



エネルギー・資源学会
東大ESI社会連携研究部門
シンポジウム

2021年2月4日(木)

風力発電大量導入と 電力系統の最適設計



京都大学大学院 経済学研究科
再生可能エネルギー経済学講座特任教授

安田 陽

+ 本日のキーワード



- 不確実性下における意思決定
- 市場経済と規制 (混合経済)
- 電力自由化と発送電分離

- 発電部門は自由競争
- 送電部門は規制(独占)部門

どのように最適化するか？

+ 最適化シミュレーションの役割



- なぜ政策決定に最適化シミュレーションが必要か？
 - 客観性、透明性の確保
 - 人為的恣意性の排除
 - スムーズな合意形成
- コンピューターの結果は信じられる？
 - 科学に「絶対」はない。
 - 科学には「不確実性」が内在する
 - 不確実性は感度分析やマルチシナリオで対応
- 国や人類の将来をコンピューターに任せていいの？
 - 科学者：「あらゆる予想」と判断材料を提供
 - 政策決定者：不確実性も踏まえ最終決定

根拠に基づく
政策決定
(EBPM)



市場と政府、規制緩和と規制強化



- 「厳密な意味で純粹の**市場經濟**というものは存在しない」

小嶋隆夫編: 經濟用語辞典, 第4版, 東洋經濟新報社 (2007)

- 規制緩和と規制強化のせめぎ合い

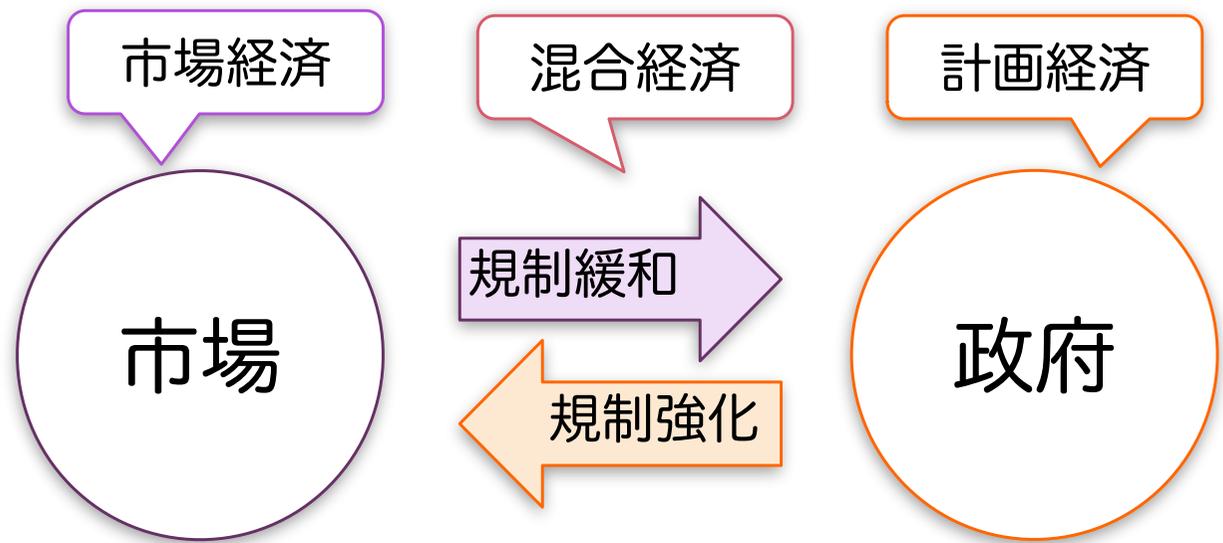
- 規制緩和

- 電力自由化

- 新規技術(再エネ)の参入障壁の緩和

- 規制強化

- 公衆安全・事故防止・環境影響評価



混合経済と規制



- 市場が社会にとって望ましくない結果をもたらす場合もある。
- たとえば、公害がひどすぎたり、富の不平等が大きくなりすぎたりして、市場がうまく機能しないことがある。そのようなときは人々は政府に頼ろうとする。
- **混合経済**では、何をどのように、誰のために生産するかという決定は、基本的には消費者と生産者の自由な相互関係の結果として決定されるが、場合によっては政府がそうした意思決定を行うこともある。
- 政府は法律の枠組みを定め、民間企業や個人はそのまま活動することになる。政府は企業活動を**規制**したり、消費者や従業員を保護したりする。

そもそも規制とは？



- 経済政策の基本目的には、経済そのものに内在する構成的基本目的と経済を外から規制する規制的基本目的とが内在する。
- 経済はあくまで人間生活の一領域にすぎず、経済生活においても、人間生活において守られるべき社会倫理的諸価値に配慮することが求められる。
- それゆえ、自由や正義といった社会倫理的諸価値に反する経済政策を策定することは許されず、この意味において、それらの諸価値は経済を外から規制する基本目的となってくるのである。



市場の失敗 market failure



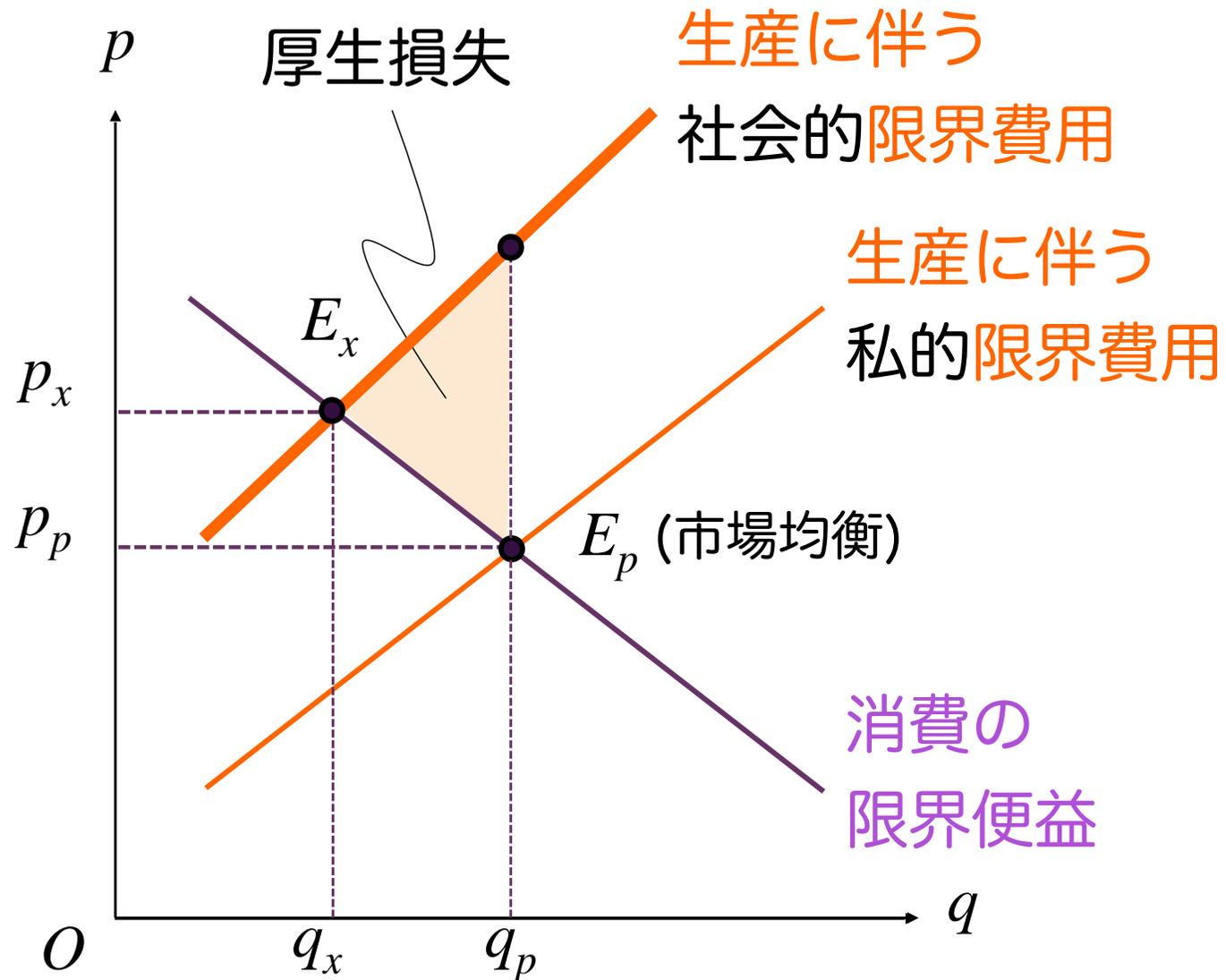
- **パレート最適**でない
(資源の効率的配分がなされていない) 状態。
- 完全市場競争であるための条件
 - **市場支配力**が存在しない(**寡占**・**独占**が存在しない)。
 - 財・サービスの消費または生産に伴う**外部性**が存在しない。
 - 財・サービスに関する**情報の非対称性**が存在しない。
- 市場の失敗の要因
 - 独占・寡占の発生、外部性の発生、情報の非対称性 etc...

外部性と負の外部費用

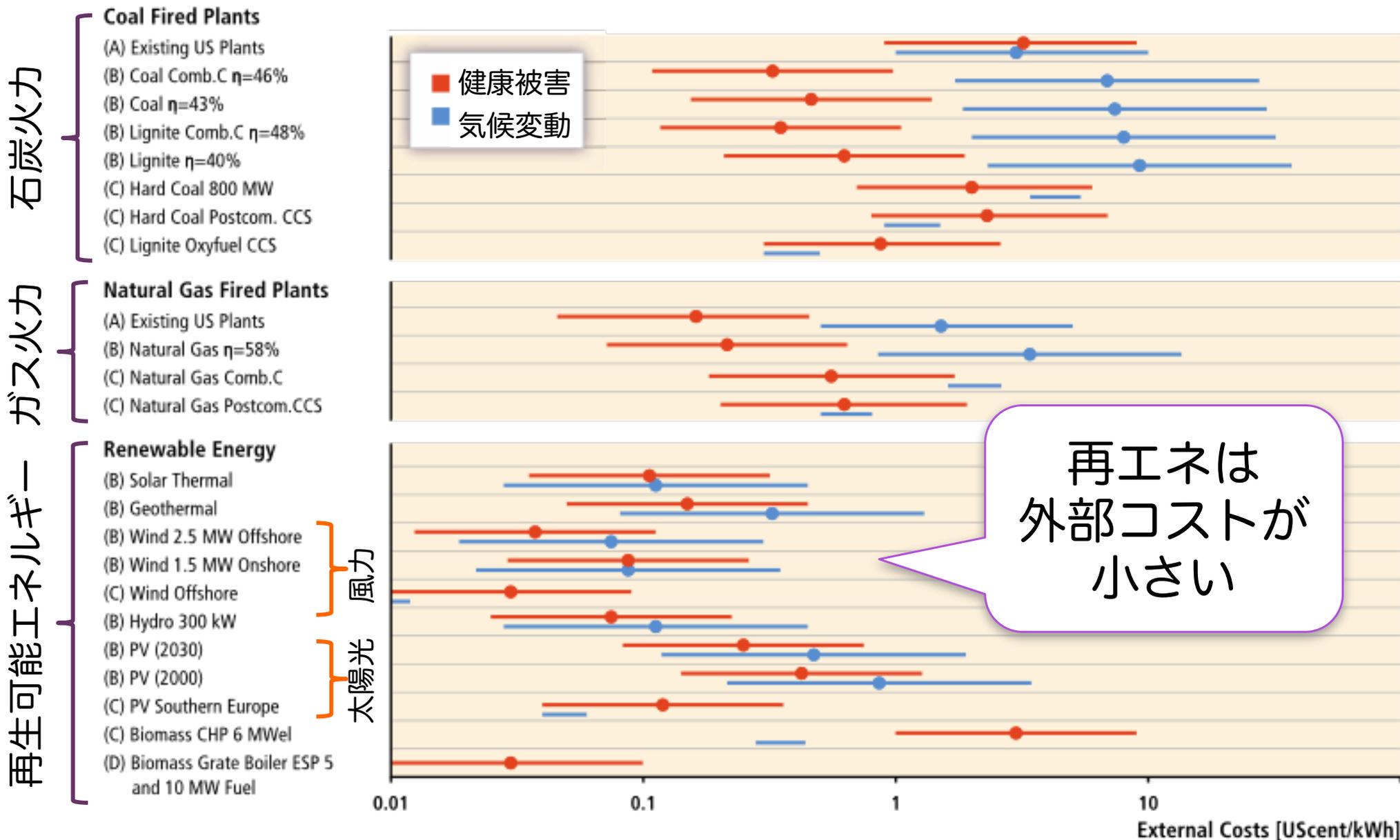


- 外部性 externality
 - ある経済主体の経済活動が他の消費者の効用や他の生産者の生産水準に影響を与える性質
 - 正の外部性 positive externality: 政策経費、補助金等
 - 負の外部性(外部不経済) negative externality
- (負の)外部費用 (negative) external cost
 - 健康被害、気候変動（異常気象による災害多発）など
 - 本来カウントされるべき費用がカウントされないと、資源配分に歪みが生じる。経済厚生が損失が発生。
 - 別名、隠れたコスト hidden cost

+ 外部不経済



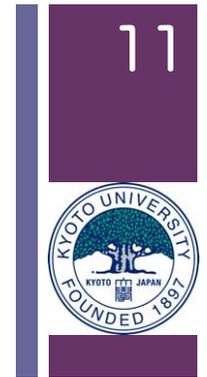
+ IPCCによる各種電源の外部コスト



(出典) 気候変動に関する政府間パネル (IPCC) 第3作業部会: 再生可能エネルギー源と気候変動緩和に関する特別報告書, 環境省(2012)

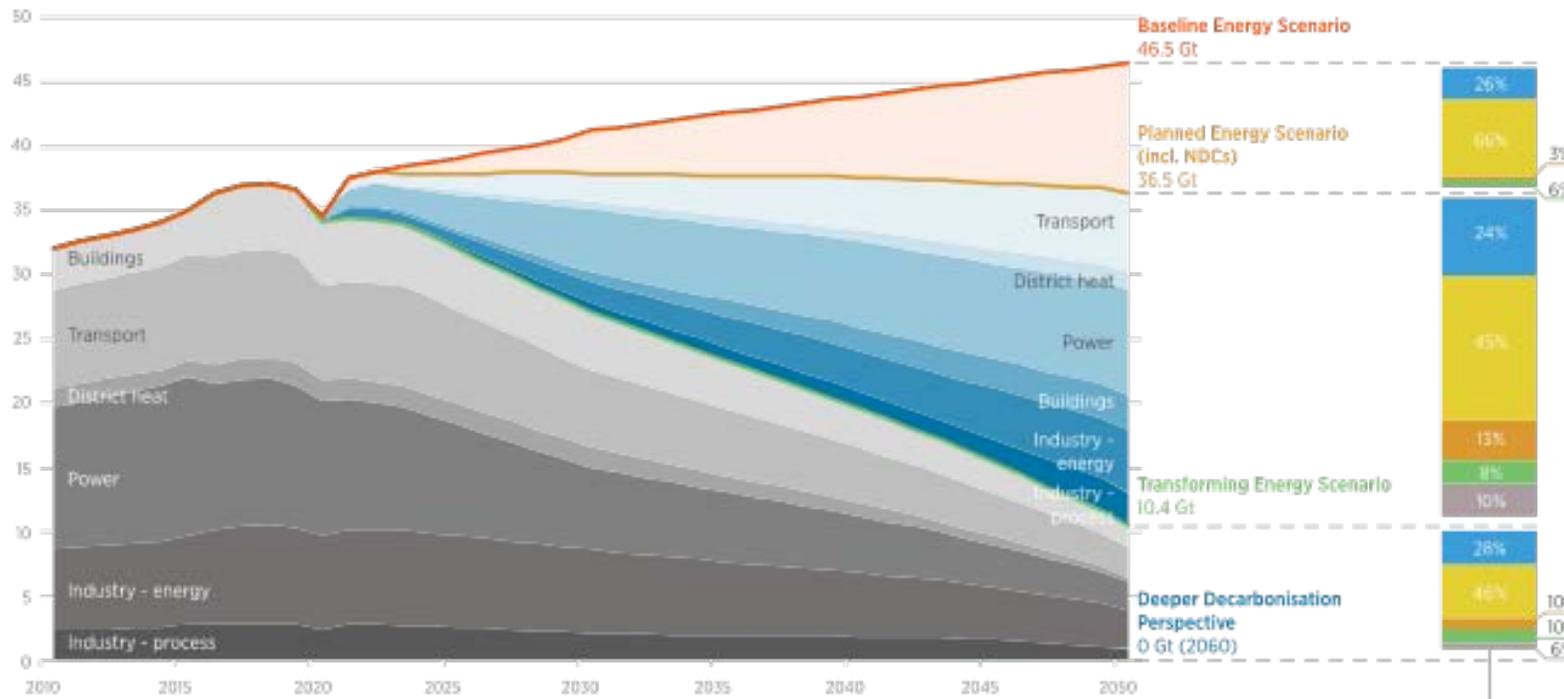


国際再生可能エネルギー機関の 2050年ゼロカーボンシナリオ

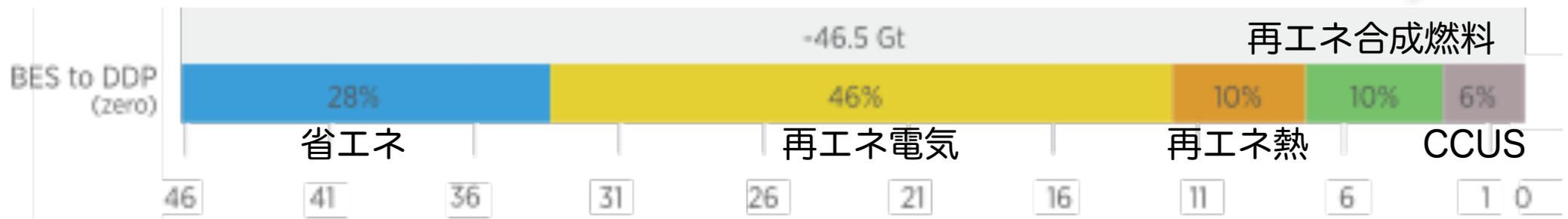


Energy and process-related CO₂ emissions (Gt/year)

Energy and process-related CO₂ emissions (Gt/year)



省エネと
再エネが
主役



(出典) IRENA: Reaching Zero with Renewables (2020)

<https://www.irena.org/publications/2020/Sep/Reaching-Zero-with-Renewables>

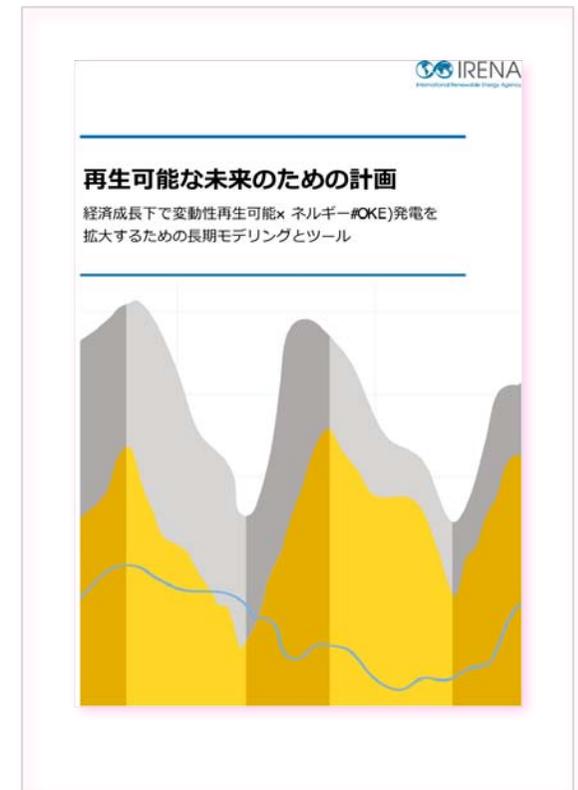
電力系統計画のモデリング手法



- 国際再生可能エネルギー機関 (IRENA):
再生可能な未来のための計画 (2017)

<https://www.env.go.jp/earth/report/h30-01/ref01.pdf>

- 元々は電力エキスパートが少ない
途上国のための
電力モデリングのマニュアル
- 日本にも参考になるため環境省
(京大・安田)が翻訳
- 短期～長期に亘る
電力系統+市場モデルと
方法論の紹介



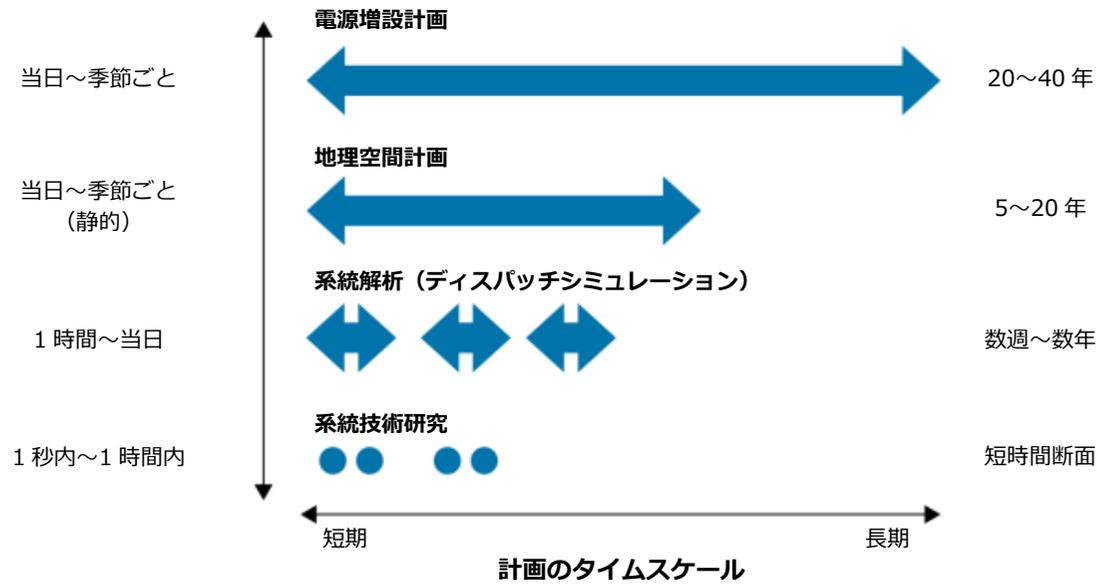


社会技術モデルのタイムスケール



一般的なタイムレゾリューション

一般的なタイムフレーム



+ 代表的な長期エネルギー計画ツール

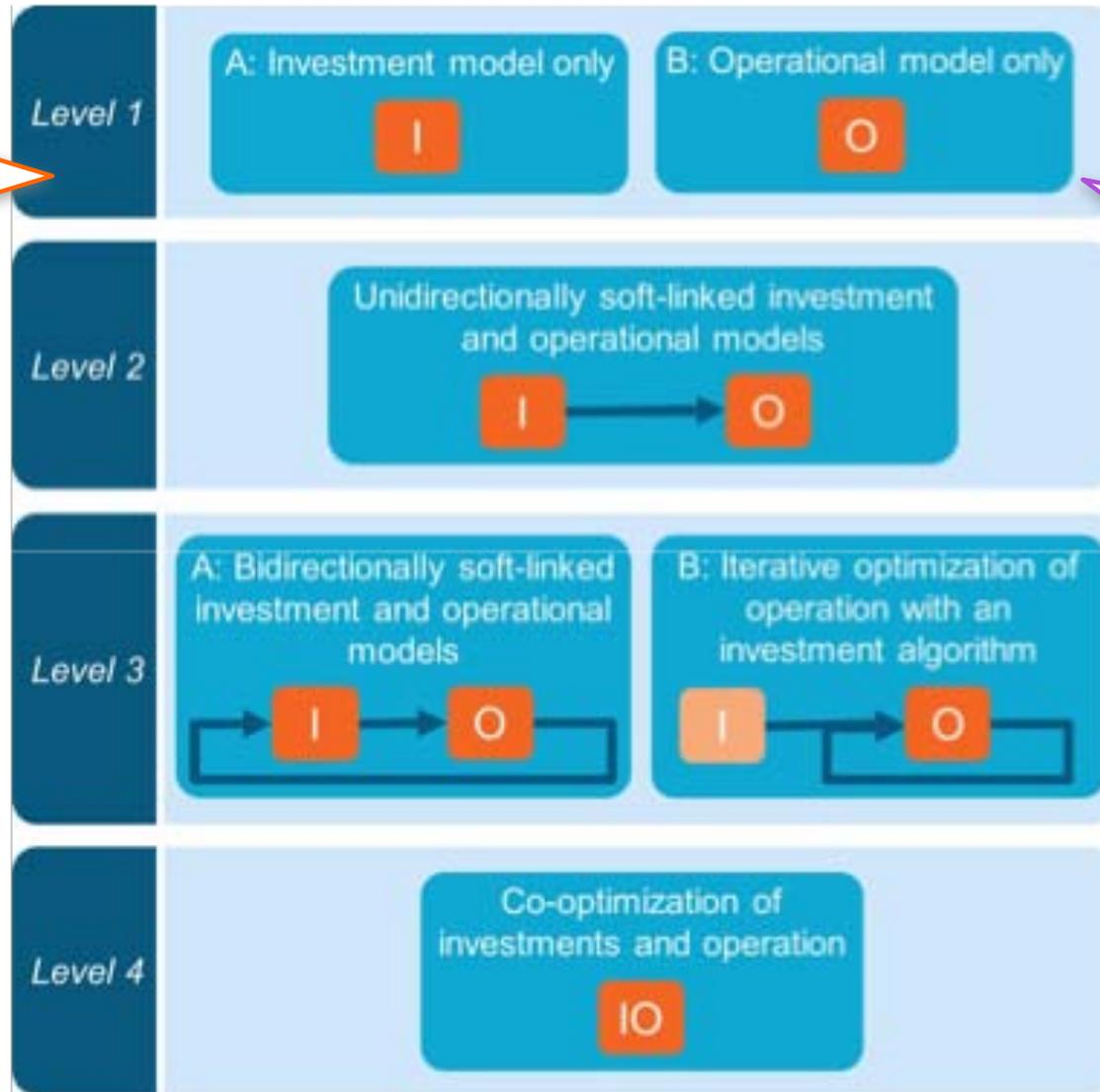


	セクター範囲	模擬	均衡	トップ ダウン	ボトム アップ	運用の 最適化	投資の 最適化	訓練の必要性	
								基礎	上級
BALMOREL	電気 (+一部火力)	○	一部	○	○	○		2週間 *	
EMCAS	電気 (+一部輸送)	○		○		○		2週間	1週間
ENPEPBALANCE	エネルギー		○	○	○			1週	2週間
Invert	エネルギー	○			○		○	1日	
LEAP	エネルギー	○		○	○			3~4 日	
MARKAL/ TIMES	エネルギー		○	一部	○	○*	○	数か月	
MESSAGE	エネルギー		一部		○	○	○	2週間	数か月*
MiniCAM ²⁵	エネルギー	○	一部	○	○			数か月	
Mesap PlaNet	エネルギー				○		○	5日	
PERSEUS	エネルギー		○		○		○	2週間	
RETScreen	電力				○		○		
WASP	電力	○			○*	○*	○	4~6 週間	

+ 経済モデルと電力系統運用モデルの統合



投資モデル
(経済モデル)



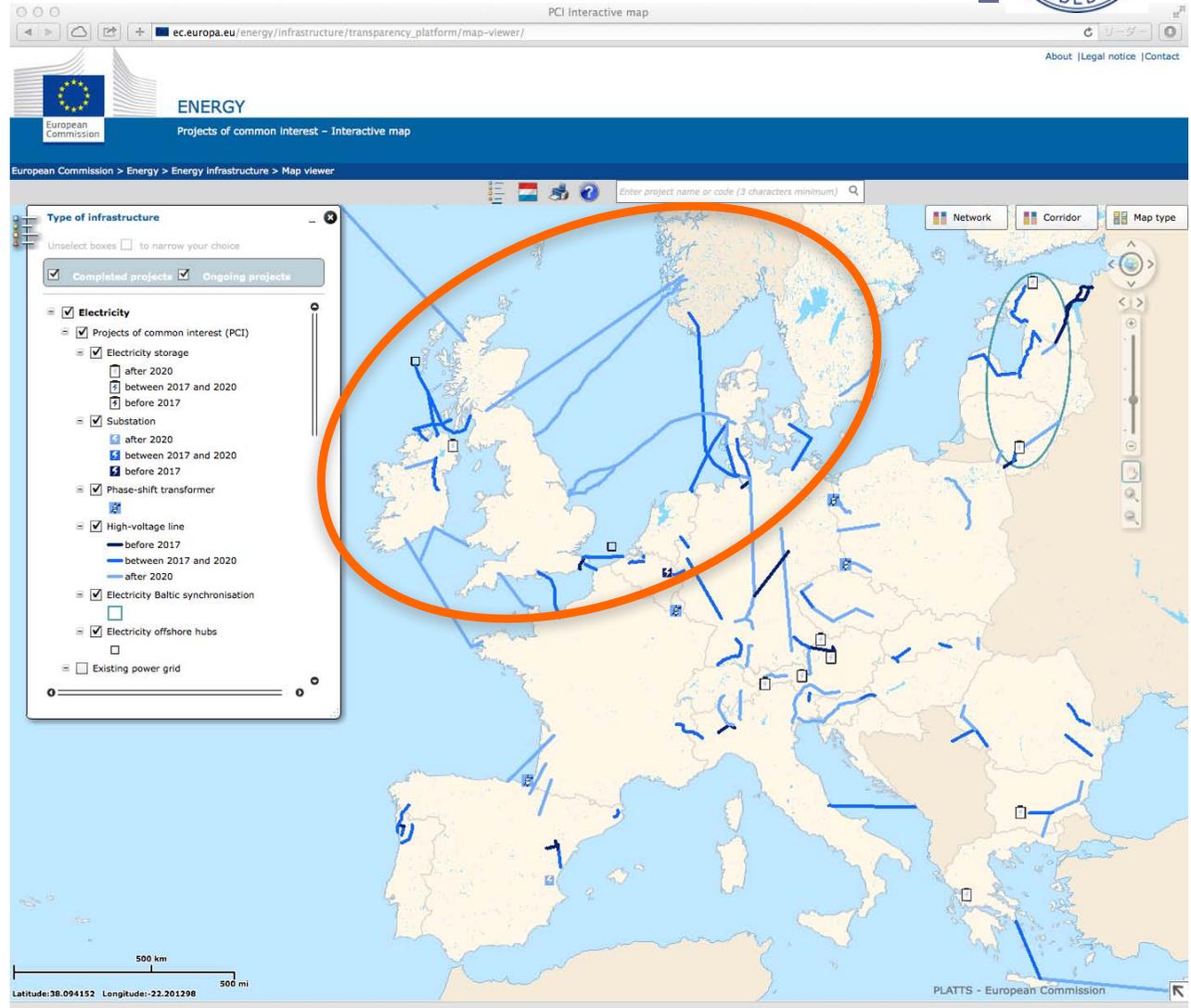
運用モデル
(技術モデル)



EUの共通利益プロジェクト (PCI)



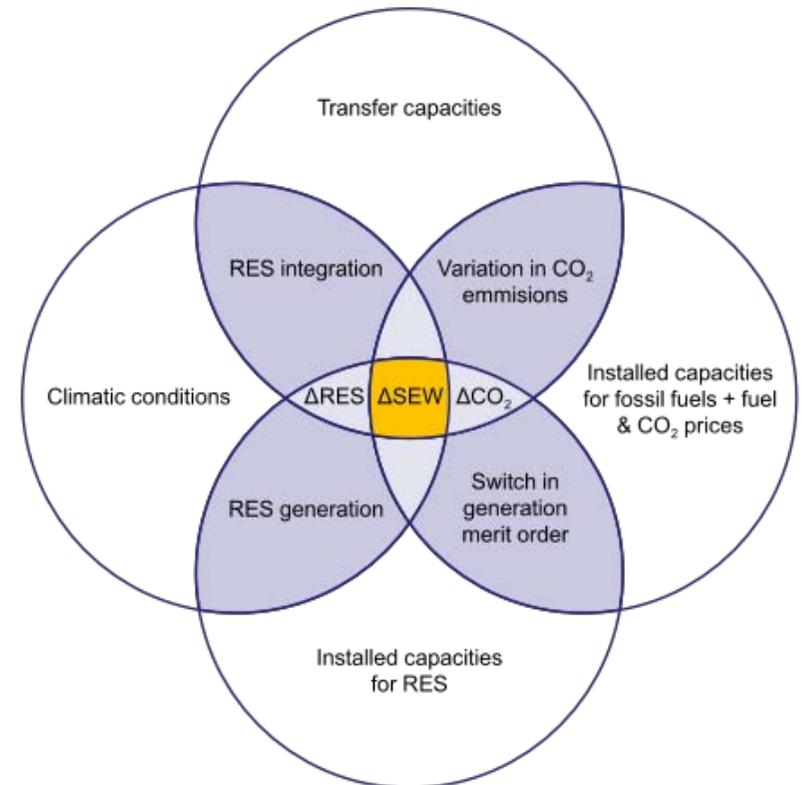
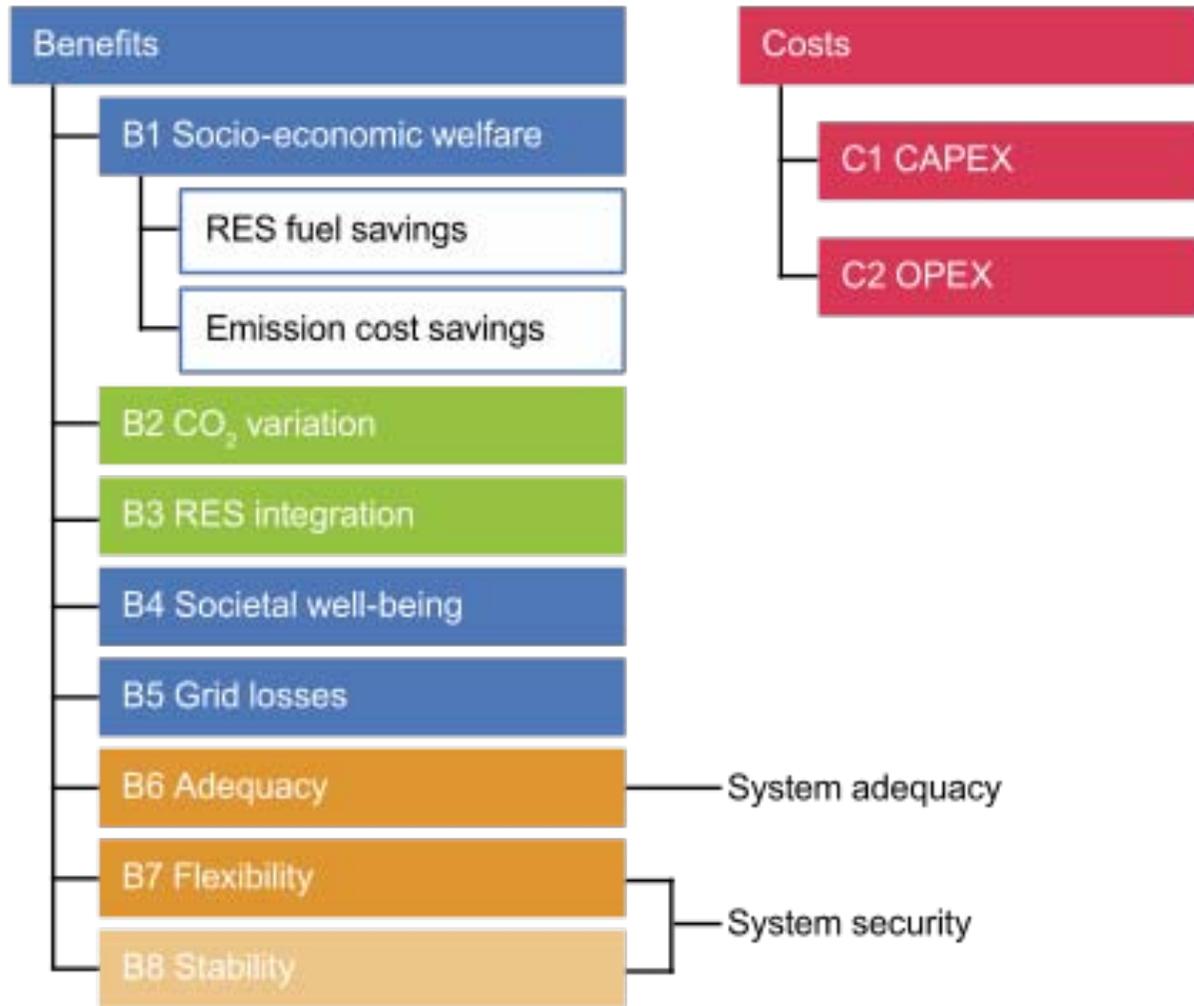
- 欧州の政府に相当する
欧州委員会が主導
 - EU Decision
「汎欧州エネルギーネットワークのガイドライン」(2006)
- 欧州の送電線・ガスパイプラインの優先順位を決定
- 費用便益分析



(出典) European Commission: Projects of Common Interest – Interactive Map
http://ec.europa.eu/energy/infrastructure/transparency_platform/map-viewer/



TYNDP2018における2nd CBA

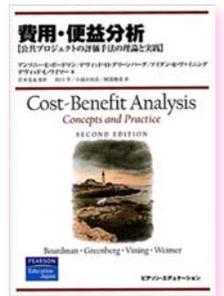


(出典) ENTSO-E: TYNDP2018 Executive Report (2018)
および ENTSO-E: TYNDP CBA from assessment indicators to investment decisions (2018)

費用便益分析

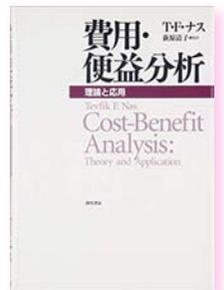


- CBA(費用・便益分析)の広義の目的は、**社会的意思決定を支援**することである。
- **市場の失敗**があると、政府介入の一応の理論的根拠になる。(中略) 選択肢に関しては、現状も含むが、ある特別な介入がより優れて効率的であることを実際に提示できなければならない。この目的のためにCBAを行うのである。



(出典) A.E.ボードマン他:「費用・便益分析 - 公共プロジェクトの評価手法の理論と実践」, ピアソン (2004) p.5

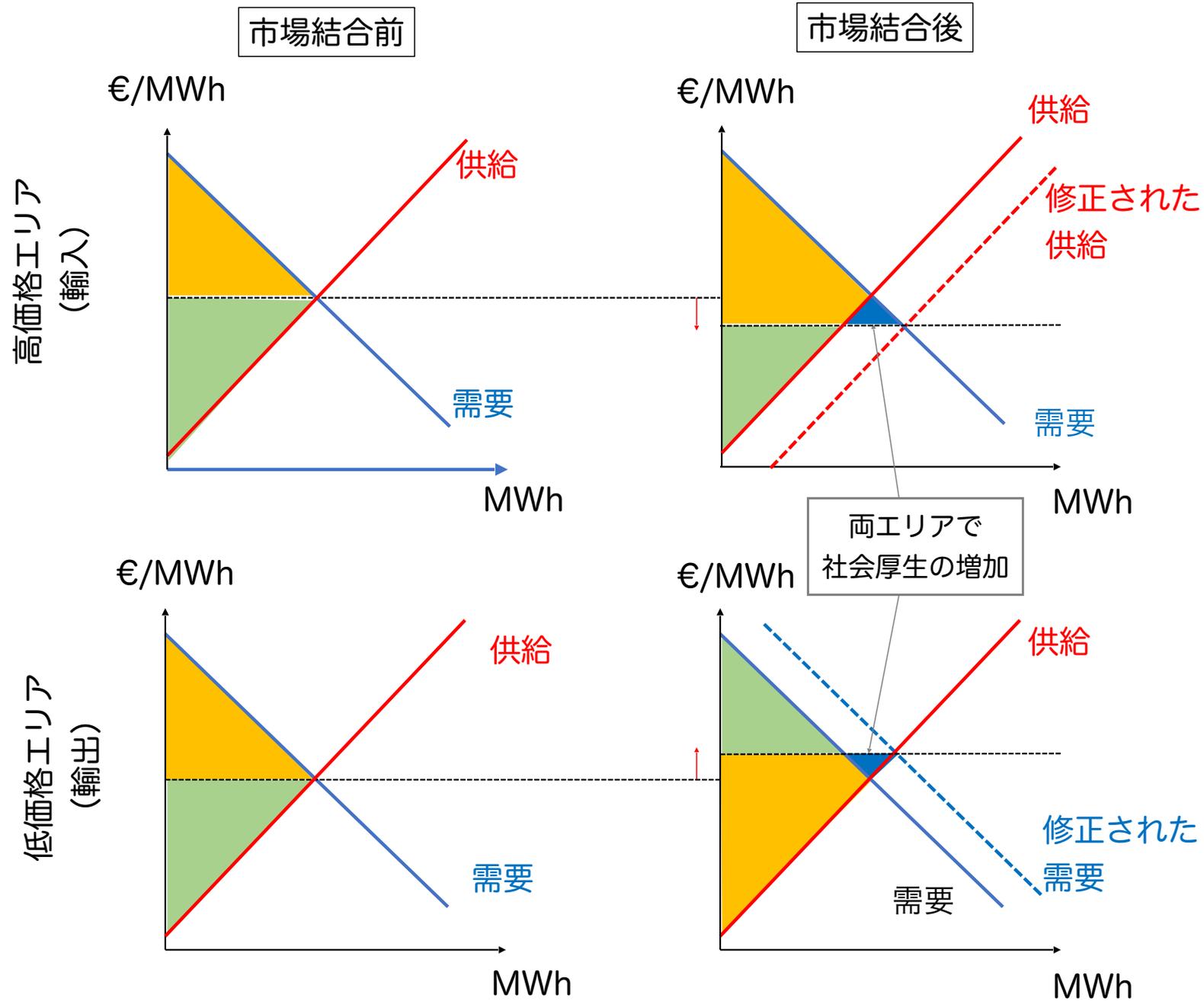
- 費用便益分析の目的は、政策の実施についての**社会的な意思決定を支援**し、社会に賦存する**資源の効率的な配分を促進**することである。



(出典) T.F.ナス:「費用便益分析 - 理論と応用」, 勁草書房 (2007) p.217 監訳者あとがき



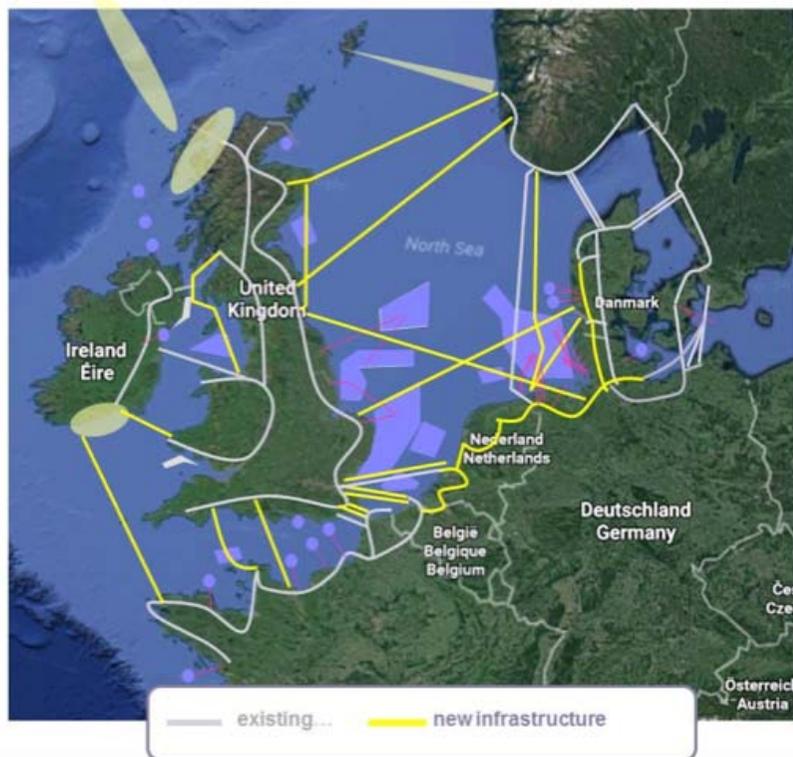
連系線増強による便益



(出典) 安田陽: 世界の再生可能エネルギーと電力システム ~電力市場編, インプレスR&D (2020)



TYNDP2018のCBA例 (北海オフショアグリッド)



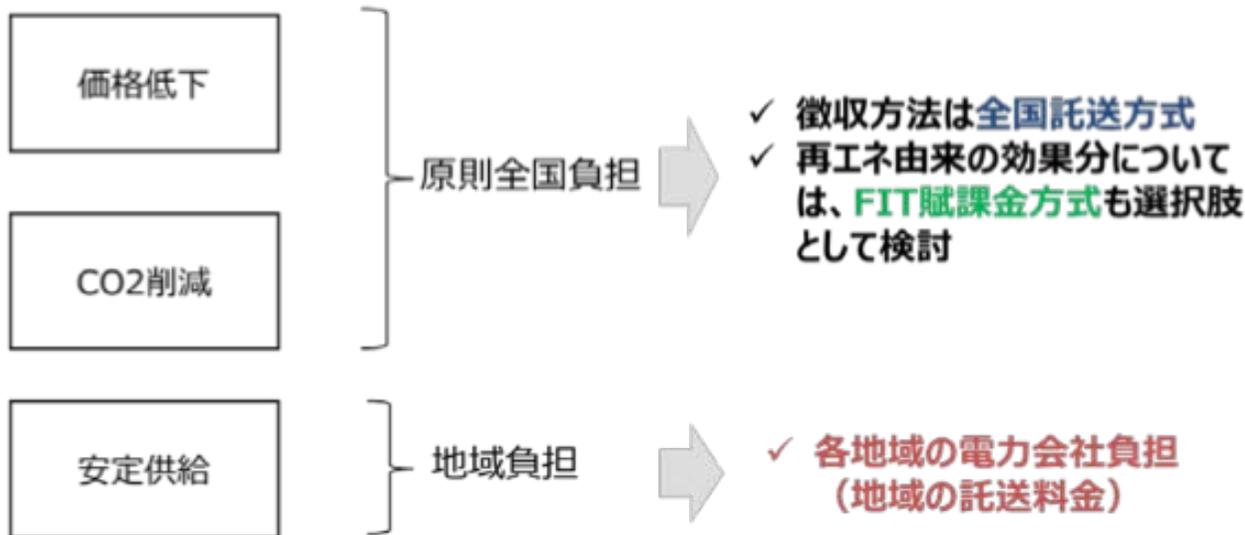
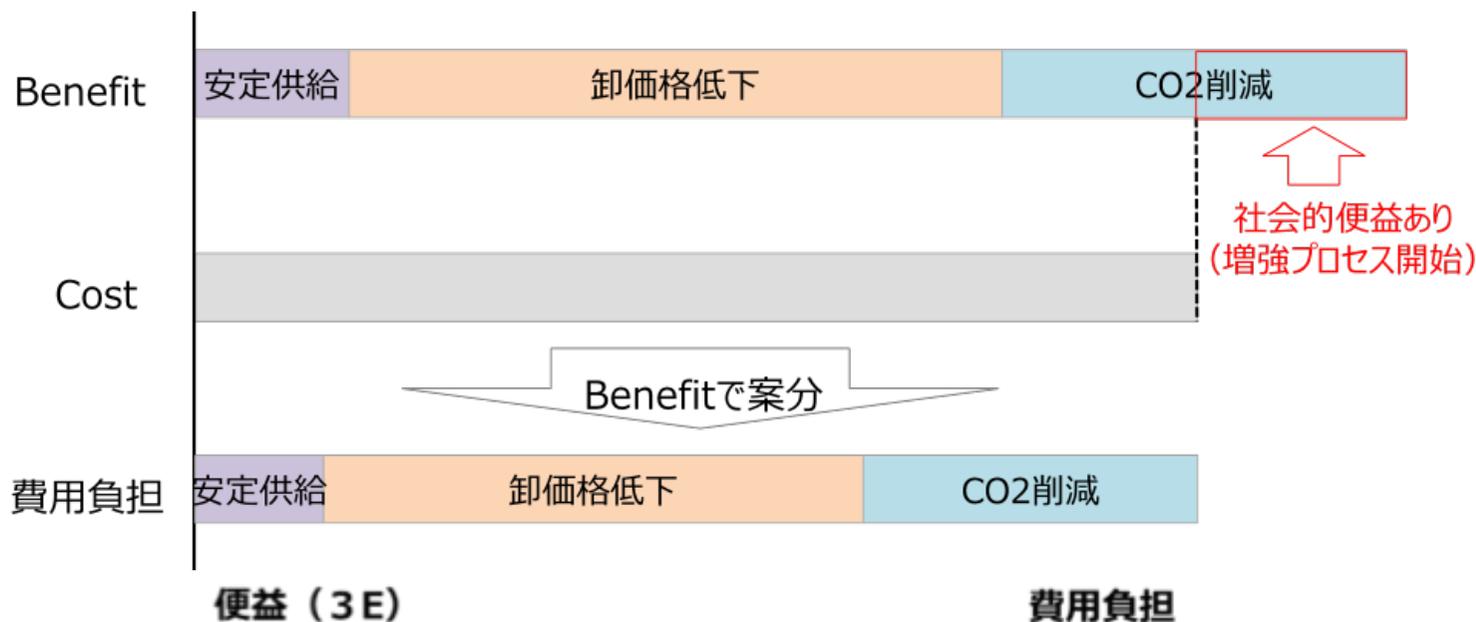
コスト：
137~274億ユーロ
(約1.7~3.3兆円)

社会厚生便益：
24億ユーロ/年
(約3,000億円)

	BE 2025	ST 2030	DG 2030	EUCO 2030
Cost (€ bn)	13.7 – 27.4	13.7 – 27.4	13.7 – 27.4	13.7 – 27.4
SEW (€/yr)	1,303	2,391	2,108	1,838
CO ₂ (kt/yr)	-8,489	-14,923	-9,003	-7,487
RES (GWh/yr)	17,756	19,507.9	19,238.6	13,840.4

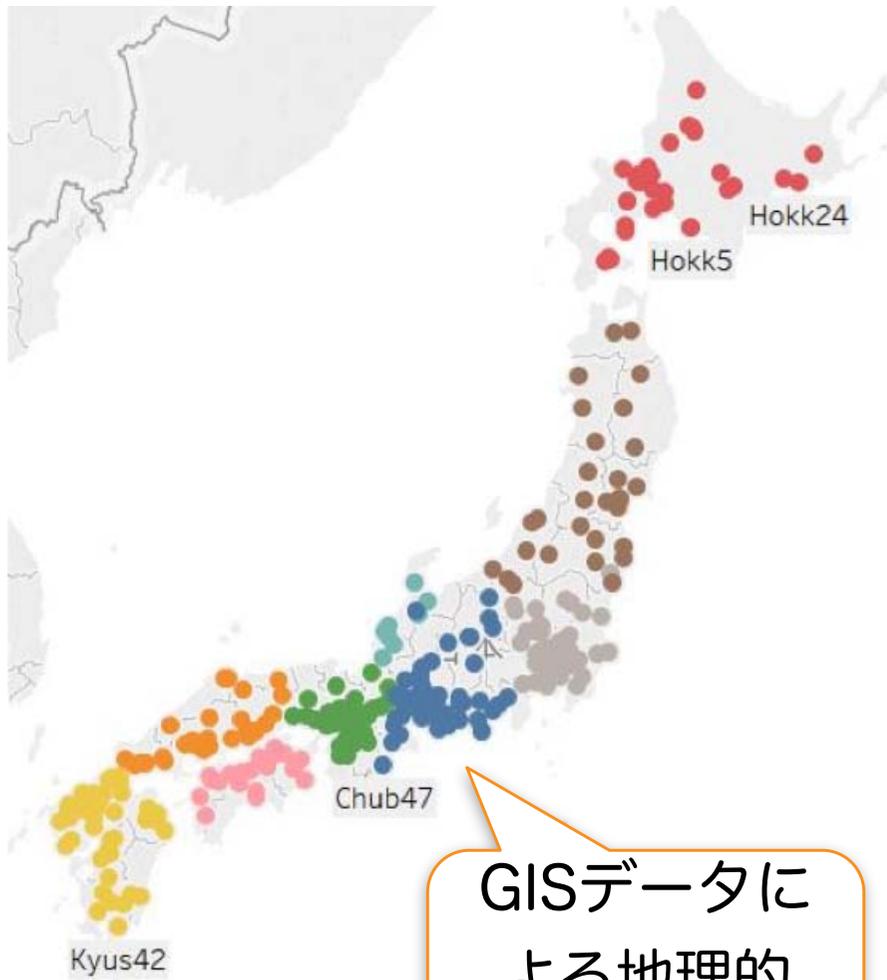


広域機関における費用便益分析



(出典) 電力広域的運営推進機関: 北本の更なる増強等の検討, 電力レジリエンス等に関する小委員会第3回資料2, 2019年2月22日

+ TIMESにおける送電線と変電所の模擬



GISデータによる地理的配置



(出典) 安田・濱崎: 2050年二酸化炭素排出量80%削減目標を達成するための電源構成と系統増強計画, 電気学会 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-20-024, HV-20-098 (2020)



TIMESとは？

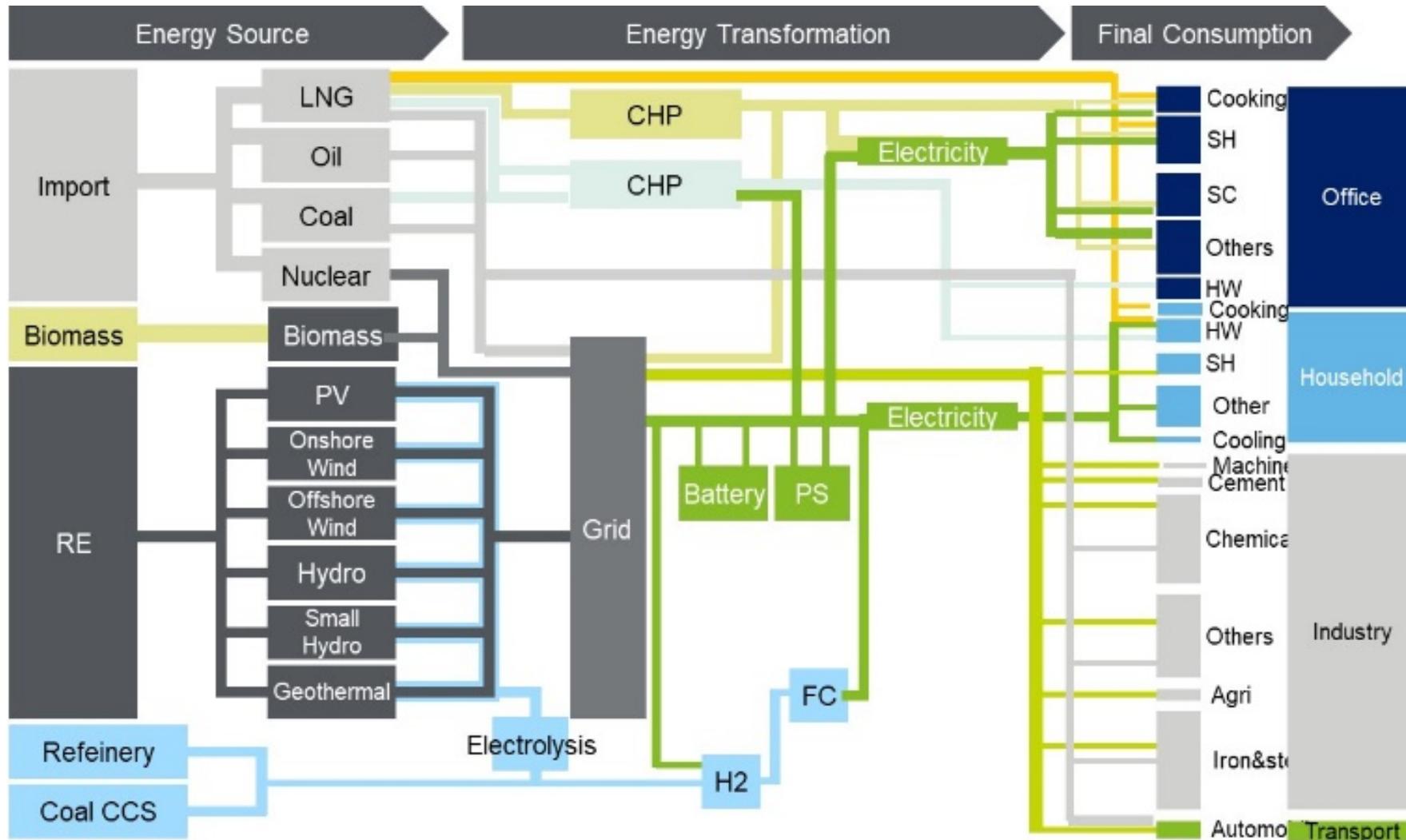


- **TIMES**: The Integrated MARKAL-EFOM System
- **IEA-ETSAP** (Energy Technology Systems Analysis Program) の活動として開発されているエネルギーモデル
開発環境
- 最適な技術の組み合わせ、投資時期、投資金額、価格、排出量などの算出を行う技術モデル
- IEA, IRENA, UK DECC, US DoE, EU JRCなど
政府・研究機関を中心に幅広く利用





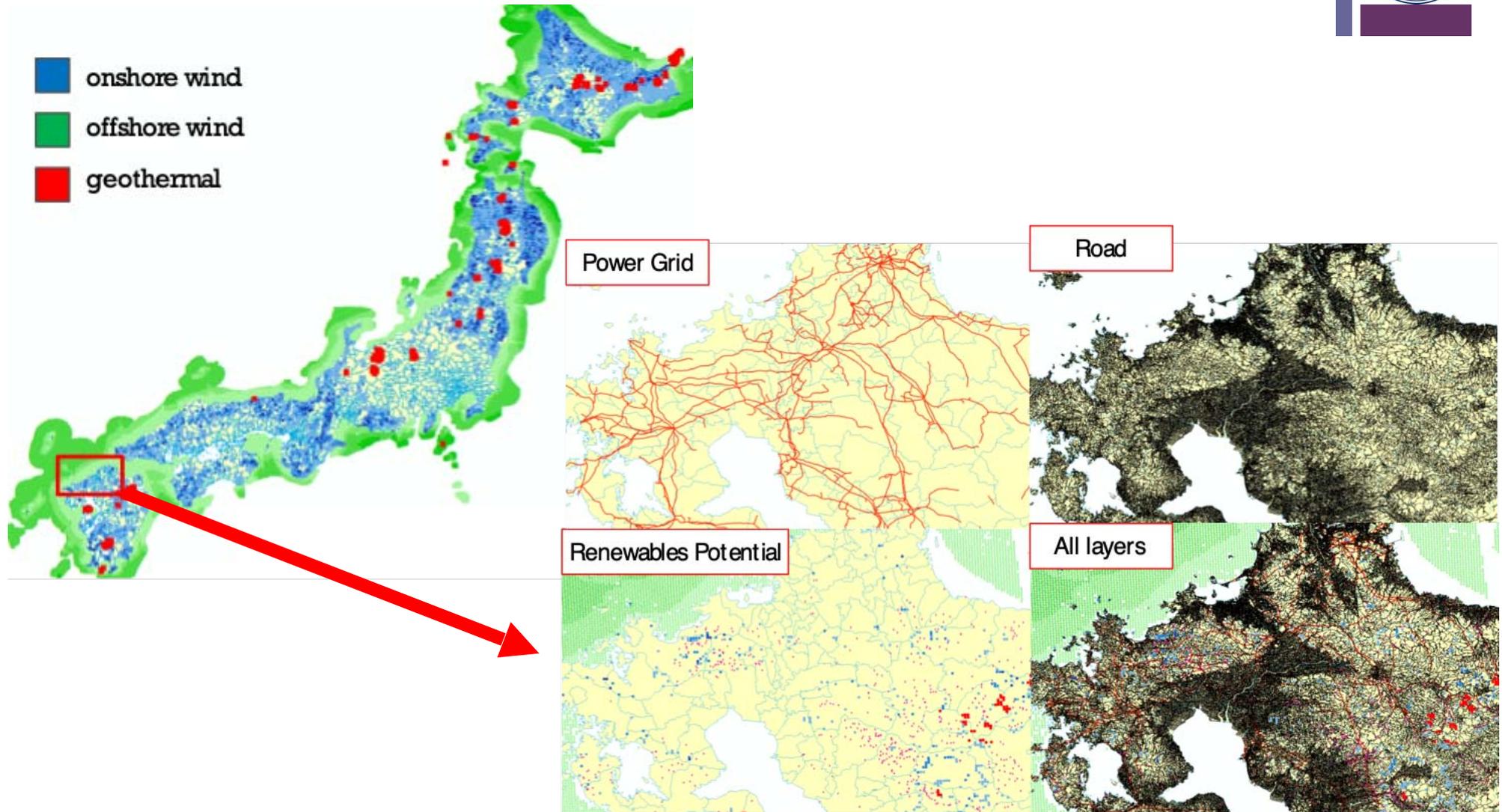
TIMESにおけるエネルギーフロー



(出典) 安田・濱崎: 2050年二酸化炭素排出量80%削減目標を達成するための電源構成と系統増強計画, 電気学会 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-20-024, HV-20-098 (2020)



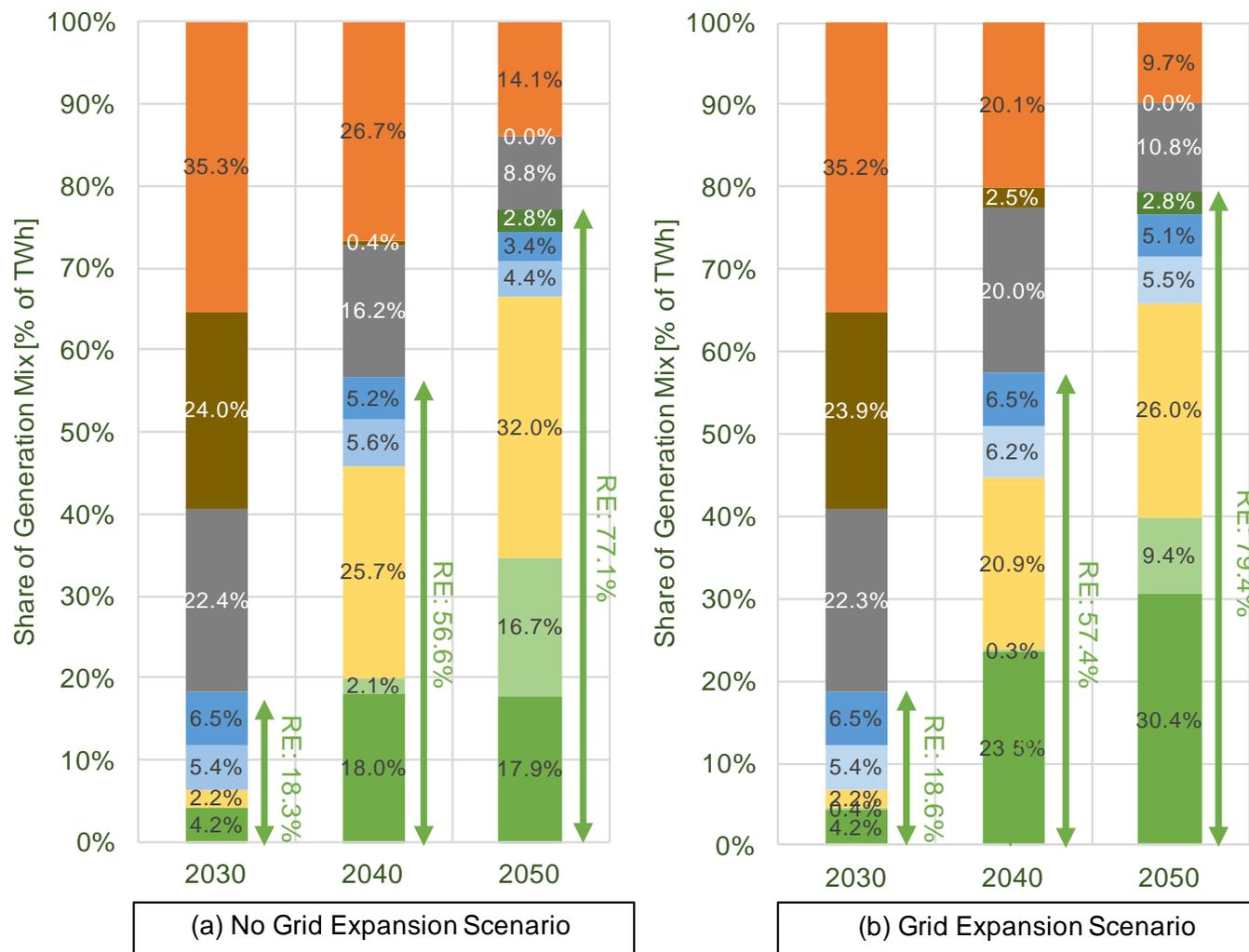
土地利用データとGISを用いた再生可能エネルギーのノードへの配分



(出典) 安田・濱崎: 2050年二酸化炭素排出量80%削減目標を達成するための電源構成と系統増強計画, 電気学会 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-20-024, HV-20-098 (2020)



2030~2050年の最適電源構成 (TIMES最適解析結果)

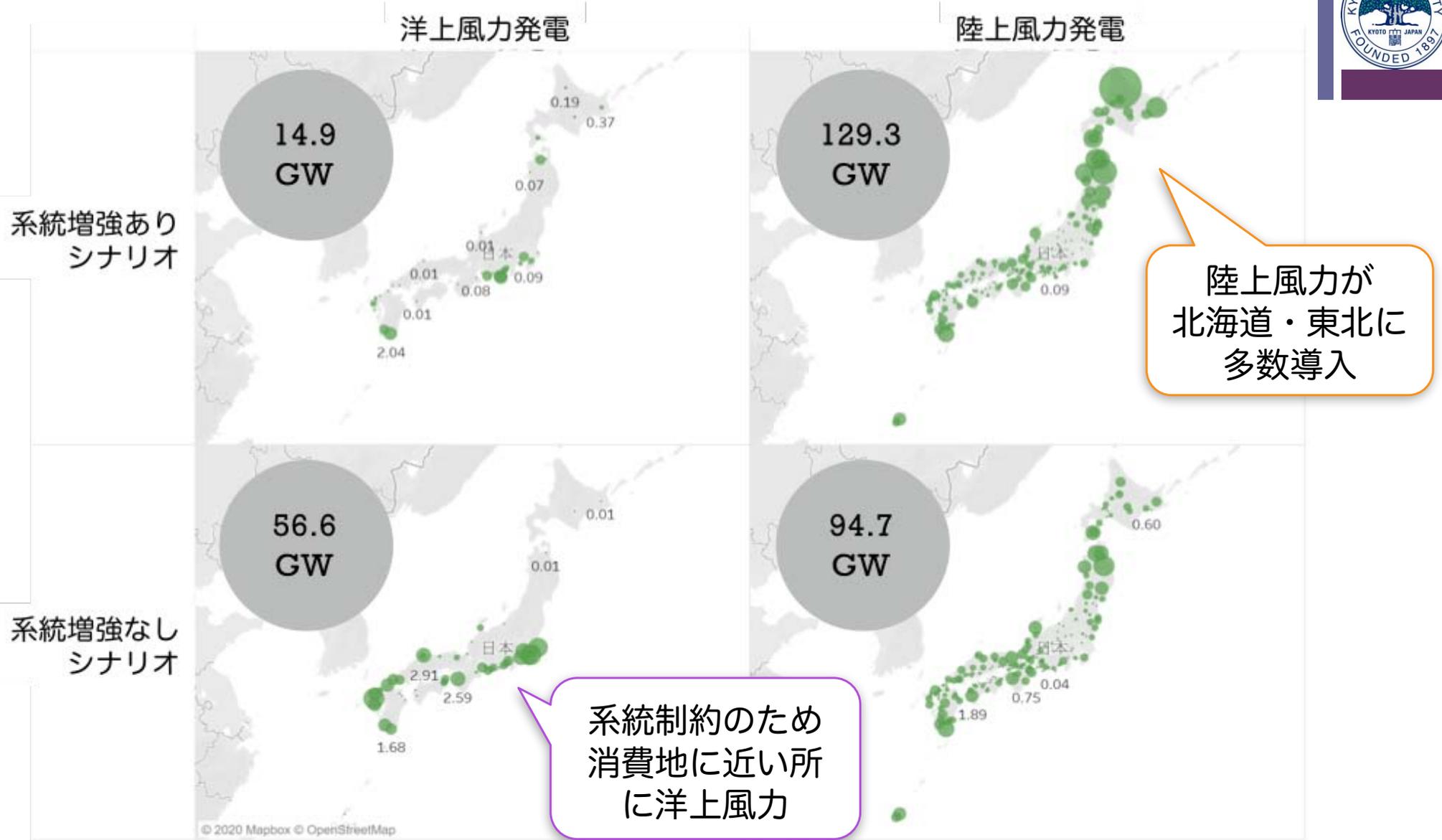


■ Onshore Wind ■ Offshore Wind ■ PV ■ Small Hydro ■ Hydro ■ Biomass ■ Nuclear ■ Coal ■ Gas

(出典) 安田・濱崎: 2050年二酸化炭素排出量80%削減目標を達成するための電源構成と系統増強計画, 電気学会 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-20-024, HV-20-098 (2020)



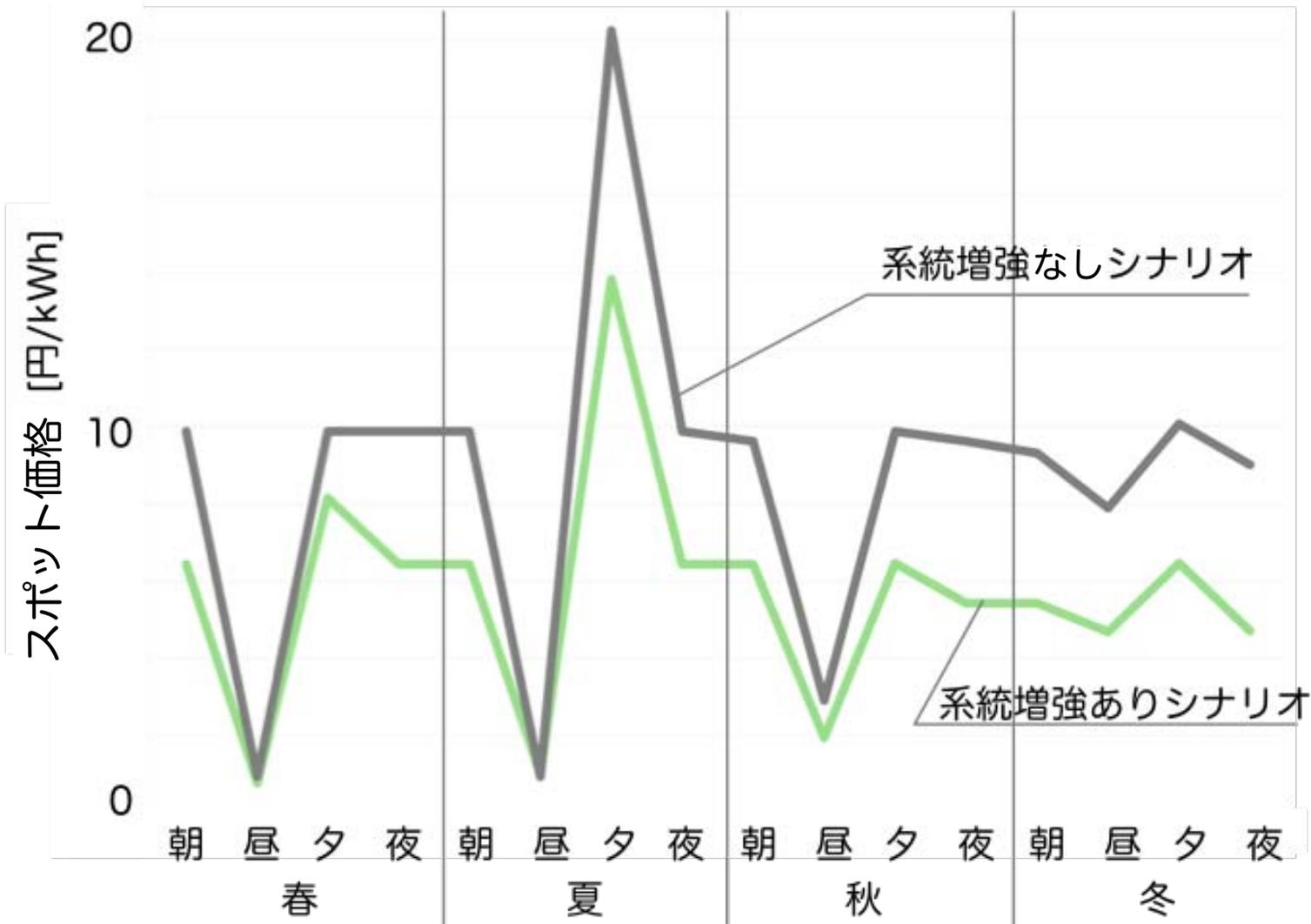
2050年における最適電源配置



(出典) 安田・濱崎: 2050年二酸化炭素排出量80%削減目標を達成するための電源構成と系統増強計画, 電気学会 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-20-024, HV-20-098 (2020)



2050年におけるスポット価格の推移



(出典) 安田・濱崎: 2050年二酸化炭素排出量80%削減目標を達成するための電源構成と系統増強計画, 電気学会 新エネルギー・環境/高電圧合同研究会, FTE-20-024, HV-20-098 (2020)

+ まとめ

- 電力自由化 = なんでもアリ ではない！
 - 混合経済: 適切な規制の下での自由競争
- 外部性の内部化による電源構成の変化
 - 電源構成の地理的分布の変化
- 電源構成: 地理的分布の不確実性
 - 規制, ゾーニング, セントラル方式
- 送電線投資: 不確実性化における意思決定
 - 最適化問題/感度分析/マルチシナリオ
 - 費用便益分析



エネルギー・資源学会
東大ESI社会連携
研究部門
シンポジウム

風力発電大量導入と 電力系統の最適設計

ご清聴有り難うございました。

yasuda@mem.iee.or.jp

