

1. 調査の概要と結果の総括

テーマ

『欧州の環境先進地域における再エネ工学技術実地化のための調査研究』

再生可能エネルギー（以下再エネ）の利用拡大は、持続可能な社会の形成に向けた今日の世界的趨勢である。建築・都市工学分野には再エネを利用した自立型エネルギーシステムの構築が要請されて久しいが、その実現を集中型電力系統へ依存する各国の現状から想像するのは未だ難しい。

そこで本テーマでは、ドイツ南部とスイス北部の都市・農村両地域でのフィールドワーク、及び研究機関でのインタビューやワークショップを通して、来るべき再エネ社会で工学技術はいかに実地化され得るか、そして実地化された技術が持続可能性を有するかを社会工学的見地から模索した。

メンバー

小松航樹（東京大学修士1年）、吉水久乃（九州大学修士1年）、谷口佳代（北海道大学学部4年）

期間

2019/09/16-09/29

調査対象地

マウンハイム（ドイツ）、フライブルク（ドイツ）、ジンゲン（ドイツ）、チューリッヒ（スイス）

研究協力機関

solarcomplex AG（ドイツ・ジンゲン）、ETH Zurich（スイス・チューリッヒ）、Empa（スイス・チューリッヒ）、Eawag（スイス・チューリッヒ）、FabLab RUC（デンマーク・ロスキレ）

調査手法

- ・インタビュー→ 研究機関を訪問し、研究者に研究内容やその将来のビジョン、技術を実地化するにあたっての課題等を尋ねる
- ・フィールドワーク→ 再エネ導入の先進地域で導入技術の使い方を観察し、また現地住民に生活の所感を尋ねる
- ・ワークショップ→ デンマーク、ロスキレ大学において、工学技術実地化のためのアイデアを募集し、それらを基に教員や学生と議論を行う

リサーチクエスチョンとその回答

①【都市が抱える膨大なエネルギー需要を、如何に再エネによって賄うか？】

漸進的に既存市街地のエコディストリクト化を進める。そのためには、オフグリッド化を含む多様な手段が提示されることや、住民が計画策定に参加し、その計画を継続的に実行していくためのコミットメントが条件となる。計画は、参加者が少ない場合、継ぎはぎ状の適用が予想されるが、その場合後続の参加者を拒まないコミュニティを形成し、また柔軟性のあるシステムの設計も重要となる。

②【2000ワット社会モデル※の目標設定は、住民に意識的イノベーションを仕掛けられるか？】

※2000ワット社会モデルとは：一次エネルギーの消費率を1人当たり2000ワットに抑えた社会

数値目標が行動に影響を与えるのは、明確なインセンティブ（例えば補助金の給付など）が与えられる場合に限られるようだ。確証は得られなかったが、関与の感覚（都市計画への住民参加や緑環境の創造、デジタル・ファブリケーションを用いたセルフビルド）がエネルギー消費を意識化したライフスタイルの創出につながるのではないかと、という仮説を得た。

上記以外に調査から得た知見

再エネ技術の実地化には

- （一）ビジネスマン・スポーツマンの存在が重要である。
 - （二）手法の一般化が有効である。
- 次章から詳細を解説する。

謝辞

本研究を行うにあたり、solarcomplex AG、ETH Zurich、Empa、Eawag、Fablab RUCの皆様にご多大なご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

2. ヴォーバン 「エネルギー問題に関心のある住民が、当事者として実現」

ドイツ南部に位置するバーデン＝ヴュルテンベルク州、バイエルン自由州はフライブルクやミュンヘンなどの環境都市を抱え、先進的な環境政策で知られる。背景にあるのは70年代の原子力発電所建設に反対する草の根市民運動であった。その流れを汲み、積極的な住民参加の下建設されたのが、フライブルク郊外の新興住宅地「エコディストリクト」ヴォーバンである。

地区の入り口には、PV設置や窓の工夫などによりZEBを実現した「Sonnenschiff」が建つ。(Rolf Disch設計。商業・オフィスの複合施設。) また、地区を出て大通りを挟んだブドウ畑の方には、プラスエネルギーハウスの「Heliotrope」が立地する。(写真2-1) 地区は歩者分離が徹底しており、大変静かだ。集合住宅の各敷地には緑のスペースがあり、住人の管理する木や藪が歩道にまではみ出すように生い茂る。歩者分離が安全性を担保するだけでなく、家の周辺をより「自分のもの」として感じられる環境を作っていると感じた。(写真2-2、3)



2.1. 「エコディストリクト」はエネルギーの使用を減らすか？ 居住地自己選択効果と政策

都市計画によってエコロジカル・フットプリントの減少を目指すのが「エコディストリクト」のコンセプトである。ヴォーバンでは、ウォークラブルな道路構成、高性能な住宅団地、PVによるエネルギー生産など都市計画的な要素に加え、住民のブリコラージュが成し得たであろう緑豊かなマイクロ環境が一つのコンセプトの下統合され、環境への配慮と共に地区環境の住みよさを伝えている。技術と人々の暮らしが相互に良い影響を及ぼし合う好例だろう。「ヴォーバンの住民として、環境に対し責任を持っています」と話して下さったのが、第一世代の居住者に当たる高齢男性である(写真2.1-1)。

ここで、「エコディストリクト」はエネルギー使用を減少させるか、という将来の研究課題について留意すべき点を記しておく。問の答えはヴォーバンの現状を見れば自明に思えるが、実はそうではない。なぜなら、もし現住民の多くが元来高いエコ意識を持ち、その選好に基づいてヴォーバンを居住地に選択したのだとすれば、エネルギー使用量の少なさと「エコディストリクト」の間に因果関係を認めることができない可能性がある(居住地自己選択効果)からである。

上の問はまた、「エコディストリクト」というコンセプトの持続可能性も問うている。現在ヴォーバン地区は建設から約二十年が経過し、第一世代の居住者が世代交代を始め、初期の都市計画策定に関わっていない移住者の数は増している。エコディストリクトは住民に持続可能な変化を与えるか？ 何が技術と人々の暮らしの良い関係を生むのか？ 「エコディストリクト」の真価が問われている。



写真2-1
地区の近隣に立地するプラスエネルギー個人住宅、Heliotrope Rolf Disch設計



写真2-2
住民が手入れする緑にあふれる集合住宅間の通路



写真2-3
道端でシェアされる古着・靴



写真2.1-1
男性の娘夫婦はヴォーバン建設時の住民運動に関わっており、彼らに呼び寄せられて居住をきめたという。

2.2 地区の更新と住民のコミュニティへの寄与

前節で述べたように、ヴォーバン地区は1997年の着工から約20年、完成から約10年が経つ。今後の地区の更新に際し、見学を踏まえて考えうる課題を以下に考察した。

1. 【技術の更新】

太陽光パネルなどの技術は、耐用年数とともに技術の陳腐化を考慮する必要がある。エコディストリクトとしては通常の建物・設備のメンテナンスのみならず、適切なタイミングで技術の更新を行っていく必要がある。ヴォーバンの住宅は全て集合住宅であることから、どのように住民合意を形成するのか、適切なタイミングとはいつか、またどのステークホルダーが主導権を握るのかなどが、今後課題となるのではないかと考える。

2. 【人の更新】

現在のヴォーバンの居住者には、比較的富裕な子育て世代が非常に多いと感じた。（写真2.2-1、2.2-2）一時に開発されたニュータウン同様、同地区でも住人の更新時期はまとめてやってくるだろう。その中で、前節で述べたような「エコディストリクト」コンセプトの持続や、「積極的な住民参加」という地区特性・気風自体の継承が課題となるのではないかと考える。

1と2の課題が10年ほどの間に同時に襲ってくるのではないかと私たちは予想しており、地区がどのように対処していくのかを今後も注視したい。

2.3 日本でのエコディストリクト実現に対する一考察

ヴォーバンの例は高級住宅地であるが、エコディストリクトのような地区を日本でも実現する可能性として、それとは異なるアプローチを考えてみた。

子育て世代をメインターゲットとした公営住宅団地をモデル地区として整備することが考えられないだろうか。住人にとっては「電気代が浮く」「子どもの環境教育になる」などの魅力があり、かつ住み替えが起きやすい条件であるため、持続可能性があると考えられる。



写真2.2-1 地区内には、このように自転車の後ろに子どもを載せるカートや車をつなげて走っている親が大勢いる。



写真2.2-2 歩者分離により、小さい子供も道でのびのびと遊べる。歩道にはチョークの落書きがあちこちに見られた。

3. ジンゲン「手法の一般化」

前章ではヴォーバンを例に、新しい「エコディストリクト」の事例を見たが、本章ではドイツ南部の地方都市、ジンゲンにおける既存市街地のオフグリッド化事例を取り上げる。ジンゲンの事例はドイツ国内では決して特殊な事例ではないが、一般化された手法の強みを見ることが出来た。

3.1. オフグリッドはグリッド上に存在する

ジンゲンのある住宅団地では、ウッドチップを利用し熱供給システムのオフグリッド化を達成している（写真3.1-1、2、3、4）。前述の通り、これは決して特殊な事例ではない。ドイツではエネルギー関連会社が地域ごとに存在し、ごく一般的に地域のオフグリッド化需要に応じているという。多くの企業が信頼に足るノウハウを共有しているからこそ、実現し得た状況だろう。

ところで、一口にオフグリッドと言っても、その定義中にシステムがどの程度の自律性を有するかを規定する要件はない。従ってオフグリッドとは、住戸単体から地域全体に至るまで様々なレベルのシステムを含み得る概念である。

当該の熱供給システムも、ボイラーから各住戸に熱を供給する部分を取り出せば完全に自律的であるが、燃料となるウッドチップの輸送を含めれば道路網というグリッドを利用しており、完全に自律的とは言えない。いかなるオフグリッドシステムも、多少なりグリッドとの接続点を持つ。特に事例のような既存市街地のオフグリッド化は、元々あるグリッド上でなければ成立し得ぬものと見て間違いはないだろう。

既存市街地におけるオフグリッドシステムの評価は、どの程度自律的か、というよりも、グリッドとの関係性を含む広範なシステムの中で、どの程度効率的か・環境負荷は低いか・安定的かといった観点がより重要である。

3.2. 既存市街地でオフグリッド化を実現する工夫

既存市街地のオフグリッド化には、住民間の合意形成が必要になる等、新たな住宅団地の建設とは異なる種類のコストが伴う。そこでコストを少なく抑える、または同じコストでも、システムの参加者が得られる利得を上げる工夫が欠かせない。

以下に示すのはジンゲンで得られた知見である。

1. システムの柔軟性確保

始めは限られた住民が参加する「パッチーな」オフグリッド化からスタートしても、新たな参加者に対応できるように設備容量を設定したり、コストの適切な負担体系や住民のコミュニティを構築することで、システムに柔軟性を与える。

2. 地域資源の利用

地域の経済循環を促すことで長期的なリターンが見込まれる

3. レトロフィット

オフグリッド化と同時に断熱改修などによって建物の性能を上げる。初期投資は大きくなるが、長期的には回収可能であり、住環境の改善など利得も大きい。



写真3.1-1 住宅団地のオフグリッド化を手掛けた企業の方による説明



写真3.1-2 当該住宅団地のボイラー設備



写真3.1-3、4 当該住宅団地のウッドチップ設備

4. マウエンハイム「コミュニティと外部機関の協働」

ジンゲンの北部に位置する人口約500人の集落・マウエンハイムは、バイオマス発電や太陽光発電を利用して集落の電力需要の約9倍を生産することから、「エネルギー自立村」や「バイオエネルギー村」と呼ばれる。集落に元々存在していた共助的なコミュニティが、外部機関との協働によって成し遂げた農村のオフグリッド事例と言える。

今回私たちは、発電施設と地域熱供給網の整備を行ったsolarcomplex社でお話を伺った。

4.1. 温熱及び電力供給に関する要素技術

マウエンハイムで用いられているオフグリッド化のための要素技術を紹介する。

- ・写真4.1.1：温水パイプ。地中に敷設され、チップボイラーとバイオガス施設から各戸に熱源水を供給する。集落内の熱源水入口温度差は最大で4度程度
- ・写真4.1.2：バイオガス・コジェネ施設。バイオマスから得られたガスを用いて、電気と熱の生産を行う。熱の生産にはチップボイラーも並行して用いられる。
- ・写真4.1.3：バイオマスは肥料としても利用される。
- ・写真4.1.4：各家庭の太陽光発電設備。設置は家主の意向によるもの。



写真4.1-1



写真4.1-2



写真4.1-3



写真4.1-4



マウエンハイム。集落の南西部にあるのがバイオマス用施設

4.2. 外部機関の介入が住民の意識醸成に果たす役割

マウエンハイムにおけるsolarcomplex社の介入には大きく3つのステップがあった。

- 1) 集落で農業を営む有志数名がバイオマス発電設備の導入に関心を持ち、地域のエネルギー関連会社solarcomplex社に相談する。
- 2) Solarcomplex社は「バイオガス設備を導入するならば、発電だけでなく再エネ熱による地域熱供給網をしくべき」と提言し、集落全体での協議が始まった。経済性確保のためには一定人数以上の同意を得る必要があったため、交渉がしばらく続いた。
- 3) 協議の結果、地域熱供給網の導入が決定し、solarcomplex社により集落の道路での埋設工事とバイオガスプラントの建設が行われた。

マウエンハイムのエネルギー自立村の構想は、もともとは有志数名の意欲に端を発したものであった。しかし上記の2)、3)の過程で外部機関が介入して来たことにより、住民の環境に対する意識や「エネルギーを自分事」として考える意識が高まったと考えられる。その結果、自主的に太陽光パネルを導入する世帯が集落内に多くなり、発電により「稼げる」までの規模となったと考えられる。ボトムアップ・アプローチにとって、相談役としての外部機関の存在は重要である。



写真4.2-1 solarcomplex社の方に解説していただいた

5. チューリッヒ「研究機関と研究者が果たす役割」

エネルギー分野の研究で国際的中心と目されるチューリッヒで、ETHZを始めとする研究機関の訪問、及び研究者へのインタビューを行った。

5.1. NEST

建設・エネルギー分野における新技術・新製品の早期市場投入の難しさに鑑み設立されたのが、モジュラー研究棟「NEST (Next Evolution in Sustainable Building Technologies)」である(写真5.1.1)。eawag(スイス連邦水科学技術研究所)及びEmpa(スイス連邦材料試験研究所)の諸研究室が、その有する技術を実際の建物に適應する形で入居しており、施設見学にも寛容な為、研究技術のショールームとしての役割も担っている。インタビューに協力していただいたのは、何らかの形でNESTの技術実地化実験に関わっている研究者の方々である。

5.2. 水の分散型システム

NESTには、再生可能な資源として水を捉えた分散型システムWaterHubが導入され、水の浄化、リユース、分離した汚物の燃料・肥料化が行われている。WaterHubは建物単体での利用から、地区レベルでの利用にも対応できるよう研究されている。

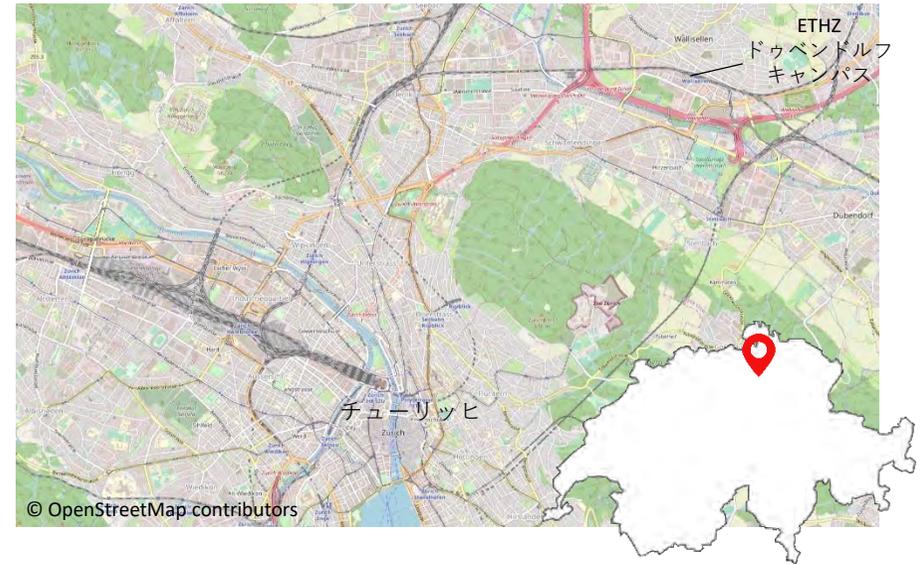
5.3. デジタル・ファブリケーションの意義

デジタル・ファブリケーションは、CNCマシン(写真5.3.1)や3Dプリンタ(写真5.3.2)等、新たなツールを利用した次世代のものづくりである。NESTモジュールの一つDFAB HOUSE(写真5.3.3)は、デジタル・ファブリケーションを利用した新工法で建設されたスマートハウスである。なぜデジタル・ファブリケーションを利用するのか? 工事の効率化やデザインの革新など、その答えは多様だが、CAADの研究员であるHischier博士が挙げたのは、省エネへの寄与であった。未だ試行錯誤の段階ではあるが、デジタル・ファブリケーションの可能性は大きい。

5.4. シミュレーションとその実践

CAADのSchlueter博士やHischier博士は、建築単体や地域単位のオフグリッド化や省エネ化に対し、コンピュータシミュレーションを使ったアプローチも用いている。こうしたシミュレーションの実現についてインタビューしたところ、研究者という立場では大きなハードルがあることが分かった。

写真5.4.1に示した壁面太陽光パネルの例を挙げる。このパネルは壁面を利用できるため、設置に広い屋上空間を必要としない。よって既存市街地への適用が有効と考えられているが、効率的な利用には、日当たりの良い場所壁面を選ぶ必要がある。コンピューター上の街区モデルから、どのような設置形態が効率的かをシミュレーションできるが、それを実際の所有者がいる建物で検証することは研究者の立場では難しい。技術の陳腐化のスピードを考えると、シミュレーションと並走するように、それを実現化するためのビジネスモデルを立案していくような仕組みが必要なのではないかと感じた。



NESTはチューリッヒ北東部のETHZドゥベンドルフ・キャンパス内に位置する



写真5.2-1 EawagのDoll女史にWaterHubの説明を受ける



写真5.4-1 Hischier博士に壁面太陽光パネルの説明を受ける

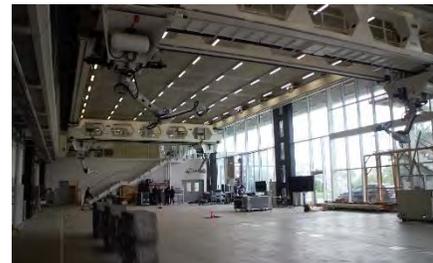


写真5.3-1 建設用CNC



写真5.3-2 3Dプリンタによるプロトタイプング

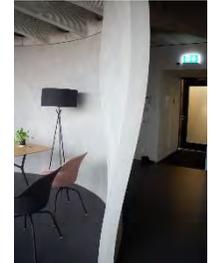


写真5.3-3 DFAB HOUSE内部曲面壁の施工例

5.5. 何が分散化を加速したか？

学術論文やメディアから、欧州でエネルギー分散化がひと昔前に比べ加速していることを知ることが出来る。では、何が分散化に関する関心を引き起こしたのか？ 「東日本大震災に伴う原発事故が今日のトレンドが生まれる契機となった」とEmpaのOreihounig博士は語った。クリーンエネルギー推進の旗手であった原子力の安全性が揺らぎ、いち早く代替技術を広く実地化させる要請が生まれた。その結果、エネルギー分散化トレンドの加速に至った、というわけである。（この説明が行き過ぎた単純化であることは理解しているが、）欧州の分散化研究は、環境保護という理念に、かなり純粋に立脚しているという印象を強く受ける。

Oreihounig博士は以下のように続ける。「分散化はレジリエンスを強化しない」「その意味で、現状における最良の選択肢はない」再生可能エネルギーを利用した分散化システムは安定性に問題が多いことが知られている。「単一の方法に頼りすぎるべきではない」それは、とりもなおさず「分散と集中のエネルギーシステムを併用していく」という基本方針を提示する。

5.6. Zernez2000の経験

EmpaのOreihounig博士は、道半ばで計画が凍結されているZernez2020というプロジェクトで、研究に参加していた経験がある。

Zernez2020：スイスのZernezという山間部の町が、エネルギー自立村を目指したプロジェクト。具体的には「2020年までに町での化石燃料使用を廃止し、地元で生産可能な再エネに漸次移行する」ことを目標としていた。町からETHに協力を要請し、研究チームによる実地調査や建築家チームによる住民ワークショップを続けてきたが、首長交代を機に頓挫した。研究結果では、費用負担の大きさから、2050年までの実現が現実的との提言がなされていた。

計画頓挫の最大の理由は、「研究の結果示された各家庭の多大な費用負担や計画スパンの長さ住民の気持ちが圧倒され、計画を進めていくインセンティブが失われた」ことだとOreihounig博士は述べる。

4章のドイツ・マウエンハイム村との単純比較はできないが、以下の点が結果の差を生んだ可能性があると考えた。

- ・マウエンハイム村では個人のイニシアチブが出発点だった（ボトムアップ）のに対し、Zernezは町としての目標が出発点だった（トップダウン）。
- ・ワークショップ開催・相談窓口であるenergy officeの設置等を通じて住民の教育を図ったが、最終的にトップダウンとボトムアップがうまく噛み合わず、個人の意欲が持続しなかった。

5.7. 研究者の果たす役割について

研究機関の強みは、（現況での）費用対効果から企業が着手しがたい技術開発を行えることである。例えば、長期間のエネルギー貯蓄の技術開発がこの状況にあり、Empaは現在、研究のパートナー企業を探すのに大変苦慮しているという。

こうした「技術開発を通じた選択肢の提供」が研究者の役割だとOreihounig博士は考えている。一方、「（エネルギー分散化を進めたり、そのための適切な選択をしたりするには）人々への教育が重要になってくる」との話もあった。そこで今後は以下の2点が研究者の役割として重要になってくると考えた。

- ・研究者が技術に長じた者として、より積極的に住民に直接アプローチ（教育など）することでコミットメントを作っていく際の触媒的な役割を果たすこと
- ・技術者/研究者/政治家とは別に、「選択する意志を持つ人」を増やし先導していくような強い働きかけをする「リーダー」的な存在が増えること

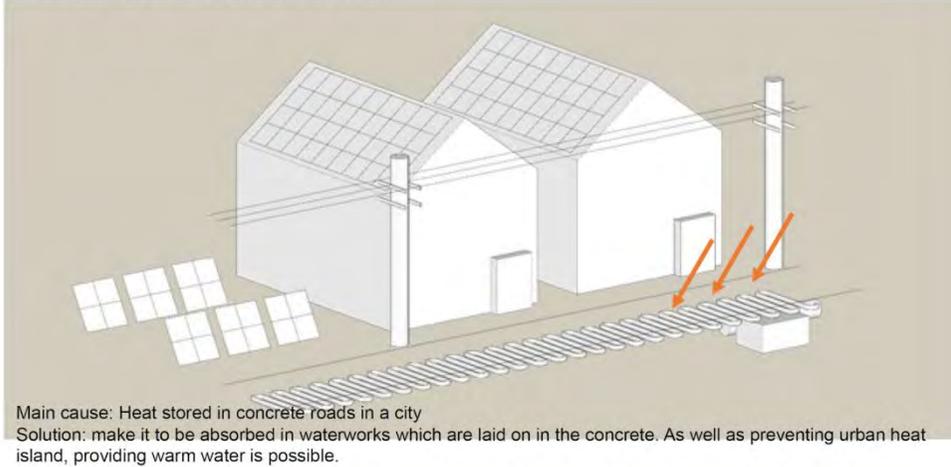


写真5.5-1 Oreihounig博士のインタビュー

6. ロスキレ

最後に、コペンハーゲン郊外に位置するロスキレ大学付設のファブラボ、FablabRUCで教員や学生との議論を通して得た再エネ利用拡大のアイデアを掲載する。ファブラボはメイカームーブメントを担う主体の一つで、市民にセルフビルドの場を提供するワークショップである。

How to Prevent Urban Heat Island?

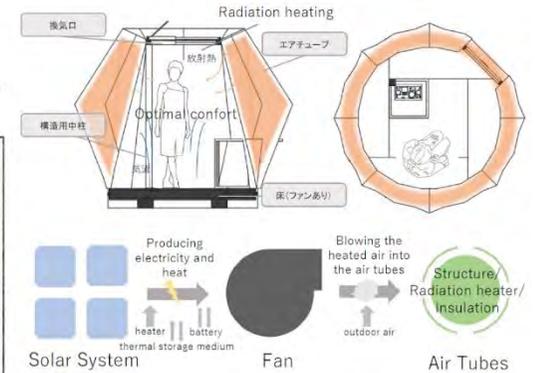


How to Prevent Heat Island

道路に蓄えられた熱エネルギーを給湯に利用しようとするアイデア。同時にヒートアイランド現象を防止する。

Mobil Tearoom Project

Mobile Space Aiming for Personal Optimal Comfort
(Optimization of indoor environment using machine learning)



ENERGY

Mobil Tearoom Project

ソーラーシステムと人工知能を使って自立的に温熱環境をコントロールする空気膜建築。個人的な空間でエネルギーを建築的に可視化することで、その消費を意識化しようとするアイデアでもある。