

地域内のFCV推定分布に基づく水素ステーション 配置最適化検討とコスト分析



筑波大学大学院
システム情報工学研究科
リスク工学専攻
諏訪部 悠太

1. 研究背景
2. 関連研究
3. 研究目的
4. 分析手法
5. データ設定と前提条件
6. 分析結果
7. まとめと今後の展望

1. 研究背景 エネルギーとしての水素

福島原発の事故を契機に日本のエネルギー事情が変化
 ➡ エネルギー構造の見直しの機運が高まる

エネルギー基本計画(第4次)

電気中心の二次エネルギーの構造
 ↓
 二次エネルギー供給の多様化が必要

エネルギーとしての水素
 に注目が集まる

水素

- ✓ 水や多様な一次エネルギーから製造可能 ➡ エネルギーセキュリティの向上
- ✓ 様々な形態(気・液・固)で輸送貯蔵 ➡ 再エネの利用拡大につながる可能性
- ✓ 燃料電池利用時は高効率・ゼロエミッション ➡ 低炭素社会への発展に貢献
- ✓ 将来の運輸部門で重要な要素 ➡ 燃料電池自動車(FCV)での利用が期待

1. 研究背景 水素ステーションの現状

FCV普及のためには広範な水素インフラが必要不可欠

目標

2016年内に100ヶ所程度整備

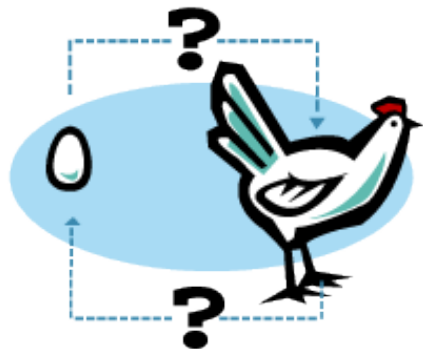
現状

77ヶ所整備・14ヶ所計画中

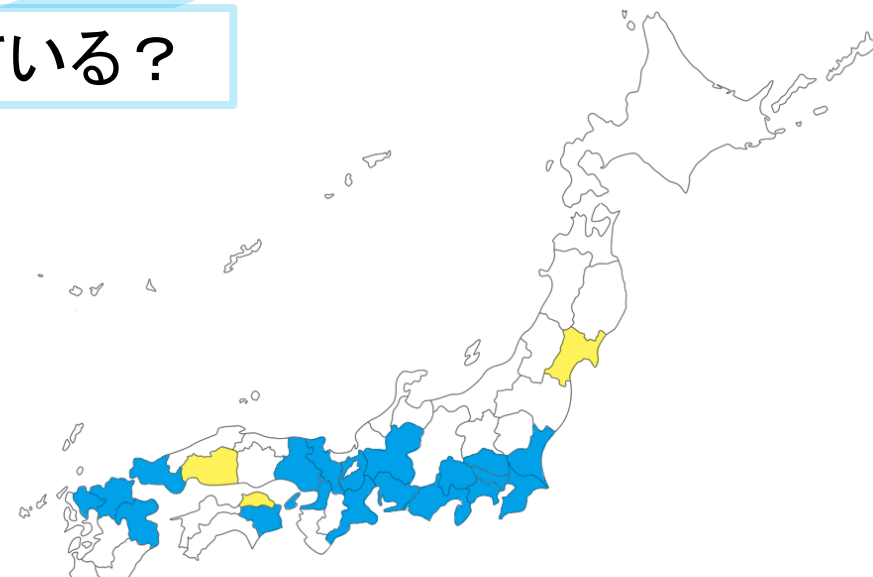
※2016/6現在

鶏と卵のジレンマ

なぜ遅れている？



- ✓ FCVの普及と水素ステーション整備の足並みを揃えることが難しい
- ✓ 互いが様子をうかがっている現状



出典 | 燃料電池実用化推進協議会(FCCJ)

■ 開所済
■ 計画中

水素インフラ導入の意思決定を促す分析が必要

2. 関連研究 水素インフラ設計のためのアプローチ

混合整数線形計画法を用いた数理最適化が一般的

Almansoori et al.: Design and Operation of a Future Hydrogen Supply Chain Snapshot Model (2006)

➡ 水素サプライチェーン(HSC)を設計する数理モデルの基礎を構築

Kim et al.: Strategic design of hydrogen infrastructure considering cost and safety using multi-objective optimization (2008)

➡ HSC設計数理モデルにおいてコストと安全性を考慮した多目的最適化分析

Almaraz et al. : Hydrogen supply chain optimization for deployment scenarios in the Midi Pyrenees region France (2014)

➡ 多期間に渡る時系列の中で多目的 (経済・環境・安全性) を最適化した分析

関連研究の課題

- ✓ 対象地域をグリッドもしくは行政区単位で分割し、割り当てられた水素需要を満たすモデルであるため、施設配置の地理的精度は低い
- ✓ 需要量だけ注視しているため土地利用・地理的制約が無視されている
- ✓ コスト等、供給側視点での最適化のため需要家側の視点が反映されていない

3. 研究目的

研究目的

1kmメッシュの詳細な需要分布を推計し、需要家側視点から水素ステーション配置を検討。これを軸に各ステーションの需要を満たす水素インフラ設計を最適化することで、水素インフラ整備計画の一助となることを目的とする

分析の流れ

FCVの台数分布を推計 + 地理的制約の考慮 (GIS)



需要側

水素ステーションの地点と需要量を決定 (Numerical Optimizer)
[FCV全体のステーションまでの移動距離の和の最小化]

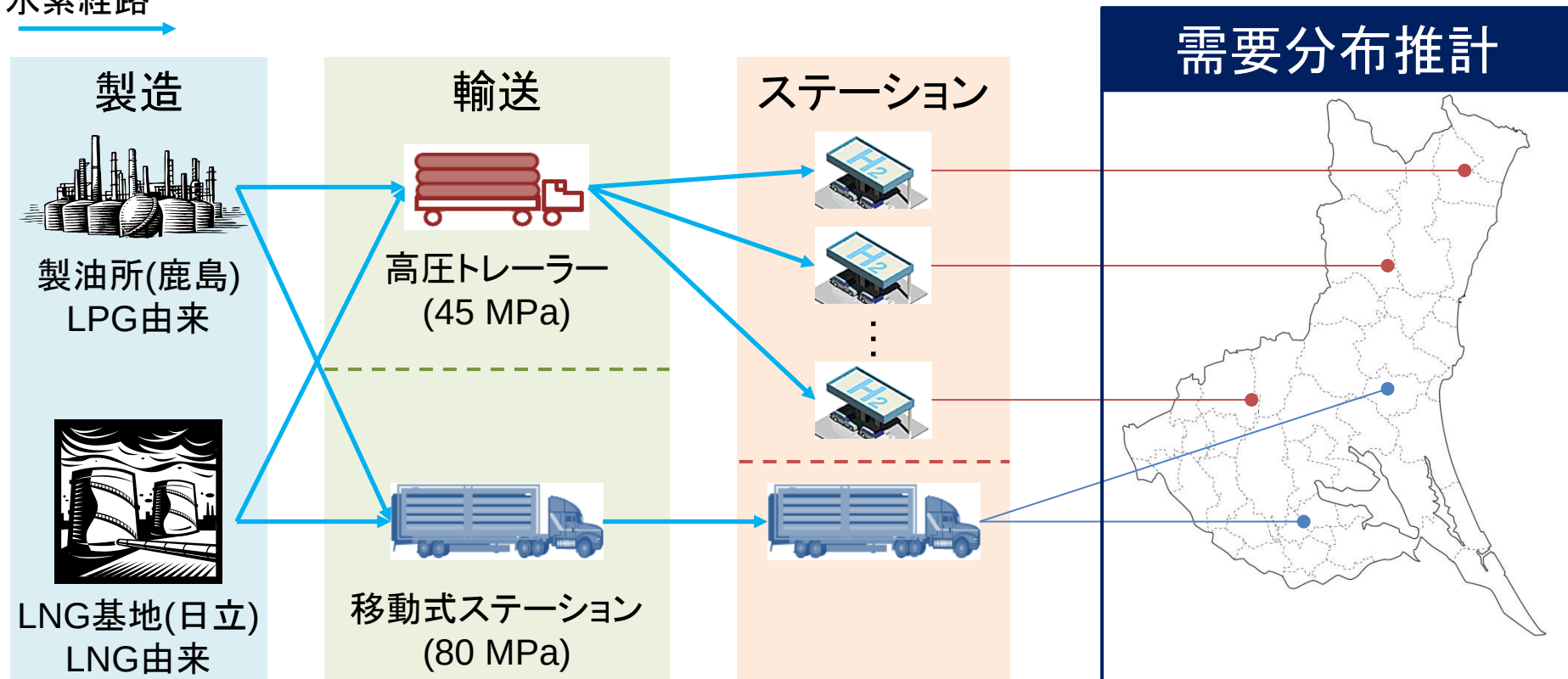


供給側

水素の製造・輸送方式、ステーション形態を決定 (Numerical Optimizer)
[水素供給コストの最小化]

4. 分析手法 分析対象 ケーススタディ：茨城県

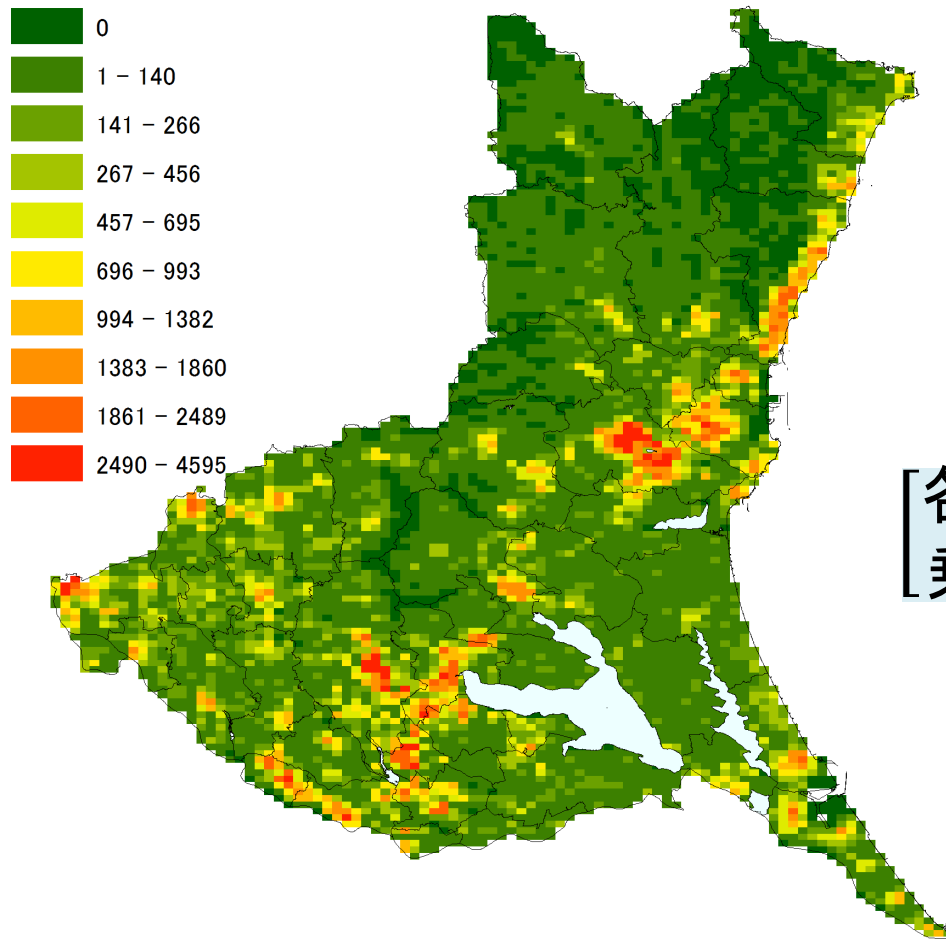
水素経路



- 需要分布に応じた詳細なステーション配置とプロセス全体を検討
- 最適化する際の目的関数は2つ (Numerical Optimizerを使用)
- ➡ **【全FCVのステーションまでの移動距離】【供給コスト】を最小化**
- ステーション数を変化させて分析を行う

4. 分析手法 茨城県推定乗用車台数分布

茨城県推定乗用車分布 [台]



- 各市町村の1kmメッシュの世帯比を求める
- 市町村別乗用自動車登録数データから各メッシュの乗用車登録台数を推計

[各メッシュの推定
乗用車登録台数]

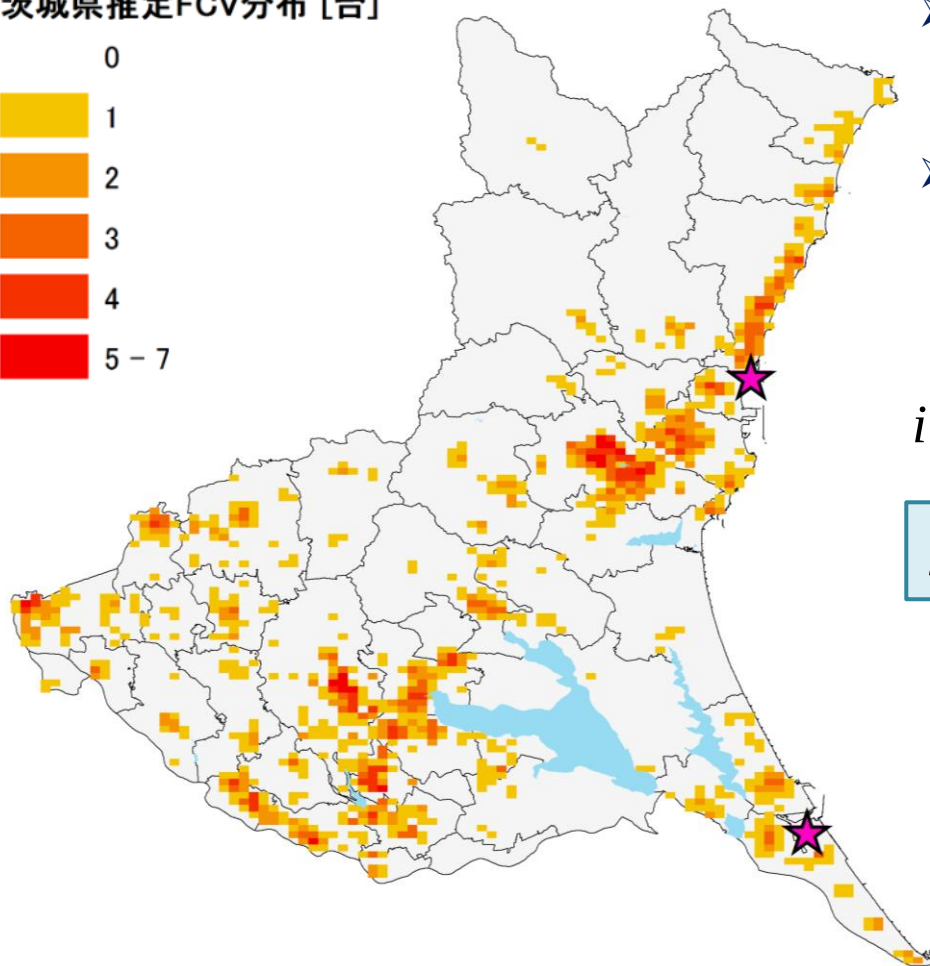
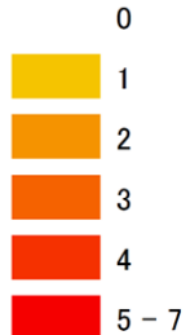
$$= \left[\frac{\text{市町村保有台数}}{\text{市町村世帯数}} \right] \times \left[\frac{\text{メッシュ世帯数}}{\text{市町村世帯数}} \right]$$

4. 分析手法 茨城県推定FCV台数分布

製造拠点位置



茨城県推定FCV分布 [台]



- 各メッシュのFCVの普及割合を一定と仮定
- 式(1)を満たすような α を求める

$$\sum_{i \in \text{point}} \boxed{\alpha \cdot M_i} = E_{FCV} \quad (1)$$

i 地点のFCV台数

α : FCVの普及割合

i : 需要地メッシュ番号

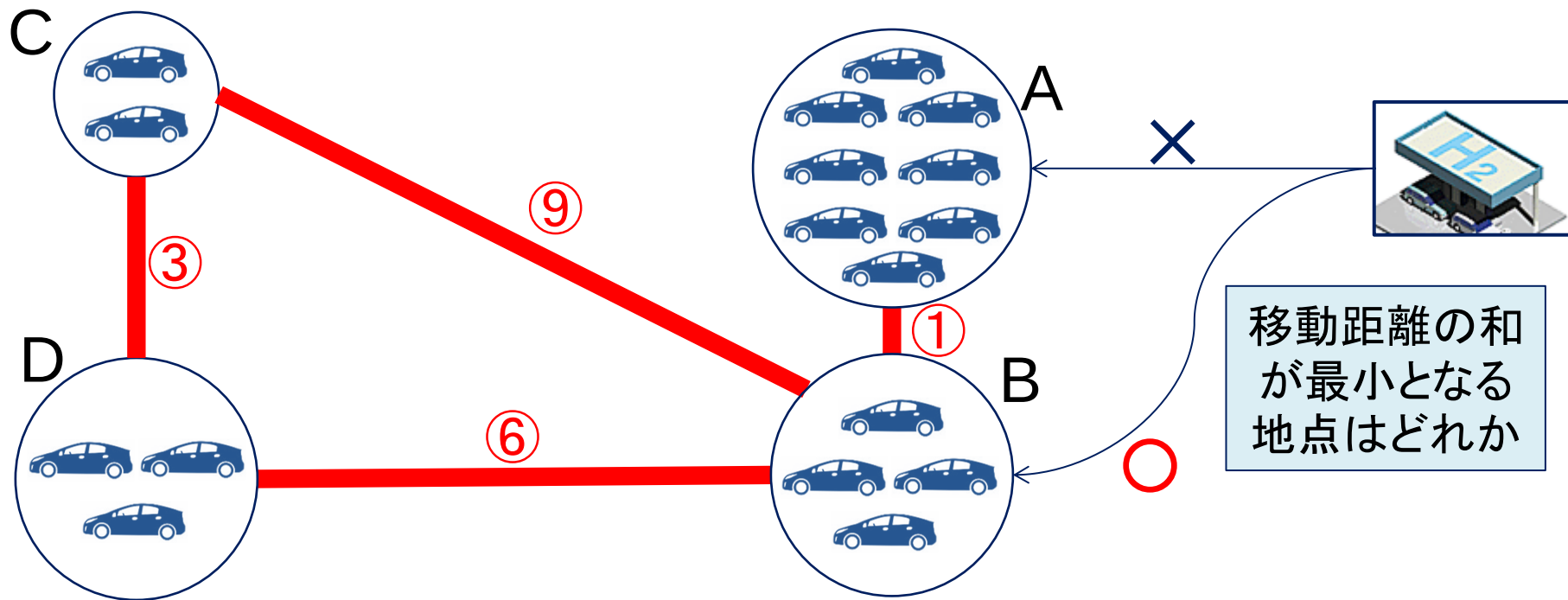
M_i : 各メッシュの自動車登録台数

E_{FCV} : 県全体のFCV普及予測台数

4. 分析手法 ステーションの地点を決定

p-メディアン問題

➤ 各需要点から施設を配置した地点への移動距離の総和を最小にする点を求める



➤ 水素ステーションの配置位置

➤ 配分されるFCV台数 = 水素需要量

が決定される

4. 分析手法 FCVの水素充填移動距離の合計を最小化

p-メディアン問題

$$\text{minimize } TD = \sum_{i \in \text{point}} \left\{ \alpha \cdot M_i \cdot \sum_{j \in \text{point}, j \neq i} (d_{ij} \cdot x_{ij}) \right\} \quad (2)$$

TD : 総FCV移動距離

d_{ij} : i 地点と j 地点間の距離

N_p : 水素供給拠点数

x_{ij} : 0-1整数変数 i 地点が供給拠点となる場合1
ならない場合は0

$\alpha \cdot M_i$: i 地点のFCV推定台数

$$\text{s.t. } \sum_{i \in \text{point}} x_{ii} = N_p \quad \text{水素供給拠点数 } N_p \text{ を制約} \quad (3)$$

$$\sum_{j \in \text{point}} x_{ij} = 1 \quad \text{供給地点間のFCVの競合を防ぐ} \quad (4)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad , i \neq j \quad \text{供給地点以外にFCVが配分されることを防ぐ} \quad (5)$$

4. 分析手法 水素供給コストの最小化

配送問題

- 1年間の水素供給に係るコストを最小化する
- 製造・輸送・ステーションの各設備費、製造・輸送の運転費を考慮

$$\begin{aligned}
 \text{minimize } TC = & \frac{1}{CCF} \left(\underbrace{NP \cdot PCC + NS \cdot SCC + NPS \cdot SPCC + 2 \cdot NS \cdot TCC}_{\text{固定費}} \right) \\
 & + \underbrace{\sum_{r \in \text{plant}, r' \in \text{point}} TFC \cdot (NTrans_{rr'} + NPTrans_{rr'}) \cdot 2 \cdot d_{rr'}}_{\text{輸送可変費}} \\
 & + \underbrace{\sum_{r \in \text{plant}} PFC_r \cdot Pflow_r}_{\text{製造可変費}}
 \end{aligned} \quad (6)$$

TC : 総供給コスト CCF : 資本費用係数 NP : 製造拠点数 PCC : 製造設備費

NS, NPS : 供給拠点数(固・移) $SCC, SPCC$: ステーション設備費(固・移) TCC : 輸送設備費

TFC : 輸送可変費係数 $NTrans_{rr'}, NPTrans_{rr'}$: r 地点から r' 地点間の輸送回数(固・移)

$d_{rr'}$: r 地点から r' 地点間距離 PFC_r : r 地点の製造可変費係数 $Pflow_r$: r 地点の製造量

4. 分析手法 水素供給コストの最小化

$$s.t. \quad 0 \leq Pflow_r \leq NP_r \cdot Pcap \quad \text{製造量の上限} \quad (7)$$

$$Pflow_r = \sum_{r' \in \text{point}} Tflow_{rr'} \quad r \text{ 地点での製造量} = r \text{ 地点からの輸送量} \quad (8)$$

$$Tflow_{rr'} = Tcap \cdot NTrans_{rr'} + TPcap \cdot NPTrans_{rr'} \quad (9)$$

r 地点から r' 地点への供給量 高圧トレーラと移動式ステーションの和

$$Sflow_{r'} = \sum_{r \in \text{plant}} Tflow_{rr'} \quad r' \text{ 地点の供給量} = r' \text{ 地点への輸送量} \quad (10)$$

$Pflow_r$: 製造量

$Pcap$: 製造量上限

NP_r : 製造設備数

$Tflow_{rr'}$: 輸送量

$Tcap, TPcap$: 輸送量上限(固・移)

$Sflow_{r'}$: 供給量

4. 分析手法 水素供給コストの最小化

$$s.t. \quad Demand_{r'} \leq Sflow_{r'} \quad r' \text{地点の需要を供給量が上回る} \quad (11)$$

$$\sum_{r \in \text{plant}} Tcap \cdot NTrans_{rr'} \leq 365 \cdot Tcap \cdot NS_{r'} \quad (12)$$

r' 地点の高圧トレーラー輸送回数上限

$$\sum_{r' \in \text{point}} TPcap \cdot NPTrans_{rr'} \leq 365 \cdot TPcap \cdot NPS_r \quad (13)$$

r 地点からの移動式ステーションの輸送回数上限

$NS_{r'}$: 0-1整数変数 r' 地点に固定式ステーションを建てる場合1
建てない場合は0

NPS_r : r 地点から供給を行う移動式ステーション数 $Demand_{r'}$: r' 地点の水素需要量

4. 分析手法 需要家側コストの貨幣価値換算

需要家側:FCV全体のステーションまでの移動距離の和[km]



トレードオフの関係

供給側:水素供給コスト[円]

比較のために需要家側コストの貨幣価値換算が必要

移動距離の和 ➡ 交通の時間価値 + 走行経費

交通の時間価値

➤ 次スライド参照

走行経費

- 需要点からステーションへ移動する際に消費する燃料費
- 水素価格を1100円/kg 年間25往復すると仮定して計算

4. 分析手法 交通の時間価値

「時間価値」(Value of time) ➡ 時間変化に対する支払意思額

➤ **交通の時間価値** = 交通時間が1分減ることに対する支払意思額

所得接近法による交通の時間価値推定

- 機会費用の考え方に基づく
- 機会費用とは「ある選択肢を採る際に犠牲とされる費用」

➔ **労働賃金率**

$$[\text{交通の時間価値}] = \frac{[\text{年間平均現金給与}]}{[\text{年間平均労働時間}]}$$

茨城県の勤労統計と時間価値

総実 労働時間	現金 給与総額	非業務交通 の時間価値
(時間)	(千円)	(円/分)
153.5	324.9	28.2

出典 | 毎月勤労統計調査地方調査 平成26年年平均分結果

- FCV平均移動速度を 20 km/h と仮定して移動時間を計算する

5. データ設定と前提条件 茨城県のFCV普及台数推定

茨城県内のFCV導入推移の推定

年次	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
累計台数	0	4	15	75	300	750	1500
(単年度増)	0	4	11	60	225	450	750

出典 | いばらき水素戦略

2020～2030年の乗用車車種別普及目標(政府目標)

	2020年	2030年
従来車	50～80%	30～50%
次世代自動車	20～50%	50～70%
ハイブリッド自動車	20～30%	30～40%
電気自動車 プラグイン・ハイブリッド自動車	15～20%	20～30%
燃料電池自動車	～1%	～3%
クリーンディーゼル自動車	～5%	5～10%

出典 | 自動車産業戦略2014

➤ 茨城県の新車販売台数(2014) **75,000**台

本研究では普及台数1500台の時点での分析を行う

5. データ設定と前提条件 価格・エネルギー消費

エネルギー価格

LNG	83 円/kg
LPG	93 円/kg
電力	16 円/kWh
軽油	137 円/L

出典 | EDMCエネルギー・経済統計要覧

FCV諸条件

燃費	100 km/kg-H ₂
年間走行距離	10000 km
年間水素充填量	100 kg-H ₂
充填圧力	70 MPa

出典 | 水素キャリアに応じたフィージビリティスタディ

設備諸元

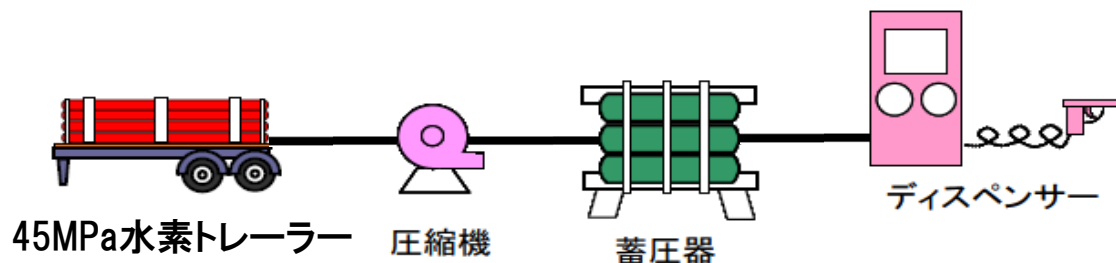
	費用[円/基(台)]	設備規模	耐用年数
出荷設備	4億 0 万	1500Nm ³ /h (45MPa)	10
輸送設備	4800 万	260kg-H ₂ (45MPa)	10
(固)ステーション設備	4億 3500 万	300Nm ³ /h (80MPa)	10
(移)ステーション設備	2億 0 万	26kg-H ₂ (80MPa)	5

出典 | 水素キャリアに応じたフィージビリティスタディ, 「製油所からの水素供給能力評価」調査報告書, 地域水素供給インフラ技術・社会実証

- 水素製造時に消費する電力: 4.98 kWh/kg-H₂
- 水素製造時に消費する原料: LNG 2 kg or LPG 2.2 kg
- 輸送設備の燃費: 3 km/L

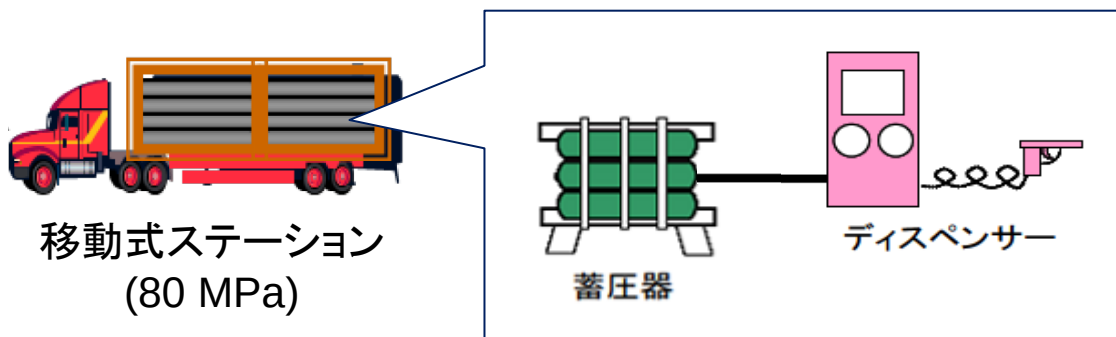
5. データ設定と前提条件 ステーション構成

固定式



ステーション費用構成項目	コスト[円]
ディスペンサー	20,000,000
蓄圧器	50,000,000
圧縮機	70,000,000
プレクール設備	40,000,000
配管・バルブ類	35,000,000
計装・制御関連	20,000,000
土木建設・機器設置等工事	150,000,000
設計費等	50,000,000
合計	435,000,000

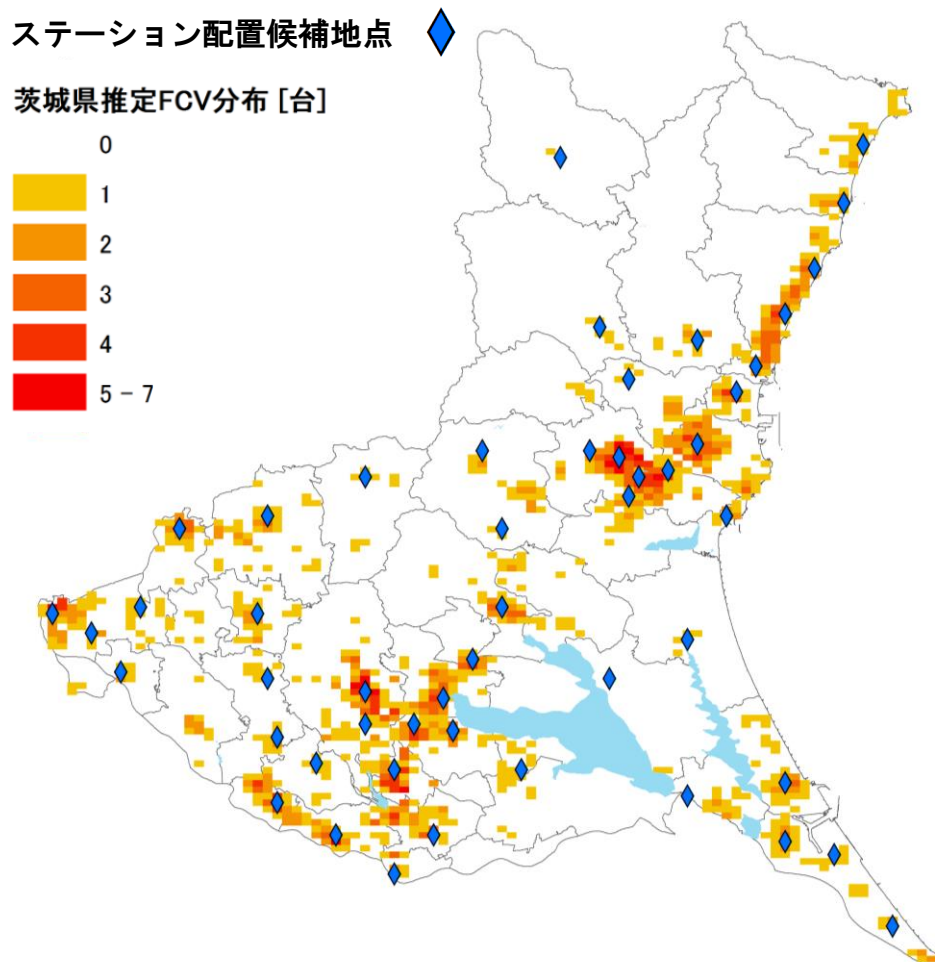
移動式



ステーション費用構成項目	コスト[円]
ディスペンサー	20,000,000
蓄圧器	50,000,000
プレクール設備	40,000,000
配管・バルブ類	35,000,000
計装・制御関連	20,000,000
トレーラ	20000000
ユーティリティ車両	15000000
合計	200,000,000

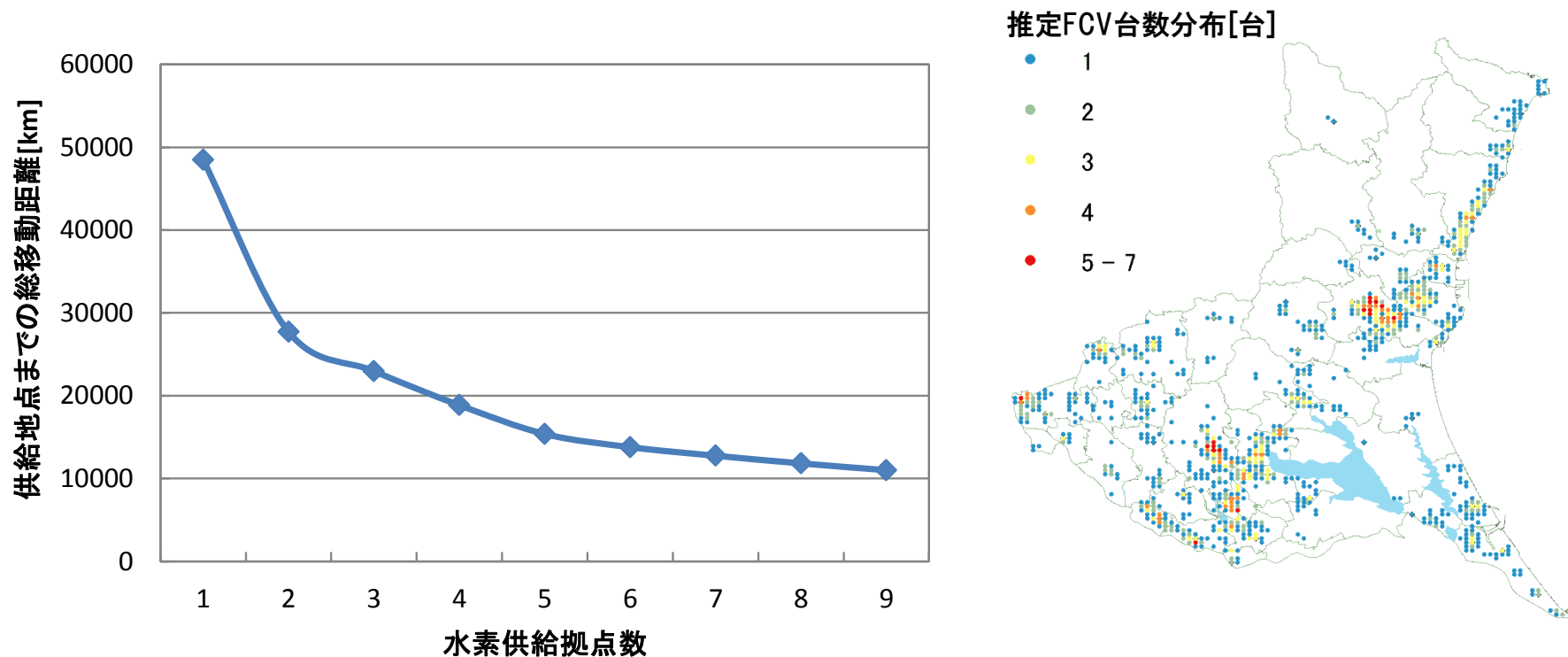
出典 | 水素キャリアに応じたフィージビリティスタディ

5. データ設定と前提条件 ステーション配置候補地点



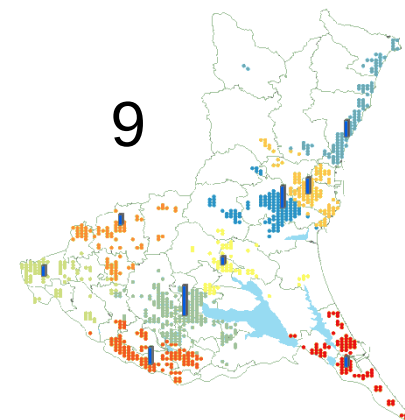
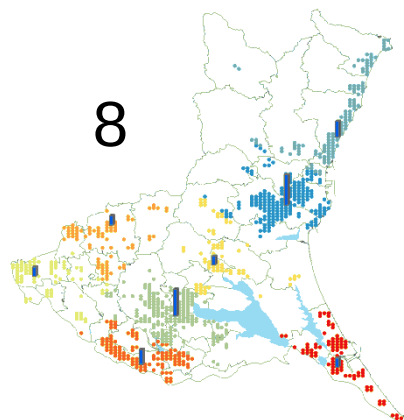
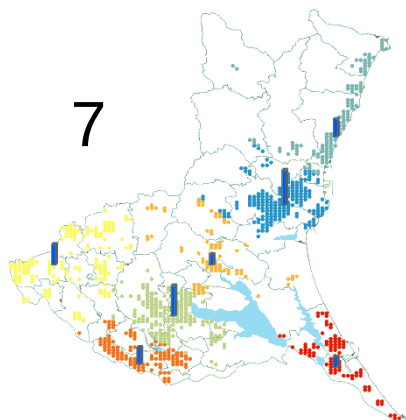
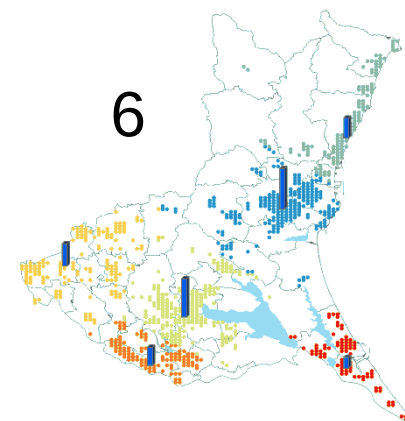
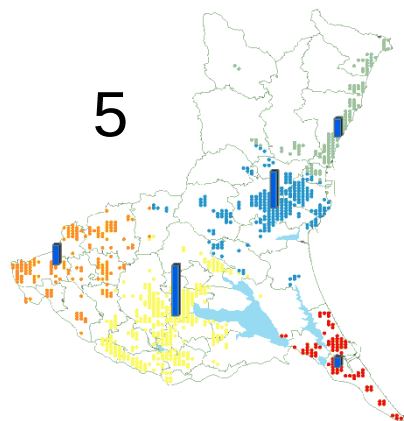
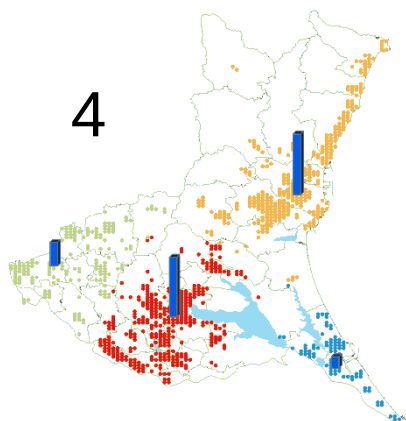
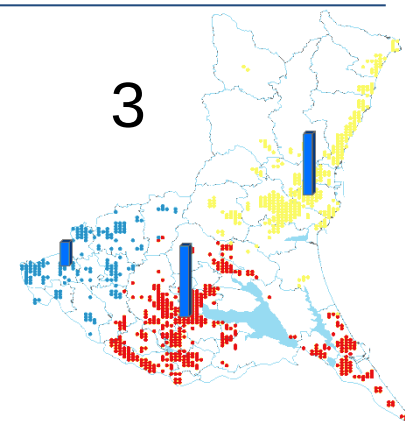
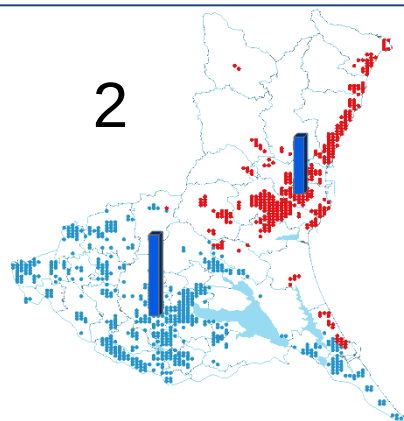
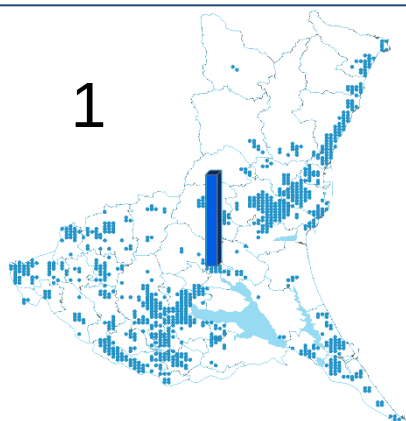
- 需要の存在する925ヶ所のメッシュから任意に50ヶ所選出した

6. 分析結果 FCV全体の移動距離の和の最小化

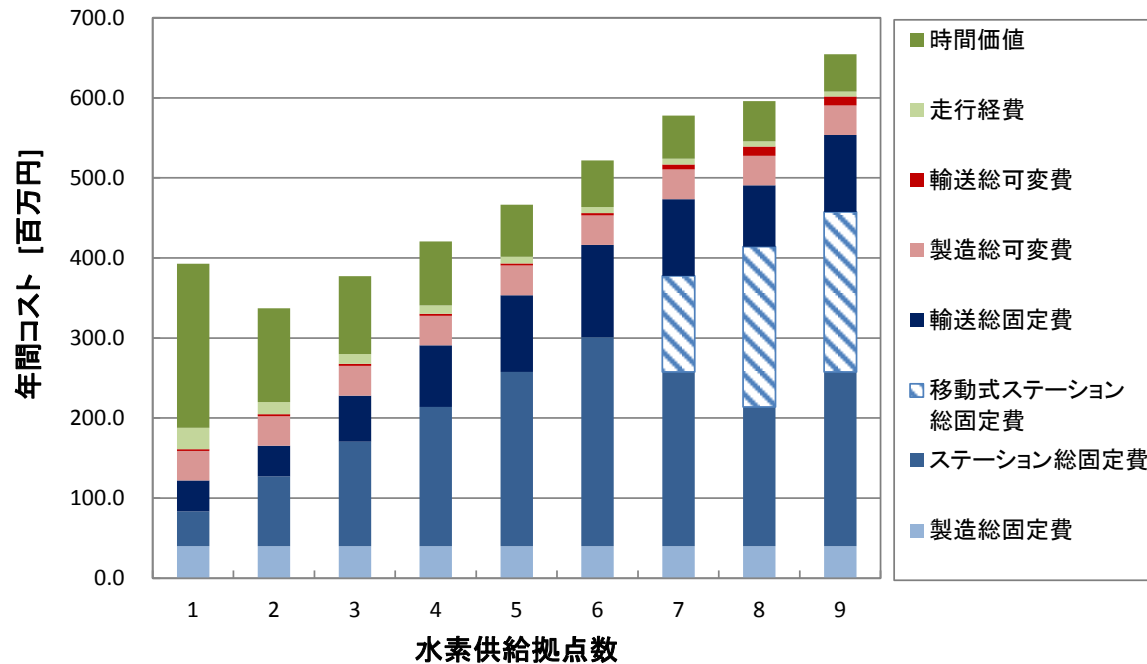


- 需要分布密度が高い地域が2ヶ所(県央・県南)あるため、ステーションを1ヶ所から2ヶ所に増やしたときに総移動距離が大幅に減少する
- 残りは県西・鹿行地域に広く分布しているため、2→3ヶ所では移動距離の減少が小さく、3→4ヶ所の方がより減少している
- ステーションが5ヶ所以降になると移動距離減少効果は次第に小さくなる

6. 分析結果 ステーション数ごとの配置位置と需要量



6. 分析結果 コスト分析



色で費用内訳を分類 需要側費用 供給側可変費 供給側固定費

- 需要側と供給側のコストを足し合わせて比べると、FCV1500台普及時はステーションが2ヶ所の時が年間コスト最小となった
- ステーション7ヶ所以降は需要が分散するため、供給容量は低いが設備費を抑えられる移動式ステーションが一部採用される
- 8→9ヶ所で移動式が増えないのは9ヶ所目で一番需要量の大きい地域が二分され、それぞれ移動式ステーション容量よりも需要量が大きいためである

7. まとめと今後の展望

まとめ

- FCV1500台普及時の分布を推計し、p-メディアン問題と配送問題を活用して、任意の水素ステーション数に応じた配置最適化と供給コスト最小化を行った
- 需要家側と供給側のコストはトレードオフ関係にあり、最適なステーション配置数は2ヶ所となり、配置位置も明らかにした

今後の展望

- GISによる道路網データを用いた移動距離・時間の厳密化
 - ・ 現状はメッシュ間の直線距離、平均移動速度一定で分析
- 時系列を考慮
 - ・ 一時点での分析しかできていない
 - ・ 前期間のインフラ配置を引き継いで新たな最適化を行うモデルの構築

1. 経済産業省;エネルギー基本計画;2014 年4 月11 日
2. 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO);NEDO水素エネルギー白書, 2015
3. 燃料電池実用化推進協議会(FCCJ);商用水素ステーション情報, <http://fccj.jp/hystation/> (2016.5.4確認)
4. 茨城県科学技術振興課;茨城県の概況と県政の方向, (2015)
5. A.Almansoori , N. Shah: Design and Operation of a Future Hydrogen Supply Chain Snapshot Model, Chemical Engineering Research and Design, 84(A6): 423–438,2006
6. Jiyong Kim, Il Moon; Strategic design of hydrogen infrastructure considering cost and safety using multi-objective optimization, International Journal of Hydrogen Energy, Volume 33, Issue 21, November 2008, Pages 5887–5896
7. Sofia De-Le on Almaraz, Catherine Azzaro-Pantel, Ludovic Montastruc, Serge Domenech: Hydrogen supply chain optimization for deployment scenarios in the Midi Pyrenees region France , International Journal of Hydrogen Energy, Volume 39, Issue 23, 4 August 2014, Pages 11831–11845
8. 茨城県;いばらき水素戦略, (2016), 38, 企画部科学技術振興課新エネルギー対策室
9. 財団法人 エネルギー総合工学研究所;水素キャリアに応じたフィージビリティスタディ, (2009), 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構
10. 一般財団法人石油エネルギー技術センター;「製油所からの水素供給能力評価」調査報告書, (2013), 49-51.
11. 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構水素供給・利用技術研究組合;地域水素供給インフラ技術・社会実証／技術・社会実証研究, (2014), 134-139.
12. 一般財団法人日本エネルギー経済研究所計量分析ユニット;EDMCエネルギー・経済統計要覧, (2015), 50-57, 一般財団法人省エネルギーセンター.
13. 経済産業省製造産業局 自動車課;自動車産業戦略2014,(2014)
14. 加藤浩徳;交通の時間価値の理論と実際, 技報堂出版, (2013)