



한국·독일한림원 공동 정책 제안서

한국과 독일의 에너지 전환

제8회 한국·독일한림원 공동심포지엄은 2024년 한 해 동안 5개 소주제로 진행된 온라인 전문가 워크숍을 거쳐, 최종적으로 2025년 1월 14일~15일 서울에서 대면 심포지엄으로 개최되었다. '에너지 전환'을 주제로 태양광 기술, 수소, 배터리, 전력망 관리 및 미래에너지 등 5개 분야를 다루며, 관련 분야의 한국 및 독일 선도 과학자들이 한자리에 모여 워크숍과 심포지엄의 결과를 공동 정책 제안서로 집약했다. 양국의 협력 증진과 지속 가능하며 회복력 있는 에너지 미래를 향한 발전을 목표로, 본 제안서는 소주제별 직면 과제, 양국 공동 연구 우선순위, 그리고 정책 입안자들을 위한 권고사항을 제시한다.

태양광 기술

태양광 발전(PV)은 재생 가능 에너지 기술 중 발전 비용이 가장 낮고 대규모 도입 가능성이 가장 높은 기술이다. 한국과 독일 모두 야심 찬 에너지 전환 목표를 설정하였으며, 태양광 기술은 그 핵심 수단으로 작용한다. 양국의 기술적 노하우와 세계적인 수준의 연구 역량은 글로벌 태양광 기술 발전을 선도하는 데 중요한 역할을 한다.

직면 과제

- **효율성 한계:** 결정질 실리콘 태양전지는 글로벌 태양광 시장을 주도하는 완전히 성숙한 기술로 단일 접합 효율성 한계에 근접한다.
- **높은 연구개발 비용:** 태양광 발전 기술 발전에는 광범위한 연구, 막대한 재정 투자 및 긴 개발 기간이 필요하다.
- **환경적 영향:** 태양광 모듈의 전 세계 생산 증가로 인한 폐기물 발생과 토지 이용 갈등으로 대규모 도입에 어려움이 있다.

권고사항

1. **차세대 태양광 발전 기술 혁신 촉진:** 페로브스카이트-실리콘 탠덤 및 실리콘 셀이 포함되지 않는 (silicon-free) 멀티 접합 태양전지 기술 발전을 통해 효율을 높이고 탄소발자국을 극도로 저감한 유기 태양전지 등 차세대 태양광 발전 기술 개발을 추진한다.
2. **인공지능 및 발견 전략 투자:** 인공지능 통합으로 산업 현장에 바로 이전 가능한 최적화된 신소재를 발굴한다. 태양광 연구실에서 비용을 절감하고 개발 기간을 단축할 수 있다.
3. **폐쇄루프 접근 방식 촉진:** 원자재 조달부터 수명 종료 후 재활용까지 전 과정을 포함하는 폐쇄루프 전략을 도입하며, 예를 들어 유기 태양전지에 중점을 둔다. 또한, 건물, 농업 지역, 차량, 부유 구조물 등에서의 다중 혜택 PV의 통합을 강화하여 토지 사용 갈등을 줄인다.

양국 공동 연구 우선순위

공동 연구 보조금을 지원하고 산업 파트너십을 구축하여 전략적이고 체계적인 프로젝트에 참여한다. 양국은 탠덤 태양광 발전과 같은 차세대 태양전지의 공동 연구 인프라와 생산 시설을 조성하여 협력과 지식 교류를 증진한다.

수소 기술

수소는 전기화가 어려운 부문의 탈탄소화, 전력망 안정성 지원, 그리고 대규모 에너지 저장 구현에 핵심적 역할을 한다. 한국과 독일은 모두 수소를 에너지 전환의 필수 요소로 인식하여 전기분해, 촉매 혁신, 연료 전지 등 수소 기술 발전에 주력한다. 수소 기술은 생산뿐 아니라 수입, 운송, 저장 인프라 구축이 병행되어야 한다.

직면 과제

- **수입 의존성:** 높은 에너지 수요와 국내 그린수소 생산 능력 한계로 인해 새로운 국제 에너지 파트너십이 필요하다.
- **고비용의 복잡한 인프라:** 그린수소 생산지와 소비지 사이의 지리적 거리로 인해 수소 및 파생 기술에 부합하는 선박, 파이프라인, 항구 등 인프라 구축에 상당한 비용이 발생한다.
- **느린 도입 속도:** 높은 생산 비용과 제한된 그린수소 공급으로 기술 도입과 실행이 지연되어 기후 목표 달성이 저해된다.

권고사항

- 수소 생산 효율성 강화:** 수소 경제에 적합한 전기 촉매와 열 촉매의 최적화 및 대규모 생산을 가속화한다.
- 효율적 수소 운반체 향상:** 액상 유기물 수소운반체(LOHC) 및 디메틸 에테르(DME) 등 액체 유기 수소 운반체를 강화하여 기존 연료 인프라(개조된 가스 파이프라인 포함)를 활용한 장거리 운송 효율성을 높인다.
- 그린수소 기술 확산 및 시연:** 수소 기술을 철강-시멘트 등 중공업과 선박, 기차 등 장거리 수송에서 우선적으로 활용하여 실현 가능성을 입증하고, 더 넓은 범위로 확장을 도모한다. 재생 에너지 기반 수소 생산과 고온 전기분해에도 투자하여 비용을 절감하고 기술 공급을 확대한다.

양국 공동 연구 우선순위

전략적이고 체계적인 공동 프로젝트로 촉매 및 전기 촉매 소재, 그리고 수소 운반체 주기의 기초 및 응용 연구를 추진하며, 수소 공급망 전반의 혁신을 가속화한다.

차세대 배터리

배터리는 전기차 등 전기 수송 수단으로의 전환에 필수적이다. 전력망의 안정성을 보장하고 수 분에서 몇 시간 단위의 단기 및 중기 에너지 저장 수단이기 때문이다. 한국과 독일은 강력한 연구 환경과 산업 역량을 바탕으로 고급 배터리 기술 개발의 핵심 주체로 활동하고 있다.

직면 과제

- 공급망 제약:** 배터리 원자재 수요 증가로 인한 비용 부담이 커졌다. 특히, 전기차(EV) 분야에 필요한 고에너지 밀도, 배터리 내구성 향상, 극한 조건에서의 성능 문제를 해결해야 한다.
- 위험 및 대중 우려:** 전기차 및 건물 내 대규모 배터리 도입은 열폭주나 화재와 같은 새로운 안전 문제를 야기한다.
- 재생 에너지의 계절적 변동성:** 계절 및 연간 재생 에너지 저장은 여전히 큰 난관이나, 탄소 중립 달성에는 필수적이다.

권고사항

- 폐쇄루프 배터리 제조 시스템 도입:** 배터리 재활용 공정을 개선하고 배터리 내구성을 향상하며, 과불화알킬 및 폴리불화알킬 물질 사용을 포함한 환경 영향을 줄이기 위해 Na, K 등 대체 배터리 화학물질을 연구한다. 전기차 배터리를 스포츠 마트 건물의 전력망 저장용으로 재활용한다.
- 배터리 안전성 증대:** 내화 재료 및 전고체 배터리 연구에 투자하여 안전성을 강화한다.
- 계절 및 연간 저장방안 향상:** 해수 배터리나 알루미늄-공기(AI-air) 배터리 등, 배터리 외부에 고에너지 반응성 금속을 저장할 수 있는 장기적이고 확장 가능한 에너지 저장 방안 연구를 촉진한다.

양국 공동 연구 우선순위

액체 및 전고체 배터리, 그리고 포스트 리튬 기술에 중점을 둔 대규모 공동 연구 프로젝트를 강화하여 독일의 기초 연구 역량과 한국의 제조 역량을 결합하고 실험적 혁신 제품을 상용 제품으로 전환하는 과정을 가속화한다.

전력망(그리드) 관리

스마트그리드는 재생 에너지 통합, 전력망 혼잡 완화 및 전력 안정성 개선에 필수적이다. 독일은 유럽 에너지 시스템에 편입되어 인접국의 지원을 받을 수 있으나, 한국은 자체적으로 전력망 균형을 유지해야 한다. 이러한 지정학적 조건 차이를 고려한 상호 보완적 스마트그리드 해결책은, 개념 설계부터 시연까지 함께 추진될 경우 연구개발 속도를 크게 가속화할 수 있다. 독일은 재생 에너지 통합 경험이 풍부하며, 한국은 인공지능 기반 전력망 최적화 분야에서 선도적 역할을 수행한다.

직면 과제

- **전력망 혼잡 및 불안정:** 발전 구조의 변화로 인해 혼잡이 발생한다. 기존 발전소의 부재는 전압 불안정을 초래하고, 재생 가능 에너지원의 변동성이 주파수 문제를 야기하여 전력망을 더욱 취약하게 만든다.
- **네트워크 확충 지연:** 풍력 에너지가 소비지와 먼 곳에서 주로 발생하여 새로운 송전선 건설이 필요하고, 이로 인해 사회적 갈등이 발생할 수 있다. 동시에 가정용 태양광, 히트펌프 및 전기차 충전기가 기존 인프라에 부담을 주어 배전망의 역할이 더욱 중요해진다.
- **화석 전력 시장 전환:** 풍력 및 태양광 발전의 변동성으로 인해 유연한 예비 발전 용량이나 분산 저장 용량이 필요하다. 전력 공급과 수요의 시간적·공간적 불일치로 인한 복잡성이 가중된다.

권고사항

1. **시스템 유연성 증대:** P2G(Power-to-Gas), 전기차 배터리 통합, 열·가스/수소 부문 연계, 스마트 가정·산업 소비를 활용한 수요 관리로 잔여 부하를 효과적으로 제어한다.
2. **분산형 전원 활용:** DER(분산형 전원)을 기반으로 가상 발전소(VPP), 에너지 클라우드 시스템, 프랙탈·마이크로·모듈형 그리드 등을 확장하여 에너지 시스템의 지역화를 촉진하고, 초고압 직류(HVDC) 송전 시스템을 도입하여 먼 거리 재생 에너지 전송 효율을 높인다.
3. **경쟁력 있는 에너지 시장 및 디지털화 추진:** 기존 인프라의 효율적 활용을 위해서는 전력망의 모든 수준에서 적절한 디지털화가 필수적이다. 이를 통해 시스템 유연성을 확보할 수 있다. 또한, 인공지능 도구를 적용하여 전력망 관리의 효율성과 안전성을 향상하고, 실시간 에너지 조정을 위한 유연한 시장 기반의 해결책을 도입해야 한다. 재생 에너지 투자와 예비 발전소 공급을 동시에 강화할 수 있기 때문이다. 한 국가에서 성공한 해결책이 타 국가에서도 상호 운용되기 위해서는 국제 협력이 중추적 역할을 한다.

양국 공동 연구 우선순위

회복력 있는 전력망 조직을 중심으로 공동 연구를 촉진하여 새로운 운영 원칙과 통합된 네트워크 계획에 초점을 맞춘다. 마이크로그리드 응용과 시스템 안정성 협력 연구를 통해 양국 전력망의 유연성과 안정성을 강화하고, 전력망 설계 및 관리를 위한 공동 플랫폼 개발에 투자한다.

미래에너지

소형 모듈 원자로(SMR)와 핵융합 에너지는 저탄소 및 회복력 있는 에너지 시스템 구축에 기여할 수 있다. 핵융합 에너지는 미래 청정 에너지원이 될 수 있으며, 최근 스텔러레이터와 토카막 설계 발전, 그리고 국제핵융합실험로(ITER)와 같은 국제 프로젝트가 21세기 중반 또는 그 이후에 실현 가능한 핵융합 에너지로 가는 새로운 길을 열고 있다. SMR은 화석 에너지 시스템을 단계적으로 대체하고 전력망에 안정적인 에너지 공급을 제공할 수 있는 유연한 전력 및 열 생산 방안으로써 가능성을 지닌다. 두 기술 모두 과학적, 기술적, 상업적으로 직면한 과제가 있으나, 저탄소 에너지 미래에 보완적으로 기여할 잠재력을 보유한다.

직면 과제

- **기술적 복잡성:** 핵융합 에너지는 안정적이고 지속 가능한 플라즈마 감금 및 통합 공학 해결책 등이 필요하며 SMR은 핵발전소 비상계획구역을 최소화할 수 있는 안전성 강화의 공학적 해결책이 요구된다.
- **투자 위험:** 높은 투자 비용, 장기적인 프로젝트 주기, 그리고 국제 협력의 필요성으로 인해 핵융합의 지속적 자금 지원과 상업화가 어려워지며, SMR은 향후 10년 내 시연될 것으로 예상되나 건설 비용 및 순차 생산(동일 설비 n번째 생산) 과정의 학습 곡선에 대한 불확실성이 남아 있다.
- **대중 수용성:** 두 기술 모두 안전과 보안 위험을 효과적으로 관리하고, 환경적 영향에 대한 대중의 우려를 해소해야 상업화가 가능하다.

권고사항

1. **시스템 유연성 증대:** 플라즈마 및 원자로 설계 향상: 플라즈마 감금과 안정성, 그리고 3차원 자기구성에 대한 연구와 스텔러레이터 및 토카막에 필요한 소재 개발을 확대한다. SMR 설계와 안전 기술 혁신을 지속하고, 다양한 응용 분야에 맞춰 구성을 최적화한다. 폐기 중인 화석 발전소 인프라의 재사용 가능성도 검토한다.
2. **전력망 통합 및 저장 방안 향상:** 첨단 감금 개념과 신소재 연구를 통해 경제적인 핵융합 운영으로의 진입을 가속화한다. SMR의 경우, 탄소중립 수소 생산 및 에너지 저장 시스템 활용 등 SMR 운영 시 유연성 향상을 위한 혁신적 연구를 장려한다.
3. **투명성 및 안전 조치 강화:** 비상 대응 조치가 필요하지 않도록 핵융합과 SMR 모두를 위한 안전 및 허가 개념을 개발한다. 원자로 핵폐기물 관리에 대한 회복력 강화 방안을 마련한다. 고정밀 시뮬레이션 플랫폼과 인공지능 지원 기법을 도입해 실시간 비상 대응 능력을 제공하고, 안전 문제에 대한 선제적 대화와 장기적 환경 보호 효과를 중심으로 소통하여 대중의 신뢰를 얻는다.

양국 공동 연구 우선순위

공동 연구의 주요 관심사는 원자로 설계 내 3D 물리학의 발전, 고온·중성자 환경에 강한 소재 개발, 실시간 비상 대응 시뮬레이션 시스템 구현 등을 포괄한다. 특히, 핵융합과 SMR 시스템의 안전 연구와 핵폐기물 관리 분야의 잠재력이 크며, 이는 장기적인 대중 수용성과 환경 지속 가능성 확보가 중요한 역할을 한다.

결론

한국과 독일이 화석 연료에서 지속 가능한 에너지원으로 전환하는 과정에서 혁신적인 과학적 해결책은 그 어느 때보다 절실하다. 양국은 각기 다른 과제에 직면해 있으나, 탄소 중립 달성과 친환경 에너지 기술 발전이라는 공통된 목표를 지향한다. 한국과 독일은 상호 보완적인 강점을 활용하여, 본 제안 정책서에서 다룬 5개 분야의 심도 있는 협력으로 해당 분야의 발전을 가속화할 수 있다. 양국의 파트너십은 기초 연구부터 첨단 기술의 대규모 시연에 이르는 학제 간 대화를 지속적으로 촉진함으로써 지속 가능한 에너지 미래로의 의미 있는 전환을 이끌어낸다.

본 정책 제안서는 제8회 한국-독일한림원 심포지엄 “에너지 전환”의 발표 및 토론 내용과 2024년 내내 진행된 일련의 온라인 전문가 워크숍을 토대로 작성되었다. 한국과학기술한림원 이학부 정회원인 박남규 성균관대 교수와 독일레오폴디나한림원 정회원이자 헬름홀츠 올리히 연구소 전 의장인 볼프강 마르쿼트(Wolfgang MARQUART) 교수가 주도하고, 양국 한림원 국제협력부서의 지원으로 편찬되었다. 심포지엄에 관한 자세한 내용은 다음 링크에서 확인할 수 있다:

한국과학기술한림원 e-뉴스레터 [2025-03호] 제8회 한국독일한림원 공동심포지엄 개최

발행 정보

출판사

한국과학기술한림원

The Korean Academy of Science and Technology (KAST)

독일레오폴디나한림원

German National Academy of Sciences Leopoldina

이미지 출처

Adobe Stock | Antony Weerut

저작권

본 작업의 텍스트는 Creative Commons 저작자표시(CC BY-ND 4.0) 라이선스 조건에 따라 배포되며, 라이선스 전문은 <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0> 에서 확인할 수 있다.

DOI

10.26164/leopoldina_04_01260

발행일

2025년 3월

한국과학기술한림원은 1994년에 우리나라 과학기술 진흥 기반 조성을 위해 순수 민간단체로 설립되었다. 최우수 연구자들이 국가 과학기술 선진화와 세계화에 기여하기 위해 헌신하였으며, 2005년 기초연구 진흥법에 따라 법정 기구로 전환된 이후 과학기술 발전과 국가 경쟁력 강화를 위해 지속적으로 노력한다. 정책학, 이학, 공학, 농수산학, 의약학 등 5개 학부의 약 1,200명의 한림원 회원들은 세계적인 석학으로서 각자의 분야와 위치에서 우리나라 과학기술 발전을 주도한다.

독일레오폴디나한림원은 1652년에 설립되어, 152명의 노벨상 수상자를 포함한 약 1,700명의 독일 최고 과학기술 연구자들이 회원으로 소속되어 있다. 2008년에는 독일연방 한림원으로 지정되어 8개 지역한림원을 대표하며, 독일 과학계를 대표하고 정책 입안자 및 대중에게 과학 기반 조언을 제공하는 주요 임무를 수행한다.