

(株) NTTデータ数理システム
学生研究奨励賞

北海道における風力・太陽光発電大量導入時 に向けたコストおよび二酸化炭素排出量変化と 運輸部門内電力利用の効果解析

北海道大学大学院 工学院
エネルギー環境システム専攻
岡田 季樹



1. 研究の背景と目的
2. 解析方法
3. 発電部門の解析結果
4. 発電+運輸部門の解析結果
5. まとめ

1. 研究の背景と目的



2015年12月に採択されたパリ協定に対応し、日本は2030年に温室効果ガスを2013年度比26%削減、2050年までに80%の削減を目指すことを閣議決定

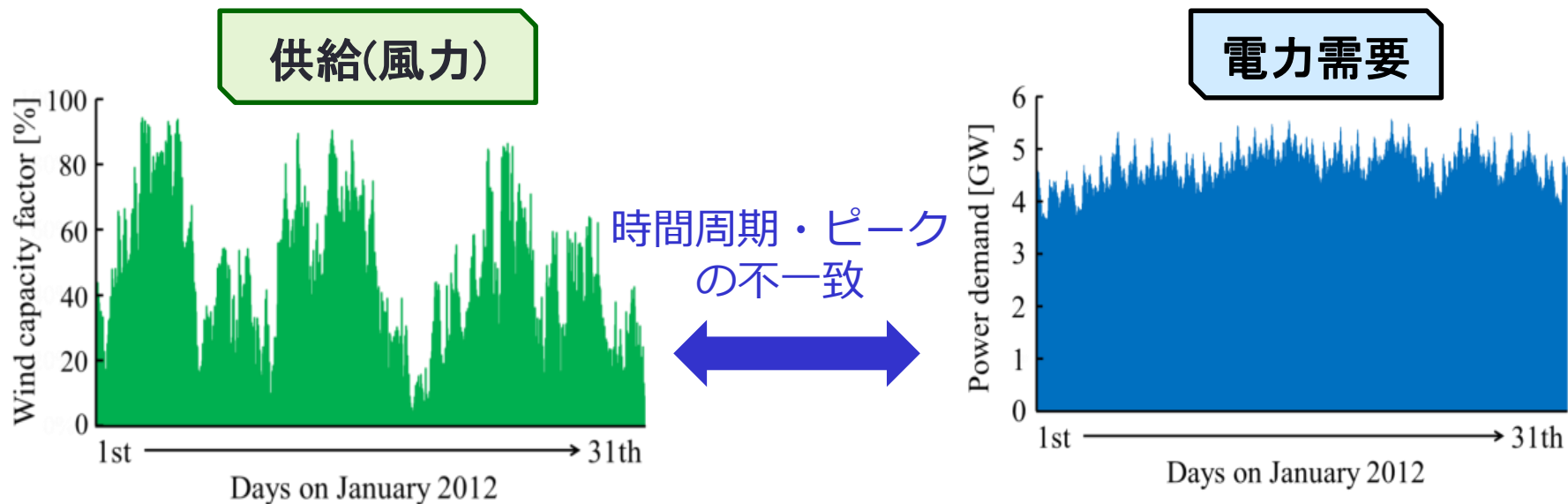


この目標を達成するため、長期的な視点での発電構成の変更が重要。特に北海道は風況の良い気象や土地利用の観点から再生可能エネルギーの導入ポテンシャルが高い特徴



風力・太陽光発電の大量導入への課題

- ・気候に依存する発電方法であるため出力変動が生じる
- ・発電に適している地域と電力需要の大きい地域が離れていることが多い



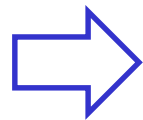
再生可能エネルギー大量導入



需要と供給のギャップ発生



変動を抑える必要



変動対策技術の評価

変動対策技術

- ・地域間の送電線の増強
- ・余った電気を貯め必要な時に放電できる蓄電池の導入
- ・出力変動により生じた余剰電力の輸送部門での利用

研究目的

再生可能エネルギー大量導入時の最適エネルギーシステム構成を明らかにする

- 発電設備・対策技術の最適設備構成
- 送電線増強, 大容量蓄電池によるトータルコスト上昇抑制効果
- 余剰電力の運輸部門での有効利用効果

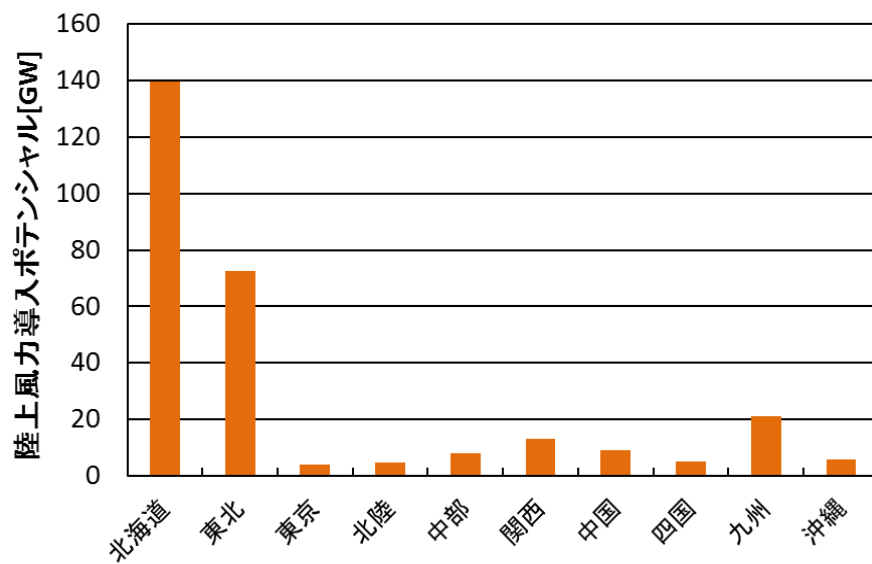


2050年の北海道

2050年・・・再生可能エネルギーのコストが十分安価になっていると予想される

北海道・・・風況が良い, 土地利用の観点からも最適

- ・約50%の陸上風力導入ポテンシャルが北海道に集中
- ・太陽光発電の導入ポテンシャルも全国的に見て高水準



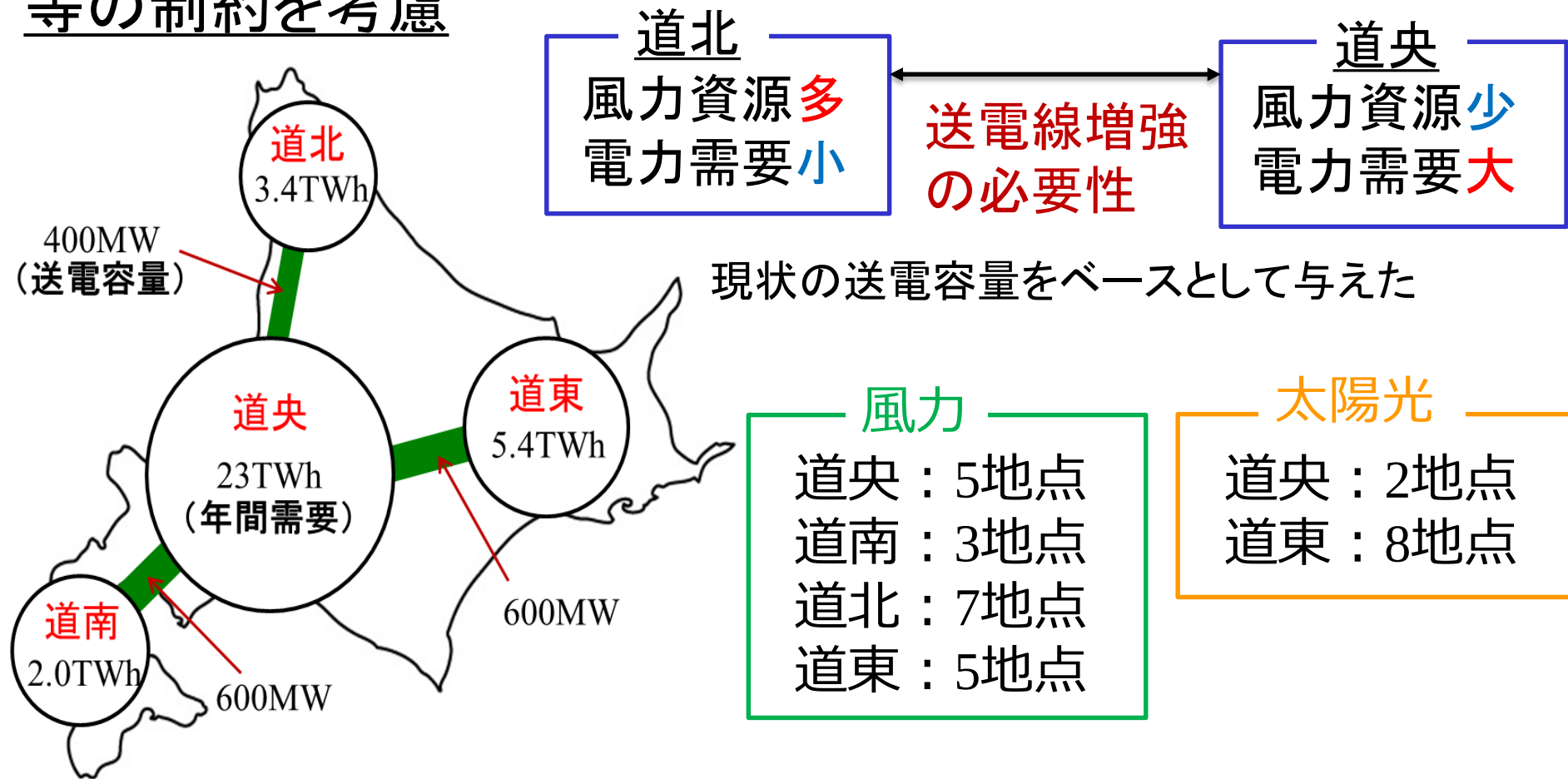
風力発電の導入ポテンシャル
(伊藤忠テクノソリューションズ株式会社より)

北海道は再生可能エネルギーの導入に適しており大量導入が見込まれる

2. 解析方法



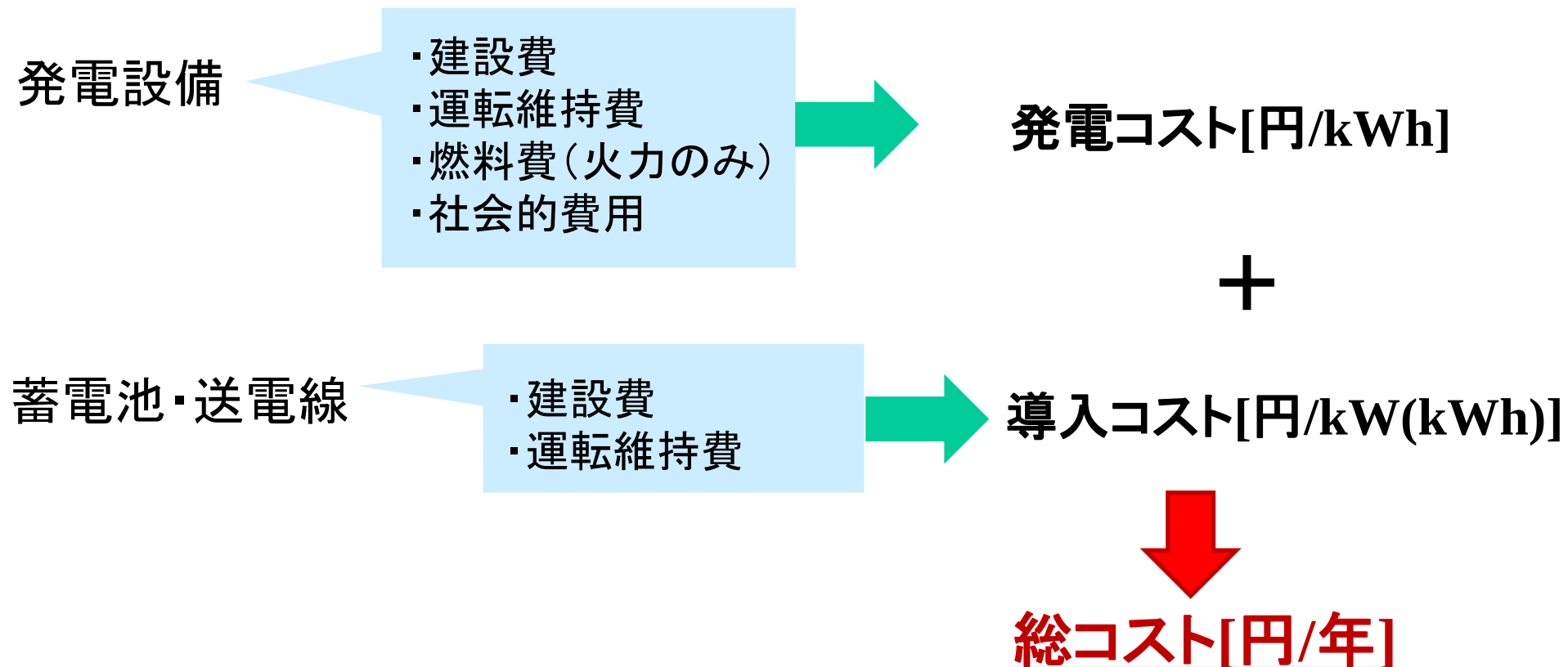
北海道を4つの地域に分割し電力需要の偏り, 送電線容量等の制約を考慮



電力需要は2014年の電力供給データおよび人口分布予測より2050年の1時間ごとの地域別需要を与えた



発電設備, 変動対策技術に要する, 減価償却年数で割った1年あたりの設備費, 運用費, 燃料費の合計を各技術に与えた





	Hydro	Coal	LNGCC	LNGOC	Wind	PV
Initial cost [10 ³ yen/kW]	640	250	120	83.8	252	222
Fixed O&M cost [10 ³ yen/kW/year]	9.1	10	3.7	0.74	5.3	3.2
Variable cost [yen/kWh]	0.20	9.1	14	16	0.30	0.20
Useful life [year]	40	40	40	40	20	30

経済産業省・資源エネルギー庁

発電コスト検証ワーキンググループ 2030年推定

再生可能エネルギーが十分安価となった2030年の値を採用
金利は3%



NaS電池

Cost items	NaS battery ^[1]
Initial cost [10^3 yen/kW]	47.4
Initial cost [10^3 yen/kWh]	38.6
Fixed O&M [10^3 yen/kW/year]	3.38
Variable O&M [yen/kWh]	0.233
Useful life [year]	15

[1] B. Zakeri, S. Syri, Renew. Sustainable Energy Rev, 42, 569–596, (2015)

送電線

Cost items	Transmission line
Initial cost [10^3 yen/kW]	1315
Fixed O&M [10^3 yen/kW/year]	9.9
Useful life [year]	15

使用ソフト:

NTTデータ数理システムの数理計画法パッケージ
Numerical Optimizer



線形計画法を用いた最適化(変数:制約式:)により,
一年間のトータルコスト最小になる計算



需給データ(1時間ごと)
電力需要
風力・太陽光発電の出力変動

エネルギー供給技術
風力, 太陽光, 石炭火力,
LNGOC(オープンサイクル)
LNGCC(コンバインドサイクル), 水力

変動対策データ
蓄電池(NaS電池), 送電線増強,
水素変換, 電気自動車への充電

制約式: 70本
変数: 約350000個
関数: 約660000個

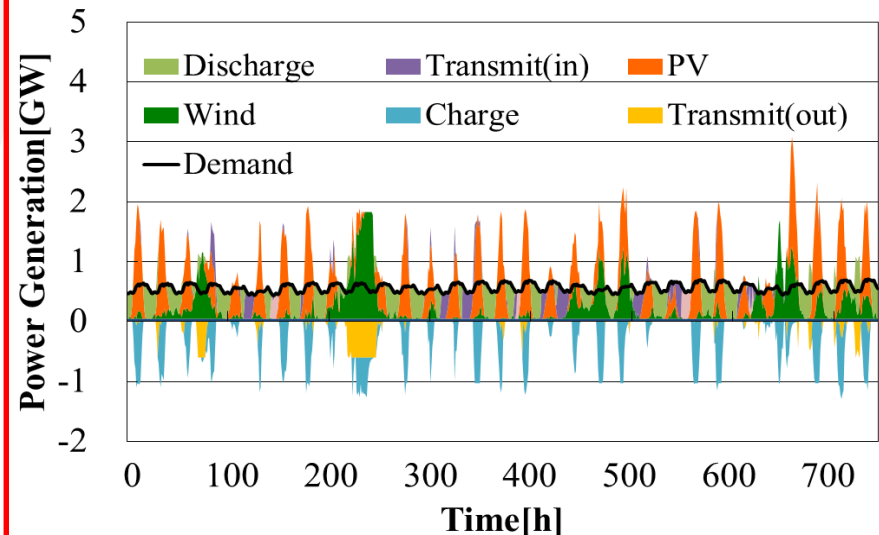


最適化

風力・太陽光発電が
年間需要に占める割合

最適化: 総コスト最小

計算結果





現在のガソリン車のうち50%が燃料電池車または電気自動車に置き換わると仮定，各車両ごとに水素または電気を供給する際のコストやCO₂排出量を解析し比較

ガソリン車の50%

燃料電池車（以下FCV）

- ・電力によるアルカリ水電解から水素製造
- ・ガス改質による水素製造
- ・アルカリ水電解とガス改質を適切に組み合わせ水素製造

電気自動車（以下EV）

- ・電気をそのまま用いて充電

それぞれの水素需要，電気需要を満たすようにエネルギーを製造（場合によっては発電部門の発電量も増加する）



電気自動車や燃料電池車の地域分布に応じ、必要な電力または水素をその地域に供給

FCVの場合の仮定

- ・各地域の水素需要を上回った水素は道央に送る
- ・水素製造地域内で消費する場合は圧縮水素で輸送
道央以外で作った水素を道央におく場合は液化水素で輸送
- ・アルカリ水電解とガス改質を組み合わせる場合は余剰電力で水素を製造し、水素需要に足りない分をガス改質によって補完

EVの場合の仮定

- ・午前4時にすべての車のバッテリー蓄電量が100%になる制約内で充電タイミングは最適化によって決定
- ・充電効率は95%, モータ効率は85%, 自己放電率は0.1%/h



・水素製造-燃料電池自動車への利用

計算範囲

electricity

エネルギー供給

- ・ 風力
- ・ 太陽光
- ・ 石炭火力
- ・ LNGOC
- ・ LNGCC
- ・ 水力

NaS電池

電力需要

アルカリ水電解

圧縮or液化・輸送

H₂

水素ステーション

水素需要(固定)

目的関数

最小化（総コスト） = 電力供給コスト + 水素製造コスト
（輸送コスト込）



アルカリ水電解装置コスト

	Electrolyzer
Initial cost [yen/kW]	75.2×10^3
O&M cost [yen/kW/year]	2.26×10^3
Conversion efficiency [Nm^3/kWh]	0.222
Lifetime	30

水素輸送コスト

液化水素	液化	28.6 [yen/Nm^3]
	輸送	1.6 [$\text{yen}/50\text{km} \cdot \text{Nm}^3$]
圧縮水素	圧縮	5.97 [yen/Nm^3]
	輸送	18.25 [$\text{yen}/50\text{km} \cdot \text{Nm}^3$]

水素輸送距離

各地域内	30km
道央-道北	300km
道央-道南	250km
道央-道東	200km

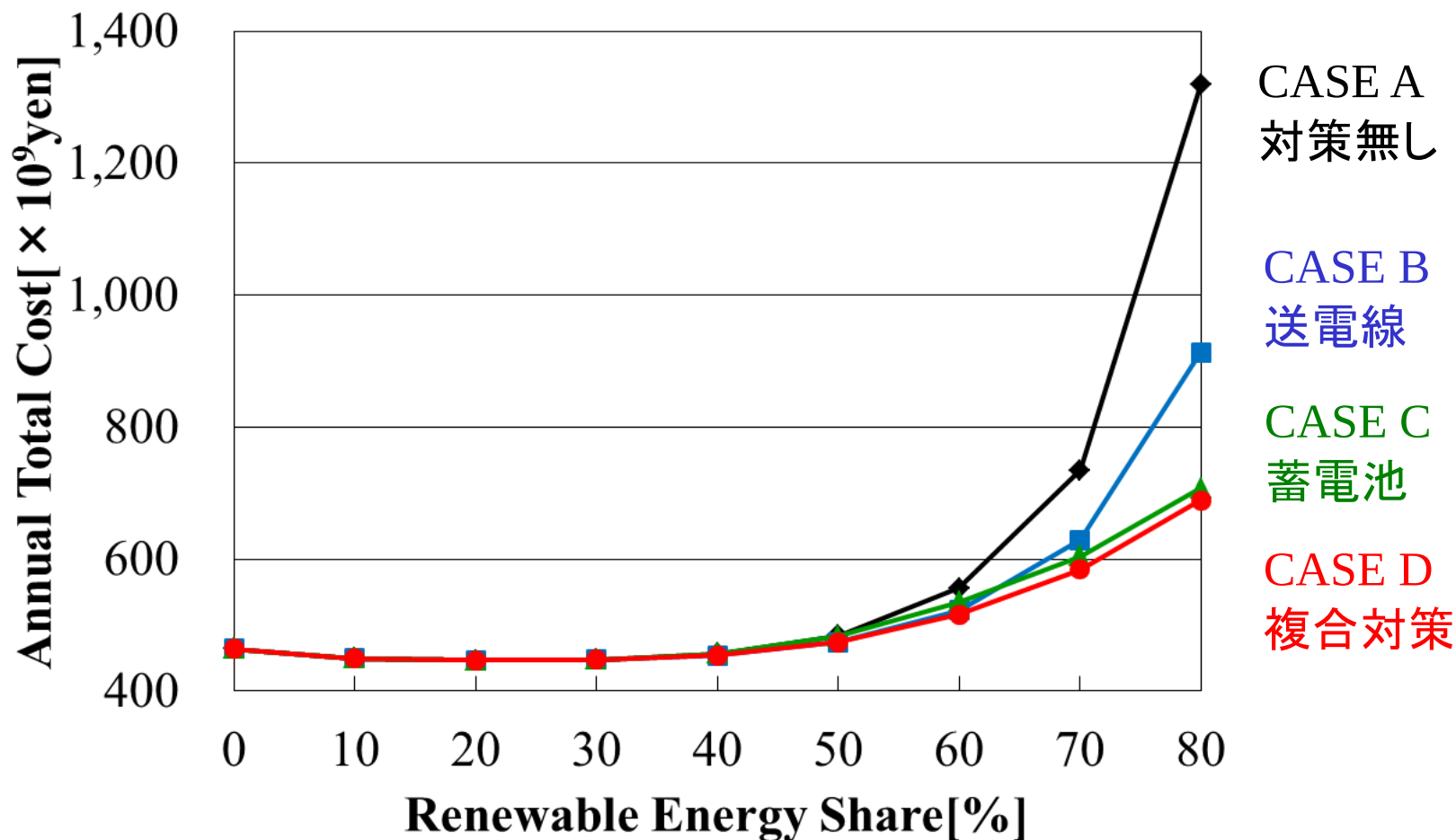
3. 発電部門の解析結果



運輸部門を含まない発電部門のみの解析

	Case A	Case B	Case C	Case D
送電線増強	×	○	×	○
NaS電池導入	×	×	○	○

出力変動対策として4つの解析ケースで比較



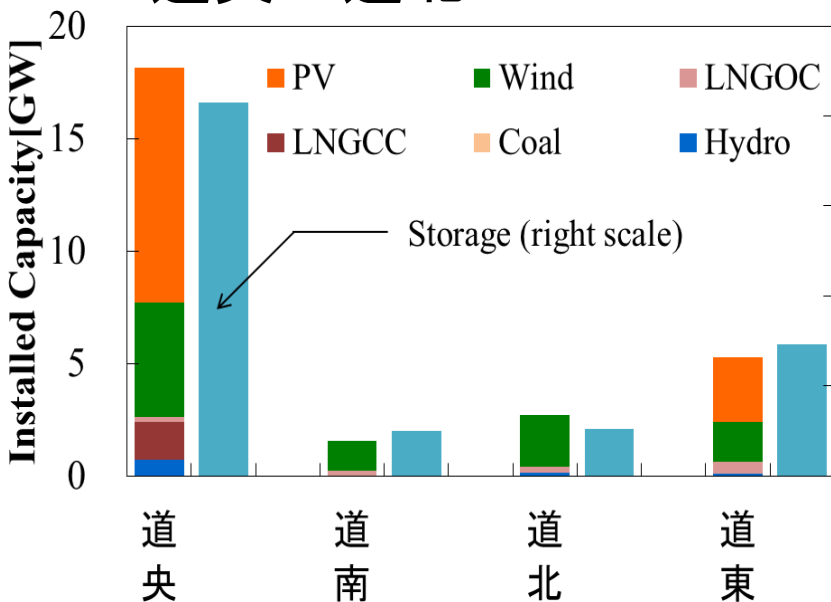
※横軸には水力発電は含めておらず, この他に約10%程度占める

- ・再エネ割合が50%までは余剰電力が生じずコスト上昇は見られない
- ・50%を超えると余剰電力の発生が顕著になりコストが上昇する
- ・「蓄電池のみ」と「蓄電池と送電線の複合対策」のコストは同程度



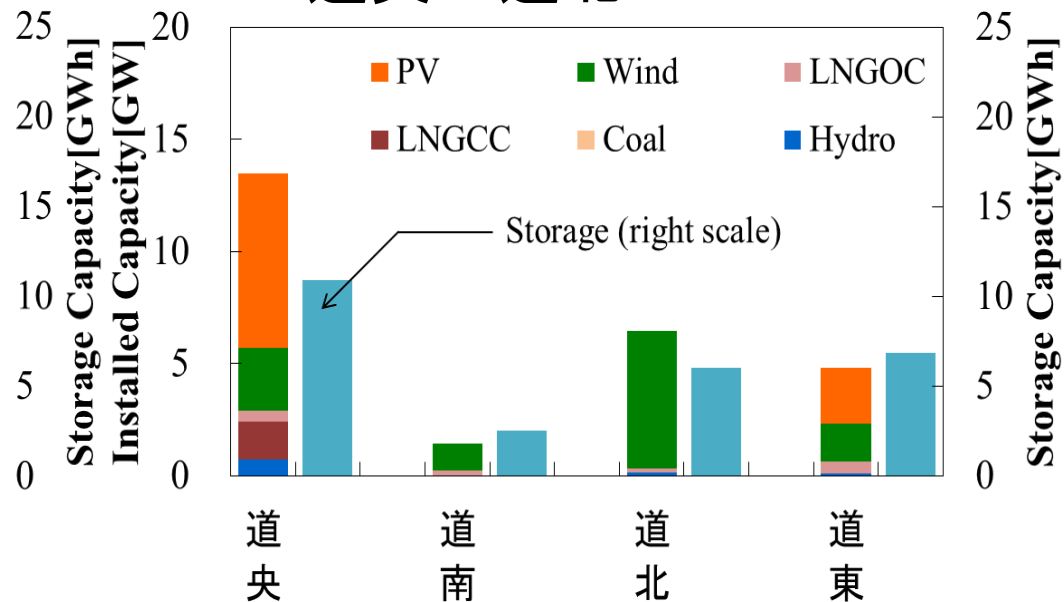
CASE C(蓄電池)

道央一道北 0.4GW



CASE D(複合対策)

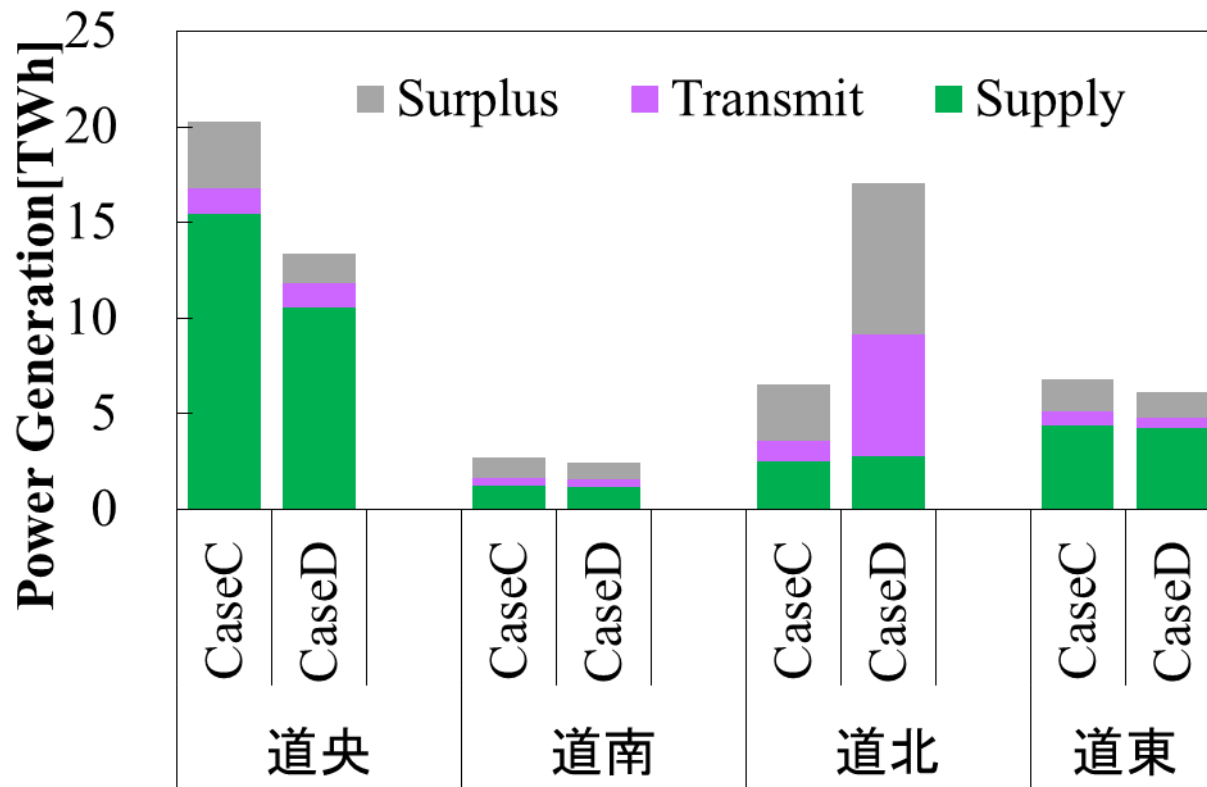
道央一道北 1.9GW



- ・蓄電池と複合対策は同程度のコストであるが設備容量や導入地域が異なる
- ・蓄電池導入に加え送電線を増強すると、道北の発電設備と蓄電池の設備量が増加し、道央の設備が減少



再生可能エネルギー割合80%

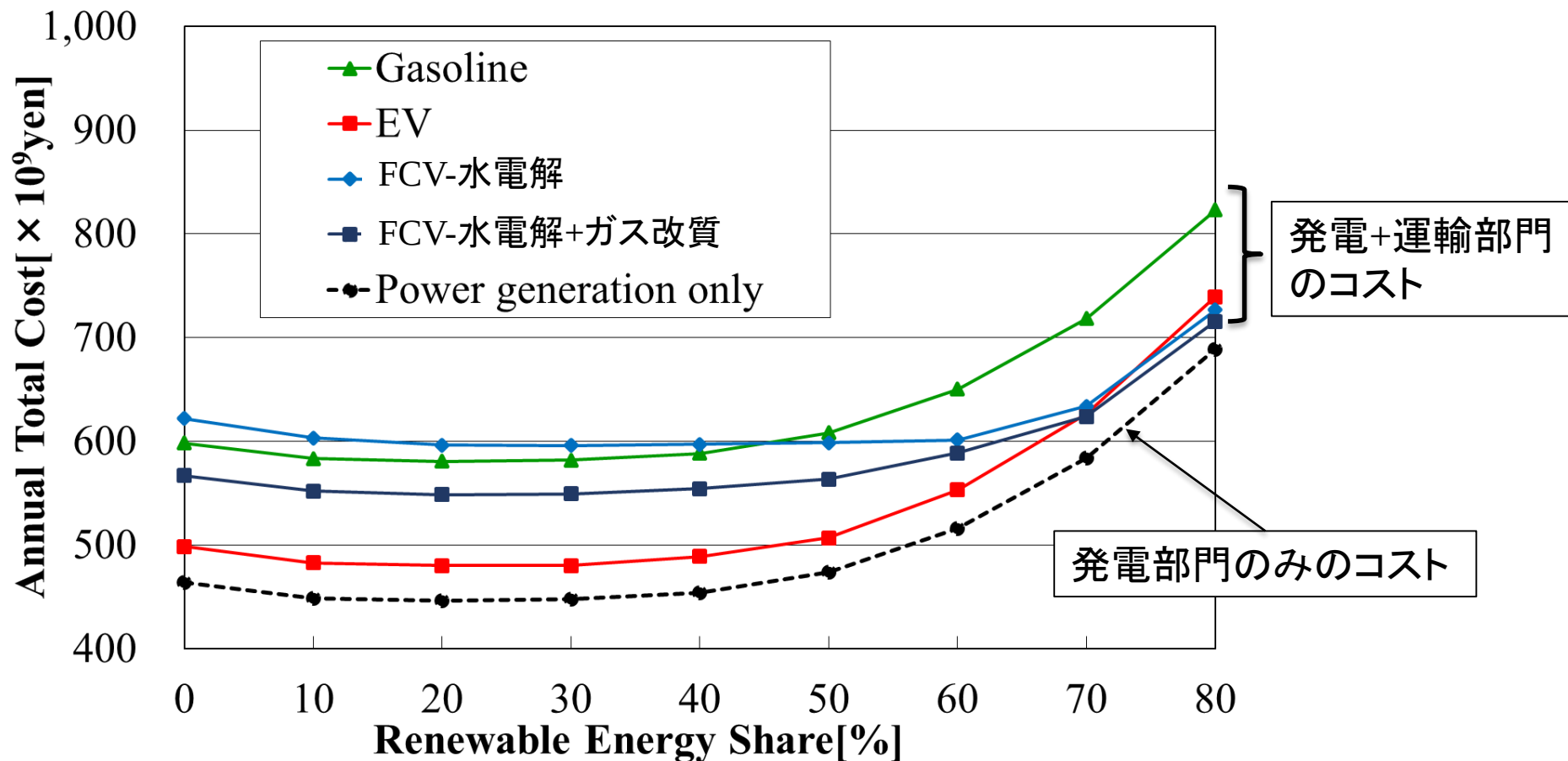


両ケースにおいて、再エネ割合が高くなると変動対策をしても余剰電力が発生



余剰電力の運輸部門での利用が有効

4. 発電+運輸部門の 解析結果

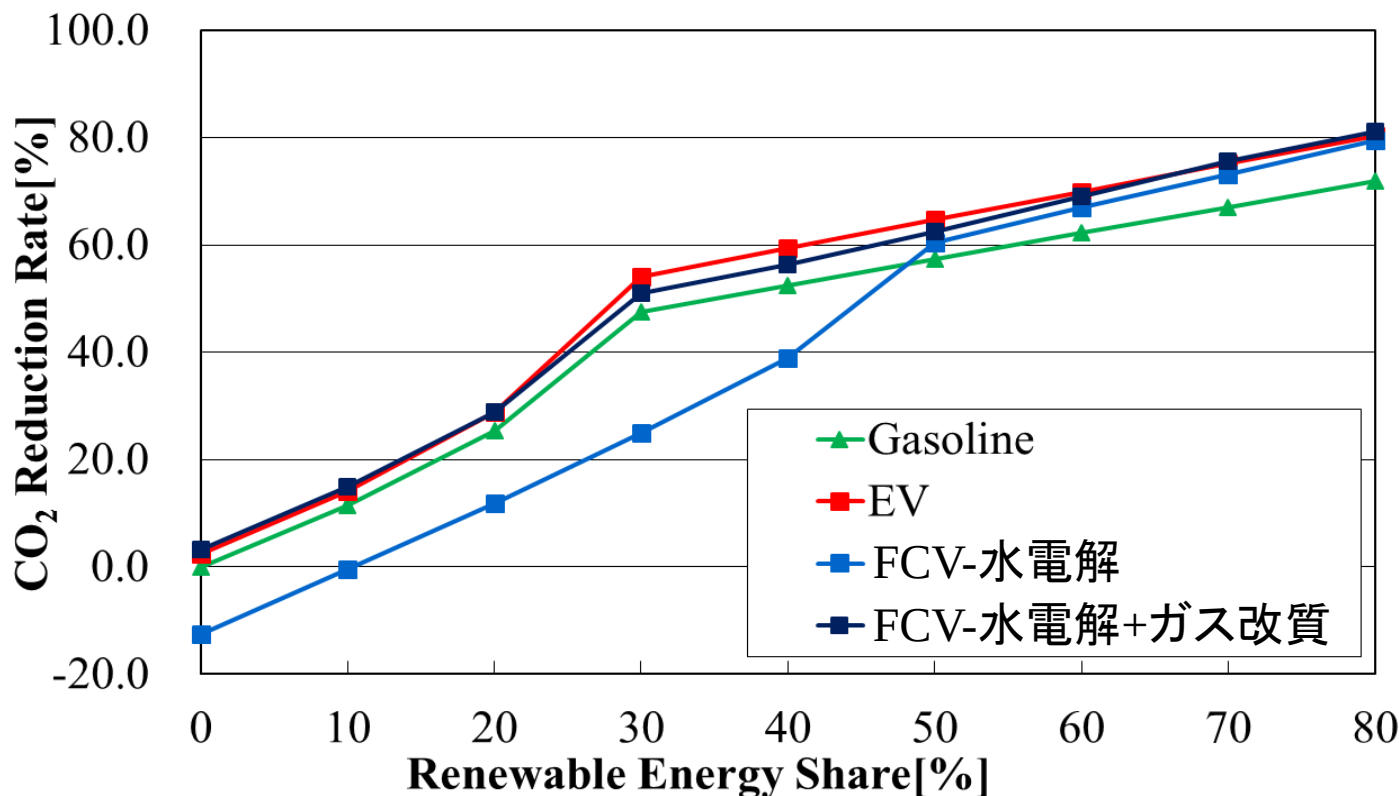


・EVは低コストだが、再エネ割合に関係なく発電部門のみの場合に対してのコスト上昇は一定(充電パターンがある程度決まっているため余剰電力をうまく充電に用いられていない)

・FCVは再エネ割合が低い範囲ではガス改質が有利だが、再エネ割合が高い場合は余剰電力を効率よく水電解に用い水素を作ることが最適

CO₂削減率変化

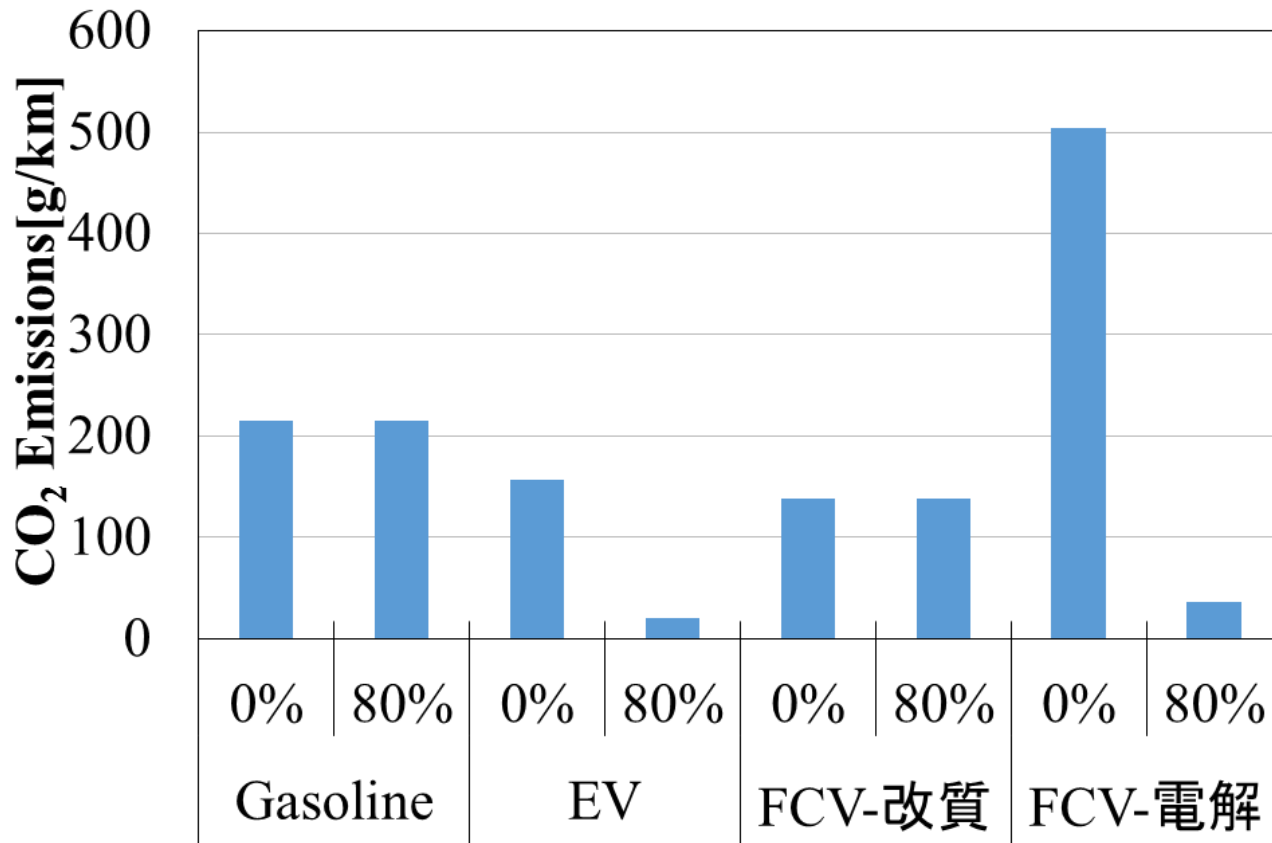
基準：発電部門再エネ0% 運輸部門ガソリン100%



- ・水電解で水素を作った場合のFCVでは、余剰電力がない場合、水素を作るために大幅に発電量を増やすためCO₂排出量が増加
- ・長距離トラック・バスはFCVの利用が見込まれるので、再エネ割合が高い範囲では余剰電力を用いた水電解により水素を作り、再エネ割合が低い範囲ではガス改質により水素をつくるのが最適



再エネ割合0%, 80%でのCO₂排出量



- ・再エネ0%では、CO₂排出量は少ない順に、ガス改質水素によるFCV, EV, ガソリン自動車であり、水電解水素によるFCVが最多
- ・再エネ80%では、EVおよび水電解水素によるFCVで大幅にCO₂排出量を削減でき、特に水電解水素によるFCVでその割合は大きい

5. まとめ

- 地域ごとに異なる1時間ごとのエネルギー需要と再生可能エネルギー供給データに対して最適エネルギーシステム構成を求める問題を扱い、変数35万個、関数66万個、制約式70本の解を適切に取得した。
- 再生可能エネルギー割合が50%までは余剰電力の発生が少なく、社会コストの上昇はほとんど生じない。50%を超えるとコスト上昇するが、蓄電池と送電線増強を適切に行うことによって、コスト上昇を最小化できる。
- ガソリン自動車に比べてEVは少ない社会コストでCO₂排出を効果的に抑制できる。一方、再生可能エネルギー大量導入時の余剰電力による水素製造・FCV利用は社会コストおよびCO₂削減の点で最も優れており、余剰電力が少ない場合は天然ガス改質水素が有効である。特にEV利用の難しい長距離輸送車に適している。