

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 9 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289376

研究課題名(和文) リチウムイオン二次電池電極材料の緩和解析

研究課題名(英文) Relaxation Analysis of Electrode Materials for Secondary Lithium Ion Battery

研究代表者

八尾 健 (YAO, Takeshi)

香川高等専門学校・その他部局等・校長

研究者番号：50115953

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：リチウムイオン二次電池電極材料からグラファイト、 LiNiO_2 、 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ およびメカノケミカル処理を施した LiMn_2O_4 を取り上げ、電気化学的にリチウムを挿入あるいは脱離した後の経時変化をX線リートベルト解析により調べた。速度論的に有利な充放電時の構造から熱力学的平衡状態へと至る構造緩和を明らかにし、サイクル特性などの電池性能について議論した。また $-\text{Fe}_2\text{O}_3$ については、これまでのX線回折に加え、XAFS、磁化率測定、およびNMRにより緩和挙動を包括的に調べ、充放電および緩和挙動の詳細を明らかにした。緩和解析が、充放電機構や電極性能の評価に、極めて有効であった。

研究成果の概要(英文)：Crystal Structural changes after the termination of lithium insertion and/or extraction have been investigated on graphite, LiNiO_2 , $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ and mechanochemically activated LiMn_2O_4 of anode or cathode materials of lithium ion batteries by means of X-ray diffraction coupled with the Rietveld analysis. We clarified the structural relaxation process from the kinetically favorable structure at the charge-discharge state toward the equilibrium one to discuss battery performance as cyclability. We also performed the relaxation analyses comprehensively on $-\text{Fe}_2\text{O}_3$ by using XAFS, SQUID and NMR in addition to precedent XRD to make clear the lithium insertion, extraction and relaxation behaviors accompanied by the site migration of Fe ions. It has been shown that the relaxation analysis is a powerful technique to evaluate the charge-discharge mechanism or battery performance.

研究分野：材料電気化学

キーワード：緩和解析 リチウムイオン二次電池 電極材料 結晶構造 X線回折 リートベルト解析 拡散 平衡状態

1. 研究開始当初の背景

ハイブリッド自動車や電気自動車用電源あるいは再生可能エネルギーの電力平準化用電源への応用のために、優れた蓄電システムの需要が高まっている。高い電力密度とエネルギー密度を兼ね備えたリチウムイオン二次電池は優れた蓄電デバイスであり、さらなる性能向上に向けて研究開発が精力的に進められている。電極材料の構造や物性の評価は平衡状態での解析のみならず、充放電中の動的状態や、さらにはその過渡的状態の解析も重要な情報を与える。リチウムイオン二次電池負極材料 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ に電気化学的にリチウムを挿入すると、挿入停止後も長時間に渡って緩やかな電位上昇を示す。これは研究者の間では知られていたが、詳細な機構は明らかにされていなかった。我々はこの電位変化を結晶構造変化に結びつけ、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ にリチウム挿入後の様々な経過時間で X 線構造解析を行い、結晶構造の変化を調べた。その結果 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ にリチウムを挿入すると、スピネル型構造中で鉄の占有率は 8a サイトで減少し 16c サイトで増加するが、リチウムの挿入を停止すると、鉄の 16c サイト占有率は減少して 8a サイト占有率が増加することがわかった。すなわち、リチウムは挿入時には鉄を 16c サイトに追い出して優先的に 8a サイトを占め、リチウムの挿入を停止するとより安定な状態に向かって、リチウムは徐々に 16c サイトに移動して鉄は 8a サイトに戻ることが明らかになった。(S. Park, M. Oda, T. Yao, "Relaxation Structure Analysis of Li Inserted $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ", *Solid State Ionics*, 203, 29-32 (2011).)

このようにして、充放電停止後に電極材料の状態解析を行うことにより、リチウムの挙動を解析することが可能であることが初めて示された。我々はこの解析を「緩和解析」と名付け、電極材料の動的な状態の研究に重要な知見を与える画期的な手法と位置づけ、挑戦的萌芽研究(平成 24 年度~25 年度)「電極材料の緩和解析」(研究代表者 八尾 健)において、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ や LiMn_2O_4 、 LiFePO_4 、 LiCoO_2 等の酸化物系リチウムイオン二次電池電極材料に対して緩和解析を行った。

2. 研究の目的

先行的に行った挑戦的萌芽研究では、いくつかの酸化物系リチウムイオン二次電池電極材料に対して緩和解析を適用し、この手法が電極材料の動的状態と平衡状態の両方の情報を得る強力な方法であることを明らかにしてきた。そこで本研究ではこれを継続発展させ、(1)さらに様々なリチウムイオン二次電池電極材料に対して緩和解析を適用し、リチウムの挿入脱離過程とその充放電特性との関係を明らかにすること、および、(2) X 線構造解析ばかりでなく相補的な他の様々な手法も用いて、X 線回折のみでは十分得られなかった緩和挙動の詳細を明らかにすることを目的とした。以下にそれぞれの項での目的を記載する。

(1) 本研究では、負極材料として広く用いられている層状構造を示すグラファイト、電気自動車やプラグインハイブリッド車用の電源として有望な高容量 4 V 級の LiNiO_2 および $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ カソード材料、5 V 級カソード材料の $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 、サイクル特性向上のためメカノケミカル処理を施した LiMn_2O_4 カソード材料といった、応用的観点からも極めて重要ないくつかの電極材料をとりあげ、緩和解析による詳細な充放電機構の解明しサイクル特性などの電池性能について議論することにした。またグラファイトについては、実験結果と第一原理計算を用いたシミュレーションを比較して、グラファイトのステージ構造の変化についても議論を行う。

(2) 緩和過程において他のイオンのサイト遷移を伴う大きな構造変化を示した $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ に着目し、その挙動を XAFS 測定、磁化率測定ならびに NMR 測定を用いて詳細に調べることにした。

3. 研究の方法

リチウムイオン二次電池用正極および負極材料の $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、グラファイト、 LiNiO_2 、 $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ 、 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ あるいは LiMn_2O_4 は、市販の試料を購入、あるいは固相反応法やメカノケミカルな手法で合成した。これらの活物質を導電剤・結着剤とともに集電体上に成形して試験極とし、対極(および参照極)には金属リチウムを用いて、ガラス製ビーカーセルあるいは金属セルを作成した。それぞれの電極活物質に電気化学的にリチウムを挿入あるいは脱離し、電流停止後直ちに電池を解体して試験極をアルゴンガスで置換したグローブボックス内で取り出し、緩和解析に供した。以下、(1) 各種リチウムイオン二次電池電極材料の X 線回折による緩和実験および、(2) X 線回折以外の様々な手法を用いた緩和解析の実験方法についてそれぞれ記述する。(1) 各種リチウムイオン二次電池電極材料の緩和解析

取り出した試料はアルゴンガス雰囲気下で気密試料台にセットし、X 線回折実験を所定の時間おきに測定した。得られた回折パターンは RIEVEC コードを用いて Rietveld 解析を行い、構造パラメータを得た。

① グラファイト負極については、Li 挿入後あるいは脱離後のステージ構造の変化と層間距離に着目して解析を行い、リチウムの配列について議論した。また、ステージ構造の安定性については、Advance/PHASE パッケージを用いて DFT 計算を行うことにより実験結果とあわせて考察した。

② LiNiO_2 系正極材料では、 200mAhg^{-1} を越える領域で H2 相と H3 相の 2 相共存下での緩和過程を測定し、電極構造安定性について知見を得た。

③ $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ は高電位領域で緩和解析を行い、Li-rich 相と Li-lean 相の変化について論じた。

④ メカノケミカル処理を施した LiMn_2O_4 は、サイクル特性向上のメカニズム解明を主眼に置いて緩和解析を行った。

(2) 様々な測定法を用いたリチウム挿入 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の緩和解析

$\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ にリチウムを電気化学的に挿入し、挿入直後の試料と十分時間の経過した試料に対して XAFS 測定、磁化率測定、および NMR 測定を行い、様々な観点から $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ の構造緩和挙動を明らかにした。XAFS 測定では Al 集電体ごと吸収スペクトルを測定し、磁化率、NMR 測定ではリチウム挿入後 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 合剤を Ni メッシュ集電体から取り出して測定した。

① XAFS 測定はあいちシンクロトロン BL5S1 ラインを使用し 6800~8200 eV の領域で吸収データを収集した。解析は Athena コードおよび Artemis コードを用いて行った。

② 磁化率測定は東京工業大学フロンティア材料研究所の共同利用により、SQUID (Quantum Design, MPMS) を用いて行った。 10^3 Oe の外部磁場を印加し 300 K で磁化率の経時変化を観測した。

③ NMR 測定は、東レリサーチセンター所有の Bruker Biospin 製 AVANCE400 を用いて、 $^7\text{Li-NMR}$ (155.6500000 MHz) シグナルをシングルパルスおよびハーンエコー法で、それぞれスピンおよび static 状態で観測した。

4. 研究成果

(1) 各種リチウムイオン二次電池電極材料の緩和解析

① ステージ構造を示すグラファイト負極の緩和解析

グラファイトにリチウムを電気化学的に挿入すると、ステージ 1 とステージ 2 の 2 相の回折ピークが現れ、モル分率は緩和過程においては図 1 のように、ステージ 1 が減少してステージ 2 が増加した。またステージ 2 の 2 種類の層間距離 D_w および D_n は図 2 のような緩和挙動を示した。ステージ 2 の 2 種類の層間が、リチウムの濃度の高い広い層間 D_w とリチウム濃度の低い狭い層間 D_n からなる考えると、リチウム挿入時は多くの欠陥を含みながらリチウムは均一にグラファイト層間を占めてステージ 1 を過剰に形成し、挿入停止後は最安定状態に向かってリチウム占有率の高い層間と低い層間からなるステージ 2 に変化することがわかった。また欠陥をもつステージ 1 よりもステージ 2 を形成した方が安定であることは、DFT による第一原理計算からも確認した。さらにリチウム挿入速度の違いについて調べると、低い電流密度で挿入した場合は、挿入直後の構造がより熱力学的安定状態に近く、緩和時の構造変化も小さいことが明らかになった。

一方リチウムを挿入したグラファイトからリチウムを電気化学的に引き抜くと、挿入方向での結果と同様に、脱離時にはステージ 1 が過剰に生成し、緩和過程でステージ 1 の一部がステージ 2 に変化した。このことからい

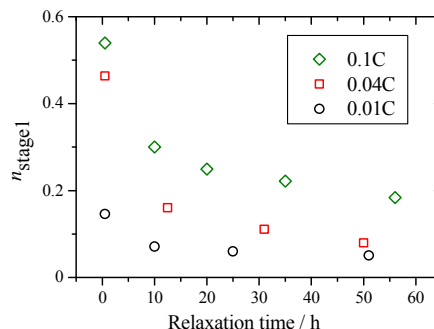


図 1 リチウム挿入後のグラファイトのステージ 1 のモル分率の緩和時間における変化。

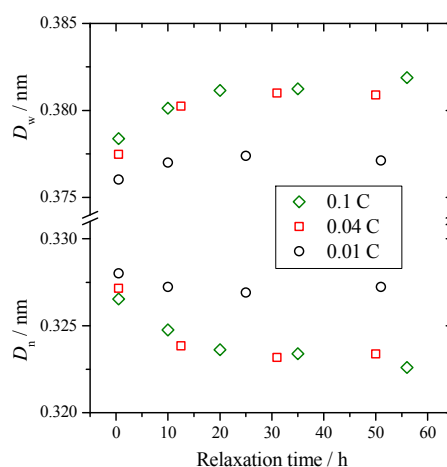


図 2 リチウム挿入後のグラファイトのステージ 2 における 2 種類の層間距離の変化。

ずれの方向でも、リチウムの挿入・脱離は速度論的に有利なランダムにリチウムが配置したステージ 1 で優先的に行われ、挿入・脱離を停止すると熱力学的に安定なステージ構造の分率に向かって変化することが明らかになった。

グラファイトは現在主要なリチウム二次電池負極材料であり、充放電メカニズムについては詳細に調べられているが、緩和挙動についてはあまり知られていない。本研究で得られた知見は、基礎的なインターカレーションの観点からも実用材料の観点からも大きな意義を持つ。

② 高容量 LiNiO_2 系正極材料の緩和挙動と H2-H3 相転移

LiNiO_2 は 200 mAhg^{-1} を越える充放電容量を持つものの、深い放電を行うと H2 相から c 軸長が大きく異なる H3 相に変化し、構造安定性の面から好ましくない。一方 Ni の一部を Co と Al で置換した $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Al})\text{O}_2$ 系では高温安定性や電気化学的特性が向上することが報告されている。そこで $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}_2$ および $\text{Li}_x(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Al})\text{O}_2$ の組成式で $x \leq 0.12$ の領域までリ

チウムを引き抜き、その緩和挙動について Co および Al による置換の効果を比較した。

いずれの系でも a 軸長はほとんど変化せず、 c 軸長に大きな差異が見られた。図 3 に LiNiO_2 の c 軸長の緩和による変化を示す。H2 相の c 軸長は緩和時間が経過してもほとんど変化せず、またリチウム濃度によらずほぼ一定値を示した。これに対し、H3 相では緩和時間とともに c 軸長は低下した。リチウム量 x が少ないほど c 軸が短いことを考慮すると、充電時には速度論的に有利な H3 相を過剰に形成し、脱離を停止すると周囲の H3 相からリチウムを集めて H2 相に転移することがわかった。一方 $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ では H2 相の c 軸長も平均リチウム量 x によって変化するが、緩和による c 軸長の変化は H2、H3 相とも LiNiO_2 に比べて小さい (図 4)。多相解析から H3 相から H2 相への転移が生じていることは明らかであるが、 c 軸長のデータから x の値によって H2 相の組成も変化していると考えられ、 $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ では H3 相が H2 相に転移するのに必要なリチウム量が少なく、残存 H3 相の緩和時のリチウム濃度変化も少ないと言える。このような $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ の性質が良好な電池特性をもたらすと考えられた。

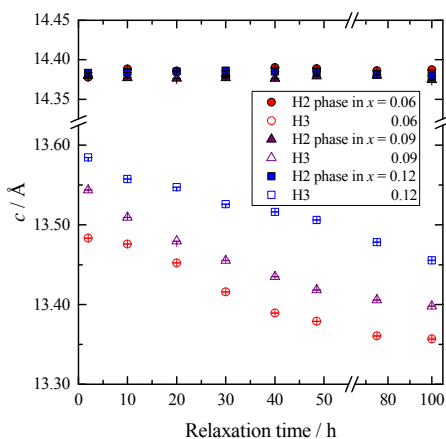


図 3 充電後の LiNiO_2 における H2 および H3 相の緩和に伴う c 軸長の変化。

③ 5V 級 $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 系正極材料の緩和解析

スピネル型構造を示す $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 系は高い放電電位を示すことから注目されている。 $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ の組成式で $x = 0.1 \sim 0.2$ までリチウムを引き抜き、充電停止後の構造緩和を観測した。図 5 に Li-rich 相と Li-lean 相の 2 相共存で解析したモル分率の変化を示す。Li-lean 相の割合は緩和時間に伴い緩やかに低下することから、充電中のリチウム脱離時には平衡状態に比べて Li-lean 相が過剰に生成することがわかった。Li-rich 相と Li-lean 相では格子定数には大きな差異は認められなかったが、Li-lean 相の方が LiO_4 四面体のサイズが大きく Li サイトに空孔が多いことから、速度論的にはリチウムの脱離に有利であるため、充電時には Li-lean 相が多く生成するものと考えら

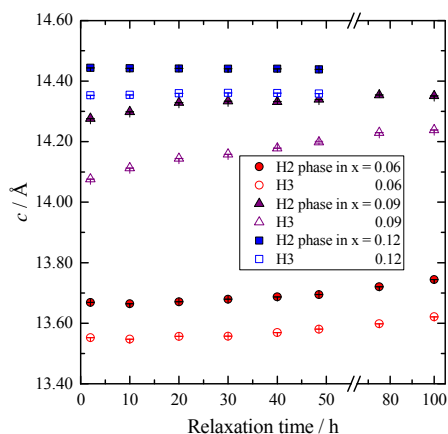


図 4 充電後の $\text{Li}(\text{Ni},\text{Co},\text{Al})\text{O}_2$ における H2 および H3 相の緩和に伴う c 軸長の変化。

れた。また、電流密度が大きいほど Li-lean 相のモル分率の変化が大きく、高速充電時には Li の拡散を促進するために、より多くの Li-lean 相を形成したと考えられる。

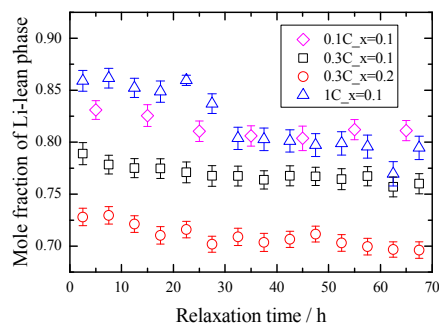


図 5 充電後の $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ の Li-lean 相のモル分率の変化。

④ メカノケミカル処理を施した LiMn_2O_4 の緩和解析

LiMn_2O_4 正極材料は安価で安全性が高く、良好な放電電位かつ容量を示すものの、とくに高温でサイクル劣化が顕著であるという短所をもつ。我々はメカノケミカルな処理を施すことにより LiMn_2O_4 のサイクル特性が向上することを見だし、合成条件の最適化により極めてサイクル安定性の優れた LiMn_2O_4 を開発してきた。本研究ではこの物質について X 線緩和解析を適用し、サイクル特性向上のメカニズムに関する知見を得ることにした。

2 相共存を仮定して解析を行ったところ、リチウム脱離後はメカノケミカル処理を行った LiMn_2O_4 でも通常の試料と同様に、緩和時間とともに Li-rich 相のモル分率が増加し、充電時にリチウムの拡散に有利な Li-lean 相が過剰に生成することがわかった。しかし緩和に伴うモル分率の変化は通常の試料に比べて少なく、メカノケミカル処理を行った

LiMn₂O₄ではリチウム脱離が平衡状態に近い構造で行われると考えられた。またリチウム挿入方向でも同様の緩和過程が観測され、さらにメカノケミカル処理を行った LiMn₂O₄では大きな格子定数を維持するという結果が得られた。メカノケミカル処理を施した試料では、平衡状態に近い構造での充放電と大きな格子定数のため、スムーズに充放電を行うことができ、サイクル特性が向上するものと考えられる。

(2) 様々な測定法を用いたリチウム挿入 γ -Fe₂O₃ の緩和解析

① XAFS 測定による鉄イオンの緩和挙動の観測

γ -Fe₂O₃ に Li_{1.5}Fe₂O₃ まで電気化学的にリチウムを挿入し、挿入直後の試料と十分緩和した試料に対して XAFS 解析を行った。図 6 に XANES 領域のスペクトルを示す。Fe₂O₃ と比較すると、Li_{1.5}Fe₂O₃ は鉄の平均価数が低下するため、ピークが低エネルギー側にシフトする。メインピーク B は FeLs \rightarrow 4p σ 遷移に相当すると考えられる。Li_{1.5}Fe₂O₃ では緩和中に平均価数が変化しないので、緩和した試料で見られた吸収端の高エネルギー側へのシフトとメインピークの強度低下は、局在性が強くイオン半径の小さい四面体サイトへの鉄イオンの移動として説明できる。またスペクトル中の C 位置に特徴的なピークが出現しないことから、四面体サイトへ移動した鉄は Fe²⁺ではなく Fe³⁺と推測できる。プリエッジ領域 A を拡大して図 7 に示す。7112 eV のピークは、四面体サイトの Fe³⁺ の 1s \rightarrow 3d 遷移に由来するピークと考えられる。緩和時間の経過により 7109.5 eV 以下の強度が低下する一方で 7112 eV の強度が増加することからも、緩和過程で四面体サイト中に増加したのは Fe²⁺ではなく Fe³⁺と考えられた。

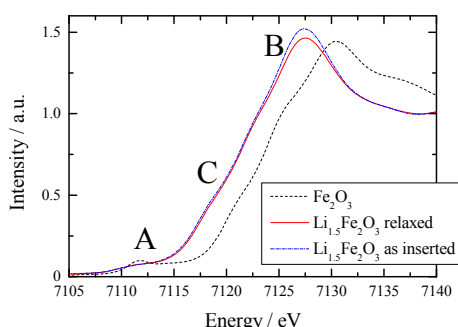


図 6 緩和過程前後の γ -Li_{1.5}Fe₂O₃ の XANES スペクトル。

② 緩和過程における磁化率の変化

緩和過程においてスピネル型構造中で鉄がサイト移動することから、SQUID を用いて磁化率の変化を調べた。図 8 に γ -Fe₂O₃ にリチウムを電気化学的に挿入した後の磁化率の緩和時間変化を示す。リチウムを挿入しない試料

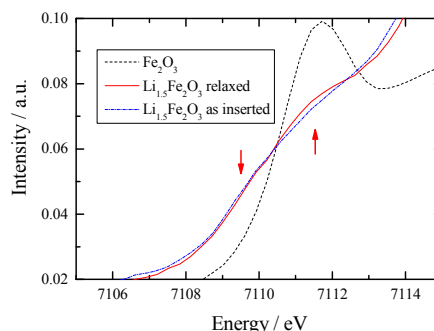


図 7 緩和過程前後の γ -Li_{1.5}Fe₂O₃ の XAFS プリエッジ領域。

ではこのような磁化率の時間変化を示さないことから、確かに鉄の結晶サイト間の移動を伴う緩和現象であることがわかる。

X 線回折で求めた 8a サイトおよび 16c サイトの占有率を適当なパラメータを用いて線形結合でフィットさせると図 8 の□のプロットのようにになる。詳細な議論をするにはスピンの計算をする必要があるが、緩和過程は鉄のサイト占有率の変化とおおよそ類似した傾向を示すことがわかった。

③ NMR を用いた緩和解析

Li 挿入直後の γ -Li_{1.5}Fe₂O₃ と十分緩和した γ -Li_{1.5}Fe₂O₃ について、いくつかの NMR 手法を駆使してリチウム周囲の環境の変化を観測した。両者の NMR シグナルは極めて類似したものであったが、それでもハーンエコー static の NMR データでは、1400 ppm のシグナルに対して 800 ppm のピークが緩和時間とともに

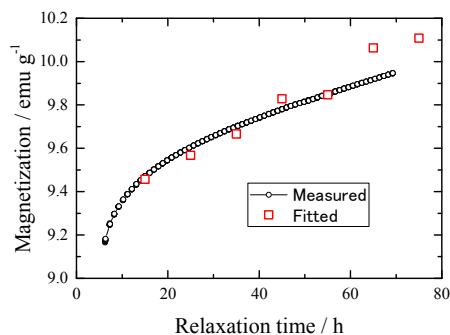


図 8 γ -Fe₂O₃ のリチウム挿入後の磁化率の経時変化。

相対的な増大し、緩和過程でスピネル型構造中でのリチウムイオン周囲の環境が変わっていることがわかった。鉄が 16c から 8a サイトに戻るにつれてリチウムが 8a から 16c サイトへ移動する構造モデルと比較すると、リチウムの八面体配位の増加が 800 ppm のピークの増大をもたらすと考えられた。

以上のように緩和解析は、通常の Ex-situ 実

験とも Operando 測定に代表される In-situ 実験とも異なり、平衡状態からの変化やその速度論的な知見を得る強力な手法である。本研究によって正極および負極材料の充放電特性に関する挙動を明らかにすることができた。

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 2 件)

① K. Yamada, S. Takai, T. Yabutsuka, T. Yao, "Relaxation Analysis of $\text{LiNi}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ 5V Cathode Material by Means of the Rietveld Refinement", *Electrochemistry*, **84**, 808-811, (2016).

② A. Tamura, S. Takai, T. Yabutsuka, T. Yao, "Relaxation Analysis of Li_xNiO_2 and $\text{Li}_x(\text{NCA})\text{O}_2$ in the Deeply Lithium Extracted Region ($x \leq 0.12$)", *J. Electrochem. Soc.*, in press.

[学会発表] (計 8 件)

① T. Kitamura, S. Park, S. Takai, T. Yao, "Relaxation Stage Analysis of Inserted Graphite by Means of One-dimensional Rietveld Method", the 225th Electrochemical Society Meeting, 2014.05.13, Orland, FL, USA.

② T. Kitamura, S. Takai, T. Yao, "Relaxation Rietveld Stage Analysis of Li Inserted Graphite", the 226th Electrochemical Society Meeting, 2014.10.07, Cancun, Mexico.

③ S. Takai, H. Kawaji, A. Tamura, T. Yabutsuka, T. Yao, "Relaxation Behavior of Magnetization for Electrochemically Lithium Inserted Gamma- Fe_2O_3 ", the 228th Electrochemical Society Meeting, 2015.10.13, Phoenix, AZ, USA.

④ Akihiro Tamura, S. Takai, T. Yabutsuka, T. Yao, "Relaxation Structure Analysis of Li_xNiO_2 ($x=0.09$) after Li-Extraction", the 228th Electrochemical Society Meeting, 2015.10.13, Phoenix, AZ, USA.

⑤ K. Yamada, S. Takai, T. Yabutsuka, T. Yao, "Rietveld Relaxation Analysis on $\text{Li}_x\text{Ni}_{0.5}\text{Mn}_{1.5}\text{O}_4$ ($x=0.1, 0.2$) 5V Cathode Material", 2016.05.31, the 229th Electrochemical Society Meeting, 2016.05.31, San Diego, CA, USA.

⑥ S. Takai, A. Tamura, S. Kaji, T. Yabutsuka, T. Yao, "Difference of Relaxation Behavior Between LiNiO_2 and $\text{Li}(\text{Ni}, \text{Co}, \text{Al})\text{O}_2$ after Lithium Extraction", Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRiME 2016), 2016.10.05, Honolulu, HI, USA.

⑦ M. Yamamoto, H. Okano, K. Yamada, S. Takai, T. Yabutsuka, T. Yao, "Relaxation Analysis of

Electrochemically Lithium Inserted $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ By Using a Solid-State Li NMR", Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRiME 2016), 2016.10.05, Honolulu, HI, USA.

⑧ T. Endo, H. Okano, T. Kitamura, S. Takai, T. Yabutsuka, T. Yao, "Lattice Energy Calculation for Li Inserted Graphite at Relaxation Process", Pacific Rim Meeting on Electrochemical and Solid-State Science (PRiME 2016), 2016.10.05, Honolulu, HI, USA.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.kagawa-nct.ac.jp/>

<http://fssc.energy.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

八尾 健 (YAO Takeshi)

香川高等専門学校・校長

京都大学名誉教授

研究者番号：50115953

(2) 研究分担者

岡野 寛 (OKANO Hiroshi)

香川高等専門学校・教授

研究者番号：60342565

相馬 岳 (SOUMA Takeshi)

香川高等専門学校・准教授

研究者番号：60508266

遠藤 友樹 (ENDO Tomoki)

香川高等専門学校・准教授

研究者番号：60448024

山本 雅史 (YAMAMOTO Masashi)

香川高等専門学校・助教

研究者番号：60448024

高井 茂臣 (TAKI Shigeomi)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・准教授

研究者番号：10260655

藪塚 武史 (YABUTSUKA Takeshi)

京都大学・大学院エネルギー科学研究科・助教

研究者番号：20574015