

NIGT BRIEF

탄소중립 실현을 위한 독일의 수소 R&D 전략: 수소 수입 전략과 시사점

민지홍 / 손지희 / 신종석





민지홍 / 글로벌전략센터(hong11@nigt.rer.kr)

손지희 / 글로벌전략센터(jie.son@nigt.re.kr)

신중석 / 글로벌전략센터(shin@nigt.re.kr)

하이라이트

- 독일은 수소 기술의 글로벌 리더로 자리매김하기 위해 국가 수소 전략을 수립('20, '23)하고, 2030년 자국 수소 수요를 충족하기 위해 해외수소 도입을 위한 국제협력 및 파트너십 강화 추진 중
- 독일의 해외 수소 수입전략에 있어 프라운호퍼 시스템 및 산업혁신연구소는 수소 수입에 대한 분석을 통해 수입전략('24)에 대한 권고사항을 다음과 같이 제안: ① 순수 수소와 파생상품(메탄올, 암모니아, 항공유, 합성연료(e-연료) 등)의 전망 불확실성을 고려한 응용분야(철강, 기초화학, 국제항공·해운, 정유 등)에 대한 우선순위 설정 필요, ② 잠재적 수소 수출국 설득을 위한 지원 방안 마련 필요, ③ 수소 거래 지역시장 형성을 위한 필요여건 마련 필요, ④ 수입국가로서 EU 등 인근 국가에 우선순위를 둘 필요, ⑤ 수입원 다양화를 고려하는 경우 비용 고려 및 대상국별 특화조치 마련 필요, ⑥ 수소 파생상품의 국제시장 개척을 위한 필요여건 조성 필요, ⑦ 파생상품별 특성 고려한 수입전략 마련 필요
- 한국 또한 탄소중립 달성을 위한 핵심수단으로 수소를 생각하며 이를 위해 “수소 공급분야 탄소중립 기술혁신 전략 로드맵('22)”을 제시하고, “세계를 선도하는 글로벌 R&D 추진전략('23)”을 바탕으로 수소공급 분야에 대한 “글로벌 R&D 전략지도('24)”를 구축하여 수소 생산, 국내수소 운송·저장, 해외수소 운송·저장에 대한 기술개발과 실증 중심의 전략 방향성을 수립
- 독일의 수소 수입전략에 대한 제언을 바탕으로 한국의 수소 수입에 대한 주요 시사점을 다음과 같이 도출 가능: ① 선박운송에 특화된, 파생상품 등을 중심으로 한 수입 방안 마련 필요, ② 수입원 다양화를 통해 위험회피 등을 고려한 수소 수입을 위한 협력대상국 선정체계 마련 필요, ③ 잠재적 협력 가능 지역들에 수소 거래 시장 형성을 위한 필요여건 마련, ④ 한국의 우수한 관련 기술(수소 운송·저장)을 바탕으로 잠재적 수소 수출국과 상생할 수 있는 협력전략 마련 필요, ⑤ 독일 및 일본과 같이 수소 수입에 의존해야 하는 국가들과의 파트너십을 통해 국제 수소 거래 시장의 활성화 촉진 필요

키워드

- 독일(Germany), 수소 R&D (Hydrogen Research Development), 수소 수입 전략(Hydrogen import strategy), 국제협력(International cooperation)

독일의 수소 R&D 전략

독일 정부는 1차적으로 친환경 수소 기술의 글로벌 리더이자 주요 기술 수출국으로 자리매김하기 위해 90억 유로 투자 프로젝트를 포함하는 국가 수소 전략을 발표('20)¹⁾하였으며, 수소 국제협력력을 위한 2차 전략 발표('23)

- (국가 수소 전략, '20) 독일은 수소 기술 분야에서 강력한 입지를 유지하고 더욱 확대하기 위해 국가 수소 전략(Nationalen Wasserstoffstrategie, NWS)을 수립
 - 2023년 말까지 혁신적인 수소 기술의 시장 확대를 위한 계획을 수립하였고, 구체적인 조치방안을 담은 실행계획을 포함하였음(실행계획에 포함된 조치는 8가지 분야*를 아우르고 있음)²⁾
- * ① 수소 생산, ② 운송, ③ 산업, ④ 열, ⑤ 인프라/공급, ⑥ 연구 및 혁신, ⑦ 유럽 차원의 조치, ⑧ 국제 수소 시장 및 대외경제 파트너십
- (국가 수소 전략 업데이트, '23) 에너지 안보와 에너지 시스템의 효율 측면에서 수소 경제를 위해 조정된 목표와 전략 도입³⁾
 - 새로운 과제와 시장 상황에 대처하기 위해 '20년 발표한 독일의 국가 수소전략을 업데이트하고 단기(~2024년), 중기(2024~2026년) 및 장기(2026~2030년)로 구분하여 4가지 전략*을 제시
- * ① 충분한 수소 공급원 확보, ② 수소 인프라의 구축, ③ 수소의 적용 및 활성화, ④ 프레임워크 구축

[표1] 독일의 업데이트 된 국가 수소 전략의 4가지 세부 전략

| 전략 | 설명 |
|-------------|--|
| 충분한 수소공급 확보 | <ul style="list-style-type: none"> • 목표: 다양한 공급 구축, 새로운 에너지 의존성 방지, 전해조 용량은 2030년까지 10GW로 두 배로 증가 • 수단: 유럽수소은행(European Hydrogen Bank), H2Global, PtX 개발 기금인 H2Upp을 통한 PtX 플랫폼 등을 통해 제 3국으로 부터의 수입을 위한 협력 강화 |
| 수소 인프라 구축 | <ul style="list-style-type: none"> • 목표: 2032년까지 모든 주요 생산, 수입 및 저장 센터와 소비자를 연결할 수 있는 운송 인프라 확장 • 수단: 유럽수소파이프라인(EHB·European Hydrogen Backbone): 국경을 넘어 4500km의 수소 파이프라인 설치(북해 및 발트해 지역, 북아프리카와의 연결(프랑스, 스페인, 포르투갈(H2Med) 또는 오스트리아 및 이탈리아(SouthH2Corridor) 경유) |
| 수소 적용 활성화 | <ul style="list-style-type: none"> • 목표: 산업, 대형 상용차, 항공 및 해운 운송, H2 지원 가스 발전소에 응용 분야 구축 • 수단: 수소 전환을 위한 전반적인 전략 개발 |
| 프레임워크 구축 | <ul style="list-style-type: none"> • 목표: 지속가능한 수소시장을 위한 국제적 수준의 제도 및 시스템이 국내에 표준화되어 안착할 수 있도록 지원 • 수단: 수소 가속법(효율적인 허가 절차), 표준 및 인증 시스템, 기술개발 로드맵* 등을 통해 일관된 규제와 관리 <p>*플래그십 프로젝트(H2Giga, H2Mare, TransHyDE), 국가 혁신 프로그램(NIP: National Hydrogen and Fuel Cell Technology Innovation Program) 등 포함</p> |

출처: BMWK*, 2023, National Hydrogen Strategy 바탕으로 저자가 재구성

*독일연방경제기후보호부

1) German Federal Ministry of Economic Affairs and Climate Action website, <https://www.bmwk.de/Navigation/EN/hydrogen/national-hydrogen-strategy.html> (24.04.25 접속)

2) 한국산업기술진흥원(KIAT) 산업기술정책 브리프(2020), EU·독일·호주 수소전략의 주요 내용 및 시사점

3) BMWK, 2023, National Hydrogen Strategy NHS 2023

독일은 수소 수요 증가가 예상됨에 따라 이를 대비하기 위한 수소 수입을 위한 국제협력 및 파트너십을 구축·강화 추진 중

- 독일은 원자력 및 석탄을 2038년까지 완전히 퇴출시키는 것을 목표로 하고 있으며, 따라서 이를 대체하는 수소에 대한 수요가 2030년까지 약 95~130 TWh까지 증가할 것으로 예상*(BMW, 2023)
 - * 30~50%만 국내 생산가능 하며, 나머지는 약 50~70% (45~90TWh)를 해외에서 수입해야 할 것으로 예상
- 최근 독일의 탄소중립 실현을 위한 시나리오 연구에 따르면, 전기화 및 수소 생산 등의 부문별 결합으로 자국의 전력 수요는 2045년 약 1,000 TWh까지 증가할 것으로 전망(Agora Industrie and TU Hamburg, 2023; Prognos et al, 2021)
- 독일의 정치재단 FES diskurs은 수소 경제 발전을 위한 국제협력 추진 시 고려해야 할 6가지 관점과 9가지 정책적 제안을 제시(Quitow et al. 2023)
 - 수소 경제 발전을 위한 6가지 국제협력 관점(key dimensions): ① 기후 완화(mitigation), ② 유럽 친환경 산업개발, ③ 파트너 국가간 공정한 전환, ④ 안정적인 공급 확보, ⑤ 지정학적 이슈의 완화, ⑥ 경제적 타당성
 - 수소 국제협력을 위한 9가지 정책적 제안(policy messages): (제안 1) 인근지역의 우선 고려, (제안 2) 수소 인프라의 확보; (제안 3) 전력의 상호보완; (제안 4) 파트너십 추진; (제안 5) 인증제도 마련; (제안 6) 공동 외교정책 수립; (제안 7) 글로벌 표준화 선도; (제안 8) CCS 기술개발; (제안 9) 수소합성연료 개발

독일의 수소 수입을 위한 고려사항과 제안

독일의 수소수입을 위한 고려사항*

* 프라운호퍼 시스템 및 산업혁신연구소(ISI)는 HyPat 프로젝트의 일환으로 독일의 수소 수입에 대한 분석을 통해 독일 수소 수입전략에 대해 권고사항을 제안('24)

- ① 수소 생산 지역에 대한 고려사항
 - 지역적 환경(일조량, 풍력 등)을 고려해 생산비용이 저렴한 지역·국가로부터 수입이 필요하며, 미국, 호주, 아르헨티나, 러시아, 이집트, 캐나다, 멕시코, 리비아, 칠레, 사우디아라비아 등의 지역이 가능(Pfenning et al. 2021)
 - 일조량이 높은 아프리카와 중동의 국가들이 자본지출(CAPEX)이 낮은 태양광을 활용할 수 있기 때문에 수소 생산에 유리한 지역*으로 분석(Viehbahn et. a.l, 2022; Hank, 2023)되며, 정부 이니셔티브 혹은 국가 기금을 통해 저비용 금융을 이용할 수 있는 국가들이 수소 무역에 있어 유리한 위치를 차지할 것으로 전망(IRENA, 2023)
 - * 예, 중동·북아프리카(MENA) 지역, 브라질, 호주, 스페인 등
 - 수소 수입 관련 메타 연구들에 따르면 원칙적으로 파이프라인, 특히 기존 가스 파이프라인의 용도 변경을 통한 수소 운송이 가장 저렴한 것으로 분석되며, 신규 건설의 경우 약 4,000km 이상의 운송*은 선박**이 더 저렴한 것으로 분석(Agora Industrie and TU Hamburg, 2023; IRENA, 2022)
 - * 신규 건설 파이프라인의 경우 4,000km, 용도가 변경된 가스 파이프라인의 경우 약 8,000km 이상
 - ** LNG에 비해 액화수소, 암모니아 및 LOHC를 운송하는데 필요한 에너지 밀도(부피당 저장되는 에너지)가 낮기 때문에 거래되는 동일한 에너지량 당 필요한 선박의 수가 증가
- ※ Liquid Organic Hydrogen Carrier (LOHC): 액상유기수소운반체

② 수소 생산과 수입의 비교

- 자국 내 생산에 비해 수소 수입 수요가 더 높은 국가들은 세계적으로 소수에 불과할 것으로 예상하며, 미래의 수소 시장은 현재 가스 시장과 같이 생산량의 33%만이 국경을 넘어 거래될 것으로 전망됨(Hydrogen Council, McKinsey & Company 2022; IRENA 2022; Simon et al., 2023; Shirizadeh, B. et al. 2023)
- 수소 무역은 순수 수소 거래보다는 장거리 운송이 용이한 수소 화합물(예, 암모니아, 메탄올, e-등유 등)이 주를 이룰 것으로 예상되며, 특히 암모니아의 국제 무역은 향후 매우 중요한 요소가 될 것으로 전망(Verschuur et al. 2024)
- 독일, 네덜란드, 벨기에, 한국, 일본 등은 철강·화학 산업 비중이 크고 높은 온실가스 감축 목표를 가진 국가들로, 수소 수요가 높으나 자국 내 생산 잠재력이 충분하지 않다고 분석됨(Sensfuß, F. et al., 2023).

③ 수소 운송방식 및 거래경로

- 국제 수소 거래의 55%는 파이프라인*을 통해 이루어질 것으로 예상되며, 천연가스 파이프라인을 재활용해 운송비 절감이 기대됨(Brändle et al., 2021; Moritz et al., 2023; IRENA, 2022; Hydrogen Council, McKinsey & Company 2022).
- * 순수 수소는 파이프라인, 수소 파생상품은 선박을 통해서 거래하는 것이 경제성을 가질 것으로 예상
- 그린 암모니아의 선박 수입이 독일 자국 내 생산보다 경제적인 것으로 분석되며, 수소 파생상품 수입이 철강, 요소, 에틸렌 산업에 경제적이고 환경친화적 대안이 될 전망(Moritz et al., 2023; Veerport et al., 2023)

독일의 수소 수입전략에 대한 제언

① 순수수소·수소 파생상품에 대한 공통 제언

- 수소와 수소 파생상품의 가격은 과소평가되는 경향이 있기에 특정 응용분야에 대해 초점을 맞출 필요
 - 수소 및 수소 파생상품에 대한 단기·중장기 전망을 제시하는 많은 연구에서는 공급 부족, 규제·제도 부재, 투자 불확실성 등으로 미래 시장가격에 대한 전망이 어려우므로 철강, 기초화학, 국제항공·해운, 정유 및 발전 산업 등에 대한 명확한 우선순위를 설정하고 국제사회에서 수소관련 거래에 대한 빠른 파악과 해석을 수행해야 할 필요
 - ※ H2Global에서 추진하고 있는 수소 경매와 같은 제도·프로그램 활용 가능
- 잠재적 수소 수출국의 목표가 독일의 목표와 상충 할 수 있음에 대한 고려 필요
 - 잠재적 수소 수출국들의 정책 목표 혹은 이해관계가 수소의 수출에 맞춰져 있지 않을 가능성을 고려하여 독일의 수소 수입전략은 잠재적 수소 수출국들에 대해 수출 시 그들의 이점을 명확히 제시하는 동시에 수출국들이 수소 공급 및 기후변화대응 목표를 달성할 수 있도록 지원해야 할 필요
- 수소 수출국의 단기·중장기적으로 시장을 지배하여 압박될 수 있지만, 상생의 기회를 창출할 수 있음
 - 미국, 캐나다와 같은 대규모 그린수소 생산이 가능한 국가들은 독일의 경제적 입지를 위협(Eicke and De Blasio. 2022)할 수 있지만, 선두주자들의 대응을 하기 위해서는 글로벌 수소 가치사슬을 재구성하고 수소 기술력이나 재정 능력이 부족한 국가들과 에너지 파트너십을 맺어 새로운 비즈니스 모델을 개발하는 등의 전략이 필요

② 수소 수소 수입전략에 대한 제언

- 수소 관련 지역 시장(regional market) 형성을 위한 필요 여건을 조성하기 위한 신속한 조치 필요
 - 향후 수소 거래는 지역시장을 중심으로 이루어질 것으로 예상되며, 천연가스 시장처럼 파이프라인 운송이 지배적일 가능성이 높아 사전적 인프라 구축이 중요한 요소로 평가(Van der Graf et al. 2020, Dejonghe et al. 2023)
 - 독일의 국가 수소 전략에서 명시하는 수소 수요에 대한 확실성을 검토해야 할 필요가 있으며, 국제 수소시장의 형성이 느리게 진행될 가능성을 고려해 수소 운송의 기술적·제도적 요소(고장, 테러 등)에 대한 대응 방안을 사전에 마련 필요
- 유럽의 천연가스 거래 경험을 바탕으로 수입 전략 수립
 - 물리적 유사성으로 인해 수소 무역은 유럽의 천연가스 무역과 그 행태가 유사할 것으로 예상되며, 최근 우크라이나-러시아 전쟁으로 인한 천연가스 변동과 같이 지정학적 리스크와 공급원 분포 등을 고려한 적절한 정치적 프레임워크를 설정하는 요소가 수입전략에서 고려되어야 할 필요
 - 정치적 의사결정권자는 비용 효율적으로 수소를 수입하기 위해 다음 측면들에 대한 주의 필요: 수요 감소 및 필수 수소 활용 수요, 수입가능 국가 등 공급원의 다각화, 외부 충격(전쟁, 테러 등)에 대한 대응능력 강화, 수소 생산 방식별 시장 차별화, 장기 공급계약을 통한 공급 안정화 등
- 독일은 수소 수입 시 EU와 주변 국가들에 우선 집중해야 할 필요
 - 독일은 수소 수입 채널의 다양화를 통해 공급처에 대한 의존성을 낮춰야 할 필요가 있으며, 이를 위해 인근지역인 EU 국가들을 우선적으로 수입원으로써 활용하는 전략을 수립하고 파트너십 체결을 통한 동맹 강화를 추진해야 할 필요

③ 수소 파생상품의 수입에 대한 제언

- 수소 파생상품의 국제 시장 개척을 위한 필요 여건 조성
 - 독일은 전 세계적으로 수소 및 파생상품*의 수입에 크게 의존하는 소수 국가 중 하나일 것으로 예상되며, 한국 및 일본과 같이 유사한 특성을 가진 국가들과 경쟁자이자 잠재적 협력파트너로 고려하여 수소 시장에서의 구매력을 향상시키고 글로벌 시장을 활성화함에 기여할 필요
- * 수소에 비해 운송이 저렴하고 이미 구축된 일부 인프라로 인해 석유시장에 버금가는 시장이 형성될 것으로 전망
- 특정 수소 파생상품의 특성을 고려한 수입전략 마련(Ansari and Pepe, 2023)
 - e-등유*(e-kerosine), 암모니아, 메탄올, Fischer-Tropsch 합성연료** 등은 각각 적용분야가 다르기에 서로 다른 상품으로 전환이 불가능하거나 전환손실이 크기에 수입전략에서는 각 파생상품에 대한 개별적 전략 수립 필요
 - * 예, e-등유는 주로 항공에서 필요하지만, 현시점에서는 마땅한 대체재가 없는 상황이기 때문에 항공분야에서의 지속가능성 확보를 위한 기술개발 및 수요 충족에 대한 지속적 고려 필요
 - ** Fischer-Tropsch(FT) 합성연료: 합성가스로부터 액체 탄화수소를 만드는 것으로 화석 원유와 매우 유사하기 때문에 정유 공장에서 연료와 플랫폼 화학 물질을 운송하고 생산하는 데 인프라를 계속 사용할 수 있다는 이점이 있음

한국의 수소 R&D 전략

한국은 탄소중립 달성에 있어 수소 기술을 핵심수단으로 고려하여 대규모 수소에 대한 경제적이고 안전한 공급을 위해 “수소 공급 분야 탄소중립 기술혁신 전략 로드맵*(‘22.11)”을 제시(관계부처합동, 2022)

- 한국은 2050년 탄소중립 달성을 위해 수소를 핵심 미래 에너지원으로 고려하며, 수소차·연료전지·발전·운송·산업·도시 등 다양한 분야로 확대할 전망이나 수소 수급에 대해 불확실성이 크며 국내 수요 전망은 생산규모를 상회할 것으로 예상
 - 2050년 한국의 탄소중립 시나리오에서는 연 27.9백만톤의 수소가 필요할 것으로 예상하고 있으며, 이를 충족하기 위해 블루수소 2백만톤(66.6TWh), 그린수소 3백만톤(100TWh) 공급과 해외수소** 공급 22.9백만톤 (763.3TWh)을 계획
 - * 수소 기술혁신 전략 로드맵에서는 수소 생산, 국내수소 저장·운송, 해외수소 저장·운송에 대해 각각 ① 그린수소의 대량생산을 위한 기반구축, ② 설비가격 50% 이상 절감, ③ 대용량 수소의 안정적 저장·운송 핵심기술 확보를 목표
 - ** 해외수소 공급은 해외에서 국내의 재생에너지·수전해 기술을 패키지로 하여 수소 생산 및 국내 도입하는 공급망 구축
 - 한국은 글로벌 협력 전략 도출을 위한 수소 공급 분야에 대한 글로벌 R&D전략지도 수립*(‘24)
 - * 수소 공급 분야는 ① 수소 생산 ② 수소 저장·운송 ③ 해외수소 저장·운송 3가지 세부 기술을 기준으로 수립
 - ‘기술 유형별 협력전략 지도’에서 ①수소생산(수전해 시스템)는 시장 추격형 협력 유형 ②수소 저장·운송은 시장 주도형 협력 유형 ③수소생산 중 차세대 수소 생산(AEM)은 신기술 확보형 협력 유형, ④수소생산 중 차세대 수소 생산(SOEC)은 신기술 확산형 협력 유형으로 분류
 - 미국(CCUS/신기술확보형)·영국(무탄소신전원/시장주도형)·독일(수소공급/시장추격형)·네덜란드(수소공급/시장추격형) 등의 국가를 대상으로 원천기술 개발, 플랜트 구축 등의 협력 전략을 제시

시사점

- 한국은 독일과 유사하게 국내 수요의 대부분을 수입에 의존해야 하는 상황이며, 국제협력을 통한 수소 수입에 대한 전략 필요
 - 독일과 마찬가지로 한국 또한 2050년 국내 수소 수요의 대부분(90%)을 해외수소 수입에 의존해야 할 것으로 전망
 - 자국 내 수소 생산이 한정적으로 수소 수입이 요구되는 소수 국가 중 대표적인 국가로 한국, 독일, 일본 등이 포함
- 한국은 “수소공급 분야 탄소중립 기술혁신 전략 로드맵”을 통해 수소 생산, 국내수소 저장·운송 및 해외수소 저장·운송에 있어 요구되는 기술개발 및 실증, 차세대 기술개발을 위한 투자를 진행하는 전략을 수립하였으나, 해외로부터의 수소 수입을 위한 국제협력 전략 부재
- 한국의 관련 기술력과 독일의 수소 수입전략에 대한 제언을 바탕으로 해외수소 수입에 대한 한국의 국제협력 전략에 관한 시사점은 다음과 같이 도출 가능

- 독일과 달리 한국의 경우 파이프라인을 활용한 해외수소의 수입은 지정학적 요인으로 인해 매우 어려운 환경으로 선박을 활용한 수소 수입이 유력한 방식이기에, 선박을 이용한 수입에 있어 비용 효율적 측면에서 순수 수소보다는 파생상품(암모니아, 그린 메탄올 등) 혹은 차세대 저장기술(LOHC)의 활용을 우선적으로 고려할 필요
 - 비용 효율적 측면에서 인근지역 우선 수입원 확보와 지정학적 리스크를 고려한 수입원 다양화 등을 검토하여 비용 효율적인 해외수소 수입을 위한 협력대상국과 국가특성별 협력 전략 도출 필요
 - 잠재적 협력가능 지역들을 대상으로 지역 시장을 형성하고 한국이 주도적으로 이끌어갈 수 있기 위한 필요여건*을 조성하기 위한 조치 등 기술협력 유형을 기반으로 탄소시장과 기술외교를 복합적으로 고려한 체계적인 전술을 확립 필요
- * 예, (수출을 위한) 암모니아·LOHC 합성 플랜트 구축 지원 등
- 한국은 수소 운송·저장 관련 세계 수준 기술을 보유하고 있고 “수소 기술혁신 전략로드맵”에 따라 지속적으로 기술선도를 하고자 목표하기에, 잠재적 수소 수출국들이 겪고 있는 기술적 장애요인을 해결하는 등 기술협력을 중심으로 한 관계 구축을 통해 상생의 기회로 삼을 수 있도록 전략 수립 필요
 - 독일, 일본 등 수소 수입에 의존해야 하는 소수 국가와의 긴밀한 협력을 통해 국제 수소 시장을 선도하고 활성화할 수 있도록 수소 수입 국가들과의 파트너십을 전략에 반영할 필요

- 1) Agora Industrie und TU Hamburg (2023) Wasserstoff-Importoptionen für Deutschland. Analyse mit einer Vertiefung zu Synthetischem Erdgas (SNG) bei nahezu geschlossenem Kohlenstoffkreislauf.
- 2) Ansari, D. and Pepe, J.M. (2023) Toward a hydrogen import strategy for Germany and the EU Priorities, countries, and multilateral frameworks, SWP Working Paper Nr. 01, June 2023
- 3) BMWK(2023) National Hydrogen Strategy NHS 2023,
- 4) Brändle, G., Schonfisch, M., Schulte, S. (2021) Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen, Appl Energy 2021;302:117481 (accessed <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117481>)
- 5) Dejonghe, M., Van de Graaf, Th., Belmans, R. (2023) From natural gas to hydrogen: Navigating import risks and dependencies in Northwest Europe. In Energy Research & Social Science 106 (2023) 103301
- 6) Eicke, L. and De Blasio, N. (2022) Green hydrogen value chains in the industrial sector—Geopolitical and market implications, Energy Research & Social Science 93, 102847.
- 7) Energiewende, Agora. Ember (2021) The European Power Sector in 2020: up-to-date analysis on the electricity transition (accessed https://static.agoraenergiewende.de/fileadmin/Projekte/2021/2020_01_EU-Annual-Review_2020/AEW_202_Report_European-Power-Sector-2020.pdf)
- 8) Hank, Ch. (2023) Power-to-X Country Analysis – Site-specific, comparative analysis for suitable Power-to-X pathways and products in developing and emerging countries, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. (accessed file:///C:/Users/vi/Downloads/Fraunhofer-ISE-H2Global-Study-Power-to-X%Country%20Analysis%20(4).pdf)
- 9) Hydrogen Council, McKinsey & Company (2022) Global Hydrogen Flows: Hydrogen trade as a key enabler for efficient decarbonization. Hydrogen Council (accessed <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Hydrogen-Flows.pdf>)
- 10) Simon R, et al., (2023) Bulk Transport Options for Green Molecules. Focus Area: Europe and MENA Region, iLF Consulting Engineers, Mena Hydrogen Alliance, Dii.
- 11) IRENA (2022) Global hydrogen trade to meet the 1.5°C climate goal: Part I – Trade outlook for 2050 and way forward, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
- 12) IRENA (2023) Renewable energy markets: GCC 2023. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi
- 13) Klessmann, C., Vogel, S., Engelhart, J., Blanke, J. (2022) Wasserstoff-Importstrategie für den Markthochlauf. Policy Paper, Epico Klimainnovation und Konrad Adenauer Stiftung.
- 14) Moritz, M., Schonfisch, M., Schulte, S. (2023) Estimating global production and supply costs for green hydrogen and hydrogen-based green energy commodities. in Int J Hydrogen Energy 2023;48(25):9139e54. (accessed <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.046>)
- 15) Pfennig, M., von Bonin, M., Gerhardt, N (2021) PTX-Atlas – Weltweite Potenziale für die Erzeugung von grünem Wasserstoff und klimaneutralen synthetischen Kraft- und Brennstoffen. Teilbericht im Rahmen des Projektes: DeV-KopSys. Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (Fraunhofer IEE)
- 16) Prognos, A. G., Öko-Institut eV, & Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH. (2021) Towards a climate-neutral Germany by 2045 How Germany can reach its climate targets before 2050: Executive summary conducted for Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende and Agora Verkehrswende.

- 17) Quitzow R, Mewes C, Thielges S, Tsounpa M, Zabanova Y. (2023) Building partnerships for an international hydrogen economy: Entry-points for European policy action, The Friedrich-Ebert-Stiftung (accessed 2024.05.03., <https://library.fes.de/pdf-files/a-p-b/19921-20230215.pdf>)
- 18) Sensfuß, F. et al. (2023) Langfristszenarien. Studie im Auftrag des BMWK. (accessed <https://langfristszenarien.de/enertile-explorer-de/dokumente/>)
- 19) Shirizadeh, B. et al. (2023) Towards a resilient and cost-competitive clean hydrogen economy: the future is green. In Energy Environ. Sci., 2023, 16, 6094-6109.
- 20) Van de Graaf, T., Overland, I., Scholten, D. and Westphal, K. (2020) The new oil? The geopolitics and international governance of hydrogen, Energy Res. Soc. Sci., 2020, 70, 101667. (accessed <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629620302425>.)
- 21) Verpoort, Ph., Gast, L.; Hofmann, A., Ueckerdt, F. (2021) Future global green value chains: estimating the renewables pull and understanding its impact on industrial relocation. Institute for Climate Impact Research, Potsdam.
- 22) Verschuur, J. et al (2024) Optimal fuel supply of green ammonia to decarbonise global shipping, Environ. Res. Infrastruct. Sustain. 4 015001
- 23) Viebahn, P. et al., (2022). Synthese und Handlungsoptionen – Ergebnisbericht des Projekts MENA – Fuels. Teilbericht 14 des Wuppertal Instituts, des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und des Instituts für ZukunftsEnergie- und Stoffstromsysteme (IZES) an das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Wuppertal, Stuttgart, Köln, Saarbrücken.
- 24) 관계부처 합동, 2022, 수소공급 분야 탄소중립 기술혁신 전략로드맵(안) (2022.11)

본 내용은 국가녹색기술연구소(NIGT)의 주요사업 「탄소중립 R&D 혁신전략 수립지원 프레임워크 구축연구」의 일환으로, 「Bundesbericht Energieforschung 2023」(2023)의 내용을 발췌하여 요약·해석한 것입니다.

