

# 「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

令和3年6月24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 . . . . .                       | 18  |
| 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 . . . . . | 19  |
| 4. 個別採択案件のアウトプット指標・目標値および達成状況 . . . . .  | 27  |
| 5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ（詳細） . . . . .   | 35  |

## 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)

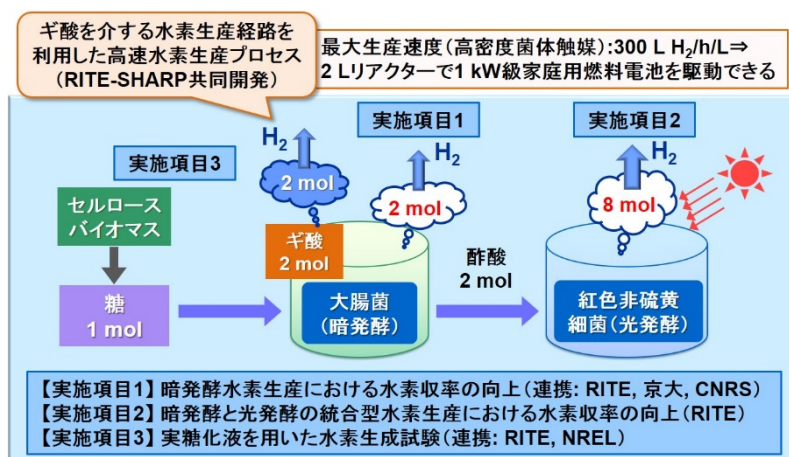
【連携機関】(米)国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、(仏)国立科学研究センター(CNRS)

### 【概要】

バイオ水素生産は、CO<sub>2</sub> 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、2L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に取り組んだ。

### 【特筆すべき成果】

本研究では、大腸菌を用いた暗発酵水素生産における収率向上のため、同菌のギ酸を介した水素生産経路では利用されない電子供与体を有効利用できる水素生成酵素を探索し、高効率な反応機構を有する新規電子分岐型 [FeFe]-ヒドロゲナーゼの高発現に成功した。この酵素を導入した大腸菌の水素生産活性は電子伝達経路の改変により、著しく向上することを示した。また、コーンストーバーの糖化プロセスで生じる主要な発酵阻害物質の濃度と水素生産阻害効果の関係を明らかにし、実用化に向けた最適条件の設定に有益な成果が得られた。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だ。炭素／水素／窒素代謝経路の改変を組み合わせることにより、酢酸からの水素収率が大きく向上することを示した。本技術は米国微生物学会の学会誌 (Appl. Environ. Microbiol.)、新聞(化学工業日報、DIARIO DE LEÓN)、一般科学雑誌(電気評論)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。



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)

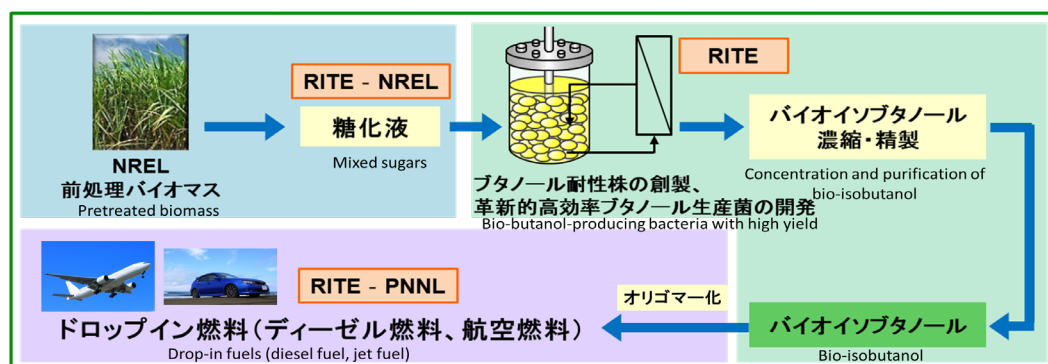
【連携機関】(米)国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、(米)パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)

【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と、(米)パシフィック・ノースウェスト国立研究所のアルコール類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する技術を融合させ、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た。

【特筆すべき成果】

スマートセル技術を活用した代謝経路の最適化などを通じて、コリネ型細菌の遺伝子組換え体作製を進め、グルコースを原料にブタノール生産速度 3.6 g/L/h、および対糖収率 92.8%と世界最高値を達成した。(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ブタノール生産速度 2.2 g/L/h、および対糖収率 80%を達成した。また、バイオ生産によって得られたブタノール溶液を濃縮するため、省エネ型パーバレーション膜を開発した。開発した膜分離と蒸留のハイブリッドプロセスを用いることで、ブタノール回収エネルギー4 MJ/kg を理論的に実現可能な回収設備の基本設計を行うことに成功し、従来よりも 90%のエネルギー削減が可能となった。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進め、得られたブタノールとエタノールの混合物をそのままオリゴマー化して航空燃料などのドロップイン燃料に化学変換可能とする触媒種や反応条件に関する情報をパシフィック・ノースウェスト国立研究所から得た。RITE の技術を利用し古着から製造した日本初の純国産バイオジェット燃料を搭載した商用フライト(JAL)を実施した。



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 曾根 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

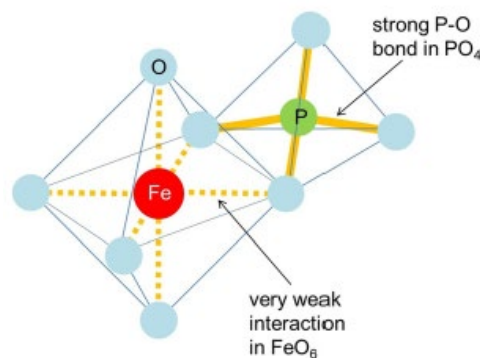
【概要】

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、宇宙等の過酷環境でも安全に動作する低コスト・高容量電池の開発を目的として、劣化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)、宇宙航空研究開発機構(JAXA)を中心とした分野融合的国際共同研究にて実施した。劣化機構解明のための最先端放射光測定・解析においては、LBNL、SLAC、ユトレヒト大学の技術を、安定性向上のための電極表面改質については NREL の技術を、電池の安全性評価および電気化学的評価については長岡技術科学大学(長岡技科大、JAXA の再委託先)、JRC、DLR、NASA、ESA の技術を、産総研および JAXA の技術と融合させることで、本事業を遂行した。

【特筆すべき成果】

LBNL 等の施設を用いた産総研の先端的な放射光解析により、 $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  系正極材料や高安定性を有する  $\text{LiFePO}_4$  系正極材料において、電子状態と電極の安定性の関係性を解明した。今後のより効果的な電極表面修飾や元素置換等を用いた材料設計につながる成果である。また、産総研では電池の運用法の検討を行い、適切な温度管理や充放電シーケンス等を用いることで、サイクル劣化による充放電容量の低減を抑制することに成功した。

JAXA および長岡技科大では、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するとともに、劣化の端緒を充放電曲線上での異変から突き止めることに成功した。長期運用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。また、産総研、JAXA、長岡技科大の三者と JRC、および同三者と DLR において、それぞれ共同研究契約の締結に至り、JRC とは安全な運用法に関する研究開発を、DLR とは熱力学シミュレーションの技術開発を深化させることができた。以上の各種研究内容について、物理化学や電気化学分野での複数の論文発表を行った。



放射光解析で得られた  $\text{LiFePO}_4$  に関する知見

【テーマ名】④ CO<sub>2</sub> 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 ゼロエミッション国際共同研究センター 姫田雄一郎

【連携機関】

(米)ブルックヘブン国立研究所、(米)パシフィックノースウエスト国立研究所、(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】

化学系水素貯蔵材料としてギ酸に着目し、安価・大規模な水素の貯蔵・輸送と高圧水素供給システムのための「ギ酸を分解する高性能触媒の開発」と「高圧水素発生と相分離プロセスによる水素精製の実証」により、公益財団法人 市村清新技術財団より、市村地球環境学術賞貢献賞「ギ酸分解触媒の開発による革新的水素製造技術」(姫田 雄一郎・川波 肇・徐 強)を受賞した。また、徐強研究員は、ドイツ政府の国際的学術活動機関であるアレクサンダー・フォン・フンボルト財団よりフンボルト賞(Humboldt-Forschungspreis, Humboldt Research Award)を受賞した。本事業での得られた査読付き論文(28 報)の総被引用数は 2665 回に達している(2021/04/11 現在)。

ギ酸は「低コスト・簡便な手法で高圧水素が発生できる水素キャリア」としての認知されるようになり、有償試料提供2件、技術コンサルティング2件、秘密保持契約3社、共同研究 1 社(手続き中)の契約を行っている。また、企業と実証化に向けた話し合いを進めている。

2017 年 12 月 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った。また、事業終了後であるが、「低温で二酸化炭素からメタノールを合成できる触媒を開発」で産総研プレス発表を行った。



第 51 回市村地球環境学術賞貢献賞を受賞(左)、産総研 LINKS (2020 年 3 月号)(中)、連携国への展開(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)、(奥)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】

蓄電池システム等のためのスマートインバータの制御プロトコルの開発は、制御プロトコルの相互運用性の検証及び、機能試験における手順の明確化が重要課題となっていた。そこで、産総研 FREA において、通信機能を追加した蓄電池用パワーコンディショナ(PCS)を用いてスマートインバータの制御プロトコルの機能試験を行い、相互運用性の検証のための基礎データとした。共同研究先のサンディア国立研究所が中心に開発したスマートインバータの試験プラットフォーム(SunSpec SVP)を産総研 FREA に移植し、スマートインバータに対する米 UL 1741 SA 規格に準拠した自動試験を可能とした。自動試験方式の採用により、スマートインバータの機能試験が、従来のエンジニアのマニュアル操作による試験に対して大幅に短時間(約1/6)で実施可能となった。

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、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」を開発し、サポート機能の分析を行った。指定無効電力機能(Q 指定)と指定力率機能(PF 指定)、電圧/無効電力制御機能(Volt-Var)の 3 つを比較分析した結果、有効電力量を最大化するために最適な機能は PF 指定と 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。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。

【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

【概要】

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、水素製造と同時にさまざまな高付加価値の化学品(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)を非常に効率良く製造する革新技術を開発する。また、カソード側でも水素製造だけでなく、水素以上に価値のある過酸化水素等の化学品製造を検討する。本研究成果により、経済性が高く CO<sub>2</sub> 排出の少ない新規化学品製造プロセスの実用化の加速が期待できる。太陽エネルギーから有用化学品を製造する本研究は広い意味で人工光合成技術である。

具体的な研究内容として下記に関して実施する。

- ・化学薬品製造用の半導体光アノード電極の高性能化
- ・化学薬品生成の反応メカニズムの解明
- ・安価なカソード電極の高性能化
- ・光アノード電極とカソード電極の組み合わせ全体システム

【特筆すべき成果】

①次亜塩素酸などの様々な化成品製造の電流効率(Faraday 効率:FE)を 90%以上にする技術を開発した。5年間で、光アノード上で FE90%以上を達成した生成反応は 10 種類以上: HClO、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、HBrO、Mn<sup>7+</sup>、PINO、シクロヘキセン、シクロヘプテン、Ce<sup>4+</sup>、Br<sup>+</sup>、Cr<sup>6+</sup>など。目的の反応ターゲットのみを選択的に製造する技術を確立したと言える。産総研がこの関連の特許群を構築している状態である。

②光電極の過酸化水素製造において、太陽エネルギー変換効率を3%以上に向上することができた。この成果は世界最高効率である。本成果は企業との実用化のための共同研究に結びついた。将来の10%を目指すための指針をとりまとめ、その実現が可能であることを示した。

③光アノード電極とカソード電極の組み合わせ全体システムのプロトタイプを構築した。BNL の技術のカソードに活用し、非貴金属触媒を用い、非常にシンプルな「過酸化水素生成用一体型プレート」のプロトタイプを構築・提案できた。ニッチな応用の実用例につながる成果と言える。

【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】(米)国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、(独)フラウンホーファー研究機構、(瑞西)スイス連邦材料試験研究所(EMPA)、(独)ベルリン・ヘルムホルツ資源エネルギーセンター(HZB)、(独)バーデン・ビュルテンブルク州立太陽エネルギー・水素研究センター(ZSW)

【概要】

太陽光発電の発電コストを 7 円/kWh 以下を達成するために、Cu(In,Ga)Se<sub>2</sub>(CIGS)系化合物薄膜を用いて、理論限界変換効率に迫る単結晶太陽電池を開発する。単結晶 CIGS 太陽電池の世界最高変換効率は 10%程度(本事業の開始前)であり、多結晶 CIGS 太陽電池で培われた高効率化技術(アルカリ金属添加、Ga 濃度勾配、準安定アクセプタ制御技術など)を適用することで、高効率化を早期に達成させる。CIGS 太陽電池の課題(ワイドギャップ CIGS 化)を解決することで、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%を達成させる。国際共同研究として、連携機関が単結晶 CIGS の結晶学的・光学的評価を行い、高効率化技術の開発期間を短縮させる。

【特筆すべき成果】

高品質結晶成長法の開発により、結晶欠陥のない単結晶 CIGS 層形成に成功した(図参照)。この単結晶 CIGS 層にアルカリ金属添加、Ga 濃度勾配、準安定アクセプタ制御技術を採用することで、世界最高効率の 21.3%が達成された。NREL の研究者らが単結晶 CIGS の発光特性を調査したところ、組成揺らぎのない高品質な結晶薄膜であることが確認された(図参照)。また、HZB の研究者が、単結晶 CIGS に発生している転位は太陽電池特性に悪影響を及ぼさないことを明らかにした。これらの特性より、多結晶 CIGS 太陽電池の性能を既に凌駕しているといえる。今後は単結晶 CIGS 層の高品質化、新型 n 型バッファ層の開発により、さらなる高効率化が期待できる。これらの研究成果が高く評価され、欧州の CIGS 太陽電池ワークショップ(IW-CIGSTech、2019 年にフランスパリで開催)にて、学会賞を受賞した。

III-V 族化合物半導体を n 型バッファ層として使用する新型 CIGS 太陽電池の開発に成功した。この技術は、III-V 系多接合太陽電池のボトムセルとして、CIGS 太陽電池をモノリシックに形成できる技術である。この新型多接合太陽電池の製造法を国内特許として出願した。今後、国際特許として出願し、低コスト製造法の開発を行う。

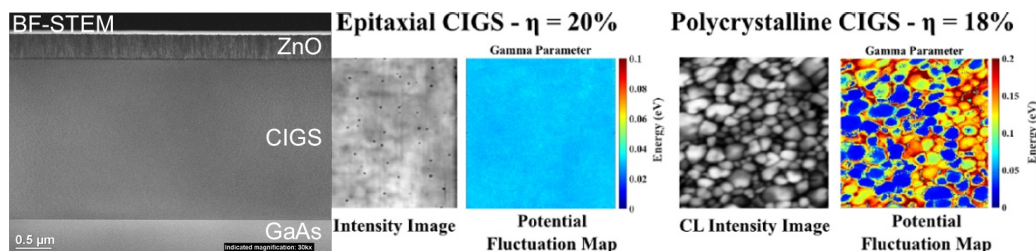


図 高品質結晶成長法による単結晶 CIGS の断面 TEM 像および発光マッピング像

【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)エネルギー省(DOE)、(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)、(アイスランド)IDDP プロジェクト、(独)ドイツ地球科学研究センター(GFZ)、(伊)イタリア海洋学・実験地球物理学研究所(OGS)

【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した。

【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、開発を実施し、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。本研究開発の成果の一部は国際誌 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。2020 年代半ばに超臨界地熱開発用坑内機器を実現し、超臨界地熱発電に関する国プロの一環として掘削予定の調査井内での試験を行い、2030 年代早期の実用化へ結びつける計画である。



図1: 本事業で開発した非金属小型耐圧容器



図2: 本事業で開発した光ファイバ計測システム

【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)、(独)ドイツ地球科学研究センター(GFZ)、(伊)イタリア海洋学・実験地球物理学研究所(OGS)

【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実施した。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について検討した。

【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。この結果を用いて、米国 FORGE プロジェクト(EGS テストフィールドでの人工地熱システムに関する研究開発)サイトでの貯留層造成シミュレーションを実施した。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。

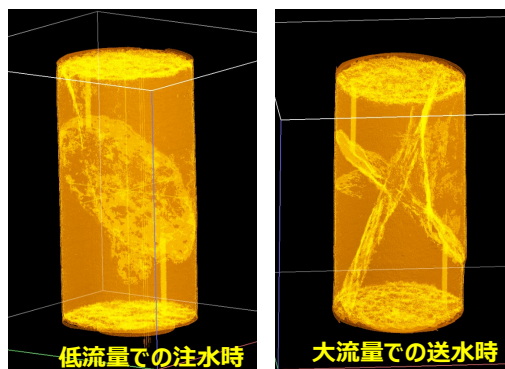


図1: 樹脂を用いた水圧破碎試験結果

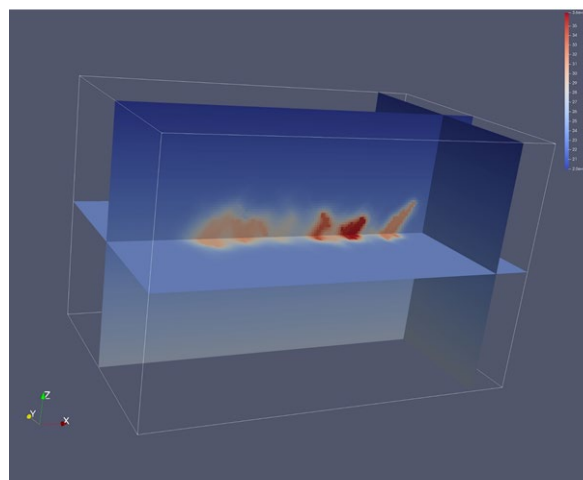


図2: FORGE サイトを模擬したシミュレーション結果(圧力分布)

【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ゼロエミッション国際共同研究センター 太田 道広

【連携機関】

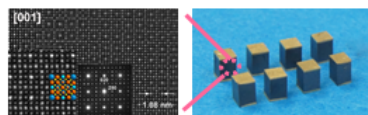
(米)アルゴンヌ国立研究所(ANL)、(米)ブルックヘブン国立研究所(BNL)、(仏)クリスマット研究所(CRISMAT)、(独)ドイツ航空宇宙センター(DLR)

【概要】

熱の有効活用は省エネルギーと CO<sub>2</sub> 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、広島大学、九州大学などが開発した日本発の低毒性で希少元素レスの熱電変換材料(硫化物系や酸化物系)を基盤技術として、材料の高性能化から、デバイスの開発と信頼性向上、発電実証までを、海外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の開発を進めた。

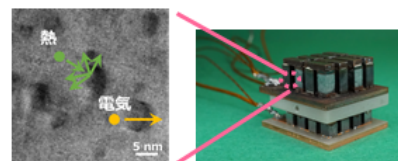
【特筆すべき成果】

化学式  $\text{Cu}_{26}\text{A}_2\text{E}_6\text{S}_{32}$  (AとEは金属元素)で書ける硫化物は、資源制約の少ない銅(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、CRISMAT のナノ構造の観測技術などを活用して、資源制約のある元素(例えば鉛)を用いなしで達成できなかった高い熱電性能を、資源制約の少ないこの硫化物系で実現した。さらに、ANL の有するナノテクと、日本のデバイス化技術を融合することで、テルル化鉛(PbTe)系超高効率熱電変換デバイスの開発に成功した。電極界面などの改善により、高温側が600℃、低温側が10℃のときに最大変換効率12%に達した(従来技術の二倍程度)。このPbTe系デバイスにおいて、電気損失と熱損失を減らせば、16%近くまで効率が向上する可能性を示した。酸化物を用いた熱電変換デバイスにおいては、高い耐久性を実現した。高温側を700℃とした13000時間の連続発電試験を実施して、発電出力に大きな劣化が見られないことを確認した。概算すると、10年後でも94%の発電出力を維持できることとなる。最後に、産総研が開発した標準デバイスの候補をDLRと相互評価して、標準デバイスとして相応しい安定性を示すことを確認した。一連の研究開発で、1件のプレス発表、30報の査読付き論文の出版など大きな成果を上げた。

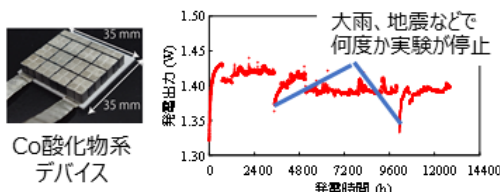


化学組成やナノ構造を制御して、銅(Cu)と硫黄(S)を主成分とした資源制約の少ない硫化物材料で高いZTを達成。

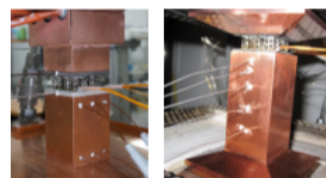
左図は、J. Am. Chem. Soc., 2018, 140, 2186で発表。



ナノ構造の形成により、熱は流し難いが電気は良く流すPbTe系材料を開発して高い変換効率を達成。



連続発電実証で大きな劣化は見られない。



(左) 産総研と(右) DLRでの標準デバイス候補の測定。  
本図は、Energy Technol., 2020, 8, 2000557で発表。

【テーマ名】⑪ CO<sub>2</sub> 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 エネルギープロセス研究部門 榑浩司

【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

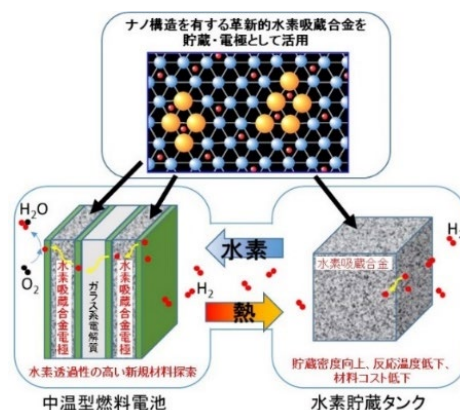
【概要】

再生可能エネルギーから製造された CO<sub>2</sub> 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、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、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・放出の作動温度(300℃)が技術的課題であり、本研究ではナノ構造・組織に起因した界面からの弾性拘束力を利用し水素放出温度の低温化に挑戦し、革新的マグネシウム系水素吸蔵合金の開発に取り組んだ。Mg 系非混合性クラスター材料では材料の混合のエンタルピーを指標とすることで、長周期積層合金(LPSO)ではその結晶構造の特異性を利用することで、簡便にナノスケールの組織・構造を有する材料の合成技術確立した。非混合性クラスター系材料では目標の作動温度 200℃を達成した。また、構成金属元素の分散状態が理想的な薄膜試料とすることで、室温でも水素吸蔵放出できることを見出した。耐久性に関しても少なくとも 10 サイクル程度まで全く劣化することなく、低温作動化と耐久性を両立することに成功した。LPSO 系材料では 150℃でも 4.32wt%の水素吸蔵量に達した。また、各種 LPSO 合金で反応温度を低温化することで、超高压相である不安定な  $\gamma$ MgH<sub>2</sub> 相が生成できることを見出した。この  $\gamma$ MgH<sub>2</sub> は  $\alpha$ MgH<sub>2</sub> に比べて水素放出温度が低温化することも明らかにした。これらの結果から、ナノオーダーの構造・組織を創製することで本事業目標である低温作動化につながり、開発コンセプトを実証することに成功した。

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。作動温度 300℃での動作を達成するとともに、乾燥水素での直接発電に成功した。従来の貴金属単体から水素含有量が高い Mg 系材料との積層電極とすることで、貴金属使用量を半減しても電極抵抗を 10 分の一に低減することに成功した。この新規電極構造と材料に関して特許の出願を行った。



【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】

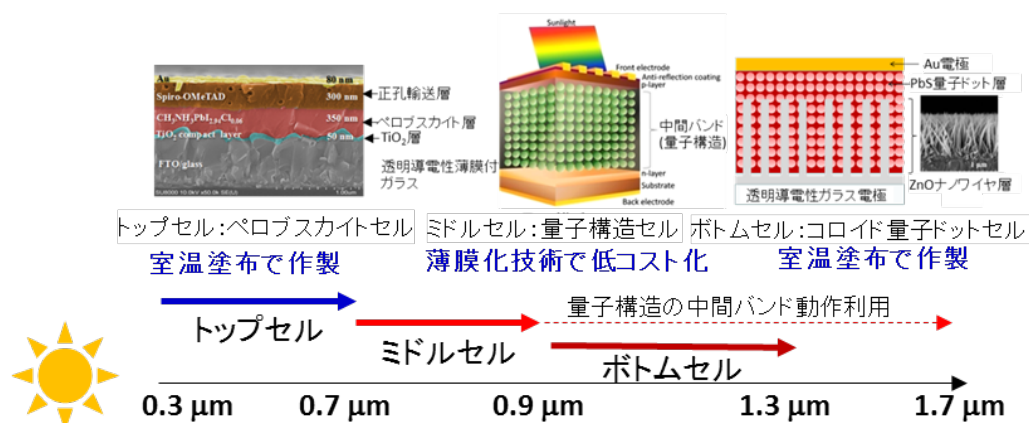
(仏)フランス国立科学研究所(CNRS)・太陽光エネルギー研究所・分子構造学研究ユニット、(仏)ボルドー大学

【概要】

ペロブスカイト太陽電池をトップセルとし、量子構造を組み込んだ太陽電池とコロイド量子ドット太陽電池をそれぞれミドルセルとボトムセルとする多接合太陽電池を、溶液プロセスや剥離技術など低コスト化に資する技術により実現することを目的として、研究開発を実施した。多接合太陽電池を構成するサブセルの高性能化を行うと共に、最適なサブセルの組み合わせを実現するために、理論計算を行い、トップセルおよびボトムセルのバンドギャップ制御をした上で、多接合化の可能性について、分光タンデムなどにより検証を行った。ミドルセル(化合物セル)に中間バンドを形成する際に導入する量子構造として、波型量子井戸構造がキャリアの長寿命化に有効であることを見出した。さらに、化合物セルの低コスト化や軽量化、フレキシブル化に必須の薄膜化技術の研究開発が進展した。また、共同研究先が独自開発した非破壊で太陽電池性能の面内分布を評価解析する技術を活用するなどして、本事業の研究開発の加速を図った。

【特筆すべき成果】

量子構造を導入した化合物太陽電池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、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、シミュレーションで設定した 1.55  $\mu\text{m}$  に吸収端を制御した。開発中のトップセルおよびミドルセルと同等な吸収端を有する化合物半導体セル(InGaP/GaAs 2 接合太陽電池)とコロイド量子ドットの分光タンデムで、電流整合条件で約 28%の変換効率を達成し、コロイド量子ドットセルのボトムセルとしての可能性を検証した。ペロブスカイトトップセルについても、バンドギャップ制御することで、GaAs セルと電流整合条件を満たすタンデム化が可能であること示した。本事業の成果を含む日仏共同研究の取り組みを踏まえ、次世代型太陽電池の展望を議論した学術論文「Material challenges for solar cells in the 21st century: directions in emerging technologies”, Science and Technology of Advanced Materials (2018)」の被引用は、57 回(Web of Science 2021 年 3 月)である。



【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)

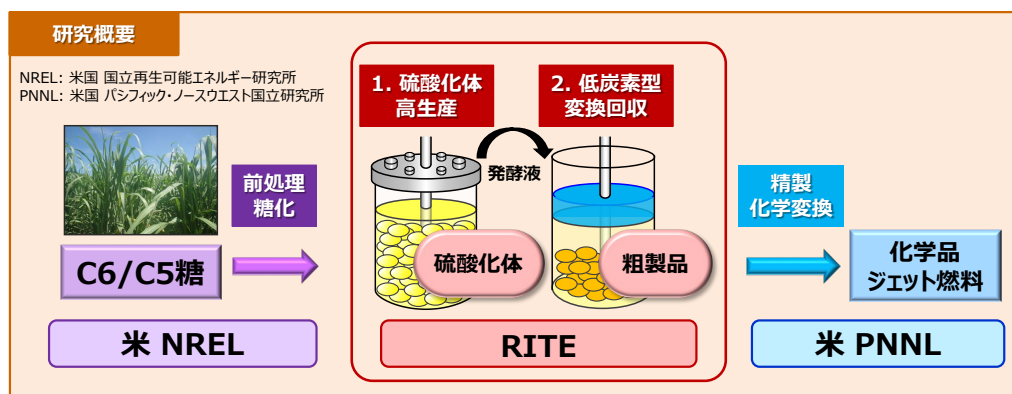
【連携機関】(米)国立再生可能エネルギー研究所(NREL)、(米)パシフィック・ノースウェスト国立研究所(PNNL)

【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た。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認することによって製造コストの削減も目指すものである。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た。

【特筆すべき成果】

イソamilアルコール(C5)や 2-フェニルエタノール(C8)等の中鎖アルコールやアルデヒド類は細胞毒性が高く微生物での高生産は困難である。本研究では中鎖アルコールを発酵生産と連続して酵素的に硫酸化させ、低毒性型誘導体として生産させることに成功した。低毒性型の硫酸化誘導体はイオン交換樹脂を用いて高収率で発酵液から回収することが可能で、化学的あるいは酵素的に元の中鎖アルコールに戻すことも可能であった。ただし硫酸化誘導体の生産量は現時点ではかなり低い。一方、毒性が高いアセトアルデヒドについては発酵液に安価な亜硫酸塩を添加しておくことで、発酵生産と連続して低毒性な亜硫酸付加体として蓄積させることに成功し、3 日間の連続生産でも菌体活性は低下することなく 300 mM 以上の生産量を達成した。これまでのアセトアルデヒドの発酵生産では大腸菌の 10 mM 程度の生産が報告されている程度であり、低毒性化させることでこれをはるかに超える高生産が可能であることが実証できた。本亜硫酸付加体はイオン交換樹脂による発酵液からの回収も可能であり、アルカリ条件で元のアルデヒドに戻すことが可能である。亜硫酸塩とアルデヒドの反応は汎用性があり、様々なアルデヒドの高生産化の可能性も示された。



高汎用性バイオプロセス

【テーマ名】⑭ 第3世代パワー半導体  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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、 $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶の製造技術を高度化した。産総研は精密温度分布制御が可能な低出力レーザ加熱結晶育成装置を開発し(図(左))、1/2 インチの結晶育成技術を確認した(図(中上)、(中下))。それを基盤として、フラウンホーファー研究機構は自身の独自技術により高出力レーザ加熱結晶育成装置を開発し、産総研は結晶を大型化する計画であった。(ドイツ側の作業遅れとコロナ禍での発送の遅れにより、高出力装置の開発と結晶大型化は実施しなかった。)また、産総研は高純度化・低欠陥密度化などの結晶高品質化を行った。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 CO<sub>2</sub> 排出量削減に向けた基盤技術を開発した。

【特筆すべき成果】

・低出力レーザ加熱結晶育成装置においてレーザビーム照射強度分布の最適化により結晶に与える熱ショックを緩和しクラック等の欠陥の発生を防止する技術を開発した。この技術は高出力レーザ加熱結晶育成装置にも有効であり、レーザ加熱結晶育成技術の基盤を構築した。

・育成結晶の高純度化に取り組み、環境から混入しやすい不純物Siの濃度を 100ppb まで低減させることに成功した(図(右))。石英管管状炉と金属製キャップを使用し原料焼結時のSi混入を防止した上で、ゾーンリファイニング法による精製を4回以上繰り返した。特に炉から試料を取り出すことなくゾーンリファイニングを繰り返すプロセスを開発したことが効果的であった。

・育成結晶から製作した基板の欠陥密度を  $10^3\text{cm}^{-2}$  台まで低減することに成功した。加工(切断・研磨)する際に表面にダメージが入ってしまうが、CMP研磨によって新たなダメージを加えずに既存のダメージを取り除くことが可能であることを示した。育成結晶はバルクとしてのダメージは少なく、基板・ウエハに加工する際の表面処理が重要であることを明らかにした。

・上記基板上にショットキーバリアダイオードを作製し、ON/OFF 比が  $10^9$  以上の整流性を達成した。パワー半導体の高効率化への貢献が期待される。また、この素子はUVC(波長 200~280nm の紫外線)を感度良く検出することも確認した。地上に到達する 290nm 以上の太陽光に応答しないため、ソーラーブラインドな UVC フォトダイオードとして種々の応用が期待される。

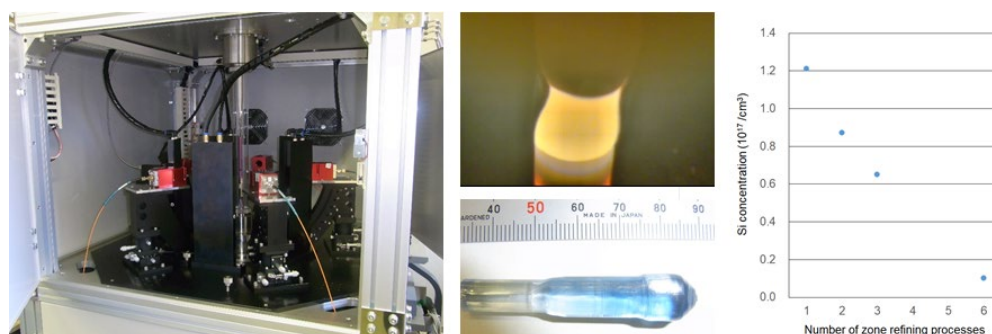


図 (左)完成した低出力レーザ加熱結晶育成装置。(中上)Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶育成の様子。(中下)育成した Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶。(右)Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶中の Si 濃度のゾーンリファイニングの回数依存性。

【テーマ名】⑮ 3D ライダーと AI による風況フルスキャンング手法の開発

【所属・代表研究者名】国立研究開発法人産業技術総合研究所 再生可能エネルギー研究センター 風力エネルギーチーム 小垣哲也

【連携機関】

(蘭)オランダエネルギーセンター(ECN)、(独)風力エネルギー研究センター(ForWind)

【概要】

本研究は、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次元構造を詳細に計測できる手法の開発を目指したものである(図)。新たな風計測技術を開発する本テーマは、従来の観測鉄塔を用いた手法を格段に進化させるもので、洋上風況調査への応用や将来的に風車制御技術と融合することでウィンドファーム全体の最適制御を実現するというイノベーション創出にチャレンジするものである。



【特筆すべき成果】

実証実験より、スキャンングライダー視線風速の合成で、海上風を陸上から遠隔で計測できる萌芽的な結果を得た。洋上ブイとデュアルライダー風速の平均誤差は、洋上ブイの平均値に対して±5%の範囲内に収まった。さらに決定係数は0.98を超えていた。また、風向についても平均偏差は5°以下、決定係数は0.8以上であった。すなわち、計測精度の面においては、本手法は従来法の代替となり得る十分な結果を得た。他方、データ取得率は計測距離が長くなるにつれて単調減少するだけでなく、気象条件にも大きく依存することが示唆された。さらに解析時に人工知能技術のニューラルネットワーク回帰を適用することで、計測精度の平均誤差は±3%以下まで改善する結果も得た。

すなわち、スキャンングライダー遠隔風計測は着想段階から実際の風力発電事業での応用が期待できる十分な検証結果が得られた。国内機運の高まりが続く洋上風力の開発に欠くことの出来ない基盤技術として2050年でのCO<sub>2</sub>大幅削減に寄与できるものと考えられる。

【テーマ名】⑩ 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、(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

【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、産総研で開発した機能性セラミックス膜(透明導電膜・蓄光膜)をデバイスに組み込むことで、高効率なフレキシブル有機EL(オーストラリア連邦科学産業研究機構との連携)を開発する。更に、パワエレ用電子部品(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。

【特筆すべき成果】

従来、セラミックス薄膜を用いた電子部品は、超高真空、高温加熱工程を有するが、本プロジェクトでは、国際共同研究により、光反応プロセスを開発することで、従来プロセスでは作製できないフレキシブルサーミスタやフレキシブル抵抗体などの電子部品を実現すると同時に、従来の気相プロセスと比して、1/3の低消費電力化に成功し、企業との共同研究にも進展している(図1)。更に、フレキシブル透明導電膜の開発では、特に、光反応により結晶成長と同時に格子間に高濃度酸素空孔を生成することで、従来困難であった、高電気伝導と高仕事関数とを両立する手法を開発した(図2)。これにより、従来のガラス基板上と同等の10000cd/m<sup>2</sup>と発光効率30%向上の青色発光を実現した。本成果は、光反応制御により、熱反応ではなしえない高キャリア濃度を有する酸化物薄膜の電子構造制御といった新しい学術的な成果と同時に、省エネルギーディスプレイ・照明の開発に加えて、今後ゼロエミッション化の重点テーマである軽量フレキシブル太陽電池開発にも必須な部材としての産業応用も期待できる成果である。

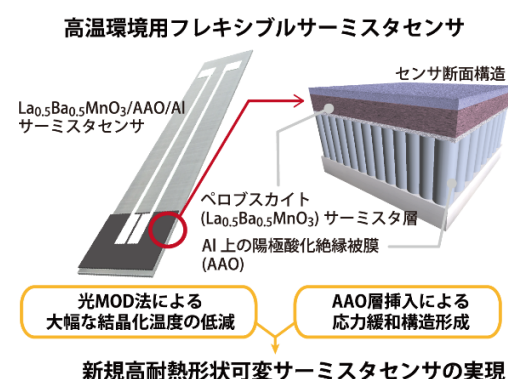


図1 高耐熱フレキシブルサーミスタ

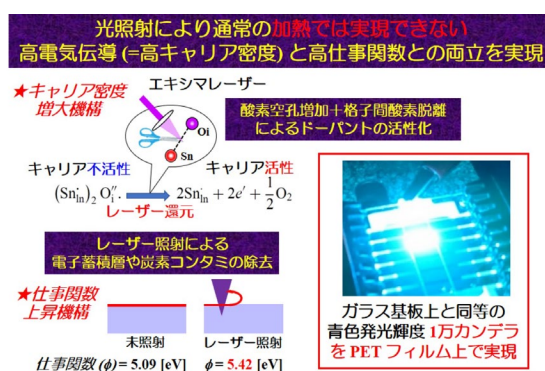


図2 フレキシブル透明導電膜の開発

【テーマ名】⑪ 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(氏名)石原達己

【連携機関】(独)ユーリッヒ国立研究所

【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<sub>2</sub>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行った。

【特筆すべき成果】

#### 1) 酸素イオン伝導体を用いる水蒸気電解セル

ガスシール性から小型円筒型セルによる中温作動型水蒸気電解セルの開発を行ってきた。このセルでは Ni-YSZ の多孔質基体管を用い、その上にディップコート法で Ce<sub>0.6</sub>Mn<sub>0.3</sub>Fe<sub>0.1</sub>O<sub>2</sub>(CMF)および TiO<sub>2</sub>-Ce<sub>0.6</sub>La<sub>0.4</sub>O<sub>2</sub>を 2 層取り付け、その上に La<sub>0.9</sub>Sr<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.8</sub>Mg<sub>0.2</sub>O<sub>3</sub> の電解質層を取り付ける構成でセルを作成した。本研究では Ni-YSZ の円筒基板内への CeO<sub>2</sub> ナノ粒子の作成をインフィルトレーション法で行った。最適の濃度は 1.5MGe(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> のインフィルトレーションであった。ナノ CeO<sub>2</sub> 粒子の導入により低温での過電圧が大きく低減でき、600°Cでも 1W/cm<sup>2</sup> の最大出力密度を有するセルの作成が行えた。同セルは、電解特性も優れており、目標とした 500°Cでの電解電流 1A/cm<sup>2</sup> を 1.9V の印加電圧で達成した。これは円筒型セルを考えると従来になく、優れた可逆動作特性を示すセルの開発が行えた。

#### 2) プロトン伝導体を用いる水蒸気電解セル

テープキャスト法によるプロトン伝導性酸化物水蒸気電解セルの研究開発を行った。ユーリッヒ研究所において九州大学から学術研究員が現地への約 3 ヶ月間滞在してハーフセルの作製を行うとともに、その水蒸気電解特性を九州大学において調べた。その結果、作製の困難な Ba(Zr<sub>0.5</sub>Ce<sub>0.4</sub>)<sub>8/9</sub>Y<sub>0.2</sub>O<sub>3-δ</sub>の 10μm の膜厚の薄膜化に成功し、1 A/cm<sup>2</sup>における電解電圧はそれぞれ、1.44 V(550°C)、1.64 V(500°C)、600°C、1 A/cm<sup>2</sup>におけるファラデー効率は約 70%であった。これは従来の電解特性をはるかに凌駕する結果であり、優れた電解特性を有するセルの作製を行うことができた。

#### 3) 可逆動作を実現するセルの開発と Fe-空気電池への展開

水素の貯蔵媒体として Fe の酸化還元を利用した電力貯蔵を、可逆動作型セルとの複合により検討した。従来より検討している Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 粉体に比べると、微粒子のナノ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を用いると繰り返し安定性は向上し、300 時間まで大きくは、劣化することなく酸化還元を行えることを見出した。この Fe 粉体を用いることで、Fe の酸化還元反応で水素を貯蔵できる新しい蓄電デバイスを提案し、繰り返し特性の性能の向上を図ることができた。

## 2. 成果の内訳

| テーマ                                                                | H27～H29 |     |             | 事業終了時 |     |             |
|--------------------------------------------------------------------|---------|-----|-------------|-------|-----|-------------|
|                                                                    | 査読      | 特許等 | 【参考】        | 査読    | 特許等 | 【参考】        |
|                                                                    | 論文      | 件数  | 論文・総説等(査読無) | 論文    | 件数  | 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   | 1           | 2     | 0   | 2           |
| 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                   | 7       | 3   | 2           | 11    | 5   | 5           |
| 3 過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発                                           | 3       | 2   | 4           | 12    | 5   | 8           |
| 4 CO <sub>2</sub> 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-   | 13      | 0   | 6           | 28    | 4   | 6           |
| 5 系統協調型の分散電源大量導入技術の開発                                              | 1       | 0   | 0           | 2     | 0   | 0           |
| 6 太陽光による有用化学品製造                                                    | 9       | 5   | 0           | 16    | 10  | 0           |
| 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                                        | 1       | 2   | 3           | 6     | 4   | 3           |
| 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                                | 1       | 0   | 1           | 2     | 0   | 0           |
| 9 EGS 設計技術による地熱発電可能地域の飛躍的拡大                                        | 1       | 0   | 0           | 3     | 0   | 0           |
| 10 低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発                                             | 13      | 2   | 10          | 30    | 4   | 20          |
| 11 CO <sub>2</sub> 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           | 4     | 1   | 2           |
| 12 革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発                                             | 6       | 11  | 7           | 29    | 22  | 13          |
| 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                     | 0       | 0   | 0           | 1     | 0   | 0           |
| 14 第3世代パワー半導体 $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の高品質化・高性能化技術 | 0       | 0   | 0           | 6     | 0   | 0           |
| 15 3DライダーとAIによる風況フルスキャンング手法の開発                                     | 0       | 0   | 0           | 0     | 0   | 4           |
| 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                                  | 0       | 2   | 3           | 8     | 9   | 6           |
| 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                             | 2       | 0   | 0           | 7     | 0   | 0           |
| 計                                                                  | 57      | 27  | 37          | 167   | 64  | 69          |

### 3. 国際共同研究によって得られたメリットおよび推定短縮年数

#### 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

短縮年数 6年

##### 【国立再生可能エネルギー研究所（NREL）】

世界で最も低コストなバイオマス糖化技術を持つNRELとの連携により実用化に最適な糖からの水素生産条件を検討できた。（5年短縮）

##### 【国立科学研究センター（CNRS）】

水素生成酵素の分子機構に関して世界最先端の研究を行うCNRSとの連携により酵素機能の改良を大幅に効率化できた。（5～10年間短縮）

#### 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

短縮年数 5年

##### 【国立再生可能エネルギー研究所（NREL）】

（米）国立再生可能エネルギー研究所が有するバイオマスの前処理・糖化技術は世界最高の糖化効率であり、その技術を用いて作製されたコーンストーバーの実糖化液を用いることによって、イソブタノール生産に関する設定目標を達成することが出来た。（5年短縮）

##### 【パシフィック・ノースウェスト国立研究所（PNNL）】

（米）パシフィック・ノースウェスト国立研究所が有するアルコール類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する技術に関する触媒や温度条件などを入手することが出来た。（5年短縮）

#### ③ 過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発

短縮年数 4年

##### 【ドイツ航空宇宙センター（DLR）】

熱力学シミュレーションによるLIBデータ解析により多くの知見を得ることができた。（4～5年間の短縮）

##### 【アメリカ航空宇宙局（NASA）】

民生電池の安全な利用について意見交換を図りつつ、必要に応じてNASAのバッテリレベルでの安全性評価装置の利用について了承を受けることができた。（2年短縮）

【(欧州委員会) 共同研究センター (JRC)】

安全性試験法や運用について知見を得ることができた。産総研の放射光を用いた解析や JAXA・長岡技科大の電気化学的手法と組み合わせて、電池の系統的な劣化診断が可能になった。(4 年短縮)

【欧州宇宙機関 (ESA)】

ESA の保有する小型電池の安全性評価用のチャンバ利用についての打ち合わせより知見を得ることができた。(2 年短縮)

【国立再生可能エネルギー研究所 (NREL)】

NREL の持つ原子層堆積技術は世界最高水準で精密な制御が可能なものであり、電極の高安定化につながる表面改質の研究を進めることができた。(2 年短縮)

【SLAC 国立加速器研究所 (SLAC)】

SLAC の持つ準大気圧光電子分光技術は世界最高水準かつ独自の技術であり、日本の放射光施設にも応用可能なものであるため、国内における電子状態研究のスピードが加速した。(4 年短縮)

【ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL)】

LBNL の持つオペランド軟 X 線分光技術は世界最高水準で独自の技術であり、日本の放射光施設にも応用可能なものであるため、国内における電子状態研究のスピードが加速した。(4 年短縮)

【ユトレヒト大学】

ユトレヒト大学の持つ放射光スペクトル計算の技術を提供していただくことができた。すでに公開になっているプログラムに追加する特別なソースコードの指南をいただき、より精緻な計算を行えるようになった。(2 年短縮)

④ CO<sub>2</sub> 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-

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 CO<sub>2</sub> 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研究期間が短縮された。(5 年以上短縮)

【スイス連邦工科大学ローザンヌ校 (EPFL)】

当該大学は CO<sub>2</sub> 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 <sup>1</sup>H 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研究期間が短縮された。(3 年以上短縮)

【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、現在共同研究を行っている。産総研単独で同様な解析を行うのは不可能。(5 年以上短縮)

⑤ 系統協調型の分散電源大量導入技術の開発

短縮年数 5 年

【サンディア国立研究所 (SNL)】

サンディア国立研究所の持つスマートインバータの自動試験方式は米国の業界団体 SunSpec によって SunSpec SVP という統合プラットフォームとして、スマートインバータの試験のデファクトを目指している。この SunSpec SVP の無償提供を受けたことで、米国 UL1741SA に基づく認証試験が容易に行えるようになった。

⑥ 太陽光による有用化学品製造

短縮年数 4 年

【ブルックヘブン国立研究所 (BNL)】

BNL の貴金属を使わないカソード技術は世界最先端。本来水素製造用であったが、この技術のノウハウやサンプルを産総研に提供してもらうことで速やかに新規の反応（過酸化水素製造）へと応用展開できた。

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あり、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

短縮年数 5 年

【国立再生可能エネルギー研究所 (NREL)】

試料の測定を担当した。NREL の材料解析技術が提供されたことによって、高効率化技術の開発が加速した。(5 年以上短縮)

【Fraunhofer 研究機構】

多接合太陽電池の製造技術が優れており、試料提供を受けた。この試料によって、変換効率 30%を超える多接合太陽電池の開発が早期に実現した。(3 年以上短縮)

【スイス連邦材料試験研究所 (EMPA)】

アルカリ金属添加技術に優れており、研究討論を通して指導していただいた。アルカリ添加技術によって、CIGS 太陽電池の高効率化が早期に実現した。(3 年以上短縮)

【HZB（独）】

試料提供を行い、光学的特性の評価を行った。多結晶 CIGS との比較を行い、単結晶 CIGS の優れた点を確認した。本技術によって、CIGS 太陽電池の基礎的物性解析が早期に実現した。（3 年以上短縮）

【ZSW（独）】

生産法に関する議論を行った。大面積成膜法の開発を得意としており、低コスト成膜法に関する議論を行った。本技術の提供により、大面積成膜装置の開発期間短縮に成功した。（3 年以上短縮）

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

短縮年数 5 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使用する高温用坑内機器に関する情報の入手により研究期間が 1 年短縮
- ・ FORGE プロジェクトの遅れにより当初 FY2019 に実施予定であった FORGE サイトでの坑内試験は実施できなかった（研究開発期間短縮見込：7 年）

【サンディア国立研究所】

- ・ 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】

- ・ 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

研究期間が 10 年短縮

【ドイツ地球科学研究センター】

・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】

・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

短縮年数 3 年

【サンディア国立研究所（SNL）】

・SNL 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（5 年短縮）

・FORGE サイトの基礎データ、シミュレーション結果の提供（3 年短縮）

【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、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（5 年短縮）

・FORGE サイトの基礎データ、シミュレーション結果の提供（3 年短縮）

【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（3 年短縮）

【米国地質調査所】

・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）

【ペンシルバニア州立大学】

・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（8 年短縮）

・PSU で実施した岩石透水性評価共同試験（3 年短縮）

【ドイツ地球科学研究センター】

・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（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および基本コードの開示（10 年短縮）

【イタリア海洋学・実験地球物理学研究所】

・ イタリア高温地熱掘削プロジェクト（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（6 年短縮）

#### ⑩低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発

短縮年数 8 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の提供（5 年短縮）

【クリスマット研究所（CRISMAT）】

熱電変換材料におけるナノ構造の観察技術では世界トップとである。CRISMAT と協力することで、産総研で作製した試料のナノ構造の高精度観測が可能となった。ナノ構造と熱電物性の関係について基礎的な知見が得られ、研究開発が加速した。（2 年短縮）

【ブルックヘブン国立研究所（BNL）】

ブルックヘブン研究所（BNL）には、既存熱電変換デバイスの大量生産技術がある。産総研が開発している新規熱電変換デバイスにこれらの技術が応用できないか議論した。直接応用できるものではなかったが、既存技術をよく理解できたことはメリットであった。（1 年短縮）

【ドイツ航空宇宙センター（DLR）】

宇宙開発用熱電変換デバイス評価技術の知見の提供（5 年短縮）

熱電変換デバイス用の自動車テストベンチの知見の提供（3 年短縮）

#### 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

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）】

材料中の水素の占有状況・拡散状況を知るうえで NMR は優れた手法の一つである。PNNL はこの NMR 技術に長けており、効果的な助言を得ることができた（5 年以上短縮）

【ミズーリ大学】

ナノ材料の合成および第一原理計算に長けているため、効果的な助言を得ることができた。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であった（3 年以上短縮）

【ボルドー大学】

水素吸蔵合金に対して超臨界流体を用いた触媒添加を実施した唯一の研究所であり、彼らの技術を用いることで合金の低温での反応性が向上した。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いる（4～6 年短縮）

【デルフト工科大学】

ナノ構造材料の典型例である薄膜合成およびその水素吸蔵特性評価技術を有する唯一の研究所であり、その技術を国内移転することができた。また試料作成に協力いただくとともに、効果的な助言を得ることができた。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いる（5～7 年短縮）

⑫革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発

短縮年数 5 年

【CNR-IPVF/C2N】

IPVF が開発した絶対発光計測を利用して、太陽電池特性の面内分布を非破壊で評価する手法により、太陽電池の研究開発が加速（3～4 年短縮）

【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に、ボルドー大学が構築してきた材料合成技術を活用（2～3 年以上短縮）

太陽電池の構成材料の電子状態を把握する際、ボルドー大学の有する評価技術を活用（1 年以上短縮）

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

短縮年数 5 年

【国立再生可能エネルギー研究所（NREL）】

世界最先端のバイオマス糖化技術を有する（米）国立再生可能エネルギー研究所と連携し、実用的なセルロース系バイオマス糖化液を用いて本開発に必要な各種検討が行えた。（5 年短縮）

【（米）パシフィックノースウェスト国立研究所（PNNL）】

クルードな原料の化学プロセス技術は世界最高レベルであり、本技術の生産物の精製に関して有益な情報を得られた。この技術を単独で開発するとなると 5 年以上はかかる。（5 年短縮）

⑭第 3 世代パワー半導体  $\beta$ -Ga203 の高品質化・高性能化技術

短縮年数 5 年

【フラウンホーファー研究機構】

世界最先端の高出力レーザー光集光技術を誇っており、日本側の結晶育成炉に応用することで結晶大型化・高品質化が可能となる。

⑮3D ライダーと AI による風況フルスキャン手法の開発

短縮年数 5 年

【ECN】

風力業界で広く知られたテストサイトでの実験ができた（5 年短縮）

【ForWind】

スキャンングライダー装置の使用方法・解析方法についての知見・ノウハウの提供（2～3 年短縮）

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

短縮年数 5 年

【(豪) オーストラリア連邦科学産業研究機構 (CSIRO)】

CSIRO では、透明導電膜の仕事関数やそれを用いたデバイス作製技術を有するため、産総研で開発した電子部品の評価を行うことができ、従来にない性能の電子部品開発を実現した（5 年短縮）

【(米) テューレーン大】

産総研ではこれまで、レーザープロセスにより薄膜を作製してきたが、テューレーン大では異なった光反応装置を有しており、それを用いて産総研で開発したインクとの組み合わせにより、プロセスの高効率化を実現できた（5 年短縮）

【(米) アルゴンヌ国立研究所】

パワーエレクトロニクス仕様やプロセスに実績があり、それを基に、高耐熱部品の開発の基盤技術を開発することができた（5 年短縮）

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

短縮年数 10 年

【ユーリッヒ国立研究所】

ユーリッヒ国立研究所の持つ湿式プロセスによる電解質薄膜の作製技術を導入することで、低温での電解性能が、飛躍的に向上できた。

#### 4. 個別採択案件のアウトプット指標・目標値および達成状況

| 番号 | テーマ名                                                           | 目的および終了時目標<br>(評価軸が異なる場合は中間評価時<br>目標も)                                                                                                                                                                     | 達成状況 |                                                                                                                                                                             |
|----|----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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                              | 水素生産性の向上に有効な遺伝子を探索するため、<br>・水素生成酵素 5 種の発現系の構築、糖 1 モルから 3.5 モルの水素収率(暗発酵)<br>・代謝系/酵素発現系 4 種の改変、酢酸からの理論水素収率の 30%(光発酵)                                                                                         | 達成   | ・水素生成酵素 5 種の発現系の構築、糖 1 モルから 3.95 モルの水素収率を達成(暗発酵)<br>・代謝系/酵素発現系 4 種の改変、酢酸からの理論水素収率の 82%を達成(光発酵)                                                                              |
| 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                 | ブタノール生産速度を従来の7~10倍に上げるため、<br>・ブタノール収率 92%および生産速度 3 g/L/h を達成する技術見通しを得る。<br>・量産モジュールでブタノール回収エネルギー4 MJ/kg を達成する技術の目途を得る。<br>・コーンストーバー糖化液を原料とし、ブタノール収率 80%、生産速度 2.0g/L/h および回収エネルギー4 MJ/kg の目標値を達成する技術見通しを得る。 | 達成   | ・ブタノール収率 92.8%および生産速度 3.6 g/L/h を達成した。<br>・量産モジュールでブタノール回収エネルギー4 MJ/kg を達成する技術の目途を得た。<br>・コーンストーバー糖化液を原料とし、ブタノール収率 80%、生産速度 2.2g/L/h を達成し、回収エネルギー4 MJ/kg の目標値を達成する技術見通しを得た。 |
| 3  | 過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発                                         | 日本の冬季も考慮した温度環境で、1 年間 1 日 1 回の充放電を行った際の容量維持率を目標として、<br>・常温(25℃)での電池容量に対する低温下(10℃)での容量比率が 360 回の充放電サイクル後に 75%を維持。                                                                                            | 達成   | ・常温での電池常温(25℃)での電池容量に対する低温下(10℃)での容量比率が 360 回の充放電サイクル後に 81%を維持。                                                                                                             |
| 4  | CO <sub>2</sub> 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- | 実証化のために求められる 2000 時間以上の耐久性を有し、かつ金属 1 gあたり・1 時間あたり 1.2 Nm <sup>3</sup> の水素発生性能を有する触媒の開発                                                                                                                     | 達成   | 2000 時間以上の耐久性を有し、かつ金属 1gあたり・1 時間あたり 1.2 Nm <sup>3</sup> の水素発生性能を有する触媒の開発に成功した。                                                                                              |

|   |                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |      |                                                                                                                                                                                                                                                            |
|---|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 5 | 系統協調型の分散電源大量導入技術の開発       | <p>わが国および海外でスマートインバータの開発や導入に必要な制御機能の評価試験法を開発するため、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・蓄電池用 PCS の制御プロトコルについて米欧3機関と共通する試験内容を実施し、相互運用性を検証する（中間評価時目標）</li> <li>・系統連系試験設備とシミュレーションモデルを融合し、国内外の様々な電力系統を模擬し、国内 PCS メーカーが米国等への海外輸出においても通用する試験方式とする（終了時目標）</li> </ul>                                                                                                                                                                               | 達成   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・米欧の研究機関と共同執筆した次世代型パワーコンディショナ(PCS)の制御プロトコルの文書を公開。IEEE や IEC における標準化の審議において参照された。（中間評価時目標達成）</li> <li>・共同開発した制御プロトコル等を基に、次世代型パワーコンディショナを自動試験するプラットフォームを完成し、北米向け UL 認証 UL1471SA に基づく試験が行えるようになった。（終了時目標達成）</li> </ul> |
| 6 | 太陽光による有用化学品製造             | <p>未開拓分野の先行利得を活かし、有用化学品の生成反応種類を確実に増やして特許出願し、太陽エネルギー変換効率の向上をはかるため、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・次亜塩素酸などの様々な化成品製造の電流効率(Faraday 効率)を 90% 以上（事業開始前は ClO<sup>-</sup>、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、Ce<sup>4+</sup>、IO<sub>4</sub><sup>-</sup>でそれぞれ約 50%）にする技術を開発する</li> <li>・太陽エネルギー変換効率を3%以上（事業開始前は WO<sub>3</sub> 光電極の過硫酸製造において 2.2%）に向上するための要素技術を確立するとともに、効率10%を目指すための指針を得る</li> <li>・光アノード電極とカソード電極を組み合わせ、全体システムのプロトタイプを構築する</li> </ul> | 達成   | <ul style="list-style-type: none"> <li>・次亜塩素酸などの様々な化成品製造の電流効率(Faraday 効率)を 90%以上にする技術を開発した（5 年間で、光アノード上で FE90%以上を達成した生成反応は 10 種類以上）</li> <li>・太陽エネルギー変換効率を3%に向上し、効率10%を目指すための指針を得た</li> <li>・光アノード電極とカソード電極を組み合わせ、全体システムのプロトタイプを構築できた</li> </ul>           |
| 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 | <p>太陽光発電の発電コスト 7 円/kWh を実現させるため、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・化合物単結晶薄膜太陽電池の変換効率 25%</li> <li>・CIGS 系多接合太陽電池で変換効率 30%</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 一部達成 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・化合物単結晶薄膜太陽電池の変換効率 21.3%</li> <li>・III-V/CIGS 多接合太陽電池で 32.7%（参考値）</li> </ul>                                                                                                                                        |

|   |                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |      |                                                                                                                                                                                                                   |
|---|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|   |                                   | <p>&lt;未達成項目の原因および今後の対応&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・目標は未達成であったが、本事業によって、世界最高効率が10%から21.3%となった。未達成の要因は、p-n 接合界面での損失を減らす上で要となる、新規 n 型層の開発が困難であったことである。これは CIGS 研究開発において、誰も成功していない技術であり、今後も研究を進めていく。</li> <li>・新規 n 型層として、III-V 族系化合物半導体を想定している。電子親和力を制御することで、ワイドギャップ CIGS 太陽電池の高効率化が期待できる。この CIGS 太陽電池は、多接合太陽電池のトップ層として利用でき、CIGS 系多接合太陽電池によって、高効率・軽量・フレキシブル・長期信頼性の高い多接合太陽電池が実現できる。</li> </ul> |      |                                                                                                                                                                                                                   |
| 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 | <p>超臨界地熱発電システムを実現させるため、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・高温地熱井を模擬したオートクレーブ装置(坑井直径 150mm, 長さ 200mm 程度, 最大温度 350℃、最大圧力 60MPa, 酸性水(pH3 以上))を設計・製作し、運用を開始する。</li> <li>・高温用素子, 材料等の評価を行い, 最大温度 350℃, 最大圧力 60MPa で動作する圧力容器, センシングシステム等の試作を行う(中間評価時目標)</li> <li>・最大温度 350℃, 最大圧力 60MPa で動作する光ファイバセンシングシステム・圧力容器を実坑井で試験し、実用性を実証する</li> </ul>                                                                 | 一部達成 | <ul style="list-style-type: none"> <li>・世界トップの性能(約 400℃, 60MPa)を有する「超臨界坑内模擬装置」を開発。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</li> <li>・米国側のプロジェクトの遅れにより、米国での実証試験は実施できず。</li> </ul> |
|   |                                   | <p>&lt;未達成項目の原因および今後の対応&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験に使用する実坑井の所有者が、坑内でのトラブルリスクを回避したいという趣旨で、圧力容器の試験を許可しなかったため。</li> <li>・FORGE サイトでの試験井の掘削が予定より1年程度遅れ、本事業期間に当該坑井を使用できなかったこと。</li> <li>・2020 年代半ばに超臨界地熱開発用坑内機器を実現し、超臨界地熱発電に関する国プロジェクトの一環として掘削予定の調査井内での試験を行い、2030 年代早期の実用化へ結びつける計画である。</li> </ul>                                                                                             |      |                                                                                                                                                                                                                   |

|    |                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 9  | EGS 設計技術による地熱発電可能地域の飛躍的拡大          | <p>超臨界地熱発電実現のため、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・亀裂せん断滑り室内実験装置(～180℃, 40MPa)を完成させる(中間評価時目標)</li> <li>・亀裂せん断滑りと透水性の関連を定式化し、シミュレータへ組込む(中間評価時目標)</li> <li>・国内実証試験を実施し、高精度(誤差数%以下)に現象を予測できることを実証する</li> </ul>                                                                                                                 | 一部達成(計画変更有り) | <ul style="list-style-type: none"> <li>・亀裂せん断滑り室内実験装置(～180℃, 40MPa)を完成させた。</li> <li>・亀裂せん断滑りと透水性の関連を定式化し、シミュレータへ組込んだ。</li> <li>・予算等の制約があり、国内での実証試験は実施しなかったが、米国 FORGE サイトのシミュレーションを実施した。その結果、米国側のシミュレーションとの差異が数%以下であった。</li> </ul>                                                                                                                                                                         |
|    |                                    | <p>&lt;計画変更の原因および今後の達成計画&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・予算および試験に使用可能な坑井の条件等から国内での実証試験を実施できなかった。</li> <li>・今後、国内での大規模な水圧破碎・涵養注水時に、開発したシミュレータを用いた事前・事後シミュレーションを実施していく。(JOGMEC プロジェクトの一部として2021年度から実施)</li> </ul>                                                                                                       |              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 10 | 低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発                | <p>自動車での熱電変換デバイス実用化を目指して、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・効率14%を超える熱電変換デバイスの開発。</li> <li>・100 時間の実証実験。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                         | 達成           | <ul style="list-style-type: none"> <li>・効率14%を超える熱電変換デバイスの開発指針を確立。</li> <li>・13000 時間の発電実証で大きな劣化が見られない熱電変換デバイスを開発。</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| 11 | CO2 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 | <p>高容量な水素吸蔵合金材料の開発および白金触媒の不要化を目指して、</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・マグネシウム系高容量水素吸蔵合金を開発に取り組み、ナノ構造化による界面からの弾性拘束力の制御技術確立する</li> <li>・水素密度は 70 MPa タンクと同等以上の水素容量を確保できる5 質量%、作動温度は燃料電池システムからの排熱供給を考慮し 200℃以下、耐久性は 600 回以上を満たす水素吸蔵合金の開発</li> <li>・300℃近傍で作動する新規なリン酸塩ガラス系プロトン伝導性固体電解質を用いた次世代型燃料電池システムの開発に取り組み、水素吸蔵合金</li> </ul> | 一部達成         | <ul style="list-style-type: none"> <li>・Mg 系非混合性クラスター材料および長周期積層構造合金の両材料系において、それぞれ目標であったナノ構造化のラボスケールでの合成技術確立</li> <li>・両材料系において作動温度 200℃以下で水素を吸蔵することに成功。水素吸蔵量は Mg 系長周期積層構造合金で 4.3 質量%</li> <li>・当初目標の 600 サイクルまでの長期耐久性評価を実施できなかった</li> <li>・Mg 系非混合性クラスター材料で繰り返し吸蔵・放出サイクルを実施しても、特徴的なナノスケールの組織が維持できることを確認</li> <li>・作動温度 300℃での動作を達成するとともに、乾燥水素での直接発電に成功</li> <li>・2～3 Ωcm<sup>2</sup> まで電極抵抗を低減</li> </ul> |

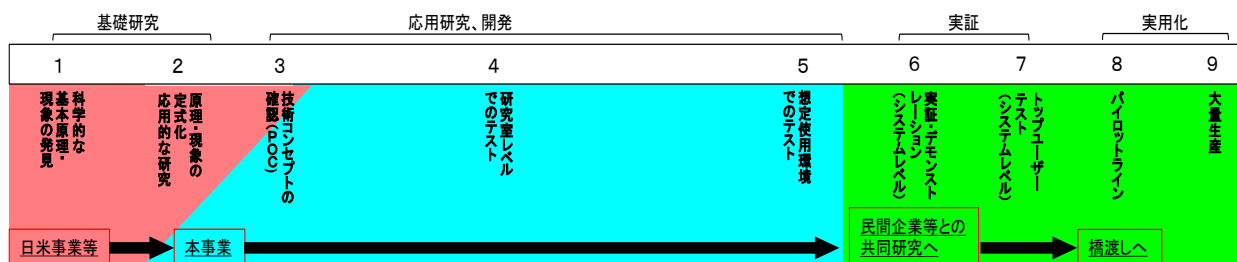
|    |                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |      |                                                                                                                                                                 |
|----|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                     | <p>から供給される高純度水素を加湿せずに直接発電できる新規電極材料を開発</p> <p>・固体酸化物形燃料電池などで実用レベルと言われる <math>0.1 \Omega\text{cm}^2</math> の面積抵抗</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |      |                                                                                                                                                                 |
|    |                     | <p>&lt;未達成項目の原因および今後の対応&gt;</p> <p>本事業において、ナノ組織を有する材料合成技術を確立するとともに、電極構造の特性改善の方向性を見出すことができた。これら知見を活用し、さらに材料組成の最適化、構造最適化を実施し、すべての目標を達成できる合金・電極の開発を進める。</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |      |                                                                                                                                                                 |
| 12 | 革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発 | <p>建物の壁面や移動体など、従来と異なる環境への用途展開のため、</p> <p>・ペロブスカイト太陽電池、化合物太陽電池、コロイド量子ドット太陽電池による、多接合化を行い、変換効率30%を目指す</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 一部達成 | <p>・化合物半導体(2 接合)とコロイド量子ドットボトムセルの分光タンデムセルで、28.1%(2 端子)、30.4%(4 端子)を達成</p> <p>・ペロブスカイトトップセルについては、化合物太陽電池(GaAs ミドルセル)との多接合化を想定し、バンドギャップ制御並びに直セル接続による電流マッチングを達成</p> |
|    |                     | <p>&lt;未達成項目の原因および今後の対応&gt;</p> <p>本事業の目標(変換効率 30%)をほぼ達成したと考えている。本事業期間中にペロブスカイト、化合物、コロイド量子ドットセルをそれぞれ、トップ、ミドル、ボトムセルとした多接合構造の構築はできなかったが、トップセルを化合物セルで代替した2 接合化合物セル(InGaP/GaAs)とコロイド量子ドットボトムセルからなる分光タンデム型セルにより、30%を達成し、溶液プロセスで構築可能なボトムセルを実現できた。</p> <p>一方、ペロブスカイトトップセルにおいては、理論計算通りのバンドギャップ制御を達成することができたが、開放電圧の向上が課題であり、分光タンデムセルに組み込むことができなかった。開放電圧を向上させるために、電極や正孔輸送材料との界面に着目し、引き続き検討している。ペロブスカイトトップセル、コロイド量子ドットボトムセルの開放電圧を高めること、ミドルセルでは、開放電圧と短絡電流値の増加を可能とする量子井戸構造の挿入と、薄膜化(剥離)技術の確立が、実用性を高めた多接合セル構築に向けた重点課題となっている。</p> |      |                                                                                                                                                                 |

|    |                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                               |                       |                                                                                                                                                             |
|----|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 13 | 様々な有用化学品の<br>低コスト・低炭素型生<br>産を可能にする革新<br>的高汎用性バイオプ<br>ロセスの開発               | 全く新規の技術として硫酸抱合反応<br>を物質生産と連続して行い、かつ実<br>用化に近い生産性を実現するため、<br>①グルコースから硫酸抱合体の生産<br>量が 4 mM/h 以上<br>②3～4 種類の硫酸化抱合体をアル<br>コール・フェノール・アルデヒドに変換<br>できるバイオ触媒を開発<br>③細胞毒性が高い主要な化学品の<br>うち少なくとも 1 種類について生産量<br>が 30 g/L                                                                  | 一部<br>達成              | ①C2 アルデヒド(アセトアルデヒド)の硫<br>酸化体生産について目標の生産性 4<br>mM/h 以上を達成<br>②3 種類のアルコール硫酸化体をアル<br>デヒドに変換するバイオ触媒を開発<br>③実糖化液を原料として 15g/L 相当の<br>C2 アルデヒド(アセトアルデヒド)の生産<br>を達成 |
|    |                                                                           | <p>&lt;未達成項目の原因および今後の対応&gt;</p> <p>当初は酵素的に毒性物質を硫酸化をさせる計画であったが酵素の活性が予想以上に低<br/>かったため反応はするものの期待した生産速度は得られなかった。しかし本事業内での<br/>検討の過程で安価な亜硫酸塩を培地に添加するだけで毒性が高いアルデヒドを非酵素<br/>的に硫酸化可能であることが分かり、目標をほぼ達成することができた。</p> <p>今後は毒性物質の生合成経路自体の最適化と、亜硫酸塩の培地中での安定化や培地<br/>への添加方法について検討を重ねる。</p> |                       |                                                                                                                                                             |
| 14 | 第 3 世代パワー半導<br>体 $\beta$ -Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> の高品質<br>化・高性能化技術 | 高性能化に不可欠な高純度化を不<br>純物濃度 100ppb まで進め、同時に<br>容器消耗の問題を解決してコスト増<br>を抑えることを目標とした<br>・不純物濃度 100ppb の高品質結晶<br>を育成する<br>・高出力レーザ加熱結晶育成炉を開<br>発し、2 インチ径の結晶育成の実証<br>研究を行う                                                                                                                | 達成<br>(計画<br>変更<br>有) | ・不純物濃度 100ppb の高品質結晶を<br>育成<br>・共同研究先の作業遅れとコロナ禍で<br>の発送の遅れにより、計画変更を申<br>請・受理され、2 インチ径結晶育成は実<br>施せず                                                          |
|    |                                                                           | <p>&lt;計画変更の原因および今後の予定&gt;</p> <p>高出力レーザ加熱結晶育成炉開発は、共同研究先の作業遅れとコロナ禍での発送の遅<br/>れにより目標未達成となった。他については、市販品の製造手法(EFG 法)よりもすぐれ<br/>た結晶育成法を採用して綿密な計画により事業を遂行したため、達成できた。</p> <p>高出力レーザ加熱結晶育成炉開発については、共同研究先から装置移設が完了。2 イ<br/>ンチ径の結晶育成の実証研究を令和 3 年度内に行う。</p>                             |                       |                                                                                                                                                             |
| 15 | 3D ライダーと AI によ<br>る風況フルスキャン<br>グ手法の開発                                     | 洋上気象観測鉄塔の建設が不要に<br>なる水準を目指して、<br>・2～3 km 距離での平均誤差±3%程<br>度の風計測技術の開発                                                                                                                                                                                                           | 達成                    | ・離岸距離 2.5 km をターゲットした実験<br>において-2.3%の誤差                                                                                                                     |

|    |                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 | <p>(1) フレキシブルセラミックス低消費電力型プロセス開発(透明導電膜、酸化物半導体)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・酸素量,透過率を制御したナノ粒子による光反応性インク開発(特許出願)</li> <li>・各種光源による低温薄膜プロセスの確立と薄膜成長メカニズム解明</li> <li>・溶液法を用いたフレキシブル透明導電膜の開発: 10Ω/□、湿度 85%、1000h(信頼性)で変動 5%以内</li> <li>・極限センサ膜の開発、400℃、耐熱 1000h、湿度 85%、1000h(信頼性)抵抗値変動5%以内</li> </ul> <p>(2) 高効率有機 EL デバイスの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・仕事関数制御: 電子注入層 3.0eV 以下</li> <li>・フィルム透明導電膜シート抵抗向上 (10Ω/□)</li> <li>・フレキシブル蓄光膜の開発: 湿度 85%、1000h、残光輝度 1500mcd/m<sup>2</sup>(460nm 励起停止後 5 分)の変動 2%以内</li> <li>・フレキシブル有機ELデバイスの開発: 発光効率 30%向上</li> <li>・蓄光型有機ELデバイスの開発(これまで報告がないオリジナル発光素子)</li> </ul> <p>(3) パワーエレクトロニクス用受動部品の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ドーピングによる高耐熱誘電体膜の開発: 250℃、1000hの耐熱性、変動5%以内</li> </ul> | <p>(1) フレキシブルセラミックス低消費電力型プロセス開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・液中レーザーにより酸素量素制御した光反応性ナノインクを開発し、CSIRO と共同で特許を出願</li> <li>・紫外レーザーに加えてフラッシュランプによる低温薄膜プロセスを確立。膜のキャリア濃度の向上や電子構造変化は、紫外レーザー化学反応による格子間酸素の還元反応に寄与していることを解明</li> <li>・溶液法を用いたフレキシブル透明導電膜(10Ω/□)を開発。レーザー照射結晶化膜で、湿度 85%、1000hで変動 3.0%(5%以内)の信頼性を実現</li> <li>・極限センサ膜の開発では、高耐熱サーミスタセンサを従来のスパッタ法と比較して 1/3 の消費電力で製膜を実現、400℃、耐熱 1000h、湿度 85%、1000h(信頼性)抵抗値変動 4.3%(5%以内)を達成。企業との実用化共同研究に進展(知財技術移転)</li> </ul> <p>(2) 高効率有機 EL デバイスの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・仕事関数制御: 透明導電膜の仕事関数制御(5.0eV 以上と低抵抗化の両立)に成功。従来デバイスに比べて 30%高効率なフレキシブル有機ELデバイスを開発。更に、(1)で開発したナノインクを用いて、新しい QLED デバイスも開発。</li> <li>・フレキシブル蓄光膜の開発: 湿度 85%、1000h、残光輝度 1500mcd/m<sup>2</sup>(460nm 励起停止後 5 分)の変動 2%以内を実現</li> <li>・蓄光型発光照明(有機ELデバイス、LED)を開発</li> </ul> <p>(3) パワーエレクトロニクス用受動部品の開発</p> |
|----|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

|    |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |      | ・250℃の耐久性試験(1000h)で、変動5%以内を達成                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 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 | <p>1) 水蒸気電解: 作動温度 500℃、電解効率 95%、1.6V での電解電流 1.0A/cm<sup>2</sup> 以上の達成、劣化率 0.5%/1000h 以下の達成、ショートスタックで 6L/h の水素生成速度の達成</p> <p>2) 可逆動作セル: 作動温度 400℃以下、10mA/cm<sup>2</sup> における繰り返し効率 90%以上、100 サイクルでの劣化率が 1%以下、繰り返し酸化還元容量 1000mAh/g-Fe の Fe 粉体の作成、900mAh/g-Fe の容量を繰り返し安定に示す Fe-空気固体電解質セル</p>                                                                                   | 一部達成 | <p>1) 水蒸気電解: 酸素伝導性セル; 作動温度 500℃、クーロン効率 100%、1.9V での電解電流 1.0A/cm<sup>2</sup> の達成、2 直列スタックで電解可能、プロトン伝導性セル; 作動温度 500℃、クーロン効率 70%、1.6V での電解電流 1.0A/cm<sup>2</sup> の達成。劣化率 0.166V/1000h(1.58%/100h), 0.455L/cm<sup>2</sup>.h</p> <p>2) 可逆動作セル: 作動温度 400℃、10mA/cm<sup>2</sup> における繰り返し効率 85%、100 サイクルの可逆運転成功、繰り返し酸化還元容量 1000mAh/g-Fe の Fe 粉体の作成、Fe-空気固体電解質セルにおける充放電サイクル数 30 回を達成。SOFC/SOEC 効率 85%(100mA/cm<sup>2</sup> 時), 99% (10mA/cm<sup>2</sup> 時)600℃</p> |
|    |                                     | <p>&lt;未達成項目の原因および今後の対応&gt;</p> <p>単セルレベルでは目標とした数値を、長期安定性の評価を除き、ほぼ達成できた。未達の課題は時間がなくて、間に合わなかった 1000 時間以上の長期安定性の評価と小型組セルの開発である。いずれも単セルの性能向上に時間を要したために、時間が足りなくなったものである。</p> <p>未達の目標中で、劣化特性の評価と安定性の向上には、時間を要するが、ほぼ単セルレベルでのセル作製が順調に行われているので、早い時期に評価できると考えている。一方で、小型のスタック化はシールが重要な課題であり、今後、シール材をガラス系の材料を中心に検討し、ショートスタックの開発を行う。現在、Ag とガラスである程度のシールが行われているので、数年以内に達成できると考えている。</p> |      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

## 5. 事業アウトカム達成に至るまでのロードマップ（詳細）



| テーマ                                                | 2015年度                                                       | 2016年度                                                 | 2017年度                                                              | 2018年度                                                                 | 2019年度                                                                                                         | 2020～2030年度                                                                                                | 2030～2050年度                            |
|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 革新的なエネルギー技術の国際共同研究開発事業                             | ・研究テーマ毎に検証可能な指標による目標を設定する<br>・1年毎にステージゲートを設けて、評価結果を基に見直しを行う。 |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                | ・民間企業等との共同研究<br>・開発<br>・実証                                                                                 | ・技術の実用化、普及<br>⇒CO2排出量削減へ               |
|                                                    | 個別要素技術の研究開発                                                  |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                | ・国際標準化、安全性基準、規制緩和等の取組                                                                                      |                                        |
| 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                 | 暗発酵水素生産における水素収率の向上                                           |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                | ・水素収率の向上（バイオマス由来糖類からの理論水素収率の75%）<br>・プロセスモデル/ビジネスモデルに基づいた生産性・持続性の向上（30円/Nm3）                               | ・実証試験（バイオマス原料、リアクターの仕様、生産規模等の検討）を経て実用化 |
|                                                    | 暗発酵と光発酵の統合型水素生産における水素収率の向上                                   |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | 実糖化液を用いた水素生成試験                                               |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | ・水素生成酵素発現系の構築・解析（暗発酵）<br>・水素生産関連代謝系の解析（光発酵）                  | ・水素生成酵素発現系の改良（暗発酵）<br>・水素生産関連代謝系の改変・解析（光発酵）            | ・水素収率向上のための代謝改変<br>・水素収率グルコース1モルから2モル以上（暗発酵）、酢酸からの理論収率の20%（光発酵）     | ・高機能水素生成酵素の創製（暗発酵）<br>・水素生成酵素発現系の構築・解析（光発酵）                            | ・水素収率向上のための代謝改変<br>・水素収率グルコース1モルから3.5モル（暗発酵）、酢酸からの理論収率の30%（光発酵）<br>・最適な前処理・糖化条件の決定                             |                                                                                                            |                                        |
| 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    | 高速分子進化法によるブタノール耐性株の創製                                        |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                | ・民間企業との共同研究開発、トータルプロセス検証、ベンチプラントによる実証試験                                                                    | ・バイオ燃料ブタノールの実用化                        |
|                                                    | 革新的高効率ブタノール生産菌の開発                                            |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | 省エネルギーブタノール回収技術の開発                                           |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | セルロース系バイオマス由来糖化液からのブタノール生産技術の開発                              |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | ・ブタノール生産基本株の開発<br>・ブタノール耐性株の創製<br>・回収膜選択と特定比較                | ・ブタノール収率80%を達成する技術を開発<br>【中間目標】<br>ブタノール収率81%を達成       | ・ブタノール生産速度2.0 g/L/hへ向上する技術を開発                                       | ・ブタノール収率85%を達成する技術を開発                                                  | ・ブタノール収率92%および生産速度3 g/L/hを達成する技術見通しを立てる                                                                        | ・ブタノール燃料の成分規格や製造・輸送・貯蔵における安全性への要求基準や試験方法、および燃料関連機器の構造の共通化やインフラ設備の安全基準について、関連企業と連携した実証実験等を通して策定、国際標準化に貢献する。 |                                        |
| ③過酷温度環境作動リチウムイオン二次電池の開発                            | 低温環境下での詳細な電気化学特性評価                                           |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                | ・低温対策電池の人工衛星・深宇宙探査機での実用化                                                                                   | ・低温対策電池の航空・宇宙用から一般民生電池としての実用化          |
|                                                    | 先端的放射光測定技術と理論解析による劣化メカニズムの検討                                 |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | 材料合成技術および界面制御技術を用いた電極材料開発                                    |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | 高性能低温動作電池の開発                                                 |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | ・低温劣化メカニズムの仮説の立証手法の立案<br>・仮説に基づいた劣化抑制革新材料合成手法の開発             | ・電気化学解析と放射光解析による仮説の立証手法開発<br>・劣化抑制革新材料合成手法の高度化         | ・劣化メカニズムの立証<br>・劣化抑制材料によるリチウムイオン電池の低温特性の向上（コインセル：実験室レベル）            | ・劣化メカニズムの計算科学を用いた理論的確認<br>・劣化抑制材料によるリチウムイオン電池の低温特性の向上（18650セル：小型民生レベル） | ・劣化および劣化抑制リチウムイオン電池のラウンドロビンテスト<br>・劣化抑制材料によるリチウムイオン電池の低温特性の向上（バックセル：中型民生レベル）<br>【360回充放電後の容量維持率75% @10-15℃を達成】 | ・標準認証、評価法の機関である欧州委員会共同研究センター等と協力しつつ、評価法や安全性評価の国際標準化に貢献する<br><br>・低温劣化抑制等により安全性を向上させつつ、安全性の策定にも貢献する         |                                        |
| 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- | 高性能・高耐久性固定化触媒開発                                              |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                | ・ギ酸からの高圧水素ガス発生の実証実験および民間企業との共同研究開発の実施                                                                      | ・ギ酸からの高圧水素ガス発生技術の実用化と水素ガスステーションの普及     |
|                                                    | 高性能・高耐久性固体触媒開発                                               |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | 高圧プロセス技術の構築                                                  |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | 水素貯蔵システムの実証化に向けた技術開発                                         |                                                        |                                                                     |                                                                        |                                                                                                                |                                                                                                            |                                        |
|                                                    | ・高性能触媒骨格の探索および、高効率固体触媒の探索（1.0 m3/hg以上の性能発現）                  | ・高耐久化触媒の開発（1000時間以上の耐久性）と高性能固体触媒活性向上（1.2 m3/hg以上の性能発現） | ・均一系触媒の固定化、高性能固体触媒の活性向上（1.5 m3/hg以上の性能発現）、および高圧（50MPa仕様）フローリアクターの構築 | ・固定化触媒の高性能化（1m3/hg以上の性能発現）と高性能固体触媒の活性向上（2.0 m3/hg以上の性能発現）              | ・固体および固定化触媒の高耐久化および耐久試験の実施【2000時間以上の耐久性】                                                                       | ・100MPa以上の高圧ガスの実施に関する、装置の性能試験や安全基準の策定<br><br>・高圧ガス保安法の規制緩和に向けた取り組み                                         |                                        |

|                                    |                                                                                                                                                                     |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ⑤系統協調型の分散電源大量導入技術の開発               | PCS制御プロトコルの開発                                                                                                                                                       |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              | ・分散電源の大量導入に向けた実証研究や系統連系規程の国際標準化<br>・スマートインバータの試験方法を確立し、メーカーによるスマートインバータの開発、ならびに電力事業者による導入を促進する。                                |
|                                    | スマートインバータの評価試験法の開発                                                                                                                                                  |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | 国内PCSメーカーへの技術移転                                                                                                                                                     |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | ・スマートインバータの各国における導入要件を調査し、試験方式の検討を行う                                                                                                                                | ・スマートインバータの試験方式の原案を策定する        | ・スマートインバータの試験方式の原案から主要部分を国際的枠組みによって検証する         | ・スマートインバータの統合制御方式の検討を行う                                                                                                       | ・スマートインバータの試験方法を確立し、メーカーによるスマートインバータの開発、ならびに電力事業者による導入を促進する。 |                                                                                                                                |
| ⑥太陽光による有用化学品製造                     | 光アノード電極の高性能化                                                                                                                                                        |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              | ・小型実証の開始。<br>・長期安定性の向上。<br>・殺菌や環境浄化分野での実用化のため、企業との共同研究を拡大<br>・H2O2やHClO等の大型製造の実用化。<br>・水素製造への応用展開                              |
|                                    | 反応メカニズムの解明                                                                                                                                                          |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | カソード電極の高性能化                                                                                                                                                         |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | ・有用化学品の反応種を増やす                                                                                                                                                      | ・表面処理や反応条件の最適化による電流効率向上        | ・無機及び有機反応の種類の更なる拡大を行い特許を増やす。電流効率を100%に近い反応を複数開発 | 組み合わせ全体システム<br>・逆反応や逐次反応を抑制し、長期間安定化する手法の開発。長波長材料の開発による性能向上<br>・光アノードとカソードを組み合わせた原理実証のプロトタイプセルを構築<br>・広範な特許群の構築【太陽エネルギー変換効率3%】 |                                                              |                                                                                                                                |
| 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         | 化合物単結晶薄膜成膜技術の開発                                                                                                                                                     |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              | ・民間企業との共同研究および長期信頼性の検証<br>・技術の実用化（年間2GW以上の生産）と普及<br><br>・高効率太陽電池の作製および実証を行うことで、国際標準化を進める<br>・企業と共同開発を行い、業界団体と協力して、安全基準の策定等を進める |
|                                    | 理論限界変換効率の実証                                                                                                                                                         |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | スマートスタック太陽電池の開発                                                                                                                                                     |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | ・化合物単結晶薄膜成膜装置の開発および成膜技術の開発                                                                                                                                          | ・化合物単結晶薄膜結晶成長の解析および太陽電池の作製     | ・化合物単結晶薄膜太陽電池の高効率化技術の開発                         | スマートスタック太陽電池の信頼性の実証<br>・化合物単結晶薄膜太陽電池の剥離技術の開発およびスマートスタック技術による多接合化<br>・スマートスタック技術による高効率多接合太陽電池の開発【CIGS系多接合太陽電池の変換効率30%】         |                                                              |                                                                                                                                |
| 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 | 超臨界坑内模擬装置の開発                                                                                                                                                        |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              | ・超臨界地熱井（500℃、60-70 Mpa、高腐食性流体の存在）下で使用可能なセンシングシステム、素材の開発<br>・超臨界地熱井（500℃、60-70MPa、高腐食性流体の存在）下で使用可能なセンシングシステム、素材の実用化             |
|                                    | シール材の開発                                                                                                                                                             |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | シール機構、ケース、可動機構、電子/光回路、センサの開発                                                                                                                                        |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | ・現状調査<br>・試験機器試作                                                                                                                                                    | ・既存技術・素材の評価<br>・試験機器製作         | ・プロトタイプの設計・試作                                   | 実証試験<br>・プロトタイプの評価・改良<br>・実証試験【最大温度350℃、最大圧力60MPaで動作する光ファイバセンシングシステム・圧力容器の開発】                                                 |                                                              |                                                                                                                                |
| ⑨EGS設計技術による地熱発電可能地域の飛躍的拡大          | 貯留層内現象理解の深化                                                                                                                                                         |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              | ・国内EGSプロジェクトへの適用と発電量増大<br>・超臨界地熱開発への適用                                                                                         |
|                                    | シミュレータの開発                                                                                                                                                           |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | FORGEサイトのシミュレーション                                                                                                                                                   |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | 国内実証試験<br>・地熱システム内で起こる現象理解のための実験装置開発<br>・地熱システム内で起こる現象理解の深化とモデル化<br>・地熱システム内で起こる現象シミュレーション技術の開発<br>・米国FORGEサイトのシミュレーション<br>・国内実証試験およびFORGEの結果からの課題の整理【誤差数%以下で現象を予測】 |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
| ⑩低毒性・超高効率熱電変換デバイスの開発               | 低毒性・超高効率熱電変換材料の開発                                                                                                                                                   |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              | ・熱交換などの周辺技術との融合、評価などの標準化<br>・熱電変換デバイスの実用化<br><br>・国際標準化の推進および性能や安全基準の策定<br>・電気事業法での設置基準の緩和                                     |
|                                    | 熱電変換デバイスの開発                                                                                                                                                         |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | デバイスの実証実験                                                                                                                                                           |                                |                                                 |                                                                                                                               |                                                              |                                                                                                                                |
|                                    | ・毒性・希土元素代替技術の開発                                                                                                                                                     | ・熱電変換デバイスの組み立てに必要な電極形成と接合技術の開発 | ・拡散防止層の開発によるデバイスの耐久性向上と長寿命化                     | ・ナノ構造化による熱電変換デバイスの高効率化                                                                                                        | ・デバイスの動作実証【効率14%と100時間の実証実験】                                 |                                                                                                                                |

|                                    |   |                               |                                                              |                                    |                                                           |                                                            |                                          |
|------------------------------------|---|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| 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 | — | 新規水素吸蔵合金の開発                   |                                                              |                                    |                                                           | ・大規模化・システム化へ展開                                             | ・順次燃料電池自動車への搭載                           |
|                                    |   | 中温燃料電池用高性能電極の開発               |                                                              |                                    |                                                           |                                                            |                                          |
|                                    |   | ・水素吸蔵合金および燃料電池電極材料の試作開始と特性評価等 | ・各材料の基礎的特性向上に向け、各国連携研究機関の技術導入・試作等                            | ・各材料の特性評価と、さらなる高性能化を目指した材料試作等      | ・各材料の作動温度調整、高耐久性化を目指した作製方法最適化等【5質量％、200℃以下で600回以上の耐久性を達成】 | ・国際標準化の推進および性能や安全基準の策定                                     |                                          |
| ⑫革新的新構造太陽電池の国際共同研究開発               | — | 高性能量子構造太陽電池の開発                |                                                              |                                    |                                                           | ・多接合セルを構築し、40%以上の変換効率を目指す。<br>・セル製造技術開発および実証試験（民間企業との共同研究） | ・太陽光発電として実用化<br><br>・更なる変換効率（50%）の向上を目指す |
|                                    |   | 高性能ペロブスカイト太陽電池の開発             |                                                              |                                    |                                                           |                                                            |                                          |
|                                    |   | 多接合太陽電池の構築                    |                                                              |                                    |                                                           | ・革新型太陽電池に適した国際標準化の実施<br><br>・使用環境を踏まえた、基準の策定               |                                          |
|                                    |   | 多接合セル評価技術開発                   |                                                              |                                    |                                                           |                                                            |                                          |
|                                    |   | ・多接合太陽電池のトップセル設計              | ・多接合太陽電池用のトップ、ミドル、ボトムセルの高性能化<br>・シミュレーションにより最適なサブセルの組み合わせを検討 | ・トップ、ミドル、ボトムセルの高性能化<br>・多接合太陽電池の作製 | ・トップ、ミドル、ボトムセルの高性能化による変換効率30%の達成<br>・4接合セルを構成するサブセル仕様決定   |                                                            |                                          |

| テーマ                                          |   |   | 2017年度                               | 2018年度                                                         | 2019年度                                                                              | 2020～2030年度                                                                                        | 2030～2050年度                                                                                               |
|----------------------------------------------|---|---|--------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 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 | — | — | 硫酸抱合体高生産株の開発                         |                                                                |                                                                                     | ・主要な化学品について生産速度20g/L/d<br>・主要な化学品・ジェット燃料の商用化                                                       | ・100%グリーンジェット燃料の商用化<br>・主要な化学品の生産速度40g/L/d<br>・主要な化学品、ジェット燃料の50%を代替                                       |
|                                              |   |   | 低炭素型変換回収技術の開発                        |                                                                |                                                                                     |                                                                                                    |                                                                                                           |
|                                              |   |   | 高汎用性バイオプロセスの開発                       |                                                                |                                                                                     |                                                                                                    |                                                                                                           |
|                                              |   |   | ・4種の基質を修飾できる酵素を取得<br>・補酵素非依存バイオ触媒の探索 | ・3種の基質を修飾できる菌株を構築<br>・4種のアルコールを生成できるバイオ触媒の開発<br>・3種のイオン交換樹脂を検討 | ・硫酸抱合体生産株による生産速度4mM/h以上<br>・3種のアルデヒドを生成できるバイオ触媒の開発<br>・糖化液原料から一気通貫生産量30g/L          | セルロース系バイオマスに対応した本プロセスの国際標準化を検討、バイオ由来成分の含量等の性能基準を策定、バイオマス調達コストの削減策について関連する規制緩和も含めて検討                |                                                                                                           |
| ⑭第3世代パワー半導体β-Ga2O3の高品質化・高性能化技術               | — | — | 結晶育成装置の開発                            |                                                                |                                                                                     | 4インチ、10ppb、10 <sup>2</sup> cm <sup>-3</sup> 、高耐圧SBD                                                | 8～12インチ、1ppb、1cm <sup>-3</sup> 、n-off MOSFET                                                              |
|                                              |   |   | 高品質大型結晶の作製                           |                                                                |                                                                                     |                                                                                                    |                                                                                                           |
|                                              |   |   | 材料評価                                 |                                                                |                                                                                     |                                                                                                    |                                                                                                           |
|                                              |   |   | 結晶育成装置の開発                            | ・結晶育成装置出力1kW<br>・半インチ結晶育成                                      | ・結晶育成装置出力10kW<br>・2インチ結晶育成<br>・不純物<100ppb<br>・転移欠陥<10 <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> | 純度、欠陥密度、モザイク度、表面平坦度などに関して標準化を図る、高出力レーザー取り扱いの安全基準を策定                                                |                                                                                                           |
| ⑮3DライダーとAIによる風況フルスキャン手法の開発                   | — | — | 単一ライダーによる観測技術の開発                     |                                                                |                                                                                     | ・単一ライダー技術（シングル観測）は、関連企業に技術移転し、洋上風力の有望地域探索に活用。<br>・複数ライダー技術（デュアル観測）は、風車強度計算に係る乱流計測技術の高度化を実施（他の国プロ）。 | ・風車の超大型化に対応するため、任意のポイント、任意の空間の風況を計測出来るシステムへ改良。<br>・現状の2～3kmという計測範囲を拡張するため、ハード的な改良や機械学習による欠測データ補間などの技術を高度化 |
|                                              |   |   | 複数ライダーによる観測技術の開発                     |                                                                |                                                                                     |                                                                                                    |                                                                                                           |
|                                              |   |   | 大型野外実証試験                             |                                                                |                                                                                     |                                                                                                    |                                                                                                           |
|                                              |   |   | ・実測データ取得<br>・基本解析プログラム開発             | ・国内試験フィールドにて、複数ライダーによる実証実験。<br>・風向風速を平均誤差±2～3%以内で計測            | ・ECNの実証フィールドで屋外実験（国外）<br>・2～3km先の風向風速を±3%の精度で計測                                     | 2025年頃を目処にスキャンングライダーによる海上風観測技術に関する国際標準化を想定                                                         |                                                                                                           |

|                                      |   |   |                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                  |                                                 |
|--------------------------------------|---|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| ⑩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      | — | — | フレキシブルセラミックスの開発                                                                                                                                       |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        | ・光MODタッチパネル実用化<br>・スマートウィンドウでの実用化<br>・パワーモジュール用電子部品での実用化                                                                                                                         | ・高性能化した有機ELの実用化<br>・蓄光型照明での実用化<br>・大面積太陽電池での実用化 |
|                                      |   |   | 有機EL・高輝度蓄光膜の開発                                                                                                                                        |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                  |                                                 |
|                                      |   |   | 高耐熱電子部品膜の開発                                                                                                                                           |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                  |                                                 |
|                                      |   |   | ・フレキシブル透明導電膜:シート抵抗:100Ω/□<br>・フレキシブル有機EL発光効率:15%向上<br>・蓄光膜1250mcd/m <sup>2</sup><br>・極限センサ膜の開発、400℃、耐熱1000h:抵抗値変動5%以内<br>・セラミック誘電体膜の低温プロセスの開発(300℃以下) | ・フレキシブル透明導電膜:シート抵抗:50Ω/□<br>・フレキシブル有機EL発光効率:25%向上<br>・蓄光膜1375mcd/m <sup>2</sup><br>・極限センサ膜の開発、500℃耐熱、1000h:抵抗値変動5%以内<br>・セラミック誘電体膜の樹脂基材への開発(300℃以下) | ・フレキシブル透明導電膜:シート抵抗:10Ω/□<br>・フレキシブル有機EL発光効率:30%向上<br>・蓄光膜1500mcd/m <sup>2</sup><br>・残光型有機EL開発<br>・極限センサ膜の開発、400℃耐熱、湿度85%、1000h:抵抗値変動5%以内<br>・発誘電体膜/フレキシブル金属基板:比誘電率:200 | 高機能部材として国際標準化に取り組む                                                                                                                                                               |                                                 |
| ⑪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 | — | — | 酸化物中温電解セルの開発                                                                                                                                          |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        | ・災害用小型自立型システムの実証<br>・定置型蓄エネシステムでの実用化                                                                                                                                             | ・大型水蒸気電解装置での実用化                                 |
|                                      |   |   | プロトン伝導性電解質低温電解セル開発                                                                                                                                    |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                  |                                                 |
|                                      |   |   | 可逆動作セル開発とFe空気電池への応用                                                                                                                                   |                                                                                                                                                     |                                                                                                                                                                        |                                                                                                                                                                                  |                                                 |
|                                      |   |   | ・小型中温電解セルの開発<br>・低温電解セルの新規電解質探索<br>・可逆動作セルの耐久性向上                                                                                                      | ・中温電解セルの長期安定性評価<br>・低温電解セルの薄膜化<br>・Fe空気電池用触媒の探索                                                                                                     | ・中温電解セルのショートスタック試作<br>・低温電解セルのショートスタック試作<br>・可逆動作小型組セルの開発                                                                                                              | バイオ水素燃料の成分規格や製造・輸送・貯蔵における安全性への要求基準、試験方法、燃料関連機器の構造の共通化、インフラ設備の安全基準、バイオ水素燃料成分規格や性能評価法、環境評価法の統一、燃料の貯蔵・運搬、関連機器・インフラ設備における安全基準・規格について国際標準化に貢献。バイオ水素燃料の国内品質規格などに対しても、関連企業等と連携して規制緩和に協力 |                                                 |