ISSN 2983-2616(온라인)
ISSN 2983-2322(인쇄본)

2023년
Vol.1 No.6

NIGT BRIEF

일본의 수소 국제공급망 구축 연구개발 및 실증 동향

– NEDO성과발표회(2023.07)를 바탕으로 –

손범석

국가녹색기술연구소
NATIONAL INSTITUTE OF GREEN TECHNOLOGY

ISSUE
06

일본의 수소 국제공급망 구축 연구개발 및 실증 동향 – NEDO성과발표회(2023.07)를 바탕으로 –

손범석 / 기술분석센터

하이라이트

- 일본은 2017년 '수소기본전략'을 수립하면서 '수소사회' 달성을 위한 국가 정책을 추진해 왔으며, 최근에는 이를 개정하여 국제 수소공급망 구축을 위한 다국간 협력 강화 및 적극적인 상류부문 투자를 천명
- 일본은 장기적으로 2050년까지 2,000만 톤의 수소를 공급한다는 목표를 수립하였으며, 이를 위해 해외로부터의 수소 제조 및 국내 공급을 위한 연구개발·실증에 박차를 가하고 있음
- 최근 일본 NEDO에서 개최되었던 「수소·연료전지성과발표회」('23. 7. 13~14)에서는 일본이 추진 중인 수소에너지 캐리어(MCH, 액화수소)를 활용한 연구개발 및 실증사업에 대한 최신동향이 발표
- 「제1차 수소경제 이행 기본계획('21)」에 따르면 우리나라도 2050년까지 27.9백만톤의 수소 도입하고 해외공급망을 40개 구축한다는 목표를 설정한 바, 해외수소 공급원의 확보·다변화를 위한 R&D 및 실증의 적극적 추진 필요

키워드

- 수소 국제공급망, MCH, 수소액화, 수소 저장, 수소 운송, 해외 수소 공급 다변화

일본의 수소사회 구축을 위한 국가 정책 현황

- 일본은 「수소사회의 구축」이라는 국가적 목표를 설정하고, 이를 달성하기 위해 정책을 지속적으로 추진
  - 2017년 12월 「수소기본전략」의 수립을 통해 수소에너지의 생산·공급 목표량과 차량·연료전지 시스템 보급목표량, 비용저감 목표 등이 구체적으로 제시되면서 본격적인 「수소사회」의 구축에 박차
  - 2018년 7월 수립된 「제5차 에너지 기본계획」에서는 '탈탄소화'를 천명하였고, 이를 실현시키는 핵심 수단으로서 '수소에너지'를 언급
  - 2020년 12월 수립된 「탄소중립의 달성을 위한 그린성장전략」에서는 수소가 화석연료 대비 충분한 경쟁력을 갖출 수 있도록 공급비용의 저감 및 도입량 확대 목표 설정
  - 2021년 수립된 「제6차 에너지기본계획」에서는 「그린성장전략」을 계승하여, 공급측면에서는 글로벌 수소공급망 및 국내 보급기반의 구축, 수요측면에서는 발전, 수송, 산업, 민생 부문별 목표를 설정하고, 탄소제거기술(CDR)[1]인 탄소포집·활용 및 저장기술(CCUS)[2] 및 직접대기포집(DAC)[3]와의 연계를 통한 탈탄소사회 구축을 제시

1) Carbon Dioxide Removal
2) Carbon Capture, Utilization, Storage
3) Direct Air Capture

제5차 에너지기본계획(2018)	제6차 에너지기본계획(2021)
• **연료전지** 활용한 에너지 절감 - 530만대 도입(~`30) 및 가격저감 • 모빌리티 분야 **수소**이용 가속화 - 충전소 320개소 구축(~`50) - 선박 및 기차에 **수소에너지** 적용 • 국제 **수소공급망** 구축 - 액화수소, 암모니아, 메탄 등 에너지 캐리어 기술 개발 - 국제 수소공급망 구축(공급비용 30엔/N㎥ 달성) • 재생에너지 기반 **수소생산** 확대 - 수전해 시스템비용 5만엔/kW 달성 - 자급자족형 수소공급망 구축	• 안정적 수소공급 기반 확충 - 해외 저가수소 도입 및 국내 수소제조기반 확립 - 국제 공급망, 수전해 상용화, 광촉매 등 혁신적 수소제조기술 개발 추진 - 수소 공급비용 저감(화석연료 수준) * 20엔/N㎥, 2,000만t/연(~`50) • 수요측(발전,수송,산업,민생)의 수소이용 확대 - (발전)수소·암모니아 혼소·전소 실증 추진 - (수송)연료전지승용차 및 상용차 및 충전소 정비 - (산업)수소환원제철기술 전환 - (민생)고정형연료전지 도입확대 • **수소**와 CDR기술의 병용 - 비(非)전력부문의 탈탄소화 추진(합성연료 등 활용)

- 일본이 '수소사회'의 구축을 달성하기 위해서는 자체적인 수소생산 뿐만 아니라 해외로부터의 수소 공급이 필수
  - 2050년까지 약 2,000만톤 이상의 수소를 도입해야 하나[4], 이는 현재의 일본 자체 수소생산 및 공급역량 만으로는 달성하기 어려운 목표치임 (경제산업성, 2022)
  - 이에 따라 일본 정부는 '23년 6월에 개정된 '수소기본전략(개정판)'에서, 해외로부터의 수소 도입량을 늘리기 위해 자원국과의 협력관계 강화 및 해외 거점을 통한 수소산업 상류부문(수소 제조)에의 적극적인 투자를 통해, 수소의 본격적인 상용화를 위한 대규모 공급망 및 생산 거점을 구축할 것이라 언급(경제산업성, 2023)
- 최근 일본의 해외 수소공급망 구축을 위한 R&D 및 실증과 관련하여 신에너지·산업기술 종합개발기구(NEDO)[5]에서 「수소·연료전지성과발표회」를 개최, 일본이 수소캐리어로서 전략적으로 기술개발 및 실증 추진 중인 메틸시클로헥산(MCH)[6]과 액화수소에 대한 최신 동향을 발표
  - 따라서 본 Brief에서 일본의 글로벌 수소공급망 구축을 위한 최신 동향을 파악하고, 이를 바탕으로 우리나라에 부여하는 시사점을 제시

일본의 글로벌 수소공급망 구축을 위한 실증사업 현황

- 수소의 장거리 국제운송을 위해서는 액체 상태에서의 저장 및 수송이 효율적
  - 수소는 가솔린 및 디젤의 에너지 밀도보다 약 3배 높은 33.3kWh/kg(120MJ/kg)의 에너지 저장 밀도를 가지고 있음
  - 그러나 해외에서 생산한 대용량의 수소를 안전하게 경제적인 방법으로 장거리 운송하기 위해서는 단위부피당 높은 에너지 밀도를 갖는 액상 형태의 수소운반체(Hydrogen Carrier)가 반드시 필요(윤창원외, 2019).
  - 일본은 미래 수소사회의 구축을 위해서는 해외로부터의 수소 공급이 필수적임을 인지하고, 국제 수소공급망 구축을 위한 연구개발 및 실증을 진행 중

4) 일본의 현재 수소 도입량은 약 200만 톤 수준. 또한 최근 발표된 「수소기본전략 개정판('23. 6)」에서는, 일본 내 수소 도입목표로서 기존의 300만톤(~'30), 2,000만톤(~'50)에 중간목표로서 1,200만 톤(~'40)이 추가되었으며, 이는 기존의 수소공급 목표치 달성을 위한 전략을 보다 앞당겨서 적극적으로 추진하겠다는 의미

5) New Energy and Industrial Technology Development Organization

6) Methylcyclohexane

〈표 2〉 일본의 해외 수소공급망 구축을 위한 실증사업 개요

에너지 캐리어	MCH		액화수소
사업주체	AHEAD[7]	ENEOS	HySTRA[8]
실증 내용	· 브루나이의 수소 합성 설비에서 수소 캐리어인 MCH 합성, 일본 국내에 수송·공급 · 합성을 위한 원료인 수소의 제조 및 공급과, 톨루엔 - MCH 간 변환기술이 관건	· 시간과 비용이 소요되고 에너지 손실이 큰 MCH 합성 기술의 개선을 위해, 톨루엔에서 직접 전해 과정을 통해 MCH를 합성하는 '직접 MCH 전해(DirectMCH)' 위한 전해조의 개발 및 실증	· 호주의 미이용 에너지인 갈탄을 기반으로 수소를 추출하고, 이를 액화시켜 (액화수소) 일본으로 해상 운송하여 국내 수요처에 공급 · 액화수소 운송선 기화 방지 및 수소 인수기지 하역 장비 기술이 핵심
현황	· `20년 1차 실증완료 · 현재 상용화 진행 중	· `23년 6월 호주-일본 간 실증 성공적 추진	· 수소인수기지 하역장비 (로딩암) 통한 하역 실증사업 성공(`23. 3)

출처: ENEOS(2023), Chiyoda(2023), HySTRA(2023)을 바탕으로 저자 정리

- 이와 관련하여 NEDO에서는 2023년 7월 13~14일 양일에 걸쳐 「수소·연료전지 성과보고회」를 개최하였으며, 온라인으로도 송출된 동 발표회 중 '대규모 수소공급망의 구축' 관련 세션에서는 '호주 미이용갈탄유래 액화수소 대규모 해상수송 공급망 구축 실증사업'과 'MCH전해합성 기술개발'의 두 가지 연구주제를 발표

1. 수소캐리어로서의 액화수소

- HySTRA가 중심이 되어 세계 최초로 호주-일본 간 액화수소의 장거리 해상 수송 실증사업을 성공리에 완수하고, 향후 수소의 글로벌 공급망 구축을 위한 기반을 마련
- 일본은 호주에서 채굴한 갈탄[9]으로부터 수소를 제조 및 액화하고 이를 액화수소운반선에 실어 일본 고베에 위치한 수소인수기지에서 하역 완료(`23.3)
  - 1단계(갈탄 채굴) : 호주 동남부에 위치한 약 6,000ha 규모의 Latrobe Valley 탄전(炭田)에서 갈탄 채굴
  - 2단계(갈탄 가스화) : 채굴된 갈탄은 가스화되어 수소를 포함한 가스로 형태 변환
  - 3단계(수소 액화) : 호주 헤이스팅스(Hastings)항에 위치한 액화 설비 통한 수소 액화
    * 수소를 -253℃의 극저온에서 액화시 체적이 1/800으로 감소되며, 이는 운반 효율을 비약적으로 향상시킴
  - 4단계(저장·수송 및 하역) : 액화수소 운반선이 약 9,000km의 항로를 거쳐 일본 고베(神戸)에 도착하고, 수소인수기지의 로딩 암(Loading Arm)시스템이 -253℃를 유지하며 수소를 흡입하여 육상 저장탱크로 전달
- 동 실증사업은 '신에너지산업기술종합개발기구(NEDO)'의 조성사업으로 채택되어, 수소를 대량으로 제조 및 수송하는 기술의 확립을 위한 연구개발 목적으로서 2016년부터 사업을 진행해 왔으며 2023년 상반기에 종료
- 일본은 동 실증사업의 성공을 통해 국제 액화수소 공급망 구축의 실현 가능성을 입증하였으며, 향후 실증사업 규모의 증대를 통한 상용화를 2030년까지 추진 예정

---

7) Advanced Hydrogen Energy chain Association for tehchnology Development. 차세대수소에너지 체인기술연구조합. 치요다화공건설, 미츠비시상사, 미쓰이물산, 일본유센 등 4개 기업 연합체

8) CO2-free Hydrogen Energy Supply-chain Technology Research Association. 기술연구조합 CO2free 수소공급망 추진기구. 쉘 재팬, 이와타니산업, 가와사키중공업, J파워, 마루베니, ENEOS, 가와사키기선 7개 기업 연합체

9) 갈탄은 저품위의 석탄으로서, 세계 석탄 매장량의 약 5할 정도를 점하고 있음. 그러나 수분과 불순물을 매우 많이 함유하고 있어 발열량은 낮다고 알려져 있으며, 또한 공기와 접촉하면 자연발화할 우려가 있기 때문에 수송이나 보관에 적합하지 않고 현지에서만 제한적으로 활용되어 왔음

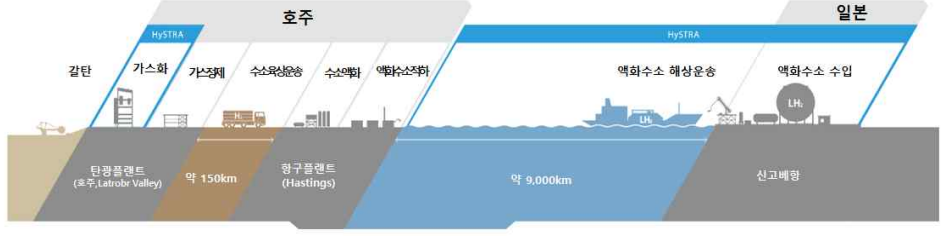
〈표 3〉 일본의 수소 공급 부문의 성장전략 로드맵

구분	2021	2022	2023	2024	2025	~2030	~2040	~2050
저장·수송	국제수송 대형화를 위한 기술개발			대규모 실증, 수송기술의 국제표준화 항만(인수기지)에서의 수소 저장·배송 위한 제도정비			상용화·국제 진출 지원	
제조	수전해 장치의 대형화 지원·성능평가환경 정비							
	혁신적 기술(광촉매, 고체산화물형 수전해, 고온가스로(고온열원) 활용 수전해 등)의 연구개발 및 실증사업 추진							도입 지원

출처: 경제산업성(2021)

- 국제 수소 공급망 구축의 상용화를 위하여 1)관련 장비의 대형화를 통해 규모의 경제를 최대한 활용하고, 2)공급 규모가 커지는 만큼 이에 대응하는 수요를 국내적으로 창출

〈그림 4〉 일본의 수소액화 및 저장·운송 사업 상용화 규모



구분	수소제조	수소액화	적하기지	수소운반선	인수기지	연간공급량
장비	제조장치	액화기	저장탱크	운반량	저장탱크	
현 보유기술	0.1톤/일	5톤/일	2,500㎥/기	2,500㎥/척 (1,250㎥/기×2기)	2,500㎥/기	약 36톤/년*
상용화 추진 규모	770톤/일	1,000톤/일 (50톤/일×20기)	20만㎥ (5만㎥/기×4기)	32만㎥ (4만㎥/기×4기/척×2척)	20만㎥ (5만㎥/기×4기)	약 22.5만톤/년

* 비용 : 약 30엔/Nm³ 목표

출처: 경제산업성(2021)

- 또한 국제 수소 공급망 상에서의 최하류 부문인 일본 수소인수기지와 관련하여, 기술개발 통한 난제 해결 추진
  - 로딩 암(Loading Arm) : 극저온(-253℃)을 견디면서 가동성을 확보할 수 있는 새로운 소재 및 구조 개발. 대(大)구경화와 긴급이탈 시 수소 방출량 최소화를 가능하게 하는 긴급이탈 시스템* 개발 추진

    * 갑작스런 가상현상으로 저장탱크의 급격한 이동이나 파손 등의 예기치 못한 사태가 발생한 경우, 유체를 퍼지(인화성 기체가 있는 저장탱크에 불활성 가스를 주입하여 가연성 환경이 유지되지 않게 하는 것)하는 일 없이 단시간에 안전하게 저장탱크로부터 분리하는 시스템

2. 수소캐리어로서의 MCH 활용

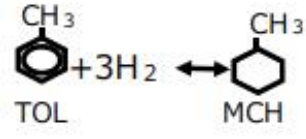
- MCH는 상온상압에서 액체이고 강한 독성이나 냄새, 부식성이 없으며,[10] 컨테이너 장기 저장도 용이하여 취급하기

10) 잉크 수정액의 용제로서 사용되는 만큼 일반 생활에 있어서도 친숙한 물질임

쉬운 물질

- (탈수소화 과정) MCH를 350℃~400℃로 가열시 수소(기체)와 톨루엔(액체)으로 분리되는 흡열반응
- (수소화 과정) 톨루엔은 증발 후 수소와 질소(N2)를 혼합하여 반응기에 투입되고, 여기서 MCH로 변환되는 발열반응(Imagawa Kenichi 외, 2014).

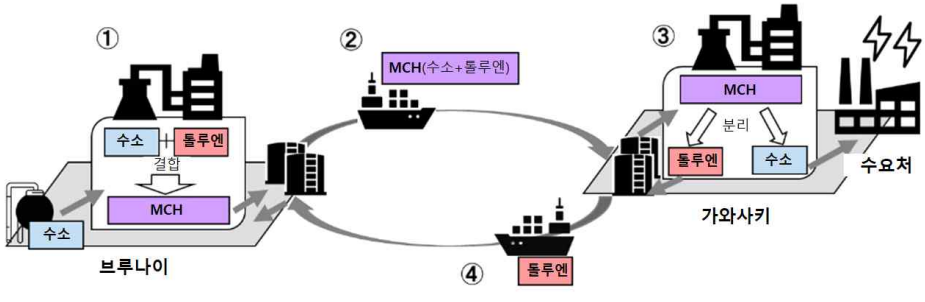
〈그림 5〉 톨루엔 – MCH 변환 과정



출처: Chiyoda(2023)

- 일본의 엔지니어링 전문기업인 치요다 화공건설(千代田化工建設)은 2017년 7월, 닛폰유센, 미쓰이물산, 미츠비시상사와 함께 '차세대 수소에너지 체인기술 연구조합'이라는 의미의 기업연합체인 'AHEAD'를 설립
  - NEDO는 이와 관련하여 해외(브루나이)수소의 제조·저장·수송 ·활용을 포함한 수소 공급망 구축 관련 기술개발과 실증을 목표로 2015년부터 「수소사회 구축기술 개발사업/대규모 수소에너지 이용기술 개발사업」을 추진

〈그림 6〉 브루나이-일본間 수소의 흐름(MCH-톨루엔 변환)

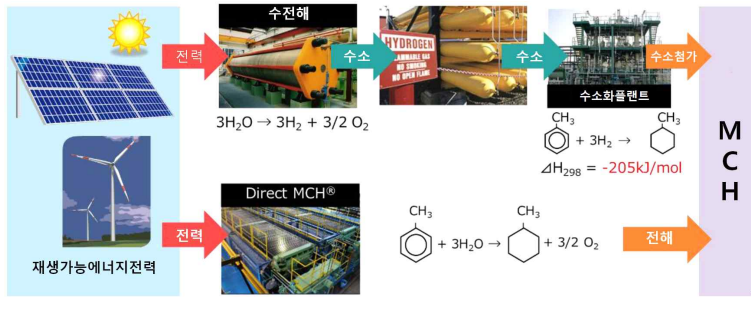


출처: 가와사키시 웹페이지(https://www.city.kawasaki.jp/590/page/0000111043.html. [2023.07.18. 접속]

  - 동 실증사업은 2020년에 종료되었고 현재는 상용화를 위한 데이터 축적 중

- 한편, 「직접MCH 전해합성(Direct MCH)」는, 기존의 수소캐리어로서의 MCH 합성기술이 톨루엔에서 수소를 합성하기 위한 수소 생산, 운송 및 저장, 합성 공정에서 에너지 손실이 많다는 점에 착안, 톨루엔에 직접 물을 투입 및 전기분해하여 MCH 및 물을 생성하는, 에너지 손실을 방지하는 기술

〈그림 7〉 기존 MCH합성기술 과 직접MCH전해합성기술의 공정 비교



출처: ENEOS(2023)

주: 기존의 MCH합성(그림 상단)은 수소를 따로 생성 및 저장 후 톨루엔의 수소화 플랜트에서 수소를 투입, MCH를 합성해야 했기 때문에 에너지손실이 발생하고 비용이 많이 들었으나, 직접MCH전해합성기술(그림 하단)은 톨루엔에 물을 첨가 후 On-site에서 직접 전기분해하여 MCH를 생성함으로써 에너지효율 향상 및 수소 저비용화에 기여

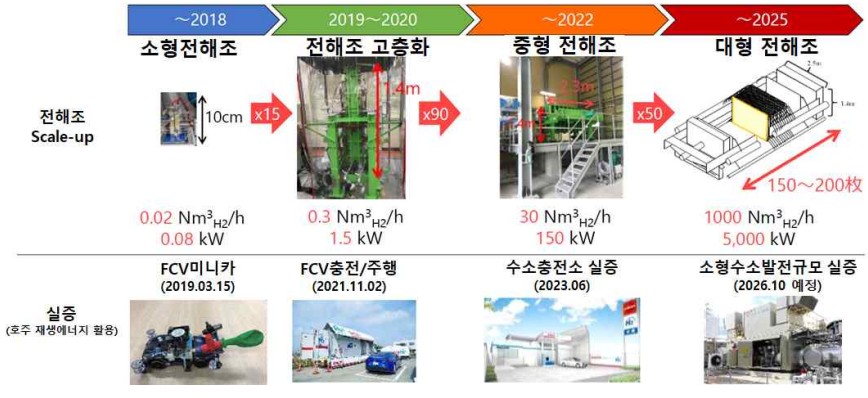
- 「직접MCH 전해합성」은 MCH를 활용한 CO2 free 수소 공급망의 상류부문(MCH 제조)을 대체하는 기술로서, NEDO의 「그린이노베이션기금사업」의 일환으로서 2021년부터 2031년까지 추진되는 연구개발 및 실증사업

  ※ 동 기술이 상용화될 경우 기존의 MCH합성 기술 대비 수소 제조에 드는 설비비용을 절반 수준으로 줄이는 것이 가능

- 기술을 독자 개발한 ENEOS사는 공업용 사이즈로는 최대 규모인 3㎡의 전극을 적층한 중형 전해조(수소제조능력 30N㎥/h)의 실증 플랜트를 호주에 구축하였으며(`22년) 동 설비에서 제조된 MCH 약 200리터를 일본으로 수송하여 요코하마에서 탈수소화 공정을 통해 수소를 추출, 수소충전소에서 FCV에 충전하는 실증 추진(`23. 6).

- ENEOS는 금번의 연구결과를 바탕으로 재생에너지 기반의 MCH 대량 제조를 위해 Direct MCH 전해조의 대형화를 추진하며, `25년에는 전극을 150~200매 적층한 대형 전해조(수소 제조능력 1000N㎥/h)의 개발 및 상용 플랜트의 운용을 목표로 하고 있음 (ENEOS, 2023; 가스신문, 2023)

〈그림 8〉 ENEOS(日)의 Direct MCH의 실증현황 및 상용화 로드맵



출처: ENEOS(2023)

주: NEDO성과발표회가 있던 `23년 7월 시점에는, 호주에 구축한 중형 전해조에서 생산한 MCH를 일본에 수송, 국내에서 탈수소화를 거쳐 충전소에 보급, FCV로의 충전까지 실증을 완료한 상태

정리 및 시사점

- 일본은 기업이 컨소시엄을 구성하여 해외 수소공급망 사업화 Seed를 발굴하고 정부의 지원을 견인
  - AHEAD가 가장 먼저(`15년) 톨루엔의 수소에너지 캐리어 활용성에 주목, 사업구상 후 NEDO를 통한 사업 추진
  - HySTRA 역시 호주의 갈탄에너지 활용가능성에 착안, 액화수소 및 장거리 저장·운송 실증사업을 구상하여 추진
    * 상기 프로젝트들은 NEDO의 '수소사회구축기술개발사업 - 대규모수소에너지이용기술개발'으로 조성
- 일본은 대규모 실증사업의 성공을 통해 중·장기적인 상용화 가능성 제시
  - 특정 분야에서 높은 수준의 기술을 보유만 하고 있는 것과, 실증사업을 통해 기술의 상용화 가능성을 국제사회에 증명하는 것은 향후 해당 기술의 투자유인효과 및 기술성숙도 제고 측면에서 큰 간극이 존재
  - 실증사업의 성공은 해당 기술의 효용성과 발전가능성을 나타내는 지표로서 작용하며, 이후의 R&D 목표가 기술의

Scale-up에 집중됨으로써 효율적인 R&D투자를 추진할 수 있음

- 또한 성공적인 실증사업은 국제사회에서 해당 기술 및 기술 운용 방식의 표준화를 추진하는 강력한 동력이 되며, 이는 글로벌 기술 선도 및 국제경쟁력 강화로 이어질 가능성이 높음

• 우리나라의 수소경제 목표 달성을 위해서는 국제협력을 통한 해외수소 저장 및 운송기술의 R&D 및 실증 추진 필요

- 우리나라 역시 일본과 같이 국내에서 생산하는 수소만으로는 미래의 수소 수요를 충당하기 어려우며, 이를 위해서는 해외로부터의 수소 생산 및 수입이 필수적[11)]

- 이에 필요한 수소 저장 및 운송기술에 대한 R&D를 통해 수소 액화 및 저장·운송 기술 수준 제고 필요

  * 수소 저장탱크 용량 대형화 및 액체수소의 손실을 최소화하기 위한 일일기화율(BOR)[12)]성능 제고 등이 핵심

- 미래에 필요한 수소 수요를 충족하기 위해 해외 수소 확보 거점을 확보하는 한편, 해당국에서 생산된 수소를 저장·운송하기 위한 실증사업의 조속한 추진 필요

참고문헌

1) 가스신문(2023), '일 ENEOS, 저비용 수소로 수소차 충전'. 2023.07.27.

2) 가와사키시 웹페이지(https://www.city.kawasaki.jp/590/page/0000111043.html. [2023.07.18. 접속]

3) 관계부처합동(2021a), '2050 탄소중립 시나리오(안)'

4) 관계부처합동(2021b), '제1차 수소경제 이행 기본계획'

5) 경제산업성(2021), '향후 수소정책의 과제와 대응의 방향성 중간정리(안)'

6) 경제산업성(2022), '수소를 둘러싼 국내외 정체와 수소정책의 현황에 관하여'

7) 경제산업성(2023), '수소기본전략 개정판'

8) 윤창원(2019), '수소사회 실현을 위한 액상유기수소운반체(LOHC)기술'

9) Chiyoda(2023), 'MCH水素キャリアを活用した水素社会構築への取り組み'

10) ENEOS(2023), '직접MCH전해합성 기술개발'. NEDO 수소·연료전지성과보고회 발표자료

11) HySTRA(2023), '미이용갈탄유래 수소 대규모 해상운송 공급망 구축 실증사업'

12) Imagawa Kenichi 외(2014), '水素の大量貯蔵輸送システム'

13) NEDO 웹페이지(https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100807.html). [2023.07.15. 접속]

11) '2050 탄소중립 시나리오'에 따르면, 2050년의 수소 수요인 2,790만 톤 중 2,290만 톤의 수소를 해외로부터 조달해야 함

12) Boil off rate