

技術経済性分析およびライフサイクルアセスメント とシナリオ連携

2. 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

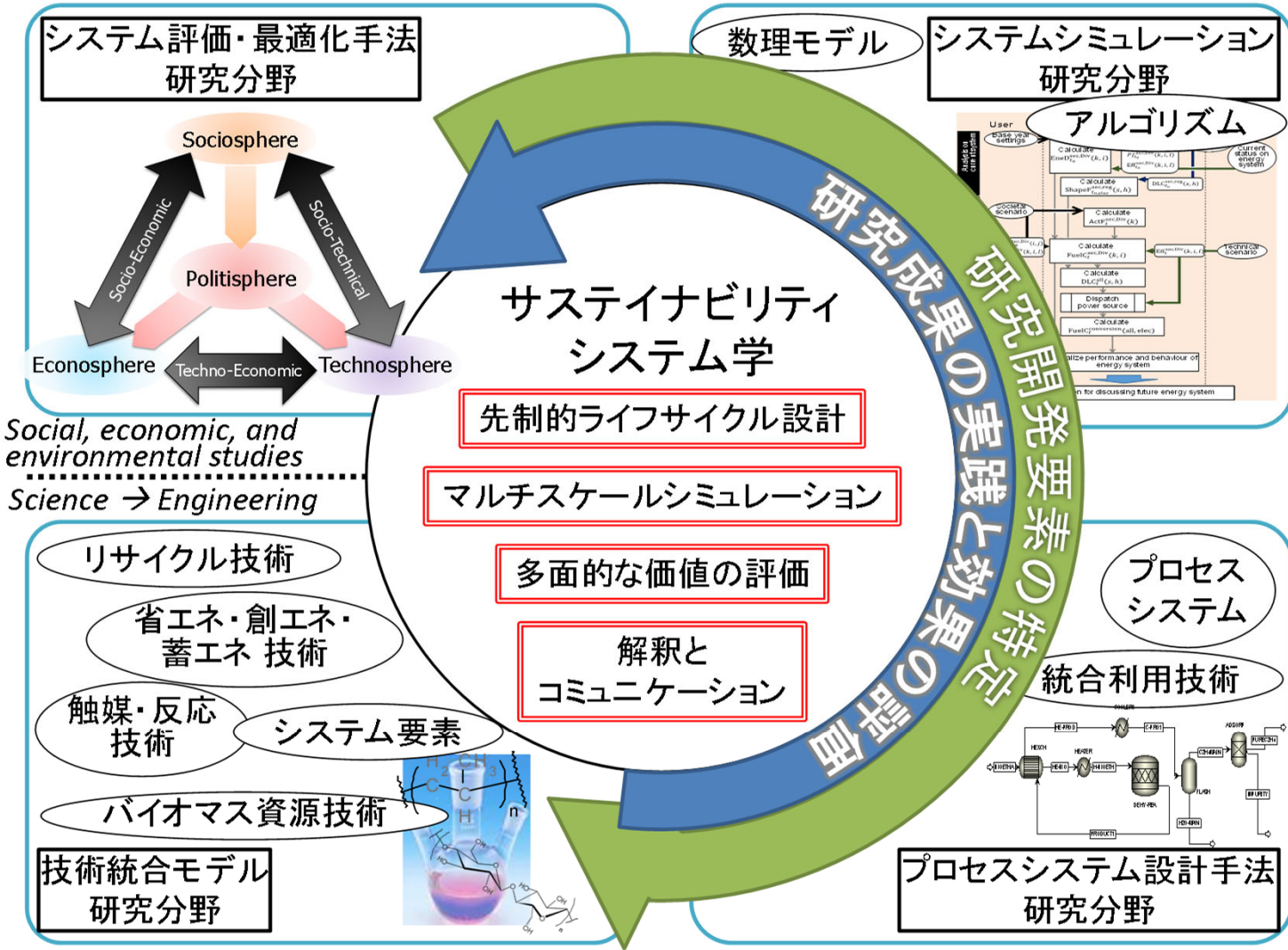
ykikuchi@ifi.u-tokyo.ac.jp



2024年11月21日(木)

菊池グループにおける研究概要

- 手法
 - 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
 - シミュレータ開発
- 近年のテーマ例：技術・システムの設計と評価
 - 蓄電池のリサイクルシステム
 - 蓄エネ(蓄電・蓄熱・化学蓄エネ)システム
 - バイオマス由来製造システム
 - 新規プラスチックリサイクル
 - 持続可能な森林管理
 - 窒素循環技術・システム
- 近年のテーマ例：地域システム設計と評価、実証
 - 種子島、佐渡島、岩手、和歌山

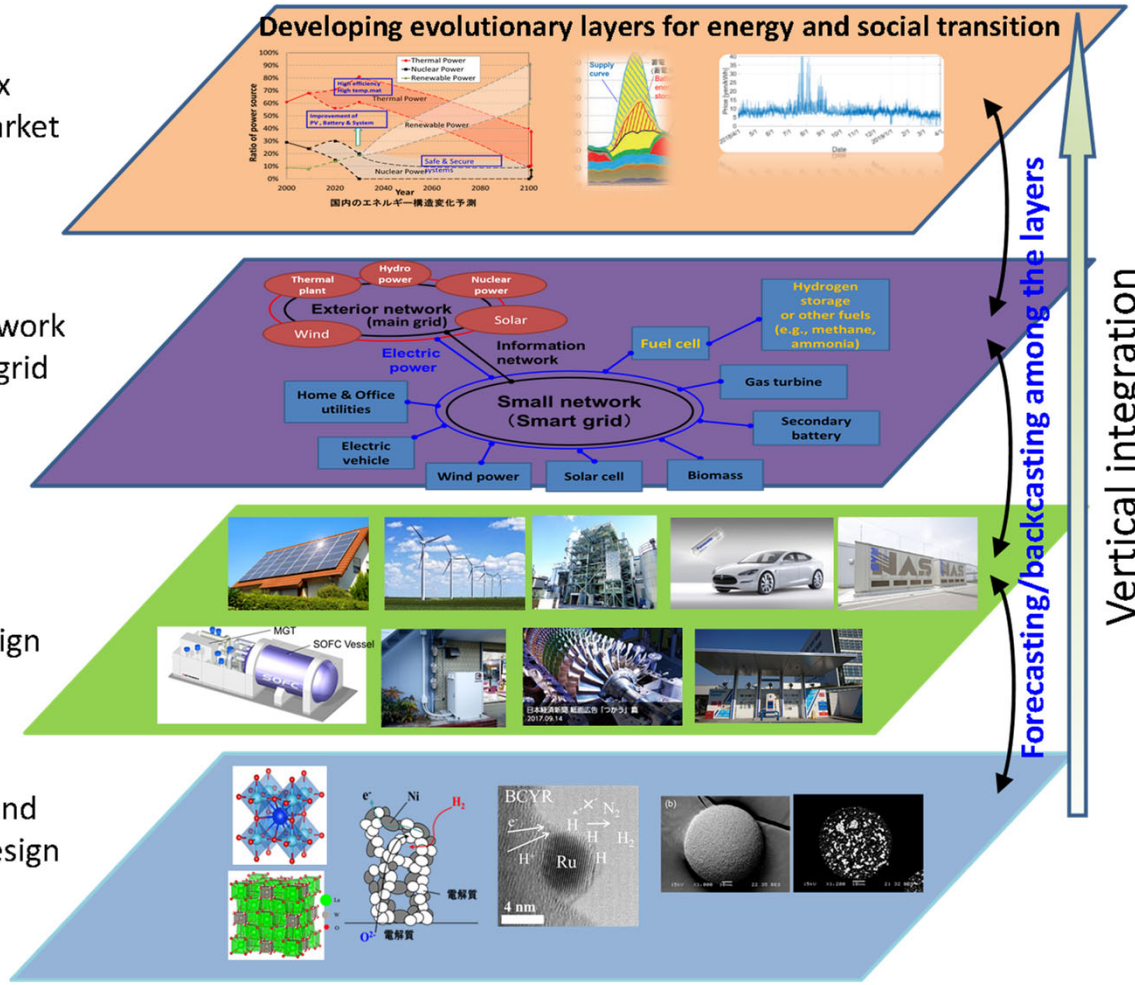


技術・システムの評価と研究開発の統合

- Input-output analysis (IOA)
- 産業連関分析
- Material flow analysis (MFA)
- マテリアルフロー分析
- Life cycle assessment (LCA)
- ライフサイクルアセスメント
- Technoeconomic analysis (TEA)
- 技術経済性分析

- TEA：大友班、LCA：菊池班にて実施
- パラメータ解析により技術・システムの性能を幅で表現
→他のグループとのインタフェースに

- Society
 - Energy mix
 - Energy market
 - Industry
 - Daily life
- Energy network and smart grid (ICT)
- Device and system design
- Materials and reaction design



Integration with the aid of informatics and data science

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慮することが特徴的**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？

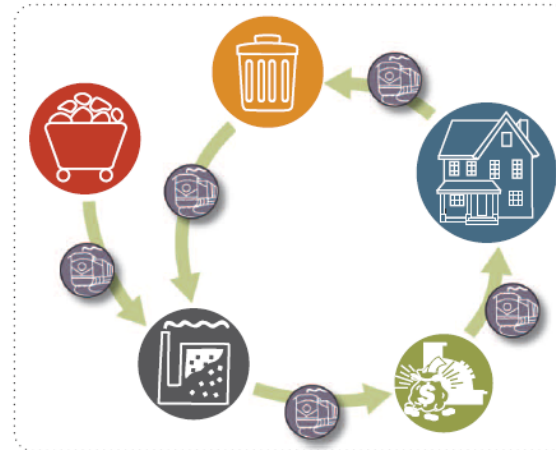
→石油から生産するPETボトルの方が、
トラック輸送の高効率化や破損の減少による
エネルギー消費削減によりトータルで
石油使用量が削減しうることを示した

LCAの用途

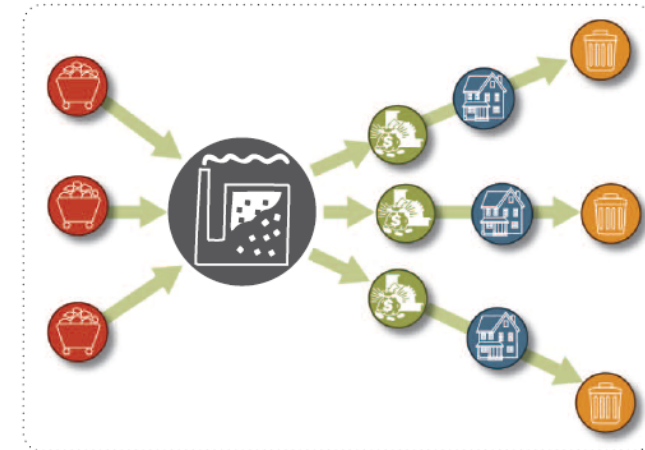
- 製品レベルのLCA (A)
 - 製品あたりの環境影響 (最も多くみられるLCA)
- 組織のLCA (B)
 - 組織の活動期間、製品等生産量・額、規模あたりの環境影響
- 消費者/ライフスタイルのLCA (C)
 - 消費者の生活に伴う環境影響
- 国のLCA (D)
 - 国や特定領域の期間・規模あたりの環境影響

→いずれも現状の結果に基づくものから将来シナリオを設定した評価まで存在

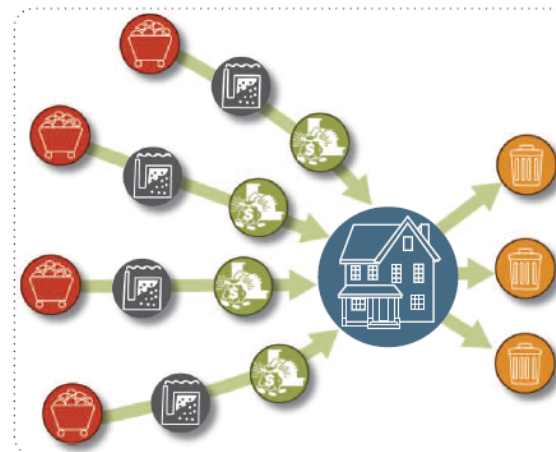
A. Product level LCA



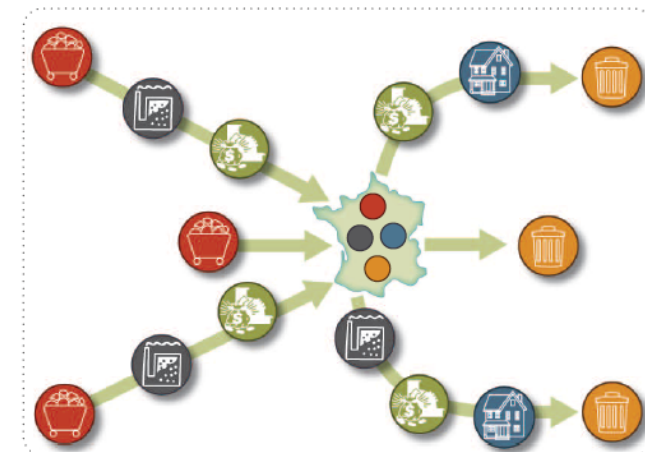
B. Organizational LCA



C. Consumer/lifestyle LCA



D. Country LCA



学術的知見における状況 例：環境影響とLCAにおけるインパクト評価手法

国際的に合意
Site-generic impact

評価地域の
環境条件に依存

Site-specific impact

日本の影響評価手法
日本版被害算定型影響評価手法
(LIME ; Life-cycle Impact
Assessment Method based on
Endpoint Modeling)

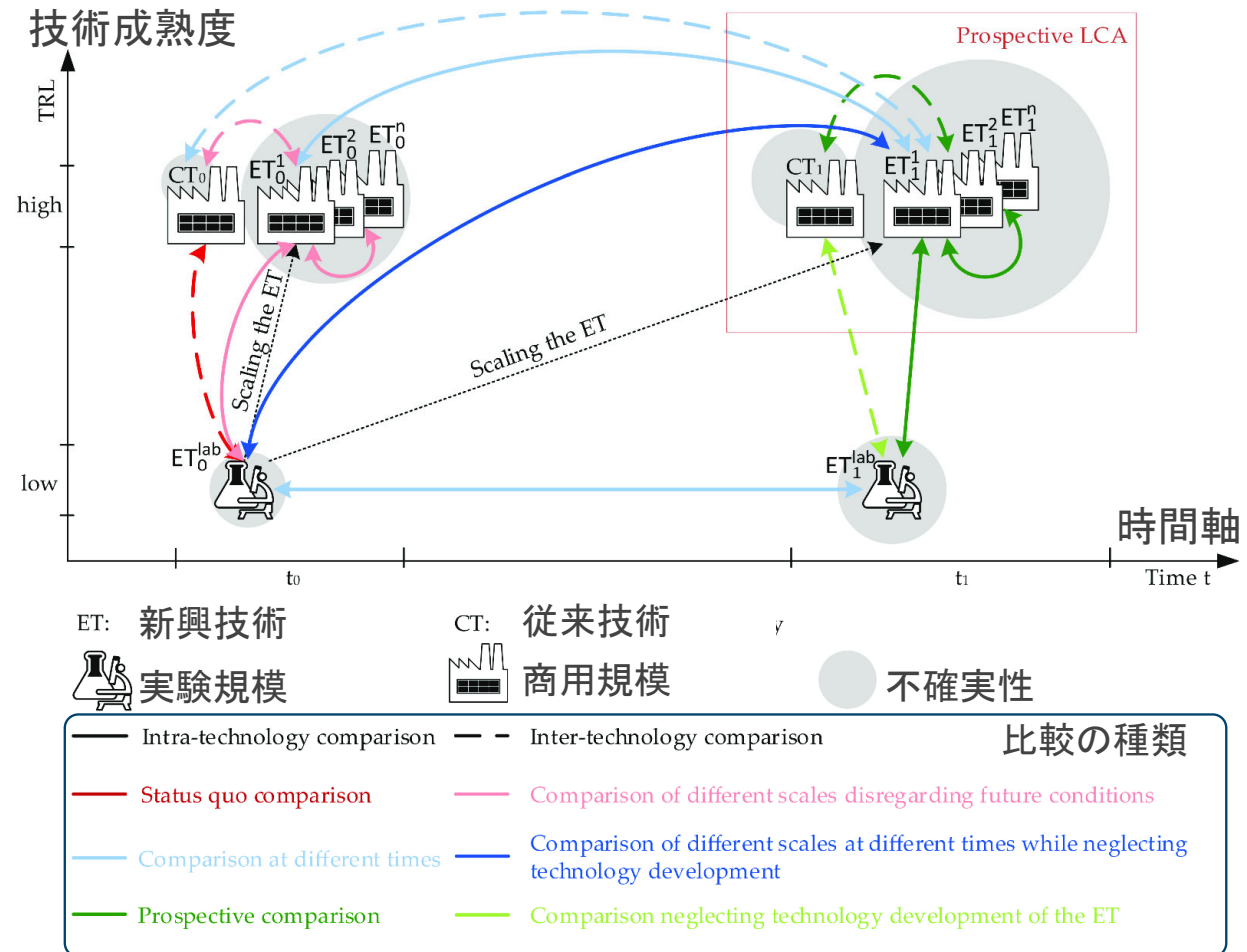
未合意
Data limitation

CML 2002	Eco-indicator 99	IMPACT 2002+	ReCiPe 2008
影響領域 (ミッドポイント)			
気候変動 [kg CO ₂ eq]	気候変動 *	地球温暖化 [kg CO ₂ eq] *	気候変動 [kg CO ₂ eq]
成層圏オゾン枯渇 [kg CFC-11 eq]	オゾン層枯渇 *	オゾン層枯渇 [kg CFC-11 eq] *	オゾン枯渇 [kg CFC-11 eq]
酸性化 [kg SO ₂ eq] *	酸性化・富栄養化 ***	陸域酸性化・富栄養化 [kg SO ₂ eq] ***	陸域酸性化 [kg SO ₂ eq]
富栄養化 [kg PO ₄ ³⁻ eq] **		水系酸性化 [kg SO ₂ eq] *	淡水富栄養化 [kg P eq]
		水系富栄養化 [kg PO ₄ ³⁻ eq] **	海域富栄養化 [kg N eq]
人間毒性 [kg 1,4-DCB eq]	発癌性物質	人間毒性 (発癌・非発癌) [kg C ₂ H ₄ eq]	人間毒性 [kg 1,4-DCB eq]
光化学オキシダント生成 [kg C ₂ H ₄ eq]	呼吸器影響：有機物 * 呼吸器影響：無機物 **	光化学オキシダント [kg C ₂ H ₃ Cl eq] * 呼吸器 (無機物) [kg PM _{2.5} eq] **	光化学オキシダント生成 [kg NMVOC eq] 粒子状物質生成 [kg PM ₁₀ eq]
陸域生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]			陸域生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]
淡水水系生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]		陸域生態毒性 [kg TEG eq]	淡水生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]
淡水底質生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]	生態毒性物質	水系生態毒性 [kg TEG eq]	海域生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]
海域生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]			
海域底質生態毒性 [kg 1,4-DCB eq]			
イオン化放射線 [DALY]	イオン化放射線 *	イオン化放射線 [Bq C ¹⁴ eq] *	イオン化放射線 [kg U ²³⁵ eq] *
土地利用影響 [m ² ・年] * #	土地占有 ** 土地改変	土地占有 (耕地) [m ² ・年] ** #	農業土地占有 [m ² ・年] * # 都市土地占有 [m ² ・年] * # 自然土地改変 [m ²] * #
-	-	-	水枯渇 [m ³] #
非生物資源枯渇 [kg Sb eq]	鉱物枯渇 * 化石燃料枯渇	鉱物資源 (追加エネルギー) [MJ] [kg Fe eq] * 非再生資源 [MJ] [kg 原油 eq]	鉱物資源枯渇 [kg Fe eq] 化石資源枯渇 [kg 石油 eq]

*, ** または *** で示した影響領域は、それぞれ手法間で同じ特性化モデルが用いられている https://www.istage.ist.go.jp/article/lca/9/3/9_189/pdf

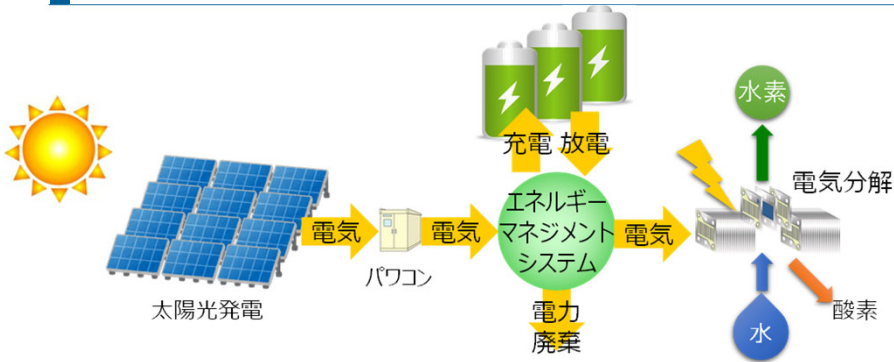
LCAによる将来性の分析：Prospective LCA

- 新興技術(Emerging technology)
 - 革新的、急速な成長、顕著な影響、将来に影響、不確実
 - 将来性と技術成熟度
 - 社会システムの変化
- 将来性を評価するLCA (Prospective LCA)
 - 技術の比較可能性
 - データの可用性と品質
 - スケールアップの課題
 - 評価結果の不確実性
- 用語
 - ex-ante LCA
 - “事前の”LCA
 - 将来技術のLCAに近い
 - Consequential LCA
 - “帰結的”LCA
 - 将来技術に限らない

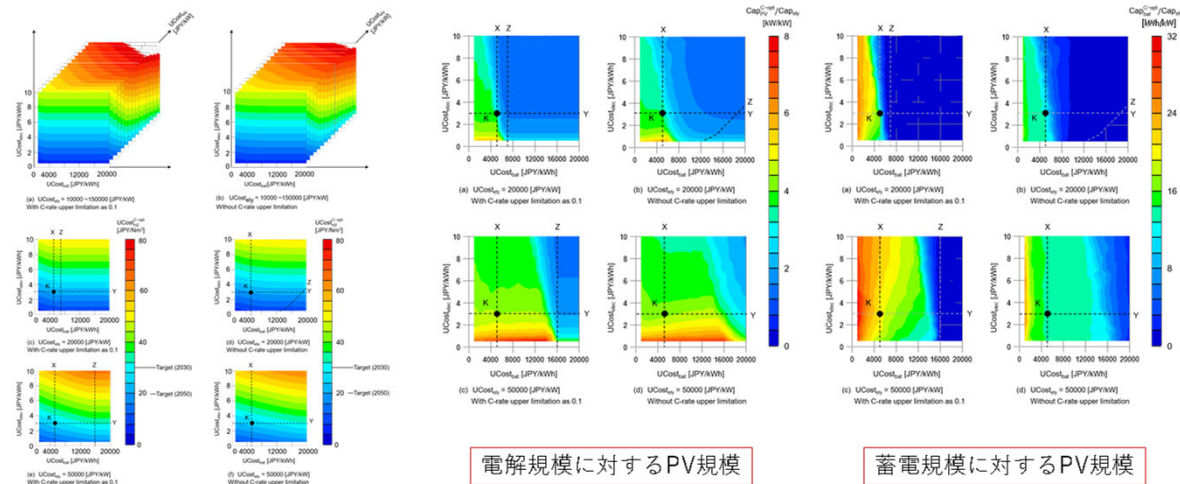
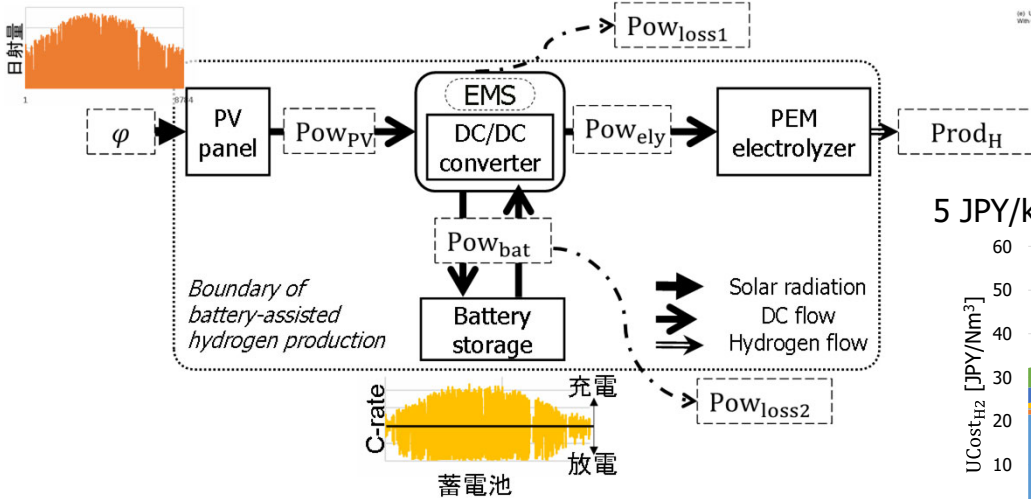


Cucurachi et al., 2018; Tonenmann et al., 2020; Moni et al., 2020; Dou et al., 2021

新規技術システムの適用可能性検証：蓄電池援用型水素製造



数理モデル化

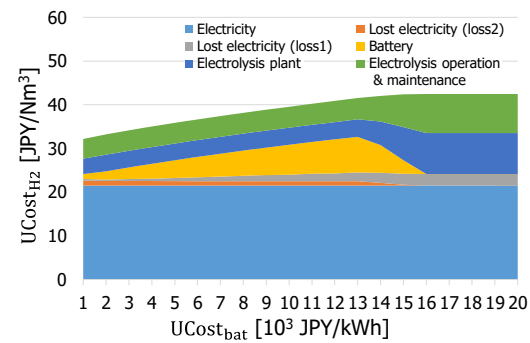


電解規模に対するPV規模

蓄電池規模に対するPV規模

水素コスト

5 JPY/kWh; 50k JPY/kW; C-rate<0.1



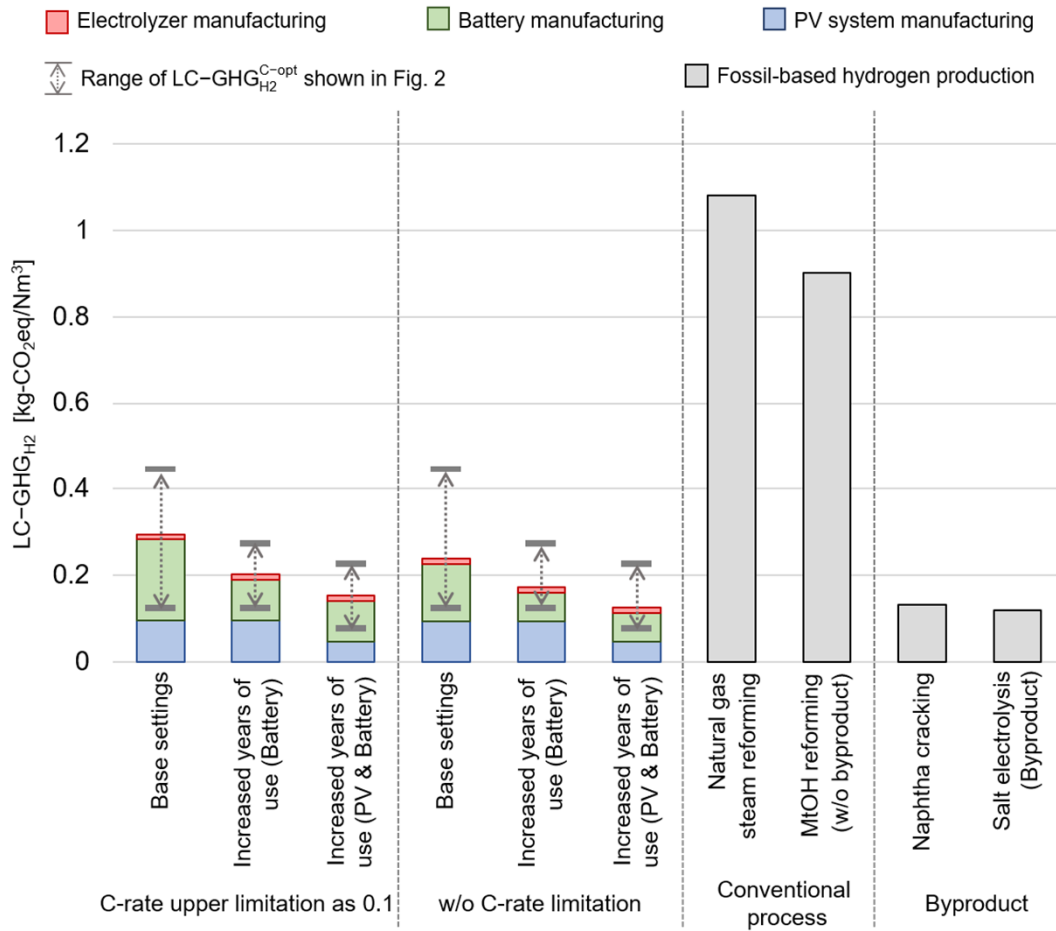
- 蓄電池の援用によるコスト・環境負荷への影響を解析
- 目標到達を達成しうる条件の有無を解析
- 目標達成に向けた技術・システムの要件を逆解析

Kikuchi et al., 2018;
Sako et al., 2022

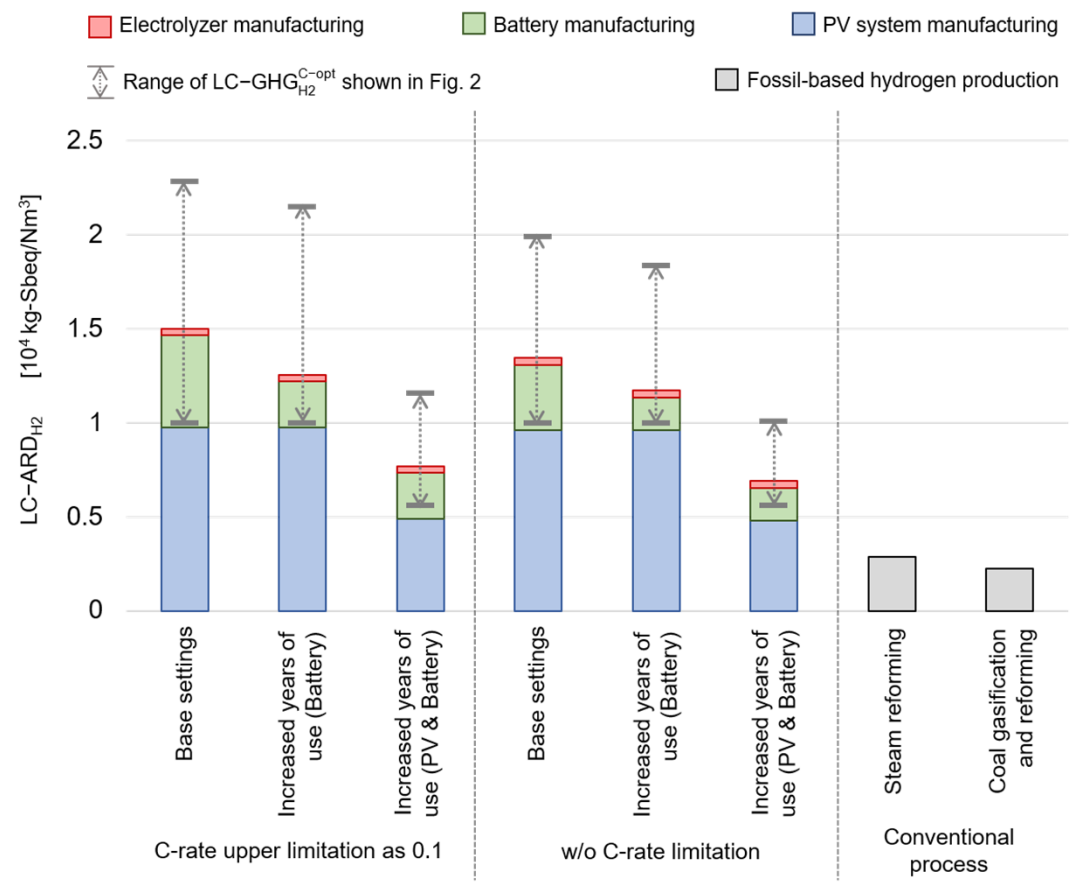


新規技術システムの適用可能性検証：蓄電池援用型水素製造

ライフサイクルGHG排出量



ライフサイクル資源消費量



Kikuchi et al., 2018;
Sako et al., 2022

(LCA (+MFA) ⇔ 統合評価) の連携へ

- 詳細な帰結的LCAの結果をパラメタに組み込んだボトムアップ型IAMと、ボトムアップ型の調整・検証を経たトップダウン型IAMにより、包括的な政策パッケージを直感的に解釈しやすくしつつ、関連する不確実性を低減、ないしはシステムミックリスクを特定できる (Creutzig et al., 2012)
 - 不完全な森林保護；リバウンド効果によるエネルギー・水・食料の共相関 (Nexus) の可能性；土地利用改変・占有の制約；資源の不十分な循環による生産限界、など
- 統合評価モデル(IAM)とLCA(+MFA)による相補的な解析がシナリオ設定における技術的・システムの妥当性を強化する (Creutzig et al., 2012; Arvesen et al., 2018)
 - IAM：マクロレベルの変遷経路 → ライフサイクルの観点不足
 - LCA：静的・ミクロ志向 → バウンダリと機能単位に限定
- 将来シナリオとLCAの併用は、相互に品質要件を定義・確保し、目的の整合性を取った上で展開されていなければならない (Bisinella et al., 2023)

カーボンニュートラルへ向かうことによるCritical minerals

- 化石資源からの転換において多様な金属資源を分散して利用する必要がある
 - 資源循環を前提としない限りカーボンニュートラルは持続しない
 - 各技術において使用量削減／使用回避のための技術開発が展開されている
 - 使用量が削減するだけでは、資源循環の重要性は変化せず、むしろ低濃度化により回収システムの工夫が必要になる可能性がある

- カーボンニュートラルとリスクトレードオフが起こる環境問題

Critical mineral needs for clean energy technologies

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

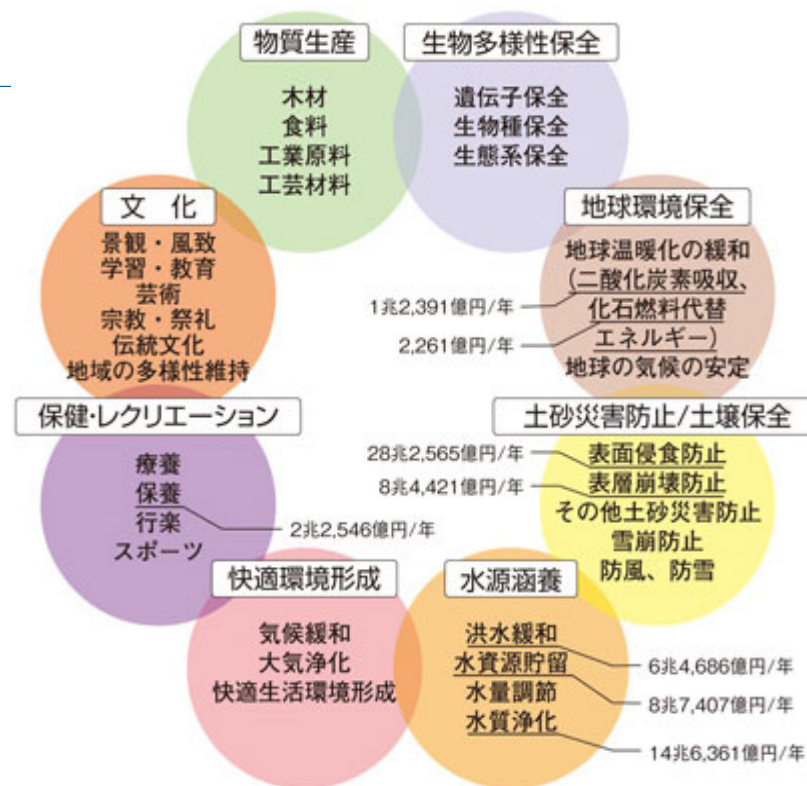
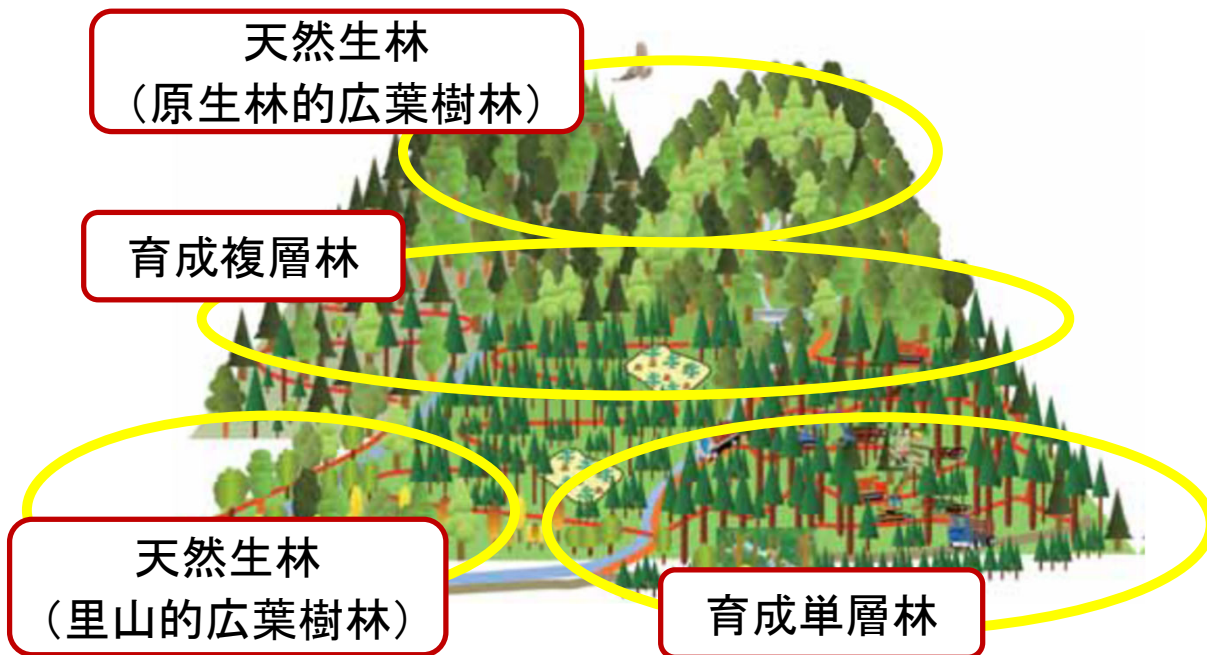
	Copper	Cobalt	Nickel	Lithium	REEs	Chromium	Zinc	PGMs	Aluminium*
Solar PV	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Wind	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hydro	●	●	●	●	●	●	●	●	●
CSP	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Bioenergy	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Geothermal	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Nuclear	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Electricity networks	●	●	●	●	●	●	●	●	●
EVs and battery storage	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Hydrogen	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Importance	High ●	Moderate ●	Low ●
------------	--------	------------	-------

Shading indicates the relative importance of minerals for a particular clean energy technology which are discussed in their respective sections in this chapter. CSP = concentrating solar power; PGM = platinum group metals. * In this report, aluminium demand is assessed for electricity networks only and is not included in the aggregate demand projections.

森林のビジョンとは何だったのか？

✓ 森林の公益的機能をバランス良く配置



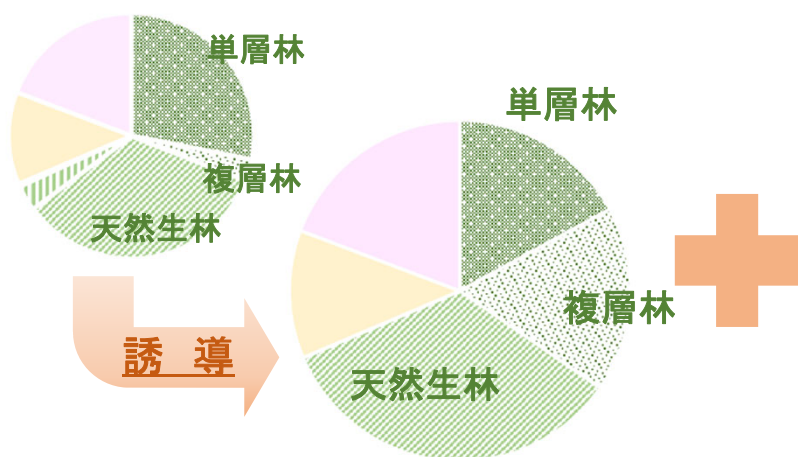
脱化石のために森林があるわけではないが、その価値は高まる一方

→ 役割を果たすための施業の持続化と社会経済の変革が必要



林相と齢級分布を意識した森林資源の管理へ

1 林相の誘導

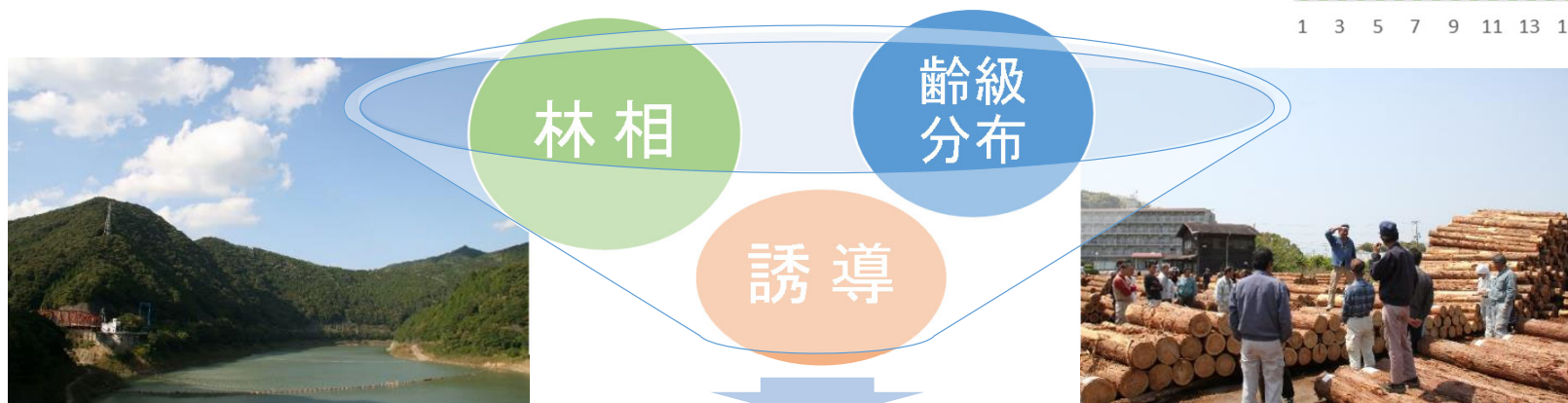
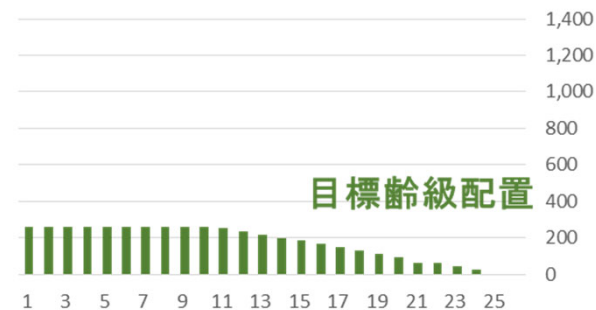


2 齢級分布の誘導



200年程度の森林管理が必要

誘導

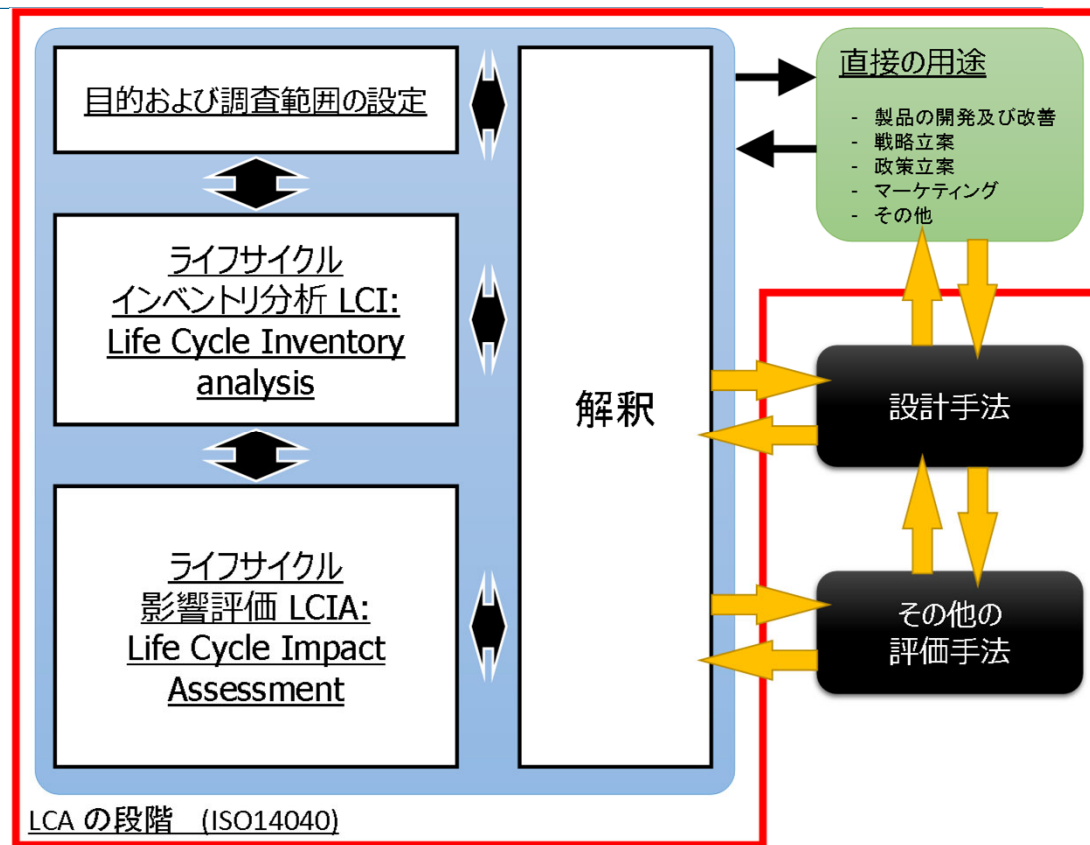


森林資源の持続可能な利用シナリオの分析

“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
 - 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
 - “シナリオ”計画・分析との連携により、micro-meso-macroの連成解析を目指せる



マテリアルフロー分析(MFA)

産業連関分析(IOA)