

「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」で示された水素の役割と課題

吉岡 七海 朝野 賢司 永井 雄宇
電力中央研究所 社会経済研究所

作成日 (2021年3月23日)

要約:

本研究では、2017年に決定された水素基本戦略と、2020年に決定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(以下、CN戦略)」について、目標とする水素の導入量等を整理した上で、水素供給と需要の両面からCN戦略実施の課題を検討した。

その結果、水素供給の面からは、2050年に2,000万t程度の「クリーン水素」(化石燃料+CCUS、再エネ等から製造された水素)を供給するにあたり、国内で再エネ由来水素を製造する場合には再エネ発電量の確保が、国内で化石燃料+CCUSで水素製造する場合にはCO₂貯留地の確保が、液化水素での輸入を行う場合には運搬船の大型化が、各々課題となることがわかった。

水素の潜在的な需要規模は、トラック等の商用車(以下、商用車)、発電、鉄鋼、化学、熱需要の分野を合計して、約3,700~4,200万tであると本研究では推計した。具体的には、商用車、発電、鉄鋼については、CN戦略内で「一定の仮定に基づく導入量」が示されており、順に約600万t、約500~1,000万t、約700万tである。化学と熱需要については、CN戦略では同規模が示されていないため、約1,100万tと約800万tと推計した。

一方で、水素の供給目標を十分に上回る潜在的な需要規模があるからといって、供給量を確保することが必ずしも需要喚起につながるとは言えない。水素の利用に際し、CN戦略では技術的課題として、CN戦略では、燃料電池トラック等の商用化、発電における安定燃焼性の実証、100%水素還元製鉄の技術確立、水素由来プラスチックの製造コスト等が指摘されている。これらに加え、商用車では液化水素輸送網の拡大、化学ではCO₂循環の確立、熱需要では水素転換が可能な温度帯に限られること等の課題が挙げられる。

CN戦略が示す「水素社会」の実現には、供給・需要・利用において様々な課題の克服が前提となる。本研究で推計した需要規模はあくまで潜在的なものに過ぎず、その実現には各分野の技術的・経済的な課題の解決が必要である点には留意が必要である。

免責事項

本ディスカッションペーパー中、意見にかかる部分は筆者のものであり、電力中央研究所又はその他機関の見解を示すものではない。

Disclaimer

The views expressed in this paper are solely those of the author(s), and do not necessarily reflect the views of CRIEPI or other organizations.



「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」 で示された水素の役割と課題

電力中央研究所 社会経済研究所
研究員 吉岡 七海
上席研究員 朝野 賢司
主任研究員 永井 雄宇

電力中央研究所 社会経済研究所 ディスカッションペーパー

2021年3月23日

 電力中央研究所

目次

- | | |
|---------------------|-----------|
| 1. 背景と目的 | スライド4 |
| 2. CN戦略が示す「水素産業」の整理 | スライド6-12 |
| 3. 水素供給面の整理 | スライド14-25 |
| 4. 水素需要面の整理 | スライド27-42 |
| 5. 結論 | スライド44-45 |

参考文献

1. 背景と目的

背景と目的

- ◆ 2050年のカーボンニュートラル（以下、CN）実現を目指す政府方針のもとで「**2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略（以下、CN戦略）**」が公開され、産業政策の観点から成長が期待される産業の一つとして「**水素産業**」に対して同年までの水素の導入量目標や実行計画が示された[1]
- ◆ 既存研究[2][3][4]では水素の供給や消費、輸送における技術的・経済的課題について様々に論じられてきた
- ◆ しかし、CN戦略では**2050年CN実現という新たな目標の下、2017年に策定された水素基本戦略[5]とは異なる水素の導入量目標や利用分野等が示された**
- ◆ 以上を踏まえ、**CN戦略で示されている水素の利用、製造、輸送について包括的に検討することが必要である**

- ◆ そこで本資料では、**CN戦略が示す「水素産業」の内容を、水素基本戦略と比較する形で整理したうえで、水素の供給、需要の両面から以下の点を整理した**
 - 水素供給
 - 製造方法等による水素の分類
 - 2,000万t程度の水素供給を確保するうえでの課題
 - 水素需要
 - トラック等の商用車(以下、商用車)、発電、鉄鋼、化学、熱需要を対象に、潜在的な水素需要の規模、水素の利用における課題等

2. CN戦略が示す「水素産業」の整理

日本における水素政策の歴史

- ◆ サンシャイン計画[6][7](1974～)
 - 石油に代わるエネルギー技術の開発を目的に、太陽エネルギー、地熱エネルギー、石炭エネルギー、水素エネルギーを4本の柱とした技術開発プロジェクト
- ◆ ニューサンシャイン計画[7][8] (1993～2002)
 - サンシャイン計画をはじめとして、独立に推進されてきた新エネルギー、省エネルギー、地球環境技術の開発体制が一体化された
- ◆ 水素基本戦略[5](2017)
 - 「水素をカーボンフリーなエネルギーの新たな選択肢として位置づけ、政府全体として施策を展開していくための方針である」
 - 「本戦略は、主として2030年前後に実現すべき内容を目標として掲げる「水素・燃料電池戦略ロードマップ」を踏まえつつ、2050年を視野に入れ、将来目指すべき姿や目標として官民が供給すべき大きな方向性・ビジョンを示すものとする」
 - 以下の経緯等を踏まえて策定したとされる
 - 2014年に第4次エネルギー基本計画で水素のエネルギー利用について記載されたこと
 - 2014年に水素・燃料電池戦略ロードマップが取りまとめられ、2016年に改訂されたこと
 - 2017年の再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議で、世界に先駆けて水素社会を実現するため、基本戦略を年内に策定する方針が示されたこと

CN戦略策定の経緯と水素産業への期待

◆ CN戦略策定の経緯と概要

- 2020年10月に菅内閣総理大臣が2050年CNの実現を宣言したことを踏まえ、同年12月にCN戦略が策定された
- CN戦略は「温暖化への対応を成長の機会と捉え...積極的に対策を行う...『**経済と環境の好循環**』を作っていく**産業政策**」と位置付けられている
- 産業政策の観点から成長が期待される**14の産業に対して「実行計画」**を示している
 - 実行計画には、現状と課題、今後の取り組み、工程表が示されている
 - 工程表には、当該分野における成長を実現するうえで鍵となる重点技術について、日本の国際競争力を強化しつつ、自律的な市場拡大につなげるための具体策が提示されている

◆ CN戦略での水素に対する記載

- 「**水素産業**」に加え、水素キャリアの一つであるアンモニアが「**燃料アンモニア産業**」として上記の14の産業に含まれている
- 両産業以外にも「**原子力産業**」では水素の製造、「**自動車産業**」「**船舶産業**」「**航空機産業**」「**カーボンリサイクル産業**」等では水素の利用について言及されている
- いずれの産業でも詳細は示されていないものの「**熱需要には、水素などの脱炭素燃料、化石燃料からのCO₂の回収・再利用も活用することとなる**」との記載がある

CN戦略の水素産業の工程表

- ◆ 工程表では**利用分野**として**輸送、発電、製鉄、化学、燃料電池**が示されている
- ◆ 燃料アンモニア産業等の**多くの産業**で**水素産業と連携する方針**が示されている

③水素産業の成長戦略「工程表」

●導入フェーズ: 1. 開発フェーズ 2. 実証フェーズ 3. 導入拡大・コスト低減フェーズ 4. 自立商用フェーズ
 ●具体化するべき政策手法: ①目標、②法制度(規制改革等)、③標準、④税、⑤予算、⑥金融、⑦公共調達等

| ●地域 | 2021年 | 2022年 | 2023年 | 2024年 | 2025年 | ～2030年 | ～2040年 | ～2050年 |
|--------|---|-------|---|-------|--|---|---|-------------------------|
| 利用 | | | | | | ★目標(2030年時) コスト:30円/Nm3 量:最大300万t | ★目標(2050年時) コスト:20円/Nm3以下、 量:2000万t程度 | |
| ●輸送 | 自動車、船舶及び、航空機産業の実行計画を参照 | | | | | | | |
| ●発電 | FC鉄道の車両の技術基準・地上設備の性能要件明確化 | | 関連基準・規制の見直し | | 実証試験 | | | コスト低減 |
| ●製鉄 | 大型専焼発電の技術開発 | | 水素還元製鉄の技術開発 | | 水素還元製鉄の実機実証(燃料電池、タービンにおける混焼・専焼) | | | エネルギー供給構造高度化法等による社会実装促進 |
| ●化学 | 国内外展開支援(燃料電池、小型・大型タービン) | | COURSE50(水素活用等でCO2▲30%)の大規模実証 | | 導入支援 | | | 脱炭素水準として設定 |
| ●燃料電池 | 水素還元製鉄の技術開発 | | 水素等からプラスチック原料を製造する技術の研究開発 | | 大規模実証 | | | 技術確立 導入支援 |
| 輸送等 | 革新的燃料電池の技術開発 | | 多用途展開、生産設備の投資支援、導入支援 | | 革新的燃料電池の導入支援 | | | |
| ●水電解 | 国際輸送の大型化に向けた技術開発 | | 大規模実証、輸送技術の国際標準化、 | | 商用化・国際展開支援 | | | |
| ●革新的技術 | 商用車用の大型水素ステーションの開発・実証 | | 水素ステーションへの規制改革等によるコスト削減・導入支援 | | | | | |
| 分野横断 | 水電解装置等の大型化等支援・性能評価環境整備 | | 海外展開支援(先行する海外市場の獲得) | | 余剰再生エネ活用のための国内市場環境整備(上げDR等)等を通じた社会実装促進 | | | 卒FIT再生エネの活用等を通じた普及拡大 |
| | 革新的技術(光触媒、固体酸化物形水電解、高温ガス炉等の高温熱源を用いた水素製造等)の研究開発・実証 | | 導入支援 | | | | | |
| | 福島や発電所等を含む港湾・臨海部、空港等における、水素利活用実証 | | 再エネ等の地域資源を活用した自立分散型エネルギーシステムの実証・移行支援・普及 | | インフラ等の整備に伴う全国への利活用拡大 | | | |
| | クリーン水素の定義等の国際標準化に向けた国際連携 | | 資源国との関係強化、需要国の積極的な開拓を通じた国際水素市場の確立 | | | | | |
| | 洋上風力、燃料アンモニア、カーボンリサイクル及び、ライフスタイル産業の実行計画と連携 | | | | | | | |

(出典)[1]

水素基本戦略とCN戦略の相違点①

CN戦略の「水素産業」と水素基本戦略を比較した場合、**主な相違点は水素の利用分野と目標量の2点**である

◆ 水素の利用分野

- **水素基本戦略では電力、運輸、熱・産業プロセス**が利用分野として示されている
 - うち、発電、モビリティ、FC(燃料電池)活用に対して数値目標が示されている
- **CN戦略では工程表で利用分野として発電、輸送、鉄鋼、化学、燃料電池**が示され、実行計画では**発電、商用車、鉄鋼**に対して**潜在国内水素需要*1**が示されている(下表)

| 利用分野 | CN戦略の工程表で示された具体策 | CN戦略で示された潜在国内水素需要*1 |
|------|--------------------------------|----------------------|
| 発電 | 混焼・専焼技術の開発・実証 | 約500～1,000万t/年程度 |
| 輸送 | FC鉄道の実証 自動車・船舶・航空機の水素の利用も想定 | 輸送のうち商用車に対して約600万t/年 |
| 鉄鋼 | 既存製法での水素活用 水素還元製鉄の技術開発 | 約700万t/年 |
| 化学 | 水素等からのプラスチック原料の製造 | — |
| 燃料電池 | 多用途展開、革新的燃料電池の技術開発 | — |

利用分野の設定には、以下のような要因が影響したものと本資料では推測した。

- ・商用車：2018年度末時点での燃料電池自動車の台数が2020年目標に対して10%に満たない[9]など普及が遅れている現状を踏まえ、電動化が難しいとされる商用車を中心とした目標への方向転換を図ったものと考えられる。
- ・鉄鋼：産業部門において最もCO₂排出量が多い産業であることに加え、日本鉄鋼連盟が「ゼロカーボン・スチール」の実現に向けて、水素還元製鉄に関する試算を示している[10]ことが背景にあると考えられる。
- ・化学：産業部門において鉄鋼業に次いでCO₂排出量が多い産業であることが要因と考えられる。

*1 CN戦略内で潜在国内水素需要は「一定の仮説に基づく導入量」とされる

水素基本戦略とCN戦略の相違点②

◆ 目標量

➤ 2030年

- 水素基本戦略では「2030年ごろに商用規模のサプライチェーンを構築し、**年間30万t程度**の水素を調達する」ことを目標としている
- CN戦略では「国内水素市場を早期に立ち上げる観点から、2030年に水素導入量を**最大300万トン**とする」ことを目標としている
 - この300万tにはアンモニア等の水素キャリアの直接利用も含まれる
 - うち、グリーン水素(化石燃料+CCUS*1、再エネ等から製造された水素)の供給量は約42万t*2以上を目指すとしている

➤ 2050年

- 水素基本戦略では目標年ではなく「将来目指すべき姿」として「**~1,000万t+α**」が示されている
- CN戦略では水素の導入量について「**2,000万トン程度**を目指す」とされている

目標量の設定には、以下のような要因が影響したものと本資料では推測した。

- ・2030年：ドイツの国家水素戦略で2030年までに年間90~110TWh(約270~330万t-H₂)が必要になるとされている[11]ことを参考に行っている可能性がある。なお、日本ではすでに年間130万tの水素が工業用途などで消費されている[12]が、水素基本戦略では明らかにこの水素消費を目標量に含めていなかった(既存の水素消費がほとんど自家消費であるためと推測される)。CN戦略での目標量が既存の水素消費を含めた数値であるかどうかは明らかではない。
- ・2050年：商用車、発電、鉄鋼に対して示された潜在国内水素需要を積み上げた数値(約1,800~2,300万t)を参考に行っている可能性がある。

*1 Carbon dioxide Capture, Utilization and Storageの略であり、CCS(Carbon dioxide Capture and Storage)とCCU(Carbon dioxide Capture and Utilization)を合わせた表現である。

*2 この数値はドイツの国家水素戦略にて、2030年の水素需要の一部を賄うために14TWh(約42万t-H₂)のグリーン水素(再エネ由来水素)の製造が可能な水素製造容量を確保することから設定されている。ただしCN戦略での「グリーン水素」はドイツの国家水素戦略での「グリーン水素」に加えて化石燃料+CCUS等も含まれている(スライド15)

水素基本戦略とCN戦略の相違点③

◆ その他の相違点

➤ 水素の名称

- 水素基本戦略では「**トータルでのCO₂フリー水素供給システム**」の確立に**化石燃料+CCSと再エネ由来水素を活用する**としている

- 水素基本戦略策定以降もCO₂フリー水素WGではCO₂フリー水素の定義に関して議論が行われ、製造段階のみ、あるいは原料採掘から製造段階までを対象としてCO₂排出量をカウントすることが提案されている[13]

- CN戦略では**クリーン水素は「化石燃料+CCUS、再エネ等から製造された水素**」と製造方法によって定義されている

- ただし「等」とあることから他の製造方法も否定はされておらず、例えば原子力産業では「カーボンフリーな水素製造」が可能であるとしている

➤ 目標年

- 水素基本戦略では2030年以降の目標年はなく「**将来目指すべき姿**」が示されているが、**CN戦略では2050年CNを念頭に目標年を2050年**としている

➤ コスト目標

- 水素基本戦略では将来的に水素発電がLNG火力発電と同等のコスト競争力を持つことを目標に「**20円/Nm³程度**」を示した一方、CN戦略では「**水素発電コストをガス火力以下**」にするとし、目標が若干強化されている

水素基本戦略とCN戦略の相違点(まとめ)

- ◆ 水素基本戦略とCN戦略の「水素産業」での記載を比較し、下表の通りまとめる
- ◆ 主な相違点として水素の利用分野と目標量が挙げられた

| | 水素基本戦略(2017) | CN戦略(2020) |
|-----------|---|---|
| 利用分野と消費規模 | <p>以下の分野で数値目標が示されている</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電 将来目指すべき姿：年間500～1,000万t程度 ・モビリティ 2030：FCV(燃料電池車)80万台、ステーション900箇所、等 ・FC(燃料電池)活用 2030：エネファーム530万台 | <p>以下の項目が水素産業の成長を実現するうえで鍵となる重点技術として工程表に示されている</p> <ul style="list-style-type: none"> ・発電 潜在国内水素需要量：約500～1,000万t/年程度 ・輸送 潜在国内水素需要量(商用車)：約600万t/年 ・鉄鋼 潜在国内水素需要量：約700万t/年 ・化学 潜在国内水素需要量：示されていない ・燃料電池 潜在国内水素需要量：示されていない |
| 目標量 | <p>2030：30万t程度 将来目指すべき姿：～1,000万t+α</p> | <p>2030：最大300万t 2050：2,000万t程度</p> |
| コスト目標 | <p>2030：30円/Nm³ 将来目指すべき姿：20円/Nm³</p> | <p>2030：30円/Nm³ 2050：20円/Nm³以下</p> |
| 水素の名称 | <p>CO₂フリー水素 化石燃料+CCSと再エネ由来水素の活用に言及</p> | <p>グリーン水素 「化石燃料+CCUS、再エネ等から製造された水素」</p> |

3. 水素供給面の整理

- 製造方法等による水素の分類の整理
- 2,000万tのグリーン水素の供給における課題

製造方法等による水素の分類の整理

- ◆ **水素は使用時にCO₂を放出しない反面、あくまで二次エネルギーであり、水素の導入拡大による脱炭素化を議論するうえでは使用までの工程におけるCO₂排出をどう評価するかが重要**である
- ◆ 各国が表明している水素戦略等では、**水素の分類**を行うことで利用拡大によって**脱炭素に資する水素を差別化**している
- ◆ 水素基本戦略とCN戦略に加え、独、仏の国家水素戦略[11][14]、米の水素プロジェクト計画[15]、欧州委員会から提案された水素戦略案[16]における水素の分類を整理した結果、以下のことが明らかになった
 - いずれの戦略でも**各国のエネルギー政策に合わせて独自の分類を用いている**
 - 一方で**製造時のCO₂排出を抑制した水素を差別化している点では共通している**
 - 加えて、独、EUでは再エネ由来の水素を特に差別化していると言える
 - これらの地域では将来的には輸入品の原料や燃料に使用する水素の製造方法に応じた措置が取られる可能性も考えられるため、注視が必要と考える

各国における水素の分類

◆ 各国が自国のエネルギー政策に合わせて独自の分類を用いている一方、製造時のCO₂排出を抑制した水素を差別化している点では共通している

➤ 以下の表では各戦略、文書内で定義、あるいは製造方法の例示とともに示された水素の分類を挙げている

| 製造方法 | 日本 | | EU[16] | 独[11]*2 | 仏[14] | 米[15]*4 |
|-----------|-----------------------|---------|--|----------------|-----------------------|---|
| | 水素基本戦略[5] | CN戦略[1] | | | | |
| 再エネ | CO ₂ フリー水素 | グリーン水素 | <ul style="list-style-type: none"> Renewable hydrogen Clean hydrogen | Green hydrogen | Decarbonised hydrogen | <ul style="list-style-type: none"> clean hydrogen carbon-neutral hydrogen |
| 化石燃料+CCUS | | | <ul style="list-style-type: none"> Fossil-based hydrogen with carbon capture Low-carbon hydrogen | Blue hydrogen | —*3 | |
| 原子力 | — | —*1 | — | — | —*3 | |
| 電気分解 | — | — | <ul style="list-style-type: none"> Electricity-based hydrogen Low-carbon hydrogen | — | — | — |
| 化石燃料 | — | — | Fossil-based hydrogen | Grey hydrogen | Fossil-based hydrogen | — |

*1 グリーン水素は「化石燃料+CCUS、再エネ等から製造された水素」とされており、他の製造方法も否定はされていない。特に原子力産業では「カーボンフリーな水素」の製造が可能との記載がされている。

*2 LNGを水素と固体の炭素に分解する手法で得た水素を「ターコイズ水素」と定義し、化石燃料を原料としながらCO₂を排出しない製造法として差別化している。

*3 Decarbonised hydrogenについて「炭素フリーか再生可能である電源の電力による電気分解」によって製造された水素は「製造時にCO₂排出がないことから脱炭素水素と呼ぶことができる」と記載されている。「炭素フリーか再生可能である電源」に原子力が含まれる場合には原子力由来の水素が、製造方法によらず製造時のCO₂排出が抑えられることが根拠とされる場合には化石燃料+CCUSが脱炭素水素に含まれるものと考えられる。

*4 前大統領政権下での文書を参考としている。新大統領であるバイデン氏は自身の選挙HP[17]にて再エネ電力による電気分解を通じて得られる「グリーン水素」のコストダウンに言及しており、今後再エネ由来水素に重点を置いた政策が打ち出される可能性がある。

CN戦略での水素の製造・輸送

- ◆ CN戦略は水素の導入量を**2030年に最大300万t、2050年に2,000万t程度**を目指している
 - うち、グリーン水素の供給量は2030年に42万t以上を目指している
 - 2050年のグリーン水素の供給量に対する目標は明言されていない*1
- ◆ CN戦略では水素の製造と国際輸送に関して下表の記載がある

| | CN戦略での記載 |
|---------|--|
| 水素の製造 | 「今後重要となるのは...水電解装置である」とし、先行して市場が立ち上がる 欧州等での水電解装置の市場獲得にまず注力する としている 国内での水素製造に関しては「中長期的には余剰エネルギーが増大することなどを見越し...安価な電力の積極的な利活用促進策も併せて検討する」としている |
| 水素の国際輸送 | 「我が国は 当初から輸入水素の活用を前提 としており、海上輸送技術等を国も支援してきた」とし、 2030年を目途とした商用化の達成を目指すことが重要 としている |

以下の理由から、CN戦略では水素の供給量確保の手段として輸入を重視している傾向があると言える。

- ・「我が国は当初から輸入水素の活用を前提として」いるとの記載がある
- ・対して、水電解装置では国内ではなく欧州等の海外市場での市場獲得に注力している
- ・国内水素製造に関しては余剰エネルギーの活用への言及に留まる

なお、輸入水素の活用を前提とした考え方は水素基本戦略でも確認でき、4章「水素社会実現に向けた基本戦略」では1節で海外エネルギーの活用、2節で国際的な水素サプライチェーンの開発に向けた目標等を示している。

*1 「目標量に関しては…2030年に水素導入量を最大300万トンとすることを目指す。うち、グリーン水素…の2030年供給量は..(約42万トン)以上を目指す。加えて、2050年には2,000万トン程度の供給量を目指す。」とされており、グリーン水素の供給量に対して2,000万tの目標値を設定しているとも取れる反面、製造方法を限定せず単に供給量に対して目標値を示しているとも取れる。

水素供給における課題

- ◆ 他方、**水素輸入には運搬船の大型化が必要であると指摘されている**
 - 「液化水素を輸入するならば、**運搬船の水素積載量（現状約75t/隻）を100倍以上（約1万t/隻）に拡大した船を約90隻確保する必要**」[18]
- ◆ 本資料では以下の方法で、**2050年の水素供給における課題を整理した**
 - CN戦略が2050年のCN達成に向けたものであることを踏まえ、本資料では同年の水素導入量2,000万tをすべてグリーン水素で供給するものと想定した
 - 輸入水素の活用を前提とせざるを得ない理由として、**国内でのグリーン水素製造における量的課題を以下の面から整理した**
 - 再エネ由来：2,000万tのグリーン水素の製造に必要な再エネ発電量の規模
 - 化石燃料 + CCUS由来：2,000万tのグリーン水素の製造に伴うCO₂回収の規模
 - 液化水素での輸入に対して指摘されている**運搬船の大型化について整理した**
 - 2,000万tの液化水素の海上輸送に必要な運搬船の規模
- ◆ 上記の通り、本資料では各供給方法単独で2,000万tのグリーン水素を供給した場合を想定している点に注意が必要である
 - なお、実際には各方法を組合せた供給が予想されるものの、その場合にも各課題は無視できないものとする

国内における再エネ由来水素の量的課題

- ◆ 国内で再エネ由来のグリーン水素を製造する場合に必要な再エネの発電量を試算した
- ◆ 2050年CNの達成には**電源の脱炭素化も並行して行う必要がある**と考え、**再エネ由来のグリーン水素2,000万tの製造と電源の脱炭素化に必要な再エネ発電量を1,450～1,700TWh/年と試算した(下表)**

| 電力の用途 | 必要な再エネ発電量 | 数値の根拠 |
|--------------|--------------|--|
| 2,000万tの水素製造 | 約800TWh/年 | 電解効率100% (3.54kWh/Nm ³) [19]を仮定した*1 |
| 電源の脱炭素化 | 650～900TWh/年 | 以下の参考値が実現された場合の再エネ発電量を算出した 「2050年には発電電力量の約5～6割を再エネで賄うことを今後議論を深めて行くにあたっての参考値としてはどうか」[20] 「2050年の発電電力量は...約1.3～1.5兆kWhを参考値とする」[20] |

計 1,400～1,700TWh/年

- ◆ 一方、2050年に向けたPV・風力導入シナリオとして**当所で検討している「受容性重視シナリオ」では、2050年における再エネ発電量を約650TWhと推計している**[21]
 - 電源の脱炭素化と水素の製造には推計量の2倍以上の電力が必要となる

*1 なお、2018年度末での水電解装置のエネルギー消費量は5kWh/Nm³[9]である。

国内における化石燃料+CCUS由来水素の量的課題

- ◆ 国内での化石燃料+CCUS由来のグリーン水素供給において必要となるCO₂貯留地の規模を試算した
- ◆ 本資料ではLNGの水蒸気改質による2,000万tの水素製造に伴うCO₂排出量を約2.4億t-CO₂/年と試算した
 - 排出係数は1.07kg-CO₂/Nm³-H₂[22]を仮定した
 - CCUはCO₂の固定が可能な量や期間に課題があると考え、考慮しない(スライド22)
 - 約2.4億t-CO₂/年のCCSに必要な設備の規模は以下のとおりである
 - 苫小牧実証機(10万t-CO₂/年) : 2,400カ所分
 - Gorgonプロジェクト*1 (400万t-CO₂/年) [23] : 60カ所分
- ◆ 対して、掘削リグの台数等に制約があることから、CO₂貯留の急拡大には困難が伴うとされる[24]
 - 文献[24]では年間で拡大可能な貯留量に以下の想定を置き、2050年における最大貯留可能量を0.91億t-CO₂と試算している
 - 2030年以降に国内の総貯留量ポテンシャル(113億t-CO₂)のうち年間0.04%(約450万t-CO₂)ずつ貯留量を拡大可能と想定している

*1 豪州にある、2020年時点で世界最大（EOR除く）の操業中のCO₂貯留プロジェクト[23]

液化水素による水素輸入の課題

- ◆ 液化水素の輸入によるクリーン水素供給においては**運搬船の大型化が課題になると指摘されている**
 - 「液化水素を輸入するならば、**運搬船の水素積載量（現状約75t/隻）を100倍以上（約1万t/隻）に拡大した船を約90隻確保する必要**」[18]
 - ただし、液化水素の年間の輸送量は明記されていない*1
- ◆ 他方、川崎重工業は2050年に既存LNG船級の16万m³*2≒約1万t-H₂の水素運搬船80隻以上を用いて年間900万t以上の水素輸送を行う将来ビジョンを示している[25]
- ◆ 川崎重工業の将来ビジョンを基に**液化水素2,000万tを輸入する際に必要な運搬船の隻数**を以下のように試算した
 - **既存LNG船級(積載容量16万m³)の場合** : 約180隻
 - **現状レベル(積載容量1,250m³)の場合** : 約2万隻
- ◆ 対して、世界におけるLNG船の隻数は360隻程度[26]であり、少なくとも現状の運搬船での液化水素の輸入は現実的ではなく、運搬船の大型化が必須であると言える
- ◆ 液化水素以外の水素の海上輸送方法として、CN戦略ではメチルシクロヘキサン(MCH)とアンモニアが挙げられている

*1 仮に、資料[18]で示されている「約90隻」が年間2,000万の水素輸入に必要な隻数として示されているならば、2,000万tの水素輸入のために必要な運搬船の隻数を試算すると、既存LNG船級の船で約90隻、現状レベルの船で約1万隻となる。川崎重工業の将来ビジョンとの輸送量の差は、運搬船1隻あたりの年間往復回数の想定が異なるためと推測した。

*2 資料[25]では運搬船の積載量は明記されていないものの、同資料に示されている2030年の水素輸送量(2隻以上の運搬船を用いて年間22.5万t/年以上)が同社試算[27]と一致しており、試算[27]では16万m³の水素運搬船を想定していることから、資料[25]での運搬船の規模も16万m³と考えた。

水素供給における課題(まとめ)

◆ 水素供給における課題を以下にまとめる

- CN戦略では水素の国際輸送に対して早期の商用化を課題としており、国内での水素製造については多くは触れられていない
- 一方で、CN戦略外では液化水素の海上輸送には運搬船の大型化が必要との指摘がある[18]
- 本資料での試算を通して、**国内での2,000万tのグリーン水素の製造には量的課題があること、液化水素による水素の大量輸入には運搬船の大型化が必須であることが確認された(下表)**

| 供給方法 | | 課題 | 各方法単独で2,000万tの水素を供給する際の規模感 |
|---------|-----------|------------------------|--|
| 国内 | 再エネ由来 | 発電量の確保 | 水素製造用の再エネ発電量が約 800TWh (電解効率100%)必要と試算した 電源の脱炭素化のために必要な発電量も合わせると約1,450~1,700TWhの再エネ発電量の確保が必要と考えられる |
| | 化石燃料+CCUS | CO ₂ 貯留地の確保 | CO ₂ 貯留地が約 2.4億t-CO₂ (LNG水蒸気改質)必要と試算した 苫小牧実証 2,400ヵ所分 Gorgon基地 60ヵ所分 CO ₂ 貯留地の急拡大には、掘削リグ台数の制約等から困難が伴うとされる[24] |
| 液化水素の輸入 | | 運搬船の大型化 | 水素積載容量を16万m³(現状の100倍以上)に拡大した運搬船を約180隻確保する必要があると試算した 現状の運搬船では2万隻以上が必要となり、世界のLNG船が360隻程度[26]であることから、液化水素の大量輸入には運搬船の大型化が必須と言える |

(参考) CO₂固定技術としてのCCU

- ◆ CN戦略では化石燃料を用いた水素製造を脱炭素化する方策としてCCSに加えCCUも検討されている
- ◆ 一方、技術的課題に加え、固定が可能な量や期間に課題があると考え、本資料では化石燃料を用いたグリーン水素製造にはCCSが用いられるものと想定する

| 主たる固定先 | 世界の長期的なCO ₂ 需要[億t/年] | CO ₂ 保持期間 | CO ₂ 削減効果 | 課題 |
|--------|---------------------------------|----------------------|----------------------|--|
| 合成燃料 | 3～ | 燃焼まで | 化石燃料代替 | CO ₂ 固定が一時的 |
| 化学品 | 0.01～0.03 | プロセスに依存 | 一時的固定 | |
| コンクリート | 0.3～3 ^{*1} | 数十～数百年 | 永久的固定 | CO ₂ 需要量 |
| 炭酸塩 | 3～ | 数十～数百年 | | 用途によっては 使用時にCO₂を放出 ^{*2} |

文献[28]より著者が作成

*1 需要量の拡大には鉄筋コンクリートに利用できるCCUコンクリートの開発が必要と考えられる。コンクリート製造にCO₂を用いるとpH値が低下するため骨材が腐食しやすく、現状では道路緑石等の骨材を用いない用途が主となっている。

*2 市場規模が大きい炭酸塩であるCaCO₃は、半分近くがセメント原料に用いられており加工の過程でCO₂が排出される。

(参考)水素キャリアを用いた輸入

- ◆ 液化水素以外での水素エネルギーの輸入方法として、CN戦略ではアンモニア、MCH等の水素キャリアを用いた輸送が検討されている
- ◆ 液化水素と比較した際の各水素キャリアの特徴と課題は以下のようにまとめられる
 - MCH：沸点が高く扱いやすいが、脱水素に多量のエネルギーが必要である
 - アンモニア：燃料としての直接利用が可能で熱量も高いが、毒性や腐食性がある。また、現状検討されている利用用途は発電や船舶等に限られる

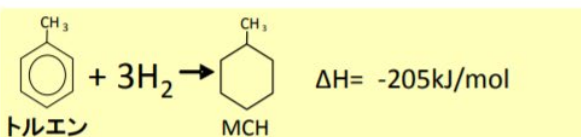
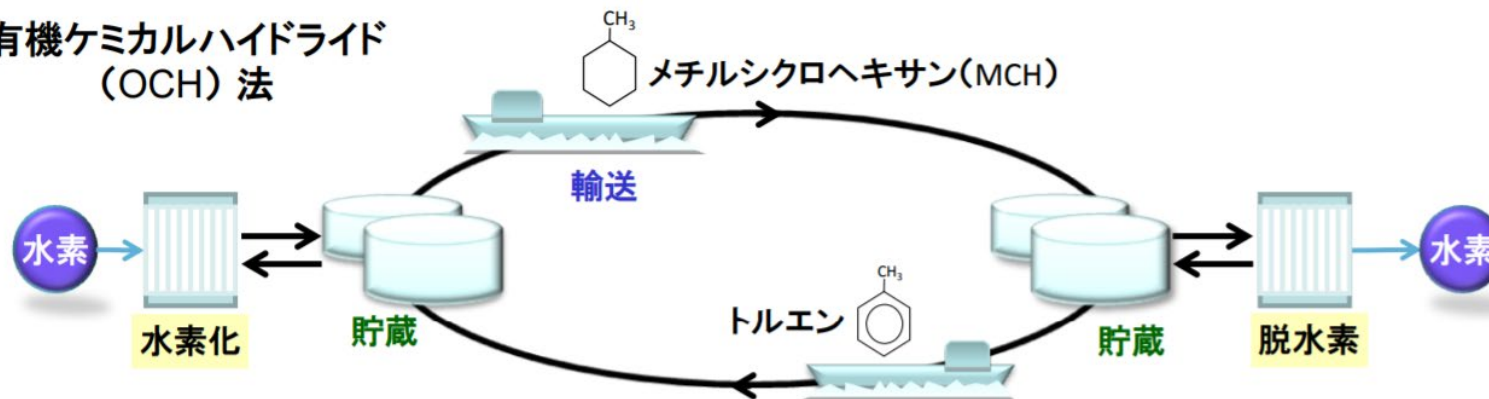
| | 液化水素 | MCH | 液化アンモニア |
|-------------|---------------------------------------|--|--|
| 沸点 | -253℃ | 101℃ | -33.4℃ |
| 高位発熱量 | 142MJ/kg 10GJ/m ³ | - | 23MJ/kg 16GJ/m ³ |
| 水素密度 | 70.8kg-H ₂ /m ³ | 47.3kg-H ₂ /m ³ | 121kg-H ₂ /m ³ |
| 脱水素反応の反応熱*1 | - | 34MJ/kg-H₂ (得られる水素が持つ熱量の約25%) | 16MJ/kg-H ₂ (得られる水素が持つ熱量の約10%) |
| 課題 | 運搬船の大規模化 | 脱水素反応に 多量のエネルギー投入が必要 | 毒性、腐食性 利用用途が 限られる |

*1 反応前の物質（MCHやアンモニア）と反応後の物質（水素、トルエン、窒素など）が持つ化学的エネルギーの差分である。

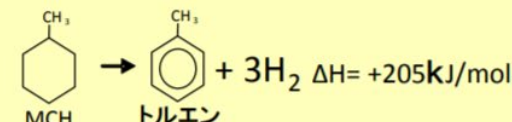
(参考)MCHでの水素輸送

- ◆ 水素とトルエンをMCH に転換して輸送する
- ◆ MCHは常温常圧で液体であることから扱いが容易で、既存インフラの利用が可能である
- ◆ 反面、脱水素時に多量の投入エネルギーが必要となる
 - 脱水素反応は水素3molあたり205kJ≒水素1kgあたり34MJの反応熱を必要とする吸熱反応である
 - 対して、水素の発熱量は142MJ/kgであり、脱水素のためには発生する水素が持つ熱量の約1/4にあたる投入エネルギーを別途用意する必要があることを意味する

有機ケミカルハイドライド (OCH) 法



[トルエンと水素の結合でMCH (SPERA水素) を生成]



[MCH から水素を生成]

(出典)[29]

(参考)アンモニアでの水素輸送

- ◆ 水素と窒素をアンモニアに転換して輸送する場合、以下の利点が挙げられる
 - 沸点が比較的高い(-33.4°C)
 - 体積当たりの発熱量、水素含有量が高い
 - 燃料としての直接利用が可能である（脱水素が不要）

- ◆ CN戦略でも燃料アンモニア産業の項目が設けられ、2050年に向けてアンモニアの燃料利用を拡大する方針である

- ◆ 燃料アンモニアの国内導入量を2030年に300万t-NH₃、2050年に3,000万t-NH₃とする目標が示された[30]
 - それぞれ熱量等価の水素に換算すると50万t-H₂、500万t-H₂程度である

- ◆ 反面、主な利用用途は発電に限られる
 - 船舶でも燃料利用に向けた技術開発を行う方針がCN戦略内工程表で示された

4. 水素需要面の整理

- 水素の潜在的な需要規模の推計
- 水素の利用における技術的・経済的課題

CN戦略での水素の利用分野の整理

- ◆ CN戦略では下表のように様々な分野での水素の利用が言及されている

| CN戦略内の記載場所 | | 取り上げられた水素の利用分野 |
|------------|---------------------------|---------------------------------|
| 水素産業 | 工程表* ¹ (スライド8) | 輸送* ² 、発電、製鉄、化学、燃料電池 |
| | 実行計画* ³ | 水素発電タービン、FCトラック等の商用車、水素還元製鉄 |
| 水素産業以外 | | 自動車、船舶、航空機、カーボンリサイクル |
| その他 | | 熱需要 |

- ◆ 本資料では上記を踏まえ、**商用車、発電、製鉄、化学、熱需要**の利用分野での水素の利用に着目し、**需要規模**(スライド28-31)**や課題**(スライド32-41)**等について整理を行った**

- 実行計画では輸送のうち商用車に着目していることから本資料でも商用車について整理した
- 燃料電池は水素の利用に際して用いられる転換技術と捉え、本資料での整理には含まない
- 熱需要での水素利用に関してCN戦略では詳細は示されていないものの、水素基本戦略では電力、運輸と並んで「熱・産業プロセス」が利用分野とされていることから、水素の利用において重要な分野と考え整理に含めた

*1 工程表には、当該分野における成長を実現するうえで鍵となる重点技術について、日本の国際競争力を強化しつつ、自律的な市場拡大につなげるための具体策が提示されている

*2 輸送の項目は自動車(商用車含む)、FC鉄道、船舶、航空機が含まれる形で示されている

*3 実行計画には、現状と課題、今後の取り組み等が示されている

水素需要の規模と課題

- ◆ 商用車、発電、鉄鋼、化学、熱需要における水素の潜在的な需要規模を約3,700万t~4,200万tと推計した
 - 商用車、発電、鉄鋼に対してはCN戦略で「一定の仮説に基づく導入量」として潜在国内水素需要が示されている
 - 化学、熱需要に対してはCN戦略で国内水素需要が示されておらず、独自に推計を行った
 - **あくまで潜在的な需要規模に過ぎず、その実現には各分野の技術的・経済的な課題の解決が必要である点には留意が必要である**
- ◆ 推計した需要規模は水素の供給目標を十分に上回るものの、**水素の利用に際しては下表に示す課題が挙げられ、供給量の確保が必ずしも需要喚起につながるとは言えない**

| 利用分野 | 水素の潜在的な需要規模 (スライド28-31) | | 水素の利用における課題 (スライド32-41) 太字:CN戦略内で言及されている課題 |
|------|----------------------------|---------|--|
| | CN戦略内で示された 潜在国内水素需要 | 本資料での推計 | |
| 商用車 | 600万t | — | 商用化 、液化水素輸送網の拡大 |
| 発電 | 500~1,000万t | — | 安定燃焼性の実証 燃焼器の開発(NOx対策、逆火対策) |
| 鉄鋼 | 700万t | — | 100%の水素還元製鉄は技術的に未確立 大量かつ安価な水素の調達 炉内温度の維持、還元鉄中の炭素量の低下 |
| 化学 | — | 1,100万t | 製造コスト 、CO ₂ 循環の確立 |
| 熱需要 | — | 800万t | 1,000℃以上の直接加熱での利用が困難 |

潜在国内水素需要

- ◆ CN戦略では「一定の仮説に基づく導入量」として潜在国内水素需要が示されている
 - 一方で「一定の仮説」についてCN戦略では確認されず、潜在国内水素需要が想定している水素の導入規模は明らかではない
 - **潜在国内水素需要が「仮説」として置いている水素の導入規模を下表の通り独自に推測した**

| | | 商用車 | 発電 | 鉄鋼 |
|------------------------------------|-------|----------------------|---|--|
| CN戦略で示された潜在国内水素需要 | | 約600万t/年 | 約500～1,000万t/年 | 約700万t/年 |
| 潜在国内水素需要が「仮説」として置いている水素の導入規模(独自推測) | | 商用車の燃料をすべて水素転換する | 2050年の発電量の10%程度を賄う | 銑鉄生産をすべて水素還元製鉄に転換する |
| 独自推測の根拠 | CN戦略内 | 確認できず | 2050年の発電量について以下の記述あり 「水素・アンモニア発電は10%程度...を参考値とする」 | 確認できず |
| | CN戦略外 | 確認できず | 約500～1,000万tの水素で発電した際の発電量を950～1,900億kWh(発電効率57%)とする試算あり[20] | 日本の銑鉄生産量8,000万を100%水素還元製鉄で製造した際の水素必要量を約800億Nm ³ (約700万t)とする試算あり[31] |
| | 独自試算 | 約440万t/年 (スライド30) | — | — |

(参考)商用車における水素需要の推計

- ◆ 下表に示す試算を行い、商用車の燃料をすべて転換した場合の水素需要を約440万tと推計した
 - 商用車として営業用・自家用貨物自動車、営業用旅客自動車、営業用乗用車を考慮した
 - エネルギー消費量について、以下の点に注意が必要である[32]
 - いずれのエネルギー消費量も小型乗用車を対象とした数値である
 - 内燃機関自動車（ガソリン車、LPG車）とディーゼル車は市販車段階の車種を対象としている一方、FCVは実証車段階の車種を対象としており、比較には注意が必要である
 - このことから、下表の試算では内燃機関自動車と比較したFCVのエネルギー効率を過大評価し、需要を過小評価している可能性がある

| | ガソリン | 軽油 | LPG |
|----------------------------------|-------------------------|------------|-------------------------|
| 商用車の燃料消費量[33] ① | 9,865億L/年 | 33,227億L/年 | 1,151億L/年 |
| 各燃料の発熱量(LHV)[34] ② | 32.9MJ/L | 36.1MJ/L | 25.8MJ/L |
| 走行時のエネルギー消費量[32] ③ | 1.52MJ/km ^{*1} | 1.39MJ/km | 1.52MJ/km ^{*1} |
| FCVのエネルギー消費量[32] ④ | 0.65MJ/km | | |
| 水素の発熱量(LHV) ⑤ | 120MJ/kg | | |
| 水素に転換した場合の水素消費量 ①×②×④ / (③×⑤) | 約100万t/年 | 約330万t/年 | 約10万t/年 |

*1 ともに内燃機関自動車のエネルギー消費量を参照している

化学、熱需要での潜在的な水素需要の規模

- ◆ CN戦略では、化学、熱需要に対しては潜在国内水素需要が示されていない
- ◆ 化学、熱需要での潜在的な水素需要の規模をそれぞれ約1,100万t、約800万tと推計した

| | CN戦略で示されている水素利用 | 独自に推計した潜在的な水素需要 | 推計の根拠 |
|-----|---------------------------------|-----------------|--|
| 化学 | プラスチック原料の製造 | 約1,100万t/年*1 | 原料化学品の国内市場規模を根拠に基礎原料品の製造に水素を用いた場合の消費量を試算した例[35]を参照している |
| 熱需要 | 「熱需要には、水素などの脱炭素燃料...も活用することとなる」 | 約800万t/年 | <p>以下の想定で算出を行った</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水素転換の対象：200～1,000℃の産業用熱需要 200℃以下の熱需要にはヒートポンプが導入されると想定 1,000℃以上の熱需要の水素転換は困難とされる[36]ため除外 ・うち、蒸気需要(約300PJ[36])：約300万t-H₂*2 ・残る燃焼加熱需要(約700PJ[36])：約500万t-H₂*3 |

*1 原料として必要な量であり反応に必要な熱エネルギー分は含まない。

*2 水素焼きボイラーが既存ボイラーと同等の効率となる場合を想定し、効率90%(LHV基準)で算出した。

*3 文献[36]では燃焼加熱に対して燃料投入量 = 需要と見なしていることから、水素燃焼器が既存の燃焼器と同等の効率を持つ場合を想定し、燃焼加熱需要を水素の高位発熱量で除した。

商用車における水素の利用の課題

- ◆ CN戦略では商用車での水素の利用における課題として商用化を挙げている
 - 商用化に向けた取り組みとして、FCトラックの実証、インフラ整備、規制改革(水素タンクの昇圧等)によるコスト削減などを示している
- ◆ 本資料では上記の課題に加え、**水素輸送のための液化水素輸送網の拡大**が商用車における水素の利用での課題と考える
 - 液化水素以外の水素輸送は下表に示す課題が挙げられることから、液化水素での輸送が重要になると考える
 - 商用車の潜在国内水素需要が約600万tであるのに対し、液化水素の形で外販されている水素は2012年時点で0.3万t程度[12]にとどまる
 - 潜在国内水素需要のすべてに液化水素での輸送が必要とは限らないものの、液化水素の輸送網の拡大が重要になると言える

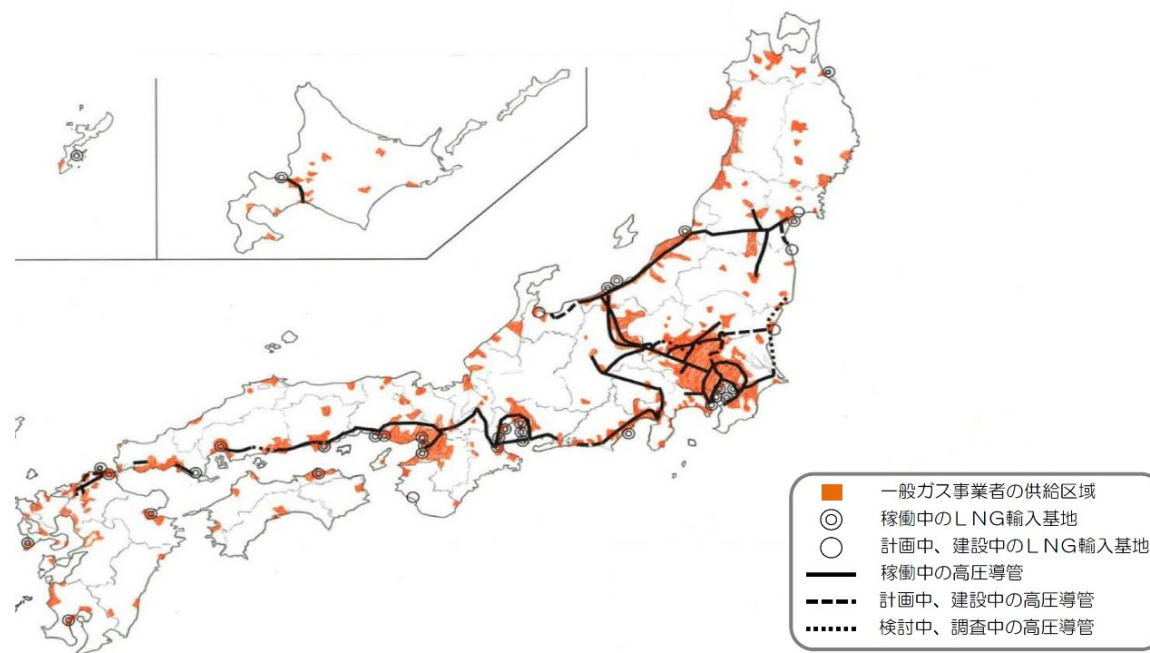
| 輸送手段 | 課題 |
|--------------|--|
| 水素パイプラインの新設 | 建設コスト 単位熱量当たり天然ガスの1.5~2倍[37] |
| 既設のパイプラインの利用 | パイプライン設備の密度(スライド33) |
| 車両(圧縮水素) | 台数の確保 本資料ではトレーラー1台の積載量を0.25t-H ₂ *1と想定し、年間600万t-H ₂ の輸送に1日のべ7万台*2程度が必要と試算 |

*1 19.6MPa充填トレーラーを想定

*2 対してガソリン等を輸送するタンクローリーの台数は2018年度末時点で5,486台[38]

(参考) 既存ガス網での水素輸送

- ◆ 既存ガス網での水素輸送は、**低中圧の都市ガス導管であれば混入率100%までの水素混入が技術的には可能**とされる[39]
 - ただし老朽設備への混入や長期的な安全性は未確認とされる[39]
 - また、混入により熱量や燃焼特性が変わるため需要側の機器の入替が必要である
- ◆ 一方で低中圧の都市ガス導管が整備されている一般ガス事業者の供給区域は**国土全体の6%弱**にとどまる[40](図中色付き部分)



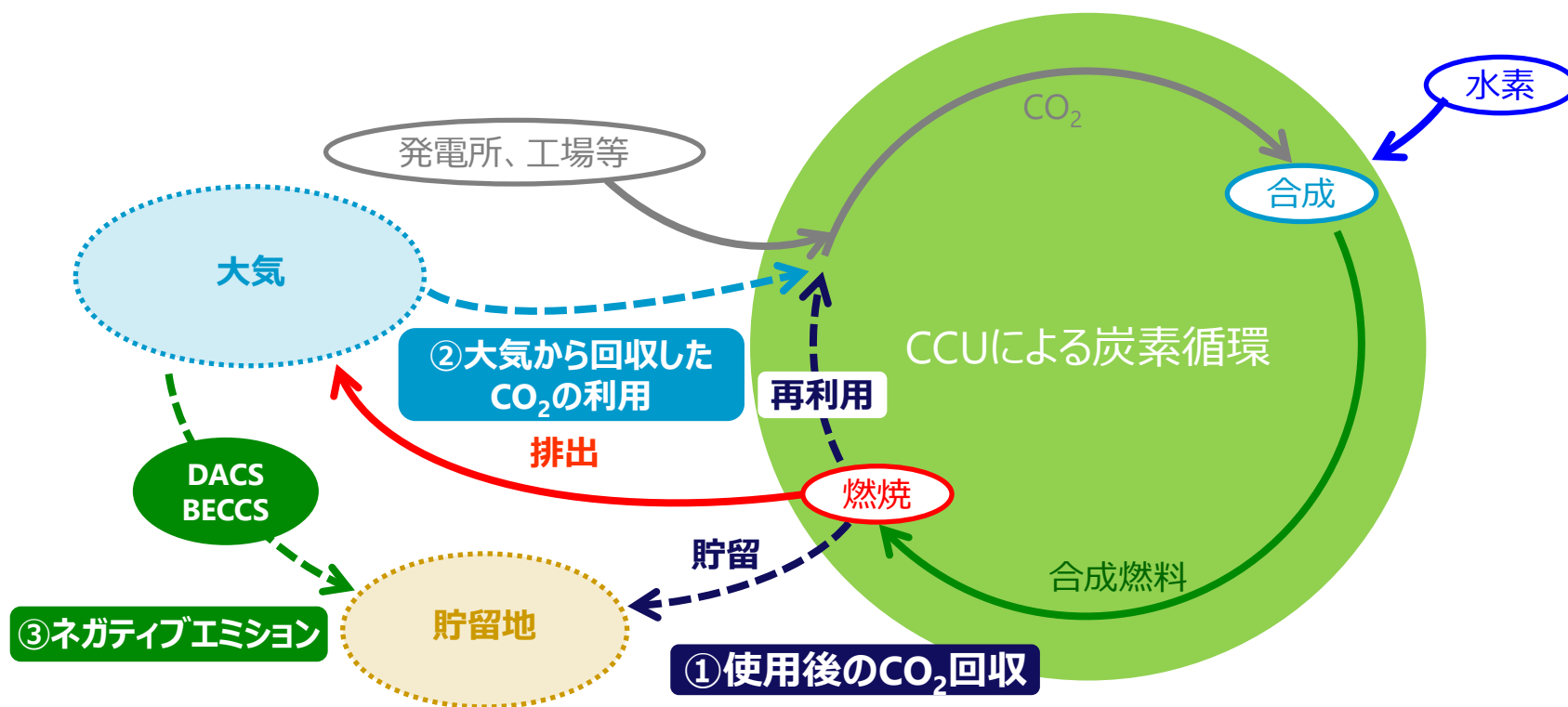
(出典)[40]

商用車における水素キャリアの直接利用

- ◆ CN戦略では**自動車・蓄電池産業で水素キャリアの直接利用に言及している**
 - 「電動化のハードルが高い商用車等については...燃料のカーボンニュートラル化の取組が重要となる。燃料のカーボンニュートラル化に向けては既存のインフラが使える合成燃料(e-fuel)が注目されている」
 - 合成燃料は「発電所や工場等から回収したCO₂と水素を合成して作られるエンジンで利用可能な液体燃料」とされる
 - 合成燃料の利用に向けては、商用化に向けた一貫製造プロセスの確立や低コスト化が必要とされる
- ◆ 他にも、航空機産業で合成燃料の利用が検討されている
- ◆ 一方、CN戦略では記載がみられないものの、**CNの実現を前提とした場合の合成燃料の利用における課題**として、本資料では**炭素循環**(スライド35)の**確立の必要性を挙げる**
 - 合成燃料は燃焼時にCO₂を生じることから、CNにするためには①使用後のCO₂回収②大気から回収したCO₂を利用した燃料の合成③ネガティブエミッション技術を用いた排出量の相殺等によって炭素循環を確立する必要があると考えられる

(参考)CN実現時の合成燃料の利用における炭素循環

- ◆ 特に対策を打たない場合、**合成燃料の燃焼時にはCO₂が排出される**
- ◆ 合成燃料の利用をCNにするためには①**使用後のCO₂回収**②**大気から回収したCO₂を利用した燃料の合成**③**ネガティブエミッション技術を用いた排出量の相殺**等（図内破線の矢印）を用いて炭素循環を確立することが必要になると考えられる
 - ただし、商用車の場合には①が困難である可能性が高い

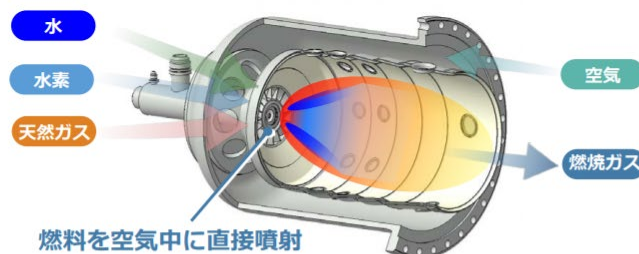


発電における水素の利用の課題

- ◆ CN戦略では**実機での安定燃焼性の実証が水素の利用における課題**としている
- ◆ 500MW級の火力機では混焼率30%(熱量比率)を達成しているが、**混焼率の向上や専焼に向けては以下の対策が必要とされる**[20][41]
 - **NOx対策**：水素は燃焼温度が高く、NOxが発生しやすい
 - **逆火対策**：水素は燃焼速度が速く、噴射される燃料を伝って火炎がノズルを逆流する「逆火」が生じやすく、燃焼器の破損につながる

拡散燃焼器

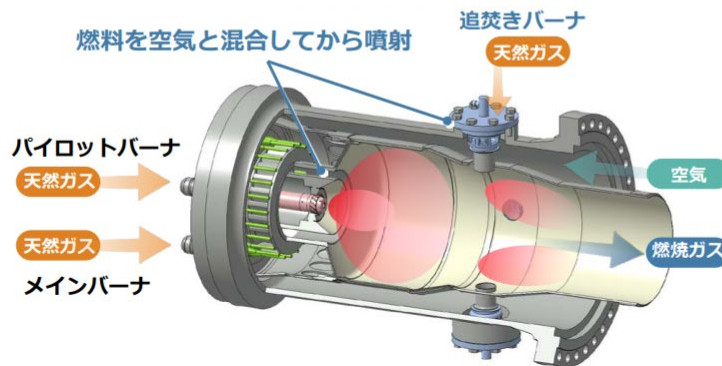
- ・ 燃焼が安定
 - ・ 多様な燃料に対応可能
 - ・ NOxが多い
- 水、水蒸気による低NOx化



DLE燃焼器

Dry Low Emission

- ・ 希薄予混合低NOx燃焼
- ・ 追焚き低NOx燃焼
- ・ 安定燃焼条件が限定される
逆火、振動、吹き消え



(出典)[41]

発電におけるアンモニアの直接利用

- ◆ CN戦略では**燃料アンモニア産業の項目が設けられ発電での利用が言及される**など、水素キャリアであるアンモニアの直接利用が検討されている
 - アンモニアの消費量に関する目標はCN戦略では示されていない
 - 発電における混焼率の向上や専焼化にはNO_x抑制の検証と収熱技術^{*1}の開発が必要とされる
 - 石炭への熱量比20%の混焼は可能とされ2021年度から実機での実証を行うとしている

- ◆ **燃料アンモニア導入官民協議会[30]において、2050年に国内で年間3,000万tのアンモニア需要を想定した燃料アンモニアの導入・拡大への工程表が示されている**
 - 同協議会[30]では混焼率を上げるうえで以下の技術開発が必要としている
 - 未燃アンモニアの完全燃焼技術
 - NO_xの抑制技術
 - 着火困難性の克服技術
 - 混焼時と比較して低下する熱量を、必要な熱量まで引き上げる技術^{*1}

^{*1} いずれも同じ技術をさすものと考えられる。アンモニアは石炭に比べ燃焼時の火炎温度が低いうえ、燃焼時にススを発生しないことから輻射熱が低く、発電利用には収熱技術が必要となるとされる。

鉄鋼における水素の利用の課題

- ◆ CN戦略では**100%の水素還元製鉄が技術的に未確立**であること、**大量かつ安価な水素供給が不可欠**であることが指摘されている
- ◆ **水素のみを用いた直接還元製鉄での技術的課題**について、文献[42][43]では**炉内温度の維持と還元鉄内の炭素量の低下**が指摘されている
 - **炉内温度の維持**：水素還元は吸熱反応であり、主に発熱反応を用いる従来の製鉄方法と比べ、**温度維持のためのエネルギー投入が必要**である[42][43]
 - **炭素量の低下**：LNG等を用いて還元鉄に**いくらかの炭素を付加**することが求められる可能性が指摘されている[42]
 - 水素のみで還元した還元鉄は炭素量が0%になり、炭素が含まれる場合よりも鉄の融点が高くなること等から、電気炉の効率が大幅に低下する*1[42]
- ◆ **大量かつ安価な水素供給**については、日本鉄鋼連盟が以下のように指摘している[10]
 - 「水素還元製鉄に利用される水素は、カーボンフリーであることはもとより、**安価安定供給も重要な要件**となる」
 - 銑鉄1tの製造に必要な水素量を1,000Nm³/t、**炭素還元製鉄と等価にする場合の水素価格を7.7¢/Nm³-H₂(約8円/Nm³)**と示している
- ◆ なお、日本鉄鋼連盟はCO₂排出ゼロで鉄鋼を製造する「**ゼロカーボン・スチール**」の実現に向けて、**水素還元製鉄だけでなく従来の高炉法の高効率化+CCUSも検討**している[10]

*1 加えて、炭素量によって鉄鋼製品の性質や用途が異なることから、LNG等を用いた還元鉄への炭素の付加が求められる可能性が考えられる。

(参考)製鉄プロセスの比較

- ◆ 水素による還元反応は**吸熱反応**であり、炉内温度の維持にはエネルギーが必要である
- ◆ 日本では高炉とスクラップを原料とした電気炉での生産が主流である
- ◆ 天然ガスを用いた直接還元法はLNGが安価な地域を中心に導入されている

| | 高炉法 | 直接還元法(天然ガス) | 直接還元法(水素) | スクラップ溶解 |
|------------------------|--|--|--|---|
| フローの一例 | <pre> graph TD A[コークス] --> B[高炉] C[鉄鉱石] --> B B --> D[転炉] D --> E[粗鋼] </pre> | <pre> graph TD A[天然ガス] -- 改質 --> B[H2やCO] C[鉄鉱石] --> D[直接還元炉] B --> D D --> E[電気炉] E --> F[粗鋼] </pre> | <pre> graph TD A[H2] --> D[直接還元炉] C[鉄鉱石] --> D D --> E[電気炉] E --> F[粗鋼] </pre> | <pre> graph TD A[スクラップ] --> D[電気炉] D --> F[粗鋼] </pre> |
| 主な還元剤 | C、CO、H ₂ | CO、H ₂ | H ₂ | — |
| 主な還元反応 発熱反応 吸熱反応 | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}_2$ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ | $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$ | — |

化学における水素の利用の課題

- ◆ CN戦略での水素産業の項目における化学に対する言及は、化学での水素などを用いたプラスチック原料の製造の**工程表が示されるのみであり、課題は示されていない**
- ◆ **カーボンリサイクル産業**の項目では**人工光合成技術によるプラスチック原料の製造**について言及されており、**課題として変換効率の低さと製造コストの高さを挙げている**
- ◆ 本資料では、人工光合成に限らず水素を用いた化学原料の製造に対する課題として、**合成燃料(スライド35)と同様にCO₂循環の確立が挙げられると考える**
 - CNの達成を前提とした場合①使用後(化学品の場合焼却処分時)のCO₂回収②大気から回収したCO₂を利用した燃料の合成③ネガティブエミッション技術を用いた排出量の相殺等が必要と考える
 - 廃プラスチック、廃油等の焼却によるCO₂排出量は2018年時点で**2,600万t**[44]である
 - 焼却施設は全国で約1,000カ所[45]にのぼり「①使用後のCO₂回収」には、各施設へのCO₂回収装置の設置に加え、施設近辺でのCO₂の固定、あるいはCO₂の消費地、貯留地への輸送網が必要となる
 - ②③の場合バイオマスやDACを用いて大気からCO₂を回収する必要が生じる

熱需要における水素の利用

◆ 水素の利用における課題

- CN戦略では**熱需要における水素の利用の課題は示されていない**
- 文献[36]では**1,000°C以上の燃焼加熱での水素の利用が困難なことが指摘されている**
 - 1,000°C以上の高温加熱分野では火災からの放射などによって被加熱物を加熱する一方、水素は燃焼時にすすが生じないことから放射熱が低く、転換が困難とされている
 - 一方、同様に燃焼時にすすを生じず放射熱が低いアンモニアについては収熱技術の開発に言及されており(スライド37)、熱需要における水素の利用でも同様の対策が今後検討される可能性があると考え

◆ 水素キャリアの直接利用

- CN戦略内では「**水素などの脱炭素燃料**」を熱需要に活用すると記載されている
 - 脱炭素燃料については燃料アンモニア産業にて「**アンモニアは...水素社会への移行期では主力となる脱炭素燃料である**」や「その他の脱炭素燃料についても、活用に向けた検討を進める」と記載されている
 - 脱炭素燃料とは呼ばれていないものの、**CN戦略内で言及された水素キャリアの直接利用としては合成燃料も挙げられる**
- CN戦略内では上記水素キャリアを熱需要で利用した際の課題が記載されていないものの、**以下の課題が予想される**
 - 合成燃料：炭素循環の確立(スライド35)
 - アンモニア：水素と同様に、放射熱が低いことから温度帯が限られる可能性がある

水素需要面の整理(まとめ)

- ◆ 商用車、発電、鉄鋼、化学、熱需要における水素の潜在的な需要規模を約3,700万t~4,200万tと推計した
 - 商用車、発電、鉄鋼に対してはCN戦略で潜在国内水素需要が示されている
 - 化学、熱需要に対してはCN戦略で国内水素需要が示されておらず、独自に推計を行った
 - **あくまで潜在的な需要規模に過ぎず、その実現には各分野の技術的・経済的な課題の解決が必要である点には留意が必要である**
- ◆ 推計した需要規模は水素の供給目標を十分に上回るものの、**水素の利用に際しては下表に示す課題が挙げられ、供給量の確保が必ずしも需要喚起につながるとは言えない**
- ◆ 水素の他にも水素キャリアの直接利用が検討されているが、利用可能な範囲や利用時のCO₂排出に留意が必要である

| 利用分野 | 水素の潜在的な需要規模 | | 水素の利用における課題 太字:CN戦略内で言及されている課題 | CN戦略で言及された 水素キャリアの直接利用 |
|------|------------------------|-------------|--|---------------------------|
| | CN戦略内で示された 潜在国内水素需要 | 本資料 での推計 | | |
| 商用車 | 600万t | — | 商用化、液化水素輸送網の拡大 | 合成燃料 |
| 発電 | 500~1,000万t | — | 安定燃焼性の実証 燃焼器の開発(NO _x 対策、逆火対策) | アンモニア |
| 鉄鋼 | 700万t | — | 100%の水素還元製鉄は技術的に未確立 大量かつ安価な水素の調達 炉内温度の維持、還元鉄中の炭素量の低下 | — |
| 化学 | — | 1,100万t | 製造コスト 、CO ₂ 循環の確立 | — |
| 熱需要 | — | 800万t | 1,000℃以上の直接加熱での利用が困難 | 脱炭素燃料 |

5. 結論

結論①

- ◆ CN戦略では2050年CNの達成に向けて産業政策の観点から成長が期待される産業として水素産業が挙げられており、水素基本戦略と比較した際の相違点としては主に導入量目標と利用分野が挙げられる
 - 導入量目標：2030年には最大300万t、2050年には2,000万t程度
 - 水素基本戦略では2030年に30万t、「将来目指すべき姿」として「 $\sim 1,000$ 万t + α 」が示されている
 - 利用分野：工程表で輸送、発電、鉄鋼、化学、燃料電池が利用分野として示されている
 - 水素基本戦略では電力、運輸、熱・産業プロセスが利用分野として示されている
- ◆ CN戦略では「化石燃料+CCUS、再エネ等から製造された水素」をグリーン水素と定義する一方、2050年の導入量目標2,000万t程度をグリーン水素で供給することを想定した場合に考えられる課題として、以下が整理された
 - 国内での水素製造には以下の量的課題があり、輸入水素の活用が重要となる
 - 再エネ由来：再エネ発電量の確保(電源の脱炭素も含め約1,450～1,700TWh)
 - 化石燃料+CCUS由来：CO₂貯留地の確保(2.4億t-CO₂/年)
 - 液化水素での輸入：運搬船の大規模化(現状の約100倍の規模を約180隻)
()内の数値は各方法単体で2,000万tを確保する前提で行った想定であり、実際には上記を含めた様々な方法を組合せて水素供給を行うことになるものの、各課題は無視できないものとする

結論②

- ◆ 需要面では、商用車、発電、鉄鋼、化学、熱需要の5つの分野での水素の利用に着目して整理を行い、以下のことが明らかになった
 - 5つの分野における水素の潜在的な需要規模を約3,700万t～4,200万tと推計した
 - 商用車、発電、鉄鋼に対してはCN戦略で潜在国内水素需要が示されている
 - 化学、熱需要に対してはCN戦略で国内水素需要が示されておらず、独自に推計を行った
 - あくまで潜在的な需要規模に過ぎず、その実現には各分野の技術的・経済的な課題の解決が必要である点には留意が必要である
 - 本資料で推計した需要規模は水素の供給目標を十分に上回るものの、水素の利用に際しては以下に示す課題が挙げられ、供給量の確保が必ずしも需要喚起につながるとは言えない（**太字はCN戦略内で指摘されたもの**）
 - 商用車：**商用化**、液化水素輸送網の拡大
 - 発電：**燃烧安定性**、NO_x対策、逆火対策
 - 鉄鋼：**100%の水素還元製鉄は技術的に未確立**、**大量かつ安価な水素の調達**、炉内温度の維持、還元鉄中の炭素量の低下
 - 化学：**製造コスト**、炭素循環の確立
 - 熱需要：1,000℃以上の直接加熱での利用が困難
- ◆ 今後の展開
 - CN戦略や燃料アンモニア導入官民協議会で示された水素、アンモニアの利用目標を踏まえた2050年の電源構成の分析を行う

参考文献

参考文献①

- [1] 経済産業省 (2020)「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」
- [2] エネルギー総合工学研究所(2020)「CO2フリー普及シナリオ研究 成果報告書(2019年度)」
- [3] エネルギー総合工学研究所 (2015)「エネルギー技術情報に関する調査報告書 (4 / 4)
IV. 水素・燃料電池に関する技術情報調査・分析」
- [4] 日本エネルギー経済研究所 (2017)「水素導入拡大に向けた政策提言研究会 報告書」
- [5] 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議 (2017)「水素基本戦略」
- [6] 水素エネルギー協会 (2019)「水素エネルギーの事典」, p.29-31
- [7] 経済産業省 産業技術環境局 (2011)「これまでの国家プロジェクトの変遷」, 第31回 産業構造審議会
産業技術分科会 研究開発小委員会, 資料5
- [8] 山崎邦彦 (1994)「ニューサンシャイン計画の概要」, 『応用物理』, vol.63, no.8, p.762-769
- [9] 水素・燃料電池戦略室 (2019)「水素・燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」,
第1回水素・燃料電池戦略ロードマップ評価ワーキンググループ, 資料3
- [10] 日本鉄鋼連盟 (2020)「ー日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョンー『ゼロカーボン・スチールへの挑戦』」
- [11] Federal Ministry of Economic Affairs and Energy (2020) “The National Hydrogen Strategy”
- [12] 資源エネルギー庁 燃料電池推進室 (2014)「水素の製造、輸送・貯蔵について」第5回水素・燃料電池戦略
協議会ワーキンググループ, 資料2
- [13] 資源エネルギー庁 水素・燃料電池戦略室 (2018)「第12回CO2フリー水素WG 事務局提出資料」第12回CO2
フリー水素ワーキンググループ, 資料1
- [14] Ministry for the Ecological Transition et.al. (2020) “ National strategy for the development of
decarbonized and renewable hydrogen in France”
- [15] U.S. Department of Energy (2020) “Department of Energy Hydrogen Program Plan”

参考文献②

- [16] European Commission (2020) "Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions; A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe "
- [17] "The Biden Plan to Build a Modern, Sustainable Infrastructure and an Equitable Clean Energy Future"
URL: <https://joebiden.com/clean-energy/>
- [18] 資源エネルギー庁 (2021)「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討」基本政策分科会, 第36回会合, 資料2
- [19] 阿部勲夫(2008)「水素電解法による水素製造とそのコスト」,水素エネルギーシステム, vol.33, no.1, p.19-26
- [20] 資源エネルギー庁 (2020)「2050年カーボンニュートラルの実現に向けた検討」基本政策分科会, 第35回会合, 資料1
- [21] 朝野賢司他 (2020)「ネットゼロ実現に向けた風力発電・太陽光発電を対象とした大量導入シナリオの検討」, 基本政策分科会, 第34回会合, 資料3-4
- [22] 水素・燃料電池戦略協議会 CO2フリー水素ワーキンググループ(2017)「CO2フリーワーキンググループ 報告書」
- [23] Global CCS Institute (2020) "Global Status of CCS 2020"
- [24] 秋元圭吾他 (2020)「脱炭素社会に向けた対策の考え方」, 第3回グリーンイノベーション戦略推進会議, 資料3-4
- [25] 川崎重工業(2021)「国際水素サプライチェーン構築に向けた取り組み」,第21回水素・燃料電池戦略協議会,資料4
- [26] 国土交通省 (2014)「我が国のエネルギー調達の取組」, 第1回エネルギー輸送ルートの多様化への対応に関する検討会, 資料5
- [27] NEDO他(2012)「国際連携グリーンコール技術開発プロジェクト クリーンコール技術に関する基盤的国際共同研究 低品位炭起源の炭素フリー燃料による将来エネルギーシステム（水素チェーンモデル）の実現可能性に関する調査研究」
- [28] 東レリサーチセンター (2018)「平成 2 9 年度科学技術イノベーション創造推進委託事業 エネルギー・環境分野における有望技術の技術課題に関する包括的調査 調査報告書」
- [29] 千代田化工建設株式会社(2017)「水素供給シナリオ」,第9回水素・燃料電池戦略協議会,資料5-2

参考文献③

- [30] 燃料アンモニア導入官民協議会 (2021)「燃料アンモニア導入官民協議会 中間取りまとめ」
- [31] 資源エネルギー庁 水素・燃料電池戦略室 (2020) 「今後の水素政策の検討の進め方について」,
第18回水素・燃料電池戦略協議会, 資料1
- [32] 日本自動車研究所(2011)「総合効率とGHG排出の分析 報告書」
- [33] 国土交通省(2019)「自動車燃料消費量統計 年報 平成30年度分」
- [34] JHFC総合効率検討特別委員会他(2006)「J H F C総合効率検討結果」報告書」
- [35] 経済産業省他 (2019)「エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会 報告書」
- [36] 三菱総合研究所 (2018)「平成29年度新エネルギー等の導入促進のための基礎調査
(熱の需給及び熱供給機器の特性等に関する調査) 調査報告書」
- [37] NEDO (2007) 「世界エネルギー技術の展望 WETO H2報告書(EU) -水素の輸送と貯蔵-」, NEDO海外レポート,
No.999, p64-76
- [38] 資源エネルギー庁「石油設備調査」
- [39] 田畑健 (2010)「水素社会と都市ガス事業」, 水素エネルギーシステム, vol.35, no.4, p.77-80
- [40] 経済産業省 総合資源エネルギー調査会 基本政策分科会 ガスシステム改革小委員会 (2016)
「導管整備計画方針について」, 第31回, 資料4
- [41] 柏原宏行 (2019)「水素焚きガスタービン開発の取組」 水素エネルギー社会形成研究会
- [42] ビンセント・シェヴリエ他 (2020)「ミドレックスプロセス-その進化と脱炭素製鉄への展望-」, 神戸製鋼技報, vol.70,
No.1, p.91-97
- [43] 日本製鉄 (2021)「鉄鋼業における水素利用」, 第20回水素・燃料電池戦略, 資料5
- [44] 環境省 (2020)「2018年度(平成30年度)温室効果ガス排出量 確報値」
- [45] 環境省 (2020)「一般廃棄物処理事業実態調査の結果 (平成30年度) について」