

水素自動車が生排出する二酸化炭素に関する一考察 問われる水素社会の虚構

伊藤 俊秀*1 宮澤 樹*2 山本 恭輔*2

要 旨

二酸化炭素の排出が地球温暖化にどの程度影響しているかは議論の余地が残るところではあるが、現時点で商用化されている水素自動車（燃料電池車）は走行時に二酸化炭素を排出しないので、地球温暖化防止に有効であると広く認識されている。しかし、水素は、工業的には天然ガスから製造されているので製造時点で二酸化炭素が生排出される。そこで、水素自動車が生排出する二酸化炭素量を推計し、ガソリン車、ハイブリッド車、電気自動車が排出する二酸化炭素量と比較して考察した。ここで、電気自動車については発電時の排出量であるので、各国の電力ミックスに大きく依存する。比較考察した結果、日本の場合、水素自動車と電気自動車の二酸化炭素排出量は、現時点ではほぼ同量であるが、政府が2030年に目標としている電力ミックスで考えるとむしろ電気自動車の方が少なくなることがわかった。したがって、水素ステーションなどに膨大な設備投資を行って取り扱いが難しく非常に危険な水素で走行する水素自動車の普及を推進するより、現時点でもかなり普及している電気自動車の更なる普及を促進する方が合理的である。本稿では、最後に、水素の製造や発電の際に排出される二酸化炭素の地中への貯留手法である CCS の現状と実現性についても言及した。

キーワード：水素自動車、二酸化炭素、CCS

Carbon Dioxide Emissions from Hydrogen Vehicles — Is a Hydrogen-based Society Realistic? —

Toshihide ITO, Tatsuki MIYAZAWA, Kyosuke YAMAMOTO

Abstract

Hydrogen-fuel vehicles do not emit carbon dioxide while running; however, carbon dioxide is emitted during the hydrogen production process. In this study, the amount of carbon dioxide produced by hydrogen vehicles was estimated, and compared to the carbon dioxide emissions of gasoline, hybrid,

*1 関西大学総合情報学部

*2 平成30年度卒業

electric vehicles. Although the quantity of carbon dioxide produced by electric vehicles depends on the power mix, in Japan, electric vehicle and hydrogen vehicle emissions are currently almost the same. However, by 2030, electric vehicle carbon dioxide emissions, are expected to be lower than those of hydrogen vehicles, when the power mix will reach current government targets. The government is currently promoting the use of hydrogen vehicles, but high capital investment will be required for the necessary hydrogen refueling stations. Above all, hydrogen is a very dangerous gas that can explode due to minor errors. Conversely, electric vehicles have already gained popularity and do not carry the same risks. For these reasons, it is more reasonable to promote the use of electric rather than hydrogen vehicles. Finally, this study considers the current situation and feasibility of carbon dioxide capture and storage.

Key words: hydrogen vehicle, carbon dioxide, CCS

1. はじめに

水素自動車は、水素そのものを燃焼させる方式と燃料電池で発電する方式に分けられるが、前者はまだ試験走行の段階である。本稿ではすでに商用化されている後者（以下、水素自動車）の二酸化炭素（以下、CO₂）排出量について考察する。

世界で最初の水素自動車は、GMが1966年に開発したElectrovanであるが、一充填（燃料タンクに液化水素を満杯にした状態）での走行距離は240kmであった。その後、量産体制で販売が開始されたのは、国内では、トヨタ自動車のMIRAIが2014年（720万円台）、本田技研工業のクラリティ Fuel cell（以下、クラリティ）が2016年（760万円台）である。水素自動車は、燃料として充填された水素と空気中の酸素の化学反応で水を生成させ、その際に発生する電気を蓄電池に蓄え、この電気でモーターを回す。したがって、走行時に排出されるのは水蒸気だけであり、CO₂の排出はなく環境に対してクリーンな自動車とされている。

現在危惧されている地球温暖化に温室効果ガスのCO₂がどれほど寄与しているかについては、さまざまな想定で推測されているのが現状であり、影響は微小との見解もある。したがって、自動車が走行時にCO₂を排出しなくなった場合に温暖化がどの程度防止できるかは推測の域を出ないが、水素自動車は温暖化を緩和する効果があるものとして期待されている。

ところが、一般にはあまり知られていないが、水素の製造過程でCO₂が排出されている。水素の製造にはいくつかの方法があり、CO₂を排出しない電気分解による製造も可能ではあるが、この方法はコストが高く短時間で大量の製造は難しい。このため商業的には、低コストで大量の製造が可能な天然ガス等を原料とするのが一般的である。原理的には、メタンガス（CH₄）と水（水蒸気）を反応させて精製しており、この過程でCO₂が発生する。したがって、水素自動

車は、確かに走行時にはCO₂を排出しないが、その燃料となる水素を製造する過程でCO₂を排出しているのである。これは、植物由来の方法で水素を精製しても同様である。

しかしながら、水素精製時にCO₂が排出されていることがとくに報道されていないためか、水素自動車の普及によって地球温暖化が緩和されるとの認識が一般的である。そこで、本稿では、温暖化効果ガス対策としての水素自動車の有効性を考察した。まず、水素の製造時に排出されるCO₂量を基に水素自動車が1 km 走行する際に実質的に排出しているCO₂量を推計した。この際、水素自動車が走行時に必要な水素量など、水素自動車に関する仕様はMIRAIとクラリティのデータを用いた^{1),2)}。次いで、他の方式の自動車と比較し、CO₂排出量という観点から水素自動車の有効性を考察した。

しかし、脱CO₂という観点では、水素自動車と電気自動車については、CO₂の排出量のみでその有効性を考察する以外にCCS (Carbon Dioxide Capture and Storage: CO₂回収・貯留) による回収貯留の可能性にも言及する必要がある。そこで、最後にCCSの現状と将来の展望について概観した。

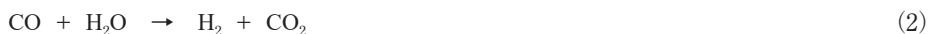
2. 水素自動車が生産するCO₂量

2.1 水素の精製時に排出されるCO₂

わが国では年間約135万トンの水素が販売され、その80%が石油精製や石油化学で利用されているが、液化水素として外販されているのは3,150トン程度である³⁾。現在、水素の製造は水蒸気改質とよばれる工程で工業化されており、国内の水素はほとんどがこの方法で製造されている⁴⁾。水蒸気改質では、まず(1)式で示すように、メタンガスと水蒸気を反応させて水素と一酸化炭素を発生させる。



ここで発生した一酸化炭素は、(2)式でさらに水蒸気と反応を起こして水素を発生する。



したがって、水蒸気改質では、全体として(3)式で水素が生成される。



(3)式より、同位元素を無視した分子量で重量を換算すると、総分子量8の4H₂を製造すると分子量44のCO₂が発生する。つまり、1 kgの水素を製造すると5.5 kgのCO₂が排出されることになる。なお、この反応は吸熱反応であるため、(1)式の反応を継続させるためには3~25気圧で700~850℃を保つ必要がある。

2.2 水素自動車が行走時に実質的に排出する CO₂ 量の試算^{1),2)}

MIRAI とクラリティともに水素の車載方法として高圧水素タンク方式を採用している。一充填で補給される水素量は、MIRAI の場合、122.4リットルのタンク容量に対し、外気温20℃、水素タンク内圧力10MPa からの充填で5kgの水素が充填される（SAE規格J2601、以下、この条件を前提に試算）。充填する水素の密度を高くすれば一充填あたりの走行距離は長くなり、実現の可能性は別として、仮に完全な液化状態で充填されれば、液体水素の密度は70.8kg/m³ であるので約8.6kgの水素が充填されることになり、一充填での走行距離は1.7倍になる。

一方、走行距離に関しては、一充填での走行距離はJC08走行パターンで650kmと公表されている。前節で述べた通り、水蒸気改質の化学反応式からは、重量比で水素1の生成に対し、5.5のCO₂ が排出されるので、MIRAI の走行時には、1kmの走行あたり約42.3g（5.5×5kg/650km）のCO₂ が排出されることになる。

一方、クラリティは貯留タンクの容量が141リットルで、MIRAI と同じ計測方式で一充填あたり750kmの走行と公表されている。したがって、MIRAI の排出量から換算して、1kmの走行で42.8gのCO₂ が排出されることになる。単純に両者を平均すると水素自動車は1kmの走行で約42.5gのCO₂ を排出することになる。

以下では、ここで推計された水素自動車のCO₂ 排出量と他の駆動方式であるガソリン車、ハイブリッド車、電気自動車が排出するCO₂ を比較して考察する。

3. ガソリン車・ハイブリッド車・電気自動車・水素自動車が排出する CO₂ 量の比較

図1は、IEA (International Energy Agency) のエネルギー経済統計便覧2017を基に作成したガソリン車とハイブリッド車、電気自動車の駆動方式別のCO₂ 排出量を比較したグラフである⁵⁾。縦軸は1km走行毎のCO₂ 排出量 (g) であるが、横軸のガソリン車とハイブリッド車は世界平

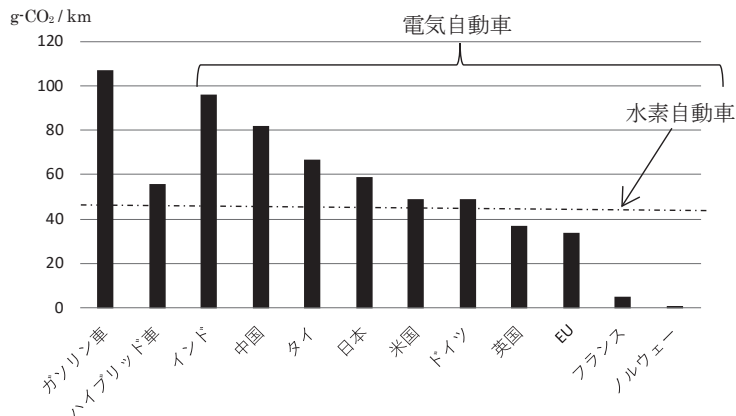


図1 駆動方式別のCO₂ 排出量

均であり、電気自動車は Well-to-Tank（燃料を車に入れるまで）の CO₂ 排出量で推計している。すなわち、電気自動車に関しては発電時の CO₂ 排出量で走行中の CO₂ 排出量を推計しているが、各国の電力ミックスによって CO₂ 排出量が異なる。このため、主要な国別に排出量を比較している。

電気自動車でも排出量の多いインドは石炭火力発電が全体の75%を占め、次いで中国の70%と続く。一方、フランスとノルウェーは他の国に比べて際立って排出量が低いが、インドや中国とは対照的にフランスは電力の70%以上が原子力、10%を水力で賄っており、ノルウェーでは95%が水力で賄われている。

わが国の電気自動車の排出量は59gであるが、電力ミックスは、石炭火力が32%、水力が7%で原子力は2%にも満たない。わが国の原子力発電は東日本大震災での福島第一原子力発電所事故以来急激に縮小しているが、震災前の2010年は原子力発電が31%を占め、電気自動車の CO₂ 排出量は47gであった。なお、政府は2030年の電力ミックスとして石炭火力26%程度、原子力20~22%、再生エネルギー22~24%を目指しており⁶⁾、これが実現すれば電気自動車の CO₂ 排出量は41gになると推測されている⁵⁾。

それぞれの駆動方式での CO₂ 排出量を比較するため、電気自動車の排出量として各国の排出量の平均を求めると48gとなる。MIRAI とクラリティの 1 km 走行毎の排出量は平均で42.5gであったが、これはガソリン車の40%、ハイブリッド車の76%、電気自動車の89%であり、CO₂ 排出量としては最も少ない量となっている。しかし、電気自動車の国別の排出量と比較すると英国の1.15倍、フランスの8.5倍でありノルウェーに至っては42倍もの排出量となっている。

確かに、ガソリン車と比較すれば水素自動車の CO₂ 排出の削減効果は大きいですが、ハイブリッド車や電気自動車との比較では CO₂ の削減がそれほど効果的ではないことがわかる。むしろ、電力発電の環境によっては電気自動車の方がかなり有効であることがわかる。加えて、水素を精製する水蒸気改質は吸熱反応であり、3~25気圧の圧力と700~850℃の温度を維持しなければならない。ボイラーや電気炉などプラントによって熱効率が異なるので、この圧力と温度を維持するために排出される CO₂ 量の詳細な見積りは行わないが、かなりの量の CO₂ が排出されると推察される。

このように水素自動車に大きな CO₂ 削減効果が望めないことを考えると、取り扱いに非常な危険をとめない、水素ステーションなどのインフラ整備に膨大な投資が必要な水素自動車の普及を図るより、電気自動車を普及させ、電力ミックスを改善した方が合理的ではないかと考える。現に、政府が目標としている2030年の電力ミックスが達成されれば、電気自動車の CO₂ 排出量は41gとなり水素自動車（42.5g）より削減される⁶⁾。加えて、現段階での電気自動車の保有台数は10万台を超えており、水素自動車（2,440台）をはるかに上回っている（表1）⁷⁾。このように、現実的な選択肢という観点からも、水素自動車より電気自動車の普及を促進する方が合理的である。

表1 駆動方式別の国内保有台数の推移（乗用車・軽自動車）

	2012	2013	2014	2015	2016	2017
水素自動車	—	—	150	630	1,807	2,440
電気自動車	38,707	54,757	70,706	80,511	89,844	103,569
ハイブリッド車	2,869,386	3,843,558	4,684,755	5,558,725	6,544,266	7,512,846

4. CO₂回収・貯留の現状と展望

これまでCO₂の排出量に着目して水素自動車の有効性を他の方式の自動車と比較して考察した。確かに排出量は重要な要素ではあるが、それぞれの方式では排出後の回収可能性が異なる。すなわち、ガソリン車とハイブリッド車では走行時にCO₂が排出されるため回収が困難であるのに対し、電気自動車や水素自動車では、発電時や水素製造時のプラントでCO₂が排出されるため回収が可能である。したがって、脱CO₂という観点からは、これが電気自動車と水素自動車の利点となり、回収したCO₂を地中に貯留するCCSが実用化されれば、電気自動車と水素自動車に関しては、排出されるCO₂の問題が解決されることになる。

そこで、CCSの現状と課題について考えてみる。もともとCCSは採油時におけるEOR (Enhanced Oil Recover: 原油増進回収法) が発想の原点である。EORは、原油の回収率を上げるために油田の貯留層に天然ガスや窒素を圧入して圧力をかける手法で、枯渇が近づいた油田では古くから行われていた。このEORに対し、CCSでは、地下深層の砂岩層や枯渇した油田、閉山した炭鉱の坑道などに液化したCO₂を貯留することで大気中に排出されるCO₂を削減する。

わが国では、新潟県長岡市で2003年から1年余りの実証実験が行われ、約1万トンのCO₂を地下1,100mの砂岩層に圧入した⁸⁾。圧入後、2004年の新潟県中越地震、2007年の新潟県中越沖地震でもCO₂の漏洩は認められなかったと報告されているが、1,100mもの地下で生じていることは推測の域を出ない。その後、電力会社など24社の出資で2008年に日本CCS調査株式会社が発立された。同社は全国115ヶ所の候補地から北海道苫小牧で実証事業を行うことを2011年に決定し、2016年から圧入を開始している(図2)。実証地には萌別層(深度1,100m)と滝ノ上層(深度2,400m)の2つの貯留層があり、現在は萌別層への圧入が行われている。同社によれば2019年7月には397トンが圧入され、2016年4月から2019年7月までの3年4か月の累積貯留量は264,191トンとなっている⁹⁾。(財)地球環境産業研究機構(以下、RITE)の調査では国内で1,400億tの貯留が可能であるとの報告があるが、2013年度比26%の削減目標を達成させるためには毎年約2億トンのCO₂削減が必要である¹⁰⁾。なお、CCSは、わが国だけではなく米国をはじめ海外でも37の大型プロジェクトが進められている(表2)。

このようにCCSは技術的には可能であるが、問題は商業化できるコストを実現できるか否かである。RITEの試算では、火力発電プラントの場合、CCSコストは、新設の発電所では7,300



図2 日本CCS調査株式会社(苫小牧実証試験場:同社HPより)

表2 世界のCCS大規模プロジェクト¹¹⁾

(a) 地域別		(b) 進行状況別	
地域	件数	進行状況	件数
北米	16	運転	17
欧州	5	建設	5
中東	2	調査	4
南米	1	評価	11
オセアニア	3	計	37
アジア	10		
計	37		

(2018年3月現在)

円/tであるが、既設の火力発電プラントでは12,000円/tを超える。この差は、プラントの排出ガスからのCO₂の分離回収費用の差である¹¹⁾。一方、市場で取引されているCO₂の価格は1,000円/tであるので、現状では商業化には程遠い水準である¹¹⁾。

最近では、コスト高を解消するために分離貯留したCO₂を利用するCCUS (Carbon Dioxide Capture, Utilization and Storage) が注目され、資源エネルギー庁のサイトでは、一例として「米国ではCO₂を古い油田に注入することで、油田に残った原油を圧力で押し出しつつ、CO₂を地中に貯留するというCCUSがおこなわれており、全体ではCO₂削減が実現できるほか、石油の増産にもつながるビジネスになっている」と紹介されている¹²⁾。しかし、この例は古くから行われているEORそのものであり、CCUSという新たな術語を生み出したに過ぎない。

CCSには、他にも地震を誘発する懸念や水と混ざったCO₂が炭酸となって地中の鉱物を溶かす危険性、海中のCO₂増加による生物への影響など多くの課題が指摘されている¹³⁾。このような不安材料を背景に住民の反対から合意を得られずに断念した実証プロジェクトの例もある。現在、苫小牧以外でも実証プロジェクトが計画されているが、遠い将来の実用化の可能性は否定できないとしても当面の事業としての継続は非現実的であると言わざるを得ない。仮にCCS

の商用化が実現したところで水素自動車に対する電気自動車の優位性は変わらない。

5. おわりに

水素自動車は走行時にはCO₂を排出しないが水素の製造時にCO₂が排出される。そこで、水素自動車を実質的に排出するCO₂量を推計し、他の駆動方式の自動車と比較して考察した。その結果、政府が目標としている電力ミックスの改善が実現すれば、水素自動車よりも電気自動車を普及させる方が合理的であることがわかった。加えて、現在の電気自動車の保有状況から考えても電気自動車の普及を図る方が現実的である。

しかしながら、政府の方針は水素社会の実現であり、危険な水素を充填して走行する水素自動車の普及を促進している。水素の取り扱い是非常に難しく、水素ステーションでの水素供給時や水素自動車への水素充填時などでの爆発事故が懸念されるが、すでに全国で104ヶ所の水素ステーションが稼働している¹⁾。現段階で水素ステーションの建設コストは5～6億円といわれているが、水素社会の実現という政府の方針が堅持されれば、今後も水素関連のインフラに膨大な投資が行われることになる。裏を返せば、今後、政府の方針が変わることになれば、これらの設備への投資が無駄になってしまうばかりか、そこに従事する従業員の生活も脅かされることになってしまう。すなわち、すでに後戻りが難しい状況で水素社会実現という目標だけが独り歩きしている。

これは水素社会の問題に限ったことではなく、その構想の根本にある地球温暖化に関わる環境問題そのものにいえることではないだろうか。例えば、本稿でCCS実現への疑問を述べたが、CCSに関してはすでに会社が設立され、設備投資が行われ、そこでは多くの人々が働いている。このように温暖化問題そのものがすでに既成事実化されて多額の予算が組まれており、その是非を問う機能が麻痺した結果、もはや後戻りができない状況となっている。

しかしながら1980年代までは、地質学者や気候学者の多くは温暖化よりはむしろ地球寒冷化を危惧していた。それが、1980年代末になって突如、地球温暖化論が脚光を浴び、1988年にIPCC（気候変動に関する政府間パネル）が国連機関によって設立される。IPCCはCO₂などの温室効果ガスが気候に及ぼす影響を検討し国連に報告する機関である。しかし、もしCO₂に問題がないとわかれば国連はエネルギー需給を差配するという名目を失い、IPCCは不要になるというジレンマが内在している。かつて、IPCCの業務を「科学のねじ曲げ」と皮肉ったIPCC報告書の査読者がいたが、第三次報告書での気候推移の不自然なグラフを疑うホッケースティック論争やメールの漏洩で偽りの合意が露呈したクライメートゲート事件など深刻な疑惑も指摘されている。いずれにしてもCOP（気候変動枠組条約締約国会議）ではこのIPCCの報告書を基に政策論争が進められるが、現状では各国の温室効果ガス削減割り当てをめぐる利害対立の場と化しており^{14),15)}、ついに米国がパリ協定から離脱してしまった。他方で、地球温暖化回避のための温室効果ガスの削減自体はすでに議論の余地すら閉ざされてしまったかのようにもみえる。

しかし、地球温暖化に温室効果ガスが大きく影響しているという仮説そのものを疑問視する研究者も多い^{16), 17), 18), 19)}。

そもそも地球は温暖化と寒冷化を繰り返しており、地質年代的なスケールで見れば、現在の温暖化とは比較にならないくらいの温暖化を何度も経験している。逆に地球全体が数千メートルもの氷に覆われた極端な寒冷化の時期もあった²⁰⁾。しかし、気候変動には不明な点が多く、変動の要因に関する研究・考察は仮説の域を出ない。現在、問題視されている温暖化の主要な要因がCO₂などの温室効果ガスであるというのもひとつの仮説にすぎず、直接的で具体的な観測、証拠が指摘されているわけではない。しかも、この仮説は、46億年の地球史の中での千年程度の知見で構成されている。このように考えると、水素社会という発想そのものの意義が改めて問われる。

参考文献（URLは2019年8月参照）

- 1) トヨタ, MIRAI 公式サイト
<https://toyota.jp/mirai/>
- 2) ホンダ, Clarity Fuel Cell Honda 公式サイト
<https://www.honda.co.jp/CLARITYFUELCELL/>
- 3) 資源エネルギー庁（燃料電池推進室）, 水素の製造・輸送・貯蔵について, 2014
<https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/>
- 4) 水素エネルギー協会, 水素の本, 日刊工業新聞, 2017, pp.52-53
- 5) 経済産業省（自動車新時代戦略会議）, 新自動車会議戦略会議（中間報告）, 2018
<https://www.meti.go.jp/press/2018/08/>
- 6) 資源エネルギー庁, 2030年エネルギーミックス時実現へ, 2018
https://www.enecho.meti.go.jp/committee/council/basic_policy_subcommittee/
- 7) 社次世代自動車振興センター, EV 等保有台数統計
<http://www.cev-pc.or.jp/tokei/>
- 8) 地球環境産業研究機構, 長岡 CO₂ 圧入実証実験
<https://www.rite.or.jp/co2storage/safety/nagaoka/>
- 9) 竹内純子, CCS は切り札になるか, 国際環境経済研究所
<http://ieci.or.jp/2017/10/takeuchi171026/>
- 10) 環境省, 国の CO₂ 削減事業について
<https://www.pref.akita.lg.jp/uploads/public/archive/>
- 11) 経済産業省, CCS を取り巻く状況
<https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/sangi/>
- 12) 資源エネルギー庁, 知っておきたいエネルギーの基礎用語2017
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/>
- 13) 土木学会岩盤力学委員会, 我が国の CCS 実現における課題の抽出・整理と岩盤工学の果たす役割に関する調査研究（報告書）, 2010, pp.2-3
- 14) Mark Morano 著, 渡辺正訳, 地球温暖化の不都合な真実, 日本評論社, 2019, pp.14-298
- 15) 有馬純, 地球温暖化交渉の真実, 中央公論新社, 2015, pp.147-184
- 16) 赤祖父俊一, 正しく知る地球温暖化, 成文堂新光社, 2008, pp.20-180
- 17) 丸山茂徳, 科学者の9割は「地球温暖化」CO₂ 犯人説はウソだと知っている, 宝島社新書, 2008, pp.12-174

- 18) 渡辺正, 地球温暖化狂騒曲, 丸善出版, 2018, pp.18-225
- 19) 近藤邦明, 検証温暖化, 不知火書房, 2019, pp.15-237
- 20) Gabrielle Walker, 渡会圭子訳, スノーボール・アース, 早川書房, 2004, pp.200-267