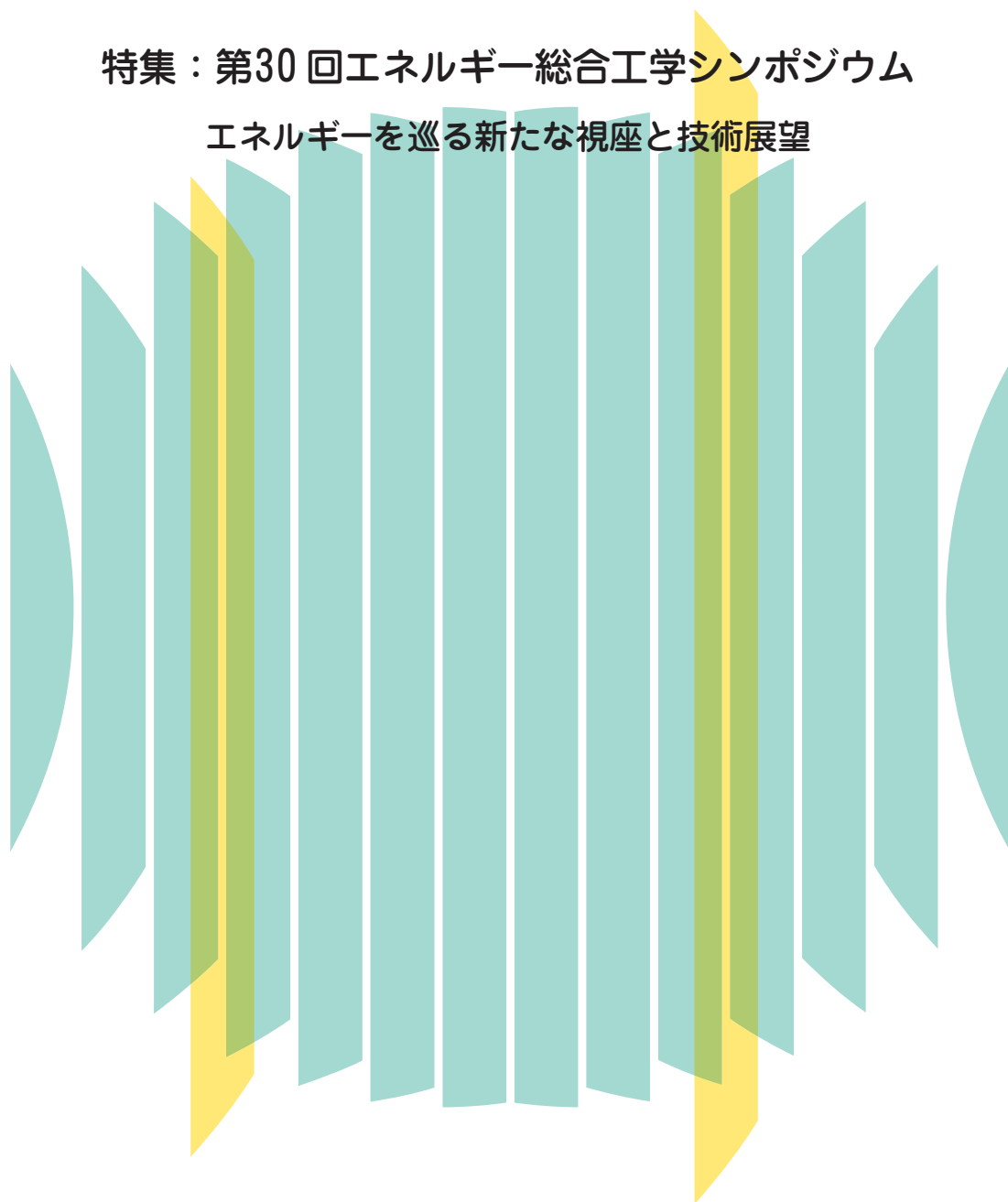


季報 エネルギー総合工学

Vol. 38 No. 4 2016. 1.

特集：第30回エネルギー総合工学シンポジウム

エネルギーを巡る新たな視座と技術展望



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

第30回エネルギー総合工学シンポジウム

エネルギーを巡る新たな視座と技術展望



来賓挨拶を述べる 谷 明人 経済産業省 技術総括審議官

日 時：平成27年10月9日（金） 10：00～15：45

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 技術総括審議官	谷 明人	3
【基調講演】 エネルギーミックスと地球温暖化対策	(公財) 地球環境産業技術研究機構 理事・研究所長	山地 憲治	5
【基調講演】 エネルギー情勢のグローバルな変化と総合商社の取組み	三井物産(株) 執行役員 (株)三井物産戦略研究所 代表取締役社長	中湊 晃	17
【講演 1】 2050 年に向けたエネルギー技術への期待	研究理事・プロジェクト試験研究部 部長	蓮池 宏	31
【講演 2】 エネルギーミックスを支える原子力技術の課題と期待	常務理事・原子力工学センター長	田中 隆則	38
【講演 3】 火力発電の低炭素化技術展望	理事・プロジェクト試験研究部長	小野崎正樹	44
【講演 4】 電力システムの将来像	プロジェクト試験研究部 主任研究員	益田 泰輔	55
【講演 5】 水素大規模導入に向けた技術展望	プロジェクト試験研究部 部長 プロジェクト試験研究部 参事	坂田 興 後藤 新一	63
【閉会挨拶】	(一財) エネルギー総合工学研究所 専務理事	佐藤 憲一	70
【研究所のうごき】			71
【編集後記】			74

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



皆さん、おはようございます。本日はご多忙中のところ、私共の第30回シンポジウムに多数ご参加いただきまして大変ありがとうございます。また、皆様には日頃より当研究所の事業にご理解ご協力を賜っていますことに、この場を借りまして厚く御礼申し上げます。

昨日もやれ台風が北海道のほうで大暴れしていたり、台風18号による常総市の大水害など、地球温暖化の影響が出たのではないかと少し心配しておりました。その反面、ラグビーが世界で2勝し、日本も捨てたものではないなと思いました。新しいところではノーベル賞受賞者が日本から2人出ました。そういった中で、「1億総活躍」を目指す内閣改造も行われました。今年は、1つの変わり目にあって、混沌としているのではないかと思います。

エネルギー情勢を見ますと、アメリカの「シェール革命」が大きな転機となって、世界のエネルギー需給構造が大きく変化しつつあります。今、米国は世界最大の天然ガス生産国と言われ、石炭から天然ガスへの転換を加速させています。アメリカの報告を見ていますと、オバマ大統領が地球温暖化問題について、お金、その他政策転換をしているという感じがいたします。一方、欧州では自由化が進んでいるせいか、経済性がある石炭火力が依然として残っています。発展途上国では、中国を始めアラブ首長国連邦(UAE)など原子力の利用拡大がかなり急ピッチで進められているようです。そういう意味では、日本のエネルギー問題は大きな課題として取り組まなければなりません。

一方で、先ほど申し上げましたように、日本では今夏の猛暑や大型台風の襲来、世界ではインドの熱波など異常気象が見られました。このように、地球規模の気候変動がかなり顕著になってきたと思われます。11月末からパリで開かれる「COP21」(気候変動枠組み条約第21回締約国会議)では、各国が新たな温暖化対策の目標案を提出することになっています。政府は7月11日に、温室効果ガス削減目標として、2030年度に2013年度比で26.0%削減(2005年度比25.4%削減)を決定いたしました。この問題の解決には、全ての主要国が協調し公平で実効性のある新たな国際枠組みが構築されるかどうか鍵であります。

わが国では、福島第一原子力発電所事故以来、4年半が経過した現在も約11万人の方々が避難生活を続けておりまして、事故の収束、福島の復興・再生が全力で進められているところです。しかし、まだ最終的な姿が見えておらず、かなり苦戦している、問題もあるということですから、これからも創意工夫して解決していかなければいけないと感じている次第です。

「COP21」への提案に付随しまして、わが国のエネルギー政策の基本政策もほぼ同時に出ています。これにつきましては、後ほど地球環境産業技術研究機構（RITE）の山地憲治先生から詳しいお話を伺えるのではないかと考えています。また、グローバルなエネルギー情勢の変化に関しましては、三井物産戦略研究所の中湊・代表取締役社長より「エネルギー情勢のグローバルな変化と総合商社の取り組み」という演題で、ご講演を頂く予定です。その後、当研究所より、エネルギーの将来像を検討する上での新たな視点、エネルギーミックスを超える将来を見据えたエネルギー技術について、ご報告をする予定です。

当研究所は、総合的且つ俯瞰的な観点から、「エネルギー総合技術研究」をキーワードといたしまして社会に貢献していく所存でございますので、今後とも皆様方のご支援、ご協力を賜りますようお願いを申し上げます。

最後に、公務ご多用の折、ご臨席を賜りました谷・経済産業省技術総括審議官、本日ご講演を頂きますRITEの山地先生、三井物産戦略研究所の中湊社長に改めて御礼申し上げますとともに、シンポジウムの内容がご列席の皆様にとりまして有意義なものに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。ご静聴ありがとうございました。

来賓挨拶

谷 明人 (経済産業省
技術総括審議官)



皆様、おはようございます。本日は非常に時機を得たシンポジウム、白土理事長はじめエネルギー総合工学研究所（エネ総工研）の皆様には心から敬意を表させていただきたいと存じます。また、本日、ご列席の皆様には、政府のエネルギー政策につきまして、日頃からご指南頂いておりますことを心から御礼申し上げます。

私も、30年程、エネルギー技術分野の職場にいるわけですが、この期間、ずっとエネ総工研の皆様方には技術的なアドバイス、人的ネットワークのご紹介など、至るところで大変お世話になっておりました。やはり、エネ総工研、そしてこの会場にいらっしゃるような皆様方のお知恵を頂くことが、わが国のエネルギー政策を正しい方向へ導く最善の方法ではないかと存じます。

私、今、福島第一原発の廃炉汚染水対策にも関与させて頂いておりまして、先日も現場を訪問させていただきました。驚きましたのは、皆様方のご尽力で進展が素晴らしいということです。特に、廃炉汚染水対策は、世界で今世紀最大の、そして困難なプロジェクトではないかと思っております。4つの原子炉と地下水との戦いでは、関連60社と東京電力の皆様方が心をひとつにして対策をとられていることに、強い感銘を受けた次第です。

作業を進める上での環境も非常に整って参りました。以前は食事をとるにも近くのコンビニで買ってきたおにぎりを車の中で食べていました。夏の間は、おにぎりが痛まないよう、車に積んだクーラーボックスの中にコンビニのおにぎりを置いて行くというような厳しい状況でした。ところが先日、お邪魔した際には、事務棟の中にきれいな食堂ができておりまして、非常に美味しい温かいご飯と味噌汁、現地で穫れるお米と新鮮な野菜、肉、魚といったものが提供されておりました。そこでは、作業に携わっておられる若い方々の笑い声が絶えなかったというのが非常に強く印象に残っております。

私、現地では、4号建屋の中まで入らせて頂きました。4号建屋は使用済み核燃料プールがあるところですが、3.11の後、アメリカが「あそこに水はあるのか？」と問題視し、自衛隊のヘリが海水を汲んで放水したり、消防隊員の方が決死の覚悟で放水したりした所です。その真上に登らせて頂きましたところ、勿論、使用済み核燃料は全て取り出されており、非常にきれいな水面が印象的でした。その使用済み燃料を取り出すために、4号棟

の隣に大きなクレーン塔のようなものを造ったわけですが、そこで使った鉄だけで東京タワー1つ分だということです。それだけ大変な作業なわけですが、現場を訪問させて頂き、このプロジェクトが、困難ではあっても、必ずや成功裡に進展できると確信した次第です。

復興もまだまだ道半ばです。福島第一原発の隣にあります、東北電力の広野石炭火力発電所も訪問させて頂きました。ここでも素晴らしかったのは、津波で多大な被害を受け、事務棟も含めて廃虚と化していた発電所が、考えられないほどの急ピッチでタービン、ボイラーが修復され、今はフルスペックで運転され、日夜安定的に電力を供給されているということです。

かたや、先ほどの白土理事長のお話にございましたように、まだ、福島県全体では多数の方々が帰宅困難を強いられております。この夏、「相馬野馬追い祭り」という伝統行事がありました。これは、平将門から数えて1200年続く伝統行事です。南相馬の各地区から、昔の鎧甲冑を着た方々が武将の元に馬に乗って集まって来られるのですが、中には避難地域から来られたという方がいらっしゃいました。桜井・南相馬市長の「出陣式」のご挨拶の中で、「1200年の歴史の中では、天保の大飢饉や地震、戦乱など、非常に困難な時期があったのですが、今が一番困難な時期である。しかし、1200年の歴史を持ってこの地を復興していこう」という言葉が非常に印象に残った次第です。

やはり、エネルギー政策というのは、国の中で、「治安」、「外交」、「教育」に並ぶベースとなるもの、大変重要なものと存じております。そして、エネルギー政策の中では、“Applied Energy”（実地適用エネルギー技術）というものが非常に大きな位置を占めると存じております。私は、その“Applied Energy”というものをエネルギー政策の中で正しく位置づけて、次の世代、更にその次の世代、そして将来において、日本そして世界が安定的に発展できることを心から願っております。その中で、エネ総工研の役割というのは非常に大きいのではないかと存じております。

以上、本日のシンポジウムがご成功に終わりますことを心から祈念いたしまして、簡単ではございますが、私のご挨拶とさせて頂きます。ありがとうございました。



はじめに

次に、2015 年 11 月 30 日からパリで開かれ
る「国連気候変動枠組条約第 21 回締約国会議」

エネルギーミックス

最初の E（安定供給）については、震災前

を上回るエネルギー自給率を目指して、一次エネルギー供給の25%程度を国産で賄うことにしました。

2つ目のE（経済効率）についてですが、震災以前と比べて、昨年度は、電気料金が家庭用で25%、産業用で38%程度高騰しています。審議会の中では「震災前の水準に戻してほしい」という声が強くありましたが、2030年までに実現可能で、かつ、S+3Eも同時に実現するという条件で、今よりは下げるという条件でエネルギーミックスを作ったわけです。

3番目のE（温暖化対策）については、欧米と遜色のない温室効果ガス削減目標を掲げて世界をリードするということでした。これについては後でもう少し詳しく話をさせていただきます。

2030年度のエネルギーミックス

その結果、決定されたエネルギーミックスは、図1の通りです。2013年度の最終エネルギー需要は、石油換算で約3億6,000万kℓで、その約4分の1が電力でした。これを経済成長率を年率1.7%くらいと考えて、2030年度のベースライン需要を想定し、更にそこから5,000万kℓ程度の省エネをして3億2,600万kℓ

程度に下げました。電力需要は現状とほぼ同じですが、最終エネルギー需要に占める割合は28%に増えます。

この最終エネルギー需要に対して2030年度の一次エネルギー供給は、今までのわが国の実績より相当下げた水準（4億8,900万kℓ程度）を実現しようとしています。この中で原子力と再生可能エネルギー（再エネ）の合計が約24%、天然ガスのごく一部も国産ですので、おおむね最初のE（安定供給）に掲げた「国産で25%程度」がここに示されたわけです。

最もチャレンジな省エネ

2030年度のエネルギーミックスで一番チャレンジなのは省エネです。2030年度のエネルギー消費は2013年度より少なくなっています。

図2に示すように、国内総生産（GDP）当たりのエネルギー消費量（エネルギー効率）は、1970年～1990年の20年足らずで35%改善しました。ところが、その後、2010年まではあまり下がっていません。今回のエネルギーミックスでは、今後2030年にかけて35%改善を図りますが、これは相当難しいことだと思います。オイルショックの時代は、エネルギー

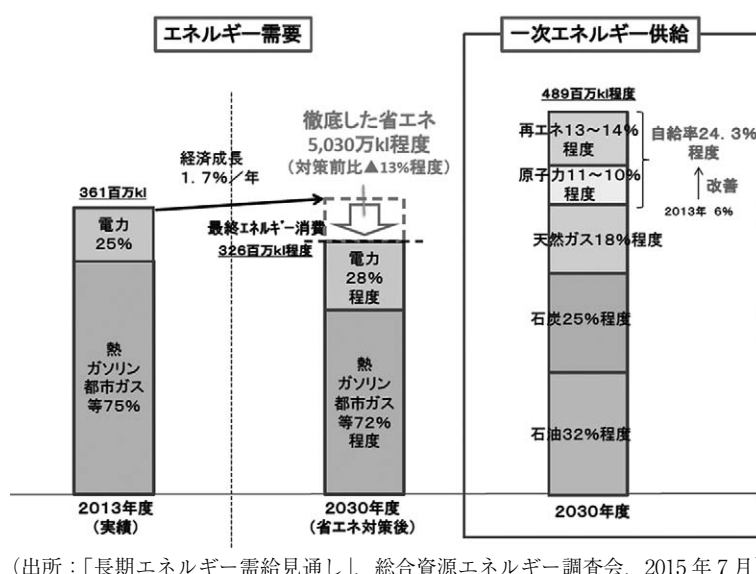


図1 2030年度のエネルギー需要と一次エネルギー供給

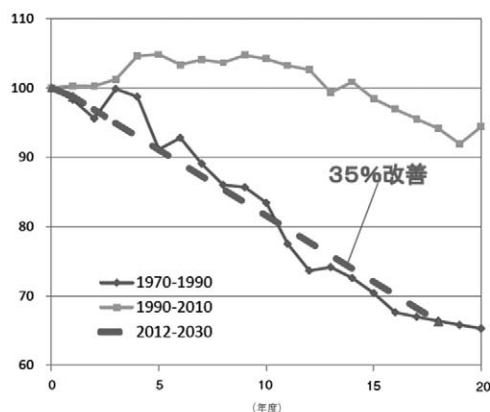


図2 エネルギー効率の改善

価格の高騰で節約意識が働き、つまり、経済合理性で省エネが起こったわけですが、今回は、逆に電力料金を下げる中で省エネを実現しようというのですから、省エネは非常に大きなチャレンジとなります。これを理解していただきたいと思います。

2030年度の電力需要と電源構成

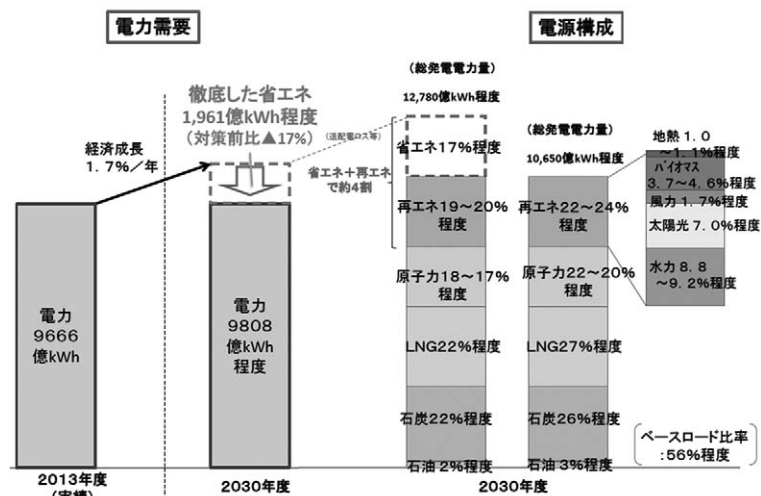
図3にあるように、経済成長率を年率1.7%としながらも2030年度の総電力需要は省エネによって、2013年度実績とほぼ同程度としています。電力需要はGDPとの相関が非常に高く、弾性値は0.8か0.7くらいです。ですから、年1.7%の経済成長で電力需要は増えると思込

まれますが、そこから約2,000億kWh程度の省エネをして、現状とほぼ同程度の総電力需要までに下げるといことです。これが本当に実現できるかどうか非常に大きなチャレンジです。

普通、エネルギーミックスという、もっぱら電源構成の議論となっています。福島第一原発事故によって、「原子力ゼロ」という事態も経験した今、電源構成をどうするかは最大の問題です。また、従来、エネルギー政策による電源構成では、事業用電源のことを考えていましたが、今回は、民主党政権時代の議論も踏まえ、自家発の自家消費も含めたわが国の総電力需要を考えました。

2030年度の電源構成ですが、省エネの貢献で伸びを抑えた総発電電力量（1兆650億kWh程度）のうち、再エネ22～24%程度、原子力22～20%程度、液化天然ガス（LNG）27%程度、石炭26%程度、石油3%程度となります。

再エネの中で比率が一番大きいのは相変わらず水力（8.8～9.2%程度）ですが、水力は現在までにほとんどが開発済みです。続いて、太陽光（7%程度）、バイオマス（3.7～4.6%程度）、風力（1.7%程度）、地熱（1%）です。今回の1つの特徴は、バイオマス発電に相当期待しているということです。



(出所:「長期エネルギー需給見通し」, 総合資源エネルギー調査会, 2015年7月)

図3 2030年度の電力需要と電源構成

2030 年度エネルギーミックス決定の手順

[コスト評価]

このエネルギーミックスをどのように決めたのかお話しします。発電コスト検証ワーキンググループでは、エネルギーミックスの計算のために発電コストの評価を行いました。

ここでやった発電コスト評価は、通常の電気料金の原価としての発電コストだけでなく、表 1 に示すように、資本費や運転維持費、燃料費に加え、二酸化炭素（CO₂）対策費や政策経費等も評価しました。CO₂ 対策費の計算では、仮に CO₂ に値段が付いたとしたらということで、国際エネルギー機関（IEA）のシナリオで使われている 2030 年に 37 ドル / t-CO₂ という値を使っています。追加的安全対策費は、原子力に関しては実際に行われていますから、実際のコストです。

事故リスク対応費用は、今、共済方式で福島第一原発事故の費用を分担しているわけですが、もし共済方式での原子力損害賠償制度が今後も行われれば実際の負担になります。シビアアクシデントが発生した場合の被害コスト、廃炉コスト、除染コストなどについては、福島第一原発事故の例に取りながら、同時に、安全対策を講じたことで低下した事故発生確率も加味し、現状で計算して、仮に出したものが入っています。

それから政策経費ですが、これには、例えば研究開発費、あるいは立地交付金があります。また、今回の計算では、全てのコストを生涯発電量で割った均等化発電コストを、キャッシュフローを割引いて計算しています。そのとき、割引率を 3 % に設定した評価を中心にしました。ところが、今の固定価格買取制度（FIT）の下では、内部収益率（IRR）を高く設定して「原価プラス利潤」で買っています。その IRR は、6 ～ 7 %、ものによっては 10 % を超える高さです。その差の分は政策経費としました。

実は、発電コストの評価は、震災直後の 2011 年 12 月に 1 回目を行っています。今回も基本的には同じような費用項目なのですが、大きく違うのは、再エネ導入に伴う系統安定化費用の見積もりです。電力は瞬時に需給をマッチさせなければいけませんので、太陽光や風力のように出力が自然変動する再エネ発電には調整コストが掛かります。

図 4 の左側は、2011 年の「コスト等検証委員会」において整理した安定化費用の項目です。前回は項目を整理するだけで安定化費用の計算をしませんでしたが、今回（右側）は、火力や揚水を使った調整コストの一部（右側の (i) のみ）を定量的に計算しました。火力、揚水で調節する時、火力の出力を絞って運転すると発電効率が低下しますが、その分増加する燃費（①）を計算しました。また、起動

表 1 個別電源の発電コストの項目

○資本費
減価償却費（建設費に減価償却率を乗じたもの）、固定資産税、水利使用料、設備の廃棄費用の合計
○運転維持費
人件費、修繕費、諸費、業務分担費の合計
○燃料費
単位数量当たりの燃料価格に必要燃料量を乗じた値（原子力は核燃料サイクル費用として別途算出）
○CO ₂ 対策費用（化石燃料関係電源）
発電のための燃料の使用に伴い排出されるCO ₂ 対策に要する費用
○追加的安全対策費（原子力）
東京電力福島第一原子力発電所事故後、4回にわたる政府からの追加的安全対策の指示、原子力関係設備・施設に係る新規規制基準、自主的安全性向上の取組を踏まえて講じられた安全対策の費用
○事故リスク対応費用（原子力）
シビアアクシデントのリスクに対応するコスト
○排熱利用価値（コジェネ、燃料電池）
発電時に生ずる熱を有効活用することが可能であるため、排熱利用価値として発電コストから控除
○政策経費
発電事業者が発電のために負担する費用ではないが、税金等で賄われる政策経費のうち電源ごとに発電に必要と考えられる社会的経費

（出所：発電コスト検証ワーキンググループ報告、2015 年 5 月 26 日）

- (1) 2011年コスト等検証委員会において整理した系統安定化費用

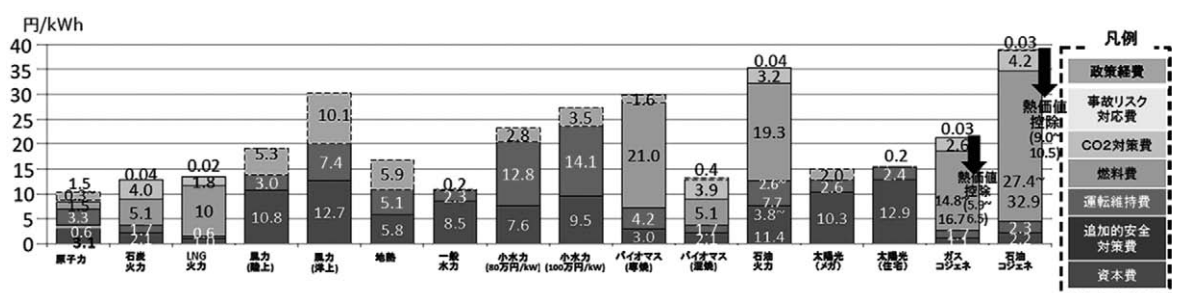
 - (i) 既存の火力や揚水を使った調整のコスト
 - (ii) 系統間連系強化のコスト
 - (iii) その他
 - ・市場機能を活用した調整のコスト(スマートメーター/CEMS)
 - ・出力抑制機能付きPCSのコスト
 - ・蓄電池設置コスト及び揚水による調整
 - ・配電系統における電圧上昇抑制対策のコスト

(2) 今回検討する系統安定化費用

 - (i) 火力発電・揚水発電に関する調整費用
 - ①火力発電の稼働率低下による発電効率の悪化等に伴う費用
 - ②火力発電の停止及び起動回数の増加に伴う費用
 - ③自然変動電源発電時に、揚水式水力の動力によって需要を創出することによる費用
 - ④発電設備を自然変動電源対応のために確保しておくために必要な費用
 - (ii) 再生可能エネルギーに係る地域間連系線等の増強費用
 - (iii) その他

(出所：発電コスト検証ワーキンググループ報告，2015年5月26日)

図4 再エネ導入に伴う系統安定化費用



(出所：発電コスト検証ワーキンググループ報告，2015年5月26日)

図5 2030年モデルプラント試算結果の概要

停止回数が増えることによる費用増加(②)、揚水(往復効率70%)を使う場合のロス分(③)を計算しました。

(i) の中の費用として一番大きいのは④です。火力の設備利用率が下がると、火力の固定費の未回収分が出てきます。これをそのまま火力に押し付けると火力は高く見えるわけですが、その分は、再エネが原因ですので、それを計算してみました。

なお、③と④については、今でも揚水の往復ロスはあるわけですし、火力の設備コストは既に発電コストに入っています。ですから、ネットで増えるのは①と②と考えられます(揚水の運用量が増大するなら③の一部も正味増分)。なお、(i)の調整費用は全国規模で行われると想定して計算しています。しかし、それを実現する(ii)の地域間連系線等の系統増強費用については、今回は計算していません。この点で今回の系統安定化費用の推定は過小評価されています。

[2030年モデルプラントのコスト評価]

図5は2030年モデルプラントにおけるコスト評価の結果です。2030年に運開して、それが設定した寿命期間運転したときの均等化発電コストを計算しました。

政策経費や原子力事故対応費用やリスク対応費用などを考えても、原子力が安く見えます。

原子力で、追加安全対策費が2倍になったら、あるいは、廃止措置の費用が2倍になったらどうか感度解析をやってみました。表2で分かるように、感度解析をしてみると、これから大きく上振れするわけではないだろうと言えます。ただ、この計算では、ディスカ

表2 原子力の感度解析

追加的安全対策費 2倍	+0.6
廃止措置費用 2倍	+0.1
事故廃炉・賠償費用等 1兆円増	+0.04
再処理費用およびMOX燃料加工費用 2倍	+0.6

(円/kWh)

(出所：発電コスト検証ワーキンググループ報告，2015年5月26日)

表3 自然変動原電（太陽光・風力）の導入拡大に伴う調整費用
（総発電電力量1兆650億kWhの場合）

自然変動電源の導入割合	再エネ全体の導入割合	調整費用
660億kWh(6%)程度	19～21%程度	年間 3,000億円程度
930億kWh(9%)程度	22～24%程度	年間 4,700億円程度
1240億kWh(12%)程度	25～27%程度	年間 7,000億円程度

※ 太陽光・風力の導入に地域的な偏在が起こらず、地域的な需給のアンバランスが生じないなどの様々な前提を置いた上で算定。

（出所：発電コスト検証ワーキンググループ報告，2015年5月26日）

ウントキャッシュフローの割引率として3%を使っていますが、実際に発電所建設の資本コストを3%で資金調達できるかは別の話です。リスクが高いものに関しては、もっと高い金利を想定しなければいけないと思います。それを考慮しても、やはり原子力の経済的な安定性は保たれていると考えられます。

表3は、先ほど説明したやり方で、太陽光や風力などの自然変動する電源が入ってきたら、どれくらい調整コストが掛かるかを新しく計算した結果です。

真ん中の白抜き部分が今回決めたエネルギーミックスに対応する数値です。太陽光と風力の導入量が2030年に930億kWh程度になり、これを受け入れるための調整費用が年間約4,700億円程度になります。これは単価にすると5円/kWhというかなり高い値になります。これは今回確認された新しい知見だと思います。

ただ、先ほど申し上げたように、火力の固定費の未回収分や揚水の往復ロス、電源全体として考えれば純増ではないので、電気料金を現在より下げざるを得ないことを考察するときには、4,700億円からそれらの費用を除いた1,300億円程度を勘案しています。

〔電源をミックスする理由〕

発電コスト評価に基づいたエネルギーミックスの話をする時に、私が強い違和感を感じるのは、「原子力が安いなら全部原子力でいいのではないのか。自由化の中で経済的なものを選ぶと原子力でしょう」と言われることです。電気のことをよくご存じの方は、「そんなことは決してあり得ない」とももちろん理解されていると思います。電気は瞬時瞬時でバランスを取らなければいけない性質のもので、短い期間しか動かさなくても経済的とい

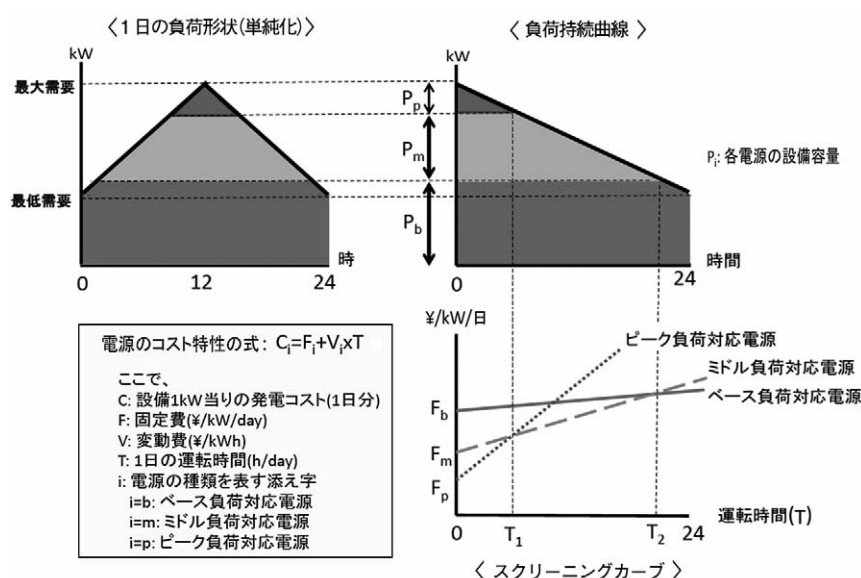


図6 1日の負荷形状（単純化）、負荷持続曲線、スクリーニングカーブ

う電源が必要です。

図6で示すように単純化した1日の負荷カーブがあるとします。それを高い順に並べると負荷持続曲線となります。それから、「スクリーニングカーブ」という各電源のコスト特性があります。電源には、固定費は小さいけれども変動費が大きいピーク負荷対応電源、固定費は高いけれども変動費は安いベース負荷対応電源、そして固定費も変動費も中間くらいのミドル負荷対応電源があります。

T₁という時間より短い時間を供給する場合には、ピーク負荷対応電源が一番安い。T₂よりも長い時間で動かすには、ベース負荷対応電源が良い、中間部分はミドル負荷対応電源が良いとなります。

従って、経済合理性だけからでも、電源はミックスになるわけです。もしも、原子力のような現実のベース負荷対応電源のコストが固定費も変動費もものすごく安ければ、電源をミックスせずにそれで全部やれということになるのですが、ベース負荷対応電源は、そういうコスト特性にはなっていません。

[ミックスの決め手：電気料金引き下げ]

では、再エネ発電の内部構成を含めてどのように電源ミックスを決めたか。一番のキーは、電気料金を現在よりも下げるという条件です。固定費は、あまり変わらないので、図7にあるように、再エネの買取費用を含めた変動費の削減を考えました。2013年の再エ

ネの買い取り費用は、約5,000億円（現在は2兆円近い）で、燃料費と合わせると変動費は9.7兆円でした。これを2030年には、9.5兆円以下にしようということです。

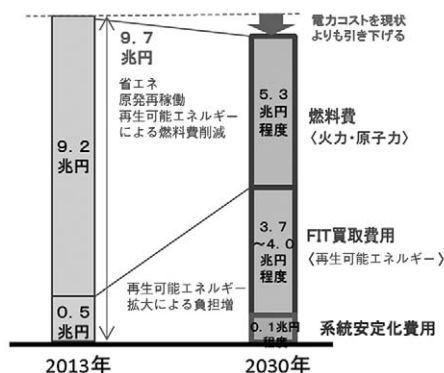
FITの買い取り費用をどのように考えたか。まず、再エネは一律ではなく、種類によって特性が違います。一番問題なのは、建設のリードタイムが短いけれども、系統安定化費用は高い太陽電池が先行して大規模に入っていることです。これは困るのです。建設のリードタイムは長いけれども、安定的な運用ができる再エネ（地熱、水力、バイオマス）を、2030年までにできる限り多く導入する必要があります。それに要する買い取り費用が1～1.3兆円くらいになります。全体としての買い取り費用は、4兆円くらいに抑えなければいけないので、風力と太陽光を合わせて2.7兆円くらいの買い取り費用に制約することになりました。

太陽光はすでにこの水準を突破していますが、既設太陽光の中でもなかなか建設に入らない「不良案件」があり、現在、FIT制度改革小委員会でそれを整理していく仕組みを議論しているところです。太陽光に関しては、コスト効率的な対応を取って2.3兆円。逆に、風力はもう少し伸ばしたいので、1,000万kW相当分の0.4兆円を見込みました。ですから、この部分が再エネの中でのポートフォリオを決める論理のベースになっています。

地球温暖化対策

COP21に登録した「約束草案」

「約束草案」は、エネルギー起源のCO₂以外の温室効果ガス(GHG)も含めた目標ですが、エネルギー起源のCO₂排出量だけで言いますと、2013年度に対して2030年度は25%減になります。電力に限りまると、2013年度比で34%減という大幅な削減になります。



（出所：長期エネルギー需給見通し小委員会資料、2015年7月16日）

図7 電力コスト（変動費）の推移

「約束草案」としては、その他 GHG の削減も含めて、2030 年度のわが国の目標として、2013 年度比で 26%減という数値を登録しました。これに対して、欧州連合（EU）は 1990 年比 40%減、米国は 2025 年に 2005 年比で 26～28%減としています。面白いのは、各国とも自分が選んだ基準年比、例えば、ヨーロッパですと 1990 年比にすると削減が一番大きく見える、アメリカについても 2005 年比にすると一番大きく見えます。表 4 の左端にあるように、基準年を 2013 年にそろえてみると、日本の削減目標も EU や米国と遜色ありません。しかし、「約束草案」の本当の野心度は、この削減を実現するときに、どれくらいのコストが掛かるのか、どんなに大変なのかということだと思います。その部分を RITE の研究で補完させていただきたいと思っています。

1 つだけ申し上げておきたいのは、今回、わが国が提示した GHG 削減目標は、全て国内のものだということです。ただ、それだけでわが国の温暖化対策における世界への貢献が十分かという、決してそんなことはありません。わが国の良い製品や技術、あるいは人材を提供することによって世界規模での GHG 削減に貢献することがより重要で、もっと強調すべきことだと考えています。

「約束草案」では、推進中の JCM（二国間クレジット制度）に加えて、民間の良い製品や技術を世界展開することによって、2030 年度に世界で少なくとも 10 億 t-CO₂ の削減を見

込んでいます。すなわち、わが国全体の排出量（10 億トン程度）と同じくらいを世界への技術、製品、プロセス等の展開による貢献で削減できるわけです。このことも知っておいていただきたいと思います。

エネルギーミックスと GHG 排出削減 ～ RITE モデルによる経済分析～

RITE モデルによるエネルギーミックス

RITE モデルによる評価ですが、フレームワークは政府案と同じで、GDP 成長率は年率 1.7%を考えました。違うのはエネルギー需要量の計算です。RITE モデルでは、IEA の仮想的な炭素価格（2030 年に 37 ドル /t-CO₂）が入ったときに、1.7%の経済成長に対してどれくらいの一次エネルギー需要があるか、電力需要があるかを計算できます。図 8 と図 9 がその結果なのですが、政府の見通しとだいぶ違うのです。

RITE モデルと過去の実績から考えると、今の成長率の見通しと電気料金の見通しのもとでは、2030 年度に政府案のような小さい需要には納めきれません。

図 8、図 9 で「現状放置」というのは、2013 年の電源構成比率を 2030 年にも維持して、エネルギーシステムコストが最小になるようにしたときのエネルギー供給量です。この「現状放置」と比較して、電源構成比率を様々に制約してシミュレーションしています。いずれのケースと比較しても、政府案は、棒の高さが相当違います。つまり、RITE モデルで計算すると、政府がいうほどの省エネはできそうにないのです。

エネルギーシステムコストの差

原子力がほとんど動いていない 2013 年の電

表 4 主要国の約束草案の比較

	2013年比	1990年比	2005年比
米国	▲18～21% (2025年)	▲14～16% (2025年)	▲26～28% (2025年)
EU	▲24% (2030年)	▲40% (2030年)	▲35% (2030年)
日本 (2015年4月30日提示の目標値)	▲26% (2030年)	▲18% (2030年)	▲25.4% (2030年)

◆ 米国は2005年比の数字を、EUは1990年比の数字を削減目標として提出

(出所：RITE)

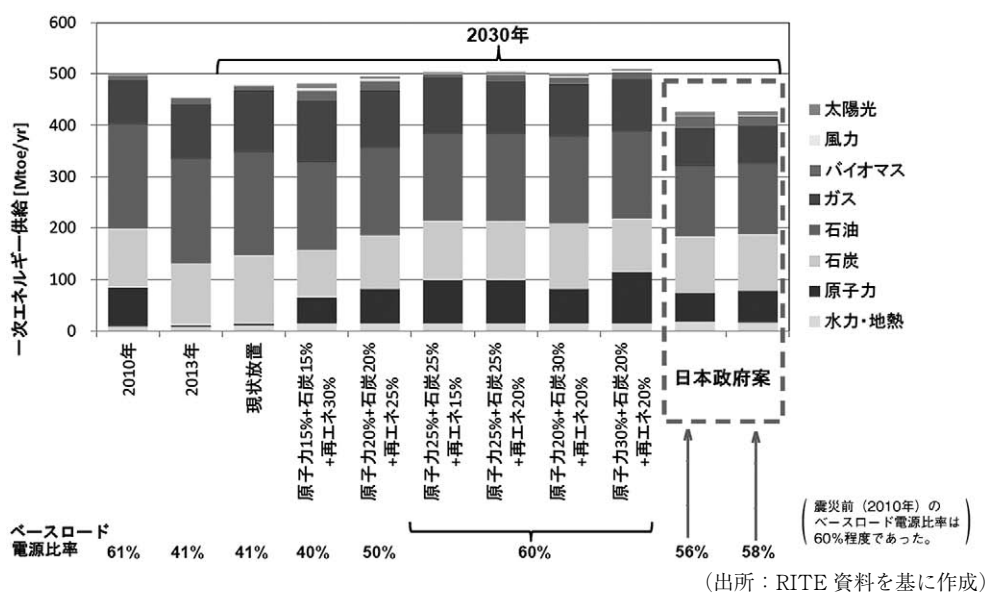


図8 2030年の一次エネルギー供給

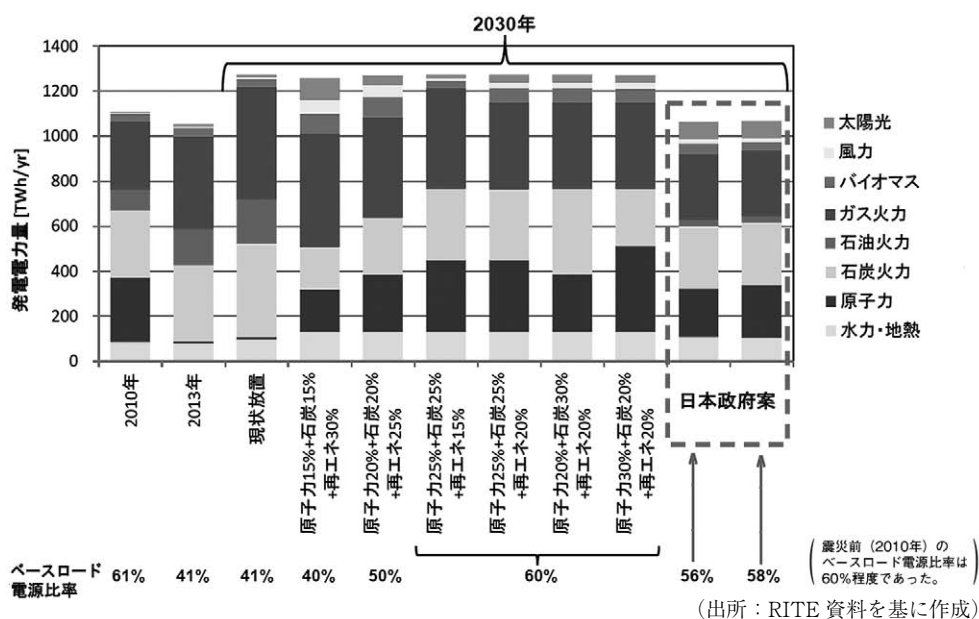


図9 2030年の発電電力量

源構成比率のまま2030年にエネルギーシステムコストが最小になるよう最適化した場合(現状放置ケース)と比較して、ベースロード電源(原子力、石炭、水力、地熱)と再エネとのいろいろな組み合わせを想定した場合にはエネルギーシステムコストがどう変わるか。

例えば、「再エネを30%に」という意見が強くありました。そうすると、表5の右下の数値のように、再エネ30%で、原子力15%、石炭15%とすれば、「現状放置」と比べてコ

ストが年間プラス0.4兆円になる。つまり、再エネ比率を30%にすると、原子力が動いていない現状の電源構成を維持した場合よりもエネルギーシステムの総コストが大きくなってしまいます。これを、再エネを20%くらいにして、原子力25%、石炭25%とすると、2兆円くらい下がります。再エネ比率を下げ、原子力と石炭を増やすことで年間何兆円ものシステムコストのメリットを生むという結果になりました。

表 5 2030 年のベースロード電源比率による基準比エネルギーシステムコストの差 (兆円 / 年)

		ベースロード電源		
		40%	50%	60%
		(うち原子力15%; 石炭 15%)	(うち原子力20%; 石炭 20%)	(うち原子力25%; 石炭 25%)
再生可能エネルギー	15%		年2.9兆円の差	▲2.5 (▲3.0)
	20%		年2.4兆円の差	▲2.0 (▲2.6)
	25%		▲1.0 (▲1.6)	
	30%	▲0.4 (▲0.3)		

*1 基準は現状放置ケース(2013年電源構成比率)とした。
 *2 括弧内は炭素価格を加味したコスト (出所：RITE)

2030 年の経済影響

[GDP の変化]

電源構成比率が2013年のままで炭素価格が37ドル/t-CO₂ (IEA WEO2014 新政策シナリオレベル) の「現状放置」を基準ケースとし、2030年の電源構成を変えた場合のGDP変化を計算してみました。すると、図10のように、原子力を動かさないよりも動かしていくほうが

GDPは増えます。例えば、一番右側の原子力30%、石炭20%、再エネ20%だと、基準ケースよりも約4兆円増えます。これが、炭素価格100ドル/t-CO₂ (IEA WEO2014 450シナリオレベル) だと、同じ電源構成でもGDPはぐっと下がります。

[家計消費の変化]

図11は基準ケースに対する2030年における

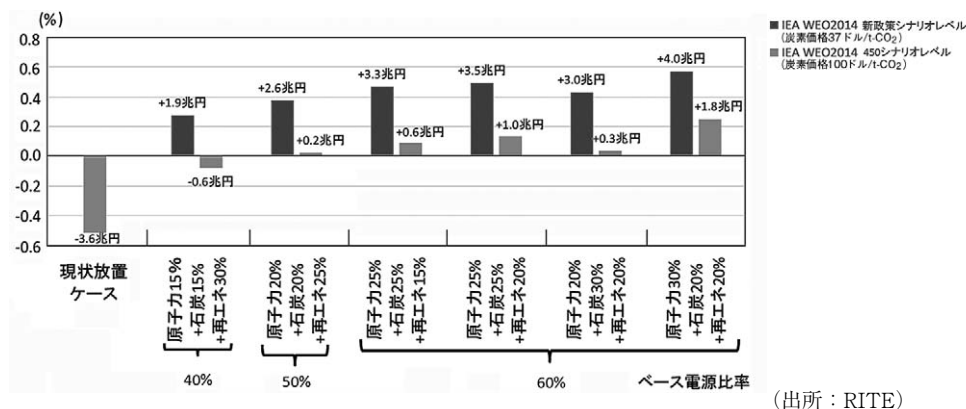


図 10 2030 年の経済影響：GDP の変化 (基準ケース比)

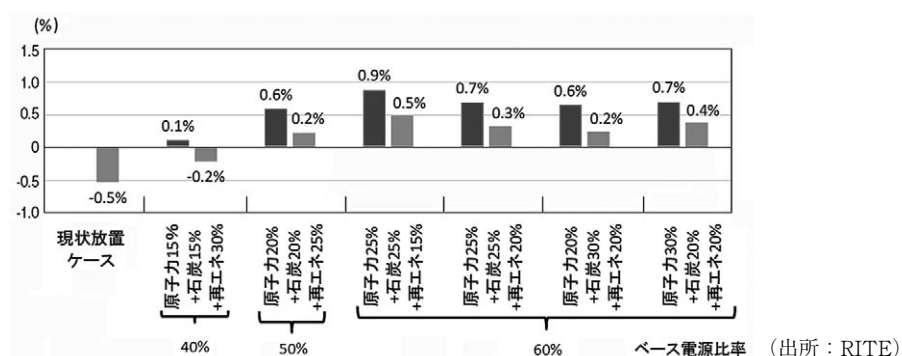


図 11 2030 年の経済影響：家計消費の変化 (基準ケース比)

る家計消費の変化です。家計消費が増えるほど幸福度が増すわけですが、やはり、原子力や石炭を増やしていくほうが増えます。しかし、これも炭素価格が100ドルになると効果は薄れます。

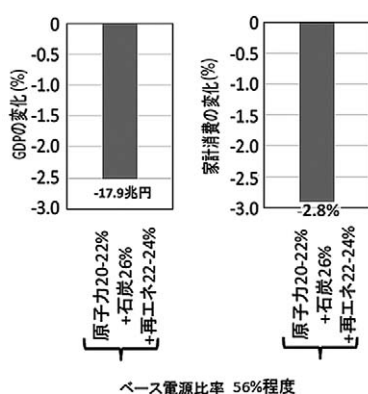
それに対して、大きな省エネを前提とするエネルギーミックスの政府案をRITEモデルで再現すると、図12のようにGDPも家計消費も大きく下がることになります。これは、政府のエネルギーミックスに暗示されているCO₂の限界削減費用が非常に高いからです。RITEモデルで計算すると、仮想的炭素価格を100ドル/t-CO₂としても、2030年のエネルギー起源のGHGは17%くらいしか下がらないのです。ですから、政府案の2013年比で26%減という目標は、相当アンビシャス

な、多大の努力を要する目標なのです。そして、その努力の中心は、ミックス（電源構成比率）の実現よりも省エネであるということを主張したいわけです。

チャレンジングな日本の「約束草案」

図13は、主要国のGDP当たりGHG排出量（＝CO₂原単位）です。今回のわが国の「約束草案」を主要国と比較すると、日本は2030年でも一番いいレベルにあります。

また、図14は、GDP変化とCO₂原単位変化の関係です。例えば、原単位の削減率は一番下のラインが－6%/年です。この水準であれば、GDPが6%/年で成長してもCO₂は増えません。2002年から2012年の各国の



(出所：RITE)

図12 政府案における2030年の経済影響（基準ケース比）

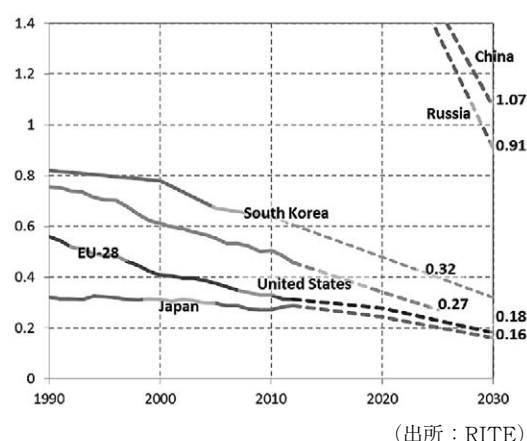


図13 主要国のGDP当たりGHG排出量（CO₂原単位）の実績と予測

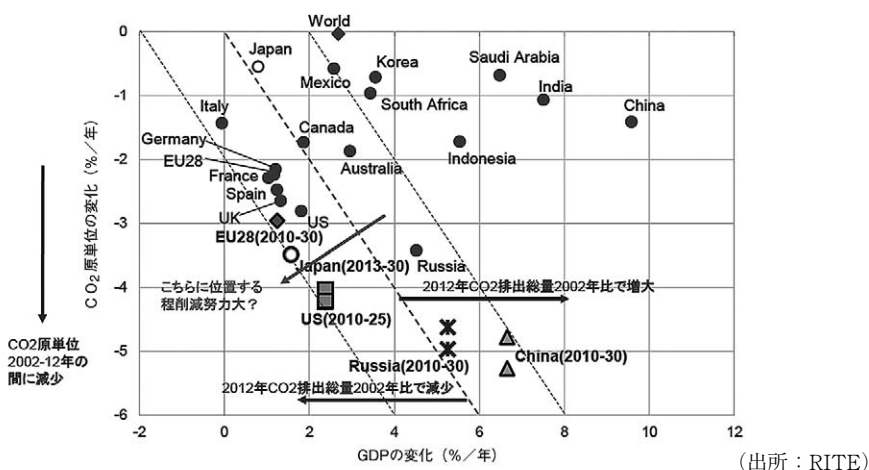


図14 GDP変化とCO₂原単位変化（2002年～2012年実績値と約束草案）

表6 主要国約束草案（一部暫定値）のCO₂ 限界削減費用推計値

	限界削減費用 (\$/tCO ₂ eq)	
	低位	高位
日本: 2013年比▲26% (2030年)	380程度* (エネルギー起源CO ₂ の目標のみで評価した場合は260程度)	
米国: 2005年比▲26%~ ▲28% (2025年)	57	76
EU28: 1990年比▲40% (2030年)	168	
ロシア: 1990年比▲25%~ ▲30% (2030年)	0	12
中国: 2030年CO ₂ 排出ピークアウト (RITE排出見通しに基づき、15~16GtCO ₂ eq)	0	9

* 吸収源対策▲7.6%は森林吸収対策としてコスト計算せずに、エネルギー起源CO₂、その他GHG排出削減対策で実施するとして計算した場合。他国も同様

(出所: RITE)

実績値を示していますが、日本は残念ながら、2012年に震災の影響が入ってこの間に少し増えています。ヨーロッパ諸国はどちらかというと下がっています。この図には、日・米・EUと中国、ロシアの「約束草案」の値も示していますが、日本の「約束草案」は、EUや米国とほぼ同じく、削減側でほぼ同一ライン上にあります。一方、ロシアや中国は増大側の領域にあります。

表6に主要国が登録した「約束草案」の目標を実現するときの限界削減費用（ドル/tCO₂）を示しました。RITEモデルによると、日本はエネルギー起源CO₂だけでも1トン当たりの削減コストが260ドルです。その他のGHGも含む削減コストだと380ドルかかります。これは、IEAの新政策シナリオ（37ドル）や450シナリオ（100ドル）よりもはるかに高いのです。それに対して、米国は57～76ドル、EUは168ドルです。つまり、日本の限界削減費用が非常に高いということは、日本はものすごくチャレンジングなGHG削減を約束していることを意味します。

ですから、単にパーセントで議論するよりも、こういう計算をしてみると、日本の「約束草案」がチャレンジングな、特に省エネについて非常にチャレンジングな目標を立てているということが分かるのです。

おわりに

2030年度のエネルギーミックスは決定されたわけですが、では、その実現に向けて、何が行われているか。

総合資源エネルギー調査会で、具体的な政策展開について審議が行われて言います。原子力に関しては、「原子力事業環境整備検討専門ワーキンググループ」で、再エネについては「再生可能エネルギー導入促進関連制度改革小委員会」、火力については、2030年に向けていかに高効率にするかということで、「省エネルギー小委員会」の下に「火力発電にかかる判断基準ワーキンググループ」を設けて検討しています。また、それと並行して、「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」を開き、ロードマップ作りも行われているところ です。

私からは以上です。ご清聴、ありがとうございました。

(拍手)

[基調講演]

エネルギー情勢のグローバルな変化と 総合商社の取組み

中湊 晃 (三井物産(株) 執行役員
(株)三井物産戦略研究所 代表取締役社長)



はじめに

(株)三井物産戦略研究所は、三井物産(株)のために、ビジネス思考でグローバルに時代の大きなうねりを捉えるため、政治・経済・社会、産業・企業、技術・イノベーションという7つの切り口で、今、世界で何が起きているのか、あるいは、これから何が起きるのかということに関して、情報を収集して分析し経営に発信することを役割にいたしております。

エネルギーは、政治・経済・社会、産業・企業、技術・イノベーションのいずれにも様々な影響を与えます。加えて、三井物産は、エネルギーに関わるビジネスを広範にやっております。そういう意味で、私たちの仕事の中で、エネルギー分野のウエイトは大変高いと言えます。

今日は「エネルギー情勢のグローバルな変化」ということで、世界で今どんな変化が起きているのかについてお話したいと思います。今日は、原油価格の急落、地球温暖化対策の動き、エネルギー地政学の変化というようなことをポイントとしてお話をしたいと思います。

加えて、そういった環境変化の中で、三井物産が総合商社として、エネルギー情勢の変化にどう取り組んでいるのか。いくつか例を挙げてご説明したいと思います。

エネルギー情勢のグローバルな変化

原油価格の急落

2015年1月17日の『The Economist』は、表紙で原油価格がどんどん下落している絵を掲げながらも、“Seize the day”というタイトルで、むしろこの原油価格の下落をチャンスとして、世の中を変えなければいけないという論調の記事を載せました。さらに2015年2月2日の『TIME』は“CHEAP FUEL”という表紙で、原油価格がどこまで下がりいつまで続くのかという記事を載せていました。

図1が示すように、原油価格は2014年7月頃の100ドルから下がり続け、2015年3月頃には50ドルを切りました。その後、シェールオイルの減産で少し戻ったのですが、後述する要因によってまた下がり、昨日(10月8日)は49ドルになっています。原油価格は、この1年余りで約半分になってしまいました。

原油価格急落の要因

～供給面：シェールオイルとOPEC増産～

なぜ原油価格が急落したのか。まず供給面から見てみます。1つ目の要因は、シェールオイルの増産です。2012年から2015年4月頃まで増産が続いていました。国際エネルギー

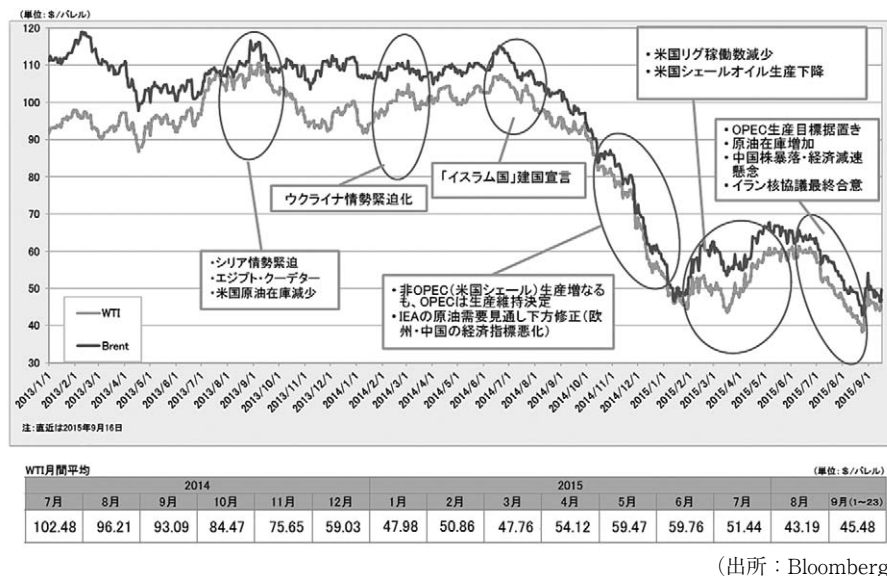


図1 原油価格 (Brent/WTI) の推移 (2013年1月～2015年9月)

機関 (IEA) によると、2011年に世界全体の原油増産量は480万バレル/日 (b/d) でした。そのうち7～8割が米国の増産分380万 b/d でした。その結果、表1のように、2014年には米国が世界最大の産油国になりました。

2つ目の要因がOPEC (石油輸出国機構) の増産です。実は、米国がトップになった背景には、OPECがスイングプロデューサー (調整役) として生産調整したこともあります。図2に示すように、OPECは、2006年から3,000万 b/d をベースに生産調整しながら価格

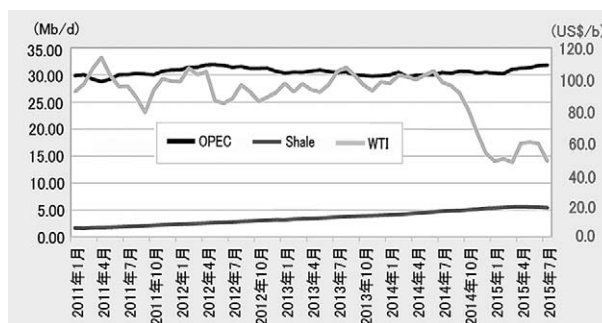
を安定させてきました。米国がシェールオイルを増産する中で価格維持のために減産したのです。ところが、2014年12月からサウジアラビアはスイングプロデューサーの立場を放棄し、シェア拡大を考え増産を始めました。2015年上半期のOPEC増産分ですが130万 b/d、そのうち、サウジアラビアが90万 b/d、イラクが40万 b/d でした。まだシェアを大きく変えるまでには至っていませんが、OPECのシェアが少し上方に向かっています。

表1 世界の原油生産量 (含む NGL) トップ3

(単位: 百万b/d)

2000		2005		2010		2013		2014	
サウジアラビア	9.47	サウジアラビア	10.93	ロシア	10.37	サウジアラビア	11.39	アメリカ	11.64
アメリカ	7.73	ロシア	9.6	サウジアラビア	10.08	ロシア	10.77	サウジアラビア	11.50
ロシア	6.58	アメリカ	6.9	アメリカ	7.56	アメリカ	10.07	ロシア	10.83

(出所: BP Statistical Review 2015)



(出所: 各種データを基に三井物産戦略研究所作成)

図2 OPEC・shale の生産量推移と WTI

原油価格急落の要因

～需要面：中国経済の大幅な減速～

次は需要面です。中国経済の減速が目下大きな懸念材料になってきています。『The Economist』は、上海株価が上昇し続けた2015年5月、上海市場の株価急落を中国政府が必死に支えた6月、そして中国が突然の元切り下げを行い経済の先行き不安を世界に投げかけた8月下旬の3回、中国が表紙を飾りました。それぞれの表紙からは中国経済の変化を感じることができます。

もともと中国経済が徐々に減速していくということは、織り込み済みでした。2012年に世界銀行（国際復興開発銀行）と中国国務院発展研究センターがつくった、国内総生産（GDP）中長期見通しでは、2016年から2020年のGDP成長率はそれ以前の5年間より1.6%減速して7%になるという見通しでした。ところが、図3に示すように、2015年4月のIMF（国際通貨基金）による予測では、2016年から2020年にかけて6%台になると見えています。ということは、数年前に考えていたよりも大きい中国経済の鈍化に我々は直面しているということです。

中国の生産年齢人口は2015年の10億1,500万人がピークとなりそうです。今後、中国では労働力が減り、中国経済が今までの投資主体から消費主体へ移行し、第二次産業から第三次産業に移動することで労働生産性も落ちます。その合成によって成長率が落ちるというのは、織り込み済みだったのですが、予想

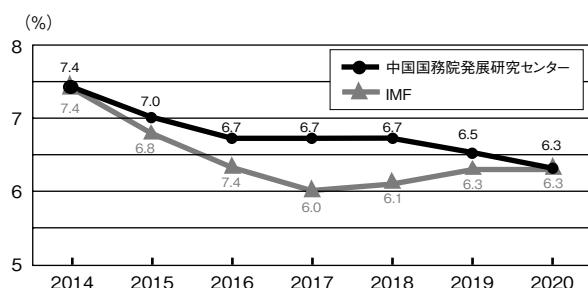
よりも減少が少し大きそうだということもあり、マーケットに懸念が広がっています。

（公社）日本経済研究センターが、いわゆる「李克強指数」をベースに中国のGDP成長率を独自に試算しましたが、2015年第2四半期で、中国政府の発表した7%という成長率に対し、日本経済研究センターは、4.8～6.5%の範囲と予想しました。平均すると、中国政府が発表している7%は、実は5%くらいではないかということです。

過去数年間は、その試算と政府公表のGDPはほぼ同じ水準でしたが、2015年の今、乖離が見られるのはなぜか。実際に、中国のGDP速報は、四半期後、3週間もたたずに発表され、日本の1カ月半後に比べ発表が早い。「中国で、なぜそんなに早く数字が出るのか？」というのは、エコノミストの間では以前からの疑問でしたが、実際にそれが見えてしまったという感じです。

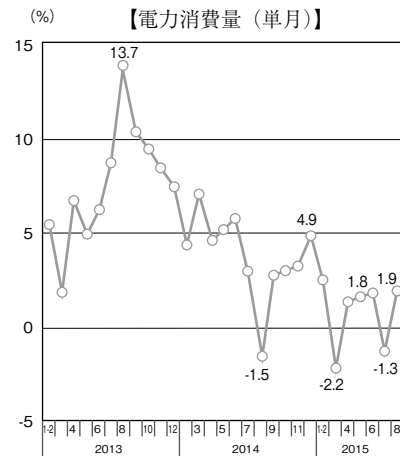
図4は「李克強指数」を構成している、電力消費量や鉄道の貨物輸送量推移ですが、電力消費量も、最近では前年同月比でマイナスになることが多く、鉄道の貨物輸送量に至っては2014年からずっとマイナスが続いています。確かに、経済の第三次産業化で「李克強指数」とGDPの乖離が出てきてもおかしくありませんが、「本当にこれで7%も成長しているのか？」という疑念も無視できません。

一方、需要面では、IEAは、石油需要が2010年から2035年にかけて、全世界で5.4億トン増えると予想していましたが、そのうち約半分当たる2.5億トンが中国であるとい

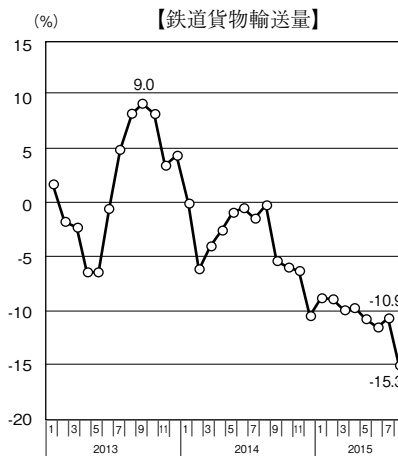


（出所：IMF、中国国務院発展研究センター）

図3 中国GDP成長率の中期見通し



注：前年同月比，直近は2015年8月
（出所：中国国家エネルギー局，CEIC ほか）



注：前年同月比，直近は2015年8月
（出所：中国鉄道総公司，CEIC）

図4 中国 GDP 成長率の中期見通し

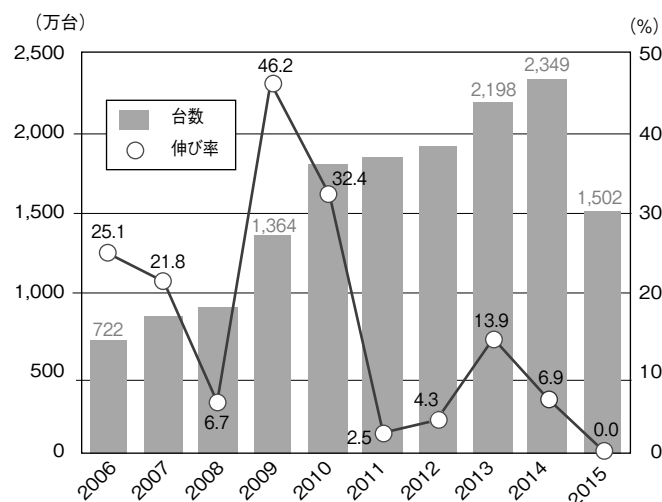
う見通しでした。中国経済の減速が予想より大きいとしたら，ガソリンを含めた石油需要がそこまでは増えないのではないかと懸念も出てきます。

ガソリン需要と関係の深い，中国の自動車販売を見ますと，図5のように2015年1月～8月は伸び率ゼロです。過去5カ月間は，4月（－0.5%），5月（－0.4%），6月（－2.3%），7月（－7.1%），8月（－3.0%）で，ずっとマイナスです。今年も通年だと多分ゼロ成長と予想されていて，以前のように自動車は売れなくなってきています。1人当たりの保有台数はまだ少ないのですが，今後，自動車

販売が伸びないとガソリン需要の見通しも変わってきます。

供給面の「ニューリアリティ」と 需要面の「ニューノーマル」

原油供給は予想以上に増えていく。需要は予想ほど伸びないという状況の中で，2015年第2四半期で需給バランスは，250万b/dの供給過剰になっています。これまではOPECが調整役として機能していたから，これほど大きくバランスが崩れたことはかつてありませんでした。それが放棄された今，この供給



注：2015年は1月～8月（出所：中国自動車工業協会）

図5 中国新車販売（台数と伸び率）

過剰は価格を押し下げる大きな原因になっています。

エネルギー・アナリストとして有名なダニエル・ヤーギン氏は、シェールオイルの増産は、誰も予測しなかった「ニューリアリティ」であると言っています。多くの人が驚くような変化が供給面で起きたわけです。

対する需要面では、習近平の言う「ニューノーマル」、中成長移行により大きな構造変化が生まれています。

今後の原油価格

～1985年「逆オイルショック」と酷似～

図6は1946年から今までの原油価格(WTI)の推移です。注目したい点が1985年の「逆オイルショック」です。

1973年の「オイルショック」の後、西側諸国は、OPECの支配下でない原油供給を増やすために、北海などで増産を行いました。一方で、景気が後退し省エネが進み需要が減りました。供給が増え需要が減ると、当然価格は下がります。そこに追い打ちをかけるように、サウジアラビアのヤマニ石油相（当時）が主導するOPEC総会は、1985年12月に増産を決定しました。それにより原油価格が30ドル台から10ドル台に、つまり半分に下がり

ました。これが「逆オイルショック」といわれる現象でした。

実は昨日、カタールのアッティヤ・前エネルギー大臣が当社を訪問され、お話をしたのですが、彼は、そのOPEC総会に末席で出席していたそうです。「この決定後しばらくして、ヤマニは首になったんだよ」と言っていました。

今回は、シェールオイルにより供給が増える一方、中国経済の減速で需要が減り、そこにOPECが3000万b/dを維持すると宣言した途端、価格が急落しました。1985年の「逆オイルショック」と非常に似た動きとなっています。「逆オイルショック」の後、20年の間、新興国経済がブームになるまで原油価格は20ドル台で推移しました。今度はどうなるのでしょうか。

今の見通しでは、2015年は、45～55ドルくらいで推移するというのが一般的になっています。2015年3月の段階では、55～65ドルと見ていました。当時のシェールオイルの平均コストがそれくらいと思われていたからです。その後、米国のシェール生産者も採算性向上のために、リグ（掘削装置）を削減したりしてコストダウンを図りました。その結果、今は45～55ドルが1つの目安になっています。

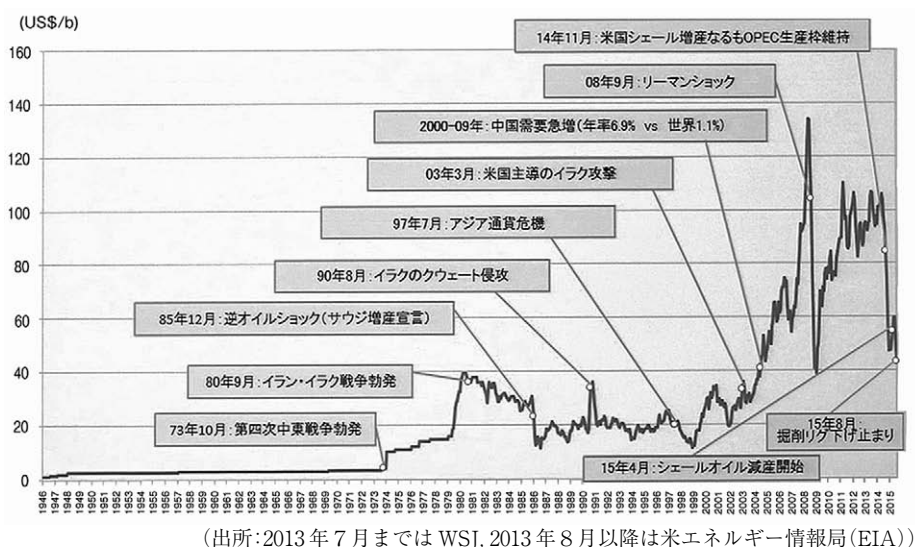


図6 WTI 月間平均価格推移 (1946年1月～2015年8月)

原油価格下落のプラス面とマイナス面

実際に原油価格が下がると、様々な変化が起きます。プラス面では、世界経済への好影響があります。産油国から消費国に所得が移転し、そこでの消費が伸びるからです。日本の場合、経常収支が赤字になるのではないかと懸念されていましたが、今回の原油価格の下落で貿易収支が改善し、経常収支の黒字も拡大しています。

一方、マイナスな面は、シェル社、エクソン社、BP社といったオイル・メジャーの業績が急速に悪化しています。特に、上流からの利益が減ってきています。石油会社の経済活動が世界経済に与えるインパクトは非常に大きいです。リグの稼働数も米国で激減したため、エネルギー会社だけでなく、機械、サービスなど、関連する広い分野にマイナスの影響を及ぼします。

サウジアラビアの今

2015年5月14日の『FINANCIAL TIMES』は一面の記事で「サウジアラビアは世界の石油の支配を維持する戦いに、勝ったと考えている」と伝えました。本当にそうなのかというと、実は、サウジアラビアも大変なことになっています。2012年では地域別に見ると、中東諸国の財政収支は大変健全で、世界中で最も良いレベルにありましたが、今や世界で最悪の水準に落ち込んでいます。サウジアラ

ビアにいたっては、121カ国の中で119位と、非常に厳しい財政収支状況になってきています。なぜそうかという、「アラブの春」以降、国民の不満をなだめるべくバラマキを増やしていることに加え、イランの核協議の進捗の中で、イランに対抗すべく軍事支出を増やし歳出が増加、そこに原油価格が下落し歳入が減ったためです。

地球温暖化対策への関心

新枠組みへの努力

エネルギー情勢の変化として、われわれビジネスにとってもう1つの関心事は、「気候変動枠組み条約第21回締約国会議」(COP21)での合意がどうなっていくのかということです。

1997年12月に採択された「京都議定書」は先進国だけが対象であり、また、米国は加盟しませんでした。COP21では先進国、途上国を含めた全ての国を何とか枠組みに入れようと努力しています。

表2は「京都議定書」と新枠組みとの比較です。「京都議定書」では、第一約束期間、第二約束期間に5%削減、18%削減という目標を合意し、達成できないときは罰則を課すという内容になっていました。COP21では途上国を含め全ての国が参加する一方、削減目標も自主的に決め、対象期間もとりあえず2025年とか

表2 京都議定書と新枠組みの比較

	京都議定書	2020年以降の枠組/COP21の争点
目標設定対象国	・先進国(付属書1国)のみ ・米国は議定書不参加、カナダは2012年に議定書脱退 ・日本およびロシアは第二約束期間不参加	・全ての国が参加
削減目標	・第一約束期間は、先進国全体の温室効果ガス排出量を1990年比で少なくとも5%削減することを目指し、各国に排出枠(削減目標)を割当(2008年～2012年) ・第二約束期間では先進国全体の温室効果ガス排出量を1990年比で少なくとも18%削減することを目指(2013年～2020年)	・各国が自主的に削減目標を設定(pledge and review方式) ・対象期間は2020年以降25年～30年(更に長期を目指す) COP21の争点 ・「共通だが差異ある責任」(先進国V途上国)をどのように調整するか ・2℃目標を達成するため、今後、どのように削減目標を引き上げていくか(5年毎にレビューし目標を再設定等)
法的形式	・議定書(各国政府が批准) ・目標達成を徹底するため、報告義務不遵守や排出枠不遵守に対して罰則を規定	・未定 (議定書(=国会承認)? COP決定(=行政権限)?) COP21の争点 ・各国提案方式の目標に対してどのように実効性を確保するか ・合意の法的形式はどのようなものか

(出所：三井物産
戦略研究所)

2030 年にして、その代わり目標を 5 年おきに
チェックしていこうということで合意しようと
しています。罰則もどうするのかまだ決めない。
これがパリでの決め事になると考えます。

「約束提案」と COP21 後の見通し

表 3 は主要国の「約束提案」の数字です。
インドも公表して、主要 CO₂ 排出国は全て提
出しています。

では、COP21 の後、「約束草案」に沿っ
て各国がどんな動きを見せるのか。図 7 に
COP21 後の想定される動きを示してみまし
た。例えば、米国では、石炭火力への規制が
大変厳しくなっています。欧州連合 (EU) は、

排出量取引が完全に崩壊してしまったので、
これを建て直すために、様々な工夫をしよう
としています。中国は排出量をピークアウト
して経済構造改革とどう結びつけていくのか。
日本は、JCM (二国間クレジット制度) の確立、
低炭素化技術の輸出に注目しています。

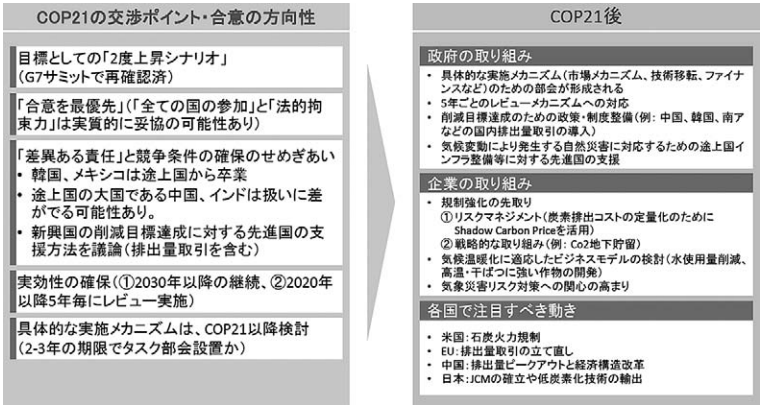
そこで、企業として興味を持って見ているの
は、「炭素の価格付け」の点です。将来、例え
ば炭素税など、炭素排出にコストがかかるよう
になった場合、長期的事業の採算に、これをコ
ストとして織り込まなくていいのかということ
です。既に 400 社くらいのグローバル企業が、
CO₂ のシャドープライスを設定し、事業採算上
のコストとして織り込み始めています。この辺
は最近の大きな変化だと思います。

表 3 COP21 に向けた各国の「約束提草案」の提出状況

国名 (排出量シェア)	目標	一人当たり排出量 (2030年)	備考
中国 (25.9%)	・2020年 GDP当たり▲40～45%(2005年比) ・2030年 GDP当たり▲60～65%(2005年比) ・2030年より前のピークアウトを目指す。	7.1トン	IEA特別レポート/INDCシナリオ (エネルギー起源CO2)
米国 (16%)	・2020年 ▲17% (2005年比) ・2025年 ▲26-28%(2005年比)、2050年▲80%	10.9トン	IEA特別レポート/INDCシナリオ (エネルギー起源CO2)
EU (11%)	・2020年 ▲20%(～30%)(1990年比) ・2030年 ▲40%(1990年比)、2050年▲80-95%(1990年比)	6トン	INDCに明示
インド (6.2%)	・2020年 GDP当たり▲20～25%(2005年比) ・2020年以降の目標は未提出。	2.1トン	IEA特別レポート/INDCシナリオ (エネルギー起源CO2)
ロシア (5.2%)	・2020年 ▲15～25%(1990年比) ・2030年 ▲25～30%(1990年比)	16.0トン	INDCから計算
日本 (3.9%)	・2020年 ▲3.8%(2005年比) ・2030年 ▲26%(2013年比) (15年6月G7にて表明済)	8.9トン	2030年26%削減(2013年比)の場 合
メキシコ (1.4%)	・2030年22% 削減(BAU比)	5.9トン	INDCに明示

(注) WEO: World Energy Outlook、NPS: New Policy Scenario(新政策シナリオ)

(出所：UNFCCC ホームページ、IEA World Energy Outlookなどを基に三井物産戦略研究所作成)



(出所：三井物産
戦略研究所)

図 7 COP21 の交渉ポイントとその後の見通し

エネルギー地政学の変化

米国の国力低下で混乱する世界

今、中国、ロシア、中東など、様々な地域で地政学的な変化が現れています。何がその根本原因なのかというと、米国人のマインドの変化と米国の相対的な国力の低下だと思われます。今でも米国は、世界最大の経済国ですが、1960年においては、世界GDPの40%を占めたものが今では23%に低下しています。1960年においては、軍事支出のGDP比は9%でしたが、今は3%台になっています。今も米国が世界唯一の超大国であることに変わりはないのですが、そのウエイトは落ちてきています。例えば、米・国家情報会議の作成した国力指数では、米国は2030年代に中国に抜かれ、2050年にはインドにも抜かれると見られています。

この環境では、地政学的な野心を持つ国々が様々なことを仕掛けてきます。例えば、中国は、「中華民族の偉大な復興」を唱え、中国を世界のメインプレーヤーにしようと勢力拡大に出てきます。ロシアのプーチン大統領も「1991年のソ連崩壊の年は痛恨の極みである」と発言し失地回復を考えているといわれます。

さらに、中東ではISのような非国家主体が登場し、様々な対立軸が錯綜しています。実は、これらの地政学的変化が全てエネルギー情勢に影響を与えているのです。

エネルギー埋蔵地帯・中東の液状化

中東は、世界のエネルギー埋蔵の中心地です。2014年時点で石油の51%、ガスの42%が中東に埋蔵されています。ですから、中東での混乱は、エネルギー情勢を大きく悪化させます。

図8は、今の中東情勢を理解するのに役に立つ図です。複雑な構図ですが1点だけ、中東で頭に入れておくとしたら、サウジアラビアとイランの対立関係です。シーア派の軸は、イランを中心としています。アバディ政権のイラクとアサド政権のシリアは、傍流ですがシーア派です。さらに、レバノンの国家内国家的存在である「ヒズボラ」もシーア派のグループです。

対するサウジアラビアは、中東で最大のアラブ人口を擁するエジプトを支えながら、湾岸諸国などとアラブ人の穏健スンニ派の軸を作っています。

イランを中心としたシーア派の軸とサウジアラビアを中心としたスンニ派の軸の対立から様々な問題が起きています。

9月30日にロシアがシリアの「イスラム国」

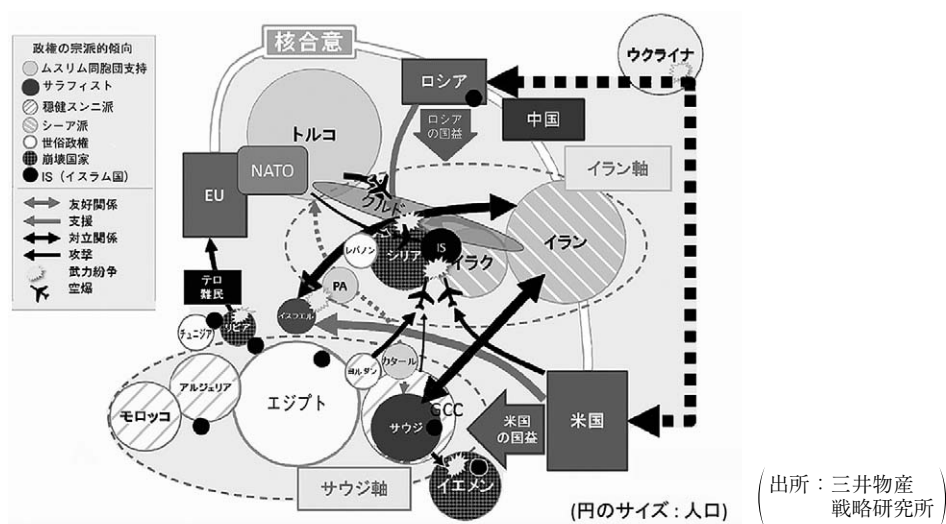


図8 エネルギー埋蔵地帯・中東の液状化（混乱の状況）

に対して空爆を始めました。昨日は、冷戦以降、初めてロシアが他国にミサイルを撃ち込みました。ロシアは地上戦を展開しているイラン、イラク、シリアのアサド政権と軍事情報を共有しています。ロシアはシリアのタルトゥース港に海軍を寄港させていますが、この拠点を維持するためにアサド政権の擁護に動いています。

また、イエメンの内戦はイランとサウジアラビアの代理戦争の様相を呈しています。「アラブの春」以降、シリア、イエメン、リビアの3つが破綻国家と化しています。

トルコには、国を持たないクルド人との対決の問題があります。エルドアン大統領は、11月の選挙に向け、クルド勢力への対決姿勢を明確にしています。前回6月の総選挙でエルドアン大統領率いる与党が過半数に届かなかったのはクルド系左派政党の躍進によるものだったからです。

また、イスラエルの存在もあり、パレスチナ問題もあります。更に、「イスラム国」のテロは、アフリカにも飛び火し、世界に広がっています。

難民問題

内戦やテロの結果として、住民たちが難民となって国外に流出しています。シリアからも、アフリカからも流出していますが、受け入れ側のヨーロッパでは、この受け入れに反対する右派政党が反移民を謳って一定の支持を得ており、難民問題はヨーロッパの最大の問題となってきています。

旧約聖書の「エクソダス」（『出エジプト記』というモーゼがユダヤの民を連れて紅海を渡りパレスチナに行った話）と同じような状況が、シリアからEUに向けて起きています。シリアの人口は約2,300万人なのですが、半分が既に家を失っています。そのうち700万人は国内にとどまり、400万人が国外に出ています。EU各国は難民受け入れで議論を重ねていますが、その対象人数は、ギリシャ、イタリアにいる12万人です。12万人の受け

入れでも大変なのに、400万人をどうするのか。大変な問題を抱えているわけです。

欧米によるロシアへの経済制裁

欧米とロシアの軋轢とロシアへの経済制裁もエネルギーに大きな影響を与えます。ウクライナは、EU、ロシアの双方にとり地政学的に重要な位置に存在します。経済制裁の概要は表4の通りで、2014年3月6日に政府間

表4 欧米によるロシアへの経済制裁（ウクライナ政変以降の経緯）

13年2月21日	ウクライナ政府がEUとの連合協定の署名準備プロセスの停止を発表。その日よりキエフでデモが開始。
11月29日	EU東方パートナーシップサミット（於ウィリニウス）でヤヌコーヴィチ大統領は連合協定に署名せず
14年1-2月	ウクライナでデモ激化。警官発砲により死亡者発生。
2月21日	ヤヌコーヴィチ大統領と野党3党首との間でウクライナ危機打開に関する合意が署名される最高会議において、大統領の権限を縮小する2004年版憲法が採択、新内閣の組閣が開始
2月22日	未明、ヤヌコーヴィチ大統領がキエフを脱出。最高会議は、ヤヌコーヴィチ大統領が職務を放棄した旨の決議を採択、2014年5月25日に大統領選挙を実施する旨決定。
2月27日	所属不明の戦闘員によりクリミア自治共和国政府庁舎、セヴァストポリ空港等が占領される
3月1日	ロシア下院・上院がウクライナ領内へのロシア軍派遣に関する大統領宛て提案を採択、ロシア軍部隊がウクライナ軍基地の占領を開始
3月6日	EUがロシアとの政府間協議の停止を発表（制裁の第1段階）
3月11日	クリミア自治共和国最高会議及びセヴァストポリ議会はそれぞれ独立宣言を採択
3月16日	クリミアの地位に関する「住民投票」が実施
3月17日	米国及びEUがクリミアの占領に関係した人物の資産凍結・渡航禁止の制裁を発動（第2段階）
3月18日	クレムリンにおいて、クリミアのロシア編入に関する条約が署名
4月上旬	ドネツク州、ルハンスク州、ハリコフ州の行政府庁舎、警察署等が親露派デモ隊、武装集団により占拠される
4月6日	「ドネツク人民共和国」が独立宣言
4月14日	ウクライナは、反テロ作戦の開始を発表
4月28日	「ルハンスク人民共和国」が独立を宣言
5月25日	ウクライナ大統領選挙の実施、ポロシェンコ新大統領が54.7%の得票により選出
6月4-5日	ブリュッセルにてG7サミットが開催（ロシア抜きでサミット開催）
7月16日	米国はロシアに対するセクター制裁発動（第三段階）
7月17日	ドネツク州でマレーシア航空機が撃墜、乗員乗客298名が死亡
7月31日	EUはロシアに対するセクター制裁発動（第三段階）、米国は制裁拡大。
9月5日	ミンスクにおいて、ウクライナ、OSCE、ロシアの代表者により、即自停戦、OSCEによる停戦の監視と確認、東部2州の権限拡大に関する法律の採択等に関するミンスク合意が署名（ミンスクI合意）（その後もウクライナで戦闘継続）
15年2月12日	ウクライナ、ロシア、ドイツ及びフランス首脳による協議の結果、「ミンスク合意の実施にかかる包括的措置」が署名（ミンスクII合意）
6月5-6日	安倍総理がウクライナを訪問
6月7-8日	ドイツ・エルマウにてG7サミット開催
8月31日	ウクライナ議会によるウクライナ憲法改正案（地方自治権の拡大：ミンスクIIの条件）の第一次採択（年末迄に最終採択必要）
10月25日	ウクライナ地方選挙（ドネツク・ルハンスク人民共和国は独自選挙実施を模索。その場合はミンスクII違反となり制裁強化も）

（出所：各種報道を基に三井物産戦略研究所作成）

協議停止（第1段階）、3月17日にクリミアの占領に関係した人物の資産凍結・渡航禁止、7月31日にはセクター制裁を発動しました。特に、第3段階のセクター制裁がエネルギーに関係があり、少なくとも来年までは継続します。

例えば、欧米エネルギー企業は「北極海・深海・シェール」の活動をロシアで禁止され、表5にあるように、エクソン社は北極海での10プロジェクトを停止せざるを得なくなりました。シェル社やトタル社は、ロシアがシェールの最大埋蔵国にも拘わらずシェールの開発作業を停止しています。

もう1つは、EUのロシアへのエネルギー依存の修正の動きです。ヨーロッパ諸国は、ロシアにエネルギーを依存しています。例えば、ドイツは4割近くの高ガスをロシアに依存しています。そこでEUは、長期的に特定の燃料を特定の供給者やルートに依存することをやめたいと言っています。「特定の供給者」とはロシアのことです。特に、東ヨーロッパの国々は、ロシアへのエネルギー依存の低減を図りたいと考えています。米国国務省の高官も「1つの供給先への依存が拡大しないようにしていくことが、我々にとっての主要なポイントだ」と発言しています。これは将来、シェー

ルガスによるLNGをヨーロッパの同盟国に出荷することも含めた考え方と見られます。

欧米からの制裁に対するロシアの動向

それに対してロシアもしたたかに動いています。制裁発動後の2014年12月に黒海経由でヨーロッパへ天然ガスを供給するパイプライン「サウス・ストリーム」の建設計画が中止されましたが、新たにバルト海海底を経由してドイツにつながる「ノルド・ストリーム2」が計画され主体となるガスプロムが本年9月にドイツ等の西欧企業との間で合弁契約を締結しました。この案件が実現すると、ドイツがロシア産ガスの欧州向けハブになります。その意味では、ロシアは、ドイツにアプローチして、融和を図り、米国とEUを分断しようとしているとも見えます。

また、経済制裁直後は、ロシアは中国に接近しました。2014年5月、東シベリアの天然ガスを30年間、「シベリアの力」パイプライン建設を通じて380億m³供給する4,000億ドル契約を結びました。その後、双方の戦勝記念日に出席しあったり、緊密な関係を国際社会にアピールしました。ところが、もう1つのシベリア「西ルート」のパイプライン計画は交渉が大きくスローダウンしています。背景として、中国のガス需要見通しが下方修正されたのか、ソースの多様化を狙ったのか、よく分かりません。

そのトーンダウン直後に、ロシアとドイツをつなぐ「ノルド・ストリーム2」建設の話が浮上してきました。エネルギーに関わる大国であるロシア、EU、中国そして米国が今後どう動いていくか。今後の地政学的変化がもたらすエネルギー情勢への影響には大変興味深いものがあります。

表5 セクター制裁後のエネルギー開発状況

会社名	制裁後の状況
Exxon Mobile	北極海を対象とした制裁により、カラ海での探鉱活動を初めとするRosneftとの10に亘るプロジェクトの作業を停止。一方で既存事業であるサハリンIにおける生産・更なる掘削活動は継続。
Shell	Gazprom Neftと進めていた西シベリア Bazhenov層のシェール開発に関し作業を停止。一方、15年6月にGazpromとガス事業に係る「戦略的協業」に関するMOU、並びにサハリン2プロジェクト拡張(T3)推進に向けたMOUを締結した。(同8月に米国は関連する南キリンスキー鉱区を制裁対象に加えた)
Total	Lukoilと推進を計画していた西シベリアにおけるシェールオイル開発プロジェクトを停止。一方、Novatekと推進している Yamal LNGプロジェクトについては、中国からの資金調達を計画する等引き続き推進。
BP	本年6月にRosneftから東シベリアのTaas Yuriakh油田の権益20%を取得。
Statoil	Rosneftと共同推進するプロジェクトの作業継続に関し政府から承認を取得。加え、本年シベリア North Komsomolskoyeにおいて2本の試掘井の掘削を計画している。

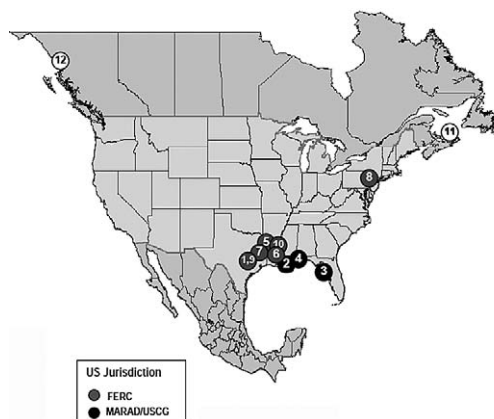
(出所：三井物産戦略研究所)

中国のエネルギールート確保 ～重点は南シナ海からインド洋へ～

中国の地政学的な動きのポイントは、エネルギー輸入ルート確保になります。南シナ海の埋め立て問題がしばしば話題になりますが、南シナ海は中国にとり、中東原油を運ぶための重要なルートにあたります。米国とは好対照に、中国の石油輸入依存度は着実に増えており、安全なシーレーンの確保を命題としていることが分かります。また、既にゲームの重点は南シナ海からインド洋に移っているようにも思います。

中東からのエネルギーをマラッカ海峡の通過を避け陸路で運ぶために、中国はミャンマーのチャオピューに港をつくり、雲南省の昆明までパイプラインを敷きました。現在は、パキスタンのグワダルに港をつくり、原油をウイグル自治区カシュガルまで運ぶためのインフラ建設を計画しています。

そういったインド洋での中国の動きに、インドが対抗しようとしています。例えば、中東から中国への原油輸送ルートに沿って、中国は、バングラデシュのチッタゴン、スリランカのハンバントータなどでも、港の建設を行っています。インドはこれらの使用权を得たり、米印日で海上共同軍事演習を実施したり、様々な牽制を行っています。今やインド洋がホットになりつつあるのです。



シェール革命による米国の変化

エネルギー地政学において、シェール革命がもたらした米国の変化は非常に大きな意味があります。シェールオイルの増産で、米国の原油輸入が減り、石油製品の輸出が増えていきます。

シェールガスの生産も急拡大しています。ガスの場合は、供給が国内消費を上回ることから米国はガスの純輸出国になろうとしています。そのため、図9に示した⑤～⑩の場所で、LNGの輸出プロジェクトが進捗しており、われわれ三井物産も1件に投資をしています。既に合計で1,700万トンのLNG引き取りが米国と日本企業の間で契約されています。

面白いことに、この辺のプロジェクトは、もともとLNGの輸入ターミナルの計画でした。日本の商社が米国でLNG輸入をしようと思って造ったターミナルを、今は輸出するためのターミナルに切り替えている状況です。

総合商社三井物産の取組み

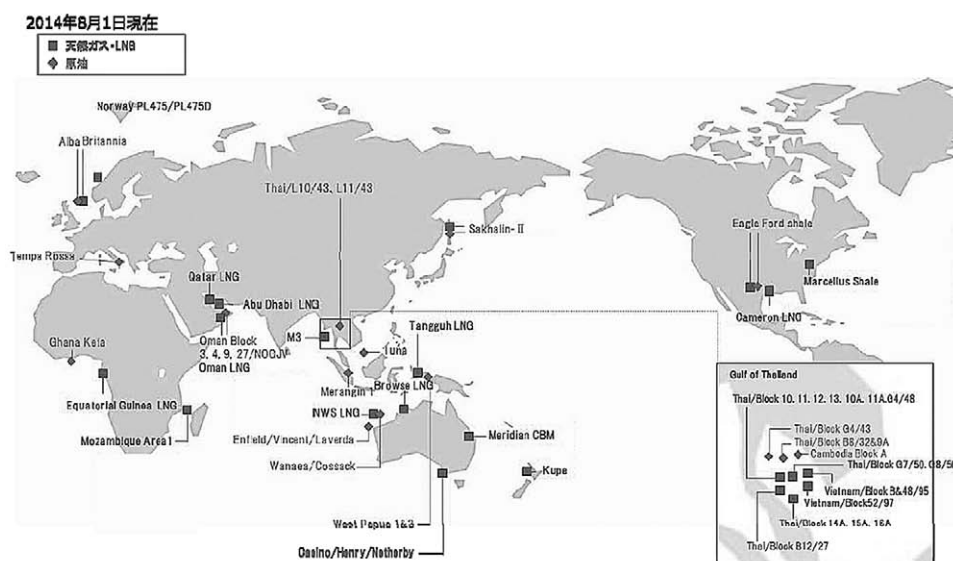
エネルギーの安定確保の視点での取組み

総合商社には、日本のためのエネルギー安定確保という役割があり、そのため、三井物

Import Terminals	
U.S.	
APPROVED - UNDER CONSTRUCTION - FERC	
1. Corpus Christi, TX: 0.4 Bcf/d (Cheniere - Corpus Christi LNG) (CP12-507)	
APPROVED - NOT UNDER CONSTRUCTION - MARAD/Coast Guard	
2. Gulf of Mexico: 1.0 Bcf/d (Main Pass Molokai Exp.)	
3. Offshore Florida: 1.2 Bcf/d (Hogarth LNG - Fort Dolphin Energy)	
4. Gulf of Mexico: 1.4 Bcf/d (TCRP Technology Bienville LNG)	
Export Terminals	
U.S.	
APPROVED - UNDER CONSTRUCTION - FERC	
5. Sabine, LA: 2.76 Bcf/d (Cheniere/Sabine Pass LNG) (CP11-72 & CP14-12)	
6. Hackberry, LA: 1.7 Bcf/d (Semptra-Cameron LNG) (CP13-25)	
7. Freeport, TX: 1.8 Bcf/d (Freeport LNG Dev/Freeport LNG Expansion/FLNG Liquefaction) (CP12-509)	
8. Cove Point, MD: 0.82 Bcf/d (Dominion-Cove Point LNG) (CP13-113)	
9. Corpus Christi, TX: 2.14 Bcf/d (Cheniere - Corpus Christi LNG) (CP12-507)	
APPROVED - NOT UNDER CONSTRUCTION - FERC	
10. Sabine Pass, LA: 1.40 Bcf/d (Sabine Pass Liquefaction) (CP13-552)	
Canada	
APPROVED - NOT UNDER CONSTRUCTION	
11. Port Hawkesbury, NS: 0.5 Bcf/d (Bear Head LNG)	
12. Kitimat, BC: 3.23 Bcf/d (LNG Canada)	

(出所：連邦エネルギー規制委員会 (FERC))

図9 米国におけるLNG輸出計画の推進 (2015年8月6日現在)



(出所：三井物産，2014年8月1日現在)

図 10 三井物産の原油・ガス開発プロジェクト

産は、図 10 のように、地政学的なリスク分散を考え原油・ガス開発を世界的に進めています。原油・ガスの持ち分合計は現在約 24 万 3,000 バレルですが、着実に増やしていく予定です。日本企業では、専業の国際石油開発帝石株（INPEX）にこそ劣りますが、その他の企業よりは高いレベルにあります。

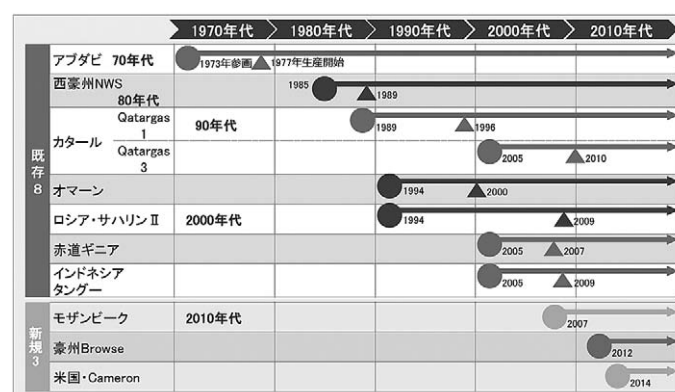
幅広い天然ガスへの取り組み

IEA はこれからは一次エネルギーの中でガス需要が伸びると予測していますが、われわれも将来ガスが重要だと思っています。ガス田開発に限らず、液化プラントを造る，LNG 船を保有し輸送にあたる，受け入れターミナ

ルを造る，揚げ地でガスの流通に携わる，ガス発電・ガス化学へ事業展開するなど，様々なことに取り組んでいます。

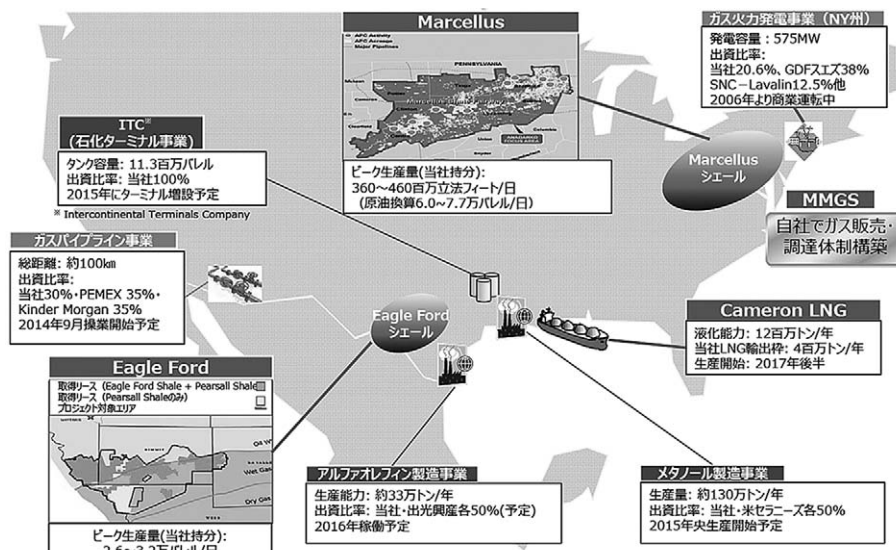
図 11 のように、三井物産はこれまで供給地域の多角化に手を打ってきました。1970 年代は中東のアブダビ，80 年代は西オーストラリア，90 年代はカタールに取り組みました。その結果，現在，カタールは世界最大の天然ガス輸出国になっています。2000 年代には，ロシア・サハリンでの開発に取り組みました。

2010 年代のフロンティアとしては，アフリカ南東部のモザンビークに取り組んでいます。モザンビークの沖合で発見された世界最大級の 50 ～ 75 兆立法フィート（tcf）の巨大ガス田を対象に，米国のアナダルコ社をオペ



(出所：三井物産
戦略研究所)

図 11 三井物産 LNG プロジェクトの歴史



(出所：三井物産，2013年11月現在)

図12 三井物産・米シェールガスバリューチェーン

レーターに、われわれが20%出資をし、その他、インドやタイ、これからエネルギーが必要な新興国と組んで開発検討を進めています。現時点では、2系列で1,100万トンくらいのLNGを生産する計画ですが、将来は10系列までの拡大可能性があります。その場合、カタールよりも大きなLNG輸出国になっていく可能性もあります。モザンビークの国造りに貢献しながらアジアへの輸出につなげていこうと考えています。

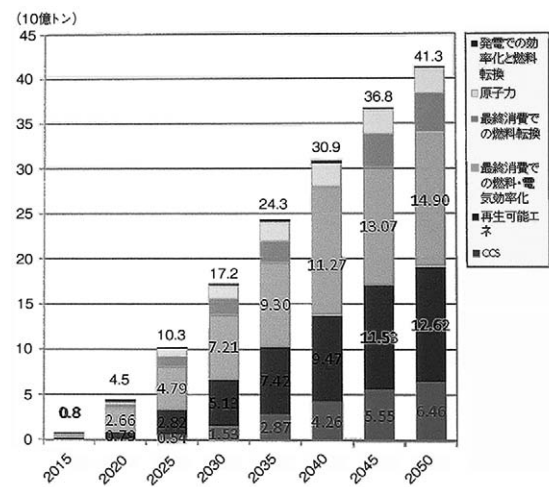
シェールオイル、シェールガス関連事業

シェールオイル、シェールガスに関しても様々な取り組みをしています。図12のように上流での開発、LNGプラント建設だけではなく、化学品のメタノールや電解といった事業、さらには、化学品タンクのターミナル事業も行っています。

ガス発電にも対応しています。更に、運送のためのパイプラインやシェール開発のコストダウンに貢献するIoT（モノのインターネット）サービス分野での事業も進めています。上流だけでなく下流分野でも活動しているので、採算面でのバランスを取ることができます。

地球温暖化対策の視点

図13はIEAの『エネルギー技術展望』からの図ですが、「6℃上昇シナリオ」（現行政策シナリオ）から「2℃上昇シナリオ」に必要なCO₂削減量を技術ごとに示しています。一番重要な技術は「省エネ」で2050年の必要削減量（413億トン）の40%を担います。「再生可能エネルギー」で30%、「炭素回収貯留（CCS：Carbon dioxide Capture and Storage）」で10%を担うことになっています。



(出所：IEAETP2015を基に三井物産戦略研究所作成)

図13 技術領域ごとに必要とされるCO₂削減量（6DS→2DS）

[再生可能エネルギー]

その中の、再生可能エネルギー分野ですが、太陽光、風力、バイオマスの発電事業(780MW: 国内 180MW + 海外 600MW) をグローバルに展開しています。また、企業向けの 200 億円ファンドを使って日本国内 20 カ所に大規模太陽光発電所を建設しました。

太陽光発電所の保守運営や遠距離監視のようなサービスもビジネスとして提供しています。また、風力発電分野では、英国で、風力発電の海洋構造物の組立事業に投資をしています。例えば、定置型洋上風力発電のために、「ジャケット」と呼ばれる支持構造物を製造する企業や「タワー」と呼ばれる風車の部分を製造する企業に投資しています。発電事業そのものだけでなく、周辺ビジネスにも色々取り組んでいます。

[エネルギー効率化]

エネルギー使用の効率化に関しては、ICT(情報通信技術)分野で先行する米国のエネルギーマネジメント会社に出資しています。高性能蓄電池を用いピーク電源をカットすることによって電気料金を下げるという、サプライヤー、ユーザー双方にプラスを提供するビジネスモデル作りに取り組んでいます。将来日本でも展開してみたいと思っています。

[CCS]

最後に、オーストラリア・クイーンズランド州で、2012 年 6 月～2015 年 2 月まで、(株)IHI や電源開発(株)と共に酸素燃焼法での「CCS 実証試験」に取り組んできました。一定の成果を得たので、今度はこれをカナダ・アルバータ州に展開しようと検討しています。将来、CCS は CO₂ 削減のための重要な技術になってくるので、われわれも技術蓄積をしながら、将来のビジネスチャンスとして見ていきたいと考えています。

現在のエネルギーを巡るグローバルな変化と三井物産の取組みということで、お話をさせていただきました。ご清聴どうもありがとうございました。

(拍手)

2050 年に向けたエネルギー技術への期待

蓮池 宏 (研究理事・プロジェクト試験研究部
部長)



はじめに

本日のシンポジウムの主題は、先ごろ取りまとめられた 2030 年までの「長期エネルギー需給見通し」(2015 年 7 月)を踏まえて、その先の 2050 年に向けた技術を展望するというものです。

まず、出発点となる「長期エネルギー需給見通し」のポイントを簡単にまとめます。今回の「長期エネルギー需給見通し」を一言で言うと、基本的な政策目標である「S + 3E」(安全性、エネルギーの安定供給、経済効率性の向上、環境への適合)を同時達成する 2030 年のエネルギーミックスを示した、ということになるかと思います。エネルギーミックスを構成する原子力、石炭、液化天然ガス(LNG)、再生可能エネルギー(再エネ)について「S + 3E」との関係を表 1 に「○、△、×」で示してみました。それぞれに強み、弱

みがあり、これらを適切に組み合わせることが必要になります。

「長期エネルギー需給見通し」では 1 つの章を設けて「2030 年度以降を見据えて進める取組」について記述してあります。そこには、革新的な蓄電池とか、水素社会の実現に向けた技術、次世代型再生可能エネルギー、CCS(二酸化炭素の回収貯留)、メタンハイドレートといったキーワードが入っています。これらも踏まえて、2050 年を見据えて、どんな技術が重要になってくるかを考えていくことが本日のテーマです。

私の講演では、まず、今後取り組むべき技術について考えるときの視点についてお話しします。次に、世界の動向、エネルギーミックスにおける発電以外の部門(産業、民生、運輸)も含めて 2050 年に向けた展望をご紹介します。その中で技術がどう貢献できるか、あるいは重要な貢献が期待できる技術は何か、ヒントになるようなことをご紹介します。できればと思っています。

表 1 各種一次エネルギーと「S+3E」の関係

□ 需要: 3億6,400万kℓ □ 一次エネルギー供給: 4億8,900万kℓ □ 電力需要: 9,808億kWH(対策前比17%減) □ 電源構成: 再エネ22~24%,原子力22~20%	□ 自給率: 6%→24% □ 電力コスト: 2~5%減 □ エネルギー起源CO₂: 22%減(いずれも2013年比)
---	--

<各種一次エネルギーと S+3E の関係>

	安全	安定供給	経済性	環境
原子力	△	○	○	○
石炭	○	△	○	×
LNG	○	△	△	△
再エネ	○	○/×	×	○

(出所:「長期エネルギー需給見通し」, 2015 年 7 月)

技術選定に必要となる3つの視点

①エネルギーミックスを通じた「S + 3 E」実現への寄与

技術に求められる役割として、まず「S + 3 E」の達成に寄与することが求められます。ただし現在の「S + 3 E」議論は、エネルギー自給率にしても、エネルギー価格やコストにしても、国内の視点が強いと思います。エネルギーの問題は、世界との関係を抜きに考えることはできません。特に「環境への適合」は、世界全体の問題であって、日本だけが削減しても効果に限りがあります。日本の国外での活動も含めて、どう世界全体へ貢献していくかということも大事です。

②国内経済（GDP）への貢献

エネルギー技術開発が国内経済の活性化に貢献するという話はよく語られるところです。ただし、この議論についての体系的・定量的な評価は不十分で、課題があります。

この視点を本当に重視するのであれば、例えば発電コストの評価の際には、燃料や機材を国内で調達するのか国外から調達するのかを区別する必要があります。また、国外に設置されるエネルギー装置もプラント輸出という形で国内経済に貢献することがあります。そうした技術の実用化は国内のエネルギーミックスには直接

関係しませんが、経済には関係します。

今回の長期エネルギー見通しではこれらの視点は含まれていませんが、今後は定量的な評価が進められていくと期待されます。

③倫理の視点

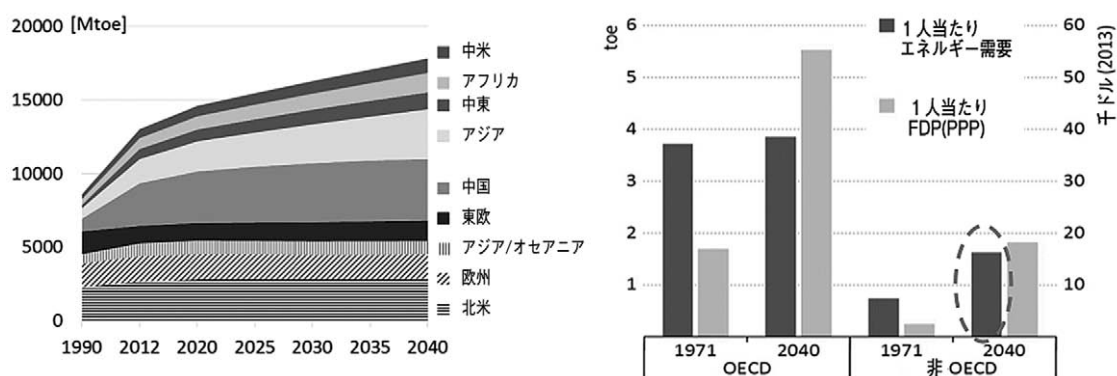
これは当研究所が「長期エネルギー需給見通しのパブリックコメント」として出させていただいたものです。倫理の視点のポイントは公平性と責任です。国際的な公平性、あるいは将来世代との公平性も考慮する必要があり、世界全体の問題に日本がどのように貢献していくのかという視点も重要です。

エネルギーミックスを巡る世界の傾向

エネルギー需要予測

国際エネルギー機関（IEA）の予測では、経済協力開発機構（OECD）諸国のエネルギー需要は、図1（左）のように、将来に向けほとんど増えません。増えるのは非OECD諸国で、2040年には需要の7割を占めます。

図1（右）の1人当たりエネルギー需要で見ますと、非OECD諸国は、2040年でもOECD諸国の2分の1弱の水準に留まります。非OECD諸国では、まだまだエネルギー需要が増えていく圧力が今後も続くということです。



(出所：IEA “World Energy Outlook 2014”)

図1 エネルギー需要予測

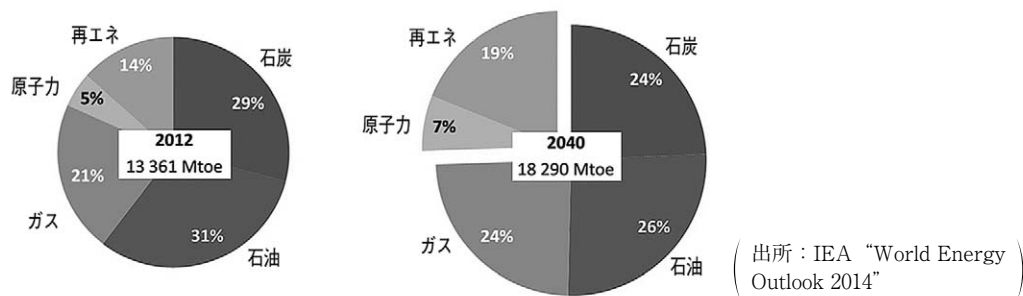


図2 エネルギーミックス予測

世界全体のエネルギーミックスの傾向

図2に示すように、世界全体の一次エネルギー供給量は、2012年から2040年までに約1.5倍に増えます。今、一番大きい石油と石炭の比率はやや低下し、ガス、原子力、再エネの3つが比率を上げます。再エネと原子力は、CO₂を出さないエネルギーとして増加していくというのが世界全体の傾向です。石炭は安価で資源量も豊富であるにもかかわらず比率が低下するというのは、何らかの規制やディスインセンティブが課されることが推測されます。

IEA が注目する技術

IEA の“Energy Technology Perspectives 2015” (ETP2015) で取り上げられている技術分野を表2に示します。普及拡大が見込まれる技術として、再エネ発電、CCS、燃費、電気自動車・プラグインハイブリッド車 (EV・PHV)、エネルギー貯蔵が挙げられています。

また、図3は、2℃上昇ケースでCO₂削減への貢献が求められる分野を示したものです。発電部門では、再エネで大きな貢献が必要です。需要部門では、省エネによる貢献に期待するところが大きくなっています。CCSも産業分野、発電部門で入れていく必要があります。

表2 IEA ETP 2015 が取り上げた技術分野

再エネ発電	ビル
原子力発電	躯体
ガス火力発電	需要機器
石炭火力発電	コジェネ・地域熱供給
CCS	再生可能熱
鉄鋼	スマートグリッド
セメント	エネルギー貯蔵
運輸	水素
燃費	
EV・PHV	

※太字は普及拡大が見込まれる技術 (出所：IEA, ETP 2014)

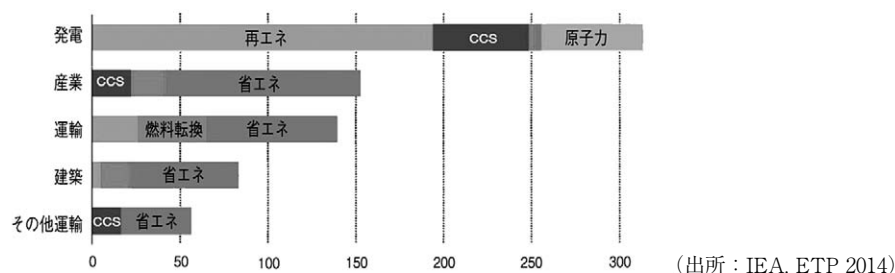


図3 2050年までの累積CO₂削減量 (2℃上昇ケース)

表3 日本で注目されている技術開発

1. 太陽エネルギー利用	5. 海洋エネルギー利用
2. 風力発電	6. 人工光合成
3. 地熱発電	7. 宇宙太陽光発電システム
4. バイオマス利用	9. 高効率石炭火力発電(IGFC)
8. 原子力発電	11. 二酸化炭素回収・貯留
9. 高効率石炭火力発電(A-USC, IGCC)	14. 資源開発技術
10. 高効率天然ガス火力発電(ACC, AHAT)	15. メタンハイドレート
12. コージェネレーションシステム	16. 海底熱水鉱床
13. 再生可能エネルギー熱利用	17. 超電導送電
18. 高性能電力貯蔵	23. 環境調和型製鉄プロセス
19. 蓄熱・断熱技術	24. 革新的石油精製プロセス
20. エネルギーマネジメントシステム	25. 革新的セメント製造プロセス
21. 革新的デバイス	31. 超低燃費航空機
22. 高効率エネルギー産業利用	33. 革新的構造材料
26. 省エネディスプレイ	34. 水素製造(海外の未利用エネルギー利用)
27. 省エネ住宅・ビル	35. 水素輸送貯蔵(海外からの輸送)
28. 高性能ヒートポンプ	36. 水素利用(水素発電)
29. 次世代自動車(HV・PEV・EV・クリーンディーゼル等)	
30. 次世代自動車(燃料電池自動車)	
32. 高度交通システム	
34. 水素製造(副生水素, 化石燃料利用)	
35. 水素輸送貯蔵(ステーション)	
36. 水素利用(燃料電池)	

(出所：長期エネルギー需給見通し小委員会，第1回会合資料「エネルギーの需給に関する長期的，総合的かつ計画的に講ずべき施策／9. 戦略的な技術開発の推進」，2015年1月30日)

日本で注目されている技術

一方，日本ではどのような技術を注目しているか。表3に，「長期エネルギー需給見通し小委員会」の第1回会合の資料が掲げた36の技術について，2030年くらいまでに導入が見込まれる技術(既に一部実用化)を左側に，2030年以降でないと難しいものを右側に分けて示しました。日本政府としては，ここに示した技術

に注目し期待している，ということです。これらの技術を世界で議論されている表2の技術と見比べると，日本特有で注目しているものもあれば，そうでないものもあります。

発電以外の部門の展望

今回の長期エネルギー需給見通しの作成の過程で，エネルギーミックスあるいはエネル

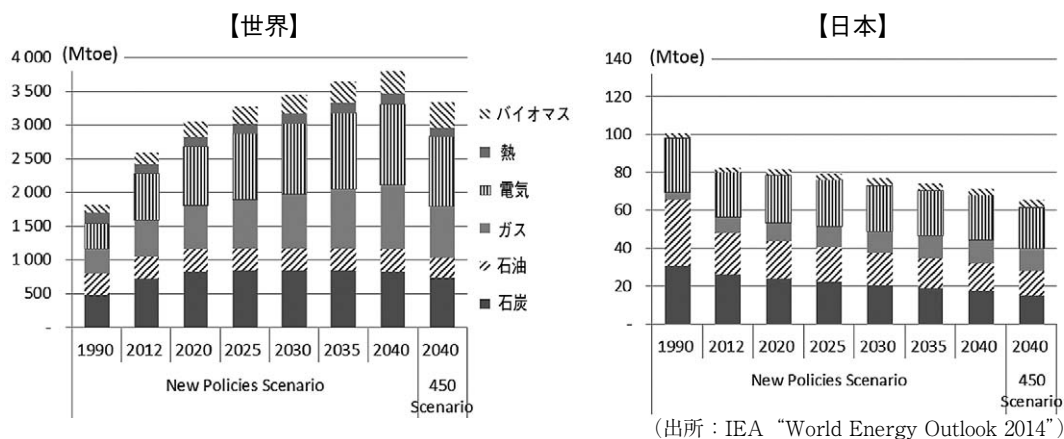


図4 産業部門のエネルギーミックス予測

ギーの選択ということが議論になりましたが、対象は発電部門に限ったものでした。

そこで、発電以外の部門はどのような傾向があるのか、今後の技術開発はどのように展望できるかを概観してみたいと思います。

産業部門

図4では、World Energy Outlook 2014における産業部門のエネルギーミックスを世界と日本とで比べています。「新政策シナリオ」が中心的なケースで、2040年については、450ppmシナリオ（2℃上昇シナリオに相当するかなり強力な温暖化対策を行うシナリオ）も示しています。

まず、世界の産業用エネルギー需要は増加傾向にあります。石油と石炭がほぼ一定で、ガスと電力が増分を賄うという形です。

それに対し、日本の産業用エネルギー需要は、やや減少傾向にあります。エネルギー種別は、世界とほぼ同じですが、ガスが増加します。世界と比較して目立つのは、石油がかなり残ることです。エネルギーセキュリティの観点から石油依存度をなるべく下げるとするのが1つの方向であるとする、産業部門の石油を他のエネルギーに代替することを促進する必要があります。

産業分野の技術の展望はどのようになるでしょうか。まず、最新の实用技術を世界中に

水平展開することによって、相当なCO₂削減が可能ということは、多くの意見が一致するところだと思います。実際に水平展開する場合、コスト効果のある取組みが大事です。

エネルギー多消費産業（鉄鋼、セメント、紙、パルプなど）の省エネを図るために、生産プロセスを革新する取組みが目指されています。鉄鋼産業では、高炉への水素利用や高炉ガスからCO₂分離回収するといった技術のロードマップを作って開発が進められているところです。セメント産業でも焼成温度を低くするとか、バイオマス廃棄物の利用やCO₂分離回収といったことが考えられています。

複数の産業に適応可能な要素技術もあります。例えば、リジェネバーナ（排ガスに含まれる熱で燃焼空気を予熱する技術）、排ガス損失を少なくする酸素富化燃焼、自己熱再生加熱（排熱を圧縮して温度を上げ、熱回収をやり易くする技術）です。また、コンビナートなどでの異業種間のエネルギー融通もあります。

日本全体として低炭素産業へシフトしていくという方策もありますが、この中にはCO₂を大量に排出する産業は海外に移転するということも含まれます。ただしそれはCO₂発生源が移動するだけで、世界全体の解決にはなりません。この辺は国内中心に考えるのか、世界全体を考えるのか、いろいろな議論があるところだと思います。

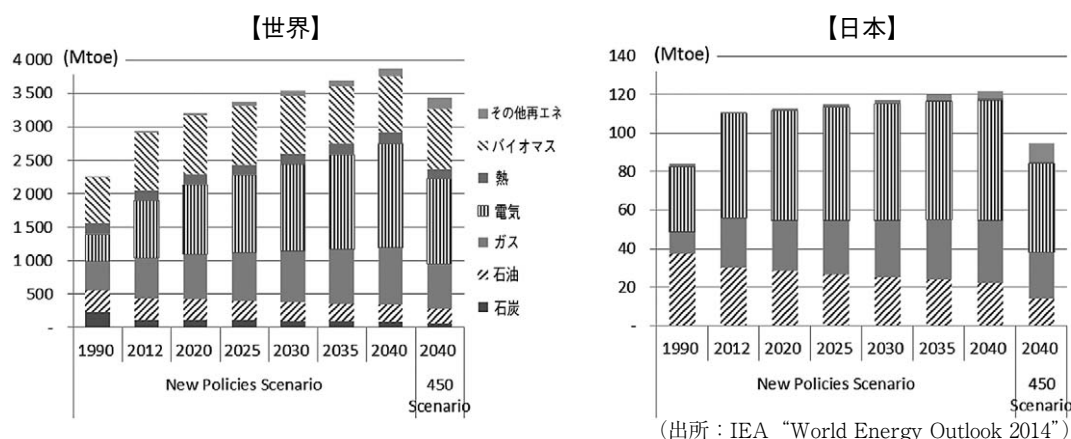


図5 民生部門のエネルギーミックス予測

民生部門

民生部門のエネルギー需要の傾向を見ますと、図5に示すように、世界も日本も増える傾向にあります。ここでも電気、ガスの比率が高まります。また、バイオマスが一定量使用されるというのが世界の特徴ですが、日本では民生用バイオマスはほとんどありません。

日本の民生部門では、まだ石油がかなりの比率で残っています。これは、特に寒冷地での給湯や暖房に灯油が使われているためです。これらをどうしていくかも、日本特有の課題になると思います

民生部門の技術はどのように展望できるでしょうか。民生部門は、産業や運輸に比べ需要が小規模で分散しています。そのため、大規模集中システムでエネルギーを分配するのは相対的にコスト高となり、分散型の再エネで自給する形が一番実現し易い分野だと言えます。

少し極端なコンセプトですが、太陽光発電を中心とした再エネ利用による「ネット」ゼロエネルギービル、ゼロエネルギー住宅というものがあります。これは再エネ発電し、一部は系統に売電し、年間で見ると収支がゼロになるという考え方です。ここに蓄熱や蓄電を組み合わせると、ほぼリアルタイムでゼロエネルギービル、ゼロエネルギー住宅が実現する。これが、民生分野で目指す方向の1つだろうと思います。

そう考える理由は、太陽光発電のモジュール価格とリチウムイオン電池の価格が、累積生産量が増えるに従って着実に下がってきていることです。これがずっと下がっていくと、リアルゼロエネルギー住宅／ビルの可能性も見えてくると思います。

電気の供給は太陽電池と蓄電池という組み合わせになります。給湯、暖房は、太陽熱でもいいですし、ヒートポンプやバイオマス燃料もオプションになります。ただ、需要のパワー密度が重要です。パワー密度が高くなると再エネだけでは賄いきれませんが、これを低く維持するために省エネ技術が重要になります。

運輸部門

図6に示すように、運輸部門のエネルギー需要は、世界全体としてやや伸びていきます。一方、日本では下がっていくと予想されています。運輸部門は、使い勝手の良い石油が太宗を占め続けるわけですが、世界ではバイオ燃料やその他の燃料として天然ガスがある程度増えていく、電気も増えていくという傾向があります。

この中で水素がどうなるかというのが1つの注目点ですが、“World Energy Outlook 2014”では、水素は登場してきていません。

運輸部門の展望としましては、この分野の特徴として、自動車のウェイトが非常に高い

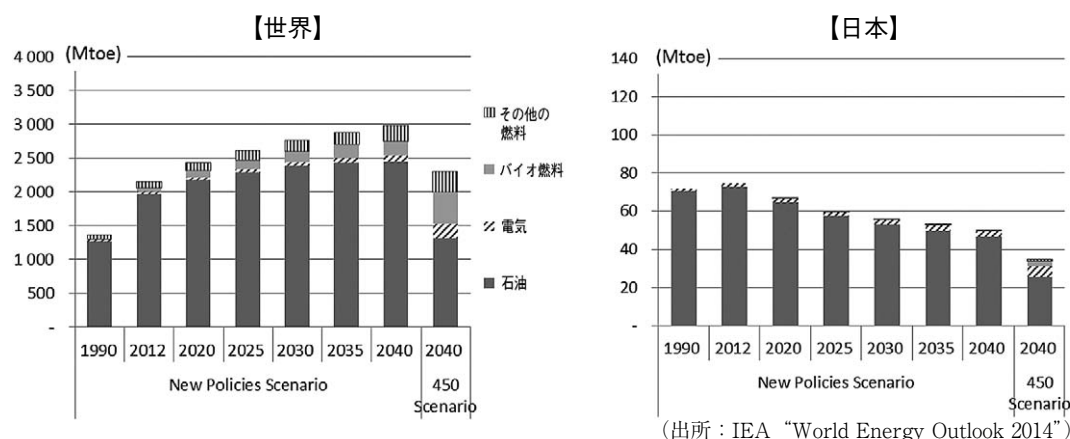


図6 運輸部門のエネルギーミックス予測

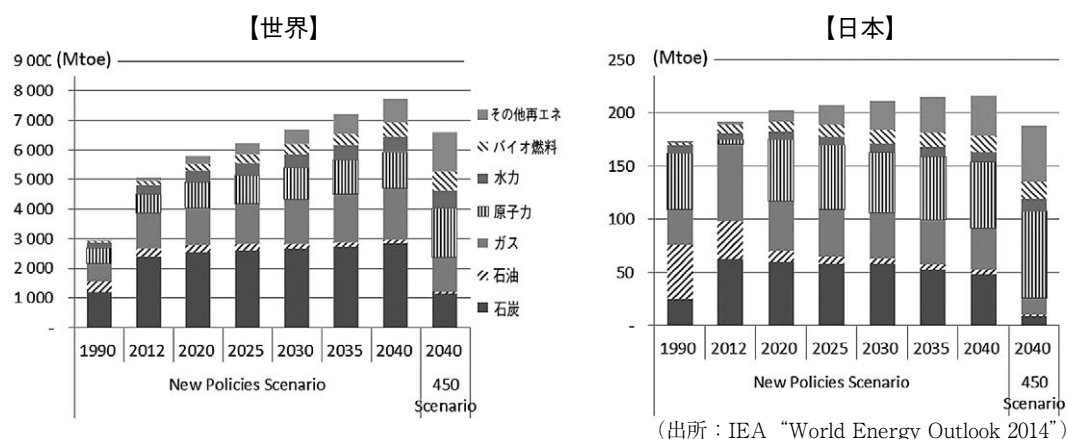


図7 発電部門のエネルギーミックス予測

ので、自動車メーカーがどう考えるかが大きく影響することになります。

自動車メーカーの開発のモチベーションは、世界各国でどんどん厳しくなっていく燃費規制にいかに対応していくかということです。短期的には経済性の面で適用し易く適用台数も多い、エンジンの改良やダウンサイジング、ハイブリッドシステム、軽量化などが有効です。ハイブリッドシステムは、特殊な技術ではなく一般的な技術へ移行していきます。

CO₂の大幅削減のためには、燃料自体を替えて行かなければいけません。その選択肢は電気、水素、バイオマスしかないと思いますが、どれも難しい課題があります。本格普及は2030年以降で、そのために今から準備を進めることになりますが、あまり性急に大量導入すると、経済的なデメリットが発生します。そうしたことも考えながら普及を目指していくことになると思います。

にその先のエネルギーミックスを考えますと、2050年にはさらに高いレベルで「S + 3E」を達成することが求められることになると思います。新しい技術が開発され実用化されることによって、高いレベルで「S + 3E」を達成するための選択肢の幅が広がるという認識があります。したがって、いろいろな分野でいろいろな技術を開発していくことが、2050年における次のエネルギーミックスを考えるために非常に有益であると考えます。

原子力、火力、再生可能エネルギーはそれぞれ弱点を持っています。冒頭で示した表1の△や×の部分になりますが、それを如何に補っていく技術開発ができるかがポイントになると思います。そういった視点で、午後の講演2から5までをお聞きいただければと思います。

ご清聴、ありがとうございました。

(拍手)

おわりに

私の講演の後、午後の講演2から5では、原子力、火力発電、電力系統、水素エネルギーに焦点を当てた講演があります。それぞれ発電部門に特化した話になると思います。

全体の問題意識としまして、2030年のさら

エネルギーミックスを支える原子力技術の課題と期待

田中 隆則（常務理事
原子力工学センター長）



はじめに

原子力は、エネルギーミックスの全体構成を考える上で重要な要素であり、その位置づけによって、エネルギーミックスは、大きく変化することとなります。

今、私たちがエネルギーミックスの前提となる原子力について語る際には、2011年3月11日に発生した福島第一原発事故を踏まえて、そもそも原子力利用に伴うリスクをどう考えるのかというところから、始める必要があると考えます。

今後の参考として、事故後のドイツの決断、欧州連合（EU）の動きについてご紹介し、その上で、原子力というものをもう一回考え、技術の問題に入っていきたいと思います。

事故が突きつけた原子力利用への疑問

福島事故のような原子力災害は、特に、先進的技術インフラが整った日本において「基本的に起きないもの」と受け止められていました。しかし、それが現実のものとなり、原子炉内の放射性物質の危険性があらわになりました。

また、その際の対応等で、安全対策そのもの、既存組織、専門家への不信感が出てきました。事故後の汚染水処理がなかなか進まなかったり、事故炉の廃止措置が非常に困難であった

りもしています。

そして、福島では、まだ多くの方々が元の住まいに戻れないなど、原子力災害が地元を与えた負担の重さから、原子力技術そのものへの不信、あるいは規制を含めた関係機関、専門家への不信、こういうものが極めて大きくなってきたわけです。

ドイツとEUのエネルギーミックスの検討 —倫理の視点から—

2022年までに原発廃止というドイツの決断

ドイツは、福島第一原発事故を受け、事故直後2つの委員会をつくりました。技術的な検討を行う「原子炉安全委員会」（SRK）と「安全なエネルギー供給に関する倫理委員会」です。

SRKは、原子力分野の専門家16名で構成され、環境省の要請を受け、ストレステストを実施して安全性の確認を図り、2011年5月16日には報告書を出しました。航空機の墜落というような特殊な事象を除けば、比較的高い耐久性を持っているという評価でした。それを受け、政府は、今すぐに全ての原子炉を止める必要はないという判断を下したわけです。

他方、「倫理委員会」は、政治家、宗教者、大学、産業界、労働組合の方々と構成されました。メルケル首相の強い要請で設置され、事故後の早い段階（4月4日）で活動を開始、5月末日までに報告するという指示で動きま

した。5月30日に報告が出て、政府はそれを受け、2011年6月6日の閣議で「2022年までに原発を廃止する」という決定を下したわけでは。

委員会の名前に「安全」という言葉が付けられているように、特に、安全問題を重視した検討が行われましたが、「倫理委員会」での議論のベースになったのは、原子力に対するリスク認知が変わったとの捉え方でした。それまでにドイツは、チェルノブイリ原発事故（1986年）の際、放射性物質による汚染を経験しましたが、「特殊な国の特殊な炉での事故」であってドイツでは発生しないと思われていました。ところが、日本というハイテク国家で原発事故が発生したため、ドイツでの発生も否定できないという認識が変わったというわけです。ドイツでは、ずっと原子力をやめるのかやめないのかという議論が続いてきたのですが、そこに福島事故が起こってリスク認知が変わり、「安全の問題でやめる」という結論を割と短期間で出したということだと思います。

ただ、ドイツは、必ずしも原子力の利用を即時に取り止めたわけではありません。原子力のエコロジック、経済的、社会的な適合性に即しながら、リスクのより少ないエネルギーで代替しうる限り、速やかに終わらせるという判断だったのです。それを「エネルギー大転換」（脱原子力）として提言し、国を挙げての共同事業として取り組もうと呼びかけたのです。

「倫理委員会」では、エコロジック、経済的、社会的に適合した方法で、脱原発が可能だという見通しも検討しています。ただ、極めて短期間ということもあって、定量的な分析には至らず、定性的な分析で判断が下されました。

EUでのエネルギーミックス議論と倫理

福島事故後の2011年12月、EUは、エネルギーミックスを議論するに当たり、倫理面の問題を考える必要性から、「科学と新技術における倫理に関する欧州グループ」（EGEグ

ループ）での議論をエネルギーミックスの検討に反映させることを決めました。

ここでも、委員構成は、科学、法律、哲学、倫理、社会科学といった分野からの15名です。

まずは、エネルギー全般についての歴史的・科学的な整理、EUの取組みについての整理が行われました。その上で、エネルギー政策の意思決定プロセスに、倫理問題を統合的に適用する手法について検討がなされました。EGEグループは、ドイツと違い、安全に絞り込むことなく広範に倫理的視点を入れ、約1年余り検討を続け、2013年1月に報告書を取りまとめました。

EGEグループは、現在の世界や将来世代の福祉が、他者の利益の犠牲にならないように、今の社会を変革する責任ある政策手法を要請し、倫理的にどういう点を考慮すべきか整理したわけです。

EGEグループによる検討の基盤となるのはEUの基本的価値です。『基本権憲章』（2000年に公布）にそれが規定されています。すなわち、「人間の尊厳」「自由」「民主主義」「多元主義の尊重」「非差別」「寛容」「公平性」「連帯」「従属性」といった、EU市民が共有できる一連の価値観です。

まず、「人間の尊厳と人権の尊重」では、エネルギーによって、例えば、医療と安全な環境に対する権利の保証や、人間の基本的な繁栄に重要な条件としてエネルギーへのアクセス権、エネルギー政策に関する意思決定プロセスに参加する権利、透明性と情報に対する権利が尊重されることが導かれています。

次に、「公平性」というでは、公正、分配、社会正義、政治、世代間の公平性といったように、中身が明確化されています。

「連帯」ということでは、EUのみならずグローバルな福祉に対する責任と関心の共有、現在および将来世代の幸福のための協力があります。そういう価値を明確にした上で、エネルギー政策に関する倫理基準を整理したわけです。

EU 市民が共有する普遍的な価値観と併せて、エネルギーに関連した EU の価値基準についても検討が行われました。この点については、「リスボン条約」で、エネルギー政策と環境政策に関する目標が決められていますので、それを踏まえた整理が行われました。ここでは、「エネルギーへのアクセス」「エネルギー安定供給」「持続可能性」「安全性」の 4 つの倫理基準が規定されています。

(a) エネルギーへのアクセス

エネルギー貧困、エネルギーが利用できないという問題への取り組みです。途上国支援に用いられる国連の「ミレニアム開発目標」も踏まえ、グローバルな視点も取り入れた目標です。必ずしも EU 域内だけではなく、もう少しグローバルな視点を持ち途上国などでのエネルギーアクセスの確保ということも考えていくわけです。

(b) エネルギー安定供給

輸入エネルギー源に対する脆弱性の克服が挙げられています。このとき、倫理面からは、持続可能で、かつ環境にも健全な方法で脆弱性を小さくするという方向性が求められているのです。

(c) 持続可能性

環境的側面のみならず経済的、社会的側面も含め、将来世代に対する責任を持っていくことが確認されています。

(d) 安全性

エネルギー源のライフサイクル全体について、環境的・経済的・社会的・技術的リスクを比較評価し、合理的かつ公正な評価を求めています。これも単純に「安全」という言葉で現せない面があります。

この 4 つの倫理基準は、場合によっては相反する場合もあります。そこで、基盤的価値である「公平性」を基に、相互のバランスを取りつつ倫理基準をエネルギーミックスに適用していくということ整理を行ったわけです。

日本のエネルギー問題への視点

ドイツや EU の取り組みを参考にしながら、日本のエネルギー問題をどういう視点で考えるか整理してみます。

[基本的視点]

「エネルギー基本計画」においては、基本的視点として、「S + 3 E」（エネルギーの安定供給、経済効率性、環境への適合、安全性）が示されています。このような視点の下、「多層的」な供給構造、「柔軟かつ効率的」なエネルギー供給構造の実現が目指されています。

[新たな視点]

エネルギーの課題について、EU のアプローチも参考にしながら、より高次の形で考えていく必要があるのではないかな。もう一回、普遍的な価値（理念、倫理）を基礎として問題を整理する必要があるのではないかな、と考えます。また、それが、国民、特に原子力を巡るいろいろな考え方の違いを超えて議論するコミュニケーションツールにもなっていくものと期待します。

特に、「エネルギー基本計画」に明示されていない視点は、「エネルギー問題は地球的な課題である」という視点だと思います。「エネルギー基本計画」は、その性格上、日本国内を中心に、エネルギーが安定的に確保され、それが阻害要因を生まないように、どう実利的に実現するかという視点での整理が中心だったと思います。そこに、「全人類の持続的発展を支えるエネルギー」という視点を入れて初めて、国民がサポートできるものになってくのではないかと考えています。また、そういう視点から、原子力の役割も浮かび上がってくると思います。

原子力の安全問題への対応

ドイツが提起した「安全」問題への対応

ドイツは原子力の「安全」について非常に重大な問題を突きつけました。要するに、「原子力利用に伴うリスクを社会が受け入れることができるのか」ということです。ひとたび事故が発生すると社会が崩壊する、あるいは、福島で実際に起こったような長期にわたって避難せざるを得ないリスクを持った技術をどう考えるのかという問題があります。

また、福島事故を踏まえた安全強化策を技術的にどのように評価するか、①事故原因の究明、②規制組織の改組、事業者の安全文化の構築、③新たな安全規制・基準の適用、④国際的連携による継続的安全向上の努力という視点があるわけです。特に、可能性は小さいが極めて甚大な影響を与えるリスクについて考える中で出てきて来たのが、「残余のリスクへの対応」です。つまり、想定されていないリスクに対応できるのかを考えていくことであり、それが深層防護の進化へと繋がっています。

[事故原因の究明]

事故の原因等については、日本原子力学会の事故調査報告書においても示されていますが、2015年9月、国際原子力機関（IAEA）から詳細で膨大な包括報告書が出ました。そこでは実際に事故が起こった1～3号機と、何とかそれを防げた5号機、6号機、福島第二原発とはどう違うかという分析も踏まえ、地震と津波の影響を明らかにしています。

日本原子力学会の分析と同じですが、要するに、炉心溶融を引き起こした電源喪失、海水系ポンプの機能喪失等は、地震動ではなく津波によるということが明らかになっています。

[規制組織の改組]

福島第一原発事故の教訓を踏まえ、「新規制基準」が整理され適用されてきています。また、規制委員会（NRA）についても、世界基準に沿った組織作りがなされました。

[残余のリスクへの対応：深層防護の進化]

原子炉の安全の確保にとって、「想定されていないリスク」への対応という点が、最も本質的な問いかけです。それに答えるための安全の考え方を整理してみます。

図1のように、事故前から安全の考え方は

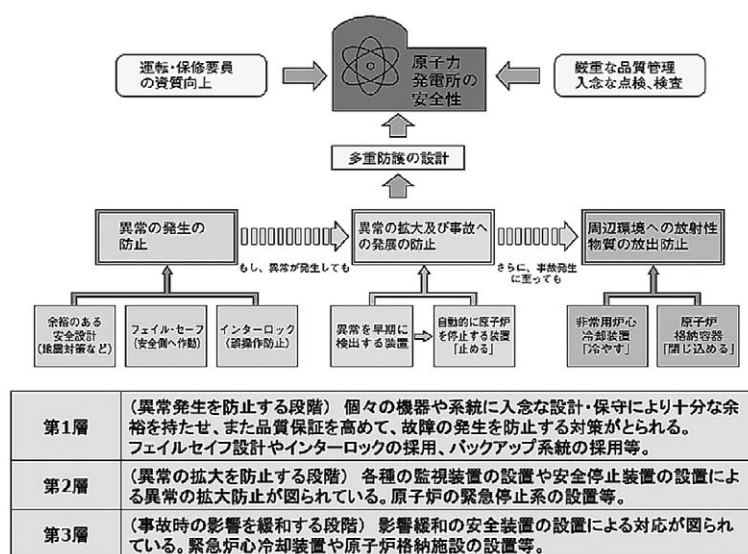


図1 福島事故前の原子力安全確保の考え方（深層防護）

「深層防護」に基づいていました。異常の発生の防止（第1層）、異常の拡大あるいは事故への発展の防止（第2層）、さらに周辺環境への放射性物質の放出防止（第3層）という各層の対策を、防衛ラインのように設け、しかもそれぞれが全く異なるアプローチで防衛していくという考えです。

表1が事故後の安全確保の考え方です。IAEAの例と欧州原子力規制協会（WENRA：西欧17か国の原子力安全規制機関の長によって構成される組織）の例です。

炉心溶融というシビアアクシデントは起こり得るとの考えに立ち、シビアアクシデントを前提とした対策（第4層）を講じる。さらには、シビアアクシデントが発展し、外部に放射能放出が起きたときの対応についても、第5層として整備する。こういう体制で、「残余のリスク」（想定外）への対応を整備しようと取り組んでいます。

実は、欧州は、既にチェルノブイリ事故で放射性物質の放出を経験し、相当広範囲で影響を受けています。そこで、福島事故の前には既に深層防護の進化を遂げ、炉心溶融を伴うシビアアクシデントが起きても大規模放出

に進展しないようにすることを原子炉設計のベースにしていました。

[原子力の役割]

進化した深層防護で、安全を確保できるという見通しを立てて初めて、ドイツが突きつけた問題に答える形で、改めて原子力の役割を考えることができます。

前述の安全確保の体制の下で原子力の活用を図ることが可能となります。そのとき、まず、国際的な公平性の観点からは、安全確保に要請される基盤を持った国において、原子力を重要なベースロード電源と位置づけ活用していくこととなると考えます。原子力の利用が、グローバルな化石燃料資源の消費削減にもつながり、それによって途上国の化石燃料へのアクセス性を確保するというのは重要な視点です。現に中東でも産油国が石油資源を温存するために、原子力を利用する動きも出てきています。その中で原子力事故の甚大な被害を身を持って経験した日本こそ、福島事故の教訓を生かして、原子力を安全に使っていく道をとる必要があるのではないかと考えます。

将来世代との公平性の観点からは、既設炉

表1 新たな安全確保の考え方（深層防護）：残余リスク（想定外）への対応

[IAEAの安全基準]

	運転状態	多重防護レベル	目的	必須手段
事故発生防止	通常運転	第1層	異常運転及び故障の防止	保守的設計及び建設・運転における高い品質
	予期される運転時の事象	第2層	異常運転の制御及び故障の検出	制御、制限及び防護系、並びにその他のサーベランス特性
	設計基準事故及び複合した運転時の事象	第3層	設計基準内への事故の制御	工学的安全施設及び事故時手順
事故影響緩和	シビアアクシデント	第4層	事故の進展防止及びシビアアクシデントの影響緩和	補完的手段及び格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント
	シビアアクシデント後の状況	第5層	放射性物質の放出による放射線影響の緩和	サイト外の緊急時対応

[WENRAの安全目標]

0.3 炉心溶融を伴う事故

- 1) 早期放出又は大規模放出に至る炉心溶融事故が実質的に排除されていること。
- 2) 実質的に排除されない炉心溶融事故に対して、エリアと時間の点で公衆に対する限定的な防護措置しか必要とせず（永久移住が不要、プラント近傍の外での緊急時退避が不要、屋内退避が限定的、長期的食物摂取制限がない等）、かつ、防護措置の実施に十分な時間を利用できること。

のリプレースの要請が出てきます。まだ、明確な政策にはなっていませんが、リプレースについても明確にし、将来世代の選択肢を確保していくことが必要だと考えます。特にリプレースに長期の準備期間を要することを考慮すると、できる限り早く政策判断を下す必要があります。

なお、原子力利用に伴う大きな課題は、放射性廃棄物の最終処分、特に高レベル放射性廃棄物を地下深くの地層に埋設する施設の立地問題です。この地層処分についても、技術的な視点のみならず、倫理的視点での解決というアプローチが試みられるようになってきています。例えば、「段階的アプローチ」は、将来世代が必要であれば、地下に埋めた廃棄物をもう一回取り出して、その時点の技術での使用を検討することも許すというアプローチです。これによって、将来世代の選択の自由度を最大化し、意思決定プロセスの公平性と公開性を確保しようとするものです。

また、地球の生態系の持続可能性の視点から、原子力利用を求める動きもあります。65名以上の生物・生態学者が、地球温暖化で生物多様性が大きく損なわれることを懸念し、原子力が地球温暖化に対する有効な技術であるにもかかわらず、それを選択肢から排除するのは許されないのではないかというオープンレターを連名で出しており、原子力に直接関わっていない専門家の意見として注目されます。

原子力技術の可能性と研究開発への取組

原子力利用を安全かつ効率的に進めるためには、様々な分野の技術を継続的に高度化していく努力が求められます。このような技術とそれを支える人材について、日本原子力学会が経済産業省の委託を受けて検討し「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」としてとりまとめました。今後取り組むべき安全技術、

特に、軽水炉の安全技術に関して優先度を付けて整理しています。

また、軽水炉の進化形である次世代軽水炉の開発が福島第一原発事故の前から進められており、シビアアクシデント対策も設計に折り込まれていたのですが、日本の場合、リプレースが不透明であるため中断を余儀なくされています。

軽水炉以外も含めた「第4世代原子炉」については、国際プロジェクトとして、新しい炉の概念が議論され、開発が行われているところ です。

さらに、アメリカにおいては、「中小型モジュール炉」という、小型で安全性が高く、それから核セキュリティリスクも抑えられる炉の概念が作られるなど、いろいろな原子炉のアイデアが出されています。

こういった様々な原子力技術に対する取り組みも、今、世界で進みつつあるということ、また、それにエネルギー総合工学研究所が幅広く取り組んでいるということも一言ご紹介し、私の発表を終わらせていただきます。どうもありがとうございました。

(拍手)

火力発電の低炭素化技術展望

小野崎正樹 (理事
プロジェクト試験研究部長)



はじめに

「長期エネルギー需給見通し」で示されたエネルギーミックスでは、2030年における火力発電の比率は56%です。50%以上を火力に頼らざるを得ないとも言えます。

さらに、この56%という数値は、原子力が順調に再稼働することが前提になっていますから、そうでない場合、あるいは2030年を越えて、2040年、2050年には、原子力発電が寿命を迎えていきますから、そういうときに一体どうなるのか。それを考えますと、火力で

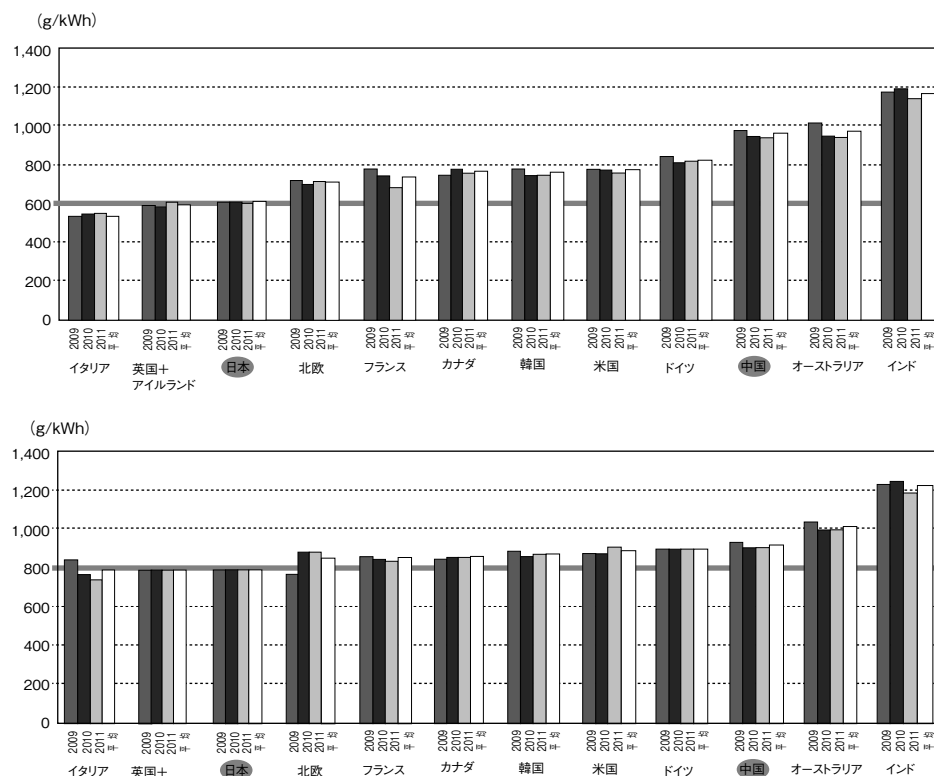
二酸化炭素（CO₂）対策も含みながら対応をとっていく必要が必ずあると思っています。

火力発電の課題としてCO₂削減と燃料の安定供給がありますが、今日は、CO₂削減に軸足を置いてお話ししたいと思います。

世界の火力発電

火力発電とCO₂排出量

火力発電からの発電量当たりのCO₂排出量を図1に示します。日本は600 g/kWh くら



(出所：ECOFYS, International Comparison of Fossil Power Efficiency and CO₂ Intensity-update 2014)

図1 各国の火力発電からのCO₂排出量（上：全体，下：石炭火力のみ）

いです。アメリカが800くらい、中国、オーストラリアは結構高い1000くらいで、インドは1000を超えています。石炭火力に限ってみると、日本は800を少し越すくらいです。

一方、燃料別CO₂発生量の比較では、図2のように、全ての技術を含めた火力発電の世界平均が958のところ、石炭火力の日本平均は864です。最新の微粉炭火力（USC）だと800くらい、石炭ガス化複合発電（IGCC）は700、さらに先をいく燃料電池と組み合わせた石炭ガス化複合発電（IGFC）だと600くらいまで下がります。しかし、500を切るのはほとんど不可能というのが石炭火力の実情です。それを可能にするには二酸化炭素回収貯留技術（CCS）が必須となります。

安定供給の面からは燃料の値段が気になるところです。図3は熱量当たりの燃料価格（日本着価格）の推移です。原油が高くなっていた頃は100ドル／バレル以上でした。液化天然ガス（LNG）価格は、基本的に原油と連動して動いていて、2014年から随分と下がってきています。現在、LNGのスポット価格は8ドル／MMBtuくらいで、1000 kcal熱量当りに換算すると4円くらいになります。

一方、アメリカでの天然ガス価格は、日本着 LNG スポット価格の半分かくらいの所で推移しています。アメリカでは、天然ガスと石炭で価格差がなくなりましたから、石炭火力から天然ガス火力へ移っていくのは当然の成り行きだと思います。

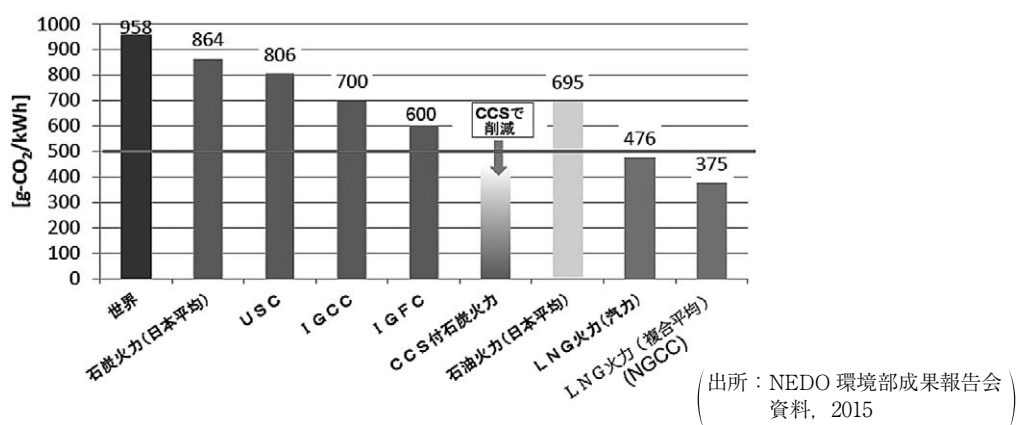
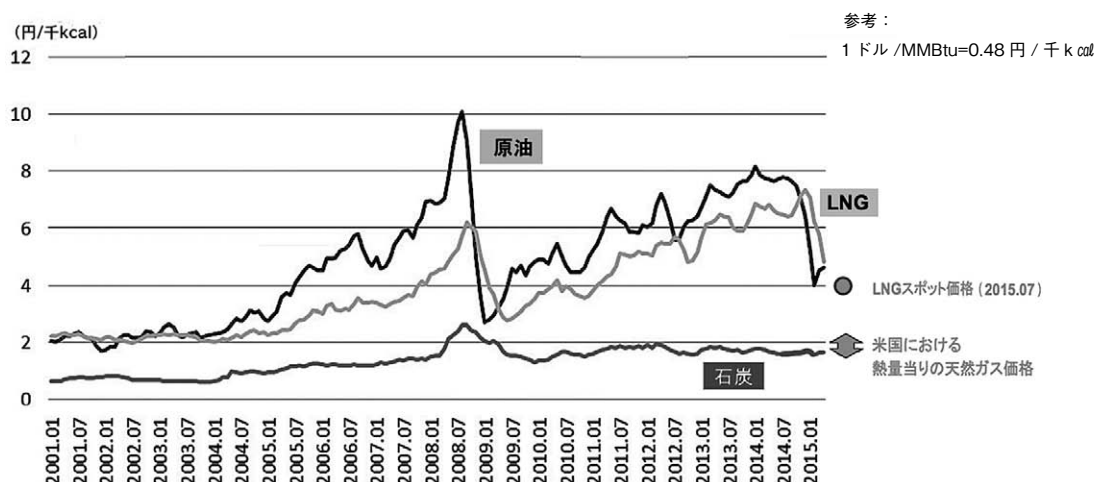


図2 燃料および発電方式別のCO₂排出量



（出所：『エネルギー白書 2015』，財務省「日本貿易月表」のデータを基に作成）

図3 燃料ごとの熱量当たりの日本着価格の推移

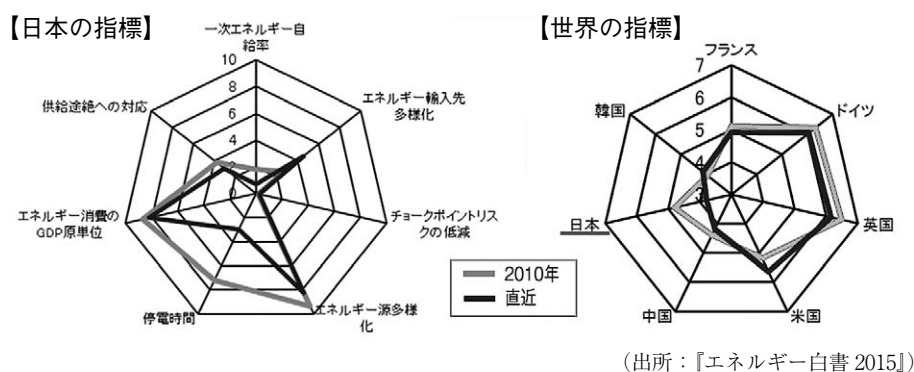


図4 日本と世界のエネルギー安全指標

エネルギーの安全保障

値段だけでなく、それ以外の燃料の安定供給という観点から、様々な要因を考えなければいけません。図4にエネルギー安全保障の指標を示しました。これは、純国産か、輸入先がどうなのか、輸送のチョークポイント（リスク）があるかとか、さまざまな観点からまとめています。

わが国では、2010年に比べると、震災後、原子力発電の停止により電力ではエネルギー源多様化は下がったものの、LNG輸入が増加し、輸入先多様化としては増加しています。他方、主要国で比較すると、日本は2010年の4.8から直近では4.0に下がっています。安全保障の指標が大幅に低下していると言っていると思います。

一方、米国は、シェールガスが出てエネルギーの多様化が図れ、自給率もだいぶ高まり、5.2から5.6に上がっています。フランス、ドイツ、イギリスは5以上です。ドイツの場合、石炭もありますから、結構数値が高くなっています。ですから、「原子力をやめる」という決断もできたのかなと思います。

米国の火力発電

アメリカのシェールガスの話の流れでいきますと、2013年6月、オバマ大統領が“Climate Action Plan”を出し、温暖化対策に積極的に取り組むということを表明しました。CO₂を

Pollution（公害）と位置づけ、環境保護庁（EPA）から規制案が色々出てきました。例えば、2013年9月には、火力発電からのCO₂排出量を1,100ポンド・CO₂/MWh（499g/kWh）に規制すると発表。その後、2015年8月には、新設石炭火力は1,400ポンド/MWh（635g/kWh）と最終発表しました。石炭火力の場合、IGCCだと700g/kWhくらいですが、IGFCだと635より低くなりますから、IGFCなら達成可能かなという微妙な数字です。

この厳しい規制が1つのスタンダードとして世界に出ていくと思われますが、それに対して、日本は、高効率の技術で結構それに近いところまで到達できるという感触を得ています。

石炭火力発電の高効率化

わが国における技術開発

[2050年までのエネルギーミックス]

エネルギーミックスは2030年まででしたが、その先の2040年、2050年というときに、そもそも発電電力量はどういうふうになるのか。午前中の山地先生のお話だと、2030年でもあまり下がらず、図5の10,000億kWhの線を越えているのではないかとのことでした。

それは省エネ等との兼ね合いもあり、本当のところどうなるか分かりませんが、基本的

には日本の総人口が減りますから、全体としては下がっていくと思います。

図5は、われわれで色々なシミュレーションを行い、どんな形でエネルギーミックスが進んでいくのかを考えたものです。この場合にも、原子力は2025年、2030年でもそれなりの割合がありますが、新設やリプレースを行わないと、その先だんだん減らざるを得ないという傾向を示しています。その分、例えば高効率の大型石炭火力を、年1基くらいずつ建設していく必要

があるという結果が出ています。

[次世代ロードマップ]

石炭火力に話を絞ってみたいと思います。実は、2015年6月と7月に、資源エネルギー庁石炭課主催で「次世代火力発電の早期実現に向けた協議会」が4回開かれました。エネ総工研とJCOAL（石炭エネルギーセンター）が事務局を担当し、私も委員で参加させていただきました。この会議で、2030年に向けて開発すべき技術が整理されました。

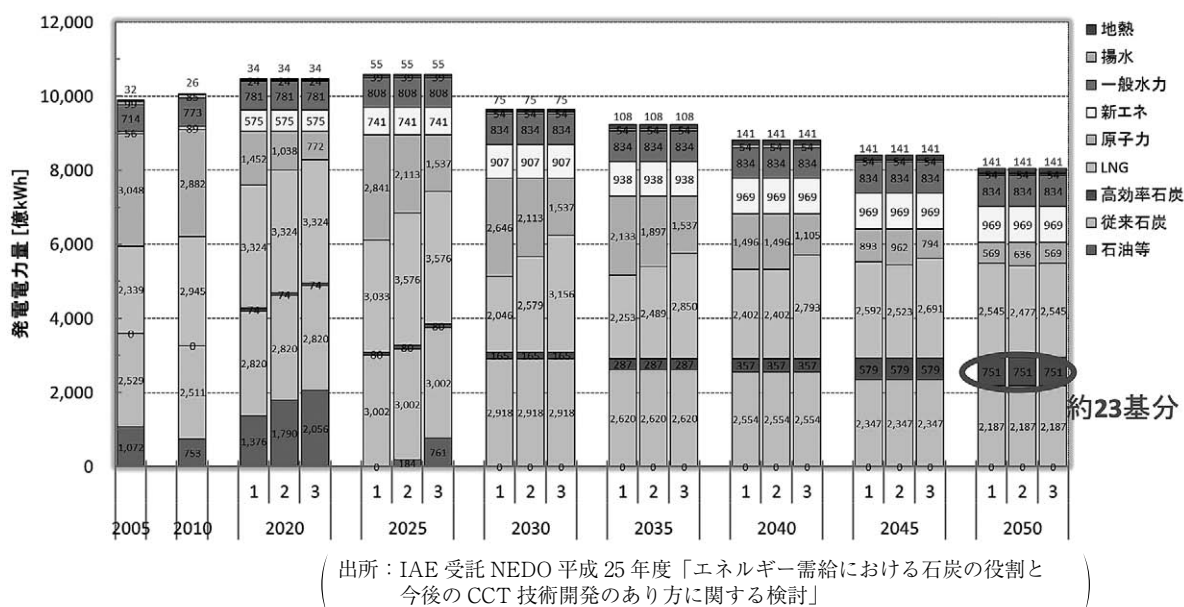


図5 わが国の発電電力量（ケース1，2，3）の推移とエネルギーミックス

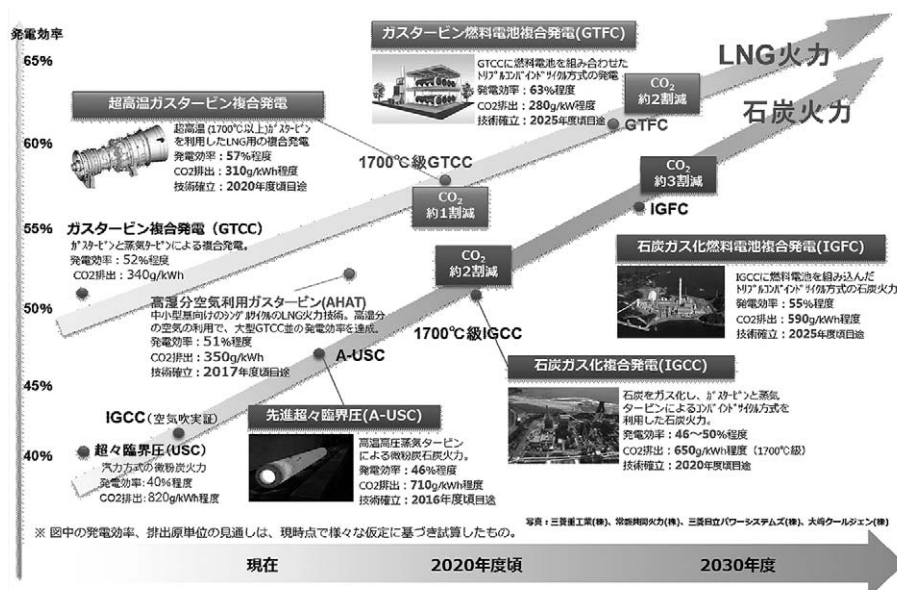


図6 次世代火力発電技術の高効率化，低炭素化の見通し

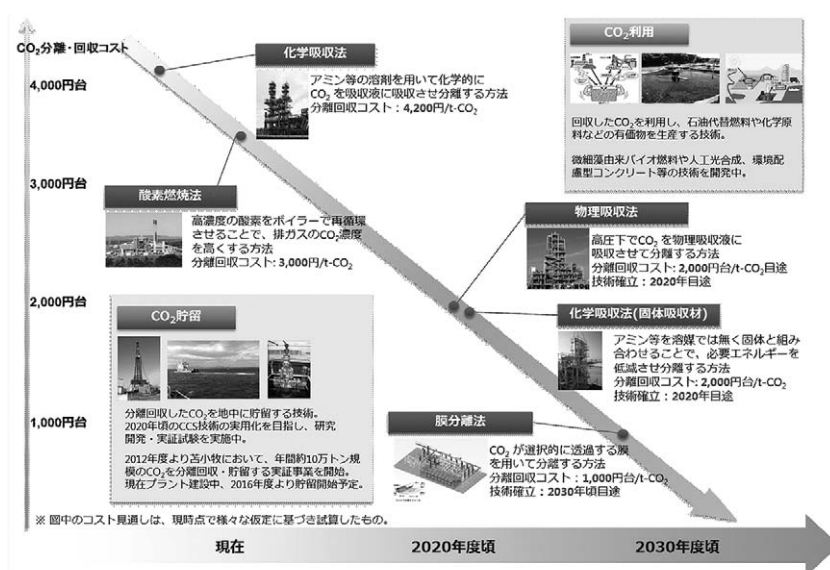
結果は、図6のようになりますが、ここで言いたいことは、ガスタービンの温度を上げることで効率を上げていく流れと、燃料電池と組み合わせてかなり高い発電効率を得ていく流れとがあります。

ただ、時間軸は、あくまで技術が確立する年度です。それから実際にプラントができるまで、10年以上の年数がかかります。2050年に向けて大幅にCO₂を削減するには、今後10年、20年で技術を確立させないといけないとご理解ください。

一方、CO₂回収について整理した結果を図

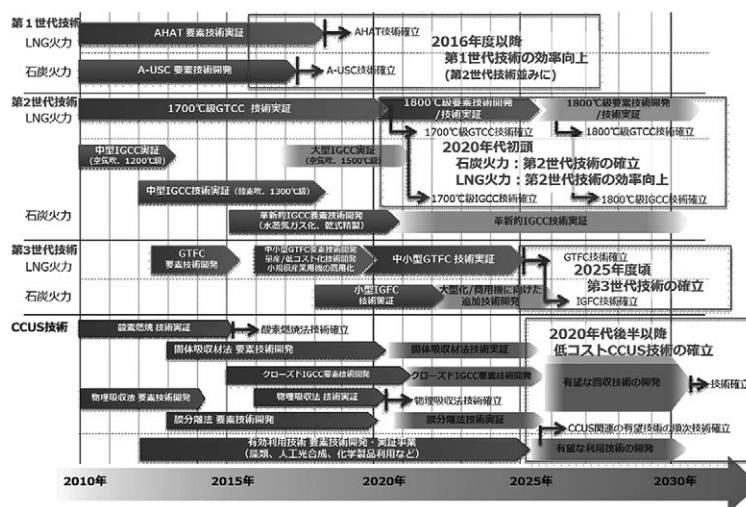
7に示します。既存の化学吸収法を進化させた固体吸収材を使うものとか、膜分離法へという流れで、回収コストをかなり下げていかないと、現実には2030年度以降に、CO₂回収を行うというのは無理なのではないかという感触は得ています。

図8のロードマップでは、一番上に通常の燃焼（第1世代）を、次に「第2世代」として、IGCC、ガスタービンコンバインドサイクル発電（GTCC）を挙げ、さらに「第3世代」として、燃料電池を組み合わせたIGFCを挙げ2025年以降の技術確立としています。



(出所：経済産業省「次世代火力発電に係わる技術ロードマップ 中間取りまとめ」, 2015)

図7 CO₂回収関連技術の開発の見通し



(出所：経済産業省「次世代火力発電に係わる技術ロードマップ 中間取りまとめ」, 2015)

図8 次世代火力発電技術のロードマップ

高効率発電の世界への普及

海外火力発電の高効率化

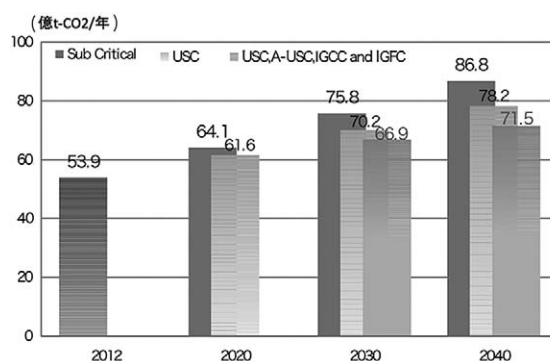
高効率の技術を開発し、それを世界中に普及させていくと、2012年から2040年までに、どれだけのCO₂削減につながるのか、図9に示します。

例えば、アジアの非OECD諸国では、2040年に、USC、A-USC、IGCCなどの技術を全て適用すると、年間90億t-CO₂のところ70くらいまで削減（16億トン減）可能となります。つまり、日本の年間排出量12億トンより相当多い量の削減になると考えます。

高効率の石炭火力を、いかに世界に普及させていくかというのが、次の大きな課題になると思います。

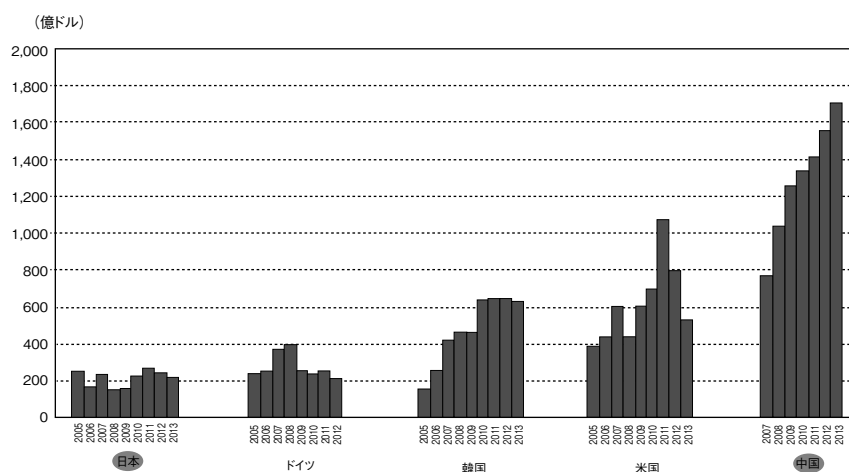
世界主要国のプラント輸出がどのように推移しているかを図10に示します。日本のプラント輸出は、毎年200億ドル（約2兆円）くらいしかありません。一方、中国は、日本の8倍くらいまで伸びています。ドイツ、アメリカ、韓国も日本よりだいぶ多いというのが現状です。

図11（左）に電力プラント輸出を示します。ここでも、中国は日本の4倍です。日本に比べ、韓国、中国というのは、ダントツに多いという認識が必要だと思います。



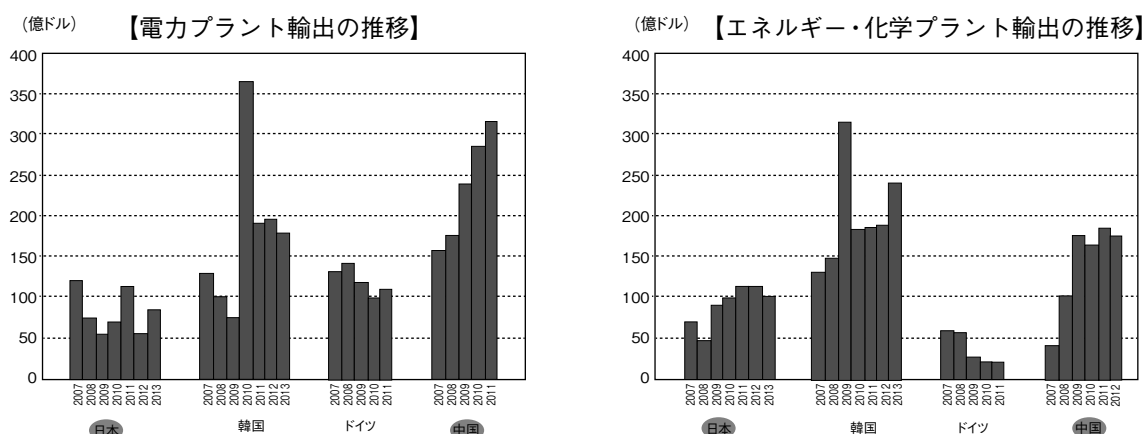
（出所：経済産業省「次世代火力発電に係わる技術ロードマップ 中間取りまとめ」、2015）

図9 高効率技術普及で見込まれるCO₂削減量（アジアの非OECD諸国）



（出所：日本機械輸出組合、News Release 2015.6.25）

図10 世界のプラント輸出



(出所：日本機械輸出組合，News Release 2015.6.25)

図 11 世界のプラント輸出（業種別）

一方、エネルギーおよび化学プラントの輸出では、図 11（右）に示すように、日本と中国の差はそれほど大きくありません。1 対 2 くらいです。電力プラントでも他業種でやっているプラント輸出のやり方が参考になると思います。例えば、LNG のプラントをつくる場合、部品のほとんどは海外調達しているわけです。IGCC のような化学プラントに近いものだと、海外調達をうまく行うことで、かなり値段を下げるができるのではないかと感じています。

純粋に技術の面から言うなら、中国、韓国でできないことが、日本ではできるという技術開発が必要になると思います。例えば、高効率であること、また、CO₂ 回収が必要になるならケミカルルーピングなどの新しい技術開発に取り組むことが重要だと思います。

さらに、日本のプラントを受け入れやすくするように、受け入れ側の事業者のオペレーターの研修に始まり、保守管理技術の移転、あるいは移転だけではなく、日本で保守管理をリモートで行うとか、そういう技術の組み合わせが必要になると思います。

最終的には、ファイナンスの問題になるでしょう。日本の各メーカー、事業者、国が官民一体となって良いアイデアをつくり、システムを構築していくことが重要だと思っています。

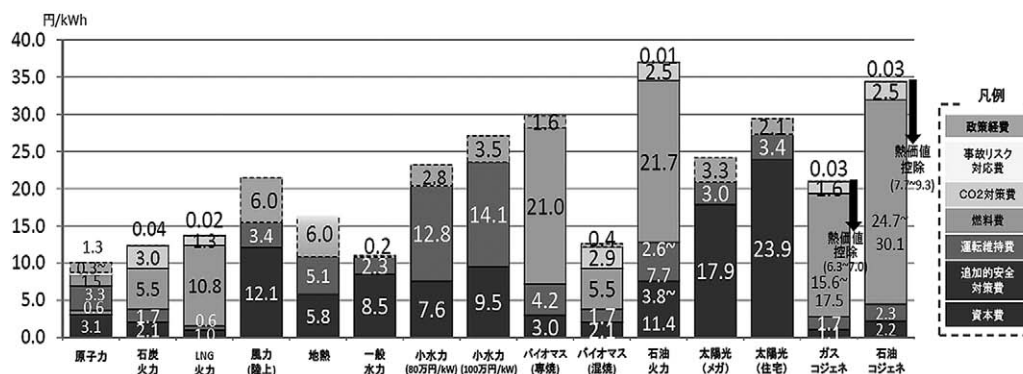
CCS による低炭素化

火力発電の発電コスト

図 12 のように、エネルギー・環境会議、コスト等検証委員会が各種電源の発電コストを評価しています。石炭火力は CO₂ 対策費を除くと圧倒的に安くなります。CO₂ 対策費をどれだけ上積みするかでコストが変わってくるのです。

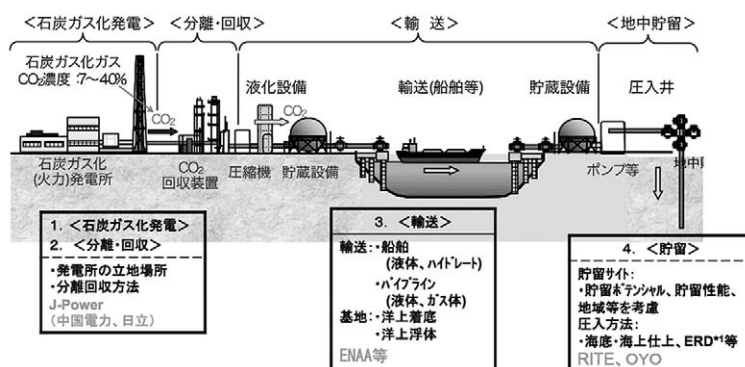
では、CCS のコストはどれくらいかかるのか。図 13 のように、CCS は CO₂ 回収だけではありません。CO₂ を回収・圧縮し、超臨界状態として、パイプラインや船である場所まで持って行き、そこで地中に貯留する。わが国では、海底下というケースが多いと思います。

分離・回収までを t-CO₂ 当たり 2,000 円台まで持って行こうという目標があり、アミン法を始め色々な技術の研究開発が行われています。ただ、その先の輸送、地中貯留のコストは、数年前にわれわれが行った FS だと、t-CO₂ 当たり 3,000 ～ 8,000 円くらいでした。全工程では、5,000 円～1 万円という金額になります。これではまだまだ高いというのが現状です。しかし、日本の場合、回収した CO₂ を圧縮しても、沿岸地域にパイプラインを通す



(出所:「長期エネルギー需給見通し小委員会に対する発電コスト等の検証に関する報告」, 2015年5月)

図 12 各種電源による発電コストの評価



(出所: IAE 共同受託 NEDO 平成 20 ~ 24 年度「革新的ゼロエミッション石炭ガス化発電プロジェクト」
発電から CO2 貯留までのトータルシステムのフィージビリティ・スタディ)

図 13 CCS による低炭素化ゼロエミッション石炭火力のトータルシステム

わけにも行かないので、船に頼らざるを得ない。船で海洋まで持って行って海底下に埋めることになるので、そのコストがかなり高めになってくると思います。

向上」という観点からは様々な技術があります。CO₂ 回収の効率化でも、化学吸収から始まり Dry Sorbent, イオン液体など、様々な技術があり、長期にわたっての研究開発も十分にされています。

低炭素発電の技術開発

低炭素発電の技術開発全般をもう一度見てみると、図 14 に示すように、「発電効率の

「システムの効率化」ということでは、CCS の輸送以降も含めてきちんと検討しなければいけないということで、船を含めた様々な輸送システムが提案されています。

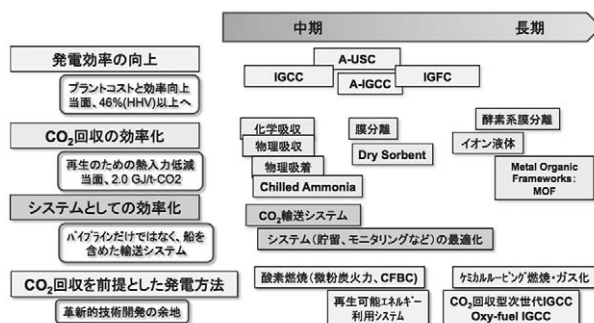


図 14 低炭素発電の技術開発

最後の「CO₂回収を前提とした発電方法」をしっかり押さえていかなければいけないと思っています。例えば、酸素燃焼があります。微粉炭火力を、空気ではなく酸素に変えれば、そのままCO₂が出てきます。また、微粉炭火力とは全く異なるケミカルルーピングとか、クローズドIGCC（Oxy-fuel IGCC）というのもあります。

ケミカルルーピングでは、図15のように反応塔を2つ設けて、空気反応塔には空気を入れて、酸化鉄をつくり、それを燃料系に持ってきて、酸化鉄についている酸素で燃料を燃やす。そうすると、酸化鉄が還元され、また空気反応塔に戻る。酸化還元を繰り返す物質がぐるぐる回って、最終的に出てくるのがCO₂だけというアイデアです。これも新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）か

らの委託で調査研究を行ってきましたが、2015年度からは基盤研究として進めるという目処が立っています。

一方、クローズドIGCCも、（一財）電力中央研究所が中心になって、コンセプトを確立しました。図16のように酸素でガス化を行い、発生したガスをガスタービンで酸素燃焼することで、CO₂を循環使用し、最終的に純粋なCO₂を取り出すというシステムです。昨年までは基盤研究を行ってきて、2015年度からある程度の規模のパイロットプラントレベルで実験を行うというところまで来ています。

低炭素化への課題

[導入への課題]

発電効率の高い新規技術を導入すると、新

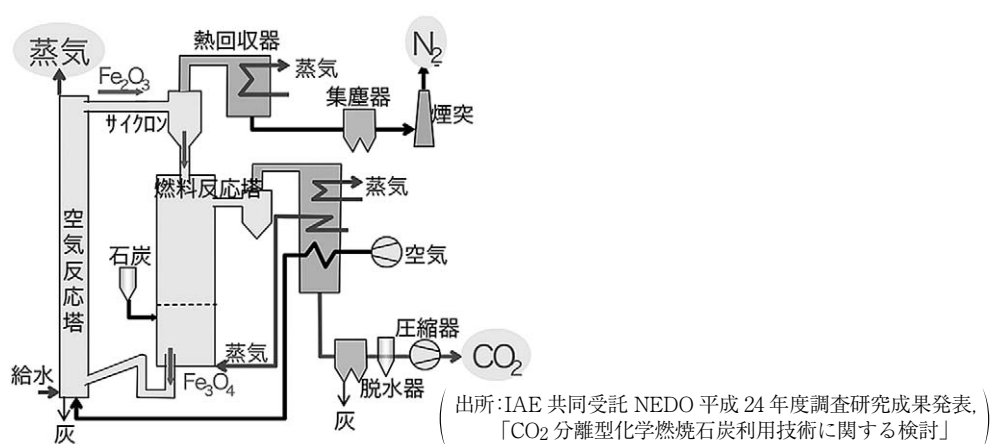


図15 ケミカルルーピングの概念

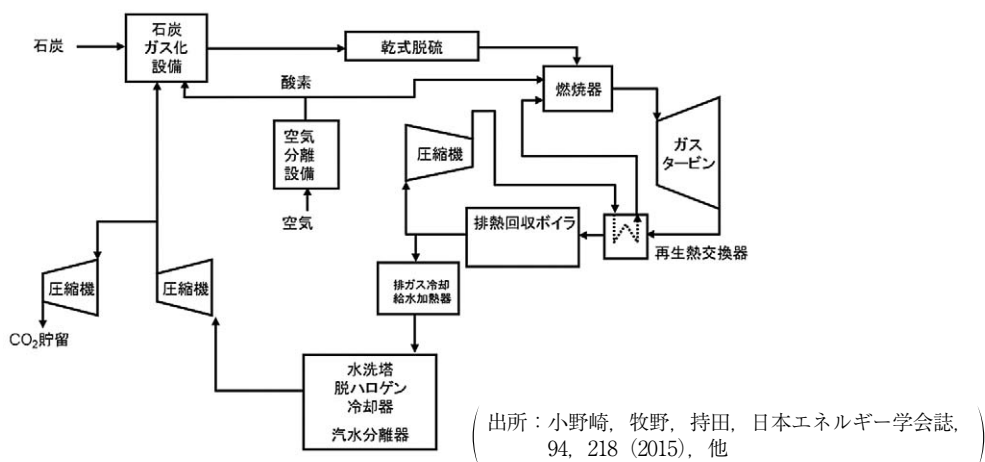


図16 クローズドIGCCの概念

たに高効率発電技術を開発しても、燃料費が下がる以上に建設費が上がってしまうこともあり、その結果、発電単価が上がることになります。それに対して、ある程度、CO₂排出量削減によるクレジットをつけることで、図17のように、送電端効率を高めると、むしろ発電単価は下がり気味になるというインセンティブを設定することも可能ではないかと思っています。こういう導入促進の方法も必要になってくると思います。

[石炭火力とLNG火力の使い分け]

図18に示すように、CCSなしの微粉炭火力（USC wo/CCS）だと、稼働率が高いほど発電単価が下がり、天然ガス複合発電（NGCC）よりも相当安くなります。しかし、CCS付き石炭火力（USC w/CCS CO₂ 90%回収）だと

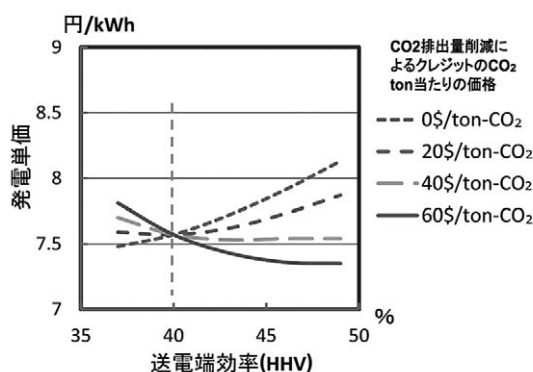
発電単価が上がってきます。ここで、半分くらいのCO₂回収（USC w/CCS LNG相当）であれば良いとなると、ある稼働率で、発電単価がNGCCと交差する点が出てくるのです。

こういうように、稼働率の高いときと低いときとで、USCとNGCCを使い分けていく。石炭火力とLNG火力の特徴をうまくつかみながら、CCS込みで考えていくことが重要だと思っています。

[再生可能エネルギーへの火力の対応]

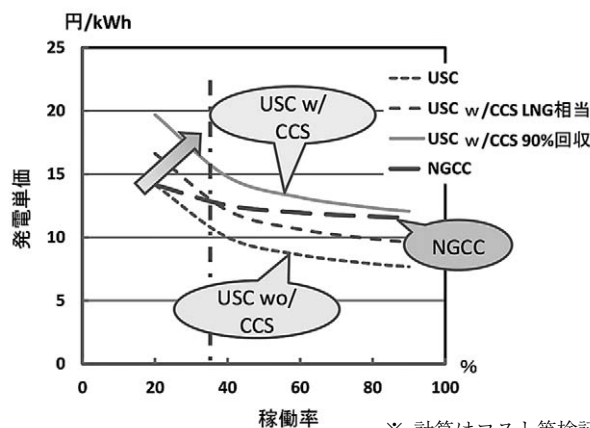
再生可能エネルギーがだんだん導入されてくると、火力のほうで負荷変動への対応をどうするのかとか、様々な課題があると思います。

特に、石炭火力の場合、負荷が落ちると発電効率も落ちてきます。そういうコストをどうするのかという課題があります。



※ 計算はコスト等検証委員会の計算式による。発電単価の計算には、エネ総工研独自の仮定が含まれる。

図17 高効率発電技術導入のためのインセンティブ（クレジット付与）



※ 計算はコスト等検証委員会の計算式による。発電単価の計算には、エネ総工研独自の仮定が含まれる。

図18 CCSで変化する発電単価

[火力によるバックアップとそのコスト]

変動の大きい電源のバックアップとして一定容量の設備が必要となります。その費用負担をどうするか。容量市場が必要となるのではないかと思います。

[CCS 導入のための制度設計]

CCS 導入をどのような制度の中で行っていくべきなのか。これは火力だけで収まる話ではありません。わが国にとっての CCS の位置づけを明確にする必要があると思います。

[再生可能エネルギーの火力への導入]

再生可能エネルギーも取り込んだ火力の生き方というのがあるのではないかと思います。

例えば、集光型太陽熱で、微粉炭火力（USC）の給水予熱をすとか、水蒸気を発生させるという方法。また、天然ガス複合発電に集光型太陽熱を組み合わせた ISCC（Integrated Solar Combined Cycle）。それから、再生可能エネルギー起源や CO₂ フリーで製造された水素やアンモニアによる発電も考えられます。

このように、再生可能エネルギーを火力とうまく組み合わせることで、CO₂ 削減につながる方法があるのではないかと思います。

他方、普及の観点からの課題は、石炭火力と LNG 火力の特徴を活かした形でトータルの効率をどう上げていくか。あるいは、石炭火力の中で高効率の方式を開発した場合、その導入のインセンティブをどう設定するか。あるいは、どうやって海外での普及を図るか。そのときにも日本の高効率技術のメリットを出していくための工夫がないか。こういうような観点が重要だと思っています。

私からの提案は以上です。ご静聴ありがとうございました。

(拍手)

おわりに

最後にまとめです。純粹に技術の観点からは、CO₂ 回収を前提とした発電方法として、革新的な技術があるのではないかとということで、われわれはトライしています。それ以外のアイデアもまだまだ出てきていいと思います。

それから、再生可能エネルギーとの組み合わせでは、今はバイオマスの混焼が主流ですが、それとは全く違う、両方のメリットを出すような組み合わせもあると思っています。

電力系統の将来像

益田 泰輔

プロジェクト試験研究部
主任研究員



はじめに

現在、エネルギー源としての再生可能エネルギー（再エネ）に注目が集まっています。その大量導入が期待されていますが、再エネの受け入れ側としての電力系統の高度化が重要になってきます。具体的には、制御・通信の高度化、新たな機器の利用ということです。

その際、これまで通りの安定供給（Safety, Energy security）、できるだけ安価な価格（Economic efficiency）、高い環境性（Environment）という「S + 3 E」を同時に実現していくのは困難な状況になっています。解決手段として、新しい電力系統のあるべき姿としての「スマートグリッド」という概念が注目され、現実の課題として、その実現に取り組んでいるところです。

図1に、大量の再エネを電力系統に連系す

る際の懸念がまとめられています。電力の需給バランスの問題（余剰電力の発生、出力の急峻な変動）、電圧上昇、過負荷問題（送電容量の不足）が挙げられています。

そこで、私の発表では、それぞれの課題への対策と電力系統の高度化に関する研究を紹介したいと思います。

再エネ導入拡大と電力系統の現状

太陽光発電の導入実績

図2は、太陽光発電（PV：Photo Voltaic generation）の政府導入目標と導入実績です。2012年7月から始まった「再生可能エネルギー固定価格買取制度」により導入量が急増しました。2014年に至り、複数の電力会社が接続申し込みの回答保留を発表しています。

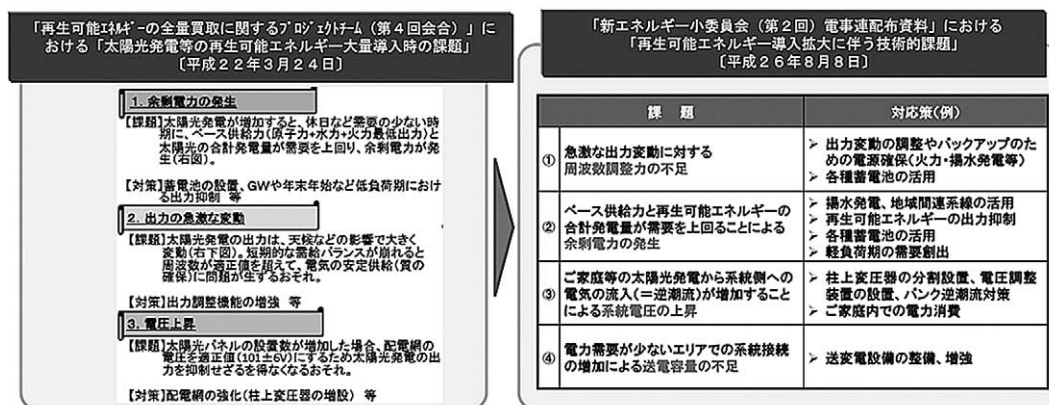
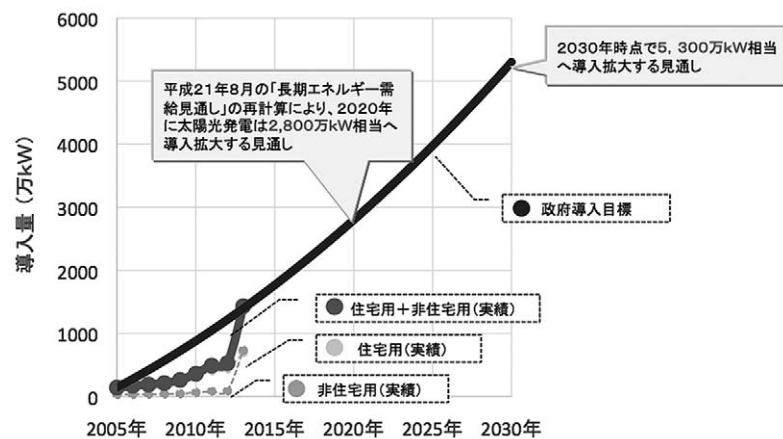


図1 再生可能エネルギーが電力系統に与える悪影響



(出所：経済産業省 HP を基に作成)

図2 太陽光発電の政府導入目標と導入実績

今、PV による発電電力が昼間の消費電力を上回り、需要と供給のバランスが崩れる問題が最も懸念されています。

電力系統における日本と欧米の違い

[自動配電システム]

一般にわが国の電力系統は、「停電の発生」の点で信頼度が高いと言われていますが、これは主として、配電システムの自動化によるものです。わが国では、配電自動化システムが全国的に普及しており、また、遠隔可能な開閉器も広がっています。配電線に事故が起こったときに、事故区間を切り離し、健全区間を生かすことが、自動かつ高速に行えて信頼性が保たれているのです。一方、欧米では、わが国と比べると、自動化が進んでいません。

[電圧]

表1は、日本とヨーロッパの低圧の基準電圧とその管理目標値の比較です。ヨーロッパでは、400V、230Vと基準電圧が高いので、わが国よりも電圧の管理は容易です。

表1 日本と欧米の電圧

国名	基準電圧	管理目標値
日本	200V 100V	202V ±20V 101V ±6V
オーストリア	400V 230V	400V ±40V 230 ±23V
ドイツ	400V 230V	360V ~ 424V 207V ~ 251V

[周波数]

表2に、日本、北米、欧州で、基準周波数とその許容値を示しました。ヨーロッパよりも日本のほうが許容値が大きくなっているのが分かります。日本は島国なので、どうしても系統容量が小さくなり周波数維持が困難なので、許容値を大きくせざるを得ない状況にあります。

表2 日本と欧米の周波数

国名	基準周波数	許容値
日本	50Hz (北海道) 50Hz (東地域) 60Hz (中西地域)	50 ± 0.3Hz 50 ± 0.2Hz 60 ± 0.2Hz
北米 (NERC)	60Hz	年間標準偏差 0.0018Hz (東部・1分平均) 0.0057Hz (東部・10分平均)
欧州 (UCTE)	50Hz	滞在率 50Hz ± 0.04Hz 以内：90%以上 50Hz ± 0.06Hz 以内：99%以上

周波数・需給バランス維持について

需給バランス維持の現状

再エネが導入する際に懸念される、電力の需給バランスの問題（余剰電力の発生、出力の急峻な変動）とは、長周期成分や短周期成分の変動をどのように抑制していくかに関わってきます。

まず、需給バランスが、現在どのようにして保たれているのかお話しします。図3の左

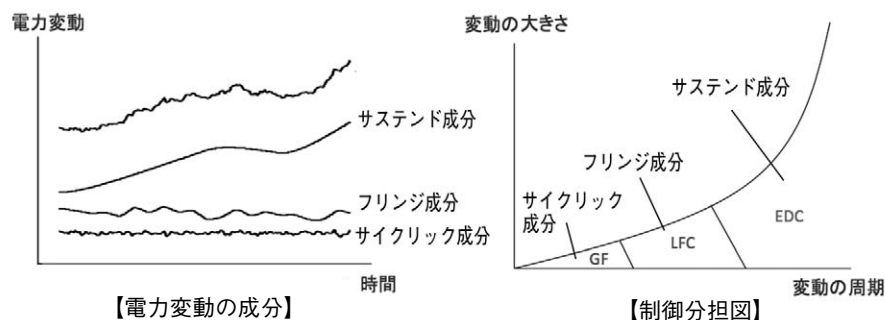


図3 電力変動の成分と制御分担図

側は、電力変動の成分です。電力系統の需要と供給の変動は、様々な時間周期の変動の合成として表されます。

周期の短い順に、「サステンド成分」、「フリンジ成分」、「サイクリック成分」があります。それぞれに対し、火力発電を中心とする従来電源によって変動抑制が行われています。数秒から数十秒と最も周期が短い「サイクリック成分」については、各発電機の調速機の働きによって、発電機出力を自動的に増減する運転（ガバナフリー運転）によって、調整が行われます。

数十秒から数十分の「フリンジ成分」については、中央給電指令所が需給のアンバランスの大きさから制御量を計算し、各発電機に制御信号を送信するという集中制御（LFC：Load Frequency Control）によって調整が行われます。

最後に、数十分以上と最も周期の長い「サステンド成分」については、中央給電指令所が各発電機の経済性までを考慮して負荷配分量を計算し、制御信号を送信するという集中制御（EDC：Economic-load Dispatching Control）によって、需給バランスが維持されています。

電力余剰の問題

長周期の需給バランスを維持している主力は、電力系統では火力機です。ただし、大型の火力機の場合、停止から起動、並列まで数時間を要します。また、出力は20～30%程度までしか落とすことができません。

さらに、供給予備力と調整力を基本的に火力機によってまかなう必要があることから、現在は、起動や停止のパターンを計画し、運転台数を事前に決めておく「起動停止計画」が実施されています。

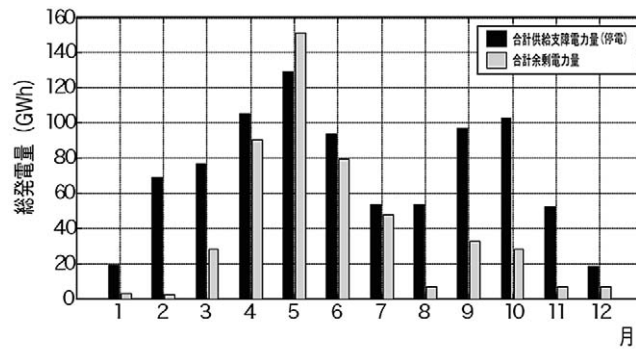
再エネの出力が急増した場合、「起動停止計画」に従って運転されている火力機を急に起動・停止することはできません。例えば、再エネの出力が急増した場合、起動中の火力機の出力を落しても、電気が余ってしまう（電力余剰、下げ代不足）可能性があります。一方、再エネの出力が急減した場合、急に火力機を増やして起動することはできません。つまり、火力機を最大出力で運転しても、電気が足りなくなってしまう（停電、供給支障、上げ代不足）という問題が起こると懸念されます。

需給バランス維持のための研究

[長周期需給バランスの維持]

対策として、系統の運用方法の変更、系統の設備増強または新規設備による対策、需要家の機器制御（デマントレスポンス）が挙げられます。

例えば、運用方法の変更については、PV予測を用いた日間需給運用シミュレーションに関する研究があります。このシミュレーションでは、前日のPV予測を用いて、発電機の起動停止（UC：Unit Commitment）の計画を立て、当日の誤差に応じて火力機の出力を調整します。ただし、出力を調整しきれない場合は、供



(出所: 益田, 大関, フォンセカ, 村田, 「電気学会論文誌B」, Vol.134-B, 2014 年 4 月)

図 4 毎月の合計供給支障電力量と余剰電力量

給不足（停電）や供給の過剰が発生します。

モデル系統は関東エリアで、原子力と水力の一定出力での運転を想定し、PV 予測を用いて火力機 94 機の起動停止計画を立てます。負荷と日射のデータは、2010 年の 1 時間ごとの実データで、予測データは計算によるデータを用います。

図 4 はシミュレーション結果の一例です。月ごとに、予測誤差が原因となる合計供給支障電力量（停電）・余剰電力量を示しています。予測が完全に合っていれば停電や余剰は発生しませんので、予測誤差のために停電や余剰しています。やはり、予測精度の改善が今後の重要な課題です。

[短周期需給バランスの維持]

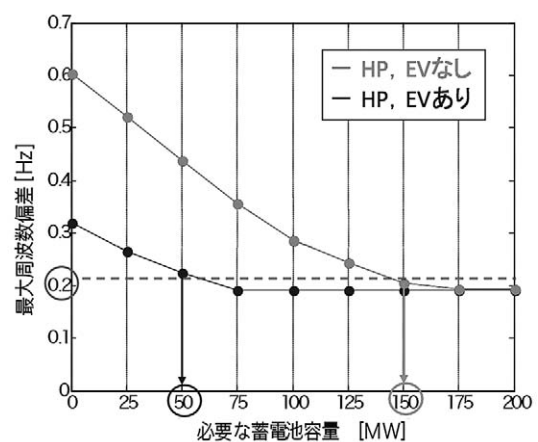
現在の電力系統では、需要の短周期変動に対しても、従来電源の出力調整で対応しています。そこに再エネが増加すると、需要起因の短周期変動に加え、供給起因の再エネ短周期変動に対しても対応が必要になってきます。また、再エネが増加すると従来電源の発電全体に占める割合が低下するので調整容量も減少し、周波数維持が難しくなるのです。

対策として、系統の設備増強による対策、需要家の機器制御が挙げられます。特に、「速いデマンドレスポンス」(Fast-DR: Fast Demand Response) が、現在注目されています。その例として、ヒートポンプ給湯機、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) を周波数制

御に利用した周波数変動抑制に関する研究を紹介したいと思います。

この研究では、原子力と火力からなる 8 機系統モデルに、風力と太陽光が大量導入され、火力機だけではなく、蓄電池や需要家のヒートポンプ (HP: Heat Pump) 給湯機 (42 万台: 全需要家の 10% 相当), EV (3 万台: 全乗用車の 0.5%) も消費電力や充電電力を変化させることで、周波数制御に利用できる状況を仮定しています。また、負荷と太陽光、風力の変動データは、短周期まで含めた 24 時間の変動を使用しています。

図 5 には、火力機と蓄電池だけ (HP, EV なし) で周波数制御をした場合と、HP と EV も利用した場合が示されています。どちらも蓄電池容量の増加に従って、周波数変動が抑制されてい



(出所: 益田, 清水, 横山, 「電気学会論文誌B」, Vol.132-B, 2012 年 1 月)

図 5 HP, EV も加えた周波数制御の例

くのですが、一般的な制御の目標値（0.2Hz 以下）を達成するには、「HP, EV なし」の場合、150MW 相当の電池容量が必要ですが、「HP, EV あり」の場合、50MW で済むと言えます。

つまり、蓄電池 150MW の制御性能と、蓄電池 50MW + 今回想定した HP・EV の制御能力とが同等ということです。この場合、追加的に必要な 100MW 分の蓄電池を削減でき、系統の対策コストを抑制できることになります。

電圧問題について

PV 拡大で発生する電圧上昇

需要家用と事業用の PV の拡大に伴って「逆潮流」（系統側への電気の流入）が増加した場合、図 6 のように、配電系統の電圧が上昇することがあります。一般的に PV システムでは、系統の電圧が適正範囲を超えると、発電を停止することになっています。発電を停止しない場合、電圧上昇を抑制するため、電圧調整器の設置やネットワークの増設等の対策が行われることになります。

電圧調整の方法

[需要家の機器制御]

「逆潮流」対策として、配電機器を用いた対策以外に需要家の機器制御があります。系統

連系している再エネが PV の場合、PV の出力制御となります。そもそも PV が出力しなければ電圧上昇はないので、必要に応じて下げてしまうということです。

また、PV のインバータの無効電力を制御して電圧を維持する対策もあります。

最後のアイデアは、需要家機器の有効電力制御（DR）です。PV 以外の家庭の機器を使って制御するわけです。

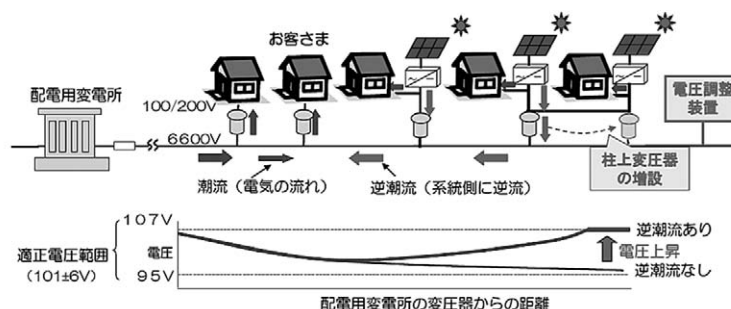
[既存機器を用いた制御]

既存機器を用いて電圧調整をすることもできます。利用可能な配電機器には、図 7 のように、他励式の SVC（Static Var Compensator）、自励式の SVC、SVR（Step Voltage Regulator）、TVR（Thyristor Voltage Regulator）があります。いずれも配電線に設置して用いる電力機器です。このうち、SVC と TVR は、パワーエレクトロニクス技術を応用した機器です。TVR は、SVR が機械式でタップを切り替えて電圧調整しているところ、この切り替え部分をパワーエレクトロニクス回路にしたものです。

[パワーエレクトロニクス機器による制御]

配電系統における電圧上層対策の 1 つとして、パワーエレクトロニクス機器が配電用に一部実用化されていますが、コンパクト化、軽量化、低コスト化等の課題があります。

当研究所が参加している NEDO の「分散型エネルギー次世代電力網構築実証事業」は、再エネ大量導入のための共通基盤技術の開発



（出所：新エネルギー小委員会（第2回会合）電気事業連合会配布資料、2014年8月）

図6 電圧上昇のイメージ

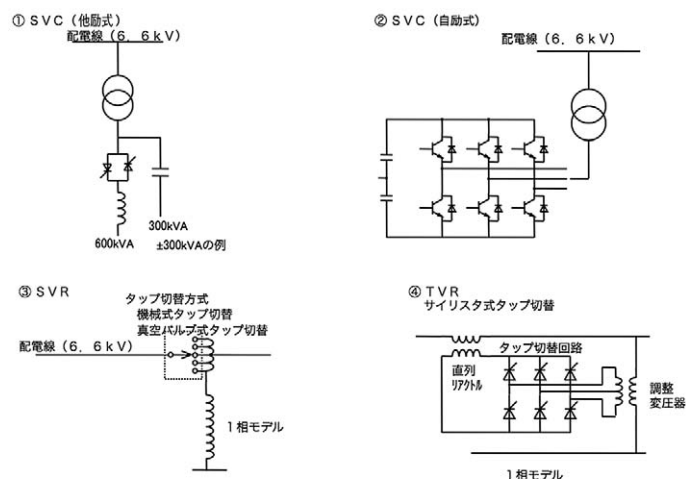


図7 電圧調整に利用可能な配電機器の例

ということで、新規技術導入に際しての常時・非常時の制御・運用の検討や模擬系統・実系統における運用実証に取り組む事業です。

当研究所はこの事業で、従来のSi(シリコン)の代わりにSiC(シリコンカーバイド)を用い、軽量化、コンパクト化、さらに低コスト化を目的とした電圧調整機器の開発に取り組んでいます。

成される結果として、電力ネットワーク設備の容量不足による設備増資等の対策が必要となるケースが発生してきています。大規模な再エネ設備が、送電系統はもとより、配電系統に連系された場合も、同じ配変バンクから供給する需要規模との見合いで、発電余剰がバンク逆潮流となって一次側に流出し、設備増強が必要になってきます。

図8は容量不足が発生するイメージ図です。今まで電気が上流から下流に流れていったのが、逆に下流から上流に流れます。基本的には下流で発電して、その電気の流れが大きいと、送電線の容量が不足してしまうことがあります。

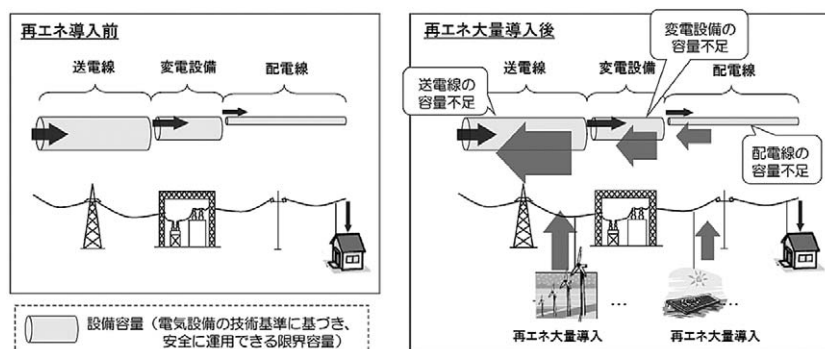
過負荷問題について

過負荷問題（系統の容量不足）

最後に、過負荷問題について説明いたします。近年、再エネ設備が過疎地に偏在して形

設備増強による対策

過負荷問題対策として単純に考えられるの



(出所:新エネルギー小委員会(第2回会合)電気事業連合会配布資料, 2014年8月)

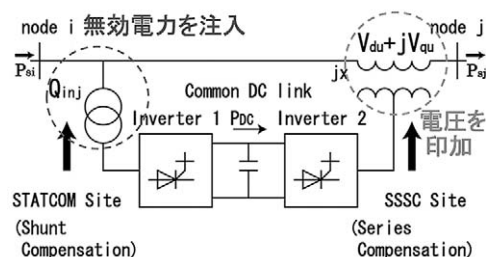
図8 エリア内系統におけるネットワーク設備の容量不足のイメージ

は、送電線や配電線の増強です。新しい送電線をつくればいいということになってきます。連系線容量の増加も同じような考え方ですが、送電線の増強、増設というのは、設備のコスト面だけではなく、他の要因もあって、なかなか難しいです。

そこで、他の対策として、パワーエレクトロニクス技術応用機器による対策があります。

パワーエレクトロニクス技術応用機器による対策

UPFC（Unified Power Flow Controller）機器を用いて、送電能力を拡大するという研究があります。UPFC というのは、図 9 に示すように、2つのインバータで構成される機器



（出所：益田，元木，横山，「電気学会論文誌 B」，Vol.127-B，2007 年 1 月）

図 9 UPFC による電力潮流制御

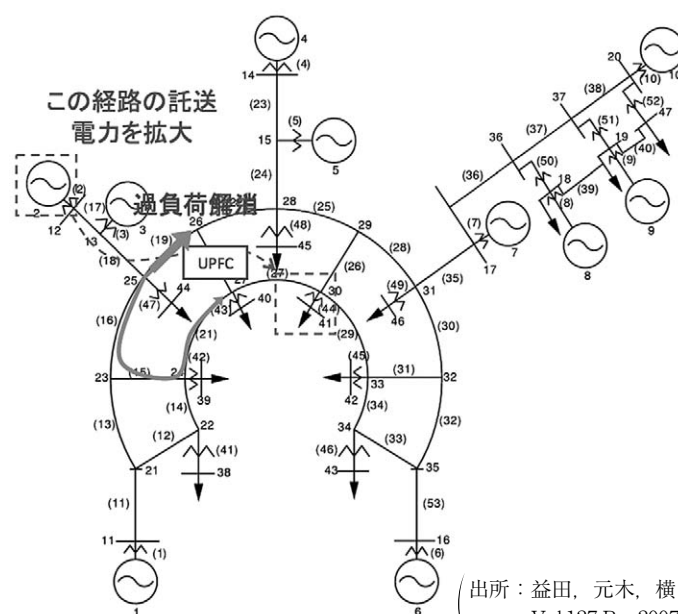
で、無効電力を注入する、電圧を印加するといった、パワーエレクトロニクス技術の応用による電力潮流制御が可能となります。

既存の送配電ネットワークを変更する必要がなく、最適潮流制御によって適切に過負荷をバイパスすることが可能となるのです。一般的に送電電力を徐々に増加させていくと、ある時点で過負荷が発生し、送電容量が不足します。それをこのような機器を用いて電力潮流をバイパスすることで、過負荷を解消できるのです。

図 10 に「電気学会東 10 機系統モデル」を使った研究例を示します。図中の破線で囲まれた発電から負荷側までの経路の電力を増加させていくと、ある時点で、送電線に過負荷が発生してしまい、それ以上電気を送ることができない限界となります。

この研究には、UPFC を設置・制御し、適切に潮流をバイパスすることによって過負荷を解消し、機器の設置がない場合よりも、送電電力の増加が可能であることを示しました。

このような技術というのは、大規模な系統だけでなく配電系統にも応用が可能で、過負荷対策の 1 つのオプションとして期待されています。



（出所：益田，元木，横山，「電気学会論文誌 B」，Vol.127-B，2007 年 1 月）

図 10 電気学会東 10 機系統モデルで UPFC を使った電力潮流制御

おわりに

最後に、まとめさせていただきます。再エネが大量導入された電力系統には4つの課題(長周期需給バランス, 短周期需給バランス, 電圧, 過負荷)があります。それぞれについて, この10年ではなく, かなり先の将来を想定して進められている研究事例を紹介させていただきました。

新しい電力・エネルギー技術の適用が必要になってきますが, パワーエレクトロニクス技術応用機器, 省エネ機器といったハードウェア面だけでなく, 予測技術, 高度な制御技術といったソフトウェア面も考慮しながら, 技術開発や技術適用を進めていく必要があります。

中でも, 予測技術には注目しています。例えば, 1日先の予測だけでなく, 1週間先の予測, 季節ごとの予測は, 水力発電, 特に揚水発電の運用に役立ちます。もっと短期の予測, 例えば, 数時間, 数十分といった単位で, 再エネの出力が分かってくれば, 1日単位ではなく数時間単位で発電機の起動停止計画を立て直すことで, より経済的に停電や余剰の問題を回避していけます。やはり, 予測情報を利用するといったソフトウェアの活用は重要になってくると考えています。

以上で発表を終わります。ご清聴ありがとうございました。

(拍手)

水素大規模導入に向けた技術展望

※
坂田 興（プロジェクト試験研究部
部長）
※※
後藤 新一（プロジェクト試験研究部
参事）



はじめに

日本では、1993年に「水素 利用国際クリーンエネルギーシステム技術研究開発（WE-NET）」の第Ⅰ期がスタートして以来、産官学が力を合わせ水素エネルギーシステムの技術開発に注力してきましたが、最近では燃料電池自動車（FCV）の実用化に向けた努力が成果を上げつつあります。そういう中、水素エネルギー関連の話題が、この2年くらいで、急速に盛り上がってきました。

「エネルギー基本計画」（2014年4月）の中で、水素が大きく取り上げられました。同月スタートした内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）」では、10のテーマのうち1つに水素が採択されました。2014年6月には、資源エネルギー庁で「水素燃料電池戦略ロードマップ」が策定されました。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）も『水素エネルギー白書』（2015年2月）を公表し、水素に対する総合的な知見および施策を打ち出しています。

更に、東京都が「水素社会の実現に向けた戦略会議」を開催し、2020年のオリンピック・パラリンピックに向けて、水素をショーケースとしてアピールして行くと言うことです。

他方、ビジネスのほうでは、家庭用燃料電池コージェネレーションシステム「エネファーム」が累計10万台を突破しています。FCV

用の商用水素ステーションの建設も始まり、2015年8月時点で申請件数が81件となりました。それから、2014年12月には、トヨタ自動車㈱が、燃料電池自動車「MIRAI」を、世界で初めて商用で発売しています。

その他、千代田化工建設㈱、川崎重工業㈱が、大規模な水素製造・輸送・利用で、海外から日本に水素を持ってくるプロジェクトを自社および国家プロジェクトにおいて開始しています。

ただ、こういった動きについていくつか疑問が生じます。つまり、①なぜ今、水素が盛り上がっているのか。②日本で想定しているFCV用の水素は製油所や鉄鋼のコークス炉ガスからの水素ですが、これでは、化石燃料由来の水素では二酸化炭素（CO₂）削減に効果がないのではないか。③水素の盛り上がりは日本だけで、今取り組んでいるエネルギーシステムがガラパゴス化するのではないか。④現在の盛り上がりを保ったまま、水素社会に移行できるのか、ということです。

本日の発表では、これらの疑問に対する考えを述べさせていただこうと思います。

水素に関する4つの疑問に答える

水素の盛り上がりの背景

日本では、今、FCV、水素ステーション、エネファームの技術革新・政策展開が、世界の最

前線にあると言えるほど進展しています。また、CO₂フリー水素を海外から大量に日本に持って来る構想が産官で本格検討されています。

また、海外の再生可能エネルギー（再エネ）を国内導入するときの手段として、水素を使えるのではないかと期待があると思います。

水素とCO₂削減

日本で当面使うFCV用の水素は、製油所由来や鉄鋼のコークス炉からの水素を想定しています。それだとCO₂削減に効果はないのではないかとこの疑問があります。

化石燃料から水素を製造する際にはCO₂が発生するのですが、実は、化石燃料由来の水素でも、CO₂の削減効果があります。化石燃料由来の水素とは、例えば、水素ステーションで都市ガスの改質反応を行って製造した水素や製油所から持って来た水素のことです。

図1は、化石燃料由来の水素とCO₂フリー水素（水電解で製造した水素）を使う場合のCO₂排出量の比較です。油田（Well）から自動車での利用（Wheel）まで、燃料のライフサイクル全体を通した比較で、単位は1km走行する時のCO₂排出です。

ガソリン車、ディーゼル車、ハイブリッド車（PHV）では、ガソリン車からPHVの方向に行くほど燃費が向上します。一方、化石

燃料由来の水素を利用したFCVでも、ガソリンエンジン車、ディーゼルエンジン車に比べて、CO₂排出量がさらに少ないと期待されるのです。FCVが600万台導入された場合のCO₂削減量ですが、例えば、製油所の水素製造装置で造った水素を水素ステーションに持って行き、それをFCVに入れるとガソリン車よりも390万トン／年のCO₂削減となる。電解由来の水素の場合には、760万トン／年くらいの削減ができるということです。

海外での水素の盛り上がりと経済合理性

アメリカは、2001年以来、ブッシュ大統領がエネルギーの中東依存を減らそうということで、水素に力を入れたわけです。しかし、最近はシェールガス、シェールオイルの輸出なポテンシャルを持つに至りましたので、水素に関する進展が遅くなっている可能性があります。ただし、カリフォルニア州においては、水素エネルギーの検討が引き続き活発に行われています。ドイツを中心とする西欧、ノルウェー、スウェーデン、デンマークを中心とする北欧では、逆に盛り上がっているようです。

日本のエネルギーシステムが「ガラパゴス化」することはないだろうか。おそらくスマートフォンと携帯電話の場合と異なり、エネルギーに関しては、わが国は孤立系でも閉鎖系でもあ

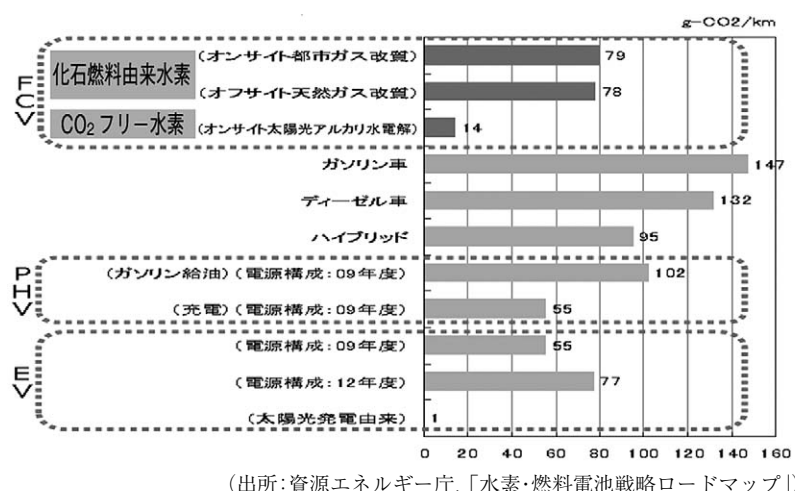


図1 CO₂排出量（Well to Wheel）の比較

りません。エネルギーそのもの、あるいはエネルギーを使って生産する製品を通して、グローバルな競争の中にいることは明らかです。

その中で、経済合理性によって、わが国に最適なエネルギー構成が選択されることになると思います。従って、日本において世界と隔絶したガラパゴス的なエネルギーシステムが普及するとは考えられません。

水素社会への移行となるのか？

現在の盛り上がりそのまま、水素社会に移行することになるか。これまで国内外で何回も水素の盛り上がりはありました。国内外ともに、そのたびに沈静化してきました。ただ、今回の水素に対する関心の盛り上がりは、単なるブームではなく、技術陣の主体的力量（産官学の取り組み、技術・規制の進展）が増大したためだと思います。

しかし、エネルギー問題は、外部環境に大きく依存しています。例えば、温暖化にどう取り組むか。あるいは資源動向、競争エネルギー、地政学といったものに大きく影響されるわけです。しかもそれは、われわれでコントロールできませんので、非常に不確実性が高い因子と言えます。

水素の普及も、主体的力量と外部環境で決まると考えます。今後、普及するエネルギーというのは、その時点での重要課題を解決できるものになっていくと思っています。水素が今後、環境面を含めた重要課題の解決に貢献できれば、普及していく可能性があるということです。図2の左側が「現在の大規模普及エネルギー」

「普及エネルギー」で、右側が「今後の大規模普及エネルギー」です。左から右に移っていくわけですが、「今後の大規模普及エネルギー」というのは、重要課題を解決できるエネルギーに限定されるのだらうと思っています。

私どもの研究は、水素は今後の重要課題の解決に貢献できると示唆しています。普及の十分条件は満足している。つまり、「今後の大規模普及エネルギー」の中に入っていると思っています。ただ、だからといって普及するという必要条件を満たしているわけではありません。

持続可能性の確保と水素

持続可能な低炭素社会の構築

水素社会への移行の可否と普及は、今後の進展（特にコストダウンにつながる技術進歩、規制見直し）および外部環境の変化に依存します。

今、国際エネルギー機関（IEA）は、持続可能性が危うい状態にあると危惧し、低炭素エネルギーシステムによる持続可能社会の構築を提言しています。

低炭素社会とはどういうものか。究極の姿としては、一次エネルギーについては、①原子力、②化石燃料＋CCS（炭素回収貯留）、③再エネのいずれか、またはそれらの組み合わせだと思います。また、二次エネルギーについては、①水素、②電力のいずれか、またはその組み合わせが考えられます。

わが国の課題と解決策

化石燃料＋CCS、再エネの推進が急がれますが、大規模かつ経済的にそれを展開する適地は日本国内よりも海外に多いと思われます。そうすると、そのエネルギーを日本に持って来るためのエネルギーの長距離輸送技術が必要となります。海外で得られるCO₂フリーの

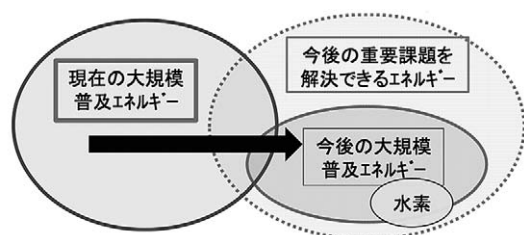


図2 未来のエネルギー体系と水素の位置付け

電力、再エネ発電で得た電力を日本に持ってくる方法の1つとして、媒体としての水素に注目する手もあります。ただ、実行するには、大規模技術とそのシステム開発が必要です。

また、国内で再エネを最大限導入する必要がありますが、その実現には、受入側である電力グリッドへの負荷を低減する技術が不可欠です。そのときに、蓄電技術としての水素技術の開発があると思います。ここでも、大規模長期間のシステム技術開発が必要になります。以上の技術開発は、民間企業の通常の研究開発、技術開発投資のスパンをはるかに超える可能性がありますので、政府の支援に期待したいと思います。

最後に、原子力の推進という課題が残ります。確かに、「2030年のエネルギーミックス」の値は公表されましたが、持続可能性を議論する場合には、2030年以降の世界にどう対処するかという話が重要になると思います。わが国の原子力発電が、2030以降どのように推移するか、現在のところまだ不透明と言えましょう。

政府の施策動向

水素技術の開発に関連する政府の施策について紹介いたします。

1つ目に、経済産業省の「エネルギー基本計画」が挙げられます。

2つ目に、資源エネルギー庁の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」とNEDO技術開発機構新エネルギー部の「水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発」があります。これは、基本的に、液体水素や有機ハイドライドの形で、タンカーを使って大規模に水素を日本に持って来るための技術開発です。

3つ目に、経済産業省産業技術環境局研究開発課（旧通商産業省工業技術院）の「再生可能エネルギー貯蔵・輸送等技術開発」があります。これは平成25年度にスタートし、平成26年度からNEDOに移管され、「水素利用等先導研究開発事業」として実施されていま

す。これには当研究所も参加し、ています。

最後に、内閣府「戦略的イノベーション創造プログラム」にある水素研究があります。

今、紹介した施策の中で、NEDO「水素利用等先導研究開発事業」について、当研究所のプロジェクトリーダー、後藤参事からご説明させていただきたいと思います。

水素利用等先導研究開発事業の概要

再エネ大規模導入に役立つ水素技術

水素グループの後藤です。折角の機会ですので私からNEDOの水素プロジェクトについて、ご説明させていただきます。現在、この水素のプロジェクトのプロジェクトリーダーを務めております。

まず、再エネ発電はかなり不安定です。その変動を全て蓄電池で安定化するのは不可能ですから、再エネ発電の余剰電力を水素等に変換・貯蔵・輸送する技術が有効と考えられます。また、エネルギーセキュリティーの点からも、安価なエネルギー媒体を海外の供給地で製造し、日本へ輸送し貯蔵する技術が必要となります。更に、再エネの導入が進めば、化石燃料由来の発電よりも低コストとなる見込みがあります。

そこで、この水素のプロジェクトでは、2030～2040年に水素価格を20～40円/Nm³にすることを目標に技術開発を進めています。

図3に、プロジェクトのコンセプトを示します。現在、海外で水素を安価に製造し、液体水素、メチルシクロヘキサン（MCH）、アンモニア（NH₃）、メタン等の媒体により、船で日本まで運ぶことが考えられています。液体水素にするときに、－253℃まで下げないといけません。絶対温度が－273℃ですから、アローアンスが20℃しかありません。ただ、液体水素をガス化させていくときに、液体水素は冷熱源として使うことができますので、無駄にはなりま

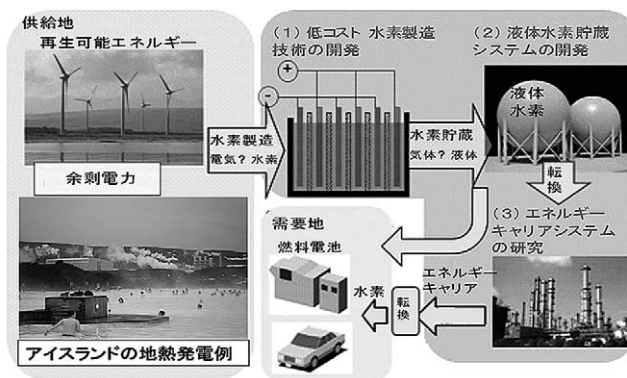


図3 水素利用等先導研究開発事業のコンセプト

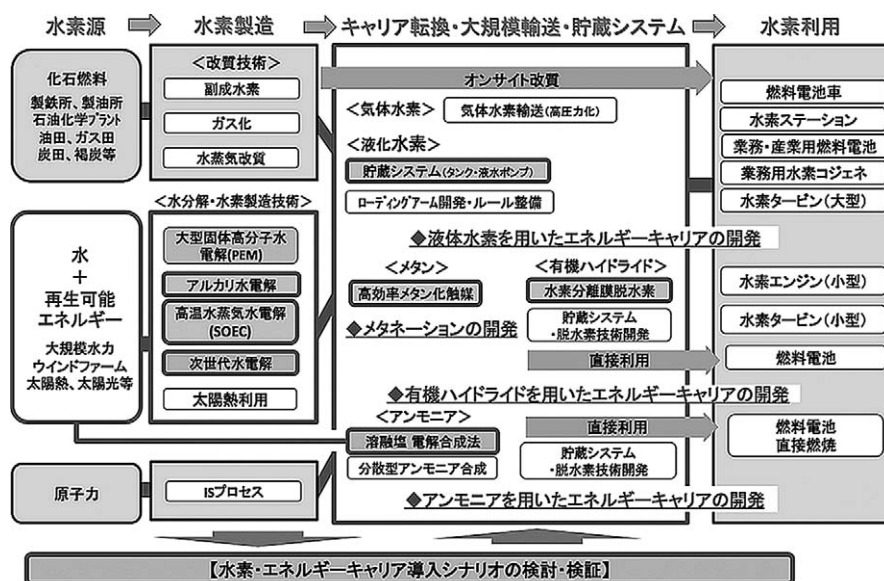


図4 事業の位置付けと必要性

せん。メチルシクロヘキサンは、トルエンに水素を化合させて輸送しますが、常温・常圧での貯蔵輸送が可能というメリットがあります。さらに、アンモニアの場合、大気中に大量にある窒素と水素を合成して船で日本に運んで来ることになりますが、アンモニアの合成は一般的に行われている技術です。

図4にプロジェクトの位置付けと必要性を示します。技術開発に加え、トータルシステム導入シナリオとして、どのようなエネルギー媒体で運ぶと効率が良いのか比較検討しています。プロジェクトには、旭化成(株)、日立造船(株)、(株)東芝、川崎重工業(株)等が参加し、当研究所もエネルギーキャリアシステムの経済性評価とエネルギーキャリア導入シナリオを

担当しています。先日、中間評価が終わり、高い評価をいただいております。

運輸部門における水素導入の可能性

『エネルギー白書』(2014年版)にある最終エネルギー消費の部門別の割合を見ると、トップが産業部門(42.6%)、次が運輸部門(23.1%)です。自動車分野や発電分野が狙い目です。

図5は、原油価格、ガソリン価格、軽油価格の推移(単位:円/ℓ)です。運輸部門における水素導入の可能性を考えてみます。発熱量ベースでは、原油1ℓが水素3Nm³に相当しますから、NEDOの水素価格の目標値20～40円/Nm³は、原油1ℓ当たりで60～



(出所：ドバイ原油 (OPEC Monthly Oil Report)
円ドルレート (日本銀行「主要時系列データ表-月次-」)
ガソリン、軽油価格 (資源エネルギー庁「石油製品価格調査」)

図5 ドバイ原油価格、ガソリン、軽油価格の推移

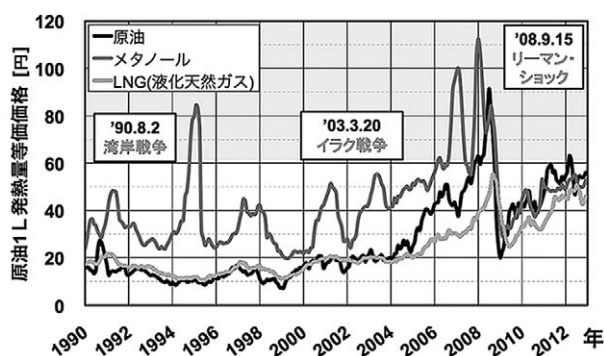


図6 原油、メタノール、LNG 価格の推移

120 円になります。

例えば、ガソリンの値段が 120 円 / ℓ だと、税抜きで 60 円 / ℓ くらいです。水素が目標値の 40 円 / Nm³ で調達できると、ガソリン換算で 120 円 / ℓ と同等となり、更に課税されない場合には、ガソリンの半分の価格になり十二分に競争できるということです。自動車分野での利用が非常に有望だと分かります。

発電部門における水素導入の可能性

図6に、原油 1 ℓ の発熱量換算での、メタノール、LNG の価格推移を示します。LNG は原油よりも少し安い価格でかつ原油と連動して動いています。発電分野では LNG に対抗しなければならないため、水素が 20 円 / Nm³ 以下、LNG と同等クラスになります。発電分野

で水素が活躍するには、原油価格が 2030 年や 2040 年にはもう少し上がるのを期待しながら、かつ今一歩、水素製造コストの低減を図っていかないといけないということが分かります。

まとめ

坂田から発表の「まとめ」をさせていただきます。わが国において過去 15 年間ほど、国家プロジェクトとして集中的に取り組んできたのは、FCV 用水素供給システムとエネファームでした。しかし、上述のように大量に水素をハンドリングすることになりますと、新たな技術体系が必要になります。そのときの課題は以下の通りです。

1. エネルギー貯蔵・輸送媒体としての水素の製造技術 ■再生可能エネルギー電力の高度利用 ① 電解技術の高度化 ② 高温水電解技術・中温水電解技術 ③ PEFC 水電解・アルカリ水電解技術高度化
2. 水素貯蔵 ① 高性能水素貯蔵材料の開発 ② 液体水素技術の開発 ③ 高圧水素用複合容器技術の開発
3. 大規模 CO₂ フリー水素エネルギーシステム（輸送含む） ① 海外由来水素チェーン実証及びシステム最適化 ② 水素利用等先導研究開発事業 ③ 水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発
4. 長期的（一層の効率化を目指して） ① 光触媒水素製造、光電気化学法水素製造、アンモニア電解合成（$6\text{H}_2\text{O}+2\text{N}_2\rightarrow 4\text{NH}_3+3\text{O}_2$） ② 輸送を含めたグローバルシステム
5. 水素利用技術 ① 火力発電技術 ・天然ガス・水素混燃焼タービン ・純水素空気燃焼タービン ・純水素純酸素燃焼タービン ② 燃料電池 ・燃料電池・水素電車等の鉄道システムの研究開発 ・アンモニア燃料電池の研究開発

要素技術（1, 2, 4, 5）とシステム技術（3）で、3の②と③は、2014 年末から国家プロジェクトとして開始したシステム技術開発です。

今まで水素社会を、CO₂ 削減手段、あるいはエネルギー安定供給という視点で見てきたのですが、新たにサプライチェーンという目で見たときのイメージを図 7 に示します。左側が現在のエネルギーの姿で、熱、電気、石油・ガスのネットワークがあります。そのネットワーク上に、いろいろな一次エネルギー、二

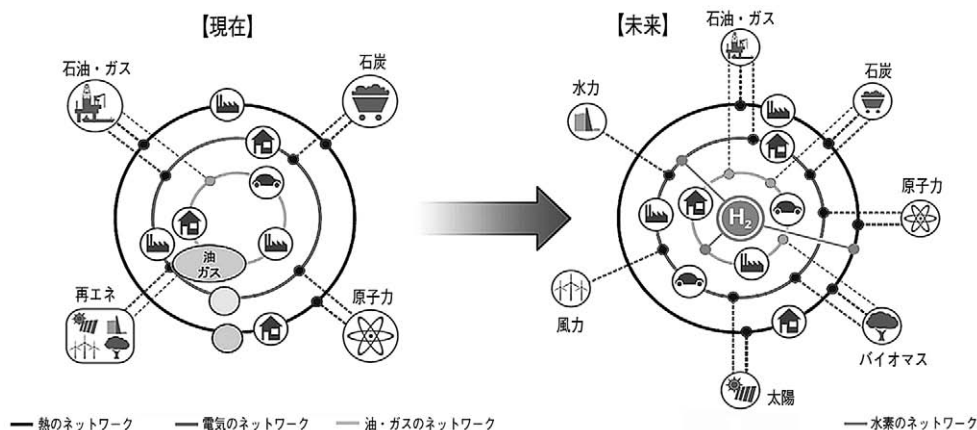
次エネルギーの供給源がぶら下がり、その中に利用側がいるという図です。

右側が未来のエネルギーの姿では、熱、電気、油・ガスのネットワークに水素が入り込むことで「新結合」ができるのではないかと思います。今までは縁遠かった電気自動車と風力エネルギーとの関係、太陽エネルギーと FCV の関係ができるなど、需要と供給の間に新たな結合が作れるというのです。これこそ、経済学者ヨーゼフ・シュンペーターが唱えた「新結合」「イノベーション」そのもののように思います。これにより、新しい事業分野ができるのではないかと期待されます。世界全体やわが国の低炭素化実現の一里塚として、CO₂ フリータウンや低炭素タウンの構築が考えられます。その手段として水素という低炭素エネルギーの普及が始まると、持続可能性社会の構築にも貢献できると思います。そして、今まで縁遠かったエネルギー源と利用分野を新しく結合できると、選択の幅が広がり、より公平で、安全、快適な社会の実現が期待できると思います。

最後に、WE-NET 以来、当研究所は、水素エネルギーシステム研究のセンターとして機能してきています。今後とも真摯に研究を継続し、偏らない、正確な情報提供を続けていきたいと思っています。

以上で、坂田と後藤による発表を終わります。どうもありがとうございました。

（拍手）



（出所：IAE, Technoogy Roadmap Hydrogen and Fuel Cells, 2015）

図 7 サプライチェーンから見た水素社会のイメージ

閉 会 挨 拶

佐藤 憲一 (一財) エネルギー総合工学研究所
専務理事

本日は「エネルギーを巡る新たな視座と技術展望」というテーマでシンポジウムを開催いたしましたところ、多数の方々に長時間にわたりご参加頂きまして誠にありがとうございました。

基調講演として、まず、地球環境産業技術研究機構 (RITE) の山地憲治先生より「エネルギーミックスと地球温暖化対策」につきまして、次に、三井物産戦略研究所の中湊晃社長より「エネルギー情勢のグローバルな変化と総合商社の取り組み」につきまして、大変示唆に富むお話を頂きました。山地先生のお話をお伺いし、7月に取りまとめられた「長期エネルギー需給見通し (エネルギーミックス)」(2015年7月)と11月30日から開催予定の「気候変動枠組み条約第21回締約国会議(COP21)」との関係がよく整理されたのではないかと思います。また、中湊社長のお話では、資源小国であるわが国のエネルギー戦略がいかに重要であるか、さらには総合商社の役割を再認識した次第です。

基調講演に続きまして、当研究所の蓮池研究理事よりエネルギーの技術開発を考える場合、エネルギーミックスが想定する2030年よりも更にその先につながる長期的視点が重要であるとの報告がなされました。

また、午後には、当研究所の田中常務理事、小野崎理事、益田主任研究員、坂田プロジェクト試験研究部部长、後藤参事より、長期的且つグローバルな視点に立って、個別分野の技術動向についての研究成果を報告させて頂きました。

私共は、去る4月21日の「長期エネルギー需給見通し (エネルギーミックス)」に対するパブリックコメントで、エネルギー問題を考える時に倫理の視点が重要であると訴えました。この場合の倫理とは、地球上の限られた資源を共有するグローバルな市民の公平性、世代間の公平性といった広い視野に立った論考を求めるものです。現代社会においては、エネルギーが一瞬でも途絶えれば、経済活動や市民生活全般にわたり、計り知れない影響を及ぼします。そして、エネルギーは、未来永劫その重要性を増し、公共性、公益性、公平性が他の財以上に強く求められると考えます。従いまして、エネルギー政策を立案する政府、エネルギー関連企業、エネルギーに携わる研究者、技術者には、孫やその孫の世代までの責任があり、そのために長期的視点で考えることや、自国のことだけでなく地球全体のことを考えるグローバルな視点が求められます。さらに、エネルギーの供給安定性、経済性、環境性、安全性、いわゆる「3E + S」を達成して明るい社会を作るには、その根本に公平性などが保たれる倫理観が必要だと考えております。

当研究所は今後とも「エネルギーの未来を拓くのは技術である」との理念の下、幅広いエネルギー分野を長期的な観点から俯瞰的に分析し、エネルギーの技術戦略、あるいはエネルギービジョン作りにおいて、先頭集団を走り抜く所存であります。今回のシンポジウムが皆様方の今後のビジネス展開、あるいはエネルギー戦略の構築に少しでもお役に立てば幸甚に存じます。

最後になりましたが、引き続き皆様方のご協力とご支援をお願いし、本日のシンポジウムを終了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。

研究所のうごき

(平成 27 年 10 月 2 日～平成 28 年 1 月 1 日)

◇ 第 21 回賛助会員会議

日 時：10 月 9 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「電力自由化と原子力発電」
(経済産業省 資源エネルギー庁 電力・ガス
事業部 政策課長 畠山陽次郎 氏)

◇ 月例研究会

第 349 回月例研究会

日 時：10 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. 再生可能エネルギー由来水素 - HyGrid 研究会の取組
(㈱テクノバ 調査研究一部 主査 丸田昭輝 氏)
2. CO₂ フリー水素チェーン構築への取組
(川崎重工業㈱ 技術開発本部 水素チェーン
開発センター プロジェクト推進部 水素エネ
ルギー利用推進室 基幹職 松本俊一 氏)

第 350 回月例研究会

日 時：11 月 27 日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 福島第一原子力発電所の事故進展挙動の解
析評価と廃炉に向けての今後の課題
(（一財）エネルギー総合工学研究所 原子力
工学センター 安全解析グループ 部長 内藤正
則)
2. ドイツのエネルギー転換政策のための廃炉
積立金問題
(（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 参事 楠野貞夫)

第 351 回月例研究会

日 時：12 月 18 日（金）14:00～16:00

場 所：航空会館 5 階 501・502 会議室

テーマ：

1. 国内外の地熱開発の動向
(地熱情報研究所代表 九州大学 名誉教授
江原幸雄 氏)
2. 地熱・地中熱の利用技術：見えない地下の
見える化を目指して
(（国研）産業技術総合研究所 再生可能エネ
ルギー研究センター 総括研究主幹 安川香澄
氏)

◇ 外部発表

[講演]

発表者：石本 祐樹

テーマ：Sensitivity Analysis of Global Hydrogen
Demand from Low-Carbon Resources

発表先：Hypothesis XI

日 時：9 月 8 日

発表者：田中 健一

テーマ：廃止措置準備作業における放射能インベ
ントリ評価手順の UML 分析

発表先：日本原子力学会 2015 秋の大会
(於 静岡大学)

日 時：9 月 9 日

発表者：田中 健一

テーマ：Radiological characterization for commer-
cial nuclear power plant in Japan

発表先：日本原子力学会 2015 秋の大会
(於 静岡大学)

日 時：9 月 10 日

発表者：石本 祐樹

テーマ：夢の水素エネルギー社会へ

発表先：茅ヶ崎市環境フェア 2015

日 時：9 月 20 日

発表者：笹倉 正晴, 石本 祐樹, 坂田 興

テーマ：Action plan study for realizing CO₂-free
hydrogen global supply chains

発表先：6th World Hydrogen Technologies Con-
vention (WHTC2015), Sydney, Australia

日 時：10 月 11 日～14 日

発表者：木野 千晶

テーマ：Reduction of pressure oscillations when using cut-cell-based immersed boundary method

発表先：The 34th International Conference on Simulation Technology (JSST2015)

日 時：2015 年 10 月 12 日～14 日

発表者：坂田 興

テーマ：CO₂ フリー水素システム－普及の可能性と今後の動向－

発表先：日本 LCA 学会 2015 年秋のシンポジウム

日 時：10 月 14 日

発表者：田中 健一

テーマ：Benchmark calculation for radioactivity inventory using MAXS library based on JENDL-4.0 and JEFF-3.0/A for decommissioning BWR plants

発表先：CNR*15 5th International Workshop on Compound-Nuclear Reactions and Related Topics (於 東京工業大学)

日 時：10 月 19 日

発表者：酒井 奨

テーマ：Future Development of Clean Coal Technology in Japan

発表先：IEA Clean Coal Center 40th anniversary / 63rd Meeting of the executive committee

日 時：10 月 22 日

発表者：酒井 奨

テーマ：食品バイオマス利活用の状況と今後の方向性について

発表先：静岡県バイオマス利活用セミナー

日 時：10 月 27 日

発表者：蓮池 宏

テーマ：①水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発

②蓄エネルギー技術を用いた出力制御技術の開発

発表先：NEDO 新エネルギー成果報告会 (於パシフィコ横浜)

日 時：① 10 月 28 日, ② 10 月 30 日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：INDC の提出状況とその評価事例

発表先：第 7 回温暖化リスクメディアフォーラム (主催：(国研) 国立環境研究所, 東京大学)

日 時：11 月 5 日

発表者：内藤 正則, 鈴木 洋明, ペレグリニ・マルコ, 岡田 英俊

テーマ：

(1) Accident-Analysis of the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant with the SAMPSON Code for the Assessment of the Core Status (発表者：内藤 正則, 鈴木 洋明, ペレグリニ・マルコ, 岡田 英俊)

(2) Preliminary Considerations from the 2nd Phase of Experiments at the SIET/SWAM Facility (発表者：内藤 正則, ペレグリニ・マルコ)

発表先：2015 International Workshop on Post-Fukushima Challenges on Severe Accident Mitigation and Research Collaboration (SAMRC-2015) (大田, 韓国)

日 時：11 月 9 日～11 日

発表者：川村 太郎

テーマ：我が国の天然ガス需給見通し及びガスハイドレート技術の役割

発表先：第 14 回ガスハイドレート産業創出イノベーション講演会 (於 (国研) 産業技術総合研究所 臨海副都心センター)

日 時：11 月 10 日

発表者：黒沢 厚志

テーマ：中長期的技術開発のあり方

発表先：プレ COP イベント「COP21 に向けて」 (主催：日本エネルギー経済研究所)

日 時：11 月 10 日

発表者：坂田 興

テーマ：CO₂ フリー水素システム－普及の可能性と今後の動向－

発表先：グローバル水素エネルギーコンソーシアム発足記念シンポジウム (於 東京工業大学)

日 時：11 月 26 日

発表者：相澤 芳弘，村田 謙二，坂田 興

テーマ：離島における再生可能エネルギーの水素
電力貯蔵評価モデル

発表先：第 35 回水素エネルギー協会大会

日 時：12 月 3 日

発表者：木野 千晶

テーマ：Cut-Cell ベース IB 法を用いた振動壁乱
流シミュレーション

発表先：第 29 回数値流体力学シンポジウム（CFD
2015）（於 九州大学筑紫キャンパス）

日 時：12 月 15 日～17 日

発表者：益田 泰輔，J. G. S. Fonseca, Jr.，大関 崇，
村田 晃伸

テーマ：Power System Operation by Prediction
Interval of Photovoltaic Generation Fore-
cast

発表先：IEEE ICHS2015（於スリランカ）

日 時：12 月 20 日

[論文]

発表者：加藤悦史 他

テーマ：Biophysical and economic limits to nega-
tive CO₂ emissions

発表先：Nature Climate Change, doi:10.1038/
nclimate2870

発表日：12 月 8 日

発表者：加藤悦史 他

テーマ：Global Carbon Budget 2015

発表先：Earth System Science Data, 7, 349-396,
2015, www.earth-syst-sci-data.net/7/34
9/2015/, doi:10.5194/essd-7-349-2015

発表日：12 月 8 日

[寄稿]

発表者：酒井 奨，入谷 淳一，小野崎 正樹

テーマ：2050 年に向けた我が国の発電の将来像

寄稿先：日本エネルギー学会誌（2015 年 11 月号）

発表者：水田 美能，塙 雅一

テーマ：化石燃料供給の我が国への影響

寄稿先：日本エネルギー学会誌（2015 年 11 月号）

発表者：坂田 興

テーマ：2050 年における水素エネルギーシステム

寄稿先：日本エネルギー学会誌（2015 年 11 月号）

発表者：村田 謙二

テーマ：水素を用いる電力貯蔵の新たな展開

発表先：（一社）水素エネルギー協会

会誌第 40 巻第 4 号（2015 年 12 月発行）

発表者：相澤 芳弘，坂田 興，村田 謙二，植屋
治紀（㈱システム技術研究所）

テーマ：離島における Power-to-Gas 事業の可能
性

発表先：（一社）水素エネルギー協会

会誌第 40 巻第 4 号（2015 年 12 月発行）

発表者：黒沢 厚志

テーマ：国際エネルギー機関の水素ロードマップ

発表先：（一社）水素エネルギー協会

会誌第 40 巻第 4 号（2015 年 12 月発行）

◇人事異動

○平成 27 年 10 月 31 日付

（退職）

笠井 滋 原子力工学センター 部長（参事）

○平成 28 年 1 月 1 日付

（兼務）

高橋知慎 経理部主任研究員 兼 総務部 兼 エネル
ギー国際標準（ISO）センター 兼 技術
開発支援センター
エネルギー技術情報センター 兼務

野村和之 総務部研究員 兼 企画部 兼 技術開発支
援センター
エネルギー技術情報センター 兼務

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。まず国内では、一昨年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画を踏まえ、長期エネルギー需給見通し、いわゆるエネルギーミックスが7月に策定されたことが挙げられよう。徹底した省エネルギーの推進と並行して電力コストの低減も図るという極めてチャレンジングな条件の下、再生可能エネルギーの最大限の導入や火力発電の効率化を進めつつ原発依存度を可能な限り低減すると、の基本方針により、2030年度の電源構成として再エネ22～24%、原子力22～20%などが提示されたところである。

原子力については、長期間の厳しい審査を経て、9月と11月に川内原子力発電所1・2号機の運転が再開したほか、高浜発電所3・4号機や伊方発電所3号機の原子炉設置変更許可等がおりるに至った。過度に火力に依存した現在の電源構成の是正に向け、今後も科学合理性のあ

る審査が着実に進められることが大いに期待される。

国際的な動きに目を向けると、石油価格の更なる低迷などがあるが、最大の目玉は11月末から12月にかけて開催されたCOP21における「パリ協定」の採択ではないだろうか。2週間にわたる交渉の末、COP21に参加した196の国・地域すべてにより、気温上昇を「2℃よりかなり低く」抑える、といった野心的な内容の合意がなされ、世界が協調して地球温暖化対策に取り組むこととなった。その目標達成に向け、今後各国がいかに実効性のある対策を打ち出し実施に移していくかがカギとなろう。

12月には京都の清水寺で「今年の漢字」として「安」が発表された。エネルギー分野では安全性、(エネルギー)安全保障、安定供給といった語句がすぐに思い浮かぶ。今年はこれらが着実に達成され、安堵や安寧の年となることを期待したい。

編集責任者 重政弥寿志

季報 エネルギー総合工学 第38巻第4号

平成28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）株式会社日新社

※ 無断転載を禁じます。

