第1回革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業
研究資金制度プログラム　中間評価検討会
参考資料4

「革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業」研究資金制度プログラム

補足資料

平成２９年１２月８日

経済産業省産業技術環境局国際室

目次

ページ

１．個別テーマ概要　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ １
２．成果の内訳　・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ １７
３．国際共同研究によって得られるメリットおよび想定短縮年数　・・・・・・・・・ １８

１．個別テーマ概要

【テーマ名】①　セルロース系バイオマスからの高効率バイオ水素生産プロセスの研究開発

【所属・代表研究者名】地球環境産業技術研究機構　バイオ研究グループ　乾　将行

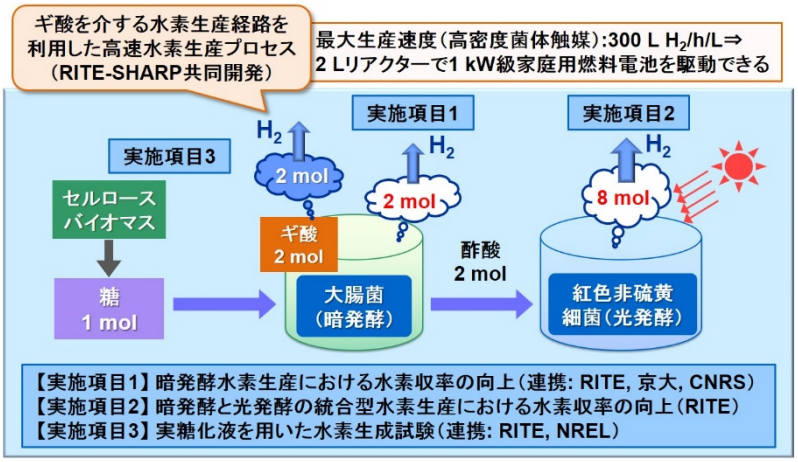
【連携機関】（米）国立再生可能エネルギー研究所（NREL）、（仏）国立科学研究センター（CNRS）

【概要】

バイオ水素生産は、CO_2 フリーの水素製造技術として期待されるが、経済性ある技術として確立するためには生産性の飛躍的な向上が必要である。地球環境産業技術研究機構（RITE）はシャープ（株）と共同開発した高速バイオ水素生産技術を有している。本技術では、ギ酸からの水素生成酵素複合体の発現を強化した大腸菌を高密度菌体触媒として用いることにより、最大で 300 L/h/L の水素生産速度を達成している。水素生産工程は細胞増殖と切り離されており、従来の増殖に伴う発酵水素生産と比較して生産速度は 2 桁程度高く、2 L のリアクターで家庭用燃料電池を動かせる計算となる。本技術に関して 19 件の特許を取得している。本技術を基盤として、本研究では（米）国立再生可能エネルギー研究所（NREL）、（仏）国立科学研究センター（CNRS）、および再委託先の京都大学と連携し、バイオマス原料（コーンストーバー）あたりの水素収率の大幅向上を図る。

【特筆すべき成果】

本研究では、バイオマス（糖）からの水素収率向上のため、国内外の研究機関と連携して、複雑な生合成機構を必要とする水素生成酵素（ヒドロゲナーゼ）複合体の高効率異種発現系の構築に取り組んでいる。ヒドロゲナーゼの多重破壊をベースとした異種発現評価系を構築し、導入した超好熱性アーキアや好気性菌由来の酵素複合体が機能することを示した。一方、コーンストーバーに含まれる主要な C5 糖であるキシロースからの水素収率が副生経路の破壊により向上することを確認し、さらに糖化前処理液およびこれに含まれるフラン類の濃度と水素生産阻害効果の関係を明らかにした。一方、大腸菌による暗発酵水素生産で副生する酢酸から光発酵によりさらに水素を生産させるため、光発酵に用いる紅色非硫黄細菌の改良に取り組んでいる。水素生産に関わると予想される各種遺伝子の解析に基づき、酢酸代謝経路の改変が生産性の向上に有効なことを見出した。本技術は新聞（化学工業日報、DIARIO DE LEÓN）、一般科学雑誌（電気評論、広島醗酵会会報）等に掲載され、また、国際ビジネスフォーラム（BioJapan）や招待講演等を通して注目を集めた。本技術について多くの企業から問い合わせがあり、複数の企業と実用化に向けた今後の研究開発プラン等について検討を行っている。



暗発酵と光発酵の統合型水素生産プロセス

【テーマ名】② 高炭素収率を特徴とするセルロース系バイオマスからのバイオ燃料ブタノールの製造に関する研究開発

【所属・代表研究者名】地球環境産業技術研究機構 バイオ研究グループ 乾 将行

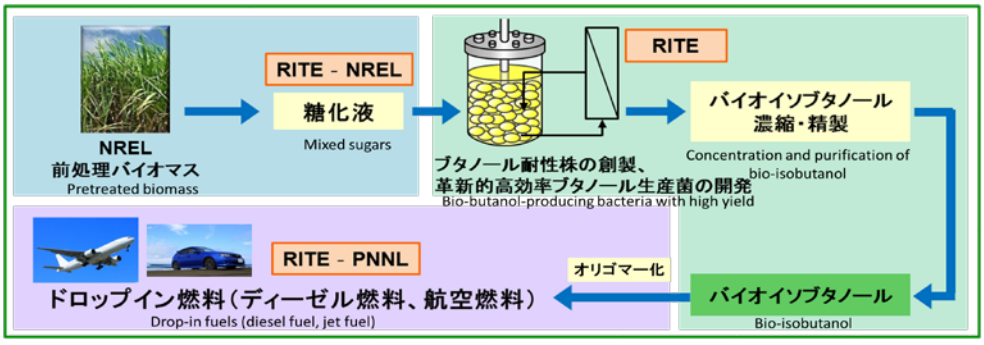
【連携機関】（米）国立再生可能エネルギー研究所（NREL）、（米）パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）

【概要】

（米）国立再生可能エネルギー研究所のバイオマスの前処理・糖化技術と、地球環境産業技術研究機構（RITE）が開発した増殖非依存型バイオプロセスを融合させ、セルロース系バイオマスからガソリン代替燃料や、ジェット燃料素材として利用可能なブタノールを生産する革新的技術の確立を目指している。また、米国パシフィック・ノースウェスト国立研究所と共同でブタノールを化学的にオリゴマー化して航空燃料などのドロップイン燃料化する研究開発については、平成 29 年度からの追加課題として技術開発を進めている。

【特筆すべき成果】

（米）国立再生可能エネルギー研究所は、世界で最も安価なバイオマス糖化技術を有しており、実際にコーンストーバーを前処理したサンプルを入手して酵素糖化を行い、得られた実糖化液を原料に RITE の増殖非依存型バイオプロセスに適用して 1.5 g/L/h の高生産速度を達成した。また、スマートセル技術を活用した代謝経路への迂回経路の導入や、解糖系の強化、副生経路の破壊、ブタノール生産に必要な高活性酵素遺伝子の高発現などを通じて、コリネ型細菌の遺伝子組換え体作製を進め、グルコースからのブタノール生産速度は 3.3 g/L/h、及び対糖収率 81%と世界最高値を達成済みである。また、バイオ生産によって得たブタノール溶液を濃縮するため、従来のように蒸留に頼らない方法として、省エネ型パーベーパレーション膜の開発を進め、膜素材の最適化を行った。本年度は、本膜素材を用いたモジュールの設計・試作を進め、ブタノールの濃縮を実現する予定であり、本法が実現すれば 90%以上のエネルギー削減が可能となる。更に、実糖化液からイソブタノールを生成する過程で、実糖化液に含まれる未利用の酢酸をエタノールに同時変換する技術開発を世界で初めて進めており、ブタノールとエタノールの混合物をオリゴマー化して航空燃料などのドロップイン燃料化を目指している。研究進捗については、BioJapan2017 にて口頭発表を行い、さらに出展ブースで同研究内容についてポスター説明を行った。成果発表については、日本農芸化学会 関西・中四国・西日本支部にて発表等 計 6 件、新聞記事 計 7 件、発表論文 計 3 件、講演 計 13 件。



セルロース系バイオマスからのブタノール及びドロップイン燃料製造プロセスの概要

【テーマ名】③ 過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発

【所属・代表研究者名】 産業技術総合研究所 省エネルギー研究部門 朝倉 大輔
宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 曽根 理嗣

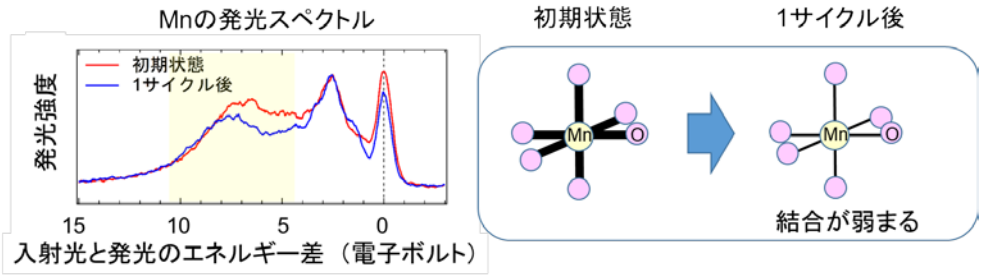
【連携機関】(米)ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)、(米)国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、(米)SLAC 国立加速器研究所(SLAC)、(米)アメリカ航空宇宙局(NASA)、(独)ドイツ航空宇宙センター(DLR)、(欧州委員会)共同研究センター(JRC)、(欧州)欧州宇宙機関(ESA)、(蘭)ユトレヒト大学

【概要】

リチウムイオン電池において、安全性の向上は喫緊の課題である。本研究では、10℃程度でも問題となる低温環境での金属リチウムの析出等の劣化機構を解明するとともに、その抑制法の考案に基づく材料合成と実用化への検討を、産業技術総合研究所(産総研)、LBNL、SLAC の最先端放射光測定技術、産総研と NREL の高度材料合成技術、長岡技術科学大学 (再委託)、JRC、NASA、ESA における安全性評価技術、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の精密電気化学評価技術、DLR の熱力学シミュレーションを中心とした分野融合的国際共同研究にて遂行している。安全性を備えた低コスト・高容量電池を作成し、宇宙等の過酷環境でのリチウムイオン電池の利用促進を通じて、将来的には広く社会に普及させ、大幅な CO_2 削減効果をもたらすことを目的とする。

【特筆すべき成果】

産総研の先端的な放射光解析により、マンガン酸リチウム系正極材料において、マンガンと酸素の結合の強さが充放電サイクル特性と相関していることを突き止め、一部のマンガンをアルミニウムで置換した材料の特性が向上する原因を明らかにした。本結果は英国王立化学会の専門誌 Physical Chemistry Chemical Physics (Vol.19, 16507-16511(2017))に掲載された。また、産総研、および放射光施設 SPring-8 の研究成果記事 (2017/8/16) に採り上げられ、日経新聞電子版等 (他 2 件) の電子媒体記事にも採り上げられた。今後、本結果を、電極表面修飾や元素置換等を用いた高安定な材料設計につなげていく。JAXA では市販のリチウムイオン電池に対して精密な電気化学測定を実施し、充放電を繰り返していく際の交流インピーダンスの推移をモニターすることで、電池の内部状態評価が可能であることを実証した。長期運用時のリチウムイオン電池の劣化診断につながる重要な成果である。本結果は、日本の電気化学会の専門誌 Electrochemistry (Vol. 84, 601-604 (2016)) に掲載された。今後、上記の研究機関の連携の下、より高い安全性・安定性を有するリチウムイオン電池の開発を進めていく。



マンガン酸リチウムの先端放射光解析と構造安定性に関わる知見

【テーマ名】④ CO_2を利用した水素製造・貯蔵技術 −二酸化炭素の再資源化技術によるクリーン水素キャリアシステム−

【所属・代表研究者名】 産業技術総合研究所　創エネルギー研究部門　エネルギー触媒技術グループ
姫田　雄一郎

【連携機関】

（米）ブルックヘブン国立研究所（BNL）、（米）パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）、（独）ライプニッツ触媒研究所、（スイス）スイス連邦工科大学ローザンヌ校

【概要】

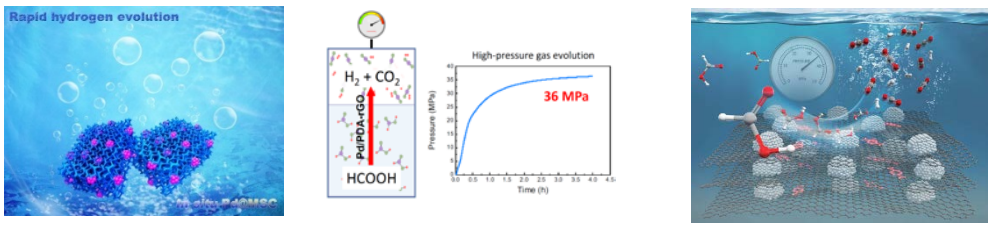
二酸化炭素の再資源化技術によるクリーン水素キャリアシステム構築のための、高性能・高耐久性固体（固定化）触媒の開発と、それらを用いた高圧水素連続発生・供給プロセスの構築を図り、ギ酸を用いた水素貯蔵システムの実証化に向けた基盤的研究開発を行う。

【特筆すべき成果】

高性能触媒開発にむけた新しい手法を開発し、多孔質炭素担体のメソ孔の中にパラジウム塩前駆体を導入し、その場還元法を用いて、パラジウムナノ粒子を炭素担体のメソ孔の中に固定化することに成功した。通常の還元法による還元や、パラジウム塩前駆体をメソ孔の中に導入せずに作製した試料と比べ、本手法で調製した試料は、ギ酸分解・水素放出反応において、極めて高い活性を示し、本年度目標を超える水素放出速度を達成した。

この**世界最高効率の固体触媒**を用いた**高圧水素発生**を検討した結果、固体触媒を用いた例では**世界初**かつ**最高圧力**である**36 MPa** を達成した（図：中）。これにより、35 MPa クラスの燃料電池車やフォークリフトなどへの利用が可能である基盤技術として実証することに成功した。

現在、「触媒反応機構及び触媒活性と触媒構造との相関関係」および「高圧発生時における触媒表面上の反応メカニズム」の解析を（米）パシフィック・ノースウェスト国立研究所と、「高性能触媒構造の DFT 計算を（米）ブルックヘブン国立研究所と共同で進めている。また、（独）ライプニッツ触媒研究所、（スイス）スイス連邦工科大学ローザンヌ校との共同論文を執筆中である。なお、近日中に PNNL と本テーマを中核とする共同研究を進める Memorandum of Understanding（MOU）締結に関するプレス発表を行う予定である。



高性能触媒のイメージ（左）、高圧水素発生（中）、高圧水素発生のイメージ（右）

【テーマ名】⑤ 系統協調型の分散電源大量導入技術の開発

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 大谷謙仁

【連携機関】(米)サンディア国立研究所(SNL)、(墺)オーストリア技術研究所(AIT)、国際エネルギー機関(IEA)

【概要】

現在、わが国の配電系統において、太陽光発電(PV)の大規模導入が進んでいるが、PV が大量かつ集中的に連系された配電系統においては、電圧上昇の問題が大きくなることが予想され、一部の地域では既に問題が生じている。この問題に対し、力率調整、無効電力制御などの系統サポート機能(以下サポート機能)を持つ次世代型パワーコンディショナ(以下、スマートインバータ)による解決が期待されている。福島再生可能エネルギー研究所(FREA)のスマートシステム研究棟を最大限活用し、太陽光発電及び蓄電池のためのスマートインバータの総合的な試験・研究開発プラットフォームを構築し、メーカによる世界市場の獲得を支援する。スマートインバータの試験・研究開発プラットフォームの構築のため、米欧の研究機関と共に相互運用性のあるスマートインバータの制御プロトコルを開発する。

【特筆すべき成果】

スマートインバータの複数のサポート機能が電圧上昇抑制機能による有効電力量(太陽光発電所有者から見ると電力売り上げ分に相当)に与える影響を比較評価するために、昨年度に開発したスマートインバータの影響評価が可能な系統解析シミュレーションツール「SoRA-Grid」を改良し、サポート機能の分析を行った。分析したサポート機能は以下の 3 つである.

(1) 指定無効電力機能(Q 指定):設定された無効電力指令値通りに無効電力の出力を行う機能

(2) 指定力率機能(PF 指定):設定された指令力率で動作する機能

(3) 電圧/無効電力制御機能(Volt-Var) :連系点の電圧に応じて無効電力出力を制御する機能

分析に当たっては、図 1 に示す配電系統モデルを用いた。低圧系統には 5 つの住宅負荷が接続されており、全住宅に 5kW の PV が設置した。全体で 150 個の負荷と PV が接続されている。PV は容量 5kVA のスマートインバータを介して低圧系統に連系している。PV の出力は、NEDO による日射量データベース METPV-11 から得られた日射量データを用いた。住宅の負荷は電気協同研究会よる文献で示されている負荷データをもとに作成し、全住宅でそれぞれ異なる負荷を与えた。

比較検討の結果、有効電力量を最大化するために最適な機能は(1)PF 指定と(3)Volt-Var であり、無効電力量当たりの有効電力量は PF 指定が最も大きくなった。

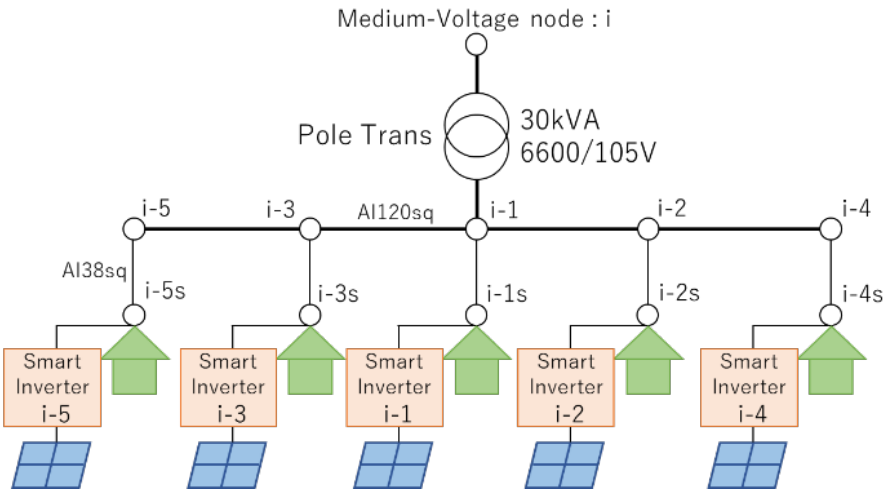


図1　分析に用いた住宅地区配電系統モデル

このように、スマートインバータを利用した PV 及び蓄電池システムが多数台配電線フィーダに配置されることを想定した様々な電圧分布等の計算を可能とし、電圧制約等の解消のためのスマートインバータの機能検証が行えるシミュレーションツールは、国内では SoRA-Grid が初めてであり、今後のスマートインバータの国内導入の影響評価を促進することが期待出来る。この SoRA-Grid は、汎用的な計算ツールである MATLAB で開発したため、入力データの作成、計算、分析、グラフ描画等の作業を一貫して MATLAB 上で実施可能である。また、ソースコードの可読性が高く、将来の機能追加が容易であり、教育用途にも適する。系統データ（系統構成，機器データ）は GUI による容易な操作が可能なように Simulink 上で動作する。PV 出力，需要データ等の時系列データの形式（フォーマット）は、利用者自身の自作データによる計算が容易な様に、CSV ファイルとした。図 2 に画面の例を示す。

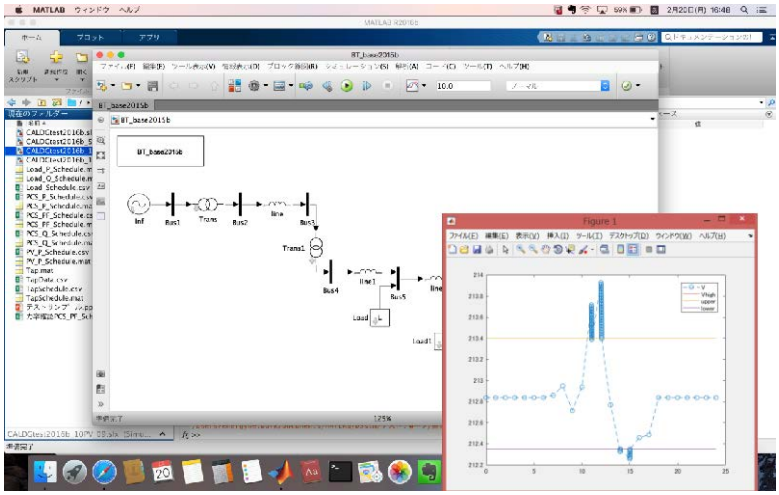


図 2　シミュレーションツールの画面例

【テーマ名】⑥　太陽光による有用化学品製造

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　太陽光発電研究センター　佐山和弘

【連携機関】（米）ブルックヘブン国立研究所（BNL）

【概要】

様々な化学薬品の製造には膨大な化石燃料のエネルギーが使用されており、その省エネルギー化や CO_2 フリー化は非常に重要な課題である。太陽光エネルギーを利用した光電気化学的な化学薬品製造プロセスが高効率・低電圧で実現できれば大きな省エネ効果と低コスト化、大幅な CO_2 削減が期待できる。太陽エネルギーを利用する光電気化学的な水分解反応において、カソード側で水素を製造販売するだけで利益を上げることは大変であるが、アノード側で酸素よりも数百倍（水素より数十倍）付加価値のある化成品を製造できれば経済性は飛躍的に向上できる可能性がある。カソード側では水素以外に還元的な高付加価値品（過酸化水素等）も製造できる。本研究では、半導体光電極を用いて、太陽光エネルギーで水を分解し、水素製造だけでなく様々な高付加価値の化学薬品（過硫酸や次亜塩素酸塩、過酸化水素、などの酸化剤や酸化生成した有機物等）を効率良く製造する革新技術を開発する。

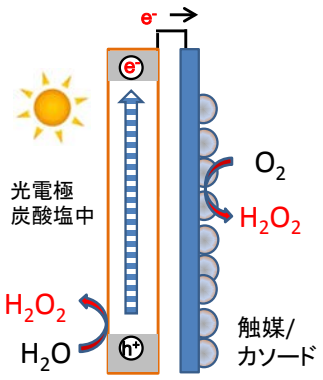
【特筆すべき成果】

この光電極を用いた有用化学品製造の分野は非常に重要であるにも関わらず、これまで意義付けが行われておらず世界的に見ても未開拓の分野である。産総研では本事業によって多くの反応を開拓し、その反応選択性（電流効率）を 100%に近づけ、同時に特許出願（3 件、準備中 2 件）を行ってこの新規研究分野をリードしてきた。下記に代表例を示す。

・過酸化水素（H_2O_2）の水からの生成反応に関して、アノード光電極上のアルミナ表面処理を行うことで生成した H_2O_2 の O_2 への逐次酸化分解を抑制でき、高い電流効率を維持できること見いだしたことは特出すべき成果である。電流効率は従来の 54%から約 80%への大きく向上できた。H_2O_2 の微量分析技術を確立して、炭酸塩中では反応のごく初期過程において高選択的に H_2O_2 が生成していることを確認できたことは学術面だけでなく実用化面においても重要である。さらに、米国ブルックヘブン国立研究所のカソード電極技術を基に、貴金属を使わずに酸素から H_2O_2 を高効率で生成できるカソード電極を開発できたこと、ノンバイアスで両極から H_2O_2 が生成できたこと（図）、などは非常に重要な進捗である。

・その他に、次亜塩素酸生成では従来の 50%以下から 80%以上に向上できた。Ce^{4+} 生成では対アニオンを変化させることで従来の 40%をほぼ 100%に向上できた。

新規反応の開拓としては、次亜臭素酸製造や、メトキシフラン合成、芳香族アルコールをアルデヒドやケトンに変換する反応などの多くの電流効率の高い反応を開発できた。



【テーマ名】⑦　単結晶化・積層化による太陽電池の高効率化技術の開発

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　太陽光発電研究センター　菅谷　武芳

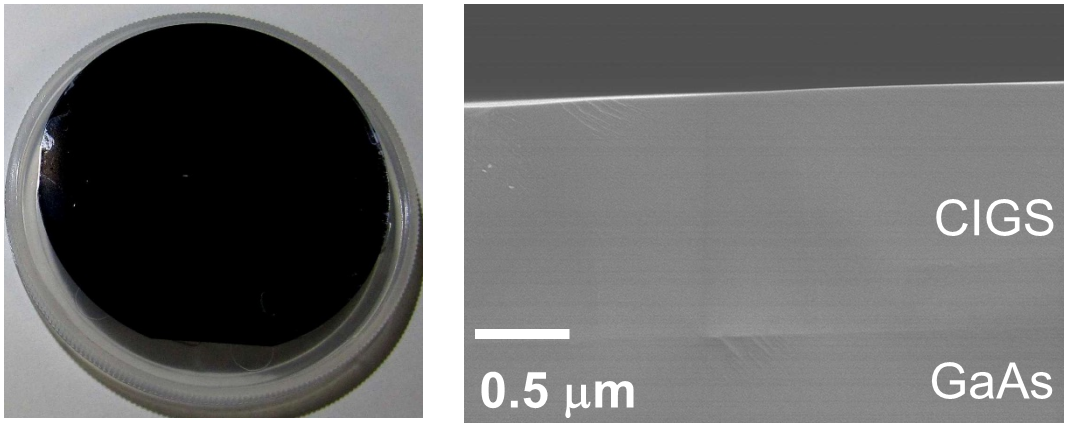
【連携機関】（独）Fraunhofer 研究機構、（瑞西）スイス連邦材料試験研究所（EMPA）、（米）国立再生可能エネルギー研究所（NREL）

【概要】

$Cu(In,Ga)Se_2$(CIGS)系化合物の単結晶薄膜を用いて、理論限界変換効率に迫る単結晶薄膜太陽電池を開発する。その際、多結晶 CIGS 太陽電池の高効率化技術を駆使することで短期間にて高効率化を図る。次に多結晶 CIGS 太陽電池の問題点（ワイドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化）を解決することで、小面積セルで変換効率 25%を達成させる。その後、ワイドギャップ CIGS 太陽電池と多結晶 CIGS 太陽電池をスマートスタック技術によって多接合化し、変換効率 30%を超える、低コスト多接合太陽電池を開発する。連携機関と要素技術の共同開発を行うことによって、目標達成を加速させる。

【特筆すべき成果】

多結晶 CIGS 太陽電池の製造法である三段階法によって、単結晶 CIGS 層をエピタキシャル成長させても、空孔や歪の多い CIGS 層となり、高効率太陽電池を実現できない。そこで、高品質結晶成長が行える分子線エピタキシー法にて単結晶 CIGS 薄膜の成膜を行い、空孔および結晶欠陥の発生抑制に成功した。図は単結晶 CIGS wafer（2 インチ、鏡面）と、断面 SEM 像を示している。CIGS 結晶成長において、化学量論比を精密に制御することは重要であり、電子線回折および赤外線カメラによる“その場観察”を行い、再現性の高い結晶成長を行う技術の開発を行っている。得られた単結晶薄膜の物性評価を行ったところ、多結晶 CIGS 薄膜よりも発光寿命が長いことが確認され、高効率太陽電池としての潜在能力が高いことがわかった。これらの成果は、2017 年 11 月に開催される第 27 回太陽光発電国際会議（PVSEC-27）にて発表を行う。今後は裏面障壁層、表面パッシベーション技術、アルカリ金属添加、ドーピング技術、剥離技術の開発により、高効率太陽電池を実現させる。



単結晶 CIGS wafer（2 インチ）と断面 SEM 像

【テーマ名】⑧ 超臨界地熱資源による革新的発電のための坑内機器基礎技術・素材の開発

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究センター 浅沼 宏

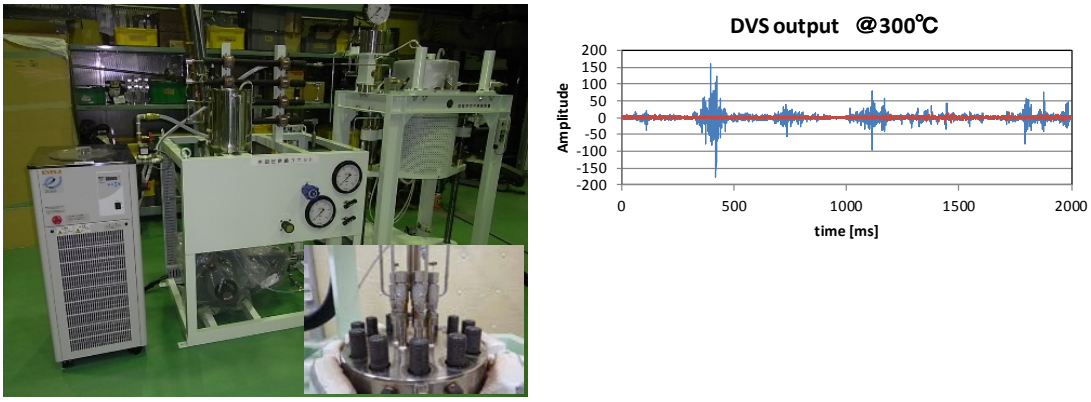
【連携機関】(米)ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)、(米)サンディア国立研究所(SNL)、(米)米国地質調査所(USGS)

【概要】

国内に多数存在する古火山，古カルデラの地下数 km には，沈み込み帯起源の超臨界地熱資源(400～500℃)が大量に存在する可能性があり(国内総量:数 100GW×30 年程度)，これを利用できれば我が国のエネルギー政策に大きなインパクトを与える。本研究では，産総研の坑内機器開発実績，高温井掘削経験と米国国研等の高温機器開発実績，高温地熱開発プロジェクト参画実績をベースに，高温井用坑内機器(350℃，60MPa)の基礎技術を構築し，米国エネルギー省の Enhanced Geothermal Systems(EGS)型地熱開発新技術実証プロジェクトサイトで性能を実証することを目標に研究開発を実施中である。

【特筆すべき成果】

超臨界岩体へ掘削された地熱井内を模擬可能な世界トップの性能(約 400℃，60MPa)を有する「超臨界坑内模擬装置」を当初の予定通りに開発し，素材，機器の性能評価，開発を実施中である。これらを通じて世界でも他に類のない非金属，高耐食性小型圧力容器，および 300℃の坑内環境下で温度，振動を計測可能な世界最高性能の光ファイバ計測システムを実現した。本研究開発の成果は国際誌 Geothermal Energy に掲載されるとともに，国内外の学会で発表され注目を集めている。今後，2020 年代半ばに超臨界地熱開発用坑内機器を実現し，試掘井内での試験を行い実用化へ結びつける計画である。



超臨界坑内模擬装置(左)と 300℃の環境で光ファイバセンシングシステムにより取得した振動波形(右)

【テーマ名】⑨ EGS 設計技術による地熱発電可能地域の飛躍的拡大

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　福島再生可能エネルギー研究所　再生可能エネルギー研究センター　浅沼　宏

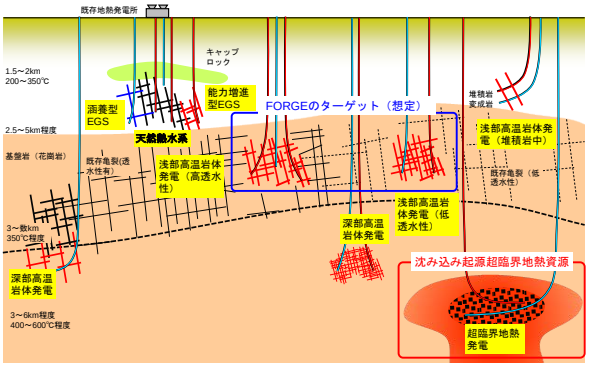
【連携機関】(米)ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)、(米)サンディア国立研究所(SNL)、(米)ローレンスリバモア国立研究所(LLNL)、(米)米国地質調査所(USGS)、(米)ペンシルバニア州立大学(PSU)

【概要】

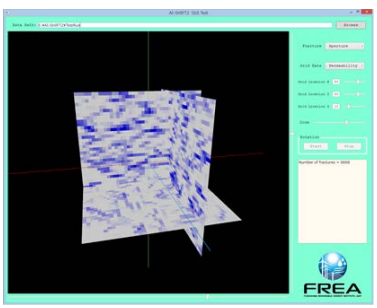
本研究では，加圧注水等の人工的手段により能力が増大した地熱システム(Enhanced Geothermal Systems: EGS)の設計技術を確立し，地熱発電可能地域および利用可能エネルギー量を飛躍的に増大させることを目指している。国内の地熱システムに関する広範な知見と地熱環境下での室内実験に実績がある産総研と EGS 実証試験フィールドの設置を目指している米国エネルギー省，および地熱シミュレータの開発に実績がある米国国研とが相補的に連携し，シミュレーションをベースとした人工地熱システム設計技術を導出するとともに，米国エネルギー省実証試験フィールドでのデータを使用して有効性を実証する。

【特筆すべき成果】

高温地熱環境下における亀裂への加圧注水を模擬するために，当初の目標通りに世界トップクラスの実験温度，透水性計測能力を有する「亀裂せん断滑り実験装置」を開発し，データを蓄積するとともに，実験結果を数値モデル化し，様々な条件下での亀裂挙動・水理特性をシミュレーション可能にした。研究成果は地球科学分野で評価の高い Geophysical Research Letter 誌に 2 編掲載される等により注目を集めた。今後，開発されたシミュレーション技術を用いて，超臨界地熱開発を含む様々な EGS 型地熱開発の拡大へ結びつける計画である。



EGS の概念



亀裂せん断滑り実験装置(左)と加圧注水シミュレーション結果(左)

【テーマ名】⑩　低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　省エネルギー研究部門　太田　道広

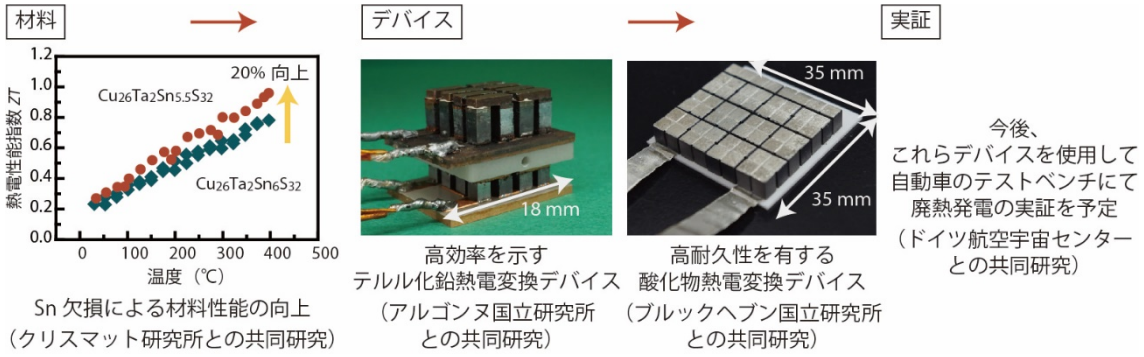
【連携機関】（米）アルゴンヌ国立研究所（ANL）、（米）ブルックヘブン国立研究所（BNL）、（仏）クリスマット研究所、（独）ドイツ航空宇宙センター（DLR）

【概要】

熱の有効利用は省エネルギーと CO_2 排出削減の重要な柱であり、特に、熱の電力回収（発電）には高いニーズがある。本研究では、産業技術総合研究所と広島大学などが開発に成功した、日本発の低毒性で希少元素レスの熱電変換材料（硫化物（400℃用）や酸化物（700℃用））を基盤技術として、材料性能の高効率化から、デバイスの開発と信頼性向上、実証実験までを、米国と欧州の研究機関と共に実施して、実用化に資する低毒性・超高効率熱電変換デバイスを開発することを目的とする。

【特筆すべき成果】

2014 年に、我々が開発に成功した p 型半導体のコルーサイト $Cu_{26}A_2E_6S_{32}$（A = V, Nb, Ta: E = Ge, Sn）は、環境にやさしい元素である銅（Cu）と硫黄（S）を主成分としており、低毒性熱電変換材料の有力な候補となっている。本研究では、このコルーサイトの性能を向上させることを目的として、化学組成の調整や製造プロセスの開発などを推進してきた。特に、E サイトへの欠陥導入を通じてキャリア濃度を調整することに成功して、熱電性能指数 *ZT* を 400℃にて 1.0 まで向上させた。これまで、毒性元素の鉛（Pb）や希少元素のテルル（Te）を用いないと達成できなかった、実用化の目安である熱電性能指数 *ZT* = 1.0 を、Cu と S を主成分とした材料で達成した意義は大きい。さらに、デバイス開発においては、ナノ構造を形成して高効率化を達成したテルル化鉛（PbTe）を用いてカスケード型熱電変換デバイスを開発した。電極界面などの改善により、最大変換効率は 11%以上に達した。これまで達成することが困難であった変換効率 10%の壁を越えた。また、高温に強い酸化物材料を用いて、高温側 700℃、低温側 20℃の条件での連続発電試験を実施して、1200 時間を超えてもほとんど劣化しない高耐久性を有する熱電変換デバイスの開発にも成功している。デバイスの実証実験に関しては、ドイツ航空宇宙センターの保有する自動車のテストベンチを使用する予定で、その準備として、2016 年 3 月に包括研究協力覚書、そして 2016 年 9 月に共同研究契約書を締結した。一連の研究成果は、英国王立化学会の Journal of Materials Chemistry A などに合計 8 本の査読付き論文として発表され、大きな注目を集めている。



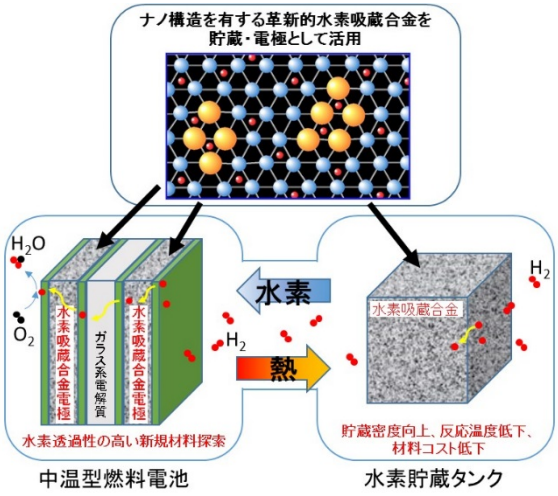
Sn 欠損による材料性能の向上
（クリスマット研究所との共同研究）

高効率を示す
テルル化鉛熱電変換デバイス
（アルゴンヌ国立研究所
との共同研究）

高耐久性を有する
酸化物熱電変換デバイス
（ブルックヘブン国立研究所
との共同研究）

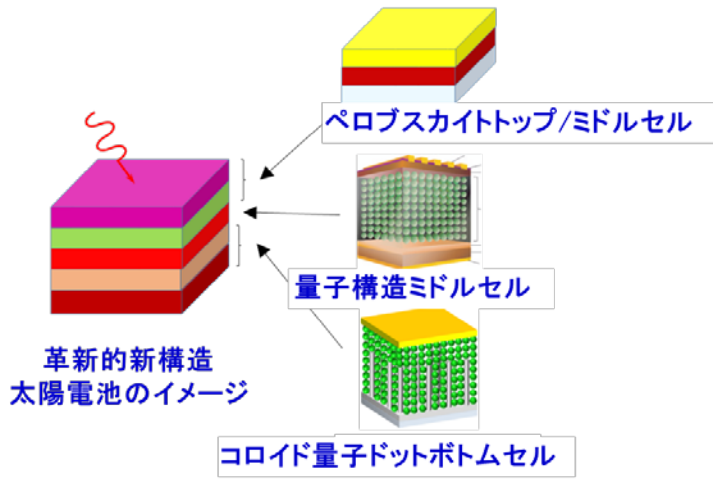
熱電変換において材料開発、デバイス化、実証までの学際的な国際共同研究を推進

【テーマ名】⑪ CO_2フリー水素社会を見据えた高効率・安価な水素貯蔵・利用技術開発
【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　創エネルギー研究部門　榊浩司
【連携機関】(米)パシフィック・ノースウエスト国立研究所(PNNL)、(米)ミズーリ大学セントルイス校、(仏)ボルドー大学、(蘭)デルフト工科大学
【概要】
再生可能エネルギーから製造された CO_2 フリー水素を効率的に貯蔵・利用する技術の確立に向けて、300℃近傍で作動するリン酸塩ガラス系プロトン伝導性固体電解質を用いた新型燃料電池とその熱を利用することにより高容量化が実現できる革新的な水素吸蔵合金を組み合わせた、安価で高効率な水素貯蔵・利用システムの構築を目指す。産総研がこれまでの材料試作から見出した独自の新材料開発の方針の下、高い材料反応機構解析技術をもつパシフィックノースウエスト国立研究所、計算科学による熱力学的な材料安定性予測を得意とするミズーリ大学セントルイス校、触媒物質の合成・添加技術で実績のあるボルドー大学、ナノメートルオーダーの材料創製・探索研究で高い成果をもつデルフト工科大学それぞれの技術および知見を融合して、ナノ構造を有する水素吸蔵合金による水素貯蔵と、ナノ構造を有する水素吸蔵合金を電極材料として適用した燃料電池を組み合わせた水素貯蔵・利用技術を開発する。
【特筆すべき成果】
従来のマグネシウムは水素の吸蔵・放出に300℃程度の熱が必要であるが、本研究ではマグネシウム合金中にマグネシウムと異種金属から成るナノメートルオーダーの構造界面を形成させることで生じる材料内部応力を利用して、マグネシウム水素化物を不安定化し反応温度の低下を試みた。その結果、従来の水素吸蔵合金に比べて材料コストを大幅に下げられるマグネシウムーマンガン系合金を、ナノメートルオーダーの材料組織制御を行い作製することに成功した。反応温度は従来のマグネシウムに比べて、50℃以上低下できる見通しが得られた。また、ナノ構造を有するバルク合金を溶解法で大規模に作製する方策を検討した。ガス雰囲気等の合成条件を最適化することで、ナノ構造を有するバルク合金の作製に成功した。燃料電池の燃料側の電極に水素との反応性が高いナノメートルサイズの水素吸蔵合金の利用を試みた。電極材料として材料コストが極めて高いパラジウムの代替として、マグネシウム系およびチタン系の金属・合金の試作を行った。その結果、パラジウムの一部をマグネシウム系で置き換えることで、パラジウム使用量が減少したにもかかわらず、パラジウム単体と同等程度の電極特性が得られることを見出した。



【テーマ名】⑫　革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発
【所属・代表研究者名】東京大学　先端科学技術研究センター　久保　貴哉
【連携機関】
（仏）フランス国立科学研究所（CNRS）・太陽光エネルギー研究所・分子構造学研究ユニット、
（仏）ボルドー大学
【概要】
ペロブスカイト太陽電池をトップセルとし、量子ドットや量子構造を組み込んだ太陽電池をボトムセルとする多接合太陽電池を、溶液プロセスなど低コスト製造技術により実現することを目的として研究開発を実施している。多接合太陽電池を構成するサブセルの高性能を行うと共に、最適なサブセルの組み合わせを実現するために、理論計算を行った。また、連携機関への派遣による研究開発の加速を図った。

【特筆すべき成果】
量子ドットセルをミドルセルとした3接合太陽電池を想定し、サブセル特性の理論計算を行い、トップセル用ペロブスカイト材料の最適なバンドギャップとして、1.5～1.9 eV であることを明らかにした。さらに、電流整合条件を満たし高効率を実現するための多接合セルを設計し、トップセルのバンドギャップを 1.67 eV とすることで、太陽光照射下(AM1.5G、100 $mWcm^{-2}$)で 46%の変換効率が可能であることを示した。ボトムセルに要求される赤外領域での光電変換を実現するために、コロイド量子ドットのバンドギャップの狭窄を行い、1.9 μm 帯まで光電変換領域を拡張した。
本事業の技術成果は、米国物理学会の学会誌（*Physical Review Applied*, 8 (2017)）などに掲載された。学会誌への掲載以外にも、フランス高等教育・研究・イノベーション大臣の来学時に、革新的エネルギー技術の国際共同研究開発事業の概要説明や成果のアピールを行うなど、国内外の会合など様々な機会を活用して、本事業の成果を発信している。



革新的新構造太陽電池のイメージ
低コスト製造技術により、超高効率太陽電池の実現を目指す。

【テーマ名】⑬ 様々な有用化学品の低コスト・低炭素型生産を可能にする革新的高汎用性バイオプロセスの開発

【所属・代表研究者名】地球環境産業技術研究機構 バイオ研究グループ 乾 将行

【連携機関】(米)国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、(米)パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)

【概要】

微生物発酵生産法の大きな課題である細胞毒性が高い物質の高生産化と発酵産物回収コストの削減を可能にする新規バイオプロセスの開発を行っている。汎用性の高い耐性能を微生物に導入することで様々な高毒性有用化学品生産に適用可能とし、これと併せて発酵産物を自然分離によって回収する技術を確立することによって製造コストの削減も目指す。米国研究所の協力のもと、非可食バイオマスであるリグノセルロースを原料とした本バイオプロセスの開発と最適化を進める。

【テーマ名】⑭ 第3世代パワー半導体β-Ga2O3 の高品質化・高性能化技術

【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所 電子光技術研究部門 伊藤 利充

【連携機関】(独)フラウンホーファー研究機構

【概要】

パワー制御・電力変換に不可欠なパワー半導体の高性能化・低コスト化の目的で、β-Ga2O3 結晶の製造技術を高度化する。産総研が開発し精密温度分布制御に適したレーザ加熱結晶育成技術を基盤として、フラウンホーファー研究機構の持つ高出力レーザ技術と照射分布制御技術を組み合わせることによって、大型化と高品質化を同時に実現する。高品質結晶を用いたデバイス物性の研究を推進し、パワー半導体の高効率化を通じて CO2 排出量削減に向けた基盤技術を開発する。

【テーマ名】⑮　3D ライダーと AI による風況フルスキャニング手法の開発
【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　再生可能エネルギー研究センター　小垣哲也
【連携機関】(蘭)オランダエネルギー研究センター(ECN)、(独)風力エネルギー研究センター(ForWind)
【概要】

本テーマは、近年発展が著しいライダー(レーザーによる風計測装置)と人工知能(機械学習)の 2 つの先端技術を融合し、実フィールドにおける風況の 3 次元構造を計測する技術開発を目指すものである。この新たな風計測技術は、観測鉄塔を用いた従来法と比較して、広域かつ自由度の高いこれまでにない計測技術の確立を目指すもので、産総研が並行して研究開発を進めているナセル搭載型ライダーによる風車制御と融合することにより、2050 年を見据えたイノベーション創出にチャレンジするものである。このライダー風計測と機械学習とを統合する空間スキャン技術は、未来の風力発電システムにおける制御の中核となり得る技術であり、風況調査から出力変動の緩和まで幅広い応用が期待できる。

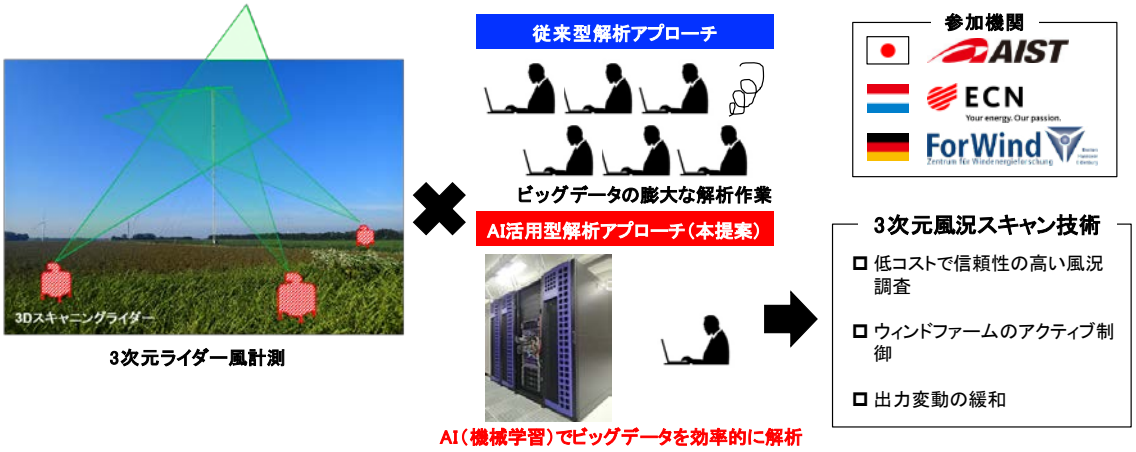


図　提案事業の概要

本研究は、産総研の再生可能エネルギー研究センター及び知能システム研究部門、(蘭)オランダエネルギー研究センター及び(独)風力エネルギー研究センターによる国際共同研究である。再生可能エネルギー研究センターでは、洋上風況マップ開発等、数値モデルによる風力資源調査に関する研究を行ってきた。実測技術という分野で効率的に研究を進めるため、この分野での実績が豊富な欧州との共同研究を実施する。(蘭)オランダエネルギー研究センターは、広大かつ理想的な風力専用のテストフィールドを運用しており、研究後半にはここでの野外実験を計画している。また、(独)風力エネルギー研究センターは、ライダー解析技術に関して各国をリードしている。こうした風力研究機関に加えて、知能システム研究部門の研究グループが機械学習の専門家として参画している。

2017 年 10 月末現在、研究装置の設備投資を進めると同時に、オランダおよびドイツ連携先とのキックオフ会議を終えて、国内での野外実験をスタートさせている。

【テーマ名】⑯ 光反応による低消費電力型製造プロセスとグリーンデバイスの開発
【所属・代表研究者名】産業技術総合研究所　先進コーティング技術研究センター　土屋哲男
【連携機関】
(米)アルゴンヌ国立研究所(ANL)、(米) テューレーン大、(豪)オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO)
【概要】
本プロジェクトでは、光 MOD(産総研独自技術)の高度化により、室温、大気中で高速に太陽用電池やディスプレイに使われている機能性セラミックス膜(透明導電膜、酸化物半導体、極限センサ膜)を製造する次世代型プロセスを開発し(テューレーン大との連携)、産業構造改革によるエネルギー消費の大幅削減を目的とする。また、産総研で開発した蓄光材料を照明デバイスに組込むことで、残光型有機EL照明 (オーストラリア CSIRO との連携)を開発する。更に、パワエレ用モジュール電子部品(アルゴンヌ国立研究所との連携連携)、地熱、タービンなどの高温センサなどグリーンデバイスを開発し、省エネルギー社会の構築に貢献する。

【テーマ名】⑰ 高効率な水蒸気電解セルの開発と可逆動作可能な固体電解質燃料電池への展開
【所属・代表研究者名】九州大学カーボンニュートラル・エネルギー国際研究所　石原　達己
【連携機関】
(独)ユーリッヒ国立研究所(FZJ)
【概要】
現在、水素は電気と同様にクリーンなエネルギーキャリアとして利用の拡大が期待されており、FC 車などの普及による CO_2 の削減が期待されている。本研究では国際共同により、酸素イオン伝導性またはプロトン伝導性固体電解質を用いる高効率な中低温水蒸気電解セルの開発について検討を行う。さらに、本研究では水素を、電力に戻すことを想定して、可逆動作可能な固体酸化物燃料電池の開発およびエネルギーのさらに安定な平準化を目的とした Fe の酸化還元を利用して蓄エネを行う大容量の新しい概念の燃料電池の開発を国際共同で行う。
現在、水蒸気電解は、高効率な電解技術として期待されている。長期的な安定性の向上や電解効率の向上が課題であることから、本研究では、優れた活性を有する電極触媒の開発を行うとともに、水蒸気電解時に生じる劣化機構を種々の分析方法で検討する。一方、電力をジュール熱にすることなく、水素を発生するには、抵抗の低い固体電解質が必要であり、本研究では水蒸気濃度の高い条件でも分解しないプロトン伝導体を開発する。本研究により、風力発電などの再生可能エネルギーの過剰電力を用いて、水素を効率よく合成し、グリーン水素の製造を実現でき、CO_2 の削減に寄与できると期待される。

２．成果の内訳

テーマ	H27～H28			H29(9 月時点)		
	査読論文	特許等件数	【参考】論文総説等（査読無）	査読論文	特許等件数	【参考】論文総説等（査読無）
①セルロース系バイオマスからの高効率バイオ水素生産プロセスの研究開発	0	0	3	0	0	0
②高炭素収率を特徴とするセルロース系バイオマスからのバイオ燃料ブタノールの製造に関する研究開発	2	0	2	1	0	0
③過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発	1	2	4	1	0	0
④CO2 を利用した水素製造・貯蔵技術 －二酸化炭素の再資源化技術によるクリーン水素キャリアシステム－	4	0	6	5	0	0
⑤系統協調型の分散電源大量導入技術の開発	0	0	0	1	0	1
⑥太陽光による有用化学品製造	3	3	4	3	1	2
⑦単結晶化・積層化による太陽電池の高効率化技術の開発	0	0	1	2	2	0
⑧超臨界地熱資源による革新的発電のための坑内機器基礎技術・素材の開発	0	0	1	1	0	0
⑨EGS 設計技術による地熱発電可能地域の飛躍的拡大	1	0	1	1	0	0
⑩低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発	6	2	5	2	0	4
⑪CO2 フリー水素社会を見据えた高効率・安価な水素貯蔵・利用技術開発	0	0	0	0	0	0
⑫革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発	2	0	0	6	0	1
計	19	7	27	23	3	8

３．国際共同研究によって得られるメリットおよび想定短縮年数

①セルロース系バイオマスからの高効率バイオ水素生産プロセスの研究開発
平均短縮年数　6 年

【国立再生可能エネルギー研究所（NREL）】
セルロース系バイオマスに対して世界で最も低コストで効率的な前処理・糖化プロセスとして知られる NREL の技術（NREL プロセス）は、NREL の有する各種リアクターを用いて行った本プロセスに関する膨大な工業化基礎データの蓄積に裏打ちされたものであり、これを単独で再現するには 5 年以上を要すると考えられる。

【国立科学研究センター（CNRS）】
フランスの CNRS では、同研究所内の複数の研究チームの連携の基、世界最先端の解析技術を用いてヒドロゲナーゼの分子機構に関する研究を行っている。このような酵素機能改変の指針を得るために必要とされる基礎的データを蓄積・活用するノウハウを単独で確立するには 5～10 年を要すると考えられる。

②高炭素収率を特徴とするセルロース系バイオマスからのバイオ燃料ブタノールの製造に関する研究開発
平均短縮年数　5 年

【国立再生可能エネルギー研究所（NREL）】
NREL が開発したセルロース系バイオマス糖化液調製技術は、世界で最も低コストな糖化プロセスとして知られている。NREL が長年かけて確立した独自の技術によって調製された実糖化液を用いて、我々の RITE バイオプロセスへの適用を図ったものであり、これを単独で再現するには少なくとも 5 年以上を要すると考えられる。

【パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）】
PNNL では、世界最先端のエタノールのオリゴマー化技術を用いてジェット燃料などのドロップイン燃料への製造プロセス開発を進めている。PNNL と連携することによって、この技術がイソブタノールにも応用できれば目標達成に要する期間を 5 年程度は短縮できると考えられる。

③過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発
平均短縮年数　6 年

【ドイツ航空宇宙センター（DLR）】

Li イオン電池の熱理学シミュレーションにおいて、独自コードによる計算が可能。高度なシミュレーションコードを開発している機関の見当がつかない。通常のシミュレーションのソフトの開発には３年、パラメータの精査に更に２年を要し、独自での開発には 5 年以上は必須。

【アメリカ航空宇宙局（NASA)】
バッテリーの安全性試験の実施実績と解析能力が世界随一。
単独や国内で実施できない試験も可能であり、NASA との連携によって得られる情報は、研究の効率化と促進にとって貴重である。単独での実施は、コスト的に不可能であるが、資金を得たとしても 5 年以上は必要となるほどに、知見が先行している。

【(欧州委員会）共同研究センター（JRC)】
Li イオン電池の安全性試験において、多様な試験設備を有する。
参照・標準認証を主務とする政府機関であるため、研究開発から国際標準化、政策を兼ね備える機関。高額で多様な設備を利用できるコスト的なメリットも大きい中、将来的な国際標準化によるマーケット確保を考えると、単独、国内連携の範囲を超えた、スケールの大きな国際標準化戦略が立てられるため、連携のメリットは計り知れない。

【欧州宇宙機関（ESA)】
ESA の小型バッテリーの安全性試験の技術も重要であるが、宇宙用電池の運用について ISO の TR(Technical report)を主導しており、国際的な枠組みへの貢献も大きい機関。国際的な枠組みの中で日本の意見を主張し、取り入れられることは、将来の日本のマーケット確保においても重要であり、単独でも、国内連携でも得ることができない、国際連携のメリットである。

【国立再生可能エネルギー研究所（NREL)】
Li イオン電池電極シートへの原子層堆積装置による均一コート技術と知見は世界的にも NREL に集中しており、ゼロの知見から、単独で再現するには少なくとも 2 年くらいかかるため。

【SLAC 国立加速器研究所（SLAC)】
透過型の放射光軟 X 線顕微分光の技術や放射光硬 X 線発光分光において、SLAC の装置は、世界トップレベルである。単独で再現することは不可能であり、国内の機関との連携においても、輝度やビームサイズ、検出器などの各点において、同等性能のビームラインや装置が存在しないため、SLAC との連携によってのみ可能。別途国内で再現するには、新型放射光施設の誕生を待たねばならないため、最低でも 7 年程度かかる見通し。

【ローレンスバークレー国立研究所（LBNL)】
液体を用いた放射光軟 X 線分光の世界トップレベルの技術と知見を誇り、他機関には無い、高効率な Li の真空紫外光の分光技術も有している。単独での実施は不可能であり、液体を用いた測定においては、国内機関との連携によっても LBNL からの知見なしでの実施では、再現に 5 年くらいはかかり、国内で高効率な Li の真空紫外光の分光を実施するには、新型放射光施設の誕生を待たねばなら

ないため、最低でも 7 年程度かかる見通し。

【ユトレヒト大学】
放射光スペクトルの理論解析・シミュレーションの世界的な大家。
最先端シミュレーションコードの開示・指導により、最先端放射光の測定結果に対し、世界最先端のコードで、詳細な物理的解釈も含めた解析を行うことができる。単独では、不可能で、国内にも同等の技術は存在せず、再現には 10 年以上を要する。

＊JRC と ESTC/ESA については、国際標準化のメリットを考えての連携であり、短縮年数という評価基準とは、異なる記載をした。

④CO2 を利用した水素製造・貯蔵技術　-二酸化炭素の再資源化技術によるクリーン水素キャリアシステム-
平均短縮年数　4 年

【ブルックヘブン国立研究所(BNL)】
錯体触媒による CO2 還元に関する分光分析および計算機化学に関する技術は当該研究所が世界でトップ知見を有しており、産総研単独で再現することは不可能。共同研究によって得られた知見により少なくとも５年以上の研究期間が短縮された。

【スイス連邦工科大学ローザンヌ校(EPFL)】
当該大学は CO2 変換反応における高圧条件で反応溶液を in situ 解析できる 1H NMR 測定技術としては、世界唯一であり、得られた触媒反応解析により、すくなくとも３年以上の研究期間が短縮された。

【パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)】
固体触媒を in situ 解析できる超高分解能 NMR (Nuclear Magnetic Resonance)装置システムと解析技術を当該研究所のみが有しており、現在共同研究を進めている。将来、産総研単独で同様な解析を行うのは不可能であり、仮に莫大な投資をして同様な施設を設置しても最低でも５年間以上はかかる見込みである。

⑤系統協調型の分散電源大量導入技術の開発
平均短縮年数　2 年

【サンディア国立研究所 (SNL)】
次世代型パワーコンディショナ（スマートインバータ）は国内では未だ開発とルール整備が済んで

おらず、開発やルール整備、導入では米欧が先行している。SNL は、スマートインバータの制御プロトコルの開発において業界団体・メーカ を主導し、２年以上先行している。SNL のスマートインバータの制御プロトコル の開発と連携することにより２年短縮出来た。

【国際エネルギー機関（IEA） 国際スマートグリッド行動ネットワークスマートグリッド研究施設ネットワーク （SIRFN)】
次世代型パワーコンディショナ（スマートインバータ）は国内では未だ開発とルール整備が済んでおらず、開発やルール整備、導入では米欧が先行している。SIRFN 加入によって最新技術と欧州研究所の研究者派遣を受け入れて効率的な情報入手が可能となり、１年短縮出来た。

【オーストリア技術研究所（AIT)】
AIT とは SIRFN 活動等で連携し、研究者を１ヶ月受け入れることで、スマートインバータの試験法の検証作業を２機関で行うことが出来、２年短縮出来た。

⑥太陽光による有用化学品製造
平均短縮年数 4 年

【ブルックヘブン国立研究所(BNL)】
事業終了時には、小規模でも良いので実用化の目処ができていることが望ましい。
可能性が最も高いのは、外部バイアス無しでの小型殺菌溶液製造（H2O2 等）である。そのための安価で高性能なカソード触媒技術は BNL のみが保有し、その製造には多くのノウハウが有り、産総研単独では 5 年でも再現不可能であった。これを 1-2 年でほぼ再現できた意義は大きい。

⑦単結晶化・積層化による太陽電池の高効率化技術の開発
平均短縮年数 4 年

【国立再生可能エネルギー研究所（NREL)】
CIGS 太陽電池の長期信頼性の評価技術は、NREL が規定を策定しており、NREL と議論することが重要である。NREL は 20 年以上の CIGS 開発の歴史があり、単独で開発するには少なくとも５年以上かかると見込まれる。

【Fraunhofer 研究機構】
化合物半導体太陽電池の多接合化技術を Fraunhofer ISE は長年開発しており、多接合太陽電池を Si 太陽電池上に Wafer bonding 技術によって貼り付けて、高効率化を達成している。彼らの技術によっても、CIGS 太陽電池と Si 太陽電池を多接合化でき、高効率化が達成できる。単独で再現するには、少なくとも 3 年くらいかかると見込まれる。

【スイス連邦材料試験研究所（EMPA)】
高品質 CIGS 層の開発を長年行っており、アルカリ金属添加技術を有している。単結晶 CIGS 層に彼らのアルカリ金属添加技術を採用することで、高効率化が達成できる。単独で本技術を再現するには、少なくとも３年程度かかると見込まれる。

⑧超臨界地熱資源による革新的発電のための坑内機器基礎技術・素材の開発
平均短縮年数　8 年

【DOE】
・　DOE が実施してきた高温地熱井用電子機器，シール材開発プロジェクト成果に関する情報提供により研究期間が３年短縮
・　DOE が実施中の FORGE プロジェクトサイトでの性能評価試験（FY31 に実施予定）により研究期間が７年短縮の見込（国内で独自に行う場合，数億円以上の費用が必要と見込まれる）

【サンディア国立研究所（SNL)】
・　高温用掘削システム，坑内計測装置（坑内地震計（最高 330℃））等の開発に関する情報の提供により研究期間が５年短縮
・　アイスランド高温地熱開発プロジェクト（最高 500℃）への参画により得られた知見の提供により研究期間が３年短縮

【ローレンスバークレー国立研究所（LBNL)】
・　高温用坑内機器（多機能検層器（最高 220℃））等の開発により得られた知見の提供により研究期間が５年短縮

【米国地質調査所（USGS)】
・　高温用坑内機器（坑内超音波イメージング装置（最高 250℃））等の開発より得られた知見の提供により研究期間が５年短縮
・　アイスランド高温地熱開発プロジェクト（最高 500℃）への参画により得られた知見の提供により研究期間が３年短縮

【アイスランド IDDP プロジェクト】
・　アイスランド高温地熱開発プロジェクト（最高 500℃）実施により得られた知見の提供により研究期間が１０年短縮

【ドイツ地球科学研究センター（GFZ)】
・　高温用光ファイバ分布型センサ（最高 200℃）の開発・評価により得られた知見の提供により研

究期間が６年短縮
・　アイスランド高温地熱開発プロジェクト（最高 500℃）への参画により得られた知見の提供により研究期間が５年短縮

【イタリア海洋学・実験地球物理学研究所（OGS)】
・　高温用坑内機器（多機能検層器（最高 200℃））等の開発により得られた知見の提供により研究期間が３年短縮

⑨EGS 設計技術による地熱発電可能地域の飛躍的拡大
平均短縮年数　6 年

【DOE】
・　DOE が実施中の FORGE プロジェクトサイトデータを使用したシミュレータ性能評価試験（FY30 以降に実施予定）により研究期間が 10 年以上短縮の見込（国内で独自に行う場合，10 億円以上の費用が必要と見込まれる）
・　国内での実証試験（FY31 に実施予定）への協力により研究期間が３年短縮の見込

【サンディア国立研究所（SNL)】
・　LBNL が長期にわたって独自に開発してきた高温地熱流体シミュレーション技術に関する情報提供により研究期間が５年短縮
・　国内での実証試験（FY31 に実施予定）への協力により研究期間が３年短縮の見込

【ローレンスバークレー国立研究所（LBNL)】
・　LBNL が長期にわたって独自に蓄積してきた高温環境下での岩石破壊試験方法に関するノウハウの提供により研究期間が６年短縮
・　国内での実証試験（FY31 に実施予定）への協力により研究期間が３年短縮の見込

【ローレンスリバモア国立研究所（LLNL)】
・　高温環境下での岩石破壊試験装置に関する知見の提供により研究期間が３年短縮
・　国内での実証試験（FY31 に実施予定）への協力により研究期間が３年短縮の見込

【米国地質調査所（USGS)】
・　USGS が独自に開発してきた高温環境下での岩石破壊試験装置，実験方法，データ解析方法に関する知見の提供により研究期間が６年短縮
・　国内での実証試験（FY31 に実施予定）への協力により研究期間が３年短縮の見込

【ペンシルバニア州立大学（PSU)】
・　PSU が独自に開発してきた岩石透水性評価実験装置，実験方法，データ解析方法に関する知見の

提供により研究期間が８年短縮

【ドイツ地球科学研究センター（GFZ)】
・　アイスランド高温地熱開発プロジェクト（最高 500℃）への参画により得られた高温貯留層に関する知見の提供により研究期間が５年短縮
・　GFZ が２０年以上に渡り開発してきた高温地熱システムシミュレーション技術に関する情報提供により研究期間が８年短縮

【イタリア海洋学・実験地球物理学研究所（OGS)】
・　イタリア高温地熱開発プロジェクト（最高 500℃以上）への参画により得られた高温地熱システムに関する知見の提供により研究期間が４年短縮

⑩低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発
平均短縮年数　7 年

【米国アルゴンヌ国立研究所（ANL)】
バルク体熱電材料におけるナノ構造形成による熱輸送特性の制御技術は、ANL　Materials Science Division（Prof. Mercouri Kanatzidis）が世界で初めて開発したものである。2004 年に Science でその技術を発表後、2011 年に Nature Chemistry、2012 年に Nature、2014 年に Nature Communications に 2 報など、この分野で長年トップを走っている。その ANL においても、最初の発見後（2004 年)、ナノ構造の形成や熱輸送に与える影響などを理解し、技術を成熟させて、次のブレークスルー（2011 年）に至るまで 7 年を要している。7 年間、思うようにナノ構造を形成できず、また形成できても熱輸送に与える影響が不十分など、技術を成熟させるために相当の苦労したようである。ナノテクノロジーが発展したことを考慮しても、日本単独で再現するには、5 年程度の時間がかかると思われる。

【クリスマット】
クリスマット研究所は、バルク体熱電材料のナノ構造観察（透過型電子顕微鏡 TEM 観察）において、フランス、ひいては EU の中核機関となっている。最先端の TEM を何台も有しており、クリスマット研で得られた TEM 写真からは、原子レベルで欠陥が判別でき、組成分析を実施してその原子種まで特定できる測定が可能である。産総研で同様の観察を実施したところ、クリスマット研究所ほどの情報量を得ることはできず、試料の調整や観察方法などにノウハウがあるため、日本単独で再現するには、2 年程度の時間がかかると思われる。

【ブルックヘブン国立研究所（BNL)】
BNL　Condensed Matter Physics & Materials Science Department は、既存の熱電材料を利用した熱電変換デバイスの開発における米国の拠点の一つである。産総研では、酸化物や硫化物など、日本発の新規材料を用いてデバイス開発を実施しており、既存の熱電材料のノウハウはない。日本単独で再現するには、1 年程度の時間がかかると思われる。

【ドイツ航空宇宙センター（DLR)】
DLR の材料科学研究所は、長年、宇宙開発用に熱電変換デバイスとその評価技術を開発してきた。日本でも、評価技術の開発は、2002 年ごろから、NEDO（2002 年から 2006 年）などの支援を受けながら進めてきたが、宇宙開発における 60 年以上の蓄積に追いつくには、まだまだ時間が必要で、日本単独で再現するには 5 年以上の時間がかかると思われる。また、熱電発電の応用先の一つとして、自動車が考えられる。日本でも、各自動車会社が開発を進めているが、ドイツは一歩進んでいる。ドイツ航空宇宙センター車両コンセプト研究所（DLR Institute of Vehicle Concepts）は公的研究機関としては世界に先駆け、熱電変換デバイス用の自動車テストベンチを開発して整備している（Martin Kober)。ガソリン車、マイルドハイブリット車、フルハイブリッド車でのテストが可能である。自動車技術に強い日本ではあるが、日本単独でドイツと同じ程度の知識を得るためには 3 年程度の時間がかかると思われる。

以上合計して、事業終了時の目標を達成するために、海外機関と連携したことによって短縮できるであろう年数は、合計して 15 年となる。いくつかの技術を並行して開発できたとしても、7～8 年程度の短縮が想定される。

⑪CO2 フリー水素社会を見据えた高効率・安価な水素貯蔵・利用技術開発
平均短縮年数　5 年

【パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL)】
PNNL の NMR 設備および技術を単独で整備・確立するには少なくとも 5 年以上かかるため。

【ミズーリ大学】
第一原理計算および特殊な結晶構造モデルの構築技術には計算方法の知見だけでなく、プログラムコードの作成技術等が必要となる。ミズーリ大学のレベルに達するには 3 年程度はかかると思われる。

【ボルドー大学】
水素吸蔵合金に対する触媒添加技術としての超臨界流体技術はボルドー大学のみが有しており、単独で技術導入し、ノウハウを確立するには少なくとも 4～6 年程度かかるため。

【デルフト工科大学】
水素吸蔵合金薄膜の創製技術および薄膜の水素吸蔵特性評価技術はデルフト工科大学だけが保有しており、単独での技術構築には少なくとも 5～7 年程度はかかるため。

⑫革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発
平均短縮年数　5 年

【ボルドー大学】
トップセルを開発するためのホール輸送材料の合成は、ボルドー大学が構築してきた材料合成技術を活用している。本事業のトップセル開発には、新しいホール輸送材料を合成する必要があるが、該当する分野の知識と合成技術を有した研究員の存在が不可欠である。この点において、最適な人材を確保し、育成する期間だけでも、最低でも２、３年は要するものと推察される。また、太陽電池セル作製において、構成材料の電子状態を把握することが必要となるが、先端研では実施することのできない電子物性評価に、ボルドー大学の有する設備を活用することができる。設備の選定および導入が可能だとしても、計測設備の導入および立上げ、適切なデータ解析が行えるまで、１年以上は要すると考えられる。

【フランス国立科学研究所（CNRS)】
ミドルセルの有力な候補である量子構造を有する太陽電池の研究開発において、フランス側は、太陽電池の光電変化素過程に関する基礎物性計測および解析技術、モデル化技術を有しており、これらの技術は、本事業の研究開発の推進に貢献している。その中でも、太陽電池の動作状態での光電変換特性の面内分布を非破壊で評価する手法を、共同研究先が独自に開発しており、太陽電池の高性能化には不可欠な計測技術となっている。これらの知見を利用しないで、東京大学のみで研究開発を行う場合、３、４年は要すると推定される。また、東京大学より研究員を 1 ヶ月程派遣し、実験を行っており、有用な成果を得ている。
さらに、本事業で構築する革新型太陽電池において、溶液プロセスで高性能なボトム・ミドルセルを作ることが一つの重要課題となっている。フランス側は、量子ドット太陽電池用材料となる化合物半導体の量子ドットの合成技術を有している。本技術は東京大学側にはない技術であり、トップセル用のホール輸送材料の合成と同様に、最適な人材を確保し、育成する期間だけでも、最低でも２、３年は要するものと推察される。

以上、研究開発に関しては平均 5 年の短縮効果が見込まれる。一方で、日仏共同研究を行うシナジー効果としては、従来では接点がなかった異なる研究分野の研究者との交流により、研究開発を促進するような取り組みも発生しており、さらなる研究期間の短縮に貢献することも推察される。