

エネルギーの分散化が創出する地域の産業革命

スマートレジリエンスネットワーク代表幹事 岡本 浩

1. 産業革命の歴史とエネルギー

人類が火を使い始めたのは、今から 100 万年以上前のことです。18 世紀、ジェームズ・ワットの蒸気機関の発明により、石炭を燃やして発生する蒸気エネルギーでピストンを動かす、その力を伝えることで、人力や馬力に代わる機械が誕生しました。第一次産業革命です。しかし、燃料を燃やすと必然的に CO2 が発生してしまいます。

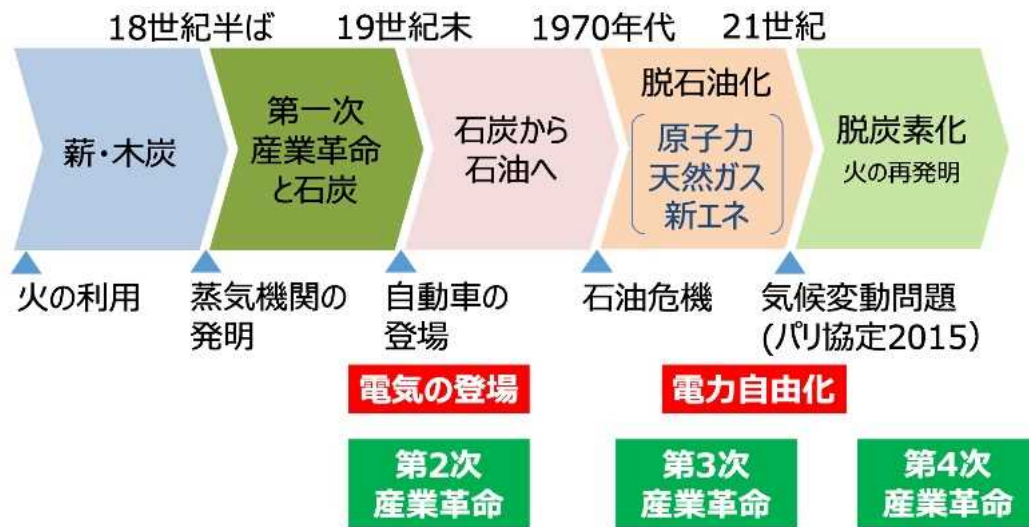


図 1：産業革命の歴史とエネルギー

第二次産業革命では、電気が登場し、工場での自動車などの大量生産が可能になりました。モータリゼーションの進展に伴い、化石燃料の主役は石炭から石油へと移行しましたが、2度のオイルショックにより、天然ガス、自然エネルギー、原子力といった代替エネルギーも普及を始めました。その後の第三次産業革命は、電子計算機によってさまざまな工程が自動化されはじめた「情報革命」であり、インターネットの目覚ましい発展によって今日まで続いています。

一方、エネルギーに関しては、多くの国が今世紀半ばまでのカーボンニュートラル実現を目標としています。エネルギー転換(energy transition)とは「火の再発明」を意味し、容易なことではありません。実現に向けて、再生可能エネルギーや原子力などの非化石エネルギーによるカーボンニュートラルな電力が使われるようになります。一部のプロセスでは、こうした電力から製造されるグリーン水素やアンモニアなどを使用することも想定されますが、中心的な役割を果たすのは電力になります。

産業革命の歴史をもう少し詳しく見てみましょう。図2は、第一次産業革命後、1875年頃の工場内の様子です。工場の右側には、蒸気機関のピストンと思われるものが見えます。工場内には、この機械動力を動かすための軸や歯車、ベルトがたくさんあります。生産性が悪く、労働には危険も伴ったと推測されます。つまり、工場には大きな動力源

が一つであり、その動力をこの機械的なネットワークで伝達していたのですが、これは非常に不便だったわけです。

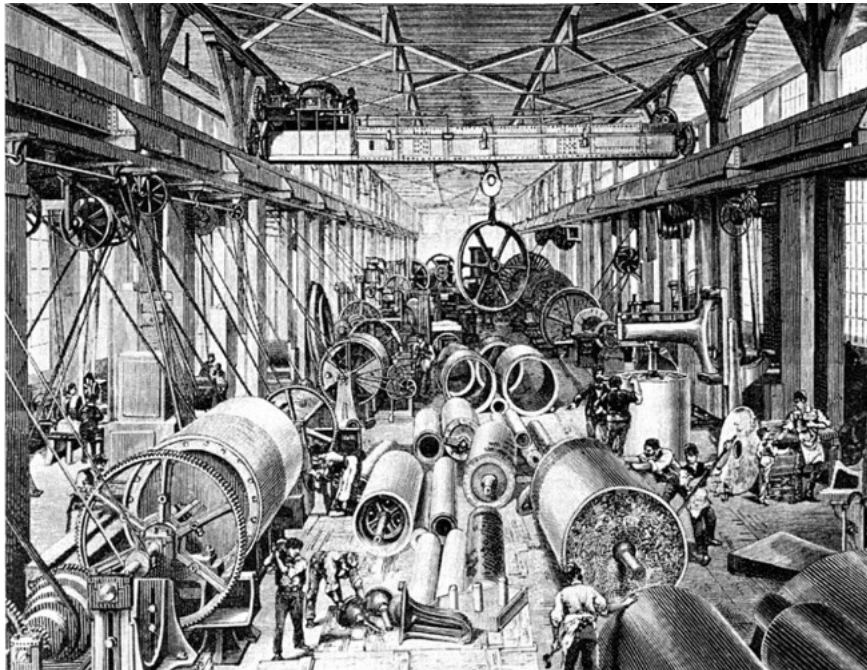


図2：1875年 蒸気機関によって機械化された工場^[1]

これを図3に示す1930年代のフォード工場と比較してみましょう。図3の工場は整然としています。この間に何が起きたのでしょうか。よく知られているようにフォードの発明は、電気モーターを使ったベルトコンベヤーによる大量生産です。モーターは蒸気機関と違って、小型化しても効率が落ちないので、機械的な動力源を分散配置してベルトコンベアを動かすのに利用し、ベルトコンベアを自由にレイアウトすることで、工場の生産性を高めることができたわけです。これが電化による第二次産業革命です。工場

内の単一の機械的動力源と動力伝達ネットワークが、電化によって分散配置されたモーターと工場内の電力ネットワークに取って代わられたことを意味します。



図3：第二次産業革命（1930年代）後のフォードの工場^[2]

興味深いのは、エジソンが初めて電気事業を始めてから、ここに至るまで25年以上の空白があったことです。マシュー・サイドによれば、当時の経営者の多くは、工場内の機械的動力源は一つしかないと思い込んでいたようで、電気が出現した後も、蒸気機関を大型モーターに置き換えるだけでは、工場の生産性は上がらないと考えて、電化を進めなかったというのが真相のようです^[3]。マカフィーとブリニョルフソンは、「電化は史上最も破壊的な技術の一つであり、20世紀の最初の数十年間で、米国の製造業に大

量絶滅に近い惨事を引き起こした。」と述べています^[4]。電化によって生産性が飛躍的に向上し、従来の蒸気機関は瞬く間にモーターに置き換えられていったということです。

さて、フォード工場のモーターに供給される電力はどこから来たのでしょうか。工場の上流では、電力供給のイノベーションが起きていました。我が国ではあまり知られていませんが、エジソンの秘書であったサミュエル・インサルが、エジソン方式の直流ではなく、ニコラ・テスラが発明し、ウェスティングハウスが普及させた交流を使って、電力をより大規模に供給するようになりました。交流によって、初めて電力グリッドのスケールが可能になったのです。

その結果として、スケールメリットによる大きなコストダウンがもたらされ、米国の電気事業が軌道に乗りました。「大規模な発電設備から、広範な送配電網を通じて電気をお客さまにお届けする」という集中型の電気事業ビジネスモデル(Utility 1.0)が誕生したのです。現在では多くの国で発送電分離が行われていますが (Utility 2.0)、いまでも大規模集中型のビジネスモデルが 100 年以上にわたって存続しています。

フォード工場の下流では何が起こったのでしょうか。1908 年、T 型フォードの量産が開始されました。自動車の動力源として内燃機関を使用したわけですが、この頃には電気

自動車も発明されており 1899 年時点で時速 100km 以上の走行が可能になっていました。しかし、電気自動車は航続距離の短さから T 型に圧倒され、歴史から一旦姿を消したわけです。ガソリン大量消費の始まりといえます。

フォードの工場の下流では、もう一つ興味深いことが起きました。今日、私たちは自動車が単一の内燃機関と 4 つの車輪を持つことを当たり前だと思っています。一つの内燃機関と機械的なトルクを必要とするタイヤを、機械的なトランスミッションがつないでいます。このシステムも素晴らしく、100 年以上続いているため、私たちにとっては当たり前なのですが、ある意味で集中型とも言えるでしょう。

まとめると、フォード工場では機械動力の分散化が起こった一方で、工場の上流と下流では集中型が広がっていったというのは非常に興味深いことだと思われます。

2. 第4次産業革命の現実

私は、エネルギーの世界が Utility 3.0 の世界にシフトしていくと考えています^[5]。ポイントとなるのは、1つ目は再生可能エネルギーをより効率的に利用する社会へのシフト、2つ目は顧客主導の変革の必要性、3つ目はインフラの収束です。

再生可能エネルギーの大量導入における大きな課題は、発電と電力消費の空間的・時間的なギャップです。図4は東京電力パワーグリッドの2022年冬とGWの一日の電力消費パターンを示しています。冬とGWを比べると、GWは冷暖房を使っていないことに加えて工場も停まっているため、電力消費に2倍の開きがあります。一方、電力消費が高まる冬の雪の日には太陽光発電がほとんど期待できません。このために冬や夏には電気が足りないのに、春や秋には余ってくるということが起きています。

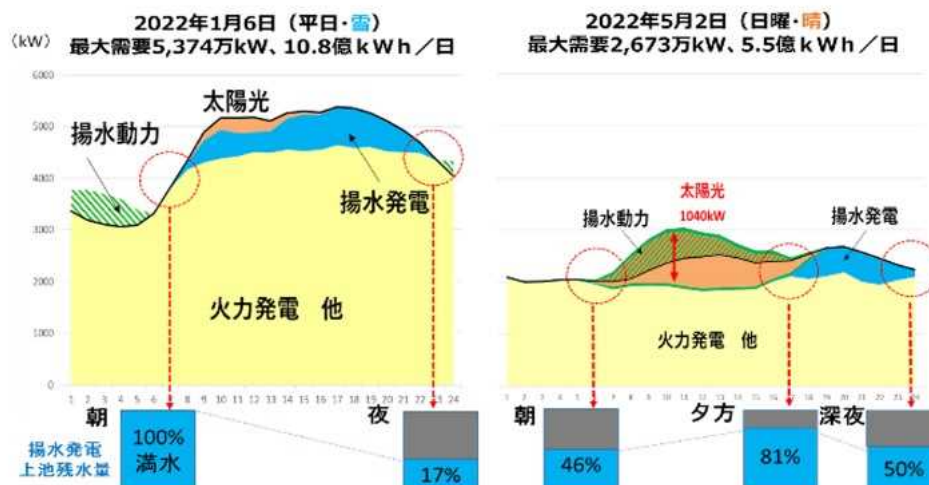


図4：東京電力エリアの冬と春の電力需給（2022年）

電気が余ると何が困るのかという方もいらっしゃると思いますが、供給が過剰になると需給バランスが崩れて系統の周波数が上がってしまい発電所が停止に追い込まれるので、大規模な停電につながってしまいます。このため、各一般送配電事業者はやむなく再生可能エネルギーの出力制御を行っています。

この課題に対処するため、一般送配電事業者は電力システムの広域運用を推進しており、全国規模で接続された基幹系統を活用して全国需給を最適化する共同利用型の「次期中給システム」の実現に取り組んでいます。

次に重要となるのは「Energy with X」(エネルギーはすべての産業や人間とともにある)という考え方です。エネルギーの供給は非常に重要ですが、より良いユーザーエクスペリエンス (UX, ユーザー体験) を通じてウェルビーイング (well-being, 幸福・健康) をもたらすという目的に立ち戻る必要があります。より良い UX を提供するのには機械や装置、サービスであり、エネルギーはあくまで中間財として提供されることになります。すべてをユーザーの視点から、人間中心の視点で考える必要があります。そのために必要なエネルギーは、カーボンニュートラルでレジリエントなものでなければならず、太陽光発電など分散型の再生可能エネルギーの増加に伴い、電源と需要のマッチングがますます重要な課題となっていくでしょう。つまり、双方向のエネルギーマネジメント技術が必要とされているのです。

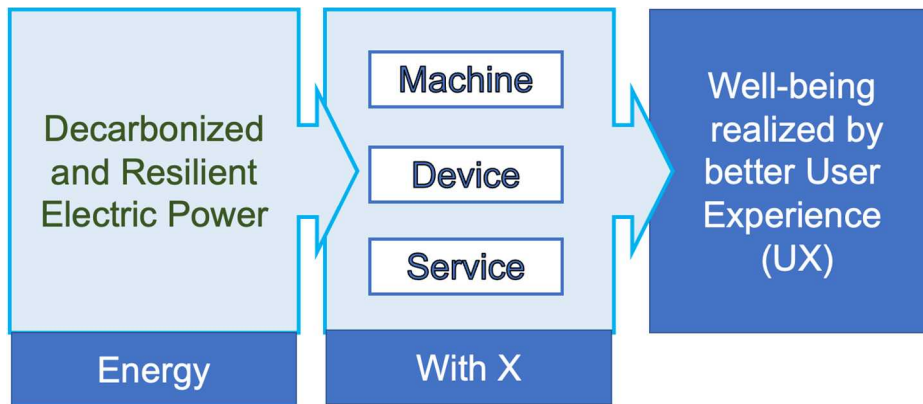


図 5 : Energy with X (文献[6]をもとに作成)

第三に、エネルギー、情報、モビリティのインフラが融合をはじめます。EV は道路という交通網の上を走りますが、充電ステーションという電力グリッドの上を移動しているとも言えます。スマートレジリエンスネットワークでも取り上げていますが、災害時に配電線がダメージを受けた時に、EV の駆けつけによる電気が役に立ちます。この場合、電力グリッドの代わりに道路が使われたこととなります。さらに、これらのシステムを運用するためには、情報共有のための通信ネットワークが必要です。今後、自動運転化に 5G などの高速無線通信が本格的に利用されると期待されていますが、そのためアンテナや基地局は、電柱や送電鉄塔、変電所などの電力インフラを利用して設置される可能性もあります。そのため、これらを別々のネットワークとしてではなく、統合されたインフラとして考える必要があるのです。

さらに AI×ビッグデータによって起こる第四次産業革命について考えてみましょう。

日本では Society 5.0 と呼んでいますが、どちらもサイバー空間と物理空間を高度に融合させるという考え方が基礎になっています。サイバー空間は「**電脳**」で、物理空間は「**電動**」と「**電熱**」で駆動されますが、これらを支えるためにカーボンニュートラルな電力が必要になります。

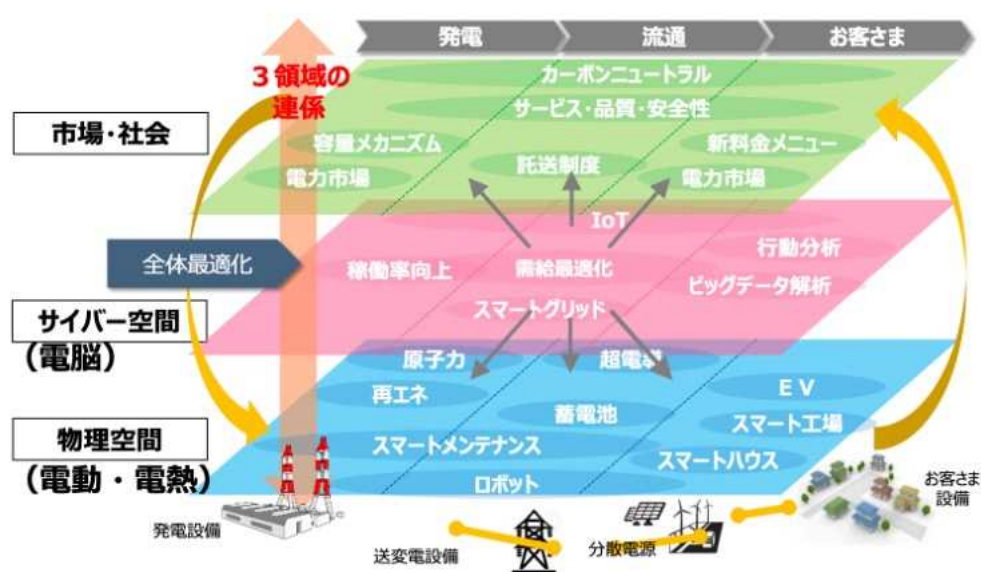


図 6：電脳・電動・電熱による Society 5.0 の実現

ひとつずつ見ていきましょう。自動車の電動化は、カーボンニュートラルという課題への一つの解決策であるだけでなく、クルマがコネクテッド（情報通信によって外部接続された状態）となり、ソフトウェアで定義される（Software defined）となることも意味しています。一部の EV はすでにソフトウェア定義されており、携帯電話網を使ったファームウェアのアップデート、追加サービス、リコールなどが可能です。

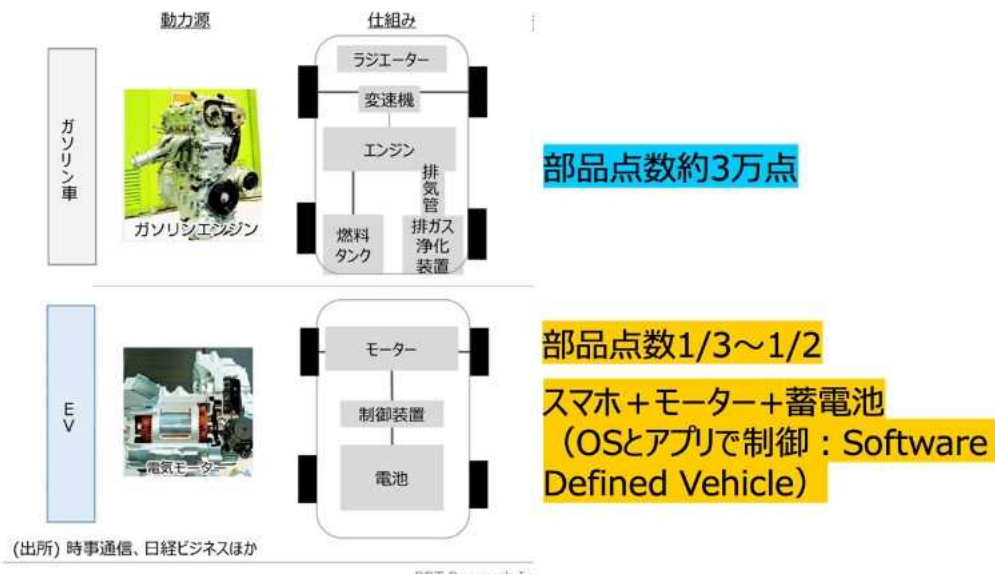


図7：ガソリン車とEVの比較

ただし、現在のEVの多くは、まだ「電気モーター1個、タイヤ4個を車体に搭載している」状態です。モーターは小型化してもインホイールモーターとして高い性能を発揮できるため、動力伝達機構は不要となり、配線でつなぐだけでよくなります。そのため、目的に応じたどんな形状の乗り物でも自由に作る事が可能になりますし、プロペラ翼を駆動して空を飛ぶこともできる。つまり、AIや5G技術を駆使して自動運転される移動型ロボットに生まれ変わるわけです。この劇的な変化のきっかけは、バッテリー技術の進歩にあります。EVがすでにロボットになりつつあることは、モーターショーでダンスのデモンストレーションをするスーパーカーをご覧になれば納得できるでしょう。

熱需要についても同様の変化が起こります。工場の大型ボイラーなどの熱源設備はすべて電化され、ヒートポンプやIHヒーターとして分散配置されます。蒸気や温水などのネットワークは電線に置き換えられ、熱源の分散化により個々の熱需要に応じた温度での効率的かつ最適な熱供給が可能となります。

最後に、サイバー空間を支配する電腦について述べましょう。AI×ビッグデータの世界に突入し、データ量が爆発的に増加する中、AI×ビッグデータの進展により、データセンターなどのデジタルインフラの消費電力は急速に増加しています。国立研究開発法人科学技術振興機構 低炭素社会戦略センターの想定によると、日本におけるデータセンターの消費電力は2018年には14TWhですが、現在の技術が継続する場合、2030年には90TWh（国内消費電力の10%）、2050年には12000TWh（現在の12倍以上）に達する見込みです。ハイパースケールだけでなく、エッジにも分散されて、情報の地産地消も進むと考えられます。

拙稿[7][8]でも触れたように、人間の身体では、情報伝達・処理を司る神経系と、身体を動かすのに必要な酸素を循環させる血管系が密接な関係にあります。また、人間の脳は全身の酸素の25%を消費していることから、Society 5.0では、データ量が爆発的に増えても、データセンターのエネルギー消費を4分の1程度に抑える必要があると類

推されます。

人体と同じように、光ファイバーと電線の相補性も利用すべきです。例えば、日本で必要な電算需要を賄うために、再生可能エネルギーが豊富な国に電気の頭脳を持っていき、そのためにデータを伝送するグローバル光ファイバーを強化すれば、再生可能エネルギー豊富な国から脱炭素エネルギーを運ぶのと同じことです。大容量の光ファイバーケーブルは、HVDC 電力ケーブルの約 100 分の 1 の重量と設置コストであることを念頭に置いています。遠隔地のデータセンター間で計算負荷を移動させることで、電力が消費される場所を瞬時に移動させることができます。

コンピューティングのアプリケーションには、低遅延のリアルタイム性を必要とするものと、事前に計算しておけるものがあります。事前に計算できるものについては、先に計算してメモリに保存しておけば、電気の使用時間をずらすのと同じ効果があります。

これらの技術が一般化すれば、再生可能エネルギーの発電余剰分を、物理空間で「電気」や「水素」として苦勞して蓄えるのではなく、サイバースペースでビットコインなどの「貨幣価値」や AI の事前学習などの「知恵」として蓄えることができるようになります。

まとめると、AI×ビッグデータの第4次産業革命は、電脳、電動、電熱の分散化と分散型電力システムの統合によって初めて社会実装されることになるのです。この革命はすでに始まっていると私は考えています。

3. 地域に産業革命を起こす^[9]

図8は、千葉エコ・エネルギー株式会社が運営する営農型太陽光発電システム、いわゆる「ソーラーシェアリング」です。農地の上に太陽光発電パネルが設置されると、農業が満足にできないのではないかとされるかもしれませんが、しかし、この写真のように最適な位置にパネルを設置すれば、農地は十分に明るく、霜も降りず、強い日差しによるダメージもなくなります。また、農作物から出る水蒸気がソーラーパネルを冷やし、発電量を増やすという相乗効果もあるのです。



図8：千葉にあるソーラーシェアリングを利用した農場（代表の馬上氏と筆者）^[9]

蓄電池も活用すれば、発電した電力により農業に必要な機械動力を電化・自動化することができます。おそらくドローンや5G、エッジデータセンターなども、農業の自動化に活用されるはずです。

ソーラーシェアリングで作った電気は、農業だけでは使い切れません。全国の耕作面積の5%を営農型太陽光に転換するだけで、年間約2000億kWhの電気を作ることができます。農場に隣接して食品加工工場を作り、余剰電力を利用して、その工場で分散型の電気と熱を活用すれば、農産物をベースにした食品加工産業が成立するのです。加工品を配送するためには物流が必要です。この物流もいずれ電化・自動化されるでしょう。

また、鉄道やバス路線などの交通手段の確保が難しい地方では、ソーラーシェアリングで発生した電気ですべて自動運転するEVバスをハブ&スポーク（中心の集約拠点と放射線状の各路線）で運行することとし、ハブをバッテリーステーション化して、近隣の再生可能エネルギーを地産地消するだけでなく、いざというときの避難場所なども設置すれば、地域のレジリエンスを高める上でも大きな力になるはずです。アグリツーリズム（農業と観光の造語）のような形でのリゾート開発も考えられます。それでも使い切れない電気は、ビットコインマイニングをはじめとする分散コンピューティングに利用したり、大都市圏に送電したりすることができるでしょう。

4. エンド・ツー・エンドとなる電力システムとスマートレジリエンスネットワークの果たすべき役割

地域における産業革命を実現するためには、インターネットと同じ「エンド・ツー・エンド」の原理で電力システムを設計することが重要です。インターネットのエンド・ツー・エンド原理とは、高度な通信制御や複雑な機能は端末が行い、経路上のシステムは単に信号やデータの中継や伝送を行うことを意味しています。つまり、端末側をインテリジェント化し、ダムネットワーク（馬鹿なネットワーク）と組み合わせています。端末側をインテリジェント化することで、さまざまなアイデアが融合し、圧倒的なスピードでイノベーションが進むのに対し、ネットワークをインテリジェント化しようとする、どうしても中央集権的となり、イノベーションが進みにくくなるからだと考えられます。

電力システムにおいても同様にエッジにある DER や需要家側エネルギー機器に EMS を搭載し、需給バランスや電力フローの輻輳を調整することが望ましいと考えられます。図のように、すべてのグリッドエッジに EMS が組み込まれ、EMS 間の情報交換によって全体の需給バランス、電力フローが制御されることとなります（市場も EMS の 1 つと考えられます）。このようにともにエンド・ツー・エンドのアーキテクチャとしてイ

ンターネットと電力システムが融合するにより、サイバー空間とリアル空間を統合した

Internet of Functions（機能のインターネット）^[10]の基盤が完成することになります。

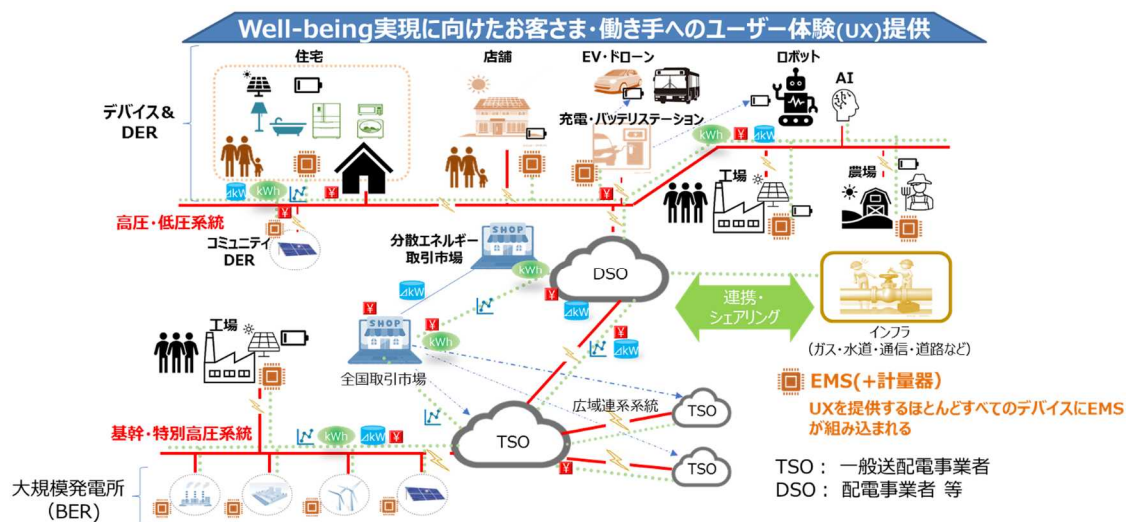


図9：End-to-End 電力システムの実装(Utility 3.0)^[9]

図9は以上をまとめたものです。一番上に自家発電・自家消費のお客さまのレイヤーがあり、次に分散エネルギー取引市場をおいた地産地消のレイヤーがあり、三番目のレイヤーとして全国大で広域化された電力ネットワークがあります。原子力や大規模な洋上風力などはこのレイヤーに接続されることとなります。仕組みの核となるのは2番目のレイヤーに入る分散エネルギー取引市場で、分散システムと広域システムをつなぐ核となります。将来はブロックチェーンを活用して、インフラに関するデジタルツインと連携しながら、様々な産業が相互に連携しながらエネルギーを融通し合うようになります。

EMS 間で交換できる情報は様々であり、スマートレジリエンスネットワークでも具体的なユースケースを元に検討を進めていますが、例えば系統内の需給バランスや混雑状況を反映できる「価格シグナル」を利用するのが効果的であると考えられます。同時に、サイバーセキュリティを確保し、利用者のプライバシーを守るための「エンド・ツー・エンドのセキュリティ」が必須です。

スマートレジリエンスネットワークは、地域の課題を起点として、課題解決のために必要となるカーボンニュートラルでレジリエントな電力をマッチングするための関係者間の情報共有のあり方を、実ビジネスを展開する企業が地域の関係者とともに検討・合意・推進する場を提供し、地域の産業革命を目指すエコシステムが形成されていくことを支援して参りたいと考えています。

参考文献

[1]

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bild_Maschinenhalle_Escher_Wyss_1875.jpg

[2]

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LongBeachFord.jpg>

[3] Matthew Syde, 'Rebel Ideas: The Power of Thinking Differently', John Murray, June 2021

[4] Andrew McAfee, Erik Brynjolfsson, 'Machine, Platform, Crowd: Harnessing the Digital Revolution: Harnessing Our Digital Future', June 2017

[5] [Hiroshi Okamoto, "Utility 3.0: Japan's Utility of the Future", ELECTRA N°311 - August 2020](#)

[6] 竹内純子他：「エネルギー産業 2030 への戦略 Utility 3.0 の実装」、日経 BP、2021 年 11 月

[7] [Hiroshi Okamoto, "Challenges in Japan's Power Systems to Achieve Carbon Neutral and Resilient Communities", ELECTRA N°327 - April 2023](#)

[8] [岡本浩、「カーボンニュートラルを目指すエネルギーシステムの課題と電力グリッドの役割」、KEC 情報、関西電子工業振興財団、2023 年 1 月](#)

[9] [次世代の分散型電力システムに関する検討会（第 1 回）東京電力パワーグリッド提出資料：「カーボンニュートラルかつレジリエントな豊かな地域の実現に向けて ~地域の分散エネルギーの有効活用策~」、2022 年 11 月](#)

[10] 江崎浩：「サイバーファースト 増補改訂版 インターネット遺伝子が創るデジタルとリアルの逆転経済」、インプレス R&D、2019 年