

第 173 回エネルギー問題に発言する会 座談会議事録

座談会演題：「2050 年に向けたエネルギービジョン及びその中での原子力の役割」

講師：都筑 和泰 氏

日時：2017 年 1 月 19 日（木）16:00～17:45

場所：日本原子力安全推進協会（JANSI）13 階 第 2,3 会議室

座長：針山 日出夫 氏

参加者：会員 約 40 名

議事録作成：田辺 博三

配布資料：

- ① 講演資料：2050 年に向けたエネルギービジョン及びその中での原子力の役割

講演内容：

昨年発効したパリ協定においては、世界共通の長期目標として 2℃目標のみならず 1.5℃への言及が行われた。本講演においては、その実現に向けたエネルギー構成の試算結果を示し、目標実現には「社会の変革」が必要となること、原子力もほぼ必須の技術オプションと位置づけられることを可能な限り定量的に議論する。さらに、日本のエネルギー需給を巡る状況を考慮すると、原子力の必要性が相対的に高いということも示す。

講師略歴：

1994 年 東京大学大学院 工学系研究科 物理工学専攻 修士

プラズマプロセッシングに関わる基礎研究

1997 年 総合研究大学院大学 数物科学研究科 核融合科学 博士

核融合真空容器に適用するボロンコーティング膜へ水素吸収・放出挙動に関わる基礎的な研究

1998 年 日本原子力研究所 那珂研究所

中型トカマク JFT-2M を利用した核融合に関わる実験研究及びプロジェクトマネジメント（特に低放射化フェライト鋼の適用に関わる実験研究）

2006 年 (財)エネルギー総合工学研究所

原子力：次世代軽水炉開発、原子力規制改革、

福島第一原発事故の初期におけるデータ収集と分析

スリーマイル島、チェルノブイリ事故の調査

人的過誤の分析、高レベル廃棄物処分の社会経済分析

再生可能：太陽熱利用、PV 利用に関わる規制改革の予備検討

エネルギー需給、CO2 対策：

エネルギーモデル GRAPE などの解析ツールを用いて、主に中長期の観点からのエネルギー需給の在り方の検討

講演概要：

現在のエネルギーの使われ方と今後の見通し、2050年を見据えたエネルギー需給見通しと低炭素技術、原子力の役割について GRAPE モデルを用いたシミュレーション予測にもとづく考察結果を紹介する。

1. エネルギーの現在の使われ方と今後の見通し

世界のエネルギー供給とエネルギー構成を下図に示す。

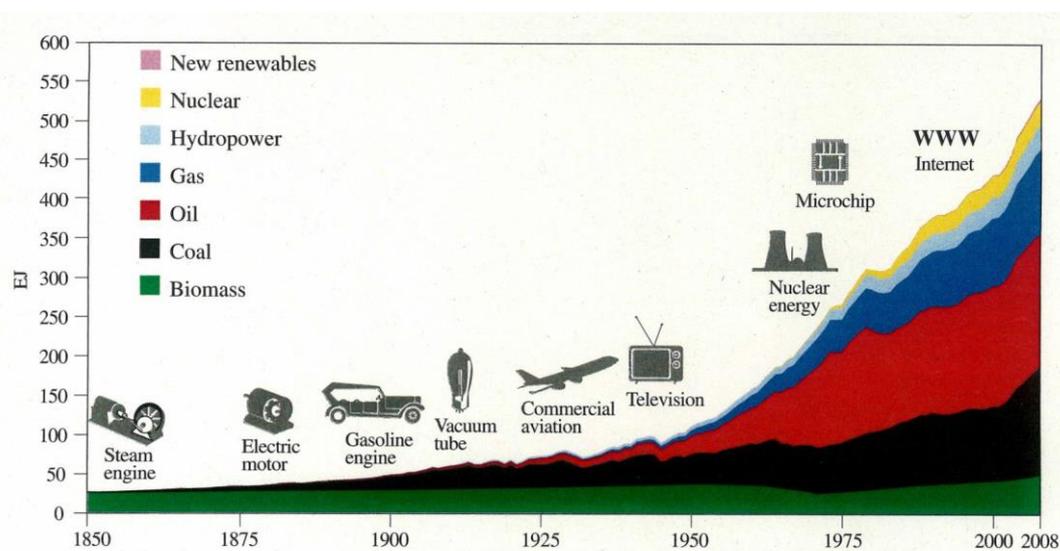


Figure 1.9 | History of world primary energy use, by Source (in EJ). Source: updated from Nakicenovic et al., 1998 and Grubler, 2008.

人々はエネルギーが欲しくてエネルギーを使っているわけではなく、寒さをしのぐ、調理をする、作業をする、楽に移動する、便利に楽しく暮らすといった目的のために使っている。日本の現在の一人あたりの最終エネルギー消費は石油換算で約 3 トン、一次エネルギーベースでは約 4 トンである。その用途を大まかに分類すると、モノの生産・輸送・販売にかかわるものが約 2/3、個人の生活や乗用車に関わるものが 1/3 程度である。このエネルギーは、一人が摂取するエネルギー（約 2500kcal/日・人）の 30 から 40 倍に相当するものであり、いわば、各個人が数 10 名の奴隷にかしずかれている特異な状況といえる。

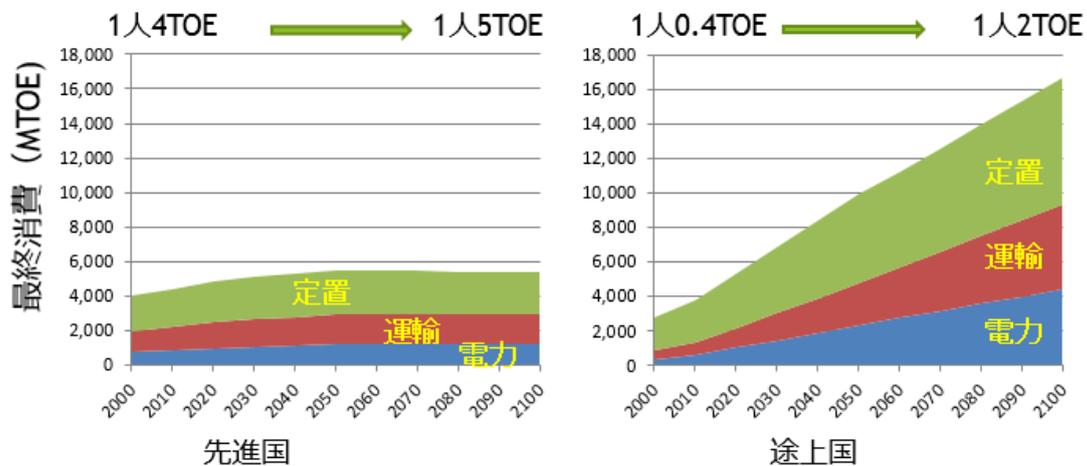
この状態を維持するためには大量のエネルギー資源が必要であり、これまでは主に化石燃料によって供給されてきた。化石燃料については、その持続性と気候変動問題の 2 つが懸念材料となる。ここで、オイルピーク論は 10 年ほど前盛んに議論されていたが、シェールガス革命や最近の石油価格の下落もあり、現在は沈滞気味である。多くのモデル計算では、CO₂ 対策をしない成り行きシナリオにおいてさえ、今世紀中は化石燃料中心の燃料供給が可能と予想されている。

気候変動緩和に向けた取り組みとしては、パリ協定が 2016 年 11 月 4 日に発効した。各国の宣言 (INDC) では 2°C の目標には全く不足であり、追加的な取り組みが必須となっている。これにどこまで取り組むかは、エネルギー需給構造を検討する上での重要な不確定要因となる。また、世界がこれに向けて着実に取り組むのであれば、化石燃料はむしろ余ることになり、安い燃料を利用せずに低炭素化に邁進することは可能か、という問題も発生しう

る。

2. 2050 年を見据えたエネルギー需給見通しと低炭素技術（2℃目標を実現するためには何をすべきか）

気候変動問題への取り組みの是非はさておき、まず、2℃目標を実現するためには、どの程度の努力が必要かということ概説する。計算の前提となる、世界のエネルギー需要の見通しを下図に示す。



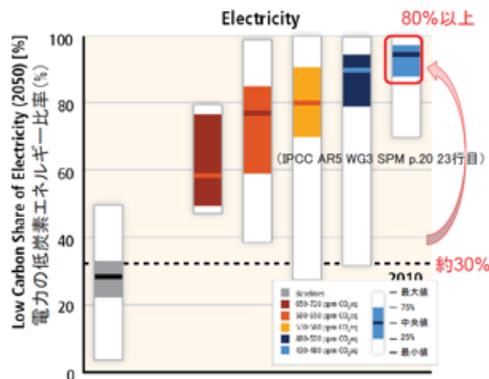
出典) GRAPEの設定値 ~ SRES B2と同程度

2000年のエネルギー消費概況は、先進国は約10億人が一人平均約4TOEで生活し、トータル4000MTOE、途上国は約60億人が一人平均約0.4TOEで生活し、トータルでは2400MTOEとなっている。2100年には、先進国が人口、エネルギー消費とも維持または微増にとどまる一方、途上国は人口が80億人にまで増加し、1人あたりのエネルギー消費が現在の日本半分程度になると想定している。このように、途上国が先進国のような暮らしを指向すれば、上図に示すとおり、エネルギー消費は確実に増えることになる。

一方、IPCC第五次報告書においては、2℃目標の実現のためには2050年までにCO₂排出量を40～70%削減(2010年比)、21世紀末までにほぼゼロにすることが必要であると指摘されている。これらの条件を踏まえつつ、GRAPEモデルで2050年世界CO₂排出半減を制約条件としてエネルギー供給構造・CO₂排出の地域分布など計算した。その結果、先進国は、日本も含め排出量を8割程度以上削減、途上国は、やや減少という結果となった。ただし、これは先進国だけが努力をするというわけではない。途上国は需要が増える中で排出削減を行うので、結局2050年における、最終消費に対するCO₂排出量は、いずれの地域も現状のほぼ8割減になっている。言い換えると、エネルギー消費が今後も増加する中で世界のCO₂を半減するためには、世界全体で協力して排出原単位約8割減に取り組む必要

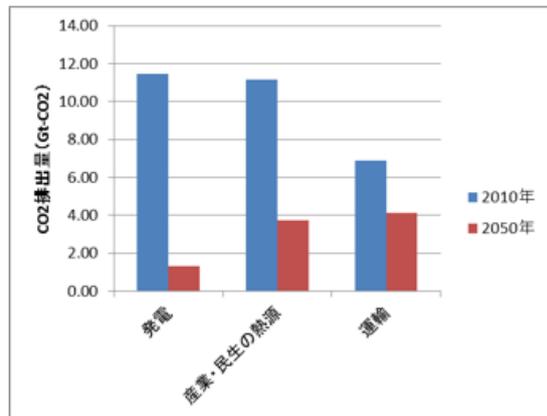
があるということがわかる。

この実現のためには、あらゆる部門で対策を進める必要があるが、中でも電力部門の対策（CCS 火力、原子力、太陽光発電、風力発電、バイオマスなど）は他部門と比べ導入しやすいとみなされており、多くの検討において、2050年には、ほぼゼロエミッションを実現することが期待されている。（下図参照）



平成27年10月11日
第一回気候変動長期戦略懇談会資料1-1

IPCC第五次報告書WG3



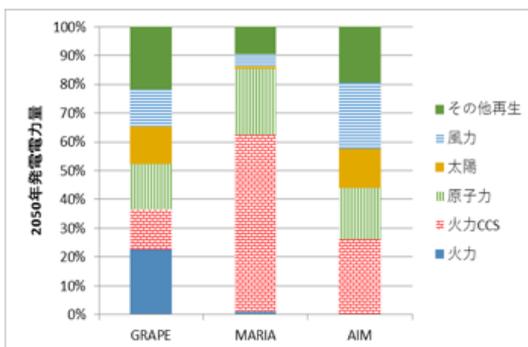
GRAPE計算結果例

これを達成するためには、CCS 火力、原子力、再生可能エネルギーの全てを投入することが必要となる。ただし、下図に示す通り、その内訳はエネルギーモデル、すなわち技術想定に大きく依存している。また、同じモデル（GRAPE）においても、地域別ごとに多様（風況、CCS ポテンシャル、バイオマスなど）な対応が考えられる。結局のところ、完璧なエネルギー源は存在せず、技術開発の進展や地域特性に応じて、2つまたは全ての技術を大規模に導入していく必要があるということになる。

ここで、「大規模に」のイメージをつかむため、GRAPEにおいて想定している2050年に向けた世界全体としての原子力や再生可能の導入速度を以下に示す。

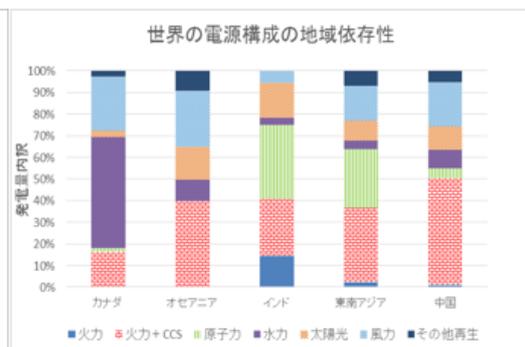
○原子力

GRAPEの場合今世紀半ばには、毎年100万kW級40基程度を導入する必要がある。



モデル間の比較

環境省CA-RUSプロジェクト「地球規模の気候リスクに対する人類の選択肢 第1版」のデータに基づきIAEにて作成



GRAPEによる地域依存性の例

この速度は原子力導入初期である 1980 年代前半に経験があり、技術的に不可能というわけではないが社会的には容易ではない。

○再生可能

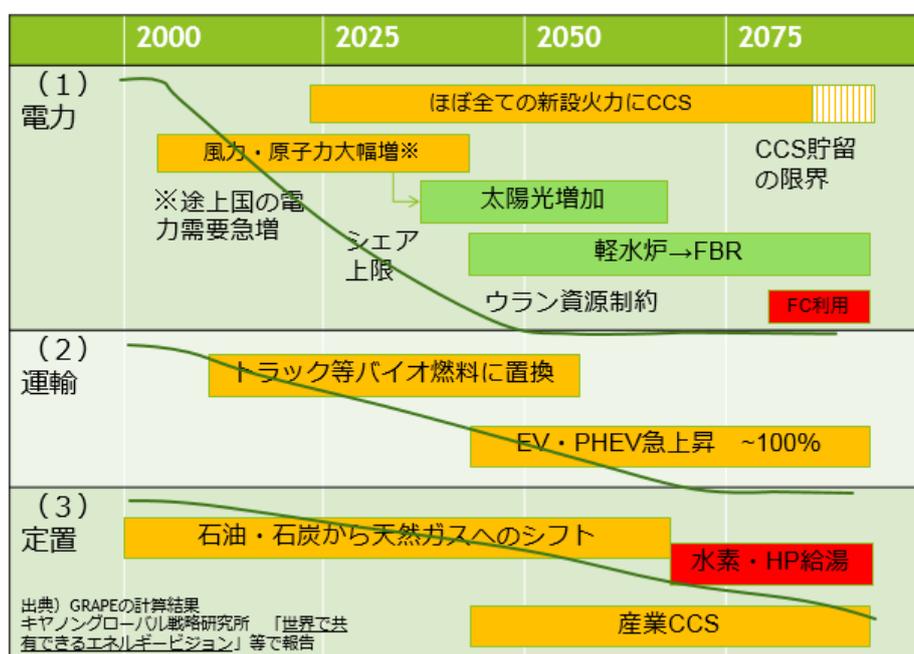
風力は近年の実績の 2 倍程度の導入速度。2030 年までは関係団体のロードマップの上限をやや上回るペースを 2050 年まで継続する必要がある。風力発電の導入の勢いは大変なものであるが、それでも中長期的には全く足りない規模である。

○CCS (炭素回収貯留)

2030 年以降、ほぼ全ての施設火力プラントに CCS を設置する必要がある。

電力以外の対策も重要である。下図に GRAPE によるエネルギー技術構成の変遷を模式的に示す。運輸はまず燃費の改善やバイオ燃料の導入が進み、その後、EV、FCV の大規模普及が起こる。定値 (産業・民生の熱源) については、まず排出原単位の低い天然ガス利用が促進され、その後、CCS やヒートポンプ利用、さらには水素利用を想定している。

ここで、気候変動を抑制するという観点において、2050 年は通過点にしか過ぎないとい点には留意する必要がある。IPCC 第五次報告書では、累積排出量と温度上昇の強い相関があり、2℃まで約 1000Gt-C しか許容されないということが示された。温暖化対策を是とするのであれば、短中期的な対策の多寡にかかわらず、今世紀後半にはほぼゼロエミッションにす



図中の曲線はCO2削減率 (Z650の排出/BAUの排出) のイメージ
る必要がある。

原子力を大規模かつ長期的に利用することを想定した場合には、ウラン資源問題についても考慮する必要がある。GRAPE の計算においては、2050 年頃から高速増殖炉に移行

することとしており、今世紀前半の軽水炉利用は、単なる低炭素電源という位置づけだけでなく、初装荷燃料を確保するという目的がある。

以下に低炭素技術のまとめを示す。

- ・途上国の生活レベルを向上させつつ 2050 年に世界の CO2 排出を半減するには、排出原単位 8 割減という目標に世界全体で協調して取り組む必要がある。電力に限らず、運輸、産業、民生の全てにおいて、相当な努力が必要。
- ・中でも電力については、多くのモデルで 2050 年ゼロエミッションが想定されている。その実現のためには、再生可能、原子力、CCS の全てを非現実的といえるくらいの速度で導入する必要がある。
- ・再生可能、原子力、CCS の割合は技術の進展や地域特性に大きく依存する。原子力無しでゼロエミッションを実現することは数字の上では可能だが、CCS や再生可能の大量導入にはまだ実績がないことまで考慮すると、原子力はほぼ必須の技術オプションといえる。
- ・2°C制約実現の観点では、2050 年半減は単なる通過点。継続して排出量を削減し、今世紀末にはゼロまたはマイナスにする必要がある。

3. 原子力の役割（国内を想定した試算）

日本の国内エネルギー需給の特徴として以下があげられる。

- ・化石燃料はほぼ全て輸入。電力供給も大陸から切り離されている。
- ・食料・エネルギーなどの基本的な物資を海外に依存。よって産業の国際競争力の保持は死活問題。したがって、安くて豊富なエネルギーの利用が前提である。
- ・すでに多くの原子力発電所を所有している（2017 年 1 月時点で 42 基）。

以上を踏まえると、原子力の必要性は相対的に高いと考えられる。ここでは 2030 年、2050 年のエネルギー需給構造を具体的に試算し、その中での原子力の役割を分析して行くこととした。

（1）2030 年シナリオ分析の基本的な考え方

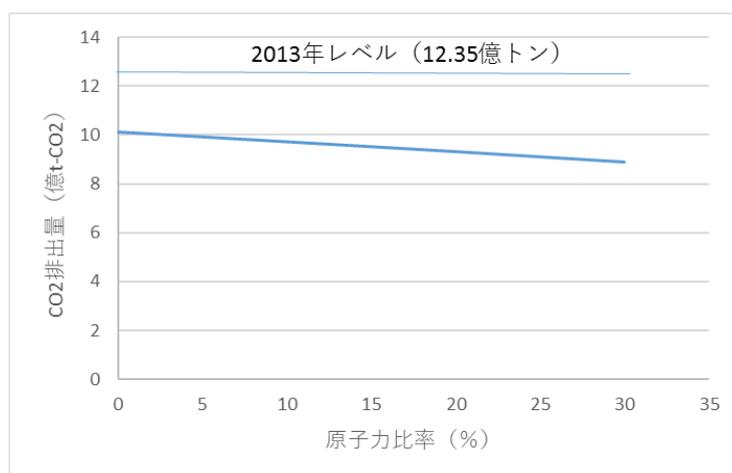
長期エネルギー需給見通しで、再生可能エネルギーの電源シェアが 22%～24%とされた。この数字は、少なくとも現時点において最大導入とされたものであり、ここから大幅に増加させることは容易ではないと考えられる。それに対し、既存の原子力発電所は年数別には 0～34 年のものが 35 基となっており、60 年までの寿命延長が認められれば大部分が 2030 年頃まで利用可能である。よって、新增設無しでも総電力の 30%程度は供給できるポテンシャルをもつ。火力についても、化石燃料供給に関わる国際情勢の大幅な変化や二酸化炭素排出の厳しい制約がなければ、国内電力の大部分を供給するポテンシャルをもつ。ここでは原子力の多寡のメリット・デメリットを明確化するため、再生可能・省エネルギーのシナリオは長期需給エネルギー見通しの値に固定し、原子力と火力の比率を大きく変えるような

分析を実施した。

その結果、原子力比率を 20～22%からゼロにすると以下のような影響が発生するというを示した。

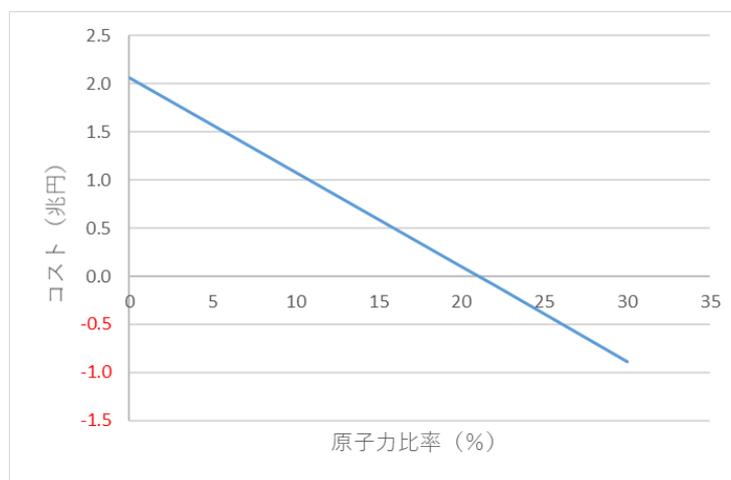
- 自給率が 24.3%から約 14%に減少
- CO₂ 排出量が約 0.8 億トンの増加（下図参照）

なお、発電部門の CO₂ 排出が全排出量の約 1/3 であり、原子力はその 20%を低炭素化するということであり、その削減効果は決定的なものではない。しかしながら、すでに再生可能や省エネの想定は上限である中、再起動・寿命延長の決断のみで全体の 7%を削減できると考えると、CO 削減の有効アイテムであるといえる。



(2015 長期需給見通しのデータ (概数) に基づき IAE にて作成)

- 経済性では約 2.1 兆円のコスト負担増(下図)。これは人口 1 人当たり約 18,000 円、kWh あたり約 2 円に相当。さらに、即時停止の場合は、既設プラントが不良債権化(減価償却+廃止措置費用)するという効果もある。



(2015 長期需給見通しのデータ (概数) に基づき IAE にて作成)

- ・天然ガス消費量約 30%減（最大の調達先を上回る量）
- ・電力供給の多様性向上（化石燃料調達途絶の場合でも、水力や再生可能と併せて半分程度の電力は供給継続）

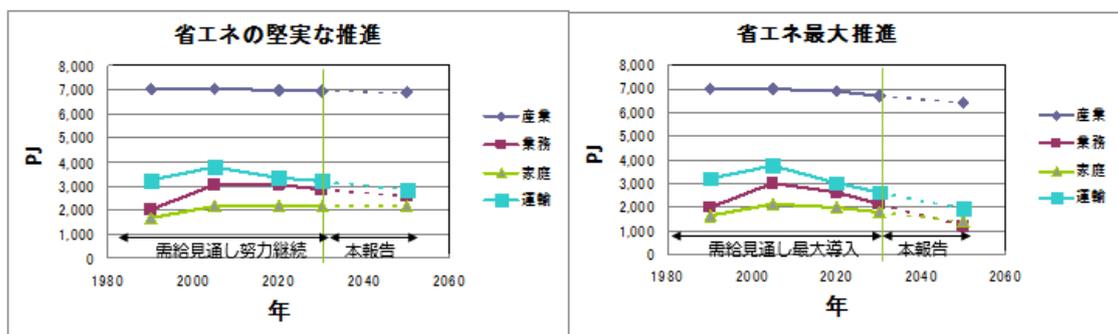
以上より、安全性を前提とした原子力の継続的利用は、メリットがあると考えられる。

（２）2050年シナリオ分析の考え方

2030年の延長上の世界を想定するが、不確実性はより大きくなる。例えば、省エネルギーが画期的に進展するケースや再生可能で電力を半分程度供給する状況も想定しうる。化石燃料の供給・価格や、二酸化炭素排出制約の動向もさらに不透明となる。原子力の動向も不確実性が大きい。ここでは脱原子力から30%程度までを想定する。原子力利用の3Eの観点でのメリットは基本的に2030年と同等であるが、原子力を継続的に利用するには新設が必要であるため、プラント建設、廃炉、使用済燃料処理処分を含めた経済性は自明ではないことには注意を要する。

最終需要は下図のとおりとする。東日本大震災後、省エネ意識が高まっていることを踏まえ、省エネが進まないシナリオは取り扱わない。

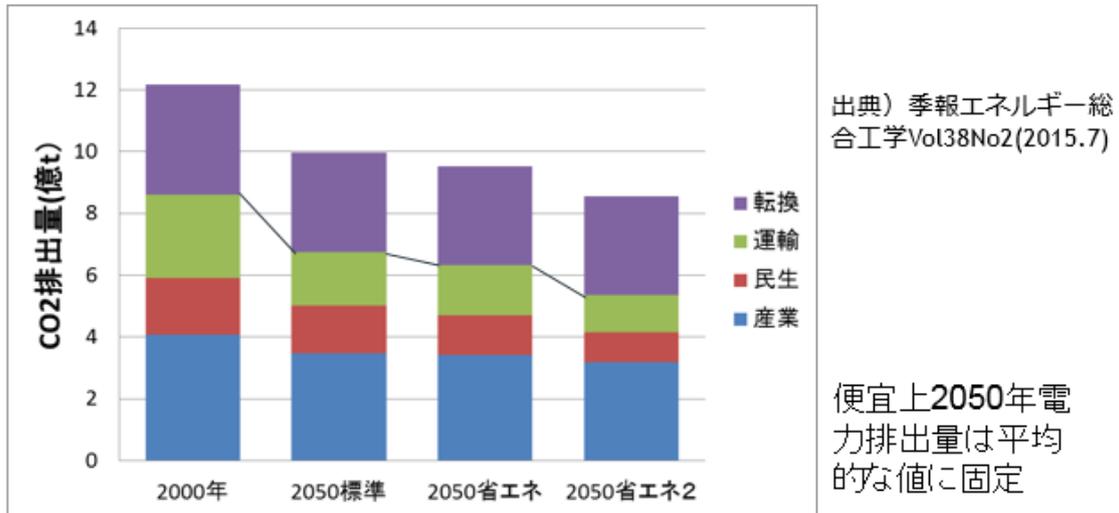
省エネの度合	～2030年（需給見通し）	～2050年（外挿）
堅実な推進（左図）	努力継続	努力継続を外挿
中程度の推進	努力継続	最大導入の2030年
最大推進（右図）	最大導入	最大導入外挿



① 2050年における部門別排出概観

各需要シナリオに対応するCO₂排出量及びその内訳を下図に示す。ここで、各部門の排出原単位についても、上図と同様の考え方で外挿している。極端な省エネシナリオ(省エネ2)以外では電力部門以外からの排出だけで1990年比半減の目標(5.6億トン)を上回っている。

したがって、電力の対策（原子力、再生可能等）は前提として、他部門の対策も重要であることが分かる。



②半減に向けたシナリオ設定とその比較

他部門のCO₂排出削減の検討シナリオとして、以下の2ケースを試算した。根拠についての詳細は割愛するが、産業・民生においては、熱の使われ方を分析の上、比較的低温の需要をヒートポンプに置き換えていくことを基本方針とした。また、運輸については乗用車の電化を進めていくことを想定した。

・中程度の対策

産業は低温の全てをヒートポンプ

民生の電化率を75%

乗用車の3割を電化

・高程度の対策

産業は低温の全てをヒートポンプ、自家発の半分を高温ガス炉

民生の電化率を90%

乗用車の5割を電化

③シナリオ分析の結果

熱源や動力源を電気に置き換えれば、需要端におけるCO₂排出は直接減少する。しかしながら、省エネルギーを急速に進め、かつ電化を促進した場合であっても、発電部門以外のCO₂排出量だけで排出枠の大部分を消費してしまうため、発電部門で出せるCO₂は限られている。すなわち、かなり極端な省エネや電化を想定した場合であっても、電力の大部分は低炭素電源で供給する必要がある。それを再生可能、あるいはCCSのみで供給することは容易ではなく、やはり原子力の必要性は大きいということが示された。

以上の考察にもとづき、国内原子力の必要性をまとめると以下ようになる。

<短期的な視点>

- ・既設炉を利用することにかかわる経済利益は大きい。安全対策を前提として再稼働、さらには寿命延長や出力増強を進めることが経済的には合理的である。
- ・CO₂ 排出量や天然ガス消費量を低減するための最も安価でかつフィージブルな対策である。よって、排出枠や天然ガス調達の交渉カードとして有効である。
- ・万一天然ガス調達が困難に陥っても最低限の電力は供給可能という点で、天然ガス供給急減リスクに対する電力供給の安定性は明らかに向上する。

<中長期的な視点>

- ・短期対策の場合と同様に、原子力は CO₂ 排出量や天然ガス消費量を低減するための安価でかつフィージブルな対策である。ただし、原子力を維持するには新增設が必要であるため、その時期の化石燃料調達動向や温暖化制約動向を見極めた上での判断となる。
- ・厳しい二酸化炭素排出制約がある場合は、原子力はほぼ必須といえるオプションとなる。
- ・上記を考慮すると、原子力の技術基盤維持は極めて重要。

4. 講演のまとめ

- 近年の先進国における文明は、一人の人間が約 30 人分ものエネルギーを消費しており、人類の歴史から見ると特異な状態である。これを途上国にまで展開すると想定するとエネルギー消費はまだ増える。
- 温暖化に対する基本的な対応策は、再生可能・原子力、CCS の導入と省エネルギーの普及。厳しい目標をクリアするには、今すぐ全ての技術を全ての地域、全ての部門に野心的なレベルで導入してなければならない。
- 原子力は切り札というほどではないが、化石燃料消費低減や、CO₂ 排出削減に着実に寄与する。とくに CO₂ 排出半減以下といった厳しい目標をクリアするためには、ほぼ必須の技術オプションといえる。
- 再生可能と CCS だけでも数字の上では電力ゼロエミッションは実現可能。ただし、両者とも大規模導入の実績はまだない。将来の不確実性を考えると、少なくとも当面原子力技術基盤は着実に維持すべきと考えられる。
- 資源に乏しい国内においては、原子力の必要性は相対的に大きい。特に既設プラントの再稼働は 3E の観点からメリットが大きい。安全性の確保を前提としつつ、再稼働のメリットを冷静に議論していくことが必要。
- 2050 年を見据えた場合、新設・リプレースが必要になるため、経済的なメリットは自明ではない。ただし、以下を考慮すると、ほぼ必須といえる重要な技術オプションと考えられる。
 - ・ CO₂ 排出目標の動向は不透明
 - 半減以下を目指す場合は、原子力もほぼ必須。

- ・化石燃料が今後も安価かつ十分に調達できるかは不透明
- ・CCS が本格的に導入できるかも不透明
- ・再生可能で電力の半分程度以上を供給できるかどうか不透明

主な質疑応答：

質問：CCS が難しいのは分かるが 2°Cまで約 1000Gton-C と制約されているのであれば CCS はもっと入るのではないか。

回答：GRAPE では日本では CCS はほとんど使えない想定とした。世界では大規模に利用されている。

質問：IEA の世界見通し 2016 では、将来のあるべき姿を示しているものの、現実的には CO₂ は増え続ける。2°Cは信用できない。原子力の新設が必要になると思う。各国が CO₂ 削減目標を示しているがどの国も達成できないと思う。再エネも 20~24%達成は難しい。もっと地に足の着いた検討が必要である。

回答：ご指摘のとおりと思う。本日は 2°C目標の実現が如何に難しいかという観点で講演を行った。それを踏まえつつ、地に足の着いた議論を行い、落としどころを探ることが必要である。今後の課題と思っている。

コメント：エネ基 2011 では省エネの寄与が大きすぎると思っている。再エネを増やすことは系統の安定性から技術的に難しいと思う。火力を減らし原子力をどこまで入れられるかがポイントではないか。

コメント：リプレースによって 40 万 kW を 110 万 kW にするとしても 50 年間はかかる。新規立地、増設もほぼ不可能である。技術維持、人の維持をどうやってやるかが課題である。2020 年予定の発送電分離が行われるとリスクの高い原子力を引き続きやっていくことは困難。CCS を入れても合意を埋めることは難しい。パリ協定には罰則がないので守らなければならないとするインセンティブがない。したがって、自由化の中で原子力を維持することは難しいだろう。特に米国では既設炉でさえも経済性が厳しい。原子力が必要だと皆さんが思わないと難しい。これが一番大きい。温暖化がキーだが、温暖化自体に懐疑的な人もいる。

質問：理想を掲げて進むのもよいが、一方でダメになった時にどうするか、あるがままに検討してみるのもよいのではないか。そうすると少しましになるのではないか。

以上