

NIMS 研究成果

2008年度 主要研究成果6件
トピックス 2件



2009年6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>

INDEX

NIMSの主な研究成果	1
岸 輝雄	

研究成果

1 無機物からの生物有機分子の衝撃合成	3
隕石の海洋衝突で生成した生命の原材料	
関根 利守 中澤 弘基	
2 超微細結晶粒組織鋼における靱性の	7
逆温度依存性を発見	
低温ほど壊れにくい超鉄鋼	
木村 勇次 井上 忠信 殷 福星 津崎 兼彰	
3 鉄系超伝導に新物質を発見	11
線材化にも挑戦	
高野 義彦	
4 ナノ膜による有機分子の超高速濾過	15
水の透過速度が1000倍に！	
一ノ瀬 泉	
5 細胞膜表面トランスポーターの	19
非侵襲機能解析デバイスの創製	
バイオトランジスタ	
宮原 裕二	
6 超1 GHz NMRの開発に向けて	23
Bi系酸化物コイルでタンパク質のNMR計測に成功	
木吉 司	

トピックス

1 NIMS連係大学院の強化・拡充	27
納富 健文	
2 企業との関係センター	29
原 龍雄	

2008年度の運営（データ集）

2008年度運営に関するデータ集	31
-------------------------------	----



NIMSの主な研究成果

(平成20年度主要な研究成果6件の発行について)

独立行政法人 物質・材料研究機構

理事長 岸 輝雄

鉄鋼、自動車、電機、エレクトロニクスなど、日本の基幹産業の成功の多くは、卓越した材料開発の上に成り立ってきました。そして今起こっている地球規模の環境・エネルギー問題の解決のためにも材料におけるイノベーションが強く望まれています。独立行政法人物質・材料研究機構（National Institute for Materials Science : NIMS）は、このような、新しい時代を拓く新物質・材料研究の専門機関で、「ナノテクノロジーを活用した持続社会形成のための物質・材料科学」をモットーとしてまいりました。

NIMSとして発足してから9年目を迎えますが、研究成果を自己評価するため、第1期5年間（平成13-17年度）では、21件、第2期からは年度ごとに、8件（平成18年度）、6件（平成19年度）顕著な進捗のあった研究テーマをNIMS内部で選定し、小冊子を作ってきました。平成20年度も、同じ考えで研究テーマを6件選び、皆様に研究内容を紹介させていただきます。

物質・材料に関する探査的または萌芽的な研究から、新材料として、広く、皆様に使っていただき、生活の便利さ、快適さ、安全性等を実感していただくためには、一般には4つのステップがあり、それぞれのステップを乗り越えるための3つのギャップ（魔の川、死の谷、ダーウィンの海）があ

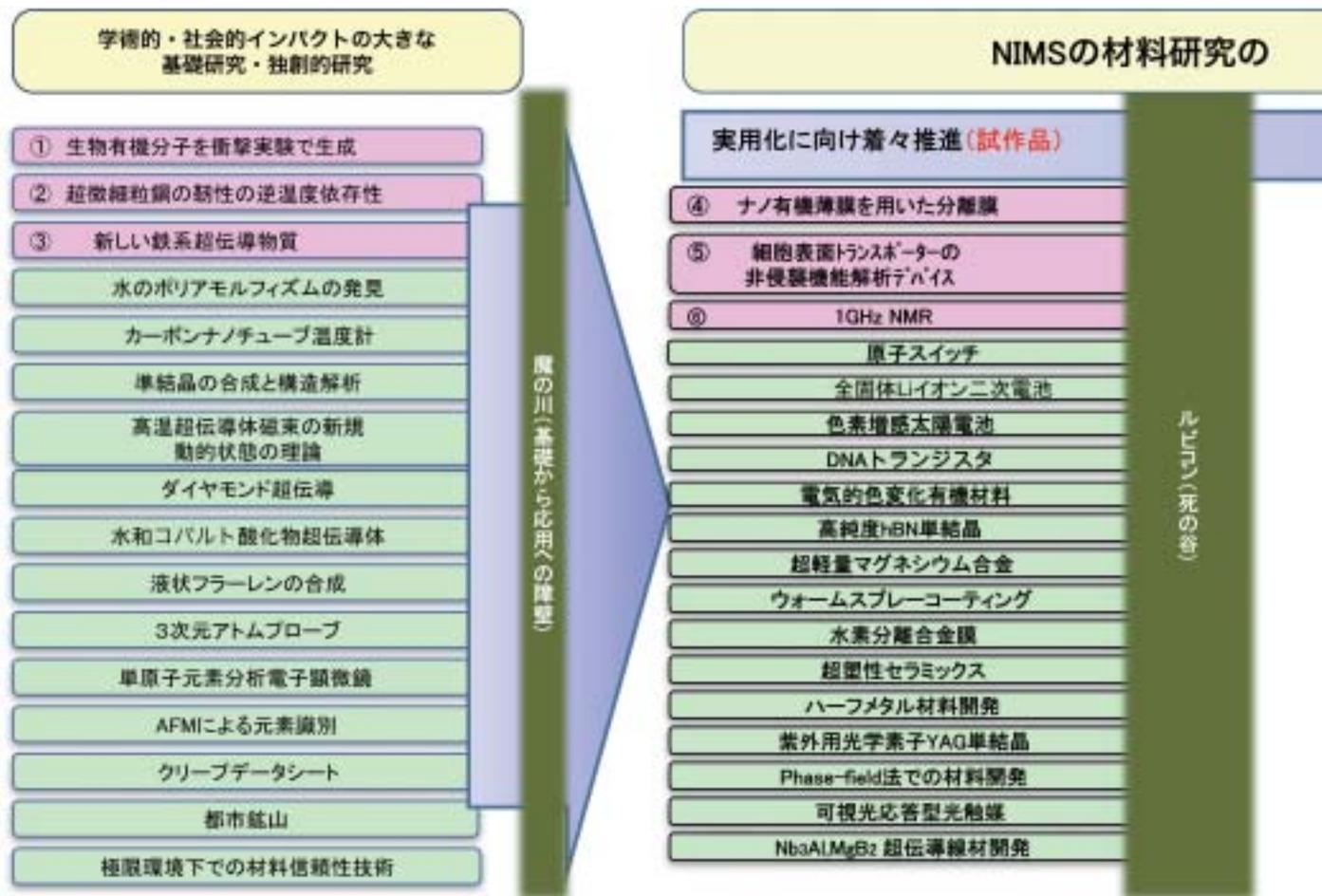


図1 NIMSの主な研究テーマ

ると言われています。NIMSには萌芽的な研究から大きなプロジェクト研究まで数多くの研究テーマがありますが、上記小冊子で紹介した研究を含む代表的な研究テーマを、研究のステップごとに分類したのが図1です。

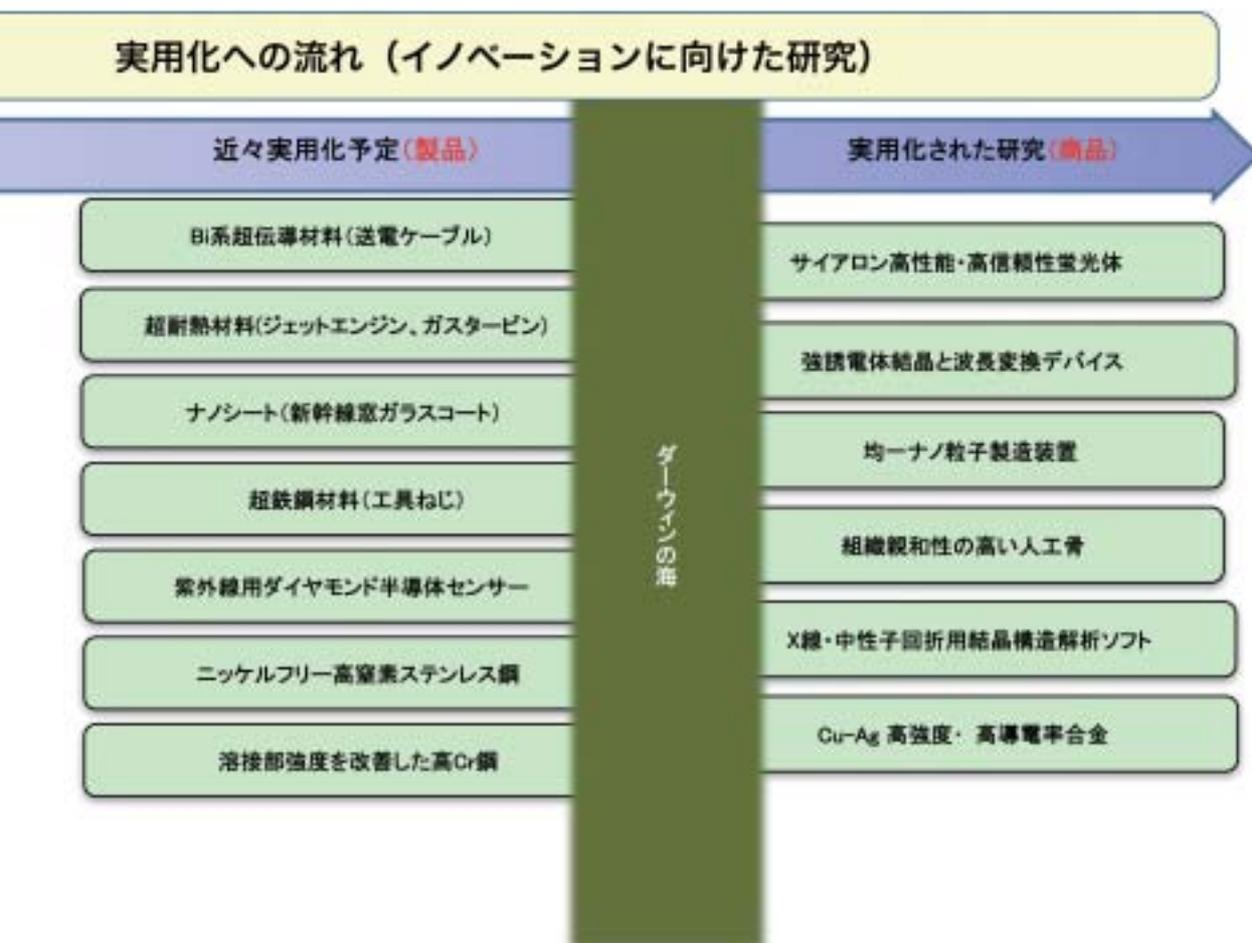
学術的にインパクトの大きい独創的な研究としては、今回取り上げた「①衝撃実験による無機物質からの生物有機分子の合成」、「②超微細結晶粒組織鋼における靱性の逆温度依存性の発見」「③新しい鉄系超伝導物質」の他に、「水のポリアモルフィズム」などが代表的な例です。

実用化に向けて着々と推進している段階にあるのが、今回取り上げた「④ナノ有機薄膜を用いた分離膜」、「⑤細胞膜表面トランスポーターの非侵襲機能解析デバイス」、「⑥超1GHzに向けた酸化物系超伝導NMR」の他に「原子スイッチ」などです。

死の谷を渡り、製品として近々実用化予定のある研究としては、高温超伝導体を用いた送電ケーブルとして「Bi系超伝導材料」、ジェットエンジンや高温ガスタービン用の「Ni基超耐熱合金」、さらに新幹線の窓ガラスのコーティングに利用されるナノシートなどが代表的な例です。ダーウィンの海を渡り、すでに商品として実用化されている研究としては、優れた性能と信頼性を持つ「サイアロン蛍光体」などがその代表的な例で、携帯電話、ゲーム機などのバックライト用蛍光体として広く利用されております。

マテリアルサイエンスをさらに深めていくためには、次の研究世代の人材育成も含めて大学とのより強い協力関係が重要になります。そのためNIMSでは早くから国内外の大学との連係を進めてきましたが、今回はトピックス1として大学との連係の最近の取り組みを紹介します。また、新材料として社会に広く利用されるには企業との共同研究が必要であり、今回はトピックス2として企業との共同研究の現状を紹介いたします。

最後になりますが、材料の研究開発は、長期的視点に基づく積み重ねと安定した研究環境が必要で、国家的取組として、広く皆様に理解していただき、着実に研究を進めてゆくことがますます重要であると考えています。



1. 無機物からの生物有機分子の衝撃合成

■ 研究のポイント

物質材料研究の基盤技術である衝撃圧縮法を応用して、40-38億年前の隕石が地球の大気を通過し海に激しく衝突した際の化学反応で、無機物質だけからの生命起源論説に必要な生物有機分子の生成の再現実験を行い、その生成を証明する。

■ 研究の内容

生命起源論

本研究は初期地球の激しい隕石衝突の化学反応で、隕石と地球の無機物質だけから生物有機分子が生成したであろうとの仮説¹⁾の基に、衝撃実験によってそれを証明することを試みた。本研究の前に、衝撃実験に基づきアンモニア（アミノ酸の前駆体の一つ）が隕石海洋衝突で初期地球に出現し得たであろうことを明らかにしていた²⁾。初期地球の大気をメタンやアンモニアであると想定して、その混合気体に放電してアミノ酸など生物有機分子を合成した「ミラーの実験」は著名であるが、現在の地球科学は初期地球大気が、窒素や炭酸ガスを主成分とすることと前提条件が大きく異なる。そこで本研究は、当時の大気組成中の窒素に注目した研究を行った。

衝撃合成

衝撃波が物質中を伝播すると誘起される瞬間的な高温高压環境下での化学反応は、物質合成や物質科学の未知領域の一つである。特に気体や液体を含む系での衝撃化学の研究は、従来実験的困難さ故実施されなかった。本研究では、種々の固体に関する衝撃合成³⁾で使用した技術に、液体や気体が反応系に加わっても衝撃試料回収を可能にする技術開発を行った結果、世界に先駆けた今回の実験の成功に繋がった。

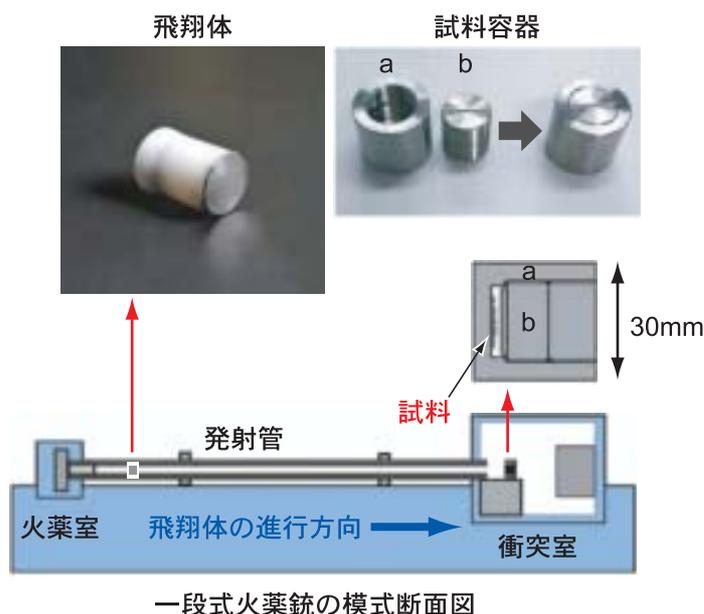


図1 衝撃銃での衝撃合成実験 発射管中で加速された飛翔体が試料容器に高速衝突し、衝撃波が発生する。

隕石の海洋衝突で生成した生命の原材料

■ 主な成果

生物有機分子の衝撃合成

無機物である炭素粉と鉄粉（これらは隕石由来）、海洋を代表する水（或はアンモニア水）及び大気を代表する窒素ガスをステンレス製容器に封入して、その混合物に衝撃波を与えて得られた反応試料をクロマトグラフ法と質量分析法での分析でアミノ酸であるグリシン、アミノ酸の原料物質であるアミン類やカルボン酸などが同定⁴⁾された。本実験条件は、地球が形成した頃の約40-38億年前の条件、つまり当時の大気の成分である窒素ガスと海洋の存在と共に、

当時は現代以上に頻繁に隕石衝突が地表では起きていた事に相当する。また地質学的研究から地球の生命の痕跡が約38億年前頃まで遡れることから、本実験結果は地球の生命の起源に対して隕石が海洋に衝突する際の化学反応で出来た可能性¹⁾を強く示唆する。また、無機物から有機物の非生物学的合成という視点では、将来蛋白質の人工合成の可能性⁵⁾も示唆している。



図2 約40億年前の地球の概念図

発表文献

- 1) 中沢弘基 生命の起源・地球が書いたシナリオ(新日本出版社, 2006)
- 2) H. Nakazawa, T. Sekine,, T. Kakegawa, and S. Nakazawa: Earth Planet Sci. Lett. **235**(2005) 356.
- 3) T. Sekine: Eur. J. Solids State Inorg. Chem. **34**(1997) 823.
- 4) Y. Furukawa, T. Sekine, M. Oba, T. Kakegawa, and H. Nakazawa: Nature Geoscience **2**(2009) 62.
- 5) 特許4288332

期待されるイノベーション

本研究成果は、従来の生命起源を覆す新たな実験的証拠となり、今後の生命の起源の探究に大きな一歩を示す。また、無機物質だけから“非生物的”アミノ酸を合成する可能性を示し、食料危機対応に一つの光明を与えるものでもある。

お問い合わせ先

ナノ基盤物質萌芽ラボ 関根 利守 中澤 弘基
ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>

研究領域の説明

物質合成基盤技術の衝撃合成

従来 NIMS にあった基盤技術である衝撃圧縮法で無機物質からの生物有機分子の合成に世界で初めて成功した。この実験成果は、Nature Geoscience に掲載が決まると、生命の起源に新たな実験的検証として国内外の TV、新聞や科学雑誌の記事として紹介された。Nature Geoscience でも Backstory として選定され、紹介されている。

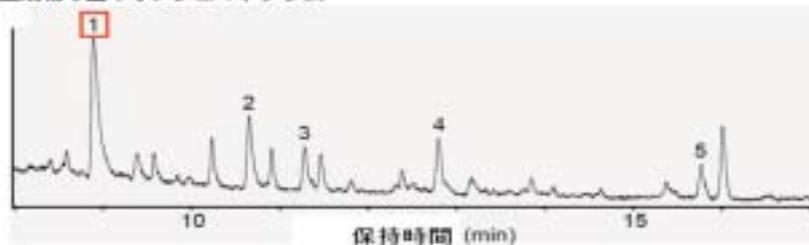
生命の起源物質

生命の原材料として最も基本的な物質は、アミノ酸であろう。このアミノ酸がどのようにして地球に現れたかに関して、2つの考え方がある。その1つは宇宙のどこかで生成され、隕石に乗って飛来したとする地球外説である。もう一つの考え方は、教科書にも載っているメタン、アンモニア、水、水素のガス中に電気放電させる有名なミラーの実験でアミノ酸が生成する事を根拠にした地上発生説である。しかしその後の研究によりミラーの実験条件は、地球環境に合わない点がある事が明らかになっている。このため最近では海洋底熱水条件下で発見された微生物細菌などから、この海底熱水をトリガーとするアミノ酸合成実験も行われている。何れの場合にも、実験の前提条件がどれだけ当時の地球環境に近く、またその収率がどうか重要なポイントである。

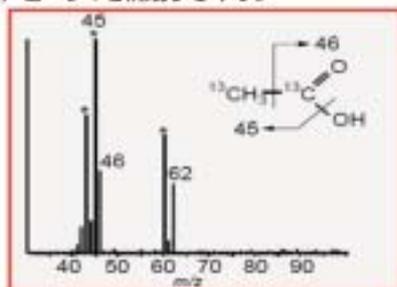
地球環境の再現性の問題は地球科学的検討でより明瞭になる様な設定が必要であるが、現在最もらしい当時の大気組成 (CO₂, N₂, CO)、海洋の存在及び隕石衝突頻度は、本実験条件に矛盾しない。生成物の収率については、炭素に対して 2.6x10⁻⁵ 程度の有機物であるが当時の頻度を考慮すると十分な量に達するであろう。

衝撃生成物(純水抽出)のGC-MS分析結果(カルボン酸)

(a) 生成物の全イオンクロマトグラム



(b) ピーク1を構成するイオン



1: エタン酸(酢酸), 2: プロパン酸(プロピオン酸), 3: 2-メチルプロパン酸, 4: 酪酸(ブタン酸), 5: 吉草酸(ペンタン酸)

解説: 生成物からカルボン酸を抽出しガスクロマトグラフィー/質量分析計(GC-MS)で分析を行い多数のカルボン酸の存在が判明する [(a)]. (a)の番号を付けたピークは全てカルボン酸。1のピークは酢酸のピークでこれを構成するイオンは(b)に示すもの、これらのイオンの組み合わせが¹³Cでできた酢酸の存在を示す。

図1 衝撃合成されたカルボン酸に関する分析結果

炭素同位体 ^{13}C の使用

生物有機分子は比較的熱に強く、特に使用する容器や試料に極微量ながら付着していたり、反応物処理分析中に付着する恐れがある。そこで自然界には約1%しか存在しない ^{13}C を炭素源として使用する事で、この問題の解決を図った。その為に合成物の同定にクロマトグラフ法で分離した後に質量分析計でその分子量を決定し、従来の研究より正確な実験を行った。

今後の研究課題と展望

今回の成果は、衝撃波によって無機物から生物有機分子が合成されるという画期的な成果であるが、生命起源論としてはアミノ酸の種類は1種類のグリシンが確認されただけであり不十分な状態である。実験系としても水素、炭素、酸素及び窒素の4元系であり、更にイオウを含むアミノ酸や複雑なアミノ酸まで検討する必要がある。蛋白質を構成する必須アミノ酸20種類に対する検討や光学異性体の検討は、生命の起源の議論には不可欠である。隕石の種類としても今回の実験では、地球上で最も多く観察されている普通コンドライトをモデルとして再現実験を行ったが、約38億年前当時の状況を加味した検討も必要である。このような無機物由来のアミノ酸から蛋白質、食料の合成は未来の研究課題である。

関連文献

- 1) 2008年12月8日付け全国紙各紙及び茨城新聞、常陽新聞、河北新報など
- 2) Nature Geoscience 1月号 Backstory
- 3) Nature Asia-Pacific Web Contents 2月号 : <http://www.natureasia.com/japan/tokushu/detail.php?id=157>



図2 Nature Geoscience 1月号 Backstoryに紹介された実験装置(一段式火薬銃)と研究チーム

2. 超微細結晶粒組織鋼における靱性の逆温度依存性を発見

■ 研究のポイント

省資源、省エネルギー、CO₂ガス排出量削減の観点から、各種部材の軽量化のために高強度・高靱性な構造材料の需要が益々高くなっている。本研究では、鉄鋼材料のナノ-マイクロレベルでの階層的組織制御法をNIMS独自の技術として提案し、合金元素の少量添加のみで靱性を飛躍的に向上させ、リサイクル性に優れた超高強度鋼を実現する。

■ 研究の内容

構造材料で要求される基本性能は大きな荷重を支えること（強度）と粘り強く壊れにくいこと（靱性）である。

ところが、降伏強度と靱性はトレードオフの関係にある（図1）。これまで降伏強度が1400MPa以上の超高強度鋼ではNi、Coなどの高価な希少元素を総量で10～30重量%と多量に添加して靱性の向上が図られてきた（高合金鋼）。しかし最高級のマルエージ鋼でも1800MPa以上の降伏強度では衝撃吸収エネルギーが40J程度であり、靱性が低かった。

これまで、基地となる結晶粒の微細化と層状破壊の活用が靱性向上に有効なことは良く知られていた。

本研究では、低合金鋼の加工熱処理により基地相の結晶粒の短軸粒径を0.3 μm（普通鋼の約100分の1）以下に超微細化するとともに結晶粒の形状と集合組織を制御（図2(a)）、さらには第2相の炭化物粒子の分散状態をナノスケールで制御（図2(b)）した。すなわち、階層的組織制御によって靱性向上につながる層状破壊を制御した。

加工熱処理は、鋼ブロックを通常の焼入れおよび焼戻ししたのち500℃付近の温度域で棒状に加工するという単純かつ実用性の高いものである。

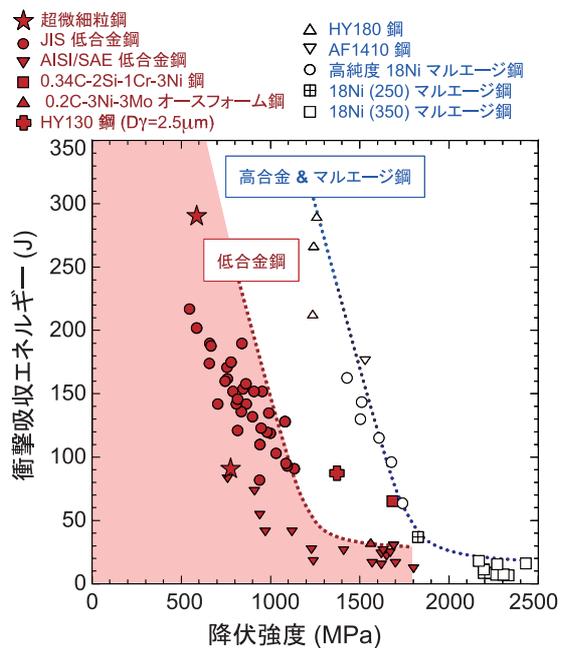


図1 既存鋼の室温における衝撃吸収エネルギーと降伏強度の関係。なお、炭素以外の合金元素の総量が10%未満の鋼を低合金鋼、10%以上を高合金鋼と定義する。

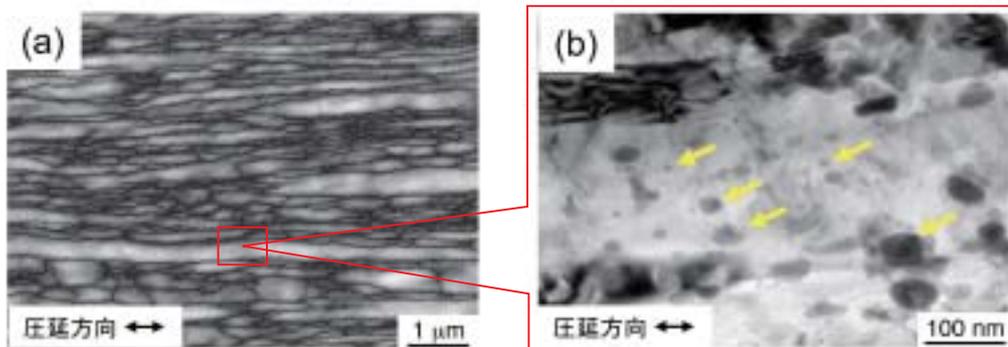


図2 0.4%C-2%Si-1%Cr-1%Mo鋼の加工熱処理で形成された階層的組織構造。(a)超微細結晶粒組織像(平均短軸粒径:0.26 μm)。(b)織維状結晶粒の基地中にナノサイズで分散した炭化物粒子の電子顕微鏡写真。

低温ほど壊れにくい超鉄鋼

■ 主な成果

降伏強度が1400MPa以上の低合金鋼は顕著な延性脆性遷移挙動（次頁の研究領域の説明を参照）を示し、室温以下では衝撃吸収エネルギーがほとんどなくなるのが常識であった（図3、通常材）。一方、開発材（図3）では既存の超高強度鋼の延性脆性遷移温度域で衝撃吸収エネルギーが室温よりもさらに上昇するという韌性の逆温度依存性を見出した。-20 から -60℃では、500Jの衝撃エネルギーでも試験片が完全に破断しないものもあった。

韌性向上の原因は割れが衝撃方向とほぼ直角に分岐する層状破壊による。これまで韌性の逆温度依存性はいくつか確認されているが、室温降伏強度1840MPaの超高強度でかつ-60℃での発現は画期的である。とくにNi、Coなどの希少元素によらない超高強度低合金鋼の飛躍的な韌性向上はNIMS独自の技術として国内外から注目を集めている。

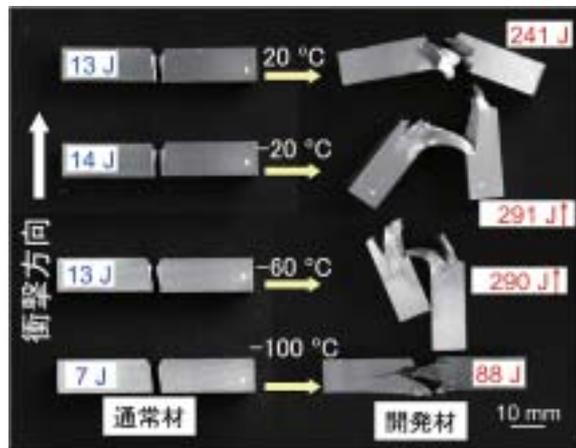
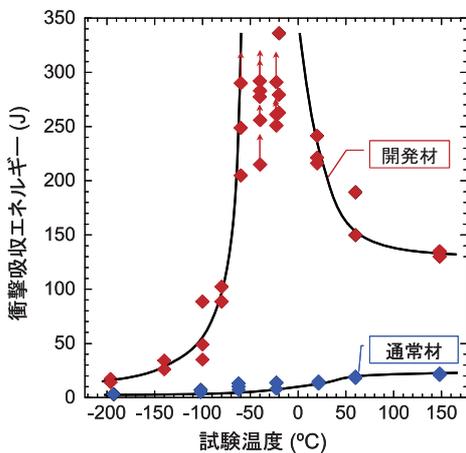


図3 0.4%C-2%Si-1%Cr-1%Mo鋼の加工熱処理材（開発材、室温降伏強度1840MPa）と通常焼入れおよび焼戻し材（通常材）の衝撃吸収エネルギーと試験温度の関係（左側）、およびシャルピー衝撃試験後のVノッチ試験片の外観（右側）。図中の↑は500Jの衝撃エネルギーで完全に破断なかった試験片を示す。

発表文献

- 1) Y. Kimura, T. Inoue, F. Yin, K. Tsuzaki : Science **320** (2008) 1057.
- 2) <http://www.nims.go.jp/news/press/2008/05/vk3rak0000000gx.html>
- 3) 木村勇次：ふえらむ，**14** (2009) 154.
- 4) PCT/JP2006/323248

期待されるイノベーション

寒冷地の資源採掘用機器部品などを含めて多くの軽量高強度部品への適用が期待される。また、本研究で見出されたナノミクロの階層的組織制御のコンセプトは、チタンなどの他の金属材料へも適用可能である。さらに、低温になるほど韌性が向上するという現象は材料科学的に見ても興味ある課題であり、破壊の基礎研究分野の活性化にもつながる。

お問い合わせ先

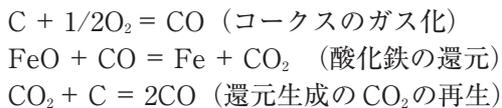
新構造材料センター 木村 勇次 津崎 兼彰
 材料信頼性萌芽ラボ 井上 忠信 殷 福星
 ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/smc-5/>

研究領域の説明

1. 環境負荷低減の観点からの鉄鋼の高強度化・長寿命化の意義

金属材料は、我々の生活を支える重要な構造材料である。なかでも鉄鋼は、強度と靱性のバランスに優れ、製造コストも安価であることから最も多く使われている。現在、わが国で生産される材料の半分（重量比）が金属であり、その90%以上は鉄鋼である。鉄鋼が安価に製造できるのは、鉄鉱石（鉄の酸化物）が地表付近に豊富に存在し、比較的容易に還元できるためである。

鉄は鉄鉱石にコークス（炭素）を加えて、還元反応により精製される。以下は基本となる化学反応式を示す。



この還元反応では鉄の製造に同程度の量のCO₂ガスが発生する。日本鉄鋼連盟の報告によれば2006年度の日本の粗鋼生産量は117.7百万トンで、エネルギー起源CO₂排出量は194.5百万トンと試算されている¹⁾。したがって、鋼の高強度化と長寿命化によって鋼の生産量（使用量）を減らすことは、CO₂ガス排出量を削減できる大きな方策のひとつである。

鉄鋼には靱性などの特性を高めるためにNi、Coなどの希少元素が添加されており、省資源の観点からも生産量の低減が望まれている。鉄鋼の使用量は他の金属と比べてはるかに大きく、わずかな合金元素添加量の減少でもそれは大きな省資源化につながる。

しかも、構造材料の更なる高強度化・長寿命化が達成されれば、省エネルギー、CO₂ガス排出量削減を念頭に置いた革新的なデザインの輸送機や構造物も実現可能となる。すなわち、環境および経済への大きな波及効果が期待できる。

より効率的な資源循環型社会を確立する観点では、鋼材のリサイクルおよび部材のリユースがとくに強く望まれている。その場合、単純な合金成分からなる低合金鋼、かつ単純な工程の加工熱処理での部材の製造が求められる。

2. 鉄鋼の高強度化における課題

鉄鋼の高強度化には、製造コストに加えて、靱性、疲労特性、遅れ破壊特性などの高強度化とはトレードオフの関係にある特性を用途に応じて向上させる必要がある。

ちなみに、遅れ破壊とは、鋼材の大気腐食による水の加水分解によって水素が発生、鋼中に侵入して鋼材が脆化する結果、起こる破壊である。引張強度が1200MPaを超えた低合金鋼ではとくに遅れ破壊が深刻な問題であり、鉄鋼の高強度化の大きな妨げとなっている（図1²⁾）。例えば、1960年代半ば、鋼板を締結していた高強度のボルト（引張強度1300MPa級）がある日突然破断してしまう事例が報告された。この遅れ破壊のため、1990年代後半に1400MPa級の超高強度ボルトが開発されるまでの約30年間、建築用ボルトの強度上限は1000MPa級で頭打ち状態であった³⁾。

また、材料の強度が高くなるほど、材料をボルトなどの複雑形状の部材に成形し、その部材に所定の特性を持たせることが難しくなる。“使われる材料および部材の実現”には、材料製造者、部品製造者ならびに鋼構造設計者が一体となった取り組みが必要不可欠であることをとくに強調したい。

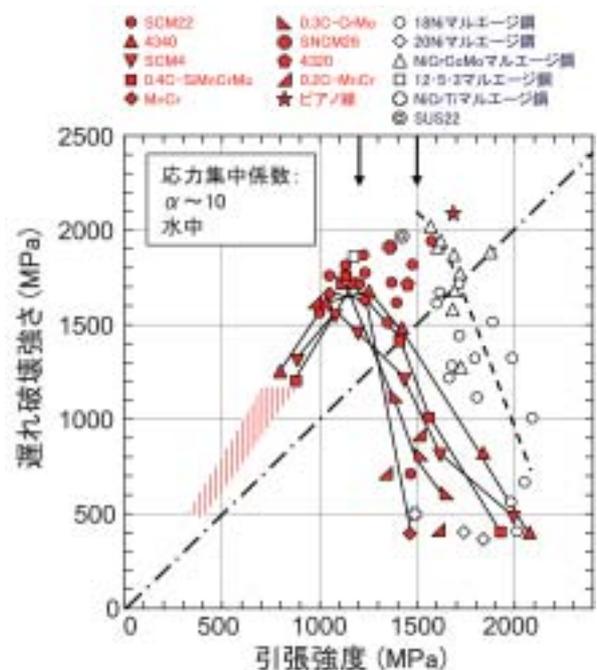


図1 遅れ破壊強さと引張強度の関係²⁾

3. 延性脆性遷移とは？

金属は高温域では軟らかく断裂することなく塑性変形できる（延性）。一方、低温域では硬くて塑性変形しにくくなる。このことは、“鉄は熱いうちに打て”という諺からも容易に想像出来るであろう。そしてある温度以下になると金属は塑性変形することなく脆く壊れるという性質を示す。その壊れ方はまるでガラスのようである（脆性）。この現象は延性脆性遷移と呼ばれる。

延性脆性遷移の問題は、第2次世界大戦中に米国で貨物船として建造されたリバティール船（1万1千トン級）の脆性破壊でクローズアップされることとなった⁴⁾。1939年から1945年の6年間で2708隻建造された船のうち、1946年4月1日までに脆性破壊による損傷が1031件も報告された。そのうち200隻が沈むか、または使用不能という重大な損害を受けた。停泊または航海中に突如船が真二つに折損した事例もある。多くの脆性破壊は冬期（低温）で生じた。この大量の事故は、正に高価で壮大な大実験と言えるものであった。米国は脆性破壊について貴重な知見を世界に示し、これが今日の破壊力学の体系化への出発点となった。

延性脆性遷移が起こる温度（ T_B ）は工業的にはJIS規格（JIS Z 2242）で定められているシャルピー衝撃試験などで調べられる。シャルピー衝撃試験では、UまたはV字の切欠きを入れた試験片を用い、種々の温度で切欠きと反対から試験片に大きなハンマーをぶつけて破壊し、試験片を破断するのに要したエネルギー（衝撃吸収エネルギー）を測定する。低合金鋼の T_B は120から-130℃付近にある。通常、鉄鋼の降伏強度が高くなるほど T_B は高くなり、 T_B より高温側の延性域での衝撃吸収エネルギーは低くなる。したがって高強度材の開発では T_B を下げることも衝撃吸収エネルギーを上げることに大きな注意が払われる。

4. 組織制御による高強度・高靱性化

延性脆性遷移は、材料の降伏応力（降伏強度の数倍の大きさ）が脆性破壊に必要な応力（脆性破壊応力）を上回ったときに起こる⁵⁾。鉄などの体心立方格子（BCC）金属はとくに低温域で降伏応力が急激に上昇するため明瞭な延性脆性遷移を示す（図2）。材料の降伏応力や脆性破壊応力は材料の成分や金属組織に大きく依存する。例えば、結晶粒の大きさを小さくすると延性脆性遷移温度、 T_B が低下することは良く知られている。これは、結晶粒の微細化が降伏応力と同時に脆性破壊応力も上昇させるが、その上昇の度合いが脆性破壊応力のほうで大きいためと考えられている。本研究成果はこのような結晶粒微細化効果の応用例のひとつである。

構造材料の更なる高強度・高靱性化を達成するには、ナノスケールからマイクロまでの金属組織と破壊現象との関係を材料科学と破壊力学の両方から解明し、材料創製にフィードバックすることが重要である。

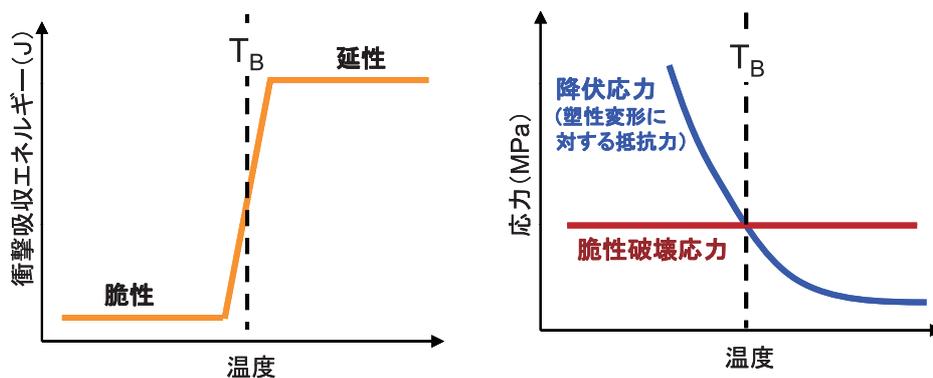


図2 延性脆性遷移挙動に及ぼす降伏応力と脆性破壊応力の関係。 T_B は延性脆性遷移温度を示す。

参考文献

- 1) 日本鉄鋼連盟HP (<http://www.jis.or.jp/business/ondanka/joukyo/index.html>).
- 2) T. Fujita and Y. Yamada: NACE-5 (1977) 736.
- 3) 2008年度日本建築学会大会・構造部門PD資料, 高力ボルト接合における高強度化技術の最前線, 日本建築学会, (2008).
- 4) 小林英男, 尾上久浩: リバティール船の脆性破壊, 失敗知識データベース-失敗百選 (<http://shippai.jst.go.jp/>).
- 5) J. W. Morris Jr : Science **320** (2008) 1022.

3. 鉄系超伝導に新物質を発見

■ 研究のポイント

鉄系超伝導体は、昨年発見された高温超伝導物質の新しい鉱脈である。豊富に存在する鉄を主原料とした超伝導体であり、類似物質に新超伝導体が沢山潜んでいるものと考えられ、その発見が求められている。

■ 研究の内容

超伝導現象とは、ある金属を低温に冷やすと、電気抵抗が完全に消失する現象である。この超伝導になる温度を超伝導転移温度と言い、その温度以下ではゼロ抵抗状態になり、電気を損失無く流す事ができる。例えば、超伝導体で作られた送電線を用いれば、電気のエネルギーをロス無く遠くへ輸送することができ、超伝導線材でコイルを作れば、強い磁場を発生させることができる。体の断面を見るMRIや磁気浮上して走るリニアモーターカーなどにも、この超伝導体が用いられている。

超伝導は1911年、初めて水銀で発見された。その後、1986年に、銅酸化物高温超伝導体が発見され、超伝導転移温度が飛躍的に向上した。さらに、2008年には新鉄系超伝導体LaFeAsOが発見され、第二の高温超伝導体として大変注目されている。この鉄系超伝導体の発見を契機に、類似鉄化合物に次々と新しい超伝導体が発見された。その代表的なものの結晶構造を図1にまとめる。(a) LaFeAsO、(b) BaFe₂As₂の超伝導体に共通する結晶構造は、鉄(Fe)とヒ素(As)が作る平面構造である。これは、超伝導発現に不可欠な結晶構造で超伝導層と呼ぶ。そして、FeAs面と交互にLaOやBaといった別の構造(ここではブロック層と呼ぶ)が積層している。このような、超伝導層とブロック層の積層構造は、銅酸化物高温超伝導体とも共通していて、二次元的な結晶構造は高温超伝導発現に適しているものと考えられる。一方、図1(c)に示すFeSeは鉄系超伝導体の中で最も単純な結晶構造を持っている。FeSe二次元面が超伝導を担う層であり、それらの間にブロック層を持っていない。

このように、これまで発見された鉄系超伝導体の超伝導層は、鉄とヒ素、もしくは、鉄とセレンが形成する二次元構造である。鉄は、身の回りに豊富にある安全な元素である。しかし、ヒ素やセレンは、毒物に指定されている元素である(毒物及び劇物取締法)。これらの超伝導体を、様々な用途に応用していくためには、生産過程で扱いやすいより安全な元素で構成された超伝導体であることが望ましい。そこで、毒性が比較的少ない元素で構成された新しい超伝導体の探索が求められている。我々は、結晶構造が類似しているにもかかわらず超伝導にならないFeTe(図1(d))に着目し、他元素のドーピングによる超伝導化を目指した結果、新超伝導体FeTe_{0.8}S_{0.2}を発見するに至った^{1,4)}。

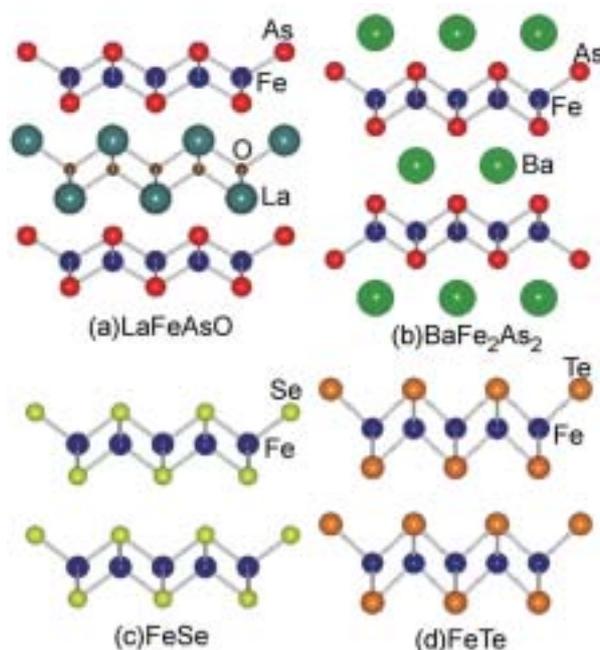


図1 主な鉄系超伝導体の結晶構造

線材化にも挑戦

■ 主な成果

FeSeとFeTe (図1 (c)、(d))は、ほぼ同じ結晶構造を持っている。しかし、FeSeは $T_c=13K$ の超伝導体であり、FeTeは70 K付近に磁気転移を示し超伝導は示さない。この両者は、まさに対照的と言えよう。我々は、FeTeを超伝導化するためには、FeSeの物性を理解することが重要と考え、詳しく調べてみた。そこで、FeSeの超伝導転移温度は常圧において $T_c=13K$ であるが、加圧すると37 Kへ急上昇することを発見した²³⁾ (図2)。加圧することは、即ち結晶格子を縮めることに相当する。格子長や原子位置を最適化すれば、FeSeの超伝導転移温度はさらに上昇する可能性を示唆している。

我々は、FeTeも結晶格子を縮めることにより超伝導が出現するのではないだろうかと考えた。格子を縮めるために、Teの一部を性質が類似したイオン半径の小さいSに置き換えることを試みた。これは、ケミカルプレッシャーといい、化学的に結晶格子を縮める手法である。Sを10%、20%と置換していくと、結晶格子は徐々に縮まり、70 K付近に見られた磁気転移が徐々に消滅してゆく (図3)。そして、 $FeTe_{0.8}S_{0.2}$ は、10 K付近より電気抵抗がゼロに向かって急激に減少し、超伝導の出現を確認した。

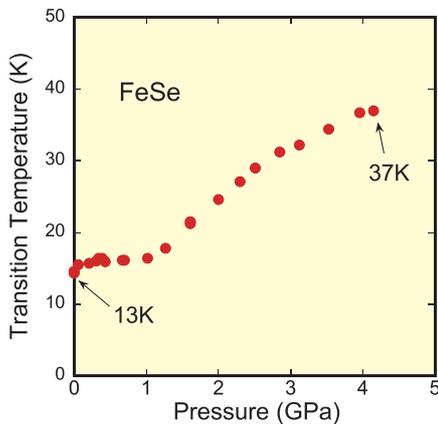


図2 FeSeの T_c の圧力効果

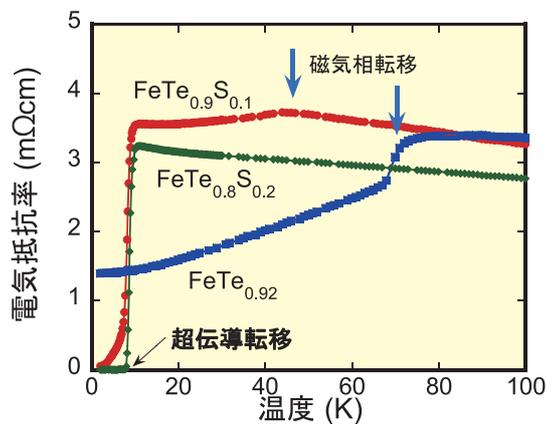


図3 新鉄系超伝導体 $FeTe_{0.8}S_{0.2}$ の電気抵抗

発表文献

- 1) Y. Mizuguchi, F. Tomioka, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, Appl. Phys. Lett. 94, 012503 (2009).
- 2) Y. Mizuguchi, F. Tomioka, S. Tsuda, T. Yamaguchi and Y. Takano, Appl. Phys. Lett. 93, 152505 (2008).
- 3) S. Masaki, H. Kotegawa, Y. Hara, H. Tou, K. Murata, Y. Mizuguchi and Y. Takano, JPSJ 78, 63704 (2008).
- 4) 特願2008-282673
- 5) 特願2009-136662

期待されるイノベーション

超伝導体は、完全に損失無く電気を運び貯蔵し強力な磁場を発生させることができる大変素晴らしい機能を備えた材料である。リアモーターカーやMRI、送電線や超伝導コンピューターへと発展していくものと期待される。

お問い合わせ先

超伝導材料センター 高野 義彦
ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/NFM>

研究領域の説明

超伝導材料の魅力

超伝導にのみ現れる三つの興味深い現象がある。それは、ゼロ抵抗、ジョセフソン効果、マイスナー効果である。ゼロ抵抗とは、文字どおり電気抵抗が完全に消失する現象であり、電気のエネルギーをロス無く輸送することができる。もし、非常に長い超伝導線材が作られ、地球をぐるっと一周結ぶことができたなら、地球の昼間の地域で太陽エネルギーを用いて発電し、そのエネルギーを地球の裏側の夜の地域へ送ることも不可能ではない。ジョセフソン接合は半導体におけるダイオードやトランジスタに相当し、ジョセフソン接合を用いることにより非常に消費電力が少なく演算速度の速い超伝導コンピュータが可能であると考えられている。近年ITに関わるエネルギー消費が急増しており、消費電力の少ないスーパーコンピュータが望まれている。マイスナー効果は、超伝導体から磁束を排除する現象で、磁石の上に超伝導体が浮遊する実験を見た方も多いただろう(図1)。このように超伝導には多くの興味深い現象があるが、すべて超伝導転移温度以下に冷却しなければ発現しないため、転移温度の上昇が望まれている。

超伝導材料と T_c の変遷

これまで発見された主な超伝導体の転移温度を年表にしたものを図2に示す。1911年、超伝導は初めて水銀で発見された。その後、Pbなどの単体金属やNbNなどの化合物に発見され、超伝導転移温度 T_c は緩やかに上昇してきた。1986年高温超伝導体の発見により、Y123系やBi2212系など銅酸化物に新しい超伝導体が多数発見され、 T_c も急激に上昇した。これまでで最も高い T_c は135 K (圧力下164 K) で、水銀系銅酸化物超伝導体で記録した。現在のところ、超伝導は水銀に始まり水銀系に至っているのである。

さて、最近発見された鉄系超伝導体は、今後どのような展開を示すのであろうか。今までは、高温超伝導といえば銅酸化物のみであったが、鉄系超伝導体の登場により、物質のバラエティーが広がった。今後は銅や鉄化合物以外の元素の組み合わせでも、新しい高温超伝導が可能なのではないかと期待される。最近、新しい高温超伝導体を見出そうとする気運が高まっており、第三の高温超伝導体が発見されることが大いに期待される。



図1 超伝導体の浮上実験

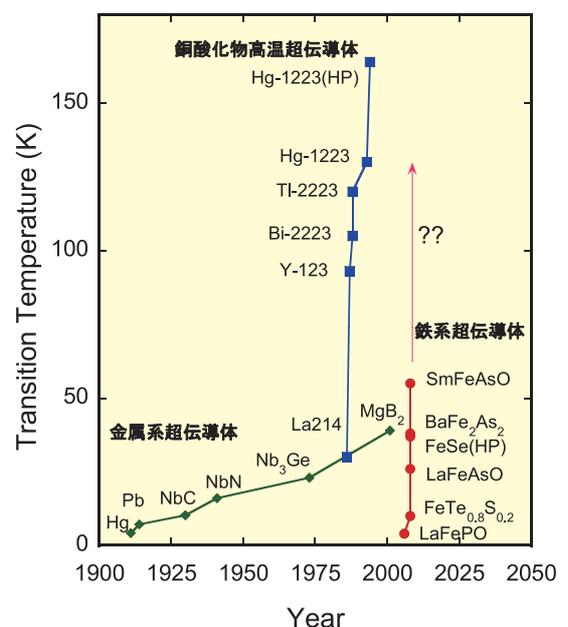


図2 超伝導体転移温度の変遷

鉄系超伝導線の試作

我々のグループでは、鉄系超伝導体の線材化にも取り組んでいる。本研究に用いた鉄系超伝導体は、最も単純な結晶構造を持つFeSe系である。FeSe系超伝導体を用いた線材の試作はこれが初めての例である。鉄系超伝導体の主成分である鉄は地球上に豊富に存在し、現在広く使われている材料であるので、線材の主成分となるシース材に鉄を用いた。鉄がシースの役割と同時に鉄系超伝導物質の原料の両方を兼ねるというユニークな超伝導線材の作製方法を考案した⁵⁾。

作製プロセスは、まず、鉄系超伝導体の鉄以外の成分SeとTeを予め反応させSeTe化合物を用意する。これは、後に熱処理する際、Seのみだと融点が低すぎるためTeを添加し融点を高めるのが狙いである。外形6mm内径3.5mmの鉄製シースパイプに用意したSeTe化合物を詰め、溝ロールや平ロールを用いて細長く圧延する(図3)。得られた線材を4-5cm程度に切断し、試験片を石英ガラス管に封入し熱処理を施す(図4)。するとシースの鉄と内部のSeTe化合物が反応し、Fe(Se,Te)超伝導体がシース内部に形成される。得られた線材の断面写真を図5に示す。線材の両端の部分に超伝導体がシースと密着し隙間無く充填している良好な状態が得られた。

線材の試験片に電極を設け、通電法による超伝導臨界電流密度の評価を行った結果、臨界電流密度は $J_c = 12.4 \text{ A/cm}^2$ (4K)と求まった。鉄系超伝導体を用いた線材において、通電法により臨界電流密度が観測されたのはこれが世界で始めてである。得られた臨界電流密度は、現在のところまだ小さな値であるが、これは、線材の中央の部分においてシースと超伝導体の間に空壁が生じていることなどが主な原因であると考えられる。今後、加圧しながら加熱することができるホットロールなどを用い、充填率の向上やシースとの結合を改善し、多芯線化、ピンングサイトの導入などを試みることによって、臨界電流密度が増加するものと考えている。

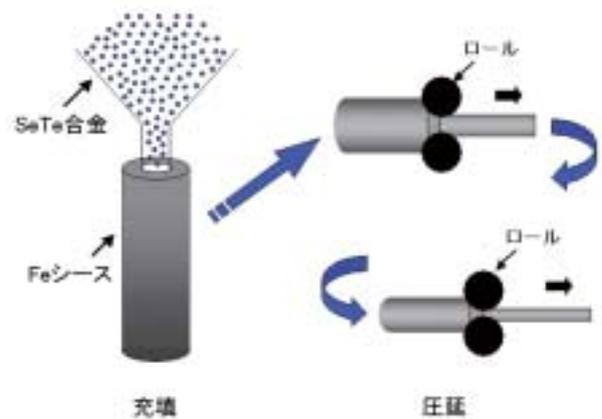


図3 鉄系超伝導線の試作プロセス

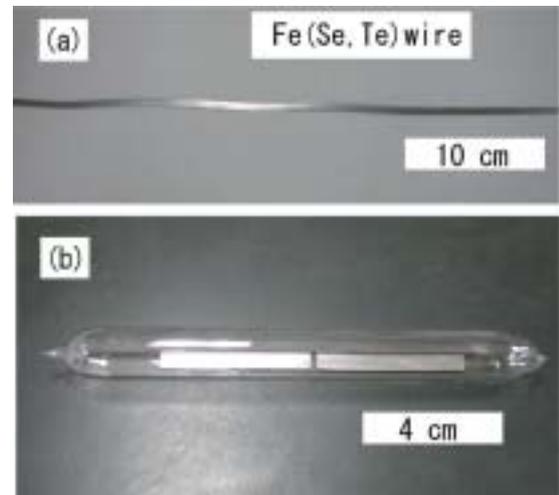


図4 鉄系超伝導線のサンプル

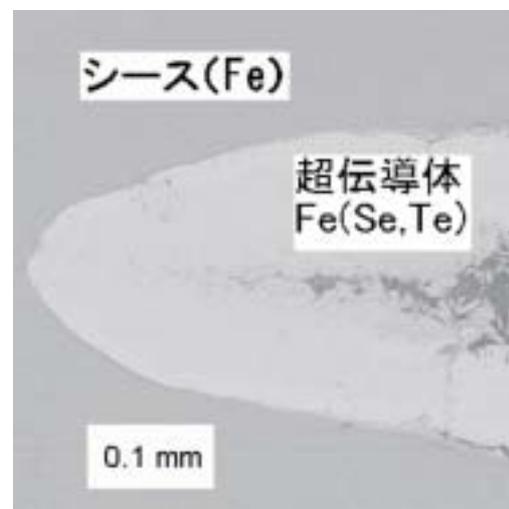


図5 走査電子顕微鏡による線材の断面像

4. ナノ膜による有機分子の超高速濾過

■ 研究のポイント

多孔膜を用いた圧力駆動の水処理プロセスでは、膜の厚みに反比例して処理速度が向上する。しかし、水の高速度透過を実現するには、大きな透過流束に耐えることができる極薄かつ丈夫な多孔膜を製造しなければならない。当機構では、フェリチンという球状タンパク質を用いて、数10 nmの薄さの大面積多孔膜を製造することに成功した。開発された膜は、市販の限外濾過膜（あるいはナノ濾過膜）と比較して約1000倍の速度で有機分子を濾過することができる。さらに、製造コストも低く抑えられており、幅広い分野での実用化が期待できる。

■ 研究の内容

多孔性ナノ膜の新しい製造法

物質・材料研究機構では、表面が著しく正に荷電したナノストランドと呼ばれる極細のファイバーを開発していた。今回の研究では、ナノストランドの表面電荷を利用することで、負に荷電したタンパク質（フェリチン）を自己集合させ、多孔膜の製造に用いている。

ナノストランドは、銅や亜鉛やカドミウムの硝酸塩の水溶液にアルカリを加え、pHを中性付近に調整することで得られる。例えば、水酸化カドミウムのナノストランドは、直径1.9 nm、長さが数 μm の極細のファイバーであり、その表面の3分の1のカドミウム原子が正に荷電している（文献1と2を参照）。ナノストランドの水溶液にフェリチン（直径12 nm）の水溶液を加えると、負に荷電したフェリチンがナノストランドに沿って直接的に自己集合する。これをフィルターで濾過して不織布を形成し、フェリチンを化学的に架橋した後に酸で洗浄すると、球状のフェリチンが結合したタンパク質のシートが得られる。

この製造方法では、予想以上に丈夫な大面積の自立膜が形成できる。例えば、薄さ25 nm、直径が7 cmの大きさでも、水処理膜として十分に使用可能な強度をもつ。ヤング率の測定から、タンパク質のナノ膜は、ナイロンに匹敵する強度（弾性率：4.4 GPa）をもつことが明らかとなっている（文献3と4を参照）。

ナノ膜の構造

開発されたナノ膜の断面の走査電子顕微鏡写真を図1に示す。直径12 nmのフェリチンは、球状の構造を保っており、ナノ膜の内部は多くの隙間を有する。その空隙率は、含水率の測定から約27%と見積もられている。フェリチンの間に形成された隙間は、水が透過するのに適しているが、1.5 nm以上の有機分子は、膜を通過することができない。これは、3つのフェリチンに挟まれた部分が狭くなっており、この細孔の直径が1.7~2.2 nmになっているためである。即ち、水はこの細孔を高速で透過するが、有機分子は阻止されるのである。

膜厚が60 nmのナノ膜における水の透過量は、9000 L/h \cdot m² \cdot barである。即ち、1 m²の面積のナノ膜は、1気圧の圧力差で1時間あたり9000リットルの水を透過させる。この値は、同様な分画分子量をもつ限外濾過膜と比較しても約1000倍大きい。水の透過量は、膜の前後の圧力差に比例して大きくなるのが、20~100 kPa（100 kPaは1気圧に相当）の間で確かめられている。また、透過量は、ナノ膜の厚みに反比例して増大する。

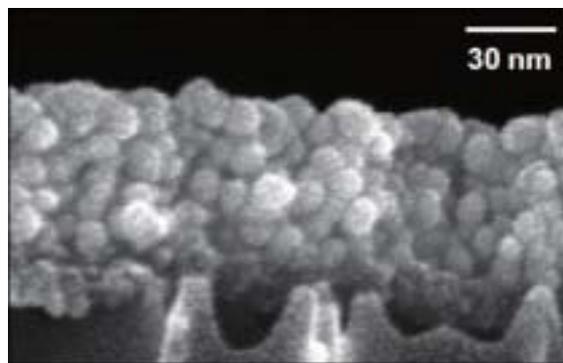


図1 フェリチンを架橋することで製造されたナノ膜の断面(SEM像)
厚み60nmのナノ膜は、陽極酸化アルミナ膜の上に移植されている。粒子状の構造は、直径12nmのフェリチンに対応する。

水の透過速度が1000倍に！

■ 主な成果

水的高速透過は、圧力差や膜厚の依存性からハーゲン・ポアズイユの式で解析できることが確認された。多孔膜の内部の細孔が2 nm 程度であっても、巨視的な流体力学の式で議論することができるのである。一方、9000 L/h・m²・barの流速から膜厚を推定すると、実際の膜厚の10分の1の値となった。即ち、膜の厚みの90%は、水の粘性抵抗として働かないのである。ナノ膜では、3つのフェリチンに挟まれた部分のみが抵抗として働き、60 nmのナノ膜では、その実効膜厚が5.8 nm以下であると考えられている。タンパク質の表面は、一般に、水分子が強く吸着していると言われるが、水はその隙間を高速で通過できるのである。2 nm程度の細孔中の水の状態を分子シミュレーション法により検討した結果、バルクの水と同様の拡散係数をもつことが確認された。

開発されたナノ膜は、1.5 ナノメートルの色素分子を阻止しながら水を6000 L/h・m²・barの速度で通過させる。このとき、供給液の色素濃度は時間とともに増加する。即ち、ナノ膜中の細孔が色素分子によって塞がれることはない。高速濾過は、シクロデキストリンなどの中性の有機分子でも可能である。多くの濾過実験から、有機分子の阻止率がサイズや形状、コンフォメーションなどに顕著に影響を受けることが分かった。本研究成果は、2009年6月のNature Nanotechnology誌に掲載されている。

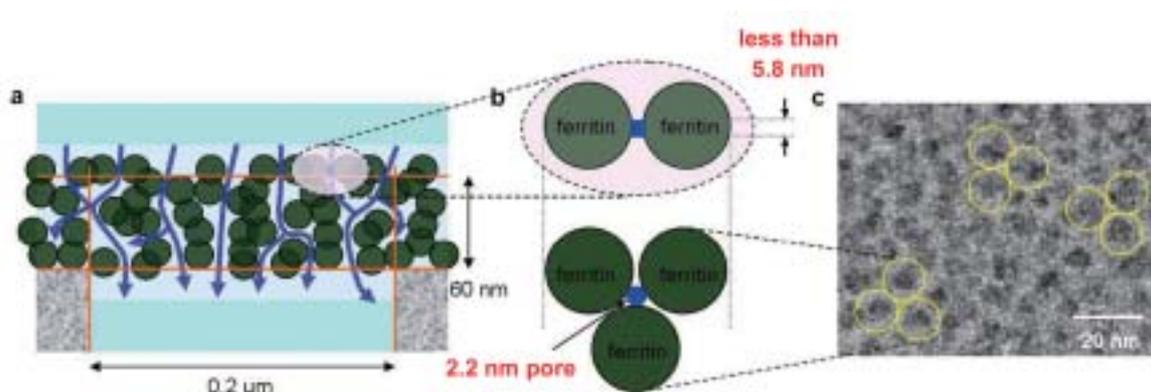


図2 (a) ナノ膜断面の模式図、(b)3つのフェリチンで囲まれた水の流路、(c) ナノ膜のTEM像

発表文献

- 1) I. Ichinose, J. Huang and Y. -H. Luo: Nano Lett. **5**(2005)97.
- 2) 一ノ瀬泉: 現代化学 **450**(2008)49.
- 3) X. Peng, J. Jin, E. M. Ericsson and I. Ichinose: J. Am. Chem. Soc. **129**(2007)8625.
- 4) X. Peng, J. Jin, Y. Nakamura, T. Ohno and I. Ichinose: Nature Nanotechnology **4**(2009)353.

期待されるイノベーション

開発された多孔膜は、水の透過性が著しく大きい高性能の限外濾過膜として、浄水用の水処理膜、人工透析に関連するフィルター、あるいは大量の工業用水からのナノスケールの不純物の除去などに利用できる。様々な分画分子量をもつ多孔膜を開発することで、水処理に必要なエネルギーコストの低減が可能となり、世界の水問題の解決に貢献するであろう。

お問い合わせ先

ナノ有機センター 一ノ瀬 泉
ホームページ:機能膜グループ, <http://www.nims.go.jp/mfo/>

研究領域の説明

従来の1000倍の速度で濾過できるナノ膜

——— その特性と実用化への展望 ———

水処理膜としての分類

圧力駆動の膜分離プロセスは、広範囲に利用されている。例えば、水中の溶存イオンを濾過できる逆浸透膜は、海水淡水化や浄水処理、工業用の超純水の製造などに利用されている。概ね2 nm から100 nm のサイズの微粒子を除去できる膜は、限外濾過膜と呼ばれ、細菌やウイルスの除去、タンパク質や酵素などの濃縮、人工透析などの用途に用いられる。限外濾過膜と逆浸透膜の境界領域には、2 nm 以下の粒子や高分子を濾過できるナノ濾過膜が存在するが、一般には、硬水の軟水化など多価イオンの除去に利用されている。今回開発されたナノ膜は、1.5 nm 以上の有機分子を除去できるが、多価イオン (Mg^{2+} など) を除去できない。このため、分画分子量が非常に小さい限外濾過膜と位置づけられる。

水処理膜としての性能

水処理膜では、分画分子量と阻止率、水の透過性能などが重要となる。一般には、小さな分子やイオンを高い阻止率で除去しようとする、水の透過性が低下する。このため、高い圧力をかけて水の透過性を上げる必要がある。海水淡水化などでは、浸透圧が非常に大きいために、さらに大きな圧力をかけなければならない。一方、限外濾過膜を用いて微粒子などを濃縮する場合、ファウリングと呼ばれる現象により水の透過性が低下する。これは、微粒子などが膜の表面に堆積するため、特に濃度が高い場合に起こりやすい。さらに、水処理膜の実用化には、使用する環境に応じて、力学的強度や耐久性が要求される。

開発されたナノ膜は、320 MPa の硬さ、4.4 GPa の弾性率をもつ。厚みが60 nm のナノ膜では、0.2 μm の穴をもつ基板上で100 kPa 以上の圧力をかけることができる。また、pH 1.5 から pH 13.0 の範囲で濾過膜として使用できることが実証されている。フェリチンを用いて製造されたナノ膜の最大の特徴は、水の高透過性である。その速度は分画分子量が3000 の市販の限外濾過膜と比較して1000倍以上、分画分子量が1000 の膜と比較すると1万倍近く大きい。有機色素であるプロトポルフィリンは、分子量が562.7 であるが、ナノ膜によって完全に除去できる (図1)。一方、比較実験において、市販の限外濾過膜 (分画分子量3000) のプロトポルフィリンの阻止率は84%程度であった。

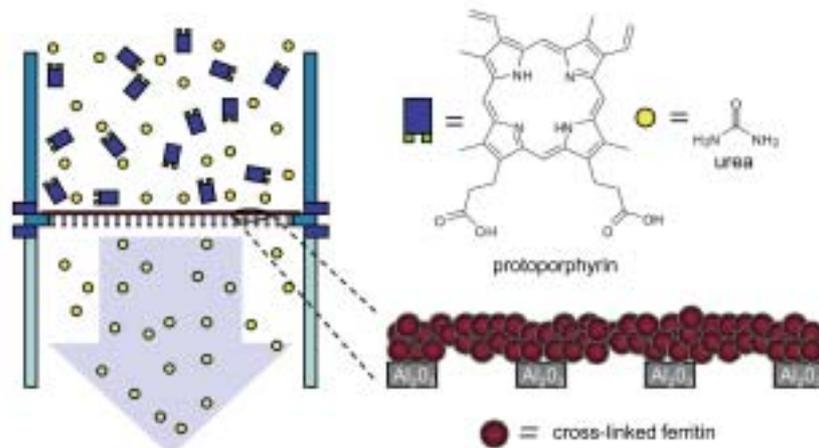


図1 ナノ膜を用いた有機色素の濾過
幅1.5 nmのプロトポルフィリンはナノ膜に阻止され、尿素は透過する。

多孔膜中の水の透過は、ハーゲン・ポアズイユの式($J = \varepsilon n r_p^2 \Delta p / 8 \mu L$)で表される。ここで、 J は流束、 ε は表面の空隙率、 r_p は細孔の半径、 Δp は圧力差、 μ は水の粘度、 L は膜中を水が通過する距離である。開発されたナノ膜(膜厚:60 nm)では、表面空隙率27%、細孔半径1.1 nm、圧力差90 kPa、流束9000 L/h \cdot m 2 \cdot barであり、水の通過距離は5.8 nmと計算される。即ち、ナノ膜を通過する水は、実際の膜厚から予測される距離よりも著しく小さな抵抗を受けている。一般に、水処理膜では、小さな流束を補うために大面積化が不可欠となるが、今回開発されたナノ膜では、小さな面積でも十分に大きな透過流量が期待できる。

有機分子の濾過特性

今回開発されたナノ膜は、有機分子の濾過特性という点で、幾つかの特徴がある。まず、高速で濾過されるにも関わらず、濾過速度の大幅な低下が起こらない。これは、目詰まりなどの現象が起こっておらず、膜の表面で阻止された有機分子が、供給液中に拡散するためである。図2に示すように、プロトポルフィリンの濾過実験では、供給液中の濃度が時間とともに増加する。即ち、供給液中の有機分子は、濾過量に依存して濃縮される。この場合の濾過速度(流束)は、6000 L/h \cdot m 2 \cdot barであり、純水の透過流束(9000 L/h \cdot m 2 \cdot bar)の3分の2程度となる。

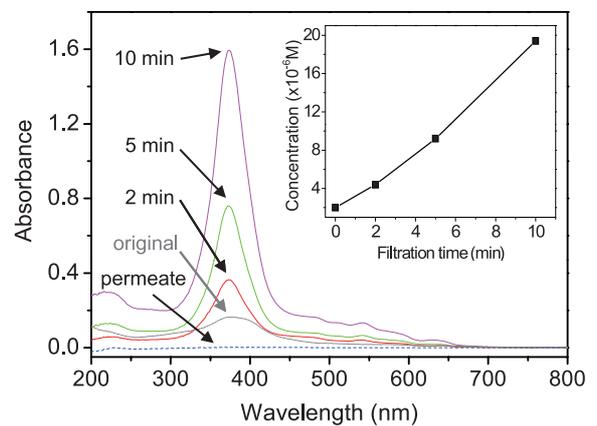


図2 供給液におけるプロトポルフィリンの濃度変化

ナノ膜の阻止率は、分子の幅によって決まる。先述の分子量562.7のプロトポルフィリンは、幅が1.5 nmであるため透過できないが、分子量864.9のダイレクトイエローという色素分子は、細長い形状(1.2 \times 3.1 nm)のために素通りする。 γ -シクロデキストリンは直径1.7 nmであるが、柔らかい環状分子であるために、阻止率が51%に留まる。この環状分子の内部にアルコール(1-アダマンタノール)という分子を包摂させると、阻止率が89%となる。アルコールが入ることで環状分子が硬くなり、ナノ膜を通過できなくなるのである。興味深いことに、細長い直鎖状ポリマーであれば、ナノ膜をすり抜けることができる。例えば、分子量7万のポリスチレンスルホン酸ナトリウムの水溶液(0.1 mg/ml)は、1700 L/h \cdot m 2 \cdot barの流束で膜を透過し、ポリマーの阻止率は2.9%となる。直鎖状ポリマーは、幅が1.5 nmより小さいために、ナノ膜を透過するのである。何故、高速で透過できるのか必ずしも明らかになっていないが、ナノ膜の実効膜厚(5.8 nm以下)と関係しているようである。

フェリチンは、牛などの肝臓、脾臓に多量に存在し、価格が安い。試薬級のフェリチンは、1グラム95ドルで市販されており、ナノ膜に必要なフェリチンの価格は、1 m 2 あたり750円と計算されている。ナノ膜の製造コストは、実用化の大きな障害にはならないであろう。即ち、環境浄化から医療応用まで、水処理膜としての幅広い用途が期待できる。

本研究成果は、2009年6月のNature Nanotechnology誌にハイライト記事があり、研究の背景と重要性が詳しく説明されている。

文献

O. Bakajin and A. Noy: Nature Nanotechnology 4(2009)345.

5. 細胞膜表面トランスポーターの非侵襲機能解析デバイスの創製

■ 研究のポイント

電界効果トランジスタ (Field Effect Transistor, FET) と細胞を融合させ、細胞膜表面で生ずるトランスポーターと基質の相互作用を非侵襲で解析するバイオデバイスを開発した。創薬プロセスにおいて薬物候補化合物の高スループットスクリーニングに有効であるとともに、細胞膜ダイナミクスを直接、標識なしで電子の信号に変換する新しいデバイスとして細胞機能解析への応用が期待される。

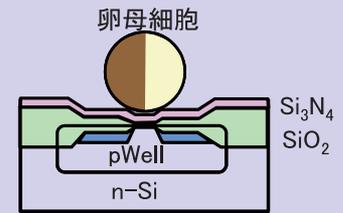


図1 細胞トランジスタの概念

■ 研究の内容

トランスポーターは細胞膜に存在し、物質の能動的な膜輸送を担っている重要な蛋白質、ペプチドである。薬物の作用は作用部位での薬物濃度によって決まり、吸収・分布・代謝・排泄で代表される薬物の体内動態に大きく依存する。吸収・分布・代謝・排泄はすべて細胞膜の透過プロセスを含むため、薬物輸送を担うトランスポーターは薬物の薬効、副作用に大きな影響を与える。このため創薬においては、細胞膜表面のトランスポーターと薬物候補化合物 (基質) との相互作用を迅速に解析する技術が求められている。

本研究では電界効果トランジスタのゲート絶縁膜表面にトランスポーターを発現させた細胞を設置し、トランスポーターと基質との相互作用を細胞外電位の変化として計測する細胞トランジスタを開発した。

細胞としてアフリカツメガエル卵母細胞、トランスポーターとしてヒト有機アニオン輸送体 (human Organic Anion Transporting Polypeptide; hOATP)、基質としては Estrone-3-Sulfate (E3S) 等の有機アニオンを用いた。

図2に示すように卵母細胞にヒト有機アニオン輸送体の遺伝子を注入し、細胞膜にヒト有機アニオン輸送体を発現させる。トランスポーターを発現させた卵母細胞およびコントロールとして未発現の卵母細胞をそれぞれ電界効果トランジスタのゲート絶縁膜表面に固定する。基質である Estrone-3-Sulfate (E3S) を卵母細胞雰囲気を導入するとトランスポーターを発現させた卵母細胞ではトランスポーターを介して E3S が細胞内に取り込まれる。一方、トランスポーターを発現させていない卵母細胞では E3S が取り込まれない。

FET チップ及び卵母細胞の写真を図3に示す。5 mm 角のチップに16個のFETが集積化されている。FETのゲート絶縁膜は $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{SiO}_2$ であり、チャンネル領域の大きさは約 $300 \mu\text{m}$ 角である。卵母細胞の直径は約 1mm であり、チャンネル領域に合わせて設置される。

図4に示すように細胞膜にはイオンチャンネルやイオンポンプなどの膜蛋白質が埋め込まれており、ヒト有機アニオン輸送体 hOATP により Estrone-3-Sulfate (E3S) が細胞内に取り込まれる際、E3S 以外のイオンなどが細胞内に流入したり、細胞から流出することが知られている。その結果、細胞膜電位が変化する。細胞膜の極近傍にゲート絶縁膜を設置することにより、その変化を細胞外電位変化として検出することができる。

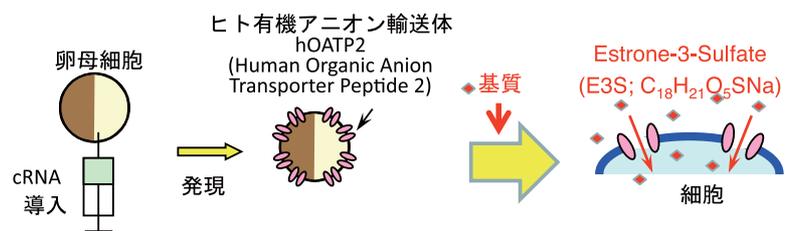
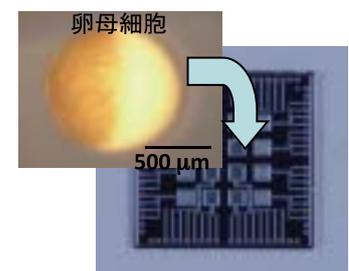


図2 トランスポーターの発現と基質との相互作用スキーム



FET chip (5mm x 5mm)
n channel depletion

図3 FETチップ及び卵母細胞の写真

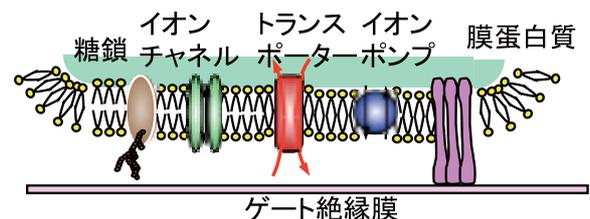


図4 トランスポーターによる基質の取り込み

バイオトランジスタ

■ 主な成果

細胞膜にヒト有機アニオン輸送体 (hOATP2) を発現させた卵母細胞をゲート絶縁膜上に設置したFET、コントロールとしてトランスポーターを発現させない卵母細胞を設置したFET、さらに卵母細胞を設置しないFETの3種類のFETを用い、基質に対する応答を調べた結果を図5に示す。ヒト有機アニオン輸送体を発現させた卵母細胞を有するFETのみ基質との相互作用の結果、10 mV程度のシグナル変化を示した。応答は基質添加後約30分で一定値を示し、基質E3Sなどが関与する細胞膜輸送が定常状態に達することがわかる。一方、トランスポーターを発現させていない卵母細胞の電位シグナルはほとんど変化しなかった。これより、細胞膜表面におけるトランスポーターと基質との相互作用のカイネティクスを非侵襲で解析できることを確認した。

hOATPトランスポーターには幾つかの遺伝子多型が存在し、細胞への基質取り込み能は多型の種類によって異なることが知られている。

野生型 hOATP-C*1a と2残基アミノ酸置換した変異型 hOATP-C*15 を発現させた卵母細胞を作製し、それぞれFETのゲート絶縁膜表面に設置して、基質に対する応答を調べた。図6に野生型、変異型、コントロールFETの応答を比較して示す。野生型トランスポーターを発現させた卵母細胞を有するFETの電位応答は変異型のFETの電位応答の約2倍であった。この結果はラジオアイソトープを標識として用いた取り込み実験と同様の結果が得られ、トランスポーターの多型による膜輸送効率の違いを識別できることがわかった。

細胞トランジスタでは、細胞膜で起こる電気現象を非標識、非侵襲で計測することができるため、トランスポーターと基質との相互作用や膜蛋白質機能の高スループット解析などに有効である。

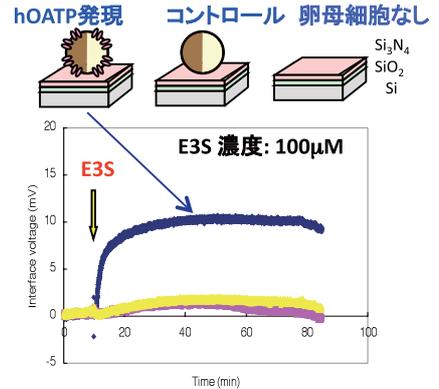


図5 hOATP-基質相互作用のカイネティクス

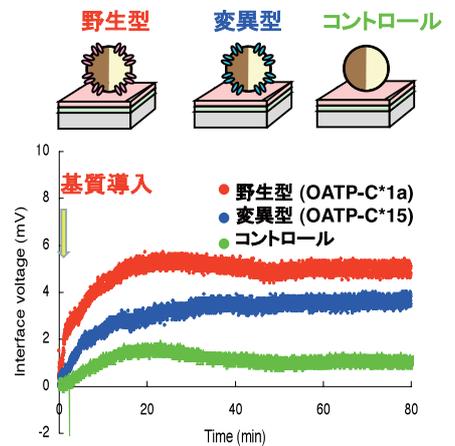


図6 多型による取り込み能の違いの識別

発表文献

- 1) T. Sakata and Y. Miyahara: Anal. Chem. **80**, 1493-1496 (2008).
- 2) T. Sakata and Y. Miyahara, Japanese Journal of Applied Physics, **47**, 368-370 (2008).

期待されるイノベーション

医用材料、製薬、あるいは化粧品の分野では、新規化合物の安全性や有効性を評価するために、ヒト細胞や哺乳動物細胞を用いてスクリーニングを行っている。また、各種毒性試験や薬物動態試験は一般に哺乳動物を用いて行う必要がある。しかし最近では動物愛護の精神や経済的な観点から、動物実験代替法が研究されている。今後は動物実験の代替として培養細胞を用いた解析技術が重要になると考えられる。培養細胞を用いた解析では、合成した新規化合物は貴重であるため、微量の試料でも解析可能であることが望ましく、反応場、検出場の微小化が必要である。また、再生医療の分野では生体内にインプラントする細胞や組織の安全性の確認が求められている。患者の自家組織を用いるため、微量の組織の安全性を非侵襲で評価する必要がある。本研究で開発した細胞トランジスタはこれらのニーズに合致したシステムのキー技術になると考えられる。

お問い合わせ先

生体材料センター 宮原 裕二
ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/jpn>

研究領域の説明

1. バイオトランジスタとは？

絶縁ゲート電界効果トランジスタのゲート電極の代わりに、イオン感應膜をゲート絶縁膜上に直接形成した構造のトランジスタをイオン感應性電界効果トランジスタ (Ion Sensitive Field Effect Transistor, ISFET) という。ゲート電位は同じ試料溶液中に浸せきした参照電極により制御される。

バイオトランジスタは図7に示すようにISFETのゲート絶縁膜表面に生体分子が固定化された機能性膜を形成した構造を有し、機能性膜の表面及び内部で生ずる分子認識反応により誘起される電荷密度変化をトランジスタで検出する。あらかじめ検量線を作成しておけば、ドレイン電流変化から生体分子濃度を求めることができる。バイオトランジスタは半導体技術により製作されるため、下記の特徴がある。

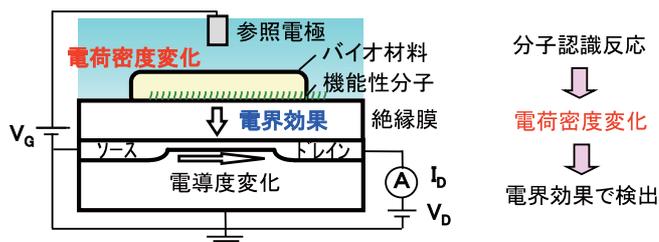


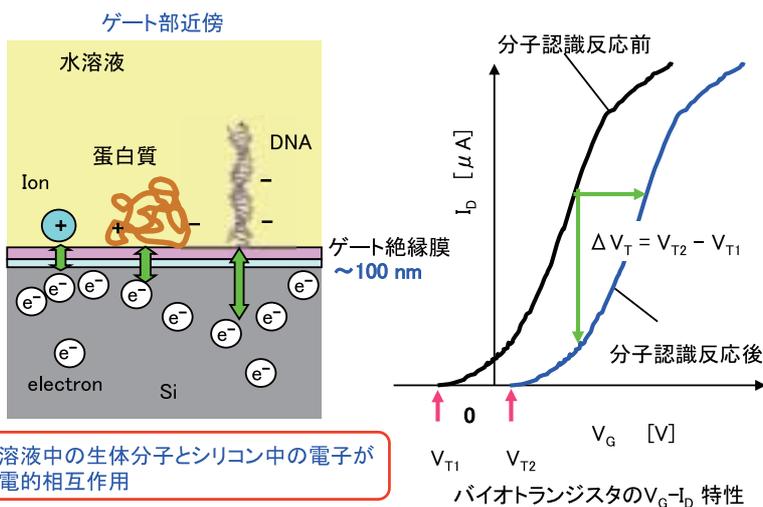
図7 バイオトランジスタの構成概念

- (1) FETはインピーダンス変換機能を有するため、絶縁材料でも機能性膜として用いることができる。
- (2) 微細加工技術により小型のバイオチップを製作することができる。
- (3) 複数のイオンセンサや信号処理回路をワンチップに集積化することができる。

ISFETのイオン感應膜としては、半導体プロセスとの整合性がよい Si_3N_4 、 Al_2O_3 、 Ta_2O_5 がpH感應膜材料として開発されている。固定化する生体分子や機能性膜の種類を変えることにより、検出対象や選択性を変えることができる。固定化酵素を用いたグルコースや尿素の検出、オリゴヌクレオチドを固定化したDNAの検出、脂質膜、糖鎖解析用の機能性膜などが研究されている。

2. バイオトランジスタの動作原理

バイオトランジスタのゲート部近傍の模式図を図8に示す。試料溶液中の電荷を有する分子がゲート絶縁膜表面に吸着している様子を示してある。バイオトランジスタゲート部では約100 nmの厚さのゲート絶縁膜を挟んで電荷を持つ生体分子（試料溶液中）と電子（シリコン中）が静電的に相互作用する状態を実現できる。



水溶液中の生体分子とシリコン中の電子が静電的相互作用

図8 バイオトランジスタの動作原理

ゲート絶縁膜表面の生体分子の電荷密度変化に応じてシリコン表面（チャネル）の電子密度が変化するため、ドレイン電流を測定することにより、原理的に生体分子の分子認識反応を検出することができる。例えばFETのゲート絶縁膜表面にオリゴヌクレオチドプローブを固定化し、ターゲットDNAを含有する試料溶液を導入するとハイブリダイゼーションによりゲート上で二本鎖DNAが形成される。DNA分子は水溶液中でリン酸イオンに起因する負の電荷を有しているため、ハイブリダイゼーションにより負電荷が増加する。この負電荷の増加により、シリコン中の電子が静電的斥力を受けシリコン表面の電子密度が減少する。したがって、図8右図に示すようにドレイン電流の減少、あるいはしきい値電圧の正方向へのシフトとしてハイブリダイゼーションを検出することができる。

3. 溶液／絶縁膜界面のデバイ長の影響

バイオトランジスタを用いた生体分子電荷の計測では、電荷変化の検出領域がゲート表面のごく近傍に制限される、という特徴がある。図9に示すように溶液／ゲート絶縁膜界面の電気二重層の幅（デバイ長）の内部で誘起される電荷密度変化を検出することができるが、デバイ長の外で誘起される電荷密度変化はカウンターイオンによりシールドされ、原理的にFETで検出することが困難になる。電気二重層の幅、すなわちデバイ長は次式で表される。

$$\delta = (\epsilon \epsilon_0 kT / 2qI)^{1/2} \quad (1)$$

ここで、 δ ：デバイ長、 ϵ ：比誘電率、 ϵ_0 ：真空の誘電率、 k ：ボルツマン定数、 T ：絶対温度、 q ：電荷、 I ：イオン強度を表す。(1)式からわかるようにデバイ長 δ はイオン強度の関数であり、NaClのような単純な溶液では、100 mMの濃度で約1 nm、1 mMの濃度では約10 nmである。感度を確保するためには測定溶液のイオン強度の最適化のほか、デバイ長の範囲内で大きな電荷密度変化を誘起させる分子認識反応の設計を工夫する必要がある。

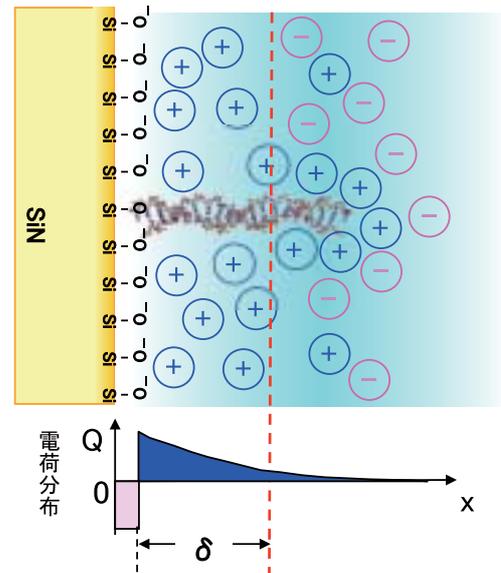


図9 溶液／ゲート絶縁膜界面の模式図

4. 細胞トランジスタの展望

細胞トランジスタは、細胞機能計測、リガンドー蛋白質相互作用の高スループットスクリーニングに応用可能であり、医用材料、製薬、あるいは化粧品分野での活用が期待される。また、細胞膜の電気現象を非侵襲でモニタリングできることはバイオトランジスタのみの特徴であり、新たな発見や知識の獲得につながる可能性がある。新たに得られる知見の中で、疾病との関連が明らかになれば、疾病の新たなマーカーとして病気の診断に利用することが可能である。また、培養細胞の安全性、機能制御に関する情報が取得できれば、再生医療の伸展に大きく貢献することができる。

バイオトランジスタでは、細胞内シグナル伝達とシリコンデバイスによる信号処理が機能化ゲート界面を介して組み合わせられており、細胞や生体分子を利用した新しいデバイス、バイオ素子へと展開できる可能性がある。“ムーアの経験法則 (Moore’s Law)”によるトランジスタ微細化の限界が指摘され、半導体分野ではムーアの法則の外挿から外れる (More than Moore) タイプの新しい機能を有する半導体デバイスの出現が望まれている。バイオトランジスタを基盤とする新たな情報処理デバイスは、認識、予知など従来のシリコンデバイスが苦手とされている分野に応用展開できる可能性がある。上述した卵母細胞を用いた細胞トランジスタは、細胞が設置されているゲート表面の環境に対して、細胞が常時周囲の状態を検知して、それらの入力を細胞内で情報処理した結果を細胞応答として出力し、ゲート界面を介して電子信号に変換される。細胞トランジスタは細胞内の高度情報処理を利用した電子デバイスということができる。このように生体の持つ高次の情報処理を細胞レベル、組織レベルで制御し、アレイ化して電子信号に変換することにより、従来のシリコンデバイスでは困難であった機能を有するデバイスを実現できると考えられる。筆者らは細胞シグナル伝達と電子情報処理を融合する新たな領域の開拓を目指している。

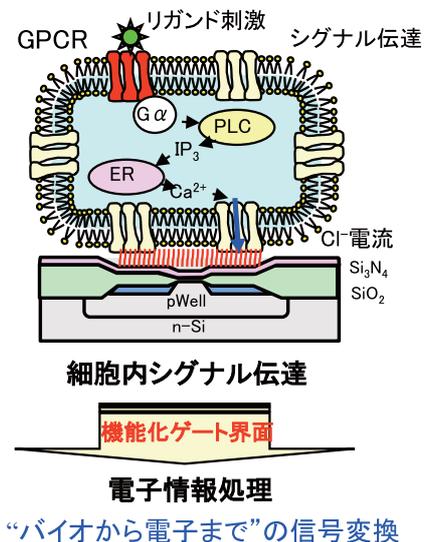


図10 新しいバイオデバイスの創製

6. 超1 GHz NMRの開発に向けて

■ 研究のポイント

ビスマス系酸化物超伝導体はNIMSで開発された材料です。30 T以上の磁場中でも実用的な電流が流せることから、液体ヘリウム中での強磁場応用が期待されています。

一方、材料の構造決定に威力を発揮する核磁気共鳴（NMR）装置は使用する磁場が強くなるほど感度と分解能が向上します。

23.5 T（水素の共鳴周波数1 GHz）を超えるNMR装置の開発には酸化物線材の使用が必須と考えられています。しかし、NMR装置で要求される磁場の均一性、安定性を満足することが困難で、実現されていませんでした。ビスマス系酸化物線材の超1 GHz NMR装置への適用を目指して、ビスマス系酸化物コイルがNMR装置に適用できることの実証を目指しました。

■ 研究の内容

ビスマス系酸化物超伝導体の1つであるBi-2223のコイルをNMR装置の内層コイルとして組み込み、通常のNMR装置と同等の性能を得るために、以下の課題に取り組みました。Bi-2223線材は、強度と巻きやすさから、図1に示す弱磁性のブロンズ（青銅）をBi-2223素線の両側に貼り合わせた線材を使用しました。

磁場の安定性

Bi-2223線材の場合、線材間の超低抵抗（ $< 0.01 \text{ n}\Omega$ ）接続技術が未開発なこと、線材自体に極微小の抵抗が存在していることから、従来のNMR装置で採用されてきた永久電流モードではなく、通常に比べて20倍安定度の優れた電源で運転することにしました。この電源でも磁場はノイズや気温の影響で変動します。これは磁場の変化を検出し補償する技術で解決することにしました。

また運転初期に生じる磁場の長期的変動に対応するように、磁石を格納する低温容器に小型冷凍機を取り付け、さらに酸化物超伝導電流リードを採用することで、長時間、冷媒を補充せずに運転できるよう改造しました。

磁場の均一性

Bi-2223線材のようなテープ形状の線材は、通常ダブルパンケーキ巻きとしてコイルを製作します。しかし、この方法ではコイルの厚みと積層間隔の管理が困難で、コイルの発生する磁場の不均一成分が増加します。NMR装置で実績のある図2のような整列巻きに取り組みました。

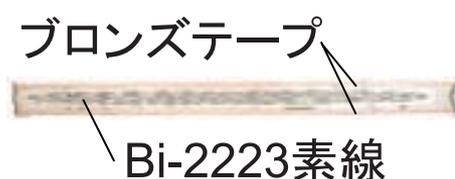


図1 ブロンズで補強したBi-2223線材



図2 Bi-2223線材の整列巻き

Bi系酸化物コイルでタンパク質のNMR計測に成功

■ 主な成果

Bi-2223 コイルを内層コイルとする 500 MHz NMR 装置の開発

ブロンズ補強 Bi-2223 線材を整列巻きして、図3に示すコイルを製作しました。このコイルを既存のNMR磁石の最内層コイルと交換し、図4に示すNMR装置として完成しました。この装置を中心磁場 11.7 T (500 MHz) まで電源で励磁し、冷媒を補充することなく3ヶ月以上連続で運転することで、NMR計測を行いました。

従来の 500 MHz NMR 装置に匹敵する性能

図5はタンパク質であるリゾチームの水溶液サンプルの2次元NMR (2つの核種の相関を測定) の代表であるNOESYの結果です。NOESYは、タンパク質の立体構造を求める上で最も重要な計測ですが、NMR装置の磁場の安定性や均一性が悪いと、良い信号を得ることができません。図に示した結果は、従来のNMR装置の測定結果と比較してもほぼ遜色のないものになっており、ビスマス系酸化物超伝導コイルがNMRに適用できることを世界で初めて実証しました。



図3 Bi-2223整列巻きコイル



図4 500 MHz NMR装置

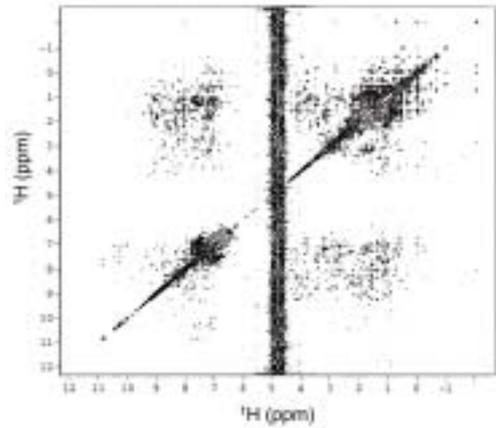


図5 リゾチームの計測結果(NOESY)

本研究はJSTの先端計測分析技術・機器開発事業の支援を受け、理化学研究所、神戸製鋼所、日本電子と共同で実施しています。

発表文献

- 1) 2008年11月7日付け科学新聞。
- 2) T. Kiyoshi et al., IEEE Trans. Appl. Supercond. **18**(2008)860.
- 3) 大塚昭弘, 木吉 司, 松本真治, 野口隆志, 小湊健太郎, 竹田雅詳, 低温工学 **43**(2008)287 (2009年度論文賞)。

期待されるイノベーション

酸化物超伝導コイルの有用性が発揮できる超 1 GHz NMR 装置の開発が可能となりました。NIMS 所有の 920 MHz NMR 装置を Bi-2223 コイルを使用して、1.03 GHz NMR 装置へアップグレードする計画が進行中です。また開発した技術は MRI (核磁気共鳴イメージング) 等の計測機器への展開が可能です。



お問い合わせ先

超伝導材料センター 木吉 司
ホームページ: NIMS homepage, <http://www.nims.go.jp/smc/index.html>

研究領域の説明

強磁場 NMR 装置の開発

これまで観測できなかった原子核を観測できるように

材料の構造決定に威力を発揮する NMR 装置はタンパク質の立体構造・機能の解明を主たる推進力として強磁場化が進展いたしました。現在は、NIMS の 930 MHz NMR 装置で得られた成果（チーグラー・ナッタ触媒中のチタンや葉緑素中のマグネシウム等）に代表されるようにこれまで困難であった酸素、チタン、マグネシウム、アルミニウム等の観測を目的として、一層の強磁場化が期待されています。

強磁場化の推移

NMR は磁場中である特定の電磁波を加えると原子核が共鳴する現象で、磁場と共鳴周波数は精確に比例します。NMR 装置の場合、磁場が性能に直接関係するため、歴史的に NMR 装置の発生する磁場に対応した水素の共鳴周波数で装置を呼称します。1000 MHz (1 GHz) は磁場 23.5 T に対応します。

図 1 に NMR 装置を含めた超伝導磁石の発生磁場の推移を示します。NIMS では 1999 年に世界で初めて 900 MHz を発生し、2001 年に 920 MHz の装置として完成いたしました¹⁾。さらに 2004 年に 930 MHz NMR 装置を開発しています²⁾。これらは NIMS で開発されたチタン添加 Nb₃Sn 線材を改良することで実現されました。

2009 年に長年の目標とされてきた 1 GHz NMR 装置の完成が発表されています。超伝導磁石の最高磁場は NIMS が 1999 年に Bi-2212 内層コイルを使用して発生した 23.4 T ですが、1 GHz NMR 装置の磁場 (23.5 T) は若干ですがこれを上回っており、強磁場 NMR 装置への強い期待を実証しています。

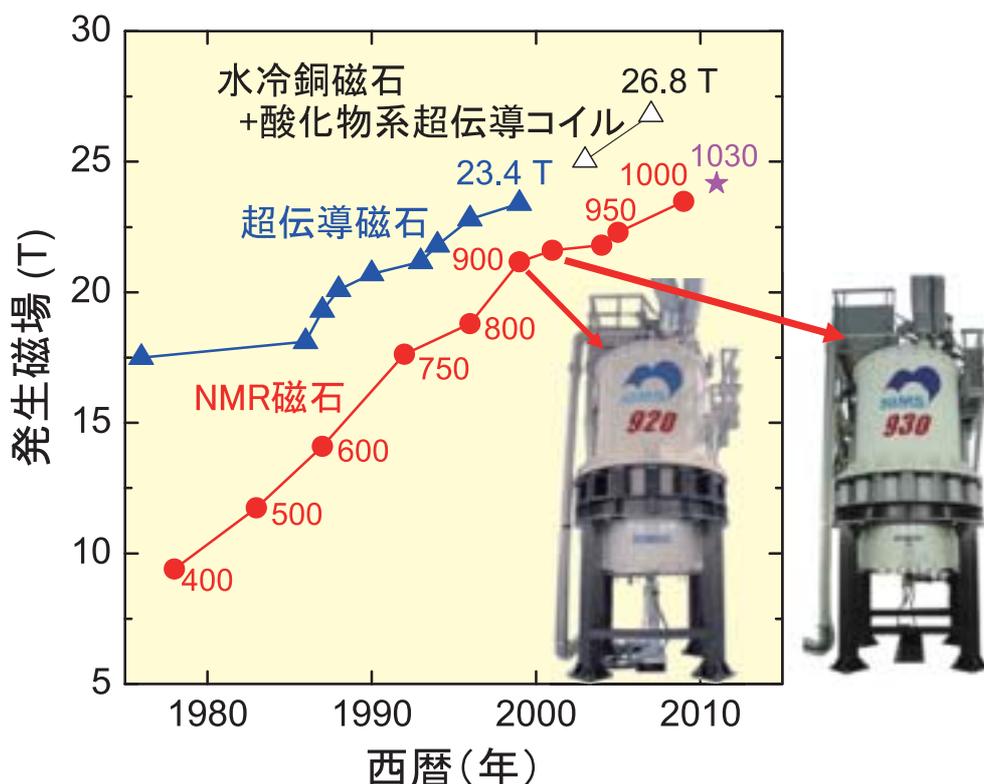


図1 強磁場超伝導磁石の最高磁場の推移。NMR磁石の横の数字は共鳴周波数(MHz)を表す。

強磁場化の課題

これまでのNMR磁石はすべて弱磁場部にNbTi線材、強磁場部にNb₃Sn線材を使用して製作されてきました(400 MHzはNbTi線材のみ)。今後のNMR装置の強磁場化には、新たな超伝導線材の使用と磁石サイズの抑制という2つの課題が存在しています。

酸化物系超伝導線材のNMR装置への適用

図2に液体ヘリウム中での各種超伝導線材の臨界電流密度と磁場の関係を示します。この図からNb₃Snを使用する限り、1GHz(23.5T)を大幅に超える磁場を発生することは困難なことが分かります。一方、ビスマス系やイットリウム系に代表される薄膜系超伝導線材(図2ではホルミウム系をプロット)の場合、30Tの磁場中でも実用的な臨界電流密度(100 A/mm²)を持っており、強磁場発生の際には極めて有望です。

しかしこれらビスマス系や薄膜系酸化物超伝導線材をNMR装置に適用するには2つの大きなハードルがありました。

1つはNMR磁石で使用されている永久電流モード(磁石励磁後、両端を短絡して、電源を外して運転)では、接続部の抵抗等によってNMR計測には致命的な速さで磁場が減衰することです。

もう1つは、磁場の均一性に関する問題です。NMRに使用するコイルは図3(a)に示すような整列巻きで作製されてきました。一方、酸化物系超伝導線材のうちBi-2223線材や薄膜系超伝導線材はテープ形状のため図3(b)に示すパンケーキ巻きで製作されてきました。しかしこの巻線方法は線材や巻線間に挿入するスペーサの厚みのバラツキの影響を受けやすいことが懸念されてきました。

この度の成果はこの2つのハードルをクリアし、酸化物超伝導線材がNMRに適用できることを実証した点で画期的です。この成果を踏まえて最終目標である超1GHz NMR装置の開発を行っており、2011年にはBi-2223内層コイルを使用した1.03 GHz NMR装置を製作する予定です。

磁石サイズの抑制

強磁場化のもう1つの課題は磁場の増加に伴う磁石サイズの増加です。現在のように線材に加わるフープ応力を200 MPa程度とすると磁場の8乗で磁石体積が増加するという検討結果が得られています³⁾。しかし線材が許容できる応力を増加することで磁石サイズを大幅に低減できる結果も得られており、ハステロイを基板とする薄膜系超伝導線材の使用が期待されています。

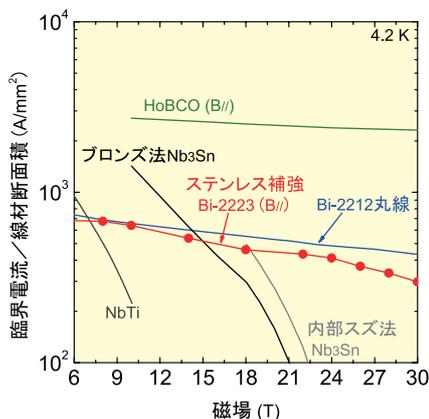


図2 各種超伝導線材の臨界電流密度の磁場依存性。

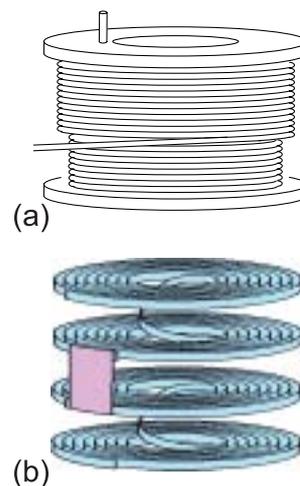


図3 超伝導コイルの巻線方法。

- (a) 整列巻き(密巻き)
(b) ダブルパンケーキ巻き

関連発表文献

- 1) 木吉 司, 低温工学, **37**(2002) 10.
- 2) 吉川正敏ら, 低温工学, **39**(2004) 625.
- 3) 大塚昭弘, 木吉 司, 低温工学, **42**(2007) 196.

NIMS Joint Graduate Program



図3 早稲田大学との連係大学院



図4 九州大学との連係大学院 先端ナノ材料工学講座

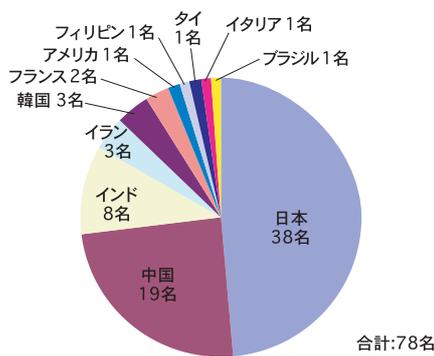


図5 連係大学院生国籍一覧

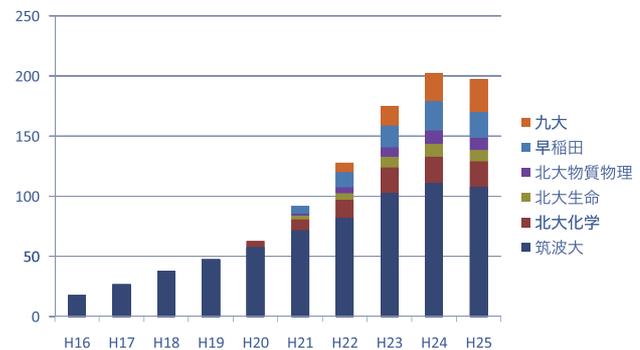


図6 連係大学院の学生数推移(H22以降は計画値)

課題

NIMSは法人化されたとはいえ、研究機関であり、教育機関ではありません。連係大学院制度の強化・拡充には、NIMS連係大学院の制度・仕組みが外から見てよく分かる（visible）ことが重要です。

- ①国内外の優秀な学生の確保
- ②学生支援体制の構築
- ③「NIMSジュニア研究員制度」の充実
- ④教員（NIMS研究員）のファカルティーディベロップメント（FD）
- ⑤連係先の大学との更なる研究協力体制の強化。

将来展望

連係大学院の拡充と国際化の推進により有能な人材を確保することは、NIMSが国際化を実現するための重要な施策です。NIMS将来計画委員会の報告書によれば、現時点での「NIMS連係大学院」を拡充・国際化した「国際連係大学院」において、所属大学の指導教員との共同研究の一環として運営することが人材確保に必要であるとしています。

今後は海外の材料科学分野で存在感のある大学との連携を深め、国内大学との取り組みと同様な「国際連係大学院」を設置することができれば、さらに国際化が進むでしょう。NIMS内に、海外の大学たとえばUCLAの専攻を設置し、UCLAの教授が学生を指導し、学位もUCLAからという環境を構築すれば、真に国際的に開かれた研究拠点が実現することになります。

お問い合わせ先

若手国際研究センター(大学院チーム) 納富 健文

トピックス 2 企業との関係センター

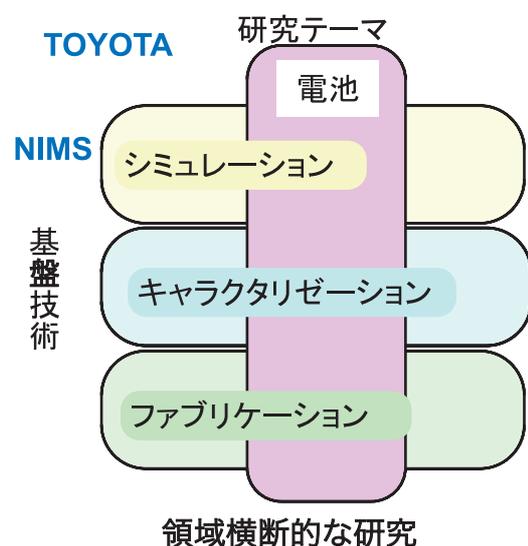
- ★物質・材料の将来ニーズに係わる中長期的な戦略的課題を抽出し、世界に先駆けて、シーズ発掘並びに必要な研究基盤整備を図る
- ★人材確保、人材輩出の人材交流育成グローバルセンターを目指す
- ★実用化・製品開発は連携パートナーが担当、NIMS は基礎現象の解明および研究基盤開発とその利用などの基礎研究を分担

NIMS – トヨタ次世代自動車材料研究センター

2008年7月18日開設

次世代自動車材料の大きな壁を乗り越えるために、領域横断的な NIMS 研究者が協力し合って研究している。

- ★次世代の自動車材料を生み出すために必要な、基本現象メカニズムの解明と基盤技術開発
- ★次世代車載用二次電池の研究からスタート
- ★今後順次、他の環境・エネルギー対応材料に研究領域を拡大させる計画
- ★第三研究機関の参加も視野に入れた活動
- ★本連携を通じて材料開発に必要な基盤技術を習得した研究人材の育成・輩出も図る



NIMS サンゴバン 連携研究

2008年11月25日開始

二者間セミナーで共通テーマを発掘し、人的交流も含めて、相互連携を拡大している。透明導電膜に関するコンビナトリアルテクノロジーが最初のテーマ

- ★サンゴバン社は、300年以上の歴史を持つ、革新的材料（ガラス、高機能材料）、建築用製品、建材流通、容器の4つ事業を核としたグローバル企業
- ★革新的材料の共同研究を、世界中のトップ研究機関と連携、オープンイノベーションの推進
- ★日本では、NIMS を材料科学の分野でのパートナーとして位置付けた

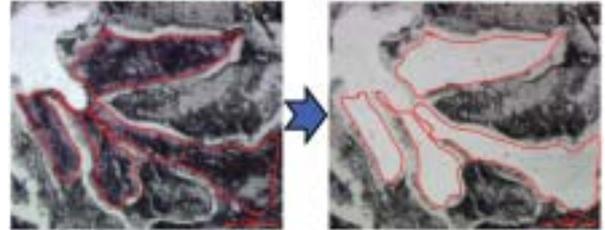


NIMS-Leica バイオイメージングラボ

2007年10月1日開設

誰でも使えるオープンラボラトリーを目指している。

レーザーマイクロダイセクションシステムを用いた胆道癌 FFPE 組織切片からの癌細胞特異的ダイセクション（右側がダイセクション後）



- ★最新鋭の顕微鏡イメージングシステムが利用出来る、生命科学の研究者・技術者を支援する画像ソリューションラボがつくばに開設
- ★ナノテクノロジー融合センター ソフトマテリアライン内にライカの最新バイオ関連機器を揃えたイメージングラボ



ロールス・ロイス航空宇宙材料センター

2006年6月30日開始

NIMS が開発した合金を大型民間航空機用ジェットエンジンに使うための基礎研究を進めている。

(右) ロールス・ロイス社の Trent1000 エンジンを搭載したボーイング 787 試験機

(右下) 基礎科学に立脚した合金設計により、耐熱性と安全性を向上させた単結晶タービン翼



- ★大型民間航空機用ジェットエンジンの最高温部（タービン翼）で使う耐熱性に優れた Ni 基単結晶超合金の開発
- ★開発目標は、一般のものより 100℃ 高い世界最高の耐熱温度 1,150℃ の合金
- ★2012 年のエンジンへの実用化をめどに研究中
- ★耐用温度を 40℃ 向上につきエンジン効率が 1% 向上、1 機あたり年間 1 億円の燃料費削減と CO₂ の削減が期待される



お問い合わせ先

企画部 連携推進室 原 龍雄

2008年度運営に関するデータ集

- 論文被引用数
- 論文数の推移
- 運営費交付金及び施設整備費補助金の合計額の推移
- 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20年度末現在）

2008年度運営に関するデータ集

論文被引用数

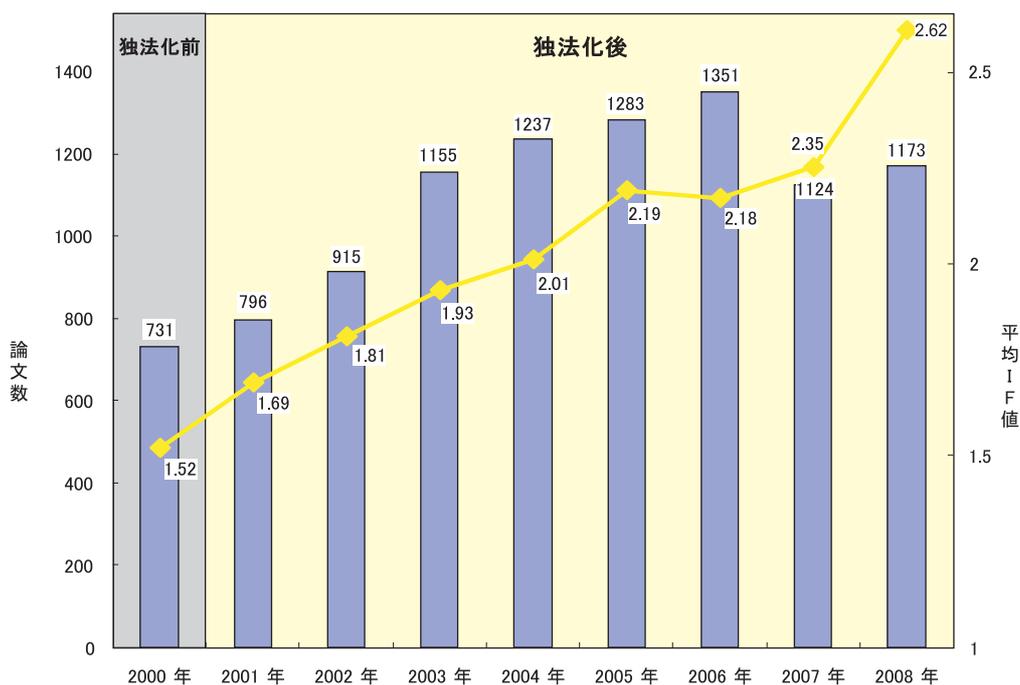
論文被引用数ランキング (Materials Science)

独法化前 (1996～2000)			独法化後 (2005～2009)		
1	マックスプランク研究所	4,886	1	中国科学院	32,241
2	東北大学	3,990	2	マックスプランク研究所	14,607
3	カリフォルニア大学サンタバーバラ校	3,204	3	物質・材料研究機構	10,003
4	マサチューセッツ工科大学	3,095	4	東北大学	9,845
5	ロシア科学アカデミー	3,026	5	シンガポール大学	9,460
6	ケンブリッジ大学	2,570	6	清華大学	8,840
7	産業技術総合研究所	2,561	7	MIT	8,271
8	ペンシルバニア州立大学	2,517	8	産業技術総合研究所	7,465
9	京都大学	2,443	9	CNRS	7,049
10	大阪大学	2,370	10	CSIC	6,884
⋮					
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21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

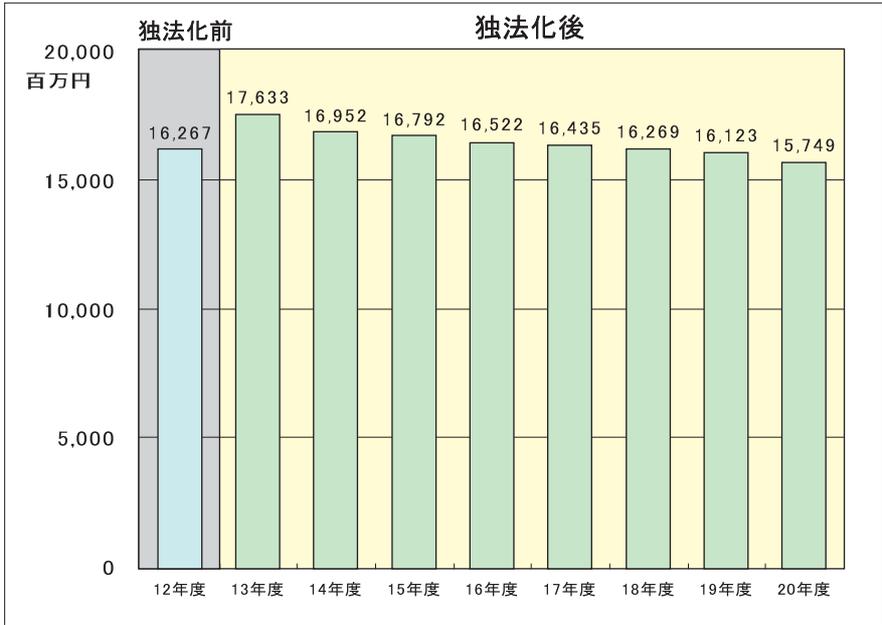
論文数の推移

SCI 論文数及び平均インパクトファクター



※トムソンサイエンティフィック社の「Web of Science」のデータベースをもとに分析

運営費交付金及び施設整備費補助金の合計額の推移



※12年度は、総理府所管一般会計のうち、旧金材技研・旧無機材研に該当する予算の合計額。13年度以降は、運営費交付金及び施設整備費補助金の合計額。

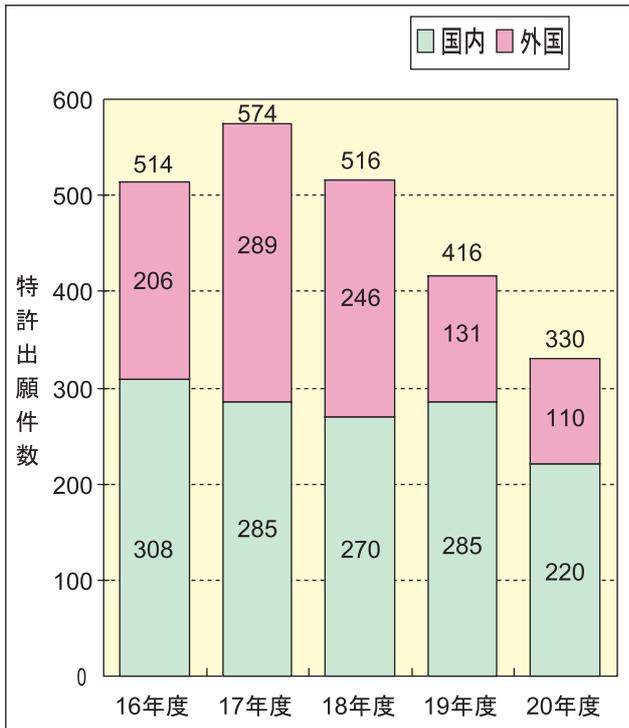
常勤職員数の推移



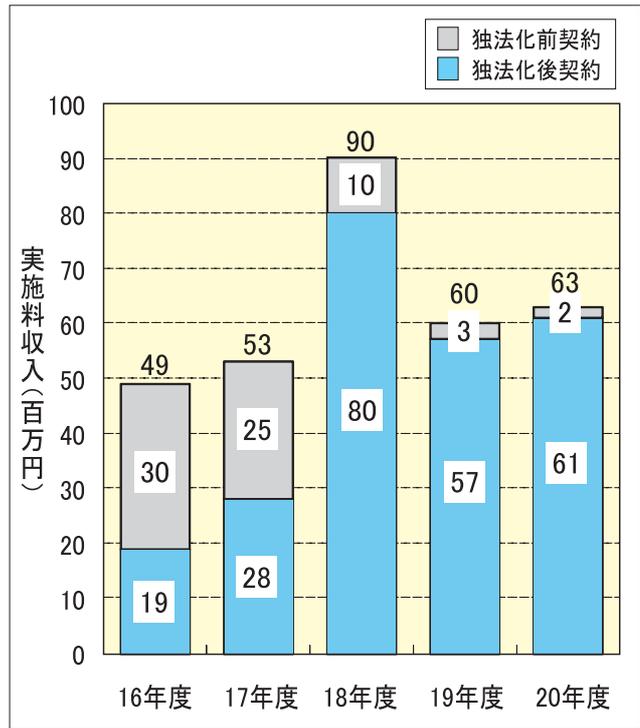
※各年度末の人数(役員は含まず)。

特許出願・実施料収入の推移

出願件数

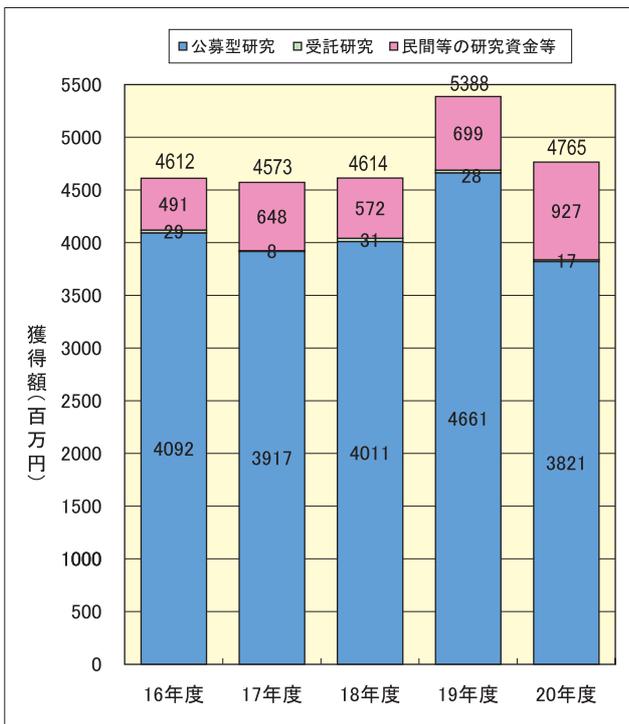


実施料収入

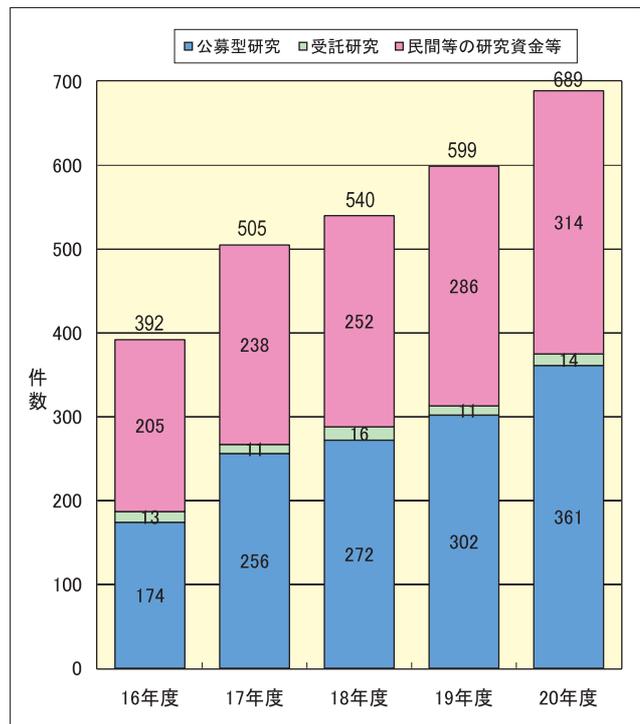


外部資金等の獲得状況

獲得額

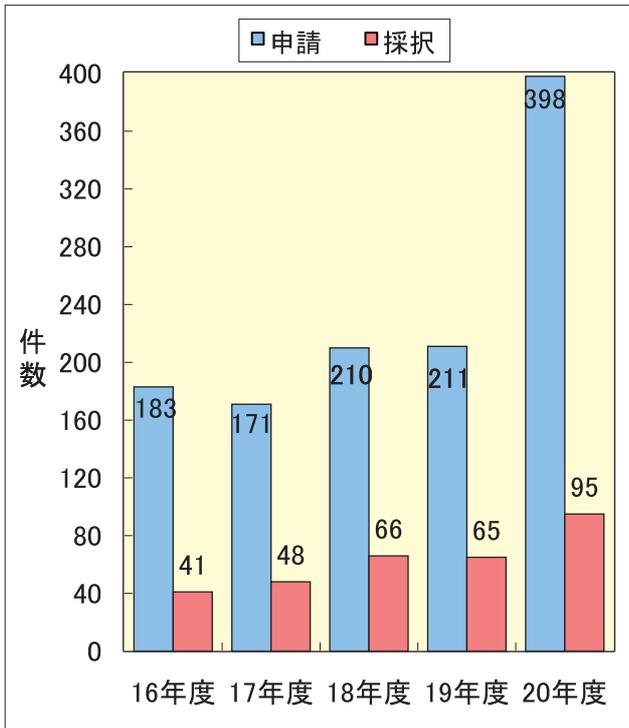


件数

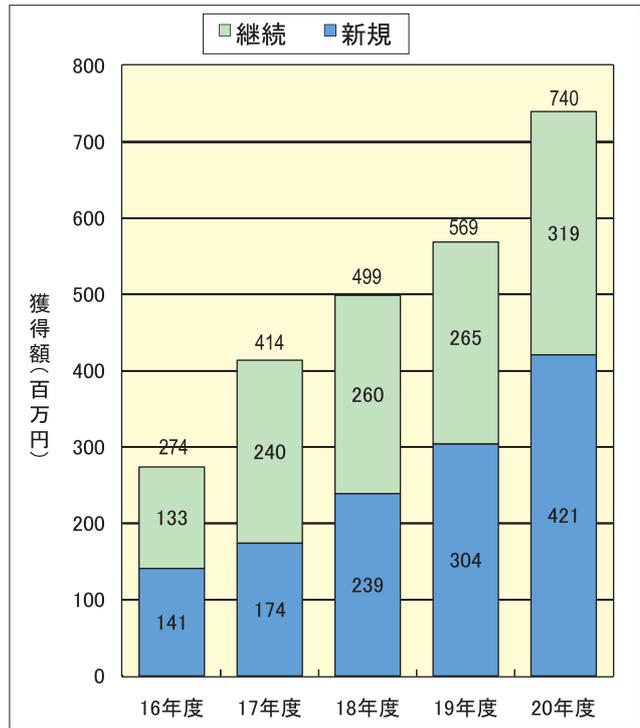


科学研究費補助金の獲得推移

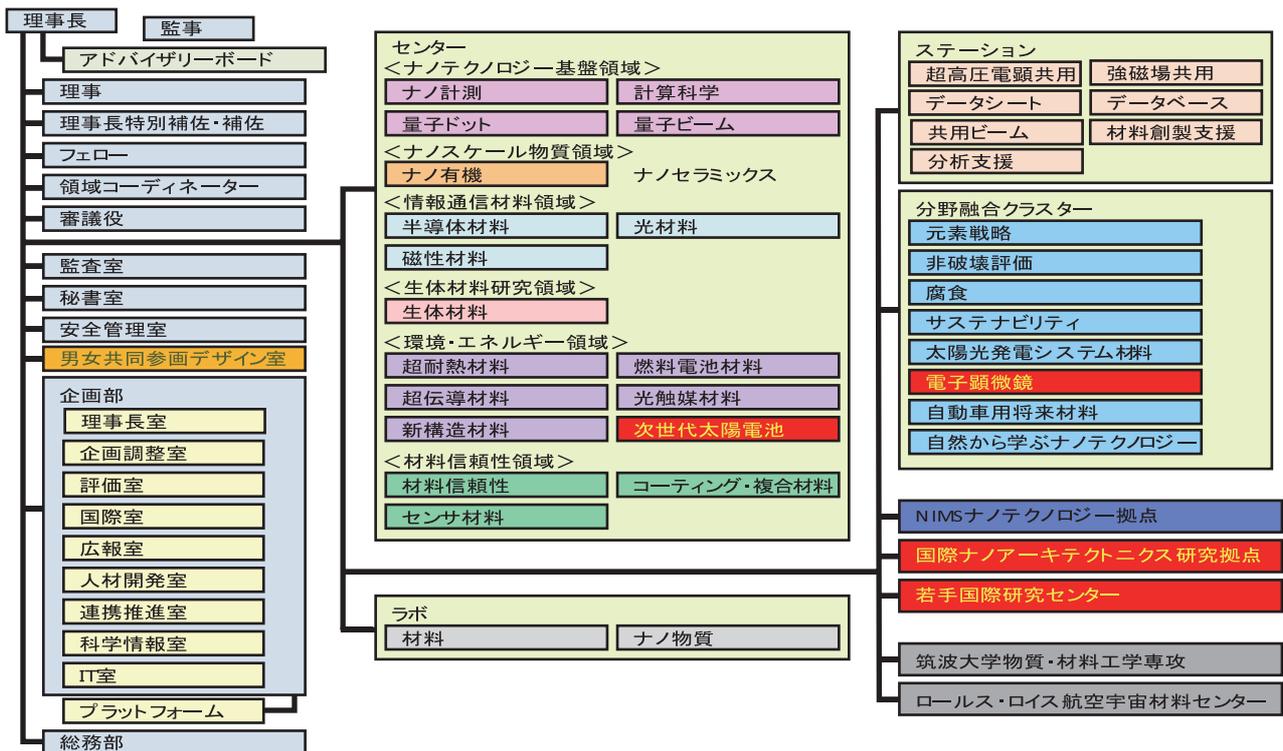
申請・採択件数



獲得額



機構の組織 (平成20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

2009年6月29日発行

担当者：企画部評価室／黒澤 景

〒305-0047 茨城県つくば市千現1-2-1

電話：029-859-2042

FAX：029-859-2025



物質・材料研究からイノベーションを目指して