

EV バッテリーの持続的活用に関する研究

主査 中川 純*¹委員 金 ジョンミン*², 福島 加津也*³, 中谷 礼仁*⁴

本研究は、車載用リチウムイオン電池の環境負荷と再利用可能性について評価し、特に定置用蓄電池としての利用に焦点を当てた。日本の建築部門における CO₂ 排出量削減、および 2050 年カーボンニュートラル目標達成に向けて蓄電池の活用が期待されている。リチウムイオン電池の性能や耐久性が課題とされる中、本研究は、経済産業省統計データに基づく市場成長率と GHG 排出量を分析し、家庭内転用後の CO₂ ペイバックタイムを算出した。結果として、LCA に基づく環境負荷削減の方向性と、今後の建築分野における CO₂ 排出低減の可能性を示した。

キーワード：1) 車載用リチウムイオン電池, 2) 定置用蓄電池, 3) 家庭用蓄電池, 4) CO₂, 5) カーボンニュートラル

A STUDY ON THE SUSTAINABLE UTILIZATION OF EV BATTERIES

Ch. Jun Nakagawa

Mem. Jungmin Kim, Katsuya Fukushima, Norihito Nakatani

This study evaluates the environmental impact and potential for repurposing automotive lithium-ion batteries, focusing on their use as stationary storage. In light of growing expectations for battery utilization to reduce CO₂ emissions in Japan's building sector and to achieve the 2050 carbon neutrality target, the performance and durability of lithium-ion batteries have been identified as key challenges. Amid challenges in lithium-ion battery performance and durability, this research analyzes market growth rates and GHG emissions based on METI statistics, estimating the CO₂ payback time for residential repurposing. Results suggest directions for reducing environmental impact based on LCA and highlight the potential for CO₂ reduction in Japan's construction sector.

1. 背景と目的

建築物の新築、運用、改修に係る CO₂ 排出量は、日本の全 CO₂ 排出量の 40% を占める^{文¹}とされており、化石燃料の燃焼における CO₂ 排出量のうち家庭部門が全体の 14.7% を占めている^{文²}ことから、住宅・建築物に係る CO₂ 排出量の総計は多い。日本政府は 2050 年カーボンニュートラル実現を掲げ、第 6 次エネルギー基本計画^{文³}で示された 2030 年度におけるエネルギー需給の見通しでは、22~23% を再生可能エネルギーとしている。建築物に関しては、省エネルギー化に向けた ZEH (ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス) 等の普及が進んでいる。さらに、運用時の環境負荷削減のみならず、建設、運用、廃棄を含むライフサイクルを通じての CO₂ 排出量の収支をマイナスにする LCCM (ライフ・サイクル・カーボン・マイナス) 住宅^{文²}の普及も期待されている。いずれも自然エネルギーである太陽光で発電することで CO₂ を排出せずにエネルギーを創出するが、それらの有効利用を図る上で注目されているのが蓄電池である。蓄電池は、卒 FIT 以後の住宅用太陽光発電による電力の自家消費や余剰電力の有効活用、災害時の備えを背景に近年家庭に向けた定置用を中心に導入が進み^{文⁴}、海外でも定置用蓄電池の拡

大が進められ、太陽光発電システムや蓄電システム設置の義務化などの施策が講じられている。

市場の拡大が期待される定置用蓄電池であるが、更なる普及拡大に向けては課題を抱えている。蓄電池は、スマートフォンや電気自動車 (以下「EV」と称する) に搭載されるリチウムイオン電池が主流であり、エネルギー密度の高さが特徴である。しかし、リチウムイオン電池を構成するリチウムはレアメタルと呼ばれる希少な非鉄金属であることや世界的な需要増加から、市場動向などの変動による価格高騰に伴う蓄電池の製造費の変動が課題となる場合がある。また、蓄電池は充放電の繰り返しによる劣化が原因で性能が低下^{文⁵}することがわかっており、リチウムイオン電池の寿命は 15~20 年^{文⁶}と予測されている。蓄電池には定置用と車載用があるが、車載用蓄電池の性能低下は EV の航続距離に直接影響することから、EV 普及による EV バッテリーの需要拡大^{文⁷}は使用済み蓄電池の廃棄と定置用蓄電池の供給に影響を与えると考えられ、使用済みの車載用蓄電池の定置用蓄電池への再利用を促進することが期待されている。

EV や多くの電子機器に搭載されるリチウムイオン電池は、物質の化学反応で電力を生み出す化学電池であり、

*¹ 東京都市大学 准教授 博士 (工学) *² 京都工芸繊維大学 助教 博士 (工学) *³ 東京都市大学 教授 修士 (美術) *⁴ 早稲田大学 教授 博士 (工学)

充電して繰り返し使うことのできる二次電池に分類され、リチウムイオンを蓄えられる正極と負極間をリチウムイオンが電解液の中を往來することで充放電を行っている。特徴として、「電圧の高さ」、「エネルギー密度の高さ」、「メモリー効果がない」、「長寿命」が挙げられる。これらの特徴によって、電池の小型軽量化や、電池交換をせず充電を繰り返すだけで長期的にエネルギーを得ることができ、その他の二次電池と比較してEVの航続距離の伸長を実現した。

使い勝手の良さからリチウムイオン電池の需要は拡大し、販売金額が増加傾向にある。車載用リチウムイオン電池の販売金額⁸⁾に関しては、2018年7月の販売金額が約263億円であったのに対し、2023年7月には約692億円と5年で約429億円も上昇し、EVの普及拡大が窺える。本論では、定置用蓄電池として再利用される車載用蓄電池を扱うため、継続使用による蓄電池の性能の低下を考慮する必要がある。そこで、蓄電池の性能の低下に関する定義を列挙する。蓄電池の性能低下により継続して使用すべきでないといわれる使用期限をEOL(End Of Life)、蓄電池の劣化状態を表す指標をSOH(State of Health)、充電率または充電状態を表す指標SOC(State Of Charge)、容量に対する放電量の割合をDOD(Depth of Discharge)、修理や交換が必要となるまでの蓄電池の寿命(残存耐用年数)をRUL(Remaining Useful Life)とする。

ライフサイクルでの環境負荷を定量的に評価するライフサイクルアセスメント(以下「LCA」と称する)の国内におけるデータベースには、産業連関表に基づく評価と積上法による評価が存在する。産業連関表を基に作成されたデータベースには、国立環境研究所の発行する「産業連関表による環境負荷原単位データブック⁹⁾(以下「3EID」と称する)」や、建築物のLCAとして日本建築学会が「建物のLCA指針¹⁰⁾」を建築物に係るあらゆるLCCO₂の評価手法と産業連関表をもとに作成されたデータベースを公開している。積上法による評価には、産業技術総合研究所と産業環境管理協会によって共同開発されたIDEAがある。

本研究では、車載用蓄電池を転用した場合のCO₂ペイバックタイムを試算し、その妥当性や効果を検証することを目的としている。ここでペイバックタイムとは、転用に際して発生するCO₂排出量が、蓄電池の利用により削減されるCO₂量によって相殺されるまでの期間を指す。まず、蓄電池市場に関する基礎調査を行い、過去の生産額や生産容量等の推移を整理した上で、将来予測をCAGRに基づき試みた。ただし、CAGRによる予測には地政学的な問題や技術革新、制度的支援強化等が十分に織り込まれていない可能性があるため、これらの制約についても言及する。さらに、ペイバックタイムを算定するための

数式や各項目の定義を明確化し、結果を踏まえて考察と今後の展望を示す。本研究では、温室効果ガス(以下「GHG」と称する)排出量を評価することを想定し、2023年時点で無料公開されている2015年産業連関表(2015年)に基づいて作成された3EID⁹⁾のCO₂排出原単位に基づく環境負荷で主に評価する。3EIDでは部門ごとに環境負荷原単位が与えられ、蓄電池の環境負荷算出時には、電池部門の数値を適用する。蓄電池以外の設備についても環境負荷算出時には、該当する環境負荷原単位を適用する。このとき、輸入品の生産に伴うCO₂排出量を国産品と同等と仮定して計算した値を示す「(I-A)-1」型を採用する。

2. 車載用蓄電池の動向

2.1 車載用蓄電池の市場成長率の算出

本研究では、はじめに経済産業省生産動態統計時系列表および経済産業省生産動態統計年報⁸⁾ ¹¹⁾の2015年から2022年の車載用リチウムイオン電池の生産金額を含むデータの推移から、生産金額、販売金額、生産容量、1Ahあたりの生産金額の年平均成長率(Compound Annual Growth Rate: 以下「CAGR」と称する)を算出する。その後、算出した各CAGRから需要拡大が期待されるn年後の車載用リチウムイオン電池の生産金額、販売金額、生産容量、1Ahあたりの各項目の予測値E_nを算出する。CAGRは式(1)、算出したCAGRに基づくn年後の予測生産金額E_nを(2)で求める。

$$CAGR = \left(\frac{\alpha_n}{\alpha_1} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \quad (1)$$

$$E_n = \alpha_1 \times (CAGR + 1)^n \quad (2)$$

ここで、 α_1 : 基準年の数値

α_n : n年後の数値(例: 生産金額 etc.)

車載用リチウムイオン電池の生産金額のCAGRと、n年後の生産金額E_nを算出する。まず、経済産業省生産動態統計の2015年から2022年の8年間の生産金額より、生産金額のCAGRは2015年~2016年が15.26%/年、2015年~2017年が17.63%/年、2015年~2018年が16.41%/年、2015年~2019年が10.06%/年、2015年~2020年が10.06%/年、2015年~2021年が14.13%/年となり、2015年の生産金額197,490百万円を α_1 とし、7年後の2022年の生産金額570,757百万円を α_7 とすると、CAGRは8年間で16.37%/年となった。(図2-1) また、2015年~2022年のCAGRに基づき、さらに8年後の2030年のE₁₅を算出した結果、2030年にはおよそ1.920兆円分の車載用リチウムイオン電池が製造されることが予測できる。2015年から2022年にかけてCAGRが16%を超えており、2030年には生産金額がおおよそ1.9兆円規模に達すると予測されることから、国内の車載用リチウムイオン電池市場は今後も急速に拡大していく可能性が高い

と考えられる。



図 2-1 CAGR and Expected Output of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計^{文8)}文11)を参考に作成

次に、車載用リチウムイオン電池の販売金額の CAGR と、 n 年後の販売金額 E_n を算出する。販売金額の CAGR は 2015 年～2021 年が 13.17%/ 年となり、2015 年の販売金額 202,320 百万円を α_1 とし、7 年後の 2022 年の販売金額 543,419 百万円を α_7 とすると、CAGRs は 8 年間で 15.16 % / 年となった。(図 2-2) また、2022 年の CAGR に基づき、さらに 8 年後の 2030 年の E_{15} を算出した結果、2030 年には、およそ 1.681 兆円分の車載用リチウムイオン電池が販売されると予測される。2015 年から 2022 年までの CAGR が約 15% という高い成長率であることから、今後も車載用リチウムイオン電池の需要は拡大すると考えられ、それに伴い技術開発・生産体制整備・資源確保など複合的な取り組みがさらに重要になると推察される。

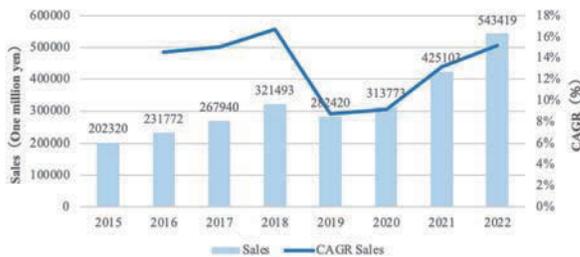


図 2-2 CAGR and Expected Sales of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計を参考に作成

車載用リチウムイオン電池の生産容量の CAGR と、 n 年後の生産容量 E_n を算出する。生産容量の CAGR は 2015 年～2021 年が 13.74% / 年となり、2015 年の生産容量 $1,912,723 \times 10^3$ Ah を α_1 とし、7 年後の 2022 年の生産容量 $4,464,154 \times 10^3$ Ah を α_7 とすると、CAGR は 8 年間で 12.87 % / 年となった。(図 2-3) また、2015 年-2022 年の CAGR に基づき、さらに 8 年後の 2030 年の E_{15} を算出した結果、2030 年にはおよそ 1.176×10^{10} Ah の車載用リチウムイオン電池が製造されることが予測できる。以上より、生産金額や販売金額の CAGR が約 15~16%/ 年前後、あるいはそれを上回る時期も見られた一方、生産容量の CAGR は最終的に約 13% 程度で落ち着いていることがわかる。蓄電池の技術の進歩や量産効果などにより Ah あ

たりの単価が一定程度下がる傾向がある場合、金額の伸び率が容量の伸び率よりも大きくなる場合もあれば逆に小さくなる場合もあり、相対的な変動が生じるためと考えられる。

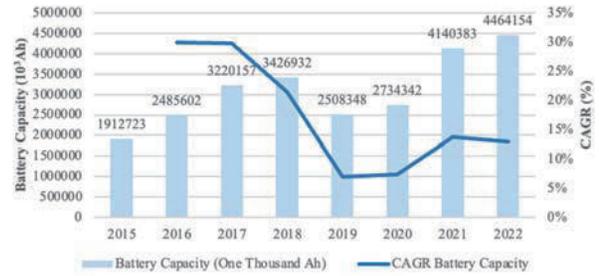


図 2-3 CAGR and Expected Battery Capacity of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計を参考に作成

最後に、車載用リチウムイオン電池の 1Ah あたりの生産金額の CAGR と、1Ah あたりの n 年後の生産金額 E_n を算出する。生産容量の CAGR は 2015 年～2021 年が 0.35% / 年となり、2015 年の 1Ah あたりの生産金額 103.25 円 / Ah を α_1 とし、7 年後の 2022 年の 1Ah あたりの生産金額 127.85 円 / Ah を α_7 とすると、CAGR は 8 年間で 3.10 % / 年となった。(図 2-4) また、2015 年～2022 年の CAGR に基づき、さらに 8 年後の 2030 年の E_{15} を算出した結果、2030 年にはおよそ 163.23 円 / Ah となることが予測できる。

2015 年から 2018 年まで継続的に下がっていることから、当初は量産効果や技術革新、あるいは競争の激化による価格低下が影響していたと考えられる。しかし、2019 年に 115.54 円 / Ah へ上昇し、その後 2020 年はさらに微増、2021 年にやや下がり、2022 年に再び大きく上昇して 127.85 円 / Ah となった。コバルトやニッケル、リチウムなどの供給制約や価格高騰が電池生産のコスト増につながった可能性が高いと考えられる。また、2019 年頃の米中貿易摩擦、新型コロナウイルス感染症の拡大による物流混乱などが影響し、価格が高止まりする要因となったと考えられる。

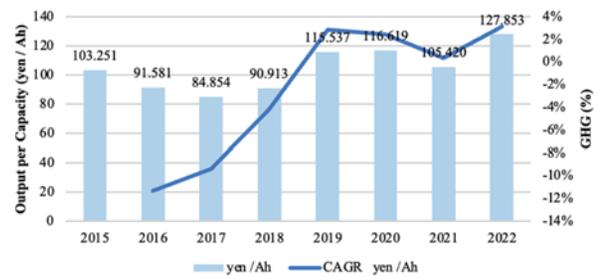


図 2-4 CAGR and Expected Output per Capacity of EV LiB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計、財務省貿易統計^{文12)}を参考に作成

2.2 車載用蓄電池の国内外需要の算出

2015年から2022年の電池部門の販売金額をもとに算出した各年の車載用リチウムイオン電池の販売金額とリチウムイオン電池の国内販売容量の推移および、販売容量の推移からCAGRを算出し、車載用リチウムイオン電池の国内外需要の違いを明らかにする。算出した各CAGRに基づくn年後の需要 E_n を予測する。CAGRは式(1)、算出したCAGRに基づくn年後の需要 E_n を(2)で求める。

車載用リチウムイオン電池の国内の販売金額は、2015年から2022年における各年の経済産業省生産動態統計の電池部門の総販売金額から該当年の財務省貿易統計¹²⁾の主要商品別輸出における電池部門を差し引いた金額に該当年の販売金額に占める車載用リチウムイオン電池の割合を乗じた値とする。国内の販売容量は、車載用リチウムイオン電池の販売容量に電池の総販売金額に占める国内販売金額の割合を乗じたものとする。国外の販売金額は、2015年から2022年における各年の財務省貿易統計の主要商品別輸出における電池部門の金額に、該当年の販売金額に占める車載用リチウムイオン電池の割合を乗じた値とする。国外の販売容量は、車載用リチウムイオン電池の販売容量に電池の総販売金額に占める国外販売金額の割合を乗じたものとする。

車載用リチウムイオン電池の国内販売金額のCAGRと、n年後の国内販売金額 E_n を算出する。まず、経済産業省生産動態統計、財務省貿易統計より、国内販売金額のCAGRは図2-5のようになった。また、2015年～2022年のCAGRに基づき、さらに8年後の2030年の E_{15} を算出した結果、2030年には車載用リチウムイオン電池の国内販売金額がおおよそ3.54千億円となることが予測できる。日本市場ではハイブリッド車(HV/PHV)が先行して普及してきた背景があり、純EV比率は欧州や中国と比べると依然として低いが、新型コロナウイルス感染症など外部要因による自動車市場全体の停滞があった時期においても年間約10%近いCAGRを示していることは、国内市場も電池需要が着実に成長していることを示唆している。

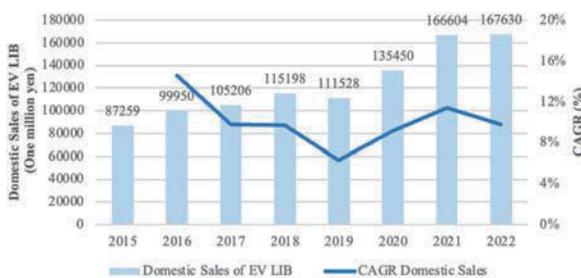


図 2-5 Domestic Sales and CAGR of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計、財務省貿易統計を参考に作成

次に、車載用リチウムイオン電池の国内販売容量のCAGRと、n年後の国内販売容量 E_n を算出し図2-6のようになった。また、2015年-2022年のCAGRに基づき、さらに8年後の2030年の E_{15} を算出した結果、2030年には車載用リチウムイオン電池の国内販売容量がおおよそ 2.34×10^9 Ahとなることが予測できる。

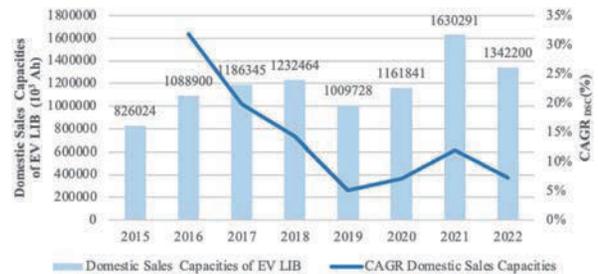


図 2-6 Domestic Sales Capacities and CAGR of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計、財務省貿易統計を参考に作成

車載用リチウムイオン電池の国外販売金額のCAGRと、n年後の国外販売金額 E_n は、経済産業省生産動態統計時、財務省貿易統計より図2-7のようになった。また、2015年-2022年のCAGRに基づき、さらに8年後の2030年の E_{15} を算出した結果、2030年には車載用リチウムイオン電池の国外販売金額がおおよそ1.45兆円となることが予測できる。



図 2-7 Abroad Sales and CAGR of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計、財務省貿易統計を参考に作成

車載用リチウムイオン電池の国外販売容量のCAGRと、n年後の国外販売容量 E_n を算出する。経済産業省生産動態統計、財務省貿易統計より国外販売容量のCAGRは図2-8のようになった。また、2015年～2022年のCAGRに基づき、さらに8年後の2030年の E_{15} を算出した結果、2030年には車載用リチウムイオン電池の国外販売容量がおおよそ 9.61×10^9 Ahとなることが予測できる。

以上、国内外の販売金額と販売容量を予測したが、2019年の落ち込みと2021年の急伸は、世界自動車市場の変動(2019年の米中貿易摩擦など)や新型コロナウイルス感染症の影響による生産・販売調整が影響した可能性が高いと考えられる。また、欧州や中国をはじめ世界

的に EV シフトが加速し、日本企業の電池技術や品質が一定の評価を得ていることで、輸出需要が大きく伸びたと考えられる。国外販売金額 CAGR の約 18% という数値は、世界的な EV 化の勢いを反映しており、日本メーカーにとっては海外市場が成長基盤となっていることが示唆される。しかし、今後は行きすぎた規制強化に抗う産業構造の転換なども考えられるため、注意が必要である。

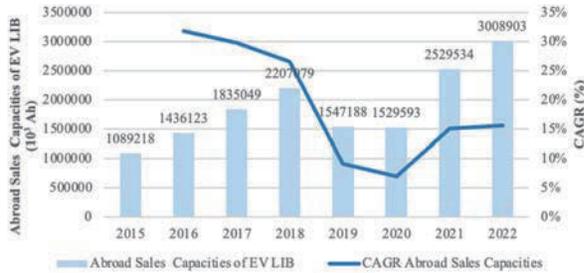


図 2-8 Abroad Sales Capacities and CAGR of EV LIB (2015~2022)

出典：経済産業省生産動態統計，財務省貿易統計を参考に作成

2.3 車載用蓄電池の GHG 排出量の算出

3EID^{文9)} は産業連関表に基づくことから、評価対象の製品の単価を対応する部門の環境負荷原単位に乘じる必要がある。本研究では、2015 年から 2022 年の車載用リチウムイオン電池の 1Ah あたりの生産金額の推移に電池部門の GHG 排出原単位 (I-A)⁻¹ を乘じ、CAGR_Output per Ah (以下「CAGR/Ah」と称する) を算出する。その後、算出した CAGR/Ah から n 年後の車載用リチウムイオン電池の 1Ah あたりの製造に係る GHG 排出量の予測値 E_n / Ah を算出する。CAGR/Ah は式 (3)、 E_n / Ah は式 (4) で求める。

さらに、n 年後の生産容量に予測値 E_n / Ah を乘じることで、n 年後の車載用リチウムイオン電池の 1Ah あたり製造に係る GHG 排出量の推移を分析する。

$$CAGR / Ah = \left(\frac{\alpha_n / Ah}{\alpha_1 / Ah} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \quad (3)$$

$$E_n / Ah = \alpha_1 / Ah \times (CAGR / Ah + 1)^n \quad (4)$$

ここで、 α_1 / Ah : 基準年の 1Ah あたりの生産金額

α_n / Ah : n 年後の 1Ah あたりの生産金額

3EID における電池部門の GHG 排出原単位は、4.364 t - CO₂eq / 百万円である。車載用リチウムイオン電池の 1Ah あたりの GHG 排出量の CAGR/Ah と、n 年後の GHG 排出量 E_n / Ah を算出する。まず、経済産業省生産動態統計より算出した 2015 年から 2022 年の 8 年間の GHG 排出量は、2015 年 およそ 0.45kg-CO₂eq/Ah、2016 年 およそ 0.40kg-CO₂eq/Ah、2017 年 およそ 0.37kg-CO₂eq/Ah、2018 年 およそ 0.40kg-CO₂eq/Ah、2019 年 およそ 0.50kg-CO₂eq/Ah、2020 年 およそ 0.51kg-CO₂eq/Ah、2021 年 およそ 0.46kg-CO₂eq/Ah、2022 年 およそ 0.56kg-CO₂eq/Ah で

あった。

以上より、1Ah あたりの GHG 排出量の CAGR / Ah は 2015 年~2016 年が -11.30% / 年、2015 年~2017 年が -9.35% / 年、2015 年~2018 年が -4.15% / 年、2015 年~2019 年が 2.85% / 年、2015 年~2020 年 2.46% / 年、2015 年~2021 年 0.35% / 年となり、2015 年の 1Ah あたりの GHG 排出量 0.4506kg-CO₂eq/Ah を α_1 とし、7 年後の 2022 年の 1Ah あたりの GHG 排出量 0.5580kg-CO₂eq/Ah を α_7 とすると、CAGR は 8 年間で 3.10% / 年となった。(図 2-9) また、2015 年-2022 年の CAGR / Ah に基づき、さらに 8 年後の 2030 年の E_{15} / Ah を算出した結果、2030 年には車載用リチウムイオン電池 1Ah あたりの製造におよそ 0.71kg-CO₂eq/Ah となることが予測できる。

さらに、2030 年には 1.176×10^{10} Ah の車載用リチウムイオン電池が製造されることが予測できたことから、車載用リチウムイオン電池の製造全体におよそ 8.38×10^9 kg-CO₂eq の GHG が排出されることが予測できる。

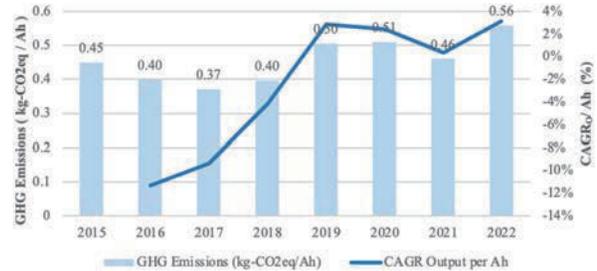


図 2-9 GHG Emissions per Ah of EV LIB (2015~2022)

2.4 太陽電池モジュールの GHG 排出量の算出

本研究では、2015 年から 2022 年の太陽電池モジュールの 1kW あたりの生産金額の推移に半導体素子部門の GHG 排出原単位 (I-A)⁻¹ を乘じ、CAGR_Output per kW (以下「CAGR/kW」と称する) を算出する。その後、算出した CAGR/kW から n 年後の太陽電池モジュールの 1kW あたりの製造に係る GHG 排出量の予測値 E_n / kW を算出する。CAGR/kW は式 (5)、 E_n / kW は式 (6) で求める。

$$CAGR / kW = \left(\frac{\alpha_n / kW}{\alpha_1 / kW} \right)^{\frac{1}{n-1}} - 1 \quad (5)$$

$$E_n / kW = \alpha_1 / kW \times (CAGR / kW + 1)^n \quad (6)$$

ここで、 α_1 / kW : 基準年の 1kW あたりの生産金額

α_n / kW : n 年後の 1kW あたりの生産金額

経済産業省生産動態統計の 2015 年から 2022 年の 8 年間の 1kW あたりの生産金額は、2015 年 およそ 0.126 百万円 / kW、2016 年 およそ 0.120 百万円 / kW、2017 年 およそ 0.104 百万円 / kW、2018 年 およそ 0.103 百万円 / kW、2019 年 およそ 0.090 百万円 / kW、2020 年 およそ 0.060 百万円 / kW、2021 年 およそ 0.049 百万円 / kW、

2022年 およそ 0.80 百万円 / kW であった。

3EID における半導体素子部門の GHG 排出原単位は、5.997 t - CO₂eq / 百万円である。太陽電池モジュールの 1kW あたりの GHG 排出量の CAGR / kW と、n 年後の GHG 排出量 E_n / kW を算出する。まず、経済産業省生産動態統計より算出した 2015 年から 2022 年の 8 年間の GHG 排出量は、2015 年 およそ 756.25kg-CO₂eq/kW、2016 年 およそ 717.57kg-CO₂eq/kW、2017 年 およそ 626.32kg-CO₂eq/kW、2018 年 およそ 615.68kg-CO₂eq/kW、2019 年 およそ 539.99kg-CO₂eq/kW、2020 年 およそ 362.73kg-CO₂eq/kW、2021 年 およそ 295.57kg-CO₂eq/kW、2022 年 およそ 477.28g-CO₂eq/kW であった。

以上より、1kW あたりの GHG 排出量の CAGR/kW は 2015 年～2016 年が-5.11%/ 年、2015 年～2017 年が-9.0%/ 年、2015 年～2018 年が-6.63%/ 年、2015 年～2019 年が-8.08%/ 年、2015 年～2020 年-13.67%/ 年、2015 年～2021 年-14.49s%/ 年となり、2015 年の 1Ah あたりの GHG 排出量 756.254kg-CO₂eq/kW を α₁ とし、7 年後の 2022 年の 1kW あたりの GHG 排出量 477.279kg-CO₂eq/kW を α₇ とすると、CAGR は 8 年間で-6.36 % / 年となった。(図 2-10) また、2015 年～2022 年の CAGR / kW に基づき、さらに 8 年後の 2030 年の E₁₅ / kW を算出した結果、2030 年には太陽電池モジュールの 1kW あたりの製造におよそ 282.05kg-CO₂eq/kW となることが予測できる。

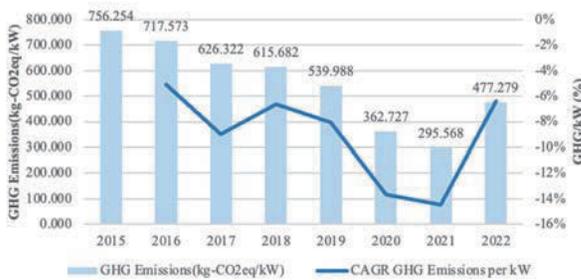


図 2-10 GHG Emissions per kW of Solar Module (2015~2022)

3. 車載用蓄電池の住宅への転用と環境負荷

3.1 車載用蓄電池の住宅用への転用後の CO₂ペイバックタイムの算出

車載用蓄電池の住宅用への転用後の CO₂ペイバックタイムを算出する。本研究では、CO₂ペイバックタイムの算出を車載用リチウムイオン電池および太陽電池モジュール製造時の GHG 排出量の和から、二子玉川駅（東京都世田谷区玉川 2-22-13）付近における集合住宅の推定消費電力量から太陽光発電量の予測値を差し引いた値に火力発電（LNG、石油、石炭）の直接 CO₂排出原単位¹³⁾ を乗じて算出した CO₂排出量を差し引いた収支が 0 となるのに要した期間とする。太陽発電システムの年間発電量は、加藤ら¹⁴⁾の研究から参照した式 (7) より求める。

本研究では、太陽電池モジュールの傾斜角を 30°、設置面を南として想定する。Q_s は、対象地の NEDO 日射量データベース閲覧システム¹⁵⁾の年平均斜面日射量 4.34kWh / (m² · day) をもとに、Q_s = 4.34 × 365 = 1,584 [kWh / (m² · 年)] とした。K_p は、0.8¹⁶⁾ と仮定する。

対象電池は、楊ら¹⁷⁾の研究から 2012 年製造「N 社 EV」の総公称電圧 346V、容量 20kWh の空冷方式リチウムイオンバッテリーとし、1 個あたり 3.6V かつ 2.9Ah の性能を持つセルを 20 並列、96 直列の総セル数 1920 個で構成されたもの¹⁸⁾ とする。さらに、リチウムイオン電池は使用や経年により容量が低下し、EV においては航続距離に影響するため、SOH が 70~80% に達すると、別用途に転用されると考えられている¹⁹⁾。そこで、メーカー保証期間として設定される傾向にある 8 年を車載用途の RUL とし、以降を電池の転用時期と仮定する。充電はすべて太陽光発電による電気の使用を想定する。

$$E_p = \frac{Q_s}{\alpha_p} \times K_p \times P_p \quad (7)$$

- ここで、
- E_p: 太陽電池アレイの発電量 [kWh/年]
 - Q_s: 太陽電池アレイの設置面単位面積あたりの日射量[kWh / (m² · 年)]
 - α_p: 標準状態の日射強度(=1kW / m²)
 - K_p: 太陽電池アレイの総合設計係数
 - P_p: 太陽電池アレイのシステム容量[kW]

二子玉川駅付近における集合住宅の推定電気消費量は、住戸面積を 60m² / 戸、住戸数を 6 戸と仮定し、東京都の集合住宅の電気の消費原単位²⁰⁾ 631MJ / (m² · 年) をもとに、電気の一次エネルギー換算係数の 9.76MJ / kWh から算出した、64.65kWh / (m² · 年) を乗じた値とする。

以上より、「N 社 EV」¹⁷⁾ ¹⁸⁾ のバッテリーパックの転用を想定すると、製造年に最も近い 2015 年の 1Ah あたりの GHG 排出量 0.45 kg-CO₂eq / Ah をもとに GHG 排出量を算出した場合、20kWh 製造時におよそ 2500 kg-CO₂eq 排出したこととなる。また、太陽電池アレイの発電量: 4kW、16kW、32kW は、それぞれ 5.07 × 10³ kWh / 年、2.03 × 10⁴ kWh / 年、4.05 × 10⁴ kWh / 年となり、二子玉川駅付近における集合住宅の推定消費電力量は、2.33 × 10⁴ kWh / 年となった。よって、1 日あたりの推定消費電力量が 63.8kWh / 日、推定発電電力量が 111.1kWh / 日となる 32kW の太陽電池アレイ有する集合住宅は、推定余剰電力量 47.3 kWh / 日が生じることから、SOH80% の車載用リチウムイオン電池 20kWh の導入を想定し、製造時に排出した CO₂に係る CO₂ペイバックタイムを算出する。蓄電池の容量を超過した余剰電力は、廃棄したと仮定する。

対象住宅に 32kW およびの太陽電池アレイを設置し、蓄電する余剰電力を 16kWh / 年とした場合の CO₂ペイバックタイム T_p を火力発電の燃料 (LNG、石油、石炭) 別

に算出する。CO₂ペイバックタイム T_n は式 (8) で求める。本研究では、消費電力量を 2.33×10^4 kWh / 年、車載用リチウムイオン電池を住宅用に転用した時点のSOHを80%とし、製造時のGHG排出量は5,000 kg-CO₂eqとする。

$$T_n = \frac{G_n}{0.8\beta W_n} \quad (8)$$

ここで、 T_n : CO₂ペイバックタイム [日]
 G_n : 製造時 GHG 排出量 [kg-CO₂eq]
 β : 火力発電 CO₂排出係数[kW]
 W_n : 車載用リチウムイオン電池の容量[kW]
 ※SOHが80%のため $W_n \times 0.8$ とした

LNG 火力発電、石油火力発電および石炭火力発電の直接 CO₂排出原単位と、余剰電力 32kWh / 年を蓄電することで1日あたりに削減可能なCO₂量を表3-1、CO₂ペイバックタイムを図3-1に示す。燃料種類によってCO₂排出原単位が異なるため、蓄電システムによるCO₂削減効果やペイバックタイムにも差が生じる。石炭火力発電の排出原単位が大きい分、同じ条件下では削減量も大きく、相対的に短い期間でペイバックが可能になることが示唆された。

表 3-1 CO₂ Reduction Effects by Each Thermal Power Generation Method

発電方式	CO ₂ 排出原単位 [kg-CO ₂ /kWh]	CO ₂ 削減量 [kg-CO ₂ /日]
LNG 火力発電	0.376	約 12.03
石油 火力発電	0.695	約 22.24
石炭 火力発電	0.864	約 27.65

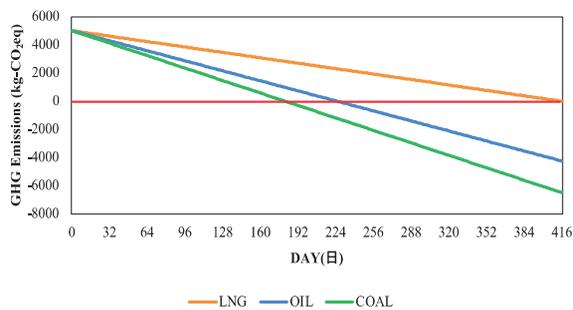


図 3-1 CO₂ payback time

3.2 車載用蓄電池転用の事例「高床の家」

対象住宅は、茨城県の「高床の家」^{文21)}とする。当建築は、地上2階、延床面積82.81m²の木造住宅である。また、4kWの太陽光発電システムを有しており、余剰電力はEVバッテリーを転用し、蓄電している。通常、蓄電池の使用は、蓄電池の下限電圧59.0vを下回る場合までであり、商用電源と併せて電力供給をしている。図3-2にシステム詳細図を示す。

対象住宅は設置されたセンサーにより電流値を測定しており、供給電圧が100Vとなっている。夏季(2023/07/13)と冬季(2024/01/13)における12:00と20:00に測定した電流値から、昼間(12:00~12:59)と夜間(20:00~20:59)の1時間に消費した予測電力量を算出し、昼間および夜間の1時間あたりの総消費電力量と太陽光自家発電により削減したCO₂排出量を火力発電の燃料別に予測する。

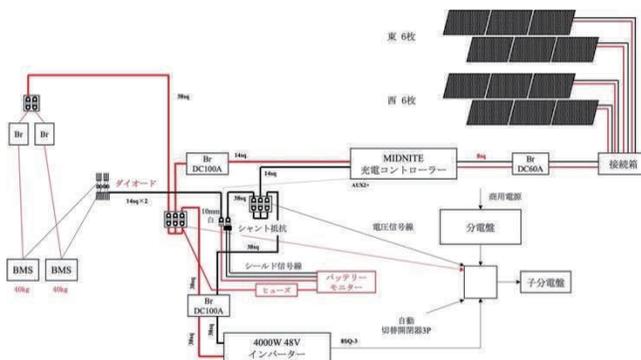


図 3-2 System Diagram of 「高床の家」

対象住宅は、夏季(2023/07/13)12:00に商用電力0.06A、自家発電電力2.34Aを測定したことから、消費電力量は14.4kWh((3.6Ah+140.4Ah)×100V=14400Wh)となり、20:00に商用電力0.05A、自家発電電力1.64Aを測定したことから、消費電力量は10.14kWh((3.0Ah+98.4Ah)×100V=10140Wh)となった。冬季(2024/01/13)12:00に商用電力3.08A、自家発電電力2.77Aを測定したことから、消費電力量は35.1kWh((184.8Ah+166.2Ah)×100V=35100Wh)となり、20:00に商用電力9.38A、自家発電電力4.02Aを測定したことから、消費電力量は80.4kWh((562.8Ah+241.2Ah)×100V=80400Wh)となった。(図3-3)

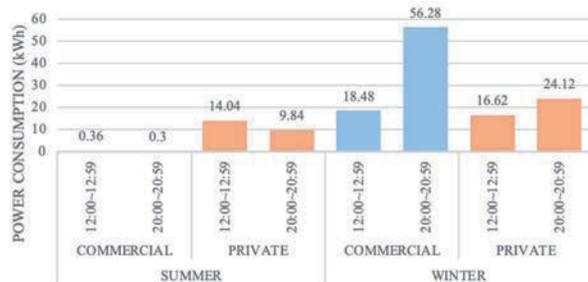


図 3-3 Differences in Hourly Electricity Consumption between Daytime and Nighttime in 「高床の家」 by Season

下記に、算出した太陽光発電量に火力発電の燃料別CO₂排出原単位を乗じた、数値を削減CO₂排出量として示す。

・LNG 火力発電

LNG 火力発電の直接CO₂排出原単位0.376kg-CO₂ / kWh^{文13)}から、夏季(2023/07/13)12:00に自家発電電力量は14.04kWhとなり、20:00には9.84kWhとなった。よ

って、夏季昼間には1時間あたりおよそ5.28 kg-CO₂を削減し、夏季夜間には1時間あたりおよそ3.70 kg-CO₂を削減したと予測できた。冬季(2024/01/13)12:00に自家発電電力量は16.62kWhとなり、20:00には24.12kWhとなった。よって、冬季昼間には1時間あたりおよそ6.25 kg-CO₂を削減し、冬季夜間には1時間あたりおよそ9.07 kg-CO₂を削減したと予測できた。

・石油火力発電

石油火力発電の直接CO₂排出原単位0.695kg-CO₂ / kWh²¹⁾から、夏季(2023/07/13)12:00に自家発電電力量は14.04kWhとなり、20:00には9.84kWhとなった。よって、夏季昼間には1時間あたりおよそ9.76 kg-CO₂を削減し、夏季夜間には1時間あたりおよそ6.84 kg-CO₂を削減したと予測できた。冬季(2024/01/13)12:00に自家発電電力量は16.62kWhとなり、20:00には24.12kWhとなった。よって、冬季昼間には1時間あたりおよそ11.55 kg-CO₂を削減し、冬季夜間には1時間あたりおよそ16.76 kg-CO₂を削減したと予測できた。

・石炭火力発電

石炭火力発電の直接CO₂排出原単位0.864kg-CO₂ / kWh²¹⁾から、夏季(2023/07/13)12:00に自家発電電力量は14.04kWhとなり、20:00には9.84kWhとなった。よって、夏季昼間には1時間あたりおよそ12.13 kg-CO₂を削減し、夏季夜間には1時間あたりおよそ8.50 kg-CO₂を削減したと予測できた。冬季(2024/01/13)12:00に自家発電電力量は16.62kWhとなり、20:00には24.12kWhとなった。よって、冬季昼間には1時間あたりおよそ14.36 kg-CO₂を削減し、冬季夜間には1時間あたりおよそ20.84 kg-CO₂を削減したと予測できた。

4. 考察

まず、車載用リチウムイオン電池の国内需要について考察する。販売金額・容量およびCAGRのいずれも国外需要より低く、日本のEV普及が世界と比較して遅れていることがわかる。実際、2022時点で日本は世界諸国と比較して、乗用車の保有台数に占めるEVの比率が低く、充電インフラの数も少ない²²⁾。T社のある米国では、法律施行による支援のように国が蓄電池産業の市場拡大に注力している²³⁾事例もあることから、今後、2035年までに新車販売をすべてEVにすることを目標としている日本において、体制を整え、生産や購入の支援および充電インフラの拡充をすることが求められる。

2022年の車載用リチウムイオン電池の生産金額と生産容量から、2022年の1Ahあたりの生産金額は127.85円/Ahとなった。さらに、リチウムイオン電池1kWhあたりの価格²⁴⁾がセル1kWhあたり\$120であり、2022年のTTM²⁵⁾が131.43円/\$であること

から、セル1kWhあたりの価格を日本円換算すると15771.6円/kWhである。上記の2つの値のみ考慮した場合、N社EVに搭載されたセル容量2.9Ahを基準にした場合、1kWhあたり42.5個のセルで構成されることとなり、N社EVに搭載された20kWhのバッテリーが850個のセルでバッテリーが構成されていることとなる。しかし、並列数をN社EVと同様に20とした場合、20kWhのEVバッテリーを得るためには、セル1個あたり8Vの電圧が必要となるが、現行の車載用リチウムイオン電池セルの電圧は、N社EVのセル電圧3.6Vとの差は少ない。つまり、現行のEVバッテリーはセル容量を増やすことで、少ないセル数でバッテリー容量を増加させている。

そこで、車載用リチウムイオン電池セルの性能を1個あたり3.5Vかつ60Ahと仮定し、バッテリーパック2並列、96直列のセル(総セル数:192個)で構成した40kWhのEVバッテリーを製造した場合の生産金額をリチウムイオン電池1kWhあたりの価格²⁴⁾に準拠して、経済産業省生産動態統計より算出した値の整合性を確認する。2022年の1Ahあたりの生産金額127.85円/Ahした場合のEVバッテリー40kWhの生産金額は14.7万円(60×192×127.85=1,472,832)となるが、15771.6円/kWhとした場合は6.31万円(15770×40=630,800)となることから、車載用リチウムイオン電池1Ahあたりの生産金額は127.85円/Ahより低い金額でなければ、整合性がとれない。この原因として考えられることは、EVバッテリーの性能および構成が定格でなく製造元で異なることや、製造元ごとで製造に係るコストが異なることが挙げられる。また、2015年から2022年の8年間の1Ahあたりの生産金額のCAGRは3.10%/年であるが、生産金額が増加する理由として、2021年まで減少傾向であったリチウムイオン電池1kWhあたりの価格が2022年に僅かに増加したことや輸入物価の上昇などが挙げられる。よって、経済産業省生産動態統計の生産金額および生産容量から、車載用リチウムイオン電池の生産に係る詳細なGHG排出量を明確にすることは困難である。

本研究で使用したLCAの3EIDにおけるGHG排出原単位は百万円単位の値で、電池部門は4.364t-CO₂eq/百万円である。よって、3EIDに基づいて算出した車載用リチウムイオン電池の生産に係るGHG排出量は生産金額に比例し、1Ahあたりの生産金額は2015年に0.45kg-CO₂eq/Ahとなり、2022年には0.56kg-CO₂eq/Ahとなった。2015年から2022年の8年間のCAGRは、3.1%/年と増加傾向であった。しかし、3EIDは2015年の産業連関表をもとに作成されており、10年ほど経過した現在と比較すると製造に係る排出原単位が変化している可能性が高く、近年は電子

機器の成長が目覚ましいことから、技術向上による製造時の環境負荷の低減が考えられる。研究対象としたN社EVが製造された2010年は、EV需給率は近年と比較して低く、EVバッテリー容量も少ないが、需給率は年々上昇し、技術向上に伴い価格に対する容量の割合は増加していることから、1AhあたりのGHG排出量は2022年予測値0.56 kg-CO₂eq/Ahを下回る可能性が高い。この原因として、現行の3EIDが発行されたのが2015年であり、2022年時点の産業連関表における各部門間の取引額が異なることや、リチウムイオン電池以外のマンガン電池や鉛電池など多種であるのに対し、環境負荷原単位が電池部門と大きく分類されていること、3EIDの排出原単位は百万円単位の値であるが、生産金額は年産規模や生産技術が製造元で異なることで1Ahあたりの生産金額が異なることが挙げられる。太陽電池モジュールもリチウムイオン電池同様、製造時のGHG排出量は3EIDにおけるGHG排出原単位をもとに算出した値を下回る可能性が高い。

以上より、2015年の産業連関表をもとに作成された現行の3EIDで算出したGHG排出量およびCO₂排出量などの環境負荷は、2022年時点の生産技術を考慮すると過剰評価され、生産規模などの違いから綿密な環境負荷を評価できていない可能性が高い。また、建築物のLCCM達成を評価できる「建物のLCA^{x10)}」は産業連関表をもとに作成されており、建築物は製造元の異なるいくつもの資材により構成されていることから、ライフサイクルでの環境負荷を適切に評価できていない可能性が高いことから、環境負荷を評価する場合、金額あたりの環境負荷原単位ではなく、投入資材の重量あたりの環境負荷原単位をもとにする方が、資材ごとのGHG排出量などに大きなばらつきが生じなくなると考えられる。しかし、重量あたりの環境負荷原単位にした場合においても製品原料調達時の燃料消費量や輸入元により運搬距離が異なるなど、詳細な環境負荷は困難であると考えられる。今後、世界的な環境負荷低減の取り組みが加速することから、定格化された製品を基準に世界基準の環境負荷係数を作成することが望ましい。

CO₂ペイバックタイムに関しては、火力発電の燃料によってCO₂排出源単位が異なる^{x13)}ため、どの燃料由来の電力を太陽光発電により賄えたかによって、削減したCO₂排出量は異なる。また、電力会社からの供給電力^{x26)}は、直接CO₂排出を排出しない原子力発電など火力発電以外からも電力を得ていることから、実際に削減したCO₂排出量を評価するには、燃料別のCO₂排出源単位を用いるのではなく、供給元の電力会社の電源構成の比率から算出した平均的なCO₂排出

源単位を用いることが求められる。

また、本研究では車載用蓄電池および太陽電池アレイのみを対象に環境負荷の算出を実施したが、LCCMを達成するには、木材やコンクリートなどの建材の製造から破棄までのLCCO₂を考慮しなければならない。木造はS造とRC造よりもLCCO₂^{x27)}が少ないことや、「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」^{x28)}が施行されたことから、LCCMを指向した住宅は木造が効果的であると考えられる。しかし、木造であっても樹種や木材の乾燥方法の違いでCO₂排出量が異なり^{x29)}^{x30)}^{x31)}、基礎や耐火性の違いによってCO₂排出量が異なる^{x32)}ため、LCCM達成には設計段階から資材の緻密な選定が必要となる。また、本研究のように車載用蓄電池を定置用蓄電池として転用する場合、新品と比較してRULが短くなることで設備の更新回数が増えることや、蓄電池は大きな衝撃によりショートすることで火災の原因となり得るため、地震発生に伴い二次災害を引き起こす可能性があることから、木造住宅に蓄電池を導入する場合に延焼対策を講じた設計をしなければならない。

最後に、本研究では使用済みの車載用蓄電池を廃棄せずに住宅の定置用蓄電池として転用した場合について評価してきたが、今後、車載用リチウムイオン電池の生産容量が増加することが予測でき、EVバッテリーを住宅用に再利用する体制を整えることが、蓄電池の廃棄問題解決および、住宅への蓄電池導入の普及に貢献すること考えられることから、国内の中古電気自動車バッテリー市場の整備や、新品の住宅用蓄電池より、再利用した電気自動車バッテリーのコストが低くなるようなコスト面での利点を強化が望まれる。また、EVバッテリーの規格がメーカーで異なることで転用が難しい可能性や、転用後のEOLが訪れる際には廃棄されてしまう可能性があるため、その後の利用についても今後は考えなければならぬ。さらに、安全対策を講じた上で転用先を災害時の仮設住宅とすることで、停電時にも電力供給が可能となり得ることから、EVバッテリーの転用先の選択の幅を拡大することが求められる。

5. まとめと展望

本研究では、車載用リチウムイオン電池および太陽電池アレイを住宅に導入した場合の環境負荷削減効果を評価し、特に製造時のGHG排出量やCO₂ペイバックタイム、さらには国内外における車載用リチウムイオン電池市場の拡大状況を分析した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 車載用リチウムイオン電池を定置用として転用

した場合のCO₂ペイバックタイムは、火力発電の燃料種類ごとに差異があるものの、石炭や石油などCO₂排出原単位が比較的高い燃料を置き換えるほど短縮されることを確認した。

(2) 太陽電池アレイおよび車載用リチウムイオン電池の製造時GHG排出量を算出し、建物への導入効果を評価した。本研究では経済産業省生産動態統計や3EIDを用いて排出原単位を導出したが、これらは2015年時点の産業連関表がベースとなっているため、実際には技術進歩や製造工程の効率化により、推定値が過大評価される可能性が高い。特にリチウムイオン電池の分野は競争が激化しつつあり、各社が生産コストや環境負荷の低減に取り組んでいると想定される。そのため、最新の製造プロセスを反映した精緻なLCA手法を構築し、電池部門のみならず個別プロセスや材料レベルでの排出係数を更新していくことが不可欠である。

(3) 車載用リチウムイオン電池の国内外需要をCAGRベースで分析した結果、国内よりも国外の成長率が高いことが明らかとなった。国外向け販売のCAGRが約18.42%/年と非常に大きいのは、中国や欧州を中心としたEVシフトの加速による需要拡大が背景にあると考えられる。日本国内においては、EV普及率が世界水準よりもやや遅れている現状が読み取れ、インフラ整備や政策的支援を強化する必要性が示唆される。2035年までに新車販売をすべて電動車にする目標が掲げられているが、実効性を持たせるには充電インフラ整備や中古EVバッテリー再利用の枠組み整備が急務と言える。

(4) 本研究では建物のLCCM達成を見据え、蓄電池の導入効果に焦点を当てた。しかし実際には、木材やコンクリートなどの建材の製造から廃棄までを含めたライフサイクルでのCO₂排出量も考慮しなければ、総合的な環境負荷評価は難しい。したがって、より厳密な環境負荷評価を行うには、資材レベルでの排出原単位を詳細に把握し、複数の部材が組み合わさる建築物全体にわたる評価手法を整備する必要がある。

(5) 車載用リチウムイオン電池を再利用する際には、安全性や規格の問題も浮上する。各自動車メーカーのセル電圧や制御システムが異なるため、標準化されていないバッテリーの転用はコスト面や技術面で障壁がある。さらに、使用済みバッテリーの衝撃による火災リスクや、地震時の二次災害への対策も課題である。今後は、用途に応じた規格の整備や再利用バッテリー専用の安全ガイドラインを策定し、転用後の最終廃棄まで見通したライフサイクル管理が求められる。

以上を踏まえると、EVバッテリーのセカンドライフ活用は、EV需要拡大に伴い大量に排出される使用

済みバッテリーの廃棄問題を緩和し、住宅部門への蓄電池普及を後押しする有効な手段であると言える。一方で、製造時GHG排出量の評価精度向上や、メーカーごとの仕様差を踏まえた再利用プロセス、リサイクルや安全性確保のための法制度の整備が不可欠である。また、定置用蓄電池の導入を災害時の非常用電源として活用するなど、多面的なメリットを創出する方策も検討すべきであろう。

本研究は、再生可能エネルギーや蓄電池を組み合わせた住宅の環境負荷削減効果を示しつつ、現行の統計データや産業連関表を用いた場合の限界を浮き彫りにした。今後はより詳細なプロセスベースのデータ整備や国際標準化された排出原単位の策定を進め、車載用リチウムイオン電池のセカンドライフに関する実証実験・安全基準の確立を通じて、建築物のLCCMの達成に向けた具体的な指針を提示していく必要があると考えられる。再利用バッテリーの市場を活性化させ、経済的・環境的両面でメリットが得られる仕組みを構築することで、国内のみならずグローバルな脱炭素社会の実現に寄与することが期待される。

<参考文献>

- 1) 伊香賀俊治：建築LCAの国・自治体・民間での活用状況と健康影響評価への発展，日本LCA学会誌，pp. 104-110，2017. 4
- 2) 国土研究開発法人国立環境研究所：日本の温室効果ガス排出量データ，2023. 4，<https://www.nies.go.jp/gio/aboutghg/index.html>，(参照2023-08-20)
- 3) 経済産業省資源エネルギー庁：第6次エネルギー基本計画，https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/，(参照2023-08-27)
- 4) 経済産業省資源エネルギー庁：定置用蓄電システムの普及と拡大策の検討に向けた調査調査報告書，2023. 2，https://www.meti.go.jp/meti_lib/report/2022FY/000050.pdf，(参照2023-09-06)
- 5) 高根英幸：きちんと知りたい！電気自動車用パワーユニットの必須知識，日刊工業新聞，2021年
- 6) Kostiantyn Turcheniuk, Dmitry Bondarev, Vinod Singhal and Gleb Yushin：Ten years left to redesign lithium-ion batteries, Nature, Vol. 559, pp. 467-470, 2018. 7
- 7) IRENA: Global Renewables Outlook Energy transformation 2050, 2020. 4, https://www.irena.org/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Apr/IRENA_Global_Renewables_Outlook_2020.pdf?rev=1f416406e50d447cbb2247de30d1d1d0，(参照2023-09-24)
- 8) 経済産業省：経済産業省生産動態統計時系列表，2023. 9，https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html，(参照2023-10-02)
- 9) 独立行政法人国立環境研究所：産業連関表による環境負荷原単位データブック(3EID)，2015
- 10) 日本建築学会：建物のLCA指針-温暖化・資源消費・廃棄物対策のための評価ツール改訂版，2013
- 11) 経済産業省：経済産業省生産動態統計年報，2023. 9，https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/seidou/result/ichiran/08_seidou.html，(参照2023-10-02)
- 12) 税関Japan Customs，財務省貿易統計報道発表資料，2023. 12，<https://www.customs.go.jp/toukei/shinbun/happyou.htm>，(参照2023-12-02)
- 13) 今村栄一，井上正直，坂東茂：日本における発電技術のライフサイクルCO₂排出量総合評価，電力中央研究所報告書，No. Y06，pp. 1-73，2016. 3
- 14) 加藤和彦，山田興一，稲葉敦，黒川浩助，小宮山宏：太陽

- 光発電システムの CO₂排出源単位に関する考察, 化学工学論文集, 21 巻 4 号, pp. 753-759, 1995
- 15) NEDO: 日射量データベース閲覧システム(MONSOLA-20), https://appww2.infoc.nedo.go.jp/appww/monsola_map.html, (参照 2024-1-10)
 - 16) 環境省: 平成 27 年度 廃棄物埋立処分場等への太陽光発電導入実現可能性調査委託業務, <https://www.env.go.jp/content/900535953.pdf>, (参照 2024-1-10)
 - 17) 楊殿宇, 高原慎二, 末富隆雅: EV 駆動用バッテリーのリユースに向けた取り組みの紹介, マツダ技報, No. 39, 2022
 - 18) 松井恒平, 喜田裕万, 栃岡孝宏: デミオ EV の高密度 Li イオンバッテリー開発, マツダ技報, NO. 30, 2012
 - 19) Podias, A., Pfrang, A., Di Persio, F., Kriston, A., Bobba, S., Mathieux, F., Messagie, M., Boon-Brett, L.: Sustainability assessment of second use applications of automotive batteries: ageing of Li-ion battery cells in automotive and grid-scale Applications, World Electric Vehicle Journal Vol. 9 Issue 2, 24, 2018. 9
 - 20) 鷺津明由, 中野諭: 東京都の建築物による一次エネルギー消費データベースの作成, 早稲田大学先端社会科学研究所ワーキングペーパー, IASS WP, pp. 1-10, 2017
 - 21) 福島加津也 + 富永祥子建築設計事務所: 高床の家, <http://ftarchitects.jp/高床の家/>, (参照 2024-1-10)
 - 22) 経済産業省: 参考資料, 2023. 10 <https://www.meti.go.jp/press/2023/10/20231018003/20231018003-2.pdf>, (参照 2024-01-18)
 - 23) 経済産業省: 自動車分野のカーボンニュートラルに向けた国内外の動向等について, 2023. 4, https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/green_innovation/industrial_restructuring/pdf/014_04_00.pdf, (参照 2024-01-02)
 - 24) Bloomberg NEF: Lithium-ion Battery Pack Prices Rise for First Time to an Average of \$151/kWh, 2022. 12, <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-rise-for-first-time-to-an-average-of-151-kwh/>, (参照 2023-10-02)
 - 25) 三菱 UFJ リサーチ&コンサルティング: 外貨為替相場情報, 2023, http://www.murc-kawasesouba.jp/fx/year_average.php, (参照 2023-09-20)
 - 26) 東京電力: 電源構成・非化石証書の使用状況, https://www.tepco.co.jp/ep/power_supply/index-j.html, (参照 2024-01-10)
 - 27) 磯部孝行, 清家剛, 三井所清史, 小林謙介, 渡辺直哉, 山本正顕, 近田智也: カーボンニュートラルを指向した低層共同住宅の LCCO₂評価ツールの開発, 日本 LCA 学会誌, 19 巻 1 号, pp. 33-41, 2023. 1
 - 28) 林野庁: 脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律(通称: 都市(まち)の木造化推進法), <https://www.rinya.maff.go.jp/j/riyou/koukyou/>, (参照 2023-10-02)
 - 29) 山形龍一, 浅野良晴, 高村秀紀: 長野県産スギ, カラマツのカーボンバランスの算出地場産材を使用した住宅における木材のライフサイクルアセスメントに関する基礎調査その 2, 日本建築学会環境系論文集, 第 78 巻 第 683 号, pp. 73-79, 2013. 1
 - 30) 山内一矢, 浅野良晴, 高村秀紀: 長野県北部における杉戸長野県東部におけるカラマツの CO₂排出原単位及び木造住宅における CO₂排出量の算定地場産材を使用した住宅における木材のライフサイクルアセスメントに関する基礎調査その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 74 巻 第 645 号, pp. 1261-1267, 2009. 11
 - 31) 重川隆廣, 赤林伸一, 坂口淳, 尾池孝太: 新潟県の製材所を対象とした年間エネルギー・CO₂排出量 木材の地産地消に関する研究その 1, 日本建築学会環境系論文集, 第 76 巻 第 666 号, pp. 721-726, 2011. 8
 - 32) 一宮孝至, 大住政寛, 小林靖尚, 長坂健司, 井上雅文: 木造及び RC 造非住宅建築の環境経済評価(第 1 報)積上法 LCA による GHG 排出量の比較, 木材学会誌, 67 巻 1 号, pp. 14-19, 2021

<研究協力者>

笹生啓太 元東京都市大学大学院前期博士課程
田中水都 東京都市大学大学院前期博士課程