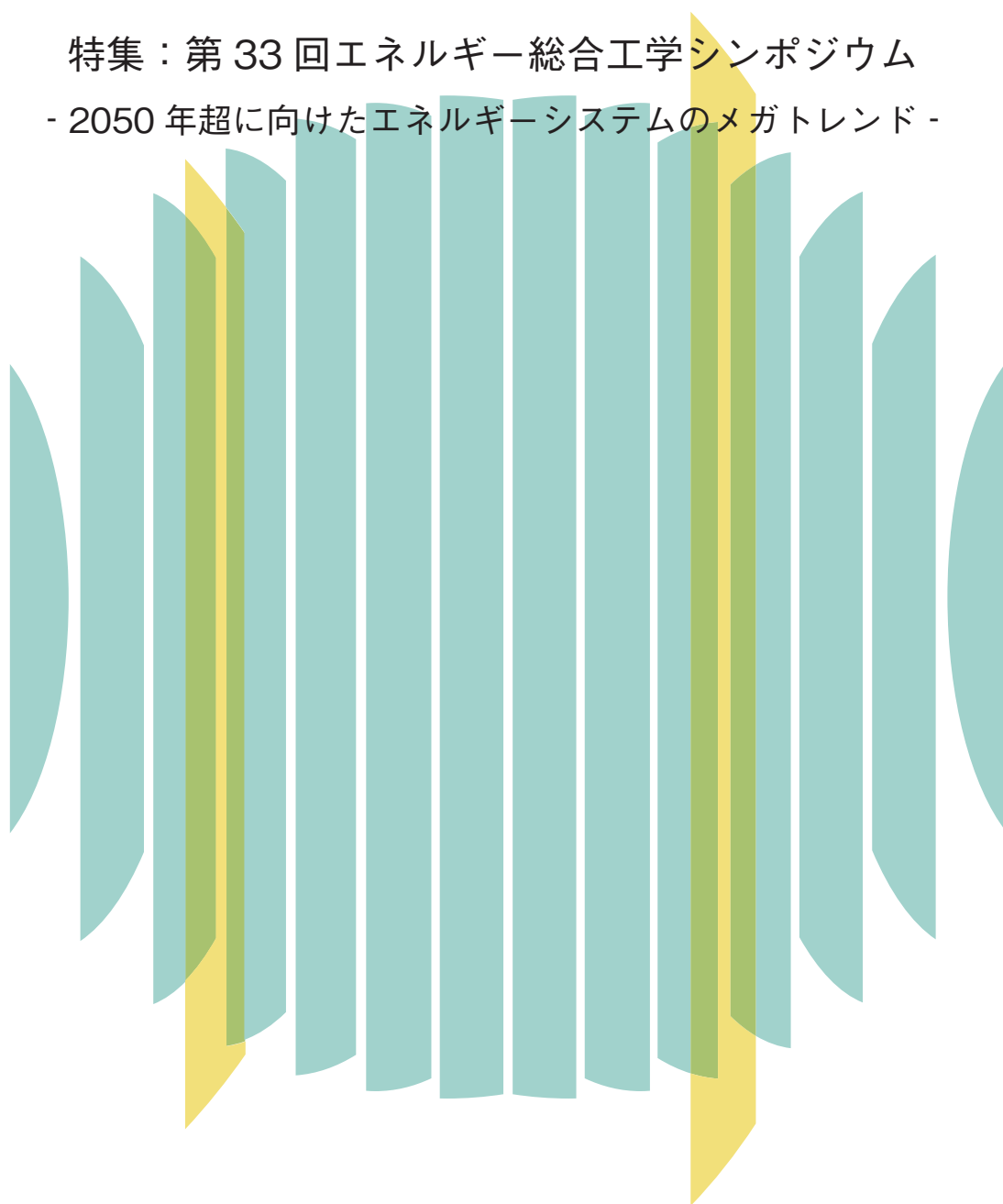


季報 エネルギー総合工学

Vol. 41 No. 4 2019. 1

特集：第 33 回エネルギー総合工学シンポジウム
- 2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド -



一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
THE INSTITUTE OF APPLIED ENERGY

第 33 回エネルギー総合工学シンポジウム

2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド



来賓挨拶を述べる 福島 洋 経済産業省 技術総括・保安審議官

日 時：平成 30 年 10 月 12 日（金） 10：00～15：30

場 所：千代田放送会館

総合司会：理事 重政 弥寿志

目 次

【開会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 理事長	白土 良一	1
【来賓挨拶】	経済産業省 技術総括・保安審議官	福島 洋	3
【基調講演 1】	持続可能性を目指したエネルギー転換		
	国際応用システム分析研究所 副所長	ネボイシャ・ナキセノヴィッチ	5
【基調講演 2】	エネルギーシステムの技術・社会イノベーション		
	(公財) 地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長	山地 憲治	12
【講演】	2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド		
◆ エネルギーモデルによるシナリオ分析	プロジェクト試験研究部 副部長	加藤 悦史	24
◆ 電力化・蓄エネルギーシステム	プロジェクト試験研究部 副部長	森山 亮	31
◆ 水素活用エネルギーシステム	プロジェクト試験研究部 部長	飯田 重樹	38
◆ 炭素循環エネルギーシステム	プロジェクト試験研究部 副部長	酒井 奨	44
【パネル討論】	テーマ：2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド		
	モデレーター：寺井 隆幸 東京大学大学院 工学系研究科附属総合研究機構長 教授		
	パネリスト：都筑 和泰 プロジェクト試験研究部 部長		
	飯田 重樹 プロジェクト試験研究部 部長		
	森山 亮 プロジェクト試験研究部 副部長		
	酒井 奨 プロジェクト試験研究部 副部長		
	加藤 悦史 プロジェクト試験研究部 副部長		50
【閉会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 専務理事	中村幸一郎	65
【研究所のうごき】			67
【編集後記】			69

開 会 挨 拶

白土 良一 (一財) エネルギー総合工学研究所
理事長



皆さま、おはようございます。本日は、第33回エネルギー総合工学シンポジウムにお運び頂きましてありがとうございます。また、皆さまには日頃より当研究所の事業にご理解、ご協力を賜っておりますことを、この場を借りまして厚く御礼申し上げる次第です。

まずは、6月の大阪府北部の地震、7月の豪雨、先月の北海道胆振地方の地震や台風24号など、多くの自然災害によって被災された方々に対し、深くお見舞い申し上げます。また、災害からの復興に励んでおられる方々に心から敬意を表するとともに、一日も早い生活再建や災害復旧が図られることをお祈りする次第です。

さて、昨今のエネルギー情勢を見ますと、原油価格は、地政学的リスクの高まりや需給逼迫が継続するとの見通しなど不透明な情勢です。冬場に向って、今後もこの混迷が続くと見られています。

発電分野では、わが国で天然ガスや石炭火力が引き続き主要な割合を占める中、高効率化などで環境に対応することが非常に重要になっています。また、再生可能エネルギーの導入が大幅に進展する一方で、出力変動や火力発電の稼働率低下による調整力不足等が課題となっています。特に、九州地方では今週中にも太陽光発電の出力抑制をお願いするかも知れないと、先日、九州電力が発表いたしました。

地球環境問題についても昨日までICEFで色々ご議論されたところですが、2015年に国連サミットで採択されたSDGs（持続可能な開発目標）や2016年に発効したパリ協定に掲げられた目標の達成に向けて、世界が協調して温室効果ガスの大幅な削減に取り組むことが要請されているところです。このような中、わが国では本年7月、「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、2030年のエネルギーミックス実現へ向けた取組みの更なる強化と新たなエネルギー選択として2050年のエネルギー転換、脱炭素化に向けた挑戦が掲げら

れました。国内外のエネルギーや環境を巡る情勢を見ながら、長期的な視点に立ち、総合的な戦略の下で、官民挙げて必要な取組みを着実に進めて行くことを通じて、わが国が世界に貢献していくことが求められていると考えています。

さて、当研究所では産学官の連携の下、総合工学の視点に立脚し調査研究等を実施するとともに、5年ごとに「エネルギー中長期ビジョン」を作成してきております。今般、創立40周年を迎えた当研究所では、我々の有するエネルギーモデルである GRAPE や TIMES-Japan を用いた分析を行うとともに、エネルギー技術の現状の課題を整理し、国内外の有識者の意見を聞きつつ、2050年以降に向けたエネルギー技術展望の検討を進めてきております。今回のシンポジウムでは、このような状況を背景に、「2050年以降に向けたエネルギーシステムのメガトレンド」をテーマとして報告をさせていただきます。また、国際応用システム分析研究所のネボイシャ・ナキセノヴィッチ副所長から「持続可能性を目指したエネルギー転換」について、続いて公益財団法人・地球環境産業技術研究機構の山地憲治理事・研究所長から「エネルギーシステムの技術・社会イノベーション」についてご講演を頂戴した後、当研究所から現在研究中の技術展望に基づき、わが国のエネルギーシステムのメガトレンドを提案させて頂くとともに、東京大学の寺井隆幸教授をモデレーターにお迎えして検討を行う予定です。

冒頭で述べました通り、世界のエネルギー環境を取り巻く情勢は絶えず変化しており、先行きを見通すことはなかなか困難です。このような中、当研究所としては、エネルギーの未来を指し示す羅針盤たるべく、今後とも総合的且つ俯瞰的観点から「エネルギー」、「総合」、「技術」、「研究」をキーワードとして社会に貢献していく所存です。引き続き皆様方のご支援、ご協力を賜りますようお願い申し上げます次第です。

最後に、公務ご多用の折、ご臨席を賜りました経済産業省の福島洋・技術総括審議官ならびに国際応用システム分析研究所のナキセノヴィッチ副所長、地球環境産業技術研究機構の山地研究所長、東京大学の寺井教授に改めて御礼申し上げますとともに、本日のシンポジウムがご列席の皆さまにとりまして有意義なものとなることを祈念いたしまして、開会のご挨拶とさせていただきます。ありがとうございました。(拍手)

来賓挨拶

福島 洋（経済産業省
技術総括・保安審議官）



今日の第33回エネルギー総合工学シンポジウムの題は、「2050年超に向けたエネルギーのメガトレンド」と伺っています。エネルギーを取り巻く情勢等につきましては理事長からもお話がございましたけれども、今年の春に新しい「エネルギー基本計画」を閣議決定いたしました。2030年に温室効果ガスを26%削減、2050年には80%削減するという目標についての基本的な考え方、ありうべきシナリオ等について提示させて頂いたと思っています。ただ、2050年の見通しについては、技術の進展や経済性も含めて、こういったエネルギーを選択するかについて、エネルギー間の競争がありながら順次見直しをしていくという考えで「エネルギー基本計画」が作られていると思っています。

エネルギーに関する国際的な議論としましては、今週ICEFで議論がありました。また、今月は、LNGに特化した、産出国と消費国の大臣級の会合「LNG産消会議」が名古屋で、「水素閣僚会議」が東京で開催されます。さらに、来月11月にはアルゼンチンで開催されるG20で主要各国が集まってエネルギーについても地球環境についても議論が行われますし、来年のG20は大阪で開催されます。首脳会議は大阪で行われますが、エネルギー等については軽井沢でも議論がなされることになっています。日本政府としても来年のG20に向けて地球温暖化に関して何を提案していくのか、また、今年末のCOP24（国連気候変動枠組条約・第24回締約国会議）でどういう貢献や考え方を示すのかについて各種検討が進んでいますので、今日のシンポジウムの結果もそういった検討の材料になるのではないかと、強く期待したいと思っています。

私の仕事の関係で考えをご紹介します。私、技術総括保安審議官ということでエネルギー関係の規制の対応、それから災害の対応をさせて頂いています。理事長からのご紹介がありましたように、大阪北部の地震に始まり、西日本の豪雨、2つの大きな台風の襲来、北海道でも地震があり北海道全土が停電に至りました。こういった自然災害によって、エネルギーインフラも含めた国民生活に大きな打撃を与える事象が起こっています。北海道の地震に関しましては、なぜ北海道全土が停電に至ったのか、今月中に電力広域的

運営推進機関が技術的な検証を行い、11月末には、電力に限らず、鉄道、空港、道路も含めたインフラが本当に大丈夫なのか政府全体で総点検をすることになっています。

エネルギー問題に関しましては、自然災害への対応も求められていますけれども、九州地方を中心にした太陽光発電等の課題や新エネルギーの固定価格買取制度（FIT）の課題等、各種課題が山積している状態です。これはエネルギー問題でありながら、環境問題、技術の問題でもあり、地政学的な問題でもあります。そういった色々なファクターを考えながら解を見つけて行く一方で、技術による解決への期待が非常に高まってきているのではないかと考えています。

今回、北海道全土の停電の件では、技術的な検証はもとより技術以外の検証も行います。私が担当する規制についても、耐震性も含めた技術基準が果たして的確であったかどうかという点も検証します。台風で、関西電力管内では約170万世帯の大規模停電が、中部電力管内でも静岡を中心にかなり長期間にわたる停電がありました。電気がなければ何もできないという現在の国民生活ですし、電気は産業の基盤にもなっていますので、国民、それから政府内でも電力に対して「早く直るんでしょ」といった声のように大きく期待されています。そういった中で、技術的な面、経済的な面での考え方も含め、我々規制当局と資源エネルギー庁とが一体になりながら各種の検討を進めて参りたいと思います。

最後になりますけれども、技術革新がエネルギー政策に与える影響は非常に大きいと思っていますし、最後は技術で解決して欲しいという期待が強くなっていると思います。一方で、大学での教育や民間企業における研究が昔に比べて弱くなってきているのではないかとこの不安の声も聞こえています。どのような体制で研究を進めて行く必要があるのか。電力については、電力中央研究所を中心に研究が進められていますけれども、それでいいのか。それから、沢山ある国の研究機関が担う役割には何があるのか。そういった点もこれから検討していく余地があるのではないかと考えています。そういった点につきまして、忌憚のないご意見を伺わせて頂ければと思います。

本日はこのシンポジウムに大きく期待をしていますので、よろしくお願いいたします。どうもありがとうございました。（拍手）

持続可能性を目指したエネルギー転換

ネボイシャ・ナキセノヴィッチ（国際応用システム分析研究所 副所長）



はじめに

皆さま、おはようございます。本日は「第33回エネルギー総合工学シンポジウム～2050年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド～」にお話をする機会を頂き大変嬉しく思っています。このトピックは、私自身にとっても大変重要なトピックと考えていますし、今、世界規模で直面している課題の中でも、重要な課題の1つと捉えています。

本日、私からは「持続可能性を目指したエネルギー転換」という題でお話いたします。また、話の後半では、2018年7月にニューヨークで行われた「持続可能性に関わるハイレベル政治フォーラム」で、国際応用システム分析研究所（IIASA）が発表した報告書“The World in 2050”についてお話しします。

人類のこれまでの功績と残る課題

産業革命以降の3つの功績

まず、1826年のストックトン・ダーリントン鉄道設立から始まった産業革命以降、人類が遂げてきた3つの大きな功績に触れたいと思います。

1つ目が寿命が2倍に伸びたことです。中

でも日本は世界の最長寿国になっています。これは驚くべきことで、技術の革新、経済の発展、環境への配慮、そして保健医療の発展があったからこそだと思います。しかし、このような功績がある中でもまだ10億人を越える人が飢餓に直面しています。その一方で、10億人を越える人達が肥満という問題を抱えていることも事実です。つまり、十分な量の食料はあるけれども、その分配に問題があると言えます。

2つ目に、戦争や暴力行為で死亡する人の数が減ったことです。一方で、自殺をする人が増えているという事実もあります。世界で80万人を超える人が自ら命を絶っています。しかし、戦争や暴力によって命を落とす人は、その半数ほどに留まっています。

そして3つ目。これまでの技術進歩の中で最も優れたことは、今、世界中の殆ど全員が携帯電話を持っているだと思います。現在、世界の人口は75億人で、電話回線は75億本あります。

産業革命とともに始まったエネルギー革命

産業革命とともに、蒸気機関、石炭を使った鉄道が登場し、エネルギー革命も始まりしました。しかし、残念なことに、今になっても全ての人がこのエネルギー革命の恩恵を受けているわけではありません。

今も世界で30億人が薪などの固形燃料を使って調理し、それによって、300万人が若

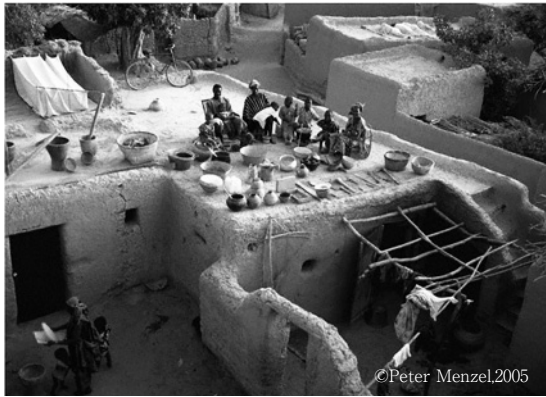


図1 マリのマナト一家と家財道具

いまま亡くなっています。これは最も多い死亡原因の1つですから、2050年までにこの分野での発展が必要です。例えば、図1のマリ共和国のナトモ一家が現代のエネルギーサービスへアクセスできるようにしていかなければいけません。ナモト家は7人家族のようですが、すべての家財道具の中で、現代的な物は自転車とトランジスターラジオくらいで、その他は伝統的な物ばかりです。そして左下に写っているように、調理には薪を使っていることが分かります。

平等且つ急速に普及した携帯電話

次に、分配について、「ローレンツ分配」を紹介したいと思います。縦軸に消費、横軸は左

から所得額の低い順に並べた人に対する分配率（累積百分比）です。最も平等な世界では、図2の対角線上、例えば、その世界の50%の人が何らかの商品やサービスの50%を消費している状態にあります。曲線が対角線から下に膨らめば膨らむほど不平等な分配と言えます。

まず、経済生産（Economic outputs or GDP）については平等な状況になっていません。80%の人で経済生産の30%にしかアクセスしていません。電気（Electricity）に関しても同様の状況で、10億人を超える人たちが未だに全くアクセスが無い状態にあります。

次に、食料についてです。カロリーで見ると、経済生産や電気エネルギーよりも少し平等に分配されています。動物由来のカロリーも割と平等に分配されています。

分配という意味で最も成功を収めているのは、携帯電話ではないでしょうか。OECD諸国、その他の国々でも非常に早いスピードで普及し、約20年間で、ほぼ全ての人に携帯電話が行き渡る状況になりました。

エネルギー技術についても、今後、このような非常に早い普及を進めていく必要があります。しかし、今までの歴史を見ると、それは必ずしも容易なことではありません。例えば、トイレの普及には100年かかりました。今後のエネルギーの普及では、このような長

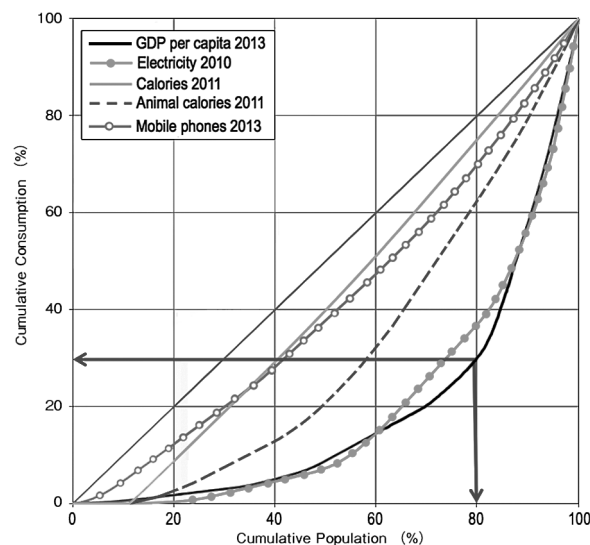


図2 世界の分配状況



図3 発電機で充電する携帯電話

い時間をかけずに、携帯電話と同じような普及の道程を辿っていかなければいけません。

図3は、電力へのアクセスが無い人達が発電機で携帯電話を充電している様子です。皆さんが系統電力を使って充電する場合の10～20倍ほどの費用がかかります。世界で10億人が未だにこのような状況にあるわけです。

2030年、2050年超に向けた取組み

IIASA “Global Energy Assessment”

以上のような背景に鑑み、私達IIASAは、2050年までに前述の世界的な課題の解決に何をなすべきか理解するために、“Global Energy Assessment”（2012年8月）を発表しました。

国連の “Energy for a Sustainable Future”

また、国連事務総長も「エネルギーと気候変動に関する諮問グループ」を設置し、“Energy for a Sustainable Future”（2010年4月）を発表しています。そこでは、2030年まで、そして2030年を超えてエネルギーの課題に取り組んでいくため「2030年のエネルギー目標」を3つ掲げています。

1つ目は近代的エネルギーへの普遍的なアクセス。全ての人にアクセスを広げていく必要があるとしています。未だに薪などの固形燃料で調理している30億人、電力へのアクセスがない10億人にも、近代的なエネルギーへのアクセスを確保していかなければいけないということです。2つ目は、エネルギー効率の向上。3つ目に、CO₂回収貯留（CCS）なども含めノンカーボンのエネルギー源の普及です。これら3つの野心的な目標は、国連の持続可能な開発目標（SDGs）の7番目に組み込まれました。

また、この3つの目標は、エネルギー問題の解決だけでなく、気候を安定させる重要な目標でもあり、私達にはこのような課題に取り組んでいく、集団的な責任があると思います。

IPCC “Global Warming of 1.5°C”

地球へのプレッシャーで一番顕著なのは、世界の平均気温の異常な状況だと思います。図4

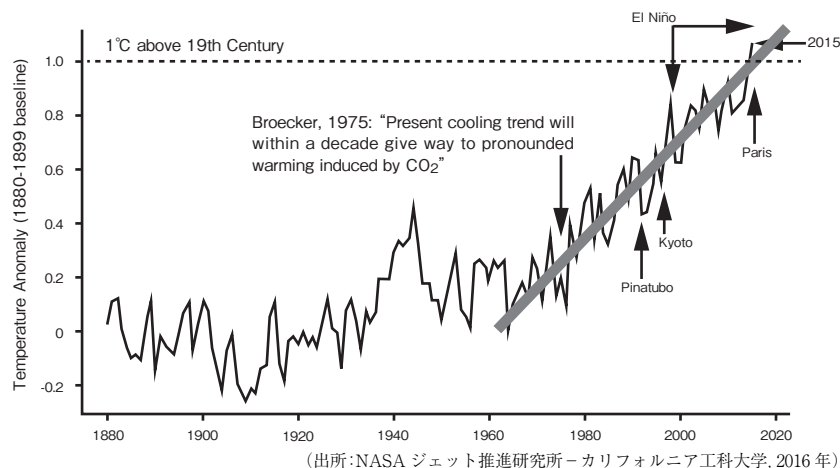


図4 世界の平均気温上昇（1880～2015年）

は、地球の平均気温の傾向です。既に1℃上昇しています。このような状況について、1975年の時点で、ウォーレス・ブロッカー氏が予測していたことは言及に値すると思います。

既に1℃気温が上昇している状況の中、「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)が10月8日、『1.5℃特別報告書』(Global Warming of 1.5℃)を出しました。報告書では、今の状況を改善して、1.5℃で平均気温を安定させるには、2030年までに二酸化炭素(CO₂)排出量を半分まで減らさなければならない。2050年までに排出量を正味ゼロにしなければいけないと述べています。

IIASA “The World in 2050”

また、私達IIASAが2018年7月に「持続可能性に関わるハイレベル政治フォーラム」で発表した報告書“The World in 2050”では、結論として、IPCCが示す道程を辿っていくことが健康上でも多くの恩恵をもたらすことを述べました。

さらに先週末、私達の友人でもあるウィリアム・ノードハウス氏が、気候変動と経済に関する研究、また気候変動と技術に関する研

究でノーベル経済学賞を受賞しました。相次ぐ報告書の発表やこの分野の研究でのノーベル賞受賞を考えると、私達は正しい方向に向かっていると言えるでしょう。

1.5℃安定化のための脱炭素化シナリオ

図5は、2017年3月に『サイエンス誌』に、私を含む数名の研究者が共同で発表した論文“A roadmap for rapid decarbonization”の図です。世界の平均気温を1.5℃で安定させるためには、今後10年毎にCO₂排出量を半減させなければいけないことを示しています。

そのためには、吸収源を増やしながら、大気からCO₂を除去しなければいけません。それには、植林やバイオマスを使ったCCSなど必要になります。同時に、地球に対して様々な操作を加えている中で、自然の吸収源を弱体化させないように気を付けなければいけません。

図6は、“Global Energy Assessment”で示した将来の一次エネルギー構成の推移です。右上が省エネでエネルギー効率を高めた部分です。今よりもずっとエネルギー効率が高くなる必要があります。また、天然ガスや石炭と組合せるCCSの数もかなり増えていきま

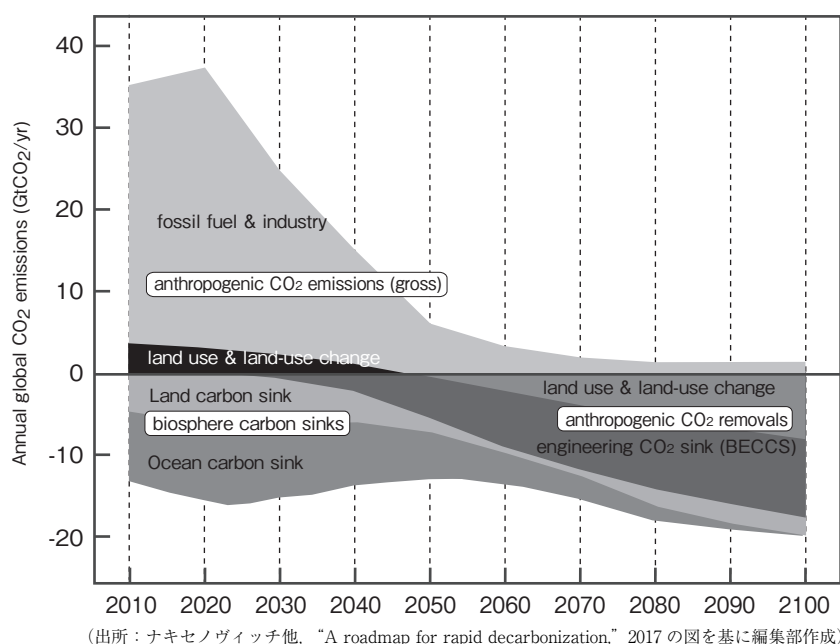


図5 1.5℃安定化のための脱炭素化シナリオ (2010～2100年)

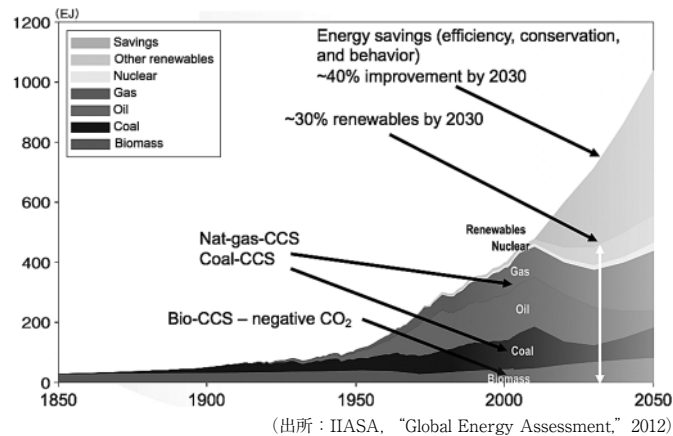


図6 世界の一次エネルギー供給構成～ A transformational Pathway ～

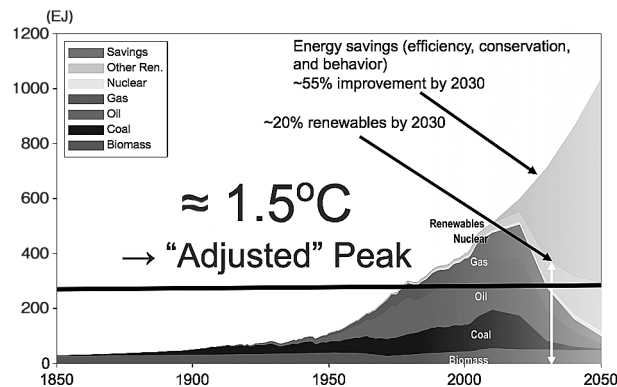
す。これによって、化石燃料からのCO₂排出量を相殺し、更にネガティブエミッションにつなげていかなければいけません。

最近、私の同僚が平均気温を1.5℃で安定化させる革命的なシナリオを導き出しました。図7に示す“ALPS Low Energy Demand” (LED) という研究で、多目的多様な世界を前提とした下での人類が選択し得る脱地球温暖化と持続的発展可能な経済社会実現に向けたシナリオ開発 (ALternative Pathways toward Sustainable development and climate stabilization) を目的に、IIASAが(公財)地球環境産業技術研究機構と協力して行っている研究です。

そこでは、通常と異なり、今後、気温上昇を安定化させて行く中で重要になるのは、供給側ではなく需要側(エンドユーザー側)です。「エンドユーザー側での変革や行動の変化が必

要」というのはどういうことかと言うと、皆さんが使っている50ほどの機器、例えば、テレビ、携帯電話、GPS機器などの消費電力は約450Wになりますが、これらをタブレットや、スマートフォンなどの効率的な機器に取り替えると、消費電力が100分の1になるのです。これは、2050年、そして2050年を超えたエネルギー転換にとって大きなチャンスとなります。

もちろん、これを実現するには、2030年まで全員が電力にアクセスできるようにする必要がありますが、適切な投資さえすれば、可能だと私は思います。その例が図8です。左のメキシコの太陽光発電所の電気料金は2.69セント/kWhです。中央のモロッコの陸上風力発電所が3セント/kWh、右のドイツの洋上風力発電所が4.9セント/kWhです。



(出所: Grubler et al, "A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies," nature energy, 4 June 2018)

図7 世界の一次エネルギー供給構成～ ALPS Low Energy Demand (LED) ～



図8 低コスト化が進む再生可能エネルギー発電

SDGs とエネルギー問題

2015年に採択をされたSDGsの7番目がエネルギーの目標で、図9に示すように、13番目が気候に関する目標です。しかし、2050年を超えて、エネルギーについて考えていく時には、SDGs全体を包括的な目標として捉える必要があります。17の目標のどれ1つとして取り残してはいけません。

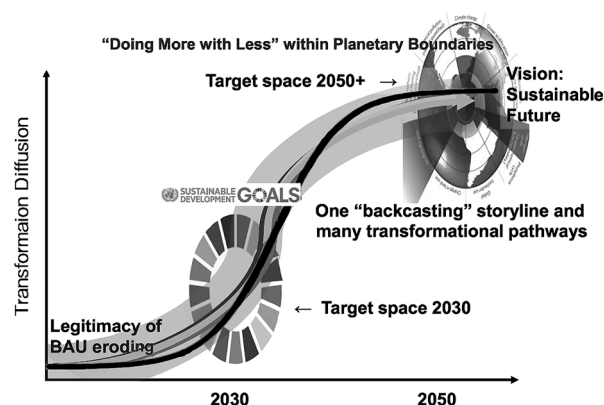
これから2050年を超えた未来に向けて大きな転換が必要なのですが、IIASAの“The

World in 2050”で重要年として位置づけたのが2030年です。2030年には全てのSDGsの目標を達成し、2050年も超えて持続可能な開発を進めなければなりません。

SDGsを実現するために何をしていくべきか。私達IIASAは、バックキャスティングで、そのストーリーを作りました。その中で、2030年にはSDGsを実現することをストーリーに入れたわけです。図10の黒い曲線は定量的なモデリングによる線です。



図9 国連持続可能な開発目標（SDGs）



（出所：German Council on Global Change (WBGE), “World in Transition” - A social Contract for Sustainability,” 2011）

図10 2030年にSDGsを達成し2050年へ

結論

最後に結論です。“The World in 2050”の中では、これから図 11 に示す 6 つの転換が必要であると結論付けました。その中で最も重要と位置づけたのは「脱炭素」とエネルギーの転換です。6 つ全てを実現するには、17 の SDGs 全てを達成しなければいけません。また、この 6 つの中で、恐らく非常に困難と思われるのは、デジタル革命だと思います。これまで何十年もデジタル技術が様々なシステムに

組み込まれてきました。

このような非常に野心的な目標を実現していくには、私たちは価値観も規範も変えていかなければいけないと言えると思います。

図 12 は、サンクトペテルブルグ空港で撮った写真です。免税店の写真なのですが、そこで、17 の SDGs のサインを見ることができました。空港の免税店で、香水やタバコ、アルコールを売っているだけではなく、このようなサインが出てきているということは、もしかしたら既に価値観が変わり始めているということかも知れません。

ご清聴ありがとうございました。(拍手)

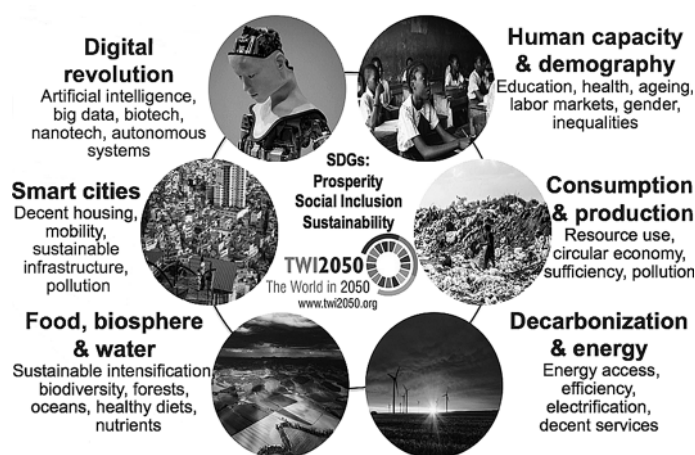


図 11 6 つの転換



図 12 サンクトペテルブルグ空港免税店前の SDGs サイン

エネルギーシステムの技術・社会イノベーション

山地 憲治 (公財) 地球環境産業技術研究機構
理事・研究所長



はじめに

わが国のエネルギー選択と政策の流れ

今回のテーマは「2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド」です。今から 32 年後の 2050 年を考えるということですが、始めに、では 32 年前はどうであったかを考えてみます。

32 年前と言えは 1986 年で、中曽根政権の時代です。前年の 1985 年には為替レート安定化に関する「プラザ合意」がありました。また、1986 年は正に「バブル景気」が始まった年で、国鉄の民営化が政治的に決着した年でもあります。それほど昔という感じはしません。ですから、2050 年もすぐ来ると思います。

ただ、今は当たり前になっているスマートホンも 1986 年当時は、「ドラえもんが持っているかな？」くらいの未来の技術でした。やはり技術は変わっていきます。2050 年超となると更に変わっていくと思います。

図 1 にエネルギー選択と政策の流れを示します。1960 年代はわが国でも国内炭を使っていて、電力の主体は水力でした。それが、急速に石油に変わっていきました。エネルギー政策というの 60 年代に生まれました。それ以前は、国内の産業政策だったわけです。それが 70 年代に 2 回のオイルショックがあり、今度は脱石油で石油の比率を下げていくことで、ガスと原子力が増えてきました。しかし、90 年代になって新たな要素として、自由化（電力システム改革）と温暖化問題が入ってきました。これらの問題は今も続いています。90 年代と今との間、2011 年には東日本大震災

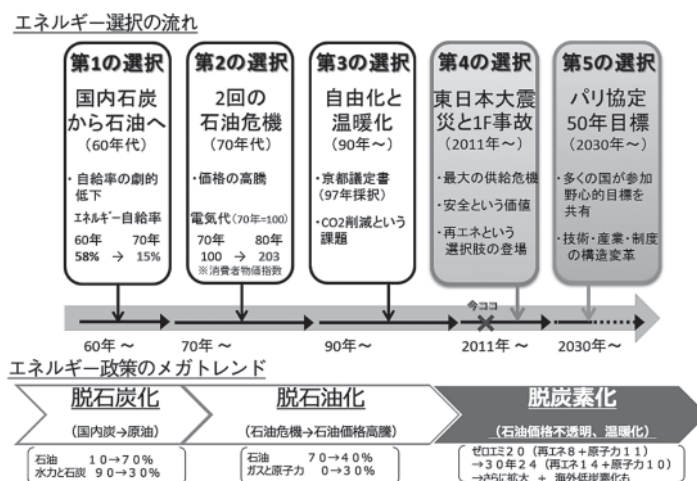


図 1 エネルギー選択の流れと政策のメガトレンド

が起こり、原子力という選択肢が非常に危ういものになってきました。

2050 年超を考えると、温暖化問題が長期的に取り組まなければならない問題だと思いますが、日本のエネルギーセキュリティ、経済性も重要であることに変わりはありません。

「第 5 次エネルギー基本計画」における 原子力と再生可能エネルギーの位置づけ

7 月に閣議決定された「第 5 次エネルギー基本計画」には、2030 年への具体的な行動目標（ターゲット）と 2050 年への野心的なビジョン（ゴール）とが掲げられています。

2030 年のエネルギーミックスは、「第 4 次エネルギー基本計画」を踏襲していますが、自給率の向上（6 % → 概ね 25 %）、電力コストの抑制、CO₂ 排出 25 % 削減などをターゲットに、PDCA（Plan, Do, Check, Action）サイクルの階段を上がっていく直線の取組みが達成することとしています。

これに対し 2050 年では、低炭素を超えて脱炭素化に挑戦するというゴールに向かって、OODA（Observe, Orient, Decide, Act）サイクルで多様な選択肢による複線シナリオをもって達成することになっています。ゴールの中には、「3 E + S」（安定供給、経済性、環境性、安全性）もあるでしょうが、その度合いが違っていき、「高度化する」という言い方をしています。色々な不確実性があり、技術革新もあり、社会経済も変わっていくことを考えれば、野心的なビジョンに向かう道は色々あるだろうということで、「複線シナリオ」という言葉は妥当だと思っています。

「第 5 次エネルギー基本計画」をもう少し具体的に見ていくと、2050 年に向けたところで、原子力に関しては、「安全を最優先し、経済的に自立し脱炭素化した再生可能エネルギーの拡大を図る中で、可能な限り原発依存度を低減する」と書かれています。ただし、次に、原子力は「実用段階にある脱炭素化の選択肢

である」とありますので、原子力を維持する意識はきちんと出ていると思います。ただ、足元を考えると、社会的信頼の回復が大事で、「安全性・経済性・機動性に優れた炉の追求、バックエンド問題の解決に向けた技術開発を進めて行く」という位置付けです。原子力は今、議論しにくいということでしょう。

今、具体的に議論し進めているのは、再生可能エネルギー（再エネ）です。再エネについては、2050 年向けには「経済的に自立し脱炭素化した主力電源化を目指す」と記されています。「経済的に自立」するためにどうするか。固定価格買取制度（FIT）などによる「補助からの早期自立を図り、既存送配電網の開放を徹底、補完電源としての火力容量維持の仕組みを早急に整える」、「技術革新によるブレイクスルー」、「調整力の脱炭素化」に向けた開発（蓄電池、水素システム、需給調整のためのデジタル技術の開発など）を考えています。それから再エネの「分布に応じた送電網の増強、分散型ネットワークシステムの開発」といった本質的な課題解決に向けた取組みが謳われています。原子力に比べると具体的です。私はそういうことに関する幾つかの審議会に関与していますので、その中からより長期に向けて、どう進めていくのかという話を以下述べていきたいと思っています。

再生可能エネルギー大量導入の課題

再エネ電源の制御

まず、自然変動する再エネ電源の制御についてです。特に太陽光発電では、九州電力㈱による出力抑制の報道がなされています。

図 2 は、太陽光発電が 800 万 MW も導入されていなかった 2 年前のデータですが、10 時台から発電量が需要量を超えたため、超えている分について火力を抑制するとともに、揚

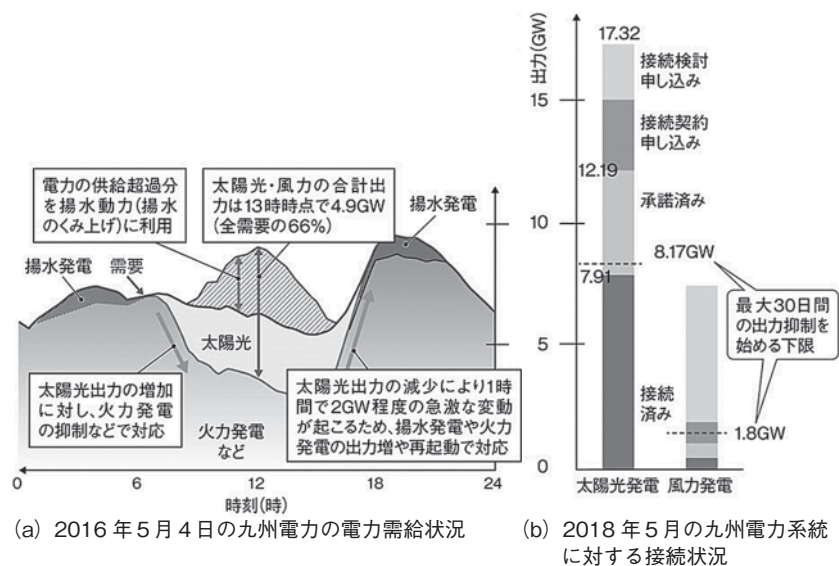


図2 九州電力の需給状況

水の汲み上げにも使って調整しました。ですが、揚水の汲み上げと放水の1往復で30%のエネルギーをロスしますから、揚水を調整に使うのは望ましいことではありません。

もう1つ、この日は出力制御の必要はなかったのですが、太陽光が発電なくなる夕方に増えて来る残余需要に対して、他の電源を急速に立ち上げなければいけませんでした。だから、単なる需給バランスだけでなく、変化速度の問題もあるのです。

現在、九州電力管内の太陽光発電導入量は800万MW（8GW）になっています。それほどあって、春、秋の九州の需要は図2に示す程度ですから、出力制御をかけていかざるを得ない、あるいは貯めなければいけないという問題が目の前に来ているというわけです。

送電線の容量管理～系統制約の克服～

それから、送電線の話もあります。送電線は最大の需要に応じて電気を流さなければいけませんし、送電線事故に備えて予備容量も持っています。昔は電力会社が自分の発電所の電気を自分の送電線で顧客に送っていたわけですが、今は、他の事業者が発電し、それを他の小売事業者が売るための電気を送るのに電力会社の送電線を使うという状況です。

そうなると、発電事業者と「あなたはどれくらい送りますか」という系統接続契約をすることになります。風力も太陽光も最大出力で契約することになりますが、そうすると送電線に空きが沢山でき、送電線の利用率が低下します。そこで、「送電線の容量を全部空けておかななくても何とかかなる、空き容量を、使いたい人に使わせないか」という話が出てきます。そのために、数年前から、送配電線の利用ルールを決めなければいけないという問題が起こってきています。

今、再エネの発電コストは下がりつつあります。それに伴って、再エネ電源をどんどん受け入れていくと、前述の理由で、送配電線の利用率が下がってきます。そうすると送配電コストが上がるのですが、それをどれくらい抑えられるかという問題が出てきます。ですから、図3に示すように、再エネの発電コストとネットワークコストの2つを足したトータルコストを削減していかなければいけないわけです。発電から送配電まで1社でやっていた時は、送電コストは内部会計でした。今は、新しく小売電気事業者が出てくると、その事業者が電源から送配電網で電気を送る時に託送料を払うわけですが、発電側にも課金をする必要があるのではないかという問題が出てきています。

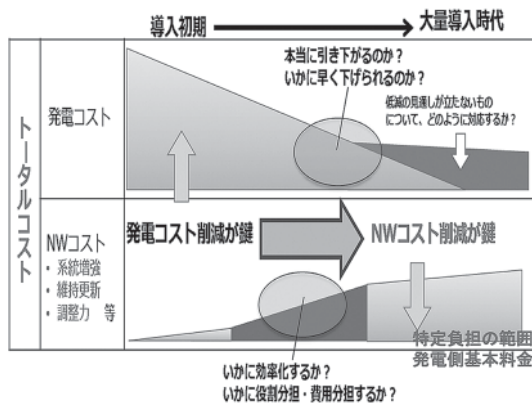
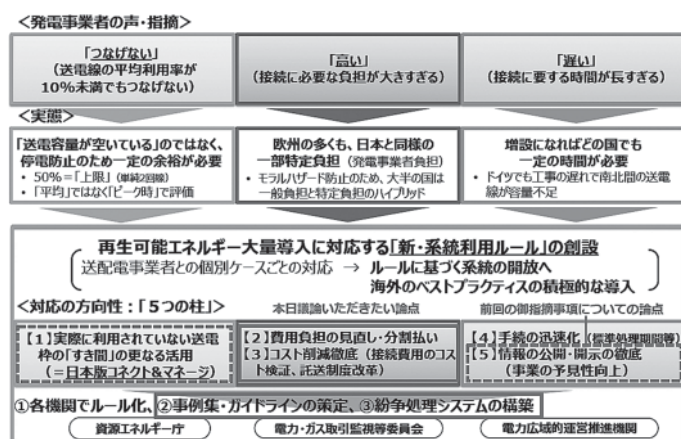


図3 再エネ大量導入時代のトータルコスト削減

それで、「再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会」（以下、小委員会）では、図4に示すように、送電線が余っているのに繋げないという問題を解決す

るために、実態を調べて、実際に利用してない送配電枠の隙間を使うこと（コネクト&マネージ）を考えました。しかし、できるだけ有効に使うには、費用負担の見直しが必要です。それからどんどん接続するので、今のネットワークだけでは足りず、これから作るネットワークのコストも下げなければなりません。更に、公平な運用のためには、情報開示や手続きの迅速化が必要となります。このような課題を整理して、今、順番に手を打っているところです。

表1は、小委員会で検討された日本版コネクト&マネージの内容です。発電所は出力を変えるわけですし、風力や太陽光も出力は変動していますから、実際に流れる電気はどれ



（出所：第3回 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会，2018年2月22日）

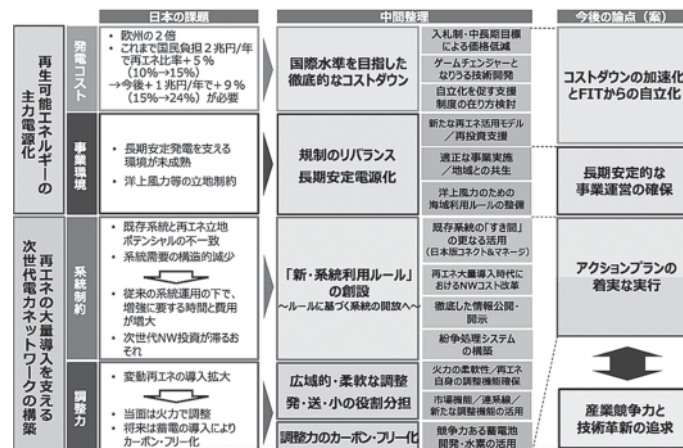
図4 系統制約の克服に向けた対応の全体像

表1 日本版コネクト&マネージの検討

取組	想定潮流の合理化	コネクト&マネージ	
		N-1電制 (N-1故障時瞬時電源制限)	ノンファーム型接続 (平常時出力抑制条件付き 電源接続)
運用制約	原則、マネージなし	N-1故障（電力設備の単一故障）発生時に電源制限	平常時の運用容量超過で電源抑制
設備形成	・接続前に空容量に基づき接続可否を検討 ・想定潮流が運用容量を超過で増強	・事前の空容量に係わず、新規接続電源の出力抑制を前提に接続 ・主に費用対便益評価に基づき増強を判断	・事前の空容量に係わず、新規接続電源の出力抑制を前提に接続 ・主に費用対便益評価に基づき増強を判断
取組内容	想定潮流の合理化・精度向上 ・電源稼働の蓋然性評価 ・自然変動電源の出力評価	N-1故障発生時に、リレーシステムにて瞬時に電源制限を行うことで運用容量を拡大	系統制約時の出力抑制に合意した新規発電事業者は設備増強せずに接続
混雑発生	（平常時）なし （故障時）あり ⇒電源抑制※1で対応	（平常時）なし （故障時）あり ⇒電源制限※2で対応	（平常時）あり （故障時）あり

※1 給電指令による発電出力抑制
※2 リレーシステムによる瞬時の発電出力制限

（出所：第1回 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会，2017年12月18日）



（出所：第7回 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会，2018年8月29日）

図5 「第5次エネルギー基本計画」を受けた論点の全体像（案）

くらいか潮流を想定してやると、送電線の容量に空きが出ますから、この4月から想定潮流の合理化は行っています。予備の送電線の容量の部分についても、事故がない時には使っていて、事故が起こった時には切ってもらうN-1電制をやっているとか、特に送電枠を持たないけれど、送電容量に空きがある時には送れるという仕組み（ノンファーム接続）ができないか整備中です。

そうした中で、「第5次エネルギー基本計画」を受け、今夏から小委員会の第2フェーズが始まりました。再エネについては、太陽光や風力といった大規模に入ってきて今後急速にコスト低下が見込まれる電源と、もう少し規模が小さく地域と共生しつつ緩やかに自立に向かう電源とを分けて対応していきます。まずは、図5に示すように、主力電源化に向けて発電コストを下げていく、FITからの自立を図る、それから事業環境も整備していきます。例えば、洋上風力などのために一般海域の利用ルールを作ろうとしています。

また、太陽光ですと、乱開発もあるので、事業環境整備を図りつつ自立化させよう、系統問題にもちゃんと取り組むだけでなく産業競争力を高めて世界に打って出ようということと動き始めています。

ただ、公益を担う一番大きな部分は、送配電のうち送電の部分だと思います。配電部分

も公益を担いますが、送電と違って配電は、ユニバーサルサービスの基盤でもあり、ピア・トゥ・ピアの電気のやり取りなど色々な新しいビジネス展開の基盤にもなります。そういう違いを意識しながら後半の第2フェーズを進めていこうとしています。

2050年に向けたエネルギーの方向性

エネルギー情勢懇談会の提言

経済産業省のエネルギー情勢懇談会が「第5次エネルギー基本計画」について提言しています。そのポイントを表2に示します。この中で、複数のシナリオをきちんと解析して、科学的レビューメカニズムを作るという点ですが、私は、モデルを使ってそういうシナリオを定量化していく作業をしましたので、我々の専門分野がレビューメカニズム作りに反映されていくと思います。

非連続イノベーションへの挑戦

非連続（ディスラプティブ）な長期のイノベーションには具体的に何があるか。図6に示すように、再エネの中には、未来型のエネ

表 2 2050 年に向けたエネルギー情勢懇談会提言のポイント

●可能性	→ 野心的シナリオ「エネルギー転換、これによる脱炭素化への挑戦」 脱炭素化への挑戦を主要国も主要企業も標榜 エネルギー転換に向けた国家間の覇権獲得競争の本格化
●不確実性	→ 複線シナリオ「あらゆる選択肢の可能性を追求」 他方で、非連続の試み、主要国は野心的だが決め打ちなし 再エネ一本のドイツより全方位の英国、仏などが優れた成果 経済的で脱炭素の完璧なエネルギーがない現実 電源別コスト検証から脱炭素化システム間のコスト・リスク検証へ
●不透明性	→ 科学的レビューメカニズム「最新情勢で重点をしなやかに決定」 地政学情勢、地経学情勢、技術間競争の帰趨は全て不透明 常に技術と情勢を 360 度観察し、開発目標と政策資源の重点を設定 一度定めた重点を、更新するレビューメカニズムで修正・決定
●複雑で不確実な環境でのエネルギー転換	→ 「3E+S」の要請を高度化 ○安全最優先 → 技術とガバナンス改革による安全の革新で実現 ○資源自給率 → 技術自給率向上 + 選択肢の多様化確保 ○環境適合 → 脱炭素化への挑戦 ○国民負担抑制 → 自国産業競争力の強化



(出所: 第7回 再生可能エネルギー大量導入・次世代電力ネットワーク小委員会, 2018年8月29日)

図6 2050 年に向けた非連続イノベーションの挑戦

ルギー技術（宇宙太陽光、超臨界地熱技術、塗布型太陽光、水素還元製鉄、人工光合成など）もありますが、当面リアリティがあるのは、自動車の電動化、自動化の辺りです。

分散化も大きな傾向です。その中には次世代蓄電池や AI 駆動型システム、ブロックチェーンとかがあります。

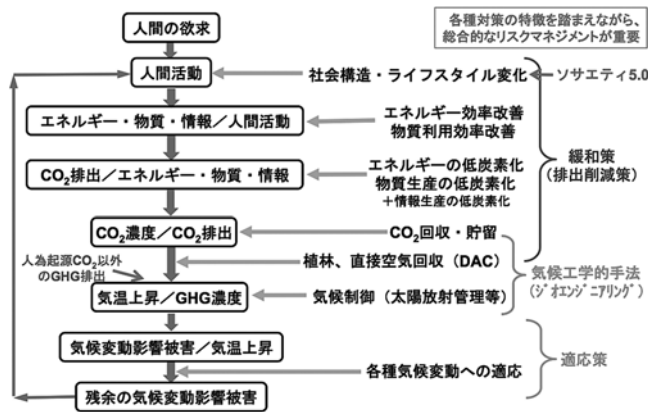
ことは、やはり温暖化への取組みだと思っています。図7に温暖化対策の基本構造を示します。そもそも人間の色々な欲求による活動があって、その活動を支えるためにエネルギーや物質、情報を生産することで二酸化炭素（CO₂）が排出されます。CO₂を排出すれば大気中のCO₂濃度が上がって気候変動の被害がある。

この中で、我々が従来やってきた対策は、人間活動当りのエネルギー需要の削減やエネルギー効率改善、物の使い方の改善といった省エネです。エネルギーから出るCO₂を減らす中には、エネルギーの低炭素化・脱炭素化、あるいは物質生産の低炭素化もあると思います。それから、CO₂は出るけれど大気中のCO₂濃度を上げないためのCO₂回収貯留

地球温暖化対策への取組み

温暖化対策の基本構造

2050 年以降もやらなければいけない大きな



(出所：山地憲治，「エネルギー・環境・経済システム論」（岩波書店）に加筆）

図7 地球温暖化対策の基本構造

(CCS)もあるし、一旦大気に排出するけれど、それを人工的に回収する「ダイレクトエアキャプチャー」(DAC)、地球の太陽光反射率を上げて温室効果を抑える気候制御という気候工学的な手法もあります。

最後は、台風の大型化や洪水など、気温上昇の影響に適応していくことも重要です。農業での品種改良、堤防を作るとか、海岸強化などの防災・減災対応など様々な適応策があります。

従来、私の説明はここまででしたが、2050年超のイノベーション考える時には、もっと違う部分、つまり人間活動の量や質にも手を付けられるのではないかと思います、2016年の科学技術基本計画で謳われた「Society 5.0」政策についてお話しします。社会構造やライフスタイルの変化があって、人間活動そのものが変わっていく可能性があります。

地球温暖化のリスクマネジメント ～平衡気候感度の違い～

「Society 5.0」の中身についてお話しする前に、地球温暖化のリスクマネジメントと「Society 5.0」の関連について説明したいと思います。

認知度が高い温暖化問題ですけど、実は問題の中に大きな不確実性が含まれています。一番典型的な不確実性として、平衡気候感度というものがあります。これは、大気中の温

室効果ガス濃度が倍になったら、それと平衡する温度上昇は幾らかという係数です。現在の科学的知見では、この平衡気候感度には1.5～4.5℃というものすごく大きな幅があります。「気候変動に関する政府間パネル」(IPCC)の「第5次評価報告書」で使っている代表値は3℃ですけど、実は、これは合意された値ではありません。私は「第3次評価報告書」、 「第4次評価報告書」に関わりましたが、 「第3次評価報告書」の時の代表値は2.5℃でしたが、「第4次評価報告書」では3℃になりました。2.5℃と3℃は0.5℃しか差がないので、たいしたことはないと思われがちですが、この差は2℃目標を達成する2050年頃の排出経路に非常に大きな違いを生みます。

図8は、2300年までのCO₂排出量を地球環境産業技術研究機構(RITE)で計算した結果です。何も対策を講じないまま(BaUシナリオ)だと、排出量はずっと増えていきますが、2℃目標で気候感度が2.5℃なら①の線、気候感度が3℃なら②の線になります。いずれの場合も、2100年頃にはネットゼロに持ってかなければいけないのですが、我々が議論している2050年の排出量は、同じ2℃目標でも平衡気候感度が2.5℃と3℃の時では随分違ってきます。

今、②の線を見ていて「大変だ」と言っているわけですけど、もし①の線であればまだ時間はあるということになります。なお、安定化目標が2℃を十分に下回る場合だと③

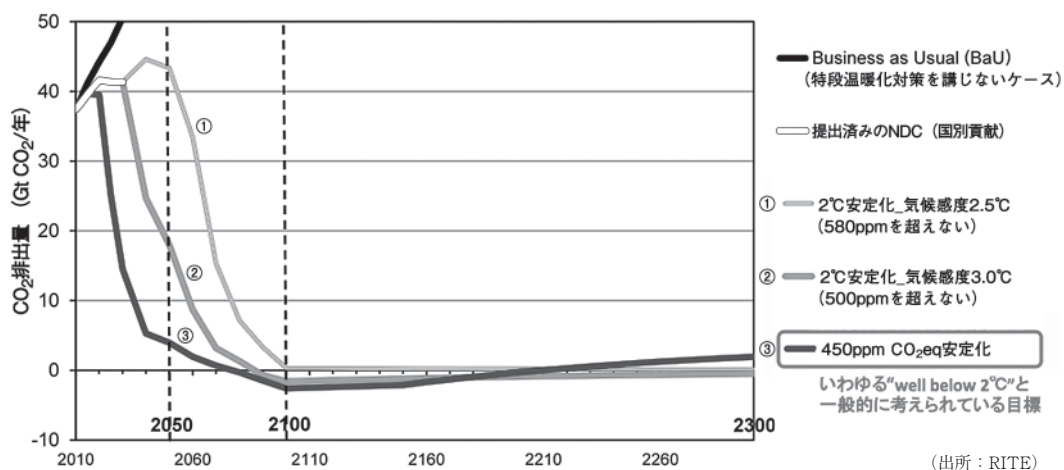


図8 IPCCの各シナリオのCO₂排出量推移(～2300年)

の線になりますが、それが非常に困難なことは明らかです。

温暖化対策では、気候変動の不確実性をどう扱うか難しいのですが、今世紀末くらいまでに排出量を正味でゼロにするという目標は、非常にロバスト(robust)な目標だと思います。それをどう達成していくかが大事です。

地球温暖化のリスクマネジメント ～ベースラインシナリオの違い～

シナリオ分析をする時、「ベースラインシナリオ」というのを使います。図8ではBaUがそれに当たります。つまり、特段の温暖化

対策は講じないけれど、通常想定される政策と技術進歩を考えているシナリオです。しかし、世界のベースラインシナリオが2100年まで1本であるはずがありません。IPCCもベースラインシナリオとして色々な社会経済シナリオ(SSP: Shared Socioeconomic Pathway)を持っています。図9に、IPCCの5つのSSPのCO₂排出量推移を「第5次評価報告書」(AR5)の排出シナリオと重ねて太い折れ線で示しました。ベースラインシナリオ内でも2100年での排出量に大きな幅があり、同じ2℃目標でも、どのベースラインシナリオから下げるのかで難しさは大きく違ってきます。

先ほど私が言った「Society5.0」のような対

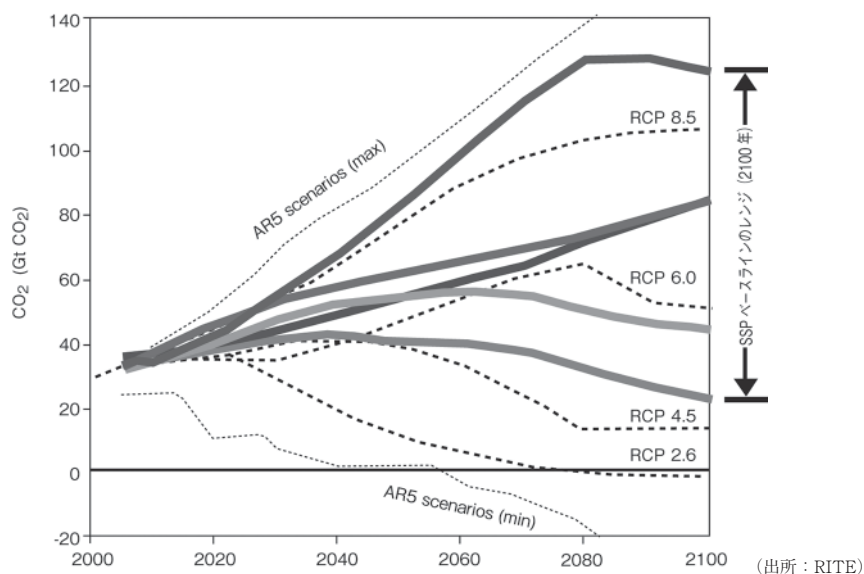


図9 SSPによるCO₂排出量推移

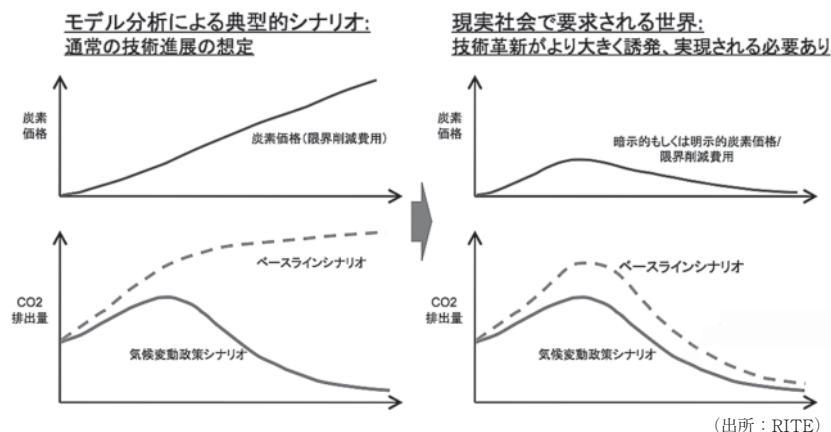


図 10 CO₂ 排出大幅削減シナリオ

応で、ベースラインそのものをえられるのではないかと思います。つまり、図 10 左側の典型的シナリオで CO₂ 排出量を減らしていくとすると炭素価格がものすごく上がっていきます。だけれど、ベースラインシナリオが右側だと、一時的に気候変動対策シナリオよりも CO₂ 排出量が増えるけれど、技術・社会の広範なイノベーションによってゼロエミッションが実現できます。この部分に着目しようというのが、今、私どもが考えているところです。

「Society 5.0」の温暖化対策へのインパクト

内閣府が「第 5 期科学技術基本計画」で示した「Society 5.0」は、「超スマート社会」という言い方もされています。IoT（モノのインターネット）や AI（人工知能）、ビッグデータ解析などを活用してサイバー空間とフィジカ

ル空間が融合した「超スマート社会」の実現を図り、経済成長や健康長寿社会の形成などをめざす取組みを「Society 5.0」として推進するとされています。「超スマート社会」は、必要なモノ、サービスを必要な人に、必要な時に、必要なだけ提供する社会ですから、もし実現すれば、省エネがすごく進むと思います。

その実現のために、図 11 に示すサービスプラットフォームを作ります。その中にはエネルギーバリューチェーン最適化がありますが、今までのイノベーションと違うのは、太陽光発電、風力といったエネルギー技術分野の技術のイノベーションというよりも、ロボット、センサー、アクチュエーター、ヒューマンインターフェース技術など色々な分野に使える共通基盤技術のイノベーションを図っていくという点です。これは、我々が通常考えている「エネルギーのイノベーション」の範囲から外れていましたが、交通部門では、こ

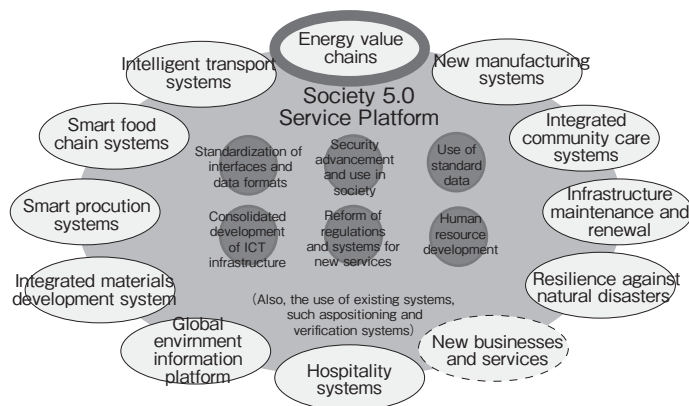


図 11 Society 5.0 のサービスプラットフォーム

のような共通基盤技術を活用した自動運転やカーシェア・ライドシェアなどが既に起こりつつあります。

内閣府の「Society 5.0」に対応する形で、経済産業省では第4次産業革命による技術革新を踏まえて「Society5.0」を実現するために、様々な繋がりによって新たな付加価値の創出や社会課題の解決をもたらす「Connected Industries」への取組みを進めています。

「Society 5.0」は、人類の発展を、狩猟社会→農耕社会→工業社会→情報社会→超スマート社会への展開と捉えます。一方で、「Connected Industries」では、技術変化に着目して、第1次産業革命（蒸気機関）→第2次産業革命（電力・モーター）→第3次産業革命（コンピューター）→第4次産業革命（大量の情報を基に人工知能が最適な行動をとる）と捉えます。

こういう国の動きは結局、「シェアリングエコノミー」とか「サーキュラーエコノミー」とかを生んでいくわけです。

「Society 5.0」は、「第17回未来投資会議」（2018年6月4日）でも言及されています。そこでの安倍総理の発言では、これまで温暖化対策は国が主導して義務的な対応を求めるものだったけれど、2050年を視野に脱炭素化を牽引していくためには、このやり方では対応できないので、環境と成長の好循環をどんどん回転させビジネス主導の技術革新を促す形へのパラダイム転換が求められている。そ

して今、常識に囚われない新しいビジョンを持って、自動運転、ヘルスケア、デジタルガバメントなどの重点分野でのプロジェクトが推進されつつあり、そこでは、「Society 5.0」の実現を目指すことが述べられています。

この機会というのは、大きな変わり目ではないかと思います。

カーシェア・ライドシェアによる エネルギー需要削減の試算

RITEでは、まだ試算段階ですが、「Society 5.0」の効果の分析の例としてカーシェア・ライドシェアの普及シナリオがどれくらいエネルギー削減に役立つかを分析してみました。自動運転で且つカーシェアが普及すると車の利用率が高まり、無駄が無くなり燃費も減っていきます。これにより、低人口・低需要シナリオ（SSP1）では、特段のCO₂削減策をとらなくても、図12に示すように、2050年以降では、カーシェア・ライドシェアを考慮しない標準シナリオ（SSP2）比で世界のCO₂排出は40～70%程度の削減となります。ただ、便利になると利用量が増える「リバウンド効果」の評価という難しさはあります。RITEとしては、こういう分析をして、この中でエネルギー分野での「Society 5.0」の効果がどうなるかを分析していきたいと思っています。

それから、日本国内で80%削減を目指すことになっているのだけれど、本当にそれでいい

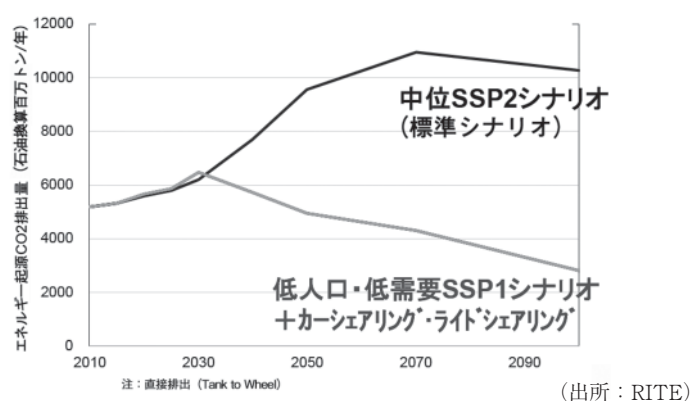


図12 低人口・低需要シナリオに道路交通部門のシェアリングを加えた場合のCO₂排出削減効果

のか。温暖化対策というのは、世界全体でやるものですから、日本の技術、産業、製品のグローバル貢献も考えなければいけません。それを RITE のモデルで計算した結果を図 13 に示します。図の上側で国内の削減量を段々増やしていくと、図の下側で日本製の製品等によるグローバルな CO₂ 削減効果が減少することが示されています。ここに示されているように、日本国内で無理に温室効果ガス（GHG）の大幅な削減をすると、産業競争力が低下したり産業構造が変化することなどを通して海外での貢献が減ってしまうという問題があります。

まとめ

図 14 は私がここ 2 年くらい使っている図です。地球温暖化対策のロバストな目標である正味排出ゼロに向けて、どういう技術・イノベーションがあるかを整理したものです。私が中心に置くのは、クリーンで効率的なエネルギーキャリア（Clean and Efficient Energy Carrier）で、電気と水素です。電気と水素の何が良いかというと、利用する所で

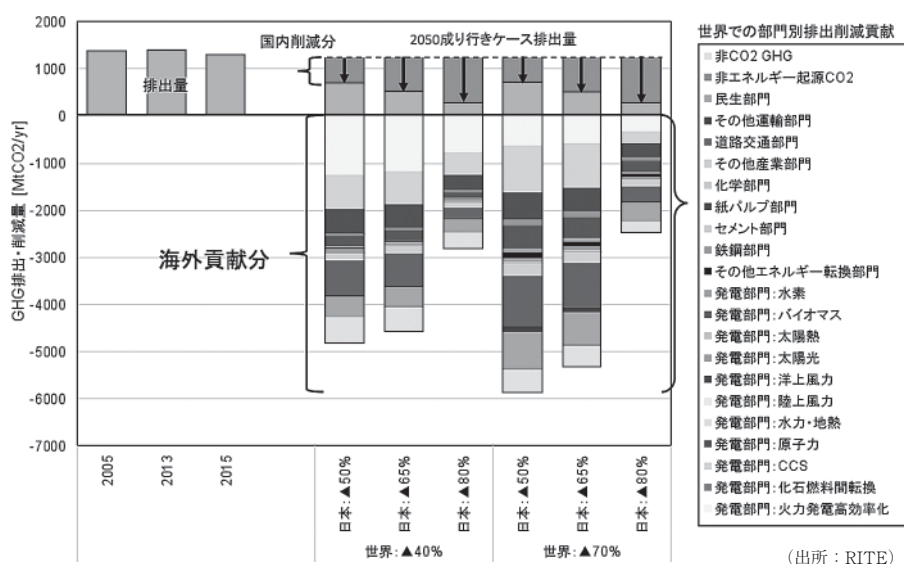


図 13 グローバル・バリューチェーンにおける日本の GHG 排出削減効果（2050 年）

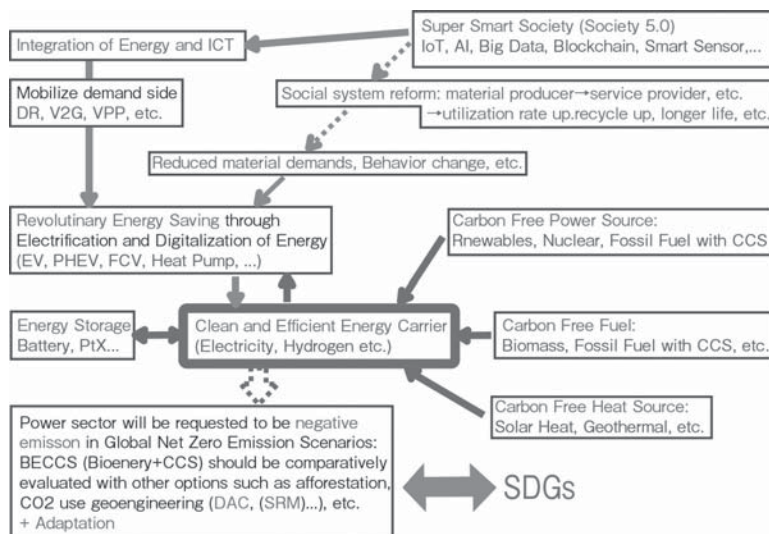


図 14 正味排出ゼロへの経路

非常にクリーンであること、色々なものから作れることです。カーボンフリーの電源としては、再エネ、原子力がありますけれど、CCS 付きの火力もあります。カーボンフリーの燃料では、バイオマスが主体になるでしょうが、化石燃料と CCS を組み合わせて作っても良いです。それから、カーボンフリーの熱源には、地熱や太陽熱とかがあります。こういうようなもので電気や水素を作ります。ただ、変動性の電源にはエネルギーを貯蔵するためのバッテリーなどによるエネルギー貯蔵技術が必要になります。自然変動電源の調整力としては、デマンドサイドマネージメントとか、ビークル・ツー・グリッド (V2G) とかもあります。

しかし、これだけではゼロ・エミッションにはできないので、ネガティブ・エミッションの部分も必要です。しかも、温暖化だけが世界の問題ではないので、国連の持続可能な開発目標 (SDGs) との絡みで色々なオプションを持っておかなければいけないと思っています。

図の右上のほうに社会システム改革 (Social system reform) があります。「超スマート社会」, 「Society 5.0」によって社会システムが変わると何ができるか。例えば、モノを作っていた企業がサービスプロバイダになるとか、シェアリングエコノミーでモノの利用率が上がり、リサイクル率も上がるし、部品をきめ細やかにコントロールしてくと部品寿命もプラント寿命も延びます。ということは、結局、マテリアルへの需要が減り、人間の行動も変えられます。

また、図の左上のエネルギー分野では、特に電力と ICT の統合が本格的にできるようになる。それによって、デマンドサイドの色々な資源を活用できる。そこで非常に革命的なエネルギーの節約 (Revolutionary Energy Saving) ができれば、昔のシステム分析だと、ベースラインだったところの変化が大きな役割を果たすのではないかと思います。

以上で私の話は終わらせていただきます。

ご清聴ありがとうございました。(拍手)

【講演1】

2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド ～エネルギーモデルによるシナリオ分析～

加藤 悦史 (プロジェクト試験研究部
副部長)



はじめに

本日のシンポジウムのテーマ「2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド」について、午後は4件の報告をさせていただきます。私とその最初ということで「エネルギーモデルによるシナリオ分析」で将来のエネルギーシステムの可能性を探りたいと思います。

当研究所は、産官学の連携のもと「総合工学」の視点で政府や民間企業と協力しながら研究を行っています。その中で5年毎に「エネルギー中長期ビジョン」(以下、中長期ビジョン)を策定してきていますが、本年は創立40周年ということもあり、当研究所が有する地球環境統合評価モデル GRAPE と TIMES-Japan を用いた解析でエネルギー技術の現状と課題を整理しています。また、国内外の有識者の様々な意見を収集することで、超長期のエネルギー技術展望について幅広く検討を進めているところです。今回のシンポジウムでの皆さんとの議論も踏まえ、後日、中長期ビジョンを出版する予定です。

私の講演では、策定中の中長期ビジョンの目的、次にモデル計算とその条件やシナリオについて、最後に主要な計算結果をお示ししたいと思います。

さらに、私の後に続く講演で、モデル結果から、どういう2050年を超えるメガトレンドが言えるのかお伝えしようと思います。

中長期ビジョンの目的と策定の流れ

中長期ビジョンの目的

2050年を超える将来に向け、どういうエネルギー技術の研究開発や実証試験(RD&D)を行っていけばいいか。その優先順位を見つけ出し、中長期的なエネルギー技術の問題解決のための戦略的プラットフォームを構築することが中長期ビジョン検討の目的です。

検討の流れ

図1に示すように、検討はフェーズ1(将来エネルギーシステムの評価)とフェーズ2(エネルギー技術シナリオの記述)で行っています。私が担当しているフェーズ1では、世界と日本の長期的な見通し、国際エネルギー機関(IEA)やパリ協定(2015年12月採択)で示された温室効果ガス(GHG)の排出経路や低炭素エネルギーシステムへの転換という流れをベースに、モデルによってエネルギーシステムの評価を行っています。評価を行うモデルは、世界についてはGRAPE(Global Relationship Assessment to Protect Environment)、それに基づいた日本国内の詳細についてはTIMES-Japan(The Integrated MARKAL-EFOM System-Japan)です。

フェーズ2では、フェーズ1での解析で抽出された技術開発項目について、より詳細に現状

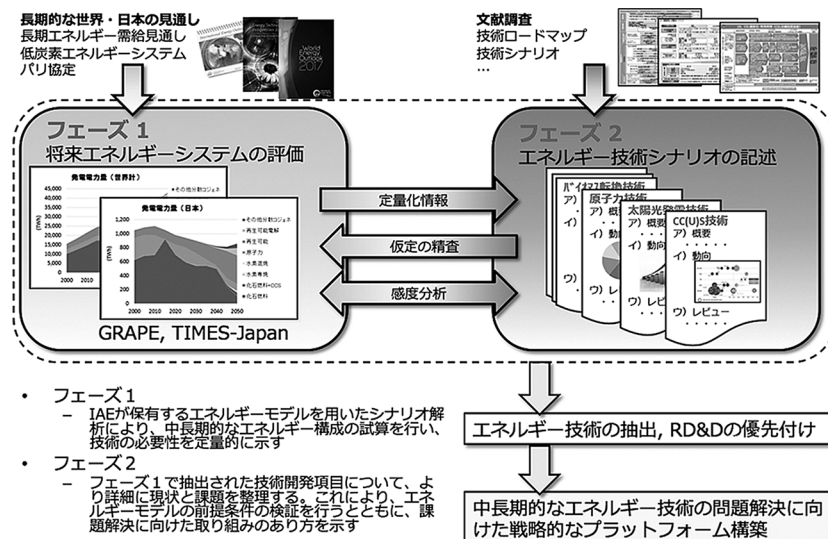


図1 「エネルギー中長期ビジョン」策定の流れ

と課題を整理します。これにより、GRAPE と TIMES-Japan モデルの前提条件を検証するとともに、課題解決に向けた取組みの在り方を示します。その際、再生可能エネルギー（再エネ）、原子力、化石燃料の個々のエネルギーについての技術シナリオを作ります。

実は、モデルというものは、現実をありのまま反映するものではなく、現実を理想的な形で抽出して簡易に表現したものです。従って、必ず記述が不十分な領域が出てきます。そこで、そういった領域を特定し、その領域における技術オプション・技術革新の可能性を提示することにも使えるのがフェーズ 2 の技術シナリオなのです。

モデル計算

前提となるエネルギーシステムシナリオ

GRAPE では、パリ協定と整合的なエネルギーシステムの解析を行っています。パリ協定では、産業革命前からの世界の平均気温上昇を 2℃ 未満に抑え、1.5℃ を目指す努力を追求することが掲げられ、2030 年における国別貢献が約束

されています。

そこで、まず、GRAPE で各国の排出削減費用が均等となるようにしながら、2050 年での日本の排出量がどうなるかを計算します。そして、TIMES-Japan モデルで、それを実現するエネルギーシステムの解析を行っています。

この TIMES-Japan モデルの概要を図 2 に示します。TIMES-Japan モデルというのは、IEA 実施協定（現在は技術協力プログラム）の一環として開発された様々な国や地域に適用できる汎用的なツールである TIMES モデルに、日本のエネルギーバランスや将来技術の価格設定、効率などを入力して作ったモデルです。1 期 5 年、2050 年まで年単位で需給バランスを細かく見えています。また、産業、家庭、業務、運輸の部門毎に細かく需要を設定し、その需要と供給のバランスから成り立つモデルになっています。割引率 3% という設定で 2050 年までのシステムコストが最小となるエネルギー需給構成を求めるモデルになっています。

TIMES-Japan による解析の制約条件としては、一次エネルギー、発電、転換、最終エネルギー消費という流れの中で、パリ協定下での二酸化炭素（CO₂）排出量、エネルギー源の使用可能量、技術の利用可能量、最終的なシステムコストなどがあります。

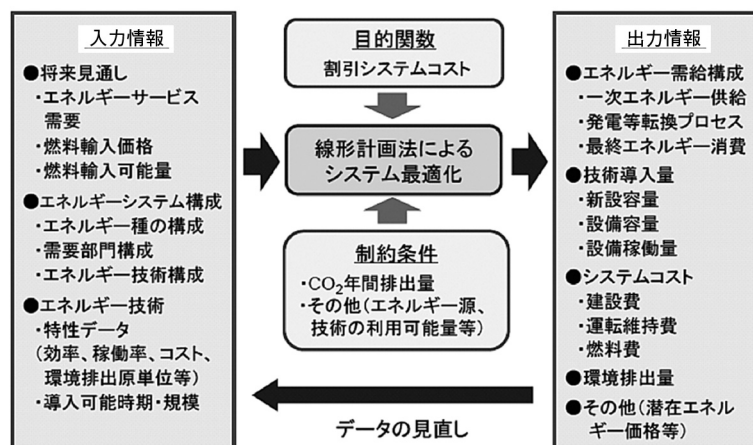


図2 TIMES-Japan モデルの概要

図2の左側にある入力情報うちエネルギーサービス需要の情報には、素材産業で鉄を何t作るか、化学物質を何t作り有効エネルギーを幾つにするかといった情報もあります。運輸については、旅客輸送では人/キロ、貨物輸送ではtキロという単位で需要を与えています。また、民生部分、業務・家庭では有効エネルギーを与えるという形になっています。

モデル解析の主要な前提条件：需要想定

モデル解析に必要な需要、価格、技術に関する想定について説明します。

GRAPEでは、IEA『世界エネルギー見通し(2017年版)』の新しい政策を盛り込んだGHG排出シナリオNPS(New Policy Scinario)や「持続的な開発」を求めるシナリオSDS(Sustainable Development Scinario)をベースに需要を想定しています。

より詳細に日本について解析するTIMES-Japanでは、2050年の需要を政府の「長期エネルギー需給見通し」に示された2030年の値の延長で、人口や国内総生産(GDP)の推計を基に想定しています。産業構造については、製造業は現在と同程度の生産量を維持していく。また、家庭部門や運輸部門のエネルギー需要は、人口減少で若干下がっていくと想定しています。

モデル解析の主要な前提条件：価格想定

輸入エネルギー価格は、『世界エネルギー見通し』のSDSを基に設定しています。SDSは、化石燃料の価格は現状維持か少し上がるというシナリオです。また、海外で二酸化炭素(CO₂)フリーで製造した液体水素を35円/Nm³で輸入することも想定しています。

2030年、2050年の発電コストについては、化石燃料と原子力については、政府の報告書を参考に設定しています。

モデル解析の主要な前提条件：技術想定

今後、導入拡大が予測される再エネ電源については、2030年、2050年の上限値(最大導入量)を設け「標準ケース」としました。ただし、導入が上手くいかない「限定ケース」も設定しています。

原子力については、将来が不透明なので3つのケースを設定しています。「標準ケース」では、廃炉が決まった以外の炉は再稼働して「運用開始から60年で廃炉・新設なし」を想定しています。また、2020年以後、全ての原子力が稼働しないという極端なケースも設定していますし、2020年までにほぼ全部の原発が再稼働して、2000年程度の設備容量(約40GW)を維持するという設定もあります。

化石燃料利用については、「標準ケース」で炭素回収貯留（CCS）の可能性を考慮しています。2050年まで段階的に貯留可能量が増えていき、2050年では最大貯留可能量5,000万t-CO₂に達すると設定しています。ただ、CCSの普及が進むか進まないかは政策にもよるので、CCSがないケースも設定してあります。

主要な計算結果

2050年までの一次エネルギーと発電量

主要な計算結果について、再エネが大量導入され、原子力も26GW程度に維持される（新設なし）という「標準ケース」で説明します。

図3の左側は、日本の一次エネルギー供給が2050年に向けてどうなるかを示しています。再エネが着実に増えていきます。2050年では

約半分が再エネになります。ただし、世界中で低炭素化に向けて動く中では、海外から輸入する液体水素も2050年に全体の9%を利用しなければならなりません。

また、図3の右側の発電量を見ると、2050年には99%がCO₂を排出しない電力となり、ほぼゼロエミッションを達成するという結果が出ています。

2050年までの産業部門と民生部門のエネルギー消費量

図4の右側は民生部門のエネルギー最終消費ですが、民生部門の電化率がどんどん高まっていき、石油製品の利用がかなり低くなります。逆に、図4左の産業部門では、化石燃料を原料とする素材産業や高温の熱利用があり、エネルギー消費量は中々減りません。2050年でも化石燃料は6割弱使われるというのが「標準ケース」です。

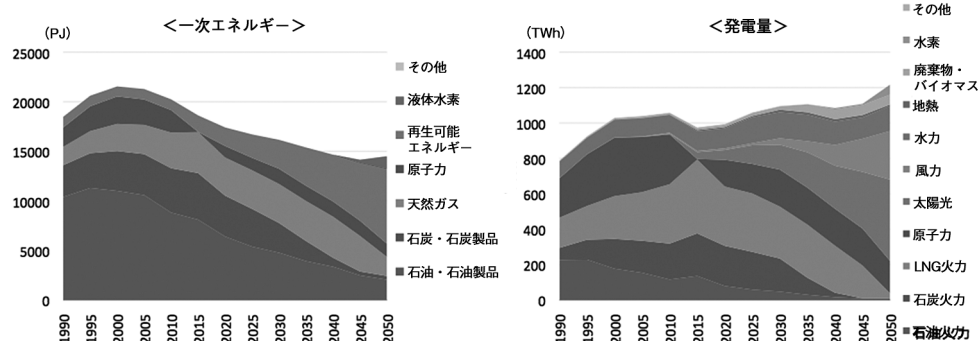


図3 2050年までの一次エネルギー（左）と発電量（右）

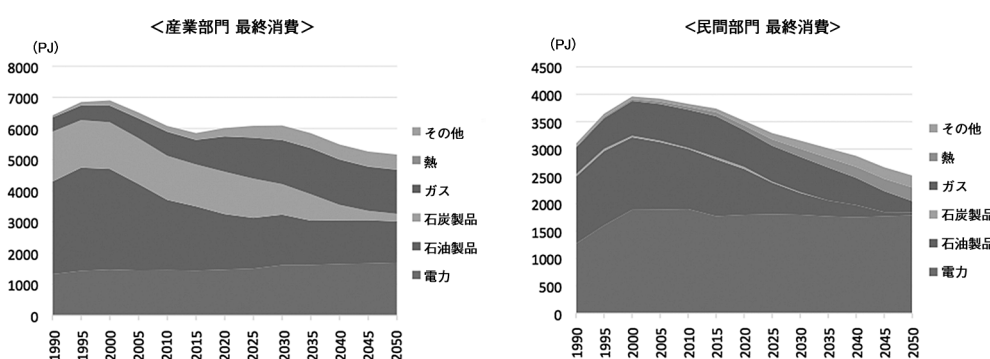


図4 標準ケース（産業・民生エネルギー）

図5に2050年までの運輸部門のエネルギー最終消費と日本のCO₂排出量の推移を示します。2030年頃までは現在とそれほど変わりません。まだガソリンが多く使われていますし、ジェット燃料も多く使われています。ですから、2030年以降の変化が非常に大きくならないと、2050年での80%削減といった低炭素化は実現しないということになります。結局、2050年で、運輸部門のゼロエミッションキャリア（水素と電力）の割合が全体の7割弱まで増えることになります。

CO₂排出量は、2030年までは2013年比で26%減、2050年には約80%減に変化していくのですが、素材産業での石油製品利用や産業全体での熱利用があるので、産業部門からのCO₂

排出はなかなか減らないというのが「標準ケース」の結果となります。

感度解析

モデルというものは、将来を予測するものではなく、あり得る様々な将来を示すものです。図6に発電量（上）と運輸エネルギー最終消費（下）が前提条件の違いで結果にどれほどの差が出るか示します。2030年と2050年の発電量、また、2030年と2050年の運輸エネルギー最終消費は、前提条件の変化に対してかなりの感度がある（結果に大きな差がある）ことが分かりました。しかし、産業部門と民生部門のエネルギー最終消費に対する電源構成の変化の影響は

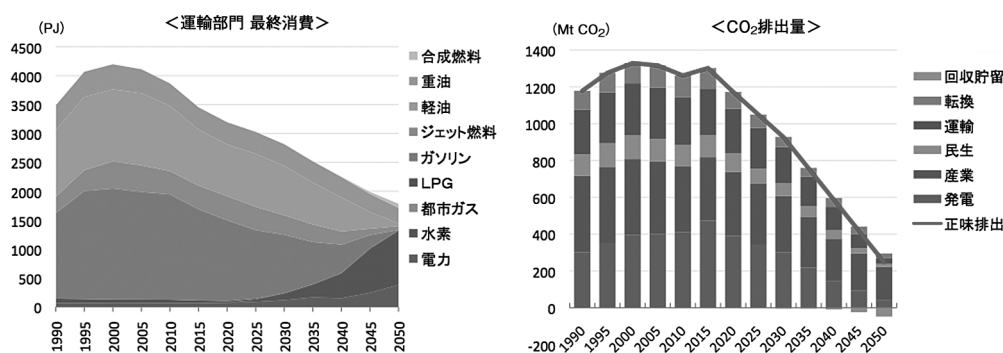


図5 運輸部門のエネルギー最終消費（左）とエネルギー起源CO₂排出量（右）の推移

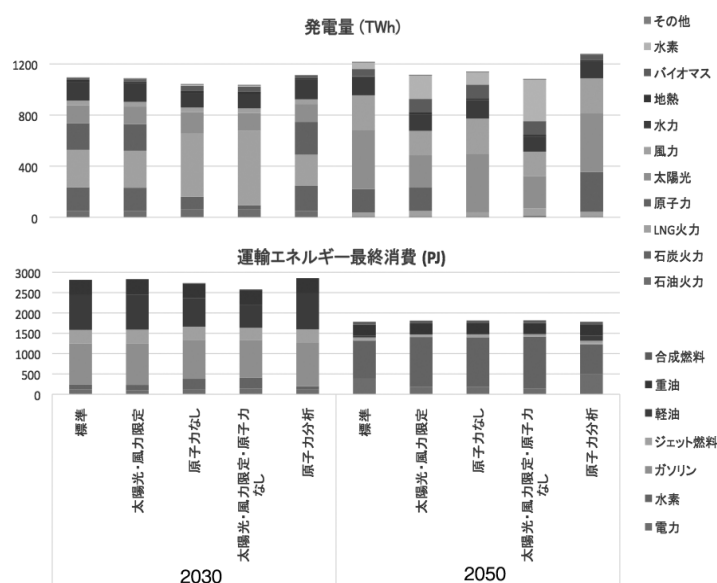


図6 発電量（上）と運輸エネルギー最終消費（下）における感度分析

それほどではないということも今回の解析で分かりました。

様々な電源構成がありますが、2030年でも原子力発電についての想定の違いが電源構成にかなり大きく影響します。2030年では液化天然ガス（LNG）の必要量が、2050年では水素の必要量が電源構成によってかなり変わってきます。例えば、水素による大規模発電が必要となると、水素の必要量が大きくなります。

また、図6の下に示す2050年の運輸エネルギー最終消費では、原子力発電の制約によって電力消費がかなり変わってきます。「原子力解析ケース」だと運輸部門での電化が進みますが、そうではない場合は、水素が非常に重要になることが分かってきました。

エネルギーシステムコスト

図7にエネルギーシステムコストを示します。「標準ケース」を始め、それぞれのケースで2015年から2050年までにどう変わっていくのか。「太陽光・風力限定・原子力なしケース」で最もコストが高くなります。2030年までを見ても、やはり「原子力なし」のケースではエネルギーシステムコストが高くなります。

また、海外から大量に輸入する液体水素の設

備を作るところで、かなり違いが出てくることが分かります。2050年までには太陽光・風力のコストが下がると予想されるので、太陽光と風力の導入が限定的だと、システムコストは「標準ケース」よりも上がってしまいます。基本的に、「標準ケース」では液体水素の輸入コストが相対的に下がるためにエネルギーシステム全体のコストも下がっていくと言えます。

しかし、エネルギーシステムを評価する場合、セキュリティの話などもありますから、コストだけでは評価が終わりません。そこで、多様度指数（一次エネルギーの多様度）やエネルギー自給率で見るとどうなるかを評価してみました。結果を図8に示します。

多様度の観点からは、2030年において「原子力利用なし」だと下がってしまいます。2050年では、逆に、太陽光・風力の導入量が多い「標準ケース」のほうが多様度が下がります。つまり、太陽光・風力の導入が限定的な方が多様度が高まります。つまり、一次エネルギー源として輸入水素を使うと、多様度が上がることも考えられるのです。

他方、エネルギー自給率の観点からは、「原子力なし」では、大きく下げってしまうだろうし、また、輸入水素が大量に導入されると自給率は下がってしまうと言えます。

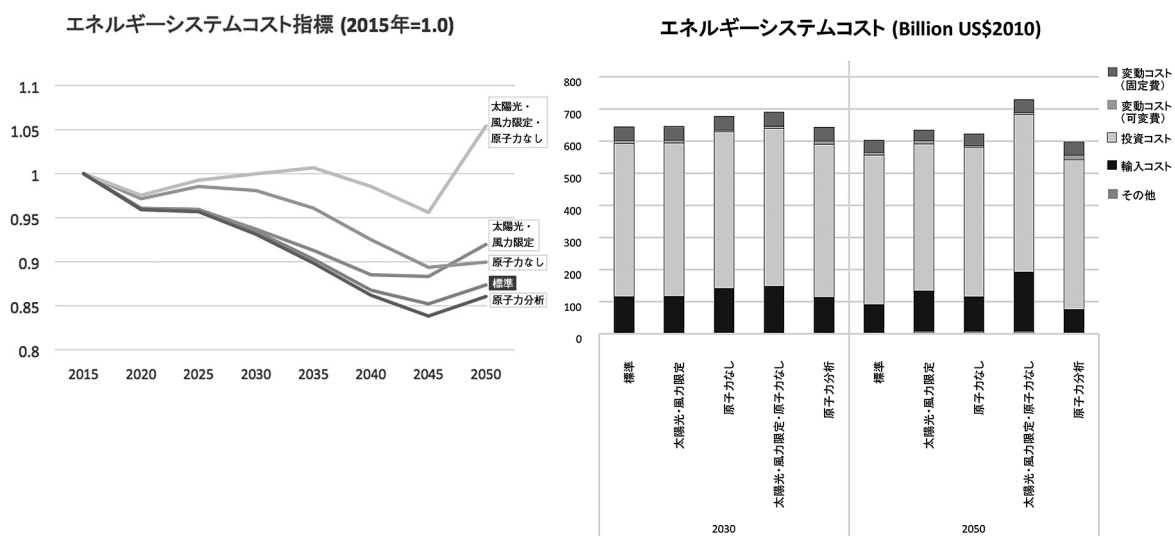


図7 エネルギーシステムコストの推移と内訳

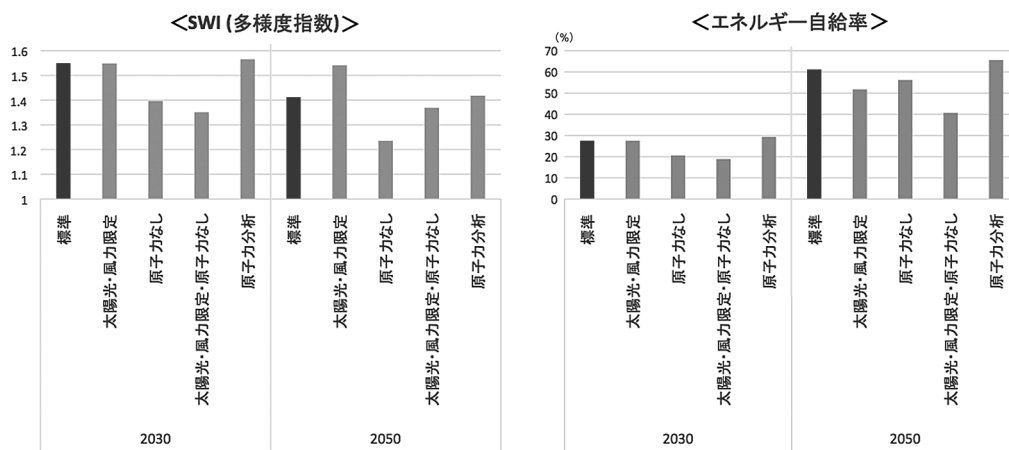


図8 多様度指数（左）とエネルギー自給率（右）によるシステム評価

まとめ

計算結果から得られる示唆

技術シナリオの如何に関わらず、発電については、2050年にはほぼゼロエミッションとなります。「標準ケース」では、出力変動が大きい再エネを大規模に導入した上で、原子力を維持していると設定されていますが、その不確実性が大きいので色々な電源構成が考えられます。再エネが想定通りに導入されない場合、輸入水素の重要性が高まるのですが、そちらの不確実性も大きいということを技術シナリオで考えるべきだと思います。

また、民生部門では電化や省エネルギーの進展により、CO₂排出が大幅に低下します。

運輸部門では、電源の状況次第で乗用車が電気自動車（EV）か燃料電池車（FCV）かに分れるという結果になっています。重い物を長距離輸送するために、燃料の高エネルギー密度が求められるトラックの場合、蓄電池、電化という方向よりも、水素が選ばれる結果になっています。飛行機では、水素利用がかなり大規模になされてきます。蓄電池の可能性もあるのですがここでは検討していません。合成燃料利用も利用されます。量は少ないのですが、他のバイオエネルギーも利用されているかも知れませ

ん。この辺りは今後検討する必要があります。

産業部門では、省エネルギー、鉄鋼における電炉の活用、CCS、セメント産業でのCCSなど、各種対策がとられますが、CO₂排出はなかなか減りません。つまり、産業部門の低炭素化に向けた早期のRD&Dが大きな課題と言えます。以上がモデルによる計算の結果から言えることです。

3つのメガトレンド

私の後の講演では、中長期ビジョンの執筆者でもある当研究所研究員から3つのメガトレンドについて説明いたします。

① 再エネが電力システムの中で主力化していく時、蓄エネルギーによるシステム構築というチャレンジがあるのではないかとということで、「電力化・蓄エネルギーシステム」について。② 輸入水素を積極的に利用するシステム、コスト削減、サプライチェーンをどう構築していくか、そのR&Dは何なのかということで、「水素活用エネルギーシステム」について、そして③ CO₂排出削減が難しい産業部門や大型運輸分野での化石燃料代替、発電を含む大規模なCO₂回収・利用・貯留（CCUS）がどうなっていくのか、どういうチャレンジがあるのかということで、「炭素循環エネルギーシステム」についてです。私の講演は以上です。どうもありがとうございました。（拍手）

[講演2]

2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド ～電力化・蓄エネルギーシステム～

森山 亮 (プロジェクト試験研究部
副部長)



はじめに

私からは、3つのメガトレンドのうち1つ目「電力化・蓄エネルギーシステム」についてご説明いたします。

まず、エネルギーモデル TIMES-Japan の解析結果を踏まえた再生可能エネルギー（再エネ）の導入規模について説明し、既に実施されている九州電力㈱での太陽光発電の出力変動対策について述べさせていただきます。続いて、再エネ大量導入や大規模設置に関する課題の評価、電力系統側の対応、最後に、2050 年超の電力供給システムのイメージについて説明いたします。

再エネ導入の規模

TIMES-Japan の計算した再エネ導入量

図1は電源別発電量のシェアを表しています。2015 年が実績、2030 年と 2050 年がモデル予測です。発電量が 2030 年、2050 年と少し増えていますが、これは電気自動車（EV）の導入や産業の電化で発電量と需要量が増えるためです。特に、太陽光発電や風力発電といった出力変動が大きい再エネ電源（自然変動電源）のシェアは、2015 年の 5 %から 2030 年で 16～19%（現状の 3～4 倍）、2050 年には 34～59%（7～12 倍）に増えるとモデルでは予測しています。

再エネ出力変動への対応

図2は、既に実施されている再エネ電源への需給調整の対応状況です。2016 年 5 月 4 日の九州電力㈱の電力需給の状況を示しています。既報の通り、今秋には、太陽光発電への出力抑制が実施されると見られています。図

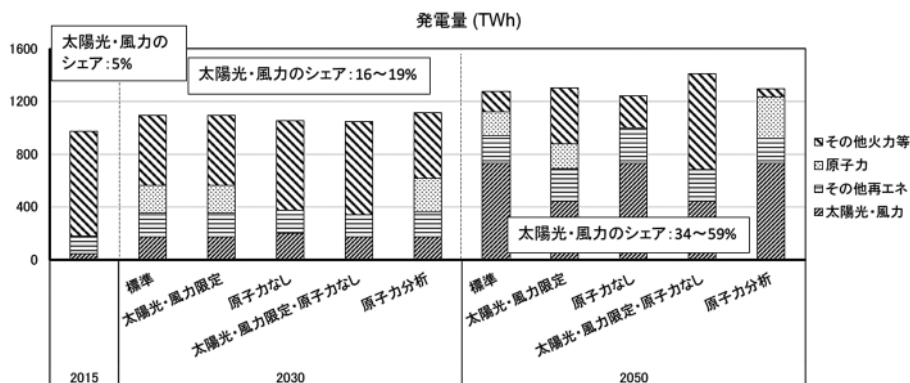


図1 TIMES-Japan モデルによる電源構成比予測

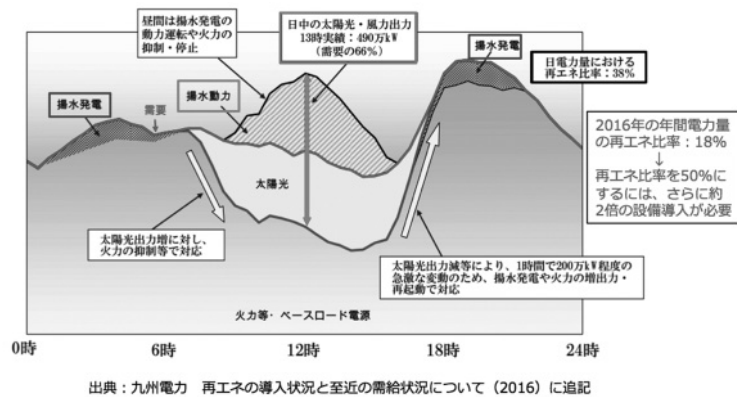


図2 電力需給の状況（九州電力株 2016年5月4日）

2で、日中の太陽光発電の出力増加に伴って火力発電が出力を絞っていることが確認できます。九州電力株の2016年の年間電力量のうち再エネ比率（水力・バイオマス含む）を見ると18%となっていることから、エネルギーモデルの計算結果が示す2030年、2050年の再エネ電源シェア（50%以上）を実現するには、更に2倍以上の設備導入が必要となります。

電力供給システム側の需給調整分野

電力システムシステムで需給調整を行う分野は、図3に示すように、大別して3つあります。「a」が発電分野で行う供給の部分、「b」が送配電分野の運用、そして「c」が需要分野です。

一般的に、電力システムでは、周波数変動を一定の範囲内に収めるために、絶えず需要量と供給量を一致させる必要があります。これまででは需要の変化に応じて、火力、水力、原子力といった従来の発電設備の出力を調整して

需給を一致させていました。

しかし今後、太陽光発電、風力という自然変動電源が大量導入されてくると、従来の発電設備側での調整にも限界が出てきます。従って、図1の2030年や2050年での再エネ導入量になりますと、自然変動電源の出力を抑制する必要が出てきます。これは、再エネの発電設備の能力が十分に使えないというデメリットがありますが、需給バランスを取るためには、最も安価な方策です。

更に出力抑制の必要が出てきますと、変動エネルギーの余剰電力を貯蔵する必要が出てきます。蓄エネルギー設備は、太陽光発電の余剰電力を貯蔵して、電力が不足する夜間などにそれを出力して賄うことができます。それに加え、大量に再エネが導入される2030年、2050年に大量に電力を貯蔵できていれば、例えば梅雨時期に、太陽光発電の出力があまり見込めない日が続いた場合のバックアップとして使える可能性があります。蓄エネ設備は、

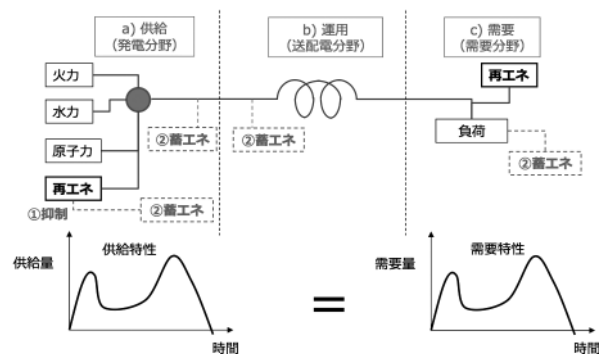


図3 電力システム側で制御対象となる3分野

図3で示すように、余剰の出力を調整するために供給側に置く場合と、負荷を調整するために需要側で使う場合、それから運用部分で使う場合が考えられます。

再エネ大量導入の課題

大規模設置／電力系統における課題

再エネの大量導入には様々な課題がありますが、それらへの対応について述べます。TIMES-Japan モデルの計算では、将来、再エネが大量導入されますが、その前提条件として、導入ポテンシャルや設置条件、将来の低コスト化、更に設備の高効率化、生産能力、廃棄物処理、資源制約などの課題が考えられます。一例として、導入ポテンシャルについての評価結果を後ほど述べます。また、電力系統側での課題として、送配電設備の整備や運用の高度化、更に系統全体での需給調整があります。

大規模設置の課題（太陽光発電）

まず、太陽光発電の大量導入が可能なのかどうかを検証しました。TIMES-Japan モデルの計算では、太陽光発電の導入上限を2030年109 GW、2050年244 GWと設定していますが、2015年の実績では、約30 GWに留まっています。モデルによると、今後、現状の3～7倍が導入されていく訳ですが、実際にこの数値が妥当なのかを考察しました。

既存の文献を見てみると、導入ポテンシャルとして、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の「太陽光発電開発戦略」は、住宅用を91 GW、環境省は、非住宅用と耕作放棄地用なども足して59～150 GWとしています。この導入ポテンシャル全てを利用することができれば、2050年の244 GWは導入可能と考えられます。

また、（一社）太陽光発電協会でも、2050年までの累積稼働見通しを200 GWと想定しています。244 GWはその想定を少し超えますが、規制緩和や技術進展を見越して244 GWが導入を予測する文献も他にあります。

では、244 GWの設備を生産する能力があるのか。使い終わったパネルはどうなるのかを考察しました。2050年に244 GWになるには年平均6 GWの太陽光発電設備の新規導入がなされることになりますが、2016年の日本向け太陽電池モジュールの出荷量は6.34 GWですから、工場の生産能力は足りていると思います。ただ、将来、他国でも太陽光発電が必要になってくると、新たな工場建設も必要になります。

同時に、将来、毎年6 GW分の廃棄パネルが発生します。環境省では2040年の廃棄量が約80万tに上るという議論もあります。太陽光パネルのリサイクルについて検討が必要になっています。

大規模設置の課題（風力発電）

次に、風力発電について、評価検討してみました。TIMES-Japan モデルの計算では、風力発電の上限値を2030年15GW、2050年100GWで、陸上風力と洋上風力が半々としています。風力発電の導入ポテンシャルは、洋上を考えると大きいのですが、陸上で見ると、設置に向いている場所が偏在しています。

図4で示すように、風力のポテンシャルは北海道と東北の一部に偏っています。日本風力発電協会（JWPA）のビジョンでは、導入量を2050年に陸上38GW、洋上37GW（合計75GW）と予測しています。また、水素製造などの活用も含めて、2050年に100GWを想定している文献もあります。風力発電の場合、陸上での適地が偏在しており、洋上風力については実際の導入量について不確実性が大きいと考えています。

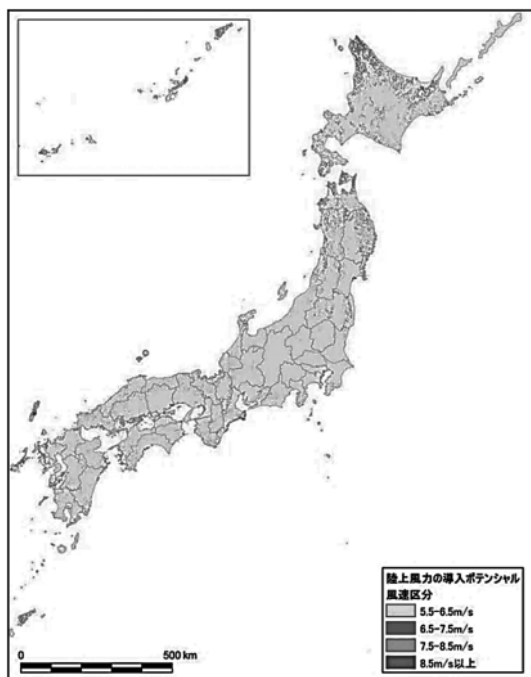


図4 偏在する陸上風力の適地

電力系統における課題の対応

次に、再エネが大量導入された場合の電力系統における課題とその対応について、大きく2点述べます。

1点目は、送配電設備の整備、運用高度化です。先ほどの大型の風力の偏在性などから、送配電設備の新設や増容量の系統増強が必要になります。また、その系統増強は、時間もお金も掛かるので、既存設備を有効に利用していくために、「日本版コネクト&マネージ」

などの検討も進んでいます。更に、送配電設備を安定的に運用するため、系統運用の一層の高度化も求められます。

2つ目のポイントは、系統全体での需給調整です。電力系統では需給を絶えずバランスさせて周波数を一定範囲内に収める必要があります。その1つとして、先ほど述べた蓄エネルギー設備の活用があります。更に近年では、IoT技術の進歩、EVの普及などでバーチャルパワープラント（VPP）の活用も注目されています。

送電系統の増強

送電系統の増強についてお話しします。図5は、図3で示した運用部分の対応策です。日本の送電系統は、東側の50ヘルツと西側の60ヘルツに大別されていて、この間を周波数変換所（FC）によって融通可能にしています。この間の送電容量を増強して、自然変動電源の受入れ可能量を増やす計画が進んでいます。その他、先ほどの風力の偏在性のある北海道エリア、東北エリアとの送電容量の増強計画も進んでいますが、これらの増強工事には10年程度の期間が必要というので、その他の対応策も必要となります。

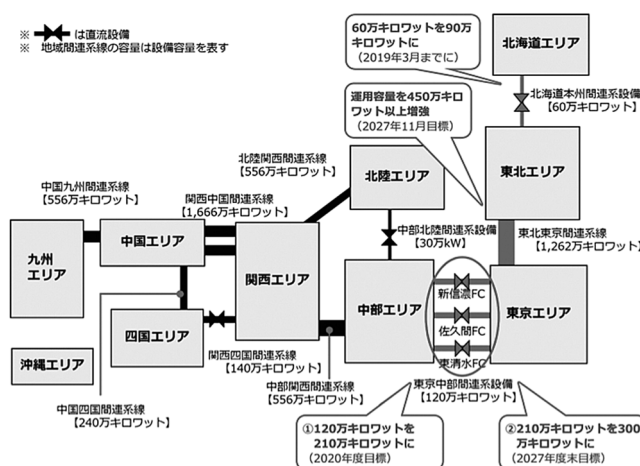


図5 地域間連携送配電系統の増強計画

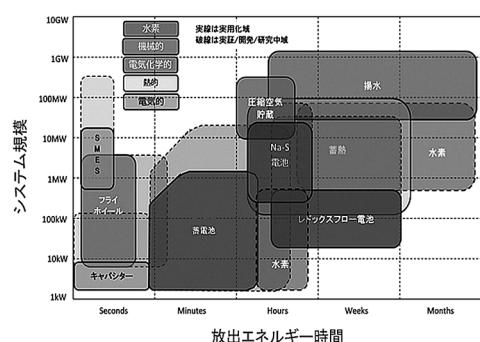
系統用蓄エネルギー設備

次に、系統全体での需給調整に対する技術開発の一例として、系統用の蓄エネルギー設備について述べます。図6は、供給分野での対応策です。設備の設置場所によっては、運用や需要での取り組みにもなります。太陽光発電や風力発電が需要を大きく上回って、需給調整が必要な時に、余剰電力を貯蔵するという技術です。一般的には、図2の例のように、数時間の需給調整で揚水発電が使われていたり、蓄電池での太陽光パネルの出力調整も行われています。当研究所では、図6の右側に写真で示すような圧縮空気貯蔵設備の実証試験を行っています。こちらは余剰電力を使って空気を圧縮し、電力を圧力のエネルギーとして貯めて、その圧力を必要な時に開放して発電するという設備です。この他、電力系統

の需給調整のための蓄エネルギー装置として、電気、熱、圧力、水素、ガスなどが有効です。蓄電池をはじめ、様々なシステムのコスト低減、信頼度向上に向けた技術開発が進んでいます。

バーチャルパワープラント (VPP)

仮想的な発電所（バーチャルパワープラント）の取り組みについて紹介します。こちらは主に、需要分野での取り組みです。図7に示すように、近年のIoT技術の進歩やEVの普及、電力自由化によるビジネスチャンスの増加などで、オフィス、工場、家庭などにあるエネルギーソースを、高度なエネルギーマネージメント技術によって、統合的に制御し、あたかも仮想的な発電所として機能させることによって電力の需給調整に活用するという



(出所：英バーミンガム大学ホームページ、NEDO 再生可能エネルギー白書（第2版）を基に IAE 作成）



図6 蓄エネ技術性能マッピング図（左）と圧縮空気を利用した蓄エネ設備（右）

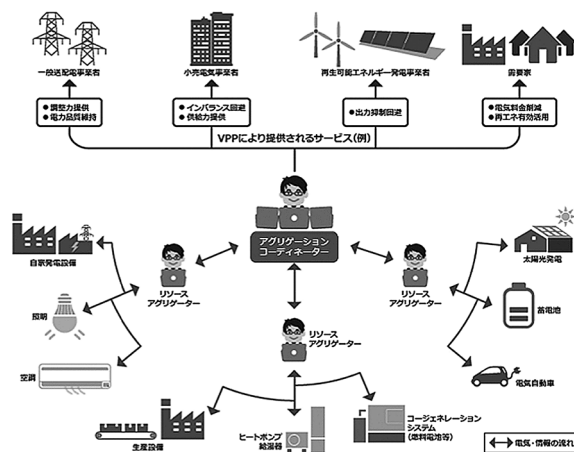


図7 バーチャルパワープラント (VPP) のイメージ

技術が注目され、国内外で実証試験が始まっています。

エネルギーの地産地消化

エネルギーの地産地消化は、需要側の取り組みです。人口減少やインフラ維持が困難になっている社会的要因、エネルギーマネジメントシステムやバイオマス発電の技術進歩によって、中小の都市において、エネルギーを地域で生み出して活用するといった地産地消化の可能性があります。図8は、鳥取市の取り組み例です。地域に賦存するバイオマスやその他再エネを利用して、域内のエネルギー需要を賄うとともに、地域の資源、資金を循環させるというコンセプトです。

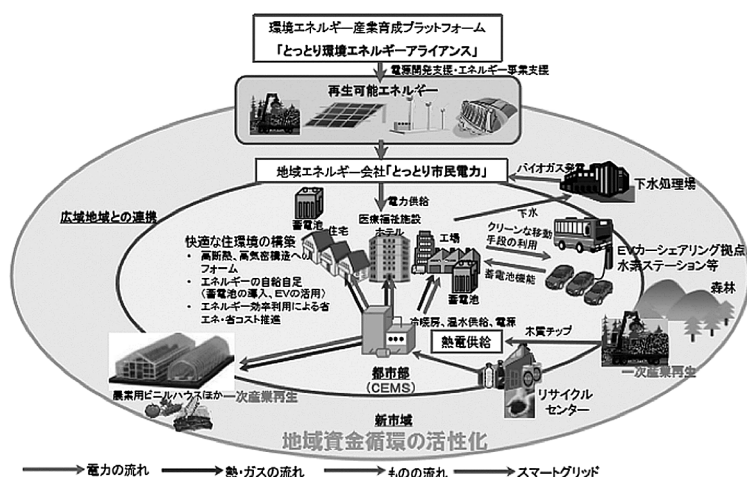


図8 エネルギーの地産地消化の一例（鳥取県スマートエネルギータウン構想）

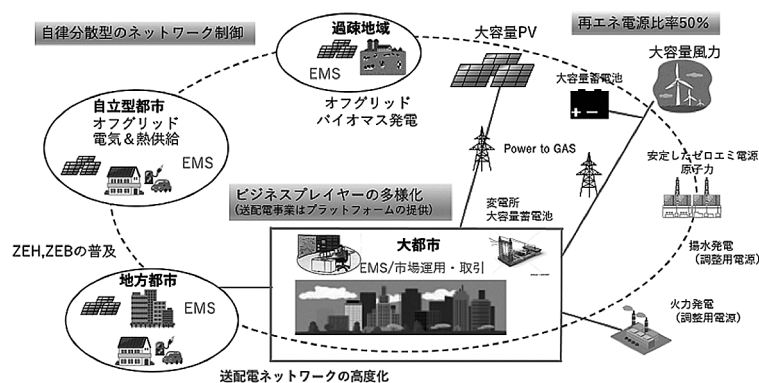


図9 2050年超の電力供給システムのイメージ（例）

おわりに： 2050年超の電力供給システムイメージ

図9は、総合的に取り組んだ場合の2050年超の電力供給システムのイメージです。エネルギーモデルで試算したような再エネが50%を超えるケースでは、特定の地域で大規模な再エネ設備を導入し、そこで発生した電力を増強した送配電ネットワークによって需要地に供給するというシステム、それから、需要家をコアとするような地産地消型のオフグリッドシステムがあります。オフグリッドシステムについては、電力会社からのバックアップの必要性について検討が必要です。こういっ

た2つの大きな流れを、地域特性などに応じて組み合わせたシステムが考えられると思っています。

最後に要点をまとめると、再エネの導入拡大への期待は大きいのですが、実際には気象条件によって、太陽光発電や風力発電の出力は変動するので、系統側の様々な対策が必要となっています。2050年、2050年超の将来に向けては、技術面に加え、社会情勢、経済性を含めて、電力の供給システム全般をどのように構築していくか、引き続き検討が必要です。

当研究所では、東京大学大学院の横山明彦教授を会長に「次世代電力ネットワーク研究会」を運営し、2030年を視野に入れた「次世代電力ネットワーク社会」の具体像を描き出すための検討を行っています。

以上です。(拍手)

[講演3]

2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド ～水素活用エネルギーシステム～

飯田 重樹 (プロジェクト試験研究部
部長)



はじめに

私からはメガトレンドの2つ目「水素活用エネルギーシステム」についてお話しいたします。

まず初めに 2050 年のエネルギー社会において水素がどういう役割を果たすかを見た上で、モデルがどういう結果を示したか見ていきたいと思います。その上で、現状どんな技術開発が行われ、将来何が必要かまとめたいと思います。

図1に水素の特徴を示しました。水素は二次エネルギーですから、何らかの一次エネルギーから作って、輸送貯蔵して利用することになります。

図の上段に水素の特徴をまとめてあります。
①多様な一次エネルギーから生産できる、②電力と相互変換が可能、③貯蔵輸送が可能、④利用時に二酸化炭素(CO₂)の排出がない、ということです。これらの特徴が水素を考える上で重要となります。

2050 年のエネルギー社会での水素の役割

では、2050 年のエネルギー社会における水素の役割とはどんなものか。大きく分けて2つを考えています。

1つは、再生可能エネルギー(再エネ)や炭素回収貯留(CCS)の適地からCO₂フリーのエネルギーを日本国内に供給する「エネルギーキャリア」としての役割です。現実的なCO₂フリーのエネルギーは、原子力、再エネ、CCSを組み合わせた化石燃料のどれかだと考えます。再エネやCCSを考えた場合、その大規模な適地は世界に偏在しています。国内にも再エネの適地はありますが、海外の日射量が豊富な地帯など日本よりもかなり再エネが豊富な所があります。日本が島国であることを考えますと、海外のCO₂フリーエネルギーを大量に長距離輸送する技術が必要になってきます。その時のエネルギーキャリアとして

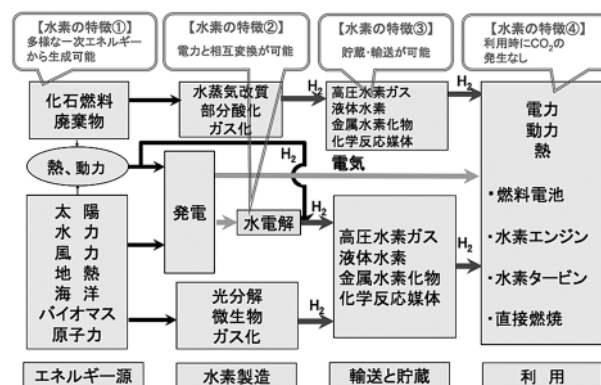


図1 水素の特徴

水素が活用できるのではないかと思います。水素はCO₂フリーの燃料ですので、運輸部門などの分散型のCO₂排出源の低炭素化にも貢献できます。

2つ目は、出力変動が大きい再エネ電源を最大限活用するための「蓄エネルギー手段」としての役割です。水素は、蓄電して電気に戻すだけではなく、燃料電池自動車（FCV）の燃料として、また、産業用の熱源として、電力以外の用途にも使用できますので、水素を活用することで、国内の再エネ導入量を拡大できるとともに、地域のビジネスモデル創出に役立つ可能性も考えられます。

モデルが示す 2050 年の日本の姿

モデル解析の結果を図2に示します。水素が海外からCO₂フリーのエネルギーを国内に供給するエネルギーキャリアとしての役割を果たすことが計算結果から分かります。輸入水素は、2050年の一次エネルギー供給の5～13%、量にして700万～1,500万tとなります。その用途は、主に発電と運輸です。

モデルの前提条件と不確実性

TIMES-Japan モデルでは、水素は35円/Nm³で必要量を随時調達できるとの前提になっています。では、35円/Nm³という前提と、結果として導き出された700万～1,500万tという量は妥当なのか。

2017年12月に政府は「再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議」において「水素基本戦略」を決定しました。その目標を図3に示します。水素基本戦略では、水素コストは、プラント引渡価格で2030年頃に30円/Nm³、将来的には20円/Nm³を目指すとしています。ですので、モデルが設定した35円/Nm³は概ね妥当、むしろ若干保守的な数字だと思います。

また、モデル計算結果の700万～1,500万tという量は、現在の液化天然ガス（LNG）輸入量の10分の1～5分の1といった規模です。「水素基本戦略」の将来目標は1,000万t規模ですから、700万～1,500万tという値も妥当だと考えています。

ここで注目したいのは、現在エネルギーとして使用されている水素の量が200tと非常に少ないということです。既に大規模導入されている太陽光や風力と比べても、エネルギーとしての水素の利用は、まだ緒に就いたばかり

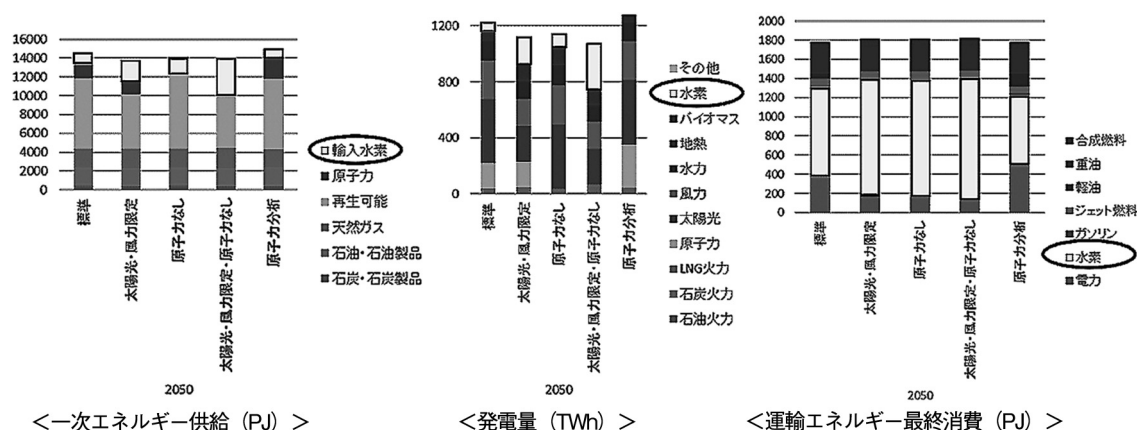


図2 モデルが示す日本のエネルギーの姿（2050年）

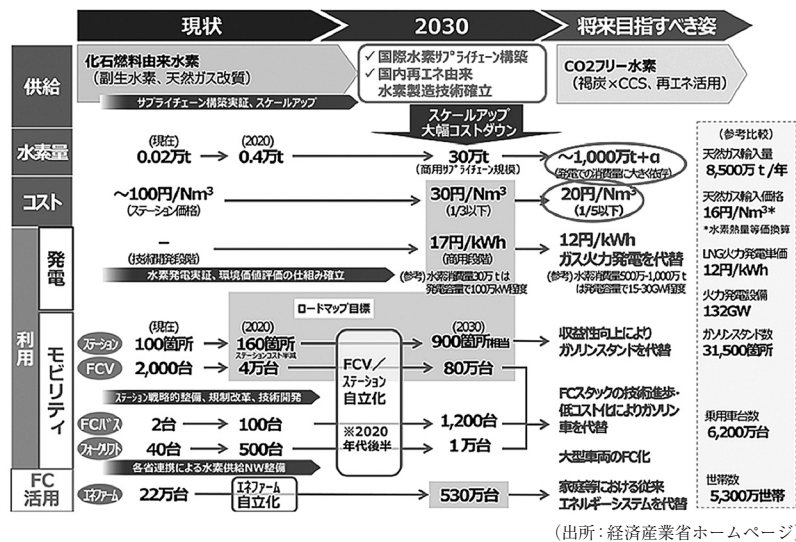


図3 水素基本戦略のシナリオ

りで、サプライチェーンの構築もこれからです。将来見通しは示されていますが、不確実性が非常に高いことは頭に入れておく必要があると思います。

技術開発の状況

エネルギーキャリア

不確実性は高いものの「水素にはポテンシャルがある」ということで様々な研究開発が進められています。図4はエネルギーキャリアとしての取組みです。海外で化石燃料から水素を製造し、その過程で排出されるCO₂はCCSで貯留する。あるいは、再エネから水素

を製造し、液化水素や有機ハイドライド、アンモニアなどいくつかのエネルギーキャリア（エネルギーの輸送・貯蔵を担う化学物質）で輸入する検討がなされています。有機ハイドライドとは、有機物に水素を反応させた化合物で、これを日本に持って来て、国内で脱水素し、水素を取り出す方法です。図4に例示した他に「水素基本戦略」には、エネルギーキャリアとしてメタンも示されています。

国際的な水素サプライチェーン構築に向けた検討も着々と進められています。図5に示す豪州褐炭から製造した水素を液化水素にして日本に持ってくる方法やブルネイで未利用ガスから製造した水素を有機ハイドライドにして日本に持ってくる方法が検討されています。2020年からこの2つのサプライチェーンの実証運転を開始するための検討が進められているところです。

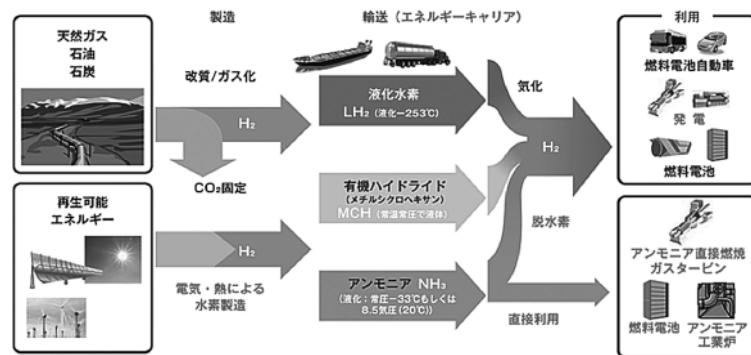


図4 エネルギーキャリアの取組み

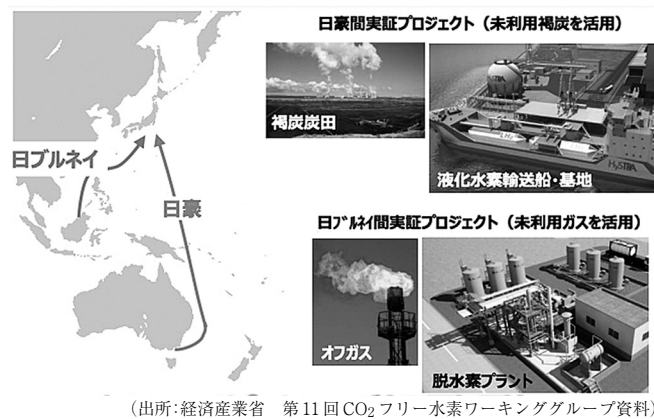


図5 国際的な水素サプライチェーンの構築

水素利用技術

「水素の利用」という話になると、普通、燃料電池やFCVを思い浮かべる方が多いのですが、燃料電池の技術開発に加え、より大規模な水素ガスタービン発電技術の開発も進められています。図6はその一例です。NEDO事業として、神戸市で水素で発電した電力と熱を地域に供給する水素発電の実証プロジェクトが進められています。また、大型水素発電向けの水素バーナーの開発も行われています。

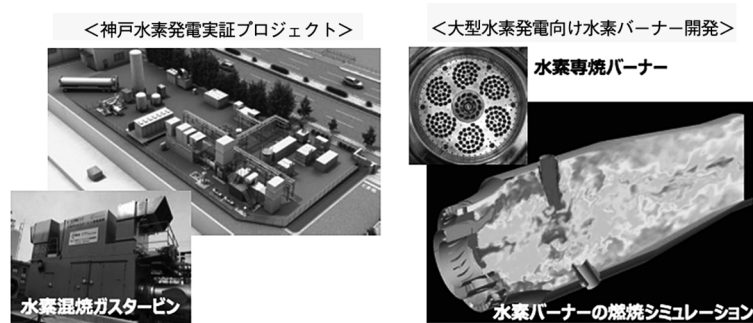
サプライチェーンの構築

「エネルギーの転換」ということを考えると、これまで述べたような個々の技術開発だけでなく、製造から貯蔵・輸送・利用に至るまでのサプライチェーン全体にわたる多くの技術やステークホルダーの有機的な協調と制度の整備が不可欠です。また、エネルギー供

給で最も重要なのは、その時々規模に応じて、供給側と利用側で量とコストのバランスが取れていることです。民間だけで「エネルギーの転換」を図っていくのはかなり難しく、LNG導入の時のように、官民一体の取り組みが必要だと思っています。

そういう観点から、当研究所では、産官学の関係者に声を掛け、2011年から「CO₂フリー水素普及シナリオ研究会」を運営し、年3回ほど関係者に自由な討論の場を提供してきています。

図7が「CO₂フリー水素普及シナリオ研究会」でまとめた水素サプライチェーンのイメージ図の一例です。海外の一次エネルギーから色々な形で水素を製造し、色々なエネルギーキャリア（液体水素、アンモニア、メタン、メチルシクロヘキサンなど）で、日本に持って来て、利用するイメージです。なお、日本国内での水素製造も入れて、シナリオの検討を行っています。



（出所：経済産業省 第11回CO₂フリー水素ワーキンググループ資料）

図6 水素発電実用化の取り組み例

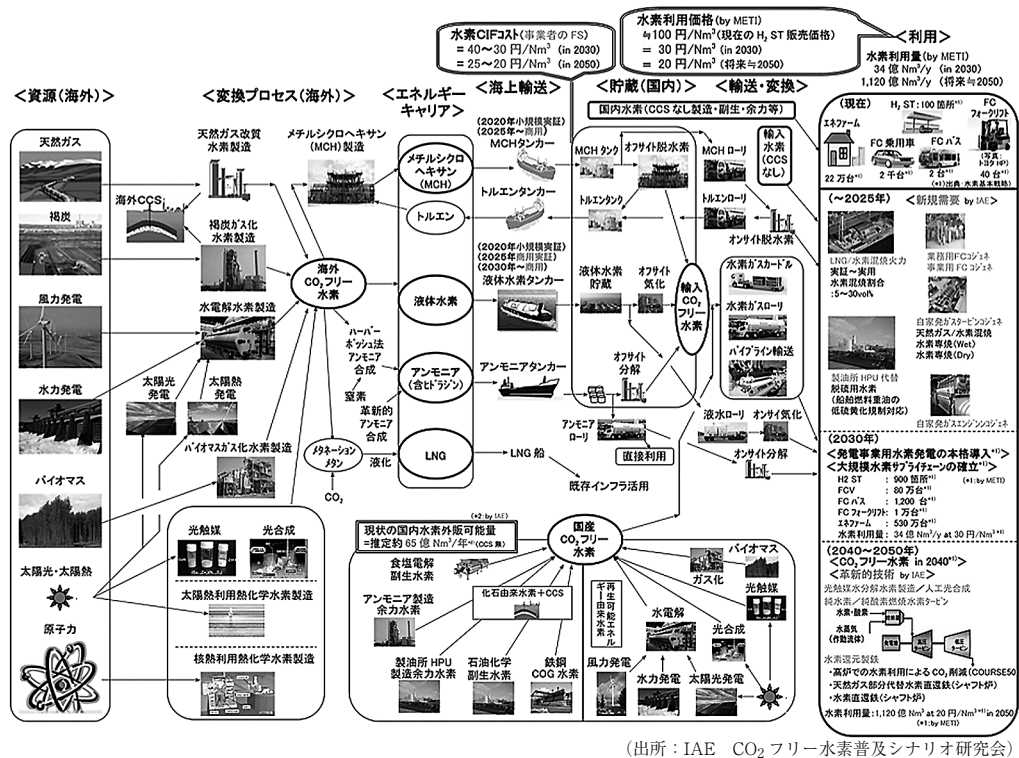


図7 水素サプライチェーンのイメージ図

国内再エネの出力変動の緩和

技術開発状況の紹介の最後に、国内再エネの出力変動を緩和するための水素関連の動きについて説明します。

この分野では、欧州を中心に多くの実証研究が進められています。日本でもNEDOや環境省で技術開発が進められています。図8はNEDOの例ですが、当研究所も加わり、稚内エリアによる検討を行っています。図9は環境省の例です。水素を水素吸蔵合金に吸

せて、危険物でも高圧ガスでもない形で、生活協同組合の食料品を配当するトラックで家庭まで運ぶという工夫です。

まとめ

水素は、様々な面からCO₂排出削減に貢献できる可能性があります。水素の大きな役割として、①CO₂フリーのエネルギーを供給す

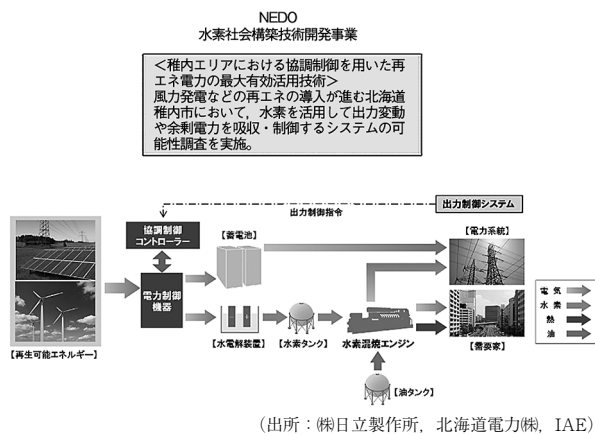


図8 再エネ変動緩和の技術開発（NEDO）

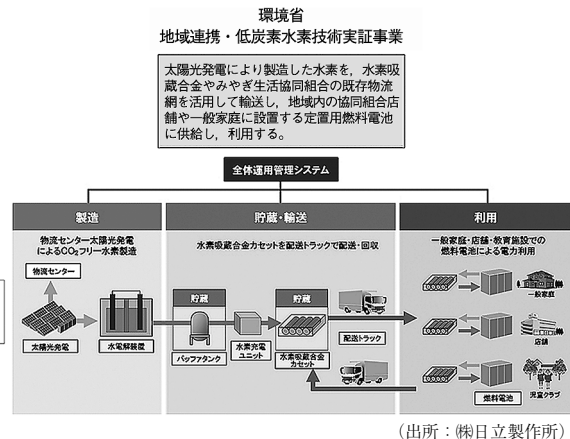


図9 再エネ変動緩和の技術開発（環境省）

るエネルギーキャリアとしての役割, ②再エネを最大限活用するための蓄エネルギー手段としての役割です。エネルギーモデル TIMES-Japan による評価では, 2050 年の日本の一次エネルギー供給の 5 ~ 15% を輸入水素が占めるという結果になりました。主に, 輸入された水素は, 発電と運輸に利用されます。ただ, その実現には, 製造から利用までのサプライチェーンの構築が不可欠です。個々の技術開発に加え, サプライチェーン全体にわたる多くの関係者の有機的な協調が必要だと考えています。

それから, 2050 年は通過点に過ぎないと考えています。今日の話は, 導入が見込まれている技術に特化した感がありましたが, その他に萌芽的な革新技術の開発も進められています。例えば, 光触媒による水分解 (人工光合成), 磁気冷凍による液化水素製造, 純水素と純酸素で発電するガスタービンの研究開発等も行われています。

今後, そういった革新的な技術の発掘, 投資も継続して進めていくことが必要であると考えています。

私からは以上です。(拍手)

【講演 4】

2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド ～炭素循環エネルギーシステム～

酒井

奨

（プロジェクト試験研究部
副部長）



はじめに

私からはメガトレンドの3つ目「炭素循環エネルギーシステム」について、TIMES-Japan の解析結果や地球温暖化対策における化石燃料の位置付けに触れながら話を進めたいと思います。

話の流れですが、TIMES-Japan の計算結果での化石燃料の位置付け、現在の化石燃料関連の技術開発の方向性、5つの技術開発の動向（火力の高効率化、CO₂ 分離回収技術、火力の負荷調整力、CO₂ 貯留、CO₂ 有効利用）、最後に、炭素循環エネルギーシステムを紹介します。

エネルギーモデルでの化石燃料の位置づけ

消費量抑制と化石燃料の重要性との両立

TIMES-Japan の解析では、化石燃料にとって非常に辛辣なメッセージが出ています。地球温暖化対策を進める中、燃焼すると CO₂ を排出する化石燃料の消費は抑制していかなければなりません。

しかし、産業部門では、原料である炭素資源を化石燃料に頼らざるを得ないという実情があると思います。例えば、素材産業の熱源、化学品の原料である炭素源がそうです。

重い物を長距離運搬する飛行機や船の燃料

についても、エネルギー密度の高い化石燃料が重要だと思います。

化石燃料が重要であるということ、温暖化対策としてその消費量を抑制していかなければならないという TIMES-Japan モデルの計算結果とのギャップをどう埋めていくのか。これが重要な課題だと思います。

消費量抑制と火力発電の役割との両立

TIMES-Japan モデルによると、2050 年で化石燃料を利用した火力発電のシェアは数パーセントくらいに抑えなければなりません。しかし、出力変動が大きい再生可能エネルギー（再エネ）が大量導入された時、電力の安定供給のために、火力発電から負荷調整力として一定規模の電力供給が必要になると思います。

火力発電を一定規模残すとなった場合、当然、CO₂ 排出量について考えなければいけませんから、発電の過程で出てくる CO₂ は回収・利用・貯留技術（CCUS）を使って、火力発電システム全体として低炭素化を目指さなければなりません。

技術開発の方向性

第5次エネルギー基本計画

先般公表された「第5次エネルギー基本計画」（2018 年 7 月）では、2030 年までは化石

燃料の効率的、安定的利用（高効率火力の有効利用）が書かれています。また、2050年に向けて過渡期である2030年では化石燃料が主力であるとも書かれています。その上で、2030年、2050年に向けて化石燃料部門で何を検討していかなければならないのかについて、短中期と中長期の2つに分けて考えてみますと次のようになると思います。

短中期では、①火力発電の高効率化及び再エネ導入による出力変動に対する負荷調整対応、②大規模CO₂排出源におけるCO₂分離・回収技術の開発と普及、③経済性がある分野への合成燃料の利用促進、などが挙げられると思います。中長期では、①大規模かつ安価な低炭素エネルギー起源の水素源の確保、②大規模かつ安価な炭化水素合成技術の確立、③大規模な（大量の）CO₂輸送や合成燃料の輸送の最適化、④CO₂回収まで考慮した合成燃料の効率的利用（システムの最適化）、などが挙げられると思います。これらの中で、火力発電の高効率化とCO₂分離回収技術、火力発電の負荷調整力、CO₂貯留、CO₂有効利用について、開発の方向性を見ていきたいと思います。

火力発電の高効率化とCO₂分離回収技術

2年ほど前になりますが、図1に示すように、次世代火力発電の早期実現に向けた協議会の中で高効率火力発電技術のロードマップがまとめられています。

更に図2に示すように、CO₂の分離回収技術についても同協議会の中で開発の見通しがまとめられています。ここでは、分離回収したCO₂をCCUで使うのか、それとも貯留で使うのかについては限定されておりませんが、用途例として図の中に描かれています。横軸は2030年頃までということで、短中期的な視点ですが、国としての火力発電の高効率化とCO₂分離回収技術の開発の方向性が見取れます。

火力発電の負荷調整力

火力発電技術は、2030年までは高効率化を推し進めていくわけですが、2050年まで目を向けてみると、再エネの大量導入を支える負荷調整力が火力発電に求められると予想されます。それに対しては表1、図3に示すよう

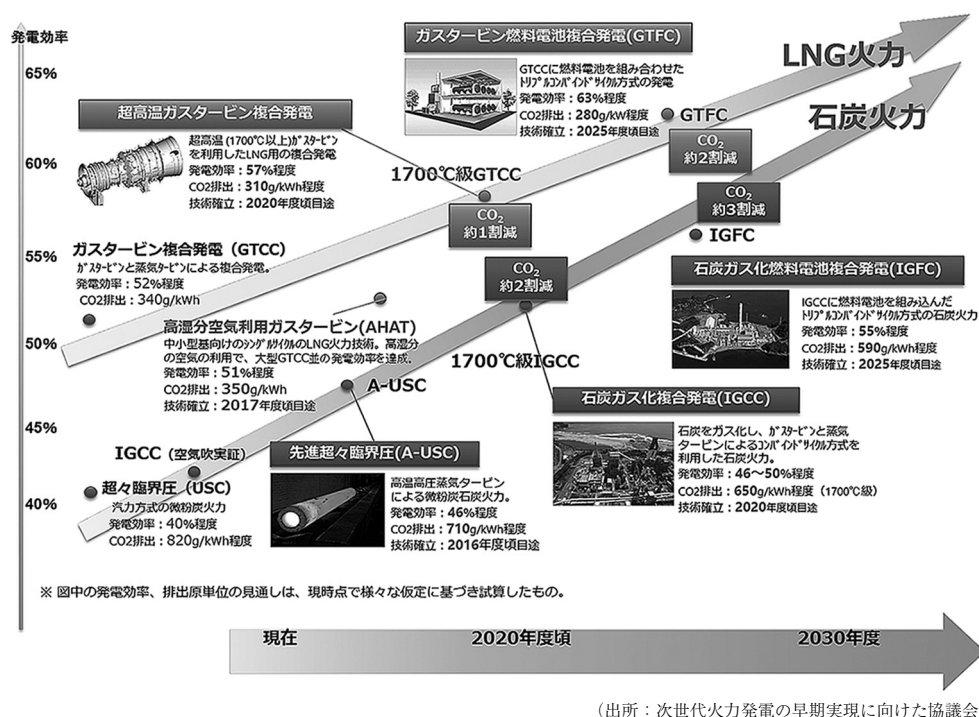


図1 2030年度に向けた火力発電の高効率化と低炭素化

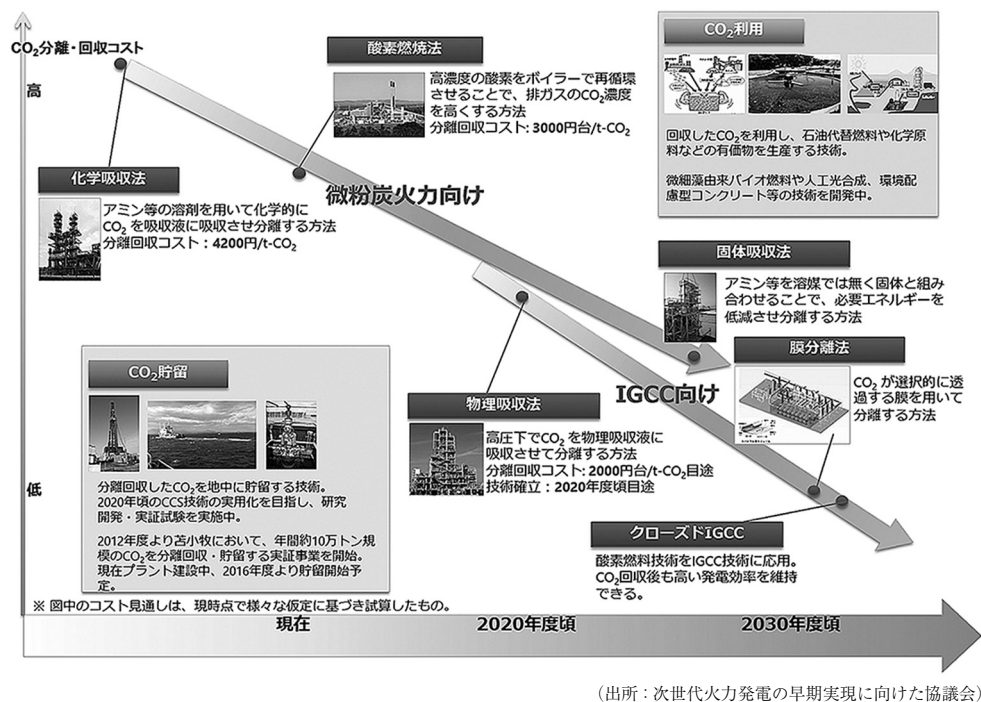


図2 次世代のCO₂回収関連技術の開発の見通し

表1 火力の負荷調整力向上のための技術目標

プラントタイプ	変化速度			最低出力		起動時間	
	現状	潜在能力	目標	現状	目標	現状	目標
USC(石炭) 600~1000MW	1~3%	3~5%	5%(低出力帯) 8%(高出力帯)	30%程度	15%	4時間以上	4時間以下
GTCC 1100~1500℃級	1~5%	8%	14%(CCで) 20%(GT単独で)	50~60%	25%	40分以上	30分以下

※GTCCの数値は単軸の場合

(出所：次世代火力発電の早期実現に向けた協議会)

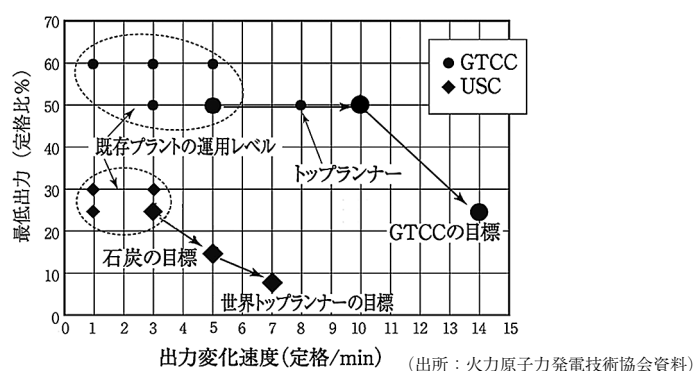


図3 火力の負荷調整力のための技術開発

に、火力発電では、負荷変化速度、最低出力、起動時間などに対しての技術開発目標が掲げられています。

CO₂ 貯留

CCS (CO₂ 貯留) は CO₂ 排出削減に非常に

大きな効果をもたらすと考えられますが、この CCS についても国内で唯一になります。苦小牧で CCS 大規模実証試験事業（NEDO プロジェクト）が展開されています。図 4 に示すように、国内にも CO₂ 貯留ポテンシャルが十分にあるということです。今後は CCS 事業の開発動向と、貯留ポテンシャル調査の動向については注視していく必要があると思います。

CO₂ の有効利用

CCS は、地下の状態（ポテンシャル）を調べて実際に CO₂ を地中などに貯留するまでにはとても長い時間がかかります。もし国内での CCS がなかなか進まないということであれば、CCU（CO₂ 有効利用）も考えておかねばいけません。図 5 は米国エネルギー省傘下のエネルギー技術研究所（NETL）の CO₂

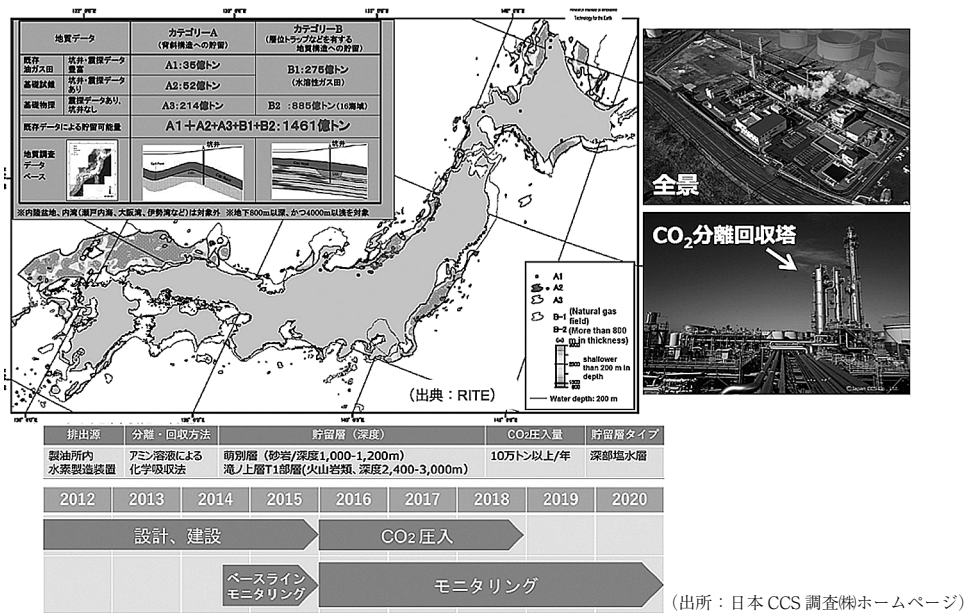


図 4 CO₂ 貯留ポテンシャルと CCS プロジェクト

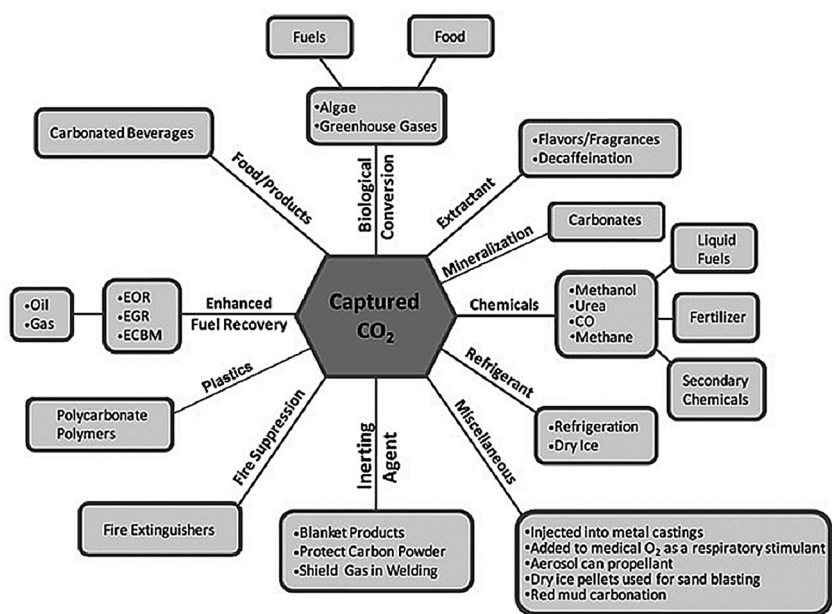


図 5 CO₂ の用途

用途パスの図ですが、CO₂ がどういう物に利用できるか体系的、視覚的にまとめられています。例えば、微細藻類に食べさせて燃料を作る、化学反応などで合成燃料を作る、消火器に入れる、といった具合です。

図5をCO₂の転換技術で分けると、表2のように4つに大別できます。CO₂というのは非常に安定な物質ですから何か別の物質に変える（転換する）には外からのエネルギーが必要になります。そのエネルギーをどのように調達するかという問題やコスト的な問題など課題は山積しておりますが、CCUについては日本発の技術も沢山ありますから、こういったCCUを進めることも将来の低炭素化には非常に重要になります。

表2 CO₂ 利用技術の4 類型

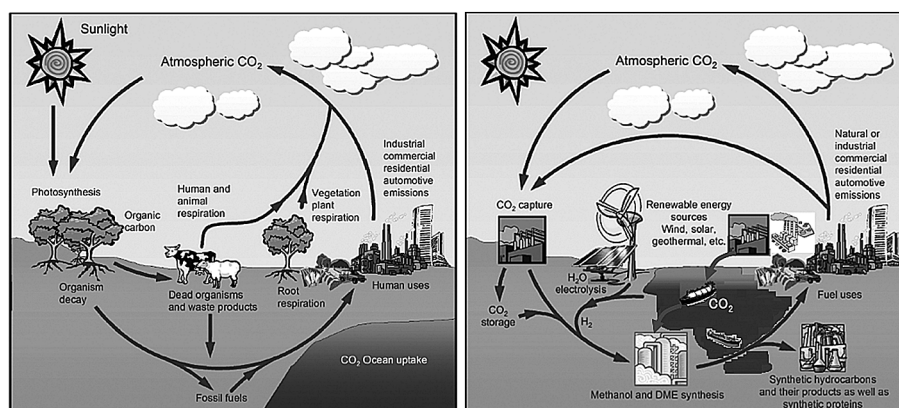
CCU分類	目 的	技 術
①還元(熱反応)	カーボン担体の生成	プラズマ分解法
		金属との反応(マグタイト・Mg法ほか)
		メタン利用
	化成品への変換	高分子合成
		尿素の製造
		超臨界CO ₂ 利用による有用品製造
		接触水素化によるメタノール、DME等の合成
②電気化学	化成品への変換	電気化学還元
③光化学	化成品への変換	光化学還元
④無機炭酸塩等	化成品への変換	炭酸塩固定
		コンクリート養生
	その他	ボーキサイト残渣の処理

炭素循環エネルギーシステム

最後に炭素循環エネルギーシステムについて少し説明したいと思います。産業界などで低炭素を目指すとなると、炭素循環、ライフサイクルアセスメント(LCA)、プロセス最適化の3つが重要になると思いますが、ここではその内の炭素循環に焦点を当てて考えてみます。自然界では、人間の経済活動から出て来たCO₂を植物が吸収して、図6の左側の図のように左回りに炭素がサイクル(循環)します。但し、(植物が吸収した炭素源が人間の経済活動のためのエネルギーとしてに使えるようになるまでの炭素の)循環のスピードはとても遅いので、図6の右側の図のように、技術でそのスピードを加速させる強制的な炭素循環をACC(Anthropogenic Carbon Cycle)と呼んでいます。そのようなACCのシステムをどうやって社会システムに取り入れるかを当研究所では検討しているところです。

ACCシステムでは、発電所から排出されるCO₂を分離回収し、一部は貯留するにしても、残りを合成燃料に換えて発電用に燃やすという炭素循環も考えられます。

例えば、図7のように、石炭火力発電所から出て来たCO₂を9割ほど分離回収して合成燃料を作り、それを石炭火力発電燃料として



(出所:George A. Olah, et al., J. Am. Chem. Soc. 2011, 133, 12881 (右図はIAE 加筆))

図6 炭素循環システム：自然界のシステム(左)とACC(右)

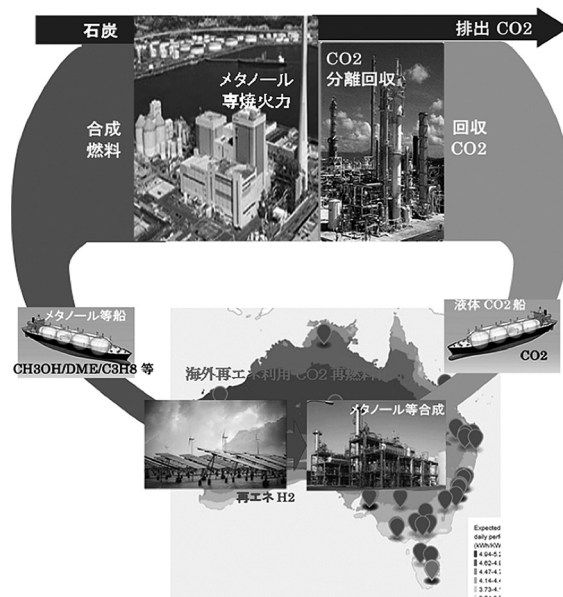


図7 炭素循環システムの火力発電への適用例

混焼すれば CO₂ 排出量は単純に 1 割になります。簡単に CO₂ 排出原単位を削減できるわけです。実は、ACC は何も全く新しい革新的な技術を取り入れた難しいシステムではなく、古くからある技術を上手く活用した新しい炭素循環の話なのです。産業分野などでは廃棄物のリサイクルの話の中で炭素循環が良く議論されますし、最近ではバイオマスでも炭素循環という形で重要視されています。

この炭素循環の技術やシステムが世の中にとってどのくらいの需要があるのかについて、産学官を問わず、議論の場を設けようということで、今年度（平成 30 年度）に当研究所で ACC 研究会を立ち上げました。ご興味のある方は是非参加して頂いて、ACC とはどのようなシステムで、社会の中にどう取り入れることができ、更に地球温暖化対策にどのように貢献できるのかを議論して頂きたいと思っています。

まとめ

化石燃料というのは、エネルギー密度が非常に高いものですから、今後も主要なエネルギー源であることに変わりはありません。しかし、2050 年超を考えた時、化石燃料を使うのは構わないけれども、低炭素社会にどう貢献するのかを考えていかなければならないと思います。つまり燃料や原料としての化石燃料の需要は、ある規模で残ると思いますので、低炭素社会と化石燃料需要の両方を念頭に置いて考えていかなければなりません。その中で CO₂ 排出規制が厳しくなるのであれば、CCS や CCU に期待がかかることになります。そして、今は非常に期待されている再エネや蓄エネの導入ですが、今後、もし思ったほど普及進展しない場合は、炭素循環エネルギーシステムも並行して考えていかなければなりません。

まだまだ沢山お話ししなければならない技術やシステムの話がありますが、お時間ですので、今回はこれで「まとめ」といたします。私からの話は以上です。ありがとうございました。（拍手）

2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド

モデレーター 寺井 隆幸 (東京大学大学院工学系研究科附属
総合研究機構長)

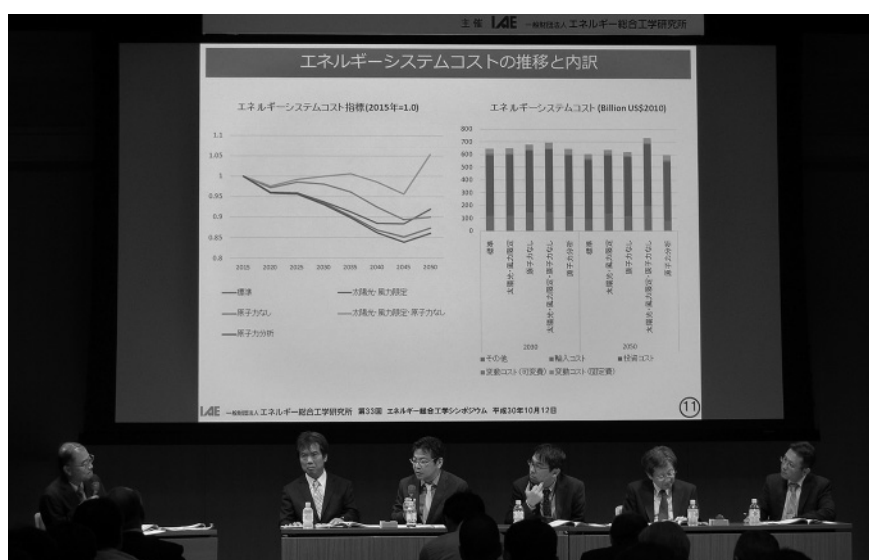
パネリスト 都筑 和泰 ((一財)エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長)

加藤 悦史 (プロジェクト試験研究部 副部長)

森山 亮 (プロジェクト試験研究部 副部長)

飯田 重樹 (プロジェクト試験研究部 部長)

酒井 奨 (プロジェクト試験研究部 副部長)



はじめに

エネルギー中長期ビジョン検討の経緯

寺井 私自身は、元々、原子力出身で材料を中心に研究していました。2005 年からは、大学院の学科が改組となり、色々な環境エネルギーシステムの中で原子力をどう考えたらいいかも含めた教育・研究を行ってきました。そういう意味で、今日のシンポジウムの講演は、私自身強い興味を持っている分野の話で大変勉強になりました。

午前中、ナキセノヴィッチ先生、山地先生による基調講演が 2 件、午後は、エネルギー総合工学研究所 (IAE) メンバーによる発表が 4 件あり、将来のエネルギーシステム、特に 2050 年超という超長期のエネルギービジョンについて考える材料を提供して頂きました。

このパネルセッションでは、今までの講演の内容を踏まえ、中長期のエネルギー技術開発の方向性について議論していきたいと思います。

まず、IAE で「エネルギー中長期ビジョン」(以下、中長期ビジョン) のタスクフォース・リーダーである都筑さんから検討の経緯についてご紹介したいと思います。

都筑 私はIAE 原子力グループの所属ですが、中長期タスクフォース・リーダーとして、様々な検討を行ってきました。

まず、検討の経緯ですが、当研究所が創立40周年を迎えるということもあり、2017年9月1日、表1に示す12名からなるタスクフォースを結成しました。2017年9月19日～2018年9月18日に4回のタスクフォース会合を開き、中長期ビジョンの検討を行ってきました。

また、これと並行して、表2に示す企画委員とメンバーとも意見交換も行ってきました。2017年10月には、中長期ビジョン検討のコンセプトについて、委員各位に個別に相談に伺いました。コンセプトがある程度固まった2018年4月に企画委員会を開き、委員の方々から様々な意見を伺いました。それを踏まえつつ、2018年5月～6月には、海外の主要機関を訪問し、意見交換を行っています。これ



寺井 隆幸氏

(東京大学大学院工学系研究科附属
総合研究機構長)

らの検討を踏まえて、本日のシンポジウムで発表し、さらに本日の議論も踏まえて、最終報告をまとめていこうとしているところです。

次に検討の内容ですが、2018年4月の企画委員会で頂いた意見を表3にまとめました。

表1 タスクフォース名簿

氏名	役職名(2018年10月時点)
◎ 都筑 和泰	プロジェクト試験研究部 部長(副主席研究員)
久田 司	原子力工学センター 副部長(主管研究員)
○ 森山 亮	プロジェクト試験研究部 副部長(主管研究員)
○ 酒井 奨	プロジェクト試験研究部 副部長(主管研究員)
飯田 重樹	プロジェクト試験研究部 部長(副主席研究員)
○ 加藤 悦史	プロジェクト試験研究部 副部長(主管研究員)
鈴木 博之	原子力工学センター 主任研究員
白井健一郎	プロジェクト試験研究部 主任研究員(2018年6月まで)
炭谷 一郎	プロジェクト試験研究部 参事(2018年8月より)
田中 健一	原子力工学センター 参事
井野 大輔	業務部 主任研究員
高橋 知慎	経理部 主任研究員
野村 和之	総務部 主任研究員

◎: 全体とりまとめ ○: 各グループとりまとめ

表2 委員会名簿(委員会実施時)

氏名	役職名
◎ 横山 明彦	東京大学 大学院新領域創成科学研究科 先端エネルギー工学専攻 教授
岡本 孝司	東京大学 大学院工学系研究科 原子力専攻 教授
竹内 純子	特定非営利活動法人 国際環境経済研究所 理事・主席研究員
多田 進一	一般社団法人 日本ガス協会 常務理事
堤 敦司	東京大学 生産技術研究所 エネルギー工学連携研究センター 元特任教授
八代 浩久	電気事業連合会 理事・事務局長
吉村宇一郎	石油連盟 常務理事

◎: 委員長

表3 企画委員からの主要なコメント

●CO ₂ 大幅削減のために、各種低炭素技術が必要というストーリーに加え、他機関の報告と差別化できる分析が必要。
●CO ₂ 大幅削減を前提として2050年断面を議論すると、短中期的に重要な技術(例えば高効率火力)が漏れる可能性がある。2050年に向けた連続性を考慮した議論が必要。
●再生可能+蓄エネルギーシステムのあり方の検討は重要。モデル計算への反映も考慮すべき。
●エネルギーセキュリティ、産業の国外流出リスクなども考慮すべきでは。
●熱利用も含め原子力の活用方法も考慮すべき。
●技術の導入を考える上では、技術開発の成功を前提としつつ、市場競争力や政策支援といった社会的な面も考慮すべき。
●化石燃料の将来の需給を考える際、石油精製工程の連産品である燃料以外の石油化学製品に与える影響についても考慮することが必要。
●2050年を念頭に置いて検討しているが、2100年を想定すると現状の延長線では解はなく、ドラスティックなシステムの変更が必要。
●2050年に向けたエネルギーシステム全体について、セキュリティを含みリスク分析が必要。

表4 海外機関との意見交換の主要な内容

● 多くの機関において、再生可能エネルギーの大量導入は関心事であり、蓄エネルギーシステムを含んだ電力システムのモデル化の検討が進められている。
● 運輸については、電化が基本的な傾向であった。ただし、飛行機や船舶の低炭素化が課題というのは共通的な認識であり、水素利用の可能性も考慮されている。
● 輸入水素の大規模利用については、米国の研究機関は概ね否定的であった。一方、国際エネルギー機関（IEA）は水素について比較的高い関心を示していた。
● IEA では『エネルギー技術展望』（ETP）で産業の低炭素化に野心的なシナリオを提示する一方、『世界エネルギー見通し』（WEO）では保守的なシナリオとなっている。

今、企画委員からの全てのコメントに着実に応える形で検討を進めているところです。

それから、海外機関（国際応用システム分析研究所、国際エネルギー機関、国立再生可能エネルギー研究所、ワシントン大学、パシフィック・ノースウェスト国立研究所）との意見交換の結果を表4に示します。再生可能エネルギー（再エネ）の大量導入とエネルギーシステムの電化、運輸の脱炭素化が海外機関の共通の関心事でした。また、運輸について、我々のモデルは水素中心ですが、各機関から「水素は1つの可能性ではある」という意見を頂いています。また、我々のモデルの「輸入水素を大量に使う」という点について、米国ではシェールガスもあるので「ピンとこない」という反応でしたが、IEA は水素に非常に高い関心を示し、かなり熱い議論をして来しました。

寺井 中長期ビジョンの報告書は、近い将来ままと伺っています。その検討の経緯についてご紹介頂きました。都筑さん、どうもありがとうございました。



都筑 和泰

（一財）エネルギー総合工学研究所
プロジェクト試験研究部 部長

1つ目はモデル計算の前提条件と結果の意味することの確認です。加藤さんの発表で、モデル計算の結果が明確に示されていましたが、その結果は前提条件によってかなり大きく変わってくるところがあります。その辺りについて確認をしたいということです。

2つ目は、エネルギーシステムに関わる主な技術的課題と取組みです。森山さん、飯田さん、酒井さんの発表で紹介された技術トレンドについても幾つか質問したいことがあります。

パネル討論

討論のための2つの論点

寺井 これまでの講演と今の検討の経緯を踏まえまして、討論へ移りたいと思います。

本日のパネル討論の論点は2つあります。

論点1

モデル計算の前提条件と結果の意味すること

～5つのケースの成り立ちと結果の意味～

寺井 モデル計算に10ケースがあつて、そこには色々な前提条件がありましたが、その妥当性、そして、最終的にコストミニマム（費

用最小化) ということで評価されたと思うのですが、これは日本全体としてのコストミニマムであって、地域性は考えていないという理解で宜しいですか？

加藤 はい。まず、世界全体でエネルギーシステムコストが最小化される、どの地域も同じような温室効果ガス削減努力が必要になるという世界を描き、その排出削減努力を日本が2050年にどのくらい実施しなければいけないかをGRAPEモデルを使って計算し、その中で日本でどうコストミニマムにするかをTIMES-Japanモデルで計算しました。

寺井 世界の中で日本がどうなるかを描き、それから先の計算を日本としてコストミニマムになるように計算したということですね。そこでは10ケースについて計算されていますが、この10ケースの妥当性、それを選んだ理由は何なのでしょう？ 恐らくこの10ケースは、どれもかなり極端なケースではないかという気がするのですが。

都筑 2030年の5ケースと2050年の5ケースを表示していますので、設定しているのは

5ケースになります。

図1は感度分析の結果ですが、ケース設定においては、再エネ、原子力、二酸化炭素回収貯留(CCS)の3つの項目を変化させています。原子力は、大(震災前のレベル)、中(維持)、小(なし)の3つ。再エネは、かなり野心的な大規模導入、限定的な中程度の導入の2つ。CCSは「あり」「なし」の2つです。これらを単純に組み合わせると全部で12ケースできますが、そこから5ケースを選んでモデル計算をしています。

標準ケースでは、再エネは野心的な大量導入、原子力は「維持する」(比較的新しい炉を再稼働し、運用開始から60年利用、新設はなし)としています。その標準ケースから、再エネの導入が限定的なケース(太陽光・風力限定)、原子力が無くなってしまいうケース(原子力なし)、両方上手くいかないケース(太陽光・風力限定・原子力なし)というふうに少しずつ電力供給が減る方向でケースを選んでいきます。さらに、標準ケースの前提(原子力を維持する)を「原子力を震災前のレベルに戻す」に替えたケース(原子力分析)を加えて、5ケースとしています。

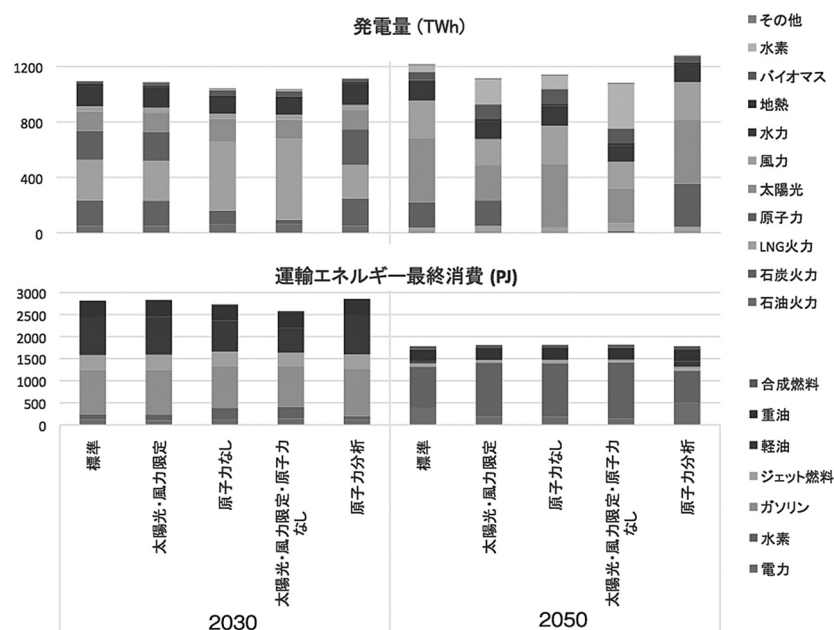


図1 発電量(上)と運輸エネルギー最終消費(下)における感度分析

寺井 それで全てをカバーしていると思って宜しいですか？

加藤 CCSについて補足します。図1では CCS についての結果を示していません。何故かと言いますと、比較的保守的な需要状況では「CCS あり」でないと解がないからです。「CCS なし」での結果は出していないのでここには載せていませんが、別途 CCS 大量導入ケースも検討はしています。

寺井 かなり色々なケースを想定していますね。今後の実際の成り行きは、これらのケースの中に納まるだろうという理解で宜しいですか？

加藤 いいえ。それは難しいと思います。基本的にモデルというものは、将来を予想するものではなく、「将来の航海のための地図を作るもの」というイメージを持って頂ければ良いと思います。将来に幅があるのだけれども「こういう状況だったらどっちにいかねばいけないんだろう。どういう所にいくのだろう」というのを、全体像として描くことが今回の中長期ビジョンの目的です。

寺井 分かりました。会場の皆さんには、モデル計算の結果は必ずしも絶対的なものではないとご理解頂ければと思います。

～再エネ大量導入コストの算入～

寺井 次にコストについてです。再エネの大規模導入がかなり重要だと思いますが、その実現には蓄電や送電部分が大事になると思います。そのコストは、モデルにどの程度入っているのでしょうか？

加藤 今回の発表では、系統のコストは入っていますが、蓄電については検討中なので入っていません。但し、「これ以上再エネ導入を進めると蓄電池のコスト負担が許容でなくなる所」を再エネ導入の上限値と設定しています。

寺井 加藤さんの資料で、2045年から2050年にかけては、それまで下がっていたコストが上がっていますね。この所で制約条件が変わったとかの理由があるのですか？

加藤 図2がその資料ですが、基本的に、これはエネルギーシステム全体のコストであっ

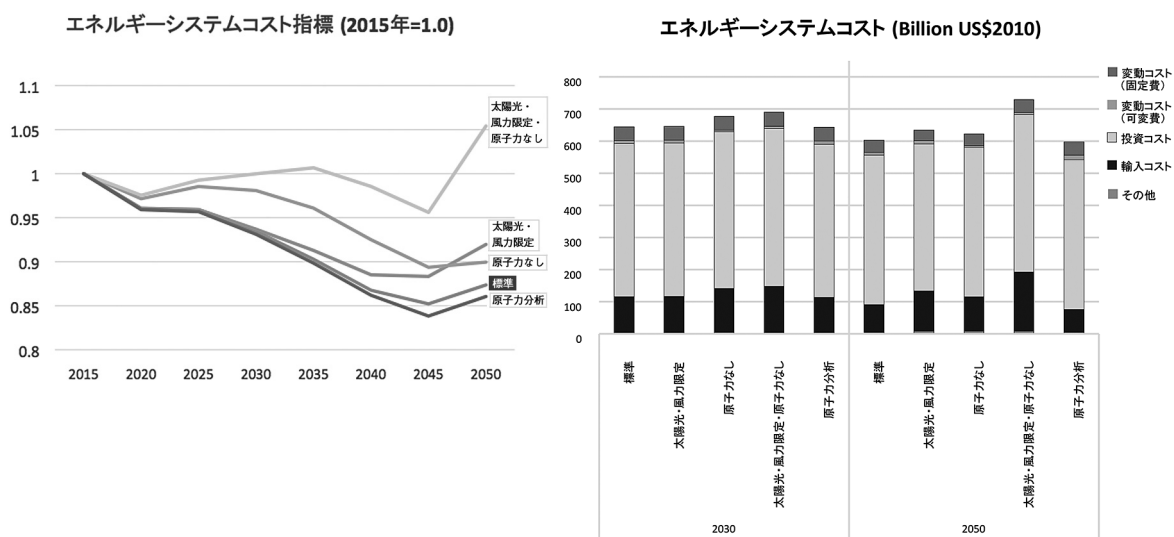


図2 エネルギーシステムコストの推移と内訳

て、電力だけを見ているわけではないことに注意して下さい。

電力システムだけの資本費や運用費を考えると、実は、2015年から2050年まで段階的に上がっています。

他方、人口減少に伴って運輸需要や家庭需要が微減していくので、石油消費が減っていき輸入コストが非常に下がります。電力システムのコストと輸入資源のコストが相殺合って、徐々にですが全体コストが下がっていくのです。

但し、2050年に向けて二酸化炭素（CO₂）を1トン減らすためにどれだけの技術を導入しなければならないか、というところでコストが大きく変化します。例えば、一番高くなっている「太陽光・風力限定・原子力なし」のケースですと、発電施設にも水素が大量に入り、運輸部門にも水素が入り「ゼロエミッションキャリア」にできる所は全部そうしてしまう。水素35円/Nm³と設定すると、資本費と燃料費でコストが急上昇していきます。もしも、輸入水素の値段が2050年に20円/Nm³まで下がっていれば、この状況は変わっていくことになります。

寺井 分かりました。CO₂削減の制約条件に抵触するかどうかの所でコストが大きく変わるという話ですね。



加藤 悦史

（プロジェクト試験研究部 副部長）

～エネルギーの多様度指数と自給率の意味～

寺井 資料で多様度指数とエネルギー自給率が示されていましたが、多様度指数の定義について説明をお願いします。それから、エネルギー自給率を上げるというのは、エネルギーセキュリティという意味で大事だと思います。計算ではエネルギー自給率が50%近くまで上がるということですが、今が原子力による数パーセントです。それが50%近くまでいくという具体的な見込みについて説明して頂けますか？

加藤 図3の資料がそれですが、まず、多様度指数の定義について説明します。ここでは、一次エネルギーの多様度指数を計算していま

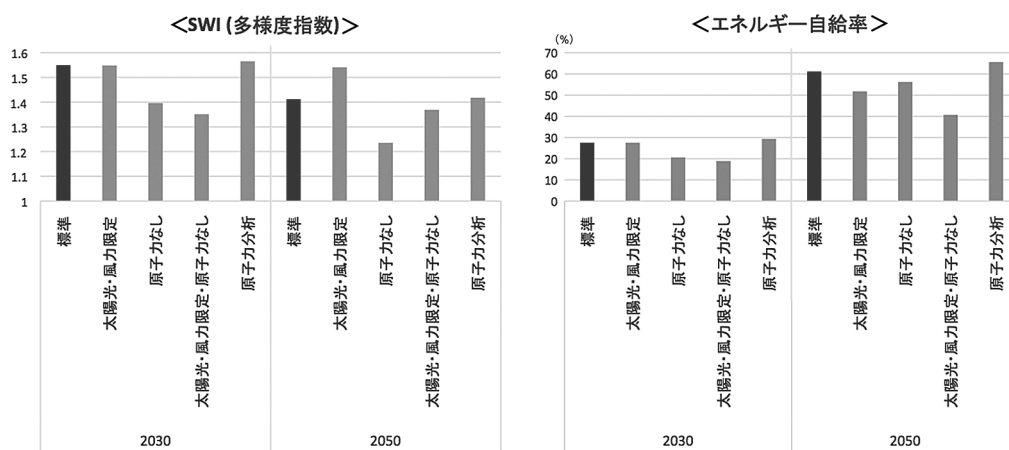


図3 多様度指数（左）とエネルギー自給率（右）によるシステム評価

す。ここで使った式は、よく生物多様性で使われる計算式です。

寺井 情報エントロピーみたいなものですよ
ね？

加藤 そうです。シャノン・ウィーバーの情報量（情報エントロピー）と一般に呼ばれる式です。数値が大きければ大きい程、多様度高いということになります。

寺井 「エネルギー自給率が50%」というのはどんな数字ですか？

都筑 エネルギー自給率についてですが、モデル計算では、再エネが大量導入され、原子力も維持されている標準ケースでは自給率が60%になります。それが妥当かどうか議論が分かれるところではあります。

また、必ずしも「高い自給率＝高いセキュリティ」とも言えません。「国力があって、エネルギーを海外から買ってこることができれば、セキュリティは高い」という観方もあります。セキュリティと自給率を直接結び付けることは非常に難しいと思います。ちなみに、モデルで買っているのは水素ですが、比較的政情が安定している国から買っていますから、現在よりもセキュリティは相当高い状態になっていると思います。

寺井 そうですね。現在、日本のエネルギー自給率はOECD34カ国中33番目という壊滅的な状況ですから、50%というのは現在のフランス並みですね。

～フロアとの質疑応答～

寺井 私からの質問はここまでにして、モデルについてフロアの方からご質問があればお受けしたいと思います。如何でしょうか？

質問者1 図1の電源構成について質問いたします。標準ケースによると、2030年は現在の構成と大きく変わらないような気がするのですが、2030年から2050年では、石炭が無くなったりして大きく変わります。今から2030年までと、2030年から2050年までとは何か違う事情があるのでしょうか？ それとも、2030年までは12年の期間に対して、2030年から2050年までは20年の期間があるから変わっているということなのでしょうか？

加藤 モデルには、設備の耐用年数なども入っていますし、新設でどれくらい入っていくかを年ごとで計算していますから、そういう時間の流れも影響します。また、2030年から2050年までが、現在から2030年までよりも大きく変わっているのはCO₂削減目標の違いがあるからです。2030年の26%削減に対して、2050年には80%削減という制約があります。それを満たすためにコストを最小にしながら、設備の利用率・利用期間も考慮して技術を選んでいくと図1のようになります。但し、その再エネや原子力についても上限値があって、その中でコスト最小化で計算しています。

質問者1 2030年で26%減、2050年で80%減というのは、ターゲットということですね？

加藤 はい。2030年の26%減というのは、政府で設定されたボトムアップによる値です。現在のエネルギー構成で利用しながら着実に達成できる範囲です。但し、それから先の変革をいかに速くやっていくかが気になりますので、研究開発が重要だと思います。

質問者1 先ほど太陽光発電を平均して毎年6GWずつ増やしていけそうだという技術的な説明がありましたが、今のお答えですと、やはり2030年以降は少し加速していかなければいけないということですか？

加藤 太陽光発電については、2030年に100GWまで入っていますね。しかも2030年の先は、交流（AC）の容量に対して直流（DC）の容量をかなり増やすシステムをメガソーラーで使っていく、太陽光の効率を上げていくという技術的な変化が効果を挙げているのだと思っています。

寺井 もう1件、質問をお受けしようと思いますが、如何でしょうか？

質問者2 再エネの導入では、風力発電を沢山入れたと思います。風力発電は地域偏在性がありますが、各エリアの調整力を制約条件としてモデル計算に入れているのかどうか。それから、気象予測のズレへの対応力は、どこで担保されるのか。何か考えがあればお答え下さい。

加藤 今回のモデル計算では、風力発電の地域偏在性までは考慮できていません。今回利用したのは、洋上風力も含めて100GWまで風力発電を導入するという日本風力発電協会（JWPA）の最大導入シナリオです。JWPAでは、風力の偏在性を賦存量を出すところで考慮します。そこから、系統制約も考慮して賦存量よりは少ない導入ポテンシャルを考えています。更に、そのポテンシャルが100%可能となるわけではないので、我々は、例えば、水素で貯蔵するという調整力も考慮してシナリオを作っています。

今回、JWPAのシナリオを我々のモデルに持ってきましたが、詳細はもっと検討しないといけないと考えています。

論点2

エネルギーシステムに関わる 技術的課題と取組み

寺井 それでは、2番目の論点に移りたいと思います。エネルギーシステムに関わる主な



森山 亮

（プロジェクト試験研究部 副部長）

技術的課題と取組みということで、3名の方から具体的な技術課題と研究開発の動向についてご紹介頂きました。

～蓄エネルギーシステムの技術的課題と取組み～

寺井 まず、再エネを入れていきますと、どうしても変動性対策が必要で、電力システムや蓄エネルギーシステムが極めて重要になると思うのです。「長期エネルギー需給見通し」（2018年7月）では、再生エネが最大22～24%となっていますが、その大量導入に向けてのキーテクノロジーは、どういうものになるのでしょうか？

森山 再エネ大量導入のキーテクノロジーは、やはり需給調整技術だと考えています。中でも蓄電や出力抑制技術がありますが、それらの技術も発電側で検討するのか、需要側で検討するのか、運用目線で考えるのかを総合的に見て、経済性が成立する所を検討する必要がありますと思っています。

我々のモデルでは今後、太陽光発電設備や蓄電池が安くなると想定しています。現時点では高い蓄電池の導入について出力抑制などの安い方法とのバランスを考えることが必要だと思っています。

寺井 山地先生の講演でも森山さんの講演で

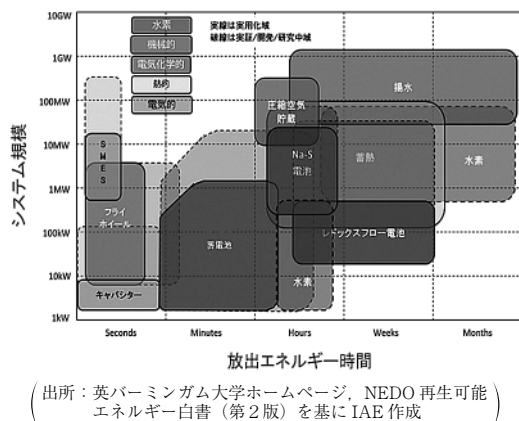


図4 蓄エネ技術性能マッピング図（左）と圧縮空気を利用した蓄エネ設備（右）

も九州電力(株)の例が出ていましたが、出力変動には揚水発電で対応しようという話でした。

実際に、もっと太陽光や風力が入って来てそれができない状況になって来ると、余った電力を蓄電池などで蓄電するという話になると思います。やはり問題は、そのコストですよね。それから、蓄電して放電すると、かなり電力量が減るという効率の問題もあります。その辺りも含めたコストをどうするか。図4には色々な蓄電技術が紹介されています。蓄電池というのが1つの電力貯蔵方法ですが、携帯電話で使っているリチウム電池みたいなものは効率も悪いしコストもかかるので、そのまま使う訳にはいきません。変動性のある再エネを入れていこうと思うと、今後その蓄電池を安くすることが必須課題になってくると思います。この辺りの技術開発動向はどうなっていますか？

森山 図4には様々な蓄エネルギー技術が載っています。皆さん既に使っているのは、携帯用バッテリーでお馴染みのリチウムイオンバッテリーですね。そういうものもありますし、九州電力(株)が出力調整に使っている揚水発電もあります。また、ナトリウム・硫黄（NAS）電池のように大容量のものもあります。システムの規模と放出時間を見ると、どのくらいの量を蓄え、どれくらいの時間対応しなければいけないかで適材適所の技術が特定できると思います。

また、ご指摘の低コスト化も再エネ大量導

入のために重要です。図4の右側の写真は、当研究所が行っている電力貯蔵システムの実証設備の外観です。こちらも電力の貯蔵と放出で必ずロスが生じます。どの蓄エネルギー設備でも、何らかのロスが生じますので、ロスを下げることも重要だと思います。

寺井 図4左側の実線で示されているのが実用化しているもので、点線は未だ実用化していないけれど今後実用化が見込めるものですね。コストを書いてもらうと分かりやすくなるかも知れませんね。例えば、三次元方向にコストを取るとかして整理するようお願いできればと思います。

森山 はい。今回の発表では図4の通りなのですが、既に実用化している揚水やリチウムイオンバッテリー、NAS電池については、コストで並べた図もあります。今回は、縦軸と横軸だけの図を出しましたが、将来に向けてコストがどのくらい下がるのかなど、色々な情報が手元にあります。

寺井 いずれにしても、変動性の再エネを大量に入れていく。特に、2050年までに色々な技術を開発していかないといけないということ、将来の技術には不確実性があるということ、その辺りも重要だということがよく理解ができました。

～コスト負担という社会的・制度的課題～

寺井 今、「電力自由化の時代」に入っていて、こういう技術のコストを誰が負担するかということは、重要な政治・政策課題だと思います。例えば、太陽光発電や風力発電については、固定価格買取制度（FIT）で、発電した電力を電力会社が一定のかなり高いコストで買い取り、それを一般の電力料金に上乗せしています。今後、再エネが大量に導入されていった時に、蓄電池や電力貯蔵システムのコストをどう負担していくのかは非常に重要な社会問題になり得ると思います。その辺りについては如何でしょうか？

都筑 現実問題として、例えば、火力発電の稼働率が非常に下がって儲からなくなってしまったという問題があります。それに対して、例えば、発電容量そのものに価値を付けることが考えられます。例えば、米国では原子力のガス火力に対する競争力が無くなって来て、既存の原子力発電所でさえ停めなければいけない状況になったので、「低炭素クレジット」を付けるという話が出ています。恐らく、日本でもそのような形で発電システムの価値を適切に評価して、それを市場メカニズムに入れていくことでコスト負担の課題が解決されていくのだらうと思います。

ですから、蓄電設備や送電網の整備のコスト負担についても合理的な理由を考えて、それを上手く市場メカニズムに入れていく工夫が進められると考えています。

寺井 電力については、これまで電力会社9社が発電・送電・配電をやっていたところ、自由化になって「上下分離」になりました。電力会社は送電事業を地域独占でやるけれども、発電・売電事業は、それぞれの事業者がやれる自由度が出て来ました。その時に、電力の供給義務が重要な社会的課題になると思いますが、そこはやはり、配電会社が全部責

任を持つのでしょうか？

森山 その辺りは、技術的な話というよりも制度的な話になると思いますが、今日も「地域自立」という、地域の中でエネルギーをマネージして自立供給するという例が示されましたが、そこに対してバックアップする必要はないのか、供給義務をどうするのかについては、未だ答えが無くて、今後の検討課題だと思います。

もう1つ、我々のモデルで想定されている太陽光や風力のポテンシャルについて、色々な所で言われている数値やモデルと合っているという話をしましたが、では、環境性や地域住民の感情も含めて、ポテンシャルを100%導入できるかは、技術的な問題ではなく社会的な問題としても考えなければいけないのではないかと考えています。

寺井 そうですね。そういう意味では社会的な課題ですので、その所をどう考えていくのかですね。しかしながら、重要な課題であることは事実だと認識しておきたいと思います。

～水素活用システムの技術的課題と取組み～

寺井 今後、電化が進んでいくという話なのですが、やはり、不確実性はあるし、太陽光・風力発電の大量導入が上手くいきそうにないとなった時に、水素の話が出てくるのだらうと思います。電力のバックアップであったり、電力と非常に互換性の高いエネルギーソース、キャリアとしての水素という話がありますが、午後の報告では、輸入水素の話がありました。一見すると、これまでの天然ガス輸入を水素に換えるだけではないのかという気がするのですが、今どういう状況で、今後の見通しはどんな感じになるのでしょうか？

飯田 今、天然ガスを液化天然ガス（LNG）の形で輸入していますが、水素の輸入もそれと似た形で考えていけると考えています。

ただ、LNGと比較した時、今の水素の技

術レベルがどのくらいであるかは重要なポイントです。実は、今の水素の技術レベルは、LNG 輸入が決断された時のレベルには達していないと認識しています。今、水素を海外から日本に持って来る実証研究が幾つか進められています。実証研究を進める中で、個別技術のブラッシュアップを図って、確実なものにしていくことによって、大量の水素を輸入する事業判断ができるだけの技術をきちんと提示できることが大事です。そういうことも含めて、今、2030 年頃の商用化に向けて 2020 年に実証運転ができるよう技術開発が進められているとの認識です。

寺井 恐らく、水素を海外から日本に持って来て発電をする。国内では CO₂ は出ないのですが、当然、水素を作る海外ではどうなのかという話が出るわけですね。太陽光や風力を使ってゼロエミッションの水素ができれば全く問題が無いのですが、もしも、化石燃料の改質で水素を作ったとしたら、そこで CO₂ が出るわけです。

天然ガスや石油については、日本の商社などが共同開発をやって来たという話がありますが、海外での水素製造に対して、そういう可能性はありますか？

飯田 はい。あります。具体例として、川崎重工業(株)がビクトリア州政府・豪州政府と協定を結びながら、豪州の褐炭で水素を作って、出て来た CO₂ は CCS をするというを進めています。

また、私が今年 6 月に南米での学会に出席した時に、エネルギーのキャリアとしての水素の話をしましたら、非常に興味を持って可能性がどのくらいあるかとか、日本にとってどういうメリットがあるかとかを訊ねてきました。南米には豊富な再エネを何とか輸出したいという願望がありますので、日本企業との共同開発の可能性はあると思っています。

今日は、私どもが産官学の関係者に声をか



飯田 重樹

(プロジェクト試験研究部 部長)

けている「CO₂ フリー水素普及シナリオ研究会」の話をさせて頂いたのですが、ここ数年、そのメンバーとして商社や銀行も加わって来ました。そう言う意味で、寺井先生がおっしゃった海外での権益確保という観点も含めて、可能性を探っていく段階に来ていると考えています。

寺井 水素の輸入が、ひょっとしたら将来大きなビジネスになり得るかも知れないということだと思います。それから、国内の再エネの余剰電力を水素にして貯めて置くということもあり得るわけですね？

飯田 はい。それも水素の重要な役割の 1 つだと思っています。

～炭素循環システムの技術的課題と取組み～

寺井 次に炭素循環について伺いたいと思います。実際に海外の低炭素エネルギー資源である水素を大規模に利用するという意味では、水素の活用システムと炭素循環システムというのは、ある種共通の話題かなと思いますが、水素や炭化水素、CO₂ から合成燃料を造るという役割分担が 1 つのポイントだと思います。どういう所からそれを選択すればいいか。この辺りは如何でしょうか？

酒井 はい。私が示したシステムの最大の特徴は、需要側での設備がそのまま使えるということです。炭化水素は水素に比べてエネルギー密度が高いわけですから、大量にエネルギーを使う所にも適用できるといった特徴があると思っています。

図5には、石炭火力の中に合成燃料を混焼するイメージを示しました。石炭火力発電所には、発電設備を始め、排ガスを浄化する設備、燃料を調整する設備など色々な設備があります。ここで合成燃料を使えるとなると、排ガス中の不純物が少なくなってくるので、例えば、脱硫設備は小さくできます。もしくは、合成燃料を100%入れることができれば、脱硫設備は不要になります。既存設備を使えて、且つシステムとしてシンプルな発電設備になるといったメリットもあると思います。

寺井 炭素を循環させることでCO₂として外に出さない、環境に出さない。要は、循環させるだけで、その間をメタノールなどの炭素含有物質をエネルギーキャリアとして使うという考え方ですね。

水素や合成燃料の大量輸入というのは、す



酒井 奨

(プロジェクト試験研究部 副部長)

ぐの実現は難しいかも知れませんが、将来の可能性も見据えつつ、技術開発を進めることは非常に大事だと思います。

～原子力とバイオマスの位置づけ～

寺井 今日あまり出てこなかった原子力、バイオマスについて質問したいと思います。バイオマスは、かつてかなり注目された時期がありました。国内の間伐材や廃棄物が発電などに使えるのではないかと言われた時期があったのですが、この辺りについて伺いたいと思います。

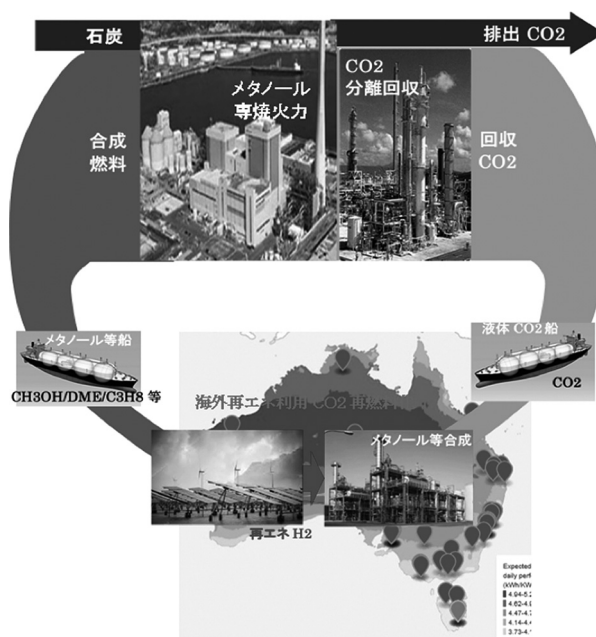


図5 炭素循環システムの火力発電への適用例

まず、原子力についてです。今日、原子力を今後も使い続けるケースも評価されていたのですが、中長期ビジョンの中で原子力をどういうふうに位置づけるべきか。ご見解を頂けますでしょうか？

都筑 はい。何はともあれ、原子力については、事故の反省を踏まえて安全性を十分に高めていくことが大前提になるのは間違いないと思います。

ただ、幾ら安全性を高めていっても、必要ないと思われれば使われないということになります。例えば、自動車は、何千件もの死亡事故があっても「使いたいから使う」という状況にあります。ですから、原子力が「安全性をここまで高めました。これから更に高めます」と言うだけでは不十分だろうと思っています。

ではどうするか。やはり原子力の魅力、必要性をしっかりと考えていく必要があると思います。今回の中長期ビジョンでも、その一環として色々な見解を考えています。

今日、我々が提示した3つのトレンド（蓄エネルギーシステム、水素活用エネルギーシステム、炭素循環エネルギーシステム）には、未だ大規模利用の実績がありません。それに対して、原子力には震災前に30%の電力を供給していたという技術的な裏打ちが十分にあります。原子力には、他の技術が上手くいかなかった場合のバックアップという価値は最低限あると思います。また、着実にエネルギー・セキュリティと自給率の向上に貢献するという点にも価値はあると思っています。

将来を見据えた場合、例えば、炭素燃料の代替が困難な素材産業の熱源や（既に外航船、砕氷船には原子力船がありますが）船舶について、原子力技術をより広く使っていくことも視野に入れて、それぞれに適した原子力技術を開発していくことは1つの大きな可能性でないかと思っています。

トータルで考えますと、やはり原子力も将来それなりの役割を担う可能性があると思っ

ています。

寺井 今、原子力の議論を表立ってやるのは難しい状況になって来ているのですが、やはり、しっかりと技術を確保するということ、今後の原子力システム（従来の軽水炉だけではなく、第四世代炉、高温ガス炉も対象）の技術はしっかりと継続・発展させていくことが必要ではないかと思います。

寺井 バイオマスのほうは如何ですか？

森山 バイオマスの話は、今日、取り立てて大きくは出て来なかったのですが、バイオマスも国内資源を使っていくことが非常に重要だと考えています。今、FITでバイオマス発電の導入量がかなり伸びて来ているのですが、実は燃料の大半が海外からの輸入なのです。再エネというくくりの中でも、バイオマスと太陽光・風力には大きな違いがあります。バイオマス発電は燃料を入れないと発電できない上に、その燃料が国内で調達すると高くつくという点です。「バイオマス発電をドンドン入れていけばいい。国内の木を全部切っていけばいい」という話ではなく、持続可能性を考えて、2030年以降も国内資源の有効利用と言う観点で、バイオマスについて考えていく必要があると思っています。

寺井 ゼロエミッションということで、バイオマスが考えられるのですが、やはり資源量の制約があるということですね。

～「Society 5.0」のモデルへの反映～

寺井 午前中、山地先生が「Society 5.0」のことをおっしゃいました。今回の中長期ビジョンは、そういうことはあまり考えずに、国が出している今後の持続可能なエネルギー経済発展を前提にしていますね。「ライフスタイルや産業構造を大きく変えなさい」というの

が山地先生の講演だったと思うのですが、それについてはどういうふうに対応されるのでしょうか？

都筑 その点については、色々な方から指摘されております。我々も「Society 5.0」のような需要側の対応の重要性は深く認識していますが、その一方、我々は供給側の技術を中心としたシンクタンクなので、中長期ビジョンには供給技術を中心とした検討を行ってきています。

また、需要が極端には減らないということは、エネルギーシステムの検討からいきますと厳しい条件であると考えられます。同様に80%のCO₂削減という制約条件も厳しい条件であると考えています。高めの需要に対して、低めのCO₂制約をかけるということは、供給側システムの検討としては最も厳しい条件でありまして、それに耐え得る準備をしておけば、大抵のことには対応できるはずと考えています。そのような理由で、まずは最も厳しい状況で検討を進めてきましたが、今後、「Society 5.0」を含めた検討も引き続きやっていきたいと思っています。

寺井 不確実性が高い中で「Society 5.0」を含めた検討をどうやっていくか難しい話だと思いますが、最終報告書の中で、その辺りの今後の見通しや作業の方向性について最後に触れると良いと思いました。

～フロアとの質疑応答～

寺井 私からの質問は以上にして、フロアの方からご質問お受けしたいと思います。後半の3件、あるいは全体についてでもご質問がありましたら宜しくお願い致します。

質問者3 水素の将来価格が30円/Nm³という話が沢山出ていたのですが、どう考えるとそういう価格になり得るのでしょうか？現状ですと100～200円/Nm³だと思うのです

が。今後どのように水素が使われていくのかという観点からも、水素価格がどうなるか気になっています。

飯田 30円/Nm³というのは、政府の目標値です。それが、どういう構造であれば成り立つかは、「CO₂フリー水素普及シナリオ研究会」でも色々な公表数字を参考に議論しているところです。例えば、豪州の褐炭で水素を作って、それを液化水素にして日本に運んで来るNEDOプロジェクトで、川崎重工業㈱が現地でのCCSコストも含めた試算をして、かなり具体的な数字を出しています。また、中東では再エネ電力が2セント/kWh程度とかなり安い価格での取引も出てきているようですが、そういう再エネ電力を使って電気分解で水素を作って日本に運んだ場合、価格がどのくらいになるかの試算も研究会で行っています。試算では、30円/Nm³を少し超えるくらいの数字が出ています。そのような試算結果を研究会で示し、色々な参加企業にその数字の妥当性や可能性、達成するための課題等について議論して頂いているところです。

質問者4 圧縮空気エネルギー貯蔵というのは、IAEも関わっているということですので、現状の技術レベル、それから今後の発展の可能性が分かれば教えて下さい。

森山 図4の右側の写真ですね。今、正に実証中で報告書も出ていないので、今、ここで詳細はお答えできないのですが、この設備では、風力発電の出力変動に対して蓄エネシステムが調整力として機能するかどうかを実証しているところです。この実証設備は、かなり小さなサイズですので、現状コストはある程度試算できると思いますが、将来コストとなると、検討が難しいと思います。また、他の蓄電池も含めて、充電と放電の時の効率がありますので、電力を蓄えて100%出すことはできません。そこのロスも実証機ではな

く実機になるとどのくらいになるかも色々シミュレーションしながら検討しているところです。

寺井 まだ、ご質問があるかと思いますが、終了の時間が来ておりますので、これでパネル討論を終らせて頂きたいと思います。パネリストの方々、フロアの方々、ご議論を頂きましてありがとうございました。

閉 会 挨拶

中村幸一郎 (一財) エネルギー総合工学研究所
専務理事

本日は当研究所の「第 33 回シンポジウム～ 2050 年超に向けたエネルギーシステムのメガトレンド～」に多くの皆さまに長い時間にわたりご参加を頂き、誠にありがとうございました。

来賓の福島様からエネルギー・地球環境分野、最近の災害を踏まえた保安分野につきまして政府の取組みをご紹介頂き、種々の問題解決に向けての技術の貢献が大きいということをご指摘頂き、またこのシンポジウムへの期待が込められたご挨拶を頂戴いたしました。

国際応用システム分析研究所副所長のナキセノヴィッチ様からは「持続可能性を目指したエネルギー転換」と題してお話を頂きました。2100 年に向けた Carbon Law のお話、2050 年へのエネルギーシナリオのご提示を頂き、加えて持続可能な世界での 6 つの変革について解説をして頂きました。

続いて、公益財団法人・地球環境産業技術研究機構の理事・研究所長の山地憲治様からは「エネルギーシステムの技術・社会イノベーション」と題してお話を頂きました。モデルによって示される排出削減シナリオと現実社会で有りうるシナリオとは異なること、現実社会では技術革新による大きく誘発実現されることがあるということ、また、ネットゼロエミッション社会へ向けて、カーボンフリーの電力、熱、燃料の実現のためにできるだけ多くの選択肢を持ちながら、非連続のイノベーションへ挑戦するということが大切だというご指摘を頂きました。

午後には、当研究所で現在検討している中長期ビジョンのエッセンスをご紹介させて頂きました。モデルを使いながら将来のエネルギー技術の展望を行ったものです。2℃シナリオ実現のため、どのようなエネルギーシステムの組合せが考えられるのか。その前提条件、結果、その意味するところを私どもとしてお示しをし、関係者における議論の素材としてご活用頂くことを念頭に置いたものです。

今日は、割愛させて頂きましたけれども、各分野での技術課題とその取組みも整理いたしまして、近いうちに「エネルギー中長期ビジョン」の全体をとりまとめたと考えております。

ナキセノヴィッチ様のお話にもございましたけれども、IPCC から「平均気温の上昇は既に 1℃に達し、2030 年にも 1.5℃になる」という特別報告が出されました。昨日、一昨日に開催された ICEF におきましても、この報告に関するものも含め、今後の気候変動問題へ

の国内外の様々なステークホルダーの取組みに関する熱心な議論がなされておりました。

当研究所といたしましても、モデルを使ったシナリオの提示、エネルギー技術システムの評価等を通じまして、そのような議論に少しでも多く貢献して参りたいと考えております。引き続き、私共の事業、調査研究にご指導、ご支援をよろしくお願い申し上げます。

最後になりますが、ご来賓、ご講演者、そして討論のモデレータをお務め頂いた寺井隆之先生に改めて御礼を申し上げ、ご参加頂いた皆さまのご健勝、ご発展を願い、閉会の言葉とさせていただきます。本日は誠にありがとうございました。(拍手)

研究所のうごき

(平成 30 年 10 月 2 日～12 月 31 日)

◇ 第 24 回賛助会員会議

日 時：10 月 12 日（金）15：50～19：00

場 所：千代田放送会館

議事次第：

1. 最近の事業活動について
2. 調査研究活動について
3. 講演『エネルギー基本計画と今後のエネルギー政策について』
(経済産業省資源エネルギー庁資源エネルギー政策統括調整官 小澤典明氏)

◇ 月例研究会

第 383 回月例研究会

日 時：11 月 9 日（金）14：00～16：00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. NEDO のバイオマスエネルギーに関する取り組み
(（国研）新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部バイオマスグループ 主査 石川 智啓 氏，主査 河守 正司 氏)
2. 国産バイオ燃料製造・供給に向けた取り組み
(株)ユーグレナ 執行役員バイオ燃料事業部長 尾立 維博 氏)
3. 将来のバイオマス利活用に向けて
(（一財）エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副部長 森山 亮)

第 384 回月例研究会

日 時：12 月 4 日（金）

研究会 14：00～16：00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室（研究会）

航空会館 8 階 801 会議室（交流会）

テーマ：

1. 水素燃料電池システムの船舶分野への適用と技術課題
(（国研）海上・港湾・航空技術研究所 海上技術安全研究所 環境・動力系 係長 平田 宏一 氏)

2. 北欧からの CO₂ フリー水素サプライチェーン分析 - Hyper プロジェクト

((一財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副部長 石本 祐樹)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：坂田 興

テーマ：Current Status of Development of Hydrogen Technology in Japan and the Governmental Policies

発表先：3rd Japanese-German Workshop on Renewable Energies

日 時：10 月 17 日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：エネルギーモデルの中での NETs の量的な必要性

発表先：セミナー「ゼロエミッションからネガティブエミッションへ」（主催 LCA 日本フォーラム，日本 LCA 学会パリ協定後の産業研究会，工学院大学）

日 時：11 月 8 日

発表者：坂田 興

テーマ：我が国への水素導入の意義，施策動向および技術開発の現状と展望

発表先：2018 年度 関西経済団体連合会 科学技術・イノベーション委員会／地球環境・エネルギー委員会 共催講演会「水素社会実現に向けた現状と課題」

日 時：11 月 30 日

発表者：飯田 重樹

テーマ：持続可能なエネルギー社会構築に向けた水素の貢献可能性

発表先：電気学会 多様な電力・エネルギー要素技術の機能的結合によるシステム高度化協同研究委員会

日 時：12 月 6 日

発表者：水野 有智

テーマ：電力システムを活用した日本版 Power to Gas システムの試案

発表先：技術情報センター「Power to Gas を中心とした水素エネルギー関連事業と技術開発動向」セミナー

日 時：12 月 21 日

[寄稿]

寄稿者：坂田 興

テーマ：水素エネルギーシステム

寄稿先：化学工学誌 82 巻 10 号『化学工学年鑑 2018』（10 月号）

◇人事異動

○11 月 1 日付

（異動）

茶木 雅夫 企画部部長（特命事項担当・副主席
研究員）兼 プロジェクト試験研究部
兼 原子力工学センター

（兼務）

内藤 正則 原子力工学センター部長

○11 月 30 日付

（出向解除）

堀山 雄資 原子力工学センター 主任研究員

○12 月 1 日付

（出向採用）

青柳 俊宏 プロジェクト試験研究部 主管研究員
兼 原子力工学センター

編集後記

昨年のエネルギー情勢を振り返ると、例年同様、内外ともに様々な動きが見られた一年であった。まず石油については、イラン核合意からの米国の離脱など中東情勢の不安定化やイラン経済制裁に係る供給懸念、米シェールオイル・ガスの増産、世界経済の減速への不安などにより、大きな価格変動が見られた。再生可能エネルギーを見ると、パリ協定への対応や太陽光・風力等のコスト低下を背景に、世界的に再生可能エネルギー投資が進み、導入普及が拡大している。原子力については、経済発展に伴いエネルギー需要の増加が見込まれるアジア、特に中国やインドにおいて依然として活発な開発が進められる状況にある。

わが国においては、自然災害の影響、例えば夏の豪雨や台風、とりわけ9月の北海道胆振東部地震による北海道全域の

ブラックアウトが記憶に新しいが、やはり第5次エネルギー基本計画の決定がエネルギーを巡る最大のトピックスではないだろうか。本計画では、2030年のGHG26%削減に向けて施策の深掘り・強化等を通じてエネルギーミックスの確実な実現を目指すとともに、2050年への対応としては、GHG80%削減を目指し、エネルギー転換・脱炭素化に向けて、野心的な複線シナリオをたて、あらゆる選択肢を追求するとの方向性が示されている。

当研究所においても、本号の特集でもある、「中長期ビジョン～2050年に向けたエネルギー技術展望～」をとりまとめたところであり、これらを踏まえ、関係者の皆様とともにエネルギー・環境に関する課題に取り組んでいく所存である。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第41巻第4号

平成31年1月20日発行

編集発行

一般財団法人 エネルギー総合工学研究所

〒105-0003 東京都港区西新橋 1-14-2

新橋SYビル（6F）

電話（03）3508-8891

FAX（03）3501-1735

<http://www.iae.or.jp/>

（印刷）株式会社 吉田コンピュータサービス

※ 無断転載を禁じます。