

## [招待講演] 持続可能な未来とパワーエレクトロニクス

大村 一郎

九州工業大学大学院生命体工学研究科 〒808-0196 北九州市若松区ひびきの 2-4

E-mail: omura@ele.kyutech.ac.jp

あらまし 2050年CO<sub>2</sub>排出実質ゼロとパワーエレクトロニクス技術が果たす役割について述べます。IPCC, IEA等のデータから2030年目標を確認し、経済成長とCO<sub>2</sub>排出量削減のギャップの分析を行い、パワーエレクトロニクスの役割として、電力利用効率、電力化、電力のフレキシビリティの観点から考えます。

キーワード CO<sub>2</sub>排出実質ゼロ, パワーエレクトロニクス, 経済成長, 電力利用効率

### Power Electronics for a Future Sustainable Society

Ichiro Omura

† Graduate School of Life Science and Systems Engineering, Kyushu Institute of Technology 2-4 Hibikino, Wakamatsu-ku Kitakyushu-shi Fukuoka, 808-0196

E-mail: omura@ele.kyutech.ac.jp

**Abstract** This presentation discusses the role of power electronics technology in achieving virtually zero CO<sub>2</sub> emissions in 2050, confirming the 2030 target based on data from IPCC, IEA, etc., analyzing the gap between economic growth and CO<sub>2</sub> emissions reduction, and considering the role of power electronics in terms of power use efficiency, power conversion, and power flexibility. The role of power electronics will be discussed from the viewpoint of power use efficiency, power conversion, and power flexibility.

**Keywords** Net zero CO<sub>2</sub> emissions, power electronics, economic growth, energy efficiency

#### 1. 概要

##### 1.1. 成長の限界?

1972年にローマクラブが発表した有名な報告書「成長の限界」から50年が経過し、CO<sub>2</sub>排出量の観点から報告書が予測したように「有限なサイズの地球」を認識せざるを得ない状況になっている([1])。報告書発表当時、地球上の人口は36億人、GDPは3兆8000億ドルだったが、現在はそれぞれ78億人、86兆ドル(1972年のGDPは2015年の価格に直すと19兆9000億ドル)[2]である。また、1972年から現在までの間に、地球の表面温度が約0.7°C上昇し([3])、気候変動に起因すると考えられる深刻な自然災害が発生している。例えば、日本では、日降水量400mm以上の日数がこの35年間で2.7倍にもなっている([4])。近年、現在の経済システムがこのような問題に対して適切でないという意見もあり、日本では斉藤教授のベストセラーをきっかけに「脱成長」の考え方[5, 6]が注目されている([7])。

もちろん、現在の社会成長を前提とした考え方で対応できると考えるべきであるが、そのためには、ネット・ゼロ・エミッション実現のシナリオにおいて、経済成長は重要なパラメータである([8])。世界のGDPは1998年から2018年までの20年間で85%増加しており、これは年平均3.1% (2015年米ドル換算、世界銀行)の成長率に相当する。そして、人口も同期間に

27.7%増加している。CO<sub>2</sub>の観点からの持続可能性の目標は、GDPの成長を維持しながら排出量を大幅に削減することであり、そうでなければ経済成長か気候の安定、あるいはその両方が持続不可能となる。よく知られているように、GDPとCO<sub>2</sub>排出量には歴史的に強い相関があり、この問題への対応は困難である。

##### 1.2. NDC:各国・地域のGHG排出削減目標

2021年にイギリスのグラスゴーで開催されたCOP26に合わせて、パリ協定の締約国(国・地域)は、気候変動枠組条約(UNFCCC)に国別貢献(NDC、各国のGHG排出量削減努力の具体化)[9]を提出した。192の条約締約国がNDCsを提出したが、2030年の目標は表1に示すとおりである。多くの締約国がこの問題に対処することを表明し、GHGあるいはCO<sub>2</sub>排出量を約半分に削減することを約束した。また、GDPに対する削減率で発表しているところもある。

各NDCは、GHG排出削減に対する締約国の挑戦的な野心を示しているが、UNFCCC事務局の計算によると[10]、NDCの目標を達成できたとしても2050年のネットゼロCO<sub>2</sub>排出に対するIPCCのシナリオには到底及ばないことが分かった。温暖化を2°Cよりかなり低く抑える、あるいは1.5°Cに抑えるためにIPCCが検討した多くのシナリオで提案された排出レベルを達成するためには、現在から2030年の間にNDCの目標値

を大幅に上げるか、最新の NDC を大幅に超過達成するか、あるいはその両方を組み合わせることが緊急に必要な、としている。([11]).

表 1 各国の NDC [7]

2030 Targets, based on NDCs Submitted to UNFCCC before COP26			
	Reference year	Reduction of	Reduction by
Japan	2013	GHG emission	46%
China	2005	CO2 emission/GDP	65%
India	2005	CO2 intensity/GDP	33-35%
Russia	1990	GHG emission	70%
EU	1990	GHG emission	55%
UK	1990	GHG emission	68%
Saudi Arabia	2019 (622MtCO2Eq)	GHG emission	278MtCO2 eq (eq. 44.6%)
US	2005	GHG emission	50-52%
Brazil	2005	GHG emission	43%

実際、報告書では、土地利用、土地利用変化及び林業 (LULUCF) を考慮しない場合、2030 年の GHG 排出量は 1990 年比で 58.5%、2010 年比で 15.9%、2019 年比で 4.7%程度 CO2 排出量が多くなると予測している。この事実は、この排出量の削減が非常に困難なものであることを示している。その一方で、COP26 の締約国は、「そのギャップを縮小し、世界が現在の 10 年間に前進を続け、平均気温の上昇を 1.5 度に抑えるよう努力することに集団で合意した。締約国は、排出削減を強化し、各国の気候変動対策誓約をパリ協定と整合させることが奨励される。」([12])としており、そのための具体的な目標やシナリオは示されていない。

CO<sub>2</sub> Emission Reduction Challenge in 2030 and UNFCCC prediction with NDCs at COP26

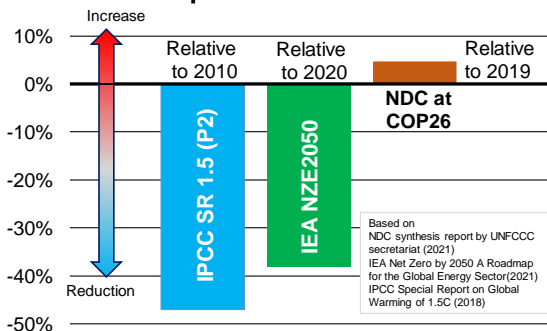


図 1 IPCC と IEA NZE 2050 のシナリオと比較した NDC の合成インパクト。

IPCC は、報告書[11]において、産業革命以前の水準から 1.5℃に温暖化を抑制すれば、2.0℃の場合に比べて、猛暑や降雨などの異常気象が減少し、平均海面上昇が 10cm 減少、水不足にさらされる人口が 50%減少するなど、リスクを大幅に軽減する効果があると主張した。地球温暖化を 1.5℃に抑えるためには、2030 年までに CO2 排出量を 2010 年比で 45%削減し、2050 年頃に「ネットゼロ」にする必要がある。一方、地球温

暖化を 2.0℃に抑えるためには、2030 年までに 25%削減し、2070 年までに正味ゼロにする必要がある。

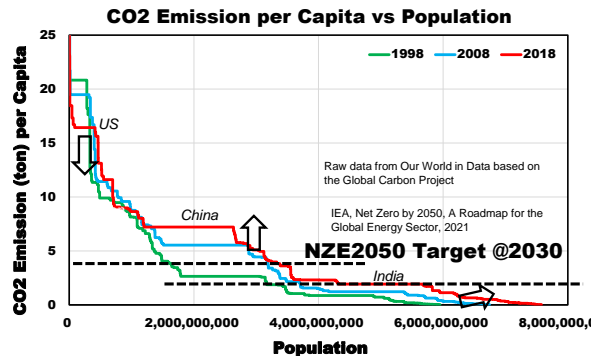


図 2 IEA の 2030 年の一人当たりの CO2 排出量目標を、過去の一人当たりの CO2 排出量と合わせて示した。

国際エネルギー機関 (IEA) は、2050 年までの Net Zero Emission (NZE) に向けたロードマップとマイルストーンを報告書「Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector」[8]で示している。IEA のロードマップは、IPCC の「SR 1.5」の Pathway である「P2」シナリオに対応している ([11] Fig.SPM3a and SPM3b 参照)。「P2 シナリオは、IPCC が示した 4 つのシナリオの一つであり、「温暖化を 1.5℃に抑制し、オーバシュートを発生させない、あるいは発生させない」ことを特徴としている。COP26 に向けて UNFCCC に提出された締約国の NDCs に基づいて予測された 2030 年の CO2 排出量を、IPCC と IEA のシナリオと比較したのが図 1 である。このように、COP26 での NDC に基づくインパクトと IPCC や IEA のネットゼロエミッションのシナリオには大きな隔りがある。

IEA の 2030 年の一人当たり CO2 排出量目標を、1998 年、2008 年、2018 年の過去の一人当たり CO2 排出量とともに図 2 に示した。横軸は累積人口を一人当たりの排出量でソートしたものである。1998 年から 2018 年までの 20 年間で、CO2 排出量の非常に多い国は CO2 排出量を削減しているが、2018 年時点の一人当たりの CO2 排出量は、先進国 (OECD 地域グループとブルガリア、クロアチア、キプロス、マルタ、ルーマニア) の 2030 年に達成すべき一人当たりの目標値 3.5 トンより途方もなく高い水準になっています[8]。1998 年から 2018 年まで世界人口が 25%以上増加し、2030 年以降もさらに増加することが、IEA のロードマップで考慮されている。

## 2. GDP 成長率と CO2 排出量成長率の比較分析

### 2.1. 過去データからの散布図分析

CO2 排出量は、経済活動と密接に関係している。図 3 は、過去数十年間の特定国の GDP 成長率と CO2 排

出量増加率の散布図である。各点は、GDP 成長率の 5 年移動平均と、排出量増加率のパーセント表示である。GDP と CO2 排出量の両方の成長率（増加率）を導入することで、経済規模や CO2 排出量を正規化することができる。図から、ほとんどの点が垂直方向の切片は 4%、水平方向の切片は -4%の直線より下にあることが分かる。一方、2030 年の IEA NZE2050 目標も同じグラフに示されている。2030 年の世界経済は、2020 年比で 24% から 45%の成長が見込まれ、これは GDP 平均成長率で 2.1%から 3.7%に相当する。

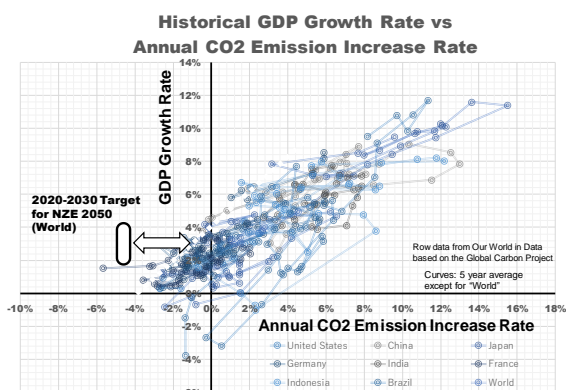


図 3 過去の GDP 成長率 vs. 年間の CO2 排出量増加率の散布図。

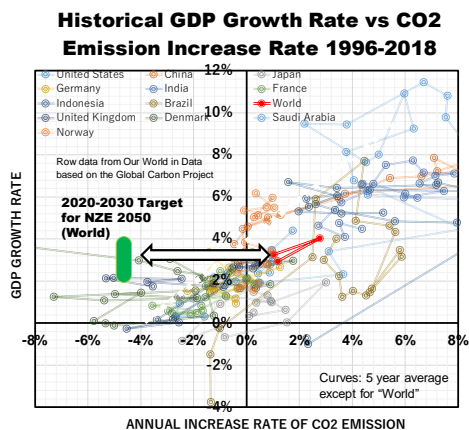


図 4 IEA NZE2050 の 2020-2030 年目標に対して、過去の GDP 成長率と年間の CO2 排出量増加率を散布図にした。

また、2030 年の世界の CO2 排出量は、IEA NZE2050 によると 2020 年比で 37%削減する必要があり、これは毎年排出量の成長率で -4.5%に相当する。COP26 での合意は非常に高い目標になっている。Fig.4 の散布図をよく見ると、「世界」の現在の位置は目標から大きくかけ離れていることがわかる。ここで注意しなければならないのは、この散布図は各国の目標ではなく、世界全体の目標であること、つまり「先進国」の中に

は 2030 年にさらに高い目標を設定しなければならない国もあることだ。

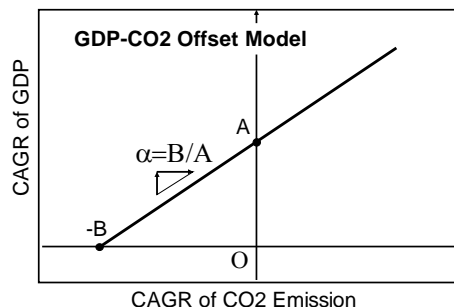


図 5 IEA NZE2050 の 2020-2030 年目標に向けた議論のための GDP-CO2 オフセットモデル

## 2.2. IEA2030 年目標に関するモデルベースの議論

### 2.2.1 GDP-CO2 オフセットモデル

上記の散布図に基づき、簡易モデルを導入する。このモデルでは、図 5 に示すように、GDP 成長率と CO2 排出量成長率の 2 つの値は、GDP 軸の成長率を「A」、排出量の成長率を「B」の切片を持つ線形関係を持っている。切片 A は、CO2 排出量を増やさずに達成可能な GDP 成長率を示し、切片 B は、GDP 成長率をゼロとした場合の CO2 排出量削減速度を示している。パラメータ  $\alpha = B/A$  は、GDP 成長率と CO2 排出量成長率のカップリングを示している。GDP の成長率を CAGR(GDP)、CO2 排出量の成長率を CAGR(CO2)と単純に定義すると、以下のような関係で表現することができる。

$$CAGR(CO_2) = \alpha \cdot CAGR(GDP) - B$$

微分方程式を解くと、GDP の関数として年間の CO2 排出量が得られる。

$$CO_2 = K \cdot GDP^\alpha \exp(-B \cdot year)$$

ここで、K は定数である。

このモデルは、GDP の変化に伴う CO2 排出量の変化を正確に分析するには単純すぎるかもしれないが、NZE2030 年に向けての我々の位置を知るには良いツールである。このモデルをいくつかの国に当てはめてみる。フィッティングには、モデルパラメータ B と  $\alpha$  を使用した。データは、例えば論文[13]の "Our world in data (OWID)" から得たものである。なお、元の生データは、記事中のリストにある様々な文献や政府・団体の統計局文書から得たものである。(記事からの注釈これは、化石燃料由来とセメント生産による CO2 排出量のみを考慮したものであり、土地利用変化は含まれていない。一人当たりの国内総生産(GDP)は、国による物価の違いを調整し、インフレを補正するため、2011 年価格の国際-US\$ で計算している)。

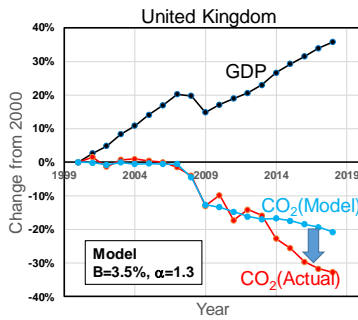


図 6 B=3.5%、 $\alpha=B/A=1.3$  のモデルパラメータで計算したイギリスの過去の CO2 排出量。

英国は 1998 年から 2018 年までの 20 年間で GDP が 35.7% 成長し、CO2 排出量が 32.7% 削減された。英国における CO2 排出量の推移を、 $B=3.5\%$ 、 $\alpha=B/A=1.3$  のモデルパラメータでフィットさせたのが図 6 である（付録参照）。このパラメータは、2013 年までの区間の初期にフィットするように選択され、モデルが CO2 排出量に非常によくフィットすることが分かる。（しかし、2014 年以降では、大きな差が生じている。これは英国が「無負荷石炭発電の早期段階的廃止」([14], [15]) という強い政策によって石炭発電所を閉鎖したためである。）

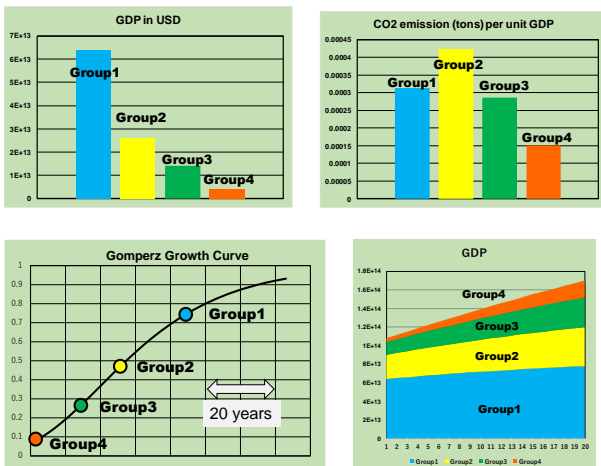


図 7 世界を 4 つのグループに分け、設定した解析条件（GDP は Gomperz 成長モデル）。

また、英国が経済成長と CO2 排出を分離していることを指摘する論文もある。しかし、英国では、CO2 集約的なエネルギー源がエネルギーミックスに含まれているため、デカップリングの議論を結論づけるには時間がかかる。実際、モデル中のパラメータ  $\alpha=B/A$  は、GDP 成長率と CO2 排出量増加率のカップリングの強さを表し、両者が完全にデカップリングされている場合には、 $\alpha$  はゼロでなければならない。

表 2 計算条件と 2030 年の CO2 排出量計算値

	Condition	@2030 (ref. 2018)
Case 1	B=2% and $\alpha=1.0$ for all groups	+6.4%
Case 2	B=-4%, -3%, -2% and -1% for group 1, 2, 3 and 4 respectively and $\alpha=1.0$ for all groups	-9.1%
Case 3	B=-8%, -6%, -4% and -2% for group 1, 2, 3 and 4 respectively and $\alpha=1.0$ for all groups	-40.0%

### 2.2.2 今後 20 年間の世界の CO2 排出量: モデルによる分析

今後 20 年間の世界全体の CO2 排出量を図 5 のモデルにより算出した。モデルでは、モデルパラメータを簡略化・削減するために、世界の国と地域を 4 つのグループに分け、各グループ内の CO2 排出量の年増加率及び GDP 成長率は同じであると仮定している。図 2 に示した CO2 排出量データを参照し、図 7 に示すように、初期の CO2 排出量と GDP 総額を設定した。各グループの GDP 成長率は、図 7 に示すように、 $a=1, b=1, c=0.05$  のパラメータを持つ Gomperz 曲線に従うと仮定している。GDP の計算結果も同図に示されている。

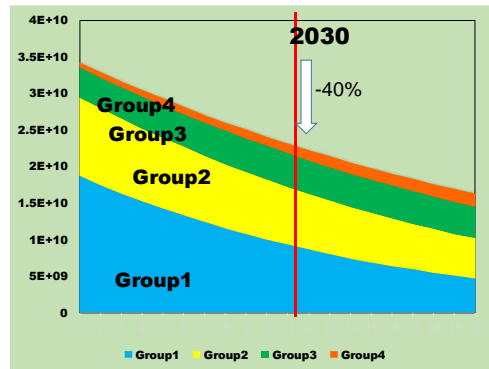
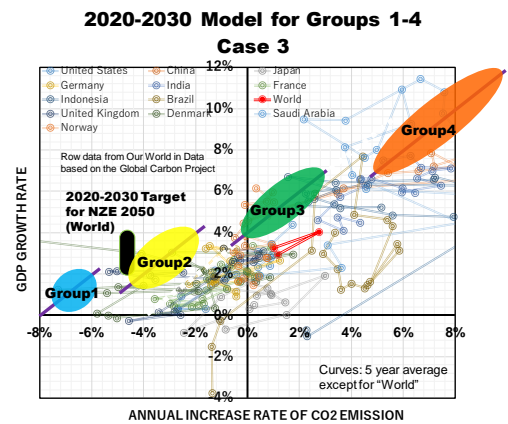


図 8 ケース 3 の解析結果。CO2 排出量は 40% 削減。Group1 は毎年 6~8% の排出量削減が求められる。

2030年のCO2排出量は、3.1節で提案したモデルにより、4つのグループに対して計算した。Case1、2、3の計算に用いたパラメータと、2030年の計算結果をTable 2に示す。図8はケース3の結果である。その結果、先進国は毎年6%以上のCO2排出削減率を実現し、それを何年も維持しなければ、2030年のNZE2050のマイルストーンを達成できない。

### 3. 再生可能エネルギーとしての効率性

ご存知のように、パワーエレクトロニクスの変換効率率は理論上100%が限界であり、パワーエレクトロニクス界では、ロードマップや技術成果の指標として「1.0-」や「電力密度」が用いられてきた([16])。以上のように、私たちが目標とするCO2削減率は、年率6%以上でなければならない。

この目標を達成するためには、最終消費エネルギー効率と再生可能エネルギーによるエネルギー資源の割合を高めること、つまり、単純化すれば、Xの電力の最終消費効率を単位電力あたりのCO2排出量で割った値を高める必要があります([17])。

$$\frac{\text{End use efficiency of electricity for } X \left[ \frac{X}{\text{kWh}} \right]}{\text{CO}_2 \text{ emission for unit electricity} \left[ \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} \right]}$$

ここで、Xは、あるシステムが提供する経済的生産物やサービスであり、例えば、家の一室の冷暖房、人の移動、工場における単位生産物の生産などである。この式の値を「Delivered Energy Productivity」またはDEP([17])と呼び、分子と分母をそれぞれ「経済活動のエネルギー原単位」「エネルギーの排出原単位」と呼ぶ。NZE2050に対するパワーエレクトロニクス分野の貢献を考える場合、電力変換効率は技術の一面を表しているに過ぎない。パワーエレクトロニクス技術の貢献は、経済的なアウトプットやサービスに対する効率としてカウントすることができる。

ヒートポンプの技術は、その好例と言えるでしょう。ヒートポンプは再生可能なエネルギー資源として認識されており、家庭やビルだけでなく、ボイラーに代わる産業用熱源としても利用されています。

#### 3.1. ヒートポンプ

ヒートポンプシステムは、パワーエレクトロニクス技術の貢献により、「beyond 100%」を実現した顕著な例である。圧縮機制御にインバータを導入してからは、毎年2.2%の割合で効率が向上している。図9はエアコンの効率向上の歴史である(東芝・キャリアの場合)1982年に東芝が世界で初めてインバータエアコンを商品化して以来、COP2.8(280%)からAPF6.9(690%)に効率向上している。コストも3分の1程度に抑えられている。効率だけでなく、冷媒も地球温暖化係数ゼロのR32が使われるようになった。

EUの提案[18]では、「2019年のEUにおけるこの分野の自然エネルギー比率は22.1%で、過去10年間で5.3ポイントの上昇にとどまっている。地域暖房では、自然エネルギーのシェアは28.9%程度とやや高いが、主にバイオマス(26.9%)の利用に起因し、2%に過ぎない他の自然エネルギー熱技術(ヒートポンプ、太陽光、地熱)は、少数の革新的ネットワークでのみ使用されている。」(2.2.1.2項の「Insufficient ambition for renewables deployment in the heating and cooling sector」に記載)。EU指令2009/28/ECの付属書VII[19]、または[20]に定義されているように、ヒートポンプを再生可能エネルギー源としてカウントすれば、ヒートポンプの効率は、再生可能エネルギー導入と直接的に等価になる。

$$E_{RES} = Q_{usable} \cdot \left( 1 - \frac{1}{SPF} \right)$$

ここで、E<sub>RES</sub>は再生可能エネルギーとして考慮されるヒートポンプによる周囲エネルギーの取り込み量、Q<sub>usable</sub>はヒートポンプによる使用可能な熱量の推定値、SPFはヒートポンプの季節ごとの平均性能係数(SPFは、気候条件の違いを考慮し、ヒートポンプシステムによって供給される総熱量とシステムで使用される電力量の比であり、詳細は[21]に記載されている)。

ここで、ヒートポンプの設置には、電力変動を補償するための蓄電システム(BESS)などのエネルギー貯蔵は必要ないことに留意する必要がある。ヒートポンプの導入コストとエネルギーコストを他の再生可能エネルギーと比較したのが表3である。設置コストとエネルギーコストは、この中で最も低い水準にある([22, 23])。

今後、ノンインバータエアコンからインバータ駆動エアコンへの置き換えが進み、世界的な効率向上が期

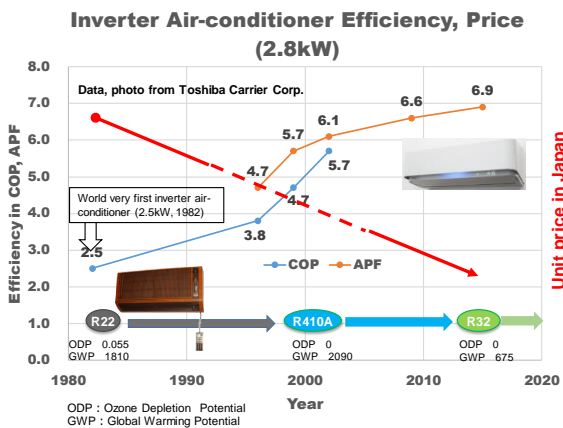


図9 日本におけるインバータ駆動エアコンの効率と価格(東芝キャリア(株))。

待される。表 4 は、2005 年と 2015 年の地域別エアコン設置台数と 2018 年のインバータ比率（総設置台数に対するインバータ駆動エアコン台数）である ([24])。

エアコンだけでなく、最近では家庭の給湯や産業界の製造工程でヒーターやボイラーに代わってヒートポンプが使用されている。図 10 に、家庭用「エアツウウォーター」システムと産業用ヒートポンプの事例を示す。まず、電気ヒーターからヒートポンプへの置き換えが挙げられる。高効率（高 COP）であるため、電力消費量が大幅に削減されている。副次的な効果として、このシステムは工場の建物内に涼しい空気温度環境を提供している。

表 3 ヒートポンプの導入コストと等価的な再生可能エネルギーコストを他の再生可能エネルギーと比較

	Installation Cost USD/kW	Energy Cost USD/kWh	Remarks
Heat pump as RES (house hold)	280	0.054	Assumption: 3.5kW, COP=SPF=5.0, 900USD, 5 years, costs calculated by the author. RES=Renewable energy source.
Utility-Scale PV + BESS	1900	0.068	LCOE from RENA, Renewable Power Generation Cost in 2019. BESS cost (900USD/kWh from NERL benchmark 2021) included
Offshore Wind	3000	0.115	LCOE from RENA, Renewable Power Generation Cost in 2019
Onshore Wind	1430	0.053	LCOE from RENA, Renewable Power Generation Cost in 2019
Hydro	1704	0.047	LCOE from RENA, Renewable Power Generation Cost in 2019
Biomass	1500	0.066	LCOE from RENA, Renewable Power Generation Cost in 2019. Installation cost vary from less than 1.0 to 4.0 USD/kW (ex. wood waste)

RES: Renewable Energy Resource, BESS: Battery Energy Storage System

表 4 2018 年のインバータ比率の地域別エアコン設置台数 (2005 年、2015 年) 推移

Region	Million units in 2005	Million units in 2015	Inverter Ratio
Europe	6.2	5.4	81.60%
Middle East	2.9	5.4	13.10%
Japan	8.3	8.9	99.90%
China	19.8	39.2	74.00%
Asia (other)	7.6	15.1	36.10%
Oceania	0.8	1.1	95.80%
North America	14.9	14.3	6.90%
Latin America	2.8	7.3	No data
World(expected)		110 (2018)	57.80%

### 3.2 再生可能なエネルギー資源としての効率改善

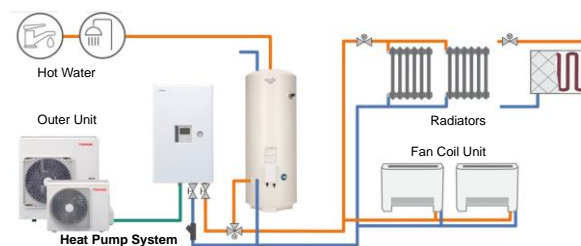
EU 指令 2009/28/EC の付属書 VII[19]にあるように、ヒートポンプ ERES で取り込んだ熱エネルギー量は、上に示した式で計算し、再生可能資源からのエネルギーとしてカウントされることになっている。この考え方を、効率向上によるインパクトの指標に展開することができる。

$$E_{RES} = X \cdot \left( \frac{1}{\eta_{ref}} - \frac{1}{\eta_{imp}} \right)$$

ここで、 $\eta_{ref}$  は X の電力の最終利用効率の基準値であり、 $\eta_{imp}$  は改善された効率である (X は冷暖房、

人の輸送、単位製品の製造など、システムによって提供される結果やサービスである)。

効率改善により再生可能エネルギーとしてカウントされる電力 ERES 価格 (Euro/kWh) は、機器の減価償却費 (または設置費用 ÷ 運転年数) とメンテナンスの年間費用を ERES の年間価値で割ったもので、上記の式から求めることができる。表 3 に示すエネルギーコストは、この方法により、 $\eta_{ref}$  が単一となるように算出したものである。



Target	Replacement	Spec. of heat pump	System impact
Cleaning process with hot liquid	Heater → Heat pump	Output 14kW COP 3.5 (Catalog) Liquid Temp 50-90°C	Electric energy -54% CO2 -28ton/year
Preprocess to painting (shown in figure below)	Boiler → Heat pump	Output 14kW X2 COP 3.5 (Catalog) Liquid Temp 45°C, 55°C	Reduction of heat loss in plumbing Running cost reduction -62%

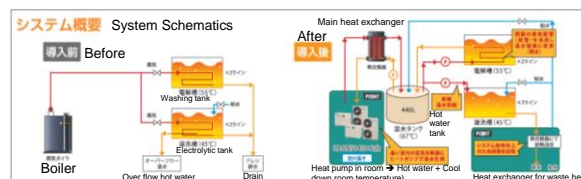


図 10 住宅用 “Air-to-Water” システムおよび産業用ヒートポンプの例。

太陽光パネルを設置して再生可能エネルギーを発電するプロシューマーと、高効率ヒートポンプを設置して電力消費量を削減するコンシューマーを区別することは、CO2 排出量削減の観点からは意味がない。従って、上記の計算式を受け入れるならば、継続的な効率向上は CO2 排出削減への貢献としてカウントされることになる。

### 3.3 その他の例

他の例として、圧縮空気システムを取り上げる。圧縮空気は、清掃、噴霧、持ち上げたり押ししたり、加熱や冷却など、産業界で広く使用されています。英国では、「圧縮空気システムは、全産業用電気消費量の約 10%、年間 8.8 TWh を消費し、3,100 kt/年の CO2 排出をもたらす大きなエネルギー消費源である」 [25] とされている。 [25]、あるいは日本では「圧縮空気システムは、製造工場で消費される総電力の 20~30% を消費すると考えられており、圧縮空気のエネルギー消費の管理は、エネルギー効率の観点から重要な問題である」 [26] とされている。圧縮空気システムは、ポンプによる

約 0.5MPa までの圧縮、制御弁、ホースでの減圧と使用時に発生する熱による大きな損失が発生する。

もう一つの例として、油圧システムは、力と速度の制御、数百トンの出力への乗算に有利である。ポストダイナミクス社の人型ロボット "アトラス" が小型油圧システムの高度な技術によって、人間並みの俊敏な走り、ジャンプ、バク転を実現したことはよく知られている。

一方、油圧システムの効率は 35%~50% 程度である。ポンプをインバータ駆動にした省エネ型の油圧システムも登場している、油圧ホースやパイプ、ポンプ自体、アクチュエータ、制御弁などに大きなエネルギー損失がある。また、油圧システムに油への加圧の限界があり小型化が困難である。最近では電気システムの出力密度が油圧に近づいてきている。油圧システムは圧力を高くすると効率が落ちるとされている[27]。

### 3.4 電力化率向上の可能性

電力化率の向上は、エネルギー効率を向上させるための重要な要素である。表 5 は、運輸部門と産業部門の電力化を示している ([28] のデータ)。電力化率の向上は、効率改善と再生可能エネルギーの増加の両方に影響を与える ([29])。

表 5 運輸・産業部門の電化シェア ([28])

Sector	Electricity share	Renewable share
Transport	1%	4%
Industry	27%	14%

### 3.5 電力システムのフレキシビリティ

電力システムの柔軟性を高めることは、再生可能エネルギーの増加や効率化において重要であることは報告 [17, 30, 31] で述べられており、以下の 11 のイノベーション領域が挙げられている。1. 環境ステewardシップ、2. 送電システム、3. 配電システム、4. 送電・配電境界、5. 金融・市場・プライシング・コスト配分、6. 静的・動的負荷、7. フレキシブル発電、8. 冷暖房との統合、9. 輸送との統合、10. エネルギー貯蔵、11. マイクログリッド。すべての領域はパワーエレクトロニクス技術に関連しており、中でも 5、6、7 は、エネルギーの P2P 取引や需要応答のためのブロックチェーン技術など、パワーエレクトロニクスシステムに新しい技術を導入するチャンスとなり得る。

### 3.6 PV インバータのコスト比較

表 6 に示すように、PV インバータのコスト傾向を学習率の観点から他製品と比較した ([22, 23, 32, 33])。PV インバータを選択した理由は、PV パネルやシステム構成機器のコストに関するデータを容易に入手できるためである。表中の学習率は、設置台数や出荷台数

が 2 倍になったときのコスト削減率である。PV インバータの学習率は -19% という高い値を示している。このコスト削減は、太陽光発電システムの量産規模とそれに伴うコスト削減によってもたらされたものである。発電システムにおけるパワーエレクトロニクスのコストは、エネルギーコストに応じて決定される。

表 6 他社製品との比較による PV インバータの学習率。学習率は、量産規模が 2 倍になったときのコストダウン率

Item	Learning Rate	Remark
PV module	20% ↓	Bloomberg New Energy Finance
Onshore wind	19% ↓	Bloomberg New Energy Finance
Li-ion Battery	19% ↓	Hannah Ritchie, Our world in data, 2021
PV inverter	19% ↓	Agora report, Current and Future Cost of Photovoltaics, 2015,
DRAM/Flash	35% ↓	Walden Rhines, Predicting Semiconductor Business Trends After Moore's Law, 2019
Remaining Semis	23% ↓	Walden Rhines, Predicting Semiconductor Business Trends After Moore's Law, 2019

## 4. まとめ

NZE2050 の道筋と現状とのギャップを議論してきました。そのギャップを埋めるために

1. X/kWh (X は経済生産高またはサービス等) の **効率向上** に挑戦する必要がある。この効率向上は、再生可能エネルギーとしてカウントされる。
2. **さらなる電力化率向上** が必要であり、効率向上と CO2 原単位削減の双方に影響がある。
3. **電力システムのフレキシビリティ向上** により、再生可能エネルギー導入の障壁が低くなり、関連技術への投資が促進される。

## 謝辞

東芝キャリア株式会社の遠藤隆久氏、東芝三菱電機産業システム株式会社の川上典子氏、株式会社 NTT ファシリティーズの湯浅一史氏には、本テーマに関連する議論と情報共有に感謝します。

## 文献

- [1] Meadows, Donella H; Meadows, Dennis L; Randers, Jørgen; Behrens III, William W, "The Limits to growth; a report for the Club of Rome's project on the predicament of mankind", scanned version is available at <https://www.clubofrome.org/>, 1972,
- [2] World bank, <https://data.worldbank.org/>
- [3] IPCC, "SPECIAL REPORT, Global Warming of 1.5 °C", <https://www.ipcc.ch/sr15/>, [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15\\_Slide\\_Deck.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/09/SR15_Slide_Deck.pdf), 2019.
- [4] Japan Meteorological Agency <https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme>

\_p.html

[5] Serge Latoushe, “Survivre au developpement” 2004

[6] Serge Latoushe, “Le décroissance” 2019

[7] Kohei Saito, “The Anthropocene’s ‘Capitalism’”, (in Japanese) 2020.

[8] IEA, “Net Zero by 2050, A Roadmap for the Global Energy Sector”, 2021

[9] UNFCCC, NDC Registry, <https://www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/All.aspx>

[10] UNFCCC secretariat, “Nationally determined contributions under the Paris Agreement, Synthesis report by the secretariat” Sep, 2021. (Access to <https://unfccc.int/news/cop26-update-to-the-ndc-synthesis-report>)

[11] IPCC, “Global Warming of 1.5 C”, <https://www.ipcc.ch/sr15/>, 2018

[12] The Glasgow Climate Pact – Key Outcomes from COP26”, UNFCCC, 2021.

[13] H. Ritchie and M. Roser, "CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gas Emissions". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>', Online Resource, 2020.

[14] H. Ritchie and M. Roser, "Energy". Published online at OurWorldInData.org. Retrieved from: '<https://ourworldindata.org/energy>', Online Resource, 2020.

[15] Department for Business, Energy and Industrial Strategy, COAL GENERATION IN GREAT BRITAIN, 2016.

[16] J. W. Kolar, F. Krismer, Y. Lobsiger, J. Muhlethaler, T. Nussbaumer, J. Minibock, “Extreme Efficiency Power Electronics,” Proceedings of the International Conference of Integrated Power Electronics Systems (CIPS 2012), Nuremberg, Germany, March 6-8, 2012

[17] M. Miller, E. Martinot, S. Cox, B. Speer, O. Zinaman et al. “Status Report on Power System Transformation, A 21st Century Power Partnership Report,” NREL Technical Report, NREL/TP-6A20-63366, 2015.

[18] EU, “Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL”, Brussels, 14.7.2021, COM(2021) 557 final, 2021/0218 (COD)

[19] EU, ANNEX VII in DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 April 2009, on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC. (32009L0028, found at <https://eur-lex.europa.eu/>)

[20] Heat Pump & Thermal Storage Technology center of Japan (HPTCJ) “Heat pumps as renewable energy source -EU RES-Directive and Heat pumps-”, <https://www.hptcj.or.jp>.

[21] 2013/114/EU: Commission Decision, document 32013D0114, 2013.

[22] “Renewable Power Generation Costs in 2019,” International Renewable Energy Agency (IRENA),2020.

[23] V. Ramasamy, D. Feldman, J. Desai, and R. Margolis, “U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2021,” National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2021.

[24] “World Air Conditioner Demand by Region,” Japan Refrigeration and Air Conditioning Industries Association, 2019, <https://www.jraia.or.jp/english/statistics/index.html>

[25] “Compressed air equipment A guide to energy efficient equipment listed on the Energy Technology List (ETL)”, <https://assets.publishing.service.gov.uk/>

[26] “Report on Research and Study on Standardization of Pneumatic Energy Evaluation and Its Application to Energy Saving,” Japan Machinery Federation, Japan Fluid Power Industry Association, 2007.

[27] S. Sakama, K “Trends and Outlook of Hydraulic Technology”, KYB Technical Review, (In Japanese) No. 56, 2018.

[28] IRENA, “Global Energy Transformation: A roadmap to 2050”, International Renewable Energy Agency, 2018. [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).

[29] IRENA, “Electrification with Renewables: Driving the Transformation of Energy Service”, International Renewable Energy Agency, 2019. [www.irena.org/publications](http://www.irena.org/publications).

[30] “Status of Power System Transformation 2018, Advanced Power Plant Flexibility,” IEA 2018, <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2018>

[31] “Status of Power System Transformation 2019, Power System Flexibility” IEA 2019, <https://www.iea.org/reports/status-of-power-system-transformation-2019>

[32] NREL, “U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmark: Q1 2020”, National Renewable Energy Laboratory, NREL/PR-7A40-81408, 2021.

[33] Fraunhofer- (ISE) “Current and Future Cost of Photovoltaics Long-term Scenarios for Market Development, System Prices and LCOE of Utility-Scale PV Systems,” Study on behalf of Agora Energiewende.2015.

## 付録

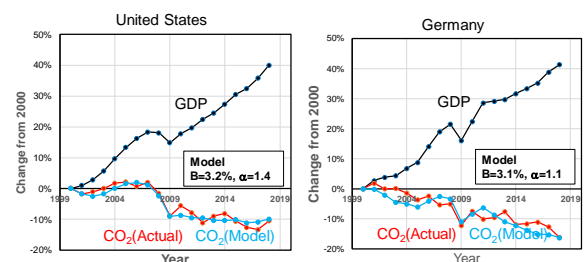


図 A1 GDP-CO<sub>2</sub> オフセットモデルのフィッティング例 (米国とドイツ)