

소형원자로 Small Modular Reactor 왜?



원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

이 정 윤



소형원자로에 대한 재인식(1)

- 소형원자로는 **안전**하다
- 소형원자로는 **지구온난화**에 기여한다
- 원전은 가장 **안전하고 저렴**하다(박지원)
- 원전수출 경험을 살려 SMR에 매진하여 한국산업을 선도하고 기후변화를 제어하자(이원욱)
- 빌게이츠도 SMR을 대안으로 이야기 한다
- 민주당의원들은 **탈원전과 SMR을 분리**생각한다(유동수)
- 문재인정부가 망하는 길은 부동산과 탈원전(김영식)



소형원자로에 대한 재인식(2)

- 소형원자로는 중동이나 사막처럼 섬도시에 유리(강재열)
- 300MWe 이하의 소규모 시장에서 잠재력이 크다(임채영)
- 2035년까지 65~85GW SMR 건설 예상(영국국립원자력 연구소)
- 혁신형(???) SMR 개발에 4천억원 투자(9차 원자력진흥 위, 정세균위원장)
- NuScale사를 통해 SMR 기자재 13억달러 공급예정(두산)



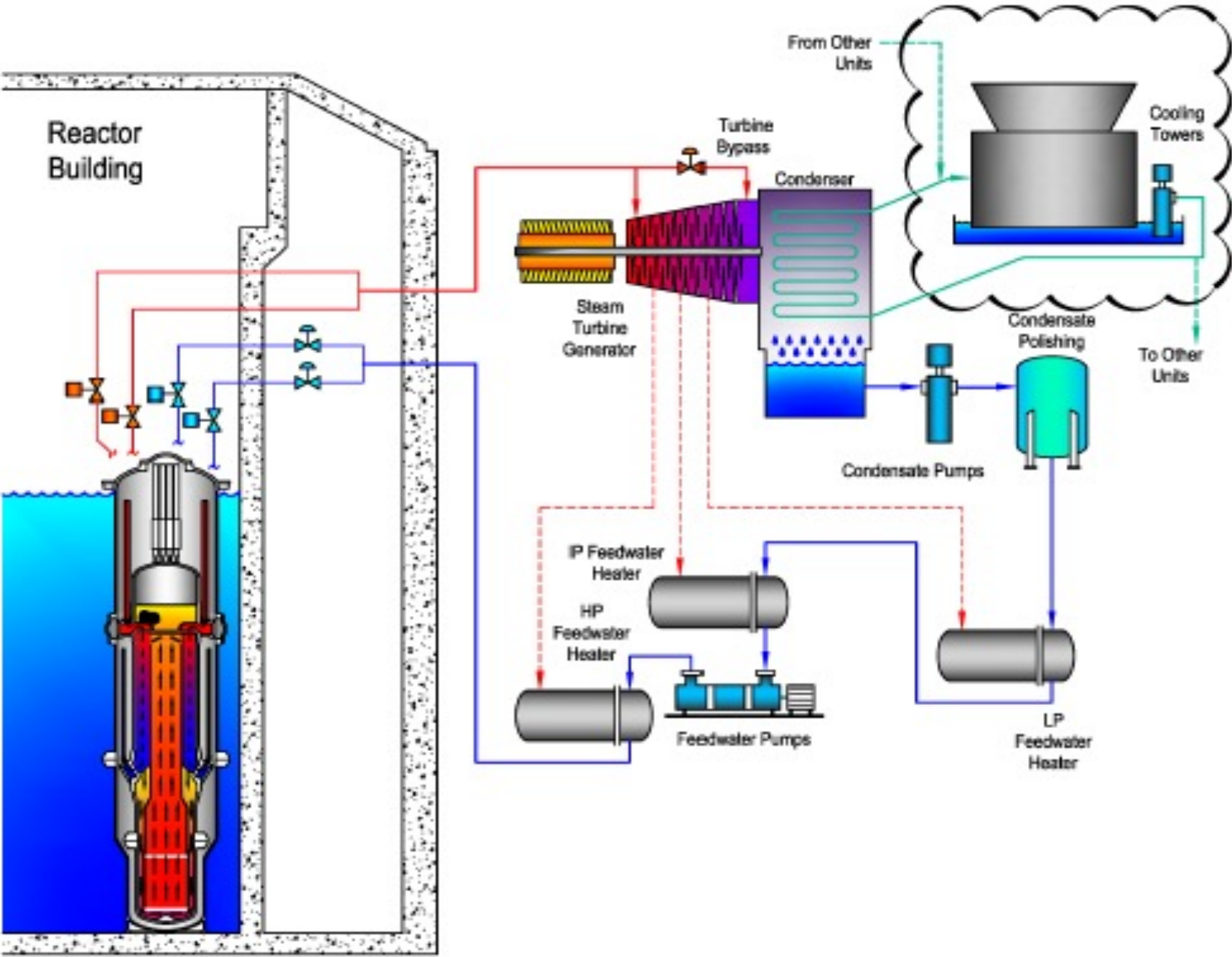
소형원자로란 무엇인가?

- 소형원자로는 300MWe 이하의 원자로를 통칭
- 대부분 군함, 핵잠수함에 사용되는 소형원자로를 이용하여 발전용으로 전환한 것이 다수 ; SMART, 등
- 경수로형, 비경수로형, 핵분열 에너지를 기초로 함
- 후쿠시마 원전사고 이후 소형화와 피동형안전개념, 대피 최소 적용으로 발전 및 비발전용(고속로 등)으로 개발 중
- 공장에서 대부분 모듈화 제작, 현장 설치로 공사비 절감
- 용도 ; 전력, 담수화, 수소에너지생산, 사용후핵연료 처리, 그리고 이동수단(선박, 잠수함) 등 **다양한 적용**



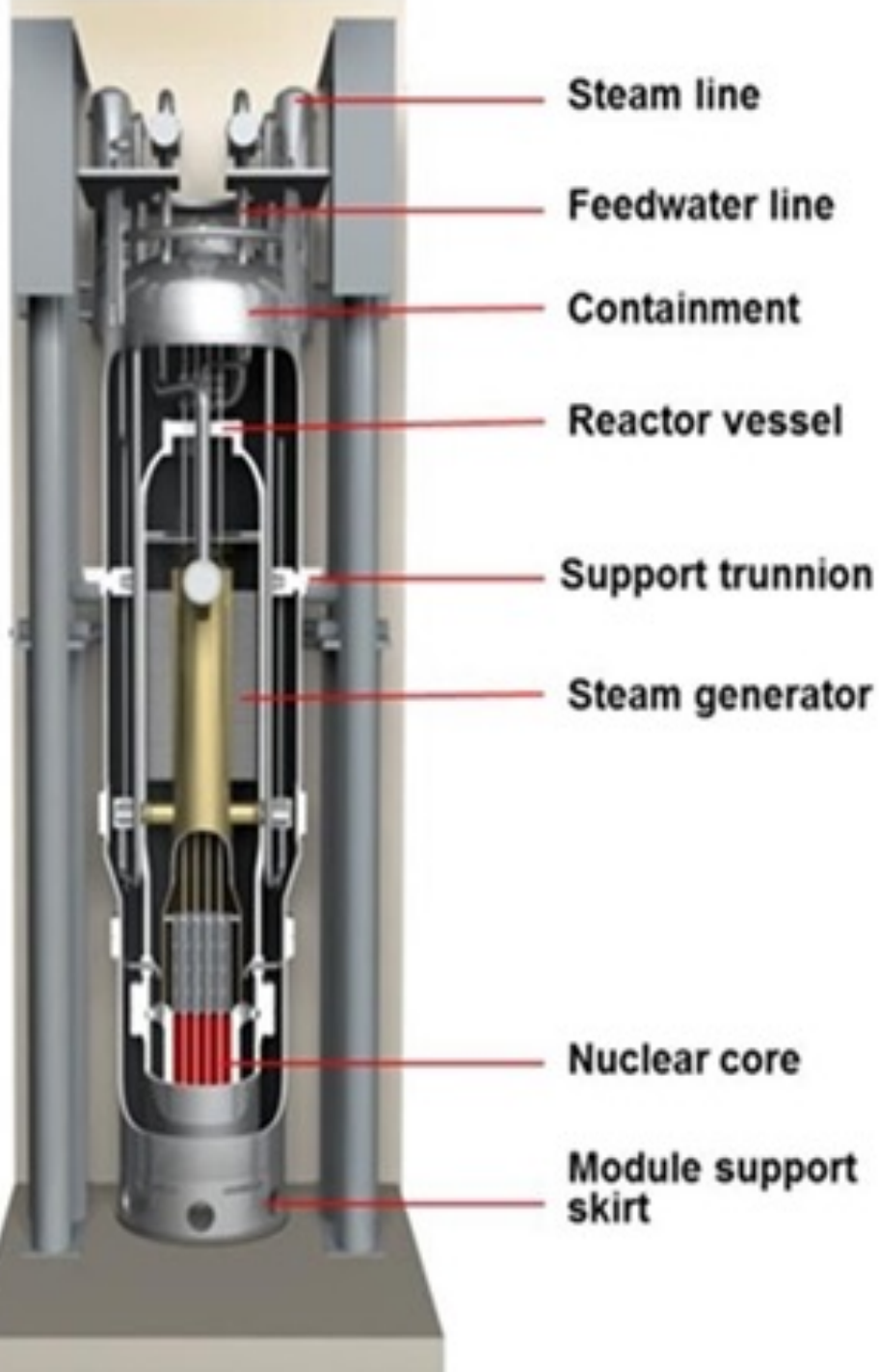
원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

NuScale 소형원자로 by NuScale Power, LLC





NuScale 소형원자로

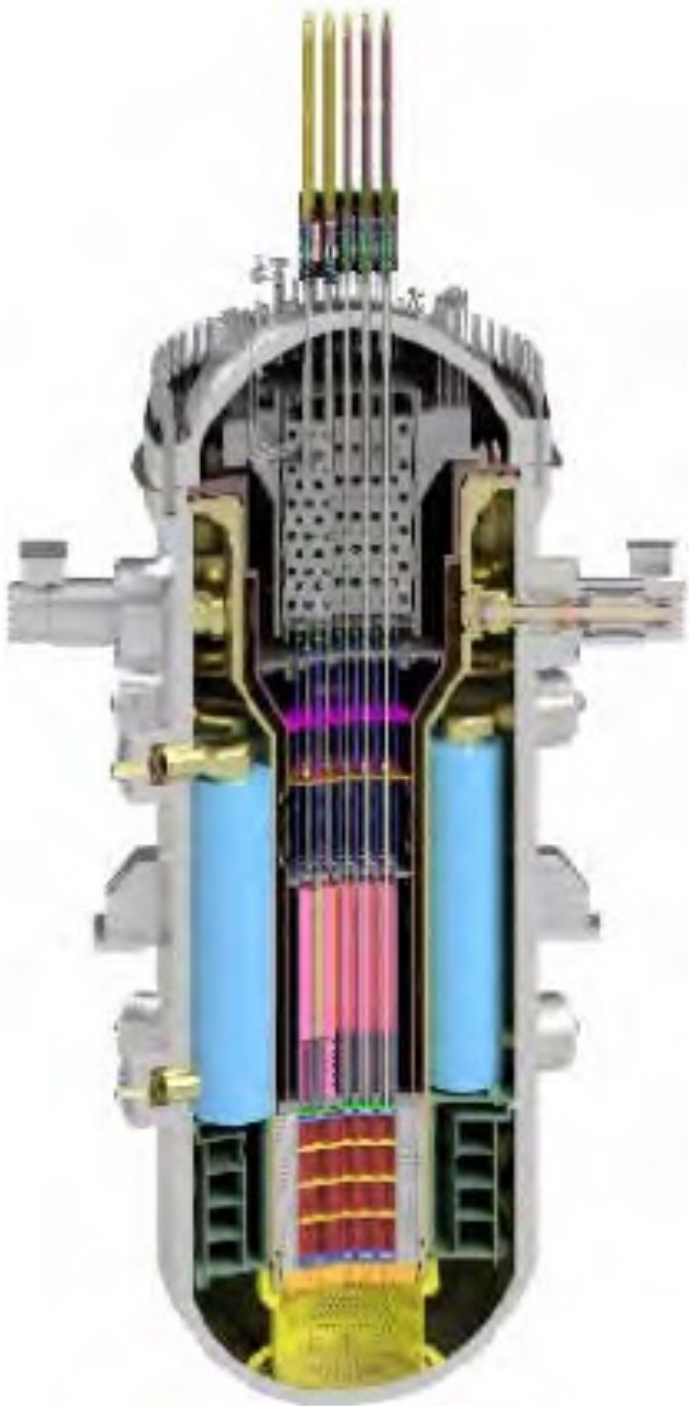


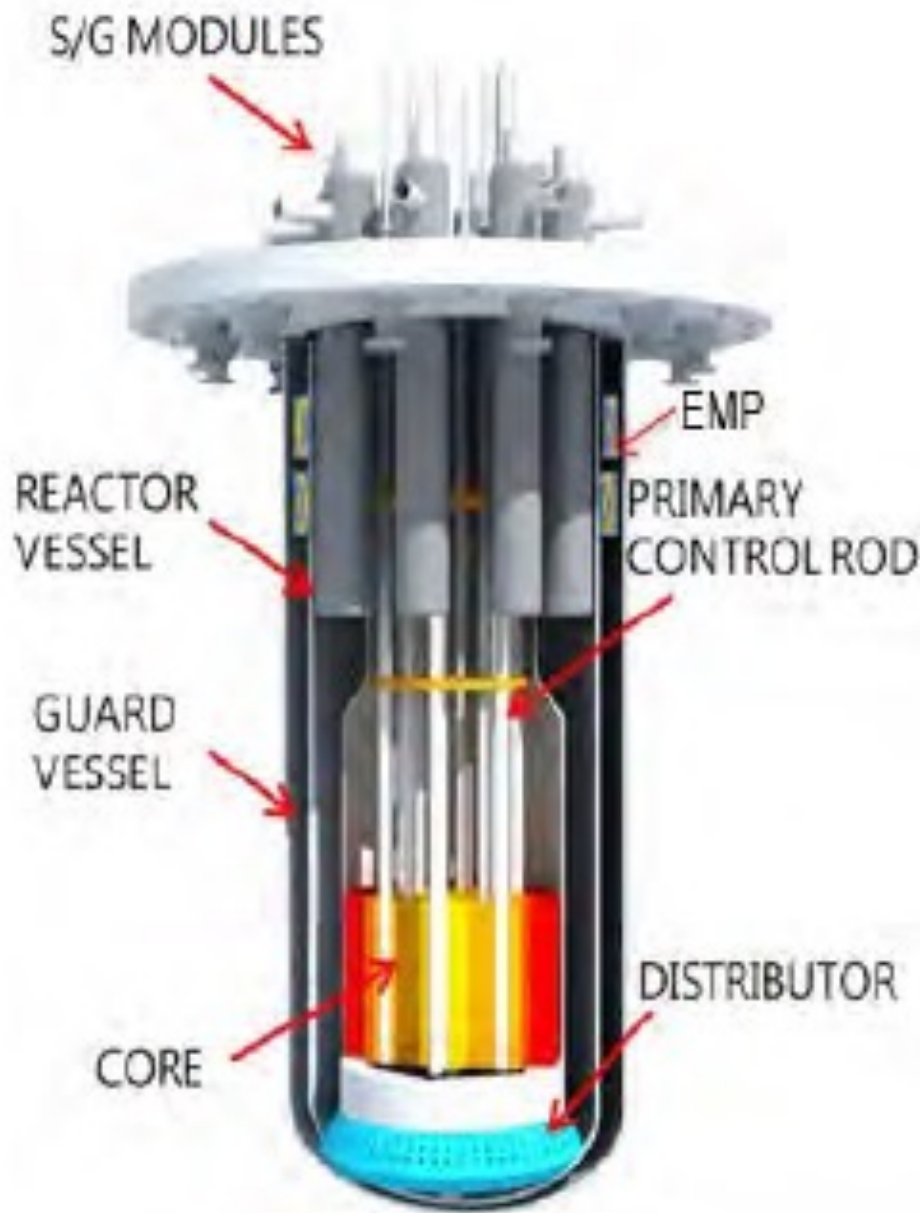
- 미국 NuScale Power사
- 경수로(60MWe) 일체형모듈식 원자로
- 자연순환, 피동형 냉각방식
- 농축도 <4.95%, UO₂ 17X17, 37다발
- 압력 13.8/4.3MPa, 온도 265/321℃
- 수명 60년, 표준내진설계 0.5/0.4g
- 핵연료교체주기 24개월
- 최종설계승인(2020), 일부 미흡 검토 중(NRC) ; 2026년 인허가 목표



스마트 원자로

- 한국, 사우디아라비아 공동개발
- 경수로(107MWe) 일체형원자로
- 냉각재 펌프로 강재순환, 비상시피동형
- 농축도 5%이하, UO₂ 17X17, 57다발
- 압력 15/5.8MPa, 온도 296/322℃
- 수명 60년, 표준내진설계 0.3g
- 핵연료교체주기 30개월
- 표준설계인가(원안위)





MicroURANUS 원자로



원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

- 한국, 울산과기대(황일순교수)
- 납-비스무스원자로(20MWe) 일체형
- 냉각재 펌프로 강제순환
- UO₂ Hexagonal, 85다발
- 압력 8~15MPa, 온도 250/350℃
- 수명 30년, 면진시스템 적용
- 핵연료교체주기 30년
- 예비 개념설계 단계



소형원자로는 좋다?

- 전원 상실에도 핵연료 용융사고 발생 안 한다(피동형 냉각)
- 소형원자로는 소형이므로 부지가 작아 부지비용이 적다
- 소규모 전력망에 연결이 용이하고 유연운전이 가능하다
- 소형이라 초기 투자비용이 작으므로 금융위험이 작다
- 탄소저감, 기후변화 대응에 적합
- 무전력, 무붕산 운전 등 2년 이내 건설완료, 저비용으로 안전하다(ISMR)

☞ 전부 진흥논리에 의한 검증되지 않은 일방적인 주장



소형원전인가 중형원전인가?

- 모듈개념 적용(NuScale)
 - 50MWe를 12개 적용시 600MWe로 중대형화가 가능
 - 소형이나 모듈화 적용으로 중대형화 가능(소형원전???)
 - 고장 나도 단일 모듈 원자로만 정지, 유연운전 가능
- 안전한가?
 - 다수호기 문제는? 격납용기 Sizing은? 노심 보론농도 문제
 - 소형원자로를 일체형으로 하기 위한 코일형 증기발생기 - 정비 요건 충족문제(ITAAC) ; 정비검사 난관으로 교체형(SMART)
 - 핵연료도 같이 생산되고 결국 600MW 원전과 차이점 없음



소형원자로는 안전한가?

- 피동형안전개념에서 고려하는 가상사고 유발요인
 - 냉각재의 천이응답시간 지연에 따른 노심 출력사고
 - 핵사고시 핵분열 생성물이 상대적으로 작고 대기에 천천히 배출
 - 압력방출밸브 누설시 냉각수 보론농도 낮아지는 문제
- 증기발생기 수격, 진동마모, 정비/검사 등 미결과제 다수
- 비상계획 이행을 방해하는 요인(인구 밀집도, 근거리, 교통, 인프라 시설 등), 대피로 설정, 피폭 가능성과 수준
- 체내 피폭 방지 대책 ; 50마일까지 섭취 금지지역??
- CDF $10E(-09)$???

소형원자로와 핵폐기물은 안전?

- 사용후핵연료
 - 고준위 및 중저준위 핵폐기물 양은 원전과 동일하게 발생
 - 농축도에 따라 폐기물 양은 달라짐
 - 소형모듈화에 따른 기기 교체폐기물이 보다 많이 발생가능
- 안전한가?
 - 소형원자로는 보다 많은 지역에 설치하여 원자로와 폐기물 분산
 - 개별사업자 관리에 따른 대 보안문제 발생
 - 분산 설치된 원자로 상대적 취약한 테러전략 강화 필요
 - 원전과 차별화 없는 동일한 문제 대응 필요



소형원자로는 유연전원이다?

- 유연운전개념 적용(NuScale)
 - 부하추종을 위한 모듈 원자로 한 두개 정지하여 유연운전
 - 원자로출력을 분/시간 단위로 조정가능
 - 스팀을 터빈에서 바이패스하여 초/분/시간 단위로 출력대응 (NuFollow기능에 의해 CCGT 수준 대응가능)
- 안전한가?
 - 피동형 냉각개념이 적용되어 천이대응이 늦는 특성
 - 노심출력 안정을 위한 보론, 제어봉 등 부하추종은 입증 필요
 - 신속대응이 필요한 비상시 대응지연 문제발생 가능 - AP1000?
 - 유연운전에 따른 환경피로, 수명감축, 경제성 문제

한국의 소형원자로 개발 현황(SMART)



원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

- 스마트는? 현재까지 5천억원 이상을 투입
 - 1997~2001 스마트 개념설계 및 기본설계 (305억원)
 - 스마트P 실증로 개발사업 (918억원)
 - 2002~2008년 스마트원자로 개념설계 기술개발 (2500억원)
 - 2009~2011 스마트 기술검증 및 표준설계인가 사업(1700억원)
 - 2021 한수원(500억원), 정부(4000억원) **혁신형SMR**개발에투입
- 미국의 NuScale 원자로는?
 - 2011~2017 4억75백만불 민간투자
 - 2013~2026 인허가 2억26백만불 투입(DOE)
 - 2020년 NRC Design Certification Approval

소형원자로(SMART) 부지문제



원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

부지확보 방안	장 점	단 점
기존 원전부지	부지 활용성 증대, 부지선정 절차 단순화, 원전 운영 및 유지보수 시너지 효과	- 부지별 문제점 전면 재검토 및 대책 필요 (송전선로 확보, 지반 안전성, 온배수 저감 대책 등) - SMART 고장, 사고시 기존원전운영 지장(주민 반대, 등) - 기존 부지내 가용부지 확보 곤란시 추가용지 확보 필요
신규원전 예정부지	신규원전예정부지로 중복업무 방지로 선정절차 간소화	SMART 예정부지 추진으로 기존 원전건설예정부지 계획 추진 지장, 방해가 될 소지
SMART 별도부지	SMART 장점 부지 확보 가능 (담수화, 열병합, 분산전원 등)	- 별도의 부지선정 절차 이행으로 인허가에 장기간 소요 우려 - 지자체 간 유치경쟁시 정치적 부담 및 추가조건 발생 가능

소형원자로(SMART) 경제성



원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

타 발전원 (연료비)		석탄발전 (91 ~ 224\$/ton)	중유발전 (50 ~ 96\$/bbl)	LNG발전 (436 ~ 780\$/ton)
SMART (건설단가)				
건설단가 (\$/kWe)	5,000	경쟁가능	경쟁가능	경쟁가능
	7,000	경쟁불가	제한경쟁가능	제한경쟁가능
	10,000	경쟁불가	경쟁불가	경쟁불가

□ SMART 수익성 확보방안

○ 1안 : 건설단가에 따른 적정 보상단가 적용

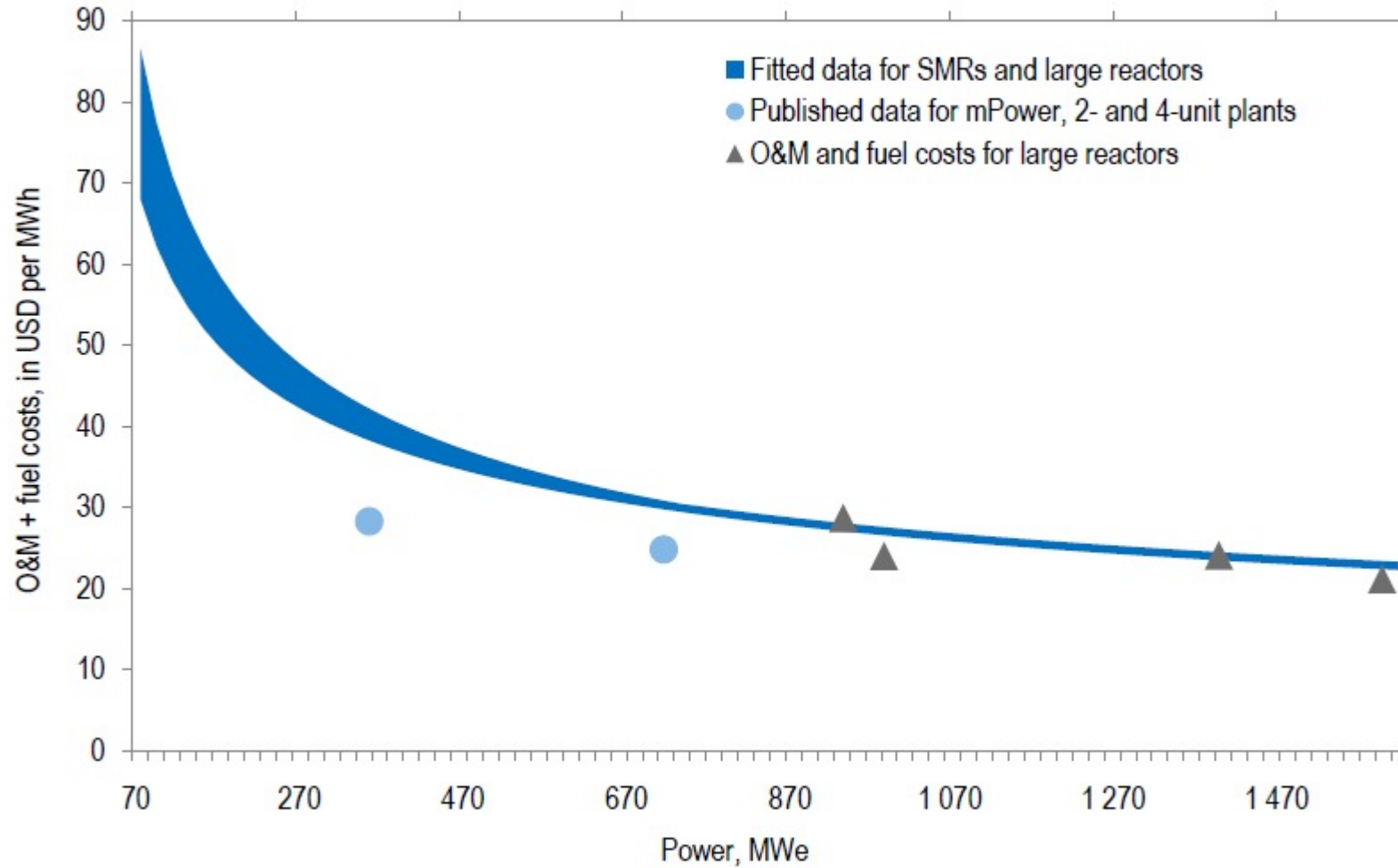
○ 2안 : 기금으로 보상(원자력연구개발기금, 전력산업기반기금 등)

○ 3안 : 기존 운영원전에 SMART 원전 포함 전체 원자력보상단가 조정

타 발전원과의 상대비교를 위한 민감도 분석 수행(한전, 2009)



Figure 2.1: Fitted sum of O&M and fuel costs of pressurised water reactors and SMRs as a function of power



Source: Based on information from NEA/IEA, 2015, and from a survey of vendors.



소형원전은

- 스마트(혁신형 SMR 포함)
 - 한미정상회담에서 IAEA 핵사찰 가입국으로 제한; 사우디, 이집트 등 미국과 동반 진출하지 않으면 수출불가
 - Pilot 건설 불가로 국내검증 미비로 수출 불가 -> **실패**한 원전
 - **스마트가 혁신형SMR의 미래**
- 미국 NuScale
 - 노심출력 안정성, 증기발생 문제 등 인허가 완전 습득 미지수
 - 2030년 정도에 인허가가 나와도 **Pilot Plant 운영**에 의한 검증이 필요하므로 추가 사업투자 필요하며 **부지확보 난항예상**
 - 2030년 탄소중립(?)을 위한 선택은 불가

SMR은 원전산업계의 탈원전 대응전략



원자력 안전과 미래
원자력 안전에 우리의 미래가 있습니다

1. 원전수출 정책을 유지(2017)
 - UAE에 국가적인 대형건설 일자리 효자산업 설득
 - 당장 산업계 사기문제, 급격한 정책변화로 UAE와 외교마찰
2. 핵안보 확립은 국가 안보문제(수면하 진행, 제9차원진위)
 - **사용후핵연료재처리**; 감포 제2 로카쇼무라 건설(2800억원 발주)
 - 파이로프로세싱, 핵잠수함개발, SMR 개발, 핵융합개발
3. SMR은 다목적용이지만 발전용으로 차별성을 무력화
4. SMR 건설 보다 신한울 3,4 건설공략(**민주당 분열**)
5. 결국 탈원전은 무의미해지고 문재인정부 핵정책은 이명박근혜정권 핵정책을 지속 유지, **탈원전 분쇄가 목적**



현재 원자력 진흥주의만 활개

- 총리 국가안전안심위, 원자력특보
 - 국가안전안심위에 노골적인 탈원전 반대인사 다수 포진
 - 비리로 해임된 탈원전 반대 원자력 용역업체 대표가 원자력특보
- 국가 원자력연구개발의 현실
 - 인적 다양성 부족 ; 과제기획, 심사, 연구수행, 평가 전 과정에 특정대학 핵공학과 선후배로 구성 ; 국가연구비가 핵공학과 연구비
 - 대통령과기자문위, 연구재단, 에기평 연구재단 핵공과 선후배
- 원자력 객관성 취약
 - 핵정책, 원자력안전, SMR 등에 대한 객관적인 전문가 너무 취약
 - **SMR평가보고서, 핵융합평가보고서, 재처리평가보고서를 제안함**

결론

원자력
연구는



스마트
SMR(혁신형)
고속로
파이로프로세싱
핵융합



SMR 등은
제2의
4대강 사업
!!!

...
결과 없는
연구를 위한 연구