

新規方法論によるカーボンナノチューブベースリチウム二次電池の開発と環境影響評価

The concurrent development and environmental impact assessment of carbon nanotube-based Li secondary batteries using a new framework

Tomotaro Mae, Department of Applied Chemistry, Waseda University

前 智太郎, 早稲田大学, 応用化学科

Email: t.mae@aoni.waseda.jp

Achieving carbon neutrality requires not only the development of superior battery performance but also the assessment of environmental impacts. However, in academic research, technology development and environmental impact assessment are practiced separately. To address this issue, a new framework for the concurrent development and assessment was constructed to develop Li secondary battery with the enhancement of battery performance and the reduction of environmental impact. In this approach, lightweight, flexible, and good conductive carbon nanotube (CNT) three-dimensional current collectors and partial prelithiation were employed. These enabled CNT-based SiO-NCM ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$) full cells to achieve high energy density based on the total electrode mass. In contrast, life cycle assessment (LCA) indicated that the greenhouse gas (GHG) emissions reached 221 kg-CO₂eq/kW h-pack, representing a 57% increase compared to those of a conventional Li-ion battery (140 kg-CO₂eq/kW h-pack). The hotspots were identified as the prelithiation process and the associated electricity consumption of the dry room, resulting from a high electrolyte-to-SiO mass ratio (E/SiO, 20 $\mu\text{L}/\text{mg}_{\text{SiO}}$) and a long prelithiation time (24 h). To mitigate this issue, the prelithiation conditions were investigated using half-cell measurements, and the optimum conditions were determined to be an E/SiO ratio of 6.9 $\mu\text{L}/\text{mg}_{\text{SiO}}$ and a prelithiation time of 4 h. CNT-based SiO-NCM full cells under the optimized conditions achieved high energy densities of 346–377 W h/kg_{electrode} at the 300th cycle under 0.45 mA/cm². Furthermore, LCA showed that GHG emissions under the optimized conditions showed 168 kg-CO₂eq/kW h-pack, representing a 24% reduction compared to previous prelithiation conditions.

カーボンニュートラル社会実現には、優れた電池性能開発だけでなく、環境影響評価も重要である。しかし学術研究では、技術開発と環境影響評価が独立して実施されているのが現状である。この課題を解決するため、電池性能向上と環境負荷低減を両立する Li 二次電池を開発するために同時並行で開発・評価する新たなフレームワークを構築した。本手法では、軽量・柔軟性・良導電性を有するカーボンナノチューブ (CNT) 三次元集電体と部分的プレリチオ化法を採用した。これにより CNT ベース SiO-NCM ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{O}_2$) 全電池は、総電極質量基準で高エネルギー密度を達成した。一方、ライフサイクルアセスメント (LCA) により、温室効果ガス (GHG) 排出量が 221 kg-CO₂eq/kWh-pack に達し、現行リチウムイオン電池 (140 kg-CO₂eq/kWh-pack と比較して 57%の増加を示した。ホットスポットは、プレリチオ化プロセスおよびこれに伴うドライルームの電力消費であり、これは高い電解液量と SiO 質量の比率(E/SiO 比、20 $\mu\text{L}/\text{mg}_{\text{SiO}}$)と長い処理時間(24 時間)に起因する。この問題を緩和するため、半電池測定を用いてプレリチオ化条件を調査し、E/SiO 比 6.9 $\mu\text{L}/\text{mg}_{\text{SiO}}$ 、プレリチオ化時間 4 時間が最適条件であると分かった。最適化された条件下での CNT ベースの SiO-NCM 全電池は、0.45 mA/cm² 条件下で 300 サイクル目に 346–377 W h/kg_{electrode} という高いエネルギー密度を達成した。さらに、LCA により、最適化された条件下での GHG 排出量は 168 kg-CO₂eq/kW h-pack であり、従来のプレリチオ化条件と比較して 24%の低減が明らかになった。