

玉川大学 TSCP における ハイブリッド・ソーラーカーの開発

Research and development of Hybrid Solar-Car in Tamagawa University TSCP

齊藤 純*, 小原宏之*

1. はじめに

玉川大学では、地球環境に対する意識向上と次世代技術者の育成を目的として、1997年にソーラーカー開発プロジェクト TSCP (Tamagawa Solar Challenge Project) を発足させた。TSCP は、人や物の移動に関わるモビリティを題材に、その駆動エネルギーに再生可能エネルギーを中心とした低環境負荷のエネルギー源を活用する方法や、モビリティの省エネルギー化に関する研究を行っている。発電システムとそれに適した実験車両を開発し、ソーラーカー大会でその評価を行う。これを通じて、再生可能エネルギー利用技術の研究開発と環境に配慮できる広い視野を持った人材育成を両立する実践的なエネルギー教育を実践している。

ソーラーカーは日射依存性が高く、曇天や夜間の走行には課題がある。そこで TSCP では、2003年に太陽光と水素燃料電池（水素）を併用するハイブリッド・ソーラーカーを開発し、2008年には水素菌によるバイオ水素発酵を用いた水素自動車の走行試験に成功した。

2016年にプロジェクト名称を Tamagawa Sustainable Chemistry-powered-vehicle Project に改称し、再生可能エネルギーと持続可能なエネルギー源の組み合わせによる次世代モビリティの開発に取り組んでいる。現在は、太陽光と資源循環型エネルギーとして注目されるマグネシウムを併用したハイブリッド・ソーラーカーの開発を進めている。

本稿では、これまでのハイブリッド・ソーラーカーの開発経緯とその成果について報告する。

2. エネルギーキャリア

再生可能エネルギーは地球上に広く分布しているが、そのエネルギー密度は日射量などの気象条件に

より地域差が生じる。また、都市部などのエネルギー需要地では必ずしも供給適地と一致せず、安定的な利用にはエネルギーの貯蔵と輸送が不可欠である。特に再生可能エネルギーの主な利用形態である電力は大規模貯蔵や長距離輸送が困難という課題がある。

この課題に対し、再生可能エネルギーを他の媒体に変換して蓄積・輸送するエネルギーキャリアの活用が有効である。代表例としては、水素、アンモニア、有機ヒドライド、金属・金属酸化物などが挙げられる。これらを再生可能エネルギー由来の電力で生産し、需要地に輸送した後に、電力や動力、熱として利用することで、再生可能エネルギー供給の安定性が向上する。近年では、地域特性や製造プロセス、利用形態に応じたエネルギー多様化が検討されており、その導入は環境負荷の低減にも寄与する。

3. ハイブリッド・ソーラーカー

一般にハイブリッドカーとは、内燃機関とモーターという2種類以上の異なる動力源を統合的に用いて駆動力を得る車両を指す。これにより、走行状況に応じて各動力源を最適に制御することが可能となり、燃費の向上や排出ガスの低減といった環境性能の改善が図られている。

ソーラーカーは車両に搭載された太陽電池によって太陽光エネルギーを電力に変換して蓄電池に充電するとともにモーターで駆動力を生じさせて走行する車両であり、全ての走行エネルギーを再生可能エネルギーである太陽光によって賄うことが可能である。しかし、その発電能力は日射量や気象条件に大きく左右されるため、安定した走行性能を確保する上で課題が残されている。

*玉川大学 TSCP

本研究のハイブリッド・ソーラーカーは、再生可能エネルギーである太陽光を主たるエネルギー源としつつ、環境負荷の低いエネルギー源による発電を併用することで、太陽光発電の不安定性を補完して昼夜を問わず安定したエネルギー供給および持続的な走行を可能とするモビリティである。本研究では水素とマグネシウムに着目し、エネルギーキャリアとして活用することで、再生可能エネルギーに基づく持続可能なモビリティの社会実装を目指す。

4. 太陽電池と水素燃料電池を組み合わせたハイブリッド・ソーラーカー^{1), 2), 3)}

ハイブリッド・ソーラーカー「アポロンディーン」は、動力として太陽光エネルギーと水素（燃料電池）を組み合わせている。太陽光エネルギーだけを利用する従来のソーラーカーは、天気の悪い日や夜間にエネルギーを蓄えることが出来ない。そこで、ソーラーカーの開発や運用で培った技術を随所に生かしながら、さらに水素燃料電池を加えることでソーラーカーの弱点を克服し、さらに速く、長時間にわたり走行が可能な、環境にやさしい車の開発を目指した。この車両の基は、WSR (World Solar-car Rallye) 大会および JISC (全日本ソーラーカー・チャンピオンシップ) 大会で3年連続優勝を成し遂げたソーラーカー「ホワイトドルフィン」のシャーシである。カウルの面積は、燃料電池とのハイブリッドを考慮し、ソーラーカーの2/3とし、新たにこのシャーシに合うように設計した。車両を図1に示す。

図2に示す電装システムは、太陽電池に固体高分



図1 「アポロンディーン」

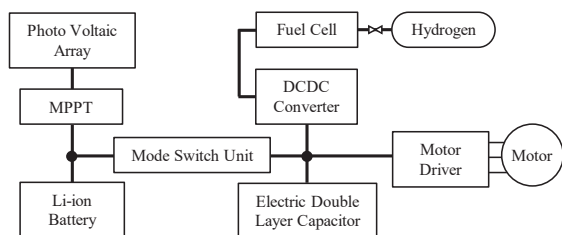


図2 「アポロンディーン」電装システム構成

子型燃料電池を組み合わせ、出力電圧を Li-ion バッテリーの電圧に昇圧する DC-DC コンバータと入出力電力を平滑化する電気二重層キャパシタを追加した。

ハイブリッド・ソーラーカー「アポロンディーン」のデビューは2003年のWSRであった。ハイブリッドのカテゴリーが無く、太陽電池の配線を外してJISCの燃料電池部門への参加となった。ただし名前を「ハイブリッド・ソーラーカー」と称して他車との違いを訴えた。DC-DC コンバータの故障によりクラス2位であったが、これがきっかけで、当時WSCの企画・運営をしていたハンスソルストラップ氏の発案で、この新しい試みの実用性を証明するためにオーストラリア大陸横断パース～シドニー間の大陸横断4000kmすることとなる。万全を期して横断に臨んだつもりであったが、日本では考えられない暑さによるモーターのトラブル、原因不明の水素漏れ検知器の発報など、国内では得られない貴重な実走行データを得た。

その後、WSR大会では2003年より燃料電池部門が創設されJISFC (全日本学生ソーラー & FC カーチャンピオンシップ) 大会との併催となった。2004年から2008年までは燃料電池部門優勝。車両サイズと供給水素量の制限から総合順位ではなかなかソーラーカー部門の車両に勝てなかったが、システムの改善を繰り返し2009年に総合優勝を遂げている。2006年にエネルギーシステムの対比実験用に燃料電池車として「オンディーン」を開発した。「アポロンディーン」と同形状で、シャーシとカウルは新造した。後に同車両も「アポロンディーン」の電装システムを改良したハイブリッド・ソーラーカーに変更し、JISFC大会で2010年～2012年にかけて総合優勝連覇を遂げた。

5. バイオ水素調達^{4), 5)}

化石燃料から作られることが多い燃料電池の燃料である水素を、これも再生可能エネルギーであるバイオマスから作る研究を行った。2008年には、廃糖蜜を餌に水素菌によるバイオ水素発酵を行い、燃料電池でモーターを駆動して走る4輪2人乗り水素自動車の試験走行に成功した。

この水素菌の探索では、神奈川県、静岡県、沖縄県などの富栄養化が進んでいる川や湖、草食動物の排泄物、メタン発酵プラントの残留物などの土壤試料を集めた。土壤試料を50倍希釈廃糖蜜培地が入ったバイアルビンに注入し、常温で数日振盪培養する。

バイアルビンに植菌したもののうち、ブチルゴム栓が大きくふくらみ、気体が多く発生していると見られるものを選び出し、気相部のガス成分をガスクロマトグラフで測定する。43箇所サンプル中、13サンプルから水素生産が確認できた。この内、水素生産の安定性があり、収率の良い佐鳴湖サンプル Sa-3a を用いて大量培養した。

Sa-3a は、偏性嫌気性細菌の一種で、酸素の存在しない環境で増殖し、水素ガスを生産する。この Sa-3a を、テクノスルガラボに分類解析に出した結果、バイオセーフティレベルは1で、人に疾病を起こす、或いは動物に対して獣医学的に重要な疾患を起こす可能性はないものという報告を受けた。また、その解析より作成された系統図から Clostridium 属に属する。

生産したガスは一度、水で水上置換したものをテドラーパックに集め、脱イオン水 5L → 1M 水酸化ナトリウム 5L → 脱イオン水 5L → 活性炭フィルター の順で約 30 分間循環させたあと、切り替えコックを圧縮ポンプ方向に切り替え、水素吸蔵合金タンクへ充填した。

大量培養装置を用いて生産したバイオ水素をエネルギー源に、開発した水素自動車で試験走行を実施した。走行結果は、収集ガス量約 300L、走行時間約 3 分で、走行距離約 1km、最高時速 50km/h であった。

後に同実験車両用に空気抵抗低減のためのカウル



図3 バイオ水素による走行実験



図4 「未来叶い」(太陽電池 + 水素燃料電池)

を製作し、燃料電池に太陽電池を追加したハイブリッド・ソーラーカーに変更した「未来叶い」を完成させた。

6. マグネシウム空気電池

マグネシウムは、炭酸岩塩や海水に多く含まれる元素であり、地殻表層に広く分布する極めて豊富な資源である。確認されているマグネサイト(MgCO₃)は約 130 億トン、ブルーサイト (Mg(OH)₂) は数百万トンの資源量が報告されており、マグネシウム含有鉱物やブラインは数十億トンに上ると推定されている⁶⁾。また、地球上の海水総量は約 1.37 × 10¹⁸ トンとされ、このうち約 0.13% がマグネシウムに相当し、約 1.78 × 10¹⁵ トンに達する⁷⁾より筆者計算。

こうした豊富な資源特性に加え、マグネシウムは比重 1.7 と実用金属中で最も軽く、自動車部品や電子機器筐体などの軽量構造材のほか、アルミ合金の添加材、鉄鋼の脱硫、チタンの製錬など、さまざまな用途に利用されている。さらに、金属空気電池の負極として用いることで発電が可能であり、モビリティ用電源などへの応用が期待されている。海水中に豊富に含まれるマグネシウム化合物を再生可能エネルギーにより金属マグネシウムへ製錬することで、持続可能な資源供給が可能となる。さらに、発電反応で生成された酸化物は再び金属マグネシウムに還元できるため、資源循環型のエネルギーキャリアとしての活用も期待される。

マグネシウム空気電池は、図5に示すように、空気中の酸素を正極活物質、マグネシウム金属を負極活物質とし、電解質には主に食塩水などのアルカリ性水溶液を用いた一次電池である。主な反応は、負極でマグネシウムが酸化されて電子を放出し、外部回路を通じて電流として流れる。正極では酸素が水と反応して還元され、水酸化マグネシウムが生成される。発電が進行するとマグネシウム電極が徐々に消耗し、完全に消失すると発電は停止する。

1セルあたり解放電圧 V_{oc} は約 1.4 ~ 1.5 [V] であり、出力電圧は低いが出力電流は数十 [A] に達

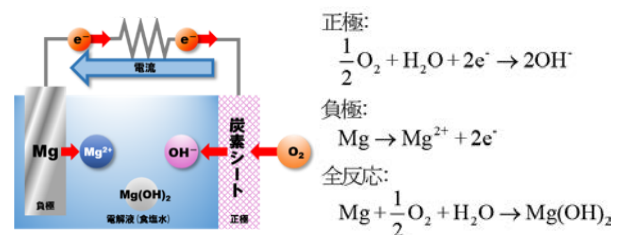


図5 Mg 空気電池の発電反応

する。本電池は出力電流の増加に伴い出力電圧がほぼ線形に低下する特性を有しており、短絡電流 I_{sc} の半分程度の出力電流において最大電力が得られる。しかし最大電力点での動作はマグネシウム電極の消耗を促進する。発電実験の結果、出力電流の増大に伴い、マグネシウム電極表面における溶解が不均一に進行する様子が観察された。特に一部領域において溶解深度が著しく深くなることで、未反応の電極部分が十分に発電反応に寄与する前に分解し、局所的に欠損が生じる現象が確認された。これにより、取り出せる電力量の低下を招く可能性がある。したがって、走行時における動作点は、事前の発電試験で出力電力と総発電電力量のバランスを考慮したうえで、適切に設定する必要がある。

7. 太陽電池とマグネシウム空気電池を組み合わせたハイブリッド・ソーラーカー⁸⁾

太陽電池と燃料電池を組み合わせたハイブリッド・ソーラーカー「未来叶い」の電装システムを基に、太陽電池とマグネシウム空気電池を組み合わせた新たな構成に変更した。図6に車両を、図7にその電装システムを示す。太陽電池の搭載面積はソーラーカーの約1/2とし、発電の不足分をマグネシウム空気電池で補う構成とした。

モビリティ用電源への応用可能性を検証するため、マグネシウム空気電池は市販の携帯端末充電用のセルを無改造で使用した。1セットあたり32セルを直列接続して構成し、出力は電気二重層キャパ



図6 「未来叶い」
(太陽電池 + マグネシウム空気電池)

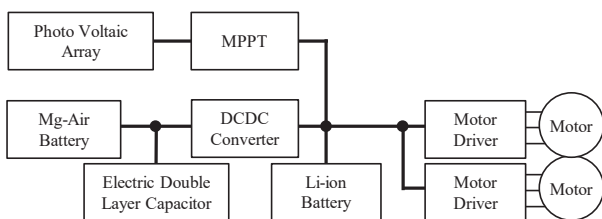


図7 「未来叶い」電装システム構成

シタで平滑化した後、バッテリー電圧に合わせてDC-DCコンバータで昇圧して供給する。マグネシウム空気電池の動作点は、出力電力と出力可能時間のトレードオフを考慮して設定し、市販の標準仕様より高出力となる電流値を設定した。

セルを無改造で使用しているため、電極の消耗や副生成物の影響で取り出せる電力量は定格より低下するが、走行に必要な電力を十分に賄うことが出来た。

2016年のWGC大会では競技時間外に夜間走行試験を行い、太陽電池が発電しない条件下でもLi-ionバッテリーの出力をマグネシウム空気電池が補い、安定した走行が可能であることを実証した。さらに、2018年のWGC大会では、3日間・計25時間で800kmを走行し、グリーンフリークラスで優勝を達成した。大会期間中のエネルギー収支の内訳を図8に示す。マグネシウム空気電池3セットを使用し、太陽電池・マグネシウム空気電池・Li-ionバッテリーの各電源からほぼ同量の電力を得て、バランスの取れたエネルギーミックスによる走行を実現した。

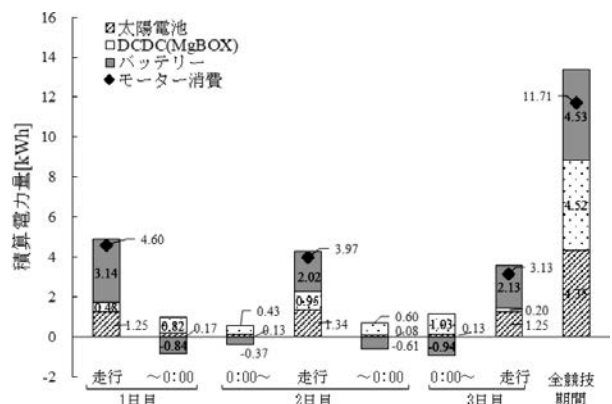


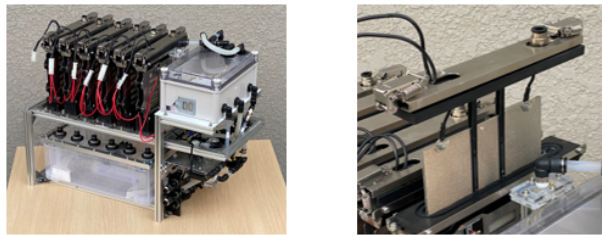
図8 エネルギー収支（「未来叶い」WGC2018大会）

8. メカニカルチャージ方式マグネシウム空気電池

燃料電池が水素と酸素の反応により電力を得ると同様に、マグネシウム空気電池もマグネシウムと酸素の反応を用いて発電することから、固形燃料型燃料電池の一種として位置づけることができる。本電池は発電に伴いマグネシウム電極が消耗する。消耗した電極を物理的に交換する方式は、内燃機関や燃料電池における燃料補給に相当し、メカニカルチャージ方式と呼ばれる。本研究では、マグネシウムを固形燃料という形態のエネルギーキャリアとして活用することを目指し、図9(a)に示すメカニカ

ルチャージ方式マグネシウム空気電池を開発している。

本セルはマグネシウム電極の両面に空気極を配置する構造を採用した。また電極間ギャップを狭めることで大電流の出力が可能となっている。図9(b)のようにマグネシウム電極はホルダーに固定され、1枚ずつ交換することができる。



(a) 外観 (b) 電極交換
図9 メカニカルチャージ方式マグネシウム空気電池

正極と負極の間の電解液中に副生成物が滞留するとイオンの移動が阻害され、セルの内部抵抗が増大するため発電電力が減少する。電極間ギャップが狭いことからこの問題の影響が顕著になる。これに対処するため、電解液処理システムを構成し、電解液をセル外部に接続される沈殿槽およびリザーバタンクの間をポンプにより循環させている。これにより、発電領域に副生成物が滞留することを防ぎ、出力の低下を抑制している。

9. 太陽電池とメカニカルチャージ方式マグネシウム空気電池を組み合わせたハイブリッド・ソーラーカー

都市部における自動車の平均走行距離は1日あたり9～15 km程度と報告されている⁹⁾。このような使用実態を踏まえると、必要最小限のバッテリー容量を搭載した小型モビリティの導入により、地球温暖化対策や都市交通の混雑緩和にも寄与できると考えられる。従来のEVは充電のために長時間駐車する必要があり、この充電時間が利用者にとってダウンタイムとなる点が課題である。一方、小型モビリティは搭載バッテリーが小型・軽量であることから、走行後のエネルギー補給は、従来の充電方式に代えて、充電済みのバッテリーユニットとの交換によって短時間で行う運用も可能である。

本研究では、こうした小型モビリティの運用形態を想定し、太陽電池とメカニカルチャージ方式マグネシウム空気電池を組み合わせたエネルギーミックス型のオフグリッド充電ステーションを構築し、バッテリーユニットの充電に利用することを提案する。この構成により、商用電力に依存せず展開可能

な柔軟性を備えた充電インフラの実現を目指している。

図10に示す実験車両「S-Mg concept」の開発にあたっては、小型電気自動車の競技であるエコノムーブ大会のレギュレーションを参考にしつつ、これに準拠した車両としては例の少ない4輪車両で設計した。また、本研究で対象とする小型モビリティは太陽電池の搭載面積が限られると想定されるため、本実験車両にも最小限の面積で太陽電池を搭載した。

エネルギーミックス充電ステーションを含めた電装システム構成を図11に示す。使用するLi-ionバッテリーユニットの容量は約840Whであり、その80%を使用範囲と設定している。これは本実験車両で約90km走行可能な電力量に相当する。充電ステーションの太陽電池とメカニカルチャージ方式マグネシウム空気電池の発電能力は、本実験車両が約90kmを走行するのに要する時間内にLi-ionバッテリーユニットの充電が完了できるように構成している。

まず、「S-Mg concept」にメカニカルチャージ方式マグネシウム空気電池を車両に搭載して、車載太陽電池と併用したシステムで走行試験を実施した。一周550 mの概ね平坦な往復路で加減速を含む条件下にて、ハイブリッド・ソーラーカーとしてはマグ



図10 「S-Mg concept」

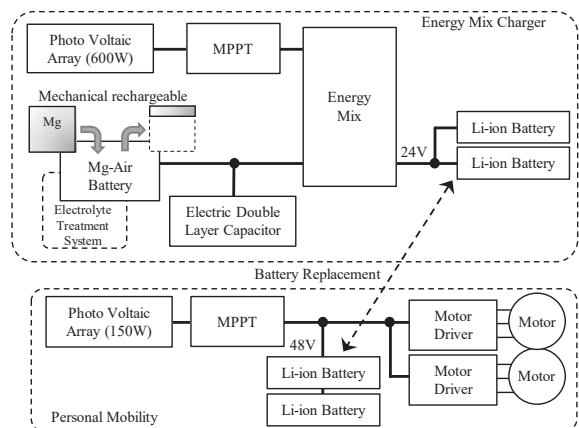


図11 「S-Mg concept」電装システム構成

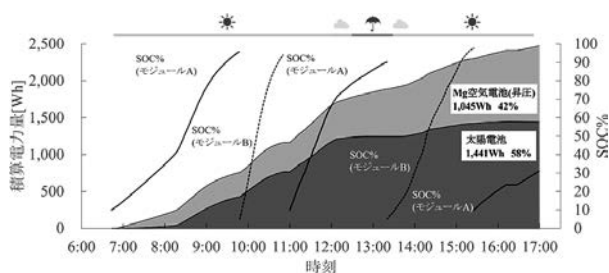


図 12 エネルギーミックス型充電スタンドバッテリー充電試験

ネシウム電極 1kg で 96.6km を走行できることに相当する結果を得ることができた。また、太陽電池を併用せずマグネシウム空気電池の発電のみで走行することを想定すると、マグネシウム電極 1kg で 65.7km 走行可能であることが推定される¹⁰⁾。

2023 年に出場した WGC 大会では、エネルギーミックス充電スタンドの不具合で想定した充電が行えなかったものの、3 日間の合計 25 時間で 525km を走行できた。グリーンフリークラス 2 位という結果が得られたが、システムの改善により更に長距離が走行可能であると考えられる。

3 月に実施した充電実験では、天候変化が予想される 1 日を選び、エネルギーミックス型充電スタンドによるバッテリー充電の安定性を評価した。使用したバッテリーは、容量約 840Wh のユニット A と約 420Wh のユニット B で、これらを交互に充電した。図 12 に示すように、朝夕が晴天であったのに対し、日中は雨天であったが、マグネシウム空気電池の発電により、日照が不十分な時間帯でも充電を継続できた。その結果、両ユニットともに SOC(State Of Charge) 10% から 90% までの充電を 2 回ずつ完了した。このとき得られた電力量は、「S-Mg concept」における約 270km の走行に相当し、都市部での小型モビリティの日常利用に十分対応可能な充電能力である¹¹⁾。次回大会において本システムを実運用し、その有用性を検証したい。

10. 今後の展望

ソーラーカーは、太陽電池を搭載してエネルギーを地産地消する自己完結型モビリティであり、環境負荷が極めて小さいことが特徴である。一方で日射依存性の課題を抱えている。本プロジェクトでは、ソーラーカーの有用性を高めるために、その課題を補う手段としてエネルギーキャリアを併用するハイブリッド・ソーラーカーの開発を続けている。カーボンニュートラルの実現には、再生可能エネルギー

の活用に加えて資源の循環利用も不可欠である。本プロジェクトでは、持続可能なモビリティの構築に向けてエネルギーキャリアであるマグネシウムの循環利用を目指している。

また、本取り組みは PBL (Project Based Learning) の実践の場として展開している。研究に加え大会出場といった対外的な目標を設定することで実体験を伴った主体的な学びを促している。学生がモビリティやエネルギーに関心を持ち、実験車両の実践的な設計・製作・運用に加え、エネルギー技術に関する議論や研究を主体的に取り組む中で、地域や資源状況に応じたエネルギー選択の視点を養い、環境調和型社会の担い手となる技術者の育成を目指している。

謝辞

マグネシウム空気電池や電極をご提供いただいた、藤倉コンポジット株式会社、古河電池株式会社、電気二重層キャパシタをご提供頂いた日本ケミコン株式会社に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小原宏之, ソーラー&燃料電池ハイブリッドカーの開発, 太陽エネルギー Vol.32. No.2, Journal of JSES (2006), 31-38
- 2) 小原宏之, 燃料電池と太陽電池を組合わせたハイブリッド・ソーラーカーのシステム構成, 電気自動車・燃料電池車・ソーラーカー製作講習会資料テキスト (2007), 31-35
- 3) 小原宏之, 燃料電池と太陽電池のハイブリッドシステムを利用した自動車の実環境運転に関するデータ取得-ハイブリッドソーラーカーによるオーストラリア大陸横断 4,000km の記録-, NEDO 報告書 (2004)
- 4) 小原宏之, PBL 教育におけるハイブリッド・ソーラーカーの開発展開, 太陽エネルギー Vol.40. No.1, Journal of JSES (2014), 35-40
- 5) 小原宏之, 齊藤純, 高橋, 本波, G.A.バック, PBL 教育における Sustainable Chemistry-powered-vehicle の開発展開, 第 64 回応用物理学会春季学術講演会公演予稿集 (2017), 01-115
- 6) USGS, Mineral Commodity Summaries2025 (2025), 112-113

- 7) MATTHEW A. CHARETTE, WALTER H. F. SMITH, The Volume of Earth's Ocean (2010), Oceanography Vol.23, No.2, 112-114
- 8) 齊藤純, 小原宏之, WGC2019 における "未来叶い" の走行実績, 玉川大学工学部紀要 第 55 号 (2020), 13-20
- 9) 国土交通省, 全国都市交通特性調査 (2021)
- 10) 齊藤純, 小原宏之, 車載用メカニカル充電方式マグネシウム空気電池, 第 70 回応用物理学会春季学術講演会公演予稿集 (2023), 01-037
- 11) 齊藤純, 小原宏之, メカニカル充電方式マグネシウム空気電池と太陽電池を使用したモビリティ充電システム, 第 71 回応用物理学会春季学術講演会公演予稿集 (2024), 01-059

著者略歴



齊藤純 (サイトウ ジュン)
玉川大学工学部デザインサイエンス学
科教授
TSCP 代表
応用物理学会会員, 日本工学教育協会
会員, 日本技術史教育学会会員, 循環社会推進協議
会 EV 部会
saitoj@eng.tamagawa.ac.jp



小原宏之 (オバラ ヒロユキ)
1997 年玉川大学ソーラーチャレンジ
プロジェクトを立ち上げる. TSCP 元
総監督
玉川大学工学部名誉教授 工学博士
玉川大学大学院工学研究科特別研究員
日本太陽エネルギー学会会員, 応用物理学会会員
hiroyuki@eng.tamagawa.ac.jp