

第9部

特集9 DXによる地球温暖化対応スマートインフラ

江崎 浩

第1章 地球温暖化のメカニズムと状況^{*1}

地球の現在の平均気温は約摂氏14度前後であるが、もし大気中の水蒸気、二酸化炭素、メタンなどの温暖化効果ガスが存在しない場合には、平均気温は摂氏マイナス19度くらいになるとされている。地球に太陽から降り注ぐ太陽光線は、地球の大気圏を通過して地面(や海面、大気)を暖め、その地表・海面から放射される熱を温室効果ガスが吸収し、大気を暖めること(と温室効果ガスが太陽光で直接暖められること)で、温かい温度を保っている。

近年、人間の産業活動が活性化したことによって、二酸化炭素、メタン、さらにフロン類などの温室効果ガスが大量に排出されて大気中の濃度が高まり、その結果熱の

吸収・保存量が増加した結果、地球の気温が上昇し始めている。「地球温暖化」である。

1.1 温室効果ガス(二酸化炭素)排出量

2020年の世界の温室効果ガス排出量は、約314億トンとされている。図2に、国別の温室効果ガス排出量では、中国(32.1%)、アメリカ(13.6%)、インド(6.6%)、ロシア(4.9%)に続き日本は第5位の3.2%となっている。

過去20年間での大気中の二酸化炭素濃度の増加量の3/4以上は、石炭、石油などの化石燃料により排出されている。したがって、上位は、先進国となっている。

また、一人当たりの二酸化炭素の排出量を見ると、先進国における一人当たりの排出量は、新興国や途上国と比

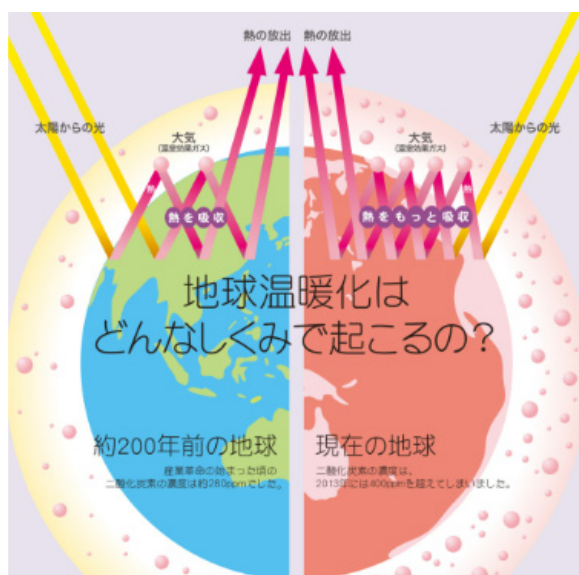


図1 地球温暖化のしくみ

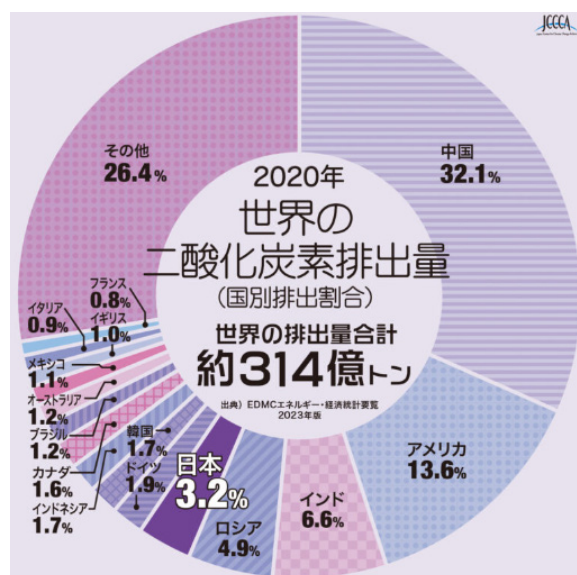


図2 主要国の二酸化炭素排出の割合

*1 全国地球温暖化防止活動推進センター（JCCCA; Japan Center for Climate Change Action）<https://www.jccca.org/>

較して大きな値となっている。しかし、今後、新興国や途上国においては、経済発展の進行に伴い急速にその量が増加することは明らかである。

(1) フロンおよび代替フロンなどの温室効果ガス

オゾン層を破壊するとともに、温室効果ガスでもあるフロンおよび代替フロンガスの大気中濃度は、1995年モントリオール議定書の規制が効果を発揮して、その排出量の削減が進んでおり、微増または減少の状態となっている。

(2) メタン(CH₄)・一酸化窒素(N₂O)

二酸化炭素に次いで地球温暖化への大きな気体であり、大気中のメタン濃度は1750年以降で約150%の増加となっており、現在も増加を継続している。メタン排出の半分以上が、化石燃料の使用、家畜、農耕地の土壌、化学工業等の活動によるものである。さらに、一酸化窒素(N₂O)の濃度も1750年以降で約20%増加し、現在でも増加を続けている。

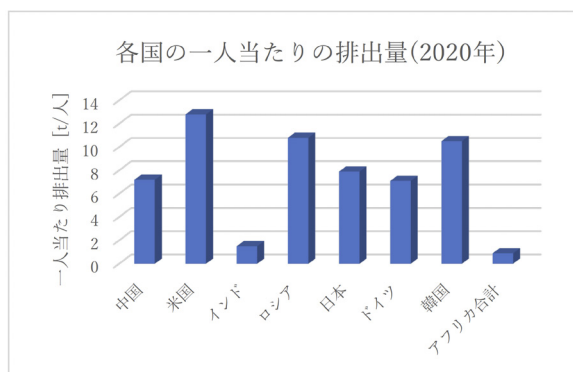


図3 各国の一人当たりの地球温暖化ガスの排出量

表1 地球温暖化効果ガスの割合

温暖化効果ガス	寄与の割合
二酸化炭素	76.7%
メタン	14.3%
一酸化窒素	7.9%
フロン類	1.1%

IPCC第4次評価報告書によれば、温室効果ガス別の地球温暖化への寄与は以下(表1)のように示されている。

すなわち、石炭や石油などの化石燃料の燃焼に伴って排出される二酸化炭素が最大の地球温暖化の原因である。二酸化炭素濃度は、1750年(産業革命以前)の280ppmから、2013年には400ppmを超える値になっており、40%以上も増加している。

2021年のIPCC第6次評価報告書では、世界の平均気温は、産業革命前と比較して2011年～2020年で1.09℃の上昇となっていると報告されている。また、陸上では海面よりも1.4～1.7倍の速度で気温の上昇が発生しており、特に、北極圏では世界平均の約2倍の速度で気温上昇が発生することになるとされている。

2023年の夏は、世界平均気温が歴史上もっとも高い値となったと報告されている。今後、これまでと同じ速度で温室効果ガス濃度が上昇を続けるとすると、今世紀末までに、3.3～5.7℃の気温の上昇が発生してしまうとの報告が行われている。

気温の上昇は、海面の上昇も起こす。20世紀において、海面は19cmも上昇したとされている。今後も地球温暖化が継続する場合には、海水温の上昇に伴う熱膨張と氷河などの融解によって、2100年までに最大で82cmの海面の上昇が発生すると予測されている。特に、北極の海水は、1979年～1988年の10年間と2010年～2019年とを比較すると、海水が一番少ない9月で約40%の減少、海水が一番多い3月で約10%の減少が観測されている。

1.2 日本におけるエネルギー消費の状況

エネルギーの消費量を整理するために、消費者が利用可能なエネルギーの生産を行うために必要な一次エネルギーと、消費者が実際に消費・利用する二次エネルギーが定義されている。我々の社会・産業活動を実現するために消費されるエネルギーに由来する地球温暖化の原因となる構造を概観する。

(1) 一次エネルギー

石油、石炭、天然ガス、薪(バイオマス)、水力、原子

力、風力、地熱、太陽光など、自然から直接採取されるエネルギー源である。これらを加工・変換することで、消費者が利用可能な二次エネルギーが供給されることになる。

(2) 二次エネルギー

一次エネルギーを転換・加工することで得られる電力、都市ガス、ガソリン・灯油などの実際に消費者・需要者が利用するエネルギーで、二次エネルギーと呼ばれる。水素も二次エネルギーに分類される。最終的に消費者が利用可能な形態に一次エネルギーが転換されたもので、その総量を「最終エネルギー消費」と呼ぶ。

1.2.1 一次エネルギー

一次エネルギーを二次エネルギーに変換する際には、無駄(=ロス)が発生することになり、一次エネルギーは二次エネルギーよりも大きな値となる。2021年度のデータでは、一次エネルギーの総量を100とすると、最終エネルギーすなわち二次エネルギーの総量は66程度とされており、34%のエネルギーが二次エネルギーの生産・供給のために地球表面に排出されていることになる。このエネルギーのロスは、エネルギーが消費者まで届けられるまでに発生する発電や輸送・配電中のロスを含んでいる。

2021年度の日本における一次エネルギーの供給構成は以下(表2)の通りである。

1.2.2 二次エネルギー

二次エネルギーすなわち最終エネルギー消費の構成を図6に示した。

ここで、一次エネルギーには存在しない「電力」が登場す

表2 日本における一次エネルギーの構成(2021年度)

化石燃料	83.2%	石炭	25.4%
		石油	36.3%
		LNG	21.5%
		原子力	3.2%
非化石燃料	16.8%	水力	3.6%
		再生可能エネルギー	10.0%

る。また、再生可能エネルギーの0.3%は、再生可能エネルギーの自家消費に対応することになり、一次エネルギーで10.0%となっていた再生可能エネルギーのほとんどは、二次エネルギーにおいて27%を占める「電力」に対応することになる。政府は、このような状況のエネルギーの現状を、今後、

(1) 更なる一次エネルギーにおいて再生可能エネルギーの割合を増加させる

(2) 石油による二次エネルギー供給を電力(および水素)への置き換えを増加させる

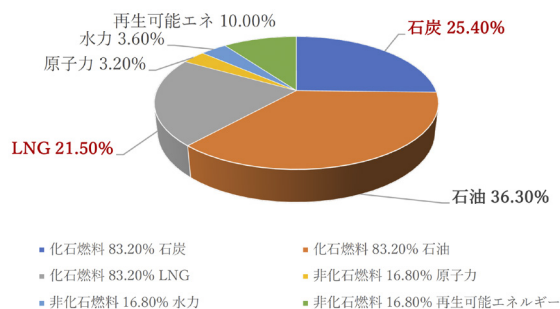


図4 日本における一次エネルギーの構成

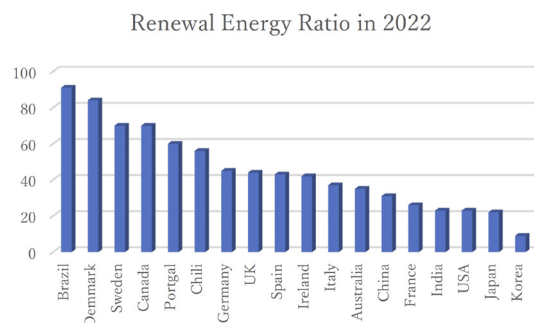


図5 主要国における再生可能エネルギーの割合(2022年)

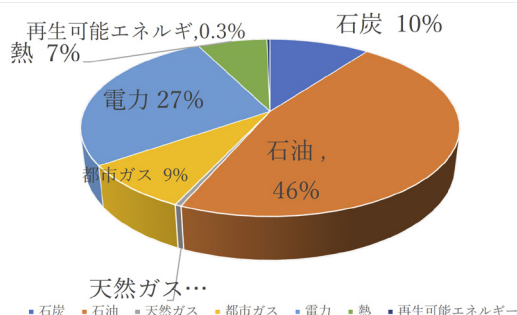


図6 日本における二次エネルギーの構成

という方向性を加速しなければならないという政策方針を出している。

次に、二次エネルギーの各産業部門で整理したものが、図7である。

- ・44%が製造業において消費されていることが分かる。製鉄や化学など、多くの製造業の中でも大きなエネルギーを必要とする産業は、石油・石炭の自家発電設備および熱利用設備を所有して製造活動を展開している。
- ・業務他は、製造業および農林水産業以外の業務設備であり、オフィスなどのビル設備におけるエネルギー消費を示しており、その割合は17%となっている。
- ・家庭における消費量は、14%であり、オフィスなどのビル設備におけるエネルギー消費と同じレベルの消費量であり、合計すると31%となっている。
- ・旅客と貨物の運輸の合計が22%となっている。運輸システムは、ガソリンエンジンで稼働するトラックやバスなどの電化を促進するとされているが、輸送する人と貨物の絶対量を減らさない限りは、電力の確保のために多くの化石燃料を使用している現状を改善しなければ、地球温暖化ガスの総排出量の削減は実現することができないことになる。

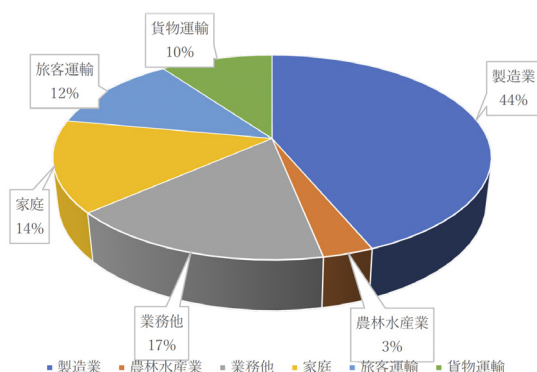


図7. 二次エネルギーの産業別割合

すなわち、

- (1)再生可能エネルギーによる総電力発電量を劇的に増加させ、
- 一方では
- (2)各産業セグメントの活動維持に必要なエネルギー量の削減(=効率化)

を同時に実現しなければ、現在の経済・産業活動の維持は不可能との結論が導き出されることになる。

ここで、簡単な計算をしてみよう^{*2}。

EP-100 を全セグメントで実現するとすれば、必要なエネルギー量は 1/2 となる。この過程において、化石燃料ベースの産業・社会活動を電力ベースに置換することを基本にする。当然なことではあるが、単純に現在の化石燃料ベースの二次エネルギーを電力に置き換えることは容易ではないことは明白ではあるが、挑戦すべき方向性であろう。

再生可能エネルギーの総量(一次エネルギー)を 現在の 2.5 倍(=150%の増加)にすれば、現在の一次エネルギーにおいて 20% $\times$ 2.5=50%を再生可能エネルギーによって獲得可能になる。EP-100 の実現によって、必要な二次エネルギー量が 1/2(=50%)となるので、完全に再生可能エネルギーによって、必要な二次エネルギーを確保・提供可能となる。

第2章 各業務セグメントでのエネルギー消費量の削減手法

各業務セグメントでのエネルギー消費量の削減(=エネルギーの生産性効率(EP; Energy Productivity)の向上)の手法を考えてみよう。

2.1 システムの構築時に新規に必要なモノを削減する

製造業は、社会・産業活動を行うために必要な物理的なモノ資源を製造するために、二次エネルギーの44%を消費している。製造業が必要とする二次エネルギーは、社会・産業が「新規に必要なモノ」の総量を減少することができれば結果的に減少させることが可能となる。2つのアプローチが考えられる。

- (1)「新規に必要なモノ」を「過去に製造したモノ」で代替する

*2 小宮山宏氏が主宰するグループが提唱する「プラチナ構想」では、田畑を覆うように太陽光パネルを設置する営農型太陽光発電を利用するなどすれば、国内で必要なエネルギーの5倍の再エネでまかなうことができるとの主張もされている。 https://www.sustainablebrands.jp/news/jp/detail/1213848_1501.html また、洋上風力発電の大規模な開発が計画されているのが現状であり、現在の再生可能エネルギーの総発電量を2.5倍あるいは5倍にすることは、不可能ではない数字であろう。

リサイクルあるいはサーキュラーエコノミーと呼ばれるエコシステムの構築・運用である。資源や部品の再利用・再生利用である^{*3}。これまでの、産業革命以降、基本的には、Scrap&Buildの形態であり、新しいモノは、未使用の資源を確保し、資源から基本原料を製造し、さらにこれを加工・組み合わせて最終的なモノが生産され、社会に提供・展開される形態となった。しかし、基本原料のための資源貴重であり、基本原料を製造するため(+資源から基本原料を製造するため)に必要なエネルギーを、既に、製造済の基本原料を再利用することができれば、大きなエネルギー削減を実現することが可能となる。

このような、既に生産し運用されたインフラを構成する「モノ」を再利用(リサイクル)する構造は、少子高齢化と人口増加の停滞・停止による「物理」経済の成長が鈍化・停滞あるいはマイナス成長となっている国や都市・地域に有効な構造であり、このような現象は、特に先進国で加速することになるとともに、新興国や発展途上国においても地球温暖化を減少させるために有効な方策となると考えられる。



図8 EV中古蓄電池の再利用(アムステルダム競技場)
<https://www.nissan.com.sg/experience-nissan/lifestyle/amsterdam-arena.html>

以下に、4つの具体的な事例を紹介する。

(i) アムステルダム・スタジアムでの電気自動車(EV; Electric Vehicle)中古蓄電池の再利用^{*4}

総合競技場を電力グリッドとの連携拠点とし、周辺の街への配電拠点かつ系統との電力デマンドレスポンス拠点とするとともに、競技場は非常時の避難所となることから、競技場内に設置される大容量の蓄電池を避難所での非常用電源とする設計である。電力系統との連携のための大容量の蓄電池として、日産の電気自動車(EV)の中古蓄電池セルを用いるという運用である。具体的には、148個のEV車(LEAF)のバッテリーパックを再利用して、3MWの電力を提供可能としている。この蓄電池は、系統との連携も可能であり、系統側で電力供給が不足している場合には、スタジアム配下の街への電力供給に蓄電池からの放電電気を利用することができる。なお、電気自動車に搭載されている蓄電池容量は、非常に大きく、ピークで100KW、平均で30KW、100KWH程度の容量を持っている。

(ii) EVを用いた電力デマンド制御

自家用自動車の実稼働率は平均で10%程度とされている。つまり、90%の時間は利用されていない遊休の時間と捉えることができる。しかも、この遊休資源は、既に自家用自動車の所有者によって投資済みの資源である(これは、サブスクライプ型の自家用自動車の場合には提供会社が利用者に替わり投資済で、分割形式でこれをユーザが返済する形態)。つまり、90%の時間は、誰も利用しない時間であり、EVが電力ネットワークに接続されていれば、デマンドレスポンス用の蓄電池資源と捉えることができる。上述したように、EVの蓄電池は、電源グリッドにとって大容量の分散型の発電機であり蓄電池であると捉えることができる。EVの目的外利用であるが、これは、既投資済の資源の有効利用であり、社会が必要とする資源の削減をシェアリングエコノミーで実現する形態であると考えられる。

*3 小宮山宏氏が主宰するグループが提唱する「プラチナ構想」における都市鉱山(金属資源の供給を都市鉱山が担う)のアイデアである。日本のように「鉄が飽和」している先進国では、解体されるビルや自動車から金属資源を取り出し再利用すべきであり、「都市鉱山資源の品質とコスト問題は技術が解決できる」としている。

*4 <https://www.nissan.com.sg/experience-nissan/lifestyle/amsterdam-arena.html>

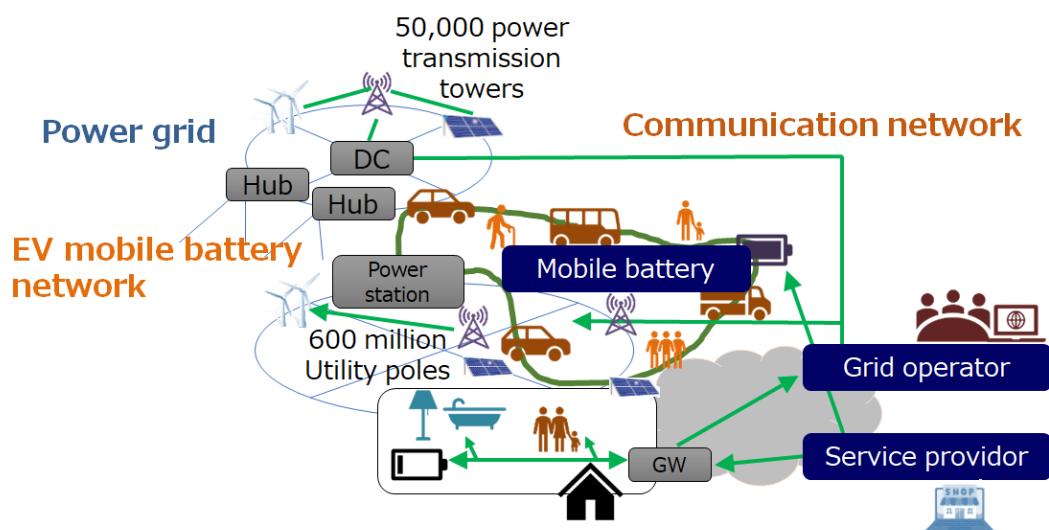
さらに、EVの大容量蓄電池は、電力グリッドにとって、物理的な場所を動的に需要の状況に応じて変化させることも不可能ではない蓄電池&発電資源と捉えることができる。すなわち、電力グリッドにとっては、EVは、モビリティ機能を持った大容量分散型蓄電池としての“新しい”利用可能性を持つことになる。

最後に、従来の燃料自動車とEVとの大きな違いとして、計算機資源の大きさが挙げられる^{*5}。正確には、自動運転車である。自動運転の実現には、大量の計算資源が必要であり、その電力の提供に適する自動車は、EVとなる。自動運転には、高性能・大容量のCPU、GPUとメモリ資源が必要となる。この計算資源も車体が稼働している時間だけ必要なものであり、その稼働率は10%程度となる。しかも、この物理資源も投資済みの遊休資源である。この遊休時間の計算機資源を、自身あるいは他人に利用可能とすることで、資源の本来の目的以外での有効利用が可能となる。しかも、自動車は、稼働してない時には、“通信”ネットワークにはConnectedな状態で静

止しており、場合によっては、電源供給・提供のための電源アダプター & ケーブルで“電力”システムともConnectedな状態になる。つまり、非稼働な状態でも、電力と通信システムの両方にConnectedな状態となり、電力とデジタル情報を交換可能な状態と捉えることができる。

(iii) 建築物におけるスケルトン&インフィル

スケルトン&インフィルの考え方は1960年代にMITのProf. Nicolaas John Habrakenが提唱した考え方で、スケルトン(躯体)とインフィル(内装)を分離して考えることで、新耐性・耐久性のある構造体を保ちつつ、室内を作り替えて何世代に渡っても建物を使用することができるアーキテクチャである。躯体を解体して、再構築する必要がないので、廃棄物(含 産業廃棄物)の削減、再構築に必要な資源とエネルギーを実現することになり、地球温暖化ガスの減少に大きな貢献を行うことになる。なお、中国における集合住宅は、スケルトン&インフィルのアーキテクチャで構築・運用されているし、東ドイツが西ドイツと統合された時に、東ドイツが急速に西側



(出所) 岡本(2021)「GRIDで理解する電力システム」、電気新聞出版

図9 EVを用いたモバイル蓄電池デマンドレスポンス

*5 2023年AMDは特斯拉に搭載するコンピュータの能力を10 TFLOPSとしている(CES2023での展示<https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/1469629.html>)。一方「富岳」の仕様によると(<https://www.fujitsu.com/jp/about/businesspolicy/tech/fugaku/specifications/>)、各ノードが約3TFLOPS、158,976ノードで、最大1,000PFLOPSの性能とされている。つまり、約10万台の特斯拉で富岳と同程度の計算機能力を持つことになる。なお、電力量に関しては、30kW/台なので、100万台(10^6)で3GW(10^9)となり黒部ダム(335MW)換算で10基程度(最新の原子力発電5基程度)、容量で100GWhとなり東京電力管内の揚水発電容量(約9GWh)の約10倍の容量(Wh)となる。

の建築インフラとして機能したのは、東ドイツ内の建築物がスケルトン&インフィルの考え方で構築・運用されていたからとも言われている。

建築物の利用者は、①建築物の所有者である場合と、②所有者ではなく賃借人(テナント)の場合とが存在する。①の建築物の利用者が建築物の所有者である場合には、基本的には利用者が定住する形態であるが、スケルトン&インフィルの適用によって、地球温暖化ガスの減少に大きな貢献を行うことになる。この形態は、現世代での資源の共有は実現しないが、複数世代での時間軸方向でのシェアリングエコノミーと捉えることができる。一方、②の建築物の利用者が所有者ではなく賃借人(テナント)の場合には、スケルトン&インフィル型の建築物の場合には、賃借人が賃貸する建築物の変更が容易になる。ある意味、建築物というハードウェアとその利用者というアプリケーションがアンバンドルされることになり、現世代でのシェアリングエコノミー型の建築物に関する不動産業界が形成されることになる^{*6}。

当然であるが、これまでは、インフィルインスタンスとしては、物理アセットであったが、今後は、居住空間のデジタル・ツイン化が実現・進展することに

なり、その場合には、インフィルインスタンスとして、ソフトアセットも含まれることになる。

(iv) トレーラ・ハウス(不動産を動産へ)

建築物は地面に恒久的に固定されており地理的場所を変えないので不動産と呼ばれている。古い日本の建築物は、基礎はしっかり作るけども、建築物は地面に固定されない、ある意味免振構造となっていたし、建築物自体の解体・再構築あるいは、建築物を構成する部品の再利用が可能な構造となっていた。すなわち、物理的な移動を可能にした資源の再利用を、AS ISで行う場合(建築物をそのまま移動させる)とTO BEで行う場合(建築物の部品を再利用して別の構造の建築物を{異なる場所に}構築する)、の両方を可能としていたと捉えることができる。

この古い環境負荷が非常に小さい日本建築に似た近年の建築物が、自由に移動が可能な「トレーラ・ハウス」あるいは、少し労力は必要であるが移動や「レゴブロックのような」組み合わせが可能な「コンテナ・ハウス」である。これらは、蓄電池と計算機パワーを持った電気自動車(EV)との連携も容易な建築物であり、物理的な移動や部材の再利用がほぼ不可能な現在の建築物と比較して、特に竣工後の運用において大きな地球温暖化ガスの減少を実現することになる。移動可能な建築物である特長を活かしたキッチンカーは、その典型例であろう。

さらに、移動可能な住居は、災害時の支援物資としても、有効に利用可能であることが広く認識されつつある。特に、2016年4月に発生した熊本地震においては、長期の余震が原因で、被災者のための仮設住宅の施工を行う場所が選定できなかったが、トレーラ/コンテナ・ハウスは、設置後にも設置場所の変更が可能であることから、その有効性が認識されたと聞いている。

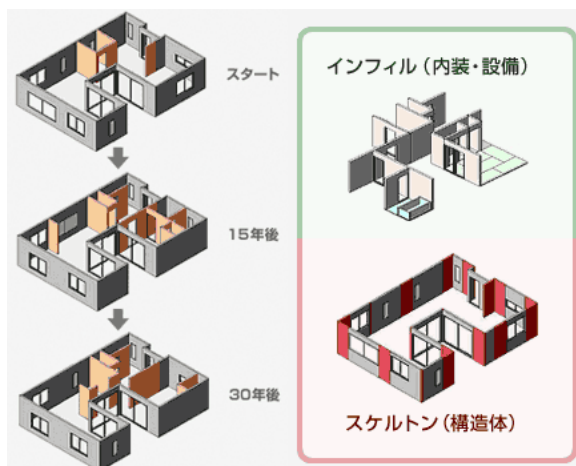


図10 スケルトン&インフィル(as Hardware)

*6 北欧フィンランドなどでは、製紙工場や物流倉庫の躯体、電力受電設備、さらに電力グリッドをそのままデータセンターに再利用する事例が少なくない。これは、データセンターの建設に必要な、セメントや鉄鋼、さらに労働力・建機などに必要な物理資源とエネルギーが節約されることになり、総合地としてのデータセンターの地球温暖化効果ガス量の大幅な削減に寄与することになるとされている。利用者が替わっても、同じ不動産躯体や電力インフラ等を再利用するという構造である。

このような移動可能な建築物は、「2.3システムの構築・運用に必要となるコストを削減する(TO BE)」の「(3)点(not面)のインフラ構造」で議論する「点で構成可能なインフラ」に通じるコンポーネントとなる。拠点を構成する建築物が自由に、地理的な場所を「道路」などを用いて変更可能であり、資源を廃棄せずに再利用・有効利用することを可能にする。つまり、建築物の集合や離脱に必要な資源とエネルギーのコストが大幅に削減され、結果的に地球温暖化ガスの減少にも貢献することになる。

ここで、電気自動車(EV)は上述したアムステルダム・スタジアムの事例で示したように、大容量の移動可能な蓄電池として、このキャンパスに組み込むことができる。さらに、EVの資源で有効利用可能なコンポーネントとして、自動運転に必要なコンピューティング資源(CPU/GPU/Storage)とコミュニケーション資源が存在する。特に、自動運転に必要なコンピューティング資源(CPU/GPU/Storage)は、蓄電池容量と同様に、非常に大きな容量となっている。後述するように、コンピューティング資源を利用するタスクには、リアルタイム性や高品質を要求しないタスクは少なくなく、その総量は、人工知能の成長などもあり、急拡大しているし、今後も

需要が増加することが予想されている。すでに、自己利用のために購入済み(=投資済)の電気自動車に存在する「遊休資源」を、他の人・組織に利用可能にする(貸し出す)ことで、付加的報酬を獲得する機会が発生する。EVの所有者・購入者にとって「遊休資源」の有効利用である。一方、EVの「遊休資源」を利用する人・組織にとっては、初期ハードウェア投資が不要なサブスクリプション型の資源利用が可能になる。エンドユーザのハードウェア資源のシェアリング・エコノミーである。図12および図13に、電力システムシステムと連携運用されるショッピングモールのイメージを示した。電気自動車やデータセンターが持つ大容量のエネルギー貯蔵・供給能力を、常時には電力システムとの連携、災害発生時には非常用エネルギー源として利用する方向性である。

(2)「新規に必要とするモノ」をシェアリングエコノミーによって削減する

従来の多くのサービスインフラは、サービスとそれを提供するために必要な物理資源がほぼ1対1にロックオンされた形態であった。サービス提供者による物理的資源の専用利用である。広義のデジタル化の導入によって、人類は、排他的な物理資源の専用利用ではなく、物理資源を複数のこれまで、物理資源の共

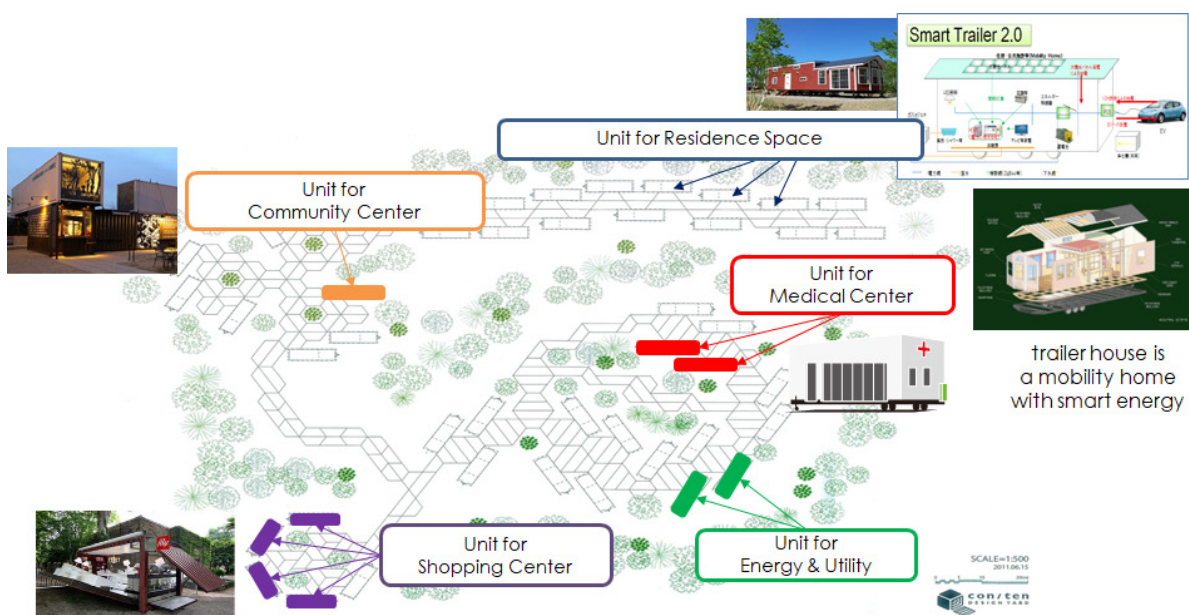


図11 Connected LEGO-Trailer Town/Campus

有を行わなかったサービス提供者間で共用利用するシェアリングエコノミーを編み出し、実展開している。サービスという「コト」と、サービスという「コト」を提供するための「モノ」のアンバンドル化である。物流におけるパレット・コンテナ、コンピュータネットワーク(インターネット)におけるIPパケットをその典型例として挙げることができる^{*7}。

実際に、物流においても、コンピュータネットワークにおいても、物理資源の共有によって、必要となる物理的なモノの総量とその運用に必要なエネルギーの両面で、それらの大きな削減を実現するこ

とに成功している。Resource ProductivityとEnergy Productivityの飛躍的な向上である。上で議論したように、資源(Resource)の共用による効率的な有効利用は、資源量(=モノ)の削減だけではなく、資源を作成するために必要となるエネルギー量も削減することになるのである。

2.2 システムの運用時に必要となるエネルギー量を削減する(AS IS)

同じ「モノ」でも、その使い方によって、必要となるエネルギーや時間、さらには廃棄物など資源の無駄も変化する。賢い・無駄のない「運用」の実現によって、システムが

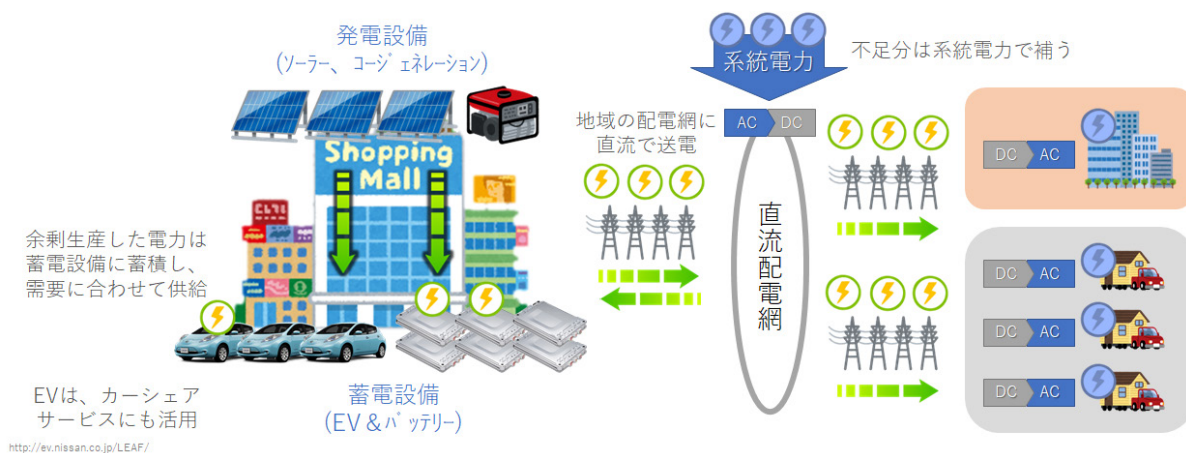


図12 常時運用

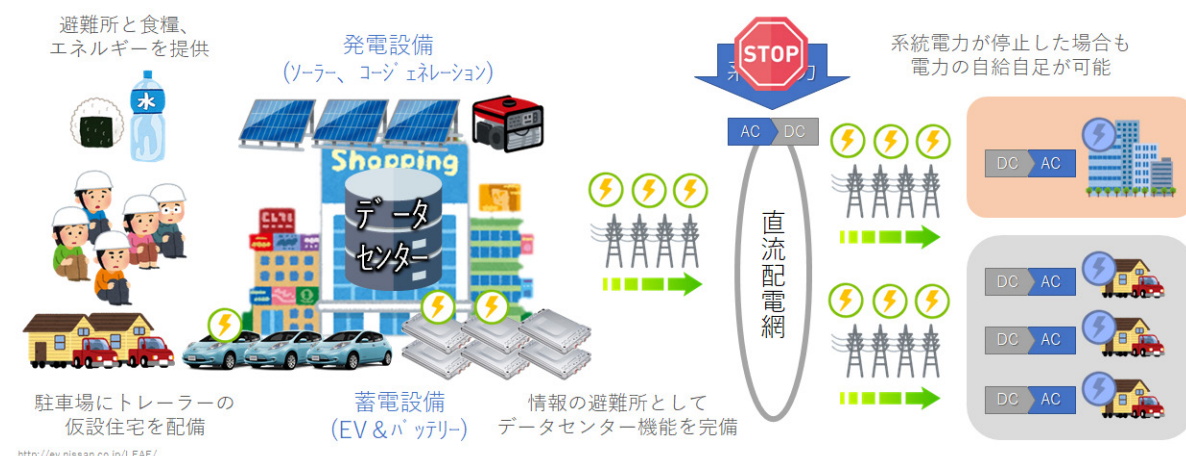


図13 非常時運用

*7 物流においては、コンテナとパレットの発明・導入によって、共通の「箱」であるコンテナ・パレットには、任意の「荷物」を収容させることを可能にし、さらに「箱」を任意の輸送媒体(船・列車・飛行機・自動車など)で移動可能かつ乗り換え可能にした。一方、インターネットでは、同様に、デジタルの小包であるIPパケットの発明・導入によって、多様なデジタルコンテンツを共通の「箱」であるIPパケットに収容し、「箱」であるIPパケットは多様なデジタルビットの伝送媒体(無線、銅線、光線など)で移動可能かつ乗り換え可能にした。

消費するエネルギー量と廃棄物の量を少なくすることが可能となる。この「賢い・無駄のない運用」には、対象となるシステムの状況を把握するためのデータが取得され、そのデータを用いたシステムの同定し、さまざまな試行錯誤(シミュレーション・エミュレーション)を行い、適切な制御を行うことを可能とする。これを最近ではデジタル・ツイン化と呼んでいる。デジタル空間でデジタル・ツイン化されたシステムの運用・制御方法の検討・評価には、今後は人工知能の有効利用が進展・導入されることになる(すでに適用・導入が進展しているのが現状である)。このようなデジタル技術を駆使した、システムの同定と適切な制御・運用の適用によって、システムが消費するエネルギーの総量が削減(廃棄物の削減も)可能となる。

このデジタル・ツイン化による消費エネルギー量の削減は、既存(AS IS)のシステムばかりではなく、新規(TO BE)導入・設置されるシステムにも適用可能である。デジタル空間での実空間のエミュレーションとシミュレーションが行われ、最適・適切なシステムを出力(=Print-out)する形態である。例えば、ビル施設においては、ビルのデジタル・ツイン化によって、既存ビルの30%程度のエネルギー削減が多くのビルにおいて実現可能であるし、新規ビルの設計においては、ビルの運用時の消費エネルギーを低く抑えるための竣工構造と竣工後の運用の設計・評価が可能となりつつある。特に、データセンターという特殊なビルは、電力消費量がビルの経営上非常に必要なコスト要因であり、デジタル・ツインを用いた、設備設計と運用方法の最適化が取り組まれている。

2.3 システムの構築・運用に必要となるコストを削減する(TO BE)

デジタル技術とデジタルインフラを利用することで、それまでのシステムの構造とは根本的に異なる構造(not AI IS, but TO BE)にすることで、結果的に、かつ総合的・統合的に、さらに長期的に、その構築と運用に必要となる地球温室効果ガスの総量を削減するアプローチである。デジタルの力を最大限引き出し、デジタル前提でのシステムの設計である。すなわち、デジタル・ファーストでの設計・実装・運用である。

(1)コトとモノのアンバンドルによるモノの選択が可能という前提

デジタル化によって、モノ(ハードウェア)とコト(ソフトウェア)がアンバンドル化され、コト(ソフトウェア)が、モノ(ハードウェア)を選択可能となる。すなわち、コト(ソフトウェア=Function)を実現する場所(=ハードウェア)は、効率の高い、すなわち、地球温室効果ガスの排出量が小さいモノを適宜選択することが可能となる。コトをPrint outする場所とモノが選択・変更可能になることを前提にシステムの設計・運用を行うことができる。複数・多数のコトが、共通のモノを共用するシェアリングエコノミー型のインフラは、コトとモノのアンバンドルにより実現される地球温室効果ガスを小さくする・削減するインフラ構造と捉えることができる^{*8}。3Dプリンターに代表されるデジタルのレシピ(=デジタルの設計図)を、デジタル通信インフラを用いて、適切な場所に設置されている3Dプリンターに送信すれば、任意の出力(物理的なモノの場合もあるし、ディスプレイへの表示やサウンド出力など多様なモノが存在し、選択可能)を実現することができる。例えば、新聞のように、紙(paper)への出力よりも、表示デバイス(display)への出力、さらにはサウンドデバイス(Speaker/Ear-phone)への出力の方が、長期的視点で地球温室効果ガスの排出量が小さくなるし、出力デバイスの世代交代によっても地球温室効果ガスの排出量が削減可能となる。

さらに、分かりやすい事例として、①スマート鍵、②マイナンバーを取り上げる。

①スマート鍵

ドアの鍵がハードウェアの呪縛から解放されたおかげで、鍵の所有者・利用者の認証方法や鍵の開閉の指示方法も音やジェスチャーなどその機能(=コト)実現方法・デバイスの選択肢が劇的に増加することになるとともに、さらに、鍵を失くすというインシデントもなくすることが事実上可能になる。また。鍵のコピーを作るときに、物理的な鍵を作る手間もコストも不要になった。誰かに渡した鍵は、回収する

*8 お金(紙幣・貨幣)ももともとは、デジタルのモノ(価値)とコト(貸借・約束)の物理的なモノへのPrint Outであると捉えて分析・考察することも可能であると考えられる。デジタル・キャッシュは、デジタル空間での動作となり、選択肢とTO BEのコト(=機能・サービス)を提供することになるであろう。

必要はなく、ドアに取り付けた装置とデジタルデバイス(例えばスマートフォン)との間で電子的認証手続きをする際に、許可しない設定をする、あるいは渡した電子鍵の情報を消去するだけでよくなる。さらに、中古の不動産物件の受け渡し時には、前の入居者が物理的な鍵を複製した可能性があるので、ドアの鍵とシリンダーを取り換えることが通常である。デジタル鍵の導入によって、鍵の交換コスト(=運用コスト)が劇的に削減可能となる^{*9}。

さらに、ドアの鍵がハードウェアの呪縛から解放されたおかげで、鍵の持つコード(符号)が、持ち運ぶ媒体から自由になることで、大幅なコストダウンになるばかりではなく、新しい機能・サービス(=TO BE)が可能となる。ドアの鍵がデジタル化・オンライン化されることで、「利用履歴データ」という、それまでのシステムでは取得・保存・解析することができなかったものが手に入ることになる。この「利用履歴データ」は、プライバシーの問題は十分に考慮されることを前提とするが、いろいろな新しい価値やビジネスを創出する可能性を持っているのは明らかである。

②マイナンバー

マイナンバーは各人に割り当てられた固有の番号である。マイナンバー(=デジタルのモノ)マイナンバーを用いて提供する機能/サービス(=コト)とマイナンバーカード(=物理的なモノ)を区別する必要がある。この3つは、そもそも分離されてシステム構造が設計・構築・運用されなければならない。これを、分離不可能にすると、実現方法の選択肢が消失あるいは少なくなってしまう、その進化を阻害することになってしまう。上述した「デジタル鍵」と同様に、「マイナンバーカード」は「物理的な」「ICカード・チップ」である必要はなく、「デジタルのICカード・チップ」で実現可能であり、このデジタルのICカード・チップを稼働させるインスタンス(=実体)は、デジタルインスタンスでもハードウェアインスタンスでも可能なのである。これは、マイナンバーの機能を、ICカード・チップだけではなくスマートフォンでも実現可能とする取り組みに相当する。また、「マイナンバー」は、デジタルのID(=モノ)であり、特定の媒体(=モノ)やサービス(=コト)にその利用が限定されるわけではなく、多くの選択肢を持つように設計・構築・運用が行われなければならない。「コト

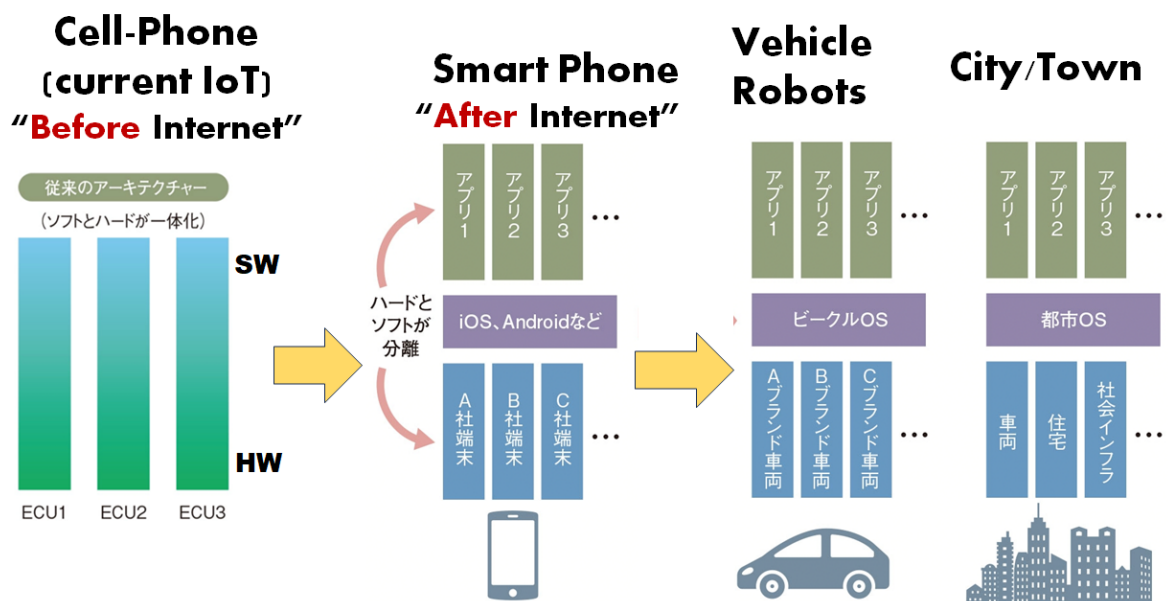


図14 ハードとソフトのアンバンドル化

*9 引越しの際の鍵交換費用は、日本では約200億円/年になっているとのことである。さらに、鍵の紛失による鍵の交換もある。紛失して警察に届けられた鍵の本数は約30万本/年とのことであるし、ポストや鉢に隠した鍵を用いた不法侵入は、約7000件/年とのこと。

とモノのアンバンドルによるモノの選択が可能」という前提である。

(2)通信インフラの利用を前提

デジタル通信インフラの敷設・管理・運用コストは、電力の送配電インフラの敷設・管理・運用コストと比較して、二桁以上小さくなることが報告されている*¹⁰。物理的なモノ(貨物や人)を輸送・配送する運輸インフラの敷設・管理・運用コストは、さらにオーダーで大きな値となる。このシステムの敷設・管理・運用に必要な物理資源とエネルギーの大きさは、金銭的なコストだけではなく、必要となる地球温室効果ガスの排出量にも反映されることは明らかである。すなわち、金銭的なコストと地球温室効果ガスの排出量の両面において、『物理的モノの移動』エネルギー(含電力)の移動』デジタルビット(デジタル化されたモノとコト)の移動』という関係が一般的に存在する。

(a)コロナ禍によって、デジタルネットワークで遠隔会議が一般化した。これは、人という物理的なモノを大きな移動に必要なコスト(時間と金銭)をかけて移動させるより、デジタルインフラを用い

てデジタルの人(モノとコト)を遠隔地に移動させたのと等価のことを実現したと捉えることができる。さらに、デジタルファイルをプリンターで出力させた印刷物という物理的なモノを遠隔地まで持参(=移動)していた従来の対面型の会議は、印刷物(モノ)のレシピ(プログラム)である電子ファイルで表現されるコトを印刷用紙に印刷(print out)せず、遠隔地のディスプレイに出力(これもprint out)して、物的な廃棄物を削減させるとともに移動コストの激減を実現させたと捉えることができる。『物理的モノの移動』デジタルビット(デジタル化されたモノとコト)の移動』を利用した地球温室効果ガスの排出量削減の実例の一つである。

(b)クラウドコンピューティングは、コンピュータの仮想化すなわちハードウェアからのアンバンドル化によって実現されたと見ることも可能である。仮想マシン(VM; Virtual Machine)の導入である。仮想マシンの導入によって、コンピューティングというコトは、ハードウェアというモノからアンバンドルされた。その結果、コンピューティ

Innovation in Logistics

2020s =Cyber-First Sharing Economy

19th century = exclusive separated system

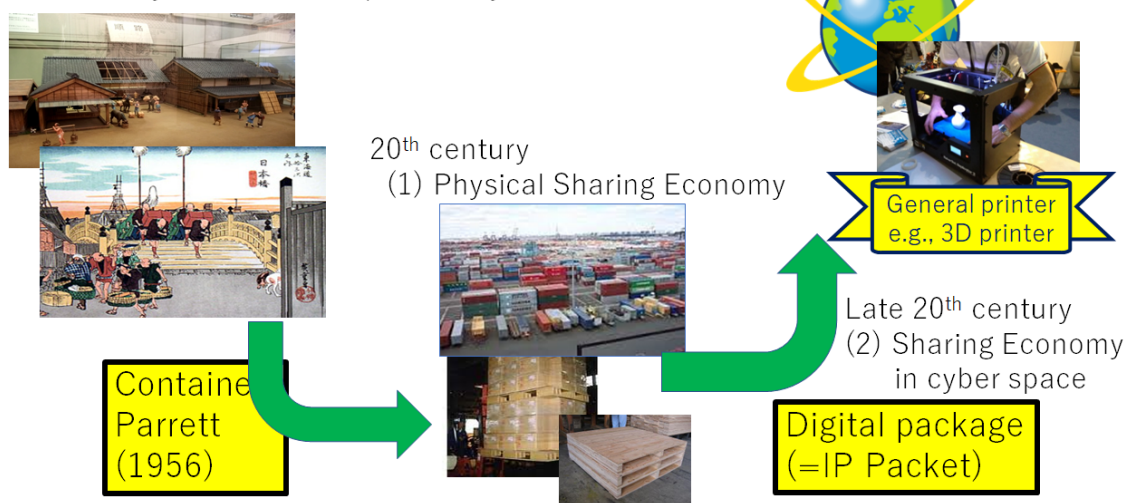


図15 物流における2つのシェアリングエコノミー大革命

*10 「エネルギー x 情報基盤インフラの連携・協調の必要性について」(東京電力パワーグリッド 副社長 岡本浩、P.5)、第5回 デジタルインフラ(DC等)整備に関する有識者会合、2023年3月22日、https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/digital_infrastructure/0005/08.pdf

ングを行うコンピュータ(=仮想マシン)は、地球上に張り巡らされたインターネット上を自由に移動可能になった(さらに、複製を簡単に生成することも、消滅させることも簡単に、デジタルのみの操作で行えるようになった)。この仮想マシンの移動可能な性質を用いて、多くの先進的な企業・事業者において、コンピュータが動作するために必要な電力を安価に利用可能にするために、電力事情に合わせて、仮想マシン(=デジタルのコンピュータ)をインターネット上で移動させることで、システムの稼働に必要な総電力量と総電力コストを最小化する運用が導入された。これは、まさに、『物理的モノの移動』電力の移動』デジタルビット(デジタル化されたモノとコト)の移動』の関係を考えて時に、デジタルネイティブな仮想マシンの利用によって、固定的なハードウェア(モノ)をデジタル通信インフラで相互接続し、固定的なハードウェアを、地球温室効果ガスを発生させずに電力エネルギーを供給可能な水力・風力・太陽光の再生可能エネルギーの発電所に共生(Collocation)させることで、電力エネルギーの移動(送電)コストを小さくすることに成功するとともに、電力エネルギーの移動(送電)に必要な資源

確保に必要な地球温室効果ガスの排出をゼロにすることに成功した事例である。なお、どうしても、低遅延や事故への即時対応性の確保のために、クラウド利用者の物理的に近い場所でコンピューティングを行わなければならないタスクは、利用者に近い地球温室効果ガス排出量が小さくない施設のコンピュータハードウェア(モノ)を利用せざるを得ない。すなわち、低遅延の要求が小さく、地理的に遠い場所でのコンピューティングでも構わないコンピューティング・タスクは、地球温室効果ガス排出量が小さい再生可能エネルギーの発電所にデータセンターを立地させることで、特に中長期的な観点で、インフラの敷設・構築・管理・運用の金銭面でのコストと地球温室効果ガス排出量の削減を実現している事例である。^{*11}

図16は、ドイツの自動車会社における社内のIT/ICTシステムの進化を示している。社内のコンピューティングタスクをカテゴライズ(棚卸し)を行った結果、80%のタスクは国外の安価な再生可能エネルギーと施設コスト、さらに外気温度が低く空調コストが小さくなるスウェーデンとアイスランドに移動させ、20%のタスクを電力

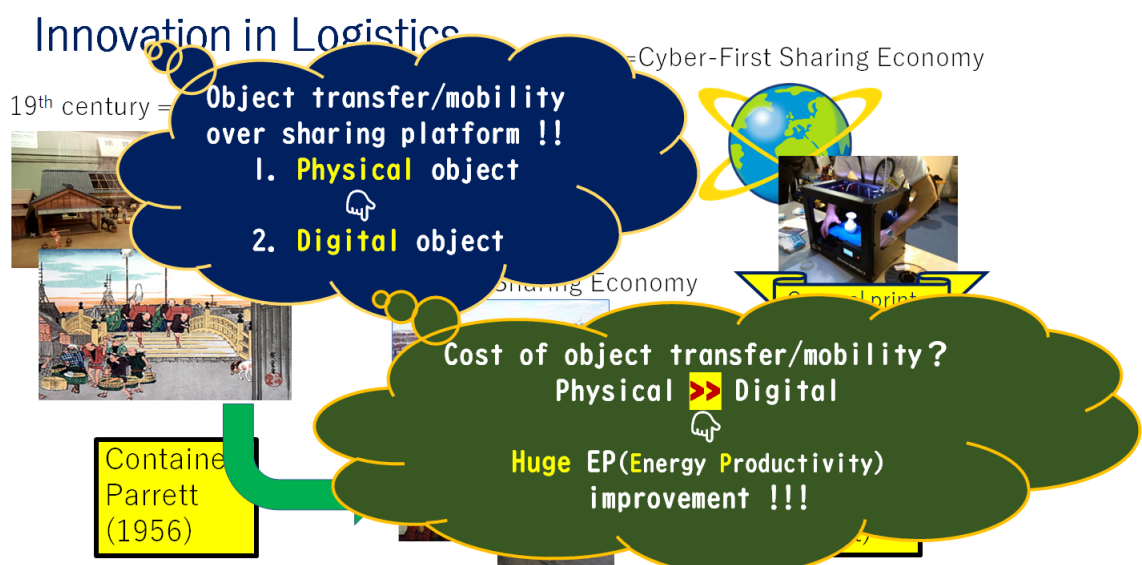


図16 物理的なモノからデジタルのモノへのシェアリングエコノミー

*11 さらに、低遅延要求とコンピューティングの信頼性がクリティカルでないコンピューティングは、その稼働量、すなわち電力消費量の増減を制御可能であり、電力の発電・送配電事業者とのデマンドレスポンス連携も可能にする。実際に、(株)ハイレゾ(<https://highreso.jp/>)社は、HPC (High Performance Computing) サービスに特化したデータセンターを構築、北陸電力とのデマンドレスポンス連携を実施・展開している。

単価も施設コストも高いドイツに残し、大規模な地球温室効果ガス排出量の削減を実現するとともに、財務および運用に必要な金銭のコスト削減を同時に実現した事例である。

このドイツの自動車会社の事例は、低遅延通信・高品質運用・最重要データ管理を必ずしも要求しない計算タスクを実行するコンピューティング・ハードウェアの設置場所をドイツからスウェーデンとアイスランドにPermanent（恒常的に）に移動させるというソリューションであった。現在では、デジタル化のサーバコンピュータに適用され、計算タスクを実行するサーバコンピュータ（あるいはタスク/プロセスコンピュータ）は、物理的ハードウェアからアンバンドルされ、デジタル空間上を比較的自由に移動可能（＝マイグレーション）になるとともに、その複製作成と削除/消去（＝スケールアウト）することが可能となった。

特に、ハイパージャイアントあるいはOTTと呼ばれるGAFA/M-BATは、このデジタル空間上でのプロセス・タスクのマイグレーション（移動）とスケールアウト（複製・削除）を積極的に利用して、効率的なエネルギー利用とエネルギーコストの削減を実現してきた。最初の段階では、Follow-the-

Moonと呼ばれる外気温が低い“月が見える”涼しい夜の場所でコンピューティングタスクを実行する運用を行っていた。近年の運用では、Follow-the-Sun/Windで、太陽光と風力発の発電量の多い時間・場所にプロセス・タスクのマイグレーション（移動）を行い、再生可能エネルギーの積極的利用を行い、化石燃料由来の電力の使用量削減を実現している。このような運用は、都市部では再生可能エネルギー源の設置空間の確保と設備が産み出す利益額が小さいが、一方、非都市部では設置空間の確保の困難度が小さくなることに起因しており、その結果、再生可能エネルギー源の偏在が発生することになる。

図18には、2022年の1月から7月での再生可能エネルギーへの発電抑制要請が行われた頻度が示されている。再生可能エネルギー源が少ない（＝化石燃料源の電力が多い）関東圏および関西圏では再生可能エネルギーへの発電抑制要請は行われていなかったが、再生可能エネルギー源が多い（＝化石燃料源の電力が少ない）北海道・東北・四国・中国・九州、特に九州においては、再生可能エネルギーへの発電抑制要請が頻発している。

このように、日本においては再生可能エネルギー

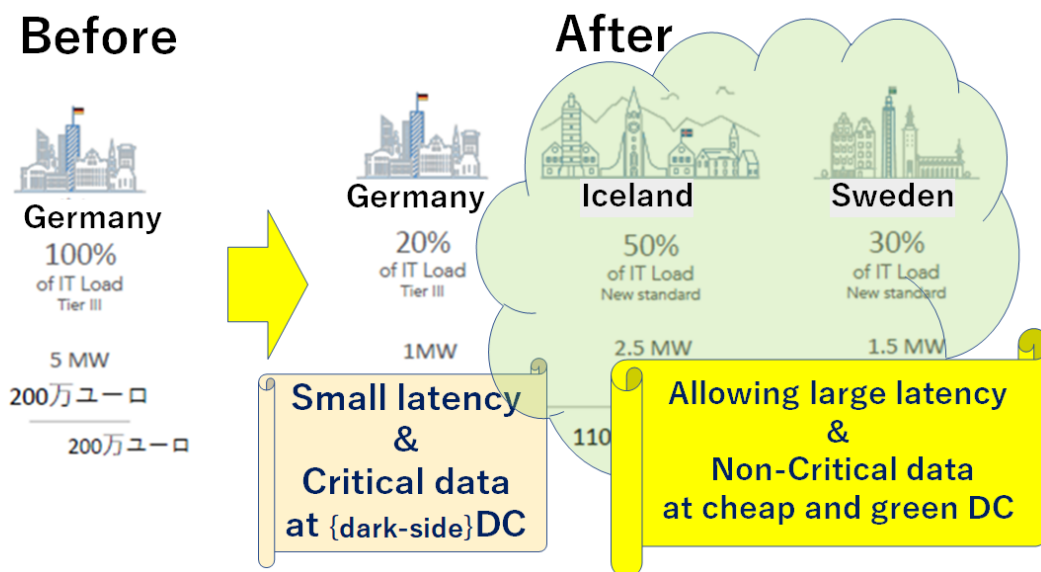


図17 ドイツの自動車会社の事例

源の偏在が存在しており、再生可能エネルギー源の割合が大きな地域では、電力供給の不安定性が増加しており、需要家によるデマンド制御(DR: Demand Response)の実現・実装が望まれる。つまり、デマンド・レスポンスの能力と容量(ΔkW)が大きな産業・タスクをこの地域への設置・移設が望まれる。上述した北陸電力と連携運用を実現しているハイパフォーマンス・コンピューティングに特化したハイレゾ・データセンターが、この典型事例と捉えることができる。

図19に、概念図を示した。関東・関西の遠隔地で稼働可能なコンピューティングタスク・プロセスを、恒常的あるいは動的に移動させるというソリューションである^{*12}。

(3)点(not面)のインフラ構造

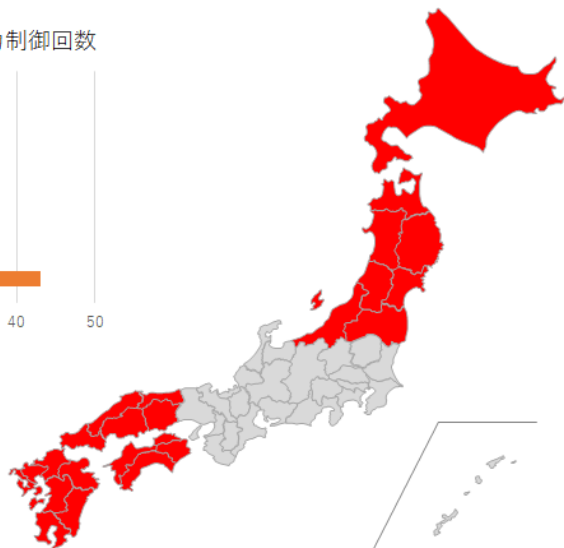
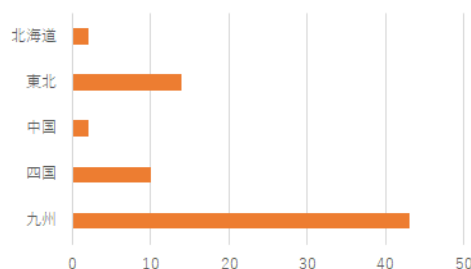
2次元(あるいは3次元)に構成される社会インフラを構築する際に、インフラのハードウェア(モノ)を「点」で敷設・維持することができれば、「面」で敷設・維持するインフラと比較して、短期的にも長期的敵

にも大きな必要な物理資源量の削減を実現することができる。

図20の左端列のインフラである鉄道・道路・光ファイバー網は、地面上に2次元のリンクとノードで構成される固定的なトポロジーを持ったインフラを敷設する。この2次元の固定的なトポロジーを持ったハードインフラの上を、列車や自動車あるいはデジタル小包が走り回る構造となっている。このような、面構成のインフラの敷設・運用・維持コストは非常に大きく、インフラのトポロジーの変更に多大なコストを必要としてしまう。すなわち、環境の変化への対応という運用・維持に要する金銭的成本と対応に必要となる物理資源量(=地球温室効果ガス排出量)が大きくなってしまう。

ところが、図17の中央の列の空港・港湾・地域電力網(米国)・携帯無線網は、{固定}点の拠点を整備すれば、拠点を結ぶリンクへの整備コストは小さくなる。その結果、環境の変化に対応するために必要となる金銭的成本と対応に必要となる物理資源量(=地球温

2022年1月～7月の各地の出力制御回数



【資料】 ビットメディア 代表取締役社長 高野 雅晴 氏

図18 2022年1月～7月各地の発電出力制御回数

*12 これまでは、寒冷な外気温の地域ではサーバの冷却に必要な電力量を小さくすることができるので、北半球ではGo-North(北へ)となっていた。しかし、近年ではサーバ・コンピュータが稼働可能な温度が大きくなったため、①冷却は熱の移動と、②空気媒体から液体媒体への変化、が起こっており、外気温が高い地域の不適合性は急激に緩和・解消されつつある。

室効果ガス排出量)の両方面で敷設整備が必要なインフラよりも有利となる。最後の図17の右側の右端列は、そもそも、共用の大規模な固定点のノード設備も必要としない、自律分散型のネットワーク構成を持ったインフラであり、公的に整備・共有される固定的ノード施設もほとんど必要としないネットワークである。

面としての物理インフラ資源を、①隣接する拠点間で排他的(専用利用)に利用する構造と②物理的には直接には隣接していない拠点間を論理的なリンクで

結ぶことが可能な構造が存在する。拠点間でのコンテナ(自動車やIPパケットなど)の移動は、拠点間に準備される「論理的なリンク」を利用して、拠点間を移動可能にする構造である。これは、インターネットのレイヤ構造で考えると物理レイヤ(L1)とリンクレイヤ(L2)、そしてコンテナの移動を実現するネットワーク(IP)レイヤ(L3)で考えることができる。物理レイヤ(L1)とリンクレイヤ(L2)が完全一致しているのが構造①、L1のインフラの上に、任意の論理的なネットワークポロジを形成することが可能な構造②となる。初期のインターネットは①の構造で

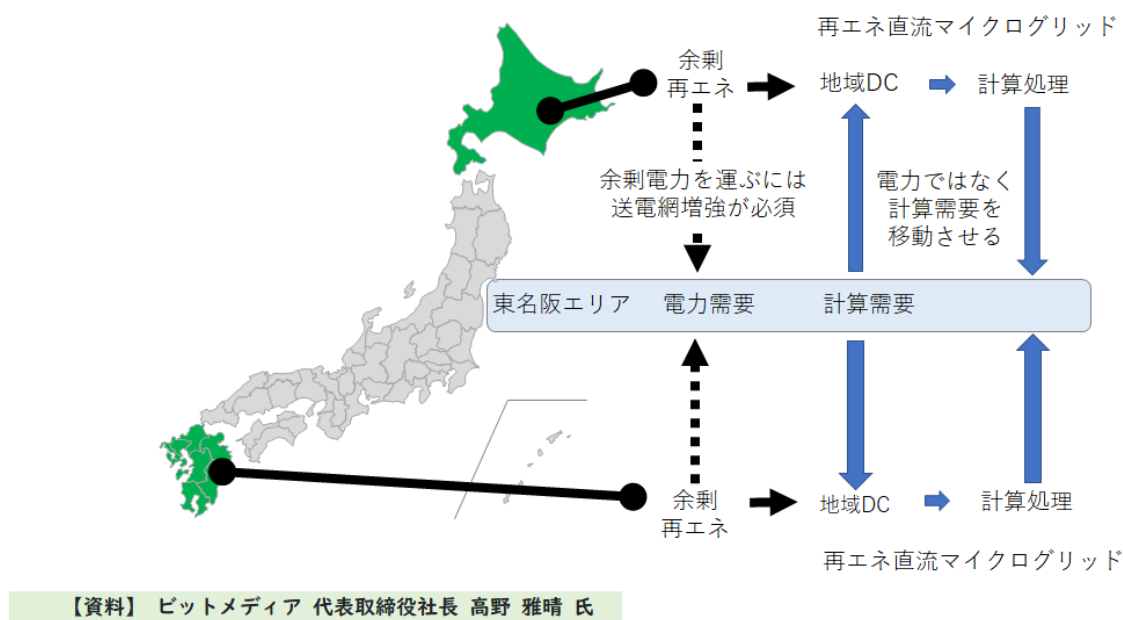


図19 地域データセンター連携による再エネ活用・燃料節約・情報基盤レジリエンス



図20 社会インフラの構成(面から点へ)

あったが、その後VLAN (Virtual LAN)やMPLS (Multi-Protocol Label Switching)などが②の構造を提供するようになり、物理的インフラのトポロジーの上に、論理的な任意の拠点間にリンクを提供可能にし、コンテナの移動経路の決定に必要な拠点間の接続形態(＝トポロジー)が柔軟に修正・変更可能となった。このような、論理トポロジーの修正・変更機能は、物理インフラを利用するコンテナの流通状況の変化への対応を可能とすることになる。このような構造②は、海底ケーブルシステムでは、ほぼ不可能であったが、ROADM (Reconfigurable Optical Add/Drop Multiplexer)が開発され、多地点間に敷設された海底ケーブルの物理レイヤ(L1)のトポロジーを敷設後にも修正・変更可能とした。いわば、L1をL0とL1にさらに分割したような構造で、構造①のL1を変更することで構造②を物理レイヤに導入したと捉えることができる。これは、VLANやMPLSが、それまで構造①であったシステムで、L2を2つに分割したような構造と類似している。

このような考察を行うと、面でのインフラ整備に必要なコストはインフラ上で移動させるモノによって、オーダーでの違い(物≫エネルギー≫デジタルビット)が発生すること、さらに、固定的な物理的なリンクを必要としない移動体(コンテナ)を用いるインフラの可能性を考慮したインフラのアーキテクチャの検討を行う必要があるのではないだろうか。例えば、車輪・タイヤを用いた移動が自動車であったが、最近では、高品質の舗装道路を必要としない「足」を用いた移動を少ないエネルギーで実現可能な電力で稼働・移動するロボットが出現している。空飛ぶ自動車やドローンは、高品質の舗装道路を必要としない移動体であり、社会インフラ全体で捉えれば、総合的・統合的な観点での地球温室効果ガス排出量の削減に貢献する可能性を持っていると考えることもできよう。

このような考察と方向性は、国交省が平成26年に「国土のグランドデザイン2050～対流促進型国土の形成」の中で提唱した「コンパクト・プラス・ネットワーク」構想に通じる考え方である。低成長あるいはマイ

ナス成長を前提としなければならない少子高齢化が進展する我が国においては、自由に2次元に活動領域を拡大し続けるこれまでのインフラ整備ではなく、コンパクトな拠点(ノード)と、これらを太い高機能リンクで相互接続する構成にすることで、末端神経・血流網の維持コストの削減を目指すものであった。物理リンクを必要としない、高性能・高効率な移動体が出現すれば、疎密度の領域の結合を、物理的固定リンクを敷設・整備せずに実現可能となる。すなわち、高効率に小さな地球温室効果ガスの排出量で稼働する移動体の研究開発と実現すれば、社会インフラ全体の構造の大進化が可能となるであろうし、地球温暖化対策にはこのような新しい移動体の発明と導入が必要となる。なお、前述のような、物理的なモノを、デジタルビットの移動で代替する技術とシステムは、この新しい移動体の一つの実現形態と捉えることもできるであろう。

最後に、『物理的モノの移動≫エネルギー(含電力)の移動≫デジタルビット(デジタル化されたモノとコト)の移動』を意識した産業・社会インフラの変革・進化を考えてみよう。第1次産業革命は蒸気機関による人力を大きく上回る動力源の発明が起因とされている。蒸気機関は、石炭などを燃焼させ、その高熱源を用いて水を蒸気化(相転移)し、その熱エネルギーを用いて生成した蒸気をシリンダーに誘導し、ピストンの往復運動を回転動力に変換するのが一般的なシステム構造であった。産業革命で誕生した工場では、蒸気機関が生成した回転エネルギーが、ベルトや変則機という“硬い/堅い”ハードウェア資源を用いて工場内で稼働する複数の工作機器に伝達された。ここで、人類は、蒸気で羽根車をまわすタービン型の蒸気機関を用いた発電機を発明する。蒸気の移動エネルギーをタービンで回転エネルギーに変換し、電磁誘導を用いて電力を発生させるシステムである。蒸気機関が生成する回転エネルギーを電気エネルギーに変換する技術の発明である。この典型的な現役のシステムが火力及び原子力発電である(水力発電は、蒸気の代わりに水を用いて羽根車をまわしている)。この蒸気機関の変革・進化は、ベルトや変則機のような“硬い/堅い”ハードウェア資源を用いずに、蒸気機関が生成

する回転エネルギーを電気エネルギーに変換し、“柔らかい”ハードウェア資源である銅線を用いて工場内に存在する工作機械のモーターに電気エネルギーを供給し、電気エネルギーが再び電磁誘導を用いたモーターによって回転エネルギーに変換される構造を実現させた。工場内の各工作機械がベルトや変則機というから“硬い/強い”ハードウェア資源から解放され、自由に起動・停止さらに設置場所を移動させること(=トポロジー変更)を容易にした。これが、第2次産業革命のようである。現在でも生き残っている蒸気機関は、ほぼ火力発電・原子力発電であり、さらに、初期の蒸気機関を用いた工場とほぼ同じ構造を持っているのは自動車のみではないだろうか。さらに、人類は、近年、高容量・高効率の蓄電池(近年では無線給電)を発明することで、機械が電力供給インフラというハードウェア資源に電線で接続されていなければならないという制約から機械を解放させたようであるし、発電時にも利用時にも回転エネルギーを経る必要がない技術(例えば、太陽光発電)をたくさん発明した/している。最後に、人類は、デジタルビットの伝送とその処理技術を発明し、電気エネルギーの発見とその利用法を発明した時に匹敵する、エネルギーインフラに関する大革命を経験している。その結果、人類は、同期型の集中クライアントサーバーシステムである電気(electron)の生成(=発電)と伝送システムを、大量の電気エネルギーの長距離の配送信網を必要としない非同期型の分散ピアツーピアシステムに進化させつつある。デジタルビットの塊である“デジタルのモノ”を銅線よりもはるかに軽量で低コストの光ファイバーあるいは質量がゼロの無線を用いて伝送することで、所望する機能(=コト)を実現する物理的ハードウェアを移動させることなく、さらに、その機能を稼働させるために必要な電気エネルギーを伝送することもなく、ローカルの電気エネルギーを用いて、さらに他の目的のために投資されていたかもしれない{コンピューティング}ハードウェア資源を利用させてもらうことで、所望する機能(=コト)を遠隔地に実現・展開可能とすることができる。つまり、最も地球への環境負荷が大きい「物理的な{硬い/

強い}モノ」を移動させることもなく、さらに、次に環境負荷が大きい「{電力}エネルギー」を“柔らかい”ハードウェア資源である銅線を用いて長距離輸送することもなく、「デジタルビットの塊(=デジタルのモノ)」を電力銅線と比較して二桁程度必要コストが小さい光ファイバー(や無線)を用いて長距離移動させることを可能にした。さらに、その「デジタルのモノ」が稼働するために必要な電気エネルギーは、自律分散化が容易ではない化石燃料を用いた蒸気機関を用いた発電設備に由来する遠隔地から輸送されるエネルギーではなく、太陽光発電や風力発電などの自律分散化がより容易なローカルの再生可能エネルギーにすることを可能としつつあるのであるようである。このように、『物理的モノの移動』エネルギー(含電力)の移動』デジタルビット(デジタル化されたモノとコト)の移動』は、社会産業インフラの初期構築だけではなく、その運用とトポロジーの変更などを含む構成変更においても、そのコスト構造に大きな影響を与えることを認識するべきである。

第3章 カーボンクレジット取引

カーボンクレジットとは、「二酸化炭素などの温室効果ガスの排出量削減量を、主に企業間^{*13}で売買可能にする仕組み」であり、特に大企業において、温暖効果ガスの削減が社会的責任と位置づけられた結果利用されるようになってきている。特に、温室効果ガスの排出量の削減が容易ではないエネルギー業界や運輸業界などでカーボンクレジットの購入を行うことで、地球温室効果ガス排出量の削減に貢献していることをアピールする方法として利用されている。

カーボンクレジットの取引としては、(1)ベースライン&クレジット制度(削減量取引)と、(2)キャップ&トレード制度(排出権取引)の2つが存在する。

3.1 ベースライン&クレジット制度(削減量取引)

地球温室効果ガスの「削減量」を取引する制度である。

*13 企業間のみならず、国家間でも可能である。

例えば、ある工場で使用していた機器を、よりエネルギー効率の高い機器に取り換えた時に、前の機器を利用し続けた場合の排出見込み量と、新しい機器に交換した際の排出量の差が「クレジット」となる。クレジットの創出者は、このクレジットを、排出量削減を実現したい事業者に売却することができる。なお、造林・植林のような地球温室効果ガスの「吸収・吸着」を行う事業もクレジットの創出を行うことが可能となっている。

3.2 キャップ&トレード制度(排出権取引)

地球温室効果ガスの「排出権枠」を取引する制度である。

事業所ごとに排出可能な地球温室効果ガスの総量が決められており、自身の対策で排出量の削減ができない場合、不足している排出量の分をクレジットとして、削減量枠に余裕のある事業者から購入する仕組みである。東京都では、2010年度から条例に規定された取り組みとして、大規模事業者に対して温室効果ガスの排出量削減が義務化されたため、キャップ&トレード制度(排出権取引)が利用されるようになった。

3.3 非化石証書

非化石証書は、「非化石の電気」、すなわち、化石燃料ではない、クリーンな電気であるという環境価値を証明する証書である。企業が非化石証書による環境価値を組み込んだ電力プランを契約することで、クリーンな電気を使用していることとすることを可能にする。

非化石証書には、以下の3つの種類が存在する。

(1) FIT非化石証書

国が定めた要件を満足し、FIT制度により固定価格で買い取られている①太陽光、②水力、③風力、④地熱、⑤バイオマスの再生可能エネルギー電源から取り出された環境価値を証書化したもの。

(2) 非FIT非化石証書(再エネ指定あり)

FITで定められた買取期間を過ぎた卒FIT電力や、FITの対象にならない大型水力発電から取り出され

た環境価値を証書化したもの。

(3) 非FIT非化石証書(再エネ指定なし)

化石燃料をエネルギー源としては用いてはいないものの、すなわち、再生可能エネルギーではない原子力発電などから発電された環境価値を証書化したもの。

第4章 カーボン・ニュートラルを実現するスマートシティ

カーボン・ニュートラルに必要なスマートシティの実現には、少なくともDXの推進、すなわち、デジタル化とデジタルの活用を前提とした、システム構造の進化を実現しなければならない。WEF (World Economic Forum) G20 Smart City Alliance^{*14}で議論では、以下を実現しなければならないと提起されている。単純なカーボン・ニュートラル(decarbonize)ではなく、快適で持続的な成長を実現可能なシステムの構築と運用を実現しなければならないとしている。

- (1) Decarbonize
- (2) Democratize
- (3) Digitalize
- (4) Demonstration

特に、(2)Democratizeは、政府やインフラ事業者によるWater-Fall型のPUSHシステムではなく、ユーザー主導のPULL型のAgile型のシステム構築・運用・維持を目指すというマルチステークホルダーによるシステム統治を推奨・提起している。また、3.1.1.2で議論したように、我が国においては、全産業セグメントにおいて、EP-100（エネルギー生産性を2倍に）が実現され、再生可能エネルギーを5倍にすれば、ほぼ、カーボン・ニュートラルが実現可能である。

EP-100の実現には、3.2.2で議論したように、デジタル・ツインの実現と人工知能の活用、すなわち、データ収集とコンピューティングに関する共有空間、すなわちシェ

*14 <https://www.globalsmartcitiesalliance.org/home>

アリング・エコノミーに立脚した実空間と相互作用が可能なデジタル空間を構築・運用・維持・進化させていかなければならない。このデジタル空間を実現・実装するコンピュータネットワークは、大量の電力を必要としており、必要な容量は、今後も増加せざるを得ない。すなわち、コンピュータネットワークとエネルギーシステムは、一体で設計・実装・構築・運用・維持されるインフラストラクチャに進化しなければならない。

最後に(4)については、特にスマートキャンパスやスマートファシリティなど実践的な実証から得られる知識と経験を関係者間で共有することは非常に効果的かつ実践的で重要である。したがって、実際の施設やキャンパスを利用した実践的な実証による先進的な挑戦は非常に重要な活動であり、相互に奨励し、連携する必要がある。特に、地域内だけではなく、地域間、さらに海外組織とのグローバルな実証連携を産学連携で進める体制・インフラを整えるべきである。

4.1 OT(産業)サイバーセキュリティ

(3)Digitizeと(2)Democratizeは、これまでのStove&Pipe型のサイロ構造であった社会・産業システムを、プラットフォーム化すなわちDe-silo-ingすることを含むことになる。データとソフトウェアが、ハードウェア(モノ)からアンバンドルされ、デジタルネットワークを介して、De-Siloされたデジタルビットが自由に移動可能なインフラに進化することを意味する。デジタル空間をプラットフォームとしたシェアリングエコノミーインフラの構築・運営である。De-Silo-ingされる社会インフラは、従来のいわゆるコンピュータばかりではなく、すべての電子デジタルデバイスが国境を越えて接続し、すべてのデジタルデバイス間での自由なデータ交換を可能にするような進化を遂げることになる。すなわち、これまでデジタル空間に接続されることは想定することがなかったデバイス(Things)がインターネットに接続されることを前提にしたサイバーセキュリティを我々は実現しなければならなかったのである。デジタルのコンテンツがいわゆるコンピュータの間で流通・交換されるIT/ICTシステムと呼ばれるネットワークは、組み込み電子機器のような“ネットワークへの接続を前提としていなかった”デジタル機器で構成されるOTシステムがデジタル空間に

Connectされ、さらに各デジタル機器が取得・生成するすべてのデータがネットワークを介してアクセス可能となり、高度なデータ解析を行う人工知能がその高度化を支援・実現するという新しい段階を迎えることにある。経済産業省における「産業サイバーセキュリティ」の活動はそれを象徴した施策である。

地球をとりまくデジタル空間とConnectされたスマートシティでは、多様なコミュニティが形成され、地理的制約(含む国境)を受けることなく、各個人が自身の意志で自由にグローバルなデジタル空間を利用することが実現されなければならない。当初のインターネットのユーザは、互いに信頼することが可能な技術者を中心としていましたが、インターネットの拡大・成長とともに、さまざまな技術者、そして、さまざまな利用者が利用するようになり、残念ながら不適切なインターネットの利用をする個人・組織も出てきている。適切なサイバーセキュリティの実現がインフラに要求されることになる。

一方、デジタル空間が社会・産業の重要基盤であることをほぼすべての政府が認識するようになり、各国政府は、サイバーセキュリティを経済安全保障と国家安全保障にとって戦略的な重要領域と認識するようになった。このような中、我々は、健全なデジタル前提の社会おインフラに必要なサイバーセキュリティ技術の継続的研究開発とその普及、そして適切で健全なデジタルシステムの運用を実現しなければならない。ここで、我々は、サイバーセキュリティは、国が提供してくれるものではなく、自助を第1、共助を第2、そして公助が第3となければ健全なサイバーセキュリティの実現とはならないことを共通認識として確立されなければならないと考える。この順序が守られない時には、不幸なことが起こってしまう確率が大きくなってしまうことは歴史が示している。すなわち、バランスのとれた産官学民での、マルチステークホルダーによる“対等な”連携協調が実現されなければならない。

4.2 新しい三方良し

人類だけではなく地球が生き残るために必要な境界線であるプラネタリー・バウンダリを越えないために、わ

れわれは2050年までにカーボン・ニュートラルを実現しなければならないとされている。カーボン・ニュートラル、地球温室効果ガス排出量の削減だけではなく、サイバーセキュリティ対策は、通常、企業(や個人)において、利益を産まない施策・活動であるので、「利益」を産むための投資ではなく利益を蝕む「コスト」と捉えられるのが一般的である。これらの施策・取り組みを「単独」に捉えるのではなく、社会産業活動の“成長”のための投資であり、利益の獲得というインセンティブが必要である。つまり、ある意味、渋沢栄一氏の「論語と算盤」を実現させなければならない。

利益確保・増大と環境保持・改善を実現させた実例として、環境汚染問題の解決が挙げらよう。環境汚染問題の解決は公益である。当初は、環境汚染対策はコストであるし、生産性・生産量、さらに利益率を押し下げるとして、産業界は消極的だった。しかし、環境汚染問題の解決は、結果的には無駄の削減と新技術の発明・導入で実現され、私益の追求・向上が、公益である環境問題の解決になるというWin-Winの関係になった。カーボン・ニュートラルでも、同じような方向を追求しなければならない。

図21の左側が従来のそれぞれの施策・活動が独立していた構造である。DXは、基本的に①新機能・サービスによる利益率の高い新ビジネスの創成・創造と、②データを用いた効率化(=生産性の向上)を目指すものと考えられていた。しかし、“ちゃんとした”DXを行うと、同時に③カーボン・ニュートラル(=節電・省エネルギー)が実現されるとともに、④堅牢性・BCP向上(含サイバーセキュリティの向上)を実現することができる。右図のように、「オー

ブン・デジタル・プラットフォーム」を構築・利用することで、4つの報酬を得ることが可能となる。明確には意識・認識されてはいないであろうが、たくさんの成功事例が存在している。

例えば、工場における5S(整理、整頓、清掃、清潔、躰)は、品質向上と効率化(無駄の削減)を主目的に据えているが、実際の現場では5Sの実施によって、無駄の削減による省エネルギー、整理整頓された作業環境による事故の削減(=安心・安全)が実現されている。効率化と品質向上は、企業に高い利益と利益率をもたらす。すなわち「算盤」への貢献である。一方、省エネルギーと事故の削減は、企業利益への貢献(=利益率)は大きくないが、地球と従業員に対する重要な社会的責任の遂行、すなわち「道徳」の実現に貢献する。このような観点でEP-100を捉えると、エネルギー効率(Energy Productivity) 100%向上なので、同じ生産量を半分のエネルギーで実現させる①利益の総量と利益率の向上(=算盤)と同時に、②半分のエネルギーで同じ量の生産可能になるので50%の省エネルギーを実現し“自然に/自動的に”地球温暖化対策(=道徳)に貢献することになる。

実際、2018年に国家政策として提唱した「クラウド・バイ・デフォルト」は、①サイロ構造の各省庁のシステムを共有のインフラとして相互接続させ、省庁の壁を越えたデータの自由な利用を実現する。」ことで、新しい社会経済活動を豊かで快適にするサービスを提供することを(第1)の目的としたが、この「共有インフラ」の構築によって、同時に、②システム基盤のサイバーセキュリティ対策は専門家に任せることで、サイバーセキュリティ

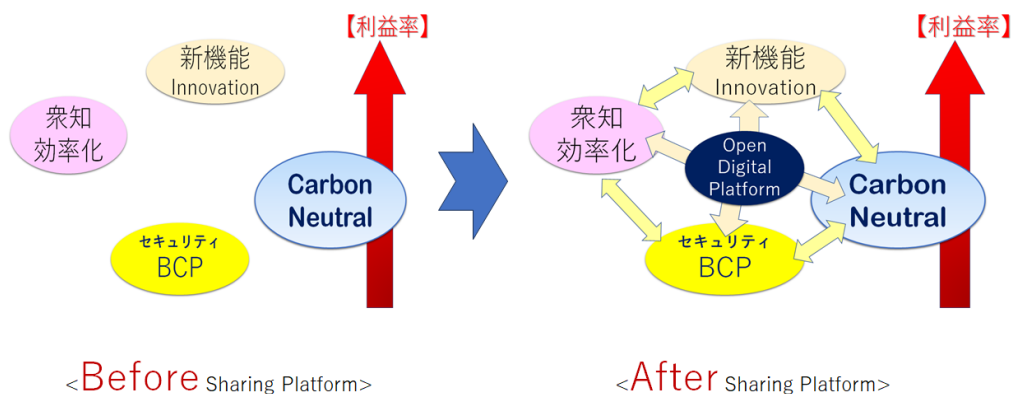


図21 Before and After 3方良し

品質の向上とオンプレ施設の担当人事の固定費削減の実現、③人件費を含むCAPEXとOPEXの削減を所有(BS)から利用(PL)への変容で実現、さらにある意味「Gift(棚から牡丹餅)」として、④自然災害&サイバー攻撃に対するBCPの拡充、⑤地球温暖化への貢献として省エネルギー(地球温室効果ガス排出量の削減)が実現されるというシナリオを描いていた。3方良しならぬ5方良しである。

さらに、マイクロソフト・ジャパンでは、2011年3月の東日本大震災の直前に、首都圏に散在していたオフィスを品川の新本社ビルに集結させる際に、オフィスに存在するサーバーをすべてデータセンターに移設し、クラウドコンピューティング環境に移行させた。このクラウド化によって、発災直後に従業員の95%以上が品川のオフィスに出社できない状況でも業務を継続することに成功した。BCPの実現である。しかし、このクラウド化によって、発災後には、出社することが難しい従業員への対策が可能となり社員の多様性の確保に大きな貢献をすることになるとともに、ローカルなサーバーームを本社オフィスに設置する必要がなくなったため、①オフィスにおけるライフタイムコストの削減(初期入居経費、入居中の高熱費、退去時の現状復帰経費)、②危機管理機能の向上(知的財産の保護、情報漏洩期間の減少)、③エネルギー使用量の削減(低エネルギー効率で稼働するオンプレサーバを高エネルギー効率で稼働するデータセンターに移動)、に貢献することになった。その結果、日本マイクロソフトの本社ビルは、マイクロソフトが全世界で展開するオフィスビルの参照モデルとされた。

第5章 まとめ

本章では、DXによる地球温暖化対応スマートインフラの検討と議論を行った。

- (1)地球温暖化は、エネルギー消費量(含 熱エネルギーの排出量)の削減を資源の生産、利用の両面で実現しなければならない。
- (2)EP-100が重要な施策・活動である。
EP-100を全セグメントで実現するとすれば、必要な

エネルギー量は1/2となる。再生可能エネルギーの総量(一次エネルギー)を現在の5倍にすれば、EP-100の実現によって、必要な二次エネルギー量が1/2 (=50%)となるので、完全に再生可能エネルギーによって、必要な二次エネルギーを確保・提供可能との計算となる。

- (3)スマートシティの設計・実装・運用にあたっては、以下の方針を適用すべき

- ①システムの構築時に新規に必要なモノを削減する

- > リサイクル・サーキュラーエコノミーの適用によって、「新規に必要なモノ」を「過去に製造したモノ」で代替する
- > 「新規に必要なモノ」をシェアリングエコノミーによって削減する

- ②システムの運用時に必要となるエネルギー量を削減する(AS IS)

- > デジタル・ツインの適用と普及が必須となる。

- ③システムの構築・運用に必要なコストを削減する(TO BE)

- > コトとモノのアンバンドルによるモノの選択が可能という前提
- > 通信インフラの利用を前提
『物理的モノの移動』エネルギー(含電力)の移動『デジタルビット(デジタル化されたモノとコト)の移動』であり、デジタルビットの送受信に必要なインフラの敷設・管理・運用コストは、電力送配電のインフラと比較して、二桁以上小さくなる

- ④点(not面)のインフラ構造を目指す

- ⑤OT(産業)サイバーセキュリティの実現

カーボン・ニュートラルを実現するスマートシティの実現には、以下の4つを留意した設計・実装・運用を実現しなければならない。

- (1)Decarbonize
- (2)Democratize
- (3)Digitalize
- (4)Demonstration

最後に、コンピュータネットワークとエネルギーシステムは、一体で設計・実装・構築・運用・維持される「新しいデジタルを前提とした3方良し」による「論語と算盤」を同時に1つのインフラストラクチャで実現するアーキテクチャに進化しなければならない。

【付録1】フィンランドにおけるデータセンター最新状況

日本データセンター協会、北海道ニュートピアデータ研究会の合同で、2023年9月18日～21日にフィンランドの主要なデータセンターの訪問を行った。以下に、概要を取りまとめた。

- (1)フィンランドは、ロシアのウクライナ侵攻以前から、ほぼ100%再生可能エネルギーによる電力供給が実現されていた。既に、Carbon Negativeな状況も発生しており、下げDRに加えて、過剰・余剰電力に対する需要増加(=上げDR)に対するインセンティブも検討されているようである。
- (2)フィンランドの南部にあたる首都ヘルシンキの国営放送局の地下に欧州中西部を結ぶ海底ケーブルが引き込まれIXが形成されている。データセンターとしては、Digita Data Center^{*15}が国営放送局キャンパス内に新設されているが、海底ケーブルの端点とIXは、地上波放送塔の地下の施設に存在している。
- (3)近年のMWクラス以上のデータセンターは、フィンランド政府によるエネルギーの再利用を行う事業者に対する電気税の優遇施策(2021年施行)の実施を利用したデータセンターから排出される熱エネルギー

ギーの地域熱水提供・循環システムとの連携・連結が推進されている。

2.253セント/kWh ⇒ 0.063 セント/kWh

[適用条件]

電力の5MW以上10MWの部分について、ERE(エネルギー再利用効率)=1.00未満、
または、PUE=1.25未満(2027年以降は1.20未満。
(例)

$$\begin{aligned} \text{ERE} &= \{ (\text{全エネルギー}) - (\text{再生可能エネルギー}) / \text{ITエネルギー} \\ &= \{ (15\text{MW}) - (5\text{MW}) \} / 10\text{MW} = 1.00 \end{aligned}$$

なお、EUではデータセンタにおけるエネルギー利用効率についての報告等が義務化される見込み(by改正EED (Energy Efficiency Directive), 2023年10月発効、2024年5月報告)。

- (4)躯体および設備の再利用
ほとんどのデータセンターが、製紙工場跡地や物流倉庫施設を再利用することで、地球温暖化対策のStep3とされている事業実現・推進にあたって必要となる物資等のサプライチェーンに対する温暖化効果ガスの削減を、政策とビジネス両面で主張・PRしている。施設の躯体(セメントや鉄鋼等)や電力設備を再確保・投資する必要がなく、地球温暖化防止への貢献とデータセンターの構築コストの削減を実現するとしている。
- (5)ハイパフォーマンス・コンピューティングに注力
政府のスパコンデータセンター CSC^{*16}をはじめとして、レイテンシ要求が厳しくなく、かつ、高エネルギー密度のサーバ施設実装を必要とするハイパフォーマンス・コンピューティングを意識したデータセンターが増加している。CSCおよびCSCに近隣するLUMI^{*17}では、ほぼ100%水冷式でのサーバ室

*15 <https://www.digita.fi/en/services/data-center/>

*16 <https://www.csc.fi/en/home>

*17 <https://www.csc.fi/en/lumi>

となっている。AtNorth社^{*18}は、CSCおよびVTT^{*19}との連携で、量子コンピュータとの連携も模索している。

*18 <https://www.atnorth.com/>

*19 <https://www.vttresearch.com/en/ourservices/quantum-technology>