



ムーンショット型研究開発事業
新たな目標検討のためのビジョン策定

「マルチスケールなエネルギー収穫・貯蔵システム
による適度な分散社会の可能性に関する調査研究」
調査研究報告書

令和3年7月

目標検討チーム「Moon Village ～ HO・DO・HO・DO」

チームリーダー：能村 貴宏（北海道大学 大学院工学研究院 准教授）

サブリーダー：石井 一英（北海道大学 ロバスト農林水産工学国際連携教育拠点 代表・教授）

チームメンバー：次ページに記載

チームメンバー

吉川琢也（北海道大学 大学院工学研究院 助教）
渡部典大（北海道大学 大学院工学研究院 助教）
石川志保（北海道大学 大学院工学研究院 助教）
大沼 進（北海道大学 大学院文学研究院 教授）
田部 豊（北海道大学 大学院工学研究院 教授）
三上直之（北海道大学 高等教育機構／理学研究院 准教授）
奥本素子（北海道大学 高等教育機構 CoSTEP 准教授）
高橋尋子（古河電気工業株式会社 研究開発本部企画部 イノベーション創出部）
入澤拓也（エコモット株式会社 代表取締役）
高内 章（Strategic Business Insights, Inc. Vice President）
Muhamad Afif Faiq（北海道大学 大学院工学研究院 博士後期課程 3 年）
Faisal Bin Ariffin（北海道大学 大学院工学研究院 博士後期課程 3 年）
Ade Kurniawan（北海道大学 大学院工学研究院 非常勤研究員）
トウ ガイキン（北海道大学 大学院工学研究院 博士後期課程 3 年）
山本佳世子（電気通信大学 大学院情報理工学研究科 教授）
西部 忠（専修大学 経済学部 教授）
谷田部千理（農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 主査）
佐竹輝洋（札幌市 環境局 環境都市推進部 環境計画課 推進係長）
堂屋敷誠（北海道石狩市 企画経済部 企業連携推進課 課長 ）
山本敏夫（北海道下川町森林商工振興課 バイオマス産業戦略室 室長）

目次

I. MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案
 - 1.1 MS 目標案の名称
 - 1.2 実現したい 2050 年の社会像
2. Targets (当該 MS 目標の達成シーン。2050 年 (及び 2030 年) に何が実現しているか)
3. 当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等
 - 3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが、今必要である理由
 - 3.2 目標達成の社会的意義
 - 3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要
4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題 (科学技術的・社会的課題) や必要な取組
2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰
3. 当該目標に関連する研究開発の動向 (全体)、海外動向及び日本の強み

III. 社会像実現に向けたシナリオ

1. 挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題
2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標 (マイルストーン)、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果)
3. 目標達成に向けた国際連携の在り方
4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方
5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)
(目標達成に向けて取り組む上での倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

IV. 結論

V. 参考文献

I. 提案する MS 目標案のコンセプト

1. MS 目標案

1.1 MS 目標案の名称

2050 年までにエネルギーから自由になる

HO・DO・HO・DO の自律分散ネットワーク社会を実現

ここで、「エネルギーから自由になる」とは、人類がエネルギーを自然から必要な量を十分収穫でき、かつこのエネルギーの収穫とその利用が地球環境に影響を及ぼさないことを意味する。

申請時の MS 目標案

「マルチスケールなエネルギー収穫と貯蔵×循環による HO・DO・HO・DO の分散ネットワーク社会で第二の故郷を！」

1.2 実現したい 2050 年の社会像

HO・DO・HO・DO（ほどほど）とは、「度が過ぎず、無理をしすぎず、平等・人並みであって心地よい」という元来日本人が有する感覚であり日本の幸福につながっている。このような他者とのバランスを考慮した日本の幸福のベースには、チームワークによる分かち合いや循環という発想がある。まさに HO・DO・HO・DO とは、サステイナブル社会を実現するために必要な感覚であり、*Mottainai* に続く世界に広げていくべき誇るべき感覚である。

我々が実現したいと思う HO・DO・HO・DO の自律分散ネットワーク社会とは、エネルギーを収穫し貯蔵・輸送する高度な技術と共に「エネルギーを循環し分かち合う技術・システム」が確立した社会である。

この HO・DO・HO・DO の自律分散ネットワーク社会においては、高度蓄熱技術の開発などの技術革新により、産業分野・民生分野・交通輸送分野などあらゆる分野で飛躍的な省エネを達成し、現在の 50%のエネルギー量を自然から収穫するのみで十分な社会となる。そして収穫したエネルギーを、蓄電池、水素やアンモニア等の形態で貯蔵・輸送するのみならず、蓄熱技術をも駆使し貯蔵・輸送する。最終的には、エネルギーの量と質を考慮した熱と電気の統合・究極的なエクセルギー再生利用に基づくエネルギーネットワークを形成する。これはどのようなエネルギー形態であっても、最終的には熱利用の効率性の向上が全体

システムの効率向上に帰着するという科学的根拠に基づいている。

地域エネルギー共同体に出資し参加する利用者は、域内収穫・循環利用証明付きのエネルギーをまず選択する。域内の過不足は、他地域と融通する。さらに、自分の故郷や思い出のある地域タグのついたエネルギーを利用することも可能となるなど、風土にあった自然エネルギーの融通利用を通じて、温かさやぬくもりさえも、時空間を超えて分かち合うことができる社会となる。



図 I -1 実現したい 2050 年の社会像

「2050 年までにエネルギーから自由になる

HO・DO・HO・DO の自律分散ネットワーク社会を実現」

2. Targets（当該 MS 目標の達成シーン。2050 年（及び 2030 年）に何が実現しているか）

Target 1: 2050 年、全国にて排熱の徹底利用により究極の省エネ 50%を達成する（2020 年基準）。（2030 年：一部地域で省エネ 20%以上達成）
（排熱利用による究極の省エネ）

Target 2: 2050 年、全国にて風土に応じた再生可能エネルギーを収穫し、地域内及び地域間で分かち合いながら利用するシステムを構築し、必要なエネルギーを 100%再生可能エネルギーでまかなうことを達成する。
（2030 年：一部地域で省エネ 50%以上達成）（再エネ 100%達成）

Target 3: 2050 年に、エネルギーと情報価値の融合を達成し、様々な地域発信型の生産物やサービスに新たな価値が付加される。
（2030 年：エネルギー（グリーン）地域通貨試験導入）
（価値の内部循環と心の循環）

ここで新たな価値とは、エネルギーのトレーサビリティやタグ付け（いつ、どこで、誰が収穫、貯蔵期間、品質保証、リサイクルマークなど）を意味し、遠く離れた場所からも情報技術を通じて価値交換できることを意味している。

図I-2 に各 Target の位置づけを示した。

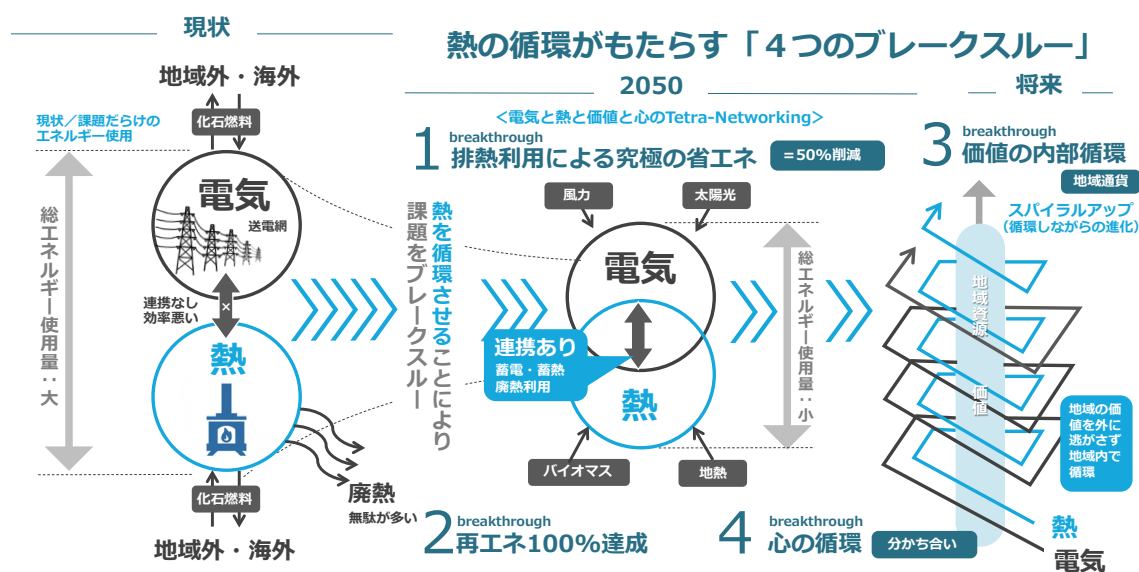


図 I-2 熱の循環がもたらす「4つのブレイクスルー」

3.当該 MS 目標を設定した理由及び、目標達成の社会的意義等

3.1 当該 MS 目標の設定や目標達成に向けた取組みが今必要である理由

1) 「HO・DO・HO・DO (ほどほど)」とは

図I-3に示すように、「HO・DO・HO・DO (ほどほど)」とは、「度が過ぎず、無理をしすぎず、平等・人並みであって心地よい」という日本人が持っている感覚であり、「他者とのバランス、人並み指向、まわりまわって自分にも幸せがやってくるという信念」である日本の幸福（協調的幸福感であり、北米の自己価値の実現に代表される獲得的幸福感とは異なる）につながっている¹⁾。

地球上の限りある資源を乱用し、地球環境容量をはるかに超える汚染物質（例えば温暖化ガス）を放出してしまうなど、人間活動が度を過ぎてかけ離れてしまった結果、人間自らの生存を危うくしてしまっているのが、現在の社会である。「ほどほど」とは「持続可能性」を意味しており、人間が地球上の自然環境の一部として生きるための本質を言い表していると言えよう。

この「HO・DO・HO・DO (ほどほど)」の感覚は、デンマークの「ヒュッゲ」（ほっとする、安心できる、心地いい、というようなデンマーク人が大切にしている時間の過ごし方や心の持ち方を表す言葉）やスウェーデンの「ラーゴム」（「多すぎず少なすぎず、ちょうどよい」という意味で、スウェーデンでは生活において何よりも重んじられている概念）もあり²⁾、必ずしも日本人のみ有する感覚ではない。北欧も福祉・環境を重要な政策として位置づけており、「持続可能性」を重んじる日本人と共通的な考え方をもっている。

産業革命以前は、環境容量の範囲内に人間活動は収まっていた（技術・社会の制約から、そうせざるを得なかった、自然とそうだったという表現の方が正しい）。そのような生活に戻ろうと言っているのではない。一度、度が過ぎてしまった人間が、かつては無意識に感じていた「ほどほど」を、今度は「ほどほど」を自ら意識して、かつ膨張から収縮へ向かうことに頑張りすぎず、我慢しすぎず、ちょうど良い着地点を探す。このような次のステージにスパイラルアップするための新たな旅路につくことを意味している。

化石エネルギーが有限であること、そして地球温暖化という人類生存の危機があるかもしれないという指摘があるにも関わらず、自ら抑制することのできなかつたエネルギーに着目することが、新しい「ほどほど」な社会へと自ら進化し、スパイラルアップするために、まさに今、この目標設定が必要であると考えた。

HO・DO・HO・DO ≡ 日本的幸福感 ≡ 持続可能性

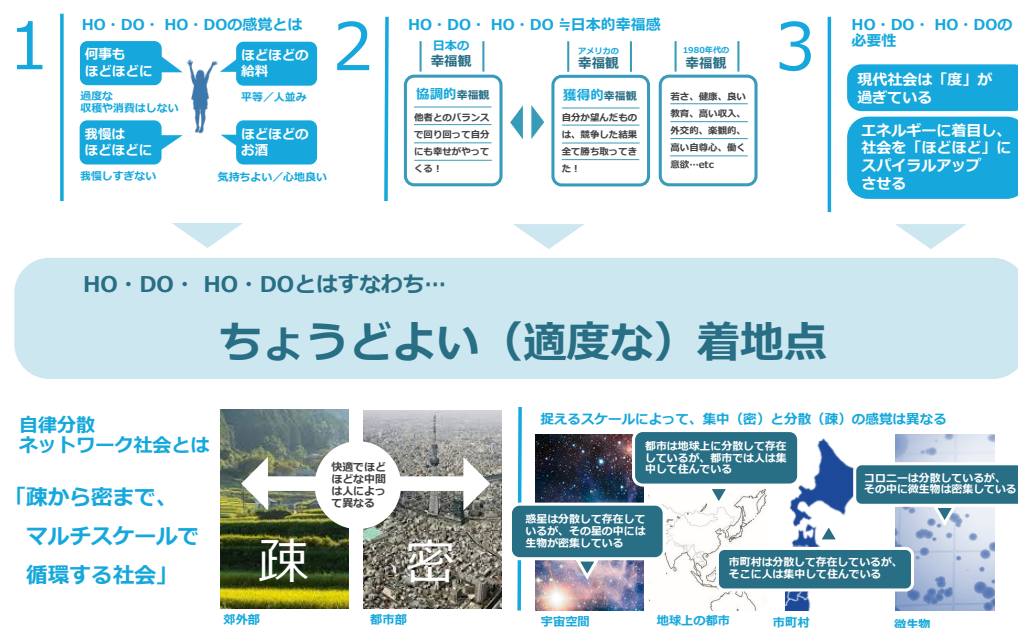


図 I-3 「HO・DO・HO・DO（ほどほど）」 ≡ 日本的幸福感 ≡ 持続可能性

2) HO・DO・HO・DOの自律分散ネットワーク社会とは

分散は、捉えるスケールによって異なる。シャーレ内に分散して存在する微生物コロニーはコロニー内では微生物が密集している、地球上で都市は分散して存在するが、都市内では人が密集しているなどがその例である。また、集中（密）と分散（疎）の間に、ほどほどの中間が存在するかという問いに対しては、存在するが人の感覚によって異なるので、一義に決定できるものではないと答えざるを得ない。つまり、ほどほどに分散した社会を定義するのは難しい（図I-3）。

本提案での「ほどほど」とは、エネルギーと環境面での持続可能性を意味しており、広い意味での様々な「循環」を意味している。風土にあったエネルギーを必要な分だけ収穫し、分かち合いながら利用する。分かち合う相手は、家族、ご近所・地域内の人々のみならず、隣接地域、そのまた向こうの地域などであり、マルチスケールなネットワークを形成する。そして、分かち合う相手は価値観を共有・循環する仲間となる。すなわちエネルギーと価値が、密から疎までマルチスケールで循環する社会が、ほどほどの自律分散ネットワーク社会である。

そして、風土にあったエネルギーを新たな価値と共に上手に利用することができるようになった各地域では、地域間でのエネルギー融通をしながら、過不足分を分かち合うことができる仕組みを自ら支え、そして進化させていく。このような地域の力でスパイラルアップできる仕組みが必要であると考えた。

3) 今必要である理由

- ・人為起源である温室効果ガス排出によって引き起こされる気候変動への対応がまさに求められている。
- ・2℃目標に対応する温室効果ガス量の 80%の削減に加えて、2050 年に 1.5℃目標に対応する 2050 年排出量を正味ゼロにするシナリオが示され、日本も正味ゼロを宣言したこと。
- ・世界規模のパンデミックによる分散型社会移行が加速化している。
- ・一極集中型の社会の弊害として、地方の過疎化、財政逼迫、少子高齢化による疲弊が続いており、地域コミュニティが崩壊しつつある。
- ・災害等のリスク分散として分散型社会への移行は総論的には異論は少ないが、実際には地方での雇用や社会の体制は不十分な部分も多く、分散社会での新たな生活基盤を創出することが困難であり打破する必要がある。

3.2 目標達成の社会的意義

- 1) 気候変動の影響を最小限にし、人類の生存に大きく貢献する。
- 2) 風土にあった再生可能エネルギーを利用した生活基盤を達成することは、エネルギーを獲得するために域外へ支払っていた資金を、地域内部で利用することができるため、新たな雇用を創出することができ、一極集中化に歯止めとなる。
- 3) 衣食住やライフスタイルの選択肢が増え、好きなところに住みたいという個人の要望を妨げることが無くなる（過度な集中、過度な分散ではなく、我慢なく自由な人並みと感じられる生活を送ることができる）。
- 4) 分散型社会への移行が促進され、災害・感染症等のリスクの分散・回避が可能となる。
- 5) エネルギーの観点からの格差が緩和される。例えば、発電所の存在する場所と消費する場所の格差など。各国内で風土にあった再生可能エネルギーを利用し、過不足分は対価で分かち合うことができれば、エネルギーの観点から国家間の争いが緩和される。
- 6) 風土に合った再生可能エネルギーの分かち合いを、その地域住民らの出資による共同体により運営することができれば、他の福祉、教育といった公共部門との連携・融合も可能となり、地域住民らのコミュニティの再生と自律に大きく貢献する。
- 7) 地域通貨を導入することにより、地域内、地域間の再生可能エネルギー（熱の再生・循環利用）利用、省エネルギー化の飛躍的に高めることができる。

3.3 当該 MS 目標の達成に向けた社会全体の取組み概要

下記に示すあらゆるセクターでの取組と連携・融合が必要となる。

1) コア技術開発セクター

- ・熱循環媒体技術及びシステムの開発

2) 関連技術開発セクター

- ・再生可能エネルギー収穫技術・時間スケールの大きなエネルギー循環技術
- ・究極の省エネルギー熱技術
- ・熱の再生・循環利用プロセス
- ・ロバストな蓄エネとしての蓄熱技術
- ・熱輸送技術
- ・蓄熱材利用による電気・熱統合管理システム

3) 技術適用セクター

- ・産業分野（電気・ガス・熱供給・水道業、鉱業、製造業、農業など）
- ・民生部門（建設業、宿泊業、各種サービス業）
- ・運輸部門（運輸業など）
- ・他部門も含むあらゆるセクターでの技術適用が必要

4) 社会技術セクター

- ・再エネのコモン化とモラル形成（制度、事業体、教育）
- ・再エネ利用に関する価値交換制度設計（経済、法律、制度）
- ・社会の役割分担

5) 情報技術セクター

- ・エネルギーのトレーサビリティ、タグ付け技術
- ・ブロックチェーン技術等による価値交換技術システム
- ・個人情報管理などの社会課題への対応

6) 行政・市民セクター

- ・地域施策と住民との合意形成
- ・地域共同体の立ち上げ、運営（市民出資型の共同事業）
- ・教育、福祉、地域交通などの他の公共部門との連携

4. 当該目標達成によりもたらされる社会・産業構造の変化

- ・オイルショック時代から確立されてきた日本の省エネ性能（効率性、断熱性）を遙かに上回る省エネ（蓄熱材活用による飛躍的効率性の向上）を達成する。特に、電気・鉱業・製造業分野での飛躍的な省エネが達成される。グローバルな視点から持続可能な社会に貢献する日本産業の世界的競争力を飛躍的に向上させると共に、日本発出の省エネ技術が世界の持続可能性に貢献する。
- ・太陽光、風力、地熱、バイオマスなど風土にあった再生可能エネルギーの最大活用を実現し、蓄電、水素、蓄熱など、ニーズ（貯蔵期間、輸送距離）に応じた多様なエネルギーキャリアを実現する。域内から流出していたエネルギーコストが内部環流することにより、エネルギー関連の新規雇用が創出される。地域内に、自然エネルギー関連に携わる人口割合が増加し、風土に合った技術ノウハウの蓄積、人材育成が行われていく。
- ・カーボンニュートラル、かつ環境汚染物質フリーな流通体系を確立する（送電線、パイプライン、車両輸送、など）。中長期的な視点から次世代への財産となり得る社会のインフラに市民自らが出資し支える仕組み（共同体）が出現する。
- ・エネルギー利用者が、エネルギーの産地、収穫年、貯蔵方法や期間を選択できるような技術が開発され、自らがカーボンニュートラルであり、地域・国・地球規模の持続可能性に貢献していることを日々の生活で感じるができる。
- ・自分のライフスタイルにあった地域での生活を選択でき、分かち合う仲間とのふれあいや感謝、つながりを感じることができるエネルギーを通じたコミュニケーションが可能となる。
- ・このような誰もが多様な生活を自ら選択できる社会にすることで、一極集中型の都市形成を緩和しつつ、日本国土の至る所で風土にあった特徴的かつ魅力的なコミュニティが形成されることで、自律分散ネットワーク社会が実現される。

II. 統計・俯瞰的分析

1. 当該 MS 目標を達成するための課題（科学技術的・社会的課題）や必要な取り組み

1) 2050 年排出量を正味ゼロにするシナリオ

産業革命以後の化石燃料の利用による生産性の向上により人口は急増し、人類は著しい発展を遂げてきた（図II-1）。国際連合によると、2100 年には 110 億人に達すると推測されている³⁾。特にアジア、アフリカの人口増が顕著であると推測されている。



図 II-1 世界人口の推移（出典：国連人口基金東京事務所ホームページ）

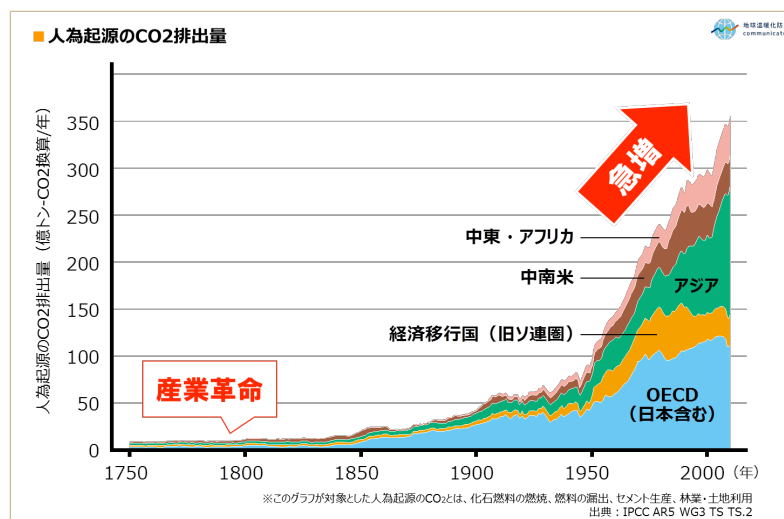


図 II-2 人為起源の CO₂ 排出量（環境省ホームページより）

そして 1950 年以降、人為起源の CO₂ 排出量は急増し（図 II-2）、大気中の二酸化炭素濃度は 2020 年の時点で 410 ppm（1985 年は約 345 ppm）となっている⁴⁾。

国連気候変動に関する政府間パネル（International Panel on Climate Change, IPCC）の第 5 次評価報告書（2013 年）では、「人間活動が 20 世紀半ば以降に観測された温暖化の支配的な要因であった可能性が極めて高い（可能性 95%以上）、大気中の二酸化炭素、メタン、一

酸化二窒素は、過去 80 万年間で前例のない水準まで増加している」と公表された⁵⁾。2015 年 12 月、フランスのパリで開催された第 21 回国連気候変動枠組条約締約国会議（COP21）にて、2020 年以降の温室効果ガス排出削減等のための新たな国際枠組みとして、パリ協定が採択され。国内においても、2020 年 10 月 28 日、菅首相が「2050 年までに脱炭素社会を実現する」と宣言したことを受け、経済界・産業界が大きく反応し、日本全体の脱炭素に向けた動きが加速している。

図II-3 に示すように、2016 年時点の世界のエネルギー利用の 51%は熱利用（冷房含む）であり、再生可能エネルギーのシェアはまだ 10%に過ぎない。ちなみにエネルギー利用の 32%が輸送利用、電気利用は 17%であり、再生可能エネルギーのシェアはそれぞれ 3%と 26%である⁶⁾。

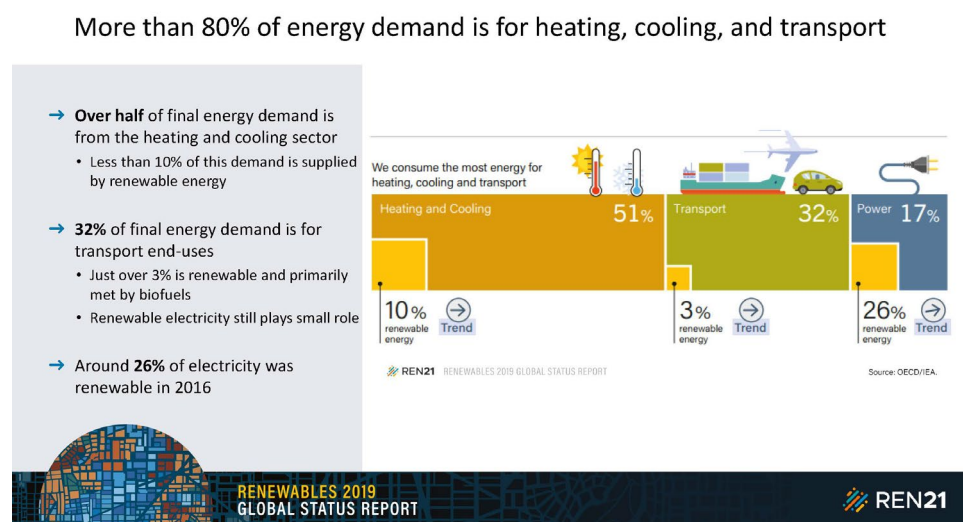


図 II-3 エネルギー利用の内訳と再生可能エネルギーのシェア
（出典：REN21, Renewables 2019 Global Status Report, 2019）

2021 年 5 月に IEA (International Energy Agency)より公表された「NET ZERO by 2050」⁷⁾では 2050 年までのロードマップとシナリオが示された。NETZERO シナリオ (NZE) における全エネルギー供給（図II-4）では、再生可能エネルギーと原子力エネルギーが、ほとんどの化石燃料を代替し、化石燃料のシェアは 80%から 20%にまで低下するとしている。さらに、図II-5 に示すように、2020 年から 2030 年の活動量増加 24%、2030 年から 2050 年の 51%を考慮した目指す CO₂ 排出量削減寄与は、「電化」「CCUS」「行動変容と回避（新技術開発含む）」「風力及び太陽光」「水素関連」「エネルギー効率化」「他の燃料のシフト」「バイオマスイエネルギー」であることが示されている。2030 年までに必要とされる削減量内訳と較べると、2030 年以降は特に、「電化」「CCUS」「行動変容と回避」「水素関連」に関する取組が必要とされることがわかる。

Figure 2.5 ▶ Total energy supply in the NZE

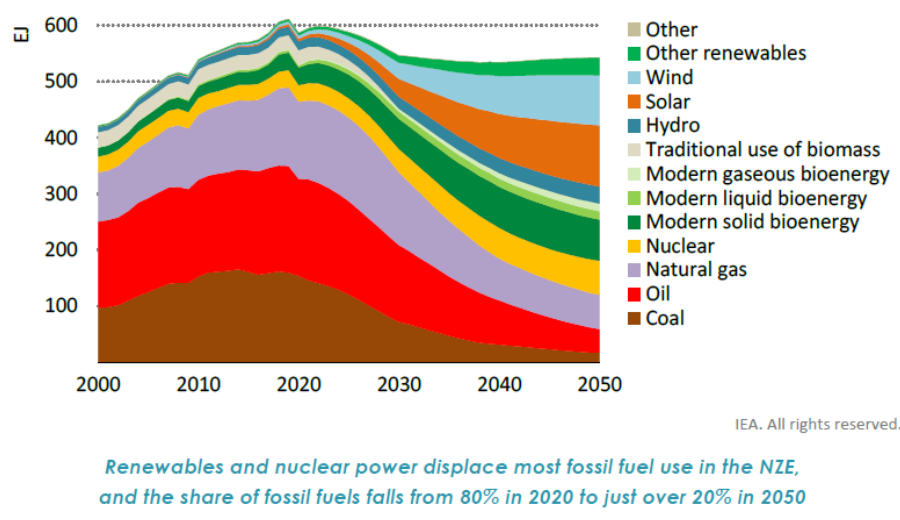
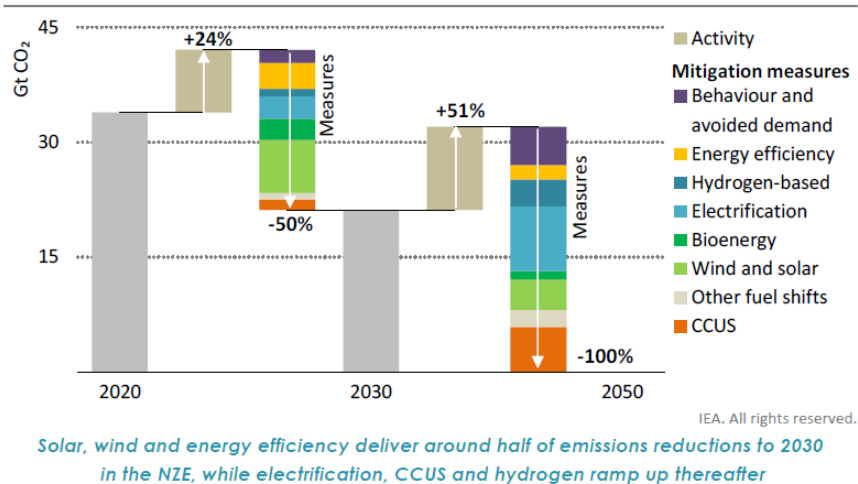


図 II-4 NET ZERO by 2050 (NZE) シナリオにおける全エネルギー供給の内訳
(出典：IEA, NET ZERO by 2050, 2021)

Figure 2.12 ▶ Emissions reductions by mitigation measure in the NZE, 2020-2050

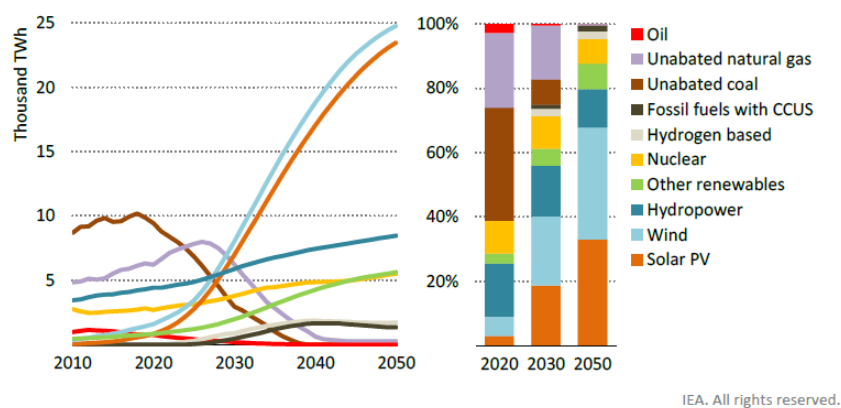


Notes: Activity = energy service demand changes from economic and population growth. Behaviour = energy service demand changes from user decisions, e.g. changing heating temperatures. Avoided demand = energy service demand changes from technology developments, e.g. digitalisation. Other fuel shifts = switching from coal and oil to natural gas, nuclear, hydropower, geothermal, concentrating solar power or marine.

図 II-5 NET ZERO by 2050 (NZE) シナリオにおける CO₂ 排出量削減
(出典：IEA, NET ZERO by 2050, 2021)

発電部門では、図II-6 に示すように太陽光と風力のシェアが著しく増加し、再生可能エネルギーのシェアは2020年の29%から、2050年には90%近くまで増加する⁷⁾。

Figure 3.10 ▶ Global electricity generation by source in the NZE



Solar and wind power race ahead, raising the share of renewables in total generation from 29% in 2020 to nearly 90% in 2050, complemented by nuclear, hydrogen and CCUS

図 II-6 NET ZERO by 2050 (NZE) シナリオにおける発電量の内訳
(出典：IEA, NET ZERO by 2050, 2021)

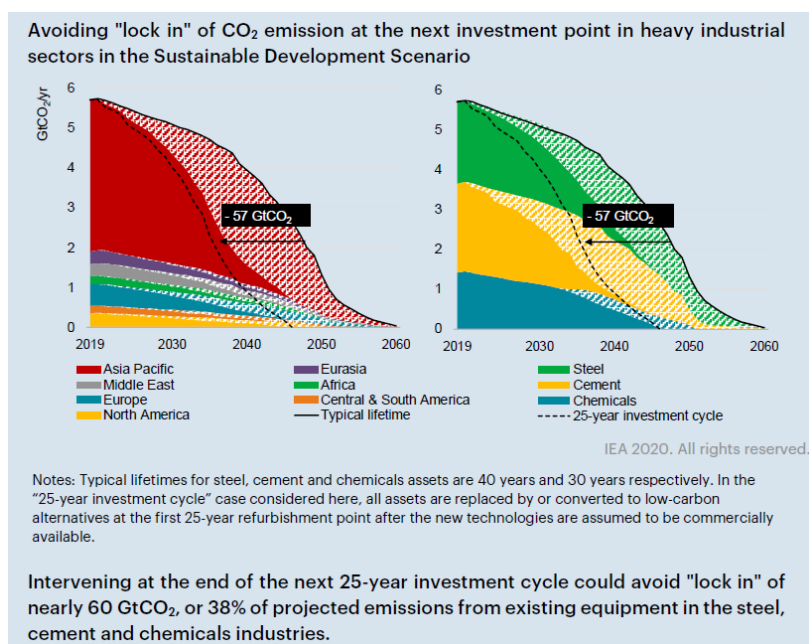


図 II-7 鉄鋼、セメント、化学工業の CO₂ 排出量削減シナリオ
(出典：IEA, Energy Technology Perspectives, 2020)

工業部門においては、特に鉄鋼、セメント、化学工業の重工業部門においては、現有施設の次の更新時期まで待たずに、今後25年以内の施設更新などの抜本的な対策が望まれている。

る（図II-7）⁸⁾。一方、それ以外の軽工業部門（図II-8）の2050年は、400℃以下の低・中温度域の熱利用については、電気ヒーター、ヒートポンプ、バイオマスが主たる熱源となっており、400℃以上の高温域の熱利用は、電気ヒーター、水素、バイオマスが主たる熱源となっている⁷⁾。部門別では、鉱業・建設業、食品・たばこ業、機械・輸送設備の順で熱需要は大きくなっている。

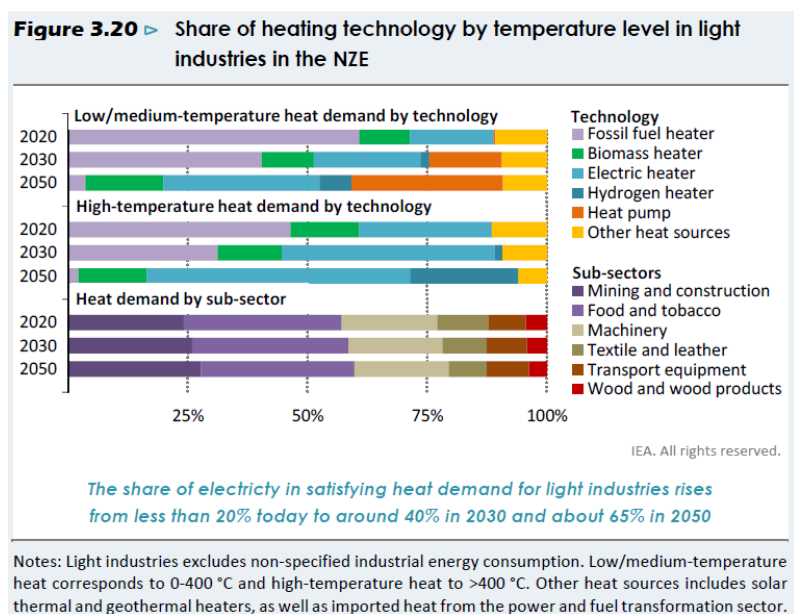


図 II -8 NET ZERO by 2050（NZE）シナリオにおける軽工業部門の温度別の技術シェア
（出典：IEA, NET ZERO by 2050, 2021）

Figure 3.22 ▶ Global transport final consumption by fuel type and mode in the NZE

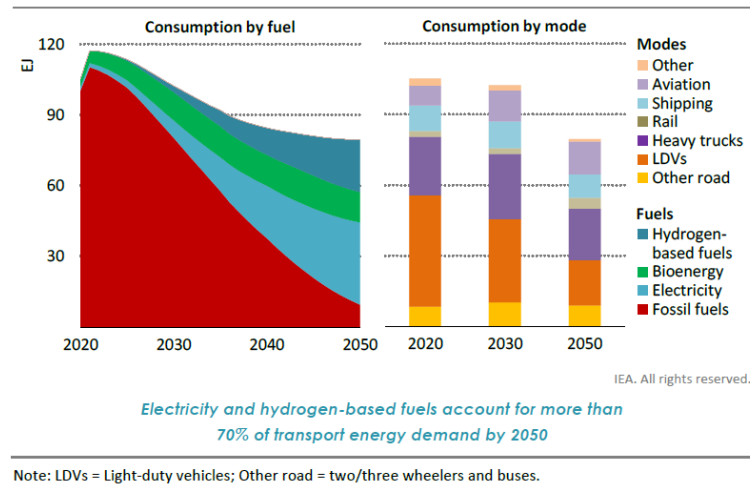


図 II-9 NET ZERO by 2050 (NZE) シナリオにおける輸送部門のエネルギー消費量の内訳
(出典：IEA, NET ZERO by 2050, 2021)

輸送部門では、図II-9 に示すように化石燃料の利用は大幅に削減され、電気、水素、バイオ燃料が主流となる。また自家用車の効率上昇によるエネルギー消費量の大幅な削減が見込まれている⁷⁾。

最後に、建造物部門は、図II-10 に示すように、主にエネルギー効率の向上より、化石燃料の利用は 2050 年までに 96%削減、暖房に必要なエネルギーは 2/3 にまで減少することが想定されている⁷⁾。

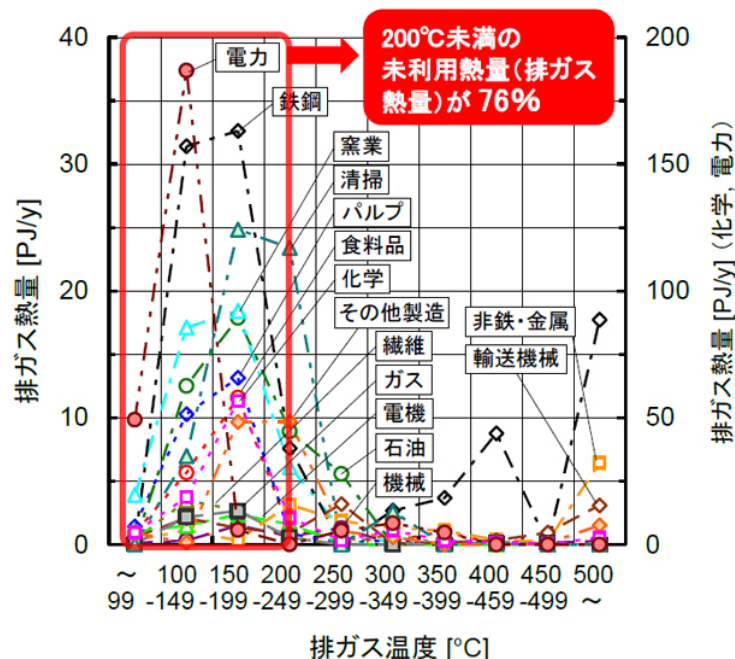


図 II -11 業種別・温度帯別の未利用熱量（排ガス熱量）の全国推定値（化学、電力は右軸）
 （出典：NEDO，産業分野の排熱実態調査報告書，2019，
https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101074.html）

3) 再生可能エネルギー大量導入における課題

IEA が示した NET ZERO by 2050 シナリオでは、化石燃料のシェアが 20%にまで低下し、再生可能エネルギー、特に太陽光や風力から得られる電気が主力となると想定されている。太陽光や風力エネルギーは、昼夜のバランスや天気大きく左右されることから変動電源（variable renewable energy, VRE）と呼ばれており、2050 年には発電の 60%を占めることが予測されている¹¹⁾。このように変動電源が主流となると、エネルギー供給システム全体でその変動調整が必要となる。この課題に対して現在主に、短期的貯蔵に有効な蓄電池と季節をまたぐ長期的貯蔵には水素によるエネルギー貯蔵が検討されている。

4) 様々なエネルギー源を有効利用するための蓄熱技術の開発概要

近年、熱エネルギーの貯蔵（Thermal Energy Storage, TES）による蓄エネルギー技術が世界的に注目されている¹¹⁾。図II-12 に示すように、VRE への対応として TES は太陽光や風力由来の余剰電気を貯蔵することができるので、出力調整の機会が減り、そして急激な需要の落ち込みや高まりへの対応が可能となる。送電の観点からは、TES は多額な送電線ネットワークの増強を延期・回避することができる。TES は季節をまたぐエネルギーの貯蔵ができるので、夏の余剰な再生可能エネルギーを冬期の暖房需要に用いることができる。さらに、異なるセクターを結合し暖房と冷房負荷パターンを改善できる。今後も再生可能エネルギー

としての電気の需要が高まる中、電気のみ依存してしまうことは全体コストの増加につながる。TES は、電気、暖房、冷房を統合的に管理するために必要な要素であり、結果的に送電線の容量の制約を緩和し、できるだけ多くの再生可能エネルギーを低価格で利用することが可能となる。図II-13 に示すように、様々な温度帯で、時間、日、月レベルで熱としてエネルギーを貯蔵できる技術開発が実施されている。図II-13 に示した TES 技術を表II-1 にまとめる。また各技術の一例も図II-14～19 で示した。

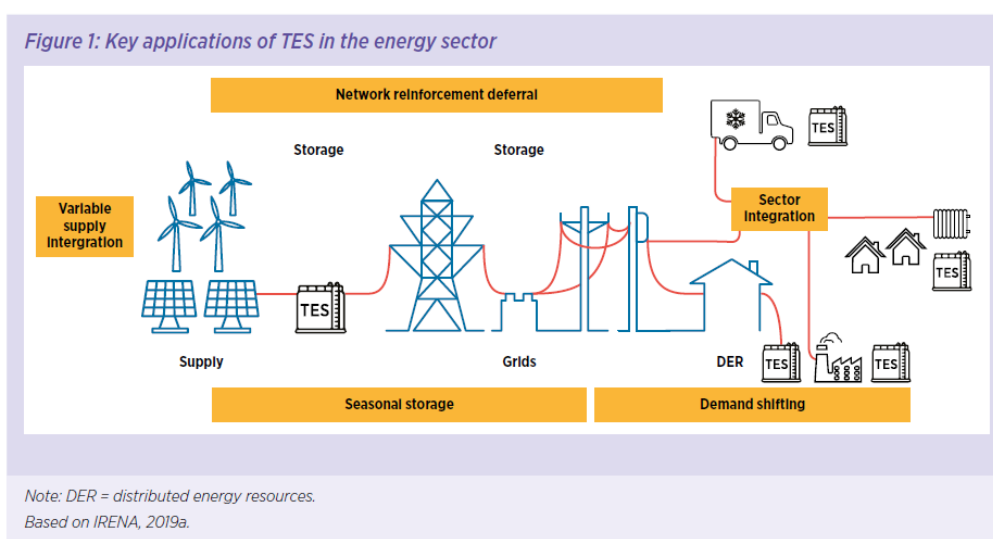


図 II -12 エネルギー部門における熱エネルギー貯蔵の利用
(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

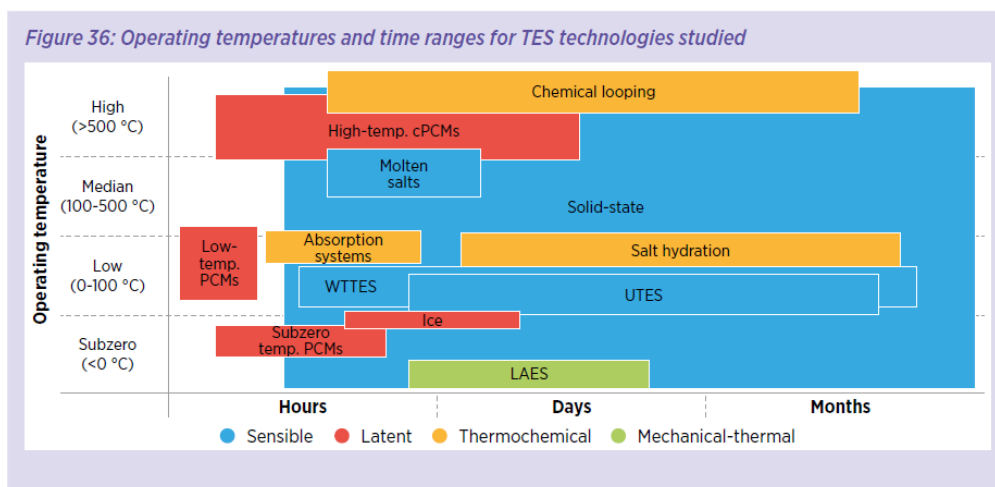


図 II -13 エネルギー部門における熱エネルギー貯蔵の利用
(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

表 II -1 TES（蓄熱）技術

カテゴリ	名称	補足説明	図
顕熱蓄熱 Sensible heat storage	Tank thermal energy storage (TTES)	水を媒体として用いるもの：WTES	
	Solid-state thermal storage	レンガ、石、コンクリートなどを利用	
	Molten salts	熔融塩を利用	図 II -14
	Underground thermal energy storage (UTES)	地下空間（土壌、地下水）を利用	図 II -15
潜熱蓄熱 Latent heat storage	Ice thermal storage	雪氷を利用	
	Sub-zero temperature phase-change materials (PCMs)	マイナス温度領域の潜熱蓄熱材	図 II -16
	Low-temperature PCMs	低温領域の潜熱蓄熱材	図 II -16
	High-temperature PCMs	高温領域の潜熱蓄熱材	図 II -16
熱化学的蓄熱	Chemical looping	例：カルシウムルーピング	図 II -17

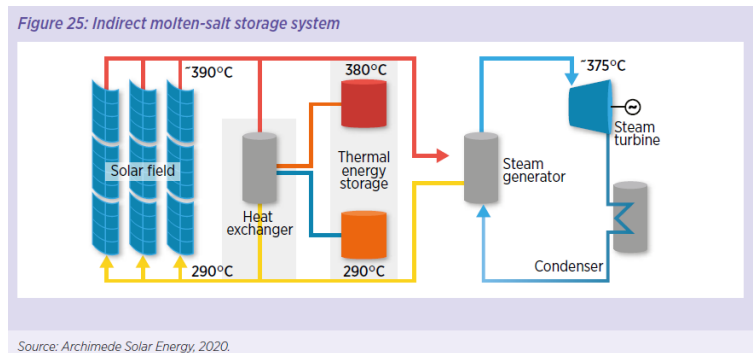


図 II -14 Molten-salt 蓄熱システム

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

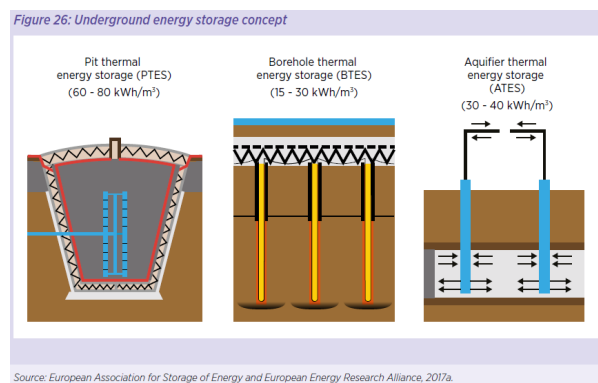


図 II -15 地下空間を利用した蓄熱システム

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

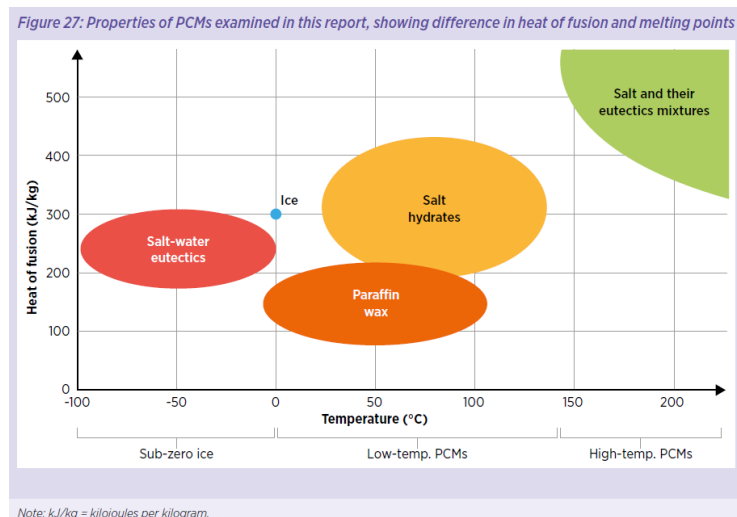


図 II -16 潜熱蓄熱材料の温度領域と材料の関係

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

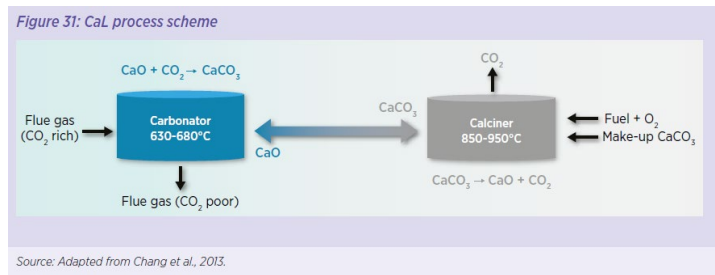


図 II -17 Ca looping

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

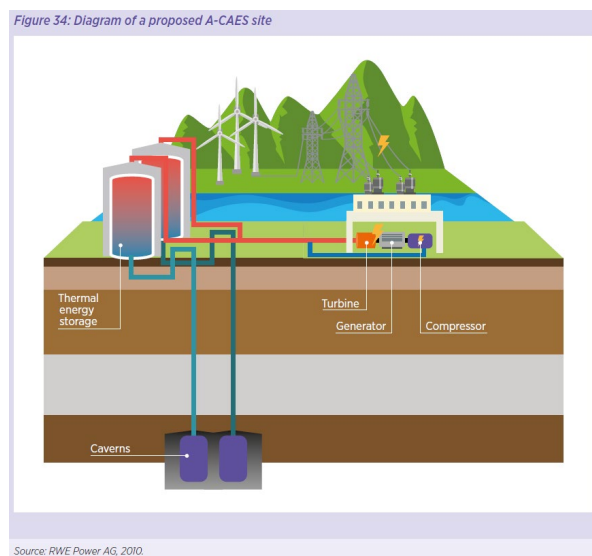


図 II -18 圧縮空気による蓄熱システム

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

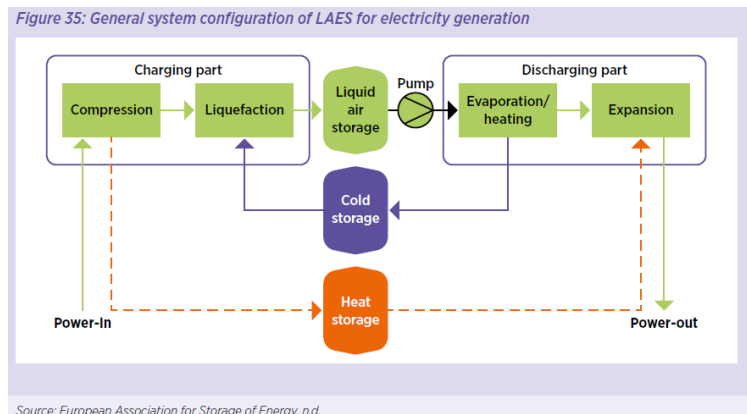


図 II -19 液体空気による蓄熱システム

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

蓄熱はその原理、特徴をそのまま活用する蓄エネルギーとしての応用のみならず、熱利用、熱輸送、熱制御、建物や機器の保温など様々な熱関連技術の基礎として支える技術であることから、その利用領域は広範にわたる。図II-20～24 は発電部門、産業部門、コールドチェーン部門、地域熱供給部門、地域熱・冷熱供給部門、建物部門における蓄熱技術開発の現状と 2030 年を見据えた開発ターゲットを示す。未だ先進的な蓄熱技術として位置付けられる潜熱蓄熱や化学蓄熱は、コールドチェーン部門を除いて、比較的高温の領域に開発ターゲットが移行していることがわかる。この背景には、VRE 用の蓄エネルギー技術としての蓄熱技術が進展しつつある背景がある。つまり、2030 年およびそれ以降は、再生可能エネルギーによる発電と他部門における熱利用をカップリングする技術としての役割が蓄熱技術には求められている。蓄熱技術の各部門における開発状況を表II-2 及び蓄熱技術の現在の技術レベルを表II-3 に示す。

Industry



図 II-21 産業部門における蓄熱材の開発状況と 2030 年の開発目標
(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

Cold chain



図 II-22 コールドチェーンにおける蓄熱材の開発状況と 2030 年の開発目標
(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

District heating and cooling



図 II-23 地域熱・冷熱供給における蓄熱材の開発状況と 2030 年の開発目標
(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

Buildings

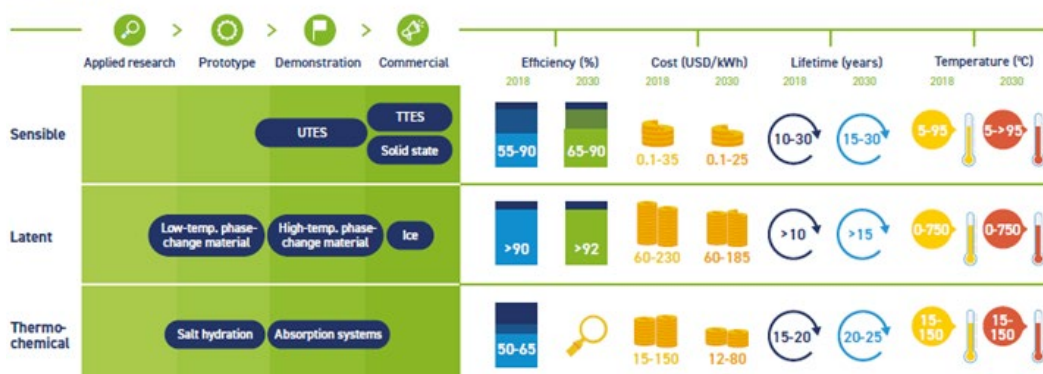


図 II-24 建築物における蓄熱技術開発状況と 2030 年の開発目標
(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

表 II-2 蓄熱技術の各部門における開発状況

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020 を基に作成)

蓄熱技術	発電部門	産業部門	コールドチェーン部門	地域熱供給部門	建造物部門
顕熱					
TTES, WTTES					
Solid-state					
Molten salts					
UTES					
潜熱					
Ice					
Sub-zero PCMs					
Low-temp PCMs					
High-temp PCMs					
熱化学					
Chemical looping					
Salt hydration					
Absorption					
機械熱力学					
CAE					
LAES					

Commercial

Demonstration

Prototype

Applied research

None

表 II-3 蓄熱技術の現在の技術レベル

(出典：IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020)

Type of TES	TES technology	Range of capacities	Range of power	Operating temperature	Round-trip efficiency	Storage period	Energy density	Lifetime (years or no. of cycles)
Sensible	WTES	kWh to 1 GWh	kW to 10 MW	10 to 90°C	50 to 90%	Hours to months	15-80 kWh/m ³ (1)	15-40 years
	UTES	MWh to GWh	MW to 100 MW	5 to 95°C	up to 90%	Weeks to months	25-85 kWh/m ³	50 years
	Solid state	10 kWh to GWh	kW to 100 MW	-160 to 1 300°C	>90%	Hours to months	0.4-0.9 kWh/m ³ -K (heat capacity) (2)	> 5 000 cycles
	Molten salts	MWh to 5 GWh	100 kW to 300 MW	265 to 565°C (4)	>98%	Hours to days	70-200 kWh/m ³	> 20 years
Latent	Ice thermal energy storage	kWh to 100 MWh	kW to 10 MW	-3 to 3°C	>95%	Hours to days	92 kWh/m ³	> 20 years
	Sub-zero temperature PCM	kWh to 100 kWh	kW to 10 kW	down to -114°C	>90%	Hours	30-85 kWh/m ³	> 20 years
	Low-temperature PCM	kWh to 100 kWh	kW to 10 kW	up to 120°C	>90%	Hours	56-60 kWh/m ³	300-3 000 cycles
	High-temperature cPCM	10 kWh to GWh	10 kW to 100 MW	up to 1 000°C	>90%	Hours to days	30-85 kWh/m ³	> 5 000 cycles
Thermo-chemical	Chemical looping (calcium looping) (5)	MWh to 100 MWh	10 kW to 1 MW	500 to 900°C	45-63%	Months	800-1200 kWh/m ³	>30 years
	Salt hydration	10 kWh to 100 kWh	N/A	30 to 200°C	50% (open systems) 60% (closed systems)	Months	200-350 kWh/m ³	20 years
	Absorption Systems	10 kWh to 100 kWh	10 kW to 1 MW	5 to 165°C	COP: 0.7-1.7	Hours to days	180-310 kWh/m ³	50 years
Mechanical-thermal systems	CAES	10 to 1 000 MWh	10 to 1000 MW	up to 600°C	> 90% (thermal efficiency)	Hours to weeks	N/A	20-40 years
	LAES	MWh to GWh	10 to 300 MW	> 300°C (heat) -150°C (cold) -196°C (liquid air)	> 90% (thermal efficiency)	Hours to months	N/A	> 25 years

Notes: (1) The energy density of water TTES and UTES is based on a reference temperature at 20°C; sensible heat is not considered in the calculation of energy density of latent heat storage; (2) Energy density of solid state is determined by the operating temperature difference; energy density = heat capacity x temperature difference; (3) for "solar salt" (60% NaNO₃ and 40% KNO₃); (4) Only referring to calcium looping process (as opposed to other chemical looping examples); kW = kilowatt; MW = megawatt; MWh = megawatt hour; COP = coefficient of performance.

Note: N/A denotes that no main needs were identified.

5) 主要な蓄熱技術に関する具体的な研究開発動向

次に、主要な蓄熱技術に関する具体的な研究開発動向について述べる。

蓄エネルギー技術

顕熱利用の蓄熱技術は、実証・商用レベルにある。熱風炉やリジェネバーナードなど、固体顕熱蓄熱材を用いた産業用の蓄熱熱交換器は現在の産業における熱利用の基盤技術となっている。また、太陽熱発電技術の進展に伴い、混合硝酸塩を利用した大規模溶融塩顕熱蓄システム（使用最高温度：565℃）が商用化に至っている。さらに近年、VRE 用の蓄エネルギー技術としての蓄熱技術（通称：カルノーバッテリーまたは蓄熱発電）の開発が急速に進展している。カルノーバッテリーは再エネ由来の電力の余剰あるいは変動が大きく使用困難な部分を高温の熱に変換し、その熱を中規模～大規模の蓄熱システムに貯蔵（蓄熱）しておいて、電力需要の大きい時間帯に貯蔵した熱を使ってスチームタービンなどで発電する。"Power-Heat-Power"タイプの再生可能エネルギー安定利用法であり、数 h～数日単位での低コスト蓄エネルギー技術として期待されている。表II-4 は技術開発動向を示す。カルノーバッテリーに関する技術開発は、実績のある顕熱蓄熱技術が中心となっている。一方、産業や民生とのセクターカップリングを考えると、今後、先進的な蓄熱技術の開発が求められる。

表 II-4 Examples of thermal energy system for grid-scale energy storage¹²⁻¹⁵⁾

Company/Project	SIEMENS Gamesa RENEWABLE ENERGY	STORASOL GmbH	MAN Energy Solutions	Malta Inc.
Storage method	Sensible	Sensible	Sensible	Sensible
Storage material	Rock	Sand	Water	Molten salt
Storage temp. [°C]	~750	~1000	120~	~565
Storage capacity	130 [MWh _{th}]	50 – 1000 [MWh _{th}]	-	(100 MW _e × 10 h)
Volume of storage unit [m ³]	800	-	-	-
Status	Real scale pilot demonstrating	Under development (Target for commercial availability is 2024)	Under development	Under development (First commercial project online in 2024 or 2025)

潜熱利用の蓄熱技術は、Ice を利用する技術は商用レベルにあるが、PCMs については発電部門、産業部門、地域熱供給部門、建造物部門等、幅広い温度帯において開発途上の技術である。近年、太陽熱発電や蓄エネルギー技術としての蓄熱技術、産業排熱回収などをターゲットとした高温領域の潜熱蓄熱技術の研究開発が進展している。高温領域の潜熱蓄熱技術では、溶融塩や金属・合金などの高融点物質を PCMs として使う必要があるため、蓄熱槽や伝熱機器と PCMs との腐食性の克服が第一のボトルネックとなっていた。近年、一部の PCMs (Al-Si 系 PCMs など) において、伝熱面や蓄熱槽へのセラミックスコーティングなどによって一定の解決策が見出され、商用化に向けたプロジェクトが計画されている例もある¹⁶⁾。また、高温領域だけではなく、他の幅広い温度領域において、耐腐食性や使用または加工時の機械的強度などの観点からセラミックスの利用が新たな技術開発トピックスとなっており、SiO₂ や Al₂O₃ をシェルとしたマイクロカプセル PCMs^{17,18)}の開発が進展している。

また、セラミックスそのものを PCMs として利用する新たな領域も見出された¹⁹⁾。表II-5 は代表的な新 PCMs 開発の例を示す。これらの新材料開発は、我が国が先行している。また、この新材料を利用した開発は、単純な蓄熱用途だけではなく粒子搬送による熱輸送、熱の制御など、様々な熱関連技術への応用が可能であり、発電部門、産業部門、地域熱供給部門、建造物部門等全部門にまたがる新たな技術領域として期待できる。今後、これらの新材料の安価・大量生産技術を確立するとともに、産学一体となった一貫通貫のデバイス、プロセス、システム開発が求められる。

表 II -5 Examples of technology on new-generation PCMS¹⁷⁻¹⁹⁾

Technology	Core-shell type micro encapsulated PCMs	Core-shell type micro encapsulated PCMs	Heat storage ceramics
Storage material	Alloy PCMs/ Al_2O_3 shell	Salt hydrate PCMs/ SiO_2 shell	Oxide
Phase change	Solid-Liquid	Solid-Liquid	Solid-Solid
Target storage temp. [$^{\circ}\text{C}$]	~ 800	< 150	About ~ 300
Storage density [GJ m^{-3}]	~ 1.0	~ 0.43	~ 0.23
Status	Laboratory	Laboratory	Laboratory

表 II -6 Examples of projects on large-scale chemical heat storage system²⁰⁻²²⁾

Company	AICHI STEEL CORPORATION/ Toyota Central R&D Labs., Inc.	TOYOTA Motor Corporation, etc.	Salt X Technology
Storage method	Chemical heat	Chemical heat	Chemical heat
Storage material	$\text{CaO-H}_2\text{O}$	$\text{MgO-H}_2\text{O}$	Nano-coated $\text{CaO-H}_2\text{O}$
Storage temp. [$^{\circ}\text{C}$]	~ 427	200 $\sim$ 250	~ 550
Storage density of storage unit [GJ m^{-3}]	0.57	~ 1.0	-
Status	Real scale pilot demonstrating	Pilot demonstrating	Pilot demonstrating

化学反応を利用した蓄熱技術は、実証レベルにある部門もあるが、発電部門、産業部門等を中心に研究開発途上の技術である。化学蓄熱は、可逆的な化学反応の反応熱を利用するため、顕熱や潜熱利用と比べて高い蓄熱密度が可能だが、使用する化学蓄熱材の繰返し耐久性（粉化等が主原因）や、熱交換性能が未だボトルネックとなっている。近年、一部の反応系（特に $\text{CaO-H}_2\text{O}$ 系）においてこれらの課題への解決策が見出され、排熱回収技術などへの実用化の兆しも見えて来ている。表II-6 はその代表例を示す。国内では、電炉排熱の回収²⁰⁾や工場間の熱輸送²¹⁾が実証され、国外においても工場排熱の回収を目的とした 1 MW/15 MWh 級のパイロットプラントの建設も計画されている²²⁾。一方、より低温の産業排熱を平衡操作によりアップグレードし再び熱源として可能なケミカルヒートポンプなど、上記ボトルネックの解決を前提として、産業のニーズにマッチした材料とプロセスの一貫通貫で

の研究開発が求められている。

機械的なエネルギーを利用した蓄熱技術は、蓄エネルギー技術としてプロトタイプから実証段階である。高温蓄熱システムを付帯した圧縮空気エネルギー貯蔵（CAES: Compressed Air Energy Storage）²³⁾、-190℃の液化空気としてエネルギーを貯蔵する液化空気エネルギー貯蔵（Liquid Air Energy Storage）²⁴⁾が実証段階にある。

熱輸送技術

熱によるエネルギーの循環、融通を実現するためには、熱の輸送技術が必要となる。熱の需要と供給の時間的、空間的なギャップを埋める輸送として、オンラインまたはオフラインの熱輸送が検討されている。また、地域の特性に応じた「時間」を超えた熱の貯蔵、輸送への展開も重要である。

オフライン熱輸送技術としては、コンテナトラックに PCM、化学蓄熱材、吸着蓄熱材を積んで輸送する技術開発が進んでいる。表II-7はその検討事例を示す。いずれのシステムにおいて共通の課題となっているのが、高いイニシャルコストおよびランニングコスト、その結果としてのペイバックタイムの長さである。1 バッチ当たりの高密度な熱輸送が求められる一方、システムの熱交換性能が低いと熱を輸送できる回数が減り、ライフタイムでの熱輸送量に大きな差異はなくなる。また、熱のエネルギーを余すことなく利用することの重要性は理解される一方で、そのエネルギーとしての価格（≒価値）は高くないことも普及を妨げる要因となっている。

表 II -7 Examples of technology of off-line heat transportation ^{21, 25, 26)}

Company	Sanki ENGINEERING CO., LTD.	Waseda University etc.	Takasago Thermal Engineering Co., Ltd. etc.	TOYOTA Motor Corporation, etc.
Storage method	Latent heat/Sensible	Adsorption	Adsorption	Chemical heat
Storage material	Erythritol	Zeolite	HAS-Clay	MgO-H ₂ O
Storage temp. [°C]	About 120	About 180	80~120	200~250
Storage density of storage unit [GJ m ⁻³]	0.24	0.56	0.59	~1.0
Status	Commercially available	Bench scale	Real scale pilot demonstrating	Pilot demonstrating

オンラインの熱輸送技術は北欧を中心に熱導管による熱輸送が社会インフラとして 100 年もの間にわたって整備され、使われてきた経緯がある。日本でも新たな都市計画の立案には多くの場合地域熱供給が導入されており、多数の事例がある²⁷⁾。今後、地域熱供給におけるオンライン熱輸送において再生可能エネルギーをエネルギー源として使うことまでを想定すると、不安定な電源（≒熱源）を安定化する機能を持ち、かつ電力と熱を併産が可能な蓄エネルギー技術の開発と、地域熱供給システムとのインテグレーションが必要である。

熱の再生・循環利用技術

熱力学的な視点から熱利用における理論的な到達点を示しているエクセルギー再生理論に基づく、従来のカスケード利用からエクセルギー再生技術²⁸⁾への転換により、従来比大幅な省エネルギーの達成（従来比～85%）が可能である。図II-25はその原理を示す。

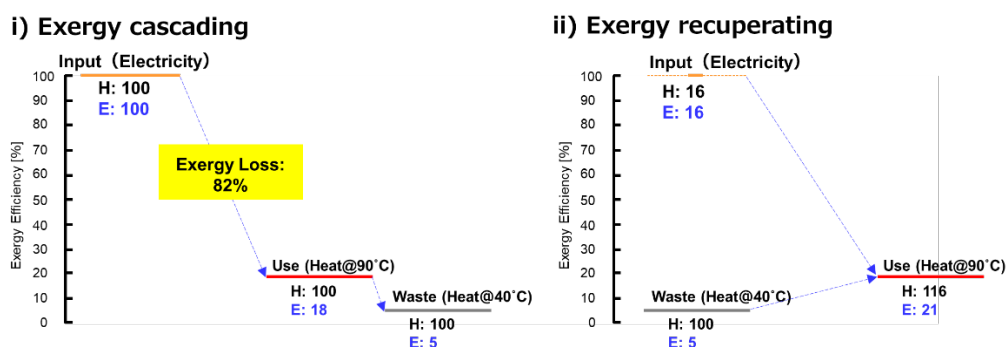


図 II -25 Exergy cascading V.S. Exergy recuperating

表 II -8 Examples of projects on exergy recuperation technology³⁰⁻³²⁾

Company	Tokyo Univ./NIPPON STEEL ENGINEERING CO., LTD.	Mitsubishi Chemical Engineering Corporation	Daicel Corporation
Principle	Self-heat recuperation	Self-heat recuperation	Vapor Re Compression
Application	Distillation plant for Bio-Ethanol	Distillation plant	Distillation plant
Operating temperature [°C]	< 200 (Estimation)	< 200 (Estimation)	< 200 (Estimation)
Status	Real scale pilot demonstration@2012	Commercially available	Commercially available

エクセルギー再生技術により、使い終わった低質の熱を、電気などの質の高いエネルギーで再生し、循環利用することができる。このエクセルギー再生技術は日本発の技術として、理論体系の構築²⁹⁾と応用技術の開発が進められ、蒸留プロセスへの実装が達成された。表II-8はその検討例を示す。原理的には全ての温度領域においてこの技術体系を展開することができるが、既往の技術では200℃程度の温度領域までしか検討が及んでいない。このボトルネックとして、①200℃以上の温度領域において「仕事」を効率的に投入して熱をアップグレードする技術が開発されなかったこと（既往技術はコンプレッサーの使用が前提であったため、より高温の温度領域には対応できなかった）、②高い効率を達するために熱交換時の温度差を限界（＝ピンチ温度）まで小さく設定する必要があり、結果として大きな熱交換器と大きな設備費が必要となることなどが挙げられる。

熱（温度）の制御技術

既往の産業と熱利用技術のパラダイムでは、図II-11 に示したとおり多量の低温排熱の発生とその有効利用技術の確立が課題となっている。NEDO「未利用熱エネルギーの革新的活用技術開発（2015 年度～2022 年度）」³³⁾では、排熱（≡未利用熱エネルギー）を減らす技術として、蓄熱とともに遮熱や断熱技術が検討され、多くの成果が報告されている。

一方、一次エネルギー使用量などが他の産業と比較して多い鉄鋼業などの高温プロセスにおける排熱の発生源の大部分は製品（主に固体）顕熱である。鉄鋼業では、高温のスラブ表面へ水や水蒸気を精密に吹きつけ、冷却することで製品を所望の組織、組成に調整している。一方、吹き付けられた水や水蒸気は、低温の廃熱となる。即ち、高温に熱せられたスラブの顕熱は全て低温排熱となってしまいます。NEDO「環境調和型製鉄プロセス技術開発（COURSE50）」において、製鉄業の副産物である製鋼スラグを製品化する過程で、この高温顕熱を回収する先進的な取り組みが実証された³⁴⁾が、製品顕熱そのものを回収する取り組みは現在のところ極めて難易度の高い技術として位置付けられている。

また、化学産業などにおける多くの発熱プロセスでは、温度を一定にして操業する必要があるため、温度を制御して安定操業するためには、反応熱を冷却水で冷却し、その結果として低温排熱が多量に発生する。この発熱プロセスにおいて発生する熱を安定熱源に変換し、吸熱プロセスの熱源として利用することができれば、排熱レスのプロセスが実現できるが、現在のところ難易度の高い技術である。

6) 社会課題

事業主体の課題

エネルギー資源に乏しい日本が、海外へ重油や天然ガスの調達のために支払っているコストは十数兆円とも言われている。図II-26 は、国内の地域内総生産に対するエネルギー代金の収支の比率であり、全国の自治体のうち 90%がエネルギー代金の収支が赤字、70%が地域内総生産の 5%相当額以上、151 自治体で 10%以上の地域外への資金流出を招いていることがわかる³⁵⁾。

風土にあった再生可能エネルギーを収穫し、地域内で利用することは資金の外部流出を防ぐことにつながり、地域の新たな雇用を生む可能性がある。

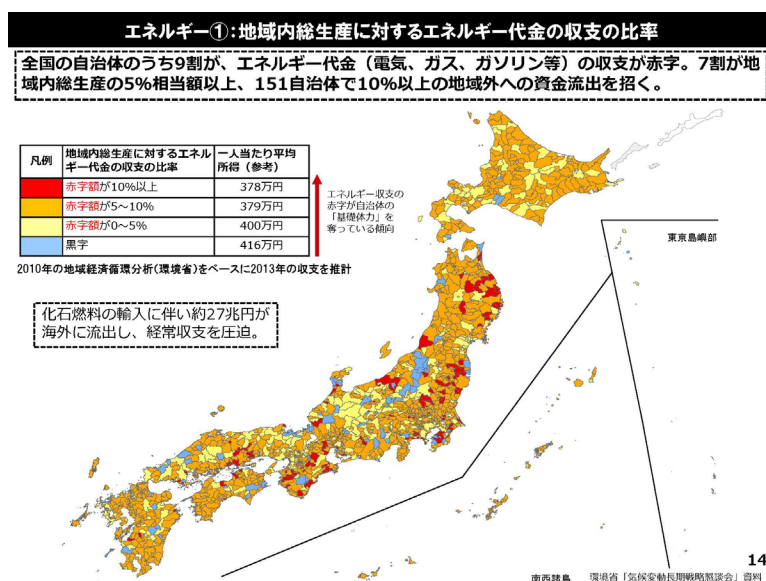


図 II-26 地域内総生産に対するエネルギー代金の収支の比率（環境省 HP より）

地産地消のエネルギーの利用を促進し地域経済を好転するためには、事業の仕組みが課題となる。国内では、公共的事業はもっぱら行政が管轄し、行政から民間へ発注されるか行政自体が公的事業を実施する。エネルギーは、経済産業省管轄の下で、基本的には民間事業者が事業を行っている。近年の電気事業法の一部改正により、電力小売全面自由化、送配電部門の分社化が行われ、発電や小売りの改革が行われた。それに伴い、再生可能エネルギーを扱う地域電力会社が全国各地でできはじめている。主に、行政と民間事業者の共同出資によって設立され運用されている事例が増えている。

シュタットベルケとは、ドイツやオーストリアでエネルギーをはじめとする幅広い分野の公共事業を担う公益企業（公社）を指す総称であり、一般的に株式の多くを地方自治体が保有しており、集約的・総合的なインフラ関連サービス（電力に限らず水道や公共交通など）が提供されている（図II-27）³⁶⁾。



図 II -27 シュタットベルケの事業内容(例)

(出典：

<http://kinki.env.go.jp/11%20%28HP%E6%8E%B2%E8%BC%89%E7%94%A8%29%E7%AB%8B%E5%91%BD%E9%A4%A8%E5%A4%A7%E5%AD%A6%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%91%E3%83%83%E3%83%8F%E6%95%99%E6%8E%88%E8%B3%87%E6%96%99.pdf>

国内でも日本版のシュタットベルケの検討がなされた経緯があるが、いわゆる自治体100%出資の公社、民間事業者との共同出資の3セク方式との違いが十分ではなく、自治体の半官の組織が増えるだけとの批判もあり、十分な議論が進んでいないのが現状である。公的な仕事を行うと言っても、民間並みのマネジメント機能の強化が必要である分野であると言え、立命館大学ラウパッハ教授は図II-28のようにドイツと日本の比較を行い課題を整理している³⁶⁾。

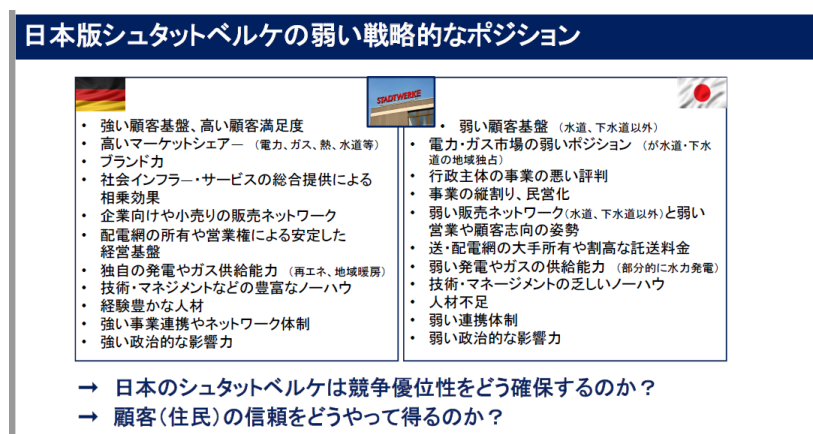


図 II -28 日本版シュタットベルケの課題

(出典：

<http://kinki.env.go.jp/11%20%28HP%E6%8E%B2%E8%BC%89%E7%94%A8%29%E7%AB%8B%E5%91%BD%E9%A4%A8%E5%A4%A7%E5%AD%A6%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%91%E3%83%83%E3%83%8F%E6%95%99%E6%8E%88%E8%B3%87%E6%96%99.pdf>

今後、再生可能エネルギーの地産地消を達成する事業とはどうあるべきなのか、市民、自治体、民間事業者の役割分担、合意形成、出資はどうあるべきなのか、今後制度設計も踏まえた事業運営方式について議論していく必要がある。

地域コミュニティ形成の課題

また、風土にあった再生可能エネルギーを地域内で利用し、隣接地域との分かち合いながら利用していくためには、自然の恵みから得られたエネルギーを、地域内共通の資産、すなわちコモンズとして捉え直す必要がある。コモンズとして捉えることにより、その乱獲や乱獲による環境影響を最小限にすることができ、地域内の住民間コンフリクトも最小限にすることができるかもしれない。そしてそのエネルギーの利用にあたっては市民出資型の共同体での運営を考えたときに、地域内には新たな社会の役割分担、すなわち地域内の職業の構造改革が生ずることになる。そして、その役割分担において、地域における新しいコミュニティが形成されるものと考えられる。

そしてエネルギーのみならず、地域内の様々な価値、例えば教育や福祉、ちょっとした困りごとの解決などを地域内で価値交換できる地域通貨のような仕組みも必要である。行政と民間企業で行う活動の隙間を埋めるような事業が必要であり、現行貨幣に変換できない価値の交換や分かち合いが必要となる。すなわち、エネルギー購入のための資金が域外に流出していたのみならず、地域コミュニティを形成するのに必要な「つながり」や「思いやり」といった社会的資本（ソーシャルキャピタル）をも、地域から消失しかけていたかもしれない。

そのような地域の再生可能エネルギーの収穫と利用から端を発した地域の新たな価値形成や地域コミュニティが本当に地域の人にとって良いモノであれば、地域の人とそのシステムを支えていく基盤を形成する。すなわち、そのシステムを支えるための人材育成にまでつながっていくものと考えられる。

7) 情報技術を基盤とする地域コミュニティの運営

エネルギー分野におけるブロックチェーン技術の活用が進んでいる。笹川³⁷⁾によれば、ブロックチェーン技術の200事例（36カ国）のうち、分散型エネルギー利用が88件であり最も多かったと述べており、分散型エネルギー取引の事例を挙げながら、生産消費者と需要家の電力取引がブロックチェーン技術の活用により実現されたことに加え、需要家が購入電力に関する情報を容易に得られるようになったと述べている。ドイツでは、電源証明の制度化が2001年のEU指令に基づき進められてきた経緯がある。このようなトレーサビリティを確保しながら、ブロックチェーンで決済を行う仕組みづくりは技術上可能であると考えられる。

しかしながら、笹川³⁷⁾は、「一方で、需給バランスを維持し、電力の安定供給を実現することは、ブロックチェーン技術単体で行うことができない。ドイツの事例でみてきたような

需給調整市場との連携や、スマートメータの導入拡大等のインフラ面での整備に加え、ブロックチェーン技術に強みをもつ企業と電力事業者間の協力体制構築の促進が一層重要となると考える」と述べている。

すなわち、風土にあった再生可能エネルギーを地産地消するシステムを地域内で創っていくための情報基盤整備には、電力マネジメント機能を有する企業、ブロックチェーンに長けた企業などの連携が必要である。

8) ELSI

本提案で目指す社会の実現のためには、地域内のコミュニティを構成する多様なステークホルダー間（市民－行政－企業など）から個人と個人の関係まで、マルチスケールでの信頼感の醸成も必要となる。共通的な社会資本の一つである再生可能エネルギーの収穫・貯蔵・輸送・利用を巡って、共通価値観を形成し、その共通価値観に基づいた取引（価値交換）を行っていく必要がある。

そのためには、上記で述べたようなブロックチェーンを用いた仮想通貨としての地域通貨の導入が一つの手段となる。そしてその域内での継続的な利用・拡大のための信用貨幣としての信頼醸成が不可欠となる。そしてその信頼醸成のためには、個人情報の管理の徹底と、インフォームドコンセントを考慮した個人情報の適切な取り扱いが課題となろう。

一方で、地域内コミュニティの信頼が醸成されたならば、今度は、エネルギーの取引によって得られた新たな価値の循環が、教育・福祉・地域交通など他の公共的なサービスにまで波及する可能性を秘めている。その根本である個人情報管理のあり方について、国際・国内的な取り決めはもちろん、地域コミュニティでのルールづくりにまで言及する必要があると考えられる。

2. 当該 MS 目標を達成するために取り組むべき研究開発の俯瞰

当該 MS 目標を達成するためには、再生エネルギーの大量導入と電化、および水素利用を両輪としつつも、この両輪の「軸」となる熱利用技術を中心としたエネルギーの貯蔵・輸送・再生・制御技術と、社会技術及び情報技術との統合・融合が必要である。これらの技術を俯瞰的に捉えると以下ようになる。

1) 熱関連技術

○蓄エネルギー技術

熱はエネルギーメディアの中で最も低質なエネルギーとなり得ることから、全てのエネルギーメディアは熱エネルギーに変換可能である。よって、余剰に収穫した電力はもちろんのこと、バイオマス、貯蔵容量を超えた水素などを熱へと変換し、運用することができる。すなわち、蓄熱による蓄エネはインプットのエネルギーメディアを問わない極めてロバストな蓄エネルギー技術であると同時に、過剰に収穫したエネルギーを一時的に貯蔵し、地域内で融通できる形に変換するエネルギーコンポジット的な役割を担うことができる。当該 MS 目標の達成を想定すると、低コスト、大容量、コンパクト、高い熱交換性能（産業とのセクターカップリングを想定）、かつエネルギーの入出力のフレキシビリティ性や地域熱供給等とのカップリング可否などの性能が必要となる。

○熱輸送技術

当該 MS 目標の達成には熱を輸送し、融通する技術が必要となる。表II-7 に示した通り、実証や実装に至った技術はあるが、社会的なニーズがあるにも関わらず普及には至っていないのが現状である。そこでは、蓄熱材料としてではなく熱輸送システムとしての高密度化や高速化とともに、経済的に実現可能な熱輸送サービスを想定した上での技術開発が必須となる。

○熱の再生・循環利用技術

当該 MS 目標の達成には、低質の熱をアップグレーディングし、循環利用するエクセルギー技術の開発が必要である。熱の利用用途は様々なことから、各温度範囲において適切な熱の再生技術を縦断的に開発する必要がある。また、熱力学的に到達可能な効率だけではなく、速度の観点と有限時間内に発生する損失をも考慮した新たなエクセルギー再生技術の確立が必要となる。

○熱制御技術

既往の技術では、プロセスの温度を一定に保持したり、製品の品質を精密に制御するために、冷却水や水蒸気を用いて冷却してきた。一方、これらの技術は必然的に低温排熱を多量

に発生させる。そこで、吸熱反応などを使ってこの冷却と製品顕熱の回収を達成することができれば、排熱レスのプロセスが実現できる。以上、化学反応などのコプロダクション型の吸熱現象を利用した熱制御技術による熱制御により、「そもそも排熱が出ない技術」へとパラダイムシフトができる。

2) 社会・情報技術

当該 MS 目標を達成するためには、上記蓄熱技術を中心とした再生可能エネルギー収穫・貯蔵・輸送技術と、社会技術及び情報技術との統合・融合が必要である。社会・情報技術の俯瞰的に捉えると以下ようになる。

○概念形成（哲学、倫理）

- ・ 共通社会資本としての再生可能エネルギーの位置づけの整理
- ・ コモンズ化、モラル形成
- ・ 個人情報管理などの社会課題への対応

○制度・事業形態（経済）

- ・ 柔軟な制度設計
- ・ 進化可能な事業形態

○社会の役割分担（社会学）

- ・ 産官学市民の新たな役割
- ・ 市民参加

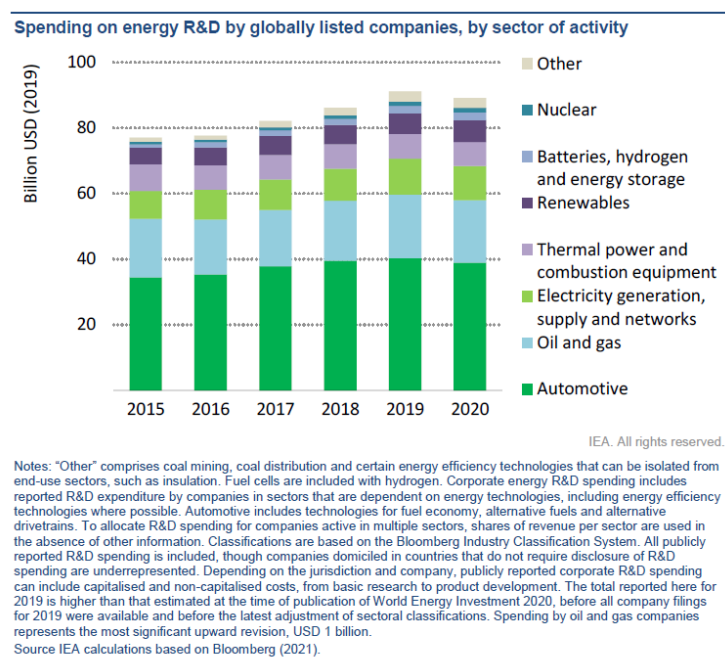
○ブロックチェーン（既存技術）の適用（工学）

- ・ ブロックチェーン技術によるエネルギーのトレーサビリティ、タグ付け、決済システム
- ・ 地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システム

3. 当該目標に関連する研究開発の動向（全体）、海外動向及び日本の強み

1) 再生可能エネルギーの研究開発の動向

グローバル企業によるエネルギー関連の研究開発に投資された金額を活動分野毎に図II-29に示す³⁸⁾。自動車関連、油・ガス関連、発電・送電ネットワーク関連、火力発電・燃焼機器関連となり、再生可能エネルギーへの研究開発投資は一見、それほど大きくはないと思える。例えば、注釈にあるように自動車関連には代替燃料に関する研究開発費も含まれており、分類が難しい側面もあるようである。



図II-29 グローバル企業によるエネルギー関連の研究開発への投資額
(出典：IEA, World Energy Investment 2021)

同様に、国別のエネルギー関連の研究開発費をまとめたのが図II-30である。米国と中国がほぼ同様であり、続いてヨーロッパ、日本は、韓国とオーストラリア、ニュージーランドと一緒に示されている。

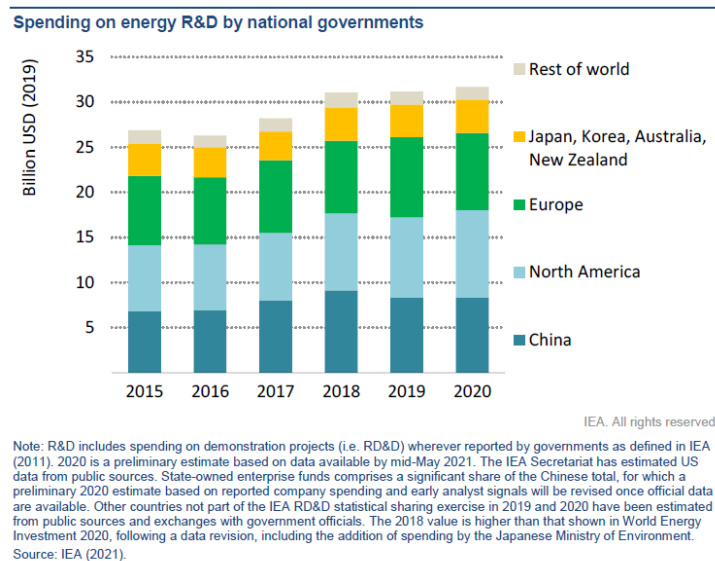


図 II-30 国別エネルギー関連の研究開発への投資額
(出典：IEA, World Energy Investment 2021)

図II-31 は、中国、EU、日本、米国の低炭素関連の技術の特許数である⁸⁾。中国以外 2011 年をピークに低下している。また日本については、再生可能エネルギーの部門よりも、貯蔵や電気自動車の分野に特徴がある。蓄熱関連については調べることができなかった。

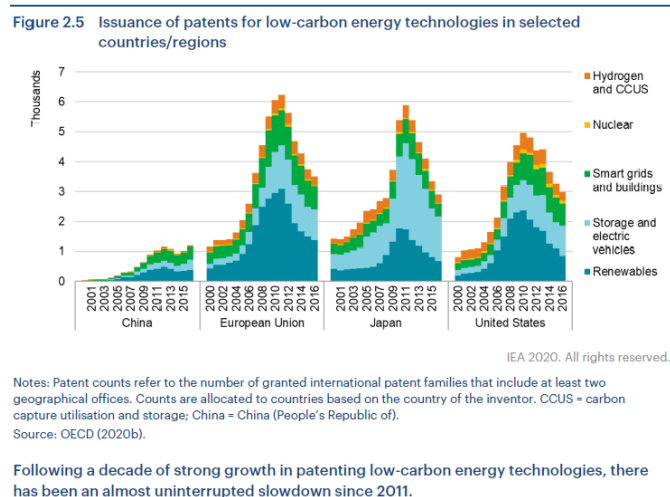


図 II-31 国別エネルギー関連の研究開発への投資額
(出典：IEA, Energy Technology Perspectives 2020)

表II-10 は、Web of Science にて関連キーワードにヒットする論文数とその国の内訳を整理した。“Energy”にヒットする論文は 300 万編以上あり、論文数では日本は 4 位であった。続いて、“Coal”、“Oil”、“Gas”、“Nuclear”、“Renewable”の内訳でみると、Gas と Nuclear の部門

で日本は4位であり、Renewableについては16位であり寄与率は低かった。Renewableの内訳である、“Solar power”、“Wind”、“Geothermal”、“Hydro”、“Biomass”においては、24位から15位であつた。

“Electricity”、“Heat”、“Thermal”、“Cool”、“Fuel”の分布では、4～5位となっており、日本の熱利用についての優位性が伺われる。エネルギー貯蔵の分野では、電気の貯蔵が16位であつたのに対して、熱の貯蔵は11位と順位は上であつた。さらに、圧縮空気以外の蓄熱分野で8～11位と比較的高い順位であつた。日本は、蓄熱の分野での一定の強みを有すると言えよう。

さらに、PCMでは日本は13位と若干順位は下がるが、北大は39位と国内1位であり、国内2位と3位の京都大学と東京大学の世界順位はそれぞれ124位と150位であり、日本では北海道大学がPCM分野での強みがあることがわかる(表には示していない)。

表II-10 エネルギー関連論文のヒット数と日本の位置づけ

Web of Science 検索ワード 2021.6.12	ヒット数	上位国					日本の順位
		1	2	3	4	5	
Energy	3,124,856	USA	China	Germany	Japan	England	
Energy + Coal	27,769	China	USA	Australia	India	England	Japan (9)
Energy + Oil	64,685	USA	China	India	Canada	England	Japan (11)
Energy + Gas	259,755	USA	China	Germany	Japan	England	
Energy + Nuclear	100,515	USA	Germany	China	Japan	France	
Energy + Renewable	87,859	China	USA	Germany	India	England	Japan (16)
Energy + Renewable + Solar power	12,127	USA	China	India	Germany	Spain	Japan (15)
Energy + Renewable + Wind	19,698	USA	China	India	England	Germany	Japan (17)
Energy + Renewable + Geothermal	2,114	USA	Turkey	China	Italy	Germany	Japan (18)
Energy + Renewable + Hydro	2,375	China	USA	India	Germany	England	Japan (24)
Energy + Renewable + Biomass	12,353	USA	China	India	Italy	Germany	Japan (16)
Energy + Electricity	68,749	USA	China	England	Germany	Spain	Japan (13)
Energy + Heat	263,291	USA	China	Germany	Japan	India	
Energy + Thermal	282,531	USA	China	Germany	India	Japan	
Energy + Cool	70,498	USA	China	Germany	England	Japan	
Energy + Fuel	127,569	USA	China	India	England	Germany	Japan (6)
Energy + Electricity + Storage	12,053	USA	China	Germany	England	Italy	Japan (16)
Energy + thermal + Storage	31,059	China	USA	India	Germany	England	Japan (11)
Energy + sensible heat storage	1,380	USA	China	India	Spain	Germany	Japan (11)
Energy + latent heat storage	5,580	China	USA	India	England	Turkey	Japan (9)
Energy + thermochemical heat storage	916	China	Germany	USA	France	Spain	Japan (8)
Energy + compressed air storage	1,163	China	USA	England	Canada	Iran	Japan (25位以下)
Energy + liquid air storage	1,100	China	USA	England	Germany	Australia	Japan (9)
Energy + PCM	10,529	China	USA	India	Iran	Spain	Japan (13)

III.社会像実現に向けたシナリオ

1.挑戦的研究開発の分野・領域及び研究課題

①挑戦的研究開発を推進すべき分野・領域

当該 MS 目標を達成するためには、再生エネルギーの大量導入と電化、および水素利用を両輪としつつも、この両輪の「軸」となる熱利用技術を中心としたマルチスケールのエネルギーの貯蔵・輸送・再生・制御技術と、社会技術及び情報技術との統合・融合が必要である。そこでは、先進的な潜熱蓄熱、化学蓄熱技術とエクセルギー再生技術の研究開発を共通的な技術基盤として推進すべきである。エネルギー消費の大きな産業分野では、排熱自体を発生させない熱の制御・再生・循環利用を実現するために高温域の挑戦的な技術開発を推進すべきである。すでに成熟しつつある低温領域の技術の利用が想定される民生分野では、完全自動運転型の熱輸送など社会技術および情報技術との統合・融合する領域の推進が必要となる。さらに、両セクターをカップリングしてより大きなスケールでの熱の再生・循環利用のコアとなるロバストな季節間蓄エネルギー技術としての蓄熱技術の開発を推進すべきである。

②目標達成に当たっての研究課題

I. コア技術開発

1) 蓄エネルギー技術

1)-1 ロバストな季節間蓄エネルギー技術としての蓄熱技術の開発

2) 熱輸送技術：

2)-1 高密度かつ高速熱交換可能な熱輸送システムの開発

2)-2 自動運転・配送・交換によるランニングコストの徹底的削減

2)-3 他の公共サービス（ごみ収集、資源回収、公共交通機関など）や物流と熱輸送をインテグレーション可能な統合的輸送システムの開発。

3) 熱の再生・循環利用技術：

3)-1 多様な温度領域で展開可能なエクセルギー再生技術

3)-2 従来の性能を凌駕する高性能熱交換器の開発

4) 熱制御技術：排熱レス熱制御技術

4)-1 製品顕熱の回収が可能な制御冷却技術

4)-2 吸発熱現象を利用したコプロダクション型の熱回収技術

Ⅱ. 社会技術

- 1) 共通社会資本としての再生可能エネルギーの位置づけや概念整理
- 2) 時代にあった進化可能な制度・事業形態の検討
- 3) 再エネ利用に関する価値交換制度設計（経済、法律、制度）
- 4) 市民行動変容を促すナッジ技術（デザイン、アートなど）
- 5) 新たな市民の役割や責任の整理と社会参加を促す仕組み作り（自治、合意形成、教育など）
- 6) 地域共同体の立ち上げ、運営技術（市民出資型の共同事業）

Ⅲ. 情報技術

- 1) エネルギーのトレーサビリティ、タグ付け技術
- 2) ブロックチェーン技術等による価値交換技術システム
- 3) 地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システム（教育、福祉、地域交通などの他の公共部門との連携）
- 4) 個人情報管理などの社会課題への対応

2. 2030 年・2040 年・2050 年のそれぞれにおける、達成すべき目標（マイルストーン）、マイルストーン達成に向けた研究開発、これによる波及効果

①2030 年、2040 年、2050 年のそれぞれにおいて達成すべき且つ達成が見込める具体的な目標（マイルストーン）

1) 蓄エネルギー技術

2030 年：蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムのデモプラントでの実証（試験運用）

2040 年：蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムの普及とセクターカップリングの拡大

2050 年：地域共同体におけるエネルギー循環（エネルギーを分かち合う）システムの実現

2) 熱制御技術

2030 年：排熱 $\rightleftharpoons$ 0 プロセスの技術基盤の構築

2040 年：排熱 $\rightleftharpoons$ 0 プロセスの各種産業への展開とパイロットスケールでの実証と試験的運用

2050 年：産業-民生のセクターカップリングと排熱 $\rightleftharpoons$ 0 プロセスの導入による排熱 $\rightleftharpoons$ 0 産業の実現

3) 熱輸送技術

2030 年：自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの実証

2040 年：自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの普及

2050 年：物流・公共サービスインテグレートした熱輸送システムの普及

4) 熱再生技術

2030 年：多様な温度領域に対応したエクセルギー再生プロセスの開発と概念実証

2040 年：パイロットスケールでの実証試験の完了

2050 年：エクセルギー再生プロセスの普及によるエネルギー消費ミニマムなエネルギー社会の実現

5) 社会・情報システム

2030 年：地域エネルギー（電気）を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ（試験運用）

2040 年：地域エネルギー（電気+熱）を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ（試験運用）

2050 年：地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システムの運用

表Ⅲ-1 2030年、2040年、2050年の目標（マイルストーン）

項目	2030	2040	2050
1) 蓄エネルギー技術	蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムのデモプラントでの実証（試験運用）	蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムの普及とセクターカップリングの拡大	地域共同体におけるエネルギー循環（エネルギーを分かち合う）システムの実現
2) 熱制御技術	排熱≒0プロセスの技術基盤の構築	排熱≒0プロセスの各種産業への展開とパイロットスケールでの実証と試験的運用	産業-民生のセクターカップリングと排熱≒0プロセスの導入による排熱≒0産業の実現
3) 熱輸送技術	自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの実証	自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの普及	物流・公共サービスシステムの導入した熱輸送システムの普及
4) 熱再生技術	多様な温度領域に対応したエクスセルギー再生プロセスの開発と概念実証	パイロットスケールでの実証試験の完了	エクスセルギー再生プロセスの普及によるエネルギー消費ミニマムなエネルギー社会の実現
5) 社会・情報システム	地域エネルギー（電気）を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ（試験運用）	地域エネルギー（電気＋熱）を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ（試験運用）	地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システムの運用

②マイルストーンの達成に向けて取り組むべき具体的な研究開発テーマ

1) 蓄エネルギー技術

1)-1 2030 年マイルストーン：蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムのデモプラントでの実証（試験運用）

- ・安価かつ高性能な蓄熱体の開発とその大量生産技術の構築
- ・高蓄熱密度と高速熱交換性能を兼ね備えた蓄熱熱交換システムの開発
- ・高効率な電熱変換技術の開発
- ・デモプラントの小規模導入と運用による実証試験

1)-2 2040 年マイルストーン：蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムの普及とセクターカップリングの拡大

- ・高蓄熱密度と高速熱交換性能を兼ね備えた蓄熱熱交換システムのスケールアップ
- ・蓄エネルギーシステムとしての蓄熱システムにおける電熱併給の実証試験

1)-3 2050 年マイルストーン：地域共同体におけるエネルギー循環（エネルギーを分かち合う）システムの実現

- ・社会・情報システム技術と連動した地域内熱・電気運用システムの開発

2) 熱制御技術

2)-1 2030 年マイルストーン：排熱 $\rightarrow$ 0 プロセスの技術基盤の構築

- ・化学反応などのコプロダクション型の吸熱現象を利用した熱制御技術の開発
- ・固体顕熱からの熱回収を伴う制御冷却技術の開発
- ・ダーティな排熱源からのエクセルギーロス最小な熱回収・利用技術の開発

2)-2 2040 年マイルストーン：排熱 $\rightarrow$ 0 プロセスの各種産業への展開とパイロットスケールでの実証と試験的運用

- ・各種産業にそれぞれ適した排熱 $\rightarrow$ 0 プロセスのパイロットスケールでの実証試験

2)-3 2050 年マイルストーン：産業-民生のセクターカップリングと排熱 $\rightarrow$ 0 プロセスの導入による排熱 $\rightarrow$ 0 産業の実現

- ・各種産業、地域特性に応じたシステム全体の最適化

3) 熱輸送技術

3)-1 2030 年マイルストーン：自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの実証

- ・室温での貯蔵・輸送かつ高速の熱出力が可能な蓄熱材料・デバイスの開発
- ・完全自動運転型オフライン熱輸送・利用技術の開発

3)-2 2040 年マイルストーン：自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの普及

- ・各市町村での実証試験

3)-3 2050 年マイルストーン：物流・公共サービスインテグレートした熱輸送システムの普及

- ・価値の統合交換循環システムと統合化されたオフライン熱輸送システムの運用試験

4) 熱の再生・循環利用技術

4)-1 2030 年マイルストーン：多様な温度領域に対応したエクセルギー再生プロセスの開発と概念実証

- ・高密度熱循環媒体/プロセスの開発
- ・熱のアップグレード手法の開発（機械的/化学的手法など）
- ・従来の性能を凌駕する高効率熱交換器の開発と各プロセスへのインテグレーション検討

4-2) 2040 年マイルストーン：パイロットスケールでの実証試験の完了

- ・パイロットスケールでの実証試験

4-3) 2050 年マイルストーン：エクセルギー再生プロセスの普及によるエネルギー消費ミニマムなエネルギー社会の実現

- ・実装に向けた課題の抽出とその対応策の検討

5) 社会・情報システム

5)-1 2030 年マイルストーン：地域エネルギー（電気）を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ（試験運用）

- ・共通社会資本としての再生可能エネルギーの位置づけや概念整理
- ・再エネ利用に関する価値交換制度設計（経済、法律、制度）
- ・ブロックチェーン技術等による価値交換技術システム開発
- ・市民行動変容を促すナッジ技術開発と実証（デザイン、アートなど）
- ・地域共同体の試験立ち上げ（市民出資型の共同事業）

5)-2 2040 年マイルストーン：地域エネルギー（電気＋熱）を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ

- ・エネルギーのトレーサビリティ、タグ付け技術開発
- ・エネルギー以外の物流・サービスに関する価値交換制度設計（経済、法律、制度）
- ・時代にあった進化可能な制度・事業形態の検討
- ・新たな市民の役割や責任の整理と社会参加を促す仕組み作り（自治、合意形成、教育など）

5)-3 205 年マイルストーン：地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合と運用

- ・地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システム開発（教育、福祉、地域交通などの他の公共部門との連携）

表Ⅲ-2 マイルストーンの達成に向けて取り組むべき具体的な研究開発テーマと社会にもたらす効果

	2030	2040	2050
1) 蓄エネルギー技術	蓄エネシステムとしての蓄熱システムの実証(試験運用) ・安価かつ高性能な蓄熱体の開発とその大量生産技術の開発 ・高蓄熱密度と高速熱交換性能を兼ね備えた蓄熱交換システムの開発 ・高効率な熱交換技術の開発 ・デモプラントの小規模導入と運用による実証試験	蓄エネシステムとしての蓄熱システムの普及とセクターカップリングの拡大 ・高蓄熱密度と高速熱交換性能を兼ね備えた蓄熱交換システムのスケールアップ ・蓄エネシステムのシステムとしての蓄熱システムにおける蓄熱供給の実証試験	地域共同体におけるエネルギー循環(エネルギーを分かち合う)システムの実現 ・社会情報システム技術と運動した地域内熱・電気運用システムの開発
2) 熱制御技術	排熱≒0プロセスの技術基盤の構築 ・化学反応などのコプロダクション型の吸熱現象を利用した熱制御技術の開発 ・固体顕熱からの熱回収を伴う制御冷却システムの実証 ・データ駆動型排熱源からのエクスセルギーロスミニマムな熱回収・利用技術の開発	排熱≒0プロセスの各種産業への展開とパイロットスケールでの実証と試験的運用 ・各種産業にそれぞれ通じた排熱≒0プロセスのパイロットスケールでの実証試験	産業・民生のセクターカップリングと排熱≒0プロセスの導入による排熱≒0産業の実現 ・各種産業、地域特性に応じたシステム全体の最適化
3) 熱輸送技術	自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの実証 ・室温での貯蔵・輸送かつ高速の熱出力が可能な蓄熱材料・デバイスの開発 ・完全自動運転型オフライン熱輸送・利用技術の開発	自動運転を利用したオフライン熱輸送システムの普及 ・各市町村での実証試験	物流・公共サービスインテグレートした熱輸送システムの普及 ・価値の統合交換循環システムと統合されたオフライン熱輸送システムの運用試験
4) 熱再生技術	多様な温度領域に対応したエクスセルギー再生プロセスの開発と概念実証 ・高密度熱循環媒体/プロセスの開発 ・熱のアップグレード手法の開発(機械的/化学的手法など) ・従来の性能を凌駕する高効率熱交換器の開発と各プロセスへのインテグレーション検討	パイロットスケールでの実証試験の完了 ・パイロットスケールでの実証試験	エクスセルギー再生プロセスの普及によるエネルギー消費ミニマムなエネルギー社会の実現 ・実証に向けた課題の抽出とその対応策の検討
5) 社会・情報システム	地域エネルギー(電気)を対象とした地域通貨(グリーン通貨)技術運用と地域共同体立ち上げ(試験運用) ・共通社会資本としての再生可能エネルギーの位置づけや概念整理 ・再生エネルギーに関する価値交換制度設計(経済、法律、制度) ・ブロックチェーン技術等による価値交換技術システム開発 ・市民行動変容を促すナッジ技術開発と実証(デザイン、アートなど) ・地域共同体の試験立ち上げ(市民出資型の共同事業)	地域エネルギー(電気+熱)を対象とした地域通貨技術運用と地域共同体立ち上げ(試験運用) ・エネルギーのトレーサビリティ、タグ付け技術の開発 ・エネルギー以外の物流・サービスに関する価値交換制度設計(経済、法律、制度) ・時代にあった進化可能な制度・事業形態の検討 ・新たな市民の役割や責任の整理と社会参加を促す仕組み作り(自治、合意形成、教育など)	地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合 ・地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システム開発 (教育、福祉、地域交通などの連携)
社会にもたらす効果	蓄エネ技術が将来適用可能な技術として社会に認知される ・蓄エネ技術が地域熱供給地域ヘデモプラントが導入され余剰再生エネルギー利用が開始 ・熱制御により排熱を出さない技術の開発へのシフト ・自動運転による熱輸送の導入 ・エネルギーカスカード利用からエクスセルギー再生ヘパラダイムシフト ・地域再生エネのコモニ化が認識され、地域共同体で地域通貨(グリーン通貨)による運用試験開始	蓄エネ技術が多様な分野で適用が始まる ・蓄エネ技術を利用した地域熱供給のマイクログリッド化が進むとともに、産業と民生の蓄熱技術によるセクターカップリングの実現 ・化学、鉄鋼業への熱制御技術実証展開 ・熱輸送技術を導入する市町村が増加し、市町村間のエネルギーネットワーク開始 ・熱再生技術パイロットスケール実証試験 ・地域共同体で、電気に加えて熱も地域通貨での取引が開始	地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システムの運用 ・蓄エネ、熱制御、熱輸送、熱再生の熱循環技術が普及 ・セクターカップリング進行による電気・熱の融通とデマンドレスポンスと次世代EMSによる全体最適化 ・エネルギーと他の公共部門(教育、福祉、地域交通など)との価値統合化が進み、地域通貨での取引が本格化され、域内での経済循環が達成 ・2050年が、自律分散型ネットワーク社会形成元年として認識

③マイルストーンの達成が社会にもたらす効果

I. 2030 年 蓄エネ技術が将来適用可能な技術として社会に認知される

- 1) 蓄エネ技術が地域熱供給地域へデモプラントが導入され余剰再エネ回収と利用が開始される。

システムの成立に必要な各要素の開発が達成され、デモプラントの導入と運用による実証試験がスタートする。デモプラントは将来の拡張性を考慮し、地域熱供給用の熱導管が敷設されている地域へ導入する。当面は普及の拡大した再エネの余剰電力の回収と、安定的な電力供給に資する技術として設置、運用する。この実証、運用の成功により、不安定なエネルギー源である再エネを安価に貯蔵し、安定的運用できるようになるため、再エネ導入の普及が加速化される。

2) 熱制御により排熱を出さない技術の開発へのシフト

今までの排熱回収技術のパラダイムであった「低温排熱の回収」が、製品顕熱回収技術の概念実証により、「排熱を出さない技術の開発」へとシフトする。

3) 自動運転による熱輸送の導入

自動運転の普及とともに、今までの熱輸送の課題となっていたランニングコスト＝人件費の削減に目処がつき、フレキシブルなエネルギー運用としての熱輸送技術が花をひらく。

4) エネルギーカスケード利用からエクセルギー再生へパラダイムシフト

あらゆる温度領域でのエクセルギー再生技術とこの技術を現実的な時間とスケールとコストで実現するための高性能熱交換器の概念実証が達成され、エネルギーのカスケード利用から、エクセルギー再生へのパラダイムシフトの機運が高まる。

5) 地域再エネのコモン化が認識され、地域共同体で地域通貨（グリーン通貨）による運用試験開始

再生可能エネルギーの収穫・貯蔵・利用に関する共通社会資本としての議論が進むとともに、仮想通貨による地域通貨（グリーン通貨）が社会的信用力が高まり、一部の地域で、地域共同対による再エネ電気を対象とした地域通貨運用試験が始まる。

II. 2040 年 蓄エネ技術が様々な分野で適用が始まる

- 1) 蓄エネ技術を利用した地域熱供給のマイクログリッド化が進むとともに、産業と民生の蓄熱技術によるセクターカップリングの実現

事業の拡大に伴い、蓄エネルギーシステムを起点とした地域熱供給のマイクログリッド

が形成されていく。地域インフラの再開発の選択肢として、再エネ電源×蓄熱による蓄エネ×地域熱供給のマイクログリッドが有力な選択肢となる。また、地域によっては、熱を介して、産業とのセクターカップリングも実現する。産業プロセスから出た排熱を蓄熱システムで回収し、熱または電力として民生へと供給可能となる。産業の電化は進み、デマンドレスポンス対応で安価に電力を購入、使用し、プロセスから出てきた排熱を貯蔵し、民生へと熱または電力として供給される。

2) 化学、鉄鋼業への熱制御技術実証展開

化学・鉄鋼産業を中心に、排熱レスプロセスの実証が展開されていく。

3) 熱輸送技術を導入する市町村が増加し、市町村間のエネルギー融通が開始

各市町村に熱輸送技術が普及する。また、地域内で余った熱を近隣の地域自治体へ輸送する熱エネルギーのネットワークも構築され始める。

4) 熱再生技術パイロットスケール実証試験

パイロットスケールでの実証が展開されていく。

5) 地域共同体で、電気に加えて熱も地域通貨での取引が開始

蓄熱技術を中心とした技術が身のまわりに増え始め、地域共同体で再エネ電気に加えて、熱エネルギーも取引されるようになる。セクターカップリングが進み、地域民生部門だけではなく、遠方の産業分野との価値交換も始まる。さらに、隣接する市町村とのエネルギー融通が進み、異なる地域通貨の価値交換システムの運用も始まる。

Ⅲ. 2050 年 地域内物流・エネルギー・サービスのすべての価値の統合交換循環システムの運用

- ・セクターカップリング進行による電気・熱の融通とデマンドレスポンスと次世代 EMS による全体最適化
- ・エネルギーと他の公共部門（教育、福祉、地域交通など）との価値統合化が進み、地域通貨での取引が本格化され、域内での経済循環が達成
- ・2050 年が、自律分散型ネットワーク社会形成元年として認識

3. 目標達成に向けた国際連携の在り方

HO・DO・HO・DO は日本人のみに特有の感覚ではなく、スウェーデンにおける「ラーゴム（少なすぎず多すぎずちょうどよい）」やデンマークにおける「ヒュッゲ（居心地のよい雰囲気や時間）」など、近い感覚を大切にしている多くの国、地域がある。また、特に北欧は熱導管による地域熱供給のインフラや温水タンクによる熱貯蔵設備が広域にわたって整備されており、これらの運用やより良く使うための技術に関する研究開発が活発である。よって、これらの国々と連携することで、HO・DO・HO・DO のスケールの分散都市においてエネルギーを循環させるための社会システムや技術を議論していく。

また、これまで熱は電力と比べて効率の低いエネルギー利用形態と考えられてきたが、技術の確実性や低コスト性が見込めることから、ここ数年で急速に開発が進んでいる。蓄えた熱を電力に再変換して利用する「カルノーバッテリー」は、国際エネルギー機関（IEA）の国際共同研究活動Annex36として取り上げられるなど、将来の主要な蓄エネ技術の一つとして期待と社会的要請が高まっている。再生可能エネルギー導入で明らかに我が国より先行している欧州では、再生可能エネルギーを効率的に活用するための蓄エネルギー技術のニーズが具体化してきており、カルノーバッテリー等の大規模蓄熱システムの実証試験が積極的に推進されている。国内では再生可能エネルギーを主ターゲットとした研究開発例がほとんどないことから、先行している欧州の研究機関との連携が肝要となる。一方、省エネルギー技術に関しては、我が国は世界最高の技術を有していることから、両者をつなぐムーンショット型熱利用技術の研究開発を推進することで、本MS目標が目指すエネルギーから自由になる自律分散社会を実現する。

4. 目標達成に向けた分野・セクターを越えた連携の在り方

当該 MS 目標を達成するためには、下記のあらゆるセクターを超えた連携による技術開発から現地実証が必要である。

- ・コア技術開発セクター（大学、研究機関、企業）
- ・関連技術開発セクター（大学、研究機関、関連企業）
- ・社会技術セクター（大学、研究機関）
- ・情報技術セクター（大学、研究機関、関連企業）
- ・行政セクター（行政、政治家、など）

連携のあり方については、従来の研究者－研究者、研究者－企業、といった個人的なつながりのクローズドな関係ではなく、オープンな議論の場の形成が必要である。例えば、文部科学省が進める JST「共創の場形成支援プログラム」では、組織－組織群で共通のビジョン設定を行い、バックキャストとして設定されたターゲットに基づき課題設定された研究を推進する仕組み作りを行っている。このような、“大学の間”を、多様なステークホルダーに開放し、秘密保持などの一定の社会ルールの下、自由闊達な議論を行える場を創出することが重要である。本 MS 目標達成に向けても、共創の場のコンセプトによる、仲間作り、自由闊達な雰囲気の中で創造的な仕事が、多様なステークホルダーによって生み出される仕組みづくりから始めたい。

一方で、コア技術については、知的財産クローズドな環境下で、国プロ獲得や企業との共同研究で行っていくこととなるが、知的財産が守られた形で、その技術を応用・適用できる分野への情報発信を積極的に行い、上記の共創の場に巻き込みなどの戦略を常に考えながら、技術開発と社会実装を現地実証（社会実験）を通じてスパイラルアップさせていく。

それから、本ミレニアプログラムでの得られた他のチームとの連携を強く推進していく。定期的な情報交換はもとより、合同シンポジウムやセミナー、ワークショップの開催により、仲間を増やし、そして、学部生・大学院生・博士学生、社会人学生、若手研究者を巻き込んだ人材育成に力を入れ、継続的イノベーションを創出できる強いネットワークを形成する。また、研究成果を学術論文での公表だけではなく、国民に広くその必要性やその進化、可能性を伝えていく仕組みも重要である。あらゆる世代に届くように、あらゆる媒体を利用した情報効果と情報収集の仕組みを形成し、常に開かれた研究開発と実証を行うと共に、合意形成に必要な情報やコミュニケーションの場として機能することを期待する。

ポスト SDGs の世界をいかに創造するか。セクター間を超えた議論とコミュニケーションにより、次の課題に取り組む準備もできる体制づくりを行っていきたい。

5. ELSI (Ethical, Legal, Social Issues)

(目標達成に向けて取り組むうえでの倫理・法的・社会的課題及びその解決策)

1) 個人情報管理などの社会課題への対応

まずは、世界的な議論、国内での議論の進展を見守りながら、めまぐるしく変化する倫理観やルール（国内、国際）に対応しながら、研究開発を進めていく必要がある。

2) 合意形成とコミュニケーション

どんなに良い技術やシステムであっても、その社会実装のためには合意形成が重要である。そのためには、あらゆるステークホルダーとのコミュニケーションが必要である。特に、本研究の推進に当たっては、地域実証というステップが欠かせないことから、実証検討段階から、地域に入り将来のビジョンやターゲットを共有しながら、市民の意見や考え方を反映し進めることが重要である。上記、個人情報管理など難しい問題もあるが、地域住民による共同体による取組が、地域住民の信頼の下、一步一步着実に進められるようにする。

IV. 結論

1) 本プロジェクトの経過

本プロジェクトの計画を図IV-1 に、その実際の経過を表IV-1 に示す。合計 7 回のミーティングでは、メンバーからの話題提供に加えて、外部講師からの話題提供も積極的に企画し、講師の方にも本 MS 目標の議論に加わっていただいた。そのほか、学生や若手研究者などの多様な世代の意見を集約するために、寒冷地ワークショップ、若手研究者・大学院生・学部生による若手ワークショップ、DEMOLA プログラム「私たちの 2100 年はどうなる世界？」を開催した。



図IV-1 本プロジェクトの計画

表IV-1 本プロジェクトの経過

日付	内容	備考
2021 年 1 月 21 日	オリエンテーション	WEB 開催
2 月 1 日 17:30～	第 1 回会議（キックオフミーティング） ○調査の進め方、役割分担、内容の議論 ○話題提供 1) 能村貴宏 「蓄熱技術に関するトピックス」 2) 田部豊「将来の目指すべき北海道のエネルギーシステム」	工学部アカデミックラウンジ 3

	3) 三上直之「「気候市民会議 さっぽろ 2020」札幌市民会議について」 4) 杉村逸郎（産地機構）「DEMOLA の説明」 5) 石井一英「オリエンテーション報告 久能 VL メッセージの紹介」	
--	--	--

2021.2.1
HO.DO.HO.DO

第1回ミーティング

会場／工学部アカデミックラウンジ3

▼テーマはこれ！

蓄熱

熱を貯めて、運んで、使う！
未来の暮らしを創る技術！

ここでは目！潜熱技術！

潜熱利用型
とくにコスト面、水やレンガなどの
低コストな蓄熱を可能にする

潜熱利用型 / フォトリソグラフィー

化学反応利用型
ヒートポンプを使って、熱を持ち上げ
たり下げたりしながら蓄熱する

様々な蓄熱、進化する技術

▼温水器／氷蓄熱

夜間の安い電力
→ 氷や温水を蓄熱
→ 日中に利用

▼雪蓄熱

雪の蓄熱
→ 雪解け時の温水として利用

▼カルノーバッテリー

風力発電
太陽光発電
→ 蓄熱
→ カルノーバッテリー
→ 安定供給
供給先の街

熱を運ぶ技術もすごい！

蓄熱材をカプセルで包んじやいました！

シェルセラミック素材でできており、カプセルの大きさは30μm = 0.03mm程度

長期蓄熱を貯蔵可能、蓄熱材の作動温度を変えることが可能
セラミックは分子のため、様々な形に加工・運用可能

北海道が目指すべきエネルギーシステムとは！ 明確な答えはないけど...

札幌市第2次札幌市環境基本計画で掲げる目標
2015年 → 2050年

二酸化炭素排出量80%削減！

この調子では達しない！
劇的な変化が必要！
危機感を持とう！

さあどうする

必要なのは...

上記技術を有効に活用できる
社会システムそのもの！

<部門別CO2削減予測>

▼対策なし

CO2削減率 (%)

2015 2020 2030 2040 2050

2050年 削減率 0%

▼対策あり

CO2削減率 (%)

2015 2020 2030 2040 2050

2050年 削減率 80%

オール電化など対策をすれば、
家庭やオフィスのCO2は大幅に削減する。

製鉄業や製紙業などは容易には減らない...
▼CO2を減らすには
発電部分の再エネ化

需要と供給を最適にマッチング

送電線と蓄電池の組み合わせにより、大幅にエネルギーロスを低減可能

2050年

年間需要

道北 3.4 TWh

道東 6.7 TWh

道央 20.0 TWh

道南 3.4 TWh

400MW (送電容量)

23.0%

25.2%

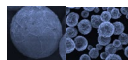
600MW

39.7% 道央内で最も風況の良い地点CF (%)

24.8% 道内各地域の年間需要 (TWh) と送電容量 (MW) または地域内で最も風況の良い地点CF (%)

2050年のエネルギーロスの削減結果 (80%を風力と太陽光で供給すると仮定)

2月17日 17:30～	第2回ミーティング ○話題提供 1) 能村貴宏「革新的蓄熱材料 h-MEPCM の実装展望」 2) 奥本素子「STEAM アプローチを通して語る高校生の持続可能な未来像」 ○DEMOLA 及び未来社会像イメージの検討の進め方について ○Workshop について ○外部有識者とのミーティング（講演依頼）について ○自由討論	工学部アカデミックラウンジ3
-------------------------	--	-----------------------

▼ 革新的蓄熱材料
h-MEPCMの実装展望延岡啓希
長村先生

PCMマイクロカプセル＝潜熱蓄熱・熱輸送粒子

PCM= Phase, Change, Material

＝相変化物質、潜熱蓄熱材

- 安心・安全に使用可能
- 他の材料との混合化が可能
- 熱輸送媒体として利用可能

- 特長1 緻密で硬いセラミックスシェル
- 特長2 蓄熱密度が高い（従来比5倍強）
- 特長3 コアPCMの熱伝導率が高い
- 特長4 成型・加工自由度が高い

様々な形状の蓄熱体を実装可能

<研究・開発のロードマップ>

Stage 1

MEPCM製造技術の確立

2020申請時点

2021年～春

Stage 2

h-MEPCMをベースとした

高性能蓄熱体の開発と評価

2022

Stage 3

蓄熱・

熱利用モジュールの

プロトタイプの開発

2022

Stage 4

熱利用技術における新たな技術

経路の創成

2022

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

蓄熱体実装の国際プロ

ジェクト

▼ 実装に向けた展望

- ・排熱回収を中心とした熱→熱変換による省エネだけでなく高温の熱を運用できるため、熱→電気、熱→化学変換も視野に入る。
- ・また、蓄熱＝蓄エネルギー技術として再生エネ分野においても基礎技術となる可能性。
- ・新材料であることから、はじめは小規模で効果のある用途を起点に、生産体制を徐々に拡大していくことを想定。

▼ イノベーションが生まれる対話の過程
STEAMアプローチ延岡啓希
長村先生

空間や対話の手法が変われば、

新たな意見や態度が表明される

科学技術に関するテーマで学びを深める際のポイント

1 異分野分野にまたがって異なる科学技術に対する

見方は具体的に異なる (Gardner, 1983)

2 現在の教育現場は、ある特定のトピックには関心が高い

可能性がある (Gardner, 1983)

3 対話的なイベントの手法によっては参加者が得意

という知識やスキルが (Kempster, 2001) 異なり、異なりと

しても科学技術の理解が深まる (Kempster, 2001)

4 もともとディスカッションという形式に慣れていない

文化や国もある (Kempster, 2001)

Frame3のイノベーション

Frame1

異分野で起こる

イノベーション

Frame2

異分野イノベ

ション (インターネット)

Frame3

多岐性から生まれる

イノベーション

STEAMとは

STEM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

STEAMとは

STEAM (Science, Technology, Education, Mathematics) に

Artを取り入れた学際的な学習形態

▼ 北海道大学が日本で初めて参加
DEMOLA network延岡啓希
長村先生

< DEMOLAを活用したディスカッションのテーマ (仮) >

Case 1

私たちは2050年に

どんな世に生きている

のだろうか？

・世界の多様な学生が集まってもらうためにはどんなテーマ設定が良い？

・同じテーマでも異なる国・地域を有する学生とどう交流できる？

・30年後は近未来の100年後と想像は異なるが、教育関係者も参加するが、

今後どんなプラットフォームがあるのか？

Case 2

利便性と自然環境の

ハーモニーをどう

実現できるか？

Case 3

ちょうどよいエネルギー

システムをどう

構築できるか？

DEMOLAとは

DEMOLA (Digital Education Model for Learning Across

Disciplines) が提供する教育学

領域のプラットフォーム

・世界中の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

・60以上の大学が参加している

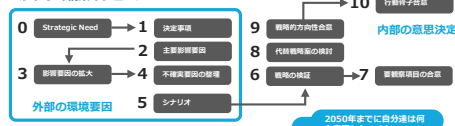
3月1日

2050年未来社会像について意見交換

アカデミックラウンジ3

▼ そもそもどんなプロジェクトだった？
背景と取組の確認延岡啓希
長村先生

<シナリオ構築のプロ>



本日のテーマ

Decision Focus

意思決定に影響を及ぼしそうなことをとにかき出し、絞り込む

▼ このプログラムの狙い



▼ まずは前提条件を再確認しよう

プロジェクトの背景／たき台

たき台に対する意見

目標は「エネルギーのコンプレックス」だ！

2050年、活用する熱の出どころはどこ？

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

2050年までに数分は利用を実現したい。

3月4日

ミレニア・プログラム ワークショップ

3月5日	久能 VL オフィスアワー JAXA チームとの意見交換	WEB 開催
3月19日 11:00～12:00	ミレニア・プログラムセミナー 第1回(渡辺 VL)	WEB 開催
3月24日	寒冷地ワークショップ ・他分野他専攻からなる大学生 20 名 ・「2050 年になっているべき寒冷地の未来」への 19 の未来アイデアとコレスポンデンス分析 ・2050 年の未来アイデアとエネルギー分野の関 連付け ・実現にあたっての課題分析	WEB 開催
3月29日	第3回ミーティング ○講演 「脱炭素の姿から考える蓄エネルギー（仮）」 信州大学先鋭材料研究所 教授 古山通久 氏 「地域資源を活用した経済循環の考え方（仮）」 東京大学 未来ビジョン研究センター 特任研究員 尾下優子 氏 ○計画実施状況・活動報告など	工学部アカデミッ クラウンジ 3

2021.3.29
HO.DO.HO.DO

第3回ミーティング

会場／工学部アカデミクラウンジ 3

▼ トレンドとファクトから夢想する未来の姿 脱炭素におけるパラダイムシフト

求められているのは「脱炭素」

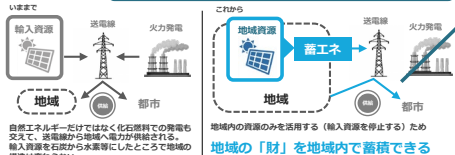
エネルギー領域だけでなく全方位的なソリューションが必要
＜サーキュラーエコノミーの視点＞



＜経済の豊かさを計る指標＞



＜society5.0の兆し＞ ▶ 地域の「財」を外へ輸出させない



＜思い込みの排除＞

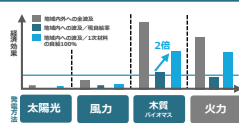


▼ 地域資源を活用した 地域内経済循環の考え方

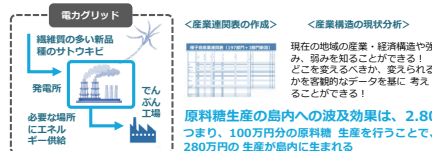
＜再エネ導入が地域経済にもたらす影響＞

木質バイオマスは燃料を地域内財にすることで現在の2倍の地域内波及が起こる

※産業連関表の活用（国内経済において一定期間に行われた財・サービスの産業間取引を一つの行列に示した統計表）



地域内の資源・エネルギーの効率的利用による経済循環／種子島の例



産学公協創による
社会実験トライアル
種子島一市二町と 地域内外の産業、
大学と 技術・システムの実証試験

▼ 計画実施状況／活動報告

- 3/1 高内氏との打ち合わせ
- 3/4 JST主催ミレニアワークショップ
- 3/5 久能VLのオフィスアワー
- 3/5 JAXAチームとの意見交換
- 3/20 「気候市民会議さつぽろ」
～脱炭素社会を目指した市民会議～結果
寒冷地ワークショップ
DEMOLAの進捗状況

	・「熱利用のアイデア」について、ブレインストーミングを実施 ・熱に価値をつけて海外輸出、熱のブランド化・ラベル化、エンターテインメントに利用などのアイデア	
5月11日 13:00～16:00	第5回ミーティング ○講演 「幸福とは何か：文化的幸福観からの検討」 京都大学 こころの未来研究センター 副センター長 教授 内田由紀子 氏 「"The Happiness Movement - Social and Subjective Well-Being as Topic of Public Policy"」 上智大学 総合人間科学部 社会学科 准教授 Carola HOMMERICH 氏 ○報告書について（フリーディスカッション） ※ Wellbeing について ※ HO・DO・HO・DO について	WEB 開催

2021.5.11
HO.DO.HO.DO

第5回ミーティング

監修 内田由紀子
協賛 赤木ミチ子

▼ 2050年を考える上で欠かせない視点「幸福」 今「幸福」について考える意義

幸福とは個人に閉じない概念

まち 家族 友人 国家

「幸福」とは個人単位でのマイクロな「心豊状態」を指すこともあれば、他人をとりまく社会全体の質を測るマクロな「社会幸福」を指すこともある。

個 社会、習慣、制度… 場

「幸福」という「あいまいな」概念をいかにして定量的に分析するか…

▼ イロイロな「幸福観」

1980年代の幸福観	アメリカの幸福観	日本の幸福観
若さ、健康、良い教育、高い収入、外交的、楽観的、高い自尊心、働く意欲…etc	獲得的幸福観 自分が望んだものは、競争した結果全て勝ち取ってきた！	強制的幸福観 他者とのバランスで回り回って自分にも幸せがやってくる！

幸福度を測る評価指標が必要

▼ 「幸福度」の測り方 / 何をもち「幸福」か…？

参考 / 内閣府が示す「幸福度」の指標は下記3つの観点から成る

幸福度の測り方の留意点

単純なランキングではなく、本数など、地域性や個性を捉え、ミクロな範囲で相対的に評価

＜妥当性検証＞

多世代共創 後継世代への継承・伝達と革新

向社会的行動 地域内外の連携へのサポート 主体的な発言、地域への積極的行動

異質・多様性への寛容さ 開放性、地域外への信頼

地域の一体感 連帯共同体、実体性知覚

地域の幸福 地域内の社会関係資本

The HAPPINESS MOVEMENT

Good society とは？ 何を持って「良い社会」か？

WORLD HAPPINESS REPORT 2019
Self-reported Life Satisfaction, 2019

収入と幸福の関係

収入と幸福の関係

私たちのHAPPINESSに影響する要素は？

GDPの高い日本/HAPPINESSは中程度
GDPの低いメキシコ/HAPPINESSは高い

▼ 各種ランキングにおける日本の位置

World Happiness Report 2020
Ranking 153 countries by subjective happiness (0-10)

Create your better life index

▼ HAPPINESS and PUBLIC POLICY

都市のwell-beingに直接影響のある政策分野

雇用

失業対策

ワークライフバランス

環境 / 自然・公害・福祉

健康ケア/フィジカル・メンタル

交流と助け合い

どこからどう始める？

Communityによる取組

健康なライフスタイル

・健康教育
・健康意識の向上
・健康行動の促進
・5年以上の継続性

優良実績を共有しよう

ローカルコミュニティによるボトムアップの取組

GLOBAL HAPPINESS and WELL-being POLICY REPORT 2019

Todmorden

・アーバン・ガーデン・プロジェクト
・健康を促進する公共空間
・環境改善とコミュニティ活性化が目的

5月19日	ミレニア・プログラムセミナー 第3回(足立 VL)	WEB 開催
-------	---------------------------	--------

13:00～14:00		
5月21日 10:30～	久能 VL オフィスアワー	WEB 開催
5月25日 16:00～	第6回ミーティング ○講演 「ブロックチェーンとエネルギー」 株式会社 INDETAIL（インディテール） 代表取締役 坪井大輔 氏 ○中間報告会について	WEB 開催

2021.5.25
HO.DO.HO.DO

第6回ミーティング

▼ 目的ではなく「手段」である ブロックチェーンという技術について

目指すところは…
分散型社会
その実現のために…
企業ができること
行政ができること
抜け落ちていた部分
ここを埋めるためのシステムとしてのブロックチェーン

今世界はどこに向かっているか…
テクノロジーの進化
4G ⇒ 5G
今まで抱えきれなかった種類・量のデータまでも集めることが可能な時代

「人の機能」を補完するデバイスの開発
AI, Cloud, Robot, AR/VR, Augmented, VR, Haptics, Smartwatch, etc.
データを活用して社会を暮らしを進化させる

▼ 2050年とはどんな社会か／どんな価値が評価されるか

人と人がネットワークを介してつながる社会（リアルでは繋がっていないとも関係性がつくれる時代）

個人主義化
未来の社会は、中央集権的から個人と個人がつながる社会へ

価値観の多様化
暗号資産／トークン
儲かる・儲からないの指標ではない。
人間として生まれた価値を測る評価基準をつくる。それがブロックチェーンの本質的な価値

これまで、生き方の「質」を評価できない社会だった…
これまでの価値観
価値が高い = 経済的価値 × 人間価値 × 社会貢献価値
生活の質／貨幣 × 生き方の質／暗号資産・トークン

▼ エネルギー分配への応用 ブロックチェーン活用の可能性と課題

＜将来に向けた課題＞
2050年に向けて地球資源の枯渇が大きなテーマ
※そもそも人間の遺伝子が継承できないという恐怖心から、命を奪い合うような大きな戦争はもう起きない

＜ブロックチェーンの可能性＞
テクノロジーを活用した新しい社会の基盤づくり
エネルギー × ブロックチェーン
新たな価値の定量化

自家発電をしてもエネルギーを効率よく運べない
小規模なコミュニティを1単位としたエネルギー共創ネットワークの構築が必要

▼ ブロックチェーン活用のケーススタディ

例／IoTデバイスの普及
ウェアラブルなIoTデバイス
健康データ等
医療会社等
データ活用・解析調査、新規開発等
データの活用等

貨幣経済とのリンクは順序を逆で、チャレンジしていくのがいいのではないかと…
1st STEP まず貨幣で買えないものと交換（スポーツ観戦VIP席など）
2nd STEP その次に貨幣との交換

TOPIC

2021.3.24 寒冷地ワークショップの報告

2021年3月24日
16:00-18:00 80名オンライン
Zoomブレイクアウトルームでのグループディスカッション

目的：寒冷地における「ほどほど」を踏まえた「よい」のエネルギー分散ネットワーク社会の2050年未来像をテーマに、学生による討議と発表を行い、未来像を具現化する重要事項を抽出する

議題：アイディア、グループワーク、アイディアに対して議論の集

提案されたアイディア
2050年未来像の策定に向けた提議分析
クロスセクタランス分析

デジタルとエネルギーの融合
分散型による電力エネルギー削減
食品・エネルギーの地産地消
エネルギーの移動・貯蔵
メンテナンススクリューの設置
「寒」が地域の特色に…

5月26日	フィンランド Paulig 社 Sustainability Manager, Climate & Circularity, David 氏 ヒアリング	WEB 開催
5月27日 13:00～15:00	廃棄物資源循環学会廃棄物計画研究部会と共催 セミナー実施 「脱炭素社会へ向けた廃棄物・バイオマスの役割～エネルギーの面から」 1. (公財)自然エネルギー財団 相川高信氏 「2050年の脱炭素化に向けたバイオエコノミーの役割：自然エネルギーとの相乗効果の観点か	WEB 開催

	ら」 2. デンマーク大使館 田中いずみ氏 「脱炭素社会と再生可能エネルギー100%を目指すデンマークの取り組み－廃棄物・バイオマスの役割」 3. 日立造船株式会社 環境事業本部開発センター 中田谷直広 氏 「日立造船株式会社におけるメタネーション技術の取り組み事例の紹介」 4. 上記講演者による座談会 コーディネーター： 部会長 石井一英（北海道大学）	
5 月 29 日	DEMOLA 発表会 ・学部生、留学生、社会人の合計 7 名 ・「私たちの 2100 年はどうような世界？」をテーマ ・4/10～議論開始 ・エネルギー利用に関するアイデア ・ YUKIDENKI、台風キャッチャー、トラックサンダーなど	WEB 開催
5 月 30 日	中間報告会	WEB 開催
6 月 8 日 11:00～12:00	ミレニア・プログラムセミナー 第 4 回（タン氏）	WEB 開催
6 月 16 日 9:00～10:00	ミレニア・プログラムセミナー 第 5 回（久能 VL）	WEB 開催
6 月 23 日 9:00～12:00	第 7 回ミーティング ○報告書案について	工学部アカデミックラウンジ 3
6 月 30 日	DEMOLA 最終ミーティング	工学部アカデミックラウンジ 2

2) メンバーの変遷

本チームのメンバー構成について、当初申請段階より、6名の追加を行った（図IV-2）。

山本佳世子（電気通信大学 教授）

西部 忠（専修大学 教授）

谷田部千理（農業・食品産業技術総合研究機構 北海道農業研究センター 主査）

佐竹輝洋（札幌市 環境局 環境都市推進部 環境計画課 推進係長）

堂屋敷誠（北海道石狩市 企画経済部 企業連携推進課 課長）

山本敏夫（北海道下川町森林商工振興課 バイオマス産業戦略室 室長）



図IV-2 チームメンバーの構成（青四角が新規メンバー）

3) 結論

本報告書の結論として、本提案の Inspiring, Imaginative, Credible を下記にまとめる。

Inspiring

- ・現在私たちが直面している地球環境、感染症、コミュニティの問題を緩和・解決するための道筋が今まさに必要とされている。
- ・行き過ぎた資源利用によって得られた物質的豊かさによる現在の世界は、必ずしもウェルビーイングにはつながっていない。まさに今、日本人が固有感覚である HO・DO・HO・DO を自ら再認識し世界へ広げ、世界的共感を得るべく情報発信を行っていく。
- ・「2050 年にエネルギーから自由になる」ことは、再生可能エネルギーを使いたい放題利用できる世界ではなく、我々世界で必要とされるエネルギーを自然から収穫し、貯蔵・輸送し分かち合うことで、最大限効率的に利用することを意味する。
- ・地域の再生可能エネルギーが、地域の経済、教育、福祉、互助、利他、といった地域特有の価値空間と融合し、あらゆる物、エネルギー、サービスが表現・交換できる社会、すなわちこれまで成し遂げることができなかった、HO・DO・HO・DO 自律分散ネットワーク社会が形成される。
- ・これを成し遂げるためには、工学のみならず、人文社会科学分野、そして行政・企業の多様なセクターとの共創が必要である。

Imaginative

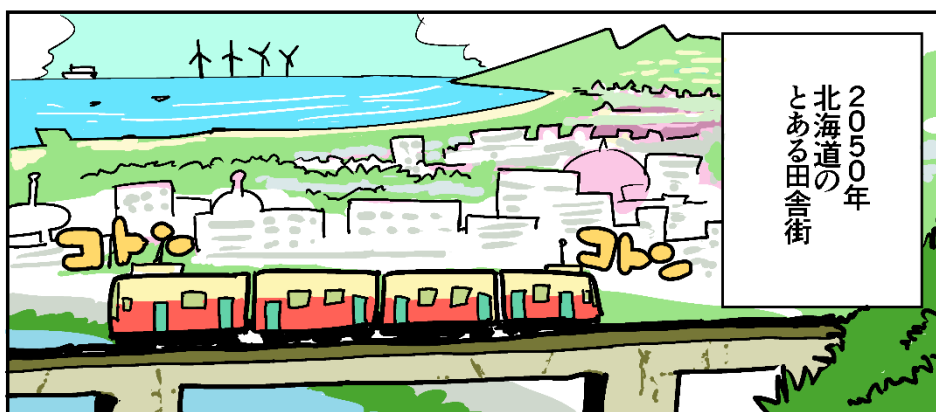
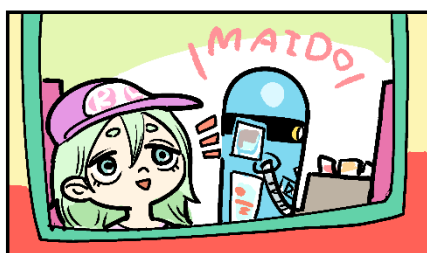
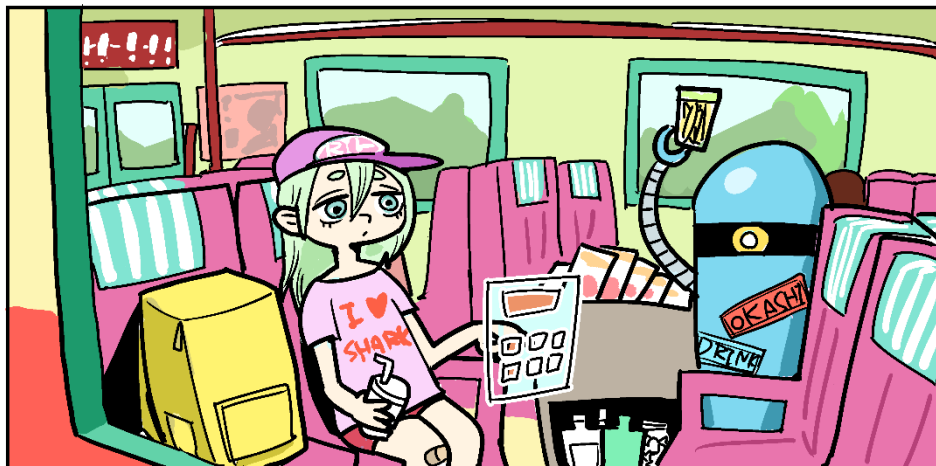
- ・本提案のコア技術は、蓄熱技術のブレークスルーにより熱力学的に究極な効率を目指すものである。
- ・あらゆる温度帯の熱エネルギーを自由に蓄熱、貯蔵・輸送して、そしてあらゆる用途に応じて、電気や必要な温度帯のエネルギーに変換することができれば、あらゆる産業部門、民生部門、そして輸送部門に爆発的なイノベーションを起こすことができる。

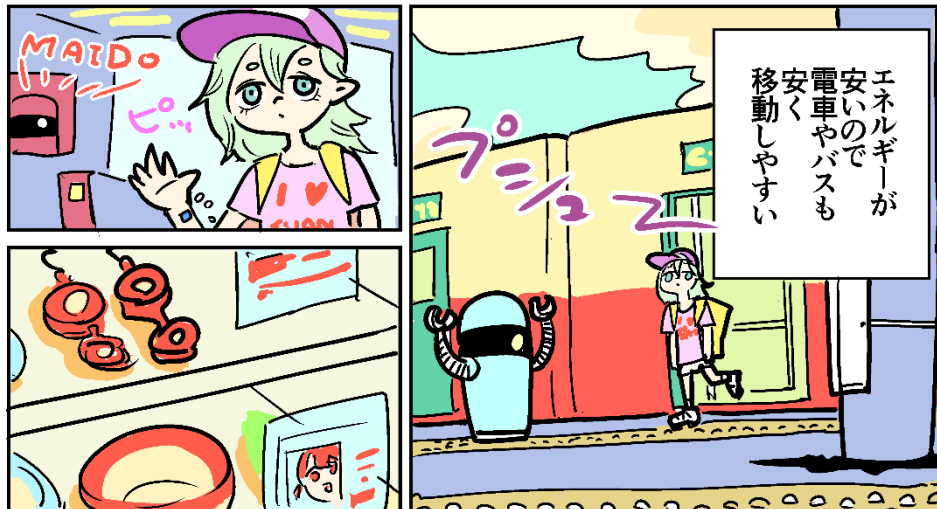
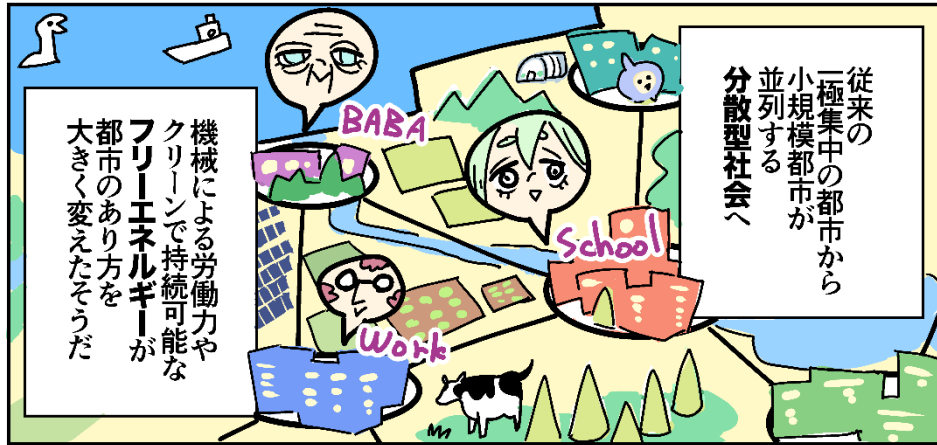
Credible

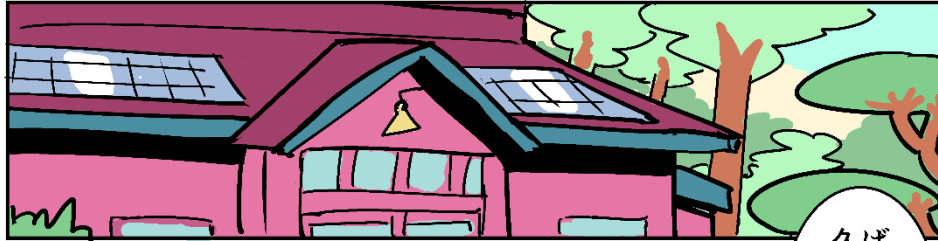
- ・蓄熱材の革新的な開発は、蓄エネ、熱制御、熱輸送、熱再生の分野での新技術やシステムの開発を誘発し、電気と送電線、石炭・石油に頼ってきたあらゆる産業部門、民生部門、そして輸送部門の技術体系を一変させる。
- ・2050 年に、現在の 50%のエネルギー量で済み、かつそのエネルギーをすべて再生可能エネルギーでまかなうという目標設定を提案する。これは、2050 年カーボンニュートラルを目指す政府、世界の施策と整合的である。

4) 本 MS 目標のイメージ漫画

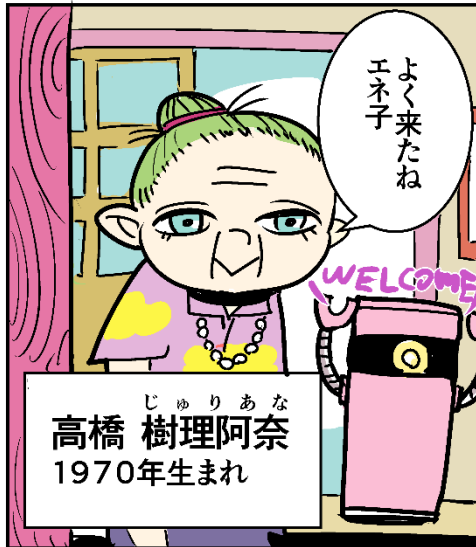








ばあちゃん
久しぶりー



じゅりあな
高橋 樹理阿奈
1970年生まれ



高橋 エネ子
2036年生まれ



おばあちゃんちで
いろいろ
教えてもらおう

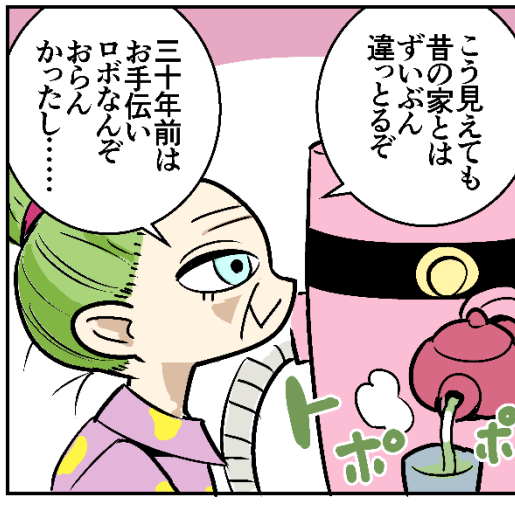
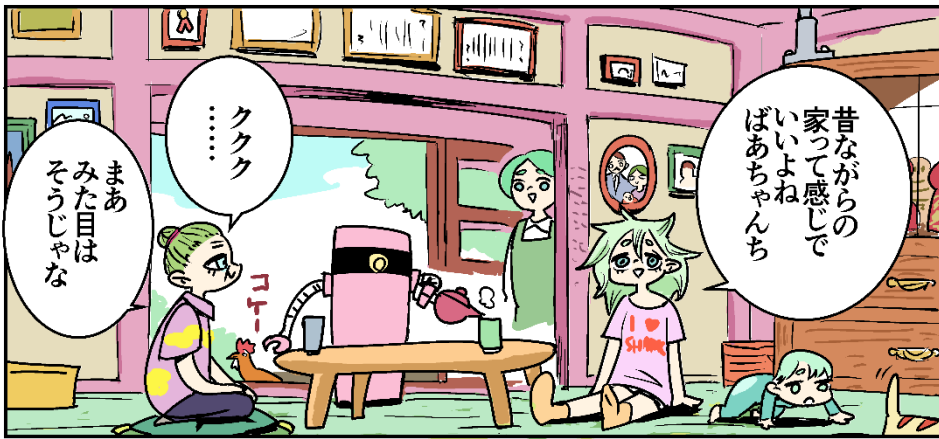
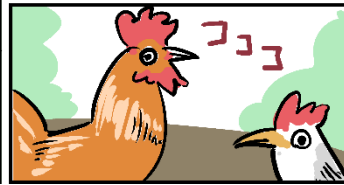
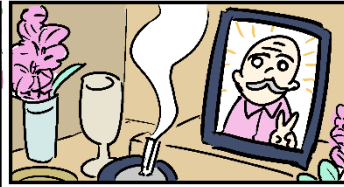
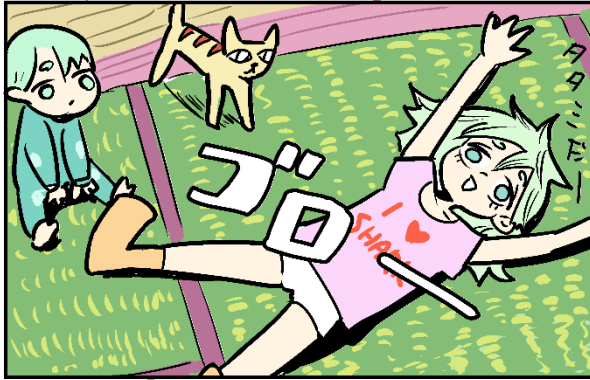
道わかった？

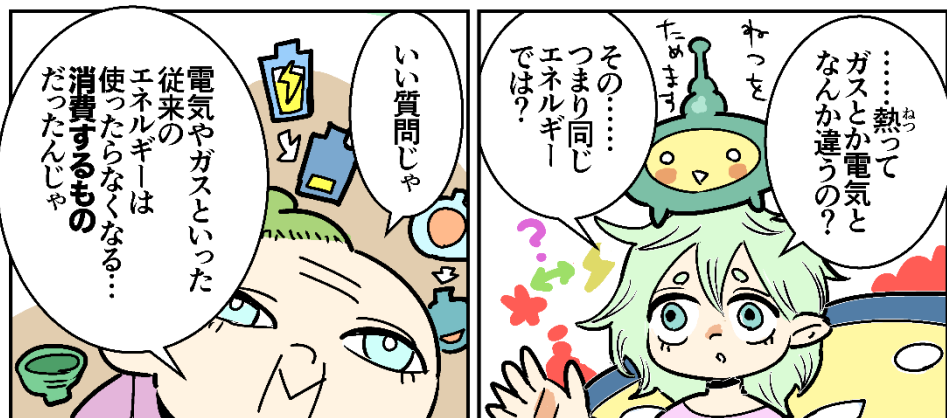
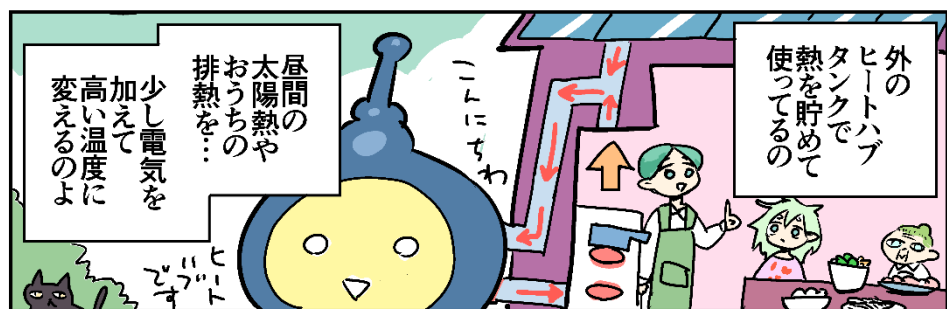


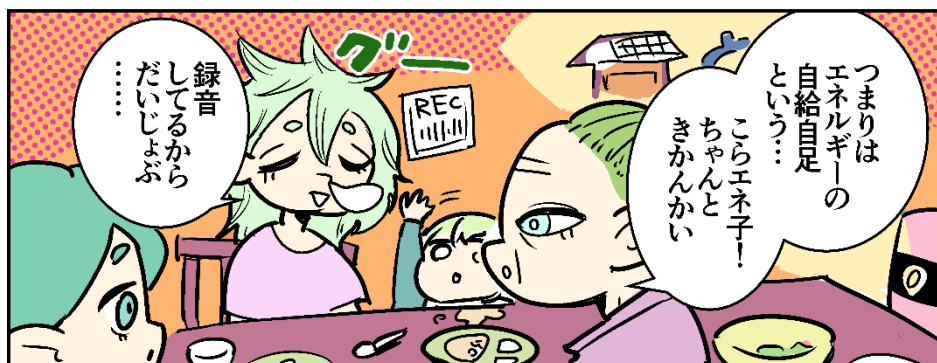
また
おつきく
なったねえ

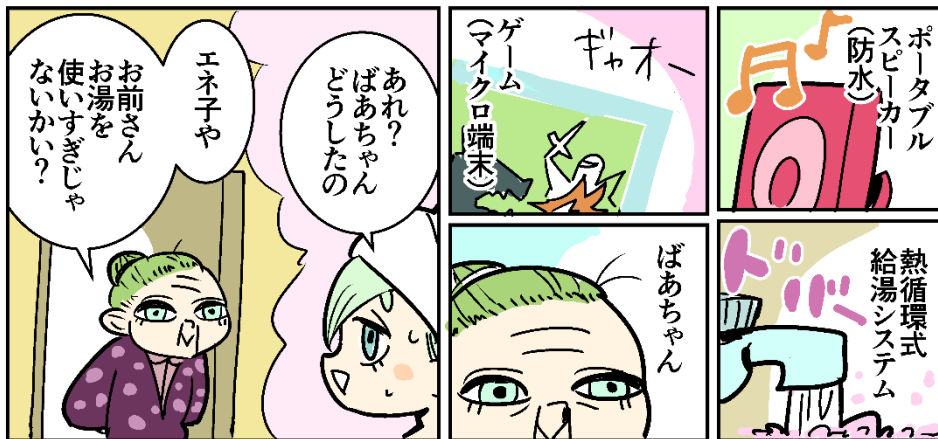
お邪魔
しまーす

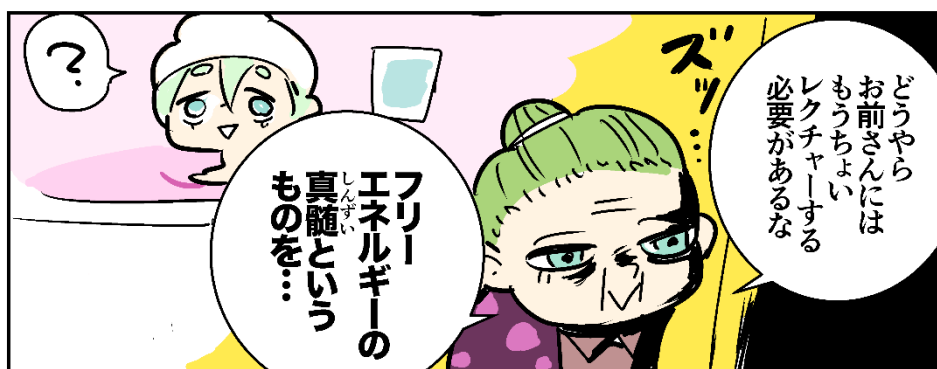
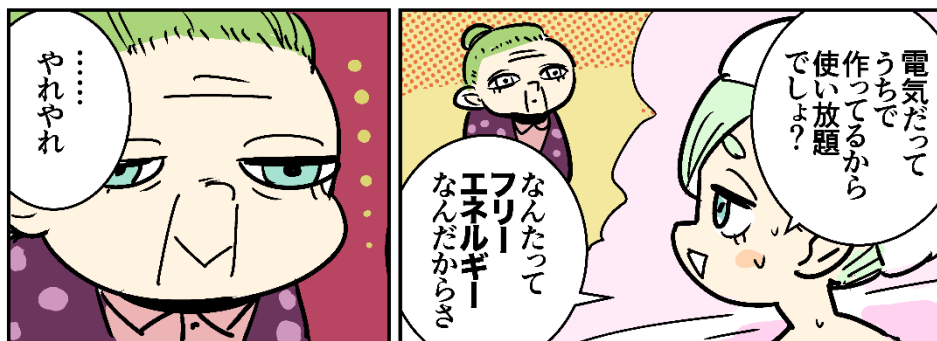
夏休みの課題で
現在2050年の
フリーエネルギー
社会について
調べることになった

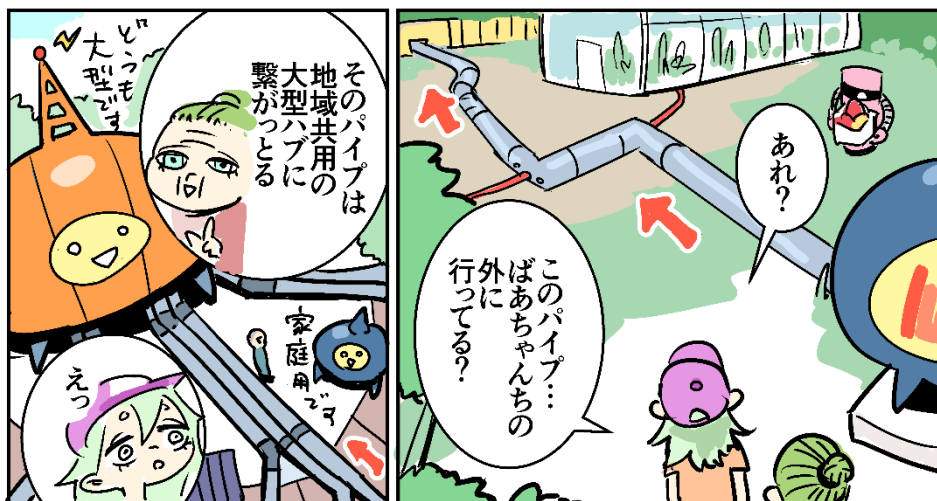
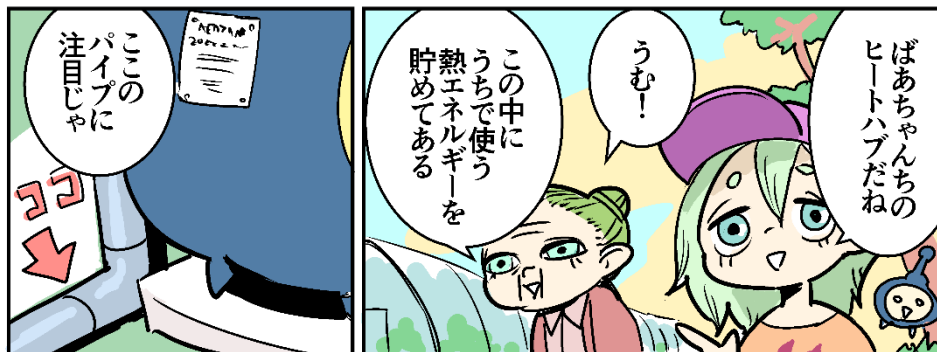
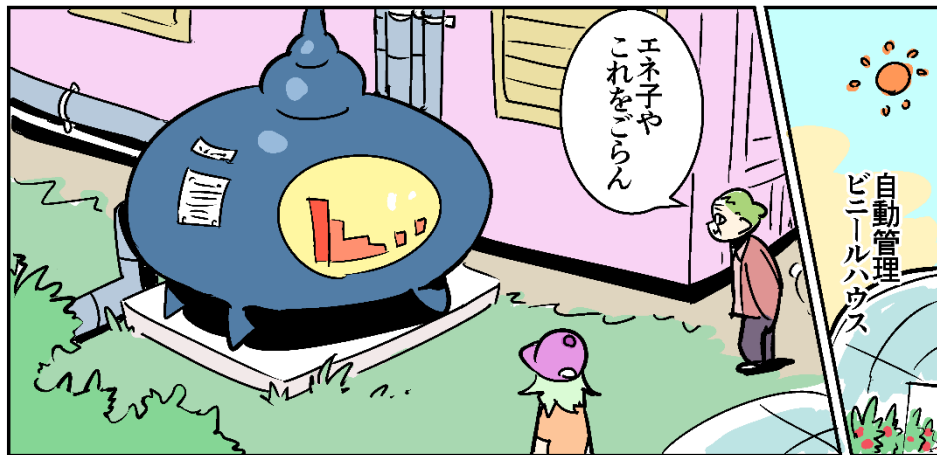


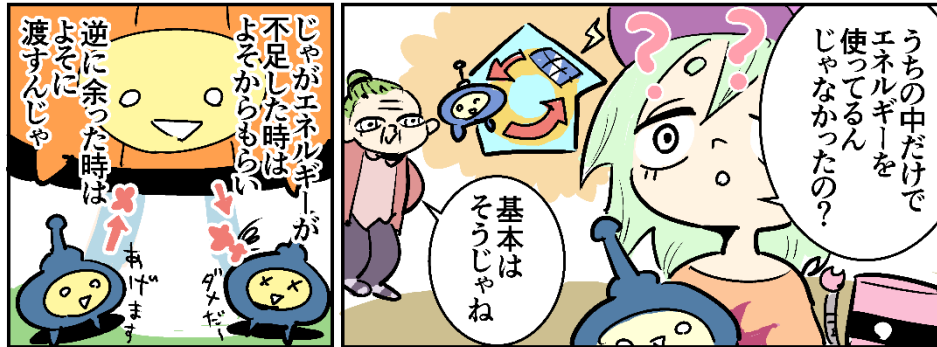


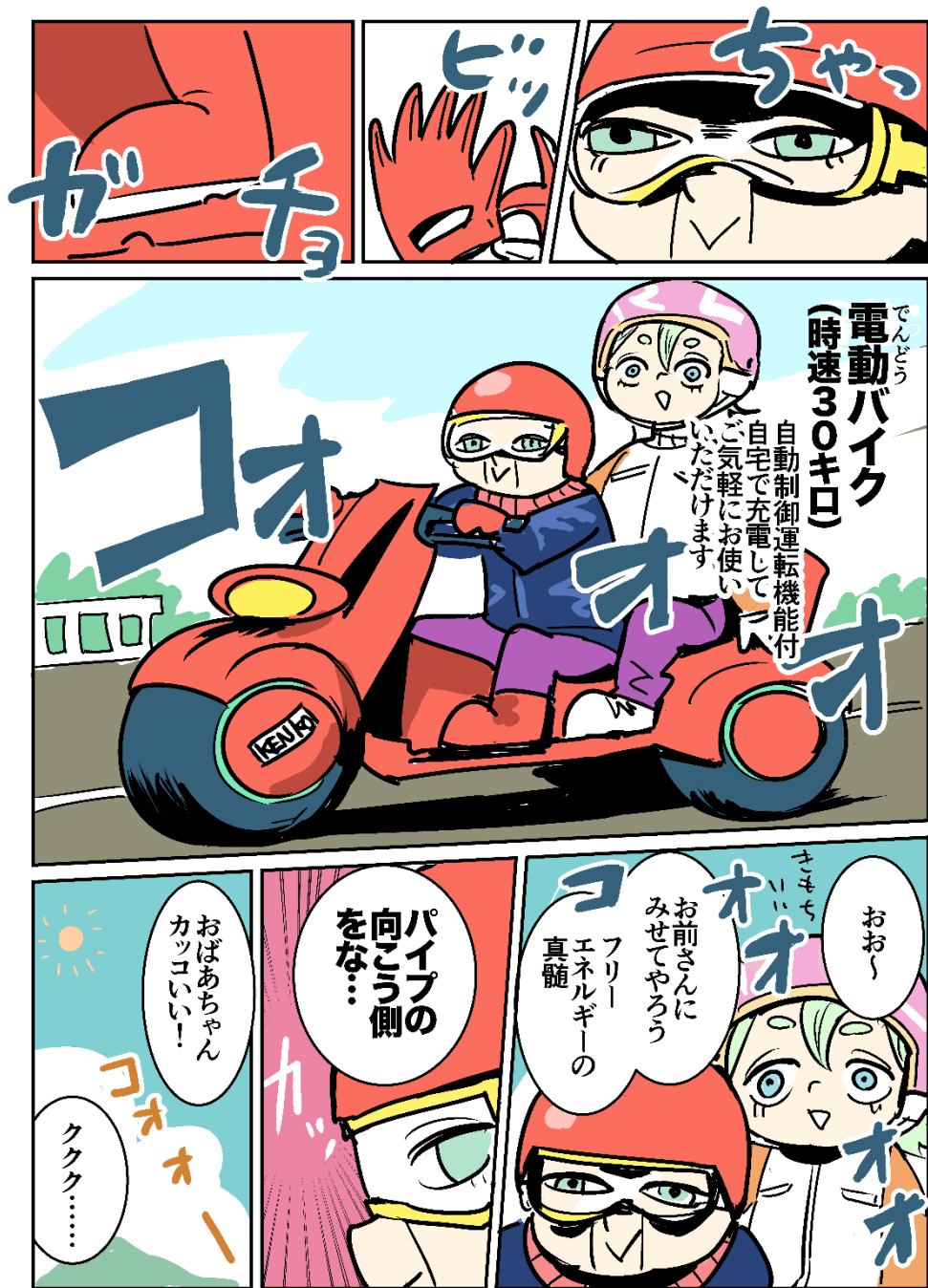


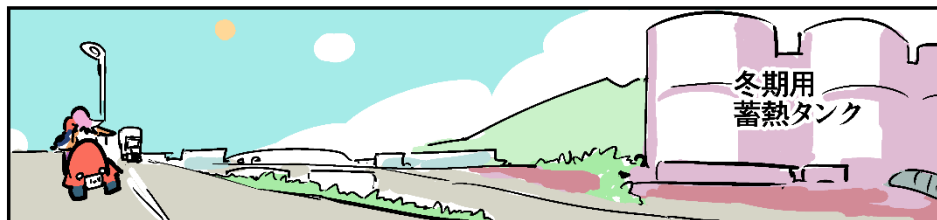
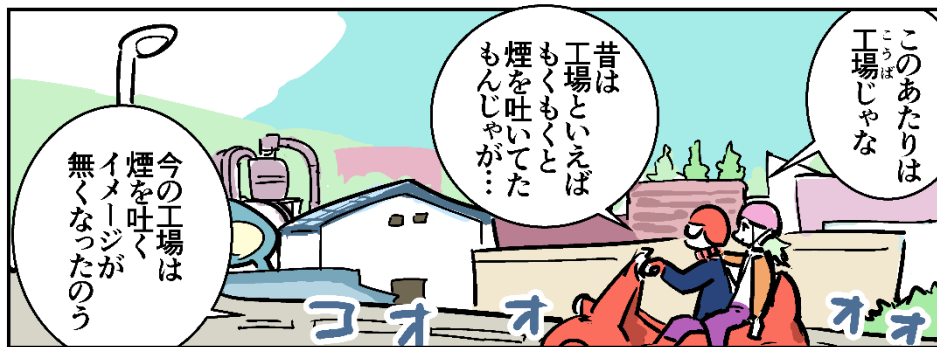
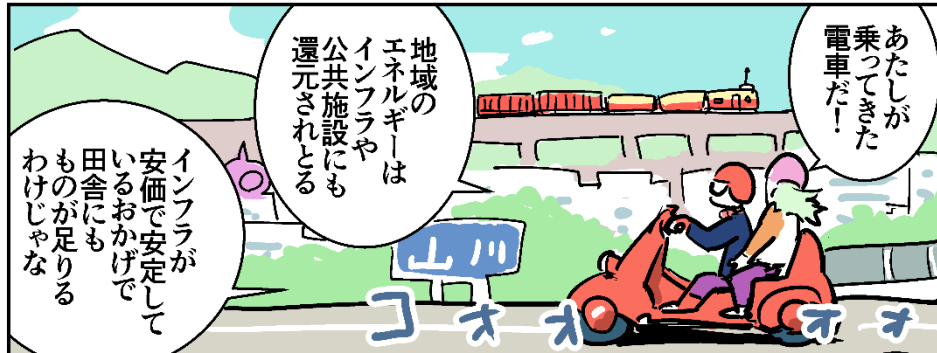




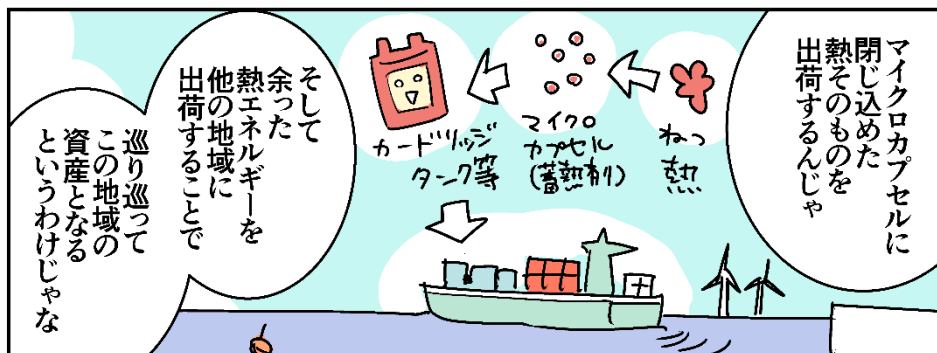
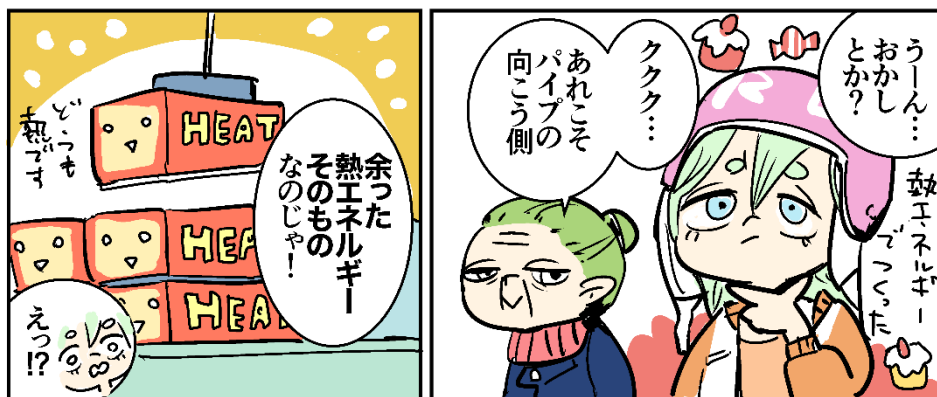
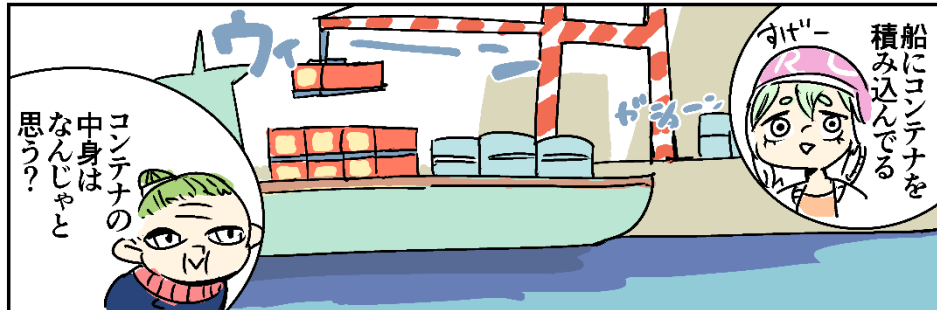


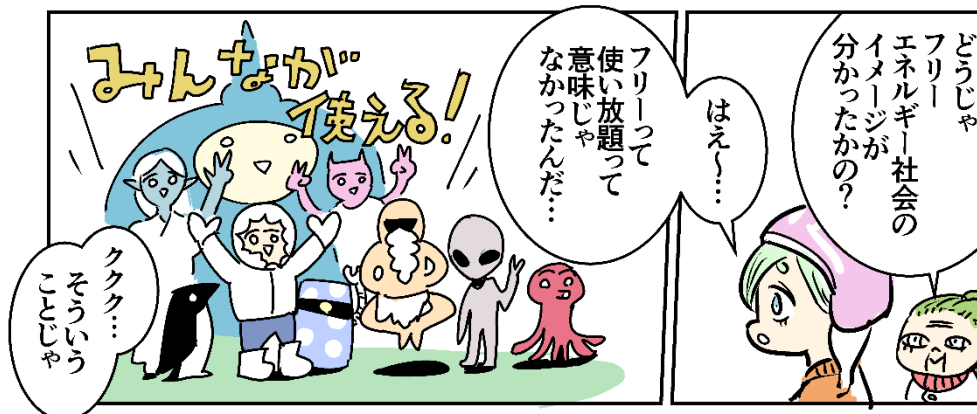
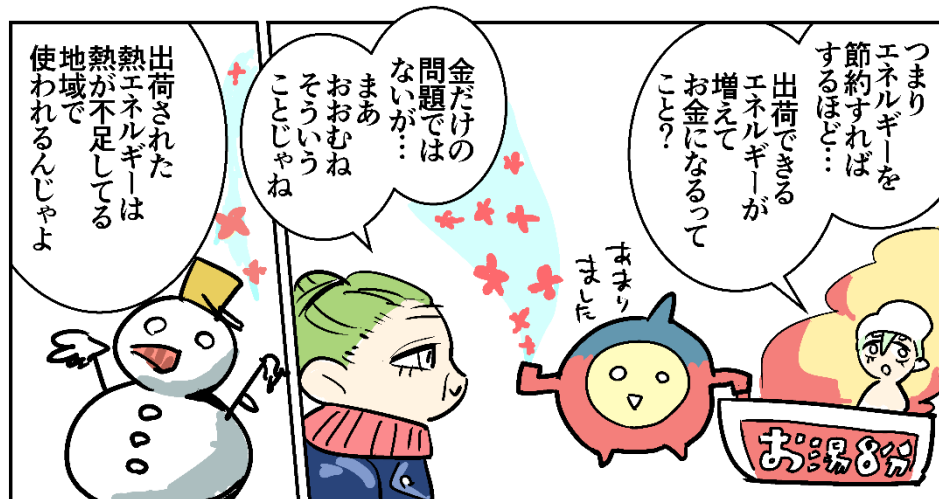


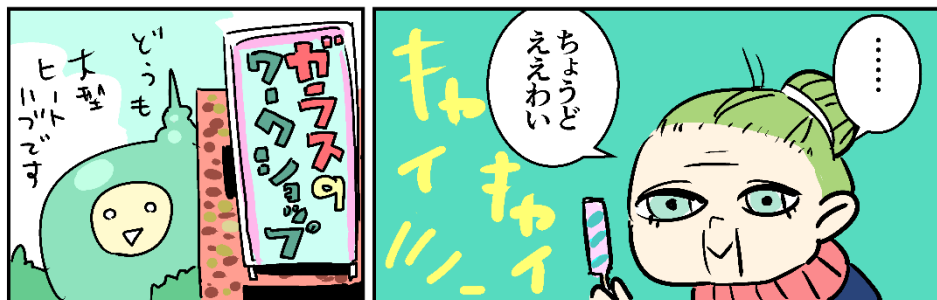
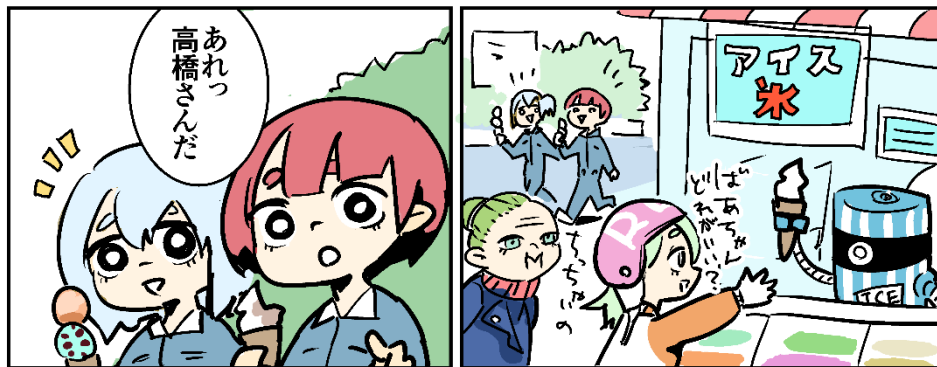


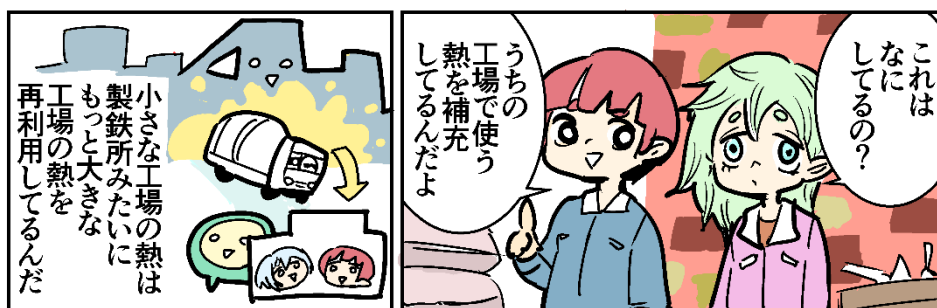
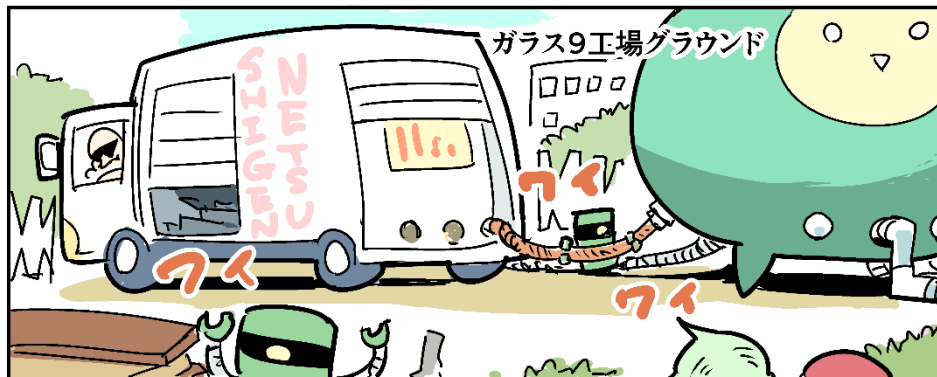


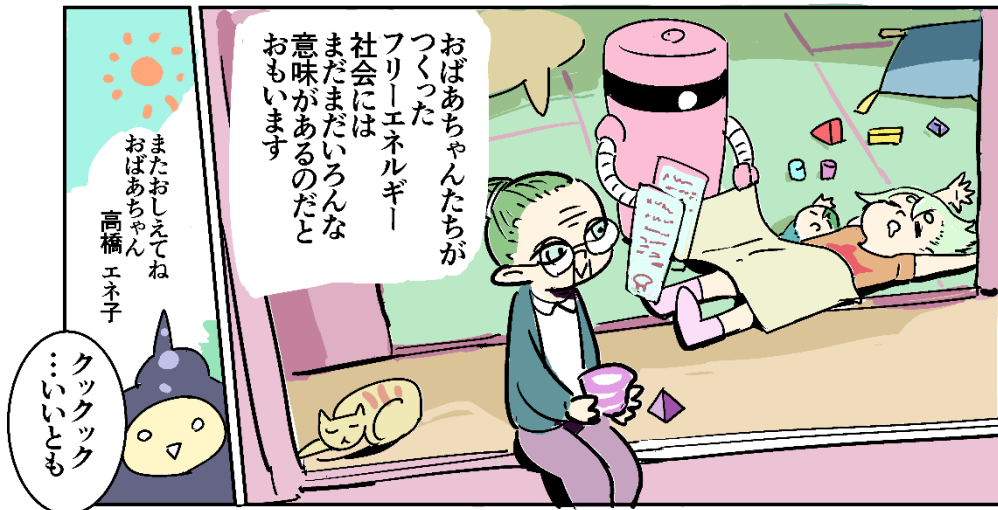












V. 参考文献

- 1) 内田由紀子:「これからの幸福について—文化的幸福観のすすめ」に関する講演資料, 第 5 回ミーティング, 2021
- 2) キナリノ:「ほどほど」がもたらす幸福って?～スウェーデンの「ラーゴム」に学ぶ幸せな生き方, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://kinarino.jp/cat6-%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%95%E3%82%B9%E3%82%BF%E3%82%A4%E3%83%AB/34734->
- 3) United nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Dynamics, World Population Prospects 2019, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://population.un.org/wpp/Graphs/Probabilistic/POP/TOT/900>
- 4) 国土交通省, 気象庁, 二酸化炭素濃度の経年変化, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
https://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
- 5) IPCC: Climate Change 2013, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>
- 6) REN21: Renewables 2019 Global Status Report, 2019, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf
- 7) IEA: NET ZERO by 2050, 2021, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- 8) IEA: Energy Technology Perspectives, 2020, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- 9) NEDO, 産業分野の排熱実態調査報告書, 2019, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101074.html
- 10) 資源エネルギー庁: エネルギー白書, 2000, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2020html/2-1-1.html>
- 11) IRENA, Innovation Outlook Thermal Energy Storage, 2020, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Innovation_Outlook_TES_2020.pdf
- 12) SIEMENS Gamesa RNEWABLE ENERGY
<https://www.siemensgamesa.com/en-int/products-and-services/hybrid-and-storage/thermal-energy-storage-with-etes> (Accessed on July 1, 2021)
- 13) STORASOL GmbH <http://storasol.eu/en/2021/04/27/thermal-battery-optes-battery/>
(Accessed on July 1, 2021)

- 14) MAN Energy Solutions
<https://www.man-es.com/energy-storage/solutions/energy-storage/electro-thermal-energy-storage>
- 15) Malta Inc. <https://www.maltainc.com/our-solution> (Accessed on July 1, 2021)
- 16) AZELIO <https://www.azelio.com/> (Accessed on 27 June 2021)
- 17) T. Nomura et al., “Microencapsulation of Metal-based Phase Change Material for High-temperature Thermal Energy Storage” Scientific Reports 5, Article number: 9117 (2015)
- 18) https://shingi.jst.go.jp/var/rev0/0001/2914/2021_mirai_3.pdf (Accessed on July 1, 2021)
- 19) T. Tokoro et al., “External stimulation-controllable heat-storage ceramics” Nature Communications 6, Article number: 7037 (2015)
- 20) http://www.iae.or.jp/wp/wp-content/uploads/2018/09/f30_02_04_ito_yamauchi_20180926.pdf (Accessed on June 27, 2021)
- 21) <https://tateho.co.jp/labo/page012.html> (Accessed on July 1, 2021)
- 22) <https://saltxtechnology.com/> (Accessed on July 1, 2021)
- 23) C. Bullough et al. “Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage for the Integration of Wind Energy” Proceedings of the European Wind Energy Conference, EWEC 2004, 22-25 November 2004, London UK.
- 24) <https://highviewpower.com/> (Accessed on 1 July 2021)
- 25) <http://www.city.nishinoomote.lg.jp/material/files/group/15/17986410.pdf> (Accessed on July 1, 2021)
- 26) <https://www.nedo.go.jp/content/100902072.pdf> (Accessed on July 1, 2021)
- 27) Japan Heat Supply Business Association <https://www.jdhc.or.jp/> (Accessed on June 27 2021)
- 28) K. Yoshida et al. (1999) “Exergy Engineering (In Japanese)”
- 29) e.g., Supervisor/Atsushi TSUTSUMI (2015) “Highly-efficient Utilization of Thermal Energy and Energy Conservation Technology” Page 3-18. Frontier Publishing.
- 30) T. Kiuchi et al., “Energy Saving Bioethanol Distillation Process with Self-heat Recuperation Technology” Journal of the Japan Petroleum Institute, 58, (3), 135-140 (2013)
- 31) Mitsubishi Chemical Engineering Corporation
https://www.mec-value.com/up_pdf/20210609103018_f.pdf (Accessed on July 1, 2021)
- 32) https://www.jeh-center.org/asset/00032/monodukurinidenki/vol6_daicel.pdf (Accessed on July 1, 2021)
- 33) NEDO が取り組む未利用熱エネルギーの革新的活用技術開発
<https://www.nedo.go.jp/content/100891002.pdf>
- 34) H. Tobo et al., “Development of Heat Recovery System from Steelmaking Slag” JFE Technical Report No. 32 (2013) Page 38-43
- 35) 環境省 HP: 地域経済循環分析とは, 2015, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://www.env.go.jp/press/files/jp/28653.pdf>

- 36) ラウパッハ スミヤ ヨーク：日本におけるシュタットベルケの現状と展望, 2019, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<http://kinki.env.go.jp/11%20%28HP%E6%8E%B2%E8%BC%89%E7%94%A8%29%E7%AB%8B%E5%91%BD%E9%A4%A8%E5%A4%A7%E5%AD%A6%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%83%91%E3%83%83%E3%83%8F%E6%95%99%E6%8E%88%E8%B3%87%E6%96%99.pdf>
- 37) 笹川亜紀子：エネルギー分野におけるブロックチェーン技術の活用ードイツとアメリカの事例にみる可能性と課題ー, IEEJ, 2019, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://eneken.ieej.or.jp/data/8528.pdf>
- 38) IEA: World Energy Investment 2021, 2021, 下記 URL 参照, 最終閲覧日 2021 年 7 月 4 日,
<https://www.ica.org/reports/world-energy-investment-2021>