

研究論文

リン添加シリコン負極を用いたリチウムイオン二次電池の高性能化

野村英生*, †佐藤慶介*

High performance of lithium-ion batteries with phosphorus-doped silicon anodes

by

Hidetaka NOMURA*, †Keisuke SATO*

(Received Jul. 3, 2025; Accepted Oct. 10, 2025)

Abstract

Silicon (Si) has garnered significant interest as a potential anode material for lithium-ion batteries (LIBs) due to its high theoretical capacity. The utilization of Si nanoparticles (SiNPs) has been demonstrated to effectively mitigate volume changes and internal stress during charge–discharge cycles, thereby enhancing battery life. However, the low electrical conductivity of Si persists as a significant challenge. In this study, we propose a method to enhance both conductivity and electrochemical performance by using Si sludge powder, an industrial waste from semiconductor manufacturing, as the raw material. Through a series of steps involving ball milling and phosphorus (P) doping, P-doped SiNPs were synthesized. The resulting anode demonstrated enhanced conductivity, substantial initial capacity, and sustained capacity exceeding 1000 mAh⁻¹ following 100 cycles. These findings suggest that P-doping of SiNPs derived from Si sludge is a promising and environmentally friendly strategy for developing high-capacity, long-cycle-life Si-based LIB anodes.

Keywords: silicon-based lithium-ion batteries, silicon sludge powder, silicon nanoparticles, phosphorus-doping

1. 緒言

リチウムイオン電池（LIB）は、電気自動車、スマートフォン、エネルギー貯蔵システムなど、現代技術に不可欠な存在となっている¹⁾。これらの電池の利用が広がる中で、更なる普及を支えるためには、低コストかつ高性能な LIB の開発が必要不可欠である。LIB の需要が高まり続ける中、グラファイトが依然として主要な負極材料として使われている。しかし、グラファイトの理論容量（372 mAh g⁻¹）は低く、電池性能の更なる向上を妨げている²⁾。このグラファイトが抱えている課題を克服するため、ここ数 10 年にわたって代替負極材料の研究が盛んに行われてきた³⁾。

シリコン（Si）は、次世代 LIB の有望な負極材料として

令和 7 年 7 月 3 日受付

* 東京電機大学工学研究科電気電子工学専攻：東京都足立区千住旭町 5 番
TEL 03-5284-5120
satok@mail.dendai.ac.jp
Department of Electrical and Electronic Engineering, Tokyo Denki University: 5 Senju-Asahi-cho, Adachi-ku, Tokyo 120-8551, Japan

†:連絡先/Corresponding author

大きな注目を集めている。Si は、約 0.4 V vs. Li/Li⁺ という低い動作電位と、4200 mAh⁻¹ という極めて高い理論容量を併せ持ち、次世代高容量 LIB 負極として魅力的な特性を有する⁴⁾。しかし、Si は充放電サイクル中に約 300%以上の体積膨張を伴い、粒子の亀裂や構造崩壊、さらには固体電解質界面（SEI）膜の不安定化を引き起こす⁵⁾。これにより、容量劣化や電池寿命の著しい低下が生じ、実用化への大きな障壁となっている。また、導電性の向上も Si 負極の性能改善において重要な課題である。Si は本質的に低導電性材料であり、レート特性を制限する⁶⁾。

Si 負極の課題が明らかになっている中、Si ナノ粒子（SiNPs）として粒径を 150 nm 以下に制御することで、体積変化に伴う Si 粒子内部と表面付近の応力差を緩和し、サイクル安定性を向上させることが可能であると報告されている⁵⁾。そして、ドーピングによって Si の導電性を向上させる研究が進んでおり、特にリン（P）ドーピングは、電子伝導性の顕著な向上が期待できるアプローチとして注目されている⁷⁾。P 添加 Si は、n 型半導体特性を付与すること