

機械/船舶・海洋/航空・宇宙、電気電子/経営工学/情報工学、化学/繊維/金属 3部会合同講演会  
**エネルギー政策のゆくえ～産業への影響と今後の取り組みは？～  
ならびに GX に向けた挑戦**

講師：公益財団法人地球環境産業技術研究機構 システム研究グループリーダー 主席研究員  
東京工業大学特任教授 秋元 圭吾 氏

主催

機械/船舶・海洋/航空・宇宙部会 部会長  
高井英夫氏

電気電子/経営工学/情報工学部会 部会長  
盛田直樹氏

電気電子/経営工学/情報工学部会 副部会長  
杉内栄夫氏

化学/繊維/金属部会 部会長 焼本教利氏



写真-1 地球環境産業技術研究機構 秋元圭吾氏

動、カーボンニュートラル等に関する問題は、量を一緒に考えなければ、その解決は難しい。

### 3. 発電電力量と経済成長率との関係

発電電力量と経済成長率との間には、非常に強い正の相関関係がある。発電電力量の増加が無ければ、世界は成長できていない。

主要先進国では GDP は上昇しているがエネルギー消費量は下っている。これはエネルギー多消費産業が途上国に移転したためである。

### 4. 日本における製品に体化された電力輸入 (間接的電力輸入)

日本では系統連系線が海外と繋がっていないため、海外から直接電力を輸入できない。そこで製品を輸入することで、製品製造に要する電力を間接輸入する方式をとった。日本では低廉・安定な電力供給が難しくなった。

### 5. 世界・主要国の CO<sub>2</sub> 排出量の推移

CO<sub>2</sub> は世界全体で一様に上がり続けている。一方、米国、欧州、日本は下がっている。インド、中国は上昇している。CO<sub>2</sub> 対策を取らないと仮定した場合よりも CO<sub>2</sub> が増えている。

### 6. 累積排出量と気温上昇との関係

温暖化対策は非常に重要である。CO<sub>2</sub> 累積排出量と気温上昇との間には、かなり線形に近

## 1. エネルギーと気候変動、そしてカーボン

### ニュートラルに向けて(はじめに)

本講演会は、『経済産業省 資源エネルギー庁 令和5年度「講師派遣」事業』を受けて、「将来の日本のエネルギーを考える」と題して、2024年2月24日(土)に日本技術士会中国本部で開催された。地球温暖化対策、エネルギー安全保障、グリーントランスフォーメーション(GX)等に向けて、日本の原子力・エネルギー政策は大きな転換点を迎えている。

本講演会では、エネルギー・環境システム工学がご専門で大変に著名な秋元圭吾先生を講師にお迎えすることができた。秋元先生は、カーボンニュートラルに向けた国の審議会の委員や政策提言など、我が国が進むべき方向性をつかさどる立場におられる。本講演会は、最新情報を聴講し、研鑽する貴重な機会となった。以下に講演の記録を示す。ただし図表は除く。また、本講演記録は、先生のご許可を頂いた上で、Microsoft Teams を用いて音声と画像を収録し、収録した音声を再生して文字に変換したものである。録画は、会員に限定して継続的自己研鑽(CPD)のために技術士会ホームページにて視聴可能である。

## 2. 世界のエネルギー消費量の増大

我々人類は、産業革命後、膨大な量のエネルギーを消費してきた。エネルギー、気候変

い関係がある。これは、IPC 第 5 次評価報告書 (2007) の新しい知見である。世界で CO<sub>2</sub> を出し続ける限り気温は上昇を続けるため、いつかはカーボンニュートラルの目標を達成しなければならない。

## 7. COP28 成果:グローバルストックテイク

グローバルストックテイクは、パリ協定下で各国が NDCs と呼ぶ国別貢献の排出削減目標を提出し、5 年に 1 回チェックする手続きである。下記の成果がピックアップされた。

「IPCC 報告書は、世界全体の GHG が、遅くとも 2025 年までのピークアウト、2030 年 43% 減 (19 年比)、2035 年 60% 減 (同) を達成する場合、オーバーシュート無しもしくは小さく、1.5°C 目標が達成される見込みがある、としていることを認識する」。但し、すでに現在 1.45°C の気温上昇に達しているため、ほぼ 1.5°C 目標を達成することは困難である。世界の意思を示す形でこのように記述された。パリ協定を踏まえ、各国に以下の貢献が要請された。

- a. 2030 年までに再エネ容量を世界全体で 3 倍、エネルギー効率改善率を世界平均で年率 2 倍
- b. 排出削減措置の無い石炭火力の段階削減
- c. ゼロ・低炭素燃料活用、今世紀半ば以前のネットゼロ・エネルギーシステム構築
- d. 科学に沿った形で 2050 年までにネットゼロを達成するため、2030 年にエネルギーシステムの化石燃料からの移行を図る。
- e. 再エネ、原子力、CCUS などのゼロ・低排出技術を加速。
- f. 2030 年までに、メタンなど二酸化炭素以外の GHG 排出を大幅に削減
- g. インフラの整備や ZEV・低排出車の迅速な導入など、道路交通からの排出削減を加速。
- h. 非効率な化石燃料補助金を早期廃止。2036 年 60% 減、1.5°C 目標は既に 1.46°C 上昇。

秋元先生のご評価は、2050 年のカーボンニュートラル、気温上昇を 1.5°C 以下にする目

標実現はほぼ不可能であるので、その実現を目指しながらも緩やかに柔軟にとらえて達成していく議論が起こってくる。ただし、カーボンニュートラルの達成自体は、2050 年かどうかは別にして必要である (気温上昇対策)。

## 8. 日本のカーボンニュートラルのイメージ (1/2)

省エネルギーはいつの時代も重要である。日本では今後、デジタルトランスフォーメーション、Society5.0 を用いて、サーキュラー経済やシェアリング経済を誘発することにより、低エネルギー需要社会を作ることが重要。

残るエネルギーは、原則上は原子力、再生エネルギー、化石燃料を使いながら CO<sub>2</sub> を回収し CCS で貯留する 3 つの組合せしかない。

なお、CCS 無しの化石燃料は一部残る。この場合は出てくる CO<sub>2</sub> をオフセットする手段が必要になる (CO<sub>2</sub> 除去技術 Carbon Dioxide Removal Technology)。これには植林、鉱物化、ブルーカーボン (マングローブ、藻場の形成等) が挙げられる。また、バイオエネルギーを用いて CO<sub>2</sub> を回収・貯留する BECCS 技術、大気中の CO<sub>2</sub> を直接回収・貯留する DACCS も必要になる。バイオエネルギーはカーボンニュートラルであるので、そこから出てくる CO<sub>2</sub> をさらに回収貯留することにより「カーボンネガティブ」にすることができる。回収した CO<sub>2</sub> は、基本的に地下深く埋めることになる。

原子力は、社会的制約が強いことをどう乗り越えていくか、が大事な点である。化石燃料を使うのであれば、燃焼前に CO<sub>2</sub> と水素とに分けて、ブルー水素の形で日本に持ってくることにより、全体としてカーボンニュートラルを達成して、エネルギーを賄うことが必要になる。但し、水素の直接水素 (還元) という考え方もあるが、窒素を付加してアンモニアにする方法や、回収してきた CO<sub>2</sub> を合成して合成燃料、合成メタンに変える方法もある。

## 9. 日本のカーボンニュートラルのイメージ (2/2)

水素、高温の熱、合成メタン、メタネーション、合成燃料、e-fuel, biomass, これらを組み合わせて使うことも考えられる。

## 10. IPCC 報告書・シナリオで異なる CN の達成手段

植林だけでオフセットできるシナリオはほぼ存在しない。その一方で、BECCS (バイオエネルギー + CO<sub>2</sub>回収・貯留) は、バイオエネルギーから出てくるも CO<sub>2</sub>を回収して貯留するものである。この方法を使ってオフセットしたほうが、経済合理的である。

## 11. カーボンニュートラルに向けた各種対策技術の役割と課題

### 12. 再生可能エネルギーの役割と課題

### 13. 世界の再生可能エネルギーの動向

・太陽光発電は、非常に急速にコストが下がってきている。風力発電も同様に下がってきた。化石燃料発電の発電コストよりも、太陽光発電、風力発電のコストが安価になっている。日本も太陽光、風力のコストが相当に下がってきたが、世界よりもまだ2倍程度と高い。秋元先生のご見解では、日本の地理条件を考えると、海外の再生可能エネルギーを使って、水素、アンモニア、合成燃料、合成メタン等に換えて、日本に持ってきたほうが、経済効率的になる可能性がある。

### 14. 日本の再生可能エネルギー導入急拡大のひずみ

・日本は、国土面積、平地面積が少ない中で、太陽光をかなり急速に導入している。平地面積当たりの太陽光設備容量は、日本は飛びぬけて高い。

ここでは、風力、太陽光共に、地元住民とのトラブルも増えている。場所を選ぶと拡大は難しい局面になっている。また、風力は風況が良い場所は山の尾根になるので、風車を尾根まで上げるコスト、景観の問題も出てくる。

### 15. 再生エネルギーの拡大に向けて：プッシュ型の電力系統形成

再エネ 50%導入の場合、系統増強に必要な投資額は6～7兆円である。太陽光、風力は設備利用率が送電線も低くなる。すると電気をあまり通さない送電線をたくさん作って、電気料金の値上げにつながる懸念がある。慎重に拡大するペースを考える必要がある。

### 16. 変動性再エネの増加に伴うエネルギー貯蔵の重要性

蓄電池の拡大は温暖化対策にとって重要であり、水素の利用も重要である。但し、増やしすぎると、コストが非常に高くなる。電子をそのまま貯留することは難しい一方、化石燃料やウランは貯蔵に向いている。その辺も含めて総合的な戦略が必要である。

### 17. CCS, CDR の役割と課題

### 18. CO<sub>2</sub>回収関連技術の概要

この図は、CO<sub>2</sub>回収関連技術の概要を示す (CCS: 二酸化炭素回収・貯留、CDR: CO<sub>2</sub>除去)。CO<sub>2</sub>回収関連技術には、化学吸収法、物理吸収法、固体吸収材、膜分離法、酸素燃焼法など様々な方法がある。先行しているのは化学吸収法である。現在、価格は高いが下がってきている。再エネが望ましいがコストがかかる。このため、CCS も組み合わせなければ費用対効果が高い対策にならない。

### 19. 世界の CO<sub>2</sub>貯留の動向とコスト・ポテンシャル

日本は貯留ポテンシャル146GtCO<sub>2</sub>という推計もある。実際のポテンシャルは保守的に見て11GtCO<sub>2</sub>程度と推定され、10年分となる。

### 20. 二酸化炭素除去技術(CDR)によるネガティブ排出

植林では、大気中のCO<sub>2</sub>を生物が光合成で固定する。植林の場合は大量の土地が無ければ大量のCO<sub>2</sub>を固定できない。例えば2℃目標でネガティブにオフセットしようとする、アメリカ国土面積分の植林用土地が必要といわれる (1,000Mha 必要)。これは理論的には可能でも全部は使えないので、事実上不可能である。そこで BECCS という手段が出てくる。

BECCS は、バイオエネルギーを使って、出てくる CO<sub>2</sub> を回収して地下に埋める。そうすると、CO<sub>2</sub> を地下に埋めるため効率が良くなる。植林だけで 1,000Mha に対し、BECCS では 400Mha で済む。土地面積は減るがそれでも 400Mha を要し、かなりの土地面積である。そこで、最近では DACCS が流行っている。大気中から CO<sub>2</sub> を直接回収して貯留する。この手法をとると、土地面積は negligible となる。プラントは相当大規模になるが、植林や BECCS に比べると限定的である。但し、非常に濃度が薄い 400ppm の CO<sub>2</sub> を回収しなければならない。このため、代りに莫大なエネルギーを投入しなければ CO<sub>2</sub> を回収できない。土地を差し出す代わりに、エネルギーを差し出さなくてはならない。一方で、カーボンニュートラルの対策ということではなければ、こういうことを行う感覚は無かった。しかし、ここにきて非常に強いカーボンニュートラルという目標が出てきたため、それでもやらなくてはならない感覚が出てきた。DACCS については、ベンチャーがたくさん出てきた。イーロンマスク氏、ビルゲイツ氏も DACCS を行おうとするベンチャーに相当の出資をしている。世界の競合が相当、ここに集まってきている。但し、非常にコストが高いことは間違いない。にも拘わらず、皆が可能性有りともっているのは、太陽光発電や風力発電は変動が非常に激しいため、太陽光発電や風力発電が大量に余ってくる時間帯がある。そうすると、例えば中東地域で、大量に余ってくる太陽光発電を DACCS に投入し、そこで出て来た CO<sub>2</sub> をそのまま地下に埋める。砂漠の下には、良い貯留層が沢山ある。元々、ガスや石油がたまっていたということは、CO<sub>2</sub> を入れやすい事でもある。こういう使い方をすれば、意外に安くできるのではないかと、という見込みを持つ人々が多い。但し、日本では、できても安価にはできないと見込まれる。日本で実証をして、僻地で展開するのが現実的である。

## 21. 水素系エネルギーの役割と課題

### 水素系エネルギー

ブルー水素は化石燃料+CCUS で作られる水素、グリーン水素は再生エネルギー由来電源+水電解で作る水素である。ピンク水素は原子力由来の水素である。日本では、基本はブルー水素とグリーン水素である。原子力は稼働が進んでいないので、余剰する程のピンク水素は無い。このため、原子力では電気は電気のまま使ったほうが良い。原子力が大量に得られる場合は、設備利用量が高くとれるため、原子力をピンク水素に換えるのも有効である。

水素は取り扱いが難しいので、アンモニアに換えることができる。但しアンモニアも毒性があるので、合成メタン、合成燃料も考えられる。合成燃料の場合、既存のガス導管、石油スタンド、ガソリンスタンドをそのまま使える柔軟性がある。また、混合率を変えていけるというメリットがある。このため、柔軟にコストと見合わせながら混合法を考え、最終的には水素を 100% としてカーボンニュートラルを達成していける柔軟性がある。

但し、CO<sub>2</sub> を回収して水素と合成する手間が必要となる。そのコストと、既存機器が使えるメリットとを考慮に入れる必要がある。水素の製造方法には、ブルー水素系メタン CCS 系水素と、石炭 CCS 系水素とがある。現時点では、ブルー水素系が安価で有利である。再エネ・グリーン水素に関しては、今は高コストであるが将来は下がると予想される。現状ではブルー水素が安く有利であるので、当面はブルー水素から入り、将来はグリーン水素に移るとの見方が一般的である。

次に、メタネーション、e-メタン、合成メタンを紹介したが、ガスの CN 化オプション例について述べる。

## 22. ガスの CN 化オプション例

カーボンニュートラルには様々な方法がある。  
[1] LNG-CCS/CDR : LNG を日本にもってきて発電所で発電する。そこで CO<sub>2</sub> を回収して

貯留する。LNGの場合、ガスのコンロでも使えるが、これをCCSにするのはほぼ不可能である。この場合、カーボンニュートラルを達成しようとする、大気中に出たCO<sub>2</sub>を大気中でDACCSのような形でCDRすることによりCO<sub>2</sub>を貯留する。これでもカーボンニュートラルは達成できる。全体的にCCSを行ってカーボンニュートラルを実施する手段は存在している。もしくは植林という手段があり、ガス会社も実施しており、「カーボンニュートラルLNG」という商品名でガス会社から販売されている。これは海外で植林をしてそのクレジットを使う形でLNGから出てくるCO<sub>2</sub>をオフセットするものである。植林の量は限られるので、部分的にはできるが大量にはできない。この場合はDACCS等のCDRが必要になる。

**[2]水素システム：**ブルー水素、グリーン水素を液化水素の形で持ってきて、水素発電する手法である。これもカーボンニュートラルになる。この場合難しいのは、一般家庭等でこの方法を用いるためには、新しく水素用の導管を引かなければならない点である。これはコストがかかる。水素のガスコンロなどは想像しがたい。そこはどうするのか、完全に電化をするのか、ということになる。水素のパイプラインも必要になる。コストを考えなくてはならない。そうすると、e-methaneシステムに可能性があることになる。

**[3]e-methane(合成メタン)システム：**大気中に出るCO<sub>2</sub>を回収し、これを水素と合成してe-メタンの形にして持ってくる。そうすると、日本で燃焼した時はCO<sub>2</sub>が排出されるが、海外で一度吸収している、正味で見るとカーボンニュートラルになる。こういうものでもカーボンニュートラルができる。[1]～[3]いずれも完全なものではなく、どの方法が費用対効果に優れるかが、課題となる。おそらく、部分的に混ざってくるものと推測される。それを考えながら対策をとる必要がある。

### 23. 自動車燃料のCN化オプション例

同じことが自動車でもいえる。完全電動化(純電気自動車[BEB])だけがCNではない。HEVもかなりエネルギー効率が高いので、それでオフセットする方法もある。しかし、植林でオフセットできる量は限られるため、DACCSを使うと高価になる。このため、合成燃料を混ぜていくという手段もある。また、ペルーあたりまで、船便でプラグイン・ハイブリッドとして電気を休ませておいて、排出量を減らしておくことで、オフセットしなければならないCO<sub>2</sub>の量を減らし、一部だけオフセットする方法もある。今後、いろいろなバリエーションがある。トヨタ自動車では、一時、ハイブリッド戦略を批判されていたが、BEB一辺倒では難しいと認識されるようになりHEV, PHEVのほうが売れている現実もあり、「マルチパスウェイ」の戦略に移りつつある。但しCNを達成するためには、残ったCO<sub>2</sub>はオフセットする必要がある。そのためには、DACCS, BECCS等の手法も必要になる。長期的には、合成燃料に変わってくる可能性もある。

### 24. 日本におけるe-methane他技術のコスト構造

海外の合成メタン、海外の液化水素の内容にも示されているが、CO<sub>2</sub>を回収して合成する費用は、水素の製造費用に比べると高くない。合成したとしても水素を液化して持ってくる費用よりは安いと予想される(「日本エネルギー経済研究所」試算参照)。大部分は水素を改質して合成する費用が占める。このため、水素か、アンモニアか、合成メタンか、合成燃料かという比較になると、どれも似たものになるので、その時に使いやすいものを用いればよく、様々な戦略が可能になる。水素の費用が下がれば状況は変わる可能性がある。

### 25. 原子力の役割、課題、展望

#### 26. 原子力の安定供給等における優位性

原子力100万kWと同量の発電量を得るために必要となる土地面積は、原子力であれば約0.6km<sup>2</sup>、火力であれば約0.5km<sup>2</sup>で済むの

に対し、太陽光では100倍の約58km<sup>2</sup>、風力では約214km<sup>2</sup>となる。すなわち薄い密度の自然エネルギーを利用するためには土地が必要になる。土地の少ない日本では無理をして設置せざるを得ず、住民とのトラブルが増えている。ウランの国内在庫日数は2.9年分であり、化石燃料よりもかなり有利である。

## 27. 原子力発電の審査と再稼働状況

日本では再稼働は12基であり進んでいない。設置変更許可は5基、審査中10基、未申請は9基である。廃炉は24基である。大きな課題はあるが原子力発電の稼働時のメリット、CO<sub>2</sub>へのメリットは非常に大きい。1基稼働することにより、燃料コストは350~630億円/年を削減できる。CO<sub>2</sub>は260~490万ton/年を削減できる。原子力には大きな課題があるが、稼働した時のCO<sub>2</sub>と経済性のメリットは非常に大きい。このため、リスクとのトレードオフをよく考えなければならない。

## 28. 日本の原子力発電容量の見通し

2050年に向けて、全基が40年運転する仮定では2050年に3基、60年運転の仮定では2050年に23基、2060年に8基である。原子力がない状況では、再エネ、CCS、水素を使ってもカーボンニュートラルは厳しくなる。

GXに対して原子力をより活用すべきとする基本方針が昨年認められた。水素、アンモニアを海外から日本に輸送する方法もあるが、コストは高い。また、海外でDACCSをしてクレジットでオフセットする手段もあるが、国として認めるか、ルールの問題もあり難しい。

## 29. 海外の状況

### 30. 英国の原子力政策の動向

英国は合理的な考え方で動く傾向にある。原子力にネガティブな時期もあったが、気候変動リスクが大きいと、カーボンニュートラルを目指し、原子力を進めることに熱心になった。原子力政策の資金調達の仕組みとして、RABモデルを導入して原子力を導入してきている。このモデルは総括原価主義そのも

のである。原子力は長期で見ればメリットが非常に大きい短期では少ない。民間企業は長期を見て投資はできないので、10年等で投資判断せざるを得ない。そこで、RABモデルのような総括原価主義を用いて、民間企業も長期のメリットが出る形で、原子力発電所建設を支援し、気候変動対策を進めている。

### 31. フランスの原子力政策の動向

一時、原子力を低減すると述べていたが、撤回して建設を進めている。再生エネルギーも進めている。

### 32. その他の動き(小型原子炉[SMR]の開発)

小型原子炉(SMR)が流行している。その理由は、技術習熟効果が働きやすい事である。そのためには、相当多くの導入が必要である。本当に多くの導入ができるか、そこまでコストの習熟が進むか、軽水炉が良いのか、安全対策がしっかりした次世代の軽水炉が良いのか、SMRが良いのか、見極める必要がある。しかし、電力を自由化すると、初期の設備費が非常に高くなるので、大規模なものには投資しにくい。そこで、自由化している州はSMRに行きやすく、自由化していない州はMWR(軽水炉)に行きやすい。制度に依拠する部分もある。技術のオプションを沢山持つことも必要である。但し、社会的受容性は非常に重要だが、日本ではそれがまだある訳ではない。

### 33. 国際エネルギー機関 IEA の Net-Zero

#### Emissions シナリオ(2023年度版)における原子力発電所の設備容量

2050年CNにむけた原子力発電の見通しを示す。先進国は横ばいである。新設は2010年にかけてほぼゼロに近い位置に来ていたが、2040年にかけて相当戻ってくるのではないかと、戻らないと2050年にCNは達成できないのではないかとIEAは考えている。原子力発電所の建設は中国では進むと考えられている。

IEAは2021年にも2023年度版でCNの見通しを出している。大きく見込んだのは太陽光発電と原子力である。原子力は状況が良くな

っており大き目に見込まれた。一方、風力は低めに見込まれた。色々と壁に当たり増えていない。水素と CCS はまだ離陸できていない。

その他に電気自動車が多く見込まれる。但し太陽光と電気自動車は中国の政策で牽引されているので、今の状況が続くか、慎重に見る必要がある。

### 34. 原子力政策の今後の進め方

エネルギー安全保障、安定供給、電気料金抑制の問題があるので、原子力発電は低減の方向にあるが、原子力に向き合う必要がある。再稼働の加速、次世代革新炉の開発・建設、運転期間延長（60年超えも可能）、予見性の確保などで、国が前面に立つ方針が示された。

### 35. エネルギー需要の展望と低エネルギー需要社会の実現の可能性

#### 将来の発電電力量の主要な要因

ここに来て、半導体工場を多数建設する必要性が出てきている。しかもデータセンターが沢山できる。このため、これまで電力需要は下がってきたが、今後、電力需要が大きく上昇する可能性がある。但し、電源（発電所）が無いという制約がある。電力需要があるのに、電源が無いために経済発展の機会を失う懸念がある。データセンターは2年間で作り、2年後には電力を供給する必要がある。しかし2年間で電力を供給できる場所が無い。発電所建設には5～10年を要する。

我々は冷静に今後の電力を見る必要がある。発電電力量の上昇要因には所得効果、気候変動による電力需要増大効果等がある。これは量的には大きくない。今の問題は、デジタル社会への変化に必要な電力需要の増大である。BEV等の増加需要もあるが何よりデータセンターや半導体工場が政策的に入ると相当増える。他方、発電効率の低下・無駄もある。CCUSを導入するとCO<sub>2</sub>を回収する動力が必要になるので発電電力量を増やす必要がある。例えばCO<sub>2</sub>を鉄で回収すると、エネルギー効率が下がるので、電気を余計に出す必要がある。

蓄電池を通すと70%程度が戻り、30%は無駄になるので、発電電力量を上げる必要がある。今言ったのはデジタル社会に関するもので、むしろ発電電力量を上げなくてはならない。水素製造、DACCSでも電力需要は増える。一方、これまで起こってきた状況は減少傾向である。人口減少、途上国に対する労働生産性の相対的な低下等によって、エネルギー多消費産業が海外に出ていく。海外は労働生産性が高く優位になり、中国や日本が出ていく。

あとは、価格効果による需要側の高効率化、電力の省エネルギー化ということになるが、国際的、相対的な電力コスト上昇に伴って、海外に出ていく、すなわち、温暖化対策をとりすぎるために、日本の電気料金ばかりが高くなる。例えば再エネを入れすぎると、賦課金が上がり、そういうものを導入していない国との電気料金の差が上がってきて、益々電力多消費産業は海外に行ってしまう懸念がある。そうすると、日本の電力需要は下がってくる。こうしたことが、複数の上昇・下降要因が重なり合った状況でどうなるのか、見ていかなければならない。また、こういったものがある中で、どう対策をとっていくか、雇用を維持しながら日本経済を発展させながら、それでもカーボンニュートラルにどう向かっていくのか、を考えなければならない。

### 36. データセンターの電力消費:消費増大はそれほど大きくないとする論文

2020年に発行されたサイエンスの論文によれば、世界のデータセンターの電力消費量は、2010年に194TWhであったものが、2018年に205TWhとなり、需要では世界全体の消費電力量の1%に増加したといわれる。電力消費量の増大分としては6%増大した。但し、計算インスタンス輸出としては550%増加した。それだけ分に相当するエネルギー効率が改善したという事である。よって、今後も電力の効率は上がるとサイエ

ンスの論文は述べている。但しそれに対する反論の論文も出ている。

この論文は、もうムーアの法則は消滅するであろうと述べている。そうすると、計算量は増えてくるがエネルギー効率は改善しないので、エネルギー消費量は膨大に、急速に増大するのではないかといわれている。この論文は、Science の論文に反論する形で出されている。但し、なかなか分からないというのが正直なところである。

### 37. データセンター・ネットワークの電力消費

#### 38. JST による推計

次に国内の JST が推計したデータセンター、情報通信ネットワークの電力需要を示す。エネルギー効率の改善が全くないと仮定した場合(As is)、Modest と Optimistic とを比較すると、国内の optimistic なケースでは、上がデータセンター、下が情報ネットワークの電力需要である。データセンターについては、2018 年頃は 10TWh 超が、2050 年は 100TWh になると予測される。日本の電力需要が 1000TWh であるので、その 1 割をデータセンターが占めると予想される(楽観的に見ても)。

情報通信ネットワークでも 100TWh であり、両方合わせて 200TWh と大量の電力需要が予想される。こういうものが追加されてくると、日本の電力需給がどうなるのか、仮に電力が供給できない場合、世界が発展する中で、日本経済が取り残される可能性があり得る。

### 39. 利用段階別の世界のエネルギー利用量(消費エネルギー)

他方、省エネルギーの余地についてである。この図は、一次エネルギーに対する比率を利用段階別に見ている。一次エネルギーを 100% としたとき、各段階でロスしているエネルギーを示す。最終エネルギーは、運輸では 90% を超える位で線が引かれている。これは化石燃料、原油からガソリンを精製するのに 10% のロスがあることを示す。一方、発電のとき

ろでは 33~34% のロスとなる。これは発電効率に相当し、世界平均でかなり低い効率になっている。熱として大きくロスしている。ただし有効エネルギーにかかわると、発電と運輸とで逆転する。これは、自動車が内燃機関であるので、熱を大きくロスし効率が下がるためである。一方で、電気の場合はモータで使えるため、ロスが 10% 位と少ない。そういう使われ方になっている。

ここで申したいのは、「サービスエネルギー」であり、それを拡大したものが一番右側の図である。最終的なサービスエネルギーとしては、平均して一次エネルギーの 4~5% しか活用できていない。一次エネルギーの 95% は無駄になっている。サービスエネルギーとは、典型的には照明であり、人がいない所で照明がついていることがある。これはサービスに寄与しないのでサービスに入らない。最近ではトイレに人感センサーが設置され、人が入室した時のみ照明が入るしくみになっている。この場合、サービスに寄与する時だけエネルギーが使用されるものとなっている。こういうものが、世の中に沢山ある。エアコンもそうであり、人感センサーがついており、人がどこに居るか、暑さはどうかを見て、集中的に敵正温度で冷房できるようにしている。まだまだ DX、デジタルの力を使って省エネルギー化ができると考える。

### 40. IT, AI 等のデジタル技術による社会変化と低エネルギー需要・低炭素排出社会の可能性

スマホ 1 台で、表に示す電気製品等の様々な機能を代替できるようになっている(完全な一対一代替ではない)。家電製品の電力エネルギーパワーは 449W、待機電力は 72Wh、エンボディードエネルギー 1,706kWh となっている。エンボディードエネルギーとは、この製品を作るのに投入されるエネルギーである。

それに対して、一番左側であるスマホの場合、パワーが 5W(家電 449W)、待機電力 2.5W(家電 72W)、スマホを作るエンボディードエネル

ギー75kWh(家電1,706kWh)で済む。すなわち、エネルギーを大幅に低減できる。かかるデジタルデバイスの進展によって、我々の社会が変わると、ものが変わり、ものに体化されるエネルギーが減って、エネルギー全体が減らせる可能性があるのではないか？こうした社会を追求していく必要がある。

若い世代にはスマホで十分と考える人が徐々に増えている。その可能性は確かにある。また技術の進展につれて、直接エネルギーを減らすだけでなく、サービスに体化されたエネルギーや、製品に体化されたエネルギーを減らす事も含めて考えていく必要がある。

#### 4.1. 運輸部門:CASE

CASEはまさにサービスに体化されたエネルギー削減手段の典型である(Connected Autonomous Service and Share Electronic)。例えば完全自動運転になると、マイカーの稼働率が5%であるのに対して、これが深夜カー、カーシェア、ライドシェアとして利用されれば、自家用車の稼働率は20%まで上がるとすれば、稼働率は4倍に向上し、車の台数は4分の1で済む。自動車の台数が減るのは非常に大きなリスクである。しかしこれは、気候変動対策や政策とは無関係に、そのほうが利便性は上り、資金を投入しなくて済むので、技術の進展結果として、自動的に移行していく可能性がある。

また、台数は減っても1台当たりの高い付加価値で稼ぐモデルに変化し、あるいはそれをサポートする交通システム全体で稼ぐような社会が変われば、物質の消費量を減らすことが可能になる。車の台数が減ると、そこに体化されている鉄、化学製品、ガラス、プラスチック、ゴム等が減り、立体駐車場や道路が減る可能性がある。すなわちデジタルにより低炭素排出社会が実現することとなる。

#### 4.2. デジタル化によるエネルギー消費・CO<sub>2</sub>排出への影響

IPCの最新報告書では、デジタル化によりCO<sub>2</sub>排出量、エネルギー消費量がどれ位減るかを住居、食べ物、教育エンターテインメント(例えばe-video、e-music、e-publication、

等)で評価している。モビリティ(移動体)についても評価している。但し、どういう仮定、バウンダリーの下で計算するか、どういう技術が出てくるかによって、推計値に幅がでる。場合によっては、リバウンドにより、逆にCO<sub>2</sub>排出量、エネルギー消費量が増大する場合もある。こうしたものをどう実現してCO<sub>2</sub>削減につなげるかが重要である。

#### 4.3. シェアリング経済、サーキュラーエコノミーによるエネルギー消費・CO<sub>2</sub>排出への影響

自家用車の種類には内燃機関、ハイブリッド、プラグイン・ハイブリッド、純電気自動車、燃料電池車が挙げられる。しかし、これらの差よりも、乗車人数が圧倒的にCO<sub>2</sub>排出量に効いてくる。1人ではなく複数人が同乗することにより、CO<sub>2</sub>排出量は圧倒的に減少する。ウーバーだけでなくデジタルの力でこうした乗り方ができ、しかも完全自動運転が実現されれば、CO<sub>2</sub>を圧倒的に削減する乗り方が実現できる。完全自動運転のハードルは高いが、その可能性も見ていく必要がある。

#### 4.4. 日本のカーボンニュートラルに向けたシナリオと費用

カーボンニュートラルへのシナリオに向けてどれ位の費用を要し、ポテンシャルがあるかを検討する。これにはモデルを使った評価によりシステムを全体として見る必要がある(先生のご専門であるが時間の関係上、説明を省略)。世界全体で部門が整合的になるように、費用とポテンシャルを見ていく。

#### 4.5. シナリオ想定(概略)

最初のシナリオは、海外クレジットを活用するケースであり、世界費用最小化と記す。これは、日本で費用最小化と1.5°C以下を実現するのではなく、世界全体で費用を最小化しながら1.5°C以下の目標を達成しようとするケースを示す。日本でDACCSを実施するのは高価であるため、海外でDACCSを行ったケースである。次のシナリオは、日本国内でカーボンニュートラルを実施した場合である。但し技術は将来不確実であるので、例えば再エネのコストが下がった場合、原子力をもっと活用できた場合、水素の製造コストが

下がった場合など、これらのパラメータをふって評価した結果である。評価結果が、「日本の部門別 CHG 排出量(2050 年)」である。

#### 46. 日本の部門別 CHG 排出量(2050 年)

第1は、海外クレジットを活用し、世界全体で費用を最小にしたケースである。このケースでは、日本でカーボンニュートラルを達成せず、日本は63%減までで良い、ということになる。そのほうが全体経済は合理的になる。残りの37%は、日本の排出量を残しておいても、それを海外の DACCS、BECCS、植林等でオフセットしたほうが、世界全体としてのコストが安くなる。但し、残り37%分のクレジットを海外と交渉ができるか否かという問題はあがるが、コスト計算上は、残したほうが良い結果となる。

次に、日本国内でカーボンニュートラルを実施した場合、「ステイ」に出ている部分と「負」に出ている部分とが丁度オフセットしている。冒頭の IPCC のグラフでは、CO<sub>2</sub>排出量で正負のグラフを示している一方、日本政府の目標は GHG でカーボンニュートラルと言っているの、CO<sub>2</sub>以外の non-CO<sub>2</sub>-GHG もオフセットしている点異なる。それも含め、CHG 排出量の上と下(正と負)が同じ高さとなっている。但し、完全に non-CO<sub>2</sub>-GHG をゼロにすることは難しいので一部残り、それも含めて、DACCS、BECCS(発電所でバイオマス発電をして、そこで出てくる CO<sub>2</sub>を回収して貯留する)で CHG 排出量のグラフが一部で負に出ている。多くの分野では植林もあるが、植林だけでオフセットすることは難しいので、DACCS も使ってオフセットしている。そのほうが、経済合理的である。ただ、もう一回海外クレジット活用ケースを見ると、このケースになると当然、日本で DACCS をするという結果は出てこない。海外で DACCS をしたほうが安く合理的である。

#### 47. 日本の一次エネルギー供給量(2050 年)

この時、日本の一次エネルギー供給量がどうなるかであるが、省エネルギーはかなり進んでくると予想される。日本の人口が減って

くる問題もあり、一次エネルギーは減ってきている。海外クレジット活用ケースであると、ガスと石油がかなり残っている。これは、温暖化ガスを63%減で留めたほうが良いことから、CO<sub>2</sub>原単位の良い天然ガスはまだそのまま使ったほうが良いことによる。残る部分については、海外で DACCS、BECCS を実施したほうが経済合理的である。

残るケースであるが、日本国内でカーボンニュートラルが成り立つと、当然ながら再エネを増やす、原子力が増やせるケースについては、MAX を増やす。あとは CCS、合成メタン、合成燃料を一部使う、水素やアンモニアを海外から輸入する、ということになり、これらを組み合わせたほうが経済合理的となる。

#### 48. 日本の発電電力量(2050 年)

日本の発電電力量は、一次エネルギーとは異なり、いずれのシナリオでも2015年に比べて増えている(いずれも Wave limit)。海外クレジット活用ケースでは、ガスをそのまま使う、あるいはコジェネを活用するという手段が合理的である。その他のケースとしては、太陽光、風力が増えつつ、水素アンモニア発電、もしくは CCS など、様々な組み合わせになっている。原子力については、2050年で発電電力量の上限値10%(原子力活用のケースのみ20%)を設けており、上限値いっぱい利用することが経済合理的である。原子力は相対的には安価なので、原子力の使用量は上限値に貼りつく。原子力を増やせばその分、太陽光、水素アンモニア等が追い出される状況である。

#### 49. 最終エネルギー消費量(2050 年)

最終エネルギー消費量であるが、電化を進めることが重要である。但し電化一辺倒になるわけではない。やはり高温熱があるので、天然ガスが残り、天然ガスで厳しいケースでは E-メタン、合成メタンに変えるケースもあり、水素アンモニアも一部で使うことになっている。水素は、主に鉄鋼で使い、直接水素還元製鉄で水素の排出量をゼロにしている。但し、悩ましい課題があり、液化水素の形で日本に持ってきて使うと、鉄

の価格が非常に上がる。この分析は、日本で鉄を生産する前提条件で解いている。

無理をしても日本で水素直接還元製鉄により鉄を生産するという前提であるが、本当にこの条件で、日本で鉄が作れるのか問題が別にある。それだけ高い鉄を作るのであれば、安い水素がある所で鉄を作って、鉄の形で日本に運んだほうが、運ぶコストが安いので、そうなる可能性がある。仮に日本で鉄を作らなければならない制約があると、水素直接還元製鉄を活用するのは合理的となる。

#### 50. CO<sub>2</sub>限界削減費用、エネルギーシステム 総コスト、電力限界費用:日本

海外クレジット活用ケースでは、CO<sub>2</sub>限界削減費用は168ドルとなる。カーボンプライスに相当する。安価な対策から順番実施して最後の1本を削減するのに世界全体でいくら対策費用がいくらかかるかが、海外クレジット活用ケースのCO<sub>2</sub>限界削減費用である。

一方、参考値525ドルの値以下になると、国内限定となる。国内で順番に安い対策をとって、最後にカーボンニュートラルになるときに費用が525ドルと非常に高くなる。海外も含めて、視野を広げて対策するのが望ましい。また、電力の限界費用も相当に上がっている可能性があり、とりわけ再エネ100%を国内で実施しようとする、非常に高くなり、電力の限界費用の何倍にもなる。やはり、エネルギーのミックスは非常に重要となる。それをグラフにしたのが

51. 「**図 日本の2050年の部門別・技術別の排出削減ポテンシャルコスト**」である。横軸に排出削減ポテンシャル(ベースライン比CO<sub>2</sub>削減量)、縦軸にその技術のコスト(CO<sub>2</sub>限界削減費用)を示す。グラフ右端ほどの技術がどういうレンジにあるかを示す。原子力は混焼されると20~50ドル位になる。原子力は以前にはネガティブで負の排出であったが、今は様々な対策コストが増えてポジティブのコストとなっている。但し20ドル/tCO<sub>2</sub>から50ドル/tCO<sub>2</sub>位である。その上にCCSがあり、それと重なる形で海外から水素やアンモニア

を運んでくる水素アンモニア発電があり、その上の限界的な所にDACCSのコストがある。

太陽光発電や風力発電は右端にあり、安いところもあり、ネガティブなコストもある。これはIRENAの分析を示すが、火力発電より安いところがある。原子力より安くなることもある。しかし、量を増やそうとすると、条件の悪い太陽光と風力を使わなければならないため(天候、風の強さ、向き等)、kWh当り単価が上昇する。逆に言うとtonCO<sub>2</sub>当りの単価が上昇する。さらに、景観の対策、需給バランスをとるためのコストが相当上がってくる。全体のコストはグラフの面積になる。これを小さくする対策が重要である。そうすると、なるべくCO<sub>2</sub>削減費用が小さいものから使うべきである。原子力は10%に制約した部分であるが、かりに10%を増やせば全体の面積をもっと減らすことにつながる。

太陽光、風力のコストがもっと下がれば、CCSに関しては貯留が難しい場合があるので、少し厳しい制約を置いたケースもある。見え方は変わるが、色々な技術を組み合わせなければならぬことに変わりはない。

#### 52. 日本の2030年▲46%の産業別生産量

日本では、2030年にGHGを46%減と言っているが、その達成には相当コストがかかる。場合により、鉄や化学などエネルギー多消費産業に大きなインパクトが出る。流れとして、先進国から途上国に向けてエネルギー多消費産業が移ってきている。さらにこのカーボンプライスの違いにより、さらに誘発され、エネルギー多消費産業が日本や先進国から途上国に移るリスクがある。すると日本や先進国のGDPが大きく下がる可能性がある。

#### 53. 日本の2030年▲46%の要因別経済影響 (RITEエネルギー経済モデル DEARSによる推計)

政府は経済と環境の好循環を主導し、好循環をもたらす投資の促進が検討されている。但し、あまり高価な対策をとると、投資は促進するが消費が減り、輸入が増え、輸出が減り、GDPが下がる可能性がある。相手がどれくらい削減するかを見ながら戦略を立てる

必要がある。そうしなければグローバル(世界全体)に CO<sub>2</sub>が減らない。着実かつ柔軟に対応することが重要である。

#### 54. GX 政策動向

#### 55. 政府の GX 実現に向けた政策のロードマップ

最後に、政策の動向であるが、GX 実現に向けて政府が方針をかかげ、20 兆円の経済公債を発行し(発行したばかり)、その後は官民あわせて 150 兆円を 10 年間で引き出していく考えである。これは大変に重要な取り組みであり、しっかり進めることは重要である。しかし、場合によっては 20 兆円の借金だけが残る可能性もあるので、しっかり見極めて良い技術に資金を張らなくてはならない。さらに繰り返しになるが、コストを上げすぎると、結局、技術は開発されても使うのは日本だけとなり、日本で使えばエネルギーコストを上げ、他のエネルギー多消費産業を海外に誘導するだけになる。そこを見る必要がある。

この政府の取り組みは、経済公債という形で、将来の財源として取っていく。それを先に投資をしてしっかり勝っていくというスキームであるが、失敗すると将来に借金を残すだけになりかねないリスクも見必要がある。

#### 56. GX 投資促進策の方針

日本の GX 投資促進予算であるが、エネルギー供給側が 50 兆円規模、需要側で 100 兆円規模と政府は考えている。

#### 57. GX 分野別投資戦略:製造業関連

鉄で言うと、水素還元製鉄、電炉というところにしっかり投資をすると書かれている。化学分野では、アンモニアへの転換、ケミカルリサイクル、バイオケミカル、CCUS を実施していくと書かれている。

紙パルプではバイオリファイナリー、セメントでは CCU がかけられている。運輸関係では当然ながら蓄電池が重要であり、電動化ということである。

SAF(持続可能な航空燃料) の他、新しいカーボンニュートラル燃料の開発を進めていくという事である。但し、大部分は水素のコストが占めるので、水素のコストが下がらな

れば全体のコストは下がらない。このため、そこを見ながら、どういったレベルでカーボンニュートラル燃料を増やしていくのか、ペース感には十分注意していく必要がある。SAF はバイオ燃料ということで重要である。その他には、資源循環、半導体等が挙げられている。

エネルギー関連では、水素等と書かれている。水素は、アンモニア、合成メタン、合成燃料を含み、まだどのエネルギーが一番良いか、今は決めきれていない。適材適所という事があるので、全方位でかけていく方針が打ち出されている。

再エネに関しては、ペロブスカイト電池、浮体式洋上風力にかけていきたいということである。陸上の中では、普通の風力、太陽光は増やす余地があまりないので、これまでは載せられなかった窓などにも軽いので載せられるようになるのでそういうもの、あとは洋上に出ていこうという方針である。

原子力については、繰り返すが、次世代原子炉なども実施していく方針である。CCS も実施していく方針である。

今後 5 年間、さらにその先の GX 経済移行債の振り分け先のおよその金額も年末に政府は提示している。大体、今年度の支援金額として 2.4 兆円赤字分であり、それ以外に青字分を含めると 13 兆円の規模感まで決めてきている。但し 20 兆円といわれているので、残り 7 兆円分はまだ配分を決めていない。

#### 58. S+3E の総合的なバランスが重要(まとめ)

安全・安心(S)と、エネルギーの安全保障・安定供給、経済性、環境(3E)のバランスをどうとっていくかがエネルギー戦略の基本中の基本である。どれかが欠けると結局長続きしないので、しっかり進めていく必要がある。

カーボンニュートラルを目指していかなければならない。色々な可能性がある(水素、アンモニア、E-メタン、E-fuels)。しかし万能なエネルギーは無い。

但し一方で、使用電力量はこれまで下がってきたが、色々な段階で上がってくる可能性がある。半導体やデータセンターもあり、色々

なエネルギーに転換していかなければならない。その基は電力という事になる。従って電力需要は上がってくる可能性が高いので、その準備をしていく必要がある。

<講演会参加者数>

83名

<出展・参考資料>

秋元圭吾氏:「エネルギー政策のゆくえ～産業への影響と今後の取り組みは?～ならびにGXに向けた挑戦」、日本技術士会中国本部  
2024年2月24日講演会 配布資料  
(講演テキスト)