Current Photovoltaic Research 6(4) 124-132 (2018)
DOI:https://doi.org/10.21218/CPR.2018.6.4.124
pISSN 2288-3274
eISSN 2508-125X

태양광 대량보급 시대의 기술개발

조은철[1)]* · 송재천[2)] · 조영현[1)] · 이준신[1)]**
[1)]전자전기공학부, 정보통신대학, 성균관대학교, 수원시, 16419
[2)]태양광발전학회, 과학기술회관 908호, 서울시, 06130

Technology Development in the Era of Photovoltaic Mass Supply

Eun-Chel Cho[1)]* · Jae Chun Song[2)] · Young Hyun Cho[1)] · Junsin Yi[1)]**
[1)]School of Electronic & Electrical engineering, College of Information and communication engineering, Sungkyunkwan University, Suwon-shi,16419, Korea
[2)]Korea Photovoltaic Society, The Korea Science and Technology Center #908, 22, 7-Gil, Teheran-Ro, Gangnam-Gu, 06130 Seoul, Korea

Received July 31, 2018; Revised October 3, 2018; Accepted October 15, 2018

ABSTRACT: The Korean electric power supply plan was prepared by greatly enhancing the environmental and safety with considering the economical efficiency of the electric equipment, the impact on the environment and the public safety. As a result, the fossil energy-based power generation sector is accelerating the paradigm shift to eco-friendly energy such as solar power and wind. Also the solar power industry is expected to grow into a super large-sized industry by converging the energy storage and electric vehicle industry. Generally, a levelized cost of electricity (LCOE) is used to calculate the power generation cost for different generation power generation efficiency, operating cost, and life span. In this paper, we have studied the future research and development direction of photovoltaic technology development for the era of massive utilization of photovoltaic solar power, and have studied the LCOE of major countries including China, USA, Germany, Japan and Korea. Finally we have reviewed USA and Japan research programs to reduce the LCOE.

Key words: Eco-friendly energy, LCOE, Future direction of photovoltaic development, Sunshot, NEDO

Subscript

LCOE : levelized cost of electricity
FiT : Feed-in-Tariff
FBR : fluidized bed reactor
DWS : diamond wire saw
BSF : back surface field
PERC : passivated emitter rear contact solar cell
PERT : passivated emitter rear totally diffused solar cell
BOS : balance of system
LID : light induced degradation
LeTID : light and elevated temperature induced degradation
NREL : national renewable energy laboratory
DOE : department of energy
NEDO : new energy and industrial technology development organization
CIS : copper indium selenium
IEA : international energy agency
ZEB : zero energy building
PCS : power conditioning system
BIPV : building integrated photovoltaics

*Corresponding author: echo0211@skku.edu, junsin@skku.edu

1. 서 론

지금 세계는 기후변화에 대한 대책마련과 동시에 4차 산업혁명이라는 기술적 진보에 의한 에너지 효율화, 안전한 에너지원, 에너지 발전-송전-수요 관리의 고지능화, 에너지 절약, 친환경 에너지로의 전환 등으로 대표되는 새로운 에너지 패러다임 변화에 대한 준비를 본격화 하고 있다. 더불어 에너지 안보 측면에서 에너지 공급의 효율적 관리, 에너지 인프라 신뢰성, 수요 충족을 위한 에너지 공급의 안정성을 유지하고, 환경적 지속 가능성을 위한 수요-공급 측면에서 에너지 효율성, 재생에너지 및 저탄소 에너지원 공급 발전, 그리고 에너지 형평성 측면에서 에너지 공급의 접근성과 가격 적정성 등의 이슈가 상존하고 있다.

ⓒ 2018 by Korea Photovoltaic Society
This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0)
which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

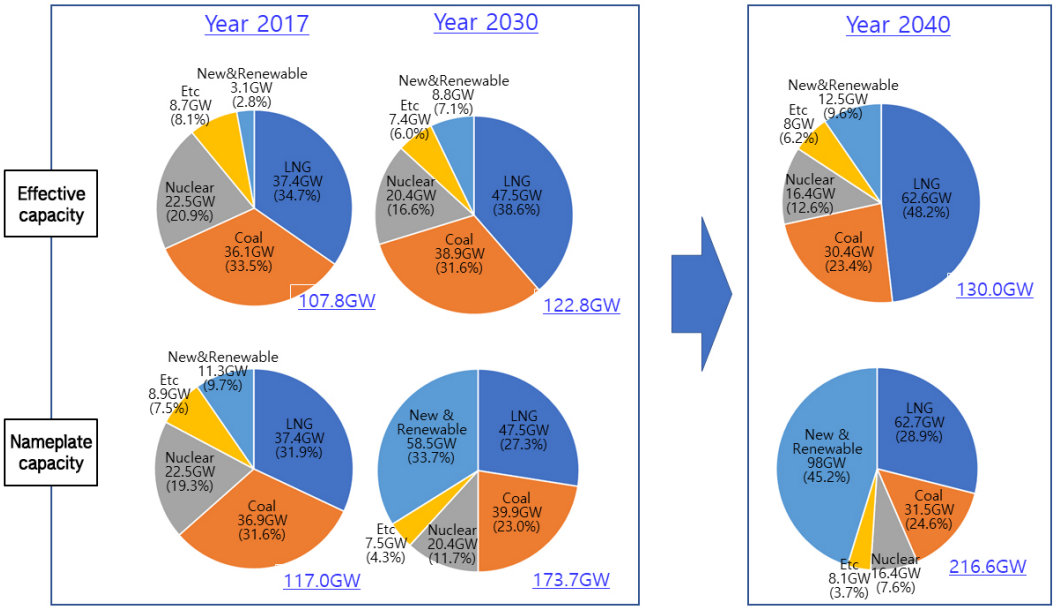

Fig. 1. Power mix according to the 8th basic plan for long-term electricity supply and demand

우리나라는 국민경제의 건전한 발전에 필요한 에너지의 수급 안정, 에너지 이용의 합리화를 도모하고, 에너지 관련 환경피해 요인의 최소화 및 에너지관련 기술의 개발촉진에 관한 국가 에너지 정책목표를 효과적으로 달성하기 위하여 국가에너지 기본계획을 수립하고 있다. 2014년 '2차 에너지 기본계획'을 확정하였으며, 2018년에 2040년까지 향후 20년간 국가에너지 정책방향을 수립하기 위한 본격적인 행보에 들어갔다. 2017년에는 '17년부터 '31년 까지 향후 15년간의 전력수급 전망 및 전력설비 계획 등을 담은 '제8차 전력수급 기본계획'을 마련하였다. 기존 수급계획이 수급 안정과 경제성 위주로 수립되었던 것에 반해, 제8차 전력수급 기본계획은 2017년 3월 개정된 '전기사업법 제3조'의 취지인 "전력수급 기본계획 수립시, 전기설비의 경제성, 환경 및 국민안전에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여야"를 감안하여 환경성과 안전성을 대폭 보강하여 수립한 것이 특징이며, 발전소 건설을 우선 추진하기보다는 수요관리를 통한 합리적 목표수요 설정에 주안점을 두었고, 신규 발전설비는 대규모 원전·석탄 일변도에서 벗어나 친환경·분산형 재생에너지와 LNG 발전을 우선시하였다. 더불어 2017년에는 "에너지전환 로드맵"과 "재생 에너지 3020 이행계획"을 수립하여 재생 에너지 확대 등 에너지전환을 추진하고 있다. 에너지 전환 정책의 주요 핵심 내용은 ① 원전의 단계적 감축, ② "재생에너지 3020 이행계획"을 통한 재생에너지의 확대, ③ 에너지 전환에 따른 지역·산업의 보완대책을 주요 골자로 하며, 이와 연계된 에너지 세제, 전기요금 체계개편과 같은 핵심정책을 진행하고 있다.

"재생 에너지 3020 이행계획"에 따르면, 2030년 재생에너지 발전량 비중을 2016년의 7%인 재생에너지 발전비중을 2022년 10.5%, 2030년까지 20%를 단계적으로 달성한다는 계획으로, 이에 따른 재생에너지 설비용량을 현재의 13.3 GW에서 63.8 GW로 확대하며, 신규설비의 95% 이상을 태양광, 풍력 등 청정에너지로 공급한다. 이는 약 35기의 신규 원전과 맞먹는 규모로, 특히 태양광 공급이 63%로 가장 큰 비중을 차지하며 2017년 누적 설치용량 5.6 GW에서 2030년 36.5 GW로 전체 재생에너지의 57%를 공급할 계획이다.

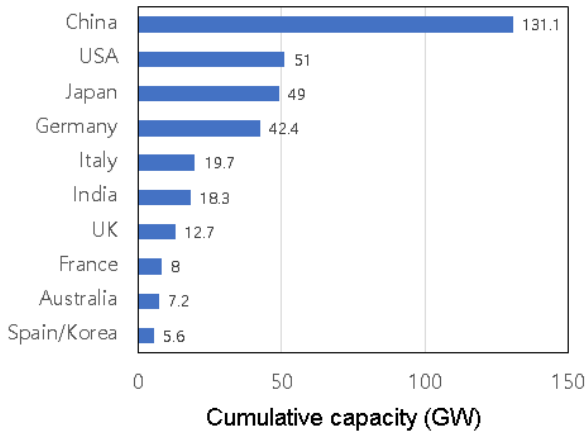

Fig. 2. Cumulative PV capacity of the major countries

8차 전력수급기본계획에 따른 전원믹스는 실효용량 기준으로 원전, 석탄 비중은 감소하고, LNG·재생에너지는 Fig. 1과 같이 증가한다.[1] Fig. 2는 2017년까지의 태양광 발전 시스템의 국가별 누적설치 용량을 나타낸다.[2]

화석에너지 중심의 발전분야가 태양광 등 친환경 에너지로의 패러다임 전환이 가속화되고, 여기에 에너지저장과 전기차 산업이 융합되면서 태양광 산업은 초대형 산업으로 성장할 가능성이 높아지고 전망된다. 본고에서는 태양광의 대량보급 시대를 맞이하여, 태양광 기술개발 측면에서 앞으로의 방향에 대해 검토하였다.

2. 태양광 대량 보급을 뒷받침하는 기술개발

2.1 태양광 LCOE의 주요 구성

재생에너지 전력생산비용은 기술개발로 지속적으로 하락하고, 환경 비용과 연료가격 상승 등으로 전기요금이 상승하면서 최종 소비자의 관점에서 태양광, 풍력 등의 재생 에너지원을 이용한 전력생산비용이 현재 전력망에서 전력을 구매하는 가격과 균형을 이루는 시점을 그리드 패리티(grid parity)라고 한다. 그리드 패리티는 태양광의 설치비용, 발전효율, 일사량, 지원정책 및 전기요금 체계 등의 요소에 영향을 받는다. 그리드 패리티에 도달하면 태양광 발전이 타발전원 대비 경쟁력을 가지게 되어 관련 산업 활성화되어 투지 및 공급이 확대되고, 설비단가 및 발전단가 감소가 발생되고 수요증가가 증가되는 선순환 구조가 구축되어 태양광 시장의 빠르게 증가될 것으로 전망된다. 일반적으로 발전효율, 운전비용, 수명기간 등이 다른 발전원에 대한 발전단가를 산정하여 비교하기 위해서 균등화 발전비용(LCOE: Levelized Cost of Electricity)을 활용한다. LCOE는 식 (1)과 같이 발전 시설의 총 비용의 현재 가치를 총 발전량의 현재 가치로 나누어 준 것으로, 발전설비 설계과정에서 폐기 단계까지 발생한 총 투자비용을 시설의 수명기간 내에 회수하는데 필요한 최소한의 평균 단위가격이다.[3-5)]

$$LCOE = \frac{\text{초기투자비용} + \sum_{t=1}^{\text{수명기간}} \frac{(\text{유지운영비} + \text{이자비용})_t}{(1+\text{할인율}_t)^t}}{\sum_{t=1}^{\text{수명기간}} \frac{\text{발전량}_t}{(1+\text{할인율}_t)^t}} \quad (1)$$

초기 투자 비용은 하드웨어 비용과 소프트 비용으로 구성되며, 하드웨어 비용은 모듈, 인버터, 시스템 설치 부대 비용(설치 구조물, 기계·전기 부속설비)이다. 소프트 비용은 공사비, 인허가, 설계 감리, 검사비, 간접비, 토지비용 및 재원조달을 위한 금융비용을 포함하는 비용이다. 유지운영비는 발전소 운영에 필요한 인력 관리, 품질 및 토지 관리, 검사 및 소모품 등의 제반 비용이며, 이자 비용은 재원조달, 토지 임대 등에 소요되는 금융비용이다. 발전량은 태양광 모듈의 종류, 모듈의 설치 방법, 즉 고정식 또는 트랙킹, 설치되는 기후조건에 따라 달라진다. 그 외 국가별 시장의 성숙도 및 지역별 코스트에 의해 차이가 발생한다. 지역별 코스트는 노동 임금, 제조가격, 정책적 지원, 유지보수 비용 등에 의해 영향을 받는다.[5)]

태양광 기술개발은 LCOE 하락에 크게 기여할 수 있다. 태양광 설치 규모가 점차 증가하면서 규모의 경제실현을 통해, 단위 규모당 모듈 가격 및 운영유지비용이 감소하여 총 시스템 가격이 하락되고 있다. 태양광 발전기술의 가장 큰 특징은 기술발전에 따라 발전단가가 지속적으로 감소한다는 점이다. ITRPV에서는 Fig. 3와 같이 1975년에서 2017년까지의 태양광 누적 설치

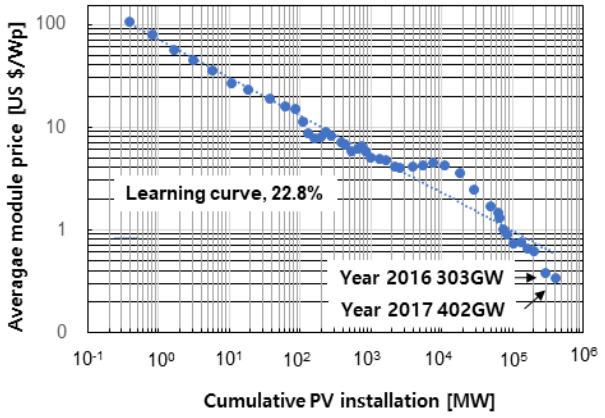

Fig. 3. Average module price based on accumulated installation

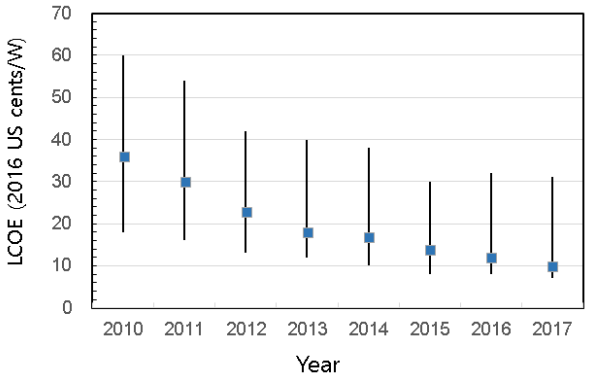

Fig. 4. LCOE weighted average of utility solar

량에 따른 단가를 분석하였고, 설치량이 2배 증가할 때마다 단가는 22.8% 하락됨을 보고 하였다.[6)] 2016년까지 303 GWp의 모듈이 누적 설치되었으며, 2017년에는 99 GWp의 모듈이 추가되어 402 GWp의 모듈이 누적 설치되었다.

Fig. 4은 유틸리티에 적용된 태양광 발전소의 LCOE로 사각점은 가중평균된 LCOE이며, 2010년 ~ 2017년 사이에 kWh 당 USD 36센트에서 10센트로 73% 하락하였다. Fig. 4의 막대의 상단과 하단은 LCOE의 95%와 5% 지점을 의미한다. 2017년에 LCOE는 USD 7 ¢~31 ¢/kWh의 분포를 보였다.

Fig. 5는 주요 국가별, 태양광 설치 형태별 LCOE를 나타낸다. 중국, 일본, 독일의 유틸리티 태양광의 LCOE는 2010년 대비하여 2017년에 64~73% 하락하였으며, 미국은 높은 일사량에 따라 LCOE가 44% 하락하였다. 한국의 가정용 태양광 LCOE는 2013년 0.24 $/kWh에서 2017년 0.17 $/kWh로 약 33%가 하락하였다.[7)] 중국의 유틸리티 시장의 LCOE는 2017년말에 0.08 $/kWh의 LCOE를 보이며, 이에 반해 일본은 0.14 $/kWh의 상당히 높은 LCOE를 보인다. 일본과 누적설치량이 비슷한 독일의 LCOE는 0.11 $/kWh로 LCOE의 의미 있는 차이가 있다. 이에 대한 일본의 독일과의 태양광 모듈 설치비 차이 분석에 따르며, Fig. 6과 같이 계통연계 비용을 제외하고 일본에서 비용이 높다. 일본의 계통연계 비용은 4 ¥/KW로. 독일의 8 ¥/KW의 절

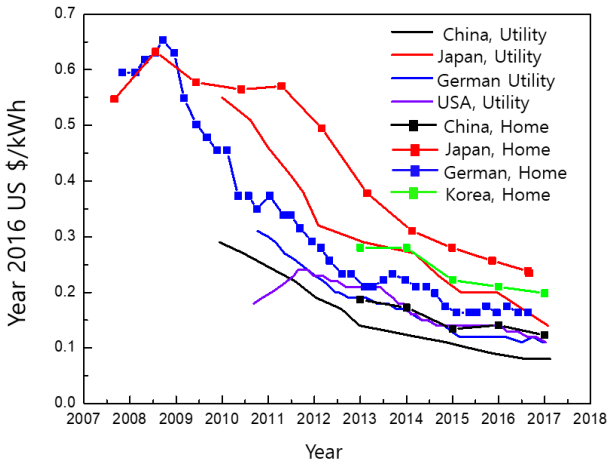

Fig. 5. LCOE trend by nations and applications

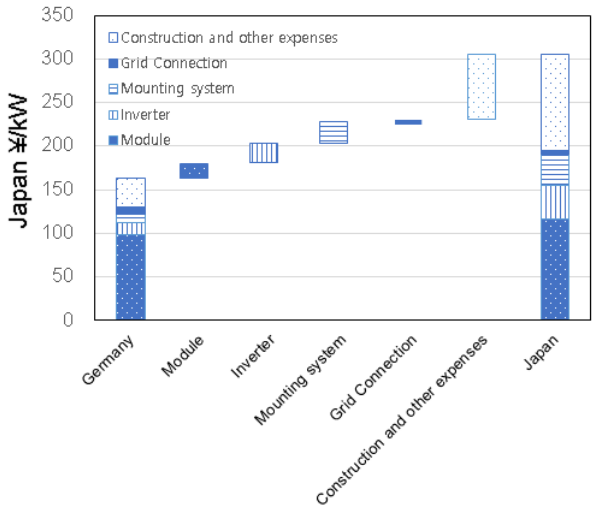

Fig. 6. Comparison of costs of solar PV system (5~500 kW) in Japan and Germany by elements

반이다. 일본에서 모듈의 가격은 독일보다 약 20% 정도 비싸며, 이에 대한 원인으로 1) 모듈 제조사가 동일한 모듈제품에 대해 독일보다 일본에서 모듈의 가격을 높게 책정하거나 2) 일본에서 소비자들이 외국산 저가 모듈보다 고가의 자국산 제품을 선호하여 일본에서 자국산 제품의 시장점유율이 높은 원인으로 분석된다. 외국 모듈제조사는 2013~2014년 동일한 제품에 대해 독일보다 일본시장에서의 가격이 15% 정도 높았다. 이는 일본의 높은 FiT 요율과 환차에 기인한다. 또한, 일본에서 제조된 모듈의 제조원가는 독일 제품보다 45% 높아, 일본 소비자가 일본산 모듈제품을 선택하면 높은 가격을 지불한다. 독일과 일본의 설비비용에서 가장 많이 차이나는 분야는 건설 및 그에 따른 지출이다. 태양광 발전소 건설시의 비용은 가대 및 모듈의 설치 및 전기적인 연결시의 인건비와 건설기간이 중요한 요소이다. 2015년을 기준으로 독일의 인건비는 일본에 비해 1.5~2배 정도 높으나, 건설기간에서 일본이 독일보다 약 2~7배 정도 더 소요된다. 즉, 1000 kW 발전소의 건설기간은 독일에서 2~3주이나 일본은 4~5개월이 소요된다. 태양광 발전소의 건설기간은 모듈을 거치하는 가대의 최적화나 설치를 위한 기계의 사용뿐만 아니라 시공업체의 능력에 따라 다르며, 독일에 비해 일본 설치업체에서 불필요한 업무 진행이나 재작업에 기인한다.[8)]

2.2 LCOE 저감 기술

태양광의 대량 보급을 위해서는 LCOE로 대표되는 제조원가를 낮추기 위한 고효율화, 제조기술의 혁신, 발전량 향상, 유지보수 비용의 절감하는 기술개발을 지속적으로 진행되어야 한다. 태양광 시장의 95% 이상을 차지하는 결정질 실리콘 태양전지 분야에서 LCOE 저감과 관련된 기술개발로는 잉곳, 웨이퍼, 셀과 모듈 레벨에서 제조원가의 하락을 위한 재료의 혁신과 공정 및 생산성의 개선을 들 수 있다. 태양광 밸류체인별 LCOE 저감 요소를 아래에서 검토하였다.

폴리 실리콘은 시장의 대부분을 Siemens 제조법이 시장의 대다수를 차지하며, 원가의 대부분을 차지하는 전기 사용량이 적은 FBR법을 주목할 수 있다. DWS 웨이퍼링은 기존의 슬러리를 이용한 웨이퍼링 대비하여 약 15% 정도의 폴리실리콘 사용량이 감소되어 원가 절감에 기여할 수 있다. 고품질의 실리콘 잉곳은 고효율 셀을 제조하기 위한 필수요소이다. N-type Si은 Fe 불순물의 영향이 p-type Si보다 둔감하여 고효율 셀 제조에 적합하다. 만약 Fe의 농도가 저감되면 이론적으로 p-type Si 태양전지의 효율이 n-type Si보다 높다. 2019/2020년 Shin-Etsu와 Kyocera가 보유한 Ga 도핑에 대한 특허가 만료되고, p-type Si 잉곳제조를 위해 Ga을 사용하면 현재의 B 도핑된 실리콘 기판에서 발생되는 LID에 의한 출력저하 현상을 축소할 수 있다.

Fig. 7은 웨이퍼별 제조법에 따른 폴리실리콘의 사용량 변화를 보여준다. 향후 와이어 직경이 지속적으로 작아지면, 웨이퍼당 폴리실리콘의 사용량이 2028년경에는 20% 정도 감소하게 된다. 현재, 웨이퍼 제조시 kerf loss는 다이아몬드 와이어를 사용하는 경우 85 ㎛이며, 지속적으로 감소하여 2028경에는 60 ㎛로 예상된다. 단결정 잉곳과 다이아몬드 와이어 웨이퍼는 2028년경에는 50%의 비용절감이 가능하고, 다결정 잉곳 및 다이아몬드 웨이퍼링은 2028년경에 약 35%의 원가절감이 가능하다고 예상된다.[5)]

셀의 제조단가를 낮추는 유효한 방법은 생산성의 향상이다. 예를 들면, 금속전극 형성을 위한 장비의 생산성은 현재 시간당 5000장 이하가 시장에서 찾을 수 있다. 2028년경에는 모든 공정에서 시간당 10,000장의 생산성을 갖는 설비가 보급되어 생산성이 향상될 것으로 예상된다.

PERC 셀 제조시에 실리콘 기판 외에 가장 비싼 재료는 전면 Ag 페이스트이며, 전극의 미세화를 페이스트의 개선과 공정개발로 전극 사용량은 지속적으로 감소가 예상된다. 현재의 전극 선폭은 40~45 ㎛이며, 2022년경 전극선폭이 30 ㎛으로 미세화가 되고, 이에 따라 태양전지 효율은 Fig. 8과 같이 0.1% (절대치)

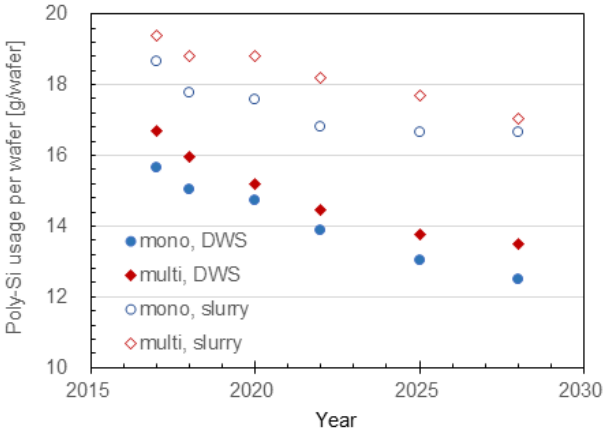

Fig. 7. Average poly-silicon utilization per wafer type (156x156 mm^2)

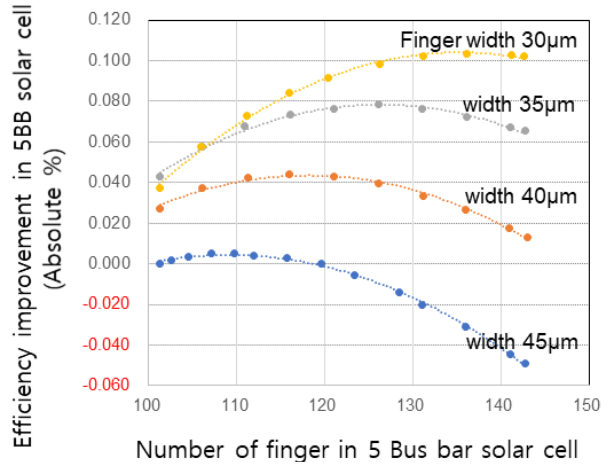

Fig. 8. Cell efficiency improvement according to finger number with different finger width at 5 bus bar solar cell

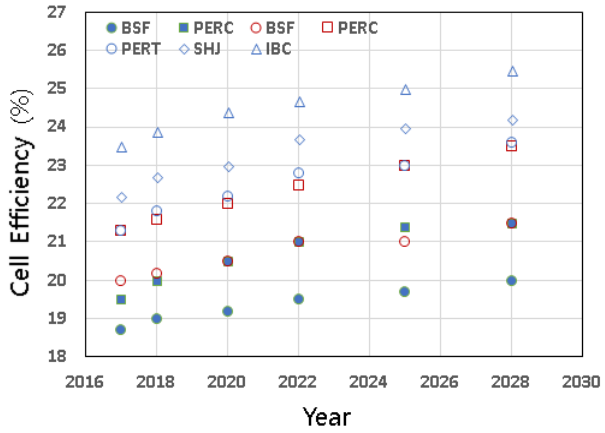

Fig. 9. Average stabilized efficiency values for Si solar cells (156 x 156 cm^2)

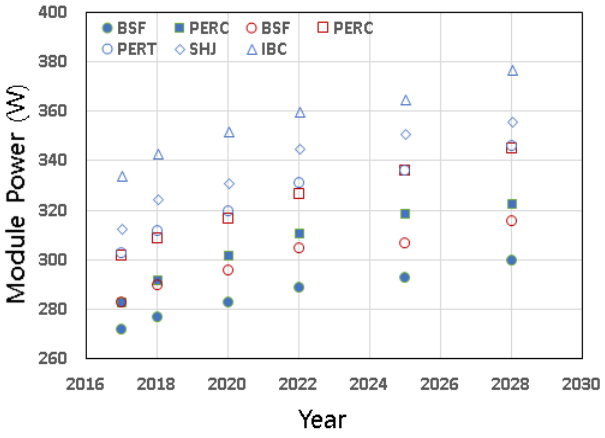

Fig. 10. Module power for 60-cell (156 x 156 cm^2)

증가될 것으로 예상된다.

셀 레벨에서의 LCOE 저감하는 방안은 셀 효율의 향상이 가장 큰 요소이다. Fig. 9는 다결정 p-type, p-type, n-type 실리콘 기판을 이용한 태양전지 구조별 효율을 나타낸다. p형 반도체를 이용한 단결정 BSF 태양전지의 효율은 현재 20.2%에서 2028년 21.5%에 도달하고, 단결정 p-type PERC 태양전지는 현재 효율이 21.3~21.6% 정도이며, 2022년경에는 22.5%, 2028년 23.5%를 전망하고 있다. n형 반도체를 이용한 이종접합 태양전지의 효율은 현재 22.2%~22.7%에서 2022년 23.7%, 2028년 24.2%로 향상될 것으로 예측되고 있다. 효율에 대한 예측치는 매년 상향하고 있어, 연구개발시 좀 더 공격적인 목표수립이 필요하다. 또한 다결정 PERC 태양전지와 단결정 BSF 태양전지, 단결정 p-type PERC 태양전지와 n-type PERT 태양전지의 효율을 보이며, 모듈에서 유사한 출력을 가질 것으로 판단된다.[6] 이에 시장에서 어떤 태양전지가 선택되어질지는 지켜보아야할 사항이다.

모듈 레벨에서의 LCOE를 저감하는 항목은 고효율 고출력의 모듈, 낮은 온도 계수와 장수명의 모듈 수명 등이다. 모듈 효율 1%p가 개선됨에 따라 전체 시스템 가격은 6~7%가 하락하게 된다. Fig. 10과 같이 단결정 PERC모듈의 출력은 현재 310 W (60셀)이 시장에 출시되고 있으며, 2022년 330 W, 2028년 345 W로 증가할 것으로 예상된다. n형 이종접합 태양전지 모듈의 출력은 현재 325 W에서 2022년 345 W, 2028년 355 W로 예상된다. 모듈의 출력을 높이기 위해, 셀을 1/2 또는 1/4로 절단하여 셀의 전류를 낮추고 직렬저항 성분을 낮추는 모듈의 적용이 향후 증가될 것으로 예상된다. 낮은 온도 계수의 모듈은 일간 및 년간 태양광 발전량을 증가시키며, 특히 고온의 환경에서 다른 모듈 대비하여 발전량에 장점이 있다. 양면수광형 bifacial 태양전지는 값비싼 플라스틱 백시트를 대체하여 저가의 유리를 사용하고, 프레임이 없는 설계로 발전량과 원가절감을 가능하게 한다. 현재 AR코팅된 모듈유리의 기대수명은 약 10년으로 2025년경에는 약 20년의 수명이 예상된다. 제품과 모듈의 수명 기간의 출력 저하를 고려한 출력 성능의 보증이 LCOE를 저감하기 위한 중요한 요소이다. 모듈의 설치후 LID 및 LeTID에 의해 첫 번째 1년간의 출력 저하율은 3.0%에서 2017/18년에 2.5%로 개선되었으며, 2020년 이후에는 2.0%로 개선될 것이다. 태양광 모듈의 연간 출력저하율은 현재의 0.7%에서 지속적으로 개선이 되어

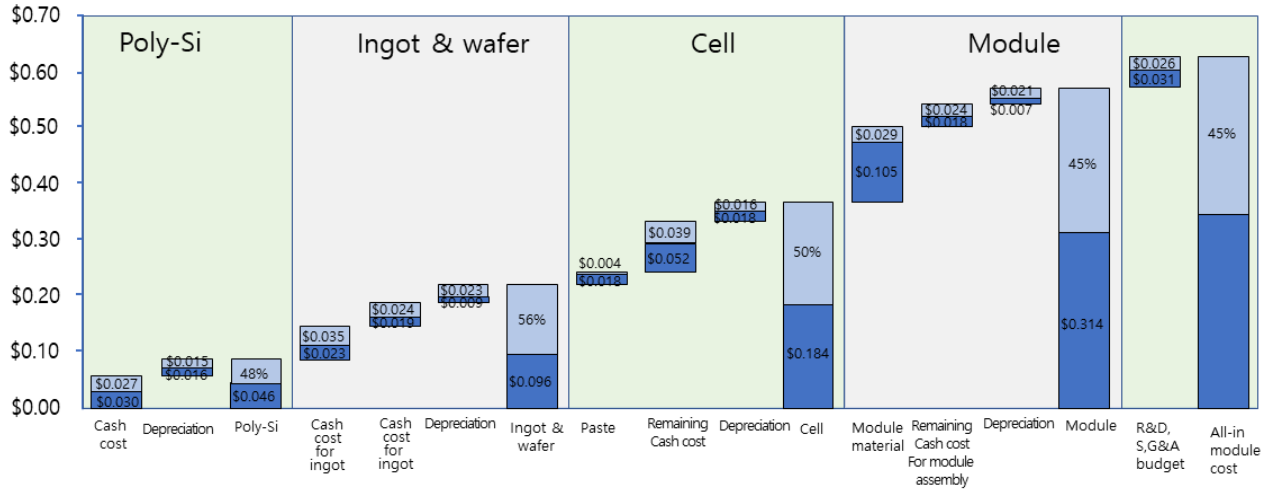

Fig. 11. Manufacturing cost for the c-Si module supply chain from 2014/15 to Q1 2017

2025년경에는 0.5%로 예상이 된다. 결정질 태양광 제품의 보증이 현재와 같은 10년을 유지하더라도 출력보증은 현재의 25년에서 2024년 이후에는 30년 보증으로 변화되어 LCOE 저감에 기여할 것으로 예상된다.

Fig. 11는 NREL에서 작성한 2017년 모듈 제조원가의 분석이다.[9] 막대그라프의 최고 지점은 2014년/2015년 상반기의 각 항목별 원가를 표시하며, 모듈의 제조원가는 $0.63/W이다. 막대그래프의 청색은 2017년 PERC의 각 가치사슬에서의 원가부분을 나타낸다. 즉, 폴리실리콘에서 $0.05/W, 잉곳과 웨이퍼에서 $0.05/W, 셀에서 $0.08/W, 모듈에서 $0.13/W, 연구개발 및 일반 판매관리비 $0.03/W을 포함하여 모듈의 제조원가는 $0.35/W이다. 이는 단기간에 약 45%의 원가절감이 실리콘 태양전지 가치사슬 전반에 걸쳐 진행되었음을 보여준다.

시스템외에 항목에서 금리는 LCOE에 큰 영향을 미치며, 금리 1% 하락시 LCOE는 약 0.1 cents/kWh 감소하는 것으로 분석된다.

3. 해외동향

3.1 태양에너지의 저가화를 도모하는 미국의 Sunshot initiative

미국의 "Sunshot initiative"은 태양광의 채용을 늘리고 태양광에 의한 전기료 저감을 위해 DOE에서 2011년에 시작한 프로그램이다. 세부 프로그램으로는 ① 집광형 태양광 발전, ② 태양전지, ③ 시스템 통합, ④ 소프트 코스트, ⑤ 기술의 상용화를 운영 중이다. 세부 프로그램중 "② 태양전지"은 제조원가를 낮추고, 태양광 기술의 효율과 성능의 향상 및 신뢰성의 개선하여 LCOE을 낮추는 것을 목표로 한다. Fig. 12와 같이 프로그램이 시작한 2011년 utility 태양광의 LCOE는 28 ¢/kWh에서 2017년 6 ¢/kWh로 하락되어 2020년 목표를 달성하였고, 거주용과 상업

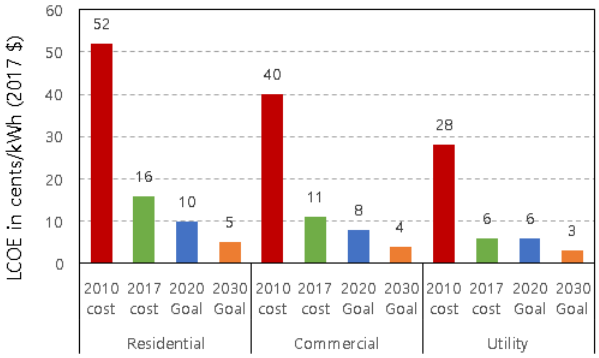

Fig. 12. LCOE progress and targets without the ITC or state/ Local incentives

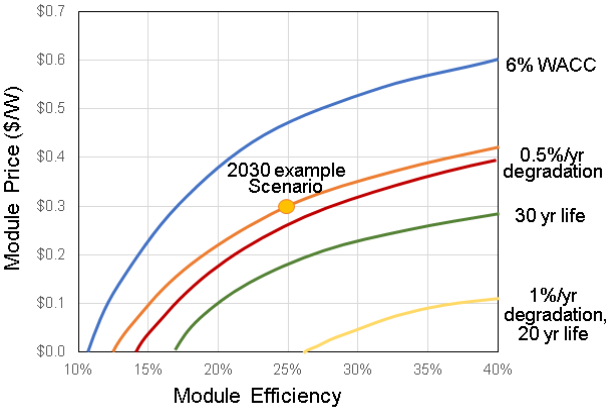

Fig. 13. Pathways to achieving Sunshot 2030 goals

용에서도 LCOE의 개선이 진행되었다. 2030년에는 2020년 LCOE의 50% 하락을 목표로 프로그램이 진행되고 있으며, 2030년의 LCOE 목표는 2011년의 대략 90% 정도인 $0.03/kWh이다. 세부프로그램은 LCOE가 $0.03/kWh으로 도달할 수 있는 기회를 제공하도록 집중하고 있다.

Fig. 13의 2030 시나리오에서 LCOE $0.03/kWh를 달성할 수

있는 방안을 나타낸다.[10] 예를 들면 모듈 효율 25%을 가진 1,860 kWh(AC)/kW(DC) 용량의 단축 트렉킹 시스템을 구성하고, 7%의 가중평균 자본비용, 2.5%의 인플레이션, $0.85/W의 시스템 가격, $4/kW-년의 유지보수 비용, 0.2%의 년간 출력저하 및 50년의 시스템 운영기간을 가정하면 $0.03/kWh이 달성된다.

3.2 태양광 대량 보급 시대를 준비하는 일본의 NEDO

일본은 태양광 발전의 새로운 기술 개발 지침으로 2009년 "태양광 발전 로드맵(PV2030+)"이후 5년만인 2014년 9월에 "태양광 발전 개발 전략(NEDO PV Challenges)"을 발표하였다. 신흥국업체의 시장점유율 확대에 대응하고, 고정 가격 매입제도 도입 등 태양광 발전을 둘러싼 상황의 변화를 근거로 다가올 태양광 발전의 대량 도입 사회를 원활하게 실현하기 위한 전략으로서 ① 발전 비용 절감, ② 신뢰성 향상, ③ 위치 제약의 해소, ④ 재활용 시스템의 확립, ⑤ 산업의 고부가 가치화의 5개 방안을 제시하여, 태양광 발전의 도입 형태의 다양화와 새로운 이용 방법의 개발에 의한 저변 확대 등을 제언하고 있다. 발전 비용 목표는 2020년에 업무용 전력요금과 같은 14엔/kWh, 2030년은 기간전원 발전 가격과 같은 7엔/kWh이다. NEDO에서는 연구개발을 통해 2030년의 발전가격을 5년 앞당겨 2025년까지 발전 비용 7엔/kWh를 실현하는 기술의 확립을 목표로 하여 기술개발을 가속화하고 있다.[11] 또한, 일본은 "조달가격 산정위원회"에서 최신 발전 비용을 산정 공개하고 있다. Fig. 14은 비주택용 10 KW 이상의 태양광 발전시스템에서 세금을 제외한 판매가격과 설비이용률을 보여주고 있다.

Table 1는 NEDO에서 현재 수행하고 있는 태양광 발전 분야의 프로젝트를 나타낸다. 고성능· 고신뢰성 태양광 발전 비용 저감 기술 개발에서는 ① "첨단 복합 기술형 실리콘 태양 전지, 고성능 CIS 태양 전지 기술 개발"의 주제로 이종접합 백 컨택트형 태양전지와 고성능 CIS 태양전지의 개발과 이를 뒷받침하는 공통기반 기술의 개발을 산학연 제휴로 실시, ② "혁신적인 새로운 구조 태양 전지의 연구 개발"의 주제로 성막 속도의 고속화 기술, 저렴한 기판 위에 증착 및 접착 기술 비싼 기판의 재활용 기술, 양자점(Quantum dot)과 초격자(Superlattice) 셀을 이용한 초고효율화 기술 등 기존의 연장선상에 없는 혁신적인 III-V 고효율 태양 전지와 빠르게 변환 효율을 향상시키고 전 세계적으로 주목 받고 있는 페로브스카이트 태양전지에 대한 새로운 개념의 생산용 장비 및 신뢰성 확보 기술 발전 원리의 검증과 안정적인 성능 평가 기술의 확립, 새로운 성능 향상을 목표로 신구조, 신소재의 연구 개발, ③ "공통 기반 기술 개발(태양광 발전 시스템의 신뢰성 평가 기술 등)"의 주제로 태양광 모듈의 장기 신뢰성을 확보하기 위해 태양광 모듈의 내구성 향상에 이바지하는 기술 개발이나 실제로 설치하는 환경에서 출력 측정 및 수명을 예측할 수 있는 시험 방법 등의 평가 기술과 PID 등의 태양 전지 모듈의 열화 요인에 대해 분석하고 예방 대책 기술의 개발, ④ "고효율 태양 전지 제조 기술 실증"의 주제로 이종접합 백 컨택트형 태양전지와 같이 압도적인 고효율 태양 전지의 저가 공정 기술을 구축하기 위해 양산에서 비용 절감으로 이어질 제조 기술의 실증 ⑤ "동향조사"의 주제로 발전비용 저감 목표 달성을 위한 동향 조사와 IEA 국제 협력 사업에의 참여를 통해 외국의 기술 개발 정책 및 시장 동향 분석을 진행하고 있다.

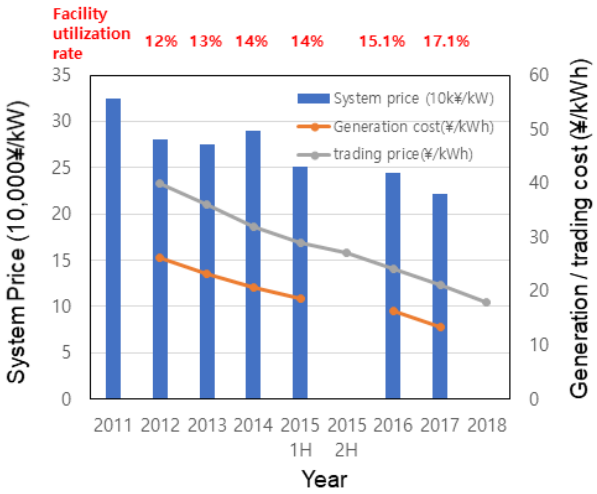

Fig. 14. Electricity cost of non-housing (10kW or more) solar power generation system estimated by the Japan's procurement price calculation committee

Table 1. Current photovoltaic research program in NEDO, Japan

Project name	Period	Budget for year 2018	Target goal
Development of high performance and high reliability photovoltaic power generation cost reduction technology	2015~2019	4,600 M¥	Development of solar cell that combines high performance and high reliability contributing to realization of 7 yen / kWh by 2030 to achieve power generation cost reduction target.
Solar PV power system efficiency improvement and maintenance technology development project	2014~2018	690M¥	Technology development targeting non-solar cell elements (efficiency improvement of whole system, BOS cost and maintenance cost reduction).
Solar PV power recycling technology development project	2014~2018	110M¥	Development and demostration of technology that realizes appropriate treatment of photovoltaic power generation systems such as demolition and recovery technology as well as recycling treatment technology at low cost and is aimed at building a social system for recycling.

태양광 발전 시스템 효율 향상·유지 관리 기술 개발 프로젝트는 ⓐ "태양광 발전 시스템 효율 향상 기술 개발"의 주제로 PCS와 지지대 등 주변 기기의 고기능화와 추적·반사·냉각 등의 부가기능을 통해 발전량을 증가시키는 기술 개발 및 기초·구조물의 시공과 태양 전지 모듈 설치에 관한 부분에서 부품 수 및 시공 시간의 단축 등 BOS 비용을 대폭 절감하는 기술 개발 ⓑ "태양광 발전 시스템 유지 관리 기술 개발"의 주제로 발전 기기·설비의 건전성 자동 진단 및 고장 방지, 자동 복구 등 발전 시스템의 열화 예방 및 장수명화, 인건비 절감 등에 기여하는 모니터링 시스템 및 유지 관리 기술 개발 ⓒ "태양광 발전 시스템 기술 개발 동향 조사"의 주제로 국내외 태양광 발전 시스템의 시장 및 기술 개발 동향 등을 조사하고, 태양광 발전의 보급 확대를 위해 필요한 기술 개발 요소와 과제를 정리하여 본 프로젝트에 피드백 ⓓ "태양광 발전 시스템의 안전 확보를 위한 실증"의 주제로 운용 기간 동안의 열화나 자연 재해에 대해서도 안전을 확보하는 평가·설계 기술을 확립하기 위해 태양광 발전 시스템의 구조 안전 전기 안전 등의 문제에 관한 조사·연구·실증 실험 등을 실시하며 ⓔ "ZEB 실현을 위한 태양 광 발전 시스템 기술 개발"의 주제로 태양광 발전 시스템을 건축물에 설치 환경을 모의하고 ZEB 화에 필요한 기술적 과제(설치, 유지 관리 방법, 교환 가능 같은 벽면 태양광 발전 시스템 등)를 추출하고, 그 과제 해결을 위한 태양광 발전 시스템의 개발·검증을 실시한다.

태양광 발전 재활용 기술 개발 프로젝트는 ⓐ "저비용 철거 · 수거 · 분리 기술 조사"의 주제로 사용된 태양광 발전 시스템의 철거, 회수, 분별 비용을 절감하는 저비용 철거 기술, 저렴한 회수 기술, 저비용 분리 기술에 대해 타당성과 유효성을 검증하고 과제나 목표 비용을 명확히 하며, ⓑ "저비용 분해 처리 기술 개발"의 주제로 다양한 태양전지 모듈을 대상으로 한 유리와 봉지재, 금속류 등의 저가 범용 분해 처리 기술뿐만 아니라 결정질 실리콘 태양 전지와 박막 계 태양 전지 등 태양전지 모듈의 종류에 따라 전용 분해 공정으로 비용의 절감이 가능한 저비용 분해 처리 기술을 개발하며, 태양광 모듈을 분해하여 회수하는 고부가가치 물질에 대해 재활용 비용 절감에 기여하기 위해 고부가 가치 물질의 회수율 향상과 가치가 높은 상태에서의 회수를 가능하게 하는 고부가 가치화 기술을 개발하고 처리 비용 절감 효과를 명확히 하며, ⓒ "저비용 분해 처리 기술 실증"의 주제로 연구개발 항목 ⓑ에서 목표 처리 비용의 달성 목표와 충분한 비용 절감 효과가 확인된 기술은 비용 절감 효과를 실증, ⓓ "태양광 발전 재활용 동향 조사"의 주제로 태양광 발전 시스템의 적정 폐기 처리에 관한 국내외 기술 개발 동향, 보급 동향, 정책 동향, 실시 사례 등을 조사하며, 태양광 발전 시스템의 분포 조사를 실시하여 분포에 따라 배출량 예측하며, ⓔ "사용한 태양 전지 모듈의 저비용 재사용 기술 개발"의 주제로 사용된 태양 전지 모듈을 낮은 비용으로 재사용 할 수 있는 기술을 개발한다.

4. 태양광 산업 활성화 전략

태양광 산업 생태계를 활성화시키는 연구개발의 주제로는 1) 경제성 확보를 위한 보급형 태양광 기술개발 2) 부품 소재 자립화 기술 개발 3) 대규모 단지형 실증 프로젝트 추진 4) 대국민 수용성 제고 5) 농가 태양광 활성화를 둘 수 있다.

태양광의 보급이 활성화되기 위해서는 화력 발전단가 이하의 가격쟁쟁력을 갖춘 저가 태양전지/모듈/시스템/폐기의 태양광 전체 요소기술을 개발하여 2030년 LCOE가 일본과 유사한 수준인 80원/kWh를 달성하는 기술개발이 필요하다.

국내 태양광 산업 생태계를 유지하는 부품 및 소재 자립화를 위해서는 국내 태양광 산업 가치 사슬을 분석하여 국산화가 취약한 부분에 집중투자를 통해 국산화율을 대폭 개선하여, 글로벌 기업으로 성장할 수 있는 핵심기술력을 확보한 강소기업의 육성이 필요하다.

태양광은 다양한 환경과 기후에 설치되기 때문에 지역별 최적지역에 MW급 이상 태양광발전 실증단지 구축을 통해 모듈과 시스템의 장기신뢰성 확보 및 사업화를 위한 시장 생태계 조성이 필요하다. 즉, 국산 태양광 모듈, 인버터, 시스템 등의 장기신뢰성 테스트 및 초기 시장 제공을 통해 사업화 기반을 마련하고 최적의 전력공급 시스템을 개발 및 실증하는 프로젝트이다. 실증단지를 통해 시스템 설계 및 운영기술을 습득하고 태양광 중심의 친환경에너지 타운 연계기술에 활용될 수 있다.

우리나라에서 태양광은 소음, 경관훼손, 안전문제 등 국민이 거부감을 느끼는 요소에 대한 올바른 정보제공과 보급 확산 기반 마련을 위한 부지확보 및 생활밀착형 기술개발을 하여 국민참여형 기술 및 시장여건을 조성해야 한다. 예를 들면, 지역산업 상생을 위한 연계 등 주민공존형 과제를 추진하고. 환경, 안정 영향 모니터링 및 과학적 규명을 통해 올바른 정보를 제공하는 기술개발과 도심형 분산발전기술, 제로에너지건물용 BIPV 등 생활밀착형 차세대 기술개발을 둘 수 있다.

우리나라의 협소한 국토면적의 한계를 극복하기 위하여 농지의 활용 및 작물의 특성을 고려한 농업공존형 태양광 발전 기술이 필요하다. 이에 대한 기술개발로는 농사와 태양광 발전을 병행하는 신규 모델 개발 및 실증하는 과제, 대상 작물과 지형 및 기후의 변화에 따른 태양광 모듈의 형태 최적화 기술, 식량과 전력의 동시 생산으로 단위면적당 경제성 향상 기술 등이다.

5. 결 론

우리나라는 전력수급 기본계획 수립시, 전기설비의 경제성, 환경 및 국민안전에 미치는 영향 등을 종합적으로 고려하여 환경성과 안전성을 대폭 보강하여 국가전력수급 계획을 마련하였다. 이에 따라 화석에너지 중심의 발전분야가 태양광 등 친환경 에너지로의 패러다임 전환이 가속화되고, 여기에 에너지저장과

전기차 산업이 융합되면서 태양광 산업은 초대형 산업으로 성장할 가능성이 높아지고 전망된다. 본고에서는 태양광의 대량 보급 시대를 맞이하여, 태양광 기술개발 측면에서 앞으로의 방향에 대해 검토하였다.

일반적으로 발전효율, 운전비용, 수명기간 등이 각기 다른 발전원에 대한 발전단가를 산정하여 비교하기 위해서 균등화 발전비용(LCOE)을 활용한다. 중국의 유틸리티 시장의 LCOE는 2017년말에 0.08$/kWh의 LCOE를 보이며, 이에 반해 일본은 0.14$/kWh의 상당히 높은 LCOE를 보인다. 일본과 누적설치량이 비슷한 독일의 LCOE는 0.11$/kWh로 LCOE의 의미 있는 차이가 있다. 이에 반해 1MW 이하의 소규모 태양광 발전이 주류를 이루는 우리나라의 가정용 태양광 LCOE는 2013년 0.24 $/kWh에서 2017년 0.17$/kWh로 약 33%가 하락하였다.

태양광의 대량 보급을 위해서는 LCOE로 대표되는 제조원가를 낮추기 위한 고효율화, 제조기술의 혁신, 발전량 향상, 유지보수 비용의 절감하는 기술개발을 지속적으로 진행되어야 한다. 태양광 시장의 95% 이상을 차지하는 결정질 실리콘 태양전지 분야에서 LCOE 저감과 관련된 기술개발로는 잉곳, 웨이퍼, 셀과 모듈 레벨에서 제조원가의 하락을 위한 재료의 혁신과 공정 및 생산성의 개선을 둘 수 있다. 태양광 밸류체인별 LCOE 저감 요소를 검토하였다.

미국의 "Sunshot initiative"은 태양광의 채용을 늘리고 태양광에 의한 전기료의 저감을 위해 2011년에 시작된 프로그램이다. 세부 프로그램으로 1) 집광형 태양광 발전, 2) 태양전지, 3) 시스템 통합 4) 소프트 코스트, 5) 기술의 상용화를 운영중이다. 이 프로그램의 운영으로 2011년 utility 태양광의 LCOE는 28 ¢/kWh에서 2017년 6 ¢/kWh로 하락되어 2020년 목표를 달성하였고, 거주용과 상업용에서도 LCOE의 개선이 진행되었다. 2030년에는 2020년 LCOE의 50% 하락을 목표로 진행되고 있다. 세부 프로그램중 태양광은 제조원가를 낮추고, 태양광 기술의 효율과 성능의 향상 및 신뢰성의 개선하여 LCOE을 낮추는 것을 목표로 한다. 2030년의 LCOE 목표는 2011년의 대략 90% 정도인 $0.03/kWh이며, 태양전지 세부프로그램은 LCOE가 $0.03/kWh으로 도달할 수 있는 기회를 제공하도록 집중하고 있다.

일본은 태양광 발전의 대량 도입 사회를 원활하게 실현하기 위한 전략으로서 ① 발전 비용 절감, ② 신뢰성 향상, ③ 위치 제약의 해소, ④ 재활용 시스템의 확립, ⑤ 산업의 고부가 가치화의 5개 방안을 제시하여, 태양광 발전의 도입 형태의 다양화와 새로운 이용 방법의 개발에 의한 저변 확대 등을 제언하고 있다. 발전 비용 목표는 2020년에 업무용 전력요금과 같은 14엔/kWh, 2030년 기간전원 발전 가격과 같은 7엔/kWh이다. NEDO에서는 연구개발을 통해 2030년 발전가격을 5년 앞당겨 2025년까지 발전 비용 7엔/kWh를 실현하는 기술의 확립을 목표로 하여 프로그램을 가속화하고 있다.

태양광 산업 생태계를 활성화시키는 연구개발의 주제로는 1) 경제성 확보를 위한 보급형 태양광 기술개발 2) 부품 소재 자립화 기술 개발 3) 대규모 단지형 실증 프로젝트 추진 4) 대국민 수용성 제고 5) 농가 태양광 활성화를 제안한다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20173010012940). 본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지공단(KEMCO) 신재생 에너지센터의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20001795).

References

1. The 8th basic plan for long-term electricity supply and demand, MOTIE, 2017.
2. IEA PVPS, "Snapshot 2018 of global photovoltaic market"(2018). http://www.iea-pvps.org/?id=266
3. DOE, "Levelized Cost of Energy (LCOE)," 2017. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/ 08/f25/LCOE.pdf
4. IRENA, "Renewable energy technologies : cost analysis series," 2012. https://www.irena.org/documentdownloads/publications/re_technologies_cost_analysis-solar_pv.pdf
5. K. Branker, M.J.M. Pathak, J.M. Pearce, "A Review of Solar Photovoltaic Levelized Cost of Electricity," Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, pp. 4470–4482, 2011.
6. ITRPV, International Technology Roadmap for Photovoltaic Results 2017, 2018.
7. IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2018.
8. K. Kimura, R. Zissler, Comparing Prices and Costs of Solar PV in Japan and Germany - The Reasons Why Solar PV is more Expensive in Japan, 2016.
9. R. Fu, D. Feldman, R. Margolis, M. Woodhouse, K. Ardani, U.S. Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017, NREL/TP-6A20-68925, 2017.
10. https://www.energy.gov/eere/solar/photovoltaics -research-and-development
11. http://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP2_100060.html