

エネルギー座談会
日時：2017年1月19日
場所：原子力安全推進協会 会議室

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

2017年1月19日
一般財団法人 エネルギー総合工学研究所
都筑 和泰

自己紹介

- ▶ 1994年 東京大学院 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

本日の内容

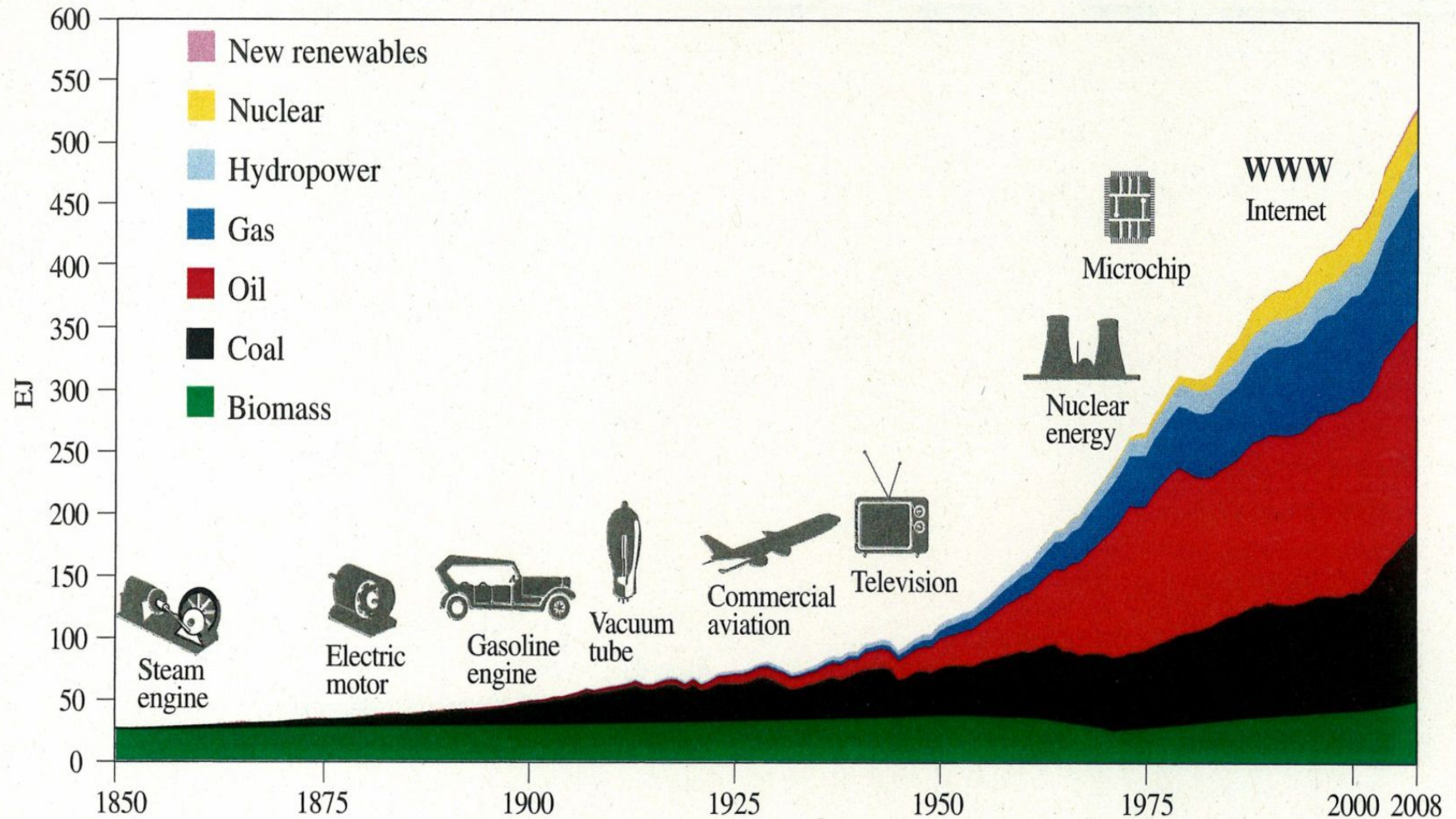
- ▶ エネルギーの現在の使われ方と今後の見通し
- ▶ 2050年を見据えたエネルギー需給見通しと、
低炭素技術
- ▶ 原子力の役割

1. エネルギーの使われ方 と今後の見通し

エネルギーはなぜ必要か、何に使われているのか？



世界のエネルギー供給の推移



出典：Global Energy Assessment (2012) IIASA

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

エネルギー需要とは

- 人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い。
 - ① 寒さをしのぐ : たき火 → エアコン、
 - ② 調理をする : かまど → コンロ
 - ③ 作業をする : 人力、水車、牛馬 → トラクター、トラック、重機
 - ④ 楽に移動する : 馬車、人力車 → 自動車、電車、飛行機
 - ⑤ 便利に楽しく暮らす : 音楽隊、舞踊 → 家電、映画、各種娯楽施設

燃料使用量増加



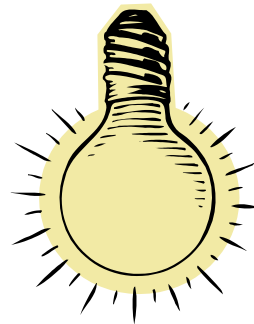
一次エネルギー

出力増加



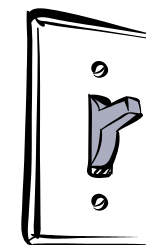
転換

電灯使用



最終需要

電源投入



サービス需要

暗い…



H23エネ総研シンポジウム、季報エネルギー総合工学

エネルギーの用途をリアルに想像するための定義の導入

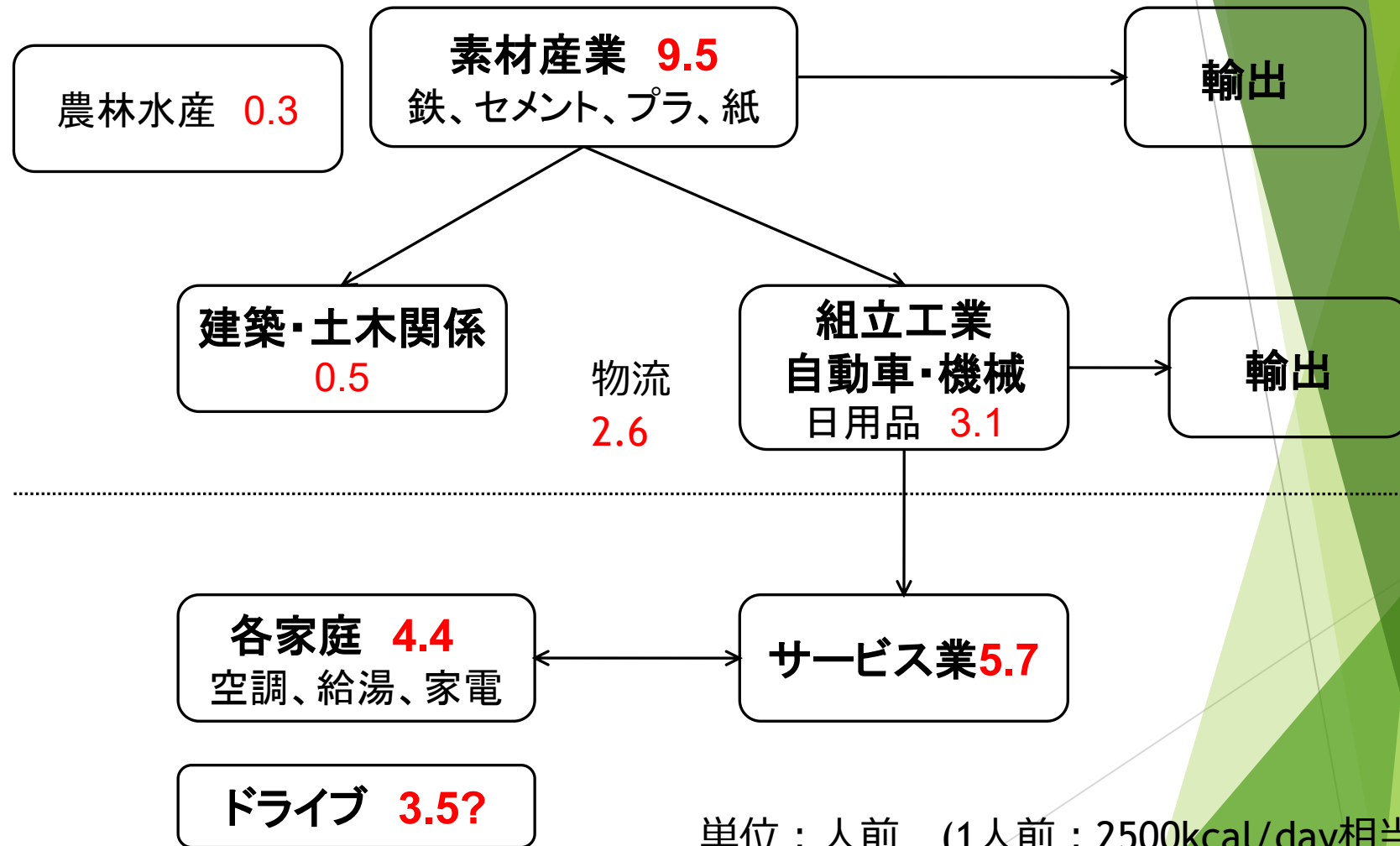
- 一人が摂取するエネルギー : 2500kcal/日・人程度
 - 平均消費率は、121W、 ~100kcal/時・人
 - 年間では
 - SI単位 : 3.8GJ/人
 - 石油換算 : 90kg/人

※これ以降この値を「一人前」と定義

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。30人~40人分のエネルギーを消費している計算になる。

多くの奴隷（一部はちょっとした魔法使い）にかしずかれている状況に相当。

国内では 主にモノの生産・流通・販売に大部分のエネルギーを消費



単位：人前 (1人前：2500kcal/day相当量)

2010年エネルギー統計より整理

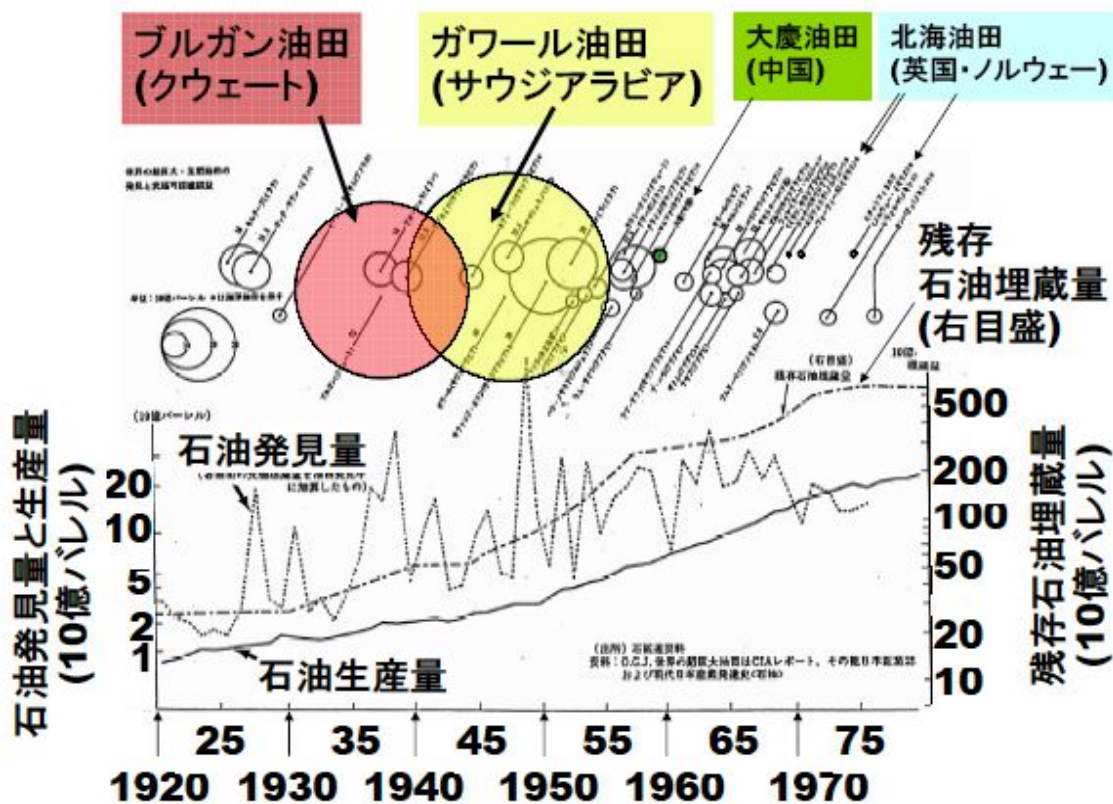
エネルギー消費急増の原因は 大量生産・消費と人口増

- ✓ 個人の消費が急増 → 一人あたり約30人前
 - ✓ モノの生産と流通: 素材、加工、輸送、販売 → 約22人前
 - ✓ 快適な暮らし: 冷暖房、家電、自動車 → 約8人前
- ✓ 人口が急増
 - ✓ 食料生産の増加: 窒素肥料、農薬、機械化農業
 - ✓ 乳児死亡率の低下: 保健衛生、暖衣飽食、抗生物質

この状態の好悪はさておき、この状態を維持するには先立つもの（=エネルギー）が必要

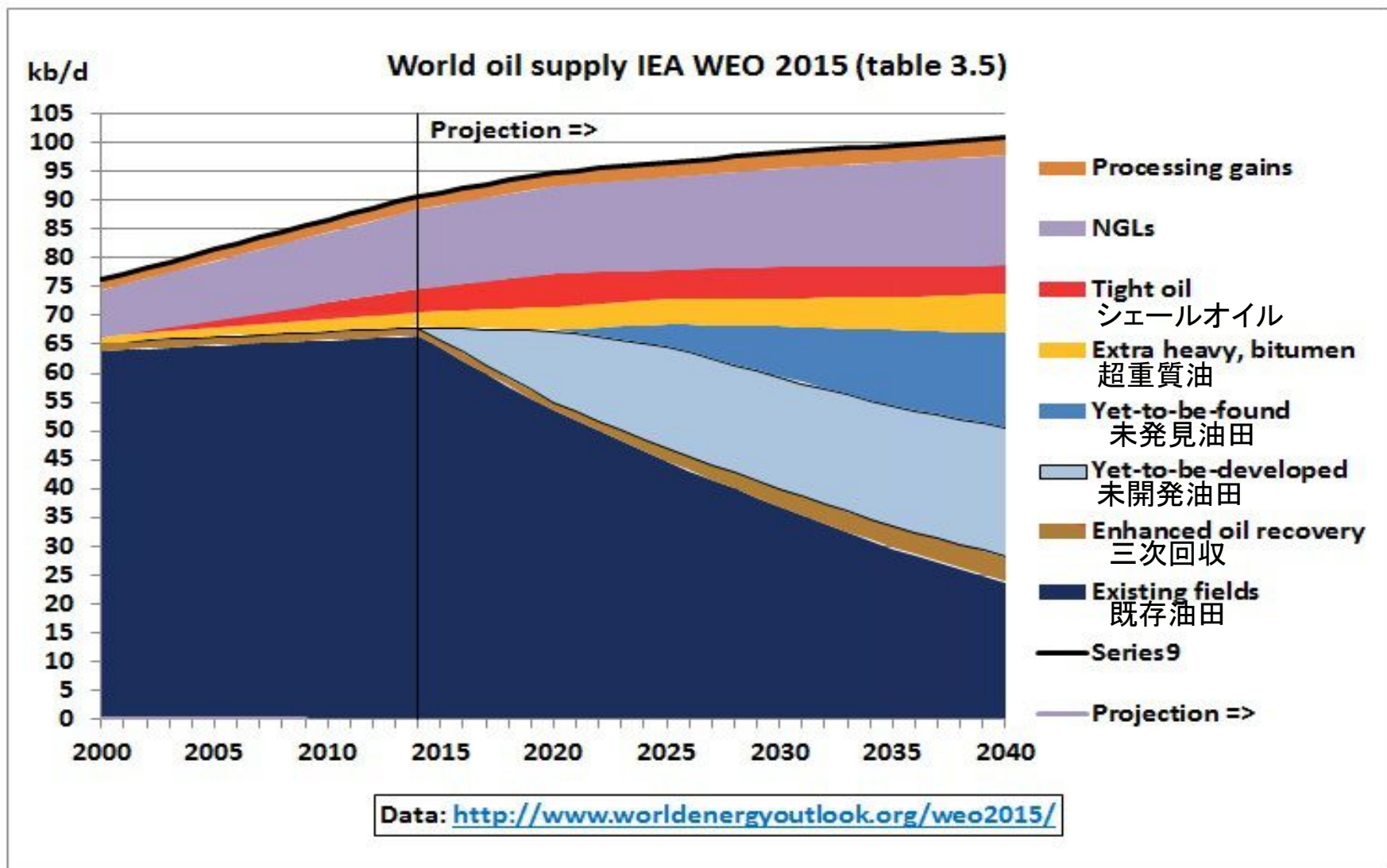
大量消費文明を支えたのは化石燃料であるが・・・

- オイルピーク論は10年ほど前盛んに議論されていたが最近は下火。
- シェールガス革命もあり、化石燃料枯渇論は沈滞気味。
- モデル計算では、今世紀中は化石燃料中心の燃料供給が可能



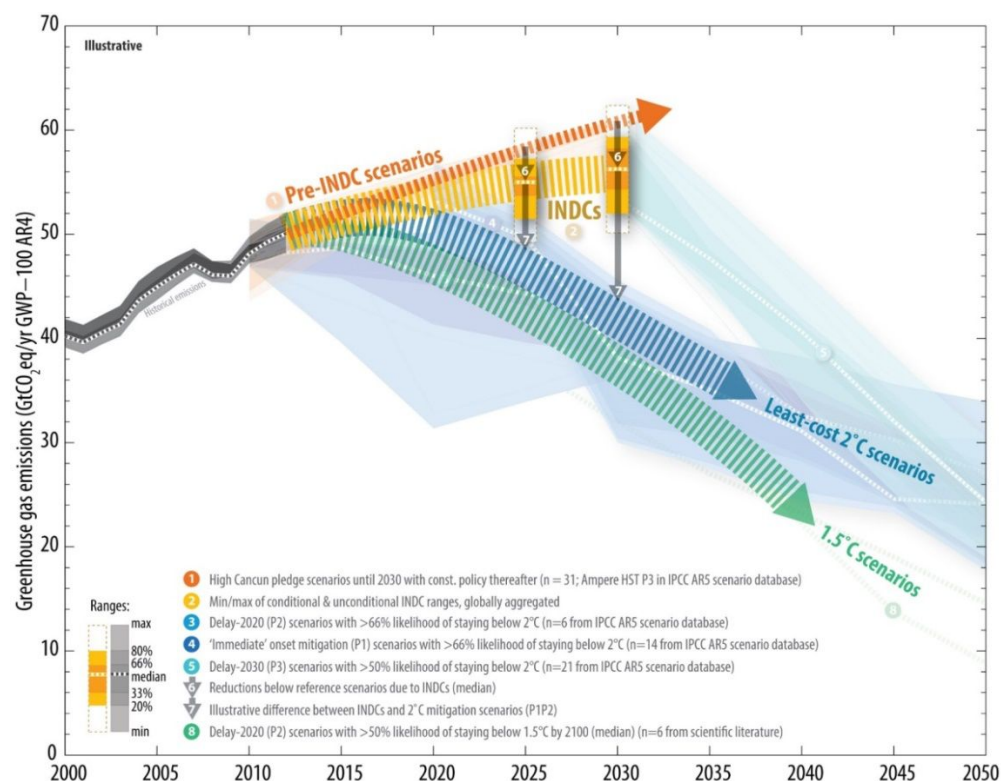
(出典) 竹内哲夫、(独)原子力安全基盤機構
「科学技術と社会安全の関係を考える市民講座」第2回 (2006年11月) 講演資料抜粋

非在来資源への期待は思ったほど大きくない。
石油楽観論は在来型資源の楽観論



気候変動緩和に向けた取り組みが世界の合意事項に。

- パリ協定が2016年11月4日に発効
- 各国の宣言=INDCでは全く不足。追加的な取り組みが必須。
- 世界がこれに向けて着実に取り組むのであれば、化石燃料はむしろあまる。
- 安い燃料を利用せずに低炭素化に邁進することは現実問題として可能か？



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°C目標を実現するには何をすべきか



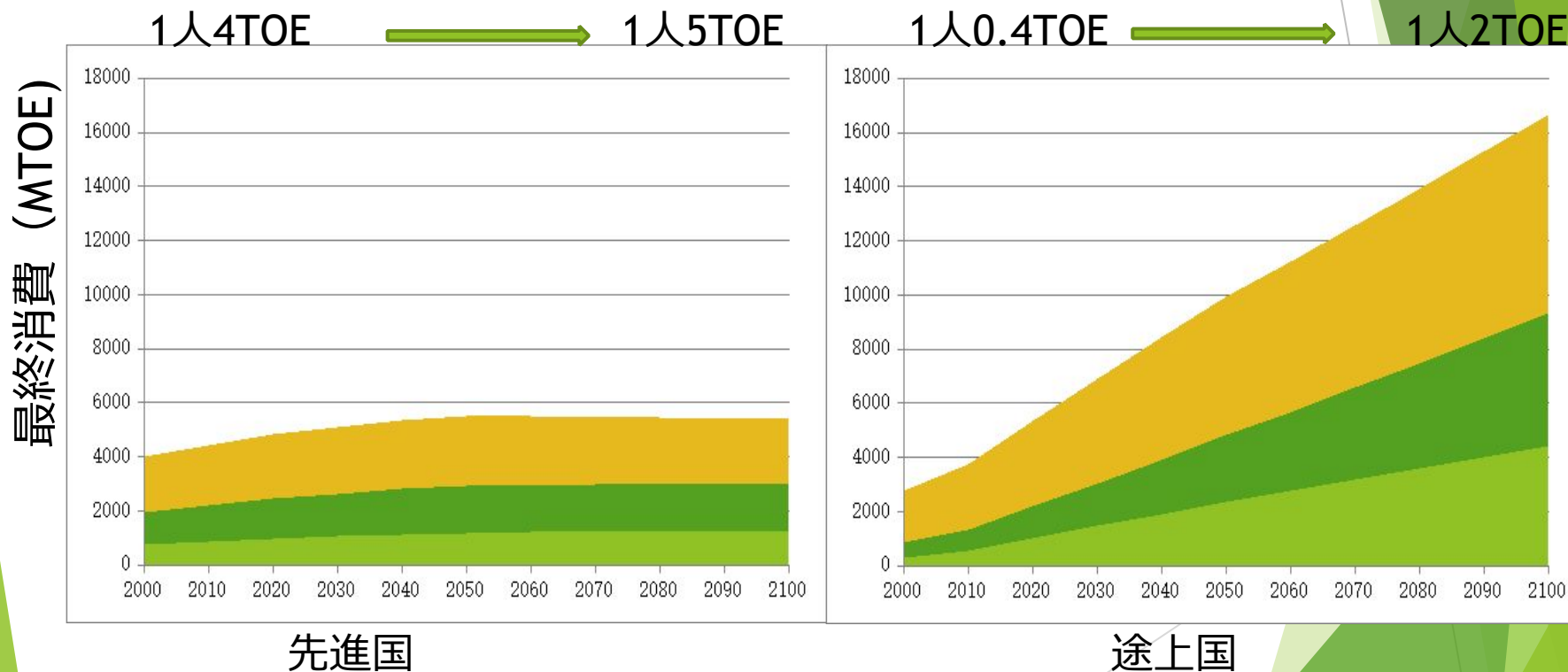
途上国が先進国のような暮らしを指向すればエネルギー消費は確実に増える

◆ 最終需要は途上国を中心に着実に増加

人口増加

生活水準の向上

◆ これでも途上国の平均一人当たりエネルギー消費は現在の日本の半分程度(2100年)。



出典) GRAPEの設定値 ~ SRES B2と同程度

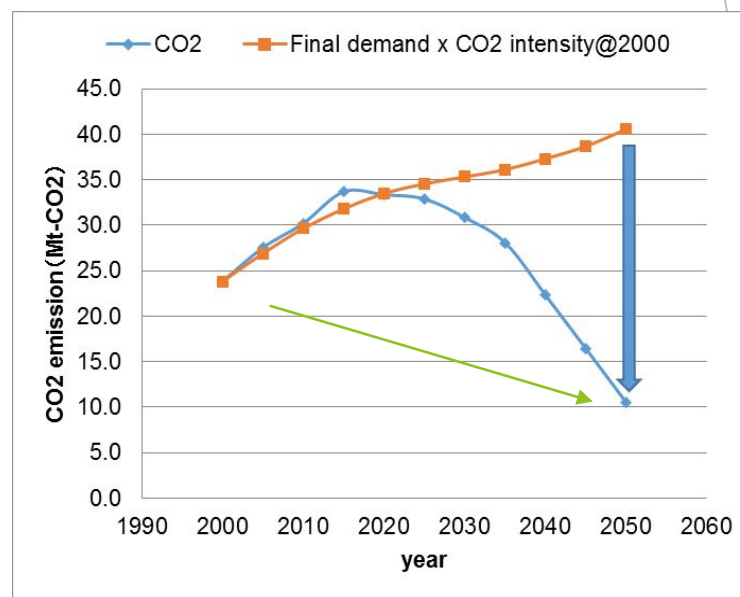
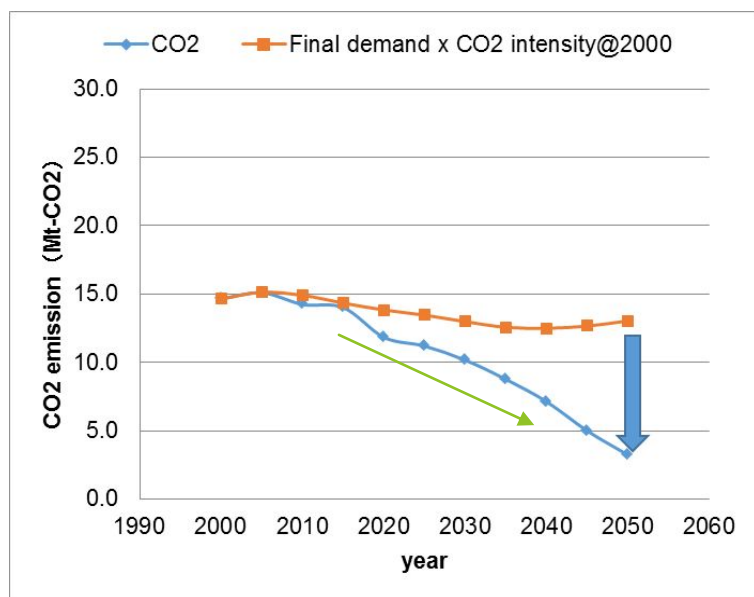


CO₂ 2050年世界半減のイメージ

- ▶ IPCC第五次報告書においては、2°C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世紀末までにはほぼゼロにすることが必要があると指摘されている。
- ▶ GRAPEモデルで2050年世界CO₂排出半減を制約条件として計算すると、
 - ▶ 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、排出量としてはやや減少という程度だが、最終消費に対するCO₂排出率としてはほぼ8割減

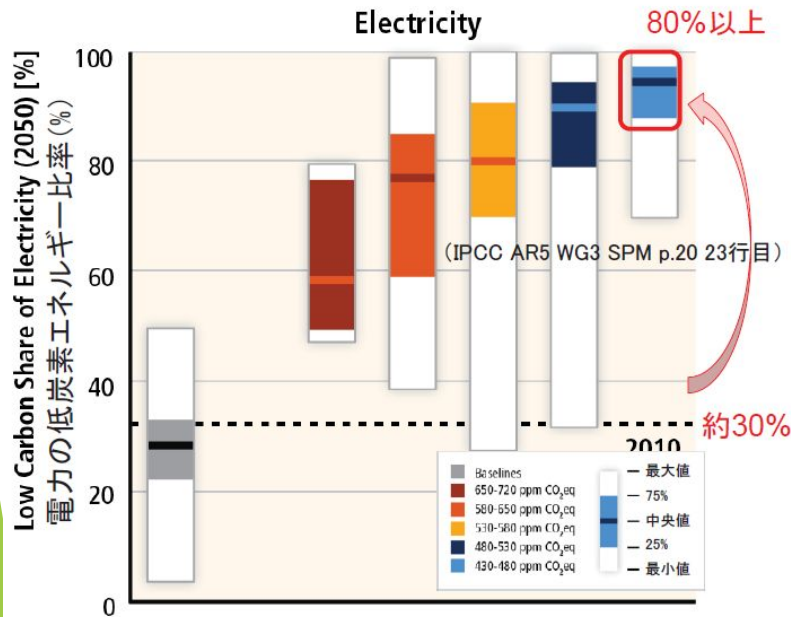


世界全体で、排出原単位約8割減に取り組む必要がある。



電力部門はほぼゼロエミッションへ

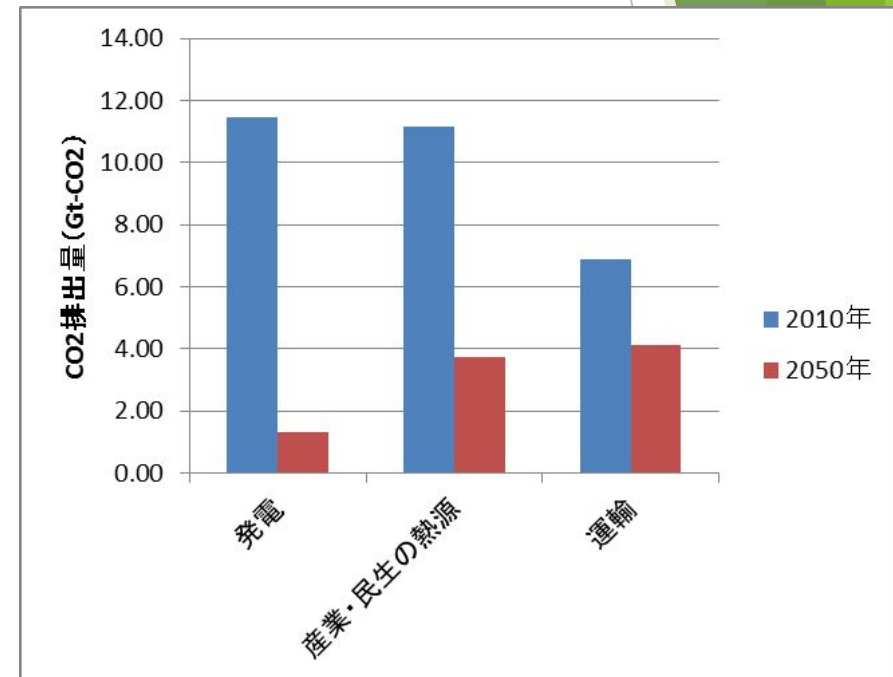
- 電力部門の対策（CCS火力、原子力、太陽光発電、風力発電、バイオマスなど）は他部門と比べ導入しやすいとみなされており、多くの検討において、電力部門の大幅削減を期待。



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



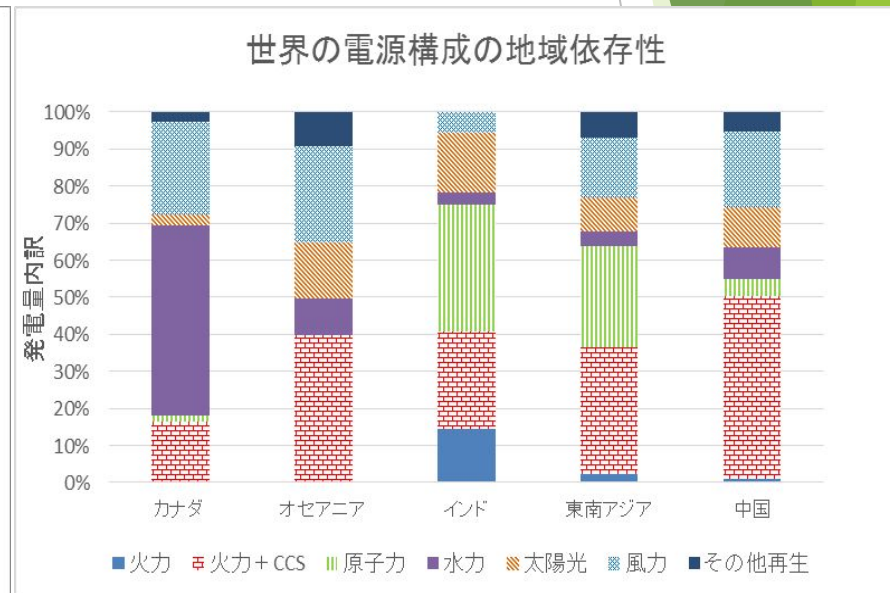
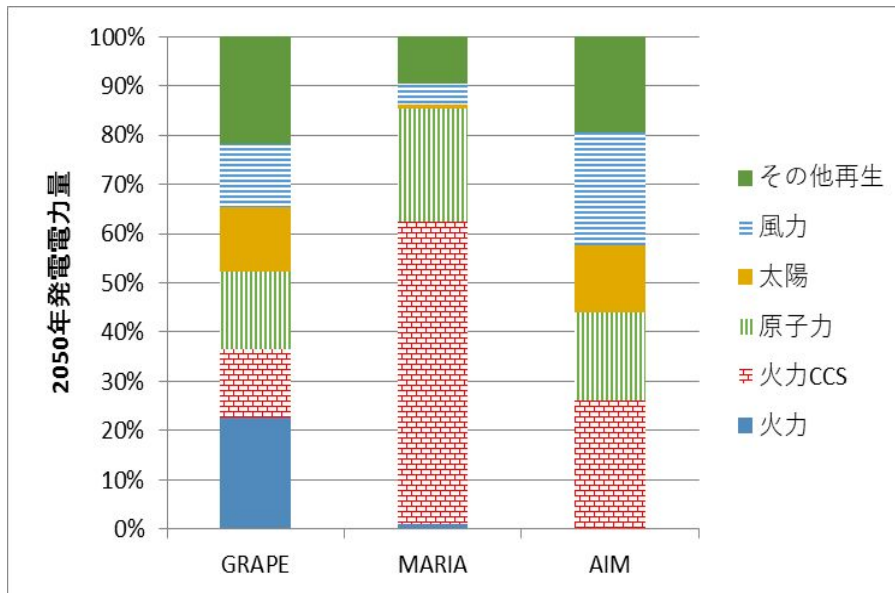
GRAPE計算結果例

ネットゼロエミッション電源構成

- 世界全体としては、**CCS火力**、**原子力**、**再生可能エネルギー**の全てを投入（ただしその内訳は技術想定に大きく依存）
- 地域別にみるとさらに多様（風況、CCSポテンシャル、バイオマスなど）



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が大規模に導入していく必要がある。



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

2050年に向けた原子力や再生可能の導入速度は？

➤ 原子力

- GRAPEの場合今世紀半ばには100万kW級**40基**程度を導入する必要がある。
- 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。しかし社会的には容易ではない。

➤ 再生可能

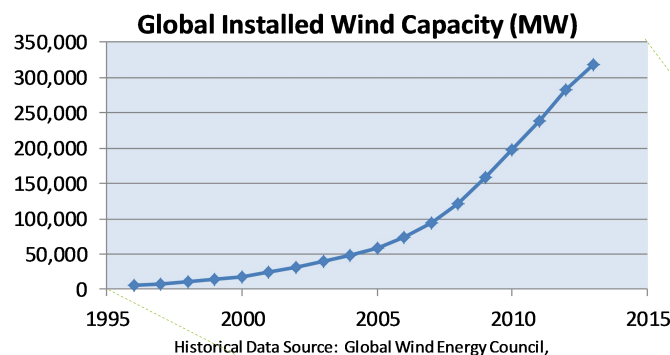
- 風力は**近年の実績の2倍程度**の導入速度
- 2030年までは関係団体のロードマップの上限をやや上回るペース
- そのペースを2050年まで継続

➤ CCS（炭素回収貯留）

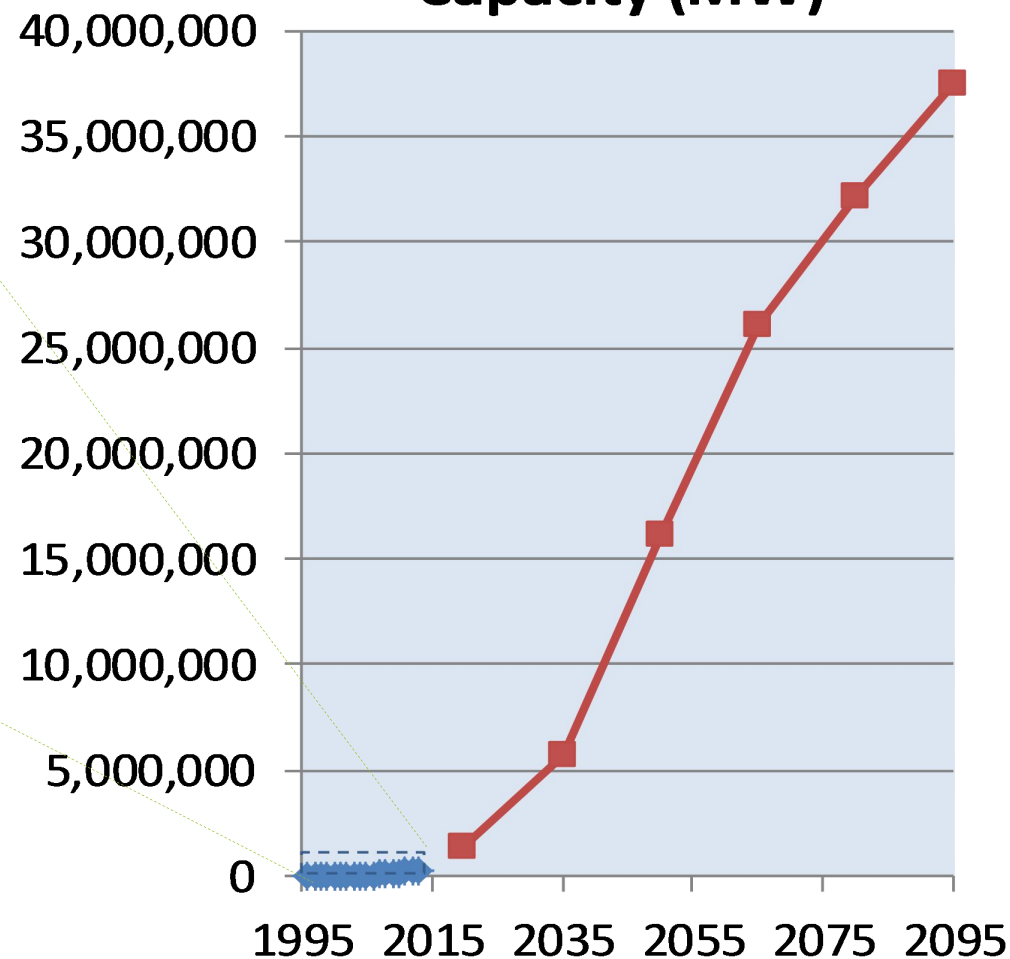
- 2030年以降、**ほぼ全ての**新設火カプラントに**CCS**を設置

Installed Wind Capacity: 450 ppm CO₂-e Limit (No Nuclear and No CCS)

H28エネ総研シンポジウム
基調講演 1 エドモンド氏



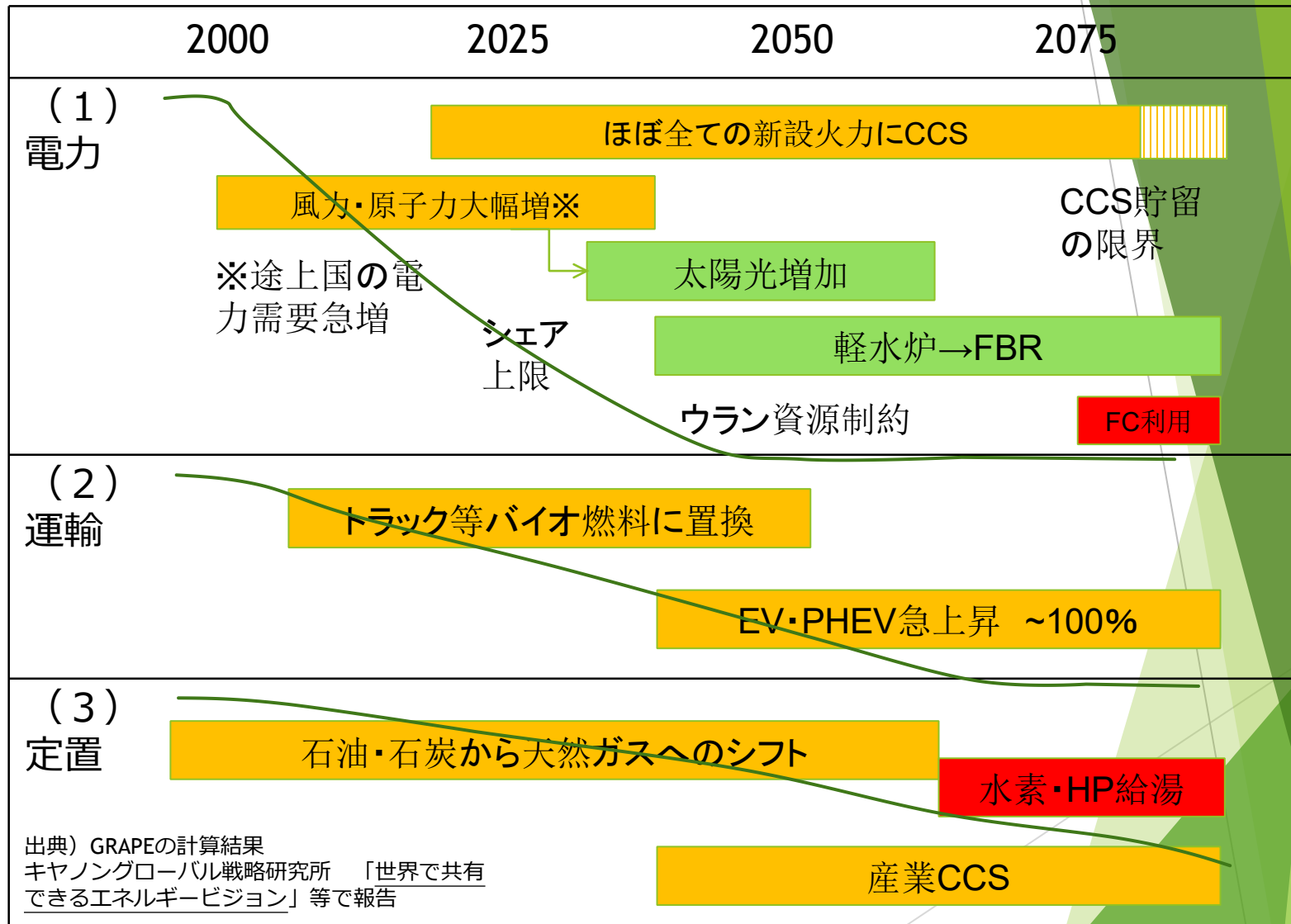
Global Installed Wind Capacity (MW)



Historical Data Source: Global Wind Energy Council,
<http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

Future Scenario Source: Calvin, Katherine, James Edmonds, Ben Bond-Lamberty, Leon Clarke, Page Kyle, Steve Smith, Allison Thomson, Marshall Wise. 2009. 2.6: Limiting Climate Change to 450 ppm CO₂ Equivalent in the 21st Century, Energy Economics, Volume 31, Supplement 2, December 2009, Pages S107-S120 .

電力以外の対策も重要 (GRAPEによる試算例)



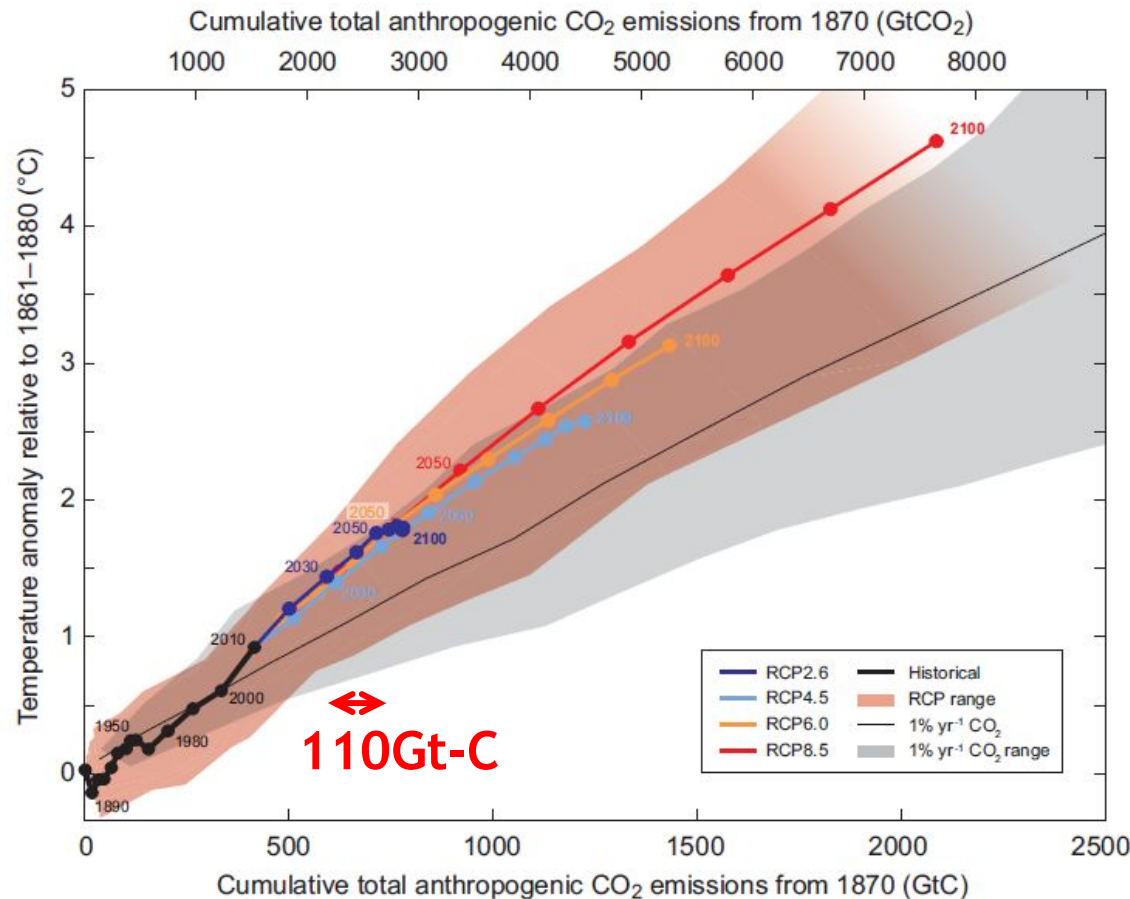
図中の曲線はCO2削減率 (Z650の排出/BAUの排出) のイメージ



2050年は通過点

本質は累積排出量の制限 = ゼロエミッション化

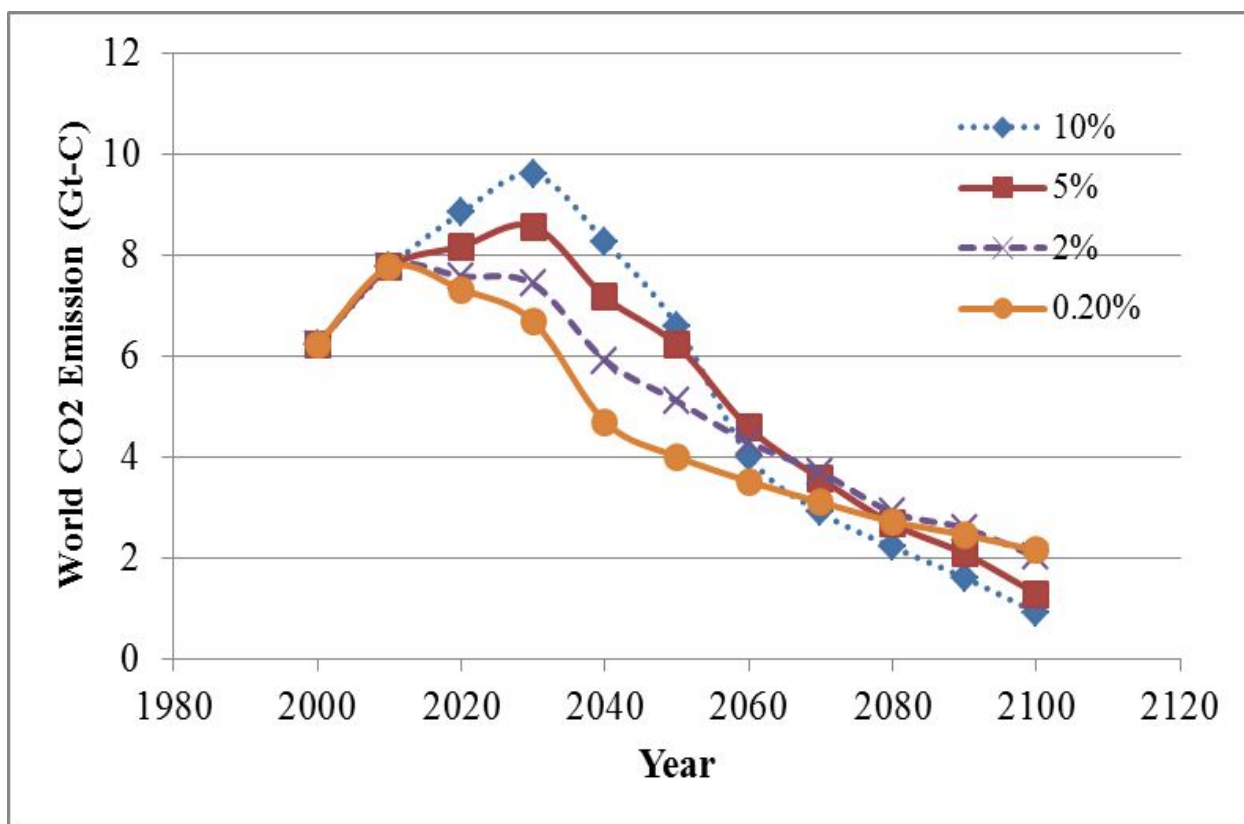
- IPCC第五次報告書で、累積排出量と温度上昇の強い相関が示された。
- 2°Cまで約1000Gt-C



出所) IPCC AR5
WG1 SPM
Figure SPM.10

先憂後楽 or 先送り

- 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る必要がある。



累積排出量を固定して割引率を大きく変更した結果

K. Tsuzuki, 22nd World Energy Congress (Daegu 2013) #887, "Middle and long term energy supply and demand structure with considering risks on climate change, technology development, and economy"

長期的なゼロエミッション技術

- 電力：火力発電を極小化の上、CCSを装備
 - 原子力：社会受容性、核不拡散、ウラン資源
 - 再生可能：コスト、出力変動
 - CCS：コスト、社会受容性、貯留ポテンシャル
- 家庭：都市ガス、灯油は最低限
 - 空調はヒートポンプ
 - 給湯はヒートポンプまたはコジェネ・燃料電池
 - 太陽熱や太陽電池を最大限利用
- 運輸：ガソリン・軽油は最低限
 - 乗用車は電気自動車または燃料電池車
 - トラック、バス、航空機、船舶はバイオ燃料か水素
 - 船舶については原子力船も視野。
- 産業熱源
 - 可搬性が高く、高エネルギー密度の熱媒（水素など）の普及
 - 水素還元製鉄

電力供給のポイント（GRAPEの試算例）

➤ 原子力

- ウラン資源問題のため、2050年頃から高速増殖炉に移行
- Pu増殖の促進のため、軽水炉使用済み燃料のPuを再処理にて蓄積し、初装荷燃料を確保
- 高速増殖炉の再処理工場は適時適切に建設（核不拡散の問題もあり）。

➤ 再生可能エネルギー

- 太陽・風力のポテンシャルは世界の総電力需要よりも十分に大きいと想定
- 蓄電設備により太陽光、風力ともそれぞれ総電力の30%
- 再生可能エネルギーをさらに導入する場合は、一旦水素化し、燃料電池にて電力供給。

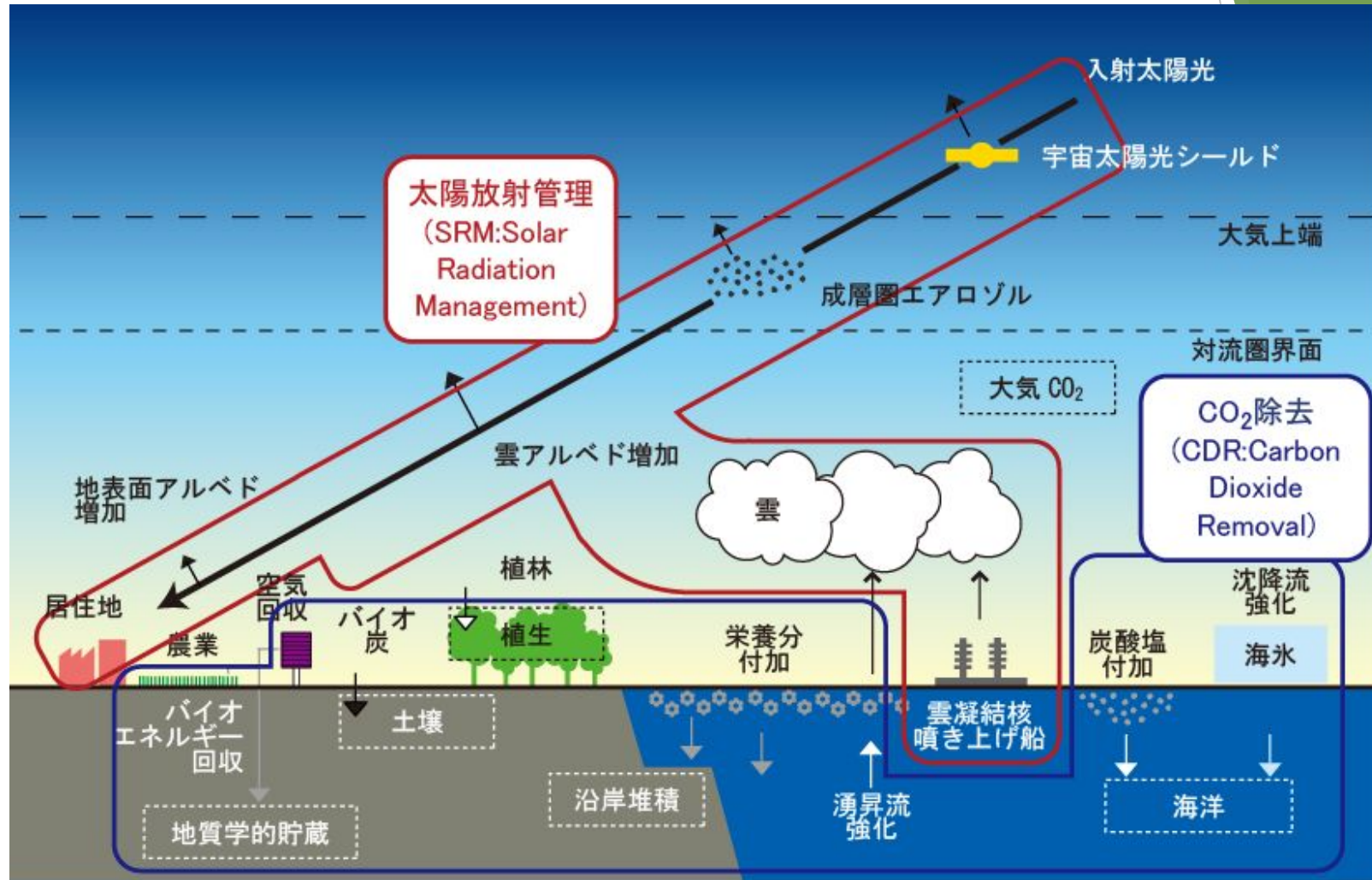
➤ CCS（炭素回収貯留）

- 世界の貯留ポテンシャルは1500Gt-CO₂と想定
- 標準ケースでは、おおむね今世紀中に使い切る計算。CCSに頼るのであればより大きな貯留地を確保する必要がある。

低炭素技術まとめ

- 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、非現実的ともいえる努力が必要。
- 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や再生可能に更なる導入努力が必要となる。
- 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。逆にいうと、今世紀末にゼロにするほうが本質であり、2050年の排出レベルはあまり重要ではない。

ジオエンジニアリングもオプションとして検討の要あり



出典:杉山(2011)を改変

© Lenton and Vaughan 2009 "The radiative forcing potential of different climate geoengineering options", Atmos. Chem. Phys., 9, pp. 5539-5561

3. 原子力の役割 (国内を想定した試算)

2030年、2050年のエネルギー需給構造を具体的に想定し、原子力発電の多寡の影響を試算



国内エネルギー需給の特徴

- ▶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。
→安くて豊富なエネルギーの利用が前提。
- ▶すでに多くの**原子力発電所を所有（2017年1月時点で43基）**。
その多くは、60年までの寿命延長が認められれば2030年まで利用可能。



原子力の必要性は相対的に高い

以下、2030年、2050年を想定し、原子力の必要性を定量的に検討

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。
- ▶ それに対し、**原子力**は寿命延長や出力増強が許されれば**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、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。

2030年における原子力減の影響

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。

▶ 自給率

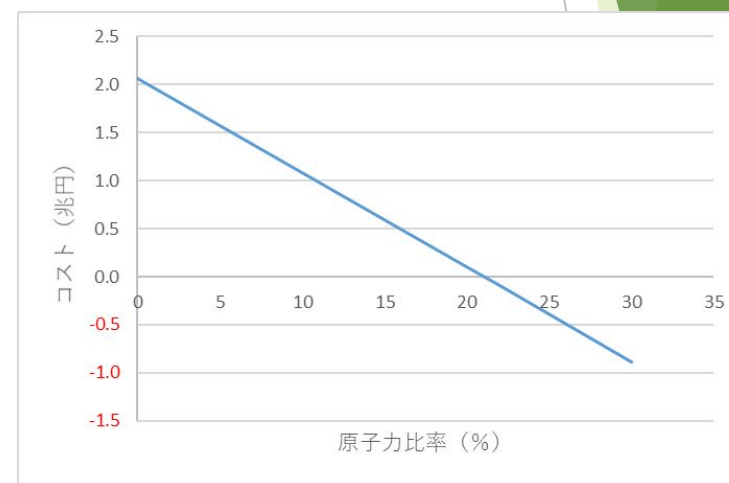
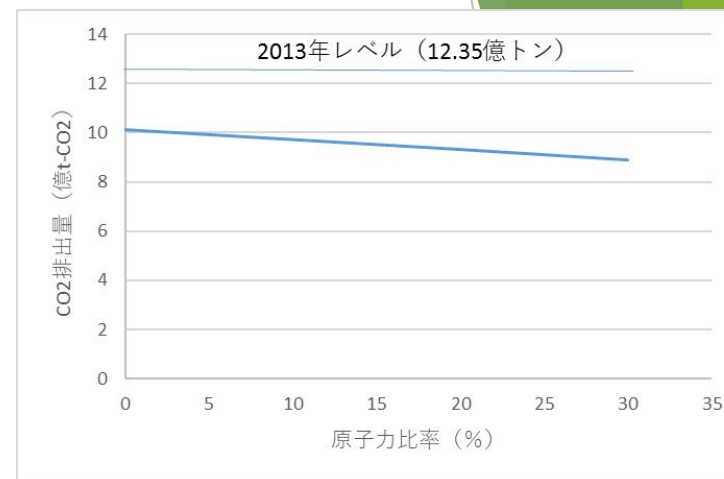
- ▶ 24.3%から約14%に減少

▶ CO₂排出量（上図）

- ▶ 約0.8億トンの増加
- ▶ 2013年比で約18%減相当（目標は25%減）
- ▶ すでに、再生可能や省エネの想定は上限であり、これ以上の増加は容易ではない。

▶ 経済性（下図）

- ▶ 約2.1兆円のコスト負担増。
 - ▶ 人口1人当たり約18,000円
 - ▶ kWhあたり約2円
- ▶ 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。

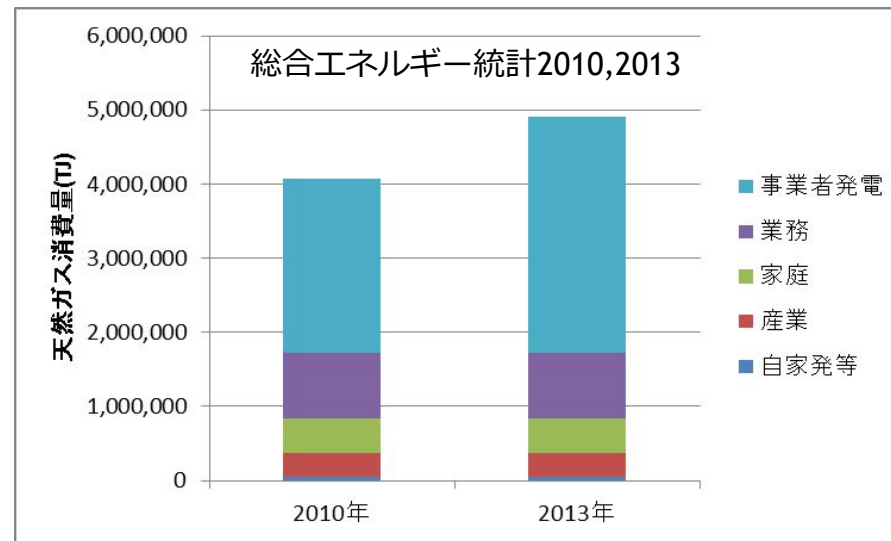


2015長期需給見通しのデータ（概数）に基づきIAEにて作成

安全性の確保を前提とした原子力の継続利用にはメリットがある。

2030年まとめ

- ▶ 原子力を再起動・寿命延長を行うと、脱原発の場合と比較して下記のメリットがある。
 - ▶ 数兆円の燃料費削減（国富流出の削減）
 - ▶ 二酸化炭素約15%削減
 - ▶ 天然ガス消費量約30%減（最大の調達先を上回る量；下図）
 - ▶ 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）



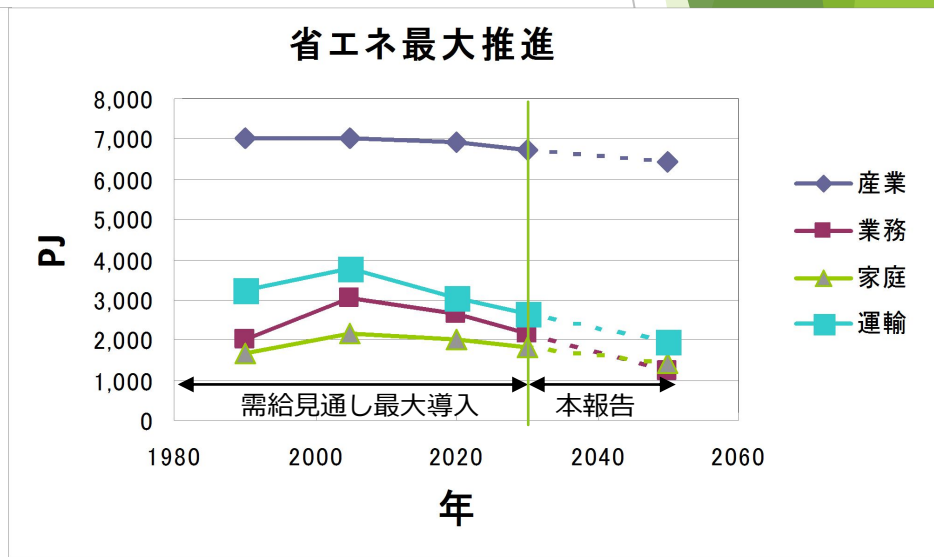
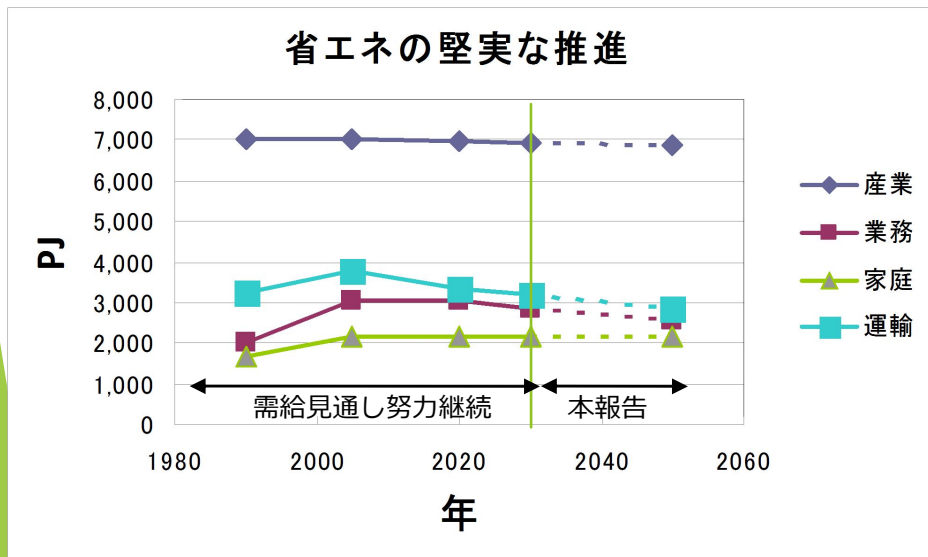
- ▶ 原子力の導入にあたっての技術的な困難は小さい。経済的には明らかにメリットがある。

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、
 - ▶ 省エネルギーが画期的に進展するケースも想定
 - ▶ 再生可能で電力を半分程度供給する状況も想定
 - ▶ 原子力は脱原子力から30%程度までを想定
 - ▶ 原子力のメリットは、基本的に2030年と同等。ただし、
 - ▶ 化石燃料の調達リスクは、さらに不透明
 - ▶ 原子力を継続的に利用するには新設が必要であり、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。
 - ▶ 二酸化炭素排出制約の動向も不透明
- 二酸化炭素排出半減を制約条件にすると、
事項以下にみるように状況は一変する

最終需要設定

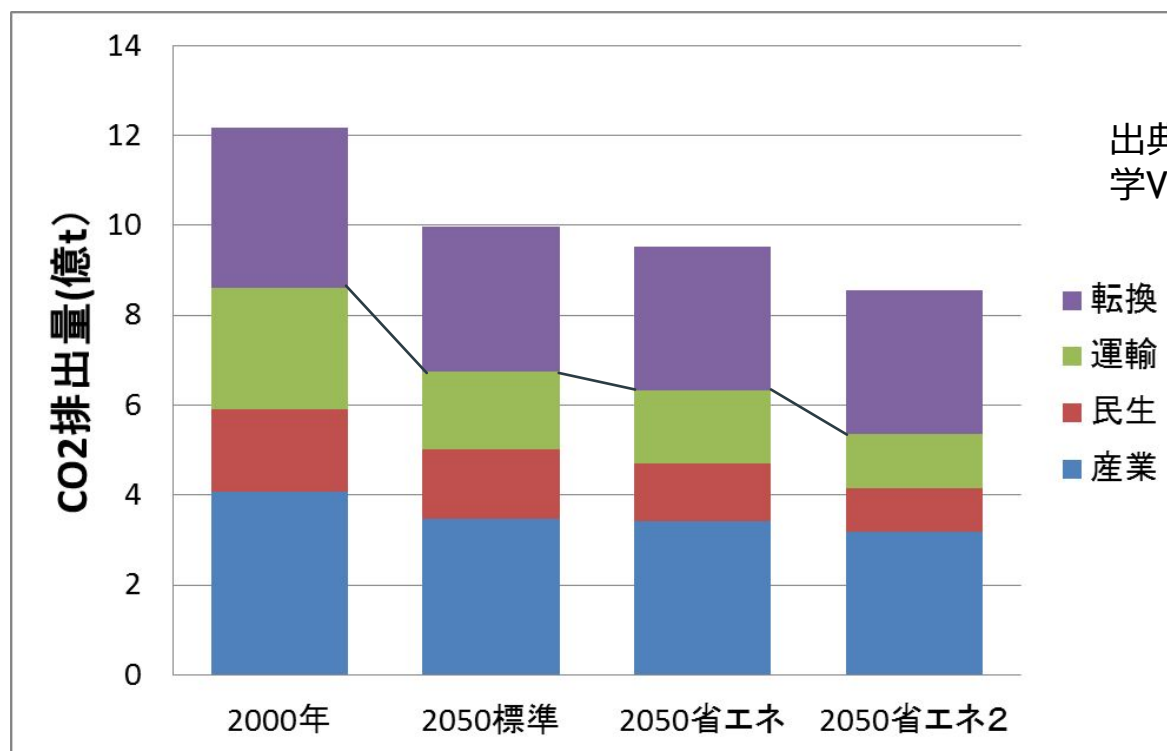
省エネの度合	～2030年（需給見通し）	～2050年（外挿）
堅実な推進（左図）	努力継続	努力継続を外挿
中程度の推進	努力継続	最大導入の2030年
最大推進（右図）	最大導入	最大導入外挿



※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



(1) 2050年 部門別排出概観



便宜上2050年電力排出量は平均的な値に固定

電力部門の排出は大きいですが、それ以外の部門からの排出も大きい。原子力や再生エネルギー(あるいはCCS)によって、電力の排出をほぼゼロにできても、極端な省エネシナリオ(省エネ2)以外では他部門からの排出だけで1990年比半減の目標(5.6億トン)を上回る。

電力の対策(原子力等)と並行して、他部門の対策も重要

(2) 半減に向けたシナリオ 設定とその比較

電力部門以外の代替シナリオとして、下記の2ケースを試算
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

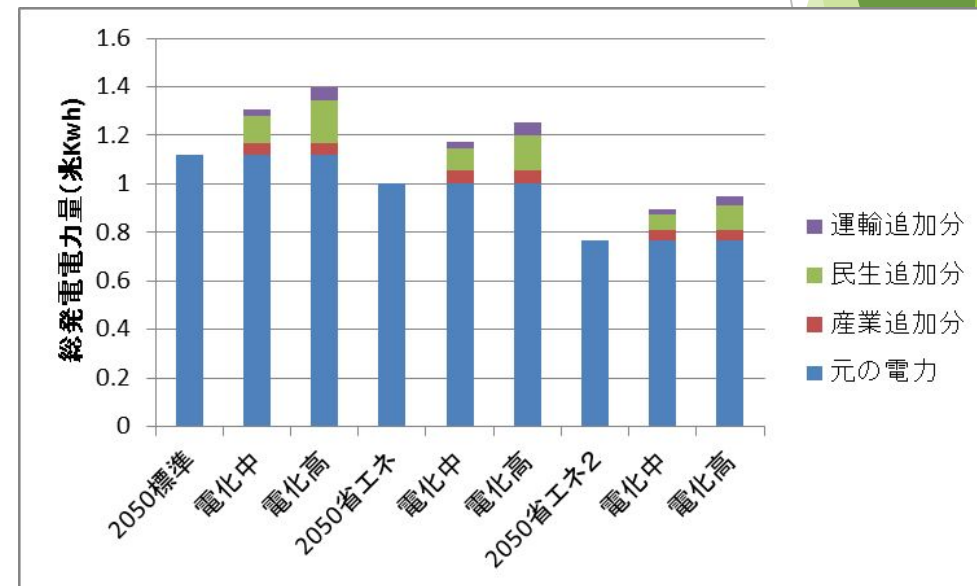
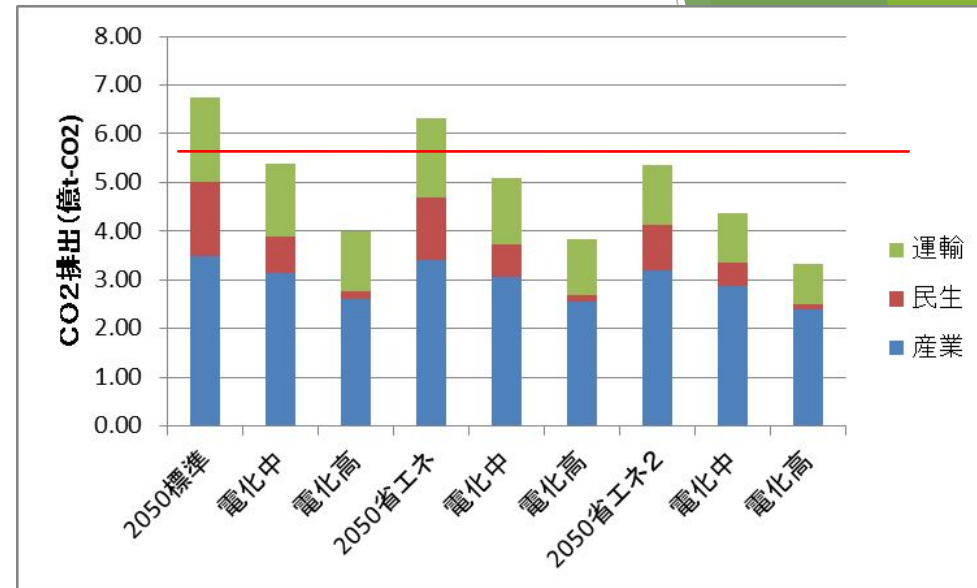
高程度の対策

- 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

省エネについては、前回同様の3シナリオ(堅実な推進、中程度の推進、最大推進)

(3) 電力部門以外からのCO₂排出

電化によるCO₂排出削減効果は大きい。
ただし、電力消費量は増える

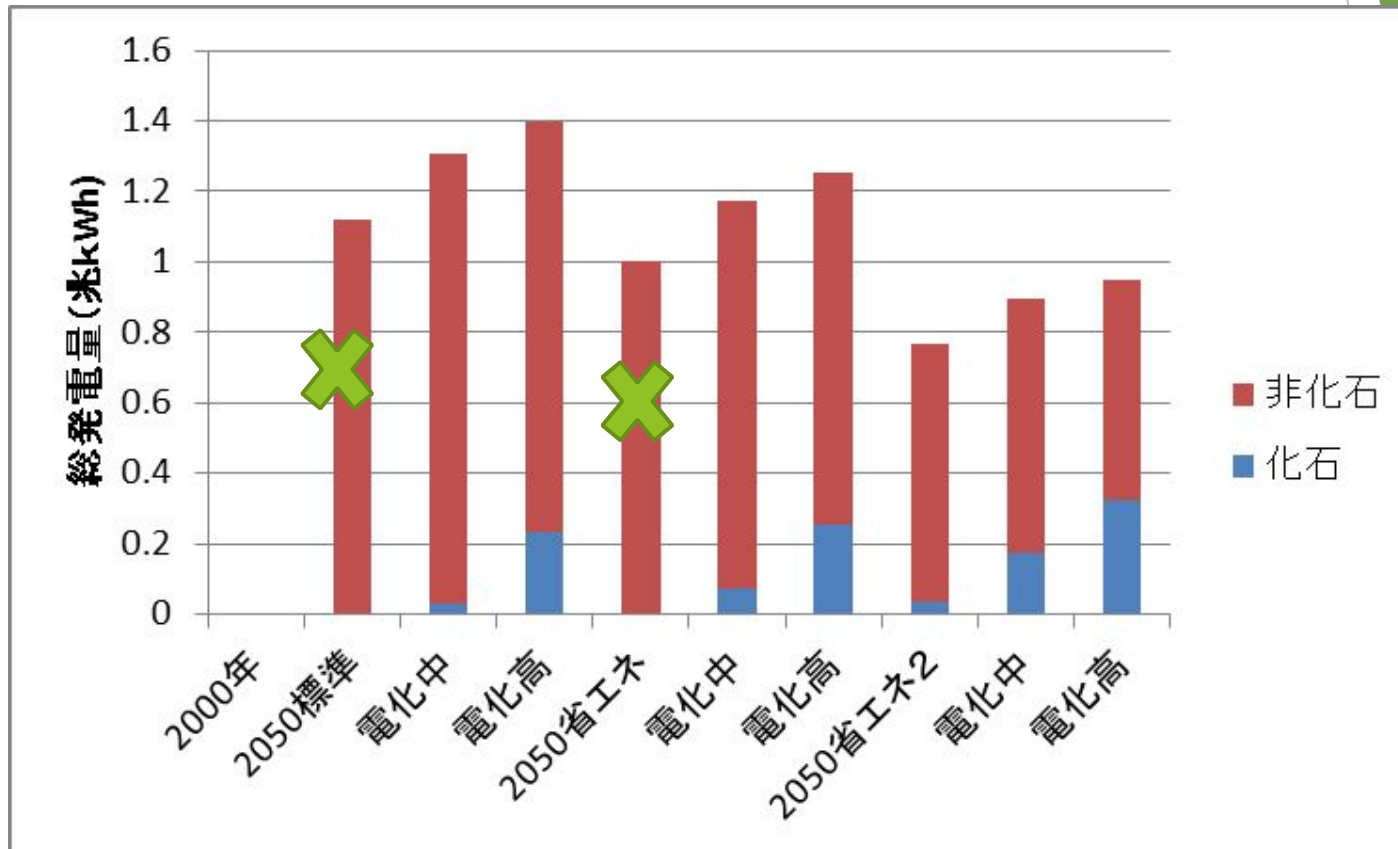


出典) 季報エネルギー総合工学Vol38No2(2015.7)



(4) 電力部門の対応

半減目標—他部門からの排出量＝電力からの許容排出量
許容排出量/排出原単位＝許容電力量



出典) 季報エネルギー総合工
学Vol38No2(2015.7) 37

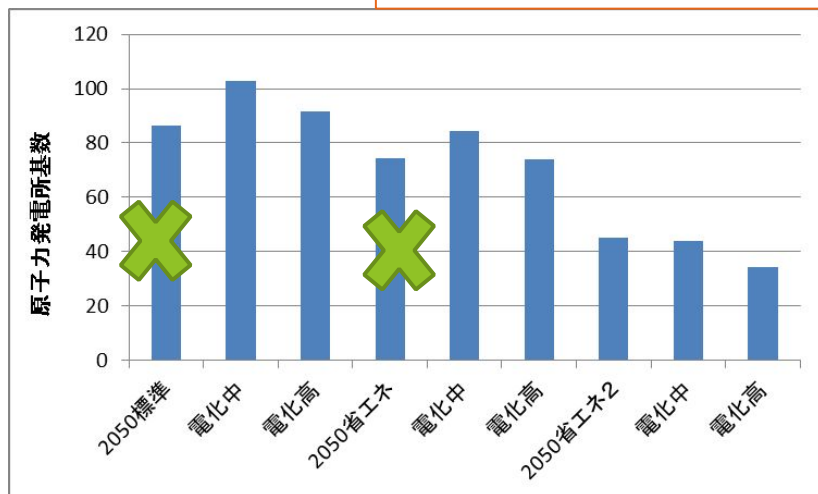
(5) 原子力・再生可能の導入規模

原子力を中心に対策を行うと、大ケースでは135万kW級の原子炉が100基程度も必要。

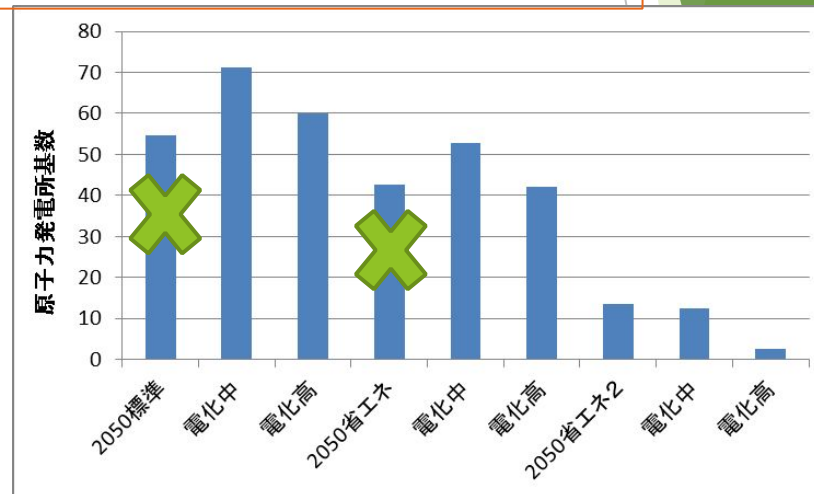
再生可能を大幅に導入した場合でも、省エネがあまり進まないシナリオではかなりの数の原子力が必要。

再生可能大、省エネ最大、電化高のケースでかろうじて脱原発とCO₂半減を両立(ただし高温ガス炉は約60MW級が約100基必要)

CO₂半減実現のために必要な原子力発電所基数



再生可能低



再生可能高

計算条件

- ・原子力の設備利用率: 80%
- ・一基あたりの出力135万kW
- ・水力: 1000億kWh固定
- ・再生可能: 2000、5000億kWh



国内原子力の必要性まとめ

<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**。

まとめ 1

- 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。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。

まとめ2

- 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

ご静聴ありがとうございました。

