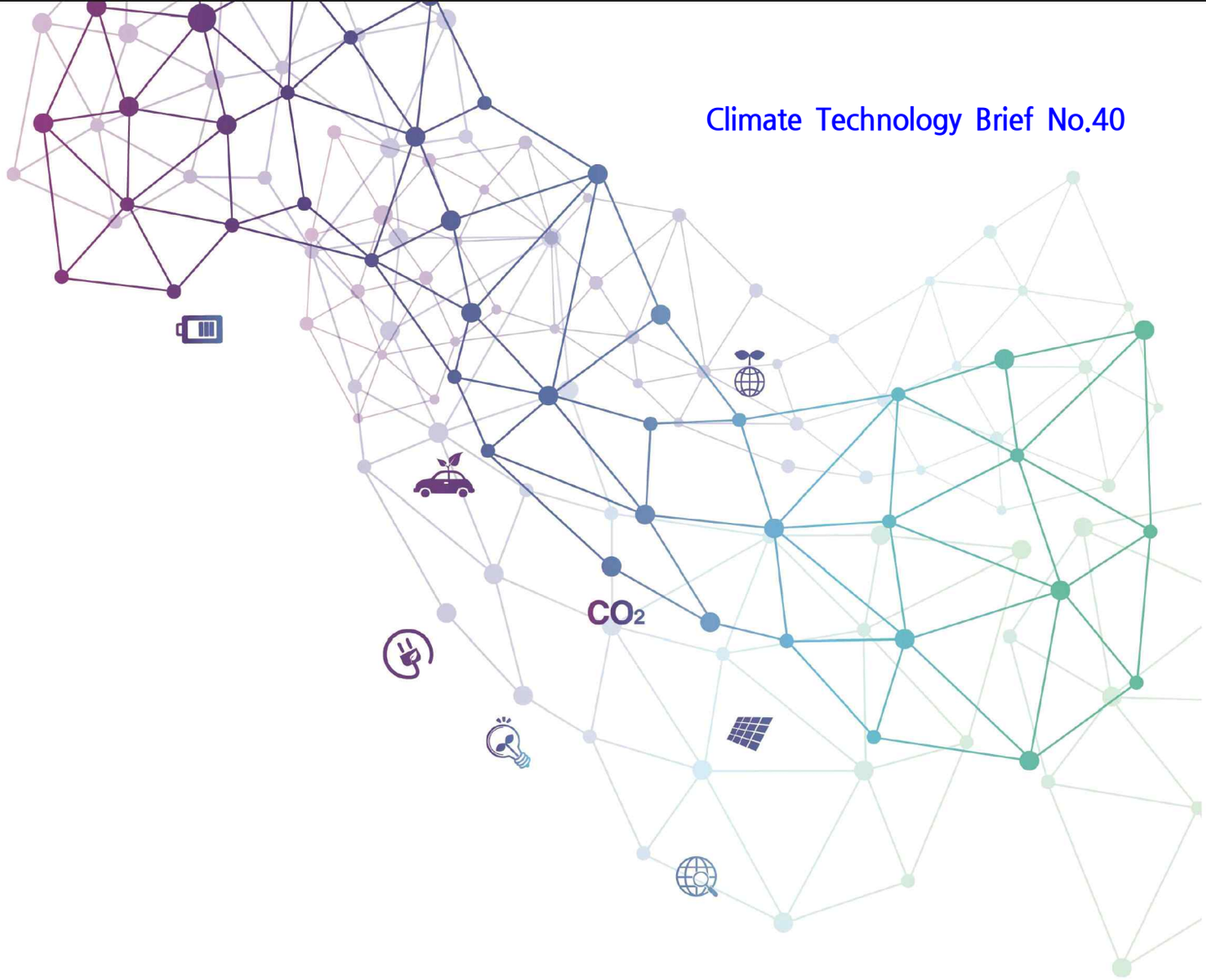

Climate Technology Brief No.40

수소·연료전지 전략 로드맵 달성을 위한 일본의 대응현황

본 보고서는 일본 경제산업성에서 발간한
「水素 · 燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況」에
수록된 내용을 발췌·번역한 것입니다.

한국에너지기술연구원

기후기술전략실

1 국제적 수소 공급망(Supply Chain) 구축

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[1-1] 저비용 수소 조달·공급①	· **(로드맵)** '30년 해외 미이용 에너지 이용 수소 공급망 도입 추진 · **(이행계획)** 해외 수소 공급원 부존량과 일본으로의 수송 가능성에 대해 조사/분석 실시	**대응현황**	▸ 호주 및 브루나이와 수소 공급망 실증사업 실시('15~) ※ 호주는 갈탄, 브루나이는 미이용 가스를 수소로 전환하여 공급 ▸ 러시아*와 수소 공급망에 대한 타당성 조사 실시 협력각서 체결('19) * 러시아 자원에너지청 및 러시아 Rosatom Overseas ▸ 남미 및 중동지역에서 수소 공급망 타당성 조사 검토 진행
		해결과제	▸ 현재 실증 중인 프로젝트 결과 검증 및 해외에서의 수소 조달 가능성 검토
		향후일정	▸ 수소 공급망 실증사업 실시 중 ▸ 추가검증 필요성에 대해 검토 중
		해외현황	▸ (노르웨이) HyPER 프로젝트 실시 ▸ (포르투갈) Green Flamingo 프로젝트 ▸ (싱가폴) 일본과 수소이용에 대한 MOU 체결('20.3)
[1-2] 저비용 수소 조달·공급②	· **(로드맵)** 수소가격* '30년 30엔/Nm^3 및 장기적으로 20엔/Nm^3 달성 추진 * 공장 인도 시점에서의 수소 가격 · **(이행계획)** 수소가격 저감을 위한 기술개발 지속 실시 및 기존 에너지 비용과 동등한 비용 경쟁력 실현 검토	**대응현황**	▸ 현재 일본 수소충전소에서의 수소 판매 가격 : 100엔/Nm^3
		해결과제	▸ 수소 가격 저감을 위한 기반기술 개발 및 일본 내 수소 수요 확대
		향후일정	▸ 수소 가격 : ('30) 30엔/Nm^3, (중장기) 20엔/Nm^3
[1-3] 국제적 수소 공급망 구축 - 수소 제조	· **(로드맵)** 갈탄 가스화에 의한 수소 생산 가격 저감 - (現) 수백엔/Nm^3 → ('22) 12엔/Nm^3 · **(이행계획)** 갈탄 가스화로의 대형화 및 고효율화를 위한 연구개발	**대응현황**	▸ '20년부터 실증사업을 통해 갈탄가스화로 운영 예정 ※ 운영 초기 시점에서의 수소가격은 수백엔/Nm^3(추정) ▸ 가스화로의 대형화·고효율화 및 가스화 공정 저탄소화 연구개발 실시
		해결과제	▸ 갈탄가스화 기술개발 ▸ 상용화 규모의 가스화로 운영을 위해선, 효율적인 갈탄 건조기술 및 대형 공기분리장치(ASU) 개발 ▸ 바이오매스 연료가스화 기술개발
		향후일정	▸ 2021년까지 갈탄 건조기술 개발
[1-4] 국제적 수소 공급망 구축 - 액화수소①	· **(로드맵)** - 지상용 액화수소 탱크 용량 : (現) 수천m^3 → ('22) 5만m^3 - 수소 액화 원단위 : (現) 13.6kWh/kg → ('22) 6kWh/kg · **(이행계획)** 액화수소 저장탱크의 대형화 및 수소 액화 효율 향상을 위한 기술개발 추진	**대응현황**	▸ 2,500m^3용량의 수소 탱크 운전개시 예정(NEDO, '20.6월) ▸ 세계 최초 액화수소 운반선 수소프론티어 출항('19.12) 및 해상수송용 1,250m^3급 탱크 탑재 ▸ 5만m^3 규모의 수소탱크 요소기술 개발 실시(NEDO, '19~'22)
		해결과제	▸ 극저온 환경에서 버틸 수 있는 수소탱크의 내구성 향상
		향후일정	▸ ('19~'20) 극저온 환경에서의 소재 특성 파악 등 ▸ ('21~'22) 수소탱크 단열구조 결정과 5만m^3급 저장 탱크 시공 요령 확인 실시
		해외현황	▸ (미국, NASA) 3,300m^3 수소 탱크 가동 중 및 4,700m^3 탱크 건설 계획 예정

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="3">주요 내용</th></tr>
<tr><th>로드맵 및 이행계획</th><th colspan="2">현황 및 해결과제</th></tr>
<tr><td rowspan="4">[1-5]
국제적
수소 공급망
구축
- 액화수소②</td><td rowspan="4">· (로드맵)
- 지상용 액화수소 탱크 용량
: (現) 수천m^3 → ('22) 5만m^3
- 수소 액화 원단위
: (現) 13.6kWh/kg → ('22) 6kWh/kg
· (이행계획) 액화수소 저장탱크의 대형화 및 수소 액화 효율 향상을 위한 기술개발 추진</td><td>대응현황</td><td>▸ 현재 5톤/일 규모에서 효율 13.6kWh/g이며, 10% 이상 인하 가능한 기술개발 추진
▸ 상용화를 위해 50~150톤/일 규모 플랜트의 효율화·대형화 추진</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 다양한 냉매를 사용하는 새로운 공정 과정 개발 등</td></tr>
<tr><td>향후일정</td><td>▸ '30년까지 50~150톤/일 상용까지 과정 개선 실현</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ (독일, Linde) 50~150톤/일 및 효율 6kWh/kg 달성 가능하다는 전망 발표('16)</td></tr>
<tr><td rowspan="4">[1-6]
국제적
수소 공급망
구축
- 유기하이드라이드</td><td rowspan="4">· (로드맵) 유기하이드라이드를 이용한 수소공급비용 저감 추진
- 톨루엔(Toluene) 로스율
: (現) 1.4% → ('25) 1/2까지 감소
· (이행계획) '30년 이후 유기하이드라이드 공급망 저가화를 위한 기반 기술 개발 지속 실시</td><td>대응현황</td><td>▸ 수소화/탈수소화 과정에서 불순물로 인한 손실로 톨루엔 로스율 저감 추진 중</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 불순물 생성량을 1/3로 저감하는 수소화/탈수소화 촉매 개발 필요</td></tr>
<tr><td>향후일정</td><td>▸ 2025년까지 수소화/탈수소화 촉매 개발 추진</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ (독일, Hydrogenious) 디벤질톨루엔(Dibenzyltoluene) 기반 액상유기수소운반체(LOHC) 기술을 소규모(300Nm^3/h) 상용화 진행</td></tr>
<tr><td rowspan="4">[1-7]
국제적
수소 공급망
구축
- 액화수소 설비</td><td rowspan="4">· (로드맵) 설비에 대한 연구개발을 통해 수소 생산-저장-운송-활용까지의 공급망(Supply Chain) 실현
· (이행계획) 액화수소 기화기, 승압펌프, 배관 등의 대용량화 연구개발</td><td>대응현황</td><td>▸ '19년부터 NEDO 사업을 통해 액화수소 관련 기기 대용량화 연구개발 지원 시작
▸ Loading arm, 승압펌프, BOG 압축기 대용량화 개발 진행 중</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 극저온 환경 대응</td></tr>
<tr><td>향후일정</td><td>▸ 대용량화 연구개발 추진('19~'22)</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ (독일, Linde) 약 0.2톤/h의 액화수소 승압펌프 판매</td></tr>
<tr><td colspan="3">
<table>
<tr><th colspan="2">항목</th><th>2019년 기준</th><th>상용화 시 예상 스펙</th></tr>
<tr><td rowspan="3">설비</td><td>Loading arm</td><td>약 150mm(파일럿 규모) 구경</td><td>약 400mm 구경</td></tr>
<tr><td>승압펌프</td><td>액화수소용 승압펌프는 0.2t/h 정도의 적은 유량 대응 밖에 존재하지 않음</td><td>16톤/h</td></tr>
<tr><td>BOG 압축기</td><td>극저온 수소가스용 압축기는 없음</td><td>3톤/h</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">[1-8]
국제적
수소 공급망
구축
- CO_2 배출량</td><td rowspan="3">· (로드맵) '30년까지 천연가스 개질 수소생산에 비해 CO_2 배출량을 60% 감소하고 장기적으로 CO_2 배출량 제로(zero) 달성
· (이행계획) 공급망을 통해 CO_2 배출량 감축 연구개발 추진</td><td>대응현황</td><td>▸ 현재 '갈탄+CCS' 방법을 이용해 수소를 생산했을 때, CO_2 배출량*은 0.1kgCO_2/Nm^3H_2
* CO_2 배출량은 원료, 제조방법, 전력원, 운송거리 등에 따라 차이 발생
▸ 수전해 및 갈탄 가스화 등 수소 제조 시 CO_2 배출 감축을 위해 각 공정에서 고효율화·저탄소화 필요</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 수전해, 갈탄 가스화 등의 고효율화·저탄소화 등을 위한 연구개발
▸ 수소 제조 과정에서 CCS와 바이오매스를 활용</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ (IPHE) 수소 생산 분석 관련 테스크포스를 출범하여 수소 생산 과정에서의 온실가스 및 오염물질 배출량을 측정하기 위한 방법론 공유</td></tr>
</table>

2 재생에너지 기반 수소 이용 확대

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="3">주요 내용</th></tr>
<tr><th>로드맵 및 이행계획</th><th colspan="2">현황 및 해결과제</th></tr>
<tr><td rowspan="3">[2-1]
알칼라인
(AEM)
수전해</td><td rowspan="3">· (로드맵)
- AEM 수전해 시스템 5만엔/kW 달성
· (이행계획)
① 전류밀도, 효율, 내구성 향상을 위한 기술개발
② 셀 열화 등 내구성 평가방법 검토·표준화 진행
③ 신재생에너지 발전량 예측 등 다양한 정보를 바탕으로 한 시스템 운영 최적 기술개발</td><td>대응현황</td><td>▸ 후쿠시마현에 재생에너지 이용 세계 최대(10MW) 수소제조시설 'FH2R' 실증 개시(NEDO 사업)
· 장비 고효율화·고내구화 기술개발 및 저비용화를 위한 운전 최적화에 대한 실증 추진</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 수전해 장치 고효율·고내구를 위한 분리막/전극 개발
▸ 수전해 부품·소재 유지 관리 최적화를 통한 비용 절감</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ AEM 수전해 시스템 비용 : 5.5~15.4만엔/kW
▸ (독일) 10MW 수전해 설비 건설 중
▸ (오스트리아) 6MW급 설비 가동 중</td></tr>
<tr><td colspan="4">
<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">구분</th><th>2019년 말</th><th colspan="2">로드맵 목표 값</th><th rowspan="2">해외현황</th></tr>
<tr><th>실증 값</th><th>2020</th><th>2030</th></tr>
<tr><td rowspan="2">시스템</td><td>에너지소비량(kWh/Nm^3)</td><td>4.3 ~ 5.0</td><td>4.5</td><td>4.3</td><td>4.6</td></tr>
<tr><td>설비 가격(만엔/kW)</td><td>14.4</td><td>7.8</td><td>5.2</td><td>5.5~15.4</td></tr>
<tr><td rowspan="3">스택</td><td>열화율(%/1,000시간)</td><td>평가 중</td><td>0.12</td><td>0.10</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>전류밀도(A/cm^2)</td><td>0.15~1.0</td><td>0.7</td><td>0.8</td><td>0.5</td></tr>
<tr><td>코발트 사용량(mg/W)</td><td>< 0.7</td><td>3.4</td><td>0.7</td><td>7.3</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">[2-2]
고분자
전해질
(PEM)
수전해</td><td rowspan="3">· (로드맵)
- PEM 수전해 시스템 5만엔/kW 달성
· (이행계획)
① 전류밀도, 효율, 내구성 향상을 위한 기술개발
② 셀 열화 등 내구성 평가방법 검토·표준화 진행
③ 신재생에너지 발전량 예측 등 다양한 정보를 바탕으로 한 시스템 운영 최적 기술개발</td><td>대응현황</td><td>▸ 야마나시현에서 1.5MW급 수전해 실증 예정(NEDO 사업)
▸ 설비의 고효율·고내구화를 위한 기술개발
▸ 셀·스택 복층화 및 운전성능의 양립을 위한 기술 검증 수행</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 수전해 장치 고효율·고내구를 위한 막, 촉매 등 개발
▸ 셀/스택 복층화 및 운전 성능의 양립을 위한 기술 검증</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ PEM 수전해 시스템 비용 : 12.1~19.8만엔/kW</td></tr>
<tr><td colspan="4">
<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">구분</th><th>2019년 말</th><th colspan="2">로드맵 목표 값</th><th rowspan="2">해외현황</th></tr>
<tr><th>실증 값</th><th>2020</th><th>2030</th></tr>
<tr><td rowspan="2">시스템</td><td>에너지소비량(kWh/Nm^3)</td><td>4.6~4.8</td><td>4.9</td><td>4.5</td><td>5.2</td></tr>
<tr><td>설비 가격(만엔/kW)</td><td>37.9</td><td>11.7</td><td>6.5</td><td>12.1~19.8</td></tr>
<tr><td rowspan="4">스택</td><td>열화율(%/1,000시간)</td><td>-</td><td>0.19</td><td>0.12</td><td>0.25</td></tr>
<tr><td>전류밀도(A/cm^2)</td><td>> 2.2</td><td>2.2</td><td>2.5</td><td>2.0</td></tr>
<tr><td>백금족 촉매 사용량(mg/W)</td><td>< 2.7</td><td>2.7</td><td>0.4</td><td>5.0</td></tr>
<tr><td>백금 촉매 사용량(mg/W)</td><td>< 0.7</td><td>0.7</td><td>0.1</td><td>1.0</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td>[2-3]
재생에너지
기반
수소사회
모델 구축</td><td colspan="3">▸ 수소사회 달성을 위해 수소제조, 저장·운송, 활용까지 일체화된 공급망 구축은 필수
▸ 후쿠시마 수소에너지 연구단지(FH2R)에서 생산된 수소는 수소차 또는 공장에서 활용
▸ 후쿠시마현 외 지역에서도 지역적 특색을 살린 다양한 수소 활용 모델 구축 및 실증 진행 예정
 </td></tr>
</table>

3 발전 부문에서의 수소 활용

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[3-1] 수소발전 도입①	· **(로드맵)** - '30년 수소 발전 상용화를 목표로 기술 개발 및 수소 비용절감 추진 - '20년 既설치된 화력발전 설비에서의 수소혼소 발전도입을 위한 조건 명확화 · **(이행계획)** ① 수소혼소 발전에 대한 타당성 조사 실시(~'19) ② 저 NOx 연소기 개발 및 냉각 기술 개발 등 수소전소를 위한 기술개발 추진	**대응현황**	▸ '18~'19년에 설치된 화력발전 설비에 수소 혼소발전 도입을 위한 타당성 조사 실시
[3-2] 수소발전 도입②	· **(로드맵)** - '30년 수소 발전 상용화를 목표로 기술 개발 및 수소 비용절감 추진 - '20년 既설치된 화력발전 설비에서의 수소혼소 발전도입을 위한 조건 명확화 · **(이행계획)** ① 수소혼소 발전에 대한 타당성 조사 실시(~'19) ② 저 NOx 연소기 개발 및 냉각 기술 개발 등 수소전소를 위한 기술개발 추진	**대응현황**	▸ (1MW급) 수소 0~100%까지 유연하게 대응 가능한 연소기* 기술개발 및 실증운전** * NOx 발생 억제를 위해 습식 방식의 연소기 사용 ** 세계 최초로 100% 수소가스 연소로 도시지역에 전기 공급 성공('18.4) ▸ (500MW급) 수소 혼소 연소기* 기술개발·실증운전 완료 및 수소 20% 혼소시험 성공 * 수소 연소 특성에 대응하기 위해 사전 혼합방식 연소기 사용
		향후일정	▸ 연소기 설계 및 실증운전 완료('15~'18)
		해외현황	▸ (이탈리아, Enel) 12MW 가스터빈 수소혼소(80%) 실시 ▸ (미국, 유타州) 수소 30% 혼소 GTCC(840MW급) 2025년 운전 개시 예정
[3-3] 수소발전 도입③	· **(로드맵)** - '30년 수소 발전 상용화를 목표로 기술 개발 및 수소 비용절감 추진 - '20년 既설치된 화력발전 설비에서의 수소혼소 발전도입을 위한 조건 명확화 · **(이행계획)** ① 수소혼소 발전에 대한 타당성 조사 실시(~'19) ② 저 NOx 연소기 개발 및 냉각 기술 개발 등 수소전소를 위한 기술개발 추진	**대응현황**	▸ 수소전소 발전을 위해 NOx값이 50ppm 미만이 되는 연소기의 일부 기본설계를 완료 및 실증 지속 진행 · 既설치된 화력발전 설비의 수소혼소 발전의 수소 비율은 20%를 달성하였지만, 수소전소를 위해 전용 연소기 개발이 필요
		해결과제	▸ 수소전소 연소기의 연소시험을 통해 NOx, 역화, 연소 진동 등의 검증 필요
		향후일정	▸ (~'25) 실제 연소기 설계(연소 진동 예측 등) 및 실 연소기 시험을 위한 연구 개발
		해외현황	▸ 고온·드라이식 저 NOx 연소기를 이용한 GTCC 수소전소 발전 실증 전무 ▸ (네덜란드) Magnum Project에서 수소전소 발전 2025년 운전 개시 예정 ▸ (미국, 유타州) 수소전소 GTCC(840MW급) 2045년 운전 개시 예정

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[3-4] Hydrogen Carrier 탈수소반응의 고효율화·저가화 ①	· **(로드맵)** 유기하이드라이드, 암모니아의 탈수소 반응에 의해 생산된 수소를 이용하여 수소 발전을 할 경우 탈수소 반응의 고효율·저가화 필요 · **(이행계획)** 탈수소 반응에 폐열을 이용하여 고효율화·저가화 추진 등	**대응현황**	▸ 현재 종합 에너지효율은 50~70% ▸ 수소 발전 이용 시 가스터빈, SOFC 폐열 등을 탈수소 열원으로 활용하여 고효율·저가화를 목표
		향후일정	▸ ('30) 가스터빈, SOFC 폐열 등을 탈수소반응 열원으로 사용하는 기술 개발 ▸ ('50) 탈수 장치 일체형 대형 분산 발전시스템 개발
		해외현황	▸ (독일, Hydrogenious) 소규모 LOHC기술 실용화 및 대규모 적용 수소 가격 저감에 대한 사업 검토
[3-5] Hydrogen Carrier 탈수소반응의 고효율화·저가화 ②	· **(로드맵)** 가스터빈 복합사이클(GTCC)에서 발생하는 열의 일부를 탈수소화에 활용하여 탈수소반응 고효율화·저가화 추진 · **(이행계획)** 탈수소 반응에 폐열을 이용하여 고효율화·저가화 추진 등	**대응현황**	▸ 현재, 암모니아를 이용하기 위해서는 많은 열을 투입해 탈수소·정화 과정이 필요 ▸ 발전 설비의 폐열을 이용하여 외부 열 투입을 감소시키고, 정제 공정의 간소화를 위한 시스템 개발 중
		해결과제	▸ 시스템 구성, 암모니아 분해장치, 연소기 등 검토 필요
		향후일정	▸ '19~'20년 NEDO 사업에서 기초적인 검토를 통해 본 시스템의 구성 조건을 확정하고, 상용화에 필요한 개발 항목 제시
		해외현황	▸ 암모니아 열분해 이용 GTCC 시스템은 특허 출원 및 소규모 시험 외에 거의 고려되지 않는 상황
[3-6] 수소 열병합 발전 시스템	· **(로드맵)** 물분사를 하지 않고, NOx를 억제하는 기술을 개발 - '20년까지 발전효율 27%(1MW, LHV) 및 NOx 35ppm 달성 추진 · **(이행계획)** 수소 열병합 발전시스템 효율 향상을 위해 물 분사 없고 NOx를 억제할 수 있는 기술 개발 실시(~'20)	**대응현황**	▸ 물 분사 없는 드라이 방식(1MW급)에 대한 프로토타입 연소기 개발 완료 ▸ 개발한 연소기에 대한 실증사업 추진 중('19~'20)
		해결과제	▸ 실제 연소기 개발 및 실행 실증운전 필요
		향후일정	▸ '20년 말까지 1MW급 가스터빈에서 드라이 방식 실증 운전 완료 ▸ '20년 이후 업그레이드를 실시하고, 1MW급 출시

4 모빌리티 분야에서 활용

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[4-1] 모빌리티 및 수소충전소	· **(충전소)** ('20) 260개소 → ('25) 320개소 · **(자동차)** ('20) 4만대 → ('25) 20만대 → ('30) 80만대 · **(버스)** ('20) 100대 → ('30) 1,200대 · **(지게차)** ('20) 500개 → ('30) 1만대	**대응현황**	▸ 일본 내 보급 현황('19년 말) · 수소충전소 117개소, 수소차 3,757대, 수소버스 57대, 지게차 250대
[4-2] 연료전지 자동차 - 가격	· **(로드맵)** '25년, 하이브리드 자동차 가격과 동등한 수준에 도달 - 하이브리드 차량과 수소차 가격 차이 : (현재) 300만엔 → ('20) 180만엔 이하 → ('25) 70만엔 * 도요타 : (수소) 740만엔 (하이브리드) 500만엔 혼다 : (수소) 770만엔 (하이브리드) 385만엔 · **(이행계획)** 산학연이 협력한 다층적 기술개발 체계 구축	**해결과제**	▸ 성능, 내구성, 신뢰성 향상 ▸ 비용절감 및 양산기술 확립 ▸ 사업성 성립
		향후일정	▸ 연료전지 스택과 고압 수소탱크 생산 설비를 연간 3만대 이상으로 확대 예정(現 3,000대)
		해외현황	▸ 미국 판매 가격(세금 제외) · 도요타 미라이 $58,500, 현대 넥쏘 $58,735
[4-3] 연료전지 자동차 - 차종 확대	· **(로드맵)** 2025년, SUV 또는 밴 타입의 수소연료전지 차량을 도입하여 판매 확대 및 가격 절감을 도모 · **(이행계획)** 산학연이 협력한 다층적 기술개발 체계 구축	**대응현황**	▸ 현재 일본에서는 도요타와 혼다*에서 세단으로 된 수소차를 각각 1종씩 판매 * 도요타 미라이('14.12 출시), 혼다 Clarity('16.3 출시)
		해결과제	▸ 성능, 내구성, 신뢰성 향상 ▸ 비용절감 및 양산기술 확립 ▸ 사업성 성립
		향후일정	▸ 2020년 말 도요타에서 미라이 후속 모델 공개 예정 ▸ 연료전지 스택과 고압 수소탱크 생산 설비를 연간 3,000대에서 연간 3만대 이상으로 확대 예정
		해외현황	▸ (한국, 현대) SUV 타입 수소차 넥쏘(NEXO) 출시('18) ▸ (독일, 벤츠) SUV 타입 플러그인 GLC-F-CELL 출시('18)
[4-4] 연료전지 자동차 - 시스템	· **(로드맵)** 연료전지 시스템 내구성 및 가격 저감 기술개발 ※ 현재 연료전지 시스템 성능 : 출력밀도 3.1kW/L, 가격 약 2만/kW · **(이행계획)** ① 내구성 향상(전해질 박막화 및 Cross leak 방지 등) ② 촉매 성능·내구성 향상(귀금속 사용량 저감과 코어쉘 촉매, 나노와이어·나노시트 등 새로운 구조의 촉매 개발을 추진)	**대응현황**	▸ 연료전지 시스템 생산설비 확충 ▸ 연료전지 스택 소형화 기술 개발 ▸ 야마나시 대학에서 연료전지 내구성이 4배 향상된 수소극 촉매(PtCo 합금 촉매) 개발(NEDO 사업)
		해결과제	▸ 전해질막의 내구성 향상 ▸ 백금(Pt) 사용량 저감 및 대체 촉매의 고성능화 등
		향후일정	▸ NEDO 지원으로 전해질 및 촉매 연구개발 실시 ▸ 2020년 이후 수소차 후속 모델 보급을 위해 자동차 제조회사는 생산 설비 확충, 기술 혁신 등 추진
		해외현황	▸ 미국과 유럽에서는 백금 사용량 저감을 위해 코어쉘(Core-Shell) 촉매 및 비백금 촉매 개발 프로젝트 실시

구분	현재	2020년	2025년	2030년
최대 출력밀도(kW/L)	3.1	4.0	5.	6.0
내구성	승용차 15년	승용차 15년 이상	승용차 15년 이상 상용차 15년	승용차 15년 이상 상용차 15년 이상
시스템(만엔/kW)	약 2	< 0.8	< 0.5	< 0.4
스택(만엔/kW)	-	< 0.5	< 0.3	< 0.2

<table>
<tr><th rowspan="2">구분</th><th colspan="3">주요 내용</th></tr>
<tr><th>로드맵 및 이행계획</th><th colspan="2">현황 및 해결과제</th></tr>
<tr><td rowspan="4">[4-5]
연료전지
자동차
- 저장</td><td rowspan="4">· (로드맵) 수소 저장시스템 기술개발
· (이행계획) 수소탱크 가격에서 많은 비중을 차지하는 탄소 섬유 사용량 절감 등 기술개발 실시</td><td>대응현황</td><td>▸ 고압 수소저장시스템 기반기술 개발</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 탄소섬유, 라이너 재료, 밀봉 재료 등 저가화
▸ 저가 고속경화수지를 이용한 복합재료 개발 등</td></tr>
<tr><td>향후일정</td><td>▸ NEDO 사업을 통해 생산 공정 개발 및 탄소재료 등 저가화 기술 개발 중('20년 시작)
▸ 2020년 이후 차세대 자동차 모델 보급을 위해 주행거리 연장, 생산설비 확충 추진</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ (한국, 현대) 일본 인증 획득(주행거리 820km, 수소탱크 6.33kg/대)</td></tr>
<tr><td colspan="3">
<table>
<tr><th>구분</th><th>현재</th><th>2020년</th><th>2025년</th><th>2030년</th></tr>
<tr><td>주행가능 거리</td><td>700km</td><td>-</td><td>-</td><td>800km</td></tr>
<tr><td>내구성</td><td>승용차 15년</td><td>승용차 15년 이상</td><td>승용차 15년 이상
상용차 15년</td><td>승용차 15년 이상
상용차 15년 이상</td></tr>
<tr><td>수소저장시스템</td><td>5.7wt%</td><td>6.0wt%</td><td>-</td><td>-</td></tr>
<tr><td>(저장용량 5kg 기준)</td><td>약 70만엔</td><td>30~50만엔</td><td>< 30만엔</td><td>10~20만엔</td></tr>
</table>
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">[4-6]
수소충전소
구축 비용</td><td rowspan="3">· (로드맵) 수소충전소 구축 비용
- ('19) 3.3억엔 → ('20) 2.3억엔(보급 초기 대비 1/2 감소)→ ('25) 2.0억엔
· (이행계획) 수소충전소 건설비용 절감을 위한 기술개발 및 규제검토 추진</td><td>해결과제</td><td>▸ 기기 간의 인터페이스 및 제어 사양 등 표준화
▸ 위험성 평가 재실시에 의한 기준 재검토 및 저가 재료 사용 가능화
▸ 저가·고내구·고신뢰 기기(전기화학식 압축기 등) 개발
▸ 수소저장합금 등 고용량·고내구 수소 저장 재료 개발
▸ 축압기 상용압력 상한 등 규제 재검토</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ 사업자에 따라 저가 재료를 사용하는 기기 설치 및 사용 용이
▸ 수소충전소 건설에 필요한 안전대책은 다소 부족</td></tr>
<tr><td colspan="2">
<table>
<tr><th>구분(단위 : 억엔)</th><th>압축기</th><th>축압기</th><th>프리쿨러</th><th>디스펜서</th><th>기타 공사비</th><th>합계</th></tr>
<tr><td>보급 초기</td><td>1.4</td><td>0.5</td><td>0.3</td><td>0.6</td><td>1.8</td><td>4.6</td></tr>
<tr><td>2018년(실적)</td><td>0.6</td><td>0.7</td><td>0.2</td><td>0.2</td><td>1.4</td><td>3.1</td></tr>
<tr><td>2019년(실적)</td><td>0.6</td><td>0.6</td><td>0.2</td><td>0.2</td><td>1.7</td><td>3.3</td></tr>
<tr><td>2025년(목표)</td><td>0.5</td><td>0.1</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>1.1</td><td>2.0</td></tr>
</table>
* 실적치는 고정식 Offsite 수소충전소(300Nm^3/h)에 대한 보조금 실적금액(2019년)을 계산
* 축압기의 경우 장수명·고가 제품이 도입되는 사례가 증가하여 도입 초기에 비해 비용 증가
* 올림픽과 관련한 건설 수요 증가 등의 영향으로 기타 공사비용 증가
</td></tr>
<tr><td rowspan="3">[4-7]
수소충전소
- 운영비</td><td rowspan="3">· (로드맵) 수소충전소 운영 비용
- ('19) 3.1천만엔 → ('20) 2.3천만엔(보급 초기 대비 1/2 감소)→ ('25) 1.5천만엔
· (이행계획) 수소충전소 운영비용 절감을 위한 기술개발 및 규제검토 추진</td><td>대응현황</td><td>▸ 운영비용은 기술개발 및 규제를 재검토하여 도입 초기(4~5천만엔/년)에서 3.1천만엔*('19)으로 감소
* 고정식 Offsite 수소충전소(300Nm^3/h) 보조금 실적금액계산</td></tr>
<tr><td>해결과제</td><td>▸ 보안 감독자의 복수 스테이션 겸임 및 원격 감시에 의한 수소충전소 무인 운영 실현
· 현재 전문가 심의를 거쳐 법령 개정 작업 중
▸ 위험평가 재실시에 따른 기술 기준 재검토에 의한 검사·보수 비용 절감
▸ 호스(hose) 수명과 새로운 충전 기술개발로 전력 절약을 위한 연구 개발
▸ Seal의 건전성 향상 등 저비용·고내구·고신뢰 기기 개발
▸ 계량기 검정 기간 연장(2년 → 3~5년)</td></tr>
<tr><td>해외현황</td><td>▸ 해외 수소충전소는 원격 감시에 의해 무인으로 운영되고 있어 인건비가 절감
▸ 일본은 연간 1회 법정 보안검사를 의무적으로 받아야 하지만, 해외는 사업자가 자체적으로 검사</td></tr>
</table>

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[4-8] 수소충전소 - 표준화 및 규격화	· **(로드맵)** '20년까지 주요 장치들의 공통된 규격 제정을 추진 · **(이행계획)** 2020년까지 수소충전소 기기 사양과 제어 방법을 통합하기 위한 검토 진행	**대응현황**	▸ 현재 업계 관계자들이 정리된 업계 통일규격(표준화 가이드라인, '19)의 내용을 정밀히 조사하고 있으며, 규제 재검토 등의 최신 동향에 대한 내용을 도입하여 2020년 중에 규격 제정을 목표 · 수소충전소 운영 사업자를 중심으로 한 분과회 및 엔지니어링 회사, 기기 제조업체를 중심으로 한 분과회를 발족하여 표준화 가이드라인 제정을 위한 논의 시작('18.6) · 설계 압력 등 11개 항목에 대해 표준화(안)을 정리하고, 원격 감시형 수소충전소 등에 대한 내용도 반영할 수 있도록 검토
		해결과제	▸ 상기 분과회에서 가이드라인에 포함하는 적절한 사양에 대한 지속적인 논의 및 결론 도출 필요 ▸ 원격 감시형 수소충전소는 인건비 등 절감이 가능하지만 추가로 발생하는 기기비용(원격 감시장치 등)이 있으므로 안전성 및 비용을 고려한 표준 사양 검토 추진
		향후일정	▸ 2020년까지 업계 통일 규격(표준화 가이드라인)제정 ▸ 제정한 규격 중 ISO 등에서 국제 표준화도 추진
		해외현황	▸ 현재 ISO 국제표준(TC197 : 수소기술)에는 수소충전소 및 구성기기의 안전성·성능에 대한 표준 제정·개정이 추진 중 ▸ 미국과 유럽 중심으로 대형 연료전지 트럭 충전 기술과 관련한 국제표준화 검토 추진
[4-9] JHyM을 통한 수소충전소 전략적 구축 추진	· **(이행계획)** 수소연료전지 자동차의 보급과 수소충전소의 자립화를 위해 수소충전소 구축지역을 확대하고 수소충전소 네트워크 구축 고려 - 일본 수소충전소 네트워크 합동회사 'JHyM' 중심으로 구축 진행 * JHyM('18.12) : 일본 내 수소충전소 보급 확산을 위해 설립 · 1기(2018 ~ 2021) : 4개 대도시 중심으로 80개 수소충전소 구축 추진 · 2기(2022 ~ 2027) : 수소충전소 추가 설치를 위해 인프라 사업자, 자동차 제조회사, 금융 투자사 등이 JHyM을 중심으로 협력하는 체계 검토 중	**대응현황**	▸ 제1기 JHyM('18~'21) ① 총 157개('20.5)의 수소충전소 건설 추진 ② 충전소 자립을 위한 사업 검토 ③ 수소연료전지자동차 수요를 위한 사용자 편리성 향상 · 수소충전소 영업 일수 확대 등 정보 최적화 추진 ▸ 제2기 JHyM('22~'27) ① 1기 활동을 근거로 인프라 사업자, 자동차 회사, 금융 투자사 등이 협력하여 로드맵 목표인 2025년 320개소 수소충전소 구축 추진 ② 수소연료전지 자동차 보급, 수소충전소 구축·운영 비용 절감, 수소 공급비용 절감 등을 민관에서 추진

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[4-10] 수소연료전지 버스	· **(로드맵)** - '23~24년, 수소연료전지 버스 가격을 1/2수준까지 감소 - '30년, 충분히 자립 가능한 가격 달성 추진 · **(이행계획)** 차량가격 및 운영 비용 저감을 위한 기술개발 실시	**대응현황**	▸ 현재 수소연료전지 버스 가격은 1억 640만엔이며, 도쿄 등에 57대 도입 ▸ 도요타는 포르투갈 버스 제조회사에 연료전지 시스템 공급 및 중국에 연료전지 Coaster 보급 검토 중
		해결과제	▸ 성능, 내구성, 신뢰성 향상 ▸ 비용절감 기술, 양산기술 확립 ▸ 운영비용 절감, 버스용 충전소 및 백업 충전소 설치 ▸ 안정적인 충전 환경 정비
[4-11] 수소연료전지 트럭	· **(로드맵)** 소형트럭 실증사업과 대형 트럭 기술개발 실시 · **(이행계획)** 차량가격 및 운영비용 절감을 위한 기술개발 실시	**대응현황**	▸ 민간사업자가 연료전지 대형트럭 공동개발* 추진 * ① 도요타 자동차와 히노 자동차 수소연료전지 트럭 개발 추진('20), ② 이스즈와 혼다 자동차 수소연료전지 트럭 공동개발 추진('20), ③ 미쓰비스 후소는 2020년 중반 수소연료전지 트럭 양산 예정('20) ▸ NEDO 사업을 통해 수소연료전지 대형트럭의 수소 충전 프로토콜 및 계량시스템 개발·조사 실시 예정 ▸ 도요타는 미국에서 대형 연료전지 모빌리티 실증 추진('17.4~)
		해결과제	▸ 실증 결과를 기반으로 수소연료전지 트럭 사용을 위한 과제 및 개선점 파악 ▸ 실용에 견디는 단시간 충전 규격 검토
		해외현황	▸ 미국과 유럽을 중심으로 수소연료전지 대형 트럭 충전기술에 대한 국제 표준화 검토 추진 중 ▸ (미국, Nikola) Anheuser Busch(美)로부터 약 800대 수소연료전지 트럭 수주
[4-12] 수소연료전지 선박	· **(로드맵)** '20년까지 선박 분야에서 수소 이용 확대를 위한 이행계획 수립 추진	**대응현황**	▸ 수소연료전지 선박 관련 지침 원안을 개정하고, 국제 해운의 무배출 시스템을 위한 로드맵 발표('20.3) · 수소와 암모니아가 LNG와 바이오연료 등과 함께 대체 연료로 제안 ▸ 도요타는 연료전지 시스템을 수소연료전지 선박 Energy Observer호에 탑재
		해결과제	▸ 수소 이용 확대를 위한 지침 수립 예정
		해외현황	▸ 국제 해사기구(IMO)에서 온실가스 저감 정책을 수립('18), 해운분야에서 온실가스 배출제로 등에 대한 국제적 목표를 제시 ▸ (유럽, Wärtsilä) 수소선박 전용 연료 엔진 개발

5 연료전지 기술 활용

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[5-1] 가정용 연료전지 - 고분자 전해질형 (PEFC)	· **(로드맵)** - ENE-FARM의 시장 자립화를 '20년까지 추진하고, '30년까지 530만대 도입을 목표 - '20년 PEFC 표준기는 80만엔, SOFC 표준기는 100만엔 달성 · **(이행계획)** ENE-FARM의 가격 저감을 위한 기술개발 및 시스템 소형화 추진	**대응현황**	▸ '20년 3월 기준 ENE-FARM(PEFC) 가격 · 초기비용 약 90만엔(장비 가격 72만엔, 공사비 18만엔) 투자회수기간 7.9년 ▸ 시장 자립화를 위해 수요 확대와 가격 저감이 필요함에 따라 지속적으로 가격을 낮추고, 2024년까지 초기비용 80만엔 달성을 추진
		해결과제	▸ 부품 수 절감 및 내수시장 확대로 연료전지 장비 가격 저감 추진 ▸ 공사비용은 경량화·소형화로 설치성 향상 등으로 감소 ▸ 폐열로 바닥난방에 활용, 축전설비 등을 활용한 블랙아웃 대응, IoT 연결에 의한 탄력성 강화 등 사용자 측면에서의 장점을 확대
		해외현황	▸ (독일, Fissman) 일본 기업과 공동으로 가정용 연료전지 판매 중
[5-2] 가정용 연료전지 - 고체 산화물형 (SOFC)	· **(로드맵)** - ENE-FARM의 시장 자립화를 '20년까지 추진하고, '30년까지 530만대 도입을 목표 - '20년 PEFC 표준기는 80만엔, SOFC 표준기는 100만엔 달성 · **(이행계획)** ENE-FARM의 가격 저감을 위한 기술개발 및 시스템 소형화 추진	**대응현황**	▸ '20년 3월 기준 ENE-FARM(SOFC, 700W) 가격 · 초기비용 약 110만엔(장비 가격 94만엔, 공사비 16엔), 투자회수기간 9.5년 ▸ 시장 자립화를 위한 수요 확대와 2024년까지 초기비용 95만엔 달성을 추진 ▸ '19년 10월 400W 제품이 출시되었으며, 초기비용은 약 87만엔(장비 가격 69만엔, 공사비 18만엔), 투자회수기간은 약 9.7년, 발전효율은 47%
		해결과제	▸ 장비 가격은 적은 부품, 판매 대수 증가에 의한 양산효과로 감소 ▸ 공사비용은 시운전 시간 단축, 소형화, 시공시간 단축 등에 의해 감소 ▸ 기존의 발전효율 및 수명향상과 함께 IoT 연결에 의한 탄력성 향상, 잉여전력 매입 추진 등 다양한 방법 활용 검토

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[5-3] 산업·업무용 연료전지 - 소형	· **(로드맵)** - 소형(수kW~수십kW급) 연료전지 가격(장비 가격, 설치·공사비 포함) · ('25) 시스템 50만엔/kW, 발전비용 25엔/kWh - 발전효율(LHV) : ('25) 55% 이상 - 내구성 : (現) 9만 시간 → ('25) 13만 시간 · **(이행계획)** 초기비용 절감 및 내구성 향상을 위한 기술개발 추진	**대응현황**	▸ '20년 3월 기준, 연료전지 시스템 가격 170만엔/kW, 발전효율 50~52%, 발전비용 : 50엔/kWh
		해결과제	▸ 시스템 소형화, 셀스택 효율 및 내구성 향상을 통해 장비 가격의 감소를 추진 ▸ 공사비용은 패키지화, 소형화, 시운전 공정 단축 등을 통해 감소 ▸ 보조기기 비용은 폐열회수 탱크 사양의 표준화, 부품 및 가공비 절감에 의해 감소 ▸ 시스템 비용은 기술개발과 더불어 양산에 의해 감소 ▸ SOFC 발전효율 65% 이상 달성을 위한 기술개발 추진(NEDO 사업, '20~)
[5-4] 산업·업무용 연료전지 - 중대형	· **(로드맵)** - 중대형(수kW~수십kW급) 연료전지 가격(장비 가격, 설치·공사비 포함) · ('25) 시스템 30만엔/kW, 발전비용 17엔/kWh · **(이행계획)** ① 초기비용 절감 및 내구성 향상을 위한 기술개발 추진 ② 발전효율 65%(LHV) 이상의 차세대 상업·산업용 연료전지 개발	**대응현황**	▸ '20년 3월 기준, 연료전지 시스템 가격 170만엔/kW, 발전효율 53~55%, 발전비용 40엔/kWh
		해결과제	▸ 장비가격은 셀·스택의 출력과 성능 향상에 의해 kW당 단가 절감 추진 ▸ 보조기기 가격은 기기 단순화, 구성 사양 재검토 등 해외 시장 확대에 따른 양산에 의한 가격 저감 ▸ '25년까지 발전효율 57% 이상 달성 ▸ SOFC 발전효율 65% 이상 달성을 위한 기술개발 추진(NEDO 사업, '20~)
		해외현황	▸ (미국) Google과 Apple 등에 수 MW 규모로 보급

6 산업 공정 열 이용에서의 수소 활용 가능성

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[6-1] 산업공정·열 이용에서의 수소 활용 가능성	· **(로드맵)** - 장기적으로 CO_2-free 수소를 이용 - 산업공정별로 CO_2-free 수소가 대체할 수 있는 연료·원료의 종류 및 비용이 상이하므로 순차적으로 CO_2-free 수소 도입을 검토 · **(이행계획)** 각 산업 공정에서 CO_2-free 수소 이용에 대한 잠재력 평가 실시	**대응현황**	▸ 산업공정별 수소가격은 7.7~30엔/Nm^3으로 추정 · (철강) 7.7엔/Nm^3(원료탄 2만엔/t 경우) · (석유) 20~30엔/Nm^3(LPG 70-100엔/kg 경우)
		해결과제	▸ (철강) 수소환원 제철기술 개발, 경제적이고 대량 생산 가능한 CO_2-free 수소 공급 필요 ▸ (석유) 기존 설비를 활용한 수입 수소 활용과 자가 발전 가스터빈을 활용한 수소전소 발전의 사전 검토를 진행중이며, 기존설비의 개조 및 새로운 인프라 시설 등 투자 필요
		해외현황	▸ (철강) 유럽 철강연맹에서 저탄소 로드맵을 수립하고, 이를 반영한 EU 그린딜 발표 ▸ (석유) 네덜란드 Rotterdam에서 신재생에너지 기반 수소 이용에 대해 타당성 검토를 진행중

7 글로벌 수소사회 실현

구분	주요 내용		
	로드맵 및 이행계획	현황 및 해결과제	
[7-1] 글로벌 수소사회 실현	· **(로드맵)** - 국제사회와 함께 도쿄 선언에 포함된 이행계획을 수행 · **(이행계획)** ① 정부 주도로 글로벌 협력체계를 활용하여 정책에 관한 정보교환과 공동 조사·연구 등을 추진 ② 글로벌 규모의 민관 협력강화를 위해 민관의 정보교환을 적극적으로 실시하여 기업 요구와 정책 제언을 적극적으로 수용	**대응현황**	▸ 수소각료회의('19)에서 도쿄선언을 실현하기 위한 이행계획을 명확히 하고, 각국의 수소·연료전지 관한 지침으로 Global Action Agenda를 발표 · 수소 공급망 구축, 기술개발, 규제 완화 등 수소 대량생산·소비를 위한 대응방안 공유

[참 고 문 헌]

1. 日本 経済産業省, 水素 · 燃料電池戦略ロードマップの達成に向けた対応状況, 2020

2. 한국에너지기술연구원, 일본 수소·연료전지 전략 로드맵 개정안, 2019

[저자] **이덕기 전문연구위원 / 김혜진 연구원** 한국에너지기술연구원 기후기술전략실

Ⓣ042-860-3194 Ⓔhyejin@kier.re.kr

※ 본 기후기술 브리프에 게재된 내용은 필자 개인(연구진)의 견해이며, 기관의 공식적인 의견이 아님을 알려드립니다. 또한 본지의 내용을 인용할 때는 출처를 밝혀야 합니다.