

# 動き出した天然水素（下）

——不確実性の分析と国内開発の勝ち筋



# 目次

エグゼクティブサマリ	3
<b>01</b> はじめに	4
<b>02</b> 天然水素開発の現状と課題	6
<b>03</b> 天然水素開発推進に必要な取り組み	16
<b>04</b> 国内の天然水素開発に向けた具体的取り組み例	19
<b>05</b> おわりに	22

## エグゼクティブサマリ

- 天然水素は、製造時の環境負荷が小さい一次エネルギーとして注目されており、低コスト供給が実現すればネットゼロ社会の実現に貢献し得ます。
- 天然水素開発は黎明期にあり、探査・開発に踏み込む事業者は世界的にも限られています。背景には、地下資源としての不確実性が大きく、投資判断 (Go/No-Go) を難しくしていることがあります。
- 本稿では、石油・天然ガス、地熱、CCSなどの地下資源開発で用いられるデューデリジェンスの枠組みを参照し、天然水素開発の課題を①資源としての存在確度、②技術成熟度、③経済性、④規制・法制度の4観点で整理しました。
- 現状の主要課題は、(1) どこに、どれくらい存在し、どの程度の期間採取できるかが見通せないこと、(2) 安全かつ継続的に生産するための工学技術が確立していないこと、(3) 販売価格とコストの予測が難しいこと、(4) 開発許可のプロセスや遵守すべき法令・ガイドラインが整備されていないことです。
- 事業化を前進させるには、生成・移動・貯留・損失を含むモデル化や「有望地域マップ」の整備、地下環境条件の整理、技術ガイドライン・規格づくり、材料・設備の検証、価格支援制度への組み込みに向けたライフサイクルアセスメント (LCA) 手法の整備、オフテイクの確保、増進回収技術への研究投資、制度のグレーゾーン整理と段階的な制度設計が必要となります。
- 国内の天然水素開発を進めるには、海外先行事業への投資を通じて獲得した知見・ノウハウを国内の地質条件、法制度に適合させて事業化を進めていくことが最も効率的です。



## はじめに

2050年のカーボンニュートラル実現に向けて、世界各国の政府が期限付きの目標を掲げる中、日本政府もエネルギーの安定供給、経済成長、脱炭素の同時実現を掲げ、2023年5月にはGX(グリーン・トランスフォーメーション)推進法とGX脱炭素電源法が、翌年5月には水素社会推進法とCCS(二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)貯留)事業法がそれぞれ成立しており、CO<sub>2</sub>排出量が少ない低炭素水素などの使用を促進し、社会の脱炭素化を進める動きが加速しつつあります。このように、日本では水素を重要なエネルギー源と位置づけており、特に再生可能エネルギーを利用して製造されるグリーン水素や、CCS技術と組み合わせて化石燃料から製造されるブルー水素を中心に、水素社会の実現を目指しています。

このような状況の中、近年、自然に生成され地中に存在する水素ガス(天然水素)を採掘し、低コストで水素を生産するための開発が世界各地で進められています。天然水素は、生成の際にCO<sub>2</sub>を排出しない一次エネルギーとして世界で注目され始めています。

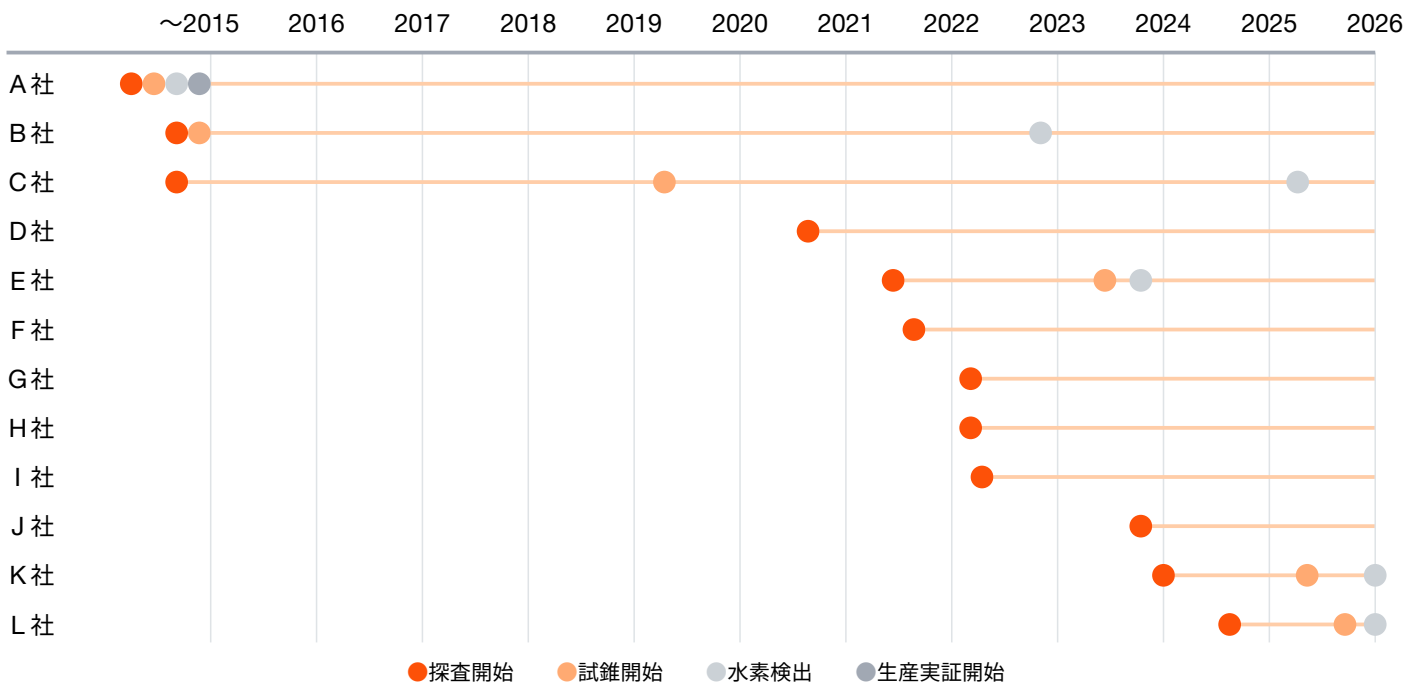
天然水素の生産は、現在、アフリカのマリ共和国にて行われています。長年にわたって地中から水素を生産し続けており、地質学におけるナチュラルアナログの観点から、世界中の類似性のある地域での産出可能性が期待されてきました。直近では、米国地質調査所(USGS)が米国内における天然水素の賦存可能性や推定存在量を示す論文を公表し、注目を集めています。

日本国内では、長野県の白馬地域において天然水素が温泉水とともに湧出しており、国内の大学などが継続的に調査・研究を行うなど、地中から湧出する水素の存在自体は以前から知られていました。近年、独立行政法人エネルギー・金属鉱物資源機構(JOGMEC)や国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による天然水素開発に関連する事業が開始されるとともに、報道などでも取り上げられ、注目度が高まっています。

PwCは、最新の研究動向をもとに、天然水素の高いコスト競争力、低い環境負荷の可能性を調査レポート「動き出した天然水素(上)——最新研究・開発動向と将来シナリオ」で提示しました。利用価値の高い次世代エネルギーとして、過去2~3年で天然水素に対する注目度は急速に高まり、国際カンファレンスの参加企業も増加し、学術研究やメディア報道、政策レベルでの議論が活発化しています。一方で、実際に開発された天然水素はマリ共和国の一例を除いて存在しないのが現状です。天然水素事業は現在もお黎明期にあり、実際に試錐・掘削などの開発に踏み込んでいる企業は、世界的にも数十社程度にとどまっています。その多くはスタートアップであり、フランス、北米、オーストラリアなどで地質調査や試験的な掘削を進めているものの、生産テスト、さらには商業開発まで進展した事例はありません(図表1)。以上から、天然水素は「ポテンシャルへの期待は大きい、実績に基づく商業化事例が乏しい」状態にあると言えます。

本レポートでは、「なぜ天然水素開発の商業化が進まないのか?」という問いを据え、天然水素開発におけるGO/NO-GOの判断を阻む要因を分析し、天然水素事業開発の推進に必要な要素を提言します。

図表1：海外の天然水素開発の進捗状況



出所：各社HPを基にPwC作成

## 天然水素開発の現状と課題

本章では、天然水素事業の普及が進まない要因、ならびに投資が進展しにくい背景を整理するため、石油・天然ガス、地熱発電、CCSなどの地下資源開発におけるデューデリジェンスの枠組みを参照し、天然水素開発事業の事業性を評価しました。

地下資源開発のデューデリジェンスでは一般に、①資源としての存在確度、②技術成熟度、③経済性、④規制・法制度の4観点を組み込んだ評価枠組みが用いられます。特に地下資源開発では、「どこに、どれだけ、どのような形で存在するか」という地質学的・資源量的な確度が事業判断の前提となります。存在確度が低い段階で大規模投資を行えば、探鉱失敗リスク(いわゆる資源リスク)が過大となります。2025年に開催された天然水素専門の国際カンファレンスでも、これまでの“ゴールドラッシュ”的な投資フェーズは収束し、今後は科学的裏付けを有する技術を吟味したうえで投資判断を行うフェーズに移行しつつある、との議論がなされました。したがって、地質学的・資源量的な確度を、信頼できる手法により評価することが求められています。

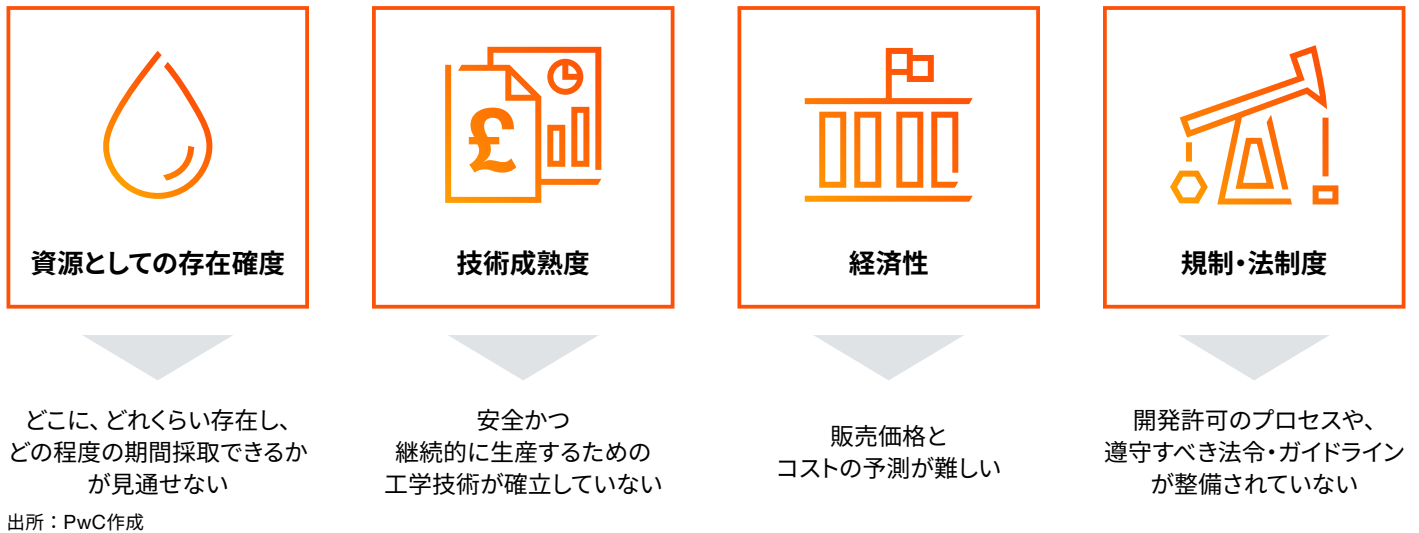
また、いかに有望な資源が地下に存在していても、安全かつ安定的に生産するための工学技術がなければ事業は成立しません。天然水素を取り扱うための技術成熟度は、「資源へのアクセス可能性」および「実用化までに要する時間・コスト」を左右する基盤的な評価軸となります。

さらに、技術的に開発可能であっても、探査・開発・生産・輸送などに要するコストが販売価格に見合わなければ投資は実行されません。天然水素開発を「持続的な産業」として成立させるには、技術面とは独立した評価軸として、水素バリューチェーン全体(製造・輸送・利用)の経済性を検証することが不可欠です。

最後に、資源が存在し、技術的・経済的に成立し得る場合であっても、法制度や規制が未整備であれば、権利関係が不明確で事業化できない、そもそも資源として採取できない、または環境・安全上の懸念から社会的受容性を得られないといった問題が生じます。規制・法制度の整備状況は、プロジェクトの実施可能性と時間軸(リードタイム)に直接影響するため、重要な評価項目となります。

以上の4観点(資源としての存在確度、技術成熟度、経済性、規制・法制度)から事業性を評価すると、現時点の天然水素開発は、持続的な商業開発に向けて大きな不確実性と課題を抱えています。具体的には、(1)どこに、どれくらい存在し、どの程度の期間採取できるかが見通せないこと、(2)安全かつ継続的に生産するための工学技術が確立していないこと、(3)販売価格とコストの予測が難しいこと、(4)開発許可のプロセスや遵守すべき法令・ガイドラインが整備されていないことです(図表2)。

図表2：天然水素開発における課題



## (1) 資源としての存在確度

天然水素を地下資源として評価するうえで主要な課題の一つは、どこに、どれくらい存在し、どの程度の期間採取できるかが見通せないこと、つまり資源としての存在確度を定量的かつ客観的に評価できない点にあります。石油・天然ガスなど既存の地下資源と異なり、天然水素については探鉱・開発判断の前提となる情報基盤が十分に整備されていません。天然水素の資源としての存在確度を評価できない主要な理由として、以下の2点があると考えます。

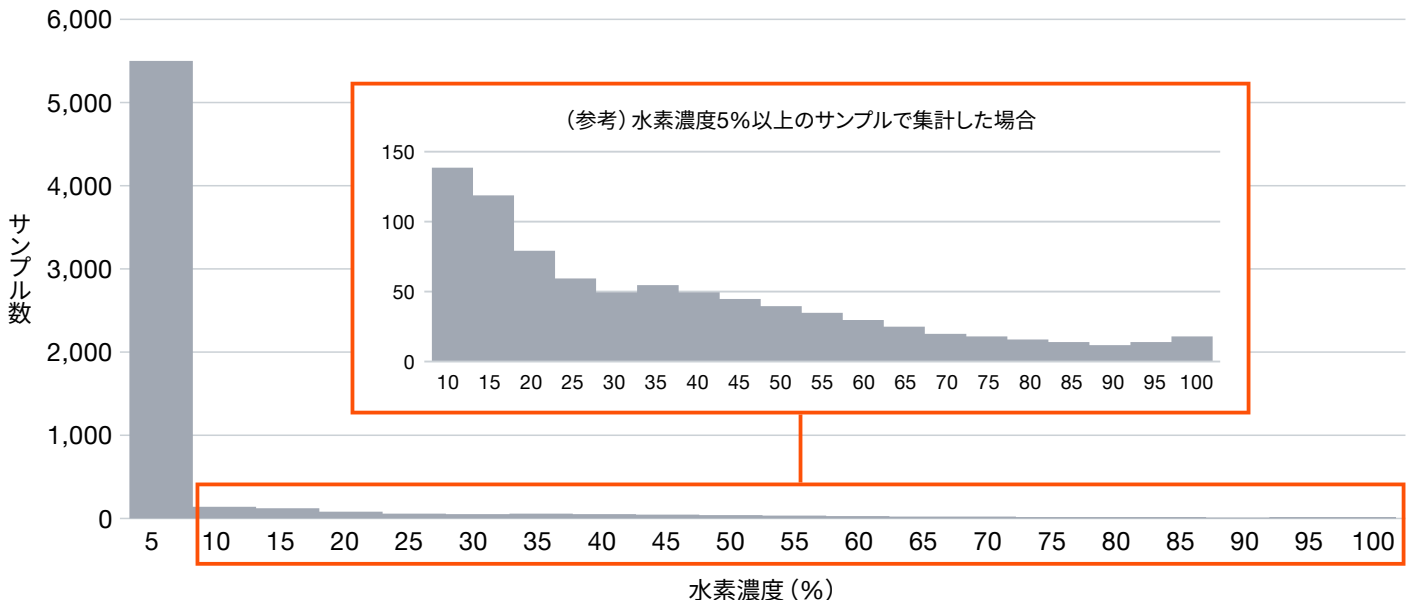
### 1. 高濃度水素の表出事例の少なさとデータ精度の問題

一つ目の理由は、産業用途として利用できる高濃度の水素が地下に貯留されていると判断できるだけの表出事例および地下データが不足している点です。

過去の天然資源開発や地質調査の過程において、水素が検出された事例の多くは、あくまで地表付近での観測やボーリング孔内での副次的な記録にとどまっており、地下深部において水素がどのような形態で存在し、どのように移動し、どこで、どの程度の規模で貯留されているかを直接示す実測データはほとんど存在しません。すなわち、現状の天然水素研究は、地質学的・地球化学的理論や間接的な観測結果の積み重ねに依存しており、資源量評価に不可欠な実証データが著しく不足していると言えます。

実際に公開されている地中ガス成分データを見ても、その不確実性は顕著です。世界的に利用可能なオープンデータとして、地中ガス中に水素が検出された事例は約6,000件存在しますが、その大部分は水素濃度5%以下の極めて微量なものです(図表3)。エネルギー資源としての利用可能性を議論し得る水準、すなわち10%以上の水素濃度が確認された事例は約600件にとどまります。このように、高濃度水素の存在が示唆される表出事例は非常に限定的であり、地下に持続的・再生的な資源システムが形成しているかどうかを判断するには情報が十分ではありません。

図表3：世界の水素の検出事例の統計グラフ



出所：Alexei V. Milkov., 2022. Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104063> を基にPwC作成

さらに、これら過去事例で観測された水素の一部は「地中由来の天然水素」とであると断定できない点も問題です。過去の計測に用いられた一部のガスセンサーや測定機器では、測定範囲全体にわたる十分な校正が行われておらず、その結果、特に低濃度域から高濃度域に至るまでの測定精度や正確性が明確に定義されていないケースがあります。このほか、一部のセンサーによる測定結果は、硫化水素 ( $\text{H}_2\text{S}$ ) や一酸化炭素 ( $\text{CO}$ ) など、他のガス成分による干渉を受けていた可能性も指摘されています。

加えて、調査過程におけるボーリング掘削や土壌へのハンマーの打ち込みにより、数十～数百 vol ppm の水素が頻繁に生成されることが、これまでの研究で明らかになっています<sup>1</sup>。また天然水素の地表への漏洩の痕跡の一つとされているフェアリーサークルにおいて、地下1mまでの掘削で、最大10 vol% (100,000 vol ppm) の人工的に生成された水素が観測されています<sup>2</sup>。もし水素が検出された過去事例における観測方法が適切でなかった場合、観測された水素がもともと地下に貯留されていた天然水素なのか、あるいはボーリング掘削などの行為によって新たに生成された水素なのかを区別することが非常に困難となります。

1 Boreham, C.J., Czado, K., Taylor, G., Black, E., 2024. Soil Gas Surveys for Hydrogen and Helium in New South Wales. <https://doi.org/10.26186/149687>

2 Halas, P., Dupuy, A., Franceschi, M., Bordmann, V., Fleury, J.M., Duclerc, D., 2021. Hydrogen gas in circular depressions in South Gironde, France: flux, stock, or artefact. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2021.104928>

## II. 天然水素の動的特性による、安定的資源への懸念

二つ目の理由は、仮に地下において大規模な水素貯留が存在する場合であっても、天然水素が静的な地下資源ではなく、生成・移動・貯留・損失がリアルタイムで進行する動的なシステムの一部である点です(図表4)。すなわち、天然水素は地下で継続的に生成される一方で、拡散や移流などによって移動し、その過程で微生物反応などにより損失するため、現状では、安定的かつ持続的に生産可能な資源として1カ所に存在し続ける保証はありません。

例えば、天然水素の生成メカニズムに関しては、カンラン岩の蛇紋岩化反応、Fe-炭酸塩およびFe-酸化物の酸化、水の放射線分解など、科学的根拠に基づき水素が地下で生成される点については確認されています。しかし、実際に自然界の複雑な条件下で、どれくらいの速度で、どれくらいの天然水素が生成されるかについては、まだ詳細が明らかになっていません。

また、地下で生成された天然水素は、「拡散」と「移流」の二つのメカニズムにより移動している可能性が高いとされています。拡散は、例えば、岩石の空隙内や溶存した水中において、物質が高濃度から低濃度の場所へ移動して均質になろうとする現象です。一般的に、拡散による物質の移動速度は遅く、さらに移行経路が長い場合には岩盤内での滞留時間も増すため、その分だけ微生物・鉱物・有機物による損失(消費)の影響を受けやすいことが指摘されています<sup>3</sup>。一方で移流は、例えば、地下で生じる圧力の差などにより、断層・亀裂や透水性を持つ岩盤を流体が通り、その流れによって物質が移動する現象です。地表で観測される水素ガスの噴出は「移流」であると指摘されています<sup>4</sup>。しかし、地下における水素の拡散や移流が、地下の温度、圧力の影響を受けながら、どのような断層・亀裂や岩石中の空隙構造の中を、どのような経路・速さで移動し、また地下でどの程度損失するかメカニズムやプロセスについては、現時点で十分に解明されていません。

3 Etiope, G. et al., 2026. Understanding the resource potential of natural hydrogen on Earth: Scientific gaps, uncertainties and recommendations. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012825226000243>

4 Etiope, G., 2023. Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.025>

図表4：天然水素が貯留するまでの各メカニズムの概要と、さらに調査が必要な点

主要なメカニズム	概要	不明確な点(一例)	
生成	蛇紋岩化反応	カンラン岩中のFe含有ケイ酸塩鉱物が水と反応し、水和(蛇紋岩化)する過程でH <sub>2</sub> が生成される現象	マイクロクラッキング、鉱物沈殿などを考慮した、地下条件下におけるH <sub>2</sub> 生成量・速度
	Fe-炭酸塩およびFe-酸化物の酸化	堆積岩や変成岩中の鉄に富む岩石の酸化反応によりH <sub>2</sub> が生成される現象	鉄含有岩石からのH <sub>2</sub> 生成速度
	水の放射線分解	結晶質岩石中に含まれるカリウムなどの放射性元素の崩壊に伴い、放射線が水を分解してH <sub>2</sub> が生成される現象	放射線分解で生成されたH <sub>2</sub> が、同時に生成される酸化種との逆反応で消費される可能性の検証と、その消費量
	有機物の活動・発酵	堆積岩中の有機物が高温条件下で熱的に分解される過程でH <sub>2</sub> が放出される現象	同時に生成されるメタンによるH <sub>2</sub> 消費量を考慮した、地下条件下で実際に放出され得るH <sub>2</sub> 生成量
	メカノラジカル反応	断層における岩石の破碎・摩擦に伴い、岩石表面にフリーラジカルが生成され、水と反応してH <sub>2</sub> が生成される現象	断層帯周辺の岩相・透水性・孔隙率の分布を考慮した反応モデル
移動	移流	H <sub>2</sub> が圧力勾配に従い、透水性の高い岩石や断層系を通じて強制的に移動する現象	亀裂幅・深度・各移流形態ごとのH <sub>2</sub> 移流速度の把握と、関係を示す系統的な移流モデル
	拡散	H <sub>2</sub> が濃度勾配に従い、高濃度側から低濃度側へ自然に移動する現象。ガス相と水相の二つの形態がある	温度・圧力・塩分濃度の変化によるガス相・水相それぞれのH <sub>2</sub> 拡散係数の整理
貯留	H <sub>2</sub> が透水性のある岩石に蓄積し、不透水性の岩石(シール岩)で封止される現象	透水性・空隙率・貯留容量・生産フローレート・空間的広がりなど、H <sub>2</sub> 貯留層そのものに関する体系的データ	
損失	H <sub>2</sub> が移動経路上や貯留層で、微生物や非生物的反応による消費、有機物への吸着などで失われる現象	移動経路上での微生物によるH <sub>2</sub> 消費の直接調査による、仮説の証明	

出所：Etiopie, G., 2023. Massive release of natural hydrogen from a geological seep (Chimaera, Turkey): gas advection as a proxy of subsurface gas migration and pressurised accumulations. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.025> を基にPwC作成

このように、天然水素は生成・移動・貯留・損失が連続的に進行する動的資源である可能性が高いにもかかわらず、その挙動を定量的に把握するための科学的知見や実測データが著しく不足しており、天然水素を地下資源として評価し、安定的な開発判断を行ううえでの大きな不確実性要因となっていると言えます。

## (2) 技術成熟度

天然水素開発オペレーションに供する資材・機材や設備に関する技術成熟度を評価すると、以下の理由により、現時点では安全かつ継続的に生産するための工学技術が確立していないと判断されます。

### 1. 水素、地下環境に長期的に耐え得る十分な資機材開発・設備設計の不足

天然水素生産設備は、水素の低密度、高い拡散性、ならびに化学的・生物学的反応性の高さといった独特な物理・化学特性により、従来の石油・天然ガス井では顕在化しにくかった安全課題を内包しています。水素は分子径が極めて小さく、鋼材やセメント、シール材といった坑井構成要素内部へ容易に侵入・透過するため、長期運用時の健全性確保が難しい資源であると言えます。これらの課題に関連する主要な損傷メカニズムは、おおむね以下の四つに分類されます<sup>5</sup>(図表5)。

第1に、水素脆化です。天然水素の生産では、水素原子が設備中の鋼材内部に侵入し、脆性破壊を引き起こす可能性があります。水素脆化に対する材料・技術の研究開発は既に進められていますが、天然水素の掘削は地下3,000～4,000mに及ぶ場合もあるため、坑井深部で想定される高温・高圧条件下での長期運転に耐え得る技術の開発が必要です。

第2に、微生物腐食です。特に硫酸還元菌が関与する場合、水素を電子供与体として硫化水素が生成され、金属腐食が促進されるリスクがあります。対策としては、殺菌剤の使用やカソード防食などがあります。これらは既に石油・天然ガス開発で使用されている腐食対策ですが、水素環境下で長期的に使用する場合の対応方針は確立されていません。

第3に、水素とセメントの反応です。坑井セメント中での水素の影響により、セメントの物性変化や微細クラックの形成が生じ、結果としてガス漏れ経路が形成される可能性があります。実際に、掘削時に利用するセメントスラリーを水素に晒した実験では、セメント強度の劣化と水素誘発の亀裂が確認されており<sup>6</sup>、水素環境に有効な添加剤などの開発が望まれます。

第4に、水素によるゴム・エラストマー材料の劣化です。シール材やパッカーの部材として使用されるゴムは、水素吸収による膨張や急減圧時に表面が水ぶくれ状になること(プリスタリング)、さらには破壊に至るおそれがあり、坑井の気密性維持に重大な影響を及ぼします。エラストマーについては、水素産業向けに改良・開発が幅広く実施されており、既に実用化されている技術もありますが、天然水素井の実際の坑内環境(腐食性物質、極端な温度圧力、動的荷重)を再現した長期的な検証は行われていません。

以上のように、天然水素開発における採掘時などに利用する資機材や設備には、高温・高圧環境下で、かつ長期の水素曝露、複数の腐食・劣化メカニズムが同時に作用する複合環境などを想定する必要がありますが、このような条件下で耐久性や機能健全性が実証された工学技術は限られています。このため、実フィールドにおける坑井健全性や設備寿命を定量的に評価するには至っておらず、技術成熟度の観点からは依然として不確実性が高い段階にあると言えます。

5 Etiope, G. et al.,2026. Understanding the resource potential of natural hydrogen on Earth: Scientific gaps, uncertainties and recommendations. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2026.105413>

6 Hussain, A. et al.,2022. Experimental investigation of wellbore integrity of depleted oil and gas reservoirs for underground hydrogen storage. <https://doi.org/10.4043/32003-MS>

図表5：採掘オペレーションにおける技術的課題と研究開発状況

課題	概要	天然水素開発への影響	技術の研究開発状況			
			基礎研究	実証	坑内条件での検証	実用化
水素脆化	水素が鋼材に浸透し、延性・強度を低下させ脆性破壊を引き起こす	チュービング/ケーシングの早期破壊、坑井構造の喪失	✓ 完了	✓ 完了	🔄 研究段階	— 未実施
微生物腐食	硫酸塩還元菌 (SRB) などが硫化水素を生成し、鋼材を電気化学的に腐食	坑井金属部材の腐食加速、水素消失 (SRB による消費)	✓ 完了	✓ 完了	🔄 研究段階	— 未実施
H <sub>2</sub> -セメント反応	水素が H <sup>+</sup> に変換されセメント鉱物と反応、物性を変化させる	セメントシールの機能喪失、水素漏洩経路の形成	✓ 完了	🔄 研究段階	— 未実施	— 未実施
ゴム劣化	水素がエラストマーに浸透し、プリスタリング・鎖切断・機械的特性低下を招く	シール不良による暴噴リスク、封止機能の喪失	✓ 完了	✓ 完了	🔄 研究段階	— 未実施

出所：Etiopie, G. et al.,2026. Understanding the resource potential of natural hydrogen on Earth: Scientific gaps, uncertainties and recommendations. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2026.105413>, Hussain, A. et al.,2022, Experimental investigation of wellbore integrity of depleted oil and gas reservoirs for underground hydrogen storage, <https://doi.org/10.4043/32003-MS>, Sun, B. et al.,2025 Review on natural hydrogen wells safety, <https://www.nature.com/articles/s41467-024-55773-y> を基にPwC作成

### (3) 経済性

天然水素開発における経済性を評価すると、事業として十分な利益を確保すること、言い換えれば販売価格とコストの予測を立てることは、現時点では極めて難しいと言えます。その主な理由は以下の2点です。

#### I. 水素価格の不透明性

一つ目に、水素市場そのものが依然として発展途上にある点が挙げられます。現状の水素需要は化学製品および石油精製向けが大半を占めており、自動車、発電、家庭用燃料などのエネルギー用途での普及は限定的です。各国は脱炭素政策の柱の一つとして水素の利活用を推進しているものの、将来の価格水準および需要見通しについては依然として不確実性が高く、広域的な価格指標(コモディティ市場)が十分に確立されていないことが、価格見通しを難しくしています。

## II. 生産コストの不透明性

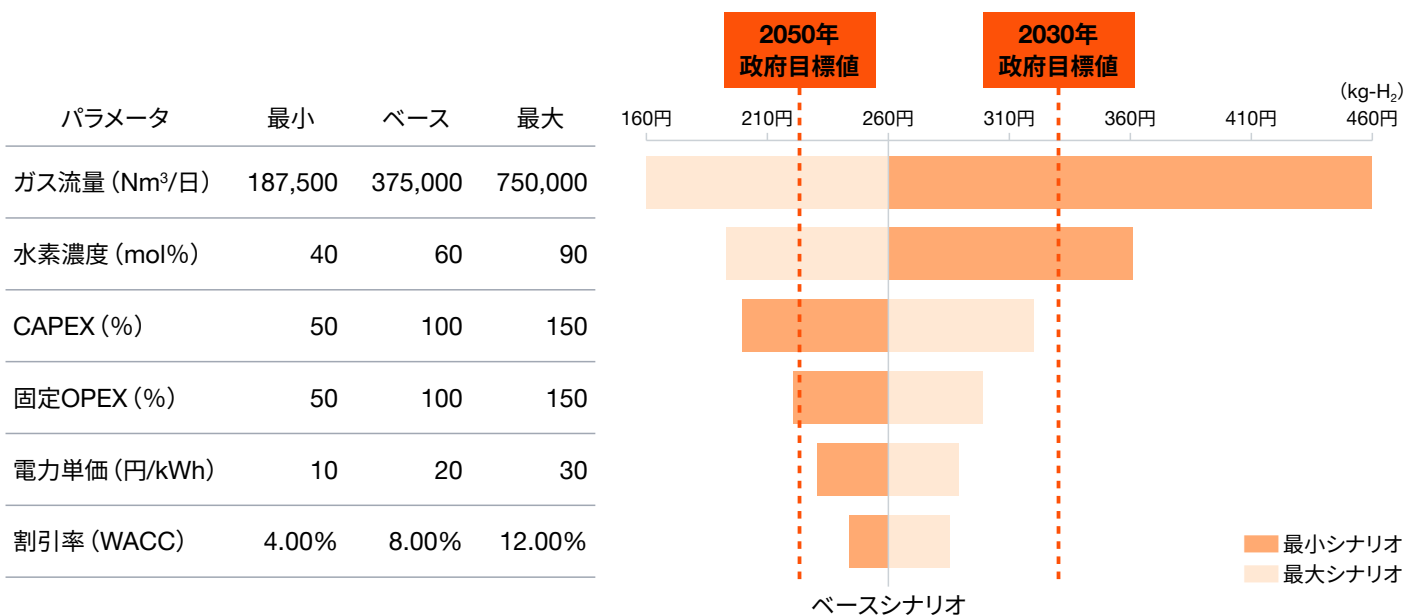
二つ目に、コスト面については、天然水素特有の地理的要因が大きな不確実性をもたらしています。天然水素の生産コストは、地下から回収可能な水素の流量や濃度に大きく左右されるため、鉱床条件の違いによって大きく変動します。

PwCの試算では、貯留層が地下1,000mに位置し、1日あたりのガス噴出量を375,000Nm<sup>3</sup>と想定した場合、天然水素の均等化生産コストは260円/kg-H<sub>2</sub>と算出され、コスト競争力が非常に高いという結果が出ましたが、均等化生産コストは水素濃度(mol%)、ガス流量(Nm<sup>3</sup>/日)の影響を大きく受けるという課題もあります(図表6)。十分な流量や高濃度の水素が得られない場合、均等化生産コストは著しく上昇する可能性があります。例えば、ガス流量が187,500Nm<sup>3</sup>/日、かつ水素濃度も40mol%とした場合は、均等化生産コストは563円/kg-H<sub>2</sub>まで上昇します。天然水素を含むガスの流量と水素濃度は、実際に探査井を掘り、現地調査をするまで確認できないため、事業者は不確実性の高い段階で一定規模の投資判断を迫られることとなります。

さらに、天然水素の生産地点は、発見される貯留層の位置に強く依存するため、必ずしも既存の需要地や輸送ハブの近傍に立地するとは限りません。その結果、パイプラインや陸上・海上輸送、あるいは変換・貯蔵に要する追加的なインフラ投資が必要となり、輸送コストが大幅に増加するリスクも内包しています。

以上のように、水素価格の不確実性とコストの不透明性が重なり合うことで、天然水素開発の経済性は現段階では明確に評価し難い状況にあります。このことが、投資判断を慎重にさせ、商業化の進展を阻む重要な要因の一つとなっていると考えられます。

図表6：天然水素均等化生産コストの感度分析



出所：Musa, M. et al.,2024. Techno-economic assessment of natural hydrogen produced from subsurface geologic accumulations., <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.11.009>を基にPwC作成

## (4) 規制・法制度

天然水素は、石油・天然ガスや鉱物資源と同様に探査・開発・生産というプロセスを要するにもかかわらず、日本を含む多くの国で法令やガイドラインで明確な位置づけがなされておらず、事業化に向けた制度が欠如しています(図表7)。特に以下の2点について、明確な基準が存在しません。

### I. 鉱業権(試掘権・採掘権)の未整備

天然水素を対象とした明確な鉱業権(試掘権・採掘権)が存在しない点は、企業にとって大きな問題です。石油・天然ガスや地熱など既存の地下資源については、鉱業法や関連法令に基づき、試掘権・採掘権の設定や権利関係が制度的に整理されています。一方で、天然水素については、どの法体系の下で権利設定を行うべきかが明確でなく、所管官庁間の調整や前例確認に多くの時間を要する可能性が高く、開発プロジェクト全体のリードタイムが長期化するリスクを内包しています。事実、この問題は特に天然水素開発を進めるスタートアップにとって開発資金の枯渇といった大きな障害となっていることが国際カンファレンスでも取り上げられています<sup>7</sup>。

日本国内においても、2026年現在、天然水素は鉱業法の対象鉱物および特定鉱物となっておらず<sup>8</sup>、許認可の申請先である省庁や遵守すべき規制、プロジェクトを進めるうえで把握すべき基準などが分からないという問題があります。

図表7：各国での規制・制度の整備状況

地域	国	探鉱権・開発権の整備状況
北米	米国	・ミシガンなど州レベルでの対応方針策定が先行中
	カナダ	・ケベックなど州レベルでの対応方針策定が先行中
中南米	ブラジル	・国家鉱業庁(ANM)が法整備を検討中
欧州	フランス	・天然水素が鉱業法の対象鉱物として既に明示
	スペイン	・天然水素に特化した法律は存在しない
アフリカ	マリ	・既存鉱業法の下、政府が探査・開発許可を特別認可
アジア・太平洋	韓国	・天然水素に特化した法律は存在しない
	中国	・天然水素に特化した法律は存在しない
	日本	・天然水素に特化した法律は存在しない
	オーストラリア	・一部州・準州レベルで探査・開発許可制度を整備済

出所：H-Nat 2024,2025発表内容、他政府・企業HPを基にPwC作成

7 Julie Daws, Australian National Hydrogen Conference 2024より

8 鉱業法(令和5年法律第63号) <https://laws.e-gov.go.jp/law/325AC0000000289/>

## II. 環境アセスメント、安全基準の未整備

さらに、天然水素開発に特化した環境アセスメントや安全基準が整備されていないことも課題です。地下から水素を生産する場合、水素の高い拡散性や可燃性、部材劣化の影響など、従来の天然ガスとは異なるリスク特性を考慮する必要があります。しかしながら、現行制度の下では、天然水素特有のリスクを前提とした環境影響評価項目や安全設計基準が定義されておらず、事業者はどの水準を満たせばよいのかを判断できない状況です。したがって、今後は欧米豪で先行する天然水素プロジェクトにおける環境影響評価の実例や、各国の規制当局が定めた安全基準を継続的に調査・参照しつつ、国内の地質条件や既存法体系との整合性を踏まえた制度策定が急務です。



## 天然水素開発推進に必要な取り組み

天然水素開発におけるGo/No-Go判断を促し、投資や事業化を前進させるためには、ここまでの天然水素開発に関する議論や実証事例で整理した四つの課題を乗り越える必要があります(図表8)。本章では、これらの課題にどのように向き合い、解決し、開発を推進するのかを示唆します。

### (1) 資源としての存在確度における課題への対応

天然水素の資源性を不確実にしている、「どこに、どれくらい存在し、どの程度の期間採取できるかが見通せない」という課題を克服するためには、まず高濃度の天然水素が大規模に存在し得ることを科学的に示す必要があります。

具体的には、天然水素が「どこに存在し得るのか」を示すための系統的なモデル化が求められます。そのためには、生成・移動・貯留・損失の各プロセスとそれぞれのメカニズムを明らかにし、モデル化することが求められます。そのうえで、地質構造、岩石組成、断層分布、酸化還元環境などのモデルの要素を構成する地下環境情報を統合し、天然水素が大規模に胚胎している可能性の高い「有望地域のマップ」を作成することで、探索対象を戦略的に絞り込むことが可能となります。これにより、勘どころの鈍いランダムな探索ではなく、科学的仮説に基づく効率的な探索へと転換することができます。

この有望地域マップを用いることで、初期調査として広域スクリーニングを進められます。開発目的に基づいて絞り込んだ有望地域を中心に、衛星データに基づく地形や植生の分析を行うとともに、当該地域の既存井データの収集・分析、現地でのガス採取・分析などの地表調査段階に進みます。実際に米国地質調査所は、米国内における天然水素の賦存可能性を示した有望地域マップを発表し、企業による開発地の絞り込みを後押ししています。

また、天然水素が鉱床として安定的に貯留される可能性を示すためには、生成・移動・貯留・損失の時間軸を含めた動的モデリング(将来予測)の開発も不可欠です。天然水素の生成速度、移動速度、貯留速度、漏洩・損失速度などを考慮した地下胚胎モデルや、多相流や移流・拡散・分散、地下環境に応じた選択的な移行と移行経路長の変化を考慮した流体シミュレーションを構築することで、「何年から何十年スケールでどの程度の生産が継続し得るのか」を事前にレンジ評価することが可能となります。この評価手法の構築には、探査井・試験井による実証を通じて、モデルやシミュレーション結果の妥当性を検証することが求められます。

広域スクリーニング結果とこれらのモデルを統合し、資源量評価を行うことが最初の目標となります。具体的には、単位時間・単位体積あたりの水素生成ポテンシャル、地表への表出や微生物消費、酸化反応などによって失われるフラックス、そして貯留に回る残余フラックスを推定したうえで、有望地域ごとの資源量を評価し、「一見有望に見えるが埋蔵ポテンシャルが小さい地域」と「技術リスクは高いが巨大な資源となり得る地域」を仕分け、見極めることが、合理的な投資判断につながります。

## (2) 技術成熟度における課題への対応

第2の課題である「安全かつ継続的に生産するための工学技術が確立していない」点を解決するための前段階として、天然水素開発が行われる地下環境を定量的に整理する必要があります。具体的には、想定される水素濃度範囲、孔口から孔底までの圧力・温度条件、孔内の岩相分布、応力状態、共存ガス種や地下水の化学組成、流体の移行経路となる割れ目や空隙構造の分布および透水特性、地下水の流速・相状態などを体系的に把握します。そのうえで、整理した環境条件に対し、現行の地下資源開発や水素関連設備で使用されている部材と設備技術がそのまま適用可能かどうかを、API/ISOなどの既存規格や、液化水素やその他の水素関連事業、地熱開発、放射性廃棄物の地層処分開発などにおける既存知見などを基に検証し、資機材・設備に想定される劣化状況を洗い出す必要があります。

検証により、既存の材料・技術で対応可能と判断された領域については、その知見を天然水素開発の条件に適合させる形で「天然水素の設計・掘削・生産に関する技術ガイドライン・規格」などとして取りまとめることが望まれます。一方、既存の材料・技術では対応が困難な領域、または健全性が判断できない領域については、具体的な技術開発目標を設定し、高濃度水素環境を再現した材料試験の計画・実施や新たな材料・工法の開発など、必要な改良に取り組むことが求められます。

## (3) 経済性における課題への対応

第3の課題である「販売価格とコストの予測が難しい」点を克服するための解決策の一つとして、天然水素の単位コストを抑制し、需要家の最終コストを低減する仕組みづくりが考えられます。

政策・制度による価格下支えは重要で、低炭素水素に対する価格支援制度の適用により、天然水素の実効的な販売価格の下振れリスクを抑制することが期待されます。天然水素を低炭素水素の支援対象に組み込むためには、まず天然水素のLCA評価手法を策定し、天然水素を含む地下から採取されるガスの組成に起因する温室効果ガス(GHG)排出を適切に評価する必要があります。共存するメタンや二酸化炭素などの取り扱い方法によって、GHG強度は大きく変化するため、ガス組成の実測と処理フローの明確化が不可欠です。

また、天然水素の需要家の最終価格を抑えるためには、生産地近辺の産業需要やローカル用途と組み合わせたオフテイク確保が現実的な選択肢となります。実際に、米国で天然水素開発を進める事業者は、生産地周辺のオフテイクへの供給を前提にプロジェクトを進めています<sup>9</sup>。

さらに、増進回収技術への研究投資を進め、商業実装化することで、天然水素の安定生産と回収率向上を図ることができ、競争力のある天然水素価格の創出につながると考えられます。増進回収技術については、岩盤の破碎による水素回収量の増加、特殊な触媒を利用した低温での蛇紋岩化反応促進など、さまざまなアイデアと科学技術に基づいて、現在スタートアップなどにより開発・実証化が進められています。

9 HyTerra社ヒアリングより、<https://hyterra.com/projects/>

## (4) 事業化に向けた制度の欠如という課題への対応

制度設計のためには、まず制度整備の土台構築に向けた取り組みが重要です。その中で取り組むべきと考えられる事項の一つは、既存の法令や規制に照らした場合に天然水素開発が直面する「グレーゾーン」の整理です。すなわち、現行の鉱業法、環境関連法、安全規制などを適用した場合に、どの部分が明確に適用可能であり、どの部分が解釈に依存するのか、あるいは制度上の空白となっているのかを洗い出す作業が求められます。この整理を通じて天然水素開発にかかる推進法と規制法が将来的に整備されていくものと想定されます。短期的には既存制度の運用改善やガイドライン整備による対応可能性を検討しつつ、中長期的には天然水素を明確に位置づけた新たな制度設計や法改正の必要性を具体化していくことが可能となります。

図表8：事業化における課題と解決に向けて実施すべき取り組み案

テーマ	課題	具体要因	解決策
資源としての存在確度	どこに、どれくらい存在し、どの程度の期間採取できるかが見通せない	<ul style="list-style-type: none"> <li>表出事例の少なさとデータ精度の問題</li> <li>天然水素の動的特性による安定的資源への懸念</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>有望地域マップの作成と広域調査による事例創出</li> <li>天然水素動的モデリング開発と資源量評価方法の確立</li> </ol>
技術成熟度	安全かつ継続的に生産する工学技術が確立していない	<ul style="list-style-type: none"> <li>水素、地下環境に長期的に耐え得る設備設計・材料基準の不足</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>「天然水素井の掘削・生産に関する技術ガイドライン」の策定</li> <li>天然水素開発に特化した材料・技術の開発</li> </ol>
経済性	販売価格とコストの予測が難しい	<ul style="list-style-type: none"> <li>将来の水素市場価格の不透明性</li> <li>濃度・回収流量による天然水素均等化コストの変動</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>低炭素水素支援制度の適用</li> <li>生産地近辺の産業需要やローカル用途と組み合わせたオフテイク確保</li> <li>増進回収技術の研究開発</li> </ol>
規制・法制度	開発許可のプロセスや、遵守すべき法令・ガイドライン整備されていない	<ul style="list-style-type: none"> <li>探鉱権・開発権などの事業化に向けた制度の欠如</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>天然水素開発が直面する「グレーゾーン」の整理</li> </ol>

出所：PwC作成

## 国内の天然水素開発に向けた具体的な取り組み例

前章までに示したとおり、天然水素開発は、資源としての存在確度、技術成熟度、経済性、規制・法制度という四つの不確実性が相互に影響し合う、複合的なテーマです。こうした不確実性が併存する市場環境において、企業が国内の天然水素開発を推進するためには、高い研究・技術・事業開発力と、強い社会的発信力を用いて課題を解決することが不可欠となります。しかし、これらの強みを単一企業が持つケースは限られており、また単一企業がゼロベースで課題を解決することは、時間・コスト・人材の観点から現実的ではありません。

そこで、海外で先行するスタートアップや研究機関の一部で進みつつある課題解決に向けた研究開発・実証の成果を取り込み、現場で蓄積されているデータ、手順、安全管理、許認可対応といった「実践知」を活用することが、国内開発において最も合理的です。具体的には、海外の天然水素開発企業への投資や研究機関との戦略的提携を通じて実践知を獲得し、国内の地質条件および既存の制度環境に適合させたいうで、これら実践知を国内開発へ応用・展開していくアプローチです。以下では、この考え方に基づく参入・開発の進め方を、三つのフェーズに整理して提示します。

### フェーズ1：海外先行プレーヤーとの接点構築および国内既存知見・データの棚卸し

本フェーズの目的は、開発ノウハウ取得のための足掛かりを構築することにあります。

天然水素の開発は世界的にも黎明期にあり、技術・知見が一部の先行プレーヤーに集中しているのが現状です。そのため、まずはこれらのプレーヤーとの関係性を構築し、最新の知見にアクセスできる基盤を整えることが不可欠となります。国外においては、国際カンファレンスへの参加などを通じて海外の先行プレーヤーとの接点を構築するとともに、海外の最新研究や調査文献を精査することで、天然水素に関する知見を体系的に獲得します。また、この段階から資源の存在確度やオフテイカーの有無といった事業成立の根幹に関わる要素を判断基準に含めたいうで、投資・提携候補先に対するデューデリジェンスを実施します。フェーズ2以降の投資参画を見据え、早期に候補先の選定と評価に着手しておくことで、迅速かつ的確な意思決定が可能となります。

一方、国内においても並行して準備を進める必要があります。日本にはこれまでの地質調査や資源探査を通じて蓄積された豊富な地質データが存在しますが、天然水素の観点から体系的に整理・評価された例は限定的です。そのため、既存の地質データを棚卸しし、国内における有望地を複数抽出します。さらに、将来の開発・生産段階では、地権者、自治体、関連省庁など多様なステークホルダーとの合意形成が不可避となることから、この段階から関係構築に着手し、長期的な信頼関係の醸成を図ります。

## フェーズ2：海外先行事業への投資参画および国内展開の準備

本フェーズの目的は、海外先行事業への投資参画および実証活動への関与を通じて、開発手法を実践的に体得することにあります。具体的には、オペレーションに関与することで既存技術・機材が天然水素の探査・採取にどの程度適用可能かを現場で検証するとともに、開発対象地における地質データなどを取得します。加えて、開発に伴う安全性・環境評価や地域コミュニティへの対応といった、商業化に向けて避けて通ることのできない実務課題についても学習します。これらの経験は、後続するフェーズ3での国内開発モデル策定において、実証に裏打ちされた判断材料として極めて重要な役割を果たします。

国内においては、海外で得られる知見を最大限に活用するための受け皿づくりを進めます。まず、海外先行事業で得られた各探査手法の有効性、掘削・精製技術の水素生産効率などの実データをあらかじめ整理・体系化しておくことで、国内の事業開発を迅速かつ効率的に行える体制を構築します。また、国内で天然水素の開発を進めるにあたっては、前項で説明したように現行の鉱業法や環境規制などにおいて天然水素が明確に位置づけられていない「グレーゾーン」が存在します。こうした法制度上の不確実性は、将来の事業化における重大なリスク要因となり得るため、この段階で論点を洗い出し、整理しておくことが肝要です。さらに、国内研究機関との共同研究体制を構築し、段階的に現地調査を実施することで、国内の地質条件に関する独自データの蓄積を開始します。

## フェーズ3：海外開発の商業稼働・検証および国内事業モデルの策定

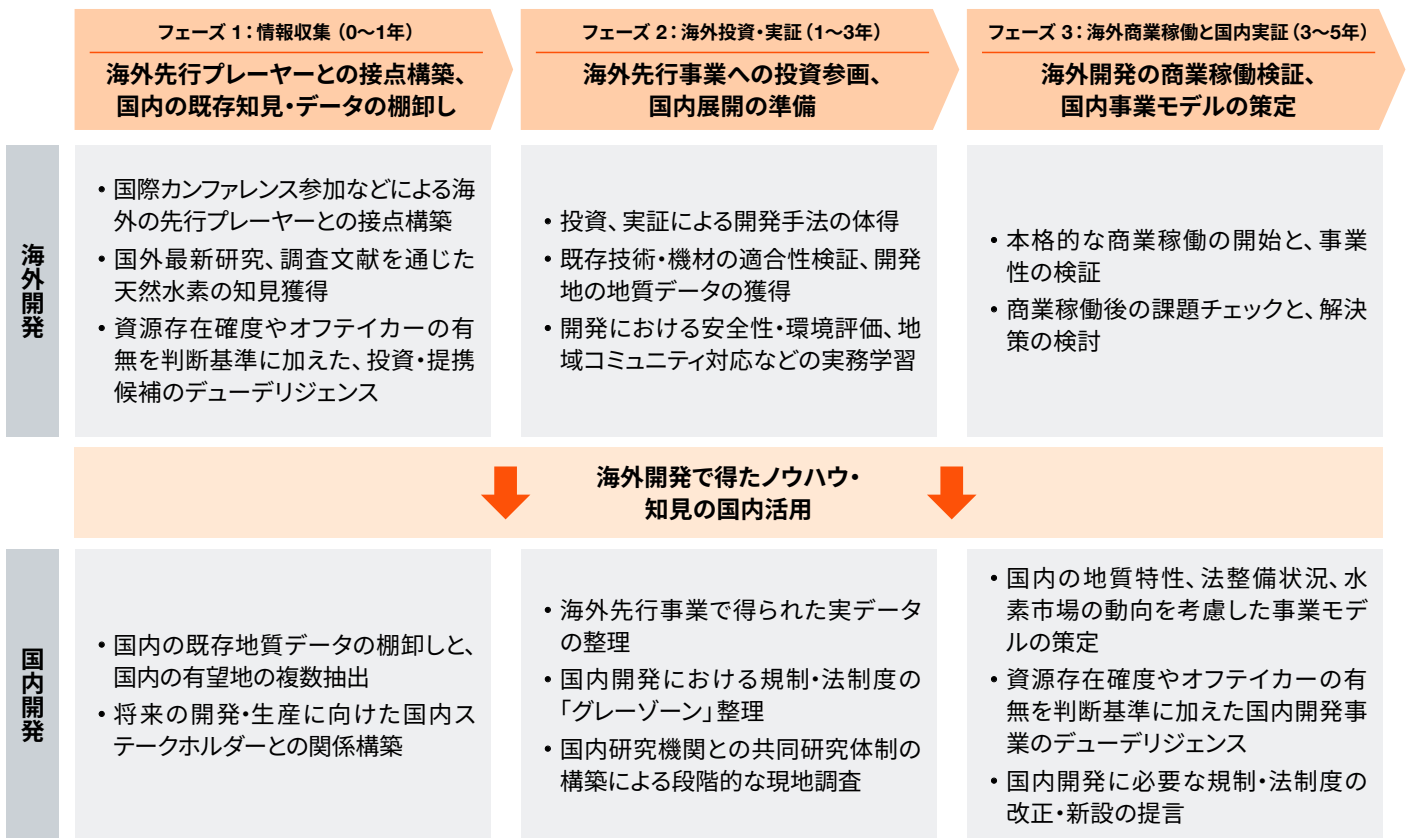
本フェーズの目的は、海外事業における論点を最終的に整理し、それを基盤として国内開発モデルを策定することにあります。

供給の安定性、コスト構造の最適化、長期的な貯留層の挙動管理など、海外の商業稼働により顕在化した論点を洗い出し、解決策を導出することが、本フェーズにおける国外での中核的な取り組みです。商業稼働の事業性の評価・検証を行うことで、実証段階では把握しきれなかった課題を抽出し、実効性のある解決策を検討します。

国内においては、フェーズ1・2を通じて蓄積した海外の知見・データと、国内固有の条件とを統合する段階に入ります。天然水素の事業化は、地質条件のみならず、法制度の整備状況や水素市場の需給動向といった国ごとに異なる要因に大きく左右されます。そのため、海外事例で得られた知見・データをそのまま流用するのではなく、国内の地質特性、法整備状況、および水素市場の動向を総合的に考慮した独自の事業モデルを策定する必要があります。あわせて、フェーズ1と同様に資源の存在確度やオフテイクの有無を判断基準に含めた国内開発事業のデューデリジェンスを実施しますが、この段階では海外での商業稼働から得られた実績データを反映させることで、より精度の高い事業性評価が可能となります。さらに、フェーズ2で整理した規制・法制度上の「グレーゾーン」に対し、国内開発の推進に必要な法制度の改正および新設に向けた具体的な政策提言を行います。

以上のとおり、天然水素の国内事業化にあたっては、海外の先行事例を戦略的に活用しながら段階的に知見・ノウハウを蓄積し、国内固有の地質条件・制度環境に適合させていくことが、最も合理的かつ実効性の高いアプローチであると考えられます(図表9)。

図表9：国内天然水素開発のためのアプローチ



出所：PwC作成

## おわりに

本稿では、天然水素が本格的な事業化に至っていない背景として、①資源としての存在確度、②技術成熟度、③経済性、④規制・法制度という四つの不確実性を整理し、投資判断(Go/No-Go)を難しくしている論点を明らかにしました。

事業化を前進させるには、生成・移動・貯留・損失を含む科学的モデル化と有望地域の絞り込み、地下環境条件を踏まえた技術ガイドライン・規格整備と実証、価格形成・オフテイク確保を見据えた事業設計、ならびに鉱業権や安全・環境基準を含む制度設計を段階的に進めることが不可欠です。そのうえで、国内の天然水素開発を進めるにあたっては、海外の先行プレーヤーとの連携を通じて課題の解決策やノウハウを獲得し、国内の地質条件・制度環境に適合させていく段階的アプローチを提言しました。海外開発で得られた知見を国内へ還元することで、国内開発を効率的に推進することが可能となります。

天然水素は、実績データの蓄積と制度・技術基盤の整備が進めば、クリーンで低コストとなり得る一次エネルギーとしてネットゼロ社会の実現に貢献し得ます。今後は、実証とデータ公開を通じて不確実性を段階的に縮減するとともに、支援制度・許認可プロセスを含む実装の枠組みを具体化することが求められます。





## PwC Japanグループ

<https://www.pwc.com/jp/ja/contact.html>



## [www.pwc.com/jp](http://www.pwc.com/jp)

PwC Japanグループは、日本におけるPwCグローバルネットワークのメンバーファームおよびそれらの関連会社 (PwC Japan有限責任監査法人、PwCコンサルティング合同会社、PwCアドバイザリー合同会社、PwC税理士法人、PwC弁護士法人を含む) の総称です。各法人は独立した別法人として事業を行っています。

複雑化・多様化する企業の経営課題に対し、PwC Japanグループでは、監査およびブローダーアシュアランスサービス、コンサルティング、ディールアドバイザリー、税務、そして法務における卓越した専門性を結集し、それらを有機的に協働させる体制を整えています。また、公認会計士、税理士、弁護士、その他専門スタッフ約13,500人を擁するプロフェッショナル・サービス・ネットワークとして、クライアントニーズにより的確に対応したサービスの提供に努めています。

PwCは、クライアントが複雑性を競争優位性へと転換できるよう、信頼の構築と変革を支援します。私たちは、テクノロジーを駆使し、人材を重視したネットワークとして、世界137の国と地域に364,000人以上のスタッフを擁しています。監査・保証、税務・法務、アドバイザリーサービスなど、多岐にわたる分野で、クライアントが変革の推進力を生み出し、加速し、維持できるよう支援します。

発行年月：2026年6月

管理番号：I202604-11

© 2026 PwC. All rights reserved.

PwC refers to the PwC network member firms and/or their specified subsidiaries in Japan, and may sometimes refer to the PwC network. Each of such firms and subsidiaries is a separate legal entity. Please see [www.pwc.com/structure](http://www.pwc.com/structure) for further details.

This content is for general information purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.