

국내 전기차 배터리의 재활용원료 함량비율 전망 연구

오정훈¹, 이주희², 김익³, 전의찬^{4*}¹LG에너지솔루션, ²세종대학교 기후에너지융합학과 조교수, ³스마트에코, ⁴세종대학교 기후에너지융합학과 교수

Forecasting the Recycled Material Content of EV Batteries in Korea

Jeonghun Oh¹, Joohee Lee², Ian Kim³, Eui-Chan Jeon^{4*}¹LG Energy Solution, Korea, ²Department of Climate and Environment, Sejong University, Korea,³SMART ECO, ⁴Professor, Department of Climate and Environment, Sejong University, Korea

ABSTRACT

The European Union (EU) has established the EU Battery Regulation, mandating minimum percentage of recycled materials for cobalt, nickel, and lithium by 2031 and 2036. In order for Korean automakers to continue exporting domestic EVs and batteries, it is crucial to assess whether the required recycled material content set by the EU can be met. In response, this study conducted a quantitative analysis using dynamic material flow analysis (dMFA) to forecast the recycled material content of EV batteries in Korea focusing on cobalt, nickel, and lithium. The results of our dMFA revealed that cobalt would not meet the EU's mandatory content requirement, while the gap between the required and actual content for nickel and lithium is gradually decreasing. These results suggest that proactive efforts by the Korean automotive and battery industries are necessary to secure recycled materials in preparation for the EU Battery Regulation. In particular, various technological and policy measures will be required to ensure a stable supply of recycled materials and to reduce the demand for battery raw materials.

Key words: electric vehicle, lithium-ion battery, recycled material, dynamic material flow analysis

요약

EU는 EU 배터리규제를 제정하여 코발트, 니켈, 리튬에 대하여 2031년과 2036년 재활용원료를 일정 비율 의무적으로 사용하도록 규정하고 있다. 국내 전기차 및 배터리의 안정적 수출을 위해서 EU에서 요구하는 재활용원료 의무 함량비율을 맞출 수 있을지 예측하고 대비하는 것이 중요하다. 이에 본 연구는 동적 물질흐름분석을 활용하여 향후 국내 전기차 배터리로 만들 수 있는 재활용원료의 함량비율을 코발트, 니켈, 리튬을 대상으로 정량분석하였다. 분석 결과, 코발트는 의무 함량비율을 달성할 수 없는 것으로 나타났으며, 니켈과 리튬은 의무 함량비율과의 차이가 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 EU 배터리규제에 대비해 한국 자동차 및 배터리 산업이 재활용원료를 확보하기 위한 선제적인 노력이 필요함을 시사한다. 특히, 재활용원료 공급 및 배터리 원료 수요를 낮추기 위한 다양한 기술적·정책적 노력이 필요할 것으로 보인다.

주제어: 전기차, 리튬이온배터리, 재활용원료, 동적 물질흐름분석

1. 서론

기후변화에 대응하기 위한 대안의 하나로 수송 부문에서 전

기차(electric vehicle, EV) 보급이 빠르게 늘어나고 있다. 전기차 보급이 늘어나면서 전기차의 핵심부품인 2차전지 시장도 빠르게 성장하고 있으며, 특히 전기차에 들어가는 배터리는 높

Date Received: Mar. 13, 2025, Date Revised: Apr. 16, 2025, Date Accepted: Apr. 21, 2025

* **Corresponding author** : Eui-Chan Jeon, Tel: +82-2-3408-3927, E-mail: ecjeon@sejong.ac.kr

† 본 논문은 제1저자 오정훈의 세종대학교 기후에너지융합학과 박사학위논문(2025)의 일부를 수정보완하여 작성한 것임.

© Copyright 2025 The Korean Society for Life Cycle Assessment. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

은 에너지밀도를 요구하기 때문에 주로 리튬이온배터리(lithium-ion battery, LIB)가 사용되고 있다.

LIB는 제조 과정에서 희소금속인 리튬을 포함하여 코발트, 니켈과 같은 중요 광물을 원료로 사용한다. 희소금속들은 배터리 원재료 중 대부분 양극재에 사용되며, 배터리 성능을 결정 짓는 중요한 요소이다. 배터리 양극재는 배터리 전체 원가의 57%를 차지하고 있기 때문에 희소금속들이 배터리 전체에 주는 경제적 영향 또한 매우 높다[1].

전기차 배터리 공급이 늘어나면서 사용후 배터리 공급량도 늘어나고 있으며, 자원 안보 및 순환 경제(circular economy) 측면에서 사용후 배터리의 재활용에 대한 관심과 중요성이 높아지고 있다[2]. 글로벌 EV 주요 국가인 유럽연합(European Union, EU), 미국, 중국은 규제와 보조금 제도를 통하여 배터리 재활용 정책을 강화하고 있다. 특히, EU는 배터리규제(EU battery regulation, EUBR)을 제정하여 전기차 배터리에 대하여 2031년 코발트 16%, 니켈 6%, 리튬 6%, 2036년 코발트 26%, 니켈 15%, 리튬 12%의 재활용원료를 의무적으로 사용할 것을 요구하고 있다[3]. 규제 기준에 미치지 못할 경우 국내에서 생산하는 전기차와 배터리를 EU에 수출하기 어려워지게 된다.

본 연구는 국내에서 중요 광물의 재활용을 얼마나 달성할 수 있을지 전망하고, 이를 바탕으로 EUBR이 요구하는 재활용 원료 의무 함량비율을 규제 도입 시기에 맞춰 달성할 수 있는지 예측해 보고자 한다. 이를 위해 동적 물질흐름분석을 활용하여 국내 전기차를 대상으로 배터리에 들어가는 코발트, 니켈, 리튬의 재활용원료 함량비율에 대해서 전망하였다.

2. 선행연구 검토

배터리 재활용원료 함량비율에 대한 연구는 대상 지역, 재활용 원료, 전망 기간에 따라서 다양하게 이루어져 왔다[4]. 기존 연구는 글로벌 지역을 포함한 미국, EU, 중국 등 다양한 지역을 대상으로 진행되었고, 재활용원료에 대해서 코발트, 니켈, 리튬 외 다른 금속과 배터리와 양극재 수준까지 연구 대상으로 하여 진행하였다[4-8]. 재활용원료에 대한 미래 전망을 위해서 물질흐름분석에 시간의 흐름을 반영한 동적 물질흐름 분석(dynamic material flow analysis, dMFA)을 사용하였다.

Xu et al.[5]은 dMFA를 사용하여 2050년까지 코발트, 니켈, 리튬에 대한 글로벌 수요를 예측하였다. 미래 변화에 대해서는 전기차 및 배터리 보급의 변화 추세를 시나리오로 설정하여 진행하였다. Dunn et al.[6]은 미국을 대상 지역으로 하여 2050년까지 분석을 진행하였다. 연구에서 사용후 배터리

발생 후 재활용하지 않고 재이용할 경우를 시나리오로 고려하여 진행하였다. Shafique et al.[7]은 중국과 미국을 대상으로 2030년까지 전망을 하였다. 분석 대상 원료는 코발트, 니켈, 리튬을 포함한 구리와 흑연까지 포함하였다. Wesselkamper et al.[4]은 EU, 미국, 중국 등 주요 국가들을 대상 지역으로 2070년까지 전망을 진행하였다. 코발트, 니켈, 리튬에 대해서 배터리원료 수요와 재활용원료 공급이 일치한 BEPs (break-even points) 시점을 예측하여 완전한 순환경제가 이루어지는 관점에서 연구가 진행되었다.

기존 연구들은 연구 목적에 맞게 동적 물질흐름모델을 구성하였고, 필요한 모델 인자들을 적용하였다. 전기차 보급량 및 배터리 종류의 변화를 포함하여 배터리 용량, 수명과 양극재 원료 함량에 대한 배터리 제품 인자를 반영하였다. 배터리 재활용에 연관된 재이용률, 제조 수율, 배터리 수거율, 재활용 기술·효율 등에 대해서 모델 인자로 고려하였다.

국내에서도 배터리 재활용에 대한 연구가 증가하고 있으나, 재활용원료 물질함량에 대한 정량적 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 국내 지역을 대상으로 2036년까지 재활용원료 함량 비율에 대해서 전망하기 위하여 dMFA 모델을 구성하였고, 국내 여건에 맞는 모델 인자와 데이터를 적용하였다.

3. 연구 방법 및 데이터

3.1. 동적 물질흐름분석 방법

dMFA 모델을 수립하기 위하여 우선 배터리 전과정 프로세스에 대해서 흐름을 분석하였다(Fig. 1). 배터리 원료는 채굴된 후 양극재 제조에 사용되고, 양극재는 배터리 제조에 사용된다. 배터리는 전기차에 사용되면서 축적이 이뤄진다. 축적된 배터리는 사용 후에 ESS에 재사용되거나, 재제조 과정을 통해 전기차에 다시 쓰이게 된다. 재이용·재제조가 되지 않은 사용후 배터리와 제조 과정에서 발생하는 폐스크랩은 최종 재활용

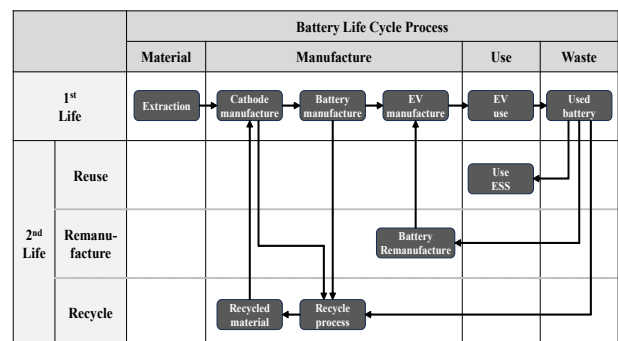


Fig. 1. Battery life cycle process.

되어 양극재 제조에 다시 들어가게 된다. 배터리 생애 전과정 에 물질이 순환되는 것이다.

배터리 전과정 프로세스를 분석한 후, dMFA 모델을 구성 하였다(Fig. 2). 재활용원료 공급량은 전기차 배터리 축적 및 배터리 제조 폐스크랩량에서의 발생을 고려하였다. 전기차 판매에 따른 배터리 축적 단계에서 전기차 연간 판매량, 배터리 용량, 양극재 종류 비중 등을 활용하여 원료 축적량을 산정한다. 배터리 사용 후 재활용 단계에서 재이용되는 배터리를 제외한 사용후 배터리 수거와 재활용 효율을 활용하여 재활용원료량을 산정하였다. 전기차 제조 과정에서 필요로 하는 배터리 원료 수요량과 폐스크랩 발생량을 산정하였고, 재활용원료 공급량을 배터리 원료 수요량으로 나누어 재활용원료 함량비율을 산출할 수 있다. dMFA 모델에 기반한 함량비율을 구하기 위하여 모델인자 간 유기적인 8개 수식을 도출하였다.

재활용원료 공급량은 양극재 축적량(Eq. (1))과 원료 축적량(Eq. (2))을 계산한 후 배터리 수거율과 재이용률을 고려한 사용후 배터리 재활용원료량(Eq. (3))과 양극재 제조 수요량을 토대로 산출한 공정 폐스크랩 재활용원료량(Eq. (4))을 합산하여 도출한다(Eq. (5)).

$$CCS_{i,j,k} = EVS_{i,j} \times EVK_{i,j} \times CCR_{i,j,k} \quad (1)$$

i : 2020~2036년

j : 전기차 차종(EV, BEV, 전기버스, 전기트럭)

k : 양극재 종류(NCM111/523/622/811, NCA, LFP)

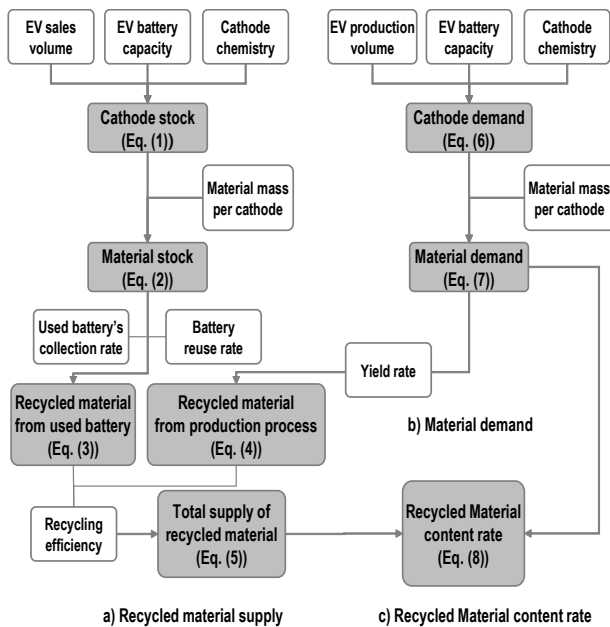


Fig. 2. dMFA model schematic diagram.

$CCS_{i,j,k}$: 양극재 연간 축적량(kWh/yr)

$EVS_{i,j}$: 국내 전기차 연간 판매량(unit/yr)

$EVK_{i,j}$: 배터리 용량(kWh/unit),

$CCR_{i,j,k}$: 양극재 종류 비중

$$MS_{i,j,l} = CCS_{i,j,k} \times MW_{k,l} \quad (2)$$

l : 양극재 원료 종류(코발트, 니켈, 리튬)

$MS_{i,j,l}$: 양극재 원료 연간 축적량(kg/yr)

$MW_{k,l}$: 양극재별 원료 함량(kg/kWh)

$$BR_{i,j,l} = MS_{i-10,j,l} \times CR \times (1 - RU_i) \quad (3)$$

$BR_{i,j,l}$: 사용후 배터리 재활용원료량(kg/yr)

CR : 사용후 배터리 수거율

RU_i : 배터리 재이용률

$$SR_{i,j,l} = MD_{i,j,l} \times (1 - YRB \times YRC) \quad (4)$$

$SR_{i,j,l}$: 공장 폐스크랩 재활용원료량(kg/yr)

$MD_{i,j,l}$: 양극재 원료 연간 수요량(kg/yr)

YRB : 배터리 제조 수율, YRC : 양극재 제조 수율

$$RMS_{i,j,l} = (BR_{i,j,l} + SR_{i,j,l}) \times RE_l \quad (5)$$

$RMS_{i,j,l}$: 총 재활용원료 공급량(kg/yr)

RE_l : 양극재 원료별 재활용 효율

배터리원료 수요량은 국내 전기차 생산량에 기반하여 양극재 제조 수요량(Eq. (6))을 산출한 후, 양극재별 원료함량을 고려하여 산출한다(Eq. (7)). 재활용원료 함량비율은 배터리 재활용원료 공급량을 배터리원료 수요량으로 나누어 산출한다(Eq. (8)).

$$CCD_{i,j,k} = EVP_{i,j} \times EVK_{i,j} \times CCR_{i,j,k} \quad (6)$$

$CCD_{i,j,k}$: 양극재 연간 제조 수요량(kWh/yr)

$EVP_{i,j}$: 국내 전기차 생산량(unit/yr)

$EVK_{i,j}$: 배터리 용량(kWh/unit)

$$MD_{i,j,l} = \frac{CCD_{i,j,k} \times MW_{k,l}}{YRB \times YRC} \quad (7)$$

l : 양극재 원료 종류

$MD_{i,j,l}$: 양극재 원료 연간 수요량(kg/yr)

$CCD_{i,j,k}$: 양극재 연간 제조 수요량(kWh/yr)

YRB : 배터리 제조 수율, YRC : 양극재 제조 수율

$$MRC_{i,j,l} = \frac{RMS_{i,j,l}}{BMD_{i,j,l}} \quad (8)$$

$MRC_{i,j,t}$: 양극재 재활용원료 사용비율

$BMD_{i,j,t}$: 배터리 제조 원료 연간 수요량(kg/yr)

$RMS_{i,j,t}$: 총 재활용원료 공급량(kg/yr)

3.2. 분석 데이터

연구 모델에 필요한 데이터는 선행연구 논문, 민간 연구자료와 정부 정책자료를 통하여 수집하였다. 모델 인자 중 전기차 보급은 국내 정책(KP), IEA STEPS와 IEA APS까지 3가지 시나리오로 구성하였다. 수집한 데이터를 dMFA 모델에 적용하여 코발트, 리튬, 니켈에 대한 함량비율을 산출하였다 (Table 1).

4. 연구 결과 및 고찰

dMFA 분석을 통해서 코발트, 니켈, 리튬에 대한 재활용원료 함량비율 전망을 도출하였다. 코발트의 재활용원료 함량비율은 2031년 14.7~15.1%, 2036년 17.9~18.9%로 나타났다 (Fig. 3). 코발트는 높은 가격과 채굴 단계에서의 아동 노동 및 온실가스 배출로 인한 ESG 이슈로 미래 원료 수요가 줄어들기 때문에 3가지 금속 중 가장 높은 비율을 나타냈다[17].

Table 1. Model parameter and data

Parameter	Data	References
EV sales forecast	Domestic KP, IEA STEPS, APS	IEA[9]
EV type	(light) BEV, PHEV (heavy) Electric truck, Bus	Korean Government ¹⁾
Battery capacity	Applied by types of BEV/PHEV/Truck/Bus	Dunn et al.[6] Abdelbaky et al.[8]
Battery lifespan	10 years to all types	Wesselkämper et al.[4]
Material content	Content of Co/Ni/Li by cathode's type	Dunn et al.[6]
Battery reuse rate	55.5% in 2031 58.0% in 2036	SNE research[10]
Yield rate of manufacturing	Cell 95.0% Cathode 92.2%	
Used battery collection rate	95% considering mandatory collection and battery loss	SNE research[10] Dunn et al.[6]
Recycling efficiency ²⁾	Co 98%, Ni 98%, Li 90%,	Dai et al.[11]

1) Korean Government[2,12]; MOLIT[13]; MOTIE[14-16].

2) Applying the efficiency of hydrometallurgy.

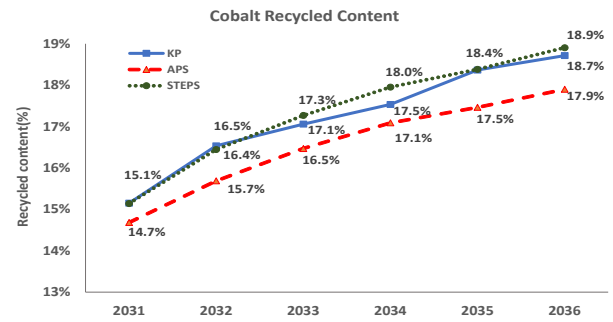


Fig. 3. Cobalt's recycled content forecast.

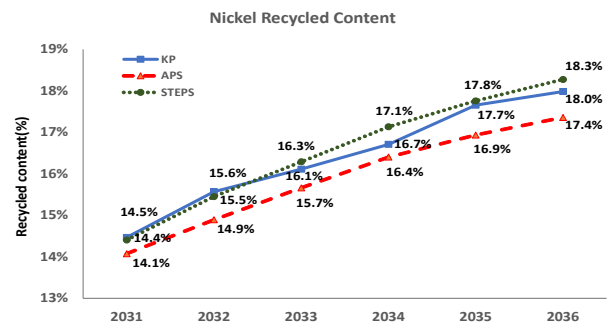


Fig. 4. Nickel's recycled content forecast.

니켈의 재활용원료 함량비율은 2031년 14.1~14.5%, 2036년 17.4~18.3%로 나타났다(Fig. 4). 코발트 대비 함량비율이 낮았고, 이는 장기적으로 높은 에너지밀도를 요구하면서 하이 니켈 제품 비중이 높아지기 때문이다.

리튬의 재활용원료 함량비율은 2031년 13.1~13.5%, 2036년 15.6~16.4%로 나타났다(Fig. 5). 리튬은 다른 원료와 비교했을 때 함량비율이 상대적으로 낮았다. LFP 배터리의 시장 점유율이 올라가면서 코발트와 니켈의 사용량은 줄어들지만, 리튬 사용은 줄지 않기 때문이다.

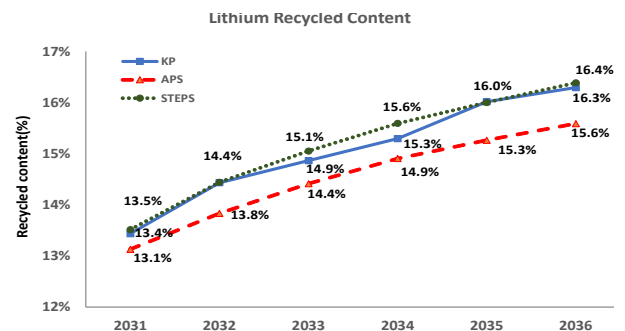


Fig. 5. Lithium's recycled content forecast.

Table 2. Comparison with EU battery regulation

Year	Material	Min. (%)	Avg. (%)	Max. (%)	EUBR (%)
2031	Cobalt	14.7	15.0	15.1	16.0
	Nickel	14.1	14.3	14.5	6.0
	Lithium	13.1	13.4	13.5	6.0
2036	Cobalt	17.9	18.5	18.9	26.0
	Nickel	17.4	17.9	18.3	15.0
	Lithium	15.6	16.1	16.4	12.0

EU 배터리규제에서 요구하는 재활용원료 의무 함량 비율과 비교한 결과, 코발트는 EU가 요구하는 2031년 16.0%와 2036년 26.0%를 충족하지 못하는 것으로 나타났다(Table 2). 니켈과 리튬은 의무 함량 비율을 만족하고는 있으나, 2031년 대비 2036년에는 차이가 줄어드는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구는 동적 물질흐름분석을 활용해 국내 전기차 재활용원료 함량비율 전망을 알아보고자 하였다. 분석 결과, 코발트는 EUBR이 정한 의무 함량비율을 규제 도입 시기까지 달성하기 어려울 것으로 예측되었다. 니켈과 리튬의 경우, 의무 함량비율과의 차이가 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 EU 배터리규제에 대비해 한국 자동차 및 배터리 산업이 재활용원료를 확보하기 위한 선제적인 노력이 필요함을 시사한다. 특히, 재활용원료 공급 및 배터리 원료 수요를 낮추기 위한 다양한 기술적·정책적 방안을 검토할 필요가 있다.

예를 들어, 배터리 원료 수요를 낮추기 위하여 회소금속이 많이 들어가는 NCM 배터리보다 LFP 배터리 사용을 확대하고, 장기적으로 코발트와 니켈 함량이 낮은 양극재 소재에 대한 개발이 필요할 것으로 보인다. LFP 배터리의 경우에는 경제성이 높은 회소금속이 부족하여 재활용이 되지 않고 폐기될 가능성이 높기 때문에, 보급이 늘어날 경우 회수가 안 될 가능성에 대한 대책이 필요하다. 또한, EUBR에 대응하고 재활용원료 공급을 확대하기 위해서 재활용원료에 대한 인증 체계와 재활용원료 경제성을 보완해 줄 인센티브 제도가 필요할 것으로 보인다.

본 연구는 국내 재활용원료의 지속가능한 확보를 위해서 정량적 분석 방법을 제시했다는 데에 의의가 있다. 그러나 한국의 배터리 재활용 시장이 초기 단계에 있고, 전기차 및 배터리 시장이 급변하는 상황에서 외부 변화와 배터리 개별 특성을 반영하는 데는 한계가 있었다. 예를 들어, 전기차 등록말소와

수출말소 비율을 고려한 의무 함량비율 추정을 위해서는 관련 장기 예측 데이터가 필요하나, 해당 데이터를 확보하기 어려웠을 반영하지 못하였다. 또한, EUBR 규제의 세부 시행 규정이 아직 마련되지 않은 현시점에서 해당 규제가 국내에 미칠 파급 효과를 심층적으로 분석하는 데 한계가 있었다. 향후 연구에서는 관련 데이터 및 정보와 함께 보다 다양한 영향 요인을 고려할 필요가 있다. 아울러, 이와 같은 정량분석 결과를 바탕으로 배터리 재활용 활성화 정책에 대한 연구도 지속적으로 요구된다.

사 사

본 연구는 환경부 “기후변화특성화대학원사업”의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Orangi, S., Strømman, A. H. A techno-economic model for benchmarking the production cost of lithium-ion battery cells. *Batteries* 8(8), p. 83 (2022).
- Korean Government. Plan for Establishing Legislation, System, and Infrastructure for the Used Battery Industry Development (In Korean) (2024).
- European Union (EU). Regulation (EU) 2023/1542 (2023). <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/1542/oj>
- Wesselskämper, J., Dahrendorf, L., Mauler, L., Lux, S. and von Delft, S., A battery value chain independent of primary raw materials: towards circularity in China, Europe and the US. *Resources, Conservation and Recycling* 201 (2024). p. 107218.
- Xu, C., Dai, Q., Gaines, L., Hu, M., Tukker, A., Steubing, B. Future material demand for automotive lithium-based batteries. *Communications Materials* 1(1), p. 99 (2020).
- Dunn, J., Kendall, A., Slattery, M. Electric vehicle lithium-ion battery recycled content standards for the US – targets, costs, and environmental impacts. *Resources, Conservation and Recycling* 185, p. 106488 (2022).
- Shafique, M., Rafiq, M., Azam, A., Luo, X. Material flow analysis for end-of-life lithium-ion batteries from battery electric vehicles in the USA and China. *Resources, Conservation and Recycling* 178, p. 106061 (2022).

8. Abdelbaky, M., Peeters, J. R., Dewulf, W. On the influence of second use, future battery technologies, and battery lifetime on the maximum recycled content of future electric vehicle batteries in Europe. *Waste Management* 125, pp. 1-9 (2021).
9. International Energy Agency (IEA). *Global EV Outlook 2024* (2024). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
10. SNE Research. *Final Report on Battery and EV Market Analysis and Recycling of End-of-Life Batteries* (In Korean) (2023).
11. Dai, Q., Spangenberg, J., Ahmed, S., Gaines, L., Kelly, J. C., Wang, M. *EverBatt: a closed-loop battery recycling cost and environmental impacts model* (2019). <https://www.osti.gov/biblio/1530874>
12. Korean Government. *Strengthening the Industrial Competitiveness of Secondary Batteries's Entire Value Chain* (In Korean) (2023).
13. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (MOLIT). *Cumulative Number of Registered Vehicles: 25.76 million* (In Korean) (2023).
14. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). *Automotive Industry Trends for December and Full Year 2021* (In Korean) (2022).
15. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). *Automotive Industry Trends for December and Full Year 2022* (In Korean) (2023).
16. Ministry of Trade, Industry and Energy (MOTIE). *K-cars Set An All-Time Record with \$70.9 Billion in Exports Last Year* (In Korean) (2024).
17. Savinova, E., Evans, C., Lèbre, É., Stringer, M., Azadi, M., Valenta, R. K. Will global cobalt supply meet demand? The geological, mineral processing, production and geographic risk profile of cobalt. *Resources, Conservation and Recycling* 190, p. 106855 (2023).

