

ナノ材料の実用的合成プロセス開発と応用展開

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、電子デバイスに向け、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

(1) CNT および BNNT の実用合成技術の開発

CNT の合成技術はこの 30 年間に大きく進展したが、高品質な CNT は依然として高価で用途が限られる。当グループでは独自の流動層法により数 100 μm と長尺で触媒不純物量 1 wt%未満と高純度の CNT の 40–70%という高収率合成を実現しているが、触媒の低コスト化が重要である。今回、安価な金属硝酸塩水溶液を原料とした簡易な触媒担持技術を開発し、独自の流動層法により高純度・長尺 CNT の高収率合成を実現した (Fig. 1, 学術論文 17)。また、担持触媒を用いた CNT の合成において、触媒が下地層へと徐々に拡散して減少し CNT 成長が停止する課題がある。当グループ独自の触媒付き基板を通電加熱し気体原料の熱分解を抑える cold-gas CVD 法において、Fe/GdO_x/AlO_y 触媒に Fe(C₅H₅)₂ および Al(OC₃H₇)₃ 蒸気を連続供給して触媒寿命を延ばし、CNT 束の長さ 14 cm への長尺成長を実現した (学術論文 12)。浮遊触媒 CVD 法では個々の触媒から CNT が相互に絡まらずに成長するため高結晶性の CNT が得られるが、触媒密度が低く収量も低いことが課題である。我々は急速加熱冷却ノズルにより Fe(C₅H₅)₂ を急速に熱分解して Fe 触媒粒子形成を高密度に生成、内径 40 mm の小型反応器ながら 28.5 mg/min (1.7 g/h 相当)の高い生産性で高結晶性単層 CNT の合成を実現した (WO 2021/029212 A1, 国際公開日 2021 年 2 月 18 日)。BNNT 合成は CNT 合成の 20 年前の状況にあり、数万円/g と依然として高価である。化学気相成長法で必要となる気体ホウ素原料に安価で安全なものがないことが大きな要因である。当研究室で新たに見出したホウ酸原料の、粉末充填層による昇華供給、およびホウ酸水溶液の超音波霧化供給を実現、どちらの方法でも基板上の BNNT 合成を実現した (特願 2021-039571, 出願日 2021 年 3 月 11 日)。

これらは CNT および BNNT の広範な実用化に通じる成果であり、豊富な軽元素を用いた持続可能なものづくりへと貢献する (特に SDG 目標 9,12)。

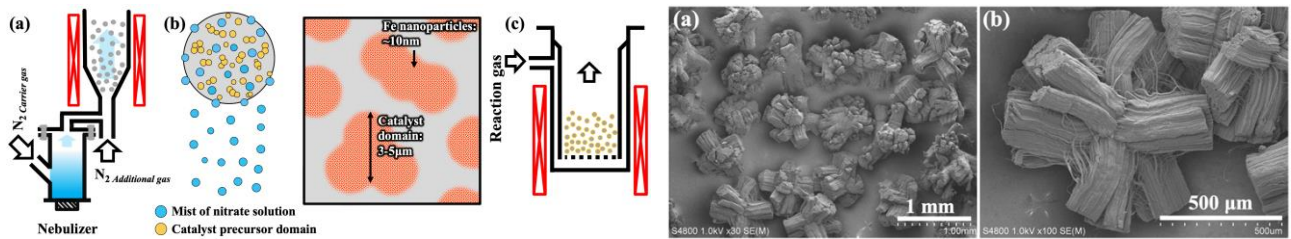


Fig. 1. 高純度・長尺 CNT の実用合成. 左：安価な硝酸塩水溶液を用いた触媒の超音波霧化担持法. 右：流動層法による長さ数 100 μm 、直径数 nm の長尺・短径 CNT（学術論文 17）.

(2) ナノチューブベース・高エネルギー密度二次電池の開発

二次電池では、CNT|BNNT|CNT 積層マトリクスを用いた全電池の開発を進めた。現行リチウムイオン電池で標準のコバルト酸リチウム(LCO)正極と黒鉛負極を用い、LCO-CNT 正極|BNNT セパレータ|黒鉛-CNT 負極スタックを開発、窒素雰囲気下で 500 $^{\circ}\text{C}$ 加熱しても壊れず、電解液を添加すると正常に電池動作することを実証した (Fig. 2, 学術論文 16)。本技術は電極・セパレータスタックに用いる補助材料比率を、現行の高性能電池での 25.0%から 6.4%へと大きく低減し、電池の軽量化・エネルギー密度向上と、低コスト化にも通じる。さらにイオン液体を電解液とし、高温でも充放電可能な活物質を用いることで 100 $^{\circ}\text{C}$ の高温動作も可能となりつつある。また、二次電池開発で国際共同研究も推進した。電池の性能を向上し低環境負荷で製造すべく、各種活物質の活用が研究されている。当グループの CNT スポンジ状膜を三次元集電体とする技術が着目され、複数のグループがその中に活物質を保持することで、高性能な電池電極および電池を開発した（学術論文 3,6,19,23）。さらに CNT スポンジ膜を三次元集電体とした新構造二次電池が特許登録された（日本国特許第 6860125 号）。

これらは、二次電池の性能向上とコスト低減に通じる成果であり、持続可能な脱炭素社会へと貢献する（特に SDG 目標 7,13）。本研究は、科学研究費補助金・基盤研究（S）(JP16H06368)の成果である。

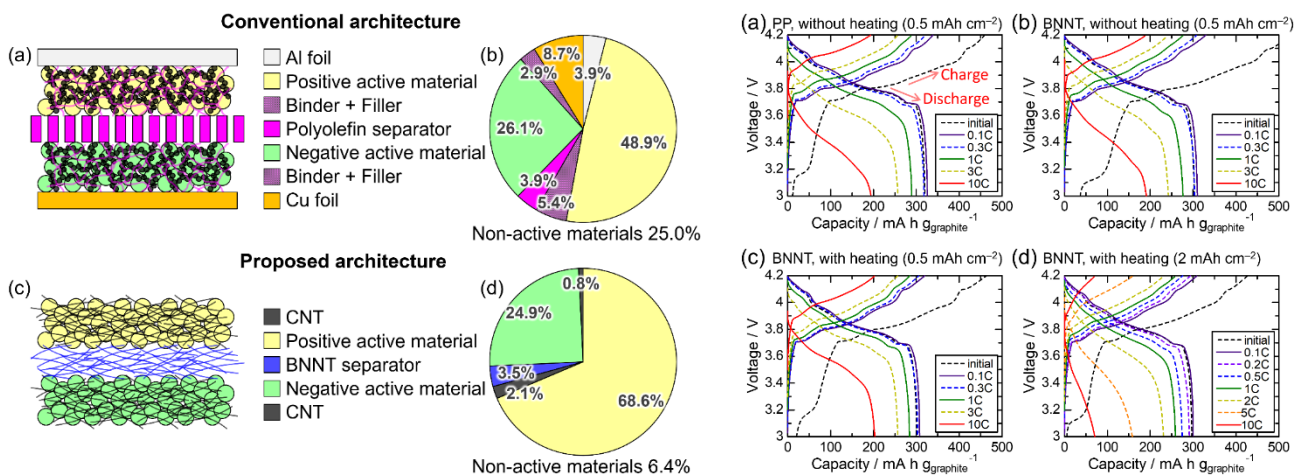


Fig. 2. CNT および BNNT ベースの耐熱軽量電池. 左：現行電池と開発電池の構造および質量分布の比較. 右：加熱前および加熱後の充放電試験結果（学術論文 16）.

(3) 簡易プロセスによる CNT/シリコンヘテロ接合太陽電池の開発

太陽電池では、単層 CNT 透明導電膜と n 型ドーパ結晶シリコン(n-Si)のヘテロ接合太陽電池の開

発に簡易プロセスで取り組んだ。昨年度に開発した、ポリ(p-スチレンスルホン酸) (PSS)を分散剤および p 型ドーパントに用いた簡易な湿式プロセスによる CNT-PSS 透明導電膜は、低抵抗で環境安定性に優れている。この CNT-PSS 膜を n-Si 表面に転写してヘテロ接合を形成、さらに反射防止膜としてナフィオンを塗布することで、14.1%のエネルギー変換効率と良好な安定性を実現した（別添業績・論文 8）。CNT/n-Si の機能化の際、無機材料を用いられればより高い安定性が期待できる。MoO₃は CNT を強く p 型ドープリ CNT/n-Si 太陽電池のエネルギー変換効率向上に有効と知られるが、これまでは真空蒸着法により行われていた。今回、MoO_xの湿式塗布により有機太陽電池の性能を向上する技術に着目、CNT/n-Si 太陽電池に MoO_xの湿式塗布を適用し、10.0%のエネルギー変換効率と良好な安定性を実現した（別添業績・論文 9）。

これらは、太陽電池の低環境負荷製造とコスト低減に通じる成果であり、持続可能な脱炭素社会へと貢献する（特に SDG 目標 7,13）。本研究は、科学研究費補助金・挑戦的萌芽研究(JP25107002)および早稲田大学・特定課題研究 B(2018B-173)の成果である。

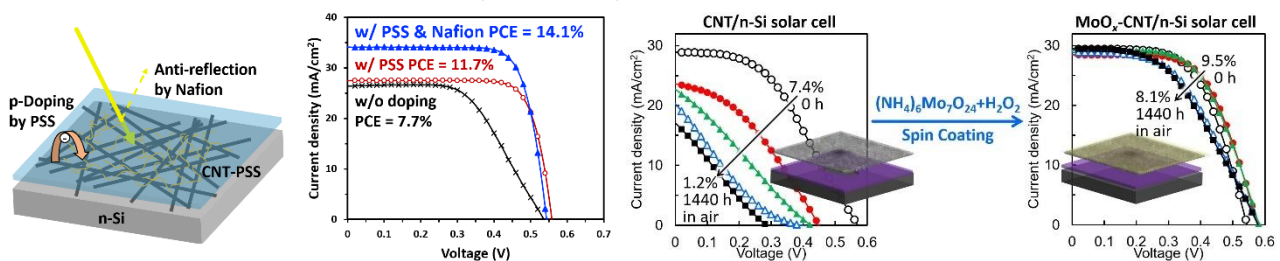


Fig. 3. 簡易プロセスによる CNT/n-Si ヘテロ接合太陽電池. 左：湿式塗布型 CNT-PSS/n-Si 太陽電池（学術論文 8）. 右：湿式塗布型 MoO_x-CNT/n-Si 太陽電池（学術論文 9）.

(4) 水電解による低コスト水素製造のための低コスト電極触媒の開発

再生可能電力を用いた水電解による水素製造は、脱炭素とエネルギーの安定供給の両立への期待が大きい。本格的実用化にはエネルギー変換効率の向上と水素製造コストの低減が欠かせず、安価で高性能な電極触媒の開発が鍵となる。安価で高活性な触媒として遷移金属カルコゲナイトが注目されているが、我々はアルカリ水電解ではカルコゲナイトは触媒前駆体であり、反応中に生成する水酸化物 M(OH)_xや酸水酸化物 MO_x(OH)_yが活性サイトであることを明らかにしてきた。今年度は、ステンレス箔表面から Cr を溶解除去したうえで電気化学還元し Ni および Mn の水酸化物に表面再構成すると高い水素生成活性を示すこと（学術論文 11）、ニッケル硫化物をアルカリ水溶液中で電気化学電位すると表面がアモルファスの NiS_x(OH)_yへと再構成され高い水素生成活性を発現すること（Fig. 4 左, 学術論文 14）、Ni を不純物として含む Cu フォームを 1 mM Fe²⁺を含む 1 M KOH 水溶液中で電気化学酸化すると Ni_xFe_{1-x}OOH ナノニードルが Cu フォーム上に高密度に形成し、高い酸素発生活性を発現すること（Fig. 4 右, 学術論文 15）、CoSe₂を CoSeO₃へと前酸化したうえでその表面を CoOOH へ電気化学酸化すると活性な Co²⁺サイトが増大し高い酸素生成活性を発現すること（学術論文 21）を見出した。また、多分野から水電解研究に参入している状況下、電解触媒活性の電気化学評価が不適切に行われている状況が生じており、その課題を指摘し適切な評価方法を提示した（Fig. 5 左, 学術論文 2,20）。さらに、日々膨大に発表される関連論文を精読し、メカニズムと課題を整理したレビュー論文を複数発表した（Fig. 5 右, 学術論文 5,10,13,22）

これらは、再生可能電力を用いた水電解による CO₂フリー製造に通じる成果であり、持続可能な脱炭素社会へと貢献する（特に SDG 目標 7,13）。本研究は、科学研究費補助金・特別研究員奨励費 (JP 19F18346)の成果である。

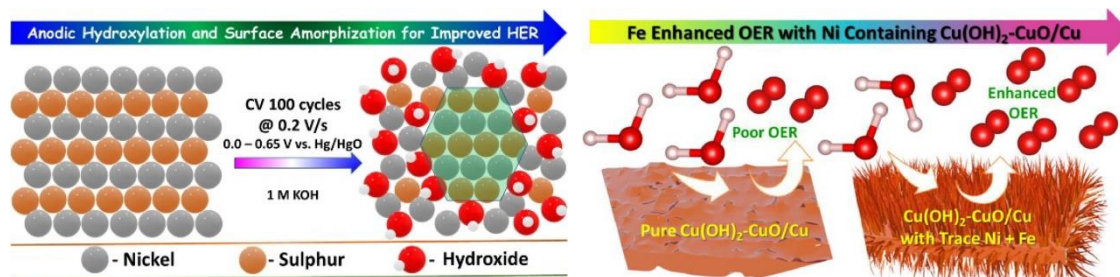


Fig. 4. 遷移金属カルコゲナイトを触媒前駆体とした高活性で安定な水酸化物・酸水酸化物電極触媒の開発とメカニズム解明. 左: NiS 表面のアモルファス $\text{NiS}_x(\text{OH})_y$ への再構成によるアルカリ水電解・高水素生成活性の発現 (学術論文 14). 右: 陽極酸化による Cu 箔表面への不純物からの $\text{Ni}_x\text{Fe}_{1-x}\text{OOH}$ ナノニードル形成と高酸素発生活性の発現 (学術論文 15).

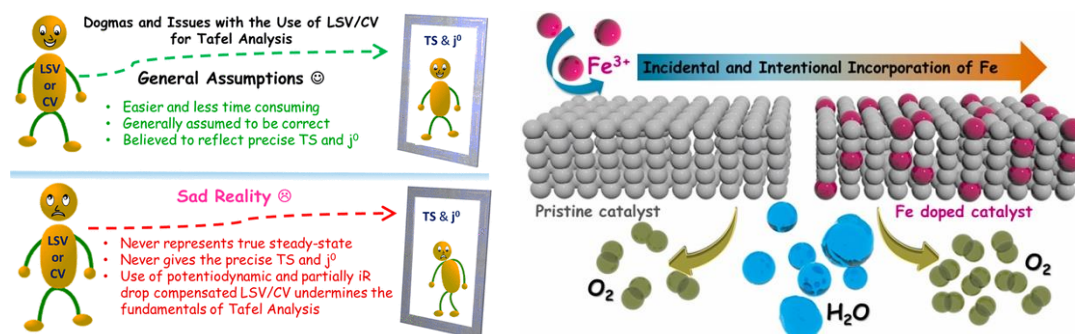


Fig. 5. アルカリ水電解触媒研究の課題と方向性の提示. 左: 現状の電気化学評価の課題と適切な評価方法の提示 (学術論文 2). 右: Ni および Co 系水電解触媒の Fe 添加効果のレビュー (学術論文 13).

3. 共同研究者

杉目恒志 (理工学術院総合研究所・次席研究員)
 花田信子 (応用化学科・講師)
 李墨宸 (理工学術院総合研究所・次席研究員)
 TEAH, Heng Yi (理工学術院総合研究所・次席研究員)
 Anantharaj Sengeni (日本学術振興会外国人特別研究員)
 門間聰之 (理工学術院・教授)
 獨古薫 (横浜国立大学・教授)
 山田裕貴 (東京大学・講師)
 Seung Woo Lee (米国ジョージア工科大学・准教授)
 Richard Laine (米国ミシガン大学・教授)

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. K. Yoshida, K. Kajiwara, H. Sugime, S. Noda*, N. Hanada*, "Numerical simulation of heat supply and hydrogen desorption by hydrogen flow to porous MgH_2 sheet," [Chem. Eng. J.](#) 421,

- 129648 (2021). [DOI:10.1016/j.cej.2021.129648](https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129648)
2. ©S. Anantharaj*, S. Noda*, M. Driess, P. Menezes*, "The pitfall of using potentiodynamic polarization curves for Tafel analysis in electrocatalytic water splitting," [*ACS Energy Lett.* **6** \(4\), 1607-1611.](#) [DOI:10.1021/acseenergylett.1c00608](https://doi.org/10.1021/acseenergylett.1c00608)
 3. ©B. Lee*, K. Lee, M. Li, S. Noda, S. W. Lee*, "Two-dimensional polydopamine positive electrode for high-capacity alkali metal ion storage," [*ChemElectroChem* **8**, 1-9 \(2021\).](#) [DOI:10.1002/celec.202100033](https://doi.org/10.1002/celec.202100033)
 4. ©J.H. Cha, K. Hasegawa, J. Lee, I. Y. Stein, A. Miura, S. Noda, J. Shiomi, S. Chiashi*, B.L. Wardle*, and S. Maruyama*, "Thermal properties of single-walled carbon nanotube forests with various volume fractions," [*Int. J. Heat and Mass Transfer* **171**, 121076 \(2021\).](#) [DOI:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121076](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121076)
 5. ©S. Anantharaj*, S. Noda*, V. R. Jothi, S.C. Yi*, M. Driess*, and P. W. Menezes*, "Strategies and perspectives to catch the missing pieces in energy-efficient hydrogen evolution reaction in alkaline media," [*Angew. Chem. Int. Ed.* **60**, 2-28, \(2021\) \(review\).](#) [DOI:10.1002/anie.202015738](https://doi.org/10.1002/anie.202015738)
 6. M. J. Lee, K. Lee, J. Lim, M. Li, S. Noda, S. J. Kwon, B. DeMattia, B. Lee,* and S. W. Lee,* "Outstanding low-temperature performance of structure-controlled graphene anode based on surface-controlled charge storage mechanism," [*Adv. Funct. Mater.* **31**\(14\), 2009397 \(2021\).](#) [DOI:10.1002/adfm.202009397](https://doi.org/10.1002/adfm.202009397)
 7. S. Anantharaj*, H. Sugime, S. Yamaoka, S. Noda*, "Pushing the limits of rapid anodic growth of CuO/Cu(OH)₂ nanoneedles on Cu for methanol oxidation reaction: Anodization pH is the game changer," [*ACS Appl. Energy Mater.* **4** \(1\) 899-912 \(2021\).](#) [DOI:10.1021/acsaem.0c02822](https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02822)
 8. R. Xie, H. Sugime, and S. Noda*, "High-performance solution-based silicon heterojunction solar cells using carbon nanotube with polymeric acid doping," [*Carbon* **175**, 519-524 \(2021\).](#) [DOI:10.1016/j.carbon.2020.12.056](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.12.056)
 9. X. Huang, R. Xie, H. Sugime, and S. Noda*, "Performance enhancement of carbon nanotube/silicon solar cell by solution processable MoO_x," [*Appl. Surf. Sci.* **542**, 148682 \(2021\).](#) [DOI:10.1016/j.apsusc.2020.148682](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.148682)
 10. ©S. Anantharaj*, S. Pitchaimuthu*, and S. Noda*, "A review on recent developments in electrochemical hydrogen peroxide synthesis with a critical assessment of perspectives and strategies," [*Adv. Colloid Interface Sci.* **287**, 102331 \(2021\) \(review\).](#) [DOI:10.1016/j.cis.2020.102331](https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102331)
 11. S. Anantharaj*, H. Sugime, and S. Noda*, "Chemical leaching of inactive Cr and subsequent electrochemical resurfacing of catalytically active sites in stainless steel for high-rate alkaline hydrogen evolution reaction," [*ACS Appl. Energy Mater.* **3** \(12\), 12596-12606 \(2020\).](#) [DOI:10.1021/acsaem.0c02505](https://doi.org/10.1021/acsaem.0c02505)
 12. H. Sugime*, T. Sato, R. Nakagawa, T. Hayashi, Y. Inoue, S. Noda, "Ultra-long carbon nanotube forest via in situ supplements of iron and aluminum vapor sources," [*Carbon* **172**, 772-780 \(2021\).](#) [DOI:10.1016/j.carbon.2020.10.066](https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.10.066)
 13. ©S. Anantharaj*, S. Kundu*, and S. Noda*, "'The Fe effect': A review unveiling the critical roles of Fe in enhancing OER activity of Ni and Co based catalysts," [*Nano Energy* **80**, 105514 \(2021\) \(review\).](#) [DOI:10.1016/j.nanoen.2020.105514](https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105514) (open access)

14. S. Anantharaj*, H. Sugime, and S. Noda*, "Surface amorphized nickel hydroxy sulphide for efficient hydrogen evolution reaction in alkaline medium," [Chem. Eng. J. **408**, 127275 \(2021\).](#)
[DOI:10.1016/j.cej.2020.127275 \(open access\)](#)
15. S. Anantharaj*, H. Sugime, B. Chen, N. Akagi, and S. Noda*, "Boosting the oxygen evolution activity of copper foam containing trace Ni by intentionally supplementing Fe and forming nanowires in anodization," [Electrochim. Acta **364**, 137170 \(2020\).](#)
[DOI:10.1016/j.electacta.2020.137170](#)
16. K. Kaneko, K. Hori, and S. Noda*, "Nanotubes make battery lighter and safer," [Carbon **167**, 596-600 \(2020\).](#) [DOI:10.1016/j.carbon.2020.06.042](#)
17. M. Li*, R. Maeda, T. Osawa, H. Sugime, and S. Noda*, "Facile catalyst deposition using mist for fluidized-bed production of sub-millimeter-long carbon nanotubes," [Carbon **167**, 256-263 \(2020\).](#)
[DOI:10.1016/j.carbon.2020.06.018](#)
18. S. Anantharaj*, H. Sugime, and S. Noda*, "Ultrafast growth of Cu(OH)₂-CuO nanoneedle array on Cu foil for methanol oxidation electrocatalysis," [ACS Appl. Mater. Interfaces **12** \(24\), 27327-27338 \(2020\).](#) [DOI:10.1021/acsami.0c08979](#)
19. ©M. Kim, B. Lee, M. Li, S. Noda, C. Kim, J. Kim, W.-J. Song, S.W. Lee*, and O. Brand*, "All-soft supercapacitors based on liquid metal electrodes with integrated functionalized carbon nanotubes," [ACS Nano **14** \(5\), 5659-5667 \(2020\).](#) [DOI:10.1021/acsnano.0c00129](#)
20. S. Anantharaj* and S. Noda, "Appropriate use of electrochemical impedance spectroscopy in water splitting electrocatalysis," [ChemElectroChem **7** \(10\), 2297-2308 \(2020\).](#)
[DOI:10.1002/celec.202000515](#)
21. S. Anantharaj*, H. Sugime, B. Chen, N. Akagi, S. Noda*, "Achieving increased electrochemical accessibility and lowered OER activation energy for Co²⁺ sites with a simple anion pre-oxidation,"
[J. Phys. Chem. C **124** \(18\), 9673-9684 \(2020\).](#) [DOI:10.1021/acs.jpcc.0c00178](#)
22. S. Anantharaj* and S. Noda*, "Nickel selenides as pre-catalysts for electrochemical oxygen evolution reaction: A review," [Int. J. Hydrogen Energy **45**, 15763-15784 \(2020\) \(review\).](#)
[DOI:10.1016/j.ijhydene.2020.04.073](#)
23. ©T. Liu, K.-C. Kim, B. Lee, S. Jin, M. Lee, M. Li, S. Noda, S. S. Jang*, and S. W. Lee*, "Enhanced lithium storage of an organic cathode via bipolar mechanism," [ACS Appl. Energy Mater. **3** \(4\), 3728-3735 \(2020\).](#) [DOI:10.1021/acsaem.0c00187](#)

4.2 総説・著書

- 大政謙次, 阿尻雅文, 北川尚美, 青野光子編「学術会議叢書 27 持続可能な社会への道 —環境科学から目指すゴール—」公益財団法人日本学術協力財団(2020), 阿尻雅文, 平尾雅彦, 野田優, 藤岡沙都子「第6章 環境課題解決のための生産技術と社会実装 科学技術、Efficiency (効率性) から Sufficiency (充足性) へ」pp.183-198.

4.3 招待講演

なし

4.4 受賞・表彰

- 野田優, 「ナノ材料の実用合成プロセスの研究」 早稲田大学 大隈記念学術褒賞 奨励賞, 2020 年 11 月.
- 野田優, 早稲田大学・次代の中核研究者, 2020 年 4 月.
- 若生 朋也, 吉江 優一, 前 智太郎, 金子 健太郎, 野田 優 「LixSi-CNT 負極の部分脱リチオ化によるリチウム二次電池の長寿命化」 "Partial delithiation of LixSi-CNT negative electrode for long-life lithium secondary battery," 化学工学会第 86 年会, PA142, オンライン開催, 2021 年 3 月 20 日 (poster) (優秀学生賞).
- 安井 浩太郎, 北川 紗映, 杉目 恒志, 越智 隼人, 高橋 大造, 野田 優 「X 線管用カーボンナノチューブ電界放出電子源の作製と階層構造制御」 "Fabrication and hierarchical structure control of carbon nanotube electron field emitter for X-ray tube," 化学工学会第 51 回秋季大会, K302, オンライン開催, 2020 年 9 月 26 日 (CVD 反応分科会・学生奨励賞).

4.5 学会および社会的活動

- 委員会企画 HC-11 「SDGs 達成に向けた札幌宣言の実行 ― 多様な分野の協働で実現するサーキュラーエコノミー ―」 化学工学会第 86 年会, オンライン開催, 2021 年 3 月 22 日 (一般公開企画オーガナイザー). http://www3.scej.org/meeting/86a/prog/session_HC-11.html
- 早稲田大学 理工学術院総合研究所 先端化学知の社会実装研究所「第 10 回先端化学知の社会実装コロキウム」オーガナイザー, 2021 年 1 月.
- 早稲田大学 理工学術院総合研究所 先端化学知の社会実装研究所「第 9 回先端化学知の社会実装コロキウム」オーガナイザー, 2020 年 12 月.
- 早稲田大学 理工学術院総合研究所 先端化学知の社会実装研究所「第 8 回先端化学知の社会実装コロキウム」オーガナイザー, 2020 年 11 月.
- 特別シンポジウム SP-4 「SDGs 達成に向けた札幌宣言の実行」 化学工学会第 51 秋季大会, オンライン開催, 2020 年 9 月 25 日 (一般公開企画オーガナイザー).
http://www3.scej.org/meeting/51f/prog/session_SP-4.html
- フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会 副会長.
- 化学工学会 国際交流センター運営委員, 戦略企画委員会委員, SDGs 検討委員会委員など

5. 研究活動の課題と展望

当プロジェクトの研究内容は、以下の 4 項目に大別される。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。

①CNT の低コスト・大量合成を目指した三次元プロセスの開発：

独自の流動層 CVD 法および浮遊触媒 CVD 法の開発に取り組んでいる。プロセスの高温化による結晶性と生成速度の向上、触媒粒子形成の精密制御による CNT 直径の低減、触媒導入量の向上と触媒の長寿命化による CNT 合成収率の向上、および触媒の高速形成によるプロセス全体での生産性向上に、産学共同研究にて引き続き取り組む。また、カーボンナノ粒子-ナノチューブ複合体の連続合成法開発にも、産学共同研究にて引き続き取り組む。

②CNT の基板上合成法および CNT デバイスの開発：

熱交換部材、熱界面材料、異方性導電膜、電子エミッタなどの平面型デバイスは、CNT の使用量

が少なく半導体/金属制御などの精密制御も不要なため、実用化に近い応用先である。しかし CNT の集合形態で特性が大きく変わるため、デバイス基板上に CNT 構造体を短時間に直接形成する技術の開発に、産学共同研究引き続き取り組む。特に小型 X 線管用の電子エミッタの開発は実用化に近い段階にきており、引き続き産学共同研究を推進する。また CNT 薄膜を用いた熱界面材料開発の産学共同研究を開始する。さらに CNT と同様の構造を有しながら絶縁体で無色と反対の性質を有す BNNT の合成と薄膜作製の産学共同研究を開始する。

③CNT 薄膜、シリコン膜の作製と太陽電池への応用：

CNT 薄膜は透明性と導電性を両立する。また、独自の急速融液蒸着・その場結晶化法により、大粒径シリコン膜の作製技術の開発を進める。両者の技術をあわせ、安定・柔軟・軽量なフレキシブル結晶シリコン膜太陽電池の実現を目指すとともに、ライフサイクルアセスメントによる社会実装性の評価を進める。CNT 透明ヒーターの開発に産学共同研究にて引き続き取り組む。また公的資金の獲得を目指す。

④CNT 膜集電体および BNNT セパレータを用いた二次電池の開発：

CNT スポンジ膜集電体による S-CNT 正極、Si-CNT 負極、Li-CNT 負極などの高容量電極の開発を進める。また、窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)のスポンジ膜による耐熱セパレータの開発を進める。これらを用いフルセルを開発、セルのトータル性能向上を目指す。加えて、本方法を固体電解質と組み合わせ、全固体電池の開発にも取り組む。科学研究費補助金・基盤研究（S）が 2020 年度に終了、2021 年度開始の科学研究費補助金・基盤研究（A）にて開発電池技術の温室効果ガス排出削減効果の評価も新たに加え、技術の開発と評価の両輪の試みを推進する。加えて、成果の実用化研究に、産学共同研究にて継続して取り組む。