

でのアンモニア・水素利用分散型エネルギーシステムの社会導入を計画する。

(1) アンモニア利用キャンパスマイクログリッド

脱炭素燃料および水素キャリアとしてアンモニアを利用する研究開発は、2014～2018年度に実施された内閣府戦略的イノベーション創造プログラム（SIP 第1期）「エネルギーキャリア」が先導的である。

「The Future of Hydrogen」（IEA、2019）において、わが国においては、CO₂フリーアンモニア（ブルーアンモニアまたはグリーンアンモニア）を輸入し、脱炭素燃料および水素キャリアとして利用すべきとの提言がなされ、その後、燃料アンモニア導入に向けた政策が進展している。アンモニアは、製造時に排出されるCO₂の回収率を90%以上とする技術が確立していること（ブルーアンモニアという）、プロパンガスと同様に容易に液化でき、輸送・貯蔵・取扱法が確立していることから、早期に社会実装可能な脱炭素エネルギーおよび水素キャリアとして期待される。

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（経済産業省、2021）においては、水素・燃料アンモニア産業は成長が期待される14分野の1つとして位置づけられ、水素・燃料アンモニアは脱炭素エネルギーとして、電力事業分野のみならず産業・運輸・民生分野においても導入されるべきと明記された。しかしながら、現在のところ、産業・運輸・民生分野への燃料アンモニア導入のためのアプリケーションは実在せず、社会実装へのロードマップはない。そのような状況下で、特に産業界では2030年CO₂大幅削減（2013年比46%減）に向けた具体的なアクションが求められるようになり、アンモニア・水素利用のエネルギーシステムの実証・実装研究に大きな関心と期待が寄せられている。このような社会背景から、産業・運輸・民生分野における脱炭素へのソリューションを得ることは喫緊の課題であり、その社会実装に向けた研究開発に早期に着手する必要がある。

図B1①-1に種々のアンモニア・水素利用デバイスから成るマイクログリッドと本テーマの研究開発対象（着色部）を示す。工業炉・ボイラ・ガスエンジン・燃料電池それぞれに適するアンモニア改質装置の研究開発を主として、各々の燃焼器に対してアンモニア・水素混合ガスの最適比率に関する探索研究を行い、エネルギー効率およびNO_x/N₂O排出量の観点で各デバイスまたは複合デバイスを最適制御するスマートエネルギーマネジメントシステムを構築する。本研究開発によって、適用分野や適用地域を考慮した、最適な脱炭素エネルギーシステムの社会実装が可能となる。本研究開発は、2028年以降の社会実装と普及を目標としており、研究開発の緊急性は高い。なお、図B1①-1には、キャンパスのカーボンニュートラルを実現する蓄電池と水素カートリッジのモバイル搬送における研究開発の開発要素も含まれている。

(2) キャンパスのカーボンニュートラルを実現する蓄電池と水素カートリッジのモバイル搬送

2050年までにエネルギー起源CO₂正味ゼロ（ネットゼロ、気温上昇1.5℃シナリオ）を実現するためには、風力やPV等の変動性の高い再生可能エネルギーを最大限に活用する必要があり、その変動を吸収し安定した電源とするための蓄放電を可能にするエネルギーネットワーク及びEMSの構築といったエネルギーイノベーションが求められる。特に再生可能エネルギーの日変動を吸収する蓄電池に加え、季

節間変動を吸収する蓄エネ設備及びマネジメントシステムの開発は再生可能エネルギー導入量が増すにつれ重要度が高まることは明らかであり、季節的余剰電力を水素に変換して貯蔵し、必要な時期に電力（あるいは燃料）として利用することが考えられるが、社会実装するうえで解決すべき課題は多い。

本研究開発テーマにおいては、ローカルに得られる再生可能エネルギーの域内消費を可能な限り高める手段として、コミュニティ単位での PV/風力発電・蓄電・水素変換・貯蔵・搬送・電力再変換を効率よく実現する技術手法の確立を目指す。その際に用いる水素貯蔵・搬送には重厚なインフラを前提としない小型モビリティ（将来的には自動搬送とする）を活用すると共に、一般市民が平易に且つ安全に水素をハンドリングする仕組みや技術が不可欠となる。

コミュニティレベルのインフラや建築物あるいは住宅は建築後長期間に渡って使用され、建設時の仕様や性能がそのまま維持されることが多い。2030年に温暖化ガス排出を現状の50%減あるいは2050年に実質100%減を目指すのであれば、今日時点で建設する施設やインフラが2030年や2050年の目標達成に与える影響は大きいのである。従って、長期使用を前提としたコミュニティレベルのインフラや建築物におけるエネルギーシステムは可及的速やかに2050年の目標値を見据えた仕様・性能を満たすことが不可欠となる。

① 研究開発目標

(1) アンモニア利用キャンパスマイクログリッド

(事業期間の5年間で達成する研究開発目標)

キャンパスでのマイクログリッド実証を念頭におきつつ、産業・運輸・民生分野に広く応用展開することを想定したアンモニア・水素利用マイクログリッドを実証し、適用分野や適用地域を考慮したゼロカーボンエネルギーシステムの設計および社会実装を実現可能なレベルとすることを目標とする。

SIP第1期「エネルギーキャリア」では、アンモニアエネルギーの実用化に関する課題が明示されており、それらの課題解決を行う本研究は、実現可能性の高い取組と考える。具体的には、次のi～viiの研究開発項目について、2023～2025年度の3年間で要素研究を行い、2026～2027年度の2年間で実証研究を行う。本研究開発は国内・国際的に先導的な取組であり、アンモニア・水素利用マイクログリッドの社会実装について国際競争力をもつ。

(KPI/マイルストーン)

i. 燃焼器用改質器ユニット

2025年度までに自立型改質器の開発 (TRL4, BRL5, GRL3, HRL3) 《達成目標 b-1》

2027年度までに自立型改質器の実証試験の実施 (TRL6, BRL7, GRL7, HRL6) 《達成目標 b-1》

ii. 燃料電池用改質器ユニット

2025年度までに純水素製造システムの開発 (TRL6, BRL5, GRL3, HRL3) 《達成目標 b-1》

2027年度までに水素製造用改質器の実証試験の実施 (TRL7, BRL7, GRL7, HRL6) 《達成目標 b-1》

- iii. 工業炉（廃熱発電システムを想定）
 - 2025年度までに最適燃焼法の開発（TRL5, BRL5, GRL3, HRL3） 《達成目標 b-1》
 - 2027年度までに改質器付き工業炉の実証試験の実施（TRL6, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》
- iv. ボイラ（スチームタービン発電システムを想定）
 - 2025年度までに最適燃焼法の開発（TRL5, BRL5, GRL3, HRL3） 《達成目標 b-1》
 - 2027年度までに改質器付きボイラの実証試験の実施（TRL6, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》
- v. ガスエンジン発電
 - 2025年度までに最適運転法の開発（TRL5, BRL5, GRL3, HRL3） 《達成目標 b-1》
 - 2027年度までに改質器付きガスエンジン運転法の実証試験の実施（TRL6, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》
- vi. 脱硝装置
 - 2025年度までに各装置に最適な脱硝装置の開発（TRL5, BRL5, GRL3, HRL3） 《達成目標 b-1》
 - 2027年度までに最適脱硝装置の実証試験の実施（TRL6, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》
- vii. エネルギーマネジメントシステム(EMS)
 - 2025年度までに EMS の検討（TRL5, BRL5, GRL3, HRL3） 《達成目標 b-1》
 - 2027年度までに EMS の実証試験の実施（TRL6, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》
- viii. 事業化対応
 - 2027年度までにキロワット発電レベルの初期ユーザーでの事業モデルについて、事業計画が策定され、学官との連携構想を明確化。大学発ベンチャー起業の検討を完了（BRL7, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》
- ix. 人材確保・育成
 - 2027年度までに人材確保・育成計画を文書化（SRL6, BRL7, GRL7, HRL6） 《達成目標 b-1》

(2) キャンパスのカーボンニュートラルを実現する蓄電池と水素カートリッジのモバイル搬送

（事業期間の5年間で達成する研究開発目標）

事業期間内にモデルとなるコミュニティで、想定するスマート EMS（コミュニティのエネルギー自給を踏まえた水素製造・蓄電・水素変換・貯蔵・モビリティ搬送・電力変換システム）をエリア限定で実装し、その有益性を実証する。

蓄電池や水素を媒体としたエネルギー実証は複数の自治体で進められている。既存のガスパイプラインを活用した水素搬送や、技術的に安定している水素貯蔵合金を使った搬送などがあるが、ガスパイプラインを新たに敷設することは多くの自治体で現実的ではなく、また水素貯蔵合金は重量の問題で搬送に課題がある。国内で1,700以上ある自治体は押し並べて人口減、統廃合、中心市街地の移動など多くの課題を抱えている。このような自治体に対して、汎用性が高く、社会の変化に柔軟に対応できる再生可能

エネルギー導入方法を提案することが求められる。

また、再生可能エネルギーを自治体内で広範囲にデリバリー（あるいは回収）するためには、可搬性と安全性に優れた蓄電・水素貯蔵デバイスが必須であり、本研究開発テーマにおいて解決すべき技術課題である。現状一般的に使われているのはガスボンベ（シリンダー）だが、14.7Mpa で 40 リットル（232mm φ×1365mm）を充填するものの場合、空重量で 52 kg、ガス重量として 1 kg 程度であり、日々取り回しをするには困難である。水素吸蔵合金は大気圧程度の低圧で水素を吸蔵・放出可能であることから、高圧ガス保安法に抵触しないという利点はあるものの、吸蔵量は合金重量比で 1 重量%程度であることから、可搬型の水素貯蔵方式としては不向きである。また、有機ハイドライドを使った水素輸送は実績があるものの、水素を取り出す際に水素発熱量の 28% に相当する熱を加える必要があり、非効率である。

水素ガスを高圧にして充填する容器は、FRP を含む複合材料の開発などにより従来よりもさらに高圧充填が可能になっており、容器の小型化と軽量化を期待できる。このことから、専任の作業者に限らず、一般にも安心して取り扱い容易な容器（例えばカートリッジ）を開発し、複数の容器を一定頻度で搬送することで汎用性と輸送効率の最適解を見出すことが狙いとなる。なお、小型高圧カートリッジのみであらゆる用途や需要量に対応することは経済合理性に反する可能性があり、比較的消費量の小さい住宅や小規模店舗向けに小型高圧カートリッジを小型 EV や UGV で搬送する方式を実現しつつ、大規模建築物や施設向けには大型ボンベを束ねたカードルや大型水素吸蔵合金をトラックで搬送する方式を組み合わせ、コミュニティ全体として合理性の高いエネルギーシステムとして確立することが狙いとなる。

（KPI/マイルストーン）

i. 個別要素技術開発

2025 年度までに要素機器（小型カートリッジ、ディスペンサー、小型カートリッジ対応燃料電池）を試作し第 1 期テストベッドでの試運用を元にした改良を実施（TRL5）《達成目標 b-1》

2025 年度までに小型カートリッジを各需要ポイントに運ぶための UGV 仕様を確立し、第 1 期テストベッドでの資運用を基にした改良を実施（TRL5）《達成目標 b-1》

ii. 実証試験

2025 年度までに第 1 期テストベッドの設計・施工・試運転（TRL5）《達成目標 b-1》

2027 年度までに第 2 期テストベッドの設計・施工・試運転（TRL6）《達成目標 b-1》

iii. 事業化対応

2027 年度までにサービスとなる企業連合に加え、大学（学府）、自治体（行政）との連携を図り、事業計画が地域の発展に繋がる。（BRL7、HRL5、GRL7）《達成目標 b-1》

iv. 制度化対応

2027 年度までにサービスとなる企業連合に加え、大学（学府）、自治体（行政）との連携を図り、事業計画が地域の発展に繋がる。（BRL7、HRL5、GRL7）《達成目標 b-1》

② 実施内容

（1）アンモニア利用キャンパスマイクログリッド

アンモニアは着火しにくく、メタンなどの炭化水素燃料と比較して燃焼速度が非常に遅いうえ、体積あたりの発熱量が低いという本質的な課題がある。さらに、アンモニア燃焼においては、窒素酸化物（NO_x/N₂O）の発生や未燃 NH₃の排出が懸念される。これらは、図 B1①-1 に発電システム 1～3 として示した工業炉、ボイラ、ガスエンジン共通の課題である。これらの課題解決のため、本研究開発では、燃焼器用改質器ユニットと各種燃焼器から成るゼロカーボン発電システムについての要素研究と実証試験を行う。すなわち、アンモニア直接燃焼ではなく、アンモニア改質ガス（NH₃/H₂/N₂）を工業炉、ボイラ、ガスエンジンの燃料とし、エネルギー効率、負荷追従性、排ガス環境特性、安定燃焼などの観点で各々の燃焼器に最適な混合ガス比率を探索し、実用条件を確立する。また、各種燃焼器の排ガス組成をもとに最適な排ガス脱硝装置を開発する。

一方、発電システム 1～3 と発電システム 4（燃料電池）との複合発電により総合的な発電効率を向上させることを目的に、燃料電池用改質器ユニットと純水素型燃料電池から成るゼロカーボン発電システムの要素研究と実証試験を行う。

燃焼器用改質器ユニットは、自立型触媒反応器（ATR）の要素研究および実証研究を行う。燃料電池用改質器ユニットの開発においては、アンモニアから純水素を効率的に製造できる水素分離装置の要素研究および実証研究を行う。

これらの研究開発は相互に関連することから、改質器に関する装置設計および触媒改良を優先的に進めつつ、工業炉・ボイラ・ガスエンジンでの混合燃料燃焼特性および脱硝装置設計に取り組む。

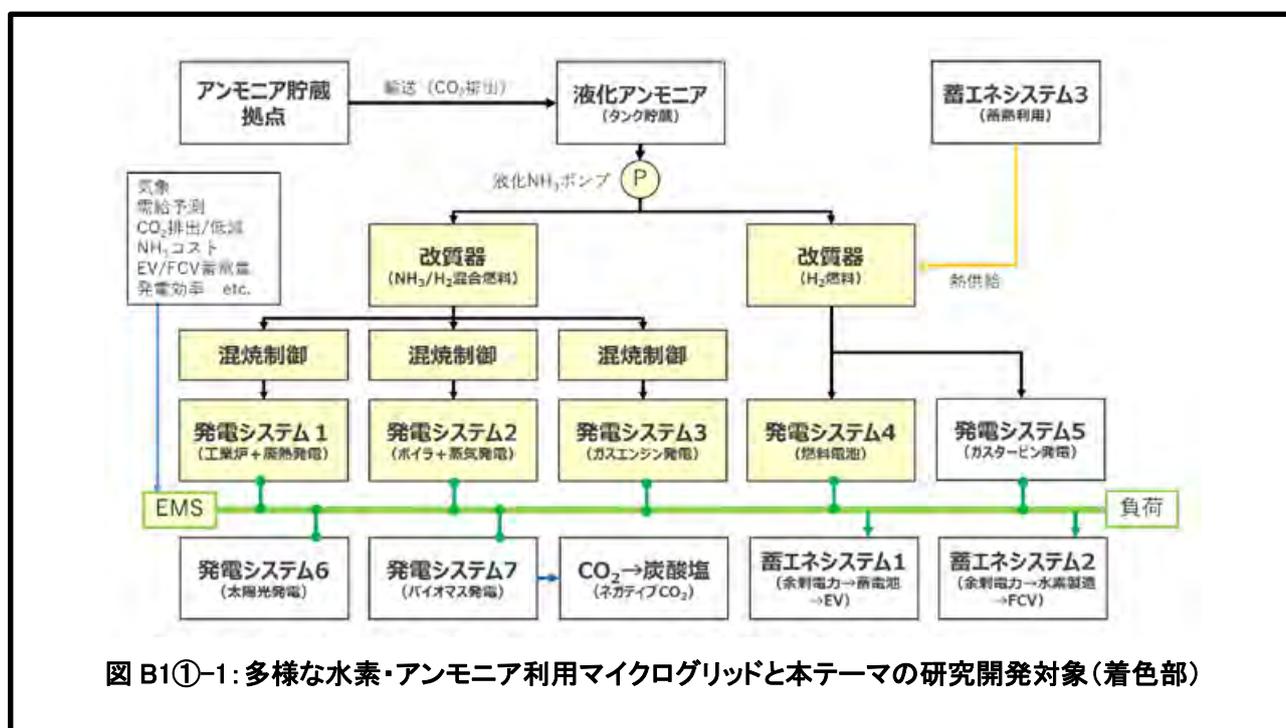


図 B1①-1: 多様な水素・アンモニア利用マイクログリッドと本テーマの研究開発対象(着色部)

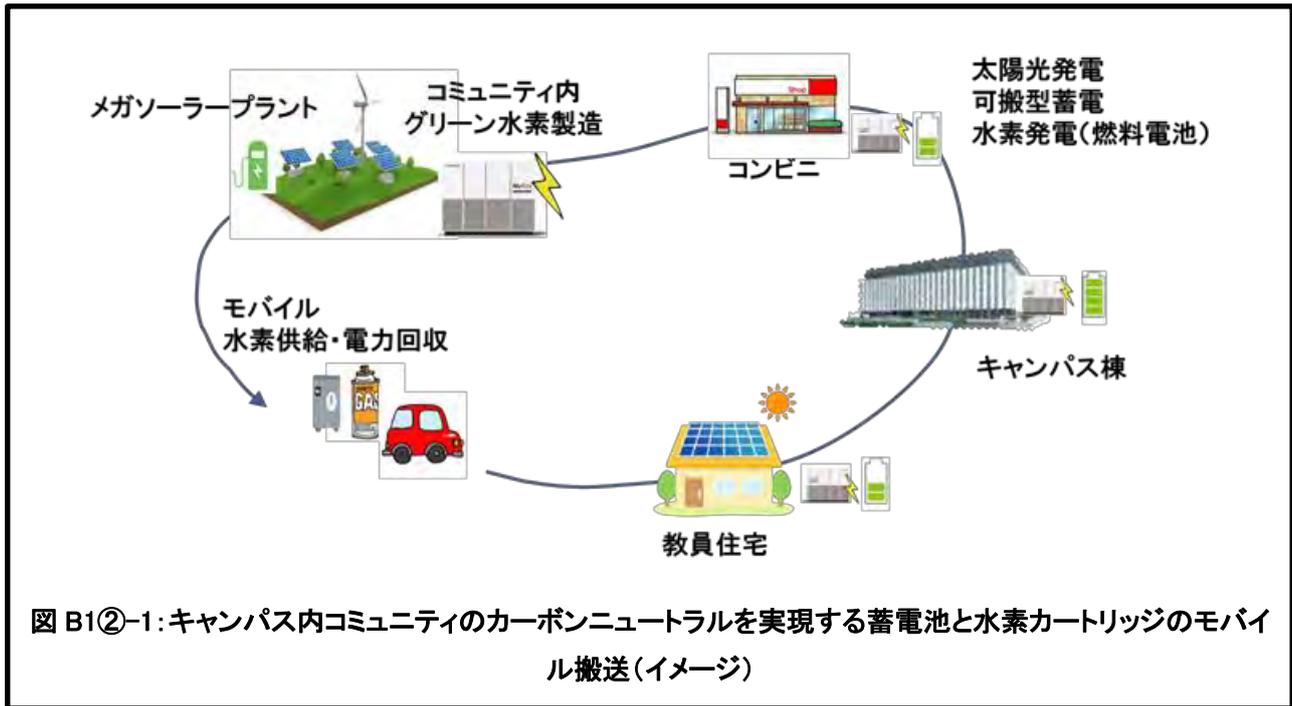
(2) キャンパスのカーボンニュートラルを実現する蓄電池と水素カートリッジのモバイル搬送

コミュニティ単位での水素製造と利用を実現するため、コミュニティのエネルギー需給を踏まえた水素製造・蓄電・水素変換・貯蔵・搬送・電力変換システムの設計がまず求められるが、住民や経済圏の移動によって過大なインフラがコミュニティの負担とならないよう、当該コミュニティの規模が中長期的に拡大（縮小）することに柔軟に対応できるシステムとすることが重要なポイントとなる。そのため、電力及び水素の搬送には送電線やパイプラインといった重厚なインフラを前提とせず、可搬型バッテリーや小型水素カートリッジをモビリティで搬送する身軽な仕組みを想定する。使用するバッテリーや水素カートリッジは経験と知識を持った専門技術者に限らず一般の市民も安心して取り扱うことができるような平易な構造や重量とすることが望ましい。

小規模な可搬バッテリーや水素カートリッジを前提とすれば、必然的に搬送本数と搬送頻度は増えることになるが、複数の可搬バッテリーや水素カートリッジを連結可能なレギュレーターと組み合わせ、数日に1回程度、空となった可搬バッテリーと水素カートリッジを満充電されたバッテリーや満充填されたカートリッジと交換することで、エネルギーの安定供給を可能にする。各施設や建築物に設置されたPV電力は自家消費される一方で、発電過多の場合にはバッテリーに充電し、短期の不足に対応可能とする。バッテリーは可搬型とし、当面の自家消費予測量に比べてPV発電余剰電力が多くなる場合には可搬バッテリーをモビリティで回収し、コミュニティ内エネルギープラントで水素変換する。PV発電量に対して消費過多になる時期には、水素カートリッジを各施設や建築物に再搬送して燃料電池のエネルギー源として利用する。

本研究開発は、小型・可搬型水素カートリッジの試作及びその搬送システム設計から着手する。どのような頻度で可搬バッテリーや水素カートリッジを搬送するか（回収するか）はコミュニティのエネルギーマネジメントを管轄するシステムが担うため、次ステップとしてその開発を行う。

本研究開発テーマでは特に水素を小型・可搬型のカートリッジに充填して搬送し、多種多様な用途に適用できる技術を確立することが重要なポイントとなるが、最終の実装にあたっては規模の大きい用途（大規模複合施設等）に対しては既存のポンペやカードルのほうが適当との判断になることが予想される。つまり、適材適所の可搬デバイスの組み合わせを見出すことも重要な開発内容となる。



(4) B2 カーボンニュートラルモビリティシステム

電力、気体・液体燃料等のエネルギーポートフォリオを最適化して再エネによるオフグリッド形成のためのシステムと市場の設計を行い、大学キャンパスで、大学施設、下水処理、自動運転グリーンスローモビリティを導入して、メガソーラー等再エネを核に、水電解水素と大気中 CO₂ によるメタン、アンモニア、e-fuel を合成する技術も組み合わせさせたシステムで実証を行う。実証では、カーボンニュートラル移行期に重要な液体燃料による内燃機関の利用維持の検証も行う。さらに、e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの創出を行い水素の輸送、貯蔵コストを省き、かつ、燃料電池自動車(FCV)さらに在来エンジン自動車(ICEV)に適用できる新たなカーボンニュートラルモビリティシステムの可能性を検討する。

以上の背景として、地域コミュニティ特に大学キャンパスを支える基盤として、電力、ガス、上下水道等のインフラとともに、モビリティが挙げられる。なかでも、電力とモビリティはカーボンニュートラル実現に向けても取組が必要とされている。電力については、資源エネルギー庁を中心に再生可能エネルギーの拡大に向けた電力ネットワークの次世代化への取組が進んでいる。また、路線バスなど地域における重要な移動手段である公共交通ネットワークが消失する一方で、電動型の次世代モビリティの導入に向けた取組が始まっている。エネルギーと移動という本来は異なる目的である多重のネットワーク形成が並行して進展する状況が現実味を帯びてきている。

一方、つながる・自動走行・シェアリング・電動化などの機能を有するモビリティの次世代化も進展している。なかでも、カーボンニュートラルへの取組としては、電動化や CO₂ フリー車両などモビリティ

の次世代化に関心が寄せられており、新たな地域交通ネットワークの形成が検討されている。中山間地域の公共交通空白問題に対しては、国土交通省のリードの下、電動化低速自動車を活用した交通ネットワークの次世代化が始まっている。地域の電力ネットワークと交通ネットワークというクロスセクターは、個別の目的達成のために「再生可能エネルギーの利活用」という目標の一致を見ている。これらを大学キャンパスなどの特定地区へ展開することで検証効果の高い実証が可能である。

さらにエネルギーの活用という観点から、再生可能エネルギーを電力だけでなく水電解による水素や大気中の炭素を活用したメタネーション（メタンさらにはメタノール）や e-fuel などの液体燃料といったエネルギーのポートフォリオを考え、次世代モビリティやその他の負荷の用途に応じて最適化することが求められる。長距離移動などには、バッテリーEV だけでは不十分であり、内燃機関での活用も可能な液体燃料とのバランスが重要である。トランジション期においては既存技術の活用が必須である。このほかバイオ燃料として家畜の糞尿からメタンを直接生成して発電するエコシステムも現存しており、エネルギーキャリアに合わせた再生可能エネルギーの切替が有効である。

欧州石油環境保全連盟（Concawe）では e-fuel を「水の電気分解によって生成されたグリーン水素と高濃度の CO₂ 源（工業地帯からの燃焼排出ガス）または空気（直接空気捕獲）のいずれかから回収された CO₂ とから合成して得られる合成燃料」と定義されている。日本機械学会では e-fuel は「余剰電力により製造した水素や、その水素と濃縮回収した二酸化炭素やバイオガス中の二酸化炭素を原料として合成・製造したカーボンニュートラルな燃料」と定義されている。一例としてメタノールであれば密度比が石油の 4 割程度に低密度であるが、高圧または液体水素の各 3 倍あり、かつ常温・常圧での輸送ができ、既存の給油インフラ設備をある程度活用ができる。このため、水素に比べ輸送コストが大幅に削減できると期待できる。

本研究開発テーマは輸送分野のカーボンニュートラルを大目標に、燃料として利用が容易な e-fuel を対象とし、e-fuel 向けのモビリティシステムを構築することである。e-fuel は燃料利用すると CO₂ の二次発生が伴い、カーボンニュートラルにはならない。そこで CO₂ の回収循環利用が必要である。そこで本研究では e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの開発・実証を行う。これにより、e-fuel のカーボンニュートラルが実現し、水素貯蔵、輸送の負担を伴わない、新たな水素システムが成立する。特にこのシステムは既存のガソリンステーションが活用でき、普及に時間を要している水素ステーションを代替でき、水素のモビリティ分野での利用を加速するとともに、FCV の普及に寄与する。

●基本概念の成立性

水素はカーボンニュートラルに貢献するため、我が国としても拡大利用は不可欠であり、よってこれに必要な技術開発が必要である。水素は経済産業省の試算で、海外水素の水素製造 10 円/Nm³ に対し、国内では液化、輸送で 100 円以上/Nm³ と高コストである。モビリティ利用としても水素の圧縮、液化、保存、配送に安全リスク、エネルギー多消費、高コストがあることに課題がある。他方、メタノールには毒性があるが、ガソリンと同レベルの法規制で対処できると見込まれる。そこで、本研究では水素と CO₂ を合成したメタノールの液体燃料をエネルギーキャリアとすることを想定する。

e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの実現には CO₂ を回収し水素を発生させる技術

の実証が鍵となるが、すでに原理的な研究実証は行われている。e-fuel 炭素循環システムの反応器設計の最適化が進むと、残りのプロセスは既存の技術やインフラを活用することで対応できる。さらに、メタノールがエネルギーキャリアになると水素の圧縮、液化工程、またその容器、ひいては水素ステーションが不要になり、ガソリンステーションとそのサプライチェーンを生かすことができる。メタノールは FCV のみならず ICEV でも利用できる。

なお、合成メタノールの e-fuel 化は諸外国でも産業界が本格的に取り組んでおり、我が国においても国産できることが望まれる。SIP において専門分野を有する研究機関や産業界、関係府省との連携に向けた検討を進め、e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの実現に速やかに取り組む。

● e-fuel の開発に関する新規性について

本課題では e-fuel メタノールを選択し、炭素循環を行うことに新規性がある。e-fuel メタノールは移動体用の最適なエネルギーキャリアといえる。

水素は水素の圧縮、液化工程に多大なエネルギーを要する。液化水素は沸点が -253°C と低く長期貯蔵、輸送、分配に課題がある、かつエネルギー体積密度が石油系の $1/5$ と小さく大容量、また断熱層を伴う大きな燃料容器が必要である。700 気圧の高圧水素は貯蔵タンクが特殊でかつエネルギー密度が石油系の $1/8$ である。水素燃料は特にトラック、バス、大型重機に適用が困難である。アンモニアもエネルギーキャリアとして価値があるが、沸点が -33°C と沸点が低く漏えい、またその毒性リスクが高く、また、エネルギー貯蔵密度が石油系の $1/3$ であり、燃焼ガスの脱硝も引き続き必要であり、やはり移動体利用には課題が多い。これに対しメタノールは沸点が 66°C と常温で液体であり、エネルギー密度は石油系の 4 割程度である。高圧容器、水素ステーションのような新設インフラは不要であり、ガソリンステーションとそのサプライチェーンを生かすことができる。また、メタノールは FCV のみならず ICEV でも利用できる。特に水素が利用しにくい、トラック、バス、大型重機に適用でき、この分野の CN 化に貢献できる。

e-fuel 炭素循環の概念は新しく、本プログラムで先駆的な取り組みを行えると日本、世界の CN に貢献できると期待できる。

運搬可能な炭素循環システムで目指す移動体用の水素発生器、CO₂ 回収器の条件は以下である。

1. 常温で起動・CO₂ 回収作動
2. CO₂ が単位体積、重量当たりで高密度で吸収できる
3. 安全、安価
4. 大量生産が容易
5. 国産材料、技術が活用できる。

これらの実現には CO₂ 回収材料の開発、反応器の開発、パッケージ化を行い、移動体エンジン、燃料電池動力部との連携実証が必要である。このような装置開発事例は見当たらず新規性があると考えられる。

材料としては高密度吸収、繰り返し耐久性、高反応性、高熱伝導性が必要であり、一化学材料では困難で材料の化学的な高性能化、また、例えば高熱伝導材料との複合化が必要である。申請者は伝熱性の高い触媒担体製造技術、CaO の反応耐久性向上のための表面修飾技術、また充填層向けの高反応性化のための複合技術を有している。さらにこれらの技術を融合した CaO 回収型水素生成器パッケージの開発は新

規性が高い。

以上の開発事項に新規性があり、得られた成果は他の CO2 回収、資源化などの CN 技術にも応用展開が期待できる。

① 研究開発目標

(事業期間の 5 年間で達成する研究開発目標)

i. 数理・AI

大学キャンパスや自治体などのモデル地域におけるモビリティを介した電力とモビリティネットワークの接続による需要に応じた再生可能エネルギーの自立化とその成立要件を理論的に導出する。そのためにエネルギーポートフォリオの予測アルゴリズムやエネルギーと移動の需要の同時解析法を開発する。また、電力ネットワークの制御理論やエネルギーシナプスのモデル形成など、数理の理論的アプローチによる最適化手法を開発する。

ii. システム設計

再エネを動力とする次世代モビリティがモデル地域の社会サービスを向上させる過程をシミュレーションし、最適化および将来予測する。再エネデータについては電力会社の協力のもと広域の“静脈データ”を収集する。

iii. 市場設計

数理的検討を社会実装するための制度設計とその理論的知見をモデル地域で実証する。

iv. 実証インフラ敷設

再生可能エネルギーの地産地消のための水素、アンモニア、メタネーション、液体燃料を活用したエネルギーポートフォリオの最適化を理論と実践で行うとともに、再エネ由来の液体燃料による用途に応じた内燃機関の運用ネットワークシステムを社会実装する。さらに、酪農業によるメタン利活用や寒冷地におけるエネルギーポートフォリオを踏まえた循環実験も行う。加えて、エネルギーポートフォリオにおけるアンモニア利活用の最適化にもフォーカスする。

v. e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの開発

同システムが成立するための要点となる水素製造技術（水素製造器）の開発を熱・物質設計をもとに行う。水素製造装置を開発し、関連する既存技術を集約することにより、e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムが構築される。さらに、同システムの評価・実証を目指し、社会実装に取り組む。SIP 終了後は、同システムの社会実装フィールドテストに進む。

vi. レジリエンス（安定供給）

電気と水素・e-fuel の融合により、自動車の充電（充填）に係る時間を（電気だけの利用 0.5～8 時間と比較して）ガソリン燃料と同じ 3 分程度（1/10 以下に）短縮する。また、常温液体 e-fuel の導入で在来ガソリンステーションのインフラの転用を行い、燃料供給インフラの無理の無いトランジション、安定供給を実現する。

(KPI/マイルストーン)

i. 数理・AI

2025年度までにエネルギーポートフォリオの数理モデル構築 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2025年度までにキャンパス内の長期需要予測 (TRL4) 《達成目標 b-2》

2027年度までに電力および移動の需要予測システム構築 (TRL6) 《達成目標 b-2》

ii. システム設計

2025年度までにセクターカップリングを考慮したシステム分析モデルの開発 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2027年度までに対象地域でのシミュレーションの実施 (TRL6) 《達成目標 b-1》

iii. 市場設計

2025年度までに公共交通とエネルギーミックスを組み込んだ理論モデルの構築 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2027年度までに地域の最適なエネルギーミックスを達成するための市場デザイン (TRL6) 《達成目標 b-2》

iv. 実証インフラ敷設

2025年度までに再エネのメタネーション実験 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2025年度までに軌道上の自動走行テスト実験 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2027年度までにメタン、アンモニアなどの最適エネルギーポートフォリオの実証 (TRL6) 《達成目標 b-2》

2027年度までに e-fuel 合成機能も包含しシステムの有効性評価と自動走行 EV の実証 (TRL6) 《達成目標 b-2》

v. 高伝熱性触媒の開発

2025年度までにラボレベルでの改質反応の実証 (TRL4) 《達成目標 b-2》

2027年度までに水素製造器への対応 (TRL4) 《達成目標 b-2》

vi. 繰り返し高耐久 CO2 吸収材量の開発

2025年度までにラボレベルでの耐久性実証 (TRL4) 《達成目標 b-2》

2027年度までに水素製造器への導入 (TRL4) 《達成目標 b-2》

vii. 水素製造器の開発

2025年度までに水素製造器の基礎設計 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2027年度までに水素製造器の作動実証 (TRL4) 《達成目標 b-2》

viii. e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの設計

2025年度までに実証システム基礎設計 (TRL3) 《達成目標 b-2》

2027年度までにシステム実用性原理実証 (TRL4) 《達成目標 b-2》

ix. 事業化対応

2027年度までにフィールド実験実施中にフィードバックを得て、事業モデルの改良の上で、事業モデルの妥当性検証実施 (TRL6) かつ、フィールド実験結果を基にして、事業モデルの事業計画

策定（BRL7）《達成目標 b-2》

2027 年度までに事業モデルの確からしさの原理的な確認が完了（BRL3）《達成目標 b-2》

x. 制度化対応

2027 年度までに実証地域にてフィールド実験を実施して、新設・改良制度の有効性を確認（GRL5）し、制度の導入計画を策定（GRL6）《達成目標 b-2》

2027 年度までに対象技術が社会に影響を及ぼし得る範囲（業界、ユーザー層、地域等）が特定（GRL1）《達成目標 b-2》

xi. 社会受容醸成

2027 年度までに実証実験を元に、実験参加者からの FB や結果を踏まえながら、実証に向けたボトルネックを洗い出し、普及計画を検討（SRL6）《達成目標 b-2》

2027 年度までに対象技術から生み出される製品・サービスが与えるリターンへの理解度、コストへの許容度を検討（SRL2）《達成目標 b-2》

xii. 人材確保・育成

2027 年度までに大学、自動車会社、行政の連携を強め、人材の育成計画をまとめる（HRL6）《達成目標 b-2》

2027 年度までに事業モデルの実施に必要なスキル要素群の仮説を立案。産/官/学連携の構想を立案。（HRL2）《達成目標 b-2》

② 実施内容

地域における電力事業および交通事業に対して、バッテリーEVのようなモビリティを介して電力とモビリティのネットワークを接続することにより、ムダとムリのない再生可能エネルギーの消費拡大をもたらし、電力ネットワークのオフグリッド化を達成する。また、モビリティネットワークによる地域の医療、介護、保育、教育などの社会サービスの向上を同時に成立させる。この電力・モビリティ多重ネットワークの成立条件を理論的に導くことが、社会実装においても有効な指針を提案することにつながる。理論検討は、数理モデルのシミュレーションにとどまらず、住民のニーズを把握した市場を設計することも視野に入れる。例えば、ある地区の電力容量がその地区の電気料金を決定し、同時に異なる電力容量をもつ地区の電気料金とその供給力を補填するような制度設計が考えられる。加えて、複数の EV からなるネットワークを成立させるための条件として、EV 事業者や電力事業者に EV 導入支援をする制度設計を提案する。

電力とモビリティのネットワークを重ね合わせることにより、エネルギー供給のロバスト性を向上させる。その過程において、再生可能エネルギーを貯蔵するエネルギーポートフォリオの最適化を検討する。例えば、PV の余剰電力を電力として蓄電池に充電することに加えて、エネルギー源としての再利用の目的にあわせたエネルギーの変換を行う。水電解による水素、さらにはアンモニアや空気中の二酸化炭素を活用したメタンやメタノールへの変換である。また液体燃料としての e-fuel への変換もモビリティにおける内燃機関の活用として、既存技術の活用というトランジションの観点からも重要である。加

えて熱エネルギーとしての利用も検討する。このようなエネルギーポートフォリオのマネジメント技術は、企業等によって自治体のための実証研究が行われている。さらに、このエネルギーポートフォリオは地域のニーズによっても形態が変わることが考えられる。例えば、大学キャンパスのように小さい領域での多くのマイクロな移動を要する地域では自動走行によるグリーンスローモビリティとしての小型EVなどの需要が高いため、電力やEVが重要である。一方で、生成したエネルギーを運搬する際には、水素やアンモニアなどに変換して運搬することが重要であり、かつその運搬を担うモビリティも長距離移動というヘビーデューティを考えると液体燃料による内燃機関活用が必須である。水素やアンモニアの燃焼によるエンジンなどへの適用も有効である。

余剰電力をさまざまなエネルギーポートフォリオへ変換することに加えて、変動する再生可能エネルギーを有効活用するためには、その安定的かつ柔軟に変更可能なベースロードを考えることも重要である。たとえば、生活用水などの下水処理のために再エネやその熱を利用することは、時間スケールも柔軟なベースロードとなりうる。このベースロードにより、大学キャンパスでの再生可能エネルギーが構成する電力ネットワークをオフグリッドとして活用することも視野に入る。さらに系統からの電力ネットワークと二重化することで、ロバスト性の向上が期待できる。

また、カーボンニュートラルを見据え、e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムを構築・検証する。

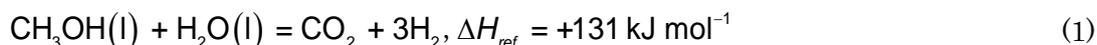
(1) e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムの構築

CCU として e-fuel を利用すると CO₂ 二次排出を伴い、カーボンニュートラルになりえないため、CO₂ 回収機能を備えた e-fuel システムの提案、実証を進める。図 B2②-1(a)に基本構成図を示す。e-fuel の燃料改質水素製造反応で副生する CO₂ を回収し燃料合成に循環利用する。結果的に水素の圧縮、輸送作業を省いた水素システムになるため、水素の貯蔵、輸送負荷を大幅に削減し、水素利用の普及に貢献できると期待できる。図 B2②-1(b) に CO₂ 吸収材の一候補である CaO の再生と e-fuel 再生プロセスを行う。このプロセスは在来技術で成立するので本研究での開発項目から除外する。

(2) CO₂ 回収形燃料改質

実際に想定される e-fuel 液体燃料を用いた運搬可能な炭素循環システムを図 B2②-2 に示す。モビリティ部分と、e-fuel 再生ステーションからなる。同システムは e-fuel としてたとえばメタノールを燃料に搭載し、車上で燃料改質を行い水素を製造し、燃料電池は製造水素を燃料として電力を発生し、移モビリティ部分が駆動する。燃料改質は CO₂ を発生し、このままではカーボンニュートラルにならない。また吸熱反応で熱供給が必要である。本研究開発テーマの特徴は CO₂ 回収形燃料改質反応を行うための水素供給器を開発である。メタノールを事例とした反応構成を以下に示す。

1) メタノール燃料改質反応：水素製造

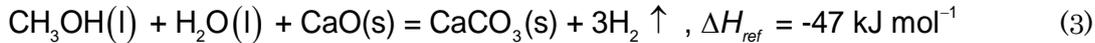


2) CO₂ 吸収材には候補があるが、ここでは一例として酸化カルシウム (CaO) 炭酸化反応による CO₂

回収を想定する：CO₂ 回収



3) CO₂ 回収形燃料改質反応



1) メタノール燃料改質反応は吸熱反応である。発生した CO₂ を 2) 酸化カルシウム炭酸化反応で炭酸カルシウム (CaCO₃) として回収する。この際に炭酸化反応熱が発生する。この発熱を式(1)に利用する。式(1, 2)を連携して行う CO₂ 回収形燃料改質反応が式(3)である。式(3)は発熱反応なので、式(1, 2)は自己発熱的に進行する。改質反応と炭酸化反応を同時に行うことで、カーボンニュートラルの状態を高純度の水素を取り出すことが可能である。製造された水素で燃料電池が駆動する。式(3)を実現するためには水素供給器が重要であり、この開発が本研究開発テーマの主課題である。

モビリティシステムの駆動後に水素供給器を e-fuel 再生ステーションに返還する。図 B2②-1(b)に示す通り、炭酸カルシウムを仮焼し CO₂ を回収する。CO₂ は Fisher-Tropsch、Savatier 法などの在来法を用いて e-fuel に再生する。これらのプロセス駆動には再生可能エネルギー、グリーン水素を用いる。再生された e-fuel と新規の水、および再生 CaO をモビリティシステムで循環利用することで炭素循環による CN モビリティシステムが構築できる。

なお、e-fuel 燃料候補にはエタノール、ジメチルエーテルなどがあり燃料改質反応による水素製造は可能である。また CO₂ 吸収材料としても CaO の他に酸化マグネシウム (MgO) などがある。これらの比較検討も今後必要である。

このシステムの利点・特徴は以下の通りである。

- A) 再生可能エネルギーに基ずく e-fuel を用いたカーボンニュートラルモビリティシステムが構築できる。
- B) 超高压、超低温液体プロセスを省いた水素供給ができる。メタノールを水素キャリアとして用いることで常圧、常温でコンパクトに水素を輸送できる。
- C) 既存のガソリンステーションが転用でき、水素ステーションの新設が不要となる。水素のモビリティ分野での利用を加速できる。モビリティ分野のカーボンニュートラルへのトランジションを無理なく進めることができる。
- D) さらに既存のエンジン自動車むけの e-fuel 炭素循環システムが成立し、移動体のカーボンニュートラルへのトランジションをユーザーの大きな負荷が無く実現できる。
- E) 使用材料が国産または汎用物質で賄うことができ、市場拡大が容易。
- F) 特に大型モビリティ (バス、重機、船舶) などのカーボンニュートラルに貢献できる。

e-fuel 再生ステーションで必要となる技術は在来技術の活用で対応が可能である。能動的炭素循環システムを備えたカーボンニュートラルなモビリティシステムで最も重要な技術課題は、式(3)を実現する水素供給パッケージであり、この開発が本研究の実際の検討課題である。

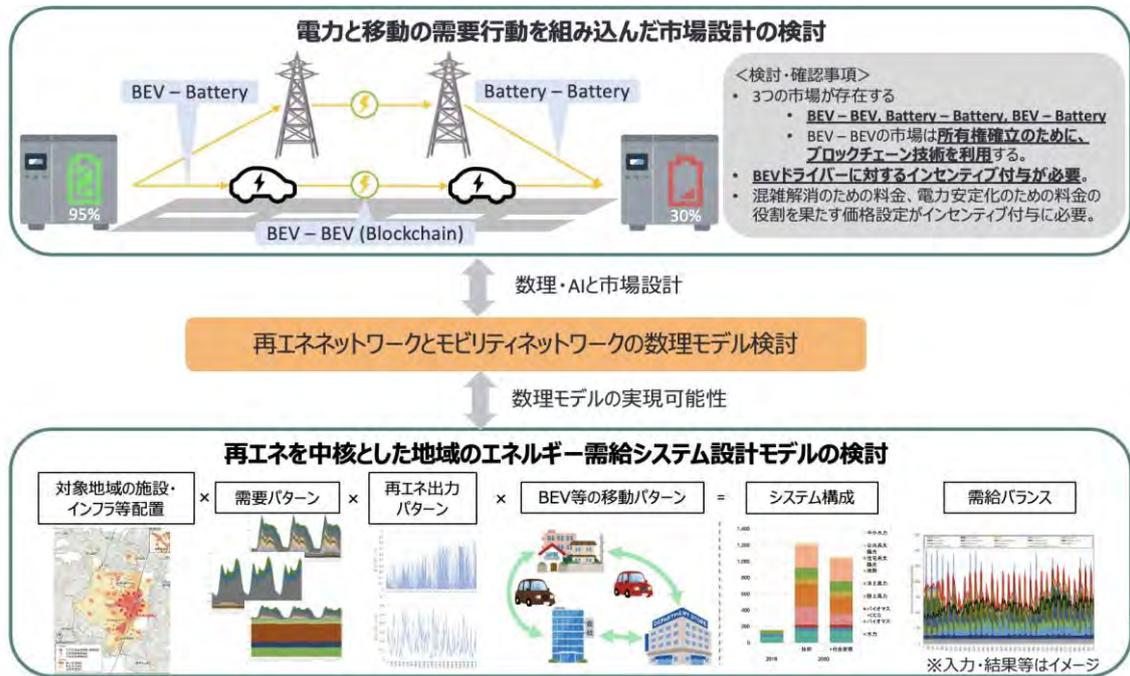


図 B2①. 数理モデルと市場設計、システム設計の関係図



図 B2②-1. e-fuel 炭素循環モビリティシステム基本構成
(a)炭素循環水素製造プロセス、(b)CaO 及び e-fuel 再生プロセス

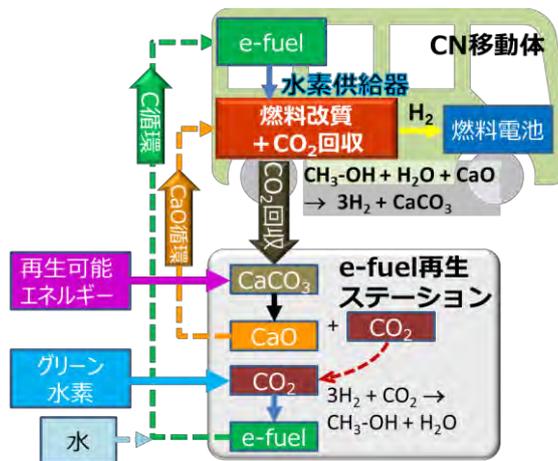


図 B2②-2. 炭素循環システムを備えたカーボンニュートラルモビリティシステムの構成

(5) B3 系統安定化をサポートする USPM によるインテリジェントパワエレシステムの開発

我が国では現状、殆どのエネルギー源を海外からの輸入に頼っており、エネルギー消費の抑制のみではエネルギーの安定的なマネジメントは実現できない。持続可能なエネルギー利用とカーボンニュートラル社会を実現するためには、自給可能な資源（再生可能エネルギー等）を様々な分野（交通、熱、電力）に安定供給し、かつ資源の利用率を最適化して社会を構築するスマート EMS の構築が求められている。エネルギーの有効利用の観点から、様々なスケールでのエネルギーマネジメント技術の導入が進んでいる。また PV や風力発電などの変動性再生可能エネルギーに加え、不安定な再生可能エネルギーの発電電力を平準化する蓄電システムが積極的な導入が進んでいる。エネルギーマネジメントのスマート化には電力、熱、化学、交通間のセクターカップリング（図 B3-1）が必要になるが、特に最も効率よく、利便性が良い電力エネルギーとのカップリングの最適化が重要となる。

上記のセクターカップリングの中で電力分野をハブとしたとき、他分野と相互に連携する Power-to-X には、電力の形態を使いやすく高効率に変換するパワーエレクトロニクス（パワエレ）技術が必要不可欠である。しかしながら、これまでのパワエレ機器は高周波・低周波、大電力・微小電力回路が混在する電氣的仕様に加え、熱設計、電磁ノイズといった極めて複合的な観点から設計、試作を行わなければならない、開発納期の長期化や設計コスト増加を招いている。

これらの課題に対応するため、SIP 第 2 期ではパワエレシステム構築を劇的に簡単化する USPM（ユニバーサル・スマート・パワー・モジュール）の開発が行われた。USPM は既存の電力変換器の構築から脱却し、USPM を電力変換器構築の 1 つの新しい素子として定義することで多様な電力変換器の構築を可能にする革新的技術である。SIP 第 2 期では蓄電池を用いて再生可能エネルギーの出力変動を平準化する USPM システムを構築し、その実証試験までに行い有用性が示された。上述したセクターカップリングによるスマートエネルギー社会を実現するためには、Power-to-X に向けて様々なアプリケーションに柔軟に対応可能な USPM を用いたインテリジェントパワエレシステムの開発（図 B3-2）が急務である。



図 B3-1: 電力分野をハブとした電力-交通-熱のセクターカップリング

図 B3-2: USPM によるインテリジェントパワエレシステム

① 研究開発目標

(事業期間の5年間で達成する研究開発目標)

SIPで達成する想定目標は以下である。

- i. USPMの高パワー密度化に向けた基盤技術の開発
 - ・シンプルな機能を持つスマートインバータ向けUSPMの高パワー密度化(従来比2倍以上を達成)
 - ・高パワー密度化・開発期間短縮による低コスト化と高信頼USPMによるパワエレシステムの長寿命化
- ii. EMS視点からのUSPM最適化技術の開発
 - ・多数台USPMを統括制御する最上位スマートコントローラの開発、および実証
 - ・USPMを用いたインテリジェントパワエレシステムの設計ツールの開発
 - ・様々な用途(水素、太陽光、蓄電)に対応したUSPMモジュールの開発、および、開発モジュールを用いたPower-to-X向けインテリジェントパワエレシステムの実証
 - ・大規模なインテリジェントパワエレシステムの実現に向けた多数台USPMを統括制御する最上位スマートコントローラの開発および実証

(KPI/マイルストーン)

- i. USPMの高パワー密度化に向けた基盤技術の開発
 - 2025年度までにUSPMのスイッチング周波数の最適化および高パワー密度化設計法(パワー密度従来比2倍以上を達成)の開発(TRL6) 《達成目標b-3》**
 - 2027年度までにUSPMの高信頼化を実現するUSPMのパッケージング技術の検討(TRL8) 《達成目標b-3》
- ii. EMS視点からのUSPM最適化技術の開発
 - 2025年度までにUSPMライブラリの体系化(TRL6) 《達成目標b-3》
 - 2027年度までにUSPMを用いたシステムの設計支援ツールの開発(TRL8) 《達成目標b-3》
 - 2027年度までにUSPMを用いたスマートインバータの応用技術開発(TRL6) 《達成目標b-3》
 - 2027年度までに最上位スマートコントローラの開発(TRL8) 《達成目標b-3》

表 1 マイルストーン

系統安定化をサポートする USPM によるインテリジェント パワエレシステムの開発	初年度	2年度	3年度	4年度	最終年度
1. USPM の高パワー密度化に向けた基盤技術の開発					
1.1. 受動部品を含めた USPM のスイッチング周波数の最適化および高パワー密度化設計法の開発	仕様検討 回路試作	動作検証・評価		ブラッシュアップ	
1.2. USPM の高信頼化を実現する USPM のパッケージング技術の検討	仕様決定	パッケージング検討, 試作および評価			ブラッシュアップ
2. エネルギーマネージメントシステム視点からの USPM 最適化技術の開発					
2.1. あらゆる用途に対応する USPM ライブラリの体系化	ライブラリ 仕様検討	動作検証・評価	ブラッシュアップ		
2.2. USPM を用いたシステムの設計支援ツールの開発	仕様検討	動作検証・評価	ブラッシュアップ		
2.3. USPM を用いたスマートインバータの応用技術開発	主回路, 制御 検討	動作検証・評価	ブラッシュアップ		
2.4. 最上位スマートコントローラの開発	通信仕様検討	動作検証・評価	ブラッシュアップ		

iii. 事業化対応

2027 年度までにスマートエネマネで想定されている一部のユーザーに対して USPM を使ったエネマネシステムを展開し、事業モデルの妥当性を得る (BRL6) 《達成目標 b-3》

iv. 制度化対応

2027 年度までに USPM によるインテリジェントパワエレシステムを普及させるにあたり、求める制度の改正・新設 (解釈変更、規制改革、規格化・標準化、ガイドライン等) 案が整理・文書化 (GRL4) 《達成目標 b-3》

v. 社会受容醸成

2027 年度までに大量生産によるコスト低下、高速デジタル制御による省電力化・安定化、稼働時間向上など USPM によるインテリジェントパワエレシステムの便益をまとめ、コストへの許容度を高める (SRL4) 《達成目標 b-3》

vi. 人材確保・育成

2027 年度までに参画機関を中心として検討行い、初期テストを通して、実際に必要な人材を手配・チーム形成・育成 (HRL4) 《達成目標 b-3》

② 実施内容

第 3 期 SIP で取り組むべき研究開発テーマでは、SIP 第 2 期の USPM の成果をインテリジェントパワエレシステムの基幹技術としてさらに発展させ、世界をリードする EMS を実現することを目的に、ど

こでも（多様なアプリケーション）・だれでも（多様な設計者）・簡単に（所望の機能を実現）インテリジェントパワエレシステムを構築できることを目指す。そのための開発として下記の 2 つの技術開発を行う（図 B3-3）。

（1）USPM の高パワー密度化に向けた基盤技術の開発

1) 受動部品を含めたスイッチング周波数の最適化や最適統合設計を行い、SIP 第 2 期で開発された USPM の 2 倍以上のパワー密度と高信頼化を目指す。まずはスマートインバータに向け USPM を中心に開発するが、最終的には、交通、熱、化学などへの相互のセクターカップリングに向けた USPM についても高パワー密度化がはかれる基盤技術を開発する。2) パッケージング技術では冷却、低インダクタンス化、小型化だけではなく、モジュール交換や周辺回路の熱耐性と塩害対策などのメンテナンス性向上技術を開発する。なお、ここでは、数年での社会実装を目指して将来低コストになると見込まれる SiC デバイスを主眼とした最適化を行い、高パワー密度化と高信頼化を目指す。

（2）EMS 視点からの USPM 最適化技術の開発

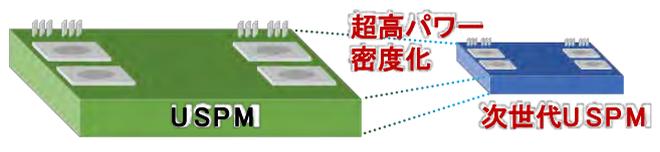
1) エネルギーマネジメントに必要な USPM のライブラリを開発し、再生可能エネルギー用途、系統安定化用途のみならず、水素やメタンなどの用途に適合した仕様を持つ USPM の開発を行う、2) USPM を用いたシステムの設計支援ツールを開発し、容易なシステム設計を実現する、3) USPM を用いたスマートインバータへの応用技術開発、4) 電力系統の情報を USPM システムにフィードバックする最上位スマートコントローラの開発を行う。

USPM 全体の統括制御は各 USPM の上位に接続されるマスターコントローラによって行われる。さらにシステム周辺の情報を監視し、システム全体の制御を行うスマートコントローラが最上位に接続される。開発項目 3) では、複数台 USPM によるスマートインバータの最適構成およびマスターコントローラ-USPM 間の制御手法を開発する。開発項目 4) では、多くのパワエレシステムの負荷変動や系統異常といった情報を大量に取得した際に、フィードバック制御を実現するソフトウェアおよびハードウェアの開発を行う。

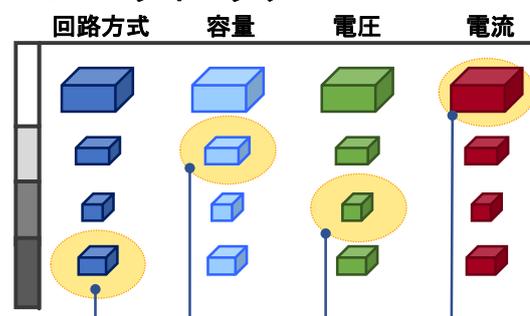
以上の (1)、(2) の開発成果を社会実装することを目標に開発を進める。

□ 開発項目(1) 高パワー密度化に向けた基盤技術開発

- 1) 主回路の最適化技術開発
- 2) 最適パッケージング技術開発



USPMライブラリ



最適統合



□ 開発項目(2) EMS視点からのUSPM最適化技術の開発

- 1) 様々な用途に対応したUSPMの開発
- 2) USPM設計支援ツールの開発
- 3) スマートインバーターへの応用技術開発
- 4) 最上位スマートコントローラーの開発

USPMによる
パワエレ機器

どこでも × だれでも × 簡単に パワエレ機器を設計、製作
多様なアプリ 多様な設計者 所望の機能実現

→スマートエネルギー社会の拡大に貢献

図 B3-3: 第3期 SIP での研究開発内容

(6) C1 エリアエネルギーマネジメントシステムのプラットフォーム開発と実装

街区、自治体、都市等の様々なスケールのエリアにおける EMS 実現に貢献するシステム・技術を開発する。2050年のカーボンニュートラルの実現に向けて、各エリアの建物、交通等の将来シナリオを構築し、EMSを社会実装するためのデータ収集分析・シミュレーションプラットフォームの開発を行う。また、地域的な課題解決を目指し、需要家やアグリゲータ等の各種プレーヤーにおけるEMSの多様な付加価値を最大限顕在化させる実証を行う。

① 研究開発目標

- (1) 自治体向けローカルエネルギープラットフォームの構築

自治体の現状把握、将来検討を支援するエネルギー需要データや分析ツールからなるローカルエネルギープラットフォーム (PF) を開発し、地方自治体と最終消費者のラストワンマイルをつなぎ、最終消