



NEWS LETTER

水素エンジン自動車の特徴

トヨタの豊田章男社長自身がドライバーとなって、水素を燃料としたエンジンに改良されたカローラ（図1）でスーパー耐久富士24時間レースに挑んだ映像や記事をテレビや新聞でご覧になった方は多いのではないのでしょうか。トヨタがレース用に開発している自動車ですが、見た目は市販のカローラスポーツと同じです。水素エンジンは、排気量1.6Lで直列3気筒のガソリンエンジン“G16E-GTS”を改造したものです。2021年は、24時間で1周4,563kmのコースを358周、1,634km走行しています。今年もMORIZOさん（豊田章男社長）ら6名がドライバーとして参加、完走し、周回数478、走行距離2,181km、最高ラップタイム1分59秒876、ピットインの回数41回だったようです。初参戦だった昨年よりも大幅に記録を伸ばしました。故障もなく、平均時速90km/h以上で24時間走行できる性能、そして平均時速137km/hでコースを1周できる性能があることを示しており、水素エンジン自動車の実用化が近いと感じたり、燃料電池自動車よりも現実的ではないのか？と思う方もおられるのではないのでしょうか？



図1 トヨタCorolla H2 Concept（水素カローラ） <https://car.watch.impress.co.jp/docs/news/1396629.html>

この水素エンジンカローラの後部座席と荷物室の位置には、4本の高圧水素容器が搭載されており、容量は7.34kgと、燃料電池自動車MIRAIの5.6kgよりも大きくなっています。MIRAIの水素容器の容量が141Lであることを考慮すると、水素エンジンカローラの水素容器の容量は約185Lになると計算できます。ドラム缶1本にほぼ相当する大きな水素容器を搭載していることになります。後部座席を取り外して、運転席の後部から荷物室に4本の水素容器が並べられていると推測できます。

1回の充填での走行距離を大きくするために、4本もの多くの高圧水素容器を設置していますが、今年のレースでは、41回ピットに入っていますので、1回の水素充填で約50kmしか走行できないか、エンジンあるいは何らかの部品の調子が悪かったものと思われます。このレースの総合優勝はニッサンGT-RニスモGT3で、周回数760、最高ラップタイム1分42秒041でした。このレースでは、カローラスポーツと同じ排気量1.6LのGRヤリスも参戦しており、完走した2台の周回数は679、678、最高ラップタイムは1分53秒987、1分54秒680でした。水素エンジンカローラは総合優勝したニッサンGT-RニスモGT3や同じクラスの2台のGRヤリスに比べて、最高ラップタイムはやや遅い程度ですが、周回数がかなり少ないことが分かります。つまり、エンジンの安定性が十分でないか、部品の寿命が短いのか、1回の水素充填による走行可能距離が短いのかの原因によって、頻繁にピット入りする必要があったものと推測されます。この問題が解消され、水素エンジン自動車が広く普及するのを考えてみたいと思います。

日本では、1970年代に武蔵工業大学（現在の東京都市大学）が水素エンジン自動車、つまり水素を燃料とした内燃機関（エンジン）を搭載した自動車の研究を始めていました。1970年日本で初めて水素を燃料としたエンジンを動かし、1974年には日本初の水素エンジン自動車「武蔵1号」が公道を走りました。1975年には液体水素を燃料とした「武蔵2号」（図2）が米国で開催されたラリーに参戦して、2,800kmを5日で走破しています。その後、メカに工夫を加えたり、スポーツカーやトラックに応用したりして、「武蔵3号」、「武蔵4号」、「武蔵5号」・・・などがほぼ毎年、製作、発表されてきました。これまで約50年間水素エンジン自動車の開発が継続されていますが、現在市販されている水素エンジン自動車は無く、技術的に解決しなければならない大きな課題の存在が暗示されます。しかしながら、武蔵工業大学の開発成果が、トヨタの水素エンジン自動車開発に活かされているように思います。また、Vol.24でお知らせしましたように、山梨交通が水素エンジン小型バスの実用化試験を2012年～2014年に行いましたが、この水素エンジン小型バスは武蔵工業大学の研究実績が活用されたものです。



図2 1975年に作られた「武蔵2号」。日産のサンニークーペをベースに作られた水素自動車 <https://minkara.carview.co.jp/user/id/1684331/blog/43740437/>

水素エンジン自動車の開発はBMWとマツダでも行われ、市販された歴史があります。トヨタよりも技術開発で先行し、市販するまでに至りましたが、今では開発が凍結され、販売されていません。この理由を知るために、これら2社が開発、市販した水素エンジン自動車の特徴を調べてみました。

BMWは、2006年にHydrogen 7（図3）を市販しています。この水素エンジン自動車には、ガソリンと水素を併用できるV型12気筒6Lエンジンが搭載され、液体水素が利用されていました。水素モードでの最高出力は191kW、そして航続距離は200kmでした。現在市販されている3.4LガソリンエンジンのレクサスLS500の最高出力が310kWですので、6Lのエンジンとしては、小さな出力です。一方、同じ年にマツダがリース販売したRX-8ハイドロジェンRE（図4）はガソリンと水素を併用できる自然吸気ロータリーエンジンを搭載して、35MPaの高圧ガスが利用されていました。最高出力は、ガソリンモー

ドで154kW、水素モードではガソリンモードよりもかなり小さな80kWであり、水素モードでの航続距離は100kmとされてきました。RX-8ハイドロジェンREも、水素モードでは出力がかなり小さくなります。また、BMW Hydrogen 7とマツダRX-8ハイドロジェンREの航続距離がかなり小さいことも気になります。これらから、水素エンジン自動車には最高出力と航続距離に大きな課題があると推測できます。

水素エンジンカローラとBMW Hydrogen 7は、ガソリンエンジンと同様にシリンダー内のピストンが上下運動します。このタイプのエンジンにおけるピストンの動きと燃料の状態の関係を次に説明します。代表的なガソリンエンジンである4ストロークガソリンエンジンは、図5に示すように、吸気-圧縮-燃焼-排気の4つの行程で構成されています。この4行程でエンジ



図3 BMW、水素自動車「Hydrogen 7」
<http://www.hydrogenmotors.com/BMW-/BMW%20Hydrogen%207.html>



図4 マツダ RX-8ハイドロジェンRE
<https://www.jsae.or.jp/autotech/1-73.php>

ンは2回転して、それを連続的に繰り返すことによって回転を持続します。

これらの4つの行程では、次のようにピストンや弁が動作します。

- [吸気行程] ピストンが下降し始める上死点(ピストンの最上点)直前に吸気弁を開いて、シリンダー内に空気または混合気を吸い込みます。
- [圧縮行程] ピストンが上昇することによって、吸入した空気または混合気を圧縮します。
- [燃焼行程] 圧縮した混合気を点火プラグの火花で着火させ、燃焼してピストンを押し下げます。
- [排気行程] ピストンが上昇し始める下死点(ピストンの最下点)より少し前に排気弁を開いて、燃焼ガスを排出します。

このような4ストロークガソリンエンジンの理想的な燃焼サイクルはオットーサイクル、あるいは等容燃焼サイクルと呼ばれています。等容とは体積が一定のまま状態が変化することを示します。燃焼サイクルは、圧力Pと体積Vの関係から評価します。シリンダー内部の圧力Pを縦軸に、シリンダー内部の体積Vを横軸にしたP-Vの関係を図示し、その曲線に囲まれる面積の大きさを調べます。この面積は、エンジンの1サイクルあたりの仕事量に対応しますので、面積が大きいほど高い出力となり、燃料が同じ量であれば熱効率が高いこととなります。オットーサイクルは、2つの断熱変化と2つの等容変化で構成されます。

[吸気行程] で混合気をシリンダーに吸い込み、[圧縮行程] で、吸入した混合気を断熱圧縮します。[燃焼行程] では、火花点火によって瞬時に燃焼、つまり等容受熱 (Q1とする) します。**燃焼反応によってモル数の変化や熱による体積膨張つまり断熱膨張が起こると**、シリンダー内部の圧力が大きくなり、ピストンが押し下げられ、仕事をするようになります。次にピストンが上昇することによって燃焼ガスは排気(等容放熱(Q2とする)) されます。これを理想的なP-Vの関係として図示すると図6のようになります。

実際のエンジンでは、圧縮行程と膨張行程で熱損失があるとともに、点火プラグによる火花点火後の混合気の燃焼も一瞬に起こるのではなく、ある程度の時間を要するので、図6に示すPV線図の頂部は少し丸みを帯びて、仕事量が減少し熱効率は低下します。熱効率を上げるためには、できるだけ燃焼速度を大きくし、熱損失を減らすことが効果的です。また、仕事量(最高出力)を大きくするためには、**火花点火時の圧力上昇を大きくすることが効果的**です。

ガソリンと水素を燃料とした場合の火花点火時すなわち燃焼時の圧力増加は、前述のように、燃焼に伴う気体のモル数の変化と反応熱(温度変化)による体積膨張に起因します。このことを頭において、1気圧の水素ガスと1気圧の酸素ガスが反応して、液体の水が生成し、それが反応熱で加熱され、水蒸気(気体)になる反応を考えてみます。液体の水が生成する熱化学反応式は次のようになります。

$$\text{H}_2 \text{ (気体)} + (1/2) \text{O}_2 \text{ (気体)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} \text{ (液体)} + 286\text{kJ/mol}$$
 水素ガス1molは1/2mol (0.5mol) の酸素ガスと反応して、1molの水が生成し、その際に286kJの熱が発生することを意味します。H₂O(水)が液体から気体(水蒸気)に変化する際、つまり水から水蒸気への状態変化(蒸発)にはエネルギー(蒸発熱) 2.5kJ/gが必要であることを考慮しますと、次の熱化学反応式が得られます。

$$\text{H}_2 \text{ (気体)} + (1/2) \text{O}_2 \text{ (気体)} \rightarrow \text{H}_2\text{O} \text{ (気体)} + 242\text{kJ/mol}$$
 1molの水素と1/2molの酸素が反応して、1molの水蒸気が生成し、気体のモル数が1.5molから1molへと減ることになります。このために、定容状態で「水素」が燃焼する場合には、**発熱が無ければ、シリンダー内部の圧力は2/3に低下**します。

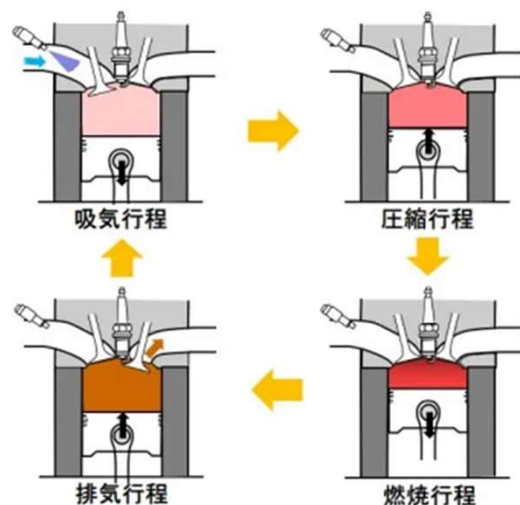


図5 4ストロークガソリンエンジンの吸気-圧縮-燃焼-排気の行程
<https://autos.goo.ne.jp/column/1025304/>

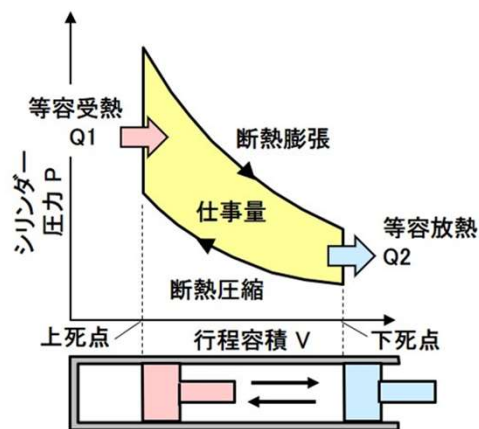
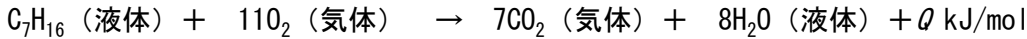


図6 オットーサイクルの理想的なP-V線図
<https://autos.goo.ne.jp/column/1025304/>

242kJ/molの発熱によってこの水蒸気が加熱され、体積が増加しますので、これを見積もることにします。水蒸気の定圧比熱は約2J/g°Cであり、1mol(18g)の水蒸気の加熱に242kJの熱がすべて利用されるとすれば、6,700°Cの超高温になりますが、ピストン、シリンダーヘッド、シリンダー壁なども加熱されますので、燃焼ガスの温度はそれよりもかなり低くなります。また、燃焼が終了すると、シリンダーには冷たい空気または混合気が入って冷却されます。エンジンでは、燃焼による発熱に起因したシリンダー内気体の温度上昇と体積膨張、そしてその後のシリンダー内への空気・混合気の導入によるシリンダーなどの冷却が繰り返されることとなります。**燃焼時のシリンダー内気体の温度を1,000°C、冷却時の気体の温度を100°Cと仮定し、燃焼に伴う気体のmolの変化も考慮すれば、水素をシリンダー内で燃焼させると圧力は2.28倍に増加**します。

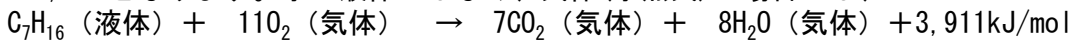
ガソリンを燃料とした場合を考えてみます。ガソリンはいくつかの物質の混合物で、主成分は炭素と水素が結びついた炭素数4~10の炭化水素です。このために、ガソリンを化学式で表わす際には、それら物質の平均的な組成を考慮して、便宜的にC₈H₁₈やC₇H₁₆と記述されます。ここでは、C₇H₁₆として話を進めます。このガソリンが燃焼する際の反応式は次のようになります。



1molのガソリン100gを完全燃焼させるには11molの酸素が必要で、反応によって7molの二酸化炭素と8molの水が生成されます。ガソリンの密度は783kg/m³(=0.783kg/L)であることを考慮して、反応に伴う体積の変化を計算すると次のようになります。

1molのガソリン(液体)128mLを完全燃焼させるには、11mol、つまり0°C、1気圧の状態では264Lの酸素ガスが必要で、燃焼によって、7mol、つまり0°C、1気圧の状態では157Lの二酸化炭素と、8molつまり144g、144mLの水が生成します。この水が液体ではなく、気体(水蒸気)になれば179Lの体積になります。つまり、液体の水が生成される場合には、264L → 157L となり、水蒸気が形成される場合には、264L → 336L となります。つまり、**ガソリンの燃焼の場合には、発熱が無くても、体積は1.27倍に増加**します。

次に発熱量Qを求めます。ガソリンの発熱量は33.37MJ/Lとされていますので、1molのガソリンの発熱量Qは4,271kJ/molとなります。水が液体ではなく、気体(水蒸気)の場合には、



となります。

二酸化炭素と水蒸気の定圧比熱はそれぞれ約1J/g°C、約2J/g°Cであり、3,911kJの熱が、それら気体の加熱に利用されれば、8,650°Cの超高温になりますが、シリンダー壁なども加熱されますので、燃焼ガスの温度はそれよりもかなり低くなり、水冷のガソリンエンジンでは、燃焼時には1,200~1,300°Cとされています。また、燃焼が終了して、シリンダーに冷たい空気または混合気が入ってくると、100~200°Cに冷却されるようです。そこで、**燃焼時にシリンダー内の気体が150°Cから1,250°Cに加熱される**として、**燃焼に伴う気体のmolの変化も考慮すれば、ガソリンを定容状態としてシリンダー内で燃焼させると圧力は4.55倍に増加**します。

エンジン出力を大きくするためには、燃焼時のシリンダー圧力の増加を大きくすることが必要で、燃焼によるシリンダー内の気体mol数の増加と気体の温度上昇によって圧力増が期待できること、水素の燃焼ではmol数が減少してしまうこと、同じmol数の水素とガソリンを燃焼させた場合には、ガソリンの方が高温になることが分かりました。次に、同じ容量の燃料タンクを利用した際の水素とガソリンの発熱量を比較してみることにします。

- (1) 10Lの高圧ガス容器に、燃料電池自動車の場合と同じ圧力(70MPa)の水素ガスを充填すると、充填できる水素ガスは312.5molとなり、**発熱量は75.6MJ(高圧水素ガス)**となります。
- (2) 10Lの容器に液体水素を充填すると、液体水素の密度は70.8kg/m³であるので、水素の量は354molとなり、発熱量は**85.7MJ(液体水素)**となります。
- (3) 10Lのガソリンは、密度が783kg/m³(=0.783kg/L)であるので、7.83kgであり、分子式をC₇H₁₆とすれば、78.3molとなり、発熱量は**306.2MJ(ガソリン)**となります。

70MPaの高圧水素ガス、液体水素は、ガソリンに比べてほぼ1/4の発熱量であり、同じ発熱量を得ようとする、ガソリンタンクに比べて約4倍の大きさの容器に水素を充填する必要があることとなります。スーパー耐久富士24時間レースに出場したカローラに何本もの水素タンクが認められ、水素充填のために数多くピットインしたことも納得できます。ガソリンエンジンに比べて、**水素エンジンが極めて不利であることが分かります。**

上記の結果を含めて水素エンジンの特徴、課題を次にまとめます：

- (1) 水素を燃料にしてエンジンで燃焼させる水素エンジンは、燃焼によって水のみが生成され、二酸化炭素を排出しない「究極の低エミッションエンジン」と言えます。また、現在利用されているエンジンを改良することによって対応できるので、燃料電池自動車のように高価な部品も必要なく、低価格となります。しかし、水素のみを燃料とすると、航続距離が短くなり、これを解決するために、水素とガソリンと併用する「バイフューエル」方式の採用が検討されることが多く、結果的に価格が高くなってしまいます。
- (2) 単位容積あたりの発熱量はガソリンの約1/4で、航続距離はガソリン自動車よりもかなり短くなります。
- (3) 理論混合気の発熱量はガソリンの約84%であり、出力はガソリンの84%と低くなる。しかし、筒内噴射方式を利用すると、ガソリンエンジンと同等の出力になります。
- (4) 水素の燃焼速度は、ガソリンの6.6倍と圧倒的に速く、熱面着火や異常燃焼が起こる可能性があります。水素は可燃範囲が広いので希薄燃焼によって燃焼温度を下げ、バックファイヤーなどの異常燃焼を抑制できますが、出力は下がります。
- (5) 水素の燃焼時にNOxが形成・排出される可能性がありますが、ガソリンエンジンと同様に、希薄燃焼と排気ガス再循環装置(EGR: Exhaust Gas Recirculation)を組み合わせて三元触媒でNOxを低減します。

最近、水素エンジンを搭載したトヨタのカローラが話題になっていますが、水素エンジン自動車の研究は、1970年代から武蔵工大(現東京都市大)で行われ、いくつかの試作車が公道を走行しました。また、2000年頃には、日本ではマツダ、欧州ではBMWが水素エンジン自動車を世に出しています。しかし、BMWは2009年には開発を凍結、マツダも最近水素ロータリーエンジンの開発凍結を発表しました。水素エンジンは、環境にやさしいエンジンですが、普及には多くの、そして大きな課題があることも分かります。

2025年大阪・関西万博の福井県独自展示スペースのアイデア募集で「優秀賞」受賞

2025年に開催される大阪・関西万博を通して、福井県の魅力を国内外に発信し、誘客を促進する目的で、福井県は関西広域連合が設置する関西パビリオンへの参加を予定しています。このパビリオン内に設置される福井県独自展示スペースの展示アイデアが福井県交流文化部ブランド課ブランド戦略グループから募集されていました(図7)。(1)企業・団体の部-企業、大学などの法人、(2)個人の部-個人、グループなどの2つに分かれて募集がありましたので、事務局から、ふくい水素エネルギー協議会として「福井県には多くの原子力発電所、大規模な太陽光発電所、風力発電所、水力発電所があり、福井県は脱炭素エネルギー利活用の先進県である。これを特徴とした観光PRを行う。」ことを提案しました。企業・団体の部には、10件の応募があり、ふくい水素エネルギー協議会のアイデアが「優秀賞」に選ばれたとの通知がありました。この書面には、『提案のあったアイデアは、福井県独自展示スペースの展示物決定の参考にするものであって、個々の提案について出展を約束するものではありません。』と書かれていましたが、福井県が脱炭素利活用の先進県であることを是非とも強くPRしてほしいものです。

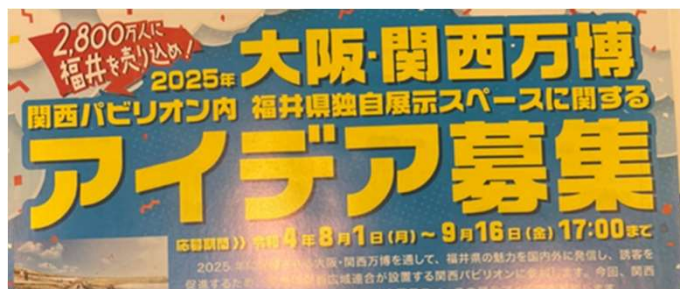


図7 大阪・関西万博展示スペースのアイデア募集チラシ

敦賀市が脱炭素先行地域に選定されました！

NEWS LETTER Vol.16でお知らせしましたように、環境省は、全国で少なくとも100か所の「脱炭素先行地域」の選定を目指しています。脱炭素先行地域とは、2050年カーボンニュートラルに向けて、民生部門の電力消費に伴うCO₂排出の実質ゼロを実現し、運輸部門や熱利用なども含めて、その他の温室効果ガス排出削減についても、我が国全体の2030年度目標と整合する削減を地域特性に応じて実現する地域です。この選定が契機となって、その近隣地域の脱炭素に対する取り組みが発展することが期待されています。

脱炭素先行地域では、国の支援を受けながら、地方自治体や地元企業・金融機関が、地域特性などに応じた先行的な脱炭素に向けた取組のロードマップを2025年度までに策定した後、2030年度までに実行し、これによって農山漁村、離島、都市部などの多様な地域において、地域課題を同時解決し、住民の暮らしの質の向上を実現しながら脱炭素に向かう取組の方向性を示すこととなります。

募集の際に、表1に示すいくつかの脱炭素先行地域の類型が示されています。また、脱炭素先行地域の選定要件として、次が示されています。

表1 脱炭素地域の類型

(1)2030年度までに、脱炭素先行地域内の民生部門の電力消費に伴うCO₂排出の実質ゼロを実現すること、(2)地域特性に応じた温暖化対策の取組(民生部門の電力以外のエネルギー消費に伴うCO₂やCO₂以外の温室効果ガスの排出、民生部門以外の地域と暮らしに密接に関わる自動車・交通、農林水産業等の分野の温室効果ガスの排出等についても、地球温暖化対策計画と整合する形で地域特性に応じ少なくとも1つ以上の取組を実施する計画となっていること)、(3)再エネポテンシャル等を踏まえた再エネ設備の最大限の導入、(4)脱炭素の取組に伴う地域課題の解決や住民の暮らしの質の向上、(5)脱炭素先行地域の範囲・規模の特定、(6)計画の実現可能性(計画の具体性、関係者の調整方針等)、(7)取組の進捗管理の実施方針及び体制、(8)他地域への展開可能性、(9)改正地球温暖化対策推進法に基づく地方公共団体実行計画の策定等。

全域	市区町村の全域、特定の行政区等の全域
住生活エリア	住宅街・住宅団地
ビジネス・商業エリア	地方の小規模市町村等の中心市街地(町村役場・商店街等)
	大都市の中心部の市街地(商店街・商業施設、オフィス街・業務ビル)
	大学、工業団地、港湾、空港等の特定サイト
自然エリア	農村・漁村・山村
	離島
	観光地・自然公園等
施設群	公的施設等のエネルギー管理を一元化することが合理的な施設群

選定された敦賀市の取組み「北陸新幹線敦賀開業を契機とした脱炭素化へのパラダイムシフト」では、2024年の北陸新幹線敦賀開業を産業・エネルギー政策転換の契機と捉えて、新幹線開業の象徴的エリアとなる駅西地区、中心市街地集客施設、シンボルロードなどへ卒FIT太陽光発電や新設予定のごみ発電による再エネ電力を供給し、脱炭素化を実現します。主な再エネ電力供給先として、商業施設10件、シンボルロード(アーケード)等34件、公共施設13件が挙げられています。また、北陸電力、福井銀行と「敦賀市脱炭素マネジメントチーム」を結成し、省エネ要請などによる需給調整や、環境意識の高い事業者等への融資・補助一体型支援などにより、中心市街地全体へ脱炭素化の取組を波及拡大するとしています。

敦賀市は水素の利活用を積極的に推進しておられ、敦賀市公設卸売市場には太陽光発電を利用した再エネ水素ステーションが設置されており、これを利用した水素製造と燃料電池自動車(4台)の運用も事業に組み入れておられます。敦賀港におけるカーボンニュートラルポート事業実施を見据えて、敦賀港の水素・アンモニアの受け入れ拠点化についても取組まれるとともに、原子力発電を利用した脱炭素化も推進されるようです。

一般社団法人 ふくい水素エネルギー協議会
〒919-0411 福井県坂井市春江町藤鷲塚37-9
株式会社 ナカテック内 事務局 羽木
TEL: 0776-58-3930 FAX: 0776-51-5144