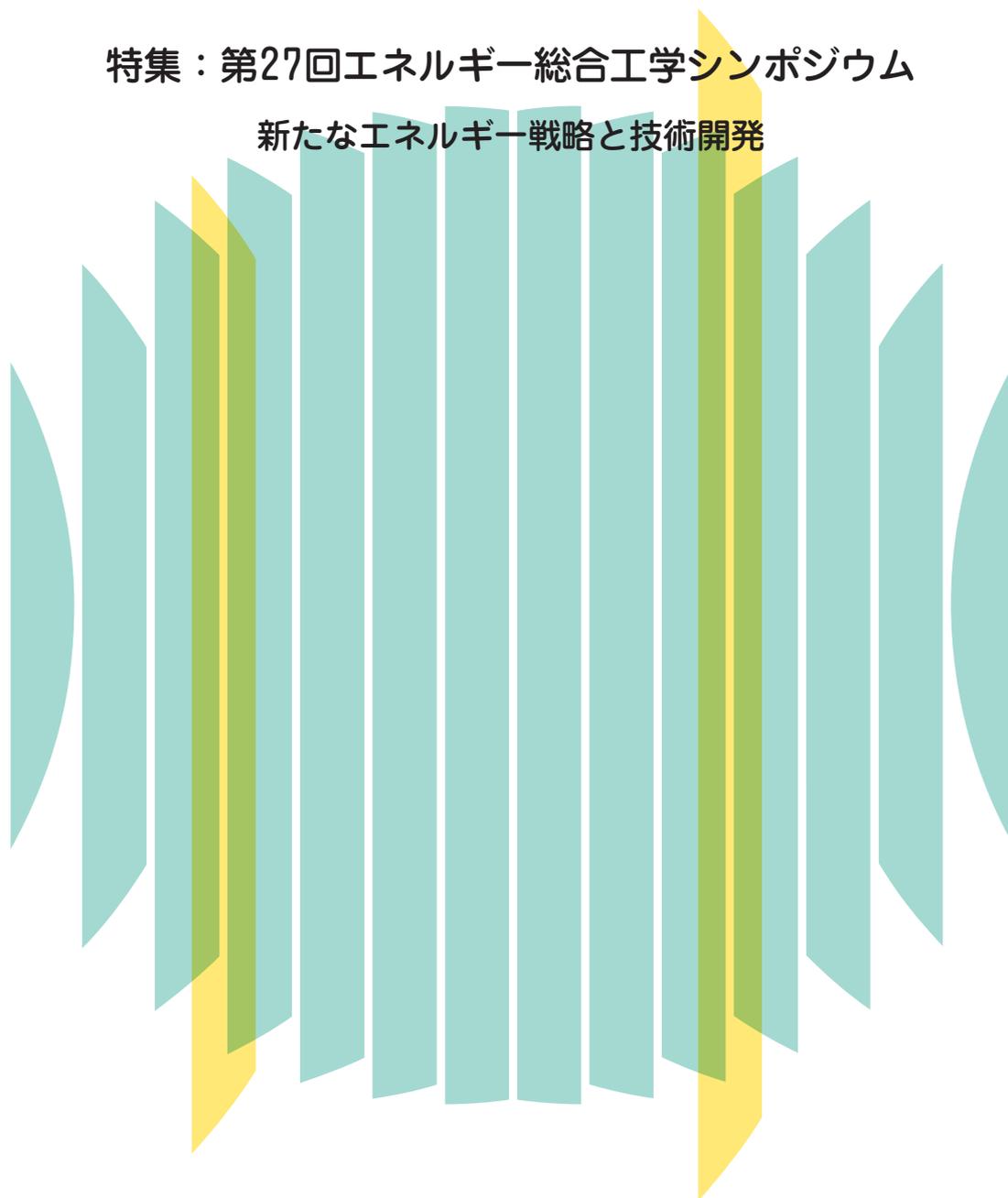


季報 エネルギー総合工学

Vol. 35 No. 4 2013. 1.

特集：第27回エネルギー総合工学シンポジウム

新たなエネルギー戦略と技術開発



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

第27回エネルギー総合工学シンポジウム

新たなエネルギー戦略と技術開発



来賓挨拶を述べる 朝日 弘 経済産業省大臣官房 技術総括審議官

日 時：平成24年10月5日（金） 10：00～15：45

場 所：千代田放送会館

総合司会：プロジェクト試験研究部 部長 黒沢 厚志

目 次

【開会挨拶】	(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】	経済産業省大臣官房 技術総括審議官	朝日 弘 ……………	3
【特別講演1】	リスク学から見たシステムの保全 ～原子力発電所を念頭に 京都大学名誉教授／(財) 国際高等研究所フェロー	木下 富雄 ……………	5
【研究成果発表】	2050年に向けたエネルギー技術開発 プロジェクト試験研究部 主任研究員 プロジェクト試験研究部 主任研究員 プロジェクト試験研究部 部長 研究理事	時松 宏治 森山 亮 蓮池 宏 小野崎正樹 ……………	22
【特別講演2】	電力システムの新たな課題とその解決 ～エネルギーインテグレーション：分散電源と技術開発 東京大学生産技術研究所 特任教授	荻本 和彦 ……………	35
【パネル討論】	テーマ：新たなエネルギー戦略と技術開発 モデレーター：山地 憲治 (公財) 地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長 パネリスト：荻本 和彦 東京大学生産技術研究所 特任教授 藤森禮一郎 エネルギージャーナリスト 小野崎正樹 (財) エネルギー総合工学研究所 研究理事	……………	46
【閉会挨拶】	(財) エネルギー総合工学研究所 副理事長	三代 真彰 ……………	60
【研究所の動き】	……………	……………	61
【編集後記】	……………	……………	63

開 会 挨拶



白土 良一 (財)エネルギー総合工学研究所
理事長

本日は皆様ご多忙の中、エネルギー総合工学シンポジウムにご参加を賜り、誠にありがとうございます。また、日頃より当研究所の事業にご協力とご理解を賜りまして、大変ありがとうございます。この場を借りて、厚く御礼申し上げます。

昨今の様々な現象を表現させていただきますと、ヨーロッパ、日本などでは、社会が「パラダイム無き時代」、「不透明な時代」に突入したのではないかという印象を受けております。この時代、また我々国民一人ひとりが生活をしていく上での安心というものが失われているのではないかと懸念しているところでもあります。2007年頃から始まった急激な円高は、高止まりが続いており、国内企業にとっては苦しい運営が続いております。ますます高齢化が進む日本社会の今後の在り方をみんなで模索していかねばなりません。私が述べるまでもなく、国際的にも政治経済的にも様々な動きが生じております。

昨年3月の福島第一原発事故を契機に、日本のエネルギー戦略の再構築が求められています。東日本大震災、そして福島第一原発事故で被災された方々にお見舞いを申し上げますとともに、事故の収束に励んでおられます方々に深く敬意を表します。私も昔の仕事の関係で、何度か福島第一原発に足を踏み入れておりますが、「これはもう普通の発電所ではない。一大化学プラントだ。大変な仕事をやっているなあ。」と感じております。昨年10月のシンポジウムは、「東日本大震災を踏まえたエネルギー戦略」というテーマで開催させていただきました。今年は、「新たなエネルギー戦略と技術開発」と題しまして、京都大学の木下先生、東京大学の萩本先生にご講演をいただき、さらに、地球環境産業技術研究機構の山地先生をモデレーターとしてパネル討論を行います。また、当研究所の研究成果として、2050年に向けてエネルギー技術開発についての発表も予定しております。

本シンポジウムにご参集いただきました皆様にとって、有意義なものとなれば幸いです。冒頭、「パラダイム無き時代」、「不透明な時代」と申し上げましたが、このような時代であるからこそ、幅広い観点から長期的な視点を持ち、しっかりとした技術力を結集して、全てのシナリオに対応できるようにすることが必要だと思います。当研究所は今後とも、「エネルギー技術研究」をキーワードとして、社会に貢献してまいりたい所存でございます。

最後になりますが、公務ご多用の折、ご臨席を賜りました経済産業省の朝日技術総括審議官、そしてご講演をいただく方々、シンポジウムに参加された方々に改めて御礼申し上げて、私の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



朝日 弘 (経済産業省 大臣官房
技術総括審議官)

ただいまご紹介いただきました経済産業省技術総括審議官の朝日でございます。私は技術関係の問題の全体を見る立場にございますけれども、実はこの9月まで資源エネルギー庁で、福島第一原発事故収束と再生可能エネルギー、省エネルギーの国際関係の問題などを担当させていただきました。3.11以降の非常に厳しい状況、エネルギー政策に対する信頼が失われていくプロセスの中にいた者でございます。事故後、計画停電もありました。石油ガスの供給の脆弱性についても指摘され、現実を経験をし、原発の再稼働が非常に難しい問題になりましたので、節電等の様々な新たな対応を進める中にいた者でございます。

昨年6月には、ゼロベースからエネルギー政策の見直しを行う「エネルギー・環境会議」が設置され、新しい政策に向けた議論が始まり、コストの検証、エネルギー基本計画、原子力委員会における議論、環境政策の議論、様々な政策オプションについての議論が年を越えて行われてまいりました。この春に政策オプションが「エネルギー・環境会議」で取りまとめられた後、国民的な議論を経て、9月14日に「革新的エネルギー環境戦略」が提示されるに至ったわけでございます。今後、それを受けたエネルギー基本計画の具体化が課題になっております。その中身をみますと、原子力技術についての安全性の確保、人材の確保と育成、再生可能エネルギー、省エネルギーの技術開発、化石燃料関係の効率の向上など、どの文書においても「技術開発」がキーワードになっております。

一方、世界のエネルギー市場を見ますと、シェールガスの開発が進んでおります。非常に少数の企業の取組みの結果かも知れませんが、非常に大きなインパクトが及ぶ技術革新も現実起こっております。そういった意味で、私どもの目の前にある技術開発課題についてどのような成果を具体的に出していくのかが問われる時代を迎えたと考えております。地球温暖化交渉などでも「技術移転」というのはビッグイシューになっております。ですから、「移転するに足る競争力のある技術」をわが国が持つことが将来のキーであると思っております。

最後に、福島第一原発事故の収束に向けて、非常に厳しい状況下で作業が続いております。使用済み燃料プールからの燃料取り出しに向けた作業も進んできております。今年、

あるいは来年に向けて、具体的にいい姿になってくるとは思いますけれども、燃料デブリーの取出しは、30年、40年かかります。そういった期間を支える技術者の確保と育成、現場を大事にしていく課題というの抱えております。エネルギー関係の技術コミュニティーにとって非常に厳しい状況、あるいは成果を出さなければいけない状況が続くと考えます。

今回のシンポジウムが具体的な成果を生む1つのきっかけになっていただければ有り難いと、私も期待しております。是非、大いに良い議論をして頂きたいと思っております。簡単ではございますけれども、私からのご挨拶とさせていただきます。どうもありがとうございます。ありがとうございました。(拍手)

リスク学から見たシステムの保全 ～原子力発電所を念頭に

木下 富雄 (京都大学名誉教授
勲 国際高等研究所フェロー)



1. はじめに

システムの保全は色々な角度から論じることができる。例えば、システムを構成するハードの面から健全性や効率性を評価したり、ソフトの面から従業員の安全意識や技能水準を評価したりという具合である。もちろん、両者のインターフェースがもたらす問題も検討の対象となろう。だが、この小論では少し趣向を変えて、「想定」の問題を中心にシステム保全を考えてみることにしたい。言葉を換えると、これはシステムの設計思想に関わる問題と、システムの継続性に関わる問題と行うことができよう。なお、ここで対象とするシステムは、原子力発電所とそれに関わる組織を中心とする。

2. 「想定」とは何か

「想定」という言葉は、様々な分野で古くから使われている伝統的な概念であり、それは「何かある計画を策定したり、施設や設備を構築したり、機器を製造する時、その設計基準となる境界条件をどのように設定するか」という場面で用いられてきた。従って、簡単に言えば「想定」とは、「設計のための目標値」、ないしは「設計の枠組みを与えるための基準」なのである⁽¹⁾。

できるだけ正確な「想定」をするためには、システムが使われる場面、使う人間を含めて、考え得るあらゆる事象や事故・トラブルを事

前に吟味しておかねばならない。それは大きな事故だけではなく、小さな事故も含んでの話である。些細な事故が、その後の大きな事故につながる例はあまりにも多いからである。そのためには、過去の顕在化した事故だけではなく潜在的な事故、いわゆる incident report (ヒヤリハット) と呼ばれる事象の隅々まで目を配らなければならない。

そのためにはシステム的な思考能力、豊かなイメージーション能力が必要であるし、技術的にも過去のデータを外装して推測するか、シミュレーションを行うとか数多い手法がある。だが正確な「想定」は、机に向かったの思考から出てくるわけではない。現場の知識と経験、それに自分の能力を過信しない謙虚な心が必須である。また、正確な「想定」はシステムが大きい場合1人の力だけでは不可能であり、集団の智慧を必要とする。だがそこまで努力しても、あらゆる事故やトラブルを完全に想定することは不可能である。

このような話をすると、「そんな想定をすれば設計などできない」といった声必ず上がってくる。だがこれは誤解である。私が主張したいのは、「想定」のレベルでは可能な限り精緻にということなのであって、それを全て具体的な設計に反映させよと主張しているわけではない。考えられる数々の事象やトラブルと、必要なコスト、現実に要求される性能レベル、その他様々な介在変数を考慮しながら「想定」を取捨選択し、妥協していくのが設計なのである。

このように、「想定」とはあくまで未来に向かっての推定値であり、必然的に不確かさを含んだ概念である。逆に言えば、不確かさを全く含まない厳密な目標は「想定」とは言わない。「想定」の精度を高めるために、上に述べたような様々な手法を駆使するが、所詮予測は予測なのである。

従って、真つ当な設計者は、「想定」が外れる事態は常に起こりうると考えている。問題は、「何をどこまで想定したか、想定が外れた場合に備えてどこまで準備をしているか」なのである。ところが、マスコミや評論家は、「想定」とは限りなく現実には近づくべきものと誤解しているから、少しでも「想定」が外れると無能呼ばわりしたり、意図的な手抜きをしたと非難することになる。

また、真つ当な設計者は、目標が不確かなものであれば当然そこに至る道筋は1つとは限らないことを知っている。従って、その道筋を検討するために、ふつう、多数のシミュレーション(シナリオ作り)を事前に行うのが常である。例えば、今回問題となった大地震の想定値も、最終的に公表された値はM9を下回っていたが、その背後には、M9を含む10余りのシナリオが委員会で検討されていたと聞く。そしてマスコミや評論家はそのことを知らない。

3. 誤解された想定概念

周知のごとく、東日本大震災、大津波、それによって引き起こされた福島第一原子力発電所の事故を巡って、「想定」という言葉がしきりに交わされるようになった。そのこと自体は問題でないのだが、前章で述べたように、マスコミや評論家の中には十分な知識のないままこの言葉を誤解し、「災害に対して何も考えず何も準備しなかった」という非難の言葉として、「想定不足」というレッテルを貼ることが多かった。一方、行政や企業の人たち、場合によっては研究者も、事態にうまく対応できなかった責任回避や弁明として、「今回の大災害は『想定

外』だ」という言葉を用いることが多かった。いずれも全くの誤用とまでは言えないが、誤解を招きやすい表現であることは間違いない。

そこで本稿では、改めてリスク学の立場から、この「想定」という言葉をどのように考えたらよいかについて再検討を加えるとともに、今回の福島原発事故において、どのような想定ミスが関わっていたかを検討することにした。

4. 「想定外」のタイプ

一言に「想定外」といっても、その中味を分析すると様々なタイプが含まれていることに気がつく。マスコミや評論家が「想定外」を誤解する理由の1つは、この多義性にあるとあって良いだろう。以下にそれを5つのタイプに分けて説明する⁽¹⁾。ただし、現実の「想定外」は相互に独立ではなく、いくつかのタイプの複合的な事象であることが少なくない。

(1) 発生確率が極端に低いので「想定」から外したというケース

これは発生確率がゼロではないが、その値が極端に低いので目標の境界条件から外したという場合である。例えば、隕石が原子炉を直撃するというリスクがそれに当たる。

実機の設計の場合にはふつう、ここまでのリスクを想定しない。これを想定すればコストが極端に大きくなり、商品として引き合わないからである。そしてたとえ「想定」が外れたとしても、この場合には「運が悪かった」と世間から許される。

ともあれこれが一番明快な「想定外」であり、これ以上の説明は不要であろう。だが以下に述べる「想定外」は微妙な問題をはらみ、議論を呼ぶことが多い。

(2) 発生確率があることを主張するものが少数存在するが、関連組織の多数意見として低確率とみなし「想定」から外したというケース

これはある事象の発生確率が存在することを主張するものはゼロではなかったが、それは少数者であり、学会や研究組織などそれに関連する専門業界全体としては支持されなかったという場合である。今回の東日本大震災で言えば、M9の大地震、10mを超える大津波の「想定」がそれに当たる。

(3) 発生確率がある程度存在することは理解するが、他の外部要因とのトレードオフ関係にあるので「想定」から外したというケース

これは発生確率の存在は認めるが、他の外部要因、ことにコストとのトレードオフの結果、「想定」から外した、ないし基準を緩やかにしたというケースである。実機の設計はふつうこのような発想で行われ、その論理自体に異論はない。問題はそのトレードオフラインの引き方である。

つまり、品質とか安全を重視してトレードオフラインを引くのか、それともコストを重視してトレードオフラインを引くのかという違いである。この場合コストには金銭的なそれだけではなく、当然ながら時間的、社会的、手続き的コストも含まれることになる。そしてその背後には、設計者、およびその上司となるトップの価値観が大きく横たわっている。その違いによって、対象となる計画、施設、設備、機器などの品質や安全性は大きく異なることになる。

(4) 発生確率が存在することを感じつつも、過信ないし慢心から「想定」から外したというケース。また、発生確率の存在に不安を感じ、それを意識から追いやるために「想定」から外したというケース

これは発生確率が明らかに存在するのに、過信ないし慢心から、それを低く見積もったというケースである。それに加えて、発生確率の高さによってもたらされる苛酷な災害に恐怖心を抱き、それによって派生する秩序の

崩壊に不安を感じて、その考えを意識から追いやるために自己正当化して「想定」を低く見積もるというケースもここに含める。どちらにも心理学的なバイアスの問題が関わっていると見えよう。

(5) 発生確率が存在すること自体に気づかなかったというケース

最後の例は、発生確率の存在自体に気づかないまま、何も想定しなかったというケースである。その原因は設計者の勉強不足、情報不足、想像力不足などが主たるものであるが、時には組織が閉鎖的であったために自分で問題に直面せず、他者依存してしまったことによって発生する場合もある。

5. 福島原発では何が「想定外」だったか

(1) M9を超える地震や10mを超える津波

今回の地震に関して、M9を超える大地震の可能性を指摘した研究者がいなかったわけではない。だが問題は、その証拠の確かさである。彼らが指摘したのは従来考えられていた以上に多くのプレートが同時に動く可能性があること、その場合には巨大な地震エネルギーが発生する可能性が大きいという理論的な仮説である。大津波の痕跡や、地層のズレや褶曲など、それを支える若干の補助資料もあるが、いずれも因果が実証された確度の高いデータをもとに指摘したわけではない。

また、巨大な地震（869年の貞観地震）が来襲したという古文書も確かに存在するが、千年以上も前の記述がどの程度客観的に担保できるかという保証はどこにもないだろう。結果として組織の多数意見は、「このような指摘を考慮する必要はあるが、確たる証拠とは言えないので、今後の検討事項として留め置く」という程度の学問的に保守的な「想定」になりやすい。

従って、この想定能力は当該分野の学問水準にも依存するわけで、日本地震学会も残念ながら

ら、最大地震の規模を想定するだけの科学的根拠を持ち合わせていなかった。結果としてM9クラス大地震を想定することができず、2011年10月の学会大会で遺憾の意を表することになったがこれは個別学会だけの責任ではない。

ただ歴史を見ると、学界の多数意見が「真実」を語っているとは限らないことも事実である。ガリレオの有名なエピソード(宗教裁判)はその典型例であるし、ノーベル賞の世界でも、2011年にイスラエルのシェヒトマンが準結晶の発見で化学賞を受賞したが、彼の主張は、学界からは10年以上異端視され受賞が遅れたという。

だが逆に、少数意見が常に先進的な発想に基づいているかと言えば、これはまたNOといわざるを得ない。クレイジーな極論を述べる研究者は決して少なくないからである。

従って、少数意見をどう評価するかということは、なかなか厄介な問題を抱えていると言わざるを得ない。学会誌のレフェリー制度も、各種の表彰制度も、メタ分析の手法も、基本的には突出した少数意見ではなく、相対的に多数を占める評価によって支えられているからである。大袈裟に言えばこの「想定外」は、学問のあり方、真実の見極め・発見法につながる大問題に繋がっていると見えよう。

この点に関して内閣府の有識者検討会は、南海トラフで発生する巨大地震の震源域想定を、2011年12月になって従来の2倍に引き上げた。それによって、想定される地震もM9に増大した。そのこと自体に異論はないが、私が気になるのはそれに至るロジックである。

彼らが「想定」を引き上げたのは、巨大地震に関する新しい画期的な証拠が発見されたからではない。最新の断層モデルなど一部に新しい知見も取り入れられているが、大部分はこれまでに集積された知見の見直しに過ぎないのである。ということは、同じデータからでも、立場によって色々な「想定」が可能だということを意味する。

東日本大震災での失敗への反省が、今回の

見直しの契機になったというのが事実であるとしても、これら一連の騒ぎを見ると複雑なリスクの「想定」は、「科学的エビデンスに基づいて厳密に」行う立場と、「データが不確実でも安全を優先的に考える」という価値観に基づく立場とのせめぎあいになるかも知れないわけで、その是非を巡って考え込まれることになりそうだ。いずれにしてもこの「想定外」は、前章の(2)のタイプと言えよう。

(2) 安全設計指針の不備

今回の原発事故の原因の1つは全電源喪失による炉心熔融であるが、その遠因として、安全設計指針の不備が関係している印象を受ける。というのは、行政が定めた「安全設計指針」の第27条「電源喪失に対する設計上の考慮」として、「原子炉施設は、短時間の全交流電源喪失に対して、原子炉を安全に停止し、かつ、停止後の冷却を確保できる設計であること」とされ、その解説部分に「長期間にわたる全交流動力電源喪失は、送電線の復旧又は非常用交流電源設備の修復が期待できるので考慮する必要はない」と書かれているからである。なおここで短時間というのは、慣行上、8時間とされている。つまり8時間以上の全交流電源喪失は、法規上、あり得ないと想定されていたのである。今回の事故で電力会社がバッシングを受けがちであったが、それ以上に日本という「国家」自体が、リスクに対して過信していたと言えよう。

この条文の説明を受けたメンバーの述懐によると、一瞬、これで大丈夫かなという疑念を抱いたらしい。しかしこれまで日本では長期に渡る全交流電源の喪失例がなかったし、電気が専門のメンバーから、8時間もあれば十分という自信満々の説明を受ければ誰も反論できなかったという。結果としてこれが過信ないし慢心だったわけであるが、お互いの専門を尊重する風土の中で、自分の小さな疑念を口にしがたいという状況は、社会心理学的に見て容易に想像できる。

このような慢心は電気の専門家に特有な傾向ではなく、他の工学分野の者にもしばしば見られる。例えば、1994年にサンフランシスコ大地震が発生し、高速道路が崩壊したことがあったが、その映像を見た土木専門家は、「アメリカの土木技術レベルは低い。日本ではこのような事故は絶対に起こらない」とせせら笑っていた。ところが、翌年に発生した阪神淡路大震災で日本の高速道路が同じように倒壊し、その後、彼らは口が重くなった。これらの例は、発生確率が存在することをうすうす感じながら、過信ないし慢心から「想定」から外したという意味で、前章のタイプ（4）に近いと言えるか。自信と慢心は異なるのである。

（3）仕様変更の膨大なコストを怖れて設計変更をせず

今回の原発事故において、リスクとコストの問題が事前にどの程度考慮されたかということであるが、その真相は、外部にいるわれわれには分からない。ただ前項の（2）で述べたような事態と重なった場合、地震学会や土木学会などの公的な専門機関が示した以上の安全対策（例えば、M9の地震や10mを超える大津波への対策）を企業が講じることは少ないだろう。なぜなら、講じないことが違法行為でない以上、コストを重んじる企業からすれば、過大な投資は避けたいという心理が働くからである。いわゆる「モラルハザード」の一種と言えるか。

事実、関係者の話によると、それに類似する事態が過去にあったという。それは、福島原発の契約条件と地元対策の葛藤である。福島原発の原型はGE社のBWR/MarkIタイプであるが、その設置に当たって東京電力は、GE社との間でターンキー・パッケージという契約を結んだ。これは名のごとく、出来合いの設計と施工をパッケージとして受け取るという低コストで効率の良い手法である。ところがこのパッケージを福島の現地に持ってくると、地形の関係で津波に対して脆弱であ

ることが判明した。建屋も水密になっていなかったのである。

それを見た東電の技術者の中には、不安の声を上げる者が何人かいたという。津波のリスクに耐えるために、建設場所を移動させたらという意見もあったらしい。だがそれをする、これまで長い時間をかけやっとの思いでこぎ着けた地元との了解事項がご破算になるし、行政の認可事項も改めてやり直しという、膨大なコストが別途発生することになる。結局両者のリスクとコストを天秤にかけ、パッケージをそのまま受け入れることになった。前章のタイプで言えば、（3）に属する「想定外」と言えるか。ただ問題は、このトレードオフの結果残存することになった津波リスクを、なぜ水密仕様にするなど、追加工事によって軽減しなかったのかということである。

これに関して気になることがある。今回の津波で東京電力だけでなく東北電力も被害を被った。その一例として、海岸沿いに走っていた送電線が津波で倒れたという事実がある。それを復旧する際、次の津波を避けるために海岸沿いのラインを改めて、海岸に直角に入るようにラインを再構築しようという案も検討されたと聞く。だがそれに必要な膨大なコストを考えて、結局ラインは元の位置に再建された。そこまでは仕方なかったとして、問題は、そこで残存した津波リスクを、今後いかなる手法によって軽減するかということである。

最後にもう1つ気になるのは、原発サイトにおける炉数の過密である。外国では1つのサイトに炉は2つか3つまでの所が多いが、日本では福島原発のように5つもあるところがある。その背後にはもともとの国土の狭さと、活断層を避けねばならないという立地条件の制約があるのだろう。だが今回の事故でも明らかになったように、炉の数が多いと事故が発生した場合、互いに影響し合って処理が非常に困難となる。

この問題はリスク学的に言えば集中と分散の話でもある訳で、1カ所に集中して建設すれ

ば効率は良くなるが、その分リスクは高まることになる。リスク分散の発想からすれば当然1カ所への集中的建設は避けるべきだが、そこで登場するのがやはりコストの問題である。これは狭い日本で今後とも続く悩みであろう。

ともあれこのような事例を見ると、リスクとコストのトレードオフ関係は、単純な線形ではなく、ある一定以上のリスク(許容リスク)を超える場合には、今後、リスク側に重みを与えるような非線形トレードオフを適用する必要があるかも知れないと思う。

(4) 「想定」の背後にある文化の違いに気づかず

「想定」に関して工学を専門とする人たちは、「想定」は技術の世界の問題であり、技術は通文化的なものと考えがちである。しかしそれは大きな誤解で、技術の背後には文化が存在する。それはことに設計思想の形で表面化することが多い。

例えば、今回の原発事故のもとになった全電源喪失であるが、一番想定外だったのは、格納容器の地下室に設置された、非常用ディーゼル発電機を始めとする電気機器が津波で水没したことである。そして日本の原子力関係者に聞くと、非常用ディーゼルが地下室に設置されているのは、「普遍的な」安全確保のためと思って全く不審の念は持たなかったらしい。だがこの炉を設計したGE社の技術者は、アメリカの自然災害の中でも最も頻度の高い竜巻対策として、大切な非常用機器を地下室に安置したという。

もしその文化事情を日本の技術者が知っていたら、日本の自然災害の中で最も危険な地震や津波対策という観点から、非常用ディーゼルの設置場所を考慮したであろう。設計思想の背後に文化が潜んでいるといったのはこのことである。これは前章のタイプ(5)に当たるであろうか。

似たような話は実は原子力業界以外にも散見される。例えば、高速鉄道の車両設計の際、

日本ではATCのような運行ソフトに安全性の主眼を置く。つまり日本では衝突を起こさないことを前提とした設計思想がある。それに対してアメリカでは、事故は起こるものとして、先頭車両が衝突に耐えうるだけの頑健さを重視する。その背後には、アメリカの高速鉄道の列車牽引方法とか、レールが専用線ではなく、在来線との併用という文化の差がある。

また、航空機の操縦桿の設計思想に関しても、コンピュータと人間が対立した時、いずれに優位性を持たせるかという問題に関して、アメリカでは人間に、ヨーロッパではコンピュータに優位性を与える。その背後には、アメリカのアポロ13号の奇跡の生還の教訓が影響しているという。

(5) 苛酷な事故を積極的に想定せず

福島原発の1～5号炉は、GE社が40年前に設計したBWR/Mark1タイプの炉である。この炉のデザインベースの問題点として、冷却機能が喪失すると格納容器に想定以上の負荷がかかりすぎて破裂する可能性のあることが、後になってから設計者によって指摘された。このことは米議会の公聴会においても報告されている。GE社はこれを受けてMark1の全オーナーに対応を求め、東京電力も炉にベントなどの改良を加えた。ただ基本設計が外国製だったから、日本の企業は当事者意識に欠けていた可能性を否定できない。

事実、アメリカではその対策として、炉の大爆発と放射線の外部放出とのリスク・トレードオフと割り切って圧力開放弁(ベント)を導入したのに、日本では「止める・冷やす・閉じこめる」の安全規範に自己呪縛され、適切なタイミングでベントを開くことになかなか踏み切れなかった。日本ではベントは「開かずの扉」として奉られたと言えようか。

それだけではなく、アメリカでは全電源喪失に備えてベントをこじ開ける道具まで用意したのに対し、日本では何もしなかった。また、安全性を過信したのか、ベントの使用訓練も

なされなかった。さらにアメリカでは、非常用復水器の弁が閉まらないように設定変更をしたが、日本では変更されないままで、その誤解から操作に遅れが出たといわれている。ともあれ、これらの想定ミスは、前章のタイプ（４）や（５）に該当するように見える。

（６）閉じた系のもたらす負の効果

原子力関係者がその高度の専門性のために、内部的に結束し、外部への発信もしないし外部からの意見も聞かないという閉鎖性がしばしば指摘されてきた。いわゆる「原子力ムラ」である。私はこの揶揄的な言葉を好まないが、電力会社の知人からも、「同じ会社でありながら原子力部門は別会社の感じ」という声をよく聞くから、ある程度的を射ているのかも知れない。その背後には法律も絡んでいる。

この閉じた系で困るのは、そこで発生する想定ミスの原因が、メンバーの迂闊さや不勉強といった個人的能力の欠如に基づくのではなく、閉じた系そのものの特質によって発生しやすいことである。

その典型例は、group think（集団脳炎とか集団的浅慮と訳される）と言われるものである。皮肉なことに、なまじ集団の構成員の能力が高く、集団の一体感が強く、集団が閉鎖的で外部の情報が得られ難く、強力なリーダーが指導性を発揮する場合に発生しやすいことが知られている⁽²⁾。閉鎖性が強いといわれている原子力業界に、果たしてこのような特質はなかっただろうか。かつて閉鎖性の高かった日本軍の参謀本部が独善に陥り、外部からの情報を無視した結果、誤った「想定」の下に第二次世界大戦に突入した悲劇を思い出す⁽³⁾⁽⁴⁾。閉じた系の特質は、エントロピーの挙動として物理の世界で良く問題となるが、社会の分野でも同じことが発生するのである。これは前章のタイプ（４）や（５）に属するものであろうか。

ただかねて不思議に思うのは、このようなムラの特質が、いわゆる「安全神話」をばらまく原因となったという、マスコミや評論家

の指摘である。たしかに1990年代の半ば頃までは、政府も電力会社もその方向での広報をしきりにしていた。しかし関西電力は、蒸気発生器の細管破断によって緊急炉心冷却装置（ECCS）が作動する事故を受けて、1997年から「事故はまったく起こらない」というPR誌の表現を撤回した。また政府の原子力白書も、2000年度版から安全神話と決別することを宣言した。そのことは当時の新聞にも大きく報道されている。つまり公には、企業も政府も、かつての安全神話から撤退していたのである⁽⁵⁾。

ところが今回の事故を見ると、安全神話がそのまま継続していたようにも見えるわけで、そのギャップはどこから来たのかという疑問がある。真相は良く分からないが、おそらく企業や行政が神話としてではなく、彼らなりのデータに基づいて設定した安全基準が、世間のそれと乖離していた所為ではなからうか。神話という言葉は消えたが、慢心という内実は残っていたのかも知れない。

（７）福島事故は「想定外の複合汚染」

以上に述べたことから分かるように、今回の福島原発事故は、単一の想定ミスによって発生したものではない。それはいくつもの想定ミスが重なって発生したものである。かつて公害が日本をおおったころ「複合汚染」という言葉が流行ったが、その言葉をもじって言えば、今回の事故は「複合想定ミス」、ないし「想定外の複合汚染」と言えるだろう。

そしてもっとも印象的なのは、個々の想定ミスを見る限りいずれも特殊なものではなく、どこにでも見られる平凡なミスだということである。今回の事故に関して、マスコミや評論家は行政や企業を激しく攻撃したが、実はそれらのミスは特定の行政や企業に固有のものではないのである。言葉を換えれば私たちも、もしその立場にあれば、同じ想定ミスをしていた可能性がすこぶる高いのである。逆に言えば、その平凡さの重なりこそが今回の

事故で一番重要であり、かつもっとも恐ろしいところではないか。

6. 「想定外」をどうして減らすか

3.11以降、「想定外」という言葉を、科学技術の分野から無くしたいと宣言する研究者がいた。無責任な「想定」に愛想を尽かし、それを退治しようという意気込みは評価するが、最初に述べたように、「想定」というものが不確実性のある状況下での意思決定である限り、それを完全になくすのは原理的に不可能である。

ただ「想定」の精度をできるだけ高めるとか、「想定外」を可能な限り減らすことはできるわけだから、問題はその手法をどう構築するかということであろう。以下にその可能性について述べる。

(1) リスク概念の導入

これまで長い間工学の分野では、「想定論」を経験値に求めてきた。例えば、機械工学の分野では、機械の健全性や保全の指針として、1960年代は「事後保全」という概念を使用してきた。それが1970年代に入ると「予防保全」という言葉に変わり、1980年代に「予知保全」という言葉に変わった。「リスクベース保全」という概念が導入されたのは、やっと2000年代になってからだという。

機械学会の方にリスク概念の導入が遅れた原因を問うと、「この学会が大世帯で組織が肥大化し、新しい知見を取り入れて舵を切るのに時間がかかるからだ」と言われる。そして「リスクベース保全」という新しい概念が導入されても、今なお「定期点検」というリスクベースでない保全システムが残っているという。

私はこれまでの古い「想定論」を全面的に否定するつもりはない。古いロジックにもそれなりの根拠はあるし、新しいシステムを構築するとしても、リスク評価の前提となる観測データがまだ不十分な分野がある

からである。しかし将来に向けて考えれば、リスクという発想は必要不可欠と考える。この概念の導入によって予測の精度も高まり、コストの削減にも効果があるからである。

だが気になるのは、リスクという考え方に對する日本と欧米との大きな差である。すなわち欧米では、リスク概念は語源的に見ても、その背景となる時代精神を見ても、能動的、積極的、自己選択といった価値観を含んでいる。言葉を変えれば、冒険とかチャレンジングという精神を体現している。

それに対して日本では受動的、消極的、他者からの押しつけといった価値としてリスクを捉えている⁽⁶⁾。一言で言えば日本人にとってのリスクは、「自分は良い子で温和しくしているのに、外からやってきて迷惑を掛ける困りもの」という感覚であろうか。日本人のリスク嫌いの根源はそこにある。そこからくる諦観的な感情を、かつてライシャワーは「タイフーンメンタリティ」と呼んだ⁽⁷⁾。

(2) 安全・安心思想からの脱却

「安全・安心」という言葉がここ10年近く流行気味である。この言葉が流行語になった経緯は省略するが⁽⁸⁾、1998年に行われた総合科学技術会議の提言が1つの契機になったことは否めない。ではどこが問題なのか。

それは第一に、「安全・安心」が2値の価値を表出するだけで、確率的な発想を持たないことである。「安全」と「危険」、「安心」と「不安」とどちらが良いかと二律背反的に問われたら、答えは決まっているだろう。だが「白か黒か」「善か悪か」を問うだけのロジックはサイエンスではない。

第二に、「安全」は「危険」と左右相称関係にない。「危険」は対象となるシステムの中で1つでも危険な箇所があれば「危険」とレッテルを貼れるが、「安全」は、システムを構成する全ての要素が安全でないと「安全」と宣言できないからである。いわゆる「反対派」の声が、「賛成派」に比べて景気よく聞こえる

のはそのためだと言えよう。

この問題は肯定と否定の論理構造に通じるところがあって、発達心理学のデータによれば否定は幼児でも可能だが、肯定は年齢が進まないと困難であるという。幼い子供が、「イヤ」と駄々をこねて親を困らす風景を思い出して欲しい。「安全」と「危険」は非対称なのである。

その上第三に、「安全」は、evidence basedに定義できないという大きな欠点がある。「安全な自動車」とか「安全な牛肉」という表現は、ただリスクの低い自動車や牛肉を言い換えているだけなのであって、「安全」という言葉の中に、リスクを超えた特別な付加価値が含まれているわけではない。例えば、安全な牛肉とは、狂牛病に犯されていないとか病原菌に汚染されて無いことを表明しているだけであって、それを超えた価値、すなわち栄養価が高いとか、美味であることを意味しているわけではない。また、「安心」という言葉は極めて日本的な情緒語で、外国語にはこれに対応する適切な単語がない。

ところが研究者の中にはこの言葉を誤解して、「安全」は客観的に担保されているevidence basedな概念であると論じる人がいる。これは大きな間違いである。「安全」というのはローランスが論じるごとく⁽⁹⁾、専門家がevidence basedで測定したリスクを、市民社会が受容するという、「二重の関所」を潜ることによって、始めて成立する概念なのである。そこには市民が受容するという、主観的な価値判断が含まれていることを理解して欲しい。リスク学の言葉で言えば、「許容リスク」という概念がそれに近いと言えようか。

このように流行の「安全・安心」は、アカデミックな概念ではなく、耳に心地良いプロパガンダ用語なのである。それを日常生活に用いることはまったく構わないが、学問の世界で用いるには相応しくない。そしてそのことが、リスクに囲まれた現実世界の理解を妨げている大きな原因の1つに見える。

(3) 閉じた系からの脱出

前章(6)で指摘したように、原子力業界は閉じた系の中に安住してきたという印象を受ける。原子力は高度の専門家集団であるから排他的な構造になりやすいことは理解するが、いわゆる専門家は、なまじ自分の専門に過剰な自信を持っているが故に、自分の守備範囲内で想定してしまう悪癖がある。結果として、深いが狭い「想定」になりやすい。単純な装置や機器の設計はそれで十分かも知れないが、大きなシステムの設計になると、それが仇となって肝心なものを見落すことにつながる。

それにgroup think研究が示すように、通常はプラスに働く組織要因(頭がよいこと、尊敬し合っていること、結束力が強いこと、強力なリーダーシップがあることなど)が、閉じた系の中では逆機能することが多いという事実に注目すべきではないか。今回の災害を機会に原子力業界がより「開かれた」組織になることを願う。

この問題を別の角度から見れば、原子力がこれだけ複雑なシステムである以上、そこには原子力専門家の知識体系だけでなく、ヒューマンファクター、人間の認識システム、グループダイナミックス、組織理論、背景となる文化論など、人文・社会系の学問を含めた学際的な知見が必要であることを意味するのではないか。つまり閉じた系の中だけでは解決できない多くの学際的問題を、原子力業界はすでに抱えていたということである。

(4) 過去の事例の再点検

正確な「想定」をするためには、第2章でも述べた通り、過去の事故や災害例を子細に検討して、その失敗に学ぶ姿勢が必須である。その検討はいくらしてもし過ぎることはない。しかもその検討は人を変えて、また、時間を空けて何度も行うことが望ましい。人や時間が異なると、検討の視点が変わって新しい発見があるからである。さらにその評価の視点はハード面、ソフト面、両者のインターフェー

ス面だけでなく、デザインベースにおける設計思想や運転時に発見された問題点、それに自社の事故だけではなく他社の事故も含めて、文字通り関連システム全体にわたる目配りが必要である。

この点に関して少し残念に思うのは、日本の電力会社が1999年にフランスのジロンド川の洪水によって引き起こされたル・ブライエ原発事故をどれほど詳細に分析していたかということである。

この事例を原子力関係者にたずねると、しばしばその危険性を過小視する傾向が見られる。多少の危険性はあったが、無事に乗り切れたのではないかという反論である。私は技術に関して素人だから正確なことは分からないが、ル・ブライエ原発が福島原発と同じ状態にならなかったのは幸運であったとしか思えない。幸運さとは、洪水と津波との違いである。ル・ブライエは洪水であったから水位の上昇は比較的緩やかで、建屋の周囲に土嚢を積むなど対策のための時間が稼げた。それに対して福島は津波であったから時間が稼げなかった。電気が水に弱いというのは小学生でも分かる常識だし、日本は津波、洪水、山津波、溢水などの水関係の自然災害が多いことは誰でも知っているのに、なぜこの教訓が福島で生かされなかったのだろうと思う。

(5) 「想定」のレベルをどこに設定するか

「想定」に際して常に問題となるのは、「想定」の厳密さのレベルをどこに設定するかということであろう。その場合、原子炉のような人工物に関しては、十分とまでは言えないにしても、比較的厳密な「想定」が可能である。これらは想定する対象を直接観測することが可能だし、それを支える測定技術や予測技術もかなり発達しているからである。

しかしながら地震のように、原因が地球内部にあって直接観測することが困難な自然現象に対しては、精度の高い「想定」をすることは原理的に難しい。事実、これまでに

発表された首都圏におけるM7級の直下型地震の発生確率も、4年以内に70%（東京大学）、5年以内に28%（京都大学）、30年以内に70%（政府の地震調査委員会）と、研究主体によって大きな分散がある。その差はモデルの違いや投入データの違いによるものであるが、これではどの「想定」を頼りに対応すべきか、行政も市民も困惑するばかりである。最小限の義務として上記の組織は、合議して地震発生確率のメタ分析を行うべきではなかったか。

このようにリスクの「想定」に際してその根拠とする条件の不確か性が高い場合には、「起こりうる最大のリスクを想定する」のがリスク学における基本的な考え方である。今回の原発事故の際、日本政府から正確な情報入手できなかったアメリカ政府が、4号炉プールの使用済み核燃料の溶融まで想定して、日本に滞在中の自国民を待避させる基準として原子炉からの距離80kmを指示したのは、このような思想に基づいている。

また、過去に事故が発生していなくても、リスク学的に見て確率が高いと予測された時は、たとえ確実なデータが無くても、それに見合った想定をするのもリスク学の思想である。過去に事例がないということは、将来も事例は生じないことを意味するものではないからである。

また、これと関係して、最近イタリアで問題となったように、行政や研究者が想定して安全宣言をしたのにそれが外れて被害が発生した場合、裁判になって担当者が有罪になる可能性も出てきた。その裁判リスクを防ぐためには一番厳しい「想定」を採用すればよいわけだが、これは必要以上に市民に不安を与えることになるし、それごとの地震対策に必要な膨大なコストを考えると、そう簡単には決定できない。そのコストの中には経済的コストだけではなく、政治的コスト、時間的コスト、社会的コスト、心理的コストなど、多面的なコストが含まれるからである。このよ

うな、不確実性が極度に高い場面での最適意思決定をどうすればよいか、法的責任も含めて今後大きな問題となろう。

(6) 苛酷事故のシミュレーション

過去の事例点検とともに重要なのは未来予測である。ことに過酷事故の未来予測は、例えば事故発生が確率的に低くても、コンピュータ・シミュレーションや思考シミュレーションを実施しておくことが最小限の義務ではないか。そしてこのような想定がなされていれば、万万が一そのような苛酷事故が起こっても、ある程度のシナリオと心の準備はなされているわけだから、パニックに陥ることはないだろう。しかも「想定」に必要なコストは極めて低いのである。

その意味では、外務省が1984年に行った、「爆撃による原発攻撃の被害予測シナリオ」(全電源喪失と放射性物質の大量流出による急性被曝死者18万人)⁽¹⁰⁾、1997年に通商産業省が実施した「原発テロの被害予測シナリオ」(核燃料物質の持ち出し、放射性物質の外部放出)⁽¹¹⁾などは画期的な試みと言うべきであろう。このようなシミュレーションは、いくらしてもし過ぎということはない。

ところが、このような「想定」に対する対応は、アメリカと日本では大きく異なった。アメリカでは、9.11後、原子力規制委員会(NRC)が、電力会社に対して、航空機の自爆テロによる全電源喪失や使用済み核燃料プールの被害を想定して対策を求め(いわゆるB5b文書)、日本の原子力安全・保安院に対しても通知をした。ところが、保安院はその重要性に気づかず一部の者にしか情報を降ろさなかった。この情報が保安院を経由して電力会社に届いていたら、今回の事故は防げたとまで言うつもりはないが、心構えぐらいはできていたかも知れないと思うと非常に残念である。

このように同じ情報がアメリカでは想定内として扱われるのに、日本では「想定外」というか、無視されてしまうところが情けない。

日本という国は、テロを含めた過酷事故に対する緊迫度があまりにも乏しいと言わざるを得ないし、それ以前に、情報の価値を判断できる人がいないことに危機感を覚える。単なる情報技術者ではなく、情報を的確に分析して価値判断することのできる人材の養成が急務ではないか。

(7) 意地悪な想定者

想定を行う人は、当然ながら現場を熟知したプロ中のプロでなければならない。ことに設計対象が複雑なシステムを形成している時はそれが必須の条件である。研究室に閉じこもって机上の空論に終始する研究者には、手に余る仕事と言えよう。そのためには、システム全体を把握して、考え得る限りの「想定」を盛り込んだシナリオ作りができる「意地悪爺さん」が必要である。

これに関して是非参考にして欲しいのは、アメリカ航空宇宙局(NASA)の想定プログラムであろう。宇宙飛行計画は、現在人類が保持するあらゆる技術の中でも最高度に先端的で、かつ複雑なシステムであることは疑問の余地がなく、その意味で極めてリスクの高い環境と言える。余談であるが、宇宙飛行士はフライトの前に遺書を書く。このようにリスクといふか、チャレンジングな職業はほかにないだろう。そしてこの大きなリスクを低減するために、NASAはあらゆる努力を試みている。

すなわちNASAでは、「想定」を専門とするユニークなスタッフを置いており、彼らが「意地悪爺さん」の役割を演じて極めて苛酷なシナリオを提示する。宇宙飛行士はそれに基づいたトレーニングを行い、さらに「想定」が外れた時の緊急対応が厳しく評価される。それがクリアされないと飛行士はミッションに参加できない。これは私の知る限り世界最高の想定システムである。これまで日本に欠けていたこのような「想定システム」を、今回の失敗を機に、原子力の世界でも早急に構築する必要があるのではないかと思う。

(8) 複雑系による評価システムの導入

これまで「想定」や評価の道具として、様々な技法が用いられてきた。上述したシミュレーションだけでなく、フォルトツリー解析、ストレステスト、確率論的安全評価法 (PSA)、などである。これらの技法は従来それなりの効果を上げてきたことは事実であるが、今回の大地震や津波に起因する原発事故は想定できなかった。その理由の1つは、これらの技法の前提となっている線形的な事故発展のシーケンスが、その通り進行しなかったからである。放射線封じ込めの守り言葉のように言われていた「五重の壁」が簡単に破れたことはその象徴的な現れだろう。

すなわち従来のモデルの大多数は、リスクにつながる各要素が、時間的・空間的に線形結合していることを前提としていた⁽¹²⁾。ところが今回の事故はそれほど単純なものではなく、非線形的に発展したように見える。いわゆる複雑系の事故である。もちろんこれまでも複雑系の想定手法がなかったわけではないが、今回のように千年に1回というような事態までは想定していなかった。

このような「確率が極めて低いが、ひとたび顕在化すると大惨事になる」というリスクは、今後ことさら重要視されるべきだと考える。というのは、学問的にも現実的にもこの現象は大きな問題を抱えているからである⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

例えば、学問的には、千年に1回程度というM9の地震や、過去に1回だけ前例があるイスラエルが行ったイラクの原発の爆撃(1981年)は、 $n = 1$ 分散ゼロという意味で通常確率分布に乗らない、従って、伝統的なリスク分析には馴染まないのではという疑問につながっている。かつてリスク学が世に出なかった時代にも同様の問題が提起され⁽¹⁵⁾、確率が知られている「リスク」と、それが不明確な「不確定性」は区別されるべきであると議論されたことを思い出す。ではそれに対応するのはいかなる手法か。あいまい性を解析する数理的手法は1次元的な確率論だけではないから⁽¹⁶⁾、分

析手法を再検討する必要があるだろう。

その手法の候補の1つとして、1950年代から知られ始めたベキ分布モデルがある。横軸に災害の大きさを取り、縦軸に発生頻度を取ると、両者の関係は下に凸のベキ分布になる可能性が高いというものである。その分布特性が示すとおり、発生頻度が減少するにつれて災害の大きさは急激に大きくなる。グラフでは、ロングテールと呼ばれる部分であり、これが上述の極低確率・極高被害として表出する⁽¹⁷⁾。

このモデルは、地震学会や原子力学会で広く受け入れられている伝統的な理論ではないが、金融経済の分野で用いられるレバレッジ理論を組み入れた、非線形の複雑系モデルとほぼ同等のものと言えよう。そのレバレッジの駆動因として、原子炉の場合は、電力系(外部交流電源停止→非常用電源停止→全電源喪失に至る一連の進行過程)、崩壊熱系(冷却水の蒸発→ペレットの破損→水素爆発→炉心溶融に至る一連の進行過程)、組織規範系(安全に対する過信→原子炉安全確保の3原則による自己呪縛→命令系統の混乱→手順の失敗に至る一連の進行過程)などといった、一見独立に見える、複数の時間系・システム系の中に隠されたリスクが、相互作用的に突如進展するクリフエッジ効果が想定されている⁽¹⁾⁽¹⁸⁾。

非線形の制御理論そのものは昔から存在するわけで、このベキ分布モデルが複雑系の唯一最高のものという訳ではないが、今後、超長期的にふたたび発生するかも知れない原子力災害の予測に、新しい思想と分析手法の開発が喫緊の課題になったように見える。

7. 想定されたものをどう保全するか

ある「想定」の下にシステムが構築され、運用が開始されたとする。だが「想定」はこれで終わった訳ではなく、そのシステムが想定通り動いているかを最後まで確認し、その結果を次の「想定」に生かさなければならない。そのためには常にシステムに目配りし、メン

メンテナンスを継続する必要がある。この部分はふつう保全とか保安という言葉で呼ばれ、1つの学問分野を形成している。

(1) 技術と記憶の伝承

想定されたシステムは時間の経過とともに劣化する。それは炉やパイプといったハード面の劣化だけではなく、記憶や技能や意識というソフト面の劣化も含んでの話である。

まずハード面であるが、40年前に建造された福島原発の炉は、例えて言えば40年前のフォード車を運転しているようなものである。材料そのものは頑丈で痛みも少なく、運転に特に差し障りはない。しかしデザインベースの話になると、パネルのレイアウトが悪いとか、ハンドルの動きが悪いとか、安全装置が貧弱であるといった問題が出てくる。原子炉も同じことで、炉の傷みは少なくともデザインベースの欠点はいくつもあり、それは今さら直しようがない。従って、その運転は、フォード車の場合と同じく、欠点を知りつつ慎重にということになる。

だが私にとってもっと心配なのはソフト面の劣化である。40年も経つと、炉の設計者も当時の施工責任者も引退している。設計思想、炉の細部にわたる技術的な知の集積、運営のノウハウなどは、確実に引き継がれていたのだろうか。大切な設計図は確実に保管されているのだろうか。真偽は定かでないが灰聞するところによると、事故当時サイトでは、電源が落ちてパソコン内の設計図が引き出されなかったとも聞く。それに備えて予備の設計図はどのような形で保管されていたのか。事故が発生した時、引退した設計者や、当時の工事責任者はすぐ動員できる体制はとられていたのか。心配は尽きない。

心配はそれだけではない。40年も大きな事故がないと次第に当初の緊張感が失われ、炉の欠陥を補うために後から追加されたベントも「開かずの扉」となり、十分な訓練がなされない体制になってしまった。それに加え、

原子力安全の基本として「止める・冷やす・閉じこめる」が強調され、閉じこめるに反するベント操作はタブー的な感覚にあった。私たちの頭の中から、全電源喪失、圧力増加、ベントといった手順が薄れてしまっていたのかも知れないと思う。

古くなった炉の健全性は、放射線による炉の劣化とか周辺機器の損傷の具合によって評価されることが多いが、実はこのような記憶の劣化を含めた「システム全体の劣化」によっても引き起こされることを銘記すべきであろう。

(2) ハードとソフトの微妙な関係

上に述べたように、システムはハードが劣化すると同時にソフトも劣化することが多い。だが、現実には事は単純ではないのである。というのは、ハードが古くてその面からの安全性が十分でない場合、技術員の安全意識、すなわちソフト面が高まって、トータルとしてのシステムは健全性が保たれるからである。逆に新しい炉では、自動的に安全を担保する装置が付いているので、技術員は気を緩めて安全意識が低まることが多いという。そこで安全意識の高い古い炉勤務の技術者を新しい炉に転勤させると、期待に反して安全意識が低まるし、逆に、安全意識の低い新しい炉勤務の技術者を古い炉に転勤させると、これまた予想に反して安全意識が高くなることが知られている⁽¹⁹⁾。

どうやら人間は無意識のうちに安全の「相場感覚」を身につけており、ハードの安全性が低まるとソフトの安全性を高めて「相場」を維持する、また、ハードの安全性が高まるとソフトの安全性を低めて「相場」を維持しているらしい。つまりハードとソフトの安全性を天秤に掛けながら、トータルとして安全相場を維持していることになろう。これをリスク学では「リスク・ホメオスタシス」という。この現象が原発サイトでも見られるのである。

理想的には、ハード面とソフト面の安全性がともに高まることが望ましいのだが、それ

を実現するのがなかなか難しい。通常の訓話によって安全意識を高めることはまず困難であり、それを突破するには集団規範の改変法、ないし集団意思決定法など、新しい社会心理学的技術が必要である。

(3) 実技訓練の必要性

世の中は面白いもので、想定しないことを批難する人もいるが、逆に、想定することを批難する人もいる。例えば、前章(6)で述べたように、外務省や通産省は原発攻撃シミュレーションを行ったが、両省とも市民からの反発を恐れ、貴重な資料を積極的に公開しなかった。

彼らが積極的に公開することをためらったのは、過去に同様のケースが何度もあったからである。緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム(SPEEDI)が開発された時も、原発サイトでの事故発生を想定した避難訓練を行政が試みようとした時も、さらに古くは自衛隊が「三矢計画」を立案した時も、一部の市民から激しい反対運動が起こったのである。その理由を要約すれば、「このような想定訓練をすることは、その存在を認めたことになる」ということであろうか。

この反対理由は形式論理から見れば分からぬ訳ではないが、リスク論からすれば、「確実に存在するリスクを無視しろ」ということになるわけで、単純に認めるわけにはいかない。この論理が通じるなら、「リスクを抱える自動車の存在を認めることになるので、自動車保険は掛けるべきではない」という理屈になる。

アメリカでは全原発に3年に一度のテロ模擬演習を義務づけており、単なるシミュレーションを超えた実戦形式の訓練を実施している。また、その手法も航空機の突入、テロ部隊の攻撃、水辺からの侵入など、様々な事態を想定したものになっている。攻撃対象も原子炉だけでなく、警備が手薄な使用済み核燃料プールも含まれている。日本の行政も電力会社も、これまでのように世論の反撥を恐れ

て資料を隠したり、「想定外」と逃げるのではなく、国家と国民を守るために、強い意志と大局観に基づく対応をする必要に迫られているのではないか。

なおここで付け加えておきたいのは、訓練の手順書(マニュアル)問題である。多くの組織は非常時に備えて手順書を作成しており、それに従って訓練を実施している。そしてそのことに問題はない。だが重要なのは、マニュアルは大切だけれども、所詮マニュアルに過ぎないということである。現実に緊急事態が発生した時、事態はマニュアル通り進行するとは限らない。

阪神淡路大震災の時、ある企業のマニュアルのフロントページに「緊急時には社長の指示に従って行動せよ」と書いてあったために、忠実な部下が連絡の取れない社長を求めて無為な時間を過ごしたという実話がある⁽²⁰⁾。今回の福島原発事故でも、全電源が停止した非常時にも拘わらず、技術員が非常用復水器をマニュアルを手順どおり操作しようとして、対応が遅れたことが報告されている。今後の訓練には、標準的な処置をマニュアルで学んだ後、「想定外」の事態に備えた脱マニュアル訓練を実施すべきだと思う。

(4) 点検機能の強化

「日本の原子炉の設計は一流だが、施工は三流、そして検査官も三流」といった指摘がかねてよりなされていた⁽²¹⁾。私はこの面に関して全く経験がないので誤解があるかも知れないが、いわゆる反原発の立場の方ではなく、しかも現場の細部にまで通暁しておられる平井氏の文には一定の説得力がある。そしてこの話は、熟練した技術の伝承がなされていないという、私が直接耳にする原発サイトの責任者の嘆きとも重なってくる。

平井氏の話によると、現場では原子炉の仕事に従事する作業員から「職人」が少なくなり、素人に近い作業員が増えたこと、彼らを教育しようとしても被曝の問題があつて後継者養

成が困難であること、経済産業省から派遣されて監督するはずの運転管理専門官も素人が多く、的確な指摘のできる人が少ないことなどが問題だという。そしてこの話は必ずしも誇張ではなく、私が現場の技術者の方たちと議論すると同じ話がしばしば登場する。

この問題と関連するのが監査の手法である。ふつう安全の監査の第一段階は、行政があらかじめ求める点検項目に対し、企業側が回答する大量の書類に基づいて行われることが少なくない。その項目はメインとなる炉やその周辺装置だけではなく、例えば、非常用の発電機はあるか、発電機を搭載した車が準備されているか、定時点検は実施されているか、連絡用の電話が不通になった時に備えて代替する交信システムは準備されているか、消防を担当する職員は何人用意されているか、非常時の訓練は実施されているか、といった類である。そしてその点検項目は膨大な数である。

この書類審査はそれなりに意味を持つし、その全てが悪いわけではないが、問題は、書類上の数字がどの程度実体を表しているかなのである。書類上の点検項目すべてに○が付いていたとしても、そこから実体が浮かび上がってくる訳ではない。なぜならこれは、悪く言えば単なる「員数合わせ」だからである。

例えば、上述の非常用の発電車にしても、問題はそれが数の上で存在するか否かではなく、その車が「生きた」状態で、いつでも稼働可能かどうかの問題なのである。そのためには車が災害に対して常に安全な場所に保管されているか、車は日々点検されているか、燃料は安全な場所に十分確保されているか、連続運転はどこまで可能か、車が車検や修理に出されている時の代替車は用意されているか、代替運転手の確保は十分か、道路が障害物で通行不能になった時の対策は講じられているかなど、あらゆる阻害要因に配慮する必要がある。そしてこのような複雑多岐にわたるリスクへの目配りは、現場に行かないと分からない。

それを知るためには有能な監督官が常に現

場に配置されているだけではなく、彼らがどこへでも自由に立ち入る権限を持たせ、会議も傍聴でき、現場と改善法を議論できるシステムを構築すべきではないか。

(5) 組織の安全規範

安全規範ないし安全文化は、組織の健全性を保つ上で決定的に重要である。ハード面から見ていかに安全性が保たれていても、人や組織の「安全でありたい」という意思がなくてはシステム全体の健全性は保たれない。そして「安全でありたい」という組織の意思を方向付けるのは、基本的にトップマネジメントなのである。ことに大組織ではトップマネジメントの及ぼす影響力は強く、彼らの方向付けによって組織の意思はどちらへも動くことになる。そしてその失敗による組織の悲劇の実例はあまりにも多い。

だが難しいのは、このような強力なリーダーシップは、専制主義のそれと紙一重ということである。そうならないためには、上に立つものが常に「権威の勾配(コックピット・リソース)」をモニターし、状況に応じて最善の勾配をコントロールする力量を磨かねばならない。口でいうのは易しいが行うに難い振り舞いであろう。

次に述べるのは、リーダーたちがリスクの存在に不安を感じ、それを意識から追いやるために「想定」から外したというケースである。この問題は、災害社会学の分野においてティアニーが「エリートパニック」と呼んだ現象に通じる⁽²²⁾。

これはエリートたちが、自分たちの正統性に対する社会秩序の混乱を怖れる行動として知られている。例えば、苛酷な災害が発生するとか、それが予想されると、エリートたちは、市民が混乱したり悪事を働くという強迫観念に囚われ、それを鎮めるために強硬手段を取ったり、根拠もなく安全だと言いたがるという。彼らが守ろうとするのは市民ではなく、既成秩序であると言えようか。そして苛酷な災害に

においては、パニックになるのは予想に反して一般市民よりもエリートに多いといわれている。

事実、福島原発事故においても、このエリートパニックがあったように見える。その直接の検証は難しいが、事件当時の首相、閣僚、行政の関係者、それに東京電力の首脳たちに見られた強ばった表情や感情的発言、論理不明でちぐはぐな言動を見ると、まことに失礼ながら事実かも知れないと思う。そしてエリートのパニックは、彼らが権力を持っているだけに影響力が強く、その危険性も高いと言わざるを得ない。

では守るべきものが組織の正当性や秩序の安定性ではなく、市民や社会であるという決意をリーダーに持って貫くためにわれわれはどうすればいいのか、その解決には社会心理学だけではなく、政策論的な知見を必要とする。

8. 究極の「想定外」と保全

前章(8)で述べた極低頻度・極大災害という事態への対応は、極めて大きな意味を私たちに投げかけている。いわゆるブラックスワン問題である⁽²³⁾。今回の3.11だけでなく、9.11事件も同じ文脈で考えられるし、科学技術の複雑化とグローバル化が進む現在、今後もその可能性は高いと考えられるからである。とすればこの問題の解決は科学でなし得るのか、社会の合意形成に委ねるべきか、それとも政治的判断を必要とするのか(例えば、三原山の爆発後、火山学者の逡巡にもかかわらず、本土へ避難した住民の帰還解除の決断をした鈴木俊一東京都知事)、今後の大きな課題であろう。

この問題に対して1つの興味深い提案をしたのが土木学会である。この学会も10mを超える大津波を想定できなかったという反省があったわけだが、今後千年に1回あるかも知れない大津波にどう対応するかという問題に改めて1つの考え方を示した。

それによると、千年に1回の大津波に備えて10mをはるかに超す高さの防波堤を建設す

ることは止める。これは海岸線に沿って万里の長城を築くようなものであり、これでは漁業が成立しないし景観的にも良くない。第一経費が膨大になる。従って、対応は100年に1回という程度の現実的なリスクを想定して、それに見合った高さの防波堤に留める。ただし海岸線に沿った防波堤を1つだけ作るのではなく、その背後には高台にした公共地、土手の上を走る鉄道、避難所を兼ねた高層建造物などを二重、三重に設ける。そしてそれを超えた大津波が来襲した時は、ただ人命だけを救う方向に対応を切り替える。

言葉を変えると、これは被害が莫大であっても極度に確率が低いリスクに対しては、コストとか社会的便益を考えて巨大なハード対策をすることはしない。その代わりに、被害が中程度以下であるが頻度が高くなるリスクに備えて、多重の防御線を設ける。そしてその「想定」を超えた極端な災害(大津波)が来た時は、ハードの対策は諦めてソフトに頼るということであろう。そしてこの発想は、深層防護の究極の発展型と言えるかも知れない。問題はこの提案に国民の合意が得られるかである。

9. 結語

これまで原子力発電所を代表とする巨大システムの保全を、「想定」という視点から論じてきた。ただ筆者は工学系の技術者でないので、その視点がりスク学、社会心理学の分野に偏っていることは否めない。

だが逆に言えば、これまで原子力分野の内部で議論されてきた問題の外に、このような人文・社会科学的問題が存在することを提起できたかも知れないと思う。ことに「想定」という一見工学的な営みの中にも、個別プロジェクトの設計指針を超えて、背後に人間の認識構造全体に関わる大きな問題を抱えていることが理解されたのではないか。その意味でこの議論は学際的なものになった。今後この問題を巡り、自然・人文・社会諸科学の専門家

が自由に意見を交換できる場のできることを期待して、この論考を閉じることにしたい。

[謝辞]

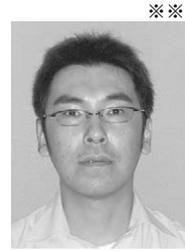
本小論執筆に当たって、京都大学工学研究科の杉本純先生から懇切なコメントを頂いた。心からの謝辞を捧げたい。また、この論考は筆者が昨年執筆した論文⁽¹⁾を下敷きにして改稿したものである。

参考文献

- (1) 木下富雄,『想定』を再考する:福島を経験をもとに, 日本リスク研究学会誌(第21巻4号), 237-247, 2011年
- (2) Janis, L.L., *Victims of groupthink: A psychological study of foreign policy decisions and fiascoes*, Houghton Mifflin, 1972
- (3) 戸部良一・寺本義也・鎌田伸一・杉之尾孝生・村井友秀・野中郁次郎,『失敗の本質—日本軍の組織論的研究』(中公文庫), 中央公論社, 1991年
- (4) 山本七平,『空気の研究』, 文藝春秋, 1983年
- (5) 木下富雄, 「リスク・コミュニケーション再考—統合的リスク・コミュニケーションの構築に向けて(1)」, 日本リスク研究学会誌(第18巻2号), 3-22, 2008年
- (6) 柴田義貞(編): 木下富雄他『リスクコミュニケーションの思想と技術: 放射線リスクの正しい理解を目指して』, 1-46, 長崎大学グローバルCOEプログラム「放射線健康リスク制御国際戦略拠点」, 2010年
- (7) Reischauer, E. O., Jansen, M. B. *The Japanese today*, Mass:Harvard University Press, 1988(福島正光訳『ザ・ジャパニーズ・トゥデイ』, 文藝春秋, 1990年)
- (8) 木下富雄「安全と安心—その真実と虚構」, ヒューマンセキュリティ・サイエンス(No.4), 1-30, 2009年
- (9) Lowrance, W. W., *Of acceptable risk: Science and the determination of safety*, Los Altos: William Kaufmann Inc., 1976
- (10) 朝日新聞「原発攻撃の被害予測」, 2011.7.31
- (11) 朝日新聞「原発テロ想定内部資料」, 2011.9.29
- (12) 木下富雄, 「リスク学から見た福島原発事故」, 日本原子力学会誌, 第53巻7号, 465-472。(この補論が, 2012年の8月に東北大学で開催された日本放射線影響学会公開市民講座で配布されている)
- (13) Hopkins, A., *Thinking about process safety indicators*, *Safety Science*, 47, 460-465, 2009
- (14) 池田三郎,『『想定外』は『リスク分析』の枠外か? —極低頻度・巨大複合災害へのリスク分析の展開に』, 日本リスク研究学会誌, 第21巻1号, 1-5, 2011年
- (15) Knight, F.H., *Risk, uncertainty and profit*, Boston: Houghton Mifflin, 1921(奥隅栄喜訳『危険, 不確実性および利潤』, 文雅堂銀行研究社, 1959年)
- (16) 田中幸吉, 「種々のあいまいさとその取扱い」, 第1回あいまい科学研究会資料, 1980年
- (17) 日本工学アカデミー原発事故・エネルギー問題検討会, 「福島第一原子力発電所事故後のエネルギーの円滑な供給に向けて」, 2012年
- (18) 木下富雄, 「リスク論と確率論の悩ましき関係」, 日本統計学会春季集会シンポジウム「リスク, 信頼性, そして確率統計: 震災1年, 統計学の役割を問う」発表資料, 2012年
- (19) 前田典幸・高城美穂, 「作業者の安全意識・行動様式に影響を与える『状況』の検討」, 原子力安全システム研究所創立20周年記念第18回研究成果報告会発表資料, 2012年
- (20) 木下富雄, 「地震防災の危機管理—地方自治体の場合」, 日本リスク研究学会誌, 第7巻2号, 3-12, 1996年
- (21) 平井憲夫「原発がどんなものか知って欲しい」
<http://www.iam-t.jp/HIRAI/pageall.html>
- (22) Solnit, R., *A paradise built in hell: The extraordinary communities that arise in disaster*, Viking Adult, 2009(高月園子訳『災害ユートピア: なぜそのとき特別な共同体が立ち上がるのか』, 亜紀書房, 2010年)
- (23) Taleb, N.N., *The black swan: The impact of highly improbable*, Random House, 2004(望月護訳『ブラックスワン: 不確実性とリスクの本質』上・下, ダイヤモンド社, 2009年)

2050年に向けたエネルギー技術開発

時松 宏治 [※] (プロジェクト試験研究部 主任研究員)



森山 亮 ^{※※} (プロジェクト試験研究部 主任研究員)

蓮池 宏 ^{※※※} (プロジェクト試験研究部 部長)



小野崎正樹 ^{※※※※} (研究理事)

1. はじめに

わが国のエネルギー基本計画は、東日本大震災以降、総合資源エネルギー調査会等において見直しの議論が行われ、2012年9月14日にエネルギー・環境会議から「革新的エネルギー・環境戦略」が発表された⁽¹⁾。そこでは、「省エネルギー・再生可能エネルギーといったグリーンエネルギーを最大限に引き上げることを通じて、原発依存度を減らし、化石燃料依存度を抑制することを基本方針」⁽¹⁾とするものの、現実の課題や解決のための方策が明確になっていない。

昨年の当研究所主催のシンポジウムでは、当研究所の都筑、森山⁽²⁾より、東日本大震災を踏まえたわが国の長期エネルギー需給に関するシナリオ分析を報告した。脱原子力シナリオ、二酸化炭素(CO₂)徹底削減シナリオ(地球温暖化顕在化)、脱石油・ガスシナリオ(調達困難)に基づいて検討し、シナリオごとに重要となる技術を示した。

原子力発電が縮小した場合に、その分を何で補うのか、また、再生可能エネルギーを大量導入するとしても不安定さに起因する課題が無いのか、当面は火力発電を増やすとして

もどの程度の増強が必要でその影響は何なのか、などの疑問に答えるべく検討を続けてきた。ここでは、「革新的エネルギー・環境戦略」も踏まえ、これら検討の成果を、省エネルギーと再生可能エネルギーにおける重点技術、原子力が縮小した場合の2050年に向けた電力供給の変化、さらに、将来、火力発電を低炭素化する方策の順に報告する。

2. 省エネルギーと再生可能エネルギーにおける重点技術

(1) 省エネルギー

「革新的エネルギー・環境戦略」では、表1に示すように、省エネルギーにより最終エネルギー消費を7,200万kL削減するとしている。

表1 革新的エネルギー・環境会議の主な数値目標

	2010年	2030年	
最終エネルギー消費	3.9億kL	3.1億kL (▲7,200万kL)	
総発電電力量	1.1兆kWh	1.0兆kWh (▲1,100億kWh)	
比率	原子力	26%	
	再生可能エネルギー	10%	30% (3,000億kWh)
	化石燃料	63%	—

この省エネルギーを実現するための投資額と、エネルギー消費減による節約額の試算値を表2に示す。ここで、投資額より節約額の方が小さいことに注意が必要である。投資額のうち節約で回収できなかった分は、ユーザーが負担することになる。家庭部門の20兆円は国民

民が直接負担し、その他の部門も最終的には国民の負担となる。こうした負担を減らすために、省エネルギー技術のコスト低減が求められる。

産業、民生、運輸の各部門別に対策と節減量の内訳が想定されているが、個別技術の中では、ヒートポンプ給湯と電気自動車に対して大きな省エネルギー効果が期待されている。以前から、需要側において使用する二次エネルギーを化石燃料（石油、ガス）から電力に替えるとともに、発電部門において非化石燃料化と火力発電の高効率化を進めることが、省エネルギーとCO₂削減の重要な戦略の1つであった。震災後、原子力比率が低下する可能性がある中で、この戦略の有効性は維持されるであろうか。これを、需要側での主要な電化技術であるヒートポンプ給湯と電気自動車について検証した結果を図1、図2に示す。

ヒートポンプ給湯は、成績係数（COP）が5の場合、ガスボイラに比べエネルギー消費、

表2 省エネ対策投資（2030年までの累計）

(単位:兆円)

	15シナリオ/20~25シナリオ	
	投資額	節約額
合計	84	55
産業部門	9	
個別産業固有技術	5	7
業種横断技術	5	
業務部門	21	
外皮性能向上	12	15
その他(給湯,照明など)	9	
家庭部門	35	
外皮性能向上	17	15
その他(給湯,照明・家電など)	17	
運輸部門	20	
自動車	18	16
その他(インフラなど)	2	

注) 節約額:省エネ投資によって削減されるエネルギー費用(電気代・燃料代)。2030年以降に削減される費用は含まない。

(出所:国家戦略室ホームページ)

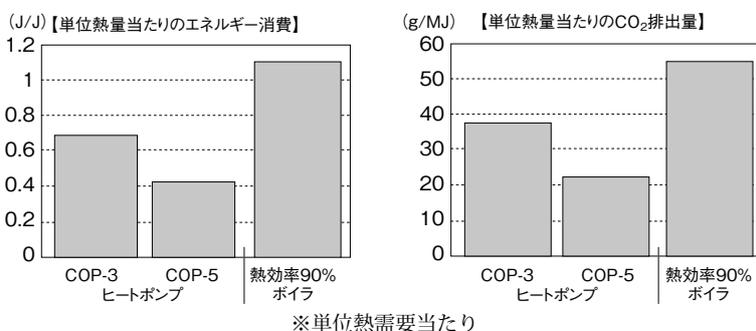


図1 ヒートポンプとボイラによるエネルギー消費（左）とCO₂排出量（右）

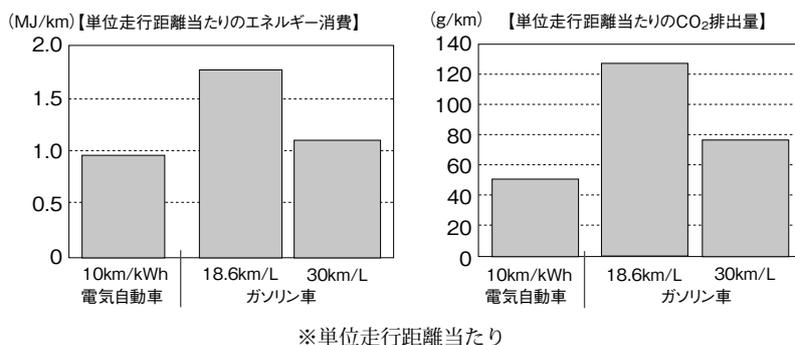


図2 電気自動車とガソリン車のエネルギー消費（左）とCO₂排出量（右）

CO₂ 排出ともに 4 割程度である。COP が 3（現状の蒸気生成相当）では 6.5 割程度となる。また、電気自動車は、従来のガソリン車に比べエネルギー消費、CO₂ 排出ともに 2 分の 1 程度である。

この結果から、ヒートポンプ給湯と電気自動車は電力需要を増加させるが、トータルで考えれば化石燃料の削減効果があると言える。需要ピーク時の使用を避けることで、需給逼迫への影響は回避することができる。また、エネルギー貯蔵機能があるため、太陽光発電や風力発電の出力変動の影響緩和に貢献できる可能性がある。

震災前の電源構成であれば、ヒートポンプ給湯と電気自動車は大きな CO₂ 削減効果があった。原子力発電所の停止により電力の CO₂ 排出原単位が増加しているが、原単位が震災前の 1.5～2.5 倍（ヒートポンプ給湯の場合）、および 2 倍（電気自動車の場合）までは CO₂ 排出削減の効果があると言える。CO₂ 原単位の見通しについては、次項で検証する。

なお自動車については、最近の超低燃費を実現したガソリン車やハイブリッド車は、電

気自動車にあまり劣らない省エネルギー性と低 CO₂ 性を有する。社会全体としての省エネルギー量は、1 台あたりの省エネルギー率と普及台数の積になる。従って、普及の容易さも考慮して、電気自動車だけに偏ることなく、他の次世代車も推進すべきである。電気自動車も軽量化や次世代パワーエレクトロニクス技術により一層の効率向上を図っていくことが期待される。

(2) 再生可能エネルギー

① 全体像

図 3 に従来の「長期エネルギー需給見通し」(3) と今回の「革新的エネルギー・環境戦略」における各種再生可能エネルギーの 2030 年導入目標を示す。いずれの再生可能エネルギーについても革新的エネルギー・環境戦略の目標値の方が高く設定されており、白抜きの部分が積み増しの部分に相当する。後者における 2010 年から 2030 年までの増加分は、再生可能エネルギー全体で 1,900 億 kWh で、これは長期エネルギー需給見通しの最大導入ケースの約 2 倍であり、大きめの目標と言える。

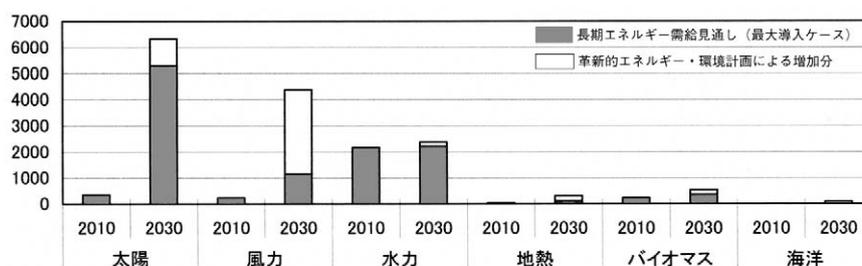


図 3 再生可能エネルギーの導入目標（設備容量）

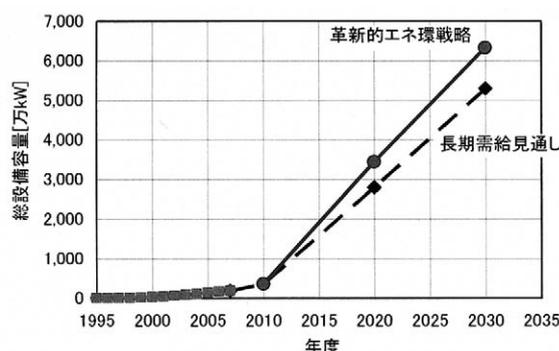


図 4 太陽光の導入目標と見通し（設備容量）

その中でも太陽光発電と風力発電の増加量が大きく、全体の増加量の7割を占める。これら2つの増加量が、全体としての目標達成を大きく左右すると言える。

② 太陽光発電

太陽光発電の導入量は、図4に示すように2010年時点の360万kWから2030年には5,300～6,300万kWに増やす目標となっており、年間250～300万kWの増設が必要になる。2012年7月から固定価格買取制度がスタートしメガソーラーを中心に建設計画が急増しているが、11月までの受け付け量は前記の必要とされる増加ペースと同程度で、これを2030年まで継続していくのは簡単ではない。

目標達成のために、低コスト化、高効率化、軽量化の技術開発が求められる。軽量化は、既存建物の屋根の利用可能性を拡げる。高効率化は、出力当たりの所要パネル面積が減るので、低コスト化や軽量化にも有効である。

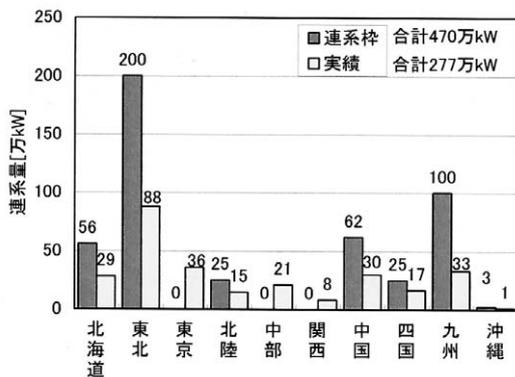


図5 電力会社ごとの連系枠

③ 風力発電

風力発電は、陸上風力に加えて洋上風力も注目されるようになってきた。しかし、陸上風力の課題として、電力系統影響による制約の顕在化に加え、今後は立地制約（地形、低周波音、用途規制等）も出てくるであろう。洋上風力は、沿岸域では漁業権との調整が必要である、着床式の適地が少ない、浮体式は実証段階でしかないといった課題がある。また、これらの課題の中で、電力系統影響による導入制約について詳しく見てみる。電力10社のうち7社が連系の上限枠を図5のように設定している。設定していない東京、中部、関西の各社は、系統の規模が大きく風力発電のような出力が変動する電源の受け入れ容量も比較的大きいが、肝心の風力資源が乏しい。風力資源が豊富なのは北海道、東北、九州など枠を設定している地域である。つまり連系枠の拡大が導入拡大の律速になっており、その状況は今後も変わらない。

連系枠は10年間に図6に示すように470万kWまで拡大してきたが、その拡大は明確な根拠に基づいて行われてきた。エネルギー・環境戦略の導入目標値は現在の連系枠の約7倍に相当する3,490万kWであるが、具体的な対策がなければ連系枠が拡大することはない。これまで費用対効果の高い対策から採用されてきており、今後の対策はコストが増大する可能性が高い。

最近になって、再生可能エネルギーを大量導入した場合の系統対策費用の試算がいくつか発

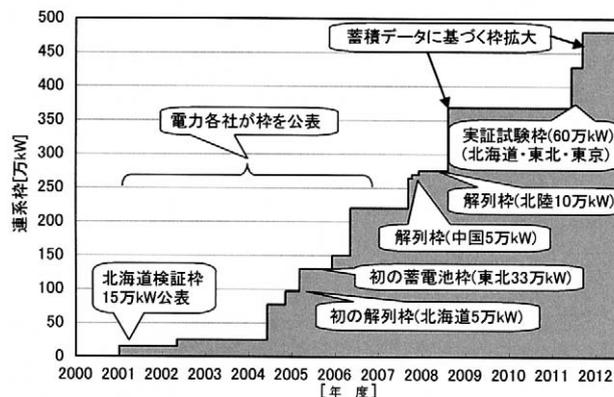


図6 電力会社間の連系枠の推移

表されているが、試算結果は大きくばらついている。対策内容は再生可能エネルギーの導入量によって異なり、他電源の比率や運転方法も影響する。この分野の研究は緒についたばかりであり、どのような対策の組合せが合理的か、という問題について更なる研究が必要である。

④ 発電コスト

電源の種類ごとの発電コストはコスト等検証委員会⁽⁴⁾によってまとめられており、各所で引用されている。ここで注目したいのは、太陽光発電はメガソーラーの場合、2010年に30.1～45.8円/kWhが2030年には12.1～26.4円/kWhにコスト低減が見込まれているが、他の再生可能エネルギーについてはコスト低減がほとんど想定されていないことである。再生可能エネルギーの比率30%を目指すのであれば太陽光以外の発電コスト低減は必須である。

図7に示すように、再生可能エネルギーの発電コストを決める要因として、設備費と立地条件がある。設備費は累積導入量が増えるに従い低下していくが、立地条件については、条件の良いところから導入され次第に悪化していく。2つの要因を加味した総コストが上昇に転じる辺りから導入は頭打ちとなる。

こうした理解の上でコスト低減策の方向性を考えてみる。設備費は技術革新によってステップ状に低下させることが可能である。また、立地条件に関わるコストの低下をもたらす方策として規制緩和を位置づけることができ

る。技術開発と規制緩和が両輪となって、発電コストの低減が実現することが期待される。規制を緩和する場合、安全に関わる規制であれば安全のレベルを下げるのではなく、新技術等によって安全のレベルを下げることなく規制緩和が可能になることが望ましい。そうした安全確保を容易にする技術開発も重要である。

3. 2050年に向けた電力供給の検討

(1) 電力の低炭素化と石炭火力の役割

将来に向けて、積極的な省エネルギーの推進と大量の再生可能エネルギーの導入が必要であると同時に、電力分野では、発電量の6割を占める火力発電の将来動向を検討しておくことも重要である。原子力発電が徐々に減少するシナリオでは、減少分を再生可能エネルギーだけで補完することは難しく、石炭やLNG火力を明確に位置づけておく必要がある。

同時に、火力発電の増強はCO₂排出量および排出原単位に直接影響する。ここでは、日本全体の2050年までの総電力需要、各種発電方式の運転年数と設備利用率、CO₂排出原単位等のシナリオを設定することにより、電力需給像とCO₂排出量の推移を提示する。

① 検討の手順

最初に各電源の基本的な考え方を決め、次いで電力需給の作成を行った。作成は、最初に総電力需要量、次に非化石燃料電源（原子

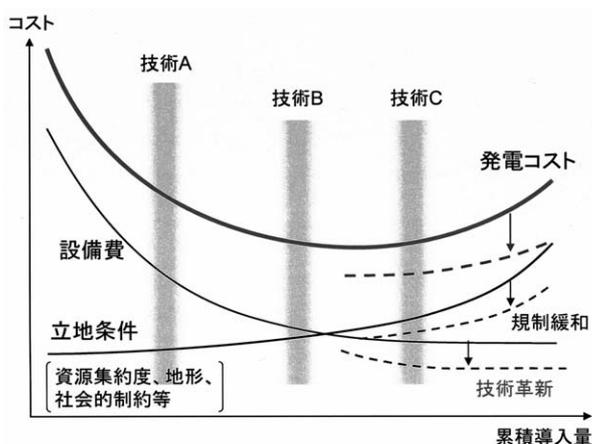


図7 累積導入量とコストの関係のイメージ

力、再生可能エネルギー等),最後に火力発電の内訳(LNG,石油,在来石炭,高効率石炭),という手順で電力供給量を作成した。高効率石炭火力は「Cool Earth エネルギー革新技术計画」等を参考に,先進的超々臨界圧石炭火力であるA-USC(蒸気温度750℃級),石炭ガス化複合発電(IGCC)と燃料電池を組み込んだ石炭ガス化燃料電池複合発電(IGFC)を対象とし,CO₂回収・貯留(CCS)は,これら新設の高効率石炭火力に設置することとした。このように電力需給を確定した後に,燃料の排出係数や発電方式毎のCO₂排出原単位を用いてCO₂排出量の推計を行った。

② 基本的な考え方と電力需給の推計方法

総電力需要量については,平成21年8月に資源エネルギー庁から出された「長期需給見通し(再計算)」⁽³⁾の,省エネ機器・設備が最大限導入される「最大導入ケース」における総電力需要を用いた。「長期需給見通し」は2030年までの予測のため,電力需要のGDP原単位と1人あたりGDPの伸び率が2030年以降も継続すると想定して2050年までの電力需要を推計した。1人あたりGDPも電化も進行するが,総人口が減少するために,2030年と比較して2030年以降の総電力需要は減少する。

原子力,再生可能エネルギー,火力の導入量は,次のように設定した。

- 原子力:東日本大震災を踏まえ,新規着工(建設準備中)はなく,「電気事業便覧」(平

成22年度版)における「運転中,建設中」プラントが40年間運転。

- 再生可能エネルギー:2030年までは「長期需給見通し」と同一とし,2030年以降については2030年時点の設備容量と発電電力量が一定。
- 火力発電:運転開始後48年以上経過するプラントが石油,石炭,LNG火力いずれにもあることから,60年間運転。
- 高効率石炭火力発電:表3に示すように,2020年以降に導入するシナリオを設定。
- CCS:在来技術の石炭火力やLNG火力へのCO₂分離回収装置の設置は経済効率的ではないと考え,高効率石炭火力発電のみを対象。

その上で,石油火力を調整代と位置づけ,ベースおよびミドル運転を,それぞれ在来石炭火力およびLNG火力で担うものとし,このケースを「石炭火力ベース運転」とした。一方,CO₂原単位が低いLNG火力への期待も高まっていることから,ベースとミドルの運転を逆転させた「LNG火力ベース運転」ケースも検討した。「LNG火力ベース運転」ケースについては,「在来石炭火力」をミドル運転して設備利用率を一律45%に変更した。これと60年運転による設備容量から在来石炭火力の発電電力量を求めた。LNG火力を調整代にし,総電力需要に一致するようにLNG火力による発電電力量を求め,60年運転による設備容量から,設備利用率を算定した。

表3 高効率石炭火力の導入シナリオ設定

発電技術	導入時期(年)	導入基数	電気出力(万kWe)	導入時点発電端効率(HHV%)	導入時点での設備利用率	設備利用率向上(5年毎)
A-USC	2020	1基/5年	100	48	60%	10%
A-USC-CCS	2025		90	38		
空気吹きIGCC	2020		50	48		
空気吹きIGCC+CCS	2025		45	38		
酸素吹きIGCC	2020		50	51		
酸素吹きIGCC+CCS	2025		45	41		
IGFC+CCS	2030	1基/10年	25,35,50	58		

上記のプロセスを経て積上げ方式で策定した電力需給を元に、燃料の排出係数および発電方式毎のCO₂排出原単位を用いて、CO₂排出量を推計した。

③ 推計結果

図8に「石炭火力ベース運転」ケースの設備容量と発電電力量を示す。ここで、2020年と2030年の全体の発電電力量と、揚水・一般水力・新エネルギーの設備容量・発電電力量は「長期需給見通し」と同じである。

設備容量では、LNG火力が30～25%程度、在来石炭火力が15%程度で推移し、高効率石炭火力が2050年時点で11%、新エネルギー、LNG火力、石炭火力が同程度になる。発電電力量では、LNG火力が30%程度、在来石炭火力と高効率石炭火力の割合の合計が2050年時

点では約45%に増大する。表3に示すように、高効率石炭火力を毎年1基程度建設していくことで、石炭火力の設備利用率がベース電源として妥当な80%弱に維持でき、石炭火力発電とLNG火力発電のバランスの取れた電源構成となる。一般炭消費量は1億トン前後で推移する。

図9に「LNG火力ベース運転」ケースの発電電力量と発電用LNG調達量を示す。LNG火力の発電電力量は4割前後で推移し、設備利用率はLNG火力発電全体で61～73%となり、LNG火力がベース運転並みの設備利用率となった。これに対応する発電用LNG消費量は2020年時点で約6,000万トンまで増加する。電気事業者のLNG調達契約期間内のもの（稼動中）と契約計画中（計画中）を合計しても、この半分の3,000万トンであり、今後10年未満で3,000万トンの契約完了の必要性を意味する。

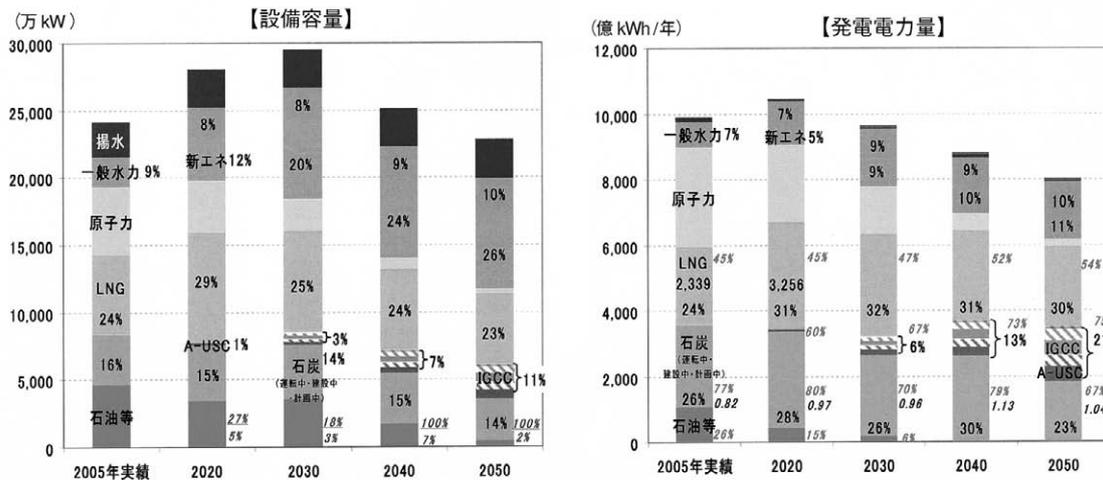


図8 石炭火力ベース運転ケースの設備容量（左）と発電電力量（右）

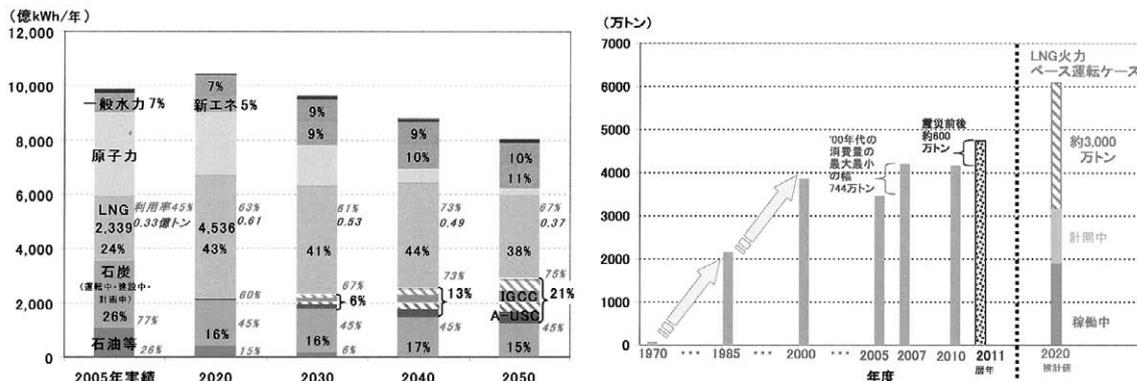


図9 LNG火力ベース運転ケースの発電電力量（左）と発電用LNGの調達量（右）

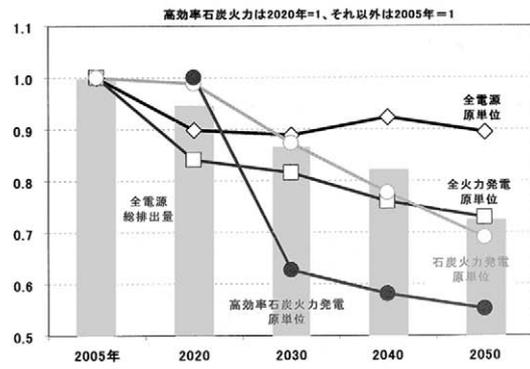
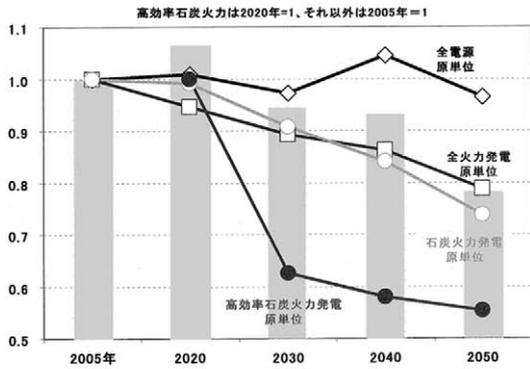


図 10 CO₂ 排出量の推移：石炭火力ベース運転（左）と LNG 火力ベース運転（右）

図 10 に火力発電からの CO₂ 排出量の推移を示す。棒グラフは全電源からの総排出量、折れ線グラフは原単位で、いずれも 2005 年時点の値でノーマライズしている。火力発電による発電電力量はほぼ横ばいでも、高効率発電の割合が増加するため、全電源からの CO₂ 排出総量は減少してゆく。CCS 付きの高効率石炭火力発電の導入により、2030 年以降の「高効率石炭火力発電原単位」が約半減する。これにともなって「全火力発電原単位」も低下するが、2050 年時点で総電力需要と全電源総排出量が 2005 年に対して共に 2 割減となっているため、「全電源原単位」は 2005 年時点から変わらない。「LNG 火力ベース運転」ケースでは、発電用 LNG 消費量の増加により CO₂ 排出総量が低減するものの、「全電源原単位」は 1 割程度しか低下しない。原子力の段階的縮小では発電からの CO₂ 排出量削減は困難なことが理解される。

(2) ピーク電力供給力

「革新的エネルギー・環境戦略」や前述の「石炭火力ベース運転」ケースにおいて想定している電力需給シナリオでは、kWh で表される年間に必要な総電力需要に対して、原子力、再生可能エネルギーおよび火力発電からの発電量割合が設定されている。一方、kW で表される電力の供給力はエネルギー源によってそれぞれ特徴があり、特に再生可能エネルギーからの発電の中でも太陽光発電や風力発電は自然条件に応じて供給力が変わるために、期

待される出力が得られない場合がある。

太陽光発電の出力は日中太陽が出て、日射が強い時に大きくなり、日が沈むとゼロになる。これは天候によっても左右され、太陽に雲がかかった時には出力が低下し、雨の日には一日中ほとんど発電が見込めない場合もある。また、風力発電の出力は風況によって変動するため、天気が悪く、風が強い日には出力が大きくなったり、快晴の日は無風状態が続いたりすることもある。

これに対し、電力の需要は人々の活動によって変動する。日変動で見ると、夜間には需要が少なく、日中に需要のピークを迎える。こうした変動を有する電力需要に対して安定的に電力を供給するには、自然条件によってその出力が変わる再生可能エネルギーのみに頼ることはできず、人為的にその出力を調整できる火力発電、揚水発電および蓄電池等によって、需給のギャップを補う必要がある。

以上のことから、シナリオにおいて設定した年間総電力需給のバランスが取れていても、電力の需要変動に対して供給力が十分かどうかについては別のアプローチで検討する必要がある。本項では最大の電力需要、いわゆるピーク電力に対してシナリオで設定した設備容量が十分かどうかについて検討した。

① 検証の方法

シナリオにおいて設定した設備容量の検証は以下の手順に従って行った。

(a) ピーク電力の推定

電力需給に関わる各種統計資料を参考に、シナリオで設定した年間総電力需要からピーク電力を推定する。ピーク電力は年間を通して最大の必要電力のことを指し、その単位はkWで表される。通常、7月下旬から8月上旬の暑い日、夕方15時頃に発生し、2009年の場合、8月7日の15時であった。

(b) ピーク時の各電源出力割合の推定

上記ピーク電力発生時に期待できる出力は、設備容量そのままではなく、電源毎に可能な出力割合を考慮して求める必要がある。従って、過去の実績に基づいてピーク時の最大出力割合を推定した。

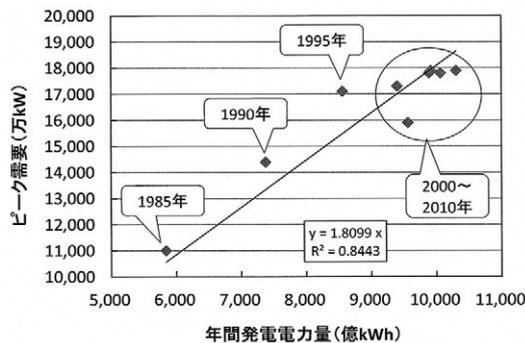
(c) ピーク電力供給力の検討

推算したピーク電力とピーク時の出力を比較することで、発電設備の過不足を検討する。

② ピーク電力の推定

図11に1985年～2010年における年間総電力需要とピーク電力の関係を示す。1985～1995年は好景気の影響も受けて、両者は順調な伸びを示している。2000年以降は景気の停滞のみならず、エネルギーの高効率利用も進み、両者の伸びは停滞している。このように、両者の関係を見ると、概ね比例関係が得られた。

この関係式を用いて「石炭火力ベース運転」ケースで推定した年間総電力需要をピーク電



(出所：電力事業連合会ホームページ)

図11 年間発電電力量とピーク需要の関係

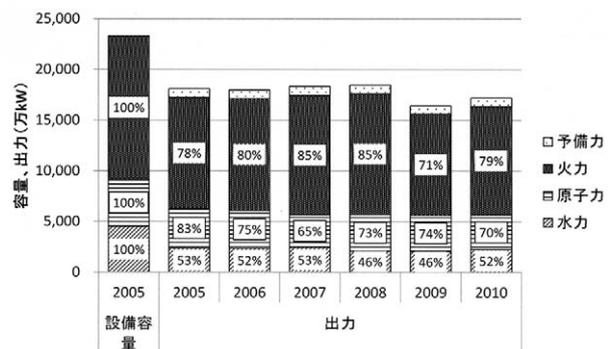
力に換算した。式は1985～1995年の期間の影響が大きく、近年のエネルギー高効率利用やピークの平準化が考慮されていないため、推算されるピーク電力はやや高めになる。

③ ピーク時の各電源出力割合の推定

図12は2005～2010年の各年次における各電源のピーク時出力を表した実績のグラフである。一番左の積み上げ棒グラフは2005年における火力(LNG, 石油, 石炭の合計)、水力(一般水力と揚水の合計)および原子力の設備容量を表しており、合計で2億3,000万kW程度になる。グラフ中に示した割合は2005年の各電源の設備容量に対する出力割合を示している。

図11に示したように、ピーク電力はこの期間において1億6,000万～1億8,000万kWであり、設備容量はこれらの値に比べて十分高い。しかし、ピーク時に各電源を100%の出力割合で運転させることはできない。例えば、河川の流量などに左右される水力発電は50%程度しか出力しておらず、ベース電源として出力調整をしていない原子力発電は70～80%程度の出力になっている。実際には出力調整が可能なLNG火力、石油火力および揚水発電によって需要と供給のバランスをとっている。

これらの実績を踏まえて、ピーク時における最大の出力割合を、水力は53%、火力は85%、原子力は83%とした。また、各電源の出力を合計したものはピーク電力と一致するが、ある程度の予備率を確保する必要がある。本検討



(出所：資源エネルギー庁統計)

図12 発電設備容量と出力 (2005～2010年)

ではピーク電力に対して5%を予備力とし、出力調整が可能な火力発電が有すると仮定した。

また、「石炭火力ベース運転」ケースでは2020年以降に太陽光発電と風力発電の大幅な設備導入が想定されている。資源エネルギー庁によると⁽⁵⁾、需要と太陽光発電の出力には「非常に弱い」ながら「相関がある」ため、ピーク時に設備容量の30%程度の供給力が期待され、風力発電の出力と需要との相関は認められないため、供給力として期待することは不可能であるとの見解を示している。

従って、本検討では再生可能エネルギーによるピーク電力供給力としては、太陽光発電の設備容量の内、30%を見込むこととする。

④ ピーク時電力需給バランスの検討および追加設備の検討

以上の検討を元に、2050年までのピーク時の電力需要と各電源のピーク時最大出力を積み上げたピーク電力供給力を比較し、図13に示した。図には、2005年の実績と「石炭火力ベース運転」ケースで推定した2020年、2030年および2050年における計算値を表している。ピーク電力供給力からピーク電力を引いた分が供給の余裕度になるが、2050年では余裕度がほとんどなくなっていることがわかる。

2050年において2005年と同程度の余裕度を持つには、図中「増設」で示した1,000万kW程度のピーク電力供給力を追加する必要がある。1,000万kWのピーク電力供給力に必要な

設備容量はLNG火力で1,200万kW（ピーク時出力割合85%を仮定）、太陽光発電では3,300万kW（ピーク時出力割合30%を仮定）である。

以上の結果から再生可能エネルギーの設備を追加しても、ピーク電力供給力としてはその一部しか期待できないため、ピーク時の調整力として利用できる火力発電の設備を今後とも着実に建設していく必要があることが分かる。

4. 火力発電の低炭素化に向けて

(1) 低炭素発電の技術

今後、原子力発電が段階的に縮小することを仮定すると、火力発電のシェアが増すことは避けられない。その場合、次に示す3つの観点を踏まえて、燃料を確保した上でCO₂排出量を抑制した発電の体制を構築していくことが必要である。

- 高効率発電技術の導入；IGCCやA-USCのように先を見据えた技術開発の促進
- CO₂の回収に適した技術開発；CCSを導入する上で、CO₂回収を前提とした効率的技術の開発
- 燃料の資源確保と多様化；LNG、石油、石炭の適切な利用と低品位炭の利用拡大

3章では、IGCCおよびA-USCは2020年以降の導入、CCSについては2025年以降の導入を想定して、発電電力量のシェアの推移とCO₂排出量の変化を示した。その結果、大幅なCO₂の削減が難しいことが明らかであ

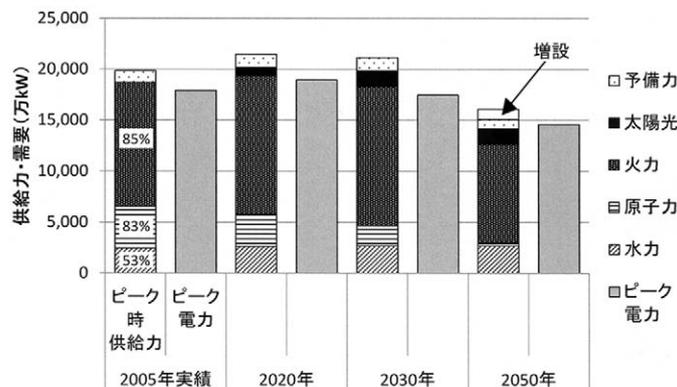


図13 ピーク時の電力供給力と需要

り、CO₂削減にはそれ以外の視点が必要となることも明らかになった。

そこで、中長期の視点でCO₂削減に寄与する技術開発テーマを図14に示す。CCSの導入により、発電効率は10%程度低下する。発電効率の向上やCO₂回収の効率化だけではなく、CO₂発生源から回収したCO₂の輸送を経て、貯留するまでのシステムの効率化が重要である。さらに、従来の発電がCO₂回収を前提としたものではなく、燃焼前、後のCO₂回収方式を問わず、後からCO₂回収を付加したものである。今後、CCSを実施する上では、CO₂回収を前提とした高効率な発電方式を開発していくことが必要である。

その例が、ケミカルルーピング燃焼・ガス化である。ケミカルルーピングは、1994年に東京工業大学の石田教授(現名誉教授)が提案、命名された燃焼方法で、当初は低NO_x燃焼技術として開発された。燃料への酸素を金属酸化物から供給することで、燃焼排ガスはCO₂と水である。このことから、2000年以降、欧米ではCO₂回収・燃焼技術として開発が進み、燃料が天然ガスから重質油や石炭にも広がり、現在、パイロットプラント規模の試験が行われている。わが国では、新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)がケミカルルーピングの調査を民間会社、石炭エネルギーセンター(JCOAL)や当研究所に委託し、調査を進めている。

また、IGCCにあっては、電力中央研究所がNEDOの事業として開発を進めている、CO₂回収型次世代IGCCがある。ガスタービンでは石炭ガス化ガスを酸素で燃焼し、発生したCO₂の一部を石炭ガス化炉に戻して、高濃度CO₂雰囲気中で石炭をガス化するものである。燃焼排ガスは高濃度CO₂となり、CCSに供することが可能となる。

このように、2030～2050年を目指して、CO₂回収を前提とした技術開発が求められる。

(2) 火力発電燃料の課題

原子力発電が縮小した場合には、当面、火力発電の稼働率を上げ、中期的には着実に火力発電所を建設していくことになる。その場合の最大の問題は、輸入する燃料が増加し、海外に支払う燃料費が増加することと、CO₂排出量が増加する点である。

燃料費は、わが国のCIF価格で、石炭が6米ドル/MMBTU(1.9円/1,000kcal)に対してLNGが15～18米ドル/MMBTU(4.7～5.6円/1,000kcal)である。米国では、シェールガスの産出により、天然ガス価格は3米ドル/MMBTU(0.93円/1,000kcal)前後に下がり、石炭の価格優位性が失われた結果、米国の発電に占める石炭は40%以上であったのが30%余りに低下した。

原子力発電を停止し、その分を石炭およびLNGで補う場合、主に最新のLNG火力で代

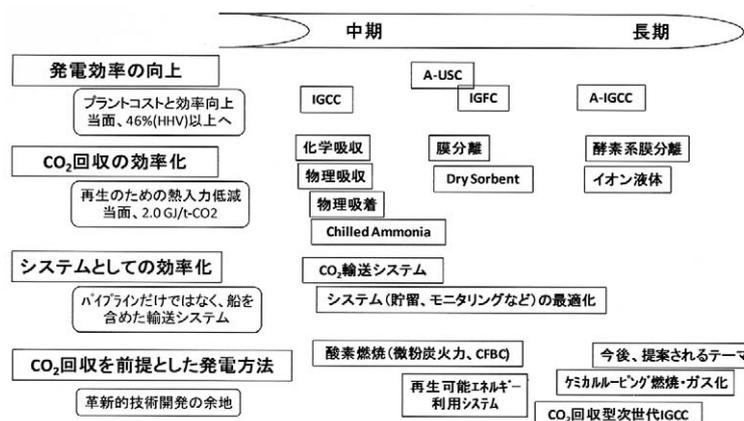


図14 中長期の視点でCO₂削減に寄与する技術開発テーマ

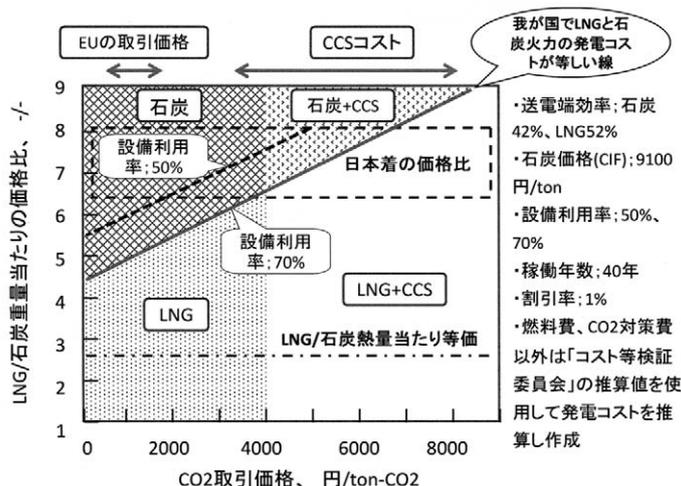


図 15 LNG 火力と石炭火力の CO₂ 取引価格と LNG / 石炭価格比による導入マッピング

替すると、年間 3 兆円の燃料費が増加し、世帯当たり年間 5.8 万円のコスト負担になる。石炭と LNG で同量ずつ代替すると、燃料費の増加は 0.5 ～ 1.5 兆円に抑えられる。

石炭と LNG の棲み分けは、燃料費に加えて、CO₂ 回収費もしくは CO₂ 取引価格を考慮する必要がある。図 15 に示すように横軸に CO₂ 取引価格、縦軸に LNG と石炭の重量当たりの価格比をとると、石炭火力 (CCS 無し)、石炭火力の CCS 付き、LNG 火力 (CCS 無し)、LNG 火力の CCS 付きにマッピングされる。石炭火力と LNG 火力の設備利用率が高いと、石炭の範囲が広がり、低いと LNG の範囲が広がる。設備利用率が低く、CO₂ 処理コストがかかる場合は、LNG の範囲が拡大する方向に移動する。CO₂ の取引価格は、現状、約 1,000 円 / トンであるため、石炭と LNG の選択には大きくは影響しない。CCS は、そのコストが取引価格より下がると実施される。

(3) 低炭素燃料導入のスキーム

① 石炭からの低炭素燃料導入

低炭素社会に向けて、石炭を発電に用いる場合には、国内で CO₂ を回収し、その CO₂ をわが国の海域海底下に地中貯留するか、海外の産炭地などに戻し貯留することになる。どちらの方法であれ、CCS を含めた発電効率は 10% 程度低下することになる。そこで、石

炭を産炭地でガス化し、メタノールや DME などの石炭に比べて熱量当たりの CO₂ 排出量が少ない燃料に変換しわが国に輸送する。同時に、発生した CO₂ は産炭地で貯留あるいは EOR などに供することが考えられる。

石炭ガス化ガスから SNG (代替天然ガス) を製造し、既存の LNG 基地から LNG としてわが国に出荷することも考えられる。

② CO₂ フリー水素

わが国で CO₂ の発生をゼロに近づけるには、水素を燃料として輸入するのが究極の方法である。中期的には、豪州などで石炭などからの水素製造が考えられる。長期的には再生可能エネルギーが豊富な地域で水素を製造し、液体水素や有機ハイドライドなどの媒体でわが国まで輸送することが考えられる。アルゼンチンの風力やカナダの水力が候補となる。

5. まとめ

資源の確保や環境の保全などの制約がますます厳しくなる中で、島国である日本が経済・社会を維持していくためには再生可能エネルギーだけではなく、原子力や火力を含む中期の多様なエネルギー技術の開発が必要である。今回は、2050 年に向けたエネルギー技術

開発の方向性を検討した結果、次のことが明らかになった。

- ① 2050年に向けた革新的エネルギー技術開発が必要である。
- ② 省エネルギー、特にヒートポンプや電気自動車の積極的推進と再生可能エネルギーの大量導入において技術開発が重要である。
- ③ 原子力発電を段階的に縮小することを仮定して電力需給の分析を実施した。火力発電設備を最新技術の設備にリプレースするなど、着実に建設し、十分なバックアップ可能な電源構成を維持していくことが必要である。
- ④ CO₂取引価格とLNGと石炭の価格差を踏まえて、バランス良く導入することが重要。米国では「天然ガスシフト」が着実に進んでいるがわが国は事情が異なる。
- ⑤ 中長期的にCO₂排出量を低減するには、国内におけるCCSだけではなく、海外の発電効率向上への貢献や、国際的な低炭素発電および海外からの低炭素燃料輸入のスキーム構築への寄与が重要である。

参考文献

- (1) 国家戦略室, エネルギー・環境会議, 「革新的エネルギー・環境戦略」, 2012年9月14日
- (2) 都筑, 森山, 「東日本大震災を踏まえた国内エネルギー需給構造のあり方」, 季報エネルギー総合工学, 第34巻第4号, 17-29, 2012年1月
- (3) 総合資源エネルギー調査会, 「長期エネルギー需給見通し(再計算)」, 2009年
- (4) 国家戦略室, エネルギー・環境会議, コスト等検証委員会, 「コスト等検証委員会報告書」, 2011年12月19日
- (5) 資源エネルギー庁, 「地域間連系線の強化に関するマスタープラン研究会中間報告書」, 2012年5月

電力システムの新たな課題とその解決

～エネルギーインテグレーション：分散電源と技術開発

荻本 和彦 (東京大学生産技術研究所 特任教授)



1. はじめに

2030年のわが国のエネルギーの姿として、現行の「エネルギー基本計画」(2010年6月閣議決定)では、原子力が発電電力量の約半分を期待されていた。これが2011年3月11日の東日本大震災と福島第一原発事故の後どうなるのか。

本稿では、長期電力需給解析モデルESPRITを使って1年数カ月前に私が行った、将来のシナリオ選択による電力システムの需給に関する予備的な検討結果⁽¹⁾⁽²⁾を紹介し、そこから浮かび上がってくる電力システムの需給調整力の確保の課題、そのための需要の能動化を含めたエネルギーシステムインテグレーションについて説明する。

2. シナリオ選択のインパクト

(1) 4つのシナリオと想定コスト

私が行った計算の核になる部分は、原子

力、または再生可能エネルギーのシナリオ設定である(表1参照)。

震災前の見通しでは、2030年の太陽光(PV)の設備容量は5,300万kW、風力は1,000万kWであったが、シナリオ2a～4bではPV8,000万kW、風力2,800万kWとした。これは、頑張れば2030年に達成できる数字の上限という意味である。

原子力設備容量をシナリオ毎に比較すると、開発継続・40年廃止ケース(シナリオ2b)では設備容量はほぼ水平になっているが、開発中止・40年廃止ケース(シナリオ3)なら減っていく(図1参照)。

PVの設置価格は、現行の40万±5万円/kW程度が、15万±5万円/kW程度まで落ちると想定している。風力は15万円/kWで一定と想定している。技術開発、大型化、市場の拡大で設備そのものは安くなるであろうが、これからの導入に従い適地が少なくなっていく条件の悪い地点での設置になるので工

表1 4つのシナリオ設定

No.	シナリオ名	内 容
1	震災前見通し	震災前の供給計画,長期需給見通し,エネルギー基本計画に準拠(原子力は2020年までに+9基,2030年までに+14基),PV53GW,風力10GW
2a	原子力開発継続	原子力の開発は一部遅れを見込むが継続。福島を除く原子力は今後も計画通り運用。火力の一定増強, PV80GW,風力28GW
2b	原子力開発継続 40年廃止	原子力の開発は一部遅れを見込むが継続。福島を除く原子力は40年経過で順次廃止。火力の一定増強, PV80GW,風力28GW
3	原子力開発中止 40年廃止	原子力の開発は工事中2基(大間,島根)のみ。原子力は運開後40年で順次廃止。火力の一定増強, PV80GW,風力28GW
4a	原子力5年内廃止	原子力を5年で全廃。火力の一定増強, PV80GW,風力28GW
4b	原子力5年内廃止 火力増強	原子力を5年で全廃。火力の原子力代替37.5GW, PV80GW,風力28GW
4c	原子力5年内廃止 PV/風力増強	原子力を5年で全廃。火力の一定増強, PV160GW,風力160GW

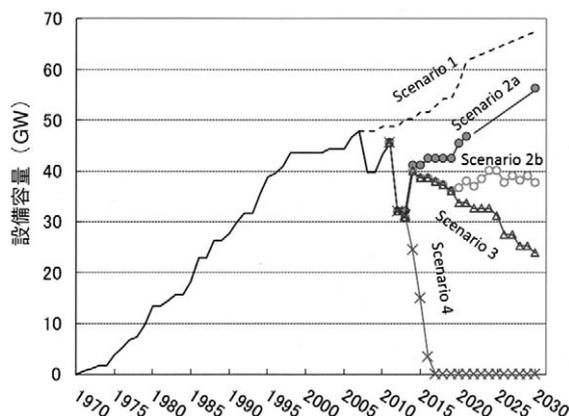


図1 原子力発電のシナリオ

事費が高くなり、両者が相殺すると考えたからである。

建設費は新設原子力が35万円/kW、新設火力では石炭火力25万円/kW、LNG火力15万円/kWと想定している。燃料費については、震災前2011年1月の単価が継続すると仮定した。従って、震災以後の実績を含めもう少し上がるはずだという要素は今回の計算には入っていない。

(2) 解析結果

① 2030年の全国の電源設備容量(図2左参照)

「エネルギー基本計画」では、従来型発電所(2億5,000万kW程度)に加え、PV5,300万kWと風力1,000万kWで合計6,000万kW強と想定していた(シナリオ1)。原子力にだんだん厳しいシナリオをとっていくと、原子力の設備量がだんだん少なくなり、シナリオ4a~4cではなくなる。

シナリオ2a~4bでは、PVを8,000万kW、風力を2,800万kWと想定、シナリオ4cでは1億6,000万kWずつと想定したものが一定の白枠の大きさで示されている。

シナリオ4bは積極的に火力を増強したシナリオであり、シナリオ4aに比べて石炭火力、天然ガス火力が少しずつ増えている。

② 2030年の全国の発電電力量(図2右参照)

日本全体の発電電力量は年約1兆kWhになっている。これは今回の色々な選択肢の議論以前の情報に基づいていることもあり、電化と省エネルギーの進展により需要がトータルで減っているからである。

「エネルギー基本計画」では、2030年の発電電力量の半分ぐらいが原子力から出てくると想定していたが、シナリオ1以外のシナリオでは、原子力の設備容量が減るのでその分の発電量が減る。これに対して、需要は変わ

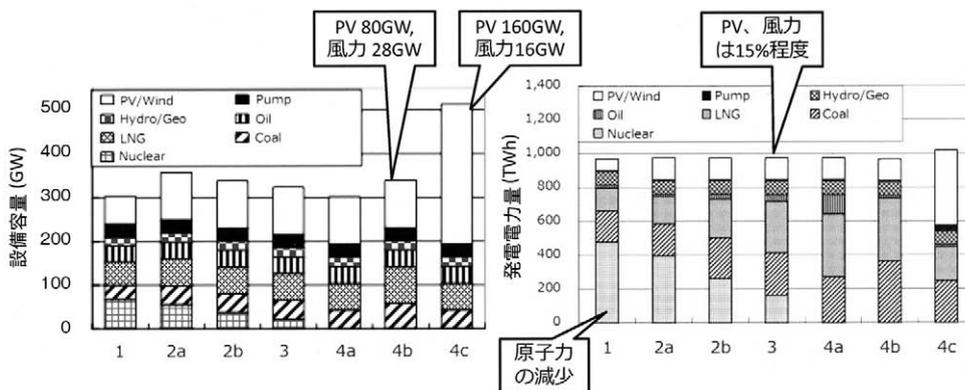


図2 2030年の全国の電源設備容量(左)と発電電力量(右)

らないので、減った分はまずPVと風力で補うことになる。夜は日が照らない、いつも風が吹いているわけではないので、PVの稼働率を約11～12%、風力の稼働率を20%強と想定すると、これらによる発電電力量は合計で全体の約15%となる。それでも足りない分は、燃料費をかけて石炭火力、天然ガス火力、そして石油火力で賄うことになる。

③ 供給不足の確率

電力の安定供給について供給不足電力量(EUE: Expected Unserved Energy)、供給不足確率(LOLP: Loss of Load Probability)を計算した結果、原子力の運転をいきなりやめない限り、電力が大きく不足することはない。ある程度の火力の増強を見込めば、そう無理のない範囲で足りるという結果となった。

④ 年間発電費用(図3参照)

図の左側は日本の全体の電力システムの燃料費合計で、右側は燃料費に設備費を加えたものである。

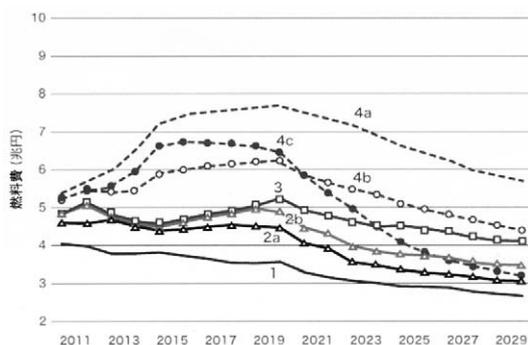
「エネルギー基本計画」では、2010年での4兆円前後の燃料費が2030年に向かってだんだん減っていき、3兆円を割ると想定されていた。省エネルギーもある程度進み電力需要が減少し、原子力の発電量も増えていき、火力の発電効率も上がっていくと想定されていたからである。ところが、原子力を全廃して積極的な手を打たないシナリオ4aでは、このエネルギー基本計画の2030年の燃料費に対し

約4兆円増えてしまう。つまり、現在の50数基ある原発をほとんど止めて、その減少分を全部火力で補うという現状と似た事態となる。需給検証委員会の報告書⁽³⁾によると、燃料費の増分が2012年度で約3.1兆円と予想されており、この計算結果は大体それと一致する。

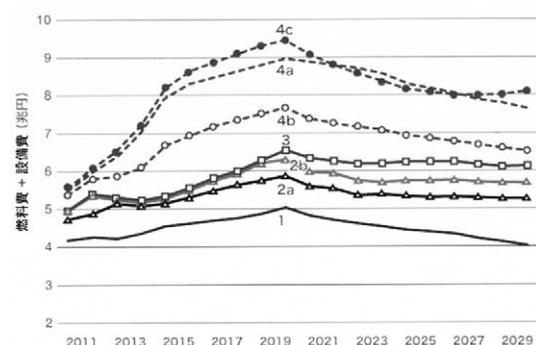
原子力を止めた時でも、シナリオ4bのように、火力を増強し発電効率を上げ、石炭火力の発電量を増加することで燃料費を安くしていくと、増分は4兆円よりも減ってくる。また、シナリオ4cの場合、再生可能エネルギーが大量に導入されれば、発電電力量の約40%を賄ってくれるので燃料費が減ってくる。

これに対して、右側の「燃料費+開発費」では、燃料費だけの場合は2030年に向けてぐっと下がっていくシナリオ4cが、シナリオ4aと同じところまで上がってくる。これは、PV、風力では、燃料費が安くても設備費が高いので全体としてのコスト増は免れないということを表している。火力を増強するシナリオ4bでは、マイルドな結果になっている。コストという点で、原子力の大きなロスを補う場面で火力が大きな役割を果たすことに間違いはないということである。

燃料費というのはほとんどが外国に直接払われるお金である。もし国内企業が設備を供給すれば、その代金は日本経済の中で還流するお金になるかも知れない。コストについては、電力需給の中か、日本の経済の中か、複数のバウンダリーで見えていく必要がある。



【日本全体の電力システムの燃料費合計】



【日本全体の電力システムの燃料費合計+設備費】

図3 2030年までの発電費用の推移

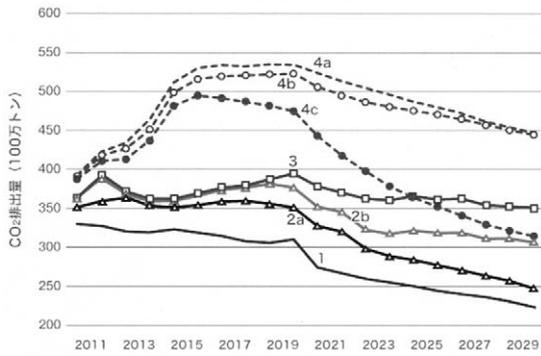


図4 日本全体の電力システムのCO₂排出量合計の推移

⑤ 二酸化炭素 (CO₂) の排出量 (図4参照)
シナリオ 4b では、シナリオ 4a とほとんど変わらないところまで上がってくる。これは当たり前の話で、原子力で減った発電量のほとんどを火力で補うシナリオ 4b では、結果はシナリオ 4a と変わらないので、シナリオ 4b ではCO₂ 排出問題を直ちに解決することはできないと言える。

⑥ エネルギーの自給率 (図5参照)
エネルギーの安定供給を考える場合、どの

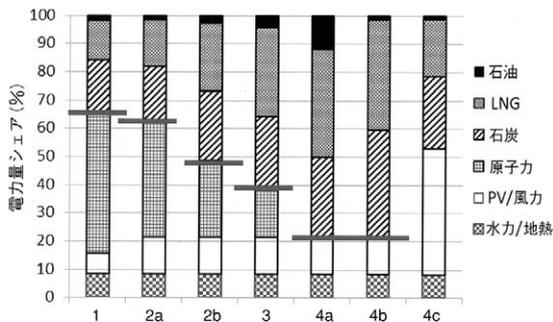


図5 2030年の電力量シェアと電力部門のエネルギー自給率

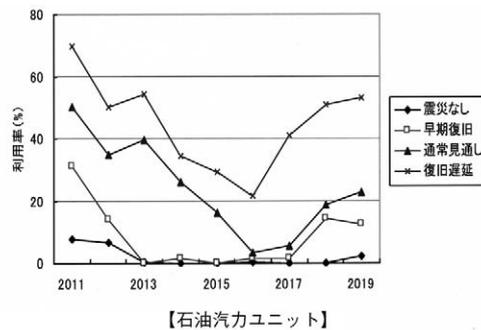
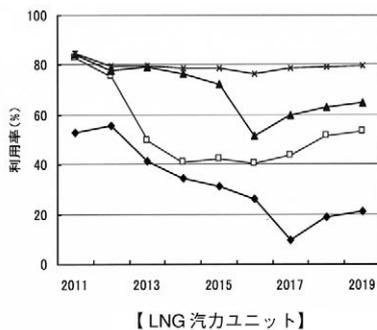


図6 火力ユニットの稼働率

ようなリスクを想定するかがその第一歩となる。海外で紛争が起こることを想定し、半年とか、1年とか、外国からの燃料供給が途絶えた場合、水力やPV、風力といった再生可能エネルギーは発電をつづけることができ自給分とできるわけである。燃料を1回装荷すれば一定の期間発電を継続できる原子力は発電を継続でき、自給の仲間に入れられるとするのであるが、その割合がだんだん少なくなり、発電全体としての自給率が非常に下がることは安定供給上の問題であろう。

備蓄は石油で行われている。ところが発電構成はほとんどが天然ガスと石炭である。だから、外国から燃料供給が途絶えた、または不都合になった場合にどう考えればいいのか。このグラフを見て代替案があるのか考えていかなければいけないし、将来とも石油を中心に備蓄をするのであれば、石油火力をどうするのか考えていかなければいけないであろう。

⑦ 火力の稼働率 (図6参照)
原子力が使えなくなれば、非常に燃料代の高い、すなわちランニングコストの高い石油火力もどんどん稼働するようになってしまう。また、再生可能エネルギーが導入されると、今度は火力の利用率がどんどん下がり、今よりも難しい運用が必要になってくる。

3. 需給調整力確保の課題

(1) 極端ケースからの示唆

2030年において、仮に総発電量の約20%を

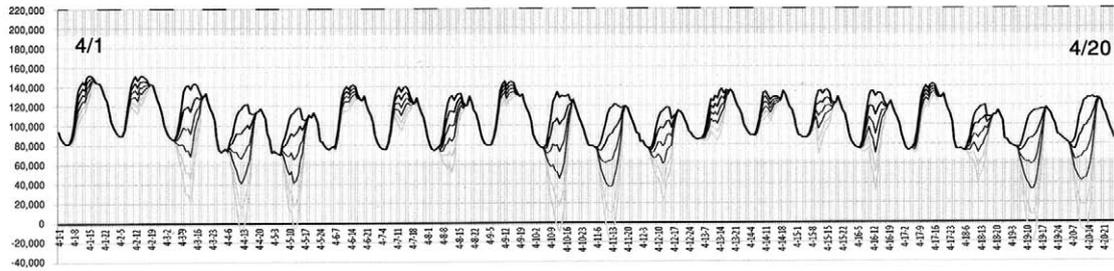


図7 2030年の系統から見た需要 (PVが総発電量の20%を占める場合)

賄えるPVがあったら、どんな需給バランスになるかを考えてみたい(図7参照)。

図の太い線は、ある年の毎日の天気の実績に基づいて、温度の関数である電力需要を4月1日(水)～4月20日(月)について想定したものである。需要は土曜、日曜の2日間がわりと低くて平日は高い。また、気温によって空調の使い方が違うので、微妙に需要が変わる。

この需要からPVの発電量を引いた残りの需要が一番下の線となる。PVの設備容量は2億kWであるが、モジュールは色々な方向を向いているし、インバーターのロスもある。色々な減分を勘案すると、全国が快晴の場合のPVの最大出力は1億5,000万kWぐらいになる。

4月3日(金)は晴れたので、本来1億4,000万kWぐらいの需要が、経済負荷配分を受ける電力システムの発電機から見た需要は2,000万kWぐらいに下がって見える。4月4日(土)、5日(日)は、もともとの需要が低い上に晴れていたため、PVの発電量を引くと需要はマイナスに見えて、従来の発電所から見える等価的な需要は「底が抜けた」となる。4月6日には月曜で需要が大きくなる一方、とても曇っていたか、雨が降っていたかでほとんど発電しなかったため、PVの発電量による減少は少ない。

(2) 再生可能エネルギーの出力変動

1日の需要の動きを見ると、朝方に需要が増えてまた下がる場所で、たくさんの発電所を起動・停止させたり出力を変化させたりして、懸命に需給バランスをとっているわけである。これよりも速い変化が毎日不規則に起こってくるということが、将来、再生可能

エネルギーをたくさん導入した時の一番大きな問題となる。

(3) ならし効果

PVの出力は、昼と夜で変わるし、天気によっても変わる。ただし、需給バランスは、例えば、東京電力管内の全需要と全発電量のバランスになるから、個々のPV、または設置場所毎の風力の出力がどのぐらい変動するかが問題ではない。送電線がしっかりしていれば、ある地点での出力変動は、広範囲の多くのシステムを対象として合計すると「ならされる」ことで、全体としてはさほどの変動にはならない(図8参照)。もちろん、例えば、PV、風力の最大出力が3,000万kWでその3%が変動すれば100万kWの振れとなる。もともとの需要変動にそういう変動が加わると、システムの運用は今までよりも難しくなると言って間違いはない。

(4) 需給調整力不足問題の2つの要素

需給バランスをとるのが難しいのは、需要そのものの変動、再生可能エネルギー自体の出力変動があるからだけではない。変動が増えると同時に、電力システムが確保できる調整力が減

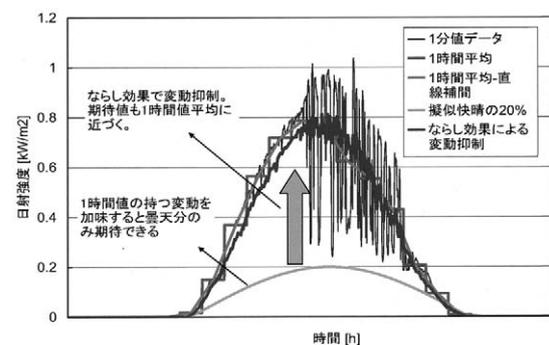


図8 ならし効果のイメージ

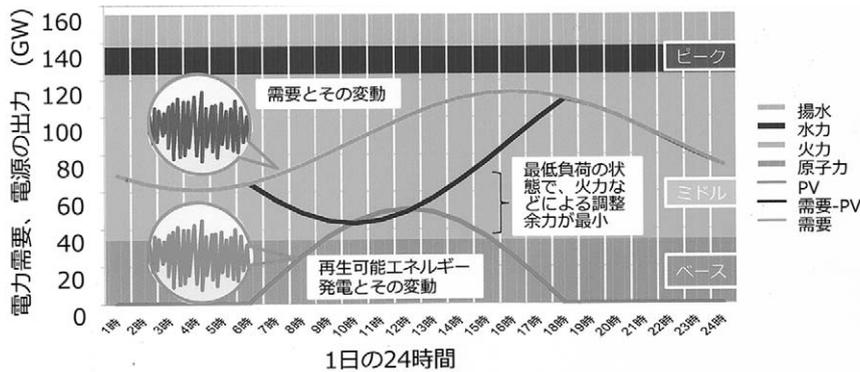


図9 再生可能エネルギーの出力変動，需要変動と需給調整力の関係

少するということが起きる。もともとの需要から再生可能エネルギーの発電量を引くと、従来の発電所の需要は、PVの場合だと昼間は少なくなる（図9参照）。11時、12時の段階では、発電所の需要が非常に少なくなっているから、最低運転負荷に制約のある火力発電所は運転できなくなるものがある。

変動は増えるが、それに対応する調整力を供給するユニットが運転できる量がだんだん少なくなって、これらが供給できる調整力が減少する。この2つの理由で需給調整の問題が起こると言える。

実は、これは世界共通の問題である。低炭素化しようとする、出力変動が大きいPVや風力といった再生可能エネルギーが導入される。または、非常に高効率での一定運転が求められる火力、または原子力が増える。だから、需給調整力の不足問題が深刻になっていく。実際に、今、ヨーロッパでは北部を中心に設置された風

力で運用上非常に厳しい状況になっているし、アメリカでも運用上の厳しさから、風力発電を抑制する運用をした結果、収入が減った事業者から訴訟が起こされている。日本でそういった問題が顕在化するの少し先であるが、世界の電力システムは全体として、その方向に向かっていると見えよう。

(5) 需給調整力確保の対応策

この問題を解く鍵は、第一は系統側の対応にある。揚水発電所が可変速化して、揚水時も調整力を持つようになること。それから火力発電所がより柔軟な運用ができるようになること。余地があれば、水力も使っていく。これはシステムの既存リソースを最大限に使うということで、非常に重要なことである。しかし、それだけでは将来の需給調整力の問題は解決しない。次は新たな需給調整力としての需要の能動化を見てみよう。

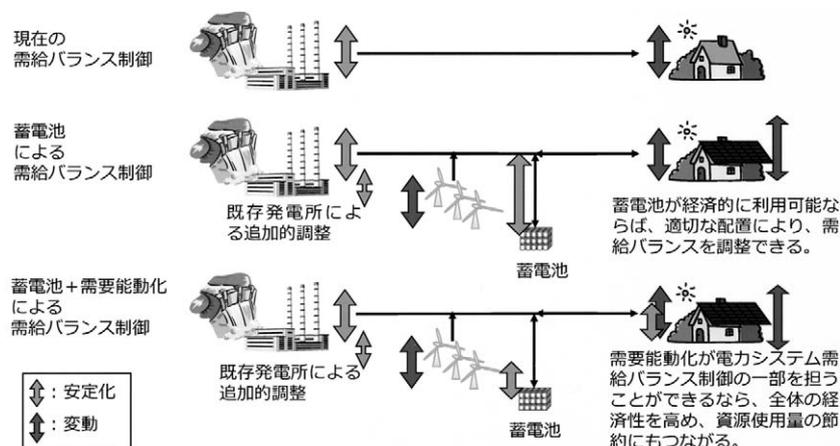


図10 需給バランス制御の3つの姿

4. 需要の能動化からスマートハウス

(1) 需要の能動化で「集中／分散エネルギー管理の協調」(図10参照)

需給バランスは現在、主要な発電設備を利用した「集中エネルギー管理」で管理されている。将来、再生可能エネルギー発電が大量に導入された際には、需要能動化を利用した「分散エネルギー管理」で需給調整の分担が期待される。

図の一番上は、電気を自由に使ってもらい、既存発電所が調整をするという現在の状況を表している。真ん中は、屋根の上にPVが設置されたり、地域的に風力が開発されたりして出力の変動量が増えるので、既存発電所だけでなく蓄電池を置いて需給調整するイメージである。

しかし、蓄電池のコストは非常に高いので、蓄電池だけで問題を解決しようとする、経済性の問題が発生する。

一番下のイメージのように、もし需要側から調整を手伝う力を引き出せれば、そして蓄電池や発電所の調整力と統合して活用すれば、経済的に需給調整力の問題を解決できるのではないかと考える。これを私は「集中／分散のエネルギー管理の協調」と呼んでいる。「集中」とは、例えば、東京電力の電力システム全体のことである。現行の運用では、中央給電司令所で需要を見ながら発電所をうまく運用している。それに対して、「分散」、例えば、家一軒、ビル一棟の需要が「集中エネルギー管理

」と協調する。全体で電気が足りなければ自らの需要を別の時間帯に移動したり軽減したりできるよ、また、電気が余っているなら、使わざるを得ない需要を持ってこられるよう協調できないかと考えるのである。

(2) 集中／分散エネルギー管理協調の実現方法

現在は、明日の天気予報に基づき、電力会社が発電所全体の起動・停止計画を前日の夜までに作り、当日運用するという、基本的にはおしまいである。

東日本大震災直後、テレビやインターネットで「明日の電力需給状況は厳しい」などという電力システム全体の需給状況に関する情報が流され、人間が節電などで対応した。しかし、再生可能エネルギーが大量に導入された将来の電力システムでは、明日の天気や時間帯によって電気が足りたり足りなかったりが日常茶飯事となるので、人間ではとても対応できない。

そこで「集中／分散エネルギー管理の協調」という対応になる(図11参照)。明日電気を何にどれだけ使いたいかを、家に設置されたエネルギー管理装置が把握して、この装置が電気代が一番安くなる電気の使い方をスケジューリングできて、家での電気の使い方をうまく制御できれば、需要の形が家一軒分変わる。そういう家が全国で世帯数は5,000万世帯の1割、2割、3割と増えていけば、全体の需要の形が変えられるのではないかと考える。

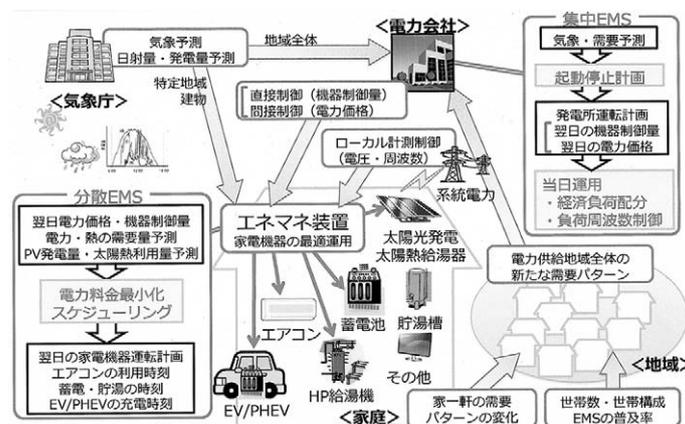


図11 集中／分散エネルギー管理の協調

このような調整を実施する時の問題はスピードである。ゆっくりスケジューリングして変えることもあるし、高速な情報通信網があれば、高速の応答も可能になってくる。恐らく、ニーズはゆっくりとしたものからより強い高速の応答を求める方向に行くわけだから、適用される技術、制度もだんだん手の混んだものに発展していくだろう。

この話は「スマートグリッド」そのものである。「スマートグリッド」はオバマ政権になって日本でも話題になってきた。中でも話題になっているのが「スマートメーター」である。「スマートメーター」というのは、双方向の情報通信機能を持ったメーターで、電力会社からある信号が来て、それに応答したら、その記録を返し、最終的に料金に反映する。このメカニズムにより、需要の能動化に利用できると期待されているのが「スマートメーター」である。

(3) 需給調整力の確保

これまでの需給調整力の系統全体でのイメージを見てみよう。PV、風力の発電量の変動を含めた必要需給調整力に対して、能動化需要、系統電源双方の活用による需給調整力を算出し比較する（図12参照）。1日24時間の中で、PVと風力の出力変動分と負荷変動分に対して、どれだけ調整力が必要か計算した結果である。大量のPVの発電のもと、左上の発電と需要のバランスは一見取れているように見える。しかし、左下の需給調整力のバランスの図で、既存

発電所の調整力を足したものが図中の棒グラフで、必要量が曲線で示されているが、必要量より供給量が少ない状況は24時間続き、需給調整力が不足しており、この状況では運用不可である。右側の図では、系統の発電機の多くを最低運転電力で運転するなど需給調整力を増加する対策をとった結果、需給調整力の不足する状態を昼間のみに限定し、その程度を小さくしたことから、一定量の再生可能エネルギーの発電量を抑制することで、運用が可能となった。このように、需給調整力が不足して安定運用ができない時間帯には、もっと既存発電機を経済性を犠牲にして部分負荷運転で運用したり、PVや風力の発電量を捨てる、つまり、発電を抑制することが必要となる。

(4) 需要、分散設置蓄電池による需給調整力の確保

蓄電池の活用の場合について、需給調整力を比べた（図13参照）。蓄電池がないと、必要量に対して需給調整力が足りないので、足りるところまで電気を捨てるしかない。

蓄電池があると、調整力が足されるので、捨てる量は少なくなるが、どうしても足りない場合はやはり発電抑制をしなければならない。「再生可能エネルギー100%は可能か」という議論がよく行われるが、こういうこれまでの再生可能エネルギーの導入水準では顕在化することのなかった需給調整の問題も入れないと将来の姿を正しくとらえた議論はできないわけである。

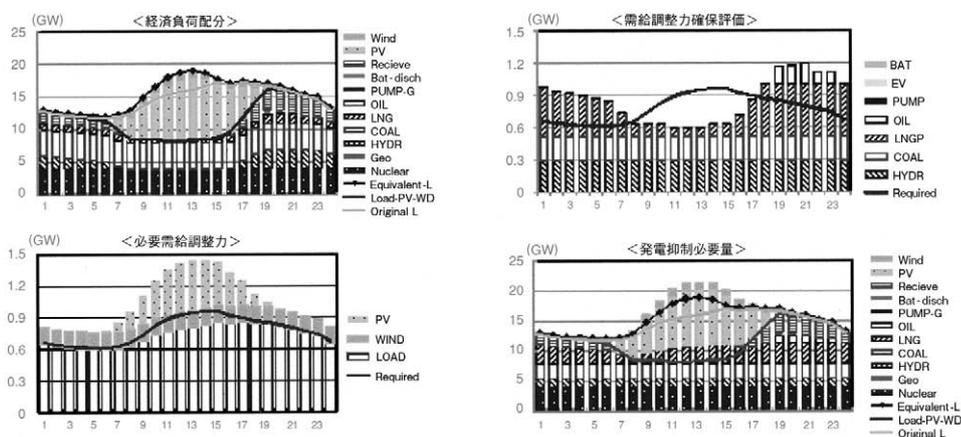


図12 需給調整力評価による運用変更と抑制電力量の分析例

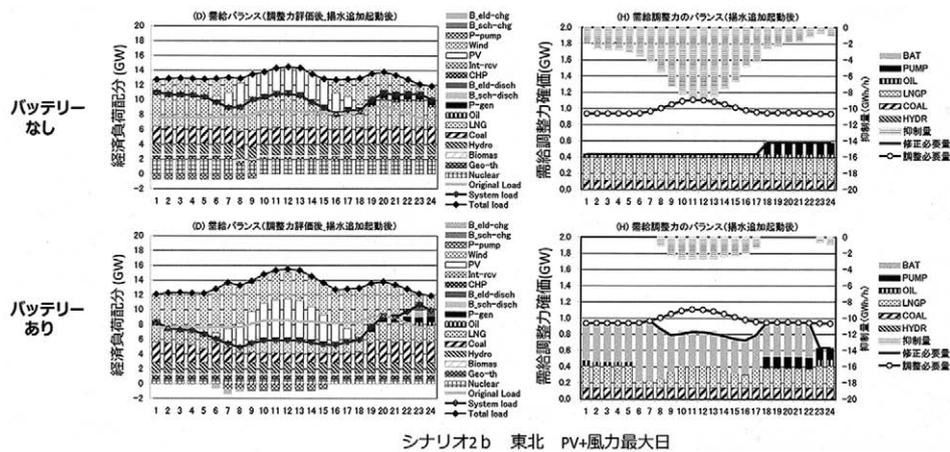


図 13 需給、分散設置バッテリーによる需給調整力

(5) ヒートポンプ給湯器、電気自動車充電の能動化による需給調整

変動する再生可能エネルギー発電が導入されると、系統の発電機から見た需要は、もとの需要から再生可能エネルギー発電量を引いた等価需要となる。等価需要の予測に基づくダイナミックな電気料金体系のもとで、ヒートポンプ給湯器や電気自動車の充電を料金が最低になるように制御できれば、ヒートポンプや電気自動車の本来のニーズを満たしつつ、需給調整に貢献できるのではないかと。

例えば、1台1kWのヒートポンプ給湯器がたくさん導入されていて、深夜だけでなく昼間も動かす。給湯器を1,000万台動かせれば、1,000万kWの需要をシフトできる。

1台3kW程度の電気自動車の充電をうまく制御できれば、30万台で100万kW、300万台で1,000万kWを制御できるかも知れない。ただ、車は本来の用途に使われている間は充電できないので、これをどこまで活用できるかは、今から議論する余地があると思うが、一定の可能性はあると考える。こういう需要の能動化という新要素を含めて、電力システムの運用を高度化させていくことで、どこまでPVや風力が利用できるかという議論が深まっていくであろう。

(6) 「スマートグリッド」の概念の拡大

従来の電力システムは、発電→送電→配電

→受動的需要で構成されており、電力の流れも一方である。これに対して、調整可能な需要、分散電源、プラグインハイブリッド車、蓄電池などの導入と、スマートグリッドの導入により、需要が能動的になり、電力の流れも双方向になる。

だから、「スマートグリッド」の核心部分として、需給調整に需要も使えないのかということ是非常に重要な概念なのである。

(7) エネルギー管理装置の高付加価値化と「スマートハウス」

2012年の夏に向けて行われた需給検証委員会では、需要に着目しようという議論も出た⁽³⁾。BEMS（ビルエネルギー管理システム）とHEMS（ホームエネルギー管理システム）に対して2012年度補助金が出ることになったのはこれを加速する意味がある。この補助制度によりエネルギー管理装置が定価10万円で売られる時代になった。恐らく今月、エネルギー管理装置が付いた家電が何種類か発売される。今まで理屈でしかなかった能動化を実現できる機器が実際の商品になったということで、今年是非常に大きな変化の始まりの年となるであろう。

しかし、需給調整のために1人ひとりがHEMSのようなエネルギー管理装置を買ってくれるわけではない。そもそもエネ

ルギーというのは、家庭、職場、街を便利に安全に運用するために使われているのだから、震災直後の節電でも、将来の需給調整のためだけの技術では受け入れられない。トータルで価値を上げていく必要がある。

だから家の中で人間が求めるもの、省エネルギー、コストダウン、もっと広い範囲の付加価値を含めて役立つもの、よりみんなが求めるものを実現していき、一部として需給調整機能が需要側から提供されるようになれば、変動性のある再生可能エネルギーを導入していくことにも役立てることができると思うわけである。

東日本大震災の後、「スマートハウス」が改めて話題になった。「スマートハウス」には蓄電池がついていることがよくある。確かに、節電、または停電という言葉が今キーワードになっているが、10年後、20年後どういうインフラを作っていく必要があるのかを考えて、技術を鍛練していくことが必要であろう。

5. エネルギーインテグレーション

(1) エネルギー技術、制度、人間の対応

エネルギーは、すべての人類の活動の基礎となる。従って、エネルギーの制約は人類の効用（経済活動、生活の質）レベルに直結するものである。

将来のエネルギー需給構造を考える際には、資源制約、環境制約、技術や社会経済などの不確実性を視野に入れ、持続可能性のもと、経済性、安定性、安全性の確保が必要となる。

今まで我々は色々な不確実性のある課題に、色々な技術と運用を組み合わせで対処してきた。これからは再生可能エネルギーを増やしたいが、今日見ていただいた需給調整力の確保を含め、それにはそれ特有の新たな問題がある。CO₂ 排出量も減らしたい。そういう問題に対処していくには、より多くのオプションの中からベストなものを選ぶということを不断に続けていかなければならないであろう。

理想の蓄電池と理想のエネルギーキャリアが実現すれば、「再生可能エネルギー 100%」となるかも知れないが、それは100年後、あるいはもっと先かも知れない。だから、時間軸を含めてすべてのオプションを組み合わせで、うまく計画をして実践していくことがエネルギーの世界にも求められるであろう。

(2) 最大範囲での最適化：エネルギーインテグレーション

今までは供給側が需給調整を担ってきた。しかし、将来の電力システム、ひいてはエネルギーシステムではそれだけではまだ需給調整力は足りない。その時は需要側の力も借り

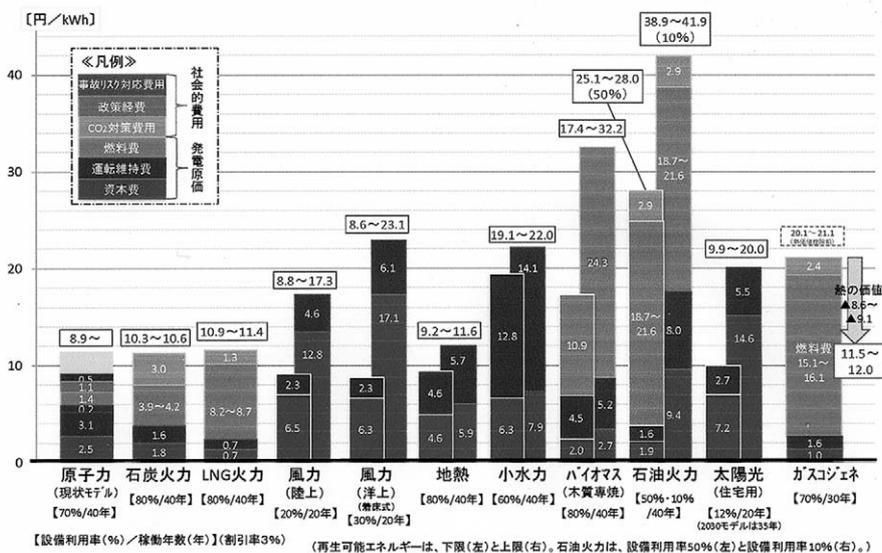


図 14 主な電源の発電コスト (2030年モデルプラント)

る必要があるという意味で、新たなものをインテグレートすることが必要になるであろう。それも家一軒なのか、街なのか、電力システムなのか、日本なのか、それとももっと広いバウンダリーで考えるのか。いつ、どこまで必要で、かつ実際に可能かということも考えていかなければいけない。

エネルギーシステム全体をイメージして、家→コミュニティ→ネットワーク→日本→世界と地理的な拡大、従来の供給側に加え需要側、ネットワークを取り込み、対象とするエネルギーも電気、ガス、燃料とするなど、より範囲の広い最適化で、より有利な解決法が得られるであろう。

さらに立ち戻るべき点として、人間、社会が必要とするのは、エネルギーそのものではなく、快適な温度・湿度の空間や高い生産性など、「サービス」であるということを忘れてはならないであろう。

6. おわりに

私も参加した「エネルギー・環境会議コスト等検証委員会」の報告書⁽⁴⁾では主な電源の発電コストを示している(図14参照)。

ここで重要なことは、このコストでいくらでも作れるものと、そうでないものがあるということである。再生可能エネルギーの資源がどこにどれだけあるのか。それも量によってコストが違う。そこを把握していかないと現実的な導入にはつながらないということを示したことは、目立たないが、この報告書の重要なメッセージである。今年のゴールデンウィーク前後に行われた需給検証委員会の報告書⁽³⁾では、この夏の電気は足りるか検討し、揚水発電所は結構難しい運用をしているということが紹介された。

エネルギーシステム、電力システムのことはもっと多くの人によく知ってもらいたい。原子力を直ちになくすと数兆円の燃料代を払うこと

になるという単純な事実であり、これを20年以内に再生可能エネルギーだけで解決するのは難しいということである。確かに今は、電気料金は見かけ上あまり上がっていないが、今後どんどん上がるのは必至である。何かを選べば、必ずその結果がストレートに出てくる。そこまですべてを知った上で我々は電力システムのあり方を選択する必要があるだろう。

最後に、これからの技術開発の視点としては、変動の調整・管理、不確定の増加、セキュリティといったものがある。需要端でのパフォーマンスに着目して、秒単位、分単位、1時間単位、日単位など様々な時間軸での柔軟性、ロバスト性を向上させることが重要であろう。

調整・管理というのは、個別技術、例えば火力発電所がより柔軟になってほしいとか、または柔軟な運用をした時に劣化が管理できるようにしてほしい、そういうものである。

貯蔵で見ると、1時間分の貯蔵から6カ月分の備蓄までをどう考えていくのかということもあろうし、再生可能エネルギーがどうしても使えない場合には積極的に発電抑制をしていくことも必要である。抑制、貯蔵、調整の全体が協調して動いていないといけない。ここで難しいのは、今までたかだか1,000カ所のプラントが協調すればよかったのが、5,000万世帯が協調することまで求められるかも知れないということだろう。

参考文献

- (1) 荻本和彦, 片岡和人, 池上貴志「長期の電力需給計画における低炭素化実現の予備検討」, エネルギー・資源学会第30回研究発表会, 2011年6月
- (2) 荻本和彦, 池田裕一, 片岡和人, 池上貴志「我が国の長期の電力需給ベストミックスの予備検討」, 電気学会電力技術・系統技術合同研究会, PSE-11-152, PE-11-136, 2011年9月
- (3) 「需給検証委員会報告書」, エネルギー・環境会議/電力需給に関する検討会合, 2012年5月
- (4) 「コスト等検証委員会報告書」, エネルギー・環境会議/コスト等検証委員会, 2011年12月

新たなエネルギー戦略と技術開発

モデレーター 山地 憲治 (公財)地球環境産業技術研究機構
理事・研究所長

パネリスト 萩本 和彦 (東京大学生産技術研究所)
特任教授

藤森禮一郎 (エネルギージャーナリスト)

小野崎正樹 (財)エネルギー総合工学研究所
研究理事



はじめに

議論のための4つの論点

山地 パネル討論のテーマは今日のシンポジウムの副題でもある「新たなエネルギー戦略と技術開発」です。

少なくとも現行の「エネルギー基本計画」(2010年6月閣議決定)の「2030年に電力の50%を原子力に」ということは不可能ですから、それに対する備えが必要です。そういう認識をもって、エネルギー分野において技術

開発が今後どういう役割を果たすのか、議論していきたいと思います。

モデレーターとして議論の論点案を提示します(表1参照)。1番目ですが、エネルギー安全保障(Energy security)と経済性(Economy)、温暖化対策(Environment)の3つのEを同時に達成するために原子力に依存できないという共通認識の下、省エネルギー、再生可能エネルギー、化石燃料クリーンのどれが重要と考えるのかということです。

2番目に、合意されている技術フロンティアとしてデマンドサイドの資源の活用があると思います。それから、わが国の技術の国際展開について。さらに、防災機能を持つこと。

表1 論点案

<p>1. 3Eの達成において従来のように原子力に依存できない —更なる省エネルギーのフロンティアは何か? —再生可能エネルギーでどこまで原子力の穴を埋められるのか? —化石燃料のクリーン利用でどこまで行けるのか? —省エネ, 再エネ, 化石クリーン利用の各分野でのキーテクノロジー</p> <p>2. 原子力に対する見解の違いを超えて合意されている技術フロンティア —デマンドサイドの資源の活用(需要の能動化)は期待できるか? —わが国の優れた技術の国際展開の具体化? —防災のためのレジリエンス(強靱性)強化はどうかすればよいのか?</p> <p>3. 技術だけでは達成できないという認識の下で技術に期待されていること —安心とは?(過酷事故対策, 放射性廃棄物処分, 低線量被曝のリスク) —エネルギー安全保障の確保における技術の役割? —消費者の選択(地産地消, 分散型システム, …)をどう考えるか?</p> <p>4. 2050年のエネルギー技術の主役は何か?</p>
--



山地 憲治氏

(公財)地球環境産業技術研究機構
 理事・研究所長

あるいは感じてきたことが何かの参考になればと思っています。

私がお話するエネルギー開発の視点は4点です(表2参照)。②から④については、これからの討論の中で色々なお話が展開されると思いますので、ここでは①の人口と電力の関係について少しお話ししようと思います。

表2 これからの技術開発の視点

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ① 世界の人口と電力 ② 電源の低炭素化 ③ 熱リサイクル社会 ④ 低炭素社会と電化 |
|---|

先進国では国民1人当たり平均1kW くらいの発電設備を確保していれば、家庭の中でほぼ快適な暮らしができる水準です。これに産業用の需要、あるいはビルや事務所の需要などを加えますと、その1.5~2倍くらいになります。

主要国の発電設備容量と人口の関係(表3参照)を見ると、日本は、発電設備容量と人口の比率が2.2です。アメリカは3.3と大きく、電力多消費国であることがわかります。カナダは3.9と高いのですが、これは水力設備が多いことが原因だと思っています。

欧州各国の比率はこの10年くらいほとんど変わっていません。恐らくヨーロッパの場合、

災害に強い、あるいは災害復旧ができる、そういう要求に応える技術フロンティアについて議論していただきたい。

3番目は技術に付加的に期待すること。安心という要求に対して技術が貢献できることはないか。あるいはエネルギー安全保障の中の技術の役割をどう考えるか。電力システム改革の中で、「電力の選択」が強調されていますが、消費者の選択肢を確保すること、あるいは地産地消を進めることをどう考えるか。その中で技術の役割は何かということです。

最初に、藤森さん、小野崎さん、荻本さんの順に言いたいことを言っていた後、私の論点案について議論を展開して頂こうと思います。

パネリストによるプレゼンテーション

世界の人口と電力

藤森 私は1969年に電気新聞に入社以来、およそ41年間にわたり電力・エネルギー問題に関わってきましたが、私がこれまで見てきた、

表3 国別の発電設備容量と人口

	総発電設備容量(A) (百万kW・2009年)	人口(B) (百万人・2010年)	A/B
カナダ	131	33	3.9
米国	1027	310	3.3
フランス	119	62	1.9
ドイツ	147	83	1.8
イタリア	101	59	1.7
イギリス	88	61	1.4
ロシア	226	141	1.6
中国	874	1340	0.6
インド	175	1118	0.15
日本	285	127	2.2
韓国	76	48	1.6

発電設備面では飽和状態に達していると考えられます。日本も既に人口がピークアウトして飽和状態になっていますから、これ以上増分の新規設備を作る必要がないところまできていると思います。

これに対して隣の韓国の場合、今後も工業化が進み生活水準も向上していきますから、設備容量は1億kWくらいまで伸びて行きます。中国も現在の0.6から日本並みの水準になるとすれば、設備容量が将来は二十数億kWまで大きく伸びる可能性があります。人口で中国を追い抜きそうなインドはまだ0.1ですから、今の中国並みになるだけでも、設備容量は相当伸びていくと思います。

今、中国だけでもすでに北米並みの設備容量があります。10年後にはインドと中国を含めたアジアだけで、恐らく北米とヨーロッパを足したよりも、もっと大きい市場が出現し

そうです。そう考えると、東アジアに出現する大きな市場の枠組みの中でエネルギー問題や環境問題を考えると様々な知恵が浮かび、問題の解決策も考えやすいのではないかと思います。日本の場合、これまで国内市場が結構大きかったので、どうしても電力会社もメーカー、そして政府も国内市場をベースに物を考えがちですが、例えば、韓国の場合には政府も電力会社の方もメーカーの方も海外市場を意識していますね。発電からスマートグリッドまで、もともと国内のニーズがそれほど大きくありませんから、最初から海外との関係で仕事をしています。

日本は国内需要が右肩下がりになっていきます。エネルギー政策は「需要の減少」という現実から出発して、海外への技術移転政策をもっと真剣に考えた方が良いと思っています。低炭素化の議論にしても、日本国内だけ

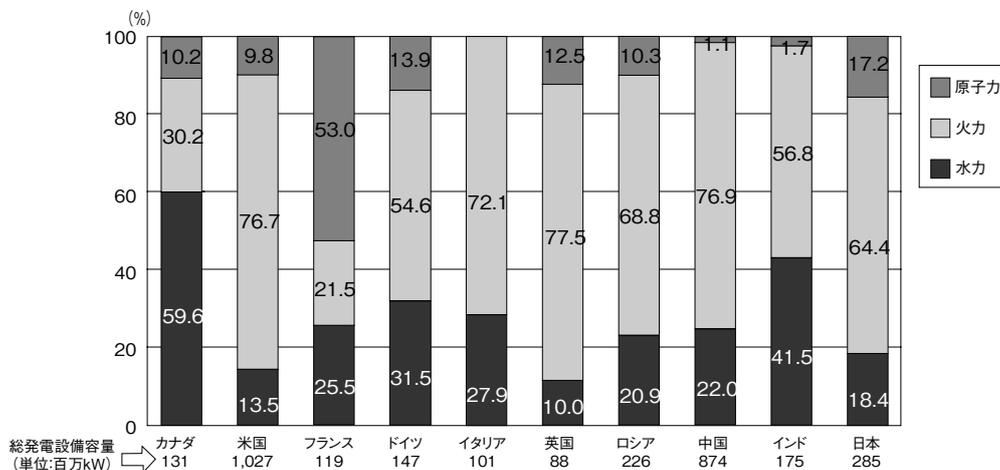


図1 主要国の発電設備の電源構成 (2009年)

で対策を考えると相当窮屈だと思います。世界の電力の40%は石炭火力に依存していますし(図1参照)、中国、インド、米国は7、8割くらいを石炭火力に依存しています。そういうところに日本の優れた技術を適用して、グローバルに低炭素化することを考えていけば、日本の低炭素化という問題にも違った解が出てくると思っていますのです。

長いタイムスパンでの技術開発と世界への目

小野崎 午前中、「2050年に向けた技術開発」という題目で発表させていただきましたが、その中で、私が言いたかったことは2点です。1つ目は、2030年以降のことも考えておかなければいけないということです。技術開発はかなり時間がかかります。特にエネルギー関係では、タイムスパンを30年、40年まで広げて考えなければいけませんから、2030年以降のネタをきちんとつかまえて技術開発に力に向けていかなければいけません。

2つ目は、世界に目を向けていかなければならないということです。例えば、二酸化炭素回収貯留(CCS)は日本ではなく海外でやったら良いとか、海外へのプラント輸出をさらに促進するとか、海外で製造した低炭素燃料、究極は水素を日本に持ってくるなどが考えられます。

監視、分析、予測をベースにシステム連動を

荻本 私の講演の最後のスライド「エネルギー技術開発の視点」で「不確定」というキーワードがあります。「不確定」をより「確定」させるために、監視、分析、予測があります。例えば、変動の激しい再生可能エネルギーを使いこなすには、今どれだけ発電しているかを把握して、それがどういう変動特性を持ち、明日どれだけ発電するかを予測することが非常に重要です。これがベースになって色々なシステムを連動させて運用できるようになると思います。



藤森禮一郎氏

(エネルギージャーナリスト)

また、一軒の家庭で電気や熱をうまく使うには、自分がどのぐらいそれらを使用するか予測する。それがマネジメントにつながると思います。

これから電力供給もだんだん不確定で使にくい世の中になってきて、個人もシステムも機器ももう少しくまなく立ち回らないといけません。ですから、私は今までよりも監視・分析・予測をベースに、色々なシステムを連動させることが大事だと考えています。

[パネル討論]

新たなエネルギー戦略と技術開発

山地 ここからは、私が提案した論点に沿って討論を進めたいと思います。

論点1 3Eの達成において従来のように原子力に依存できない
—更なる省エネルギーのフロンティアは何か?
—再生可能エネルギーでどこまで原子力の穴を埋められるのか?
—化石燃料のクリーン利用でどこまで行けるのか?
—省エネ、再エネ、化石クリーン利用の各分野でのキーテクノロジー

最初の論点。3Eの達成において従来のように原子力に依存できない。これは確実に予想されることです。再生可能エネルギー、省エネルギー、化石燃料クリーン利用の中で何が一番のキーになるのでしょうか。

再生可能エネルギーと省エネルギー

荻本 再生可能エネルギーでどのくらい原子力が抜けた穴を埋められるのか。努力をすれば、太陽光、風力を足して2030年で総発電力量の15%は実現できると思います。しかし、そこから先はかなりチャレンジングなので、省エネルギーしかないということになります。

省エネルギーをする時に、電気の省エネルギーだけを考えるのは極めてナンセンスです。「省エネルギー」というからにはエネルギー全体でやる。そのとき一番削減余地があるのは熱の利用です。ヒートポンプやコージェネレーションを使うという選択もあるでしょうが、太陽熱でお湯を沸かすとか、空調を使わずに窓を開けて涼むとか、省エネルギーを、機器を使わないところまで広げると良いと思っています。

山地 太陽光、風力は自然変動性のある電源です。地熱、小水力、バイオマスについてはどうお考えですか。

荻本 はい。たくさん量は期待できないと思いますが、小水力、地熱は開発できるだけ使いたいところです。変動性がないという点で地熱は良いと思いますが、地熱資源は東北や北海道に偏っていますから、どうやって使いこなしていくのが問題だと思います。

山地 発電量は相当取れると思うので、私も地熱は良いと思います。それから、太陽熱を含めて、環境熱をうまく使うことが重要だと思います。藤森さん、いかがでしょうか。

再生可能エネルギー「ブーム」の継続を

藤森 再生可能エネルギーは今大変な盛り上がりを見せていますが、これがブームで終わってしまうのではないかと心配しています。2、3年前までは日本中がスマートグリッド流行

りで、議論が百出していました。しかし今は、太陽光や風力に取って代わってしまった印象ですね。スマートグリッド論議は盛り上がりにかけています。そもそもブームやバブルというのは必ずはじけます。ですから再生可能エネルギー開発も、一時のブームに終わらせず、流れを継続し定着させる仕組みを作り上げることが大切だと思います。

低炭素化への対応という点では、大きなウェートを占めている「火力の低炭素化」をどうするかが国内的にも、グローバルにも重要な課題です。日本の低炭素化を、国内対策だけで達成するのは不可能と思われます。環境技術の海外移転、さらには、排出権の二カ国間取引等を国際的枠組みに取り入れていくなど、新しいスキームを構築していくべきだと思います。

山地 技術開発にとってブームというのはある程度必要です。太陽電池の場合、固定価格買取制度で相当な額がついて、今年度、多分200万kWぐらい導入されそうな勢いです。確かにブームですね。だけど、これはフィード・イン・タリフ（FIT）に支えられているので、真の経済性達成に向けて真剣に対応していかなければなりません。

ブームは、技術開発を最初に後押ししてくれます。それをうまく活用して良い方向にもっていく努力と結びつけたいとは思っています。

藤森 ダッシュするにはブームも必要だと思うのですが、例えば、戸建て住宅には太陽光設置を義務づけるくらい強力な施策を展開しないと、経済性だけで太陽光を一般に定着させるのは難しいのではないかと心配しているのです。

化石燃料クリーン利用は海外も視野に入れる

小野崎 化石燃料を使ってどこまでクリーン

利用ができるかというのは、資源量が十分であるかと言う議論とどこまでクリーンにできるかという議論の2つがあると思います。

資源量については当面心配ありません。化石燃料の中で選択の幅を広げれば何とかあります。

クリーン利用を追求すると、海外でCCSを行い低炭素燃料を海外で製造して持ってくるということを考えざるを得ないと思います。

国内でのクリーン利用を考えると、再生可能エネルギーとどう一緒にやっていくかということがあります。例えば、国内でも火力発電でのバイオマス混焼がずいぶん行われていますが、その量をどう増やせるか。それから、バイオマス以外の再生可能エネルギー、例えば、太陽熱を用いて火力発電の工程内で蒸気を温める、あるいは水を予熱することも可能だろうと思います。

海外を例にとれば、もっと可能性が広がります。我々も海外で太陽熱を利用して石炭からメタノールを作ろうと考えて、色々な試験や検討をやった経験があります。そういうふうに、再生可能エネルギーをうまく取り込んで低炭素燃料を製造するのも1つの方法だと思います。

そういう組み合わせの技術開発に、2030年を超え2050年までを見極めて今から取り組んでいく必要があると思います。

火力による出力調整～低くなる設備利用率

山地 原子力が減ってくると、化石燃料がますます重要になります。再生可能エネルギーの立ち上がりには時間がかかるでしょうから、将来も化石燃料に相当期待せざるを得ません。その時、再生可能エネルギー、特に太陽電池、風力の調整電源としての火力の役割は、非常に厳しいものだと思うのです。

例えば、ヨーロッパでは、自然エネルギーからの電力を優先給電することにして、火力が出力変動の調整をしているので、火力の設

備利用率が非常に下がっています。設備利用率が20～40%弱に過ぎない火力を新規で作ることは考えにくいのです。火力は火力なりに経済的に合理的に使う必要があると思うのです。いかがでしょうか。

小野崎 ご指摘のとおりだと思います。と言いつつながら、発電効率が低い古い火力をずっと使っていくわけにもいきません。発電効率を上げることで火力からの二酸化炭素(CO₂)排出量を減らすこともまた火力の課題です。

ただ、調整電源としての火力だと、設備利用率の低下は目に見えていますから、それを前提に日本全体の電力運用を図るために、どんな課金システムを作っていくかを考えていく必要があると思っています。

山地 荻本さん、さっきの講演の中で調整力不足になった時の対応として、出力を抑制する、バッテリーを入れる、デマンドサイドを使う、それから火力で調整するというお話だったのですが、そのあたりを真面目に評価した例はあるのでしょうか。

荻本 まだないと思います。海外では調整力の選択を誰が安く供給するかというマーケットベースでやったことになっています。しかし、それはまだ様々な選択肢の技術特性を評価して最適化した状態ではないと思います。

山地 「マーケットでの調整」という言葉は良いのですが、建設しても十分に使えるかどうか不明では、私は投資に悪影響を与えていると思っています。さっきの火力の話も同じ脈絡で言ったのです。

荻本 まったくその通りだと思います。

山地 2030年には太陽光80GW、風力28GWが導入されると言われましたが、本当にどこまでいけるといいますか。2030年の総発電量

を1兆kWhとしてシェアはどのくらいだと思われませんか。

荻本 太陽光80GW、風力28GWが導入された段階で、抑制量を1、2%ぐらいにして、総発電量の15%くらいは実現できると思います。一般水力を足せば25%（約2,500kWh）になります。その先は需要の電動化や火力の柔軟運用化で導入量をさらに増やすことができるかも知れません。

しかし、今、スペインやドイツでは火力の設備利用率が落ちて、既設発電所の維持ができなくなり、誰も新設をしたくない、既設を廃止したいという問題が起こっています。今はkWh単位で電気の取引をしているのですが、例えば、風力しかない島を想定してそこでkWh単位で電気を取引することに意味があるのか、電気やエネルギーのどの部分に価値があるかということまで考えていかないといけないと思います。

質の異なる電力供給の可能性

山地 電気の需給問題はものすごく理解されにくいです。発電能力である設備容量（kW）のバランスと実際の発電電力量（kWh）のバランスがありますから。

ただ、電気の質に差を設けて供給するというのはどうですか。今でも、例えば、逼迫したら切るという需給調整契約をすれば、ある意味「質の悪い供給契約」をしたことになりましたが、何か良いアイデアはありますか。

藤森 電力会社はこれまでずっと同質の電気を全国民に行きわたらせることを至上命題にしてきましたが、電力の供給形態が変わり、使用の形態も多岐にわたり、さらに小売りの完全自由化が進むことを考慮すると、商品としての電気にも「スタンダード電気」と「プレミアム電気」というようなサービスの仕方があっても良いのかなと思います。

例えば、ここまでは確実に供給保障をする「スタンダード電気」だけど、ここから先はお客さまの側で、自分のニーズに合わせてより高質の電気である「プレミアム電気」を選択できるというような仕組みです。ユニバーサルサービスだからと言って全ての需要家にまったく同じ条件で電気を供給する時代はもう終わったのではないかと、再生可能エネルギー利用に伴う電気の地産地消を進めていくと、そういう考え方になっていかざるを得ないと考えているところです。

山地 夏のピークの時の電気は原価が高いためから時間帯別料金にして高い料金にしておけば、それを反映した消費者行動をするはずだと経済学者などは考えます。多分、夏のピーク時の電気にプレミアム料金を課すことはできると思います。しかし、交流回路だと周波数が同期してしまうので、周波数変動の激しい電気とそうでない電気を別々に供給することはできませんね。そうすると、藤森さんがおっしゃったようなことを実現するアイデアはありますか。

荻本 電気が足りない時、電気の発電原価が高い時には料金を高く設定したり、いざという時に、優先的に切らせてもらうという契約を一定割合混ぜていくことはできると思います。

山地 そのアイデアは、需給調整契約という形で、一般的に開放されていないにしても、ある程度実現していますね。それを小口需要まで拡大しても構わない。スマートメーターが普及すると、多分できるということですね。

荻本 はい。

山地 しかし、それは「消費者が電気を選択する」のとは少し違うような気がします。その辺に過大な幻想がありはしないでしょうか。私、そういうつもりで論点案に「消費者の選択をどう考えるか」と書いたのですが。

荻本 「消費者の選択」と言った時、供給されるエネルギーの特性によって選択するというのではなく、今はどちらかという「電源を選択する」ことになっていると思います。それは、電力の需給、またはエネルギーの需給を国全体、社会全体でうまく育てていくという視点とはずれているような気がします。

電気の「地産地消」

山地 藤森さんの話の中に「地産地消」という言葉がありましたが、バイオマス利用とかで「地産地消」を進めているところもあります。熱利用も輸送が難しいので「地産地消」ですね。

しかし、電気というのはそもそも事業が「地産地消」でないところから成立しています。いくつかの需要家を集めてきてまとめて供給する。それが負荷平準化や規模の経済、供給安定性の点で利点があるからです。ですから、「地産地消」をストレートに電気供給について言われるとすごく違和感を感じるわけです。

藤森 電気事業は、もともと不安定な電源と不安定な需要をネットワークでつなぎ、大きなシステムにすることで安定化を図ってきました。設備の大型化、立地の大規模化によって供給の安定が図られてきましたと思うのです。ところが、再生可能エネルギー利用により、不安定な供給側と気ままな需要側を合わせて、安定化させるニーズが再び生じてきましたと思います。再生可能エネルギーを安定した電源として利用可能にするのがICT技術だろうと思います。技術は私たちの手の届く所まで来ています。

3.11以降、エネルギー問題を多くの消費者が自分の問題として考え、選択できる時代になったと言われますが、基本的には需要をいかにコントロールするかがスマートグリッドの大きなテーマになるだろうと思います。家庭の場合でも、例えばアンペア契約の場合「20アンペアまでは保証します。それを上回る分



荻本 和彦氏

(東京大学生産技術研究所
特任教授)

は切らしてもらう場合もありますよ」という需給調整契約を一般家庭まで拡げていければ、需給問題は意外に簡単に問題が解決するかもしれません。

小野崎 山地先生が言われるように、発電では「地産地消」にこだわることはないと思います。バイオマスを集めてきて、1万kWの発電所を作った場合の発電効率は二十数%しかない。それに対して、通常の石炭火力では42%あります。

ですから、例えば、バイオマスと火力とを組み合わせ、それなりの規模で発電して効率を上げるほうが良いと思うのです。「地産地消」にこだわって、その地域だけでやるのではなく、化石燃料等と組み合わせた形で効率化を図ることが1つの答えになるのではないかと思います。

例えば、太陽光にしても、純粹に「地産地消」だけで全体のバランスがとれるとは思えません。あくまで火力発電は集中的にやることによって効率を上げてきたという背景の中では、先ほどのような組み合わせの発想でいくのが良いと思っています。

荻本 「地産地消」については、私も意見を言いたくなります。まず、熱のように運ぶことが難しいものについては、「地産地消」できるのがベストだと言えます。しかし、電気とい

うのは線につながっていればどこまでも送れますから、そこからくるメリットは極めて大きいわけです。

東京電力管内全体の太陽光であれば、変動がかなりならされますから非常に使いやすくなる。これが家一軒だけでやるとなると、晴れたり曇ったりで変動する電気をみな溜めないといけませんので、明らかに不合理です。

ヨーロッパはそのことに気が付いています。15年ぐらい前、熱電併給を実施した時は、料金が安い電力会社から切り離れようという動きがありました。しかし、今、風力の人たちは、マイクログリッドと切り離れるということはまったく考えていません。

再生可能エネルギーの場合、大きなグリッドの中でそれをシェアしていく使い方が柱であるということに世界の多くの人たちが気付いています。日本も遅れずにそれに気付いて、どういうシステムをインフラとして作っていくのか考えるべきだと思います。

省エネ分野ではネットワーク化がキー

藤森 電気自動車に対する考え方を考えてはどうかと思っています。電気自動車の開発、改良が進み、付加価値が増すと1週間のうちに5日間くらいは、車庫に眠っている自家用自動車を日常的には電源として使い、週末にゴルフやお買い物など自動車として使うという時代が来るのではないのでしょうか。「マイカーの時代」から「マイバッテリーの時代」の予感もあるのですが、この辺はどう考えればよろしいのでしょうか。

山地 バッテリーは充電しなければいけません。バッテリーはあくまでも貯蔵装置ですから、家の電気として何日間も使うというのは災害時ぐらいだと思います。それ以外では、充電時にネットワークにつなぐことから、出力変動電源の需給調整に使えらると思います。そういう意味では非常に重要だと思います。

まとめると、省エネルギー分野のキーテクノロジーはやはりネットワーク化です。情報ネットワークで、再生可能エネルギーもデマンドサイドも調整します。化石燃料のクリーン利用も外国と協力が必要という点ではネットワークがキーだと言えるでしょう。

論点2 原子力に対する見解の違いを超えて合意されている技術フロンティア

- デマンドサイドの資源の活用(需要の能動化)は期待できるか?
- わが国の優れた技術の国際展開の具体化?
- 防災のためのレジリエンス(強靱性)強化はどうか?

山地 原子力が好きな人も嫌いな人も大事だと思っている技術フロンティアとして、自動車のバッテリー、ヒートポンプ給湯器の貯蔵槽、コージェネなど、デマンドサイドの資源利用があります。また、石炭火力の技術の国際展開。それから防災機能の強化があると思います。この問題に関して議論を進めたいと思います。

国内で実証済みの技術の国際展開

小野崎 私の場合、エンジニアリング会社に入社しましたが、その会社は、現在、LNGプラントを海外に建設しそれなりの利益をあげています。40年くらい前、私の入社当時は、LNG火力ができ始めた頃でした。それが今や総発電量の約30%を占めるようになってきました。

その結果、資源国で天然ガスを液化する設備、いわゆるLNG製造設備のシェアの半分以上を日本メーカーが占めています。今後、2050年に向けて、日本が常に技術を磨きながら海外に打って出るためには、やはり国内である程度実証したものを作り、それを海外に普及させるという形が必要です。また、そういう形で日本は生きていかなければいけないと思います。

山地 藤森さんのデータ（表3参照）でも、発電容量と人口の比率が2ぐらいいまでいくとすれば、中国、インドだけでなく、世界に色々なマーケットが大きく展開してくると思います。そういう時に、日本国内だけを見ているというのは正しくない。私もそう思います。藤森さんいかがでしょうか。

運転技術も国際展開可能

藤森 そういうことだと思います。日本の設計・製造技術は確かに素晴らしく世界に誇れるものです。さらに、もう1つ素晴らしいものがあります。発電所などの運転技術、保守管理技術です。設計当初の設備出力や熱効率が10年、20年たっても維持できているということです。これは現場力としてとても素晴らしいと思います。

ですから、技術移転する場合、設計・製造技術だけではなく、そういう素晴らしい運転技術も同時に移転していければ、国内事業の活性化にもつながりますし、世界の低炭素化も含めた新しい流れに貢献できると思います。

白物家電の機能を自動化し国際展開

荻本 電力システム全体を管理する集中エネルギーマネジメントと、需要側の分散エネルギーマネジメントが協調する「需要の能動化」が重要というのが私のメインテーマです。電源をうまく選択するために、出力が何分継続するかという情報の価値が高まることは間違いないと思います。

その上で、日本のどういう技術が今後の国際展開の可能性を持っているかということですが、その主役は、白物家電の中によくある機能だと思います。これまで取扱説明書を読み切らないと使いこなせなかった非常にきめ細かな機能が自動化されることで、その機能をフル活用できるようになっていく。すると、家電の価値が上がってきます。

だとすれば、家電がエネルギーと組み合わせ、場合によってはICTのシステムと融合して価値を上げ、国際的な展開ができるのかも知れません。それによって、収入を確保しつつ、世界のエネルギー需給にも貢献できるという大きな夢を現実のものとする可能性があると思います。

もう1つの可能性もあります。家一軒の中で、実際にそのバッテリーを持っていたとしても、自分の電気の利用を2kWに制限するという事は案外個人には難しく、できないことも多いと思います。ですから、ホームマネジメントシステム（HEMS）と分電盤でのモニタリングがインテリジェントに連動することで、ますます価値が上がってくると思います。

山地 いよいよIT家電の本領が発揮されそうだというお話ですね。ただ、補助金があって何とか成り立っているHEMSが一番のハードルだと思うのです。エネルギーマネジメントだけでの事業展開というのは無謀ですね。どんなに電気代を節約しても、1カ月1万円以上は節約できません。そもそもそれぐらいしか使っていないから。やはり、介護サービスとか、防犯サービス、行政サービス、エンタテインメントサービスなど色々な付加価値サービスが絶対必要だと思います。その場合、多分、エネルギー業界の人じゃない人の知恵を借りなければいけませんね。だから、エネルギー業界だけで考えるとあまりアイデアは展開しないのではないかと心配しています。非常に重要なポイントだと思います。

防災面で価値が高い化石燃料

山地 皆さんが触れられなかった防災は、非常に重要です。燃料電池や太陽電池の単独運転ができるようにすると、防災対応でのスマートグリッドとか、スマートコミュニティ形成に補助金が十分付いています。

現在進んでいる「エネルギー基本計画」の議論の中でも、石油系燃料の防災的な意義付けが非常に強く言われました。やはり、LPGは色々な所へ簡単に持って行けますし、石油ステーションも非常時に活躍していて、「最後の砦」と言われたりもします。

小野崎 石油の場合、阪神淡路大震災の時に経済産業省と自治体を中心になって軽油や灯油を緊急に運んだ例があります。ただ、今回の東日本大震災ではそれが必ずしもうまくいきませんでした。というのは、石油を運ぶためのインフラがかなり脆弱になってきているからです。例えば、内航船で重油を運ぶにしても、内航船の数自体が減ってきて十分な供給力を確保できなくなっているのです。

それから、石油火力も運転開始から40年が経っています。普段使わないその辺のインフラ投資をどう考えるかが、かなり大きな課題になってくると思います。

山地 そうですね。石油火力は、たまたま設備があったということですからね。ただ、石油系の燃料は貯めやすく運びやすいですから、防災面での価値が高いことは確かだと思います。

電力供給地での防災対策が大切

藤森 阪神淡路大震災の時は、電力の需要地が壊滅的な打撃を受けましたが、電力供給側はあまり打撃を受けませんでした。3日もすれば配電線が復旧し電気がつきました。したがって、地震が大きかった割には大きな問題が発生しませんでした。

ところが、新潟地震の場合も、東日本大震災の場合も、首都圏の需要地は非常に元気でしたが供給地が大きな打撃を受けてしまったのです。電力の場合、上流から下流まで防災対策はなかなか難しいのですが、東京湾内

に大きな地震や津波が来た場合、電力設備だけでなく石油やガス貯蔵、流通設備なども被害を受けてしまう可能性があります。その場合は需要と供給の双方がダメージを受けることとなりますが、その対策は想像が付きません。ただ、経験的に言えることは、需要地が元気で供給地が駄目になった場合の対策をより真剣に考えておかないといけません。

具体的な想定に立った防災対策を

荻本 今、自治体から防災機能を高めるプロジェクトがかなり提案されています。バッテリーを付ける、太陽光を付ける、燃料電池を付ける等々、色々なアイデアが出ています。私がそのような提案に共通して問題だと思っているのは、何に使うかはっきりしていないということです。どういう災害に対して、何日、どういう利用を想定しているのかがはっきりしていなくて、「何を設置すれば何日もつのか、もたないのか」というところで終わっているような気がするのです。

ですから、防災対策の議論をするためにも、例えば、テレビを見るため、情報を得るために必要な電力と、それに充てることができる物との組み合わせを考えないといけません。小さい場合はそれを考えやすいのですが、それが県レベル、全国レベルになった時、出口は何で、どういうシーンに対して役に立てるのかということを議論していくことが重要だと思っています。

山地 そうですね。防災といっても、リスクの形態と程度をどう想定するかということもあるでしょう。いずれにしても、防災対策というのは、今回の震災と原発事故を通して得たエネルギーシステムに対する要求事項の1つであることは確かで、その中で技術の果たす役割を見極めていくという視点が大事だと思います。

論点3 技術だけでは達成できないという認識の下で技術に期待されていること
—安心とは?(過酷事故対策,放射性廃棄物処分,低線量被曝のリスク)
—エネルギー安全保障の確保における技術の役割?
—消費者の選択(地産地消,分散型システム,…)をどう考えるか?

山地 原子力のことを念頭に、苛酷事故対策、放射線廃棄物処分、低線量被曝のリスクというところで技術に期待されるものは何なのでしょう。

時間の使い方を教えてくれる情報

荻本 停電の時も、放射線の時もそうなのですが、どこまで予見可能かということが大切だと思えます。つまり、「ぎりぎりでも聞かされても困るよ」ということがあると思うのです。ですから、防護するという技術もあると思いますが、それを予見し、対応する時間を作るという技術も結構大切かなと思います。

山地 広い意味でいうと、情報ですね。

荻本 そうです。情報もリアルタイムの情報ばかりでなく、ある時点までに「こういうことをしなさい」というような時間の使い方を教えてくれる情報を提供する技術が魅力的だと思います。緊急時迅速放射能影響予測ネットワークシステム (SPPEEDI) もその1つかも知れませんが、そういう技術があれば人間が落ち着いて行動でき、本来投入できる技術が使えるようになると思います。

進んだ技術を使いこなす力の重要性

藤森 技術はどんどん進んでいきますが、それを「使いこなす力」を持つことが一番大事です。情報開示の必要性が高まっていますが、リアルタイムに情報を入手できても、それを使いこなせないという問題があります。

茨城県・東海村のJCO事故(1999年9月)



小野崎正樹氏

(財)エネルギー総合工学研究所
研究理事

の時の話を思い出したのですが、JCO事故の際、東海村の小学校の校長先生は、データを毎日パソコンで取っていて、風向きが海に向かって吹き始めたのを確認して下校させたそうです。その先生は事故後、子供たちに「科学のことを良く知らない人たちが事故を起こしてしまいましたが、科学を良く知っている人がたくさんいらっしゃったので事故を終わらせることができました。君たちも科学のことをもっと勉強しようね」と話されたそうです。放射線とか被ばくなどの難しい言葉は一切使わずに子供に説明したそうです。

情報を理解してそれに対応できる力がある程度備わってこない、どんなに技術が進んでも宝の持ち腐れになってしまいます。技術だけでなく科学技術に対する意識、認識を高めていくような教育をしていくことが大切ですね。

専門家からの確に出てくる情報で「安心」へ

小野崎 「安心」という点では、情報がどんな形での確に入ってくるかという部分が大事だと思っています。東日本大震災では、発生後に流れている情報を本当に信じて良いか分からない、それぞれの専門家が見ていても良く分からない点が多々あったと思います。

2年ぐらい前、ロンドンでの国際会議に出

ていて、「そういう時に誰の意見を信じますか。政治家ですか。宗教者ですか。エンジニアですか」というアンケートがありました。「研究者なりエンジニアは信じられる」という回答が圧倒的に多かったそうです。やはり、最後はそういうエンジニアなり、研究者という専門の人間が的確な場に出て行きの確かな情報を流すようなシステムというのが最も安心につながると思っています。

山地 私がこのテーマを書いた時に念頭にあったのは、固有安全炉という原子炉のコンセプトです。外部から水を強制注入しなくても冷える、炉心崩壊が起らない、そういう設計はいくつかなされています。福島第一原発1号基のアイソレーションコンデンサーは自然循環で動くわけですが、バルブが閉まると駄目なのです。バルブのところを、例えば、温度上昇で自動的に融けるようにする設計もあることはある。しかし、地震とかで経路が塞がれて、設計した機能が働かないことだってあります。想定というのはどこまで行っても想定でしかなくて、「絶対的固有安全炉」なんてないわけです。設計の限界を見極めながら議論しなければいけなくて、コストとリスクのトレードオフみたいなことが固有安全炉でもあるのだと思います。

論点4 2050年のエネルギー技術の主役は何か?

山地 最後に、「2050年のエネルギー技術の主役は何か」ということで、今の気持ちを言っていただけだと思います。

再生可能エネルギーと火力の組合わせ、 ガス化技術の開発促進

小野崎 私自身がやっていきたい方向を2点挙げたいと思います。1つは再生可能エネルギーと火力との合体。特に、太陽熱関係をうまく利用して低炭素燃料を作る、あるいは発電をしていく技術の開発です。

もう1つはガス化技術の開発です。今後、廃棄物の処分、バイオマスの処理、何に対してもガス化という技術がますます必要になってくると思います。発電も低炭素燃料製造もそうです。ガス化技術はまだまだ進歩の余地があって、マテリアル・リサイクルをしていく上でも絶対欠かせない技術であると認識しています。

熱エネルギーの3Rを

藤森 私の将来に対する期待は「エネルギーリサイクル社会」です。今、家電や自動車、プラスチックなど色々な産業廃棄物についてリサイクル、リユースが進んでいます。熱エネルギー分野についてはこの面は遅れていると思います。熱エネルギーについてもリデュース、リユース、リサイクルの3Rを進めることが必要だと思います。身の回りにある環境エネルギーの利用はもちろんで未利用排熱エネルギーを積極的に活用し太陽光、太陽熱、蓄電池などと組み合わせ、化石燃料に頼らない社会が2050年代に実現すれば良いと思います。

各々の技術を活かすネットワークと情報

荻本 私はその挑戦を実現するためのネットワークや情報の流れがあってこそ、各々の技術の優れた点を活かすことができると思っています。その要素は何かというと、例えば、運用スケジュールの修正をできる技術、または、色々な特性を学習して適応できる技術です。そういうシステム技術が各々の技術の利点を活かすと思います。

おわりに

2050年の主役は情報

山地 技術開発をやる人は、1つのテーマに

絞って、技術開発をしなければなりません。技術開発のテーマはいっぱいあります。それぞれが大事なテーマだと思います。しかし、多分、大きな方向性、技術フロンティアはやはりデマンドサイドにあるのではないのでしょうか。デマンドサイドの技術開発、それも供給側と連動するような、萩本先生の言う需要側を能動化できるような技術、そういう技術が大事だと思います。

私は 2050 年のエネルギー技術の主役は情報だと言おうと思ったのです。つまり、エネルギーと情報とを組み合わせる、システム化する、ネットワーク化する、制御する、計画する、そういうところの情報が主役になっていくんだと思います。

技術開発は抽象レベルではできませんが、エネルギー技術開発は非常に長期的に大事ですから、方向性を議論することもたまにはやっておく必要があると思っています。今日のパネル討論が少しでもその役に立てば幸いです。

どうも長い間ありがとうございました。

閉 会 挨拶

三代 真彰 (財)エネルギー総合工学研究所
副理事長

本日は朝10時から長時間にわたり、これほど多くの方々に熱心に聞いていただき、まことにありがとうございました。本当に示唆に富む色々な話が聞けたと思います。午前中は京都大学の木下先生からご講演を頂きました。木下先生のお話の中で、「少数者、異端者の扱いをどうしたらいいのか」、「複雑系の中で、共にみんなで考えるにはどうしたらいいのか」、「意地悪いさんが今の世の中必要なのではないか」などが、強く私の印象に残りました。私は、教育的な立場からも意地悪いさんが存在することが非常に大事だと感じました。その後、当研究所の成果報告をさせて頂きました。午後の部では、最初に、荻本先生から「電力システムの新たな課題とその解決」というタイトルでご講演を頂きました。その中で各種シナリオの評価と課題、需給調整の考え方、そしてより多くのオプションの中で考えていけないといけないという「エネルギーインテグレーション」の話がありました。

最後のパネル討論では、山地先生をモデレーターに、それまでに講演された荻本先生、小野崎研究理事に、エネルギージャーナリストの藤森さんを加えて議論していただきました。私は最後の「2050年のエネルギー技術の主役は？」という質問に対して、「人間である」と答えたいという気持ちを持って、お話を聞いていました。やはり、エネルギーの使い手は人間です。すると、何のためにそのエネルギーを使うのか、よく考えて使うのが一番大事なのではないか。一時、私は環境問題にも携わっていましたが、例えば街中を四輪駆動のRVで乗り回すことは、環境的にはどのように理解したらいいのか、考え込んでしまいました。そういう「人間の意識」も含めて、2050年の人たちがどういう生活をすればいいのか、それを考えるのも非常に大事だなという印象を持ちました。皆さんはいかがでしょう。

エネルギー総合工学研究所は、「総合工学」の観点から今後ともエネルギー技術課題の解決に向けて研究を進めていきます。そして、またこのようなシンポジウムのような場で皆様と情報共有を図っていきたいと思います。今日は本当に長時間、熱心に聞いていただき、ありがとうございました。(拍手)

研究所のうごき

(平成24年10月2日～平成25年1月1日)

◇ 第18回賛助会員会議

日時：10月5日(金) 16:00～19:30

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 マスメディアと原子力(経済ジャーナリスト(元日本工業新聞社常務取締役)小澤昇氏)

◇ 月例研究会

第316回月例研究会

日時：10月26日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. 2015年燃料電池自動車普及開始に向けて
ー水素供給インフラ構築の取り組みー
(水素供給・利用技術研究組合(HySUT)技術本部長 北中 正宣氏)
2. 太陽光発電システムの現状と展望ー激変する太陽光発電ビジネス環境ー(株)資源総合システム 代表取締役社長 一木 修氏)

第317回月例研究会

日時：11月30日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. 東日本大震災後のわが国及び世界の石炭需給動向
(一般財団法人石炭エネルギーセンター参事情報センター長 原田 道昭氏)
2. 化学原料とエネルギーの現状と今後の見通し
(財)エネルギー総合工学研究所 プロジェクト試験研究部 副参事 埴 雅一)

第318回月例研究会

日時：12月21日(金) 14:00～16:00

場所：航空会館5階 501・502会議室

テーマ：

1. 東京ガスにおける家庭用燃料電池エネファームの導入状況と今後の市場展望
(東京ガス(株) 燃料電池事業推進部 燃料電池技術グループマネージャー 岡村 潔氏)

2. 次世代燃料電池SOFC小型トリプルコンバインドサイクルシステムの開発状況と今後の展開

(三菱重工業(株) 原動機事業本部 新エネルギー事業推進部 次長 小林 由則氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：蓮池 宏, 小川 紀一郎, 宇多村 元昭

テーマ：超臨界CO₂ガスタービン発電システムの開発

発表先：平成24年度火力原子力発電大会(札幌市)

日時：10月5日

発表者：蓮池 宏, 小川 紀一郎, 石田 敬一, 松尾 栄人(アーカイブワークス)

テーマ：蒸気-水ランキンサイクルによるバイナリー発電の技術開発

発表先：日本地熱学会 平成24年学術講演会(秋田県湯沢市)

発表時期：10月24日～26日

発表者：徳田 憲昭, 雪田 和人(愛知工業大学教授)

テーマ：風力発電の出力変動特性と蓄電池による平滑化

発表先：「第34回風力エネルギー利用シンポジウム」(日本風力エネルギー学会主催)

日時：11月28日

発表者：石本 祐樹

テーマ：各セクタにおける低炭素水素の需要評価

発表先：第32回水素エネルギー協会大会

日時：12月7日

[寄稿]

発表者：蓮池 宏, 小川 紀一郎, 宇多村 元昭,

山本 敬, 福島 敏彦

テーマ：超臨界CO₂クローズドサイクルガスタービンの開発ーベンチスケール装置による運転試験結果ー

発表先：日本ガスタービン学会誌

日時：9月号(Vol.40, No. 5)

発表者：坂田 興

テーマ：化学工学年鑑水素エネルギーシステム

寄稿先：化学工学年鑑2012(2012年10月発行)

発表者：宇多村 元昭, 梶田 梨奈, 山本 敬,
蓮池 宏

テーマ：超臨界 CO₂ クロージドサイクルガスター
ビンの開発－再生熱交換器の開発－

発表先：日本ガスタービン学会誌

日 時：11 月号 (Vol. 40, No. 6)

発表者：松井 一秋, 楠野 貞夫, 波多野 守, 山田
英司, 藤井 貞夫

テーマ：特集テーマ「エネルギー政策をめぐる論
点」5 世界の原子力利用の動向とわが国の
状況

発表先：電気評論 (電気評論社発行)

発表日：12 月号

◇ 人事異動

○11月1日付

(出向採用)

森田能弘 原子力工学センター主任研究員

鈴木博之 原子力工学センター主任研究員

編集後記

昨年末にちょっとした傷を不注意により化膿させてしまった。薬と医者のおかげを少し受けて順調に治ったのだが、今更ながら人体の自然治癒力に感心させられた。まだ身体の基本が、傷の再生を可能とする程度には保持されているのかと安心したものである。

小生の傷などはどうでも良いが、日本のことを考えると、年来の重篤な疾患を抱えた上に、2年前には大震災および原発事故という大怪我を負った。これらの病や傷は、自然に任せて治ることを待つことはできず、治療のための大技が必要なことは明らかであろう。しかし、どのような治療を施そうが、最後は矢張り自然治癒力が無ければ、治ることは期待できないのではないかと。そして、それを可能とするのは、人の気持ちなのではないか。人の心、気分、あるいは気の持ちよう等など、表現は色々あろうが、国の基本だろう。時折、日本人は捨てたもので

はないと思わされる事例を見聞きしたり、また外国からのそのような評価が伝えられたりする。新政権による適切な経済・エネルギー・外交政策を受けて、前向きな気分が国民に広がり、そこから発する自然治癒力によってこの国が立ち直れると信じたい。

ただし、立ち直るべき姿について、おぼろげながらも認識を共有することが必要であろう。1960年頃からの高度成長期と異なり、今日は人口減少期である。2030年の人口は1億1,000万強と、2011年より約1割減少すると予測されている。GDPの大きな伸びは期待できず、一次エネルギーの総量も減少していくと予想される。そんな時代にあっては、大きな数字を追い求めるのではなく、如何に中味を充実させるかが重要である。政府ばかりでなく、日本人一人一人の気の持ちようが問われているのだろう。

編集責任者 疋田知士

季報 エネルギー総合工学 第35巻第4号

平成25年1月20日発行

編集発行

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(8F)

電話 (03) 3508-8894

FAX (03) 3501-8021

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

(印刷) 株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。