



資源パラドックス問題の解決に向けた マルチバリュー循環研究拠点

PJ 山末英嗣

■ A. プロジェクト概略

図も用いて簡潔な説明

■ B. プロジェクトとしての達成内容

当初目標と実際の達成内容

今後(5-10年後)の目標を具体的に

■ C. その他の特記事項

組織作り活動と成果

大型予算採択状況、今後の申請予定

異分野連携に関して

成果発信など

■ D. まとめ

目標に対する達成状況の自己評価

今後の課題と予定

■ E. 組織体制

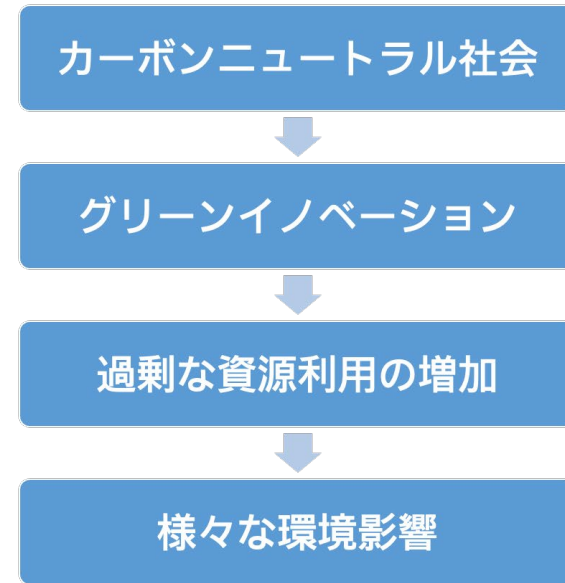
組織体制（各グループの役割や機能などが明示できる組織図の掲載）

■ F. 若手人材育成状況

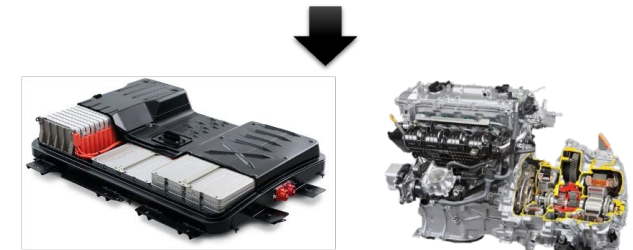
特筆すべき若手研究者の成果

若手育成のための取り組み内容等

- 現代社会では、製品の高機能化・長寿命化・省エネ化を追求するほど、製造段階での希少資源消費量が増大するという逆説的な現象が生じている。これを本プロジェクトでは「資源パラドックス問題」と定義する。
- 例えば、電気自動車（EV）は走行段階のCO₂排出量を大幅に削減するが、車載リチウムイオン電池の製造に必要なリチウム・コバルト・ニッケル等の希少金属の採掘・精錬段階では、従来の内燃機関車を上回る環境負荷が発生し得る。



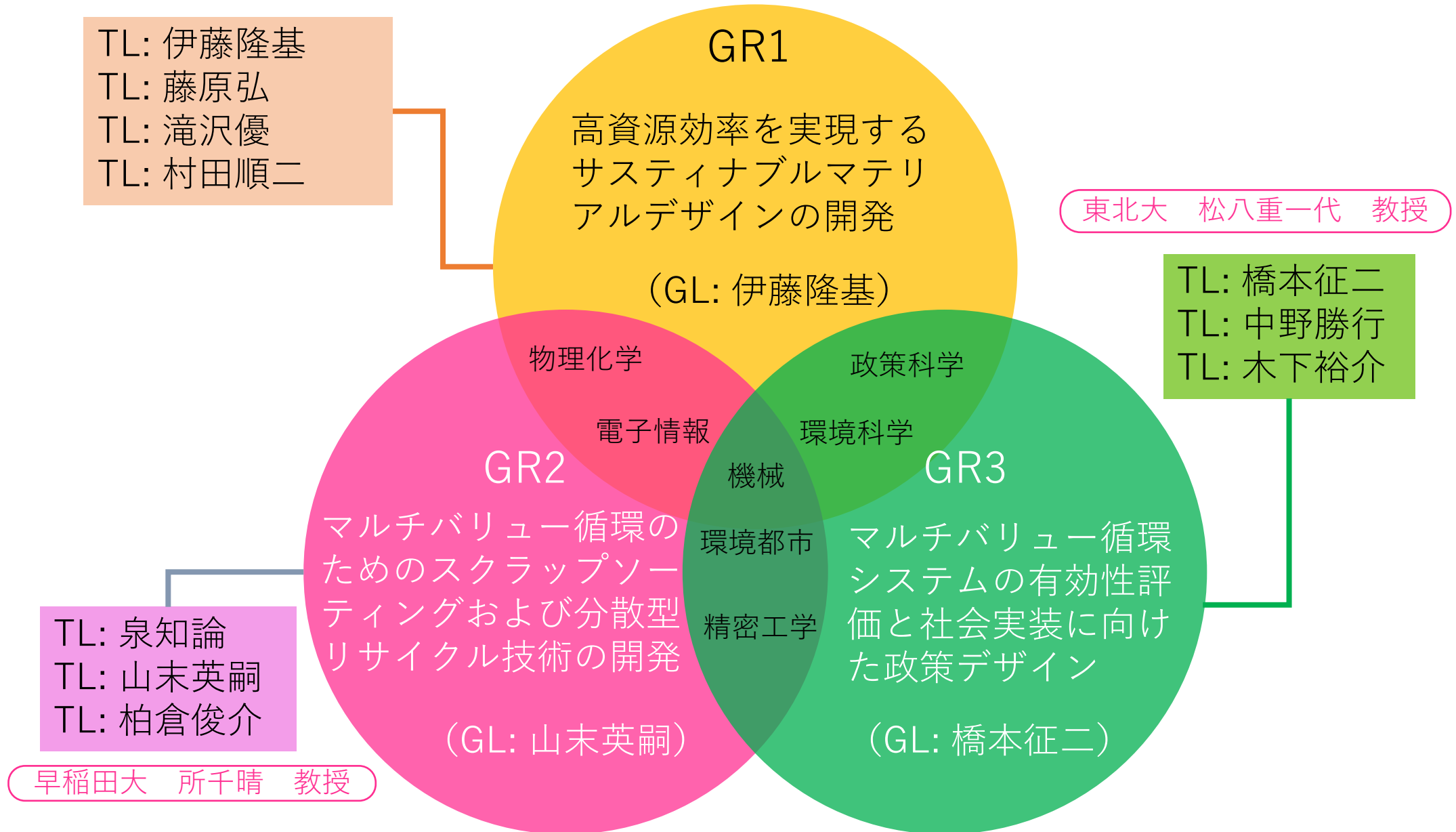
例：次世代自動車



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

この問題を解決するためには：

- ✓ 製品の機能を最大限に活かす「マルチバリュー循環」の仕組みが必要
- ✓ 技術・社会システム・政策の学際的アプローチが不可欠
- ✓ ケーススタディとして「自動車」を対象に、具体的な解決シナリオを提案



- 立命館大学理工学部・政策科学部を中心に、東京大学・東北大学・名古屋大学・早稲田大学・滋賀県立大学・ハノイ工科大学、ライデン大学、国立台湾大学等と連携する学際的研究体制を構築
- 主な研究対象：自動車
 - 自動車は鉄鋼・アルミ・希少金属・プラスチック等の多様な素材を含む
 - EV化に伴い、車載電池の資源循環が喫緊の課題
 - 製造～使用～廃棄・リサイクルの全ライフサイクルにわたる評価が可能
- 研究期間：2021年4月～2026年3月

■ 当初目標

真の持続可能な社会を構築するため「資源パラドックス問題」を誘発している製品を抽出し、それを回避するための方策を「技術」、「社会システム」と「政策パッケージ」の学際的視点から検討することで、製品の持つ機能を可能な限り有効活用するマルチバリュー循環社会を構築する。本プロジェクトでは、ケーススタディとして輸送機関（特に自動車）をまず扱い、その後、他の資源パラドックス製品へと展開する

■ 実際の達成内容

自動車をケーススタディとし、鉄鋼・プラスチック・電子基板・食材へと対象を広げ、資源パラドックスの回避策を実証。技術面ではSiC研磨機の上市や99.9%精度のLIBS選別、マイクロ波メタラジーによる高速製錬を実現し、システム面ではCO2削減を維持しつつかつ資源負荷を提言させるシナリオを提示した。これらを政策提言へと繋げ、技術・社会・政策が統合されたマルチバリュー循環社会の基盤を構築した。

グループ	当初の目標	主要な達成状況
第1グループ	<ul style="list-style-type: none"> ● 高機能材料の創成・実用化・強度評価手法の確立 ● 革新的材料加工技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ● 調和組織材料の特許申請・企業との共同開発・商用化 ● SiC研磨技術の確立
第2グループ	<ul style="list-style-type: none"> ● AIやLIBSを用いた選別技術 ● マイクロ波メタラジ技術の構築 ● 分散型リサイクル技術の開発 	<ul style="list-style-type: none"> ● LIBS+機械学習で99.9%超の分類精度・黄リン製造プロセス確立 ● マイクロ波メタラジによる高速低温製錬技術および分散型リサイクル技術
第3グループ	<ul style="list-style-type: none"> ● LCAによる循環効果定量化 ● 政策提案 	<ul style="list-style-type: none"> ● 多様なシェアリングのLCA評価 ● EV電池循環シナリオ

1. 査読付き論文（累計 127報）
2. 学会発表（国際 81件 / 国内 266件）
3. 特許の状況（出願 3件 / 取得 0件）

調和組織材料の特許取得と商用化、1000°C級クリープ試験装置の開発、SiC研磨技術の開発



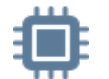
伊藤チーム：材料強度評価

- ▶ 多軸応力下の疲労・クリープ・クリープ疲労の損傷評価手法を体系的に確立
- ▶ 機械学習を活用した疲労き裂進展予測モデルを国際誌に発表 (IF 5.7)
- ▶ ミニチュア試験片用1000°C級クリープ試験装置を世界初レベルで開発・検証



藤原チーム：調和組織材料

- ▶ 高硬度・高導電性を両立する銅/タングステン複合調和組織材料を開発
- ▶ 放電加工用電極材料としての実用化に向けた特許申請を完了
- ▶ AlCoCrFeNi系ハイエントロピー合金の高温力学特性評価を国際会議で発表



村田チーム：SiC研磨技術

- ▶ SiCウェハの環境調和型電気化学機械研磨 (ECMP) 技術を開発
- ▶ 企業との共同研究により研磨装置初号機の開発完了 (2025年度)
- ▶ 2026年5月末の上市予定 (社会実装の実現)



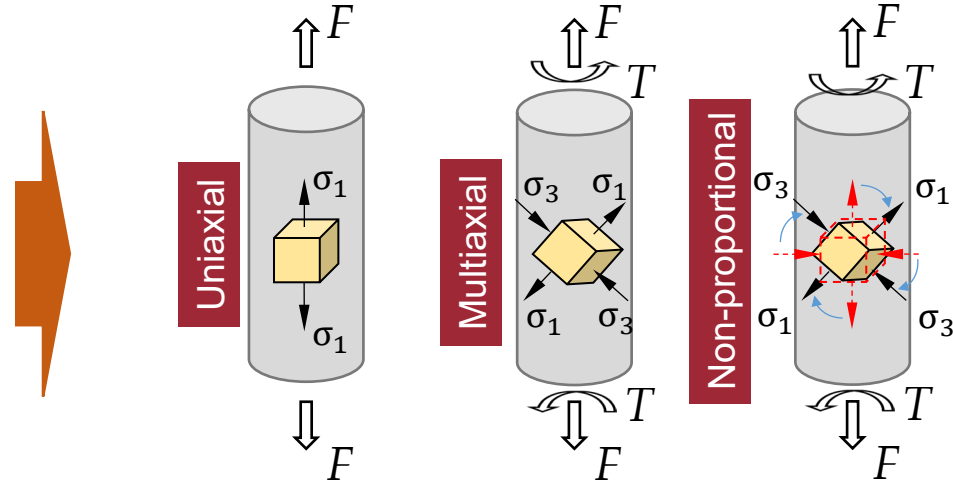
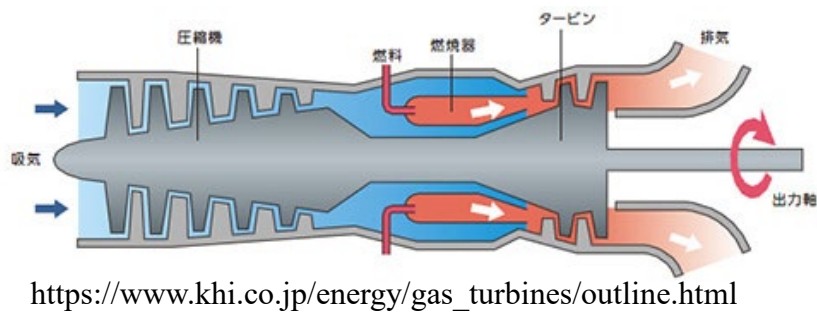
滝沢チーム：電池材料解析

- ▶ 立命館大学SRセンターの放射光を活用した電池材料の電子レベル構造解析
- ▶ 超高真空中での薄膜蒸着システムを構築し、表面化学状態変化を解明

Gr.1 高資源効率を実現するため実動負荷下での多軸疲労寿命予測手法の構築 (伊藤T)

背景

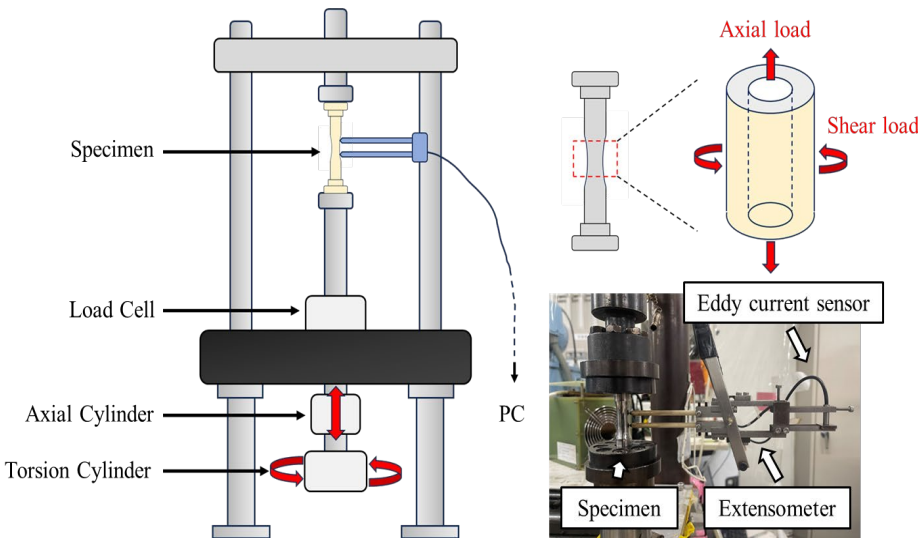
ガスタービンなど機器の運転



非比例多軸負荷が発生する

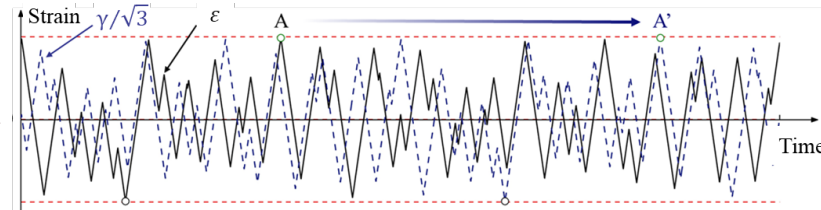
構造物健全性確保のため高精度の疲労寿命予測手法が必要

試験方法および結果

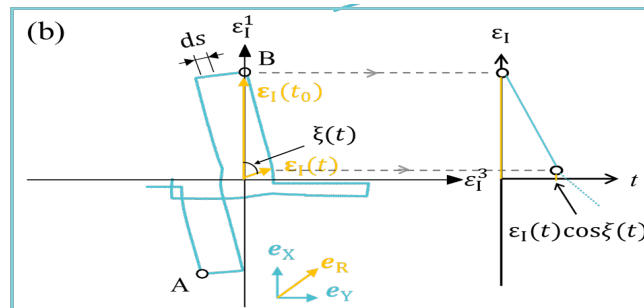


多軸疲労試験システム

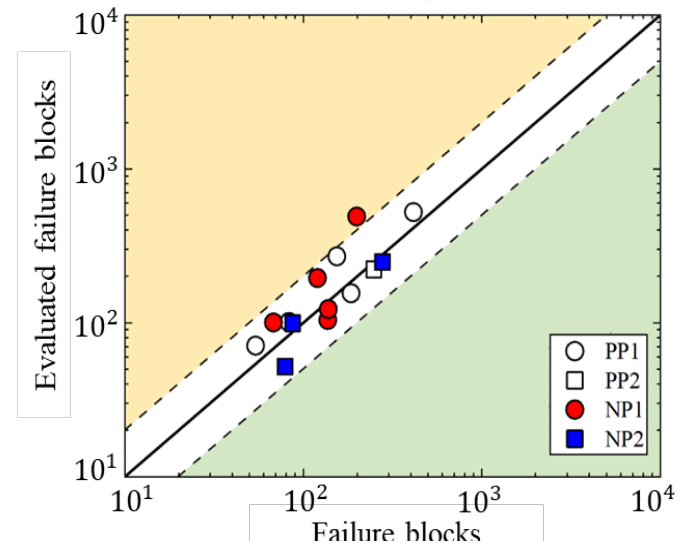
非比例多軸負荷パタンの一例



主ひずみ方向の確定

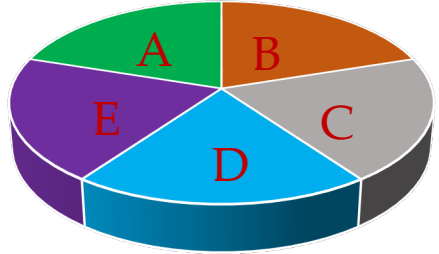


予測した結果
係数2の範囲内
(高精度)

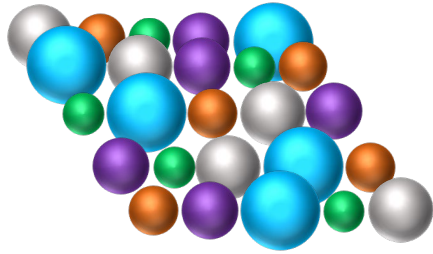


背景

ハイレントロピー合金



5種類以上の元素が等元素割合



AlCoCrFeNi

- 室温から高温で高強度
- 低密度
- 新エネルギー発電システム材料として期待

放電プラズマ焼結で製作(SPS)

- Ni基超合金と似た組織
- 高クリープ特性が期待

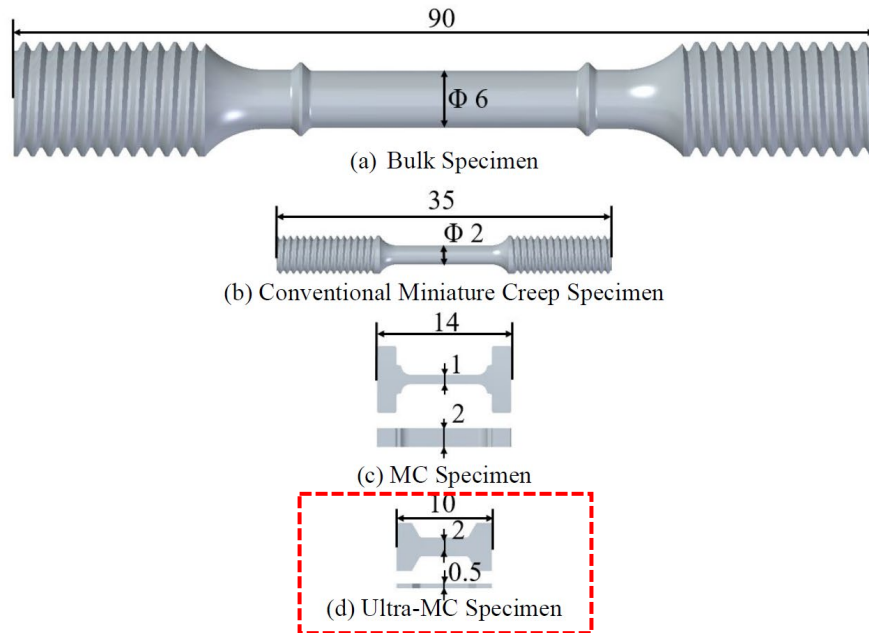
SPSで製作した試験片が小さい

微小クリープ試験システムが必須

開発した試験システム



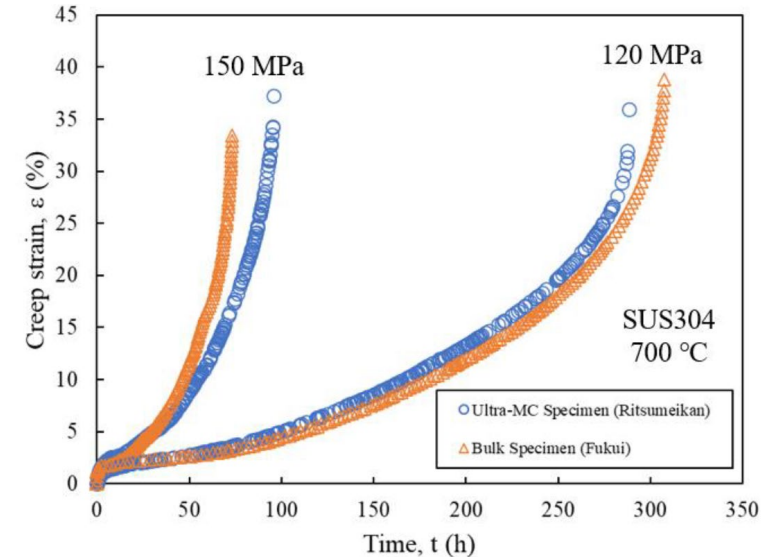
開発した超ミニチュアクリープ試験片用試験機の外観



超ミニチュアクリープ試験片(UMC)の寸法

検証試験結果(SUS304)

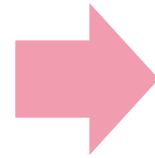
- 標準試験片とUMC寿命差はほぼない



関連成果 <https://doi.org/10.1515/jmbm-2025-0048>

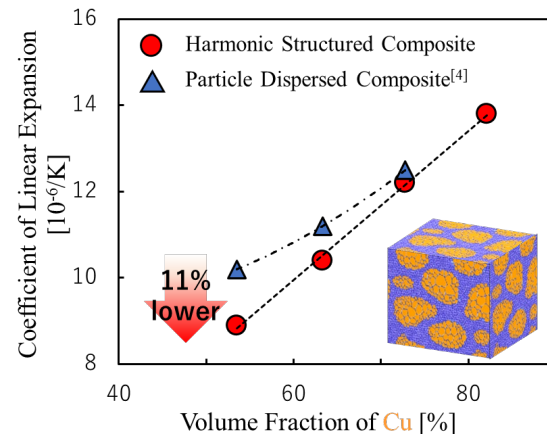
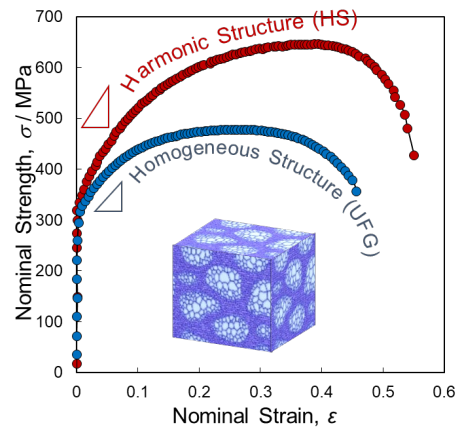
目標課題

1. レアースフリー超高機能調和組織材料の創製
2. 高耐衝撃特性超高機能調和組織材料の創製
3. 調和組織材料の実用化と社会実装



研究成果のまとめ

1. レアースなどの添加元素を使わず、組織構造を制御する「調和組織制御」だけで金属材料を高性能化できることを証明した。(論文25報、学会発表多数)
2. 通常は両立が難しい2つの特性を同時に高めた「複合調和組織材料」の創製に成功した。(論文10報、学会発表多数)
3. 開発した材料の有用性が認められ、現在は以下の2分野で実用化に向けた共同研究が加速中。
 - ・放電加工用電極材料
 - ・次世代集電材料

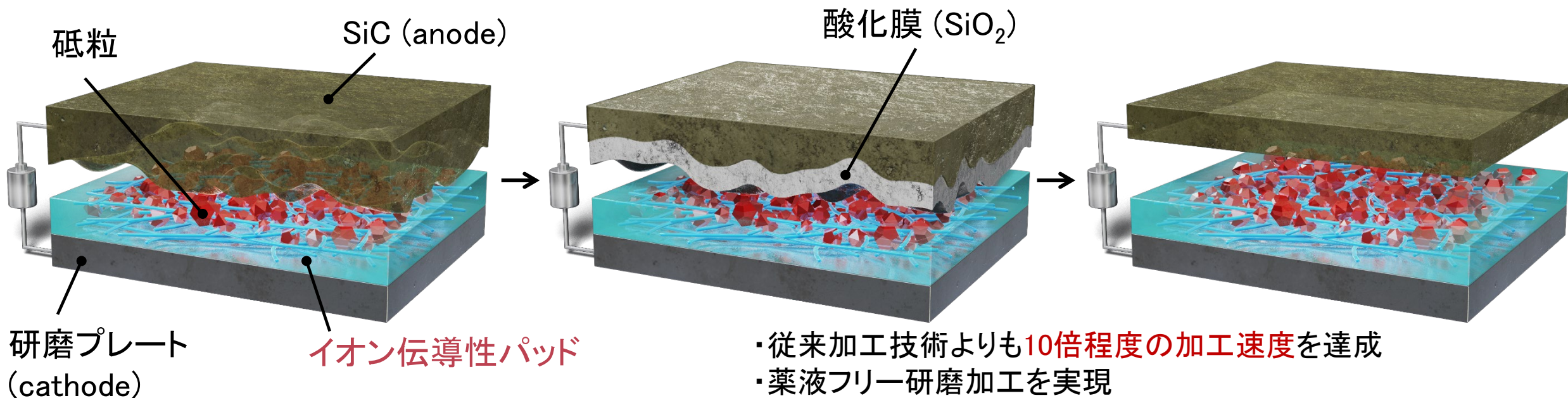


強固な研究基盤の構築:

日本学術振興会 科学研究費助成事業(基盤研究B)の採択に加え、計3件の外部競争的資金を獲得。継続的かつ安定的な研究推進体制を確立した。

次世代を担う研究人材の輩出:

2名の若手研究者を育成。高度な専門性を武器に、アカデミア(大学)および産業界(民間企業)の第一線へと送り出した。



高効率・低環境負荷・低コスト—SiC研磨の新技术

ECMP

Electro-Chemical Mechanical Polishing
電気化学機械研磨法

SiCウェハ表面の軟質化による高い加工効率を実現！

イオン伝導性複合パッドを用いた薬液フリー研磨で、低環境負荷・低コストを実現！

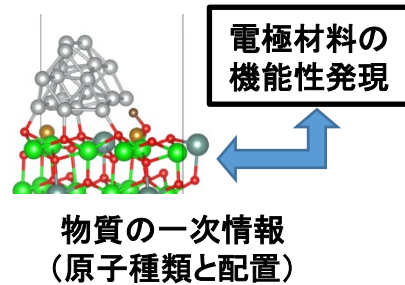
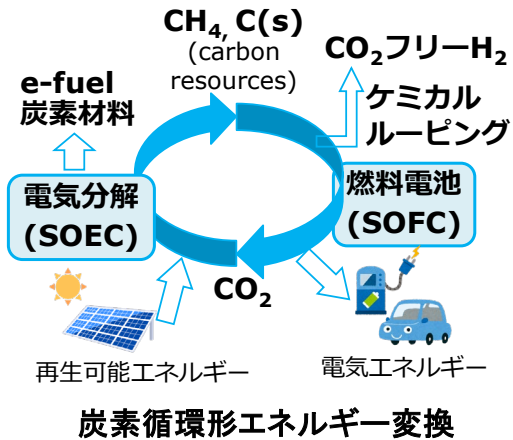
加工対象物	適用例
SiC	<ul style="list-style-type: none"> ・ SiCウェハの高速研磨 (20 μm/h) ・ SiCウェハの表面仕上げ (Sa 0.2 nm)

ジェイテックコーポレーションより2026年に装置販売開始

目的：炭素循環に向けたCO2フリーなH2/e-fuelの生産のための電極触媒の開発

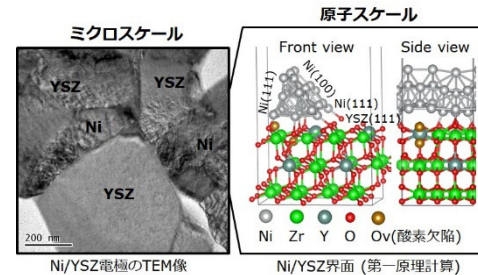
成果：電極触媒の反応制御に資する電極設計指針の構築に成功した。

今後の展望：成果の実用化に向けて民間企業との共同研究を進める



物質の一次情報 x と電極機能 y を結ぶ数理モデルの構築 ($y=f(x)$)

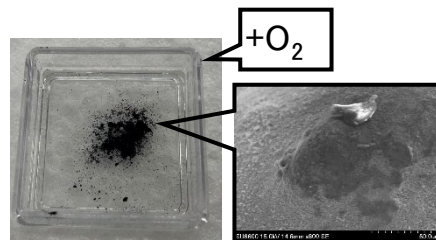
マテリアルズ・インフォマティクス



原子レベル観察&電極機能発現
電極の新機能発現に向けた材料シミュレーション

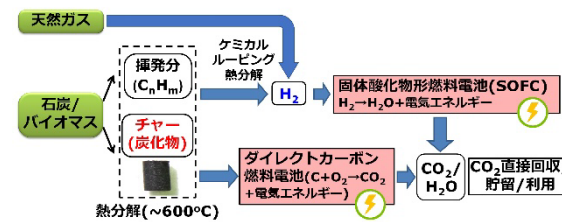


電極オペランド分析
SP8の放射光施設を使用したオペランドX線分析による電極設計指針の構築



CO₂由来炭素材料生成

- ・電気分解を用いたCO₂から炭素材料の生成
- ・CO₂から酸素も同時生成できるため、宇宙探査領域においても注目



直接型燃料電池
分散型エネルギーシステムの構築に向けた炭素型の燃料電池の開発

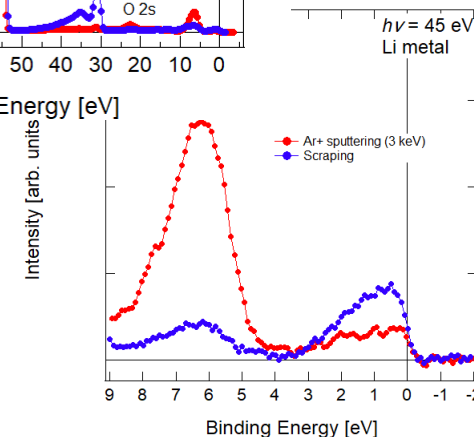
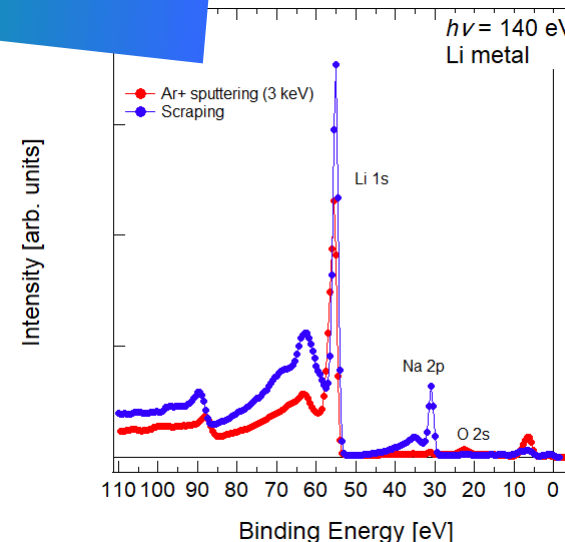
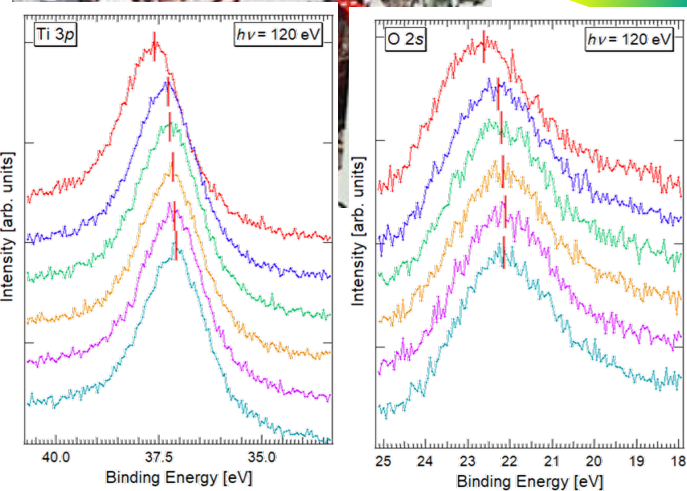
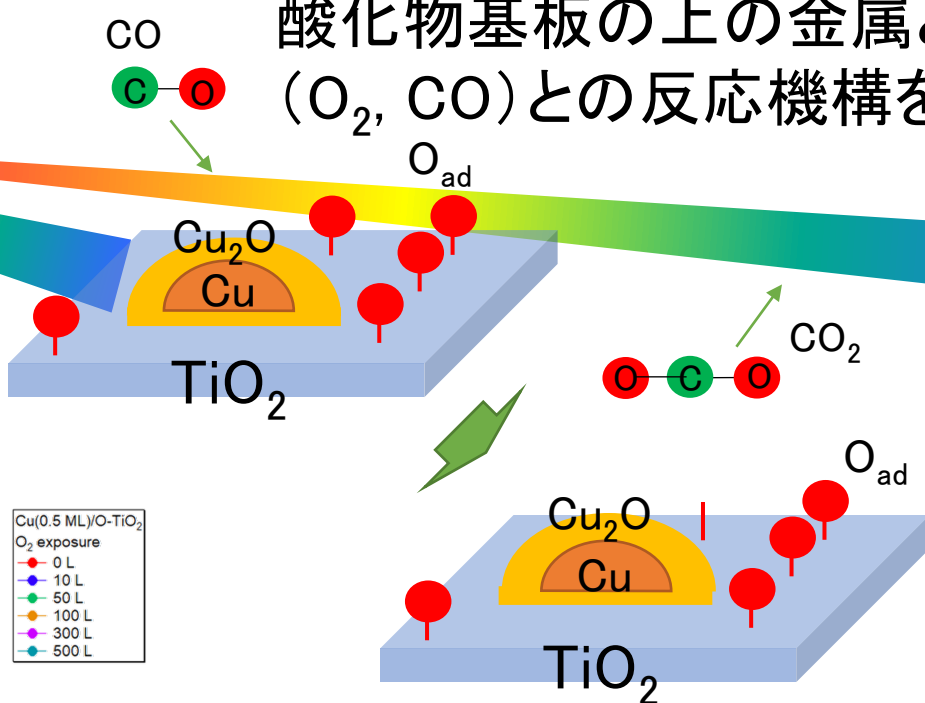
成果

[1] H. Hirai, H. Watanabe, Int J Hydrogen Energy, 218 (2026) 154005
 [2] S. Higashidani, H. Watanabe, Int J Hydrogen Energy, 155 (2025) 150319
 [3] A. Tawa et al., J Power Sources, 647 (2025) 237295
 [4] I. Ban et al., J Electrochem Soc, 172 (2025) 054505
 [5] S. Muto, H. Watanabe, Int J Hydrogen Energy, 71 (2024) 811-819

リチウムイオン電池劣化メカニズムの解明に向けて

酸化物基板の上の金属とガス (O₂, CO) との反応機構を解明

金属Liの電子状態を解明



K. Mitsuhashi *et al.*, J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **252**, 147123 (2021).

今後の展望: 実際の電池の充放電サイクルに対応する電子状態変化を直接観測

M. Takizawa *et al.*

柏倉チーム

- ▶ LIBS×機械学習によるスクラップ選別
レーザー誘起ブレークダウン分光法（LIBS）と機械学習を組み合わせた高速スクラップ選別技術を開発
- ▶ 自動車用鋼板（JFS規格）の分類精度**99.9%超**を達成
- ▶ 廃炉燃料デブリへのLIBS技術応用

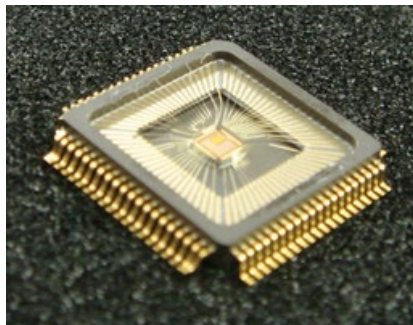
山末チーム

- ▶ マイクロ波加熱による資源回収
マイクロ波加熱を用いた急速還元反応による有価物回収プロセスを確立
- ▶ **廃プラスチックからの直接水素回収**に成功（5大汎用プラスチック対象）
- ▶ 低純度リン酸からの黄リン直接生成プロセス（日本経済新聞に掲載、ACS Sustainable Chemistry & Engineering IF 7.1）
- ▶ 連鎖反応メカニズム（鉄系酸化物→水素+CNT状炭素→連鎖加熱分解）を解明

泉チーム

- ▶ 廃電子基板のAI評価
廃電子基板の部品認識手法を開発
 - YOLOv8
 - CRAFT
 - PaddleOCR統合
- ▶ AI学習用画像データセットを一般公開し、研究コミュニティに貢献

LSIの端子メッキや内部ワイヤには金が使われている



- 基板認識による分類による貴金属の回収効率の向上
- AI画像認識による電子基板上の部品認識技術の開発

- 深層学習による電子部品の画像認識
 - 学習用データセットの構築
 - CNN最適化、YOLOによる検出、データ拡張の影響評価、ファインチューニング・転移学習による学習時間短縮
- 文字列検出・文字認識による精度向上
 - 部品上の文字列と部品型番データセット
 - 基板上的文字列と回路図命名規則
- 古典的画像処理による前処理
 - 色相ヒストグラムによる基板色推定
 - 輪郭検出による部品領域推定
 - 自己相関と標準ピンピッチによる部品サイズ推定

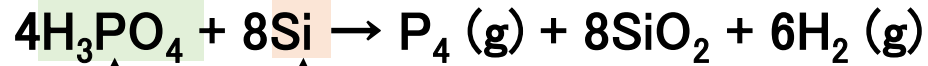
到達点: システム全体の構成と各部の妥当性を確認できた

今後の課題: 全体を統合した価値判断と処理方法の最適化

- ・黄リンの価格の高値推移(CIF, 70万円/t)
- ・黄リン輸出国の輸出抑制

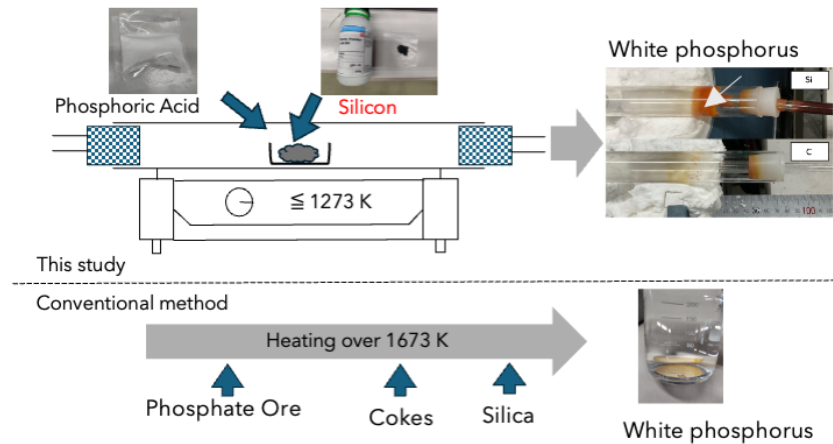
- ・日本国内で実施可能な黄リン製造プロセス
- ・二酸化炭素の排出の低減(大竹、2023)

<新規還元プロセス>



シリコンスラッジを想定(ウェハの切削屑)

湿式法による粗リン酸(純度40%前後)



- ・1273 Kで91.4%の黄リンの還元率を達成した(従来法と比較して400 Kほど低温)
- ・従来法と比較し、炭素を使わない還元と低温化で50%程度のCO₂排出を削減可能

<成果>

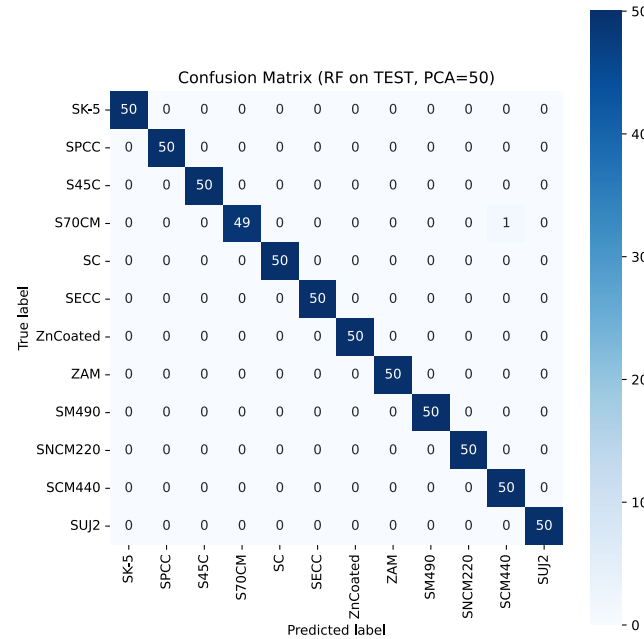
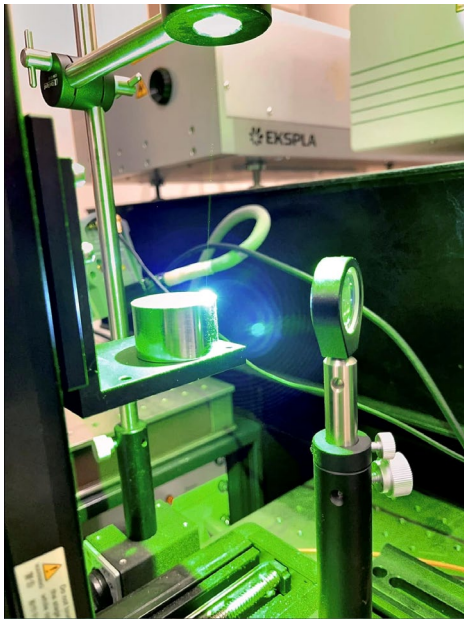
1. Kashiwakura, S., Okamoto, A., Kosai, S., Takizawa, M. & Yamasue, E. A promising silicothermic route for low-temperature, byproduct-free production of white phosphorus using silicon waste. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 13, 21537–21543 (2025).
2. 「廃棄シリコン粉末使い黄リン生成、立命館大学 セ氏1000度で」日本経済新聞、2026.1.19

- ・鉄鋼業に対するCO₂排出抑制の要請
- ・電炉生産比率の将来的な上昇



- ・高級鋼の製造のためのスクラップの組成管理
- ・高速応答条件下での正確な「分類」が必要

レーザー誘起ブレークダウン分光法(LIBS)と分類学習(XGBoost)の併用
分類ニーズに応じたラベル分類



レーザー誘起ブレークダウン
分光法

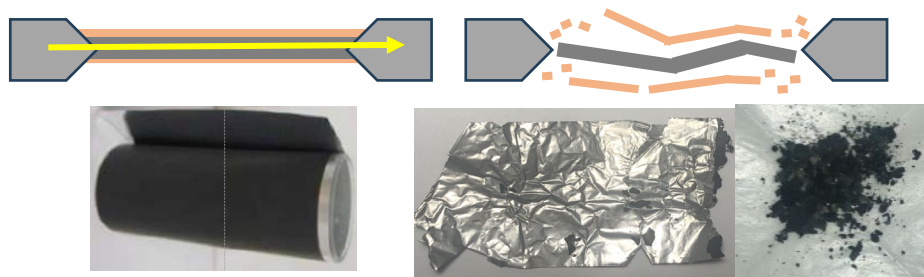
鉄鋼を中心に秒速10個での
正確な分類を達成

スクラップの選別前後の
質の向上の定量化

■ リチウムイオン電池正極材の分離

正極活物質の組成を残したまま97%を回収

- ⇒ジュール熱発生によるバインダーの融解・分解
- ⇒局所的な昇温による膨張の差
- ⇒大きさ等規格が異なっても適正電圧計算で対応

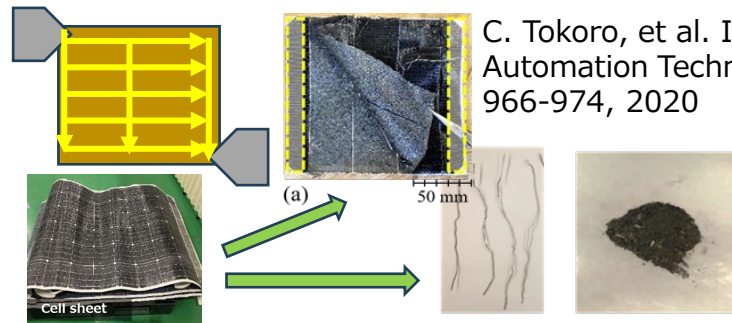


C. Tokoro, et al., Waste Manag. 125, 58-66, 2021

■ 太陽光パネルセルシートの分離

銅 96 %, 銀 69 % の回収を達成

- ⇒ジュール熱発生による細線爆発
- ⇒金属の気化・衝撃波を利用しシート剥離
- ⇒粉碎技術と組み合わせてSi, Snも分離

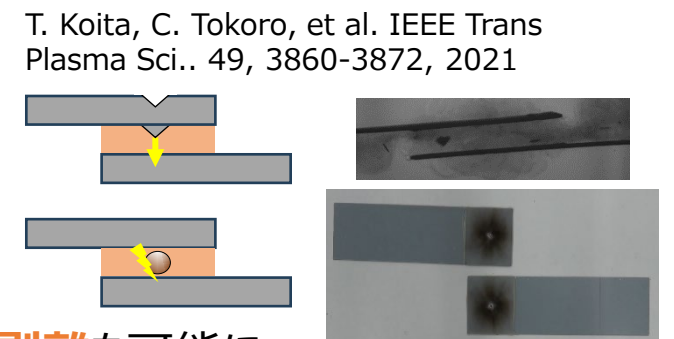


C. Tokoro, et al. Int. J. Automation Technol. 14, 966-974, 2020

■ 接着体の剥離

易解体設計への道筋を提示

- ⇒絶縁破壊・発熱による瞬間的な膨張
- ⇒発生する衝撃波も利用
- ⇒放電経路の制御可能な接着体へ



T. Koita, C. Tokoro, et al. IEEE Trans Plasma Sci.. 49, 3860-3872, 2021

1回の放電で多種多様なリユース/リサイクルの目的に合わせた**選択的な剥離**を可能に

次世代自動車の循環利用を中心に評価

橋本チーム シェアリングのLCA評価

- ▶ 多様なサービスのLCA評価を実施
 - ライドシェア、衣服
 - キックボード、傘
 - 乳幼児用品、
サイクルシェアリング
- ▶ 玩具サブスクリプションの評価
 - 通常購入と比較して環境負荷を低減しつつリバウンドなし

木下チーム バッテリーバリューチェーン

- ▶ 循環システム評価モデルの開発
 - EV・LiB・ESS需要推計モデルと製品ライフサイクルモデルを統合
- ▶ 日本・ドイツを対象としたCBVCシナリオ
 - CircularシナリオでCO2排出量を日本**32.3%**・ドイツ**36.0%**削減
 - 国内循環の重要性（トレーサビリティ強化・国外流出抑制）を示唆

中野チーム 政策デザイン

- ▶ LCAデータベースの拡張
 - 社会的データを追加し、サプライチェーン中の社会的リスク高所を特定する手法を開発
- ▶ バイオマス製品のLCA事例
 - 合板・集成材・バイオ炭の評価を実施・論文発表
- ▶ マスバランス方式の消費者認知研究
 - アンケート調査を実施し、一般消費者への情報提供の課題を明示

目的

マルチバリュー循環システムに関わる各種の製品・技術・システムの環境影響低減効果をライフサイクルアセスメント(LCA)を援用して評価するとともに評価の方法論について検討。以下は、シェアリングシステムの評価の例。

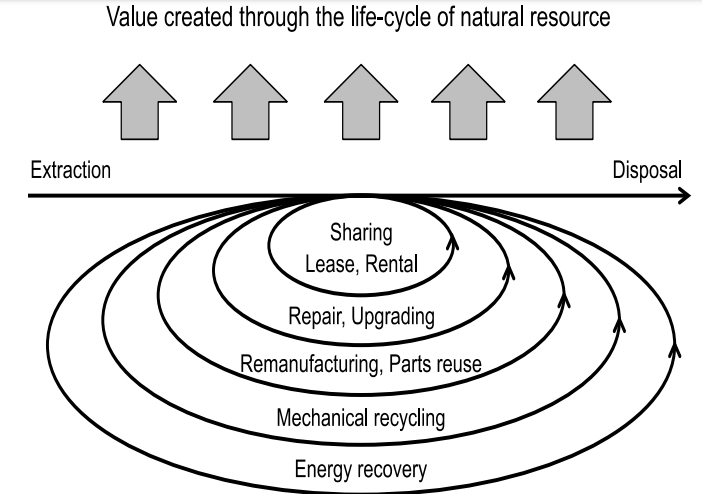
方法

LCAデータベース(IDEA)等を用いて、傘、乳幼児製品、電動キックボード等のシェアリングシステムを評価。機能単位の設定等の方法論について検討。

結果・考察

- 傘：シェア傘の利用により傘の所有本数が減ることを評価する枠組みで調査したが、逆に増える結果＝環境影響が増える結果に。
- 乳幼児製品：サブスクリプションに対し、機能単位を設定せずにシステムの変化を評価する枠組みを設定。費用増により、リバウンドを含めても環境影響は減る結果に。
- 電動キックボード：徒歩の代替は環境影響を増やすが、自動車の代替効果が大きく、全体として環境影響は減る結果に。

電動キックボードの最も多い利用目的に対する代替移動手段



図：マルチバリュー循環システム

今後の展望

左記の他、シェアオフィス、シェアサイクル、衣服のシェアリング等を検討してきたが、従来のLCAの枠組み(機能単位)では評価しにくいものも多く、様々な事例を踏まえ、適切な評価の考え方を確立することが必要。

目的

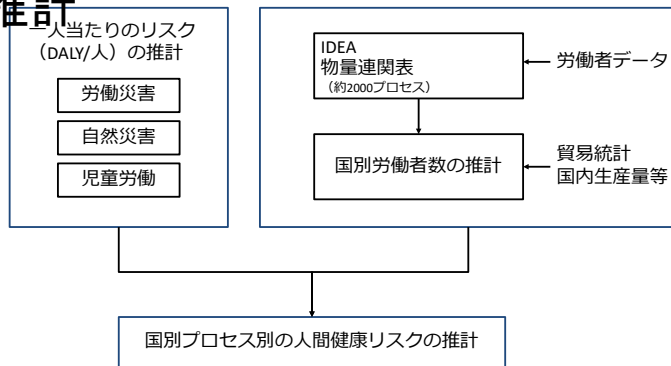
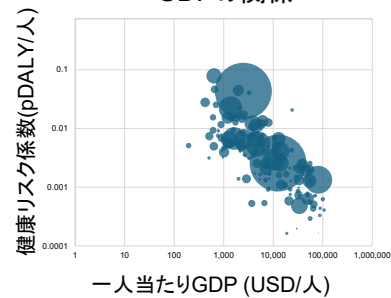
ライフサイクルアセスメント（LCA）では一般的に環境側面に着目して評価を実施する。本研究ではこれに社会的側面を追加し、統合的な評価を目指す

方法

LCAデータベース

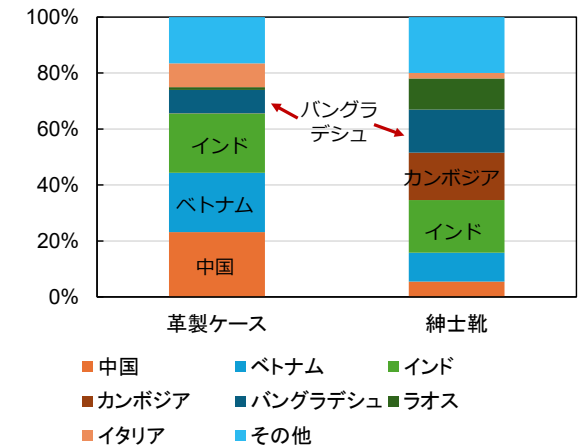
（IDEA）と貿易統計等を用いて国別の労働者データを整備。それに労働災害、自然災害、児童労働に起因する各国のリスク係数を乗ずることで国別の人間健康リスクを推計

作成した人間健康リスク係数とGDPの関係



結果・考察

- 例えば革製ケースと紳士靴の場合、インド等におけるリスクが高いことが示された。
- ただし古いデータに依存している箇所があるため、今後改良が必要



結論と今後の展望

環境面と社会面の同時評価する手法の有効性が示された。社会実装に向け、より妥当性の高いデータに更新していくことを予定している。

目的

EVの蓄電池を多用途で利用することは、資源利用効率を高め環境負荷を低減できる可能性がある。EVから家庭への給電を行うVehicle to Home (V2H)システムを事例に評価方法を検討し、定量的に分析する。

方法

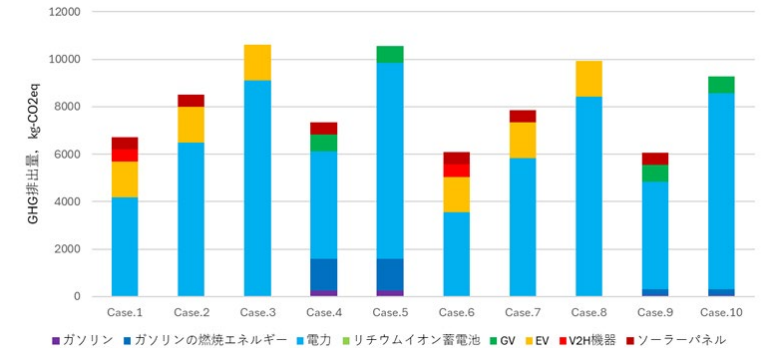
- V2Hの効果は、自動車の利用スケジュールや走行量によって変化するため、2通りの走行パターンを想定
- 太陽光発電(PV)とEVによるV2Hを基本とし、ガソリン車や家庭用蓄電池導入など5シナリオを想定、5×2=10ケースを比較
- 住宅のエネルギー消費条件として国内3箇所の戸建て住宅の実績値を利用

- 評価指標は温室効果ガス排出とTMR (物質関与総量)

	走行パターン	所有する自動車の種類	太陽光発電	V2H設備	家庭用蓄電池
Case.1	長距離	EV	○	○	×
Case.2	長距離	EV	○	×	×
Case.3	長距離	EV	×	×	×
Case.4	長距離	GV	○	×	○
Case.5	長距離	GV	×	×	×
Case.6	短距離	EV	○	○	×
Case.7	短距離	EV	○	×	×
Case.8	短距離	EV	×	×	×
Case.9	短距離	GV	○	×	○
Case.10	短距離	GV	×	×	×

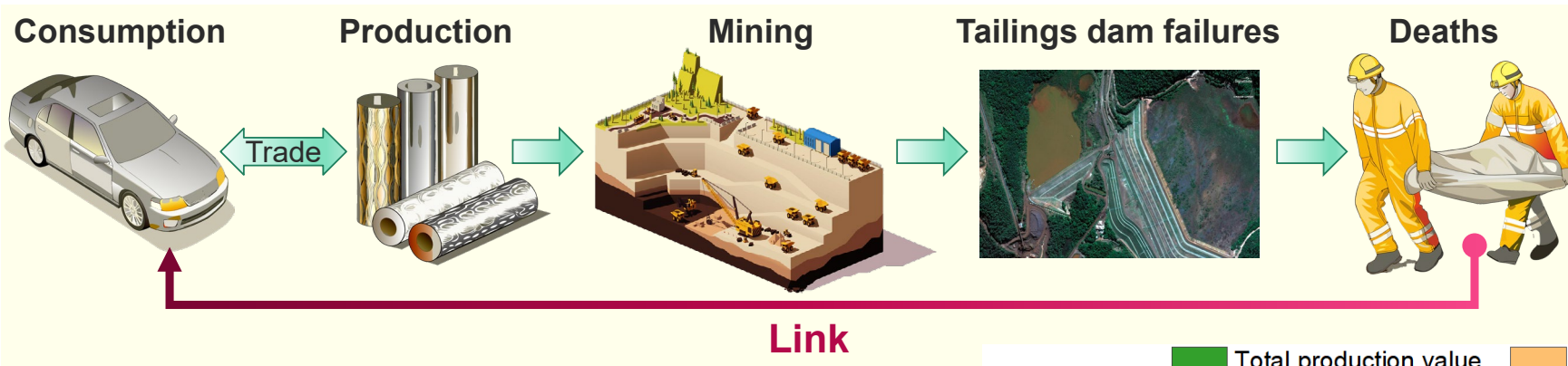
結果・考察

- V2Hシステムを導入したケース(case1)が、いずれの地域でも温室効果ガス排出量が最少となった
- TMRはcase1が最小ではなかったが、PVとEVのみのケース(case2)に比べ約15~20%低減



結論と今後の展望

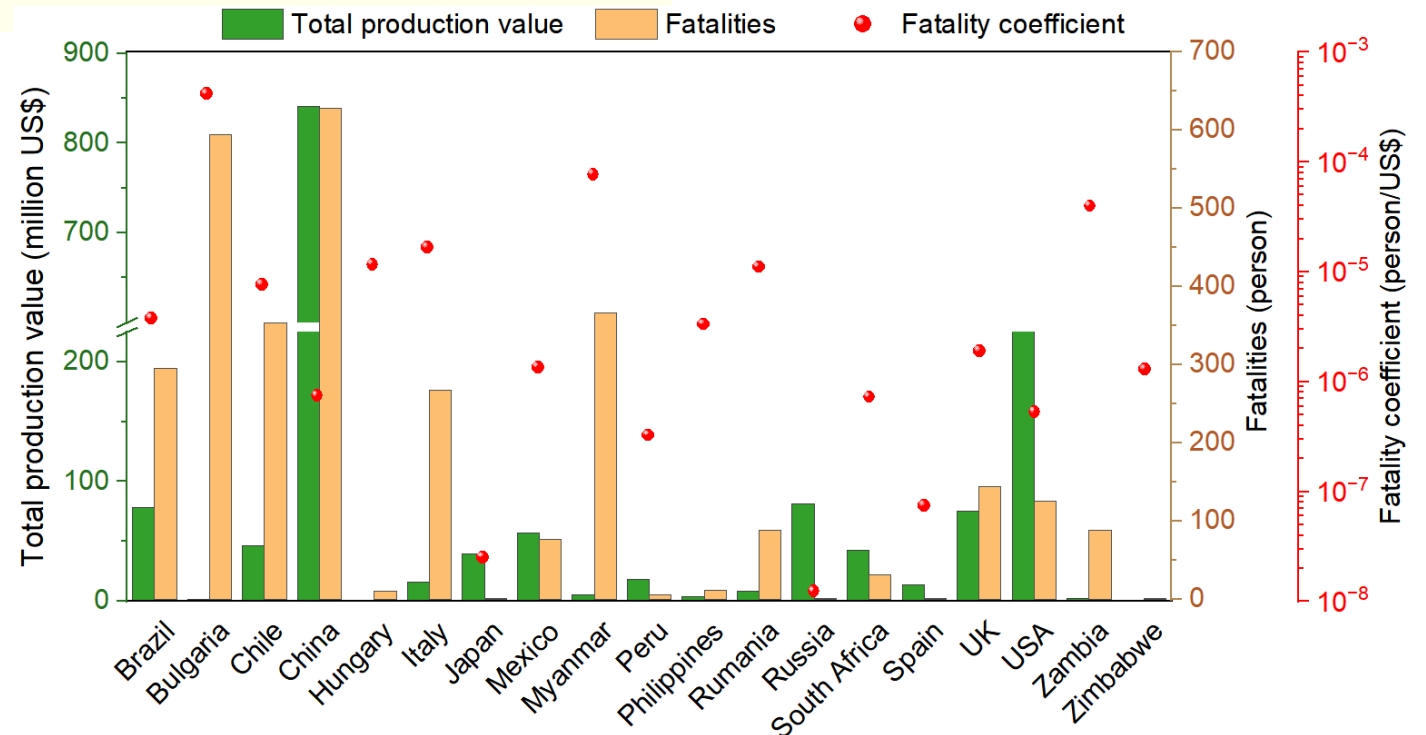
- V2H等、EVやPVの有効利用策の効果は様々な条件により変化→多くの要素を包括的に考慮すべき
- 比較評価を公平かつ簡便に行う枠組みの確立が必要



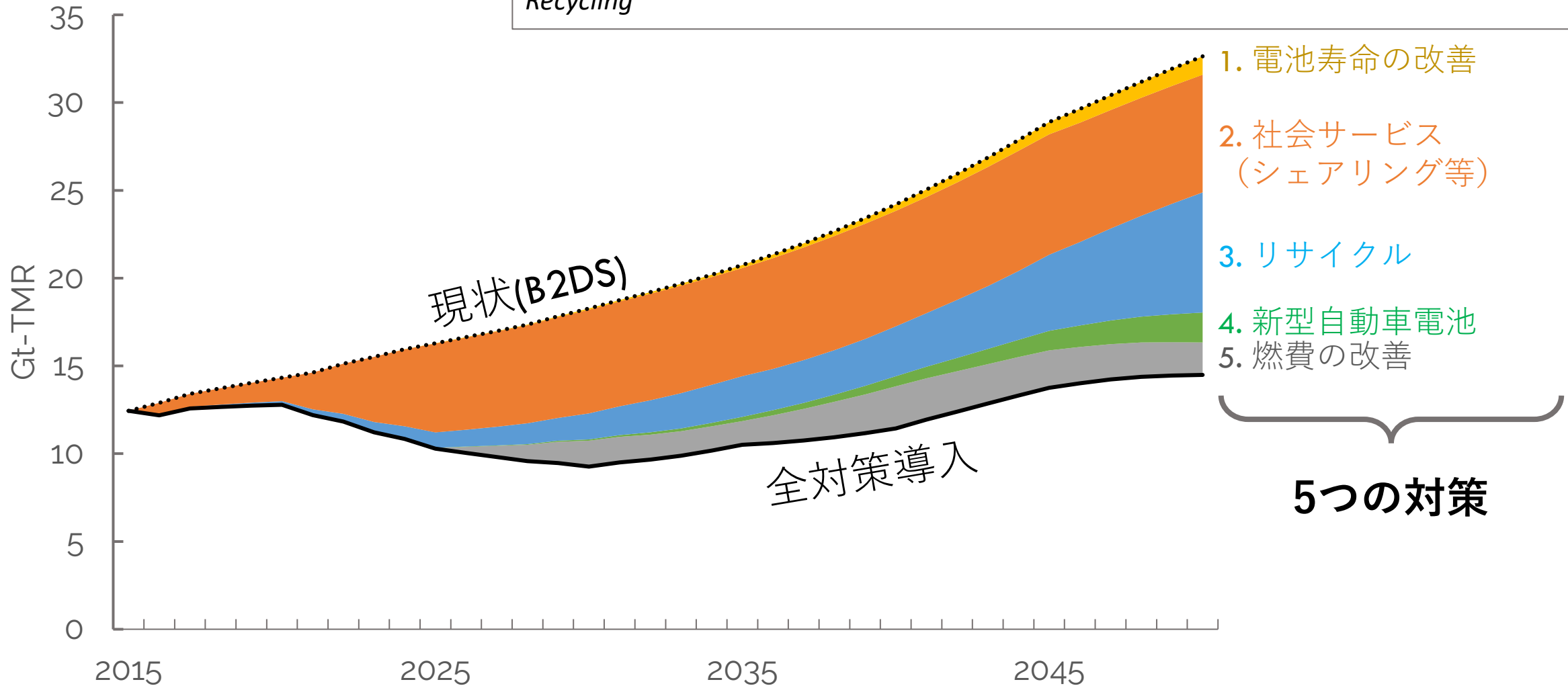
多地域間産業連関表に基づき、
 体化された社会的責任
 (Induced Social
 Responsibility: ISR)の推計
 ダム決壊による影響の事例

The extended MRIO table for ISR assessment

MRIO table		Intermediate Use				Final Demand				Total Output	
		k1		...		k190		...			
		l1	...	l26	...	F1	...	F6	...		
Inter- mediate Input	k1	l1	AX				F				X
		...									
	l26										
	...										
Value added	k	l1	V				X'				X
		...									
		l26									
Risk table	Fatality	$\omega_{1,1}$...	$\omega_{1,190}$							
	Bankrupt	$\omega_{2,1}$...	$\omega_{2,190}$							
							

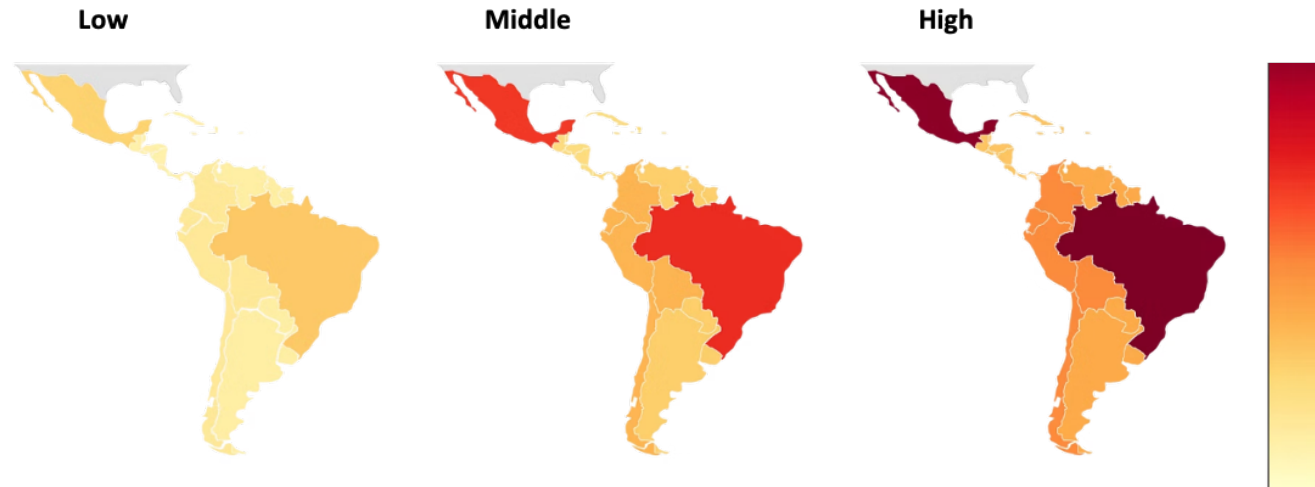
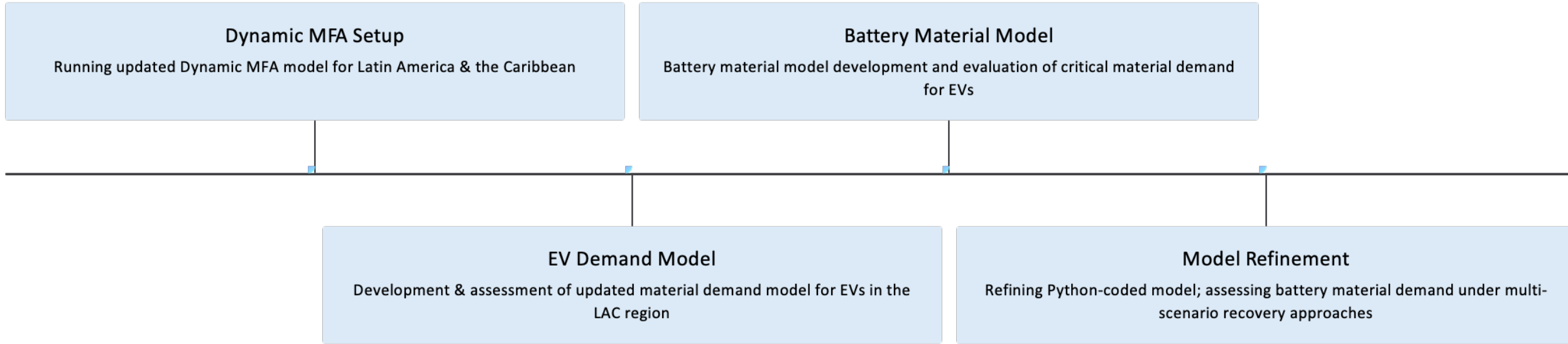


Shoki Kosai, Hibiki Takimoto, Takuma Watari, [Eiji Yamasue](#): "Circular economy can mitigate rising mining demand from global vehicle electrification", *Resources, Conservation and Recycling*



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

The following key stages trace the evolution of the research framework, from raw data ingestion to scenario-based battery material forecasting across the LAC region.



Metal Distribution by Scenario

Maps show the spatial distribution of **some metals** across LAC countries under **Low to High** EV penetration scenarios.

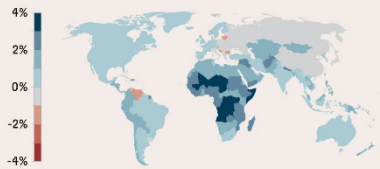
Color intensity reveals Brazil and Mexico as dominant material hubs.

Research is ongoing. Final outcomes and full scenario comparisons are forthcoming.

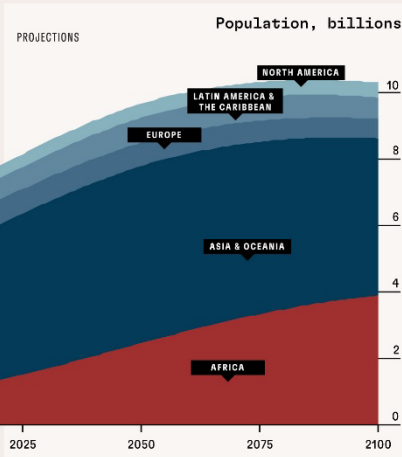
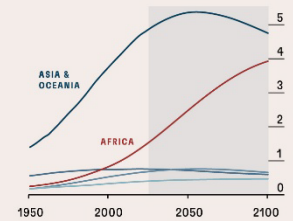
Africa's surge

Africa's population is exploding. It currently accounts for roughly half the global increase and every two years adds as many people as live in France. By 2100 two out of every five people on Earth are expected to be African.

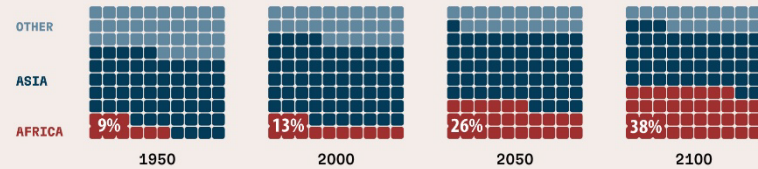
Population growth rate, 2021



Population, billions

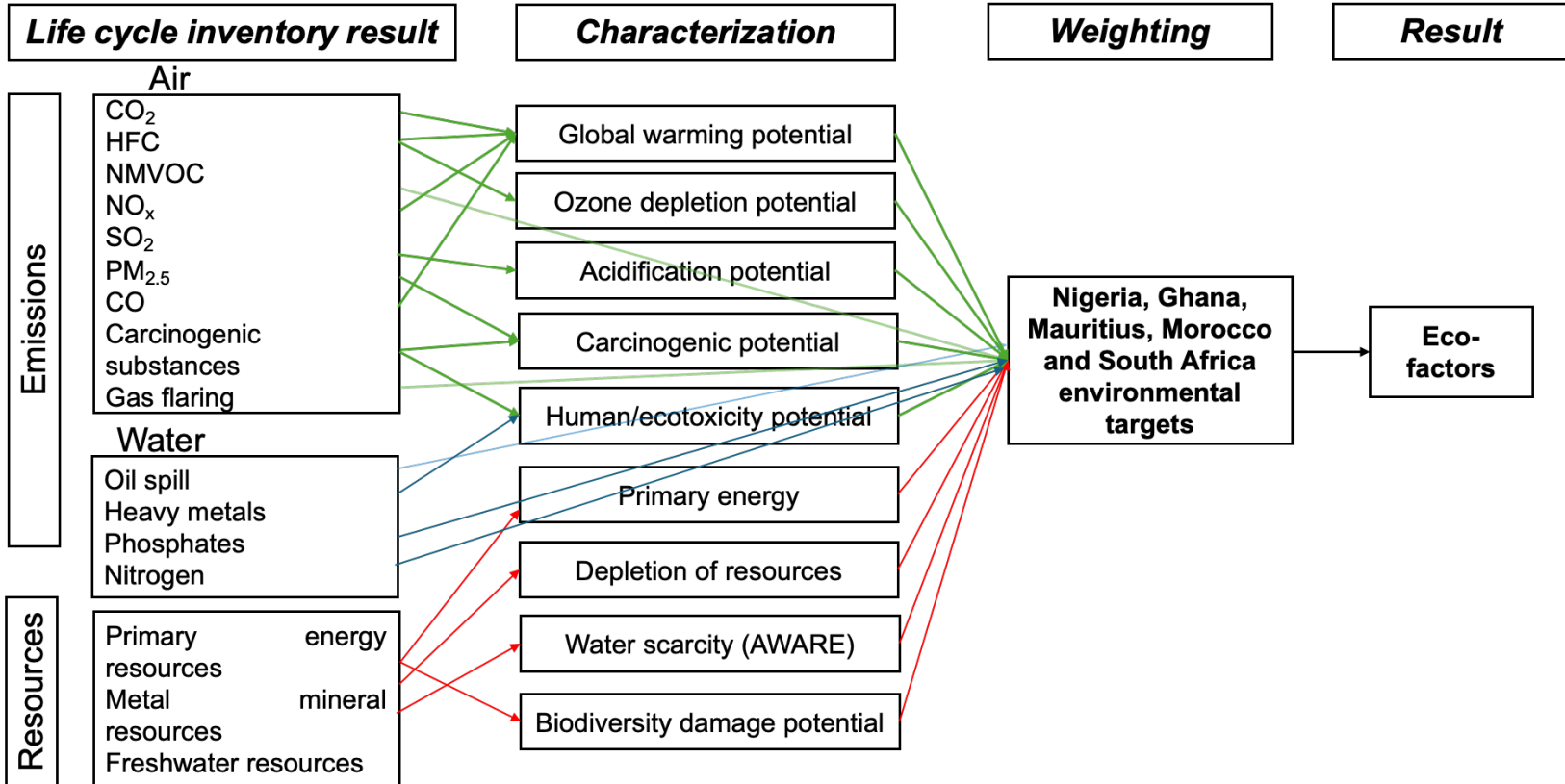


Share of global population



SOURCES: United Nations, World Population Prospects (2022); and Our World in Data.

NOTE: The charts show historical estimates and projections based on the UN medium-fertility scenario. The boundaries, colors, denominations, and any other information shown on the maps do not imply, on the part of the IMF, any judgment on the legal status of any territory or any endorsement or acceptance of such boundaries.



社会実装と国際展開を通じ、マルチバリュー循環社会の実現に貢献

🚩 5年後（2031年頃）の目標

- SiCウェハ研磨装置の市場展開と国内SiCウェハメーカーへの普及
- LIBS選別技術の実用化・標準化（JIS規格化）と国内スクラップヤードへの導入
- 分散型リサイクルシステムを活用した資源・有価ガス回収プロセスの実証試験・スケールアップ
- 循環バッテリーバリューチェーン評価モデルの政策立案への活用（国内外）
- 環境研究総合推進費等の大型資金を活用した研究拠点の継続・発展

🌐 10年後（2036年頃）の目標

- マルチバリュー循環技術の東南アジア・欧州への国際展開
- 資源パラドックス問題の解決シナリオを自動車以外の製品群（家電・建材等）に拡張
- 本プロジェクトで育成した若手研究者が次世代の研究拠点を形成
- 循環型社会政策の立案・実施に学術的エビデンスを継続的に提供

学内連携

- ✓ 環境テクノロジー・マネジメント研究センター連携：ハイテクリサーチセンターをマクロ～原子オーダーまで評価できる材料評価拠点として整備
- ✓ 学部横断的研究体制の構築：工学部・政策科学部・食マネジメント学部の連携

学外連携（国際）

- ✓ ハノイ工科大学（ベトナム）：共同研究の推進、東南アジア展開の拠点
- ✓ シンガポール国立大学：JST-NEXUS事業等を通じた連携
- ✓ 台湾国立大学：ハイレベルな学術交流の実施。日本LCA学会国際連携賞の共同受賞

学外連携（国内）

- ✓ 東京大学、東北大学、名古屋大学、早稲田大学、九州大学、中部大学を始めとする大学との連携
- ✓ 12社以上との民間企業、3機構以上の研究所等との連携

行政・政策への貢献

- ✓ 橋本征二 教授：中央環境審議会 循環型社会部会 委員（2021年～）、J-クレジット制度運営委員会 委員（2013年～）等
- ✓ 柏倉俊介 准教授：LIBS JIS規格化作業グループ委員（経済産業省 新市場創造型標準化制度）

5年間で総額**3億円超**の外部資金を獲得し、研究の継続・発展基盤を確立
(以下は主要な成果を抜粋)

年度	事業名	代表・分担	金額
2021-2023	科研費・挑戦的研究(開拓)「都市鉱山をエネルギー貯蔵庫に転換可能なマイクロ波メタラジエーションの創成」	山末(代表)	19,450千円
2023-24	内閣府SIP第3期「スマートな食選択のためのナッジ支援システム開発」	山末(代表)	108,000千円
2024-	環境研究総合推進費「マスバランス方式の適用方法研究」	橋本(代表)	103,730千円
2025-	環境研究総合推進費「サーキュラーエコノミー型ビジネス転換シナリオ設計」	木下(代表)	58,020千円
2025-	JST NEXUS「東南アジアの持続可能な食糧計画のためのLLM開発」	山末(分担)	11,700千円
2025-	環境省「革新的省CO ₂ ・GaNマイクロ波加熱装置」	山末(分担)	21,000千円
2026-	科研費・基盤A「固体界面電気化学反応の解明によるナノ加工基盤の構築とフレキシブル素子応用」	村田(代表)	32,600千円

今後は、JST-CREST, ALCA-NEXT, 科研費基盤研究S、環境研究総合推進費等を申請予定

材料科学・情報工学・環境学・政策科学・食科学の融合が新たな研究価値を創造

本プロジェクトの最大の特徴は、従来の工学的アプローチを超えた真の学際的研究にある

1. 材料 × 情報

- ▶ 機械学習を用いた材料の疲労き裂進展予測（伊藤チーム）
- ▶ LIBS分光データへの機械学習適用によるスクラップ選別（柏倉チーム）

2. リサイクル × 環境評価

- ▶ 廃電子基板のリサイクル価値評価と選別技術の統合
- ▶ 廃炉燃料デブリへのLIBS技術応用（工学→原子力分野への展開）

3. 食科学 × 資源・環境

- ▶ 細胞培養食品（培養肉）のLCA評価（橋本・木下チーム）
- ▶ 食行動変容によるフードシステムの環境負荷低減（SIP第3期・山末チーム）
- ▶ 食選択ナッジシステム開発（光斎チーム）

4. 政策科学 × 工学

- ▶ 欧州Battery Regulation・CSRD等の政策動向を踏まえた技術開発方向の提示
- ▶ マスバランス方式の消費者認知研究から政策立案への貢献

5年間で査読付き論文100報以上、国際学会発表多数、メディア報道も獲得

📄 学術論文（査読あり）

- 5年間累計127報
- 高インパクトファクター誌への掲載
 - ✓ *ACS Applied Materials & Interfaces* (IF 8.2)
 - ✓ *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (IF 7.1)
 - ✓ *International Journal of Fatigue* (IF 6.8)
 - ✓ *Waste Management* (IF 10.2)
 - ✓ *Environmental Impact Assessment Review* (IF 11.2)
 - ✓ *Resources, Conservation and Recycling* (IF 10.9)
 - ✓ *Cleaner Engineering and Environment* (IF 6.5)
 - ✓ *Journal of Cleaner Production* (IF 10.0)
 - ✓ *Journal of Industrial Ecology* (IF 7.4)

📰 メディア報道・特許

- メディア報道（抜粋）
 - ✓ 日経新聞：低純度リン酸からの黄リン直接生成プロセスに関する報道、2026年1月19日
- 特許（抜粋）
 - ✓ 銅/タングステン複合調和組織材料（放電加工用電極）：特許申請完了
 - ✓ リン回収方法，特願2023-190933
 - ✓ 金属回収方法，特願2023-217818
 - ✓ 鉛回収方法及びその装置，特願2022-007101

🏆 受賞（抜粋）

- 日本LCA学会国際連携賞(2026)
- 日本機械学会三浦賞：マイクロ波加熱による水素生成研究（大学院生）(2024)
- 廃棄物資源循環学会学会論文賞(2023)
- 日本LCA学会功績賞(2023)

技術開発・人材育成・拠点形成の3軸で当初目標を概ね達成、一部は社会実装段階に到達

評価項目	自己評価	根拠等
第1グループ：マテリアルデザイン	★★★★★	調和組織材料の特許・商用化目前。強度評価手法は国際標準レベルに到達。SiC件増す手法の開発と上市
第2グループ：リサイクル技術	★★★★★★	99.9%精度によるLIBS選別手法構築。黄リン製造・水素回収に関わるマイクロ波メタラジー技術の開発
第3グループ：評価・政策	★★★★★	CBVC定量評価・多様なシェアリングLCA等
若手育成	★★★★★★	多数の博士号取得、大学専任教員への採用、ベンチャー企業設立等
社会実装	★★★★★	SiC研磨装置の商用化・LIBS技術の廃炉応用は実現。一般社団法人、ベンチャー企業設立。他は実装に向けた準備段階ではあるが、企業との共同研究・受託研究件数は増加。
外部資金獲得	★★★★★★	総額3億円超の外部資金を獲得し、研究継続基盤を確立

総合評価：当初設定した研究目標の大部分を達成し、一部は当初想定を超える成果（黄リン製造・SiC研磨技術等）を得た。

技術の社会実装加速と国際展開が今後5～10年の最重要課題

課題1：技術の社会実装加速

- ▶ LIBS選別技術のJIS規格化を推進し、国内スクラップヤードへの普及を図る
- ▶ マイクロ波加熱プロセス（水素回収・黄リン製造）の実証試験・スケールアップ
- ▶ SiC研磨装置の市場展開と次世代半導体産業への貢献
- ▶ 開発した材料、評価手法のグローバル展開

課題2：評価モデルの政策活用

- ▶ CBVC評価モデルを国内外の電池循環政策立案に活用
- ▶ マスバランス方式の消費者理解促進に向けた情報提供ルールの整備提案

課題3：国際展開

- ▶ 国外大学（ハノイ工科大学、シンガポール国立大学、国立台湾大学等）との連携を深化させ、東南アジアへの技術移転
- ▶ 欧州Battery Regulation対応のための日欧共同研究の推進

課題4：研究拠点の継続・発展

- ▶ 環境研究総合推進費、CREST、ALCA-NEXT等の大型資金を獲得し、研究体制を維持・強化
- ▶ 本プロジェクトで育成した若手研究者が次世代の研究拠点を担う体制の整備



プロジェクトリーダー：山末英嗣（立命館大学 工学部 教授）

第1グループ

高資源効率を実現するサステイナブルマテリアルデザインの開発

グループリーダー

- 伊藤隆基（立命館大学 工学部 教授）

チームリーダー

- 伊藤隆基（多軸疲労・クリープ評価）
- 藤原弘（調和組織材料・複合材料）
- 滝沢優（電池材料・放射光解析）
- 村田順二（SiC研磨・ナノパターニング）

拠点研究員・専任研究員

- 飴山恵（名誉教授）
- 渡部弘達（准教授）
- 何磊（助教）
- 川畑美絵（客員准教授）

第2グループ

マルチバリュー循環のためのスクラップソーティングおよび分散型リサイクル技術の開発

グループリーダー

- 山末英嗣（立命館大学 工学部 教授）

チームリーダー

- 泉知論（廃電子基板AI評価）
- 柏倉俊介（LIBS×機械学習選別）
- 山末英嗣（マイクロ波加熱還元）

専任研究員・拠点研究員

- 光斎翔貴（食マネジメント学部 准教授）
- 平木岳人（東北大学）
- 所千晴（早稲田大学）

第3グループ

マルチバリュー循環システムの有効性評価と社会実装に向けた政策デザイン

グループリーダー

- 橋本征二（立命館大学 工学部 教授）

チームリーダー

- 橋本征二（LCA・シェアリング評価）
- 木下裕介（東京大学 准教授、循環シナリオ）
- 中野勝行（立命館大学 政策科学部 准教授）

専任研究員・拠点研究員

- Van Thi Le（専門研究員）
- 吉川直樹（滋賀県立大学）
- 松八重一代（東北大学）
- 粟生木千佳（IGES）



各グループの機能と役割

- 第1グループ： 高機能・長寿命材料の開発により、製品ライフサイクルの延長と資源効率向上を実現
- 第2グループ： 廃棄物からの高精度選別と資源回収技術により、マルチバリュー循環の「出口」を担う
- 第3グループ： 循環システムの環境・経済効果を定量化し、社会実装に向けた政策提言を行う

本プロジェクトを通じて多数の若手研究者が育ち、学术界の第一線へ羽ばたいている

博士号取得・若手育成

- ▶ 多数の博士号取得者を輩出
プロジェクトの5年間で、各グループから優秀な博士人材が誕生
- ▶ 日本学術振興会 特別研究員（DC）
複数名の大学院生が採択され、自立した研究者としてのキャリアをスタート
- ▶ 学会賞の受賞
日本機械学会三浦賞、日本鉄鋼協会学生ポスターセッション奨励賞、廃棄物資源循環学会論文賞、日本LCA学会奨励賞など

大学専任教員等への採用

- ▶ 光斎 翔貴
立命館大学 食マネジメント学部 准教授
(本プロジェクト専任研究員・研究教員から昇進)
- ▶ 吉川直樹
滋賀県立大学環境科学部環境政策・計画学科講師
(本プロジェクトチームリーダー)
- ▶ 何 磊
立命館大学 理工学部 助教 (本プロジェクト拠点研究員)
- ▶ その他研究機関での活躍
東北大学、早稲田大学、滋賀県立大学等で本プロジェクト出身者が活躍中

光斎翔貴 准教授（食マネジメント学部）の顕著な活躍

学術的成果・大型予算獲得

- ▶ 多数の筆頭論文発表
高インパクトファクター誌への継続的な論文掲載
- ▶ JST NEXUS 採択（分担）
「東南アジアの持続可能な食糧計画のためのLLM開発」（2025-2027年度・1170万円）
- ▶ 内閣府SIP第3期 参画（分担）
「スマートな食選択のためのナッジ支援システム開発」において中核的役割を担う
- ▶ 受賞
日本LCA学会奨励賞(2025)
廃棄物資源循環学会論文賞(2022)

社会実装・新領域開拓

- ▶ 食選択ナッジシステムの実装
環境負荷低減と健康増進を両立する消費者行動変容システムの開発と実証
- ▶ ベンチャー企業設立に向けた活動
研究成果の社会実装として起業
オーシャンリペア株式会社
<https://www.oceanrepair.co.jp/>
- ▶ 食科学×環境学の融合領域開拓
本プロジェクトの異分野連携を象徴する新領域を牽引

多角的なアプローチによる次世代研究リーダーの育成



異分野融合の促進

- ▶ グループ間合同ゼミの定期開催による異分野交流
- ▶ 材料科学・情報工学・環境学など、多様な視点の獲得
- ▶ 若手主導による新たな共同研究テーマの創出支援



国際的な研究経験

- ▶ 国際共同研究への参画
- ▶ 国際学会での発表支援と海外研究者とのネットワーク構築
- ▶ 高インパクトファクター誌への英語論文執筆指導



産学連携・社会実装

- ▶ 企業との共同研究プロジェクトへの参画
- ▶ 特許出願やJIS規格化などの標準化活動の実務経験
- ▶ 基礎研究にとどまらない社会課題解決型研究の実践