

Energy Outlook

International Institute for Carbon-Neutral Energy Research

カーボンニュートラル社会 実現のキーテクノロジー

～二酸化炭素削減手法として
最も有望な二酸化炭素回収貯留技術～

Special Interview

京都大学大学院工学研究科
都市社会工学専攻ジオマネジメント工学講座 教授

松岡 俊文

九州大学 カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所
エネルギーアナリシス研究部門長代理 教授

板岡 健之

カーボンニュートラル社会 実現のキーテクノロジー

～二酸化炭素削減手法として最も有望な二酸化炭素回収貯留技術～

IPCC（気候変動に関する政府間パネル）は、2007年に発表した第4次評価報告書で、気候システムの温暖化は疑う余地がないことを明確にした。また、昨年発表された第5次評価報告書では、20世紀半ば以降観測された温暖化の主な要因は、人為起源による温室効果ガスの増加であることをほぼ断言した。地球温暖化による気候システムの変動が世界各地に異常気象や大きな自然災害をもたらしている可能性が高い近年、地球規模の二酸化炭素（CO₂）削減が喫急の課題となっている。その解決策の一つとして今後期待される技術が、二酸化炭素回収貯留（Carbon Capture and Storage、略して「CCS」）。CO₂削減の切り札として、今後どのように普及を進めていけばよいのだろうか。

大量に排出されるCO₂を分離・回収し、CO₂を気体と液体の中間の性質である超臨界状態で、地中深くにある塩水性帯水層、枯渇油ガス田などに安全に貯留する技術です。CO₂排出量の大幅削減を可能にする革新的技術であると期待されています。

板岡 CCSは石炭火力発電などとセツトで語られることが多いですね。

松岡 過去200年ほどのエネルギー源を振り返ると、木炭が石炭になり、そして石油へとシフトしてきました。今後おそらく、先進国では天然ガスなどCO₂排出量の少ない燃料源が主流となる中、新興国などではまだ、石炭火力発電が主力となりそうです。

板岡 イギリスでは今後、大規模石炭火力発電プラントを新設する際、CCS施設の設置計画が組み込まれていないプラントには新設許可が下りないそうですね。

松岡 イギリス政府は、CCSに関する「**CC**」指令に対応するため、今後の大規模石炭火力発電プラントの新設に対して、条件付きで「CO₂キャプチャー・レディ」の義務化を決めました。つまり、今後**CC**内でCCS実施の法規定または経済的な促進策が導入されることを見据え、CO₂回収（キャプチャー）機能を追設できる状態しておくのです。CCSの先駆けとなった事例が、海底ガス田から随伴して生産されるCO₂を回収し、1996年

世界で初めてCCS施設を設置した完全操業を行った、ノルウェーのスライプナウエストです。CCSのパイオニア的な存在としてその成功事例は有名です。

板岡 スライプナウは、操業開始当時から使用している貯留サイトで、今年も年間100万トン規模でCO₂を貯留しているようですね。

松岡 そうですね。スライプナウのように、貯留に適した場所がいくつも見つかったら、CCSの普及にも弾みがつきます。

日本で期待されるCCS

板岡 スライプナウでは、ガス田から天然ガスを採掘し、その上の塩水性帯水層へCO₂を戻していますが、大規模な枯渇油ガス田などがない日本では貯留適地を探すのは難しそうです。CCSを日本で導入する場合、どのような貯留先が考えられるのでしょうか。

松岡 日本列島そのものは、ユーラシアプレートと北米プレートに乗っており、そこにフィリピンプレートが南から押し寄せる複雑な構造をしているため、貯留サイトとしては地質構造に問題があるとの指摘もあります。ですが、それはCO₂を貯留するスペースがないということではありません。実際に、過去新潟県長岡市の帯水層でCCSの実験が行われ

CO₂削減策として 重要なCCS

板岡健之（以下・板岡） カーボンニュートラル社会を実現するための

キーテクノロジーとして、今世界的にCCSが注目されています。今後の社会において、CCSが果たす役割は何でしょうか。

松岡俊文（以下・松岡） CCSとは、例えば火力発電所のような施設から

Kenshi Itaoka



ましたが、実験期間中に発生した中越地震の際にも何も問題は起こりませんでした。また大規模ではなくとも、新潟や秋田には油田やガス田があります。枯渇油田やガス田跡は、そこに長期間石油やガスが保存されていたことが

実証済みですので、貯留したCO₂が漏出するリスクは低いと考えられ、貯留にも適しているといえます。国内でも、将来的には枯渇油田やガス田跡への貯留が可能ではないでしょうか。
板岡 なるほど。日本でも大規模でなく

ても枯渇油ガス田は活用できる可能性があるということですね。他に候補はありますか？
松岡 地下深部の帯水層も活用できると考えています。さらにCO₂を「鉱物化」できれば、より理想的です。

板岡 CO₂の鉱物化といえば、温泉などでは、湯の花等がどんどん発生してパイプなどに詰まり、取り換えが必要となるころがありますね。CO₂でいえばCO₂が固定化するので理想的なわけですが。
松岡 帯水層に貯留する場合、貯留後の安全性をいかに担保するかが課題となりますが、その一つの解となる技術が鉱物化なのです。地下にCO₂を貯留すれば、そのままにしておいても1万年ほどで鉱物化が進むと考えられていますが、この期間を短縮できないかと考えています。

CCS 推進のカギは「コスト

板岡 CCSを推進するためには、コスト問題の解決も不可欠ですね。

松岡 コストは本当に悩ましい問題です。これまで、日本の技術開発は大学がある程度シーズに当たる部分を担い、実用化は企業と一緒に盛り上げてきました。ところが、CCSに関しては今のところ企業との接点がありません。コストに見合うメリットが見えないからです。とはいえ、今日本では、経済産業省や環境省が予算を組んでCCSの実証実験や貯留層探索の事業を開始しました。アメリカでも、CCSタスクフォースを設置し商業的実証プロジェクトを政府が立ち上げる動きがあるようです。

Toshifumi Matsuoka



板岡 政府が予算を投入するのは、CCS実施促進の必要性を感じているからでしょうか。

松岡 温暖化によるコスト負担が現実問題となってきたのです。例えば、国土交通省は、堤防などインフラ基準の見直しを考えています。今後の気候変動の予測から、降水量が1時間あたり数十ミリから百ミリ単位へと増加することですが、それに耐え得るようにインフラを強化する必要があります。そのためコストが必要になるのです。

板岡 温暖化による気候変動がもたらす自然災害への防災コスト、いわば気候変動が起こった場合の適応コストと、CCSのようなCO₂排出削減にかかる予防コストとの比較ですね。

松岡 もう一点、CCSをビジネス化する視点もあります。技術的には、既にCCSは分離・回収、運搬、貯留までの安全性はほぼ実証済みで、あとはモニタリング技術を残すのみですので、技術的な面ではほぼ準備ができています。あとは、ビジネス化や普及を進めるにあたり、どう運用コストを削っていくかが重要になります。

板岡 モニタリングもコストが絡んできますね。ICNERでは、辻健准教授（CO₂貯留研究部門長／主任研究者）らの研究チームが、微動ノイズを活用したモニタリング技術開発など低コストで運用できる画期的な研究に取り組

んでいます。

松岡 私も辻先生の研究には期待しています。近い将来、コスト面の課題がほぼ解消されると感じています。

板岡 となると、他に何が課題として残るのでしょうか。

松岡 CCSに関する一番の課題は、スライプナーの事例も含めて、これまで貯留自体が完了した事例が世界に一つもないことです。つまり、貯留後に、貯留サイトをどれだけの間管理する必要があるのかまだ科学的合意がないのです。

板岡 その期間が、数十年なのかもっと長いのかということですね。

松岡 現在、CCSに関してもISO規格化が検討されていますが、その管理方法やコスト負担の分担まで含めたストーリーをしっかりと確立する必要があります。

ICNERに期待される役割

板岡 CCSを日本で推進するにあたり、ICNERにはどのような役割を期待されているのでしょうか。

松岡 ICNERには様々な分野から世界トップレベルの研究者が集まっているため、知恵の集積効果もたらす技術的ブレイクスルーを何より期待します。例えば、より効率的に岩石の隙間にCO₂

を圧入するために、分子動力学を活用しCO₂の動きを制御する研究が進められています。CO₂の圧入性能に関する技術も今後大事なポイントになります。また、CCSでは、CO₂を分離・回収するプロセスが全体にかかるコストの半分以上を占めるので、このプロセスに関するコストダウンを実現する技術開発にも期待したいところです。鉱物化に関しても、まずは分子レベルの反応から考える必要がありますので、ICNERのような研究機関の力が必要になります。

板岡 人材育成や優秀な人材の供給も私達の重要な役割と考えています。

松岡 そのとおりです。カーボンニュートラルな社会を実現するには、息の長い取り組みが欠かせません。そのためには若い力がどうしても必要です。板岡 今後、学生がエネルギー分野で活躍するためには、どんなことを学ぶ必要があるのでしょうか。

松岡 大学はあくまでも人生の通過点。大学の数年間に比べて、職業人生はおよそ30年以上続きます。ですので、学生の皆さんには大学を卒業後も社会から求められる人材となるため、学生時代から将来にわたり学び続ける能力を身につけていただきたいと思います。今後、優秀な人材を育て、羽ばたかせる場としても、ICNERには大きく期待しています。



松岡 俊文

京都大学大学院工学研究科
都市社会工学専攻ジオマネジメント工学講座 教授

1973年 東京理科大学 理工学部物理学卒業。1975年 同大学院理工学研究科修士課程物理学専攻修了。1995年 東京大学大学院工学系研究科博士取得。石油資源開発(株)研究員を経て、1998年 京都大学工学部助教授、2001年から現職。

板岡 健之

九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所
エネルギーアナリシス研究部門長代理 教授

1984年 東京芸術大学美術学部芸術学科卒業、1986年 千葉大学工学部工業意匠科卒業。1992年 ウィスコンシン大学マディソン校都市地域計画学環境自然資源計画専攻修了(Master of Science)。2011年 東京大学大学院工学系研究科博士取得。(株)富士通ゼネラル、みずほ情報総研(株)を経て2013年九州大学ICNERに兼任、同年11月から現職。



1 新規高酸素イオン伝導体 「 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ (NBT)」の発見

Ming Li, Martha J. Pietrowski, Roger A. De Souza, Huairuo Zhang, Ian M. Reaney, Stuart N. Cook, John A. Kilner, Derek C. Sinclair

Nature Materials (2013) DOI: 10.1038/nmat3782

酸素イオン伝導体は、燃料電池の電解質、酸素分離膜及びセンサなどに応用可能な重要な機能性材料として知られている。この研究で私達は、固体酸化物電解質燃料電池(SOFC)の低温作動化などへの応用が期待できる新規高酸素イオン伝導体「 $\text{Na}_{0.5}\text{Bi}_{0.5}\text{TiO}_3$ 」(NBT)を発見した。NBTは、鉛(Pb)を含まない圧電体だが、圧電または強磁性を持つ物質の応用において電流が漏れることが課題であった。今回この原因が、作製時に生じたビスマス (Bi) 欠損と酸素(O) 欠陥による酸素イオン伝導の影響であることを発見し、マグネシウム(Mg)をチタン(Ti)サイトに添加することで、 600°C で 0.01S/cm という大きな酸素イオン伝導を示すことを見出した。この発見は、新しい酸素イオン伝導性酸化物の設計に新しい方針を与え、SOFCの高出力化、低温作動化及び高温水電解による水素製造能力を大きく向上させる成果として今後の展開が期待できる。

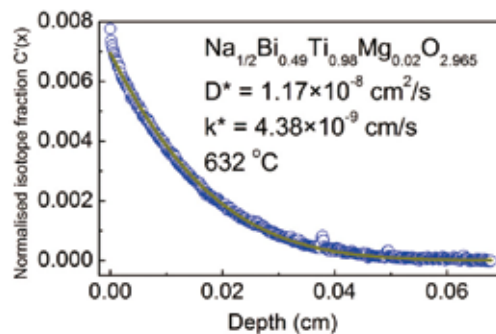


図1. マグネシウム置換物質の酸素拡散分析

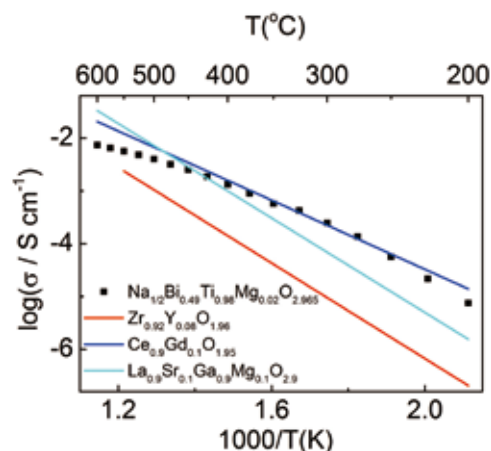


図2. NBTの酸素イオン伝導度と他の代表的な酸素イオン伝導体との比較

2 活性炭に対する ジフルオロメタンの 吸着等温線と吸着熱

Ahmed A. Askalany, Bidyut B. Saha, Kutub Uddin, Takahiko Miyazaki, Shigeru Koyama, Kandadai Srinivasan, Ibrahim M. Ismail

Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 58, P.2828-2834 (2013) DOI: 10.1021/je4005678

ジフルオロメタン (HFC-32) は代替フロンの一つであり、低温の冷凍サイクルやパッケージエアコン用の冷媒、また、それらで 사용되는冷媒番号 400 番台の非共沸混合冷媒の成分である。HFC-32の吸着データは、HFC-32を純冷媒として用いる熱圧縮型の冷凍サイクルの検討及び混合冷媒を使用したエアコン等の廃棄時の冷媒の分離回収への応用に有意義に活用できる。この研究では、粉体状活性炭及び繊維状活性炭に対するHFC-32の平衡吸着量を、 $25\sim 75^\circ\text{C}$ 、圧力 $1,400\text{kPa}$ の範囲で測定し、データを Toth 式および Dubinin-Astakhov 式によりフィッティングした(図1)。また、測定データから吸着相比容積、等量吸着熱を見積り、等量吸着熱の吸着量依存性及び相対圧依存性を解析した(図2)。これらのデータは、吸着式冷凍、ヒートポンプ及び蓄エネルギーシステム的设计・解析に不可欠である。

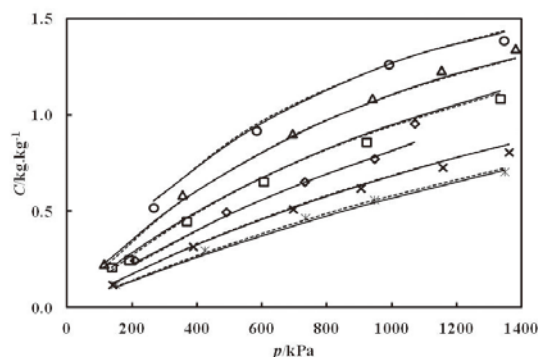


図1. 粉体状活性炭に対するHFC-32の平衡吸着量測定データとToth式、Dubinin-Astakhov式による吸着等温線(粉体状活性炭の平衡吸着量測定値とフィッティングカーブ)

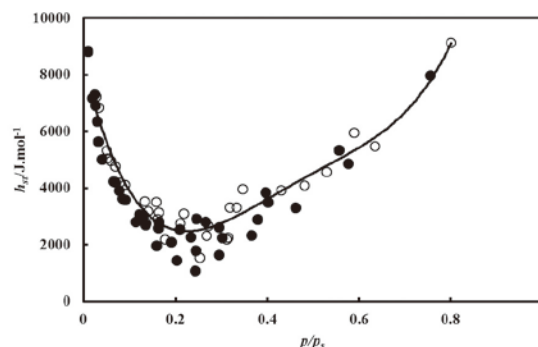


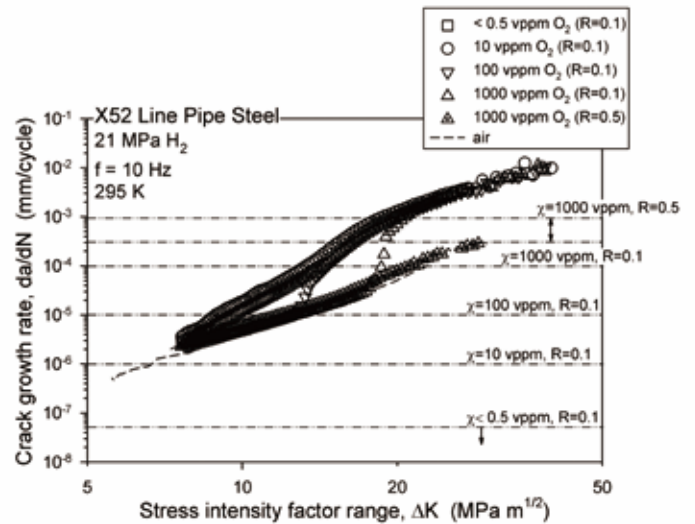
図2. 粉体状活性炭及び繊維状活性炭に対するHFC-32吸着熱の相対圧依存性

3 微量酸素を含む水素ガス中での鋼の疲労き裂進展加速に影響を及ぼす因子の解明

B.P. Somerday, P. Sofronis, K.A. Nibur, C.San Marchi, R. Kirchheim

Acta Materialia, 61, 16, P.6153-6170 (2013) DOI: 10.1016/j.actamat.2013.07.001

水素製造、水素貯蔵、及び水素輸送用の機器として、技術的に適した低強度鋼などのフェライト鋼では、水素により疲労き裂進展速度が劇的に加速される。このような疲労き裂進展の加速は、水素ガス中の微量酸素によって抑制されるという実験的根拠がある。しかし、その抑制効果は、き裂発生に影響する環境及び力学的因子の関数としてこれまで系統的に定量化されていなかった。この研究では、微量酸素の抑制効果を説明するための物理学ベースのモデルを構築し、微量酸素を含む水素ガス中での鋼の疲労き裂進展加速に、不活性環境での疲労き裂進展速度、試験周波数、平均応力及び酸素濃度が影響していることを明らかにした。そして、これらの因子の影響を考慮することによって、微量酸素を含む水素ガス中での、鋼の疲労き裂進展加速の開始点を予測することができた。



疲労き裂進展加速の開始点(シンボル)は、水素ガス中の酸素濃度(χ)と平均応力(R)の関数として容易に予測できる(破線)。

4 高圧ひずみ加工により塑性変形させたTiFe金属間化合物の水素吸蔵活性化メカニズムの解明

Kaveh Edalati, Junko Matsuda, Makoto Arita, Takeshi Daio, Etsuo Akiba, Zenji Horita

Applied Physics Letters 103, 143902 (2013) DOI: 10.1063/1.4823555

TiFe 金属間化合物は実用化が期待される水素貯蔵材料の一つである。しかし、水素吸蔵前に高温水素圧下での初期活性化処理を必要とするため、貯蔵システム全体として、コストが応用面での課題となっている。この課題に対し、高圧ひずみ(HPT)加工によりナノスケールのひずみを与えたTiFe化合物が、高温による活性化処理なく水素吸蔵することを報告したが、この研究では更にその活性化メカニズムを解明した。HPT加工したTiFeでは、Feリッチ相の島状析出物が表面に析出し、析出物の周りにき裂が発生しており、このき裂が水素の拡散経路となり活性化に寄与しているものと考えられる。原子拡散が促進されるHPT加工は、結果として材料表面への元素偏析・析出やき裂生成を引き起こす効果があると推測される。原料コスト面で有利なTiFe化合物を、高温高圧処理設備なく水素貯蔵システムに応用することができれば、システム全体の低コスト化が図れると同時に、システム的应用範囲拡大も期待できる。

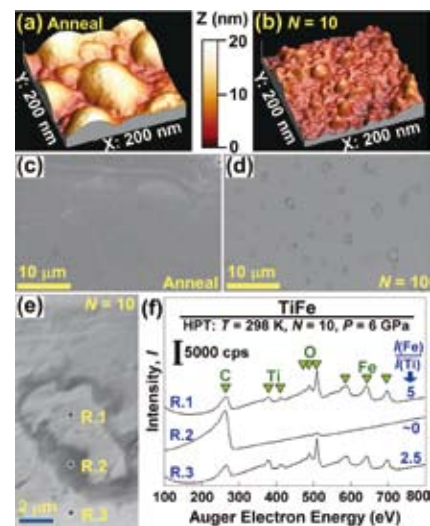


図1. 熱処理のみ(a, c, f)及びHPT加工(b, d, e, f)したTiFe金属間化合物のAFM, SEM像とオージェ(AES)スペクトル

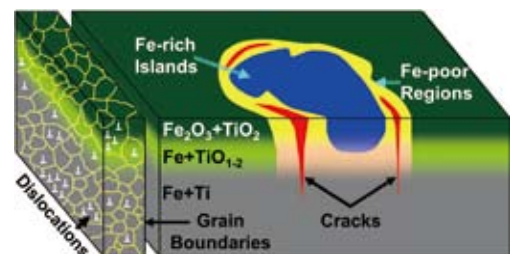


図2. HPT加工したTiFe金属間化合物の水素吸蔵活性化メカニズム

5 | ポリアミドアミンデンドリマーをポリエチレングリコール架橋体に固定した高分子膜の相分離構造がCO₂分離性能に与える影響

Ikuo Taniguchi, Shuhong Duan, Teruhiko Kai, Shingo Kazama, Hiroshi Jinnai

J. Mater. Chem. A, 1, P.14514-14523 (2013) DOI: 10.1039/c3ta13711b

大規模なCO₂発生源から、大気中へのCO₂排出を抑制させるため、分離膜を使いCO₂を分離させる。この研究では、ポリアミドアミン(PAMAM)デンドリマーの存在下で、ポリエチレングリコール(PEG)ジメタクリートを光架橋することによって、デンドリマーを固定化したCO₂分離膜を調製した。この高分子ブレンドの微細構造を、共焦点スキャンレーザー顕微鏡を用いて観察したところ、PAMAMリッチ相とPEGリッチ相からなる共連続構造を形成していること、そしてPAMAMリッチ相の平均ドメインサイズは、PEG鎖長により2.2-2.8ミクロンであることが分かった。この高分子ブレンド膜は、加湿下におけるCO₂とH₂の混合ガスからのCO₂の選択的分離において、非常に優れた分離性能を示す。この事実から、CO₂選択分離メカニズムの解明を行い、CO₂分離性能と相分離構造が密接に関連していることを発見した。このような高分子材料は、低コストでCO₂を分離できる新しい機能性材料として、今後石炭ガス化複合発電における、燃焼前排ガスからのCO₂分離への応用が期待される。

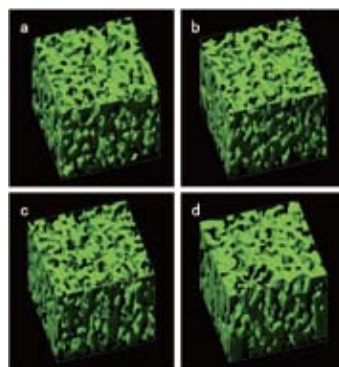


図1. PAMAM デンドリマーを種々のPEG長のPEG架橋体に固定化した高分子ブレンドの3次元像。平均EG単位(a)3, (b)9, (c)14及び(d)23。(イメージサイズ: 20 × 20 × 20ミクロン、PEGリッチ相のみ表示。)デンドリマー組成は50 wt%。

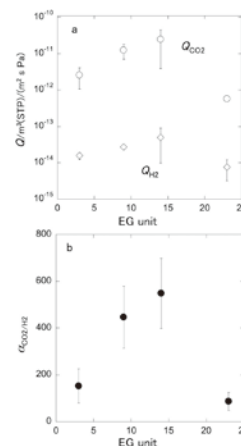


図2. CO₂分離性能とデンドリマー含有高分子膜のPEG長との関係。CO₂/H₂組成: 5/95(体積比)、相対湿度80%、温度: 298 K (a) ガス透過流速、(b) 選択性。デンドリマー組成は50 wt%。n = 3。

6 | カーボンナノチューブの電子準位を決定出来る「経験式」を確立

Yasuhiko Hirana, Gergely Juhasz, Yuhei Miyauchi, Shinichiro Mouri, Kazunari Matsuda, Naotoshi Nakashima

Scientific Reports 3, 2959 (2013) DOI: 10.1038/srep02959

単層カーボンナノチューブ(SWNT)は、螺旋度(巻き方)が異なった多くの混合物として合成され、これらはカイラリティ(n,m)SWNTで表記される。この(n,m)の値が異なると、電子準位(酸化電位、還元電位、フェルミ準位、仕事関数)が異なる。電子準位は、SWNTの基礎基盤特性であり、電子準位が異なると(n,m)SWNTの物性(電子的性質など)が異なる。私達は、SWNTの電子準位を「実験なし」で決定できる「経験式」を確立した。この成果は、カーボンナノチューブ科学に大きな学問的寄与を成すものである。電子準位を知ることによって、カーボンナノチューブの様々な分野(エネルギー、エレクトロニクス、ナノ材料及び複合材料など)への利用・応用に対して、目的の材料・システムのデザイン、構築をより適切に、精密に行なうことが可能となる。

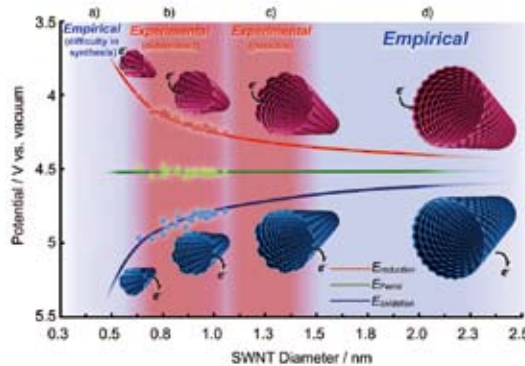


図1. SWNT直径(横軸)に対するそれらの電子準位(縦軸)

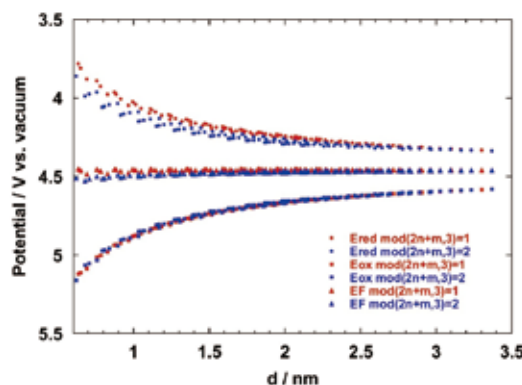


図2. 「経験式」で決定したSWNTの電子準位(縦軸). d: SWNTの直径

Event Information



I²CNER & ACT-C JOINT SYMPOSIUM

~ ADVANCED MOLECULAR TRANSFORMATIONS
FOR SUSTAINABLE ENERGY FUTURE ~

2014年1月30日(木)、九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所(I²CNER)と独立行政法人科学技術振興機構先導的物質変換領域(ACT-C)は、九州大学伊都キャンパス I²CNER ホールにおいて、「I²CNER & ACT-C Joint Symposium ~ Advanced Molecular Transformations for Sustainable Energy Future ~」を共同開催します。本シンポジウムでは、パデュー大学特別教授でノーベル化学賞受賞者である根岸英一氏及びテキサス大学オースティン校教授 Benny D. Freeman 氏による基調講演をはじめ、世界トップレベルの研究者による、低炭素社会の実現に向けた触媒による先導的な物質変換技術や、効率的な二酸化炭素の分離・濃縮技術の研究成果などの発表を行います。

(日時) 2014年1月30日(木) 9:30 - 20:00 (場所) 九州大学伊都キャンパス I²CNER ホール

(URL) <http://i2cner.kyushu-u.ac.jp/symposia2014/ja/index.html>

同時開催

I²CNER Symposia 2014

(日時) 2014年1月30日(木) - 31日(金)

(場所) 九州大学伊都キャンパス

(URL) <http://i2cner.kyushu-u.ac.jp/symposia2014/ja/program.html>

International Conference on Hydrogen Production 2014

(日時) 2014年2月2日(日) - 5日(水)

(場所) 九州大学伊都キャンパス I²CNER ホール

(URL) <http://ceram.material.tohoku.ac.jp/ich2p2014/>

AWARDS

第10回アジア熱物性会議

Significant Contribution Award

張興教授

(熱科学研究部門 主任研究者)

アジアにおける熱物性研究において重要な貢献を果たし、その業績が学術的に優秀であるとして、ATPC Significant Contribution Award を受賞しました。(2013年10月3日)

第10回アジア熱物性会議

Young Scientist Award

迫田直也 助教

(熱科学研究部門)

アジアにおける熱物性研究において、重要な貢献を果たした若手研究者であるとして、ATPC Young Scientist Award を受賞しました。(2013年10月3日)

第23回日本金属学会 奨励賞(組織部門)

中田伸生 助教

(水素適合材料研究部門)

鉄鋼材料の高機能化を目指した組織制御に関する研究で卓越した業績を挙げ、将来材料科学分野を背負う人材になることが期待されるとして、奨励賞(組織部門)を受賞しました。(2013年9月17日)

フラーレン・ナノチューブ・グラフェン学会

飯島賞

藤ヶ谷剛彦 准教授

(燃料電池研究部門)

「カーボンナノチューブで作製した高耐久性固体高分子形燃料電池電極触媒」の研究成果が、ナノチューブ及びその関連物質で、理論・実験・応用開発において優秀であるとして、飯島賞を受賞しました。(2013年9月5日)

日本機械学会 マイクロ・ナノ工学部門

優秀講演論文表彰

伊田進太郎 准教授

(水素製造研究部門)

石原達己 教授

(副所長 水素製造研究部門長 主任研究者)

第4回マイクロ・ナノ工学シンポジウムで発表を行った「二次元半導体ナノ結晶を用いた水分解光触媒の開発」の研究成果が優秀であったとして、優秀講演論文表彰を受けました。(2013年9月8日)