

한일산업기술협력재단

# 2022~2023 핵심산업 일본 트렌드 연구 -신재생에너지산업 분야-

동반성장연구소 연구위원 김영우



**KJCF**  (재)한일산업·기술협력재단  
KOREA-JAPAN COOPERATION FOUNDATION  
FOR INDUSTRY AND TECHNOLOGY

---

# 2022~2023 핵심산업 일본트렌드 연구: 신재생에너지산업 분야

---

동반성장연구소 김영우 연구위원

※ 본 자료는 재단 공식 의견과 다를 수 있습니다(무단 전재 및 재배포 금지)

## 목 차

1. 들어가며 .....	1
1) 연구개요 .....	2
2) 연구방법 및 구성 .....	3
2. 일본의 에너지 정책 .....	6
1) 일본의 주요 에너지 정책의 추진현황 .....	6
(1) 선샤인 정책도입과 WE-NET .....	6
(2) NEDO의 설립과 주요 역할 .....	11
(3) 제6차 에너지 기본계획 수립 .....	16
2) 일본 에너지산업의 정책 변화와 특성 .....	20
(1) S+3E 정책의 도입 .....	20
(2) 2030 전원 구성과 재생에너지의 비중확대 .....	22
(3) 그린 성장전략과 연계 .....	26
3. 일본의 재생에너지 산업 .....	29
1) 재생에너지의 정의와 글로벌 현황 .....	29
(1) 그린에너지와 재생에너지 .....	29
(2) 글로벌 재생에너지의 종류 .....	30
(3) 글로벌 재생에너지의 현황 .....	32
2) 일본 재생에너지의 분야별 추진현황 .....	40
(1) 태양광발전 .....	40
(2) 풍력발전 .....	47
(3) 암모니아 .....	55

## 목 차

[4] 연료전지 .....	62
[5] 수소 .....	67
[6] 원자력 .....	72
[7] 지열 .....	84
[7] 해양에너지 .....	91
<b>4. 경제적 효과와 한일 비교분석 .....</b>	<b>94</b>
1) 재생에너지 산업의 경제적 효과 .....	94
2) 한-일간의 유사점과 상이점 .....	101
(1) 유사점 .....	101
(2) 상이점 .....	104
3) 재생에너지 산업 비교 .....	110
(1) 신재생에너지 비율과 에너지 자립도 .....	110
(2) 에너지 집중도 .....	111
(3) 분야별 발전 능력 .....	112
(4) 신재생에너지 발전의 구성 .....	113
(5) 신재생 발전설비의 변화 .....	114
(6) 화석연료와 재생에너지발전의 변화 .....	115
<b>5. 정책적 시사점 .....</b>	<b>116</b>
1) 장기정책과 지자체의 협력 .....	118
2) 재생에너지 전담기구의 설립 .....	120
3) 기술개발과 해외 진출 .....	122

**[참고문헌]**

## 표 목차

〈표 2-1〉 일본의 주요 에너지 추진 계획 .....	9
〈표 2-2〉 주요국의 2030년 삭감목표 .....	16
〈표 2-3〉 일본 「에너지정책기본법」의 주요 내용 .....	17
〈표 2-4〉 2030년도 에너지 수급 전망 .....	23
〈표 2-5〉 2020년과 2030년 발전비용 비교 .....	25
〈표 2-6〉 2030년 재생에너지 도입 목표 .....	26
〈표 2-7〉 중점산업 분야별 그린 성장전략의 목표 .....	27
〈표 3-1〉 태양에너지 발전산업의 현황 .....	34
〈표 3-2〉 풍력발전산업의 현황 .....	35
〈표 3-3〉 수력발전산업의 현황 .....	37
〈표 3-4〉 바이오에너지 발전산업의 현황 .....	38
〈표 3-5〉 지열발전 산업의 현황 .....	39
〈표 3-6〉 해양에너지 종류와 잠재력 .....	40
〈표 3-7〉 일본 태양광발전의 현황과 대책 .....	46
〈표 3-8〉 일본 풍력발전의 현황과 대책 .....	53
〈표 3-9〉 수소·연료 암모니아 산업(연료 암모니아)의 과제와 대책 ...	59
〈표 3-10〉 「연료 암모니아의 서플라이체인 구축」 사업 내용 .....	61
〈표 3-11〉 연료전지의 종류와 특징 .....	67
〈표 3-12〉 수소산업의 과제와 대책 .....	69
〈표 3-13〉 원자력산업의 과제와 대책 .....	77
〈표 3-14〉 원자력 에너지의 특성 .....	79
〈표 3-15〉 세계 지열발전의 역사 .....	85
〈표 3-16〉 세계 각국 주요 지열자원량 .....	89
〈표 3-17〉 지열산업의 과제와 대책 .....	89
〈표 3-18〉 해양에너지의 이용 예시 .....	91

## 표 목차

〈표 4-1〉 일본의 에너지 계획에 따른 주요 경제전망 .....	96
〈표 4-2〉 주요국가의 온실가스 배출량 .....	102
〈표 4-3〉 주요국가의 GeGaLo 지수 .....	104
〈표 4-4〉 일본과 한국의 재생에너지 현황 .....	111
〈표 5-1〉 전력부문에 극복해야 할 주요 과제 .....	119

## 그림 목차

〈그림 2-1〉 일본 에너지 추진정책 체계도 .....	7
〈그림 2-2〉 NEDO의 역할 .....	12
〈그림 2-3〉 NEDO의 40년 발자취 .....	14
〈그림 2-4〉 3E 정책의 성과와 추이 .....	21
〈그림 2-5〉 전력수요와 전원 구성 .....	23
〈그림 2-6〉 주요국의 GDP 성장률과 에너지 자급률 .....	24
〈그림 2-7〉 그린 성장전략과 14개 중점산업 .....	27
〈그림 3-1〉 글로벌 재생에너지의 현황 .....	33
〈그림 3-2〉 주요국가의 태양광 발전 현황 .....	42
〈그림 3-3〉 일본 태양광 발전단가의 추세 .....	45
〈그림 3-4〉 일본의 풍력발전 용량 .....	48
〈그림 3-5〉 일본 풍력발전(육상+해상)의 신규 도입량 추이 .....	49
〈그림 3-6〉 해상풍력발전 각국 목표 .....	50
〈그림 3-7〉 해상풍력발전 도입예측 .....	50
〈그림 3-8〉 일본 풍력발전 누적 도입량 목표치 .....	51
〈그림 3-9〉 연료 암모니아의 제조 · 수송 · 이용 .....	56
〈그림 3-10〉 석탄화력발전 실물에 20% 암모니아 혼소 실증사업 ....	57
〈그림 3-11〉 연료 암모니아 서플라이체인 구축사업(개요) .....	60
〈그림 3-12〉 연료전지 개념도 .....	63
〈그림 3-13〉 마이크로 그리드에 의한 분산형 에너지시스템 .....	65
〈그림 3-14〉 연료전지의 원리와 구조 .....	66
〈그림 3-15〉 연료전지의 기본구성 .....	66
〈그림 3-16〉 후쿠시마 제1원자력발전소 사고에 대한 교훈 .....	75
〈그림 3-17〉 종래의 규제기준과 신규제기준과의 비교 .....	75
〈그림 3-18〉 일본 원자력시설 .....	77

## 그림 목차

〈그림 3-19〉 일본 원자력발전소의 재가동 현황 .....	80
〈그림 3-20〉 세계 원자력발전 발전량 실적과 건설중의 발전설비용량 ...	81
〈그림 3-21〉 세계 각국의 원자력 정책 .....	82
〈그림 3-22〉 지열발전의 구조 .....	86
〈그림 3-23〉 일본의 지열발전소 현황 .....	87
〈그림 3-24〉 세계 각국의 지열발전 설비용량 .....	88
〈그림 3-25〉 세계 각국의 지열발전 설비용량의 변화 .....	89
〈그림 3-26〉 세계 해양에너지의 종류별 도입량 추이 .....	93
〈그림 3-27〉 세계 해양에너지의 지역별 도입량 추이 .....	93
〈그림 4-1〉 일본의 재생에너지 발전 추세 .....	95
〈그림 4-2〉 1.5도 시나리오와 PES에 따른 GDP 성장을 비교 .....	96
〈그림 4-3〉 1.5도 시나리오와 PES에 따른 복지지수 차이 .....	97
〈그림 4-4〉 1.5도 시나리오와 PES에 따른 고용의 차이 .....	99
〈그림 4-5〉 재생에너지 산업의 일자리 전망 .....	100
〈그림 4-6〉 1.5도 시나리오의 경제적 효과 .....	100
〈그림 4-7〉 OECD 국가의 에너지 자립도 .....	103
〈그림 4-8〉 일본의 태양광 패널의 수출입 추세 .....	108
〈그림 4-9〉 일본과 한국의 에너지 집중도 .....	112
〈그림 4-10〉 일본과 한국의 분야별 발전 능력 .....	113
〈그림 4-11〉 일본과 한국의 신재생에너지 발전의 구성 .....	114
〈그림 4-12〉 일본과 한국의 발전설비의 변화 .....	114
〈그림 4-13〉 일본과 한국의 화석연료와 재생에너지 발전설비의 변화 ...	115
〈그림 5-1〉 일본의 지역별 전력회사 공급구역 .....	116
〈그림 5-2〉 일본의 주파수와 주요 송전망 .....	117



# 1. 들어가며

근래 모든 나라들에서 기후변화에 대한 대응이 초미의 관심사가 되고 있다. 온실가스 배출로 인해 지구 온도가 산업혁명 이후 1.08℃나 올랐기 때문이다. 이런 가운데 유엔 기후변화 정부 간 협의체(IPCC)가 2018년에 발간한 ‘1.5℃ 특별보고서’는 지구온난화의 심각함을 설명하고 피해를 방지하기 위해서는 기온 상승을 1.5℃로 제한해야 한다고 권고했다. 이를 위해 지구는 2030년까지 온실가스 배출량을 2010년 대비 45% 줄여야 한다고 강조한 바 있다. 이때부터 지구온난화를 막아야만 이상기후를 막을 수 있다는 공감대는 널리 형성되어 왔다.

그런데 기후변화에 관한 정부 간 협의체(IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change)는 2021년 8월 9일 제6차 보고서를 발간했다. 이번 보고서는 7년 전에 발표한 5차 보고서와 비교할 때 앞으로 기후변화가 어떻게 진행될 것인지를 예상할 수 있다는 점에서도 주목을 받았다. 그런데 6차 보고서가 충격적인 점은 3년 전에 발표한 ‘1.5℃ 특별보고서’에서 분석한 것보다 지구가 더 빨리 뜨거워졌기 때문이다. 특별보고서는 1.5℃ 기온 상승 도달 시점을 2052년 무렵으로 예측했는데, 이번 보고서는 10년 이상 빠른 2040년에 도달할 것으로 예측하고 있다. 이는 전례가 없던 일로 지난해까지 전 지구의 평균기온이 산업화 이전보다 1.09℃ 높아졌고, 해수면 상승 속도도 약 2.85배 증가하는 등 최근 추세가 심각함을 보여주고 있다.

그동안 기후 위기 대응은 글로벌 차원에서 꾸준히 있어 왔다. 1992년 기후변화에 관한 유엔기본협약(UNFCCC) 채택을 시작으로 1997년에 교토에서 개최된 제3차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP3: Third session of the Conference of the Parties)에서는 온실가스 배출 삭감을 의무화한 ‘교토의정서’가 채택되었다. 교토의정서는 산업혁명을 거치면서 많은 온실가스를 배출해온 주요 38개국이 2008년부터 5년에 걸쳐 1990년을 기준으로 탄소 배출량을 5.2% 감축하도록 약속했다. 하지만 교토의정서 당사국에는 최대 탄소 배출국인 중국이 빠졌고, 미국과 일본 같은 선진국이 가입과 탈퇴를 거듭하며 유명무실해졌다.

2015년 파리에서 개최된 COP21에서는 새로운 전기를 마련했다. 당시 IPCC ‘1.5℃ 특별보고서’를 채택하고, 지구의 평균기온 상승을 산업혁명 이전 대비 1.5℃로 억제하도록 노력하는 데 극적으로 합의한 것이다. 기후 위기는 몇몇 선진국만의 노력으로 해결할 수 없는 문제라는 점에 공감하고, 모든 당사국이

함께 노력하기로 뜻을 모은 것이다. 그 결과 교토의정서를 대체하는 파리기후협약(COP21)이 맺어졌다. 2015년 5차 보고서를 채택한 뒤 195개 국가들이 탄소중립(Net Zero)을 위해 노력하겠다고 파리협정에 서명하고 작년 스코틀랜드에서 열린 COP26에서는 산업혁명 이전 대비 1.5℃ 상승을 막기 위해 회원국들이 2030년 기준 배출량 삭감 계획을 발표했다. 파리기후변화협약에 따라 처음으로 각국의 온실가스 배출량 삭감 계획을 구체적으로 제출한 것이다.

그럼에도 불구하고 2021년 7월까지 164개 당사국이 제출한 탄소감축 계획안의 합계는 미진한 상황이 계속되고 있다. 2030년까지 2010년 대비 45% 감축해야 한다는 목표를 제시했지만, 회원국의 2030년 온실가스 배출량은 2010년 대비 오히려 16.3% 늘어날 것으로 추산되었기 때문이다. 이에 따라 2022년 11월 개최된 COP27에서는 기온 상승을 1.5℃로 막기 위한 구체적 방안으로 ▲기후기금 활성화 ▲석탄의 단계적 폐지 가속화 ▲산림 훼손 삭감 ▲전기자동차로의 전환 가속화 ▲신재생에너지 투자 장려를 의제로 다루었다. 하지만 연초부터 시작된 러시아-우크라이나 전쟁으로 인해 가스공급이 어려움을 겪으면서 탄소중립을 위한 노력은 더욱 힘든 상황을 맞이하고 있다.

## 1) 연구개요

일본은 섬나라라는 특수성과 에너지를 화석연료에 절대적으로 의존하고 그 대부분을 수입하고 있다는 점에서 기후변화에 어느 나라보다 민감하게 반응하고 있다. 특히 2011년 3월 후쿠시마 제1원자력발전소 사고 이후 일본은 원전을 정지하면서 화석연료 의존도가 높아지고 있는 상황에서 2020년 10월에는 2030년까지 이산화탄소 배출량을 2013년 대비 46%를 감축하겠다고 선언했다. 이 선언을 기점으로 일본에서는 화석연료 사용에 대한 대안으로 신재생에너지를 집중적으로 개발하고 이를 활용하는 방안이 본격적으로 논의되기 시작했다.

이에 따라 일본 정부는 2021년 전략적으로 ‘제6차 에너지 기본계획’을 수립하고, 2030년까지 온실가스를 2013년 대비 46%를 넘어 50%까지도 감축하겠다는 적극적인 정책목표를 제시했다. 이를 달성하기 위해 안정적인 전력 공급을 전제로 재생에너지 비중을 36~38%로 늘려 화석연료의 비중을 낮추는 새로운 2030년 전원구성을 제시하고 있다. 이는 2018년 7월 제정한 ‘제5차 에너지 기본계획’보다 훨씬 더 탈탄소를 위한 대응 노력을 강화하고 기후변화와 탄소중립에 대한 에너지를 둘러싼 국내·외 여건 변화에 선도적으로 대응한다는 정책 방향성을 제시한 것이다.

특히 2050년 탄소중립 실현 및 안정적인 에너지 공급을 고려하여 수요 대응, 재생에너지, 원자력, 화력, 전력시스템 개혁, 수소·암모니아, 자원·연료 등 각 분야에서의 2030년 탄소감축을 위한 에너지 정책의 골격을 제시하고 있다. 일본의 신재생에너지 정책은 향후 기술개발 가능성 및 정세 변화 등으로 불확실성이 더욱 심화될 것으로 전망됨에 따라 에너지 정책의 기본 방향성을 ‘S+3E’로 선정하고 2050년 탄소중립 실현을 위한 시나리오를 다각화하여 다양한 선택지를 마련해가고 있다. 여기서 ‘S+3E’는 안전(safety)을 기본 전제로 에너지 안정적인 공급(energy security)을 추진하고 경제적 효율성(economic efficiency)에 따른 저비용 에너지를 공급하고 동시에 친환경(environment)적인 에너지를 생산하는 것으로 요약된다.

에너지 정책의 근간은 전력 부분과 비전력 부분으로 나눌 수 있다. 먼저 전력 부분에서의 탈탄소화를 위해 재생에너지 및 원자력 등 탈탄소 전원을 활용하여 탈탄소화를 꾸준히 추진함과 동시에, 수소·암모니아 발전 및 CCUS (Carbon capture and storage: 탄소 포집·활용·저장 기술)·탄소재활용을 통한 탄소저장·재이용과 융합하여 화력발전 기술혁신을 추진하는 것을 목표로 한다. 비전력 부문에서는 산업·상업·가정·수송부문에서 철저한 에너지 효율 향상과 더불어 탈탄소화 전력을 활용한 ‘전기화’를 추진하고, 전기화가 어려운 부문의 경우, 수소·합성메탄·합성연료 등 혁신적 기술을 도입하는 것이 핵심 정책이다.

최근 기후변화가 심화되면서 일본에서는 태양광, 풍력 등의 신재생에너지 확대, EV(electric vehicle: 전기 자동차) 보급 등 그린에너지의 활용도를 높이고 리사이클 시스템 보급과 함께 디지털 기술을 활용한 친환경 순환 경제가 빠르게 구축되고 있다. 이를 위해 일본은 그린에너지 분야를 고도화하는 센서 네트워크를 적극 활용한 디지털 그리드를 구축하여 지능화된 에너지망으로 변환하는 데 주력하고 있다.

## 2) 연구방법 및 구성

최근 일본에서는 2050년 탄소중립을 위해 그린·신재생 에너지 산업이 핵심 분야로 떠오르고 있다. 이는 에너지 산업이 온실가스 배출의 80% 이상을 차지하고 있기 때문이며 이 분야에서 온실가스 감축 없이는 현실적으로 탄소중립은 불가능하기 때문이다. 따라서 일본 에너지 정책의 근간을 이루는 ‘6차 에너지 기본계획’의 내용을 세심히 분석하고 이를 실천하기 위한 구체적인 정책을 검토하고자 한다. 또한, 세계적인 탈탄소 동향 속에서 국제적인 규칙 제정을 주도하기

위한 일본 정부의 노력을 살펴본다. 한편 지금까지 전략적으로 육성해 온 탈탄소 기술과 특히 각종 전원 리소스를 통합 연계하는 가상발전소(VPP, Virtual Power Plant) 기술에 대한 분석을 통해 전력의 지능화와 탈탄소에 이바지할 이노베이션에 대한 동향도 분석하고자 한다.

그린·신재생 에너지 산업은 지식 및 기술 집약적 산업이다. 이는 고도의 안정성과 내구성, 과학과 기술이 융합된 산업이다. 따라서 연구개발에서 장시간이 소요되고 가동되기까지는 다양한 소재와 부품산업의 성장과 협력체제가 불가피한 산업이기도 하다. 또한, 그린에너지와 신재생에너지는 상호의존성이 높고 다양한 공급망 사슬이 필요한 산업이라는 특성을 가지고 있다. 따라서 안전성의 확보를 대전제로 기후변동 대책을 추진하는 가운데에서도 안정적인 공급망 확보와 에너지 코스트의 저감(S+3E)을 향한 대책은 일본의 에너지 수급 구조가 안고 있는 과제로써 대단히 시의적절한 정책으로 판단된다.

본고에서는 자료의 수집을 위해 일본 경제산업성과 NEDO, 자원에너지청에서 발간한 공식문서를 토대로 각종 연구소의 문헌자료를 일차적으로 점검한다. 또한, 이에 대한 학계와 언론의 평가와 전망 등을 분석하고 정책의 가능성과 실효성에 대해 알아보기로 한다. 한편 국제에너지기구(IEA), 국제신재생에너지 기구(IREA), IMF, OECD, World Bank 등 공신력을 가진 국제기관의 국가별 자료를 활용해 일본의 그린·신재생 에너지 정책에 대한 전반을 조망하고자 한다. 나아가 국내에서 발간한 각종 자료를 통해 크로스 체크를 통해 신뢰도를 높이 고자 한다. 이런 일련의 작업은 결국 우리나라 에너지 정책과 비교 분석함으로써 정책적 함의를 찾고자 한다.

본고의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 일본의 신재생에너지 산업의 추진 현황과 특성에 대해 살펴볼 것이다. 이를 위해 일본의 신재생에너지 발전 역사를 선샤인 정책의 도입과 전환, NEDO의 설립과 역할, 일본 에너지 기본계획 등에 대해 고찰하고 일본의 신재생에너지 산업의 변천 과정을 살펴보고자 한다. 특히 에너지 정책의 기본계획은 ①동경전력 후쿠시마 제1원전 사고 이후 10년의 발자취, ②2050년 CN(Carbon Neutral: 탄소중립) 실현을 향한 과제와 대응, ③ 2050년을 내다본 2030년을 향한 정책대응 분야로 구성되어 있는데 이를 자세히 분석하고자 한다.

제3장에서는 재생에너지 산업의 현황과 특성을 분석한다. 이를 위해 먼저 글로벌 동향을 진단하고 일본의 동향을 ‘6차 에너지 기본계획’의 개요로 짚어 보고자 한다. 이어서 대표적인 산업인 연료전지, 석탄 액화·가스화, 수소에너지에 대한 현황과 기술을 다루고자 한다. 이어서 재생에너지 산업의 현황과 특성을

분석한다. 최근 기후변화와 탄소중립을 위한 재생에너지 산업의 현황 및 후쿠시마 원전사고와 전력난 해소를 위한 원전산업의 동향과 전망을 살펴보고 또한, 태양광, 태양열, 풍력, 해양에너지, 지열 등에 대한 현황을 다루게 된다.

제4장에서는 전략적 기술개발과 탄소중립 실현을 위한 혁신정책을 검토한다. 2030년 탄소감축을 위한 에너지 정책의 기본 관점, 재생에너지를 주요 동력원으로 활용하기 위한 노력, 수소 사회 실현을 위한 과감한 노력 강화 등이 주요한 이슈가 된다. 또한, 정부 정책 및 지원현황의 한·일 비교가 이어진다. 여기서는 한·일 간 정부 정책의 특성과 그린·신재생 에너지 지원정책을 종합적으로 비교하고자 한다. 특히 2000년부터 시작된 일본의 전력시장 자유화는 우리나라 중소기업에게도 수출시장이라는 관점에서 분석이 필요하다. 이에 대한 최근의 시장동향을 담아서 중소기업의 시장 다변화를 위한 방안을 검토하고자 한다. 마지막 5장은 앞에서 다룬 내용을 요약하고 신재생에너지 산업의 방향성, 기술개발과 정책적 과제, 정책적 함의를 통한 제언 등으로 구성되어 있다.

## 2. 일본의 에너지 정책

### 1) 일본의 주요 에너지 정책의 추진현황

#### (1) 선샤인 정책도입과 WE-NET

일본에서 본격적으로 재생에너지에 관심을 가지기 시작한 것은 1974년으로 거슬러 올라간다. 그 배경에는 1973년 중동전쟁으로 발발한 제1차 오일쇼크가 있었다. 에너지 대부분을 중동산 석유에 의존하고 있던 일본에서는 대혼란이 발생하였고, 그로 인해 안정적인 에너지가 필요하게 되었다. 이를 위한 방안으로 석유에만 의존하지 않는 에너지의 장기적이고 안정적인 공급 확보를 위한 ‘선샤인(Sunshine) 계획’이 당시의 통상산업성(현, 경제산업성) 주도로 추진되었다.

이 계획은 고갈되지 않는 그린에너지 활용 기술개발을 목표로 주요 대상은 태양광발전, 지열발전, 수소에너지, 석탄액화·가스화였다. 또한 풍력발전, 바이오매스 관련 연구 등도 병행해서 추진되었다. 이 계획은 국가 연구개발 프로젝트로써 추진되었고 수정·보완을 거듭하면서 2000년까지 진행되었다. 또한 1980년에는 선샤인 계획의 추진기관으로 현재의 ‘신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)’가 설립되었다. 같은 해 10월 ‘석유 대체 에너지 개발 및 도입 촉진에 관한 법률’이 시행되어 재생에너지 연구의 기반이 만들어지게 되었다.

선샤인 계획은 일본에서 처음 책정된 신에너지 국가 프로젝트로 1973년 오일쇼크를 계기로 원유를 수입에 의존한 일본에서는 에너지 위기를 강하게 의식하게 되면서 나온 정책이었다. 석유 자원의 고갈도 지적되는 가운데 일본이 지속적으로 경제성장을 이루기 위해서는 에너지 자급률의 향상이 중요한 과제로 부상했고 에너지의 안정공급을 확보하기 위한 대책으로써 정부는 신에너지 개발 장기 전략인 ‘선샤인 계획’을 추진하게 되었다.

‘선샤인 계획’의 주요 내용은 태양에너지의 활용 등 공해를 발생시키지 않고 지구상에서 고갈되지 않는 그린에너지를 활용하는 기술을 개발하는 것을 중요시책으로 설정하였다. 통상산업성 공업기술원이 1974~2000년까지 장기에 걸쳐 시책을 챙기고 정리한 이례적인 대규모 프로젝트로 총 예산은 약 5,000억엔을 상회하였다. 미래 에너지 수요의 상당 부분을 그린에너지로 대체한다는 높은 목표를 설정하고 산학관에 연구개발 및 실증시험을 위탁함으로써 후원자 역할과 향후 태양전지 산업의 약진 등 기초를 마련하였다.

당초 주요 연구개발에는 ①태양에너지 ②지열에너지 ③석탄에너지 ④수소 에너지 등 4개를 중요 분야로 설정하였고, 풍력발전 등은 사업화의 가능성을 찾는 종합연구의 하나로 선정했다. 하지만 당시에는 일본에서의 연구가 거의 진행되지 못하였고 비용 측면에서 실용화가 어려운 것들이 많았다. 이에 따라 경제성을 감안한 기술개발이 중요해졌고 선샤인 계획은 1993년 에너지절감 기술개발을 추진하던 ‘문라이트 계획(Moonlight Project)’ 과 통합되어 ‘뉴 선샤인 계획(New Sunshine Project, NSS, 2000 ~2002년)’ 으로 거듭나게 되었다. 이 계획은 기초적인 연구단계에서 실용화 플랜트 개발 단계로 이행되어 사업 규모의 확대 및 보급을 위해 추진을 강화하는 것이었다. 뉴 선샤인 프로젝트는 1993년부터 선샤인, 문라이트, 지구 환경기술 프로젝트를 통합하여 새로운 에너지와 지구 환경을 위한 기술을 개발하는 일본의 프로젝트이다. 뉴 선샤인 계획의 예산 총액은 1조 엔을 넘는 초대형 프로젝트로 전환되었다. 이는 1974년 통상산업성 선샤인 프로젝트의 후속으로 태양광, 지열 및 수소 기술개발에 초점을 맞추어 온 것으로 조사되었다. (U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information, 1981.5., “Japan’s Sunshine Project“)

〈그림 2-1〉 일본 에너지 추진정책 체계도



출처: 通産資料調査会(1999.1, p.642), 資源エネルギー年鑑 1999/2000年版

뉴 선샤인 프로젝트는 여러 프로그램을 포함하고 있으며, 첫 번째 프로그램은 1993년부터 2002년까지 운영되었던 “세계 에너지 네트워크(WE-NET, World Energy Network)” 연구 프로그램이다. 이 프로그램은 수소를 이용한 국제 청정 에너지 시스템 기술 연구개발을 목표로 하며 수소를 2차 에너지 매체로 한 재생

이용 에너지의 국제적인 이용 실현을 위해 기획·입안되어 활동하였다. 일본이 이 프로그램을 구상하게 된 계기는 현대 사회는 에너지자원이 대량 소비되고 있으나 대부분은 화석 에너지(석유, 석탄, 천연가스 등)에 의존하고 있는 상황이다. 그러나 화석 에너지는 언젠가 고갈될 것이라는 우려와 함께 산성비, 지구 온난화를 비롯한 지구 환경문제의 원인이 되고 있다. 한편 수력, 태양광 등의 자연 에너지는 깨끗하고 지구상에 넓고 풍부하게 존재하고 있다. 이러한 자연 에너지는 자연환경 속에서 무한히 반복 이용할 수 있기 때문에 재생가능 에너지라고도 불리는데, 어떻게 대량의 유용한 에너지로 또한 어떤 방법으로 수송, 저장하고 이용할 수 있는가에 대한 고민에서 출발했다.

이러한 재생가능 에너지의 2차 에너지 매체로써 수소가 크게 기대되고 있다. 그 이유는 첫째, 수소는 그 자체가 친환경 청정에너지로서의 조건을 충족하고 있고 둘째, 물을 원료로 세계 각지에서 제조할 수 있다는 점에서 각광을 받게 되었다. 1998년까지 6년간 지속된 WE-NET 1단계 연구개발은 재사용 가능한 에너지로써 수소의 수급 네트워크 구축에 필수적인 핵심 기술을 개발하고자 하였다. 전반적인 프로젝트 개념에 대한 철저한 검토가 이루어진 다음 1999년 2단계가 시작되었다. 이 단계에서는 장기적인 개념뿐만 아니라 단기적으로도 인간사회에 수소에너지의 실제 활용을 목표로 했다. 또한, 수소자원을 더욱 발전시키고 광범위하게 활용을 할 수 있도록 수소 기술의 개발에 초점을 맞추었다.

이런 노력의 결과 2002년 2월 7일 일본 최초의 수소충전소가 오사카에 설치되었고 연료전지차에 대한 수소공급이 시연되어 수소 사회 도래를 예고했다. 그 후 가가와현 다카마쓰시에 제2의 수소충전소가 설치되었고, 2002년 2월 28일 준공식이 열렸다. 이 충전소는 수소를 생성하기 위해 고체 고분자 막을 가진 수(水)전해형이다. 수소충전소에서는 연속운전 성능 검증 및 평가, 시간 경과에 따른 파라미터 변동 확인 등 실제 적용에 필요한 실험·연구를 위한 시험운전이 진행되었다. 또한, 수소 부하를 위한 최적의 조건을 결정하고 수소충전소 안전 운행 체계를 검증해 왔다. 여기서 얻은 지식을 바탕으로 안전 및 설계 가이드 라인을 마련하고 이는 향후 수소충전소 표준사양으로 이어지고 있다.

2003년부터 시작된 새로운 프로젝트는 “수소 안전 활용 기반 기술개발”이었다. 이 프로젝트는 수소의 안전한 활용과 기반 시설 개발을 위한 프로젝트로 세계 에너지네트워크(WE-NET) 연구 프로그램의 후속작이었다. 이것은 ‘양성자 교환막 연료전지로서의 수소에너지 응용 프로그램’의 일환으로 시행되었는데 안정적인 에너지 공급시스템을 달성하기 위해 고체 고분자 연료전지의 조기 상용화를 강화하고 에너지 효율을 향상시키기 위해 추진된 것이다. 이는 지구온난화(CO<sub>2</sub>)와



환경문제(NOx, PM 등)를 해결하는 동시에 고용기회 창출을 위한 신산업 도입, 수소에너지 사회 실현 등을 구체화하기 위해 도입되었다.

WE-NET는 특히 수소에 중점을 둔 청정에너지 시스템의 연구개발에 대한 국제적인 협력으로 1993년부터 재사용이 가능한 에너지의 운송을 위한 물, 태양 에너지, 풍력 등과 같은 풍부하게 이용 가능 재생 자원의 개발을 위한 전 세계적인 네트워크 구축을 목표로 시작되었다. 발전, 연료, 도시가스 등과 같은 다양한 에너지를 활용하고 나아가 온실가스를 줄이며 국제 에너지 분야의 수요와 공급을 위한 완충장치를 제공함으로써 에너지 및 환경 문제 등 세계적인 문제 해결에 기여할 것으로 기대하고 있다. 한마디로 뉴 선샤인 계획의 핵심적인 실천방안은 WE-NET에서 찾을 수 있으며, 오늘날 수소를 활용한 기술 기반을 구축하는데 기초적인 역할을 담당했다고 할 수 있다. 일본 에너지 추진정책의 주요 내용은 <표 2-1> 과 같이 정리할 수 있다.

<표 2-1> 일본의 주요 에너지 추진 계획

계획		내용
선샤인 계획	추진기관	통상산업성 공업기술원
	추진기간	1974년~2000년
	총 예산	4,400억엔
	추진내용	에너지의 장기적인 안정공급 확보가 국민생활과 경제활동의 중요성을 인식, 제1차 석유 위기를 계기로 국민 경제상 그 실용화가 긴요한 신에너지 기술에 대해서 장기에 걸쳐 종합적, 조직적, 효율적으로 연구개발 추진 <ul style="list-style-type: none"> <li>미래 에너지 수요의 상당 부분을 담당할 수 있는 그린에너지를 공급하는 것을 목표로 규정, 태양, 지열, 석탄, 수소에너지기술 4개 분야의 중점기술 연구개발 및 실용화 추진</li> </ul>
		태양 에너지 <ul style="list-style-type: none"> <li>태양에너지 발전시스템 기술(태양광발전, 태양열발전, 기타)</li> <li>태양 냉·난방 및 급유시스템 기술</li> <li>태양에너지 새로운 이용 기술</li> </ul>
		지열 에너지 <ul style="list-style-type: none"> <li>지열에너지 탐사·채취 기술</li> <li>열수 이용 발전 기술</li> <li>화산 발전 기술</li> <li>지열에너지 다목적 이용기술 등</li> <li>환경 보전 기술</li> </ul>
		석탄 에너지 <ul style="list-style-type: none"> <li>석탄의 가스화 기술 (합성천연가스제조기술, 가스화발전기술, 플라스마가스화기술)</li> <li>석탄 액화 기술</li> </ul>
		수소 <ul style="list-style-type: none"> <li>수소 제조 기술</li> </ul>

계획		내용	
		에너지	<ul style="list-style-type: none"> <li>수소 수송·저장 기술</li> <li>수소 이용 기술</li> <li>수소 보안기술</li> <li>수소에너지 시스템</li> </ul>
		종합 연구	<ul style="list-style-type: none"> <li>풍력 에너지, 해양 온도차발전, 바이오매스, 기타 원천기술 연구, 지원연구</li> </ul>
	주요성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>지열자원종합조사 실시( '80~ '83), 전국지열자원유망지역 추출도 완성</li> <li>심층 열수 공급시스템 상용화 기술 확보( '85)</li> <li>갈탄액화 실질 연속운전 성공, 액화 추수(抽水)율 50% 달성( '81~ '93)</li> <li>석탄이용수소제조 실증 카본전환율 98%, 냉가스효율 78% 이상 달성( '86~ '95)</li> <li>수소 제조(알칼리수 전해법)·이용(수소자동차_최고속도 108km/h, 주행거리 280km 달성) 기술( ~ '85)</li> <li>석탄 가스화 복합 리사이클 발전, 고칼로리 가스화, 고성능 분리막 복합메탄가스 제조 연구 및 실증시험 등에 성공</li> </ul>	
문라이트 계획	추진기관	통상산업성 공업기술원	
	추진기간	1978년~1993년	
	총 예산	1,400억엔( ~1992년)	
	추진내용	<p>석유 위기 경험을 토대로 에너지 전환·이용효율의 향상, 에너지공급시스템의 안정화, 에너지의 효과적인 이용을 위한 각 요소에 관한 기술 연구 개발 추진</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>대형 에너지 절약 기술을 시작으로 선도적 에너지 절약 기반 기술개발</li> <li>민간 에너지 절약 기술개발 조성</li> <li>국제 연구 협력사업, 에너지 절약 기술의 종합적 효과 파악 수법의 확립을 위한 조사</li> <li>에너지 절약 표준화 추진</li> </ul>	
	주요성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>연료전지 발전 기술, 히트펌프 기술, 초전도 전력 응용 기술, 세라믹 가스터빈 등의 프로젝트 추진</li> <li>그 밖에 폐열이용 기술 시스템( '81년), 전자유체(電磁流體) 발전( '83년), 고효율 가스터빈 개량( '87년), 범용 스테어링 엔진( '87년), 신형전지 전력 저장 시스템 개발( '91년), 슈퍼히트펌프 에너지 집적시스템 효율화( '92년) 등</li> </ul>	
뉴 선샤인 계획	추진기관	통상산업성 공업기술원	
	추진기간	1993년~2020년	
	총 예산	1조 5,500억엔	
	추진내용	<p>기존 독립적으로 추진했던 신에너지, 에너지절감 및 지구 환경 기술 등 3분야의 기술개발을 종합적인 관점에서 추진하기 위해 발족</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>‘지구온난화방지계획’ 실현을 목표로 혁신 기술개발</li> <li>‘지구재생계획’ 추진을 목표로 국제 대형 공동 연구 프로그램</li> <li>개도국의 에너지·환경제약 완화 지원을 목표로 적정기술 공동 연구</li> </ul>	

계획		내용
	추진성과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 솔라시스템(민생용·산업용 태양열이용시스템) 개발 및 보급</li> <li>• 태양광 발전 개발(저비용, 변환 효율 개선 등 실용화 성공)</li> <li>• 태양열 발전(세계 최장기간 연속운전 달성)</li> <li>• 지열 탐사 기술 등 검증조사(심부 지열 자원탐사 경제성 향상)</li> <li>• 열수 이용 발전시스템(지하에서 2개(증기, 열수) 열사이클 이용하는 바이너리 사이클 발전)</li> <li>• 고온 암체 발전시스템(장기 추열(抽熱) 순환실험(90일간) 성공( '91년), 심부(2,200m) 인공 저장층 조성에 성공( '92년))</li> <li>• 역청탄(瀝青炭_석탄의 석탄화 정도에 따른 구분)액화사업 기술 및 경제성 평가 세계 최고 수준 달성</li> <li>• 대형 풍력발전(풍력발전 실용화 기술적 기반 마련( '85년))</li> <li>• 연료전지 발전기술( '81년~' 00년)_인산형, 용융형 탄산염형, 고체 전해질형, 고체분자형, 알카리형 연구 및 발전 성공</li> <li>• 초전도 전력 대응 기술( '88년~' 99년)</li> <li>• 세라믹 가스터빈( '88~' 98년)</li> <li>• 분산형 전지·전력 저장기술( '92년~' 01년) 등</li> </ul>

출처: 通商産業調査会(1999.3, p.221~228), ‘新エネルギー便覧, 1998年度版’을 토대로 저자 정리

## (2) NEDO의 설립과 주요 역할

일본 신재생에너지 연구개발의 중추기관인 ‘NEDO’는 지속 가능한 사회 실현에 필요한 기술개발 추진을 통해 이노베이션을 창출하는 국립 연구개발 기관이다. NEDO는 1970년대에 세계를 덮친 두 번의 오일쇼크를 계기로 새로운 에너지 개발의 선도역할을 담당하기 위해 1980년 발족했다. 설립 이후 NEDO는 경제산업 행정의 일익을 담당하는 일본 최대급의 공적 기술개발 매니지먼트 기관으로서 「에너지·지구환경문제의 해결」과 「산업기술력의 강화」라는 두 가지 미션을 내걸고 기업, 대학 및 공적 연구기관의 역량을 결집하여 기술 개발·실증에 주력해 왔다. NEDO는 세계 최첨단 기술개발 매니지먼트를 지향하는 2가지 미션을 추진 이노베이션 창출에 공헌하고 있다. 첫째는 에너지·지구환경문제의 해결이다. 신에너지 및 에너지절감 기술의 개발과 실증·실험 등을 적극적으로 전개하여, 신에너지의 이용 확대와 더불어 한층 더 에너지 절약을 추진하는 것이다. 또한 일본 국내 사업에서 확보한 경험을 토대로 해외에서 기술의 실증연구를 추진하여 에너지 안정공급과 지구환경문제 해결에 공헌하는 것이다. 둘째는 산업기술력의 강화이다. 산업기술력의 강화를 목표로 미래 산업에 필요한

핵심 기술을 발굴, 산업경쟁력의 기반이 되는 중장기적인 프로젝트의 실시 및 실용화 개발에 있어서 각 단계의 기술개발을 추진하는 것이다. 이때 산학관의 협력을 통해 고도의 매니지먼트 능력을 발휘함으로써 신기술의 시장화도 도모하고 있다.

특히 리스크가 큰 혁신적인 기술개발 및 실증연구를 수행하고, 그 성과를 사회에 적용하고 촉진시키는 ‘이노베이션 엑셀러레이터’로서 사회문제 해결을 목표로 하고 있다. 이를 위해 중장기 기술 전략의 책정과 이를 토대로 한 프로젝트의 기획·구상의 기능 강화, 또 프로젝트·매니저 제도를 도입해 매니지먼트 기능의 고도화나 혁신적인 기술 시즈를 사업화에 연결하는 가교 기능의 강화를 통해 이노베이션 창출에 공헌하기 위한 체제를 구축해 왔다.

NEDO는 산업, 에너지, 환경기술의 보급뿐만 아니라 연구개발을 촉진하는 일본의 최대 공공 경영기관의 하나인 독립 행정기관으로 2003년 개편되었다. 이에 따라 NEDO는 홋카이도, 칸사이, 큐슈 등에 국내 사무소와 워싱턴 D.C., 실리콘 밸리(캘리포니아), 파리, 베이징, 방콕, 자카르타 및 뉴델리에 국제 사무소를 두고 있으며, 직원 수는 1,412명(2022년 4월 1일 현재)이다. 2022 회계연도의 예산은 약 1,568억 엔(기금사업 제외)으로 대부분은 일본 경제산업성이 제공하고 있다. 각 분야별 예산을 살펴보면 ‘에너지시스템 분야’ 577억 엔, ‘에너지 절약·환경 분야’ 417억 엔, ‘산업기술 분야’ 427억 엔, ‘신산업창출·시즈발굴 등 분야’ 70억 엔 등으로 구성(주요 사업만 게재되어 총 예산과는 다를 수 있음)되어 있고, 그 밖에 기금사업으로는 ‘그린 이노베이션 기금사업’ 2조 엔 등 5개 분야 총 3조 772억 엔을 지원하고 있다. NEDO의 역할은 〈그림 2-2〉와 같이 정리된다.

〈그림 2-2〉 NEDO의 역할



출처: 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(2021.3.1), NEDO 40年史

NEDO의 주요 발전사를 살펴보면 다음과 같다. 2005년 엑스포에서 NEDO 파빌리온은 태양광발전, 연료전지 및 로봇 기술을 포함하여 NEDO가 자금을 지원하고 관리하는 많은 R&D 프로젝트의 결과를 공유했다. 2006년 경제산업성 및 환경성으로부터 정부의 교토 메커니즘 탄소배출권 크레딧 취득 사업을 위탁 받았으며, 2010년 2월 스마트 그리드를 중심으로 한 스마트 커뮤니티와 관련하여 글로벌 시장으로 일본 기업의 진출을 촉진하고 민관 제휴를 통한 스마트 커뮤니티의 실현을 위해 「스마트 커뮤니티·얼라이언스」를 설립했다. NEDO는 미국에 많은 프로젝트를 수행하고 있는데 특히 뉴멕시코에 산디아 국립연구소와 로스앨러모스 국립연구소(LANL: Los Alamos National Laboratory)라고 하는 두 개의 연구소에 있는 스마트 그리드 및 대체에너지 프로젝트도 포함하고 있다. 2010년 3월, NEDO와 실험실은 NEDO가 LANL의 스마트 그리드 연구 시설과 뉴멕시코주 로스앨러모스와 앨버커키에 있는 스마트 하우스 실증 프로젝트에 자금을 지원한다는 계약에 서명했다. NEDO는 4년 동안 이 프로젝트에 3,000만 달러를 투자한 바 있다.

또한, 2010년 NEDO와 홋카이도 대학은 희토류 광물 활용 부담을 줄이기 위해 전자 부품에 일반적으로 사용되는 자석을 이용한 모터를 개발했다. 같은 해 10월 세계은행과 신재생에너지 분야의 협력을 위한 협정을 체결하였으며, 2011년 6월 EU와 공동으로 셀 변환 효율 45% 이상을 목표로 한 초고효율 집광형 태양전지의 기술개발을 개시했다. 2012년 1월 국제 재생가능에너지기구(IRENA: International Renewable Energy Agency)와 협력 협정 체결에 이어 2015년 4월 '독립행정법인 신에너지 산업기술종합개발기구'에서 '국립연구개발법인 신에너지 산업기술종합개발기구'로 명칭을 변경해 오늘에 이른다. 2017년 3월 19일 독일에서 '대규모 하이브리드 배터리 시스템 실증사업 구축'을 위한 양해각서가 체결되었다. 이 사업은 축전지 충·방전을 통해 배전망을 안정화시켜 전력수급 균형을 조절하고, 축전지 시스템을 이용한 전력 거래를 위한 새로운 사업모델을 수립하는 것을 목적으로 한다.

2018년에 시작한 제4기 중장기 목표 기간(5년)에는 「기술개발 매니지먼트에 의한 성과의 사회구현」, 「연구개발형 벤처의 육성」, 「중장기 기술개발의 방향성 제시」 등 3가지를 골자로 주요 목표를 변경했다. 구체적으로는 우선 「기술개발 매니지먼트에 의한 성과의 사회구현」을 위해서 기술 전략에 근거한 도전적인 연구개발의 추진이나 새로운 기술개발 매니지먼트의 기능 강화를 도모하고 있다. 이를 위해 연구개발 성과를 최대화하고 세계적으로 에너지 관련 이노베이션 상황 변화에 신속히 대응함으로써, 연구 성과를 조기에 사회시스템에

실현하는데 노력하고 있다. 「연구개발형 벤처 육성」을 위해서 이노베이션의 새로운 연구자를 발굴하고 신규 산업으로 연결하기 위해 초기 단계부터 사업화까지 일관된 지원 체제를 구축하여 각종 지원책을 실행하고 있다.

〈그림 2-3〉 NEDO의 40년 발자취



출처: 新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(2021.3.1), NEDO 40年史

또한, 오픈 이노베이션의 촉진이나 다른 공적 지원 기관 등과의 상호 제휴나 정보교환 등을 통해서, 민관의 벤처 지원 및 오픈 이노베이션의 허브가 되는 것을 목표로 하고 있다. 한편 이노베이션의 시즈를 찾고 이를 사회에 구현시키기 위한 「중장기 기술개발의 방향성 제시」에 주력하고 있다. 특히 세계적인 이노베이션의 흐름을 파악하고 일본의 강점, 우위성을 살린 기술 전략의 책정이나 정책 프로세스의 제공 등을 통해 산학관 제휴 프로젝트로 연결하고자 노력하고 있다.

최근 코로나19로 세계가 빠르게 변화하고 있고 또 전 세계가 탈탄소를 향해 방향을 잡고 있는 가운데 NEDO는 지속 가능한 사회 실현을 위해 일본의 에너지·환경 정책은 NEDO가 뒷받침한다는 정책 목표로 에너지 이노베이션 정책을 견인하기 위해 노력하고 있다. 특히 2021년도부터는 「2050년 탄소 중립에 수반하는 녹색 성장 전략」을 실현하기 위한 그린 이노베이션 기금사업을 실시하고 있다.

일본의 신재생에너지 정책에 있어서 NEDO는 지금까지 핵심적 역할을 담당해왔다. 그중에서도 에너지 환경기술 연구개발을 추진하여 그 보급을 지원하는 것에 주목할 필요가 있다. 구체적으로는 태양광발전이나 풍력발전, 바이오매스 이용 기술, 에너지 절약 기술, 연료전지, 각종 재활용 기술, 지구온난화 대책 기술의 개발·보급 등을 들 수 있다. NEDO 자체는 연구개발 시설을 보유하고 있지 않고 실제 기술개발은 산학 연구기관에 위탁해 이루어지고 있는 점도 눈여겨봐야 할 대목이다. 또한, 산업경쟁력 강화를 통한 경제 활성화에 공헌하기 위한 기반이 되는 「내셔널 프로젝트」, 시장 경제 활성화를 촉진하는 「실용화 개발」, 장래 새로운 산업의 핵이 되는 「기초기술의 발전」의 각 단계에서 기술 개발을 추진하고 있다. 특히 중점적으로 추진되고 있는 분야는 생명과학, 정보 기술, 나노기술. 즉 앞의 에너지 환경기술과 함께 정부의 과학기술 정책의 중점 4개 분야를 강력하게 추진하고 있다. 실제의 연구개발은 산학의 연구기관에 위탁하고 NEDO는 공적 연구자금의 배분 기관의 측면을 갖고 있다. 이런 연구자금 배분 기관으로서의 과학기술진흥기구(JST)나 우주항공연구개발기구(JAXA)등이 알려져 있지만, 추진하는 연구개발 단계(기초연구 → 응용연구 → 기술개발)나 연구 분야를 나누어 기본적으로 사업의 중복을 피하고 있다는 점도 주목된다.



### (3) 제6차 에너지 기본계획 수립

일본 정부는 2021년 7월 21일 ‘제6차 에너지 기본계획’을 발표했다. 이 계획은 2020년 10월에 선언한 ‘2050년 탄소중립(CN)을 위한 방안’을 구체화하고 중간 목표로써 2030년도 46% 삭감 실현을 위한 에너지 정책의 로드맵을 제시한 것이었다. 이는 2018년 7월 ‘제5차 에너지 기본계획’ 수립 이후 세계적으로 탈탄소 대응 노력 강화 및 에너지 관련 국내·외 여건의 변화에 따른 새로운 정책의 방향성 제시가 필요했기 때문에 큰 관심을 끌었다. 따라서 국제 안보의 긴장감 고조, 에너지 안정공급 위협 증가, 전력시장 자유화·재생에너지 확대에 따른 공급체계 및 투자환경 변화 등도 고려한 다양한 내용으로 구성되어 있다. 또한, 온실가스 감축을 위한 에너지 정책의 세부내용을 담고 있어 국제적인 주목을 받았다.

일본은 2013년 기준으로 2030년까지 46%의 온실가스를 감축한다는 목표를 제시한 바 있다. <표 2-2>를 보면 미국, EU, 영국 등과 비교할 때 비슷한 수준에 머물고 있다. 따라서 이 수준으로는 국제사회에서 탄소중립을 위한 선도적 역할을 담당하기 어려울 것으로 판단하여 50%까지 줄이겠다는 잠재적 목표를 제시하고 있다. 이는 탄소중립은 피할 수 없는 시대적 흐름이며 제조업 중심의 산업구조를 가진 일본으로서는 불가피한 선택으로 보여진다. 하지만 일본 내에서의 반발을 의식해 공식적으로 50%의 삭감이 아니라 최대한 노력한다는 단서를 붙여 잠정적인 목표에 불과한 것으로 평가된다.

〈표 2-2〉 주요국의 2030년 온실가스 삭감목표

	2013년 대비	2005년 대비	1990년 대비
일본	▲46% 더욱이 ▲50%의 높은 수준을 향한 도전 계속	▲45% ▲49%	▲40% ▲45%
미국	▲45~48%	▲50~52%	▲43~45%
EU	▲44%	▲52%	▲55%
영국	▲55%	▲63%	▲68%

※ 일본은 2013년도 대비, 미국은 2005년 대비, EU·영국은 1990년 대비 삭감목표 제시

출처: 資源エネルギー庁(2021.12. p.3), 第6次エネルギー基本計画について

이런 상황에서 이번 6차 에너지 기본계획을 수립한 배경에는 세계적인 탈탄소 동향 속에서 국제적인 규칙을 만드는 것을 주도하기 위해서는 일본이 지금까지 육성해 온 탈탄소 기술과 이노베이션으로 국제적인 경쟁력을 높이는 것이 중요



하다는 판단에 근거하고 있다. 동시에 일본의 에너지 수급 구조가 가지고 있는 구조적 과제를 극복하는 것도 중요한 테마이며, 이런 저간의 사정을 반영하고 안전성의 확보를 대전제로 안정적인 에너지 공급과 에너지 코스트의 저감(S+3E)을 향한 대책을 추진하게 되었다.

일본은 2002년 6월 제정된 ‘에너지정책기본법’을 기초로 안정적 공급, 환경과의 조화, 시장원리의 활용을 구현하기 위해 2003년 10월 ‘제1차 에너지 기본계획’을 수립했다. 여기에는 3가지 기본방침과 함께 ‘국가’, ‘지방공공단체’, ‘사업자’, ‘국민’ 등 역할 분담을 명확하게 규정하고 있다. 주요 내용은 <표 2-3>과 같다. 이후 국제적인 에너지 환경변화와 기후변화에 따라 2006년 5월 ‘신국가 에너지전략’을 공표하였고 이때부터 3년마다 ‘에너지기본계획’을 제정하게 되었다.

<표 2-3> 일본 「에너지정책기본법」의 주요 내용

조(條)		조문 내용
1	목적	<ul style="list-style-type: none"> <li>에너지 수급에 관한 시책과 관련하여 기본방침을 정하고 국가·지방공공단체의 책무 등을 명확히 하고, 에너지 수급에 관한 시책의 기본이 되는 사항을 규정</li> <li>에너지 수급에 관한 시책을 장기적, 종합적, 계획적으로 추진</li> <li>지역·지구의 환경보전에 기여하며 일본 국내는 물론 세계 경제사회의 지속적인 발전에 공헌</li> </ul>
2	안정공급의 확보	<ul style="list-style-type: none"> <li>에너지의 안정공급에 대해서는 세계 에너지에 관한 국제정세가 불안정한 요소가 있음을 인지하여, 에너지 공급원의 다양화·에너지 자급률의 향상, 에너지 분야에 안전보장을 도모하는 것이 기본</li> <li>타 에너지로 대체 및 저장이 현저히 곤란한 에너지 공급은 그 신뢰성·안정성이 확보되는 시책이 필요</li> </ul>
3	환경 적합성	<ul style="list-style-type: none"> <li>에너지 소비의 효율화, 태양광, 풍력 등의 화석연료 이외의 에너지 이용으로 전환, 화석연료의 효율적인 이용 추진 등, 지구 온난화 방지·지구 환경 보전이 기대되는 에너지 수급의 실현과 더불어 순환형 사회의 형성에 이바지하기 위한 시책 추진</li> </ul>
4	시장원리의 활용	<ul style="list-style-type: none"> <li>에너지 수급에 관한 경제구조개혁은 제2조의 정책 목적을 충분히 고려해 가면서 사업의 자주성·창조성이 발휘되고, 에너지 수요자의 이익이 확보되어야 한다는 취지</li> </ul>
5	국가의 책무	<ul style="list-style-type: none"> <li>국가는 2~4조에 정한 에너지 수급에 관한 시책에 대해 기본방침에 따라 에너지 수급에 관한 시책을 종합적으로 책정·실시할 책무가 있음</li> <li>국가는 에너지 사용에 있어 환경 부하의 저감에 이바지하는 물품 사용을 통해 환경 부하를 줄이는 노력이 필요</li> </ul>
6	지방공공단	<ul style="list-style-type: none"> <li>지방공공단체는 기본방침에 따라 국가 정책에 의거 시책을 마련하는 등</li> </ul>

조(條)		조문 내용
	체의 책무	시에 그 구역의 실정에 맞는 시책을 책정·실시할 책무가 있음
7	사업자의 책무	<ul style="list-style-type: none"> <li>지방공공단체는 에너지 사용에 있어 환경 부하의 저감에 이바지하는 물품 사용을 통해 환경 부하를 줄이는 노력이 필요</li> <li>사업자는 사업활동시 자주성·창조성을 발휘하여 에너지 효율적 이용, 에너지 안정적 공급, 지역·지구의 환경보전을 고려한 에너지 이용에 노력, 국가·지방공공단체가 실시하는 시책에 협력하는 책무가 있음</li> </ul>
8	국민의 노력	<ul style="list-style-type: none"> <li>국민은 에너지 사용에 있어 그 사용의 합리화, 신에너지 활용에 노력하여야 함</li> </ul>
9	상호 노력	<ul style="list-style-type: none"> <li>국가, 지방공공단체, 사업자, 국민 및 민간단체는 에너지 수급에 관해 상호가 주어진 역할을 이해하고 협력하여야 함</li> </ul>
10	법제상의 조치 등	<ul style="list-style-type: none"> <li>정부는 에너지 수급에 관한 시책을 실시하기 위해 필요한 법제상 재무상 또는 금융상의 조치 및 기타 조치를 마련</li> </ul>
11	국회에 대한 보고	<ul style="list-style-type: none"> <li>정부는 매년, 국회에 에너지 수급과 관련하여 강구한 시책의 개요 및 현황에 관한 보고하여야 함</li> </ul>
12	에너지 기본계획	<ul style="list-style-type: none"> <li>정부는 에너지 수급에 관한 기본적인 계획(에너지 기본계획)을 정함</li> <li>에너지 기본계획은 다음 사항으로 정함 <ul style="list-style-type: none"> <li>에너지 수급에 관한 시책에 대한 기본적인 방침</li> <li>에너지 수급에 관한 장기적, 종합적, 계획적으로 수립해야 할 시책</li> <li>에너지 수급에 관한 시책을 장기적, 종합적, 계획적으로 추진하기 위해 중점적으로 연구개발을 해야 할 에너지 관련 기술 및 그 시책</li> <li>전술한 것 이외에도 에너지 수급에 관한 시책을 장기적, 종합적, 계획적으로 추진하기 위해 필요한 사항</li> </ul> </li> <li>경제산업대신은 관계행정기관의 장의 의견 청취와 함께 종합자원에너지 조사회의의 의견을 수렴, 기본계획안을 작성하고, 각의(閣議)의 결정을 구함. 각의에서 결정이 되면 기본계획을 신속하게 국회에 보고하는 동시에 공표</li> <li>정부는 에너지를 둘러싼 정세의 변화를 감안 및 에너지에 관한 시책의 효과에 관한 평가를 토대로 적어도 3년마다 기본계획을 검토 보완하고 필요시 변경</li> <li>정부는 기본계획에 대해서 매년 예산에 계상하는 등 그 원활한 실시에 필요한 조치를 강구</li> </ul>
13	국제협력의 추진	<ul style="list-style-type: none"> <li>국가는 세계의 에너지 수급 안정 및 에너지 이용과 더불어 지구온난화 방지 등 지구환경의 보전에 이바지하기 위해 국제적인 에너지 기관 등과의 협력, 연구자 등 국제적 교류, 양국간 및 다국간에 에너지 개발 협력 그 외 국제협력을 추진하기 위해 필요한 조치 강구에 노력</li> </ul>
14	에너지에 관한 지식의 보급 등	<ul style="list-style-type: none"> <li>국가는 널리 국민이 모든 기회를 통해서 에너지에 대한 이해와 관심을 높일 수 있도록 에너지에 관한 정보의 적극적인 공개에 노력하는 동시에 비영리 단체의 활용을 배려하면서 에너지의 적절한 이용에 관한 개발 및 에너지에 관한 지식의 보급에 필요한 조치 강구에 노력</li> </ul>

출처: 電氣事業連合會 HP, <https://www.fepc.or.jp/smp/nuclear/policy/seisaku/outline/index.html>

이번 6차 기본계획은 2030년 에너지 믹스 실현을 위한 추진 활동강화 및 2050년 에너지 전환·탈탄소화를 향한 정책을 설정하는 것이다. 이를 위해 2018년 7월 발표한 제5차 에너지 기본계획 이후 탈탄소화를 향한 세계적 조류와 기후변화문제 이외에도 에너지와 관련한 정세 변화에 대응하기 위한 방안을 제시하고 있다. 보다 구체적으로 보면 후쿠시마 제1원자력발전소 사고 후 10년의 경과를 정리하고 에너지 정책의 관점(S+3E)을 확인하며 2050년 탄소중립(CN) 실현을 향한 과제와 대응을 정리하고 있다. 2050년을 내다 본 2030년을 향한 정책 대응에서는 현시점에서의 기술을 전제한 각각의 에너지원의 자리매김, 2030년을 향한 에너지 정책의 기본적 사고를 검토하고 있다. 또한, 화석연료와 원전, 수소 등 에너지원별로 발전 방향을 제시하고 있어 주목된다. 또한 2050년 CN 실현을 향한 산업·경쟁·이노베이션 정책과 일체화된 전략적인 기술개발·사회 실제 적용 등의 추진을 설명하고 국민 각계각층과의 커뮤니케이션을 충실하기 위한 노력을 강조하고 있다.

제6차 에너지 기본계획의 전체 구조는 ①동경전력 후쿠시마 제1원전의 사고 이후 10년의 발자취, ②2050년 탄소중립 실현을 향한 과제와 대응, ③2050년을 내다 본 2030년을 향한 정책 대응 분야로 구성된다. 그중에서도 후쿠시마 제1원자력발전소 사고 이후 10년의 경과에 대한 논의가 주목된다. 당시 동경전력 후쿠시마 발전소 사고의 경험, 반성과 교훈을 명심하고 대응하는 것이 에너지 정책의 원점임을 밝히고 있다. 후쿠시마 원전사고로 2021년 3월 기준 2.2만 명의 재해를 입은 주민이 피난 대상이며, 재해를 입은 사람들 각자의 마음의 아픔을 위로하고 마지막까지 후쿠시마의 부흥·재생에 전력으로 대응하는 것은 지금까지 원자력을 활용한 에너지 정책을 추진해 온 정부의 책무라고 강조한다. 또한, 향후에도 원자력을 계속 활용해야 하는 이상, ‘안전신화’에 빠져 비참한 사태를 막을 수 없었다는 반성을 한시도 망각하지 않고 안전을 최우선으로 고려한다는 다짐도 보인다.

후쿠시마현 태평양 연안지역 등의 자립적인 산업발전을 위해 사업·생업의 재건과 후쿠시마 이노베이션·연안(Coast) 구상을 구체화하여 양측에서 지속적으로 신산업의 창출을 추진하고, 덧붙여 후쿠시마로의 귀환 촉진과 병행하여 교류인구의 확대에 따른 역외 소비를 후쿠시마로 불러들이는 운동도 함께 추진한다는 계획이다. 후쿠시마 신에너지 사회 구상의 실현을 위해 재생가능 에너지와 수소를 두 축으로 하고 더욱이 도입 확대와 덧붙여 사회에 실제 적용하고 전개한다는 방침이다. 한편 동경전력 후쿠시마 제1원자력발전소 사고를 경험한 일본

으로서는 2050년 탈탄소 및 2030년도의 새로운 삭감목표의 실현을 지향할 때, 원자력에 대해서는 안전을 최우선으로 하고 재생가능 에너지의 확대를 도모하면서 가능한 한 원전에 대한 의존도를 줄인다는 입장이다.

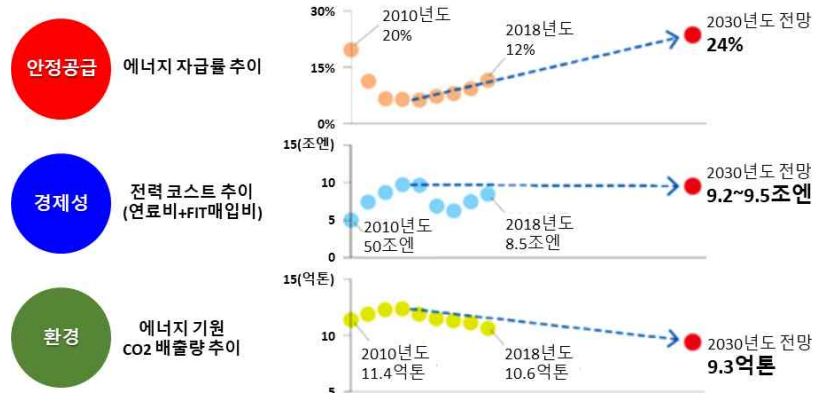
## 2) 일본 에너지산업의 정책 변화와 특성

### (1) S+3E 정책의 도입

일본 에너지 정책의 특성을 요약하면 안전성(Safety)을 바탕으로 에너지의 안정적 공급(Energy Security), 경제 효율성(Economic Efficiency), 환경 적합(Environment) 등의 3E로 이루어진 개념이다. 이것은 2014년 4월 11일 제정된 「에너지기본법」에서 등장하게 되었다. 원래 이 정책은 2003년의 제1차 계획에 이어 2010년의 제3차 계획까지 3E를 기본으로 하는 일본 에너지 정책의 근간을 이루어왔다. 당시 화석연료에 국가 에너지원의 대부분을 의존하던 중 제1차 오일쇼크로 인해 일본은 에너지 정책의 근간이 되는 3E를 만들게 되었다. 이를 통해 화석연료에 많은 것을 의존하는 전원 구성에서 벗어나 분산형 전원으로 변환하는 것을 의미한다. 동시에 재난이 일어날 경우를 대비한 에너지의 안정공급을 목표로 하고 있다. 2011년 동일본 대지진 및 그에 따른 후쿠시마 제1원자력발전소 사고로 안전성에 대한 세계적인 관심이 집중되었다. 그로 인해 원자력 발전에 대한 반대 여론의 확산으로 안전성 문제가 대두되면서 일본 내의 원자력발전소가 정지되었다. 이에 따라 2014년 4차 에너지계획에서는 안전성(Safety)을 기본으로 하는 S+3E가 탄생하게 되었다. S+3E 에너지 정책은 안전성(S)을 가장 기본적인 전제로 하고 에너지의 안정적 공급과 경제 효율성 향상에 의한 저비용 에너지 공급을 실현하고 동시에 환경에 적합하도록 최대한으로 대응한다는 것이다.

그런데 에너지는 인간의 모든 상황에서 필수적이며 활동의 근본을 지탱하고 있다. 따라서 지속적인 발전을 위해서는 안정적이고 사회적 부담이 적은 에너지 공급이 전제조건이 된다. 그러나 후쿠시마 제1원자력발전소 사고로 인한 일본 전원 비율의 변화와 전력 소매의 전면 자유화 등 에너지 수급 구조가 크게 변화하고 있다. 그런데 S+3E의 조건을 모두 충족하는 에너지원은 없기 때문에 전원 구성은 각각의 에너지원별 특성을 고려한 균형 잡힌 유연하고 다층적인 수급 구조를 구성해야 한다는 방침이다. 이를 위해 일본의 전력수요에 알맞은 대응책을 만들어야 한다는 정책적 고민을 담고 있다.

〈그림 2-4〉 3E 정책의 성과와 추이



출처: 資源エネルギー庁(2018), ‘総合エネルギー統計(2018年度確報値)等を基に資源エネルギー庁作成’

일본 전력수요의 특징은 밤낮으로 수요가 크게 변동함에 따라 각각의 에너지원은 비용이나 출력 변동·발전량 등의 능력에 따른 베이스·미들·피크 전원 등 3가지 요소의 역할을 분담해 조합하고 있다. 베이스 전원이란 주로 유입식 수력, 원자력, 석탄 화력에 해당하며, 연중 안정적으로 일정량의 전원을 공급하는 전원이다. 반면 미들 전원은 LNG 화력·석유 화력 등의 화력발전이 이용되어 전원 수요가 높아져도 대응이 쉽고 일정 출력을 얻기 쉬운 것이 특징이다. 그리고 피크 전원은 조정식·저수지식·양수식 수력 등의 수력발전으로 발전량이 조정되기 쉽고 급격한 수요변동에 대응하기 용이한 특징을 지니고 있다. 또한, 재생에너지는 일정량의 안정적 공급이 가능한 지열·수력·바이오매스 발전을 베이스 전원에, 자연조건에 의한 출력 변동이 큰 태양광·풍력 발전은 화력발전과 조합 활용하여 미들 전원으로써의 역할을 담당하는 것으로 구상하고 있다.

발전산업을 S+3E라는 관점에서 볼 때 여기에 가장 이상적인 전원은 존재하지 않는다. 어떤 전원도 장점도 있고 단점도 있기 때문이다. 원자력 발전의 경우 3E라는 관점에서는 매우 우수하다. 안정적인 공급과 경제적으로 효율적이며 이산화탄소 배출이 거의 없는 우수한 에너지이다. 그러나 원자력 발전은 안전성이 크게 떨어진다고 할 수 있다. 후쿠시마 원전사고 이후 안전성은 가장 중요한 고려사항이 되었지만, 그 이유만으로 원전을 제로로 만들면 이번에는 화석연료 유래 전원이 많아져 비용이 많이 들고 또 이산화탄소 배출 관점에서 환경 적합성에 문제가 생길 수 있다는 점도 고려해야 한다. 이러한 관점에서 국제적인 흐름 및 이산화탄소 배출 감소 목표를 조화롭게 이루기 위해서는 에너지 정책의 근간을 이루는 S+3E는 중요한 역할을 하고 있다. 특히 에너지자원이 부족한 일본에서는

S+3E의 관점에서 다양한 에너지를 조합하는 것은 대단히 적절한 정책으로 평가할 수 있다.

## (2) 2030 전원 구성과 재생에너지의 비중확대

일본에서는 원자력은 3E의 모든 점에서 뛰어난 특성을 가지고 있어 에너지 믹스의 한 축으로 빼놓을 수 없는 중요한 역할을 해왔다. 지진 이후 원자력 정지가 장기화되면서 화력에 대한 과도한 의존이 계속되고 있지만, 원자력도 포함해 다양한 선택지를 확보하고 균형 잡힌 에너지 믹스를 재구축해야 한다는 여론이 높아지고 정부도 이에 대응해 특정 에너지원에 의존하지 않고 균형 잡힌 에너지 믹스를 실현하기 위해 노력하고 있다. 이를 위한 대전제로써 안정적 공급이 이루어질 수 있도록 정책의 강도나 실시 타이밍 등을 고려해야 한다. S+3E를 대전제로 재생에너지의 주력 전원화에 집중하고 재생에너지를 최우선으로 도입함을 원칙으로 국민부담 억제와 지역과의 공생을 도모하였다.

후쿠시마 사고 이후 2014년 발표된 제4차 에너지 기본계획에서는 미래의 전원 구성을 구체적인 수치로 나타내지 않았다. 이에 관해서는 원자력 발전이 앞으로 어떻게 될지 여론을 포함해 전망이 서지 않았기 때문이라고 생각된다. 그러나 2018년 제5차 에너지 기본계획과 이번에 발표된 제6차 에너지 기본계획에는 2030년 전원 구성을 구체적으로 명시하고 있다. 발전을 위한 연료의 대부분을 해외에 의존하고 있는 일본을 비롯해 대부분의 나라가 자국 독자적으로 충분한 대응을 할 수 없는 경우가 많아지고 있다. 따라서 일본이 이러한 전원 전망을 내놓은 것은 변수가 있지만 국제협력을 전제로 한 것이라 할 수 있다.

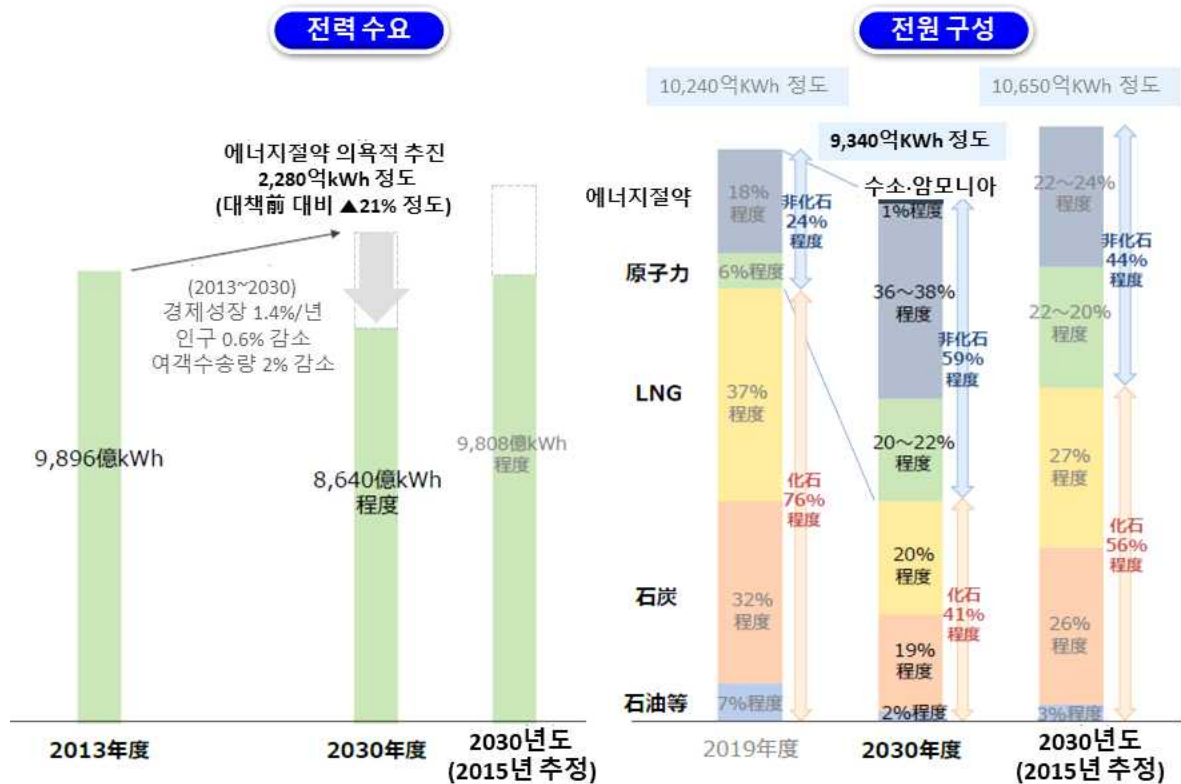
이번 6차 에너지 기본계획의 전망은 2030년도의 새로운 삭감목표를 토대로 철저한 에너지 절약 및 비화석 에너지의 확대를 추진하면서 수급 양면에 있어 다양한 과제의 극복을 의욕적으로 상정한 경우의 에너지 수급전망을 담고 있다. 이번의 의욕적인 전망을 위한 시책을 실시함에 있어서 안정공급에 지장이 없도록 시책의 강도, 실시의 타이밍 등은 충분히 고려할 필요가 있었다. 예를 들어 비화석연료 전원이 충분히 도입되기 전 단계에서 화석연료의 억제책을 강구한다면 안정적인 전력공급에 지장이 발생할 수 있음을 고려한 것이다.

〈표 2-4〉 2030년도 에너지 수급 전망

(2019년도⇒舊 에너지 믹스)		2030년도 에너지 믹스 (의욕적인 전망)	
에너지 절약	(1,655만kl⇒5,030만kl)	6,200만kl	
최종 에너지 소비 (에너지 절약 이전)	(35,000만kl⇒37,700만kl)	35,000만kl	
전원 구성  발전 전력량: 10,650억 kWh ⇒ 약 9,340억 kWh 정도	에너지 절약 (18%⇒22~24%) ➡ 태양광 6.7%⇒7.0%		36~38%*
	풍력 0.7%⇒1.7%		※현재 추진하고 있는 재생가 능 에너지의 연구개발 성과 의 활용·실제 현장적용이 진행될 경우를 상정 38% 이 상의 높은 목표 지향
	수소·암모니아 (0%⇒0%)	지열 0.3%⇒1.0~1.1%	1% (에너지 절약 내역)
	원자력 (6%⇒20~22%)	수력 7.8%⇒8.8~9.2%	20~22%
	LNG (37%⇒27%)	바이오매스 2.6%⇒3.7~4.6%	20%
	석탄 (32%⇒26%)		지열 1%
석유 등 (7%⇒3%)		2%	수력 11%
			바이오매스 5%
(+ 非에너지 기원 가스·흡수원)			
온실효과가스 삭감 비율 (14%⇒26%)		46% 50%의 보다 높은 목표 지향	

출처: 資源エネルギー庁(2021.3.10), 第6次エネルギー基本計画の概要

〈그림 2-5〉 전력수요와 전원 구성

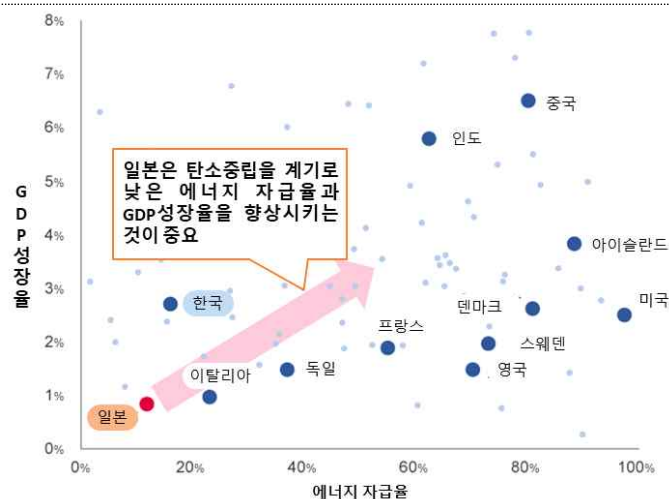


출처: 資源エネルギー庁(2021.3.10., p.70), 2030年度におけるエネルギー需給の見通し

6차 에너지 기본계획은 S+3E를 실현하는 동시에 온실가스 46% 삭감이라는 매우 어려운 과제에 대한 해법을 담고 있다. 특히 2030년까지는 불과 8년이 남은 상황인 만큼 지금의 기술을 최대한 활용한다는 전제를 담고 있다. 따라서 이번 6차 에너지 기본계획의 전원 구성은 첨단기술을 개발하여 이를 얼마나 활용하는가 하는 것이 온실가스 삭감이라는 성과로 연결될 가능성이 높아지고 있다.

〈그림 2-5〉에 따르면 일본의 2030년 전력수요는 2013년도 대비 21% 감소 전망이다. 2030년 전력수요 예상치를 보면, 본래는 2013년도 대비 증가할 전망이었지만, 일본 정부가 적극적인 에너지 효율을 시행한다는 전제하에 전력수요는 2013년 9,896억 kWh에서 2030년 8,640억 kWh로 하락할 것으로 예상하고 있다. 2030년 전원 구성 목표를 보면 재생에너지와 원자력 발전 비중을 높인 반면, 화석연료 발전 비중을 축소하는 방침을 표명하고 있다. 2019년 기준 전원별 전력생산에서 76%를 차지하는 화력발전을 2030년 41%로 대폭 삭감한다는 계획이다. 이를 위해 세부적으로 석탄(32%→19%), 천연가스(37%→20%), 석유(3%→2%) 감축 계획을 부연 설명하고 있다. 한편 재생에너지 비중을 2019년 18%에서 36~38%로 확대하고, 6%까지 축소되었던 원자력 발전 비중을 20~22%까지 증가시킨다는 목표를 제시하고 있다. 한편 수소·암모니아의 발전목표 1%를 새롭게 추가한 것도 특징이다.

〈그림 2-6〉 주요국의 GDP 성장률과 에너지 자급률



※에너지 자급률은 2018년, GDP 성장률은 2017~2019년의 3년 평균치

※에너지 자급률은 ‘국내산출÷1차 에너지공급’, 자국 자원을 수출하는 경우, 100% 초과할 수 있음  
(출처) 三菱総合研究所 石田裕之(2021.12.27.), カーボンニュートラルを契機とした日本のエネルギー安定供給と経済成長, <https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20211227.html>



일본은 에너지 자급률이 현저히 낮고 자연재해로 인한 피해가 극심하다는 문제점을 해결하기 위해 다층적이고 유기적인 에너지 공급의 확대가 과제로 대두되고 있다. 이런 상황에서 일본은 에너지 정책의 기본 방향으로 ‘S+3E’를 강조하며, 재생에너지의 주력 전원화를 최우선 과제로 제시하고 있다. 먼저 에너지의 안정적 공급을 위해 에너지 자급률을 2030년까지 25%(현재 11.8%)까지 인상하는 목표를 제시하고 있다. 아래의 <그림 2-6>은 주요 국가의 에너지 자급률과 GDP 성장률을 비교한 것으로 주요국에 비해 낮은 일본은 에너지 자급율을 높이는 것을 중요한 과제로 인식하고 있다.

경제적 효율성 향상이라는 관점에서 보면 일본은 저비용 에너지의 도입을 확대해야 하는 과제를 안고 있다. <표 2-5>에 따르면 2020년 기준의 전력별 발전요금을 비교할 때 원자력이 11.5엔/kWh, 육상풍력이 19.8엔/kWh, 해상풍력 30.3엔/kWh로 차이가 크게 나타난다.

반면, 2030년 요금을 비교하면, 사무용 태양광 요금이 최저 8.2엔/kWh까지 하락하여 원자력보다 저렴해질 전망이다. 태양광은 기술혁신과 대량 도입으로 비용이 점차 하락하지만, 원자력은 안전대책과 폐기물 처리 영향으로 비용이 상승할 전망에 그 근거를 두고 있다.

<표 2-5> 2020년과 2030년 발전비용 비교

	2020년	2030년	설비가동 년수	설비 이용률
원자력	11.5엔	11.7엔	40년	70%
태양광(사무용)	12.9엔	8.2~11.8엔	25년	17.2%
태양광(주택용)	17.7엔	8.7~14.9엔	25년	13.8%
육상풍력	19.8엔	9.9~17.2엔	25년	25.4%
해상풍력	30.3엔	26.1엔	25년	30%(33.2%)
석탄화력	12.5엔	13.6~22.4엔	40년	70%
LNG화력	10.7엔	10.7~14.3엔	40년	70%


주) 1kWh당 발전비용을 산출한 것임

출처: 経済産業省(2021.8.3), 発電コスト検証に関する取りまとめ

환경 분야에서는 온실효과 가스배출량 삭감목표 중 에너지에서 발생한 CO<sub>2</sub> 배출량을 2030년도까지 45%까지 삭감한다는 목표이다. 이를 달성하기 위해서는 2030년 재생에너지 발전 비중 목표를 22~24%(기존 제5차 계획)에서 36~38%(6차 개정 계획)로 확대하여 주력 전원으로 활용하는 계획을 수립하고 있다. 특히 태양광, 수력, 풍력 등 재생에너지를 주력 전원으로 활용하기 위해 발전목표를 36~38%대로 상향한 결과, 기존 5차 계획보다 10% 이상의 상향된 추가 도입목표

달성이 요구되고 있으며 풍력발전(육상 및 해상 풍력)을 재생에너지 주력 전력으로 설정하여, 도입 비중 목표를 1.7%에서 5%로 확대할 계획이다. 이를 정리하면 <표 2-6> 과 같다.

<표 2-6> 2030년 재생에너지 도입목표

발전 유형	제5차 에너지 기본계획 (2018년 목표)		제6차 에너지 기본계획 (2021년 개정 목표)
태양광	7.0%		14~16%
수력	8.8~9.2%		11%
풍력	1.7%		5%
바이오매스	3.7~4.6%		5%
지열	1.0~1.1%		1%
<b>재생에너지 합계</b>	<b>22~24%</b>		<b>36~38%</b>

출처: 資源エネルギー庁(2021.10), エネルギー基本計画の概要

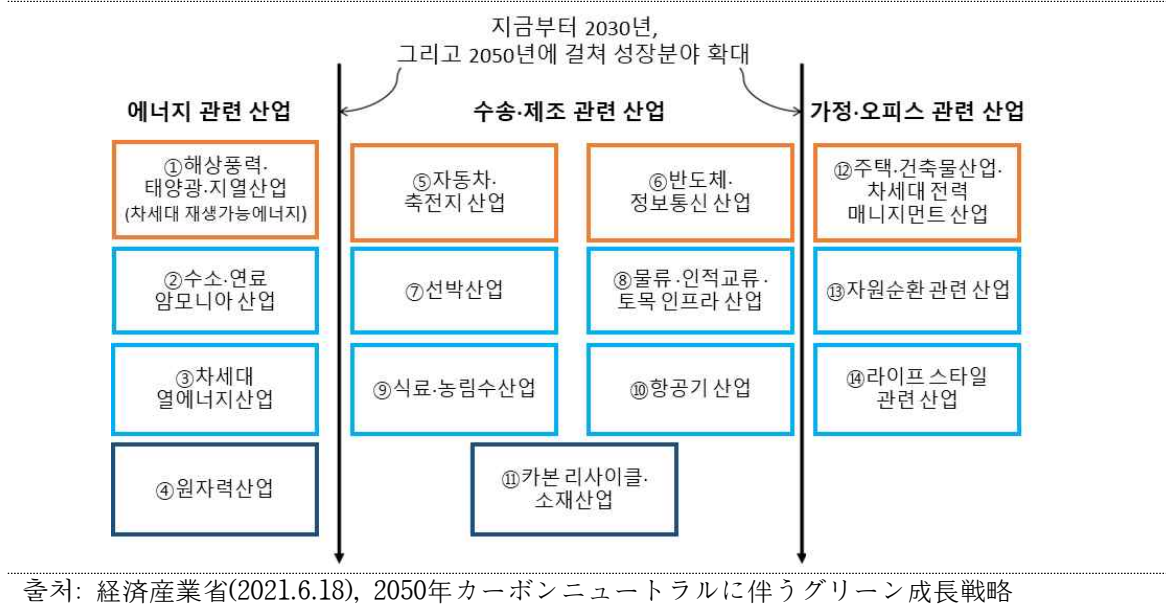
### (3) 그린 성장전략과 연계

2000년대 들어 일본 정부는 저성장·고령화라는 일본의 구조적 문제를 해결하기 위한 방안으로 ‘저탄소사회 구축’을 표방한 바 있다. 이를 통해 기후변화 문제를 해결하고 동시에 새로운 성장 기회를 확보하려는 전략이라 하겠다. 일본 정부는 중장기 경제성장의 원동력으로써 2020년 12월 ‘2050년 탄소중립을 위한 그린 성장전략’을 발표했다. 이 전략은 지구온난화 대응을 경제성장의 제약 및 비용 상승 원인이 아니라 새로운 성장의 기회로 삼아야 한다는 관점을 강조하고 하고 있다. 따라서 이 전략은 ‘경제와 환경의 선순환’을 도모하기 위한 산업정책의 일환으로써 성장이 기대되는 14개 중점산업을 선정하고 분야별 목표를 제시하고 있다.

<그림 2-7>은 그린 성장전략에서는 14개 중점분야를 에너지산업, 수송·제조업, 가정·사무산업으로 3개로 구분하고 있다. 에너지 분야에서는 해상풍력 산업, 수소 산업, 카본리사이클 산업, 연료암모니아 산업을 육성하기 위한 목표를 제시하고 있다. 수송·제조업 분야에서는 화석연료를 전기나 수소 연료로 전환하여 기술개발을 통한 산업경쟁력 강화를 목표로 설정하고, 가정·사무 분야에서는 생활 방식의 개선과 주택·건축물의 에너지 절약 성능 향상으로 2050년까지 탄소중립을 실현한다는 계획이다. 실행계획은 4단계로 구분하여 연구개발 단계에서는 정부가 조성하는 기금과 민간의 연구개발 투자를 통한 산업발전을 추구한다. 실증단계에서는 민간투자 확대를 전제로 국민 연계 투자를 확대하며,

도입 확대 · 비용 삭감 단계에서는 공공조달, 표준화 등 규제정비에 의한 수요 확대와 이에 따른 양산화, 생산비용 절감을 도모한다는 계획이다. 마지막 자립 · 상용 단계는 규제, 표준 등을 전제로 공적 지원 없이 자립적인 상용화가 진전 되도록 설정하고 있다.

〈그림 2-7〉 그린 성장전략과 14개 중점산업



〈표 2-7〉 중점산업 분야별 그린 성장전략의 목표

14대 중점분야		그린 성장전략의 주요 목표
에너지	해상풍력	- (시장 목표) 2030년까지 10GW, 2040년까지 30~45GW - (국내조달 비율) 2040년까지 60% - (비용삭감 목표) 2030~2035년 8~9엔/kWh
	수소	- (도입량) 2030년 최대 300만 톤, 2050년 2,000만 톤 - (비용삭감 목표) 2030년 상용화 30엔/Nm³, 2050년 상용화 20엔/Nm³(화력발전 이하 수준)
	암모니아	- (목표) 화력발전의 암모니아 혼소 활용(2030년까지 20%) - (비용삭감 목표) 2030년 Nm³-H₂당 10엔대 후반 - (공급량) 2030년 300만 톤/年, 2050년 3,000만 톤/年
	차세대 열에너지	- (공급량) 2050년까지 합성 메탄 2,500만 톤 - (비용삭감 목표) 40~50엔/Nm³(현재 LNG가격)
	원자력	- (목표) 2030년까지 소형모듈원전(SMR) 기술 실증 - (비용삭감 목표) 2050년까지 양산화 12엔/Nm³
수송 및	자동차·축전지	- (목표) 2030년까지 승용차 신타 판매기준 전기차 100% - (합성연료 비용삭감) 2050년 가솔린 가격 이하를 달성 - (차량 탑재 축전지 제조능력) 2030년까지 100GWh
	반도체·	- (시장) 2030년 DX시장(24조엔), 데이터센터 서비스(3조엔)

제조업	정보통신산업	- (에너지 감축 목표) 2030년 파워 반도체 전력 감소(50% 이상) 데이터센터 전력 감소(30% 이상)
	선박	- (목표) 2050년까지 선박 분야에서 탈탄소 대체 연료(수소, 암모니아)로 대체, LNG 연료 선박의 고효율화
	물류·인적교류·토목 인프라	- (목표) 2050년 탄소중립 항만 형성, CO <sub>2</sub> 배출이 적은 수소시스템 도입
	식료품·농림수산업	- (목표) 2050년까지 농림수산업의 화석연료 기원 CO <sub>2</sub> 배출량 제로 실현
	항공기	- (목표) 2050년 CO <sub>2</sub> 배출량을 2005년 대비 50% 삭감
	카본 리사이클·소재 산업	- (비용삭감 목표) 콘크리트, 카본 리사이클 화학품·연료의 비용을 기존 제품과 동일한 수준까지 인하
가정·오피스	주택·건축물	- (목표) 2030년까지 신축 주택/건축물 ZEH(Zero Energy House)/ZEB(Zero Energy Building) 달성
	자원순환	- (목표) 2030년 바이오매스 플라스틱 200만 톤 도입, 2050년까지 온실효과가스 배출 제로 달성
	라이프 스타일	- (목표) 2050년까지 탄소중립으로 탄력적이고 쾌적한 라이프 스타일 실현

출처: 經濟産業省(2021.6.18), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略

그린 성장전략의 에너지 부분에서는 해상풍력, 수소, 암모니아, 열에너지, 원전에 대한 목표와 발전 방안을 3E라는 관점에서 제시하고 있다. 먼저 해상풍력의 경우 2030년까지 10GW, 2040년까지 30~45GW로 생산량을 확대한다는 시장목표를 설정하고 2040년까지 60%로 일본 국내 조달 비율을 높인다는 계획이다. 나아가 2030~2035년 8~9엔/kWh로 비용을 낮춘다는 야심찬 계획이다.

수소는 2030년 최대 300만 톤, 2050년까지 2,000만 톤을 생산한다는 원대한 목표를 제시하고 2030년 상용화 30엔/Nm<sup>3</sup>, 2050년 상용화 20엔/Nm<sup>3</sup>으로 낮추어 현재 화력발전 단가 이하 수준으로 만든다는 계획이다.

또한, 암모니아도 일본에서 집중적으로 육성한다는 방침이다. 화력발전의 암모니아 혼소 비율을 2030년까지 20%로 늘리고 발전단가를 2030년 Nm<sup>3</sup>-H<sub>2</sub>당 10엔대 후반으로 낮추며 2030년 연간 300만 톤, 2050년에는 연간 3,000만 톤으로 공급량을 대폭 확대할 방침이다. 열에너지의 경우 2050년까지 합성 메탄공급량을 2,500만 톤으로 높이고 비용을 40~50엔/Nm<sup>3</sup>으로 인하 현재 LNG 가격 수준으로 내린다는 목표를 제시하고 있다. 끝으로 원자력 발전은 2050년까지 12엔/Nm<sup>3</sup>으로 줄이고 2030년까지 소형모듈원전(SMR) 기술을 실증한다는 전략이다.

일본 정부는 2050년 탄소중립 실현을 위한 그린 성장전략을 제시하고 있으며 이는 6차 에너지 기본계획과 연계하여 예산, 세제, 금융, 규제개혁·표준화, 국제연대를 포함한 모든 정책 수단을 총동원하여 실행한다는 방침을 천명하고 있다.

### 3 일본의 재생에너지 산업

#### 1) 재생에너지의 정의와 글로벌 현황

##### (1) 그린에너지와 재생에너지

기후변화에 대한 대응이 세계적인 화두가 되면서 에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이 과정에서 우리는 그린에너지와 재생에너지라는 용어를 자주 사용한다. 일반적으로 '그린에너지'와 '재생에너지'라는 용어는 종종 같은 의미로 사용하지만 미세한 차이가 있다. 그린에너지는 재생 가능하지만 모든 재생 가능 에너지원이 완전히 친환경적이고 녹색인 것은 아니라는 점이다. 따라서 재생 에너지가 그린에너지보다 좀 더 넓은 의미를 지니고 있다.

재생가능 에너지는 풍력 및 태양에너지와 같이 지속적이고 자연적으로 갱신되는 자원을 의미한다. 재생 가능한 에너지는 종종 지속 가능한 에너지라고도 불리는데 재생 가능한 에너지원은 유한한 에너지원인 석탄과 가스와 같은 화석 연료와는 반대 개념이다. 반면 그린에너지는 자연에서 나오는 자원인 재생 에너지로 재활용 가능한 자원이라고 정의할 수 있다. 재생가능 에너지의 다른 말로서, 태양, 풍력, 해양과 같은 오염물질을 배출하지 않고 생산되는 에너지원이며 수력, 태양, 바이오매스 에너지와 같이 환경 친화적이라고 고려되는 에너지이다.

2011년 4월 설립된 국제재생에너지기구(IRENA)에 따르면 그린에너지라는 용어 보다는 재생에너지를 사용하고 있다. 이 기구는 태양, 풍력, 바이오매스, 지열, 수력, 해양 에너지의 보급 및 지속 가능한 이용 촉진을 목적으로 설립되었다. 주요 활동은 재생에너지 이용의 분석·파악·체계화, 정책상의 조언 제공, 가맹국의 능력개발 지원 등이다. IRENA는 재생에너지에 관한 조사·정책 및 재정을 담당하는 지식·정책·재무국(KPFC), 국가 및 지역별 사안에 대해 회원과의 창구 역할을 하는 국가별 관여·파트너십 국가(CEP), 재생에너지 프로젝트의 자금·투자를 촉진하는 프로젝트 원활화·지원국(PFS), 이노베이션 시나리오 책정 등을 실시하는 이노베이션 테크놀로지 센터(ITC)로 구성되어 있다.

국내에서는 '신재생에너지개발 및 이용·보급촉진법'에 근거해 신재생에너지를 미래에 사용될 신재생에너지로 석유, 석탄, 원자력, 천연가스 등 화석연료가 아닌 에너지로 11개 분야를 지정하여 세분하고 있다. 신에너지는 연료전지,

석탄액화·가스화, 수소에너지의 3개 분야로 이루어져 있으며, 재생에너지는 8개 분야로 태양열, 태양광, 바이오매스, 풍력, 소수력, 지열, 해양에너지, 폐기물 에너지 등으로 구성되어 있다. 따라서 본고에서는 국제적으로 통용되고 국내법에도 명시된 점을 감안하여 재생에너지로 통일하여 설명하고자 한다.

#### 신·재생에너지

신·재생에너지(new and renewable energy)는 한국에서만 사용되는 개념이다. 국제적으로는 재생에너지(renewable energy)로 통용된다. OECD에서 사용하는 재생에너지에는 태양, 바람, 물, 생물유기체(biomass), 해양에너지와 생분해가 가능한 폐기물에너지가 포함되는데, 재생 가능하고 환경친화적인 에너지를 일컫는다. 하지만 한국의 신·재생에너지에는 국제 기준의 재생에너지로 분류될 수 없는 것들이 많이 포함되어 있다. 석탄액화 및 가스화 에너지와 화석연료 기반의 폐기물에너지는 재생 가능하지 않고 환경 친화성도 높지 않으며, 수소는 생산에 에너지가 투입되기 때문에 에너지가 아니라 에너지 전달자(energy carrier)라 할 수 있다. 또한, 연료전지는 에너지가 아니라 에너지를 사용하는 기기 등이다.

## (2) 글로벌 재생에너지의 종류

재생에너지는 자연적으로 보충되는 재생 가능한 자원으로부터 수집되는 에너지이다. 그것은 태양, 풍력, 수력, 그리고 지열과 같은 원천들을 포함한다. 대부분의 재생 가능한 에너지원은 지속 가능하지만 일부는 그렇지 않다. 예를 들어, 일부 바이오매스 공급원은 현재 개발 속도로는 지속 가능하지 않은 것으로 간주된다. 재생가능 에너지는 종종 그리드, 공기·물의 냉난방 및 독립형 전력 시스템에 전기를 생산하기 위해 에너지를 제공한다.

재생가능 에너지는 소비되는 것보다 더 높은 속도로 보충되는 천연자원으로부터 파생된 에너지이다. 우리가 실생활에서 늘 접하고 있는 햇빛과 바람은 끊임없이 보충되는 에너지의 원천이며 재생 가능한 에너지원은 풍부하고 우리 주변 곳곳에 있다. 반면 석탄, 석유, 가스와 같은 화석연료는 형성되기까지 수억 년이 걸리는 재생 불가능한 자원이다. 화석연료는 에너지를 생산하기 위해 연소될 때 이산화탄소와 같은 해로운 온실가스를 배출한다. 이에 비해 재생 가능한 에너지를 생산하는 것은 화석연료를 태우는 것보다 훨씬 낮은 온실가스를 배출한다. 현재 배출량에서 가장 큰 비중을 차지하는 화석연료에서 재생 가능한 에너지로 전환하는 것이 기후 위기를 해결하기 위한 핵심이라 할 수 있다.

재생 가능한 에너지는 태양, 풍력, 지열, 수력, 해양, 바이오로 구분할 수 있다. 먼저 태양에너지는 모든 에너지자원 중 가장 풍부하고 심지어 흐린 날씨에도 이용할 수 있다. 태양에너지는 열, 냉각, 조명, 전기 및 연료를 다양한 용도로

제공할 수 있다. 태양광 패널이나 태양 복사를 집중시키는 거울을 통해 햇빛을 전기에너지로 변환시킨다. 모든 국가가 태양에너지를 동등하게 사용할 수는 없지만, 태양에너지로부터 나오는 에너지 혼합에 대한 상당한 기여는 모든 국가에서 가능하다. 태양 전지판을 제조하는 비용이 지난 10년 동안 급격히 하락하여 태양 전지판이 저렴해졌을 뿐만 아니라, 종종 가장 저렴한 형태의 전기를 생산하기도 한다. 태양 전지판은 약 30년의 수명을 가지고 있으며, 제조에 사용되는 재료의 종류에 따라 다양한 형태가 있다.

풍력 에너지는 육지나 바다 또는 해안에 위치한 대형 풍력 터빈을 사용하여 움직이는 공기의 운동에너지를 활용한다. 풍력 에너지는 수천 년 동안 사용되어 왔지만, 육상 및 해상 풍력 에너지 기술은 더 높은 터빈과 더 큰 회전자 직경으로 생산되는 전기를 최대화하기 위해 지난 몇 년 동안 계속 발전해 왔다. 평균 풍속은 지역에 따라 상당히 다르지만, 풍력 에너지에 대한 세계의 기술적 잠재력은 전 세계 전기 생산량을 능가하며, 상당한 풍력 에너지 배치를 가능하게 하는 충분한 잠재력이 세계 대부분 지역에 존재한다. 세계 많은 지역들이 강한 풍속을 가지고 있지만, 풍력을 발생시키기 위한 가장 좋은 장소는 때때로 멀리 떨어져 있는 지역들이다. 이에 따라 해상풍력은 엄청난 잠재력을 제공한다.

지열 에너지는 지구 내부에서 나오는 열에너지를 활용한다. 자연적으로 충분히 뜨겁고 투과성이 있는 저수지를 열수 저장고라고 부르는 반면, 충분히 뜨겁지만 유압 자극에 의해 개선된 저수지를 지열 시스템이라고 한다. 일단 지표면에 떠오르면 다양한 온도의 유체가 전기를 생산하는데 사용될 수 있다. 열수 저수지의 발전기술은 신뢰할 수 있으며 100년 이상 운영되어 왔다.

수력발전은 높은 고도에서 낮은 고도로 이동하는 물의 에너지를 이용한다. 그것은 저수지와 강으로부터 생성될 수 있다. 저수지 수력 발전소는 저수지의 저장된 물에 의존하는 반면, 강줄기 수력 발전소는 강의 가용 흐름으로부터 에너지를 활용한다. 수력발전 저수지는 종종 식수, 관개용 물, 홍수 및 가뭄 방지, 항법 서비스, 에너지 공급 등 다양한 용도로 사용된다. 수력발전은 현재 전기 분야에서 가장 큰 재생에너지 공급원이다. 일반적으로 안정적인 강우 패턴에 의존하며 기후로 인한 가뭄이나 강우 패턴에 영향을 미치는 생태계의 변화에 부정적인 영향을 받을 수 있다. 수력발전을 만드는 데 필요한 인프라도 생태계에 악영향을 미칠 수 있다. 이러한 이유로 많은 사람들은 소규모 수력이 더 환경 친화적인 선택이며, 특히 외딴 지역의 지역사회에 적합하다고 생각한다.

해양에너지는 전기나 열을 생산하기 위해 바닷물의 운동에너지와 열에너지를 사용하는 기술로부터 유래한다. 해양에너지 시스템은 여전히 초기 개발단계에 있으며, 다수의 원형 파도와 조수 장치가 탐사되고 있다. 해양에너지의 이론적 잠재력은 현재 인간의 에너지 요구량을 쉽게 초과한다.

바이오 에너지는 목재, 숯, 배설물 및 열과 전력 생산을 위한 다른 수단과 액체 바이오 연료를 위한 농작물과 같은 바이오매스라고 불리는 다양한 유기 물질로부터 생산된다. 대부분의 바이오매스는 요리, 조명, 공간 난방을 위해 농촌 지역에서 사용되며, 일반적으로 개발도상국의 빈곤한 인구에 의해 많이 사용된다. 현대의 바이오매스 시스템은 전용 작물 또는 나무, 농업 및 임업에서 발생하는 잔류물, 다양한 유기 폐기물 흐름을 포함한다. 바이오매스를 태워서 생성된 에너지는 온실가스 배출을 발생시키지만, 석탄, 석유 또는 가스와 같은 화석연료를 태우는 것보다 적게 나온다. 그러나 산림 및 바이오 에너지 플랜테이션의 대규모 증가와 그에 따른 산림 벌채 및 토지 사용 변화와 관련된 잠재적 부정적인 환경 영향을 고려할 때, 바이오 에너지는 제한된 용도로만 사용되어야 한다.

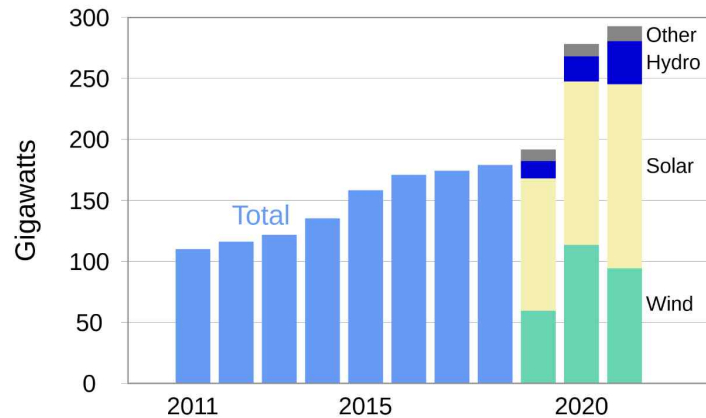
### (3) 글로벌 재생에너지의 현황

2011년 국제 에너지 기구는 “저렴하고, 고갈되지 않고, 깨끗한 태양에너지 기술의 개발은 장기적으로 큰 이익을 가져올 것이다. 그것은 토착적이고 고갈되지 않으며 대부분 수입으로부터 독립적인 자원에 대한 의존을 통해 국가들의 에너지 안보를 높이고, 지속 가능성을 높이고, 오염을 줄여 기후변화를 완화하는데 들어가는 비용을 낮추며, 화석연료 가격을 다른 것 보다 낮게 유지할 것이다. 따라서 조기 배치를 위한 인센티브의 추가 비용은 학습 투자로 간주되어야 하고, 현명하게 지출되어야 하며 널리 공유되어야 한다” 고 강조하고 있다.

〈그림 3-1〉에서 보는 바와 같이 2020년 재생에너지 용량은 신규 풍력 발전량(녹색)이 90% 증가했으며, 태양광 신규 설비(노란색)가 23% 늘어나 2019년보다 45% 이상 확대됐다. 2011년부터 2021년까지 재생에너지는 전 세계 전력 공급량의 20%에서 28%로 성장했다. 반면 화석에너지는 68%에서 62%로, 원자력은 12%에서 10%로 감소했다. 수력발전의 비중은 16%에서 15%로 줄어든 반면 태양과 바람의 전력은 2%에서 10%로 증가했다. 바이오매스와 지열에너지는 2%에서 3%로 증가했다. 135개국에 3,146GW가 설치되어 있고, 156개국은 재생에너지 분야를 규제하는 법을 가지고 있다.



〈그림 3-1〉 글로벌 재생에너지의 현황



출처: Renewable Energy Market Update 2021, IEA. May 2021.

전 세계적으로 재생에너지 산업과 관련된 일자리가 1,000만 개 이상 있으며, 태양광은 재생가능 에너지의 최대 비중을 차지하고 있다. 재생에너지 시스템은 빠르게 더 효율적이고 저렴해지고 있으며, 전 세계적으로 새로 설치된 전기 용량의 대부분이 재생 가능한 상태이며, 총 에너지 소비에서 차지하는 비율이 증가하고 있다. 대부분 국가에서 태양광이나 육상풍력은 가장 저렴한 신규 전력이다.

전 세계 많은 나라들은 이미 전체 에너지 공급의 20% 이상을 재생에너지가 기여하고 있으며, 일부는 재생에너지로 전기의 절반 이상을 생산하고 있다.

몇몇 나라들은 재생 가능한 에너지를 사용하여 모든 전기를 생산한다. 국가 재생에너지 시장은 2020년대 이후에도 계속해서 강하게 성장할 것으로 예상된다. 많은 연구에 따르면 전력, 열, 운송 및 담수화 등 모든 부문에 걸쳐 100% 재생 가능 에너지로 전환하는 것이 실현 가능하고 경제적으로도 실행 가능한 것으로 나타나고 있다. 재생에너지 자원은 한정된 국가에 집중되어 있는 화석연료와 달리 광범위한 지리적 영역에 걸쳐 존재한다. 재생에너지 및 에너지 효율 기술의 배치는 상당한 에너지 안보, 기후변화 완화 및 경제적 이익을 초래하고 있다. 그러나 국제에너지기구는 2021년 탄소배출 제로에 도달하기 위해서는 재생에너지를 증가시키기 위한 보다 많은 노력이 필요하며, 2030년까지 매년 약 12%씩 발전량을 증가시킬 것을 요구하고 있다.

## ① 태양에너지

태양에너지, 복사광과 태양으로부터의 열은 태양 난방, 태양광발전, 집중형 태양열발전, 태양광 건축, 인공 광합성 등 끊임없이 진화하는 다양한 기술을 통해 사용되고 활용된다. 태양을 이용한 기술은 일반적으로 태양에너지를 포착, 변환, 분배하는 방식에 따라 수동태양광 또는 능동태양광으로 특징지어진다. 수동 태양기술은 건물을 태양을 향하게 하고, 열량이나 광분산 특성이 좋은 재료를 고르고, 공기를 자연스럽게 순환시키는 공간을 설계하는 것을 포함한다. 능동 태양기술은 태양열 에너지, 난방용 태양열 집열기, 태양광발전 등을 포함한다.

태양광발전 시스템은 광전 효과를 이용하여 빛을 직류(DC)로 변환한다. Solar PV는 수십억 개의 고속 성장 산업으로 변모하였고 비용 효율성을 지속적으로 개선하고 있으며, 태양열발전(CSP: concentrating solar-thermal power)과 함께 재생 가능한 기술 중 가장 큰 잠재력을 가지고 있다. 집중형 태양열발전 시스템은 렌즈 또는 거울과 추적 시스템을 사용하여 넓은 면적의 태양광을 작은 빔에 집중시킨다. 상업적인 집중형 태양열 발전소는 1980년대에 처음 개발되었고 CS 시스템은 모든 태양에너지 기술 중에서 단연코 가장 높은 효율성을 가지고 있다.

태양광발전은 2021년 기준 연간 849GW를 차지하며, 이는 전 세계 전력의 약 2%에 해당하는데 2012년~2021년 사이 연평균 26%의 성장을 보이고 있다. IPCC(기후변화에 관한 정부간 협의체) 2022 기후변화 보고서에 따르면, 태양 에너지의 전 세계적인 잠재력은 다른 재생에너지 자원의 잠재력보다 훨씬 크다. 그것은 현재 세기에 걸쳐 완화를 지원하는 데 필요한 총 에너지량을 훨씬 초과한다는 주장도 있다. 호주는 2020년 기준 전력수요의 9.9%를 태양광이 차지하고 있으며 세계에서 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 호주 가정의 30% 이상이 옥상 태양광 발전소를 보유하고 있으며, 총 용량은 11GW를 차지한다. 태양 에너지의 발전용량과 연간 성장률, 발전단가, 점유율은 〈표 3-1〉과 같다.

〈표 3-1〉 태양에너지 발전산업의 현황

지 표	현 황
글로벌 발전용량	849.5GW(2021)
전 세계 발전용량 연간 성장률	26%(2012-2021)
세계 발전량 점유율	2%(2018)
시간당 메가와트 발전 평균 비용	USD 38.343 (2019)
주요 기술	태양광발전, 태양열 집열기
기타 에너지 용도	난방, 환기 및 에어컨(HVAC), 조리, 수처리 등

출처: IRENA

## ② 풍력

풍력발전은 전기를 생산하기 위해 풍력 터빈을 사용하는 것이다. 풍력은 화석연료를 태우는 것보다 환경에 미치는 영향이 훨씬 적은 인기 있고 지속 가능하고 재생 가능한 에너지원이다. 역사적으로 풍력은 돛, 풍차, 풍력 펌프에 사용되어 왔지만 오늘날에는 대부분 전기를 생산하는데 사용된다. 풍력발전소는 많은 개별 풍력 터빈으로 구성되어 있으며, 이는 전력 전송 네트워크에 연결되어 있다. 일반적으로 풍력발전소는 새로운 석탄이나 가스 발전소보다 저렴하지만, 다른 발전소들보다 지형에 대한 시각적 영향이 더 크다. 소규모 육상 풍력 발전소는 그리드에 에너지를 공급하거나 고립된 오프 그리드 위치에 전력을 공급할 수 있다. 최근 해상 풍력발전소는 더 안정적이고 강력한 에너지원을 제공하며 시각적 영향이 적다. 현재 해상 풍력발전이 적고 건설·유지비가 더 비싸지만 확대되는 추세를 보이고 있다.

풍력발전은 가변적인 재생에너지이므로 전력 관리 기술은 풍력 하이브리드 전력시스템, 수력발전 또는 기타 파견 가능한 전력 공급원, 과잉 용량, 지리적으로 분산된 터빈, 인접 지역으로 전력 수출 및 수입 또는 그리드 스토리지와 같은 공급과 수요를 맞추기 위해 사용된다. 한 지역에서 풍력발전의 비율이 증가함에 따라 송전망을 업그레이드해야 할 수도 있다. 일기예보를 통해 전력 네트워크는 예측 가능한 전력 생산의 변화에 대비할 수 있다.

2021년에 풍력은 1,800TWh 이상의 전력을 공급했는데 이는 세계 전력의 6% 이상이며 세계 에너지의 약 2%를 차지하고 있다. 2021년 한해 중국과 미국을 중심으로 약 100GW가 추가됨에 따라, 전 세계 풍력발전 설치용량은 800GW를 초과했다. 기후변화를 제한하기 위한 파리협정의 목표를 달성하기 위해 전문가들은 연간 전력 발전량의 1%를 지금보다 훨씬 더 빠르게 확장해야 한다고 강조하고 있다. 풍력의 발전용량과 연간 성장률, 발전단가, 점유율은 다음과 같다.

〈표 3-2〉 풍력 발전산업의 현황

지 표	현 황
글로벌 발전용량	824.9GW(2021)
전 세계 발전용량 연간 성장률	13%(2012-2021)
세계 발전량 점유율	5%(2018)
시간당 메가와트 발전 평균 비용	USD 30.165 (2019)
주요 기술	풍력 터빈
기타 용도	풍차, 윈드 펌프

출처: IRENA

### ③ 수력

수력발전은 수력을 이용하여 전기를 생산하는 것을 의미한다. 이것은 수원의 중력 퍼텐셜이나 운동에너지를 전력 생산을 위해 변환시킴으로써 달성된다. 수력발전은 친환경적이며 지속 가능한 에너지 생산의 한 방법이다. 예로부터, 수력 발전소는 관개 및 기계 장치의 작동을 위한 재생 가능한 에너지원으로 사용되어 왔다. 떨어지는 물로부터 압축된 공기를 생산하는 트롬페는 때때로 멀리 떨어진 다른 기계들에 동력을 공급하기 위해 사용되어 왔다.

수력발전은 이산화탄소나 다른 대기 오염물질을 직접 생산하지 않고 비교적 일관된 동력원을 제공하기 때문에 화석연료의 매력적인 대안이다. 세계은행이나 국제에너지기구와 같은 국제기관들은 수력을 경제 발전을 위한 저탄소 수단으로 보고 있다. 그럼에도 불구하고 그것은 경제적, 사회학적, 그리고 환경적 단점들을 가지고 있고 강이나 높은 호수 같은 충분히 에너지 있는 수원을 필요로 한다. 일반적으로 물은 공기보다 약 800배 더 밀도가 높기 때문에 천천히 흐르는 물줄기나 적당한 해수면 상승도 상당한 양의 에너지를 생산할 수 있다. 물은 재생에너지에서 가장 높은 비율인 약 90%의 변환 효율로 전기를 생산할 수 있다. 물 에너지에는 여러 가지 형태가 있다. 역사적으로 수력발전은 개발도상국에서 여전히 인기 있는 대형 수력발전 댐과 저수지 건설에서 비롯되었다.

수력발전은 150개국에서 생산되며, 아시아 태평양 지역은 2010년에 전 세계 수력발전의 32%를 생산한다. 재생에너지에서 발생하는 전력 비율 상위 50개국 중 46개국이 주로 수력발전이다. 현재 중국의 양쯔강 중류를 가로막아 건설된 찰샤 댐(22,500MW), 브라질·파라과이 국경을 넘는 이타이푸 댐(14,000MW), 베네수엘라의 구리 댐(10,300MW) 등은 세계 최대의 수력 발전소이다. 많은 수력발전은 풍력과 태양광을 보완한다.

한편 해수면 파도의 에너지를 포착하는 파력 발전(wave power)과 조수의 에너지를 변환하는 조력 발전은 미래의 잠재력을 가진 두 가지 형태의 수력발전이다. 해양에서 재생에너지 발전기업들은 조수간만의 차를 활용한 조력으로 전기를 생산하고 있다. 그러나 심해와 따뜻한 지표 수의 온도 차를 이용한 해양 열에너지 전환은 아직 경제성이 없는 것으로 알려져 있어 실용화까지는 시간이 걸릴 전망이다. 수력 발전용량과 연간 성장률, 발전단가, 점유율은 〈표 3-3〉과 같다.

〈표 3-3〉 수력 발전산업의 현황

지 표	현 황
글로벌 발전용량	1,230.0GW(2021)
전 세계 발전용량 연간 성장률	2.5%(2012-2021)
세계 발전량 점유율	16%(2018)
시간당 메가와트 발전 평균 비용	USD 65.581 (2019)
주요 기술	댐
기타 용도	펌프식 스토리지, 기계식

출처: IRENA

#### ④ 바이오에너지

바이오매스는 열이나 전기를 생산하기 위한 연료로 사용되는 식물 기반 물질이다. 목재 및 목재 잔재, 에너지 작물, 농업 잔재, 산업, 농장 및 가정에서 발생하는 폐기물이 그 예가 된다. 바이오매스는 목재와 같은 직접 연료를 사용할 수 있기 때문에 ‘바이오매스’와 ‘바이오연료’라는 단어를 혼용해서 사용하기도 한다. 미국과 EU의 정부 당국은 바이오연료를 수송에 사용되는 액체 또는 기체 연료로 정의한다. 유럽연합의 공동연구센터는 고체 바이오연료의 개념을 사용하며, 펄프, 나무 칩, 나무 펠릿과 같은 에너지를 위해 사용되는 생물학적 기원의 원료 또는 가공된 유기물로 정의한다.

##### 바이오연료

바이오연료는 바이오매스로부터 파생된 광범위한 연료를 포함한다. 이 용어는 고체, 액체, 가스 연료가 들어가 있으며 액체 바이오 연료는 바이오에탄올과 같은 바이오 알코올과 바이오디젤과 같은 기름을 포함한다. 가스 바이오 연료는 바이오 가스, 매립 가스, 합성 가스를 포함한다. 바이오에탄올은 식물성 물질의 당 성분을 발효시켜 만든 알코올로 주로 설탕과 전분 작물로 만든다. 여기에는 옥수수, 사탕수수, 그리고 최근에는 달콤한 수수 등이 포함된다.

세계 바이오에너지의 대부분은 산림자원에서 생산된다. 바이오매스를 연료로 사용하는 발전소는 태양광이나 풍력발전소에서 생산되는 간헐적인 전력과 달리 안정적인 출력을 낼 수 있다. 바이오매스 기반 전기는 태양광 및 풍력 발전의 기여도가 증가함에 따라 전력 안정성과 품질을 유지하는 데 필요한 균형 전력을 제공할 수 있으며 배터리 저장 수력발전, 그리드 확장 및 수요 측면의 관리와 같은 다른 균형 옵션을 보완한다. 바이오매스는 전력 생산을 위한 가능 자원으로써의 가치를 넘어 건물과 산업 공정에서 재생 가능한 난방을 위한 중요한 옵션이 되고 있다.

2019년 바이오에너지는 재생 가능한 산업용 열 소비의 거의 90%와 건물 및 산업 공정에서 현재 재생 가능한 난방 및 냉방 총량의 3분의 2를 기여하고 있다. 특히 철강 생산 및 시멘트 생산과 같은 중공업 분야에서 배출량을 줄이기 위해 사용할 수 있는 옵션 중 하나이다. 더욱이, 운송 부문의 전기화는 시간이 걸릴 것이기 때문에 탄소 기반 운송 연료는 향후 수십 년 동안 계속 중요한 역할을 것이다. 바이오연료는 화석연료 사용과 관련된 온실가스 배출 감소에 기여할 수 있으며, 장기적으로 바이오연료는 장거리 항공 및 해양 운송과 같이 탄소 기반 연료의 대체가 어려운 분야에서 사용될 가능성이 높다.

2017년 IEA는 바이오에너지를 재생에너지의 가장 중요한 원천으로 설명하고 있다. IEA는 또 현재 바이오에너지 보급률이 향후 저탄소 시나리오에서 요구되는 수준을 훨씬 밑돌고 있어 신속한 보급이 시급하다고 주장했다. 2050년까지 IEA의 탄소중립 시나리오에서 전통적인 바이오에너지는 2030년까지 단계적으로 폐지되고, 전체 에너지 공급에서 현재 바이오에너지의 비중은 2020년 6.6%에서 2030년 13.1%, 2050년 18.7%로 증가할 것으로 예상된다. 2014년 IRENA는 2030년에 바이오매스로부터 생산되는 에너지가 두 배로 증가할 것으로 전망하고 있다. 바이오에너지의 발전용량과 연간 성장률, 발전단가, 점유율은 다음과 같다.

〈표 3-4〉 바이오에너지 발전산업의 현황

지 표	현 황
글로벌 발전용량	143.4GW(2021)
전 세계 발전용량 연간 성장률	7.1%(2012-2021)
세계 발전량 점유율	2%(2018)
시간당 메가와트 발전 평균 비용	USD 118.908 (2019)
주요 기술	바이오매스, 바이오 연료
기타 용도	난방, 요리, 운송 연료

출처: IRENA

## ⑤ 지열 에너지

고온의 지열 에너지는 지구에서 생성되고 저장되는 열에너지로부터 나온다. 열에너지는 물질의 온도에 따라 결정된다. 지열 에너지는 지구의 지각에서 발생하는 열에너지로 지구의 형성과 불확실하지만 대략 같은 비율의 물질의 방사성 붕괴에서 비롯된다. 지구 내부의 높은 온도와 압력은 일부 암석을 녹이고 중심부에서 표면까지 열의 형태로 열에너지의 연속적인 전도를 유도한다. 온천의 물을 이용한 지열 난방은 구석기 시대부터 목욕과 고대 로마 시대부터 공간 난방을

위해 사용되어 왔다. 최근에는 지열 에너지로부터 전기를 생산하기 위해 사용되는 용어인 지열발전이 중요해졌다. 지구의 지열 자원은 이론적으로 인류의 에너지 수요를 공급하기에 충분할 것으로 추정되지만, 현재 극히 일부만이 종종 지각판 경계 근처 지역에서 수익성 있게 개발되고 있다.

정부 보조 연구 및 산업 경험의 결과, 지열발전 비용은 1980년대와 1990년대에 걸쳐 25% 감소했다. 최근의 기술 발전은 비용을 극적으로 줄였고, 따라서 실행 가능한 자원의 범위와 규모를 확장했다. 2019년 전 세계적으로 13,900MW의 지열을 이용하고 있다. 한편 지열발전의 미래에 대한 예측은 기술, 에너지 가격, 보조금, 판 경계 이동 및 금리에 대한 변화에 달려 있다. 저온 지열은 건물의 냉난방을 위한 재생 가능한 열에너지를 용이하게 하기 위한 열전지로서 지구의 외부 지각의 사용을 의미한다. 지열의 이러한 형태에서 지열 열펌프와 접지 연결 열교환기는 다양한 계절에 따라 열에너지를 지구로 이동하고 지구 밖으로의 난방을 위해 이동시키는 데 함께 사용된다. 저온 지열은 냉난방과 관련된 연간 총 에너지의 부하를 줄이는 중요한 재생 가능 기술이다.

지열발전은 비용이 효과적이고, 신뢰할 수 있고, 지속 가능하고, 환경친화적이지만 역사적으로 지각판 경계 근처 지역에 국한되어 왔다. 최근의 기술 발전은 특히 가정 난방과 같은 응용 분야에서 실행 가능한 자원의 범위와 크기를 확장하여 광범위한 개발 가능성을 열어주고 있다. 지열발전은 지구 깊숙이 갇힌 온실 가스를 배출하지만 보통 화석연료보다 에너지 단위당 배출량이 훨씬 더 낮다. 결과적으로, 지열 에너지가 화석연료 대신에 널리 배치된다면 지구온난화를 완화시키는 데 도움이 될 잠재력을 가지고 있다.

한편 최근 셀룰로오스 에탄올, 핫 드라이 암석 지열 및 해양에너지를 포함하여 아직 개발 중인 다른 재생에너지 기술이 주목받고 있다. 이러한 기술은 아직 널리 입증되지 않았거나 상용화에 한계가 있지만, 재생에너지 기술에 필적할 만한 잠재력을 가지고 있다고 평가된다. 지열 에너지의 발전용량과 연간 성장률, 발전단가, 점유율은 다음과 같다.

〈표 3-5〉 지열발전 산업의 현황

지 표	현 황
글로벌 발전용량	15.6GW(2021)
전 세계 발전용량 연간 성장률	4.5%(2012-2021)
세계 발전량 점유율	<1% (2018)
시간당 메가와트 발전 평균 비용	USD 58.257 (2019)
주요 기술	건식 증기, 플래시 증기
기타 용도	난방

출처: IRENA

## ⑥ 해양에너지

해양에너지는 파동, 조수, 염분, 온도 차이로 인해 전달되는 에너지를 말한다. 세계의 바다에서 물의 이동은 운동에너지, 즉 움직이는 에너지의 광대한 저장고를 만든다. 이 에너지 중 일부는 가정, 운송 및 산업에 전력을 공급하기 위한 전기 생산에 이용될 수 있다. 해양에너지라는 용어는 파동력(즉, 표면 파동으로부터의 힘)과 조석력(즉, 움직이는 물의 큰 물체의 운동에너지)을 모두 포함한다. 바다는 엄청난 양의 에너지를 가지고 있고 해양에너지는 전 세계에 상당한 양의 신재생 에너지를 제공할 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 해양에너지는 해수 온도, 염분 함량, 조수, 조류, 파도의 변화로 인해 발생하는 연간 20,000~80,000 테라와트시(TWh/y)의 전기를 개발할 수 있는 잠재력이 있다고 평가받고 있다. 해양에너지의 잠재력은 조석, 해양전류, 염도의 삼투압, 열에너지, 파도력 등으로 구성되며 이를 정리하면 다음과 같다.

〈표 3-6〉 해양에너지 종류와 잠재력

지 표	현 황
형태	연간 잠재력
조석	>300 TWh
해양전류	>800 TWh
염도 삼투압	2,000TWh
해양 열에너지	10,000 TWh
파력	8,000~80,000 TWh

출처: Implementing Agreement on Ocean Energy Systems(IEA-OES), Annual Report 2007(2007. p.5). International Energy Agency, Jochen Bard ISET.

## 2) 일본 재생에너지의 분야별 추진현황

### (1) 태양광발전

태양광발전(photovoltaics, PV)은 물리학, 광화학, 전기 화학에서 연구된 현상인 태양광 효과를 나타내는 반도체 물질을 사용하여 빛을 전기로 변환하는 것이다. 광전 효과는 상업적으로 발전 및 광센서로 사용된다. 태양광 발전시스템은 전력을 생산하는 다수의 태양전지로 구성된 태양 모듈을 사용한다. PV설치는 지상 설치, 옥상 설치, 벽 설치 또는 부유식일 수 있다. 이 장치는 고정되어 있거나 태양 추적기를 사용하여 태양을 따라가면서 전기를 생산하는 장치로 발전하고 있다.



태양광발전 기술은 화석연료보다 훨씬 적은 이산화탄소를 배출하기 때문에 기후변화를 완화하는 데 도움이 된다. 태양광 발전소는 에너지원으로써 특정한 이점을 가지고 있다. 일단 설치되면 태양광발전은 오염과 온실가스를 배출하지 않고, 그것은 전력수요와 관련하여 확장성을 보여주며 실리콘은 지구 지각에서 큰 가용성을 보여준다. 다만 은과 같은 PV시스템 제조에 필요한 다른 물질들이 태양광발전에 더 이상의 성장을 제한할 수도 있다. 또한, 태양광발전의 주요 제약 조건은 토지의 이용에 대한 제한이다.

태양광 발전시스템은 1990년대 이후 독립형 설비 및 그리드 연결 PV시스템이 사용됨에 따라 전문화된 애플리케이션이 오랫동안 사용되어 왔다. PV를 주 전원 으로 사용하기 위해서는 에너지 저장 시스템이나 고전압 직류 전력선에 의한 전 지구적 배분이 필요하며, 또한 가변 발전 등 다른 많은 특정 단점들이 균형을 이루어야 한다. 생산과 설치에 화석연료로 인한 배출량에 비해 극히 일부에 불과하지만, 일정 부분 오염과 온실가스 배출을 유발한다. 태양광 모듈은 독일 정부가 10만 개의 주택 지붕 프로그램에 자금을 지원한 2000년에 처음 대량 생산 되었다. 비용 감소는 PV가 에너지원으로 성장할 수 있도록 했다. 이는 2000년 이후 태양광 생산 능력 개발과 규모의 경제 달성에 대한 중국 정부의 대규모 투자에 의해 부분적으로는 중국이 주도하게 되었다. 또한, 제조기술과 효율성이 향상되면서 비용 절감 효과도 나타났다. 태양광발전 전기에 대한 우선 공급 관세와 같은 순 계량 및 재정적 인센티브는 많은 국가에서 태양광발전 설치를 지원해 왔다. 패널 가격은 2004년과 2011년 사이에 4배 하락했다. 모듈 가격은 2010년대에 비해 90% 이상 하락했다.

2019년에 전 세계적으로 설치된 PV 용량은 전 세계 전력수요의 약 2%를 차지 하는 635GW 이상으로 증가했다. 수력 및 풍력에 이어 PV는 세계 발전용량 측면 에서 세 번째 재생 에너지원이다. 2019년 국제 에너지 기구는 2019년부터 2024년 까지 700~880GW의 성장을 예상했다. 일부 사례에서 PV는 2020년 카타르에서 0.01567 US\$/kWh까지 낮은 가격을 제시하면서 높은 태양 잠재력을 가진 지역에서 가장 저렴한 전력 공급원을 제공했다. 2020년 국제에너지기구(IEA)는 ‘세계 에너지 전망’에서 고품질 자원을 활용하는 저비용 자금 조달 프로젝트의 경우, 태양광 발전소는 이제 역사상 가장 저렴한 전기 공급원이라고 평가하고 있다.

### 〈그림 3-2〉 주요국가의 태양광 발전 현황(2019)

Installed and total solar power capacity in 2019(MW)

#	Nation	Total capacity	Added capacity
1	China	204,700	30,100
2	United States	75,900	13,300
3	Japan	63,000	7,000
4	Germany	49,200	3,900
5	India	42,800	9,900
6	Italy	20,800	600
7	Australia	15,928	3,700
8	United Kingdom	13,300	233
9	South Korea	11,200	3,100
10	France	9,900	900

출처: IEA-PVPS Snapshot of of Global PV Markets 2020 report, April 2020(100)

Also see Solar power by country for a complete and continuously updated list

태양광 발전량은 1년마다 80배씩 증가하였으며, 2002년 이래로 매년 평균 48%의 성장을 하였고, 에너지 기술 분야에서도 가장 빠르게 성장하고 있는 분야이다. 태양광 전기에 대한 특혜적인 기준가격 의무 구매제 및 요금 상계제와 같은 재정적인 장려책은 호주, 독일, 이스라엘, 일본 그리고 미국을 포함한 많은 나라에서 태양광발전 설비의 설치를 확대하는 데 기여해 왔다.

〈그림 3-2〉는 2019년 기준 세계 주요 국가들의 태양광 발전현황을 나타내고 있다. 이에 따르면 중국의 생산량은 20만MW로 절대적인 1위를 차지하고 있다. 이어 미국, 일본, 독일, 인디아 등의 순위를 기록하고 있는 우리나라도 1만 1천MW로 9위를 기록하고 있다. 일본은 6만3천MW로 3위를 기록 중인데 이는 전년 대비 7천MW가 증가했음을 보여주고 있다.

일본은 과거 뛰어난 기술력과 정부의 적극적인 지원을 바탕으로 태양광 시장을 주도하다가 정부의 보조금 축소에 따라 큰 타격을 받고 위기를 겪었다. 태양광 산업 형성의 초기였던 1994년 일본은 적극적인 보조금 지원으로 2004~2005년도에는 태양광 시장의 강자로 떠올랐다. 그러나 정부의 보조금이 축소된 이후 시장은 급격하게 축소되기 시작했지만, 2011년 후쿠시마 원전사고를 계기로 2012년 7월 FIT(Feed-in Tariff: 재생가능 에너지의 고정가격매입제도)를 재도입하여 태양광 산업의 재기를 이끌어 냈다.

일본 태양광 시장이 비교적 단시간에 성장세를 회복할 수 있었던 것은 지붕 위 태양광 설치의 확대가 기여한 것으로 파악된다. 현재 일본 태양광발전 시장은 중국에 이어 두 번째로 큰 시장으로 평가받고 있다. 이런 계기를 마련한 것은

최근 지붕 위에 설치된 태양광 시장을 점차 확대한 것에서 찾을 수 있다.

일본의 태양광 리서치 전문기업인 RTS에 따르면 FIT 보조금이 축소되면 될수록 향후 태양광 시장은 메가 규모의 대규모 시장에서 지붕 위 태양광으로 이동할 것이라고 예측하고 있다. 사실상 규모적인 측면에서 일본의 지붕 위 태양광 시장이 큰 잠재력을 보유한 중국, 인도와 같은 시장을 넘어서지는 못할 것으로 보이지만, 주목할 만한 점은 정부가 그간 FIT 보조금을 지속적으로 축소하고 있음에도 불구하고 태양광 시장 규모가 계속 증가하고 있다는 점이다.

건물의 옥상에 설치되는 지붕 위 태양광의 성장은 독립형 분산 발전 확산의 일환으로 이는 ESS(Energy Storage System) 경제성 확보, 빅데이터, IoT와 같은 기술의 발전이 시너지를 이룬 결과로 보여진다. 이러한 독립형 분산 발전은 생산자와 수요자가 전력을 주고받는 상호 교환방식으로 에너지 시장의 구조를 근본적으로 변하게 한다. 지붕 위 태양광의 확대와 발전은 나아가 전력산업의 수익구조 자체를 변화시킬 것으로 전망된다. 태양광발전 시설은 이제 더 이상 선진국인 부자 나라가 보여주기 위해 설치하는 조형물로 치부되는 시기는 지났으며 시장의 핵심 산업으로 부상하고 있다.

일본은 지난 2011년 후쿠시마 원전사고 이후 신재생에너지 확대를 위해 2012년 7월 신재생에너지 발전보조금 제도인 FIT를 도입하였다. 일본의 태양광 시장은 FIP제도 도입으로 시장 기반의 전력 거래로 변경되었고 여기에 최적의 전력 판매 단가 유지 및 이익 증가를 위해서는 유지보수 효율화 및 비용 절감이 절대적으로 필요한 상황이 됐다. FIT제도는 국가에서 신재생에너지 발전 전력을 구매하는데 보조금을 제공하여 발전이익을 보장해주는 제도로, 도입 이후 신재생에너지 발전 설비용량의 연평균 33% 증가라는 결과로 이어졌다. 하지만 보조금으로 인한 발전 전원 간 경제성 불균형과 발전사의 원가 상승에 따른 요금 상승, 태양광 발전 편중 등 문제점도 발생시켰다. 일본 정부는 이를 해결하기 위해 보조금을 지속적으로 낮추는 등 개선을 위해 노력해 왔다.

일본 재생에너지의 가장 효과적인 정책의 하나는 2012년 경제산업성이 전기 사업자의 재생에너지 조달에 관한 특별조치법에 따라 도입한 피드인 관세(FIT) 제도이다. 새로운 FIT제도는 안정적인 세입이 재생발전 투자를 용이하게 할 수 있도록 전력회사들이 풍력, 수력, 태양광, 지열, 바이오매스 등 발전 가능한 재생 에너지원으로 발전한 전기를 정부가 정한 정가에 구매하도록 의무화했다. 그러나 일본은 태양광발전의 보조금 의존도를 낮추고 태양광발전을 위한 경쟁 입찰을 촉진하는 것을 목표로 하고 있기 때문에 태양광발전 FIT를 줄였다. 그러나 2016년 4월 1일부터 시작된 전력 소매시장 민간 자유화로 인해 정부 보

조금은 또 한번 크게 삭감되면서 향후 시장 규모의 축소가 예상되지만, 현재 일본 내 개발자들은 완공된 프로젝트보다 더 많은 개발권을 보유하고 있고, 정부 계획을 충족하기 위한 시장의 잠재력은 아직 존재하는 것으로 조사되고 있다.

그러나 최근 시장 기반 전력 매매 변경으로 유지보수 효율화 및 비용절감의 중요성 커지고 있다. 이런 상황에서 일본은 FIT제도를 2022년 4월부터 독일을 비롯한 유럽국가들이 수행하고 있는 FIP(Feed In Premium)제도로 변경하였다.

#### FIP(Feed-in-Premium) 제도

도매시장에서 전력을 팔아도 채산성이 가능하도록 매전(賣電)한 발전사업자에게 매전 수입에 프리미엄(보조금)을 더해 지불되는 제도(2022.4. 시행)이며, ‘FIP가격(기준가격)’ = ‘참조가격(매전가격)’ + ‘프리미엄(보조금, 이익)’ 으로 구성되어 있다. 이는 재생가능 에너지의 FIT(Feed-in Tariff)제도와는 다른 형태이다.

FIP제도의 가장 큰 특징은 신재생에너지 발전사업자가 전력시장에 참여하도록 한다는 점이다. 신재생에너지 발전사업자는 도매 전력시장을 통해 전력을 판매한 금액과 신재생에너지에 대한 환경가치를 프리미엄 금액으로 받아 수익을 올리는 구조다. 전력가치와 환경가치 모두 입찰을 통한 시장경쟁을 기본으로 하는 FIP 제도에서는 전반적으로 전력가격이 낮아지는 효과가 있다. 발전사업자 입장에서는 수익성이 낮아질 수 있으며 전력가격이 변동될 위험이 있다.

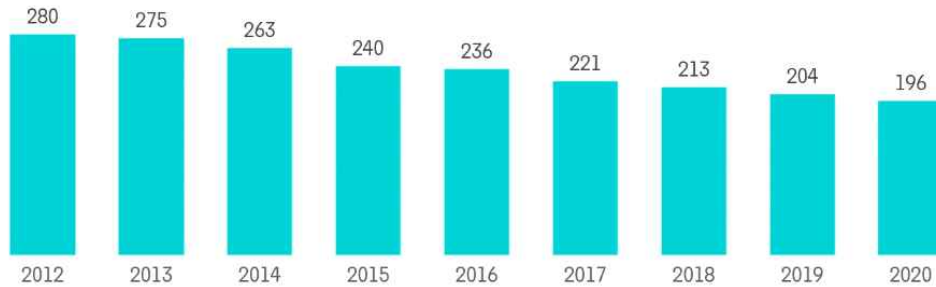
일본 태양광 시장은 2022~2027년 9.2% 이상의 연평균 성장률을 기록할 것으로 예상된다. 코로나19 팬데믹 상황에서도 2020년 약 5.4GW의 태양광 프로젝트가 완료되는 등 시장에 큰 악영향을 미치지 않았다. 이러한 결과는 공급망과 인력 관련 일부 우려는 있었지만, 2020년 시장이 성장하는데 큰 도전이 되지 않는다는 의미로 보여진다. 송유관 및 계획 단계에서 건설 중인 태양광발전 사업과 같은 요소들이 예측 기간 동안 태양광의 누적 설치용량을 끌어올릴 것으로 기대된다. 하지만 풍력 등 대체 신재생에너지의 채택이 늘어나면 예측 기간 동안의 시장 성장을 저해할 가능성이 높다.

지상 탑재형 배치는 향후 5년 동안 태양광을 연간 최대 용량으로 증가시킬 것으로 예상된다. 일본 혼슈의 태양광 설비 분야에서도 상당한 양의 태양광 신규 용량이 설치될 것으로 예상된다. 2030년까지 온실가스 배출량 감축을 목표로 하는 이 지역은 향후 몇 년 동안 태양광 기업들이 이 지역에 태양광 발전소 설치 기회를 늘릴 것으로 기대된다. 게다가 이 지역은 원유와 같은 외국 화석 연료에 대한 의존도를 줄일 계획이며 수입 석유와 관련된 지역의 비용을 줄이기 위해

태양에너지와 같은 재생에너지를 선택할 것이다. 시장은 정부의 지원정책, 특히 재생에너지 기반 발전을 장려하기 위해 수립된 계획에 의해 추진되고 있다.

〈그림 3-3〉 일본 태양광 발전단가의 추세

Price of Ground-mounted Photovoltaic(PV) Systems Per Watt, In JPY, Japan, 2012-2020



출처: IEA(International Energy Agency)

일본은 미쓰비시, 도시바 등 대기업을 통한 지상형 태양광발전의 선두에 자리하고 있다. FIT와 같은 정책 변화와 다양한 용량 목표 달성에 대한 관심이 높아짐에 따라 지속적인 기술 비용 절감과 국가 차원의 성장 증가는 향후 태양광 시장 성장에 상당한 기여가 예상된다. 2020년 지상 탑재 태양광 시스템의 와트당 가격은 약 196엔으로 2019년 204엔보다 하락했다. 이러한 추세는 규모의 경제성장과 새로운 혁신으로 인해 향후에도 계속될 것으로 보인다.

또한, 기업들의 대규모 투자는 지상형 태양광발전의 성장에 도움이 될 것으로 기대된다. 2020년 6월 솔라스틸은 94MW의 태양광 프로젝트를 시작했다. 3개의 태양광 발전소는 일본의 47,600가구에 전력을 공급할 수 있는 충분한 청정 에너지를 생산할 것으로 예상된다. 따라서 이러한 발전과 정부의 우호적인 계획과 이니셔티브가 일본의 지상 태양광 시장을 견인할 것으로 기대된다.

세계 3위의 경제 대국 일본은 재생에너지 산업부문을 보조금에서 프리미엄으로 전환했다. 이는 시장기반 프로그램이 탄소중립을 위한 공정한 경쟁의 장을 만들 것이라는 평가이다. 일본은 태양광을 제조하고 대규모 PV 설비를 배치한 최초의 국가 중 하나로 오랫동안 재생 가능 공간의 트렌드 세터였다. 일본의 최근 탄소 중립 공약과 함께 FIP의 발표는 세계에서 가장 빠르고 포괄적인 에너지 전환 중의 하나를 준비할 수 있게 만들었다. FIP 모델은 시장가격에 연동하여 결정하는 방식으로 발전사업자는 발전 대금으로 “시장가격+FIT premium”을 보장받게 된다. 따라서 시장 지향적 성격이 있어 자유 전력시장에 적합한 방식으로 평가받고 있다. 하지만 이 모델은 정부의 전력 구매약정이 없으며, 시장가격

변동이 발전사업자의 수익에 직접 영향을 미치며 FIT보다 전력가격이 상대적으로 높게 결정되는 것으로 알려져 있다.

한편 일본의 태양광발전은 차세대형 태양전지의 기술개발을 통해 2030년을 목표로 보급단계로의 이행을 도모, 기존의 태양전지에서는 설치가 곤란한 주택·건축물 등으로의 설치 확대·시장화를 실현하려 한다. 또한, FIP제도의 도입에 따른 분산형 에너지를 활용하는 애그리게이션 비즈니스(ERAB: Energy Resource Aggregation Business)를 도입할 것이라 밝히고 있다. 이는 가상발전소(VPP: Virtual Power Plant) 및 수요반응(DR: Demand Response)을 활용해서 일반 배전사업자, 소매 전기사업자, 수요자, 재생에너지 발전사업자라고 하는 거래처에 대해서 조정력, 공급력, 불균형 회피, 전기요금 삭감, 출력제어 회피 등의 각종 서비스를 제공하는 사업이다. 일본 자원에너지청은 ERAB의 활성화·육성 등에 따라 도입 확대와 관련 산업의 재구축을 도모하면서 지구온난화 대책 추진에 관한 법률(약어, 온대법(溫対法)이라 함) 대책 등을 통한 지역에서의 재생에너지 이용 촉진 및 영농형 등의 확대 등 지역과 공생 가능한 적지의 확보를 모색하고 있다.

VPP(Virtual Power Plant)
각 가정 및 사업소에 설치된 소규모 발전시설을 ICT·IoT 기술을 활용해서 집약시키고, 하나의 발전시설로 모이도록 제어하는 기술로 ‘가상발전소’라고도 함

DR(Demand Response)
수요자 측의 에너지 리소스(DSR: Demand Side Resource)의 보유자 또는 제3자가 에너지 리소스를 제어해서 전력수요 패턴을 변화시키는 것으로, 전력수요와 공급 밸런스를 통괄하는 애글리게이터(Aggregator: 전력 수요자의 수요밸런스를 정리하여 효과적 나아가 안정적으로 전력에너지를 제공하는 사업자) 주요 대응을 총칭하는 것을 의미

일본의 태양광발전 관련 현황과 향후 대책을 정리하면 〈표 3-7〉과 같다. 이에 따르면 차세대 기술의 개발, 관련 산업의 육성과 재구축을 과제로 선정하고 연구개발 가속과 현실 사회 정착, 분산형·변동 재생에너지의 활용 최적화를 위한 제도·시장 정비, 각종 규제·제도 등 제검토를 향후 대책으로 상정하고 있다.

〈표 3-7〉 일본 태양광발전의 현황과 대책

	현상과 과제	향후 대책
차세대 기술의	입지 제약의 극복에는 차세대 태양전지가 필요	연구개발 가속화와 현실 사회 적용 및 정착

	현상과 과제	향후 대책
개발	<ul style="list-style-type: none"> <li>경량의 차세대 태양광 전지의 개발 경쟁이 격화</li> <li>현행 전지를 초월하는 성능의 실현이 과제</li> <li>수요자 니즈에 맞춘 빌딩 벽면 등의 신시장 개척</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>그린 이노베이션 기금의 활용을 검토하여, 산학관이 협력해서 ‘PSC (Perovskite Solar Cell)’ 등 유망기술에 관한 공통 기반기술의 개발 및 제품화를 위한 기업 실증 등 신시장 확보를 향한 대책을 추진</li> <li>아울러 계통의 안정화 관점에서 대량 도입과 더불어 필요한 관성력 등 제공에 관한 기술(차세대 인버터 등)의 개발을 추진</li> </ul>
관련 산업의 육성·재구축	자연 변동하는 태양광을 적용한 새로운 비즈니스 창출	분산형·변동 재생에너지의 활용 최적화를 위한 제도·시장 정비
	<ul style="list-style-type: none"> <li>변동 재생에너지는 전력시장에 미통합, FIP제도의 도입이 통합의 계기로 보다 코스트 저감이 필요</li> <li>애글리게이터는 법률상으로 자리매김, 비즈니스 참여·확대는 각종 리소스의 활용 가능성과 시장 정비에 달림</li> <li>축전지의 코스트 높음</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>한층 더 코스트 저감을 추진, FIT에서 FIP제도로의 이행에 따른 변동 재생에너지 시장 통합, 애글리게이션 비즈니스를 촉진</li> <li>분산형 에너지 리소스(DER)의 가치를 제공·거래 가능한 각종 시장(도매전력, 수요조정, 환경가치 등)의 요건 정비</li> <li>정치용 축전지의 코스트 저감·보급 확대를 위한 대책</li> <li>온·오프 사이트 PPA(Power Purchase Agreement: 전력판매계약) 등의 새로운 비즈니스 형태의 창출·확대</li> </ul>
적지 확보 등	지역과 공생한 적지의 확보	각종 규제·제도 등의 재검토
	<ul style="list-style-type: none"> <li>신규 도입량의 저하</li> <li>저가로 사업 실시 가능한 토지 감소(개발 완료)</li> <li>지역의 불안 확대(재생에너지 조례 증가)</li> <li>계통 제약</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>온대법(溫対法: 지구온난화 대책 추진에 관한 법률)에 의거한 ‘촉진구역(포지티브 조닝)’의 지정으로 적합한 입지 장소 설정. 관련 인허가 원스톱 서비스 등에 의한 안건 형성으로 관련 사업자의 코스트 경감</li> <li>황·폐농지의 활용 등에 따른 연농형 태양광발전의 도입 확대책 강화</li> <li>주택·건축물로의 태양광발전 도입에 이바지하는 ZEH(Net Zero Energy House)·ZEB(Net Zero Energy Building)의 보급 확대 등을 향한 대책을 추진</li> </ul>

출처: 経済産業省(2021.6. p.30), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(概要)

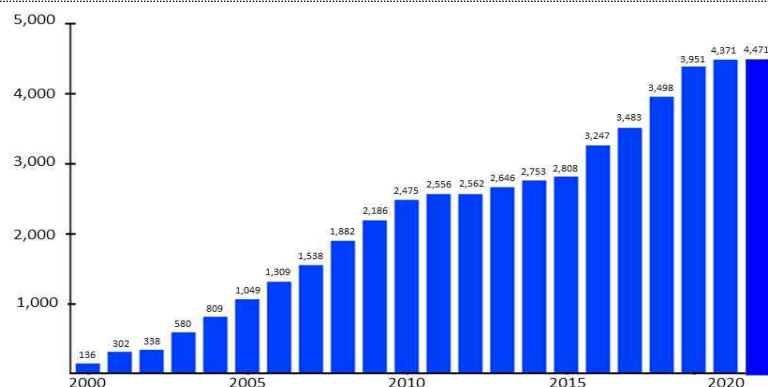
## (2) 풍력발전

바람의 에너지를 전기 에너지로 변환하는 것이 풍력발전이다. 일본은 미국이나 유럽에 비해 도입은 늦었지만, 2000년 이후 도입 건수는 급격히 증가 추세에 있다. 일본 자원에너지청에 따르면 2016년도 말 기준으로 2,203기가 설치, 누적 설비용량은 335.7만kW까지 증가하고 있다. 풍력의 장점은 육상과 해상에서 발전이 가능한 에너지원이며 대규모 발전을 통해 발전 코스트를 화력발전 수준으로 낮출 수 있어서 경제성 확보 가능성이 높은 에너지원이기도 하다. 또한 풍력 에너지는 고효율로 전기 에너지로의 변환 효율이 우수하면서 태양광발전과 달리 주·야간 관계없이 24시간 가동이 가능하다는 점을 꼽을 수 있다.

육상 풍력발전소는 새로운 석탄·가스 발전소보다 저렴하지만, 화석연료 보조금 때문에 풍력발전의 확대가 저해되고 있다. 육상 풍력발전소는 다른 발전소들보다 지형에 대한 시각적 영향이 더 크다. 소규모 육상 풍력발전소는 그리드에 에너지를 공급하거나 독립된 오프 그리드 위치에 전력을 공급할 수 있다. 해상 풍력발전소는 더 안정적이고 강력한 에너지를 제공하며 시각적 영향이 적다. 현재 해상 풍력발전이 적고 건설·유지비가 더 비싸지만 확대되고 있다.

풍력은 가변적인 재생에너지이므로 전력 관리 기술은 풍력 하이브리드 전력 시스템, 수력발전 또는 기타 전력 공급원, 과잉 용량, 지리적으로 분산된 터빈, 인접 지역으로 전력 수출 및 수입 또는 그리드 스토리지와 같은 공급과 수요를 맞추기 위해 사용된다. 한 지역에서 풍력발전의 비율이 증가함에 따라 송전망을 업그레이드해야 할 수도 있다. 일기예보를 통해 전력 네트워크는 발생하는 생산의 예측 가능한 변화에 대비할 수 있다.

〈그림 3-4〉 일본의 풍력발전 용량(단위: MW)



출처: Wind power in Japan(2020.12) "Japan plans to install up to 45 GW of offshore wind power by 2040", [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_power\\_in\\_Japan](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power_in_Japan)

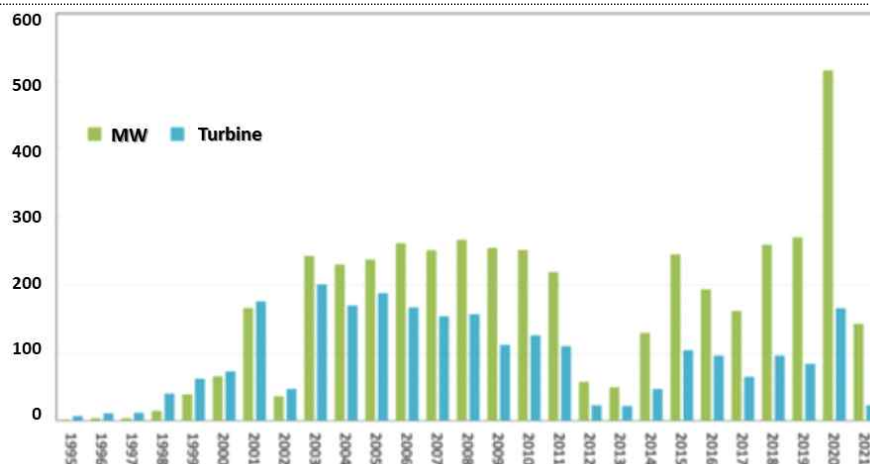


일본의 전력 부문에서 풍력발전이 차지하는 발전량은 아직 미미하지만, 육상 풍력(144GW)과 해상풍력(608GW) 모두 잠재력이 있는 것으로 추정된다. 2020년 현재, 일본의 풍력발전 총 설치용량은 4.2GW이다. 2018년 현재 풍력발전의 정부 목표는 2030년까지 전력 생산의 1.7%로 다른 나라에 비해 상대적으로 낮았으나 2020년 12월, 일본 정부는 2040년까지 최대 45GW의 해상풍력을 설치할 계획을 발표했다.

일본의 풍력산업은 재생에너지 산업을 주도하고 있는 태양광산업 규모의 약 1/7에 불과하며 향후 2030년에도 1/5에 머무를 것으로 예상된다. 그럼에도 불구하고 수력을 제외한 새로운 재생에너지원 가운데 중요한 두 축 중의 하나의 역할을 담당하고 있다. 그 이유로는 일본은 면적 기준 세계 제6위의 EEZ(배타적 경제수역)을 보유해 높은 해상 발전 가능성이 기대되기 때문이다.

일본은 2011년 후쿠시마 제1원전 참사로 전력공급이 부족한 일본 동북부 후쿠시마 연안에 2MW급 터빈 6기를 갖춘 부유식 풍력발전소 건설 시범사업이 있었고, 2016년 평가 단계가 완료된 후 2020년까지 후쿠시마 앞바다에 최대 80개의 부유식 풍력 터빈을 건설할 계획이었다. 그러나 지금까지도 사업을 위한 컨소시엄만이 구성되어 있고 완공하지 못하고 있다.

〈그림 3-5〉 일본 풍력발전(육상+해상)의 신규 도입량 추이(2021년말 기준)



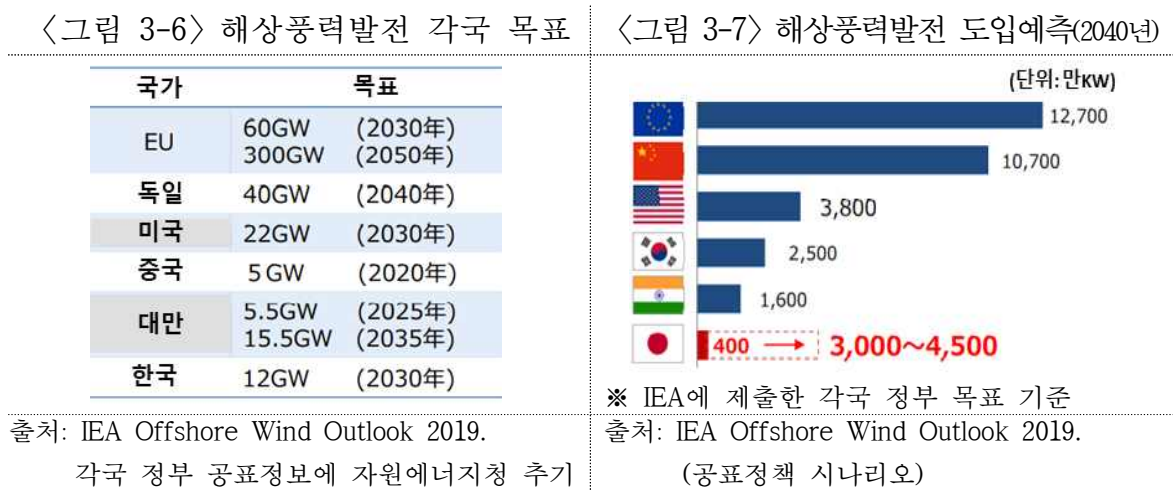
출처: 日本風力発電協会(2022.2.25) HP. <https://jwpa.jp/information/6225/>

2013년 나가사키현 카바지마(樺島) 해안에서 약 1km 떨어진 곳에 일본 최초의 2MW급 부유식 해상풍력발전소 ‘HAENKAZE’가 건설되었고 실증사업(2010~2015년)을 수행하였다. 2018년에 NEDO는 일본내에서 부유식 및 고정식 바닥 해상풍력 프로젝트의 개발 지원을 목표로 두 가지 입찰을 출시할 것이라고

발표했다. 또한 아키타 현에 위치한 유리혼조(由利本莊) 해상풍력 발전소는 2021년에 착공될 예정이다. 그것은 제안된 용량이 1,000MW인 70~90개의 터빈으로 구성될 예정이다. 이것이 완공되면 일본에서 가장 큰 해상 풍력 발전소가 될 것으로 알려져 있다. 2023년 하반기에 79개의 태풍에 강한 4.3MW의 육상 터빈을 사용하여 홋카이도 섬의 340MW 도호쿠 풍력발전단 클러스터가 가동될 것으로 예상된다. 그러나 이런 노력에도 불구하고 일본 풍력발전의 성장은 한계가 있었다. 육상 풍력발전은 극히 제한된 지역과 험한 산지로 말미암아 한계가 있었기 때문이다.

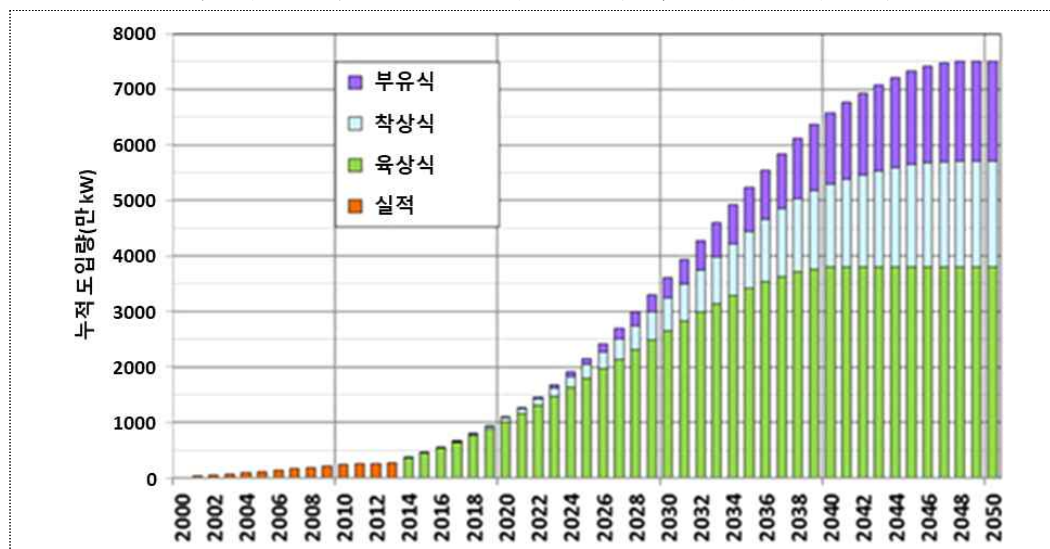
그러나 2019년 4월 새로운 기회를 맞이했다. ‘해양재생에너지 자원을 이용한 발전시설 개발에 있어 해역활용촉진법(2018년 법률 제89호)’이 시행되었다. 약칭 신재생해역이용법은 해양재생에너지 발전시설 개발촉진지구 지정 및 인증 제도 조성을 위한 시책 강구를 목적으로 하고 있다. 해양재생에너지 발전시설 개발을 위한 해양지역 이용 촉진을 통해 해양재생에너지 발전시설 개발을 위한 해양지역 전용 및 이용 등의 계획을 수립하여, 해양재생에너지 발전시설의 건전한 발전에 기여하고자 했다. 따라서 해상풍력사업의 경우 입찰 절차에 따라 특정 해역을 장기간 사용할 수 있도록 규정함으로써 해상풍력사업 추진의 새로운 계기가 될 것으로 기대된다.

또한 2020년에는 새로운 FIP제도가 통과되어 2022년 4월부터 시행되었으며 전력시장에서 달성한 시장가격 외에 전기사업자에게 보조금을 지급할 수 있도록 규정하고 있다. 이에 따라 맥킨지는 해상풍력의 용량이 1GW 증가할 때마다 일본은 연료 수입에서 3억 달러 이상을 절약할 수 있다고 추정하고 있다.



일본 풍력발전협회는 ‘일본 풍력발전 도입 로드맵 비전’을 통해 2050년까지 3,700만kW(착상식, 부유식) 규모의 해상 풍력발전 도입을 목표로 설정했다. 일본 정부는 단순히 발전설비 증가에만 초점을 맞추지 않고, 민간투자를 유도해 해상풍력 도입 확대 및 관련 산업의 경쟁력 강화에도 나섰다. 에너지경제 연구원에 따르면 최근 일본 경제산업성과 국토교통성은 민관이 공동으로 협의해 투자환경을 정비하기로 결정하고, ‘해상풍력산업 경쟁력 강화를 위한 민관 협의회’를 발족하고 논의하기 시작했다. 또한, 이들은 향후 논의 내용을 반영해 ‘해상풍력산업 비전’을 수립한다는 계획을 세웠다.

〈그림 3-8〉 일본 풍력발전 누적 도입량 목표치



출처: 日本風力発電協会(JWPA)(2015.3.4, p.6) 日本の風力発電事業の現状と将来展望

‘일본 풍력발전 도입 로드맵 비전’에 따르면 2050년 누적 도입 목표치인 7,500만kW 중 약 절반에 해당하는 3,700만kW(착상식, 부유식)를 해상풍력발전 목표치로 하고 있다. 현시점으로도 건설 예정인 해상풍력발전소의 발전량까지 모두 계상하면 1,000만kW 이상으로 그 규모는 원자력 발전소 10기에 해당하는 발전 규모이다. 일본 풍력발전협회는 2030년 목표 달성을 위해서는 향후 5~10년간 연간 1GW 규모로 해상풍력을 도입하여 시장 규모 확대를 통해 민간투자를 유도할 필요가 있다는 판단이다.

또한, 대형 부품 공급망을 구축해 수송기간(유럽-일본 간 수송기간 약 50~60일) 단축 및 수송비용 감축을 도모할 필요가 있다고도 제언했다. 협회는 일본 내에서 도입 가능한 해상풍력 용량은 고정식(수심 10~50m) 약 128GW, 부유식(수심 100~300m) 약 424GW로 추정하고 있으며, 해상풍력 도입 목표를 2030년 10GW,

2040년 30~45GW, 2050년 90GW 등 구체적으로 제시하고 있다. 이에 일본 정부는 해상풍력을 장기적·안정적으로 도입하고 효율적으로 건설하기 위해 해상풍력 도입 촉진구역 지정 및 대규모 거점항 정비를 추진하는 상황이다. 경제산업성은 해상풍력 도입 촉진구역에서 약 300MW의 발전용량이 확보될 수 있다고 판단, 2021년부터 10년간 연간 3~4건의 사업을 인가해 2030년까지 10GW로 확대할 계획이다.

일본의 풍력발전은 매력적인 국내시장을 창출함으로써 국내외 투자를 유도 경쟁력 있는 강인한 서플라이체인을 구축하고 나아가 아시아 시장 전개를 염두에 둔 차세대 기술개발, 글로벌 연계로 대응, 국제경쟁에서 승리할 차세대 산업을 창조해 간다는 계획이다. 하지만 이러한 일본의 여정이 간단하다는 것을 의미하지는 않는다. 그것은 다른 동력원과 해상풍력과의 비용 경쟁력에 대해 대중이 회의적인 국가에서는 규제 기관, 유틸리티 및 투자자를 포함한 다양한 참여자들이 비용 경쟁력에 대한 역할을 요구할 것이기 때문이다. 나아가 일본은 지진과 태풍에 견딜 수 있고 낮은 풍속을 이용할 수 있는 터빈뿐만 아니라 해안의 수심이 깊기 때문에 대부분의 현장에 부유식 플랫폼이 필요하다는 추가적인 과제를 안고 있다.

하지만 일본은 해상풍력발전에 주력함으로써 기회가 있다. 그들은 완전히 새로운 수출 산업을 창출할 기회에서부터 외국과 탄소 집약적인 에너지원에 대한 국가의 의존도를 떨쳐버릴 수 있는 기회까지 다양하다. 해상풍력은 대량 도입이 가능한 재생 에너지원으로써 해상풍력 설비에 약 1~2만 개의 부품이 사용돼 관련 산업에 대한 경제적 파급효과가 매우 크다는 점도 중요하다. 그러나 발전사업자 선정에서 상업적 운영 개시까지 약 5~8년이 소요된다는 단점으로 인해 투자가 부진한 상황이다. 이에 경제산업성과 국토교통성은 해당 협의회를 통해 일본 풍력발전협회 등과 중장기적 관점에서의 해상풍력 도입 가능성 및 부문별(설계 제조, 건설·해양토목, 유지관리, 금융 등) 문제점을 분석할 예정이다. 또한, 인프라(전력계통, 항만 등) 환경정비, 관련 사업자의 투자비용 감축 방안 등을 논의해 이를 바탕으로 가이드라인을 수립한다는 계획이다.

해상풍력발전 설비는, 구성 기기·부품 점수가 많아(수만 점), 서플라이체인(supply-chain)의 저변이 넓다. 서플라이체인 형성에 대한 투자를 촉진하기 위해 정부도 보조금·세제 등을 통한 설비투자 지원을 조정 중이다. 서플라이체인 형성을 위해서는 해외 기업과 일본 기업의 비즈니스 매칭이 불가피하며 JETRO 등을 통한 지원과 더불어 산업계에서도 자주적인 대응을 추진하고 있다. 이를 위해 해상풍력에 관한 각종 규제 및 규격을 점검한다는 계획이다. 구체적으로는

산업계로부터의 규제 재검토 요망에 대해 각 부처와 제휴한 규제·규격의 총 점검을 실시한다는 방침이다.

최근에는 풍차의 대형화에 따른 자금력의 문제 등으로 미쓰비시 중공업, 히타치 제작소, 일본 제강소는 해외 대형 풍차 메이커 기업과의 통합(협업)을 통해 풍력발전 시장을 개척하고 있다. 또한 일본을 대표하는 석유화학 EPC 기업 JGC도 2018년 11월 ‘윈드 파워 프로젝트실’을 신설하고 해상 풍력발전 인프라 분야 사업 확대를 기본 방침화하였고, 치요다화공건설 역시 주력 사업인 LNG 분야 이외의 매출 비율을 2030년 35%까지 향상시키기 위해 해상 풍력발전 분야에서 미쓰비시 상사와 협력하는 등 사업 전개를 본격화할 예정이다.

일본 내 풍력발전 풍차 메이커의 70%가 해외 기업으로 수입 부품 중 베어링, 기어박스, 브레이드, 발전기의 경우 납품까지 평균 100일 이상 소요된다. 대기업 발전사업자의 경우 부품의 사용 빈도를 고려해 다운타임(발전기 정지 기간) 단축을 위해 자사에서 부품 재고를 확보하는 경우도 있지만, 보유기 수가 적고 안전별로 풍차 메이커의 통일이 어려운 중소기업 발전사업자의 경우 고장에 대비해 사용 빈도가 낮은 고가의 부품을 재고로 확보하기 어려운 실정이다. 하지만 향후 일본이 정부 차원에서 잠재력이 높은 풍력발전 도입목표를 명확히 제시할 경우 시장 성장의 확실성이 높아지면서 민간에 의한 개발투자, 설비투자, 신규 참가가 더욱 가속화될 전망이다.

〈표 3-8〉 일본 풍력발전의 현황과 대책

	현상과 과제	향후 대책
	해상풍력 시장의 확대, 아시아 거점 유치 경쟁의 격화	매력적인 일본 국내시장 창출
국내시장 창출	<ul style="list-style-type: none"> <li>해상풍력은 2040년에는 전 세계적으로 562GW(2020년 現, 24배)의 도입량이 예상(120조엔 이상의 산업)</li> <li>유럽에서는 수요지에 가까운 공장입지로 수송비용을 줄이면서 대규모 기술개발과 양산 투자로 코스트 절감 진전(낙찰률 10엔/kWh 이하, 보조금 제로 안전도 발의)</li> <li>아시아 시장은 급속 성장. 2030년 세계시장 41%(96GW)가 아시아 시장</li> </ul>	<p>①정부의 도입 목표 명시</p> <p>-정부 도입목표: 2030년 10GW, 2040년 30~45GW</p> <p>②안전 형성의 가속화</p> <p>-해역점용(占有) 기준정비: 정부가 촉진구역을 지정하고 30년간 점유 가능(재생에너지해역이용법)</p> <p>⇒4곳(나가사키, 치바, 아키타×2) 지정 후 공모 실시 완료, 향후 매년 1GW 정도의 새로운 구역을 지정</p> <p>-초기 단계부터 정부·지자체가 주도</p>

	현상과 과제	향후 대책
	<p>으로 예측. 유럽 풍차 메이커 (Siemens Gamesa, Vestas, GE)의 아시아 진출 본격화. 아시아 각국에 있어서도 유치경쟁이 시작</p>	<p>안전 추진, 신속·효율적 풍황조사 및 계통확보를 수행하는 구조의 확립 (실증사업·계통확보계획 등)</p> <p>③인프라의 계획적 정비</p> <p>-보다 많은 재생에너지를 송전망에 접속하는 구조의 로컬계통으로 전국 전개를 위한 기술개발 및 재생에너지가 우선해서 이용되도록 계통 이용 기준의 적용개시를 향한 검토 가속화</p> <p>-계통 정비의 마스터플랜 책정(2021년 5월 중간 정리, 2022년도 완성 목표)</p> <p>-풍력발전 적지와 전력 수요지를 연결하는 장거리 해저 직류송전의 정비안(案)의 구체화</p> <p>-대형풍차 설치·유지관리에 필요한 기지 항만의 착실한 정비와 더불어 기지 항만의 방향 검토 개시</p>
국내 서플라이체 인 형성	<p><b>일본내 풍차 제조거점 부재</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>일본내 풍차 제조거점은 부재. 유럽 풍차메이커 3사는 유럽에 입지 확보</li> <li>일본 국내시장 창출을 마중물로 공급망을 형성하는 것이 전력 안정공급 및 경제 파급효과 관점에서 중요</li> <li>풍차는 부품 수가 수 만점에 달해 관련 산업으로의 파급효과가 크며, 일본내 부품 공급사(발전기, 증속기, 베어링, 블레이드용 탄소섬유, 영구자석 등)의 잠재적 경쟁력은 있지만, 일본 국내 모노즈쿠리 기반을 충분히 활용하지 못하고 있음</li> </ul>	<p><b>투자촉진, 경쟁력있는 강인한 공급망 형성</b></p> <p>①산업계에 의한 국내조달·코스트 저감 목표의 설정</p> <p>-일본 국내 조달률 목표: 2040년 60%</p> <p>-코스트 저감 목표: 2030~35년 8~9엔/kWh</p> <p>②공급사의 경쟁력 강화</p> <p>-공모를 통해 안정공급에 이바지하는 대책에 가점 부여</p> <p>-공급망 구축에 대한 설비투자 촉진</p> <p>-해외기업과 일본기업의 협업 촉진 (J-Bridge 등)</p> <p>③사업환경정비: 산업계가 요구하는 각종 규제(잔치 규제의 명확화, 항공장해등의 설치기준 완화, 안전심사 합리화 등)의 총점검 실시 완료, 각 규제 담당 부처의 검토를 가속화</p> <p>④해상풍력 인재육성 프로그램</p>

	현상과 과제	향후 대책
차세대 기술(부체) 의 개발, 시장확보	세계와 대등한 수준의 부체(浮體)기술, 유럽과 환경이 다른 아시아	아시아 전개도 염두에 둔 차세대 기술 개발, 국제 연계
	<ul style="list-style-type: none"> <li>향후 기상·해상이 유사한 상황으로 시장 확대가 예상되는 아시아 전개 를 지향하는 것이 중요</li> <li>부체식 기술은 세계와 대등한 수준 으로 조선업을 포함한 새로운 플레 이어의 참여 여지도 있음. 상용화를 직시하면서 기술개발을 가속화 하는 동시에 민관이 연계해서 해외 전개 의 기반 만들기를 추진</li> </ul>	①아시아 전개를 직시한 차세대 기술개발 - ‘기술개발 로드맵’ (2021년4월 책정) 에 의거, 요소기술 개발을 가속화 -실제 해역에서의 실증도 주시하면서 그린 이노베이션 기금의 활용도 검토 한 부체식(浮体式) 등의 기술개발 ②국제표준화·정부 간 대화 등 -국제표준화(부체식의 안전평가 수법) -미래 시장을 염두에 둔 양국 간 정책 대화·국제 실증(日·EU 에너지 정책 대화 등)

출처: 經濟産業省(2021.6, p.29), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(概要)

### (3) 암모니아

암모니아는 수소 연료전지에 전력을 공급하기 위해 사용될 수 있고, 고온 고체 산화물이 암모니아 연료전지 내에서 직접 사용될 수도 있어 온실가스를 배출하지 않는 효율적인 전원을 제공할 수 있다는 점에서 주목받고 있다. 암모니아는 연소용 또는 양성자 교환막 연료전지의 연료로써 나트륨 아미드 공정을 통해 수소로 변환될 수 있다. 암모니아는 천연가스 및 재생가능 에너지 등으로부터 제조가 가능하며, 연소하더라도 CO2를 배출하지 않기 때문에 온난화 대책의 유효한 연료의 하나로 알려져 있다. 암모니아는 수소를 연료로 하는 것에 비해 에너지 효율이 훨씬 높으며, 압축되거나 극저온 액체로 유지되어야 하는 수소보다 훨씬 저렴한 비용으로 생산, 저장 및 운송될 수 있다. 따라서 수소와 비교해서 기존 인프라를 활용함으로써 저렴한 가격으로 제조·이용 가능한 것이 특징이다.



## 암모니아

암모니아는 액화에 드는 에너지가 적고 수송도 간편하고 저렴하다. 수소를 암모니아로 바꾸면 상대적으로 더 안전해지기에 수소를 그냥 옮기는 방식보다 더 많은 양의 수소를 저장해 장거리 운송할 수 있으며, 보관 및 운반에 필요한 인프라도 상대적으로 더 간단하고, 이미 산업현장에서 사용되고 있는 물질이기에 완전히 새로운 인프라를 개발해야 하는 수소와는 달리 기존의 인프라를 개량, 연장하는 선에서 끝난다. 즉 수소를 제조한 뒤 암모니아로 바꾸어서 운반하고, 다시 수소로 바꾸는 것이다. 즉 장거리 수소 운반의 방법으로 암모니아가 가장 경제적이 될 수 있다.

일본에서는 화석연료를 대체할 차세대 연료로써 가능성을 평가하는 동시에 암모니아를 이용해서 수소를 더욱 효율적으로 활용하는 방안에 대해 일찍부터 주목해 왔다. 즉 액체 암모니아를 전기에너지나 또는 이를 이용해 생산한 수소를 경제적으로 저장하고 장거리 운송할 수단으로 쓰는 것이다. 연소시에 CO<sub>2</sub>를 배출하지 않는 암모니아는 석탄화력 혼소 등에 유효한 연료로 혼소 기술을 조기에 확립하고 동남아시아 등으로 전개하면서 글로벌 서플라이체인을 단기에 구축하고 세계시장에서 암모니아의 공급·이용 산업의 주도권을 획득할 수 있다. 암모니아는 비료 등의 용도로 이미 세계적 사용되고 있어 기존의 제조·수송·저장기술을 활용한 인프라 정비도 가능하며, 안전대책도 확립되어 있다. 화력발전의 보일러에 암모니아를 혼소하는 경우에도 버너 등을 교체하는 것만으로도 대응 가능하기 때문에, 기존의 설비를 이용할 수 있어 새로운 정비 및 초기 투자를 최소한으로 억제하면서 CO<sub>2</sub> 배출을 감축할 수 있다. 특히 암모니아와 석탄은 혼소가 용이하기 때문에 우선은 화력발전으로의 이용이 예상된다.

〈그림 3-9〉 연료 암모니아의 제조·수송·이용



출처: 資源エネルギー庁(2022.6, p.239), エネルギー白書 2022



암모니아의 혼소 기술에 대해서는 2014~2018년에 내각부 전략적 이노베이션 프로그램(SIP)의 연구개발에서 연료로 활용했을 시 질소산화물(NOx)의 배출억제가 가능하다는 것을 확인했다. 경제산업성은 그 성과를 이어받아 NEDO의 지원 아래 2021년부터 일본 최대의 화력발전회사인 ‘주식회사 JERA’가 아이치 현에 보유하고 있는 헤기난(碧南) 화력발전소(100만kW)에서 20% 암모니아 혼소 실증 사업을 실시하고 있다.

〈그림 3-10〉 석탄화력발전 실물에 20% 암모니아 혼소 실증사업



출처: 資源エネルギー庁(2022.6, p.240), エネルギー白書 2022

한편 암모니아가 연료로써 사용되게 되면 석탄화력 1기(100만kW)의 20% 혼소로 연간 50만톤이 필요하기 때문에 공급 부족으로 이어져, 가격의 급등을 초래할 우려가 있다. 그렇기 때문에 저렴하고 안정적인 연료 암모니아의 서플라이 체인을 구축할 필요가 있다. 여기서 2050년 탄소중립을 목표로 한 연료 암모니아 이용 촉진을 위한 정책적 대응에 대해 살펴보기로 한다. 연료 암모니아 정책에 대해서는 2020년 10월에 ‘탄소중립 선언’을 이어받아 동월에 연료 암모니아 도입 민관협의회를 설립, 민관이 함께 연료 암모니아의 서플라이체인 구축을 위한 과제의 공유 및 도입을 향한 전개 순서에 대해서 논의를 시작했다. 이러한 움직임을 토대로 2020년 12월에 공표되고, 2021년 6월에 보다 구체화된 ‘2050년 카본 뉴트럴(Carbon Neutrality)에 따른 그린 성장전략’에서 연료 암모니아는 수소와 함께 이 전략에서 14개 중요 분야의 하나로 자리매김하였다. 또한 2022년 3월에 종합자원에너지조사회 자원·연료분과회 산하에 ‘암모니아 등 탈탄소 연료 소위원회’를 개최하여, 암모니아를 기존 연료와의 가격 차 및 연료공급 거점

정비 등의 과제에 대해서 논의하였다.

연료 암모니아의 화력발전으로의 활용에 대해서는 2030년까지 석탄화력의 20% 암모니아 혼소의 도입·보급을 목표로, 실물을 활용한 혼소·전소의 실증을 추진함으로써 2030년에는 일본 국내 수요로 300만톤(수소 환산으로 약 50만톤)을 상정하고, 그를 위해 현재의 천연가스 가격을 밑도는 Nm3-H2당 10엔 후반으로의 공급을 목표로 하고 있다. 한편 2050년에는 일본 국내 수요로 연간 3,000만톤(수소 환산 약 500만톤)으로 상정하고 암모니아의 이용 확대에 대응한 한층 더 제조의 대규모화, 고효율화를 추구한 일본 기업 주도의 서플라이체인을 구축하는 것을 지향하고 있다. 연소해도 CO2 배출하지 않는 암모니아는 석탄 화력에서 혼소 등에서 유효한 연료이다. 혼소 기술을 조기에 확립하고 동남아시아 등으로의 전개를 도모하면서 국제적인 서플라이체인을 신속히 구축하고 세계에서 암모니아의 공급·이용산업의 주도권을 잡는다는 전략이다.

이러한 동향을 토대로 2021년 10월에 각료회의에서 결정된 ‘제6차 에너지 기본계획’에서는 2030년도 전원 구성에 있어서 암모니아가 수소와 함께 명기되어, 수소·암모니아로 1% 정도를 조달하는 것으로 되었다. 더욱이 그린에너지 전략의 검토에 있어서도 연료 암모니아의 도입·확대를 향한 구체적인 대책에 대해서 논의되고 있다.

〈표 3-9〉 수소·연료 암모니아 산업(연료 암모니아)의 과제와 대책

	현상과 과제	향후 대책
이용 (화력혼소)	<p>석탄화력의 버너에서는 암모니아를 연소하면 대량의 NOx가 발생</p> <p>-석탄화력의 혼소시 NOx의 발생을 억제하는 버너의 기술개발 실시</p> <p>-실물을 활용한 석탄화력의 20% 혼소 실증을 2021년도부터 개시</p> <p>-암모니아는 석탄에 비해 연소시의 화염온도가 낮아 복사열이 적기 때문에 암모니아의 혼소율을 높여, 전소해 가기 위해서는 NOx 발생을 억제할 뿐만 아니라 수열(收熱)기술의 개발도 필요</p>	<p>석탄화력의 암모니아 혼소의 보급, 혼소율 향상·전소화</p> <p>①단기적 대응(2030년 20% 혼소 도입·확대)</p> <p>-20% 혼소 실증(2021년도부터 4년간)을 거쳐, 전력회사를 통해서 NOx 억제 버너와 암모니아 연료를 세트로 실용화</p> <p>-혼소기술을 동남아시아 등으로 전개. 동남아시아의 석탄화력 1할이 혼소기술을 도입하면 5,000억엔 규모의 투자 필요</p> <p>-연료 암모니아의 사양 및 연소기기의 NOx 배출 등에 관한 국제표준화를 주도하고 해외 전개를 지원</p> <p>-연료 암모니아의 법제상 자리매김도 명확화하여 평가가 이루어질 수 있도록 대응</p> <p>②장기적 대응(2050년 혼소율 향상·전소 기술의 도입·확대)</p> <p>-혼소율 향상·전소화 기술의 개발을</p>

	현상과 과제	향후 대책
		추진. 전 세계에서 연간 1억톤 규모의 수요량을 목표(연간 1.7조엔 규모 시장)
공급 (암모니아 브랜드 등)	<p><b>용도 확대에 따른 암모니아 추가 생산의 필요성</b></p> <p>-암모니아 생산은 연간 2억톤, 대부분 비료로 지산지소(地産地消)</p> <p>-석탄화력 1기 20% 혼소로 연간 50만톤의 암모니아가 필요. 일본 국내 모든 석탄화력에서 실시할 경우 연간 2천만톤의 암모니아가 필요, 세계 총 무역량에 필적할 수준</p> <p>-암모니아 생산국(북미, 호주, 중동)과 소비국(일본 포함 아시아)이 연계해서 국제적인 서플라이체인을 구축하고 그것을 통해 저렴한 연료 암모니아의 공급 필요</p>	<p><b>안정적인 암모니아 공급</b></p> <p>①단기적 대응(2030년 공급 개시)</p> <p>-원료조달, 생산, CO2처리, 수송·저장, 재정적인 비용 절감, 그를 위한 각 공정의 고효율화를 위한 기술개발 실시</p> <p>-생산 확대를 위한 플랜트 설치 및 해외에서의 선적 출항 정비에 대한 출자의 검토 및 국내 항만에 기술기준 재검토 등</p> <p>-NEXI, JBIC 및 JOGMEC에 의한 재정 지원 강화를 검토</p> <p>-다양한 판매의 장을 활용한 연료·암모니아의 인지 향상, 국제연계 추진</p> <p>-조달국의 정치적 안정성·지리적 특성에 유의하면서 일본이 관리 가능한 조달 서플라이체인 구축을 목표</p> <p>-2030년에는 현재의 천연가스 가격 아래로, Nm3-H2당 10엔대 후반 공급을 목표로 하고, 국내 수요로 연간 300만톤(수소환산 약 50만톤)을 상정</p> <p>②장기적 대응(암모니아 공급확대 대응)</p> <p>-암모니아의 이용 확대에 대응한 보다 제조의 대규모화, 고효율화. 2050년에는 국내 수요로 연간 3,000만톤(수소환산으로 약 500만톤)을 상정</p> <p>-그린 암모니아 및 국내자원을 포함한 다양한 자원으로부터의 제조를 지향</p>

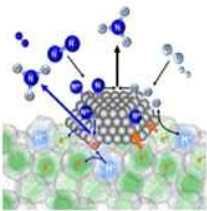
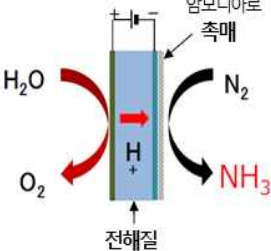

출처: 経済産業省(2021.6, p.36), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(概要)

한편 연료 암모니아의 대규모 수요의 창출과 안정적으로 저렴한 공급의 실현을 위해서는 장기에 걸친 기술개발이 불가결하다. 2021년 9월에 그린 이노베이션 기금사업의 일환으로 실시하는 ‘연료 암모니아 서플라이체인 구축’ 프로젝트의 연구개발·사회 실장 계획을 책정하였다.

본 계획에서는 ①저온·저압에서 보다 고효율로 블루 암모니아를 제조하는 기술 및 재생가능 에너지로부터 수소를 경유하지 않고 ‘그린 암모니아’를 제조하는 기술이라고 한 암모니아의 공급 코스트 저감에 필요한 기술의 개발 ②석탄 보일러 및 가스터빈에서의 암모니아 고회소·전소기술의 개발을 주요 내용으로 하고 있다.

연료 암모니아 서플라이체인 구축사업의 개요를 살펴보면, 화력발전의 탈탄소를 향해 기존 설비를 활용하면서 이행을 실현하기 위해 연료 암모니아의 활용이 중요하다. 현상에서는 암모니아 공급은 비료 등 원료 용도에 한정되어 있다. 연료 암모니아 시장의 구축을 향해서는 이용 측면·공급 측면이 일체가 되어 대규모 서플라이체인 구축이 필요하다. 이미 일본은 세계에 선두 주자로 암모니아 혼소를 위한 기술개발을 개시, 국내뿐만 아니라 일찍이 아시아를 중심으로 해외시장으로도 전개하여 제조 측면에서는 대규모화·코스트 삭감·CO2 배출량 저감에 이바지하는 제조 방법의 개발·실증을 수행, 이용 측면에서는 고훈소·전소화를 향한 기술개발을 수행하고 있다.

〈그림 3-11〉 연료 암모니아 서플라이체인 구축사업(개요)

암모니아 합성 기술	그린 암모니아 합성	혼소·전소 버너 제조
<b>참여 기업</b> (千代田化工、JERA、東電 再委託先：つばめBHBほか)	<b>참여기업 및 대학</b> (出光、東大、九大、大阪大、東工大)	<b>참여 기업 및 대학·연구기관</b> (IHI、三菱重工、JERA、東北大、産総研)
<ul style="list-style-type: none"> <li>● 블루 암모니아 합성 코스트의 저감을 목표로 'Haber-Bosch 법' 보다도 저온·저압으로 합성 가능한 기술을 개발</li> <li>● 촉매 개발 및 활성안정성의 향상이 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 그린 암모니아 코스트 삭감을 목표로 수소를 경유하지 않는 제조 방법을 개발</li> <li>● 합성에 사용하는 전극의 촉매 개발 및 전해질의 개발이 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 보일러 및 터빈에서 고훈소전소화를 목표로 하고, 그를 위해 필요한 고훈소전소 버너 개발</li> <li>● 암모니아 혼소율의 증가에 따른 NOx 증대, 수열악화, 착화의 불안정성의 기술과제에 대응한 버너를 신규 제조 필요. 나아가 개발한 버너를 활용하여 유량 및 유속, 들어오는 위치 등에 대해서도 실증을 통해서 검토 필요.</li> </ul>
 <p>(출처) NEDO 공표자료</p> <p>※ 촉매를 통해서 질소분자, 수소분자가 원자 레벨로 분리, 그것이 암모니아로써 결합</p>	 <p>※ 추출한 수소가 질소와 결합해서 암모니아로</p> <p>※ 물에서 수소를 추출</p> <p>전해질</p>	 <p>미분탄화 공기</p> <p>암모니아</p> <p>연소용 공기</p> <p>NOx의 관련 영역</p> <p>(출처) IHI 보도자료</p>

출처: 資源エネルギー庁(2022.6, p.241), エネルギー白書 2022

본 계획을 바탕으로 국립연구개발법인 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)가 ‘그린 이노베이션 기금사업’의 일환으로 2021년 1월에 ‘연료 암모니아 서플라이체인 구축’ 프로젝트를 공모하였다. 본 프로젝트를 통해서 암모니아 제조의 고효율화·저코스트화에서 이용 확대까지 기술적인 과제를 해결하고 수요와 공급이 일체화된 연료 암모니아 서플라이체인 구축을 지향하고 있다. 한편 일본은 국내를 비롯한 아시아 전력회사의 탄소 중립성 전환을 가속화하기 위한 노력의 일환으로 발전에서 암모니아 사용을 늘릴 수 있는 암모니아 공동 발사 기술개발 계획을 추진하는 것을 목표로 하고 있다. 또한 2021년 10월 제1회

연료 암모니아 국제회의(ICFA2021)가 개최되었고 이는 암모니아의 활용에 대한 일본 정부의 노력을 엿볼 수 있는 좋은 예시의 하나다.

〈표 3-10〉 「연료 암모니아의 서플라이체인 구축」 사업 내용

실시 기간	2021년도 ~ 2030년도(예정)	
국비부담 상한	598억엔	
	<b>암모니아 공급 코스트 저감</b>	
	연구개발 내용(1)	연구개발 내용(2)
	암모니아 제조 신축매의 개발·실증	그린 암모니아 전해 합성
【연구개발 항목 1】	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 연료 암모니아 서플라이체인 구축과 관련한 암모니아 제조 신축매의 개발·기술 실증</li> <li>- 연료 암모니아 이용 확대를 위해 제조 코스트 저감이 실현 가능한 암모니아 제조 신축매를 핵심으로 하는 국산 기술을 개발</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 상온, 상압 그린 암모니아 제조 기술개발</li> <li>- 물과 질소를 원료로 한 전해 반응을 활용하여, 상온 상압 암모니아를 제조하는 방법을 개발</li> </ul>
	<b>암모니아의 발전 이용에 있어서 고효소화·전소화</b>	
	연구개발 내용(1)	연구개발 내용(2)
	석탄 보일러 암모니아 고효소 기술(전소 기술 포함)의 개발·실증	가스터빈의 암모니아 전소 기술의 개발·실증
【연구개발 항목 2】	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 사업용 화력발전소에 암모니아 고효소화 기술 확립을 위한 실물 실증 연구</li> <li>- 암모니아와 미분탄을 동시에 연소시키는 암모니아 고효소 미분탄 버너를 신규 개발, 사업용 화력발전소에 암모니아 이용 사회 실제 정착을 위한 기술 실증을 수행</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 암모니아 전용 가스터빈의 연구개발</li> <li>- 가스터빈 열병합 시스템으로부터 온 실효과 가스를 삭감하기 위해 2MW급 가스터빈을 위한 액체 암모니아 전소 100% 기술을 개발</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 암모니아 전소 버너를 활용한 화력발전소에 고효소화 실물 실증</li> <li>- 암모니아 전소 버너를 개발하여 사업용 화력발전소에 종래의 미분탄 버너와 조합, 암모니아 혼소율 50% 이상으로 실증 운전 수행</li> </ul>	

출처: 資源エネルギー庁(2022.6, p.240~242), エネルギー白書 2022, ‘第8章 カーボンニュートラル実現に向けた水素・アンモニアの導入拡大’를 토대로 필자 정리

#### (4) 연료전지

연료전지(Fuel Cell)는 산화환원반응을 통해 연료와 산화제의 화학에너지를 전기로 변환하는 전기화학 전지이다. 연료전지는 연료와 산소가 공급되는 한 지속적으로 전기를 생산할 수 있기 때문에 연료를 사용하여 전기를 만들어내는 발전기의 일종이다. 연료전지는 화학반응을 지속하기 위해 연료와 산소의 연속적인 공급원이 필요하다는 점에서 일반적인 배터리와는 다르다. 연료전지는 상업, 산업 및 주거용 건물과 원격지 또는 접근 불가능한 지역에서 1차 및 예비 전력에 사용된다. 또한, 지게차, 자동차, 버스, 기차, 보트, 오토바이, 잠수함을 포함한 연료전지 차량에 동력을 공급하기 위해 사용된다.

전기 외에도 연료전지는 수증기, 열, 그리고 연료 공급원에 따라 아주 적은 양의 이산화질소와 다른 배출물을 생산한다. 연료전지의 에너지 효율은 일반적으로 40~60%이지만, 열병합 발전 방식으로 폐열을 포착하면 최대 85%의 효율을 얻을 수 있다. 이는 기존의 발전시스템이라 할 수 있는 내연기관이나 터빈과 같은 외연기관의 경우, 연소반응에 의해 생긴 열에너지를 운동에너지로 변환하고 이 운동에너지를 전기에너지로 변환시키는 여러 차례의 에너지 변환 과정을 거치는 데 반해, 연료전지는 연료의 화학에너지를 직접 전기에너지로 변환시키는 전지로 한 번의 변환 과정만을 거친다. 따라서 기존의 발전시스템보다 높은 효율을 가질 수 있을 것으로 평가받고 있다.

연료전지는 물의 전기분해의 역반응 원리를 이용하여 수소와 산소의 화학반응에 의해 전기를 직접 발생시키는 장치이다. ‘전지’라고는 하지만 축전지와 같이 충전한 전기를 담아두는 것은 아니다. 연료전지의 연료가 되는 ‘수소’는 천연가스나 메탄올을 개질해서 만드는 것이 일반적이다. ‘산소’는 대기중에서 구할 수 있다. 또한, 발전과 동시에 열도 발생하기 때문에 그 열을 활용함으로써 에너지의 이용효율을 높일 수 있다.

일반적인 발전방법은 석유, 석탄, 우라늄 등의 연료를 연소시켜 물을 비등시켜 증기의 힘으로 발전기를 돌려 전기를 만든다. 화학에너지·핵에너지→열에너지→운동에너지→전기에너지로 형태가 바뀌지만, 연료전지는 화학에너지에서 전기에너지로 연료로부터 직접 전기에너지를 생산한다는 차이가 있다.

연료전지는 1960년대부터 미국항공우주국(NASA)에서 우주선용 에너지원으로써 연구가 진행되어 달 탐사선인 아폴로 우주선에도 탑재되었다. 이는 연료전지가 수소와 산소로부터 물이 생성되는 친환경 화학반응을 이용하기 때문에 우주선 내에서도 오염 문제가 발생하지 않고 생성된 물은 음료수로도 이용 가능했던 것이

커다란 이유였다.

그 이후 일반적인 연료전지의 이용 연구는 진전이 없었지만 1990년대 들어 환경문제에 대한 관심이 높아지고, 연료전지의 환경보전 효과에 기대가 주목을 받으면서 연구개발도 활발해졌다. 환경 측면에서 연료전지의 장점은 발전 단계에서는 연소 과정이 없어 배출 가스를 발생하지 않아 종래의 발전시스템보다도 효율이 높고 배열을 이용한 ‘Cogeneration’ 등에 의한 종합효율을 더욱 높일 수 있다. 그 결과 에너지 절감은 물론 이산화탄소 배출삭감으로도 이어질 수 있다.

### Cogeneration

Cogeneration(Combined heat and power)을 일본에서는 코제네 or 열전병합(熱電併合)이라 한다. 이는 천연가스, 석유, LP가스 등을 연료로 엔진, 터빈, 연료전지 등의 방식에 의해 발전하고, 그때 발생한 폐열도 동시에 회수하는 시스템으로 회수한 폐열은 공장에 열원이나 가정, 사무실, 병원 등 생활 현장에서 냉난방, 급유설비 등에 이용이 가능하다.

일본에서는 코제네레이션에 주목하고 있는데 MicroCHP(MicroCombined Heat and Power) 시스템을 포함한 복합 열 및 전력(CHP) 연료전지 시스템으로 가정과 사무실 건물이나 공장의 전기 및 열을 모두 생성하는 데 사용된다. 이 시스템은 일정한 전력을 생산하며, 초과 전력을 소비하지 않을 때 전력망에 다시 판매하는 동시에 폐열로부터 뜨거운 공기와 물을 생산한다. 결과적으로 CHP 시스템은 열에너지 변환시스템에 의해 일반적으로 거부되는 폐열을 사용할 수 있기 때문에 1차 에너지를 절약할 수 있는 잠재력을 가지고 있다고 평가된다.

〈그림 3-12〉 연료전지 개념도



출처: 中央環境審議會地球環境部会(第51回), 配付資料「經濟産業省ヒアリング追加説明資料」(燃料電池の導入促進)



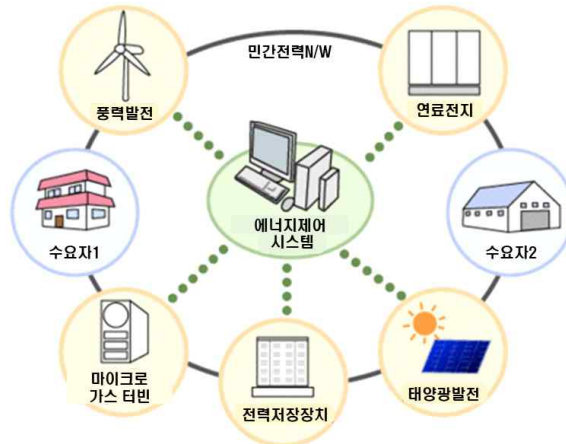
일본에서 연료전지는 일부 지역을 중심으로 하여 일반 가정에서의 실용화를 목표로 도입되었으나 최근 실용화가 진행되어 공장, 자동차, 가정용으로까지 확대되고 있으며, 나아가 노트북, 태블릿 PC 및 스마트폰 등 소형기기의 전원으로써도 이용되고 있다. 가정용 연료전지는 2009년 일본 국내시장에 출시된 이래 누계 약 34만대(2020년 12월 기준)가 도입되었다.

연료전지의 특징은 이산화탄소 배출삭감을 통한 친환경 연료로써 환경문제에 공헌 외에도 에너지원의 다양화와 분산형 전원의 이용촉진 측면에서도 장점이 크다. 연료전지는 연료인 수소와 공기 중의 산소와의 전기 화학반응을 통해 전기에너지를 직접 만들어내기 때문에 발전효율이 높다. 또한, 전기와 열 양쪽 모두를 유효하게 활용함으로써 더욱 종합에너지 효율을 높일 수 있다.

분산형 에너지시스템은 종래의 대규모 발전소에 의한 집중적인 발전시스템과는 달리 공장이나 가정용 등 각각의 에너지 수요측면에서 소규모로 발전을 하는 시스템으로 따라서 에너지원은 분산형 전원으로 부른다. 지금까지 집중형 발전 시스템은 원격지인 발전소에서 송전선을 깔아 장거리로 전력을 공급하기 때문에 대규모 송배전의 인프라 정비가 필요할 뿐만 아니라 송전 로스도 크다. 또한, 분산형 에너지시스템에 있어서도 종래형 가스 코제네 등에서는 연료를 수송할 필요가 있어 물류에 에너지 코스트가 필요하지만, 지역의 에너지를 이용하는 경우에 있어서는 이러한 영향이 경미하지만 분산형 시스템으로써는 메리트가 있다. 또한, 분산형 에너지시스템에서는 발전시에 배열을 각각의 필요로 하는 가정에 유효하게 이용 가능하다. 그 밖에 전원이 분산됨으로써 대규모 정전에 대한 대응력 향상이라는 장점도 있다. 이와 같은 분산형 전원을 조합하여 지역 단위의 소규모 전력을 공급하는 시스템을 ‘마이크로 그리드’ 라고 한다. 일반적으로 화력발전은 소규모 발전이 효율이 떨어지지만 연료전지는 소규모에서도 일정 효율을 달성하기 때문에 분산형 에너지시스템으로 적합하다.



〈그림 3-13〉 마이크로 그리드에 의한 분산형 에너지시스템



출처: 新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 「よくわかる! 技術解説 新エネルギー／分散型エネルギー」

한편 미래에는 태양광발전으로 발전한 전기로 물을 전기 분해하여 수소로 저장하고 그 수소를 다시 전기로 사용할 수 있는데, 그 경우 에너지 로스가 축전지의 충전·방전에 비해 크다는 것이 우려된다. 또한, 전술한 바와 같이 분산형 에너지시스템에서는 송전 로스는 적지만 수소 운반과 관련한 에너지 소비를 고려하지 않을 수 없다. 예를 들어 지역의 태양광발전으로 수소를 생산한다면 운반과 관련한 에너지 소비는 경미하지만, 해외로부터 수소를 수입하는 경우에는 운반에 막대한 에너지가 필요하다. 그리하여 매일 사용하는 전기는 축전지를 활용하여 저장성 높은 수소를 로컬 지역에서 비상시에 에너지로 활용하는 등 특성을 고려한 사용 구분이 바람직하며, 나아가 축전지 등 효율적인 전력의 저장을 위한 전력 저장기술에 대한 연구개발도 병행되어야 한다.

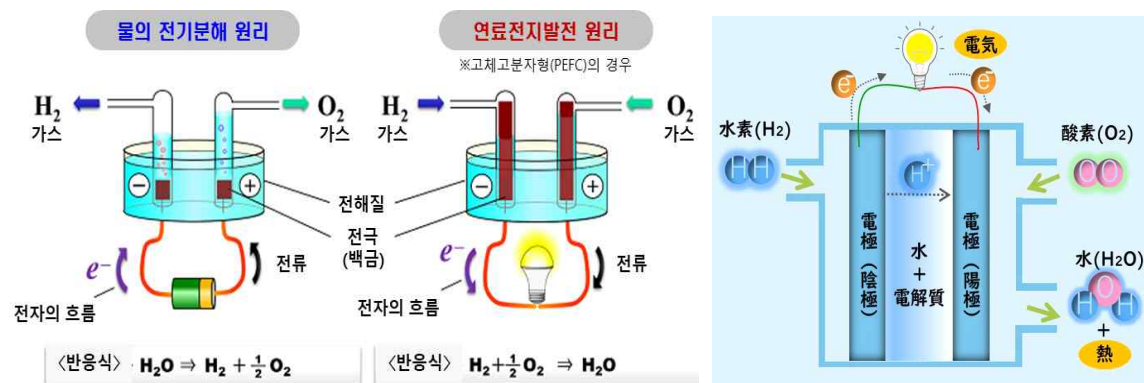
여기서 연료전지의 구조를 살펴보기로 한다. 외부로부터 공급된 수소분자( $H_2$ )는 마이너스 전극 내에 있는 촉매에 흡착되어 활성 수소 원자( $H$ )가 된다. 이 수소 원자는 수소이온( $2H^+$ )이 되어 2개의 전자( $2e^-$ )를 전극으로 송출한다. 이 전자는 외부 회로를 통해서 반대 측의 플러스 전극에 전류로써 흘러보낸다. 플러스 전극에서는 외부로부터 공급된 산소분자( $O_2$ )가 외부 회로에서 돌아온 전자를 수취하여 산소이온( $O^{2-}$ )이 된다. 한편 마이너스 전극으로부터 전자를 빼앗겨 플러스 전하를 두른 수소이온( $2H^+$ )은 전해질을 매개로 플러스 전극으로 이동하여 마이너스 전하를 두른 수소이온과 결합하여 물( $H_2O$ )이 된다.

연료전지의 구성단위를 셀(單전지)이라고 한다. 셀은 평평한 건전지와 같은 플러스 전극판(공극극)과 마이너스의 전극판(연료극)이 고체고분자막(전해질막)을 둘러싼 구조를 하고 있다. 공극극과 연료극에는 수많은 작은 구멍이 나 있고 여기를 외부에서 공급된 산소(공기: 산소는 공기중에 약 20% 포함되어 있음)와

수소(도시가스의 원료인 천연가스를 분해해서 수소가 얻어짐)가 통과함으로써 반응이 일어난다.

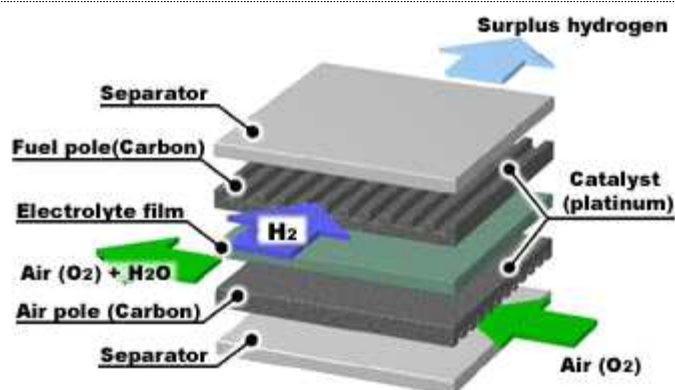
수소는 전해질막과 접하는 면까지 파고들어 전자를 유리(遊離)해서 수소이온이 되고 전자는 밖으로 빠져나간다. 전해질막 속을 이동한 수소이온은 반대편의 전극으로 보내어진 산소와 외부에서 전선을 통해 돌아온 전자와 반응해서 물이 된다. 이 전자와 이온으로 나누어지는 것이 연료전지 원리의 중요한 포인트이다. 전자가 전선을 이동하는 것은 전류가 흐르는 것, 즉 전기가 발생하는 것이다.

〈그림 3-14〉 연료전지의 원리와 구조



출처: 日本電気工業会(JEMA), HP. <https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/about.html>

〈그림 3-15〉 연료전지의 기본구성

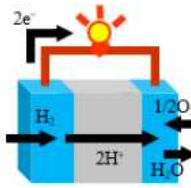
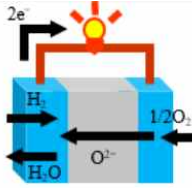
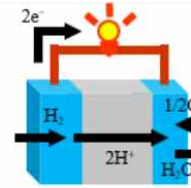
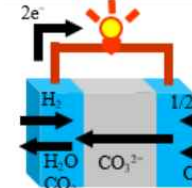


출처: 燃料電池実用化推進協議会(FCCJ), HP. <https://fccj.jp/jp/aboutfuelcell.html>

연료전지는 규모에 따라 다양하게 활용된다. 대형은 발전시설로, 중간 규모는 지역 커뮤니티 또는 오피스빌딩 등에, 소규모는 가정 등에 설치하여 전기와 열을 공급할 수 있다. 또한, 소형은 자동차 및 선박 등의 구동 원으로 사용할 수 있다. 다양한 장소에서 연료전지가 활약 가능한 기술개발과 보급을 위해 표준화가 진행되고 있다.

연료전지는 다음과 같은 장점이 있다. 첫째, 전기와 동시에 열도 이용할 수 있기 때문에 종합에너지 효율이 높다. 둘째, 발전시에는 물만 배출되기 때문에 진동이나 소음도 없다. 셋째, 도시가스, 메탄올 등의 연료나 물의 전기분해 등 다양한 방법으로 연료가 되는 수소를 만들어 낼 수 있다는 장점이 있어 지속적인 연구와 활용이 진행될 것으로 보인다.

〈표 3-11〉 연료전지의 종류와 특징

종류	고체 고분자형 (PEFC)	고체 산화물형 (SOFC)	인산형 (PAFC)	용융 탄산염형 (MCFC)
전해질	양이온교환막 (불소수지계)	세라믹	인산	리튬·칼륨탄산염
매체이온	H <sup>+</sup>	O <sup>2-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>
작동온도	80~120℃	600~1000℃	190~200℃	600~700℃
작동원리				
반응식	연료극	$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$	$O^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + 2e^-$	$CO_3^{2-} + H_2 \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^-$
	공기극	$1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$	$1/2 O_2 + 2e^- \rightarrow O^{2-}$	$1/2 O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O$
	전체	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$	$H_2 + 1/2 O_2 \rightarrow H_2O$
주요 용도	-가정용(소규모발전)	-가정용(소규모발전)	-산업·업무용	-산업·업무용
	-휴대·이동용	-산업·업무용	-사업용(대규모발전)	-사업용(대규모발전)
	-차량적재용	-이동용	-비상전원용	-비상전원용
시스템의 연료	도시가스, LP가스, 순수수소, 메탄올, 바이오가스 등			
시스템발전효율				
수증기 개질	33~44%	45~65%	40~48%	44~66%
LHV* 기준	(50~60%)		(48%)	
(순수수소의 경우)				

※LHV: 저위(低位)발열량(연료가스를 완전 연소시켰을 때, 수증기의 응축잠열을 제한 발열량)

출처: 日本電氣工業会(JEMA), <https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/about.html>

## (5) 수소

수소는 발전·산업·운수 등에 폭넓게 활용되는 탄소중립의 핵심 기술로 일본이 선행하고 있는 상황에서 유럽·한국도 전략 등을 책정하여 추종하는 모양새다.

향후 새로운 자원으로 자리매김하여 자동차 용도뿐만 아니라 폭넓은 플레이어의 참여가 필요하다. 일본은 도입량 확대를 통해서 수소발전 코스트를 가스나 화력 이하로 저감(수소 코스트: 20엔/Nm<sup>3</sup> 정도 이하) 목표를 책정, 2050년에 화석연료 대비 충분히 경쟁력 있는 수준을 확보하고 도입량은 2030년에 최대 300만 톤, 2050년에는 2,000만 톤 정도를 목표로 하고 있다. 그 가운데 그린수소(화석연료+CCUS/탄소 리사이클, 재생에너지 등으로부터 제조된 수소)의 공급량은 2030년 독일의 재생에너지 수소 공급량(약 42만톤/年)을 뛰어넘는 수준을 지향하고 있다.

일본은 탄소중립 시대를 맞이하여 수소를 새로운 자원으로 자리매김하면서 현장 실적용을 가속화하고, 장기적으로 저렴한 수소·암모니아를 안정적이고 보다 대량으로 공급하기 위해 해외로부터 저렴한 수소 활용, 국내의 자원을 활용한 수소 제조 기반을 확립해 나갈 계획이다. 이를 위해 국제 수소 서플라이 체인, 잉여 재생에너지 등을 활용한 수전해 장치에 의한 수소 제조의 적용화, 광촉매·고온 가스로 등의 고온 열원을 활용한 혁신적인 수소 제조기술의 개발 등으로 대응하고 있다. 수소 공급 가격을 화석연료와 동등한 수준까지 비용을 낮추어 공급량 확대를 모색하고 있다.

- (現) 코스트: 100엔/Nm<sup>3</sup>→2030년 30엔/Nm<sup>3</sup>, 2050년 20엔/Nm<sup>3</sup>이하로 저감
- (現) 공급량: 약 200만t/년→2030년 최대 300만t/년, 2050년 2,000만t/년으로 확대

또한, 수요 사이드(발전, 운수, 산업, 민생부문 등)에 있어서 수소 이용을 확대 하면서 대량의 수소 수요가 예상되는 전력 부문에서는 2030년까지 가스 화력에 30% 수소 혼소, 석탄 화력에 20% 암모니아 혼소의 도입·보급을 목표로 혼소·전소의 실증 추진 및 비화석 연료로써 가치의 적절한 평가가 가능한 환경정비를 수행하고, 또한 2030년의 원전 구성에 있어서 수소·암모니아 1%를 정착시키려는 계획도 가지고 있다. 운수부문에서는 FCV 및 향후 FC 트럭 등으로의 적극적인 도입 확대를 위해 수소스테이션의 전략적 정비 등에 대응하고, 산업부문에서는 수소환원제철 등의 제조 프로세스의 대규모 전환 및 수소 등의 연소 특성을 근거로 버너, 대형 고기능 보일러 기술개발 등으로 대응하고 있다. 민생부문에서는 순수소 연료전지도 포함하는 정치용 연료전지의 보다 적극적인 도입 확대를 위해 비용 저감을 향한 기술개발 등에도 대응하기 위해 지속적인 노력을 다하고 있다.

석유·천연가스·광물자원의 안정공급 확보에 더해 지금까지 자원외교에서 구축한 자원국과의 네트워크를 활용한 수소·암모니아의 서플라이체인 구축 및 CCS(Carbon dioxide Capture and Storage: 이산화탄소 회수·저장) 최적지 확보

등에 혼연일체가 되어 추진해야 하며, 새로운 ‘포괄적인 자원외교’ 전개가 필요하다고 역설하고 있다. 또한, 아시아의 현실적인 에너지 전환에 적극적으로 참여하면서 JOGMEC(석유천연가스·금속광물자원기구)가 수소·암모니아, CCS라고 하는 탈탄소 연료·기술의 도입을 위한 기술개발·리스크 매니지먼트 공급의 역할을 담당하도록 JOGMEC의 기능 강화를 검토하고 있다. 석유·천연가스에 대해서 자주 개발 비율을 2019년도 34.7%에서 2030년에 50%이상, 2040년에는 60%이상을 지향하고 있다. 또한, 메탄하이드레이트(Methane Hydrate)를 포함한 일본산 자원개발 등으로 대응하고, 광물자원에 대해서 공급 중단이 우려되는 레어메탈 등의 리스크 매니지먼트 지원을 강화하고, 해외 권익 확보와 베이스메탈의 리사이클 촉진으로 2050년까지 일본 국내 수요량에 상당하는 광물자원 확보를 지향하고 있다. 나아가 해저열수광상 및 레어어스(희소금속의 일종) 진흙 등의 일본산 해양 광물자원 개발로 대응하고 있다.

또한, 평상시뿐만 아니라 긴급 시에도 대응 가능하도록 연료 공급체제의 강화를 도모하는 동시에 탈탄소화 대응을 촉진하고 있다. 재해 등 유사시도 포함한 에너지 공급을 견고히 하기 위해 석유 및 LP가스의 비축기능을 유지하면서 기업집단 내외의 사업자 간 제휴를 통해 정유소의 생산성 향상과 더불어 CO2 프리 수소를 활용하여 정유소의 탈탄소화 등에 대응하고 있다. 또한, 지역의 에너지 공급을 담당하는 SS(service station)에 대해서 석유제품의 공급을 계속 하면서 EV 및 FCV로의 에너지 공급을 담당하는 ‘종합에너지 거점’화 및 지역 니즈에 대응하는 서비스 제공을 담당하는 ‘지역 커뮤니티 인프라’화 등으로 대응하는 동시에 열 수요의 탈탄소화 역할에 최선을 주문하고 있다. 더불어 수요 측면에 있어서 천연가스 시프트 및 메타네이션(Methanation: 수소와 CO2를 촉매를 통해 반응시켜 도시가스 원료의 주성분인 메탄을 제조하는 것) 등에 의한 가스의 탈탄소화 등을 추구하는 한편 나아가 가스의 탄력성 강화에도 대응하고 있다.

〈표 3-12〉 수소산업의 과제와 대책

	현상과 과제	향후 대책
이용  ①수소발전 터빈 ②FC트럭 ③수소환원 제철	①수소발전 터빈: 실기(実機)에서 실증 미완으로 상용화가 과제 -일본기업이 발전터빈의 연소기술(타기 쉬운 수준의 연소를 터빈 중에서 억제하는 기술)에서 세계적으로 선행 -잠재적 일본 국내 수소 수요: 약 500~1,000만톤/년	①수소발전 터빈: 선행적으로 시장을 기획·입안하고 아시아 등으로 수출 -세계시장 전망: 2050년 시점에 누적용량은 최대 약 3억 kW(터빈시장은 최대 약 23조엔) -실기에서의 안정 연소성 실증을 지

	현상과 과제	향후 대책
	<p>②정치용 연료전지: 상용화 완료, 순수소 연료전지도 포함한 보급 확대가 핵심</p> <p>-세계에 선구적으로 가정용 연료전지를 상용화하는 등 세계에서 기술을 선행. 수소를 직접연료로 사용하는 수소연료전지에 대해서도 판매 개시</p> <p>③수소 연료전지(Fuel Cell)트럭: 실기 실증 중으로 상용화가 과제</p> <p>-일본기업이 기업간 연합을 통해 세계에 선구적으로 승용차를 상용화한 식견을 활용하면서 개발중. 해외기업도 개발을 가속</p> <p>-잠재 일본내 수소 수요:약 600만톤/年</p> <p>④수소환원제철: 기술 미확립, 대량 나아가 저렴한 수소 조달이 과제</p> <p>-유럽의 철강업계도 포함해서 각국 기업이 기술개발을 실시중</p> <p>-잠재 일본내 수소 수요:약 700만톤/年</p>	<p>원하여 상용화를 가속화</p> <p>-전력회사의 탄소프리 전력의 조달 의무화와 거래시장의 활용. 재생에너지, 원자력과 나란히 탄소프리 전원으로써 수소를 평가하고 수소를 활용하면 인센티브를 받을 수 있도록 전력시장을 정비</p> <p>②정치용 연료전지: 한층 더 가치를 추구하고 생산설비 투자지원으로 사회 실장(実装)을 추진</p> <p>-세계시장 전망: 가정용 연료전지가 2050년 시점에서 약 150만대/年(약 1.1조엔)</p> <p>-한층 더 발전효율 및 내구성의 향상, 부품 수의 삭감 등 코스트 저감으로 이어지는 연구개발 추진</p> <p>-전력계통의 공급력·조정력으로써 활용하는 실증 등 연료전지가 갖는 잠재력을 최대한 활용 가능한 환경 정비를 실시</p> <p>-생산설비투자를 세제 등으로 지원함으로써 대량생산 및 코스트 삭감 촉진</p> <p>③FC트럭: 글로벌과 동시에 일본 국내시장을 발굴하고 해외에도 수출</p> <p>-세계시장 전망: 2050년 시점에 스톡으로 최대 1,500만대(약 300조엔)</p> <p>-FC트럭 실증에 따른 상용화의 가속, 전동화 추진의 일환으로 도입 지원책의 검토</p> <p>-수소스테이션 개발·정비지원, 규제개혁(수소탱크 승압)에 따른 코스트 삭감의 검토</p> <p>④수소환원제철: 글로벌 선구적 기술 확립</p> <p>-세계시장 전망(Zero Emission Steel): 2050년 시점에 최대 약 5억 톤/年(약 40조엔/年)</p>

현상과 과제		향후 대책
공급		<p>*Zero Emission: 생산활동에서 배출된 폐기물을 리사이클함으로써 매립처분량 제로를 지향하는 개념, 일본에서는 폐기물 및 온실효과가 스 배출량 제로 사회를 의미</p> <p>-수소환원제철의 기술개발 지원</p> <p>-에너지 소비효율 우수제품 도입 촉진</p> <p>-국제경쟁력 관점에서 국내외 일체의 산업정책으로써 국경조정 조치 검토</p>
	수송 등 ⑤ 액화수소 운반선 등	<p>⑤수소운반선 등: 세계에 선구적으로 상용화하고 기기·기술 등을 수출</p> <p>-세계시장 전망(국제수소거래): 2050년 시점에 약 5.5조엔/年(거래량: 최대 5,500만톤/年)</p> <p>-나아가 수소 코스트 저감에 이바지하는 대형화를 실증 및 수요창출에 지원하여 2030년까지 상용화(2030년 30 엔/Nm³ 공급 코스트 목표 달성)</p> <p>-관련기기(액화수소운반선에서 수입기기로 수소를 이동시키는 로딩팜 등)의 국제 표준화</p> <p>-해외에서의 적출항 정비에 대한 출자 검토 및 일본내 항만의 기술기준 보완 등의 검토</p>
	제조 ⑥ 수전해 장치	<p>⑥수전해장치: 유럽기업이 대형화 기술 등에서 선행</p> <p>-일본 기업은 세계 최대급의 수전해장치를 건설하는 동시에 요소기술에서도 세계 최고 수준의 기술을 보유</p> <p>-그러나 보다 대형화를 위한 기술개발에서는 유럽 등 타국 기업이 앞서 있음</p> <p>⑥수전해 장치: 재생에너지가 저렴한 해외시장에 수출하고, 그것을 일본 국내로 도입</p> <p>-국제시장 전망: 2050년까지 매년 평균 88GW分(약 4.4조엔/年) 도입이 최대치로 예상</p> <p>-대형화 및 요소기술의 제품 실장(実装)을 통한 원가절감으로 국제경쟁력 강화</p> <p>-해외시장으로의 진입장벽을 낮추기 위해 유럽 등과 동일 환경하에서 수전해장치의 성능평가를 일본 국내에서 실시(유럽은 일본보다 장치內 수소를 고압화)</p>

현상과 과제		향후 대책
		-일시적 수요 확대를 적절히 평가하여 잉여 재생에너지의 저렴한 전력 활용 촉진

출처: 経済産業省(2021.6, p.36~37), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(概要)

## (6) 원자력

### ① 원자로의 종류

원자로(nuclear reactor)는 핵분열에서 발생된 에너지를 추출하여 동력으로 사용하는 장치를 말한다. 원자로는 연료(fuel), 핵분열의 연쇄반응을 위해 중성자의 속도를 제한하는 감속재(moderator)와 생산된 열을 운반하기 위한 냉각재(coolant) 등으로 구성되어 있다. 냉각재는 원자력발전소의 원자로에서 핵분열이 일어날 때 열이 발생하는데 이 열에너지를 증기발생기로 전달하는 역할을 한다. 원자로는 냉각재에 따라 크게 3종류로 나뉜다. 냉각재로써 경수(보통의 물)를 사용하는 경수로 외에 중수를 사용하는 중수로(HWR: heavy water reactor)는 천연 우라늄이 연료로 사용되고 중수(heavy water:  $D_2O$ )가 감속재와 냉각재로 사용되는 원자로), 탄산가스나 헬륨가스를 사용하는 가스냉각로 등으로 분류된다.

일본의 상업용 원자력발전소의 역사는 영국으로부터 도입된 가스냉각로(GCR: Gas-Cooled Reactor)로 막을 열었다. 그 후 가스냉각로에 비해 콤팩트하면서 건설비가 저렴하고 개량 및 대형화도 기대할 수 있는 경수로로 이행하였다. 현재 일본에 있는 상업용 원자력발전소는 모두 경수로이다. 경수로에는 세계 원자력 발전의 중심이 되는 원자로로 비등수형 원자로(BWR: Boiling Water Reactor), 가압수형 원자로(PWR: Pressurized Water Reactor) 2종류로 분류된다. 그 밖에 연구개발 단계의 원자로로 냉각재에 나트륨을 사용하는 고속증식로(FBR: Fast Breeder Reactor)가 있다. 그런데 일본은 경수로의 안전성 및 신뢰성, 운전성 등을 국내 기술로 향상시켜 개량형 비등수형로(ABWR: Advanced Boiling Water Reactor)를 개발하였다. ABWR은 BWR(비등수 원자로)의 원자로 압력용기 외부에 설치된 원자로 재순환 펌프를 압력용기 안에 설치하고 펌프 주변의 배관을 없애고 단순화한 점이나 제어봉 구동 기구로써 수압 구동에 전동 구동을 추가한 점이 개량되었다.



## 한국의 원자로

한국에는 2종류의 원자력발전소가 건설되어 전력을 생산하고 있다. 최초 건설된 부산 고리 원자력 발전소를 포함해 영광, 울진 지역에 건설된 모든 원자로는 가압수형 경수로이며, 경주 월성 원자력발전소의 1호기부터 4호기의 원자로는 중수로이다.

## ② 세계 원자력발전의 동향

세계 최초의 원자력 발전은 1951년 미국에서 시작되었다. 그 후 1970년대 발생한 두 번의 석유 위기를 계기로 세계 각국에서 원자력 발전의 개발이 적극적으로 진행되었지만 1980년대 후반부터는 전 세계적으로 원자력 발전 설비용량의 신장률이 낮아졌다. 그러나 유한 자원인 화석연료의 확보를 둘러싼 국제경쟁의 완화 및 지구환경 대책을 위해 특히 아시아 지역에서는 원자력 발전 설비용량을 착실하게 증가시켜 왔다. 그러한 가운데 2011년 3월에 일본 동북지방 태평양 연안에 지진이 발생하여 후쿠시마 제1원자력발전소 사고가 일어났다. 사고후 안전성 대책 등을 위해 일본 전역의 원자력발전소가 운전을 정지함으로써 일본 원자력발전 전력량이 감소하였고, 아시아 지역 전체의 원자력발전 전력량도 감소하였으나 2014년에 다시 증가 추세로 전환하였다.

한편 미국이나 유럽에서는 원자력발전소의 신규 건설은 적었지만, 출력 증강 및 설비 이용률의 향상에 따라 발전 전력량은 증가하는 경향을 보였다. 설비 이용률을 예를 들면 미국에서는 1979년에 일어난 ‘Three Mile Island’ 원자력 발전소 사고 후 자주적인 안전성 향상 대응에 의거 민관에서 설비 이용률 향상을 추진한 결과, 최근의 설비 이용률은 9할 전후의 추이를 보이고 있다. 일본에서는 동일본대지진 이후 원자력발전소는 장기간 운전을 정지하고 있으며, 2015년 8월에 신규제기준\* 시행 후 처음으로 재가동한 큐슈전력의 센다이(川内) 원자력 발전소 1호기를 시작으로 2021년 12월까지 10기가 재가동하였지만, 설비 이용률은 아직 낮은 상태 그대로다. 그러나 에너지 수요가 급증하는 신흥국을 중심으로 원자력발전소의 신규 도입 및 증설 검토가 진행중에 있다.

## 원자력 신규제 기준 제정 배경

일본 원자력규제위원회는 원자로 설계를 심사하기 위해 새로운 기준을 마련 운용하고 있다. 신규제 기준(2013.7.8. 시행)은 동경전력 후쿠시마발전소 사고의 반성 및 국내외로부터의 지적을 토대로 책정되었다.

이전 기준의 주요 문제점으로는 ▶지진 및 해일 등의 대규모 자연재해의 대책이 부족하고 또

한 중대 사고대책이 규제 대상에서 빠져 있었기 때문에 충분한 대책이 이루어지지 못하였던 점  
▶ 새로운 기준을 책정하여도 이미 건설된 원자력시설을 소급해서 적용하는 법률상 근거가 없어  
최신 기준에 적합하게 요구할 수 없다는 점 등을 들 수 있지만 신규제 기준은 이러한 문제점을  
해소하기 위해 책정되었다.

이 신규제 기준은 원자력시설의 설치 및 운전 등의 가부를 판단하기 위한 것이다. 그러나 이  
것을 만족한다고 해서 절대적으로 안전성이 확보되는 것은 아니다. 원자력 안전에는 끝이 없고  
항상 보다 높은 수준의 것을 향해서 지속적으로 노력해 나갈 필요가 있다.

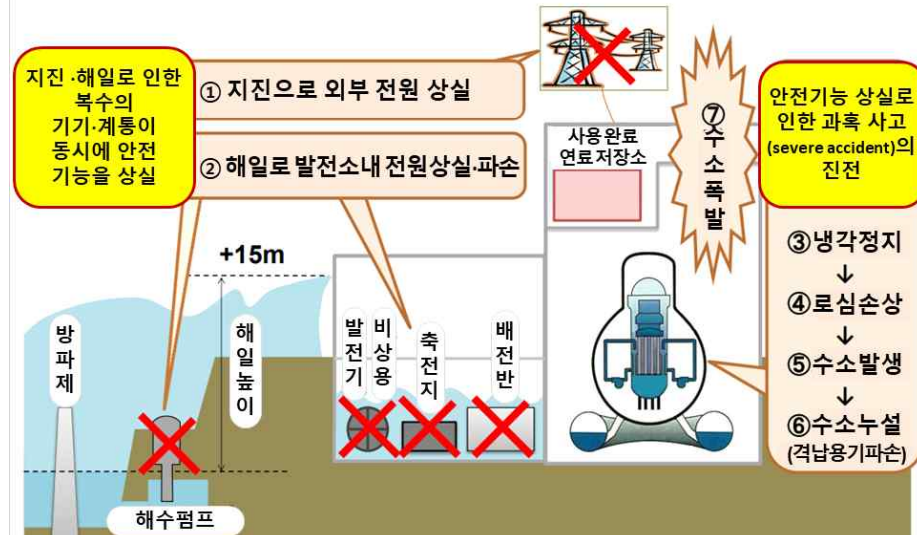
출처: 原子力規制委員会 HP, <https://www.nra.go.jp/activity/regulation/tekigousei.html>

### ③ 일본 원자력 발전의 동향

일본은 동경전력의 후쿠시마 제1원자력발전소 사고에 대한 반성이 원자력 정책의 출발점이라 인식하고, 그 무엇보다도 안전성을 모든 것에 우선하여 국민의 우려 해소에 전력을 다한다는 전제하에 ‘원자력규제위원회’를 통해 세계에서 가장 엄격한 수준의 규제기준에 적합하다고 인정받는 경우, 그 판단을 존중하고 원자력발전소의 재가동을 추진한다는 계획을 가지고 국가도 전면에서 발전소 입지 지자체 등 관계자의 이해와 협력을 얻고자 노력하고 있다.

후쿠시마 원자력발전소 사고에서는 지진 및 해일로 인한 복수의 기기·계통이 동시에 안전기능을 상실하였고, 또한 그 이후 과속사고(severe accident)로 의 진전을 멈추지 못해 피해가 더욱 가중되었다. 사고의 원인이 된 것은 원자력 발전소의 안전을 확보하기 위해 중요한 ‘정지’, ‘냉각’, ‘봉쇄’ 기능이 해일에 의해 상실되었기 때문이다. 사고 당시 지진의 흔들림을 감지한 운전중의 원자로로는 모두 정지하였고, 연료가 타는 것을 ‘정지’ 하는 기능은 작동하였지만, 지진에 의해 외부전원이 끊어지고 또한 해일에 의해 발전소 내부가 침수, 모든 전원과 원자로 냉각 기능이 작동하지 않았다. 더욱이 ‘냉각’ 기능을 잃은 원자로 내부가 고온으로 로심이 손상되었고 거기서 수소가 발생하였다. 그 수소가 원자로 건물 내에 폭발을 일으키고 말았고 방사성 물질이 발전소 밖으로 방출되어 ‘봉쇄’에도 실패하고 말았다.

〈그림 3-16〉 후쿠시마 제1원자력발전소 사고에 대한 교훈



출처: 資源エネルギー庁(2017.9.7) HP, 原発の安全を高めるための取組~新規規制基準のポイント  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/shinkijun.html>

〈그림 3-17〉 종래의 규제기준과 신규제기준과의 비교

종래의 규제기준	신규제기준
과속사고(severe accident)를 방지하기 위한 설계기준 (단일 기기의 고장을 상정하더라도 로심 손상에 도달하지 않는 것을 확인)	의도적인 항공기 충돌 대응
	방사성 물질의 확산 억제 대책
	격납용기 파손 방지 대책
	로심(爐心) 손상 방지 대책 (복수의 기기 고장을 상정)
	내부 일수(漏水)에 대한 고려(신설)
자연현상에 대한 고려	자연현상에 대한 고려 (화산·회오리·산림화재를 신설)
화재에 대한 고려	화재에 대한 고려
전원의 신뢰성	전원의 신뢰성
기타 설비의 성능	기타 설비의 성능
내진·내해일 성능	내진·내해일 성능

출처: 資源エネルギー庁(2017.9.7) HP, 原発の安全を高めるための取組~新規規制基準のポイント  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/shinkijun.html>

원자력의 사회적 신뢰 획득과 안전 확보를 대전제로 원자력의 안정적인 이용을 추진한다는 방침에 따라 안전 최우선으로 재가동 가속 TF를 출범, 인재·식전의 집약, 기술력 유지 향상을 위해 최선을 다하고 있다. 특히, 사용 완료 후의 연료 대책으로 저장능력의 확대를 위한 중간 저장시설 및 건식 저장시설 등의 건설·활용의 촉진, 방사성 폐기물의 용량 축소화·유해도 저감을 위한 기술 개발에 집중하고 있다. 핵연료 사이클에 대해서는 관련 지자체 및 국제사회의 이해를 득하고, 6개소 재처리공장의 준공과 조업을 위한 민관이 혼연일체로 대응, 플루써멀(Plutonium thermal use: 원자로에서 사용한 연료를 재처리하여 추출한

플루토늄과 우라늄을 결합한 혼합산화물연료(MOX: Mixed Oxide Fuel 연료)를 현재의 원자력발전소(경수로)에서 사용할 계획으로, 우라늄의 이용효율을 높이고 자원이 없는 일본에 있어서 중요한 에너지 정책)을 강력 추진하고 있다. 이러한 방침에 따라 홋카이도 2개 마을에서 착실한 문헌 조사 및 전국에 가능한 많은 지역에서의 조사를 실시, 안전성을 지속적으로 확보하고 장기 운전 추진을 통해 모든 문제에 대응해 나가면서 전력의 소비지역도 포함한 쌍방향으로 대화하고, 알기 쉽고 정중하게 홍보·폭넓은 의견 수렴 등 대국민 이해를 위해서도 노력하고 있다.

원전 입지 지자체와의 신뢰 관계 구축을 위해 입지 지자체와의 정중한 대화를 통한 인식의 공유·신뢰 관계의 심화, 지역 산업의 복선화 및 신산업·고용의 창출도 포함, 입지 지역의 미래상을 함께 그리는 프레임워크 등을 마련하여 실태에 즉시 지원하고, 2030년까지 민간의 창의력 및 지혜를 활용해가면서 국제 연계를 활용한 고속로 개발을 착실하게 추진, 소형모듈로 기술의 국제 연계에 따른 실증, 고온가스로에 있어서 수소 제조와 관련한 요소기술 확립 등을 추진하는 동시에 ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor: 국제열핵융합실험로) 계획 등 국제 연계를 통해 핵융합 연구개발로 대응을 착실하게 추진하고 있다.

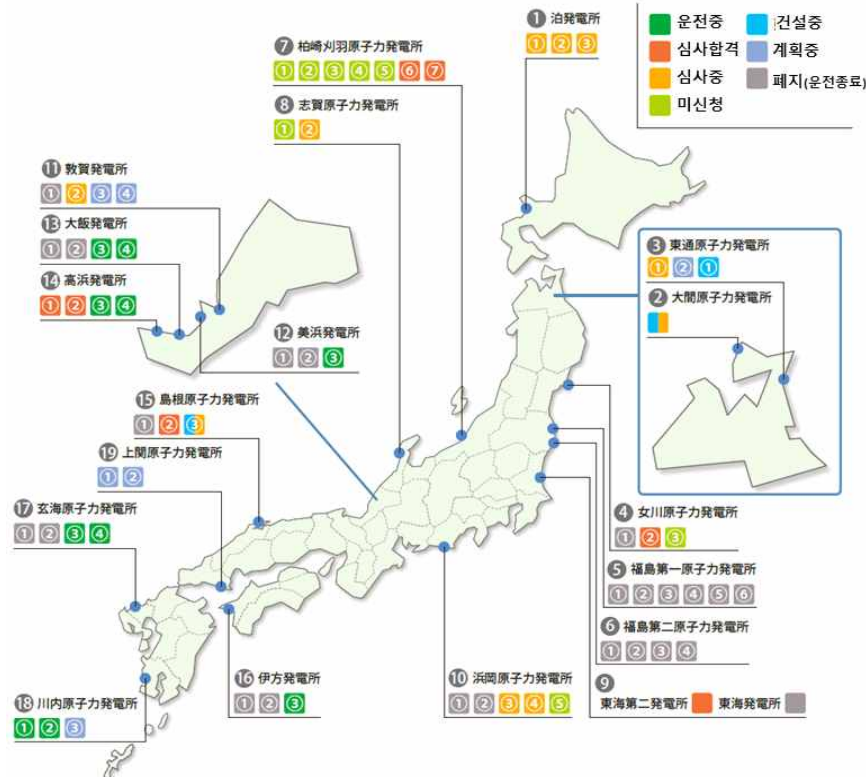
#### 미·일 원자력 협력 협정

일본의 원자력 개발은 미국의 협력을 통해서 추진되어 왔다. 1955년 미국에서 일본의 농축우라늄을 대여하기 위해 미·일 원자력 연구 협정에 조인, 일본에 처음으로 연구용 원자로가 도입되었다. 1958년에는 미·일 동력 협정이 체결되어, 연구용 동력시험로(JPDR)에 필요한 농축우라늄의 공여를 약속하였다. 이 협정은 1958년, 1963년에 개정되어 협력 범위를 상업용 경수로의 도입까지 확대되었다.

현재 미·일 원자력 협력 협정은 1988년 7월에 발효되어, 원자력의 평화이용 및 핵불확산, 핵안보 확보 등을 국제적으로 확보하면서 원자력을 이용하는 체제를 강화하기 위해 중요한 역할을 담당해 왔다. 2018년 7월 17일에 30년의 유효기간을 맞이하였지만, 미·일 쌍방으로부터 통고가 없었기 때문에 자동 연장되었다. 그 이후로 유효기간을 설정하지 않고 있으며 미·일 어느 쪽이 문서로 통고하면 그로부터 6개월 후 종료된다.

출처: 日本原子力文化財団, 原子力総合パンフレット(2021年度版, p.20), 1章 日本のエネルギー事情と原子力政策

〈그림 3-18〉 일본 원자력시설(2021.12.10 현재)



출처: 日本原子力文化財団, 原子力総合パンフレット(2021年度版, p.24), 2章 原子力開発と発電への利用

일본의 원자력시설 현황(2021.12.10.)은 〈그림 3-18〉과 같다. 운전중인 발전소는 10기, 건설중인 발전소는 1기, 심사 합격한 발전소는 7기, 계획중인 발전소는 6기, 심사중인 발전소는 8기, 폐지(운전종료) 발전소는 24기, 아직 미신청한 발전소는 8기, 건설 및 심사를 동시에 진행중인 발전소는 2기로 나타났다.

원자력은 실용 단계에 있는 탈탄소의 선택지이며 일본 국내에서도 착실한 재가동의 진전 노력과 더불어 해외(미국·영국·캐나다 등)에서 추진하는 차세대 혁신로(爐) 개발에 높은 수준의 제조 능력을 보유한 일본기업도 연계해서 참가하여 다양한 원자력 기술 이노베이션의 가속화를 지속 추진하고 있다.

〈표 3-13〉 원자력산업의 과제와 대책

	현상과 과제	향후 대책
	자원 순환성의 향상이 필요	국제 연계를 활용 개발을 착실하게 추진
고속로	<ul style="list-style-type: none"> <li>원자력의 지속적인 이용에는 방사성 폐기물의 감량화·유해도 저감, 중 장기적으로는 자원의 유효 이용을 향한 기술개발 추진이 중요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>‘전략 로드맵’을 바탕으로, 예를 들어 21세기 중반 적절한 타이밍에 현실적인 규모의 고속로 운전개시를 기대하며, 이를 위해 2030년도 말경까지는 다양한 기술간 경쟁을 촉진. 일·프, 일·미 협력으로 효율적인</li> </ul>

	현상과 과제	향후 대책
	세계 각국에서 고속로 개발이 진전	개발을 추진 원자력연구개발기구가 보유한 데이터·시설을 최대한 활용
	<ul style="list-style-type: none"> <li>러시아는 실증로 운전 개시 완료, 중국도 실증로 건설중</li> <li>북미에서도 정부 지원을 받아 벤처 기업 등에 의한 고속로 개발 가속화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>건설·운전·보수 경험에서 축적된 데이터, 시설을 최대한 활용. ‘조요(常陽)’의 재가동을 위한 준비를 신속하게 추진</li> <li>* 조요(常陽): 원자력연구개발기구(JAEA)가 보유(茨城県東茨城郡大洗町)한 고속중식로의 실험로. 2007년 로(爐)내부 실험장치 파손으로 현재 가동 중지 상태</li> </ul>
	각종 요소기술의 개발이 필요	국제 연계 프로젝트 참가
	<ul style="list-style-type: none"> <li>해외에서 실증 프로젝트와 연계한 기본설계·개발</li> <li>일본기업 독자로 다양한 니즈를 연두에 둔 소형로를 자주 개발</li> <li>혁신적 기술의 안전성 및 경제성 검증</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2020년대말 운전 개시를 목표로 해외 실증 프로젝트와 연계한 일본기업의 대책에 대해서 안전성·경제성·서플라이체인 구축·규제 대응을 염두에 두고 지원을 수행</li> <li>해외에서 선행되는 규제정책을 토대로 기술개발·실증에 참가</li> <li>일본기업이 프로젝트의 주요 플레이어로서 참가하여 탈탄소 기술인 SMR의 안전성 실증에 공헌. 주요 공급사 지위를 획득. 2020년대말 해외에서의 첫 SMR 개발후 해외 연제로 글로벌 전개와 양산체제를 확립</li> </ul>
소형로 (SMR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>안전성은 미·영·캐나다에서 인허가 취득을 향한 프로세스가 진행 중</li> <li>경제성은 양산화로 추구</li> </ul>	
	개발·운전 노하우의 축적과 실용화 규모의 확장이 필요	HTTR을 활용한 시험·실증 등
	<ul style="list-style-type: none"> <li>고온공학시험연구로(HTTR)로 950℃(세계 최고수준)·50일간 고온 연속운전을 달성(JAEA), 안전성을 실증</li> <li>일본기업이 수소 제조·발전 열전병급(熱電供給_Combined Heat &amp; Power 또는 Cogeneration: 열원으로부터 전력과 열을 생산하고 공급) 플랜트, 축열 가능한 발전용 고온가스로 등을 개발 중</li> <li>고온가스로와 수소 제조시설과의 접속 기술의 확립이 필요</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>HTTR을 활용하고 안전성의 국제실증에 더해 2030년까지 대량 또한 염가의 카본 프리 수소제조에 필요한 기술개발을 지원</li> <li>안전성·경제성·서플라이체인 구축·규제 대응을 염두에 둔 개발 지원을 수행하면서 기술개발·실증에 참가. 해외의 선행 프로젝트의 상황을 토대로 해외 공동 프로젝트를 조성</li> <li>일본 규격기준 보급을 향한 타국 관련기관과의 협력을 추진</li> </ul>
고온가스로		
핵융합	일본 국내 시설을 통한 연구개발 및 핵융합 실험로(ITER) 건설을 향한 제조·	ITER 계획 등의 착실한 추진

	현상과 과제	향후 대책
	시험, 각종 요소기술의 개발이 필요	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>플라즈마 제어기술의 고도화를 향한 시험 실시</li> <li>ITER 본체의 조립·설치 개시. 코일 등 주요 기기를 일본에서 납품</li> <li>안전하고 안정 가동 가능한 핵융합 원형(原型)로의 설계</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ITER 계획을 시작한 국제 공동 기술개발 및 장래 원형로 건설계획을 향한 대책을 통해서 주요 기기의 실증과 출력 장시간 유지기술을 확립. 일본 핵융합 원형로의 건설계획에 반영</li> <li>2030년경의 실용화를 지향하는 미·영의 벤처와 일본의 벤처회사 등이 연계를 가속화</li> <li>핵융합로의 고온열을 활용한 카본 프리 수소 제조기술의 개발을 추진</li> </ul>

출처: 経済産業省(2021.6, p.45), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(概要)

#### ④ 일본의 2030년을 향한 원자력의 기본방침

후쿠시마 원자력발전소 사고의 반성과 교훈을 발판으로 CO2 배출삭감에 공헌하는 전원으로써 그 무엇보다도 안전성을 모든 것에 우선하여 국민의 우려 해소에 전력을 다한다는 전제하에서, 원자력규제위원회로부터 세계에서 가장 엄격한 수준의 규제기준에 적합한 경우에는 그 판단을 원자력발전소의 재가동을 추진하고 있다. 정부도 전면에서 서서 발전소 입지 지자체 등 관계자의 이해와 협력 얻을 수 있도록 대응하고 있다. 이러한 방침하에 전원 구성에서는 지금까지의 에너지 믹스로 제시한 20~22% 정도를 예측하고 있다.

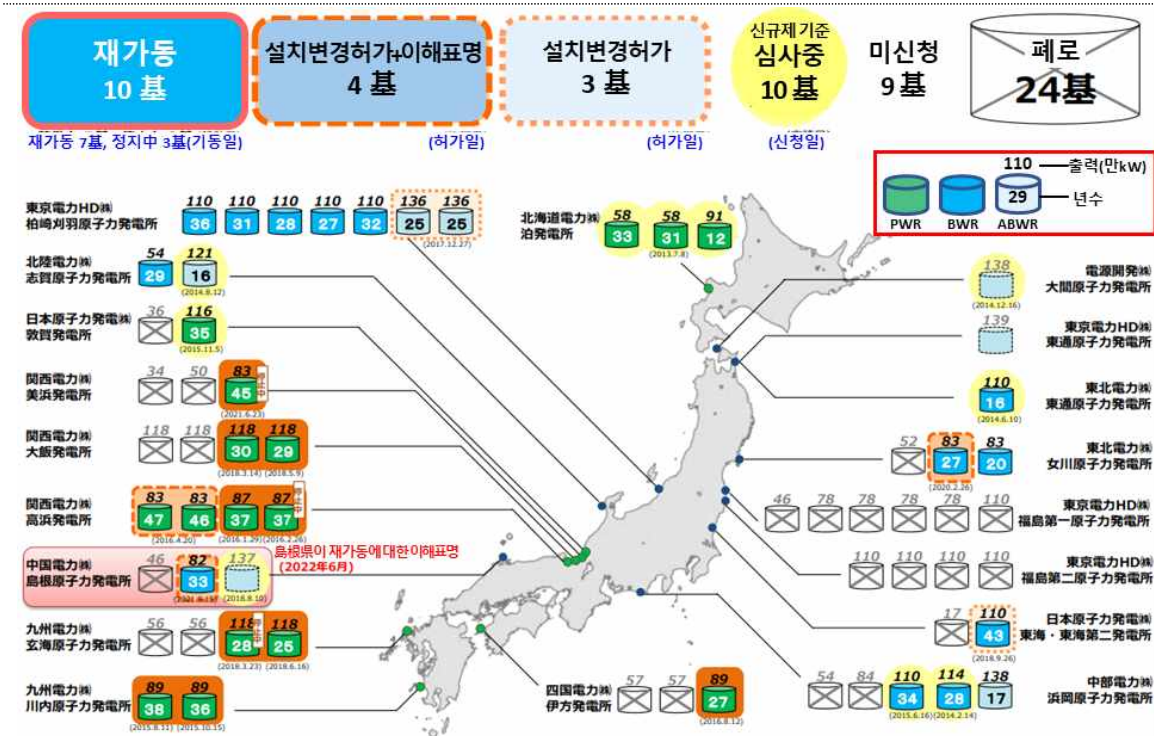
〈표 3-14〉 원자력 에너지의 특성

	특성
①안정공급 (Energy Security)	<ul style="list-style-type: none"> <li>우수한 안정공급성과 효율성(연료투입량에 대한 에너지 출력이 압도적으로 크고, 수년에 걸쳐 국내 보유 연료만으로 생산이 유지 가능한 순 국산 에너지원)</li> <li>+ 높은 기술 자급률(일본 국내 서플라이체인을 유지)</li> <li>+ 회복력 향상에 공헌(회전전원으로써의 가치, 태평양측·동해측에 분산 입지)</li> </ul>
②경제효율성 (Economic Efficiency)	<ul style="list-style-type: none"> <li>운전 비용이 저렴</li> <li>연료가격 변동의 영향을 받기 어려움(수년에 걸쳐 일본 국내 보유량만으로 운전 가능)</li> </ul>
③환경적합 (Environment)	<ul style="list-style-type: none"> <li>운전시에 CO2를 배출하지 않음</li> <li>라이프 사이클 CO2 배출량이 적음</li> </ul>

출처: 資源エネルギー庁(2021.3.22, p.46), 核燃料サイクルの確立に向けた取組



〈그림 3-19〉 일본 원자력발전소의 재가동 현황(2022.8.9. 현재)

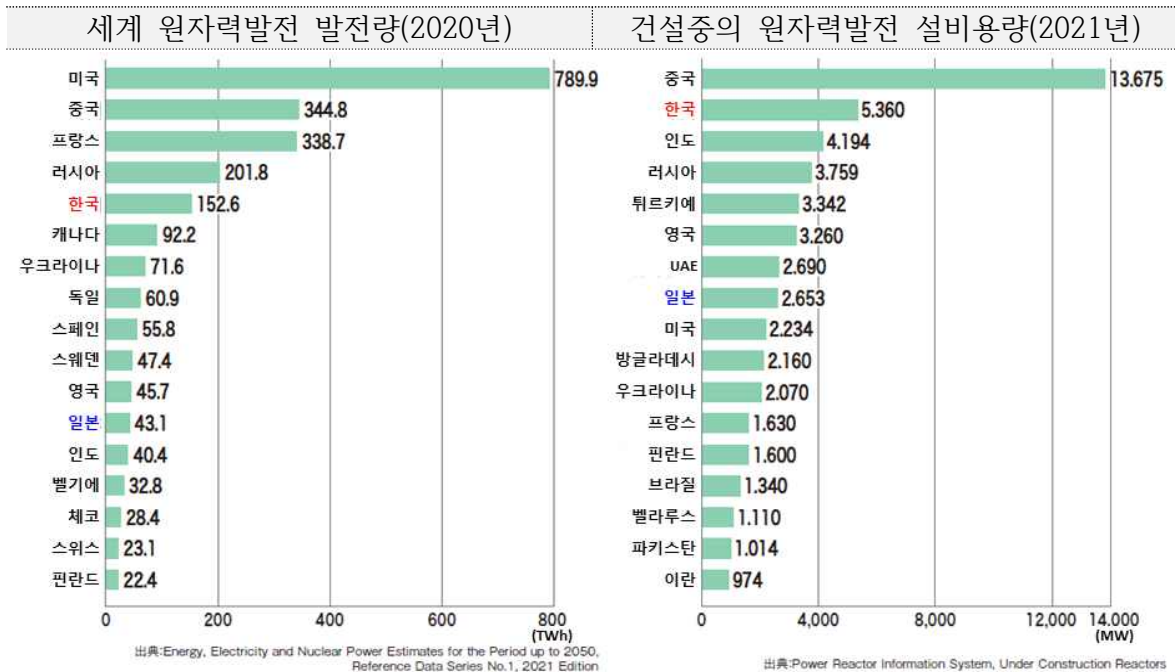


출처: 資源エネルギー庁(2022.8.9, p.23), 総合資源エネルギー調査会, 電力・ガス事業分科会, 原子力小委員会, 第29回会合(資料5), エネルギー・原子力に関する国内外の動向

에너지 믹스 실현을 향해 설비이용률의 향상 및 가동 40년을 넘는 발전소 운전도 포함한 안전 확보를 대전제로 원자력발전소 설치 지역의 이해를 구하면서 재가동을 추진하고 있다. 일본 원자력발전소의 현황(2022년 8월 9일 시점)을 살펴보면 재가동 10기, 설치변경 허가+지역의 이해표명 4기, 설치변경 허가 3기, 신규제기준 심사중 10기, 미신청 9기, 폐쇄 원자로 24기라고 경제산업성의 자원 에너지청에서 밝혔다.



〈그림 3-20〉 세계 원자력발전 「발전량 실적과 건설중의 발전설비용량」



출처: 日本原子力文化財団, 原子力総合パンフレット(2021年度版, p.19), 1章日本のエネルギー事情と原子力政策

2020년 기준 원자력발전의 발전량 실적을 보면 상위로부터 미국, 중국, 프랑스, 러시아, 한국 등의 순으로 나타났다. 특이점은 중국이 프랑스를 제치고 2위로 부상했다. 또한, 2021년 건설중인 원자력발전 설비용량에서도 압도적으로 중국이 많은 것으로 나타났고, 한국 그리고 인도 러시아 순으로 그 뒤를 잇고 있는데, 인구에 비례하여 향후 에너지 수요증가가 예상되는 인도가 3위를 차지하고 있다. 2050년을 향한 각 에너지와 관련한 주요 방향성은 아래와 같다.

- ▶ 재생가능 에너지는 주력 전원화를 철저히 하여 최우선으로 대응, 국민부담의 억제와 지역과의 공생을 도모하면서 최대한 도입을 촉진한다. 도입에 있어서는 계통 용량의 확보 및 계통 혼잡의 완화, 탈탄소화된 조정력의 확보 등의 과제에 대응한다.
- ▶ 원자력발전은 현재 상황에서 실용 단계에 있는 ‘탈탄소화’의 선택지이지만 사회적 신뢰회복이 불가결하다. 인재·기술·산업기반 강화에 착수하여 안전성·경제성·기동성에 우수한 원자로의 추구, 폐로 및 폐기물 처리·처분 등의 핵연료 사이클 최종 단계의 문제 해결을 위해 기술개발을 추진할 계획이다.
- ▶ 화력발전의 탈탄소화는 현재 상황에서 화력발전은 재생가능 에너지의 변동성을 보완하는 조정력으로써 중요한 기능을 계속 유지하면서 안정공급을 지속적으로 확보하면서, 연료 그 자체를 수소·암모니아로 전환시키는 것이나 배출된 CO2를 회수·저류·재이용함으로써 탈탄소화를 추진해 갈 예정이다.

세계 각국의 원자력발전량(2020년)은 미국이 780.9 TWh로 1위이며 그 다음으로는 중국 344.8 TWh, 프랑스 338.7 TWh, 러시아 201.8 TWh 순으로 한국은 152.6 TWh로 5위, 일본은 43.1 TWh로 12위를 차지하고 있다. 또한, 건설중인 원자력 발전 설비용량(2021년)을 보면 중국이 13,675 TWh로 1위에 올랐고 한국은 그 뒤를 이어 5,360 TWh로 2위를 차지하였고, 일본은 2,653 TWh로 8위에 랭크되었다.

### 〈그림 3-21〉 세계 각국의 원자력 정책

(운전중 기수 (2021.1 현재)/각국 총발전 전력량에서 차지하는 원자력의 비율(2020년 실적치))

 <b>한국, 24기/29.6%</b>	 <b>미국, 94기/19.7%</b>
<p>2035년 원자력발전 비율을 29%로 계획했지만 (2017. 5) 정부의 탈원전 정책 선언으로 이미 건설 허가가 난 2기에 대해서는 건설준비작업을 재개하는 한편, 그 외 신설계획은 전면 백지화하고 운전기간 연장도 불인정을 표명 (2017.12) 국무회의에서는 2030년 원자력 비율을 23.9%까지 삭감하기로 방침을 결정 (2018. 6) 1기의 조기 폐쇄와 4기의 건설계획 중지를 결정 (2019. 6) 원자력발전을 단계적으로 축소키로 방침을 정하였지만, 동년 8월에 1기의 영업운전을 개시하여 설비용량은 과거 최대를 기록 (2020.12) 발표된 전력공급 기본계획에서는 2034년 발전 설비용량에 대한 원자력 비율을 10.1%까지 삭감하기로 함</p>	<p>운전중의 원자력발전소가 94기로 기수·출력 세계 최고 규모 (2021. 3) 91기가 운전기간을 60년으로 하는 연장을 인정받고, 4기는 연장신청 예정. 또한, 인가를 받으면 80년 운전도 가능하게 되어 현재 10기가 80년 운전을 위한 2번째 운전기간 연장신청을 하였고, 3기가 연장신청을 할 예정 (2019.12) 최초 2기가 인가를 받음 (2020. 3) 2기가 운전기간 연장 인가를 받음 (2021. 1) 새로운 바이든 정권이 출범하였지만 바이든 대통령도 기후변동대책의 관점에서 원자력을 중시하는 방침을 보이고 있음</p>
 <b>영국, 15기/14.5%</b>	 <b>대만, 4기/12.7%</b>
<p>2007년 에너지백서에서 원자력발전소의 신규 건설을 향한 정책 측면에서 지원방침을 표명하고 체제 정비 및 일정 등을 정함 (2011. 7) 신설 후보 사이트를 나타내는 국가정책성명서를 승인 (2013.12) 제정한 에너지법에서는 원자력발전으로의 적용을 포함한 저탄소발전 전력의 고가격매입제도의 실시를 규정 (2021. 3) 3곳의 신설계획 진행 중</p>	<p>2005년 이후 신규 건설없이 기존로 40년간 운전후 2018~2024년에 폐로하는 방침을 표명 (2017. 1) 의회가 2025년까지 모든 원자력발전소 정지를 포함한 전기사업법 개정안 가결, 그러나 동년 8월 대만 각지에서 대규모 정전이 발생 산업계가 안정적인 전력공급을 요구 (2018.11) 민공(公)투표 결과, 해당 조문 삭제 (2021.12.18) 동결된 발전소의 건설 재개 가부를 묻는 주민 투표에서 다수의 반대로 부결</p>

 <b>프랑스, 56기/70.6%</b>	 <b>인도, 22기/3.3%</b>
<p>2014년 올란드 대통령이 이끄는 사회당 정권이 원자력 발전비율을 2025년까지 50%까지 인하, 현행 발전용량을 상한으로 하는 내용의 '에너지전환법안'을 표명</p> <p>(2015) 정식 법률로 제정</p> <p>(2017) 마크롱 정권하에서 원자력 비율 인하 목표 연차 연기가 결정</p> <p>(2019) 목표 시기를 2035년으로 연기하는 방침 표명. 원자력안전기관(ASN)은 운전개시 40년을 맞아 90만kW급 원자로에 대해 안전성 향상정책 등을 조건으로 50년 운전 인가 결정</p>	<p>(2007. 7) 미국과의 민생용 원자력 협력에 관한 양국간 협정교섭에 실질 합의. 원자력 공급국 그룹이 핵무기 불확산 조약 비체결국 인도와 예외적으로 원자력 협력을 수행 결정하고 국제 원자력 기관에 의한 보장 조치협정 승인 등을 거쳐 발효(2008.10)</p>
 <b>독일, 6기/11.3%</b>	 <b>러시아, 34기/20.6%</b>
<p>2002년 성립한 개정 원자력법에 의거 19기의 원자로를 2020년경까지 모두 폐지기로 하였으나, 2009년 연방의회 총선거에서 '탈원자력 정책'이 재검토되어 익년 운전연장을 인가하는 법안을 각의에서 결정. 그러나 후쿠시마 제1원자력발전소 사고 이후 연립정권은 탈원자력을 추진하는 입장으로 전환</p> <p>(2011. 8) 17기를 단계적으로 폐지하는 법안 시행, 그로 인해 8기가 즉시 폐쇄되었고, 남은 9기는 2022년까지 순차 폐쇄될 예정으로 2021년 3월 현재 운전중인 발전소는 6기</p>	<p>1986년 체르노빌 원자력발전소 사고 이후 신규 건설이 중단되었으나, 그 후 적극적으로 추진</p> <p>(2001) 새로운 원자력발전소가 운전을 개시, 2021년 초 기준으로 7기를 건설중에 있으며 14기는 계획 중</p> <p>(2009.11) 정부로부터 승인된 '장기 에너지 전략(2030년 전략)'에서는 원자력의 발전 비율을 2008년 16% 조금 넘는 상황에서 2030년에는 20% 가까이까지 인상되었고 발전량을 2.2~2.7배로 증대할 것으로 상정. 또한, 원자력 수출도 추진</p> <p>(2021. 3) 해외에서 35개 건설 프로젝트가 진행 중</p>
 <b>중국, 48기/4.9%</b>	
<p>2007년에 2020년까지 원자력발전 시설용량을 4,000만kW까지 확대 계획을 표명</p> <p>(2011. 3) 안전 확보를 전제조건으로 효율적인 원자력 개발 추진 방침을 천명, 2013년 공표한 계획에서 2020년의 설비용량을 5,800만kW(2013년 시점 1,500만kW)로 목표 제시</p> <p>(2018) 7기가 영업운전을 개시함으로써 일본을 제치고 세계 제3위 원자력발전 대국으로 성장하면서, 10년 후 세계 원자력 표준화에서 중국이 주도적인 역할을 다한다는 목표를 표명</p> <p>(2019) 3기가 영업운전 개시</p> <p>(2020. 9) 중국이 개발한 제3세대 원자로를 채용하는 4기의 건설을 승인</p>	
<p>출처: 日本原子力文化財団, 原子力総合パンフレット(2021年度版, p.22), 1章日本のエネルギー事情と原子力政策, &lt;参考&gt;世界の原子力発電の状況</p>	

## (7) 지열

지열은 오랫동안 전 세계 사람들의 생활을 지탱해 왔다. 유명한 로마제국의 카라칼라(Caracalla) 대욕장을 시작으로 일본에서는 시코쿠(四国)의 도고(道後) 온천이 최초의 온천으로써 ‘일본서기’에도 기술되어 있다. 개발이 진행되고 있는 재생가능 에너지 가운데에서도 특히 유망시 되고 있는 것이 지열발전이다. 환태평양 화산지대에 위치하는 일본은 약 200개의 화산이 존재하여, 대지에 잠들어 있는 풍부한 지열 자원에 둘러싸여 있다. 이러한 지리적 혜택을 바탕으로 지열에 의한 ‘발전’이 시작된 것은 20세기 초반부터이다.

일본의 지열발전 역사는 1919년에 해군 중장 야마노우치 마사지(山内万寿治)가 오이타현 벳부(別府)시에서 분기공 굴삭에 처음으로 성공한 것이 시작이었다. 그 후 사업을 계승한 동경전등(주) 연구소장 타치카와 헤이지(太刀川平治)가 1925년에 일본 최초 지열발전(출력 1.12kW)에 성공하였다. 그로부터 제2차 세계 대전이 끝날 때까지 큰 진전은 없었다.

종전 후 전력의 안정공급이라고 하는 커다란 과제를 안고 있었던 일본은 수력 및 대형 화력 건설을 추진함과 동시에 지열의 실용화를 향한 조사·연구개발에도 힘을 쏟았다. 그 노력이 1966년에 드디어 결실을 맺었다. 일본 최초의 본격적인 지열발전소로서 증기탁월형의 이와테현 마츠카와(松川)지열발전소(23,500kW)가 운전을 개시, 그 다음 해에는 열수탁월형의 오이타현 오타케(大岳)발전소도 조업을 시작하였다. 이 두 발전소의 성공으로 지열개발은 크게 진전되었다. 또한, 일본 최초의 상업용 발전소인 마츠카와 지열발전소의 영업개시(1966.10.8.)로부터 50주년을 기념하기 위해 일본은 2016년에 10월 8일을 ‘지열발전의 날’로 제정하였다.

1970년대 두 차례 석유위기를 계기로 석유대체에너지정책(선샤인계획)에 힘입어 지열 자원개발은 급속하게 확대되었다. 동북·큐슈지역을 중심으로 발전소 건설이 이어져 1996년에는 지열설비의 인가 출력 50만kW를 달성하였다. 그러나 그 이후 석유 가격의 안정화와 일본 에너지 정책의 전환 등으로 인해 지열발전은 큰 변동이 없는 시대를 맞이하게 되었다.

동일본 대지진으로 인한 심각한 에너지 위기를 계기로 고정가격매입제도(FIT)가 개시되는 등 재생가능 에너지 도입 확대의 분위기가 고조되었다. 더불어 지열 자원개발을 촉진하기 위한 규제 완화도 진행되고 있다. 지열발전으로의 기대가 높아지는 가운데 대규모 지열발전소로서 23년 만에 이와테현 마쓰오하치만타이(松尾八幡平) 지열발전소(7,499kW)가 2019년 1월에, 아키타현 와사비자와(山葵沢地)

지열발전소(46,199kW)가 동년 5월에 운전을 개시하게 되었다.

〈표 3-15〉 세계 지열발전의 역사

1900년대	이탈리아	세계 최초의 지열발전소 탄생
	1904년 이탈리아 라데렐로(Larderello) 지방에서 세계 최초의 지열발전(0.56kW) 실험에 성공했다. 이를 토대로 1913년에 세계 최초의 증기탁월형* 지열발전소가 조업을 개시(250kW). 그 후 제2차 세계대전으로 재해를 입었지만 재건되어 현재도 전력 및 열공급으로 지역사회에 크게 공헌하고 있다.	
1950년대	뉴질랜드	열수탁월형의 지열 발전을 개시
	제2차 세계대전 중에 이탈리아 라데렐로에 주둔하고 있던 뉴질랜드 병사가 지열발전의 경험을 가지고 귀국, 1958년 뉴질랜드 와이라케이(Wairakei)에서 세계 최초의 열수탁월형 지열발전소를 조업. 기수분리기 개발에 성공함으로써 전 세계에 지열발전소의 가능성을 보여주는 시발점이 되었다. 일본에서는 1967년에 오타케발전소가 이 기술을 처음으로 도입하였다.	
1970년대	아이슬란드	세계 유수의 지열 대국으로 성장
	석유위기를 계기로 정부 주도로 재생가능 에너지로의 전환을 강력하게 추진하였다. 1977년 스바르젠기(Svartsengi) 지열발전소를 시작으로 총 7개소의 지열발전소를 건설하였다. 현재 자국내 전원의 거의 100%를 재생에너지로 그 가운데 지열발전이 약 30%를 조달하는 세계 유수의 지열 대국으로 성장하였다.	
1990년대	미국	저류층의 '재생기술' 확립
	1960년 세계 최대의 지열 지대로 더 가이저스(The Geysers) 지열발전소를 건설한 이래 순조롭게 지열 발전을 하고 있는 미국. 더 가이저스 지열발전소에서는 1980년 중반부터 증기의 감쇄로 인한 발전량의 저하가 발생하였다. 이것을 해결하기 위해 1997년 생활 배수의 처리수를 지열 저류층에 주입하는 '재충전(recharge)'을 실시. 그 후 발전 능력을 회복하였다.	
2010년대	인도네시아·튀르키예·케냐	지열발전 설비능력의 현저한 증강
	최근 인도네시아, 튀르키예 및 케냐에 있어서 지열발전이 현저하게 신장하였다. 이들 국가에서는 자국의 풍부한 지열 자원을 배경으로 경제 성장과 더불어 전력수요의 증가에 대응하고, 지구온난화 방지에도 배려한 지열 발전을 국가 정책으로써 빠르게 확대시키고 있다. 향후에도 이러한 경향은 이어져 세계 지열발전 대국의 수는 점점 더 증가할 것이다.	

\*증기탁월형: 온천이나 수증기 따위가 분출되는 지열 지역 가운데 지열수보다 증기가 더 탁월한 특성을 나타내는 곳. 열수탁월형은 증기보다 지열수가 더 탁월한 특성을 갖는 지열계

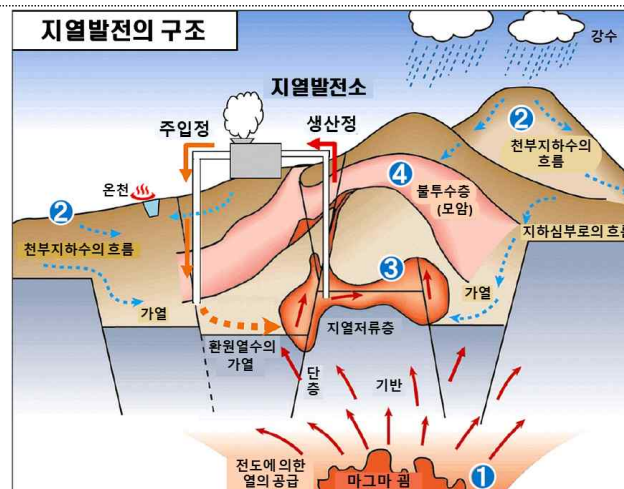
출처: 独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構 HP,

<https://geothermal.jogmec.go.jp/information/history/history.html>

마그마의 열을 전기로 변환하는 지열발전은 화산의 바닥 마그마의 열로 데워진 지하의 고온고압의 증기·열수를 이용해서 발전하는 방법으로 지열발전이 성립하기 위해서는 열(마그마), 물(강수), 용기, 덮개 등 다음 4가지의 조건이 필요하며 지열발전의 구조는 〈그림 3-22〉와 같다.

- ① **마그마 챔(magma chamber)**: 열원이 되는 마그마(지구의 지각에서 나오는 용암)가 켜진 곳으로 주위의 암반에 열에너지를 전달한다.
- ② **비나 하천의 물 공급**: 우수 및 하천수가 지하로 스며들어 마그마 챔의 주위에 있는 암반의 열에 의해 고온의 증기나 열수가 된다. 수소와 산소로 구성된 액체로 100℃에서 증기가 되며 물은 지구 내부의 열을 이동시킨다.
- ③ **지열저류층**: 고온의 증기나 열수는 캡록 아래에 갇혀서 지열저류층을 형성한다. 여기에서 생산정을 통해 증기를 뽑아내거나 터빈을 돌려 발전한다.
- ④ **불투수층(cap rock)**: 고온의 증기나 열수를 가두어 두기 위한 덮개 역할을 하고 있다.

〈그림 3-22〉 지열발전의 구조



출처: 日本地熱協會(2021.1.14, p.2), 2020年度地熱發電・熱水活用(研究会第5回), 地熱發電の現況と課題

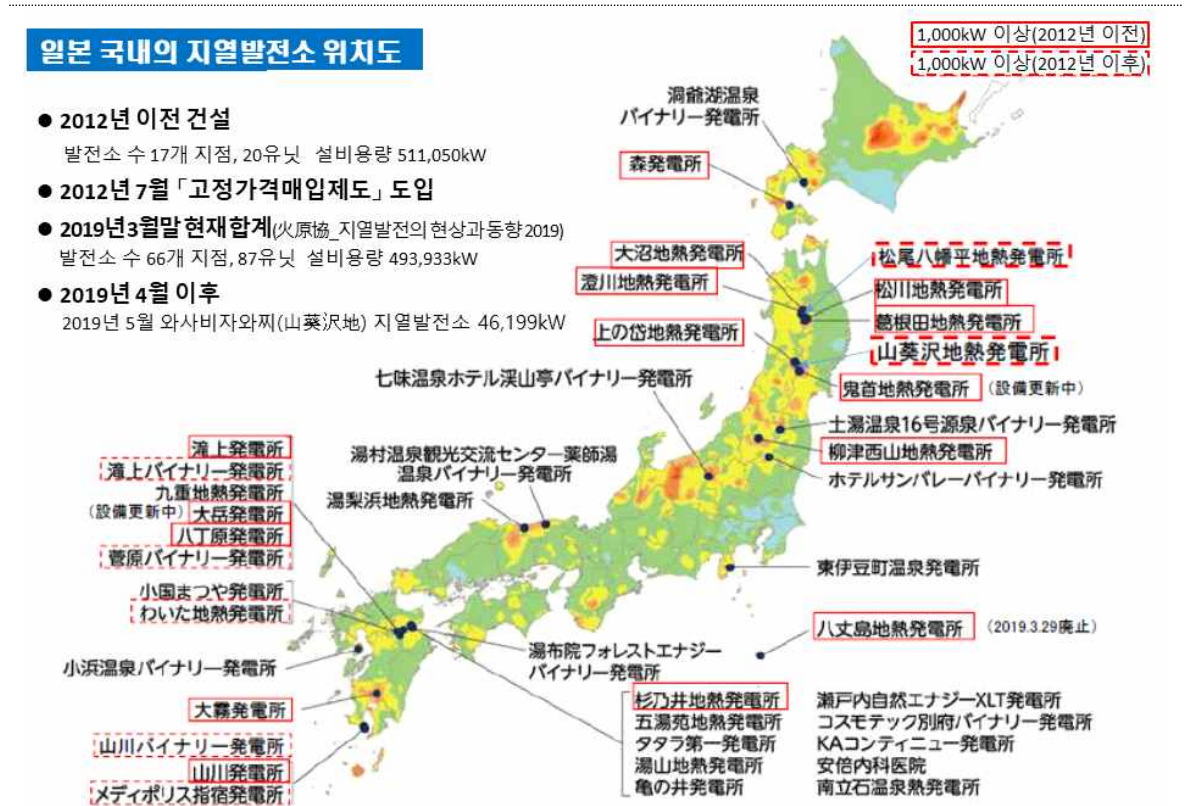
일본의 지열발전 특징은 ①세계 최고수준의 기술을 보유한 순수 국산 그린 고이용률 안정 전원으로 산간지역의 지자체에 공헌하고 재해에 강한 분산형 전원, ②50년이 넘는 장기 설비수명으로 장기적으로 생각하면 저렴한 전력을 공급 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 시간을 가지고 지역 지자체의 이해를 얻으면서 보이지 않는 지하를 조사하는 과정에서 서서히 발전출력의 예측이 가능하기 때문에 사업 계속의 예견성이 불투명하다는 우려도 존재한다. 그렇기 때문에 개발에 이르는 리스크를 최소한으로 하는 사업자의 보다 깊은 연구가 요구되고 그것을 지원하는 국가 시책이 필요하다. 일본은 재생가능에너지로의 전환을 위해서 지열발전에 크게 기대하고 있다.

한편, 보이지 않는 지하의 증기·열수를 찾는 지열 자원개발에는 다양한 리스크나 과제가 동반된다. ‘JOGMEC’는 이러한 문제를 해소하기 위해 재무



리스크의 저감 및 기술개발, 지역사회의 이해 축진을 향한 지원을 통해 지열발전의 보급 확대에 공헌하고 있다.

〈그림 3-23〉 일본의 지열발전소 현황(2020년말 현재)



출처: 日本地熱協会(2021.1.14, p.4), 2020年度地熱発電・熱水活用(研究会第5回), 地熱発電の現況と課題

#### JOGMEC

독립행정법인 에너지·금속광물자원기구(JOGMEC: Japan Oil, Gas and Metals National Corporation)는 일본의 자원·에너지 안정공급 확보를 사명으로 하고 자원의 탐사·개발 및 비축 등 자원과 관련한 다양한 활동을 수행하고 있다. 지열 자원 분야에 있어서 조사 및 탐사, 금융지원, 기술개발, 정보제공 등을 통해서 지열 자원 특유의 개발 리스크나 코스트 삭감을 추진하면서 일본의 지열 자원개발을 촉진하고 있다.

일본의 지열발전소는 화산이나 지열지역의 분포에 따라 〈그림 3-23〉와 같이 동북과 큐슈에 집중되어 있다. 일본 전국 지열발전소의 발전설비용량은 약 54만 kW, 발전전력량은 2,472GW(2019년 9월 현재)로 일본 전력수요의 약 0.2%를 담당하고 있으며, 2030년까지는 이것을 약 3배로 확대해 나갈 확대 계획이다. 해외에서는 아이슬란드와 같이 전원의 거의 100%를 재생가능 에너지로 조달하고

그중에서 지열발전으로 약 30%를 공급하고 있는 지열 대국도 있다.

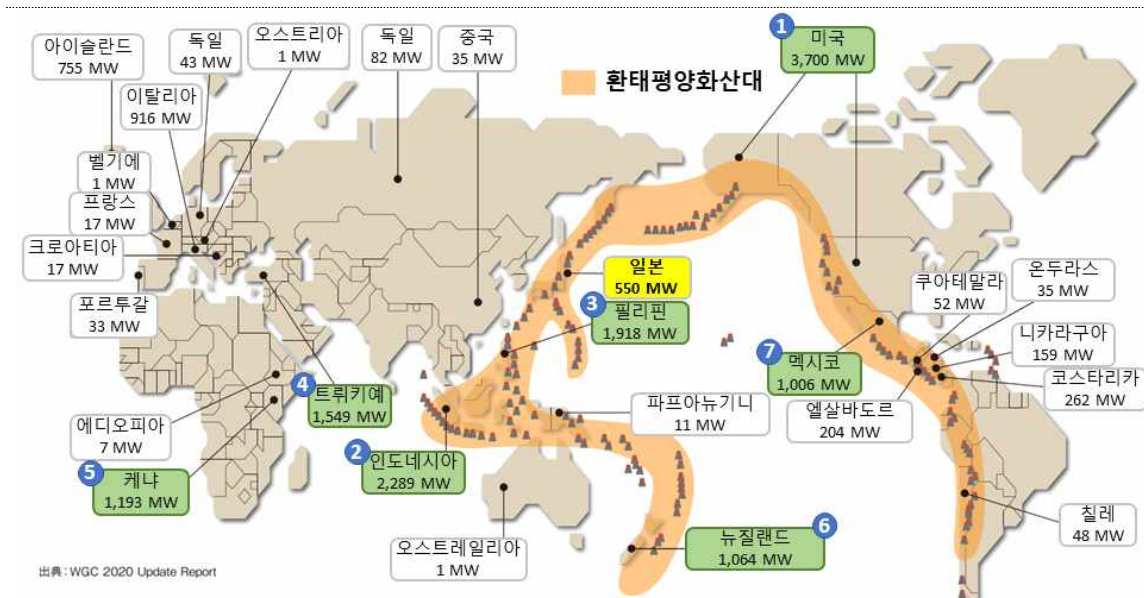
일본 국내 최대 발전소는 오이타현의 핫초바루(八丁原) 발전소로 11만kW이다. 일본의 최초 상업용 운전을 시작한 50년 이상의 역사를 자랑하는 이와테현의 마즈카와(松川)지열발전소를 비롯하여 2012년 이전에 건설된 발전소는 17개 지점, 설비용량은 511,050kW이다. 2019년 3월말 기준으로 발전소 수 66개 지점, 설비용량은 493,933kW이며, 그 이후 2019년 5월에 와사비자와(山葵沢)지열발전소 46,199kW가 신규로 건설되었다.

〈그림 3-24〉에서 보는 바와 같이 일본은 550 MW 규모이고 환태평양화산대를 중심으로 미국(3,700 MW), 인도네시아(2,289 MW), 필리핀(1,918 MW), 뉴질랜드(1,064 MW), 멕시코(1,006 MW) 순으로 나타나고 있으며, 그 외 지역은 튀르키예(1,549 MW), 케냐(1,193 MW) 등에서 1,000 MW 이상을 운영하고 있다.

세계 각국의 지열 자원량을 보면 세계 최대 규모의 지열지대(The Geysers Geothermal Area)를 보유한 미국이 제1위(3,000만kW), 다수의 화산섬이 있는 인도네시아가 제2위(2,800만kW), 이어서 일본은 세계 3위(2,300만kW)에 자리하고 있는 세계 유수의 지열 자원국이라 할 수 있다.

또한, 세계 각국의 지열발전 설비용량의 변화를 살펴보면 세계 제1위 미국은 2010년 이후 계속 증가 추세에 있으며, 그 외에도 최근 인도네시아, 뉴질랜드, 아이슬란드, 튀르키예, 케냐에 있어서도 지열개발이 현저하게 신장하고 있다. 일본은 2015년에 케냐에 추월당하면서 2020년 세계 제10위까지 밀려났다.

〈그림 3-24〉 세계 각국의 지열발전 설비용량(2020년 현재)



출처: 独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構(2020.9, p.3), 地熱



〈표 3-16〉

세계 각국 주요 지열자원량

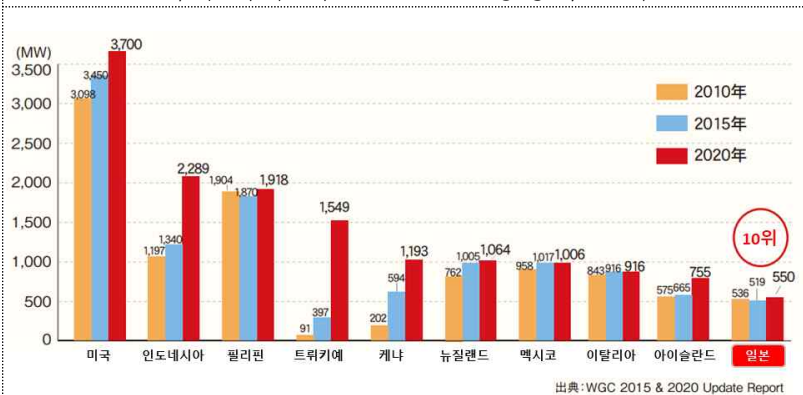
순위	국가	자원량 (만kW)
1	미국	3,000
2	인도네시아	2,779
3	일본	2,347
4	케냐	700
5	필리핀	600
6	멕시코	600
7	아이슬란드	580
8	뉴질랜드	365
9	이탈리아	327
10	페루	300

※1만kW=10MW, 1MW=1,000kW

출처: 独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構(2020.9, p.3), 地熱

〈그림 3-25〉

세계 각국 지열발전 설비용량의 변화



지열발전은 기본부하(base load) 전원이 될 수 있는 재생에너지이다. 지열 에너지 개발의 리스크를 감안한 자금(Risk Money)의 조달·지역이해의 촉진, 관련 법령 운용 재검토 등을 통해서 보다 획기적인 지열발전의 도입을 목표로 하고, 그와 더불어 2050년을 향해서는 세계에 없는 혁신적인 지열발전 기술을 실현하여 지열 발전시스템 전체를 패키지로 해외 진출을 전개하는 것이 바람직하다.

〈표 3-17〉 지열산업의 과제와 대책

	현상과 과제	향후 대책
	개발 리스크·개발 코스트가 과제	각종 리스크 머니의 공급과 한층 더 이해 촉진 필요
Risk Money 의 공급, 이해 촉진	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 운전 개시까지 막대한 리스크와 코스트가 필요(굴삭조사 등에 막대한 비용이 필요하고, 굴삭한 생산정(井)에 있어서 상정한 지열원을 확보 불가능 리스크 등)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 조성금, 출자, 채무보증 등 리스크 머니의 공급, 정부에 의한 지열자원조사, 굴삭기술 향상을 위한 기술개발 등의 실시</li> <li>• 에너지 다단계이용(지열발전소의 증기로 만든 온수를 농업용 비닐하우스로 활용) 등의 지역과 공생하는 지속 가능한 개발을 촉진, 우수사례의 전국 공유</li> <li>• ‘지열개발 가속화 계획’에 따른 지구온난화대책추진법에 따른 촉진구역 지정, 지역의 이해를 위한 데이터 수집·조사 등의 실시</li> </ul>

	현상과 과제	향후 대책
관련 법령에 의한 규제	<p>관련 법령의 운용 재검토가 과제</p> <p>(자연공원법)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>지금까지 국립·국가지정공원과 관련한 규제 완화가 진행되어 안전이 증가하였지만, 개발 추진을 위해서는 국립·국가지정공원 내에서 운용의 재검토가 필요</li> </ul> <p>(온천법)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>대심도 굴삭 허가에 대한 사고방식이 도도부현(都道府県) 별로 다르고, 동일 사업자에 의한 굴삭이라도 이격거리규제를 적용하고 있는 점 등에 대해서 지열발전 사업자로부터 지열 자원을 유효하게 활용할 수 없다는 지적</li> </ul>	<p>운용 재검토를 통한 개발 가속화</p> <p>주로 아래의 규제를 대상으로 2021년 6월에 각의에서 결정된 ‘규제개혁실시계획’을 바탕으로 재검토 추진</p> <p>(자연공원법)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>자연공원내에 지열발전 등의 허가 기준 및 심사요건의 명확화</li> <li>지표조사단계 및 조사정 굴삭시점에 있어서 발전시설 상세 레이아웃 등의 제출 불요화</li> </ul> <p>(온천법)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>이격거리규제 및 본수 제한 등에 대해서 도도부현(都道府県)에 대해서 과학적 근거가 없는 경우의 철폐를 포함한 점검을 요구하면서 규제내용 및 그 과학적 근거의 공개를 하도록 통지 등에 주지</li> <li>이격거리규제 및 본수 제한 등에 대해서 과학적 식견을 토대로 사고방식 및 방향성의 제시 등</li> </ul>
차세대형 지열발전기술 (초임계 지열발전)	<p>요소기술의 개발단계·세계적으로도 기술 미확립</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>종래 지열발전의 자원량은 2,347만 kW. 보다 깊은 초임계 지열자원(초임계 상태의 열수)을 활용할 수 있다면, 획기적인 자원량의 확대와 대규모·고효율의 개발이 기대 가능</li> <li>초임계 지열 자원은 초고온에 산성 농도가 매우 높고, 그러한 환경하에서 견디고 안정적인 발전을 가능하게 하기 위해서는 부재료·소재·굴삭기술의 개발이 필요. 세계적으로도 기술은 미확립</li> </ul>	<p>차세대 지열발전 기술의 확립, 실용화</p> <p>초고온·고압 환경하에서의 굴삭, 포장재 및 터빈 등의 부식 대책 기술 등의 확립</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>2030년까지: 조사정(井)의 굴삭·시험을 실시. 개발한 굴삭기술 및 포장재 등의 부재·소재의 검증</li> <li>2040년까지: 파일럿 플랜트에 의한 터빈 등의 지상설비를 포함한 발전시스템 전체의 검증</li> <li>2050년경: 세계에 선구적 상용화·보급을 목표로 글로벌로 기술을 전개</li> </ul>

출처: 経済産業省(2021.6, p.31), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(概要)

## (8) 해양에너지

해양에너지는 에너지자원의 한 종류이다. 석유, 천연가스뿐만 아니라 태양광, 풍력 등의 재생가능 에너지도 포함된다. 에너지 자원중에서도 해양에 존재하는 자원을 해양에너지라 하고 새로운 에너지로써 기대되고 있다. 바다에는 풍부한 에너지가 다양한 형태로 쌓여 있다. 이것을 유효하게 추출 활용함으로써 화석 연료를 대체하는 친환경 에너지로 해양에너지 이용 예는 다음 표와 같다.

〈표 3-18〉 해양에너지의 이용 예시

해양 이용 유형		내 용
발 전	해양온도차발전	바다의 표층과 심층의 온도차를 이용해서 발전
	파력발전	바다의 운동에너지를 이용해서 발전
	조류발전	해수의 흐름인 조류 및 해류의 힘을 이용해서 발전
	해상풍력발전	해상으로 부는 바람의 힘을 이용해서 발전
	조석력발전	바다 간만의 차에서 얻어지는 위치에너지를 이용해서 발전 (일종의 수력발전)
	해양농도차발전	바다속의 염분 농도 차를 이용해서 발전
해양 희소금속 회수		바다속에 녹아 있는 리튬 및 우라늄 등의 금속을 회수
해양 심층수		심해 1,000m에서 흐르는 심층수를 끌어 올려 식료품, 화장품, 양식 등 에 이용

출처: 佐賀大学, 海洋エネルギー研究所 HP, [https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean\\_energy/](https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean_energy/)

또한, 최근에는 해양에너지의 2차 에너지로써 수소에너지 이용 연구가 진행되고 있다. 해수담수화로 획득한 물과 해양에너지로부터 얻어진 전기에너지를 이용 물의 전기분해를 통해 수소를 발생시켜서 수소에너지를 생산할 수 있다.

해양에너지 연구는 계속 발전중에 있는데 해양에너지를 잘 이용하면 인류의 에너지 문제는 일거에 해결할 수 있다고 알려져 있다. 일본은 세계 6위를 자랑하는 배타적 경제수역을 자랑하고 있는데, 주변 해역의 재생가능 에너지에 대해서 육상이상의 잠재력이 있다고 전해진다. 일본의 주요 전원에서 차지하는 재생가능 에너지 비율이 2016년 15.3%인데 이것을 2030년까지 22%~24%로 끌어 올리는 것을 목표로 하고 있다. 세계 모든 나라들이 현재보다 높은 목표를 제시하고 있는데 프랑스는 16%에서 40%로, 독일은 30%에서 50%로 특히 현저하게 나타난다. 그 가운데에서도 ‘물’을 활용하는 수력발전은 발전효율이 높아 안정적인 전력공급이 가능하기 때문에 보급이 빠르게 진행되고 있다. 해양에너지도 ‘물’을 사용하는 에너지로 발전효율 측면에서 또는 부존량 측면에서도 추진을 가속화시켜야 할 에너지이며 향후에도 기대되는 재생가능 에너지이다.

일본은 2018년 2월 ‘해양 재생가능 에너지 발전설비의 정비에 관한 해역의 이용촉진에 관한 법률’을 공포하였다. 이것은 해상풍력발전 등 해양 재생가능 에너지의 본격 보급의 강한 의지 표명이다. 법 내용은 국가가 ‘촉진구역’을 지정하고 최장 30년간 해역을 발전용으로 점유 가능한 구조를 만든다는 것이다. 해외에서는 풍차가 해상에 복수로 건설된 광경도 볼 수 있지만, 일본에서는 아직 실증 사례가 없다. 하지만 이 법안을 계기로 일본의 기술이 가속화되고 해양 재생가능 에너지의 본격적인 보급이 예상된다.

이러한 해양에너지는 날씨에 좌우되는 태양광이나 풍력과 비교해서 변동이 적기 때문에 이용하기 쉬운 특성의 에너지원이다. 사방이 바다로 둘러싸여 있고 다수의 낙도를 보유하고 있는 일본에 있어서는 잠재력이 육상의 제약보다도 적은 에너지원이다. 또한, 세계적으로도 아직 상용화 사례가 적어 향후 신규시장의 개척이 기대되고 있다.

세계적으로 해양에너지 발전기술은 아직 상용화 단계에 이르지 못하기 때문에 (조석력(潮汐力) 발전은 프랑스, 한국, 캐나다에서 상용발전 가동중) 도입은 소규모 실증 레벨에 머무르고 있다. 주로 유럽, 북미, 아시아, 오스트레일리아에 있어서 각종 실증사업이 추진되고 있고 그 대부분이 조류발전, 파력발전이다.

#### 조류(潮流)발전과 파력(波力)발전

조류발전은 조수 간만에 따른 해협 등에서 발생하는 해수의 흐름을 수차 등에 의해 회전 에너지로 변환해서 발전하는 시스템이다. 발전방식은 수평축 터빈이 주류이지만 형상 및 설치방식은 다양하다. 조류는 지구·달·태양의 공전·자전에 의해 발생하는 규칙적·주기적인 흐름이다. 조류 방향이 바뀌는 것은 많은 지역에서 1일 4회이지만 지역에 따라 2회인 경우도 있다.

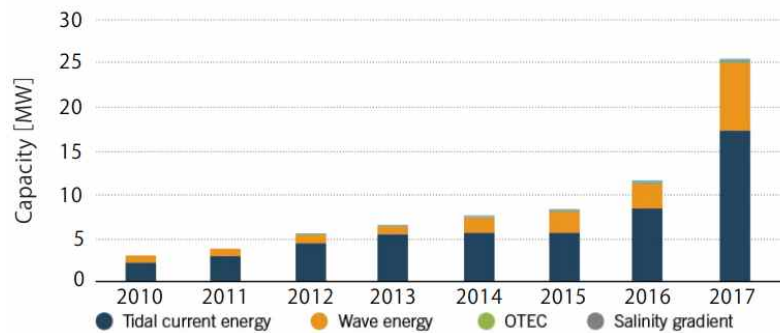
파력발전은 파도의 에너지를 이용한 발전시스템으로 다종 다양한 에너지 변환방식이 개발되어 있다. 주로 파도의 힘을 일단 공기의 흐름으로 변환하는 진동수주식, 가동물체를 이용해서 기계에너지로 변환하는 방식, 저수조에 파도를 끌어올려 거기서 떨어지는 물의 흐름을 이용하는 월파식(越波式)이 있다.

해양의 파도는 시시각각 변화하는 바람에 의해 형성되어 복잡한 간섭에 의해 파고 및 주기가 매우 불규칙하지만, 그 변동은 태양광이나 풍력에 비해 심하지 않고 예측하기 쉬운 에너지원으로 알려져 있다. 파고는 해상으로 부는 바람에 의해 파도가 바람을 받아 발달하면서 장거리로 진행함으로써 높아진다.

해양에너지의 도입량 및 시장규모를 예측해 보면 〈그림 3-26〉, 〈그림 3-27〉과 같다. 세계 해양에너지의 종류별 도입량 추이를 연도별로 살펴보면 2010년에 비해 2017년에는 약 10배 수준으로 성장하였다. 그 중에서도 조류발전이 가장 많이 도입 확대되었고, 그 뒤를 이어 파력발전, 해양온도차발전

순으로 나타났으나 〈그림 3-26〉에서 확인할 수 있듯이 해양농도차발전은 거의 도입 실적이 없는 미미한 수준으로 나타났다.

〈그림 3-26〉 세계 해양에너지의 종류별 도입량 추이



※ 단, 조석력(潮汐力) 발전은 포함되지 않음  
출처: OES Annual Report 2017 (IEA, 2018)

〈그림 3-27〉 세계 해양에너지의 지역별 도입량 추이



출처: OES Annual Report 2017 (IEA, 2018)

## 4. 경제적 효과와 한일 비교분석

### 1) 재생에너지 산업의 경제적 효과

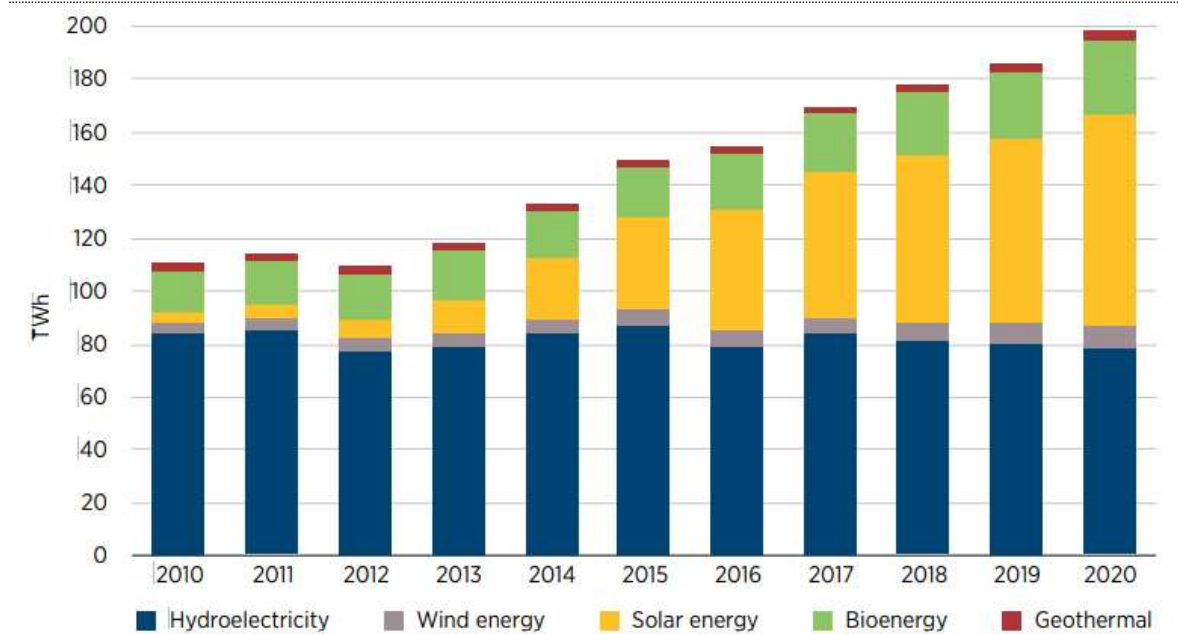
일본은 재생에너지 산업을 지원하기 위해 정부를 중심으로 다양한 정책을 실시하고 있다. 앞에서 살펴본 바와 같이 1970년대 오일쇼크 이후 재생에너지의 필요성에 국민적 공감대가 형성되었고, 이를 바탕으로 1974년 전샤인 정책을 도입했고 1980년에는 전샤인 계획을 전담해서 추진하는 기관으로 신에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)가 설립되었다. 같은 해 10월 ‘석유대체에너지 개발 및 도입촉진에 관한 법률’이 시행되어 재생에너지 연구의 기반이 만들어졌다. 또한, 일본은 2002년 6월 제정된 ‘에너지정책기본법’을 기초로 안정적 공급, 환경과의 조화, 시장원리의 활용을 구현하기 위해 2003년 10월 ‘제1차 에너지 기본계획’을 수립했다. 그러나 2011년 후쿠시마 제1원자력발전소 사고로 안전성에 대한 세계적인 관심이 집중되었고, 이에 2014년 4차 에너지 기본계획에서 안전성을 기본 전제로 하는 ‘S+3E’가 탄생하였다.

그런데 에너지는 인간의 모든 상황에서 필수적이며 활동의 근본을 지탱하고 있다. 따라서 지속적인 발전을 위해서는 안정적이고 사회적 부담이 적은 에너지의 공급이 전제조건이 된다. 발전산업을 S+3E라는 관점에서 볼 때 여기에 가장 이상적인 전원은 존재하지 않는다. 어떤 전원도 장점도 있고 단점도 있기 때문이다. 이러한 관점에서 국제적인 흐름 및 이산화탄소 배출 감소 목표를 조화롭게 이루기 위해서는 에너지 정책의 근간을 이루는 S+3E는 중요한 역할을 하고 있다. 특히 에너지 자원이 부족한 일본에서는 S+3E의 관점에서 다양한 에너지를 조합하는 것은 대단히 적절한 정책으로 평가할 수 있다. 그러나 실제로 재생에너지의 경제적 효과에 대해서는 체계적인 분석이 드물었다. 따라서 여기에서는 재생에너지산업이 경제에 미치는 영향을 다루어 보기로 한다.

일본은 세계에서 가장 경제적이고 산업적으로 발달한 나라 중 하나이다. 또한, 세계에서 가장 큰 에너지 소비국이자 수입국이다. 그리고 현재 인구 1억 2,510만 명(총무성, 2022년 6월 1일 현재)의 고령화(29.1%)와 관련된 과제에 직면해 있다. 한편 화석연료 자원은 거의 모든 공급을 수입에 의존한다. 따라서 불안정한 화석연료 가격과 지정학적 충격과 같은 외부 세력에 취약하게 만든다. 1970년대의 석유위기 이후 일본은 에너지 안보를 에너지 정책의 중심에 두었다. 에너지 안보와 자립을 개선하려는 국가의 노력은 원자력발전소가 30%의 전력

공급을 담당하게 만들었다. 그러나 후쿠시마 제1원자력발전소의 사고로 원전이 중단되면서 원전을 대체하고 동시에 에너지 효율을 높이기 위해 신재생에너지에 집중하게 되었다.

〈그림 4-1〉 일본의 재생에너지 발전 추세



출처: 經濟産業省(2021)

위의 〈그림 4-1〉에서 보는 것처럼 일본의 재생에너지 산업은 10년 사이에 거의 2배로 성장했다. 그중에서 가장 큰 성장을 보인 것은 태양광이며 그 다음으로 바이오와 풍력발전이다. 2020년 재생에너지 전력 용량 면에서 일본은 가장 높은 설비를 보유하고 있는데 태양열 발전 설비가 세계에서 3위를 차지하고 있다. 2020년 재생에너지 용량 측면에서 일본은 가장 높은 설비를 보유하고 있다. 특히 태양광 발전설비는 세계에서 3위를 차지하고 바이오매스, 그리고 지열과 수력발전은 10위를 기록하고 있다.

그러나 일본은 낮은 토지 가용성과 자연재해의 발생으로 인해 그리드에 연결하고 지역 그리드를 조화시키는 데 어려움이 있다. 이를 극복하기 위해 일본은 재생에너지 배치를 지원하기 위한 다양한 정책을 시행해 왔다. 재생 가능한 포트폴리오와 같은 도구뿐만 아니라 발전부문의 자유화를 포함하고 있다. 특히 재생에너지 표준화(RPS: renewable portfolio standards), 보조금(feed-in tariffs), 경매제도 등의 조치가 이에 포함된다. 한편 재생에너지의 사용을 늘리기 위해 바이오 연료뿐만 아니라 연료전지와 전기자동차의 홍보 및 혁신을 위한 연구 개발을 강화해왔다. 이런 가운데 일본은 2020년 10월에 2050년까지 탄소 중립을

달성하겠다고 약속했다. 2021년 4월에는 2030년 온실가스 감축 목표를 2013년 대비 46% 감소하기로 선언했다. 이에 따라 국가 차원에서 새롭고 더 야심찬 온실가스 감축계획이 구체화되고 있다. 이에 따라 자본 집약적인 전환 프로젝트는 화석에 대한 의존도를 낮추는 동시에 투자를 촉진할 수 있게 되었다. 이것은 무역수지를 개선하고 국내총생산(GDP)을 증가시킨다.

여기서는 일본의 현재 수립한 에너지 계획(PES: Planned Energy Scenario))에 따르면 완만한 경제 성장을 경험할 것으로 예상된다. 고령화와 인구 감소로 인한 어려움에도 불구하고 국내총생산(GDP)은 2021~2030년 연평균 1.27%, 그 이후에는 1.01, 1.02% 증가할 것으로 예상된다. 하지만 고용은 지속적으로 감소하여 2021~2030년 연평균 -0.24%, 그 이후에는 -0.67%, -0.55%가 감소할 것으로 전망하고 있다.

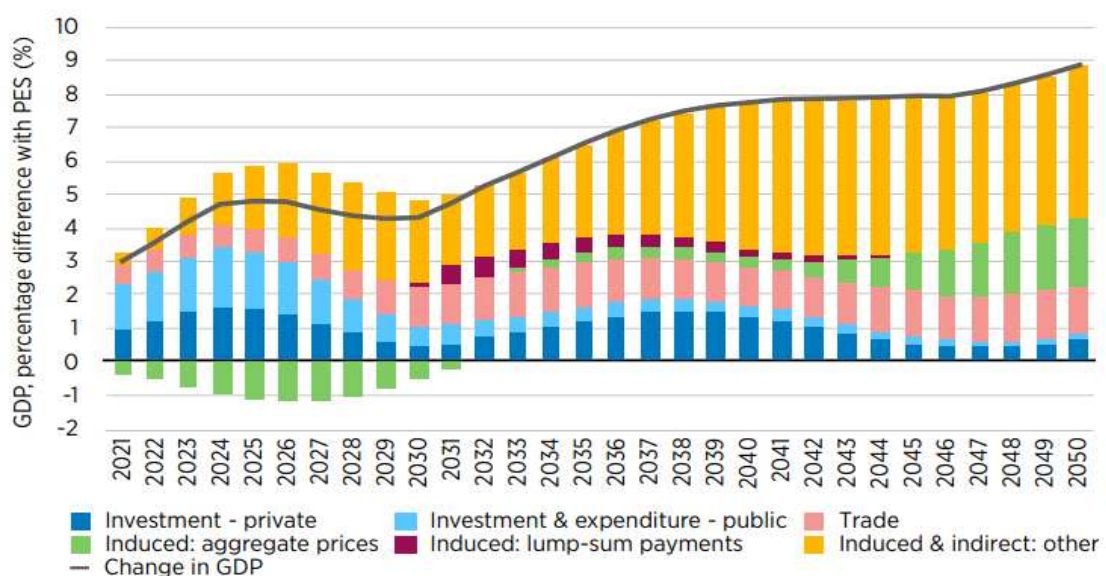
〈표 4-1〉 일본의 에너지계획에 따른 주요 경제전망

Variable	2021-2030 (CAGR %)	2031-2040 (CAGR %)	2041-2050 (CAGR %)
Real GDP	1.27%	1.01%	1.02%
Economy-wide employment	-0.24%	-0.67%	-0.55%
Total population	-0.37%	-0.56%	-0.56%

Note: CAGR = compound annual growth rate.

출처: IRENA

〈그림 4-2〉 1.5도 시나리오와 PES에 따른 GDP 성장률 비교



출처: IRENA

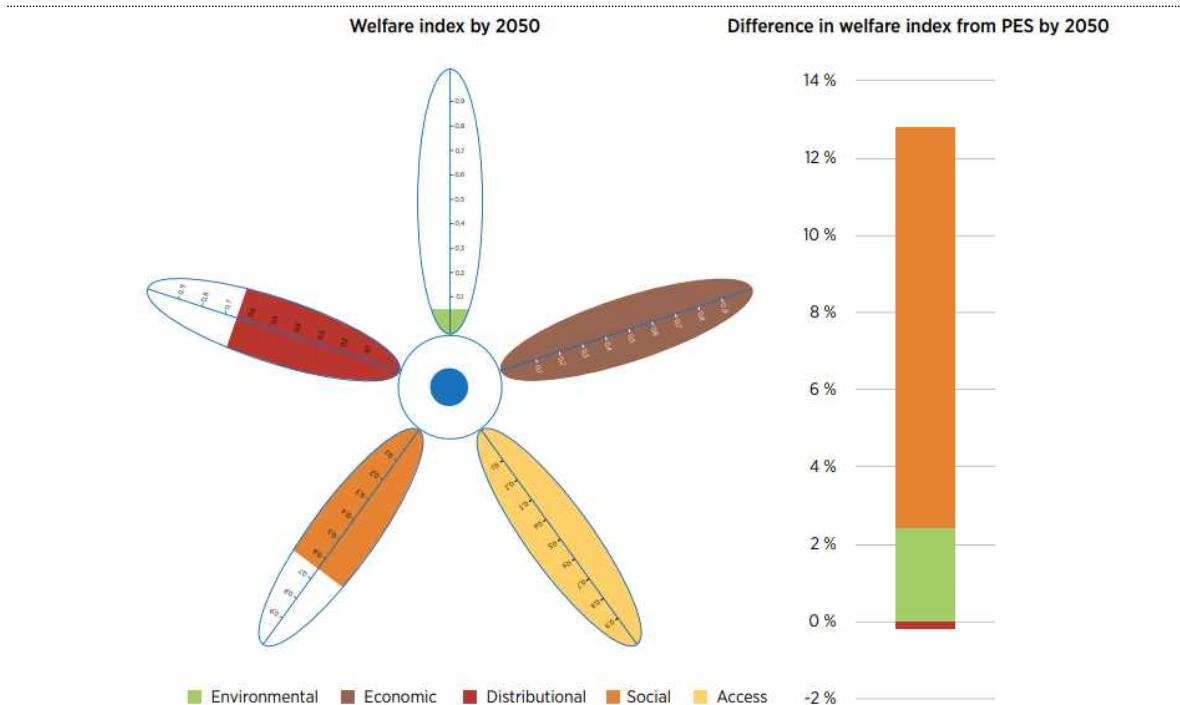


IRENA(국제 재생에너지 기구)에서는 온실가스 1.5로 낮추는 시나리오(1.5-S)에 따른 일본의 주요 경제지표를 분석하고 있다. 이는 에너지 전환 로드맵과 이에 수반되는 기후 정책 틀 안에서의 다양한 조합과 포괄적인 전환을 지원하는 다양한 도구가 포함되어 있다. 즉, 탄소 가격, 국제 협력, 보조금, 분배 문제를 해결하기 위한 진보적인 재정 정책, 공공 인프라에 대한 투자와 사회적 이니셔티브에 대한 지출과 같은 내용도 포함되어 있다. 따라서 에너지 전환을 전제로 하는 (1.5-S)와 기존 정책을 고수한다는 가정하에 PES(Planned Energy Senario)의 비교는 재생에너지 산업의 경제적 효과를 파악하는데 도움이 된다.

화석연료에서 재생에너지로의 전환은 다양한 방식으로 GDP 성장에 도움을 줄 수 있다. 더 높은 재생에너지 점유율을 통해 에너지 전환은 더 큰 이산화탄소 배출 감소를 가져올 것이다. 또한, 대기오염을 줄이고 GDP 증가, 복지 향상, 더 많은 일자리를 만드는 데 도움을 줄 수 있다.

위의 〈그림 4-2〉에서 보는 것처럼 일본에서는 온실가스 1.5로 낮추는 시나리오(1.5-S)가 도입되면서 신재생에너지 비율이 크게 증가하게 되는데, 기존의 계획된 에너지 시나리오(PES)와 비교할 때, 훨씬 더 나은 성과를 낼 것으로 추정하고 있다. 일본에서는 PES에 따를 경우 2021년부터 2050년까지 연간 1.1%의 GDP 성장을 경험할 것으로 예상된다.

〈그림 4-3〉 1.5도 시나리오와 PES에 따른 복지 지수 차이



출처: IRENA

그러나 (1.5-S)에 따르면 2021~2050년 기간 동안 PES와 비교한 평균 GDP 차이는 6.3%로 나타나고 있다. 따라서 재생에너지의 도입에 따른 에너지 전환으로 인한 경제적 이득은 상당한 것으로 분석하고 있다. 이는 성장의 주요 동력 중 소비, 무역, 투자가 크게 늘어난 것에 기인한다. GDP 증가에서 가장 큰 비중을 차지하는 “유인 및 간접효과(기타)” 요인이며 전환기 동안 GDP 증가에 긍정적인 요인이 된다. 또한, 일본은 화석연료의 수입 의존도가 높아 재생에너지의 사용 증가는 연료 수입을 줄여 궁극적으로는 무역수지를 개선하게 된다.

재생에너지 정책의 도입으로 사회적 및 환경적 측면에서 일본의 복지는 향상되는 것으로 조사되고 있다. 〈그림 4-3〉에 따르면 (1.5-S)가 도입되면 PES와 비교할 때 12.6%가 증가하는 것으로 나타나고 있다. 이것은 공기 오염으로 인한 건강에 부정적인 요인이 감소한 결과이다. 특히 누적 CO2 배출량 감소와 함께 오염, 경제적 및 에너지 액세스 차원이 작동한 것으로 분석하고 있다. 〈그림 4-3〉의 왼쪽을 보면 일본의 복지 지수에서 환경 분야는 개선의 여지가 가장 높다.

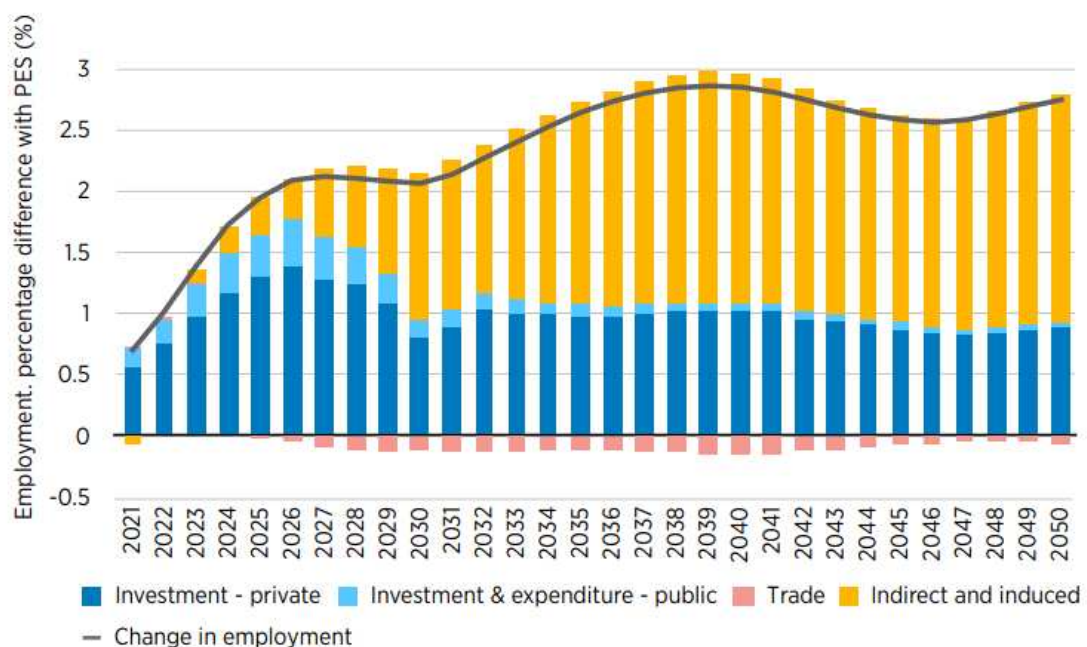
GDP와 복지 지수
<p>GDP는 경제 생산의 표준 척도이지만, 환경과 같이 시장에서 가격이 책정되지 않은 요소들을 무시한다. 예를 들면 환경오염, 소음, 안정감, 사회적 연결, 정치적 목소리와 직업의 질 등 사회성이 강한 공동체에 대한 내용은 빠져 있다. IRENA는 이런 점을 개선하고 사회적 복지의 일부를 측정하기 위해 2016년 복지 지수를 개발했다. 이는 잠재적 영향에 대한 광범위한 분석을 제공하며 이후 인덱스가 업그레이드되어 경제, 분배, 사회, 환경, 접근 등 5개 차원을 다루고 있다.</p> <p>(IRENA(2016), Renewable energy benefits: Measuring the economics, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, <a href="http://www.irena.org/publications/2016/jan/renewable-energy-benefits-measuring-the-economics">www.irena.org/publications/2016/jan/renewable-energy-benefits-measuring-the-economics</a>)</p>

소비와 오염의 추가적인 감소는 사회적 차원에서 지수를 개선할 것이다. 나아가 (1.5-S)정책 도입을 통해 일본의 불평등 격차를 해소하는 것이 중요할 것이다. 특히 부의 분배를 개선하고 높은 탄소세 도입은 정부 재정에 도움이 될 것으로 예측하고 있다. 따라서 재생에너지의 전환을 중심으로 하는 (1.5-S) 정책은 복지를 향상시키기 위해 추가적인 정책 조치가 필요할 것임을 시사하며 사회적, 분배적 차원 또한 개선의 여지를 제공한다.

한편 (1.5-S)정책 도입은 2021~2050년의 통계를 비교할 때 고용은 PES보다 평균 2.3% 더 높게 나타나고 있다. 같은 기간 동안 인구는 -0.50%의 복합 연간 성장률로 감소하지만 오늘날 일본의 낮은 실업률을 고려할 때, 두 가지 모두에서 추가 고용을 위한 여력이 거의 없다. 그럼에도 불구하고 (1.5-S)는 PES에 비해 160만

개의 추가 일자리를 창출하는 것으로 분석되고 있다. 이는 GDP 증가와 유사하게 투자, 무역에 긍정적인 요인으로 작용하고 있다. 특히 자본 집약적인 전환 기술에 대한 투자가 가장 큰 원동력이며 시간이 갈수록 간접기술이 크게 기여하게 된다. 흥미로운 점은 2030년까지 초기에는 일자리 증가는 별로 없으나 이후 크게 증가하여 안정되는 모습을 보이는데, 이는 GDP에서 차지하는 투자의 상대적 비중의 감소 때문인 것으로 풀이된다. 하지만 2030년 이후 소비자 지출이 경제 전반의 고용 증가의 주요 동인이 될 것으로 예측하고 있다.

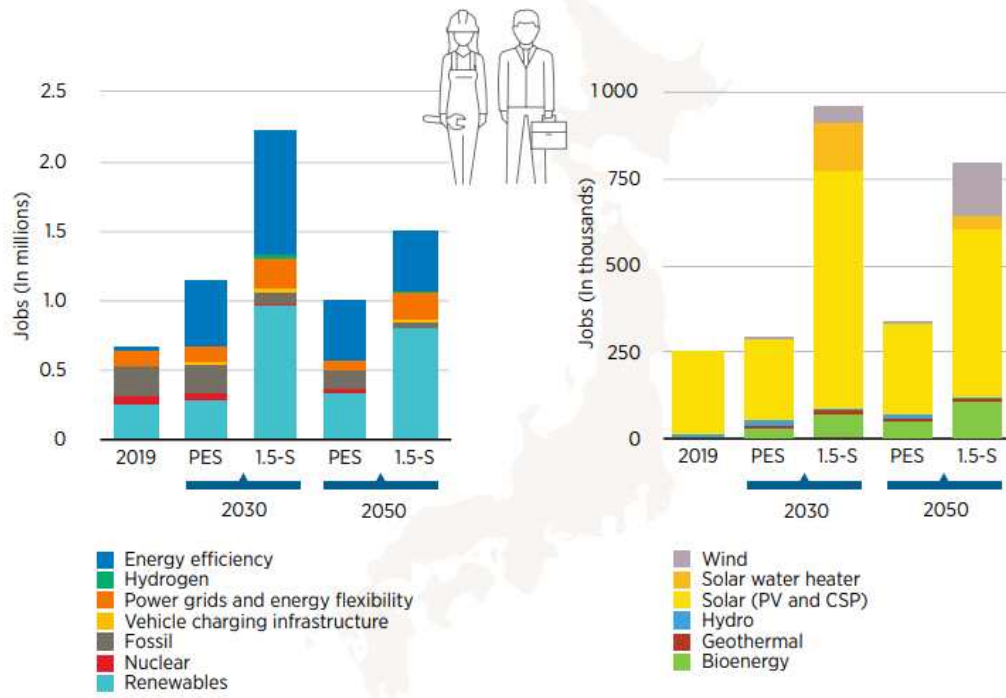
〈그림 4-4〉 1.5도 시나리오와 PES에 따른 고용의 차이



출처: IRENA

에너지 부문 일자리 수는 PES보다 (1.5-S)가 더 많을 것으로 추정된다. 〈그림 4-5〉에 따르면 에너지 부문의 일자리는 PES의 100만 개에 비해 (1.5-S)에는 총 150만 개의 일자리가 있을 것으로 추정한다. 그런데 2030년에 비해 2050년에 일자리가 줄어든 것은 재생에너지 분야에 일자리가 이미 반영된 것에서 기인한다. 하지만 전체적으로 새로운 발전소 및 인프라 건설(에너지 효율성 포함), 생산성 향상이 큰 비중을 차지하고 그중에서도 재생에너지가 전체 에너지 산업의 일자리에 50%(80만 개) 이상을 차지하는 것으로 분석하고 있다.

〈그림 4-5〉 재생에너지 산업의 일자리 전망



출처: IRENA

2050년의 경우 에너지 효율 관련 일자리가 거의 50만 명으로 30%의 점유율로 나타나고 있으며 전력망과 유연성은 17만 개의 일자리(11%)를 창출한다. 에너지 분야별로 보면 원자력, 차량 인프라 및 수소는 각각 1%를 차지하며, 그 뒤를 태양광 기술(주로 PV)이 점유율을 차지하고 있다. 재생에너지 분야만 보면 〈그림 4-5〉의 오른쪽에서 태양광은 2030년까지 그리고 2050년까지 61%, 풍력과 바이오에너지는 각각 19%, 13%를 차지한다.

〈그림 4-6〉 1.5도 시나리오의 경제적 효과



출처: IRENA

일본의 에너지 부문은 화석연료에 대한 의존도가 높다. 그러나 2050년까지 순 제로 배출정책을 추진하고 있다. 여기서 핵심은 일본의 현재 에너지정책과 더 넓은 경제 계획이 어떻게 영향을 미칠 것인가를 살펴보는 것이다. 〈그림 4-6〉에서 보는 바와 같이 포괄적인 에너지 전환에 따른 (1.5-S)하에서, 일본의 GDP는 2021~2050년 기간 동안 PES보다 6.3% 높고, 2050년에는 8.8% 높은 것으로 추정된다. 이것은 대가족 소비와 화석연료 수입의 감소, 그리고 더 높은 전환 관련 투자가 주요 요인이다. 고용률은 (1.5-S)에 따를 경우 PES보다 2.7% 높을 것으로 전망하고 있다. 2050년까지 PES(160만 개의 추가 일자리), 에너지 부문은 (1.5-S) 아래에서 50만 개의 일자리가 추가될 전망이다. 복지는 PES와 비교할 때 2050년 12.6% 향상되는 것으로 나타나고 있다. 따라서 탄소중립을 위해 재생 에너지의 사용이 일반화되는 (1.5-S)을 가정할 경우 성장, 복지, 일자리에 모두 긍정적인 결과를 가져온다고 할 수 있다.

IRENA의 연구에 따르면 에너지 변환은 국가의 많은 문제를 해결하는 데 도움이 되며. 특히 지역 경제의 부활, 디지털화, 산업 발전에 따른 부작용을 해결할 수 있다. 이를 위해서는 에너지 전환의 이점, 즉 더 넓은 정책 프레임 워크가 필요한데 △화석연료 자산에 대한 의존도 감소 △에너지 전환 솔루션에 대한 인센티브 부여 △소비자와 시민 사이에서의 인지도 제고가 절대적으로 필요하다.

## 2) 한-일간의 유사점과 상이점

### (1) 유사점

#### ① 온실가스 배출량

한국과 일본은 재생에너지 분야에서는 몇 가지 유사점과 상이점이 존재한다. 먼저 유사점으로는 온실가스 배출량이 대단히 높은 국가에 속한다. 일본은 2018년 기준 온실가스 배출량이 12.7억 톤으로 세계 5위를 기록하고 있으며 비중은 2.57%를 차지한다. 1인당 배출량을 보면 9.99톤을 기록하고 있다. 한국은 같은 기간 7.6억 톤을 배출했으며 세계 12위를 기록하고 있다. 1인당 배출량은 14.8톤으로 일본보다는 조금 더 높은 것으로 조사되고 있다. 하지만 두 나라 모두 온실가스 배출량이 높은 편이기 때문에 탄소중립을 위한 재생에너지 비율을 높여야 한다는 공동의 명제가 주어져 있는 상황이다.

〈표 4-2〉 주요 국가의 온실가스 배출량(2018년 기준)

순위	국가	비중(%)	배출량(백만톤)	1인당 배출(톤)
1	중국	27.79	13,739.79	9.71
2	미국	12.74	6,297.62	19.27
3	인도	7.32	3,619.80	2.67
4	러시아	4.68	2,313.74	16.07
5	일본	2.57	1,270.21	9.99
9	독일	1.77	873.60	10.62
12	한국	1.53	758.14	14.82

출처: UNEP - View Emissions Data By Country - [unep.org](https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html?gclid=EAIaIQobChMIq8vn3bbD-gIVDtxMAh0sZQQeEAAAYAiAAEglALfD_BwE), State of the climate  
[https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html?gclid=EAIaIQobChMIq8vn3bbD-gIVDtxMAh0sZQQeEAAAYAiAAEglALfD\\_BwE](https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html?gclid=EAIaIQobChMIq8vn3bbD-gIVDtxMAh0sZQQeEAAAYAiAAEglALfD_BwE)

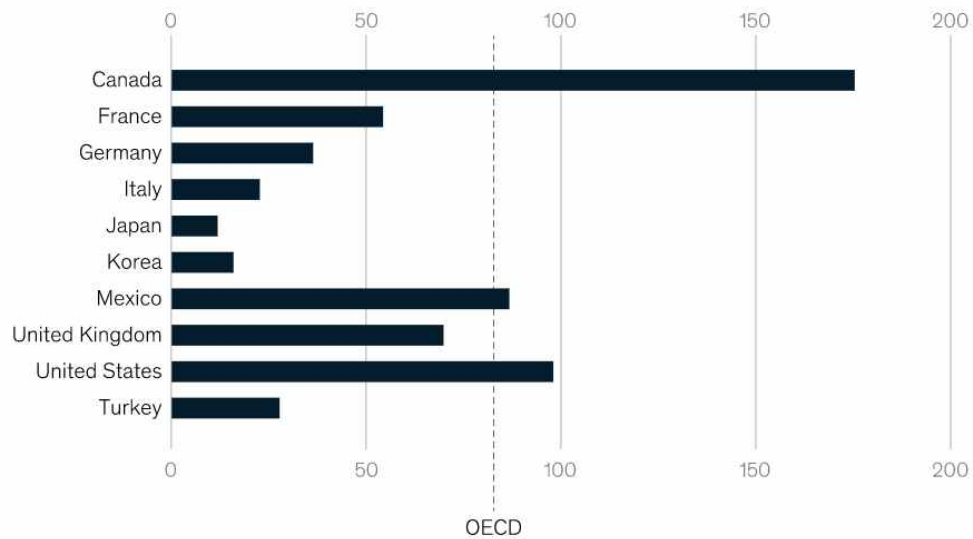
## ② 낮은 에너지 자립도

한국과 일본의 유사점으로는 화석연료의 의존도가 높고 대부분을 해외로부터 수입하는 구조로 해외 의존도가 대단히 높다는 점이다. 〈그림 4-7〉에서 보는 바와 같이 일본은 에너지 자립도가 7%로 OECD국가 중에서 가장 낮은 수준을 보여주고 있으며 한국은 12%로 그 다음에 위치해 있다. 에너지 자립도는 한 국가의 에너지 생산량과 소비량을 비교한 지표로 한 국가에서 소비하는 에너지 총량 중 자국이 생산한 에너지의 총량이 차지하는 비율을 의미한다. 여기에서 국가가 생산한 에너지 총량에는 신재생에너지 등을 비롯하여 국내에서 생산된 에너지 총량뿐만 아니라 해당 국가가 해외의 지분 취득을 포함하여 해외에서 개발한 에너지 총량도 포함하여 합산된다.

한 국가의 에너지 자립도는 에너지 안보와 직결되는데 에너지 수입 의존도가 높을수록 국제적 에너지 위기가 닥쳤을 때 국내 에너지 산업도 큰 위험에 처할 수 있기 때문이다. 따라서 에너지 자립도를 향상시키기 위해서는 화석에너지 발전을 대체할 수 있도록 하는 신재생에너지 중심의 전력 공급체계 마련과 함께, 에너지 공급을 다변화함으로써 안정적인 수급은 물론 저가의 에너지를 확보해 수익을 창출할 수 있도록 하는 해외 자원개발의 필요성이 대두되고 있다. 이와 함께 전례 없는 글로벌 협업을 위한 노력도 반드시 필요한 과제가 되고 있다.

〈그림 4-7〉 OECD 국가의 에너지 자립도

Self-sufficiency in 2018, %



출처: McKinsey Insights, Japan offshore wind: The ideal moment to build a vibrant industry, August 12, 2020

### ③ GeGaLo 지수

재생에너지의 사용이 본격화되면서 세계 경제는 점차 화석연료 중심에서 재생에너지 체제로 전환하고 있다. 이에 따라 종전 화석연료를 많이 생산하는 OPEC 중심으로 이루어졌던 화석연료의 위력이 점차 줄어들고 있다는 평가이다. 재생에너지가 확산될수록 화석연료 수출국들은 주요 수입원이 줄어들 것이고 수입국들은 재정적 부담과 의존에서 벗어날 것이며, 재생에너지 자원이 풍부한 국가들도 새로운 이점을 얻을 수 있을 것이다.

이를 체계적으로 정리하여 분석한 것이 GeGaLo(Geopolitical Gains and Losses)이다. 이 지수는 재생에너지로의 본격적인 전환 이후 경험할 수 있는 지정학적 손익을 평가한 것으로 이에 따르면 화석연료 의존성(FFD), 화석연료 매장량(FFR), 재생에너지원(RES), 정부 거버넌스, 국제적 갈등의 5개 지표를 가지고 지수를 만든 것이다. 이 지수의 일부는 잠재적 이익을 나타내고 일부는 손실을 나타내며, 일부는 지정학적 힘의 변화를 처리할 수 있는 국가의 능력을 나타낸다. 이 지수의 목적은 재생에너지로의 전환이 완료되었을 때 현재 상황과 비교하여 국가들이 경험할 수 있는 지정학적 강화와 약화를 비교하는 것이다. 하지만 이 지수는 미래의 어느 시점에서 가상의 상황을 설명하지만, 현재 상황에 관한 데이터에 의존해야 하는 한계가 있다.

〈표 4-3〉 주요국가의 GeGaLo 지수

국가	(A)화석연료 매장량 +재생에너지 자원	(B)A+화석연료 의존도	(C)B+정책+갈등조정
한국	119	30	27
일본	101	37	11
미국	153	147	46
중국	146	134	87
독일	145	130	15
프랑스	88	50	29
영국	126	116	24

출처: Overland, Indra; Bazilian, Morgan; Ilimbek Uulu, Talgat; Vakulchuk, Roman; Westphal, Kirsten (2019). “The GeGaLo index: Geopolitical gains and losses after energy transition”, Energy Strategy Reviews, Volume 26, November 2019

이 지수에 따르면 일본은 화석연료 매장량과 재생에너지 지원을 합한 (A)는 101위를 기록하고 있으며 한국은 119위에 해당한다. 하지만 재생에너지 사용이 확산되는 2050년의 경우인 (B)가 되면 일본은 37위, 한국은 30위를 기록하게 된다. 또한, 여기에 정부 거버넌스와 국제적 갈등 조정을 잘 해결할 경우 일본은 11위, 한국은 27위가 된다. 따라서 현재 두 나라는 화석연료 의존도가 높아 하위에 랭크되어 있지만 재생에너지가 확산될수록 이익이 많은 것으로 평가됨을 알 수 있다.

현재의 글로벌 에너지시스템에서 일부 국가는 화석연료를 생산한다는 장점이 있는 반면, 다른 국가는 화석연료를 구매해야 한다는 단점이 있다. 화석연료가 재생에너지로 대체되면 이전 화석연료 생산국들은 유리한 고지를 잃게 되고, 이전 수입국들은 부담에서 벗어날 것이다. 이 지표의 목적은 에너지 전환 후 세계에서 얼마나 많은 이익이 손실되는지를 반영하는 것이다.

## (2) 상이점

### ① 전력산업 자유화

전력시장의 자유화란 종래 자연 독점으로 여겨져 온 전기 사업에 대해 시장 참가 규제를 완화해 시장경쟁을 도입하는 것이다. 이는 전기요금의 인하나 전기 사업에 있어서 자원 배분의 효율화를 진행시키는 것을 목적으로 하고 있다. 그 배경에는 전력산업은 규모의 경제가 작동하는 대표적인 산업으로 인식하고 많은 나라에서 전력회사에 독과점을 인정하는 대신 요금을 규제하는 정책을 펴왔다. 이는 전기를 많이 사용하는 제조업을 중심으로 볼 때 한 나라의 경제발전에



대단히 중요한 요인으로 작용해왔다. 그러나 최근 기술발전과 경제환경 변화로 이러한 패러다임은 크게 변하고 있다. 이를 크게 두 가지 요인으로 생각해 볼 수 있다.

첫째, 발전산업에 대한 규모의 경제가 중요하지 않게 되었다. 오늘날 개별 발전소의 발전능력에 비해 수요가 충분히 크기 때문에 수요가 공급을 초과하는 상황에서 규모의 경제는 갈수록 의미가 약해지고 있다. 그 원인으로는 소규모로도 저렴하게 발전을 할 수 있는 기술 진보가 일어난 것이고, 또 다른 원인은 전력수요가 계속 증가했기 때문에 개별 발전소의 생산 능력을 뛰어 넘을만큼 전력시장이 커진 것이 중요한 요인이다. 이에 따라 많은 발전사업자가 경쟁적으로 전력공급에 참여할 수 있게 되어 수요에 따른 공급이 중요해졌기 때문이다.

둘째, 정보통신 기술의 발달로 분산적인 발전이 가능해졌다. 종전 대규모 전력회사들은 규모의 경제의 장점을 살려 능률적으로 전기를 생산하고 이를 공급해왔다. 그러나 정보통신 기술의 발달로 인해 다양한 수요의 변화와 공급의 필요성이 강조되는 분산적인 시장이 형성되면서 수급 조정이 필요해졌다. 이러한 환경 변화에 따라 발전산업에도 경쟁이 도입될 수 있게 되었다. 따라서 전력시장의 자유화란 종래 자연 독점으로 여겨져 온 전기사업에 대해 시장 참가 규제를 완화해 시장경쟁을 도입하는 것이다.

일본은 2016년 4월 1일, 전기 소매시장으로의 진입을 자유화하는 전기사업법을 개정하였다. 이는 가정과 소기업을 포함한 모든 전력 소비자들은 이제 등록된 전력회사가 제공하는 서비스 요금제를 자유롭게 선택하고 가입할 수 있다는 것을 의미한다. 이번 자유화는 2011년 신규시장 참가자의 진입을 통한 경쟁 촉진과 전력 소매가격 인하를 목표로 시작된 일본 전력시장에 대한 2단계 개혁의 일환이다.

일본에서는 1950년의 전기사업 재편성 이래 민영 전력회사가 지역마다 1사씩 합계 10개 사가 있으며, 이들이 각 지역에서 독점적 공급을 실시해 왔다. 그러나 1990년대 버블 경기의 붕괴 후 고비용 구조·내외 가격 차의 시정을 목적으로 경쟁 원리의 도입에 의한 경영 효율화를 추진해야 한다는 논의가 일어났다. 이에 따라 EU와 영국, 미국 모델의 벤치마킹을 통해 1995년부터 전력 자유화가 시작되었다. 2001년부터는 발전과 송전의 분리가 논의되었지만 전력의 안정적 공급을 위해 분리는 이뤄지지 않았다.

하지만 일본에서는 전력 시스템 개혁에 관한 개혁 방침(2013년 4월 2일 각의 결정)에 따라 다음 3단계로 개혁을 실시했다. 첫 단계에서는 동일본대지진 대응을 위해 광역계통 운용을 확대(2013.11.13)하였고, 전기사업법의 개정 에 따라 2016년

4월 1일 ‘전력 광역적 운영 추진기관(OCCTO: 전력광역적운영추진기관)’ 이 발족되었다. 이를 통해 지금까지는 지역별로 수행한 전력 수급의 관리를 지역을 넘어 보다 효율적으로 교환함으로써 안정적인 전력수급 체제를 강화하였다. 두 번째 단계에서는 전력 소매 자유화가 이루어져 소비자가 전력회사 선택이 가능해졌다. 이어 3단계에서는 전면 자유화가 실시되었다. 이에 따라 2016년 4월 1일 이후 전기 소매업으로의 참여가 전면 자유화되어 가정 및 상점을 포함한 모든 소비자가 전력회사 및 요금을 자유롭게 선택 가능해졌다. 이를 정리하면 다음과 같다.

- (1995년) 전력회사에 도매전력을 공급하는 발전사업자(IPP)의 참여가 가능하게 되었고, 또한 대형 빌딩군 등 특정 지점을 대상으로 한 소매공급이 특정 전기 사업자에게 인정됨
- (2000년) 2,000kW 이상으로 사용하는 대규모 수요자에 대해서 특정 규모 전기 사업자(PPS)에 의한 소매가 인정됨
- (2003년) 전원 조달의 다양화를 도모하기 위해 유한 책임 중간 법인 일본 도매 전력거래소가 설립
- (2004년) 2000년에 정해진 기준을 500kW 이상으로 인하
- (2005년) 2004년에 정해진 기준을 50kW 이상으로 인하
- (2005년) 일본 도매 전력거래소에 전력 거래시장이 개설
- (2016년 4월 1일) 일반 가정에서도 소매 전기사업자(PPS)로부터 구매 가능

일본의 전력시장의 자유화는 종래 자연 독점으로 여겨져 온 전기 사업에 대해 시장 참가 규제를 완화해 시장경쟁을 도입하는 것이다. 이를 통해 전기요금의 인하나 전기사업에 있어서 자원 배분의 효율화를 추진하는 것을 목적으로 하고 있다. 이를 정리하면 발전의 자유화, 소매의 자유화, 송배전 자유화, 발송전 분리, 전력 도매시장의 정비, 전력공급 다원화, 전력원 다양화 등을 추구하고 있다. 이에 따라 전기 소매업체는 2016년 4월 1일 이후 빠르게 증가했다. 시장 자유화 이전에는 지역 독점과 수직적으로 통합된 10개 전력회사만이 소비자에게 전기를 공급했다. 이제 개별 가정은 이전의 지역 유틸리티 대신 등록된 전기 소매업체로부터 전력을 구입할 수 있으며, 개정된 법에 따라 등록된 전기 소매업체는 승인 또는 허가 없이 소비자에게 제공되는 전기의 소매 가격을 자유롭게 결정할 수 있게 되었다. 그러나 이런 조치에도 불구하고 고객에게 적절한 정보 제공, 사업 절차 및 계약 최적화, 소매 전기 계약 최적화, 소비자 불만 및 문의 사항 처리를 위한 최적화 시스템, 서비스 취소 절차 최적화 등의 새로운 과제가 등장하고 있다.

전력시장의 민영화는 전기의 공공성과 시장의 효율성 확보라는 관점에서 오랫동안 쟁점이 되어 왔다. 전력시장의 자유화는 시장경쟁을 통해서 전기요금을 인하하는 것이지만, 자유화에 의해 전기요금의 저감에 성공한 나라는 현재로서는 없다. 2000년경까지는 각국 모두 전기요금이 하락하고 있지만, 자유화 개시 전인 1980년대부터 계속되고 있는 추세이기 때문에 자유화에 의한 효율화라고 설명하기는 어렵다. 오히려 자유화에서 선행하는 영국이나 독일에서는 전기요금이 급격히 상승하고 있으며, 전기 시장 자유화를 실시한 일본에서도 기대와는 달리 전기요금의 인하는 전혀 일어나지 않고 있고 오히려 상승하고 있다. 다만 전력 시장 민영화 이후 기존의 10개 발전사가 아닌 신전력회사가 차지하는 거래 비중은 21%로 급성장했다는 점은 주목된다. 따라서 전력시장 전면 자유화를 통해 산업용부터 가정용까지 전 영역에 걸쳐 전기를 공급할 회사를 선택할 수 있는 환경이 되었다. 하지만 일본은 2016년 전력시장 민영화는 전력산업의 효율성을 추구하기 위해 도입한 것이지만, 글로벌 에너지 위기에 따른 화석연료 조달의 어려움과 재생에너지의 부진에 따른 요인으로 아직까지는 실효성이 떨어지는 것으로 나타나고 있다.

## ② 정부 보조금과 기술개발

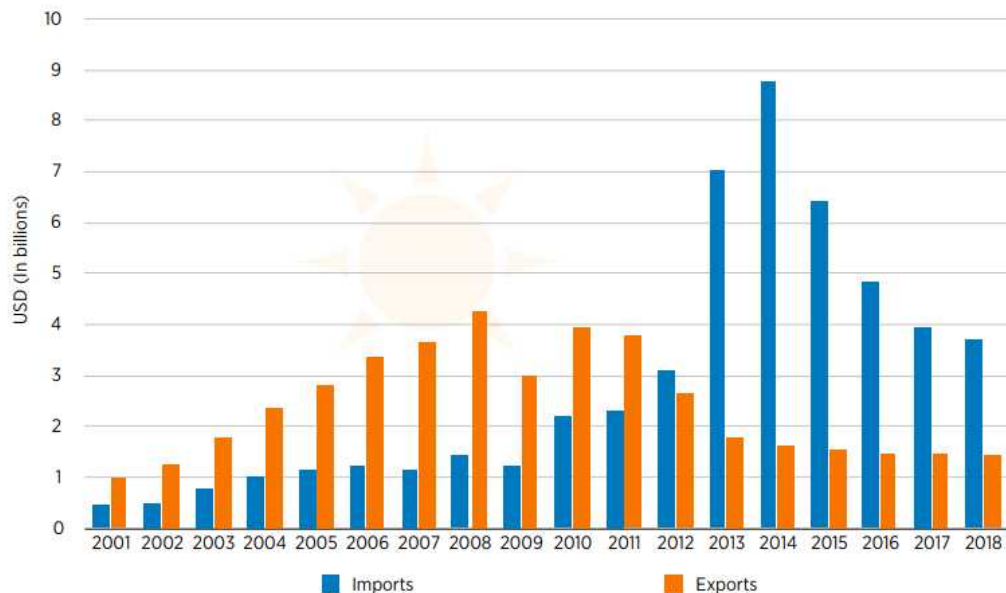
일본은 과거 뛰어난 기술력과 정부의 적극적인 지원을 바탕으로 태양광 시장을 주도하다가 정부의 보조금 축소로 큰 타격을 받고 위기를 겪었다. 태양광 산업 형성의 초기였던 1994년 일본은 적극적인 보조금 지원으로 2004~2005년에는 태양광 시장의 강자로 떠올랐다. 그러나 정부의 보조금이 축소된 이후 시장은 급격하게 축소되기 시작했는데, 2011년 후쿠시마 원전사고를 계기로 2012년 7월 FIT를 제도입하면서 태양광 산업의 재기를 이끌어냈다.

〈그림 4-8〉을 보면 일본의 태양광 패널의 수출입 추세를 보여준다. 이에 따르면 2012년부터 수입이 수출을 역전하는 현상이 그대로 나타나 있다. 이는 국제시장에서 패널 가격은 2004년과 2011년 사이에 4배 하락했다. 모듈 가격은 2010년대에 비해 90% 이상 하락한 것에 영향을 크게 받은 것으로 나타나고 있다. 이에 따라 일본의 수출저조 현상은 그대로 반영되고 있다.

그러나 일본은 이후 점차적으로 태양광발전의 보조금 의존도를 낮추고 경쟁 입찰을 촉진하면서 태양광발전 FIT를 줄여 왔다. 특히 2016년 4월 1일부터 시작되는 전력 소매시장 민간 자유화에 의해 정부 보조금이 크게 삭감되면서 향후 시장규모의 축소가 예상되지만, 현재 일본의 개발자들은 완공된 프로젝트보다

더 많은 개발권을 보유하고 있고, 정부 계획을 충족하기 위한 시장의 잠재력은 아직 존재하는 것으로 조사되고 있다

〈그림 4-8〉 일본의 태양광 패널의 수출입 추세



Source: International Trade Centre, n.d.

출처: IRENA

하지만 2019년에 세계적으로 설치된 PV용량은 전 세계 전력수요의 약 2%를 차지하는 635기가와트(GW) 이상으로 증가했다. 수력 및 풍력에 이어 PV는 용량 면에서 세 번째 재생 에너지원으로 등장하면서 일본에서는 재생에너지 가운데 가장 효과적인 동인 중 하나는 2012년 경제산업성이 전기사업자에 대한 보조금 제도(FIT)를 재도입했다는 것이다. 이 제도는 안정적인 수입으로 재생발전 투자를 용이하게 할 수 있도록 전력회사들이 풍력, 수력, 태양광, 지열, 바이오매스 등 발전 가능한 재생 에너지원으로 발전한 전기를 정부가 정한 정가에 구매하도록 의무화한 것이다.

최근 일본은 시장기반 전력 매매 변경으로 유지보수 효율화 및 비용절감의 중요성이 커지고 있다. 이런 상황에서 일본은 FIT제도를 2022년 4월부터 독일을 비롯한 유럽국가들이 수행하고 있는 FIP(Feed In Premium)제도로 변경하였다. 이 제도는 시장기반 프로그램이 탄소중립을 위한 공정한 경쟁의 장을 만들 것이라는 판단으로 도입하게 되었다. 일본은 최근 탄소중립 공약과 함께 FIP 제도를 도입함으로써 포괄적인 에너지 전환 제도를 마련하게 되었다.

일본의 태양광발전이 장기적으로 긍정적인 것으로 평가받는 것은 FIT제도에 따른 보조금 삭감에도 불구하고 지붕 위 태양광으로 이동하고 있는 것도 큰 요인이 된다. 규모 측면에서 일본의 지붕 위 태양광 시장은 잠재력을 보유한 중국, 인도와 같은 시장을 넘어서지는 못할 것으로 보이지만, 주목할 만한 점은 정부가 그간 FIT 보조금을 지속적으로 축소하고 있음에도 불구하고 태양광 시장규모가 계속 증가하고 있다는 점이다. 일본의 태양광 시장이 비교적 단시간 내에 성장세를 회복할 수 있었던 것은 지붕 위 태양광 설치의 확대가 기여한 것으로 파악된다. 현재 일본 태양광발전 시장은 중국에 이어 두 번째로 큰 시장으로 평가받고 있다. 이런 계기를 마련한 것은 최근 지붕 위에 설치된 태양광 시장을 점차 확대한 것에서 찾을 수 있다.

건물 지붕 위 설치되는 태양광의 성장은 독립형 분산발전 확산의 일환으로 이는 ESS 경제성 확보, 빅데이터, IoT와 같은 기술발전이 시너지를 이룬 결과로 보여진다. 이러한 독립형 분산발전은 생산자와 수요자가 전력을 주고받는 상호 교환방식으로 에너지 시장 구조를 근본적으로 변하게 한다. 지붕 위 태양광의 확대 발전은 나아가 전력산업의 수익구조 자체를 변화시킬 것으로 전망된다. 태양광발전 시설은 재생에너지 시장의 핵심 산업으로 부상하고 있다.

새로 도입된 FIP제도의 가장 큰 특징은 신재생에너지 발전사업자가 전력시장에 참여하도록 한다는 점이다. 신재생에너지 발전사업자는 도매 전력시장을 통해 전력을 판매한 금액과 신재생에너지에 대한 환경 가치를 프리미엄 금액으로 받아 수익을 올리는 구조다. 전력 가치와 환경 가치 모두 입찰 등을 통한 시장경쟁을 기본으로 하는 FIP제도에서는 전반적으로 전력가격이 낮아지는 효과가 있다. 따라서 FIP는 일본의 태양광 산업 발전에 긍정적인 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

일본 태양광 시장은 2022~2027년 9.2% 이상의 연평균 성장률을 기록할 것으로 예상된다. 코로나19 팬데믹은 2020년 약 5.4GW의 태양광 프로젝트가 완료되는 등 국가에 큰 악영향을 미치지 않았다. 다만 공급망과 인력 관련 일부 우려는 2020년 시장이 성장하는데 큰 도전이 되지는 않았다. 송유관 및 계획 단계에서 건설 중인 태양광발전 사업과 같은 요소들이 예측 기간 동안 태양광의 누적 설치용량을 끌어 올릴 것으로 기대된다.

일본에서 태양광발전을 긍정적으로 보는 근거로는 보급 중인 VPP(Virtual Power Plant) 기술과 분산형 에너지를 활용하는 애그리게이션 비즈니스(ERAB: Energy Resource Aggregation Business)의 도입에서도 찾을 수 있다. VPP 기술은 가정 및 사업소에 설치된 소규모발전시설을 ICT·IoT 기술을 활용

해서 집약시키고 하나의 발전시설로 모이도록 제어한다. 또한, ERAB 기술은 일반 배전사업자, 소매 전기사업자, 수요자, 재생에너지 발전사업자라고 하는 거래 관계 사이에서 조정력, 공급력, 불균형 회피, 전력요금 삭감, 출력제어 회피 등의 각종 서비스를 제공할 수 있게 된다.

한편 일본의 태양광발전은 차세대형 태양전지의 기술개발을 통해 2030년을 목표로 보급단계로의 이행을 모색, 기존의 태양전지에서는 설치가 곤란한 주택·건축물 등으로의 설치 확대·시장화를 실현하려고 한다. 태양광발전 관련 현황과 향후 대책에 따르면 차세대 기술의 개발, 관련 산업의 육성과 재구축을 과제로 선정하고 연구개발 가속과 현실 사회 정착, 분산형·변동 재생에너지의 활용 최적화를 위한 제도·시장 정비, 각종 규제·제도 등의 재검토를 향후 대책으로 설정하고 있어 패널 가격 하락에 따른 위기를 극복하고 신기술개발과 적절한 정부 정책에 집중하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3) 재생에너지 산업 비교

본 장의 재생에너지 산업 비교 부분은 IRENA의 국가별 에너지 프로파일 부분에서 한국과 일본의 자료를 인용하여 정리하였다.

#### (1) 신재생에너지 비율과 에너지 자립도

일본의 신재생에너지 비율은 2014년 5%에서 2019년 6%로 성장했다. 그러나 총 에너지사용 증가율은 같은 기간 5.6%가 감소하고 있다. 그럼에도 불구하고 신재생에너지의 비율은 25.2%가 증가하고 있어 화석연료가 7.2% 감소한 것과 뚜렷한 대조를 보인다. 한편 에너지 수입은 2014년 99%에서 2019년 95%로 하락했으나 여전히 수입 의존도가 절대적으로 높다. 이에 따라 에너지 자급률은 2014년 7%에서 2019년 12%로 증가한 것이 주목된다. 이는 총 에너지 수요가 줄면서 화석연료 수입을 줄이는 동시에 신재생에너지의 보급이 확대된 것에 기인한 것으로 볼 수 있다.

〈표 4-4〉 일본과 한국의 재생에너지 현황

일본			한국		
Total Energy Supply (TES)	2014	2019	Total Energy Supply (TES)	2014	2019
Non-renewable (TJ)	17 612 981	16 346 191	Non-renewable (TJ)	11 060 436	11 508 610
Renewable (TJ)	901 657	1 129 117	Renewable (TJ)	159 998	241 498
Total (TJ)	18 514 638	17 475 308	Total (TJ)	11 220 434	11 750 108
Renewable share (%)	5	6	Renewable share (%)	1	2
Growth in TES	2014-19	2018-19	Growth in TES	2014-19	2018-19
Non-renewable (%)	-7.2	-3.6	Non-renewable (%)	+4.1	-0.7
Renewable (%)	+25.2	+6.8	Renewable (%)	+50.9	+6.1
Total (%)	-5.6	-3.0	Total (%)	+4.7	-0.6
Primary energy trade	2014	2019	Primary energy trade	2014	2019
Imports (TJ)	18 271 877	16 670 932	Imports (TJ)	12 232 892	13 256 260
Exports (TJ)	674 268	838 891	Exports (TJ)	2 472 617	2 905 002
Net trade (TJ)	-17 597 609	-15 832 041	Net trade (TJ)	-9 760 275	-10 351 258
Imports (% of supply)	99	95	Imports (% of supply)	109	113
Exports (% of production)	56	40	Exports (% of production)	122	145
Energy self-sufficiency (%)	7	12	Energy self-sufficiency (%)	18	17

출처: IRENA

출처: IRENA

우리나라의 경우 신재생에너지 비율은 2014년 1%에서 2019년 2%로 성장해 아직은 저조한 모습을 보이고 있다. 또한, 총 에너지사용 증가율은 같은 기간 4.7%가 증가했다. 다만 2018~2019년 사이에 0.6%가 감소한 것은 주목된다, 여기서 특기할 점은 신재생에너지의 비율은 50.9%로 급증하고 있다는 점이다. 한편 에너지 수입은 2014년 109%에서 2019년 113%로 소폭 증가했으나 수출도 122에서 145로 늘어났다. 이에 따라 에너지 자급률은 2014년 18%에서 2019년 17%로 소폭 감소했다. 우리나라의 에너지 자급률은 일본보다는 높지만 신재생에너지의 비율은 상대적으로 낮은 수준이다.

## (2) 에너지 집중도

에너지 집중도는 에너지 비효율성을 측정하는 척도인데 GDP 단위당 에너지 단위로 계산된다. 높은 에너지 집중도는 에너지를 국내총생산으로 전환하는 데 가격이나 비용이 많이 소요된다는 것을 의미한다. 반면 에너지 집중도가 낮으면 에너지를 국내총생산으로 전환하는 비용이나 가격이 낮아 효율적이라는 의미가 된다. 따라서 에너지 집중도는 낮을수록 효율적이라고 할 수 있다.

에너지 집중도에는 여러 가지 요인들이 영향을 미친다. 그것은 경제의 일반적인 생활 수준과 날씨 등을 반영할 수 있다. 특히 춥거나 더운 기후에서는 난방 또는 냉방을 위한 가정과 직장에서의 과도한 에너지 소비에 대한 에너지 절약 정책

및 효율성 제고 등을 수립 대응하고 있다. 일반적으로 기기 및 건물의 에너지 효율, 차량의 연비, 차량 주행 거리, 효율적 운송 방법 및 패턴, 대중교통의 용량 및 효율, 에너지 배급 또는 보존 효과, 자연재해, 전쟁, 대규모 정전, 에너지의 효율적인 사용 또는 에너지 보조금과 같은 에너지 정책 등은 한 국가의 전반적인 에너지 집중도에 영향을 미칠 수 있다.

일본과 한국의 에너지 집중도를 비교해 보면 일본은 2014년 3.7에서 2019년 3.3으로 낮아지고 있다. 이는 에너지 효율이 높아지는 것으로 해석할 수 있다. 반면 한국의 경우 같은 기간 5.8에서 5.3으로 개선되고 있지만, 2016년 다시 5.8을 기록함으로써 실질적으로는 상대적으로 더 짧은 기간에 에너지 집중도가 개선되고 있음을 확인할 수 있다. 다만 아직 한국의 경우는 에너지 집중도가 상대적으로 높아 이를 개선하려는 노력이 더 필요할 것으로 보인다.

〈그림 4-9〉 일본과 한국의 에너지 집중도



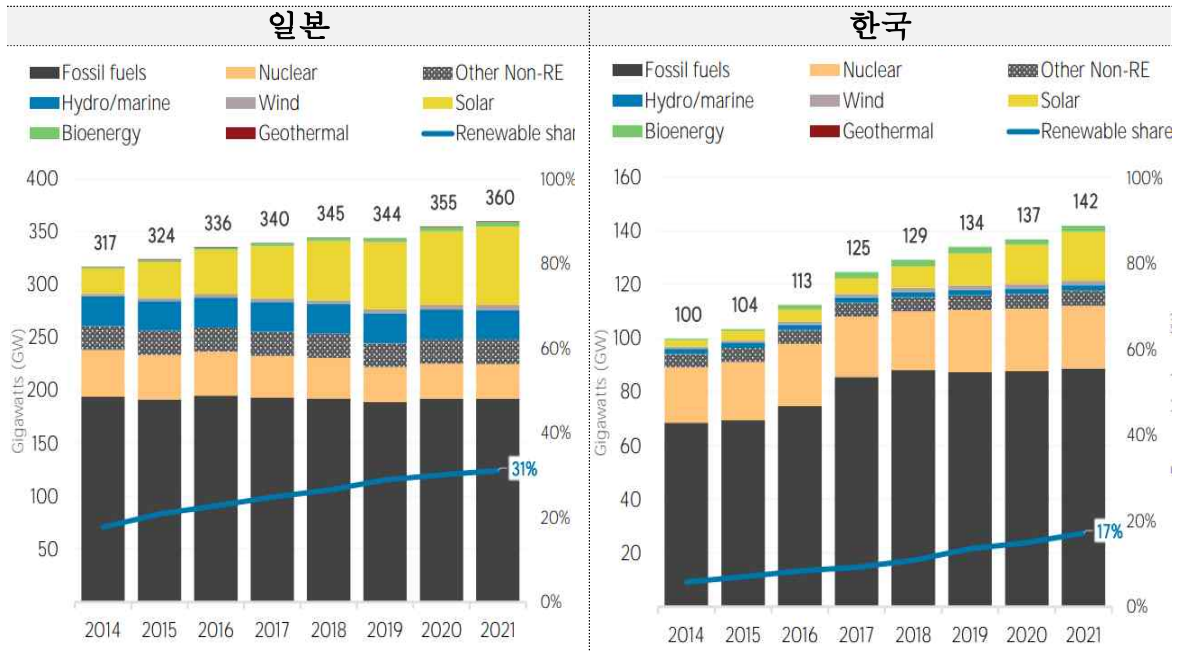
출처: IRENA

### (3) 분야별 발전 능력

일본의 총 발전용량을 보면 2014년 317GW에서 2021년 360GW로 증가했다. 분야별로 보면 화석연료 비중은 같은 기간 50% 수준에서 거의 변화가 없는 반면, 원전 비중은 14%에서 7% 수준으로 낮아졌다. 이에 따라 신재생에너지의 비중은 2014년 20% 수준에서 2021년 31%로 증가했다. 그중에서도 태양광의 비중은 급증하는 모습을 보이고 있다.



〈그림 4-10〉 일본과 한국의 분야별 발전 능력



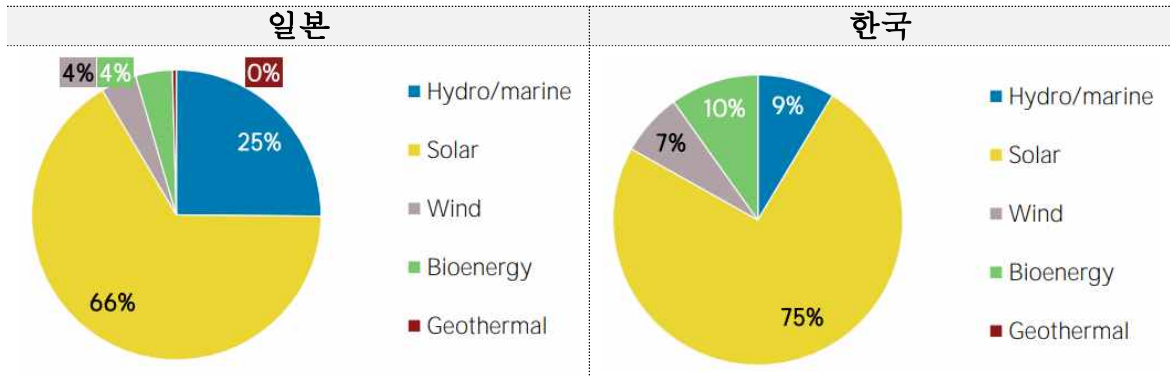
출처: IRENA

반면 우리나라의 경우는 총 발전용량이 2014년 100GW에서 2021년 142GW로 급성장했다. 이를 일본과 비교해 보면 2014년 31.5%에서 2021년 39.4%로 성장한 것으로 나타나고 있다. 그러나 여전히 화석연료에 대한 비중이 크게 나타나고 있으나 상대적으로 발전용량이 늘어나면서 재생에너지 비율이 17%까지 증가했다. 그중에서도 태양광이 차지하는 비중은 10%에 이르러 절대적인 위치에 있음을 확인할 수 있다. 그러나 다른 에너지의 증가는 미미한 상태이다.

#### (4) 신재생에너지 발전의 구성

일본과 한국의 신재생에너지 발전의 분포를 보면 두 나라 모두 태양광이 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 일본은 66%인 반면, 한국은 75%를 차지해 더욱 높은 수준을 나타내고 있다. 일본의 경우 그 다음으로는 수력·해양이 25%, 풍력, 바이오가 각각 4%로 나타나고 있다. 한편 한국은 바이오 10%, 수력·해양 9%, 풍력 7%로 나타나고 있다.

〈그림 4-11〉 일본과 한국의 신재생에너지 발전의 구성(2021년)



출처: IRENA

## (5) 신재생 발전설비의 변화

아래의 〈그림 4-12〉는 일본과 한국의 발전설비 변화를 나타내고 있다. 이 자료에 따르면 일본은 2021년 기준 전년 대비 화석연료 발전설비는 220MW, 수력·해양발전은 22MW가 감소한 반면, 태양광 4,427MW, 바이오 493MW, 풍력 100MW가 증가한 것으로 조사되었다. 이는 재생에너지를 이용한 발전이 급증하고 있다는 것을 보여준다.

〈그림 4-12〉 일본과 한국의 발전설비의 변화(2021년)

일본		한국	
Net capacity change in 2021 (MW)		Net capacity change in 2021 (MW)	
Non-renewable - 220	Hydro and marine - 22	Non-renewable + 1 162	Hydro and marine + 35
Solar + 4 427	Wind + 100	Solar + 3 586	Wind + 72
Bioenergy + 493	Geothermal 0	Bioenergy + 261	Geothermal 0

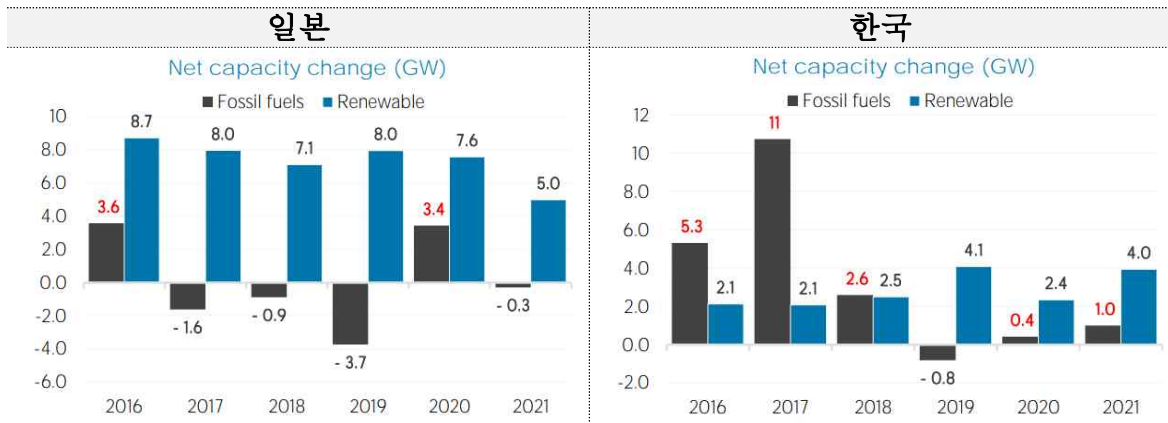
출처: IRENA

우리나라는 같은 기간으로 볼 때 화석연료 발전설비는 1,162MW가 증가해 일본과 뚜렷한 차이를 보이고 있다. 한편 신재생에너지의 발전용량도 증가하고 있는데 태양광 3,586MW, 바이오 261MW, 풍력 72MW, 수력·해양이 35MW 증가한 것으로 나타났다. 따라서 우리나라는 아직 화석연료에 의존하는 경향이 남아 있는 가운데 신재생에너지를 통한 발전도 늘어나고 있는 양상이다.

## (6) 화석연료와 재생에너지 발전의 변화

아래의 〈그림 4-13〉은 일본과 한국의 화석연료와 재생에너지의 변화를 나타내고 있다. 여기에 따르면 일본은 2016년, 2020년을 제외하면 화석연료 발전 설비는 마이너스를 기록하고 있으며 재생에너지는 지속적으로 증가하고 있음을 볼 수 있다.

〈그림 4-13〉 일본과 한국의 화석연료와 재생에너지 발전설비의 변화



출처: IRENA

우리나라의 화석연료 발전설비는 2019년을 제외하면 해마다 증가하고 있다. 그러나 2019년부터 증가 폭은 대폭 둔화되는 추세를 보여준다. 반면 재생에너지의 발전설비는 2016년부터 꾸준히 증가하고 있다. 하지만 아직까지 재생에너지를 통한 발전으로의 전환은 다소 시간이 걸릴 것으로 해석된다.

## 5. 정책적 시사점

앞에서 살펴본 바와 같이 일본은 1950년의 전기사업 재편성 이래 민영 전력 회사가 지역마다 1사씩 총 10개 사가 운영중에 있으며, 일본 내 지역별 분포는 〈그림 5-1〉과 같다. 이들은 지역을 기반으로 독점적으로 전기 공급을 해 왔다. 그러나 1990년대 버블 경기의 붕괴 후 고비용 구조·내외 가격 차의 시정을 목적으로 경쟁 원리 도입에 따른 경영 효율화를 촉진해야 한다는 논의가 일어났다. 이에 따라 EU와 영국, 미국의 모델을 벤치마킹을 통해 1995년부터 전력 자유화가 시작되었다. 그러나 후쿠시마 원전사고 이후 전력의 안정적 공급이 중요하게 인식되었다.

2016년 4월 1일 이후 전기 소매업으로의 참여가 전면 자유화되어 가정 및 상점을 포함한 모든 소비자가 전력회사 및 요금을 자유롭게 선택 가능해졌다. 하지만 앞으로의 경제적 성과는 차치하고 독점적인 발전 형태는 일본 전력산업의 약점으로 지적되어 왔다. 일본에서는 전기를 공공재로 인식하기보다는 오랫동안 민간 지역 독점 체제를 유지함으로써 효율성을 중시하는 경제재로 인식하고 있다.

〈그림 5-1〉 일본의 지역별 전력회사 공급구역



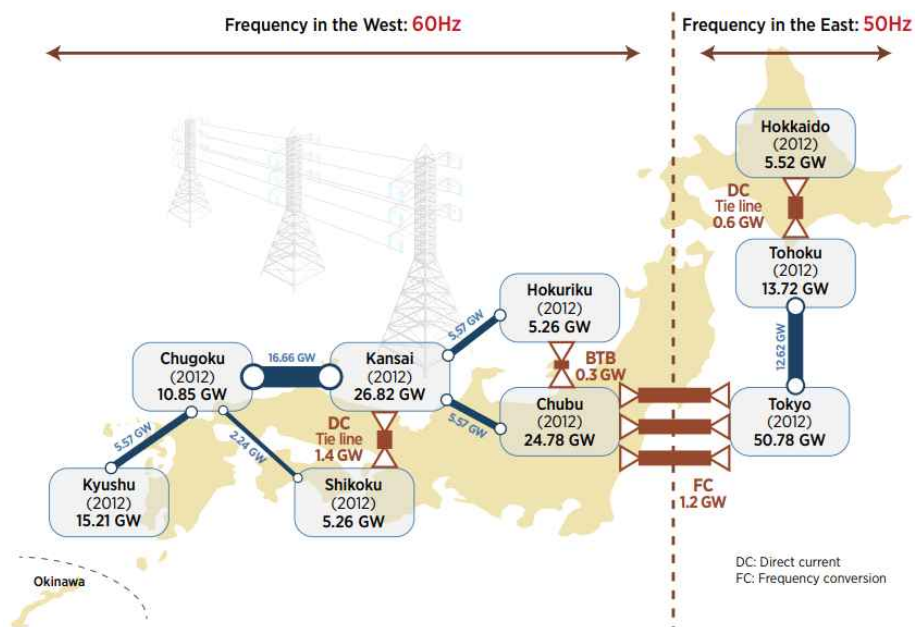
출처: 経済産業省 資源エネルギー庁 HP. 各地方の電力会社の供給区域

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/electricity\\_liberalization/what/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/what/)

일본 전력산업의 또 다른 문제점은 지역에 따른 주파수가 다른 유일한 국가라는 점이다. 일반적으로 파형이 없는 직류(DC)는 주파수가 없고 교류(AC)만 주파수가 있다. 문제는 직류로는 멀리 송전할 수 없다는 단점이 있고 교류는 파동을 이용해 멀리 송전하는데 유리하지만 주파수를 일정하게 유지하는 것이 관건이 된다. 주파수가 다르면 장비를 손상시키게 되고 서로 나란히 작동할 수 없기 때문에 일정한 전기 주파수를 유지하는 것이 중요하며 이것은 국가 규모의 전기를 공급할 때 심각한 영향을 미치게 된다. 따라서 모든 국가는 전기규격을 정하고 대부분 통일해서 사용하고 있다.

우리나라는 60Hz, 220V를, 미국은 같은 60Hz이지만, 전압은 110V로 우리와 다르게 사용한다. 이에 비해 일본은 동과 서로 갈려 동일본은 50Hz를, 서일본은 60Hz를 사용, 한 국가 내에서도 주파수가 다른 유일한 국가다. 일본의 서쪽 지역은 60Hz, 동쪽 지역은 50Hz를 사용한다. 이것은 1895년 도쿄지역은 독일형 AEG에서 50Hz 발전기를 구입하여 설치했고, 오사카지역은 1896년의 미국형 제너럴 일렉트릭에서 구입한 60Hz 발전기를 설치한 것에 기인한다. 오늘날 두 지역의 접경 영역에는 주파수를 변환하는 4개의 연속 HVDC 변전소를 설치해 송전을 돕고 있다. 하지만 이처럼 주파수가 다르면 송전의 효율성이 떨어진다는 것은 알려진 사실이다.

〈그림 5-2〉 일본의 주파수와 주요 송전망



Disclaimer: Boundaries and names shown on this map do not imply any endorsement or acceptance by IRENA.  
Source: UNESCAP, 2017.

출처: IRENA

이처럼 일본은 독점 형태의 민간 발전소와 주파수가 달라 송전에 어려움을 겪고 있다는 제약에도 불구하고 재생에너지 산업에서는 일정한 성과를 보이고 있는 것도 사실이다. 이런 점을 감안하여 다음과 같은 시사점을 도출할 수 있다.

## 1) 장기정책과 지자체의 협력

일본의 재생에너지 정책에서 가장 큰 특징은 정부가 장기적인 관점에서 정책을 제시해 국민들의 협조를 구하는 것이라고 할 수 있다. 이를 통해 사회적 갈등을 줄이고 효율성을 높이는 것이 주목된다. 이 과정에서 재생에너지 발전소가 들어설 지자체와 협력관계를 구축하기 위해 다양한 정책을 실시하는 것도 특기할 만하다.

일본은 2002년 6월 제정된 ‘에너지정책기본법’을 기초로 안정적 공급, 환경과의 조화, 시장원리의 활용을 구현하기 위해 2003년 10월 ‘제1차 에너지 기본계획’을 수립했다. 여기에는 3가지 기본방침과 함께 국가, 지방공공단체, 사업자, 국민 등의 역할 분담을 명확하게 규정하고 있다. 이후 국제적인 에너지 환경변화와 기후변화에 따라 2006년 5월 ‘신국가에너지전략’을 공표하였고 이때부터 3년마다 ‘에너지 기본계획’을 제정하여 장기적인 접근을 추진하고 있다. 에너지 정책의 요점은 안전성을 전제로 한 후, 에너지 안정공급을 가장 중요한 과제로 제시하고 경제적 효율성의 향상에 따른 저비용으로 에너지 공급을 실현하고, 동시에 환경 적합성을 고려한 S+3E의 실현을 위해 최대한으로 그 대책을 수행하는 것으로 구성되어 있다.

일본 에너지 정책의 특성은 안전성(Safety)으로 바탕으로 에너지 안정적 공급(Energy Security), 경제 효율성(Economic Efficiency), 환경 적합(Environment)의 S+3E로 이루어져 있다. 가장 최근인 2021년 7월 21일 ‘제6차 에너지 기본계획’에 따르면 ①동경전력 후쿠시마 제1원전 사고 이후 10년의 발자취, ② 2050년 탄소중립 실현을 위한 과제와 대응, ③2050년을 바라본 2030년을 향한 정책 대응 분야로 구성되어 있다.

특히 주목되는 점은 재생에너지에 대한 정책을 위해 지역과 공생하는 형태의 적지 확보를 강조하고 있다. 이는 재생에너지 촉진구역을 설정하고 여기에 태양광·육상풍력의 도입 확대, 해상풍력발전을 위한 법안 개정을 통해 장기적인 정책구상을 밝히고 있다. 또한, 태양광발전에 특화된 기술기준의 착실한 집행, 소형전원의 사고·보고 등을 통한 안전대책 강화, 지역 상생을 원활히 하기 위한 조례 책정의 지원을 위해 노력하고 있다. 한편 FIT를 대체하는 FIP제도를 도입함으로써 입찰제도 활성화 및 중장기적인 가격목표 설정, 발전사업자가 시장 연동의

프리미엄을 받는 FIP제도 도입에 따른 재생에너지 시장의 성장을 위해 노력하고 있다.

한편 풍력발전의 도입 활성화를 위해 규제 합리화, 지열의 도입 확대를 위한 자연공원법·온천법·삼림법의 규제 운용을 재검토하고 있다. 또한 건물 벽면, 강도가 약한 지붕에도 설치 가능한 차세대 태양전지의 연구개발 및 사회 구현을 가속, 부유식 요소기술 개발을 가속, 초임계 지열자원의 활용을 위한 대심도 굴착 기술개발 등을 선도하고 있다. 이를 통해 일본 정부는 발전 분야의 신재생 에너지의 활성화를 위한 종합적인 대책은 물론, 향후 극복해야 할 과제를 제시하고 이를 해결하기 위해 노력하고 있다.

〈표 5-1〉 전력 부문에 극복해야 할 주요 과제

탈탄소 기술			극복해야 할 주요 과제
전력 부문	발전	재생에너지	-도입 확대를 위해 계통제약 극복, 코스트 저감, 주변환경과의 조화가 과제
		원자력	-안전 최우선의 재가동, 안전성 등에 우수한 로(爐) 개발, 지속적 신뢰회복이 과제
		화력+CCUS/ 탄소 리사이클	-CO2 회수기술 확립, 회수 CO2 용도 확대, CCS 적지개발, 코스트 저감이 과제
		수소 발전	-수소 전소(專燒) 화력 기술개발, 수소 인프라 정비가 과제
		암모니아 발전	-암모니아 혼소율의 향상, 암모니아 전소 화력의 기술개발이 과제

※ 색상 부분은 기술적 이노베이션이 필요

출처: 資源エネルギー庁(2021.12, p.9), 第6次エネルギー基本計画について

일본 정부의 2030년 탄소 감축을 위한 정책 대응을 살펴보면, S+3E를 대전제로 재생에너지의 주력 전원화를 위해 노력하고, 재생에너지에 최우선 원칙으로 대응하며 국민부담을 줄이는 동시에 지역과의 공생을 도모하면서 최대한의 도입을 촉진한다는 방침이다. 여기서 지역과 공생하는 형태로 재생에너지 발전을 위해 재생에너지 촉진구역의 설정(Positive Zoning)에 따른 태양광·육상풍력의 도입 확대, 재생에너지 해역 이용법에 의거한 해상풍력 안전 마련의 가속 등으로 대응하고 있다. 한편 일본은 지역에 따라 주파수가 달라 송전에 문제가 심각한 만큼 송전을 위한 계통제약을 극복하기 위해 노력하고 있다. 즉, 연계선 등의 기간계통 마스터 플랜을 수립하고 재생에너지가 화석연료보다 우선적으로 기간계통을 이용 가능하도록 송전 관련 규칙을 재검토해 효율성을 높인다는 전략이다.

한편 지방자치단체와 탄소중립을 위한 재생에너지에 대한 인식 공유·신뢰 관계의 구축, 지역 산업의 복선화 및 신산업·고용의 창출도 포함해 지역의 미래상을



함께 그리는 프레임워크 등을 마련하여 금전적 지원으로 대응하고 있다. 또한, 중소기업 및 개인사업자들은 환경·에너지 대책자금 지원정책에 따라 일본정책금융공고(日本政策金融公庫: Japan Finance Corporation, 이하 JFC)를 통해 재생에너지 설비 개조 및 갱신에 필요한 자금을 융자받을 수 있도록 설계하고 있다. 이에 따르면 대출 기간은 20년 이내이며, 대상 설비는 재생에너지 발전설비(태양광, 풍력, 바이오매스, 지열, 수력), 재생에너지 열이용 설비(태양열, 바이오매스열, 지열), 연료제조설비(바이오매스) 등을 포함하고 있다. 또한 각종 대출 지원 외에도 세제 혜택을 추진하고 있으며, 지역공생 재생에너지 보급촉진사업의 일환으로 재생에너지와 축전지(ESS) 등의 조정력을 활용하여 재해시 자립적으로 지역에 전력을 공급할 수 있는 ‘지역 마이크로 그리드’를 구축하고자 하는 민간사업자를 대상으로 보조금을 지급하는 사업도 시행되고 있다.

## 2) 재생에너지 전담기구의 설립

세계적인 에너지 위기가 심화되고 탄소중립이라는 절대적 화두가 등장하는 상황에서 우리나라는 재생에너지에 관한 정책과 실행을 총괄하는 ‘에너지 전문 전담기구’가 필요한 것으로 보인다. 특히 재생에너지 분야의 기술발전에 대응하고 신기술을 개발하기 위해서는 중앙정부와 특정 에너지만을 담당하는 기관으로서 신속한 대응이 어렵다는 현실적 어려움이 있다. 따라서 중앙정부의 산하기관으로서 재생에너지 전담기구는 반드시 필요한 것으로 보이며, 이를 위해 전담기구의 설립을 적극 검토해 볼 필요가 있는 것으로 보인다. 여기에서 일본의 재생에너지의 정책은 경제산업성에서 총괄하고 있지만, 실질적인 업무는 NEDO에서 실행하고 있다는 점을 참고할 필요가 있다.

1980년 발족한 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)는 일본의 재생에너지산업의 발전전략 수립과 기술개발에 중추적 역할을 담당하고 있다. 2022년 현재 NEDO는 1,568억엔의 예산과 1,412명의 직원을 두고 에너지·지구환경 문제의 해결과 산업기술력의 강화라는 두 가지 미션을 실천하기 위해 기업, 대학 및 공적 연구기관의 역량을 결집해 기술개발·실증에 주력하고 있다. 이를 위해 비화석 에너지, 가연성 천연가스 및 석탄에 관한 기술 및 에너지 사용 합리화를 위한 기술 및 광공업 기술에 관해 민간의 능력을 활용하여 실시하는 연구개발과 민간의 연구개발 촉진, 기술 활용 촉진에 주력하고 있다. 특기할 점은 이런 업무를 국내에만 한정하는 것이 아니라 국제적으로 협조하면서 국내외 경제적 사회적 환경에 맞는 에너지의 안정적이고 효율적인 공급 확보 및 경제와 산업 발전에 이바지하는 것을 목적으로 하고 있다.



2018년 향후 5년간 NEDO가 추진하는 내용을 정리한 ‘제4기 중장기 계획’에 주목된다. 기술전략의 설정과 기술개발 매니지먼트 기능을 강화해 도전적인 연구개발의 추진, 오픈 이노베이션의 촉진이나 연구개발형 벤처기업의 육성에 집중하고 있다. 먼저 기술개발 매니지먼트를 통한 성과의 사회 구현을 위해 에너지·환경 분야에서는, 2050년까지 80%의 온실효과 가스배출량 삭감과 중장기적인 과제를 해결하기 위해 혁신적인 기술의 발굴, 개발 등을 추진한다. 산업기술 분야에서는 「Society 5.0」 실현을 향해서 인공지능(AI)이나 로봇 등의 코어 기술을 중심으로, 일본이 강점을 가지는 제조기술과의 융합을 목표로 산학관의 예지를 결집해 세계 최첨단의 기술을 사회에 전달하는 역할을 담당한다.

보다 구체적으로는 기술개발 경쟁이 격화되고 있는 가운데 국내외에서 각 분야의 정보를 수집해 기술전략의 설정이나 프로젝트의 기획·입안에 활용하고 있다. 이를 위해 국내외 기술동향 조사나 전문가 등에 대한 공청회를 통해 기술개발 목표를 설정하고 이노베이션을 통한 경제 성장과 사회의 과제해결을 목표로 5년, 10년, 20년 앞을 내다본 프로젝트의 기획·입안 등을 실시하고 있다. 특히 주목되는 것은 표준화를 염두에 둔 기술개발, 타업종과의 연계, 대규모 실증사업과 국제 협력에 집중하고 있다. 기술개발뿐만 아니라 민간기업만으로는 어려운 대규모 실증시험까지 일관되게 프로젝트를 추진하고 있다.

또한, 여러 나라와의 제휴를 통해 일본의 기술을 세계에 알리고 일본의 첨단 기술 보급이나 정보수집을 위해 국외에서 프로젝트도 실시하며 각국의 다양한 기관과 협정을 체결하여 적극적인 해외 전개를 지원하고 있다. 이를 통해 표준화 활동·지적재산 전략의 이미지 사진 개발 기술의 성과를 사회 구현으로 연결하는 효과가 높은 국제 표준의 획득을 목표로 활동한다. 이를 위해 NEDO는 가와사키에 본부를 두고 오사카에 관서지부를 두는 동시에 워싱턴, 방콕, 파리, 실리콘 밸리, 베이징, 뉴델리에 해외 지사를 두고 국제적인 연구 동향 파악은 물론, 전략적 협력과 일본 중소기업의 해외 진출을 돕기 위해 노력하고 있다.

NEDO는 세계 최첨단 기술개발 매니지먼트를 지향하는 두 가지 미션을 추진 이노베이션 창출에 공헌하고 있다. 첫째는 에너지·지구환경문제의 해결이다. 신에너지 및 에너지 절감기술의 개발과 실증실험 등을 적극적으로 전개하여, 신에너지의 이용 확대와 더불어 한층 더 에너지 절약을 추진하는 것이다. 또한, 일본 국내 사업에서 확보한 경험을 토대로 해외에 기술의 실증연구를 추진하여 에너지 안정공급과 지구환경문제의 해결에 공헌하는 것이다. 둘째는 산업기술력의 강화이다. 산업기술력의 강화를 목표로 미래 산업에 필요한 핵심 기술을 발굴, 산업경쟁력의 기반이 되는 중장기적인 프로젝트의 실시 및 실용화 개발에 있어서

각 단계의 기술개발을 추진하는 것이다. 이때 산학관의 협력을 통해 고도의 매니지먼트 능력을 발휘함으로써 신기술의 시장화도 도모하고 있다.

### 3) 기술개발과 해외 진출

일본 정부는 에너지 안보 향상과 인프라 수출 촉진을 동시에 실현하기 위해 에너지 효율 및 재생에너지 분야의 해외 진출을 지원하고 있다. 2020년 9월 환경성은 환경 인프라 관련 민간기업의 해외 진출을 종합적으로 지원하기 위해 환경 인프라 해외 진출 플랫폼(JPESI: Japan Platform for Environmentally Sustainable Infrastructure)를 설립하였다. 이 플랫폼은 상대국의 현지 정보를 수집하여 자국의 관계자가 중요한 정보를 얻을 수 있도록 지원하고, 관계자 간의 조정 및 비즈니스 매칭 기회를 만들어 다양한 민간기업 프로젝트를 창출하는 것을 목표로 한다. 더불어, 민간기업이 이용할 수 있는 국제기관의 금융 정보 등을 제공하는 역할도 수행하고 있다. 특히, 신흥 및 개발도상국에 대해서는 일본의 기술·경험에 기반한 제도 구축 및 기술 전개 부문의 지원을 통해 선진 기술의 보급을 도모하고 있으며, 재생에너지 관련 해외투자에 대한 공적 금융 지원책도 운영하고 있다.

한편 NEDO에서는 재생에너지 보급 확대, 탈탄소화 기술개발 촉진, 재생에너지의 주력 전원화 달성을 위해 2007년부터 ‘신에너지 중소·스타트업 지원제도’와 ‘미래형 신에너지 실증제도’를 실시하고 있다. ‘신에너지 중소·스타트업 지원제도’는 재생에너지 관련 또는 응용 가능한 초기 기술을 가진 중소기업 및 스타트업 기업 등을 발굴 및 지원하여 신기술 개발 및 실용화를 촉진하고 재생에너지 도입 및 향후 성장 분야의 신규 사업자 증가, 신산업 창출 등을 목표로 한다. ‘미래형 신에너지 실증제도’는 발전비용의 제언, 입지제약의 극복, 장기 안정 전원화, 지역 특유의 재생에너지원과의 공생 등 재생에너지 대량 도입을 위한 대응 지원을 목적으로 하고 있다.

우리나라의 경우 2016년 일본의 전기 소매업으로의 전면 자유화가 이루어진 상황에서, 기술력을 가진 중소기업들의 적극적인 참여를 모색해 볼 필요가 있다. 특히 1만 개 이상의 부품이 필요로 하는 해상풍력발전의 경우 초기부터 일본 기업과 전략적 협업을 추진하는 것도 일본 진출과 나아가 개도국 재생에너지 시장에 진출하기 위한 하나의 열쇠가 될 것이다. 또한, 재생에너지, 수소, 축전지와 같은 에너지시스템 분야의 해외 진출을 추진하기 위해 상대국의 정부·기업과 공동으로 국제인증사업을 진행해야 한다. 이런 사업은 해외에서 시스템의 유효성을 실증함으로써 궁극적으로는 우리 기술이 전파되는 것을 목표로 진행되어야 할

것이다. 이를 위해 정부에서는 재생에너지 발전은 미래의 첨단 성장동력이라는 점을 국민들에게 인식시키고 기술력을 가진 국내 중소기업을 중심으로 기술 플랫폼을 구성하고 여기에 참여한 기업들을 대상으로 해외 진출을 위한 제품 설명회, 구매 상담회 등을 통해 적극적인 지원책을 검토해야 할 것이다. 아울러 기술개발 동향과 실증화를 위한 다양한 정책 패키지도 필요할 것이다.

## 〈참고문헌〉

国際海運2050年カーボンニュートラルに向けた官民協議会(資料3)  
通産資料調査会(1999.1), 資源エネルギー年鑑(資源エネルギー庁 監修), 1999/2000年版  
通産資料調査会(1999.3), 新エネルギー便覧(資源エネルギー庁 編集), 1998年度版  
エンジニアリング協会 HP, <http://www.ena.or.jp/WE-NET/index.html>  
エンジニアリング協会 HP, [http://www.ena.or.jp/WE-NET/newinfo/station\\_taka\\_e.html](http://www.ena.or.jp/WE-NET/newinfo/station_taka_e.html)  
新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)(2021.3.1), NEDO 40年史  
資源エネルギー庁(2021.12), 第6次エネルギー基本計画について  
電気事業連合会 HP, <https://www.fepc.or.jp/smp/nuclear/policy/seisaku/outline/index.html>  
日本風力発電協会(2022.2.25) HP. <https://jwpa.jp/information/6225/>  
日本風力発電協会(JWPA)(2015.3.4, p.6) 日本の風力発電事業の現状と将来展望  
資源エネルギー庁(2022.6.7), エネルギー白書 2022  
エネルギー情報センター HP, <https://pps-net.org/glossary/12634>  
資源エネルギー庁(2018), ‘総合エネルギー統計(2018年度確報値)等を基に資源エネルギー庁作成’  
資源エネルギー庁(2021.3), 第6次エネルギー基本計画の概要  
資源エネルギー庁(2021.3.10), 2030年度におけるエネルギー需給の見通し  
三菱総合研究所 石田裕之(2021.12.27.), カーボンニュートラルを契機とした日本のエネルギー安定供給と経済成長, <https://www.mri.co.jp/knowledge/column/20211227.html>  
経済産業省(2021.8.3), 発電コスト検証に関する取りまとめ  
資源エネルギー庁(2021.10), エネルギー基本計画の概要  
経済産業省(2021.6.18), 2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略  
日本地熱學會 HP, [https://grsj.gr.jp/archives/jgea/index1\\_4.html](https://grsj.gr.jp/archives/jgea/index1_4.html)  
特定非営利活動法人MATSRA HP, <https://matsra.jp/about3/>  
中央環境審議会地球環境部会(第51回) 配付資料「経済産業省ヒアリング追加説明資料」(燃料電池の導入促進)  
新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)「よくわかる! 技術解説 新エネルギー／分散型エネルギー」  
日本電気工業会(JEMA) HP, <https://www.jema-net.or.jp/Japanese/res/fuel/about.html>  
燃料電池実用化推進協議会(FCCJ) HP, <https://fccj.jp/jp/aboutfuelcell.html>  
日本原子力文化財団, 原子力総合パンフレット(2021年度版, p.20), 1章 日本のエネルギー事情と原子力政策  
原子力規制委員会 HP, <https://www.nra.go.jp/activity/regulation/tekigousei.html>

資源エネルギー庁(2017.9.7.), HP, 原発の安全を高めるための取組~新規制基準のポイント, <https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/tokushu/nuclear/shinkijun.html>

資源エネルギー庁(2021.3.22, p.46), 核燃料サイクルの確立に向けた取組

資源エネルギー庁(2022.8.9, p.23), 総合資源エネルギー調査会, 電力・ガス事業分科会, 原子力小委員会, 第29回会合\_(資料5), エネルギー・原子力に関する国内外の動向

日本原子力文化財団, 原子力総合パンフレット(2021年度版, p.22), 1章日本のエネルギー事情と原子力政策, <参考>世界の原子力発電の状況

独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構 HP, <https://geothermal.jogmec.go.jp/information/history/history.html>

日本地熱協会(2021.1.14.), 2020年度地熱発電・熱水活用(研究会第5回), 地熱発電の現況と課題

独立行政法人 エネルギー・金属鉱物資源機構(2020.9, p.3), 地熱

佐賀大学, 海洋エネルギー研究所 HP, [https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean\\_energy/](https://www.ioes.saga-u.ac.jp/jp/ocean_energy/)

NEDO, TSC Foresight Vol. 28,(2018.7) 海洋エネルギー分野の技術戦略策定に向けて

経済産業省 資源エネルギー庁 HP. 各地域の電力会社の供給区域

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/electricity\\_liberalization/what/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/what/)

“Wind energy generation vs. installed capacity“. Our World in Data. Archived from the original on 19 October 2021. Retrieved 23 November 2021.

IEA (2017b). “Technology Roadmap – Delivering Sustainable Bioenergy“. International Energy Agency.

IRENA (2014). “Global bioenergy supply and demand projections – a working paper for REmap 2030“, International Renewable Energy Agency.

“Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change“. www.ipcc.ch. Retrieved 6 April 2022.

“Creating new value through collaborative creation: Wind turbines using digital technology“. Hitachi. March 2018. Retrieved 9 January 2019.

“First International Conference on Fuel Ammonia Held“. METI, Japan. 12 October 2021. Retrieved 7 November 2021

“How Does Ocean Wave Power Work?“. Energy Informative. Archived from the original on 27 April 2019. Retrieved 27 April 2019.

“IRENA – Global geothermal workforce reaches 99,400 in 2019“. Think

GeoEnergy – Geothermal Energy News. 2 October 2020. Retrieved 2020-10-04.

“Japan offshore wind: The ideal moment to build a vibrant industry“. 12 August 2022.

“Japan plans to install up to 45 GW of offshore wind power by 2040“. Reuters. 15 December 2020.

“Japan to advance ammonia co-firing technology“. Argus Media. 24 June 2021. Retrieved 8 November 2021.

“Ocean—potential“. International Energy Agency (IEA). Archived from the original on 22 May 2015. Retrieved 8 August 2016.

“Project tests viability of offshore floating wind turbines,“ Japan Times. 4 April 2013; retrieved 30 April 2013.

“Reduction of residential carbon dioxide emissions through the use of small cogeneration fuel cell systems – Combined heat and power systems“. IEA Greenhouse Gas R&D Programme (IEAGHG). 11 November 2008. Archived from the original on 3 December 2013. Retrieved 1 July 2013.

“Renewable Energy and Jobs – Annual Review 2020“. irena.org. Archived from the original on 6 December 2020. Retrieved 2 December 2020.

“Renewable Energy Market Update 2021 / Renewable electricity / Renewables deployment geared up in 2020, establishing a “new normal“ for capacity additions in 2021 and 2022“. IEA.org. International Energy Agency. May 2021. Archived from the original on 11 May 2021.

“Renewable Power – Analysis“. IEA. Archived from the original on 22 November 2021. Retrieved 22 November 2021.

“Renewables 2019“. IEA. Retrieved 26 January 2020.

“Solar – Fuels & Technologies“. IEA. Retrieved 27 June 2022.

“Solar energy“. Australian Renewable Energy Agency. Retrieved 15 August 2022.

“The Renewable Energy Law Review: Japan“. 10 August 2021.

“Types of Fuel Cells“ Wayback Machine. Department of Energy EERE website

“Why did renewables become so cheap so fast?“. Our World in Data. 1 December 2020.

“Wind Power – Analysis“. IEA. Archived from the original on 23 November 2021. Retrieved 23 November 2021.

“Wind Power Plant in Akita Might Have Output of 1GW“. NikkeiXTech. April 2018. Retrieved 8 February 2019.

Abbess, Jo (28 August 2009). “Wind Energy Variability and Intermittency in the UK“. Claverton-energy.com. Archived from the original on 12 January 2011.

Also see Solar power by country for a complete and continuously updated list  
Bazilian, M.; Onyeji, I.; Liebreich, M.; MacGill, I.; Chase, J.; Shah, J.; Gielen, D.; Arent, D.; Landfear, D.; Zhengrong, S. (2013). “Re-considering the economics of photovoltaic power“ (PDF). *Renewable Energy*. 53: 329–338.

David, William I. F.; Makepeace, Joshua W.; Callear, Samantha K.; Hunter, Hazel M. A.; Taylor, James D.; Wood, Thomas J.; Jones, Martin O. (24 September 2014). “Hydrogen Production from Ammonia Using Sodium Amide“. *Journal of the American Chemical Society*. 136 (38): pp. 13082–13085

Egré, Dominique & Milewski, Joseph (2002). “The diversity of hydropower projects“. *Energy Policy*. 30 (14): 1225–1230. doi:10.1016/S0301-4215(02)00083-6.

Ellabban, Omar; Abu-Rub, Haitham; Blaabjerg, Frede (2014). “Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology“. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 39: 748–764

European Commission (2018a). “Biofuel“. European Commission Glossary.

Expansion of wind and solar power too slow to stop climate change“. *ScienceDaily*. Retrieved 24 November 2021.

Geothermal Energy Association. “Major Companies“. Geothermal Energy Association. Archived from the original on 22 April 2014. Retrieved 24 April 2014.

Giddey, S.; Badwal, S. P. S.; Munnings, C.; Dolan, M. (10 October 2017). “Ammonia as a Renewable Energy Transportation Media“. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 5 (11), pp. 10231–10239

Holtinen, Hannele; et al. (September 2006). “Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power“ (PDF). IEA Wind Summary Paper, Global Wind Power Conference 18–21 September 2006, Adelaide, Australia. Archived from the original (PDF) on 26 July 2011.

Howard Schneider (8 May 2013). “World Bank turns to hydropower to square development with climate change“. *The Washington Post*. Archived from the

original on 22 July 2013. Retrieved 9 May 2013.

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/)

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/electricity\\_liberalization/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/)

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/electricity\\_liberalization/what/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/electricity_liberalization/what/)

[https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity\\_and\\_gas/electric/summary/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/electric/summary/)

<https://www.pv-magazine.com/2022/02/24/japan-unveils-2022-feed-in-tariff-levels-for-pv/>

[https://www.re100-denryoku.jp/column/aggregator\\_power](https://www.re100-denryoku.jp/column/aggregator_power)

<https://www.un.org/en/climatechange/what-is-renewable-energy>

[https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html?gclid=EAIaIqObChMIq8vn3bbD-gIVDtxMAh0sZQQeEAAYAiAAEgIALfD\\_BwE](https://www.unep.org/explore-topics/climate-action/what-we-do/climate-action-note/state-of-climate.html?gclid=EAIaIqObChMIq8vn3bbD-gIVDtxMAh0sZQQeEAAYAiAAEgIALfD_BwE)

IEA (2017). “Technology Roadmap – Delivering Sustainable Bioenergy”. International Energy Agency.

IEA (2020). Renewables 2020 Analysis and forecast to 2025 (Report). p. 12. Archived from the original on 26 April 2021. Retrieved 27 April 2021.

IEA Offshore Wind Outlook 2019.

IEA-PVPS Snapshot of of Global PV Markets 2020 report, April 2020(100)

Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEA-OES), Annual Report 2007” (PDF). International Energy Agency, Jochen Bard ISET. 2007. p. 5.

International Energy Agency (2007). Renewables in global energy supply: An IEA facts sheet, Archived 12 October 2009 at the Wayback Machine

International Energy Agency (2012). “Energy Technology Perspectives 2012”. Archived from the original on 28 May 2020. Retrieved 2 December 2020.

IRENA (2014), *ibid*

IRENA (2021), Renewable energy and jobs – annual review 2021, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,

IRENA (2021), Renewable energy auctions in Japan: Context, design and results, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,

IRENA (2021c), Renewable energy auctions in Japan: Context, design and results, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi,



IRENA, <https://www.irena.org/Data/Energy-Profiles>

IRENA, Socio-economic footprint of the energy transition, JAPAN, 2022.8

Jacobson, Mark Z.; von Krauland, Anna-Katharina; Coughlin, Stephen J.; Dukas, Emily; Nelson, Alexander J. H.; Palmer, Frances C.; Rasmussen, Kylie R. (2022). “Low-cost solutions to global warming, air pollution, and energy insecurity for 145 countries“. *Energy & Environmental Science*. 15 (8): 3343–3359. doi:10.1039/D2EE00722C. ISSN 1754-5692. S2CID 250126767.

Japan behind on wind power ! The Japan Times“. *The Japan Times*. Retrieved 14 March 2018.

Lan, Rong; Tao, Shanwen (28 August 2014). “Ammonia as a suitable fuel for fuel cells“. *Frontiers in Energy Research*. 2: p. 35.

Lo Piano, Samuele; Mayumi, Kozo (2017). “Toward an integrated assessment of the performance of photovoltaic systems for electricity generation“. *Applied Energy*. 186 (2): 167–74. 2016.05.102.

METI (2021), “Overview of Japan’ s green growth strategy through achieving carbon neutrality in 2050” , presentation, Ministry of Economy, Trade and Industry, Tokyo, [www.meti.go.jp/english/press/2020/pdf/1225\\_001a.pdf](http://www.meti.go.jp/english/press/2020/pdf/1225_001a.pdf)

METI (2021), “Overview of Japan’ s green growth strategy through achieving carbon neutrality in 2050” , [www.meti.go.jp/english/press/2020/pdf/1225\\_001a.pdf](http://www.meti.go.jp/english/press/2020/pdf/1225_001a.pdf)

Moran, Emilio F.; Lopez, Maria Claudia; Moore, Nathan; Müller, Norbert; Hyndman, David W. (2018). “Sustainable hydropower in the 21st century“. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 115

Nathan F. Jones, Liba Pejchar, Joseph M. Kiesecker. “The Energy Footprint: How Oil, Natural Gas, and Wind Energy Affect Land for Biodiversity and the Flow of Ecosystem Services“. *BioScience*, Volume 65, Issue 3, March 2015. pp.290–301

Net zero: International Hydropower Association“. [www.hydropower.org](http://www.hydropower.org). Retrieved 24 June 2022.

Norm Olson, “Ammonia as a Transportation Fuel IV“ (PDF), Iowa Energy Center. pp.15–16 October 2007.

Palz, Wolfgang (2013). *Solar Power for the World: What You Wanted to Know about Photovoltaics*. CRC Press. pp. 131–. ISBN 978-981-4411-87-5.

Philibert, Cédric (2011). *Solar energy perspectives*. International Energy

Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development. Paris: OECD/IEA. ISBN 978-92-64-12458-5. OCLC 778434303.

REN21 Renewables Global Futures Report 2017.

REN21. “Renewables 2020: Global Status Report. Chapter 01; Global Overview“. Retrieved 2021-02-02.

REN21. “Renewables 2022 – Global Status Report“ (renewable energies): 44. Retrieved 5 September 2022

Renewable Energy Market Update 2021, IEA. May 2021.

Ritchie, Hannah; Roser, Max; Rosado, Pablo (28 November 2020). “Energy“. Our World in Data.

Saikia, Kaustav; Kakati, Biraj Kumar; Boro, Bibha; Verma, Anil (2018). “Current Advances and Applications of Fuel Cell Technologies“. Recent Advancements in Biofuels and Bioenergy Utilization. Singapore: Springer. pp. 303–337.

Siemens Gamesa to supply typhoon-proof turbines to Japan’s largest onshore cluster of four wind farms“. 16 June 2021.

The International Geothermal Market At a Glance – May 2015“ (PDF). GEA—Geothermal Energy Association. May 2015.

Thinkprogress.org National Renewable Energy Laboratory: Solar Has The Most Potential Of Any Renewable Energy Source Archived 22 January 2015 at the Wayback Machine, 30 July 2013

UNDP: “More spent on fossil fuel subsidies than fighting poverty“. Africa Renewal. 29 October 2021.

UNEP – View Emissions Data By Country – [unep.org](https://unep.org), State of the climate

Watanabe, Chisaki (27 February 2014). “GE Says Japan Has More Potential to Harness Wind Power“. Bloomberg.

Winter, Martin; Brodd, Ralph J. (28 September 2004). “What Are Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors?“. Chemical Reviews. 104 (10): 4245–4270.

[www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA\\_RE\\_Jobs\\_2021.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Oct/IRENA_RE_Jobs_2021.pdf).

[www.irena.org/publications/2021/Jan/Renewable-energy-auctions-in-Japan](https://www.irena.org/publications/2021/Jan/Renewable-energy-auctions-in-Japan)