日本의 太陽光發電 技術開發現況

杉 本 宏
(日本新에너지・NEDO 太陽技術開發室長)

1. 서 론

Sunshine계획은 제1차 석유위기 발생후 1974년에 신에너지 이용기술의 개발을 촉진할 목적으로 통상산업성(MITI)에 의해서 시작되었다. 이 계획은 ① 태양에너지 ② 지열에너지 ③ 석탄에너지 ④ 수소에너지 이용 기술의 연구개발이 주요 과제이다.

또한 Sunshine계획을 유효 적절하게 추진하기 위하여, 제2차 석유위기후 1980년에 신에너지 종합개발기구(NEDO)가 설립되었다. 즉, 官・學・民의 자금, 인재, 기술을 결집하여 장기 lead time을 중심으로 본 기술개발 체제는 1과 같다.

NEDO 내에서의 태양에너지 이용기술 개발은 태양기술 개발실이 담당하고 있으며,

- 태양전지 제조기술
- 태양광발전 시스템 기술
- 산업용 등 solar system 기술
- 대형 풍력발전 시스템 기술

의 분야에 있어서 50여개의 project를 추진하고 있다. 이중에서 태양광발전 기술개발에 대해서 소개한다.

2. 태양전지 제조기술

Sunshine계획에서는 21세기 초에 태양광발전의 본격적인 도입을 실현하기 위하여 태양전지의 제조 cost를 100~200円/wp로 저가화 시키는 장기목표를 설정하고 있다. 또한, 태양전지의 변환효율을 높이는 것은 지지대 등 주변장치를 포함하여 저가화에 이어지기 때문에 중점을 두고 연구 개발하고 있다. (그림 2, 3) 태양전지의 연구개발을 착실히 추진하기 위해, 3~4년마다 중간 목표를 설정하여 그 달성상황을 평가하여, 다음 단계로의 진행방식을 취하고 있다. 그림 4에 태양전지 제조기술 개발 Schedule를 나타냈다. 다음 중간평가는 1992년에 행할 예정이다.

2.1 결정계 태양전지

1980년부터 1985년까지 저가화 기술의 개발을 목표로 하여, 태양전지용 실리콘 제조공정, 실리콘 기판 제조기술, PN접합・전극형성 기술 및 연속 자동화에 따른 Pannel작성기술에서 나오는 年産 500kW급의 생산기술 개발을 행하였다. 1986년에서 1988년까지는 고효율화 기술개발에 중점을 두고, 연구를 한 결과 1988년도의 중간목표를 달성했다. 표 1은 그 개요에 대해서 서술한다.

(1) 저가 클로로 실란($sicl_4$)제조 기술 개발

규소를 원료로 SOG실리콘을 저가로 제조하는 要素기술을 개발하기 위해, 고순도 시리카 및 실리콘 제조실험 장치로부터 안정운전 조건의 검토, 실리콘 순도의 향상 등 검토를 행하였다.

(2) Cast 기판공정의 기술개발

Ingot제조장치를 운전하여, 고품질・저가화의 Cast 기판 제조기술의 연구, 200㎛이하의 slice기술의 작

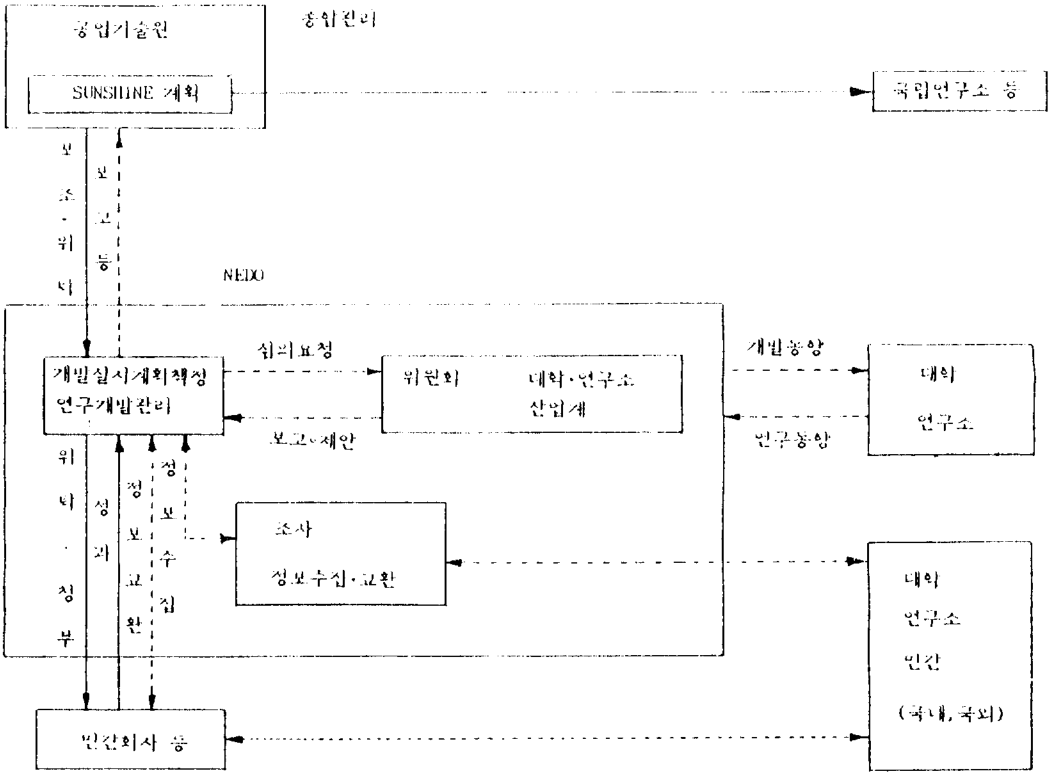

그림 1. NEDO를 중심으로한 기술개발 체계

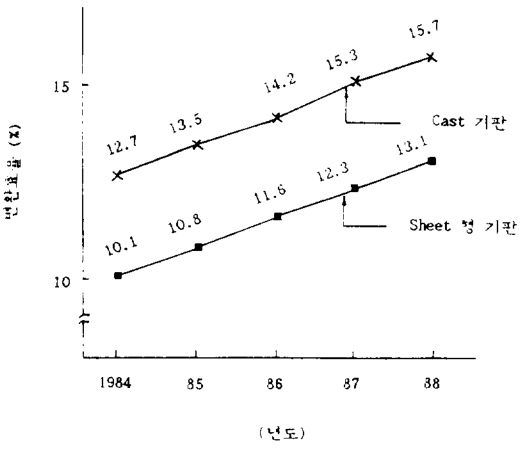

그림 2. 결정계 실리콘 태양전지의 변환효율 추이

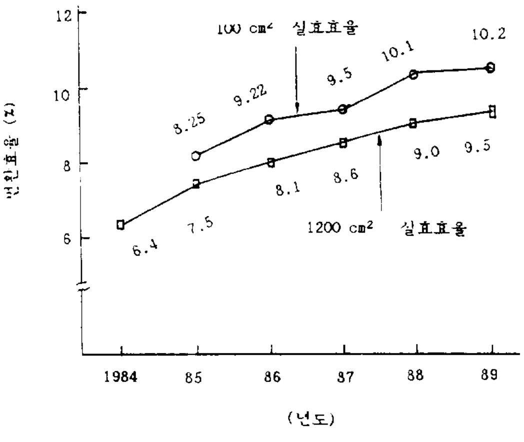

그림 3. Amorphous 태양전지의 변환효율 추이

업성 등 연구개발 및 전자 cast법의 기초검토를 수행하였다.

(3) sheet狀 기판공정의 기술개발

sheet狀 기판제조장치의 연속운전을 하여, 장치의 영구성, 고생산성, 저가화, 고품질화 등의 연구를 실시함과 동시에 sheet狀 기판의 특성을 평가하고 cell 化조건의 최적화를 수행했다.

(4) 고효율 cell 化 기술개발

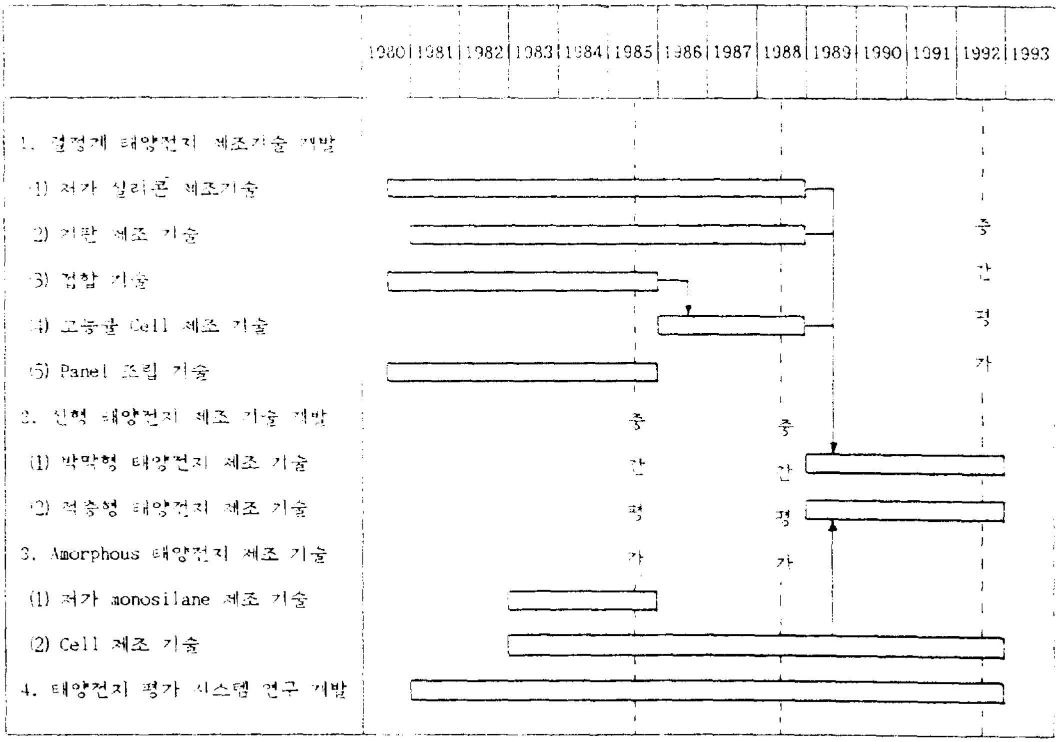

그림 4. 태양전지 제조기술 개발 Schedule

표 1. 결정계 태양전지 제조기술 개발성과

구 분	개발항목	'88년도 중간목표	달성현황
원료공정	1. 저가 실리콘 제조 기술 개발	('90년도 목표) 실리콘 원료 저가화 6~8円/g	10円/g(100t/년) 4.9円g(1000t/년)
기판공정	2. cast기판 제조 기술 개발 3. Sheet형 기판 제조기술	비저항 N형 10Ω·cm 이상 p형 30Ω·cm 이상 Lifetime 5μs이상 cell 변환효율 15% 이상 비저항 N형 5 Ω·cm 이상 p형 15Ω· cm이상 Lifetime 3μs 이상 Cell 변환효율 11% 이상	p형 38.6Ω·cm 35μs 15.7%(실효효율 최고치) p형 50.0 Ω·cm 6μs 12.3%(실효효율 최고치)
Cell 제조공정	4. Cell 제조기술	Cell 변환효율 18% 이상 (단결정 15% 이상)	20.5%(2×2cm) 15.7%(실효효율 최고치)

각종 접합기술의 개발 및 기판 특성향상을 위해 passivation, Annealing, Gettering등의 검토, 박막형성 기술 등을 개발하였으며, 또한 2차원 computer simulation에 의한 특성해석, 초고효율에 cell구조의

표 2. 신형 태양전지 제조기술 차기목표

항	목	1992 년도 목표
박막형태양전지	1. 고순도 기판 제조기술 개발	불순물농도 산 소 : 2×10^{17} atm/㎤ 이하 탄 소 : 5×10^{14} atm/㎤ 이하 확 산 강 : 150μm 이상 Ingot size : 20cm×20cm 기판두께 : 200μm 이하 Cell 변환효율(10×10cm) 18%이상
	2. 고속 기판 제조기술 개발	기판크기 20cm×20cm×0.1㎜ 제조속도 1매/분 이하 Cell 변환효율(10×10㎜) 14%이상
	3. 신접합 정조 Cell 기술 개발	다 결 정 Cell 변환효율(10×10cm) 18% 이상 Cell 변환효율(15×15cm) 17%이상 단 결 정 Cell 변환효율(2×2cm) 23% 이상
적층형 태양전지	1. Amorphous/다결정 적층 Cell 기술개발	Cell 변환효율(10×10cm) 14%이상
	2. Amorphous/화합물 적층 Cell 기술개발	Cell 변환효율(30×40cm) 13% 이상

요소 연구를 수행하였다.

1989년부터는 薄型化 등의 신기술에 따른 저가화, 고효율화를 목표로 한 신형 태양전기의 연구개발을 수행하고 있다. 이중에는 積層型 태양전지도 포함하여 표2에 나타낸 중간목표를 설정하고 있다.

현재는 cell변환효율에서 보면, 薄型 태양전지의 10cm角에서 15.7%, 15cm角에서 15.1%에 달하고 있다.

2.2 Amorphous 태양전지

Amorphous 태양전지는 대량·연속생산이 가능하고, 실리콘 원료의 사용량이 적다는 것 등에 의해 장래에 저가화를 기대할 수 있다. 그러나 현재에는 태양전지의 변환효율이 낮은 것, 제조설비가 고가로 태양전지의 제조공정이 능률적이 아니라는 것 등의 이유에서 저가화가 실현되지 않고 있다. 또한, 변환효율이 초기에 크게 저하되는 현상이 있으며, 이것의 해명과 대책은 중요 과제이다. NEDO가 Amorphous 태양전지의 기술개발을 시작한것은 1983년부터로, 요소기술로 분류하여 진행하여 왔다. 즉, 원료를 저가 Monosilane 제조기술 개발, 전지에 있어서는 고품질 제조기술 개발, 대면적 제조기술 개발, 고능률 제조기술 개발, 고신뢰성 제조기술 개발(1985년 시작), 이종기판 cell 제조기술 개발(1984~1985년), 저가 투명전도막 제조기술 개발(1986년 시작)이다. 1988년도의 성과 개요는 다음과 같다. (표3)

(1) 고품질 제조기술 개발

플라즈마 CVD법 및 광 CVD법으로부터 narrow band gap 재료 등의 고품질화 및 전지기술의 향상을 위해 새로운 박막제조법, 계면제어기술, cell 형성기술 등 요소기술을 개발했다.

(2) 대면적 제조기술 개발

대면적화 프로세스 기술향상과 더불어 p/i층 접합계면의 특성을 개선하기 위해 IVE(Interdigital Vertical Electrode)형 장치에 의한 박막제조 기술의 확립과 최적 module size의 검토를 수행하였다.

(3) 고능률 제조기술 개발

표 3. Amorphous 태양전지 제조기술 개발 성과

개 별 항 목	1988년도 중간목표	달 성 상 황
1. 고품질화	Cell 변환효율 10% 이상(10×10cm) (1×1cm 변환효율 12% 이상)	(실효효율 최고치)10.1% (변환효율 12.4%)
2. 대면적화	1200㎠ Sub module에서 변환효율 8%이상 1200㎠ Sub moidule의 최적 size 결정	(실효효율 최고치)9.0% 최적 size 4800㎠ (4800㎠까지의 size에서)
3. 고능률화	15Å/s이상 Cell 변환효율 8%이상(10×10cm)	15Å/s (실효효율 최고치)8.2%
4. 고신뢰성화	초기변환효율 10% 이상 1년후 노화율 10% 이내	초기변환효율 10% 이상 1년후 노화율 10%
5. 투명전도막	저항율 5Ω/□ 투과율 85% 이상 (유리를 포함한 파장 범위 400~800nm) cost : 10×10cm 100円이하	5Ω/□ 85% 100円/10×10cm(10MW에 상당하는 120,000 m²의 수요일때)

표 4. Amorphous 태양전지 제조기술 개발 차기 목표

항 목	1992년도 목표
1. 고품질화	Cell 변환효율(10×10cm)12% 이상 노화율(1년후)10% 이내 (1×1cm Cell 변환효율 13% 이상)
2. 대면적화	30cm×40cm Sub module에서 변환효율 10% 이상 노화율(1년후) 15%이내
3. 고신뢰성화	노화율(1년후)5%이내 초기변환효율(10×10cm) 11% 이상 초기변환효율(1×1cm) 12% 이상
4. 요소기술 (1) 복합투명전도막	투 과 율 : 85%이상 저 항 율 : 5Ω/□이내 플라즈마 내성 : 10%이내 (투과율, 저항율의 변화) 헤이즈(Haze)율 분포 : 10% 이내 기판크기 : 30cm×40cm 가 격 : 50円/10㎠ 이하 (단위 공장당 연간 수요가 120,000m²일때 ; 100MW 규모 상당)
(2) 좁은 밴드갭 재료	변환효율(면적 1㎠ 전지의) : 4%이상 (5,000Å의 a-Si 필터를 사용할 경우)

Monosilane, Disilane을 사용하여, 15Å/s이상의 속도로 박막을 제조하는 기술의 확립, 기판에 가소성의 고분자 필름을 이용하여 roll-to-roll 박막제조법의 확립 및 laser patterning등의 기술을 사용한

연속 고속제조 기술의 개발을 수행하였다.

(4) 고신뢰성 제조기술 개발

소자 내부에서의 carrier의 재결합과 光劣化의 연계를 검토하고, 결함을 유발하는 재결합과 유발하지 않는 재결합이 존재하는 것, 광강도가 강할수록 光劣化가 가속되는 것을 명확하게 하였지만 열화기구의 해명으로서 불충분하다. 그러나 열화방지를 위한 cell 구조를 검토하고 3층 구조 소자에서 초기 변환효율 10%, 열화율 10%/년을 달성했다.

(5) 저가 투명전도막 제조기술 개발

상압 CVD법에 의한 CVD 조건의 최적화, 박막제조 기술의 안정화에 따른 대면적 기판에 전기·광학 특성의 뛰어난 투명전도막의 제조기술 개발을 하였다. 그위에 탄화티탄계 및 산화아연계 박막 등의 플라즈마 내성 박막제조 조건의 최적화를 행하였다.

고능률 제조기술 개발을 양산화에 필요한 요소기술로써 확립했다. 또, 열화 대책기술, 고효율화 기술로서 합금계 Amorphous재료 등을 이용한 다층구조 소자가 유효하다는 가능성이 있으며, 전력용으로서의 고품질화의 전망이 얻어지고 있기 때문에 1989년 이후는 한단계 높은 중간목표(표 4)를 설정하여 연구개발을 계속하고 있다.

또한, 현재의 Amorphous 태양전지의 변환효율은 10cm×10cm에서 10.2%, 대면적(30×40cm)에서도 9.5%에 달하고 있다.

2.3 태양전지 제조 cost의 전망

지금까지의 개발성과에 실용화를 전제로 하여 신기술의 도입시기 및 향후의 수요증대를 고려하여도 300円/Wp가 한계이며, 현재 진행중인 박막화, 적층화 등의 신기술이 장래 실용화되는 것을 전제로 2000년경에는 1개 공장당 연간 생산규모를 100MW로 예상하면 Sunshine계획의 장기목표인 100~200円/Wp의 cost 현실이 가능하게 된다.

3. 태양광발전 시스템 기술개발

태양광발전에는 에너지원으로서 일사량의 조사가 필요하고 주변장치의 저가화 및 이용 시스템의 개발도 중요하다. 태양광발전 시스템 기술개발 계획에 의하여 1989년에 실시한 중간평가 개요는 다음과 같다.

3.1 일사량의 조사와 Data의 정비

1983년에서 1987년까지 5년간에 걸쳐 전국 838지점의 월평균 전천일사량에서 월평균 수평면 직달일사량과 월평균 천공 산란일사량을 분리하여, 전국 세부지역별 지도를 작성하였다. 또, 경사면 일사량 및 산간 지역 일사량 추정방법의 연구를 위해 각종 일사량을 실험 관측하고 경사면 일사량의 추정 model을 작성하여 산간지역에 있어서 일사장해량의 추정방법을 개발했다. 또한, 경사면 일사량 추정 model과 직달일사량, 천공일사량의 세부 지역별 지도의 Data를 이용하여 전국 225지점에 있어서 월간 및 연간 경사면 일사량을 추정 계산하여, 경사면 일사량과 경사면의 방위각, 경사각의 관계, 최대 일사량을 얻는 경사각의 특성을 명확하게 함과 동시에 日射氣候區代表 26지점에 대해서 10년 분의 日積算 경사면 일사량을 推算하고 도수분포특성, 이동평균 특성 및 simulation을 위한 代表年의 선정과 代表年 Data의 정비를 하였다.

3.2 주변장치의 저가화 기술개발

태양광발전 시스템의 주변장치가 차지하는 cost (BOS)의 비율은 약 50%로 이것의 저가화 기술은 태양전지와 마찬가지로 중요한 과제이다.

(1) 建材一體形 태양전지 어레이

유리로 만든 슬레이트 기와의 뒷면에 집적형 Amorphous 태양전지를 형성한 module을 개인 주택용으로 개발했다. 또, 상용 건물용으로서 태양전지 module의 뒷면에 glass 섬유보강 콘크리트를 부착시켜 一體化 한 module을 개발했다. 현재는 기존 주택용 架臺를 개발하고 있다.

(2) 전력 변환장치

독립전원용으로서 효율 93.0~94.3%, cost 40円/W(1000대/월생산시)의 10kW급 인버터 및 계통 연계용으로 89.0~92.5%, cost 49円/W(3000대/월생산시)의 3kW급 인버터를 개발했다. 현재는 고주파 절연트랜스를 내장했다. 효율 93% 이상, cost 49円/W(3000대/월생산시)3kW급 인버터를 개발하고 있다.

(3) 축전 장치

cost 15円/Wh(200MWh/연생산시), 방전심도 65%, 충방전 1500cycle, 무보수의 500Ah급 밀폐형 연축전지 및 cost 13円/Wh(200MWh/연생산시), 방전심도 25%, 충방전 3600 cycle, 보수 interval 1년의 2500Ah급 개방형 연축전지를 개발한다. 현재는 더욱 high grade연축전지, Redox전지, 수소전지의 개발을 진행중에 있다.

3.3 계통 연계 제어기술의 실증 연구

소형 태양광발전 시스템을 기존의 전력계통과 연계할 경우의 제어 보호방법, 계통 사고시에 있어서 보호협조 특성, 전력 품질 등의 종합적인 운전을 하여 실증연구를 실시중이다.

3.4 이용 시스템의 연구개발

태양광발전을 전력용에 이용한 형태에는 크게 분류하여 다음과 같이 분류할 수 있다.

(1) 계통 연계 시스템

① 소전력 공급 전원

개인주택, 건물의 지붕에 설치하여, 얻어진 전력은 설치자가 사용하고 전력의 여분·부족분은 상용전력계통과 서로 주고 받는 시스템

② 대전력 공급 전원

주로 전력회사가 상용전력을 공급하기 위한 발전소로서 설치하는 시스템

③ 낙도용 대체 전원

연료비가 높은 디젤 발전기로 전력을 공급하고 있는 낙도, 원격지 등에 태양광발전을 대체전원으로서 도입하는 시스템

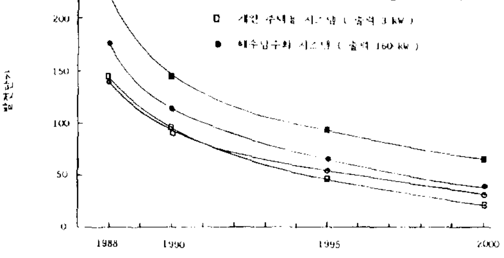

그림 5. 태양광발전 시스템의 발전단가 시산결과

(2) 독립 시스템

① 일반 부하

범용기기의 부하에 전력을 공급하는 시스템

② 전용 부하

태양광발전의 특색을 이용하여 전용 부하에 전력을 공급하는 시스템

태양광발전은 발전 단위의 구조가 단순하며, 보수의 필요가 거의 없다는 점, module을 자유롭게 조합시켜 필요한 양만큼 발전할 수 있다는 점, 수요가 있는 장소에서 발전하여 사용할 수 있다는 점, 주택의 지붕이나 옥상 등 비교적 이용이 되지 않는 장소를 효과적으로 이용하여 발전할 수 있다는 등의 이점이 있지만 야간이나 우천시는 전혀 발전할 수 없다는 점, 발생전력이 직류이기 때문에 교류로 변환할 필요가 있다는 등의 결점도 있기 때문에 이러한 특징 등을 근거로 이용 시스템을 형성할 필요가 있다.

앞으로는 지금까지 개발한 각종 이용 시스템의 data분석, simulation 계산에 의한 최적설계, 최적운전제어 기술을 확립하고 over speck등에 의한 시스템 효율의 저하를 방지하고 경제성을 향상시키는 시스템 평가기술의 연구개발을 진행할 예정이다.

3.5 발전단가의 전망

지금까지의 각종 시스템의 개발성과를 기초로 하여 낙도용 전원공급 시스템, 대규모 집중 배치형 시스템, 개인 주택용 시스템, 해수의 담수화 시스템의 발전단가 추이를 계산한 결과는 그림 5와 같다. module이나 주변 장치의 저가화, 고효율화 및 장수명화와 더불어 시스템 설계, 운전기술의 최적화를 통하여 실현시킬 예정이다.

4. 결 론

당초는 석유 대체에너지의 개발로서 출발했던 Sunshine 계획이었지만 최근, 지구의 환경문제 특히 온실효과 문제에 대해서도 유효한 태양광발전의 기술개발을 적극적으로 추진하여 먼저 연료수송이나 운전·보수에 소요시간이 걸려 발전단가가 비싼 디젤발전에 의존하고 있는 낙도나 산간벽지에 도입을 시도할 필요가 있다고 생각하고 있다.