

SIC戦略提言-III

エネルギー移行を促進する連携構築
のための新システムの提案

システムイノベーションセンター

2024年9月発行



一般社団法人

システムイノベーションセンター

Systems Innovation Center (SIC)



緒言

現代社会では「システム」の役割が極めて大きい。エネルギー、インフラ、ヘルスケア、金融、行政、防災、教育など社会のすべての分野で「システム」が主役となって我々の生活を支えている。システムが我々の生活を律し、システムのレベルが我々の生活の質を左右している。現代はまさしく「システムの時代」と言ってよい。

一方、社会が複雑になるにつれて、「よいシステム」を構成することはますます難しくなりつつある。人と人、人とモノ、モノとモノのつながりが広く深くなるにつれて、システムはますます複雑で大規模なものとなる。社会の変動が激しくなるとシステムの運用も環境変動に直面して難しくなる。また科学技術の発展に伴って、システムを構成する手段も広がり選択肢も増え、それに従いシステムを適切に進化させることが必要になってくる。世間を騒がすシステム故障の報道が最近頻度を増しているのは、現代の複雑化、広域化する社会においてシステムの構築、運用、進化が著しく困難になってきたことの現れである。

システムが主役となっている社会で、よいシステムを作り出すことが難しくなっているという事態は、現代社会が直面している大きな課題を提示している。特にわが国では「縦割り社会」の負の側面を受け継いで、垂直型の統合が圧倒的に優位で、システムを有効に構築・運用・進化させるために必要な水平統合への社会的な受容の度合いが海外と比べて小さい。システムイノベーションセンターでは5年前の発足以来この水平統合のテーマを掲げ、産業界の視点から愚直にこのことを主張し続けてきた。最近では我々の主張が「産業技術のパラダイムシフト」として官民でようやく認識され始め、「卓越したシステム」を構築するにはどうすればよいか真剣に議論されるようになってきた。

このような状況に鑑み、今の日本にどのようなシステムを構築すべきか、日本のシステム構造をどのように作りあげていくべきかを、我々のこれまでの経験を踏まえて次の6つのセクターに分けて提言する。

- (1) ヘルスケア（「SIC 戦略提言-I」にて提言）
- (2) ロジスティックス
- (3) 金融
- (4) エネルギー（本分冊「SIC 戦略提言-III」にて提言）
- (5) 防災・レジリエンス
- (6) 科学技術（「SIC 戦略提言-II」にて提言）

この提言が、「失われた30年」の次の「得られた30年」を切り開く産・学・官の努力の結節点となることを期待したい。

SIC 戦略委員会

SIC 戦略提言—III

「エネルギー移行を促進する連携構築のための新システムの提案」

要旨

国家のエネルギー基盤を四半世紀かけてカーボンニュートラル（CN）に移行するという大事業が進行中である。このための様々な技術開発，システム開発が取組まれており，その実装のための財政的措置も始まっている。ここでは，社会基盤を長い期間をかけて変革する移行マネジメント概念に基づいて，二つのアプローチからエネルギー移行に資する新システムの構築を提言する。一つのアプローチは，個別技術を横連携して移行のためのムーブメントを生み出すことであり，もう一つのアプローチは，エネルギーに関わる社会全体の取組と個別技術への取組との橋渡しを行うことによって新たな社会基盤の形成に寄与することである。

前者については，再生可能エネルギー（再エネ）に関する複数セクターの連携により新しいシステムの構築をはかるもので，喫緊の課題である再エネ大量導入を実現する社会基盤構築への駆動力を形成する。後者については，社会全体に関わる日本のエネルギー計画と地域でさまざまに展開されているエネルギー変革活動との結びつけを行うことによって，新たな社会新たな社会基盤の姿づくりに寄与すると同時に地域の取組の一層の活性化を目指すものである。さらに，基幹産業が高度に融合した生産の場であるコンビナートを，産業国家のエネルギー移行での重要な因子と捉え，エネルギー移行の場での卓越システム構築のための横連携と社会基盤の在り方という二つの視点からの取組を提言する。

具体的には，以下の三つの提言を行う。

提言1：セクター融合エネルギーマネジメントの構築

時間的に変動幅の大きい再エネを大量に導入可能とするために，これまでの発電の調整に加えて，需要の調整を行うことによって需給バランスを調整するという運用に転換して行く。この考えを，モビリティ，熱供給などの個々のセクターに限定するのではなく，それぞれのセクターが形成する物理ネットワークと電力ネットワークとを融合させるという卓越システムの構築を通して，セクター連携の範囲を量的・質的に高めることを目指す。

提言2：デジタル・電力・水素・物流網の統合的形成のための情報連携シス

テムの構築

エネルギーに関わる生産・流通・消費の構想に関する情報について、全国視点からの取組と地域視点からの脱炭素先行地域の取組や各地の CN コンビナート計画の取組等とで、相互に参照可能な情報連携を実現する卓越システムを構築する。これによって、全国計画立案の多面性、正確性を高めると同時に、地域間での技術移転の促進、新規事業者の育成につなげる。

提言 3：CN コンビナート構築広域連携拠点の設置

各地で進展する CN コンビナート計画立案においては、リサイクルを含む様々な技術や政策的な対応が必要とされている。CN コンビナート構築にかかわる広域連携拠点を設けて、システム構築の視点から各地の知識の相互流通・蓄積を図ると同時に、CN コンビナートが水素・回収 CO₂ の最大利用者であることを背景に全国的な水素・CO₂ の流通の在り方を検討することによって、各地の取組を適切な姿に導くことに貢献する。

本提言報告書では、これら三つの提言の背景とその実現に向けた検討を述べる。

(注)「卓越システム」とは、次のような特徴を持つシステムである。

- ・作られた理念が明快に理解でき、出来ることと出来ないことの境界がはっきりしている。
- ・システムの全体構成が理解しやすい。
- ・運用しやすく、故障への対応が容易である。
- ・拡張可能性 (Scalability) がある。
- ・環境の変化に応じて進化できる。
- ・利害関係者の多くを満足させることが出来る。
- ・堅牢で十分な持続可能性がある。
- ・システム構築、運用のコストが小さい。

SIC 戦略提言「エネルギー」サブワーキンググループ

メンバー：

- リーダー：船橋 誠壽（SIC 個人会員、横幹連合）
高木 真人（SIC 個人会員、日本工学会）
古屋 聡一（株日立製作所）
- 委員： 笈沼 誠（株日立産業制御ソリューションズ）
大久保 智史（東京電力パワーグリッド(株)）
片岡 俊朗（東京電力パワーグリッド(株)）
川地 光之輔（東京電力パワーグリッド(株)）
小池 俊吾（東京ガス(株)）
高橋 由泰（株日立製作所）
西川 剛雄（東京ガス(株)）
平岡 精一（三菱電機(株)）
平田 直人（東京電力パワーグリッド(株)）
牧野 泰丈（横河電機(株)）

目次

緒言	1
SIC戦略提言－Ⅲ 「エネルギー移行を促進する連携構築のための 新システムの提案」要旨	2
1. エネルギー分野に関わる政策動向	6
2. SICとして提言する上での着眼	10
2.1 エネルギー移行に対する認識	10
2.2 提言に向けた着眼	11
3. SIC 提言：「エネルギー移行を促進する連携構築のための新システムの 提案」の提言	14
3.1 提言1：セクター融合エネルギーマネジメントの構築	14
3.2 提言2：デジタル・電力・水素・物流網の統合的形成のための情報 連携システムの構築	16
3.3 提言3：CN コンビナート構築広域連携拠点の設置	19
3.4 その他の重要事項：エネルギーモデル開発・シミュレーションの振興	21
4. まとめ	23
参考文献	24

1. エネルギー分野に関わる政策動向

世界が直面する地球温暖化を回避するためのエネルギー分野での国際的な連携が進行中である。産業革命以降の温度上昇幅を 2.0 °C、できれば、1.5 °C よりも小さくするという活動に 197 カ国が参加する COP21 パリ協定が 2015 年に締結され、以降、各国はそれぞれ国際的な場でその目標を提出して温室効果ガス排出の削減に取り組むエネルギー政策を表明し、同時に、その進捗状況の報告を行ってきた。

2020 年 10 月、日本は温室効果ガスの排出を 2050 年にゼロとする宣言を発出した。2021 年 4 月には、中間目標として 2030 年に排出を 46% (2013 年比) に削減することを表明した。この 46%削減表明の国内展開として、2021 年 6 月に、「カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定された。ここでは、温室効果ガス排出の削減と経済成長を両立させるため、重点 14 分野（洋上風力・太陽光・地熱、水素・アンモニア、次世代熱エネルギー、原子力、自動車・蓄電池、半導体・情報通信、船舶、物流・人流・土木インフラ、食料・農林水産業、航空機、カーボンリサイクル・マテリアル、住宅・建築物・次世代電力マネジメント、資源循環関連、ライフスタイル関連）が選定され、2 兆円のグリーンイノベーション (GI) 基金を造成して最長 10 年間の技術開発への取組が始まった [経産省 2021]。

2023 年 2 月には、グリーントランスフォーメーション (GX) を通じて脱炭素、エネルギー安定供給、経済成長の同時実現を目指す「GX 実現に向けた基本方針」が閣議決定された。今後 10 年で 150 兆円を超える GX 投資を官民協調で実現するために、「GX 経済移行債」を創設し 20 兆円規模の先行投資促進（設備投資支援、価格差軽減）をするとともに、カーボンプライシング（排出量取引、化石燃料賦課）による企業や需要家の行動変容の創出を企図した取組が進められている [内閣官房 2023a]。さらに、2024 年 5 月には、2040 年における産業構造、産業立地、エネルギー供給態勢を描く GX 2040 ビジョンを定めることが決議された [内閣官房 2024]。この描画では、2035 年の我が国の CO₂ 削減目標を、2025 年 2 月までに国連に提出することも視野に含まれている。

上記の GI をはじめとするエネルギー分野の技術開発への取組は多岐にわたる。科学技術振興機構研究開発戦略センター (JST/CRDS: Center for Research and Development Strategy) は、様々な技術開発を包括して 4 つの研究分野を示している [科学技術推進機構研究開発戦略センター 2023]。この枠組みに沿って、SIC に関連の深いシステム情報にかかわる技術についての政府等の取組をピックアップすると以下のようにまとめられる (図 1)。

(1) 電源のゼロエミッション化

- ・全国電力システムシステム：電力広域的連携推進機関（OCCTO: Organization for Cross-regional Coordination of Transmission Operators, Japan）において、再生可能エネルギー（再エネ）の導入を踏まえた 2050 年の電力システムの姿と実現のための費用が見積もられた[電力広域的連携推進機関 2023]。さらに、経産省「将来の電力需給に関する在り方勉強会」において、将来の検討枠組み（時間軸，需給想定に関する考え方等）が検討され，議論の場を OCCTO に置いて進めることとされた[経産省 2023c]。

(2) 需給安定化

- ・分散型電力システム：様々な分散型リソース（供給量に応じて需要調節の対象となる，業務需要家，産業需要家，家庭需要家，電気自動車（EV）充電所，EV バス基地）が電力システムと融合し，安定供給・再エネ有効活用に貢献する分散型電力システムのイメージが経産省の検討会で描画され，2026 年からの電力需給調整市場の形成が目指されている[経産省 2023a]。
- ・みどりの食料戦略：食料・農林水産業の生産力向上と持続性の両立が農水省で目指されており，その取組の一つとして，2030 年に向けて農山漁村等の地域で作った再エネを地域内で活用する技術（VEMS：Village Energy Management System）の開発が進行中である[農水省 2021]。
- ・脱炭素先行地域：2018 年時点で約 9 割の市町村のエネルギー収支が赤字となっている状況に対して，地域の企業や地方公共団体が中心になって，地域の雇

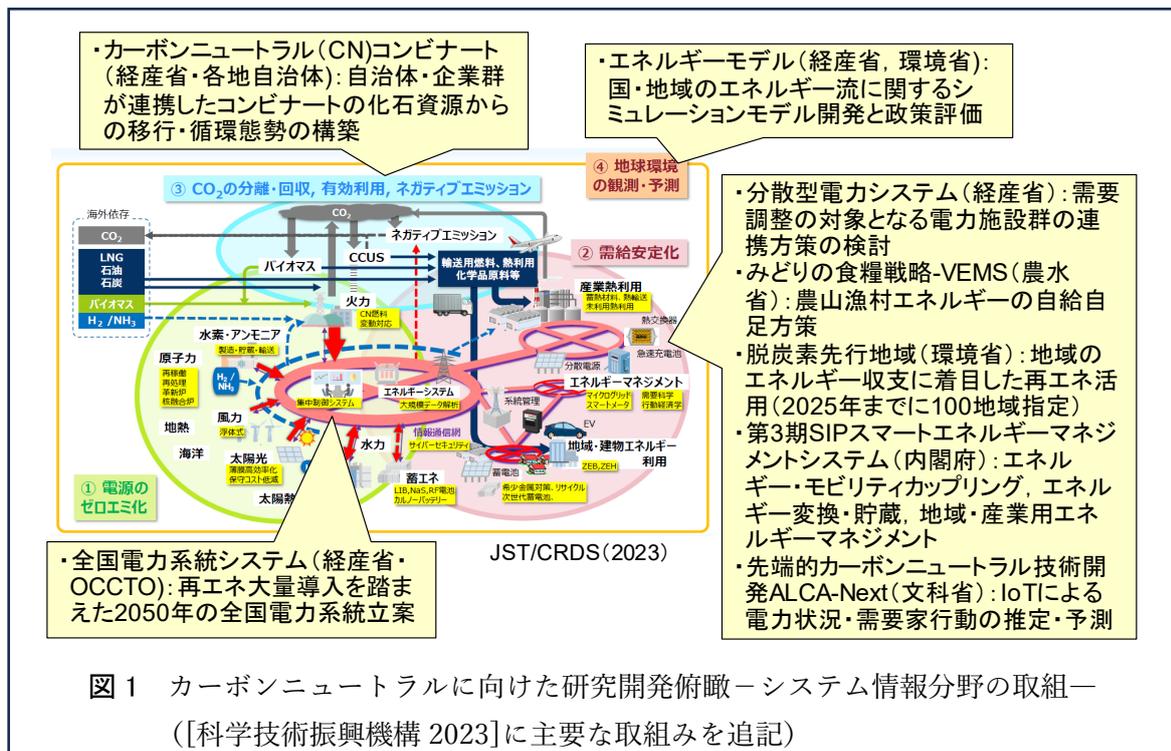


図1 カーボンニュートラルに向けた研究開発俯瞰－システム情報分野の取組－
 ([科学技術振興機構 2023]に主要な取組みを追記)

用や資本を活用しつつ、地域の再エネポテンシャルを有効利用することで、地域の経済収支の改善につなげることを目指すプロジェクトが環境省で進行中である。2025年度までに100ヶ所の地域で取組の道筋をつけ、2030年度までに目標達成することが計画されている。2022年度にスタートし2023年度までに73地域が選定されている[環境省 2023]。

- ・スマートエネルギーマネジメントシステム：内閣府による戦略的イノベーション創造プログラム（SIP: Cross-ministerial Strategic Innovation Promotion Program）の第3期（2023年～）の課題の一つとしてエネルギーマネジメントが取組まれており、その内容は、①エネルギーとモビリティ等のセクターカップリングであるRE100を実現する農村型VPP（Virtual Power Plant）、②エネルギー生産・変換貯蔵（アンモニア・水素利用分散型エネルギーシステム、カーボンニュートラルモビリティシステム、系統安定化をサポートするUSPM（Universal Smart Power Module）によるインテリジェントパワエレシステム）、③エネルギー最適利用（エリアエネルギーマネジメントシステムプラットフォーム、異業種連携等熱エネルギーマネジメントシステム基盤技術、産業用ー工場内・工場外ースマートエネルギーマネジメント連携システム）が掲げられている[科学技術振興機構 2023a]。
- ・先端的カーボンニュートラル技術開発（ALCA-Next）：GX実現のための新規技術創出を目指して科学技術振興機構が2023年に着手した取組で、エネルギー変換・蓄エネルギー領域等の6つの技術領域を対象としている。多くが要素技術開発に焦点を当てているが、グリーンコンピューティング・DX領域では、IoTセンサで得られた情報から電力システムの構成要素の状況や需要家の行動・意図を推定・予測するアーキテクチャ（需要科学等）の開発を推進課題の一つとしている[科学技術推進機構 ALCA-Next 2023b]。

(3) CO2の分離・回収、有効利用、ネガティブエミッション

- ・カーボンニュートラル（CN）コンビナート：苫小牧、千葉・蘇我・五井、川崎、周南、大分等で自治体・関連企業が集まり、化石燃料から水素燃料への移行、リサイクルによる原料投入の低減が目指されている[経産省 2023b]。GXロードマップでは、2030年に向けたCNコンビナート実現のための企業間連携の加速化が示されている[内閣官房 2023b]。

(4) 地球環境の観測・予測

- ・エネルギーモデル：国や地域のエネルギーの流れや費用を、想定する需要、燃料価格、変換技術価格等に応じて算出するシミュレーションモデルであり、エネルギーに関わる需要・供給・設備群を俯瞰的にとらえるために開発されている。直近では、(公財)地球環境産業技術研究機構（RITE:

Research Institute of Innovative Technology for the Earth) のモデル DNE+21 のアップデート[地球環境産業技術研究機構 2024], (公財) 地球環境戦略機関 (IGES: Institute of Global Environmental Strategies) による IGES 1.5°C ロードマップ[地球環境戦略機関 2023]の発出がある.

以上のとおり, 国家のエネルギー基盤をカーボンニュートラルに移行することを目指して, GI 基金に基づく要素技術開発や新プラント設備の開発はもとより, システム情報的な側面からも研究開発が周到に進められているのがエネルギー分野の現状である. これらの動向を踏まえた上で, 卓越したシステムの構築を通してイノベーションの実現を目指す SIC の視点から, 国家の基盤移行へのあらたな貢献を探索した結果が, 以下に述べる取組の基本的な着眼と具体的な提言である.

2. SIC として提言する上での着眼

2.1 エネルギー移行に対する認識

●認識 1：四半世紀にわたるエネルギー移行

対象範囲は多岐にわたっており俯瞰的な把握を欠くことはできない。ここでは、2050 年に向けてのエネルギー移行シナリオとして表1を想定する。大筋は、今後四半世紀にわたって、再生可能エネルギー（再エネ）および原子力を主力エネルギー源として開発・活用すると同時に、需要に対する不足分をこれまでの化石燃料に替えて水素で補う体制を作り上げるというシナリオである。

直近では、再エネはくらし、製造のためのエネルギー源として導入が進められ、さらには電力事業用としての開発も進められているが、これに伴って送配電事業では再エネがもつ時間的・季節的な変動特性に対応できる柔軟性を確保することが必須となってくる。一方、化石燃料に替わって水素が本格的に導入されるのは2030年代とみなされているが、この利用は水素だけにとどまらず、

表1 想定する 2050 年までのエネルギー移行シナリオ

- ・系統柔軟化：電力は需要量と供給量が常に一致していなければならない。再エネの時間的・季節的な変動性に対応するための蓄積・変換・連系等の一致のための施策を導入すること
- ・CCUS（Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage）：設備から排出される CO₂ を回収・利用・貯留する設備の総称
- ・合成燃料・合成メタン：CO₂ と水素により生成された人工石油・人工（都市）ガス

	～2030年	2030～2040年	2040～2050年
くらし	電化 再エネ導入 建物断熱化	(同左)	+合成メタン
輸送	電化	+水素, 合成燃料	(同左)
製造	低温設備電化 再エネ導入 リサイクル	+CCUS	+合成メタン +水素, アンモニア
電力	再エネ導入・系統柔軟化 原子力活用	+水素・アンモニア混焼 +CCUS	(同左)
水素燃料		流通インフラ・拠点形成	実用展開

回収した CO₂ 等と合わせて導かれる合成燃料，合成メタンなどを含めて，くらし，輸送，製造など多岐にわたると想定されている．先に述べたとおり，このシナリオを実現するために，様々な技術開発が取組み，また新技術の実装のための資金の準備がなされている．

●認識 2：不確実性を踏まえた意思決定

シナリオには多くの不確実事項が存在し，とくに，2030 年代から本格導入が構想されている水素と CCUS において顕著である．水素については，産地（国内，海外）・輸送媒体（液化水素，MCH: Methylcyclohexane，アンモニア等）・最終利用形態が，CCUS については，CO₂ 蓄積・流通が不確実事項である．その多くの実現技術は開発途上にあり，また設備建設には数年を必要とすることを踏まえた意思決定が必要とされている．

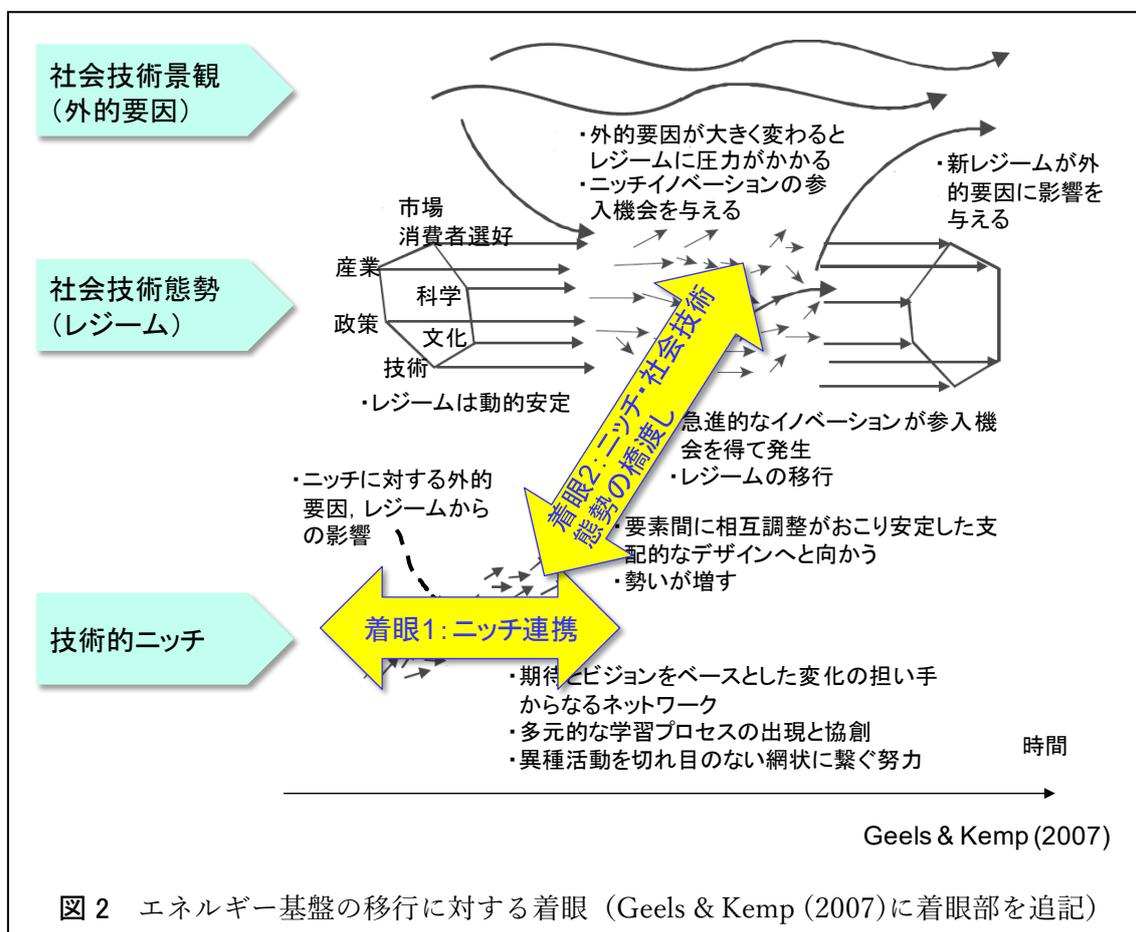
2.2 提言に向けた着眼

不確実な状況下で，かつ長期にわたる社会の技術基盤の変革に貢献する方策を求めるために，ここでは，2000 年代初期に政策科学の分野で提唱された移行マネジメント（Transition Management）概念[Geels & Kemp 2007]に依拠することとする．この概念の中心をなすのは多層的視座モデル（Multi-Layer Perspective Model）と呼ばれる移行プロセスのモデルである．ここでは，社会変革をもたらす要因を 3 階層（温暖化等のマクロな外的要因，市場選好や産業構造など社会技術態勢，技術的ニッチと呼ぶ具体的に社会変革をもたらす個別技術）でとらえ，先進国ではとりわけロックインされがちな社会の技術基盤の移行は，技術的ニッチに相互作用や連携を発現させながら成長させて，外的要因からの影響も視野に含めて，既存態勢を塗り替えてゆくことが必要であるとされている．この概念は，エネルギーモデルのような定量的関係だけでは捉えるのが難しいイノベーションと呼ぶにふさわしい構造的な変化をとらえようとしている点に注目される [陳ほか 2021]．

エネルギー移行の状況でとらえれば，電化設備，再エネ設備，水素関連技術など様々な技術を相互作用させると同時にそれらの集積として社会全体の仕組みを外的要因からの影響を考慮しつつ移り変えてゆくことと解釈できる．このような見方に立つと，エネルギー移行を実現するには，個々の技術開発にとどまらず個々の技術の連携やさらには社会技術態勢との結びつけを行ってゆくことが極めて重要であると推察される．この考えに基づいて，ここでは 2 つの側面，すなわち，個別技術の連携（着眼 1）と個別技術活動の社会態勢への結びつけ（着眼 2）について提言することとする（図 2）．

新システムの構想立案でもっとも重視すべきは，システムの要素候補の新結合によってどのような新たな価値を生み出すかである．本提言では，個別技術の

連携によって移行のための新たなムーブメントを生み出すこと、個別技術と社会態勢との結びつけによって個々の活動的確定をもたらすことを、国家にとっての新たな価値の創出と位置付けている。



● 着眼1：再エネ主力電源化のための連携の量的・質的拡大

経産省の分散型電力システム検討会や SIP スマートエネルギーマネジメントにおいてセクターカップリングが目指されているが、再エネを主力電源とするためにはこのカップリングの範囲を大幅に拡大する必要がある。SIC 会員企業では、このために、すでに分散エネルギー取引市場の開設等を提案[経産省 2023a]しているが、本提言においては、再エネ主力電源化は長期にわたる移行プロセスにおいて直近の最重要事項であると捉え、ここに質的な変革をもたらす姿として複数セクターが同時並行的に連携を図ってゆくことを要請する。これまでの供給側施策にとどまらず需要側の施策を広く取り込んで、複数セクター間の相互作用を効果的に発揮させることを目指すものであり、移行マネジメントの視点からは、技術的ニッチの相互連携をはかることによって社会技術態勢の変革を駆動する勢いを形成するものと位置づけられる。

●着眼2：地域活動と全国視点との整合化

CN コンビナート計画，脱炭素先行地域開発など，地域におけるエネルギー移行が取組まれているが，日本全体としてどのようにこれらの活動を整合化してゆくかは明らかではない．一方，全国電力系統計画では全国視点からエネルギーをとらえる重要なアプローチがなされているものの，地域での進展や非電力エネルギーとの結びつきについては一層考慮する余地があるという指摘もある[林田 2024]．厳密な整合化は，国土の有様にかかわる事項であり，計画として取り上げるには政策的に難度が極めて高いが，いくつかの未来像を仮定として構想すること，あるいはこのための情報連携は，不確実性の高い状況下で欠くことができない取組である．移行マネジメントの視点から，このような整合化のための努力は，社会技術態勢と技術的ニッチとを結びつけて新たな社会技術態勢を創出する重要な役割を担うと位置づけられる．

さらにここでは，高度に産業が集積するコンビナートは，エネルギー移行の検討には欠くことができない重要な場であるとして，各地のコンビナートの横連携と全国的な流通・消費の姿といった社会技術態勢の両面からの提言を加える．

以上の提言の方向性は，移行マネジメント概念を拠り所として導いたものであるが，これらの提言が新システムとしてどのような姿を形成しうるかについて確認しておく必要がある．このために，ここでは社会システム論[Checkland 1981]における CATWOE 分析（C: Customers, 受益者/犠牲者，A: Actors, 実行者，T: Transformation, 変換プロセス，W: World view, 世界観，O: Owner, システム所有者，E: Environmental constraints, 環境制約）に基づいてシステムとしての姿を各提言に対して確認することとしている．

3. SIC 提言:「エネルギー移行を促進する連携構築のための新システムの提案」

3.1 提言1: セクター融合エネルギーマネジメントの構築

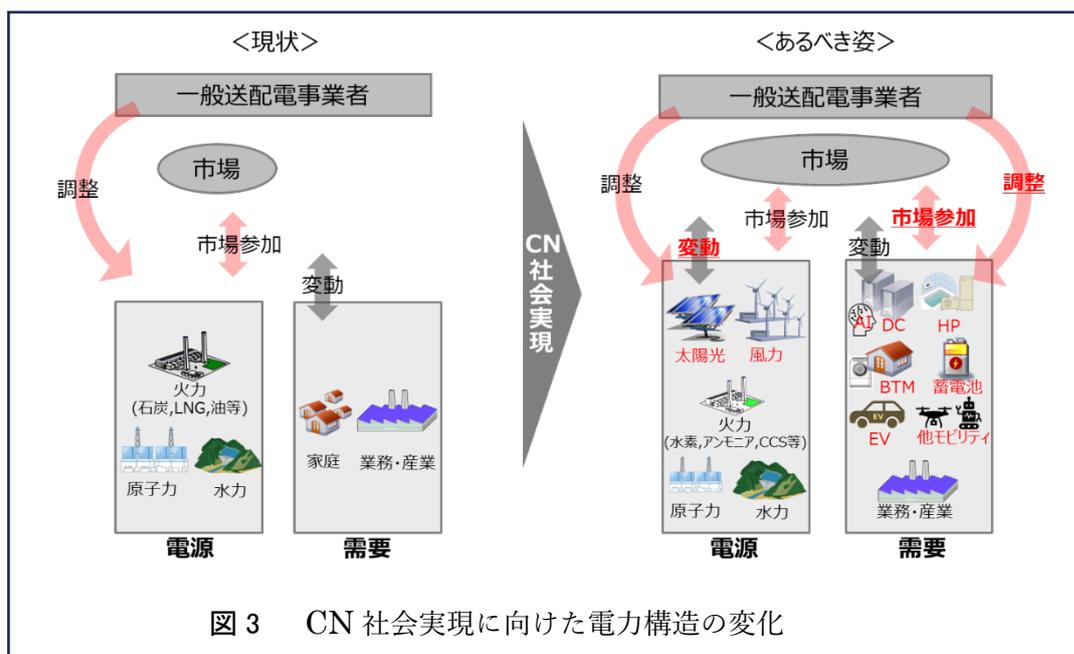
●課題

電気は、その性質上、発電（供給）と消費（需要）を常に一致させること（需給バランスを調整すること）が必要である。（一致しない場合は、周波数の上昇・低下が発生し、電気の品質への影響や停電リスクが生じる。）

現在の電力系統では、一般送配電事業者が需要の変動に合わせて、主に火力や水力などの大型発電の出力調整をすることで、需給バランスを調整し、系統の安定を保っている。しかし、将来のカーボンニュートラル社会実現に向けて、再エネ発電が大量に導入されると、再エネ発電の出力変動幅が大きいいため、需要の変動のみでなく、発電も変動することとなる。結果として、再エネ発電の出力抑制や系統設備の増強が必要となり、需給コスト増加・系統コスト増加という社会コスト（国民負担）の増加を招き、カーボンニュートラル社会実現の障壁となり得る。電力系統の柔軟性が強く求められる由縁である。

●解決策

これまでの需要の変動に対して、発電を調整して需給バランス調整するという需給運用から、需要の変動に加え再エネ発電の変動も加わることに對して、発電の調整に加えむしろ需要の調整を行い需給バランス調整するという需給運用に転換していく（図3）。

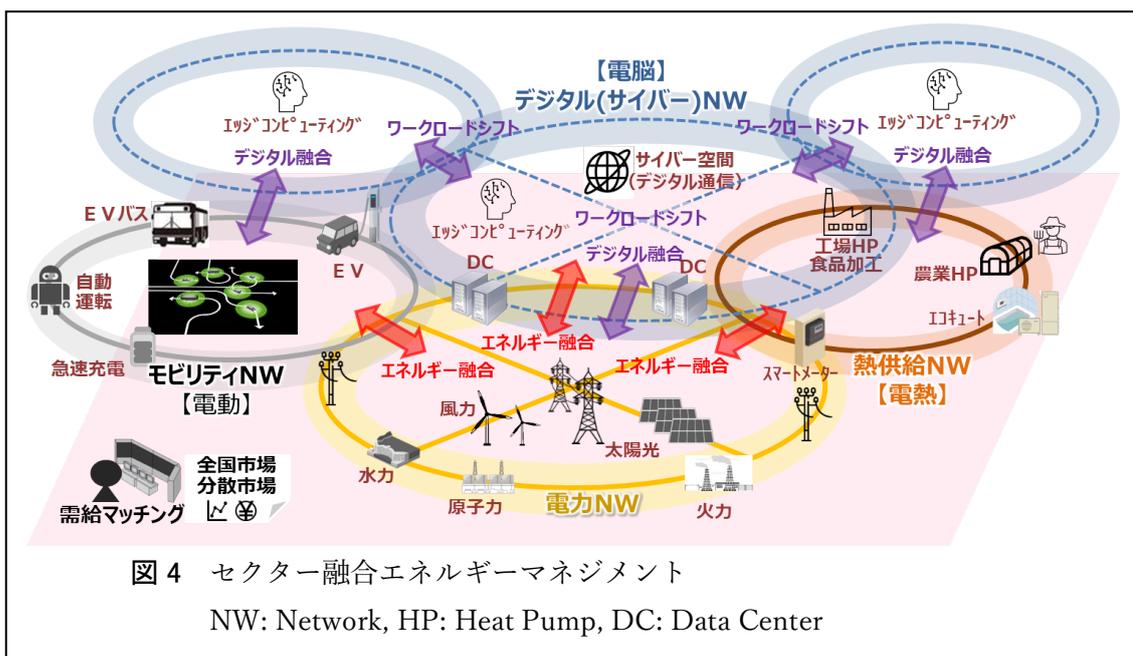


ここで言う需要の調整とは、電気自動車 (EV)、ヒートポンプ (HP)、データセンター (DC) のような制御可能な電化需要 (DER: Distributed Energy Resource) を創出しつつ調整することである。

具体的には、EV の場合、晴れにより太陽光発電が余剰となるときに EV の蓄電池に充電し、雨曇により太陽光発電が不足するときには、EV の蓄電池から放電するという電力の調整が期待できる。また、HP の場合は、給湯器を動かす時間帯を変更することで電力の調整が可能となり、最近エネルギー消費の急拡大が課題となっている DC の場合は、クラウド上のワークロードシフトの技術を活用し、即時性が不要な計算処理を電力が余剰となる場所や時間帯に変更することが期待できる。

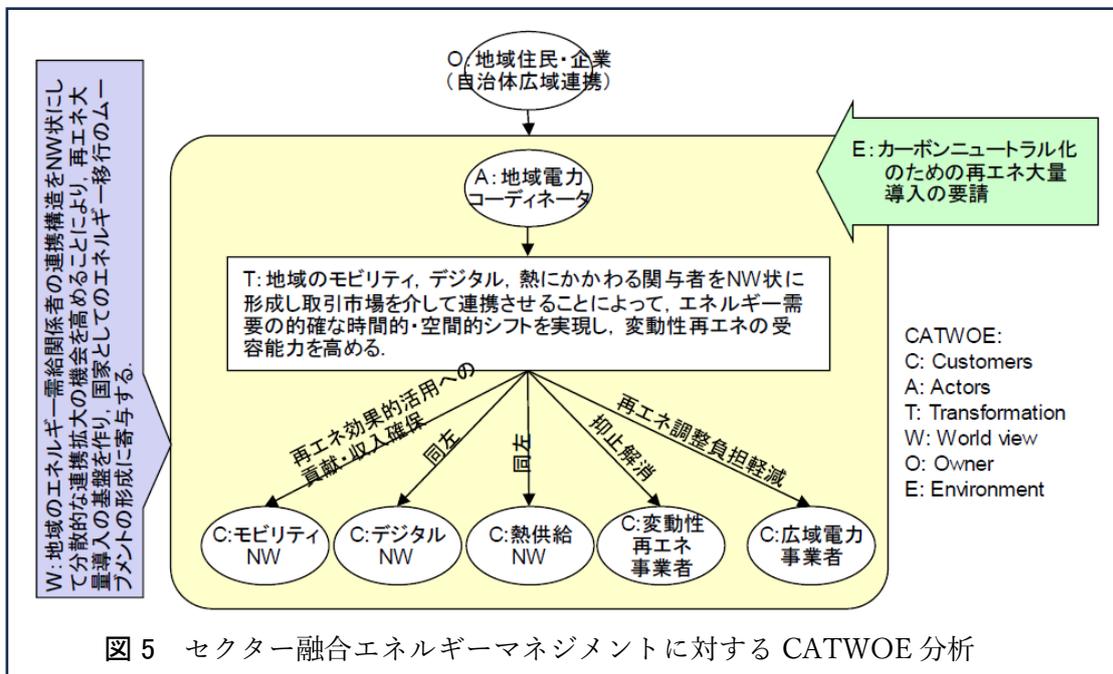
これまで電気は、電力のネットワーク (NW) の中で、需給バランス調整をしてきたが、DER が増加することで、例えば、EV にはモビリティの NW があり、電力 NW とモビリティ NW の間の融合が生じる。同様に、HP には熱供給の NW があり、DC にはサイバーの NW があるため、その NW 間の融合が可能となり、より強固な (レジリエントな) 電気の安定供給が可能となる。そして、地産地消と電力需給のマッチングにより、需給コスト・系統コストの増加を回避していく。

これらの実現のためには、制御可能な電化需要がデータ連携され、また、調整インセンティブを付与するための電力市場 (DER が参入可能な分散エネルギー取引市場と、その市場と全国市場との連携) を構築して、CO2 フットプリントに加えて価格シグナルを発現・流通させることで DER 所有者・利用者側の部分最適化が、社会の全体最適につながるようオーケストレーション



していくことが必要である。

また、これらを実現していくためには、図4に示した通り、デジタルインフラと電力グリッドの融合（MESH：Machine-learning Energy System Holistic）を基盤として面的に整備し、それらの広域的な連携をはかっていくことが重要である。図5は、システムとしてどのような関係者がかわり、かつどのような価値を生み出すかという視点から行ったCATWOE分析の結果である。変換プロセス（T）によってどんな関係者（C、A、O）がどんな便益を受けまたその役割を果たすかについて明示的に示されておりシステムとしての形成妥当性が確認される。なお、ここでは、竹内ら[竹内、伊藤、戸田2021]に倣って、地域社会を単位とした関係者構成を想定している。



3.2 提言2： デジタル・電力・水素・物流網の統合的形成的ための情報連携システムの構築

●課題

デジタル田園都市構想において全国的なデジタル網の計画がなされ、一方では全国的な電力系統の計画が立案されている。昨今、ITセクターが著しい電力を必要とする傾向にある[科学技術振興機構低炭素社会戦略センター2023]ことから、関係部署が連携して将来の見通しを得る努力がなされている[総務省・経産省2023]が、エネルギーに関わる部門はデジタル・電力にとどまらない。化石燃料から水素への移行によってもたらされる全国的な需

給・流通構造を考慮することも不可欠であり、デジタル・電力・水素・物流網といった国の基盤の統合的な形成が求められている。一方、エネルギー移行の現場として、みどりの食糧戦略、脱炭素先行地域、CN コンビナートに代表される地域の様々な取組みも併せて考えてゆく必要がある。しかし、エネルギーに関わる多様な因子の相互関係の考慮、加えて地方での様々な取組をどのように関連付けるかはあまりに対象範囲が広く、いまのところ未着手な状態にある。

●解決策

様々な部署が関係するこの構造は、エネルギーを共有しながら、守備範囲も多様な関係者がそれぞれに移行を推進している SoS (System of Systems) の姿ととらえられる。全体の姿を経済的かつ安全性をもった形で求めるのは極めて困難であり、SoS の形としては、それぞれの関係者が協力しあえるように、個々に取組もうとしていることを互いに情報提供することが現実的なアプローチと思われる。このために、図 6 に示すエネルギー移行のためのデータ連携&サービス基盤のシステム構築を提案する。ここでは、エネルギーに関わる全国的な生産・流通・消費の構想、地域視点からの脱炭

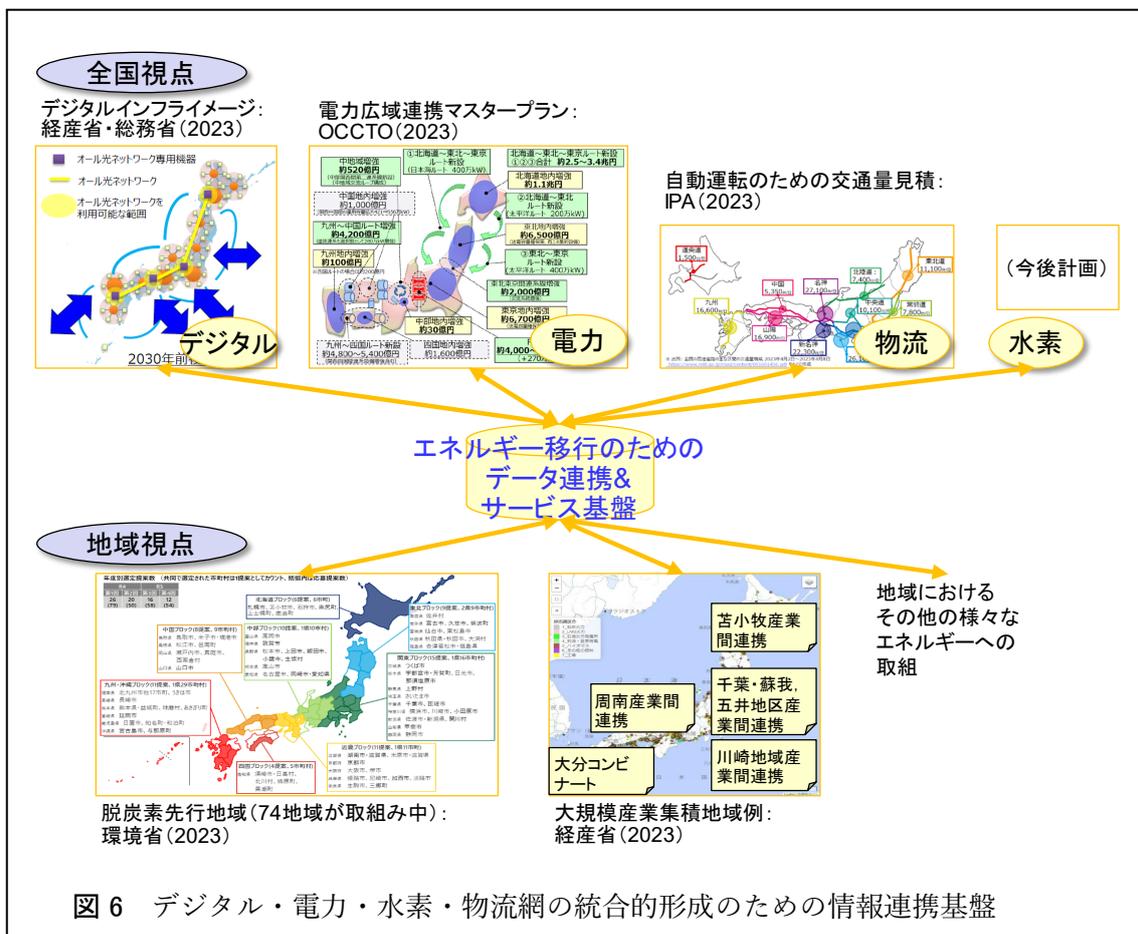
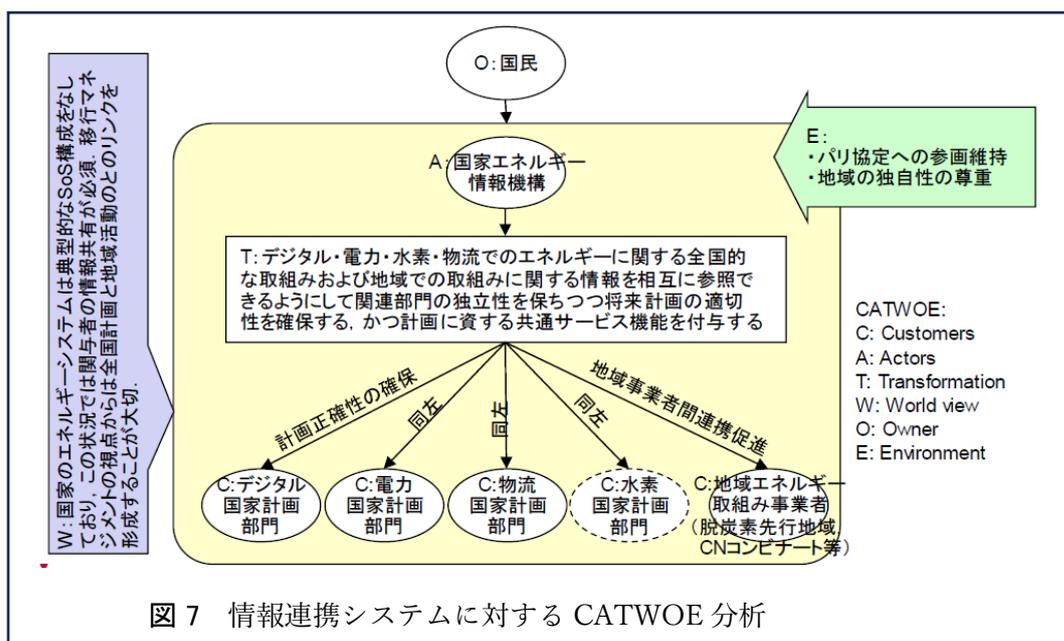


図 6 デジタル・電力・水素・物流網の統合的形成のための情報連携基盤



素先行地域の取組や CN コンビナート計画等の取組に関する情報開示を行い、それぞれの関係者が相互にこの情報を活用する姿を想定している。全国計画立案の立場からは、地域現場の見通しを得ることによって計画の正確性を高めることができる。地域にとっては、先行地域での取組開示が他地域への技術移転の機会を拡げ、また CN コンビナートのエネルギー需給の能力概要を開示することによって、参画企業の拡大・育成につながるという効果をもたらす。

具体的な実装は、ウラノス・エコシステム基盤上に構築することを想定する。エネルギーという広範な領域に対してデータをどのように特定してゆくかがシステム構築上の大きな課題であるが、この指針はウラノス・エコシステム基盤の基本的なサービスとして準備されてゆくことを期待している。さらに、個々の提供情報の信頼性の確保のために、エネルギーに関わる知見とデータ科学に基づいて、提供されるデータに対して一定の評価力を備えたサービス機能を備えることは必須である。さらにこのようなデータ連携システムが構築されると、次の段階として、それぞれの関係者が自律的な計画ソフトウェア（プランナー）を所有して、データの更新に応じて計画を見直し、またプランナー同士での調整を行って関係者に報告するという SoS の進化的な構築の新しい姿[Funabashi 2023]が生まれることが期待される。

ここで述べた情報連携基盤は、エネルギー移行の全貌をとらえる核心的な情報を扱うものであり政策的に極めて重要な位置づけをなすものであるが、システムとしての妥当性を確認するために CATWOE 分析を行った。結果を

図7に示す。この図に示すように、変換プロセス（T）と関与者に与える便益が明示的に示すことができている。

・留意事項

水素の全国的な生成・流通構想についてはこれまでに明確にされたものはない。これについては、次の提言3で述べる。

3.3 提言3： CN コンビナート構築広域連携拠点の設置

●課題

日本のコンビナートは、基幹産業が高度に融合して形成されたシステムであると同時に、主要需要地である大都市の周辺に立地しており、税金や雇用などで地域経済と密接な関係を有するという特徴を持つ。コンビナートのエネルギー移行においては、その地がもつ集積効果や立地優位性等を活かして、コンビナート内の設備やインフラの共有、水素・アンモニア・バイオ燃料等の共同調達、脱炭素技術のスタートアップの呼び込みやスケールアップのための実証・実装を進めていく必要があるとされている。各地域でエネルギー移行のための検討が始まっており、地域間での連携の必要性についても議論は始まっているが、いまだ個別である（たとえば[大分県 2024]）。

一方、2050年における水素需要の50%以上を占めるのは重工業や火力発電[水素バリューチェーン推進協議会 2022]を包含するコンビナートであって、全国の水素の在り方を大きく決める領域であるにもかかわらず、この分野では、これまではほとんど議論がなされていないのが現状である。

●解決策

各地で進展する CN コンビナート計画立案において、様々な技術や政策的な対応を必要とすることから、地域間の連携が重要であることは論をまたない。アカデミアとして、化学工学会では「地域連携カーボンニュートラル推進委員会」[化学工学会 2021]を設置し、各地との交流が始まっている。CN コンビナート構築の知の集約点として大変に貴重な存在になっており、この機能をさらに強化してゆくことが重要である。スマートシティの具体的な展開で、地域の統合的価値を形成する Master System Integrator という役割が現れたと同じように Master Material Integrator が必要となっているとの提起[岩野 2024]もある。すでに各地でこの役割を果たす企業が現れ始めているが、物質循環管理から始まって地域ブランディングまでのインテグレーション産業としての支援・育成が大変に重要であり、地域間連携の大きな使命でもある。

これに加えて、水素の最大の需要家として、全国の水素生産利用に関する在り方および水素活用に付随するコンビナートからのCO₂の流通・蓄積についても、関連動向（たとえば[エネルギー・金属鉱物資源総合開発機構 2023]）を踏まえつつあり得る姿を描いてゆくことが不可欠である。水素の社会普及は、現状の化石燃料と同等水準まで価格低減がなされることにより大型商用車 HDV（Heavy Duty Vehicle）用のまとまった需要が 2030 年代に出現し、その後の 2040 年代の産業利用へと展開するとみなされている[新エネルギー・産業技術総合開発機構 2024]。最近の試算では、海外へのエネルギー資源の依存性を減らすべく、2050 年には水素需要の 70%を国内で生産するという考えも出されている[増井 2024]。多くの不確実性が存在するものの、現在の取組を定めるための未来の水素生産・流通の姿を描く必要がある。

各地域の知識の相互流通・蓄積，CN コンビナートインテグレータ（Master Material Integrator）の支援・育成，水素・CO₂の全国的な関係性を検討・構想するタスクを担う活動の場をここでは CN コンビナート構築広域連携拠点と名付け，この設置を提言する（図 8）。すでに述べたように，国土の有様をトップダウンに決めることはできないが，多面的な観点からあり得る姿を見出すのは大変に重要な役割である。システムとしての妥当性確認のために求めた CATWOE 分析の結果を図 9 に示す。CN コンビナート相互の協力によって自地域の構想力を高めると同時に，輸送事業者や今後創設されるであろう国の水素計画部門との大切な連携構築に寄与するシステムの創出を企図したことを示している。

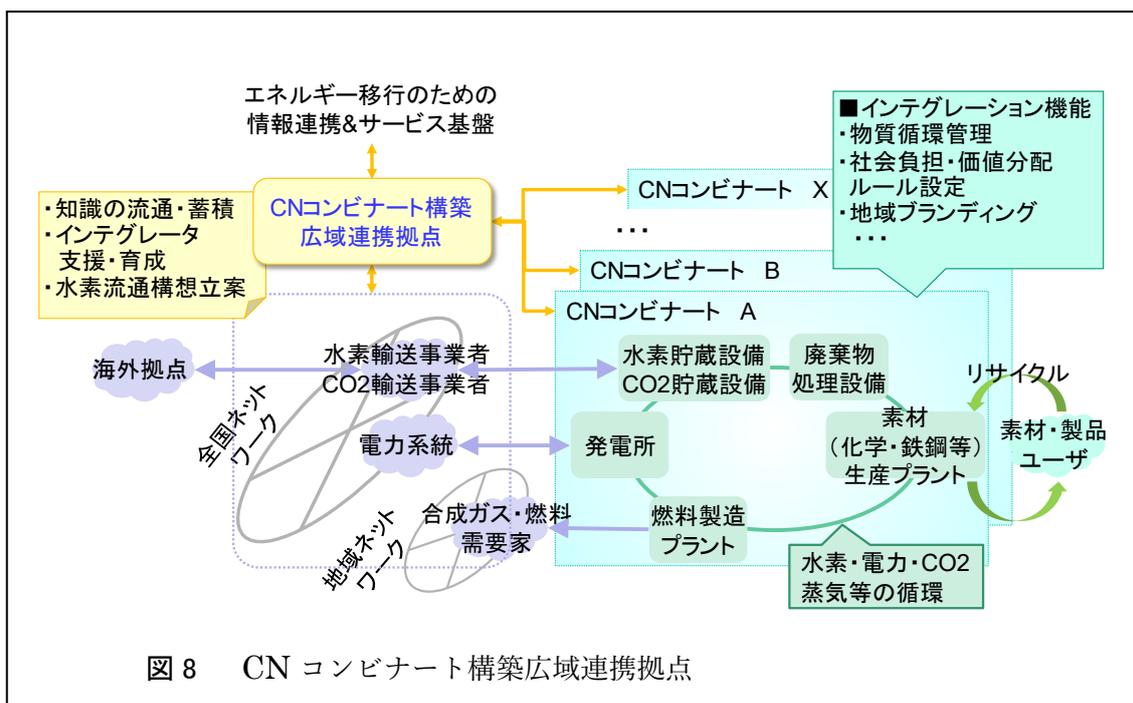
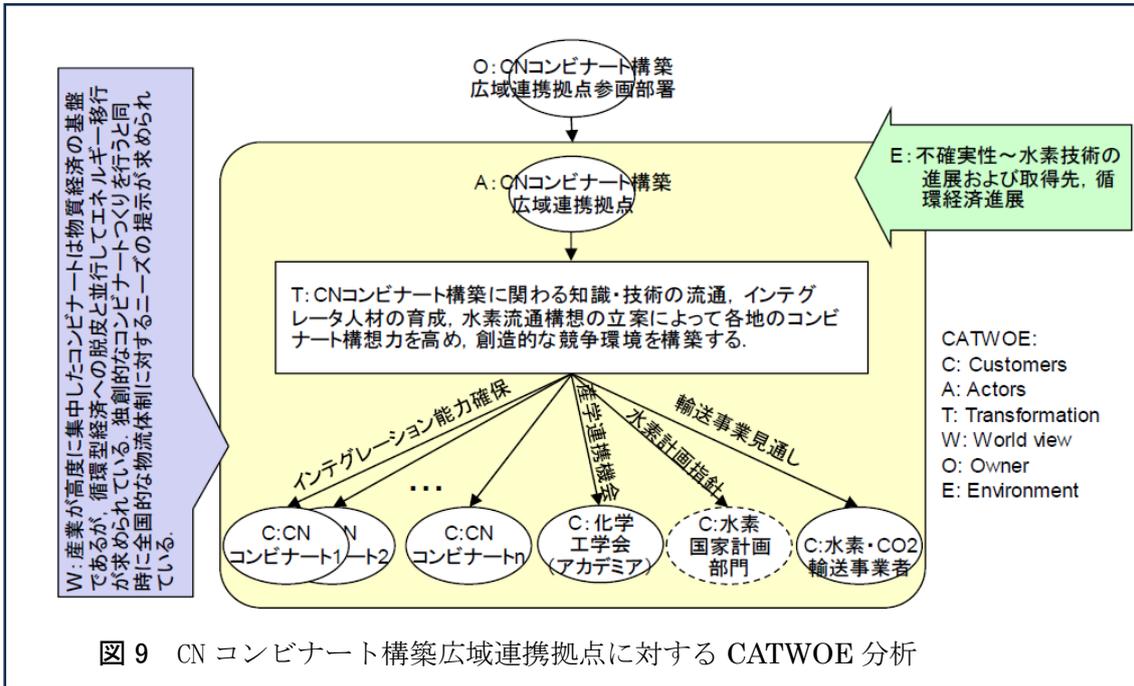


図 8 CN コンビナート構築広域連携拠点



設置を提言する拠点は、2030年以降の水素を中心とした産業向けエネルギー移行の主要部の形成に寄与する部署として育成をはかってゆく必要がある。

3.4 その他の重要事項:エネルギーモデル開発・シミュレーションの振興

エネルギー分野は極めて多岐にわたり、かつ個々の要素が密接に結びついている。個別の技術開発の結果として、どんな結果をもたらすか、さらにはクリティカルな因子は何かといったことを見出すには、エネルギーモデルの開発・シミュレーションを欠くことができない。具体的な政策立案においても、すでに（一財）日本エネルギー経済研究所や（公財）地球環境産業技術研究機構（RITE）のモデルをはじめとして種々のシミュレーション検討がなされているが、新たな政策視点を見出すためには、一層のモデル開発・シミュレーションがなされるべきである。

エネルギーモデルは政策立案にとどまらず、市民連携、海外連携においても極めて有用である。人々のライフスタイルがエネルギーの有様に大きく影響してくることを認識の大切さが重視されるようになったが、VR等のシミュレーション・インタフェースの進展は人々の未来に対する理解を深め行動変容に結びつける可能性を高めている。エネルギー資源確保、さらには新たな設備市場の展開のためには、これまで以上に東南アジア、中東等との密接

な連携が必要である。それぞれの地域のエネルギー政策立案には欠かせないエネルギーモデルをこれらの国々と共同して構築してゆくことは具体化の道筋をつけるのに極めて有用である。

デジタル技術の進展に伴って、シミュレーションの形も大きく変わり始めている。実データを直ちにシミュレーションに結び付けるデジタルツインはその典型的な変革の姿である。これまでのシミュレーションとは異なった形での人々の参画やデータ収集を踏まえた新たな政策立案の様式の出現が間近になっている。

4. まとめ

国家のエネルギー基盤の移行という大変な重要な状況において、SICの立場からどんな貢献ができるかを考察した。ここでは、進行中の取組を俯瞰するとともに、移行マネジメント概念に基づいて、個別技術の連携と個別活動を全体に結び付けるシステムの姿を、社会システム論における分析方法を通じた描画を踏まえて、

- ・セクター融合エネルギーマネジメントシステムの構築
- ・デジタル・電力・水素・物流網の統合的形成的ための情報連携システムの構築
- ・CN コンビナート構築広域連携拠点の設置

という三つの提言を行った。

1960年代、日本は石炭から石油へと国家のエネルギー基盤を大きく転換した。この転換によって、エネルギー自給率は58%（1960年代）から15%（1970年代）へと劇的に低下し[資源エネルギー庁 2019]、さらに1970年代には2度の石油危機に見舞われた。堺屋は、英国と比較しつつ、この転換が、日米同盟、人口急増に加えて日本の高度成長の三要因の一つとなっている[堺屋 2002]。過去にとらわれることなく、これからの世界がどんな姿で現れるべきかを問い続け、また大胆に取組んでいった結果といえよう。

いま我々は新たな環境の中で、これからの世界がどんな形で現れるべきかを問う状況にある。個別技術の開発だけではなく、個別技術をシステムによって多様な形をつなぎあわせることで、社会の変革を的確に進めることに貢献できることを願っている。

参考文献

- 岩野 2024, MMI (マスターマテリアルインテグレーター) 構想, 85/87, 経団連 21 世紀政策研究所, サークュラーエコノミー—新しい成長のために (2024/03)
- エネルギー・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) 2023, 国内初の CCS 事業化の取り組み～2030 年度までの CO2 貯留開始に向け、調査 7 案件を候補として選定～, JOGMEC ニュースリリース (2023/06), https://www.jogmec.go.jp/news/release/news_01_00034.html
- 大分県 2024, グリーン・コンビナートおおいた推進構想 (2024/01) <https://www.pref.oita.jp/soshiki/14200/greenkombi2023.html>
- 科学技術振興機構研究開発戦略センター (JST/CRDS) 2023, カーボンニュートラル実現に向けた研究開発動向 (2023/08), https://www.jst.go.jp/crds/sympo/20230825_IJ/pdf/TP20230825-2.pdf
- 科学技術振興機構低炭素社会戦略センター (JST/LCS) 2023, 情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol. 5) (2023/02), <https://www.jst.go.jp/lcs/proposals/fy2022-pp-05.html>
- 科学技術振興機構 (JST) 2023a, スマートエネルギーマネジメントシステムの構築, <https://www.jst.go.jp/sip/sems/>
- 科学技術振興機構 (JST) 2023b, ALCA-Next ホームページ, グリーンコンピューティング・DX 領域, <https://www.jst.go.jp/alca/field/field6.html>
- 化学工学会 2021, 地域連携カーボンニュートラル推進委員会ホームページ, <https://www.cn.scej.org/>
- 環境省 2023, 脱炭素地域づくり支援サイト, <https://policies.env.go.jp/policy/roadmap/preceding-region/>
- 経産省 2021, 2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略, https://www.meti.go.jp/policy/energy_environment/global_warming/ggs/index.html
- 経産省 2023a, 次世代の分散型電力システムに関する検討会 2023 中間とりまとめ (2023/03), https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/jisedai_bunsan/20230314_report.html
- 経産省 2023b, カーボンリサイクルについて (2023/06) https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/carbon_recycling/
- 経産省 2023c, 将来の電力需給に関する在り方勉強会, シナリオ策定に向けた

- 方向性 (2023/09),
https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/denryoku_jukyu/index.html
- 堺屋 2002, 日本の盛衰, PHP 研究所 (2002)
- 資源エネルギー庁 2019, 2019—日本が抱えているエネルギー問題 (後編) (2019),
https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2019_2.html
- 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 2024, NEDO 燃料電池・水素技術開発ロードマップ (2024/03),
https://www.nedo.go.jp/library/battery_hydrogen.html
- 水素バリューチェーン推進協議会 2022, 水素ロードマップ (2022/08),
https://www.japanh2association.jp/pages/6060688/page_202205201049
- 総務省・経産省 2023, デジタルインフラ (DC 等) 整備に関する有識者会合中間とりまとめ 2.0 の公表 (2023/05),
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/kenkyu/digital_infrastructure/index.html
- 竹内, 伊藤, 戸田 2021, エネルギー産業 2030 への戦略, Utility3.0 を実装する, 日経 BP (2021)
- 地球環境産業技術研究機構 (RITE) 2024: カーボンニュートラルに向けたトランジションロードマップの策定 (2023 年度版) (2024/01),
https://www.rite.or.jp/system/global-warming-ouyou/download-data/FY2023sectorroadmap_rev.pdf
- 地球環境戦略研究機関 (IGES) 2023, 新レポート「IGES 1.5°C ロードマップ: 日本の排出削減目標の野心度引き上げと豊かな社会を両立するためのアクションプラン」発表 (2023/12), <https://www.iges.or.jp/jp/news/20231206>
- 陳ほか 2021, 日本におけるトランジション研究の現況と今後の展望, IFI Working Paper No. 9, 東京大学未来ビジョン研究センター
- 電力広域的運営推進機関 (OCCTO) 2023, 広域系統長期方針 (広域連系系統のマスタープラン) (2023/03)
- 内閣官房 2023a, GX 実行会議,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/index.html
- 内閣官房 2023b, GX 実現に向けた基本方針参考資料 (2023/02),
https://www.meti.go.jp/press/2022/02/20230210002/202-0210002_3.pdf

- 内閣官房 2024, GX 実行会議,
https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/index.html
- 農水省 2021, みどりの食料システム戦略,
<https://www.maff.go.jp/j/kanbo/kankyo/seisaku/midori/#Midorisenryaku>
- 林田 2024, 10 地域統合経済・電力需要予測モデルの需要想定への活用に関する予備的検討, 電力中央研究所研究資料, SE23508 (2024/04)
- 増井 2024, 脱炭素社会の実現に向けた将来シナリオの役割と課題, 科学技術・学術審議会研究計画・評価分科会第 12 期環境エネルギー科学技術委員会 (第 1 回) 資料
(2024/01)https://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/gijyutu/gijyutu2/110/siryu/mext_01722.html
- Checkland, P. B. 1981, Systems Thinking, Systems Practice, John Wiley & Sons, Ltd. (1981), 日本語訳高原, 中野監訳, 新しいシステムアプローチ—システム思考とシステム実践—, オーム社 (1985)
- Geels, F. W. & Kemp, R2007, Dynamics in Socio-Technical Systems: Typology of Change Processes and Contrasting Case Studies, Technology in Society, 29, 441/455 (2007)
- Funabashi, M. 2023, Towards SoS Evolution Management for Developing Smarter Cities: Social Significance and Approaches, 165/178 in T. Kaihara et al. (Eds), Innovative Systems Approach for Facilitating Smarter World, Springer (2023)

発行：

一般社団法人 システムイノベーションセンター (SIC)

〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-12-7
ストーク新宿 B-19号

E-mail : office@sysic.org

Tel.Fax : 03-5381-3567