

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H01376

研究課題名(和文)低温反応活性セラミックによる太陽集熱水熱分解水素製造システムの開発

研究課題名(英文) Development of thermochemical water-splitting hydrogen production reactor systems with a low temperature reactive ceramics to utilize concentrating solar thermal energy

研究代表者

児玉 竜也 (Kodama, Tatsuya)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60272811

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,600,000円

研究成果の概要(和文)：高温の太陽集熱(1100～1500℃)を利用し、反応性セラミックの酸化還元系による2段階水熱分解サイクルによって水素を製造する反応システムとして、大型用(0.5-50MWth)の粒子流動層式と、小型用(50kWth)の発泡体デバイス式の、2つの反応システムのプロトタイプを、3-100kWthの反応器試験等と数値解析から設計した。低温活性型反応性セラミックのマンガンドーピングセラミックス等を利用して、流動層反応器用には流動性の優れた真球状微粒子を、デバイス式反応器用には円錐型発泡体デバイスを合成し、従来のベンチマークである非ドーピングセラミックスのものを大きく上回る反応活性を持たせることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海外の太陽日射が豊富なサンベルトでは太陽集光システムにより1500℃近い太陽集熱が得られる。本研究では、この高温太陽熱を利用して水熱分解サイクルによりソーラー水素を製造する反応システムのプロトタイプの設計を行った。3～100kWthの反応器試験等を行って、得られた結果に基づく数値解析により設計を完成させた。広大な敷地で利用する大型用(MWth級)と、建物の屋上等で利用できる小型用(数十kWth級)の2つのタイプの設計を行っており、様々な状況での利用できる。本研究を進展させれば、豪州等のサンベルトの豊富な太陽エネルギーを水素に転換し、水素キャリアによって日本へタンカー輸送できると期待される。

研究成果の概要(英文)：Solar thermochemical water splitting reactor systems by a metal oxide redox cycle, a fluidized bed reactor system for a large-scale (0.5-50MWth) application and a foam device reactor system for a small-scale (50kWth) application, are designed as the prototypes, via 3-100 kW reactors tests and the numerical simulation. These reactors are expected to utilize a high temperature concentrated solar thermal energy (1100-1500℃) to produce hydrogen. Novel spherical fine particles for the fluidized bed reactor and conical foam derives for the foam device reactor are successfully developed using the low temperature reactive ceramics of Mn-doped ceria, which have much greater reactivities than ones made with conventional or benchmark ceramic of undoped-ceria.

研究分野：太陽熱の化学利用

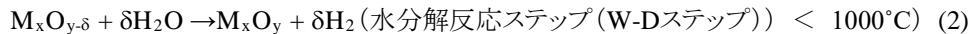
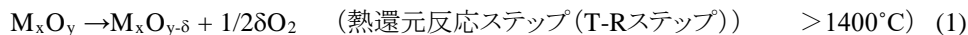
キーワード：太陽熱 水分解 水素製造 熱化学サイクル 反応器 反応性セラミック エネルギー転換 再生可能エネルギー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 太陽日射の豊富なサンベルト(米南西部, 豪, MENA 地域等)では, 大型太陽集光システムによる太陽熱発電が実用化された。しかし, エネルギー輸送・貯蔵の観点からは太陽エネルギーによる燃料製造がより重要である。集中タワー型(大型)やパラボリック・ディッシュ型(小型)の点集光型システムでは 1500°Cの太陽集熱が可能であり, この利点を活かし, 欧米諸国では「熱化学サイクルによる太陽集熱水分解水素製造システム」の開発が期待されており, 最も有望なサイクルとして下記の反応性セラミックによる2段階水熱分解サイクルの開発が活発である。



豪州再生可能エネルギー庁(AREA)の「ソーラー燃料ロードマップ」¹⁾(2012~15年: /, 委託先: オーストラリア連邦科学産業研究機構(CSIRO))では, 水熱分解サイクルの水素製造コストは「太陽電池」水電解水素の約1/2~1/3以下, ソーラー→水素のエネルギー転換効率は電解水素の10%程度に対し, 水熱分解サイクルでは20~30%が期待できるとしている。実現すれば水素キャリアによるサンベルトから日本へのソーラー水素の大型タンカー輸送が可能となる。

(2) 研究代表者は太陽集光で高温を得る反応器として石英窓を通して太陽集光を反応セラミックに直接照射する「粒子流動層式水熱分解器」と「発泡体デバイス式水熱分解器」の2つのソーラー反応器コンセプトを提案, 開発してきた。前者は MW_{th}級の大型利用, 後者は 100kW_{th}以下の小型利用を目指している。欧米で開発中の石英窓型ソーラー反応器は, 反応性セラミックをハニカム構造体に被覆した反応デバイスに太陽集光を直接照射し, これに不活性ガス(あるいは窒素)(熱還元反応)と水蒸気(水分解反応)を交互に流通して2段階反応を行う²⁾。しかし, 反応性セラミックの充填量と反応表面積が大きくできないという欠点を有する。これに対して研究代表者の「粒子流動層式ソーラー水熱分解器」(図1)では「反応性セラミックの粒子」を反応体とするため, 充填量・反応表面積が格段に大きく, また, そのため厚みを増す反応体層内の熱輸送は粒子流動によって高速化でき, 水素製造能力を格段に増大できる。集光系としては大型化に有利なビームダウン(BD)型太陽集光システム(太陽集光をタワー上の2次反射鏡で下方反射する)と組み合わせる。

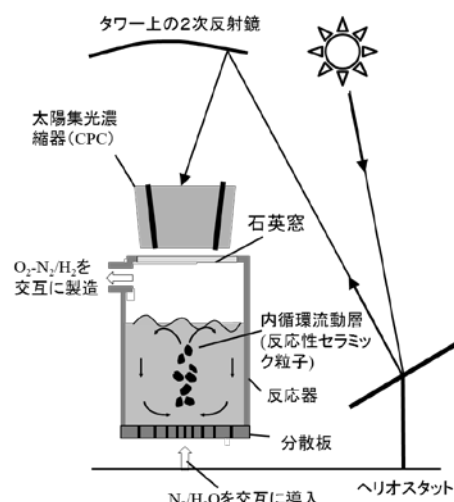


図1 流動層式ソーラー水分解器

(3) 一方, 研究代表者が考案・開発しているもう一つのタイプの「発泡体デバイス式ソーラー水熱分解器」(図2)では, 反応性セラミックで被覆したジルコニア発泡体デバイスに石英窓を通して太陽集光を直接照射して反応を行う。円錐型発泡体デバイスをを用いることで海外のハニカム構造デバイスよりも反応性セラミックの充填量・反応表面積を増大させていることが特徴である。この発泡体デバイス式は, 反応器がコンパクトなので, 小型(100kW_{th}以下)であるが集光度が高い(5000以上)パラボリック・ディッシュ型集光システムとの組み合わせに適すると考えられる。山岳地帯や建物の屋上等での利用も可能なタイプとなる。100kW_{th}以下の小型システムを増設することで段階的に(大きなリスクを避けて)規模を大きくしていけるメリットもある。

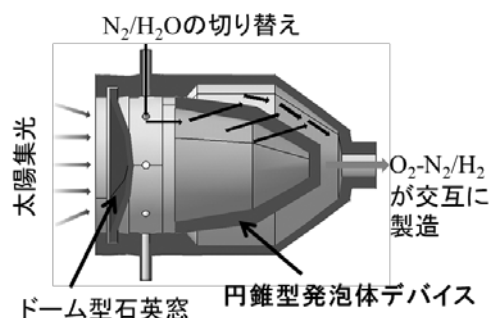


図2 発泡体デバイス式ソーラー水分解器

(4) 反応性セラミックとしてはセリア(CeO₂)系が高活性であるが, 熱力学平衡論では熱還元反応に 1400°C以上が必要であり, 反応速度も考慮すれば 1500°C以上が必要である。研究代表者は, セリアへの Mn ドープによって熱還元温度を低温下で見出している。このような低温活性型のセラミックを利用すれば, 上記の「粒子流動層式水熱分解器」と「発泡体デバイス式水熱分解器」の反応効率を高めることが期待される。

2. 研究の目的

研究者が開発した低温に水熱分解活性を有する Mn ドープ型セリア等を用いて2つのソーラー反応器の開発を行う。すなわち, 粒子流動層式ソーラー水熱分解器に関しては低温活性型反応性セラミックを利用して流動性に優れた高活性の真球状微粒子を合成, 発泡体デバイス式ソーラー水熱分解器に関しても同様に高活性の発泡体デバイスを合成し, これを用いて両ソーラー反応器を 3~100kW_{th}(反応器へ入射する輻射エネルギー量)で性能試験する。2つの反応器システムの結果から, それぞれに最適な実用化プラントサイズを検討し, その反応システムのプロトタイプ的设计を行う。

3. 研究の方法

(1) 流動層式ソーラー水分解器の開発

①低温活性型反応性セラミック真球状微粒子の開発：Mn, Co, Fe等の金属ドーパセリア粒子を共沈法によって合成し、その活性試験を熱重量分析器、または赤外線イメージ炉による小型固定層活性試験装置で行った。最も有望な他金属ドーパセリアについて、流動性に優れた真球状微粒子(50~100 μ m)の合成をスプレードライ法で検討した。

②太陽集光シミュレータによる 30kW_{th}反応器による最適運転法の検討、及び数値解析ソフトの改良：①と並行して 30kW_{th}反応器の太陽集光シミュレータ(図 3)による反応試験をセリアの破碎球(100~300 μ m)を用いて行い、光照射下での流動層反応器の最適な運転法を検討した。この結果を基に流動層反応器の数値解析ソフトを改良し、粒子の温度分布、線速度分布等の予測精度を向上させた。



図 3 新潟大 30kW_{th} 太陽集光シミュレータ(左・中央)と 30kW_{th} 流動層式反応器(右)

③宮崎 BD 太陽集光システム(図 4)+100kW_{th}反応器(図 5)による真球状セリア微粒子の反応試験：50~100 μ m の真球状セリア微粒子を用いて試験した。

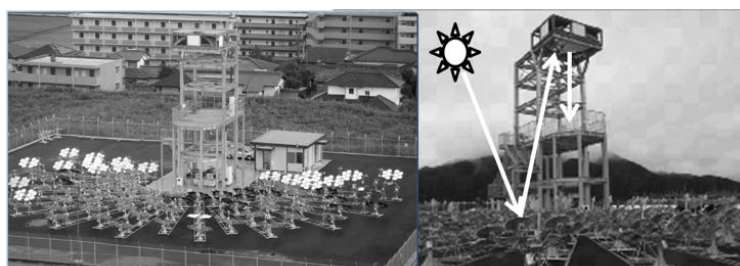


図 4 宮崎 100kW_{th} ビームダウン型太陽集光システム



図 5 100kW_{th} 流動層式反応器

④反応器の改良と太陽集光シミュレータによる反応器試験：③で得られた結果を基に反応器を再設計した。再設計した反応器を 5kW_{th}反応器として作製し、太陽集光シミュレータにより試験した。

⑤最適な実用化プラントサイズの検討とプロトタイプシステムの設計：数値解析を用いて実用化に最適なプラントサイズを検討し、反応システムのプロトタイプの設計を行った。

(2) 発泡体デバイス式ソーラー水分解器の開発

①低温活性型反応性セラミックによる発泡体デバイスの作製法の検討：安定化ジルコニア発泡体を他金属ドーパセリアで 40wt% 被覆することにより多重リング構造の発泡体デバイス(図 6)を作製する方法を検討した。これまで用いてきたスピコート法と、本研究で新たに考案した蒸発乾固法により 40kW_{th}反応器用の発泡体デバイスの作製を検討した。

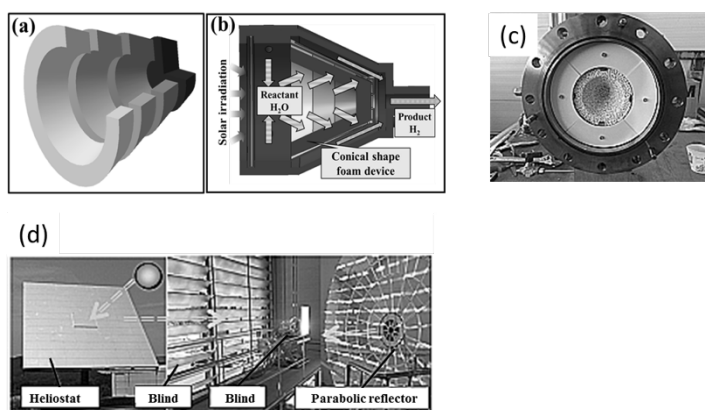


図 6 多重リング構造による円錐型反応デバイス(a)と発泡体デバイス式反応器の設計(b)、40kW_{th}反応器(c)、及び KIER 太陽炉(d)

②太陽炉による反応器試験：①で合成した発泡体デバイスを韓国大田市の韓国エネルギー技術研究院(KIER)の太陽炉(図 6)に設置してある 40kW_{th}反応器(図 6)に充填し、反応試験を行った。

③発泡体デバイスの改良：②の試験結果から発泡体デバイスの問題点を抽出し、組成・作製法の改良を行った。改良した発泡体デバイスを小型デバイスとして作製し、3kW_{th}発泡体デバイス式反応器に充填し、太陽集光シミュレータで反応試験を行った。

④最適な実用化プラントサイズの検討とプロトタイプシステムの設計：実用化に最適なプラントサイズを検討し、反応システムのプロトタイプの設計を行う。

4. 研究成果

(1) 流動層式ソーラー水分解器の開発

①共沈法で合成したドーブセリアの反応活性を熱還元温度を 1300~1400℃、水分解温度を 1000~1200℃として試験した。水素発生量、反応速度、反応の化学量論性、サイクル反応性を総合的に評価した結果、15mol%Mn ドーブセリアが最適と結論された。さらに電子軌道計算によりドーブセリアの水熱分解サイクルへの高活性発現機構を検討し、Mn がドーブされると Ce の価数が 3.5 価等の中間値をとり易くなり、酸素空孔形成に寄与していることを見出した。次に、流動性に優れた Mn ドーブセリア真球状微粒子 (50~100 μ m) の合成を、小型スプレードライ装置、続いて工業用の大型機器で検討し、大量製造が可能な製造工程を構築した。Mn ドーブセリアの真球状微粒子の反応活性は、従来の破碎球の非ドーブセリア粒子 (100~300 μ m) と比較して極めて高く、最小流動化速度も大きく引き下げられることが分かった。

②これと並行して、光照射下での流動層式反応器の最適な運転法を 30kW_{th} 反応器の太陽集光シミュレータ (図 3) による反応試験 (従来の破碎球非ドーブセリア粒子 (100~300 μ m) を使用) で検討した。光照射下では、まず流動層セリア粒子が光照射で直接加熱され、加熱された粒子によって流動ガス (窒素) が加熱されて温度が上がり流動ガスが体積膨張する。体積膨張によって粒子流動化に必要な導入ガスの質量流量 (g/s) が減少するので導入するガス流量を減らすことができる。導入ガスの流量を減らせばガス顕熱によって反応器から奪われる熱量が減り流動層粒子の温度はさらに上昇する。この原理を踏まえて、段階的に導入ガスの質量流量を落としていく反応器の運転法を開発し、光照射下での流動層粒子の加熱速度を効果的に上げることができた。

③真球状セリア微粒子 (50~100 μ m) を 100kW_{th} 反応器 (図 5) に充填し、宮崎 BD 太陽集光システム (図 4) で反応試験を行った。太陽集光を反応器内の流動層に直接照射し熱還元ステップを行ったところ、生成ガス出口から粒子の流出が激しく起き、流動層高さが大きく低下したため効果的に流動層粒子が光照射加熱されなくなった。この問題を解決するには流動層反応器のオレフィス型ガス分散板の設計を大幅に改良する必要があると判断された。

④そこで反応器のオレフィス型ガス分散板の再設計を行った。数値解析とコールドモデルによる流動試験を行い、真球状セリア微粒子 (50~100 μ m) に最適なガス分散板を設計した。再設計したガス分散板を 100kW_{th} 反応器に導入することは困難と判断されたため (これまでのガス分散板を反応器から切断し、新しいものを再溶接することは、反応器壁の焼き付きの状態から困難と判断された)、再設計したガス分散板による 5kW_{th} 反応器を新規に作製した。これを太陽集光シミュレータで試験した結果、真球状セリア微粒子の流出はほとんどなく、流動状態を保ちながら良好な粒子の加熱速度を得ることができた。

⑤以上の、Mn ドーブセリアの真球状微粒子の反応活性、5~100kW_{th} 反応器の太陽集光シミュレータあるいは BD 型太陽集光システムによる試験結果等のデータから、数値解析によって実用化に最適な反応システムのサイズを検討し、反応システムのプロトタイプ的设计を行った。すなわち 0.5~50MW_{th} 級 BD 型太陽集光システムによる大型反応システムの概念設計を完成させ、さらに 0.5MW_{th} については反応システムの詳細設計を行った。この成果を活用し、現在、豪州再生可能エネルギー庁 (ARENA) の補助支援事業として、流動層式ソーラー水熱分解反応システムを豪州サンベルトで 0.5MW_{th} 規模に大型化し実証試験するプロジェクトを豪州国研 CSIRO と連携して行っている (2021 年に豪州サンベルトにてソーラー実証試験を実施する予定)。

(2) 発泡体デバイス式ソーラー水分解器の開発

①上記 (1) の①の検討結果から安定化ジルコニア発泡体に被覆する他金属ドーブセリアとして 15mol%Mn ドーブセリアを選んだ。その粒子を共沈法で合成し、これまで用いていたスピコート法で 40kW_{th} 反応器用の多重リング構造の発泡体デバイスの作製を試みたが、共沈法で得られた Mn ドーブセリアは凝集粒子の粒径が大きく、その粒径分布も大きいため、大型のジルコニア発泡体に被覆することが困難であった (従来、被覆に用いていた非ドーブセリアの微粉体は高純度化学研究所から購入した粒径 10 μ m の粒径分布の極めて小さい粒子であった。その製造法は開示されていない。) そこで、新しい作製

法として金属硝酸塩水溶液にジルコニア発泡体を浸し、水溶液を蒸発乾固し、その後、焼成する作製

法を考案した。この作製法により 15mol%Mn ドーブセリアを 40wt% 被覆した、40kW_{th} 反応器用の多重リング構造の円錐型発泡体デバイスを作製することができた (図 7)。

②これを 40kW_{th} 反応器 (図 6) に装填し KIER 所有の太陽炉で熱還元温度 1400~1550℃、水分解温度 1000~1200℃で

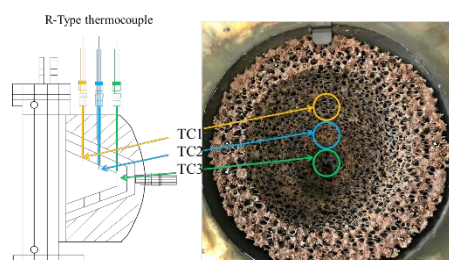


図 7 15mol%Mn ドーブセリアを 40wt% した 40kW_{th} 反応器用の多重リング構造の円錐型発泡体デバイス

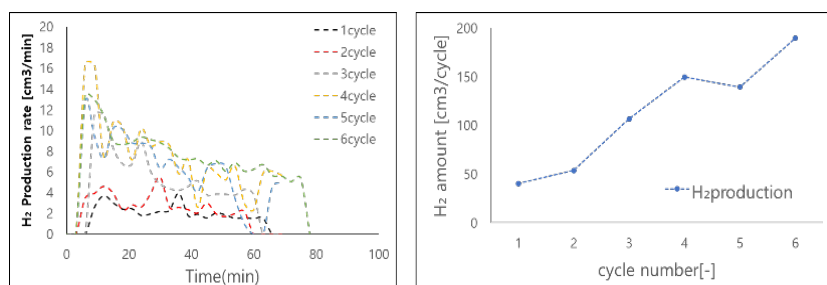


図 8 太陽炉による 40kW_{th} 発泡体デバイス式反応器の試験

6回のサイクル反応試験を行った。熱電対をデバイス表面の3か所に設置し、デバイス温度を測定した(図7)。水熱分解による水素の生成ピークが得られ、サイクルの重ねると水素発生量が増大していった(図8)。しかし、高純度化学研究所製の非ドーパセリアの微粉体をスピコート法で被覆した従来の発泡体デバイスの水素製造量を超えることはできなかった。

③サイクル反応後の発泡体デバイス表面を観察した結果、ドーパセリア被覆の均一性が乏しく、大きく凝集した被覆粒子が高温反応によって焼結し、粒子成長や細孔の目詰まりが激しく起こったことが、高い活性が得られない原因と推察された。そこで被覆量を30wt%に減らすとともに蒸発乾固法に用いる金属塩水溶液の濃度を低くする等の改良により発泡体デバイスにより均一にドーパセリア粒子を被覆することを検討した。さらにスピコート法においても、共沈法で合成した他金属ドーパセリア粒子を回転式ボールミルによって粉碎し、さらにふるい分けによって粒径分布を小さく抑えたドーパセリア微粒子を調整し、スピコートする方法も検討した。これらの方法で小型の発泡体デバイスを作製し、3kW_{th}発泡体デバイス式反応器に装填し、太陽集光シミュレータで反応試験を行った。また、太陽炉試験では発泡体デバイスの温度を1550℃まで容易に太陽集光加熱できたことから、同温度条件で高活性を示すFeドーパセリアについても検討した。5サイクルの反応サイクル試験を行ったところ、蒸発乾固法で作製した15mol%Mnドーパセリア発泡体デバイス、及び、粒径を50~75μmに調整した共沈法粒子でスピコートした10mol%Feドーパセリア発泡体デバイスで高い活性が得られ、良好なサイクル反応性も確認された。最終サイクル(5サイクル目)の水素発生量を比較した場合、従来の高純度化学研究所製の非ドーパセリアで被覆した発泡体デバイスの約20倍であった。

④以上、新規発泡体デバイスの反応性、太陽炉における反応器試験等のデータから数値解析によって実用化に最適な反応システムのサイズを検討し、反応システムのプロトタイプ設計を行った。集光系としては小型のディッシュ型太陽集光器がKIER太陽炉と同レベルの太陽集光のエネルギー密度及び出力を持ち、最適と考えられた。直径9mの集光器で50kW_{th}を、石英窓(径27cm)を通して反応器へ投入できる。一つの発泡体デバイス式反応器の重量は200kg以下になると試算された。この重量ならば、2つの反応器を一組とし、これを集光器の焦点上を上下にスライドさせて熱還元ステップと水分解ステップを切り替えるデュアル反応器システムの構築ができる(図9)。この全体システムの大きさならば山岳地帯や大きめの建物の屋上での利用が可能である。

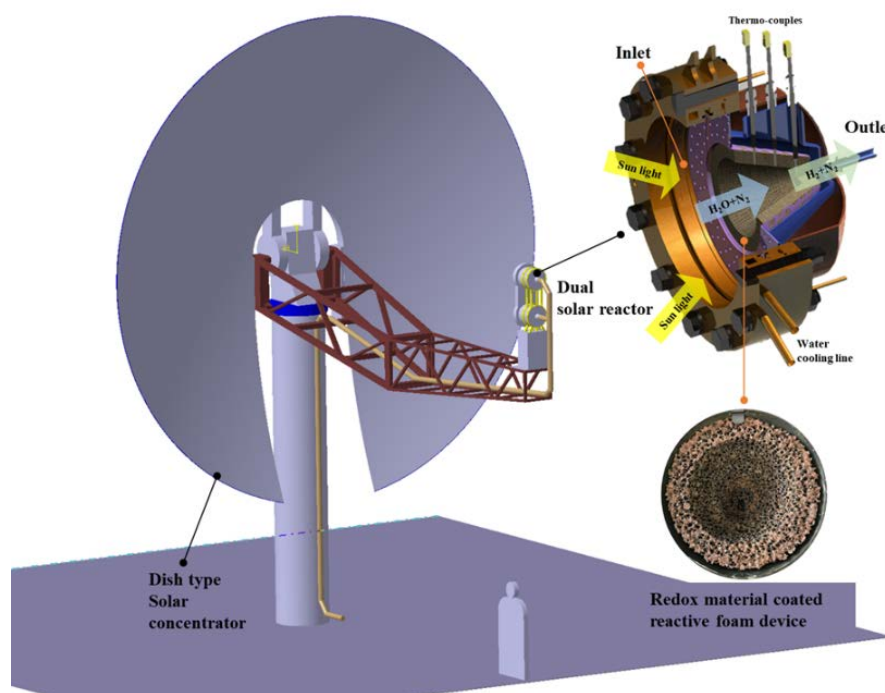


図9 ディッシュ型太陽集光器による小型発泡体デバイス水熱分解システム

以上のように、大型用・小型用のソーラー水熱分解システムのプロトタイプ設計が完了した。豪州等のサンベルトにおける太陽熱による水熱分解水素製造のソーラー実証試験に繋がる重要な成果を得ることができた。

<引用文献>

- 1) <http://arena.gov.au/project/solar-hybrid-fuels>
- 2) Kodama, T, Gokon, N., Chem. Rev. 2007, 107, 4048-4077.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Tatsuya Kodama, Selvan Bellan, Nobuyuki Gokon, Hyun Seok Cho	4. 巻 156
2. 論文標題 Particle reactors for solar thermochemical processes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Solar Energy	6. 最初と最後の頁 113 ~ 132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.solener.2017.05.084	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Selvan Bellan, Koji, Matsubara, Hyun Seok Cho, Nobuyuki Gokon, Tatsuya Kodama	4. 巻 319
2. 論文標題 CFD-DEM investigation of particles circulation pattern of two-tower fluidized bed reactor for beam-down solar concentrating system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Powder Technology	6. 最初と最後の頁 228 ~ 237
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.powtec.2017.06.060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Selvan Bellan, Koji Matsubara, Hyun Seok Cho, Nobuyuki Gokon, Tatsuya Kodama	4. 巻 116
2. 論文標題 A CFD-DEM study of hydrodynamics with heat transfer in a gas-solid fluidized bed reactor for solar thermal applications	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Heat and Mass Transfer	6. 最初と最後の頁 377 ~ 392
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon, Hyun Seok Cho, Koji Matsubara, Kaneko Hiroshi, Kazuya Senuma, Sumie Itoh, Shin-nosuke Yokota	4. 巻 1850
2. 論文標題 Particles fluidized bed receiver/reactor tests with quartz sand particles using a 100-kWth beam-down solar concentrating system at Miyazaki	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 100012-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.4984469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Selvan Bellan, Nobuyuki Gokon, Koji Matsubara, Hyun Seok Cho, Tatsuya Kodama	4. 巻 160
2. 論文標題 Heat transfer analysis of 5kWth circulating fluidized bed reactor for solar gasification using concentrating Xe light radiation	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Energy	6. 最初と最後の頁 245 ~ 256
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.energy.2018.06.212	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Selvan Bellan, Nobuyuki Gokon, Koji Matsubara, Hyun Seok Cho, Tatsuya Kodama	4. 巻 43
2. 論文標題 Numerical and experimental study on granular flow and heat transfer characteristics of directly irradiated fluidized bed reactor for solar gasification	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Hydrogen Energy	6. 最初と最後の頁 16443 ~ 16457
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijhydene.2018.06.033	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon, Hyun Seok Cho, Selvan Bellan, Koji Matsubara, Kousuke Inoue	4. 巻 2033
2. 論文標題 Particle fluidized bed receiver/reactor with a beam-down solar concentrating optics: Performance test of two-step water splitting with ceria particles using 30-kWth sun-simulator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 130009-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5067143	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Selvan Bellan, Koji Matsubara, Hyun Seok Cho, Nobuyuki Gokon, Tatsuya Kodama	4. 巻 2033
2. 論文標題 CFD-DEM investigation on flow and temperature distribution of ceria particles in a beam-down fluidized bed reactor	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 130003-1 ~ 7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5067137	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Selvan Bellan, Tatsuya Kodama, Koji Matsubara, Nobuyuki Gokon, Hyun Seok Cho, Kousuke Inoue	4. 巻 203
2. 論文標題 Heat transfer and particulate flow analysis of a 30 kW directly irradiated solar fluidized bed reactor for thermochemical cycling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Chemical Engineering Science	6. 最初と最後の頁 511 ~ 525
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ces.2018.09.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Tatsuya Kodama, Hyun Seok Cho, Nobuyuki Gokon, Selvan Bellan	4. 巻 2126
2. 論文標題 Particles Fluidized Bed Receiver/Reactor with a Beam-Down Solar Concentrating Optics: First Performance Test on Two-Step Water Splitting with Ceria Using a Miyazaki Solar Concentrating System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 180001-1 ~ 5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5117691	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Selvan Bellan, Tatsuya Kodama, Koji Matsubara, Nobuyuki Gokonm Hyun Seok Cho	4. 巻 2126
2. 論文標題 Heat Transfer and Fluid Flow Analysis of A Fluidized Bed Reactor for Beam-Down Optics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 18004-1 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5117684	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 19件)

1. 発表者名 Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon, Hyun Ceok Cho, Selvan Bellan, Koji Matsubara, Kazuya Senuma, Kousuke Inoue
2. 発表標題 Particles fluidized bed receiver/reactor with a beam-down solar concentrating optics: 30-kWth performance test on two-step water splitting with ceria particles using a big sun-simulator
3. 学会等名 SolarPACES conference 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama
2. 発表標題 HIGH-TEMPERATURE THERMOCHEMICAL HYDROGEN PRODUCTION USING A SOLAR CONCENTRATING SYSTEM
3. 学会等名 2017 ASIA-PACIFIC SOLAR RESEARCH CONFERENCE (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama
2. 発表標題 Metal doped ceria for two-step thermochemical water splitting
3. 学会等名 International Workshop on Solar Thermochemistry (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 井上紘輔、瀬沼和也、旗町剛、曹賢石、Selvan Bellen、郷右近展之、児玉竜也、金子宏
2. 発表標題 30kW サンシミュレータによる 石英窓型流動層式ソーラー反応器の水熱分解試験
3. 学会等名 第26回日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 志田円造、内藤喜子、旗町剛、Selvan BELLAN、曹賢石、郷右近展之、児玉竜也
2. 発表標題 マンガンドープセリアによる二段階水熱分解サイクルの低温化に関する研究
3. 学会等名 第26回日本エネルギー学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名	Selvan Bellan, Koji Matsubara, Nobuyuki Gokon, Tatsuya Kodama, Hyun Seok Cho, Issei Tsuchid
2. 発表標題	Gas-solid flow and heat transfer characteristics of a fluidized bed reactor for solar thermal applications
3. 学会等名	16th International Heat Transfer Conference, IHTC-16 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Selvan Bellan, Tatsuya Kodama, Koji Matsubara, Nobuyuki Gokon and Hyun Seok Cho
2. 発表標題	Heat Transfer and Fluid Flow Analysis of A Fluidized Bed Reactor for Beam-Down Optics
3. 学会等名	solarpaces conference 2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Tatsuya Kodama, Hyun Seok Cho, Nobuyuki Gokon, Selvan Bellan
2. 発表標題	Particles Fluidized Bed Receiver/Reactor with a Beam-Down Solar Concentrating Optics: First Performance Test on Two-Step Water Splitting with Ceria Using a Miyazaki Solar Concentrating System
3. 学会等名	solarpaces conference 2018 (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Tatsuya Kodama
2. 発表標題	New beam-down solar concentrator for high temperature processes and Japanese targets of solar hydrogen
3. 学会等名	HiTeMP Forum 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama
2. 発表標題 Development of Novel Beam-Down Solar Concentrating System
3. 学会等名 2018 International Workshop on Thermal Chemistry and Solar Energy (2018IWTCS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama
2. 発表標題 THERMOCHEMICAL HYDROGEN PRODUCTION USING A CONCENTRATING SOLAR SYSTEM
3. 学会等名 International Congress 2018 Laser Solutions for Space and the Earth 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama
2. 発表標題 Particle reactor technology for thermochemical fuel conversion
3. 学会等名 H2020 SUN-to-LIQUID Scientific Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama, Selvan Bellan, Koji Matsubara, Nobuyuki Gokon, Hyun-Seok
2. 発表標題 DEVELOPMENT AND PROTOTYPE TESTING OF THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEM AND THERMOCHEMICAL FLUIDIZED BED RECEIVER/REACTOR FOR UTILIZATION OF CONCENTRATED SOLAR RADIATION: RESEARCH ACTIVITIES IN NIIGATA UNIVERSITY
3. 学会等名 3rd Japanese-German Workshop on Renewable Energies (JGWQ 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名	Hyun Seok Cho, Takahashi Tetsuo, Hayashi Keisuke, Tatsuya Kodama, Yong Heack Kang, Jong Kyu Kim, Sang Nam Lee
2. 発表標題	Solar demonstration of thermochemical two-step water splitting cycle for H ₂ production from CeO ₂ coated foam device using KIER solar furnace
3. 学会等名	International Green Energy EXPO and Korea Solar Energy Society Spring Conference (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Saito Tatsuya, Hyun Seok Cho, Tatsuya Kodama
2. 発表標題	Experimental study of two-step water splitting cycle for hydrogen production with fluidized bed reactor via solar thermal energy
3. 学会等名	International Green Energy EXPO and Korea Solar Energy Society Spring Conference (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Tetsuo Takahashi, Hyun Seok Cho, Tatsuya Kodama
2. 発表標題	Experimental study of reactive Mn-CeO ₂ powder by direct doping calcination method for two-step water splitting cycle
3. 学会等名	International Green Energy EXPO and Korea Solar Energy Society Spring Conference (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Hyun Seok Cho, Tatsuya Kodama, Nobuyuki Gokon, Selvan Bellan, Naoyoshi Nishigata
2. 発表標題	Experimental Study of Mn-CeO ₂ Coated Ceramic Foam Device for Two-step Water Splitting Cycle Hydrogen Production with 3kW Sun-simulator
3. 学会等名	solarpaces conference 2019 (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama, Hyun Seok Cho, Selvan Bellan, Nobuyuki Gokon, Hyuga Oohata, Takumi Saigatsu
2. 発表標題 Near-isothermal Two-step Water Splitting Cycle Using Metal-doped Ceria below 1300 °C
3. 学会等名 solarpaces conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shota Watanabe, Takumi Saikatsu, Cho Hyun-Seok, Nobuyuki Gokon, Tatsuya Kodama
2. 発表標題 Preparation, flow-ability and reactivity of spherical ceria particles for high-temperature thermochemical two-step water splitting cycle
3. 学会等名 3rd International Solar Fuels Conference, ISF-3, Young (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuya Kodama
2. 発表標題 Solar Thermochemical Water/CO2 Splitting Cycle
3. 学会等名 3rd International Solar Fuels Conference, ISF-3 International Conference on Artificial Photosynthesis 2019, ICARP2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takaki Nishimura, Tomohiko Ishii, Tatsuya Kodama, Genta Sakane
2. 発表標題 Evaluation of Oxidation-Reduction Reaction of Ceria Using Electronic State Calculation
3. 学会等名 solarpaces conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 大平英二, 児玉竜也 他	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 415
3. 書名 水素の製造, 輸送・貯蔵技術と材料開発 事例集	

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 水素の製造方法	発明者 児玉竜也, 郷右近展之	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、2018-012060	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 水素の製造方法	発明者 児玉竜也, 郷右近展之	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、16/045,276	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

本研究のビームダウン型太陽集光器による大型反応システムのプロトタイプ設計を活用し、現在、豪州再生可能エネルギー庁 (ARENA) の支援事業で、流動層式ソーラー水熱分解反応システムを豪州サンベルトで0.5Mwth規模に大型化し、実証試験するプロジェクトを豪州国研CSIROと連携して行っている (2021年に豪州サンベルトにてソーラー実証試験を実施する予定)。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	長瀬 慶紀 (Nagase Yoshinori) (90180489)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	石井 知彦 (Ishiki Tomohiko) (90285718)	香川大学・創造工学部・教授 (16201)	
研究分担者	清水 忠明 (Shimizu Tadaaki) (10211286)	新潟大学・自然科学系・教授 (13101)	
研究分担者	Bell an Selvan (Bellan Selvan) (50785293)	新潟大学・研究推進機構・助教 (13101)	
研究分担者	曹 賢石 (Seo Hyun-Seok) (70773919)	新潟大学・自然科学系・特任助教 (13101)	
研究分担者	金子 宏 (Kaneko Hiroshi) (90323774)	宮崎大学・工学部・教授 (17601)	削除：平成30年2月28日
研究協力者	松葉 正 (Matsuba Tadashi)		
研究協力者	横田 昌久 (Yokota Masashisa)		
研究協力者	吉田 一雄 (Yoshida Kazuo)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	Kang Yong - Heack (Kang Yong-Heack)		
研究協力者	Seo Taebeom (Seo Taebeom)		
研究協力者	Hinkely James (Hinkely James)		
研究協力者	Robbie McNaughton (Robbie McNaughton)		
研究協力者	阿部 正宏 (Abe Masahiro)		
連携研究者	松原 幸治 (Matzubara Koji) (20283004)	新潟大学・自然科学系・教授 (13101)	