CEE Newsletter

No.4
April
2009

東京大学エネルギー工学連携研究センター
Collaborative Research Center for Energy Engineering（CEE）

巻頭言

東京大学
理事・副学長　**前田　正史**

エネルギー工学連携研究センターが設立され、1年以上が経過しました。本センターは、生産技術研究所と工学系研究科が、それぞれの力を結集して、さらにシナジー効果を加えて、東京大学のエネルギー研究の拠点となることを目標として設立されました。部局を超えて作られたセンターとしては東京大学では最初のもであったと思います。この1年間、エネルギーや資源を取り巻く状況は、大きな変化がありました。ますます予断を許されない状況となってきています。2008年7月には原油価格が史上最高値を記録しましたが、その後の金融危機の影響を受けた低迷へと急速に移り、歴史的にもまれな大幅な乱高下を示したことは記憶に新しい特徴的なエネルギー資源の動向かと思います。原油に限らず、急速な成長を遂げる発展途上国における様々な金属資源やエネルギーの需要拡大、産出国の政情や資源ナショナリズム、投機資金の動向などを受けた需給バランスや価格形成が複雑さを増し、また、地球温暖化といった環境問題が顕在化しているなか、グリーンニューディールに代表されるように、個別国家単位あるいは国家集団において、資源、環境、経済の問題への包括的な対策の議論が始まっています。本センター設立の趣旨は、基盤となる工学的な技術研究から持続可能な社会の実現をめざした戦略立案・提言まで、全体を俯瞰した長期ビジョンのもとでエネルギー工学の学問体系を構築しながら、エネルギーと環境問題の同時解決に貢献することであり、まさに、このような時代の要請に応える学術研究を担うグループとして着実な成果を示してゆくことが重要であると考えています。

資源・エネルギーの大部分を輸入に依存している我が国において、持続可能な産業基盤の構築に加え、先進国として国際的な資源問題、環境問題へのリーダーシップを示し続けてゆくことは、決して平坦な道のりではないでしょう。このなかで、エネルギー工学分野の研究に課せられる役割は大きく、東京大学においても、多数の研究者が広範な分野で様々な視点でエネルギーに関する研究を進めています。エネルギー工学連携研究センターには、広範なエネルギー研究を集約する学内外に開かれた拠点としての役割を果たしながら、学術研究を基盤としつつ先進的な技術開発への挑戦と合理的な長期戦略の立案を両輪として、将来のエネルギー工学の基盤となる研究を推進し、実績をあげてゆくことを期待しています。

東京大学における燃料電池および二次電池・キャパシタの研究

実証段階にある固体高分子形燃料電池や固体酸化物形燃料電池、電気自動車やプラグインハイブリッド車など輸送部門で利用される二次電池やキャパシタ、再生可能エネルギーの導入促進のための大容量電力貯蔵用二次電池など、次世代エネルギー技術において電池技術は非常に重要になりつつあります。本学においても、これらの分野において幅広く研究が行われており、その内容をご紹介します。

燃料電池の開発

○固体高分子形燃料電池に関する研究

堂免・久保田研究室
（堂免一成教授、久保田純准教授）
工学系研究科化学システム工学専攻
http://www.domen.t.u-tokyo.ac.jp/

固体高分子形燃料電池用白金代替触媒の開発

固体高分子形燃料電池（PECF）の電極触媒に用いられる白金は希少で高価であることがPEFCの普及の大きな障害のひとつである。また、白金系触媒においてもカソードにおける大きな酸素還元過電圧や強酸条件下での白金の溶出など触媒材料として問題も多く、白金触媒を凌駕し、これを代替できる触媒の開発が望まれている。当研究室では資源量が豊富な金属からなる窒化物や酸窒化物によるPEFCのカソード触媒の開発を目指している。Nb, Ti, Ta, Zrなどの4族、5族元素を中心にアンモニアと反応させることにより窒化物や酸窒化物を合成し、その触媒性能や物性についての評価を行っている。

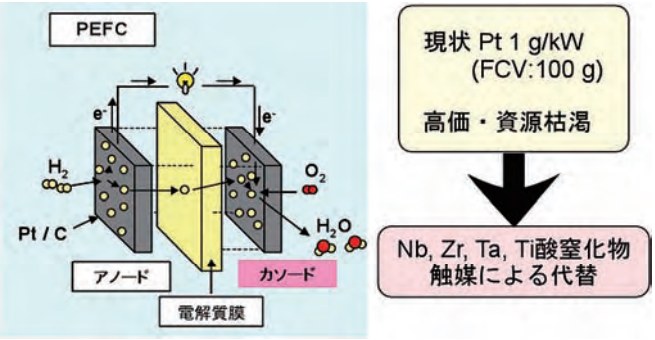


図1：非白金燃料電池電極触媒

PECFの電極触媒においては触媒表面の活性点の構築のみならず、いかに集電体との電気的接合のとれた高分散な触媒微粒子を構築するかが性能向上の鍵となる。通常のPEFCではカーボンブラック粉末を導電性担体として用い、この上に数ナノメートルの白金粒子を担持して用いている。窒化物や酸窒化物材料は微粒子として担体上への担持することが困難であるが、錯体重合法によりカーボンブラック上に金属前駆対を高分散に付着させた後に窒化する方法によって高性能な触媒を調製できることを見出している。また、アークプラズマを用い金属種を直接カーボンブラック粉末表面に堆積させ、放電ガスによって窒化することによって高性能な触媒を調製できる方法も開発した。Nb, Ti, Ta, Zrの酸窒化物触媒は酸素還元電位が0.8-0.9 V（RHE）でありPt触媒の約1.0 V（RHE）には未だ達していないが、高表面積化や酸窒化物触媒に対して最適なセル設計によって白金を用いないPEFCの実現へ向けた研究を行っている。

尾嶋研究室
（尾嶋正治教授、原田慈久准教授）
工学系研究科応用化学専攻
http://www.oshimalab.t.u-tokyo.ac.jp/

高輝度放射光を用いた固体高分子型燃料電池用カーボンアロイ触媒の解析

固体高分子型燃料電池用正極材料として白金/カーボン触媒が用いられているが、白金は高価であること、希少金属であること、また白金による電解質膜の劣化などの問題がある。そこで我々は白金を使わないカーボンアロイ触媒を開発するNEDOプロジェクトに参加し、高輝度放射光を用いて酸素還元触媒機能のメカニズムを解明してさらに高性能触媒の開発をめざしている。

放射光を用いた以下に示す各種分光法の組み合わせにより、燃料電池カソード触媒の活性点として窒素が積極的に関与している可能性を明らかにした。具体的には、軟X線吸収・発光分光による非占有・占有価電子準位の解析や硬X線光電子分光による内殻準位の解析によってC原子3つがNの周りに平面配位するグラファイト置換型（図1）が最も触媒活性と強い正の相関を示すことが分かった。また、原料中に含まれる遷移金属元素の役割についても調べ、存在量は極微量（0.1%以下）であり、触媒活性に寄与していない可能性が高いことを見出した。さらに電子状態計算プログラムGAMESSによる理論解析を行った結果、いずれの測定手法でも酸素還元活性の高い試料ほど、グラファイト型の窒素に起因する構造が顕著に現れることが裏付けられた。

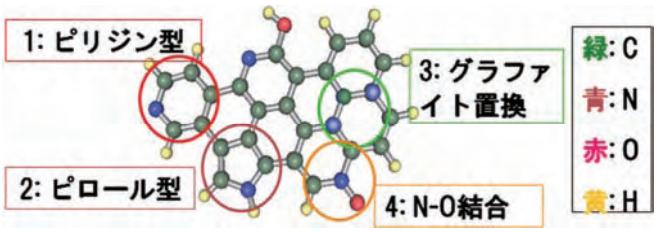


図1：放射光で決定したカーボンアロイ触媒中窒素原子の配位構造（4種類）

以上により、今後の触媒材料開発には、窒素の含有率の高いカーボンアロイ型材料を作ること、しかもグラファイト置換型の窒素が増えるような試料の合成法を開発していくことが、カーボンアロイ型材料が白金系正極触媒に匹敵する触媒性能を発揮するために不可欠であるという結論を得た。

今後は、SPring-8の東京大学放射光アウトステーションにおいて超高輝度放射光を用いて発電中の燃料電池の電子状態をin situで解析し、劣化メカニズムの解析などを行っていく。

寺井・鈴木研究室
（寺井教授、鈴木准教授、佐々木特任助教）
工学系研究科附属総合研究機構原子力国際専攻原子力専攻

http://lohas.t.u-tokyo.ac.jp/yunen/

寺井・鈴木研究室では、原子力発電により得た電気を用いて製造した水素をエネルギーキャリアとする水素エネルギーシステムの確立により化石燃料消費量を低減してエネルギーセキュリティを向上させる立場で燃料電池の研究を進めている。

PEFC用の新規電解質膜

日本原子力研究開発機構・高崎研究所（原研高崎）と共同で、架橋ポリテトラフルオロエチレン（PTFE）電解質膜の構造および物質輸送特性に関する研究を行っている。原研高崎において開発された新規な電解質膜の架橋PTFE電解質膜は、放射線グラフト重合法を用いた簡便な方法で合成できるため、低コストで量産される経済的利点がある。また、主鎖に架橋構造をもつため、膜強度やメタノール透過性においてNafionよりも優れており、ダイレクトメタノール燃料電池への応用も期待されている。

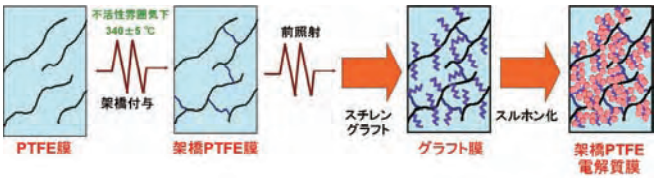


図1：放射線グラフト重合法による架橋PTFE膜の合成手順

菊地研究室（菊地隆司准教授）
工学系研究科化学システム工学専攻

http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/laboratory_kikuchi.html

固体高分子形燃料電池用水素製造触媒材料の開発

固体高分子形燃料電池の燃料となる水素は、天然ガスやLPG、灯油、アルコールやジメチルエーテル（DME）といった燃料の改質により製造される。本研究室では、複合酸化物を利用した、高活性で高耐久性の改質触媒材料の開発と、改質ガスに含まれるCOを除去する触媒材料の開発を行っている。Cuを含むスピネル酸化物を利用した、350℃以上でも安定性の高いDME改質用の触媒材料や、COを選択的にメタン化して除去する触媒材料を開発している。

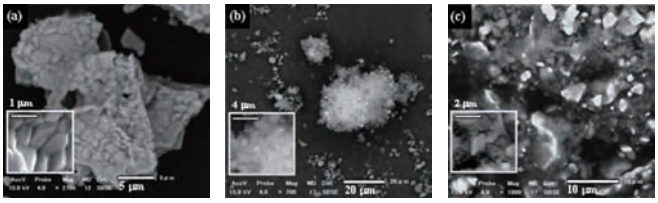


図1：ジメチルエーテル水蒸気改質用$CuFe_2O_4$-Al_2O_3複合触媒の電子顕微鏡写真：(a) $CuFe_2O_4$、(b) Al_2O_3、および(c) $CuFe_2O_4$-Al_2O_3複合触媒

○中温作動型燃料電池に関する研究

大島・大友研究室
（大島義人教授、大友順一郎准教授）
新領域創成科学研究科環境システム学専攻

http://www.oshimalab.k.u-tokyo.ac.jp/

次世代の燃料電池のニーズを検討し、そのニーズを新材料やシステムの開発にフィードバックすることによって、新しい型の燃料電池や関連する新材料開発の研究を行っている。その具体例として中温作動燃料電池（ITFC）を提案し、その電解質材料や単セルの開発、および電極反応機構の解析を行っている。従来の低温作動の固体高分子形燃料電池（PEFC）や高温作動の固体酸化物形燃料電池（SOFC）の中間温度域で作動する中温作動燃料電池は、高い発電効率を維持しつつ、迅速な起動、材料劣化の抑制、非白金触媒の利用の可能性等、従来型の燃料電池とは異なる特性が期待される。関連する研究を以下に紹介する。

1）新規イオン伝導体の開発・伝導機構の解明

新しいイオン伝導体の創成は、新規な燃料電池に限らず、二次電池、キャパシタなどのエネルギーデバイスへの応用が期待される。本研究室では、特に燃料電池への応用を目的とした新しいプロトン伝導性無機固体電解質の合成と伝導機構の観測を行っている。具体的には、プロトン伝導性酸素酸塩やプロトン伝導性無機ガラス等の中温域で伝導性を示す新規電解質材料の開発を行っている（図1）。また、絶縁体微粒子との複合化による電解質−絶縁体界面における特異なプロトン導電率の上昇効果が見いだされており、燃料電池電解質材料への応用を進めている。

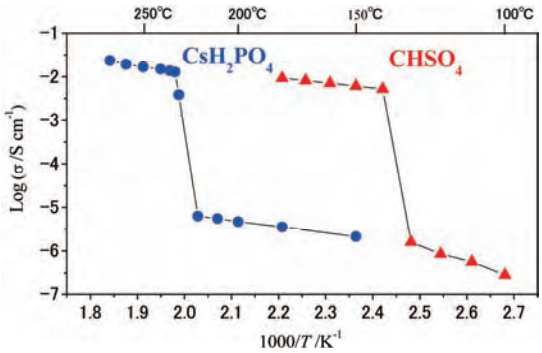


図1：酸素酸塩（CsH_2PO_4, $CsHSO_4$）のプロトン導電率の温度依存性

2）多様な燃料に対応した燃料電池の開発

上述の電解質材料を用いた中温作動燃料電池（ITFC）を開発し、その発電特性について検討を進めている（図2）。また、水素燃料に限らず、アルコール燃料（メタノール、エタノール）の直接利用の検討も進めている。従来のPEFCの場合、アルコールの電極酸化反応速度が遅いことに起因して、アルコール燃料の直接利用による発電効率は低い。一方、開発したITFCの電極反応の観測結果から、その発電効率が改善されることが示唆されている。現在、ITFC用の電極触媒の合成や電極反応機構解析について研究を進めている。

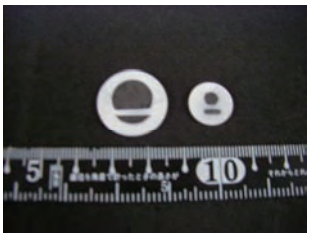


図2：作製したITFC単セル写真

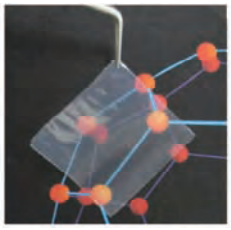
宮山研究室
（宮山勝教授、野口祐二准教授、鈴木真也助教）
先端科学技術研究センター

http://www.crm.rcast.u-tokyo.ac.jp/index.html

中温作動型燃料電池用材料の開発

プロトン伝導性ポリマー電解質を用い100℃以下で作動する固体高分子形燃料電池（PEFC）は、既に各種の応用がなされているが、燃料中に含まれるCOによる白金触媒の被毒、特性低下を防ぐための適切な水分管理、システムの総合効率の向上などの課題がある。これらの解決には100 ～ 200℃の作動温度とすることが有効であるが、適切な電解質材料が見出されていない。当研究室では、耐熱性ポリマーと無機材料（酸化物水和物等）の複合化を行い、耐熱性、化学的安定性、高プロトン導電性をもつ電解質膜の開発を行っている。ともにプロトン導電性をもつスルホン化ポリエーテルエーテルケトンと層状リン酸スズの複合化により、150℃でも安定であり、室温～150℃の範囲で10^{-2} Scm^{-1}以上（飽和水蒸気圧下）の高導電率を示す複合膜を得ることに成功している（図1）。両物質の界面に形成された水素結合によりポリマー構造の安定化と高いプロトン導電性が発現したものと考えている。

一方、通常は800℃以上で作動させる固体酸化物形燃料電池（SOFC）についても、500 ～ 600℃での中温作動化を目指し、$(Ba,Sr)(Co,Fe)O_3$系カソード材料の利用と、それに適した酸化物固体電解質の探索を行っている。



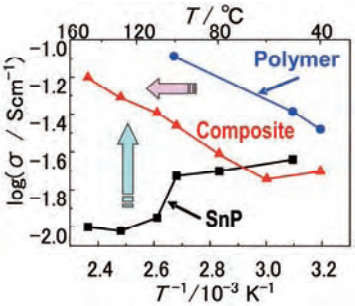


図1：（左）無機-有機複合電解質膜、（右）複合膜およびその構成材料の導電率
ポリマー：スルホン化ポリエーテルエーテルケトン、無機物：層状リン酸スズSnP

○固体酸化物形燃料電池の開発

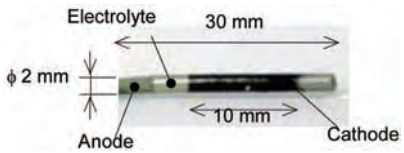
笠木研究室（笠木伸英教授）・鹿園研究室（鹿園直毅准教授）
工学系研究科機械工学専攻

http://www.thtlab.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html

工学系研究科笠木研究室および鹿園研究室では、将来のエネルギー問題の解決に欠かせない固体酸化物形燃料電池（Solid Oxide Fuel Cell、以下SOFC）に関する研究を行っている。

（1）小型固体酸化物形燃料電池システムの開発

固体酸化物形燃料電池は燃料電池の中でも発電効率が高く、多様な燃料が使用可能であることや排熱利用も含めたシステム効率が高い等の利点を有する。また、小型化に伴う性能低下が小さいため、分散・モバイル用途への適用も想定されている。一方、SOFCは高温で作動するため、自身の発熱で高温を維持（熱自立）することや、性能のバラつきや熱応力を抑制するための熱設計技術が課題となる。本研究では、自作の小型燃料極支持SOFCを用い、その過電圧特性を多孔質内のイオン導電と三相界面での電荷移動を考慮してモデル化している。さらに、これを数Wクラスの超小型熱自立システム設計に適用することで、実験及びシミュレーションの両面から小型熱自立システムの熱設計技術の高度化に取り組んでいる。



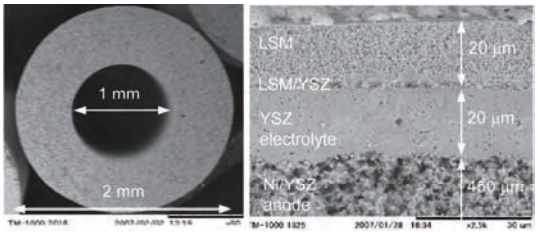


図1：燃料極支持固体酸化物形燃料電池

（2）SOFC電極の3次元微細構造と分極特性の定量化

SOFC電極の分極特性および長期信頼性は、その微細構造、すなわち反応ガス、電子、イオンの導電パスの屈曲度や、電極反応の場である三相界面（Three phase boundary、以下TPB）等に大きく影響されることが知られている。SOFC劣化の主な原因の一つとして、Niの凝集や酸化還元サイクル等による燃料極微細構造の経時変化が挙げられる。SOFCのブレークスルーのためには、このような微細構造変化と性能劣化の因果関係を定量化する必要があるが、微細で複雑な三次元構造を高分解能かつ高精度に組成判別することには大きな困難が伴うため、微細構造と分極特性を定量的に対比した研究は限られている。本研究では、FIB-SEM を用いてSOFC電極の3次元微細構造を復元し、さらに格子ボルツマン法を用いた電荷移動と電気化学反応を連立させた過電圧の数値シミュレーションを行っている。このことで、従来の経験と直感に基づく電極設計から脱却し、数値シミュレーションをベースとした電極設計が可能となる。

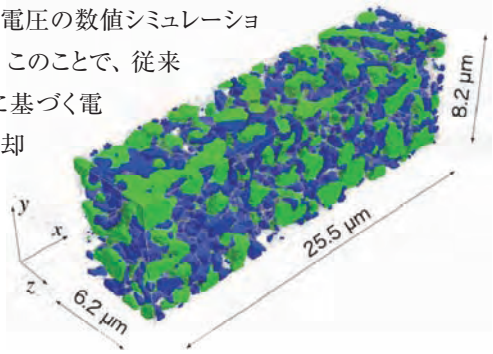


図2：FIB-SEMにより復元された燃料極の3次元構造

山口研究室（山口周教授）
工学系研究科マテリアル工学専攻

http://www.ionics.t.u-tokyo.ac.jp/index.html

中温域において動作可能な固体酸化物型燃料電池（SOFC）を実現するためのプロトン機能性（プロトニクス）酸化物の研究を行っている．特に、ヘテロ界面付近で生じるイオンの静的/動的変調による“ナノイオニクス”効果に着目し、これを積極的に利用した材料設計とその基礎科学の構築を目指している．

(1) 新規低温合成プロセスによるプロトン伝導性ペロブスカイト型酸化物の合成

通常の酸化物セラミクスの作製プロセスでは高温焼成を避けられず、微細な粒子から成るセラミクスを得ることが困難である．山口研究室では金属アルコキシドを原料としたゾル - ゲル法により酸化物ナノ粒子を合成し、これを加熱せずに超高圧プレス（約6GPa）することにより粒径10nm以下の粒子からなる酸化物緻密体を作製する方法を開発した．

この低温合成プロセスを$BaZrO_3$系などのプロトン伝導性ペロブスカイト型酸化物に適用し、イオン伝導性セラミクスにおいてしばしば主要な抵抗要因となる粒界におけるイオン伝導特性を調べている．また、高温焼成を伴わないこのプロセスを応用し、低温でのみ安定に存在する新規な高プロトン伝導性酸化物の開発も進めている．

(2) ナノ構造セラミクスにおける粒界プロトン伝導性の開拓

良好な酸化物イオン伝導体であり、プロトン伝導性を示さないことが知られる、イットリア安定化ジルコニア（YSZ）のナノ構造セラミクスを上記の低温合成プロセスにより作製したところ、500℃以下の湿潤雰囲気においてプロトン伝導性が発現する事を見出した．プロトン伝導度の粒径依存性や種々の物理化学的検討の結果から、この系におけるプロトン伝導経路は粒界であると推定され、低温合成によるセラミクス構造の高度な微細化により得られたものであると考えられる．現在は、このような低温合成セラミクスにおける特殊な粒界の本質を追及するとともに、合成プロセスの最適化による更なる微細化や界面修飾によって既存のプロトン伝導性酸化物を上回る高プロトン伝導性材料の開発を目指している．

菊地研究室（菊地隆司准教授）
工学系研究科化学システム工学専攻

http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/laboratory_kikuchi.html

固体酸化物形燃料電池に関する研究

燃料電池は燃料の持つ化学エネルギーを電気エネルギーに直接変換できるため、従来の発電システムにおける有効エネルギーの損失を低減できる。高温作動型燃料電池の固体酸化物形燃料電池は、燃料の改質を電極上で直接おこなうことにより、発電によって生じる発熱を吸熱できるため、発電効率が向上する。このための燃料極材料について研究をおこなっており、酸素イオン伝導性の高い酸化物や混合伝導性の酸化物をもちいて、多様な燃料に対応可能な高性能な燃料極の開発を行っている。また固体酸化物形燃料電池では長期安定性の向上が実用化への大きな課題である。発電による電極および電極/電解質界面微構造変化と電極活性化との関連、および耐久性との関連について研究を進め、耐久性の向上に向けた研究を行っている。

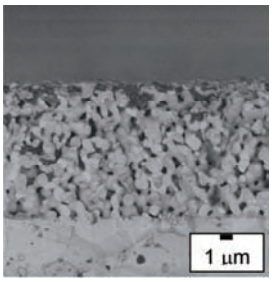


図1：固体酸化物形燃料電池の電解質/空気極界面微構造

寺井・鈴木研究室
（寺井教授、鈴木准教授、佐々木特任助教）
工学系研究科附属総合研究機構原子力国際専攻原子力専攻

http://lohas.t.u-tokyo.ac.jp/yunen/

寺井・鈴木研究室では、原子力発電により得た電気を用いて製造した水素をエネルギーキャリアとする水素エネルギーシステムの確立により化石燃料消費量を低減してエネルギーセキュリティを向上させる立場で燃料電池の研究を進めている。

SOFCの低温作動化

SOFCは燃料電池の中で最もエネルギー変換効率が高く、集合住宅や戸建て住宅などに用いられる電気・熱コージェネレーションシステムの材料コスト低減による実用化推進に向け、運転温度低減が望まれている。しかし、SOFCは、運転温度を低減するとエネルギー変換効率が低下する。その主たる原因は、空気極電極における反応抵抗増大と電解質膜におけるイオン伝導抵抗の増大である。そこで、高エネルギー変換効率を維持しながら、周辺部材に安価なステンレス鋼の使用が可能となる500℃までSOFCの運転温度を低減するため、新規空気極材料の開発や新規電解質膜作製方法の研究を行っている。

(1) 新規空気極材料

低温運転時の空気極の反応抵抗を低減させるため、銀電極を研究している。従来の空気極電極では、図1左側の図中の青丸で示す電解質と空気極、酸素の三相界面が、主たる電極反応が生ずる場（酸化物イオンの潜り込む場所）である。この三相界面の面積が広いほど、反応抵抗が小さい優れた電極となる。しかしこの三相界面は、電解質と空気極が接している線近傍に限定されている。これに対し、銀は酸素原子と電子の良導体であるため、銀電極では電極と電解質が接触している面全体（二相界面）に酸化物イオンの潜り込み場が増大する（図1右側）。これに加えて、銀には、500℃付近で高い触媒活性を有する利点もある。したがって、銀は優れた空気極電極の材料となる高い可能性がある。

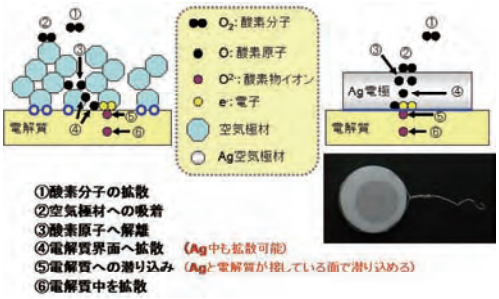


図1：従来の空気極電極と銀電極の反応場の違い

(2) 新規電解質膜作製方法

低温作動時の電解質の抵抗を低減させるために、500℃でも高い酸化物イオン導電率を持つ電解質であるLSGM（$La_{0.9}Sr_{0.1}Ga_{0.8}Mg_{0.2}O_{3-\delta}$）の薄膜作製法を研究している。低温で緻密膜の作製が可能な、RFマグネトロンスパッタリング法を用いて薄膜電解質を作製している。

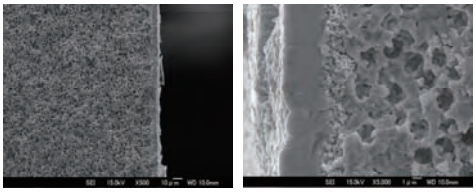


図2：RFマグネトロンスパッタリングで作製されたLSGM薄膜

渡邉研究室
（渡邉聡教授、多田朋史助教）
工学系研究科マテリアル工学専攻

http://cello.t.u-tokyo.ac.jp/index.html

燃料電池の電解質材料として固体酸化物を用いる固体酸化物形燃料電池（SOFC）は、その発電効率の高さから次世代のエネルギー供給源として大変期待されているシステムの一つである。SOFCの発電過程には気体吸着・イオン移動・電気化学反応等様々な素過程が密接に絡んでおり、個々の素過程の舞台はバルク内・電極/固体電解質二相界面・電極/気体/固体電解質三相界面と様々である。渡邉研究室では、第一原理計算を用いた手法により個々の素過程における活性障壁高さを求め、バルク内・二相/三相界面といった場が素過程に与える影響を明らかにし、SOFCの発電効率をより高めるための界面設計に取り組んでいる。

具体的な計算対象としてNi電極・安定化ジルコニア固体電解質（酸素イオン伝導体）・水素燃料を考え、酸素イオン移動障壁高さが界面の種類によって大きく異なり、化学結合（イオン結合・共有結合）の観点から障壁高さの違いを理解すべく取り組んでいる。また、三相界面に内在する場としての化学的性質と、そこで行われうる素過程との相関についても検討を行っている。

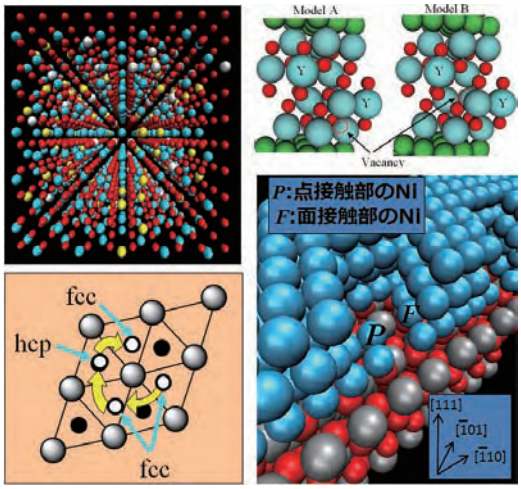


図1：左上）安定化ジルコニアバルク中での酸素拡散、左下）Ni電極表面上での燃料拡散、右上）安定化ジルコニア薄膜/Ni電極との二相界面近傍での酸素移動、右下）Ni電極/燃料/安定化ジルコニア三相界面の局所反応場

ホロニック・エネルギーシステム学（東京ガス）寄附講座
（幸田栄一特任准教授、坂東茂特任講師）
工学系研究科機械工学専攻

http://www.hes.t.u-tokyo.ac.jp

全体エネルギー系統を構成する個々の要素がそれぞれの特徴を活かした最適なエネルギー社会の実現に向け、その重要な要素の一つであるマイクログリッドの最適設計技術や分散電源による系統貢献の研究とともに、将来の発電技術の高性能化の可能性についての研究を実施している。

火力発電などの出力制御が可能な電源は電力需給バランスを取る必要があるため、今後CO_2排出量削減に向けて原子力発電の稼働率向上と自然エネルギーの利用拡大が進むと、より広い負荷範囲で運転されることになると予想される。そこで、燃料電池の持つ特性、すなわち負荷が下がるほど電池本体のエネルギー変換効率が高まるという特徴に着目し、広い負荷範囲で高い熱効率を維持できる発電システムの研究を行った。

燃料電池は一般に酸化剤として空気の代わりに酸素を用いることで単セル電圧が向上するが、中でもMCFCと低温作動形のSOFCで向上幅が大きい。そこで、幅広い条件化で信頼性の高い性能相関式が得られているMCFCを用いたシステムの設計を行った。図1に示すように、理論当量比の燃料と酸素のみを供給し、CO_2とH_2Oを循環させるセミクローズド構成とすることで、表1に示すように広い負荷範囲にわたって非常に高い熱効率となることが分かった。さらに、このシステムはCO_2全量を容易に回収可能であるとともに、燃料電池の出力密度(kW/m²)が非常に高くなるので燃料電池発電システムの低コスト化も図ることができる。

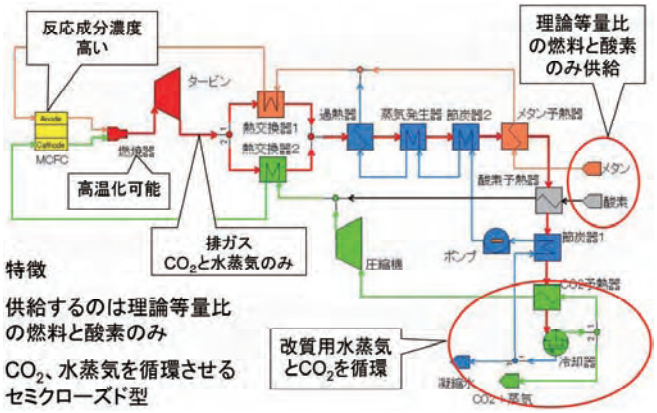


図1：広負荷対応酸素吹きMCFC-GTハイブリッドシステムの構成と特徴

負荷率		%	100	75	50	25
発電機出力		MW	82.8	56.2	31.8	3.5
MCFC	DC	MW	248.9	190.7	131.6	70.3
	電極面積	m²	75016	75016	75016	75016
	出力密度	kW/m²	3.3	2.5	1.8	0.9
発電端出力		MW	326.6	243.1	160.8	73.8
発電端効率(HHV)		%	73.4	72.8	72.3	66.3
所内動力	酸素製造動力	MW	-32.0	-24.0	-16.1	-8.0
	小計	MW	-35.3	-26.5	-17.6	-8.8
送電端出力		MW	291.3	216.6	143.2	65.0
送電端効率(HHV)		%	65.5	64.9	64.3	58.4

表1：熱効率解析結果

二次電池・キャパシタの開発

○リチウムイオン電池

宮山研究室
（宮山勝教授、野口祐二准教授、鈴木真也助教）
先端科学技術研究センター

http://www.crm.rcast.u-tokyo.ac.jp/index.html

高出力リチウムイオン電池用電極材料の開発

リチウムイオン電池は高エネルギー密度を持つが出力密度（高速充放電特性）が低く、電気自動車補助電源等への応用へはその向上が求められている。その実現のため、微細構造を制御した電極材料の設計、開発を行っている。高速充放電には、リチウムイオンが挿入脱離する活物質の薄膜化、電極内にリチウムイオンが到達しやすい多孔体構造、および高電子導電性が求められる。

そこで、チタン酸やマンガン酸などの層状構造体を層間剥離・再構築することにより得られる厚さ数nmのナノシートを電極活物質として用いる研究を進めている。多孔質カーボン骨格の孔内に酸化マンガンナノシートを固定化した複合化正極（図1）では、従来の電極に比べて著しく高速な充放電特性が発現することを見出している。さらに、グラファイトから得られるグラフェンナノシートの負極材料への利用やリチウムイオン導電性物質のナノシート化など、全固体リチウムイオン薄膜電池の実現に向けての研究を進めている。

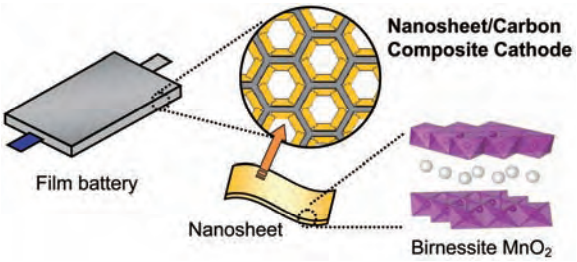


図1：導電性多孔質炭素とMnO_2ナノシートからなるリチウムイオン電池複合電極

山田研究室（山田淳夫教授）
工学系研究科化学システム工学専攻

http://www.chemsys.t.u-tokyo.ac.jp/laboratory_yamada.html

エネルギーを貯蔵し、必要に応じて取り出す機能は、いかなる電力システムにおいても重要な役割を演じている。その機能を提供する2次電池の性能向上には目覚ましいものがあり、現在では内燃機関を大幅に上回る出力密度も提供可能である。このため、低炭素社会に向けたキーデバイスとして注目が集まっている。

このような技術の進歩を、我々は携帯電話やノートパソコンといった携帯電子機器において、毎日の生活の中で大いに享受しているが、これは希少金属の浪費や発火爆発事故のリスクといった、継続が許容されない前提の上に成り立っている。これらの問題を解決し、次世代自動車、風力発電や太陽光発電といった、持続可能社会実現に向けた重要大型技術に適用していくことは、環境問題に直面した人類の宿命ともいえる。しかし、コスト低減や安全性確保のための技術的障壁は高く、問題解決のためには、システム・デバイスの中での材料の位置づけをきちんと行って上で、新たな機能性材料の適用と、その反応機構の正しい理解に基づく最適化が不可欠である。

山田研究室では、基礎科学に則った原子・分子レベルでの精緻な解析から、元素戦略、コストや安全性といった現実問題まで、様々な階層の問題意識をベースに、多角的・総合的に最適現実解を追求している。具体的には、リチウムイオン電池をはじめとするエネルギー貯蔵変換デバイスに使用される無機機能材料を対象に、クラーク数上位元素のみから構成される新規機能材料の開発、インターカレーション反応における相変化の構造・熱力学的体系化、電極反応における素過程解析、イオン拡散現象の実験的視覚化、実用化に向けた電極構造最適化などを推進している。

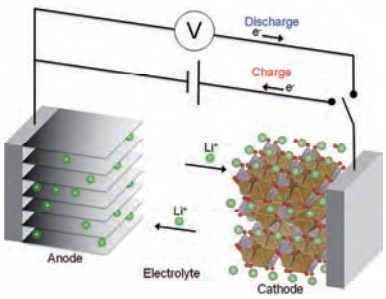


図1：リチウムイオン電池の充放電原理

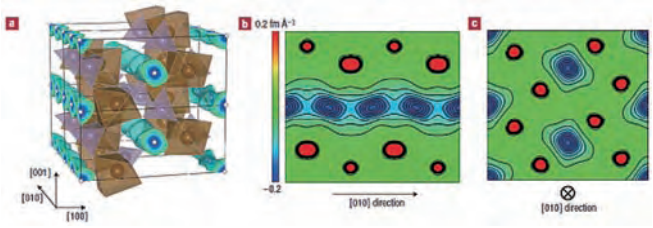


図2：中性子回折と最大エントロピー法によって視覚化されたLi_xFePO_4中の1次元リチウム拡散経路

○新規一体型二次電池・燃料電池（Fuel Cell/Battery）

堤研究室
（堤敦司教授、伏見千尋助教、李善默特任助教）
生産技術研究所エネルギー工学連携研究センター

http://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/tsutsumi/

微弱なあるいは間欠的なエネルギー（太陽光、風力等の自然エネルギー）を貯蔵し、パルス的に大出力で放電（エネルギースパークリング）かつ大容量電力貯蔵ができる電力システムがあれば、利用可能な自然エネルギーが大幅に増加し、機能拡大につながると考えられる。そこで、これまで本研究室では、燃料極に水素吸蔵材料を用いることによって電極自体に水素貯蔵機能を付加させることにより、需要端での高周波数の電力負荷変動を吸収できるエネルギー負荷変動緩和機能をもつ家庭用燃料電池システムの構築を目指し、電極に水素吸蔵合金を用いたアルカリ形燃料電池の開発を行った。現在はさらに発展させて、活物質として水酸化ニッケル及び酸素還元触媒として二酸化マンガンの混合物を正極に用いることによって二次電池と燃料電池の機能の一体化を目指し、負極に水素吸蔵合金であるニッケル合金を用いたエネルギースパークリングを可能とする「大容量電力貯蔵・高出力発電の燃料電池／二次電池（Fuel Cell/Battery）」の開発を進めている。

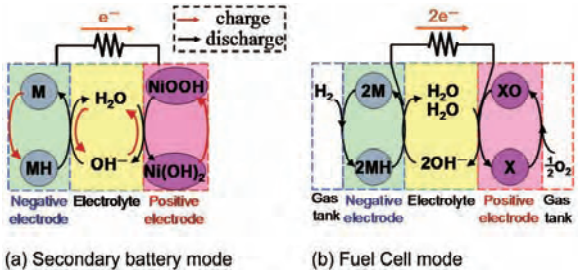


図1：Fuel Cell/Battery（FCB）システムの概念図

○キャパシタの電気自動車への応用

堀研究室（堀 洋一教授）
領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻
生産技術研究所 情報・エレクトロニクス部門
工学系研究科電気系工学専攻

http://mizugaki.iis.u-tokyo.ac.jp/index_j.html

堀研究室のテーマは、(1) 電気自動車の制御、(2) 福祉制御工学、(3) モーションコントロールの3つである。機械制御が開ルー

プ制御を基本とするのに対し、電気制御の本質はフィードバック制御にある。単純な演算を短い制御周期で繰り返す電気制御の力によって、機械系の特性は大きく変化する。この原理をもとに、電気自動車や人間親和型モーション制御の分野に、革新をもたらそうともくろんでいる。ここではその中から、キャパシタだけで動くC-COMSの研究を紹介する。電気自動車は電気モータで走るため、(1)トルク応答がエンジンの2ケタ速い、(2)発生トルクが正確にわかる、(3)モータは分散配置ができる、というガソリン車にはまねのできない電気制御の良さに大きな特長がある。これを実証するために、いままで東大三月号IおよびII、カドウェル号などを製作して走行実験を行ってきた。タイヤをすべりにくくする粘着制御によって、低抵抗タイヤで従来と同じ走りができるようになれば、燃費は一気に数倍に改善される。そのような研究である。

一方、電気二重層キャパシタには、(1)寿命が半永久的、(2)急速充放電が可能、(3)材料の環境負荷が小さい、(4)端子電圧から残存エネルギーがわかる、という特長がある。とくに、充電が非常に速くでき、端子電圧から残りのエネルギーが完全にわかるので、余分な電池(キャパシタ)を積む必要がなくなる、という点が重要である。キャパシタは物理電池と呼ばれ、従来の化学電池にない特長を持つが、パワー密度は電池をはるかにしのぐものの、エネルギー密度はリチウムイオン電池の約1/10である。20Wh/kg、20kW/kgという数字が代表的なキャパシタの実力であろう。しかし、パワー密度は高く、しかも放電時も充電時も同じ数値であることは、電池とまったく異なっている。これらの特長から導かれる新しいクルマのスタイルは、「電力系統につながり」、「インフラからエネルギーをもらって走る」、「ちょこちょこ充電する電車のような」クルマある。乗り物を動かすアクチュエータとして、電気モータが最適であることは鉄道がとうの昔に証明済みであり、これからは他の多くの製品と同じように電気を使うようになるだろう。

クルマが電力系統につながっていくとすれば、次に来るべきは、「移動体へのエネルギー貯蔵(ストレージ)と供給(サプライ)技術」が重要である。数十kHz、10～20MHz、2.45GHzなどの周波数を使った非接触のエネルギー伝送装置の研究が、いろいろなところで始まっている。近い将来、いきなりブレイクする可能性がある。そのとき、キャパシタはエネルギーを仲立ちし、系をバックアップする重要なデバイスとなって大活躍することになるだろう。

図1：キャパシタだけで駆動されるC-COMS1およびC-COMS2

○先進型二次電池による未来エネルギーシステムデザイン

堀江研究室(堀江英明准教授)
工学系研究科システム創成学専攻(人工物研究センター)

http://www.si.t.u-tokyo.ac.jp/ee/about_ee/teachers/detail.html#horie

かつて先進国で消費してきたエネルギーを、今後数十年の裡にその十倍近い地球上の人々に、いかにして平等に利用可能となさしめ得るか、しかし地球温暖化に象徴されるようにそこには様々な厳しい制限が課せられている。例えばガソリン自動車は社会の中で総エネルギーの約2～3割近くを消費しているが、より効率の高い電気自動車への転換を図る際の最大かつほとんどの課題は、今や高性能二次電池に集中していると考えられる。電気自動車あるいはハイブリッド電気自動車用高性能電池は、その普及実現を想定するなら、従来の電池に比して、(出力)性能は数十倍、寿命は一桁高く、電池搭載量の多さを勘案するなら信頼性は数桁高く、しかしながらコストは従来に比しても十分低く抑える必要があるであろう。言い換えるならもし環境車両用電池の大量普及が真に実現をしたとするなら、これら高性能二次電池はあらゆる産業に用いることができ、社会・都市の中に無数に散り嵌(ば)められ拡散してゆくに違いない。変化の契機が困難とも思える複雑化した現代社会で、このように環境車両用高性能二次電池が先導をしつつ、次世代のエネルギー変革を特徴づけてゆくシナリオも描けるのではないだろうか。

高度に集積化された情報と限りないパワーを一体化した『高性能二次電池を基軸とする自律分散統合型エネルギーシステム』の概念を創出し、社会システムを活用した実効性ある導入手法のデザインと共に、この分野で強力に世界を主導してゆきたいと考えている。

- 都市/ビル/家庭/EV(電気自動車)での電池システムを軸とした統合化の研究
- 環境志向の高い都市/地域に対するEV導入社会システムのアセスメント/導入手法研究
- 電池分離型社会材/金融商品化の研究
- 電池ネットワーク化技術の研究

(工学系研究科 システム創成学専攻　宮田秀明教授と共同で研究中)

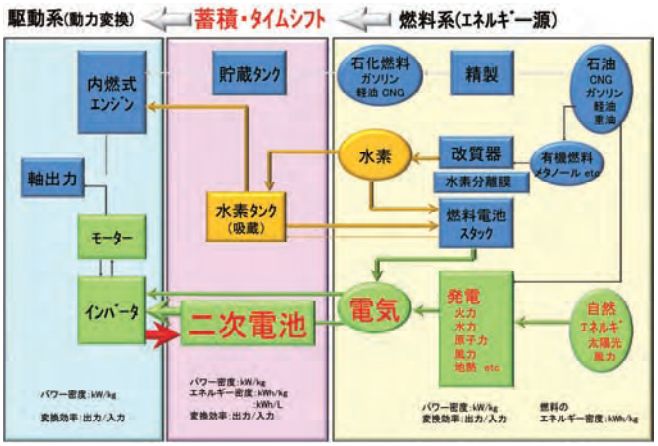


図1：走行に使われるエネルギーフロー

(エネルギー工学連携研究センター　菊地隆司)

研究室紹介

佐藤研究室（工学系研究科エネルギー・資源フロンティアセンター）

佐藤光三 教授

研究方針

我々の世代に突きつけられた地球規模での環境とエネルギーのジレンマを前に、大学における研究成果には実効性の付与がこれまで以上に求められ、実践的工学による具体的解決策の導出が急務となっています。産業革命以降の飛躍的な利便性の向上に人知の集積として工学は大きく寄与しましたが、利便の対としての環境破壊を予見しこれを回避する手立てを事前に示してはくれませんでした。工学の人類への貢献は勿論認めた上で、工学の産物がリスクフリーではない事実も自戒をもって受け入れるべきでしょう。自然の系との調和性を尺度にするなど、環境とエネルギーのジレンマに対する解のロバスト性をより高めることに留意しながら、現在、以下のような研究を進めています。

主要研究テーマ

(1)持続型炭素循環システムの構築

化石燃料起源のCO_2が自然の炭素循環を大きく乱しています。環境共生の観点からは「CO_2を産生源である地圏に封じ、従前の形態である炭化水素に変換する」ことが自然調和的行為です。変換された炭化水素はエネルギー源として再利用でき、エネルギー枯渇問題へ一つの解を与えます。炭素循環に持続性を持たせることにより、環境とエネルギーに相補的なシステムを構築することができるのです。そのために、CO_2地中隔離の最適化、貯留層モニタリング（例えば、地球潮汐を利用したパッシブモニタリング）、バイオ技術を用いたCO_2のメタン変換などを研究しています。

(2)統合型流体シミュレーション技術の開発

流体問題は多種多様であり、一つの解法があらゆる問題に適しているわけではありません。対象のスケール、形状、性状を把握した上で、問題毎に適した数値解法を選択することが重要であり、流体挙動を多側面から攻究することも大切です。このような観点から、有限差分法、複素変数境界要素法、境界要素法、格子ボルツマン法、CIP法などを統合的に利用したシミュレーション技術を開発し、流体挙動の解明に取り組んでいます。

(3)フロンティアエネルギーの環境調和型開発

次世代のエネルギー供給源として期待されるフロンティアエネルギー資源に関する先端研究を推進し、その環境調和型開発の早期実現を目指します。低環境負荷の視点から地下微生物の利用に着目し、エネルギー資源の原位置改質技術や回収増進技術の開発、流動モデルと生化学反応モデルを組み合わせたシミュレーション技術などを研究しています。

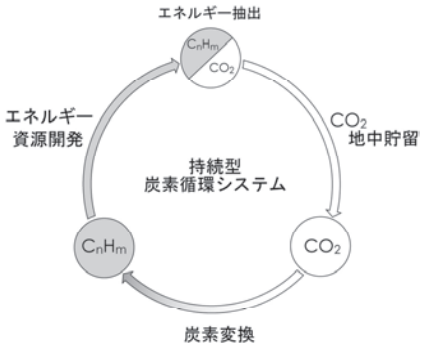


図1：持続型炭素循環システムの概念図

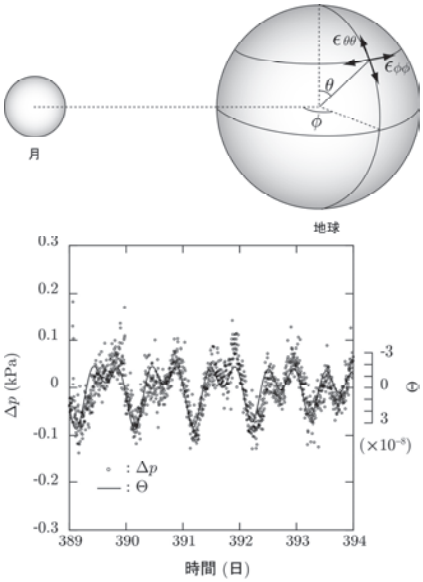


図2：地球潮汐による余緯度と経度方向の垂直歪と周期的圧力変動の解析結果

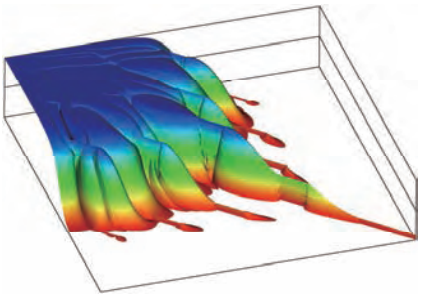


図3：フラクチャーを通過する流れのCVBEMによるシミュレーション

図4：嫌気性微生物の培養実験装置

岩船研究室（生産技術研究所）

岩船由美子 講師

研究方針

従来、エネルギー・資源問題は、需要を所与のものとし、その需要に対しいかに効率的に供給するか、という観点から論じられてきた。しかし、人類が排出する二酸化炭素を半減するといったこれまでのやり方では対応不可能なレベルを目標とするのならば、これからは需要そのものの在り方を考えていかなくてはならない。

当研究室の基本的な目標は、人はどのようなレベルのサービスや物質を必要とし、それをどのようなシステムで供給することが環境にやさしいのかを明らかにし、さらにそのようなシステムをいかに実現するかを探求することにある。

目標はシンプルではあるが、考慮しなければならない制約条件は、経済性、資源量、国際競争などの政治的な問題、システムの永続性、人間の嗜好、将来の不確実性、既存システムの硬直性、など多岐に渡る。これらを踏まえた上で適切な評価を行うためには、工学だけではなく、経済学等の社会科学分野との学際領域での研究が必要となる。

以下に具体的な研究テーマ例を示す。

主要研究テーマ

（1）エネルギー需要と効用に関する研究

地球温暖化問題の顕在化、近年の石油価格の上昇により、エネルギー価格の上昇に伴うエネルギー消費抑制の機運が高まっている。わが国の家庭用・業務用のエネルギー消費量に関する調査は多く行われ、その実態はかなり解明されつつあるが、実際に生活者なり消費者なりが必要としている効用（冷暖房、給湯、照明、動力）の実態は明らかではない。

エネルギーの充足水準というのは、存在するものか。効用（生活の質）を落とすことなく、消費者の要求に答えつつ、エネルギー消費を抑制していくことはどこまで可能なのか。また、どこまでの効用劣化が受け入れられるのか。エネルギー消費のレベルと効用の関係について研究を行う。

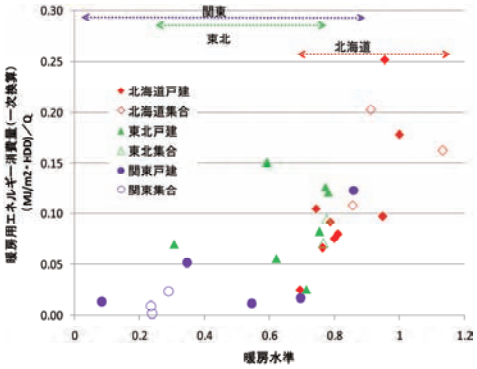


図1：住宅における暖房水準とエネルギー消費量の相関

（2）エネルギーマネジメントシステムに関する研究

家庭、業務などの民生部門におけるエネルギーサービス水準を維持・向上しつつ再生可能エネルギーの大規模導入を実現する自律協調エネルギーマネジメントシステムに関する研究を行う。

まず、気象予測と広域ならし効果により得られる再生可能発電の出力変動補償、需要機器制御、エネルギー貯蔵装置制御等の機能を有する分散型の建物レベルのエネルギーマネジメントシステムを開発する。さらに、建物エネルギーマネジメントを要素とし、個別の建物を超えた、地域（街区あるいはコミュニティ）レベルの分散エネルギーマネジメントの導入について検討する。

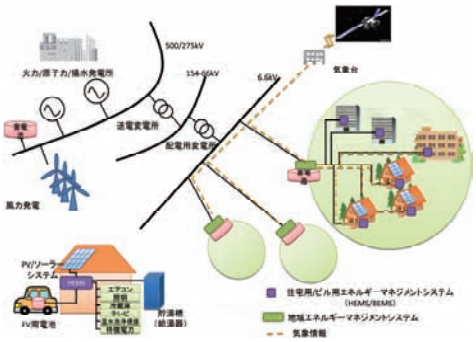


図2：再生可能エネルギーを含む自律協調エネルギーマネジメントシステムの概念

組織と研究グループ

平成21年4月より、丸山康樹 客員教授（生産技術研究所）がエネルギー工学連携研究センターのメンバーに加わりました。

○ エネルギーマテリアル分野

堂免一成 教授** 堤 敦司 教授* 菊地隆司 准教授** 望月和博 特任准教授* 伏見千尋 助教*

○ エネルギーシステム分野

山地憲治 教授** 荻本和彦 特任教授* 丸山康樹 客員教授* 岩船由美子 講師*

○ エネルギープロセス分野

堤 敦司 教授* 田中 知 教授** 佐藤光三 教授** 金子祥三 特任教授*** 鹿園直毅 准教授**

* 生産技術研究所　** 工学系研究科　*** 生産技術研究所・先端エネルギー変換工学寄附研究部門

CEE・FRCER・APET第1回 合同シンポジウム(第3回 CEEシンポジウム)
「資源・エネルギーの長期戦略を考える」

平成21年1月16日に、エネルギー工学連携研究センターとエネルギー・資源フロンティアセンター、先端電力エネルギー・環境技術教育研究センターの主催により、第1回合同シンポジウム(第3回CEEシンポジウム)「資源・エネルギーの長期戦略を考える」が、生産技術研究所コンベンションホールで、以下のプログラムにより開催されました。

○開会の辞(東京大学大学院工学系研究科　研究科長　保立和夫)
○中長期の資源・エネルギー戦略の視点　経済産業省　大臣官房審議官(エネルギー・環境担当)上田隆之
○低炭素社会の実現に向けた都市ガス事業の取り組み　東京ガス株式会社　執行役員・技術戦略部長　渡辺尚生
○炭素制約を含む包括的リスクマネジメントにおけるイノベーションの位置づけ　東京電力株式会社　フェロー　立花慶治
○エネルギーの課題解決に向けた技術戦略とインテグレーション　エネルギー工学連携研究センター　特任教授　荻本和彦
○資源・エネルギー供給の長期展望と地政学的・技術的諸問題
エネルギー・資源フロンティアセンター　センター長・教授　玉木賢策
○分散形電源普及拡大時の技術的課題と解決の方向性
先端電力エネルギー・環境技術教育研究センター　特任教授 谷口治人
○パネルディスカッション　モデレーター　エネルギー工学連携研究センター　教授 山地憲治
○閉会の辞(東京大学生産技術研究所　所長　前田　正史)

このシンポジウムでは、224名という多くの出席者があり、官・民・学の立場から、エネルギー資源問題の解決のための、政策や技術についての講演と、長期戦略に向けた熱心な議論が行われました。

第8回　コプロワークショップ
「エネルギーと物質の併産(コプロダクション)による革新的省エネルギーと次世代産業基盤の構築」

平成21年3月4日に、生産技術研究所コンベンションホールにおいて、第8回コプロワークショップ「エネルギーと物質の併産(コプロダクション)による革新的省エネルギーと次世代産業基盤の構築」が開かれた。参加者は98名、懇親会は51名の参加があった。

まず、堤センター長からワークショップ趣旨と経緯の説明があり、引き続いて「コプロダクションの理論と展開」と題して、自己熱再生方式を中心とするコプロダクションの理論とプロセスの展開についての解説があった。次に、苷蔗特任助教から、「自己熱再生型蒸留システム」についての講演があった。引き続き、新日鉄エンジニアリング後藤耕一郎氏より、「石炭熱分解コプロダクション」という題で、石炭熱分解ガス化を中心としたコプロダクション事例について講演があった。さらに産業技術総合研究所　中岩勝氏からは、「コプロピンチによるサスティナブルコンビナートのグランドデザイン」という表題で、物質とエネルギーの併産に向けた解析手法であるコプロピンチ解析の説明ならびにそれを用いたコンビナートのデザインとその省エネルギー効果について講演があった。さらに経済産業省の福田敦史氏からは我が国の化学産業戦略が紹介された。

講演会の後にパネルディスカッションを開催し、堤センター長をモデレーターとして、経済産業省 福田敦史氏、産業総合技術研究所 中岩勝氏、東京電力 陶昇氏、宇部興産 横田守久氏、JFE技研 中川二彦氏、千代田化工建設 蛙石健一氏、東京大学 金子祥三特任教授から活発な意見交換と議論がなされた。

また、その後の意見交換会も大変盛況であった。

第1回 「環」ワークショップ
「エネルギー・環境・資源問題の同時解決に向けた技術戦略－『環』の実現可能性について」

平成21年3月6日に、エネルギー工学連携研究センターが主催する題記ワークショップが生産技術研究所 An401・402号室で開催された。センター設立の目的のうち、持続的な産業・社会の構築を推進するための、物質とエネルギーの供給・利用・再生による持続性に焦点をあてた新たな取り組に関する初めてのワークショップとして、55名の出席者があり、熱心な討論が行われた。当日のプログラムは次ページの通りである。

○これまでの環の勉強会の状況　（東京大学生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター 特任教授 荻本 和彦）
○物質とエネルギーを統合した取り扱いの必要性
（東京大学生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター センター長・教授 堤 敦司）
○世界規模でみた鉄鋼材のマテリアルフロー　（（株）鉄リサイクリング・リサーチ 代表取締役 林 誠一）
○マテリアルフロー －金属以外の場合－
（東京大学生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター 特任准教授 望月 和博）
○流から環へ 現状と将来　（東京大学生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター 講師 岩船由美子）
○エクセルギーを用いたエネルギーの視点からの物質フロー分析
（東京大学大学院工学系研究科 エネルギー工学連携研究センター 教授 山地 憲治）
○金属の供給制約と循環　（東京大学生産技術研究所 准教授 安達 毅）

従来のエネルギー・物質の需給構造は、限られたリサイクル等は行われているが、利用後は大半が本来可能である「再生」を行うことなく、廃棄されており、この再生が行われず廃棄に向かう「流」構造は、既存の、生産品の設計、生産・流通インフラ、利用形態などに組み込まれている。資源の枯渇を回避するための抜本的な物質・エネルギーの生産、利用再生の協調関係の確立の必要性、物質の循環・再生を含めて必要となるエネルギーにおける持続可能エネルギーの最大活用、既存のエネルギーと物質を統合した現状のフロー分析、物質・エネルギー循環の究極的な姿をとらえこれに向けた戦略を描くことの重要性などについての講演と総合討論が行われた。

Events

第4回　CEEシンポジウム
「電池技術が拓く低炭素社会」

近い将来、電池が次世代エネルギー技術の中で重要な位置を占めると認識されている。携帯電話、ノートパソコンをはじめあらゆるモバイル用途において高機能二次電池が求められようになってきている。また、電気自動車、プラグインハイブリッド車など、輸送部門における低炭素化を進める上で二次電池が急速にクローズアップされ、世界的に開発競争が繰り広げられている。さらに、間欠性の太陽光や風力などの再生可能エネルギーの導入促進には、電池が不可欠であり、低コストで大容量電力貯蔵用電池の開発が望まれている。このように電池が広範な分野で必要とされてきており、また、それに要求される性能も、急速充電性や大容量化、高出力化、耐久性など多様化しつつある。例えばEVの普及によって、エネルギーインフラが大きく変化すると考えられ、持続可能な社会を構築していく上で、電池技術とその展開は非常に重要なものとなりつつある。そこで、第4回CEEシンポジウムでは、電池を取り上げ、エネルギー戦略における電池技術の役割、二次電池市場の動向、今後の技術開発の方向性等に関して議論する。

日　時：平成21年4月24日（金）13：00 ～ 18：20（受付開始12:30）
会　場：東京大学生産技術研究所　コンベンションホール（An棟 2階）
参加費：無料　　要旨集代：2000円　　懇親会費：3000円

プログラム等の詳細はホームページ（http://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html）でご確認ください。

■お問い合わせ・お申し込み　東京大学エネルギー工学連携研究センター　江頭桂子（えとう　けいこ）
電　話　03-5452-6899　　ファックス　03-5452-6728
電子メール：cee@iis.u-tokyo.ac.jp

【お願い】
CEE Newsletterの記事を転載または引用する際には、掲載する刊行物にその旨を明記し、該当刊行物を東京大学エネルギー工学連携研究センター事務局までお送りくださいますようお願いいたします。

CEE Newsletter　No.4　2009年4月20日

編集・発行
東京大学エネルギー工学連携研究センター
〒153-8505　東京都目黒区駒場4-6-1　東京大学生産技術研究所内
TEL：03-5452-6899　FAX：03-5452-6728
http://www.energy.iis.u-tokyo.ac.jp/index.html