

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

地球温暖化をはじめ環境破壊や資源枯渇が深刻となり、現代社会の持続可能性が問われている。多様な問題の間にはトレードオフもあり、一つの問題解決では全体の解決にはならない。これまでの材料・デバイス研究は単一指標の向上が中心であったが、長期的に持続可能なビジョンを考え、それに至るシナリオと実現手段の研究開発が重要となる。一方で、ものづくりは環境負荷および資源消費も引き起こす。技術の正と負の両面を客観的・定量的に評価し、負の影響を下げて正の効果を高める努力も欠かせない。本プロジェクト研究では再生可能エネルギーの導入拡大を目的に、特に再エネの平準化に重要な蓄電池の環境負荷低減と性能向上に取り組む。炭素やケイ素など資源豊富な軽元素をもちいた材料・デバイスの低環境負荷製造とリサイクル技術を開発するとともに、ライフサイクルアセスメント(LCA)による技術評価と、その結果の技術開発へのフィードバックを進め、持続可能性のための持続可能なものづくりを探求する。

2. 主な研究成果

- ・ 豊富なケイ素と硫黄を用いたリチウムイオン電池の開発：
再生可能エネルギーの利活用やモビリティの電動化に重要なリチウムイオン電池(LIB)を対象に、高い容量密度と良好なサイクル特性を両立する一酸化ケイ素(SiO)の LIB 負極利用に不可欠なプレリチオ化法を検討した。SiO は黒鉛負極に少量添加する形で実用化が始まっているが、SiO を主成分とした高容量負極の実現には未だ課題が多い。SiO は充放電の初期に多量の Li を消費してリチウムシリケートおよび固体電解質界面相を不可逆的に形成するため、電池作製前にリチウムと反応させるプレリチオ化が不可欠である。我々は、SiO 負極と Li 箔の直接接触法を対象に、各段階に適合する電解液を調査、物理的および化学的工工程を分けて解析し、両者を独立制御したプロセスを開発した。加えてプレリチオ化 SiO 負極と高容量硫黄(S)正極の組み合わせによる全電池動作も実現した。(研究業績・学術論文[2,5])
- ・ 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：
カーボンニュートラル達成には再生可能電力の主電源化が不可欠であり、そのためには大規模蓄電技術が欠かせない。リチウムイオン電池(LIB)への期待は大きいですが、LIB 製造時のエネルギー消費と環境負荷が大きく、Co や Li などの資源制約もある。使用済み LIB から希少元素を回収する乾式精錬や湿式精錬によるリサイクルが一部で始まっているが、Co などレアメタルの使用量を減らした各種の正極材では資源回収の経済性を失ってしまう。そこで元素・原料としてではなく、結晶構造を壊さずに正極材へと直接再生する直接リサイクルが注目され、正極材の種類ごとに技術開発が進められている。先進国での電気自動車(EV)用 LIB など

はメーカーによる単一種の回収も可能と考えられるが、一方で、汎用民生品は各種 LIB が混ざって廃棄されるため、種類ごとの分離と再生がさらに難しい。LIB の導入が急拡大する中、LIB の不適切な廃棄によるごみ処理場の火災も頻発しており、使用済み LIB のリサイクル技術の確立は喫緊の課題である。本研究では、混合廃棄された LIB 正極材の低環境負荷で省エネルギーで経済性を有す直接リサイクルに取り組む。混合系では実験条件が膨大になるため効率的な実験も不可欠である。代表者独自の、電極材とカーボンナノチューブ(CNT)の分散・ろ過による自立膜電極作製法により、従来法の 1/1000 量の数ミリグラムの正極材でコインセルを作製し、多様な再生条件を効率的に検討している。(三菱財団・自然科学研究助成(一般助成)「混合廃棄リチウムイオン電池の直接リサイクル技術の開発」2025年6月採択)

・ 効率的なグリーン水素製造と廃水浄化を目指した基質アシスト水電解：

太陽光や風力など再生可能エネルギーの余剰電力の有効活用を目指し、水電解によるグリーン水素製造と、燃料電池による発電が盛んに研究されている。水の理論電解電圧と水素燃料電池の理論起電力はともに 1.23V だが、実用上は過電圧のために電解電圧は 1.6V 以上、起電力は 0.8V 以下となり、電力→水素→電力に変換するだけで使える電力は半分以下になる。アルカリ水電解は安価な触媒を利用でき大規模化が容易だが、アノードの酸素発生反応の過電圧が高い。そこでメタノールなどの還元剤を併用してアノード電圧を下げる基質アシスト水電解が盛んに研究されているが、化学合成した還元剤を用いるとその製造時にエネルギーが消費され電解時に温室効果ガスが排出されてしまう。本研究では、各種廃水中の不純物を燃料とみなし廃水を水電解に用いることで、新たなエネルギー消費と GHG 排出を生じずに水素の省電力製造と廃水の浄化の同時達成を目指している。(科学研究費補助金・挑戦的研究(萌芽)「効率的なグリーン水素製造と廃水浄化を目指した基質アシスト水電解」2025年6月採択)

・ CO₂ 吸収型コンクリートの CO₂ 固定量評価、炭酸化機構解明、および炭酸化促進：

CO₂ 排出削減に向けて開発が進められている CO₂ 吸収型コンクリートの実用化への貢献を目指して研究を実施した。従来型コンクリートの結合材に用いられるポルトランドセメントは、使用時に水和反応により速やかに硬化して優れた機能を発現する反面、製造時に化石燃料の燃焼と石灰石の脱炭酸により多量の CO₂ を排出する。それに対して CO₂ 吸収型コンクリートでは、未利用のカルシウム源を結合材に用いて炭酸化反応により硬化させるが、CO₂ 固定量の正確な評価や遅い炭酸化反応の促進が課題となっている。我々は、既存の固体分析による CO₂ 固定量評価の信頼性を評価、気相の物質収支に基づく CO₂ 吸収量リアルタイム測定法を新たに開発し、さらにセメント材料の炭酸化反応の機構解析とモデル化を行った。(研究業績・学術論文[3,6])

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)

前 智太郎 (応用化学科・講師)

並木 克也 (理工学術院総合研究所・研究助手)

大沢 利男 (理工学術院総合研究所・招聘研究員)

Yuli WEN (理工学術院総合研究所・次席研究員)

Yihua TANG (日本学術振興会・外国人特別研究員)

Arun KARMAKAR (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)

Anantharaj Sengeni (Indian Institute of Technology Kanpur, Assistant Professor)

丸山 茂夫 (東京大学・工学系研究科・教授)

牧 英之 (慶應義塾大学・理工学部・教授)

4. 研究業績

4.1 学術論文

1. N.C. Minj, S. Mittal, S. Yadav, B. Kamaraj, P. Trivedi, S. Saraswat, K. Biswas*, L. Feng*, S. Noda*, and S. Anantharaj*, "High-entropy alloy-catalyzed bifunctional electrocatalysis of H₂ and O₂ involving reactions," *Chem. Mater.* 2026, 38, 8, 3827-3854. [Front Cover](#)
<https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.5c02763>
2. B. Huang, T. Mae, and S. Noda*, "Separate control of electrolyte wetting and prelithiation reaction of silicon monoxide-carbon nanotube anodes for lithium-ion batteries," *J. Phys. Chem. C* 130 (2026) 1450-1463. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5c06939>
3. K. Namiki*, V. Wilson, M. Takase, T. Osawa, and S. Noda*, "Real-time measurement and reaction rate analysis of CO₂ absorption in cementitious materials by gas pressure monitoring using a batch reactor," *J. CO₂ Util.* 102 (2025) 103273.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103273>
4. J.H. Cha*, A. Miura, S. Noda, J. Shiomi, J. Shin, S. Chiashi*, and S. Maruyama*, "Retention of vertically aligned carbon nanotubes enables efficient thermal pathways in PDMS-based composites," *Compos. - A: Appl. Sci. Manuf.* 201 (2026) 109395.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.109395>
5. B. Huang, T. Mae, and S. Noda*, "Proper electrolytes for prelithiation and cell fabrication of a SiO-carbon nanotube sponge anode for lithium-ion batteries," *J. Phys. Chem. C* 129 (2025) 12268-12279. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jpcc.5c01162>
6. K. Namiki*, K. Yamashita, K. Tabara, and S. Noda*, "Comparison and reliability assessment of CO₂ quantification methods for carbonated cementitious materials," *J. CO₂ Util.* 97 (2025) 103140.
<https://doi.org/10.1016/j.jcou.2025.103140>
7. Y. Shimura, S. Matano, J. Yamada, S. Noda, H. Maki*, "Thermal light emitters based on graphene directly grown on chips by etching-precipitation method," *Photonics Nanostruc. Fundam. Appl.* 65 (2025) 101400. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2025.101400>

4.2 総説・著書

なし

4.3 招待講演

1. ○野田 優 「カーボンナノチューブ合成および電池応用技術の開発と環境影響の評価」
"Development and environmental impact assessment of carbon nanotube synthesis and battery application technologies," [第52回炭素材料学会年会](#) 長野市生涯学習センター TOiGO WEST, 長野県長野市, 2025年11月26-28日 (invited).
2. ○Suguru Noda, "Enhancing the sustainability of lithium-ion batteries using carbon nanotubes," [15th A3 symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment](#),

Kitakyushu, Fukuoka, Japan, Nov. 13-15, 2025 (invited).

3. ○ Suguru Noda, "Concurrent development and assessment of carbon nanotube and battery technologies for sustainability," [3rd International Conference on Smart Devices and Sustainable Energy \(2025SDSE\)](#), Ming Chi University of Technology, Taiwan, Oct. 15-17, 2025 (Invited).
4. ○ Suguru Noda, Tomotaro Mae, Heng Yi Teah, "Concurrent development and assessment of carbon nanotube and battery technologies for sustainability," [12th World Congress of Chemical Engineering and 21st Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress \(WCCE12-APCChE2025\)](#), [20 Preparation Theory and Application of Carbonaceous New Materials](#), China National Convention Center, Beijing, China, July 13-18 (2025) (Invited).

4.4 受賞・表彰

1. ○北島 大樹, 前 智太郎, 野田 優 「リチウムイオン電池の LMO-NCM 混合正極の同時直接再生法の開発」 "Development of a Simultaneous Direct Recycling Method for LMO-NCM Mixed Cathodes of Lithium-Ion Batteries," [化学工学会第 91 年会](#), PE375, 京都大学 吉田キャンパス, 京都府京都市, 2026 年 3 月 19 日 ([優秀学生賞](#)).
2. ○金 聖俊, 高 銀, 前 智太郎, 野田 優 「正極材と電解質塩を担持したカーボンナノチューブ膜を用いた Li-S パウチセルの開発」 "Development of Li-S pouch cells using carbon nanotube films preloaded with cathode materials and electrolyte salts," [化学工学会第 91 年会](#), PE352, 京都大学 吉田キャンパス, 京都府京都市, 2026 年 3 月 19 日 ([学生奨励賞](#)).
3. ○佐藤 翔太, 吉田 啓佑, 野田 優, (北大工) 橋本 明賢, 磯部 繁人, 花田 信子 「アーク放電によりフロー合成した Mg 微粒子の構造解析及び水素貯蔵特性評価」 "Hydrogen Storage Properties and Structural Characterization of Mg particles Prepared by Arc-Discharge Flow Synthesis," [化学工学会第 91 年会](#), PE350, 京都大学 吉田キャンパス, 京都府京都市, 2026 年 3 月 19 日 ([優秀学生賞](#)).
4. ○安藤 弘耀, 大沢 利男, 野田 優 「触媒源と炭素源の分離加熱とカーボンナノチューブの気相合成」 "Separate heating of catalyst and carbon sources in gas-phase synthesis of carbon nanotubes," [化学工学会第 91 年会](#), PD347, 京都大学 吉田キャンパス, 京都府京都市, 2026 年 3 月 19 日 ([優秀学生賞](#)).
5. ○秋山 幸輝, 北原 亘, 大沢 利男, 野田 優 「パターン成長とパルス電界印加によるカーボンナノチューブ電界電子エミッタの高性能化」 "Performance enhancement of carbon nanotube field electron emitters through patterned growth and pulsed electric field application," [化学工学会第 91 年会](#), PC275, 京都大学 吉田キャンパス, 京都府京都市, 2026 年 3 月 18 日 ([学生奨励賞](#)).
6. Koyo Ando, Toshio Osawa, and Suguru Noda, "Separate control of catalyst nucleation and carbon nanotube growth in floating catalyst chemical vapor deposition," [15th A3 symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment](#), Kitakyushu, Fukuoka, Japan, Nov. 13-15, 2025 (poster) ([Excellent Poster Award](#)).
7. ○秋山 幸輝, 北原 亘, 大沢 利男, 野田 優 「カーボンナノチューブアレイの階層的構造制御による高性能電界電子エミッタの開発」 "Development of high-performance field emitters through hierarchical structure control of carbon nanotube arrays," [化学工学会八戸大会 2025](#), 青森県八戸市, 2025 年 11 月 13-14 日 ([学生特別賞](#)).
8. ○松岡 啓太, 並木 克也, 大沢 利男, 原 啓史, 森 泰一郎, 野田 優 「高炉スラグ混合セメ

ントの予備水和による活性化と炭酸化速度および機構の解析」 "Activation of blast furnace slag blended in cement through pre-hydration and its carbonation rate and mechanism," [化学工学会八戸大会 2025](#), 青森県八戸市, 2025年11月13-14日 ([学生奨励賞](#)).

○海老名 沙羅, 野田 優, 花田 信子 「Ir 担持カーボンナノチューブ膜電極を用いた水素生成のための水溶液中アンモニア電解」 "Ammonia electrolysis in aqueous solution for hydrogen production using Ir supported carbon nanotube film electrode," [化学工学会八戸大会 2025](#), 青森県八戸市, 2025年11月13-14日 ([学生奨励賞](#)).

9. ○松井 瑠璃, 並木 克也, 大沢 利男, 原 啓史, 野田 優 「CO₂ 吸収型セメント混和材の炭酸化および種結晶の混合による反応速度向上の検討」 [化学工学会第 56 回秋季大会](#), PC109, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス, 東京都江東区, 2025年9月16日 ([優秀発表賞](#)).

○横井 佑哉, 並木 克也, 大沢 利男, 原 啓史, 野田 優 「セメントペーストの炭酸化反応における空隙率と含水率の影響」 [化学工学会第 56 回秋季大会](#), PC126, 芝浦工業大学 豊洲キャンパス, 東京都江東区, 2025年9月16日 ([優秀発表賞](#)).

10. ○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」 "Flow synthesis of Mg fine particles by arc discharge and evaluation of hydrogen storage properties," [第 34 回日本エネルギー学会大会](#), 4-3-1, 東北大学 川内北キャンパス, 宮城県仙台市, 2025年8月7,8日 ([2025年度日本エネルギー学会奨励賞\(第34回年次大会発表\)](#)).

11. Catherine DIKO, °Daiki Kitajima, °Enrique Choccare, and °Rin Ito, (Advisor: Suguru Noda), "Cocoa pod husk (CPH) biomass for rural sustainability in Ghana," [12th World Congress of Chemical Engineering and 21st Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress \(WCCE12-APCChE2025\)](#), [SDGs Special Symposium](#), Group A, China National Convention Center, Beijing, China, July 13-18 (2025) (Best Proposal Award - Gold Prize).

4.5 学会および社会的活動

1. [12th World Congress of Chemical Engineering and 21st Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress \(WCCE12-APCChE2025\)](#), China National Convention Center, Beijing, China, July 13-18 (2025).
[SDGs Special Symposium](#) 筆頭オーガナイザー.
2. [The 25th International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials \(NT24\)](#), Kyoto University, Kyoto, Japan, June 15-20, 2025.
Symposium on thin films, fibers, 3D materials and their properties 筆頭チェア.
3. フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会 副会長.
4. 日本学術会議 連携会員.
5. 化学工学会 SDGs 検討委員会委員, 国際交流センター運営委員, WCEC-APCChE 委員会委員長, 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。