

(2022年2月8日講演)

10. 「2050年カーボンニュートラル」への挑戦 — 日本の課題と電中研の取り組み —

一般財団法人 電力中央研究所 特任役員 企画グループ 長野浩司委員

この委員会はカーボン・ニュートラルという大変高い目標に挑む上での、日本の産業界、あるいは個々の企業の心意気、覚悟のようなものを示すその声明といふか、提言を世に示すのだということで活動を進めてきたと認識している。また過去の委員会で、実際にそういう非常に志の高いご講演をいただいてきた。私はいつも悪いくせで、自分のプレゼンテーションをぐちや泣き言で始める。きょうもその類で、今から私がお話しすることは、私自身はエネルギー分野の一研究者のつもりでいるが、このカーボン・ニュートラルという問題は、考えれば考えるほど本当に難しいことだと、本当にこんなことができるのかと思ってしまう。そういう泣き言に近いようなプレゼンテーションになってしまうので、委員会の趣旨とはなかなか合わないかもしれない。だがどこかの時点で、本当のところ現実的に言って、カーボン・ニュートラルというのはどういうことなのかをお考えいただくいい機会かとも思い、ちょっと開き直るようだけれども、お話をしたい。よろしくお願ひする。

今ご覧いただいているのは、私ども電力中央研究所の、私が昨年の6月まで所長をしていた社会経済研究所というところのウェブサイトにある私のプロフィールだ。電力中央研究所というのは、電力技術に関わる優れて技術系の研究所だ。私はその中にあって唯一社会科学部門である社会経済研究所の所長を名乗っていた。だが実は私自身は東大の原子力工学科の出身で、原子力が専門の理科系の人間である。一般教養でも経済など取ったことがないという、そんな人間が社会経済研究所の所長を6年にわたって名乗っていた。昨年の4月からは特任役員ということで、現在は本部の企画グループに在籍している。

業績等々もご覧いただければいいのだが、国際共同プロジェクトということで、最近は特にOECD傘下の原子力機関OECD/NEAとの共同プロジェクトに加わったりした。それから、2012年、もう10年前になるけれども、きょうのプレゼンでもちょっとだけ出てくるこのGlobal Energy Assessment、これは世界から200人ぐらいの研究者が参画し、出来上がった報告書は厚さ10センチ、驚くべきことに重さが5キロもあった。報告書というよりもドアストッパーに向いているのではないかと思うような報告書だった。その分担執筆に協力をしたという、これが一番最近だろうか。それからエネルギー資源学会の学会誌にずっとリレー連載をしてきて、20本ぐらいだろうか、書きためている。これも今年で一応一区切りとなる。

ついでなのでちょっとご覧いただくと、これは社会経済研究所のトップページなのだが、社経研コラムというボタンがここにある。これを押していただくと、私自身が書いた文章

が幾つかある。真面目なものもあるけれども、例えば「『努力』と『目標』～イチロー選手の引退に寄せて」という、これは2019年のイチローの引退のときに書いたものだ。このようなエッセイのようなものもやっているので、よろしければご覧いただければと思う。

それでは本題に戻る。きょうは『「2050年カーボン・ニュートラル」への挑戦——日本の課題と電中研の取り組み——』と題してお話しする。まず、電力中央研究所の宣伝を、せっかくの機会なのでさせていただきたい（P2）。電中研の発足自体は1951年で、さかのぼること71年前だ。昨年の2021年は創立70周年という記念の年に当たっていたが、生憎のコロナ状況下なので祝賀行事も記念品も金一封も何もなかった。電力中央研究所の前身の電力技術研究所として1951年に発足したのだが、1952年に名前が変わって電力中央研究所になった。そのときに、それまであった電力技術研究所に加えて、電力経済研究所という経済研究部門が設置された。これが1953年に正式に電力経済研究所という部門になり、電力中央研究所は電力技術研究所と電力経済研究所の2部門体制であった。

ご承知のように、設立者に当たる松永安左エ門は、設立に当たって直筆の巻物を残している。私どもの大手町の本部受け付けに来ていただくと見られる。この中で、設立時、既に「経済の知識を生かして技術の研究を行う必要がある」。それから、「電気事業に携わる各種の専門家が互いに入り交って、他の専門（土木、機械、電気）」、そしてここに「経済、法律」とある。「行住坐臥」は「ぎょうじゅうざが」と読むらしいのだが、この間にできるだけその知識を理解することが大事だと書いている。「行」というのはある地点から別の地点へ行くこと。「往」というのはある地点にとどまっていること。「座」は文字どおり座っていること。「臥」は寝ていること。つまり、人間として行うありとあらゆる行いの合間にもそういう努力をすべきだと言っている。

電中研が日本社会に果たした一番重要な役割は、この松永安左エ門が率いた産業計画会議というものの事務局を務めたことだろう。これは22年にわたって活動し全16件の提言をした。その中で実現した例を挙げると、旧国鉄の分割民営化。そして東京湾横断道路というのは、出来上がったものと比べると、もちろん輸送ルートとしての意味合いもあるが、どうも防潮堤としての役割を持たせようということもあったようだ。それから原子力政策では、原子力委員会の再編強化ということも言っている。1970年に経済研究所に改称し、2004年以降は現在の社会経済研究所という名前になっている。

歴史的にはマクロ経済モデル、日本の翌年度のGDP予測が中核的な研究であり、90年代に予測精度で一定の評価を上げていたと聞いている。ただこれには訳があって、特に金融系の方にはうなずいてもらえるかと思うのだが、銀行や証券の傘下の研究所だと、どうしても翌年のGDPによくなつてほしい。そうならないと自分たちの本業に差し障りが出るので、どうしても予測結果を高めに言うのだ。われわれはそういう忖度がなかったので低めの数字を平氣で言っていたというだけのことで、予測精度で一定の評価があった。その後歴史をたどることに対象や学術分野を追加・拡大していっている。私自身が加わった1980年代後半は、原子力政策だったり、エネルギー・システム分析というような具合だった。

このスライドには、日本社会が抱えていたいろいろな状況や電気事業の課題を挙げている（P3）。その中で、もともとあった計量経済学の知見を生かして産業計画会議の事務局を務めたし、その後にもいろいろなこういう専門分野を付け加えていくことで、研究課題も広がっていった。また、トリレンマ問題というものを記憶の方もいるかもしれない。90年代になるだろうか。当時の理事長が、エネルギーと環境と経済の3つが相克してなかなか難しい問題になっているという、その構造をトリレンマと呼んでいたのだが、それへの対応ということでいろいろな研究を展開した。最近では経営や、特にマーケティング理論のようなことも加えて研究分野の拡大を図ってきた。

ここからいよいよ本題に入る。きょうは大体この4つの塊でお話を進める（P4）。そもそもカーボン・ニュートラルとは一体どういうことなのか。カーボン・ニュートラルを2050年に実現すると日本は宣言しているが、公式な見解や計画、正式な文書ではどのように言っているか。それから、その中でも特に重要な鍵を握る、期待も大きい変動性再生エネルギー。具体的にVariable Renewable Energy、VREと略すのだが、これは現実的にどこまで導入が可能なのか。そして最後に、ちょっとだけこれも宣伝になるが、私どもがどう取り組んでいるかについて触れたい。

結論というか、きょうの報告のまとめになるが、まずカーボン・ニュートラルは、需要、つまりエネルギーを使っているところ、化石燃料を直接燃やしているようなものを徹底的に電気に置き換える電化と、電源構成の低炭素化、つまり化石燃料で発電するのではなく、再生可能エネルギーや原子力に置き換えていくこと、この組み合わせで達成するというのが王道だ（P5）。一方でどうしても化石燃料を燃やさなければいけない、残余の排出、正の排出があるのであれば、それは全く同量の負の排出で相殺しなければならない。

文章に書くのはためらわれたので省いたのだが、私はカーボン・ニュートラルを言う前に、カーボン・ニュートラルとCO₂の大規模排出削減、例えば日本政府が公式見解、目標としていた80%削減とは、全く違う世界だと思っている。80%削減であれば1990年の20%、少ないとはいえる程度の排出が許されるので、その排出枠を例えれば鉄鋼や産業界、運輸部門、その他適切なセクターに最適に配分するという合理的な決断ができるということで、合理主義の世界である。ところがカーボン・ニュートラルとなれば、正の排出があれば、それを同量の負の排出で相殺しなければならない。これは言ってみれば、言葉は悪いが問答無用の原理主義の世界だ。全く違うものだと思う。100と80だから、なんか似ているな、近いなと思うのだが、ゼロと20と思っていただければいいかと思う。その中でも特にコロナ時代を経験して、もう日本社会が元に戻ることはないと思うので、今後はこの両面で進めるのだが、特に需要の電化、需要側の対策の重要性が高まると認識している。

日本政府は菅前首相の宣言以来、2050年のカーボン・ニュートラル実現に向けた公式見解や計画を提示している。だがその達成に伴う不確実性や困難は大きいと認識している。特に電源構成の脱炭素化の鍵を握る再生可能エネルギーや原子力については、特段の努力を要するだろう。私ども電中研は電力エネルギーに特化した研究開発機関として、脱炭素

化と需給の最適化の両立を目指した研究開発を進めていく。

まずカーボン・ニュートラルとはどういうことか（P6）。いきなりの数式で恐縮だが、茅恒等式というものがある。長らく RITE——地球環境産業技術研究機関の理事長を務められ、今は顧問に退任されたが、東大名誉教授でもある茅先生が、見いだしたものだ。茅恒等式、Kaya identity として世界的に知れわたっている式をご紹介する。

ある地理的範囲。これは世界全体でもいいし日本でも、皆さまのご家庭でもいい。それからある時間範囲。これは 1 年でもいいし今日 1 日でも結構だ。ある地理的範囲、時間範囲において、常に次の式が成り立つ。こういう、 $CO_2 = 4$ つのものの掛け算である。これは何のことではない、分母の E と分子の E、分母の GDP と GDP、POP と POP がキャンセルするので、 $CO_2 = CO_2$ という、これは絶対に正しい、絶対に成立するという恒等式である。

変数の説明は、ある地理的範囲、時間範囲における、 CO_2 は CO_2 排出量。 CO_2 を E で割ったこのファクターは、1 次エネルギー消費当たりの CO_2 排出量。これは炭素強度というような言い方をする。E を GDP で割ったこの項は、GDP 当たりの 1 次エネルギー消費量。これはエネルギー原単位という言い方をする。GDP を POP で割ったこれは、人口 1 人当たりの GDP であり、POP は人口である。

あらためてこの恒等式を、当たり前ではないかと思わずによく見ていただきたいのだが、 CO_2 を減らしたい。そのためには、これは掛け算なので、例えばこの右辺の 4 つのファクターのどれが 2 倍になっても、左辺の CO_2 は 2 倍になる。どのファクターを 1% 減らしても左辺の CO_2 は 1% 減る。ではこれを減らしたいので、それを減らしてもいいのだが一個一個見ていく。そうすると、POP は人口なので、例えば皆さまのご家庭であれば、メンバーの数を減らすというのはとんでもないことである。これは日本、あるいは世界全体という話になったとしても、たとえ CO_2 を減らしたいとしても、そのために POP を減らすという話にはならないだろう。これはあるがままに任せざるを得ない、手を付けられないファクターだと思う。増えるなら増えてしまう。

次に、GDP を POP で割ったこれは 1 人当たりの豊かさである。だからできるものなら増やしたい。特に貧しい国や地域であれば、これは絶対に増やしていきたいと思うはずだ。なのでこれは増える。これが増え、あるいは POP も増えるかもしれないが、そうなると、この 2 つが増える以上の勢いで、この残り 2 つを減らさなければいけないことになる。つまり CO_2 排出削減の本質というのは、1 次エネルギー消費当たりの CO_2 排出量——炭素強度を減らすことと、GDP 当たり 1 次エネルギー消費量——エネルギー原単位を減らすこと。この両方でもって、1 人当たりの豊かさが増える以上の勢いで減らすことである。 CO_2 排出削減とは、1 人当たりの豊かさを最大にしつつ、炭素強度とエネルギー原単位を下げるこだ。炭素強度を下げるというのは、エネルギー源の選択を化石燃料から無炭素なもの、つまり再生可能エネルギーなり原子力に置き換えていくことだ。エネルギー原単位を下げるというのは省エネルギーということで、エネルギー効率の向上ということになる。ちな

みに茅恒等式はいろいろなところで参照されているが、一番有名なものは IPCC の排出シナリオに関する特別報告書である。

先ほどの茅恒等式にインスピアされて、私もこの CO₂ 排出削減の基本方程式というものを編み出してみた (P8)。CO₂=、この EE というのは電力起源のもの。それから NE というのは Non Electricity、非電力起源の CO₂ 排出量だ。電力を使った結果と電力以外のものを使った結果の CO₂ 排出量の和で表される。これを変換すると次のような式になる。ちょっと複雑で見づらいと思うのだが、この ES というのはエネルギーサービス需要。つまり、例えば今皆さまは照明を使っていると思うが、その照明で得たいエネルギーサービスの量だ。他にも料理をしたり物を生産したり、いろいろなエネルギーサービス需要があるが、その総量である。これとこの大きな括弧でくくったファクターの掛け算になっている。この括弧の中は 2 つのものの足し算になっている。

一個一個見ていくと、 α というのは、このエネルギーサービス需要のうちどれだけの率を電力で賄ったか。つまり電化率だ。従って、この $1 - \alpha$ というのは非電力で賄った割合となる。このファクターはエネルギーサービス需要 ES のうち、電力で賄ったときの、その電力の CO₂ 排出係数だ。CO₂EE——電力起源の CO₂ 排出量を、小文字の p は電力を作るために使った 1 次エネルギーだ。

それに、この η というのは後でご紹介するが、エクセルギーと呼ばれるものだ。このファクターは非電力、つまり電力以外による部分の CO₂ 排出係数である。これは掛け算なので、CO₂ を減らすためにはこの ES を減らせばその分だけ減ることになるのだが、エネルギーサービス需要を減らすというのは要は我慢の省エネである。私はこれを時々削エネと呼ぶのだが、悪い種類の省エネであって、今はそれは考えないこととしたい。だがみんなが我慢する、生活水準を下げるということも、もし本当に CO₂ 排出量を削減したいのであれば最後の手段として必要になるかもしれない。

この式の意味を解説すると、電化、つまり α を高くすることに伴う省 CO₂ 効果は、電力がエクセルギーに優れるとということ、それから電源を低炭素化、ゼロ炭素化していくことで達成される。つまりエネルギーサービス需要を満たす上で、できるだけ電力に寄せる。この前半の足し算の前のファクターのほうに寄せていく、こちらのファクターは η がこちらの η よりも大きいので、この掛け算のファクターが小さいということだ。 α を大きくしてこちらに寄せることでこの η が大きいということと、これを下げていく効果でもって、この全体の CO₂ を下げていくということだ。

エクセルギーというものは 1 次エネルギー、もともとの原料である石油なら石油、石炭なら石炭が持っていたエネルギー量のうち、それぞれで利用可能な残存割合だ (P7)。サービス段階ではエクセルギー、この 1 次エネルギーを変換して 2 次エネルギーになり、それを運んでいって最終エネルギーになり、それを機器で使える形に変更することで有効エネルギーになる。有効エネルギーという言い方はエクセルギーの和訳になるのちよつとよくないのだが、ここに Useful とある。そしてそれを最終的にサービスに転換する。

この赤字で書いたものは、石油火力発電でエアコンを使った場合の例である。石油を燃やして電気にする。送電、配電を経て送り届ける。そしてエアコンで温熱や冷熱に変え、実際にそこにいる人が温感、冷感として感じる。見ていただくと、この部分を拡大したグラフがこれである。0から10で表されているように、もともと持っていたエネルギー100のうち、実に90以上を恐らく排熱のような形で捨てている。実にもったいない使い方を人類はしているのだ。中でもこの黄色、つまり電力で使った場合が、一番エクセルギー的に優れている。一番多くの量を有効に使正在することになる。よく見ていただくと、黄色は発電の時点で7割を捨ててしまうが、運んでいくときの効率が非常によいのでここではほとんど減らない。加えてエアコンならエアコンなど、電気を利用する機器の効率に優れるので、最終的に一番多くのエネルギー量を実際にサービスとして享受できる。

これが先ほど私が参画したと申し上げた、Global Energy Assessment の重さ5キロの報告書の第1章、エネルギー入門編に出てくるグラフだ。

このデータ自体はちょっと古いで最近の知見でご紹介すると、例えば電気駆動車(P9)。電気自動車は、こういう単位走行距離当たりのCO₂排出量と、単位発電電力量当たりのCO₂排出量——CO₂排出原単位を横軸に取ったときに、こういう直線で表される。最新のハイブリッド自動車がこの水準なので、今のCO₂排出量の原単位の下でも電気自動車は既に同等、もしくは少し優れている技術になる。またこれを、例えば2030年に電気事業者が目標としている0.37まで左に寄せることができれば、CO₂排出性能はここまで下がる。電気自動車自体の技術の進展があれば、この点線のようにさらに下がることになる。同様に産業用ヒートポンプも、現状の原単位の時点でも、既に重油やガスを直接燃焼するよりも効率がいいし、技術が向上していればもっと下がる(P10)。

これは私どもが、3年前に80%削減で試算した例である(P11)。従ってここではカーボン・ニュートラルは達成できていないのだが、それでも相当厳しい計算結果になっている。20%の排出を許すという条件の下で計算をした結果、こういう電力のミックスになった。これは発電量、こちらは発電設備容量だ。このときのCO₂排出原単位は0.93という数字になっている。これを先ほどご覧いただいた電気駆動車で見ていただくと(P9)、0.93というのはこの赤い星で打ったところになるので、それが実現されていれば電気自動車はさらに有利になり、もうハイブリッドの数分の1という数字になる。また同様に産業用ヒートポンプでも0.93、この水準なので、化石燃料の直接燃焼よりはるかに有利ということだ。

今のはイントロダクションのようなもので、これからいよいよカーボン・ニュートラルとは何かという話に入る(P12)。最近の科学的知見では、温度上昇と大気中の累積CO₂排出量には近似的な比例関係があると示されている。これがそのグラフだ。なので、過去にさかのぼって、どれだけ累積でCO₂を出したかということと、温度上昇は比例するので、温度上昇を一定のレベルに抑えるためには累積CO₂排出量を抑えること。すなわちもはやプラスの排出を出さなくする、ネットゼロ排出にしなければならない。この下にパリ協定ができる、今世紀後半に人為的な発生源による排出と吸収源による除去、この均衡を達成

するということで、ネットゼロ目標が示された。

IPCC では 2018 年、4 年前になるのだが、IPCC の 1.5 度特別報告書というものが出了 (P13)。これは業界では SR15 と呼んでいるようだが、大気中の CO₂ 濃度が増えることによる温度上昇を 1.5 度に抑えるには、世界全体でどれぐらいの排出が許されるかという、世界中の研究機関がやったシナリオ分析 411 本を持ち寄り収録したものだ。だが、CO₂ のネットゼロ排出はこの全てで達成していたわけではない。半数の 205 のシナリオがそれを達成すると言っている。これがその全部のシナリオをエリアで書いたものだが、これがゼロなので、ネットゼロを達成するものもあれば実は達成しないシナリオもあるのだ。

この 205 に注目して、私どもの部下がおととし検討結果を報告した (P14)。このカーボン・ニュートラルを達成する 205 本のシナリオの一本一本を丹念に見ていくと、いろいろなことをやっている。つまりカーボン・ニュートラルの姿は 1 色ではなく、いろいろなやり方があるということを見てほしい。いろいろな部門でプラスの排出が残る。それをいろいろなやり方で除去していく。特に下側のプラスの排出をどれだけのマイナスの排出でキャンセルしたかを見ていく (P15)。CDR というのは Carbon Dioxide Removal、つまり二酸化炭素除去技術だが、主に想定されている技術は 3 つあり、土地利用、つまり植林で大気中の CO₂ を吸収していくことだ。電力部門で CO₂ の回収、貯留、いわゆる CCS を付けたバイオエネルギー燃焼発電を使う。これは BECCS と呼ばれる。そして液体燃料製造施設で同様に CO₂ 回収・貯留付きのバイオエネルギーを使うというもの。

実はもう 1 つ、空気中から直接 CO₂ を回収するという DACCS ——Direct Air Carbon dioxide Capture and Storage というものもあるのだが、それを想定したシナリオは極めて少なかった。ただ、先ほど茅先生のお名前を出したが、先生が顧問を務めている RITE はこの DACCS にかなり注目した研究をこれから進めると言っている。

この 3 つの技術の組み合わせ、つまり土地利用だけ、電力だけ、液体燃料だけというのもと、土地利用と電力、土地利用と液体燃料、電力と液体燃料、それから 3 つ全部。いろいろな組み合わせで 7 種類の類型に分類できる。つまり、ネガティブエミッションだけに注目したとしても 7 つに類型化されるように、カーボン・ニュートラルの達成にはいろいろなやり方があり得ることにご注目いただきたい。

どうしても産業部門、エネルギー需要での CO₂ 排出量、プラスの排出が残ってしまうので、それを供給部門や土地利用でのネガティブエミッションで埋め合わせるということを、これらのシナリオは主張しているわけだ (P16)。

電化率は、2010 年の世界全体の実績である 20% 弱から、倍以上の 40%、50% 近くの水準まで、徹底的にできる限りの電化を進めていかなければならない (P19)。これは共通認識だと思う。繰り返すが、カーボン・ニュートラルの実現の仕方は一様ではない (P20)。特に再生可能エネルギーを推進したい方々が、よく再エネ 100% で十分いけるようなことを言うが、そうではない。再エネ 100% ではないというのは、先ほど飛ばしてしまったが、エネルギー供給源にしても原子力を使うものもあれば、まだまだ化石燃料や火力発電を残し

ているシナリオもたくさんある。

そして除去技術も重要になってくる。BECCSだけではなくて、先ほど申し上げた DACCS も増えていくのではないか。そして電力は大幅増になる。コロナ時代を経験したので、もはや日本社会も世界全体も元に戻ることはないだろう。そこでこれから需要側をどう組み換えていくかが重要になると私は認識している。

ここから 2 つ目のパートに入る (P21)。日本のカーボン・ニュートラル目標はご案内の一通りで、一昨年の 10 月に当時の菅首相が目標を宣言している。これを踏まえて、2021 年 5 月に改正された温対法では、2050 年までに脱炭素社会——排出量と吸収量との間の均衡が保たれた社会を実現すると宣言している。ご注目いただきたいのは、ここで温室効果ガスと言っていることだ。カーボン・ニュートラルと言っても厳密にはいろいろな種類があって、CO₂ だけに注目してニュートラルと言う場合もあれば、そもそも温対法の世界では温室効果ガス、つまり GHG 全体のネットゼロを目指している。これは細かいことだが忘れてはならない点だろう。

2013 年度、日本では歴史的な最大値を記録した (P22)。なのでこれが日本の基準年とされる。一番大きなところからスタートすれば、同じ排出量でも排出削減率が大きくなるからだ。2019 年度にかけて下がってはきたのだが、まだまだ下がり切っていないと言える。またエネルギー自給率はよくよく問題になる (P23)。原子力が少し戻ってきて、再エネが大量に増えたことで上がってはきているが、まだまだ 10% 強という水準にある。発電電力量は、これはミックスだが、原子力が戻ったとはいえ、この紫色なのでこのぐらいの量にとどまっている (P24)。

第 6 次基本計画は、昨年 10 月に閣議決定された (P25)。基本的な視点、S+3E の大原則に変化なし。すなわち安全性を前提とした上で安定供給を第 1 とし、経済効率性の向上と同時に環境への適応を図る。エネルギー基本計画というのは、エネルギー政策基本法にのっとって大体 3 年ごとに改定される。これまでの第 5 次以前のものと比べて第 6 次で盛り込まれた新たな点は、サプライチェーン全体を俯瞰した安定供給の重要性が再認識されたことだ。

そしてその基本計画で言っている 2030 年度目標の見直しが成された (P26)。見ていただくと、先ほど申し上げたように最大値である 2013 年度が基準値となり、そこから下がってきていて、2050 年にはカーボン・ニュートラルになるべくゼロにする。ここに直線を引く。37 年かけて 100 をゼロにするとなると、途中年度である 17 年後は、37 分の 17 で 46% 減だ。単に定規で線を引いただけの数字である。エネルギー起源の CO₂ は 45% 減、電力由来のエネルギー起源の CO₂ 排出量はそれよりも厳しく、62% 減が目標になっている。その具体的な対策としては再エネ (P27)。これには接続する電力系統での対策も重要になる。それから原子力、水素・アンモニア・CCS・カーボンリサイクルといった、その他の技術の重要性も強調されている。

その中で原子力にちょっと注目したい (P28)。既に廃止が決まっているものは除き、日

本に現存するものに計画中のものを加えた 36 基を対象に、それが 2050 年時点でどれぐらい生き残っているかを、寿命を 40 年、60 年、80 年というふうに見ていく。そうすると、40 年運転だと実は 2050 年、70 年末でも生き残っているものもあるのだが、新たに建てたものだけがわずかに生き残っているに過ぎない。60 年運転が全て達成されればこれぐらいの量は残るが、それも 2050 年を超えると次々と畳んでいくことになる。80 年運転が実現すればこれだけの量が残せるのだが、今の日本の法律では 80 年運転は許されていない。1 回限り、40 年から 20 年を超えない範囲での延長が許されているということで、これは今の法律の枠組みでは達成が不可能である。

私なりに考えると、原子力がこの低炭素化、脱炭素化の中で必要とされるのはこういう論理だろう（P29）。まず脱炭素化も、カーボン・ニュートラルと言われるとつらいのだが、発電部門にどれぐらいの排出枠が許されるかによって火力発電の利用可能量が決まる。そうすると、火力と再エネは最大限使うとしてもなお足りなければ原子力をということになる。

もう 1 つは再エネを大量に入れることで、先ほど言った系統安定化のための調整用電源として使う。調整用電源と言ってもいろいろな調整が必要になる。一番分かりやすいのは、日が照ったり曇ったり、風が吹いたりやんだりということで、再エネの電源の出力はどうしても時々刻々変化する。それを埋め合わせる再エネの出力が減ったら増やす、増えたら減らすという、kWh のでこぼこを埋め合わせる調整運転がある。

それから交流の電力系統を維持するには、電圧と周波数をある一定の値で、プラスマイナスのごくわずかな幅で一定に運転しないと大停電が起こってしまう。その電圧や周波数を一定に保つためには、特に回転機、つまり蒸気や水力のようにして水を落とすことでタービンを回して、それで発電機を回すタイプの発電機が一定以上必要だ。これは理論値というよりも経験値のようだが、専門家に言わせると、電力系統につながっている電源の半分はこの回転機系のものでないとつらいそうだ。再エネの中で、水力はいいのだが、太陽光や風力は回転機ではない。原子力は回転機だ。なので、どうしても火力と原子力が一定以上必要だということで、こういう調整用電源としての原子力も必要ということになる。

原子力の課題はいろいろあるのだが、1 つは資本集約的技術であることだ。つまり初期投資が巨額なのだが、運転中の経費は安価ということで、これは以前の総括原価主義の料金制の下ではいい性質だったのだが、このところの電力市場機能を取り入れた電力システムの下では、卸電力市場の価格は時々刻々上下動する。そうなると収益や投資回収の予見性が低くなってしまうのだ。原子力のこの資本集約的な性格と、この卸電力市場の機能は相性が悪いわけだ。なので原子力を自信を持ってというか、安心して使い続けるためには、どうしてもイギリスで採用されている FIT-CfD、あるいは RAB モデルといった、投資回収の予見性を高めるような制度的な支援策も必要だと言わざるを得ない。

それから、コロナで起こった変化の 1 つは分散の進展だと思うが、これも原子力で言えば SMR——Small and Medium、すなわち中小型炉のような、ある程度の需要・系統規模

に適合する出力へのニーズが高まるかもしれない。だがこれは現時点ではまだ期待に過ぎないので、どうなるかは分からぬ。

原子力の課題として、今申し上げた資本集約的な性格と卸電力市場の性格の相性が悪いことに加えて、私が個人的に強く感じるのはこの点である（P30）。日本国民は原子力を、これから先新たにもう一度選び直すだろうかということだ。少なからぬ日本人が、過去、と言ってもこれはもう 1950 年代に戻るので、最初の原子力国家予算もそうだし、発電炉の選択も 50 年代に成されている。もう 70 年前なので、既に原子力を社会的に選択した記憶を持たない。私自身も生まれたときには原子力があったという世代なので、これは押し付けられた、*involuntary*なものだと受け取っているのではないかという仮説を持っている。

*voluntary*なもの、例えば喫煙や自家用車、スキーなどのレジャー、航空機などに比べて、皆さんには実感してもらえると思うのだが、誰かが勝手にやっているものというのはメリットの認識は低く、リスクなどデメリットの認識が高い。原子力はこういう *involuntary*なものになってしまっていないか。

カーボン・ニュートラルが原子力への光明となってくれればいいのだが、最初に申し上げたように基本式では電源の低炭素化はどうしても必要だ。先ほどの私どもが実行した 80% 削減試算でも、再エネを最大限導入したとしても、CO2 フリー kWh、つまりカーボンを出さない電源から生み出される kWh がどうしても不足する。そうなると、原子力の潜在的な活躍の余地は大きいことにはなるが、先ほどの経済的な性格の問題、それから日本人の意識の問題があるので、なかなか難しいと思ってしまう。長期運転、新增設・リプレース、SMR・次世代炉などのオプションを多数持ちつつ、kWh 以外の価値、例えば安定化、調整力、それから熱や水素の製造などにも活路を求めていくしかないかというのが、現時点での実感だ。この点についてはぜひ皆さまのご意見も伺ってみたい。

エネルギー基本計画は技術開発についてもかなり重要な指摘をしているが、詳細は省略する（P31）。

そして 3 点目、再エネ導入ポテンシャル評価についてだ（P32）。現実的に見て導入ポテンシャル評価として、設置可能面積や平均風速から求められる理論値から、社会的な側面等も含めて再エネが現実的にはどれぐらいまでいけるかを計算してみた。ここは開発できないというような条件の設定は、現実的には難しい。各機関で前提が違うということが大きいので当然結果も違ってくる。できる限り丹念にやろうということで、私どもが地理情報システムを使って、ここは設置できる、ここは設置できないというようにやってみた結果をお示しする。

今はまだ洋上風力だけだが、ツールとして公開している（P33）。この画面で実際にシナリオや前提条件、このボックスにマークを入れて条件を変えてもらう。そうするとこの左側の画面、これは北海道沿岸でどれくらい洋上風力を立てられるかということで、この地点に実際にはこれだけという数字が出てきている。条件を変えるごとにこれは変化する。ご興味があればぜひアクセスしてほしい。

実際にやってみる（P34）。環境省が、2022年に洋上風力は100万kW単位で1,120までいけるという数字を出している。これに対して、ここからスタートして、例えば離岸距離は22.2kmとされたところ、30kmまでは設置できないということで減らす。それから年間平均風速は、6.5だったが7メートルに引き上げる。大型船は省いてあるのだが、中型船が航行するような海域は設置しない。軍事演習海域には設置しない。それから面積当たりの設備容量を引き下げると、1,120だったものが現実的には322まで下がるのではないか。これが物理的なポテンシャルだ。

そしてこの322というのも地域偏在が著しい（P35）。ご承知のように、風況が良いのは北海道、東北だ。まあ九州にも一部いいところはある。地上設置型、陸上、それから洋上風力のポテンシャルというのは、どうしても需要の大きな東京、中部、関西では小さい。そして需要の小さい北海道、東北、九州では大きい。こういう偏在も大きな問題になる。

2050年には現実的にどうなのかを考えたときに、私どもはこの受容性を重視したシナリオを検討した（P36）。社会的な紛争の可能性などをできるだけ回避し、その上で最大限導入する。それから現行導入傾向を外挿するという、すう勢のシナリオ。この2つを立てた。実際に計算してみると、先ほどの洋上風力であれば、322という現実的な物量ポテンシャルからスタートして、中型船の航行や離岸距離、それから漁業権設定海域に設置しないことなどを考え合わせると、現実的にはこの47という数字まで落ちてくるのではないか（P37）。これが受容性重視シナリオだ。それらを風力、水力、PVなど全部に対してやったところ、設備容量は受容性重視シナリオではこの水準、発電電力量概算ではこの水準という結果を得た（P38）。4億kW、6,500億kWhである。

ここから得られた示唆として、2019年度、現状の発電電力量はこの数字である（P39）。それに対して2019年度の再エネの数字は2割弱にとどまっている。先ほどの受容性重視シナリオは6,500億kWhなので、1万に比べて、まあこの辺だろうか。6,500億kWhまでは増やせるけれども、再エネで全ての発電電力量を担うことはできない。しかも、カーボン・ニュートラルを押し進める上では電化を進めなければならぬので、総発電電力量は増えていく。よってさらに増やしたいところで、再エネは目いっぱい頑張ってもこの6,500億kWhという水準だろう。これをさらにどう上積みできるのかは厳しい問題だ。つまり量が絶対的に足りない。再エネでは、系統の安定化を度外視したとしてもそういう問題が残っている。現実的に見たところそういう課題を抱えているということだ。

なお、これは現時点では分析の精度が粗いので参考にとどめるが、将来の電化ポテンシャルの検討を併せてやると、特に産業部門で徹底的に、ちょっと無理ではないかということまで含めて推し進めた場合には、2016年度の2,040億kWhに比べて、8,500億kWhぐらいまで、まあ6,500億kWhぐらいは増やせるのではないかという数字を得ている（P40）。それぐらい押し進めないと、カーボン・ニュートラルにたどり着くのは難しいのではないか。そうすると、このさらに増えた発電電力量、電力ニーズを、どう再エネその他の電源で担うかというハードルがさらに上がってしまう。

そして最後のパートである（P41）。私ども電力中央研究所がどう立ち向かっていくかということで、考え方を簡単にお示ししたい。私どもは3年前の2019年度に、2050年の目指す姿として、具体像はないけれどもキャッチコピー的に、「持続可能で社会に受容されるエネルギー・システム」というものを掲げた。そしてその実現に必要な7つの目標を打ち立てた。これは私どもの現在のパンフレットにも使っている図だ。電化社会、地域エネルギー需給基盤の構築、新たな広域系統の形成、再生可能エネルギーの主力電源化、ゼロエミッション火力、高安全・低コストの原子力、レジリエントなエネルギー・システム。このそれぞれを少しでも高めていくような研究をそれぞれ推進していくことで、この持続可能で社会に受容されるエネルギー・システムの実現に接近していくという、これが基本的な考え方だ。

それぞれの目標でいろいろな研究を進めていくこと、再エネの主力電源化、広域系統の形成、地域エネルギー需給基盤の構築と、もちろんの研究を進めていきたいということで研究計画を立てている（P42）。

われわれの得意分野としては、例えば火力発電の研究を長らく進めていたので、ゼロエミッション火力はぜひとも実現させたい（P43）。また原子力でも、何か特色のある原子力発電プラントが新たに造れないかということで検討を進めている。それから何といっても、需要側の重要性が高まるに再三申し上げている。この電化社会やレジリエントなエネルギー・システムについての研究は、少し遅れていたという認識もあるので、一層加速して進めていきたい。

簡単にまとめると、カーボン・ニュートラルの実現に向けて、供給サイドでは再エネ、およびそれを接続したときの系統安定化、原子力、火力、CO₂除去・固定に関する技術開発が不可欠であり、需要サイドでは何よりも電化の促進が重要になる（P44）。ただ、こういった技術がそろえば十分かというと、そうはいかないという認識もある。特に社会全体でどう費用負担をするかという問題だ。一般市民がこのカーボン・ニュートラルなるものに向かって進んでいかなければならないというご理解も含めて、この検討も不可欠だと思う。社会科学的研究部門にいた人間としては、この点もぜひ大切に拾っていきたい。

先ほどご覧いただいた7つの目標は2019年に立てたものなので、当時カーボン・ニュートラルを意識したものではなかったが、結果的にカーボン・ニュートラルに進んでいくための、ということで先取りができていた。7つの目標に沿う、カーボン・ニュートラルに貢献する研究課題に積極的に取り組んでいきたい。何よりも私どもは電気事業者に支えられて営んでいるので、電気事業に関わる皆さま、それから産業界の皆さまと一緒にカーボン・ニュートラルに向けて進んでいきたい。最初に申し上げた、技術と知恵で脱炭素化と需給最適化を両立するというものを、われわれ全体のスローガンとして、これからも研究活動を進めていく所存である。