

<Review>

미래 에너지원으로서 자연 수소의 발생, 기작과 분포에 대한 고찰

차지혜 · 이진용[‡]
강원대학교 지질학과

A review on occurrence, mechanism and distribution of natural hydrogen as a promising energy source

Jihye Cha · Jin-Yong Lee[‡]

Department of Geology, Kangwon National University, Chuncheon 24341, Republic of Korea

요 약

자연 수소는 환경 친화적이며 에너지 효율이 높은 연료로서의 잠재력 때문에 최근 유망한 에너지원으로 부상했고 호주, 브라질, 미국과 여러 유럽 국가들이 큰 관심을 가지고 연구와 조사를 하고 있다. 이 논문에서는 자연 수소의 지하 존재, 지하 분포를 조절하는 지질학적 요인, 지구화학적 과정 및 맨틀 기원에 대한 자연 수소의 발생 기작과 분포에 대한 심층적인 탐구를 제공하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 국제적인 학술색인인 Web of Science에 등재된 연구논문들을 대상으로 자연 수소에 대한 연구결과들을 종합하였고 이를 통해 당면한 전 지구적 기후변화 대응 및 지속 가능한 미래를 위한 실행 가능한 에너지 옵션으로서 자연 수소에 대한 우리의 이해를 높이는 것을 목표로 하였다.

주요어: 자연 수소, 지질학적 조건, 맨틀 기원, 대체에너지, 기후변화, 지속가능발전

ABSTRACT: Natural hydrogen has recently emerged as a promising energy source due to its environment-friendly and highly efficient potential as a fuel, attracting interest from various countries including Australia, Brazil, USA and many European countries for research and investigation. This paper aims to provide a deep exploration of the occurrence mechanism and distribution of natural hydrogen, including its underground existence, geological factors regulating underground distribution, geochemical processes, and mantle origin. To achieve this, we have synthesized research findings on natural hydrogen from high-quality research papers indexed in the international scholarly database, Web of Science. Through this process, our goal is to enhance our understanding of natural hydrogen as a viable energy option for addressing current electrical, geological, and climatic challenges and for a sustainable future.

Key words: natural hydrogen, geological condition, mantle origin, alternative energy, climate change, sustainable development

1. 서론

지속가능한 저탄소 에너지 미래로의 전환은 점점 하는 기후변화에 대한 대응과 적응을 위한 긴급한 세계적인 관심사이다(Lee, 2021; Lefeuvre *et al.*, 2021; Nielsen, 2021; Wang *et al.*, 2021; Lee *et al.*, 2022,

Song and Park, 2022). 온실가스 배출을 줄이고 기후 변화로 인한 문제를 해결해야 하는 필요성으로 인해 환경 친화적이면서 경제적으로 실행 가능한 대체 에너지원을 식별하는 것에 대한 관심이 높아지고 있으며 최근 몇 년 동안 자연 수소(natural hydrogen)가 청정에너지로서 유망 후보로 부상하고 있다

[‡]Corresponding author: +82-33-250-8551, E-mail: hydrolec@kangwon.ac.kr

(Prinzhofer *et al.*, 2018; Boreham *et al.*, 2021a; Frery *et al.*, 2021; Lefevre *et al.*, 2021; Mainson *et al.*, 2022). 지질학적(geogenic) 수소로도 알려진 자연 수소는 주로 지질학적 형성과 맨틀에서 지구의 지하에서 자연적으로 발생하는 수소 가스를 말하며(Zgonnik, 2020; Tian *et al.*, 2022; Etiopie, 2023), 산업 공정이나 전기 분해를 통해 생산되는 수소와는 구별된다. 수소는 높은 에너지 함량과 무배출 연소 가능성으로 인해 가치 있는 에너지 운반체로 널리 인식되고 있지만, 주류 에너지원으로서의 실행 가능성은 생산, 저장 및 분배와 관련된 문제로 인해 제한되어왔다. 그러나 최근의 연구와 발전은 자연 수소의 발생 기작과 분포를 밝혀내면서, 중요한 에너지원으로서의 잠재력에 대한 관심을 다시 불러일으키고 있다(Prinzhofer *et al.*, 2019; Boreham *et al.*, 2021a; Rezace, 2021; Tian *et al.*, 2022; Prinzhofer and Cacas-Stentz, 2023). 이 중요한 자원을 효과적으로 활용하기 위해서는 자연 수소를 발생시키는 지질학적, 지구화학적 과정을 이해하고 수소의 분포 패턴을 확인하는 것이 중요하다(Lefevre *et al.*, 2022).

이 논문은 잠재적인 에너지원으로서 자연 수소에 대한 포괄적이고 최신의 연구 결과를 검토하는데 목적이 있다. 기존에 알려진 지식과 연구 결과를 종합함으로써 수소의 지하 발생, 지질학적 기원, 수소의 형성에 관련된 지구화학적 과정, 그리고 분포 패턴에 대한 이해를 심화하고자 한다. 이러한 주요 이슈에 대한 검토를 통해 본 논문은 지질학, 지구화학 및

에너지 연구 분야 간의 격차를 해소하고 자연 수소에 대한 과학적 논의에 기여하고자 하였다. 특히 자연 수소의 발생 기작과 분포에 대한 전반적인 이해를 제공하여 향후 관련 의사 결정과 추가 연구를 촉진하는 것을 목표로 하였다. 궁극적으로 이 논문은 지속 가능한 에너지 전환에서 자연 수소의 역할에 대한 통찰력을 제공하고 청정에너지 기술의 미래 발전을 위한 길을 열어주면서 잠재적인 에너지원으로서의 자연 수소의 중요성을 강조하고자 하였다.

구체적으로 이 논문에서는 자연 수소의 발생 기작과 분포, 지질학적 기원, 포획 기작 및 침투 특성을 포함한 자연 수소의 지하 부존, 자연 수소의 생성과 안정성에 관련된 지구화학적 과정과 반응, 수소의 형성과 운송에서 맨틀의 역할, 자연 수소의 부존에 영향을 미치는 지질학적 구조 및 자연 수소의 세계적 분포, 자연 수소 광상을 확인하고 특성화하기 위해 사용되는 탐사 기술, 그리고 잠재적 에너지원으로 자연 수소 분야의 향후 연구 방향 등을 살펴보았다.

2. 연구 방법

자연 수소에 대한 지식과 연구 동향을 파악하기 위하여 강원대학교 도서관을 통해 Web of Science에 접속하였다(6월 5일 기준). Web of Science의 모든 분야에서 자연 수소(natural hydrogen)와 지질학(geology)을 AND로 검색하였다. 1993년부터 2023년 6월까지 총 1,024개의 논문이 검색되었다. 비교

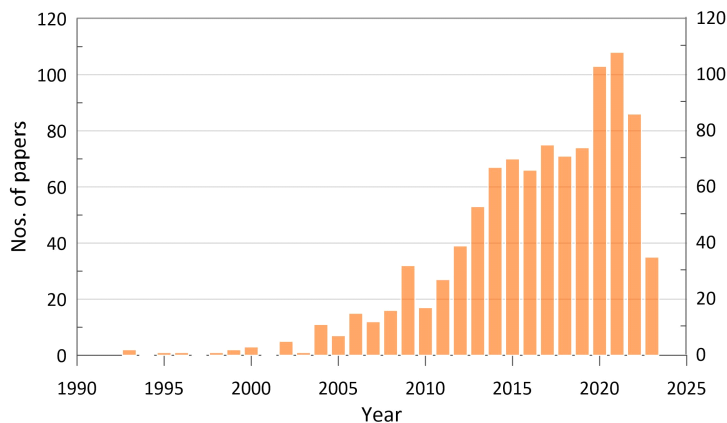


Fig. 1. Number of the papers regarding natural hydrogen, which were searched using co-occurrence of the terms 'natural hydrogen' and 'geology' in all fields of the papers in the Web of Science collection (total=1,024, period=1993 to 2023).

3. 결과 및 토론

3.1 자연 수소의 특성

3.1.1 정의와 특징

지질학적 수소라고 알려진 자연 수소는 지구의 지하와 지질학적 형성에서 자연적으로 발생하는 수소 가스를 말한다. 산업적으로 생산되는 수소나 전기 분해로부터 유래된 수소와 달리 자연 수소는 지구의 지각과 맨틀 안에서 지질학적, 지구화학적 과정을 통해 형성된다. 자연 수소는 주기율표에서 화학 기호 “H”로 표시되며 우주에서 가장 가볍고 풍부한 원소이다. 자연 수소는 일반적으로 두 개의 수소 원자가 공유 결합에 의해 결합된 이원자 분자(H₂)로 존재한다(Zgonnik, 2020). 수소 가스는 무색, 무취, 무미의 성질을 가지고 있어 특정한 기구 없이는 검출하기 어렵다. 수소 가스는 밀도가 매우 낮아 공기보다 약 14배 더 가벼워서 빠르게 상승하고 흩어질 수 있다. 자연 수소는 가연성이 높고 산소가 있는 곳에서 연소하여 수증기를 생성한다(Prinzhofer *et al.*, 2018). 그것은 연소를 위해 공기 중의 작은 농도만을 필요로 하는 광범위한 가연성 범위를 가지고

있다. 수소는 질량 대비 에너지 함량이 높아 매력적인 연료원이다. 연소 시 많은 양의 에너지를 방출하여 다양한 용도로 활용할 수 있다. 수소 가스의 연소는 부산물로 수증기만 생성하므로 온실가스 배출이 최소화된 청정 에너지원으로 연료로 사용될 때 대기 오염이나 기후 변화를 유발하지 않는다(Tarhan and Cil, 2021).

한편 수소 가스는 표준 온도 및 압력에서 기체 물질이지만 고압이나 극도로 낮은 온도에서는 액체 또는 고체 상태로 응축될 수 있다. 수소 가스는 물과 다른 액체에 거의 용해되지 않는다. 수소는 자연적으로 생성되는 세 가지 동위 원소인 경수소(¹H), 중수소(²H), 삼중수소(³H)를 가지고 있다(Ni *et al.*, 2011). 중수소와 삼중수소가 미량으로 존재하는 반면, 경수소가 가장 풍부하다. 수소의 동위 원소 변화는 지구 화학 연구에서 중요한 역할을 하며 자연 수소와 관련된 기원과 과정에 대한 깊은 통찰력을 제공할 수 있다.

3.1.2 환경적 중요성 및 에너지 잠재력

자연 수소의 환경적 중요성은 깨끗하고 지속 가

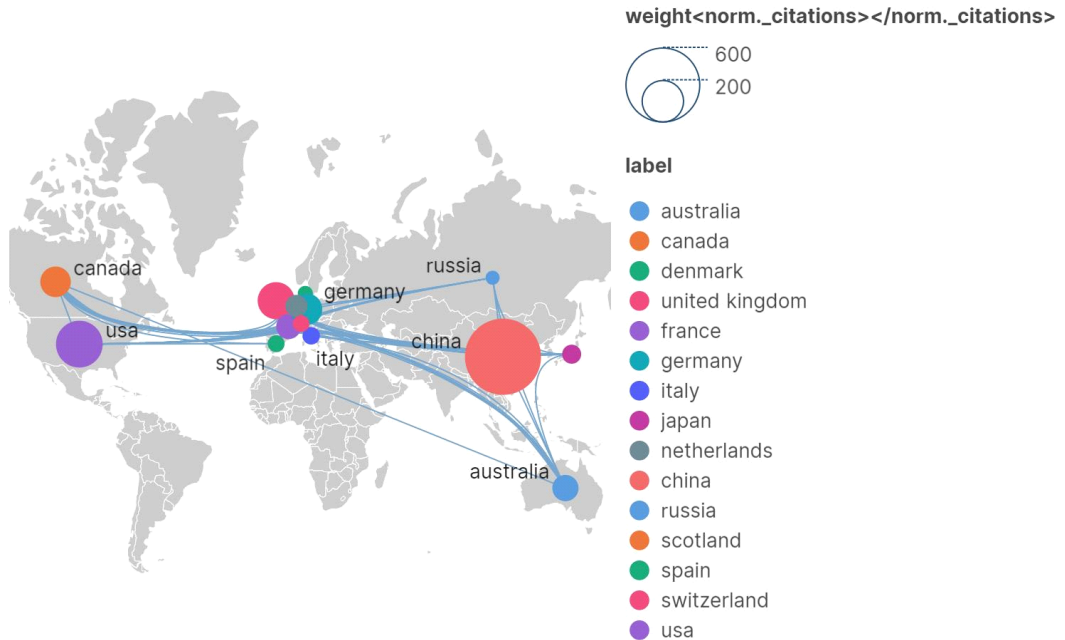


Fig. 3. Co-authorship of the papers regarding natural hydrogen, which were searched using co-occurrence of the terms ‘natural hydrogen’ and ‘geology’ in all fields of the papers in the Web of Science collection (total=1,024, period=1993 to 2023). Only top 15 countries are shown.

능한 에너지원으로서의 잠재력에 있다. 자연 수소를 이용하는 것은 환경에 여러 가지 긍정적인 영향을 미칠 수 있는데 가장 중요한 환경적 이점 중 하나는 온실가스 배출을 크게 줄일 수 있는 것이다. 연료로 사용될 때 수소 연소는 부산물로 수증기만을 생성하여 이산화탄소와 다른 유해한 오염 물질의 방출이 없는데 이는 기후 변화를 완화하고 대기질을 개선하는 데 기여할 수 있다(Milkov, 2022; Truche *et al.*, 2022). 또 자연 수소는 지질학적, 지구화학적 과정을 통해 지속적으로 생산될 수 있기 때문에 재생 자원으로 유한한 화석 연료에 대한 의존을 줄이는데 도움을 줄 수 있는 에너지원이다(Prinzhofer *et al.*, 2018; Rezaee, 2021).

자연 수소는 무게에 따른 에너지 함량이 높아 매력적인 에너지원이다. 연소될 때 수소는 높은 에너지 밀도를 제공하면서 많은 양의 에너지를 방출한다. 이 에너지는 발전, 운송 및 산업 공정을 포함한 다양한 응용 분야에 활용될 수 있다. 자연 수소는 광범위한 응용 분야에 전력을 공급할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 연료 전지 시스템에서 연료로 사용하여 고효율과 제로 배출로 전기를 생산할 수 있다. 연소 엔진, 터빈 및 기타 에너지 변환 장치에도 사용할 수 있다. 게다가, 수소는 화학적 생산과 정제를 포함한 다양한 산업 공정의 공급원이 될 수 있다.

자연 수소는 장기적인 에너지 안보를 달성하고 유한한 화석 연료 매장량에 대한 의존도를 줄이는 매력적인 선택이며 에너지 저장에 중요한 역할을 할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 다목적 에너지 운송자로서 에너지 생산 피크 기간 동안 발생한 과도한 재생 에너지를 저장하고 필요할 때 방출할 수 있다. 이는 재생 가능 에너지원의 간헐성을 극복하여 보다 신뢰성이 높고 안정적인 에너지 공급을 가능하게 한다(Baranes *et al.*, 2017). 자연 수소는 최소한의 수정으로 기존 에너지 시설에 통합될 수 있다. 기존의 천연가스 파이프라인, 저장 시설 및 유통 네트워크를 활용하여 광범위한 적용을 촉진할 수 있다. 이러한 확장성과 호환성은 자연 수소를 큰 시설 변경 없이 화석 연료 기반 시스템에서 청정 에너지원으로 전환할 수 있는 실행가능한 선택이 될 수 있다.

또 자연 수소를 에너지원으로 활용하면 에너지 독립성과 보안성을 높일 수 있다(Nuñez-Jimenez and De Blasio, 2022). 수입 화석 연료에 대한 의존도를

줄임으로써 국가의 에너지 자급률을 강화하고 에너지 자원과 관련된 지정학적 위험을 완화할 수 있다. 이는 에너지 공급망의 안정성과 복원력 향상으로 이어질 수 있다. 또한 자연 수소의 개발과 활용은 기술 발전을 촉진하고 연구 및 투자는 혁신, 비용 절감, 효율성 향상으로 이어질 수 있다. 이는 결국 에너지를 넘어 다른 부분과 동반하여 경제 성장을 담보할 수 있다. 자연 수소의 잠재력과 장점은 지속 가능성, 환경 보존 및 에너지 다양화에 상당한 이점을 제공하는 강력한 에너지원으로 자리매김할 수 있다(Panchenko *et al.*, 2023).

3.2 자연 수소 생성기작

3.2.1 생성기작

자연 수소 광상에서 수소의 생성은 사문암화작용(serpentinization), 방사선 분해(radiolysis), 암석 파쇄(rock fracturing) 및 마그마 가스분출(magma degassing) 등을 포함한 다양한 기작을 통해 발생할 수 있다(그림 4; Hao *et al.*, 2020; Klein *et al.*, 2020; Boreham *et al.*, 2021b; Lefevre *et al.*, 2021; Milkov, 2022; Etiope, 2023; Liu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2023). 이러한 프로세스는 지하 저류암에서 수소가 풍부한 유체의 생산 및 축적에 기여한다. 사문암화작용은 물이 있는 곳에서 특정 광물, 전형적으로 감람석이 풍부한 초고철질암의 변화를 포함하는 비생물학적 과정으로 사문암화 과정에서 물은 감람석 광물과 반응하여 사문석을 형성하고 부산물로 수소 가스(H_2)를 방출한다(Abrajano *et al.*, 1988; McCollom and Seewald, 2013; Truche *et al.*, 2020; Worman *et al.*, 2020; Zgonnik, 2020). 이 과정은 지열 시스템, 열수 분출구 및 해저 환경 등에서 발생하며 이런 사문암화작용은 상당한 양의 수소를 생성할 수 있으므로 자연 수소 광상에 관련된 기작이 될 수 있다(Etiope *et al.*, 2017).

방사선 분해는 감마선이나 우주선과 같은 이온화 방사선에 의해 물 분자(H_2O)가 분해되는 것을 말하며 고에너지 방사선은 물 분자를 구성 요소로 분해하여 부산물 중 하나로 수소 가스(H_2)를 생성할 수 있다(Boyd *et al.*, 1973; Dubessy *et al.*, 1989; Smith *et al.*, 2005; Dzaugis *et al.*, 2016; Bouquet *et al.*, 2017; Parnell and Blamey, 2017; Truche *et al.*, 2018; Zgonnik, 2020). 방사성 분해는 우라늄이나 토륨과

같은 방사성 원소를 포함하는 암석과 광물에서 발생할 수 있으며 이 기작은 방사능 붕괴와 고에너지 방사선이 존재하는 깊은 지하 환경에서 가장 널리 사용된다.

한편 암석 파쇄는 물과 반응하는 자유 라디칼을 생성하여 수소를 생성할 수 있다(Kita *et al.*, 1982; Wang *et al.*, 2023). 대체로 토양에서 고농도의 수소가 부존하는 것은 구조적 단층대에 많이 나타나며 이러한 것은 단층운동 시 암석의 압쇄(crushing)와 관련한 자유 라디칼의 형성과 깊은 연관이 있는 것으로 알려진다(Sato *et al.*, 1986). 그래서 이런 기작을 기계적 수소생성이라고도 하며 조산대, 섭입대, 변환단층대, 대륙 열곡(continental rift) 등에서 특징적으로 나타나는 단층에서 수소가 생성되며 고농도를 보인다(Wang *et al.*, 2023). 또 수소는 기본적으로 탄소-산소-수소로 된 마그마 시스템에 존재하는데 1,200°C에서는 물과 메탄 보다는 수소와 이산화탄소로의 화학균형이 보다 강력하며 중앙해령의 현무암에 비이상적으로 고농도의 수소 기체의 함유는 이와 관련된 것으로 추정한다(Hekinian *et al.*, 1973; Wang *et al.*, 2023).

사문암화작용, 방사성 분해, 암석 파쇄 및 마그마 가스분출을 포함한 이러한 수소 생성 기작은 자연 수소 광상의 형성 및 농축에 중요한 역할을 한다. 특정 지질학적 환경에서 이러한 기작과 그 기여율을 이해하는 것은 에너지 잠재력을 평가하고 대체 에너지원으로서 천연 수소의 실행 가능성을 탐구하는 데

중요하다. 추가적으로 이러한 기작과 관련된 미생물 군집, 지구화학적 조건 및 지질학적 과정을 연구하면 수소가 풍부한 유체의 생산과 축적으로 이어지는 복잡한 상호 작용에 대한 이해를 증진할 수 있다.

3.2.2 메탄-수소 공존 구역

메탄-수소 공존 구역은 지하 저류암에 메탄과 수소 가스가 공존하는 지하 저류층을 말하며 이러한 가스가 함께 존재하는 것은 다양한 생물학적 및 비생물학적 공정에서 발생할 수 있다(Truche *et al.*, 2020; Etiopie, 2023). 메탄-수소 공존 구역과 관련된 주요 과정은 다음과 같다. 우선 미생물학적 메탄생성반응(methanogenesis)으로 메탄생성균으로 알려진 미생물이 대사 부산물로 메탄을 생산하는 생물학적 과정이다. 메탄생성균은 습지, 동물의 소화관과 같이 산소 공급이 제한된 환경에서 번식하는 혐기성 유기체로 이러한 환경에서 메탄생성균은 유기물과 이산화탄소를 기질로 사용하여 메탄을 생성한다. 또 경우에 따라 메탄 생성 반응 과정 동안 중간체 또는 부산물로 수소 가스를 생산할 수 있다. 메탄-수소 공존 구역은 메탄생성세균이 활성화되고 메탄과 수소가 동시에 생성되는 지역에서 발생할 수 있다.

3.2.3 맨틀 유래 수소

지구 내부의 중요한 부분을 구성하는 맨틀은 수소의 생성과 방출에 결정적인 역할을 하며 지구의 지각 아래에 위치한 맨틀은 물을 함유한 광물과 같

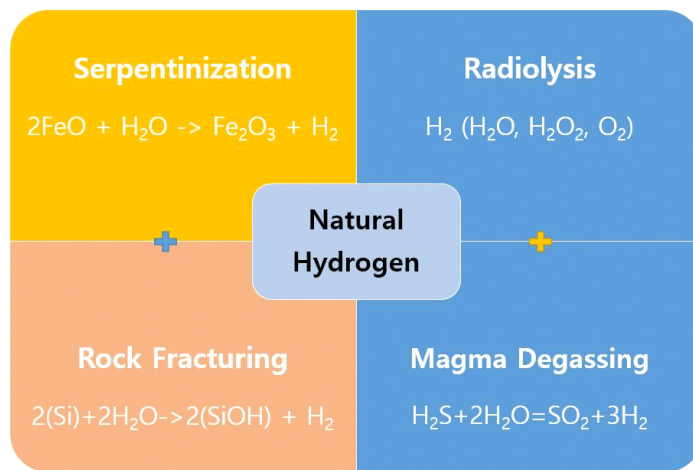


Fig. 4. Main sources or mechanisms of natural hydrogen generation. Modified from Wang *et al.* (2023).

은 수소를 함유한 광물이 풍부하다(Gilat and Vol, 2012; Ohtani, 2020). 이 광물들은 지구 내부에서 수소의 저류암 역할을 할 수 있다. 맨틀에 있는 수소의 정확한 양은 여전히 연구와 논쟁의 주제이지만 실험 및 지구화학 연구에 따르면 맨틀은 상당한 양의 수소를 포함할 수 있으며, 갑판석, 휘석 및 운모와 같은 광물에 포함된 물(H₂O) 또는 수산기(-OH)의 형태일 수 있다(Williams and Hemley, 2001). 맨틀에 있는 물과 수분이 풍부한 광물의 존재는 수소가 풍부한 유체의 생성을 위한 잠재적인 원천이 될 수 있다(Guillot and Hattori, 2013).

한편 맨틀 대류와 판 구조론을 포함한 맨틀 역학은 지구 내부의 물질의 수송과 순환에 중요한 역할을 한다. 하나의 지각판이 다른 지각판 아래로 가라앉는 섭입대를 통한 암석과 광물의 이동과 재순환은 수소를 함유한 광물과 유체의 재분배에 기여하며 섭입대는 수소 방출을 위한 중요한 장소이다(Evans *et al.*, 2017). 이 지역의 높은 온도와 압력은 탈수와 변성과 같은 과정을 통해 수분 광물로부터 수소를 분해하고 방출할 수 있기 때문이다. 가스 방출은 수소를 포함한 가스가 지구 내부에서 대기로 방출되는 것을 말한다. 화산 폭발 및 열수계와 같은 화산 활동은 가스 방출의 주요 기작이다. 녹은 암석이 맨틀에서 지구 표면으로 상승할 때 수소를 포함한 용해된 휘발성 물질을 함께 운반할 수 있다. 화산 폭발 동안, 이 휘발성 물질들은 화산 가스와 함께 대기로 방출된다. 지구의 지각을 통해 뜨거운 유체의 순환을 포함하는 열수계는 또한 수소가 풍부한 유체도 방출할 수 있다. 이 유체들은 맨틀에서 비롯될 수도 있고 보다 깊은 지구에서 유래된 수소를 운반할 수 있다(Liu *et al.*, 2023).

그러나 자연 수소의 심부 지구 기원은 여전히 연구되고 있으며 많은 의문점들이 풀리지 않고 있다. 지구화학 분석, 실험실 실험 그리고 수치 모델링을 포함한 다양한 기술을 사용하여 맨틀에 있는 수소의 양, 분포 및 거동과 자연 수소 광상에 대한 수소의 기여를 이해하고자 노력하고 있다(Liu *et al.*, 2023).

3.3 자연 수소의 지질학적 부존 특성

3.3.1 지하수소 저류층

자연 수소를 배태하는 저류암에는 탄화수소 저류암, 맨틀, 대수층, 석탄 광상, 심해 퇴적물 등을 들 수

있다. 우선 석유 및 천연가스전과 같은 탄화수소 저류암은 함께 만들어진 구성 요소로서 자연 수소를 포함할 수 있다(Smith *et al.*, 2005). 수소는 용해된 가스로 존재하거나 저류암 내에 갇혀 있을 수 있으며, 종종 석유 또는 가스 광상과 수반한다(Donzé *et al.*, 2020). 이 저류암들은 자연 수소의 잠재적인 공급원으로 인식되어 왔으며, 이들의 탐사와 생산 활동은 수소가 풍부한 자원의 확인과 활용을 위한 좋은 기회를 제공한다(Meju and Saleh, 2023).

한편 지구의 맨틀, 특히 상부 맨틀과 하부 맨틀 사이의 전이 영역은 자연 수소의 잠재적인 공급원으로 여겨진다(Demouchy and Bolfan-Casanova, 2016; Moine *et al.*, 2020). 사문암화작용 및 물-암석 반응과 같은 심부 지구 과정은 부산물로서 수소를 생성할 수 있다(Neal and Stanger, 1983; Hao *et al.*, 2020; Lefevre *et al.*, 2021; Truche *et al.*, 2022). 또 화산 활동, 지열 시스템, 다른 지질학적 과정을 통해 맨틀에서 수소의 방출은 지하에서 자연 수소의 발생에 기여할 수 있다(Combaudon *et al.*, 2022). 특정 대수층과 지열 시스템은 상당한 양의 자연 수소를 포함할 수 있다. 이러한 지하 저류암은 종종 단열 구간 형성이나 높은 물-암석 상호 작용 구역과 같은 유리한 지질 조건을 가지고 있어 수소의 생성과 축적을 용이하게 한다. 또 대수층과 지열 시스템에서 수소의 존재는 미생물 활동, 물-암석 상호 작용 또는 지열 활동과 같은 과정과 연관될 수 있다(Gregory *et al.*, 2019).

또 석탄 및 석탄층 메탄 광상은 자연 수소를 위한 지하 저류암 역할을 할 수 있다(Goraya *et al.*, 2019). 이러한 광상은 석탄 기질에 흡착된 수소 가스를 포함하거나 균열 및 기공 공간 내에 자유 가스로 존재할 수 있다. 석탄과 물 사이의 상호작용은 석탄 가스화 또는 미생물 공정을 통해 수소를 방출할 수 있으며, 그 결과 석탄 및 석탄층 메탄 저류암 내에서 자연 수소가 발생할 수 있다(Su *et al.*, 2018). 열수 시스템은 균열과 다공성 암석을 통해 순환하는 뜨거운 물로 특징지어지며 자연 수소 저류암으로 수용할 수 있다. 수소가 풍부한 유체는 특히 화산 활동이나 지열 활동이 활발한 지역에서 물-암석의 상호작용을 통해 생성될 수 있다. 이러한 유체는 지하 저류암에 축적되어 자연 수소의 잠재적인 공급원을 제공할 수 있다.

한편 심해 퇴적물이나 지하 환경 같은 심부 지하

에 있는 미생물 군집은 대사 과정의 일부로 수소를 생산하고 소비할 수 있다(Krumholz, 2000). 이러한 미생물 활동은 수소가 풍부한 지하 저류층의 형성과 유지에 기여할 수 있다. 수소 생산과 소비에 관련된 미생물 과정을 이해하는 것은 지하에서 자연 수소의 발생과 분포를 평가하는 데 중요하다. 지하 저류층에 자연 수소의 발생과 분포는 암석학, 유체-암석 상호 작용, 온도, 압력 및 전구체 물질의 가용성과 같은 지질학적, 지구 화학적 요인에 따라 달라질 수 있다는 점에 유의해야 한다. 이러한 지하 수소 저류층의 탐사와 특성화는 자연 수소의 잠재적인 근원을 식별하고 추출 및 활용을 위한 효과적인 전략을 고안하는 데 필수적이다.

3.3.2 지질학적 제어

한편 지하에서 자연 수소의 발생과 분포는 다양한 지질학적 제어(control)에 영향을 받으며 이러한 제어는 수소가 충분한 유체의 형성, 저장 및 이동에 중요한 역할을 한다(Lollar *et al.*, 2007; McMahan *et al.*, 2023). 자연 수소의 주요 지질학적 제어 중 일부는 다음과 같다. 우선 적절한 근원암의 존재는 자연 수소 생성을 위한 기본적인 지질학적 제어로 셰일이나 석탄과 같은 유기물이 풍부한 근원암은 열성숙, 진단 또는 미생물 활동과 같은 과정을 거쳐 부산물로 수소를 생산할 수 있다(Rezaee, 2021). 근원암의 유기적으로 풍부한 구성과 지질학적 역사가 그들의 수소 생성 잠재력을 결정한다. 저류암은 수소가 풍부한 유체를 저장할 수 있는 용량을 제공하는 데 사암이나 균열된 층과 같은 다공성 및 투과성 저류암은 자연 수소의 축적 및 저장에 유리하다(Rezaee, 2021). 상호 연결된 기공 공간 또는 균열의 존재는 수소 가스가 이동하여 지하 표면에 축적되어 저장소를 형성할 수 있도록 한다.

또 지질학적 포획 기작은 자연 수소의 보존과 축적에 매우 중요하다. 이러한 기작은 수소 가스의 상향 이동 및 탈출을 방지하여 지하 저류층 내에 축적될 수 있도록 한다(Hao *et al.*, 2020; Lodhia and Clark, 2022). 포획(trap)에는 단층대에 수소가 풍부한 유체의 국부적 축적을 생성하는 불균일성 또는 밀봉형성과 같은 구조적 특징이 포함될 수 있다. 단층, 균열 또는 투수성 단열과 같은 유체 경로의 존재는 자연 수소의 이동 및 분포에 중요한 역할을 한다

(Lefevre *et al.*, 2021). 이러한 경로는 수소가 풍부한 유체가 지하를 통과하여 이동할 수 있는 통로를 제공하여 국부적인 저류층을 형성할 수 있다. 또 이러한 경로의 상호 연결성과 투과성은 수소의 공간 분포와 이동을 제어한다(Donzé *et al.*, 2020).

한편 지하 환경에서 일어나는 지구화학 반응은 자연 수소의 생성, 보존 및 변환에 영향을 미칠 수 있는데 물-암석 상호작용, 사문암화작용 또는 미생물 활동과 같은 과정은 부산물로 수소를 생성할 수 있다(Gaucher, 2020). 지구화학 반응과 수소 생성에 유리한 조건을 이해하는 것은 잠재적인 저류층을 식별하는데 필수적이다. 어떤 지역의 구조적 그리고 열적 역사는 자연 수소의 발생에 영향을 미칠 수 있다. 판 섭입, 열곡대 또는 화산 활동과 같은 구조적 과정은 수소 생성과 축적에 도움이 되는 조건을 만들 수 있다(Vacquand *et al.*, 2018; Hao *et al.*, 2020). 또 열적 과정은 지하의 수소가 풍부한 유체의 안정성과 보존에 영향을 미칠 수 있으며 지하수 흐름, 유체 압력 구배 또는 물-암석 상호 작용을 포함한 수리 지질학적 체계는 자연 수소의 발생 및 분포에 영향을 미칠 수 있다. 지하수 순환은 수소가 풍부한 유체의 수송을 촉진하고 지하 저류암의 형성에 영향을 주며 수소 유체와 주변 암석 형성 사이의 상호 작용을 통해 자연 수소의 지구화학적 과정과 안정성에 영향을 미칠 수 있다(Frey *et al.*, 2021). 자연 수소의 지질학적 제어를 이해하는 것은 탐사 가능한 지역을 식별하고 수소 축적 가능성을 평가하는데 매우 중요하다.

3.3.3 삼투와 지표 배출

수소 방출은 삼투(seepage) 및 지표 배출을 통해 발생할 수 있으며 이를 통해 대기 또는 표면 근처 환경으로 수소 가스를 방출하게 된다. 이러한 배출은 다양한 지질학적 과정과 저류암에서 발생할 수 있다(McMahon *et al.*, 2023). 자연 수소가 스며 나오는 곳은 지하 저류암에서 수소 가스가 자연스럽게 빠져나가 지표면에 도달하는 지역이다. 이러한 스며 나오는 곳은 석유분지, 지열 지역 또는 미생물 활동이 많은 지역을 포함한 다양한 지질학적 환경에서 발생할 수 있다(Vacquand *et al.*, 2018). 수소 가스의 누출은 종종 가스 이동 경로를 제공하는 단층, 균열 또는 투수성 암석 형성과 관련이 있다(Hao *et al.*, 2020).

한편 특정 지질학적 환경에서 수소의 삼투 및 지표 배출은 황화수소 가스의 방출을 동반할 수 있다. 황화수소는 종종 미생물 활동, 황산염 감소 또는 탄화수소 분해와 같은 지질학적 과정을 통해 수소와 함께 생산된다(Marriott *et al.*, 2015). 황화수소 배출물은 뚜렷한 냄새와 독성을 가질 수 있다. 수소 배출과 관련된 지표 배출은 지질학적 조건에 따라 달라질 수 있는데 어떤 경우에는 수소 가스가 물속에 가시적인 가스 누출로 인한 기포를 형성하여 거품이나 뚜렷한 가스 플럼을 생성할 수 있다. 이러한 발현은 호수, 강 또는 해안 지역에서 관찰될 수 있으며(Chavagnac *et al.*, 2013), 또한 수소 가스는 식물의 식생 패턴의 변화나 식물의 황화수소의 존재와 같은 토양 이상을 야기할 수 있다(Lefevre *et al.*, 2021; Moretti *et al.*, 2022).

수소 방출은 수소가 풍부한 액체가 해저에서 물 기둥으로 스며드는 해양 환경에서도 발생할 수 있으며 해저 수소 삼투는 열수 분출구, 차가운 삼투 또는 진흙 화산과 같은 지질학적 특징과 관련이 있다(Smith *et al.*, 2005; Vacquand *et al.*, 2018). 이 유출수는 다른 액체와 미네랄과 함께 수소 가스를 방출하여 심해 생태계의 화학적 구성과 역학에 기여할 수도 있다. 모니터링 및 탐사 기술은 수소 방출을 식별하고 평가하는데 중요한 역할을 한다. 현장 조사, 가스 샘플링 및 분석, 원격 감지 기술 및 동위 원소 분석을 포함한 다양한 방법이 사용될 수 있다. 이러한 기술을 통해 삼투 영역의 식별, 수소 배출의 정량화 및 잠재적인 환경 영향 평가가 가능하다.

3.4 자연 수소의 분포와 탐사

3.4.1 세계적 분포

전 세계적으로 자연 수소 광상의 분포는 지질학적 및 구조지질학적 제어의 영향을 받아 지역적인 편재를 나타낸다(Nivin, 2019). 이러한 지질학적 제어는 세계의 여러 지역에서 자연 수소 광상의 발생, 양, 그리고 특성을 결정하는데, 고농도 지역(hotspot)이라고 불리는 특정 지역에서 더 높은 농도와 더 많은 자연 수소 매장량을 보인다(Hao *et al.*, 2020; Zgonnik, 2020). 이러한 고농도 지역은 특정 지질학적 조건 및 구조적 환경과 관련이 있다. 예를 들어 유기물이 풍부한 근원암이 있으면서 유리한 포획 조건이 있는 경우 수소가 풍부한 유체의 생성과 보존을 촉진하여

많은 자연 수소 광상이 발견된다(Larin *et al.*, 2015; Zgonnik *et al.*, 2015; Suzuki *et al.*, 2017; Mahlstedt *et al.*, 2022). 멕시코만, 북해, 카스피해와 같이 광범위한 퇴적 분지가 있는 지역은 상당한 자연 수소 발생으로 알려져 있다(Mahlstedt *et al.*, 2022).

또 마그마가 상승하여 새로운 해양지각이 형성되는 중앙해령이나 하나의 지각판이 다른 지각판 아래로 가라앉는 섭입대는 자연 수소의 농도가 상당히 높은 지역이다(Arrouvel and Prinzhofer, 2021; Pasquet *et al.*, 2021; Combaudon *et al.*, 2022; Moretti *et al.*, 2022). 환태평양 화산대를 포함한 이 지역들은 강력한 지각 활동, 활화산 활동, 그리고 유체가 풍부한 환경으로 특징지어진다. 물이 풍부한 광물의 섭입과 섭입 관련 과정에서의 휘발성 방출은 수소가 풍부한 유체의 형성에 기여한다. 지열 지역과 화산 지역은 마그마 시스템과 지구 지각 사이의 상호 작용으로 인해 종종 높은 농도의 자연 수소를 보인다. 아이슬란드, 캄차카, 뉴질랜드의 타우포 화산 지대와 같이 활화산 또는 휴화산이 있는 지역은 수소가 풍부한 유체와 징후가 있는 것으로 알려져 있다(Combaudon *et al.*, 2022).

상기 판구조적인 고농도 지역 외에도 광범위한 분포 패턴에서 벗어나는 지역적 이상 농도를 보이는 자연 수소 광상이 있을 수 있다(Deville and Prinzhofer, 2016; Lefevre *et al.*, 2021; Geymond *et al.*, 2022). 이러한 이상 현상은 국지적인 지질학적 및 구조학적 요인에 의해 영향을 받을 수 있다. 그것들은 단층대, 균열 암석 또는 수소가 풍부한 유체의 보존과 축적을 향상시키는 특정한 암석과 같은 독특한 지질학적 특징을 가진 지역에서 발생할 수 있다(Murray *et al.*, 2020; Boreham *et al.*, 2021b; Truche *et al.*, 2021; Geymond *et al.*, 2022). 특히 저류암의 종류와 특성은 자연 수소의 저장과 이동에 결정적인 역할을 한다. 사암 또는 균열이 있는 암석과 같은 다공성 및 투수성 암석은 수소 축적 및 유체 이동에 유리한 저장소를 제공하며 판 경계, 균열 구역 또는 지열 구배가 높은 지역을 포함한 구조적 조건은 자연 수소의 발생에 상당한 영향을 미친다(Welhan and Craig, 1979; Charlou *et al.*, 2002; Marcaillou *et al.*, 2011).

3.4.2 탐사 및 조사 기술

한편 자연 수소 광상을 탐사하기 위해서는 수소

가 풍부한 유체의 존재, 분포 및 특성을 평가하기 위한 다양한 기술의 조합이 필요하다. 이러한 기술은 지구화학적 방법과 지구물리학적 방법뿐만 아니라 원격 탐지 기술을 모두 포함한다(Prinzhofer *et al.*, 2019; Moretti *et al.*, 2022; Kremer *et al.*, 2023). 여기서는 자연 수소에 대해 일반적으로 사용되는 탐사 기술과 조사를 살펴보았다.

지구화학적인 방법으로는 지표의 방출, 샘 또는 우물에서 물과 가스 시료를 수집하고 분석하면 수소의 존재와 그 동위원소 구성에 대한 귀중한 정보를 알 수 있으며 중수소, 삼중수소와 같은 수소 동위원소를 측정하여 수소가 풍부한 유체의 기원과 근원을 식별할 수 있다(Suda *et al.*, 2014; Feldbusch *et al.*, 2018; Hao *et al.*, 2020). 또한 토양 가스 샘플링은 특수 기술을 사용하여 지하에서 가스 샘플을 수집하는 것을 포함한다. 또 토양 가스 조사(^{222}Rn , He, H₂, CH₄, N₂, O₂, H₂S, CO₂ 등)는 잠재적인 지하 수소 저류층 또는 누출 구역을 나타내는 수소 농도가 높은 지역을 식별하는 데 도움이 될 수 있다(Zgonnik *et al.*, 2015; Prinzhofer *et al.*, 2019; Hao *et al.*, 2020; Lefevre *et al.*, 2021; Frery *et al.*, 2022; Mainson *et al.*, 2022). 탄소의 안정 동위원소 분석은 자연 수소와 관련된 기원, 진화 및 지구화학적 과정에 대한 통찰력을 제공하며 수소와 다른 원소 또는 화합물 사이의 안정적인 동위원소 비율을 비교하면 수소 생성 및 이동과 관련된 근원과 과정을 해결하는 데 도움이 된다.

한편 지구물리탐사 방법 중 중력 조사는 지표면 아래 밀도 변화를 지도화하기 위해 지구 중력장의 변화를 측정한다. 수소가 풍부한 유체는 지하 암석의 밀도에 영향을 미쳐 중력 이상을 초래할 수 있다. 중력 조사는 잠재적인 수소 저류암 또는 이동 경로를 설명하는 데 도움이 될 수 있다(Boreham *et al.*, 2021a). 또 자기 조사는 지표면 아래의 암석과 광물에 의해 야기된 지구 자기장의 변화를 감지한다(García-Senz *et al.*, 2021). 자철석과 같은 수소가 풍부한 유체와 관련된 특정 광물은 자기 이상을 생성할 수 있다. 그러므로 자기 조사는 잠재적인 수소 함유 광물 또는 열수계가 있는 지역을 식별하는 데 도움이 될 수 있다. 탄성과 탐사는 제어된 에너지원과 수신기를 사용하여 지하 구조물의 상세한 이미지를 생성한다. 이러한 조사는 수소가 풍부한 유체를 포함할 수 있는 균열, 단층 및 저류암 구조를 식별하는 데 도움

이 된다. 또한 탄성과 탐사 데이터는 지하 수소 저류암의 깊이, 기하학적 구조 및 범위에 대한 정보를 제공할 수 있다.

이러한 탐사 기술과 조사는 종종 자연 수소의 지표면 아래 분포에 대한 포괄적인 이해를 얻기 위해 함께 적용된다. 지구화학적, 지구 물리적 및 원격 탐사 방법의 데이터를 통합하면 추가 탐사 및 자원 평가를 위한 잠재적 영역을 식별할 수 있다. 또한 기술과 인공지능 등의 데이터 통합의 기술의 발전은 자연 수소 탐사의 효과와 효율성을 지속적으로 향상시키고 있다.

4. 결론 및 향후 연구

본 논문에서는 최근 기후변화에 대처할 수 있는 청정에너지 자원으로 관심을 모으고 있는 지구 내부의 자연 수소에 대하여 알아보았다. 자연 수소는 탄소 중립적이고 지속 가능한 에너지 옵션을 제공하기 때문에 환경적으로 중요한 잠재적 에너지원이 될 수 있다. 지하 수소 저류층은 퇴적 분지, 단층대, 균열 암석, 화성 및 변성 환경을 포함한 다양한 지질학적 환경에서 발견된다. 저류층 기하학, 구조지질학적 환경, 수리지질학적 조건과 같은 지질학적 제어는 자연 수소의 발생과 분포에 결정적인 역할을 한다. 삼투 및 지표면 유출을 통한 수소 방출은 자연 수소 광상의 탐사 및 식별에 귀중한 지표를 제공한다. 한편 메탄-수소 공존 구역과 같은 생물학적 및 비생물학적 과정과 사문암화작용과 같은 수소 생성 기작은 자연 수소의 형성 및 방출에 기여한다. 한편 맨틀 및 맨틀 역학에서의 양과 가스 방출을 포함한 수소의 심부 지구 기원은 자연 수소의 세계적인 분포와 발생에 기여하고 있다. 섭입대, 활화산, 해령과 같은 맨틀 관련 과정은 자연 수소의 형성과 방출과 깊은 관련이 있다.

한편 맨틀 상승류, 용기 및 지각으로의 이동을 포함한 운송 기작은 심부 지구 근원에서 지표면으로 자연 수소의 이동과 분배에 중요한 역할을 한다. 자연 수소의 세계적인 분포 패턴은 지질학적 및 구조 지질학적 제어의 영향을 받아 국지적으로 고농도 지역과 이상 분포를 보인다. 원격 감지 기술뿐만 아니라 지구화학 및 지구물리학 방법을 포함한 탐사 기술과 조사가 자연 수소 광상을 식별하고 특성화하기

위해 사용될 수 있다. 한편 수소는 에너지원으로서 높은 에너지 밀도, 다용성 및 연료 전지 기술 및 다양한 산업 분야에서의 잠재적 응용과 같은 이점을 제공한다. 그러나 수소를 에너지원으로 지속적으로 활용하기 위해서는 탄소 중립성, 생태계에 미치는 영향, 수질 등 환경적 고려가 필요하다. 또 에너지원으로서 자연 수소의 광범위한 채택을 위해서는 추출 및 저장 기술, 비용 효율성 및 기본 시설 개발을 포함한 기술 및 경제성이 필수적이다.

이런 관점에서 향후 연구 방향은 다음과 같이 중점을 둘 수 있다. 1) 심부 지구 기원과 지질학적 제어를 포함하여 개발되지 않은 자연 수소 자원을 탐색하고 특성화하는 것, 2) 자연 수소 매장량을 보다 정확하게 확인하고 평가하는 탐사 기술 및 조사 기술의 향상, 3) 자연 수소 분야의 연구 개발을 가속화하기 위한 학제 간 협업 및 지식 공유 촉진 등이다.

자연 수소는 잠재적인 에너지원으로서 상당한 가능성을 가지고 있으며, 잠재력을 최대한 발휘하고 깨끗하고 지속 가능한 에너지 미래에 기여하기 위해서는 추가 연구, 기술 발전 및 지속 가능한 실천이 필요하다. 본 리뷰 논문은 자연 수소의 발생, 관련 기작 및 분포를 검토함으로써 지속 가능한 에너지원으로서의 잠재력에 대한 가능성을 보여주었다. 특히 지하 환경과 맨틀에서 자연 수소의 형성과 저장에 관련된 지질학적 및 지구 화학적 과정을 이해하는 것은 효율적인 추출 및 활용을 위해 매우 중요하다. 또한 이 논문이 청정 미래에너지를 위한 자연 수소의 잠재력을 최대한 발휘하는 계기가 되기를 기대한다.

감사의 글

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2021R1F1A1064027). 또한 본 논문은 2022년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2019R1A6A1A03033167). 두 분의 심사위원님과 편집위원님의 건설적인 조언에 감사드립니다.

REFERENCES

- Abrajano, T.A., Sturchio, N.C., Bohlke, J.K., Lyon, G.L., Poreda, R.J. and Stevens, C.M., 1988, Methane-hydrogen gas sppes, Zambales ophiolite, Philippines: Deep or shallow origin?. *Chemical Geology*, 71, 211-222.
- Amirthan, T. and Perera, M.S.A., 2023, Underground hydrogen storage in Australia: A review on the feasibility of geological sites. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 4300-4328.
- Arrouvel, C. and Prinzhofer, A., 2021, Genesis of natural hydrogen: new insights from thermodynamic simulations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 18780-18794.
- Baranes, E., Jacqmin, J. and Poudou, J.-C., 2017, Non-renewable and intermittent renewable energy sources: Friends and foes?. *Energy Policy*, 111, 58-67.
- Boreham, C.J., Edwards, D.S., Czado, K., Rollet, N., Wang, L., van der Wielen, S., Champion, D., Blewett, R., Feitz, A. and Henson, P.A., 2021a, Hydrogen in Australian natural gas: occurrences, sources and resources. *The APPEA Journal*, 61, 163-191.
- Boreham, C.J., Sohn, J.H., Cox, N., Williams, J., Hong, Z. and Kendrick, M.A., 2021b, Hydrogen and hydrocarbons associated with the Neoproterozoic frog's Leg Gold Camp, Yilgarn craton, western Australia. *Chemical Geology*, 575, 120098.
- Bouquet, A., Glein, C.R., Wyrick, D. and Waite, J.H., 2017, Alternative energy: production of H₂ by radiolysis of water in the rocky cores of icy bodies. *The Astrophysical Journal Letters*, 840, L8.
- Boyd, A.W., Willis, C. and Miller, O.A., 1973, The radiolysis of water vapor at very high dose rates. I. hydrogen yields from H₂O, H₂O-HCl, and H₂O-HBr mixtures. *Canadian Journal of Chemistry*, 51, 4048-4055.
- Charlou, J.L., Donval, J.P., Fouquet, Y., Jean-Baptiste, P. and Holm, N., 2002, Geochemistry of high H₂ and CH₄ vent fluids issuing from ultramafic rocks at the Rainbow hydrothermal field (36° 14'N, MAR). *Chemical Geology*, 191, 345-359.
- Chavagnac, V., Monnin, C., Ceuleneer, G., Boulart, C. and Hoareau, G., 2013, Characterization of hyperalkaline fluids produced by low-temperature serpentinization of mantle peridotites in the Oman and Ligurian ophiolites: Hyperalkaline Waters in Oman and Liguria. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14, 2496-2522.
- Combaudon, V., Moretti, I., Kleine, B.I. and Stefansson, A., 2022, Hydrogen emissions from hydrothermal fields in Iceland and comparison with the Mid-Atlantic Ridge. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 10217-10227.
- Demouchy, S. and Bolfan-Casanova, N., 2016, Distribution and transport of hydrogen in the lithospheric mantle: A review. *Lithos*, 240-243, 402-425.
- Deville, E. and Prinzhofer, A., 2016, The origin of N₂-H₂-CH₄-rich natural gas seepages in ophiolitic context: a

- major and noble gases study of fluid seepages in New Caledonia. *Chemical Geology*, 440, 139-147.
- Donzé, F.V., Truche, L., Namin, P.S., Lefeuvre, N. and Bazarkina, E., 2020, Migration of natural hydrogen from deep-seated sources in the São Francisco Basin, Brazil. *Geosciences*, 10, 346.
- Dubessy, J., Poty, B. and Ramboz, C., 1989, Advances in C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluid inclusions. *European Journal of Mineralogy*, 1, 517-534.
- Dzaugis, M.E., Spivack, A.J., Dunlea, A.G., Murray, R.W. and D'Hondt, S., 2016, Radiolytic hydrogen production in the seafloor basaltic aquifer. *Frontiers in Microbiology*, 7, 76.
- 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. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 9172-9184.
- Etiopie, G., Samardžić, N., Grassa, F., Hrvatović, H., Miošić, N. and Skopljak, F., 2017, Methane and hydrogen in hyperalkaline groundwaters of the serpentinized Dinaride ophiolite belt, Bosnia and Herzegovina. *Applied Geochemistry*, 84, 286-296.
- Evans, K.A., Reddy, S.M., Tomkins, A.G., Crossley, R.J. and Frost, B.R., 2017, Effects of geodynamic setting on the redox state of fluids released by subducted mantle lithosphere. *Lithos*, 278-281, 26-42.
- Feldbusch, E., Wiersberg, T., Zimmer, M. and Regenspurg, S., 2018, Origin of gases from the geothermal reservoir Groß Schönebeck (North German Basin). *Geothermics*, 71, 357-368.
- Frery, E., Langhi, L., Maison, M. and Moretti, I., 2021, Natural hydrogen seeps identified in the North Perth Basin, Western Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 31158-31173.
- Frery, E., Langhi, L. and Markov, J., 2022, Natural hydrogen exploration in Australia - state of knowledge and presentation of a case study. *The APPEA Journal*, 62, 223-234.
- García-Senz, J., Pedrera, A., Ayala, C., Ruiz-Constán, A., Robador, A. and Rodríguez-Fernández, L.R., 2020, Inversion of the north Iberian hyperextended margin: The role of exhumed mantle indentation during continental collision. *Geological Society, London, Special Publications*, 490, 177-198.
- Gaucher, E.C., 2020, New perspectives in the industrial exploration for native hydrogen. *Elements*, 16, 8-9.
- Geymond, U., Ramanaidou, E., Lévy, D., Ouaya, A. and Moretti, I., 2022, Can Weathering of banded iron formations generate natural hydrogen? Evidence from Australia, Brazil and South Africa. *Minerals*, 12, 163.
- Gilat, A.L. and Vol, A., 2012, Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geoscience Frontiers*, 3, 911-921.
- Gojara, N.S., Rajpoot, N. and Sivagnanam, B.M., 2019, Coal Bed Methane Enhancement Techniques: A Review. *ChemistrySelect*, 4, 3585-3601.
- Gregory, S.P., Barnett, M.J., Field, L.P. and Milodowski, A.E., 2019, Subsurface microbial hydrogen cycling: Natural occurrence and implications for industry. *Microorganisms*, 7, 53.
- Guillot, S. and Hattori, K., 2013, Serpentinites: Essential roles in geodynamics, arc volcanism, sustainable development, and the origin of life. *Elements*, 9, 95-98.
- Hao, Y., Pang, Z., Tian, J., Wang, Y., Li, Z., Li, L. and Xing, L., 2020, Origin and evolution of hydrogen-rich gas discharges from a hot spring in the eastern coastal area of China. *Chemical Geology*, 538, 119477.
- Hekinian, R., Chaigneau, M. and Cheminee, J.J., 1973, Popping rocks and lava tubes from the Mid-Atlantic Rift Valley at 36 °N. *Nature*, 245, 371-373.
- Kita, I., Matsuo, S. and Wakita, H., 1982, H₂ generation by reaction between H₂O and crushed rock: An experimental study on H₂ degassing from the active fault zone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 87, 10789-10795.
- Klein, F., Tarnas, J. and Bach, W., 2020, Abiotic sources of molecular hydrogen on Earth. *Elements*, 16, 19-24.
- Kremer, T., Ars, J., Laine, C., Mouquet, P., Peignard, L., Lenir, I. and Voisin, C., 2023, A new passive seismic monitoring strategy for the exploration of natural Hydrogen and Helium occurrences. 84th EAGE Annual Conference & Exhibition, June 2023, p. 1-5.
- Krumholz, L.R., 2000, Microbial communities in the deep subsurface. *Hydrogeology Journal*, 8, 4-10.
- Larin, N., Zgonnik, V., Rodina, S., Deville, E., Prinzhofer, A. and Larin, V.A., 2015, Natural molecular hydrogen seepages associated with surficial, rounded depression on the European craton in Russia. *Natural Resources Research*, 24, 363-383.
- Lee, J.Y., 2021, Role of geological sciences in the era of climate, energy and environment crises. *Journal of the Geological Society of Korea*, 57, 761-763 (in Korean).
- Lee, J.Y., Kim, H., Finney, S. and Pereira, M.D., 2022, Geological themes in need of more attention. *Episodes*, 45, 1-3.
- Lefeuvre, N., Truche, L., Donzé, F.V., Ducoux, M., Barré, G., Fakoury, R.A., Calassou, S. and Gaucher, E.C., 2021, Native H₂ exploration in the Western Pyrenean Foothills. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 22, e2021GC009917.
- Lefeuvre, N., Truche, L., Donzé, F.V., Gal, F., Tremosa, J., Fakoury, R.A., Calassou, S. and Gaucher, E.C., 2022, Natural hydrogen migration along thrust faults in foot-

- hill basins: The North Pyrenean Frontal Thrust case study. *Applied Geochemistry*, 145, 105396.
- Liu, J., Liu, Q., Xu, H., Ding, Q., Zhu, D. and Meng, Q., 2023, Genesis and energy significance of natural hydrogen. *Unconventional Resources*, 3, 176-182.
- Lodhia, B.H. and Clark, S.R., 2022, Computation of vertical fluid mobility of CO₂, methane, hydrogen and hydrocarbons through sandstones and carbonates. *Scientific Reports*, 12, 10216.
- Lollar, B.S., Voglesonger, K., Lin, L.H., Lacrampe-Couloume, G., Telling, J., Abrajano, T.A., Onstott, T.C. and Pratt, L.M., 2007, Hydrogeologic controls on episodic H₂ release from Precambrian fractured rocks—Energy for deep subsurface life on Earth and Mars. *Astrobiology*, 7, 971-986.
- Mahlstedt, N., Horsfield, B., Weniger, P., Misch, D., Shi, X., Noah, M. and Boreham, C., 2022, Molecular hydrogen from organic sources in geological systems. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 105, 104704.
- Mainson, M., Heath, C., Pejčić, B. and Frery, E., 2022, Sensing hydrogen seeps in the subsurface for natural hydrogen exploration. *Applied Sciences*, 12, 6383.
- Marcaillou, C., Muñoz, M., Vidal, O., Parra, T. and Harfouche, M., 2011, Mineralogical evidence for H₂ degassing during serpentinization at 300°C/300 bar. *Earth and Planetary Science Letters*, 303, 281-290.
- Marriott, R.A., Pirzadeh, P., Marrugo-Hernandez, J.J. and Raval, S., 2015, Hydrogen sulfide formation in oil and gas. *Canadian Journal of Chemistry*, 94, 406-413.
- McCollom, T.M. and Seewald, J.S., 2013, Serpentinites, hydrogen and life. *Elements*, 9, 129-134.
- McMahon, C.J., Roberts, J.J., Johnson, G., Edlmann, K., Flude, S. and Shipton, Z.K., 2023, Natural hydrogen seeps as analogues to inform monitoring of engineered geological hydrogen storage. *Geological Society, London, Special Publications*, 528, <https://doi.org/10.1144/SP528-2022-59>.
- Meju, M.A. and Saleh, A.S., 2023, Using large-size three-dimensional marine electromagnetic data for the efficient combined investigation of natural hydrogen and hydrocarbon gas reservoirs: A geologically consistent and process-oriented approach with implications for carbon footprint reduction. *Minerals*, 13, 745.
- Milkov, A.V., 2022, Molecular hydrogen in surface and subsurface natural gases: Abundance, origins and ideas for deliberate exploration. *Earth-Science Reviews*, 230, 104063.
- Moine, B.N., Bolfan-Casanova, N., Radu, I.B., Ionov, D.A., Costin, G., Korsakov, A.V., Golovin, A.V., Oleinikov, O.B., Deloule, E. and Cottin, J.Y., 2020, Molecular hydrogen in minerals as a clue to interpret δD variations in the mantle. *Nature Communications*, 11, 3604.
- Moretti, I., Geymond, U., Pasquet, G., Aimar, L. and Rabaute, A., 2022, Natural hydrogen emanations in Namibia: Field acquisition and vegetation indexes from multi-spectral satellite image analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 35588-35607.
- Murray, J., Clément, A., Fritz, B., Schmittbuhl, J., Bordmann, V. and Fleury, J.M., 2020, Abiotic hydrogen generation from biotite-rich granite: a case study of the Sultz-sous-Forêts geothermal site, France. *Applied Geochemistry*, 119, 104631.
- Neal, C. and Stanger, G., 1983, Hydrogen generation from mantle source rocks in Oman. *Earth and Planetary Science Letters*, 66, 315-320.
- Ni, Y., Ma, Q., Ellis, G.S., Dai, J., Katz, B., Zhang, S. and Tang, Y., 2011, Fundamental studies on kinetic isotope effect (KIE) of hydrogen isotope fractionation in natural gas systems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 2696-2707.
- Nielsen, R.W., 2021, The great deceleration and proposed alternative interpretation of the Anthropocene. *Episodes*, 44, 107-114.
- Nivin, V.A., 2019, Occurrence forms, composition, distribution, origin and potential hazard of natural hydrogen-hydrocarbon gases in ore deposits of the Khibiny and Lovozero Massifs: A review. *Minerals*, 9, 535.
- Núñez-Jimenez, A. and De Blasio, N., 2022, Competitive and secure renewable hydrogen markets: Three strategic scenarios for the European Union. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47, 35553-35570.
- Ohtani, E., 2020, The role of water in Earth's mantle. *National Science Review*, 7, 224-232.
- Panchenko, V.A., Daus, U.V., Kovalev, A.A., Yudaev, I.V. and Litt, U.V., 2023, Prospects for the production of green hydrogen: Review of countries with high potential. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 4551-4571.
- Parnell, J. and Blamey, N., 2017, Global hydrogen reservoirs in basement and basins. *Geochemical Transactions*, 18, 1-8.
- Pasquet, G., Hassan, R.H., Sissmann, O., Varet, J. and Moretti, I., 2021, An attempt to study natural H₂ resources across an Oceanic Ridge Penetrating a continent: the Asal-Ghoubbet rift (Republic of Djibouti). *Geosciences*, 12, 16.
- Prinzhofer, A. and Cacas-Stentz, M.C., 2023, Natural hydrogen and blend gas: a dynamic model of accumulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48, 21610-21623.
- Prinzhofer, A., Cisse, C.S.T. and Diallo, A.B., 2018, Discovery of a large accumulation of natural hydrogen in Bourakébougou (Mali). *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 19315-19326.
- Prinzhofer, A., Moretti, I., Françolin, J., Pacheco, C., D'Agostino, A., Werly, J. and Rupin, F., 2019, Natural hydrogen con-

- tinuous emission from sedimentary basins: The example of a Brazilian H₂-emitting structure. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 5676-5685.
- Rezaee, R., 2021, Assessment of natural hydrogen systems in Western Australia. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 33068-33077.
- Sato, M., Sutton, A.J., McGee, K.A. and Russell-Robinson, S., 1986, Monitoring of hydrogen along the San Andreas and Calavera faults in central California in 1980-1984. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91, 12315-12326.
- Smith, N.J.P., Shepherd, T.J., Styles, M.T. and Williams, G.M., 2005, Hydrogen exploration: a review of global hydrogen accumulations and implications for prospective areas in NW Europe. Geological Society, London, Petroleum Geology Conference Series, 6, 349-358.
- Song, Y.S. and Park, J.Y., 2022, State-of-the-art on development and operation of landslide early warning system for climate change response. *Journal of the Geological Society of Korea*, 58, 509-525 (in Korean with English abstract).
- Su, X., Zhao, W. and Xia, D., 2018, The diversity of hydrogen-producing bacteria and methanogens within an in situ coal seam. *Biotechnology for Biofuels*, 11, 245.
- Suda, K., Ueno, Y., Yoshizaki, M., Nakamura, H., Kurokawa, K., Nishiyama, E., Yoshino, K., Hongoh, Y., Kawachi, K., Omori, S., Yamada, K., Yoshida, N. and Maruyama, S., 2014, Origin of methane in serpentinite-hosted hydrothermal systems: the CH₄-H₂-H₂O hydrogen isotope systematics of the Hakuba Happo hot spring. *Earth and Planetary Science Letters*, 386, 112-125.
- Suzuki, N., Saito, H. and Hoshino, T., 2017, Hydrogen gas of organic origin in shales and metapelites. *International Journal of Coal Geology*, 173, 227-236.
- Tarhan, C. and Çil, M.A., 2021, A study on hydrogen, the clean energy of the future: Hydrogen storage methods. *Journal of Energy Storage*, 40, 102676.
- Tian, Q.N., Yao, S.Q., Shao, M.J., Zhang, W. and Wang, H.H., 2022, Origin, discovery, exploration and development status and prospect of global natural hydrogen under the background of "carbon neutrality". *China Geology*, 5, 722-733.
- Truche, L., Bourdelle, F., Salvi, S., Lefevre, N., Zug, A. and Lloret, E., 2021, Hydrogen generation during hydrothermal alteration of peralkaline granite. *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 308, 42-59.
- Truche, L., Donzé, F.V., Dusséaux, C., Lefevre, N., Brunet, F. and Malvoisin, B., 2022, The quest for native hydrogen: new directions for exploration (À la recherche de l'hydrogène natif: de nouvelles orientations pour l'exploration). *Géologues géosciences et société*, 213, 68-73.
- Truche, L., Joubert, G., Dargent, M., Martz, P., Cathelineau, M., Rigaudier, T. and Quirt, D., 2018, Clay minerals trap hydrogen in the Earth's crust: evidence from the Cigar Lake uranium deposit, Athabasca. *Earth and Planetary Science Letters*, 493, 186-197.
- Truche, L., McCollom, T.M. and Martinez, I., 2020, Hydrogen and abiotic hydrocarbons: Molecules that change the World. *Elements*, 16, 13-18.
- Vacquand, C., Deville, E., Beaumont, V., Guyot, F., Sissmann, O., Pillot, D., Arcilla, C. and Prinzhofer, A., 2018, Reduced gas seepages in ophiolitic complexes: Evidences for multiple origins of the H₂-CH₄-N₂ gas mixtures. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 223, 437-461.
- Wang, L., Jin, Z., Chen, X., Su, Y. and Huang, X., 2023, The origin and occurrence of natural hydrogen. *Energies*, 16, 2400.
- Wang, L., Zhang, Y. and Kong, Z., 2021, Late Pleistocene-Holocene vegetation and climate change in Ebinur Betula wetland, Xinjiang, NW China. *Episodes*, 44, 249-257.
- Welhan, J.A. and Craig, H., 1979, Methane and hydrogen in East Pacific rise hydrothermal fluids. *Geophysical Research Letters*, 6, 829-831.
- Williams, Q. and Hemley, R.J., 2001, Hydrogen in the deep Earth. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 29, 365-418.
- Worman, S.L., Pratson, L.F., Karson, J.A. and Schlesinger, W.H., 2020, Abiotic hydrogen (H₂) sources and sinks near the Mid-Ocean Ridge (MOR) with implications for the seafloor biosphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 13283-13293.
- Zgonnik, V., 2020, The occurrence and geoscience of natural hydrogen: A comprehensive review. *Earth-Science Reviews*, 203, 103140.
- Zgonnik, V., Beaumont, V., Deville, E., Larin, N., Pillot, D. and Farrell, K., 2015, Evidences for natural hydrogen seepages associated with rounded subsident structures: the Carolina bays (Northern Carolina, USA). *Progress in Earth and Planetary Science*, 2, 31.

Received : July 9, 2023

Revised : July 19, 2023

Accepted : July 20, 2023