

エネルギーミックス 再生可能エネルギーの主力電源化

～待ったなしのエネルギー政策転換～

公益財団法人自然エネルギー財団上級研究員
木村 啓二

1、はじめに

■代替エネルギーへの転換目指す

私が所属している自然エネルギー財団は、2011 年の福島第一原発の事故を契機に設立された財団で、原発に代わるエネルギーとして、自然エネルギーや再生可能エネルギーへの転換を進めていくことを目的としています。今日の話は 3 つのテーマがあり、1 つ目は「エネルギー大変革の時代」と題しました。いささか仰々しいテーマですが、今やまさに世界全体がエネルギーシステムを大きく変えようとしている時代なのです。その中で日本のエネルギー政策がどう問われているのかを 2 つ目にお話しし、改訂されて新しくなったエネルギー基本計画についても触れたいと思います。これに関連して、自然エネルギー財団も 2030 年のエネルギーミックスについて提言しているのので、これを 3 つ目のテーマとして紹介します。

2、エネルギー大変革の時代

1) 化石燃料時代への変遷

■技術革新に伴い化石燃料が急増

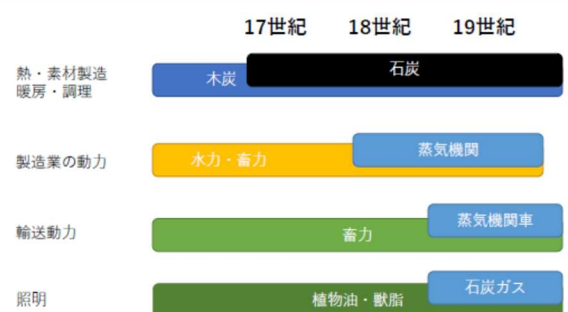
私たちが今使っているエネルギーの多くは、石油、石炭、天然ガスなどの化石燃料ですが、なぜ化石燃料に大きく依存するようになったのかを歴史的に振り返ってみましょう。16 世紀のイギリスでは、産業の発展に伴い、製鉄、精錬、ガラス製造などに使うたくさんのエネルギーが必要となりました。当時のエネルギー資源は木材から作る木炭で、木材をどんどん伐採した結果、イングランドの豊かな森林は丸裸になってしまいました。

その結果木炭価格が高騰したため、16 世紀末から安くて質の悪い石炭の利用が始まり、17 世紀にはほとんどの産業で石炭が使われ、18 世紀になると製鉄にも石炭が使えるような技術革新が起きました。こうした産業革命のもとで蒸気機関車などいろいろな発明があり、化石燃料をたくさん使って経済発展をするというシステムが出来上がってきました。

それを示しているのが右の図で、例えばエネルギーの各用途のうち、熱・素材製造・暖房・調理の分野では木炭から石炭に代わっていきます。製造業の動力では水力・畜力から蒸気機関へ、輸送では畜力から蒸気機関車へ、照明では植物油・獣脂から石炭ガスへとそれぞれ交代しています。

ここで使っているのはすべて石炭ですが、19 世紀半ばにアメリカで石油の掘削に成功すると、石炭より利点が多いとして世界中で使われるようになっていきます。同じころ、ファラデーの電磁誘導の法則の発見により、電気を作ることができるようになり、電気を使ってものを動かす電動機など、発電に伴う技術革新が起きました。同時に交流を使って電気を遠くまで流すことのできる送電技術も発達しました。こうした技術革新に伴い、世界全体の化石燃料の消費は急速に増えていきます。エネルギーの消

エネルギー利用技術の変化



費が特に拡大したのは1950年以降で、石炭、石油、天然ガスの消費が急速に増えました。そして大量生産、大量消費の社会が実現し、私たちは豊かな暮らしを享受できるようになったのです。

2) 気候変動問題

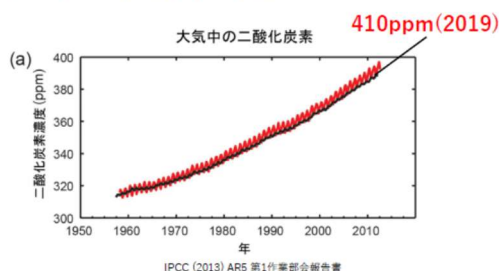
■200万年で最高レベルのCO2濃度

しかし化石燃料の大量消費により、いろんな問題が起こってきました。負の側面の1つは、化石燃料が燃焼過程で硫黄や窒素酸化物を出して空気を汚してしまうことです。最初にイギリスで深刻な大気汚染が起き、多くの人が呼吸器系の疾患で亡くなりました。日本でも高度経済成長期には公害が社会問題となり、今は中国やインドが大気汚染にさらされています。

2つ目は中東諸国との政治的対立です。石油は中東など世界の中の一部でしか採掘できないため、特に1950年代以降、石油を巡る対立が顕著に起きるようになりました。

温室効果ガスの濃度

- 2019年のCO2の濃度は410ppmで、過去200万年で最高レベルにある(高い信頼度)。
- メタンと酸化二窒素の濃度は、過去80万年で最も高い(かなり高い信頼度)



3つ目が気候変動問題で、まさに喫緊の世界的な課題として認識されています。化石燃料を燃やすと、気温を温める効果のある二酸化炭素が出ますが、左の図は大気中のCO2濃度がどんどん上がっている様子を示していて、産業革命前は280ppmだったのが2019年には400ppmにまで上昇しており、過去200万年で最高レベルとされています。同じく温室効果のあるメタンと酸化二窒素は過去80万年で最も高いということです。

これによって平均気温も上昇しています。最近出されたIPCC(国連気候変動に関する政府間パネル)のレポートによると、この100年で1度を超える上昇を記録していて、現在の地球上の平均気温は過去2000年で最も高いレベルにあるということです。また古気候学によれば過去10万年で最高レベルとされています。

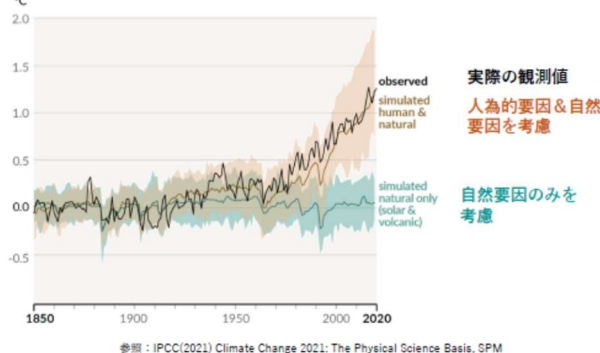
■温暖化は人為的影響が明白

温暖化の原因として様々な研究者が研究した結果、現在の急激な気温の上昇は人為的要因を考慮しなければ説明できないくらいのスピードと量であるとしています。下の図は地球の平均気温がどうなるかをシミュレーションしたもので、下のラインは太陽の黒点の変化や火山の影響など自然要因だけを考慮した平均気温がどうなるかを示し、上のラインは人為的要因を考慮したものとなっています。今の観測データを最もよく説明できるのは、人為的影響を考慮した場合となっており、このことからIPCCは人間の影響で温暖化していることは明白だと結論付けています。

温暖化によるいろんな影響のうち最も大きいのは水の被害です。温暖化によって大気中の水蒸気の量が増えることによって、台風や暴風雨などが増えてきており、2020年の世界のさまざまな気象災害のうち、台風・暴風雨の被害額は10兆円、洪水は5兆円にのぼります。

温暖化を引き起こしている要因の検討

「人間の影響で…温暖化していることは明白である。(IPCC, 2021)」



■もう化石燃料は使えない

生態系全体や人間社会を維持していくためには、気温の上昇を1.5度未満に抑えなければならないとされていて、そのためにはどこかで温室効果ガスの排出をゼロにしなければならないことが科学的に分かってきました。つまり、化石燃料は使えなくなるということです。

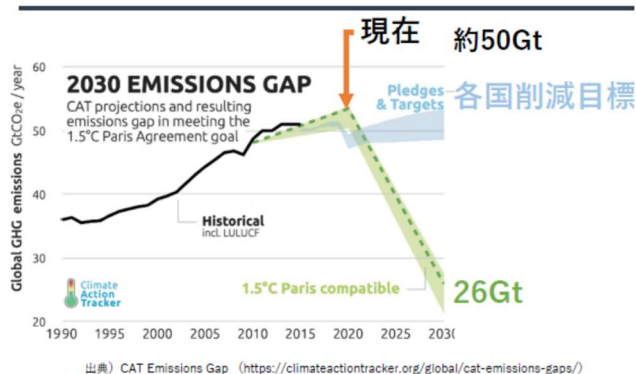
■1.5 度未満には温室効果ガス半減が必要

ここから先は政治の話になります。2015年にパリ協定が結ばれ、地球の平均気温の上昇を1.5度～2度未満に抑えるための努力をしようという合意がなされました。下の図は1.5度未満に抑えるための経路を示したものです。ドットのラインはそれを達成するために必要な排出量を示していますが、いかに急速に減らさなければならないかが分かります。

今、世界全体で50ギガトンの温室効果ガスが排出されているのですが、1.5度未満に抑えるためには2030年までに26ギガトンと、ほぼ半分にしなければなりません。各国がパリ協定の時に宣言した削減目標を守ったとしても、今とほぼ変わりません。つまり、このままいくと1.5度に抑えられないどころか2度を超える可能性もあり、今の削減目標では全然足りないということです。

アメリカはパリ協定に参加しましたが、トランプ大統領の時に脱退を宣言し、次のバイデン大統領は就任初日に復帰に署名しました。中国は昨年9月の国連総会で習近平国家主席が2060年までにカーボンニュートラル（炭素中立）を達成すると宣言しました。部門別の対策もさまざま行っていて、電力については再生可能エネルギーの普及をかなり進めています。自動車に関してもガソリン車を廃止して電気自動車を進めるとしています。欧州は90年代から削減努力をしてきていて、2050年までに炭素中立化を達成すると宣言しています。

パリ協定：1.5°C未満に抑えるための経路



■削減目標のさらなる積み上げ目指す

パリ協定の削減目標では全然足りないことから、さらに目標を積み上げようということで、アメリカが主導して今年3月に気候サミットが開かれました。この中でアメリカは、2050年までに炭素中立化をしていくなど、かなり野心的な目標を掲げ、欧州、中国、イギリス、カナダなども追随。日本は菅首相が2050年にカーボンニュートラルを宣言しました。これによって3~3.5ギガトンくらいの削減が積み上げられるのですが、50ギガトンから26ギガトンにしなければならないという観点から見ると、まだまだ足りないということになります。

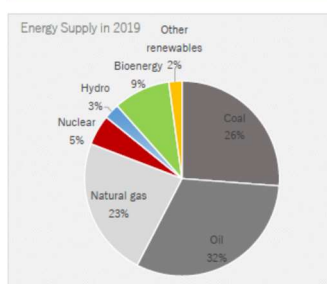
いまだに目標値の積み上げをやっていない国もあります。オーストラリア、インド、ブラジルなどですが、これは世界全体で取り組まないといけない問題なので、こうした国々にも頑張ってもらう必要があります。今年の12月に国連で気候変動の会議が開かれますが、そこで各国がどこまで協調して取り組むかが極めて注目されます。

3) 世界の再生可能エネルギーの現状

■バイオ9%。水力・太陽光・風力5%

下の図は世界全体のエネルギー消費の内訳です。黒っぽいのが石炭と石油で、両者で世界全体の6割を占めています。天然ガスは2割、原子力が5%、再生可能エネルギーは14%となっています。再生可能エネルギーで最も多いのはバイオエネルギー

世界の再生可能エネルギー利用率：14%(2019年)



Source: IEA (2020) World Energy Outlook 2020

- バイオエネルギー：再生利用の中で最大の利用量だが、多くは薪炭など旧来型のエネルギー利用
- 水力・その他再生エネ：主に発電用に利用されており、太陽光発電や風力発電等近代的なエネルギー利用技術を用いている。

で9%。水力・太陽光・風力を合わせて5%くらいです。

電気の分野では再生可能エネルギーがどんどん増えていて、世界の発電量に占める再生エネ比率は2010年には20%だったのが2019年には27%にまで増えています。電源構成を国別で見ると、再生エネ比率は欧州で4割超、中国が3割、日米印韓が2割となっています。

■カギを握る太陽光発電と風力発電

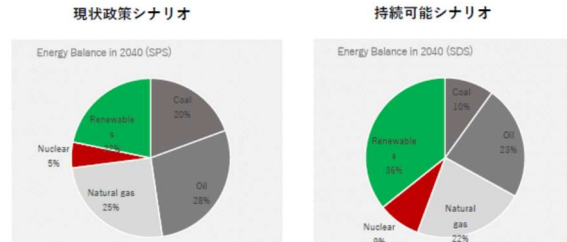
これから脱炭素を進めていくために、再生可能エネルギーはどれくらい見込みがありそうなのかについても研究が行われています。下の図は主に先進国がメンバーの IEA（国際エネルギー機関）の最新版のレポートです。2つのシナリオを示していて、左のグラフは今のままだったらどうなるかという「現状シナリオ」を示し、右は脱炭素を強力に進めていった場合の「持続可能シナリオ」となっています。

「現状」では 2040 年の再生可能エネルギーは 22% ですが、「持続可能」では石炭がかなり減り、再エネは 4 割近くまで増えるとしています。今は 14% ですから 3 倍近くになるということです。

再エネを増やす上でカギを握るのは太陽光発電と風力発電だとされています。太陽光発電は 10 年前にはほとんどありませんでしたが、世界中で導入が急速に進み、2020 年だけで 139 ギガワット、すなわち原発 139 基分が建設されました。風力発電もかなり増えてきています。

世界の再エネの見通し(2040年)

IEAのWorld Energy Outlook 2020：2つのシナリオによる2040年見通しによるとエネルギー転換の鍵は再エネ。



■急速に進む発電コストの低下

急増の背景にあるのはコストが安いこと、つまり経済性が優れていることです。IEA が 5 年ごとに行っている発電コストの検証によると、火力発電の発電コストが 1 キロワットアワーあたり 5 円から 10 円なのに対し、陸上風力発電は 5 円、太陽光は 6 円くらいです。世界ではこの 10 年で、再生可能エネルギーは高いというイメージから、一番安い電源だとの認識に大きく変わったのです。コストの低下はさらに加速しており、中東やポルトガルでの太陽光発電の入札では、1 キロワットアワーあたり 2 円前後にまで下がっており、化石燃料はもう太刀打ちできないところまで来ているのです。

2、問われる日本のエネルギー政策

1) 現代日本のエネルギー政策

日本におけるエネルギー政策上のテーマは、気候変動問題への対策と原子力の2点を言えるでしょう。1990 年代以降、福島第 1 原発事故をはじめとする原発関連の事故やトラブルが頻発しました。これを含め、エネルギーを巡るさまざまな課題が顕在化していく中で、長期的な視点に立った国のエネルギー政策をきちんと定める必要があるということで、2002 年にエネルギー政策基本法が定められました。その中で、エネルギー政策を進めていくための基本方針が打ち出され、安定供給の確保、環境への適合、市場原理の活用という 3 つの柱が提示されました。これに基づいて、経済産業省がより具体的なエネルギー基本計画を決めることになっていて、資源エネルギー庁の中にある総合資源エネルギー調査会が議論をしていくこととなります。基本計画は 3 年ごとに改訂され、いま第 6 次基本計画の策定作業が行われています。

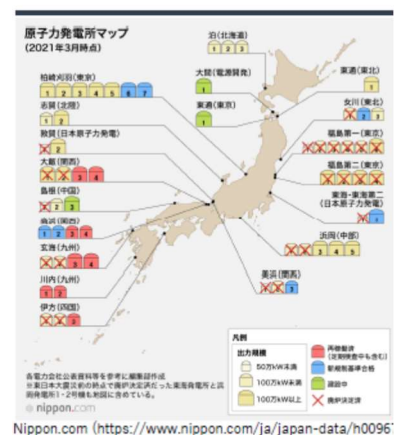
2) 原子力をどうするか？

■急速に進む廃炉

ここで大きな課題となっているのが原子力問題ですが、政治は少しずつ立場を変えてきました。菅内閣で福島事故が起こり、次の野田内閣は 2030 年代での原発廃止を打ち出しました。続く安倍内閣ではエネルギー基本計画が 2 回改訂され、原発への依存度は低下させるものの、2030 年以降も一定規模は維持するとしました。しかしこれだと国内での新設はできないため、海外に輸出することを成長戦略の一つとして掲げ、菅内閣でもこれが継承されました。右の図の×印は廃炉が

■気候変動問題と原子力が 2 大テーマ

老朽原発廃炉時代



決まった原発で、福島第1、第2、美浜1、2号機などかなり多くの原発の廃炉が決まっています。原発は1970年代から2000年にかけて急速に建設されましたが、2000年代に入るとほとんど新設されなくなりました。さらに2010年以降から廃炉が急速に進んだ結果、今の設備容量は30年前と同等の量にまで減ってきています。

■巨額の安全対策費が重荷に

電力会社が廃炉を進めている理由の1つは、福島事故を契機に原子炉等規制法が改訂され、原発の運転が40年に制限（1回のみ20年延長可）されたり、既存原発についても再稼働に際して巨費を要する安全対策が必要となったことです。2つ目は電力システム改革の影響です。福島事故以前、電力会社は地域に1つしかない独占会社でしたが、消費者が電気を選べる自由競争となり、電力会社は価格競争に勝つためにコストのかかることはしなくなりました。この安全対策投資というのはどれくらいかという、既存の原発では総額5.4兆円にのぼると見られています。各社ごとにみると関西電力は1兆円を超え、東京電力も1兆円近くに達しており、大きな重荷になっています。

■国の目論見と現実が乖離

原発輸出においても、これまで輸出を試みてきた国のすべてで、中止や行き詰まりとなっています。アメリカでは東芝が作ろうとしていましたが、かなりのコストオーバーをしてしまい、破綻の危機に追い込まれてしまいました。このように、国が目指そうとしている原子力の方向性と現実が乖離し、思ったようにうまくいかなくなっているのです。

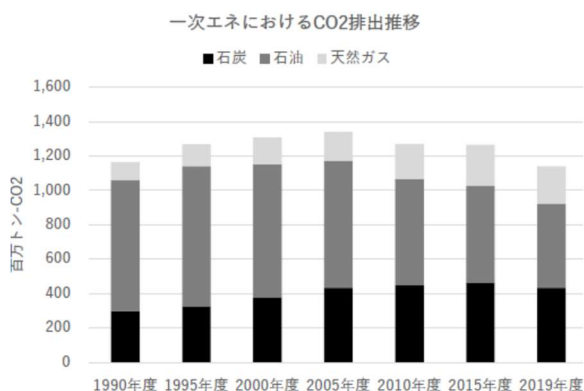
3) 進む日本の再生可能エネルギー

■再エネは2020年に20%超

2012年に再エネ特措法が施行され、再生可能エネルギーの電気を固定価格で買い取る制度が導入されました。これにより急速に、再エネの発電所がたくさん建設されました。同法施行前の2010年の再エネ電力比率は10%前後でしたが、2019年度には18%にまで達し、2020年には20%を超えたとの報道もあります。

気候変動への対策については、昨年、菅総理大臣が2050年までにカーボンニュートラルを目指すことを表明しました。そのための中間目標として、気候サミットにおいて、2030年までに2013年度比43%削減し、さらに50%削減にも挑戦すると宣言しました。

■減り続けるCO2排出量



ここで足元の状況を見てみましょう。左のグラフはエネルギーの利用に伴うCO2の排出量の推移を示しています。大きな流れとしては、1990年度から2007年度までは排出量は増えていました。その後2008年のリーマンショックで減り、2011年の福島事故でやや増えましたが、2015年度以降は減少を続けています。そして2019年度の排出量は2013年度比15%減となっています。年平均2.5ポイントずつ削減されていることとなります。

4) カーボンニュートラルに向けたエネルギー基本計画

■再エネを現在の8%から20%に

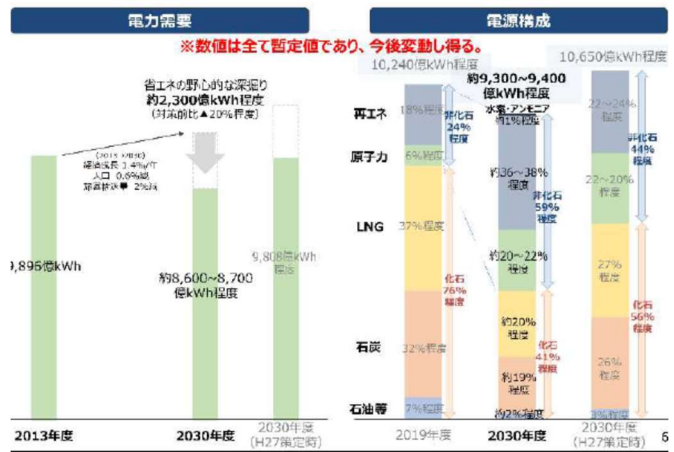
今後10年でどこまで行けそうなのかを探るために、いま議論されているエネルギー基本計画についてお話しします。まずは2030年に必要と思われるエネルギー量を推測するところから始めます。それには2030年の人口、世帯数、GDPなどを推測し、それに対してどれくらいのエネルギーを使いそうなのかを計算します。これに省エネのための政策の効果を加味するなどして、2030年に必要な最終的な消費量を推計するのです。

日本のエネルギー消費量はどんどん減っており、現在は基準年の2013年度に比べ10%くらい減少していて、2030年度にはさらに20%近く減るものと推測されています。

2030年度の必要量をどのエネルギーで満たすのかというと、再生可能エネルギーについては、現在の8%くらいから20%程度に高めることを目標としています。石油、石炭、天然ガスはもちろん下げているということですね。

ここで特に問題になるのが電気です。日本の電力需要は減っていて、2013年に比べ10%近く落ち込んでいます。そして省エネを含めた2030年の見通しは、さらに10%くらい減ると見込まれています。これを満たすための電源構成（上図）ですが、再生可能エネルギーは現在の18%から36~38%に、原子力は6%から20~22%にしたいとしており、その結果非化石電源は6割を占めることになるということです。

電力需要と電源構成



■政府見通しの達成が危うい原子力

これがその通りになるのかというと、ちょっと怪しいのが原子力です。現在稼働している原発は10基あり、600~700億kWhの発電が可能です。政府は2030年に1900~2000億kWhまで回復させる見通しを示していますが、それには現在審査中のものに加え、未申請分のものも稼働させなければ実現不可能な水準であり、常識的に考えて極めて危うい状況です。

■再エネ比率は国際的には見劣り

次に再生可能エネルギーですが、2019年度の発電電力量は1852億kWh（18%）で、今の政策を続ければ2030年までに2700億kWhくらいまで増えそうです。しかしこれでは足りないので政策を強化し、3000億、さらに野心的な数字として3300~3500億kWhまで目指し、電源構成を36~38%にもっていこうという見通しになっています。この36~38%という数字が世界的にはどうなのかというと、アメリカのニューヨーク州が70%、カリフォルニア州が60%、ドイツ、イギリスが65%ということですから、国際的にはまだ見劣りする水準と言えるでしょう。

■送電網の増強も不可欠

再エネを増やすためには発電所を増やすだけではだめで、送電網の増強が不可欠です。特に風力発電は北海道や東北に資源があるのですが、そこから関東地方まで送るための送電網が不足しており、国は新しく建設するためのマスタープランを作っています（左図）。

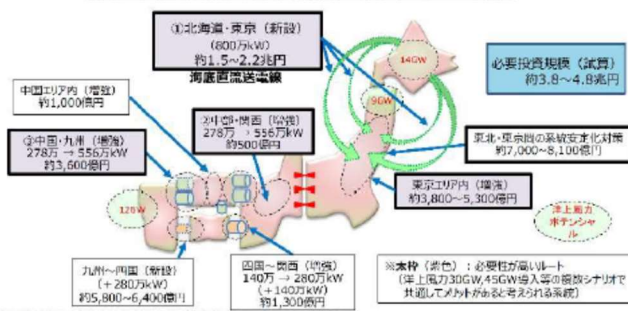
■石炭火力対応は二の足状態

脱炭素という観点から、石炭火力への対応も非常に重要です。いま石炭火力の発電量が約3000億kWhありますが、政府は、古くて効率の悪いものを壊し、新しく効率のいいものは残そうという方針です。

送電網の増強計画

- 再エネ主力電源化に向けて、系統制約を克服する取組は重要。
- 再エネポテンシャルへの対応、電力融通の円滑化によるレジリエンス向上に向けて、全国大での広域連系系統の形成を計画的に進めるため、マスタープランの中間整理を2021年5月にとりまとめた。新たなエネルギーミックス等をベースに、2022年度中を目途に完成を目指す。
- 北海道と本州を結ぶ海底直流送電等の必要性が高いルートは、順次、具体化を検討。

マスタープランの中間整理（電源備在シナリオ4.5GWの例）



ただし高効率石炭火力のCO2排出量は従来型より10%程度少ないのにすぎず、LNG火力より圧倒的に多いのです。こうしたことから、石炭火力への対応については、まだ二の足を踏んでいるような状態になっています。

3、自然エネルギー財団の2030年エネルギーミックス提言

1) 再生可能エネルギーの見通し

■再エネが46%を占める可能性も

財団では再生可能エネルギーをどこまで増やせるかを検討しました。その作業で重要視したのは、未計画ではあるものの、今後計画されていく可能性を探ることでした。具体的には、物理的には建てられるけれども、制度的に建てられないところに建てていったらどうなるのかなどを検討しました。例えば農地法で守られている耕作放棄地を農地転用するといった方法です。その結果、2030年までに今の2倍以上の発電ができることが分かったのです。そして、人口、経済成長率、省エネなどを考量した電力需要を推計し、それに対する再エネの比率を計算すると46%に達しました。

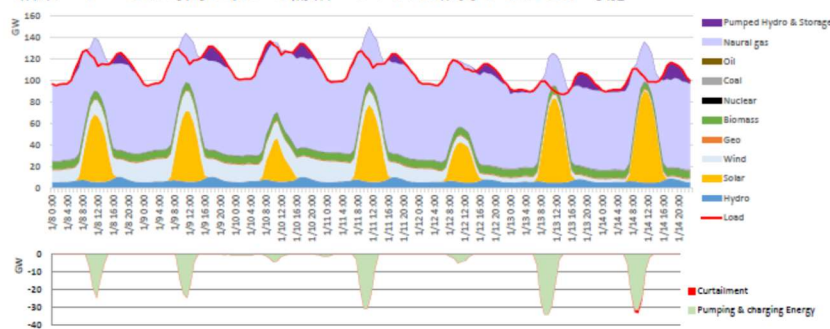
2) コストと需給バランス

■需給バランスの維持も判明

再生可能エネルギーの問題の一つとして言われているのは、お天気任せじゃないかということです。再エネを46%にまで高めたら停電は起きないのかという懸念ですね。そこで私たちは再エネを46%にした場合の1年間(8760時間)の電力需要を検証しました(下図)。太陽が照る時、照らない時、風が吹く時、吹かない時、足りないところは天然ガス火力で——といったことを細かく考慮して計算

再エネ45%以上は可能か？電力需給の検証

- 再エネ45%導入時の電力需給(1年間8760時間)をゾーンモデルをもとに検証した。
- 結果：すべての時間において需給バランスを維持することが可能



例：1月の最も需給が厳しい2週間

した結果、すべての時間において需給バランスを維持できることが分かりました。電力コストについてもシミュレーションしたところ、2019年の電力コスト(電力調達費用プラス再エネ賦課金)は9.9兆円でしたが、2030年はこれを下回る9.3兆円となりました。

4、まとめ

今後の日本のエネルギー政策を考えるうえで2つの論点があると思います。1つは原子力をどうしていくのかについて、政治的に真正面から議論していかななくてはなりません。2つ目は脱炭素を実現させるための実効的な政策をきちんと検討していく必要があります。これらについてさまざまな論点があり、解決済みでないものも多いですが、それは世界中同じです。

今後のエネルギー政策の課題

- 原子力：福島第一原発事故以降、日本の原発政策は方向を示していない。使い続けるのか止めるのかの判断が必要。破綻している核燃料サイクルの問題も。
- 脱炭素(カーボンニュートラル)へやるべきことは山積
 - 石炭火力：減らす実効性のある具体策が必要(カーボンプライシング)
 - 再生エネ：政府は主力電源に位置づけ、目標の引き上げ。導入の加速化どうする？
 - 省エネ：住宅の省エネ性能の義務化へ(国交省)
 - 電気だけでなく、熱や燃料での脱炭素をどう進めるか。エンジン車から電動車へ。素材産業の脱炭素化は？

【質疑応答】

Q 電気をすべて再エネにしてもカーボンニュートラルは実現しないのではないですか。

A エネルギー消費は電気だけでなく車、航空機、船舶、製鉄などで燃料を使っており、こうした分野でどうやって脱炭素するかが大きな課題です。方法の1つは電化ですが、自動車ではできても製鉄は電気ではできないので、水素で製鉄ができないか研究されています。

Q 地球温暖化の原因を巡る論争には決着がついたのでしょうか。

A 温暖化の議論は何をもって決着が着いたとみるかです。気候学者の間ではもう決着が着いていますが、1人でも違うという人がいれば決着とならないのか、1人くらいなら決着とするのかは、みなさん自身、あるいは政治の判断になると思います。

木村啓二先生のプロフィール

2013年より現職。専門は環境経済学、再生可能エネルギー政策論。

2007年に立命館大学大学院国際関係研究科博士後期課程修了、博士(国際関係学)。

自然エネルギー財団では、自然エネルギーの政策・制度的課題全般についての研究、発電コストの分析、自然エネルギー統計の整備に取り組む。

(著書)

- 『拡大する世界の再生可能エネルギー』(共同執筆、世界思想社、2011年)
- 『国民のためのエネルギー原論』(分担執筆、日本経済新聞出版社、2011年)
- 『地域分散型エネルギーシステム』(分担執筆、日本評論社、2016年)
- 『炭素排出ゼロ時代の地域分散型エネルギーシステム』(分担執筆、日本評論社、2021年)など。