

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 26 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25410248

研究課題名(和文) 室温イオン液体中におけるリチウムイオン電池用黒鉛系負極の電気化学的挙動の解明

研究課題名(英文) Analysis of electrochemical behavior of graphite negative electrode in lithium-ion batteries employing room-temperature ionic liquids

研究代表者

宇井 幸一 (UI, KOICHI)

岩手大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：60360161

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円

研究成果の概要(和文)：室温イオン液体電解質/黒鉛系負極の界面設計に関する、基礎的知見を得ることを目的とした。カチオン種にかかわらず、初回充放電特性は同じであったが、高電流密度では放電特性に差異を生じた。FE-SEM/EDXとXPSより、初回充電後の黒鉛粒子の表面にはカチオン種にかかわらず、LiF、C、O、およびSから成る析出物が覆うことがわかった。電気化学インピーダンススペクトルはカチオン種によって、析出物の抵抗に差異を生じることを示した。以上の結果、析出物の主成分はアニオン種由来の無機化合物で、カチオン種は析出物の生成およびその抵抗、さらには高電流密度での放電特性に影響を及ぼすことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to obtain fundamental knowledge about the design of the interface between room-temperature ionic liquid electrolytes and the natural graphite negative electrode. The discharge capacities were different at the high current densities although the initial charge-discharge characteristics were the same regardless of the cation types. The EDX and XPS results indicated that the surface deposit covering the graphite particles consisted of LiF, C, O, and S regardless of the cation types. The electrochemical impedance spectra indicated that the resistance of the surface deposit varied according to the cation type. Based on these results, it was clarified that the main component of the surface deposit was an inorganic compound derived from the anion species; the cation type had an influence on the formation and the resistance of the surface deposit, then the discharge properties at the high current densities.

研究分野：電気化学

キーワード：リチウムイオン電池 室温イオン液体 負極 黒鉛

1. 研究開始当初の背景

(1) 本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ

高エネルギー密度のリチウムイオン二次電池 (LIB) は、次世代自動車用蓄電システムや系統連系用蓄電技術として魅力がある¹⁾。LIB の構成上、黒鉛系負極 (主に天然黒鉛) がこの電池の特徴を産んでおり、サイクル寿命やコストなどの点で、全般的に大きな欠点がない。さらに、20 年近くにわたって民生小形用途とはいえ、実利用での実績が積み重ねられているため、大容量用途においても実用に最も近い位置に存在する材料といえる。また、電解質も電池の出入力特性、寿命、熱安定性に直接関わるキーマテリアルである。有機溶媒系電解質も黒鉛系負極と同様の実績が積み重ねられているが、電解質 / 黒鉛系負極の界面設計については、体系的な取り組みが十分に行われていないのが現状である。現在、LIB 用電解質として、炭酸エチレン (EC) を主体とする溶媒が用いられている。初回充電時、この EC を主溶媒とする電解質の還元分解により、固体電解液界面 (Solid Electrolyte Interface: SEI) が形成される。SEI 形成機構は完全に解明されていないが、2 サイクル目以降、SEI を透過して Li⁺イオンが挿入・脱離をするため、安定した充放電反応を発現すると考えられている。

一方、室温イオン液体 (常温型溶融塩) は低揮発性、難燃性、熱安定性の高いなどの特徴を有するが、この室温イオン液体を電解質として用いると、多くの場合、安定な SEI が形成されないため、“有機カチオンの挿入” によるグラフェン層構造の破壊や “有機カチオンの還元分解” が起こり、Li⁺イオンの挿入反応が発現しない。この問題を解決するため、SEI 形成剤として EC²⁾ や炭酸ビニレン (VC)³⁾ などの有機溶媒を添加し、充放電反応を発現させていたが、この手法は結果として、室温イオン液体の最大の特長である低揮発性、難燃性という性質を損なうものであった。

2006 年以降、(FSO₂)₂N⁻ (FSA⁻) イオンを含む室温イオン液体に Li⁺[(CF₃SO₂)₂N]⁻ (Li-TFSA) を溶解させたものを用い、天然黒鉛電極への Li⁺イオンの可逆的な挿入・脱離反応を発現することが報告された⁴⁾。しかし、FSA⁻イオン系の短所は、TFSA⁻イオン系と比べ、熱分解温度が 100 程度低いものが多い。このため、熱安定性の高い TFSA⁻イオンから成る室温イオンを LIB 用電解質として応用することが好ましいが、いずれも十分な負極特性を得られていないのが現状である。

近年の室温イオン液体電解質 / 黒鉛系負極に関する大部分の報告は、新規室温イオン液体を合成し、黒鉛系負極の電気化学的特性を評価したもので、室温イオン液体電解質 / 黒鉛系負極の SEI の成分やその形成機構の解析に関する報告はほぼ皆無である。

(2) これまでの研究成果を踏まえ着想に至

った経緯

研究代表者は 2005 年、AlCl₃-1-エチル-3-メチルイミダゾリウムクロリド (EMIC) を含む室温イオン液体中にてバインダーフリー天然黒鉛電極が負極として作動することを見いだしたが、良好な初回特性が得られなかった⁵⁾。2007 年、バインダーとしてポリアクリル酸 (PAA) を用いると、炭酸プロピレン電解質中で黒鉛系負極が充放電反応を発現することを見いだした⁶⁾。これは現行のバインダー (ポリフッ化ビニリデン: PVdF) を用いると、充放電反応を発現しないので、バインダーが黒鉛系負極の電気化学的挙動に影響を及ぼすことを示している。そこで 2011 年、AlCl₃-EMIC 系浴を用いて、これら 2 種類のバインダーが天然黒鉛負極の電気化学的挙動に及ぼす影響を検討した結果、PAA 被覆天然黒鉛負極の初回特性の方が良好であった。さらに、Li⁺イオンの挿入反応と共にアニオンが関与する副反応 (AlCl₄⁻ + 4Li(l) + 3e⁻ → Al + 4LiCl) が起こり、黒鉛表面に LiCl が析出することを明らかにした⁷⁾。これはアニオン種と SEI 形成機構が密接に関係していることを示している。さらに同年 10 月、TFSA⁻イオンを含む N,N'-ジエチル-N-メチル-N-(2-メトキシエチル)アンモニウム-ビス(トリフルオロメタン)スルホニル)アミド (DEME-TFSA) を電解質に用い、天然黒鉛負極の初回特性に関する予備的結果を得た⁸⁾。

以上の経緯で、研究代表者は熱安定性の高い TFSA⁻イオンを含む室温イオン液体中における黒鉛系負極の電気化学的挙動を解明する本研究を着想するに至った。

・引用文献

- 1) 「リチウム二次電池構成材料開発の現状と課題」, NEDO 燃料電池・水素技術開発部, 2007 年 3 月, pp.1-2.
- 2) Y. Katayama, et al, *Electrochem. Solid-State Lett.*, 6, A96 (2003).
- 3) H. Zheng, et al, *Carbon*, 44, 203 (2006).
- 4) M. Ishikawa, et al, *J. Power Sources*, 162, 658 (2006).
- 5) K. Ui et al, *J. Power Sources*, 146(1-2), 698 (2005).
- 6) K. Ui et al, *J. Power Sources*, 173, 518(2007).
- 7) K. Ui et al, *J. Power Sources*, 196, 3900 (2011).
- 8) 十和田 潤 他, 第 52 回電池討論会, 1C12, 2011 年 10 月 17 日, 東京 (タワーホール船堀).

2. 研究の目的

研究代表者はこれまで、室温イオン液体中における黒鉛系負極の 1 サイクル目 (初回) の充電反応が黒鉛層間への Li⁺イオンの挿入反応のみならず、室温イオン液体を構成する陰イオン (アニオン) の還元分解による副反応を伴うことを見いだした。本研究では、リ

チウムイオン電池の安全性向上対策として難燃化技術を構築するため、熱安定性の高い2種類のTFSA⁻イオンから成る室温イオン液体中での黒鉛系負極の電気化学的挙動を解明し、室温イオン液体電解質/黒鉛系負極の界面設計に関する基礎的知見を得ることを目的とした。そして、その知見をもとに、安全性の高い高性能リチウムイオン電池の実現を目指した。即ち、現行の有機溶媒系電解質中での黒鉛系負極の初期充放電特性と少なくとも同等の特性を得るため、室温イオン液体電解質/黒鉛系負極の界面設計に向けた基盤的研究を行った。

3. 研究の方法

本研究課題の研究方法を以下に示す。本研究に関する実験には、DEME-TFSA(関東化学, 純度99%)および*N*-メチル-*N*-プロピルピロリジニウム-ビス(トリフルオロメタンスルホニル)アミド(関東化学, 純度97%, P₁₃-TFSA)にLi-TFSA(森田化学工業, 純度100%)を溶解させた、1mol dm⁻³Li-TFSA / P₁₃-TFSAおよび1mol dm⁻³Li-TFSA / DEME-TFSAを電解質として使用した。図1に(a)DEME⁺イオン、(b)P₁₃⁺イオン、および(c)TFSA⁻イオンの構造式を示す。

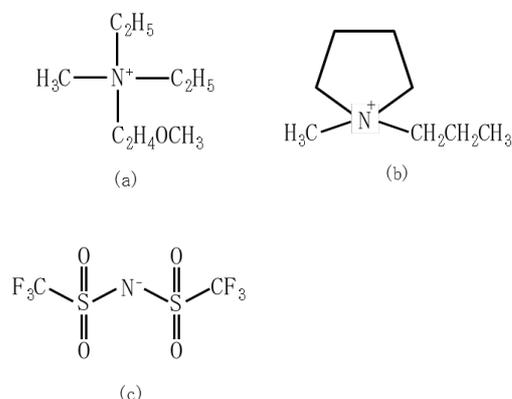


図1 室温イオン液体の構造式.

(a) DEME⁺イオン、(b) P₁₃⁺イオン、
(c) TFSA⁻イオン

(1) 室温イオン液体中における黒鉛系負極の初回充放電特性の評価

活物質としての天然黒鉛(中越黒鉛工業所製, 平均粒子径 5 μm, WF-5C)およびバインダーとの混合率を 90 : 10 (wt. %) とし、各々を分散媒に混合して室温にて一昼夜攪拌し、懸濁液を調製した。バインダーにはポリフッ化ビニリデン(クレハ製, KF ポリマーL#9130, PVdF)を、分散媒には *N*-メチル-2-ピロリドン(関東化学製, 99.0%, NMP)を用いた。これを集電体である Cu 箔(宝泉製, 厚さ 18 μm)に塗布し、80 °C で 1 時間予備乾燥し、プレス機で 40 MPa、10 分プレスした。その後、150 °C で 3 時間減圧乾燥したものを天然黒鉛電極とした。試験セルには、作製した天然黒鉛電極を作用極、金属リチウム箔(本荘ケミカル, 厚さ 170 μm)を対極に用いた。電

解質として 1mol dm⁻³ Li-TFSA/DEME-TFSA および 1mol dm⁻³ Li-TFSA/ P₁₃-TFSA を用いて、CR2032 コインタイプセルを作製した。試験セルは、アルゴンガスを充填したグローブボックス(美和製作所製, ガス循環精製機付パージ式グローブボックス装置 DB0-1NKP-1U-2 型, 露点 -80 °C)内で作製された。

電池充放電計測システム(北斗電工, HJR-1010mSM8A)を用いて、電流密度 35.0 mA g⁻¹ (1C = 350 mA g⁻¹)、電圧範囲 5 mV-2.0 V、充電完了後および放電完了後の休止時間 5 分、および測定温度 25 °C で定電流法による充放電作動試験を実施し、各室温イオン液体中における天然黒鉛電極の容量および充放電効率を測定した。また、周波数特性分析装置(エヌエプ回路設計ブロック, FRA5087)および電気化学測定システム(北斗電工, HZ-5000)を用い、周波数範囲 100 kHz-10 mHz および AC 振幅を ±10 mV の条件で、電気化学インピーダンス測定を行い、初回に 5 mV まで充電した天然黒鉛電極の抵抗変化と初回充電時における電解質/電極の界面挙動を解析した。

なお、Li(l)イオンの挿入に相当するカソード反応を充電反応、Li(l)イオンの脱離に相当するアノード反応を放電反応と定義した。

(2) 黒鉛系負極の表面に形成する SEI の成分およびその形成機構の解析

初回充放電過程における天然黒鉛電極の表面状態の変化を分析するため、電界放出形走査電子顕微鏡(JEOL 製, JSM-7001F, FE-SEM)およびエネルギー分散型 X 線分析装置(OXFORD 製, INCA X-act, EDX)を用いて、加速電圧 10 kV、作動距離 10 mm として、電解質に 24 時間浸漬後、充電 5 mV まで、および 2.0 V まで放電した天然黒鉛電極の表面について、元素の定性分析および定量分析を行った。また、X 線光電子分光型複合表面分析装置(Perkin-Elmer 製, PHI5600C1M, XPS)を用いて、初回充電後に生成する黒鉛粒子表面の析出物を分析した。XPS では、単色 Al Kα(1486.6 eV)を X 線源に用い、スポット径を 800 μm とした。測定から得られたスペクトルについて、解析ソフトウェア(アルバックファイ製, MultiPak ver. 8.0)を用いてフィッティングした。

さらに、飛行時間型二次イオン質量分析法(アルバックファイ製, PHI TRIFTV, ToF-SIMS)を用い、線源をビスマス、加速電圧 30 kV、測定範囲 100 × 100 μm として、SEI 成分と考えられる黒鉛粒子表面上の堆積物成分の解析をした。

上記の各種測定は *ex-situ* で行われた。その際、CR2032 コインタイプセルを用いて、定電流充放電試験と同等の条件で所定の電圧まで挿引した後、その電圧を 12 時間保持した。そのセルをガス循環精製機付グローブボックス装置内で解体し、採取した電極を炭

酸ジエチルで洗浄した後、室温にて一昼夜減圧乾燥した。乾燥した電極を銅テープで貼付した試料ホルダーを気密試料台に収納して運搬し、測定装置内の不活性雰囲気下で開放した。測定は大気非暴露下で実施した。

4. 研究成果

研究目的を達成するため、以下の3つの項目を実施した。

電解質に $1\text{mol dm}^{-3}\text{Li-TFSA/DEME-TFSA}$ (以下、DEME-TFSA系と示す) を用い、天然黒鉛電極の初回充放電特性に関する予備的検討結果を得た。図2に示すように、電流密度 35 mA g^{-1} (0.1C) において、放電容量 324.8 mAh g^{-1} および充放電効率 74.6% を示す。

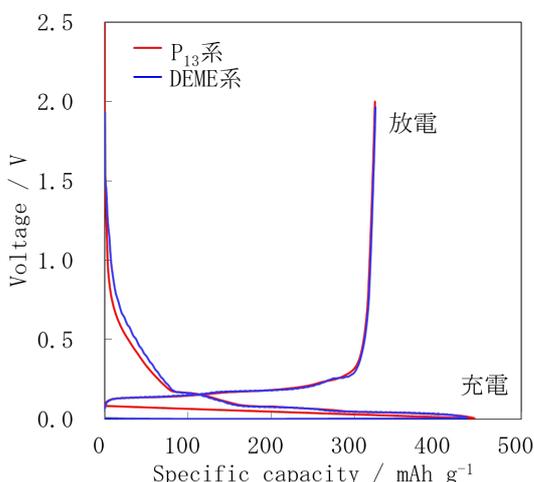


図2 DEME-TFSA系およびP₁₃-TFSA系中における天然黒鉛電極の初回充放電曲線。

(1) 黒鉛系負極の表面に形成するSEIの成分とその形成機構の解明

有機溶媒系電解質(有機溶媒系)では初回充電時、黒鉛粒子の表面に還元生成物(析出物)からなるSEI被膜が形成される。

そこで、DEME-TFSA系中で充電した天然黒鉛電極について、FE-SEM/EDXを用いて元素分布を分析した。その結果、初回充電後の黒鉛粒子表面にOおよびFを含む析出物が覆っていることがわかった。また、XPSの結果から、その析出物は主にLiF、C、O、およびSから成ることがわかった。これらはTFSA⁻イオンを構成する元素である。なお、有機溶媒系では、SEI成分中にアルキルリチウムカーボネートを含むが、DEME-TFSA系中で生成する析出物にはその存在が検出されなかった。

以上の結果、初回充電時にTFSA⁻イオンの分解反応が発生し、析出物の主成分は無機化合物であることが明らかとなった。

(2) 室温イオン液体中における黒鉛系負極の初回充電反応の解明

DEME-TFSA系中における初回充放電特性は有機溶媒系とは異なり、比表面積が大きくなると良好であった。

次に、電気化学インピーダンス測定から得られた初回充電後の天然黒鉛電極のナイキストプロットに対して、2つの時定数を持つ等価回路を用いて、パラメータフィッティングを行った。その結果、実測値とフィッティングの結果が一致したので、析出物が黒鉛粒子を覆うことが示唆された。

さらに、得られた電荷移動抵抗から求めたLi(I)イオンの脱溶媒和過程の活性化エネルギーは、有機溶媒系より、DEME-TFSA系の方が大きかった。これより、室温イオン液体系と有機溶媒系ではLi(I)イオンの脱溶媒和過程が異なることを見出した。

この成果を踏まえ、室温イオン液体電解質/黒鉛系負極の界面設計に関するさらなる基礎的知見を得るため、熱安定性が高くDEME-TFSAとほぼ同じ物性を示すP₁₃-TFSAを用いて、黒鉛系負極の初回充電反応解明を検討した。図2に示す $1\text{mol dm}^{-3}\text{Li-TFSA/P}_{13}\text{-TFSA}$ (以下、P₁₃-TFSAと示す) 中における天然黒鉛電極の初回充放電曲線は電流密度 35 mA g^{-1} (0.1C) において、初回放電容量 324.2 mAh g^{-1} および初回充放電効率 73.1% を示し、DEME-TFSA系中における天然黒鉛電極の初回充放電特性とほぼ同じである。このように、カチオン種をDEME⁺イオンからP₁₃⁺イオンに変えても、初回充放電特性はほぼ同じであった。

そこで、上記DEME-TFSA系と同様に、初回充電後の黒鉛系負極の表面をEDXおよびXPSを用いて分析したところ、LiF、C、O、F、およびSが検出された。この結果はDEME-TFSA系で黒鉛粒子の表面に生成した析出物の成分とほぼ同じであった。

さらに、ToF-SIMSを用いて、初回充電後の天然黒鉛電極の表面を分析した。その結果、上記2種類の室温イオン液体で生成する析出物には、LiFおよびLi₂SO₂が含まれることが明らかになった。

上記DEME-TFSA系と同様に、電気化学インピーダンス測定から得られた初回充電後の天然黒鉛電極のナイキストプロットに対して、2つの時定数を持つ等価回路を用いて、パラメータフィッティングを行った。その結果、実測値とフィッティングの結果が一致したので、P₁₃-TFSA系でもDEME-TFSA系と同様、析出物が黒鉛粒子を覆うことが明らかになった。

以上の結果、カチオン種にかかわらず、初回充電時にTFSA⁻イオンの分解による副反応が発生し、主成分として類似の無機化合物が生成することが明らかになった。

(3) 室温イオン液体中の黒鉛系負極の電気化学的挙動に影響を及ぼす要因の特定

上記パラメータを比較したところ、上記2種類の室温イオン液体中において黒鉛粒子の表面に生成した析出物の被膜抵抗に差異があった。このことから、カチオン種は析出物(被膜)の生成反応、すなわち、初回充電時

の副反応に影響を及ぼすことが示唆された。

また、DEME-TFSA系および P_{13} -TFSA系の放電特性を比較したところ、低電流密度ではほぼ同じであったが、高電流密度になると差異を生じた。上記パラメータとの関係性を評価したところ、被膜抵抗および高電流密度での放電特性に相関性が見られた。

以上の結果、カチオン種は被膜生成およびその抵抗、さらには高電流密度での放電特性に影響を及ぼすことが明らかになった。

(4) 総括

TFSAイオンから成る室温イオン液体では、カチオン種にかかわらず、初回充電時の副反応にはTFSAイオンの分解反応が発生し、析出物の主成分はLiF、C、O、およびSから成る無機化合物であったが、カチオン種は被膜生成およびその抵抗、さらには高電流密度での放電特性に影響を及ぼすことを明らかにした。

なお、本研究ではカチオン種であるDEME⁺イオンおよび P_{13}^+ イオンの分解反応を検出できなかったため、今後、より詳細な分析を要すると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計3件)

Koichi Ui, Hiroki Sato, Tomohiro Karouji, Jun Towada, Yoshihiro Kadoma, Tetsuya Tsuda, Tatsuya Takeguchi, Electrochemical Characteristics of Natural Graphite Electrode in TFSA-based Room-temperature Ionic Liquids, Proceedings of MS10 & AMS5, 231-235 (2015).

Jun Towada, Tomohiro Karouji, Hiroki Sato, Yoshihiro Kadoma, Kazuaki Shimada, and Koichi Ui, Charge-discharge Characteristics of Natural Graphite Electrode in *N,N*-Diethyl-*N*-Methyl-*N*-(2-methoxyethyl)ammonium Bis(trifluoromethylsulfonyl)amide Containing Lithium Ion for Lithium-ion Secondary Batteries, J. Power Sources, 275, 50-54 (2015).

DOI:10.1016/j.jpowsour.2014.10.101

Koichi Ui, Tomohiro Karouji, Jun Towada, Kazuaki Shimada, Tetsuya Tsuda, and Yoshihiro Kadoma, Analysis of Surface Deposit Formed on the Natural Graphite Negative Electrode in *N,N*-Diethyl-*N*-Methyl-*N*-(2-methoxyethyl) Ammonium Bis(trifluoromethylsulfonyl)Amide Containing Lithium Ion, ECS Trans., 62 (1), 273-280 (2014).

DOI: 10.1149/06201.0273ecst

[学会発表](計10件)

宇井幸一, 佐藤宏樹, 菊池研太, 十和田潤, 門磨義浩, 竹口竜弥, リチウムイオンを含む P_{13} -TFSA中における天然黒鉛電極の電気化学的反応の解析, 第47回溶融塩化学討論会, 2015. 10. 28, 神戸大学(神戸市).

Koichi Ui, Hiroki Sato, Tomohiro Karouji, Jun Towada, Yoshihiro Kadoma, Tetsuya Tsuda, and Tatsuya Takeguchi, Electrochemical Characteristics of Natural Graphite Electrode in TFSA-based Room-temperature Ionic Liquids, 10th International Conference on Molten Salt Chemistry and Technology (MS10) and 5th Asian Conference on Molten Salt Chemistry and Technology (AMS5), 2015. 6. 11, Northeastern University (Shenyang, China).

宇井幸一, 佐藤宏樹, 十和田潤, 門磨義浩, 竹口竜弥, TFSA系室温イオン液体中における天然黒鉛電極の電気化学的挙動の解析, 電気化学会第82回大会, 2015. 3. 15, 横浜国立大学(横浜市).

宇井幸一, 佐藤宏樹, 唐牛倫啓, 十和田潤, 門磨義浩, 津田哲哉, 竹口竜弥, 室温イオン液体のカチオン種がリチウムイオン電池用天然黒鉛電極の充放電特性に及ぼす影響, 第55回電池討論会, 2014.11.19, 国立京都国際会館(京都市).

宇井幸一, 佐藤宏樹, 唐牛倫啓, 十和田潤, 門磨義浩, 津田哲哉, 竹口竜弥, 室温イオン液体のカチオン種がリチウム二次電池用天然黒鉛負極の電気化学的特性に及ぼす影響, 平成26年度化学系学協会東北大会, 2014. 9. 21, 山形大学米沢キャンパス(米沢市).

Koichi Ui, Hiroki Sato, Tomohiro Karouji, Jun Towada, Yoshihiro Kadoma, Kazuaki Shimada, Tetsuya Tsuda, and Tatsuya Takeguchi, Influence of Cation Types of Room-temperature Ionic Liquid on Electrochemical Characteristics of Natural Graphite Electrode, 7th International Conference on Advanced Lithium Battery for Automobile Applications (ABAA-7), 2014. 7.31, Nara Prefectural New Public Hall (Nara, Japan).

K. Ui, T. Karouji, J. Towada, K. Shimada, T. Tsuda, and Y. Kadoma, Analysis of Electrochemical Behavior of Natural Graphite Electrode in *N,N*-Diethyl-*N*-Methyl-*N*-(2-methoxyethyl) Ammonium Bis(trifluoromethylsulfonyl)Amide Containing Lithium Ion, 17th International Meeting on Lithium Batteries (IMLB-17), 2014. 6. 13, Villa Erba (Como, Italy).
宇井幸一, 唐牛倫啓, 十和田潤, 門磨

義造, リチウムイオンを含む DEME-TFSA 中における天然黒鉛電極の電気化学的反応の解析, 第 45 回溶融塩化学討論会, 2013. 11. 21, 慶応義塾大学 (横浜市).

宇井幸一, 唐牛倫啓, 十和田 潤, 門磨義造, DEME-TFSA 系室温イオン液体中における天然黒鉛電極の電気化学的特性, 第 54 回電池討論会, 2013.10. 7, 大阪国際会議場 (大阪市).

Koichi Ui, Tomohiro Karouji, Jun Towada, Yoshihiro Kadoma, Naoaki Kumagai, Influence of Natural Graphite Particle Size on Its Electrochemical Characteristics in TFSA Type Room-temperature Ionic Liquids, International Symposium for the 70th Anniversary of the Tohoku Branch of the Chemical Society of Japan, 2013. 9. 29, Tohoku University (Sendai, Japan).

〔その他〕

ホームページ等

岩手大学リポジトリ

<http://ir.iwate-u.ac.jp/dspace/>

理工学部研究シーズ集

<http://www.eng.iwate-u.ac.jp/jp/seeds/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇井 幸一 (UI KOICHI)

岩手大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：6 0 3 6 0 1 6 1

(2) 研究連携者

門磨 義造 (KADOMA YOSHIHIRO)

岩手大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：9 0 4 3 1 4 6 0