

自立・分散型社会を目指した コミュニティエネルギー

Community energy for a decentralized, circular society

川本 大輔*, 地主 光太郎*, 田中 裕崇*, 矢部 和宏*, 望月 理来*

1 はじめに

近年、地球環境の変動は、深刻さを増しており、不可逆的な気候の遷移を意味する Climate Departure の議論すらされている¹⁾。さらに、2019 年末からの新型コロナウイルスの蔓延は、パンデミックとなり多くの国で長期間のロックダウンが行われるなど経済活動は大幅に制限された。しかし、これほどの経済活動の制限をもってしても気候変動の抑制への効果は極めて限定的であり、単なる量的な抑制ではなく、質的な産業構造、特にエネルギー需給構造の変革が必須であるとの認識が広まっている^{2,3,4)}。

気候変動への影響の大きい二酸化炭素の排出量抑制の議論が世界的に加速しており、日本においても 2020 年 10 月に菅義偉首相が日本政府として初めて 2050 年までに二酸化炭素ネット排出量ゼロ（カーボンニュートラル）にするとの政策目標を表明した。2050 年カーボンニュートラルの実現に向けては、電力部門における再生可能エネルギーを中心とした脱炭素電源の大量導入、非電力部門における電化が主要な取り組みとなる⁵⁾。一方で、カーボンニュートラル達成のためには、新たな技術導入に加えて需要家の行動変容が大きな要素であると言われており⁶⁾、行動変容による CO₂ 排出量の低減効果についても調査がされている⁷⁾。一方で、需要家の行動変容を促したり維持するためには、行動変容に対する動機を維持・向上させることが必要であり、環境保全活動と Wellbeing の関係や⁸⁾、サステナブルな選択と Positive emotion の関係などの調査も行われている⁹⁾。また、エネルギーのトリレンマという課題もある。これは、エネルギーの安定供給 / エネルギーへの公平なアクセス / 環境性という 3 つの目標を達成しようとする、互いに競合し、相反する場合が

あるため、同時に解くことが難しい課題とされている¹⁰⁾。

ソニーコンピュータサイエンス研究所（ソニー CSL）の OXS（Open Xchange Systems オープンエクスチェンジシステム）プロジェクトでは、脱炭素という惑星規模の課題に対して「技術 x 行動変容」というアプローチでの研究開発や実証を進めている。技術については、分散型で拡張可能性が高く、さらに災害等に対するレジリエンスで優れているマイクログリッドという電力システムの研究開発と実証実験を進めてきた^{11,12)}。マイクログリッドとは、太陽光発電などの再生可能エネルギーを始めとする分散電源を活用することで、二酸化炭素排出量を抑制するとともに、一定の地域で使用する電力を地域内で発電、蓄電、配電する分散型の電力システムである。行動変容については、需要家の動機に寄り添い、動機を満たすような行動の選択肢を提供することにより、環境に優しい行動を継続的に行う方法についての検討と効果の検証を進めている。本稿では OXS プロジェクトのアプローチと実証実験について紹介する。

2 OXS プロジェクトのアプローチ

OXS プロジェクトは、自立・分散型社会を実現する、地産地消型のエネルギーインフラに関する研究・開発・社会実装の取り組みである。社会構造の変化に柔軟に対応可能な、エネルギーの新たな流通の仕組みや、自然との関係性を感じエネルギーの在り方を考えナビゲーションする仕組みの開発と社会実装を進めている。

2.1 「技術 x 行動変容」

OXS プロジェクトでは、コミュニティへの自

* 株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所 プラネタリーナビゲーショングループ OXS プロジェクト

立・分散型のエネルギーシステムの提供とエネルギーリテラシーを向上させる仕組みによる「技術 x 行動変容」により環境に優しい再生可能エネルギーの普及を促進し、エネルギーのトリレンマの解決を目指している。

2.2 再生可能エネルギーを共有し活用する技術：OES (Open Energy Systems オープンエネルギーシステム)

再生可能エネルギーを主電源とするマイクログリッドの制御技術を開発し、沖縄県で再生可能エネルギーの導入量の増加や災害発生時の電力の継続供給といった効果を実証した¹³⁾。また、移動体を用いた電力運搬による送配電の効率化について徳島県で実証をしている¹⁴⁾。マイクログリッドや移動体により図1の示す仮想電力網を構築し、分散するコミュニティにおける効率的な電力供給を行うとともに、災害発生時の継続的な電力供給を実現することができる。コアとなる技術である Physical Peer to Peer (PP2P) 電力融通と自律分散制御を紹介する。

Physical Peer to Peer (PP2P) 電力融通
この技術の特徴は定電流制御によりバッテリー間での定量の電力融通を行い、一定のルールに従いバッテリー間の電力バランスを調整することである。電圧制御では難しかった特定ユーザ（バッテ

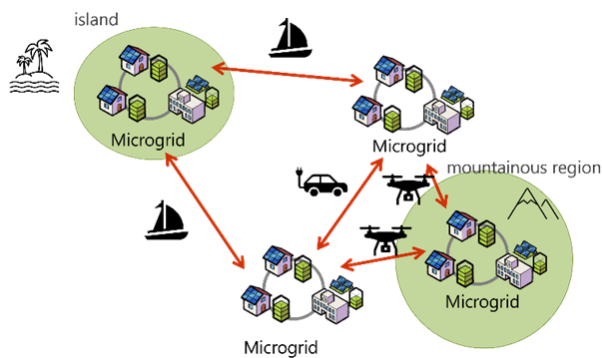


図1 OES による仮想電力網
Fig.1 Virtual power grid with OES

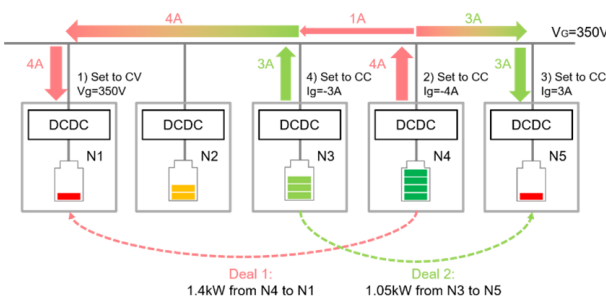


図2 PP2P 電力融通
Fig.2 PP2P energy exchange

リー) 間での定量の電力融通を複数同時に実施することが可能となり、必要な電力量と電力価格を条件としたユーザ間の PP2P 電力取引を実現することができる。

自律分散協調制御：APIS (Autonomous Power Interchange System)

各バッテリーシステムに同一機能を持つソフトウェアを設置し、ソフトウェアが各バッテリーシステムの取引条件（時間帯、電力量、電力価格など）に合わせた電力融通を実施する。バッテリーシステムごとの自由な電力融通の条件設定が可能で、また条件を時間帯ごとのダイナミックに変えることができる柔軟な電力取引システムである。

本技術はオープンソースとして公開されており、下記リンクより入手することが可能である。

<https://github.com/SonyCSL/APIS>

2.3 行動変容を促す仕組み：Navigation of Active Involvement / Behavioral Change

激甚化する気候変動やパンデミックの影響によりエネルギーや食糧の自立や、自立・分散型の自然と共生するライフスタイルに対する注目が高まっている¹⁵⁾。

従来、電気はコンセントに家電をさせばいくらでも自由に使うことができたが、その裏では火力発電所がたくさんの化石燃料を燃やしながら電気を供給している。太陽光パネルやバッテリーを使い自分で電気を作り、使い、コミュニティの中で融通しあうことで、化石燃料の使用量を減らし環境に優しい電気の使い方ができる。OXS プロジェクトでは、エネルギーを可視化し使い方を体感できる OXS Energy Cart やサステナブルな行動の選択肢を提供し、その行動を継続する動機を高めるアプリケーションの活用やイベントを通して、自然と共生し心を豊かにするエネルギーの使い方のナビゲーションを目指している。

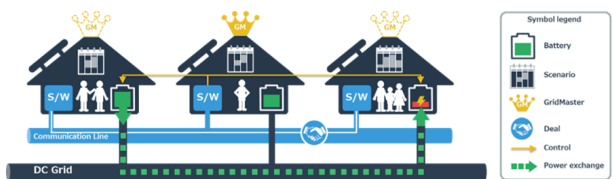


図3 自律分散協調制御
Fig.3 Autonomous Power Interchange System

3 実証事例：マイクログリッドによる再生可能エネルギー供給（沖縄）

沖縄科学技術大学院大学（OIST）にある19戸の教員用住宅に設置されたバッテリーシステムにはAPISの技術を活用したエネルギーシステムが搭載されており、2014年から2020年まで実証してきた。このOISTのエネルギーシステムでは、電気設備点検におけるAC電力供給停止時においても、約10時間にわたり継続的な電力供給を実現している。また、電力供給の1日最大60.8%、年間平均33.3%を再生可能エネルギーで供給している。（※2017年：ソニーCSL測定データより）（本実証実験は沖縄県“亜熱帯・島しょ型エネルギー基盤技術研究補助事業”の採択を受け、沖縄科学技術大学院大学（OIST）、株式会社沖創工、ソニービジネスオペレーションズ株式会社との共同事業体で実施）

図4にOIST実証実験の様子、図5にリアルタイムモニタリングの様子を示す。OISTで取得したデータをサーバにアップロードし、リアルタイムモニタリングとして稼働状況を監視、また異常の通知機能を用いて5年間にわたり共同事業体により本設備を運用してきた。



図4 OIST 実証実験の様子
Fig. 4 OIST Demonstration Experiment

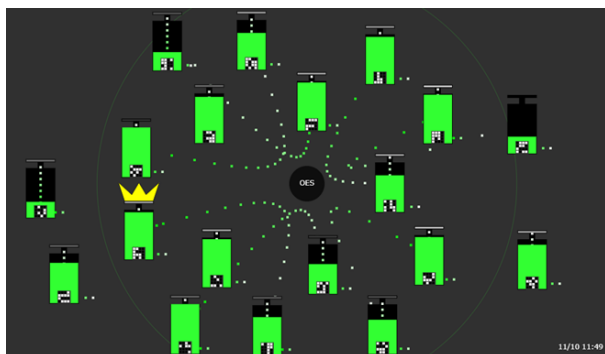


図5 リアルタイムモニタリング
Fig. 5 Real time monitoring

2015年8月には落雷により一部機器が被害を受けたが、通信が維持されている住宅では電力融通を継続することができた。図6が雷発生前の状況で19戸の住宅が表示され、点線で結ばれている住宅間では電力融通が実施されている。その後、落雷により通信障害が発生し図7のように6戸の住宅しか通信できない状況になったが、点線で示す住宅間では引き続き電力融通が実施されていることが分かる。また、その他の13戸の住宅もバッテリーによるスタンドアロンでの最低限の電力供給は継続しており、災害に対するレジリエンスを実証することができた。

OISTの教員用住宅では、電力融通の機能検証および従来の電力系統とOESの連動を検証する目的もあり、設備容量を1戸あたり太陽光発電（PV）3.5kW、バッテリー4.8kWhと小容量に設定していたが、設備容量を増強することで、より多くの再生可能エネルギーを導入することも可能である。

下記に設備容量を増強した場合のシミュレーション結果を示す。各住宅のPV、バッテリー容量を変化させた場合のコミュニティ自給率を計算してい

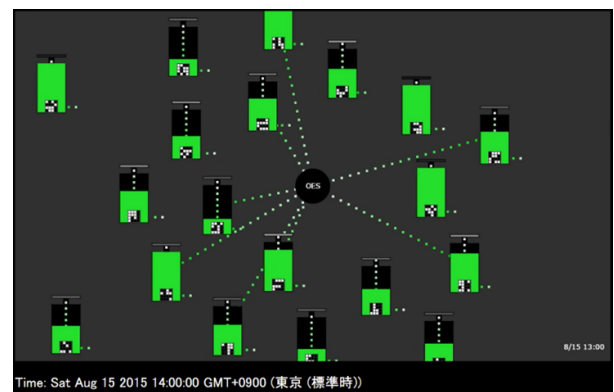


図6 雷発生前の様子
Fig. 6 Before lightning

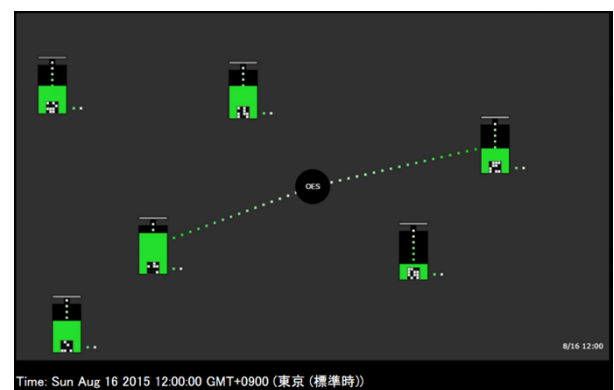


図7 雷発生後の様子
Fig. 7 After lightning

る。消費電力データは OIST の 19 戸の住宅の 1 年分の消費電力データ，発電電力データは OIST の 1 年分の日射量データから算出している。

コミュニティ自給率 $SSR_{community}$ は下記のように算出している。

$$SSR_{community} = \frac{\sum_{n=1}^{19} E_{Demand,n} - \sum_{n=1}^{19} E_{AC,in,n}}{\sum_{n=1}^{19} E_{Demand,n}}$$

E_{Demand} は各住宅の年間消費電力， $E_{AC,in}$ は各住宅の年間の系統（外部）からの供給電力量である。図 8, 9 はそれぞれ PV 7.5kW, 10kW でのコミュニティ自給率と各住宅のバッテリー容量の関係をプロットしている。実線が電力融通あり，点線が電力融通なしの場合である。いずれのグラフでも点線に比べて実線（電力融通あり）が縦軸の値つまりバッテリー容量が小さく，特にグラフ右側つまり自給率が高い領域に行くほどその差が大きいことが分かる。

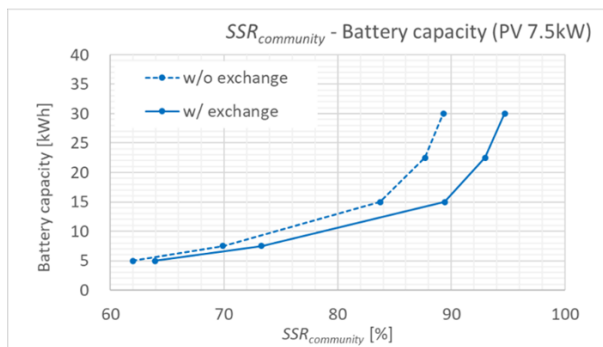


図 8 PV7.5kW での自給率とバッテリー容量

Fig. 8 Self-sufficiency rate and battery capacity at 7.5 kW PV

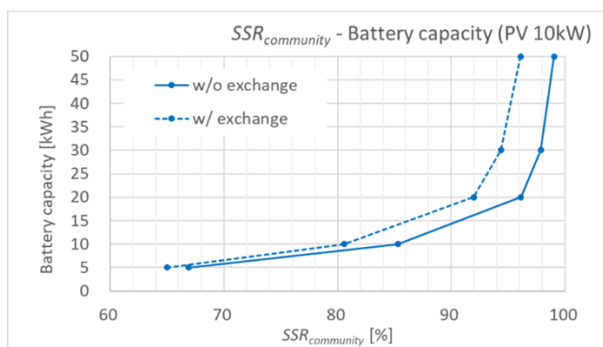


図 9 PV 10kW での自給率とバッテリー容量

Fig. 9 Self-sufficiency rate and battery capacity at 10 kW PV

4 今後の展望

4.1 仮想電力網の構築

我々は沖縄で開発した電力相互融通ソフトウェア APIS を拡張し，ECHONET-lite を介してパワコン一体型のバッテリーシステム（定置型バッテリー）や電気自動車（EV）双方向充電器と接続し，定置型バッテリーと EV 間での電力融通の実験を実施した（図 10, 11）。図 11 では EV のバッテリーから 3 つの定置型バッテリーに電力融通を行っている。拡張した電力相互融通ソフトウェアは，定置型バッテリーおよび EV のバッテリーの残容量を確認し，予め設定しているターゲットの残容量に対しての過不足が生じた分だけの電力融通を実施している。また，1 台の EV から 3 台の定置型バッテリーへの 1 対多の電力融通を実現できていることも特徴である。

EV を活用し，人の移動と共に電力を運搬し，移動先でその電力を利用することで，系統混雑等の理由により電力系統への接続が難しいような地域でも再生可能エネルギーの導入を促進する，また災害等により電力網に障害が発生した場合の電力の供給を行うといったことが可能になる。既存の電力網と移動体による仮想電力網を組み合わせることにより，発電や需要，災害発生等の状況に合わせて柔軟に電力供給を行う，効率的かつレジリエンスな電力網の



図 10 拡張した電力相互融通ソフトウェアの実験施設

Fig. 10 Experiment of extended energy exchange software

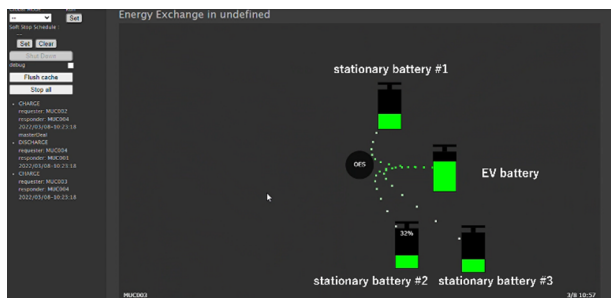


図 11 EV と定置型バッテリー間での電力融通

Fig. 11 Energy exchange between EV and stationary batteries

構築を目指し電力相互融通ソフトウェアの改良を続けている。

4.2 行動変容を促す仕組みに関する実証

我々は需要家の行動変容を促すためには3つの要素が重要と考えている。環境に優しい選択肢である「手段」、その手段を選択する理由となる「動機」、そして一時的でなく継続的に行動を実施する「インテグラ」の掛け算により行動変容の効果が生まれる。特に、行動変容に対する動機を高めるための代替手段となる新たな選択肢の提供について幾つかの実証を行っている。



OXS Energy Cart

OXS Energy Cart は再生可能エネルギーが発電する電気を自分で使い、エネルギーに対するリテラシーを向上させるためのコンセプトモデルである。OXS Energy Cart に搭載されたバッテリーを、太陽光発電やマイクロ水力発電など地域で使いやすい発電源に接続し効率的に充電する。そして、調理器具や通信機器、照明器具など負荷の優先度に応じた電力配分の制御により、再生可能エネルギーを効率的に使用する。

写真にあるプロトタイプでは太陽光発電 200W バッテリー 500Wh を積んでおり、晴れの日なら満充電 + α の発電が見込める。これは、お湯を沸かして、小型冷蔵庫を稼働させ、通信を行うことができるぐらいの電力となる。エネルギーの可視化において、画面上に流れるエネルギーフローでなく、実物としてのエネルギーシステムのサイズ感を体感することが可能である。



図 12 OXS Energy Cart
Fig. 12 OXS Energy Cart

食 CFP (Carbon FootPrint) アプリ

食 CFP アプリは、人々の今の行動がどの程度環境負荷を与えているのかを可視化するためのアプリである。個人が排出する CO₂ の約 2 割が食に関連していると言われて¹⁶⁾。自身が食べた食の CO₂ の排出量や摂取カロリーを知ることにより、地球にも、自分にも優しい食について考えるきっかけを作るのが食 CFP アプリになる。

サステナブルな夜市

2023 年 6 月に徳島県三好市においてサステナブルな夜市の実証を行った。イケダ夜市と呼ばれる地元の事業者が運営しているイベントにおいて前述の実験施設で発電した再生可能エネルギーをポータブルバッテリーを用いて一部の屋台に供給している。また、最も電力需要の多い夕方にイベントを開催し住民が外出することにより家庭の電力需要を削減することを目指している。住民は、友人との交流や、飲食といった内発的動機によりイベントに参加する

CO2算出

この料理で摂取できるカロリーは**412**[kcal]です
この料理を作るのに排出されるCO₂は **629.3** [g-CO₂] です
うち、食材が **420.1** [g-CO₂]、調理が **209.2** [g-CO₂] です
🌳これは木0.045本が1年に取り込む量と同等です🌳

算出結果を保存する

図 13 食 CFP アプリ
Fig. 13 Food CFP application



図 14 サステナブルな夜市
Fig. 14 Sustainable night market

と、結果的にサステナビリティにも貢献することができる、という仕掛けになっている。このように間接的に人々の行動変容をナビゲーションする動機付けについても今後重要なトピックになると考えている。

再生可能エネルギーは設置や運用の容易性により、電線が引かれていない場所でも手軽に電気を作り出すことができる。OXS プロジェクトチームのメンバーは、再生可能エネルギーを活用する新たな場所での人々の活動や生活を探求しナビゲーションすることで、エネルギーのトリレンマの解消、そしてプラネタリー・バウンダリー¹⁷⁾の変容に人間活動がポジティブな影響を与える社会構築を目指している。

謝辞

沖縄での実証実験は沖縄県“亜熱帯・島しょ型エネルギー基盤技術研究補助事業”に採択頂きました。同事業体で実施した沖縄科学技術大学院大学(OIST)、株式会社沖創工、ソニービジネスオペレーションズ株式会社に感謝致します。またサステナブルな夜市での実証を共同実施した株式会社エナリスに感謝致します。

参考文献

- Mora, C., Frazier, A. G., Longman, R. J. et al., “The projected timing of climate departure from recent variability,” *Nature*, 502, 183-187, 2013.
- Quéré, C. L., Jackson, R. B., Jones, M. W. et al., “Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement,” *Nature Climate Change*, vol. 10, 647-653, Jul. 2020.
- Forster, P.M., Forster, H.L., Evans, M.J. et al., “Current and future global climate impacts resulting from COVID-19,” *Nature Climate Change*, vol. 10, 913-919, Aug. 2020.
- “Coronavirus : Green recovery ‘could prevent 0.3C’ of warming by 2050” (accessed Aug. 29 2023), <https://www.carbonbrief.org/coronavirus-green-recovery-could-prevent-0-3c-of-warming-by-2050>
- 経済産業省 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略 (accessed Aug. 29 2023), <https://www.meti.go.jp/press/2020/12/20201225012/20201225012-2.pdf>
- Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, (accessed Aug. 29 2023), <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- Ryu Koide et al., “Exploring carbon footprint reduction pathways through urban lifestyle changes : a practical approach applied to Japanese cities”, *Environ. Res. Lett.* 16 084001, July 2021.
- Lovell, R., Husk, K., Cooper, C. et al., “Understanding how environmental enhancement and conservation activities may benefit health and wellbeing : a systematic review.”, *BMC Public Health* 15, 864, 2015.
- Leonie A. Venhoeven, Jan Willem Bolderdijk, Linda Steg, “Why going green feels good”, *Journal of Environmental Psychology*, Volume 71, 2020.
- World Energy Trilemma Index | World Energy Council (accessed Aug. 29 2023), <https://www.worldenergy.org/transition-toolkit/world-energy-trilemma-index>
- A. Werth, N. Kitamura, and K. Tanaka, “Conceptual Study for Open Energy Systems : Distributed Energy Network Using Interconnected DC Nanogrids”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, pp. 1621-1630, Jul. 2015.
- A. Werth, A. Andre, D. Kawamoto, T. Morita, S. Tajima, M. Tokoro, D. Yanagidaira, and K. Tanaka, “Peer-to-peer Control System for DC Microgrids,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, pp. 1-8, 2016.
- OES - 沖縄科学技術大学院大学 (OIST) でのプラットフォームの構築 (accessed Aug. 29 2023), <https://www.sonycs.co.jp/tokyo/289/>
- UMABA Project, (accessed Aug. 29 2023), https://www.sonycs.co.jp/category_sp/

openenergysystems/12193/

- 15) 環境省_令和4年版 環境・循環型社会・生物多様性白書 状況第1部第3章第1節 地域循環共生圏の更なる発展 (env.go.jp) (accessed Aug. 29 2023), <https://www.env.go.jp/policy/hakusyo/r04/html/hj22010301.html>
- 16) 1.5°C ライフスタイル (accessed Aug. 29 2023), <https://www.iges.or.jp/jp/pub/15-lifestyles/ja>
- 17) W. Steffen et al., "Planetary boundaries : Guiding human development on a changing planet." Science Vol 347, Issue 6223, Jan. 2015

著者略歴



川本 大輔 (カワモト ダイスケ)
2002年慶應義塾大学理工学研究科卒業。2014年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所にてマイクログリッドの開発やコミュニティでの行動変容に関する研究に従事。



地主 光太郎 (ジヌシ コウタロウ)
1991年ソニー株式会社入社。2019年株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所に異動。以来再生可能エネルギー分野の研究成果の事業開拓に携わる。



田中 裕崇 (タナカ ヒロタカ)
2010年大阪大学大学院工学研究科卒業。2017年よりソニーグループにてロボティクス研究と省エネルギーシステムの開発に従事。主にハードウェア設計と特許出願を担当。並行して2022年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所で OXS Energy Cart の開発に携わる。



矢部 和宏 (ヤベ カズヒロ)
1992年富山大学工学部電子工学科卒業。業務用アミューズメント機器開発業務、デジタルイメージング機器開発業務を経験。2020年より株式会社ソニー・インタラクティブエンタテインメントに所属しソフトウェアの開発業務に従事。並行して2023年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所で OXS Energy Cart の開発に携わる。



望月 理来 (モチヅキ リク)
2020年慶應義塾大学環境情報学部環境情報学科入学。コンピュータサイエンス (暗号技術、分散システム、ブロックチェーン) に関心。2022年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所で Research Assistant として環境問題に係わる行動変容の研究に従事。