

海外のSOFC研究開発状況

小笠原 慶

東京ガス株式会社

〒116-0003 東京都荒川区南千住3-13-1

Research and Development Activities of Solid Oxide Fuel Cells Overseas

Kei Ogasawara

Tokyo Gas Co., Ltd.

3-13-1 Minami-Senju, Arakawa-ku, Tokyo 116-0003

Abstract: A current status is surveyed of research and development of solid oxide fuel cells (SOFCs) in overseas countries. Several cases are presented concerning national subsidies for SOFCs in America and Europe, as well as R&D or deployment activities of SOFC manufacturers. These examples lead us to the idea that an activity towards SOFC deployment is glowing not only in Japan but also in the world.

Keywords: SOFC, overseas, research, development, project

1. はじめに

国内では各社のSOFC開発が着実に進展し、2011年には家庭用の小型コージェネレーションシステムが販売開始となるなど、SOFCは研究開発フェーズから初期導入フェーズに移行しつつあるとすることができる。一方、海外においても、国内とはコンセプトを異にするタイプも含めた多様なSOFCが、(一部は各国による補助支援政策のもと) 研究、開発、実証など積極的に推進されており、中にはBloomEnergy社(米国)のように商品化と呼んで差し支えないフェーズまで到達しているケースも存在する。いわば、全世界においてSOFC普及への歩みが加速しているのが現在の状況であり、これらの動きは今後も大いに注目されることである。

そこで本稿では、海外におけるSOFC研究開発の動きを、幾つかの取り組み例を挙げながら概観することとしたい。ただし上述のように、SOFCは海外においても、要素研究、セルスタック製造、システム開発、フィールド実証から、導入補助金を利用しての市場投入に到るまで、さまざまなレベルでのアクティビティが存在し、それらを本稿で網羅することは筆者の手に余る。ここでは欧米を中心に国・地域の研究開発支援策、および主要メ

ーカーの開発状況を紹介することとする。なおこれらの元となる情報は、国際会議等での報告や、各社・機関のWEBサイトから入手できる情報を参照した。従って、情報の濃淡や抜けなどにより必ずしも網羅的に紹介されていない可能性があることを容赦されたい。

2. 各国のSOFC関連政策

ここでは、国レベルでのSOFC研究開発関連プロジェクトなど支援策の取り組みのうち、主なものを紹介する。なお、製品の導入補助政策については省略する。

【米国】

エネルギー省(DOE)の化石エネルギー関連予算により、国立エネルギー技術研究所(NETL)が主導するSOFC研究開発プロジェクトであるSECA(Solid State Energy Conversion Alliance)プログラムが展開されている。このプロジェクトの最終目標は、石炭ガス化SOFC複合発電(IGFC)およびCCSの組み合わせにより、高効率かつCO₂排出のない大規模発電システムを実現することであるが、派生技術を用いた短期目標として、小中規模分散電源や自動車用補助動力装置、無人潜水艇用電源などの

開発が検討されている。推進体制は、システム開発を行うSOFCメーカーで構成される「Industry Team」、大学や国立研究所などが要素技術の研究開発を行う「Core Technology Program」、プロジェクト管理や応用検討を行う「Federal Government Expert」の3本柱からなる。現在Industry Teamに参画している企業グループおよびこれまでの主な成果を表1.に記す。

表1. SECA Industry Teamの成果例

FuelCell Energy/Versa Power Systems	
・ 25kWスタックで2,000時間超運転、劣化率約1%/1,000h	
・ 量産時のコスト見通し達成 (パワーブロック\$700/kW、スタック\$175/kW)	
UTC Power/Delphi	
・ 石炭ガス化模擬ガスを用い40段スタックで6.4kW発電	
・ 発電効率57%HHVの常圧IGFCコンセプト設計	
Rolls-Royce Fuel Cell Systems	
・ スタック耐久試験8,500時間超で劣化率0.5%/1,000h以下	
・ IGFCシステムコスト\$700/kWを算出	

2011 Fuel Cell Seminar, NETL発表資料より作成

なお年間開発予算は、2004年度以降5,000万ドル前後で推移してきたが、連邦政府のエネルギー政策転換の影響により、2012年度は半減となる可能性がある。

【欧州】

EUでは複数年の科学技術研究開発プロジェクトであるフレームワークプログラム (FP) を実施しており、現在は第7期 (FP7、2007-2013年度) が進行中で、燃料電池・水素関連の技術開発もこの枠組内で推進されている。その予算は期を追うごとに拡大し、FP7では7年間総額4.9億ユーロとなっている[1]。これが4種類の応用領域に分かれ、SOFCはこの内の「定地用発電・コージェネレーション」の領域 (予算1.75億ユーロ) に主に含まれている。予算は燃料電池・水素共同実施機構 (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking、FCH JU) を通じて研究開発や実証に助成されている[2]。定地用領域で現在進行中のプロジェクトは27件あり、うち14件がSOFC関連のものである。表2にSOFC関連プロジェクトの概要を記す。欧州では過去より平板形支持膜式SOFCの開発が盛んであり、プロジェクトの実施内容も、そのタイプのSOFC

が有する課題の解決を目指すものを重視した構成となっているように見受けられる。またプロジェクト参加機関も、欧州各国の多くの企業、大学、研究所等から広く募って構成されている。

表2. EUのSOFC関連プロジェクト

名称	実施内容
SOFCOM	SOFCコージェネレーション (発電/温熱冷熱、バイオガス利用、CO ₂ 分離) の評価
MMLCR=SOFC	量産低コスト化が可能な高ロバストSOFCスタックの開発
METSAPP	金属支持SOFCの定地用・移動用応用検討
SOFT-PACT	家庭用SOFCコージェネレーションのフィールド実証
LOTUS	低温作動SOFCシステムの開発
RAMSES	金属支持SOFCスタックの開発
SOFC-Life	SOFC劣化機構解明と寿命予測
CATION	大型システムの空気極側コンポーネント開発
SCOTAS-SOFC	硫黄、炭素、再酸化の耐性向上燃料極および支持体の開発
DeSign	スタック劣化手法の開発
Asterix3	HTceramixセル搭載システムの評価
ROBANODE	燃料極劣化機構の解明
ASSENT	燃料極側コンポーネント開発
GENIUS	SOFC診断システムの開発

【ドイツ】

燃料電池・水素関連の国家革新プログラム (NIP) において、2007年から2016年の10年間で計14億ユーロ (官民で7億ユーロずつ折半。国の予算は実証5億ユーロ、研究開発2億ユーロ) の予算規模で研究開発・実証が行われている。定地用燃料電池では、家庭用燃料電池実証プロジェクト「Callux」が実施されている。これは2008年度から2015年度までのプロジェクトで、総予算は8,600万ユーロ (官民でほぼ半分ずつ負担) となっている。2012年度までにSOFCおよびPEFC合わせた全800台のシステム設置完了を目指していたが、遅れが生じているようである。国立水素燃料電池機構 (NOW) の統括のもと、燃料電池メーカー3社、エネルギー企業6社が参画して推進されている。SOFCは、Hexis社 (スイス) 製およびVaillant社 (米国) 製の、いずれも1kWシステムが採用されている。

【英国】

学術プログラムである「Supergen」燃料電池プロジェクトが実施されている。現在は第2フェーズ（2009-2013年）が行われており、予算総額は360万ポンドである。大学を中心に燃料電池の分析・測定に関する研究が行われているが、産業界のパートナー企業として、SOFCではCeres Power社およびRolls-Royce Fuel Cell Systems社の2英国企業が参画している。

【デンマーク】

家庭用小型燃料電池コージェネレーションの普及によるCO₂削減を目指し、「Danish Micro Combined Heat & Power」プロジェクトが実施されている。2006-2012年のプロジェクトで、予算総額は2,000万ユーロ、7年間で100台の家庭用燃料電池コージェネレーションの実証試験を行うというものである[2]。国内の9社によるコンソーシアムを形成している。このうちSOFCにはTopsoe Fuel Cell社およびDantherm Power社の2企業が関連しており、前者がセルスタックを供給し、後者が1kW級システムを開発する体制となっている。

100kW機のシステム価格は70~80万ドルであり、決して低価格とは言えないが、州などの導入補助金を活用することで顧客メリットを確保している。現在は東海岸へも販売網を伸ばしているほか、本機を用いた電力販売事業も行っている。システムはいずれも定格連続運転を前提とし、また発電専用のモノジェネレーションであり廃熱利用は現在のところ考えていない。価格のことも考え合わせると、当面は導入補助金を活用した北米市場での普及拡大を進め、海外、さらにはコージェネレーションシステムへの製品展開に対する優先度は低いものと考えられる。

セルスタックは、平板形自立膜式（電解質支持）セルおよび金属セパレータにより構成される。同社ならびに導入先からのシステム運転実績データ開示がないため評価は難しいが、同タイプの他社製セルスタックの実績から類推すると、耐久性面での不安が考えられる。システムの設計寿命までのスタック交換回数をゼロにすることが、システムコスト低減の可否を大きく左右するものと思われる。

3. 主なメーカーの開発状況

続いて、最近の開発に進展の見られる主なSOFCメーカーの状況を概説する。

Bloom Energy (米国)

2001年設立のベンチャーであり、多額の資金をもとに長期間水面下での研究開発を進めていたが、2010年に100kW級の発電装置である「Energy Server」の販売を開始、本拠地であるカリフォルニア州の有力企業を中心に、これまで200台ほどのシステムを販売している。現在では100kW機に加え、200kW機もラインナップされており、2011年にはカリフォルニア州にある製造設備を4倍に増強、日産1台のシステム製造体制を構築したほか、さらに東海岸での工場建設も表明している。

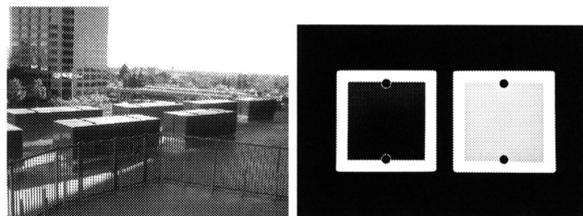


図1. Energy Serverおよび平板形セル

表3. Energy Serverの諸元

	ES-5400	ES-5700
電気出力	100kW	200kW
発電効率(LHV, AC)	50%以上	←
燃料	天然ガス、バイオガス	←
サイズ (m)	4.8×2.6×2.1	8.1×2.7×2.1
重量 (トン)	11	17

FuelCell Energy (米国)

メガワット級のMCFCシステムを世界50サイト、80機という規模で展開している同社（FCE社）であるが、将来技術の一環として、米国SECAプログラムのもとSOFCのシステム開発を行っている。パートナー企業であるVersa Power Systems社（VPS社。後述）からスタック供給を受けている。SECAプログラムにおいて、2020年頃の100MW超級IGFC発電プラントを最終目標とする一方、短期目標として2014年頃の250kW分散発電システムの実現を目指しており、現在はその要素技術となる60kWスタックモジュールの開発に取り組んでいる。VPS社の15kWスタックを基本単位としたブロック構造の採用により、製造コストの低減を図っている。モジュール開発と並行して、中大容量システムの概念設計も行っており、天然ガス燃料の250kW機で発電効率55.5%HHVといった

性能を見込んでいるほか、670MWのIGFC発電プラントのレイアウト検討なども進めている。

Versa Power Systems (カナダ)

セルスタック製造を中心としたベンチャーであり、上述のSECAプログラムにおいてFCE社と共同で60kWモジュールの開発を進めているほか、Wärtsilä社（フィンランド）の開発する50kWシステム、およびフィンランド技術研究センター（VTT）の10kWシステムへスタックを供給するなどの活動を行っている。本社は米国にあるが、製造設備を含む大半の機能はカナダ（カルガリー）を拠点とし、そこではセル作製からモジュール組立、試験ベンチなどの各種設備が3,000m²の建物内に展開されている。VPS社のセルスタックは、平板形燃料極支持膜式セルおよびフェライト系合金セパレータから構成される[3]。低コストを実現するため、単純な構成要素や製造プロセス、また比較的高い電流密度での運転条件を採用している。1セルスタックから大型セル積層の20kWスタックまで多くの運転実績を有しており、耐久試験では最長25,000時間の連続運転を実施している。各種改良により耐久性能は改善し、大面積セルスタックでの10,000時間弱の運転試験における劣化率は1%/1,000h弱となっているが、実用化にはさらなる劣化率低減が必要である。また熱サイクルの実績は少ないが、ガスシール材料にセラミックを用いたコンプレッションシールを採用しているため、熱サイクルに対しては比較的ロバストである可能性がある。

前述のSECAプロジェクトでは、25cm角のセルを96段積層した16kWスタックを4基接続した60kW級モジュールの製作にFCE社と取り組んでいる。一方VTTへは同じく25cm角セルの64段スタックを供給し、これを用いてVTTが製作した発電ユニットにおいて、DC出力9.8kW、約1,500時間の連続運転といった実績を残している[4]。

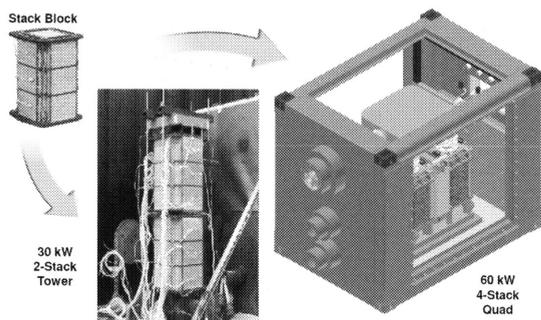


図2. 60kWモジュールの製作 (SECA)

2011 Fuel Cell Seminar, VPS発表資料より

Ceramic Fuel Cells Limited (オーストラリア)

同社（CFCL社）はオーストラリアの国立研究所が母体となって設立されたSOFCシステムメーカーであり、セルスタックからシステムまでを自社で製作、世界各国に販売してフィールド実証を行っている。日本ではパロマ、大阪ガス、東京ガスへの納入実績がある。同社の製作する発電ユニット「BlueGen」は、定格1.5kW発電時の効率が60%LHVと、他社機を凌駕する高い発電効率を誇り、これにより、燃料費が安く、定格出力で連続運転してもメリットのある余剰電力買取り制度の充実した国（ドイツなど）を主要なターゲット市場とした販売拡大を目指している。そのためサプライチェーンを考慮して2009年にドイツ国内に量産工場を設立し、セルスタック半自動製造設備を整備したほか、当初オーストラリアにあった発電ユニット製造ラインも集約し、現在年間1,000台の発電ユニット製造が可能である。

表4. BlueGenの諸元

発電出力	1.5kW
発電効率	60% (1.5kW出力時)
総合効率	最大85%
システム設計寿命	10-15年
燃料	天然ガス

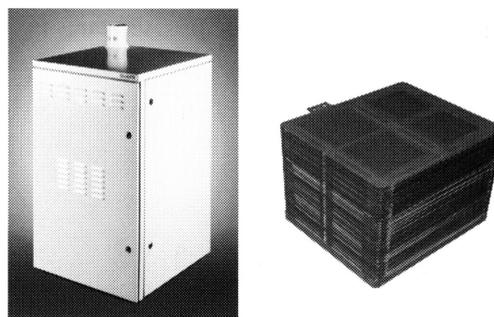


図3. BlueGen発電ユニットおよびセルスタック

これまでに世界で80台超の発電ユニットが納入され、その大部分で初期発電効率60%LHV以上が確認されている。受注済みの分も含めると、世界9カ国で300台超、さらにエネルギー会社との小型コージェネレーション開発の受注分が200台としている。導入された発電ユニットの運転実績を見ると、長いもので10,000時間を超えるものが現れてきているが、劣化率はおしなべて1%/1,000h程度となっており、10年運転のためには途中でのスタック交換が必要というのが現状である。セルスタックは、平板形燃料極支持膜式セルおよびフェライト系合金セパ

レータから構成されており、燃料流通の工夫により燃料利用率を向上させたこと、またモジュールの放熱ロスを抑えたことなどにより、高い発電効率を実現できているものと考えられる。一方、現状の仕様においては、起動停止や負荷追従の速度が遅いことや、熱サイクルへの耐性が極めて低いため、日本市場への適合性が見出しにくい。定格連続運転を前提とした海外においても、メンテナンスによる起動停止の要求は少なからずあるため、CFCL社は熱サイクル耐性を向上させる改良開発を実施中である。

Topsoe Fuel Cell (デンマーク)

Haldor Topsoe社の子会社として設立された同社 (TOFC社) は、SOFCセルスタックおよびモジュールの開発メーカーとして、外部のシステムメーカー等に部材供給を行っている。同社のセルスタックは、VPS社やCFCL社と同様、平板形燃料極支持膜式セルおよびフェライト系合金セパレータから構成されており、ショートスタックでは10,000時間超の耐久試験で1%/1,000h以下の劣化率を確認している。スタックの供給先として、前述のデンマーク国プロ向けに、1kWの発電モジュールをDanttherm Power社に供給しているほか、50kWシステムを開発中のWärtsilä社にもスタック供給を行っている。スタックの改良は継続しており、最近では空気圧損を低減して出力密度を高めたOAM (Open Air Manifold) 構造のスタックを開発している。また並行して、スタックのロバスト性向上を図るための金属基板支持膜式のSOFCスタックの開発も行っている。

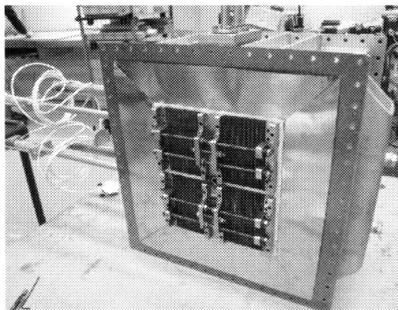


図4. OAM構造スタックを搭載したモジュール
2011 Fuel Cell Seminar, TOFC発表資料より

Wärtsilä (フィンランド)

Wärtsilä (バルチラ) 社は2007年から2010年にかけて、TOFC社製セルスタックを搭載した20kWシステム (WFC20) を3台製作し、定地用 (天然ガスおよびラン

ドフィルガス燃料) および船舶電源用 (メタノール燃料) として実証試験を行い、数1,000時間の運転実績を残している。その後、定地用50kWシステムの商用化を目指し、そのプロトタイプ機 (WFC50) の開発に取り組んでいる。システムは2台を製作予定で、搭載されるセルスタックはTOFC社およびVPS社の平板形セルスタックを検討している。この結果をもとに改良したシステム (WFC50 mkII) を商品化することを考えており、その時期を2014年頃と見込んでいる。日本市場へは協業企業である日立造船が、同時期に市場導入する意向を表明している。

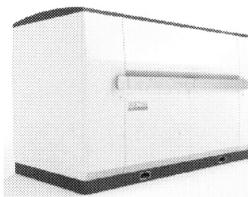


図5. WFC50外観

表5. WFC50 mkII目標仕様

燃料	天然ガス バイオガス
電気出力	AC55kW
熱出力	17kW
発電効率	53%LHV
総合効率	69%LHV
サイズ (m)	1.6×3.5×2.05

Wärtsilä発表資料より

Ceres Power (英国)

英国のベンチャーである同社は、1kW級の家庭用SOFCコージェネレーションシステムを開発を行っている。金属支持の平板形セルスタックを特徴としており、低温作動、コンパクト、耐熱衝撃性、高ロバスト性などを謳っている。コージェネレーションシステムも大変コンパクトに設計しており、英国の家庭で主流の壁掛式ボイラーの置き換えを想定している (貯湯タンクは別置)。

国内外のエネルギー事業者より資金提供を受け、システム納入の協定を締結している。具体的にはBritish Gasに37,500台、Calor (英国のLPG事業者) に20,000台、Bord Gais (アイルランドの都市ガス事業者) に16,000台、といった具合であり、最近ではオランダのItho-Daalderop Groupを通じ、ベネルクス国に78,000台を供給する協定を締結している。これら資金をもとに量産工場を建設、オープンさせたが、当初計画のシステム供給開始時期が2011年から2014年に先送りされるなど、耐久性・信頼性の面で改善の余地を残す開発状況にあることを窺わせる。既に少数台のフィールド試験も行っているが、プライベート資金による開発のため成果の開示が十分ではない。ショートスタックの耐久性では、数1,000時間の運転で劣化率1%/1,000h強といった結果が示されている。

また発電システムの現状設計性能は、発電効率34%LHV強（商品化時目標は39%強）、総合効率85%LHV強などとなっている[5]。

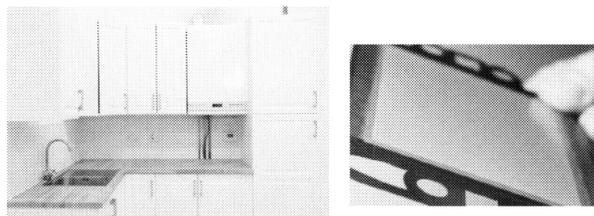


図6. 発電ユニットおよび金属支持形セル

Hexis (スイス)

SOFC開発の歴史は古く、過去（2001年）にSulzer社の傘下で100台規模のフィールド実証試験を行った実績がある。Sulzer撤退後に技術を継承し、1kW級家庭用コージェネレーションシステムの開発を継続している。2009年からはドイツのCalluxプロジェクトに参画してフィールド実証を行っており、プロジェクト以外の試験も含め、これまでに60台超のシステムをドイツ、スイス、オランダの家庭に設置している。今後フィールド試験を拡大し、2013年の市場投入を目指している。

最新のシステム「Galileo 1000N」は、発電効率が30-35%と低いが、これは燃料改質に部分酸化を用いているためと考えられる。欧州北部では冬期の寒さが厳しく、熱の利用先が十分に存在するため、発電効率の向上を前提としないという、CFCL社などとは設計思想を異にする装置と言える。逆に夏期にはシステムを停止しておくことを前提とする。

セルスタックは、合金セパレータを用いた平板形自立膜式（電解質支持）セルを採用している。最も長期のスタック運転試験は30,000時間近くになるが、劣化率は1.8%/1,000hと大きい。実システムの運転においても1%/1,000h強の劣化が認められる。また8回のシステム停止を経験してセルスタックに破損のないことも確認されている[6]。

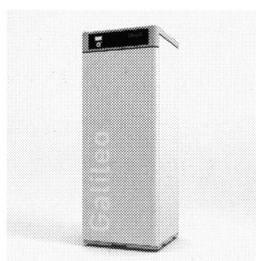


図7. Galileo 1000N外観

表6. Galileo 1000N仕様

電気出力	AC1kW
熱出力	1.8kW
発電効率	30-35%LHV
総合効率	95%LHV
燃料	メタン バイオガス
サイズ (cm)	62×58×164
重量 (kg)	170

4. おわりに

上述の通り各機関の取り組み内容を紹介したが、列挙したメーカーのSOFCのタイプが、はからずも全て平板形の金属セパレータを用いるものとなった。これは海外のSOFC開発の特徴を示すものとも言うことができ、上記で紹介し切れなかったが、欧米には平板セルの専門メーカーが複数存在して、システムメーカー等にセルを供給しているケースも多く見られる。これを、主要構成部材のコモディティ化、生産体制の水平分業化など、SOFCの普及拡大に繋がる好ましい動きと捉えることも可能である。一方で、上述各社の精力的な開発努力にも関わらず、普及の重要条件である耐久性・信頼性の向上については必ずしもゴールに到達できているとは言えず、スタックのタイプを変更して開発を進めた日本メーカーのSOFCがいち早く実用化に漕ぎ着けたという事実も見逃すべきではない。いずれにしても、海外メーカーの今後の開発進展には引き続き注視していく必要があることは間違いない。現状、海外メーカー製品で日本市場に適合するものはほとんどないと思われるが、逆に国内メーカー製品の海外進出の可能性は大いにあり得ると考えられ、事実そのような話題も耳にするようになってきた状況である。このようにしてSOFC製品のグローバル化が進んだ場合や、あるいはスマートエネルギーや水素など、社会体制の変革が今後進んでいった場合を想定した上で、改めてグローバルな視点で国内外メーカー製品の位置付けについて考えていくことも重要である。

参考文献

1. R. Steinberger-Wickens, *ECS Trans.* **35**(1), 19-29 (2011).
2. "2012年度版 定地用燃料電池の現状と将来展望", デジタルリサーチ, 2011.
3. B. Borglum, E. Tang and M. Pastula, *ECS Trans.* **35**(1), 63-69 (2011).
4. M. Halinen, M. Rautanen, J. Saarinen, J. Pennanen, A. Pohjoranta, J. Kiviahio, M. Pastula, B. Nuttall, C. Rankin and B. Borglum, *ECS Trans.* **35**(1), 113-120 (2011).
5. R. Leah, A. Bone, A. Selcuk, D. Corcoran, M. Lankin, Z. Dehaney-Steven, M. Selby and P. Whalen, *ECS Trans.* **35**(1), 351-357 (2011).
6. A. Mai, B. Iwanschitz, U. Weissen, R. Denzeler, D. Haberstock, V. Nerlich and A. Schuler, *ECS Trans.* **35**(1), 87-95 (2011).