

태양광 기초연구 높은 효율을 재현 가능한 제품 성능으로 바꾸는 지식

2026-10-05 서술형 개정. 사례의 관측·발표 시점은 출처에 표시했다. 연구·정책의 권고는 작성자의 제안이며 아직 수행하지 않은 연구의 결과와 구분한다.

1. 다음 연구는 어떤 질문에서 시작해야 하는가

태양광의 기초연구는 더 높은 효율을 추구해 왔고, 그 방향은 앞으로도 중요한 탐색 영역이다. 그러나 기존에 확보한 성과를 제품으로 연결하려면 왜 좋은 성능이 얻어졌는지뿐 아니라 왜 다른 시편이나 환경에서는 유지되지 않는지도 설명해야 한다. 본 보고서는 효율 기록, 열화 기전, 대면적 공정, 재생원료의 네 문제를 한 흐름으로 검토한다. 후속 연구의 중심은 높은 값 하나보다 성능을 재현하고 적용범위를 예측할 수 있는 지식이다.

기존 자료에는 한화큐셀의 상용 크기 탠덤 셀, 국내 대학의 페로브스카이트 모듈, Oxford PV-Fraunhofer의 산업 크기 탠덤 모듈이 함께 등장한다. 이들은 서로 다른 구조·면적·조건의 관측이다. 수치를 한 줄로 나열해 국가나 기술의 우열을 결정하기보다, 각각의 성과가 어느 단계의 불확실성을 줄였는지 읽어야 한다. R1 R3 TANDEM_MODULE

2. 기록을 비교하기 전에 기술의 단위를 정한다

2.1 셀과 모듈 사이에서 질문이 달라진다

셀에서 좋은 변환효율을 얻었다는 사실은 광흡수와 전하 수집의 성과를 보여줄 수 있다. 모듈에서는 셀의 성능 외에도 연결과 봉지, 면적 확대에 따른 균일도와 결함을 함께 다뤄야 한다. 이때 모듈 효율의 감소를 곧바로 소재의 열등함으로 해석하면 손실이 생기는 위치를 잘못 지정할 수 있다. 같은 소재 체계에서도 공정과 구조가 바뀌면 비교해야 할 원인이 달라진다.

따라서 연구의 기준선에는 구조, 활성 또는 전체 면적의 정의, 측정과 안정화 조건, 제조 배치와 시험시점을 포함한다. 서로 다른 기술을 비교할 경우에는 동일 조건으로 맞출 수 있는 부분과 기술 고유의 차이를 분리한다. 이미 발표된 기록은 당시의 성과로 보존하고 현재의 최고기록 또는 양산능력으로 다시 명명하지 않는다. 연구가 해결해야 할 문제를 정확히 정의하려면 성과를 작게 보이게 하거나 과장하는 두 방식 모두 피해야 한다.

2.2 연구량은 기전의 해결 정도와 다르다

보유 논문 수집본은 한국 연구자의 태양광 참여를 확인하는 데 유용하다. 그러나 제목에 안정성이나 탠덤이라는 단어가 등장하는 빈도로 해당 기전이 해결됐거나 연구비가 충분히 투입됐다고 판단할 수는 없다. 논문·시편·시험방법을 읽고 어떤 조건에서 어떤 결과가 재현됐는지 연결하는 검토가 필요하다. DATA

이 검토는 새로운 실험을 미루기 위한 전수조사가 아니다. 핵심 가설의 직접 근거와 반례, 이미 검증된 조건을 확인해 같은 실험을 반복하지 않도록 하는 작업이다. 지식의 공백이 명확해지면 실험은 더 좁고 강한 질문을 갖게 된다. 이후의 세 연구도 이러한 문헌·원자료 대조와 예비 실험을 통해 조건을 확정하도록 제안한다.

3. 첫 번째 연구 복합 열화가 발생하는 순서를 밝힌다

3.1 단일 스트레스에서 복합 환경으로

열·습기·빛·전기적 바이어스는 실제 사용환경에서 함께 작용할 수 있다. 개별 스트레스 시험에서 좋은 결과를 얻은 조합이 복합 노출에서도 같은 순위를 유지하는지는 별도의 가설이다. 계면 변화와 봉지의 특성이 서로 영향을 주면 열화의 경로와 속도가 달라질 수 있다. 본 보고서는 이 설명을 특정 제품에서 이미 입증된 원인으로 제시하지 않고 후속 실험의 대상으로 둔다.

PEPPERONI가 성능·제조·수명·환경안전을 함께 목표로 삼는다는 사실은 문제들을 연결해 연구할 필요성을 생각하게 한다. 다만 사업목표가 결합되어 있다는 이유로 모든 신뢰성 문제가 해결된 것은 아니다. 국내 셀·모듈 성과를 다음 단계로 넘길 때도 장기 성능을 확인하는 질문을 독립적으로 남겨야 한다. PEPPERONI R1 R3

3.2 같은 시편의 변화를 여러 측정으로 따라간다

실험에서는 대조 조성과의 계면 처리·봉지 조합을 계획적으로 바꾸고 제조 배치를 독립 반복단위로 삼는다. 시간별 전기적 성능과 광학·화학 분석을 같은 시편의 이력에 연결해야 어떤 변화가 출력 손실보다 먼저 나타났는지 검토할 수 있다. 시험 순서를 바꾼 집단과 다른 측정기관의 결과를 대조하면 노출 순서와 장비 차이를 원인처럼 읽는 위험을 줄일 수 있다.

시험 뒤 회복 가능한 변화와 비가역적 손실도 구분해야 한다. 주 결과는 단순히 일정 시간 후 남은 효율이 아니라 열화 모드가 바뀌는 시점, 배치 간 변동, 다른 배치에서의 예측오차다. 모형의 보정에 쓴 자료와 검증 자료를 나누고, 옥외 노출에서 같은 기전이 나타나는지 확인한다. 가속시험과 현장에서 다른 모드가 지배하면 단일 가속계수의 적용을 보류하고 시험을 다시 설계해야 한다.

3.3 연구결과가 다음 단계의 선택을 바꾸어야 한다

여러 배치와 기관에서 기전 설명이 유지된다면 후보 조합을 대면적 공정연구로 넘길 수 있다. 반대로 평균 성능은 좋아도 특정 조건에서 급격한 실패가 발생하면 그 조건을 적용범위에서 제외하거나 완화하는 설계를 먼저 검토한다. 유용한 결과는 우수한 조합의 이름뿐 아니라 그 조합이 유효하지 않은 조건을 함께 설명하는 것이다.

이 연구의 산출물은 열화 기전의 설명, 시편 계보와 원측정, 복합 스트레스 시험안, 외부 배치의 재현 결과로 구성한다. 재료·계면 연구실과 시험기관·모듈기업이 참여하는 24~36개월의 연구를 기획할 수 있으나, 이는 장기수명이 그 기간에 완전히 검증된다는 뜻이 아니다. 긴 사용기간의 예측은 관측자료와 구분해 범위와 불확실성을 남긴다.

4. 두 번째 연구 면적 확대의 손실과 수율을 함께 설명한다

4.1 평균 성능과 생산 분포를 구분한다

Oxford PV-Fraunhofer의 모듈화 사례와 LAPERITIVO의 대면적 연구는 셀 이후의 공정과 시험이 독립적인 연구대 상임을 보여준다. 이 사례에서 국내에 옮겨올 질문은 발표된 최고효율을 그대로 목표치로 쓰는 것이 아니라, 면적 확대와 제조 반복에서 어느 손실이 커지는지를 밝히는 것이다. TANDEM_MODULE LAPERITIVO

좋은 시편만 남기면 공정이 안정적인지 알기 어렵다. 평균 효율이 높아져도 불량과 재작업이 늘면 적격 제품 하나를 얻는 데 드는 재료·시간·비용이 커질 수 있다. 따라서 생산된 전체 시편을 추적하고 합격·재작업·폐기를 함께 기록해야 한다. 최고값과 평균, 변동 폭과 적격 수율은 서로 다른 정보를 제공한다.

4.2 손실을 위치와 공정변수로 분해한다

동일 소재 체계에서 면적, 코팅, 연결, 봉지 조건을 단계적으로 바꾸고 전류·발광 영상과 공정 계측을 연결하도록 제안한다. 한 번에 많은 변수를 바꾸면 개선의 원인을 특정하기 어려우므로 예비실험으로 민감한 변수를 좁힌 뒤 상호작용을 검토한다. 공정설정과 실제 막두께·결함분포가 다를 수 있으므로 설정값만으로 원인을 설명하지 않는다.

연구는 어느 허용범위에서 적격 제품이 반복적으로 나오는지 보여주는 공정창을 산출해야 한다. 같은 장비에서의 재현에 더해 다른 배치나 장비로 옮겨갈 때 유지되는 범위를 확인한다. 이식성이 약하다면 장비 고유의 조건과 측정오차를 추가 연구하고, 해당 공정을 일반적인 제조법처럼 제안하지 않는다.

평균효율·수율·재료소비가 함께 개선되고 외부 배치에서도 유지된다면 파일럿 확대의 근거가 된다. 효율 개선이 심한 수율 저하로 얻어진 결과라면 공정변수를 다시 좁히는 것이 우선이다. 이처럼 결과별 선택을 명확히 해야 연구가 최고 기록의 추가 발표에 머물지 않고 장비·공정·제품의 의사결정으로 이어진다.

5. 세 번째 연구 재생원료의 불순물과 사용가능성을 연결한다

5.1 회수했다는 사실과 적합한 원료라는 판단

Fraunhofer-Reiling의 회수 실리콘 셀 연구는 재생원료의 기술적 활용 가능성을 보여주는 사례다. 그러나 해당 조건에서의 성능을 모든 폐모듈의 원료 품질이나 가장 최신의 효율 경쟁으로 확대할 수는 없다. 원료의 출처와 혼입·정제 이력을 알아야 성능과 비용의 관계를 설명할 수 있다. RECYCLED_SI

후속 연구의 질문은 어떤 불순물이 어떤 수준에서 성능과 수율을 제한하는가다. 모든 회수물을 최고 순도로 정제하는 경로와 용도별 허용범위를 찾아 배분하는 경로를 비교할 수 있다. 어느 경로가 유리한지는 정제 에너지와 약품, 적격 수율, 최종 제품의 성능을 함께 보아야 판단할 수 있으며 회수율 하나로 정해지지 않는다.

5.2 원료 로트에서 셀 성능까지 이력을 보존한다

회수 로트별 조성·오염을 보존하고 정제 조건을 바꾼 뒤 동일한 셀 공정에서 결과를 대조한다. 신규 원료 대조군과 질량·에너지 수지를 함께 기록하면 정제 절감이 불량 증가로 상쇄되는지 확인할 수 있다. 여러 원료를 섞어 평균을 맞추 뒤 출처 정보를 없애면 어떤 조건에서 실패했는지 추적하기 어렵다.

불순물별 민감도와 적격 원료 수율, 성능분포와 환경부담을 바탕으로 용도별 허용범위의 후보를 제안한다. 그 후보는 구매규격과 후속 실증에서 다시 검증되어야 한다. 정제 절감이 성능과 수율을 악화시킨다면 해당 경로를 제외하고, 품질은 충족하지만 구매자가 사용하지 못한다면 다음 질문을 공정에서 규격·계약으로 옮긴다. 이렇게 해야 소재연구와 순환시장의 문제가 구분된다.

6. 세 연구를 연결하는 공통 실험 기반

열화, 공정, 원료 연구는 같은 시편 계보와 측정정의를 공유할수록 서로의 결과를 검증하기 쉽다. 다만 모든 자료를 하나로 합쳐 동일한 표본으로 계산해서는 안 된다. 동일 배치에서 나온 여러 시편은 독립 배치와 같지 않고, 같은 시편을 반복 측정한 값도 독립적인 제품 수를 늘리지 않는다. 표본 규모는 이러한 의존관계와 예비분산, 의사결정을 바꿀 최소 차이에 맞춰 산정한다.

독립 시험기관은 마지막 성적서 발급뿐 아니라 초기 측정조건과 불확실성 검토에도 참여할 필요가 있다. 실험을 수정한 뒤 같은 검증자료로 계속 최적화했다면 새 배치에서 다시 확인해야 한다. 연구가 남길 공개 가능한 절차와 민감한 공정정보의 범위를 미리 정하면 재현성을 확보하면서 기업의 권한도 지킬 수 있다.

7. 기초연구의 결과를 어떻게 평가하고 제안할 것인가

본 보고서는 효율 탐색을 중단하자고 제안하지 않는다. 새로운 가능성을 탐색하는 연구와 이미 관찰된 성과를 재현·설명하는 연구가 서로 다른 역할을 가진다는 점을 강조한다. 전자는 새로운 기전과 가능성을, 후자는 적용범위와 실패조건을 명확히 해야 한다. 두 역할을 하나의 최고효율 지표로 평가하면 필요한 지식의 일부가 빠질 수 있다.

최종적으로 우선 제안하는 연구는 복합 열화의 인과 설명과 대면적 공정의 반복성 검증이다. 재생원료 연구는 원료의 범위와 용도를 정해 병행한다. 각 연구의 성공은 예상한 후보가 반드시 채택되는 데 있지 않다. 어떤 후보를 왜 다음 단계로 넘기고, 어떤 후보를 왜 수정하거나 제외해야 하는지 재현 가능한 근거로 설명할 수 있어야 한다. 그 판단이 모듈·실증·구매 연구의 출발점을 바꿀 때 기초연구의 성과가 정책과 산업의 선택으로 이어진다.

근거와 관측범위

본문의 사례와 수치는 기존 원고에서 확인한 당시의 관측·발표를 사용한다. 이번 개정은 서술과 논증의 개정이며 각 사례의 최신 상태를 새로 조사한 결과가 아니다. 아래 설명은 출처가 뒷받침하는 범위이며, 연구와 정책의 제안은 본문의 해석과 조건부 권고다.

PEPPERONI PEPPERONI: 탠덤 모듈의 산업 파일럿

2022–2026 · 출처

EU 기여금 12,950,825유로, 총사업비 17,020,325유로. 산업규모 모듈·제조·수명·환경안전 목표를 결합한다.

26% 효율·30년 수명은 사업목표이며 달성 실적이 아니다. 등록 담당기관과 참여기업을 구분한다.

LAPERITIVO LAPERITIVO: 대면적 페로브스카이트 모듈

2024–2028 · 출처

총사업비 7,895,865.89유로·EU 기여금 6,792,147.26유로의 등록 연구사업이다.

사업비는 한국 정부 투자액이 아니고 제조 목표는 실가동 실적이 아니다.

TANDEM_MODULE Oxford PV–Fraunhofer 대면적 탠덤 모듈

2024-01 · 출처

1.68m² 모듈에서 효율25%·출력421W를 연구기관이 발표했다.

발표 당시 연구 결과이며 현재 최고기록·양산 수율·장기 보증을 뜻하지 않는다.

RECYCLED_SI Fraunhofer-Reiling 재생 실리콘 셀

2022-02-07 · 출처

회수 실리콘으로 제작한 PERC 셀의 초기 효율19.7%를 발표했다.

재생원료100% 사용과 폐모듈 회수율100%는 다른 지표다. 최신 셀 대비 경제성은 미확정이다.

R1 M10 탠덤 셀 효율 28.6% 발표

2024-12-19 · 출처

한화큐셀, 2024.12.19 — M10 탠덤 셀 효율 28.6% 발표. 기업 발표의 시험 크기·검증기관·해외 제작 위치를 함께 반영.

기관 자료와 기업 발표를 구분; 같은 원천의 재인용은 독립 증거로 세지 않음

R3 내열 페로브스카이트·100 cm² 모듈 연구

2025-04-10 · 출처

UNIST, 2025.04.10 — 내열 페로브스카이트·100 cm² 모듈 연구. 시험 조건별 성과이며 기술 간 단순 효율 순위에 사용하지 않음.

기관 자료와 기업 발표를 구분; 같은 원천의 재인용은 독립 증거로 세지 않음

DATA IRENA2026 H1 계통연계 설비·2025 WoS 보유 Article 집계

2025 관측·2026-09-21 재확인 · 출처

한국 태양광30.35GW/Article1,014편·국제공동520편; 풍력2.45GW/Article164편·국제공동71편. 논문은 보유 수집본이며 설비는계통연계·풍력전체다.

국가 전체 논문·기술순위·제조능력·정책 인과효과로 사용하지 않음.

전체 서술형 보고서 · 질문별 보고서 선택