

令和 2 年 9 月 16 日現在

機関番号：52301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05462

研究課題名(和文)ゼオライトにおけるポーラロン誘起金属絶縁体転移をめぐる局所場ゆらぎ

研究課題名(英文)Local field fluctuation comes from insulator-to-metal transition in zeolite

研究代表者

五十嵐 睦夫 (IGARASHI, Mutsuo)

群馬工業高等専門学校・電子メディア工学科・教授

研究者番号：60259819

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：LSX型ゼオライトへのNa吸蔵に際して起こる絶縁体金属転移を対象として、NMRにより局所場ゆらぎの変化を詳しく追った。無吸蔵でも局所場揺らぎ自体が存在することを見出し、活性化エネルギーが何段階かの特徴的な吸蔵量を境にして段階的に増加することを突き止めた。また、NaをRbへ置換した試料を初めて合成し、Naの場合と同様に絶縁体金属転移が起こることを見出した。最大吸蔵量では電気抵抗率がNaの場合より数桁小さく、吸蔵にあたってはバルクにおけるフェルミ面の状態密度がNaよりも数倍程度保持率が高いことを示した。そして局所場ゆらぎはRbの場合でも存在し、活性化エネルギーは数分の一に小さくなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ゼオライトは軽元素だけでできた物質であり、自然界にありふれた無害物質である。環境にやさしく、公害とは無縁である。年々重要度が高まっているSDGsの呼びかけに代表されるサステナビリティ社会を構築する観点から考えれば、この物質を使った機能性材料の構成を探求することは時代の要請にかなっている。本研究課題から得られた知見によって、ゼオライトはそれ自身に内包する空間における空きサイトが熱運動を通して電子系の物性へ影響深い存在となっていることが一層と浮き彫りになってきた。環境へ配慮した電子物性素子の展開に向けた礎という意味合いを持つ研究となっており、今後の展開が望まれる。

研究成果の概要(英文)：We aimed to investigate property of local field fluctuation in zeolite with absorbed external Na. Adopting NMR technique to perform it for LSX type zeolite, we found that relatively low energy fluctuation existed in the case of no loading and value of activation energy changed at several characteristic loading level of absorption. We at first in the world have succeeded to synthesize Rb-replaced sample and confirmed that it took insulator-to-metal transition. Resistivity of such the sample shows smaller value than Na case. It has also been shown that the density of state at Fermi level estimated with NMR shift and spin-lattice relaxation time was held for several times larger degree of preservation than Na case. Rb gives more lighter barrier than Na for local field fluctuation.

研究分野：物性実験

キーワード：ゼオライト NMR 磁化率 フェルミ面状態密度 ポーラロン 局所場揺らぎ 熱活性磁化 コリン八則

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

LSX 型ゼオライトは高濃度の外来 Na 吸蔵に際し、絶縁体金属転移を起こす。この相転移は熱活性型の常磁性磁化を伴うものであるが、現象の発見当初、磁化の発現機構を理解するには発現を促す局所環境因子に関する知見が不足していた。その後、核磁気共鳴を用いた研究がおこなわれ、ポーラロン効果はその因子であることが確認されるに至っていた。その核心は、吸蔵されたアルカリ原子が変位に対する比較的低いポテンシャル障壁を伴っており、それを越える熱活性運動の結果として局所場揺らぎを伴った磁化が発生するということである。その結果として、伝導電子はポーラロン効果によって熱活性的に局在化し、常磁性磁化となって観測される。この描像の確立にあたっては、吸蔵された原子だけが局所場揺らぎを与える存在なのであると推測されていた。

2. 研究の目的

上記の背景のもと、外来のアルカリ金属原子を吸蔵したゼオライト系における局所場の揺らぎを理解するための知見獲得を研究目的とする。特に、低吸蔵量の場合にどのようなポテンシャル障壁の状況となっているかが核心的な関心である。また、アルカリ金属の吸蔵量だけでなく、その種類の違いによる相違の把握についても研究対象とする。

3. 研究の方法

標的としたゼオライトを加熱脱水し、その上でアルカリ金属原子を吸蔵させる。研究対象試料には化学分析をおこない、組成などの素性がはっきりとした状態での評価ができるようにする。物性評価にあたっては、まず基礎データとして光学吸収スペクトルを測定する。その吸収ピーク波長に対して球形井戸型ポテンシャルモデルを適用し、電子の存在場所を推定する。また、電気伝導特性の評価のため、電気抵抗率の温度変化を測定する。以上の結果を照合し、試料相の帰属を定める。

他方、磁性の評価にあたっては、まず磁化率の温度変化を測定する。場合によっては ESR 測定をおこない、磁性解析の参考情報として活用する。その後、特徴的な特性を持つ試料を選んで NMR スペクトルの測定をおこなう。周波数掃引法によりスペクトルの全体像を把握したのち、ピークのシフトの温度変化を測定する。そして、熱活性磁化の現象論式を適用することによる解析をおこない、熱活性運動の活性化エネルギーを見積もる。また、スペクトル各位置でのスピン格子緩和時間 T_1 を測定し、熱活性磁化の現象論式を適用して磁化生成の活性化エネルギーを見積もる。金属性が見出された場合にはコリン八の関係を使い、フェルミ面の状態密度の動向を把握する。カチオンの運動が支配的な緩和過程と認められた場合には、BPP 型の緩和モデル式をもちい、運動の活性化エネルギーを把握する。

以上の測定結果を比較検討し、ポーラロン効果に対して影響を与える局所場ゆらぎに対する知見を深める。

4. 研究成果

Na タイプの LSX 型ゼオライトを真空加熱脱水したものを測定試料として準備し、 ^{23}Na -NMR スペクトルの測定をした。スペクトルは四重極相互作用により線幅と形状が異なるようになった多数の成分の重ね合わせの形態をしていた。スペクトル分解は困難であるため、多数成分の重ね合わせとしてスピン格子緩和過程を観測した。その振る舞いは単純な指数関数でないため、ストレッチトエクスポネンシャルと呼ばれる式を用いてデータに対するフィッティングをおこない、スピン格子緩和時間 T_1 とした。得られたストレッチトエクスポネント α の値は、60 K における代表値として 0.46 であった。これは、2 桁以上の相当範囲にわたって T_1 の値が分布していることに対応する。 α の値は 20 K から 400 K の範囲でほぼ一定だった。このことは、各サイトによる T_1 は概ね相対的な比率を保ったまま、測定全温度範囲にわたって同様な変化をすることに対応すると考えられる。

このようにして得られた T_1 は、その逆数である $1/T_1$ が 60 K でピークを持つようなものになっており、それ以降の昇温では 200 K で極小を示したあと単調増加するものであった。60 K 以下では降温により単調減少するものであった。これらのことは、金属性が全くないことと矛盾しないものとなっている。しかしながら、局所場の電場勾配と核四重極結合をしている核については必ず存在するフォノンとの相互作用によるラマン過程に基づく緩和が、緩和過程として支配的である可能性は残る。そこで、ラマン緩和ならば温度変化が昇温に対して単調増加することに着目し、その寄与の最大値を見積もって寄与の程度を評価することにした。その方法は、ラマン過程の理論式をデータに対し適用してパラメーターフィッティングし、200 K 周辺では $1/T_1$ の実測値の極小値をとるようにして最大寄与を見積もるというものであった。ただし、その際には問題があった。描線においてはデバイ温度をパラメーターとして繰り返し入れることが必要になるにもかかわらず、この系ではその値が知られていないからである。その困難を回避するため、類似の物質での値を参考とすることでデバイ温度の最大値と最小値の範囲を見繕い、ラマン過程

のものとして存在可能な $1/T_1$ の値の上限値を推測することにした。用いたのは、硬い物質の極限として SiO_2 の値である 1100 K と、軟らかい物資の極限としてバルク Na の 158 K である。各々それぞれをデバイ温度の最大値および最小値とし、さらにその間の値も適用しつつラマン過程の最大寄与の温度変化を描線してみたところ、いずれの場合でも 200 K 以下の $1/T_1$ のデータ点をすべて下回る寄与しか起きないことが確認された。このことから、この系のスピン格子緩和においてフォノンとのラマン過程による緩和は副次的なものに過ぎず、主要過程はそれ以外でなければならないと結論した。

以上の検討でラマン過程の可能性は排除され、解析の焦点は 60 K で存在する極大を持つような $1/T_1$ の温度変化を説明することに移行した。その特徴的な温度依存性を考慮すれば、その主要過程はいわゆる BPP メカニズムであると目される。アレニウス型の特性時間を仮定して BPP メカニズムの式により全温度変化をフィットしたところ、少なくとも 3 つの異なる特性エネルギーを持つ成分が必要になるという結果を得た。それらの持つ活性化エネルギーの値は 0.015 eV, 0.18 eV, 0.7 eV であった。これらのうち最小のエネルギーを持つ成分は $1/T_1$ に 60 K のピークを与えるものであり、ベータパイロクロアなどのような二重井戸型ポテンシャルを持つ物質で観測されるようないわゆる、ラットリングといった運動によるものである可能性もある。しかし、従来に他の物質で観測されたラットリングの特性エネルギーを調査してみるとどれをとってもエネルギー値は一桁以上小さく、この 0.015 eV は大きすぎることがわかった。このことから、これら 3 種の成分は最小エネルギーのものまで含めたすべてが BPP 型のメカニズムを反映したものであると結論された。

LSX 型ゼオライトには、ベータケージとスーパーケージの 2 種類がある。それぞれは直径が 7 Å と 13 Å くらいの球状空隙であり、入れ子になって互い違いにダイヤモンド構造をなす。それら同士はそれぞれ、2.8 Å と 8 Å の窓でつながっている。ベータケージにおける Na サイトは、すべてが占有されてしまっているため、ケージ内の飛び移りは許容されない。従って、低温において発現する極めて低いエネルギーのカチオン運動は、スーパーケージ内の許容されるサイト間の飛び移りであると推察される。上記のエネルギーの高温側の方、すなわち 0.18 eV と 0.7 eV に対応するのは、他の付加的な形態のものであろうと推察される。残念ながらこれらのエネルギーの飛び移りに対応した BPP メカニズムの $1/T_1$ のピークは観測されない。時間スケールを見積もることができない問題点はあるものの、ひとつの可能性として、ベータケージ同士での飛び移りや、ベータケージとスーパーケージの間の飛び移りである可能性は指摘できる。まだ推察の域を出ない解釈の段階にはあるが、具体的な飛び移り経路がどのようなものであるにせよ、ゼオライト中にあらかじめ含まれる電荷補償イオンもポテンシャル障壁を伴って運動する存在であることは、それまでに得られていなかった知見であった。これらの検討結果は論文としてまとめられ、査読付き研究論文雑誌である Journal of the Physical Society of Japan に掲載された。

以上の結論によれば、外来のアルカリ原子が無吸蔵の場合の低温におけるカチオン運動の活性化エネルギーの最小値は、先行研究において報告された飽和吸蔵の場合のもの比べて数分の一以下である。対応するサイトは飽和吸蔵された外来原子の場合とは異なるものと推察される。このことを受け、中間的な吸蔵量ではどうなっているかを検討することにした。数十種類の吸蔵濃度の試料作製を試み、中間段階濃度の試料の検討をおこなった。吸蔵濃度が高まるにつれ、活性化エネルギーは何段階かの特徴的な吸蔵量を境にして段階的に高くなっていくことが把握できている。ただ、残念ながら、その詳細を論文発表するには至っていない。吸蔵サイトとの対応関係について断定的な結論を出すには本質的にデータ不足のところがあり、査読付き論文としてまとめるためには乗り越えるべき問題点が残っているためである。現状では、査読付き研究論文雑誌への掲載に向け、発表可能な部分と論文化できない部分の切り分けを検討し続けている。近日中には投稿準備を完了させ、投稿を計画するものである。

他方、アルカリ金属の違いについては、Na を Rb へ置換した場合を探求した。まず、そのような置換をした試料を合成することから始めた。これは世界で初めての取り組みである。K タイプの LSX 型ゼオライトを準備し、RbCl 水溶液中でカチオンを Rb に置換した。その後、その結晶粉末を真空加熱脱水し、Rb 吸蔵の準備とした。その後バルクの Rb を吸蔵させ、スーパーケージあたり 7.6 個で飽和吸蔵となった試料を測定対象試料とした。

測定はまず、光学スペクトルからおこなった。その結果、Na を吸蔵させた場合とほぼ同様に、0.6 eV と 2.3 eV のところに吸収ピークが見られた。これらは、スーパーケージ内のクラスター準位の s 電子の励起エネルギーに対応する。このことから、Rb は確かにスーパーケージ内に吸蔵されたと結論された。

次に、Na を吸蔵した試料の場合に使ったものと同じ装置を使い、疑似的 4 端子法により電気抵抗を測定した。その結果、1 cm 程度でほぼ温度変化しない電気抵抗率を示すことがわかった。多くの物質の場合は電気抵抗率が温度変化するので平坦な温度特性は珍しくあまり例を見ないものであるが、この装置を無試料での電極接触で抵抗測定すると 0.1 Ωcm が測定下限として確認されることを受ければ、結果は信頼できるものである。Na を飽和吸蔵した場合と比べると、室温以下のすべての温度領域にわたり 1 桁以上は低いものとなっている。その Na にあってさえ、4 K で 500 Ωcm 程度の抵抗率であり、発散状態になってもいい。Na の場合にはスーパーケージあたり 7.9 個のときには室温で既に 10 M Ωcm まで抵抗率が上昇し、それより少しだけ濃度が上がれば、NMR データも金属性を支持する結果となっている。それと比べても遥かに低い抵抗率であることから、Rb を飽和吸蔵した場合には金属状態が実現されていると結論した。

ただし、この温度変化がほとんどない抵抗率特性は、不良絶縁体とでも分類されるものである。この系の特性は t-U-S-n 模型と呼ばれるもので特性が評価できるものであることから、強い電子相関と強い電子格子相互作用によって、バッドメタルとして分類されるものでもある。Na の場合について先行研究にて得られている結果によれば、このゼオライト系における絶縁体金属転移は、電子の感じるポテンシャルが吸蔵濃度に対して異なった濃度依存性を持つために、複層的な特性を示すと推察される。この系においては電子相関が重要な役割を果たすためである。それに加え、Na を吸蔵した LSX 型ゼオライトで観測されるようなカチオンの熱活性型運動が存在するため、電子格子相互作用とポーラロン効果の重要性が際立ってくると目される。

次に、 ^{87}Rb -NMR のスペクトルを測定した。すると、190 K から 10 K の間で一貫し、大局的な分類として 3 成分が見出された。それぞれの成分はそれぞれが特徴的な波形とスピン格子緩和特性を示す。第 1 の成分は、核四重極効果で特徴的に形作られた形態を持つ。低温側では 1600 ppm から 1600 ppm のシフトの広い範囲にわたって広がっていると同時に、シフトの基準として用いた RbCl の水溶液の ^{87}Rb の示す線スペクトルから見て多少のシフトを示すものである。この成分は、いわゆる残留成分 (RC) として Na タイプの LSX 型ゼオライトに Na を吸蔵した場合に観測されるものと対応づけることができる。この RC 成分は、LSX 型ゼオライトの内部壁に沿ったサイトで電荷補償の役目を担うカチオンに帰属される。第 2 の成分は、6400 ppm のシフト位置にピークが存在する比較的狭幅のものである。これは、シフトがまったく温度変化しないものであり、その値はバルクの Rb における ^{87}Rb のシフトの文献値に合致するものである。このことから、LSX 型ゼオライトのケージ内部には吸蔵されずに残ったバルク Rb からの信号だと帰属を推察した。この成分が観測されることは、結果として試料が飽和吸蔵状態にあることの証明にもなっている。最後に残った第 3 の成分は、ピークのシフトが激しい温度変化を示す。第 1 の成分と同じように、それと類似した特徴を示す成分が Na を吸蔵させた場合にも観測される。対応する成分はこの場合、シフト成分 (SC) と呼ばれたものである。そして、10K でも第 1 と第 2 の中間的な値である 2400 ppm のシフトを示し、RC 成分と明確に区別して観測することができる。ただし、その半値幅は 5000 ppm を超え、裾野は第 1 と第 2 の成分のピークと重なる。しかし、面積強度は 3 成分の間で最大を占めるため、測定結果を分離することができる。ただ、110 K くらいから上の温度で一時的に強度が弱くなる。これは、カチオン運動の効果によってスピン緩和率が 110 K 付近で大変に大きくなってしまい、スピンエコーが素早く減衰してしまうために観測が困難となることによる。そのようなメカニズムによる見かけ上の減衰と理解すべきものである。実際、昇温で 200 K 付近に近づいてくると強度比は 10 K 付近のものと同レベルに回復する。この成分が観測されることは、Rb を吸蔵した系が金属転移をしていることを端的に示す。それに対して、Na を吸蔵した場合には SC が分離して観測されるのは 130 K 以上の温度域に限られているため、金属転移を明確に判断することに困難があった。それ以下の温度ではシフト量が小さく、RC の線幅以内に収まり重なってしまっているからである。そのことにより、スーパーケージ内のクラスターからの寄与を独立して測定することが妨げられていた。しかし、Rb を吸蔵した場合にはそのような測定も可能であることになる。

Na を吸蔵した場合との類似性によれば、 ^{87}Rb のシフトの温度依存性はポーラロンモデルによって説明できるはずと考えられる。そのモデルにおいては、熱運動するカチオンにより熱活性磁化が生成と消滅を繰り返す。その際、ラージポーラロンの海においてスモールポーロンが形成されることになる。10 K ではほとんどラージポーロンの熱活性化が抑圧されていると考えることは妥当なことであり、観測されたシフトは等方的なナイトシフトであると考えてよい。それは等方的なパウリ常磁性によるシフトと比例関係にあるはずのものであり、フェルミ面における状態密度と結び付けられる。その二つを繰り返し入れた現象論モデルにもとづく実験式をシフト値に対して適用したところ、活性化エネルギーの値としては 320 K、等方的シフトの値としては 2770 ppm という値をフィッティングパラメーターとして得た。このうち活性化エネルギーは Na の場合と同様な解析の場合と比べ、1/4 程度だけ小さいものである。このことを受け、比較のためにバルク帯磁率のデータを検討した。ラージポーロンの基底状態からスモールポーロンが熱活性化してハーフスピンとして磁化率を与えるという解釈が成立するように推察された。そのことを反映させた実験式を適用したところ、フィッティングによる活性化エネルギーの値として 284 K を得た。この値は、先ほど得られた NMR スペクトルのシフトから見積もったものと良い一致を示す。このことにより、適用したポーラロンモデルが適正なものであることが確認された。

他方、等方的シフトの値として得られた 2770 ppm という値は、バルクの Rb 金属の場合に得られるシフト値である 6400 ppm の文献値と比較すべきものである。両者の比率である 1/2.3 という値は、状態密度の減少に対応する。Na の場合には残念ながら低温におけるシフトが小さく、RC の線幅の範囲に入ってしまったので単純な比較はできないが、大まかな比較なら可能である。Na を吸蔵した場合の RC 成分の線幅を考慮すると、SC のシフト値は 100 ppm から 250 ppm の範囲に収まるという目される。その範囲であるということと、バルクの Na 金属の場合のシフト値は 1120 ppm であるという文献値を使って Rb の場合と同様な比をとってみると、1/4.5 から 1/11 という値になる。この範囲のどこかに真の値が存在するはずと推察されるが、それがどの値をとるにせよ、Na 吸蔵の場合と比べて Rb 吸蔵の場合には吸蔵による金属性の減少率は小さい。金属性が相対的に留保されると結論した。

外来の Rb 原子の吸蔵に際して金属性がどの程度残留するかをさらに補強して検討するため、

NMR スピン格子緩和特性も検討した。Rb を吸蔵した場合の SC の緩和率 $1/T_1$ は、興味深いことにはほぼ温度と比例する。T を温度とすると、 $1/(T_1T)$ の値は約 $10/(sK)$ である。ただし、スピン格子緩和過程は単純な指数関数でないため、この解析は Na の場合と同様、ストレッチトエクスポネンシャル式を適用して単一の T_1 の値としたものでおこなった。ストレッチトエクスポネント α の値はほぼ温度変化せず、RC と SC についてそれぞれ 0.55 と 0.65 であった。そして、RC の場合には $1/(T_1T)$ の値が激しく温度変化する。このことは、Na を吸蔵した場合と同様、Rb カチオンが激しく熱運動するようになることを反映していると考えられる。そのことは RC のスペクトル形状にも反映されており、100 K 付近を境として高温側では狭幅化が起こっている。他方、バルクの Rb についてはコリン八の法則が満足されていると考えられる。やや不思議なことに、SC の $1/(T_1T)$ の値は 10 K から 190 K の範囲でほぼ一定である。このことから、Rb のケージ内においても金属状態が基底状態として存在していることが支持される。Rb と Na の場合の双方について、 $1/(T_1T)$ の値をバルクの値と比較してフェルミ面の状態密度がどれだけ保存されるかを比較すると、2.5 という比率を得た。この値は、Rb の場合の方が Na の場合と比べて 2.5 倍程度、金属性が良く残留していることに対応する。この値は、上記したスペクトルシフトから算定した金属性残留度の比率とも同程度のものとなっている。ここで補足的に指摘しておく、Rb の場合の $1/(T_1T)$ とシフトの 2 乗の比例関係は 50 K 以上の温度領域では温度上昇により徐々にずれが生じてくる。そのことは、Rb のカチオンの運動がポーラロン効果を通じてもたらす複雑な過程が絡んでくることによる結果であると考えられる。

以上の結果は研究論文としてまとめられ、査読付き研究論文誌である Journal of the Physical Society of Japan に投稿された。審査過程の都合で研究期間内には出版受理となるに至らなかったが、Rb を吸蔵した際に金属性がかなり残留することについて査読者の肯定的な理解を得た状態にある。そのまま審査を継続させ、刊行に結び付けることを目指しながら研究期間の満了となった。

本研究課題の探求により、ゼオライトにおいてはそれ自身が内包する空間における空きサイト間の原子移動が想像以上に活発であることが認識されるに至った。そして、電子系の物性がカチオンの熱運動から深い影響を受ける存在であることが一層浮き彫りとなった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Mutsuo Igarashi, Peter Jeglic, Tadej Meznarsic, Takehito Nakano, Yasuo Nozue, Naohiro Watanabe, and Denis Arcon	4. 巻 86
2. 論文標題 Thermally Activated Motion of Sodium Cations in Insulating Parent Low-Silica X Zeolite	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 075005-1-2
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.7566/JPSJ.86.075005	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

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Igarashi, T. Nakano, Y. Nozue, P. Jeglic, T. Meznarsic, N. Watanabe, and Denis Arcon
2. 発表標題 Strong influence of atomic motion on metallic and magnetic properties of LSX zeolite with guest sodium atoms
3. 学会等名 Internal Symposium on Intercalation Compounds (ISIC19) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 五十嵐睦夫, 中野岳仁, 野末泰夫, ピーター・イエグリッチ, タディ・メジュナルシッチ, デニス・アルチョーン
2. 発表標題 LSXゼオライトのイオン運動に対する低濃度Na原子の吸蔵効果
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 五十嵐睦夫, 中野岳仁, 野末泰夫, ピーター・イエグリッチ, アンドラーシュ・クラインツ, 渡辺直寛, デニス・アルチョーン
2. 発表標題 脱水無吸着条件におけるLSX型ゼオライトの核磁気緩和特性
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 M. Igarashi, P. Jeglic, T. Nakano, and Denis Arcon
2. 発表標題 Successive Change of the Motion in Na-Laded Low Silica-X Zeolite According to Loading Densyt of External Na Atom - Na NMR Study -
3. 学会等名 Material Research Meeting 2019, Materials Innovation for Sustainable Development Goal (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	中野 岳仁 (Nakano Takehito) (50362611)	茨城大学・理工学研究科(理学野)・准教授 (12101)	