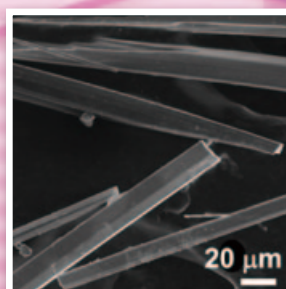
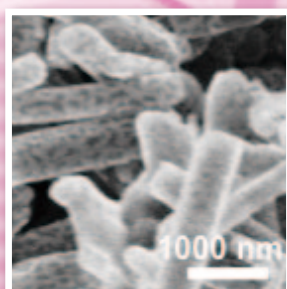
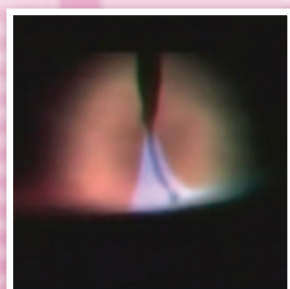
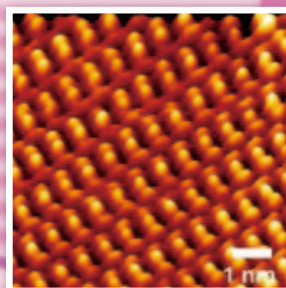
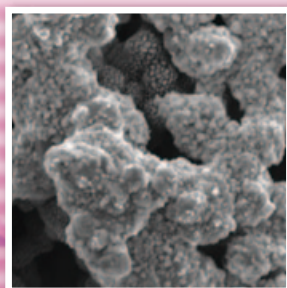
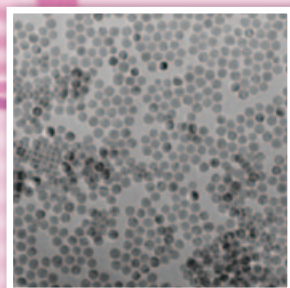


NIMS 研究成果

2011年度 主要研究成果10件
トピックス 1件



2012年7月



独立行政法人

物質・材料研究機構

National Institute for Materials Science

<http://www.nims.go.jp>



NIMS の主な研究成果

(平成 23 年度主要な研究成果の発行について)

独立行政法人 物質・材料研究機構

理事長 潮田 資勝

独立行政法人物質・材料研究機構（National Institute for Materials Science）では持続可能社会の実現に向け、ナノスケールの構造まで制御する「ナノテクノロジー」を駆使した新材料の創製や、材料機能の高度化などを可能にする研究を進めています。私は平成 21 年 7 月に独立行政法人物質・材料研究機構（NIMS）の理事長に就任しました。本年は 4 年目となりますが、独立行政法人となって 12 年目、第 3 期中期計画の 2 年目にあたります。

第 3 期中期計画の初年度に当たる平成 23 年度における主要研究成果 10 件と 1 トピックスを選別し、皆様に NIMS の研究内容を紹介させていただきます。主要成果 10 件は、先端的共通技術領域、ナノスケール材料領域、環境・エネルギー・資源材料領域の 3 研究領域における主要成果として取り上げました。この内、ナノスケール材料領域は従来の国際ナノアーキテクニクス研究拠点を NIMS 本体組織に位置付けたもので、国際研究拠点としての機能に変わりはありません。また、NIMS では平成 23 年度に日本が強みを持つ物質・材料分野の研究者が結集し、環境・エネルギー技術課題に挑戦するため「TIA ナノグリーン」を発足させました。NIMS が蓄積した環境・エネルギー技術を核とし、産総研、筑波大学、産業界、高エネ研の力を結集して、ナノテクノロジーを活用した革新的な環境・エネルギー技術の創出を目指す連携研究の場を提供するものであり、第 3 期中期計画においても NIMS の重要施策のひとつとなるので、本冊子のトピックスとして取り上げました。

NIMS は法人化後、第 2 期中期計画期間中に NIMS は大きな発展を遂げました。マテリアルサイエンス分野における論文引用数では世界第 3 位となり、特許出願数、産業界との共同研究、特許収入などでも顕著な成果をあげました。第 2 期中期計画中に文科省の WPI プログラムに採択された「国際ナノアーキテクニクス研究拠点」は顕著な成果を挙げつつあります。

国の中核的機関である NIMS の業務として、これまでに、「国際ナノテクノロジーネットワーク拠点」、「ナノ材料科学環境拠点」、「低炭素研究ネットワーク・ハブ」等の研究拠点を発足させ、研究者コミュニティからの支援・連携要請に応じてきました。日本が東日本大震災の大きなダメージから全力で復興を図ろうとしている今、我々は以前にも増して社会からの連携要請へ強力に応える必要があります。第 3 期中期計画では組織を挙げて研究者コミュニティと一般社会に対するサービス機能を強化することにしておりますが、その初年度の平成 23 年度には上記の拠点活動を通じて、強磁場施設、高圧電子顕微鏡施設、大型放射光施設をはじめとする各種先端研究設備の外部共用を 600 件近く行うことができました。

今後も、先端的共通技術領域、ナノスケール材料領域、環境・エネルギー・資源材料領域の 3 研究領域を中心に、国家的ニーズに積極的に対応することを目指すとともに、高度な設備のさらなる共用化を図り、社会に開かれたイノベーションの場を提供してゆきます。また、若手研究者の育成も NIMS の重要な使命であり、国内外の大学と協力して大学院生の教育にも力を入れてゆく所存です。

INDEX

研究成果

- 1 **有機溶媒耐性の高性能ろ過フィルター** 1
液体の高速粘性透過を世界に先駆けて実証
一ノ瀬 泉
- 2 **分子軸とスピンの向きを指定した酸化反応を実現** ... 3
シリコン酸化機構解明に貢献
倉橋 光紀 山内 泰
- 3 **磁性ナノ粒子の温熱効果を明らかに** 5
がんの選択的温熱治療の実用化にはずみ
間宮 広明
- 4 **シリコン表面上の単原子層超伝導体** 7
薄膜を超えた「表面超伝導」の実現
内橋 隆
- 5 **中高温熱電変換材料のpn制御** 9
豊富な軽元素主成分材料の高機能化
森 孝雄 丸山 恵史
- 6 **金属シェルに覆われた導電性ポリマー** 11
次世代エレクトロニクスの微細配線
川喜多 仁
- 7 **放射性物質の吸着・除去・固定化材料の開発** 13
除染・環境回復に向けて
山田 裕久 阿部 英樹
- 8 **高効率・高品質を両立させた革新的溶接技術** 15
同軸複層ワイヤを用いたクリーンMIG溶接法
中村 照美
- 9 **フラーレンナノウィスカーの超伝導化** 17
軽くてしなやかな超伝導繊維素材をめざして
竹屋 浩幸 高野 義彦 宮澤 薫一
- 10 **“スピン” と “構造” の最表面複合分析** 19
新しいイオンビームでスピン活性材料の開発を加速
鈴木 拓

トピックス

- つくばイノベーションアリーナ 21
TIAナノグリーン
中村 和夫

2011年度の運営（データ集）

- 2011年度運営に関するデータ集 23

1. 有機溶媒耐性の高性能ろ過フィルター

■ 研究の背景と狙い

濾過フィルターでは、厚みに反比例して、液体の透過速度が大きくなる。しかしながら、ナノ厚みの濾過フィルターでは、機械的強度が大幅に低下するため、圧力駆動の膜分離プロセスへの利用が困難となる。本研究では、セラミックスのフィルターの上にダイヤモンド様カーボン（DLC）の極薄の多孔膜を蒸着することに成功した。高強度の DLC 膜には、約 1 nm の流路が形成されており、従来の 1000 倍の速度で有機分子を分離できる。

■ 研究の内容と成果

水処理膜は、海水淡水化や廃水処理に幅広く利用されており、その性能は確実に向上している。しかし、既存の膜にも欠点がある。例えば、高分子膜は、酸やアルカリ、酸化還元により、徐々に分解する。また、多くの高分子膜は、加熱すると軟化し、有機溶媒によっては溶解してしまう。一方、セラミックス膜では、有機溶媒を高速で透過させることができない。このため、今日の水処理技術は、その適用範囲に大きな制限を受けている。酸やアルカリ、有機溶媒を含んだ汚染水を効率的に浄化するための高性能ろ過フィルターは、様々な分野で求められてきた。

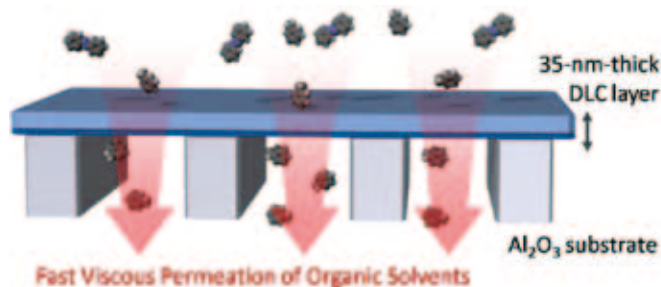


図1 高性能ろ過フィルターの模式図

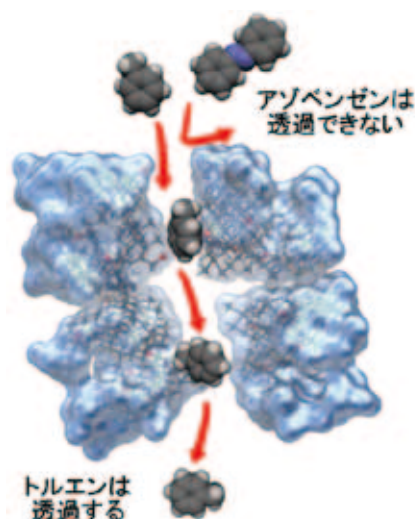


図2 極細の流路を通過するトルエン

我々は、高強度コーティングに用いられる DLC (diamond-like carbon) 膜を低温蒸着することで、数 10 nm の薄さの多孔膜の作製に成功した。その製膜のため、アノード酸化により形成された多孔性アルミナ膜の上に、ナノストランドと呼ばれる極細の無機ファイバーを濾過し、アルミナ膜の表面を均一に覆った。これに、アセチレンなどのガスを原料として、プラズマ CVD 法により DLC 膜を蒸着させ、酸で処理することで、犠牲層として利用したナノストランド層を除去した。このような方法により、膜厚が 35 nm であり、ヤング率が 170 GPa (ダイヤモンドの約 7 分の 1) の高強度の多孔性カーボン膜が得られた (図 1)。

通常の DLC コーティングでは、緻密な膜を形成するために、基板温度を上げて蒸着する。一方、我々は、基板温度をマイナス 20℃ に設定することで、ダイヤモンド様カーボンの数 nm のクラスターからなる薄膜を作製することができた。このクラスターの隙間には、約 1 nm の流路が形成されており、ここを水や有機溶媒が高速で透過する (図 2)。

多孔性 DLC 膜は、アゾベンゼン (分子量: 182.2 平均分子サイズ: 0.69 nm) を 94.4%、プロトポルフィリン (分子幅: 1.47 nm) を 100% 取り除くことができる (図 3)。

液体の高速粘性透過を世界に先駆けて実証

一方、有機溶媒の透過速度は、ヘキサンで $239 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{bar}$ となる。また、プロピルアミンを原料とした DLC 膜では、20 気圧までの耐圧性が確認されており、圧力に比例して透過速度が大きくなることが解った。図 4 には、様々な有機溶媒の粘度と透過速度をプロットしている。驚くべきことに、その透過速度は、有機溶媒の分子サイズや極性に無関係であり、バルクの粘度に反比例して大きくなることが分かった。DLC 膜の細孔は、有機溶媒の 2～3 倍のサイズに過ぎないが、このような場合でも、溶媒の透過速度がバルク粘度に依存しているのである。

DLC 膜のろ過速度は、市販の有機溶媒耐性ろ過フィルターと比較して約 3 桁大きい。さらに、高強度の多孔性 DLC 膜は、約 10 nm の膜厚でもろ過フィルターとして利用できる。この場合、細孔サイズが 3 nm 程度になるが、ヘキサンの透過速度は $1800 \text{ L/h}\cdot\text{m}^2\cdot\text{bar}$ を超える。

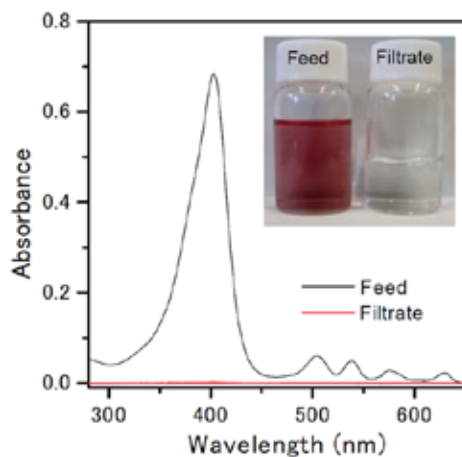


図 3 プロトポルフィリンの除去性能

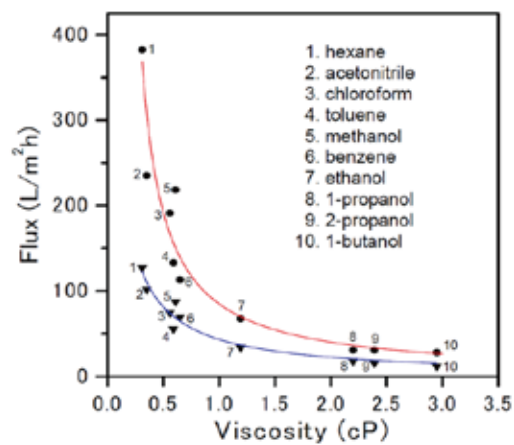


図 4 有機溶媒の粘度と透過速度の関係

開発された高性能ろ過フィルターは、水や有機溶媒を高速透過させる画期的なものであり、力学的強度が大きく、化学的安定性にも優れている。このため、化学工業における製品（塗料、機能性ポリマー、医薬品など）の分離、触媒が混入した有機溶媒のリサイクルなどに応用できる。さらに、耐有機溶媒性に優れており、オイル成分を含んだ産業排水の処理にも有効であろう。プラズマ CVD による高強度 DLC 膜の製造は、広く産業界に普及しており、膜の大面积化は比較的容易である。一方、高性能ろ過フィルターを製造するための基板には、DLC 膜と同様な耐溶媒性と力学的性質が求められる。今後は、基板として炭素繊維シートなどの先端素材を利用することで、高性能ろ過フィルターの量産化が実現するであろう。

発表文献

- 1) S. Karan, S. Samitsu, X. Peng, K. Kurashima and I. Ichinose: Science 335 (2012) 444.
- 2) 特開 2012-036061

期待されるイノベーション

オイルサンドなどの新資源開発では、有機物・反応性物質を含んだ随伴水が生じるが、化学的に安定な DLC 膜を用いると、この高速処理が可能となる。また、超低硫黄軽油に含まれる分子状の硫黄化合物を除去することで、排ガスの更なるクリーン化も期待できる。

お問い合わせ先

高分子材料ユニット 一ノ瀬 泉
 ホームページ: <http://www.nims.go.jp/units/PMU/>
 メールアドレス: ICHINOSE.Izumi@nims.go.jp

2. 分子軸とスピンの向きを指定した酸化反応を実現

■ 研究の背景と狙い

酸素分子は基礎科学および材料開発の全分野において最も重要な分子である。そして直線分子という球でない形状と不対電子に由来するスピンを持つ。我々は、酸素分子の「形」と「スピン」をよく定義できる酸素分子ビームを初めて開発し、半導体産業において重要なシリコン酸化反応に酸素分子の「形」が重大な影響を与えていることを突き止めた。

■ 研究の内容と成果

1. 分子軸とスピンの向きをよく定義できる酸素分子ビーム

酸素分子は電子スピンを持つ2原子分子である。従って、相手分子や表面に対する分子軸の向きにより酸化反応の生成物や速度は異なり、また磁性をもつ分子や表面との化学反応ではスピンの影響も考えられる。しかし従来の研究では、分子軸とスピンの向きが無秩序な酸素ガスや分子ビームしか利用できず、酸化反応における分子の「形」と「スピン」の役割を調べることはできなかった。一方、シリコン表面酸化反応は、熱酸化によるゲート絶縁膜生成過程の理解を目的として詳しく研究されてきたが、酸素分子がシリコン表面へ吸着する過程が大変非効率である原因はこれまで不明であった。表面に対する分子軸方位を指定して酸化反応速度を計測できれば、この問題を議論する上で貴重な手がかりが得られると我々は考えた。

本研究では、酸素分子の磁気モーメントが不対電子に由来する電子スピン (S) のみならず、分子内回転に伴う角運動量 (K) にも依存することに着目した(図1)。そして六極磁子による磁場選別法を用い、単一量子状態 [$(J, M) = (2, 2)$] のみから構成される酸素分子ビームを世界で初めて開発した(図2)¹⁻³⁾。この量子状態には、スピンと回転角運動量の双方の向きを指定できるという際だった特徴がある。酸素分子軸は回転角運動量 (K) の向きを法線とする平面内に分布するため、図3のように量子化軸である磁場 (H) を試料法線方向に向ければ酸素分子軸は表面に平行となり (helicopter 配置)、試料平行に向ければ分子軸が表面平行と垂直の場合が混在する cartwheel 配置となる。従って、両配置の比較により酸化反応速度の分子軸方位依存性が議論できる。

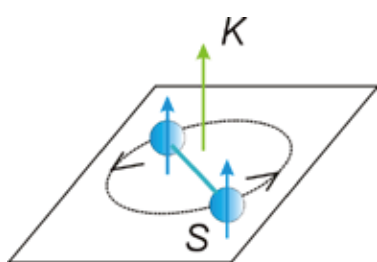


図1 酸素分子の分子内回転の角運動量 (K) とスピン角運動量 (S)。

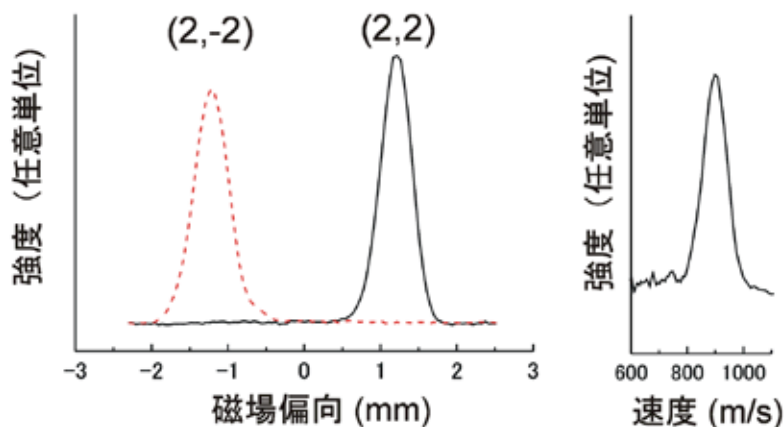
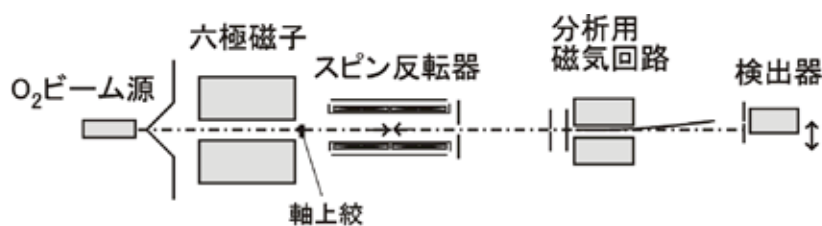


図2 単一量子状態選別酸素分子ビームの磁場偏向スペクトル。磁場偏向の大きさと速度から量子状態 [$(J, M) = (2, 2)$] に帰属できる。点線はスピン反転により得られた (2,-2) 状態に対応する。

シリコン酸化機構解明に貢献

2. シリコン酸化反応の分子軸方位依存性

量子状態を指定した酸素分子ビームを用い、シリコン表面への酸素分子吸着確率を計測した結果を図4に示す。制御信号に従い一秒ごとに酸素分子の立体配置(図3)を切り替えると、吸着確率が40%以上変化している様子が分かる。そして各配置における分子軸の方位分布から逆算すると、シリコン(100)表面に飛来する分子のうち、分子軸が表面に殆ど平行な分子のみが反応していることが明らかとなった。さらに酸素分子の並進エネルギーが0.1-0.3eVの範囲で立体異方性に殆ど差がないことから、垂直配置での活性化エネルギーが0.3eVより遙かに高いことも示される。このようにシリコン表面酸化では酸素の分子軸の向きに対する制約が強く、角度条件を満たす一部の分子しか反応できないために、酸化反応が進みにくいことが初めて証明された⁴⁾。

以上の研究によって、酸素分子軸とスピンの向きを定義した酸化反応を実現する新手法を確立することができた。さらに本研究で開発した酸素分子ビームの特筆すべき性能として、量子状態を選別しているにもかかわらず、六極磁子による収束効果のため、1表面原子あたり毎秒1分子以上の大強度が得られる点が挙げられる。この点に着目すれば、本ビームはものづくりのツールとしても有望である。明瞭な立体効果やスピン効果が観測される酸化反応では、量子状態により酸化反応を制御できるはずである。あるいは従来の酸化法で複数の生成物が生じてしまう場合でも、量子状態選別ビームの利用により必要な生成物のみ高純度で作製できる可能性も期待される。

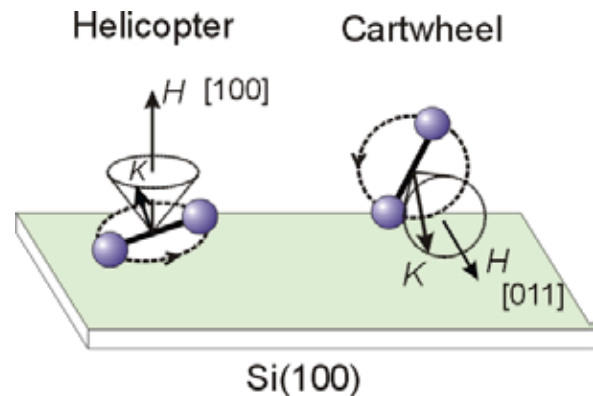


図3 磁場による酸素分子の分子軸方向の制御

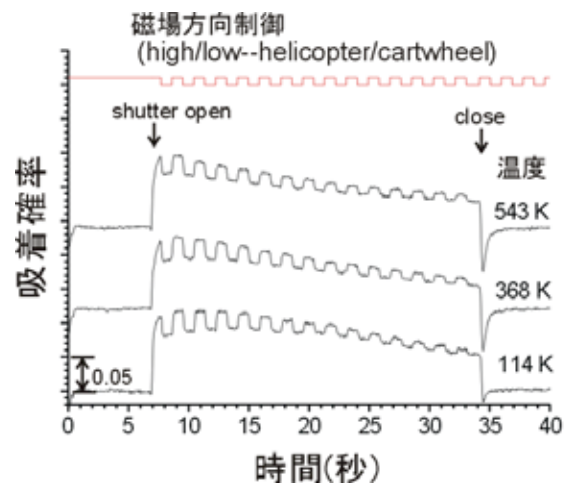


図4 測定したSi(100)表面への酸素分子吸着確率の時間変化。酸素分子の並進エネルギーは0.3eVである。分子軸の向きを変化させると吸着確率が大きく変化している。

発表文献

- 1) Mitsunori Kurahashi and Yasushi Yamauchi : Rev. Sci. Instrum. **80** (2009) 083103.
- 2) 倉橋光紀, 山内泰 : J. Vac. Soc. Jpn. B **53** (2010) 681.
- 3) 特願 2011-154995
- 4) Mitsunori Kurahashi and Yasushi Yamauchi: Phys. Rev. B **85** (2012) 161302 (R).

期待されるイノベーション

今後、本手法により、酸素分子の立体効果とスピン効果が様々な表面酸化反応および気相酸化反応に対して解明されることは間違いない。さらに量子状態を指定した酸化反応により、従来のランダム配向の酸素分子では得られない高品質の酸化膜を創製することも期待される。

お問い合わせ先

極限計測ユニット 倉橋光紀、山内 泰
メールアドレス: kurahashi.mitsunori@nims.go.jp

3. 磁性ナノ粒子の温熱効果を明らかに

■ 研究の背景と狙い

薬で治らないときは刃物で治る、刃物で治らないときは火で治る、というヒポクラテスの格言にもあるように、温熱治療（ハイパーサーミア）の効能は古くから知られている。現代では、化学物質やナノ粒子を標的とする病巣に送り届けるドラッグデリバリーシステム（DDS）が飛躍的に発達した。そこで、温熱療法でも、IH調理の鉄鍋のように交流磁場から非接触で熱を取り出すことができるナノサイズの発熱体（磁性ナノ粒子）をこのDDSを用いてがんに直接送り込み、腫瘍組織を選択的に加熱・死滅させる治療法（磁性ナノ粒子がん温熱療法）が考案された。この方法は、痛みを伴わず副作用も比較的少ない治療手段として注目を集めており、現在、本格的な実用化に向けて磁性ナノ粒子と照射装置の開発が進められている。しかしながら、がんに取り込まれた磁性ナノ粒子に大振幅の交流磁場を照射した際の発熱は実験室で粉末に照射した場合とは大きく異なるため、その解明が治療の最適化に向けて喫緊の課題となっていた。

■ 研究の内容と成果

近年、DDSを用いて検査をすり抜けた腫瘍組織にも磁性ナノ粒子を誘導・集積することが可能となってきたので、磁性ナノ粒子がん温熱療法は、手術、化学療法、放射線療法に続く第4の治療法として大きな期待を集めている（図1）。現在、がんに対する効能の確認が進むなか、図2のように磁性ナノ粒子の形状や大きさを制御し、それに合わせて照射される交流磁場の強度や周波数を最適化しようとする試みが盛んになされつつあるが、その基礎となる物理モデルの構築はおざなりとなっていた。例えば、既存の、図3(a)に示すような純力学モデルや図3(b)に示すような熱平衡モデルでは、温熱治療に用いられる大振幅交流磁場中での磁性ナノ粒子の振舞を上手く説明できていない。そこで、我々は、がん温熱治療中の磁性ナノ粒子の振舞について実際の治療に近い条件を設定してナノ粒子の内部の磁化の反転とナノ粒子自身のブラウン回転運動を同時に考慮したシミュレーションをおこなった。

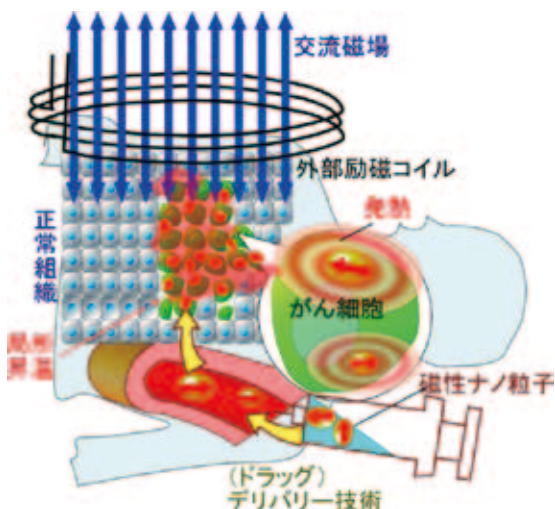


図1 磁性ナノ粒子がん温熱療法の模式図
がん細胞中に送り込まれた磁性ナノ粒子に体外から交流磁場を照射し、その磁気損失による局所的な温度上昇によってがん組織だけを死滅させる治療法である。

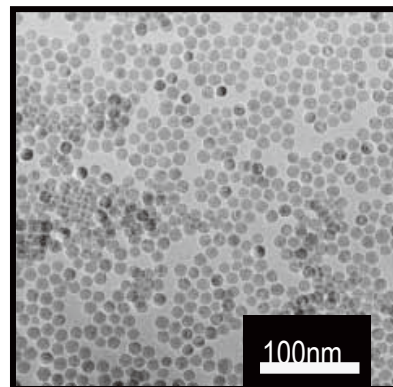


図2 磁性ナノ粒子の電子顕微鏡写真
がん温熱療法に用いられる生体親和性の高い磁鉄鉱(Fe_3O_4)のナノ粒子でも形状や粒径の制御が可能となった。

がんの選択的温熱治療の実用化にはずみ

(a)エネルギーが低く安定な磁場の方向を向いた磁石 (b)温熱治療開始前の熱平衡状態 (c)温熱治療中に生じる多様な非平衡配向構造の例

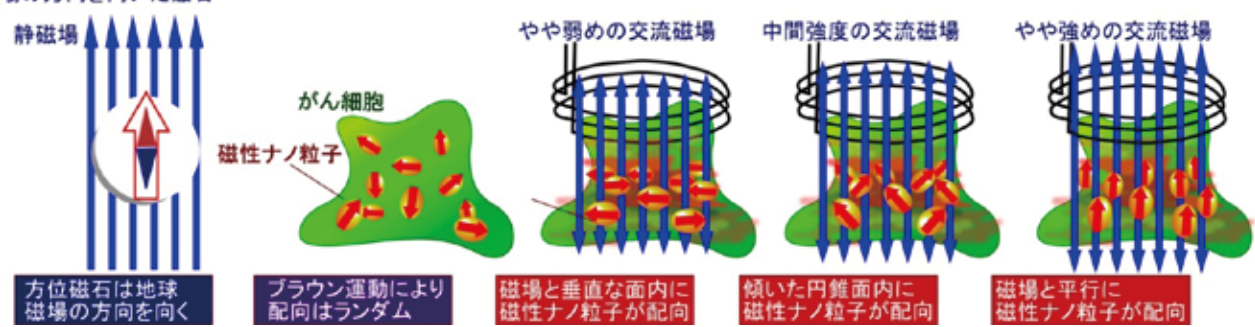


図3 日常の磁石とがん温熱治療中に生じると考えられる配向構造の例
 (a)地球磁場の方向を向く方位磁石、(b)温熱治療開始前の熱平衡状態、(c)異方性磁場と比べてやや弱い、中間、及びやや強い振幅の高周波磁場を照射した際に形成される、強磁性ナノ粒子の定常的な配向状態を模式的に示す。

今回のシミュレーションの結果、磁性ナノ粒子は交流磁場から受ける磁気トルクと超常磁性揺らぎや磁化反転、ブラウン回転運動との協調・競合作用によって、多様な振動/配向構造を形成することがわかった。例えば、磁性ナノ粒子にやや強めの高周波磁場を照射すると、それらは徐々にその向きを揃え磁場の向きに配向するのに形成するのに対して、振幅を弱めると、磁場とある角度を持った円錐面内や磁場と垂直な面内に定常的に配向した構造が現れた(図3(c))。この例は、磁性体は方位磁石のように磁場の方向を向くという日頃の経験(図3(a))が、ナノサイズの磁石には通用しないことをよく示している。また、これらの振動/配向構造は、ナノ粒子の大きさや形状、その周囲の粘性や細胞との結合状態、あるいは交流磁場の照射条件が変わっても変化し、それにともない、発熱特性も大きく変わることが明らかとなった。

発表文献

- 1) H. Mamiya and B. Jeyadevan, Sci. Rep. (Nature) 1 (2011) 157.
- 2) H. Mamiya and B. Jeyadevan, J. Magn. Magn. Mater. 323 (2011) 1417.
- 3) H. Mamiya and B. Jeyadevan, IEEE Trans. Magn. 48 (2012) in press.

期待されるイノベーション

今後、物体や生体の深部で生じるナノサイズの構造をその場で観察できる大強度陽子加速器施設の中性子ビームを利用して本シミュレーションの予測を確認し、その知見をもとにそれぞれのがん細胞との結合状態に応じた発熱体(磁性ナノ粒子)の粒径や形状、および照射する磁場の強度や周波数の最適化が可能となれば、痛みをとまわず副作用も少ない磁性ナノ粒子が温熱療法が実用化に向けて大きく歩みだすと考えられる。

お問い合わせ先

量子ビームユニット 間宮広明
 ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>
 メールアドレス: MAMIYA.Hiroaki@nims.go.jp

4. シリコン表面上の単原子層超伝導体

■ 研究の背景と狙い

超伝導を利用したデバイスは次世代のキーテクノロジーの一つとして有望視されている。このためには超伝導材料を微細化・薄膜化することが鍵となるが、最終的に原子スケールの厚さの薄膜になったときに超伝導の性質が保たれるか否かは、わかっていなかった。本研究では実際に半導体基板の上に金属原子一層の物質を作製し、超伝導状態になることを世界で初めて実証した。

■ 研究の内容と成果

● 原子一層の金属薄膜は超伝導になるか？

超伝導体を薄膜化して最終的に原子スケールの厚さになったときに、果たして超伝導の性質は保たれるだろうか？これは、超伝導の基本原理にかかわる非常に興味深い問いであるとともに、デバイス応用の観点からも、近い将来のうちに重要になってくる問題である。これまでの研究から、一般的には原子スケールの厚さになると、超伝導体はその性質を失うと信じられていた。しかし、この現象は超伝導そのものの性質というよりは、薄膜化することで試料内に欠陥が増え、金属状態が不均一化することによって起こっている可能性が高い。だが、原子スケールで結晶性の良い均一な超伝導薄膜を作ることはこれまでの技術では非常に難しく、実験的にこの問いに明確な答えを出すことはできなかった。

本研究では、表面科学の分野で良く知られているシリコン表面上の金属単原子層物質（専門的には表面超構造と呼ばれる）に着目し、その電気伝導を直接に測定することで超伝導になるかどうかを調べた。図1は、実験に用いた試料で、シリコン基板の上にインジウム原子が一層だけ吸着した構造を走査トンネル顕微鏡で見たものである。インジウム原子がある周期性をもって規則的に配列していることがわかる。しかし、表面原子構造のモデル（図2）に示したように、表面には原子スケールの段差（原子ステップ）が無数に存在し、そこで表面原子層は途切れている。このように分断された表面では、そもそも電流が長い距離にわたって流れるかどうか不明ではない。

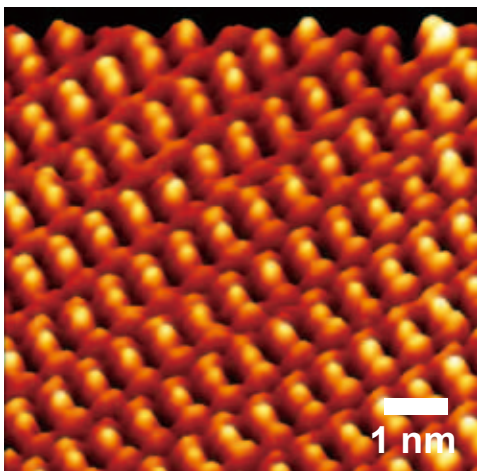


図1 シリコン表面上に並んだインジウム単原子層の走査トンネル顕微鏡写真

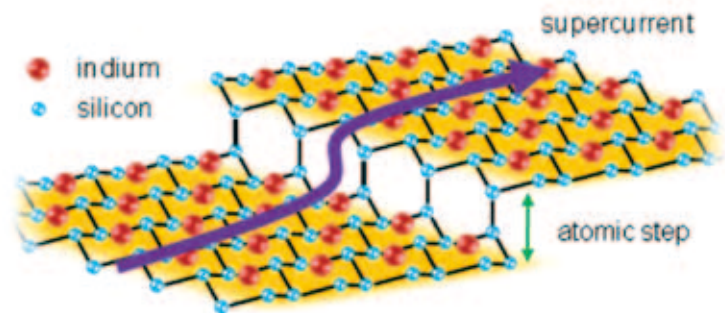


図2 シリコン表面上インジウム原子層のモデル。矢印は、超伝導電流が原子ステップを超えて流れることを概念的に示す。

薄膜を超えた「表面超伝導」の実現

● 高い臨界電流密度をもった「表面超伝導体」の実現

図3にこの試料で測定した電気抵抗値の温度依存性を示す。約2.8 Kで急激に抵抗値がゼロになって、超伝導転移が起こることがわかった。このように金属原子一層の系が超伝導状態になることを直接的に確かめたのは、世界で初めてのことである。この実験事実は二つのことを意味している。一つは、表面原子層の電子が(局所的に)超伝導状態になること、もう一つは抵抗ゼロの超伝導電流が表面の原子ステップを乗り越えて、長い距離を流れることである。

続けて試料に流す電流値を増やしていき、超伝導状態が破壊されるときの電流値(臨界電流値)を測定した(図4)。臨界電流値は非常に大きく、電流密度に換算して1.8 Kで 6.1×10^9 A/m²と見積もられる。これは、実用的な超伝導バルク材料での値と同程度の大きさである。原子一層にもかかわらず、このような「頑丈な」超伝導が実現することは驚きである。

さらに詳細な解析の結果、臨界電流値は前述の原子ステップで決まっていることが強く示唆された。これは原子ステップが天然のジョセフソン接合(超伝導接合)であることを意味している。このことからわかるように、このような半導体表面上の金属原子層はもはや単なる薄膜とみなすことはできない。本研究によって新しい「表面超伝導体」を実現したといえる。

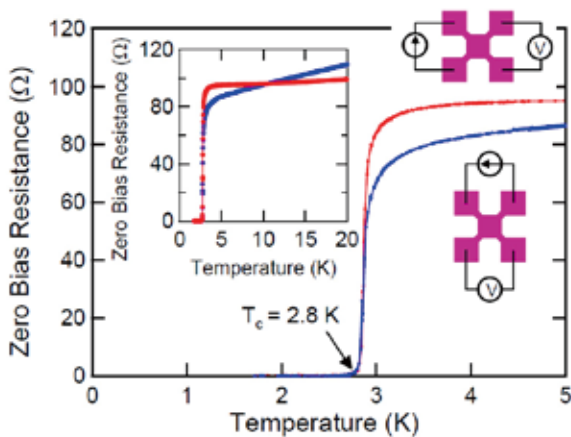


図3 電気抵抗値の温度依存性。2.8Kで超伝導転移が起こり、抵抗値がゼロになる。2つの直交する方向に電流を流して、電気抵抗の消失を確認した。

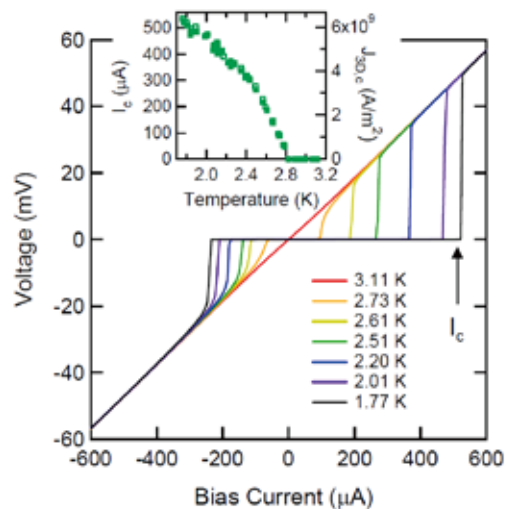


図4 電流-電圧特性の温度依存性。2.8 K以下では、臨界電流値(I_c)で超伝導状態から常伝導状態にスイッチする特性が見られる。

発表文献

- 1) T. Uchihashi, P. Mishra, M. Aono, and T. Nakayama: Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 207001.
(highlighted as an Editor's Suggestion and as a Viewpoint in *Physics*)

期待されるイノベーション

今後はナノテクノロジー技術を駆使して原子スケールで超伝導特性を制御するなど、実用化を目指した研究に取り組んでいく。例えば、究極的に薄い超伝導体であることを利用して、高感度単一光子検出器を作り、完全な情報セキュリティを持つ量子暗号通信などに応用されることが期待される。

お問い合わせ先

ナノ機能集積ユニット 内橋 隆
ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>
メールアドレス: UCHIHASHI.Takashi@nims.go.jp

5. 中高温熱電変換材料のpn制御

■ 研究の背景と狙い

日本で使用する石油・石炭・ガスなどの1次エネルギーの約3分の2にあたる莫大なエネルギーの多くが廃熱として捨てられているのが現状である。固体のゼーベック効果のよって廃熱の一部を有用な電気に変換できる熱電変換材料の開発は社会に大きな恩恵を与え得る。我々はこの課題に対して、多角的に、原子構造レベル、グレインレベルの制御をとおして広範囲実用化に資する熱電材料の開発を目指している。

■ 研究の内容と成果

熱電材料の性能を表す指数として $ZT = \alpha^2 \cdot \sigma \cdot \kappa^{-1} \cdot T$ が用いられるが、優れた熱電材料の条件としては、電気伝導度 (σ) は高いのに熱伝導度 (κ) は低いこと、そしてゼーベック係数 (α) が大きいと電気伝導度も高いこと（いわゆるトレードオフに反すること）が必要であり、性能を単純に上げることが容易でないことが分かる。

中高温域には、工場、焼却炉、火力発電所などの廃熱や太陽光集光熱などの大きな利用可能な熱エネルギーがあり、それを利用するために、中高温での温度安定性も一つの重要な要素である。

一方で、従来の高性能熱電材料は、Bi、Te、Pb、Ag など、稀少だったり、毒性のある元素で主に構成される傾向にある。

我々は、ありふれて毒性のない元素を主成分として、温度安定性の良い無機材料を高機能化するために、クラスターやカゴ状などの特徴的な原子のネットワーク構造に注目している。図2のように、ネットワーク構造に内包する金属原子の良好な操作性や、架橋サイトを導入することによるネットワーク構造の制御とそれに伴う物性制御や、ネットワーク構造に組み込まれた機能としての、熱電材料にとって必須な要素である低熱伝導率、などを活用して、新規な中高温熱電の開発を行ってきた。

特にホウ素をネットワーク構造の骨格とする化合物において、以前ボロンカーバイドが中高温で良好な p 型の熱電特性を示し、数少なく一時期米国で実用化された熱電材料であった。しかし、世界的に研究されたが、良好な n 型カウンターパートが見出されず、熱

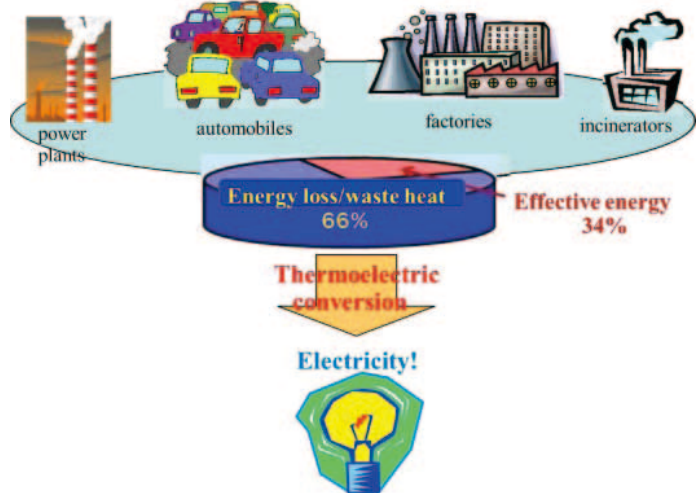


図1 熱電材料の必要性

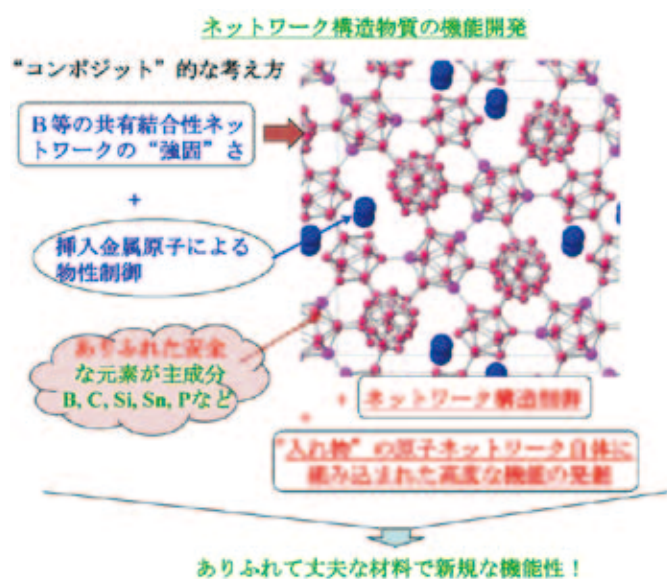


図2 ネットワーク構造物質の機能開発戦略

豊富な軽元素主成分材料の高機能化

電応用は伸びなかった。我々は、架橋サイトを導入することによるネットワーク構造の制御により、待望のボロンカーボンの n 型カウンターパート材料を以前見出した。

しかし、性能はまだ十分ではなく、更なる広い探索が望まれている。本研究では、 B_{12} 正二十面体クラスターのネットワークに Al をドーピングした $YB_{25}Al$ (YAl_xB_{14}) に注目して、熱電的性質の開発を行った。 YB_{25} は Al をドーピングすることで単斜晶から斜方晶へと構造が変化すること (図 3) は知られているが、熱電物性などに関して報告されていなかった。更に、以前は、フラックス法により、 YAl_xB_{14} の $x \sim 0.7$ 近傍の組成の試料しか得ることが出来なかった。しかし、我々は、合成方法において、雰囲気などを制御することにより、 YAl_xB_{14} の Al ドーピングの詳細な制御に初めて成功した。

その結果、図 4 のように、Al のドーピング量 x を変化させることで、p 型もしくは n 型熱電材料へと自在に制御できることを見出した。

この成果の意味するところとして、我々は、ネットワーク構造の主成分がありふれた安全な元素の化合物において、同じ結晶構造、同じ構成元素で、高温において、非常に大きなゼーベック係数の絶対値 $200 \mu V/K$ 以上の正負 (p, n) の材料を自在に制御することに成功し、実用化に資する中高温熱電材料の開発へ向けて大きく進展したと考えられる。

本研究は東北大学との共同研究である。

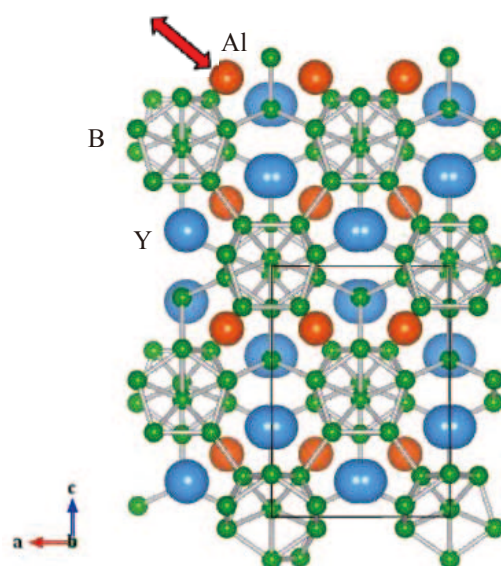


図3 YAl_xB_{14} の結晶構造 (赤い矢印が Al 原子の出し入れを表す)

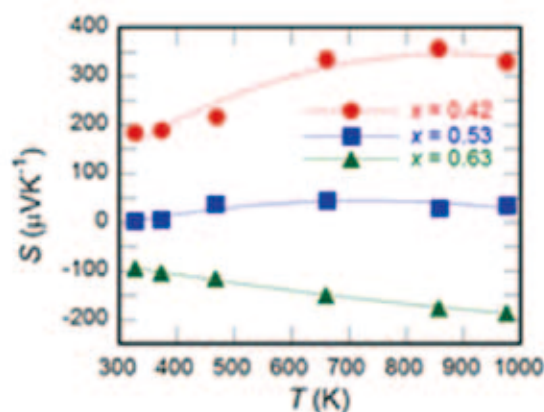


図4 YAl_xB_{14} のゼーベック係数

発表文献

- 1) 森孝雄: "ホウ素系高温熱電変換材料" [熱電変換技術—クリーンエネルギーをめざして—] シー・エム・シー出版, (2011) 72.
- 2) 丸山恵史, 宮崎 讓, 林 慶, 梶谷 剛, 森 孝雄: 第 59 回応用物理学関係連合講演会講演 (2012 年 3 月, 東京).
- 3) 特願 2012-053938

期待されるイノベーション

本研究により、ネットワーク構造の主成分がありふれた安全な元素の化合物において、同じ結晶構造、同じ構成元素で、非常に大きなゼーベック係数の正負 (p, n) の自在な制御に成功して、工場、焼却炉、火力発電所などの廃熱や太陽光集光熱などの中高温域における未利用の莫大な熱エネルギーの活用へ向けて大きく進展したと考えられる。

お問い合わせ先

無機ナノ構造ユニット ネットワーク構造物質グループ 森 孝雄
 ホームページ: http://www.nims.go.jp/group/g_inorganic-nanostructure/index.html
 メールアドレス: MORI.Takao@nims.go.jp

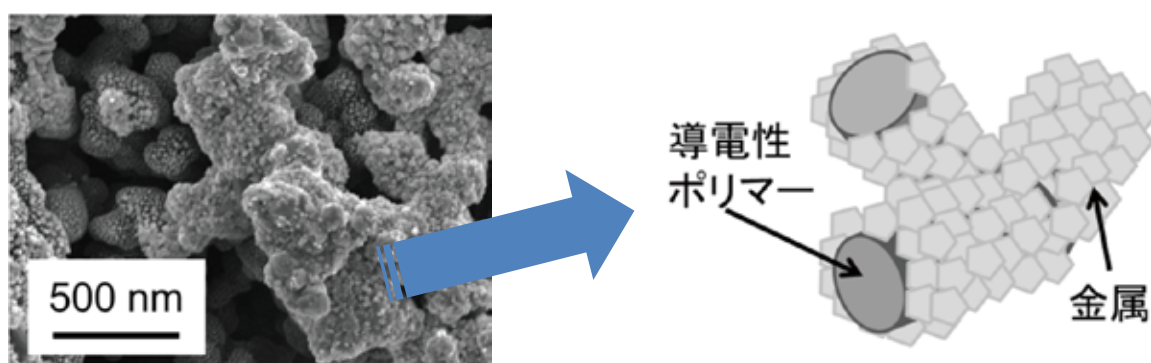
6. 金属シェルに覆われた導電性ポリマー

■ 研究の背景と狙い

次世代エレクトロニクス機器に搭載される3次元LSIの縦型配線やフレキシブルメモリ等の電極の材料には、高周波電導性や柔軟性といった特性が必要とされる。そのため、本研究では金属の殻（シェル）に覆われた導電性ポリマーの研究開発を行っている。

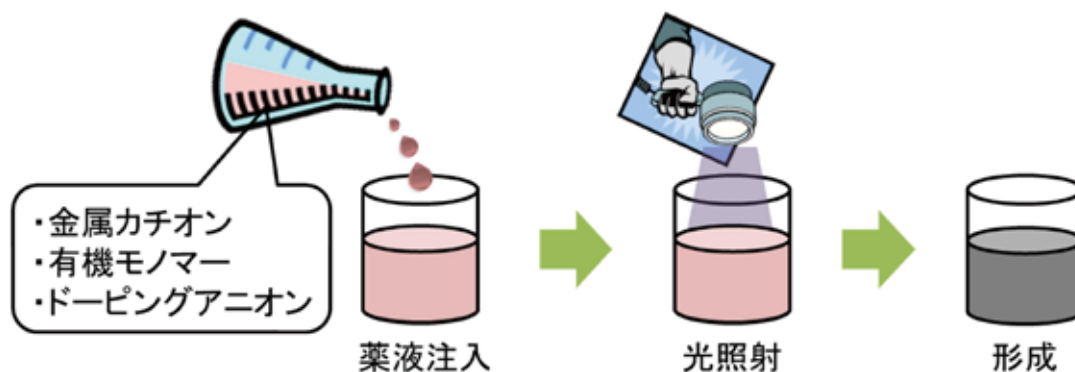
■ 研究の内容と成果

金属シェルに覆われた導電性ポリマーの微細構造



導電性ポリマーの一種であるポリピロールの表面が金属（銀）の殻（シェル）に覆われた微細構造を有する粒子およびその凝集体を得ることに成功した。この材料の導電率は $2 \times 10^4 \Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ であり、導電性ポリマー単体のものよりも2桁高く、一般的な金属と同程度の値となった。従来の手法によって同様な構造を得るためには、まず導電性ポリマーを作製した後、その表面をめっき等により金属で被覆するといった複雑な工程を経なければならなかった。また、化学反応により導電性ポリマーと金属を同時に形成する場合、本研究成果における構造とは逆となる導電性ポリマーにより被覆された金属が得られていた。

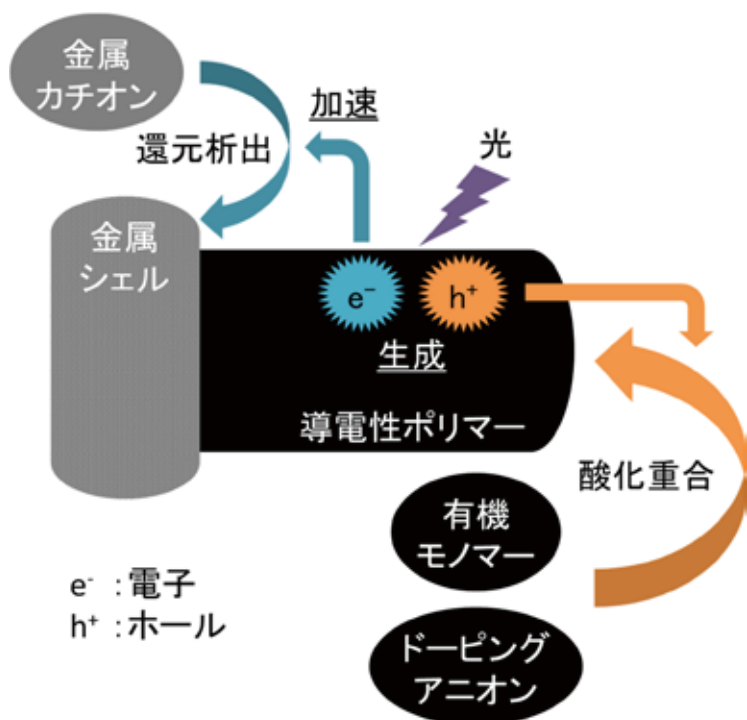
金属シェルで覆われた導電性ポリマーの形成方法



金属カチオン（プラスイオン）、有機モノマー、ドーピングアニオン（マイナスイオン）を含む薬液を注入し、紫外線などの光を照射すると、従来とは異なる化学反応が起こり、金属シェルで覆われた導電性ポリマーが形成する。

次世代エレクトロニクスの微細配線

光加速効果による金属シェルに覆われた導電性ポリマーの形成機構



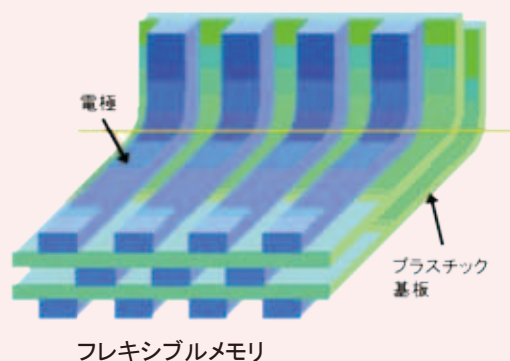
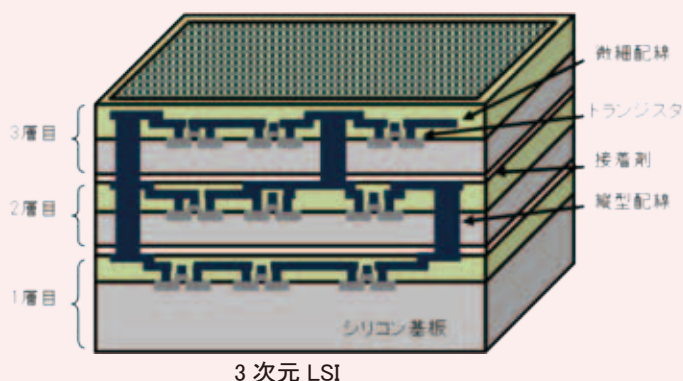
薬液中において、最初に導電性ポリマーと金属が化学反応により形成される。その後、導電性ポリマーに光が照射されると、電子とホールが生成する。電子は薬液中の金属カチオンと還元反応を起こして導電性ポリマー表面に析出し、金属シェルとなる。他方、ホールは薬液中の有機モノマーおよびドーピングアニオンと酸化反応を起こし、導電性ポリマーの重合がさらに進むことになる。この一連の過程において、光は還元析出反応を加速する効果をもたらす。

金属シェルに覆われた導電性ポリマーの形成速度 ($> 40 \text{ nm}\cdot\text{s}^{-1}$) は既存の銅のめっきやタンゲステンのCVDと比べて10倍以上大きい値となった。

発表文献

- 1) J. Kawakita and T. Chikyow: Japan. J. Appl. Phys., 51 (2012) 06FG11.
- 2) J. Kawakita, Y. Fujikawa, Y. Sakamoto and T. Chikyow: Electrochim. Acta, (2012) available on line.
- 3) 川喜多仁, 知京豊裕, 特願 2011-168502, 平成 23 年 8 月 1 日.
- 4) 日経産業新聞記事, 2011 年 10 月 4 日.

期待されるイノベーション



お問い合わせ先

ナノエレクトロニクス材料ユニット 川喜多 仁
ホームページ: samurai.nims.go.jp/KAWAKITA_Jin-j.html
メールアドレス: KAWAKITA.Jin@nims.go.jp

7. 放射性物質の吸着・除去・固定化材料の開発

■ 研究の背景と狙い

平成 23 年 3 月 11 日の東日本大震災による福島第一原子力発電所事故により、大量の放射性物質が外部に放出され、周辺に甚大な影響を与えた。従って、放出された放射性物質の吸着・除去・回収および固定化技術を開発・実証し、実際の汚染除去・汚染廃棄物の減容・環境回復が強く求められている。

■ 研究の内容と成果

セシウム 137 等の放射性物質の放出によって汚染された対象物は多岐に渡る。発電所内に溜まる炉心の冷却に使用された海水を含む汚染水や原発周辺および広域に汚染が拡大している土地（田んぼ・畑・果樹園等）、森林、水、建物、道路等が想定される。また、汚染された水の分布も、海水、河川水、ため池や湖、プール、農業用水等非常に多様である。従って、環境中の多種多様な放射性物質の除去・回収・固定・閉じ込めに際しては、汚染現状に対して最適な材料を選ぶ必要がある。

1. 放射性物質の吸着・除去のための基礎的データベースの構築

数多くの吸着材料候補物質について、その吸着能力を網羅的に示した知見は、世界的にもほとんど存在しておらず、吸着材料を選ぶ際に基準として参照できるデータベースが強く求められていた。様々な産地の天然鉱物、様々な化学組成を有した約 60 種の無機材料に対して、適材適所の物質・材料を絞り込みのために、セシウム・ストロンチウム・ヨウ素の基礎的データ 800 点の収集を進めた。収集した膨大なデータについては、(独)物質・材料研究機構が提供しているデータベース「物質・材料データベース (MatNavi)」の中に新たな枠組み (READS) を設け収録した。今後、国や自治体、電力会社や専門業者が各地で行う放射性物質の除去・回収技術の開発に際し、より有効でより効率的な方法をとることに寄与することを期待している。



除染・環境回復に向けて

2. セシウム安定閉じ込め材料

放射性セシウムの環境拡散を長期にわたって抑制するためには、熱的・化学的に安定な固体化合物（固化体）内部にセシウムイオンを閉じ込め、安定化した上で、地下深く埋設処分する必要がある。現行技術では、ホウケイ酸を主成分とするガラス固化体にセシウムを閉じ込める「ガラス固化法」が、最も有効なセシウム閉じ込め法とされてきた。

本研究では、熱・化学安定性に優れた酸化チタン（ TiO_2 ）を固化体材料として利用することにより、現行技術を大きく上回るセシウム閉じ込め効果を実現した。酸化チタンとセシウムを溶解した酸化モリブデン（ MoO_3 ）熔融体を電気分解することによって、針状のチタン酸固化体単結晶（太さ$20\ \mu\text{m}$、長さ$5\ \text{mm}$） $1\ \text{cm}^3$ あたりに $1\ \text{g}$ の高濃度セシウムを閉じ込めることに成功した（図1）。チタン酸固化体内部においては、 TiO_2 分子が形作るチューブ状フレーム内部に、セシウムイオンがすき間なく1次元的に整列している（図2）。チタン酸固化体は、1次元イオン配列と針状形態のおかげで、従来のホウケイ酸ガラスと比べ170倍ものセシウム閉じ込め効果を発揮する（図3）。

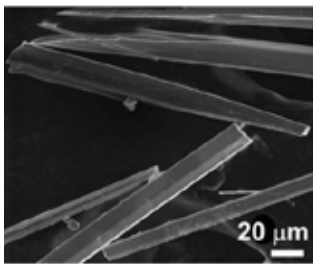


図1 チタン酸固化体の電子顕微鏡像。

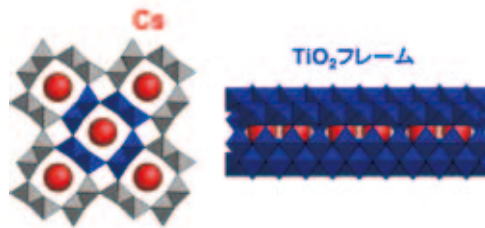


図2 チタン酸固化体の構造図。

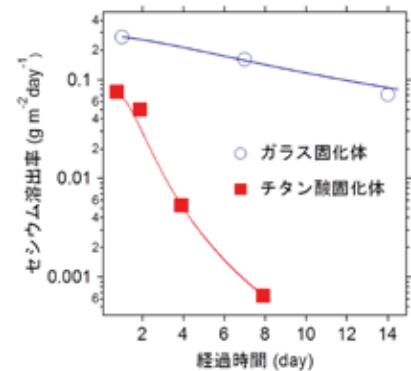


図3 水熱条件下におけるガラス固化体／チタン酸固化体からのセシウム溶出率。

発表文献

- 1) H. Yamada, K. Tamura, Y. Watanabe, N. Iyi and K. Morimoto: *Sci. Technol. Adv. Mater.* **12** (2011) 064705.
- 2) 山田裕久：粘土科学, **50** (2011) 33.
- 3) H. Abe, A. Satoh, K. Nishida, E. Abe, T. Naka, M. Imai and H. Kitazawa: *J. Solid State Chem.* **179** (2006) 1521.
- 4) 特開 2006-62933

期待されるイノベーション

放射性物質の吸着・除去・固定化材料の開発により、除染・減容化・環境回復への大きな貢献が期待される。

お問い合わせ先

環境再生材料ユニット 山田裕久
 ホームページ：NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>
 メールアドレス：YAMADA.Hirohisa@nims.go.jp
 環境再生材料ユニット 阿部英樹
 メールアドレス：ABE.Hideki@nims.go.jp

8. 高効率・高品質を両立させた革新的溶接技術

■ 研究の背景と狙い

鋼構造物の高機能化、長寿命化、安心・安全化を実現するために、980MPa 級の高強度鋼や低温用鋼を初めとして、高機能鉄鋼材料の適用が不可欠になっている。これらの高機能鉄鋼材料を構造化するために高品質な溶接継ぎ手を高効率に実現できるクリーン MIG 溶接法を開発した。

研究の内容と成果

1. 高品質溶接継ぎ手を実現するために求められるクリーン MIG 溶接

ワイヤ先端でアーク放電を行う消耗電極式溶接は広く使用され、酸素や二酸化炭素を含むシールドガスが使用される。シールドガス中の酸素や二酸化炭素は溶接金属中の酸素量を増やし溶接金属の靱性や延性の低下の原因となる。このため、高い信頼性や性能が要求される部位には消耗電極式溶接は使用されず、溶接能率の低い TIG 溶接（非消耗電極式溶接）が使用されていた。これを解決するためにはシールドガスに酸素や二酸化炭素を含まない純 Ar シールドガスを用いた消耗電極式溶接（クリーン MIG 溶接）が有効とされてきたが、クリーン MIG 溶接はアークが不安定となり良好な継ぎ手が得られなもので実用化には至らなかった。

2. 安定溶接施工が可能なクリーン MIG 溶接の実現

クリーン MIG 溶接ではワイヤ先端に溶融した金属の液柱 (Column of Liquid molten Metal:CLM) が生じ、CLM が不安定に動き回ることにより溶接が不安定になることを突き止めた (図 1)。NIMS におけるアークプラズマ研究の基盤技術を応用し、溶接アークプラズマの中でワイヤの溶融挙動をコントロールできる溶接ワイヤ (同軸複層ワイヤ) を世界に先駆けて提案した。溶接ワイヤ (ワイヤ径: 1.6mm) の中心部と外周部の融点異なる材料を使用し、平均組成が目的とする組成となる同軸複層構造のワイヤである (図 2)。この同軸複層ワイヤにより CLM の発生を抑え、ワイヤ先端部の安定な溶融と溶滴移行を実現し、安定な溶接施工が不可能とされたクリーン MIG 溶接の安定化に成功した。



図1 ワイヤ先端に溶融金属液柱が生じる不安定なクリーンMIG溶接

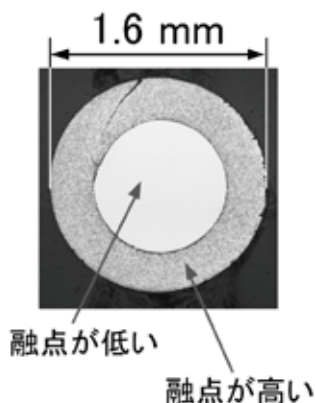


図2 同軸複層ワイヤ



図2 安定なワイヤ溶融と溶滴移行により安定なクリーンMIG溶接を実現

同軸複層ワイヤを用いたクリーンMIG溶接法

3. 高能率・高品質溶接を可能とするクリーンMIG溶接技術の適用

同軸複層ワイヤを用いたクリーンMIG溶接は、消耗電極式溶接による「高効率溶接」と、純Arシールドガスを使用した「高品質溶接」を両立するもので、溶接界の常識を破るものであると注目され、NEDO「鉄鋼材料の革新高強度・高機能化基盤開発（2008-2012年）」の溶接・接合に関する中核技術として採用され、980MPa級高強度鋼の大型模擬構造体の実証試験に成功した。

クリーンMIG溶接技術では高性能な溶接金属が高能率に得られるので、NIMSの材料技術を構造化し構造物として普及させることができる。制震ダンパー用の高Mn系鉄系形状記憶合金の溶接継ぎ手では必要な強度が得られなかったが、クリーンMIG溶接により母材と同等の強度が得られ構造化が可能になった。低温用鋼では効率の低いTIG溶接が主に使用されるが、クリーンMIG溶接により高品質・高能率溶接が可能となった。溶接部の残留応力を低減できる低変態温度溶接材料を同軸複層ワイヤとし、クリーンMIG溶接を行うことにより、強度や靱性を確保した補修・補強溶接技術として適用できる。

クリーンMIG溶接技術は、従来のTIG溶接などの低能率・高品質溶接から脱却し、高機能鉄鋼材料の高能率・高品質溶接を実現することが期待できる。

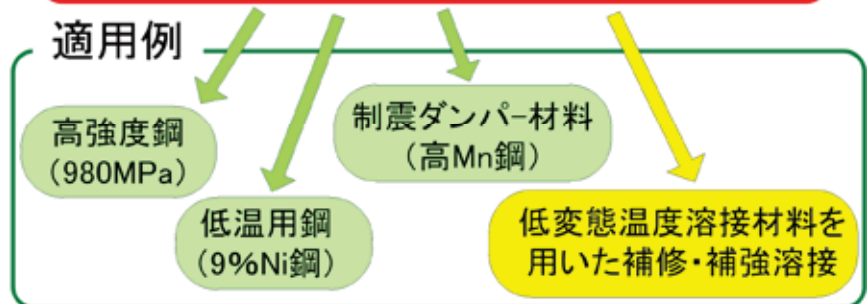
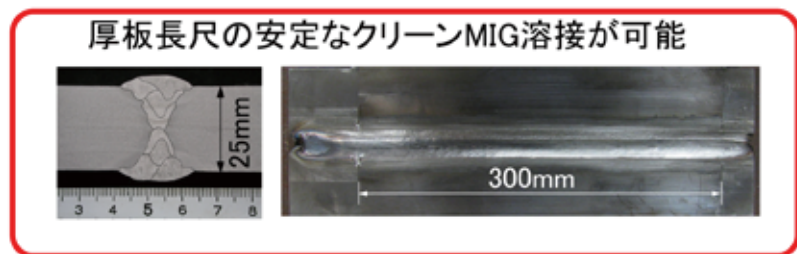


図4 クリーンMIG溶接は厚板長尺物の安定溶接施工が可能であり、各種の高機能鉄鋼材料に対して適用例が拡大している

発表文献

- 1) T. Nakamura and K. Hiraoka, Sci. Technol. Weld. Join. 16 (2011) 717.
- 2) T. Nakamura and K. Hiraoka, Q. J. Jpn. Weld. Soc. 29 (2011) 35s.
- 3) T. Nakamura and K. Hiraoka, Weld. World 53 (2009) R158.
- 4) 特許第 4894145 号

期待されるイノベーション

鋼構造物の補修・補強溶接技術は、震災の復旧復興に貢献することが期待され、本年度4月から開始した社会インフラ復旧、再生に向けた構造材料技術の開発プロジェクトの主要なテーマの1つとなっている。さらに、今後、数が増大する老朽化した社会インフラ設備の再生技術として期待される。

お問い合わせ先

元素戦略材料センター 構造材料ユニット 中村照美
 ホームページ：NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>
 メールアドレス：NAKAMURA.Terumi@nims.go.jp

9. フラーレンナノウィスカーの超伝導化

■ 研究の背景と狙い

現在実用化研究が進んでいる酸化物超伝導線材や MgB_2 線材では、原料が粉末であるためにハステロイなどの Ni 基合金や銀シースなどの金属パイプを用いてテープ状・線状にして使おうとしている。「フルーレンナノウィスカーの超伝導化」では「もともと繊維状であるものを超伝導化して、超伝導線として使えないか?」という、これまでの「超伝導物質を線材にする」とは異なった考えから研究を行った。

研究の内容と成果

1. フラーレンナノウィスカーとは?

C_{60} フラーレンは、1985年にハロルド・クロトーらによって発見された物質である。フルーレンナノウィスカーは、フルーレンの良溶媒飽和溶液にフルーレンの貧溶媒を重層する液-液界面析出法(LLIP法)によって作成した直径1マイクロメートル未満のフルーレンの針状結晶であり、作成条件により図2のように様々な形状、長さのものが得られる。

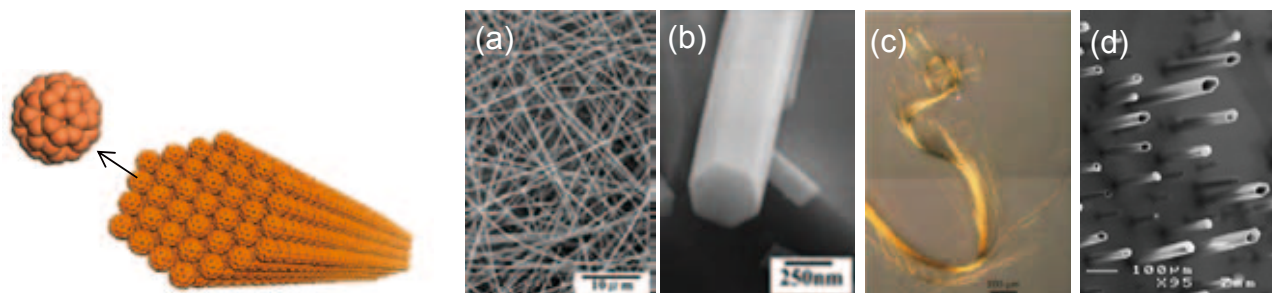


図1 C_{60} フルーレン分子が凝集して細長い針状結晶(ウィスカー)を構成している。

図2 LLIP法で作成した様々な形状のフルーレン針状結晶。(a),(b),(c): C_{60} (フルーレン)ナノウィスカー、(d) C_{60} (フルーレン)マイクロチューブ

2. フラーレンナノウィスカーへのカリウム添加

カリウム添加反応プロセスは極めて単純である。ガラス管に入れたフルーレンナノウィスカーに C_{60} -1 個に対してカリウムを約3個の割合で加え、真空封入し200度で約24時間加熱を行うことで、フルーレンナノウィスカー全体にカリウムが拡散浸透する。

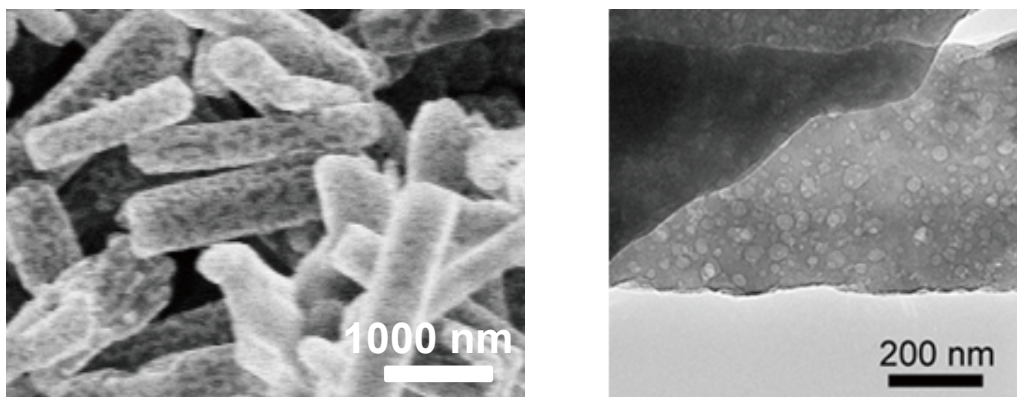


図3 カリウムがドーブされたフルーレンナノウィスカーの(左)走査電子顕微鏡(SEM)像、(右)透過電子顕微鏡(TEM)像。内部に多数の細孔が分散しており、細孔を通してカリウムがフルーレンナノウィスカー全体に侵入している。

軽くてしなやかな超伝導繊維素材をめざして

3. 超伝導化したフラレンナノウiskアーの特性

C₆₀ フラレン結晶へのカリウム添加は、反応速度が遅く長期間の加熱処理が必要だったが、フラレンナノウiskアーでは内部の細孔を通じた反応促進が起こり、1/3～1/20の加熱時間で反応が完了する。上記、フラレン結晶とフラレンナノウiskアーの反応を磁化で測定した（図4(左)）。また、それらの臨界電流密度は（図4(右)）に示すようにフラレンナノウiskアーのほうがはるかに優れている。

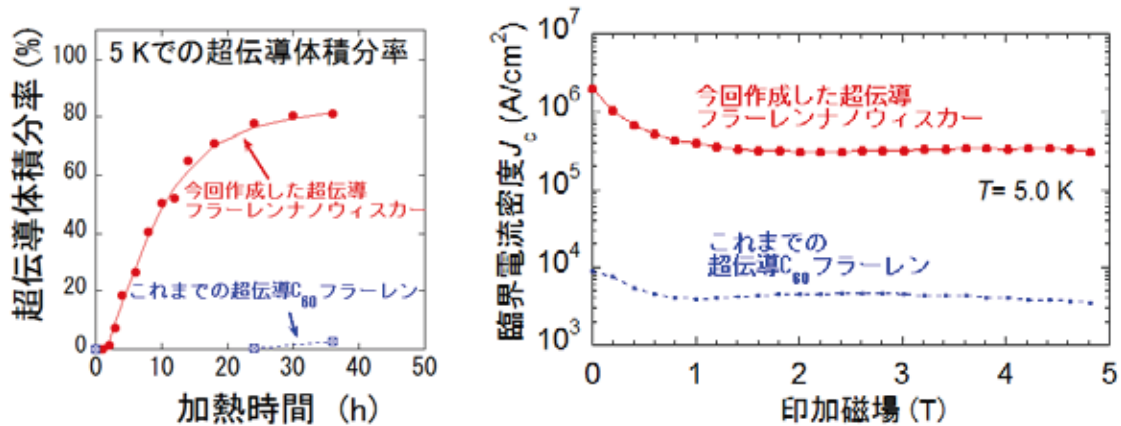
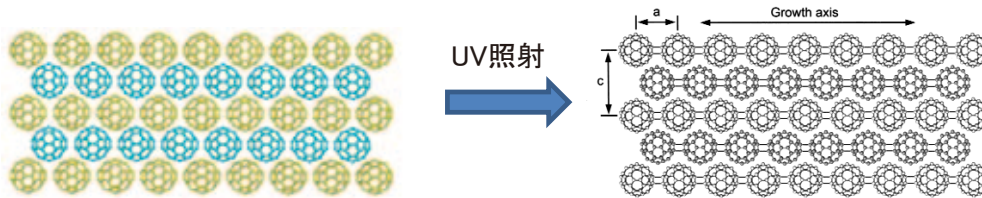


図4 (左) 超伝導体積分率と加熱時間、(右) カリウムがドーブされたフラレンナノウiskアーとフラレン結晶の臨界電流密度。フラレンナノウiskアーの方が2桁高く、 10^5 (A/cm²) 以上。

4. 今後の展開、めざすもの

超伝導フラレンナノウiskアーを大気中安定化する方法を試行すると共に、より長いウiskアー状繊維の超伝導化、重合化による強度の向上の研究を進め、軽量超伝導フラレン繊維を製造する。



発表文献

- 1) H. Takeya, K. Miyazawa, R. Kato, T. Wakahara, T. Ozaki, H. Okazaki, T. Yamaguchi and Y. Takano : *Molecules* 17 (2012) 4851-4859.
- 2) 竹屋浩幸, 宮澤薫一, 高野義彦 : 超電導 Web21 2012年2月号 30-31. : SUPERCOM Vol.21, No1 February, 2012.
- 3) 特願 2011-279825

期待されるイノベーション

フラレンナノウiskアーは金属の4分の1で絹ほどの重量しかない非常に軽い素材である。研究は始まったばかりであるが、将来の軽量超伝導線材や磁気シールド等の応用に向けて束ねたり編んだりできるような、それこそ魔法の超伝導絨毯のようなものができたらと夢を膨らませている。

お問い合わせ先

超伝導線材ユニット 竹屋浩幸、高野義彦
 先端材料プロセスユニット 宮澤薫一
 ホームページ : NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>
 メールアドレス : takeya.hiroyuki@nims.go.jp

10. “スピン”と“構造”の最表面複合分析

■ 研究の背景と狙い

電子は電荷に加え、スピンという磁石の様な性質を持っている。電荷とスピンの両方を利用するデバイスはスピントロニクスと呼ばれ、電荷だけを利用する現在のデバイス（エレクトロニクス）に比べて低消費電力化・高性能化が期待されることから、現在、世界中でその開発が進められている。

スピントロニクス開発では、最表面（表面第一原子層）の“スピン”と、元素組成や原子位置に関する“構造”の分析が重要な技術課題である。このうち、スピンに関しては、最先端の分析技術を用いてもその分析は極めて困難であり、この解決がスピントロニクス開発での課題となっていた。

これに対し、“スピン偏極 $^4\text{He}^+$ イオンビーム”と呼ばれる新しいイオンビームは、最表面のスピンとだけ相互作用すると考えられており、この相互作用を利用することで最表面のスピンと構造の複合分析が実現すると期待されている。本研究者らは平成19年に、ビームの性能指標（ビーム偏極率）が世界最高であるスピン偏極 $^4\text{He}^+$ イオンビームの開発に成功していた。ただし、その複合分析の実現には、この相互作用（スピン軌道相互作用）の解明が課題となっていた。

■ 研究の内容と成果

“スピン偏極 $^4\text{He}^+$ イオンビーム”と呼ばれる新しいイオンビームは最表面とスピンの双方に極めて敏感というユニークな特徴を有していることから、これを利用することで最表面の「スピン」と原子位置などに関する「構造」の複合分析が実現する可能性がある。具体的には、 He^+ イオンは最表面で電子を受け取り He 原子となる性質（イオン中性化）があるが、これが起こるのは He^+ イオンのスピンと最表面の電子のスピンが逆向きの場合に限られる（図1(A)）。一方、それらが同じ向きの場合には、イオン中性化は起きない（図1(B)）。したがって、 He 原子とはならず散乱された He^+ イオンの強度を観測することで、最表面スピンの特性を構成元素ごとに分析することができる。

ただし、 He^+ イオンが最表面の原子で散乱される際、 He^+ イオンの持つスピンによって散乱されやすい方向が異なる性質（スピン軌道相互作用）があり（図2）、この効果は上記のイオン中性化にしばしば重畳する。この問題を解決するために、 He^+ イオン散乱におけるスピン軌道相互作用の解明が求められていた。

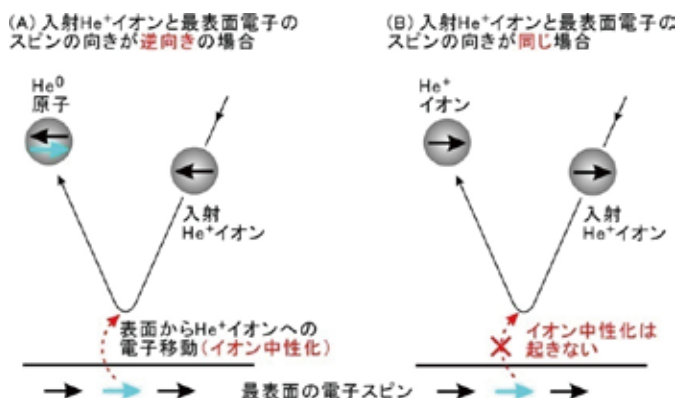


図1 スピン偏極 $^4\text{He}^+$ イオンビームによる最表面スピン分析の原理図。中性化が起こるのは、 He^+ イオンのスピンと最表面の電子のスピンが反平行の場合に限られる（パウリの排他原理）。したがって、(A)では He^+ イオンは中性化されるのに対し、(B)では中性化が起きない。

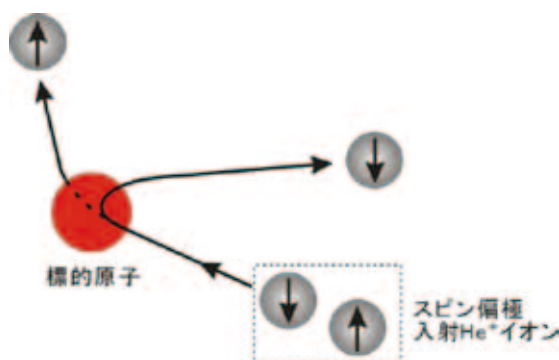


図2 He^+ イオン散乱におけるスピン軌道相互作用の概念図。 He^+ イオンが最表面の原子で散乱される際、 He^+ イオンの持つスピンの向きによって散乱される方向が異なる性質がある。図では、上向きスピンを持つ He^+ イオンが標的原子の前方に散乱される一方で、下向きスピンを持つ He^+ イオンが標的原子の後方に散乱される場合を模式的に示している。

新しいイオンビームでスピン活性材料の開発を加速

本研究者は、これまでスピン偏極⁴He⁺イオンビームの開発を進めており、ビーム偏極率^(*)が世界最高のビームの開発に成功するなど、本技術では世界を先導する立場にある。本研究では、この新しいイオンビームを用いて偏極He⁺イオン-原子衝突実験を行った。具体的には、標的元素で構成される基板を超高真空中に設置し、これに偏極He⁺イオンの運動エネルギーを揃えて入射し、特定の方向に散乱されるHe⁺イオン強度のスピン依存度（スピン非対称率）を観測した。そして、このスピン非対称率と散乱角および入射エネルギーとの関係を、様々な標的元素について系統的に調べた。その上で、スピン軌道相互作用の理論モデルを構築し、この理論モデルから計算されるスピン非対称率と実験値との比較を詳細に解析することで、スピン軌道相互作用の解明に成功した。図3で示される様に、スピン非対称率の散乱角に対する依存性（図3(A)）と入射イオン速度に対する依存性（図3(B)）の実験結果は、今回構築した理論モデルによって良く説明されている。この解明により、スピン非対称率におけるスピン軌道相互作用の寄与が決定できるようになったため、スピン偏極⁴He⁺イオンビームによる最表面のスピン分析が可能になった。

*：イオンビーム中のHe⁺イオンのうちで、上向きスピンを持つもの数(n_{\uparrow})と下向きスピンを持つもの数(n_{\downarrow})の差を和で割ったものと定義する。すなわち、 $(n_{\uparrow} - n_{\downarrow}) / (n_{\uparrow} + n_{\downarrow})$ 。

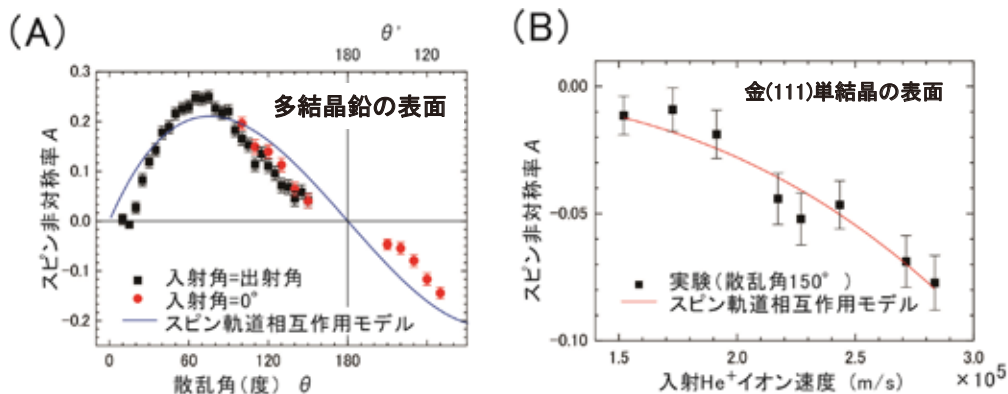


図3 スピン偏極⁴He⁺イオン-原子衝突実験における散乱イオンの分光計測から得られたデータと、その解析結果。(A)は散乱イオン強度のスピン依存度（スピン非対称率）と散乱角との関係。入射イオンビームから見て左に散乱されるとき（散乱角 θ ）と右に散乱されるとき（散乱角 θ' ）でスピン非対称率の符号が逆になっており、これは右方向と左方向の散乱では、散乱He⁺イオンのスピンの向きが逆向きであることを示している。(B)はスピン非対称率と入射イオン速度との関係を示している。速度が大きいほどスピン軌道相互作用が強くなりスピン非対称率の絶対値が増加している。(A)と(B)の実験データは、スピン軌道相互作用モデルに基づく理論解析の結果と良く一致している。

発表文献

- 1) T. Suzuki, Y. Yamauchi, S. Hishita, Phys. Rev. Lett. **107** (2011) 176101.
- 2) T. Suzuki, H. Kuwahara, Y. Yamauchi, Surf. Sci. **605** (2011) 1197.
- 3) T. Suzuki, Y. Yamauchi, Phys. Rev. A **82** (2010) 042709.
- 4) 鈴木拓, 山内泰, 国際特許出願 WO2008/069110 (米 US8, 017, 920 B2, 独, 仏, 日)

期待されるイノベーション

本研究によって、偏極イオンビームによる最表面スピン分析の実現に目処が立った。今後、表面や界面でスピン活性を有するセラミックス材料や磁性半導体材料等の開発への応用が想定される。最終的には、情報通信分野等で飛躍的な省エネ化・高性能化をもたらす新規スピントロニクスの実現に貢献することが期待される。

また、本研究により解明されたスピン軌道相互作用を利用することで、従来の性能を上回る偏極イオンビームの発生が可能であることが明らかとなった。今後、この新しい偏極イオン源の利用による表界面スピン分析法の高度化が期待される。

お問い合わせ先

光・電子材料ユニット 鈴木 拓
 メールアドレス: suzuki.taku@nims.go.jp

トピックス つくばイノベーションアリーナ

目的

時代の潮流は、一機関、一企業が単独で進める研究開発の在り方から、オープンイノベーション方式へと向かっている。

NIMS では、より社会に開かれた研究所として社会ニーズに応える研究を一層進める方針の一環として、2011年11月に「NIMS オープンイノベーションイニシアティブ」を制定した。このイニシアティブは、NIMS が、研究環境及び知的財産権の利用を外部の複数の法人にオープンにすることにより、研究開発の速度を上げ、その成果利用の早期化を推進することにより、我が国におけるイノベーションの促進を図ることを目的とするものである。

NIMS はまた、2009年6月以来、つくばイノベーションアリーナ (TIA-nano) の中核機関の一員として産総研、筑波大、さらに日本経済団体連合会 (経団連) とも連携して、つくばの地に世界的に魅力あるナノテクノロジー研究拠点を作りあげることに取り組んでいる。特に、環境・エネルギーに関わるナノ材料、ナノテクノロジー分野 (ナノグリーン領域) では NIMS が中心的役割を果たしてきている。

このような背景から、「NIMS オープンイノベーションイニシアティブ」の最初の実施例として、会員制のオープンイノベーションプラットフォーム「TIA ナノグリーン」を発足した。2012年の4月に、会員企業9社に産総研、筑波大学を加え、その活動を始めるところである。

オープンイノベーションプラットフォーム「TIA ナノグリーン」の概要

本プラットフォームの会員は企業、研究機関、大学などの法人であり、大別して企業会員と、アカデミア会員に分かれる。企業会員には、オープンな環境で研究活動を行う特別会員、正会員、準会員と、研究活動は行わず研究報告会等での情報収集を中心に行うベーシック会員がある。

研究活動を行う会員は、一つの研究テーマを課題とする Technology Committee (TC) に法人として所属し、その TC のオープンラボ (OL) に、研究員を派遣することができる。OL では、NIMS に蓄積された材料研究の基盤技術、すなわち情報、知財、人材、技術ノウハウ、設備などを活用して研究を進める。TC の研究テーマは、共通の、基礎的なものとし、複数の企業が、一緒に探求する。情報は OL 内で共有され、OL で生まれた知財は NIMS が管理し、会員企業は無償実施権を持つ。

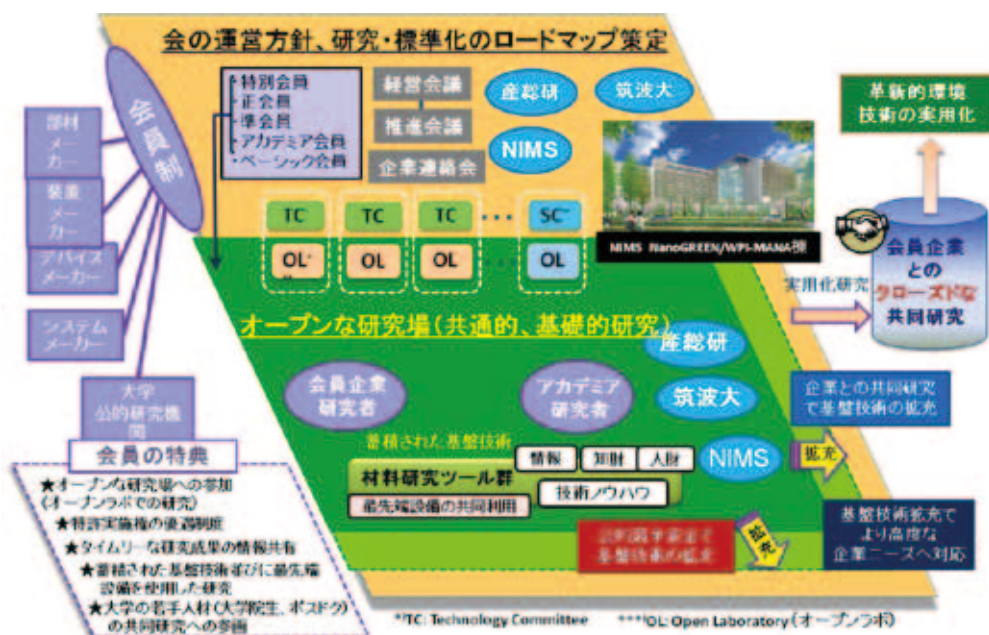


図1 オープンイノベーションプラットフォーム「TIAナノグリーン」の概念図

「TIA ナノグリーン」の運営組織

経営会議を置き、TIA ナノグリーンの重要事項である会員の承認、TCの新設・改廃、また、当該年度のTCの研究テーマ、研究計画、予算案などについて決定する。経営会議は、NIMS 理事長を議長とし、NIMS 外部から産総研理事、筑波大理事、および特別会員から一名、NIMS 内部から理事を始めとする役職員を構成員とする。

経営会議の下には推進会議が置かれ、上述の事項について審議し、その結果を経営会議に諮る。推進会議は、NIMS の担当理事を議長とし、各TCの委員長、筑波大学、産総研の有識者、特別会員を構成員とする。

研究テーマ毎に置かれるTCに対応してOLが設けられ、実際の研究はOLで行われる。TC委員長とOLのラボリーダーは兼務し、NIMS 研究者が担当する。

また、会員企業を構成員とする企業連絡会が置かれ、NIMS の担当理事を始めとする役職員の参加のもと、TIA ナノグリーンの運営について提言を行う。

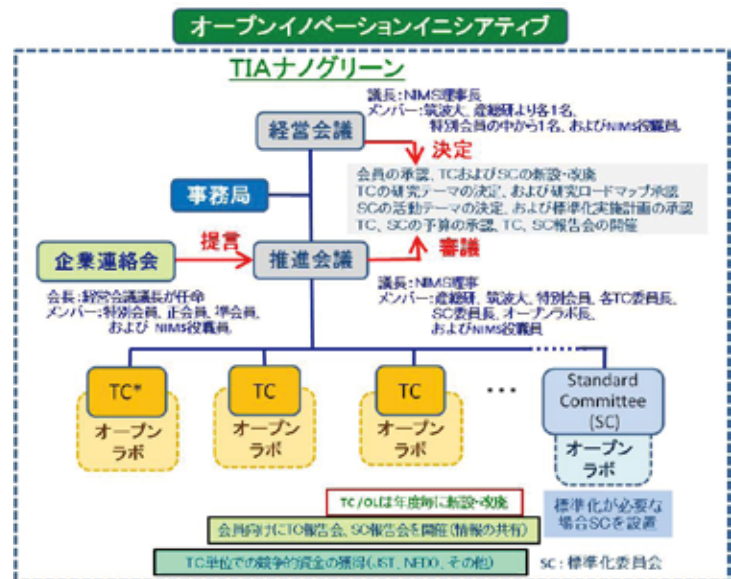


図2 「TIAナノグリーン」の運営組織図

「TIA ナノグリーン」の研究テーマ

TIA ナノグリーンは、オープンイノベーションのプラットフォームとして多様な技術や問題意識を持つ産学独の研究者の出会いによる共通的、基礎的研究の推進により、予想を超えるイノベーションを創出することを目的としている。

NIMS が強みを持つ物質・材料分野の中から2012年4月の発足時には、図3のように、電池材料、熱エネルギー変換材料、省エネルギー磁性材料の三つをTCのテーマとし、各オープンラボで研究を進めることとなっている。

TCのテーマは、NIMS が提案しつつ、会員からのフィードバックを考慮し、経営会議にて年度毎にその新設、改廃などが決められる。

2012年4月から、並木地区のNanoGREEN棟を中心にこれらの研究が、産学独の連携のもとに推進されることになっている。

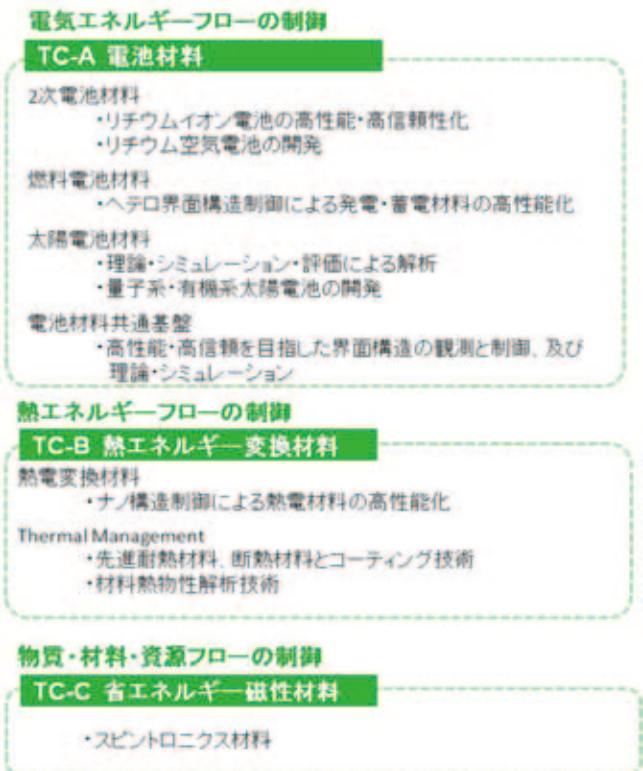


図3 「TIAナノグリーン」の研究テーマ

お問い合わせ先

つくばイノベーションアリーナ推進室 室長 中村和夫
ホームページ： <http://tia-nano.jp/core/area/nano-green.html>
メールアドレス： tia@nims.go.jp

2011年度運営に関するデータ集

- 論文被引用数
- 常勤職員数の推移
- 特許出願・実施料収入の推移
- 外部資金等の獲得状況
- 科学研究費補助金の獲得推移
- 機構の組織（平成23年度末現在）

2011年度運営に関するデータ集

論文被引用数

論文被引用数ランキング (Materials Science)

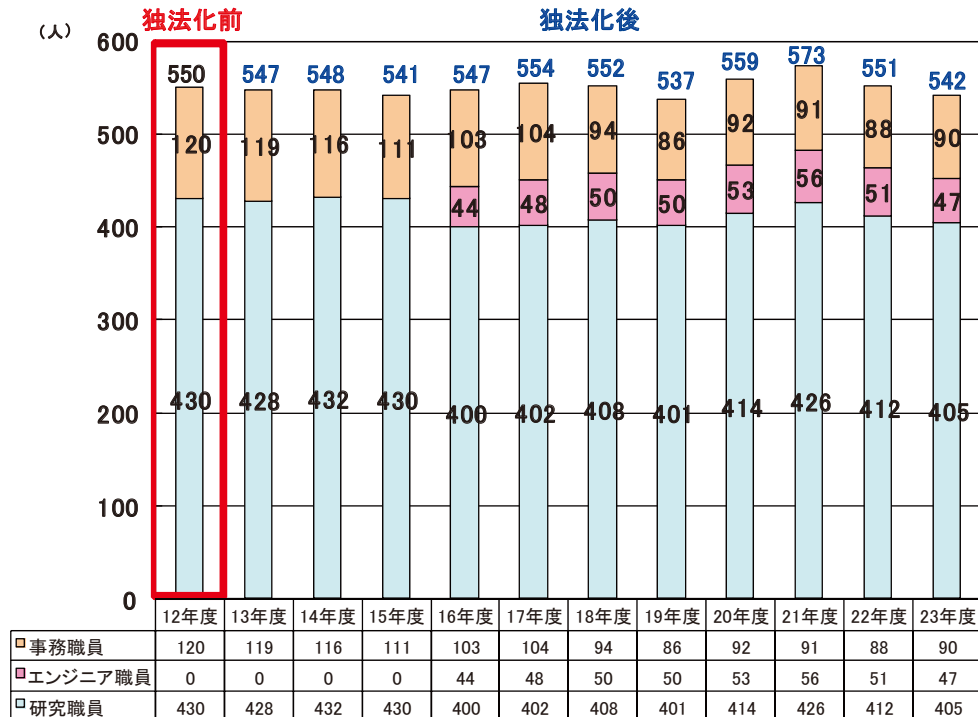
独法化前 (1996 - 2000)			独法化後 (2007 - 2011)		
Rank	Institution	Citations	Rank	Institution	Citations
1	マックスプランク研究所	4,886	1	中国科学院	50,667
2	東北大学	3,990	2	マックスプランク研究所	17,350
3	カリフォルニア大学 サンタバーバラ校	3,204	3	シンガポール大学	12,614
4	マサチューセッツ工科大学	3,095	4	マサチューセッツ工科大学	12,271
5	ロシア科学アカデミー	3,026	5	物質・材料研究機構	11,903
6	ケンブリッジ大学	2,570	6	清華大学	11,133
7	産業技術総合研究所	2,561	7	東北大学	10,704
8	ペンシルバニア州立大学	2,517	8	ジョージア工科大学	10,611
9	京都大学	2,443	9	インド工科大学	10,183
10	大阪大学	2,370	10	ノースウェスタン大学	9,670
...			
31	金属材料技術研究所 無機材質研究所	1,570			

*本ランキングは、平成24年6月のトムソンサイエンティフィック社のESIデータベースをもとに作成

日本の研究機関のみ

2007 - 2011		
Rank	Institution	Citations
1	物材機構	11,903
2	東北大	10,704
3	産総研	8,301
4	東京大	7,300
5	大阪大	7,074
6	JST	6,789
7	京都大	5,823
8	東工大	5,140
9	九州大	3,419
10	北海道大	3,132

常勤職員数の推移

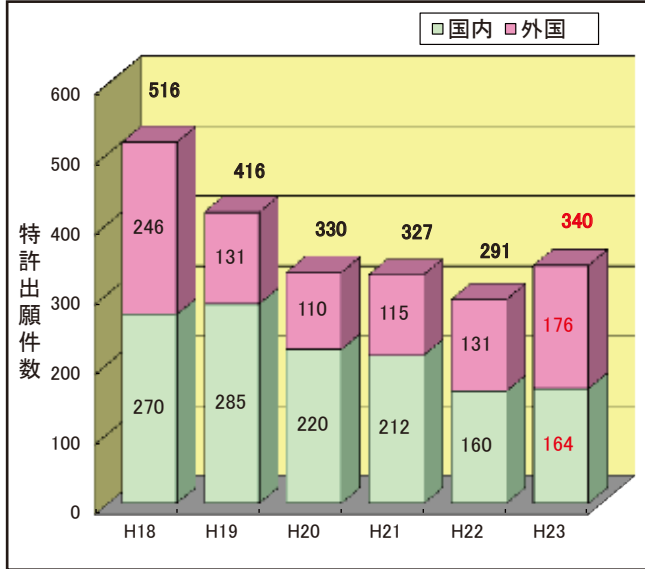


※各年度末の人数(役員は含まず)。

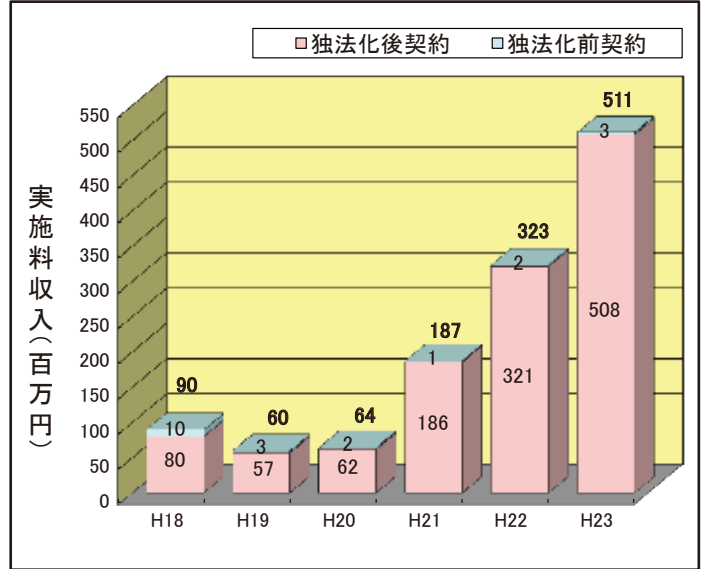
平成23年度の常勤職員数は平成24年3月31日現在の人数。

特許出願・実施料収入の推移

出願件数

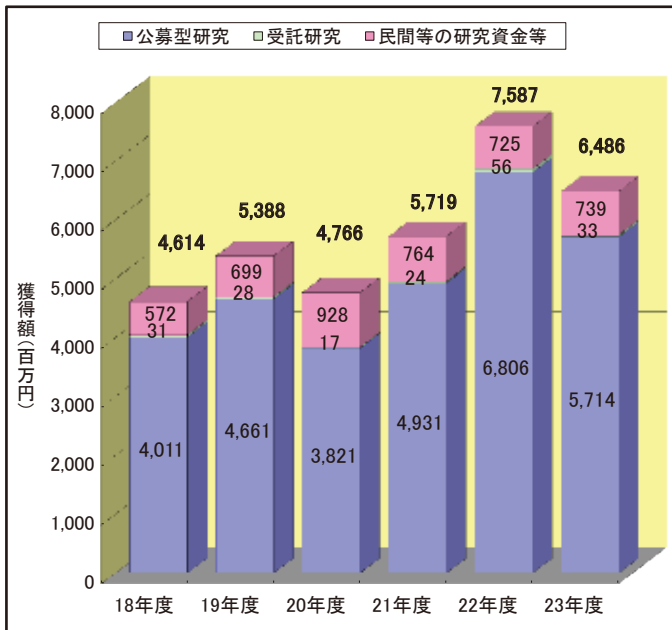


実施料収入

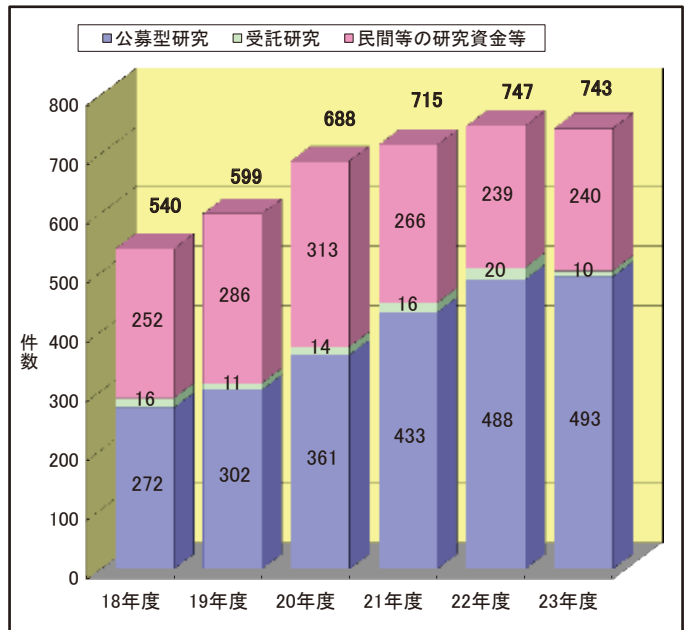


外部資金等の獲得状況

獲得額

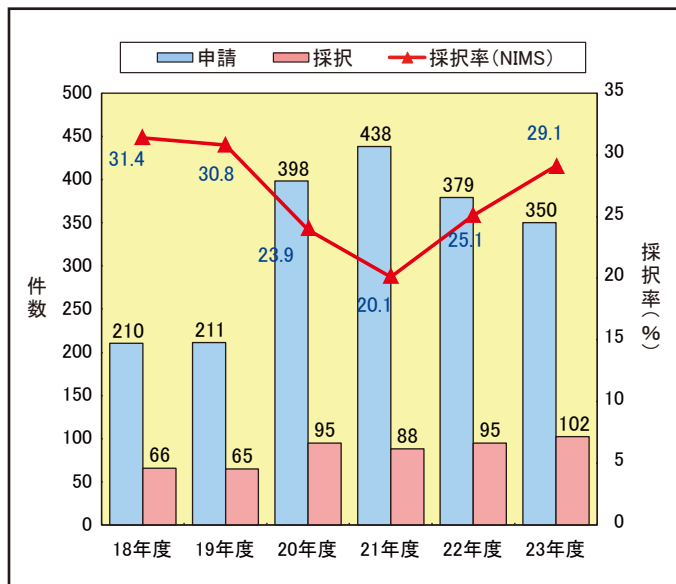


件数

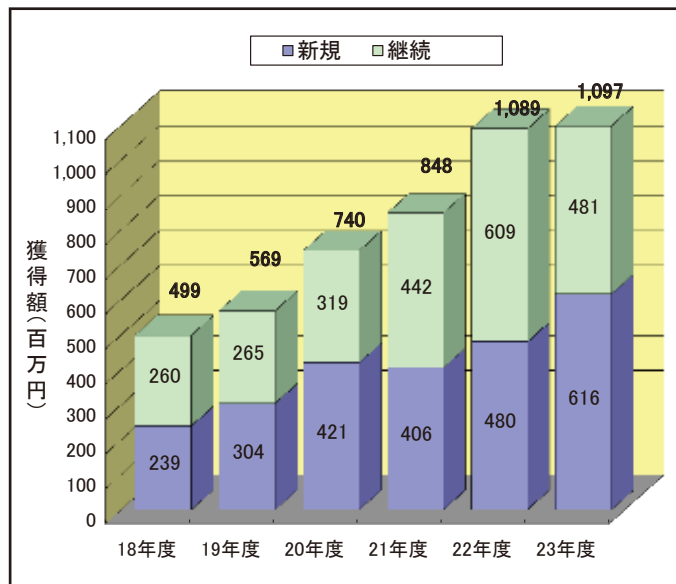


科学研究費補助金の獲得推移

申請・採択件数



獲得額



機構の組織 (平成 23 年度末現在)



- ◆本書の複製権・翻訳権・上映権・譲渡権・公衆送信権（送信可能化権を含む）は、物質・材料研究機構が保有します。
- ◆本書に関するご意見・お問合せは下記担当までお願いいたします。

発行：独立行政法人 物質・材料研究機構

2012年7月2日発行

担当者：企画部門評価室／小野寺 秀博

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

電話：029-859-2603

FAX：029-859-2201

E-mail：ONODERA.Hidehiro@nims.go.jp



物質・材料研究からイノベーションを目指して

