2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

# 2003년도 세계 태양광발전 기술 R&D 현황과 전망
## - 일본, 미국, 유럽을 중심으로-

유권종*, 정명웅*, 최주엽**, 박경은*
한국에너지기술연구원* 광운대학교 전기공학과**

# Status and Perspectives of PV Research and Development in the World
## -Focusing on Japan, USA & Europe-

Kwon-Jong Yu*, Myung-Woong Jung*, Ju-Yeop Choi**, Kyung-Eun Park*
Korea Institute of Energy Research*, Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University**

Abstract - At present, Japan, USA and Europe have been playing a leading part in photovoltaic industry. This paper presents an overview about status and perspective of PV R&D in these countries. From the results of this paper, we will intend to suggest a suitable future course for domestic PV R&D.

## 1. 서 론

지구 환경과 에너지는 현재 세계적인 이슈로 끊임없이 논의되고 있다. 특히 기존 화석연료의 한계성과 그것의 사용으로 인한 환경오염에 대한 우려가 커짐에 따라 대체에너지원에 대한 연구 개발의 필요성이 커지고 있다. 이에 선진국들을 중심으로 태양에너지와 같은 청정하고 무한한 대체에너지원에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 그 중에서도 태양광 산업은 풍력, 바이오매스와 함께 뜨거운 관심 속에서 빠르게 성장하고 있다.

1980년부터 2000년까지 1인당 에너지소비가 4배 이상 증가하는 등 에너지 소비가 급격히 증가한 반면, 에너지 해외 의존도는 더 높아져서 현재 소비되는 에너지의 97%를 수입에 의존하고 있는 우리 나라도 대체에너지 개발이 절실하게 필요한 실정이다[1].

이에 세계 태양광 시장을 이끌고 있는 일본, 미국 독일과 같은 선진국들의 태양광 연구개발 현황과 전망을 분석하여, 향후 우리 나라 태양광산업이 나아갈 방향을 모색해 보고자 한다.

## 2. 세계태양광발전시장 현황

일본, 미국, 유럽을 중심으로 세계 태양광발전 시장은 빠른 증가 추세를 이어가고 있다. 다음 그림 1에서 보여지는 바와 같이 전반적으로 1990년대 후반부터 태양전지 출하량이 빠른 증가추세를 보이고 있는데[12], PHOTON International에 의해 집계된 결과에 따르면, 2002년에는 2001년보다 약 39.4% 증가한 559.6 MWp를 공급한 것으로 나타났다[10].

특히 일본의 경우, 두드러지게 빠른 성장률을 나타내며 1990년대 중반부터 수요와 공급에서 모두 세계 태양광 산업의 선두에 서게 되었다.

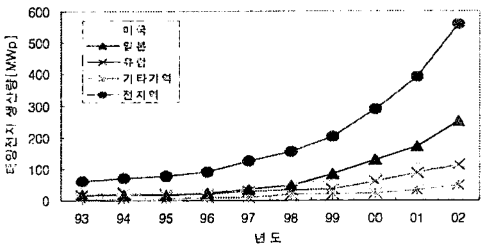


그림 1 세계 태양전지 출하량

## 3. 태양광발전기술 R&D 현황과 전망

현재 세계 태양광발전산업은 몇몇 국가들에 의해 이끌어져 가고 있다. 일본, 미국, 독일 등이 그 대표적인 나라로, 태양광발전 분야에 있어서 해결해야 할 가장 큰 과제인 비용과 효율을 비롯한 다양한 연구를 활발히 수행하고 있다. IEA-PVPS에 의해 보고된 2001년 태양광 R&D에 대한 예산에서도 이 세 국가가 다른 국가들에 비해 태양광발전기술의 연구개발에 월등히 많은 투자를 하고 있는 것으로 나타났다[6]. (표1참고).

표 1. 태양광발전기술 R&D에 대한 각 국가별 예산(million $)

| 국가 | R&D 예산 | 국가 | R&D 예산 |
|---|---|---|---|
| 네덜란드 | 2.983 | 영 국 | 4.706 |
| 노르웨이 | 1.125 | 오스트리아 | 0.554 |
| 대한민국 | 1.768 | 이스라엘 | 0.225 |
| 덴 마 크 | 0.629 | 이탈리아 | 5.536 |
| 독 일 | 26.725 | 일 본 | 50.964 |
| 멕 시 코 | 0.726 | 캐 나 다 | 1.241 |
| 미 국 | 35.000 | 프 랑 스 | 8.346 |
| 스 웨 덴 | 1.533 | 핀 란 드 | 0.520 |
| 스 위 스 | 9.127 | 호 주 | 0.508 |

이 세 국가들을 중심으로 태양광발전기술의 R&D현황과 전망을 살펴보면 다음과 같다.

### 3.1 일본의 태양광 R&D

일본 정부에 의해 이루어진 대표적인 태양광발전 관련 프로그램은 다음 그림 2와 같다.

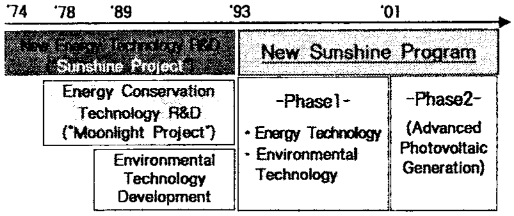


그림 2. 석유파동 이후의 태양광 관련 정부지원 프로그램

1973년 오일쇼크 이후 시작된 Sunshine Project를 비롯하여 에너지 절약 기술에 관한 연구로 Moonlight Project가 수행되는 등, 신·재생에너지와 관련된 많은 프로그램들이 수행되었다. 특히, New Sunshine Program은 Sunshine Project의 후속 프로그램으로 1993년에 시작되어 2001년 3월에 1단계가 성공적으로 종료되었는데, 이 프로그램에서 태양광이 핵심 신 에너지의 하나로 분류되었다. 이후 태양광 부분은 일본의 신 에너지·산업기술종합개발기구(NEDO)에 의해서 Advanced Photovoltaic Generation(APVG)라는 새로운 태양광 기술 프로그램으로 발전되었다[7].

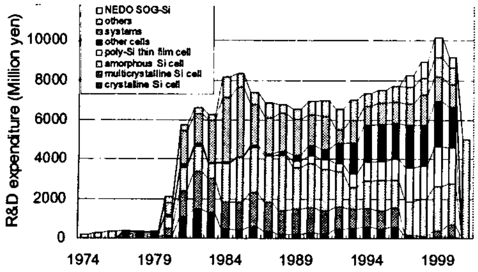


그림 3. 1974년 이후의 태양광발전 기술 R&D 비용 (in the (New-)Sunshine Program)

그림 3은 Sunshine Program이 시작된 1974년 이후부터 지출된 PV R&D 비용의 내역을 나타낸 것이다. R&D 비용이 급격히 증가한 1980년 초반에는 단결정, 다결정, 아몰포스 실리콘 태양전지와 시스템이 큰 비중을 차지하다가, New Sunshine Program이 수행된 1990년 초반부터는 박막태양전지 기술들의 R&D 비중이 증가하여, 현재는 주로 박막태양전지와 기타 다른 첨단 기술들에 관한 투자가 이루어지고 있다[3].

New Sunshine Program 1단계가 종료되는 FY2000년까지 최근 R&D의 주류를 이룬 기술들에 대한 프로그램을 수행한 결과, 표 2에서 보여지는 것과 같이 많은 부분에서 목표를 달성하게 되었다. 또한, 2001년부터 시작된 New Sunshine Program 2단계에서 박막태양전지를 중심으로 첨단 기술에 대한 R&D를 수행 중에 있는데, 그 주요 내용은 표 3과 같다[9].

New Sunshine Program 중에는 2030년까지의 일본의 PV 연구 개발에 관한 로드맵이 세워져 있다. 이 로드맵에 따르면 순차적인 태양전지기술의 연구개발로, 그 변환 효율을 증가시켜 박막 태양전지의 가격을 2005년까지

표 2. New Sunshine Program의 FY2000까지의 주 목표와 이행

| Theme | Targets by FY2000 | Achievements |
|---|---|---|
| Manufacturing technology of new type amorphous and high-reliability CdTe PV module | | |
| a-Si modules, Glass sub. | η=10%, 140yen/W, 90cmx90cm | η=10.0%, 133yen/W, a-Si/a-SiGe, 8252cm² |
| a-Si modules, Flexible | η=10%, 140yen/W, 40cmx80cm | η=9.2%, 147yen/W, a-Si/a-SiGe, 40cmx80cm |
| CdTe module | η=13%, 140yen/W, 60cmx90cm | η=11.0%, 140yen/W, 5413 cm² |
| Manufacturing technology of advanced thin-film PV module | | |
| CIGS by selenization | η=13%, 140yen/W, 30cmx30cm | η=12.9%, 137yen/W, 30cmx30cm |
| CIGS by evaporation | η=16%, 10cmx10cm | η=12.6%, 10cmx10cm, 18.5%, 1cm² |
| ZMR poly-Si thin film | η=15%, 140yen/W, 30cmx30cm | η=14.6%, 137yen/W, 600cm², 77μm |
| LPE poly-Si thin film | η=13%, 10cmx10cm | η=12.2%, 4.34cm² |
| a-Si/poly-Si hybrid | η=14%, 5cmx5cm | η=11.7%, 910x455mm², η=14.1%, 1cm² |
| a-Si/poly-Si sheet hybrid | η=14%, 5cmx5cm | η=12.0%, 1cm² |
| Single crystal Si thin film | η=14%, 5cmx5cm | η=12.5%, 2cmx2cm, 12μm |
| Micro-concentrator | η(cell)=15%, 4mm², η(module)=14%, 25cm², 140yen/W | η(cell)=15.3%, 4mm², η=14.02%, 2.7suns, 138yen/W |
| Development of manufacturing technology of new materials and substrates | | |
| High quality a-Si materials | 2nm/s, Ns*=2.5x10¹⁶/cm³ | 2nm/s, Ns*=2.0x10¹⁶/cm³ |
| High quality μc-Si | 1nm/s, Ns=1x10¹⁷/cm³ | 1nm/s, Ns=1x10¹⁷/cm³, η=9.4%(140 ) |
| Development of manufacturing technology of ultra-high efficiency crystalline compound solar cell | | |
| III-V mechanical stack | η=30%(on GaAs), 5cmx5cm | η=30.3%(GaAs/GaInAs), 5cmx5cm<br>η=31.1%(GaAs/GaInAsP), 1cmx1cm |
| III-V on Ge | η=30%(on Ge), 5cmx5cm | η=31.2%(InGaP/InGaAs/Ge), 5cmx5cm |
| III-V on Si | η=25%(on Si), 5cmx5cm | η=17.85%(GaAs on Si), 5mmx5mm |

표 3. New Sunshine Program의 2001년 이후의 R&D 개요

| Theme | Research Institute | Target*(2001-2005) |
|---|---|---|
| (1)Development of advanced solar cell modules | | |
| Si-based thin film solar cell modules | | |
| High efficiency a-Si/poly-Si hybrid module | Kaneka | η=12%, 100yen/W, 3600 cm² |
| High quality Si-based thin film | Mitsubishi Heavy Industries | (prototype module) |
| CIS based thin film solar cell modules | | |
| High quality CIGS module | Showa Shell Sekiyu | η=13%, 100yen/W, 3600 cm² |
| High throughput CIGS module | Matsushita Electric | (prototype module) |
| Ultra-high efficiency compound solar cells | | |
| Concentrator cell | Sharp | η=40%(concentrator) |
| Concentrator module | Daido Steel | 100yen/W |
| Concentrator system | Daido Metal | |
| High-efficiency multi-crystalline Si(cast Si) solar cells | Kawasaki Steel, Sumitomo Metal, Sharp | (1999-2003) η=20%, 15cmx15cm, 142yen/W |

| Theme | Research Institute |
|---|---|
| (2)Development of evaluation, recycling and other infrastructure technologies | |
| Evaluation techniques of solar cells and modules | AIST**, JET*** |
| Evaluation techniques of PV system | AIST, JET |
| Development of recycling and reuse techniques | Sharp, Showa Shell, Asahi Glass, AIST, PVTEC |
| Research on electromagnetic environment in PV system | JET |

| Theme | Research Institute |
|---|---|
| (3)Development of innovative, next-generation PV system | |
| $CuInS_2$ thin film solar cell by electroplating | Sinko Electric |
| Nano-structure Si thin film solar cell | AIST, Kyushu Univ., Toppan Printing, Stanley, Nippon Sheet Glass |
| SiGe-based solar cell | Tohoku Univ. |
| Solid state dye-sensitized cell | Univ. Tokyo, RITE |
| Low cost manufacturing technique by CAT-CVD | JAIST, Osaka Univ., Gifu Univ. |
| β-$FeSi_2$ solar cell | System Engineers, AIST |
| Ultra-efficient optical confinement | Asahi Glass |
| Silicon ball solar cell | Clean Venture 21 |
| Low cost and high efficiency dye-sensitized cell | AIST, Sumitomo Osaka Cement, Furukawa, Hayashibara Biochemical Lab, Sharp |

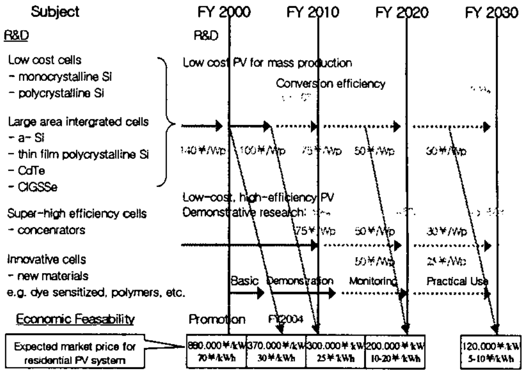


그림 4. 2030년까지의 일본 태양광발전 로드맵

Wp당 100¥, 2030년엔 그 가격을 30¥까지 감소시키는 것을 목표로 삼고 있다. 이 목표가 달성되었을 경우, 2005년에는 kW당 주거용 건물의 시스템 비용이 370¥이 되며, 2030년에는 kW당 120¥까지도 가능하다.

이와 같이 태양전지의 성능에 관한 연구개발은 태양전지의 가격을 감소시킬 수 있고, 이 경우 시스템 비용의 감소에까지 이어져 태양광 보급을 더욱 활성화시킬 수 있게 된다는 시나리오를 가지고 있다[2].

또한 집광형과 같은 초고효율 태양전지의 효율향상, 비용감소, 그리고 폴리머와 같은 새로운 재료를 사용한 새로운 타입의 전지에 대한 연구 개발 계획도 수립하여 실증과 모니터링 단계를 거쳐 2030년까지는 실용화시킬 것을 목표로 하고 있다.

### 3.2 미국의 태양광 R&D

1970년대 초반부터 에너지성(DOE) 주도하에 National Renewable Energy Laboratory(NREL)와 Sandia National Laboratory (SNL)가 태양광산업과 관련해서 중추적 역할을 담당하여왔다. 1980년을 전후로 하여 급속한 증가 추세를 보였던 R&D예산은 1980대 후반까지 감소하다가 다시 90년대부터 증가하여 2003년 현재에는 2002년보다 2.6% 증가한 칠천육백칠십만 달러의 예산을 추진하게 되었다. 또한, 2004년에도 Bush 정권에 의해서 2003년과 동일한 수준의 예산을 세우고 PV에 대한 연구개발을 수행하고 있다[10].

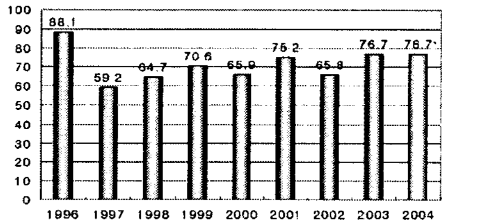


그림 5. 미국의 태양광발전 R&D 예산(in million $)

미국의 태양광 시장은 최근까지 독립형시스템이 주도해왔고, 건물 적용에 유리한 아몰포스나 박막 태양전지보다는 효율이 높은 단결정 실리콘 태양전지가 주종을 이루어왔다. 그렇지만, 70년대 후반부터 꾸준히 계속되어온 박막 및 첨단 태양전지의 효율 개선 및 비용절감을 위한 노력으로, 세계태양광산업에서 기술적 리더로서의 위치를 지키고 있다.

그림 6은 NREL을 비롯한 태양광 관련 정부, 학교, 기업의 연구기관들에 의해 연구된 태양전지 효율을 나타낸 것이다. 이러한 노력으로 각각의 태양전지의 효율이 꾸준히 개선되고 있다[8].

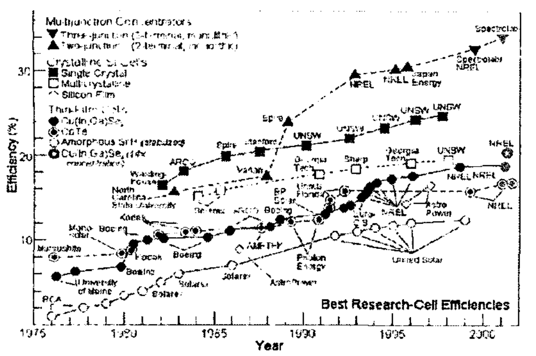


그림 6. 미국의 태양전지 효율 추이

태양광발전과 관련한 노력의 일환으로 최근에 DOE는 2020년까지의 태양광발전산업의 로드맵을 작성하였다. 그 로드맵은 단기(3년), 중기(4-7년), 장기(10-20년)적인 계획을 수립하고, 첨단 태양전지 기술 개발을 비롯한 다양한 부분에서의 발전을 꾀하고 있다. R&D 부분에 있어서는 단기적으로는 현재까지 진행해온 태양광발전 기술 관련 연구와 개발을 계속하되, 장기적으로는 다음 세대를 위한 재료에 대한 기본적인 연구와 새로운 재료의 개발을 위한 노력을 기울이고 있다[11].

### 3.3 유럽의 태양광 R&D

유럽은 일본, 미국과 함께 세계 태양광 시장을 이끌어 오고 있는 주요 태양광발전시장이다. 그 중에서도 독일은 선진 PV 국가로서 가장 큰 역할을 하고 있다. 독일의 최근 태양광 관련 프로그램으로 1999년에 시작된 10만 Roof Program이 있는데, R&D 부분에 있어서는 독일 경제기술부(BMWi)가 다음의 네 가지에 주안점을 두고 지원하고 있다. ; (1)실리콘 기본 재료 연구개발 (2) 실리콘 태양전지와 모듈 개발 (3)박막 실리콘 태양전지 (4)반도체 박막 태양전지

이 프로그램이 시작된 1999년부터 2001년까지 지출된 태양광 R&D비용과 지원과제의 수를 살펴보면, 박막 태양전지에 대한 R&D 비용이 상대적으로 많은 비중을 차지하고 있음을 알 수 있다[4].

표 4. BMWi가 지원한 PV R&D 비용(1999~2001)

| 내 역 | 1999 | 2000 | 2001 |
|---|---|---|---|
| 실리콘 기본재료 R&D(10projects) | 4.63 | 4.85 | 2.83 |
| 실리콘 태양전지, 모듈 개발(9 ″ ) | 7.58 | 6.67 | 5.76 |
| 실리콘 박막 태양전지(11 ″ ) | 6.76 | 11.22 | 9.77 |
| 반도체 박막 태양전지(9 ″ ) | 4.71 | 8.93 | 6.38 |
| 시스템 기술 | 4.40 | 4.59 | 4.33 |
| 총 계 (In Mio Euro) | 28.08 | 36.26 | 29.07 |

표 5. 유럽의 PV R&D 수행결과와 향후 목표

| 태양전지 | ~2000목표 | 달성결과 | ~2005목표 | ~2010목표 |
|---|---|---|---|---|
| c-Si | | | | |
| • laboratory | 24% | 24.7% | 25% | 26% |
| • production-momo | 16-18% | 15-17% | 16-18% | >20% |
| • production-mult | | 13-15% | 14-16% | |
| Thin-Film(polycryst, amorphous) | | | | |
| • laboratory | 18% | 18.8% | 20% | 20% |
| • production | >10% | 10% | 12% | >15% |
| Advanced devices(tandom, conc.) | | | | |
| • laboratory | >30% | 33% | 34% | 35% |
| • production | >20% | 24% | 25% | 25% |
| 모듈/시스템 | | | | |
| 모듈 | | | | |
| • 효율 | -- | 13% | 15% | >30% |
| • Lifetime | >20y | 25yr | 30yr | 25yr |
| • Lifetime동안의 감쇠 | <10% | <5% | <3% | <10% |
| • 비용(셀비용) | <2.5(<1.5) | <4.0(<2.5) | <2.5(<2.0) | <1.5(<1.5) |
| 시스템 | | | | |
| • 비용(/wP) | | | | |
| 독립형 | <5.0 | <8.0 | <5.0 | |
| 1-3kW 계통연계형 | <4.0 | <4.0-5.0 | <3.5 | <3 |

독일 이외에도 호주, 이탈리아, 영국 등 유럽의 여러 국가들은 PV R&D에 대한 노력을 게을리 하지 않고 있다. 그 결과, 유럽에서 수립한 2000년까지의 R&D 목표가 표 5와 같이 대부분 달성되었고[5], 현재에도 태양광발전기술에 관한 연구개발을 계속하고 있다.

## 4. 결 론

우리 나라의 태양광 R&D는 세계적인 추세에 맞추어 결국에는 비용 효율적이면서 유동성 있는 적용이 가능한 기술, 즉 박막 태양전지를 비롯한 첨단 기술들의 연구개발을 지향하게 될 것이다. 그러나 우리 나라의 태양광 산업은 아직 초기 단계로, 생산, 보급, 그리고 태양광에 대한 인식 등 모든 면에서 기반이 갖추어지지 않은 상태이다. 또한, 현재 국내에서 수행되고 있는 결정질 태양전지는 선진국의 것과 비교하여 비용과 효율 면에서 연구개발되어야 할 부분들이 아직 많이 있다. 또한 전세계 반도체 시장의 선두에 있는 국내 반도체 산업을 활용할 수 있다는 측면에서도 결정질 태양전지에 대한 미래는 밝다. 이에 중장기적인 목표는 첨단 기술의 연구 개발에 맞추어 수립하여 연구개발을 계속하되, 현재 태양전지 생산과 보급의 주류를 이루고 있는 결정질 태양전지의 연구개발과 보급에 초점을 맞추어 연구개발 및 기타 정책들을 수행함으로써 국내 태양광 산업의 기반을 갖추는 것이 선행되어야 한다고 사료된다.

세계 태양광 R&D는 실리콘 가격으로 인한 결정질 실리콘 태양전지의 비용 저감 한계를 인식하고, 박막 태양전지를 비롯한 첨단 기술들에 대한 연구 개발을 통해 그 비용 문제를 해결하면서 효율을 높이기 위해 노력하고 있다. 보급된 양도 많고 보급 시간도 오래된 단결정과 다결정 태양전지에 관해서는 실리콘 태양전지의 노후화와 재활용에 관한 연구가 진행 중에 있다.

### [참 고 문 헌]

[1] 문영석, "국내외 에너지시장 여건 변화와 우리 나라의 에너지 안보체계", Energy News in Korea, 2003년 4월
[2] Arnulf Jager Waldau, "Status of PV Research, Solar Cell Production and Market Implementation in Japan, USA and the European Union", PVNET Workshop RTD Strategies for PV Ispra, European Commission Joint Research Centre, 2002
[3] Endo Eiichi and Tamura Yoshihiko, "Cost Efficiencies of PV R&D in Japan and The U.S. from The Viewpoint of Solar Cell Manufacturing Cost Reduction", 7th World Renewable Energy Congress, 2002
[4] Heribert Wagner and Christoph Hunnekes, "PV Programs in Germany", Proceedings of the 29th, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002
[5] H. Ossenbrink, "Future Research nd Development in PV Status, Roadmap and Outlook", Workshop on RTD Strategies for Photovoltaics, DG JRC, Ispre, 2002
[6] IEA PVPS, "Trends in Photovoltaic Applications; In selected IEA countries between 1992 and 2001", Report IEA PVPS T1 11, 2002
[7] Koichi Sakuta, "Present States and Prospects of PV Programs in Japan", *Photovoltaic Electricity from the Sun*, IEEE, 2000
[8] Lawrence L. Kazmerski, "Photovoltaics R&D in The United States; Positioning for our Future", Proceedings of the 29th, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002
[9] Makoto Konagai, "National Program: Thin Film Cells Program in Japan-Achievements and Challenges", Proceedings of the 29th, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2002
[10] Michael Schmela, "PHOTON International", 2003년 3월
[11] NREL, "Solar Electirc Power", The U.S. Photovoltaic Industry Roadmap, 2003
[12] Paul D. Maycock, "PV News", 2003년 3월