

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H04633

研究課題名（和文）安全・高性能なナノチューブベース二次電池の開発と、温室効果ガス排出削減効果の評価

研究課題名（英文）Development of safe and high-performance secondary batteries based on nanotubes and assessment of their impacts on reduction of greenhouse gas emission

研究代表者

野田 優（Noda, Suguru）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：50312997

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 32,500,000円

研究成果の概要（和文）：リチウムイオン電池(LIB)の性能・安全性向上と環境負荷低減を両立すべく、技術の開発と評価を両輪で進めた。カーボンナノチューブ(CNT)と活物質粒子のみからなる自立膜電極を開発、Li負極-Li<sub>2</sub>S<sub>8</sub>正極全電池で高エネルギー密度を、SiO<sub>2</sub>負極-NCM正極全電池で良好なサイクル特性を実現した。さらに絶縁体の窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)の自立膜をセパレータに用いたLi負極-LTO正極全電池で150℃動作も実現した。ライフサイクルアセスメント(LCA)により電池製造に伴う温室効果ガス(GHG)排出も評価、金属箔レスによりGHGが減るが、Li負極や溶媒の削減がGHG削減に重要と明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

LIBは製造に大きなGHG排出を伴い、Li、Co、NiやCuなどの資源にも問題を有す。本研究ではCNTと活物質のみで電極を構築して補助材料を削減、各種の正極・負極材を用いて全電池を実証した。性能に加え安全性の担保も欠かせない。耐熱性に優れるBNNTセパレータとイオン液体電解液を用いて150℃の高温全電池動作を達成した。開発技術の環境影響の客観的・定量的な評価も欠かせない。Li負極-Li<sub>2</sub>S<sub>8</sub>正極全電池に対してLCAを実施、硫黄正極と金属箔削減はGHG排出を削減するが、Li負極や溶媒の負荷が大きいことを見出した。新技術の開発と評価の両輪の実践によりその有効性を示した。

研究成果の概要（英文）：To improve the performance and safety of lithium-ion batteries (LIBs) while reducing their environmental impact, we concurrently developed and assessed new technologies. We developed a self-supporting film electrode consisting only of carbon nanotubes (CNTs) and active material particles, and achieved high energy density with Li anode-Li<sub>2</sub>S<sub>8</sub> cathode full cells and good cycle characteristics with SiO<sub>2</sub> anode-NCM cathode full cells. Furthermore, 150 °C operation was also achieved with Li anode-LTO cathode full cells using a self-supporting film of insulative boron nitride nanotubes (BNNTs) as the separator. Life cycle assessment (LCA) was also made to evaluate the greenhouse gas (GHG) emissions associated with battery manufacturing, and revealed that while the absence of metal foil reduces GHGs, the reduction of Li anode and solvents is important to reduce the GHGs emissions.

研究分野：反応工学、材料プロセス、ナノテクノロジー

キーワード：二次電池、カーボンナノチューブ、窒化ホウ素ナノチューブ、安全、高性能、低炭素化、技術評価、ライフサイクルアセスメント

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

## 1. 研究開始当初の背景

リチウムイオン電池(LIB)はモバイル機器の飛躍的発展を実現した。現行電池は金属箔集電体の上に活物質と導電材と有機高分子バインダを塗布した正負極を、有機高分子微多孔膜セパレータを介して対向させ、有機電解液で満たして構成するが、有機高分子は耐熱性が低く金属箔は重い。有機電解液を固体電解質に置き換えた全固体電池も盛んに研究されているが、堅牢な無機セラミックスを薄く軽く作るのは容易ではなく、実用化に課題を抱えている。

一方で、代表者は柔軟で良導電性のカーボンナノチューブ(CNT)のスポンジ状自立膜を集電体とし、その内部に活物質を保持した軽量で柔軟な正負極を開発した。硫黄やシリコンなどの高容量正負極材料は、多量のリチウムを出し入れするため充放電時に体積が変化し従来構造の電池は壊れてしまう。代表者はCNTベース電極により体積変化を可逆化し、セル全体で体積を保存して安定動作させる「ソフト電池」を提案し高エネルギー密度電池を開発してきた。さらにCNTと同様の分子構造を持ちながら絶縁体の窒化ホウ素ナノチューブ(BNNT)に着目、そのスポンジ状自立膜セパレータを提案した。CNTベース電極とBNNTセパレータのスタックは、有機物では不可能な500℃という高い耐熱性を実現、加熱後に電解液を加えると正常に動作した。この独自の電池アーキテクチャーは性能と安全性の両立に有望である。

リチウムイオン電池の環境適合性も重要な課題である。使用時にリチウムイオン電池自体は「ゼロエミッション」だが、充電に用いる電力からCO<sub>2</sub>が排出されており、電池製造時にも多量のエネルギーが投入され環境負荷が生じている。また希少元素や環境負荷の高い物質も使われており、そのリサイクルも欠かせない。ライフサイクルアセスメント(LCA)等により定量評価し、システム全体として環境負荷を低減する必要がある。

これまでは開発中の技術情報の入手が困難という事情もあり、実用化された技術の後からの評価が主流であった。しかし、開発に成功した技術も必ずしも社会実装されない時代が来ており、今後は持続可能性の観点が一層重視されるようになる。次世代技術の開発と評価を両輪で進め、社会に適合する技術を実現する、新たな研究開発が望まれる。

## 2. 研究の目的

LIB等の二次電池は、自動車・航空機の電動化や再エネ電力の平準化など、低炭素社会の基幹技術の一つとして期待されている。エネルギー密度や出力密度などの性能向上と同時に、安全性の確保も一層重要となっている。現行の有機電解液系電池から全固体電池への展開が盛んに検討されているが、堅牢なセラミックスを薄く作るのは容易ではない。本研究では、柔軟で高耐熱な無機ナノチューブを用いて性能と安全性を両立する。我々が開発してきたCNT膜ベースの柔軟電極に、BNNT膜セパレータを組み合わせ、高容量活物質の性能を引き出しつつ補助材料を削減してエネルギー密度を向上、熱に耐え歪を吸収して安全性を確保する。低炭素化には、充電電力に加えて電池の製造・廃棄の環境負荷低減も不可欠である。補助材料の削減により環境負荷・コスト・重量を削減し、また簡易・高速製造によりプロセスの負荷も削減する。LCA等による技術評価を技術開発と両輪で進めることで、社会に役立つ技術を開発し、新たな研究開発のスタイルも実践する。

## 3. 研究の方法

二次電池のより広範な利用に必要な性能・安全性の向上と、大規模導入に不可欠な環境負荷低減を両立する電池の開発しつつ、開発技術のLCAによる環境影響の客観的・定量的評価も進め、技術開発へフィードバックすることで、社会に適合する技術開発を推進した。具体的には以下の4項目を設定して、新技術の開発と評価の両輪で取り組んだ。

- 項目1. 高エネルギー密度・高安全性二次電池の開発
- 項目2. 常温でも高温でも動作する二次電池の開発
- 項目3. 電池の製造・利用・廃棄のライフサイクルアセスメント
- 項目4. 社会実装性に優れた電池の提案

#### 4. 研究成果

代表的な成果を①~④に分けて報告する。

##### ①資源豊富な硫黄を正極に用いた CNT ベース全電池の開発と高エネルギー密度の実証

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。しかし、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 (図 1a)。我々は CNT スポンジ膜に S を担持した軽量・高容量の S-CNT 正極を開発したが、過剰な電解液や Li 箔を必要としていた (図 1b, K. Hori, et al., J. Phys. Chem. C **123**, 3951 (2019), K. Hori, et al., Carbon **161**, 612 (2020).)。S 正極は反応中間体の多硫化リチウム  $\text{Li}_2\text{S}_x$  が電解液に溶解して負極と反応する問題を抱えるが、負極表面を不活性化できれば電解液と馴染みのよい  $\text{Li}_2\text{S}_x$  により電解液量を削減できる筈である。そこで  $\text{Li}_2\text{S}_6$  ないし  $\text{Li}_2\text{S}_8$  を CNT スポンジ膜に含浸担持した  $\text{Li}_2\text{S}_x$ -CNT 正極を開発、薄い金属 Li 箔と組み合わせた全電池 (図 1c) により、電池全内容物基準で初期に 400–500 Wh/kg、100 サイクル後に約 300 Wh/kg という高エネルギー密度を達成した (図 1d) [1]。

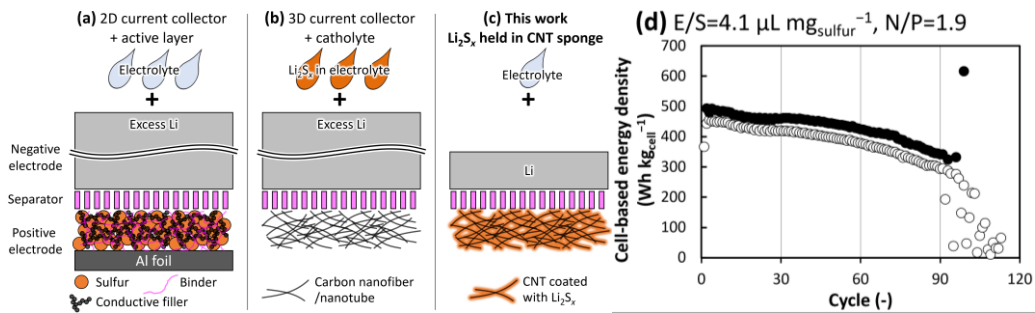


図 1. 高エネルギー密度 Li-S 二次電池. (a)従来型電池. (b)報告者らの Li||S-CNT 電池. (c)本研究での Li|| $\text{Li}_2\text{S}_x$ -CNT 電池. (d) Li|| $\text{Li}_2\text{S}_x$ -CNT 電池のサイクル特性[1].

##### ②安定性に優れた一酸化ケイ素を負極に用いた CNT ベース全電池の開発と安定動作

LIB のより大規模な利用に向け、安価な材料を用いたより高性能な LIB の開発が望まれている。負極には黒鉛が長らく用いられてきたが、すでに理論容量 372 mA h/g に迫っており、これ以上の高容量化が困難である。そこで、より高い理論容量 1710 mA h/g を有し資源豊富なケイ素からなる一酸化ケイ素(SiO)を、黒鉛負極に添加する形で利用され始めている。本研究では、主成分を SiO とした高容量負極の開発に取り組んだ。市販の炭素被覆 SiO 粒子(SiO/C)を用い、SiO/C を 85 mass% と高めた SiO/C-CNT 負極を開発し、Li 金属を対極とした半電池試験により高容量密度を実現した[2]。しかし SiO は最初の充電時に不可逆反応により  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$  を形成し、高比表面積を有す CNT 表面には不可逆的に固体電解質界面相(SEI)を形成して、多量の Li を消費する。そこで、予め SiO/C-CNT 負極をリチオ化したうえでセル化するプレリチオ化法を開発、Ni-Co-Mn 系(NCM)正極材を用いた NCM-CNT 正極と組み合わせた全電池を開発した[3]。SiO は高容量を持つためリチオ化で膨張、脱リチオ化で収縮するが、CNT ベース電極により電極膜厚が可逆的に変化し、安定に動作することが分かった (図 2)。SiO/C-CNT 負極は、リチオ化と脱 Si、O、C と資源豊富な軽元素を用いた高容量負極は、LIB の大規模利用に向けた重要な技術となる。

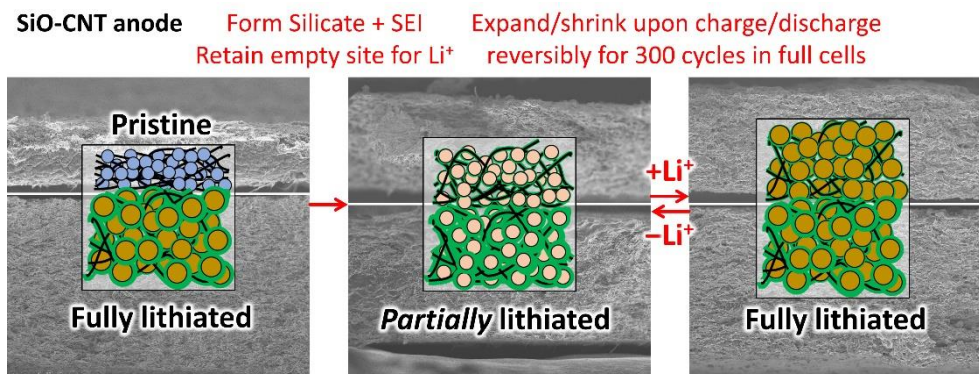


図 2. SiO 負極-NCM 正極を用いた CNT ベース全電池における SiO/C-CNT 負極の可逆的な膜厚変化[3].

### ③CNT ベース全電池に適した短径・長尺・高純度 CNT の合成法の開発

我々はこれまでに独自の流動層 CVD 法を開発し、99 wt%以上と高純度、数 100  $\mu\text{m}$  と長尺の CNT の 70%という高い炭素収率での合成を実現した (D.Y. Kim, et al., Carbon 49, 1972 (2011).)。この際、炭素原料には高活性な  $\text{C}_2\text{H}_2$  を 1.1 vol% と希薄条件で用いていて、その 90 倍量の希釈ガスが CNT 製造時の温室効果ガス(GHG)排出の大きな要因であることが、ライフサイクルアセスメント(LCA)により明らかとなった (H.Y. Teah, et al., ACS Sustainable Chem. Eng. 8, 1730 (2020).)。GHG 排出削減には原料の高濃度化が重要である。そこで  $\text{C}_2\text{H}_2$  より活性の低い  $\text{C}_2\text{H}_4$  を 10–20 vol% と高濃度で用い、他のガスを炭素源の 9–4 倍に抑える CVD 条件を検討、スパッタ法で  $\text{ZrO}_2$  ビーズ上に担持した  $\text{Fe}/\text{Al}_2\text{O}_3$  モデル触媒により 28%という高い炭素収率で数 100  $\mu\text{m}$  と長尺の単層 CNT 合成を実現した (図 3) [4]。なお、将来的に高さ方向に反応器をスケールアップすることで、炭素収率の向上が期待できる。

CNT は LIB での導電材応用が本格化し、LIB になくなくてはならない素材となった。ただし CNT 合成の際に用いる触媒金属が混入しており、その除去が大きな課題である。金属粒子の多くは炭素の殻で覆われているため、炭素殻を酸化除去したうえで酸処理で金属を溶解する方法が一般的だが、酸化処理で CNT も損傷し、酸処理後の乾燥過程で CNT が強く凝集し、さらに廃液処理の問題もある。炭素材料では以前から 1000  $^\circ\text{C}$  以上の温度で塩素ガスにより金属をエッチング、除去する方法により精製が行われてきた。この方法が CNT にも適用され、産業利用も始まっている。しかし塩素ガスは腐食性と毒性が高く、漏洩した際のリスクが大きい。我々は、 $\text{FeCl}_3$  水溶液で金属 M を溶解できることに着目、1000  $^\circ\text{C}$  程度にて気相反応にて  $\text{M}(\text{s}) + x\text{FeCl}_3(\text{g}) \rightarrow \text{MCl}_x(\text{g}) + x\text{FeCl}_2(\text{g})$  の反応で CNT から金属を除去する方法を提案した。各種 CNT に適用、物理蒸着(PVD)および化学蒸着(CVD)による単層 CNT および多層 CNT から、CNT を損傷せずに Fe、Co、Ni、Y などの金属を除去できることを示した[5]。

CNT ベース電池の作製には、適した CNT の選定が欠かせない。我々は独自の流動層法によりサブミリメートル長の長尺 CNT の高収率合成を実現してきたが、その触媒条件により CNT の直径、層数、比表面積を制御することができる。10 種類の CNT を用いて黒鉛負極-コバルト酸リチウム(LCO)全電池を作製、正極と負極それぞれに適した CNT 構造を明らかにした (図 4) [6]。また国際共同研究で流動層法長尺 CNT を提供、新材料を用いた電池開発にも有効であった[7]。

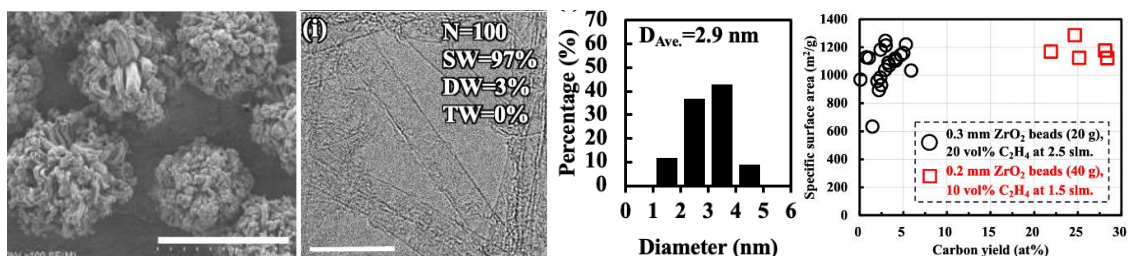


図 3. 高純度・長尺単層 CNT の高収率合成。左からビーズ上に合成した単層 CNT の SEM 像、TEM 像、直径分布、および比表面積(質)と炭素収率(量)の関係[4]。

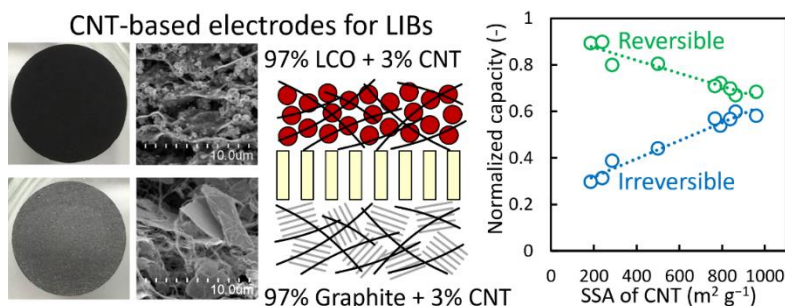


図 4. CNT ベース電池電極に適した CNT の構造[6]。

### ④LCA による新開発 CNT ベース全電池の環境影響の評価

開発技術が本当に GHG 排出削減に貢献するのか、客観的で定量的な評価が欠かせない。そこで論文[1]で開発した  $\text{Li}-\text{Li}_2\text{S}_8$  電池の製造に伴う環境影響を Cradle-to-Gate LCA で評価した。従来の NCM 等の金属酸化物正極から硫黄正極に変えることにより正極に関わる負荷が、CNT 集電

体を用いることで負極の銅箔と正極のアルミニウム箔に関わる負荷が大きく削減できることが分かった。一方、Li 負極および溶媒に伴う負荷が大きいことも判明し、それらの低減が重要なこと、さらには利用も含めると電池のサイクル寿命向上が重要なことも明らかになった(図 5) [8]。

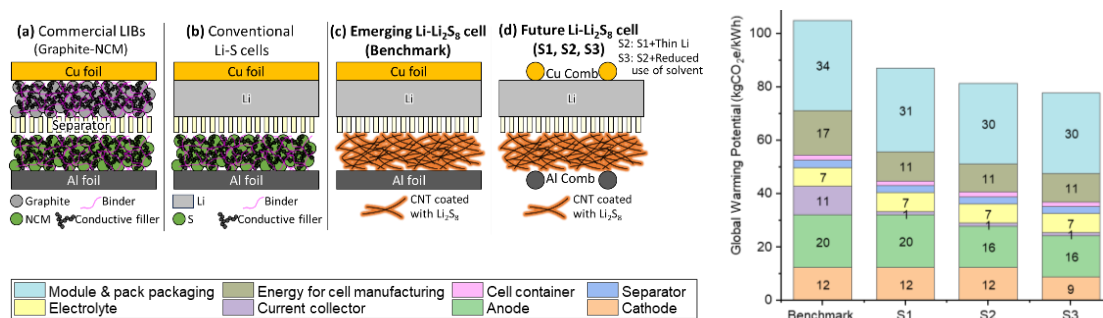


図 5. Li 負極-Li<sub>2</sub>S<sub>8</sub> 正極を用いた CNT ベース全電池の製造に伴う環境負荷の LCA による評価[8].

<引用文献>

- [1] Y. Yoshie, K. Hori, T. Mae, and S. Noda\*, "High-energy-density Li-S battery with positive electrode of lithium polysulfides held by carbon nanotube sponge," Carbon 182, 32-41 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.05.046> (open access)
- [2] T. Mae, K. Kaneko, M. Li, and S. Noda\*, "Stable and high-capacity SiO negative electrode held in reversibly deformable sponge-like matrix of carbon nanotubes," Carbon 209, 118014 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118014> (Open Access)
- [3] T. Mae, K. Kaneko, H. Sakurai, and S. Noda\*, "A stable full cell having high energy density realized by using a three-dimensional current collector of carbon nanotubes and partial prelithiation of silicon monoxide," Carbon 218, 118663 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118663>
- [4] M. Li\*, S. Hachiya, Z. Chen, T. Osawa, H. Sugime, and S. Noda\*, "Fluidized-bed production of 0.3 mm-long single-wall carbon nanotubes at 28% carbon yield with 0.1 mass% catalyst impurities using ethylene and carbon dioxide," Carbon 182, 23-31 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.05.035>
- [5] H. Tanaka, T. Goto, K. Hamada, K. Ohashi, T. Osawa, H. Sugime, and S. Noda\*, "Safe and damageless dry-purification of carbon nanotubes using FeCl<sub>3</sub> vapor," Carbon 212, 118171 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2023.118171> (Open Access)
- [6] K. Kaneko, M. Li, and S. Noda\*, "Appropriate properties of carbon nanotubes for the three-dimensional current collector in lithium-ion batteries," Carbon Trends 10, 100245 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100245> (Open Access)
- [7] K. Lee, M.J. Lee, J. Lim, K. Ryu, M. Li, S. Noda, S.J. Kwon\*, and S.W. Lee\*, "Controlled Nitrogen Doping in Crumpled Graphene for Improved Alkali Metal-Ion Storage under Low-Temperature Conditions," Adv. Funct. Mater. 33 (2), 2209775 (2023). <https://doi.org/10.1002/adfm.202209775>
- [8] 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). <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.05.022>

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Teah Heng Yi, Zhang Qi, Yasui Kotaro, Noda Suguru	4. 巻 48
2. 論文標題 Life cycle assessment of lithium-sulfur batteries with carbon nanotube hosts: Insights from lab experiments	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Sustainable Production and Consumption	6. 最初と最後の頁 280 ~ 288
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.spc.2024.05.022	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Mae Tomotaro, Kaneko Kentaro, Sakurai Hiroki, Noda Suguru	4. 巻 218
2. 論文標題 A stable full cell having high energy density realized by using a three-dimensional current collector of carbon nanotubes and partial prelithiation of silicon monoxide	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 118663 ~ 118663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2023.118663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tanaka Hideaki, Goto Takuma, Hamada Kohki, Ohashi Kei, Osawa Toshio, Sugime Hisashi, Noda Suguru	4. 巻 212
2. 論文標題 Safe and damage-less dry-purification of carbon nanotubes using FeCl3 vapor	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 118171 ~ 118171
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2023.118171	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Mae Tomotaro, Kaneko Kentaro, Sakurai Hiroki, Noda Suguru	4. 巻 218
2. 論文標題 A stable full cell having high energy density realized by using a three-dimensional current collector of carbon nanotubes and partial prelithiation of silicon monoxide	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 118663 ~ 118663
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2023.118663	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kaneko Kentaro, Li Mochen, Noda Suguru	4. 巻 10
2. 論文標題 Appropriate properties of carbon nanotubes for the three-dimensional current collector in lithium-ion batteries	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Carbon Trends	6. 最初と最後の頁 100245 ~ 100245
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.cartre.2022.100245	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Lee Kyungbin, Lee Michael J., Lim Jeonghoon, Ryu Kun, Li Mochen, Noda Suguru, Kwon Seok Joon, Lee Seung Woo	4. 巻 33
2. 論文標題 Controlled Nitrogen Doping in Crumpled Graphene for Improved Alkali Metal Ion Storage under Low Temperature Conditions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Functional Materials	6. 最初と最後の頁 2209775 ~ 2209775
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/adfm.202209775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Li Mochen, Yasui Kotaro, Sugime Hisashi, Noda Suguru	4. 巻 185
2. 論文標題 Enhanced CO <sub>2</sub> -assisted growth of single-wall carbon nanotube arrays using Fe/AlO catalyst annealed without CO <sub>2</sub>	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 264 ~ 271
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.09.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshie Yuichi, Hori Keisuke, Mae Tomotaro, Noda Suguru	4. 巻 182
2. 論文標題 High-energy-density Li/S battery with positive electrode of lithium polysulfides held by carbon nanotube sponge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 32 ~ 41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.05.046	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Li Mochen, Hachiya Soichiro, Chen Zhongming, Osawa Toshio, Sugime Hisashi, Noda Suguru	4. 巻 182
2. 論文標題 Fluidized-bed production of 0.3-mm-long single-wall carbon nanotubes at 28% carbon yield with 0.1 mass% catalyst impurities using ethylene and carbon dioxide	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Carbon	6. 最初と最後の頁 23~31
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.carbon.2021.05.035	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

[学会発表] 計49件(うち招待講演 12件/うち国際学会 21件)

1. 発表者名 ° Subramanian Natarajan, Tomotaro Mae, Heng Yi Teah, Hiroki Sakurai, and Suguru Noda
2. 発表標題 Recycling of spent anode for Li-ion battery recycling and its life cycle analysis
3. 学会等名 7th International Conference on Advanced Electromaterials (ICAE 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Takuma Goto, Toshio Osawa, and Suguru Noda
2. 発表標題 Damage-less dry-purification of carbon nanotubes using Br <sub>2</sub> vapor
3. 学会等名 13th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Suguru Noda
2. 発表標題 Safe and damage-less dry-purification of carbon nanotubes using FeCl <sub>3</sub> vapor
3. 学会等名 13th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 ° Heng Yi Teah, Qi Zhang, Kotaro Yasui, Suguru Noda
2. 発表標題 Lithium-sulfur technology reduces the environmental impact of lithium-ion batteries
3. 学会等名 20th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE2023) Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Heng Yi Teah, Qi Zhang, Kotaro Yasui, Suguru Noda
2. 発表標題 Lithium-sulfur technology reduces the environmental impact of lithium-ion batteries
3. 学会等名 11th International Conference on Industrial Ecology (ISIE2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Kaito Nakamae, Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Mochen Li, and Suguru Noda
2. 発表標題 Multi-functional carbon nanotube sponge-like paper that holds lithium polysulfide and supporting salts for simple fabrication of stable and high energy-density Li-S battery
3. 学会等名 The 23rd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Hiroki Sakurai, and Suguru Noda
2. 発表標題 Stable, high energy-density SiO-NCM full cell based on three dimensional current collector of carbon nanotubes and partial prelithiation method
3. 学会等名 The 23rd International Conference on the Science and Applications of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT23) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Suguru Noda, Heng Yi Teah, and Mochen Li
2. 発表標題 Concurrent development and assessment of carbon nanotube production processes
3. 学会等名 2nd International Workshop on Multi-Functional Nanocarbon Fibers (MNF2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Mochen Li, and Suguru Noda
2. 発表標題 Self-supporting negative electrode of silicon monoxide held by carbon nanotubes for stable and high-capacity secondary batteries
3. 学会等名 2022 MRS Fall Meeting & Exhibit (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° Hiroki Sakurai, Kentaro Kaneko, Chiharu Tokoro, and Suguru Noda
2. 発表標題 Simple regeneration of positive electrode using spent lithium ion battery and carbon nanotube
3. 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° Kentaro Kaneko and Suguru Noda
2. 発表標題 Nanotube-based architecture with ionic liquid electrolyte for high-temperature operation of Li and Li-ion batteries
3. 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° Suguru Noda, Heng Yi Teah, and Mochen Li
2. 発表標題 Concurrent development and assessment of carbon nanotube production processes
3. 学会等名 12th A3 Symposium on Emerging Materials: Nanomaterials for Electronics, Energy, and Environment (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° Qi Zhang, Kotaro Yasui, Suguru Noda, and Heng Yi Teah
2. 発表標題 A concurrent technology development and life cycle assessment of lithium-sulfur battery
3. 学会等名 The 15th Biennial International Conference on EcoBalance (EcoBalance 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° S. Noda, H.Y. Teah, M. Li, K. Kaneko, Y. Yoshie, T. Mae
2. 発表標題 Greener production of carbon nanotubes and battery applications
3. 学会等名 19th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering (APCChE2022) Congress (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° Kaito Nakamae, Yuichi Yoshie, Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Mochen Li, Suguru Noda
2. 発表標題 High energy density Li-S battery with active materials and salts held by carbon nanotube paper
3. 学会等名 The 22nd International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ◦ Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Mochen Li, Suguru Noda
2. 発表標題 Self-supporting negative electrode of silicon monoxide held by carbon nanotubes for stable and high-capacity secondary batteries
3. 学会等名 The 22nd International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ◦ Suguru Noda
2. 発表標題 Production and functionalization of carbon nanotubes for electrochemical energy storage devices
3. 学会等名 241st ECS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ◦ Suguru Noda
2. 発表標題 Greener production of carbon nanotubes and battery applications
3. 学会等名 Guadalupe Workshop X: Workshop on Single Wall Carbon Nanotubes and Related Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前 智太郎, Teah Heng Yi, 平尾 雅彦, 野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブ三次元集電体を用いたSiO-NCM全電池の開発と製造に伴う環境影響の評価
3. 学会等名 化学工学会第89年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 田中 駿, 後藤 拓磨, 大沢 利男, 野田 優
2. 発表標題 安全なエッチング剤を用いたカーボンナノチューブの乾式精製法の開発
3. 学会等名 化学工学会第89年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 岡 順也, 岩崎 秀治, 西浪 裕之, 有馬 淳一, 大沢 利男, 野田 優
2. 発表標題 化学気相成長法によるシリコン-活性炭複合材料の作製とリチウムイオン電池負極への応用
3. 学会等名 化学工学会第89年会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Zih-Ee Lin, Heng Yi Teah, Masahiko Hirao, Suguru Noda
2. 発表標題 Economic and environmental analysis of repurposing retired EV batteries for renewable energy storage systems: Case studies in Kyushu and Hokkaido
3. 学会等名 第19回日本LCA学会研究発表会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takuma Goto, Toshio Osawa, Suguru Noda
2. 発表標題 Safe and damage-less dry-purification of carbon nanotubes using Br <sub>2</sub> vapor
3. 学会等名 第66回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ben HUANG, Tomotaro Mae, Suguru Noda
2. 発表標題 Proper Electrolytes for Pre-Lithiation of SiO-Carbon Nanotube Sponge Anode for Lithium-Ion Batteries
3. 学会等名 第64回電池討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中前 快斗, 前 智太郎, 野田 優
2. 発表標題 多硫化リチウムと混合支持塩を用いたLi-S電池のエネルギー密度向上と安定動作
3. 学会等名 第64回電池討論会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブの実用合成、精製、電池応用と技術評価
3. 学会等名 第60回 粉体に関する討論会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 野田 優
2. 発表標題 サステナビリティと研究開発の一考察：再エネと蓄電池とナノテクを例として
3. 学会等名 SPEED2023 第3回研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 後藤 拓磨, 大沢 利男, 野田 優
2. 発表標題 臭素蒸気を用いたカーボンナノチューブの低損傷乾式精製法の開発
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 岡 順也, 大沢 利男, 野田 優
2. 発表標題 化学気相成長法によるシリコン-炭素複合材料の作製とリチウムイオン電池負極への応用
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前 智太郎, 金子 健太郎, 桜井 宏樹, 野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブ三次元集電体と部分プレリチオ化によるSiO-NCM全電池の高容量安定動作
3. 学会等名 化学工学会第54回秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 桜井 宏樹, 金子 健太郎, 前 智太郎, Natarajan Subramanan, 所 千晴, 野田 優
2. 発表標題 簡易プロセスによる使用済みリチウムイオン電池正極材の再生技術
3. 学会等名 化学工学会第88年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Kaito Nakamae, Yuichi Yoshie, Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Mochen Li, Suguru Noda
2. 発表標題 High energy density Li-S battery with active materials and salts held by carbon nanotube paper
3. 学会等名 第64回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 ° Tomotaro Mae, Kentaro Kaneko, Mochen Li, Suguru Noda
2. 発表標題 Stable and high-capacity SiO negative electrode held in reversibly deformable sponge-like matrix of carbon nanotubes
3. 学会等名 第64回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 前 智太郎, 金子 健太郎, 李 墨宸, 野田 優
2. 発表標題 安定・高容量二次電池に向けた一酸化ケイ素・カーボンナノチューブ自立膜負極の開発
3. 学会等名 第63回電池討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中前 快斗, 吉江 優一, 前 智太郎, 金子 健太郎, 李 墨宸, 野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブ膜への活物質と塩の担持による高エネルギー密度Li-S電池の開発
3. 学会等名 第63回電池討論会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 中前 快斗, 前 智太郎, 金子 健太郎, 李 墨宸, 野田 優
2. 発表標題 多硫化リチウムと混合支持塩を用いたLi-S電池のエネルギー密度向上と安定動作
3. 学会等名 化学工学会第53回秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suguru Noda, Heng Yi Teah, and Mochen Li
2. 発表標題 Concurrent development and assessment of carbon nanotube production processes
3. 学会等名 第63回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ° Suguru Noda
2. 発表標題 Enhancing carbon nanotube production via careful control over catalyst
3. 学会等名 2nd Symposium on Synthesis, Purification, Functionalization, and Manufacturing of Carbon Nanotubes and Low-Dimensional Materials (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ° Kentaro Kaneko and Suguru Noda
2. 発表標題 Appropriate properties of carbon nanotube for 3D current collector of lithium-ion battery
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ° Mochen Li, Soichiro Hachiya, Zhongming Chen, Toshio Osawa, Hisashi Sugime, and Suguru Noda
2. 発表標題 Fluidized bed production of 99.9 wt%-pure and 0.3 mm-long single-wall carbon nanotubes at 28% carbon yield using ethylene and carbon dioxide
3. 学会等名 International Conference on the Science and Application of Nanotubes and Low-Dimensional Materials (NT21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ° Kentaro Kaneko, Keisuke Hori, and Suguru Noda
2. 発表標題 Carbon nanotube and boron nitride nanotube make battery lighter and safer
3. 学会等名 第61回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ° Suguru Noda
2. 発表標題 Progresses and future challenges of carbon nanotube production
3. 学会等名 第61回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ○野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブの用途に合わせた実用合成とエネルギーデバイス応用
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会 脱炭素社会に向けたカーボンナノチューブの開発と応用～発見30周年記念シンポジウム～ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ○野田 優
2. 発表標題 ナノ材料を高速・高密度に作る：カーボンナノチューブでの試み
3. 学会等名 化学工学会第52回秋季大会， 特別シンポジウムSP-2. ナノ材料プロセスサイエンスシンポジウム（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ○野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブの各種合成技術と長尺カーボンナノチューブを用いた新構造蓄電池
3. 学会等名 ナノテクノロジービジネス推進協議会 第1回ナノカーボン未来技術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 ○Kentarō Kaneko, Suguru Noda
2. 発表標題 Appropriate properties of carbon nanotube for 3D current collector of lithium-ion battery
3. 学会等名 第62回フラーレン・ナノチューブ・グラフェン総合シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 前 智太郎，金子 健太郎，李 墨宸，野田 優
2. 発表標題 安定・高容量二次電池に向けた一酸化ケイ素・カーボンナノチューブ自立膜負極の開発
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中前 快斗, 吉江 優一, 前 智太郎, 金子 健太郎, 李 墨宸, 野田 優
2. 発表標題 カーボンナノチューブ膜への活物質と塩の担持による高エネルギー密度Li-S電池の開発
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白川 寛人, 李 墨宸, 杉目 恒志, 大沢 利男, 野田 優
2. 発表標題 触媒前駆体のミスト化担持とカーボンナノチューブの流動層合成
3. 学会等名 化学工学会第87年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 二次電池用負極、二次電池、および二次電池用負極の製造方法	発明者 野田 優, 前 智太郎, 山岸智子	権利者 学校法人早稲田大学, 日本ゼオン株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-030468	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 カーボンナノチューブの精製方法および精製装置、ならびに、これらによって製造されるカーボンナノチューブの集合体	発明者 野田 優, 田中 駿, 後藤 拓磨, 蛭子 蒼太	権利者 学校法人早稲田大学, 日本ゼオン株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-27609	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

野田・花田研究室ホームページ <a href="https://noda.w.waseda.jp/index-j.html">https://noda.w.waseda.jp/index-j.html</a>
---

## 6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	金子 健太郎  (Kaneko Kentaro)		
研究協力者	前 智太郎  (Mae Tomotaro)		
研究協力者	吉江 優一  (Yoshie Yuichi)		
研究協力者	ティア ヘンイ  (Teah Heng Yi)  (70822485)		
研究協力者	リン ズーイー  (LIN Zih-Ee)		
研究協力者	李 墨宸  (Li Mochen)		
研究協力者	田中 秀明  (Tanaka Hideaki)		
研究協力者	大沢 利男  (Osawa Toshio)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------