

日本のエネルギーの ベストミックスについて

東京大学 大学院工学系研究科

原子力国際専攻 教授

藤井 康正

1. エネルギー選択の評価指標

- ・供給安定性

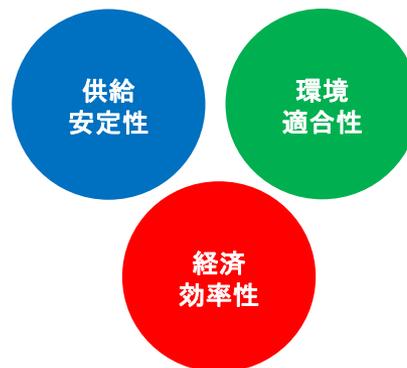
エネルギー安全保障、供給障害に対するレジリエンス

- ・経済効率性

エネルギーコスト、経済全般への影響

- ・環境適合性

CO₂等の温室効果ガスやその他の有害物質の排出量



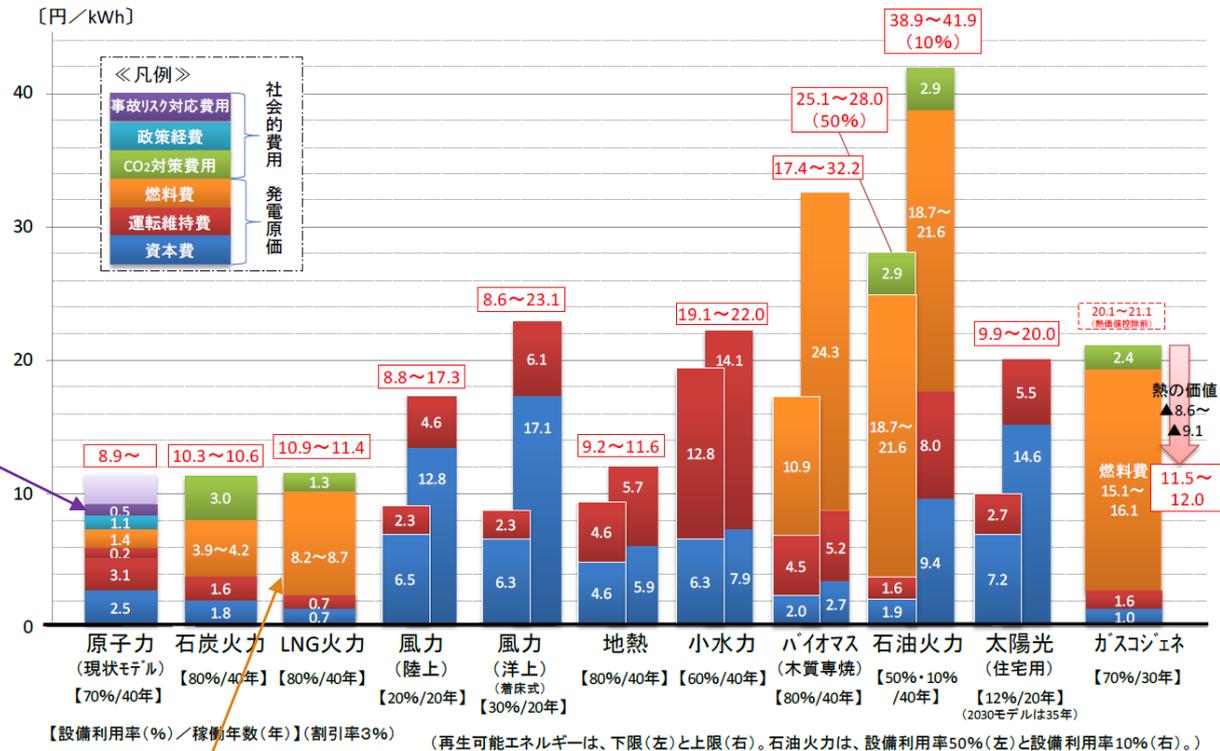
3Eのトリレンマ

2. エネルギー選択の課題

- 2. 1 発電原価
- 2. 2 CO₂排出原単位
- 2. 3 発電電力量構成
- 2. 4 燃料備蓄など
- 2. 5 再生可能エネルギーの課題
- 2. 6 原子力発電について
- 2. 7 資源埋蔵量など

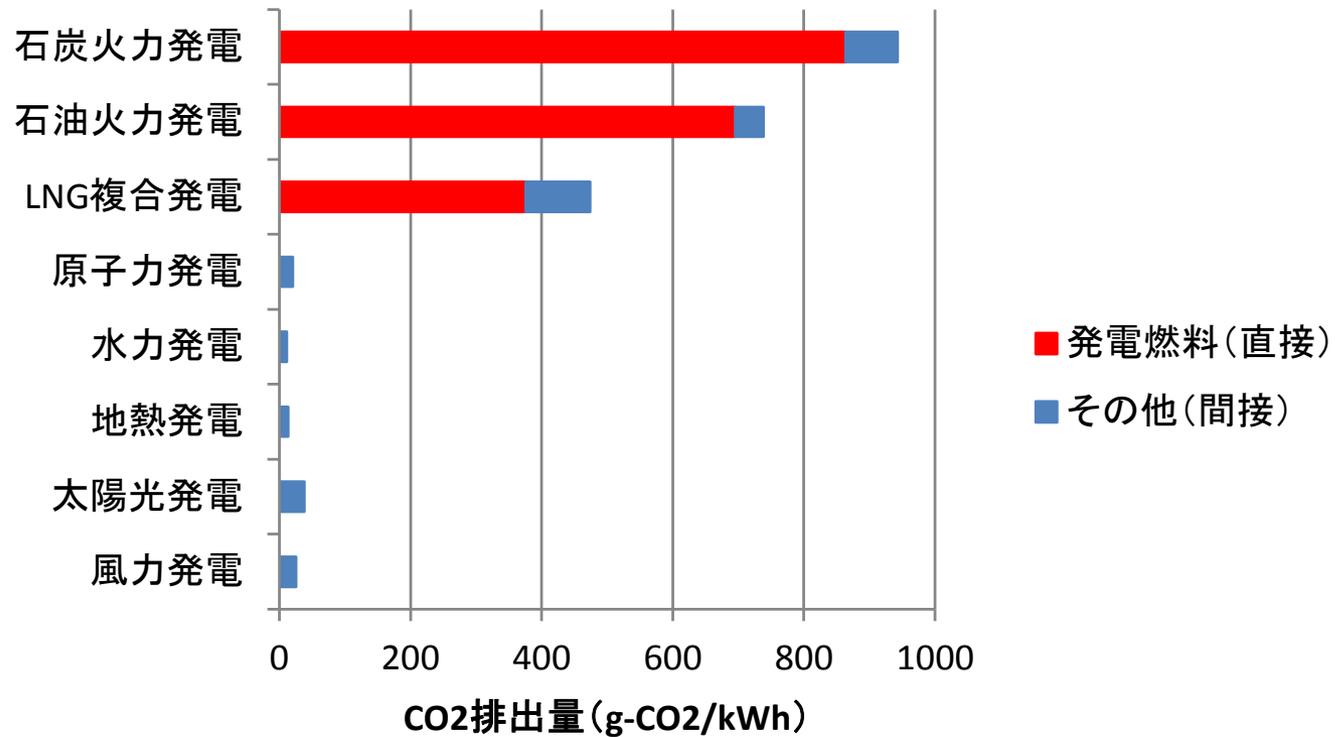
2.1 発電原価

事故損害額
10兆円で
約1円/kWh
増加

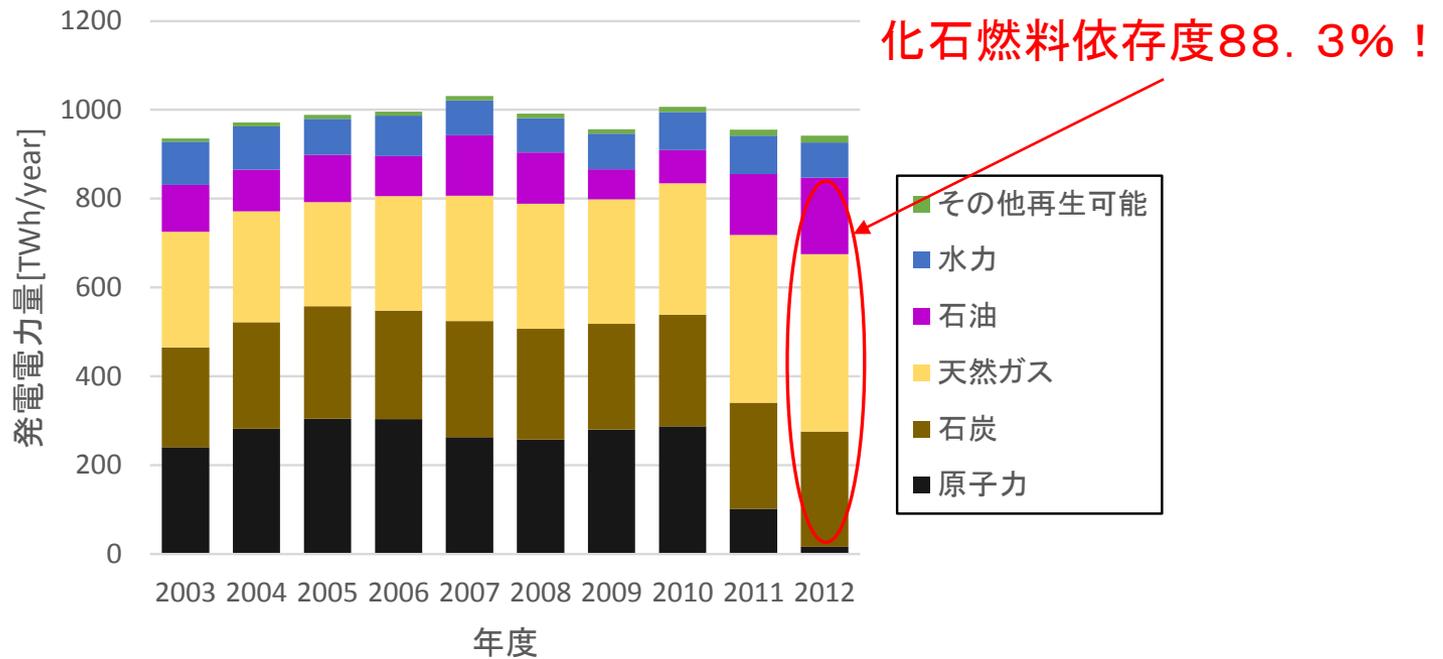


LNG火力発電の燃料費10円/kWhに上昇
(燃料単価15\$/MMBTU、120円/\$、発電効率60%)

2. 2 CO₂排出原単位



2.3 発電電力量構成



300TWh分の燃料費
LNG火力発電: 3兆円
原子力発電: 0.5兆円

2.4 燃料備蓄など

● 石油備蓄

- 約半年分の備蓄(国家備蓄109日分、民間備蓄82日分)
- 備蓄費用 約1,000円/キロリットル/年
 - 緊急時対応の国家備蓄放出の経験はなし

● 天然ガス貯蔵

- LNG国内貯蔵設備の容量は年間消費量の10分の1程度(約1ヶ月分)
 - 貯蔵量はその約半分で2週間程度 ←これで十分なのか？
- 単位エネルギー当たりのLNG貯蔵コストは石油の約10倍？
 - マイナス162°Cで貯蔵
 - ボイルオフガスの発生(1ヶ月に5%程度？)

● 石炭貯蔵

- 石炭火力発電で平均的には1～2ヶ月分程度

2.5 再生可能エネルギーの課題

- 日本の森林バイオマスのポテンシャル
 - 日本における一次エネルギー供給量の5%に相当(25Mtoe程度)
 - 年間1億m³の木材生産が可能と仮定
 - 日本の森林の蓄積量40億m³を40年周期で利用
 - 林産物生産量は2000万m³弱
- 日本の廃棄物
 - 産業廃棄物 4億トン／年
 - 鉄屑, 石灰石, 鋳滓等の不燃物が大部分
 - 2,000万トン程度が廃材等の平均発熱量4,000kcal/kgの可燃物
 - 一般廃棄物 5,000万トン／年
 - ほとんど可燃物 発熱量2,000kcal/kg
 - 両廃棄物で日本の一次エネルギー供給量の約3%に相当

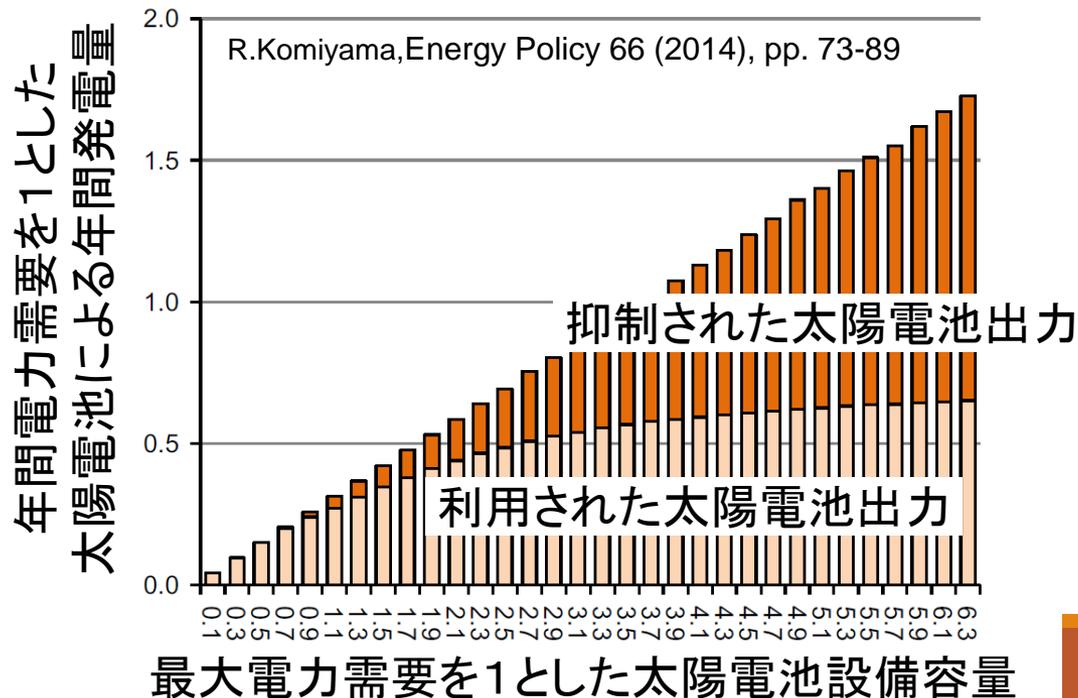
2.5 再生可能エネルギーの課題

- 地熱資源: 1,000,000 Gtoe? (Gtoe: 石油換算10億トン)
 - 発電資源: 500~1,000 Gtoe (高温が必要)
 - 既開発地熱: 0.01 Gtoe/年 程度
 - 年間発熱量 (地殻熱流 $0.07\text{W}/\text{m}^2$ 地球全体で約30Gtoe/年)
 - 大規模な火山噴火のエネルギーは
 - 石油換算で0.01Gtoeのオーダー (日本の1週間分のエネルギー程度)
 - 溶岩等の熱エネルギーも含めると0.1Gtoeのオーダー
 - 日本国内には発電資源として
 - 現在は約0.5GW、可能性として20GW程度

2.5 再生可能エネルギーの課題

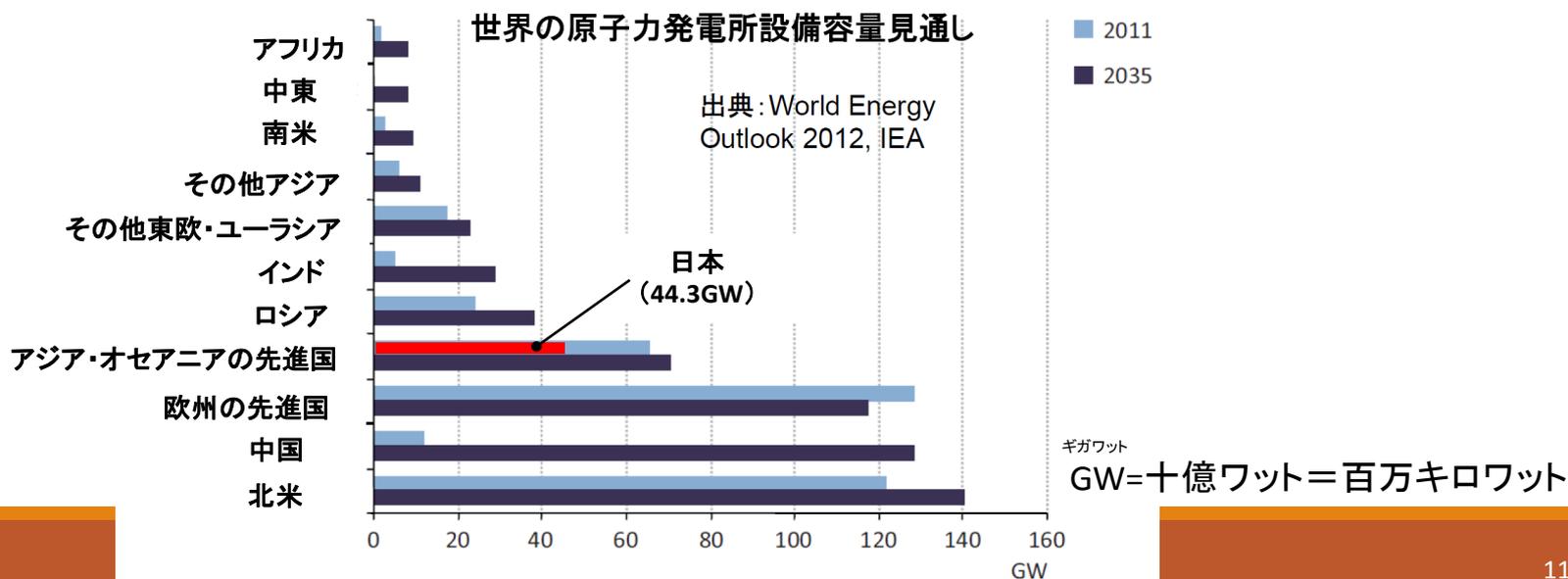
● 太陽光発電

- 国土の2%程度に設置すれば量的には日本の全電力量を賄えるが...
 - 1m²当たり年間100~150kWhの発電となり、40円/kWhとすると4,000~6,000円/年の売り上げ
 - 稲作なら米500gが得られて、300円程度
- 大規模導入すると余剰電力(出力抑制)の割合が増える。



2.6 原子力発電について

- エネルギー基本計画(2014年4月)
 - 原発依存度については、省エネ・再エネの導入や火力発電所の効率化などにより、可能な限り低減させる。
- 世界的には増加傾向
 - 2010年から2035年に50%増(中国、インドが顕著)
 - 日本メーカー等に対する世界の期待は大きい



2.6 原子力発電について

- 放射性廃棄物の最終処分

- トイレのないマンションか？

- 将来世代への「つけ」

- 大気中CO₂などの温室効果ガスの影響(1000年程度)

- 化石燃料という貯金の取り崩し(化石燃料の新たな生成には1億年)

- 2つの神話

- 「安全神話」

- 「危険神話」

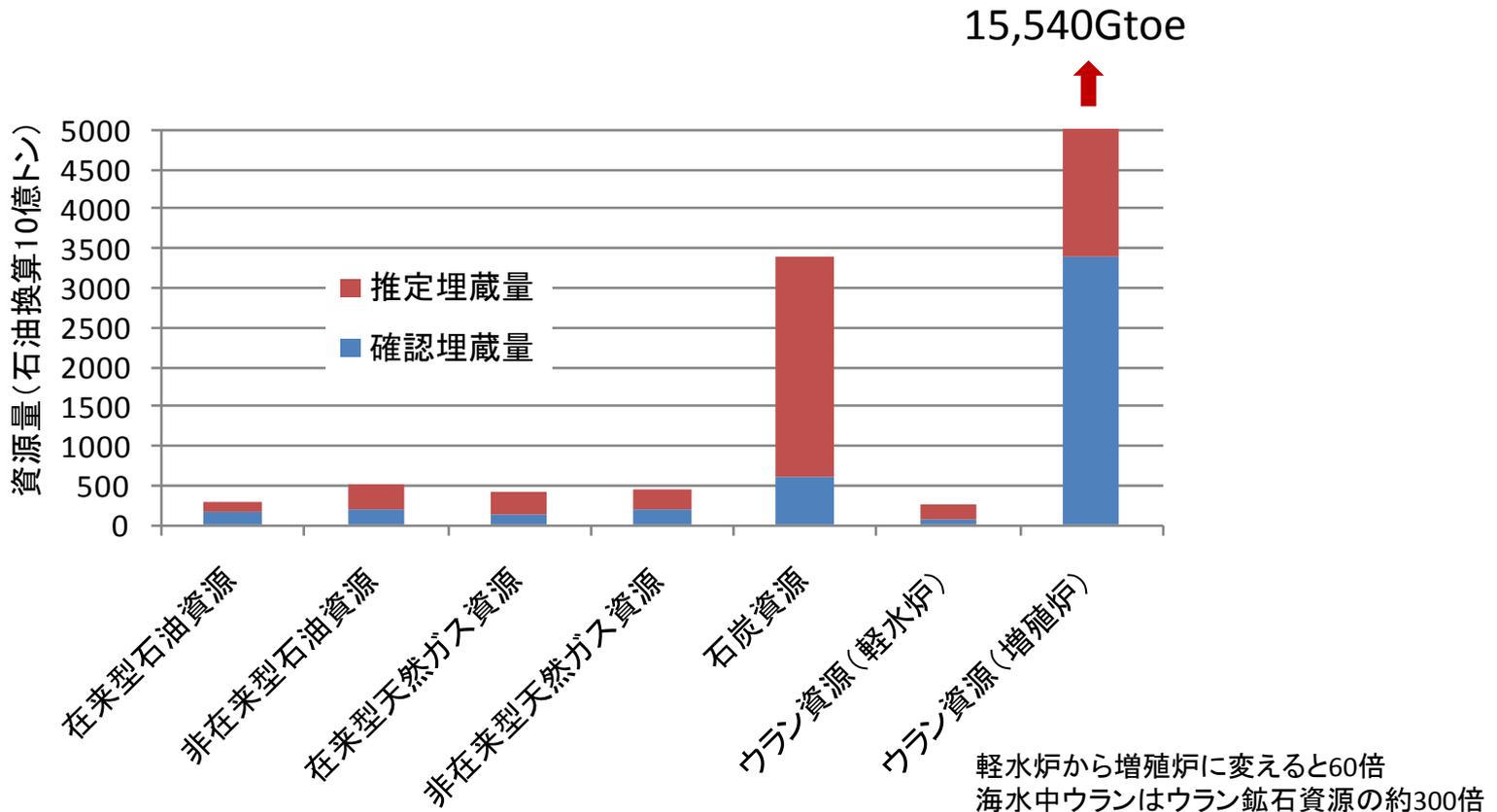
- 低線量・低線量率被曝の健康影響に関する生物学等の最先端科学による評価

- 放射線以外のDNA二重鎖切断の要因

- 細胞内の代謝による活性酸素は200mSv/day相当の影響を及ぼしているとの報告も(自然放射線の10万倍程度)

Maurice Tubiana et al., "The Linear No-Threshold Relationship Is Inconsistent with Radiation Biologic and Experimental Data", Radiology: Volume 251: Number 1—April 2009 (原文では200mGy/day)

2.7 資源埋蔵量など



Source: Nebojša Nakićenović et al., *Global Energy Perspective* p.52

3. エネルギーシステムの評価

3. 1 再生可能エネルギー大量導入時の最適電源構成

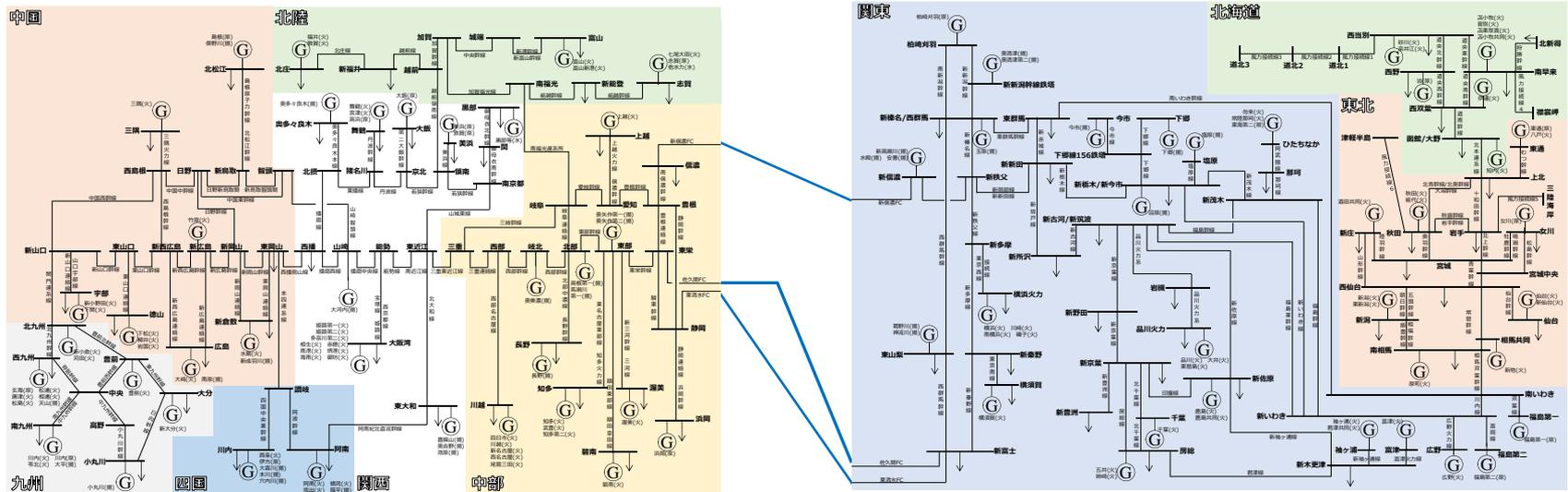
3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

3. 3 長期的な世界のエネルギー需給

3. 1 再生可能エネルギー大量導入時の最適電源構成

●概要

全国を140地点程度の地理的解像度と年間10分間隔の時間的解像度を以て、電力需給モデルを線形計画問題として定式化し、太陽光発電と風力発電を大量導入した場合の電源構成や送電網のあり方を解析する。



西日本(九州、四国、中国、関西、北陸、中部)

東日本(関東、東北、北海道)

3.1 再生可能エネルギー大量導入時の最適電源構成

●エネルギー・環境会議で想定された再エネ導入量を基準とする4シナリオ

	2020年	2030年	2030年	2030年
設備容量(万kW)	シナリオ① (エネ環20%)	シナリオ② (エネ環25%)	シナリオ③ (エネ環30%)	シナリオ④ (エネ環35%)
太陽光	3,609	5,340	6,328	6,856
戸建住宅	2,408	4,000	4,000	4,528
メガソーラー	1,201	1,340	2,328	2,328
風力	1,218	1,760	3,490	4,755
陸上風力	1,168	1,473	2,904	3,952
洋上風力	50	287	586	803
水力(除く揚水)	2,319	2,378	2,378	2,578
一般水力	1,130	1,178	1,178	1,178
中小水力	1,178	1,200	1,200	1,400
地熱	122	240	312	388
バイオマス等	420	552	552	600
海洋エネ	-	50	100	150
合計	7,676	10,320	13,160	15,327

2012年AMeDASデータを用いて出力推計
(=外生的に発電量を与える)

年平均で53%利用可能と想定

常に80%利用可能と想定
常に67%利用可能と想定
常に41%利用可能と想定

その他諸前提等

電力需要: 2012年のデータを使用

原子力設備容量: 40年廃炉ルール、新設無しルール

火力設備容量: 現状値。ガス複合発電のみ各発電所で20GWまで(既設含)増設可

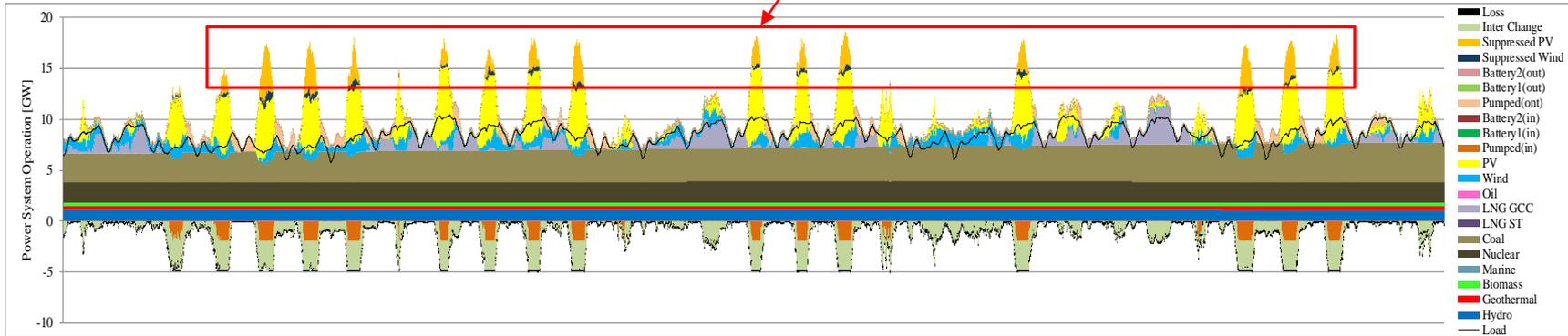
揚水容量: 現状値

蓄電池: 全て新設(各地点10GW、80GWhまで)

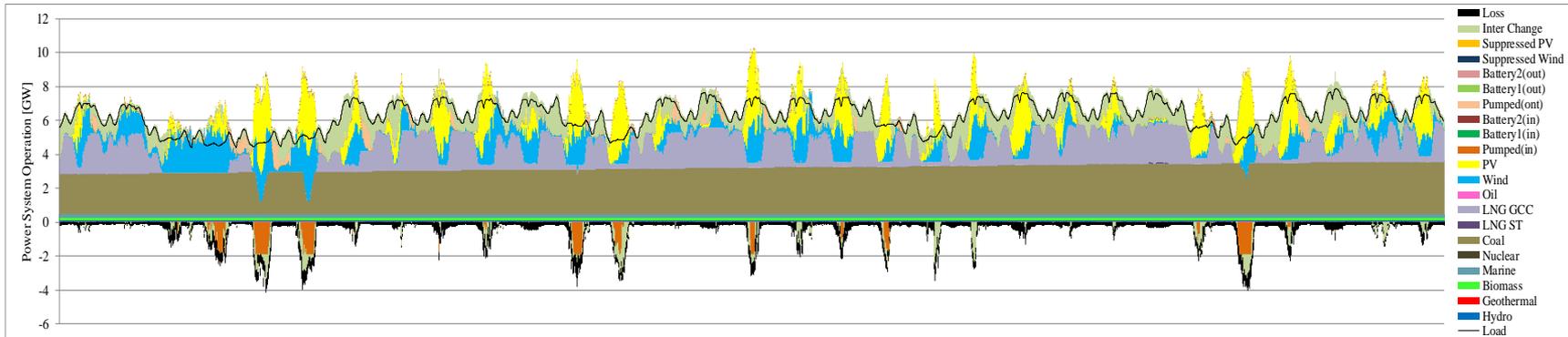
試算結果(シナリオ 3) 西日本 5月 (九州、中国、四国)

利用されない余剰電力

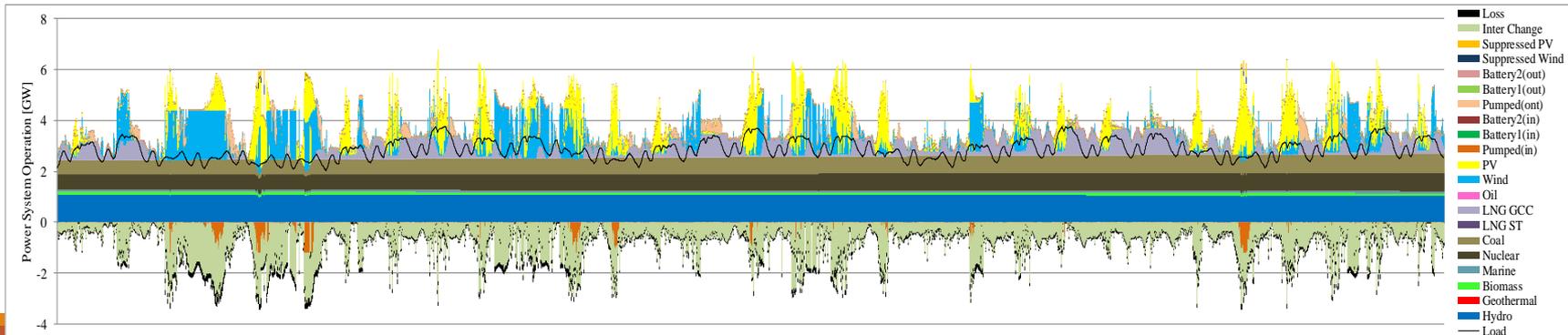
九州



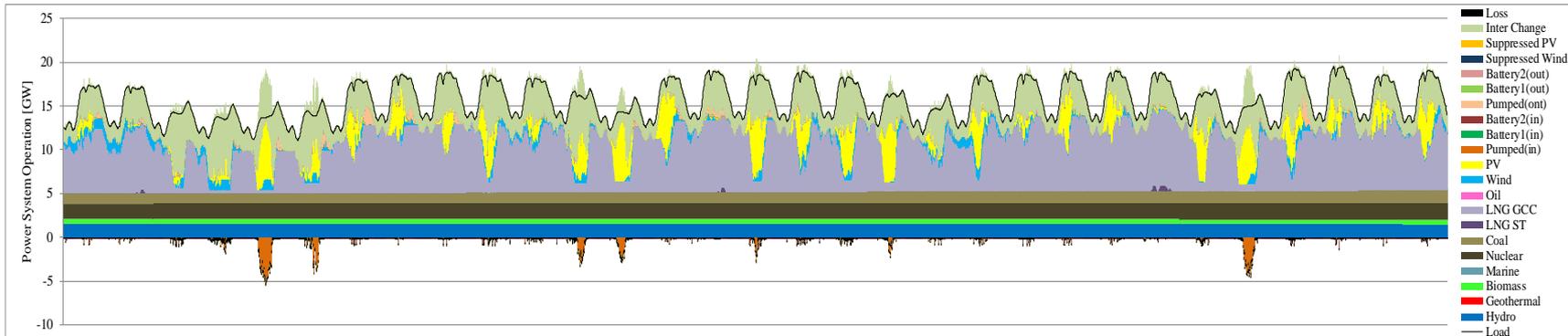
中国



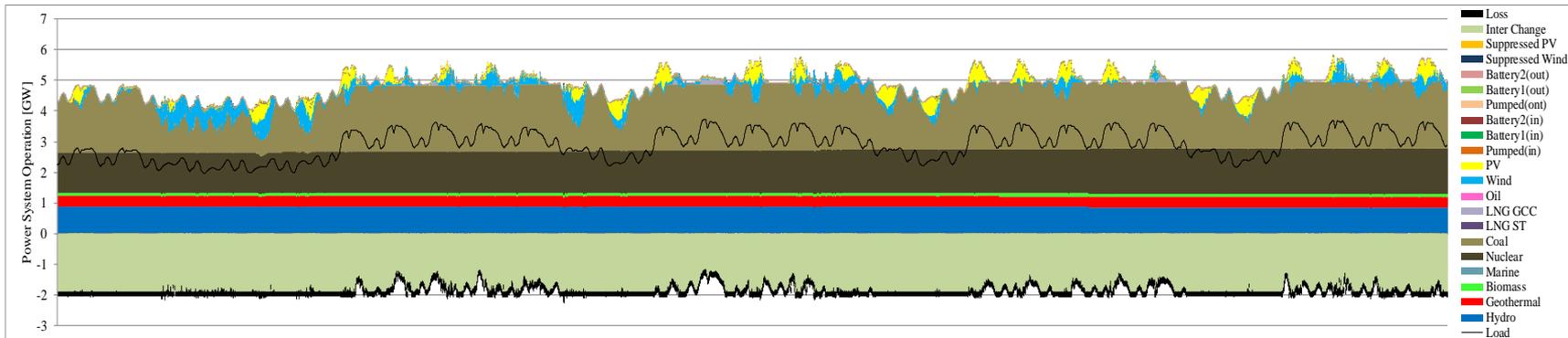
四国



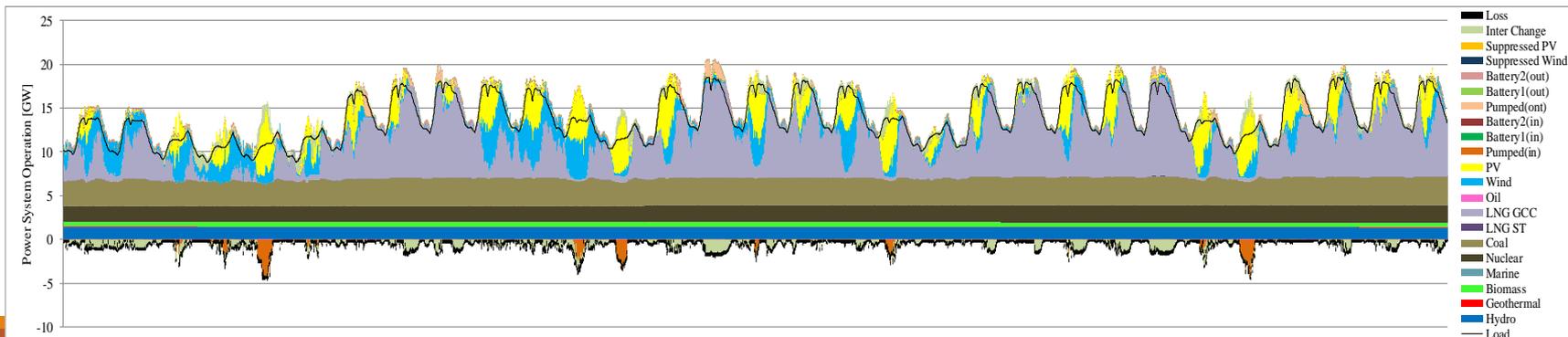
関西



北陸

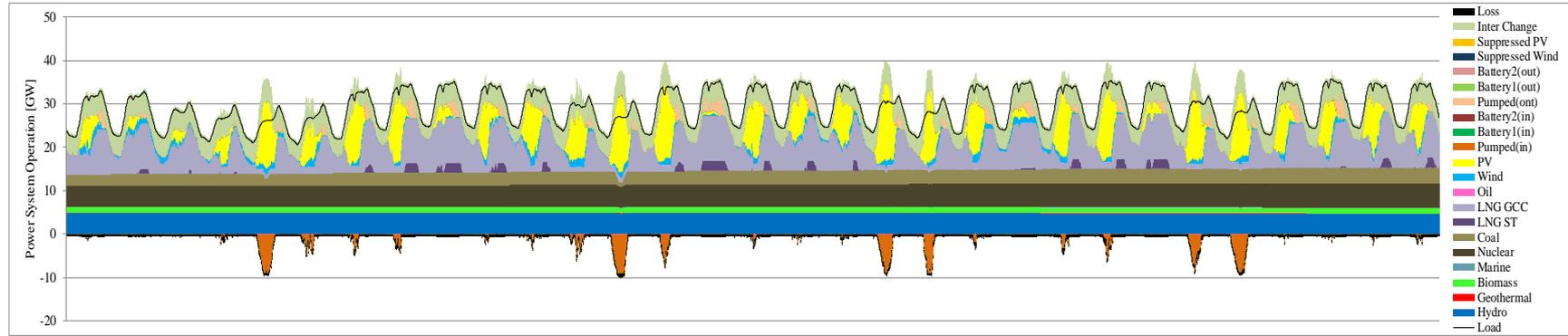


中部

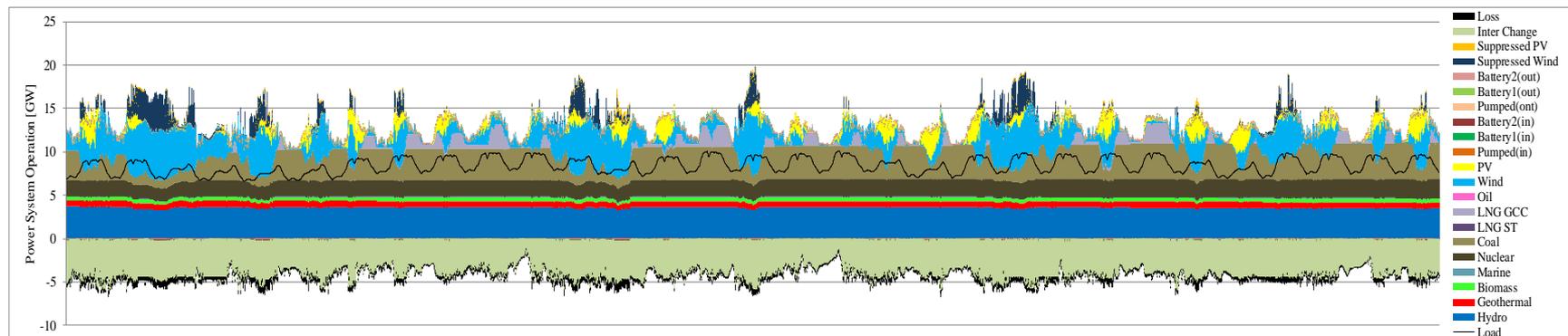


3) 東日本 5月 (関東、東北、北海道)

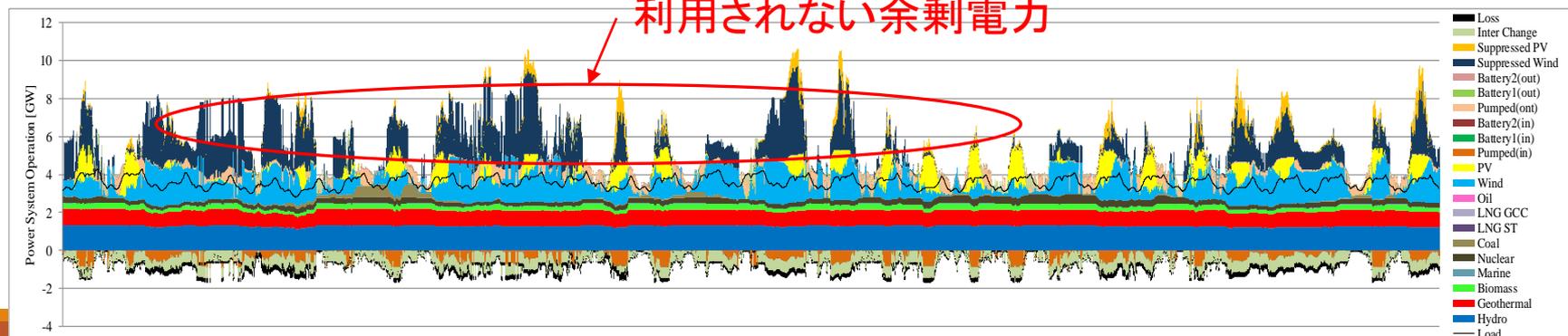
関東



東北



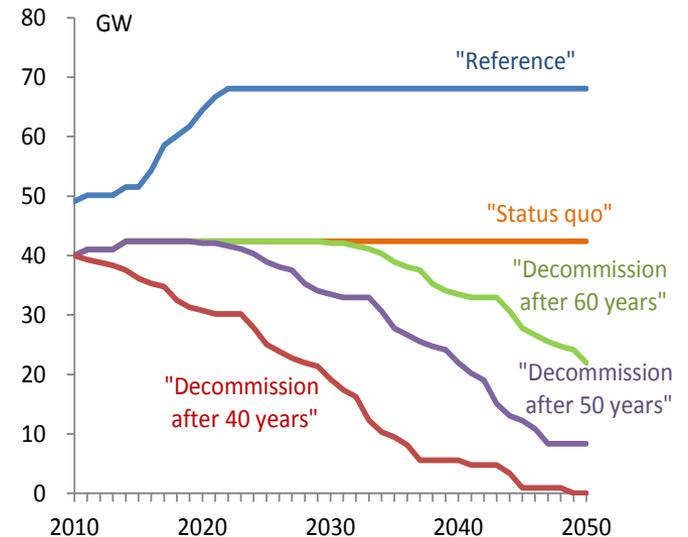
北海道



3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

●電源容量に関する想定

種類	最大容量 [GW]
一般水力発電	23
揚水発電	28
地熱発電	1.2
都市ごみ発電	2.5
バイオマス発電	0.4
風力発電	70
太陽光発電	650



原子力発電の設備容量シナリオ

3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

●その他の想定シナリオ

Type	2010	2030	2050
石炭価格 [JPY/kg]	9.8	11.0	11.0
重油価格 [JPY/liter]	45.8	68.9	68.9
天然ガス価格 [JPY/kg]	50.1	60.4	60.4
太陽光発電 [JPY/W]	600	400	300

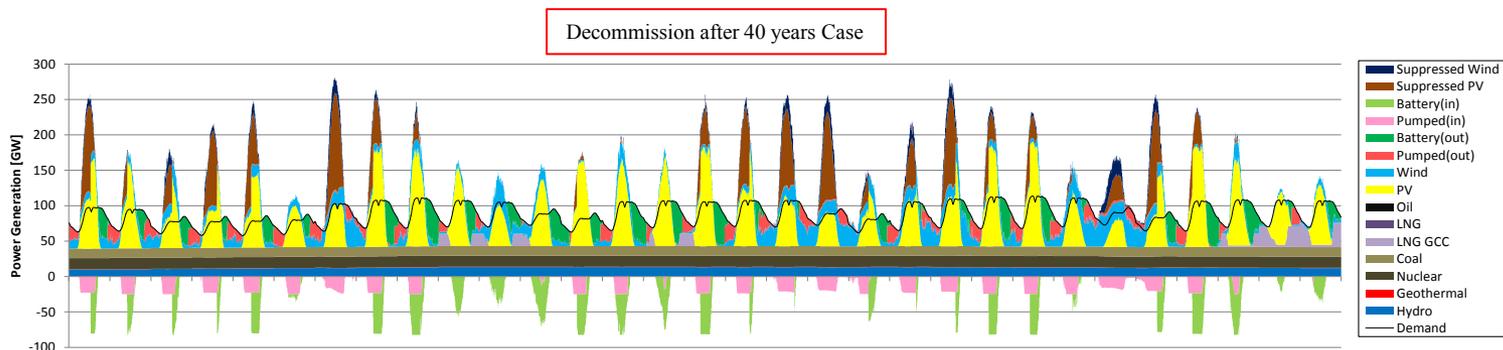
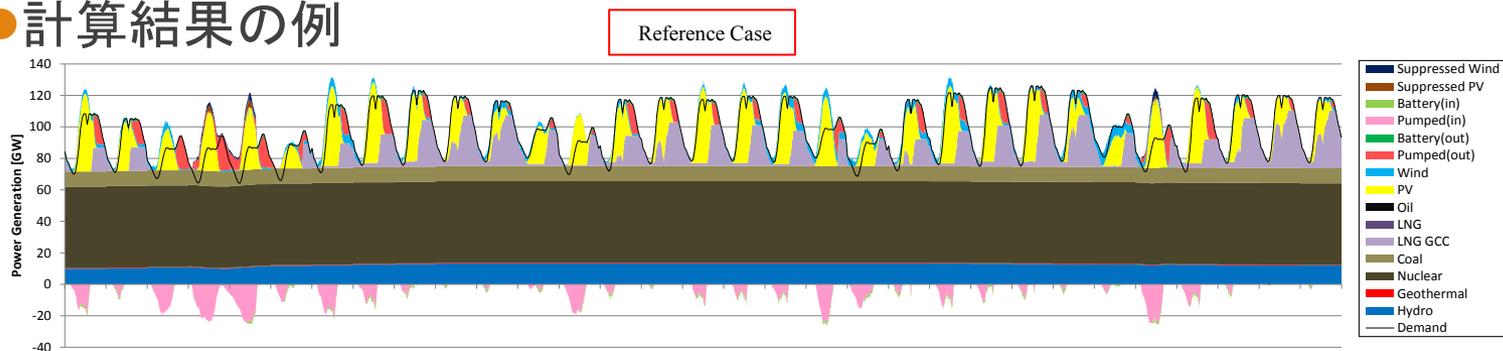
Parameters	2030	2050
CO ₂ 排出削減率 (2010年比)	- 60%	- 80%
電気自動車 [million]	5	20

Parameters	2010 - 2030	2030 - 2050
GDP 成長率	1.4%/year	0.7%/year

IEEJ Transactions on Power and Energy 132(9), 780-792, 2012-09-01
The Institute of Electrical Engineers of Japan

3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

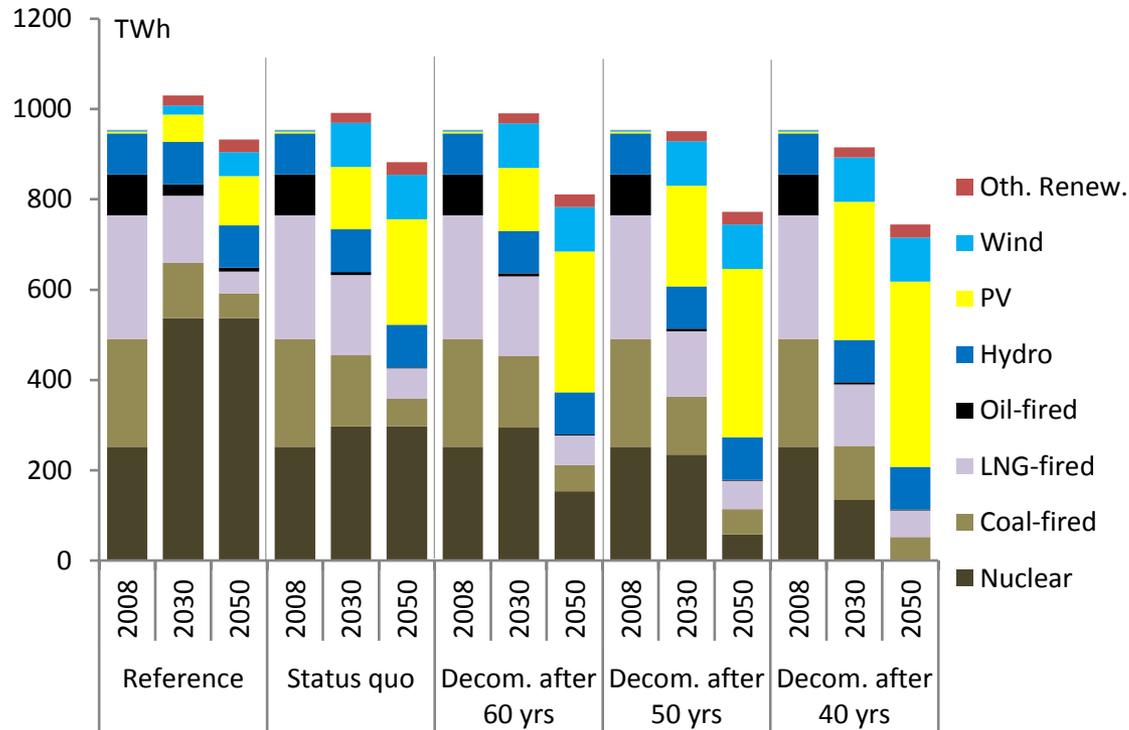
● 計算結果の例



2030年5月の電源運用の様子

3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

● 計算結果の例

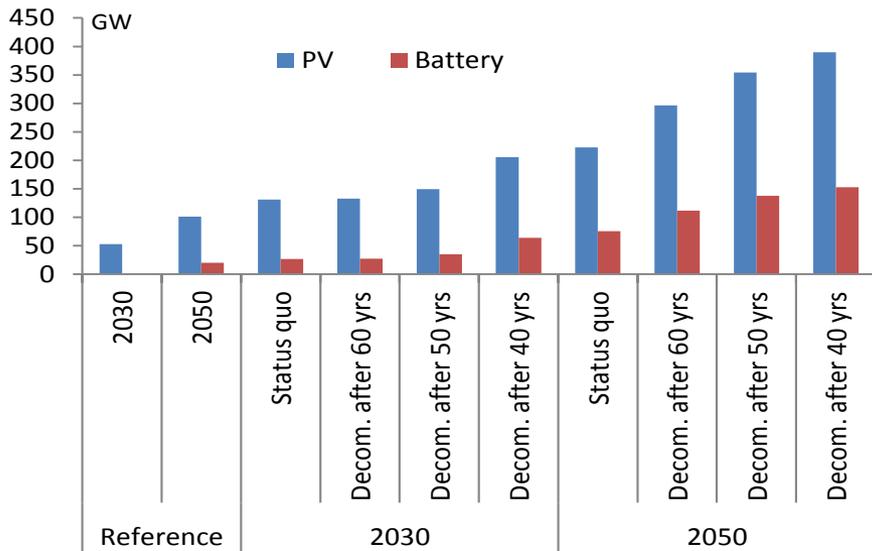


種類別の発電電力量

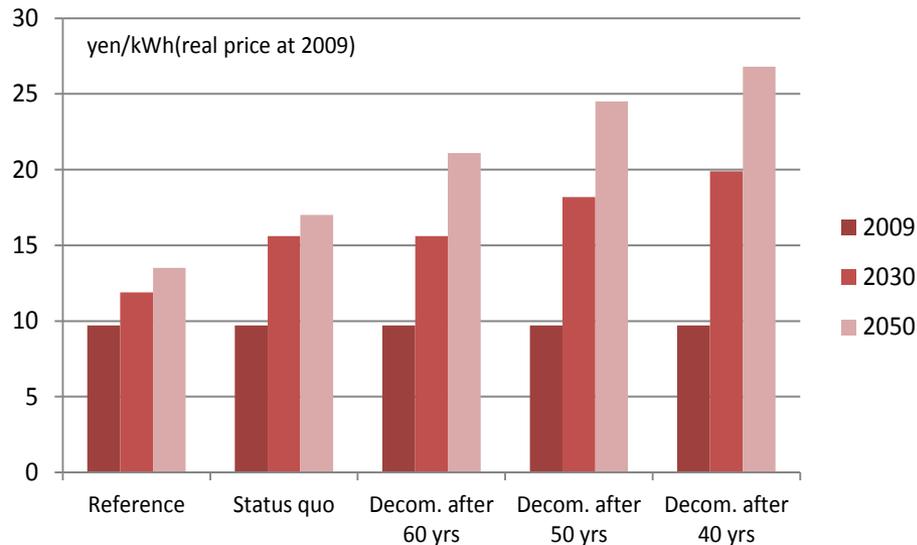
IEEJ Transactions on Power and Energy 132(9), 780-792, 2012-09-01
The Institute of Electrical Engineers of Japan

3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

● 計算結果の例



PVと蓄電池の設置容量



平均発電単価

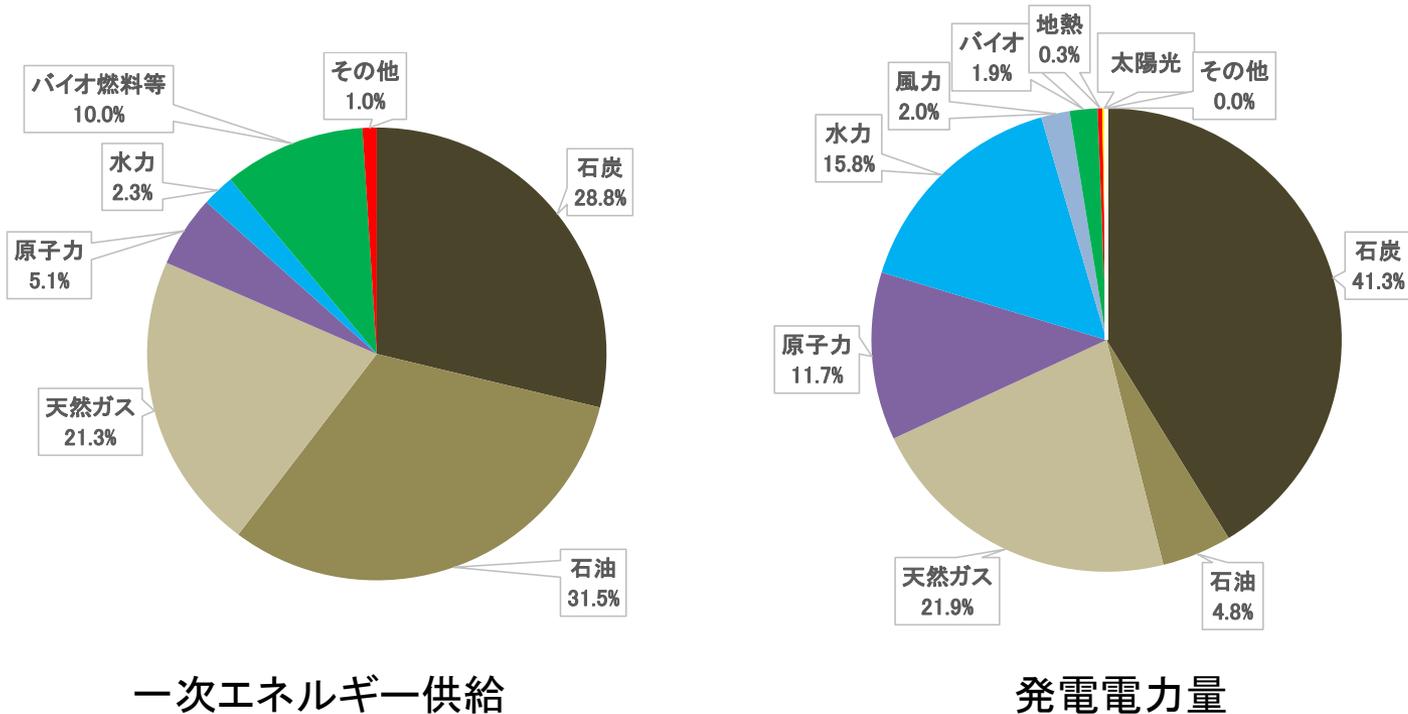
3. 2 将来の電源構成に関するシミュレーション

- 火力発電所の負荷追従運転, 太陽光や風力発電の出力抑制, 太陽光設備の設置場所の地域的な広がりによるならし効果等により, 蓄電池の導入量は太陽光発電の導入量に比較して相対的に小規模となる可能性がある。
- 2050年に400GW(国土の約1%)のPVを設置すれば、原子力発電なしでもCO₂排出削減(発電部門のみで8割減、全部門で約6割減)が可能かもしれないが、総発電コストは約3倍になるかもしれない。

(今回の計算では、地域間での電力融通容量の上限は考慮できていない。)

3.3 長期的な世界のエネルギー需給

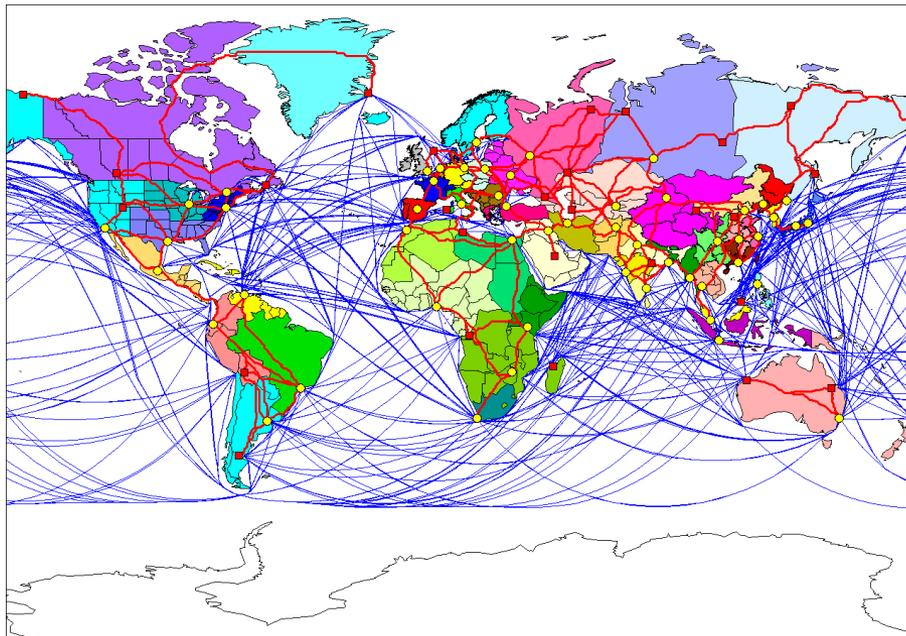
● 2011年の世界のエネルギーの種類別の割合



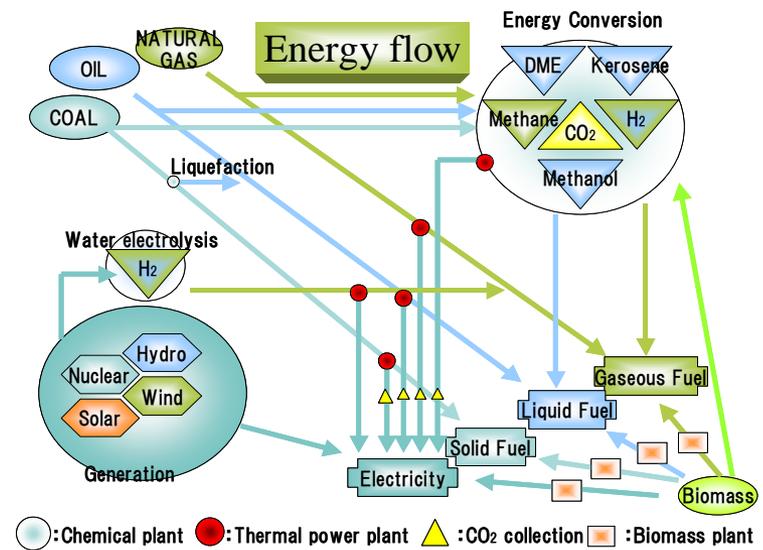
IEA国際エネルギー機関の統計データ

3.3 長期的な世界のエネルギー需給

- 世界エネルギーモデルDNE21の概要



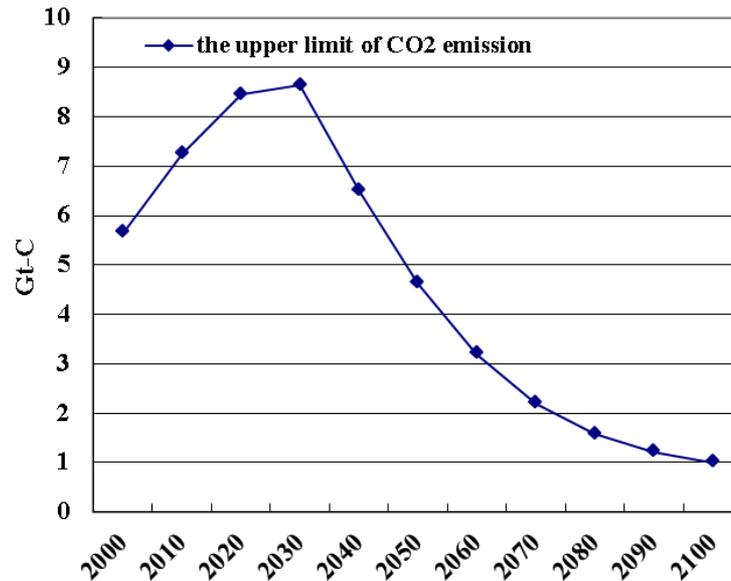
地域分割・輸送ルート



各ノードにおけるシステム構成

3. 3 長期的な世界のエネルギー需給

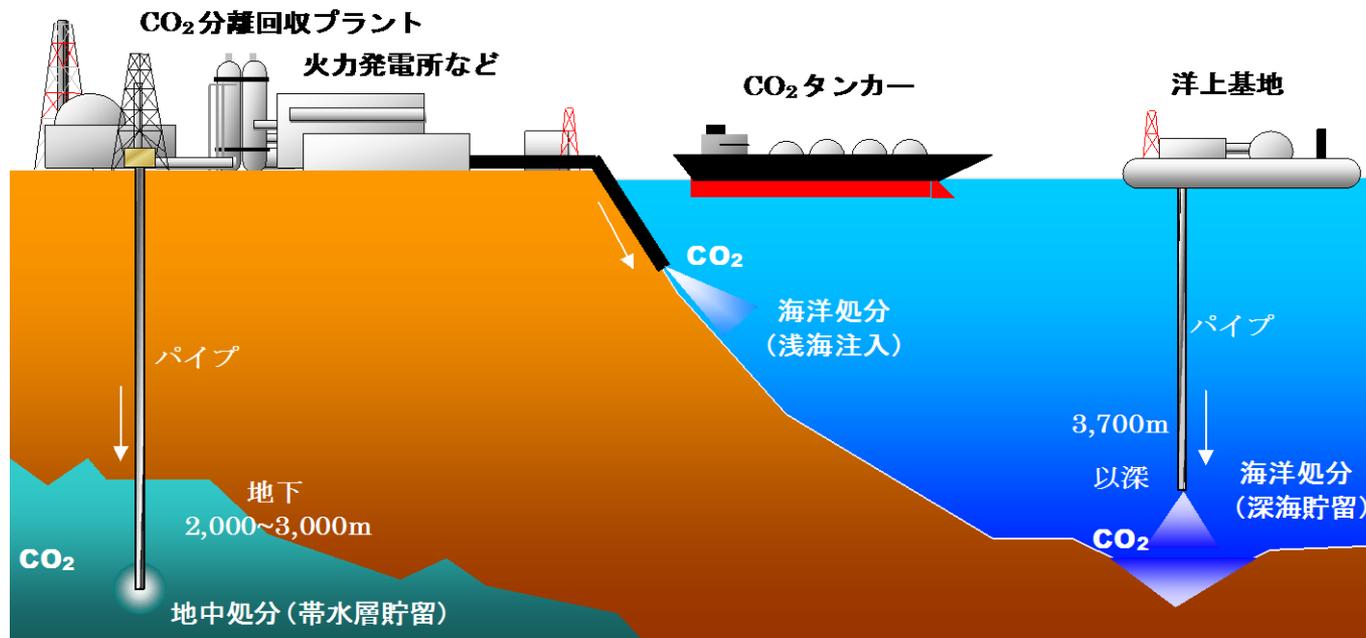
- 世界エネルギーモデルDNE21の概要



世界全体のCO₂排出上限シナリオ
(先進国には2050年までに80%削減も)

3. 3 長期的な世界のエネルギー需給

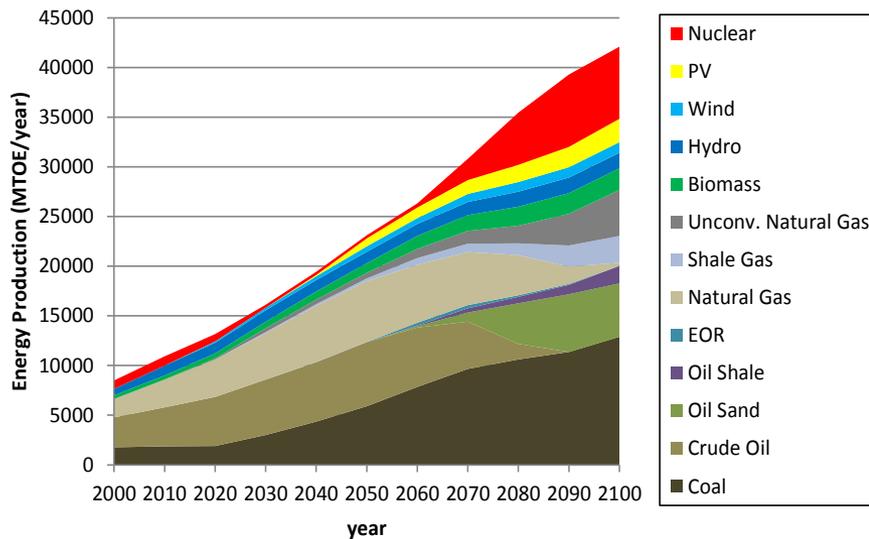
- CO₂回収貯留



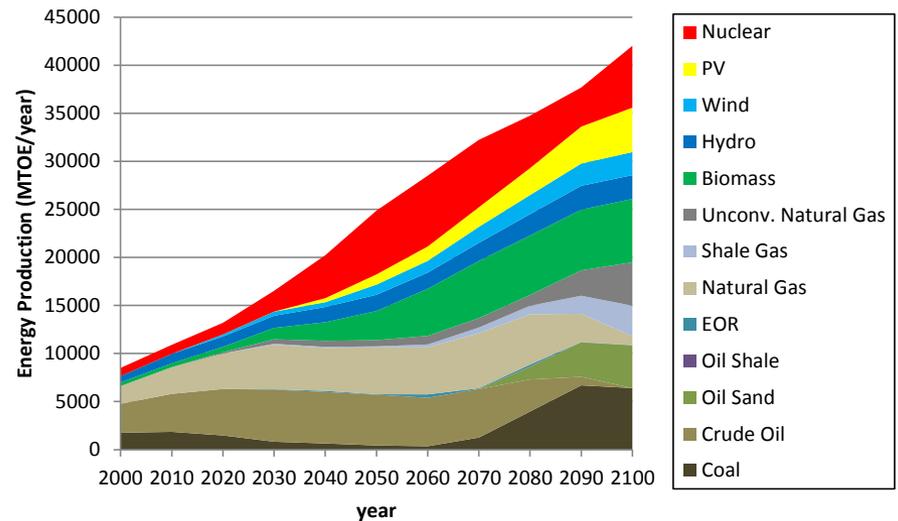
3.3 長期的な世界のエネルギー需給

● 計算結果

世界全体の一次エネルギー生産量の推移



BAUケース

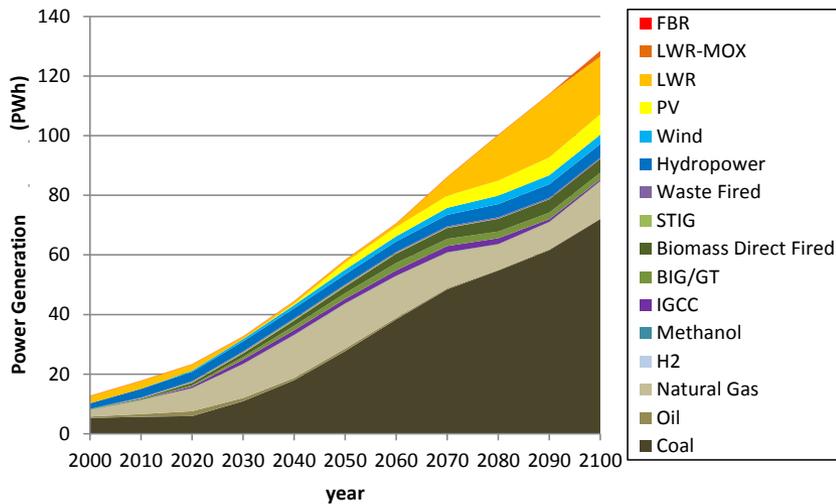


排出削減ケース

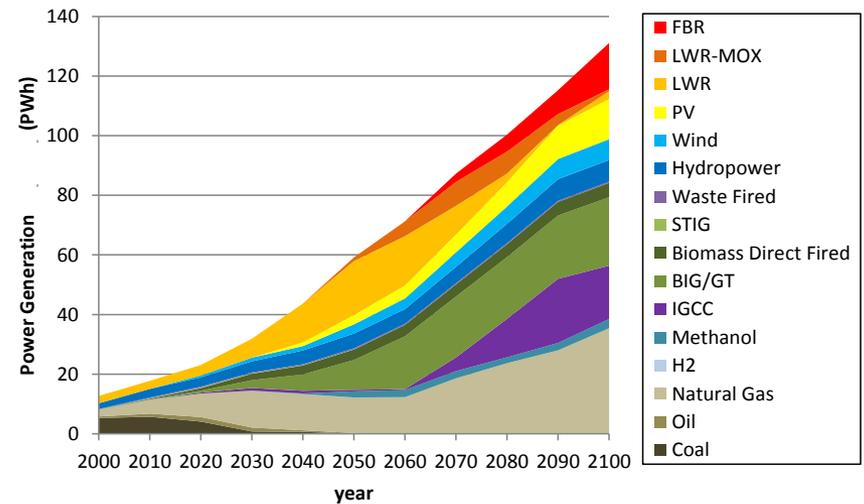
3. 3 長期的な世界のエネルギー需給

● 計算結果

世界全体の発電電力量の推移



BAUケース

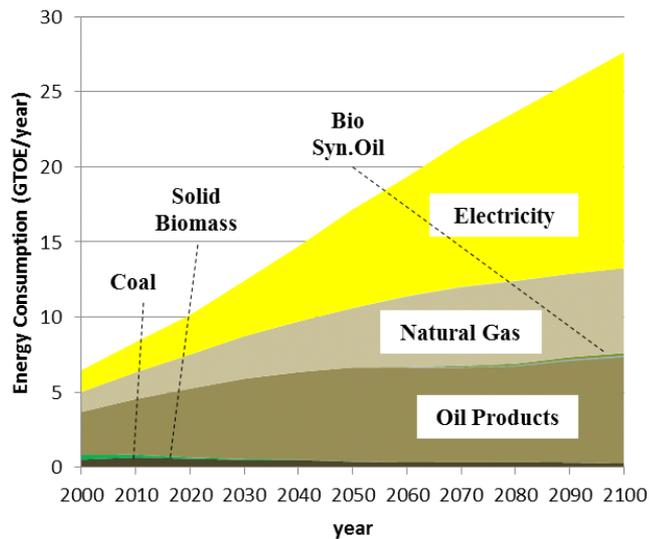


排出削減ケース

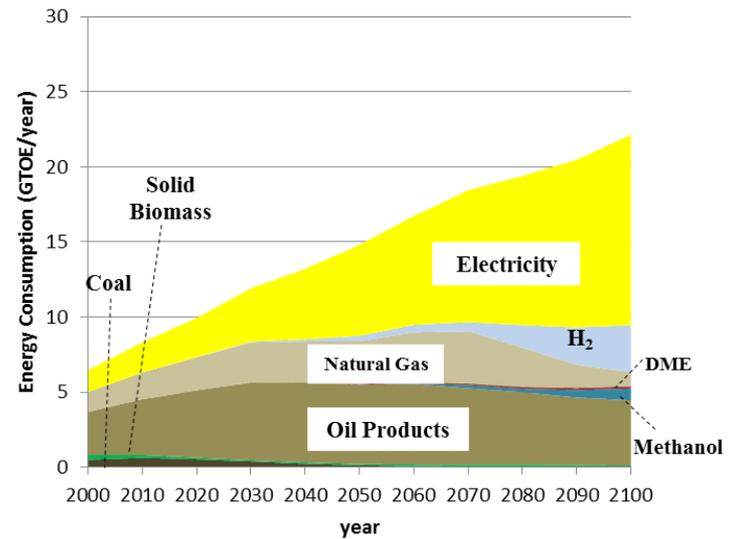
3.3 長期的な世界のエネルギー需給

● 計算結果

世界全体の二次エネルギー消費の推移



BAUケース

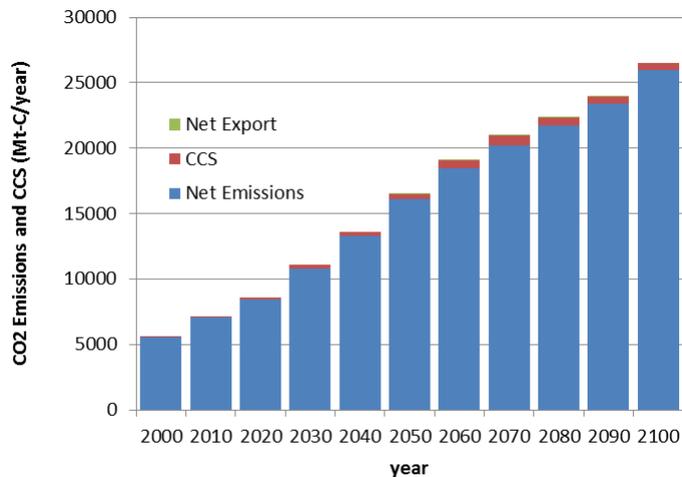


排出削減ケース

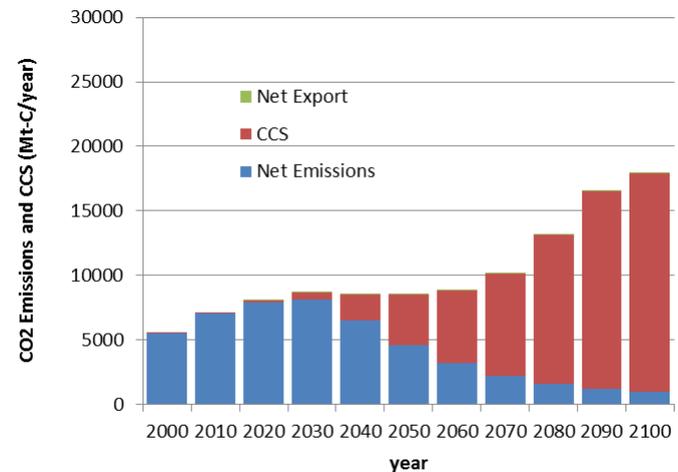
3.3 長期的な世界のエネルギー需給

● 計算結果

世界全体のCO₂排出量と回収貯留量の推移



BAUケース



排出削減ケース

3. 3 長期的な世界のエネルギー需給

- 温暖化問題の緩和はある程度は可能と考えられる。
- 省エネ、非化石エネルギーの利用、CO₂回収貯留の実施など、複合的なアプローチが合理的となろう。
- 石炭の消費量は大きく影響を受ける可能性がある。
- 電力系統の供給信頼度を保つことを考えると、現状の技術では太陽光、風力の貢献は限定的となる。
- CO₂回収貯留技術の役割も大きいと予想される。

4. おわりに

- 石炭 豊富で安価だが環境面で問題が多い
- 石油 使い勝手が良いが資源量が限られ高価
- 天然ガス 輸送が困難で備蓄が難しい
- 水力・地熱 安定しているが開発余地が限られる
- バイオマス 利用可能量は限られる
- 風力 遠隔地にあり出力も不安定
- 太陽光 高価で夜間・曇天時には利用できない
- 核分裂 事故時の社会影響が大きく廃棄物処分も課題
- 核融合 技術的にまだ困難
- 省エネルギー 限界があり、効率改善は消費量を逆に増やすことも
- 水素 生産するために1次エネルギーが必要
- CO₂回収貯留 追加的なコストとエネルギーが必要