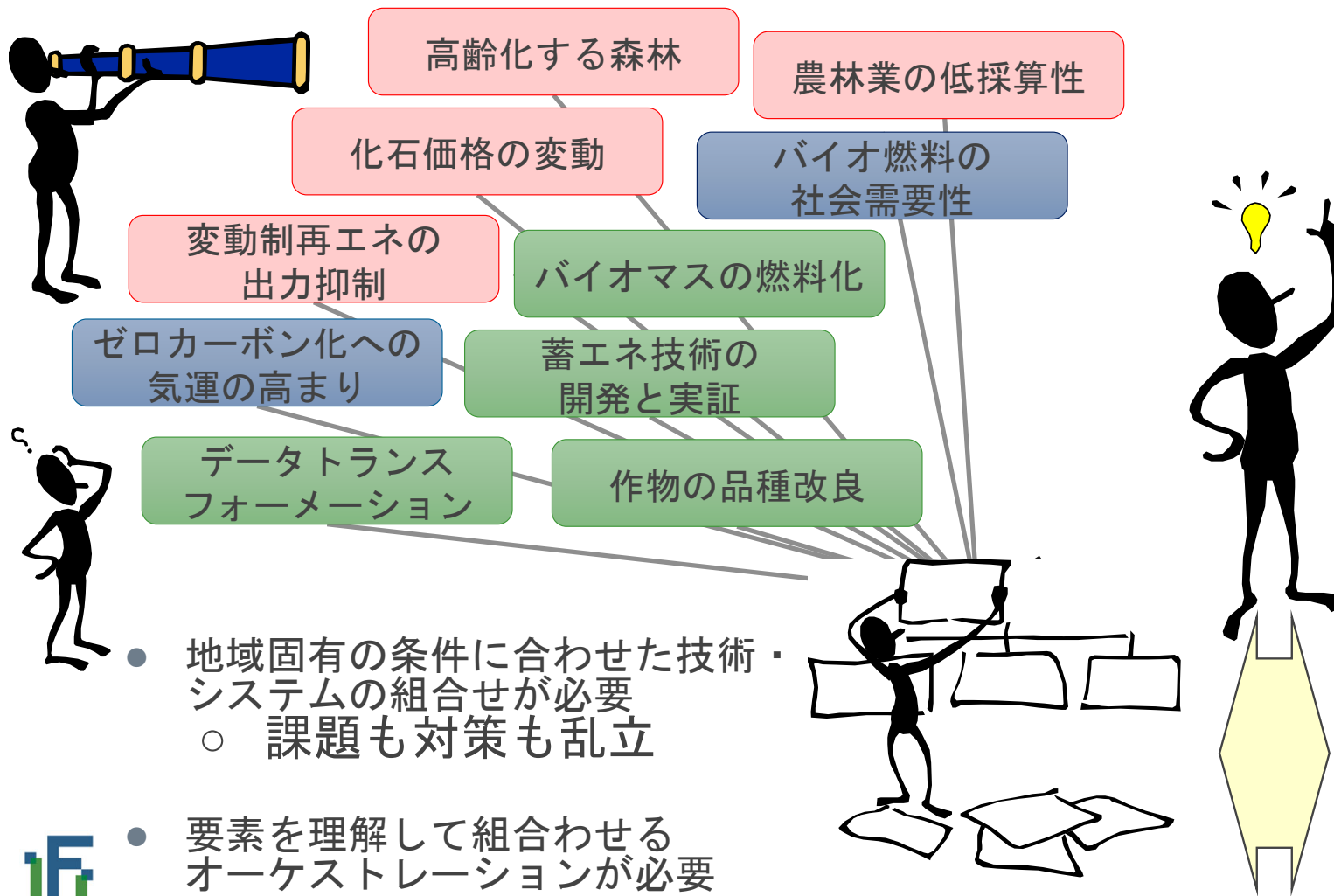
CCS、DAC、水素、再エネ電源の高い寄与

- 化石が継続利用できる（等量CCS設置）
場合にはDACが不要
- DAC導入は水素原単位次第
- 再エネ電源が不足するとDACが高負荷に

- DACとリサイクル・バイオマスが競合
- DACとCCSが間接競合
- DACと水素・電源が相互作用
- 化石資源の継続利用可否が影響



地球も地域も社会も持続するには



GXにおける要素

CN: Carbon neutral

NP: Nature positive

CEB: Circular bioeconomy

地域と社会の持続性に
必要な要素

- 生態系保全
 - ・ 森林の健全化
 - ・ 自然の再興
(ネイチャーポジティブ)
- 食料の安定生産
 - ・ 栄養資源の循環利用
 - ・ 土地の使用と改善
- 地域産業の強化
 - ・ 地域資源を活用する雇用の創出
- 持続可能な地域交通
 - ・ サービスの展開による持続
- 強靱なエネルギーシステム
 - ・ 熱電需給構造の強化

ライフサイクルと技術評価・システム設計

ライフサイクルアセスメント(LCA)

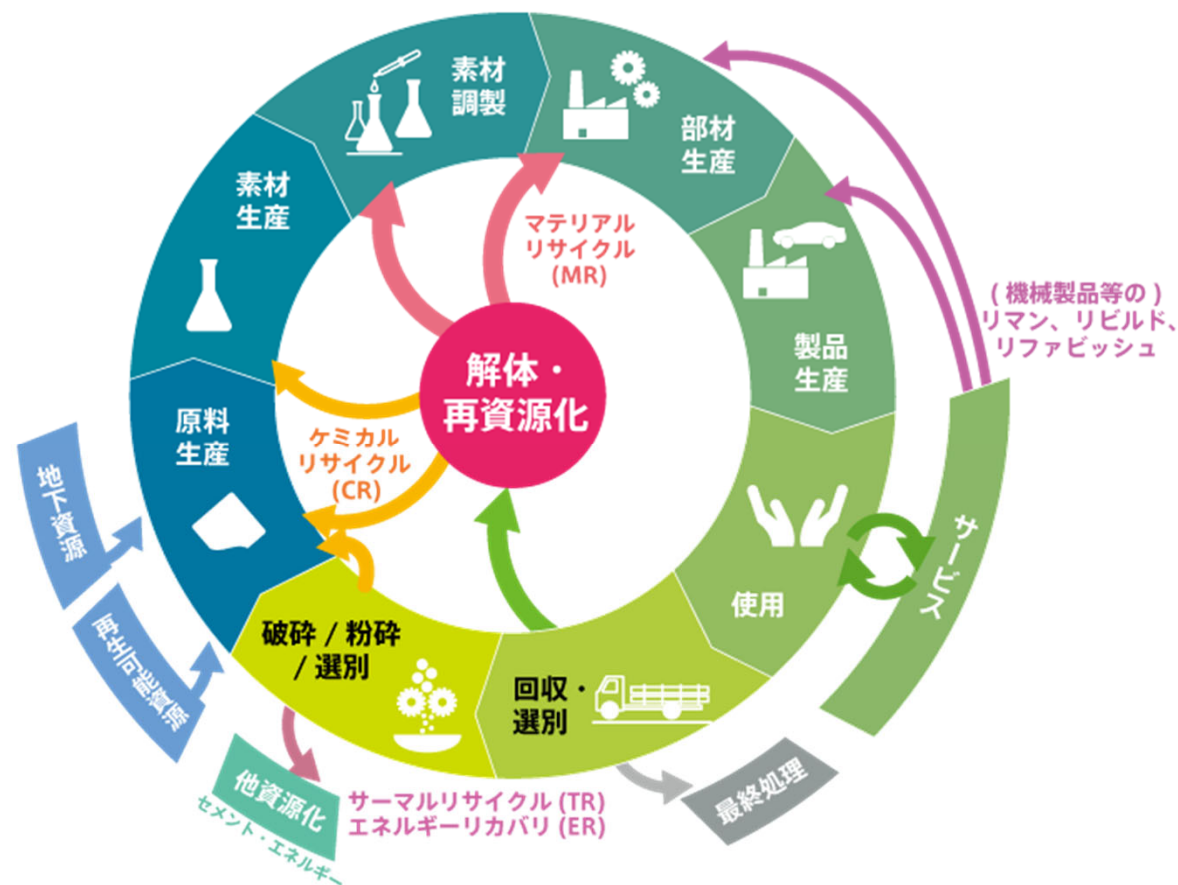
- 一定のバウンダリ内における機能単位あたりの物・エネルギーの流れから環境負荷を算定
- 一般に、静的なフロー量に基づく評価

マテリアルフロー分析(MFA)

- 一定のバウンダリ内における対象フローの総量としての流れを可視化
- 動的な要因に基づく変化を分析可能

産業連関分析(IOA)

- 任意の領域（国・自治体、経済圏、など）内に存在する産業を数十～数百程度の部門に分類し、取引を記載した産業連関表を用いた社会経済性の分析
- 将来の部門などを追加した拡張型産連表により、技術導入の波及を可視化



ライフサイクル中に分散設計者（意思決定者）
→多様な評価軸に対応する評価手法が必要

ライフサイクルアセスメント(LCA)とは、ライフサイクル思考に基づく評価手法

LCAは、対象とする製品を生み出す資源の採掘から素材製造、生産だけでなく、製品の使用・廃棄段階まで、**ライフサイクル全体（ゆりかごから墓場まで）を考慮し、資源消費量や排出物量を計量するとともに、その環境への影響を評価する手法**である。

実際にみえている製品やサービスの使用段階での環境影響だけでなく、製品が製造されるまで、また廃棄に至るまで、**目にみえない所での環境影響を考えることが特徴的**である。

国際標準化機構 ISO: International Organization for Standardization

- ・ISO14001: 環境マネジメントシステム
- ・ISO14010: 環境監査
- ・ISO14020: 環境ラベル
- ・ISO14031: 環境パフォーマンス評価
- ・**ISO14040: ライフサイクルアセスメント**
- ・ISO14050: 用語と定義

LCAのはじまりは・・・？

1969年 コカ・コーラ社が異なる容器の環境影響を定量化

割れやすく重たいガラス瓶から、
石油から作るペットボトルへの変更は良いのか悪いのか？

→石油から生産するPETボトルの方が、
トラック輸送の高効率化や破損の減少による
エネルギー消費削減によりトータルで
石油使用量が削減しうることを示した



ライフサイクルGHG (LC-GHG)

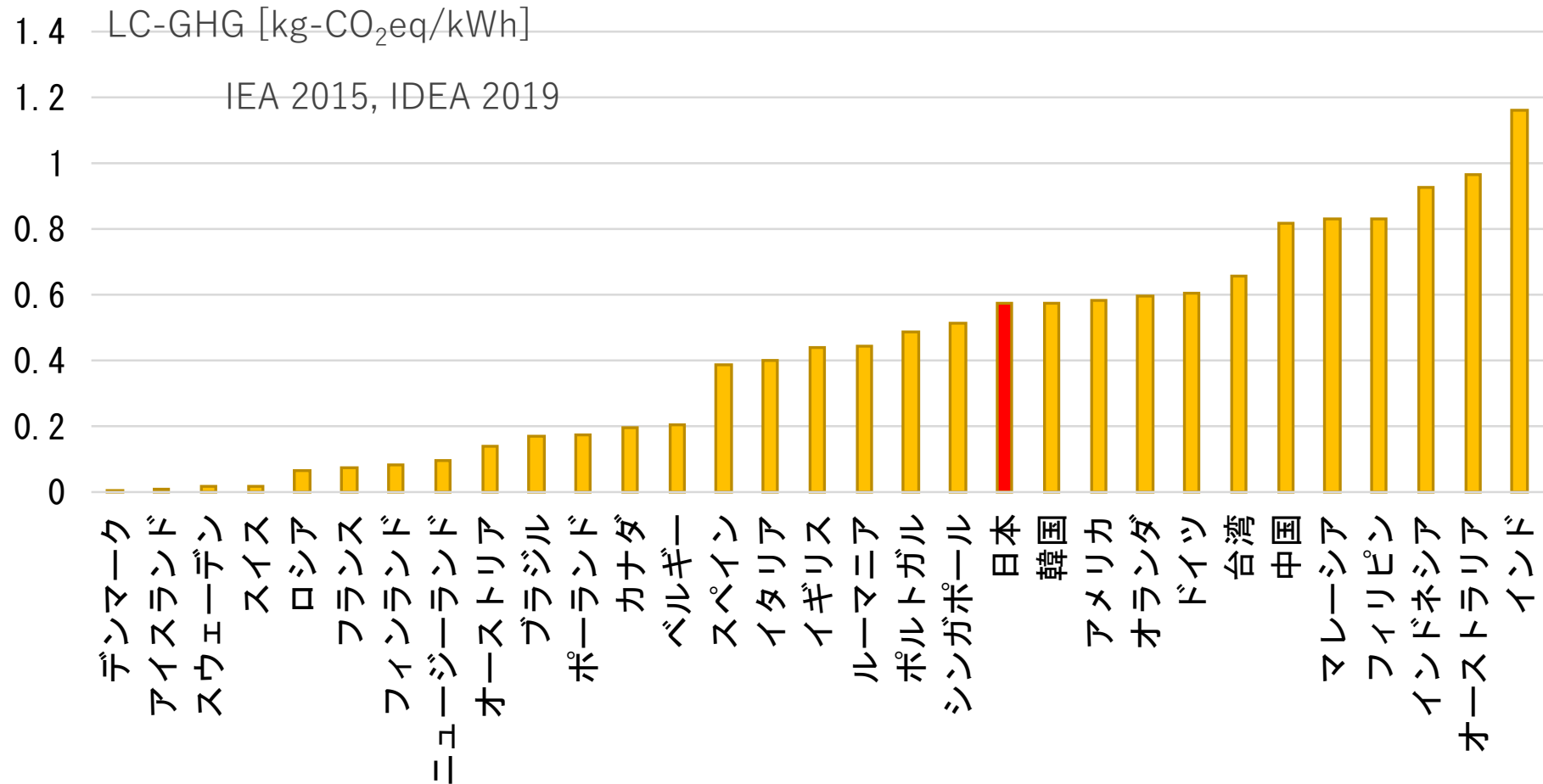
- 発電技術により設備関連・運転関連のどちらが寄与するかが異なる
- 運転中に燃料等を消費しない技術であっても、活動量あたりで環境負荷が残る
- 電源構成により、系統電力の原単位が変化
 - 2030/2050年の政府シナリオは採用できるか？
- 燃料だけでなく、装置部分も含めて考慮するのが原則
 - 太陽光/風力発電でも環境負荷がある
 - 使用年数を想定して算定
 - 自然災害による破損などの考慮は不十分
 - グリーン水素にも環境負荷がある

→ 無負荷の製品は存在しない



国別の電力原単位

日本の電力システムの環境負荷は比較的大きい



システムで考える購買行動

レジ袋



マイバック
(プラスチック製)

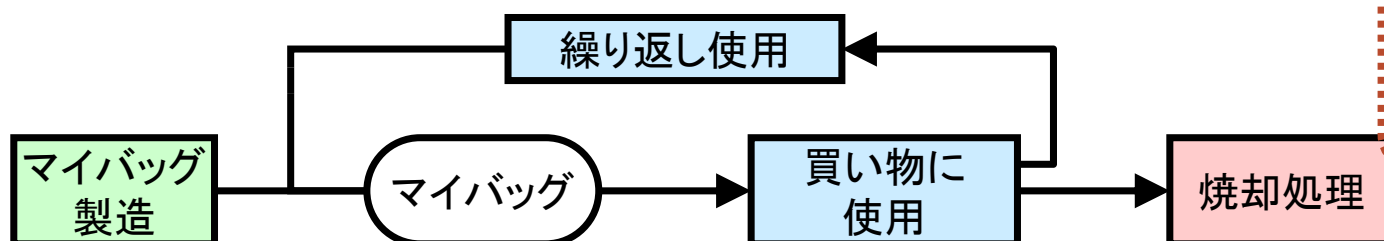
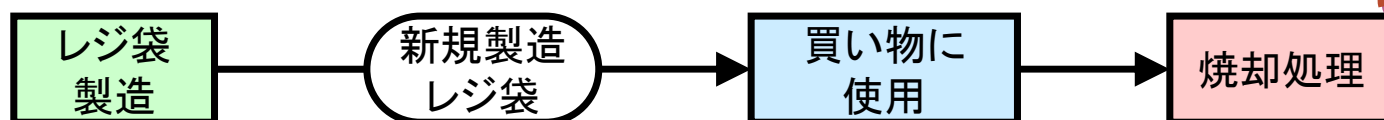


マイバック
(木綿製)



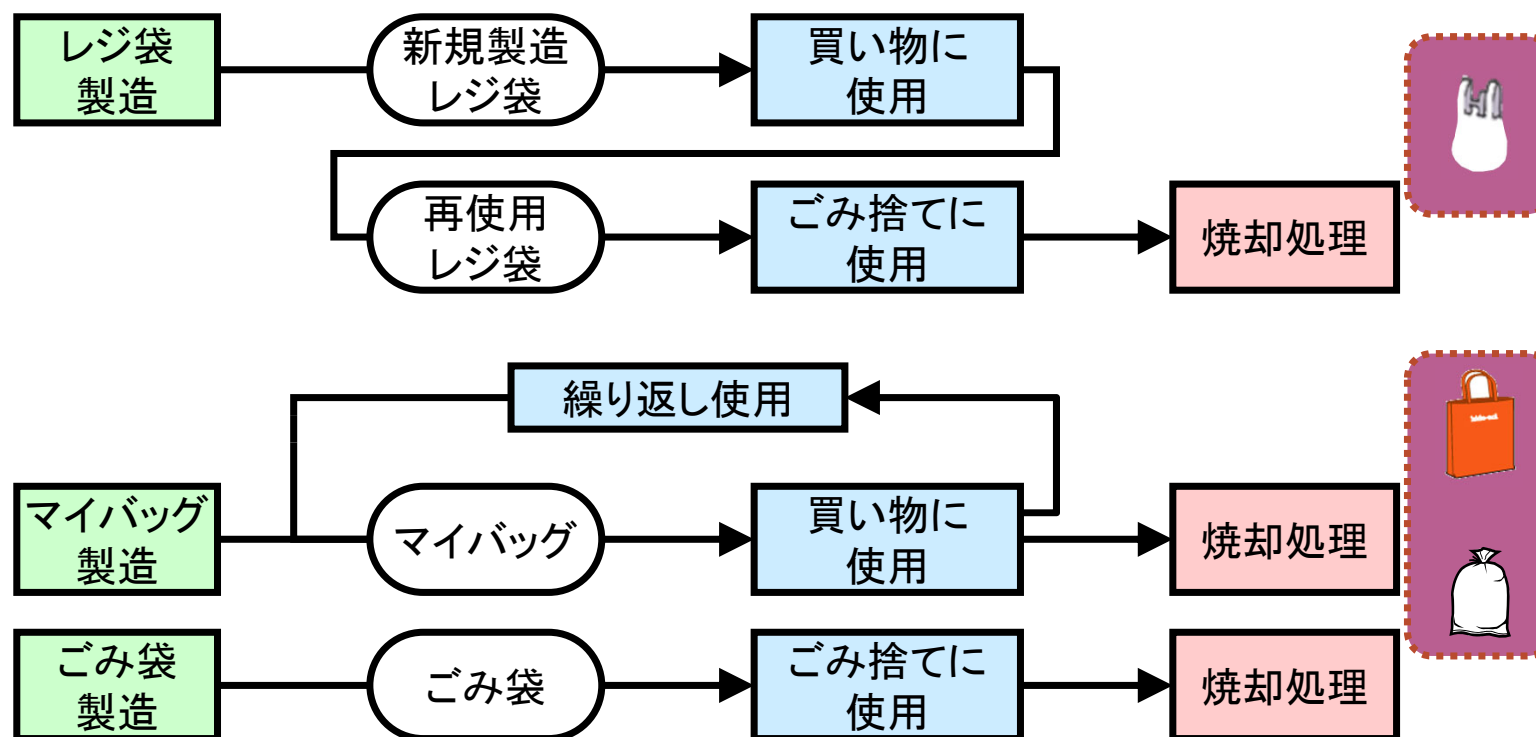
購買行動における“袋”とは？

レジ袋は基本的に使い捨てであるのに対して、マイバッグは繰り返し使うことができるという特徴があります。そのため一枚ずつを比べるのではなく、ある期間の間に使うレジ袋とマイバッグの量を基準にして、両者を比べます。



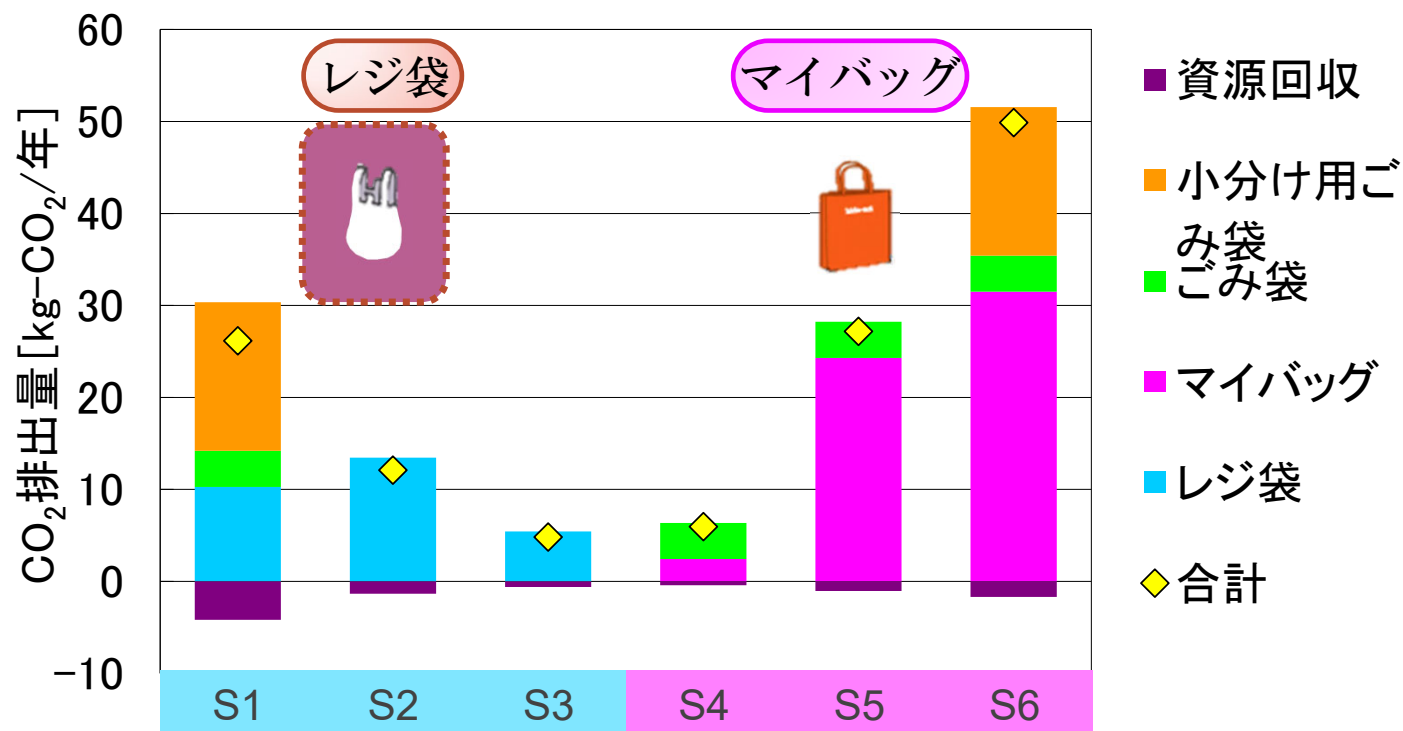
“袋”のカスケード利用

レジ袋はごみ捨てに使えるという特徴があるので、
買い物にしか使うことができない、マイバッグと比較するためには
ごみ捨てと、そこで使うごみ袋も比べるときには含めて考える必要があります。



“行動”による環境負荷の変動

とある条件における算定結果（2007）



消費者の意思決定の内容によってCO₂排出量は大きく変わる

そもそもレジ袋問題はCO₂の問題ではない

ごみ捨てへの使用	×	○	○	長	短	短	使用年数
繰り返し使用	×	×	○	○	○	×	リサイクル
小分け用袋の使用	○	○	×	×	×	○	小分け用袋の使用

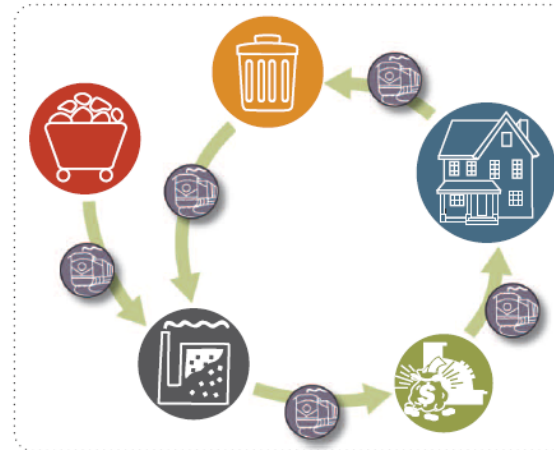
LCAの用途

- 製品レベルのLCA (A)
 - 製品あたりの環境影響（最も多くみられるLCA）
- 組織のLCA (B)
 - 組織の活動期間、製品等生産量・額、規模あたりの環境影響
- 消費者/ライフスタイルのLCA (C)
 - 消費者の生活に伴う環境影響
- 国のLCA (D)
 - 国や特定領域の期間・規模あたりの環境影響

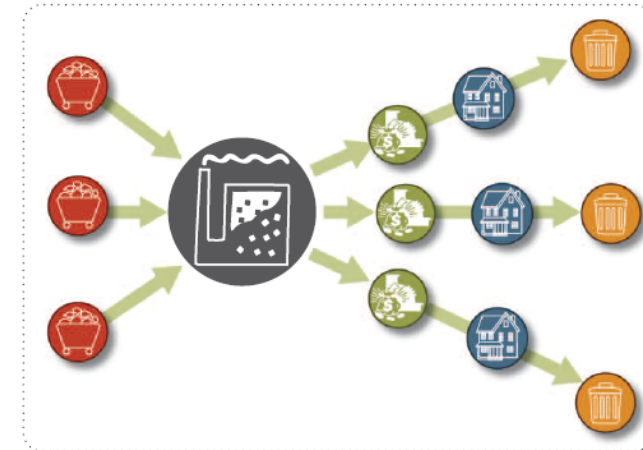
→いずれもネットゼロカーボンを目指す社会システムや技術の変革を評価するために必要

Stefanie Hellweg and Llorenç Milà i Canals
Science **344**, 1109 (2014);
 DOI: 10.1126/science.1248361

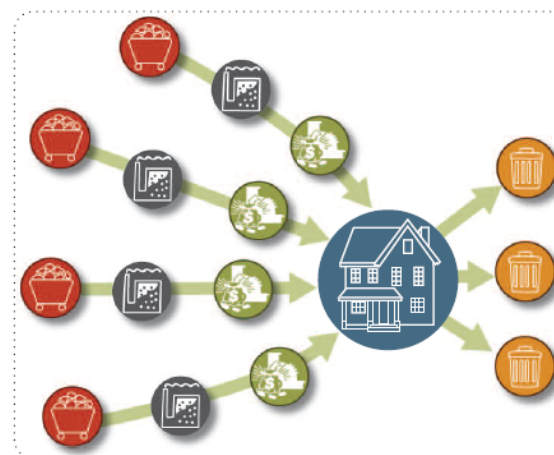
A. Product level LCA



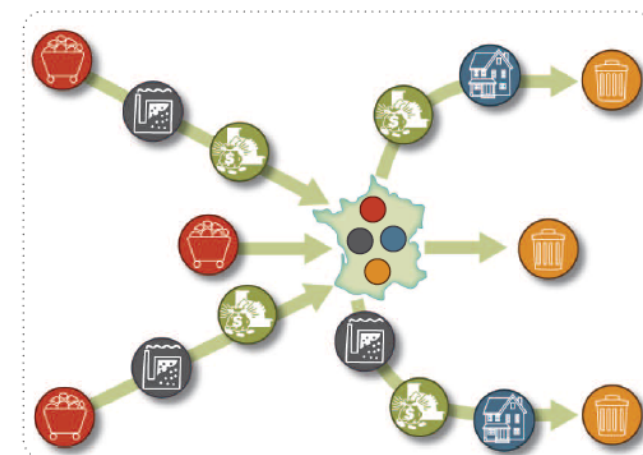
B. Organizational LCA



C. Consumer/lifestyle LCA



D. Country LCA



ライフサイクル影響評価手法

インベントリ

PM10
ホルムアルデヒド
ベンゼン
TCDD
鉛
騒音
HCFC
CO ₂
SO ₂
NOx
全窒素
全リン
VOC
Waste
Land
Copper
Oil
Natural gas
Wood

運命
分析
/
暴露
評価

影響領域

都市域大気汚染
室内空気質汚染
有害化学物質
騒音
オゾン層破壊
地球温暖化
光化学オキシダント
生態毒性
酸性化
富栄養化
廃棄物
土地利用
鉱物資源消費
化石燃料消費
生物資源消費

特性化

ISOにおける実施義務

カテゴリ エンドポイント

呼吸器系疾患
シックハウス症候群
発癌
慢性疾患
アノイアンス
睡眠障害
白内障
感染症
熱ストレス
災害被害
植物成長
農作物
土地
水産物
エネルギー
ユーザーコスト
植物プランクトン
陸生生物種
水性生物種

影響
分析

保護対象

人間社会

人間健康

DALY

社会資産

Yen

生態系

生物多様性

EINES

一次生産

NPP

被害評価

被害
評価

統合化

統合化

単一指標
Eco-index
JPY

統合化

日本版被害算定型影響評価手法

(LIME ; Life-cycle Impact Assessment Method based on Endpoint Modeling)

認証ビジネスがはじまっている 例：プラスチック

- 種類と対象
 - ISCC PLUS
 - バイオマス原料、バイオ廃棄物・残渣
 - RSB Global Advanced Products
 - バイオ燃料以外のバイオマス原料、バイオ廃棄物・残渣を原料とする製品
 - REDcert²
 - 食料品、飼料、バイオマス、廃棄物を原料とする化学製品
 - Eco loop
 - 再生プラスチック
 - UL2809
 - 再生プラスチックやリサイクル鉄
 - Recycled Material Standard (RMS)
 - あらゆる材料
- 観点
 - 環境・社会的な持続可能性、トレーサビリティ、GHG排出削減量、バイオマス・リサイクル品配合比率、等



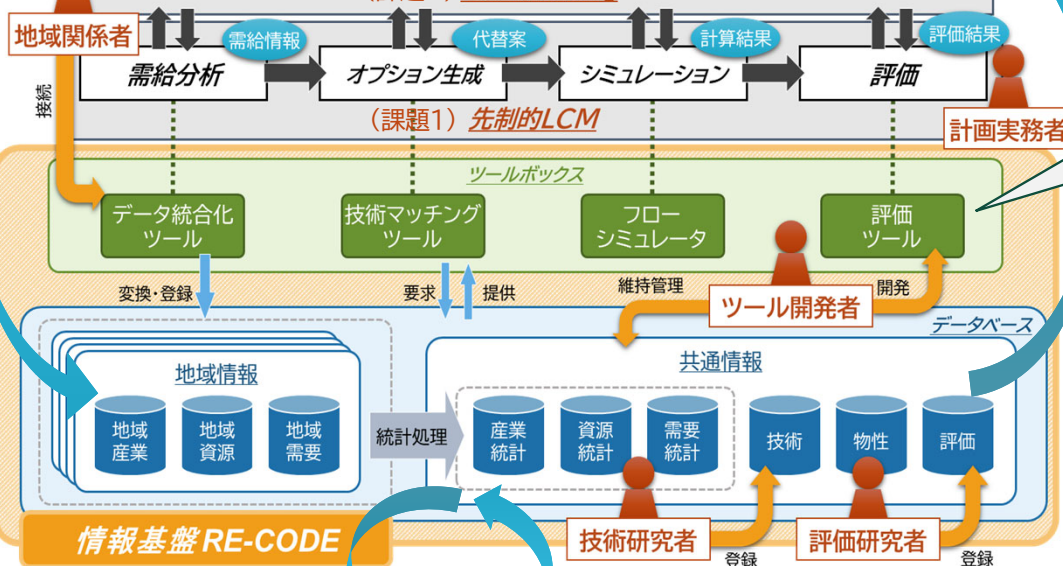
情報基盤「RE-CODE」の全体像と構想

データ活用によるCo-JUNKANの加速

(課題4,5,6) 技術開発と地域での実証

(課題2) Co-learning

(課題1) 先制的LCM



各ツールの到達目標

資源需給分析

地域の資源や需要の現状や未来の状態を即座に可視化

オプション生成

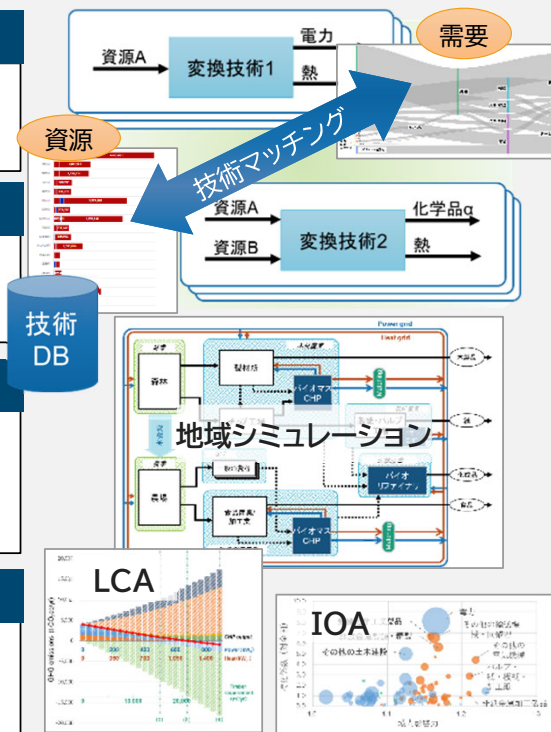
地域特性に応じて技術候補をマッチング&推薦

シミュレーション

技術者との共創により新興技術の複合システムの地域分析にも対応

システム評価

社会変化や不確実性も考慮したLCA, MFA, IOA



- 他課題の推進を加速しながらデータ集積
- 地域システム設計のDX基盤として技術の社会実装のハードルを最小化

開発中: <https://re-code.app/>



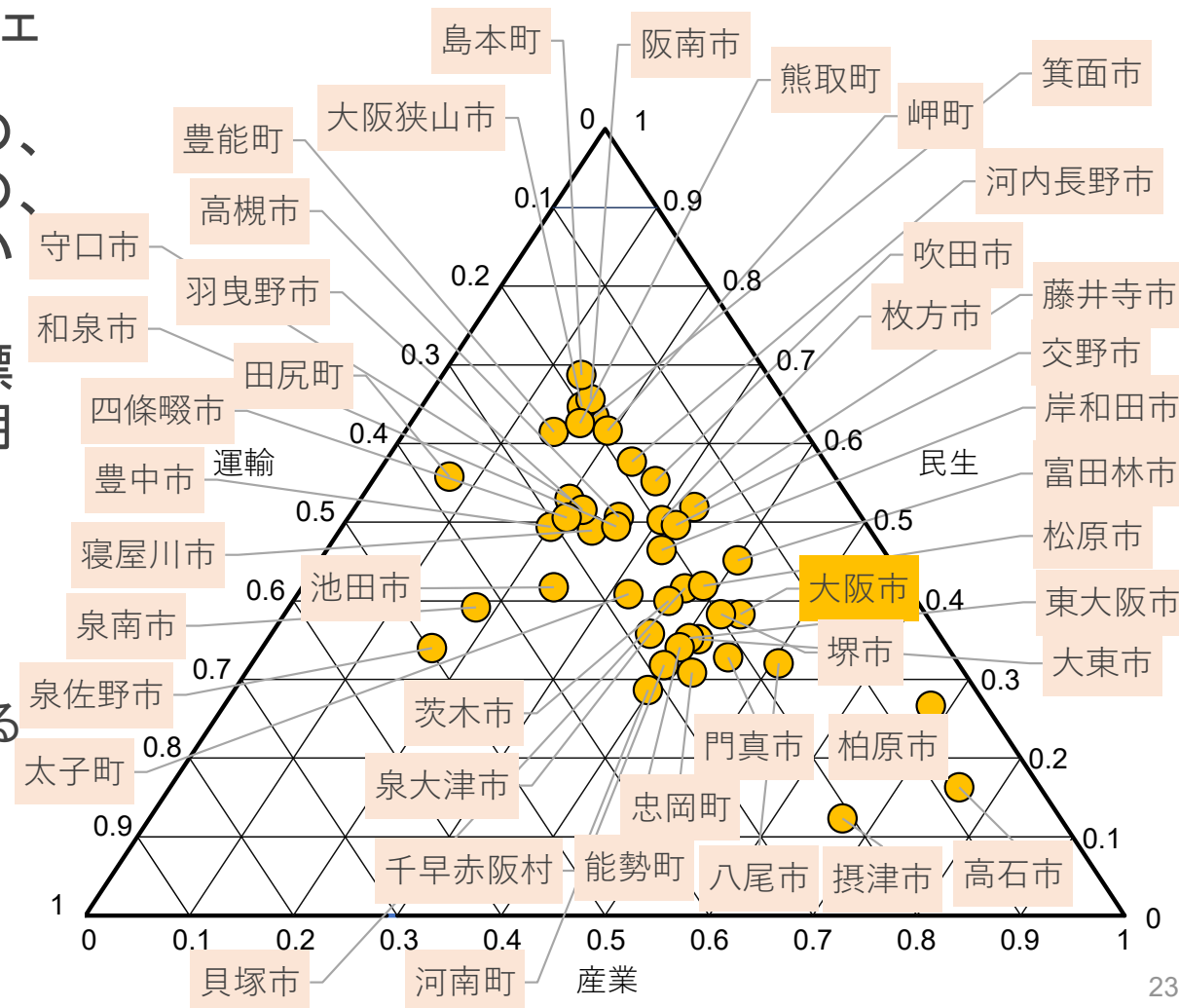
「データ活用社会創成プラットフォームmdx」の活用

地域はどんな地域か？：現状を理解する

暫定値

需要家部門別エネルギー消費割合（基礎自治体）

- 現状のエネルギー需給構造が異なればエネルギーの消費実態も異なる
 - 資源として活用しやすいもの、技術として適用しやすいもの、システムとして構築しやすいものも異なる
 - 需要家部門構成は一つの指標
 - 割合として大きい部門に適用しやすいオプションが有効
- “需要家プロセス”も資源
 - 産業プロセスは“地域資源”
 - エネルギーハブとして機能する可能性あり





地域のための取組みがゼロカーボンにもつながる仕組みづくり

ビヨンド・“ゼロカーボン”を指す“Co-JUNKAN”プラットフォーム 研究拠点

拠点ビジョン 地域が自律的に豊かさを実現できる未来

ビヨンド・“ゼロカーボン”

情報基盤による水平展開の加速化

グリーンウォッシュリスクを回避する科学的技術評価手法の統合利用

効果を可視化して議論

標準(規格)・認証の戦略

- ・ ライフサイクルアセスメント
- ・ マテリアルフロー分析
- ・ 産業連関分析

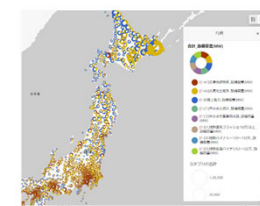
Co-learning: 学び合いを通じた地域の変革の促進

Co-learning

- ① 先制的LCA
- ② 教育・担い手

Co-JUNKAN基盤

- ③ 情報DB
- ⑦ 金融基盤



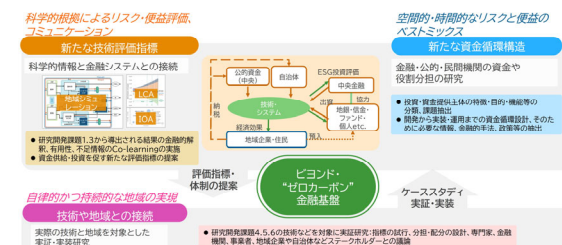
金融基盤による地域変革と技術導入の促進

地域実証試験を通じた検証

種子島、佐渡島、
岩手県、和歌山県
クイーンズランド州

他拠点との共創

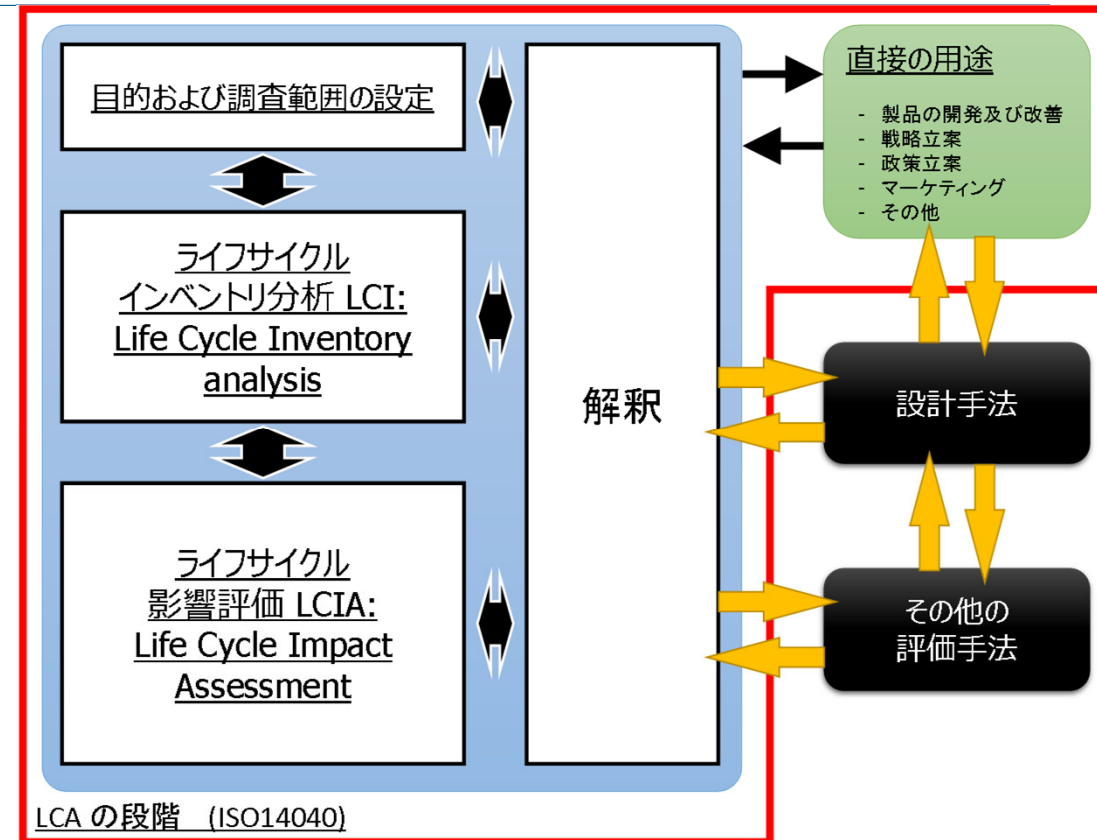
琉球大学拠点
金沢大学拠点



“将来性”を考えるライフサイクル思考

LCAはエンジニアリングツールへ

- “設計”のための“評価”としてのLCA
 - どこからはじめても全体をカバーするための“両向き矢印”
 - まずは
 - フォアグラウンドプロセスの特定
 - バウンダリの設定
 - バックグラウンドプロセスの設定
- 数値を出すことばかりを目的としないLCA
 - 技術開発目標を明確化する
 - 適切な導入規模を見定める
 - 将来のシナリオを考える
- LCA以外の手法と組み合わせて考えるLCA
 - エンジニアリングツールの活用
 - その他の評価手法の活用



マテリアルフロー分析(MFA)

産業連関分析(IOA)

講師紹介：菊池康紀



● 略歴

2000年3月 福島県立会津高等学校卒業
2004年3月 東京大学工学部化学システム工学科卒業
2006年3月 同工学系研究科化学システム工学専攻 博士課程修了 博士（工学）
2009年4月 同専攻 助教
2011年7月-9月 スイス連邦工科大学チューリッヒ校 Academic Guest
2012年4月 東京大学総長室総括プロジェクト機構 特任講師
2015年10月 東京大学総長室総括プロジェクト機構 特任准教授
2018年4月 東京大学国際高等研究所 サステイナビリティ学連携研究機構 准教授
2019年4月 東京大学未来ビジョン研究センター 准教授（組織改革）
2024年2月 同 教授

「プラチナ社会」総括寄付講座（代表兼務）
工学系研究科化学システム工学専攻(兼担)

○ 兼任等

九州大学カーボンニュートラルエネルギー国際研究所、千葉大学環境健康フィールド科学センター、科学技術振興機構研究開発戦略センター、物質材料研究機構、東京工業大学物質理工学院

○ 主なプロジェクト

- 科学技術振興機構 共創の場形成支援プログラム（COI-NEXT）共創分野 本格型、「ビヨンド・”ゼロカーボン”を目指すCo-JUNKANプラットフォーム研究拠点」、2022-2031
- 科学研究費補助金 基盤研究B: 21H03660、資源循環最適化のためのスーパーストラクチャ構築と先制的ライフサイクル設計(菊池康紀)、2021-2025
- 科学研究費補助金 若手研究A: 16H06126、資源制約下で物質・エネルギーの生産を可能にする先制的ライフサイクル設計手法の開発、2016-2020

● 専門

- 化学工学、プロセスシステム工学、ライフサイクル工学、知識の構造化、Transdisciplinary research



化学工学

+

LCA

+

社会実装学



E-mail: ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp

所属学会・委員会等

化学工学会、日本LCA学会、日本リスク研究学会、国際産業エコロジー学会、アメリカ化学工学会、UNEP IRP LCIA-WG

