

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：34315

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20013

研究課題名（和文）循環システムにおけるライフサイクル観念を考慮したバッテリーの資源投入量評価

研究課題名（英文）Global resource circularity of lithium-ion battery based on life cycle thinking

研究代表者

光斎 翔貴（Kosai, Shoki）

立命館大学・立命館グローバル・イノベーション研究機構・准教授

研究者番号：80845826

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 1,900,000円

研究成果の概要（和文）：リチウムイオンバッテリー（LIB）は車載用・定置用の利用として年々重要となっている。しかしLIBの生産にかかる資源強度は非常に高いことから、天然資源の利用量を減らすためにも循環経済のもと使用済みのLIBの適切な処理が重要となっている。そこで、採掘活動量をベースとした関与物質総量の概念を資源量の指標として用いて、LIBの質や寿命、需要パターンを考慮した上で動的マテリアルフロー分析を行い、資源循環によるLIBのライフサイクルにおける天然資源使用量の低減効果を世界規模で評価した。その結果、適切な資源循環によりLIBに関わる天然資源採取量を8-44%低減できることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

そもそもリチウムイオンバッテリー（LIB）に関わる分析科学のほとんどは温室効果ガス排出量など環境影響評価が主要なトピックであった。その一方、LIBと資源に関わる研究は使用される金属の枯渇性に限定されており、どの程度の天然資源が採掘されるかという点ではこれまで議論されてこなかった。本研究では関与物質総量を用いることにより、この課題解決の一助となった。従来の内燃機関自動車に比べ電気自動車はその2.3倍の天然資源が投入されており、その大半がリチウムイオン電池であることがわかった。気候変動対策による安易な技術転換がより多くの資源を採取することになりかねないということを明白とした。

研究成果の概要（英文）：The use of the lithium-ion battery (LIB) in both traction and stationary applications has become ubiquitous. It is essential that retired LIBs are wisely treated based on the concept of circular economy to mitigate the primary resource use. A closed-loop repurposing and recycling treatment is required. Thus, using the concept of total material requirement as an indicator of natural resource use based on mining activity, a dynamic material flow analysis was executed considering the degradation of the battery, its lifespan, and demand patterns. Then, the effect of circularity on the saving of global natural resource use involved in the entire life cycle of LIBs was evaluated.

It was shown that the global resource use of LIBs would increase to between 10 and 48 Gt in 2050. Circularity has the potential to contribute to an 8-44% reduction of the global resource use associated with LIBs in 2050.

研究分野：産業エコロジー

キーワード：ライフサイクルアセスメント 循環経済 リチウムイオン電池 リサイクル リパーパス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

世界的な人口増加と発展途上国における工業化により、エネルギーを取り巻く様相は近年劇的に変化している。特に、電気、水素、バッテリーの利用は環境負荷に大きく関与しており、ライフサイクル観念をもとにエネルギーコモディティーにおける環境影響の評価がなされてきた。特に、ReCiPe や CML など様々な手法を用いて LiB の各ライフサイクルステージにおける温室効果ガスの排出量を代表とした種々の環境負荷を評価する研究が近年飛躍的に増加している。一方、既往研究の問題として、温室効果ガスなど環境影響にのみ注目した議論は、持続可能なエネルギー利用に向けて短絡的な結論にとどまってしまう可能性がある。環境以外の側面の中でも特に、資源利用に関わる評価はこれまでほとんど分析されてこなかった。近年、世界的な経済発展のために、エネルギーのみならずマテリアルを含む資源全般の使用が増加し続けており、資源消費は環境負荷とはまた別の軸で評価する必要がある。また、既存研究では、車両用 LiB のみのライフサイクルシステムに限定されており、使用期間に伴う LiB の性能低下や使用後の車両用へのリユース、定置利用へのリパーパス、素材レベルへのリサイクルなどを考慮した包括的な LiB の循環システムにおける評価とその最適化は議論されてこなかった。

2. 研究の目的

上記の背景から、ライフサイクル観念を考慮し、資源利用の観点から車両用バッテリーを評価した上で、包括的な循環システムフローの最適化を行うことを目的とする。

3. 研究の方法

資源使用量を評価するための指標として、本研究では関与物質総量 (Total Material Requirement, TMR) を利用する。他にも直接物質投入量 (Direct Material Input, DMI) や一次資源等価換算投入量 (Raw Material Input, RMI) といった指標も存在するが、TMR は最も包括的に資源投入量を推計できる指標であり、直接的な資源 (エネルギーと材料) の投入、間接的な資源の投入、さらに隠れたフローによる使用されない物質採掘量を網羅している。特に TMR を用いる利点として、異なる DMI ベースの各資源単位を、重さの単位に統一できるため比較・加算が可能となる。TMR の概念は以下の図 1 に示す。

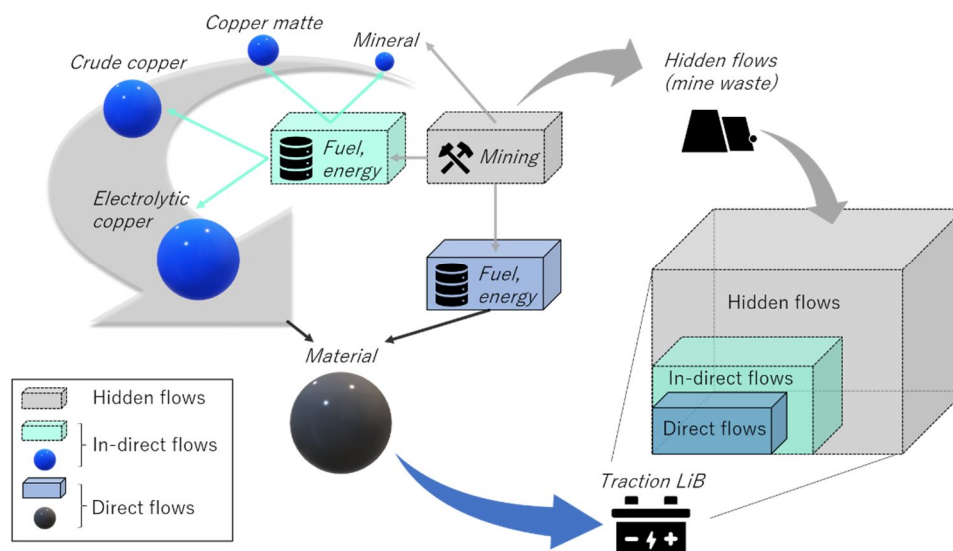


図 1 : TMR の概念図

ここではまず LiB の製造における TMR を推計する。LiB の種類は多岐にわたるが、本研究では注目度の高い三元系 LiB を対象とし、Ellingsen らにより報告されたインベントリーデータから、三元系 LiB の製造までの各工程に関わる材料やエネルギーのデータを収集する。次に、各工程に関わる 100 以上の品目に対するそれぞれの TMR 係数を準備する。これらインベントリーデータと各品目の TMR 値を合算させることで、三元系 LiB の製造に関わる TMR 値を推計する。

次に、包括的な LiB の循環モデルの構築とそのフローの最適化を行う。まず、車両用 LiB の使用後の車両用へのリユース、定置利用へのリパーパス、素材レベルへのリサイクルといった総合的な LiB の循環システムモデルを構築する。次に、都市鉱石 TMR の概念 (山末, 2010) を基に、文献調査や実地調査を通してインベントリーデータを作成し、各処理段階における TMR 値を計算する。最後に、使用期間に伴う LiB の性能低下を考慮した上で、TMR の観点からみた循環モデルフローの最適化を行う。

4. 研究成果

車載用 LIB 製造の TMR は 189kg-TMR/kg となり、200 倍近い重量の天然資源が車載用 LIB 製造に必要となることがわかった。特に LIB の本体重量に占める NMC (Ni, Mn, Co) の割合は大きいですが、TMR の観点からは Cu が最も大きな割合 (37%) を占めている (図 1)。また、感度分析より車載用 LIB の製造における TMR の推定は、銅鉱石の品位の変化に最も敏感であることがわかった。車載用 LIB 生産の内訳は、資源利用の指標である TMR では正極ペーストと負極集電体の占める割合が大きい一方、環境負荷の指標である GWP では電池セルの製造が最も大きな割合を占めている。また将来推計により 2050 年の車載用 LIB の生産では、2019 年に崩壊したブルマディーンニョ・ダムに匹敵する 80 基近い鉱滓ダムが発生する可能性があり、TMR の量を管理・制御することの重要性が明らかとなった。

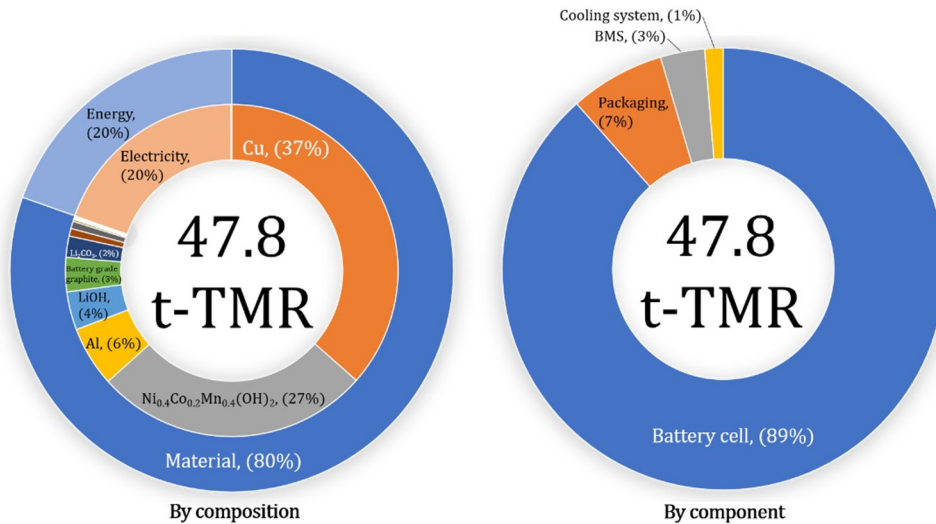


図 2 : LIB の TMR 推計結果

この車載用 LIB を有効に循環させることによりどの程度の天然資源の投入が抑えられるかを分析した (図 3)。需要や寿命の異なるシナリオを考慮すると、LIB の TMR は増加し、2050 年には 10-48Gt に達すると予想される。寿命が短いほど、使用済みリチウムイオン電池の発生が多くなり、短期的に資源の循環利用が促進され、2050 年の循環利用によるリチウムイオン電池の世界資源使用量の削減率は 44% まで増加する。一方、寿命が長いと、使用済みリチウムイオン電池の発生が少なくなり、循環型社会への効果は短期的かつ限定的である (例えば、高需要パターンの場合、寿命が 20 年の場合の 2050 年の削減率は 8% である)。

これらより LIBs の資源使用量の削減には、寿命が長い方が短い方よりも大きな影響を与えることを意味している。これは、寿命が長いと需要が減少する (しかし、循環型の効果は低い) のに対し、寿命が短いと需要が増加する (しかし、循環型の効果は高い) ことに関連するためである。循環性、特にクローズループ・リサイクルの観点からは、2050 年以降の長期的な視野で有効であると考えられる。したがって、2050 年までの中期的な戦略として、LIB の資源使用量削減のために、LIB の寿命を延ばすためのリユースやリパーパスの確保を早急に行う必要がある。また、使用済み LIB のリサイクルによる回収率を向上させる方法についても、継続的な研究開発が必要である。

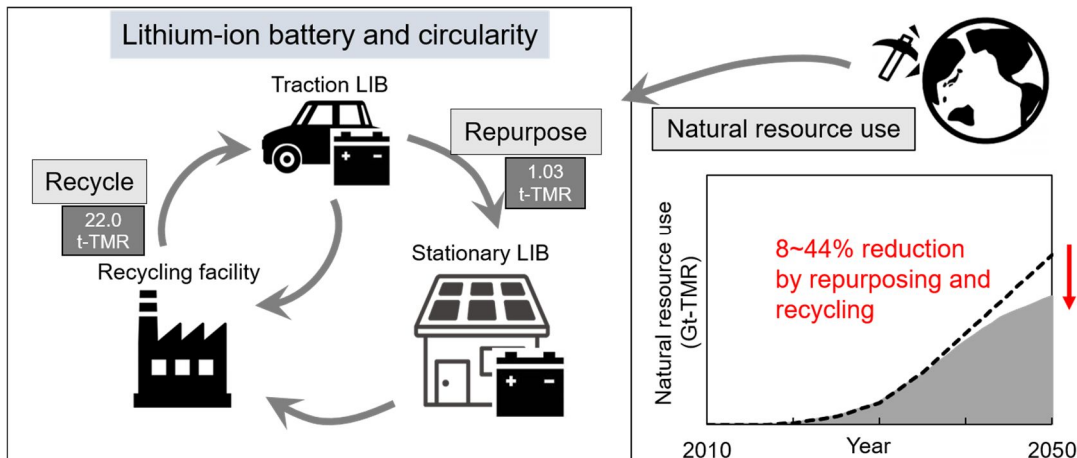


図 3 : LIB の資源循環および世界規模での資源使用量

車載用 LIB が用いられる自動車を対象に内燃機関自動車，電気自動車，ハイブリッド自動車，燃料電池自動車 1 台当たりのライフサイクルにおける TMR と CO2 排出量の比較を行った（図 4）。内燃機関自動車の TMR は 4 車種の中で最も低く，次世代自動車の TMR は内燃機関自動車の 2 倍以上であることがわかった。自動車の総重量は車種を問わず Fe が最も多く，TMR では内燃機関自動車は Al，電気自動車とハイブリッド自動車は Cu，燃料電池自動車は Pt が最も多く占めている。また，車載用 LIB の生産は、電気自動車の生産における TMR の半分を占めていることも明らかとなった。同様に燃料電池自動車の TMR の 40% 近くは，燃料電池の生産に起因している。さらにライフサイクルを加味した TMR と CO2 の間には，各車種とも逆の傾向が見られた。これより次世代自動車の普及が資源利用の増加を引き起こす可能性があることを示した。

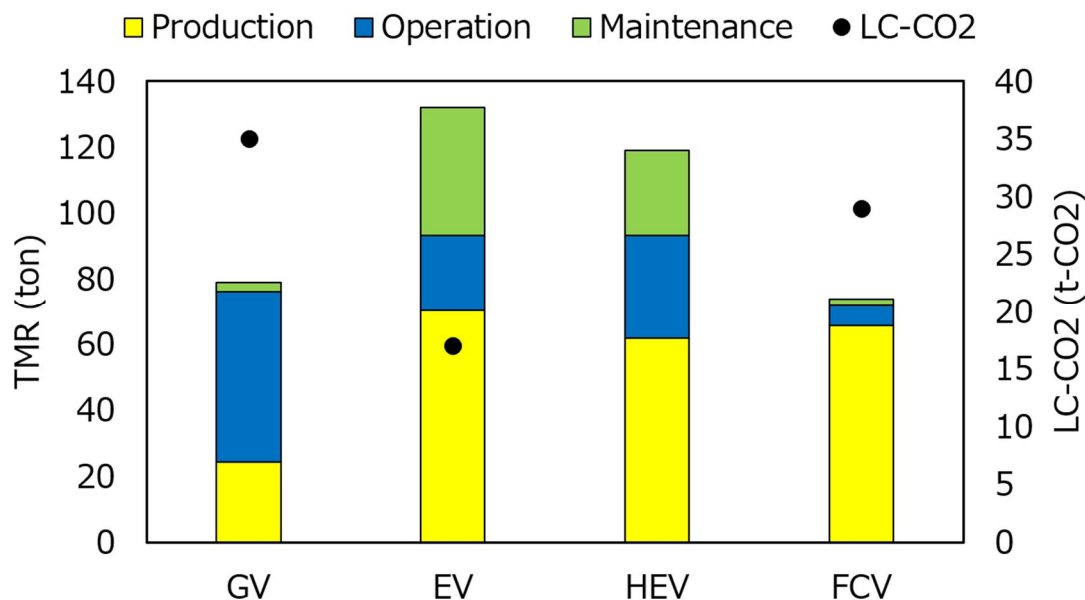


図 4：各種自動車（内燃機関自動車，電気自動車，ハイブリッド自動車，燃料電池自動車）1 台当たりのライフサイクルにおける TMR と CO2 排出量の比較

最後に，日本における自動車生産がどの国にどの程度の土地攪乱を引き起こすか分析した（図 5）。日本における自動車技術の変遷は，土地攪乱の影響を最も受ける国や地域の変化をもたらす。具体的には，オーストラリア（内燃機関自動車で 26%）からチリ（電気自動車で 27%）や南アフリカ（燃料電池自動車で 20%）へと変化することが予想される。さらに日本における自動車生産は，特にオーストラリア，チリ，インドネシア，ペルー，南アフリカにおいて，鉱山崩壊の発生リスクを毎年累積的に高めている。鉱山の社会的・環境的・規制の支援は，関連バリューチェーンに沿った関連ステークホルダーとともに，日本政府の供給セキュリティ政策および日本の自動車会社のテレカップリングに関わる CSR 戦略において優先されるべきで事項であると示した。

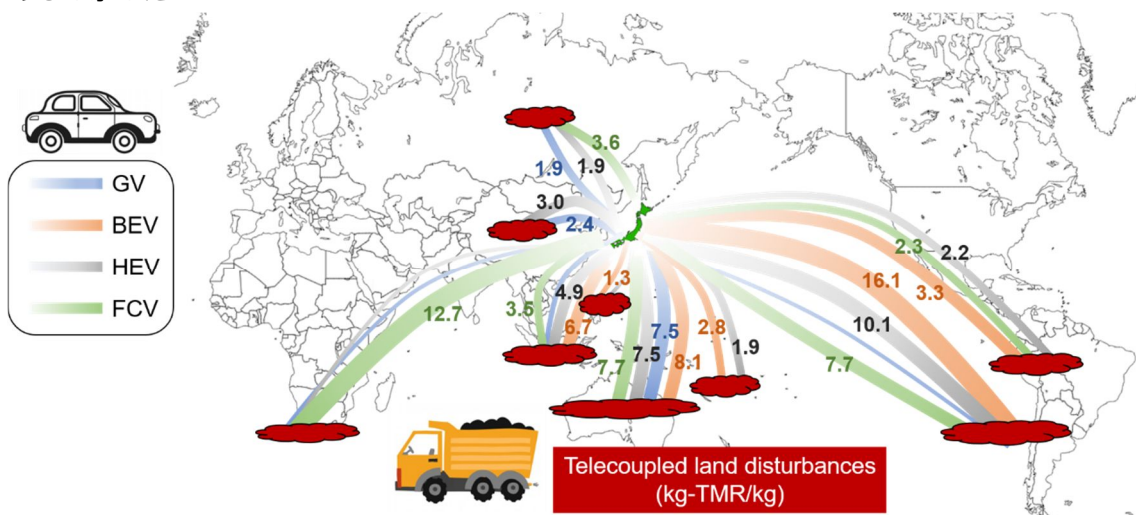


図 5：日本での自動車製造に伴う各国への採掘負荷

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計12件（うち査読付論文 12件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Eiji YAMASUE、Shoki KOSAI、Shunsuke KASHIWAKURA	4. 巻 17
2. 論文標題 A Resource Paradox Problem behind Green Innovations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Life Cycle Assessment, Japan	6. 最初と最後の頁 22 ~ 28
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3370/lca.17.22	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Kurogi Daiki, Kosai Shoki, Murakami Genya, Phong Lai Thai, Quang Nguyen Duc, Huy Tran Duc, Luong Nguyen, Yamasue Eiji	4. 巻 23
2. 論文標題 Estimating the generation of recycled metals from obsolete motorcycles in Vietnam for ELV management	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Material Cycles and Waste Management	6. 最初と最後の頁 1563 ~ 1575
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s10163-021-01237-0	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kosai Shoki, Noguchi Hiroki, Fuse Masaaki, Yamasue Eiji	4. 巻 2676
2. 論文標題 Transport Energy Efficiency in Domestic Long-Distance Travel in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board	6. 最初と最後の頁 636 ~ 648
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1177/03611981211044724	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mizuno Nobuyuki, Kosai Shoki, Yamasue Eiji	4. 巻 5
2. 論文標題 Microwave-based extractive metallurgy to obtain pure metals: A review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Cleaner Engineering and Technology	6. 最初と最後の頁 100306 ~ 100306
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clet.2021.100306	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kosai Shoki, Hanqing Liao, Zhang Zhengyang, Matsubae Kazuyo, Yamasue Eiji	4. 巻 178
2. 論文標題 Multi-regional land disturbances induced by mineral use in a product-based approach: A case study of gasoline, hybrid, battery electric and fuel cell vehicle production in Japan	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 106093 ~ 106093
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2021.106093	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosai Shoki, Takata Ukyo, Yamasue Eiji	4. 巻 280
2. 論文標題 Natural resource use of a traction lithium-ion battery production based on land disturbances through mining activities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 124871 ~ 124871
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2020.124871	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosai Shoki, Matsui Kenyu, Matsubae Kazuyo, Yamasue Eiji, Nagasaka Tetsuya	4. 巻 166
2. 論文標題 Natural resource use of gasoline, hybrid, electric and fuel cell vehicles considering land disturbances	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 105256 ~ 105256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2020.105256	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosai Shoki, Badin Arnidah Binti, Qiu Yang, Matsubae Kazuyo, Suh Sangwon, Yamasue Eiji	4. 巻 166
2. 論文標題 Evaluation of resource use in the household lighting sector in Malaysia considering land disturbances through mining activities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Resources, Conservation and Recycling	6. 最初と最後の頁 105343 ~ 105343
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resconrec.2020.105343	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Kosai Shoki, Zakaria Sazalina, Che Hang Seng, Hasanuzzaman Md, Rahim Nasrudin Abd, Tan Chiakwang, Ahmad Radin Diana R., Abbas Ahmad Rosly, Nakano Katsuyuki, Yamasue Eiji, Woon Wei Kian, Amer Ammar Harith Ahmad	4. 巻 14
2. 論文標題 Estimation of Greenhouse Gas Emissions of Petrol, Biodiesel and Battery Electric Vehicles in Malaysia Based on Life Cycle Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sustainability	6. 最初と最後の頁 5783 ~ 5783
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/su14105783	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Nakagawa Nanami, Kosai Shoki, Yamasue Eiji	4. 巻 363
2. 論文標題 Life cycle resource use of nuclear power generation considering total material requirement	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Cleaner Production	6. 最初と最後の頁 132530 ~ 132530
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jclepro.2022.132530	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosai Shoki, Kurogi Daiki, Kozaki Keita, Yamasue Eiji	4. 巻 9
2. 論文標題 Distributed recycling system with microwave-based heating for obsolete alkaline batteries	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Resources, Environment and Sustainability	6. 最初と最後の頁 100071 ~ 100071
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.resenv.2022.100071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kosai Shoki, Takata Ukyo, Yamasue Eiji	4. 巻 2
2. 論文標題 Global Resource Circularity for Lithium-Ion Batteries up to 2050: Traction and Stationary Use	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mining	6. 最初と最後の頁 449 ~ 462
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/mining2030024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Genya Murakami, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
2. 発表標題 Techno-economic assessment of recycling obsolete two-wheelers in ASEAN: the case of Myanmar and Cambodia
3. 学会等名 EcoDesign2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naotaka Haraguchi, Shoki Kosai, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
2. 発表標題 Resource intensity of intercity long-distance transportation considering infrastructure: A case study in Japan
3. 学会等名 EcoDesign2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原口 直享、光斎 翔貴、柏倉 俊介、山末 英嗣
2. 発表標題 日本におけるインフラを含めた長距離輸送機関の資源強度分析
3. 学会等名 第17回 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 村上 原野、光斎 翔貴、柏倉 俊介、山末 英嗣
2. 発表標題 ミャンマーにおける廃棄自動二輪車の推計及びコスト評価を通じた管理戦略の提言
3. 学会等名 第17回 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 王 俊祥、光斎 翔貴、柏倉 俊介、山末 英嗣
2. 発表標題 鉛蓄電池とニッケル水素電池の資源効率の評価
3. 学会等名 第17回 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小崎 啓太、光斎 翔貴、柏倉 俊介、山末 英嗣
2. 発表標題 マイクロ波炉を用いた分散型リサイクルシステムの導入によるエネルギー削減量の評価
3. 学会等名 第17回 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 寒川 友香子、光斎 翔貴、柏倉 俊介、山末 英嗣
2. 発表標題 採掘活動から見たバイオマス発電の資源強度分析
3. 学会等名 第17回 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 滝本 響、光斎 翔貴、渡 卓磨、柏倉 俊介、山末英嗣
2. 発表標題 次世代自動車の普及に伴う資源使用量の変化
3. 学会等名 第17回 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kosai, U. Takata, E. Yamasue
2. 発表標題 Total material requirement for traction lithium-ion batteries based on life cycle simulation
3. 学会等名 EcoBalance2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 E. Yamasue, S. Kosai, S. Kashiwakura
2. 発表標題 A Resource Paradox Problem of Green Innovations
3. 学会等名 EcoBalance2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中川奈那美、光斎翔貴、山末英嗣
2. 発表標題 採掘活動を考慮した電力の関与物質総量
3. 学会等名 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 光斎 翔貴、鷹田 祐京、山末 英嗣)
2. 発表標題 ライフサイクルシミュレーションによる車載用LiBの採掘活動から見た資源効率評価
3. 学会等名 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原口 直享、光斎 翔貴、柏倉 俊介、山末 英嗣
2. 発表標題 インフラを含む長距離輸送機関の採掘活動から見た資源効率の評価
3. 学会等名 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hibiki Takimoto, Shoki Kosai, Takuma Watari, Shunsuke Kashiwakura, Eiji Yamasue
2. 発表標題 Global target by 2050 to reduce natural resource use in the automotive industry
3. 学会等名 Ecobalance2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 滝本 響、光斎 翔貴、渡 卓磨、柏倉 俊介、山末英嗣
2. 発表標題 自動車産業における2050年に向けた資源使用量の削減戦略効果分析
3. 学会等名 日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------