

総論 エネルギー問題を自分事として考える

集中型の大規模発電から 分散型発電への課題について

藤本 浩嗣

ベスタス・ジャパン(株) シニアスーパーバイザー



CO₂ 排出量増加による影響は

2021 年 7 月 29 日に科学誌 Nature に、非常に興味深い内容が掲載されていました。コロンビア大学地球研究所のダニエル・ブレスラー (Daniel Bressler) によると、4434 トンの二酸化炭素を環境中に排出すると 1 人の死を招くと算出されました。具体的には、世界の気温が現在の上昇率で上がり続けた場合、2100 年までに 8300 万人が死ぬと予想されており、本研究は二酸化炭素による気温の上昇と、死者の増加についての初めての研究になります。彼は本論文の中で、二酸化炭素排出量削減について強く訴えていました。

COP26 を終えて

国連気候変動枠組み条約第 26 回締約国会議 (COP26) が 11 月 13 日に閉幕したことは記憶に新しいですが、その中でも石炭火力発電の表現をめぐる各国がかなり激しい応酬をしていたのは印象的です。例えば、議長案として、石炭火力発電について「排出削減対策が取られていない石炭火力発電の段階的な廃止のための努力を加速する」としていました。しかし採択直前になりインドの代表が「廃止」という文言を「削減」に変更することを提案すると、一

部の国からは拍手が起こっていました。その後も議論は続きましたが、最終的には議長は声を詰まらせながら「最も大切なのは文書全体が守られることだ」とおっしゃり、インドからの提案を受け入れることとなりました。まだまだ化石燃料などに頼らざるを得ない状況下に置かれている国々もあり、二酸化炭素排出量削減には時間がかかるのだらうと強く考えさせられる内容となったと思います。しかしながら、「気温の上昇を 1.5 度に抑えることを目指すことに各国が認識を一つとした」という点は、大きな一歩ではないかと思います。

二酸化炭素排出量を減らしたいが石炭火力など二酸化炭素を排出するものは廃止できないこの矛盾を、今後どのように解決していけば良いのでしょうか。日本も先進国の一つとして脱炭素を目指していく中で、その答えを導き出さなければならない状況にあります。

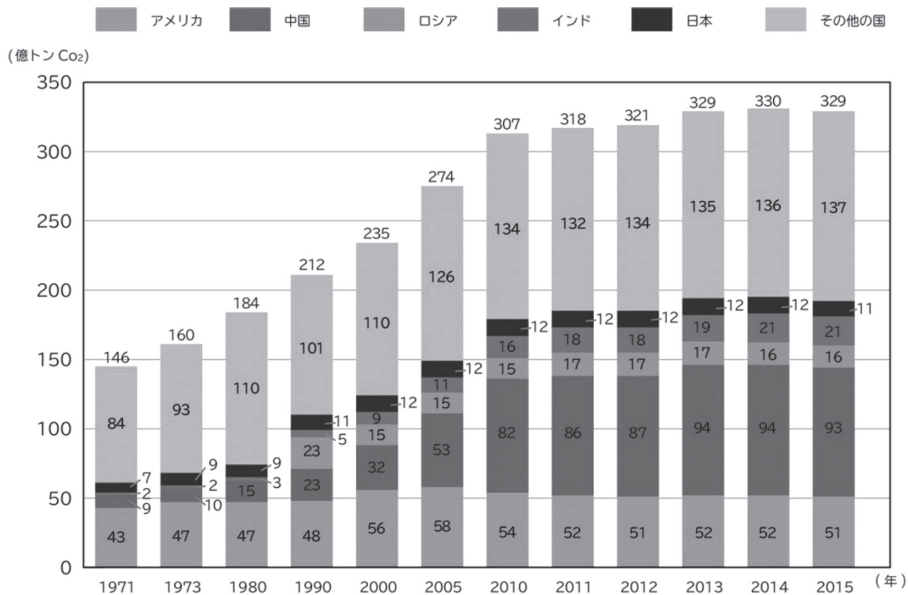
世界の現状と日本

このような背景を踏まえ、まずは世界の二酸化炭素排出量の推移をみていくことにします。以下にそのグラフを示します。

全世界の排出量でみると、1971 年と比べて二酸化炭素排出量は 2 倍以上に増えていることが分かります (図表 1)。この中

でも大きく影響していると考えられるのが中国で、10倍以上と急激に伸びていることが分かります。2019年データでは115

億トンを超えているため、脱炭素化として中国やアメリカを中心とした活動が非常に重要であることが分かります。

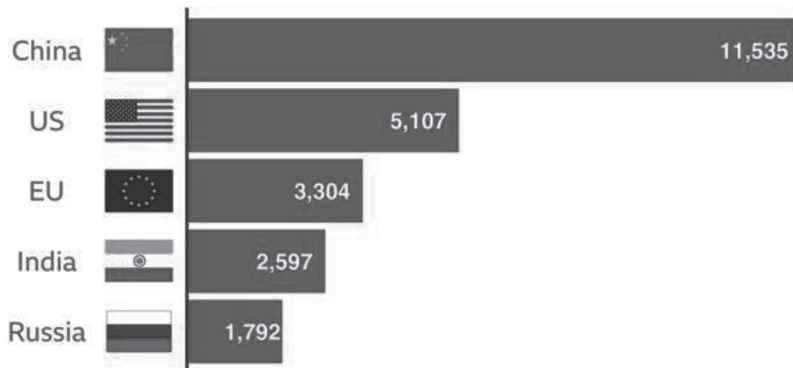


図表1 各国の二酸化炭素排出量の推移

出典：エネイチ ウェブサイト (<https://eneichi.com/useful/2192/>)

The top five emitters of carbon dioxide

Megatonnes of CO₂ per year



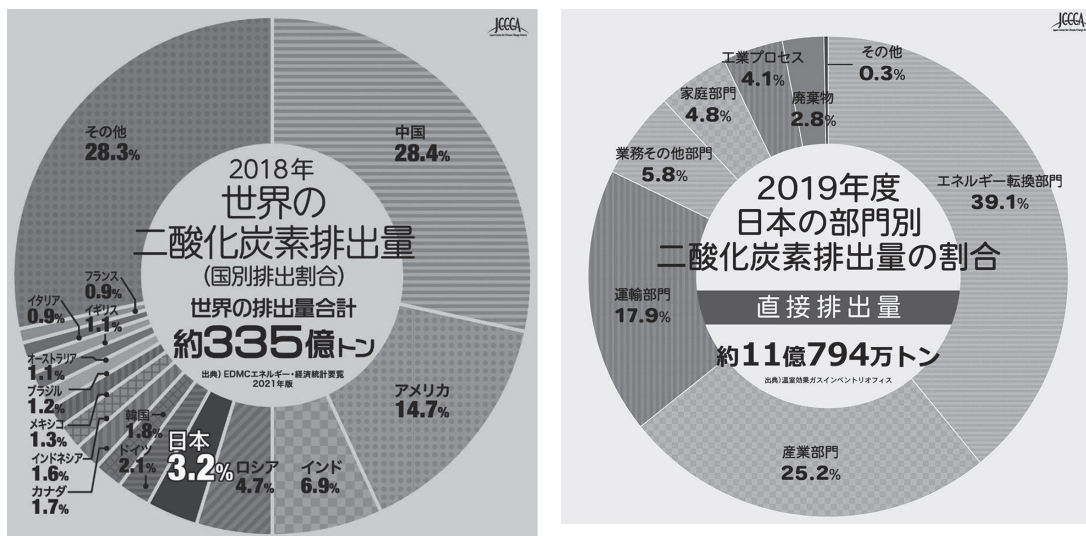
2019 data, EU includes UK
One megatonne = 1,000,000 tonnes

Source: EC, Emissions Database for Global Atmospheric Research

BBC

図表2 上位5カ国の二酸化炭素排出量

出典：EC、Emissions Database for Global Atmospheric Research



図表3 世界の二酸化炭素排出量と日本の部門別二酸化炭素排出量
出典：温室効果ガスインベントリオフィス／全国地球温暖化防止活動推進センターウェブサイト
(<https://www.jccca.org/>)

次に、国別の排出割合を見ていくと、以下のようになります。

中国、アメリカ、インドで世界の排出量の半分以上を占めていることが分かります。日本はこれの中でも第5位に入っており、脱炭素への責任は十分にあると考えられます（図表2、3）。

では、日本の中での分野別排出量についてみていくとどうなるかを示したものが以下になります。ここから分かるように、排出量の約4割をエネルギー転換部門、すなわち電力が占めていることが分かります。二酸化炭素を排出しないような電源を拡充していく必要があるということになります。

そこで、現在の電力構成の主力である集中型大規模発電から、脱炭素として主力に挙げられる再生可能エネルギーのような分散型発電についてみていくことにします。

日本の電力事情

政府は10月22日に「再生可能エネルギーを最優先に最大限導入する」方針を掲げた新たなエネルギー基本計画を閣議決定しました。その内容では、2030年度の電源に占める再生可能エネルギーの比率を2019年度実績の18%から36～38%にまで引き上げると書かれており、再生可能エネルギーの主役としては太陽光を主とし、風力や水力などが記載されていました。まず、現在の発電タイプの割合について最新情報を基に見ていくこととします。

現在の総発電所の最大発電量は以下のサイトからダウンロードが可能です。
(https://www.enecho.meti.go.jp/statistics/electric_power/ep002/results.html)
そこから抜粋して纏めたものを以下に示します。あくまで経産省に認可・登録されている発電所の情報であり、最大出力の合計になります。

ここから、二酸化炭素排出量を増やす原

因となりえる火力が主力であることが分かります。ちなみに、この中で石炭火力は20%近い容量になります。ここから再生可能エネルギー割合を36～38%まで引き上げるのですから、太陽光や風力をどの程度まで増やせるかが鍵となってきます。

図表4 発電タイプ別最大出力

発電タイプ	最大出力(kW)	割合
水力発電	49,607,584.6	18.4%
火力発電	170,223,267	63%
原子力	33,083,000	12.3%
風力	3,792,908.6	1.4%
太陽光	12,839,696.3	4.7%
地熱	468,790	0.2%
その他	42,910	—
総計	270,058,156.4	

出典：資源エネルギー庁ウェブサイトより作成。

二酸化炭素排出量を減らすためには再生可能エネルギーに頼らざるを得ない状況は理解できますが、再生可能エネルギーに偏った電源構成は安定供給の面で問題が大きいのではという懸念があります。例えば欧州では進んでいる風力発電ですが、2021年9月、欧州の電気料金が上昇しましたが、主原因は欧州で夏以降に風が減少する事態が広範囲で発生したことにあります。北海での風量が過去20年間で最低になったことで、夏の風力発電量が欧州全体で昨年比7%減少し、火力発電に頼らざるを得ない状況となりました。石炭火力発電所の廃止を進めている欧州の主要な燃料は天然ガスであるため、天然ガス需要が急拡大したことにより、価格が高騰、電力料金が急上昇してしまいました。発電量予測についてはAIを駆使し、気象予報と需給予測データを組み合わせながら再生可能エネルギーによる電力需給の変動に対応しようとしているのが欧州の状況で、各国間の電力融通な

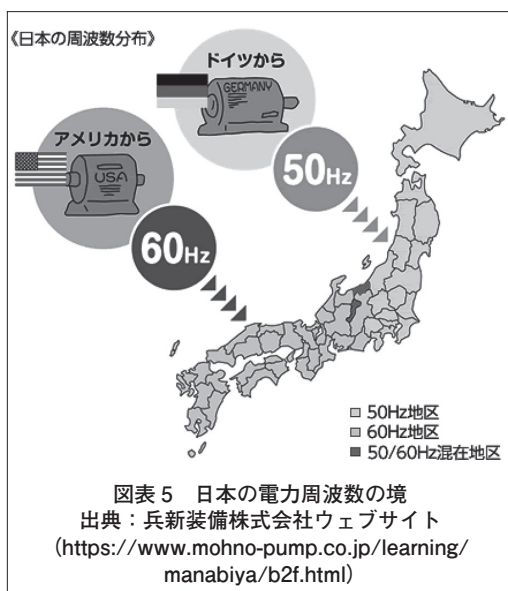
ども可能な状況ですら、想定外の気候変動に悩まされています。

これらの情報をもう少し分かりやすくするため、各設備がどれだけ利用されるかの割合を見ていくことにします。風力や太陽光は自然任せのエネルギー源になりますので、実際に発電できる量というのは、「設備利用率」によって見る必要があります。設備利用率とは、発電設備の実際の発電量が仮に最大稼働していた際の発電量の何パーセントほどであるのかを示す数値になり、この数値が高ければその設備を有効利用できているということになります。太陽光発電や風力発電などのような自然現象で発電する設備である場合、設備の設置されている環境が設備利用率に影響を与える要因になります。設備利用率は経済産業省やNEDOなどが指標を示しており、太陽光発電の設備利用率の指標が13%、陸上風力発電が20%、洋上風力発電が30%、水力発電が50%、地熱発電が70%、火力発電や原子力発電で80%になります。これが意味するところ、火力発電や原子力発電で100MW出力が可能な1基の発電所があったとして、太陽光発電に置き換えた場合、単純計算で1年間あたり615MWの太陽光発電所が必要になってくる計算になってしまいます。

現在の火力発電、まずは石炭火力の20%にとって代わるだけの容量を現在の設備容量および設備利用率から考えると、太陽光だけで現在の24倍以上、風力だけで67倍以上の設備が必要になってきます。実際には、電力の需給バランスは「同時同量」でなければならないという点が重要であるため、電気が不要なタイミングで発電する可能性のある太陽光や風力については出力抑制や蓄電池などを用いた電力保管が重要になってきます。

「同時同量」とは、電気をつくる量（供給）と電気の消費量（需要）が同じ時に同じ量になっているということです。これらの量が常に一致していないと、電気の品質（周波数）が乱れてしまい、最悪の場合は安全装置の発動によって発電所が停止してしまい、大規模停電をまねく可能性があります。2018年9月に発生した北海道全域の停電はこの電力需給バランスの崩壊が原因で発生しています。

この周波数は50Hzもしくは60Hzが基本です。電圧は各国微妙に差がありますが、50か60で一つの国は統一されています。しかし日本は50Hzと60Hzが混在している国です（図表5）。世界を探してもほぼない、珍しい国です。なぜこうなったのか、歴史的な背景もあります。



電気をつくる発電機は明治時代に輸入されました。関東にはドイツ製の50Hzの発電機を輸入し、関西ではアメリカ製の60Hzの発電機を輸入し、これにより、それぞれの周波数で東日本、西日本に広まり、

今日に至っています。西と東で電気を共有できるよう、周波数変換所という場所が、長野県の新信濃変電所と静岡県佐久間周波数変換所、東清水周波数変換所の3箇所で行っていて、変換能力は計約200万キロワットです。

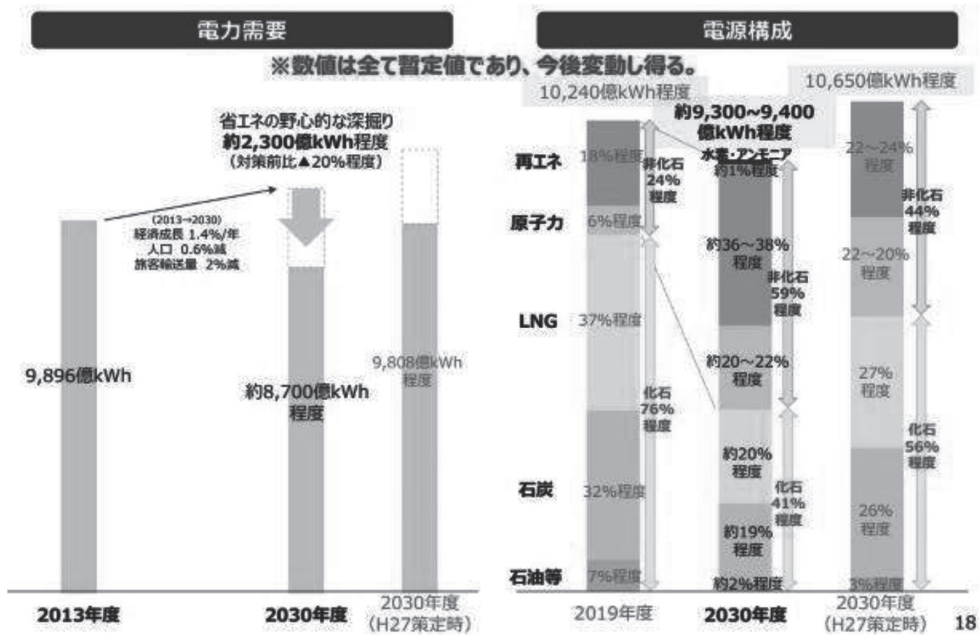
震災直後も西日本から東日本へ電力融通の応援をしていましたが、上限があるため電力不足を解消することはできませんでした。現在、経済産業省と電力会社は周波数変換所の増設に向けた検討を行っています。増設するまでにはまだまだ時間がかかると言われています。

以上のように、再生可能エネルギーや日本特有の問題点も山積されており、すぐに変更していくのは難しいのが現状です。しかし、地球環境を維持・改善していくためにも脱炭素化に向けた行動を進めていく必要があります。

日本の脱炭素化に向けて

日本の電力消費量は2020年度についてはCOVID-19の影響により若干の低下がありました。概ね横ばいを示しています。すなわち、現在の電力消費量に基づいてエネルギー計画を立てていく必要があります。日本政府は先ほど述べたように、2030年度の電源構成について、再生可能エネルギーを約36～38%程度（2015年策定時は22～24%程度）、原子力を約20～22%程度（同22～20%程度）、水素・アンモニアを約1%程度と、非化石電源合計で59%程度（同44%程度）となるようにエネルギー基本計画の素案を示しています（図表6）。

まず、石炭火力発電やLNG火力発電は、高効率化を進めつつ、環境への負担を減らすことも考慮しながら活用していく指



図表6 日本政府による将来のエネルギー計画

出典：環境ビジネスオンラインウェブサイト（<https://www.kankyo-business.jp/news/028931.php>）

針です。日本の石炭火力はSO_xやNO_xの排出量はきわめて少なく、欧米と比べてもクリーンなレベルになっています。例えばJ-POWERの磯子火力発電所は横浜市と日本で最初の公害防止協定を締結し環境対策を徹底しているそうで、2002年に生まれかわった時に排煙脱硝装置の導入だけでなく日本で初めての水を使わない排煙脱硫装置を導入し、SO_x、NO_xの排出量は主要先進国と比較しても一桁低い極めて小さい値となっています。それだけでなく、発電効率を上げて二酸化炭素排出量を抑える・回収するなどの対応を実施することで、燃焼時に発生する有害物質の除去だけでなく、脱炭素に向けて対応が可能となってきます。もちろんこれを使い続けるという流れにはならないでしょうから、自然エネルギーの普及に合わせて少しずつ減らしていくことも重要になってきます。

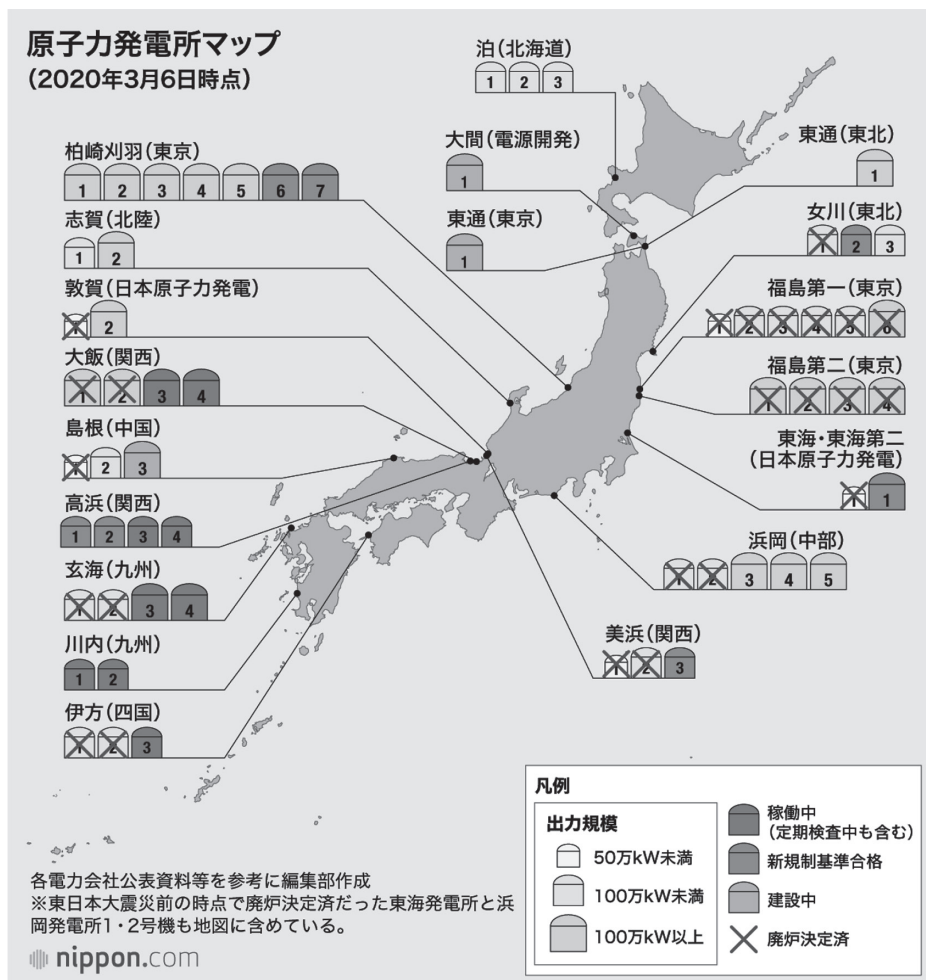
また、石油火力発電は、あくまで緊急時

のバックアップとしての利用も踏まえ、必要最小限の量を確保していくことになっています。

原子力発電については、安全性の確保を大前提として、原子力規制委員会により新規規制基準への適合性が確認された原子炉については再稼働を進めるとともに、徹底した省エネルギー、再生可能エネルギーの最大限の拡大、火力発電の高効率化などにより、可能な限り依存度を下げていくこととしています。実際、以下に示す通り、日本の原子力発電所の大半が廃炉となっています（図表7）。

これを見る限り、20%程度を原子力発電所に頼るという基本計画には合致しないように見えます。

筆者は先日、再稼働が認可された島根原発に足を運んできました（その他稼働している原発は仕事の都合ですべて訪れたことがあり、放射線管理区域内での作業も経験



図表7 原子力発電所の廃炉・稼働状況

出典：ニッポンドットコムウェブサイト (<https://www.nippon.com/ja/features/h00238/>)

しています)。

島根原発は、2011年に事故を起こした東京電力の福島第一原発と同じ「沸騰水型」と呼ばれるタイプで、同型の原発ではすでに全国で4基が合格していますが、必要な工事が残っていることや地元自治体の了解が得られていないことを理由にいずれも再稼働していません。島根原発2号機について中国電力は、耐震など再稼働に必要な工事を今年度のなるべく早い時期に完了することを目指していますが、原子力規制庁

は、中国電力が今後提出する詳細な工事計画の確認に「1年程度かかる可能性がある」という見通しを示しています。さらに、再稼働には地元自治体の了解が必要で、具体的な時期は見通せていない状況でもあります。そんな中で地元の人の意見として「本当に安全かどうか分からないので原発には反対だ」という意見がありました。地元の人ですら分からない部分が多いままであることがあるのです。筆者は友人とともに島根原子力館へ行き、実際の中国電力の取り

組みとして原子力発電所の安全対策はもちろんのこと、先に述べた火力発電の二酸化炭素排出量低減、自然エネルギーとの協和や蓄電、水素エネルギーへの転換などについて理解を深めました。特に友人は技術者ではない一般事務職であり、原子力発電の危険度や安全性について全く知らないままであったため、“今まで来る機会がなかったが、見学を通じて原子力だけでなくエネルギーに対するさまざまな理解を深めることができた”という言葉が印象的でした。何も知らないから反対するのではなく、少しでも理解を深めていただき、それでも反対であるのであればそれを貫いてほしいと筆者は考えます。太陽光や風力であっても、乱立による地盤のゆるみや保安林の損失、漏油などによる環境問題など、実際に知っておくべきことはたくさんあるのです。

話が少し逸れてしまいましたが、再生可能エネルギーの最大限の導入に向けての話に戻ります。まず、地熱発電や水力発電、バイオマス発電は、自然条件によらず、安定的な運用が可能です。そのため、環境や立地条件などの制約はありますが、可能な限り導入していくとしています。ただし、水力発電に関しては大規模発電所を増やしていくことは困難であるため、中小規模水力発電に期待したいところです。

また、太陽光発電や風力発電は、自然条件によって発電出力が大きく変動するため、発電出力を調整しやすい火力発電との組み合わせが必要となります。火力発電の燃料費の負担とのバランスを踏まえつつ、最大限導入していくとし、また、高い発電コストを現状よりも引き下げることが目標としています。太陽光の発電コストは2012年の40円/kWから20円を切るようになっていますが、風力は22円/kWに対して現在20円を切るか切らないか程度

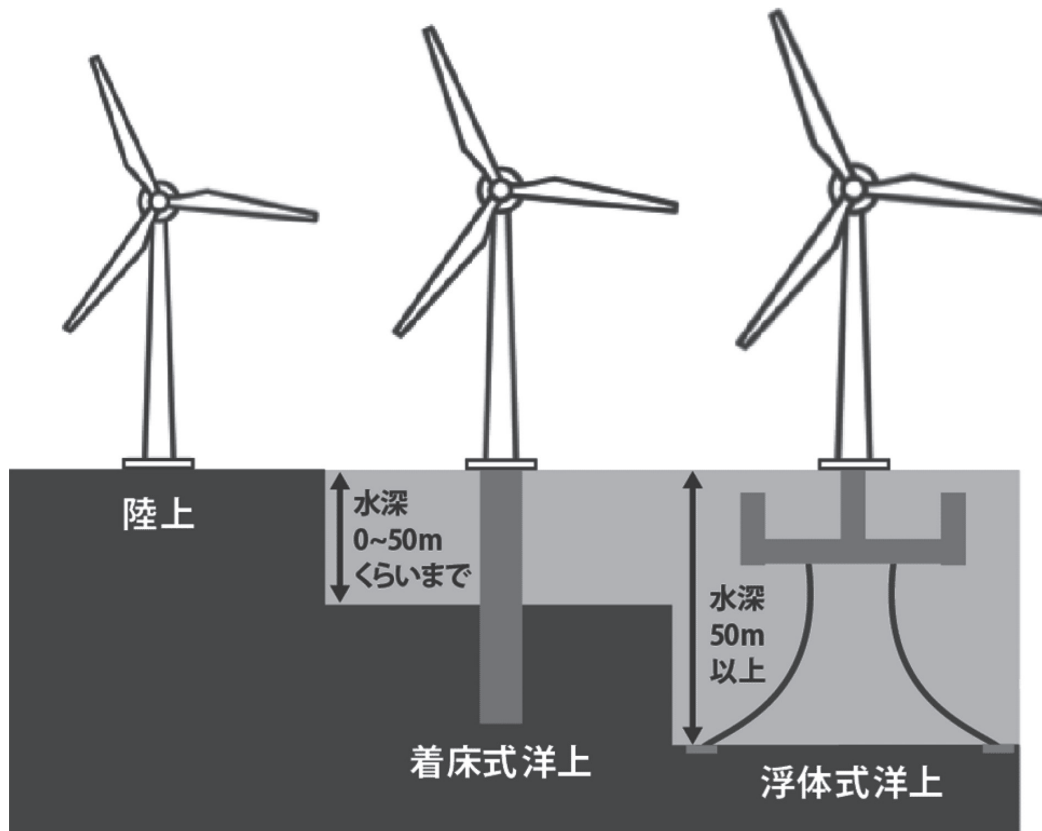
までしか下がっていません。どちらも欧州の倍以上の単価です。2030年には欧州レベルの発電コストまで下げるよう計画されています。どちらも先ほどの設備利用率が問題になってきますので、日照や風況がなるべく良い場所に設置することが望ましいことになります。その中でも近年注目されているのが洋上風力発電になります。

世界的に見ても洋上風力発電設置が加速しています。陸上に設置するスペースが限られてきたことや、海上には遮るものがないため安定した風況による発電が見込めることなどさまざまな利点を考慮してのものです。

ヨーロッパ近郊海域はそこまで深い海ではないため着床式が主に用いられます。日本の場合はこうはいかず、大陸棚から急に海が深くなる特徴があるため、浮体式を余儀なくされます(図表8)。日本は脱炭素社会に向けた2050年までの政府計画では、今後の開発電源として特に洋上風力に重点が置かれています。40年までに最大4500万キロワットと原子力発電所45基分に当たる量を目指すと言われています。1機あたりの定格出力を10MWとした場合、4500台の風車が設置されていくことになります。そのほとんどが浮体式、と考えてよいと思います。

ちなみに、日本初となる浮体式の洋上風力発電は長崎県にあります。2月末に実際に行ってみてきました。福江島に近い場所に設置されていました。だるまさんのように下側が重くなっている関係で、戦後最大の台風となった2012年の16号台風時、最大瞬間風速が50メートル/秒を超えて、波の高さは17メートルにも達しましたが、問題なく今も動作し続けています。

洋上風力設置に関して最大の難点と考えられるものとして、漁業や海洋環境に対す



図表 8 風力発電機の設置環境ごとの設置方法

出典：スマートグリッドフォーラムウェブサイト (<https://sgforum.impress.co.jp/article/4813?page=0%2C1>)

る影響があります。しかし、長崎福江の洋上風力には、むしろプラス面の期待が高まっています。水中から海底に向かって長く伸びる浮体の表面には、びっしりと海藻が付着しており、海藻のまわりに小魚が数多く集まり、それを追って大きな魚も寄って来ているそうです。東日本大震災の影響で海底地形が変わったのか、九州エリアですら近郊で獲れた魚が獲れなくなっているなどの影響がある中、このような海底の岩などに魚が集まる「魚礁」効果により海洋環境がプラスになっているものと思われます。こうして浮体の周辺に魚が集まってきた場合でも、近隣の漁場の漁獲量に変化が生じないか、定期的に確認しながら効果と

影響を検証することになっているそうです。地元の名産品であるイカは海藻に卵を産みつけることから、イカの繁殖につながる期待もあるとのこと。最近の漁業の問題点としては、魚がとれない、船の油代が高い、しかも魚価が安い、という三重苦に悩まされているそうです。洋上風車の影響により近場での漁業が可能になれば、それだけ効率も上がってきます。船が洋上風車で発電した電力で動作するようになれば、燃料代も不要になり二酸化炭素排出量も減ることになります。

ただし、洋上風車にも課題は山積です。コスト面で言えば、陸上風車の倍以上の設置コストがかかりますし、洋上によるメン



図表 9 風力発電機とともに設置される重力蓄電機（写真中央）
出典：Energy Vault 公式 Facebook より引用。

テナンスなどは陸地とは比べ物にならないほど安全対策を実施する必要があります。筆者自身、技術者として実際に過去に設置した洋上風車でのメンテナンス作業を行いました。その過程で何度も命の危険を感じました。これらの問題について、福島沖や北九州沖などで実証試験されていたものの知見を踏まえて今後の洋上風力に生かしていただければと思います。

以上、いろいろ見てきましたが、自然エネルギーへの完全シフトへはまだまだ課題が多く、現状の中で二酸化炭素排出量を少しでも減らしながら徐々に自然エネルギーに転換していくことが重要であると考えます。

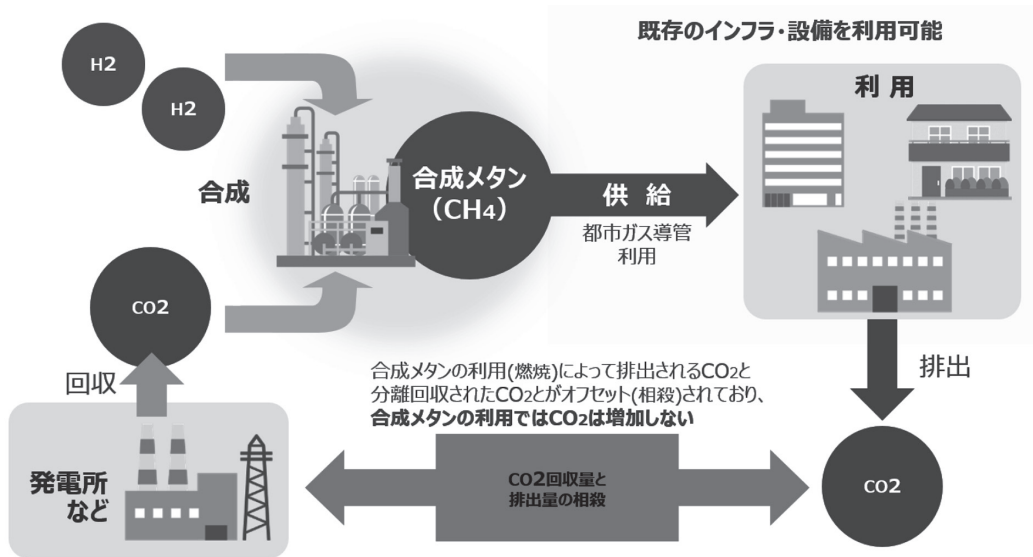
自然エネルギーを有効に活用するために

自然エネルギーを有効に活用するためには蓄電技術が何よりも重要になってきま

す。必要な時に使えないエネルギーでは安定供給はできないため、不必要な時に発生したエネルギーを蓄えて、必要な時に使うことができれば、自然エネルギーの普及にもつながってきます。蓄電、すなわちバッテリー技術は大規模なものを作り出すにはまだまだコストがかかります。そんな中で、古くて新しい技術「重力蓄電」を紹介します。

重力蓄電とは、電気モーターまたはウインチを動かして重りを下から上に上げる、つまり電気エネルギーを重りの位置エネルギーに変換して“蓄電”する技術になります。“放電”時は、逆に重りを上から下に下げてその位置エネルギーを電力に変換します。この技術は新しい技術ではなく、揚水発電システムとして100年以上前から電力系統で広く使われています。水を“重り”にしているのです。国内では蓄電容量で約130GWh、出力で約27GWもの揚水発電システムが稼働しています。

重力蓄電の仕組みは、地中15～150m



図表 10 メタネーションによる実質的な CO₂ 排出削減の仕組み
 出典：資源エネルギー庁ウェブサイト
 (<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyoku/methanation.html>)

の穴に 500 ～ 5000 トンの重りを吊し、発電機が取り付けられたウインチを使って上げ下げするシンプルな構造になっています。穴の深さや重りの重さによって、貯蔵できる電力量が変化します（図表 9）。

重力蓄電は構造がシンプルであり、汎用性が高いうえ、環境への負荷やコストも抑えることができるという点で優れていると考えられています。リチウムイオン電池より半分以下のコストで同容量のものが設置できるのも大きな特徴です。

蓄電技術については別の視点でも考えることができます。自然エネルギーにて発電した電力を用いて水の電気分解を実施し、水素を発生させることです。この水素を燃料電池等で用いることも考えられますが、ガスの脱炭素化を考えるうえでもこの水素が役立つのです。ガスの脱炭素化技術でもっとも有望視されているのは、水素（H₂）と二酸化炭素（CO₂）を反応させ、天然ガスの主な成分であるメタン（CH₄）を合成

する「メタネーション」です。メタンは燃焼時に CO₂ を排出しますが、メタネーションをおこなう際の原料として、発電所や工場などから回収した CO₂ を利用すれば、燃焼時に排出された CO₂ は回収した CO₂ と相殺されるため、大気中の CO₂ 量は増加しません。つまり、CO₂ 排出は実質ゼロになるわけです（図表 10）。

メタネーションが注目されている理由の一つとして、都市ガスの原料である天然ガスの主成分はメタンであるため、たとえ天然ガスを合成メタンに置き換えても、都市ガス導管やガス消費機器などの既存のインフラ・設備は引き続き活用できる点です。先日実証プラントを公開された日立造船など、さまざまな企業がガスの脱炭素に向けて動き出しています。

また、洋上風力発電などの再生可能エネルギーを養殖分野に生かし、新たな県内産業を生み出そうと長崎大学が研究に取り組んでいます。2050 年には AI = 人工知能

を導入して養殖の魚のエサやりを自動化することなどを目指しているそうです。漁業の担い手が減っても養殖を続けることができ、コストの削減にもつながるということです。実現するには海上でも電源を確保できる体制が必要になるため、洋上風力発電など再生可能エネルギーの需要が高まると見込んでいます。長崎大学は長崎の新たな産業を生み出すだけでなく、日本の水産業の再生にもつなげたい考えです。

その他潮流発電や小型原子力、フィルム型ペロブスカイト太陽光発電など、今後も注目していきたい新技術があり、それらをうまく組み合わせることで地球環境を維持・改善していくことができると、一人の技術者として注目していきつつ、その一翼を担う存在でありたいと強く思う次第です。