

## エネルギーと情報の相関関係

陳 清泉 (香港大学 電機電子工学科, ccchan@eee.hku.hk)

蹇 林旋 (中国科学院 深圳先進技術研究院, ln.jian@siat.ac.cn)

### Correlation between energy and information

Ching Chuen Chan (Department of Electrical and Electronic Engineering, The University of Hong Kong, China)

Linni Jian (Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, China)

#### 要約

18世紀中頃に起こった産業革命によって、地球環境の熱平衡と生態学的な平衡が崩れ始めている。エネルギー消費と温室効果ガスの急激な排出増加は、人間の持続可能な発展を脅かしつつある。その唯一の解決策は、新しいエネルギーの構成を確立することである。しかし、新しいエネルギー構成は、情報という概念との統合なしで効果的に行えない。この問題に関し、エネルギーと情報間の相関関係について提案する。最初に、発展段階の新しいエネルギー構成、すなわちエネルギー源の多様性やエネルギーの流れの特徴について紹介をする。その中で、エネルギー貯蔵の重要な役割について明らかにする。エネルギーを貯蔵することによって、エネルギーシステムの効率、クリーン度、信頼性、安定性を強化することができると考えられる。エネルギー貯蔵システムを効率的に機能させるための重要課題は、情報をエネルギーに融和させることである。本論の目的は、持続可能な発展のためのエネルギーと、情報の相関関係の重要性を明示することである。昨今の大容量のデータを扱う時代において、エネルギーと情報の関係に注意を払わなければならない点を指摘する。

#### キーワード

新しいエネルギー構成、エネルギーと情報のタイムライン、エネルギー貯蔵、エネルギーと情報の融合、地球温暖化

#### 1. はじめに

エネルギーと環境は、人間が生きる上で基礎となる要素である。すべてのエネルギーの源は、太陽であることはよく知られている。人類がこの地球に誕生してからおよそ20万年になり、地球上の環境はいわゆる熱平衡を保ってきた (Sayre, 2010)。熱平衡とは、太陽からのエネルギーが黒体放射によって地球から去る熱と同等であることを意味する。かつては、地球に入ってくるエネルギーと去っていくエネルギーは完全に釣り合いがとれ、それ相応に環境や生態系は良い生態学的な平衡を維持していた。人類が採掘したすべての資源は有機物であり、生物によって分解が可能なので最後には土に戻る。風、水、日光、そして薪のようなものは再生可能エネルギーで、排気ガスがほとんど出ないといってよい。

それにもかかわらず、産業革命が18世紀の中頃に起こった時から、これらのバランスは崩れた (Ashton, 1948)。それは、人間のエネルギー消費と環境関係の歴史にとって重要な分岐点である。蒸気機関の発明で、ライフスタイルは劇的に変わり、手作業は機械と取り替わった。これら機械の大部分は化石エネルギー (例えば石炭、油、天然ガスなど) によって動かされる。化石燃料は、再生不可能な上、燃焼すると二酸化炭素、亜酸化窒素、メタン、その他を含む膨大な量の排気ガスを生じる。一方、これらのガスは生態学的な平衡を崩し、私たちの環境に害を与える。また、これらの排気ガスは温室効果ガスと呼ばれ (Karl and Trenberth, 2003)、大気は赤外線を吸収し、地球からの放熱を妨げるために熱平衡が壊れる。

電化と大量生産の出現によって象徴される2回目の産業革命は、19世紀の後半部から始まった (Smil, 2005)。それによ

て、更なるエネルギー集約型の産業文明の世の中となった。人間は重作業からさらに解放され、人類はより繁栄するようになった。そして、当然のごとく世界人口の爆発的増加につながった。これは20世紀に急上昇するエネルギー消費によってなされ、2000年のエネルギー消費は1900年と比較して16倍に増加した (Nakicenovic et al., 1998)。

化石のエネルギー消費を増やすことは、温室効果ガス排出を増やすことになる。今日、人類の持続可能な発展が脅かされるようになった時から、重大なエネルギー危機と地球温暖化の2つの問題を解決しなければならなくなった。人類が終わりに向かうことを防ぐ唯一の解決は、エネルギー消費のトレンドを変えることである。化石燃料の消費を減らして、再生可能なエネルギーに頼ることを目的とした、エネルギーの新しい製造システムが出来つつあることは喜ばしいことである。しかし、その代表格である太陽電池や風力発電は、不安定であり、不確実性が高いため、現在のパワーシステムとエネルギーシステムに代替することには大きな課題があることは間違いない。エネルギー蓄積法の開発は、これらの難問を解決するために重要な役割を演ずるかもしれない。より重要なことは、エネルギー蓄積装置を効果的に機能させるための重要な点は、情報をエネルギーに融和させることである。本論文の目的は、人類の道を持続可能な発展に導くために、エネルギーと情報間の相関関係を考慮することの重要性を指し示すことにある。

#### 2. 新しいエネルギー構成の特徴

エネルギー消費は過去200年の間で非常に増加した。将来、更に多くのエネルギーが消費されることと予測され、人口の増加は重要な要因の一つである。国連人口部 (United Nations, 2010) の報告によると、世界人口は1年につき平均0.9%増加し、2009年の68億人から2035年には86億人になると予測さ

れている。また、国際エネルギー機関 (IEA) の報告によると、これによって、世界的なエネルギー需要が40%増加することが予測され、同時に石油換算で2009年に12132 Mtoeから2034年には16961 Mtoeになり、最近の慎重な予測でも、エネルギー関連の温室効果ガスの排出量が、新しい政策のシナリオでは33%増加する。それは、3.5℃以上の長期の世界的な温度上昇に至る可能性がある。最大2mの海面上昇は、人間の居住場所を変え、干ばつ、洪水、熱波などの極端な気候の原因となる。これらは、食料生産、人間の病気や死亡率に影響を及ぼすだろう (International Energy Agency, 2011)。

2011 ダーバン世界気候会議で、次のことが合意された。人類の持続的発展を維持するため、地球の平均気温の上昇を2℃未満に保つ必要があり、そのためにIEAは「450シナリオ」を提案した (International Energy Agency, 2010)。主な提案は、化石燃料の占める割合を2009年の33%から2035年の25%に、またオイルの割合を2009年の27%から2035年の16%に減らし、再生可能エネルギーの割合を2009年の1%から2035年に8%増やすことであった。これらの数値を達成するためには、将来のエネルギー構造は、エネルギー源の多様性、ならびにエネルギーの流れに多様性をもたせなければならない。図1は、「450シナリオ」の下に、2009年と2035年における世界の一次エネルギー需要のシェアを示している。今日、我々は主に石炭、石油、天然ガスなどの環境に良くないエネルギー源を主に使用しているが、将来的にはクリーンなエネルギー源の割合は劇的に上がる可能性がある。図2に示すように、図1に示す「他の自然エネルギー」としては、波力エネルギー、風力エネルギー、太陽エネルギー、地熱エネルギー、

現代のバイオマスエネルギー (Goldemberg and Coelho, 2004) が挙げられる。再生可能エネルギーは、エネルギー源の多様性を増やすことが分かる。それは単に「一つのかごにすべての卵を入れない」ということではなく、悪影響を与えるエネルギー源の増加を弱めることが重要なのである。

エネルギーの多様性は、将来の新エネルギー構造に関する別の重要なポイントである。今日では、電力が最も重要な二次エネルギーである。図2に示すように、すべての主要な再生可能エネルギーが電気に変換・送信され、電力網によって分配される。しかしながら、これらの再生可能エネルギーのために、他の流路があってもよい。図3に示すように、再生可能エネルギーは、水を電気分解して水素を生成するために使用することができる。水素は、燃料電池電気自動車や燃料電池容器 (Singhal, 2000) などの輸送のための電力を提供し、重要なエネルギー源になる可能性がある。それは、最大限に大量の電池を使用することにより、分散電力網 (Teodorescu et al., 2006) に直接電力を供給することができる。燃料電池電気自動車は、駐車中に他のものへ電力を供給することができる。スマートグリッド (Li et al., 2010) のスキーム内で双方向の電力の流れが可能となれば、消費者が電力網に対し、自宅の屋上太陽光発電パネルや庭の風力タービンから変換された再生可能な電力を販売することができる。

要約すると、エネルギーの持続性、およびエネルギーの流れの多様性は、エネルギー利用の全体的な効率を最大化に向上させることができる。しかしながら、これらは既存の電力網に深刻な問題を引き起こす可能性がある。従来の電源システムは、発電および電力需要の両方のバランスで決定され、従来の火力発電所の発電量によって安定的に制御が可能である。従って、発電負荷に応じた電力供給が可能である。再生可能エネルギーと、新しい電気的負荷であるプラグイン電気自動車を加えることで (Kiviluoma and Meibom, 2011)、発電側と力の需要側はよりデリケートな様相を呈し、その関係は確率的になる。すなわち、そのバランスは天候の条件によって決定されるため、再生可能エネルギー発電では、その安定的供給が極めて難しくなる。発電と電力負荷との間の動的なバランスを達成するためには、電気エネルギーの大量貯蔵しかないということになる。

### 3. 新エネルギー構造におけるエネルギー貯蔵の役割

電機エネルギー貯蔵には様々な方法がある。揚水方式およびバッテリーのエネルギー貯蔵は、もっとも一般的である。揚水方式は、低い標高から高い標高の貯水池に水を揚水することによってエネルギーを蓄える。タービンを通り、水が低いところに戻る際に解放されると電力が再生できる。揚水発電は、現在利用可能な電気エネルギー・ストレージにとって、最大の電力量をもっている (Levine, 2007)。

電池によるエネルギー貯蔵は、一旦、化学エネルギーに変換されて動作する。例えば、鉛酸蓄電池、ニッケルカドミウム (ニッカド)、ニッケル水素 (Ni-MH)、リチウムイオン (Li-ion)、ナトリウム/硫黄 (Na/S)、亜鉛/臭素 (Zn/Br) などのさまざまな種類がある。最近開発されたリチウムチタン酸化物 (LTO) 電池は、有望なエネルギー貯蔵方式である。つま

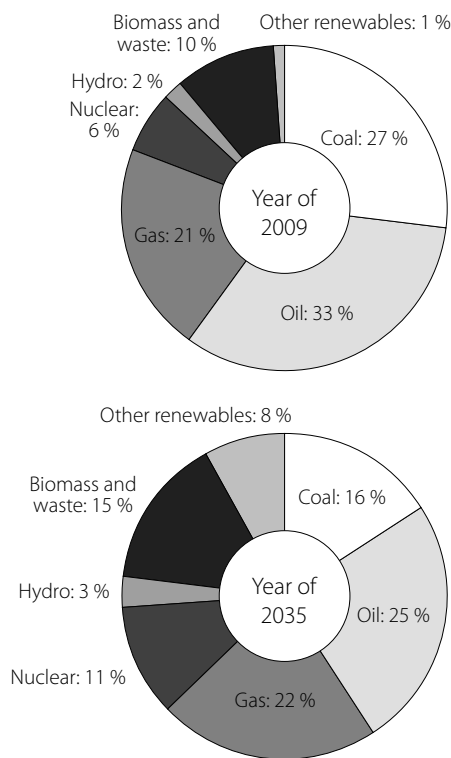


図1：世界の一次エネルギー源

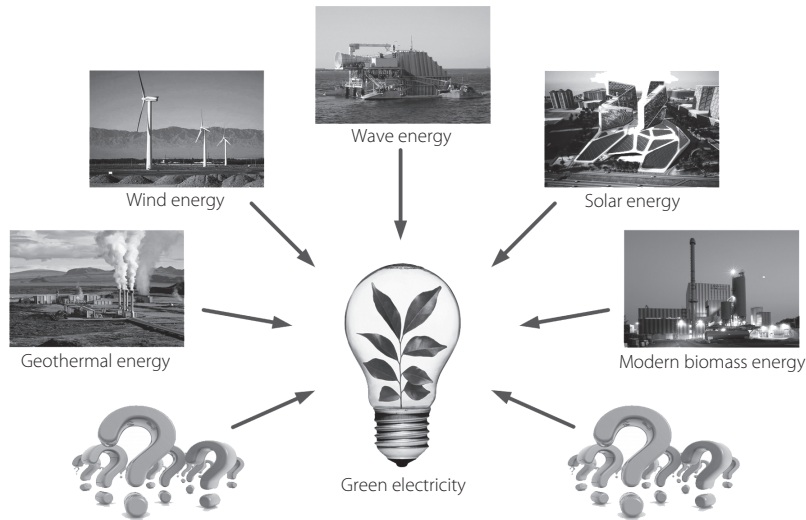


図2：典型的な再生可能エネルギー源

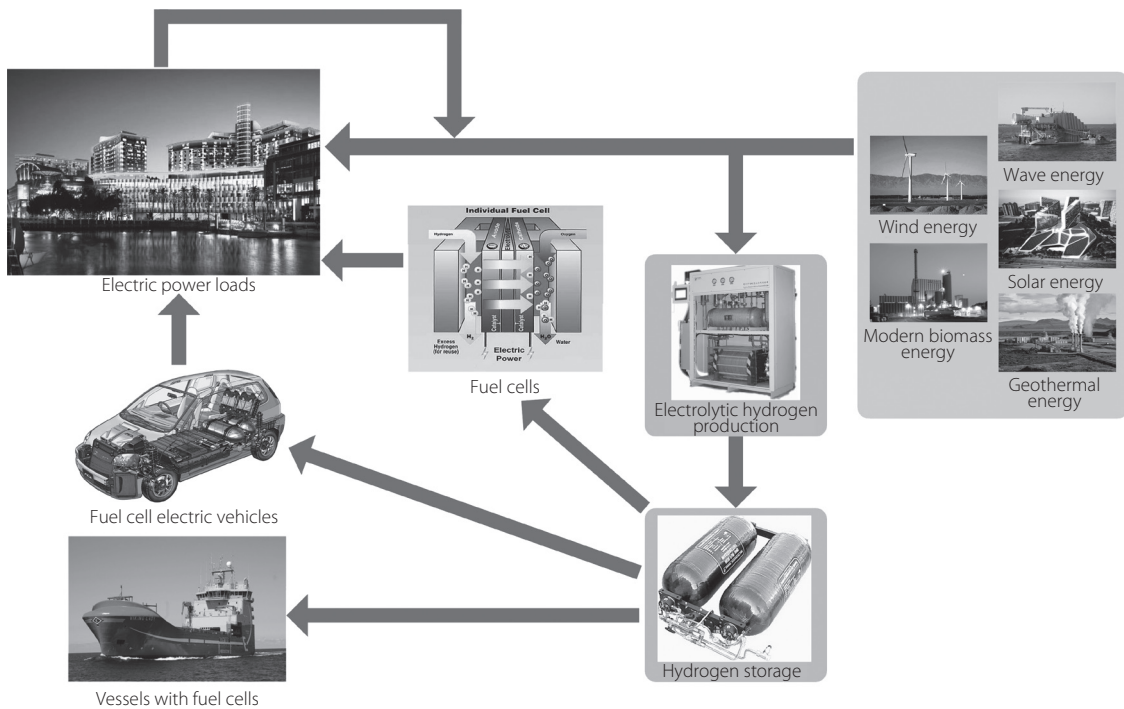


図3：エネルギー流の多様性

り、従来のリン酸鉄リチウム又はリチウムマグネシウム電池に比べて、LTO電池が数十倍高いサイクル寿命および充放電速度を有するためである。LTOエネルギー貯蔵システムは、電気エネルギー貯蔵する機能だけではなく、高速応答性を活かした電力システムの電圧制御と周波数制御を行うことに利用できる。揚水発電方式に比べ、LTOエネルギー貯蔵システムの初期投資コストは高いが、ポンプ記憶方式、変換効率と比較して年間の使用時間当たりのコストおよび建設コストはすべて低い。その上、揚水発電は地理的条件に制限される。LTOのエネルギー貯蔵は、地理的条件の制約から、電力会社だけが出来るシステムであるが、工場やビルの電気貯蔵にも適用可能である (Altairnano, 2012)。キャパシターによる貯蔵は、

充電として電気エネルギーを貯蔵する。電荷は、典型的には電子を担持する電極に堆積される。電荷分離のメカニズムを改善することにより、ウルトラキャパシターは、従来のコンデンサーよりも大量に電気エネルギーを貯蔵することができる。圧縮空気エネルギー貯蔵は、圧縮された空気を放出することにより、タービン発電機を駆動させ、電気エネルギーに再変換する。フライホイールストレージは、高速回転するフライホイールの運動エネルギーに電気エネルギーを変換する。貯えられた運動エネルギーが、フライホイールにつながった発電機によって減速され、電気エネルギーに変換される。超電導エネルギー貯蔵では、超電導コイルに流れる直流電流により磁場として電気エネルギーを貯える。超伝導材料の抵

抗がゼロになるので、コイルに流す直流電流を非常に大きくすることができて減衰しない。熱エネルギー貯蔵は、一般的に高温または低温での熱エネルギーの貯蔵として定義することができる。それには3つの主要なモードである、顕熱貯蔵、潜熱蓄熱と結合エネルギー貯蔵 (Ercan, 2006) を含み、顕熱貯蔵だけは相変化を伴わない。

新しいエネルギー構造におけるエネルギー貯蔵の重要な役割には、再生可能エネルギーの統合、電気エネルギー供給、補助的なサービス、送電、および顧客アプリケーションなど5つの側面がある (Eyer, 2012)。再生可能エネルギーの統合について言えば、エネルギー貯蔵は、タイムシフト再生可能エネルギーの供給と企業自体の再生可能エネルギー容量に適用することができる。天候の影響を大きく受けるので、再生可能エネルギーは、断続的な電気エネルギーサプライヤーであるといえる。エネルギー貯蔵は、その不確定さを低減し、それらの制御性を改善することにより、電力網に統合することができる。電気エネルギーの供給には、エネルギー貯蔵がタイムシフト電気エネルギーとして適用されることが必要であるが、既存の電気供給能力のマージンを知らねばならない。オフピーク時の電力は、エネルギー貯蔵プラントに充電することによって、より高い価格でピーク時に販売することができるようになる。電気エネルギーのタイムシフトは、電気供給能力のマージンを大きくすることができ、発電容量の新規投資を追加する必要性が低減される。補助的なサービスとしては、負荷追従、エリアレギュレーション、電圧制御やSOCKSが含まれている。もちろん、理想的には発電は電力負荷に従うべきである。エネルギー貯蔵は通常、発電設備より速く応答するので、より効果的かつ効率的に負荷追従する余裕を持たせることができる。電力供給と瞬時電力の違いを調整する地域内制御が必要となり (Hirst and Kirby, 2000)、エネルギー貯蔵システムによって、誘導負荷による電圧上昇や力率安定に対して効果をあげることができる (Hirst and Kirby, 1997)。電力伝送の観点からは、エネルギー貯蔵によって、送電システムの余力を大きくすることに貢献できる。鉛酸電池のようなエネルギー貯蔵設備は、電力網末端の小型変電所に取り付けられ、電力供給安定に役立ってきた。末端電力ユーザーにとっても、時間別のコストに対する効果低減や電力安定のために、エネルギー貯蔵は役立っている。末端ユーザーは、電気代が安い時間帯にエネルギーを充電しておき、ピーク時にこれを使用することによって、全体的なコスト削減を行うことができる。また、突然の停電に対し、その障害を防止するためにも、電力エネルギーの貯蔵は有効な手段である。エネルギー貯蔵は、周波数安定のための電圧保持を可能にし、力率を改善し、高調波を抑制することで、電力の品質向上自体にも役立つ。

要約すると、エネルギー貯蔵は、エネルギーシステム全体の効率向上、環境性、信頼性および安定性を高めることができる。既存のエネルギーシステムは、エネルギー貯蔵を導入することによって、技術者哲学にかなうようにすべきである。その中核をなすのは、エネルギーシステム全体の適切な統合である。そのシステム設計の原則は、次の6点に要約することができる。

- 目的は何であるかについて、議論、明確化、再考、実行をすべきである：それぞれの特性を生かすことで、目的の達成がなされる。必要条件は、それらがどのようにして評価されるかにかかっている。必要性は、テクノロジーと予算の制約を反映している。
- 大所高所で考える：全体は部分の総和よりも大きく、各部分は全体の部分よりも大きい。
- 創造的である：木よりも木材をみる。
- 正しい手順に従う：分割し統合する。
- 人を考慮する：人間は過ちを犯すものだ。人間工学、倫理・信用が大事である。
- プロジェクトとそれに関係する人々を考慮してマネジメントを行う：みんなは一人のために、一人はみんなのために。

#### 4. エネルギーと情報間の相関

エネルギーと情報の統合は不可欠である (Chan, 2013)。自然や社会生活において、このような統合はしばしばみられる事象である。図4に示すように、循環器系および神経系の正常な機能や活動において、このような統合がなされている。生物は神経系の情報を送信しながら、循環系は血液によって運ばれるエネルギーの流れを伝送している。図5では、金融業界における通貨の流れが、常に金融ニュースの流れを伴っ

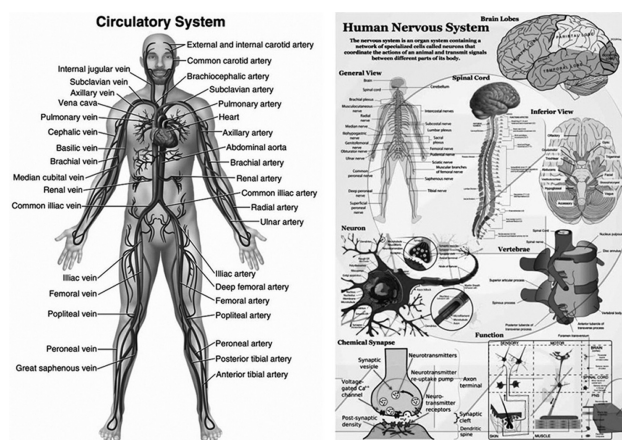


図4：人間体内の循環系と神経系の共存



図5：通貨の流れと新しい金融業界の統合

ていることを示している。通貨は、エネルギーや資源を拠り所とする富を表している。富を得るには、誰もニュースや情報を無視することはできないのである。

図6～図10から、エネルギーと以下のような情報との間の相関關係についてまとめることができる。最初の産業革命(19世紀)では、主な情報技術が電信だったとき、エネルギー源は石炭であった。次の産業革命(20世紀)では、主な情報媒体はラジオやテレビで、エネルギー源は石油とガスであった。三度目の産業革命(21世紀)では、主な情報技術は、インターネット、クラウドコンピューティング、そして大容量データシステムであり、主なエネルギー源は再生可能エネルギーに向けなければならない。したがって、エネルギーと情報の進化は常に手を取り合っており、エネルギーと情報との間には相関關係が不可欠である。

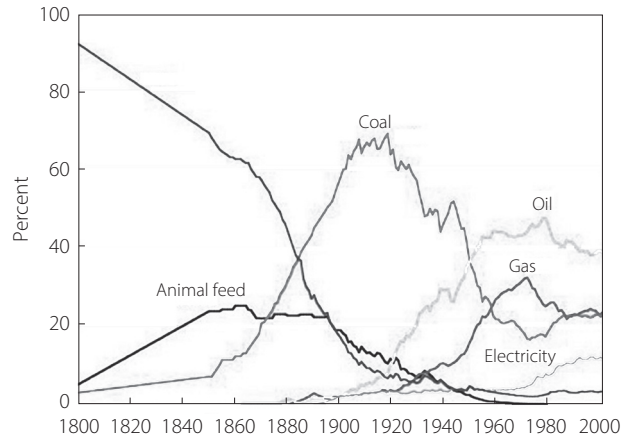


図7：エネルギー源の比率

Source: [http://www.eoearth.org/article/Energy\\_transitions\\_past\\_and\\_future](http://www.eoearth.org/article/Energy_transitions_past_and_future)

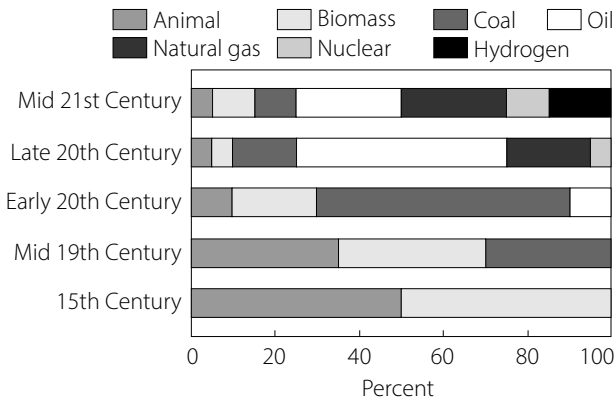


図6：15世紀以降のエネルギー源

Source: <http://people.hofstra.edu/geotrans/eng/ch8en/conc8en/evolenergy.html>

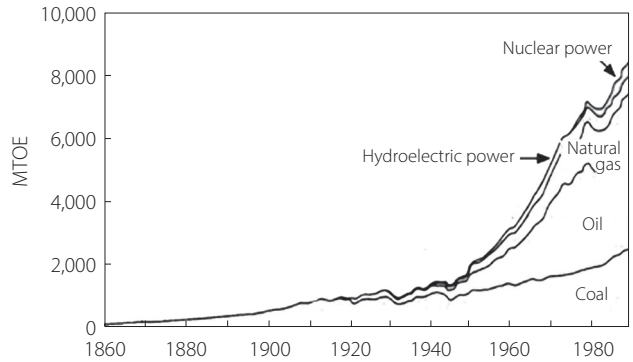


図8：エネルギー利用の歴史

Source: Agency of natural resources and energy, a brief history of energy strategies and outlook for the future

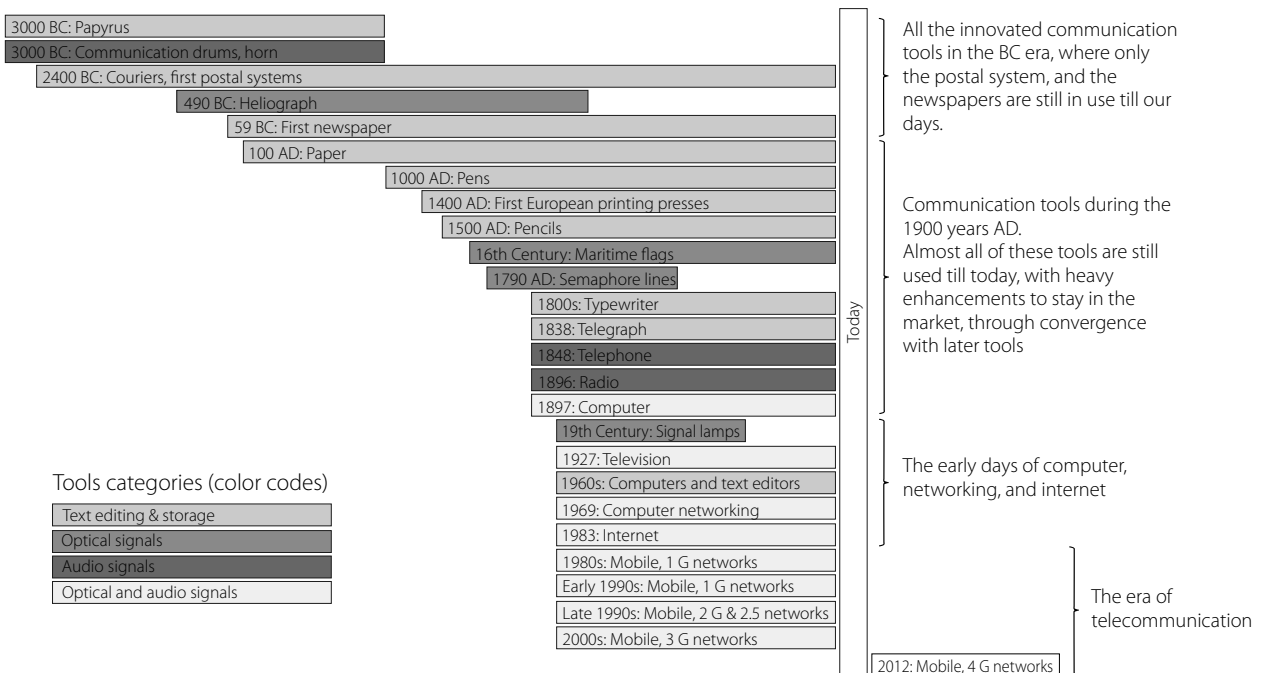


図9：コミュニケーションツールの歴史

Sources: 1. Wikipedia; History of telecommunication; 2. Book; Mobile marketing, by Alex Michael & Ben Sater

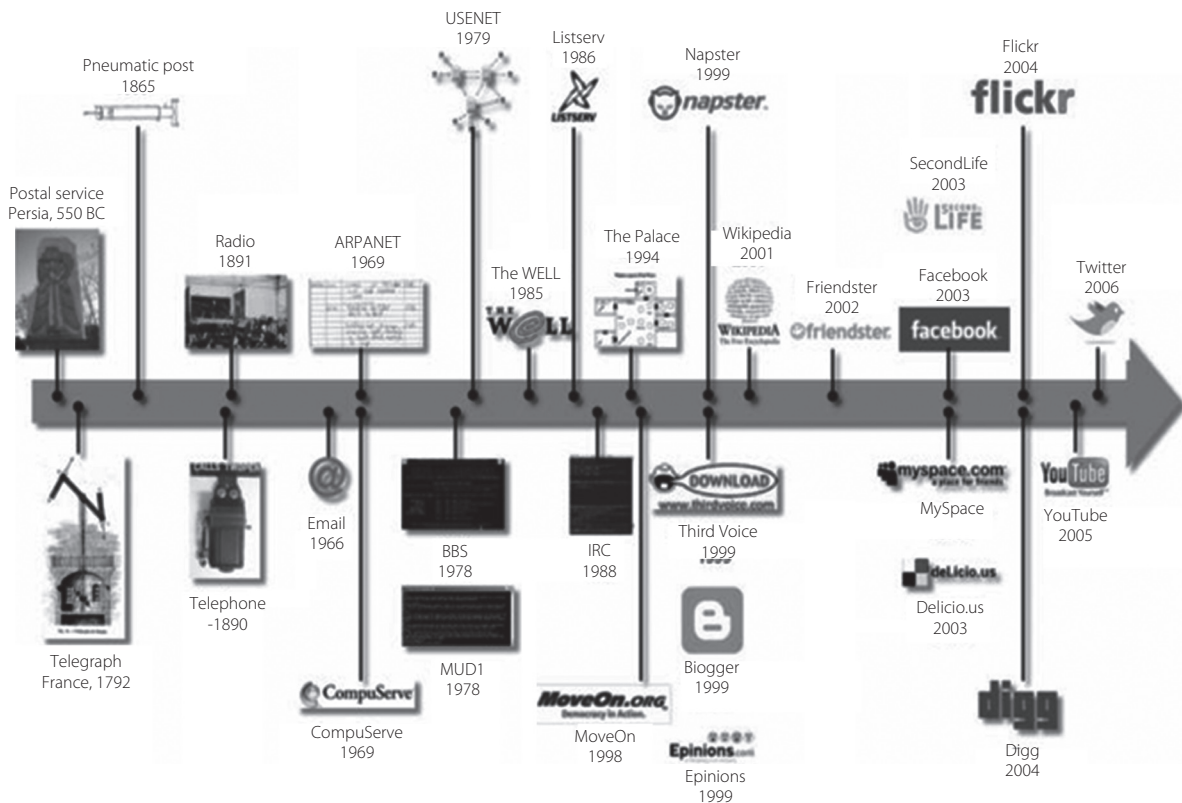


図10：通信媒体の歴史

Source: <http://www.crexendoseo.com/blog/post/2728568>

図11に示すように、今日、新生のスマートグリッドで最も重要な機能は、エネルギーと情報の流れの統合にある。スマートグリッドは、双方向のエネルギーの流れを可能にし、これは分散型再生可能エネルギーの利用、スマート充電 (Faruqui et al., 2011) あるいはV2G (Vehicle-to-Grid) 技術 (Guille and Gross, 2009) にとっての鍵となるものである。

エネルギー貯蔵を追加すると、将来の新エネルギーシステムで直面する課題に不可欠な解決手段となる。さらに重要なことは、エネルギー貯蔵システムが有効に機能するための重要な問題は、エネルギーに情報を統合することである。これは一連の次の課題にも関連している：①エネルギー蓄積装置を配備する方法、②エネルギー貯蔵ネットワークを設計する方法、③どのようなエネルギー保管が最もふさわしいか、④特定のアプリケーションにはどれくらいの規模のエネルギー貯蔵が必要か、⑤エネルギー蓄積装置に充電するときは、⑥どれほどのエネルギーを、どれほど一定の時間枠で蓄積されるべきか、⑦エネルギーの解放時にエネルギー蓄積装置に記憶されているか、⑧どのような速度で蓄積されたエネルギーが放出されるべきか、⑨利益を作る方法、⑩投資とメリットは何か。図12に示すように、問題は3つのレベルから考えることができる。最重要レベルの問題は、基本的なビジネスモデルはどうあるべきかである。この質問は、既存の電力網と既存のエネルギー供給の状況、政府の政策などの多くの問題を含んでいる。更なる質問としては、問題をモデル化し、定式化する方法についてである。コントロールオブジェクトとは何か、主要な変数は何か、制約は何か、制御戦略は何かで

ある。エネルギーストレージ・ネットワークを構築するには、どのようにセンサーを配置し、通信ネットワークにつなぐか、コンピューティング・リソースを設定する方法は何かなどの課題がある。図13は、人間の行動、エネルギーと情報の間での相互関係を示している。

情報とエネルギー間の任意の物理的に固有の相関関係があるかどうか、このすべての背後に深い問題があるかもしれない。最も制限された技術的な感覚である情報は、メッセージと解釈されることができる一連のシンボルである。物理学では、情報は明確に定義されている。

1867年のマクスウェルの悪魔による初期の実験で、思考実験が行われている (Radhakrishnamurty, 2010)。この実験では、情報および他の物理的特性、エントロピーとの間の直接的な関係が示されている。結果は、システムのエントロピーを増大させることなく情報を失うことは不可能であるということである。実際的な条件には、これは熱を発生させることをしばしば意味する。もう一つの哲学的な結果では、情報はエネルギーと同様に可逆だと考えることができる。したがって、論理ゲートの研究は、NOTゲートより高いANDゲートによって放出される熱エネルギーの理論的境界である (情報はANDゲートで失われ、NOTゲートに単純変換されるため)。物理情報は、量子コンピュータの理論において特に重要である。

2003年にJ. D. Bekensteinは、物理学の成長は、情報と物理的な世界を定義することであったと主張した (Bekenstein, 2003)。素粒子の場所、量子の混乱現象がないことも含めて、分離または光の速さの関連に関係なく、互いに伝達すること

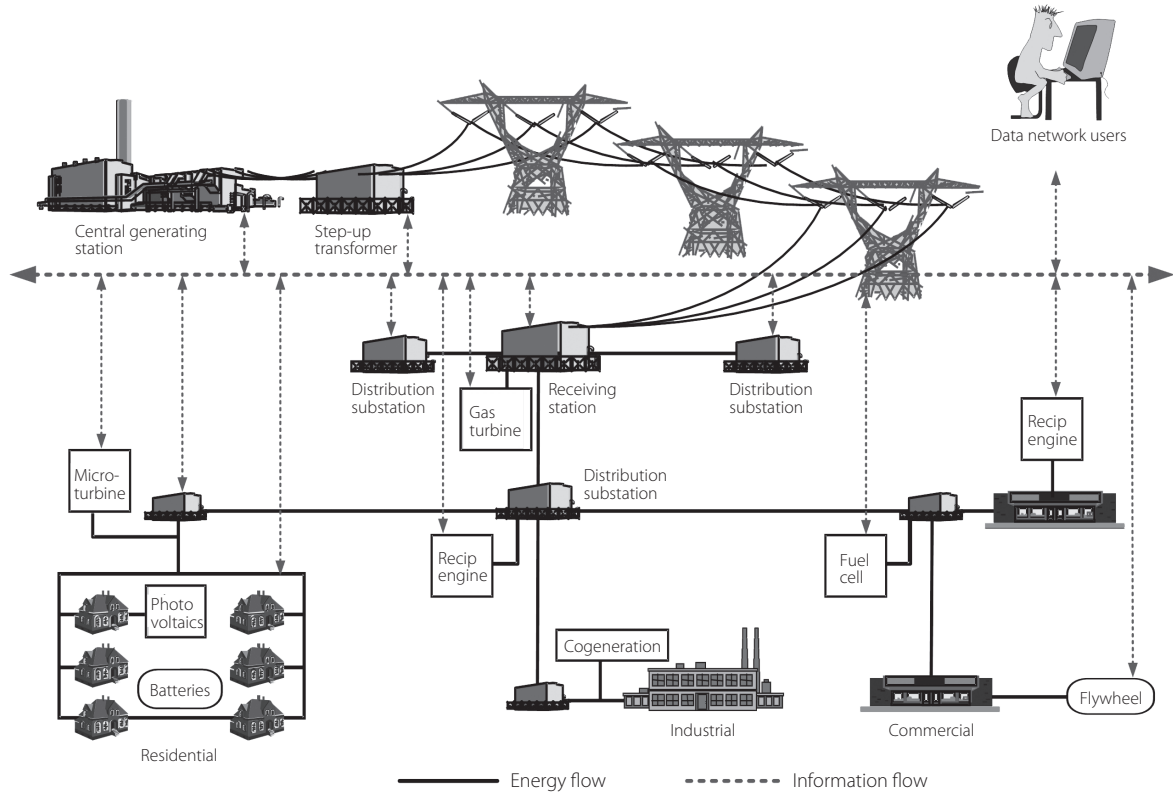


図 11：スマートグリッドのエネルギーと情報の流れの統合

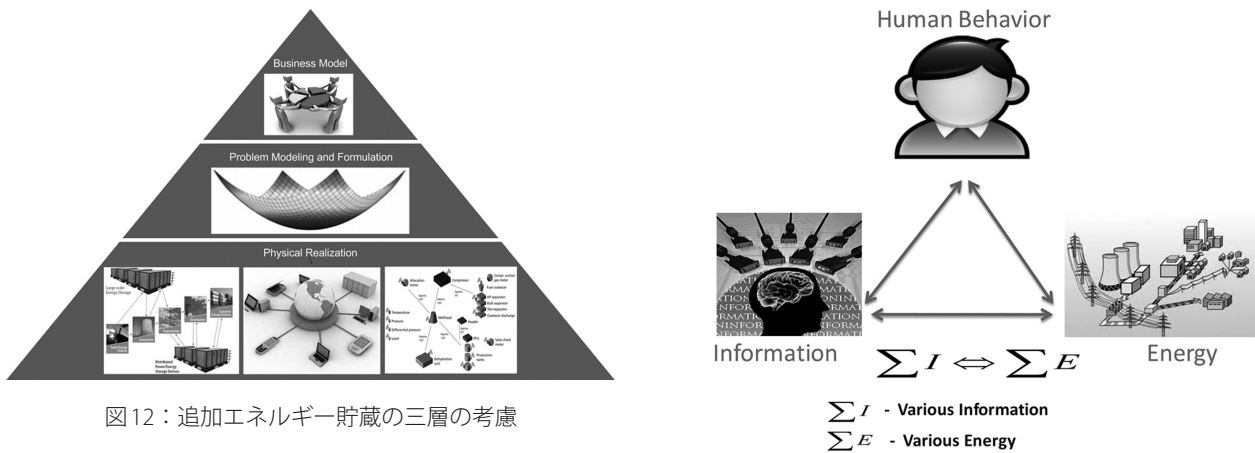


図 12：追加エネルギー貯蔵の三層の考慮

が可能である。たとえ情報が間接的に送られるとしても、情報そのものは光より速く伝わるできない。これは、粒子がそれらが運ぶ情報によって、それ以外の方法で接続されていない場合でも、物理的に別の「もつれ」の関係を有する粒子を観察する時、すべての試みは鈍化しているという事実につながる可能性がある。

2010年には、マクスウェルの悪魔は、実験的に日本の学者によって確認されている。これは、緩衝液浴中のナノスケールポリスチレンビーズの動きに関する情報が、実際にそのポテンシャルエネルギーに変換できることを示している (Toyabe et al., 2010)。情報とエネルギーの相関関係のモデルを定式化するとき、我々はこの点を考慮する必要がある。

エネルギーの輸送と情報は、相関関係をもっている。エネルギーと情報の両方が持続可能でなければならない。情報

図 13：人間の行動、エネルギーと情報の間での相互関係

通信技術 (ICT) のエネルギーの持続性に貢献するであろうし、ICTを用いるべきである。ICTは間違いなく持続可能なエネルギーに関与しており、例えばICTのエネルギー効率と環境への影響に関係する。著者らは、情報とエネルギー間の相関関係は、式 (1) のように、情報の和： $\sum I$ 、エネルギーの和： $\sum E$ によって表されることができると提案する。

$$\sum I \leftrightarrow \sum E \tag{1}$$

上記式 (1) の表現は、エネルギーと情報を統合するための一般的なガイドラインを提供する。更なる具体的表現は、異なるアプリケーションごとに行うことができる。

## 5. まとめ

人類の持続可能な発展を維持するための唯一の方法は、エネルギー消費モードを変更し、エネルギーシステムの新しい構造を構築することにある。エネルギーの新しい構造は、エネルギー源とエネルギー流れの両方の多様性を含んでいる。エネルギー源の多様性は、エネルギー消費の持続性の向上を助け、エネルギーの流れの多様性は、エネルギー利用の全体的な効率を最大化することを目的とする。エネルギー貯蔵を追加すると、電源と将来のエネルギーシステムの電力需要の不確実性に起因する問題の解決には不可欠である。新たな新エネルギー構造におけるエネルギー貯蔵の役割は、一般に再生可能エネルギーの統合、電気エネルギー供給、補助的なサービス、電力伝送、および顧客アプリケーションを含む5つの側面にある。エネルギー貯蔵システムを有効に機能させるために、重要な問題はエネルギーに情報を統合することである。エネルギーと情報との間に相関関係を考えることの重要性として、持続可能なエネルギーシステムの開発に向けた努力のあらゆる側面に注意を払わなければならない。エネルギーと情報との間の相関関係を  $\Sigma I \leftrightarrow \Sigma E$  で定義したが、これはエネルギーと情報の統合のための一般的なガイドラインを定めているのである。

## 謝辞

著者は、ドイツ・アドバンス・サステナビリティ研究所の上級研究員および研究員の方に、2012年7月から10月の間ご指導を頂きましたこと感謝申し上げます。

なお、本論は、*Journal of Asian Electric Vehicles* の第11巻1号(2013年)に掲載されたものを翻訳したものである。

## 引用文献

- Altairnano (2012). *Introducing the Power-intensive Alti-Ess Suite*.
- Ashton, T. S. (1948). *The Industrial Revolution (1760-1830)*. Oxford University Press.
- Bekenstein, J. D. (2003). Information in the holographic universe. *Scientific American*, 2003.
- Chan, C. C. (2013). The rise and fall of electric vehicles in 1828-1932: Lessons learned. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 101, No. 1, 206-212.
- Ercan, A. O. (2006). *Storage of Thermal Energy. Energy Storage Systems*, Eolss Publishers.
- Eyer, J. (2012). *Energy Storage for the Electricity Grid: Benefits and Market Potential Assessment Guide*. Sandia National Laboratories.
- Faruqui, A., Hledik, R., Levy, A. and Madian, A. (2011). *Will Smart Prices Induce Smart Charging of Electric Vehicles?*. The Brattle Group.
- Guille, C. and Gross, G. (2009). A conceptual framework for the vehicle-to-grid implementation. *Energy Policy*, Vol. 37, No. 11, 4379-4390.
- Goldemberg, J. and Coelho, S. T. (2004). Renewable energy-traditional biomass vs. modern biomass. *Energy Policy*, Vol.

- 32, 711-714.
- Hirst, E. and Kirby, B. (2000). *What is the Correct Time-averaging Period for the Regulation Ancillary Service?*. Oak Ridge National Laboratory.
- Hirst, E. and Kirby, B. (1997). *Ancillary Service Details: Voltage Control*. Oak Ridge National Laboratory.
- International Energy Agency (2011). *World Energy Outlook 2011*.
- International Energy Agency (2010). *World Energy Outlook 2010*.
- Karl, T. and Trenberth, K. (2003). Modern global climate change. *Science*, 302, 1719-23.
- Kiviluoma, J. and Meibom, P. (2011). Methodology for modeling plug-in electric vehicles in the power system and cost estimates for a system with either smart or dumb electric vehicles. *Energy*, Vol. 6, No. 3, 1758-1767.
- Levine, J. G. (2007). Pumped hydroelectric energy storage and spatial diversity of wind resources as methods of improving utilization of renewable energy sources. *Dissertation of University of Colorado*.
- Li, F., Qiao, W., Sun, H., Wan, H., Wang, J., Xia, Y., Xu, Z. and Zhang, P. (2010). Smart transmission grid: Vision and framework. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 2, 168-177.
- Nakicenovic, N., Grübler, A. and McDonald, A. (1998). *Global Energy Perspectives*. Cambridge University Press.
- Sayre, K. M. (2010). *Unearthed, the Economic Roots of our Environmental Crisis*. University of Notre Dame Press.
- Singhal, S. C. (2000). Advances in solid oxide fuel cell technology. *Solid State Ionics*, Vol. 135, 305-313.
- Smil, V. (2005). *Creating the Twentieth Century: Technical Innovations of 1867-1914 and their Lasting impact*. Oxford University Press.
- Teodorescu, R., Liserre, M. and Timbus, A. V. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 5, 1398-1409.
- Toyabe, S., Sagawa, T., Ueda, M., Muneyuki, E. and Sano, M. (2010). Experimental demonstration of information-to-energy conversion and validation of the generalized Jarzynski equality. *Nature Physics*, No. 6, 988-992.
- Radhakrishnamurty, P. (2010). Maxwell's demon and the second law of thermodynamics. *Resonance*, 548-560.
- United Nations. (2010). *World Population Prospects, the 2010 revision*.

(受稿：2013年3月1日)