

水素サプライチェーンの ライフサイクル分析

安全科学研究部門 社会とLCA研究グループ
工藤祐揮

平成29年1月27日

平成28年度 産総研 エネルギー・環境シンポジリーズ 安全科学研究部門講演会
水素社会に向けての評価研究 ～安全で持続可能な社会に向けて～

エネルギーシステムにおける水素の位置付け

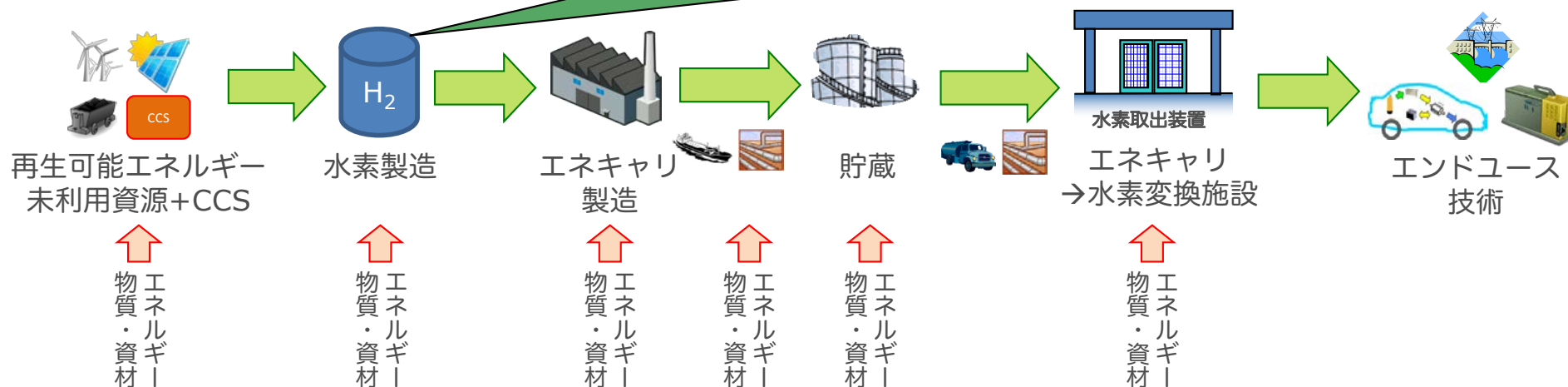
- 様々なエンドユース技術に適用可能：発電機（専焼・混焼）、エンジン（専焼・混焼）、ボイラー（専焼・混焼）、燃料電池

本分析のターゲット

- 化石代替エネルギー
 - 様々な一次エネルギー・再生可能エネルギーから製造可能
 - 温暖化対策としては、サプライチェーン全体で低炭素であることが望ましい
 - 国内へ低コストで大量導入⇄海外からの大量輸送
- 電力安定供給のための需給調整力（系統への再生可能電力大量接続：太陽光発電→短周期変動、風力発電→短周期・長周期変動）
 - 発電機調整：ガバナーフリー制御（数秒～数分の変動）、LFC制御（20分程度以下の変動）、EDC制御（20分～数時間の変動）
 - 揚水発電・蓄電池
 - 水素・水素エネルギーキャリア変換

水素サプライチェーン全体を俯瞰する必要性

「CO2フリー水素」：水素製造段階にCO2フリー



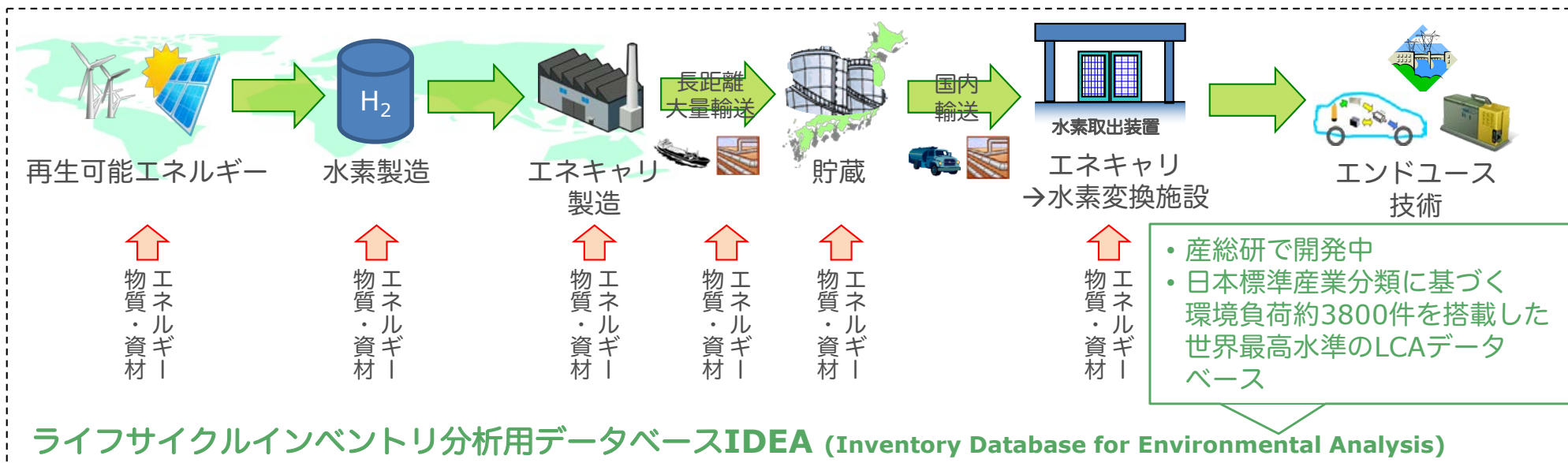
水素製造のバウンダリ（評価範囲）を広げると
「CO2フリー水素」からもCO2排出はある

さらにバウンダリをサプライチェーン全体に広げると
CO2排出は増える

水素利用による低炭素化 → 水素サプライチェーン全体での低炭素化が必要！

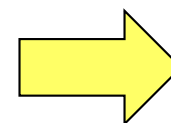
NEDO 「水素利用等先導技術開発事業 ／トータルシステム導入シナリオ調査研究」

CO2排出削減及び長期需給影響評価、LCA的評価導入検討



大陸間カーボンフリー水素サプライチェーン全体からの 温室効果ガス排出量

再エネ起源の水素製造から
エネルギーキャリア変換・輸送を経て
発電・ボイラー・燃料電池などで使われるまでの
エネルギーフロー・物質フローに伴う環境負荷



**水素社会の実現に向けた
研究開発課題の抽出**

水素関連技術のライフサイクル評価

- 国内外で数多くの事例あり（論文・学会発表・報告書など）
 - － 家庭用燃料電池・発電
 - － 自動車用燃料（Well to Wheel分析）：トヨタ・みずほ（2004）、JHFC（2006・2011）、みずほ（2016）、GREETモデル（2016：米国）、EUCAR/CONCAWE/JRC（2014：EU）など
- それぞれの事例で評価年、評価範囲（システム境界）や使用している原単位が異なる（前提条件が異なる）ため、それぞれの結果を単純に比較することはできない

Well to Wheel分析における条件設定1

	[g-CO ₂ eq./MJ-fuel(LHV)]		
	トヨタみずほ(2004) 充填圧35MPa	JHFC(2006) 充填圧35MPa	JHFC(2011) 充填圧70MPa
ガソリン	11.42	16.1	16.2
天然ガス改質(@CP)CH輸送	109.0~120.7	95.2~109.3	107.8
風力アルカリ(@CP)CH輸送			20.9
太陽光アルカリ(@SS)		20.0	19.3
風力アルカリ(@SS)			18.7
風力アルカリ(@パナマ)MCH輸送			22.3
太陽光アルカリ(@豪州)MCH輸送			20.8

CP：大規模施設（オフサイト）、SS：ステーション（オンサイト）、CH：圧縮水素

差が生じる要因1：

平均電源構成（括弧内は原子力の割合）

トヨタみずほ(2004)：2000年度(34.3%)

JHFC(2006)：2001年度(34.6%)

JHFC(2011)：2009年度(29.2%)

差が生じる要因2：

電力のCO₂/GHG排出量（係数）

トヨタみずほ(2004)：燃料燃焼のみ

JHFC(2006)：電中研(2000)の値(LCA)

JHFC(2011)：電中研(2010)の値(LCA)

Well to Wheel分析における条件設定2

	[g-CO ₂ eq./MJ-fuel(LHV)]		
	トヨタみずほ(2004) 充填圧35MPa	JHFC(2006) 充填圧35MPa	JHFC(2011) 充填圧70MPa
ガソリン	11.42	16.1	16.2
天然ガス改質(@CP)CH輸送	109.0~120.7	95.2~109.3	107.8
風力アルカリ(@CP)CH輸送			20.9
太陽光アルカリ(@SS)		20.0	19.3
風力アルカリ(@SS)			18.7
風力アルカリ(@パナソニック)MCH輸送			22.3
太陽光アルカリ(@豪州)MCH輸送			20.8

CP：大規模施設（オフサイト）、SS：ステーション（オンサイト）、CH：圧縮水素

差が生じる要因3：再エネ発電設備の規模

JHFC(2006)←電中研(2000)：

太陽光3kW、風力300kW

JHFC(2011)←電中研(2010)：

太陽光3.84kW、風力は300kW、600kW、1000kW、2000kW、2500kWの平均

Well to Wheel分析における条件設定3

差が生じる要因4：発電技術LCAのシステム境界の違い

◆ JHFC(2010)の場合

- 電中研(2000)掲載の、設備建設込みの排出量を使用

◆ JHFC(2010)の場合

表 3-30 発電起源別のCO₂排出量 (J-MIX ケース) (g-CO₂/kWh)

発電起源	石炭	原油	重油	LNG	原子力	水力	太陽光	風力
燃料の燃焼	863.73	676.83	708.7	433.43				
設備建設	3.22	2.13	2.45	2.80	2.61	6.95	29.91	19.15
設備運用	燃料の輸送	15.30	6.94	6.59	15.95	0.06		
	維持補修(発電所)	6.55	5.42	5.42	4.93	4.44	3.64	8.09
	維持補修(その他)	9.22	11.57	40.57	80.33	11.28		
採掘時のメタン漏洩	43.28	0.33	0.25	8.22				
設備廃棄					0.48			
合計	941.3	703.2	764.0	545.7	18.9	10.6	38.0	25.4
カウントするCO ₂ 排出量	870.29	682.25	714.12	438.36	15.78	3.64	8.09	6.22
g-CO ₂ /MJ	242	190	198	122	4.38	1.01	2.25	1.73

データ元：(財)電力中央研究所

「日本の発電技術のライフサイクルCO₂排出量評価－2009年に得られたデータを用いた再推計－」2010.7

注1) ハッチング部分は考慮しない値

注2) 原子力の「燃料の輸送」「維持補修(その他)」は、WtT 計算上のパスを別途考慮してないため、ここでカウントするものとする。

出典：<http://www.jari.or.jp/Portals/0/jhfc/data/report/2010/pdf/result.pdf>

- 「継続的な発生となる分をカウントする」→太陽光・風力のCO₂排出量は設備の維持補修起因分のみ（ライフサイクル全体の1/4～1/5しか考慮されていない）
- 再エネ水素は、再エネ発電設備建設に伴って生じる環境負荷に対する責任をどこまで負わないといけないか？

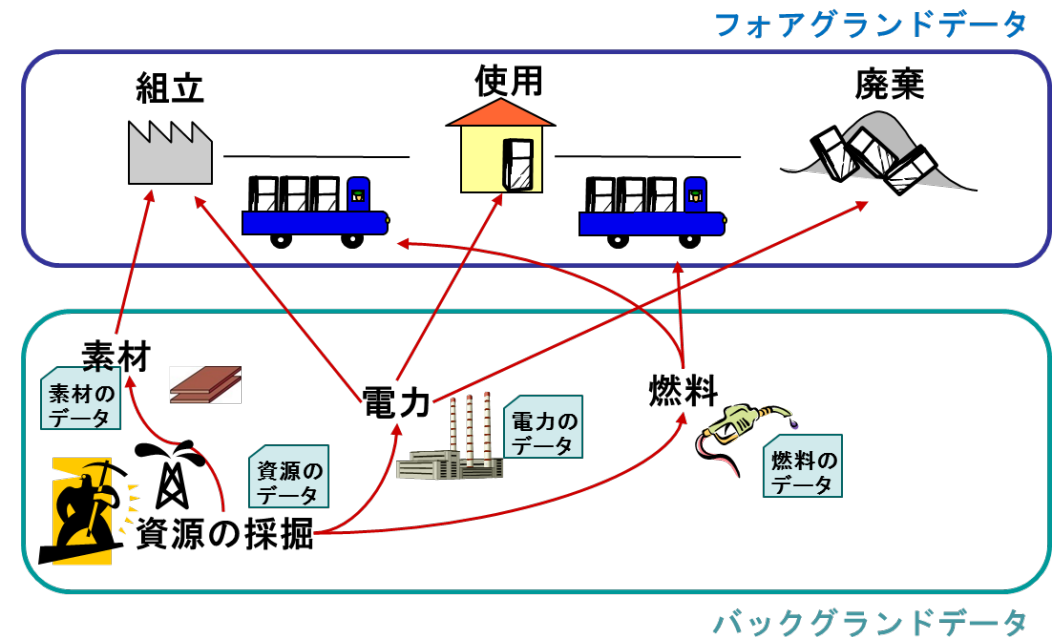
水素関連技術のライフサイクル評価

- 国内外で数多くの事例あり（論文・学会発表・報告書など）
 - 化石資源・発電など
 - 自動車用燃料（Well to Wheel分析）：JHFC、トヨタ・みずほ（日本）、GREET モデル（米国）、EUCAR/CONCAWE/JRC（EU）など
- それぞれの事例で評価範囲（システム境界）や使用している原単位が異なる（前提条件が異なる）ため、相互の結果の比較はできない
- 分析対象とする水素サプライチェーンのライフサイクルインベントリ分析を同じ土俵に乗せて実施し、環境排出物量を算定する
 - システム境界（評価範囲）を合わせる
 - フォアグラウンドデータ：文献調査によって得られたプロセスデータを利用（プロセスのエネルギー・マテリアルバランスを確認）
 - バックグラウンドデータ：ライフサイクルインベントリ分析用データベース IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis)を使用

LCAを行うために必要となるデータ

①フォアグラウンドデータ：
分析対象に直接関与するデータ
実施者でないと収集できない
(実施者が自己責任で収集する)
「競争領域」

②バックグラウンドデータ：
分析対象に間接的に関与するデータ
実施者では収集困難
→文献やLCAデータベースの利用
「非競争領域」



IDEA(Inventory Database for Environmental Analysis)の概要

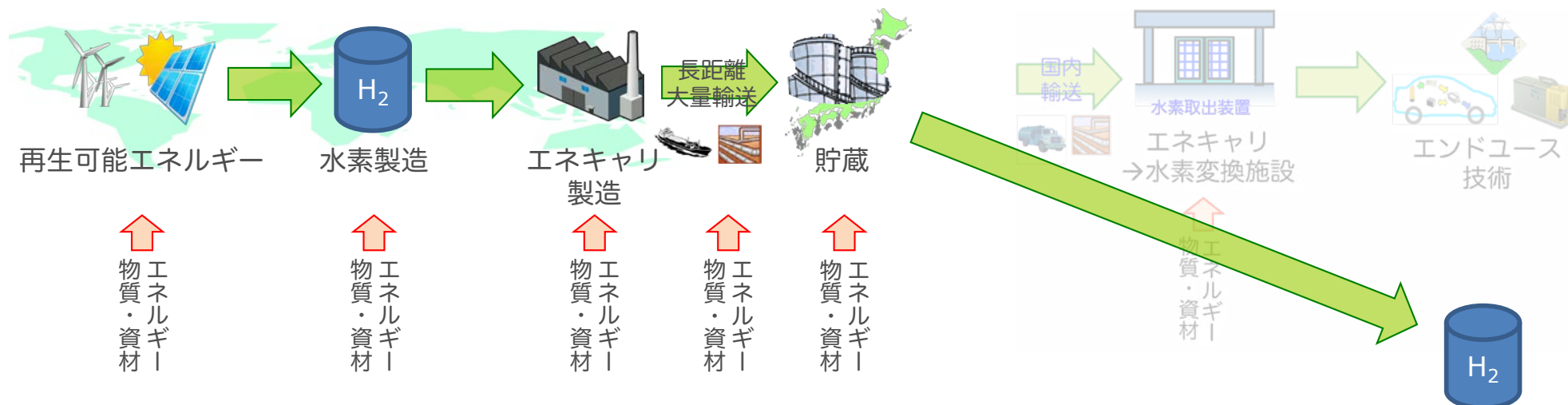
- 種々のフットプリント対応
 - Scope3など国際的な動向への国内企業の対応
 - 自社の環境対策の評価
- インベントリデータの整備が必要不可欠

すべてのニーズに対応するインベントリを作成するのは非常に困難→国内平均



- 産総研安全科学研究部門で開発
- 2016年3月にIDEA v2.0をリリース、現在v2.1を販売中
- 日本標準産業分類に基づく約3,800のデータを収録
 - ✓ 産業分類に応じた階層構造のデータ
 - ✓ サービス業の一部を除くすべての製品のデータが存在
- 詳細は、以下をご参照下さい
<http://idea-lca.jp/ja/index.html>

再エネ水素サプライチェーンの前提条件1



- ① 対象エネキャリアはLH（液化水素）、MCH（メチルシクロヘキサン）
- ② システム境界を、エネキャリア輸入→国内貯蔵→エネキャリア再変換（水素取出）として暫定的に評価
- ③ 水素サプライチェーン全体からのGHG排出量を算出（CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, SF₆の6ガスの排出量を、IPCC第4次評価報告書の100年GWPでCO₂換算）
- ④ 水素製造国
 - ・ オーストラリア：風力・PVからの水電解水素、輸送距離片道10,000km
 - ・ ノルウェー：風力からの水電解水素、片道輸送距離20,000km

エネキャリア再変換
↑
エネルギー・物質・資材

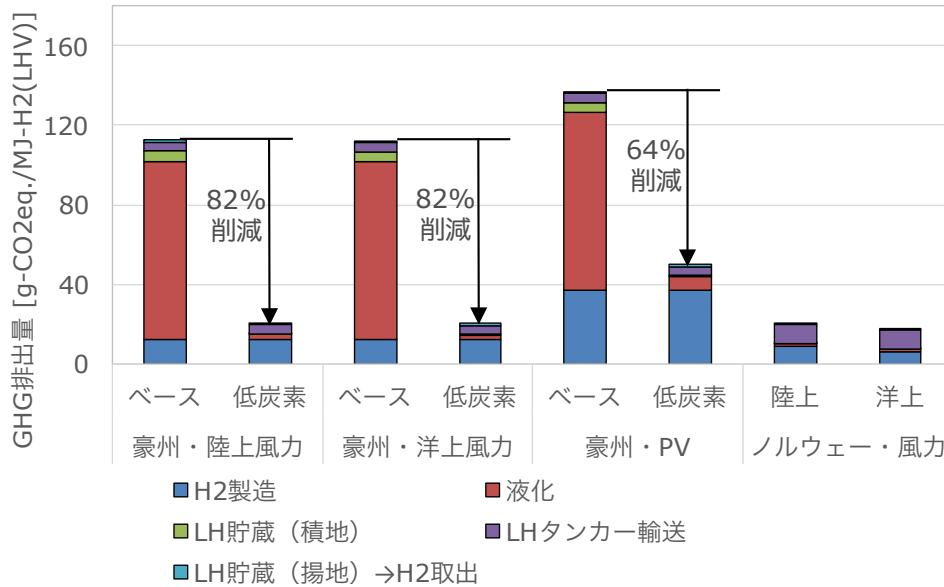
再エネ水素サプライチェーンの前提条件2

- 海外再エネ発電のGHG排出量は2ケース設定（次スライド）
 - ライフサイクル全体（構成素材製造、建設、輸送、設備補修）：
再エネ水素製造のために発電設備を新規に建設
 - 運用（設備補修）のみ：
再エネ水素サプライチェーンのエネルギー・物質フローのみに着目
- その他のエネルギー・物質投入のGHG原単位
 - 海外プロセス：IDEAを用いた推計値を使用
 - 国内プロセス：IDEA収録値を使用
- オーストラリアでは2ケースを設定
 - ベースケース：水電解水素用電力だけ再エネ電力、それ以外の現地プロセスで使う電力は系統電力
 - 低炭素ケース：すべての現地プロセスで使う電力は再エネ電力
- MCHの脱水素熱源に、天然ガスを用いる

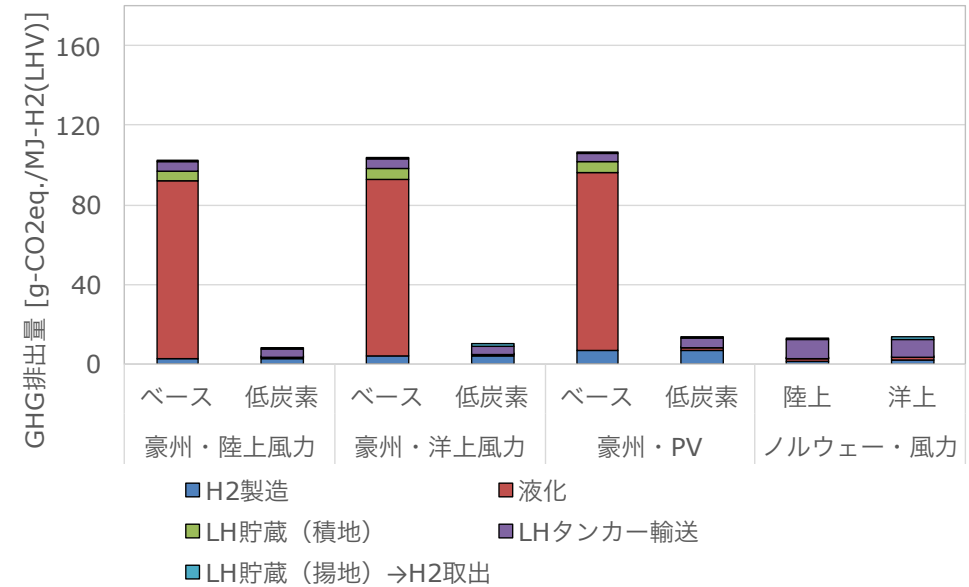
再エネ発電GHG排出原単位

- フォアグラウンドデータは電中研報告書、バックグラウンドデータはIDEAで推計
 - 風力（ウィンドファーム）：電中研(2015)、太陽光（メガソーラー）：電中研(2013)
- 2つの評価範囲の取り方：①ライフサイクル全体（構成素材製造、建設、輸送、設備補修）と②設備補修のみ
- 耐用年数：30年
- 設備利用率：20%（陸上風力）、30%（洋上風力）、15%（太陽光）
- 風力・太陽光を海外で建設→IDEAは日本の経済活動に伴う製品レベルの環境負荷を収録、一定の仮定に基づき同一製品を同一プロセスで海外で製造した場合の環境負荷を、IDEAを用いて近似

液化水素による水素サプライチェーンのGHG排出量



再エネ電力：①ライフサイクル全体

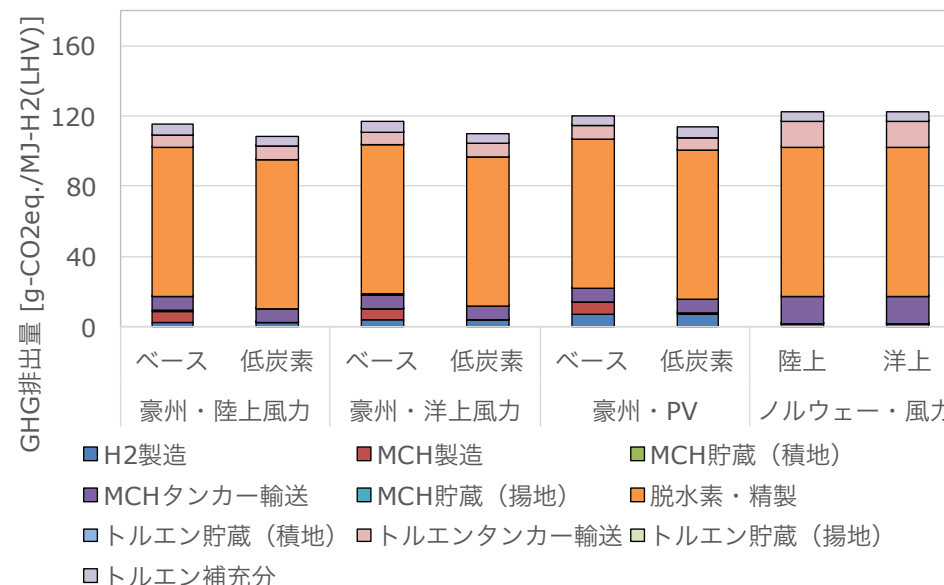
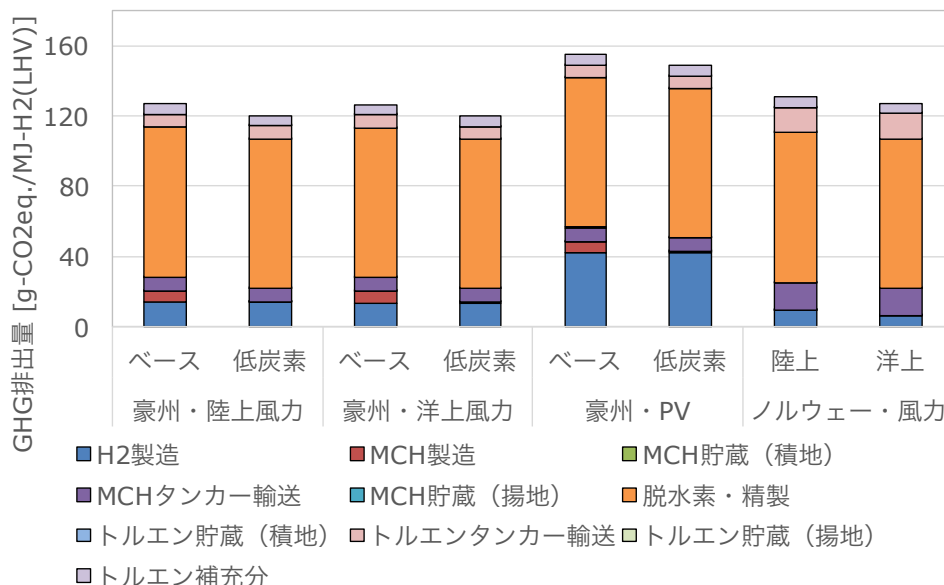


再エネ電力：②運用 (設備補修) のみ

- 豪州ベースケース：液化電力に起因するGHG排出量が大き
- 低炭素ケースによるGHG排出削減効果 (系統電力を再エネ電力に代替)
 - 現地プロセス (液化・LH貯蔵)：97% (風力)、92% (PV)
 - サプライチェーン全体：82% (風力)、64% (太陽光)
- 再エネ電力の評価範囲による排出量の違い：(右図:①運用のみ) ÷ (左図:②ライフサイクル全体)

豪州・陸上風力		豪州・洋上風力		豪州・PV		ノルウェー・風力	
ベース	低炭素	ベース	低炭素	ベース	低炭素	陸上風力	洋上風力
91%	41%	93%	49%	78%	27%	63%	76%

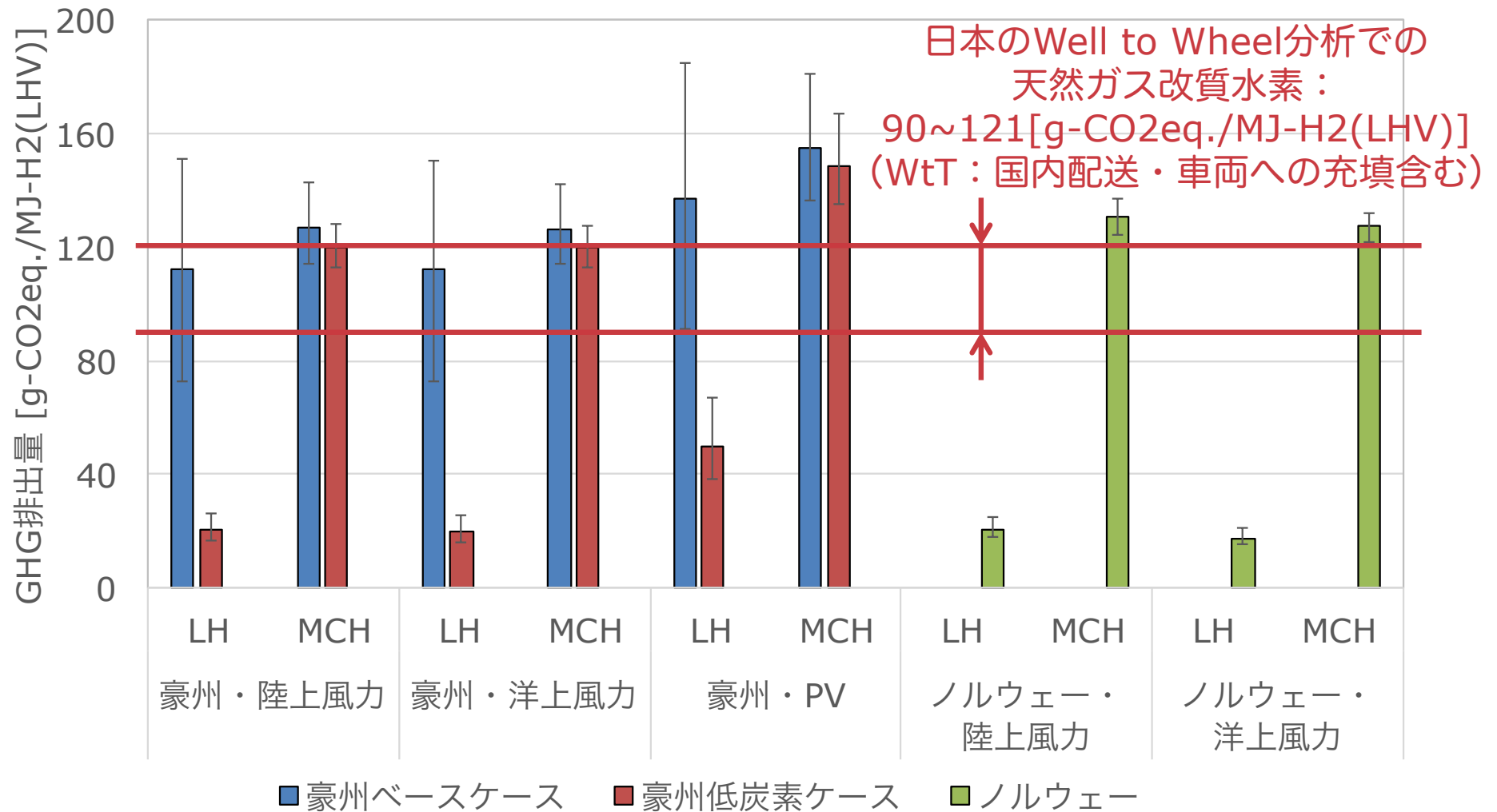
MCHによる水素サプライチェーンのGHG排出量



- 反応後のトルエンは他用途に利用可能と想定→劣化による補充分だけを計上
- 脱水素反応時の寄与が高い
 - 必要な熱量を天然ガス燃焼でなく、廃熱によって供給するシステム設計によりGHG排出量を抑制可能
 - 豪州の現地プロセスでの系統電力→再エネ電力への代替によるサプライチェーン全体のGHG削減効果は限定的 (風力で5%、PVで4%)
- 再エネ電力の評価範囲による排出量の違い： (右図:②運用のみ) ÷ (左図:①ライフサイクル全体)

豪州・陸上風力		豪州・洋上風力		豪州・PV		ノルウェー・風力	
ベース	低炭素	ベース	低炭素	ベース	低炭素	陸上風力	洋上風力
91%	90%	92%	92%	78%	76%	94%	96%

エネルギーキャリアによるGHG排出量の違い



まとめと今後の展開

分析した水素サプライチェーンのGHGホットスポットは

- 液化水素の液化段階
- MCHの脱水素段階

→低炭素化のための技術開発・プロセス設計が必要

今後の展開

- 褐炭CCS水素サプライチェーンのインベントリ分析
- モンテカルロシミュレーションによるGHG排出量の不確実性分析
- 前提条件の精緻化（出口の水素の条件をあわせる等）
- 未考慮分の影響を含めた分析（水電解のアルカリ塩など、触媒？）
- 化石燃料改質水素・副生水素・国内地産地消水素・既存エネルギーとの比較
- エンドユース技術を含めた分析
- GHG以外の環境排出物の分析

など

引用文献

- トヨタ自動車・みずほ情報総研株式会社：輸送用燃料のWell-to-Wheel評価 日本における輸送用燃料製造（Well-to-Tank）を中心とした温室効果ガス排出量に関する研究報告書、2004年11月
- JHFC総合効率検討特別委員会・財団法人日本自動車研究所：「JHFC総合効率検討結果」報告書、2006年3月
- JHFC総合効率検討作業部会・財団法人日本自動車研究所：総合効率とGHG排出の分析報告書、2011年3月
- Argonne National Laboratory: GREET Model – The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model, <https://greet.es.anl.gov/>, (最新版は2016年にリリース)
- EUCAR/CONCAWE/JRC : JRC Technical Reports WELL-TO-TANK Report Version 4.a JEC WELL-TO-WHEELS ANALYSIS, April 2014
- 電力中央研究所：ライフサイクルCO2排出量による発電技術の評価ー最新データによる再推計と前提条件の違いによる影響ー、研究報告：Y99009、2000年3月
- 電力中央研究所：メガソーラー発電技術のライフサイクルCO2排出量評価、研究報告：Y12031、2013年5月
- 電力中央研究所：日本の発電技術のライフサイクルCO2排出量評価ー2009年に得られたデータを用いた再推計ー、研究報告：Y09027、2010年7月
- 電力中央研究所：洋上・陸上ウィンドファームのライフサイクルCO2排出量評価、研究報告：Y14018、2015年4月

ご清聴ありがとうございました

工藤祐揮

kudoh.yuki@aist.go.jp

本研究はNEDO
「水素利用等先導技術開発事業／トータルシステム導入シナリオ調査研究」
の支援により実施されました