

材料・デバイスの持続可能な製造と利用

研究代表者 野田 優
(先進理工学部 応用化学科 教授)

1. 研究課題

ナノテクノロジーは広範な技術革新が可能と十数年来期待され、素晴らしい材料・デバイスが実験室規模で沢山生み出されてきた。反面、実用は未だ限定的とされ、実用的な規模とコストでの製造が本格的実用化の鍵となる。化学工学は生産の工学だが、ナノ材料に関しては微細構造制御とスケールアップの両立に必ずしも成功していない。本プロジェクト研究では、その両立を目指しプロセス開発を中心に推進する。具体的には、カーボンナノチューブ(CNT)を対象に、蓄電デバイス、薄膜デバイス、電子デバイス向け、流動層による長尺 CNT の大量合成、浮遊触媒法による高結晶性 CNT の連続合成、担持触媒法によるデバイス基板上 CNT 合成と、カスタム合成法を開発する。さらに多孔質シリコンの急速蒸着と蓄電応用、大粒径多結晶シリコン膜の急速蒸着と太陽電池応用など、シリコン材料・製膜技術も開発する。合成と応用を同時に進めることで「役立つものを実用的につくる」とともに、産学協働により技術開発と移転をシームレスに推進する。

2. 主な研究成果

・ 使用済みリチウムイオン電池の電極材料の直接リサイクル:

リチウムイオン電池(LIB)は自動車の電動化や再生可能電力の平準化など、カーボンニュートラル社会の実現に向けて大きな期待を集め、利用が急拡大している。しかし、LIBは製造時のエネルギー・環境負荷が大きく、また Co, Ni, Li などの希少資源を多く必要とする。現状、LIBの一部しかリサイクルされておらず、そのリサイクル技術の確立は LIB の持続可能な利活用に不可欠となっている。

現行の LIB では、Co, Ni, Li などを用いる正極材の環境負荷と資源制約が大きく、そのリサイクルが精力的に検討されている。現状、冶金的な乾式精錬や薬剤を用いた湿式精錬により希少元素の回収が進められているが、LiFePO₄やLiMnO₂などの Co レスの正極材への移行に伴い経済性が悪化するとされる。そのため、劣化した正極材を活性な正極材へ再生する、直接リサイクル技術が精力的に研究されている。膨大な文献情報を調査、整理・解析し、今後の課題と方向性を展望したレビュー論文を、ハイインパクトジャーナルである Materials Science and Engineering: R: Reports 誌 (IF=31.6)に発表した (研究業績 2)。

一方で負極に用いられる黒鉛の資源の持続性も大きく問われている。劣化 LIB 中の黒鉛負極材は層間や表面に不活性なリチウムが残留し、積層構造も乱れている。そこで簡易な直接再生方法の開発とその環境影響評価に取り組んだ。(i) 1 M 酢酸+熱処理(窒素ガス中 800 °C, 1 h)、(ii) 6 M KOH 水溶液処理、および(iii)熱処理+水洗を実施し、Li 回収量および再生黒鉛の負極性能を調査した。劣化黒鉛は 120 mAh/g と低容量だが、再生黒鉛は順に 328, 325, 338 mAh/g と、市販黒鉛負極材の 345 mAh/g に近い高容量を示した。ライフサイクルアセスメント(LCA)によりこれら三つの処理

法をスケールアップした際の環境影響を評価、それぞれ 0.49, 3.53, 0.27 kgCO_{2e}/kgGr の値を得た。特に(ii) 6 M KOH は過剰に用いる KOH の環境負荷が大きく、(i) 1 M 酢酸は環境負荷低減と Li 回収に有効であり、(iii) 800 °C 熱処理+水洗は最も低負荷で黒鉛を再生できることが分かった。これらの成果をまとめた原著論文を、ハイインパクトジャーナルである Journal of Materials Chemistry A 誌(IF=10.7) に発表した (研究業績 3)。

・ 軽元素を用いた高容量リチウム-硫黄電池の環境影響評価：

金属 Li を負極に、硫黄 S を正極に用いた Li-S 電池は、活物質基準で 2510 Wh/kg という非常に高いエネルギー密度を有すが、従来の電池構造では過剰な電解液や Li 箔、およびバインダーや金属箔集電体などの補助部材が必要で、実用性能に課題を抱える。我々は CNT スポンジ膜に多硫化リチウムを担持した Li₂S₈-CNT 正極により電極の軽量化と電解液の大幅削減を実現し、薄い Li 箔を負極に用いることでセル内容物総質量基準で初期 400–500 Wh/kg、97 サイクルで 300 Wh/kg の高エネルギー密度を達成した (Y. Yoshie, et al., Carbon 182, 32-41 (2021))。この技術では正極材を資源豊富な軽元素である硫黄に置き換えることで環境負荷低減も期待できるが、定量的な議論が欠かせない。

そこで我々は cradle-to-gate LCA による環境影響の定量評価に取り組んだ。Cu 箔と Al 箔を用いたセル構造では 105 kgCO_{2e}/kWh の温室効果(GWP)が見込まれるが、CNT 集電体による金属箔の 1/10 への低減で 87 kgCO_{2e}/kWh へ、Li 金属箔の膜厚低減で 82 kgCO_{2e}/kWh へ、Li₂S₈ 担持時の溶媒削減で 78 kgCO_{2e}/kWh へと、負荷低減が見込まれた。次に正極起因の環境負荷を見積もった。現行の NMC 正極の 40.7 kgCO_{2e}/kWh うち、NMC 正極材の製造が 36.9 kgCO_{2e}/kWh と 9 割を占める。正極材を多硫化リチウムに置き換えると原料の硫黄と硫化リチウムの GWP は 0.3 と 1/100 まで低減できる。一方で、CNT や溶媒の利用と乾燥工程の増大により正極としては 4 割の 14.9 kgCO_{2e}/kWh への低減にとどまるが、溶媒量削減やリサイクル、ろ過による乾燥工程の代替により 8.7 kgCO_{2e}/kWh へと低減し得ることが分かった。これらの成果をまとめた原著論文を、ハイインパクトジャーナルである Sustainable Production and Consumption 誌(IF=10.9)に発表した (研究業績[6])。

3. 共同研究者

花田 信子 (応用化学科・准教授)

平尾 雅彦 (応用化学科・客員教授)

Zih-Ee LIN (理工学術院総合研究所・次席研究員)

Jianghua Lang (理工学術院総合研究所・次席研究員)

Yuli WEN (理工学術院総合研究所・次席研究員)

並木 克也 (理工学術院総合研究所・研究助手)

Subramanian Natarajan (日本学術振興会・外国人特別研究員)

TEAH, Heng Yi (東京大学・「プラチナ社会」総括寄付講座・特任講師)

塩見 淳一郎 (東京大学・工学系研究科・教授)

Joey D. Ocon (University of the Philippines, Diliman, Professor)

Dr. Ivar Kruusenberg (University of Tartu, Estonia)

4. 研究業績

4.1 学術論文

(全て査読付き英語論文、*責任著者、◎国際共著論文)

1. Y. Kobayashi*, S. Miyakoshi, L. Murakami, K. Utada, S. Noda, and N. Hanada*, "Hydrogen production from liquid ammonia electrolysis using a high entropy alloy catalyst composed of IrRhRuCoNi," *ACS Appl. Energy Mater.* **8**, 3301-3313 (2025). DOI:10.1021/acsaem.4c01198
2. S. Natarajan* and S. Noda*, "Advancements in direct recycling technologies for lithium-ion battery cathodes: Overcoming challenges in cathode regeneration," *Mater. Sci. Eng. R* **164**, 100976 (2025). DOI:10.1016/j.mser.2025.100976
3. S. Natarajan*, T. Mae, H.Y. Teah, H. Sakurai, and S. Noda*, "Environmentally friendly regeneration of graphite from spent lithium-ion batteries for sustainable anode material reuse," *J. Mater. Chem. A* **13**, 4984-4993 (2025). DOI:10.1039/D4TA07618D
4. ◎M. Divinagracia-Luzadas*, K. Kaneko, K. Hori, J.A. Paraggua, S. Noda, J. Ocon, "Synthesis and evaluation of self-supporting graphitic carbon nitride/carbon nanotube (GCN/CNT) ORR/OER electrodes in aqueous and non-aqueous media," *Curr. Appl. Phys.* **71**, 14-26 (2025). DOI:10.1016/j.cap.2024.12.001
5. H. Chandra, S. Sasano, B. Xu, R. Ishikawa, S. Noda, N. Shibata, and J. Shiomi*, "Modulating the cross-plane thermal conductivity of graphite by MnCl₂ and FeCl₃ co-intercalation," *J. Mater. Chem. A* **12**, 23848-23858 (2024). DOI:10.1039/D4TA03644A
6. H.Y. Teah*, Q. Zhang, K. Yasui, and S. Noda*, "Life cycle assessment of lithium-sulfur batteries with carbon nanotube hosts: Insights from lab experiments," *Sustain. Prod. Consum.* **48**, 280-288 (2024). DOI:10.1016/j.spc.2024.05.022 (open access)
7. K. Yoshida, S. Noda*, and N. Hanada*, "Heat supply to and hydrogen desorption from magnesium hydride in a thermally insulated container with hot gas flow," *Chem. Eng. J.* **491**, 152070 (2024). DOI:10.1016/j.cej.2024.152070 (open access)
8. ◎R. Raudsepp, K.-K. Turk, E. Zarmehri, U. Joost, P. Rauwel, R. Saar, U. Maeorg, A. Dyck, M. Bron, Z. Chen, S. Noda, I. Kruusenberg*, and K. Tammeveski, "Boron and fluorine co-doped graphene/few-walled carbon nanotube composite as highly active electrocatalyst for oxygen reduction reaction," *ChemNanoMat* **10**, e202300546 (2024). DOI:10.1002/cnma.202300546

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

1. ○Suguru Noda, "Concurrent development and assessment of nanotube and battery technologies for sustainability," 14th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment, Fengcheng International Hotel, Jincheng, Shanxi Province, China Oct. 26-28, 2024 (invited).
2. ○野田 優 「様々な系におけるナノ構造形成とプロセス-構造相関」 化学工学会第55回秋季大会, B104, 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市, 2024年9月11日 (invited).
3. ○野田 優 「化学工学者の効率性から充足性への展開：ナノチューブ、電池、持続可

能性」新潟地方化学工学懇話会 55 周年記念講演会, 新潟県新潟市, 2024 年 5 月 29 日 (invited).

4.4 受賞・表彰

1. ○立花 桜子, 蓮實 直海, 大沢 利男, 野田 優 「攪拌によるカーボンナノチューブの低損傷分散と透明導電膜への応用」 "Low-damage dispersion of carbon nanotubes via stirring for transparent conductive films," 化学工学会第 90 年会, PE358, 東京理科大学 葛飾キャンパス, 東京都葛飾区, 2025 年 3 月 14 日 (優秀学生賞).
2. ○佐藤 翔太, 吉田 啓佑, 野田 優, 花田 信子「アーク放電による Mg 微粒子のフロー合成と水素吸蔵特性の評価」 日本金属学会 「水素が関わる材料科学の課題共有研究会」, あいちシンクロトロン光センター, 愛知県瀬戸市, 2024 年 11 月 20-21 日 (優秀若手表彰(ポスターの部)).
3. ○本橋 大輔, Wen Yuli, 並木 克也, 大沢 利男, 野田 優 「流通式反応器による CO₂ 吸収型コンクリートの炭酸化速度測定と水分量に着目した解析」 化学工学会宇都宮大会 2024 D119, 宇都宮大学陽東キャンパス, 栃木県宇都宮市, 2024 年 11 月 7 日 (学生奨励賞).
4. ○並木 克也, 亀田 博之, 原 啓史, 野田 優 「CO₂ 吸収型コンクリートの炭酸化速度の添加率依存性と速度解析」 化学工学会第 55 回秋季大会, C318, 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市, 2024 年 9 月 13 日 (注目講演・プレスリリース) (CCUS 検討委員会シンポジウム 奨励賞 & 企業賞: 東レ株式会社).
5. ○佐藤 翔太, 吉田 啓佑, 野田 優, 花田 信子「アーク放電による Mg 微粒子のフロー合成と水素吸蔵放出特性の評価」 2024 年度水素若手研究会, 北海道大学 札幌キャンパス, 北海道札幌市, 2024 年 9 月 2-3 日 (優秀学生賞).

4.5 学会および社会的活動

1. The 24th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT24), MIT, Cambridge/Boston, MA, USA, June 23-28, 2024
Symposium on thin films, fibers, 3D materials and their properties 筆頭チェア.
2. フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会 副会長.
3. 日本学術会議 連携会員.
4. 化学工学会 SDGs 検討委員会副委員長, 国際交流センター運営委員, 戦略企画委員会委員など

5. 研究活動の課題と展望

2024 年度より新しいプロジェクト研究「材料・デバイスの持続可能な製造と利用」を開始した。持続可能性のためには、環境への調和、再生可能エネルギーの利活用、および資源の循環利用が欠かせない。そのためには社会での技術利用のシナリオを描き、既存技術を組み合わせつつ、足りない技術を開発し、システムとして実装する必要がある。また、新技術、システムの開発のみならず、それらの社会実装時の環境、エネルギー、資源への影響を客観的・定量的に評価し、現状や他の技術・システムとの比較も欠かせない。引き続き「持続可能性のための持続可能なものづくり」を目指

し、技術の開発と評価の両輪の試みを、科研費などの公的プロジェクトおよび民間企業との産学共同研究により積極的に推進する。