

Energy Outlook

International Institute for Carbon-Neutral Energy Research

June
2015

日本でのCCS、 いよいよ大規模実証試験へ ～苫小牧プロジェクトと今後の展開～

Special Interview

日本 CCS 調査株式会社
代表取締役社長

石井 正一

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)
CO₂ 貯留研究部門長 主任研究者 准教授

辻 健

2016年4月からの CO₂圧入に向けて

辻健(以下・辻) 苫小牧でのCCS実証プロジェクトが、2016年4月からのCO₂圧入に向けて秒読み段階に入っています。これからの日本の気候変動対策にとって、このプロジェクトがもつ意味をどのように考えれば良いでしょうか。

石井正一(以下・石井) 2015年の年末にCOP21(国連気候変動枠組条約(UNFCCC)の第21回締約国会議)がパリで開催されます。この会議では2020年以降の世界の気候変動対策の大枠が決まる見通しです。既に各国からプロポーザルが出されており、節目の年としてCCSに対しても世界的に認知が高まっています。まさに絶好のタイミングで、日本でも気候変動対策の切り札となるCCS実証プロジェクトの準備が最終段階に入りました。これが本格稼働すれば、日本におけるCCSの位置付けが一段と明らかになるでしょう。

辻 これまでのところ、準備は順調に進んでいると考えて良いのでしょうか。

石井 3本の観測井を含めてモニタリング用の設備は、ほぼ完成しました。圧入井についても、1本は既に掘り終わっています。2015年3月から2本目の井戸、地下1100メートル層にCO₂を貯留する全長3500メートルの井戸を掘り始

Special Interview

Takeshi TSUJI
Shoichi ISHII

日本でのCCS、 いよいよ大規模実証試験へ ～苫小牧プロジェクトと今後の展開～

日本における CCS (Carbon dioxide Capture and Storage / 二酸化炭素回収・貯留) の実証プロジェクトが、2016 年本格稼働する。全国 115 カ所もの候補地点から絞り込まれ、さまざまな実地調査と国の検討会を経て、ゴーサインの出た北海道苫小牧市でのプロジェクトである。2012 年のプロジェクト開始から 4 年が経過する 2016 年には CO₂ の圧入が始まる。現時点での進捗状況と課題、今後の展望はどのようなものだろうか。

辻 健

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)
CO₂ 貯留研究部門長 主任研究者 准教授

2007年東京大学理学系研究科博士課程修了。2007年、京都大学助教を経て2012年にカーボンニュートラル・エネルギー国際研究所 (I²CNER) 着任。海洋研究開発機構やスタンフォード大学での研究員、統合国際深海掘削計画 (IODP) では共同主席研究者。固体地球から宇宙まで幅広い分野を研究しており、I²CNERではCO₂地中貯留という多分野横断的な研究を部門長として取りまとめている。現在は、地下構造や物性の推定、モニタリング技術の開発、多層流挙動の解明に力を入れている。



石井 正一

日本 CCS 調査株式会社 代表取締役社長

1973年新潟大学人文学部経済学科卒業。同年石油資源開発株式会社入社。財務課長や企画室長などを歴任の後、2003年同社取締役、2005年常務執行役員、2006年常務取締役、2014年代表取締役副社長。日本CCS調査株式会社では、2008年の同社設立時から代表取締役社長を務める。日本メタンハイドレート調査株式会社、福島ガス発電株式会社の代表取締役社長も兼任するなど、日本のエネルギー業界で幅広く活躍している。



め、現時点で1400メートルほど掘り進んでいます。陸上の設備も相次いで完成しており、2015年度後半には試運転に入る予定です。

辻 まさに圧入直前のフェーズですね。

ここに到るまでにさまざまな課題を解消してこられたと思います。

石井 そのとおりです。中でも東日本大震災以降、CCSを取り巻く世間の見方が大きく変わりました。地震国日本において、断層の問題が関心を集めるのはやむを得ないことです。私たちとしては、まず貯留地点として、断層を避けたエリアを選択した上で、貯留層の上に遮蔽層がきちんと存在していることを確認しています。もう一点、忘れてはならないのが地元への理解を得ることです。苦小牧では私たちの活動に対して、地元の方からのサポートも得ています。

CCS推進のため I²CNERに求められる役割

辻 I²CNERにはCCSに関わる部門として、CO₂貯留研究部門、CO₂分離・転換研究部門、エネルギーアナリシス研究部門があります。CCSの普及を考えた時、私たちにはどのような研究が求められるでしょうか。

石井 私はこれまで40年以上、石油資源開発に携わってきました。もともと技術屋ではなく事務畑ですが、長年の経験から言いたいのは地上と地下の構造の違いです。

辻 もちろん地上と地下では大きな違いがあることは理解できますが、具体的にどのようなことでしょうか。

石井 考えていただきたいのは、地震が起こった時の地下への影響です。石油や天然ガスなどの大規模輸送パイプラインは、地下1.5メートルに埋設してあります。新潟と仙台を結ぶガスのパイプラインも同様です。これが東日本大震災でどのような被害を受けたかご存じでしょうか。

辻 被害はほとんどなかったと聞いています。

石井 だからこそ仙台市ではいち早く、3月下旬にガス供給が復活したのです。阪神・淡路大震災の時も、ガス管への被害はほとんどありませんでした。CCSに関する話でも、中越地震の際に長岡のプラントで何かトラブルがあったかといえれば、事故はまったく起きていません。

辻 地震が引き起こす揺れの影響は、確かに地上と地下で大きく異なることが、よく知られています。

石井 同じ震度の地震でも、地上と地下では受けるダメージに大きな違いがあるのです。東日本大震災では、津波の影響もあり港にあるタンクが破壊され、あたり一面が火の海になりました。では、仮にCO₂のサイトが地震に襲われた際に、地下からCO₂が漏れだす可能性は一体どれくらいあるでしょうか。漏れた後の心配をする風潮がありますが、地中天然ガスの田のガスは1000年以上漏れていないという事実があります。その現状をより理解できるような、例えば地上に設置されたタンクが被災する確率と、地下のCO₂からCO₂が漏れだす確率などを、科学的に比較・検証していただけることを期待します。

辻 万が一、高濃度のCO₂が漏れだしたときに、何が起こるのかも冷静に考える必要があります。

石井 そのとおりです。そもそも、人が吐いている息の中にCO₂は含まれているのです。そう考えれば、CO₂が有害な物質の処分場のように危険視されるのは、大いなる誤解に基づいているといえるのではないのでしょうか。また、気候変動の一因と言われているような悪いイメージではなく、エネルギー源としてCO₂を扱う研究にも期待します。



CCSからCCUへ

辻 少し気の早い話かもしれませんが、苦小牧プロジェクトの後、日本でのCCSはどのように展開されていくとお考えですか。

石井 長岡での実験が1万吨規模のプロジェクトだったのに対して、2020年頃の実用化段階では、年間1プラントにつき100万吨規模と言われています。今後は年間1億トン規模の貯留を前提として適地を見つけると共に、技術課題や事業課題などを整理していく必要があります。1億トンレベルになれば、日本でのCO₂排出量の1割程度をCCSで担うことが可能になります。

辻 現実問題として、それはいつぐらいの話になりそうでしょうか。

石井 長岡での1万吨貯留が2003年

のことでした。それから約10年で100倍の100万吨にスケールアップ可能な実証試験までできています。今後の技術進歩を計算に入れるなら、遅くとも10年以内、早ければ7〜8年で1億トン規模の貯留が始まる可能性は高いでしょう。

辻 ただ、CCS普及にはコスト問題を解消する必要があります。例えば二国間クレジットなどが制度化されれば、CCSプロジェクトに民間企業が参入する可能性も出てくるのではないのでしょうか。

石井 世界的には、CCSはEOR (Enhanced Oil Recovery / 石油増進回収法)として石油や天然ガスの増産に伴う施設として位置付けられています。とはいえ大規模なガス田などのない日本で、この考え方を導入することは難しいでしょう。コスト問題に関しては、CO₂に対する考え方を根本的に変えることも一案です。

辻 具体的に、例えばCCU (Carbon dioxide Capture and Utilization / 二酸化炭素回収・活用)のことですね。

石井 おっしゃるとおりです。CO₂は貴重な資源となり得るのです。一例を挙げれば、苦小牧では既にトリジェネレーションに取り組んでいる企業もあります。コジェネレーションは熱電併給ですが、ここから出る排ガスからCO₂を分離・回収し、植物工場で活用しています。空気中のCO₂濃度を高めることで、植物の生育が

早くなるのです。

辻 CO₂の利用については、将来的に人工光合成も期待できそうです。CO₂が新たな、しかも画期的なエネルギー源となる可能性が出てきます。

石井 その時には、民間企業もCO₂を積極的に貯めるようになるのではないのでしょうか。CCSの意味合いも大きく変わり、地下にある巨大なCO₂貯留タンクとみなされるでしょう。必要な時にバルブをひねってCO₂を取り出し人工光合成によってエネルギーを作り出したり、石油製品の原料として使うわけです。

辻 実証試験で使われているモニタリング研究の成果に加えて、他の研究テーマとして取り組んでいる地下貯留技術も役立ちそうです。

石井 時間軸をもう少し長く取れば、バクテリアを利用してCO₂をメタンガスに変える手法もありますが、まずはCO₂を大量に貯められるサイトを探し、より安くCCSを行えるようにすることが先行されると考えます。

TCNERの若い力に望むこと

辻 CO₂貯留層がエネルギー貯留施設になり得るなどとは、少し前までは誰も考えていませんでした。実際、エネルギー分

野で起こる変化には強烈なスピード感があります。そのような分野で活躍しようとしている若い人たちに、何を期待されますか。

石井 まず大学を出ることは、一つのプロセスに過ぎないと捉えてほしいですね。30代、40代と各年代に応じて求められる役割は変わってきます。時々の状況に適切に対応するためには、常に化する世界情勢や経済情勢に目を配ることも必要です。

辻 CCSに対する世間の目もずいぶん変わってきました。

石井 少し前は、CCSは地震を引き起こすからダメだ、などと言われたこともありました。今や苦小牧CCSは国内外から注目を集めており、地元でも理解が進んでいます。

辻 CCSに対する全国的な認知度を、より高めていくこともこれからの課題ですね。

石井 さまざまな課題を抱えながらの実証試験が始まります。目に見える成果を出し、将来の年間貯留1億トンレベルまで可能な限り早くもっていく。そのプロセスで必要となるのが、若くて豊かな知性であることは間違いありません。TCNERの若い力には、大いに期待しています。



1 多孔質岩石中の小規模不均質構造がCO₂-水の二相流体挙動に与える影響について実験的手法及び数値シミュレーションによる検討

Keigo Kitamura, Fei Jiang, Albert J. Valocchi, Shun Chiyonobu,

Takeshi Tsuji and Kenneth T. Christensen

Journal of Geophysical Research: Solid Earth

DOI: 10.1002/2014JB011281

この研究では、多孔質砂岩中の小規模不均質構造(葉理面)がCO₂-水二相流体挙動、特に超臨界CO₂の挙動に大きな影響を与えることをコアスケール(mm-cm)の弾性波速度測定実験と孔隙スケール(nm- μ m)のLattice Boltzmann Method (LBM) によるシミュレーションから明らかにした。多孔質砂岩中に存在する葉理面は周囲の多孔質部分より小さな孔隙をもつ。このような葉理面をもった含水の多孔質砂岩に超臨界状態のCO₂を注入したとき、CO₂は毛管圧の影響を受け葉理面を通過できないことがわかった。この結果は孔隙内部におけるCO₂-水の二相流体挙動を、岩石外部から測定できるパラメータである弾性波速度から観測可能であることを明らかにした。また多孔質砂岩中の葉理面が貯留層内部において圧入されたCO₂の浮力に伴う移動を妨げる補助的な遮蔽層となることが判明し、これらの構造不均質がCCSの安全性向上に寄与していることを示した。

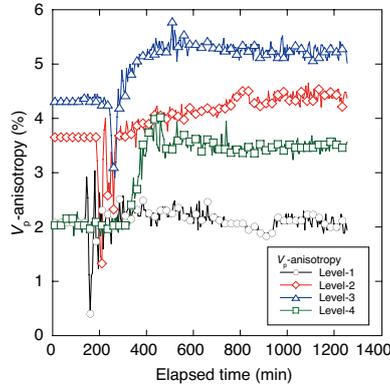


図1 CO₂圧入時間に伴う弾性波速度異方性の変化。CO₂注入端に近いLevel-1及び2は顕著な異方性の変化は見られないがLevel-3及び4は明確な異方性の増加が見られる。これは岩石の孔隙構造に規制された異方的なCO₂流動がLevel-3より上位には存在していることを示唆している。

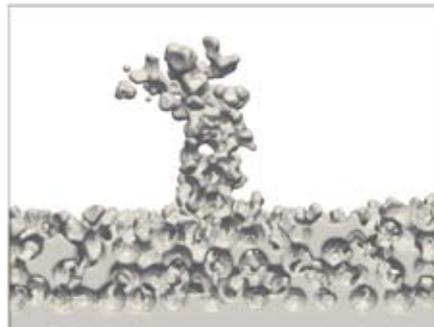


図2 LBMによるCO₂流動シミュレーション結果。孔隙率分布の異なったスリット上の構造を伴うことにより異方的なCO₂流動を再現した。

2 相溶性架橋剤を用いたポリアミドアミン dendrimer 含有高分子膜のCO₂分離性能向上

Ikuo Taniguchi, Teruhiko Kai, Shuhong Duan,

Shingo Kazama and Hiroshi Jinnai

Journal of Membrane Science

DOI: 10.1016/j.memsci.2014.10.015

次世代CO₂分離回収技術として膜分離法が注目されており、CO₂透過性の向上が研究目標となっている。ポリアミドアミンの極めて高いCO₂親和性を利用して、この化合物をPEG架橋体に内包したCO₂分離膜の開発を行ってきた。この分離膜は、CO₂/H₂からのCO₂分離に有効であり、石炭ガス化複合発電におけるCO₂分離回収への適用を目指している。その実用化には、高圧下で良好なCO₂分離性能(透過流束 100 GPU)が要求される。既存高分子膜では、ポリアミドアミンと高分子マトリックスの相分離により高圧下で分離性能が著しく減少したが、開発した相溶性架橋剤の添加により、力学的物性の改善と相分離構造の解消を同時に達成し、高圧下でも薄膜化によりCO₂透過性を200倍向上(2.2 GPU)させることに成功した。CO₂透過促進触媒や膜構造の最適化により目標性能の達成を図る。この高分子膜は、天然ガス改質におけるCO₂フリー水素製造への展開も可能である。

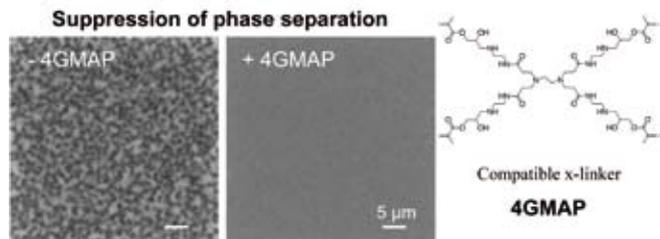


図1 共焦点顕微鏡による4GMAP非含有(左)/含有(右)高分子膜の微細構造と相溶性架橋剤4GMAPの化学構造式

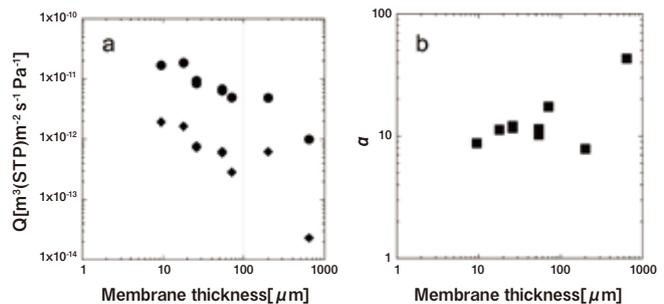


図2 相溶性架橋剤含有高分子膜の膜厚とCO₂分離性能との相関
操作温度: 313 K, 相対湿度: 90%, 全圧: 0.70 MPa, CO₂分圧: 0.56 MPa
a) ●: CO₂透過流束, ◆: H₂透過流束, ■: CO₂分離係数
膜組成: PAMAM/PEGDMA/4GMAP = 50/42.5/7.5 wt%

3

ライデンフロスト温度に及ぼす周囲圧力の影響

Daniel Orejon, Khellil Sefiane and Yasuyuki Takata
Physical Review E, Volume 90 Issue 5, 053012 (2014)
DOI: 10.1103/PhysRevE.90.053012

高温面と液滴の相互作用を詳細に予測し制御することは、冷却や液滴の操作のような様々な応用分野において非常に重要である。この相互作用には、液滴が接触する基板の温度に応じて、図1に示すように明確に区別することが可能な3つの異なる領域が存在する。すなわち、濡れ領域、遷移領域及び浮遊領域(ライデンフロスト領域ともいう)である。さらに、上述の液滴と基板の物理的な相互作用は圧力にも依存することが分かった。本論文において、私達はライデンフロスト温度(T_L)の系圧力への依存性について、統合理論を導入した。この物理的方法は、クラウジウス・クラペイロンの式とのアナロジーに基づくものであり、その結果である $1/T_L \log_{10}[P]$ の関係を図2に示す。ライデンフロスト現象をより低温で引き起こしたり予測できるようにすることで、この現象がより実用的になり、結果としてCO₂排出削減に寄与する低エネルギーコストでの利用が可能となる。

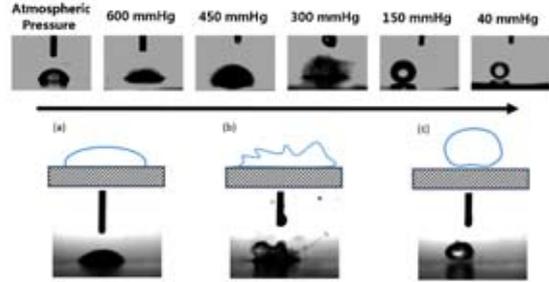


図1 異なる圧力下で加熱された基板上的液滴の画像。(a) ぬれ領域 (b) 遷移領域 (c) 浮遊領域

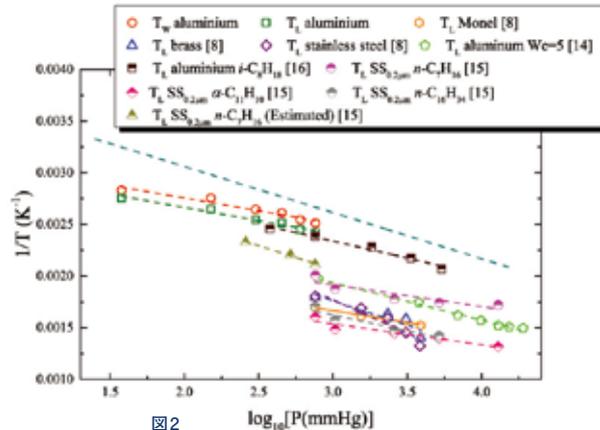


図2 $1/T_L$ と $\log_{10}[P]$ の実験結果と直線の関係

4

ペロブスカイト酸化物Sr(Ti,Fe)O_{3-α}の熱膨張及び化学的膨張の関連性の解明

Nicola H. Perry, Jae Jin Kim, Sean R. Bishop and Harry L. Tuller
Journal of Materials Chemistry A
DOI: 10.1039/C4TA05247A

様々な燃料を用いる事ができ、高い効率で発電できる固体酸化物形燃料電池(SOFC)の寿命は、運転中に起こる酸化物の熱や化学的な膨張による機能の低下によって制限されている。そのため本研究では、ペロブスカイト形酸化物の化学的膨張の要因を、試料のその場観察結果と原子論的シミュレーションを組み合わせ明らかにした。今回は、1)新たな電極材料であるSr(Ti,Fe)O_{3-α}の化学的膨張係数(CCEs)を様々な条件で測定、2)低酸素状態で起こる熱膨張係数の上昇と高温域で起こるCCEの上昇の関係性を明らかにすること、3)多価のカチオンによる電極材料中での電荷の非局在化が、CCEの低下に重要な影響を及ぼすというこれまでの結果を確認する事に主眼を置き評価を行った。これらの結果から、この研究では低い化学的膨張係数をもつペロブスカイトの設計原理を新たに確立する事ができた。

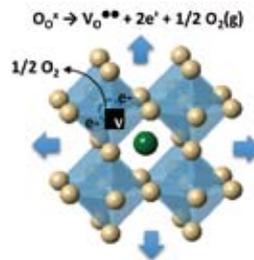


図1 化学的膨張を引き起こすペロブスカイト形酸化物の還元プロセス。生成する電子は、多価のカチオンに局在化することにより、膨張を引き起こすことがある。

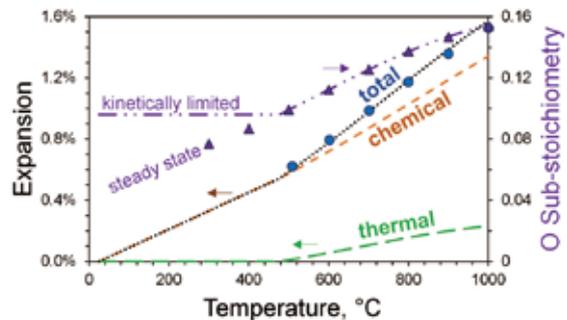


図2 酸素当量、等温過程でのCCE及び等化学量論状態での熱膨張を網羅的に評価することにより、図に示したようなフィッティングを行う事ができる。このフィッティングから、相互に強く影響を及ぼしている熱的、化学的膨張の寄与を分けることができるため、加熱過程の空气中で起こる全ての熱的、化学的膨張が完全にモデル化する事が可能となる。



5 マグネシウム膜における水素化反応速度と水素化物形成メカニズム：結晶化駆動力効果の再検討

Helmut T. Uchida, Stefan Wagner, Magnus Hamm, Jochen Kürschner, Reiner Kirchheim, Björgvin Hjörvarsson and Astrid Pundt
Acta Materialia 85 (2015) 279–289
DOI: 10.1016/j.actamat.2014.11.031

マグネシウムは軽い元素でかつ一原子当り2個の水素を吸蔵するため、液体水素より高い密度で水素を貯蔵することができる。このため、マグネシウムは燃料電池自動車の水素貯蔵タンクなどへの応用が期待されているが、水素化反応速度が遅いことが実用化を妨げる要因となっている。この原因として表面に水素化物(MgH₂)が形成されると内部に反応が進行しないことが挙げられる。本研究では、マグネシウムにおける高密度の粒界が水素化反応を促進する効果をもつことを示した。これはMgH₂が粒界では形成されないからであると考えられる。すなわち吸蔵反応中の結晶化駆動力を低下させることにより、MgH₂の反応阻害効果も弱められる可能性がある。本研究ではこの駆動力が小さいと水素化物核生成が抑制され、水素化物が層状に成長するより先に、深さ方向に反応が進行すると説明することができた。水素化物形成の反応速度を知ることで、エネルギー貯蔵効率の高いマグネシウム合金を開発することができるようになり、特に太陽や風力エネルギーのような再生可能エネルギーによって生じる過剰エネルギーを貯蔵することに寄与する。

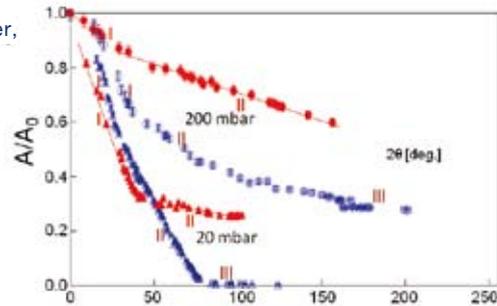


図1 厚さ2.8μm(赤印)及び0.5μm(青印)のマグネシウム膜を水素ガスに曝したときのMgH₂に覆われていないMg表面の割合(A/A₀)を反応時間の二乗根に対してプロットしたもの。水素ガス圧20 mbar(三角)と200 mbar(丸)はそれぞれ水素化物生成のための駆動力が低い場合と高い場合に相当し、駆動力の低い方で反応速度が速いことを示す。

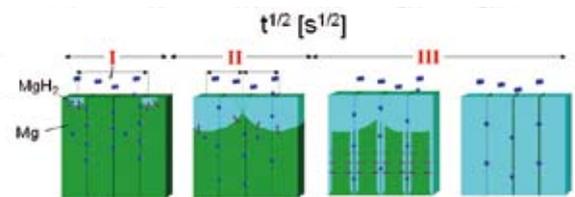
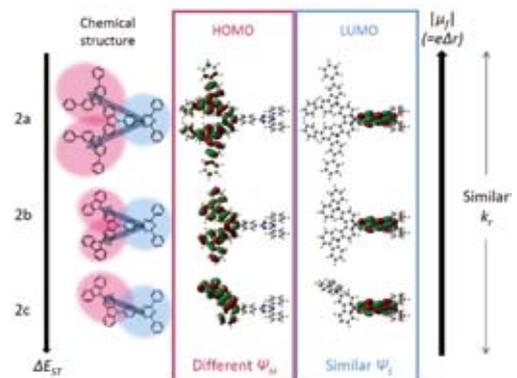


図2 MgH₂生成を三段階で表した模式図。水素化物の核生成と成長(ステージI)、水素化物の結合(II)、全体が水素化物になるまで粒界に沿って水素原子のより速い拡散が起こる(III)。粒界は垂直線、水素原子は濃青点で示している。

6 熱活性化遅延蛍光材料に基づく高効率青色有機LED

Shuzo Hirata, Yumi Sakai, Kensuke Masui, Hiroyuki Tanaka, Sae Youn Lee, Hiroko Nomura, Nozomi Nakamura, Mao Yasumatsu, Hajime Nakanotani, Qisheng Zhang, Katsuyuki Shizu, Hiroshi Miyazaki and Chihaya Adachi
Nature Materials
DOI: 10.1038/nmat4154

九州大学最先端有機光エレクトロニクス研究センター(OPERA)では、これまでに新しい熱活性化遅延蛍光(Thermally Activated Delayed Fluorescence: TADF)に基づく高効率有機LEDを報告してきた(Nature 2012)。しかしながら青色発光素子の実現は極めて困難であり、新材料の開発が強く期待されていた。本研究では、トリアジンとカルバゾール、トリフェニルアミン骨格を母核に量子化学計算に基づいた材料設計を進めることで、内部量子効率が100%に達する青色有機LEDの開発に成功した。本研究により小さな励起一重項と三重項状態間のエネルギー差(ΔE_{ST})を形成することと、励起一重項からの放射遷移の速度定数(k_r)を向上させるための分子設計が明確になった。本研究成果は、I²CNERの研究において低環境負荷のデバイスを提供するとともに、今後のエネルギーハーベスティングデバイスへの研究展開に繋がることに寄与する。そして、高効率有機LEDの実現は無機LEDでは困難な面状発光や曲面化が容易であることから、大面積・軽量・フレキシブル型のモバイルディスプレイや照明用途への展開が期待される。



高効率青色発光を可能とする熱活性化遅延蛍光材料。本分子設計によって、大きな振動子強度(μf)と小さな励起一重項-三重項エネルギーギャップ(ΔE_{ST})の両立が可能となった。HOMO、LUMOの軌道はTD-DFT法(Gaussian09/B3LYP/6-31G(d))によって計算された。