

特集 脱炭素社会を支える地下資源の最前線

地球が生み出す水素：ホワイト水素とオレンジ水素

Earth-Generated Hydrogen : White and Orange Hydrogen

辻 健*

Takeshi Tsuji

1. はじめに

水素は、燃焼時に二酸化炭素を排出しないエネルギーキャリアとして、脱炭素社会の実現に向けて重要な役割を担うと期待されている¹⁾。しかし現在利用されている水素のほとんどは、天然ガスや石炭ガス化によって製造されるグレー水素であり、その製造過程では二酸化炭素が排出される。つまり、そのグレー水素を使っている限りは、二酸化炭素の削減には貢献していないとも言える(図1)。これに対し、水素製造時に発生する二酸化炭素を回収し、地下に貯留するCCS(Carbon Capture and Storage)技術を組み合わせたものはブルー水素と呼ばれる。ブルー水素は、従来のグレー水素よりも二酸化炭素の大气への排出量を低減できるが、CCSに伴うコスト、安全性、長期的な貯留安定性などに課題が残されている²⁾。一方、再生可能エネルギー由来の電力を用いて水を電気分解して製造するグリーン水素は、コンセプトとして魅力的であり世界的に注目されている。しかし現時点では、製造コスト、電力供給、生成量、輸送・貯蔵インフラなどの課題があり、本格的な社会実装には技術革新が必要とされている。

このような状況の中で、近年急速に関心が高まっているのが、地下で自然に生成・集積された水素、すなわち天然水素である(図1)。天然に存在する水素は「ホワイト水素」とも呼ばれ、地球内部の地質学的プロセスによって生成された水素を、人工的な製造過程を経ることなく地下から採取する概念として用いられることが多い。このような特徴から、ホワイト水素はエネルギーキャリアではなく、一次エネルギー資源として位置付けることもできる。このホワイト水素は、低コストで開発できる可能性が指摘されている一方で、その供給量には大きな不確実性が残されている。

天然水素の生成メカニズムとしては、かんらん岩の蛇紋岩化反応、放射線による水の分解、鉄鉱物の酸化反応、深部流体からの脱ガスなど、複数のプロセスがあるとされている³⁾。これらの生成過程に加えて、断裂帯などの流体移動経路、貯留層、シール層が適切に組み合わさることで、水素が地下に集積し得る資源システムが成立すると考えら

れる。

しかし、どの生成プロセスが支配的であるかについては未だ統一的な見解が得られていない。また、水素は分子量が小さく拡散性が極めて高いため、長期的な集積のためにはシール層が非常に低い透水率であることが求められる。このような特性は、天然ガスや石油と比較して、水素資源の成立条件をより厳しくする要因となる。

さらに、地下の反応性岩石に水を注入し、蛇紋岩化などの反応を促進して水素を人工的・工学的に生成しようとする「オレンジ水素」も注目されている。これは単に地下に存在する水素を探すホワイト水素とは異なり、地下を「水素生成リアクター」として利用する考え方である³⁾。

本稿では、天然水素の研究背景と近年の動向、生成メカニズム、探査対象地域、オレンジ水素の概念、水素システム構築に向けた動き、さらに水素フィールドである白馬地域における簡易調査結果を紹介するとともに、今後の水素システムモデル化に向けた探査の方向性について述べる。

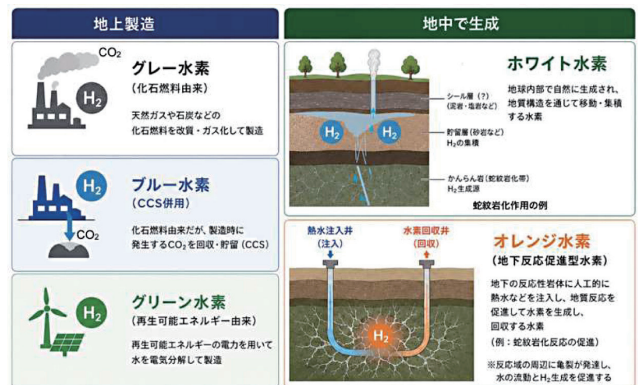


図1 地上で作られる水素と、地下で作られるホワイト水素とオレンジ水素

2. 天然水素研究の背景と近年の急速な展開

天然水素は、決して新しく発見されたものではない。鉱山、深部坑井、温泉、火山地域、オフィオライト帯、クラトン地域、堆積盆地などで、水素を含むガスの存在は古くから報告され、著者もその研究に関わってきた⁴⁾。しかし、分子量が小さいため拡散しやすく、また反応性も高い水素は地下で長期間集積しにくく、資源としては考えられてこなかった。またメタン生成菌が多い地下環境では、水素が生成しても、すぐにメタン生成に利用されてしまうと考

*東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻
〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1
E-mail: tsuji@sys.tu-tokyo.ac.jp

られる⁴⁾。以上のような背景から、石油・天然ガスと同様に資源開発の対象として天然水素を扱う研究は、限定的であったといえる。

このような認識を変えたのが、マリ共和国における天然水素の発見と利用である。同地域では、1987年に水井戸の掘削中に高濃度の水素が偶然発見され、その後、浅部に集積した天然水素を用いた小規模な発電が実施されている⁵⁾。さらに複数の坑井の調査により、同地域では水素が地下に集積しているだけでなく、時間とともに再充填される挙動を示す可能性も報告されている。これは、天然水素が単なる地球化学的現象にとどまらず、実際に地下資源となり得ることを示す重要な事例と言える。

近年は、世界各地で天然水素探査が活発化している。米国、オーストラリア、カナダ、フランス、スペイン、モロッコ、オマーン、フィンランド、アルバニアなどの多くの国で、天然水素を対象とした評価が進められている。オーストラリアでは、南オーストラリア州ヨーク半島において Gold Hydrogen 社による開発が進展しており、試掘井から高濃度の天然水素およびヘリウムが確認されたと報告されている⁶⁾。この地域では、過去の石油探査データの再解釈に加え、地震探査などの地球物理探査を活用したターゲット抽出が進められており、天然水素探査に石油・天然ガス探査の手法を応用する代表的な事例となっている。2020年頃には10社程度であった関連企業が、2025年には100社以上に増加し、過去2年間で4.5億ドル以上の投資が公表されたとされている⁷⁾。

また近年の資源量評価では、地下に存在する天然水素の総量は非常に大きいことが示されている。Ellis and Gelman⁸⁾によるモデリング研究では、地下の水素資源量は大きな不確実性を伴うものの、約 5.6×10^6 Mt (約5.6兆トン) 規模と推定されている。ただし、この値はあくまで理論的な存在量であり、経済的・技術的に回収可能な資源量とは大きく異なる点に注意が必要である。著者も天然水素の生成量が莫大であることには同意するが、それがどの程度地下にトラップされ、濃集しているのかの評価が困難であり、可採資源量の評価には大きな不確実性が伴うと考えられる。

このように、天然水素は潜在的に有望なエネルギー資源である一方で、その資源性については定量的評価が十分に確立されておらず、不確実性が大きい資源である。さらに、石油・天然ガスのように確立された探査・開発モデル、埋蔵量評価手法、生産技術、法制度、環境影響評価手法は整備されていない。したがって、今後は、資源ポテンシャルの信頼性を高めるための科学的検証と、開発に向けた技術の検討・環境整備が求められる。

3. 天然水素の生成メカニズム

天然水素の生成過程は複数存在するが⁹⁾、現在最も注目されているのは、鉄に富む岩石と水との反応である。かんらん石などを含む超苦鉄質岩が水と反応して蛇紋岩へ変化する蛇紋岩化反応では、二価鉄が三価鉄へ酸化され、その際に水が還元されて水素が生成される。この反応は、中央海嶺、オフィオライト帯、かんらん岩の露出域、深部断裂帯などで起こり得る。日本周辺では、白馬で測定される水素は、周辺にかんらん岩や蛇紋岩が分布し、さらに断層帯に近いことから、このメカニズムで生成されていると考えられる。この蛇紋岩化反応は、流体流動、破壊、熱、鉱物反応が結合した複雑な地下プロセスである。水が岩石内部へ浸透すると、鉱物反応によって水素が生成される一方、蛇紋石や磁鉄鉱、ブルーサイトなどの二次鉱物が形成される。これにより岩石の密度、弾性波速度、電気伝導度、磁化率、透水性が変化する。したがって、蛇紋岩化反応は、地球化学だけでなく、地球物理学的にも検出可能な現象ともいえる。

第二の生成過程は、水の放射線分解である。ウラン、トリウム、カリウムなどの放射性元素に富む岩石中では、放射線によって水分子が分解され、水素が生成される可能性がある。この過程は反応速度が比較的遅いと考えられるが、クラトンのように長い地質時間を有する安定地塊では、地下深部で水素が継続的に生成される可能性がある。

ここでは2つの生成メカニズムだけを述べたが、それら以外にも、玄武岩、鉄鉱床、還元的な堆積物などでは、水と鉄鉱物の反応によって水素が生成されると考えられる。また、深部マントルやマグマ起源流体からの脱ガス、断層帯を通じた深部流体の上昇も、天然水素の供給源となる可能性があると考えられる。このように複数の生成メカニズムが提案されているものの、それぞれが天然水素生成にどの程度寄与しているかについては、未だ不明な点が多い。

重要なのは、天然水素資源を理解するためには、生成メカニズムだけでなく、「移動」「集積」「保存」を同時に考える必要がある点である。生成された水素が地下に十分に集積するには、十分な供給量、流体移動経路、貯留層、シール層が必要である。この天然水素探査などを実施し、石油システムに対応するような「天然水素システム」をモデル化することが重要と考えられる。

4. 天然水素の探査対象地域

天然水素の有望地域として、まず超苦鉄質岩が分布する地域が挙げられる¹⁰⁾。オフィオライト帯はその代表であり、海洋プレート由来のマントル岩や地殻岩が陸上に露出しているため、蛇紋岩化に伴う水素生成を調べるうえで重要なフィールドである。オマーンのオフィオライトは規模が非

常に大きく、天然水素・メタン生成、蛇紋岩化、炭酸塩化反応を研究する代表的な地域である。

また、クラトンや先カンブリア時代の基盤岩地域も注目されている¹¹⁾。これらの地域では、長い地質時間の中で水素が生成され、断裂や堆積盆地を通じて移動・集積した可能性がある。マリ水素フィールドも、基盤岩、貯留層、シール層、トラップ構造が組み合わさった天然水素システムとして解釈されている。なお、ドレライトという超低透水性の地層がシール層として機能していると考えられている。

さらに、堆積盆地や火山性堆積盆地も天然水素の対象になりつつある。中国の火山性堆積盆地における研究では、天然ガス組成、炭素・水素同位体、ヘリウム同位体などを組み合わせて、天然水素の生成・移動過程が議論されている¹²⁾。

近年では、天然水素の存在形態として、構造トラップに集積した遊離ガスとしての水素に加え、地下水に溶解した水溶性水素の可能性も指摘されている¹³⁾。フランス・ロレーヌ堆積盆のような堆積岩地域では、水溶性天然水素を対象とした探査が進められているようである。またオーストラリア南部ヨーク半島における天然水素探査においても、水素が地下水中に溶存して存在する可能性が指摘されており、今後の生産テストによって、遊離ガスとして産出するか、水とともに回収されるかが明らかになると期待される。このように、天然水素の探査においては、従来の石油・天然ガスと同様の構造トラップに加え、水溶性ガスとしての存在も考慮する必要があり、探査対象および評価手法の拡張が求められる。

日本においても、天然水素のポテンシャルを議論する余地はある。日本列島はプレート沈み込み帯に位置し、火山、温泉、断層、蛇紋岩体、付加体、深部流体活動が発達している。特に、蛇紋岩やかんらん岩が分布する地域（白馬など）、深部流体が上昇する地域（有馬温泉など）、温泉・ガス湧出を伴う地域は、天然水素探査の初期ターゲットとなり得る。しかし日本では地質構造が複雑で、地形が急峻な場所が多いため、それに対応した探査方法が必要である。また土地利用・温泉利用・環境規制との調和も必要である。

5. オレンジ水素

ホワイト水素が「自然に生成・集積された水素を探して採取する」概念であるのに対し、オレンジ水素は「地下で水素生成反応を促進・生産する」概念である³⁾（図1）。ホワイト水素のポテンシャルが小さい場合でも、オレンジ水素の開発では、生産量を予測できる可能性がある。さらに大きな生産量を確保できる可能性がある。このオレンジ水素の開発の主な対象は、かんらん岩、蛇紋岩などの鉄に富む超苦鉄質岩になると考えられる。これらの岩石に熱水を注入し、温度、圧力、流路、反応表面積を制御することで、蛇紋岩化や鉄酸化反応を促進し、水素を生成すること

が考えられている。

オレンジ水素の開発では、地熱開発やシェール開発と同様に、地下の透水性を制御する技術が必要となる。水が反応性鉱物に接触するために、亀裂ネットワーク、高い透水性、反応面積、流体滞留時間が重要となると考えられる。しかし一般的に超苦鉄質岩は間隙が少なく、透水性が低い。つまり、そのままの状態では熱水などの反応促進する流体を地中に圧入することが難しい。そのため、フラッキングなどにより、亀裂ネットワークを人工的に作成することが必要となると考えられる。その場合、誘発地震が引き起こされないように、地中の水圧や応力を制御する必要がある。

さらに反応が進行すると二次鉱物が析出し、透水性が低下する可能性もある。したがって、オレンジ水素の開発では、流体をどこに圧入し、どの程度反応させ、どのように回収するかという貯留層の制御技術の確立が求められる。そのため、水素開発の場合には、石油・ガス開発で一般的に利用されている流体挙動シミュレーションに、水素生成などの地化学反応を取り入れた貯留層シミュレーターの開発が求められる可能性がある。

なお、オレンジ水素の開発では、二酸化炭素の鉱物固定を同時に実施できる可能性がある¹⁴⁾。超苦鉄質岩や玄武岩はカルシウム、マグネシウム、鉄を含み、二酸化炭素と反応して炭酸塩鉱物を形成し得る¹⁵⁾。そのため、水素生成と二酸化炭素の地中固定を同時に進める地下反応場を設計できれば、エネルギー生産と脱炭素を同時に実現する技術となる可能性がある。

6. 水素システム構築に向けた探査技術

ホワイト水素およびオレンジ水素の探査では、地球化学、地質学、地球物理学、数値モデリングを統合するのが効果的であると考えられる。地球化学的には、土壌ガス、坑井ガスの水素濃度、メタン、窒素、ヘリウム、二酸化炭素、pHなどの測定が重要である。これらは、水素の起源、混合過程、深部流体の寄与、微生物活動の影響を推定する手がかりとなる。

地質学的には、反応性のある岩石の分布、断層・破碎帯、貯留層、シール層、熱構造を評価することが求められる。特に、蛇紋岩化が進行しているか、あるいは未反応の（新鮮な）かんらん岩が残っているかは、ホワイト水素とオレンジ水素開発の両方において重要な情報である。

地球物理的には、水素生成に関与する反応場（地下の岩相分布）、水素の移動を規定する亀裂ネットワーク、水素が集積し得る貯留層、ならびにそれを封じ込めるトラップ構造を統合的に可視化することが求められる。特に、日本のように地形が複雑で、地質構造が不均質な地域では多種類の探査を組み合わせて推定することが、精度の良い開発に資する可能性がある。例えば弾性波探査では、反射法地

震探査, 表面波探査, 微動探査, 自然地震を用いたトモグラフィを, 同様の機材を用いて同時に実施することで, 探査を効率化・低コスト化し, さらにそれらの結果を組み合わせた解析が有効になる可能性がある¹⁶⁾ (図2).

水素の生成と関係する蛇紋岩化や流体の存在は, 弾性波速度 (P波速度 V_p , S波速度 V_s), V_p/V_s 比, 波動減衰構造, 電気比抵抗, 磁化率, 密度に影響を与える. 例えば, 蛇紋岩化による磁鉄鉱生成は磁気異常として検出される可能性があり, 近年の研究では, 磁気・重力・電磁探査を組み合わせ水素生成帯を推定する試みも行われている³⁾. また弾性探査で得られる V_p/V_s 比は, 蛇紋岩化の進行度を反映する指標として利用できる¹⁷⁾.

弾性波探査データから反射断面図を構築することができれば, 断裂帯, 貯留層, トラップ構造, 流体移動経路などを高分解能で可視化できる可能性がある (図2). このような地下構造の高精度イメージングは, 掘削地点の選定や, オレンジ水素開発における反応場・生成場の評価において, 有用な情報を提供すると考えられる.

一方で日本における天然水素のポテンシャル地域 (日高地方など) は山岳域に分布することが多い. そのため, 大規模な弾性波探査に利用できる道路網が限られており, 従来型の大規模な弾性波探査を適用することは容易ではない. このような条件下では, 小型の可搬型震源および小型地震計を用いた山岳域での弾性波探査が有効であると考えられる. 筆者らはこれまで, 山岳域での探査を目的として小型震源装置PASSの開発を進めてきた¹⁸⁾. PASSは小型・軽量でありながら, 高い繰り返し性を有する制御震源である. 長時間にわたって連続的に発振することにより, 振動エネルギーを地下深部まで伝達・探査することが可能である. また, 近年では地震計の小型化も進んでおり, リュックサックを用いて多数の地震計を山岳地域へ運搬・展開することも可能となっている. このような特徴を有する新規探査装置を山岳域に適用することで, 従来は弾性波探査の実施が困難であった地域においても, 地下構造の

イメージングが可能になると期待される.

さらに, オレンジ水素のような地下反応促進型の開発を将来的に検討する場合には, 弾性波探査は事前評価のみならず, 反応進行に伴う地下状態の変化を捉えるモニタリング技術としても重要となる. 水の注入や蛇紋岩化反応の進行に伴い, 地下の弾性波速度, 減衰特性, 散乱特性, さらに微小地震活動が変化する可能性がある. 特に先に述べたように V_p/V_s 比は, 蛇紋岩化の進行度を反映するため, モニタリングに利用できると考えられる¹⁷⁾. これらの物理量の時間変化を継続的に観測することにより, 地下における流体の注入領域や反応進行域, 透水性の変化を推定することができるようになる可能性がある. このアプローチは, CCSや地熱開発等で培われた技術を, ホワイト水素およびオレンジ水素の開発へと展開・拡張するものである.

7. 長野県白馬地域における天然水素調査

筆者らは, 日本における天然水素ポテンシャル評価の一環として, 長野県白馬地域周辺で調査を進めてきた. 白馬地域は, 実際に天然水素が検出されている. また温泉活動, 糸魚川沿いの断層活動, 深部流体の関与, 高いpH, 複雑な地質構造を有しており, 日本列島における天然水素システムを考えるうえで興味深いフィールドといえる.

これまでの調査では, 地表付近のガス・流体の地球化学的特徴を把握するとともに, 地下構造の簡易な弾性波探査を実施してきた. 小型震源装置PASSを用いた簡易な弾性波探査では, 水素の回収井周辺において, 弾性波速度が変化しており, その場所が地層境界に対応する可能性が示された. しかし本調査は簡易的なもの (少ない発振点と地震計) にとどまっており, 反射法による断面図の構築には至っていない. 今後は, より稠密な観測配置による地震探査を実施し, 深部構造の解明に加えて, 地下における反応性岩石の分布, 流体移動経路ならびに貯留層を三次元的に把握することを試みる.

なお, 白馬八方温泉井周辺のように亀裂を伴った蛇紋岩

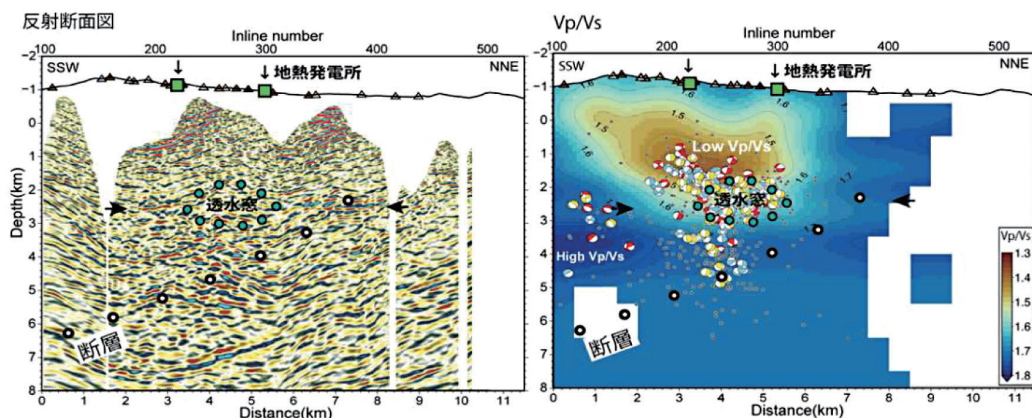


図2 天然水素フィールドと同様の山岳域で実施した統合弾性波探査の結果例¹⁶⁾. 反射断面図, V_p/V_s 構造, および自然地震分布を統合的に解釈することにより, 流体移動経路となる断層, 透水窓, さらに超臨界流体からガス相への相変化を捉えている. 流体の流れている場所で地震が発生している.

が地表まで分布する地域では、明瞭な構造トラップ（シール層）により遊離ガスが集積していない可能性があり、水素は地下水中に溶解した状態で貯留している可能性がある。揚水に伴う圧力低下により、溶存水素が脱ガスし、地表付近で気泡状の遊離ガスとして観測されている可能性もある。このような視点は、日本のように複雑な地質構造を有し、明確な構造トラップ（シール層）の形成が限定的な地域において、天然水素の探査対象を拡張する上で重要になるかもしれない。

ここでは白馬の調査を述べたが、白馬以外でもホワイト水素やオレンジ水素の開発候補地となりそうな有馬温泉や北海道の日高地方などでの探査により、日本での水素システムを明確化することが求められる。これらの地域では、水素システムが異なっていることも考えられ、それらを整理する必要がある。

8. 最後に

ホワイト水素およびオレンジ水素は、従来の水素製造とは異なり、地球内部の化学反応と地下構造を活用する新たなエネルギー資源となる可能性を有する。ホワイト水素は、自然に生成・集積された水素を低炭素資源として利用するものであり、近年、世界各地で探査が進展しつつある。一方、オレンジ水素は、地下の反応性岩石に水を供給し、水素生成反応を促進する工学的手法に基づく資源開発技術であり、将来的には二酸化炭素の鉱物固定との統合も期待される。

しかし、いずれも現時点では資源ポテンシャルの定量的評価が十分に確立されておらず、その明確化が求められている。天然水素の生成速度、集積条件、回収可能量、環境影響、経済性には依然として大きな不確実性が存在する。したがって、これらの資源の実用性を評価するためには、地球化学調査、地質調査、物理探査、さらには水素生成機構を考慮した数値シミュレーションを統合した総合的な評価が求められる。

謝辞

斎藤氏（JAPEX）には、大変有益なコメントを頂いた。ここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) International Energy Agency (IEA) ; Global Hydrogen Review 2024, IEA Report (2024).
- 2) Falko Ueckerdt, et al ; On the cost competitiveness of blue and green hydrogen, *Joule*, 8-1 (2024), pp.104-128
- 3) Shaowen Mao, et al. ; Geologic hydrogen : a review of resource potential, subsurface dynamics, exploration, production, transportation, and research opportunities, *Energy & Environmental Science*, 18 (2025), pp.9991-10035.
- 4) Akira Ijiri, et al. ; Deep-biosphere methane production

stimulated by geofluids in the Nankai accretionary complex, *Science Advances*, 4-6 (2018), eaao4631.

- 5) Alain Prinzhofer, Cheick Sidy Tahara Cisse, Aliou Boubacar Diallo ; Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakébougou, Mali, *International Journal of Hydrogen Energy* 43-42 (2018), pp. 19315-19326.
- 6) Gold Hydrogen Ltd. ; Ramsay Project - Helium Testing Update, ASX Release, Gold Hydrogen Ltd. (2024) .
- 7) Douglas Wicks ; Geologic Hydrogen (GeOH₂) : A new primary energy source, <https://www.jogmec.go.jp/content/300393414.pdf> (アクセス日 2026.5.10)
- 8) Geoffrey S. Ellis and Stanley E. Gelman ; Model predictions of global geologic hydrogen resources, *Science Advances* 10-50 (2024), eado0955.
- 9) Eric Hand ; Hidden hydrogen : Earth may hold vast stores of a renewable, carbon-free fuel, *Science*, 379-6633 (2023), pp.630-636.
- 10) Viacheslav Zgonnik ; The occurrence and geoscience of natural hydrogen : A comprehensive review, *Earth-Science Reviews*, 203 (2020), 103140.
- 11) Barbara Sherwood Lollar, et al. ; The contribution of the Precambrian continental lithosphere to global H₂ production, *Nature*, 516 (2014) , pp.379-382.
- 12) Quanyou Liu, et al. ; Natural hydrogen in the volcanic-bearing sedimentary basin : Origin, conversion, and production rates, *Science Advances*, 11-4 (2025) , adr6771.
- 13) Alain Prinzhofer, et al. ; Natural hydrogen continuous emission from sedimentary basins : The example of a Brazilian H₂-emitting structure, *International Journal of Hydrogen Energy*, 44-12 (2019), pp.5676-5685.
- 14) Juerg M. Matter, et al. ; Rapid carbon mineralization for permanent disposal of CO₂, *Science*, 352 (2016), pp.1312-1314.
- 15) Zihua Shao, et al. ; Surface reaction of CO₂ with Basaltic minerals as a mechanism for carbon mineralization, *Environmental Science & Technology*, 59-28 (2025), pp.14410-14418.
- 16) Takeshi Tsuji, et al. ; Supercritical fluid flow through permeable window and phase transitions at volcanic brittle-ductile transition zone, *Communications Earth & Environment*, 6 (2025), 752.
- 17) Richard L. Carlson and D. Jay Miller ; A new assessment of the abundance of serpentinite in the oceanic crust, *Geophysical Research Letters*, 24-4 (1997) , pp.457-460.
- 18) Takeshi Tsuji, et al. ; 4 cm portable active seismic source (PASS) for meter- to kilometer-scale imaging and monitoring of subsurface structures, *Seismological Research Letters*, 94 (2023), pp.149-158.

<著者紹介>



辻 健 (つじ たけし)

早稲田大学理工学部卒業。東京大学大学院博士課程修了。博士（理学）。2007 京都大学／工・助教。2012 九州大学／I2CNER・准教授。2017九州大学／工・教授。2022 東京大学／工・教授。地下をイメージング・モニタリングする技術を開発、デジタル岩石物理化学の創成、CCS、超臨界地熱などの未利用地下資源の研究、地震断層や火山の研究、宇宙で利用する探査装置の開発に従事。