

令和 4 年 6 月 29 日現在

機関番号：12608

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05349・20K20364

研究課題名（和文）電気化学反応と高温熱化学平衡を利用して充放電する「カーボン空気二次電池」の提案

研究課題名（英文）Proposal of Carbon air secondary battery system charging and discharging using electrochemical reaction and high-temperature thermochemical equilibrium

研究代表者

伊原 学（IHARA, MANABU）

東京工業大学・物質理工学院・教授

研究者番号：90270884

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 20,000,000円

研究成果の概要（和文）：水の電気分解によりH<sub>2</sub>を生成し発電するH<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O-P2G2P（Power to Gas to Power）システムは再生可能エネルギーの大量導入に対応した大容量の蓄電システムとして期待されている。しかし、複雑な熱管理を要し廃熱利用効率化のため十分な大きさが必要となる。そこで、高い体積エネルギー密度とシステム効率を期待できる、C/CO<sub>2</sub>酸化還元反応を用いた「カーボン/空気二次電池」（CASB）システムを提案した。CO<sub>2</sub>電解によるC充電とカーボン燃料電池の発電を組み合わせた蓄電システムである。今回初めてBoudouard平衡による劣化のない繰り返し発電（10回の充放電サイクル）の実証に成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

炭素は多くの金属を上回るエネルギー密度を持ち、常に文明活動の主要なエネルギー源であった。近年ではCO<sub>2</sub>排出制限により低炭素化が必須となっているが、CO<sub>2</sub>を排出しない方法での炭素の高エネルギー密度、汎用性の積極利用は有用である。本提案ではCO<sub>2</sub>を二次電池構成物質として繰り返し利用するため、実質のCO<sub>2</sub>排出はゼロとなる。本提案では、金属、水素に加えて第3の蓄エネルギー媒体としてCO<sub>2</sub>/Cを利用する挑戦的な提案である。原材料の高い汎用性により、低コスト、大規模な実装が可能になると期待される。

研究成果の概要（英文）：Power-to-gas-to-power systems that produce H<sub>2</sub> by water electrolysis and generate electricity from this H<sub>2</sub> are promising long-term electric energy storage systems for extensive installation of renewable energies. However, such systems require complex thermal management, and must be sufficiently large to enable the use of waste heat for higher efficiency. Here we propose the “carbon/air secondary battery” (CASB) system that uses a C/CO<sub>2</sub> reaction with potentially higher volumetric energy density and efficiency than that of the H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O reaction. This system produces C by CO<sub>2</sub> electrolysis for energy storage and generates electricity from the C via solid oxide electrolysis cells/fuel cells. Repetitive power generation (10 charge-discharge cycles) of the CASB system with Boudouard equilibrium was firstly demonstrated at 800 °C without degradation. The system achieved a maximum Coulombic efficiency of 84%, charge-discharge efficiency of 38%, and power density of 80 mW cm<sup>-2</sup>.

研究分野：原子力工学、地球資源工学、エネルギー学およびその関連分野

キーワード：固体酸化物燃料電池 蓄電デバイス CO<sub>2</sub>電解

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、研究者個人に帰属します。

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

CO<sub>2</sub> 排出フリー社会の実現に向けて、再生可能エネルギーや電気自動車の利用拡大に伴い、蓄エネルギー、蓄電技術向上への要求がより高まっている。現在リチウムイオン電池を軸とし、合金や Si 負極及び S 正極の導入、金属-空気電池の実現による 5-10 倍の蓄電容量増大、全固体電解質による高出力と安定性の両立といった多くの挑戦的研究が行われているが、それぞれ複数の本質的課題から実装には 10 年単位での研究が必須とみられる。また水電解で水素を生成して化学エネルギーとして蓄え、利用する Power to Gas to Power の考え方も広がっており、燃料電池技術を軸に検討されているが、運用形態や優位性を含め検討課題は多い。

そこで、炭素の酸化還元を軸とし、高温電気化学を用いた燃料電池/蓄電池のハイブリッド型蓄電デバイスを新たに提案する。炭素のエネルギー密度は重量基準で 32.8 kJ/g、体積基準で 66 kJ/cm<sup>3</sup> でありリチウム(40.7 kJ/g, 20.8 kJ/cm<sup>3</sup>)と同等なため、リチウムイオン電池の数倍、リチウム空気電池と同レベルの蓄電が原理的には可能である。常温域での可逆的な炭素の酸化還元は困難な一方、高温においては固体酸化物型燃料電池(SOFC)をベースとして、ダイレクトカーボン燃料電池(DCFC)や CO<sub>2</sub> の電解(EC)と、酸化還元双方で多くの研究が行われている。申請者らは、炭化水素の熱分解で電極の三相界面上に固体炭素を「チャージング」(固体炭素を析出によって供給)して発電するパッチ式の DCFC, リチャージャブル・ダイレクトカーボン燃料電池(RDCFC)の提案・開発をはじめ、液体燃料直噴型燃料電池など、SOFC 分野で多くの技術蓄積を有する。

本研究では、電気化学反応と高温の熱平衡反応を組み合わせることで、電気化学的な反応だけでは実現困難な「C+O<sub>2</sub>の酸化還元によるストレージ法」を「カーボン空気二次電池」として提案し、基本概念を実証して、カーボン空気二次電池の可能性を明確にすることを目的とする。

本研究で提案する「カーボン空気二次電池」の特長を下記に列挙する。

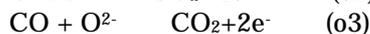
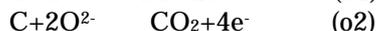
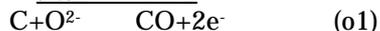
- (1) 近年特に需要が高まる定置型蓄電デバイス一つの理想形となり得る。
- (2) 活物質が炭素で、電極反応場も希少元素を用いない SOFC に準じるためコストも最小限に抑えられる。
- (3) 水素としてエネルギーを蓄える P to G to P システムでは、低温温高圧が必要である水素を蓄エネルギー源として利用するが、カーボン空気電池では、「固体の炭素」と液化が容易で安全な CO<sub>2</sub> としてエネルギーを貯蔵する。したがって、系統と連結して太陽電池や風力などの変動型再生可能エネルギー由来の電力を貯蔵する、大容量定置型の蓄エネルギーデバイスとしての利用が期待できる。
- (4) CO<sub>2</sub> は生成するが、繰り返しカーボン源として利用するため、排出はゼロである。
- (5) 本系は C+O<sub>2</sub>⇌CO<sub>2</sub>+394 kJ/mol (=2490Wh/kg-CO<sub>2</sub>) のエネルギーをすべて利用するため多大な重量あたりエネルギー密度となる。一方体積あたりエネルギー密度は、充電状態の C が固体だが放電状態の CO<sub>2</sub> は通常気体であることから CO<sub>2</sub> の貯蔵方法によって大きく変化する。60 気圧程度の圧縮状態では 300 Wh/L 程度と既存のリチウムイオン電池に近いレベルとなり、液化 CO<sub>2</sub> では 1900 Wh/L、ドライアイスでは 3800 Wh/L と大きく上回り、リチウム空気電池と同等となる。水-水素を用いた P to G では水素を数 100 気圧まで圧縮して貯蔵する必要があるが、CO<sub>2</sub> は常温で 60 気圧、低温ではより低圧で液化するため蓄積が容易であり、圧縮あるいは冷却をシステムに組み込むことで、安全性の確保と高エネルギー密度化が可能である。

カーボン空気電池の放電時は、RDCFC と同様の電極反応によって発電するため、これまでに申請者らによって発電は実証済であるが (RDCFC として多数の論文発表および特許申請済)、充電反応をいかに進行させるかが鍵となる。下記に、本研究で提案する「カーボン空気電池」における独自の発電/放電時の電極反応を示す。

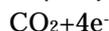
放電時 (C を燃料として発電)

--電解質として酸化物イオン伝導体--

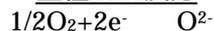
・負極での反応



トータルの負極反応: C+2O<sup>2-</sup>



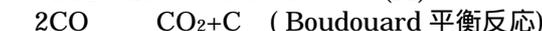
・正極での反応:



充電時 (CO<sub>2</sub> から C 燃料を生成)

--電解質として酸化物イオン伝導体--

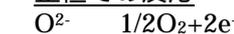
・負極での反応



トータルの負極反応: CO<sub>2</sub>+4e<sup>-</sup>



・正極での反応



また、図 1 に  $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$  (Boudouard 平衡反応) における  $\text{CO}$  分圧の温度依存性を示す。これまでの研究から、SOFC が動作する高温条件では、Boudouard 平衡が成立することが分かっている。図 1 が示すように、例えば 700 で放電をおこなった場合、 $\text{CO}$  の熱平衡分圧は 0.6、 $\text{CO}_2$  は 0.4 となるため、固体炭素が電極中に存在すれば、 $\text{CO}$  分圧は約 0.6 に維持され ( $\text{CO}_2$  分圧: 0.4、高温で  $\text{O}_2$  分圧はほぼゼロ) 主に  $\text{CO}$  を利用した電気化学反応 (o3) によって発電が続く。一方、充電時は電気化学反応 (r1) によって  $\text{CO}_2$  から  $\text{CO}$  を生成し、 $\text{CO}$  分圧が約 0.6 以上になると、 $\text{CO}$  分圧は 0.6 に維持され、 $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$  (Boudouard 平衡反応) により炭素析出 (C 燃料の生成) が続くことになる。したがって、Boudouard 平衡組成を決定する充放電温度は、カーボン空気電池の性能を決定する最も重要な動作条件となる。

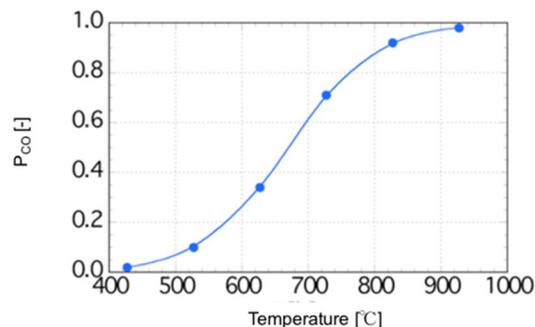


図 1 Boudouard 平衡反応 ( $2\text{CO} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{C}$ ) における  $\text{CO}$  分圧の温度依存性

したがって、上記述べた基本概念の実験による検証も含め、基礎技術、システム設計とも多くの課題を有する挑戦的研究である。

## 2. 研究の目的

$\text{CO}_2$  排出フリー社会の実現に向けて、再生可能エネルギーや電気自動車の利用拡大に伴い、蓄エネルギー、蓄電技術向上への要求がより高まっている。現在リチウムイオン電池を軸とし、合金や Si 負極及び S 正極の導入、金属-空気電池の実現による 5-10 倍の蓄電容量増大、全固体電解質による高出力と安定性の両立といった多くの挑戦的研究が行われているが、それぞれ複数の本質的課題から実装には 10 年単位での研究が必須とみられる。また水電解で水素を生成して化学エネルギーとして蓄え、利用する Power to Gas の考え方も広がっており、燃料電池技術を軸に検討されているが、運用形態や優位性を含め検討課題は多い。

そこで、炭素の酸化還元を軸とし、高温電気化学を用いた燃料電池/蓄電池のハイブリッド型蓄電デバイスを新たに提案する。炭素のエネルギー密度は重量基準で 32.8 kJ/g、体積基準で 66 kJ/cm<sup>3</sup> でありリチウム (40.7 kJ/g, 20.8 kJ/cm<sup>3</sup>) と同等なため、リチウムイオン電池の数倍、リチウム空気電池と同レベルの蓄電が原理的には可能である。常温域での可逆的な炭素の酸化還元は困難な一方、高温においては固体酸化物型燃料電池 (SOFC) をベースとして、ダイレクトカーボン燃料電池 (DCFC) や  $\text{CO}_2$  の電解 (EC) と、酸化還元双方で多くの研究が行われている。申請者らは、炭化水素の熱分解で電極の三相界面上に固体炭素を「チャージング」(固体炭素を析出によって供給) して発電するバッチ式の DCFC、リチャージャブル・ダイレクトカーボン燃料電池 (RDCFC) の提案・開発をはじめ、液体燃料直噴型燃料電池など、SOFC 分野で多くの技術蓄積を有する。

本研究では、電気化学反応と高温の熱平衡反応との組み合わせによって、電気化学的な反応だけでは実現困難な「 $\text{C} + \text{O}_2$  の酸化還元によるストレージ法」を「カーボン空気二次電池」として提案し、基本概念を実証して、カーボン空気二次電池の可能性を明確にすることを目的とした。

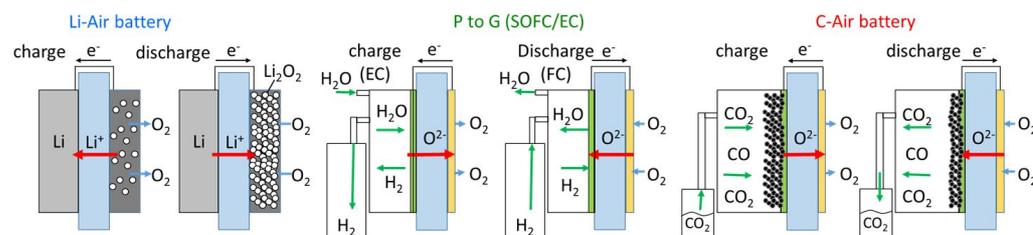


図 3 (左)リチウム空気電池 (中)SOFC/EC による P to G (右)カーボン空気二次電池(本提案)

## 3. 研究の方法

「カーボン空気二次電池」という新しい概念の実現性や優位性を、固体酸化物型電気化学デバイス、二次電池双方のアプローチから検討し、さらにシステム全体を設計しその実現性、優位性を検討した。具体的には、

固体酸化物型セルでの、 $\text{CO}_2$  電解による炭素生成と DCFC の可逆動作の電気化学的検討

燃料極を閉鎖系 ( $\text{C}-\text{CO}_2$  ストレージ) にした「蓄電」デバイスの開発と繰り返し充放電実験 (基本概念の実証)

他の蓄電池システムとの比較、優位性の検討

の 3 点 (が SOFC、が蓄電池分野)、を基に、基礎、応用両面から研究を進めた。

CASB の充放電実験では、実験装置の燃料極側を 800 で  $\text{CO}_2$  で満たし、その側のバルブを閉じた。空気極側には、100sccm で空気を供給した。  $i = \pm 100 \text{ mA cm}^{-2}$  (52 mA) で 10 サイクルの充放電動作を繰り返した。なお、各電極間の電圧は 2 秒ごとに測定した。燃料極側のガス組成がブドウアル平衡付近にあることを確認するため、1 回目の充電サイクルは、燃料基準と空気基準の間の電圧が Boudouard 平衡状態での平衡電位 1.04V (対 1 気圧の空気) より高い起電力に達

するまで進めら。2~10 回目の充電はそれぞれ 30 分間行った。放電は  $V_{ter}$  が 0V になるまで進めた。充電と放電のインターバル時間は 5 分であった。過電圧と  $V_{ohm}$  の分離には、電流遮断法を用いた。電流を 2 分ごとに中断し、15  $\mu$ s 以内の電位変化をオシロスコープを用いて測定した。

#### 4. 研究成果

(以下の成果は、主に下記論文として発表された。Keisuke Kameda, Sergei Manzhos, and Manabu Ihara, "Carbon/air secondary battery system and demonstration of its charge-discharge", Journal of Power Sources, 516, (2021), 230681 DOI: [10.1016/j.jpowsour.2021.230681](https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230681))

#### CASB の実証成功とその反応メカニズムの解明

CASB システムの充放電実験により、充電時には  $\text{CO}_2$  電解と Boudouard 平衡の組み合わせにより C の析出に成功し、放電時には析出した C を利用して繰り返し発電することが実証された。1 サイクル目とそれ以降のサイクルでは、充電特性に大きな差が見られた。これは、充電時間(容量)の違いを示している。今回の充放電実験では、燃料極側を 100%  $\text{CO}_2$  で満たした実験装置から開始した。2 サイクル目以降の参照電極間電圧から、充電開始時の  $p(\text{CO}_2)$  は約 0.7 と推定されたが、最初の充電サイクルでは、その後の充電サイクルに比べて  $\text{CO}_2$  濃度が高く、充電時間を長くする必要があった。充電サイクル中、 $V_{ter}$  は 1.1 V から 1.5 V まで徐々に上昇し、その後急速に上昇し、最終的には約 2.0 V ~ 2.1 V で比較的一定となった。これまで、 $\text{CO}_2$  電解時の  $V_{ter}$  の急激な上昇が報告されており、 $V_{ter}$  の急激な上昇時に Ni/YSZ 燃料電極上に Boudouard 平衡反応によって局所的に C の析出が起こる可能性が指摘されている。今回の実験によって、 $\text{CO}_2$  電解において、Boudouard 平衡による C 析出を、初めて観察することができた。10 サイクル目の充電プロファイルの測定結果、起電力、過電圧、オーミック抵抗による電圧損失、平衡ガス組成の計算結果から、CASB システムの充電反応機構は 3 段階のメカニズムで進行することがわかった。

#### 他の蓄電池システムとの比較、優位性の検討

CASB システム、 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}-\text{P}2\text{G}2\text{P}$  システム、および他の EES デバイス(リチウムイオン電池、ナトリウム電池、鉛電池、ニカド電池、VRFB)に関する容量および重量方向のラゴプロットを作成した。CASB の曲線は、それぞれ SOFC の PD を 174  $\text{mW cm}^{-2}$  と 2,000  $\text{mW cm}^{-2}$  と仮定して計算した。炭素/二酸化炭素の酸化還元反応から計算した CASB の体積エネルギー密度 (VED) と重量エネルギー密度 (GED) は、それぞれ、 $1.62 \times 10^3 \text{ Wh L}^{-1}$  と  $2.50 \times 10^3 \text{ Wh kg}^{-1}$  となった。一方、水素/水の酸化還元反応を用いて推定した VED と GED は、それぞれ  $3.79 \times 10^2 \text{ Wh L}^{-1}$  と  $2.60 \times 10^4 \text{ Wh kg}^{-1}$  となった。SOFC/EC に対する貯蔵物の体積(式(15)の X)が大きくなると、両システムとも貯蔵物に対する ED が飽和してしまう。例えば、 $\text{H}_2$  貯蔵用タンクのサイズが大きくなると、 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}-\text{P}2\text{G}2\text{P}$  システムの VED と GED は共に増加する。しかし、CASB システムでは、SOFC/EC の内部に C が貯蔵されているため、ESC と ED には制限がある。したがって、CASB システムの ED の上限は、SOFC/EC 内の C 貯蔵用空間の総体積と SOFC/EC 自体の体積の比率で決定される。チューブ型 SOFC/EC を想定した場合、この空間体積比を、55% と仮定したが、この ED の制限にもかかわらず、CASB システムの VED は、C 充填率が 25% 以上で 1,000  $\text{Wh L}^{-1}$  を超え、GED は C 充填率が 29% 以上で 1,000  $\text{Wh kg}^{-1}$  を超えることが確認された。CASB システムの最大 VED は、 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}-\text{P}2\text{G}2\text{P}$  システムの 4.3 倍となる可能性が期待される。また、他の電池と比較すると、CASB システムはより高い VED と GED が期待される。CASB システムは固定 EES システムと考えられるため、VED は GED よりもはるかに重要な指標となる。

#### まとめ

本研究では、カーボン/空気二次電池(CASB)システムを提案し、各充電サイクルにおいて  $\text{CO}_2$  電解、Boudouard 平衡の組み合わせにより生成した炭素を用いて、10 サイクルの充放電実験に成功した。800、100  $\text{mA cm}^{-2}$  で最大クーロン効率 84%、充放電効率 38%、出力密度 80  $\text{mW cm}^{-2}$  を達成した。バッチ式反応器を用いた起電力測定により、充電サイクル中に  $\text{CO}_2$  電解による  $p(\text{CO})$  の増加を伴う Boudouard 平衡で炭素が析出することを、初めて実証した。過電圧は、電気化学的および、TPB 上での Boudouard 平衡による炭素析出によって増加した。提案する CASB システムは、SOFC/EC をパワーユニットとし、炭素と液体  $\text{CO}_2$  を貯蔵材料として構成される。CASB システムは、 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}-\text{P}2\text{G}2\text{P}$  システムと比較して、C/ $\text{CO}_2$  の酸化還元反応の  $G/H$  が 1 であることから、システム規模の縮小と高いシステム効率が期待される。CASB システムは、 $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}-\text{P}2\text{G}2\text{P}$  システムおよびリチウムイオン電池のいずれよりも理論的に高い VED ( $1.62 \times 10^3 \text{ Wh L}^{-1}$ ) を持ち、充電容量と充放電出力密度を独立して制御可能で、長期蓄電を実現するのに必要な大きな充電容量が期待できる。Ragone プロットから、CASB システムの理論 VED は炭素充填率 25% 以上で 1,000  $\text{Wh L}^{-1}$  を超え、GED は C 充填率 29% 以上で 1,000  $\text{Wh kg}^{-1}$  を超えることが示された。今後は、電気化学的な炭素析出抑制、Boudouard 平衡下での  $\text{CO}_2$  の電気化学的還元による過電圧の抑制、炭素の結晶性及び C 析出位置の制御により、CASB システムの性能向上が期待できる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kameda Keisuke, Manzhos Sergei, Ihara Manabu	4. 巻 516
2. 論文標題 Carbon/air secondary battery system and demonstration of its charge-discharge	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Power Sources	6. 最初と最後の頁 230681 ~ 230681
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jpowsour.2021.230681	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 1件/うち国際学会 12件）

1. 発表者名 亀田 恵佑、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 Ni/GDCおよびNi/YSZ燃料極を使用したカーボン空気二次電池システムの充放電特性の比較
3. 学会等名 化学工学会第51回秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kei Hasegawa, Hyojae Lee, Keisuke Kameda, Yuta Iida and Manabu Ihara
2. 発表標題 Unified Kinetics Model of Reversible Solid Oxide Fuel Cell / Electrolysis with Competitive Adsorption Reaction on Anode Triple Phase Boundary」
3. 学会等名 The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Iida, Keisuke Kameda, Kei Hasegawa, Manabu Ihara
2. 発表標題 Consideration of operating condition and suppressing anode degradation for steep output power variation on liquid fuel direct supply solid oxide fuel cell
3. 学会等名 The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Kameda, Yuta Iida, Mankichi Hosoda, Tatsuya Matsuhira, Kei Hasegawa, Manabu Ihara
2. 発表標題 Proposed carbon-air secondary battery system as an electric power storage system」
3. 学会等名 The World Hydrogen Technologies Convention (WHTC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長谷川 馨
2. 発表標題 カーボンナノチューブを“作る”から“使う”, 電池を“作る”から“使う”へ
3. 学会等名 化学工学会横浜大会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀田恵佑、飯田雄太、長谷川馨、伊原 学
2. 発表標題 固体酸化物燃料電池を用いたカーボン空気二次電池システムの電解反応メカニズム
3. 学会等名 2019年電気化学秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kei Hasegawa, Hyojae Lee, Keisuke Kameda, Yuta Iida and Manabu Ihara
2. 発表標題 Kinetics Model to describe Reversible Operation of Solid Oxide Fuel Cell Electrolysis with Competitive Adsorption Reaction on Anode Triple Phase Boundary
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCHE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Iida, Keisuke Kameda, Tatsuya Okubo, Kei Hasegawa, Manabu Ihara
2. 発表標題 Development and evaluation of liquid fuel direct supply SOFC for high load followability based on actual demand/supply data
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCHE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keisuke Kameda, Yuta Iida, Mankichi Hosoda, Tatsuya Matsuhira, Kei Hasegawa, Manabu Ihara
2. 発表標題 Proposal of carbon-air secondary battery system and evaluation of its potential as a large capacity energy storage
3. 学会等名 18th Asian Pacific Confederation of Chemical Engineering Congress (APCCHE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Hasegawa, H. Lee, K. Kameda, Y. Iida, and M. Ihara
2. 発表標題 Comprehensive Kinetics Model with Competitive Adsorption Reaction on Water Electrode in Reversible Solid Oxide Fuel Cell / Electrolysis
3. 学会等名 236th ECS Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山田 耕生、亀田 恵佑、飯田 雄太、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 酸化イオン伝導性酸化物上でのカーボンナノチューブ合成の検討
3. 学会等名 化学工学会第85年会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古賀 康友、飯田 雄太、亀田 恵佑、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 固体酸化燃料電池/電解セルの包括的燃料極反応モデルの提案と多変数フィッティング手法の構築
3. 学会等名 化学工学会第85年会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川 馨、山田 耕生、細田 万吉、飯田 雄太、亀田 恵佑、伊原 学
2. 発表標題 固体酸化燃料電池へのカーボンナノチューブ直接成長に対するイオン伝導性酸化物の影響
3. 学会等名 化学工学会第85年会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀田 恵佑、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 Ni/GDCおよびNi/YSZ燃料極を使用したカーボン空気二次電池システムの充放電特性の比較
3. 学会等名 化学工学会第85年会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 長谷川 馨、細田 万吉、伊原 学
2. 発表標題 固体酸化燃料電池へのカーボンナノチューブ合成技術の導入
3. 学会等名 第50回化学工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 松平 達哉、倉橋 佑輔、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 ペロブスカイト関連構造の過剰酸素・酸素欠損とプロトン伝導性の関係
3. 学会等名 第50回化学工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 細田 万吉、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 固体酸化物燃料電池の燃料極へのカーボンナノチューブの直接合成法の検討
3. 学会等名 第50回化学工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀田 恵佑、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 大規模蓄エネルギーを目指した「カーボン空気二次電池」システムの提案
3. 学会等名 第50回化学工学会秋季大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kameda, K. Hasegawa, and M. Ihara
2. 発表標題 Carbon-Air Secondary Battery" System By Combining Direct Carbon Fuel Cells and CO2 Electrolysis As Large Scale Energy Storage
3. 学会等名 234th ECS and SMEQ2018 Joint International Meeting (AiMES 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 K. Kameda, K. Hasegawa, and M. Ihara
2. 発表標題 Evaluation of Fuel Electrode of Proton Conductive SOFC Considering Ion Transport Number
3. 学会等名 The Asia-Oceania Top University League on Engineering (AOTULE 2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 飯田 雄太、亀田 恵佑、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 高負荷追従性と高利用率の両立を目指した液体直噴固体酸化物燃料電池の発電特性
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 亀田 恵佑、飯田 雄太、細田 万吉、松平 達哉、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 カーボン空気二次電池システムの固体炭素反応メカニズムの解明
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 長尾 泰成、松平 達哉、亀田 恵佑、長谷川 馨、伊原 学
2. 発表標題 岩塩層を持つ層状ペロブスカイト構造酸化物のキャリア選択性の考察
3. 学会等名 化学工学会第84年会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 伊原学・長谷川馨	4. 発行年 2019年
2. 出版社 三恵社（化学工学会発行）	5. 総ページ数 15
3. 書名 最近の化学工学67 進化する燃料電池・二次電池 --反応・構造・製造技術の基礎と未来社会を支える電池技術--, 2-1「電気化学・電極反応の基礎」	

1. 著者名 伊原学	4. 発行年 2019年
2. 出版社 三恵社（化学工学会発行）	5. 総ページ数 13
3. 書名 最近の化学工学67 進化する燃料電池・二次電池 --反応・構造・製造技術の基礎と未来社会を支える電池技術--, 3-III-5「電池技術と将来のエネルギーの姿」	

〔出願〕 計0件

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 二次電池及びそれを用いた充放電方法	発明者 伊原学, 長谷川馨, 亀田恵佑	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2020-038770	取得年 2020年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

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	長谷川 馨 (HASEGAWA KEI)  (50644944)	東京工業大学・物質理工学院・助教  (12608)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------