



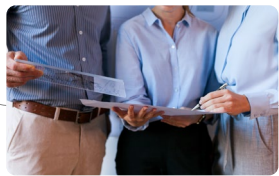
국가과학기술연구회 공동TLO마케팅사무국이란?

국가과학기술연구회 소관 25개 정부출연연구소(이하 출연(연))의 연구성과에 대한 공동 마케팅을 통해
기술이전과 출자 등 **기업의 기술사업화** 지원을 위한 전문조직 입니다.



공동TLO마케팅사무국을 통해 무엇을 도움 받을 수 있나요?

신규 사업 아이템 및 기술 업그레이드 등 기술 고민이 있는 예비창업자 및 기존 사업자에게 25개 출연(연)이 보유하고 있는
약 10만여 건의 특허 외에 연구자 노하우 및 연구·시험장비 등을 활용하여 **기업의 기술애로**를 해결해드리고 있습니다.



기업 애로해결 지원

- 기술도입 및 사업화 유망기술 발굴
- 기술창업용 출자기술 발굴
- 공동연구 대상 전문연구자 연계



정부과제 소개 지원

- 기술도입형 R&BD 과제 연계



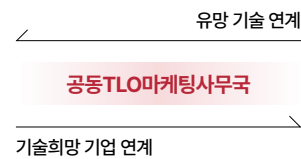
연구장비 지원

- 분석 및 실험장비 연계



IP인수보증 자금 연계 지원

- 기술보증기금, 신용보증기금 등



국가과학기술연구회

과학기술분야 정부출연연구기관을 지원육성하고 체계적으로 관리함으로써 국가 연구사업 정책 지원 및
지식산업발전을 견인하고자 만든 과학기술정보통신부 산하 정부기관임



문의처

국가과학기술연구회
T. 044-287-7369 E. gylee@nst.re.kr

공동TLO마케팅사무국
T. 042-862-6015 E. seungtae100@wips.co.kr



국가전략기술

Vol.4 차세대 원자력

TLO Tech Trends

2024

국가과학기술연구회 공동 TLO 마케팅 사무국
Technology Licensing Organization



01

차세대 원자력의 세상

- 04 차세대 원자력이란?
- 06 원자력 기술 변천사
- 08 국내 세대별 원전 변화

02

원자력 기술의 혁신

- 10 NATRIUM 원자로 (TerraPower)
- 10 군사·상업용 원자력 부품의 리더 (BWXT)
- 11 마이크로 원자로와 가압수형 원자로 (WestingHous)
- 12 우리나라의 원자력 기술활용

03

국가전략기술 '차세대 원자력' 이야기

- 16 원자력 기술의 필요성
- 17 글로벌 정세와 시장 변화
- 18 '차세대 원자력' 중점기술 분야

04

출연(연) 보유 '차세대 원자력' 기술

- 20 한눈으로 보는 출연(연) 기술 보유현황
- 22 차세대 원자력 기술개발 연구자 인터뷰

01

차세대 원자력의 세상



차세대 원자력이란?

차세대 원자력은 기존의 원자력 기술을 한층 더 발전시킨 개념으로 보다 안전하고 효율적인 에너지 생산을 목표로 한다. 대표적인 차세대 원자력 시스템으로는 고온가스로, 소듐냉각고속로, 용융염원자로 등이 있다. 이러한 기술들은 탄소 중립 실현과 국가 에너지 안보 강화에 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

차세대 원자력은 다양한 산업 분야에서 활용될 수 있다. 예를 들어, 고온가스로는 수소 생산과 산업 공정 열 공급에 사용될 수 있어, 산업 전반의 탈탄소화에 기여하여 탄소 배출을 줄이고, 청정 에너지를 활용하는 데 큰 도움이 된다. 또한, 용융염원자로와 같은 이동형 원자력 시스템은 해양 및 극한지와 같은 새로운 시장에서 활용될 수 있어, 에너지 공급망을 강화하고 새로운 산업 기회를 창출할 수 있다.

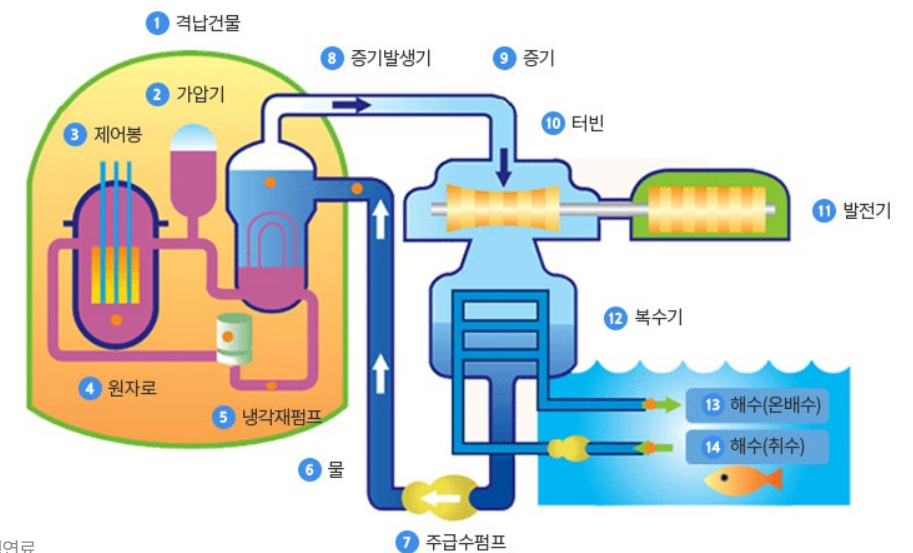
일상 생활에서도 차세대 원자력의 역할을 볼 수 있는데, 안정적인 전력 공급을 통해 가정과 사무실에서 사용하는 전기 제품들이 원활하게 작동할 수 있도록 돕는다. 또한, 전기차와 같은 친환경 교통수단의 보급 확대에도 중요한 역할을 한다. 차세대 원자력으로 생산된 전기는 전기차 충전소에 공급되어, 보다 많은 사람들이 친환경 교통수단을 이용할 수 있게 한다.

차세대 원자력 기술의 발전은 공공의 안전과 신뢰를 확보하는 데도 중요한 의미를 갖는다. 사용 후 핵연료의 안전한 관리와 처분 기술의 확보는 원자력에 대한 국민들의 신뢰를 높이고, 지속 가능한 원자력 이용을 가능하게 한다. 이를 통해 대형 원전과 소형 모듈 원자로(SMR)의 수출도 촉진될 수 있다.

차세대 원자력 기술은 탄소 중립 실현과 국가 에너지 안보 강화, 그리고 다양한 산업 분야에서의 활용을 통해 우리의 일상 생활에 직접적으로 큰 영향을 미치고 있다. 이러한 기술의 발전과 상용화는 에너지 문제 해결과 지속 가능한 미래를 위한 중요한 발판이 될 것이다.

원자력 발전 개념도

- | | | | |
|--------|---------|-------|-----------|
| ① 격납건물 | ⑤ 냉각재펌프 | ⑨ 증기 | ⑬ 해수(온배수) |
| ② 가압기 | ⑥ 물 | ⑩ 터빈 | ⑭ 해수(취수) |
| ③ 제어봉 | ⑦ 주급수펌프 | ⑪ 발전기 | |
| ④ 원자로 | ⑧ 증기발생기 | ⑫ 복수기 | |



출처 : 한전원자력연료

원자력 기술의 변천사

1 초기 발전

1942년, 미국 시카고 대학의 엔리코 페르미는 첫 번째 제어 가능한 핵 분열 반응을 성공적으로 수행했다. 이는 맨해튼 프로젝트의 일환으로, 핵 에너지가 군사적으로 활용될 가능성을 입증하는 중요한 사건이었다.

1945년, 미국은 제2차 세계 대전 막바지에 히로시마와 나가사키에 원자폭탄을 투하하면서 핵 기술이 전 세계적으로 주목받기 시작했다.

1954년, 소련에서 세계 최초의 상업용 원자력 발전소가 오브닌스크에서 가동을 시작했고, 미국은 첫 번째 원자력 잠수함인 USS 노틸러스 호를 진수했다.

1956년에는 영국의 칼더 홀에서 최초의 상업적 규모의 원자력 발전소가 가동을 시작하며, 원자력 발전이 본격적으로 시작되었다.

2 연구 개발

1960년, 프랑스는 첫 번째 핵 폭탄을 시험하면서 국가 간 핵무기 경쟁을 가속화했다.

1964년, 중국이 첫 번째 핵 폭탄 시험을 성공적으로 마쳤으며, 이는 핵 기술이 더욱 많은 나라로 확산되는 계기가 되었다. 이 시기에는 상업적 원자력 발전소가 여러 나라에서 건설되기 시작하며, 핵 에너지가 전력 생산의 중요한 부분으로 자리 잡기 시작했다.

3 안전성 이슈와 사고

1979년, 미국 펜실베이니아주에서 발생한 스리마일 섬 원전 사고는 원자력 발전소의 안전성에 대한 대중의 우려를 불러일으켰다. 이는 원자력 안전 규제를 강화하는 계기가 되었다.

1986년, 소련의 체르노빌 원자력 발전소에서 발생한 대형 폭발 사고는 원자력 발전의 위험성을 전 세계에 알리며, 많은 사람이 희생되었고, 원자력 산업에 대한 신뢰가 크게 훼손되었다.

4 재부흥기

2002년, 국제 원자력 기구(IAEA)는 혁신적인 원자로와 연료 주기를 위한 국제 프로젝트(INPRO)를 시작하며, 차세대 원자력 기술 개발에 박차를 가했다. 이 시기에는 소형 모듈형 원자로(SMR), 고온가스로(HTGR), 소듐냉각고속로(SFR), 용융염 원자로(MSR) 등의 새로운 기술이 개발되었다. 이러한 기술들은 더 높은 안전성과 효율성을 제공하며, 기존 원자력 발전의 문제점을 해결하는 데 기여하고 있다.

5 미래 전망

2020년대에 들어서면서, 여러 국가는 탄소 중립 목표를 달성하기 위해 차세대 원자력 기술에 대한 연구와 투자를 본격화하고 있다. SMR과 같은 소형 모듈형 원자로는 더 안전하고 경제적이며 다양한 용도로 활용될 수 있는 장점을 가지고 있다. 또한, 선진 원자력 시스템은 고효율, 저비용, 친환경 에너지 생산을 목표로 하여, 지속 가능한 에너지 공급을 위한 중요한 기술로 자리 잡고 있다.

이와 같은 발전사는 원자력 기술이 어떻게 진화해왔는지, 그리고 현재와 미래에 어떤 방향으로 나아가고 있는지를 보여준다. 차세대 원자력 기술은 에너지의 지속 가능성을 높이고 탄소 중립 목표를 달성하는 데 중요한 역할을 하며, 이는 **전 세계적인 에너지 문제 해결에 큰 기여**를 할 것으로 기대된다.

국내 세대별 원전 변화

세대별 원전 구분

Generation1

Generation2

Generation3

Generation3+

Generation4

제1세대 원전

Generation1



- 시핑포트 원전(미)
Shippingport nuclear power plant (USA)
- 오브닌스크원전 (러)
Obninsk nuclear power plant (Russia)

제2세대 원전

Generation2



- PWR
- CANDU
- BWR

제3세대 원전

Generation3



- AP600
- System80+
- APR1400
- Enhanced CANDU6

개량 제3세대 원전

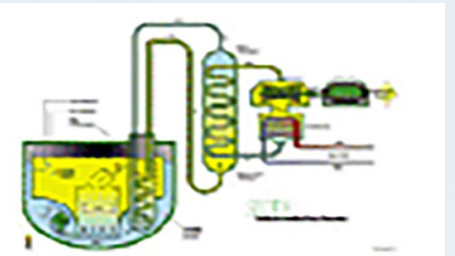
Generation3+



- AP1000
- EPR
- ACR1000
- APR+

제4세대 원전

Generation4



- 소듐냉각고속도록 (SFR)
- Sodium-cooled Fast Reactor (SFR)
- 초고온가스로 (VHTR), ECT.

1950

1960

1970

1980

1990

2000

2010

2020

2030

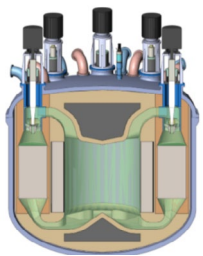
02 원자력 기술의 혁신

NATRIUM 원자로 (TerraPower)

TerraPower는 2008년에 빌 게이츠와 다른 민간 부문 지도자들에 의해 설립된 미국의 원자력 혁신 회사다. 이 회사는 Natrium 원자로와 Molten Chloride Fast Reactor(MCFR) 기술을 개발하고 있다. Natrium 원자로의 용융염 냉각과 나트륨 고속로 기술을 결합하여 높은 에너지 효율성과 안전성을 제공한다. 345MWe의 전력을 생산할 수 있으며, 필요에 따라 500MWe까지 확장 가능하다. 고온 작동과 재생 에너지 통합이 용이한 것이 특징이다. TerraPower는 미국 에너지부(DOE)로부터 자금을 지원받아 시범 원자로를 건설하고 있다.

MCFR 기술은 액체 염을 연료와 냉각재로 사용하는 혁신적인 원자로 기술이다. 고온에서 작동하며, 효율적으로 전기를 생산하고 청정 에너지를 제공한다. 산업의 탈탄소화에 기여할 수 있으며, 공정 열과 열 저장을 제공할 수 있다. TerraPower는 Southern Company와 협력하여 이 기술을 개발하고 있으며, 2023년에는 Integrated Effects Test(IET)를 시작하여 MCFR의 중요한 구성 요소를 검증하고 있다. 첫 번째 비상사태는 2025년 말로 예정되어 있다. TerraPower는 차세대 원자력 기술을 통해 에너지 독립성과 환경 지속 가능성을 추구하고 있으며, 이러한 기술을 통해 글로벌 에너지 문제 해결에 기여하고 있다.

TerraPower의 MCFR 설계



출처 : TerraPower

군사·상업용 원자력 부품의 리더 (BWXT)

BWXT Advanced Technologies는 BWX Technologies의 자회사로, 주로 고급 핵 미소 원자로와 상업용 원자력 부품을 개발하는 데 주력하고 있다. 이 회사는 미국 버지니아주 린치버그에 본사를 두고 있으며, 미국 국방부와 협력하여 고급 핵 미소 원자로를 개발하고 있다. 이 원자로의 이동성이 뛰어나 군사 및 비상용 에너지 공급에 적합하다. BWXT의 핵심 기술은 소형화된 고효율 원자로 설계와 안정성에 있다. 이 기술은 군사 작전과 같은 특수 상황에서도 신뢰할 수 있는 에너지 공급을 가능하게 한다. BWXT는 아이오와 국립 연구소에서 고급 핵 미소 원자로의 프로토타입을 제작하여 테스트할 계획이다. 이 원자로의 방사성 폐기물의 양을 줄이고, 자원 활용도를 높이는 데 기여할 수 있다.

BWXT는 상업용 원자력 부품 분야에서도 중요한 역할을 하고 있다. 이 회사는 오하이오주 바버튼과 인디애나주 마운트버논에 위치한 시설을 통해 대형 중압기 부품을 설계하고 제조한다. 이들 시설은 미국 해군의 원자력 잠수함 및 항공모함에 사용되는 중압기 부품을 공급한다. BWXT는 또한 북미에서 유일하게 대형 상업용 원자력 장비를 제조할 수 있는 시설을 보유하고 있으며, 이 시설은 엄격한 오염 제어가 필요한 민감한 부품 조립을 위해 사용된다. 이러한 제조 역량을 통해 BWXT는 다양한 원자력 부품을 높은 품질과 긴 수명을 보장하며 생산할 수 있다.

혁신적인 제조 기술과 전문 지식을 바탕으로, 차세대 원자력 시스템과 상업용 원자력 부품의 선두주자로 자리매김하고 있다. 기반이 되는 안전한 부품을 통해 다양한 분야에 활용되어 원자력 기술의 발전에 중요한 기여를 하고 있으며, 신뢰할 수 있는 에너지 공급에 이바지 하고 있다.



Steam Generators

Reactor Vessel Closure Heads

Heat Exchangers

Reactor Vessels

Spent Fuel Containers

출처 : BWXT

마이크로 원자로와 가압수형 원자로 (Westinghouse)

Westinghouse Electric Company는 1886년에 설립된 미국의 전통적인 원자력 기술 회사로, 현대 원자력 기술 혁신을 이끌고 있다. Westinghouse는 eVinci 마이크로 원자로와 가압수형 원자로(PWR)를 개발하고 있다.

Westinghouse의 eVinci 마이크로 원자로의 소형, 이동형 원자로로 자율 운영이 가능하며, 고온 열 파이프 기술을 사용하여 최대 13MW의 열을 생성한다. 이 원자로의 공장에서 제작되고 현장에서 신속하게 설치할 수 있으며, 전력망과 독립적으로 작동할 수 있어 산업용 및 지역 난방에 적합하다. 높은 효율성과 안정성으로 다양한 환경에서 안정적으로 작동한다.

PWR은 물을 냉각재 및 감속재로 사용하며, 높은 압력 하에서 물이 끓지 않도록 설계되었다. 핵분열 반응에서 발생한 열은 고압의 물을 통해 증기 발생기로 전달되며, 여기서 생성된 증기는 터빈을 구동하여 전기를 생산한다. PWR은 높은 안전성과 안정성을 제공하며, 다중 안전 시스템을 통해 방사성 물질의 방출을 최소화한다.

Westinghouse는 이 두 기술을 통해 원자력 에너지의 미래를 선도하고 있으며, 높은 신뢰성과 성능을 자랑하는 원자로 설계를 통해 다양한 응용 분야에서 안정적이고 효율적인 에너지 공급을 제공하고 있다.

Gen III+ AP1000 원자로



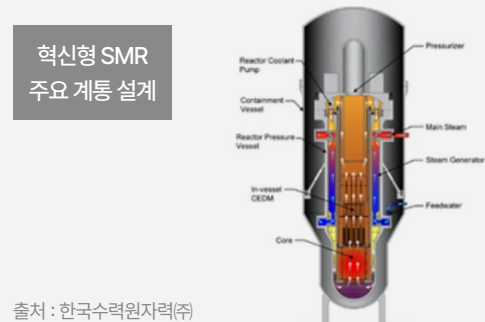
출처 : Westinghouse

우리나라의 원자력 기술활용



한국수력원자력(KHNP)은 차세대 원자력 발전을 이끌어갈 혁신형 소형모듈원전(SMR) 개발에 주력하고 있다. SMR은 공장에서 제작된 모듈을 사용해 전기출력 300MW 이하의 원자로를 구성하며, 높은 안전성, 경제성, 유연성을 자랑한다. KHNP는 2030년대 SMR 수출을 목표로 핵심 기술을 개발하고 있다.

SMR 개발 사업은 기본설계와 표준설계를 관리하며, 인허가 대응 및 해외 입찰사업 기술지원을 포함한다. 이로써 SMR의 상용화와 글로벌 시장 진출을 도모하고 있다. 계통설계, 안전계통, 성능해석, 실증실험, 노심 및 핵연료 설계 등 다양한 기술 개발이 추진되고 있다.

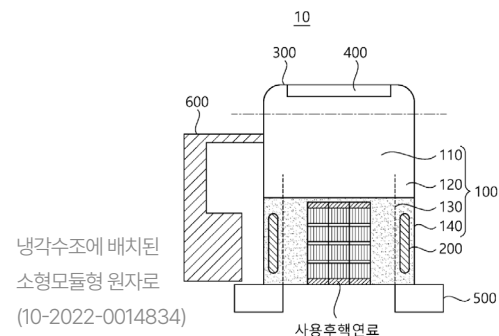


출처 : 한국수력원자력(주)

또한, 기계설계 기술은 기계, 보조기기, 구조설계, PSA 및 EPZ, 고온 수소생산 등 여러 분야에서 진행되고 있다. 계전 설계 기술 개발은 계측제어계통(I&C), MMIS, 인간공학, 소내·외 전력계통, 디지털 트윈 요소기술 등을 포함하며, 혁신형 SMR의 핵심설계 기술 확보에 주력하고 있다.

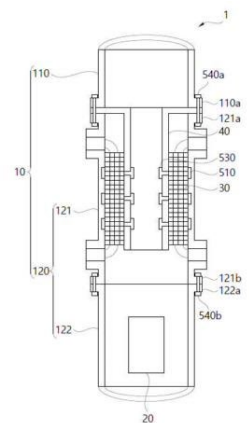
2024년 6월 28일, 한국수력원자력은 혁신형 소형 모듈 원자로(i-SMR)의 운전 검증용 시뮬레이터를 구축하여 시뮬레이터 운용 과정에서 도출되는 검증 결과와 표준 설계를 진행하고 있다.

01 냉각수와 사용 후 핵연료를 관리하는 독특한 수조 구조를 갖추고 있다. 수조는 사용 후 핵연료가 위치하는 제1공간과 원자로가 위치하는 제2공간으로 나뉘어 있다. 두 공간은 개폐 가능한 도어로 분리되어 있으며, 제2공간은 복수로 마련되어 제1공간의 둘레에 이격 배치된다. 또한, 상부 커버부와 응축부를 통해 증발된 냉각수를 포집하고 응축시켜 냉각 효율을 높인다. 이러한 설계는 기존 SMR에 비해 안전성과 효율성을 크게 향상시킨다.



냉각수조에 배치된 소형모듈형 원자로 (10-2022-0014834)

02 나선형 증기발생기를 포함한 원자로를 포함하여 내면에 지지되는 외주면을 갖추고 있다. 특히, 돌출고정부와 함몰 고정부를 통해 안정적으로 결합되는 구조를 지니며, 회전과 이동을 통해 결합되는 특징을 갖는다. 또한, 내부지지체와 냉각수 통과 유로를 통해 냉각 효율을 극대화하여 안전성과 효율성을 높인다. 이러한 설계는 기존 SMR에 비해 유지보수와 설치의 용이성을 크게 향상시킨다.



나선형 증기발생기 포함 소형 모듈형 원자로 (10-2022-0051493)



두산에너지빌리티는 대한민국을 대표하는 에너지 솔루션 기업으로, 혁신형 소형 모듈 원자로(SMR) 기술 개발에 주력하고 있다. 이 회사는 2022년 말 NuScale Power와 협력하여 상용화에 필요한 주요 부품 생산을 시작했다. NuScale Power Module™을 위한 초기 부품 생산 주문을 통해 두산은 NuScale의 혁신적인 SMR 기술을 상업화하는 데 중요한 역할을 하고 있다.

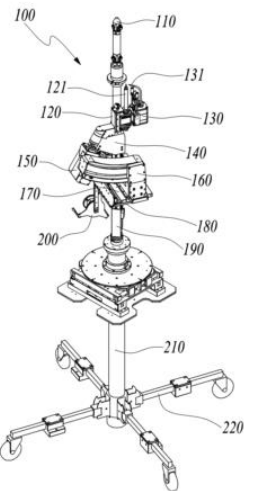
두산에너지빌리티의 SMR 기술은 소형 모듈형 원자로로, 기존 대형 원자로에 비해 더 작고, 안전하며, 경제적이다. 이 기술은 공장에서 미리 제작한 모듈을 현장에서 조립하는 방식으로, 설치와 유지보수가 용이하다. NuScale과의 협력을 통해 두산은 미국 에너지부의 아이오와 국립연구소에 설치될 462MWe 전력 생산을 목표로 하는 NuScale VOYGR-6 SMR 프로젝트를 지원하고 있다. 이 프로젝트는 2029년까지 상업 운전을 목표로 하고 있으며, 두산은 이를 위한 주요 부품을 생산하고 있다.



출처 : 두산 에너지빌리티

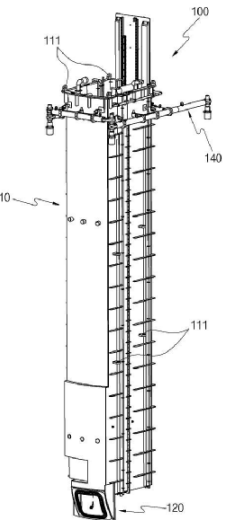
두산에너지빌리티는 혁신적인 SMR 기술을 통해 에너지 독립성과 환경 지속 가능성을 추구하고 있다. 이 기술은 기존의 대형 원자로에 비해 설치와 유지보수가 용이하며, 다양한 환경에서 안정적인 에너지 공급을 가능하게 한다. 두산은 이러한 혁신적인 기술을 통해 글로벌 에너지 문제 해결에 기여하고 있다.

01 덧씌움 용접장치는 원자로 헤드부의 J 그루브 용접면에 Alloy 690 용접 와이어를 사용해 원격으로 자동 용접을 수행한다. 6자유도 매니퓰레이터를 정밀 제어하여 용접 토치를 용접부 경사면에 수직에 가깝게 구동시킴으로써, 고품질의 덧씌움 용접을 가능하게 한다. 복수의 제어봉 구동장치 노즐의 식별번호 입력만으로 자동 용접을 수행하는 이 장치는 원자로의 안전성과 유지보수 효율성을 크게 향상되었다.



원자로 헤드부의 제어봉 구동장치 노즐 J 그루브 용접면 (10-2021-0026786)

02 원자로 용기의 내부 보수용 챔버는 원자로 용기 내부에 진입이 용이하고, 챔버의 위치조절과 고정 수단이 마련되며, 수중에서 챔버 내부로 향하는 물의 침입을 효율적으로 차단하고, 챔버 내부에서 원격으로 조절되는 보수플랫폼을 구비했다.



챔버 사시도 (10-2019-0100845)

원전설비



원전의 사업화 선도

현대건설은 국내에서 가장 많은 원전을 건설한 경험을 바탕으로, 혁신형 소형 모듈 원자로(SMR) 개발과 관련된 다양한 프로젝트를 추진 중이다. SMR은 기존 대형 원자로와 달리 공장에서 제작된 모듈을 현장에서 조립하는 방식으로, 경제성, 안전성, 유연성을 크게 향상시킬 수 있다. 현대건설은 SMR 개발 사업의 총괄 관리와 함께, 기본 설계, 표준 설계 인허가 대응, 기술 지원, 대내외 홍보 등을 수행하고 있다.

현대건설의 SMR-160 모델 조감도

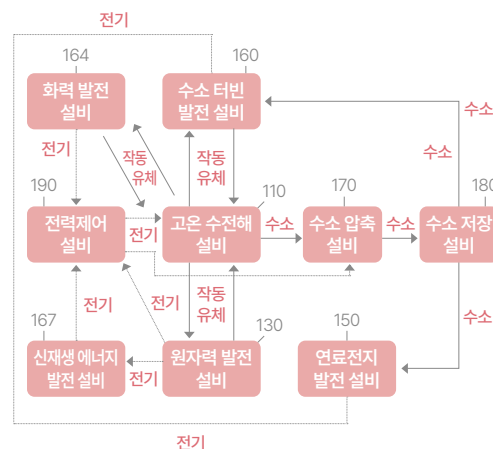


출처 : 현대건설

현대건설은 한국원자력연구원과 협력하여 비경수로형 SMR 개발, 경수로형 SMR 시공 기술, 원자력 수소 생산, 원전 해체 기술 등 다양한 분야에서 기술 개발을 추진하고 있다. 이러한 협력은 4세대 소형모듈원전 기술 개발을 가속화하고, 원자력 산업의 신시장 개척에 기여할 것으로 기대된다. 특히, 원전 해체와 원자력을 이용한 수소 생산 기술 개발을 통해 원자력 사업을 더욱 다각화하고 있다.

또한, 현대건설은 홀텍과의 협력을 통해 우크라이나에 SMR-160 파일럿 프로젝트를 추진 중이다. SMR-160은 160MWe급 경수로형 소형모듈원자로로, 사막, 극지 등 다양한 환경에서 배치 가능하다. 이 프로젝트는 우크라이나의 에너지 인프라 재건을 목표로 하며, 글로벌 SMR 시장에서 현대건설의 입지를 강화하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

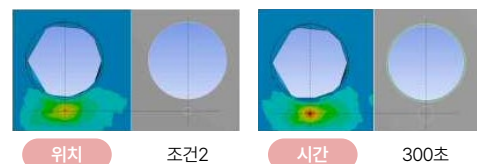
01 핵분열에 의한 발생 열의 복합 발전 시스템 설계를 통해 원자력 발전 설비와 수전해기의 수소 생성 기술을 결합하여 에너지 효율을 크게 향상시켰다. 전력계통을 효율적으로 관리하고, 실시간 수요에 따라 전기를 적절히 분배하는 전력제어장비의 기술적 진보는 원자력 발전의 활용도를 극대화하고, 지속 가능한 에너지 공급을 위한 혁신적인 솔루션을 제공하는 데 기여하고 있다.



복합발전 시스템 구성의 블록도 (10-2022-0116780)

02 원자력 발전소의 격납 라이너 플레이트(CLP)와 콘크리트 방어 벽을 유지 및 보수하기 위한 혁신적인 방법을 개발했다. 이 방법은 손상된 영역을 식별하고, 손상된 부분을 제거한 후, 수리 CLP를 제조하여 손상된 영역을 충전하고 차폐하는 과정을 포함한다. 리페어 CLP를 용접하고, 콘크리트 방어 벽을 수리함으로써 효율적인 유지 및 보수를 가능하게 한다. (10-2020-0095648)

03 원자력 발전소의 열 이미징 기술을 적용시켜 콘크리트 벽의 에어 갭 결함을 검사한다. 열 농도 패턴에 기초하여 에어 갭의 존재에 대해 열원 공급, 열화상픽업, 열원 온도 등을 통해 이미지화하여 효율적이고 정확한 검출을 가능하게 하여 원전 건설에서 안전성과 신뢰성을 높일 수 있다.



원자로 열해석 결과 확대 도면 (10-2020-0040060)

사용후 핵연료



방사성 폐기물의 안전한 관리

한국원자력환경공단(KORAD)은 대한민국의 방사성 폐기물 관리 전문 기관으로, 2009년에 설립되어 원자력 발전소 및 관련 시설에서 발생하는 방사성 폐기물의 안전한 처리와 관리를 담당하고 있다. 이 기관의 주요 임무는 방사성 폐기물의 수집, 운반, 처리, 저장 및 처분을 체계적으로 관리하여 국민의 안전과 환경 보호를 도모하는 것이다.

한국원자력환경공단의 경주방폐장 처분 방식

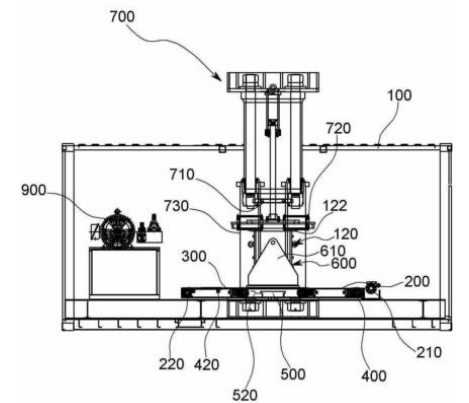


출처 : 한국원자력환경공단

한국원자력환경공단은 국제 협력을 통해 방사성 폐기물 관리 기술을 글로벌 스탠다드에 맞추고 있다. 국제 방사성폐기물관리 기구와의 협력을 통해 최신 기술과 정보를 교류하며, 지속 가능한 폐기물 관리 체계를 구축하고 있다. 이러한 노력 덕분에 한국의 방사성 폐기물 관리 기술은 세계적으로 인정받고 있다.

향후 한국원자력환경공단은 지속적인 기술 혁신과 안전한 폐기물 관리 체계를 통해 국민의 안전을 지키고, 환경 보호에 기여할 계획이다. 이를 통해 원자력 에너지의 지속 가능한 발전을 지원하며, 방사성 폐기물 관리 분야에서의 글로벌 리더십을 강화하고자 한다.

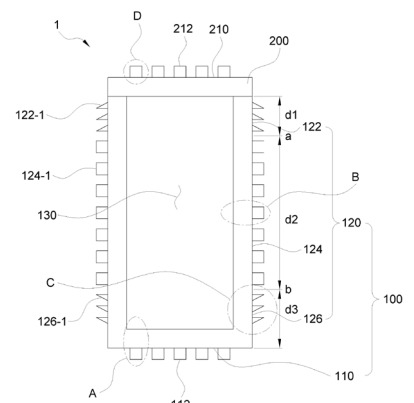
01 원전폐기물 압축 기술로 폐기물을 침전시키고, 압축된 폐기물을 배출할 수 있는 장치를 차량에도 탑재가 가능하도록 구성하여 처리 장소의 제약 없이 접근하여 처리할 수 있고, 방사성 폐기물의 종류에 따라 적합한 압력으로 압축시켜 처리할 수 있다.



원전폐기물의 압축장치 (10-2023-0115053)

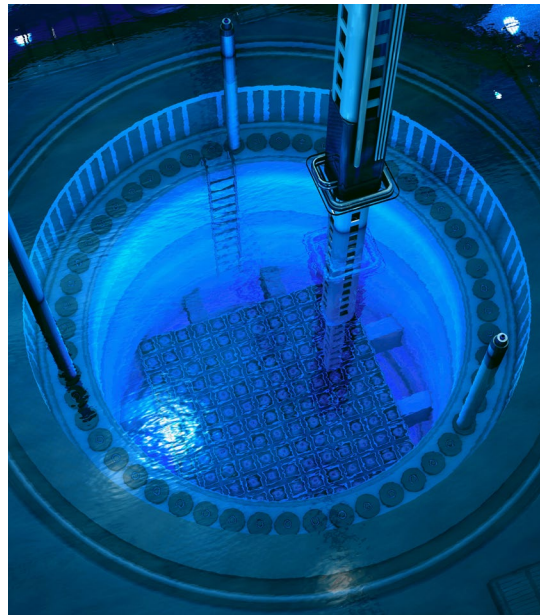
02 핵연료의 운송, 보관 및 폐기를 위한 시스템은 방사성 유출을 최소화하기 위해 열방출을 위한 브리더, 모니터링 감지센서 및 감지봉을 통해 재포장을 최소화하는 운반-저장-처분 겸용 시스템을 구축했다. (10-2022-0095198)

03 사용후핵연료 건식 저장 용기는 완충재와 접촉하는 면적이 넓어져서 절달받은 열을 효과적으로 방열시킬 수 있고, 외주면에 설치된 완충재가 돌기에 의해 붕괴열의 방열 효율이 향상시켰을 뿐만 아니라 완충재가 분리되는 것을 방지하여 활용성이 우수하다.



사용후핵연료 건식 저장 용기 단면 도식도 (10-2023-0055350)

03 국가전략기술 '차세대 원자력' 이야기



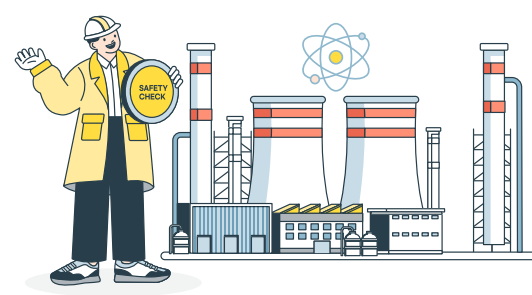
원자력 기술의 필요성

전 세계적으로 에너지 수요가 증가하고, 탄소중립 목표가 중요해지면서 원자력 기술이 새로운 기회를 맞이하면서 안정적인 에너지 수급과 지속 가능성을 확보가 핵심 기술로 부각되고 있다. 하지만 원자력 기술의 활용과 발전을 위해서는 몇 가지 중요한 조건이 필요하다.

우선, 첨단원자력 기술 확보와 국내 전주기 생태계 구축이 필요하다. 이는 기술 통제 대응과 안정적인 에너지 수급을 위한 필수 요소로, 지속가능성을 확보하는 데 큰 도움이 된다. 유럽 연합(EU) 택소노미(Taxonomy, 녹색분류체계)에 원자력 에너지가 포함된 것도 이러한 맥락에서 이해할 수 있다. 다만, 원전 폐기물 최소화, 사고저항성 핵연료 사용, 고준위폐기물 관리방안 마련 등 구체적인 조건이 필요하다. 이를 통해 원자력 에너지가 안전하고 지속 가능한 방식으로 활용될 수 있다.

또한, 신시장 점유율 확대를 위해서는 안전성과 수용성을 강화해야 한다. 전 세계 전력 수요 증가와 탄소중립 목표 달성을 위해 원자력의 시장 진출 기회가 확대되고 있다. 이에 따라 새로운 시장을 개척하기 위해서는 원자력의 안전성을 높이고, 사회적 수용성을 확보하는 노력이 필요하다. 이는 원자력 기술이 미래 에너지 시장에서 중요한 역할을 할 수 있도록 하는 중요한 요소이다.

결론적으로, 원자력 기술은 안정적 에너지 수급과 지속가능성을 확보하는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 이를 위해 첨단 기술의 확보와 생태계 구축, 안전성과 수용성 강화가 필요하며, 이러한 노력을 통해 원자력 기술은 미래 에너지 시장에서 중요한 위치를 차지할 것이다.



SMART 기술 개발 경험을 토대로 iSMR 개발 시작 단계이며, SMR분야는 미국 다음이나 상당한 격차가 있음

글로벌 정세와 시장 변화

EU 의회는 2022년 7월 6일 원자력 발전을 택소노미에 포함하기로 의결했다. 이는 녹색 금융 투자의 대상으로 원자력을 인정한 것이다. EU는 러시아 등 외부 에너지 의존도를 낮추고 자체적인 에너지 자립도를 높이기 위해 원자력의 필요성을 인정했다.

EU 택소노미는 원자력 관련 경제활동 세 가지와 기술 선별 기준을 제시했다. 제4세대 원자력 기술 개발, 제3.5세대 원전 건설·운영, 가동 원전의 계속운전 등이 포함된다. 한국은 이에 맞추어 한국형 택소노미의 보안을 위해 의견을 수렴하고 있다.

원자력 기술은 국제적으로 고도의 통제를 받는 전략 기술로, 해외로부터의 기술 도입이 어렵다. 또한 원자력 기술은 국방 분야에서도 중요하다. 미국은 이동용 초소형 원자로 개발 프로젝트를 추진 중이며, 호주는 미-영-호 안보협력(AUKUS) 차원에서 핵잠수함 도입을 추진 중이다.

한국도 이러한 국제적 흐름에 발맞춰 원전산업의 강화와 기술 내재화를 위해 원자로 계통, 핵연료 등 핵심 기술을 모두 국내 고유의 기술로 개발하여 완전한 기술 자립과 경쟁력을 갖출 필요가 있다.

국제에너지기구(IEA)는 'Net Zero by 2050' 보고서를 통해 2050년까지 재생에너지와 원자력을 연계한 에너지 믹스를 제시했다. 2050년까지 태양광과 풍력 같은 재생에너지가 전체 에너지 공급의 2/3를 차지하고, 원자력 발전은 2020년 대비 두 배로 증가할 것으로 예상된다.

글로벌 원전 시장은 크게 성장할 전망이다. BloombergNEF는 소형모듈원자로(SMR) 시장이 2027년부터 형성되어 2040년과 2050년에 각각 1,376 GW, 2,937 GW 규모로 확장될 것으로 보고 있다. 캐나다 천연자원부는 2030년에서 2040년 사이에 SMR 시장 규모가 석탄발전 대체, 오지 전력공급, 산업공정열로 나뉘어 총 142조 원에 이를 것으로 예상된다.

국내 원전 산업은 2019년 약 20조 7,317억 원의 매출을 기록했으며, 해외 매출은 UAE 원전 수출과 운영 및 건설로 1조 2,559억 원에 달했다. 탈원전 정책 이전인 2016년에는 수출 계약 규모가 1억 2,641만 달러에 달했으나, 이후 감소했다. 그러나 국내 기업들은 원전 도입국과 선진국에 수출을 지속하며 우수한 건설 및 기기 공급 능력을 보유하고 있다.

현재 전 세계에서 건설 중인 원전은 약 54,435MW 규모이며, 한국은 9,395 MW로 전체의 17.2%를 차지해 설비용량 기준 2위이다. 중국은 12,565MW를 건설 중으로 전체 원전 시장의 23%를 차지하며 1위이다.

한국은 이러한 글로벌 시장 변화에 대응하기 위해 원자력 기술 개발과 시장 확장을 통해 경쟁력을 강화해야 한다.



SMR과 선진원자력, 폐기물관리 모두 최고수준의 기술력을 유지



SMR 개발을 진행 중이며, 폐기물관리기술은 선도국 수준



개념설계, 제조능력을 토대로 실험원전의 운영경험을 보유



정부의 확고한 지원으로 빠른 속도로 서구의 원전기술을 추격

국가별 원자력 기술수준

'차세대 원자력' 중점기술 분야

소형 모듈형원자로 [SMR]

#고유 안전성 #경수로형SMR #무한 냉각

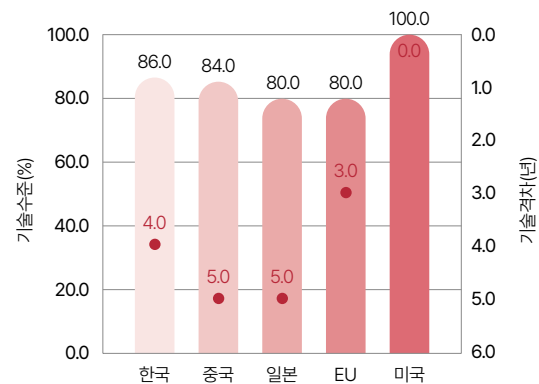
한국은 소형모듈원자로(SMR) 기술 개발에 중점적으로 투자하고 있다. 이러한 투자의 목적은 고유 안전성을 극대화하고, 세계 최고 수준의 SMR 건설에 필요한 핵심 기술을 시험하고 검증하는 데 있다. 한국의 목표는 경수로형 SMR에서 글로벌 경쟁력을 확보하고, 기술 경쟁력에서 우위를 차지하는 것이다. 이를 위해 무한냉각 기술, 무봉산 출력 조절 기술, 사고 저항성 핵연료 기술 등 세계 수준의 기술 확보가 필요하다.

또한, 소형 모듈화 제조 기술의 혁신을 통해 모듈 제작 기간 및 건설 공기를 단축하고자 한다. 이를 위해 종합 시험 플랫폼 구축, 종합·개별 안전성 효과 시험 및 SMR 혁신 운영·정비 기술 개발이 계획되어 있다.



2028년까지 표준 설계 인가를 획득하기 위한 i-SMR 기술 개발 사업에 안정적인 지원이 제공될 예정이다. 이로 인해 한국은 글로벌 SMR 제조 거점으로 도약하고, 국내 생태계 육성에 투자할 계획이다.

소규모·다목적 산업 수요 증가와 함께 소형 원자로에 대한 관심이 증가하고 있다. 세계적으로 약 80종 이상의 소형 원자로가 개발 중이나, 아직 절대강자가 없는 상황이다. 현재 우리나라가 보유한 우수한 대형 원전 기술을 바탕으로, 미래 글로벌 시장 선점을 위한 SMR 기술 개발 및 조기 상용화가 필요하다.



2022년도 기술수준평가 결과(안), 2024.02.29

기술경쟁력 우위 확보

- 안전 성능을 극대화한 세계 수준의 SMR 고유안전성 극대화 기술 확보
- 원자로 무한냉각기술, 무봉산 출력조절 기술, 사고저항성 핵연료 기술 확보

글로벌 제조 공급망 선점

- 소형모듈화 제조기술 혁신을 통해 세계 최고 수준의 SMR 공급망 확보
- 모듈 제작기간 단축 혁신제조기술, 건설공기 단축 모듈화 공법 기술

종합시험 플랫폼 구축

- 세계 최고 수준의 SMR 건설에 필요한 핵심기술 시험·검증
- 종합·개별 안전성 효과 시험, 혁신 운영·정비기술(유지보수검사 등) 개발

선진원자력시스템 및 폐기물 관리

#핵연료 공급 #고온가스로 시스템 #소듐냉각고속로

한국은 탄소중립 실현과 국가 에너지 안보 강화를 위해 선진 원자력시스템 기술의 실증과 핵연료 공급 역량 구축에 박차를 가하고 있다. 이는 전력생산 분야의 탈탄소화, 수소생산, 산업 공정열 공급, 해양 및 극지 탐사 등 다양한 산업 분야에서 무탄소 에너지원에 대한 수요가 급증함에 따라 필요해진 조치이다.

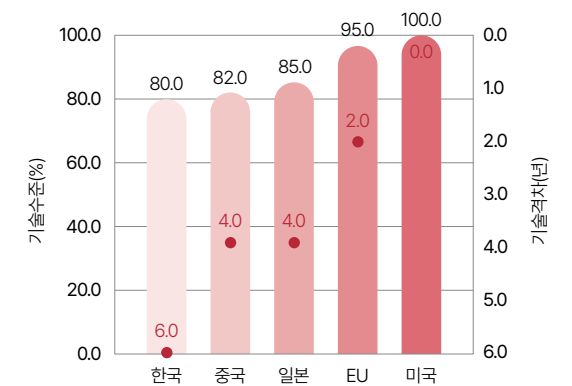
국내외에서 증가하는 무탄소 에너지원에 대한 수요에 적기 대응하고, 신산업 분야의 활용을 극대화하기 위해 고온가스로 시스템, 소듐냉각고속로 시스템 등 다양한 선진원자력시스템 기술의 실증이 진행 중이다. 또한, 청정수소 생산과 산업열 공급에 기여할 수 있는 다목적·산업용 원자력시스템 기술 확보에도 주력하고 있다.

특히, 이동형 원자력 시스템과 용융염 원자로시스템을 포함한 모빌리티용 및 해양·극한지 신시장 개척을 위한 기술 개발에도 박차를 가하고 있다. 이를 통해 에너지 공급망을 강화하고, 선진 핵연료·재료 생산기술을 확보하여 선진원자력시스템에 맞는 안정적인 핵연료 공급망을 구축하고자 한다.

상용화 가능성이 높은 선진원자력시스템에 대한 투자를 확대하고, 조기 상용화를 위해 기술 개발 단계에서부터 민·관 협력을

추진하는 것은 국민 안심과 지속 가능한 원자력 이용을 도모하며, 대형원전 및 SMR 수출을 위한 선진국 수준의 사용후핵연료 전주기 안전관리기술 확보에도 기여할 것이다.

이러한 노력은 국내 환경을 반영한 처분시스템 개발 및 선진국 수준의 저장·처분 기술 확보에도 중요하다. 이를 통해 탄소중립 실현에 기여하고, 국가 에너지 안보를 위한 비경수형 선진 원자력시스템 확보에 한 걸음 더 다가설 것이다.



2022년도 기술수준평가 결과(안), 2024.02.29

산업 탄소중립 기여

- 탈탄소화 및 청정수소 생산 등을 위한 고온 열공급 상용화 기술 확보
- 고온가스로, 소듐냉각고속로 선진원자력시스템 개발

모빌리티용 신시장 개척

- 해양·극한지 신시장 개척을 위한 이동형 원자력시스템 확보
- 용융염 원자로 시스템 기술 및 해양 선박·플랜트 연계 기술

에너지 안보 강화

- 안정적 핵연료 공급망 구축 및 선진 핵연료 재료·생산기술 확보
- 선진핵연료 생산 기술 및 선진핵연료·재료 조사시험 기술

운반·저장기술 자립

- 해외의존도 저감을 위해 운반·저장 기술 및 용기 국산화
- 고준위 방사성폐기물의 운반·저장 상용화 기술

고안전 처분기술 확보

- 고준위 방폐물 관리를 위해 국내 환경을 반영한 부지평가 및 고안전 처분기술 확보
- 부지평가 및 고안전 처분시스템 기술

처분안전성 실증기반 확보

- 심층처분 기술의 종합안전성 입증을 통해 수용성 제고
- 심층처분을 위한 종합 안전성 입증기술 확보

04

출연(연) 보유 '차세대 원자력' 기술

한눈으로 보는 출연(연) 기술 보유현황

차세대 원자력 중점기술 분야별
기술 보유현황출연(연) 보유
차세대 원자력
주요기술소형 모듈형 원자로
[SMR]

- KIMM** · LNG극저온 기자재와 관련 시스템의 성능 및 내구성 평가를 위한 시험 장비 / 이근태

선진원자력시스템
및 폐기물 관리

- KAERI** · 실시간으로 보관상태 및 위치를 확인 할 수 있는 방사성 폐기물 관리 시스템 / 이진우
- 중수로 폐수지 처리와 활용 / 박환서
- KASI** · 항공 방사선량 분석 시스템 / 황정아
- KIMM** · 원전 중대사고 환경 모사 기술 / 김대환



차세대 원자력 기술개발 연구자 인터뷰

안전한 방사성

폐기물 관리

한국원자력연구원

이진우 박사



방사성 폐기물의 증가와 관리의 중요성

최근 세계 각국은 에너지 자원과 환경 보호를 동시에 고려해야 하는 복잡한 문제에 직면해 있다. 특히, 원자력 에너지는 탄소 배출을 줄이면서도 안정적인 전력을 공급할 수 있는 대안으로 각광받고 있지만, 그와 동시에 방사성 폐기물 관리라는 중요한 과제를 안고 있다. 방사성 폐기물은 원자력 발전소의 운영, 해체, 연구 활동 등 다양한 과정에서 발생하며, 이 폐기물을 안전하게 처리하고 관리하는 것은 국민 안전과 환경 보호를 위해 필수적이다. 그렇기에, 이진우 박사는 원자력안전 분야에서 중저준위 방사성 폐기물 관리의 중요성을 강조한다. 그는 사고를 예방하기 위해 방사성폐기물 관리 기술을 개발하였으며, 안전이 최우선으로 필수적인 분야로 보고 있다.



혁신적인 방사성폐기물 관리 기술

이진우 박사의 연구팀은 방사성폐기물 관리에 ICT 기술을 도입하여 여러 기능을 구현하였다. 첫째, 사물인터넷(IoT) 기술을 활용하여 방사성폐기물의 상태를 실시간으로 감시할 수 있으며 둘째, 증강현실(AR) 기술을 통해 방사성폐기물 포장 상태에서 내부 소포장 폐기물을 확인하는 기술을 개발하였다. 셋째, 디지털 트윈 플랫폼을 이용한 방폐물 관리시스템 운영 기술을 도입하여 더 효율적인 관리를 가능하게 한다. 이러한 기술은 한국원자력연구원 뿐만 아니라 원자력관계사업자들의 방사선 안전관리 분야에도 적용되고 있다.

상용화의 도전과 기술 발전의 필요성

현재 기술의 한계점과 상용화 관점에 대해 ICT 기술의 급속한 발전 속도를 고려할 때, 이미 개발된 기술들의 지속적인 업그레이드가 필요하다고 지적한다. 예를 들어, 사물인터넷 기술을 이용한 방폐물 관리 외에도, 최근 발전된 비전 기술을 활용하여 방폐물 관리의 고도화가 필요하다고 설명한다. 새로운 기술을 지속적으로 도입하고 개선하는 것이 상용화의 핵심이라고 강조하며, 이를 통해 방사성 폐기물 관리의 안전성과 신뢰성을 높여야 한다고 밝혔다.

미래 전망과 발전 가능성

이진우 박사는 방사성폐기물 관리 기술의 미래 전망에 대해 긍정적인 시각을 가지고 있다. 방사성 폐기물 관리 기술이 향후 여러 기관에 적용될 수 있으며, 국민들이 안심할 수 있는 투명하고 안전한 방사성폐기물 관리가 이루어질 것이라고 예상한다. 또한, 인공지능(AI) 기술을 접목하면 더욱 발전된 안전관리가 가능할 것이라고 기대하고 있다.

방사성 폐기물 관리는 원자력 에너지의 안전한 활용을 위해 필수적이며, 이를 위한 첨단 기술의 도입과 사회적 합의가 중요하다. 방사성 폐기물 관리의 중요성을 인식하고, 안전하고 투명한 관리 체계를 구축하는 것은 우리의 미래를 위해 반드시 필요한 과제이다.

중수로 폐수지 처리와 활용

한국원자력연구원
박환서 박사

중수로 폐수지 처리 기술의 중요성과 필요성

한국원자력연구원의 박환서 박사는 고방사성폐기물 처리 기술을 전문적으로 연구, 이 중에서도 특히 중준위 방사성폐기물인 중수로 폐수지에 초점을 맞추고 있다. 중수로 폐수지는 경수로와 달리, 값비싼 동위원소인 C-14를 포함하고 있어, 이를 안전하게 처리하고 고순도로 회수하는 기술이 필요하다. 기존의 폐수지는 시간이 지나면서 화학적 변화로 인해 C-14가 외부로 유출될 위험이 크기 때문에 장기간 보관이 어렵고, 경주처분장에도 처분할 수 없다. 따라서 빠른 시일 내에 안전하고 효과적인 처리 기술이 개발되어야 한다.

이 기술의 중요성은 방사성폐기물을 단순히 폐기하는 것이 아니라, 폐기물 내의 고가 동위원소인 C-14를 회수하여 산업적으로 활용할 수 있다는 점에 있다. 회수된 C-14는 표지화합물 등 다양한 산업 분야에 사용될 수 있으며, 이를 안정적인 형태로 변환하여 저장하거나 처분할 수 있다. 이를 통해 국외 수입에 의존하던 방사성 동위원소의 공급 기반을 국내에서 확보할 수 있고, 중수로의 운영과 해체 과정에서의 안전성도 크게 향상될 수 있다.

혁신적 방사성폐기물 처리 기술

중수로 폐수지에서 방사성 동위원소 C-14를 효율적으로 제거하는 기술은 마이크로웨이브 조사를 통해 폐수지의 화학 변화를 약 2시간 내로 압축하여 진행하며, 이를 통해 고농도의 C-14를 안전하게 제거할 수 있다. 제거된 C-14는 안정한 탄산염으로 전환되어 장기 보관과 처분이 용이해진다. 기존의 간접가온 방식은 사고 발생 시 전원을 차단해도 내부 장비의 열이 남아 있어 반응 종료가 어렵고, 고순도로 C-14를 회수하는 데 한계가 있다. 반면, 이 기술은 선택적 반응 특성을 가지는 마이크로웨이브 조사를 통해 C-14만을 효과적으로 탈착하며, 사고 상황 시 전원을 차단하여 빠르게 반응을 종료시킬 수 있다. 또한, 고농도로 기체화된 C-14를 흡착탑을 통해 내부 순환하여 제거하는 'close gas flow' 방식을 사용해 C-14의 외부 유출을 방지하고 안전성을 확보해냈다. 이는 방사성 폐기물 관리의 새로운 기준을 제시하며, 원자력 산업의 안전성과 효율성을 크게 향상시킬 것이다.



중수로 폐수지 처리의 상용화

중수로 폐수지 처리기술을 개발하여 상용화를 위한 중요한 단계를 완료하여 원천기술, 실험실 규모 실증, 상용 규모 실증을 모두 마쳤으며, 중수로 폐수지를 안전하게 처리한다. 현재 발전소 내에서 이 기술을 실제로 적용하기 위해 필요한 인허가를 확보 중이며, 한국수력원자력과 협력하여 이를 진행할 예정으로 빠르면 2025년 후반기에는 관련 인허가가 완료되어 발전소 내에서 폐수지 처리를 위한 준비가 이루어질 것으로 예상된다.

현재 기술은 상용 규모의 공정 기술까지 완성된 상태로, 실제 방사성 폐기물을 처리할 수 있다. 다만, 실증이 짧은 시간 내에 이루어진 반면, 사업은 장기간 지속되므로 장비의 내구성을 충분히 평가하고, 장기간 지속적인 처리 과정을 통해 기술을 최종적으로 개선해야 할 것이다. 이번 월성발전소에서의 방사성 폐기물 상용 규모 실증은 국내 원자력 역사상 최대 규모이며, 세계적으로도 폐수지 상용 규모 기술의 실증은 매우 드물다. 이는 기술의 완성도와 안전성이 충분히 확보되었음을 의미한다. 또한, 중수로 폐수지는 전 세계적으로 실험실 규모에서만 기술 개발이 진행되고 있어, 이번 실증을 통해 한국의 기술이 해당 분야에서 선도적인 위치에 있음을 보여준다. 이는 기술경쟁력을 높이는 데 큰 기여를 할 것으로 예상된다.

중수로 폐수지 처리 기술은 방사성폐기물을 단순히 처분하는 것이 아니라, 유용한 동위원소를 회수하여 새롭게 활용하는 혁신적인 기술이다. 이 기술을 통해 회수한 C-14는 국내 동위원소 산업에 큰 활력을 불어넣을 수 있으며, 이를 기반으로 다양한 첨단 소재 개발 등 새로운 산업 분야를 창출할 수 있다. 국내외 사업 규모는 1조원 이상이 될 것으로 예상되며, 기술 수출을 통해 글로벌 시장에서 경쟁력을 확보할 수 있다. 특히, 이러한 기술 발전은 방사성폐기물에 대한 인식 개선과 원자력 발전의 지속 가능성에 크게 기여할 것으로 기대된다.

