

2022 한국원자력학회 춘계학술대회 SMR Workshop

SMR 개발에 따른 원자력통제 측면의 규제대응

2022.5.19

한 국 원 자 력 통 제 기 술 원
조 성 연

목 차

I	배경
II	SMR 개요
III	주요국 / IAEA 동향
IV	SMR 공통 규제 현안
V	생애주기 원자력통제 규제
VI	원자력통제 규제현안 및 과제
VI	맺음말

I. 배경 (Why SMR?)

◆ 전 세계적 에너지 전환 추세

- 화석연료 감축 → 재생에너지 위주의 대안 모색
 - 원자력의 특성/역할에 대한 재조명
 - ❖ CO₂ 발생 ×, 전력품질의 우수성, 공급 안정성
- 국가 에너지원 구성 전략 수립에 필수적인 요소

◆ 기존 경수로 원전의 한계 요인

- 경제성 추구 대형화 → 소규모 수요에 대한 유연성 부족
- 중대사고(후쿠시마) → 안전규제 강화 (경제성↓)
- 대규모 초기 건설 자본 → 재정능력 가능한 개도국 ?

I. 배경 (Why SMR?)

◆ 대형 경수로 원전에 대한 대안으로서 SMR 부각

- 우리나라 i-SMR 비롯 미국, 중국, 캐나다, 러시아 등 주요 원전 선진국에서 개발이 활발히 진행 중
 - ✓ 경수로, 고온가스로, 고속로, 용융염 원자로 등 70여개의 노형
 - ✓ 해상부유식, 모듈단위 증설, 주제어실 공유 등 혁신적인 개념도입
 - ✓ 피동형 안전성, 중대사고의 원천적 발생 방지

◆ SMR의 대표 특성

System	안전성	유연성	기술혁신성
Business	경제성?	현행 규제체제 부합성?	

I. 배경 (How to Regulate?)

◆ 현행 규제 체제의 SMR 적용의 적정성 여부 검토

- 비경수로형, 소형화, 모듈화 개념을 적용한 다양한 노형
- 기존 대형 경수로 기반의 규제체제 적용 시 인허가 난항 예상
- 개발자 공통의 요구사항은 ‘규제 완화’

✓ 현행 보수적인 접근 → 규제의 유연성, 합리적인 접근 요구 (예: Graded Approach, EPZ 축소 등)

◆ SMR을 위한 원자력통제 규제 방안 수립 필요

option ① 기존 경수로 기반 규제체제 적용

option ② SMR 인증, 운영 등에 필요한 새로운 규제 방안 준비 ☒

- 혁신적 기술 도입에 필요한 새로운 규제 전략 수립
- 기술 개발과 규제 준비를 병행하여 시행착오 방지
 - ✓ (과거) 시설 구조물 완공 후 안전조치 접근법 개발, 시설 검사
 - ✓ (향후) SSBD(Safeguards/Security by Design) 적용 (※ 원연 PRIDE 시설)

I. 배경 (When to Start SSBD?)

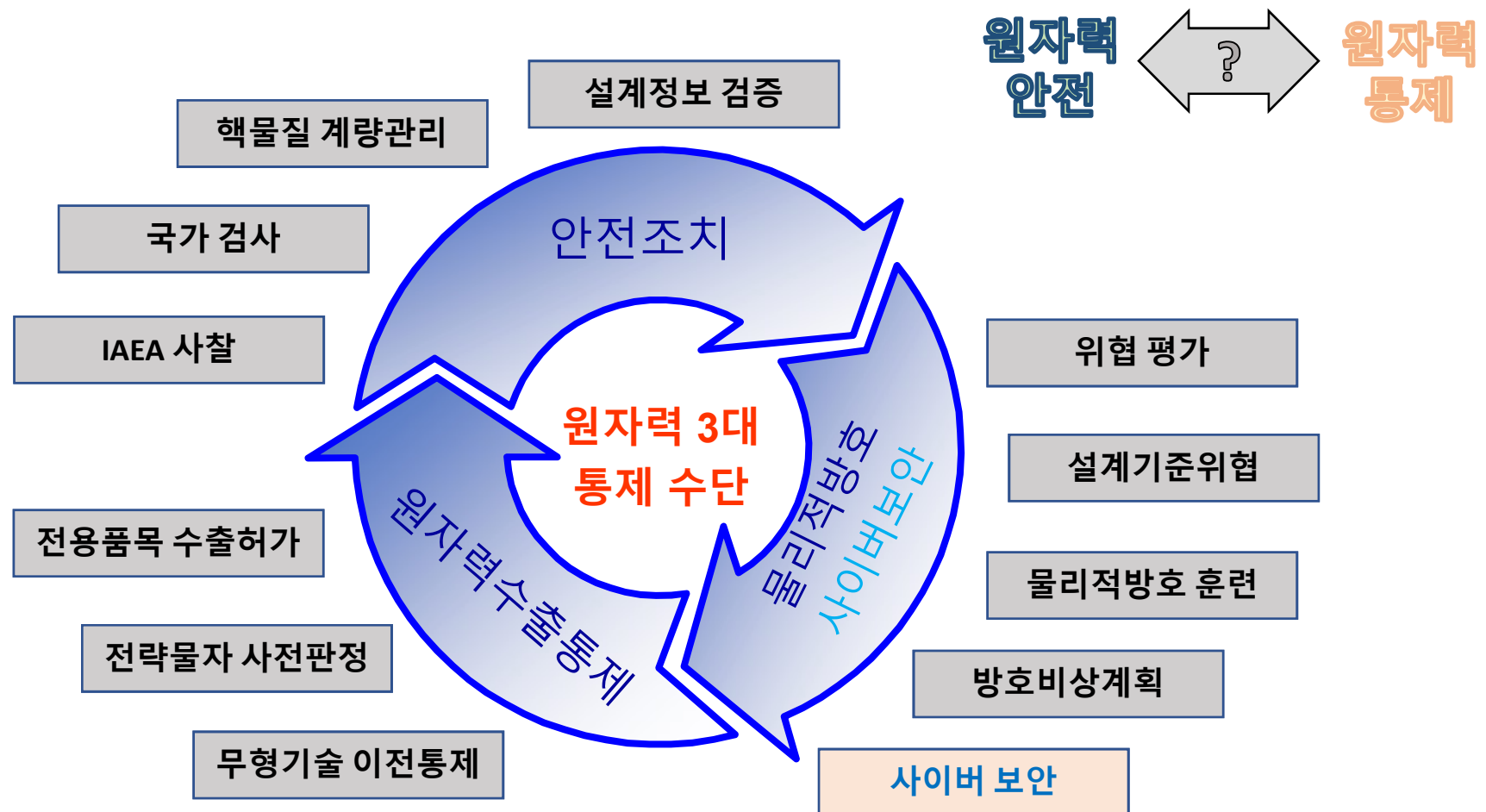
iSMR 개발사업 2023년 착수 ⇒ 2026년 설계인증 신청

◆ 중소형 혁신형 원자로 안전규제 연구사업 (원자력통제 분야)

과제명	경수형 SMR 핵비확산 규제기술 개발 및 규제체계 구축	핵안보 측면의 경수형 SMR 규제방안 연구
기간	2022.04.01~2028.12.31 (총 6년 9개월)	
예산	총 27억원	총 37.5억원
주요 연구내용	<ul style="list-style-type: none">• iSMR 설계정보, 모델 DIQ• 안전조치 부합성, 신기술 대응방안• 핵물질 검증장비 설계, 실증, 적용• 수출통제 심사요건, 심사 체계 구축	<ul style="list-style-type: none">• SMR 기술개발/규제 동향분석• 물리적방호 규제전략• 방호요건, DBT 규제 현안• 핵안보 규제 기준

I. 배경 ('원자력 통제'란?)

- ◆ 원자력의 평화적 이용, 핵무기 확산 방지
- ◆ 원자력시설에 대한 위협 방지



I. 배경 ('원자력 안전' '원자력 통제' 차이)

Nuclear Safety

원자력의 생산과
이용에 따른 각종
위험으로부터
'국민'과 '자연환경'을
보호



Nuclear Control

악의적인 행위자로부터
'핵물질' '원자력시설'을
지키는 것

II. SMR 개요

◆ SMR 특성 (IAEA SMR 규제자 포럼)

■ 시설 규모 축소

- 기존 원전 대비 축소된 부지 면적
- 노심 출력 규모 축소 (붕괴열 감소, 방사성핵종 재고량 감소, 피동형 안전성)

■ 기술혁신성

- 피동형 냉각 메커니즘
- 일체형 설계 개념
- 새로운 핵분열생성물 방출 차단 방법
- 새로운 연료 설계 개념 (세라믹, 용융염 등)

■ 모듈형 설계

- 집적, 단순화 설계 (중대사고 원천적 배제, 구조물/계통/부품 수량감소, **but 고려해야 할 새로운 이벤트**)
- 설비 제작 현장에서 조립 및 시험 수행
- 다중 모듈 설비 (주제어실, 구조물/계통/부품 공유, **but 모듈 의존성/독립성, 위험조건에서 다수 모듈 고장**)

■ 건설 / 설치 / 수송 (모듈 단위)

- 육상 외 지역 까지 확대 (해상, 지하, 수중, 이동식; 오지에 설치 가능)
- 모듈 수송 / 건설 (선행 모듈 건설/운전 중; 연료 재장전을 위한 모듈 수송)

II. SMR 개요

◆ SMR 개발 현황 (IAEA SMR Book 2020)

노형	미국	러시아	중국	한국	기타	계
경수로	5	12	5	1	8	31
고온가스로	2	3	2	0	7	14
고속로	3	1	0	1	6	11
용융염냉각로	4	0	1	0	5	10
마이크로원자로	3	0	0	0	3	6
합계	17	16	8	2	29	72

II. SMR 개요



◆ NuScale (미국)

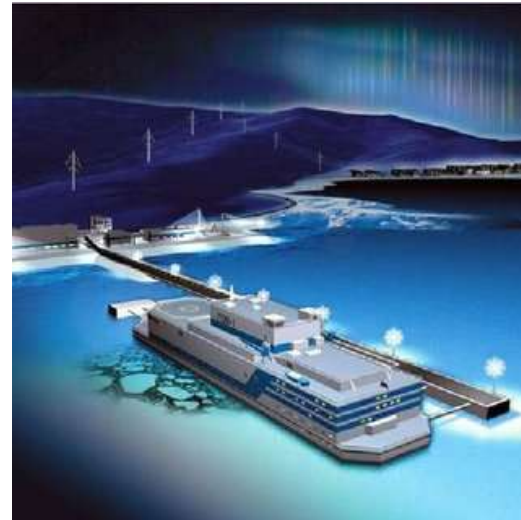
- ✓ 12기 모듈, 50MWe
- ✓ 전력공급, 수소생산, 담수화 다목적 활용
- ✓ DC 진행 중, 2026년 상업운전 목표
- ✓ 미 DOE 설계 인증 및 인허가 지원프로그램

◆ ACP100 (중국)

- ✓ CNNC 주도로 개발
- ✓ 125MWe, 부지 당 8개 원자로
- ✓ 전력/열에너지 공급, 담수화 다목적 활용
- ✓ 2021년 실증로 건설 착공



II. SMR 개요

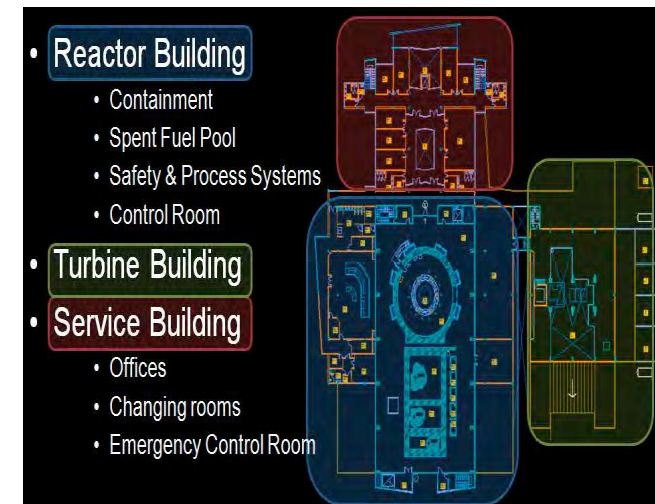
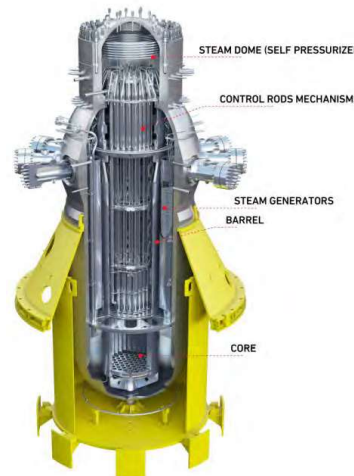


◆ KLT-40s (러시아)

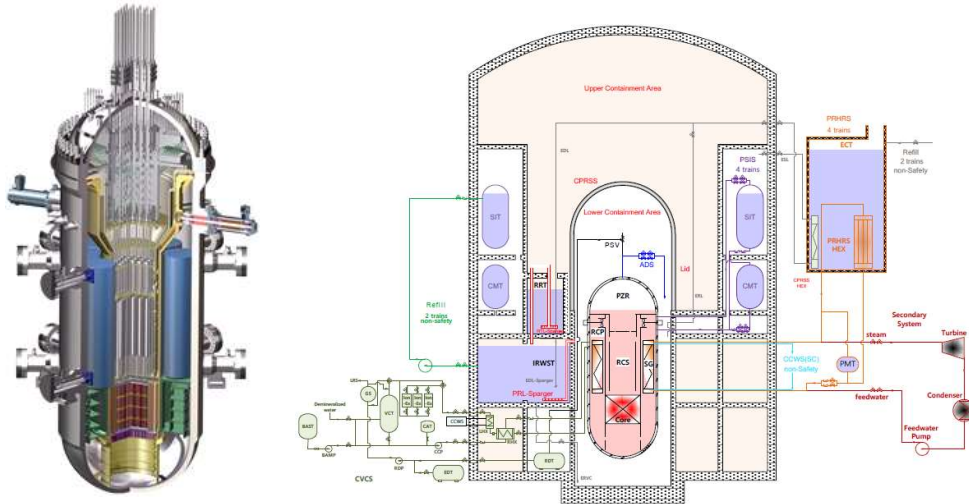
- ✓ 35MWe 가압경수로형
- ✓ 전력/에너지 공급, 담수화 및 석유시추 동력원
- ✓ 쇠빙성 추진 원자로 개량형
- ✓ Akademik Lomonosov 2기 (부유식) 2020년 5월 상업운전 시작

◆ CAREM (아르헨티나)

- ✓ CNEA 주도로 1990년대 초반부터 개발
- ✓ 자연순환형 27MWe
- ✓ 오지 전력 공급, 담수화
- ✓ 2013년 착공, 2023년 최초 임계 목표



II. SMR 개요

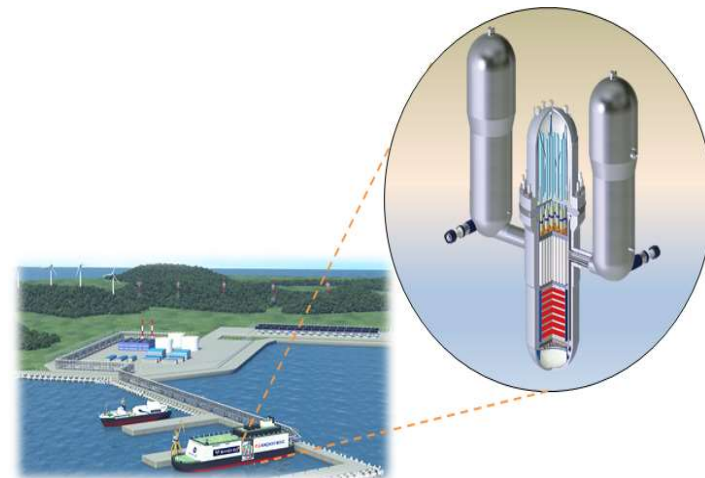
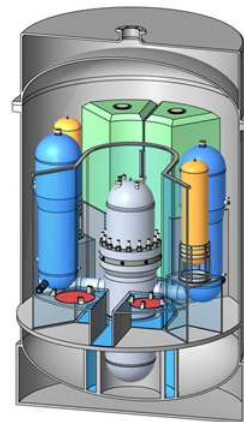


◆ SMART (KAERI)

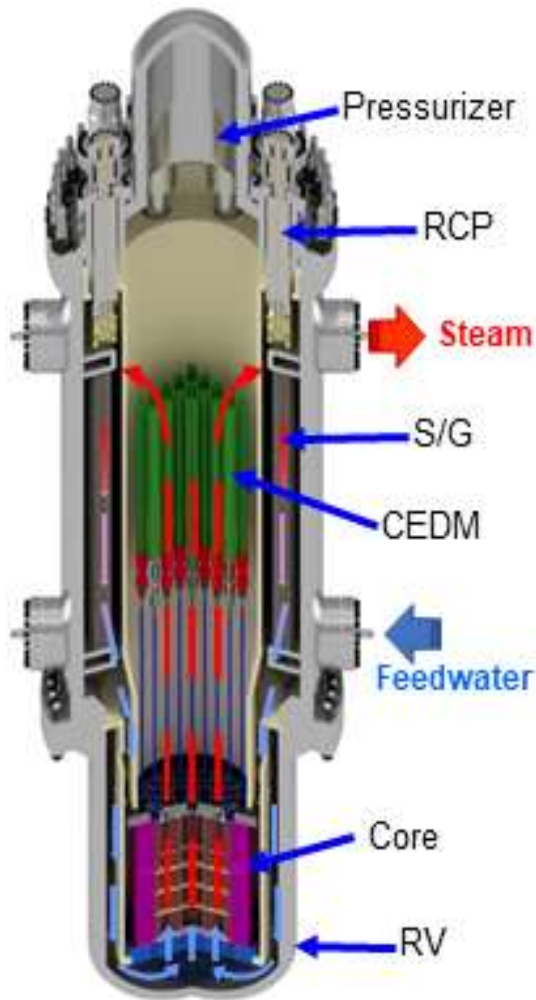
- ✓ 100MWe 일체형 가압경수로형
- ✓ 전력/에너지 공급, 담수화
- ✓ 1997년 개발 착수, 2012년 표준설계인가 취득

◆ BANDI60 (KEPCO-E&C)

- ✓ 60MWe 해양 부유식
- ✓ 분산전원, 지역난방, 해수담수화, 원자력-재생 에너지 하이브리드
- ✓ 2016년 부터 개발 착수



II. SMR 개요



◆ i-SMR

- ✓ KAERI가 기존 SMART 개발 과정에서 획득한 경험 및 지식을 바탕으로 한 ‘혁신형’ SMR 모델
- ✓ 2030년 해외시장 진출을 목표로 개발이 진행 중
- ✓ SMART와 대비하여 경쟁력을 높이기 위한 전략으로 안정성, 경제성, 유연성을 기본 요건으로 채택
- ✓ 2021년부터 개념 설계에 착수하였으며, 2028년 설계인가 취득을 목표
- ✓ 모듈 당 170MWe 출력으로 한 부지 내에 4~8개의 모듈 설치
- ✓ 무붕산 운전, $10^{-9}/\text{yr}$ 이하의 노심손상 빈도, 설계 수명 80년, 모듈 단위 제작/설치 등 발전소 건설 및 운영에 있어서 혁신적인 요소를 도입

Ⅲ. 주요국/IAEA 동향

◆ 미국, 캐나다는 SMR 개발 및 규제체제 준비를 위한 정부차원의 역량을 총동원

- 인허가 규제에 대한 정부지원 프로그램 마련
- SMR의 조기개발, 시장 선점을 위한 범정부 차원의 전략
- 신형 노형에 대한 인허가 절차의 효율화, 가속화 방안 모색

◆ IAEA 중심 SMR 규제현안 논의를 위한 포럼 결성

- 2015년 결성 (대한민국, 미국, 중국, 프랑스, 캐나다, 핀란드, 러시아, 사우디, 남아공, 영국)
- 당초 2년의 활동기한으로 주요 공통현안에 대한 실무그룹 운영
- 2018년 1월 1단계 중간보고서 발간 (모듈방식 활용, SMR 소형화/인허가 체계 관련 권고사항 등)
- 2021년 6월 2단계 실무그룹 결과보고서 발간 (수명기간 규제개입, 다중 모듈 인허가, 피동/고유 안전성 고려사항, 제작용이성, 유지보수)
- 현재 3단계 진행 중이며 2022년 11월 실무그룹 결과보고서 논의를 위한 회의 예정

※ IAEA SMR Regulators' Forum Pilot Project Report

※ IAEA SMR Regulators' Forum Licensing Issues Working Group Report

Ⅲ. 주요국/IAEA 동향

◆ SMR의 혁신성은 개발자 – 규제자 간 잠재적인 규제 갈등 요인

- 개발자 입장 – 획기적으로 증진된 안전성을 고려, 기존의 보수적인 규제기준 완화 및 경우에 따라 면제 필요
- 규제자 입장 – 현행 규제 체제는 수십 년 간의 경험이 축적된 검증된 모델, SMR도 원자력인 만큼 심층 방어 등 기존 안전 원칙 준수 요구

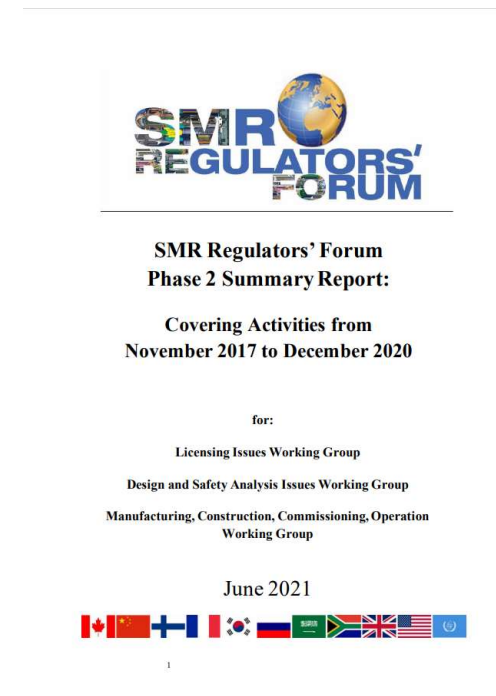
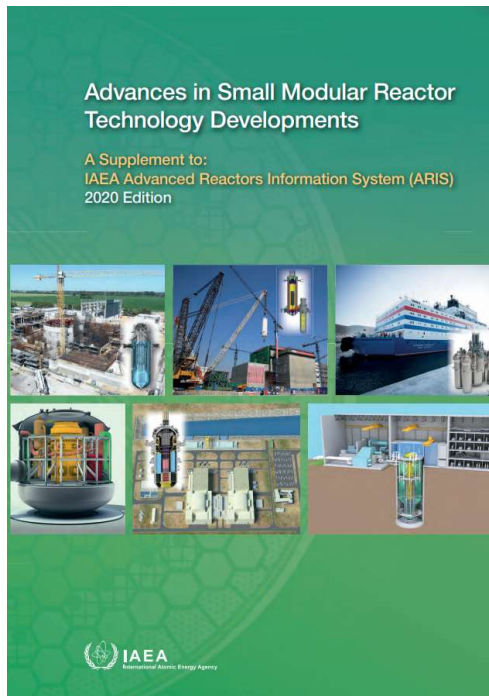
◆ IAEA 규제자 포럼 공통 현안

- ① 차등접근법 (Graded Approach)
- ② 심층 방어 (Defense-in-Depth)
- ③ 비상계획구역 (EPZ: Emergency Planning Zone)

Ⅲ. 주요국/IAEA 동향

◆ IAEA SMR 규제자 포럼 활동결과 보고서

- ✓ Advances in Small Modular Reactor Technology Developments
- ✓ SMR Regulators' Forum Pilot Project Report
- ✓ SMR Regulators' Forum Phase II Report



IV. 공통 규제 현안

◆ 차등 접근법 (Graded Approach)

- (개념) 시설의 특성을 고려, 규제활동/규제인력의 규모를 위험수준에 상응하는 방식으로 차등화하여 시행하는 방안
- 미국에서는 위험정보를 활용한 차등접근법을 기 적용 중이며, 우리나라에서도 위험정보를 고려한 규제방안을 실시 중
- 주어진 위험정보의 정확성, 신뢰성 여부에 따라 차등접근법의 실효성이 좌우
- SMR의 단순화된 시스템, 피동형 냉각계통에 대한 충분한 정보 부족 → How to prove, how to verify?
- (원칙) SMR에 대해서도 기 확립된 (경수로 기반) 규제체제로 부터 출발

IV. 공통 규제 현안

◆ 심층 방어 (Defense-in-Depth)

- (개념) 원자력 발전소의 사고 발생 시 대중 및 환경을 보호하기 위한 다중화된 방어수단
 - ✓ 원전 고유의 구조적 특성을 반영하여 낮은 단계의 방어수단 실패를 그 다음 단계의 방어수단에서 차단할 수 있도록 설계에 반영
- 심층방어 목적 (IAEA INSAG-10)
 - ① 잠재적인 인적 오류 및 기기 실패 보상
 - ② 발전소 및 방벽 자체에 대한 피해를 방지하여 방벽 효과성 유지
 - ③ 방벽들이 충분히 효과적이지 못한 사고시에도 대중과 환경을 보호

IV. 공통 규제 현안

IAEA INSAG-10 Defense in Depth in Nuclear Safety, 1996

레벨	목적	수단
1	비정상운전 및 고장 방지	보수적 설계 고품질 건설 및 운전
2	비정상운전 통제 및 고장 감지	제어, 보호 계통 기타 감시 장비
3	설계기준 내 사고 통제	공학적 안전설비, 사고발생시 대응 절차
4	중대사고 완화, 사고 진행 차단	보완 대책 사고 관리
5	방사성물질 누출에 따른 방사선적 피해 완화	소외 비상대응

- SMR의 다양한 옵션 및 일부 설계 개념(일체형 설계, 격납용기 ×)은 심층방어의 원칙 적용 해당 사항이 아님
- (원칙) IAEA SMR 규제자 포럼 입장: 심층방어 준수
 - ✓ 원자력 안전을 담보하기 위한 기본적인 원칙
 - ✓ SMR에 대해서도 유효, 설계 및 안전 검증에 동일하게 적용

IV. 공통 규제 현안

◆ 비상계획구역 (EPZ: Emergency Planning Zone)

- (개념) 원전 방사능 외부 누출 시를 대비, 주민 보호를 위해 사전에 설정한 구역

시설범주		예방적보호 조치구역	긴급보호조치 계획구역
I	$\geq \sim 1000\text{MWth}$	3 ~ 5km	5 ~ 30km
	100MWth ~ 1000MWth	0.5 ~ 3km	5 ~ 30km
II	10MWth ~ 100MWth	없음	0.5 ~ 5km
	2MWth ~ 10MWth	없음	0.5km
	부지경계 500m 이내에 책임계 질량이 존재하는 경우	없음	0.5 ~ 1km
III	$< \sim 2\text{MWth}$	없음	없음

IAEA TECDOC-953 Method for the Development of Emergency Response
Preparedness for Nuclear or Radiological Accidents

IV. 공통 규제 현안

구 분		범 위	
		예방적보호조치구역	긴급보호조치계획구역
발전용 원자로 및 관계시설		반경 3킬로미터 이상 5킬로미터 이하	반경 20킬로미터 이상 30킬로미터 이하
연구용 원자로 및 관계시설	열출력 2메가와트 이상 10메가와트 미만	없음	반경 약 0.5킬로미터
	열출력 10메가와트 이상 50메가와트 미만	없음	반경 약 1.5킬로미터
	열출력 50메가와트 이상 100메가와트 미만	없음	반경 약 5킬로미터
사용후핵연료 저장·처분· 처리시설	시험 및 연구목적이 아닌 처리시설	개별 시설별로 평가하여 결정	반경 약 5킬로미터
	저장·처분시설	없음	반경 약 1.5킬로미터
	시험 및 연구목적의 처리시설	없음	부지 경계
그 밖의 원자력시설		없음	부지 경계

원자력안전법 20조의2 방사선비상계획구역 기초지역

IV. 공통 규제 현안

- SMR 부지는 육상, 수중, 이동 부유식 등 다양한 옵션이 가능하며 인구밀도가 희박한 오지 여건에도 적합하도록 설계
- (개발자) 노심 방사선원 절대량이 축소, 중대사고 발생을 원천적으로 배제한 설계 개념 → EPZ 축소 가능 주장
- EPZ 설정에는 원자로 출력, 인구 밀집도, 기후조건, 사회적 수용성 등 다양한 변수 고려 필요
- (원칙) SMR의 설계 스펙트럼, 혁신 기술의 다양성, 노형 별 다른 특성 보유 → EPZ 결정은 기존 IAEA에서 제시하고 있는 방법론 적용



V. 생애주기 원자력통제 규제

◆ IAEA SSG-12※에 따른 원전 인허가 절차

IAEA SSG-12 기준단계	원자력통제 규제 활동
① 표준 설계 인증	n/a
① 부지선정 및 평가	예비 설계정보서
② 설계(건설허가)	최종 설계정보서, FSAR※
③ 건설(운영허가)	계량관리규정, 물리적방호 규정 설계정보서, 시설 부록
④ 시운전	반입 전 검사, 최초검사
⑤ 가동	계량관리 국가검사, 물리적방호 검사
⑥ 해체	시설부록 변경
⑦ 규제 해제	해체 시설에 대한 추가접근

V. 생애주기 원자력통제 규제

① 표준 설계 인증

- 현행 원자력안전법 하에서는 원자력통제 관련 규제에 해당하지 않음
- 원전 표준설계인증 시 주요 시설 및 장비에 대해 반영할 경우 향후 안전조치, 물리적방호, 사이버보안과 관련한 반복설계, 건설, 설치 과정 및 운영 단계에서 발생할 수 있는 시행착오 최소화
- 표준설계인증 단계에서부터 SSBD(Safeguards and Security by Design)의 선제적 적용이 가능하도록 사업자 인식 개선 및 법령 개정 필요

V. 생애주기 원자력통제 규제

① 부지선정 및 평가

- 부지 특성에 따른 물리적방호 요건 검토 필요
 - 현재 법령 상 명시되어 있지 않으나 향후 설계, 시공 과정에서 발생할 수 있는 위험성을 부지 선정 단계에서 사전식별 필요
 - ※ 원자력시설의 물리적방호 전주기 인허가체계수립연구(KINAC/TR-029/2015)

② 설계 (건설허가 포함)

- 설계 과정에서 부지 및 시스템 특성 반영이 요구되는 부분에 대해서는 물리적 방호 측면에서 사전 검토가 필요하며 향후 건설, 설치 및 운영 단계에서 발생할 수 있는 시행착오 최소화
- 설계 단계에서 SSBD(Safeguards and Security by Design)의 선제적 적용이 가능하도록 사업자 인식 개선 및 법령 개정 추진

V. 생애주기 원자력통제 규제

③ 건설 (운영허가 포함) ④ 시운전

- 법령 상 명시되어 있지 않으나 건설 진행 과정에서 원자력통제 규제 측면에서의 확인 및 검증 활동 강화 필요
 - 핵물질이동 경로 및 주요 전략지점에 대한 설계 구현 확인
 - 물리적 방호 구조물, 사이버 보안장비 등 향후 재시공이나 변경이 어려운 부분에 대한 설계 구현 확인
- 건설 단계에서 요구되는 원자력통제 규제 활동에 대한 법제화
 - 검사/심사 대상, 범위 설정
 - 검사/심사 결과 판정에 필요한 세부 기술기준 개발

건설과정 중 원자력통제 사용 전 검사 시기 (안)

1. 핵물질 이동경로, 전략지점 구조물 건설 공정율 50%
2. 핵심구역 구조물 건설 공정율 50%
3. 감시설비, 물리적방호 설비 설치 전, 설치 후
4. 핵연료 시설 내 반입 전, 반입 후
5. 핵연료 장전 및 시운전시험

V. 생애주기 원자력통제 규제

⑤ 가동

- 장기간의 이행경험 및 수차례의 법령 개정을 통해 계량관리 및 물리적방호 국가검사, IAEA 사찰 이행 절차 체계화

⑥ 해체

- 원전 해체 인허가 과정은 원자력 안전에 집중되어 있으며, 원자력통제 측면의 규제활동은 법령 상에 명시되어 있지 않음
 - IAEA 안전조치 및 원자력통제 규제 관점에서 원전해체 과정에 대한 규제 절차 확립 필요

(영구정지 - 핵물질, 핵심기기 반출 - 시설 기능상실 확인 - 안전조치 대상 시설 해제)

V. 생애주기 원자력통제 규제

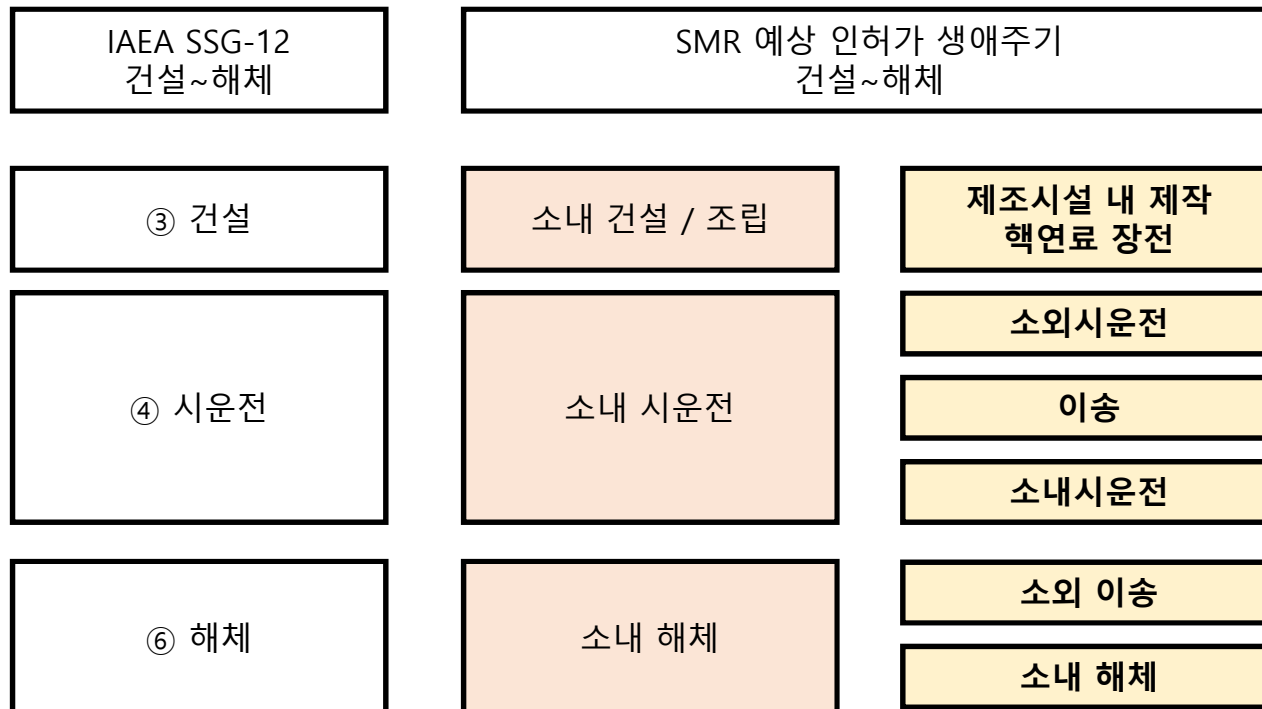
⑦ 규제 해제 (이후)

- 해체 부지에서의 미신고 핵활동 여부 확인에 필요한 IAEA 현장 접근 및 관련정보의 지속적인 제공
- 전면안전조치 협정 추가의정서에 의거 국가검사 차원에서 기술지원 제공은 지속적으로 필요하며, 추가적인 법제화의 필요성은 높지 않음

VI. SMR 원자력통제 규제 현안 및 대응방안

◆ 경수로 대비 추가가 필요한 SMR 규제 개입 단계

- 제조시설 내 주요 모듈 제작, 조립
- 제조시설 내 주요 모듈/부품 시험 및 시운전
- 제조시설 내 핵연료 장전 (Option)
- 제조시설에서 SMR 부지로 모듈 이송, 통합 시험 및 시운전
- 모듈 단위 소외 이송 후 해체



VI. SMR 원자력통제 규제 현안 및 대응방안

◆ 안전조치

검토 대상	검토 내용
○ 구조물 설계	<ul style="list-style-type: none">▷ 물질수지구역 영역▷ 핵물질 이동 및 전용가능 경로▷ 사용후핵연료 저장▷ 감시 장비 종류 및 위치 (방사선 계측기, 감시 카메라)▷ 봉인설치 위치
○ 운전 주기	<ul style="list-style-type: none">▷ 핵물질 계량관리 정기검사, 중간검사빈도▷ 사찰 장비 / 보조수단
○ 핵물질 형상 및 농축도	<ul style="list-style-type: none">▷ 비파괴 검사 장비
○ 모듈 제조시설에서 핵연료 장전	<ul style="list-style-type: none">▷ 제조시설 물질수지구역 및 안전조치 대상 시설 지정 여부

VI. SMR 원자력통제 규제 현안 및 대응방안

◆ 물리적방호

검토 대상	검토 내용
○ 구조물 설계	▷ 핵심구역 및 설계기준 위협 설정 ▷ 물리적 방벽 강도 (외부 폭발물 등)
○ 원자로 설치 위치	▷ 지하, 수중, 해상 등 원자로설치 위치에 따른 물리적방호 방안
○ 부지 내 인력 감축	▷ 보안, 대응 인력 감축에 따른 사보타주 대응
○ 노심 방사선 재고량	▷ 방사선원 재고량 감소에 따른 방사선적 영향 (차등접근법 적용 검토)

VI. SMR 원자력통제 규제 현안 및 대응방안

◆ 사이버 보안

검토 대상	검토 내용
○ 모듈 간 자원공유	▷ 주제어실 및 ssc 공유에 따른 사이버 보안 위험성 평가
○ 일체형 설계	▷ 모듈 내부 압력/온도/유량 계측기 보정 방안
○ 공간 최적화 설계	▷ I&C 장비 수량 및 복잡성 증대 영향 평가 ▷ 계측장비 유지 보수 방안

VI. SMR 원자력통제 규제 현안 및 대응방안

◆ 원자력통제 규제체제 개발 Task

Task No.	목표	법제화 필요성	규제기술 개발 필요성	협력대상
I	표준설계, 설계단계 SSBD 도입	○	○	IAEA, 개발자
II	핵물질 계량관리, 물리적방호 사용 전 검사 범위 확대 및 절차 확립	○	-	원전시설
III	건설 과정 중 검사에 필요한 원자력통제 기술기준 확립	○	○	원전시설
IV	원전 해체 인허가 원자력통제 규제 확립	○	○	원전시설
V	SMR 설계 단계 개발자-규제자 간 정보 교류 및 협력 체계구축	-	-	개발자
VI	SMR 설계 진척/완성도에 따른 규제영향 시뮬레이션	-	○	개발자

VII. 맺음말

◆ 혁신형 SMR 사업성공의 관건은 개발자-규제자 간 협업

- iSMR 최상위 규제 원칙 수립, 현안에 대한 인식 공유
- 개발자 - 규제자 간 공동참여 수준의 설계정보 공유
- 설계/규제 현안 해결을 위한 상설협의 채널 운영

◆ 미래 세계시장 선점을 위한 국가적인 역량을 총동원

- 개발완료 시점이 우리 iSMR의 시장 경쟁력을 좌우
- iSMR 인허가에 필요한 법적, 제도적 토대의 조속한 구축
- IAEA 및 SMR 개발 선도국과의 협력 필수

◆ 선진화 원자력통제 규제체제 확립의 기회

- 지속적인 환경 변화에 대응할 수 있는 유연성 필요
- 획득된 규제 경험/지식을 국내외 SMR 사업 발굴/지원에 활용