

제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍 선진원자로 안전규제의 현재와 미래

일시 2026년 6월 26일(금), 10:00~17:30

장소 서울대학교 39동 B103호 BK다목적홀

주최 서울대학교 원자력미래기술정책연구소 원자력정책센터,
서울대학교 공과대학 원자핵공학과, 비즈(주)

제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

신형원자로 안전규제 동향과 향후 추진방향

글로벌원자력전략연구소

김 효 정

e-mail : kimhhoj@gmail.com



발표 순서

- 1 개요
- 2 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향
- 3 IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향
- 4 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향
- 5 Q & A

1. 개요

신형원자로 (SMR) 개발 추이

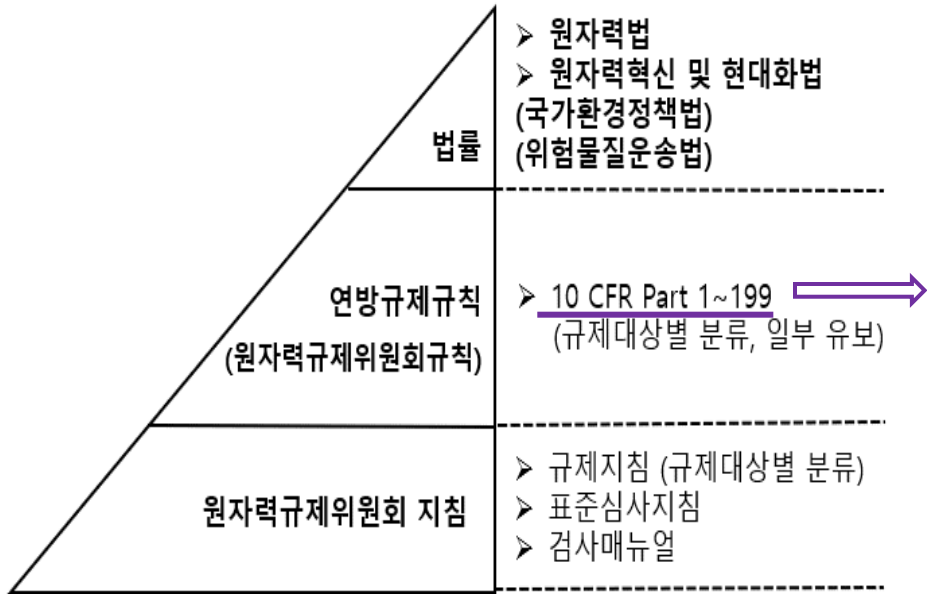
원자로규모	대형	➔	소형
원자로설치	개별호기형	➔	다수모듈형
계통배치	루프형	➔	일체형
냉각재종류 (원자로노형)	수냉각(경수형)	➔	다양한 매체(비경수형)
안전계통	능동형(전원필요)	➔	피동형(전원불필요)
원자로용도	발전용	➔	다양한 활용

- 대형 : 700MWe 이상
- 중형 : 300~700MWe
- 소형 : 300MWe 이하
 <1,000MWth 이하>
- 초소형 : 10MWe 이하
- 다수호기 발전소(부지)
- 다수모듈 발전소(부지)
- 주요 계통의 원자로용기
- 원자로냉각재계통
- 증기발생기, 가압기
- 헬륨, 소듐, 용융염, 등
- 노심냉각, 보조급수, 격납용기 열제거, 등
- 해상(선박용), 수소생산용, 공정열 활용

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

미국 원자력 안전규제 체계

미국의 원자력 안전규제 현행 법령체계



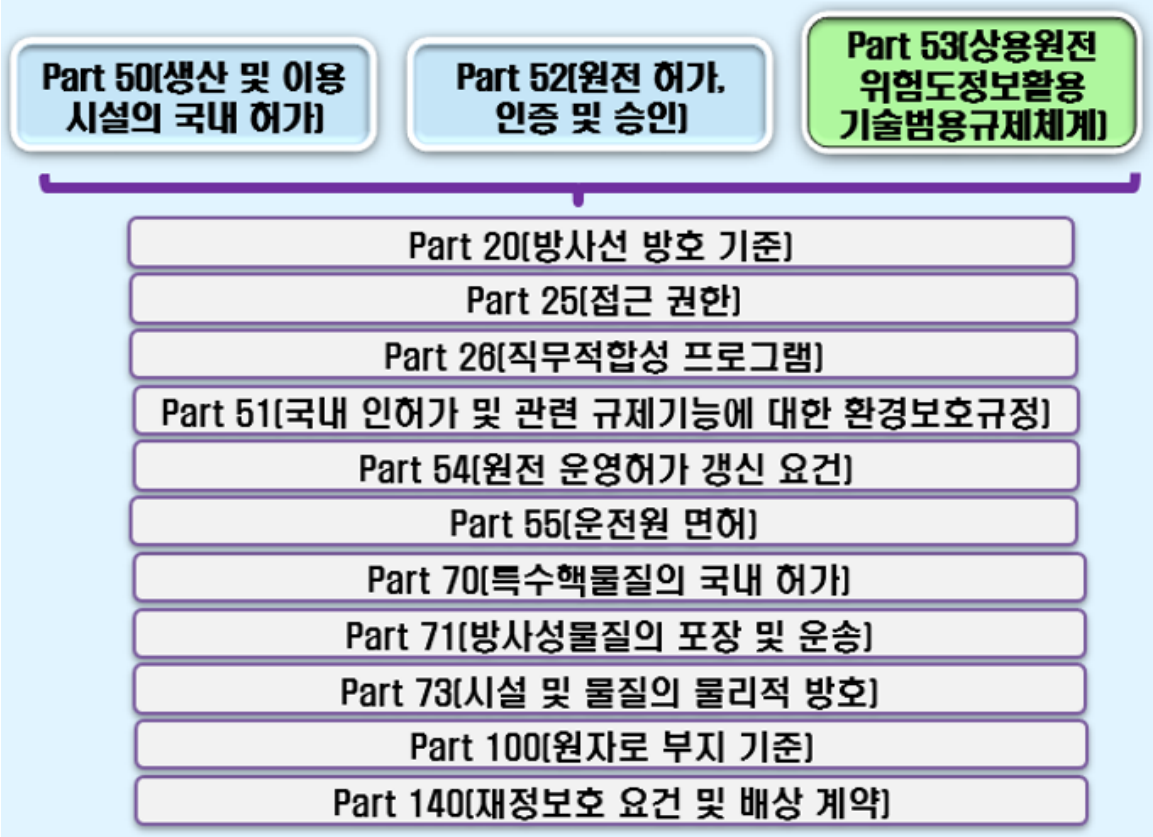
※ Atomic Energy Act of 1954
 SEC. 161 GENERAL PROVISIONS

In the performance of its functions the Commission is authorized to establish by rule, regulation, or order, such standards and instructions to govern the possession and use of special nuclear material, source material, and byproduct material as the Commission may deem necessary or desirable to promote the common defense and security or to protect health or to minimize danger to life or property.

원자력발전소 인허가체계 및 안전요건 관련 10CFR

인허가체계 및 규제요건

인허가 관련 규제요건 인용



- Part 50 : 1956년 제정
 ✓ 원자력 생산 및 이용시설
 ✓ 건설허가-운영허가

- Part 52 : 1992년 제정
 ✓ 원자력발전소 조기부지허가, 표준설계인증, 건설/운영 통합허가, 표준설계승인 및 원자로제작허가

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

미국의 신형원자로 규제정책 동향

Policy Statement on the Regulation of **Advanced Reactors**
[1986. 8 → 1994. 7 → 2008. 10]



NRC Vision and Strategy : Safely Achieving Effective and Efficient **Non-Light Water Reactor Mission Readiness** (2016년 12월)



Nuclear Energy Innovation and Modernization Act (NEIMA)
(2019년 1월)



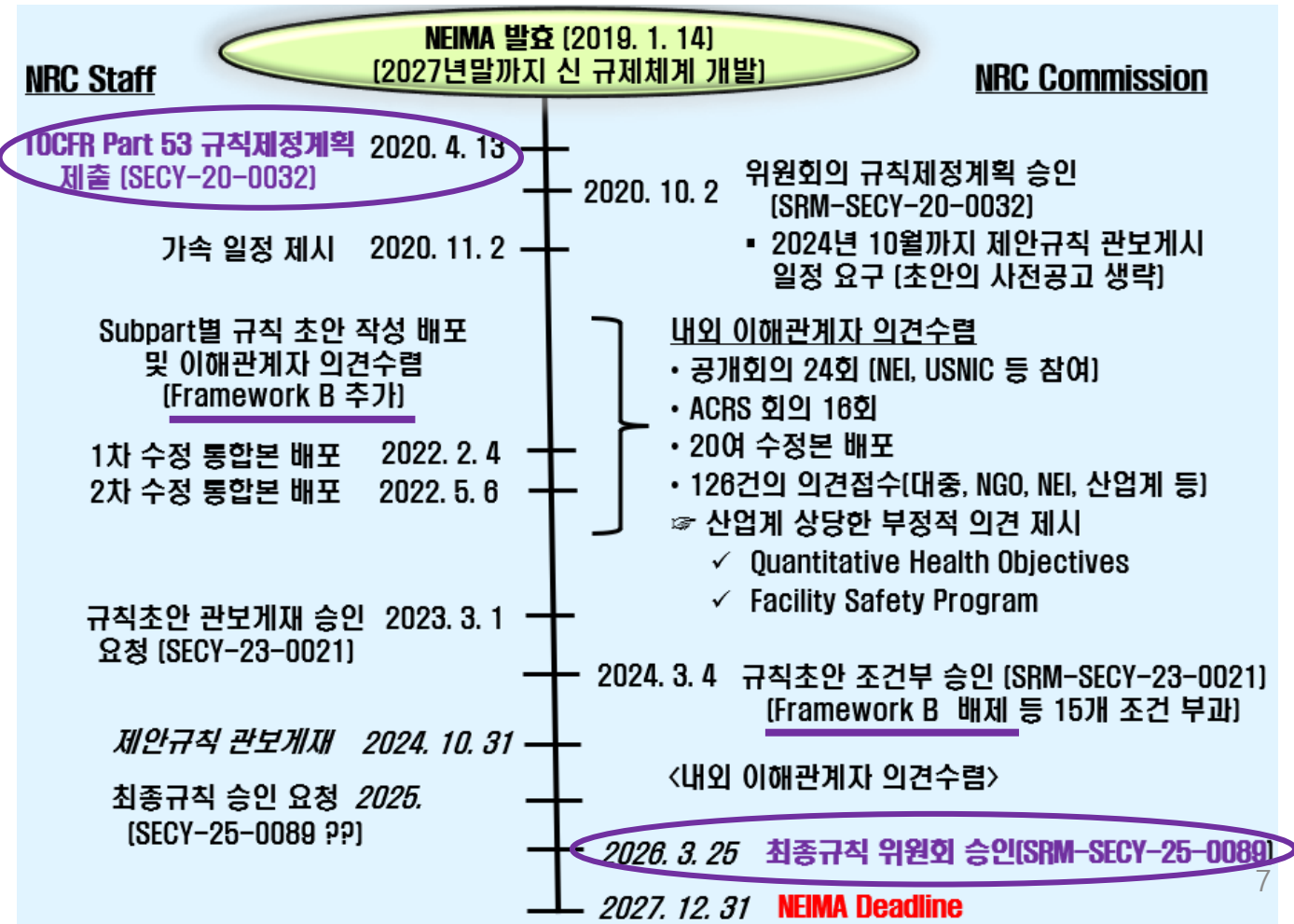
10CFR Part 53 – Risk Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for **commercial Nuclear Plants**

- 신형원자로 설계의 바람직한 특성에 관한 위원회의 견해
- Pre-application Review를 통한 가능한 조기 접촉 유지
- ※ 2007년 규칙제정 공고/보류 (비경수로 위험도정보활용 · 성능기반 규제체계)
 - ✓ 허가기반사건 선정, SSC 분류, 심층방어의 제공, 단일고장기준의 대체 등
- 비경수로의 전략적 목적과 목표, 전략, 기여활동 수립
 - ✓ 기술범용 정책현안 도출/해결, 유연한 규제심사 프로세스, 새로운 규제체계 수립(리스크정보활용 성능기반) 등
- 이행활동계획(IAP) 수립 : 단기(~5년), 중기(~10년), 장기(10년 이후)
- ※ DOE 인허가 현대화 프로젝트(2016. 4) : NRC 참여
- Sec. 103 Advanced Nuclear Reactor Program (a) Licensing
 - (1) 단계적 인허가
 - (2) 위험도정보활용 인허가
 - (3) 연구용/시험용 원자로 인허가
 - (4) 기술범용 규제체계 (2027.12. 31.까지)
 - (5) 훈련 및 기술역량
- ☞ 'NRC 비전과 전략' 법적 기반 제공
- 기존 규제의 해당요건에 대한 면제요청을 줄이고, 신형로(특히 비경수로) 기술에 대한 새로운 규제요건 수립
 - ✓ 신형로의 인허가에 규제 안정성, 예측성, 명확성 증진
- ※ 기술범용 위험도정보활용 · 성능기반 방법론의 접목

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

10CFR Part 53 – Risk Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Commercial Nuclear Plants [상용원전의 위험도정보활용 기술범용 규제체계]

- 원자력 혁신 및 현대화법 근거 제정
 - 신형로 (Advanced Reactors) : 이 법의 제정 시 건설 중인 상용원자로에 비하여 상당히 개선된 핵분열 또는 핵융합 원자로로서 원형로를 포함
 - ✓ 여기서 개선에는 추가적인 고유 안전특성, 상당히 낮은 수준의 전기 비용, 폐기물 발생 감소, 핵연료 이용성 증대, 향상된 신뢰성, 증가된 핵확산 저항성, 열효율 증가, 또는 전기 및 비전력 응용에 통합할 수 있는 능력을 포함
 - 기술범용 규제체계 : 다양한 원자로 기술에 적용하기 위하여 유연하고 실행가능한 평가방법을 사용하여 개발된 규제체계로서, 적절한 경우, 위험도정보 및 성능기반 기술과 기타 도구 및 방법의 사용을 포함
- 초소형원자로 : 10CFR Part 57(Licensing Requirements for Microreactors and Other Reactors with Comparable Risk Profiles) : 제안규칙 (2026. 5.1)
- Fusion machines : 10CFR Part 30(Rules of General Applicability to Domestic Licensing of Byproduct Material) 개정 제안규칙 (2026. 5. 18)



2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

10CFR Part 53 접근방식 및 구성

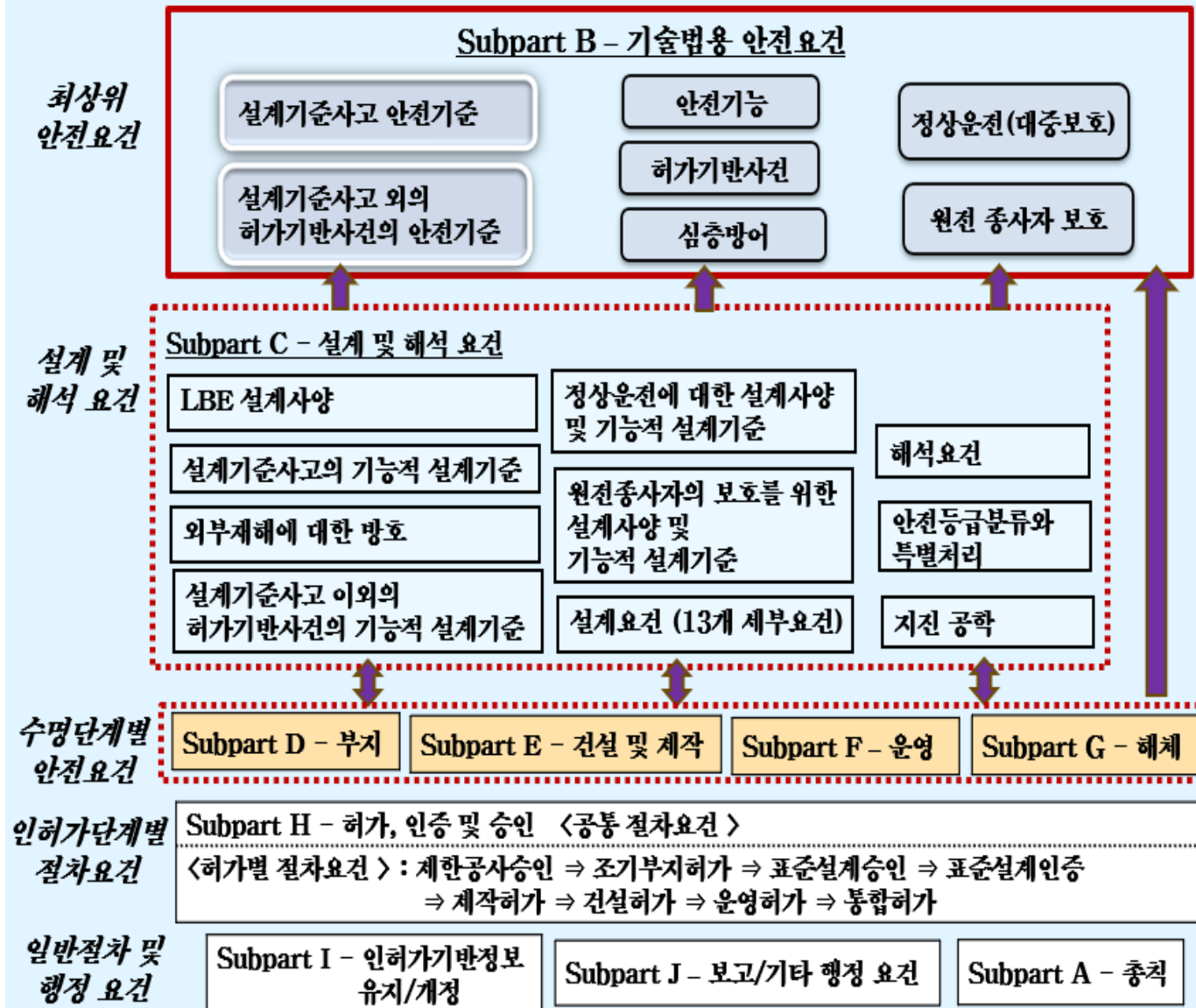
접근방식

- **유연성과 혁신성 (Flexibility & Innovation)**
 - ✓ 인허가 경험, 새로운 위험도 시사점, 성능 기반기준의 강조
 - ✓ 잠재적 설계의 광범위한 다양성을 적절히 고려
- **구조적 명료화 (Structural Clarity)**
 - ✓ 교차 참조를 피하고 가능한 독립적 요건 설정
- **기반적 안전기준의 일관성 (Consistency in Baseline Safety Standards)**
 - ✓ 안전, 보안 그리고 효과적인 규제감독의 보장을 위하여 모든 원자로시설에 적용해야 하는 기반적 요건의 수용

Subpart	조항
53.000 Purpose	1
Subpart A - General Provisions	13
Subpart B - Technology-Inclusive Safety Requirements	7
Subpart C - Design and Analysis Requirements	10
Subpart D - Siting Requirements	5
Subpart E - Construction and Manufacturing Requirements	4
Subpart F - Requirements for Operation	34
Subpart G - Decommissioning Requirements	11
Subpart H - Licenses, Certifications and Approvals	103
Subpart I - Maintaining and Revising Licensing Basis Information	20
Subpart J - Reporting and Other Administrative Requirements	14
Subpart M - Enforcement	2
소계 (11 Subparts)	234

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

10CFR Part 53 최종규칙 구성 체계



- 발전소 차원의 안전수준을 확보하기 위한 최상위수준의 기술범용 안전요건 제시
 - ✓ 심층방어 및 안전기능 포함
 - ✓ 안전기준설정 : DBA, DBA 외의 LBE
- 이들 안전요건 준수를 입증하기 위한 설계 및 해석 요건 규정
 - ✓ 설계사양과 프로그램적 관리에 대한 성능기반의 설계요건과 성능기준 충족을 위한 해석요건 규정
- 이들 안전요건 준수를 입증하기 위한 원전 수명기간 요건 규정
 - ✓ 원전 수명기간 단계별로 4개의 범주로 구분하여 특정 안전요건 규정
- 8개의 인허가 단계별 절차요건 규정
 - 신청서의 내용, 인허가 신청 및 발급 절차, 심사표준, 인허가 기간 및 갱신 절차, 인허가의 상호 연계 등

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart A – 총칙 : Part 53에 특정한 정의

- 상업용 원자력발전소(Commercial nuclear plant) : 전력생산 또는 기타 상업적 목적에 사용 (열생산, 수소생산)
- 소형모듈원자로(Small modular reactor) : 최대 1,000MW 열에너지 생산하는 2개 이상의 본질적으로 동일한 원자로(모듈)로 구성된 원전
- 설계사양(Design features) : 정상운전 중 대중 개인의 총유효선량당량(TEDE)을 제한하고 사건경위의 결말을 예방하거나 완화하는 데 기여하는 능동 및 피동 SSC 그리고 이들 SSC의 고유한 특성
- 특별처리(Special treatment) : 상용등급제품의 구매, 설치, 유지보수를 초과하는 품질보증, 설계기준, 프로그램적 관리 요건
- 프로그램적 관리(Programmatic controls) : 발전소 프로그램 실행, SSC 운영, 모니터링 및 유지관리에 있어 인적 행위를 규율하는 행정절차
- SSC 등급분류
 - ✓ 안전 관련(safety-related, SR)
 - ✓ 비안전 관련이나 안전에 중요한(non-safety-related but safety-significant, NSRSS)
 - ✓ 안전에 중요하지 않은 (NSS)
- 허가기반사건(Licensing-basis events; LBEs) :
 - ✓ 예상사건경위(anticipated event sequences)
 - ✓ 저빈도사건경위(unlikely event sequences),
 - ✓ 희귀사건경위(very unlikely event sequences) 및
 - ✓ 설계기준사고(design-basis accidents; DBAs) 포함
- 성능척도(performance metrics) :
 - ✓ 안전기준(safety criteria) : 발전소차원의 성능척도
 - ✓ 기능적 설계기준(functional design criteria) : 각 SSC의 성능척도
- 기능적 설계기준(Functional design criteria) : SSC의 성능에 대한 척도로서,
 - ✓ SR SSC에 대하여 § 53.210(DBA 안전기준)의 충족을 입증하는데 필요한 SSC 성능척도
 - ✓ NSRSS SSC에 대하여 § 53.220(DBA 외의 LBE 안전기준)의 충족을 입증하는데 필요한 SSC 성능척도

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart B - 기술범용 안전요건

설계기준사고 안전기준 (§ 53.210) : 제한구역경계/저인구지역 외곽 개인의 선량제한치 (250mSv TEDE)를 입증하는 설계사양 및 프로그램적 관리 제공

설계기준사고 외의 허가기반사건의 안전기준 (§ 53.220) : SSC, 종사자, 프로그램이 사건 대응 역량과 신뢰도 및 심층방어 방안의 제공을 입증하는 설계사양 및 프로그램적 관리 제공

사건 위험도분석이 위험도성능목표 충족과 적절한 안전수준을 제공하는 포괄적 위험도 척도의 포함을 입증하는 설계사양 및 프로그램적 관리 제공

허가기반사건 (§ 53.240) : (a) LBE 식별과 해석으로 안전요건 충족 입증

LBE는 예상되는 사건경위부터 가능성이 매우 낮은 사건경위의 범위에서 식별하고, SSC의 오작동, 인적 오류, 시설재해 및 외부재해의 영향 등 이들의 위험도 정보를 활용한 조합을 총체적으로 포함

해석은 (1) 하나 이상의 설계기준사고를 포함, (2) 안전기준의 충족을 위하여 필요한 설계사양과 프로그램적 관리의 적절성을 확인, (3) SSC, 종사자 및 프로그램에 대한 관련 기능적 요건을 설정

- 설계기준사고의 선량제한치 25rem은 기존 경수로의 전통적인 결정론적 접근 방식과 일관성 유지
- 포괄적 위험도 척도(예, 개인 조기사망위험도 및 후기 암사망위험도)와 이와 연관되는 위험도 성능목표(예, 노심손상빈도 및 조건부 격납건물손상확률)의 설정과 입증
 - ※ Part 53 규칙초안의 위험도 척도 : 개인의 조기사망위험도(5×10^{-7} /년), 잠재적 암사망위험도(2×10^{-6} /년)으로 정량적 수치로 규정
- 허가기반사건의 식별방법과 해석의 범위 및 목적을 규정
 - ✓ 초기기인사고(PIE) 개념에서 사건경위(ES)로 전환
 - ✓ LBE 사건분류 : 예상사건경위, 저빈도사건경위, 희귀사건경위 및 설계기준사고

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart B - 기술범용 안전요건 - 계속 -

안전기능 (§ 53.230) : 기본안전기능 (시설로부터 방사성물질 유출 제한) 유지 및 필요한 추가 안전기능 (반응도 제어, 열 생성, 열 제거 및 **화학적 상호작용**) 도출
안전기능은 안전기준의 충족에 필요하며, 설계사양, 인적조치 및 프로그램적 관리에 의하여 안전기능 충족

심층방어 (§ 53.250) : 안전기준 충족의 보장을 위해 해석 불확실성을 보상하는 적절한 심층방어 보장 방안 강구
불확실성에는 지식과 모델링 역량, 방벽 능력, SSC와 종사자 신뢰성 및 성능, 프로그램적 관리의 효과성 관련 불확실성 포함

해석은 DBA 외의 다양한 LBE를 다루기 위해 단일 공학적 설계사양, 인적 조치 또는 프로그램적 관리 의존 불가

정상운전 (§ 53.260) : 비제한구역 대중의 피폭선량과 선량률 관리로 Part 20 요건 충족

원전 종사자 보호 (§ 53.270) : 작업종사자 피폭선량 관리로 Part 20 요건 충족

- 방사성물질의 유출 제한을 기본안전기능으로 규정,
⇒ 잠재적 소외결말(개인의 피폭선량)을 기본성능목표로 규정
- 방사성물질 유출 제한에 필요한 추가안전기능(반응도 제어, 열 생성/제거, **화학적 상호작용** 등) 설정에 유연성 제공
- 물리적 다중방벽(핵연료, 피복재, RCS, 격납건물)과 다단계 방호(사고예방/완화 등)의 규정적 요건과는 달리
 - ✓ 성능기반 요건을 제시하고,
 - ✓ 불확실성의 근원을 구체적으로 규정
- 정상운전에서 대중의 피폭선량과 작업종사자의 피폭선량 관리는 Part 20 요건 충족으로,
 - ✓ 기존의 접근방식과 일관성 유지

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart C - 설계 및 해석 요건

LBE 설계사양 (§ 53.400) : 안전기준을 충족하도록 인적 조치 및 프로그램적 관리와 연계하여 설계사양 제공

설계사양은 LBE 동안 안전기능 충족을 보장

설계기준사고에 대한 기능적 설계기준 (§ 53.410) : 안전기준 충족의 입증에서 안전관련(SR)으로 분류된 각 설계사양의 기능적 설계기준 정의

SR SSC의 설계와 관련된 특별처리는 기능적 설계기준 및 안전기준 충족과 DBA 해석과 일관성 유지에 필요한 SSC의 신뢰성 및 능력을 달성하고 유지하기 위하여 도출되고 이행되는 인적 조치 및 프로그램적 관리를 고려하여 도출

외부재해에 대한 방호 (§ 53.415) : 자연 현상 및 인위적 재해의 영향으로부터 SR SSC 보호

설계기준 외부재해 수준까지 사건의 심각도를 고려하여 안전기능 수행 능력의 상실 예방

설계기준사고 외의 허가기반사건에 대한 기능적 설계기준 (§ 53.420) : 안전기준 충족과 LBE 평가기준 입증에서 SR 또는 NSRSS로 분류된 각 설계사양의 기능적 설계기준 정의

SR 및 NSRSS SSC의 설계와 관련된 특별처리는 안전기준 (§ 53.220)과 LBE 평가기준 충족에 필요한 SSC의 신뢰성 및 능력의 달성 및 유지를 위해 도출되고 이행되는 인적 조치 및 프로그램적 관리를 고려하여 도출

- 안전기준을 충족하도록 인적 조치 및 프로그램적 관리와 연계하여 설계사양 제공
 - LBE 동안 안전기능을 충족
- DBA 안전기준 충족을 위한 SR SSC 기능적 설계기준(성능 척도)를 정의
 - 기존 일반설계기준(Part 50 Appen. A) 기반의 기본설계기준(PDC)과 대비
- 특별처리를 기존의 규정적 방식(품질보증, 설계기준, 프로그램적 관리 요건)과는 달리
 - 기술범용 성능기반 방식 적용
- 외부재해(자연 현상 및 인위적 재해) 영향에서 SR SSC 보호
 - 기존과 유사
- DBA 외의 LBE 안전기준 및 평가기준 충족을 위한 SR 또는 NSRSS 기능적 설계기준(성능 척도)를 정의

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart C - 설계 및 해석 요건 - 계속 -

정상운전에 대한 설계사양 및 기능적 설계기준 (§53.425) :

방사선방호프로그램 지원을 위한 설계사양 제공
방사선방호 준수에 필요한 각 설계사양의 기능적 설계기준 정의
설계사양과 프로그램적 관리가 Part 20에 따른 폐기물관리 입증을 위해 설계사양에 대한 대중의 최대 피폭선량 설계목표를 포함하는 기능적 설계기준 정의

- 정상운전 동안 대중의 그리고 원전종사자의 보호에 대한 Part 20을 충족하는 설계사양의 제공 및 기능적 설계기준 정의
- 기존과 유사

원전종사자의 보호를 위한 설계사양 및 기능적 설계기준 (§53.430) :

원전종사자 보호요건을 충족하는 설계사양 제공
각 설계사양에 대하여 기능적 설계기준 정의

설계요건 (§ 53.440) : 13개 세부요건 규정



2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart C - 설계 및 해석 요건 - 계속 -

설계요건 (§53.440) : (a) 해석, 시험프로그램, 프로토타입 테스트, 운영경험 또는 그 조합은 각 설계사양의 기능적 설계기준 충족을 입증하고 SSC의 설계 프로세스에 경험 반영 행정절차 포함

(b) **SR로 분류된 설계사양은 합의 코드 및 표준을 사용하여 설계**

(c) SR 및 NSRSS SSC 재료는 발전소 수명기간 서비스 조건에 적합

(d) 경년열화, 피로, 화학적 상호작용, 방사선 영향 등 환경 요인과 기능저하 메커니즘을 평가하고 건전성평가프로그램의 설계와 개발에 반영

(e) SR 및 NSRSS SSC의 화재 및 폭발에 관한 4개의 요건

(f) **설계 과정에서 안전과 보안 함께 고려**

(g) 원자로계통과 폐기물 저장소의 미임계 조건 달성 및 유지

(h) 원자로 핵연료 및 폐기물 저장소의 장기내각 제공 능력

(i) 설계, 해석, 인력배치 및 프로그램적 통제는 원자로 및 폐기물 저장소의 수, 방사성물질 저장소 및 관련 운영상의 배치, 공통 계통, 계통 인터페이스 및 계통 상호작용 고려

(j) <유보, **대형상업용항공기 충돌 삭제**>

(k) 허가된 물질의 **화학적 재해로 인한 보건영향**으로 대중에게 영구적인 장애의 위험도가 낮음을 해석에서 입증할 수 있도록 설계사양과 기능적 설계기준, 프로그램적 관리 등을 정의

(l) 시설과 환경의 오염을 가능한 한 최소화하고, 최종 해체를 용이하게 하고, 그리고 방사성폐기물 생성을 가능한 한 최소화하기 위한 방안 마련

(m) 임계 모니터링 기능의 포함과 대체 임계사고 충족요건, 그리고 사용후핵연료 운송패키지 또는 사용후핵연료 저장 캐스크 관련 요건

(n) 발전소 안전 또는 비상대응 기능의 지속적인 가용성을 위해, 최신의 인적 요소 원칙 반영, 발전소 상태 모니터링 및 사건 대응 능력, 운영 개념의 설계 및 개발에 정보 제공, 기능요건 분석 및 기능 할당 요건

- 기능적 설계기준의 충족을 보장하는 다양한 설계요건 규정
 - ✓ 대개 기존의 요건과 유사하며,
 - ✓ 기술범용 성능기반으로 규정
- NRC가 허용하는 일반적으로 수용되는 합의 규격 및 표준의 사용
- 설계 과정에서 안전과 보안을 함께 고려하고,
 - ✓ 보안 문제는 설계 및 공학적 보안 설비를 통해 효과적으로 해결
- 허가된 물질의 화학적 재해로 인한 건강 영향에 따른 위험도를 해석에서 입증

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart C - 설계 및 해석 요건 - 계속 -

해석요건 (§ 53.450) :

- (a) **PRA, SRE 또는 조합에 관한 요건** : 잠재적 고장, 내부 및 외부 재해에 대한 취약성 식별, 안전기능에 문제를 제기할 수 있는 사건경위 기여 기타 요소 등 식별, DBA 외의 LBE 안전기준 충족 입증
- (b) **PRA, SRE 또는 조합의 특정 용도** : LBE 선정에 정보제공, SSC 등급분류, 심층방어 방안 적절성 평가, 발전소 운전상태 식별 및 평가, 가용성 제어 포함 발전소 운영방안 수립
- (c) **해석의 유지관리 및 업그레이드(PRA 등)** : NRC 인정 또는 일반적으로 허용할 수 있는 방법, 표준 및 관례에 부합, **최소 5년 마다 유지 관리**
- (d) **해석코드의 적합성** : 해석코드(열수력, 노물리, 핵연료기동, 메카니스트릭 선원항 코드 포함) 사용 범위
- (e) **설계기준사고 외의 허가기반사건 해석** : PRA 등의 시사점 활용 LBE 식별, 각 사건 또는 특정 LBE 범주의 평가기준 정의, **초기부터 최종상태까지의 사건경위**, 심층방어 입증
- (f) **설계기준사고 해석** : **초기부터 최종상태까지 사건경위**, 결정론적 방법, SR SSC와 인적조치만 안전기능 수행에 가용, 안전기준 충족의 보수적 입증
- (g) **기타 필수 해석** : 화재방호, 대중에 대한 선량

- DBA와 DBA 외의 LBE 해석으로 구분하고, 초기사건 기반에서 사건경위 기반으로 해석 수행
 - ✓ DBA : 결정론적 방법으로 SR SSC와 인적 조치만 고려 보수적으로 안전기준 충족
 - ✓ DBA 외의 LBE : 각 사건의 평가기준을 정의하고, 확률론적 위험도평가로 안전기준 충족
 - ✓ 각 사건의 평가기준은 방사성핵종의 제한, 방벽 건전성으로 빈도와 결말을 고려
- PRA 이외에 위험도의 체계적 평가(SRE)를 추가로 허용

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Subpart C - 설계 및 해석 요건 - 계속 -

안전등급분류와 특별처리 (§ 53.460) :

- (a) SSC의 안전중요도에 따라 분류 : SR, NSRSS, NSS 포함
- (b) SR 및 NSRSS SSC : 안전기능 수행조건 식별과 특별처리(품질보증) 설정
- (c) SR 및 NSRSS SSC에 대한 특별처리는 안전기준 및 해당 평가기준을 충족함을 입증하기 위하여 LBE 예방/완화에 필요한 인적 조치, 가상의 환경조건에서 신뢰성있게 인적 조치 수행 필요성, Subpart F에 따라 설정한 프로그램의 역할을 고려

지진 공학 (§ 53.480) :

- (a) SR 또는 NSRSS SSC는 안전기능의 상실 없이 SSC의 안전중요도에 상응하게 지진 영향 수용
- (b) 용어 정의
- (c) 설계 고려
- (d) 표면 변형
- (e) 지진으로 유발되는 홍수와 파도 및 기타 설계 조건
- (f) 분석
- (g) 설계기준, 인적 행위 및 프로그램 제어

▪ SSC의 안전중요도에 따라 분류 : SR, NSRSS, NSS를 포함

※ SR : Safety-Related

※ NSRSS : Non-Safety-Related but Safety-Significant

※ NSS : Non-Safety-Significant

▪ SR 또는 NSRSS SSC의 안전기능 수행조건 식별과 특별처리(품질보증) 설정

✓ 특별처리의 고려사항으로 인적 조치와 이들의 필요성, 운영상의 프로그램 등 규정

- SR 또는 NSRSS SSC는 안전기능의 상실 없이 안전중요도에 상응하게 지진의 영향을 견딜 수 있어야 함
- ✓ Part 50 Appen. S(원전 지진공학 기준)와 일관성 유지

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

종합 정리

Part 53 특정 주제별 신규 혹은 변경 규정

- Part 53 규칙 적용의 범위
 - 상용원전의 정의에서 전력생산과 더불어 다양한 산업적 응용(예, 담수화, 석유정제, 수소생산)
 - 제안된 활동에 수반되는 요금과 서비스에 대한 관할권 규정에서 ‘발전과 배전인 경우’ 를 삭제
- 초소형 원자로 특정 규정
 - 자립형완화시설과 연계하여 일반면허 원자로운전원 관련 요건 규정
 - 주재검사원이 없는 부지나 시설의 경우 검사에 사용하기 위한 임시 공간 제공
- 모듈원자로(다수 호기) 특정 규정
 - 설계, 해석, 인력배치 및 프로그램적 관리는 원자로 및 폐기물 저장소의 갯수, 방사성물질 저장소 및 관련 운영상의 배치, 공통 계통, 계통 인터페이스 및 계통 상호작용 고려
 - 건설활동으로 인해 운영호기의 SSC에 발생할 수 있는 잠재적 위험 예방/완화 계획 및 절차 구비
- 제작원자로의 공장 핵연료장전 규정
 - 핵연료 장전, 보관, 운송 동안 허가에 명시한 임계 예방을 위한 설계사양 구비
 - 사이버 보안프로그램, 물리적 보안프로그램, 접근 허가 프로그램 구비
 - 제작허가를 참조한 COL/CP 발행 또는 Part 110(원자력기기 및 물질 수입/수출) 부지로만 운송 가능
 - COL/CP 소지자의 품질보증 절차에 따른 검사

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Part 53 특정 주제별 신규 혹은 변경 규정 -계속-

● 안전해석 관련 규정

- DBA와 DBA 외의 LBE 해석으로 구분하고, 초기사건 기반에서 사건경위 기반으로 해석
 - ✓ LBE 사건분류 : 예상사건경위, 저빈도사건경위, 희귀사건경위 및 설계기준사고 포함
- PRA 이외에 위험도의 체계적 평가(SRE)를 추가로 허용
- 포괄적 위험도 척도(예, 개인 조기사망위험도 및 후기 암사망위험도)와 이와 연관되는 위험도 성능목표(예, 노심손상빈도 및 조건부 격납건물손상확률)의 설정과 입증
- SSC의 안전중요도에 따라 분류 : SR, NSRSS, NSS 포함

● 부지 관련 규정

- 인구밀집중심지 거리는 저인구지역 바깥쪽 경계까지 거리의 최소 1과 1/3배 혹은 인구분포를 고려하여 사회적 편익 대비 사회적 위험도의 평가로 결정
- 제한구역과 저인구지역을 부지경계로 축소를 제안할 수 있으나, DBA 해석이 선량기준을 충족

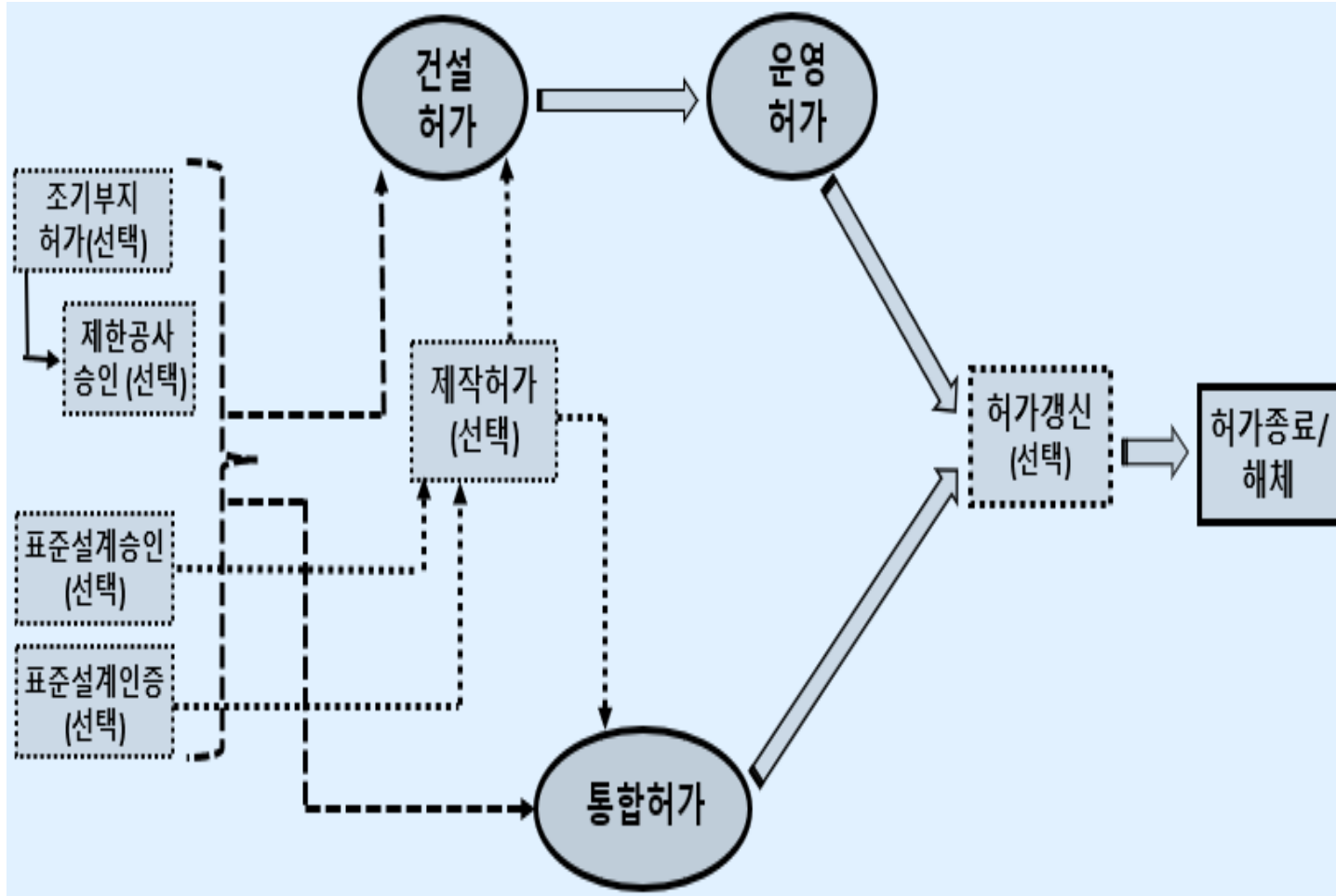
● 보안(Security) 고려 규정

- 설계 과정에서 안전과 보안을 함께 고려, 보안 문제는 설계 및 공학적 보안 설비를 통해 효과적으로 해결, 부지특성은 적절한 비상계획 및 보안계획의 개발 및 유지 가능

● 화학적 재해로 인한 건강 영향 규정 : 허가된 물질의 화학적 재해로 인한 건강 영향으로 대중에게 영구적인 부상의 위험도가 낮음을 해석에서 입증하도록 설계사양 및 기능적 설계기준 정의

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Part 53 인허가 프로세스



- Part 50의 2단계 허가프로세스와 Part 52의 통합허가 프로세스를 선택적으로 사용할 수 있도록 함께 규정
- 인허가 신청서류, 인허가 기간, 인허가 갱신 등 대부분의 요건은 **Part 50 및 Part 52와 유사**
- 각 인허가의 신청서에 대한 심사는 10CFR의 다른 Part (20, 26, 51, 73, 140 등)에서 규정하고 있는 요건에 따라 심사

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Part 53 규칙제정 단계별 주요 변경사항

규칙초안 ⇒ 제안규칙(위원회 결정사항)
Framework-B를 삭제할 것 ⇒ 삭제
QHO 요건화 배제(DBA 외의 LBE 안전기준(위험도) : 원전 인근 개인의 조기사망위험도 5×10^{-7} /년 이내, 잠재적 암사망위험도 2×10^{-6} /년) 이내 ⇒ 변경 : DBA 외의 LBE의 위험도 분석은 위험도 성능목표를 충족하면서 적절한 수준의 안전을 제공하는 포괄적인 위험도 척도를 포함
ALARA 관련 설계요건 배제 ⇒ 관련 규정 삭제
시설안전프로그램 요건 배제 (새로운 혹은 변경된 시설의 내외부 재해와 SSC 관련 성능현안 식별과 위험도 변화 평가) ⇒ 관련 규정 삭제
설계경험 프로그램 반영 ⇒ 설계요건에 반영
공장 내 핵연료장전 규정 포함 ⇒ 제작단계 요건에 핵연료장전 규정 신설

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

Part 53 규칙제정 단계별 주요 변경사항 -계속-

제안규칙 ⇒ 최종규칙
대형상업용항공기 충돌 관련 요건 ⇒ 삭제
PRA 혹은 SRE (systematic risk evaluation) : SRE 추가
운전유연성을 위해 DBA 외의 LBE 안전기준 및 평가기준보다 제한적인 대체기준 적용 ⇒ 삭제
인구밀집중심지 거리는 저인구지역 바깥쪽 경계까지 거리의 최소 1과 1/3 배 혹은 인구분포를 고려하여 사회적 편익 대비 사회적 위험도의 평가로 결정 ⇒ 편익 대비 위험도 추가
제작원자로의 핵연료장전, 보관, 운송에서 임계방지를 위한 2개의 독립된 물리적 메카니즘 설치 ⇒ 제작허가에 기술한 임계방지를 위한 사양 제공
제작원자로의 ML을 참조한 COL 발행 부지로만 운송 가능 ⇒ ML을 참조한 CP, COL발행 및 Part110(원자로수출입) 부지로만 운송 가능
운영에서의 방사선방호 프로그램에 ALARA 요건 ⇒ 삭제
인허가 및 갱신기간 변경 SDC : 15년 ⇒ 40년, 15년 ⇒ 40년 ML : 15년 ⇒ 40년, 15년 ⇒ 40년

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

10CFR Part 53 체계-B (2023년 3월 규칙초안)

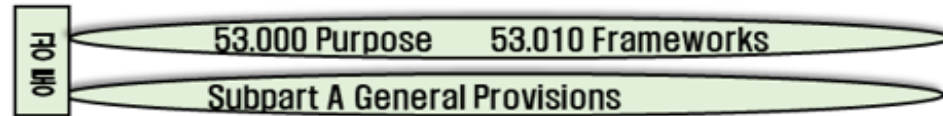
- Part 53 규칙초안의 검토에서 위원회가 삭제(산업계 의견 반영)
 - ✓ 2개의 체계로 복잡성을 증가시키고 규제 명확성과 예측 가능성이 감소하므로, 단일 체계로 재편
 - ✓ 단일 체계가 개발 시간 및 자원을 줄여 결과적으로 더 명확하고 예측 가능한 규칙
- [SRM-SECY-23-0021] : (1) 체계-B를 Part 53의 규칙제정에 포함하지 말고, 그 활용방안을 적어도 다음의 옵션을 고려하여 1년 이내에 제시할 것.
 - ① Part 50 및 52의 개정을 통하여 기술범용의 개선사항을 반영
 - ② 별도의 10CFR Part를 활용하여 체계-B를 반영
 - ③ 요건의 충족을 지침에서 반영하는 비교적 덜 규정적 규제 접근방식을 채용
- NRC 백서 제시 (White Paper : Alternative Risk-Informed, Technology-Inclusive Approaches to Advanced Reactor Regulation, 2024년 12월)

< 3가지 대안을 제시하고 분석 : 신뢰성, 효율성, 명확성, 법적·기술적·자원 고려사항 >

 - ① 방안 1 - 10CFR Part 50 및 52 개정 : 체계-B의 내용을 기존 Part 50 및 52의 새로운 부록 형태로 통합하는 방식으로, 적용 대상을 명확히 하기 위한 기준 제시
 - ② 방안 2 - 체계-B 문구 기반의 새로운 독립 규칙 'Part 56' 신설 : 체계-B의 기술적, 행정적 요건을 모두 포함하는 독립적인 규칙 'Part 56' 신설
 - ③ 방안 3 - 지침 의존형의 새로운 규칙 'Part 56' 신설 : 방안 2와 같이 독립 규정을 신설하지만, 규정 자체는 일반적이고 덜 규범적인 요건만 기술하고 구체적인 준수 방법은 지침에 상세히 기술

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

10CFR Part 53(규칙초안) 체계-A 및 체계-B 비교



Subpart B – Technology-Inclusive Safety Requirements
Subpart C – Design and Analysis Requirements
Subpart D – Siting Requirements
Subpart E – Construction and Manufacturing Requirements
Subpart F – Requirements for Operation
Subpart G – Decommissioning Requirements
Subpart H – Licenses, Certifications and Approvals
Subpart I – Maintaining and Revising Licensing Basis Information
Subpart J – Reporting and Other Administrative Requirements
Subpart K – Quality Assurance Criteria for Commercial Nuclear Plants

Subpart N – Siting Requirements
Subpart O – Construction and Manufacturing Requirements
Subpart P – Requirements for Operation
Subpart Q – Decommissioning
Subpart R – Licenses, Certifications, and Approvals
Subpart S – Maintaining and Revising Licensing Basis Information
Subpart T – Reporting and Other Administrative Requirements
Subpart U – Quality Assurance Criteria for Commercial Nuclear Plants

- 최상위 안전요건에 근거하는 **하향식 접근법(Top-down)**
 - ✓ 발전소 설계사양, 인적 조치, 프로그램적 관리를 통하여 충족해야 하는 상위의 안전기준 규정
- PRA에 기반한 접근방식 반영 (설계기준사고 외의 인허가기반사건)
- 기능적 설계기준(Functional design criteria) 규정
- 기 설정된 설계기준과 해석방법에 근거하는 **상향식 접근법(Bottom-up)**
 - ✓ 기존의 Part 50/Part 52 인용 기술범용으로 수정 (전통적인 결정론적 접근방식 반영)
- PRA 혹은 위험도시사점 대체평가(AERI) 접근방식
- 일반설계기준, SSC 등급분류 등을 Part 50과 유사하게 인용

2. 미국의 원자력 안전규제 체계 및 신형로 규제동향

10CFR Part 53 (규칙초안) 체계-B 구성 및 특성

Subpart N - Siting Requirements
Subpart O - Construction and Manufacturing Requirements
Subpart P - Requirements for Operation
Subpart Q - Decommissioning
Subpart R - Licenses, Certifications, and Approvals
Subpart S - Maintaining and Revising Licensing Basis Information
Subpart T - Reporting and Other Administrative Requirements
Subpart U - Quality Assurance Criteria for Commercial Nuclear Plants

- 최상위 안전요건과 설계/해석 요건을 제외한 수명단계 규제요건 및 인허가절차 등은 체계-A와 유사
✓ 필요에 따라 체계-A의 해당요건 인용
- Part 50 규정을 상당히 인용하고, 필요에 따라 기술범용으로 수정하고 해당하는 경우 성능기반으로 규정
✓ 사건분류/해석방법, 일반설계기준, SSC 등급분류 등 Part 50과 유사
- 경우에 따라 경수로와 비경수로 그리고 경수로의 경우 가압 혹은 비등으로도 구분하여 요건 규정

- § 53.4730(General technical requirement) : SAR 포함사항으로 37개의 일반기술요건을 규정
✓ Subpart B 및 C와 대비할 수 있는 기술기준의 형태이나, 대부분 Part 50 요건 인용
- § 53.4731 Risk-informed classification of SSCs : § 50.69와 동일 (RISC -1, -2, -3, -4)

[1] 부지 안전해석, [2] 시설에 대한 설명, [3] 방사성물질의 종류와 수량, [4] 설계기반 및 기본설계기준, [5] 초기사건 및 사고해석(DBA, AOO, 추가 LBE, 중대사고), [6] 화재방호, [7] 가연성기체제어, [8] 안전에 중요한 전기 기기의 환경검중, [9] 종사자의 역할, [10] 보수 규정, [11] 일반 대중에 대한 선량, [12] 사고후 방사선 감시 및 보호, [13] [Reserved], [14] 지진공학 기준, [15] 비상계획, [16] 비상계획에서 주/참여부족/지방정부의 협력, [17] 안전설비 시험, 해석, 운전경험, 프로토타입, [18] 품질보증 프로그램, [19] 조직 구조, [20] 관리 및 행정 통제, [21] 사용전 시험 및 초기 기동, [22] 정상운전 및 유지보수, [23] 기술지침서, [24] 직무적합성 프로그램, [25] 다수 호기 부지, [26] 기술적 자격, [27] 훈련프로그램, [28] 물리적 보안계획, [29] 안전보장조치, 보안, 관련 훈련 및 자격, [30] 운영경험, [31] 방사선 방호프로그램, 임계도 사고 요건, 오염의 최소화, [34] 위험도 평가에 대한 설명, [35] 항공기의 충돌 평가, [36] 격납설비 요건(비경수로 경우 기능적 격납설비), [37] 수냉식 원자로 요건 (ECCS 냉각성능 분석, 규정 및 표준, 가압열충격 및 파괴인성 요건, ATWS, Station Blackout, 원자로용기 재료 감시, Generic Issues 해결, 경수로 운전경험 요건)

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

IAEA

(1) IAEA SSR-2/1 대비 경수형 및 고온가스냉각형 SMR 격차분석

※ *SSR-2/1 (Safety of Nuclear Power Plants : Design)*

● **IAEA-TECDOC-1936 (2020. 12), Applicability of Design Safety Requirements to Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment**

- ✓ 변경이나 해석이 필요한 항목 8개 (HTGR 경우 30개) : 제작, 다중모듈 사고와 계통 공유 등
- ✓ 추가 요건 사항 : 5개
- ✓ 정의 추가 : Multi-module unit, Reactor module

장	(요건번호) 변경 대상 요건	경수형 SMR	가스냉각형 SMR
기본기술요건	7. Application of defence-in-depth	-	변경
	11. Provision for construction	변경	변경
일반 발전소 설계	13. Categories of plant states	-	변경
	17. Internal and external hazards	변경	변경
	20. Design extension conditions	-	변경
수명기간 중 안전운전 설계	30. Qualification of items important to safety	-	변경
기타 설계 고려사항	33. Safety systems, and safety features for design extension conditions, of units of multiple unit NPP	변경	변경
	35. NPPs used for cogeneration of heat and power, heat generation or desalination	-	변경
	42. Safety analysis of plant design	-	변경
특정 발전소 계통 설계	Reactor core and associated features 43~46	-	변경
	Reactor coolant systems 47~48, 50, 52, Construction structure and containment system 54~55, 57~58	-	변경
	56.	해석	변경
계측제어계통	66. Supplementary control room	-	변경
비상전력공급	68. Design for withstanding the loss-of-off-site power	해석	변경
지원 및 보조계통	73. Air conditioning and ventilation systems	변경	변경
	76. Overhead lifting equipment	변경	변경
기타 출력변환계통	77. Steam supply system, feed-water system, turbine generators	-	변경
방사성 배출물 및 폐기물 처리	78. Systems for treatment and control of effluents	변경	변경
핵연료 취급 및 저장계통	80. Fuel handling and storage systems	-	변경
방사선 방호	81. Design of radiation protection	-	변경
신규 요건	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈 간의 상호 연결이 개개 모듈과 전체 발전소 위해 방지 • 한 모듈에서 발생한 사건이 다른 모듈로 전파되지 않도록 제어 및 보호계통 설치 • 다수모듈 호기에서의 주제어실, 비상대응설비 등의 운전원의 역할 • 다수모듈 호기에서의 비상대응 조치 • 모듈의 연속적 설치에 따른 발전소 배치와 출력의 확장에 따른 기기의 수용능력 		

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

(2) IAEA 안전기준/지침의 비경수로 및 SMR 적용성 분석

- ☞ **IAEA SRS No. 123** (2022년), Safety Report on Applicability of Safety Standards to Non-Water-Cooled Reactors and Small Modular Reactors
 - 검토 대상 기술 :
 - ✓ 수냉각 소형모듈원자로 : 비등경수로 SMR, 일체형 PWR, 중수형 등 수냉각 SMR
 - ✓ 소듐냉각고속로, 납냉각고속로, 고온가스냉각원자로, 용융염원자로
 - ✓ 운반가능한 원전 : 기술자체는 아니나 특히 SMR 설계를 위하여 전개될 계획으로 포함
 - ✓ MSR, TNPP 및 초소형원자로(<10MWe)에 대하여는 부분적으로 검토
 - **IAEA 안전요건 및 안전지침 문서 격차분석**
 - ✓ 7개 Part GSR 그리고 연구용원자로(SSR-3)를 제외한 6개 SSR
 - ✓ 86개(격차분석 79개)의 안전지침
 - ① 적용가능한(Applicable)
 - ② 적용 불가능한(non-Applicable)
 - ③ 확인된 격차와 추가 고려분야
 - **개량·혁신설계(EID)의 새로운 분야(Areas of Novelty) 도출**
 - ✓ Group 1 공통적 새로운 분야
 - ✓ Group 2 소형, 다중모듈 및 모듈화에 관련된 새로운 분야
 - ✓ Group 3 비 수냉각로(non-WCR)에 특정적인 새로운 분야
 - ✓ Group 4 운반가능한 원전에 특정적인 새로운 분야

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

(3) IAEA SMR 규제자 포럼 현황

< 2015년 3월 구성, 우리나라 포함 11개국 참여 >

- ✓ 규제현안에 대한 입장 표명
- ✓ IAEA 문서의 개정/제정에 대한 제안
- ✓ 규제체계 개선을 위한 규제자 지원 정보 제공
- ✓ 규제현안의 향후 방향에 대한 보고서 발간

<단계별 워킹그룹 구성 및 주요 주제>

<SMR 설계 및 안전해석 관련 공통입장 도출 현황>

단계	워킹 그룹	주요 주제
1단계 Pilot (2015~2017)	차등접근법	<ul style="list-style-type: none"> • 각국의 법적 해석 및 차이점, 경험 및 시사점 • 차등접근법 사용 시설의 규제평가 시 고려사항 등
	심층방어	<ul style="list-style-type: none"> • 심층방어 (공통입장, 권고, 관찰의 세부 워킹그룹으로 운영)
	비상계획구역 (EPZ)	<ul style="list-style-type: none"> • EPZ 크기 결정을 위한 기술 범용 원칙 • EPZ 크기 결정 방법론 등
2단계 (2018~2020)	인허가 현안	<ul style="list-style-type: none"> • SMR 생애주기 중 주요 규제개입 • FOAK 및 NOAK 설계 인허가 프로세스 관련 이슈 • 신규건설 다수 모듈/호기 SMR 인허가
	설계/안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • SMR 특유의 다수 모듈/호기 측면 • SMR 설계에서 피동 및 고유안전 장치 이용 시 고려사항 • SMR 관련 설계기준초과 해석 측면
	제작·건설·시운전·운전	<ul style="list-style-type: none"> • SMR의 제작성, 공급망 관리 및 시운전 • SMR 생애주기 경험의 수집 및 활용 • SMR 정비 • 다수 호기/모듈 SMR 시설 현장에서의 공동활동 및 복합활동
3단계 (2021~2023)	인허가 현안 설계/안전해석 제작·건설·시운전·운전	<ul style="list-style-type: none"> • 규제접근법의 조화(Harmonization), 조직의 역량 • SMR 보급의 법적 과제, 장기 선행발주 항목의 고려사항 • 승인 활동 및 역량, 설계별 안전·보안·안전조치
4단계 (2024~2026)	인허가 현안 설계/안전해석 제작·건설·시운전·운전	<ul style="list-style-type: none"> • 메카니스트 선언향, 3S(안전-보안-안전보장조치), 제작 및 전개, 건설 감독, 무경험 신규 인허가소지자의 조직역량

기술분야	소주제 (공통입장 수)
다수호기/모듈 SMR 설계 및 안전해석	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈화(modular) 용어 정의 [1] • 심층방어 [1] • 내외부 위해도 [1] • 초기사건 선정 [1] • 공유 SSC [1] • 다수호기/모듈 부지의 위험도 평가 [1] • 비상대비 [1]
피동안전 및 고유안전 기능 활용 SMR 설계	<ul style="list-style-type: none"> • 다수호기/모듈 부지의 위험도 평가 [2] • 구동력 저하 시 피동계통의 신뢰성 평가 [1] • 설계 프로세스에서 피동 및 능동 설비 사용의 최적화 [1] • 피동 및 고유특성 포함 장치에의 단일고장기준 적용성 [1] • 다양성 요건 및 공통원인고장의 처리 [1]
SMR의 설계기준초과 해석	<ul style="list-style-type: none"> • 신개념 SMR의 중대사고 특성화 [1] • 중대사고 예방 및 완화에서 심층방어의 역할 [2] • 설계확장조건(design extension condition) [1] • 대량 또는 조기방출을 초래하는 사건순서 및 사고 시나리오의 실질적 배제 [1]

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

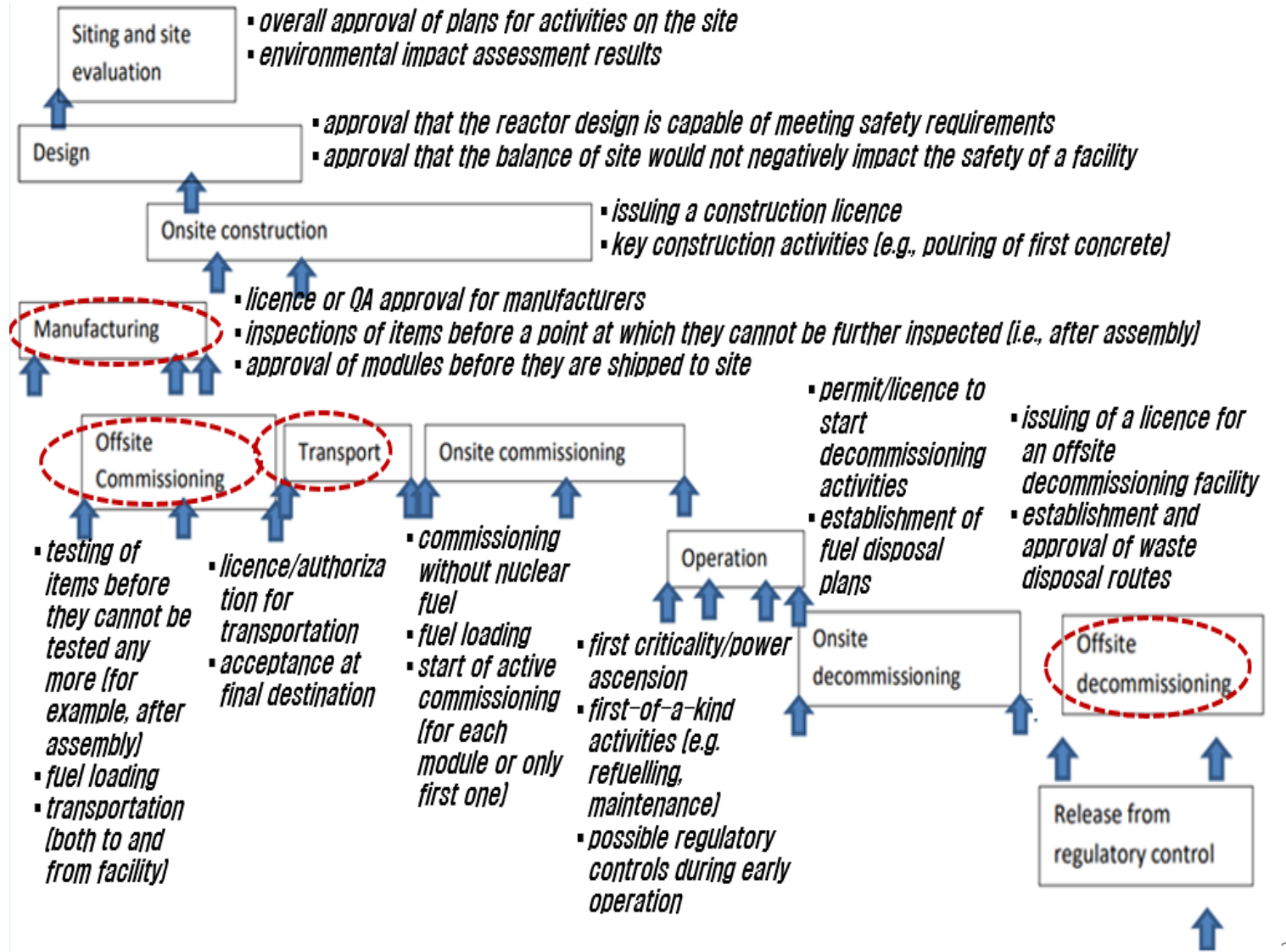
● 인허가현안 WG 보고서

✓ Interim reports on Key Regulatory Interventions during a Small Modular Reactor Lifecycle

✓ IAEA SSG-12 (7단계) + 4개 추가

- 제작
- 소외 시운전
- 수송
- 소외 해체

〈SMR의 11단계 인허가 프로세스와 규제개입 활동〉



3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

캐나다

(1) SMR 관련 규제규정

- **REGDOC-2.5.2 (Design of Reactor Facilities: Nuclear Power Plants)**

- ✓ 수냉각원자로의 신규 인허가신청에 대한 요건과 지침

- ✓ 안전목표

- 허용 선량기준 : A00 - 0.5mSv, DBA - 20mSv
- CDF 10^{-5} /년 미만
- 지역주민의 일시적인 내피를 필요로 하거나 10^{15} 베크렐 이상 요오드-131의 환경방출 모든 사건경위 빈도 합 10^{-5} /년 이하
- 지역주민의 장기적인 이주를 필요로 하거나 10^{14} 베크렐 이상 세슘-137의 환경방출 모든 사건경위 빈도 합 10^{-6} /년 미만

- ✓ Normal Operation, A00, DBA, DEC 포함 bDBA
- ✓ 기술중립적 요건의 샘플, DSA 및 PSA, 재해도 분석, 안전기능, 심층방어, 다중성-다양성-독립성에 대한 예시 제시
- ✓ Section 11(Alternative Approaches) : 수냉각로 설계 규제요건에 대한 대체접근방식 요건

▶ Nuclear Safety and Control Act

▶ Class I Nuclear Facilities Regulations

- 부지선정부터 건설·운영·해체 인허가 신청에 요구되는 자료 규정

▶ General Nuclear Safety and Control Regulations

- 허가 신청 및 갱신, 인허가소지자 의무사항 등 규정



- ▶ 원전 인허가 신청 시 서류제출 요건/지침
 - ✓ REGDOC 1.1.1(Site Evaluation and Site Preparation for New Reactor)
 - ✓ REGDOC-1.1.2(Licence Application Guide: Licence to Construct a Nuclear Power Plant)
 - ✓ REGDOC-1.1.3(Licence Application Guide: Licence to Operate a Nuclear Power Plant)
 - ✓ REGDOC-1.1.4(Licence Application Guide: Licence to decommission Reactor Facilities (개발중))
 - ✓ REGDOC-1.1.5 Supplemental Information for Small Modular Reactor Proponents
- ▶ 원전 인허가 단계별 요건/지침
 - ✓ REGDOC-2.5.2(Design of Reactor Facilities: Nuclear Power Plants)
 - ✓ REGDOC-2.3.1(Conduct of Licensed Activities : Construction and Commissioning Programs)

- **REGDOC-1.1.5 (Supplemental Information for Small Modular Reactor Proponents)**

- ✓ REGDOC-3.5.1(Licensing Process for Class I Nuclear Facilities and Uranium Mines and Mills)의 인허가절차에 추가하여 SMR의 인허가신청에 대한 요건을 규정
- ✓ SMR은 수냉각 원자로(기존 원자로보다 소형) 및 대체 냉각기술을 사용하는 신형원자로(즉, 비 수냉각)를 포함
- ✓ Section 2 : SMR 특정 인허가신청 지침 제공
- ✓ Section 3 : SMR 설비의 인허가기반 개발을 위한 차등접근법과 대체접근법의 적용 지침 제공

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

(2) DIS-16-04 (2016. 5), Small Modular Reactors : Regulatory Strategy, Approaches and Challenges)

- ① CNSC 주요 규제현안 과제
- ② 연구개발 활동을 포함한 기술정보
- ③ 단일부지 다수 모델 설비
- ④ 새로운 실증원자로 인허가 절차
- ⑤ SMR 인허가 과정 및 환경평가(EA)
- ⑥ 관리시스템-SMR 활동 인허가소지자
- ⑦ 관리시스템-SMR 시설의 최소 보완장치
- ⑧ 안전조치 이행 및 검증
- ⑨ 결정론적/확률론적 안전성분석
- ⑩ 심층방어 및 사고완화
- ⑪ 비상계획구역(EPZ)
- ⑫ 운반가능한 원자로 개념
- ⑬ 발전소 운영/유지보수의 자동화 활용
- ⑭ 인간-기계 인터페이스(HMI)
- ⑮ 인적성과(Human Performance)
- ⑯ 운영 연속성을 위한 재정 보증
- ⑰ 부지보안 규정
- ⑱ 폐기물 관리 및 폐로
- ⑲ 지하 토목구조물

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

[3] 신형원자로 기술의 규제 대비 CNSC 전략 보고서

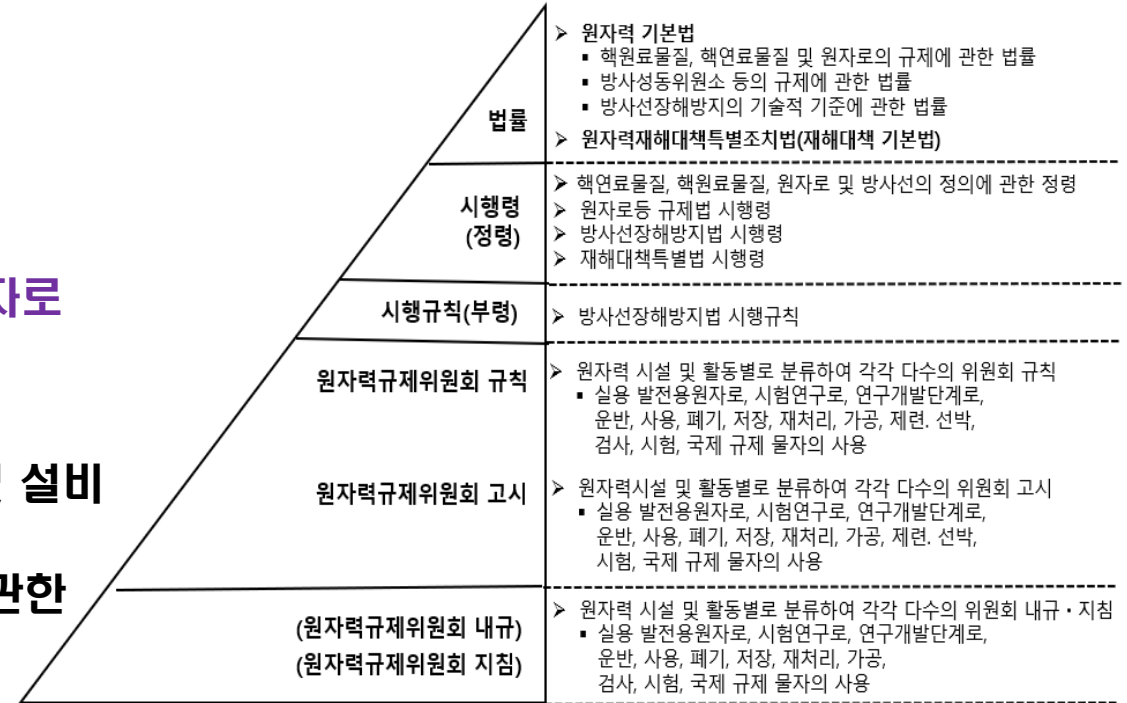
- 2017년 최초 발행, 2021년~2022년 SMR 배치 가속화에 맞춰 실행계획 구체화
 - ✓ 현재 캐나다 SMR의 규제 근간으로 활용
- 3가지 핵심 요소
 - ✓ 강건하고 유연한 규제체계 : 차등접근, 대체 접근법
 - ✓ 위험도정보활용 프로세스
 - ✓ 전문역량 및 인력
- 주요 내용
 - ✓ 특정 냉각재나 핵연료에 상관없이 '안전목표 달성'에 집중하는 기술중립적 접근
 - ✓ 원자로의 크기, 복잡성, 내재된 위험도에 따라 규제요건의 차등 적용
 - ✓ 설계자의 규제 불확실성을 조기에 해소하기 위한 공급자 설계검토
 - ✓ 해외 규제기관과 협력하여 기술검토 결과를 공유하고 규제 조화성을 추진

3. IAEA 및 주요국 SMR 안전요건 개발 동향

일본

(1) SMR 관련 규제규정

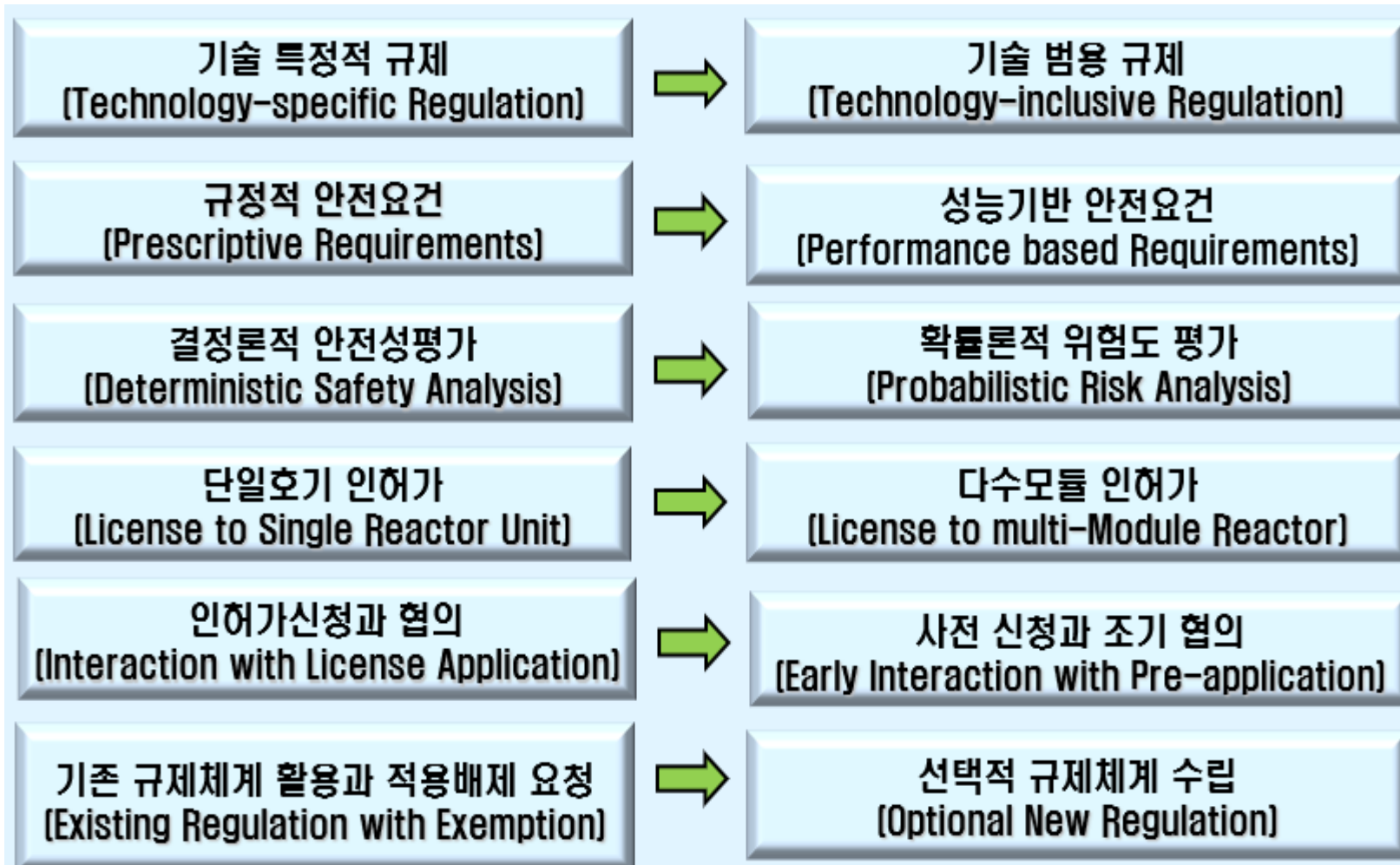
- 원자로등규제법 규정
 - ✓ 발전용원자로
 - ✓ 시험연구용 등 원자로 : 발전용원자로 이외의 원자로
- 실용발전용원자로 관련 규칙
 - ✓ 실용발전용원자로의 설치, 운전 등에 관한 규칙
 - ✓ 실용발전용원자로 및 그 부속시설의 위치, 구조 및 설비의 기준에 관한 규칙
 - ✓ 실용발전용원자로 및 그 부속시설의 기술기준에 관한 규칙
- 시험연구용 등 원자로 관련 규칙
 - ✓ 시험연구용으로 제공하는 원자로 등의 설치, 운전 등에 관한 규칙 [*선박에 설치하는 것 제외]
 - ✓ 시험연구용으로 제공하는 원자로 등의 위치, 구조 및 설비의 기준에 관한 규칙 [*선박에 설치하는 것 제외]
 - ✓ 시험연구용으로 제공하는 원자로 등의 기술기준에 관한 규칙 [*선박에 설치하는 것 제외]



- 선박용원자로 관련 규칙
 - ✓ 선박에 설치하는 원자로(연구개발단계에 있는 것을 제외한다)의 설치, 운전 등에 관한 규칙
 - ✓ 선박에 설치하는 경수감속 가압 경수냉각형 원자로에서 연구개발단계에 있지만 운전계획에 관한 규칙

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

신형원자로 (SMR) 안전규제 추이



- 원자로노형 포괄
- 원자로용도 포괄
- 규제 유연성 부여
- 규제규정의 단순화
- 위험도정보활용 활성화
- 위험도 목표 및 척도 입증
- 다수 원자로(모듈형) 동시 인허가
- 규제예측성 도모
- 인허가 안정성 도모
- 규제 유연성 부여

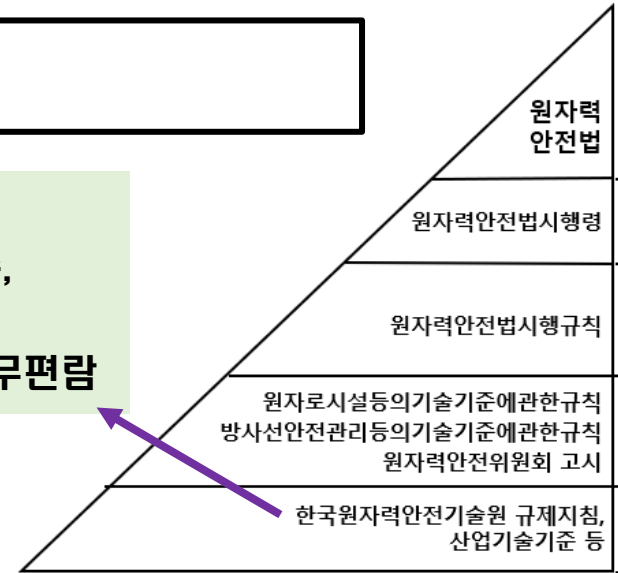
4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

우리나라 SMR 안전규제 대비 현황

- 원자력안전법령 개정 및 기술기준 규정체계 정비
 - ✓ 사전 설계검토제도 도입 : 원자력안전법 제100조의2(원자로 등의 설계에 대한 사전검토) 신설 (2026. 4)
 - ✓ 기술기준 대체적용 인정 세부절차 관련 훈령 (2025. 10)
 - ✓ 원자로시설 부지의 위치제한에 관한 기준 개정 (2026. 1)
 - ✓ 원자력안전규제 기술기준 규정체계 정비 계획(안) 마련 (2026. 3)

KINS 규제지침 ⇒

- ✓ 원안위 기술기준, 규제지침
- ✓ KINS 매뉴얼, 업무편람



- SMR 안전규제정책 공표 및 시행
 - ✓ 소형모듈원자로(SMR) 안전규제 방향 (2023. 4)
 - ✓ 소형모듈원자로(SMR) 규제체계 구축 로드맵 (2026. 2)
- SMR 규제수요 대비 원자력안전규제 기술개발 사업 시행
 - ✓ 중소형원자로 안전규제 기반기술 개발사업 (2022~2028)
 - ✓ 소형모듈원자로 전주기 안전규제 검증기술 개발사업 (2025~2032)
 - ✓ 원자력 안전규제 기초·기반기술 개발사업 內 비경수형 SMR 관련 (2025~2029)
 - ✓ 차세대 비경수형 원자로 규제검증기술 개발 (2026~2032)



4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

우리나라 기존 규제규정의 적용성 검토 (예시적)

원자력안전법/시행령/시행규칙

** Part 53 규칙초안
체계-B의 기술요건과
유사 접근방식*

- 대개의 규정은 다양한 원자로 노형이나 용도에 대하여 적용 가능
 - ✓ 적용배제 규정(일부) : 원자로의 사용목적이나 설계상의 원리적인 차이
 - 운영에 관한 안전조치, PSAR(FSAR) 내용, 표준설계 SAR 내용, 정기검사 항목
- 원자로의 용도
 - ✓ 기존 : 발전용원자로 + 연구용(교육용), 외국원자력선 입출항
 - ✓ 발전용원자로 ⇒ 상업용원자로 : 다양한 용도 포괄
 - ✓ 상업용원자로에 대한 정의 필요
- 정의 관련 규정
 - ✓ 원자로의 정의(핵연료물질을 연료로 사용하는 장치) : 노형에 무관
 - ✓ 핵연료집합체의 정의 (원자로의 연료로 사용할 수 있는 형태를 갖춘 한 다발의 핵연료물질)
 - ⇒ “한 다발의” 삭제
 - ✓ 관계시설 (원자로의 안전에 관계되는 시설) : 구조물(터빈건물), 동력변환계통시설(터빈 및 보조계통)
 - ⇒ 다양한 원자로 용도 관련 시설 : 부유식 발전소의 선체, 2차 열변환시설, 열저장시설 등 포함

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

- 원자로운전원의 수
 - ✓ 기존 : 원자로마다 조종감독자 및 조종사 각 1명 (운영에 관한 안전조치 : 적용배제 규정)
 - ✓ 원자로마다 ⇒ 원자로시설마다 혹은 다수모듈호기마다
 - ✓ 다수모듈호기 정의 필요 : 다수의 모듈형 원자로와 BOP 등의 관계시설로 구성되어, 하나의 제어실에서 원자로의 목적을 독립적으로 수행하는 시설
 - 주민 및 부지, 제한구역 관련 해당 규정
 - ✓ 제출서류 및 서류의 내용 : 방사선환경영향평가서, 부지조사보고서
 - ✓ 원자로 해체 시 부지의 재이용, 위해시설 설치제한(협의규정), 주민의 의견수렴, 환경보전(방사선환경조사 및 방사선환경영향평가 실시), 방사선 건강영향조사
 - ✓ 제한구역 면제 : 10MWth이하 연구용등 원자로시설
 - ✓ 해상용 ⇒ 적용배제, 예외규정 혹은 별도 규정
 - 인허가 제출서류의 내용
 - ✓ 해당 항목 적용배제 : 예비안전성분석보고서, 표준설계기술서, 표준설계안전성분석보고서, 최종안전성분석보고서
 - ✓ 기본내용을 본문에 규정하고, 상세내용은 위원회고시로 위임
 - 참조 : 방사선환경영향평가서, 운영기술지침서, 사고관리계획서, 방사성물질등의 배출계획서
- ⇒ 위원회고시 혹은 지침에서 다양한 옵션을 제시 (경수로, 비경수로 등)

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

- 대개의 규정은 다양한 원자로 노형이나 용도(육상용)에 대하여 적용 가능
 - ✓ 적용배제규정 : 위치기준, 구조·설비 및 성능 기준, 해체기준
 - 운영기준에서는 중대사고 관련 규정(절차서, 시험·감시·검사) 연구용에 적용배제
- 정의 관련 규정
 - ✓ 2차 냉각재의 정의 : ...1차 냉각재의 열을 흡수하여 터빈을 돌리는 유체...
⇒ “...흡수하는 유체...” 로 수정
 - ✓ 원자로냉각재압력경계의 정의 (1차 냉각재로부터 압력을 받는 부분으로 압력용기·배관 ...)
⇒ “...원자로냉각재계통으로...” 로 수정
- 주민 및 부지, 제한구역 관련 해당 규정
 - ✓ 원자로시설의 위치 기준 : 전체 규정
 - ✓ 구조·설비 및 성능 기준 : 급경사지의 붕괴방지, 방사성폐기물의 처리 및 저장시설 (제한구역경계)
 - ✓ 운영기준 (제한구역) : 방사선관리구역 등에의 조치, 방사성폐기물관리계획
 - ✓ 해체기준 : 해체에 대비한 전략 (부지), 해체안전성평가 (주민의 예상피폭선량)
⇒ 해상용 : 적용배제, 예외규정 혹은 별도 규정

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

- 원자로시설의 구조·설비 및 성능 기준
 - ✓ 우리나라 기술범용 규정
 - 외적 요인, 화재방호, 환경영향, 성능검증 부품, 시험·감시·검사 및 보수, 신뢰성(다중성·다양성·독립성 및 물리적 격리성, 단일전력·단일고장 가정)
 - ✓ 다양한 원자로 노형의 설계특성 미반영 규정
 - 전력공급설비 : 발전소 내·외 전력계통, 독립된 2개의 회로, 단일고장
 - 원자로보호계통(우발적인 제어봉 인출), 반응도 제어계통(제어봉 사용), 다양성보호계통
 - 원자로격납건물 : 기밀시험, 열제거계통 시험, 가연성기체제어수단
 - 과압방지 : 안전밸브 또는 방출밸브 등 설치
 - 단일전력·단일고장 가정 : 잔열제거, 비상노심냉각, 최종열제거설비
 - ⇒ 적용배제, 예외규정, 별도규정 혹은 기술범용으로 수정
- 원자로시설의 건설 및 운영에 관한 품질보증
 - ✓ 다양한 원자로 노형이나 용도에 대하여 적용 가능

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

SMR 대비 안전규제규정(기술기준) 개발을 위한 전제 사항

기본 고려사항

SMR 용도

- ① 다양한 용도 범용
- ② 용도별 특정
- ③ 용도특성별 혼용

SMR 노형

- ① 다양한 노형 범용
- ② 노형별 특정
- ③ 노형특성별 혼용

구성 체계

- ① 하향식 체계
- ② 상향식 체계

평가 방법

- ① 확률론적 접근방식
- ② 결정론적 접근방식
- ③ 요건별 혼용

규정 방식

- ① 성능기반
- ② 규정기반
- ③ 요건별 혼용

규정 배치

- ① 법령(법, 영, 규칙)
- ② 기술기준규칙, 고시
- ③ 규제지침

인허가 옵션

- ① 기존 : DC+CP(LWA)+OL
- ② 추가 : ESP, COL, ML

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

SMR 관련 각국의 규제규정 예시

	미국	캐나다	일본	우리나라
SMR 용도	<ul style="list-style-type: none"> Part 50 : 명시없음 [범용가능] Part 53 : 용도범용 	<ul style="list-style-type: none"> 명시없음(범용가능) Class 1 facility : 원자로장전 운송수단(vehicle) 	<ul style="list-style-type: none"> 발전용+시험연구로 [비발전용] 시험연구로 : 범용+ 선박용 	<ul style="list-style-type: none"> 발전용 + 연구용(교육용) 외국원자력선 임출항
SMR 노형	<ul style="list-style-type: none"> Part 50 : 수냉각로 기반 + 면제 Part 53 : 노형범용 	<ul style="list-style-type: none"> 수냉각로 기반 + 대체허용 	<ul style="list-style-type: none"> 명시없음(범용가능) 대체허용 	<ul style="list-style-type: none"> 명시없음(범용가능) 대체허용
구성체계	<ul style="list-style-type: none"> Part 50 : 상향식 Part 53 : 하향식 	<ul style="list-style-type: none"> 하향식 	<ul style="list-style-type: none"> 상향식 	<ul style="list-style-type: none"> 상향식
규제기반 특성 [규정방식, 평가방법]	<ul style="list-style-type: none"> Part 50 : 규정적 ✓ 결정론적 기반 + 확률론적 Part 53 : 성능기반 ✓ 확률론적 기반 + 결정론적 	<ul style="list-style-type: none"> 규정적 결정론적 기반 + 확률론적 	<ul style="list-style-type: none"> 규정적 결정론적 기반 + 확률론적 	<ul style="list-style-type: none"> 규정적 결정론적 기반 + 확률론적
규정배치	<ul style="list-style-type: none"> 연방규제규칙(CFR) + 규제지침(RG) 	<ul style="list-style-type: none"> 원자력안전 및 통제법 + 규제규정(Regulation) + 규제문서(REGDOC) [요건+지침] 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로등규제법(영, 규칙) + 규제규칙 + 고시 + [내규, 지침] 	<ul style="list-style-type: none"> 원자력안전법(영, 규칙) + 기준규칙 + 고시 + [규제지침]
인허가 옵션	<ul style="list-style-type: none"> Part 50 : 건설, 운영 Part 52 : 조기부지허가, 표준설계인증/승인, 제작, 통합허가 Part 53 : 조기부지허가, 표준설계인가/승인, 제작, 건설, 운영, 통합허가 	<ul style="list-style-type: none"> 부지선정허가 건설허가 운영허가 	<ul style="list-style-type: none"> 설치허가 설계 및 공사계획 인가 [운전계획신고] 형식증명/형식지정 	<ul style="list-style-type: none"> 표준설계인가 건설허가 운영허가

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

SMR 특성 반영 기술적 쟁점사항

안전목표/평가

- ① 안전목표와 위험도 척도
- ② 사건분류와 설계기준사고
- ③ 사건 해석방법 및 안전기준
- ④ 사고시 방사선원향
- ⑤ 내·외부 재해
- ⑥ 위험도정보활용 방법론

보안/비상

- ① 보안 및 안전보장조치 설계 고려
- ② 비상계획구역 크기 및 평가방법

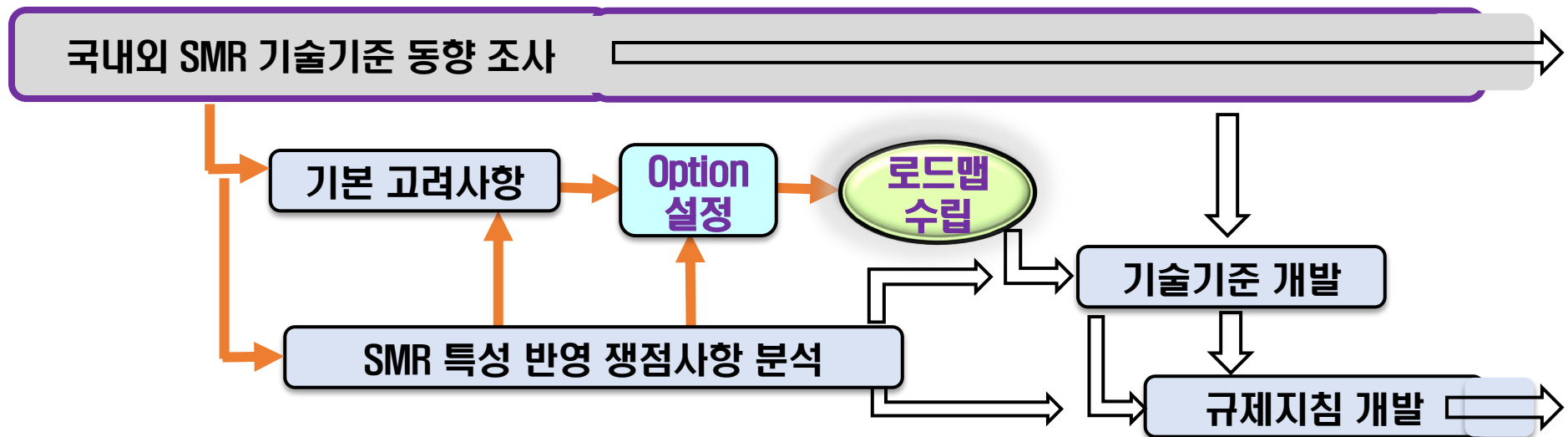
설계/운영

- ① 안전기능 정의
- ② 심층방어 확보
- ③ SSC 등급분류와 특별처리
- ④ 기본 및 기능적 설계기준
- ⑤ 피동 및 고유 안전기능 요건
- ⑥ 모듈원자로(다수 호기) 특성
- ⑦ 운전원 자격, 역할 및 역량
- ⑧ 설계/운영 프로그램
- ⑨ 공장 핵연료장전(운송 및 검사)
- ⑩ 인허가 단계별 특정요건

4. 신형원자로(SMR) 안전규제 향후 추진방향

SMR 규제규정(기술기준) 개발 기본방향

1. 기존 규제와의 일관성 유지 및 안전수준 제고
2. 원자로의 다양한 활용에서 타 관련 법령과의 조화 및 규제관할권 정립
3. 선진기법 활용(위험도정보활용, 성능기반, 차등규제)
4. 창의적 혁신기술의 수용(유연성 제공)
5. SMR 및 비경수로 인허가 경험 참조
6. SMR 관련 기존연구결과 활용 (비경수로 다양한 활용 과제)
7. 전문가 및 이해관계자 의견수렴 활성화



Q & A



Thank you

패널토의

국내 원전 계속운전 심사 경험과 과제



제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

[패널] 고리2호기 계속운전 인허가 경험

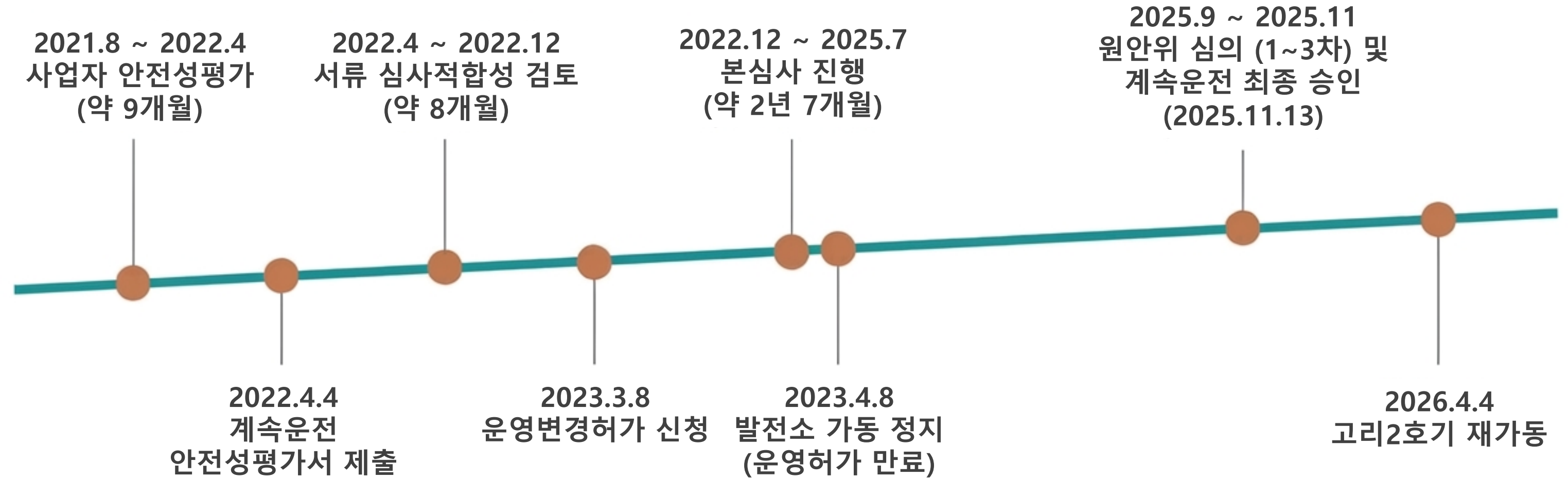
한국수력원자력 중앙연구원
윤봉요

e-mail : ybyun0707@khnp.co.kr

발표순서

1. 계속운전 개요
2. 주요 현안 해결노력
3. 주요 설비 개선사항

사업자 평가 및 인허가 심사 현황 (2021-2026)

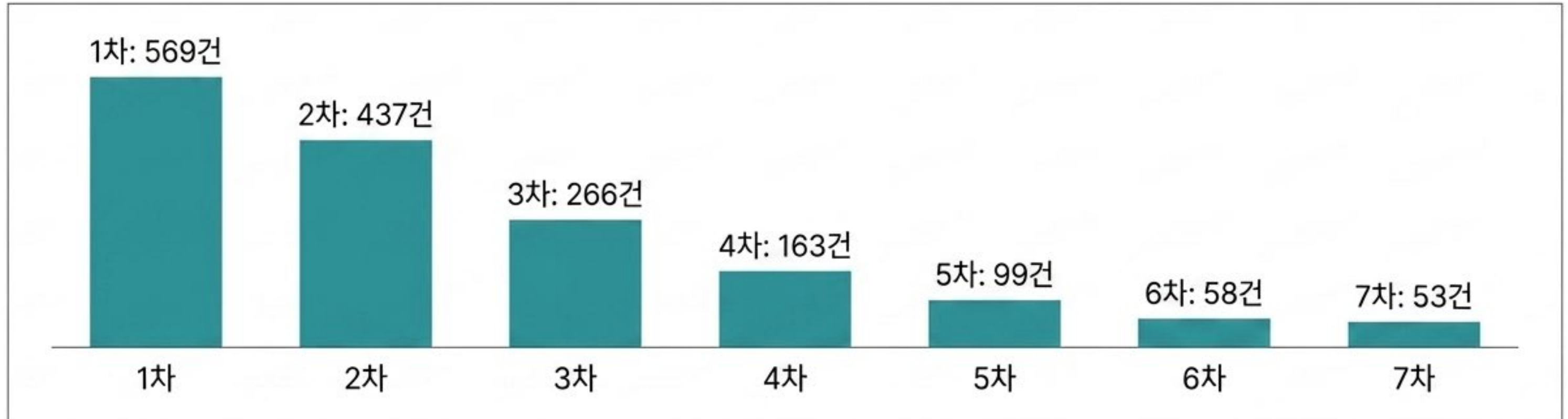


인허가 심사 질의 및 답변:

1,645건

(총 질의 건수)

차수별 답변 평균 소요일: 약 60일



PSR (주기적안전성평가): 955건

LER (주요기기수명평가보고서): 560건

RER (방사선환경영향평가서): 130건

고리2호기 계속운전 핵심 현안 해결



기술기준차이분석

최신 운전경험과 연구결과를 반영한 규제요건 평가 및 종합 안전조치 도출.



주요기기 수명평가

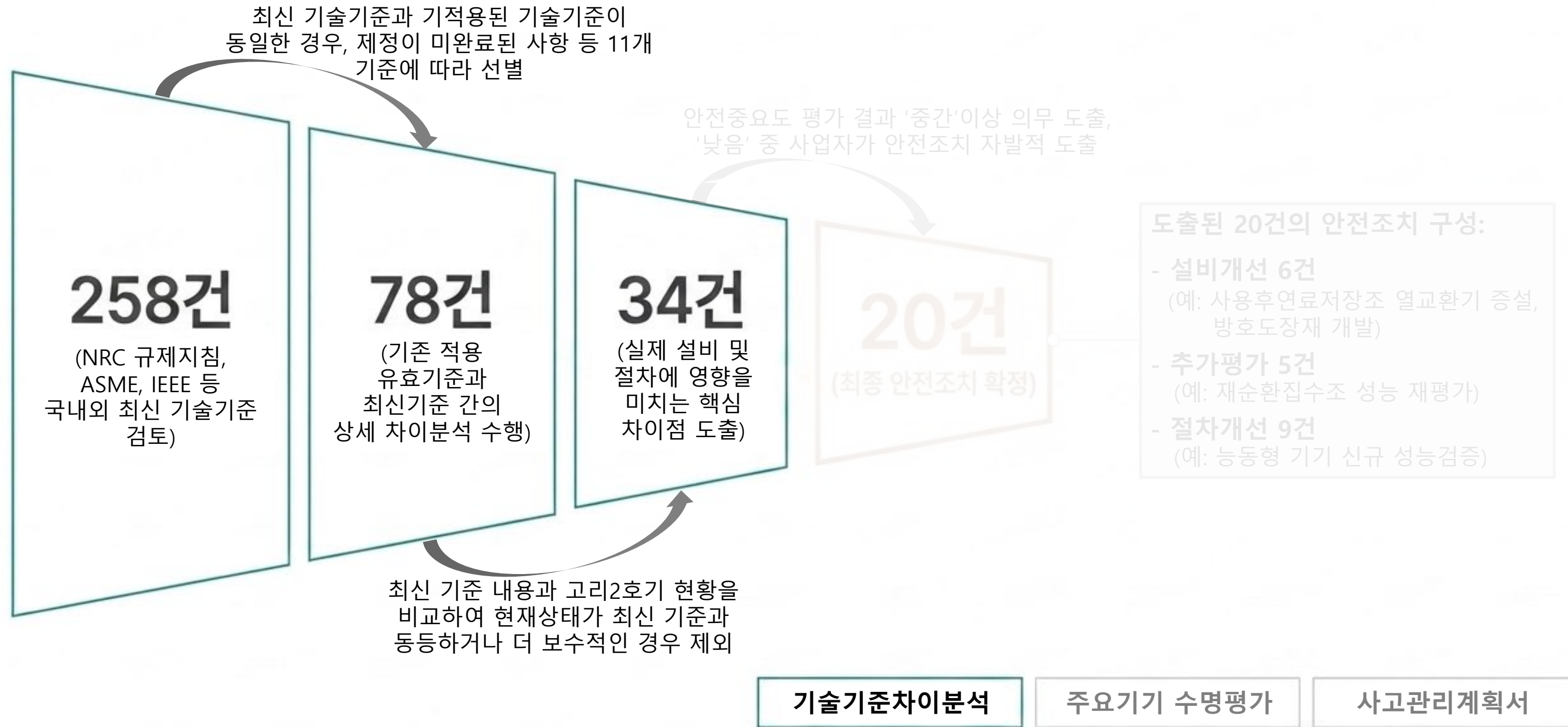
계속운전기간 동안 주요 구조물, 계통, 기기의 건전성 검증 및 후속조치.



사고관리계획서

설계기준초과 사고 및 중대사고 대응을 위한 사고관리전략 신규 개발.


[1. 기술기준차이분석] 최신 기준을 활용



[1. 기술기준차이분석] 안전중요도 평가

[IAEA SRS 12 참조]

CONSEQUENCE 잠재적 결말		TOLERABLE 허용할 수 있는			SIGNIFICANT 심각한			INTOLERABLE 허용할 수 없는		
SAFETY FUNCTION 안전 기능 수행능력		ROBU. 완전충족	ADEQ. 적정	INAD. 부적정	ROBU. 완전충족	ADEQ. 적정	INAD. 부적정	ROBU. 완전충족	ADEQ. 적정	INAD. 부적정
FREQ. 초기사건 발생빈도	EXPECTED 예상된	낮음	낮음	중간	중간	높음	높음	높음	높음	높음
	POSSIBLE 가능성있는	-	-	낮음	낮음	중간	높음	중간	중간	높음
	UNLIKELY 가능성 낮은	-	-	-	-	낮음	낮음	낮음	낮음	중간
	REMOTE 가능성 극히 낮은	-	-	-	-	-	-	-	낮음	낮음

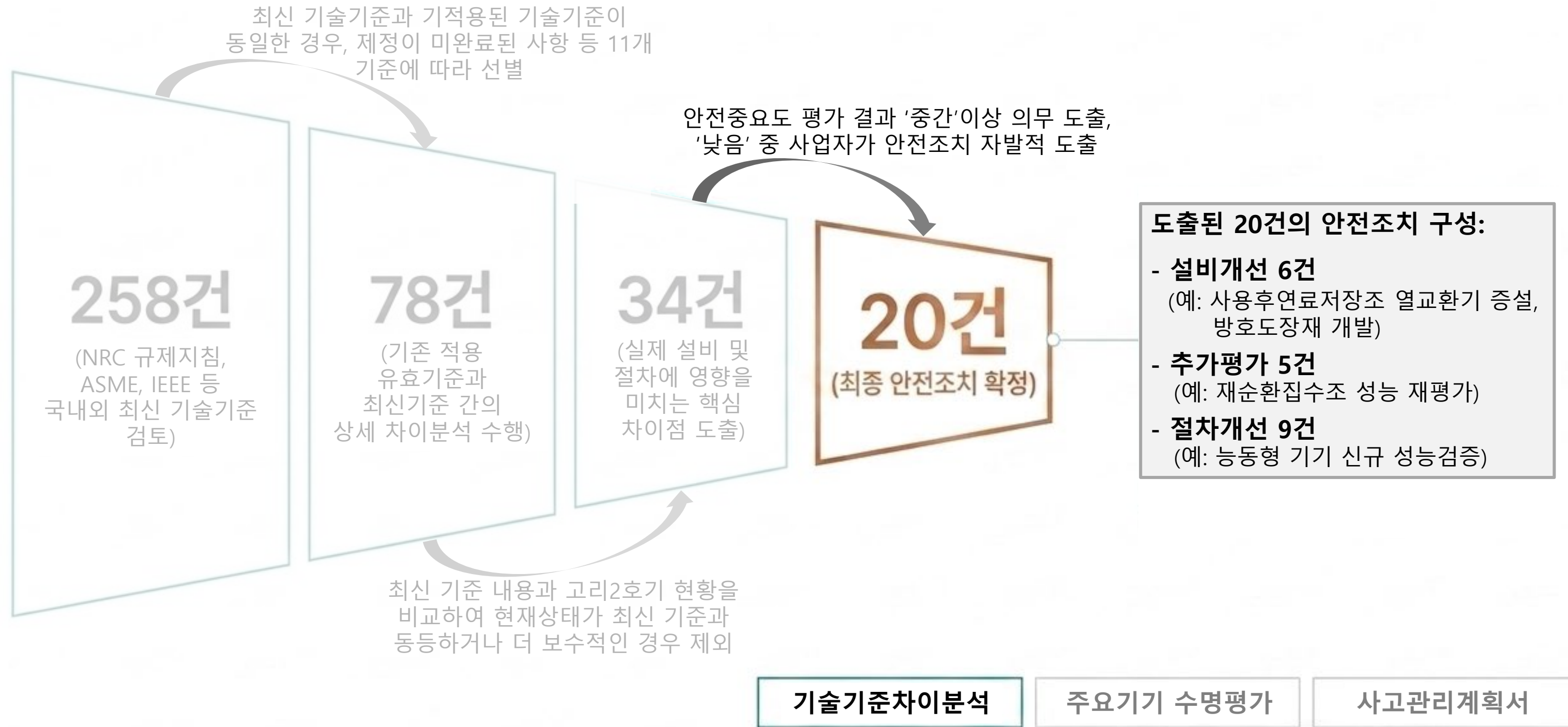
 기술기준차이분석

 주요기기 수명평가

 사고관리계획서

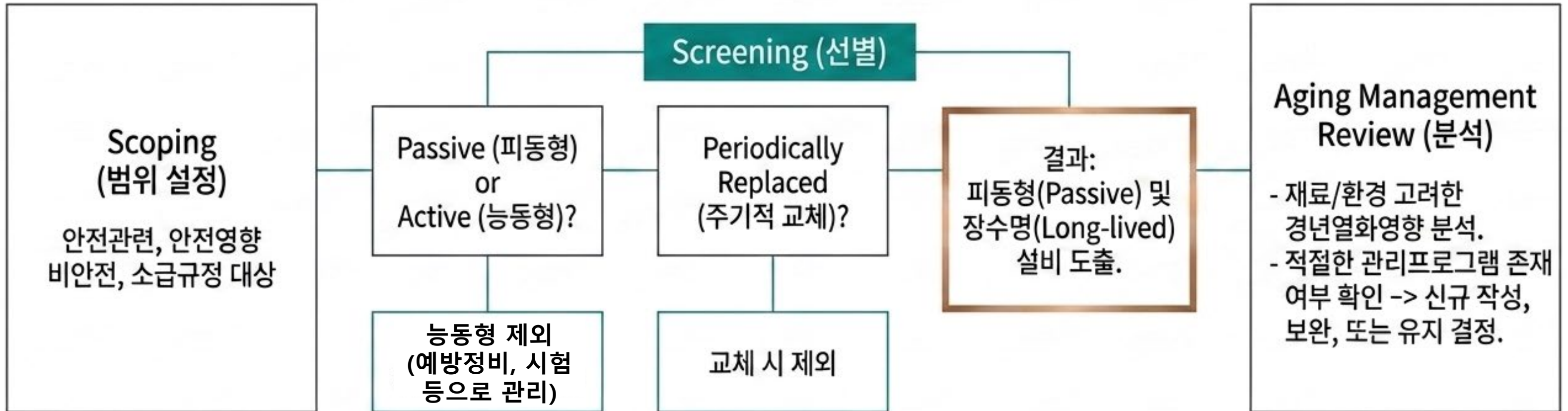
중간이상: 안전기능 수행능력을 완전충족 하지 못하고, 초기사건 유발빈도가 높으며, 잠재적 결말이 심각한 경우
낮음: 안전기능 수행능력은 완전충족 하지 못하지만, 초기사건 유발빈도가 낮고, 잠재적 결말도 허용할 수 있는 경우
영향없음: 안전기능 수행능력을 완전충족 하고, 초기사건 유발빈도가 낮으며, 잠재적 결말도 허용할 수 있는 경우

[1. 기술기준차이분석] 최신 기준을 활용, 안전성을 증진



[2. 주요기기 수명평가]

경년열화관리 대상 선정




기술기준차이분석


주요기기 수명평가


사고관리계획서

[2. 주요기기 수명평가] 40개의 관리 프로그램 확정

신규 제정 (5건)	보완 작성 (20건)	기존 유지 (15건)
<p>일회검사, 재료의 선택적 침출, 내부코팅/라이닝 등.</p>	<p>원자로용기 내부구조물, 강재격납용기, 원자력 방호도장 등.</p>	<p>기기 가동중검사, 격납건물 누설률시험, 수화학 등.</p>
<p>(예시) 일회검사</p> <p>검사대상 및 검사방법 열화메커니즘 별 14개 그룹 신규 선정, 균열검사, 재료손실, 두께 측정 등</p> <p>검사주기 계속운전 이전 1회 수행 및 10년 주기로 재검사</p>	<p>(예시) 원자로용기 내부 구조물</p> <p>검사대상 및 검사방법 (기존) 원자로 내부표면과 내부 부속기기 육안검사 (추가) 중요기기 강화육안검사, 체적검사 등</p> <p>검사주기 기존검사는 가동중검사 일정대로 수행, 추가검사는 계속운전 이전 1회 수행 및 10년 주기로 재검사</p>	<p>(예시) 기기 가동중검사</p> <p>검사대상 및 검사방법 안전등급 기기 육안검사, 표면검사 등(기존과 동일)</p> <p>검사주기 가동중검사 주기에 따라 수행(기존과 동일)</p>



재가동 전 약 8,400여 개소 현장 검사 수행

결과: 허용기준 만족

*(소구경 배관 보수용접 1개소 등
미미한 결함 외 건전성 확인 완료)



기술기준차이분석



주요기기 수명평가



사고관리계획서

[2. 주요기기 수명평가]

시간제한 경년열화분석(TLAA): 11개 항목의 건전성

평가 만족 (10/11)

- 원자로용기 중성자 조사취화, 금속 피로,
- 강제 격납용기, 중성자속 검출관 마모, 파단전누설, 고에너지 배관 파단 해석 등.

허용기준 만족,
감시프로그램 (NuFMS 등) 지속 운영.

평가 일부 불만족 (1/11)

기기의 내환경검증(EQ)

**재가동 이전 불만족 기기
전량 교체 완료.**

(226개 기기, 22라인 케이블 전면 교체)

 기술기준차이분석

 **주요기기 수명평가**

 사고관리계획서

[3. 사고관리계획서]

설계기준초과사고를 대비하는 다중방어 전략(MACST)

총 1,272건의 심사 질의답변 수행.
미국/유럽/일본 등 글로벌 벤치마킹 활용.

1. 다중고장사고
설비 및 절차 보완.


2. 설계기준초과 자연재해(지진, 해일 등)
다중방어 사고대응전략 신규 개발.

3. 설계기준초과 인위적재해(테러 등)
광역손상완화전략 신규 개발.

4. 중대사고
중대사고 평가 및 설비, 절차 개선

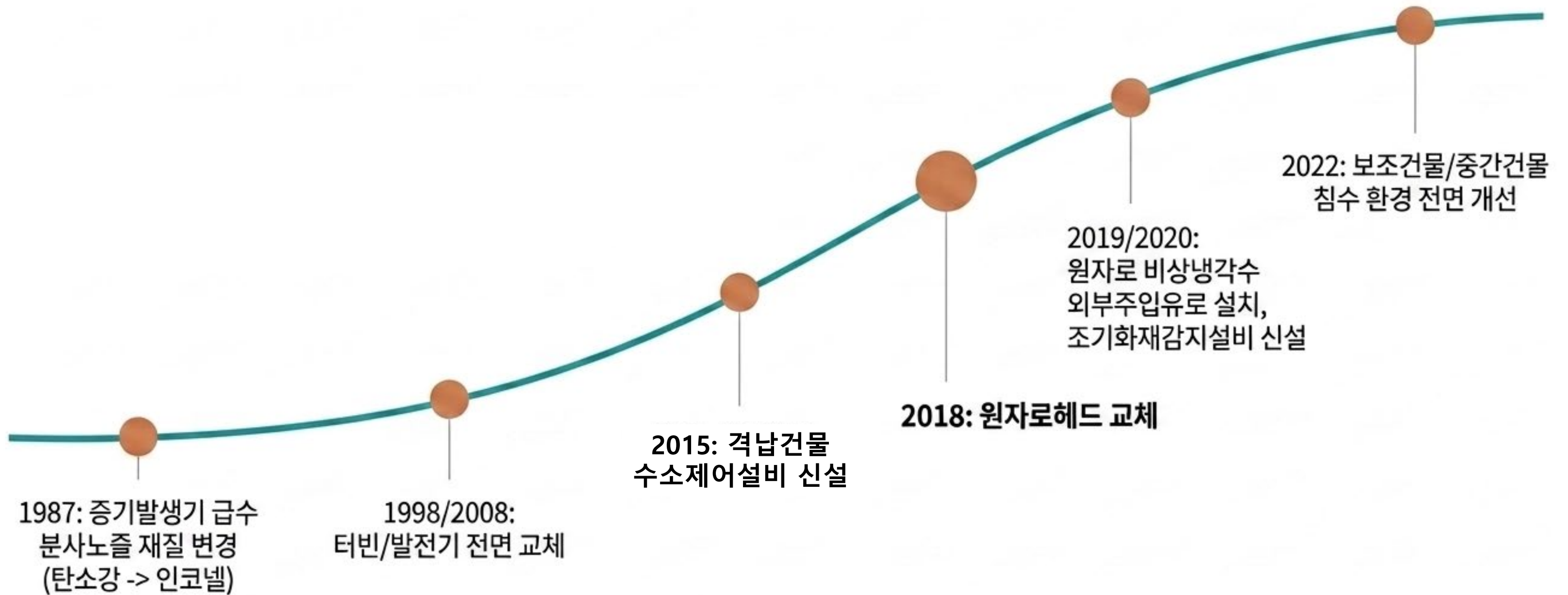
Cs-137 방출 빈도 및 선량제한치 등 안전목표 달성으로 최종 승인 (2025.10)

 기술기준차이분석

 주요기기 수명평가

 **사고관리계획서**

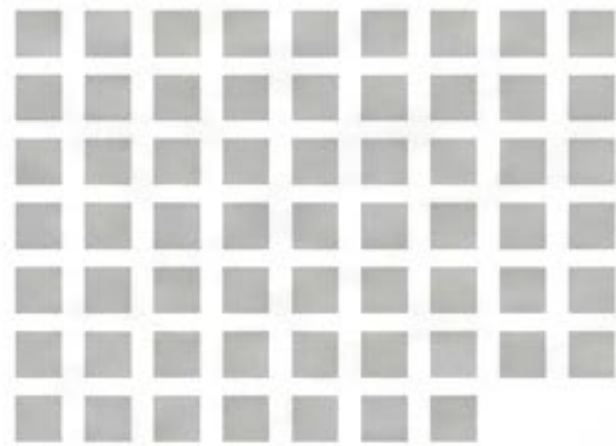
[설비 개선] 가동기간 동안 지속되어 온 유지관리의 결과 (1983-2023)



40년 동안 가동중검사, 국내외 운전경험 등을 반영하여 설비를 지속 개선해왔음.

[설비 개선] 계속운전 평가를 통한 주도적 안전성 강화

운전 및 정비 편의 향상, 노후화 및 단종 대비 등 자체개선 (총 48건)

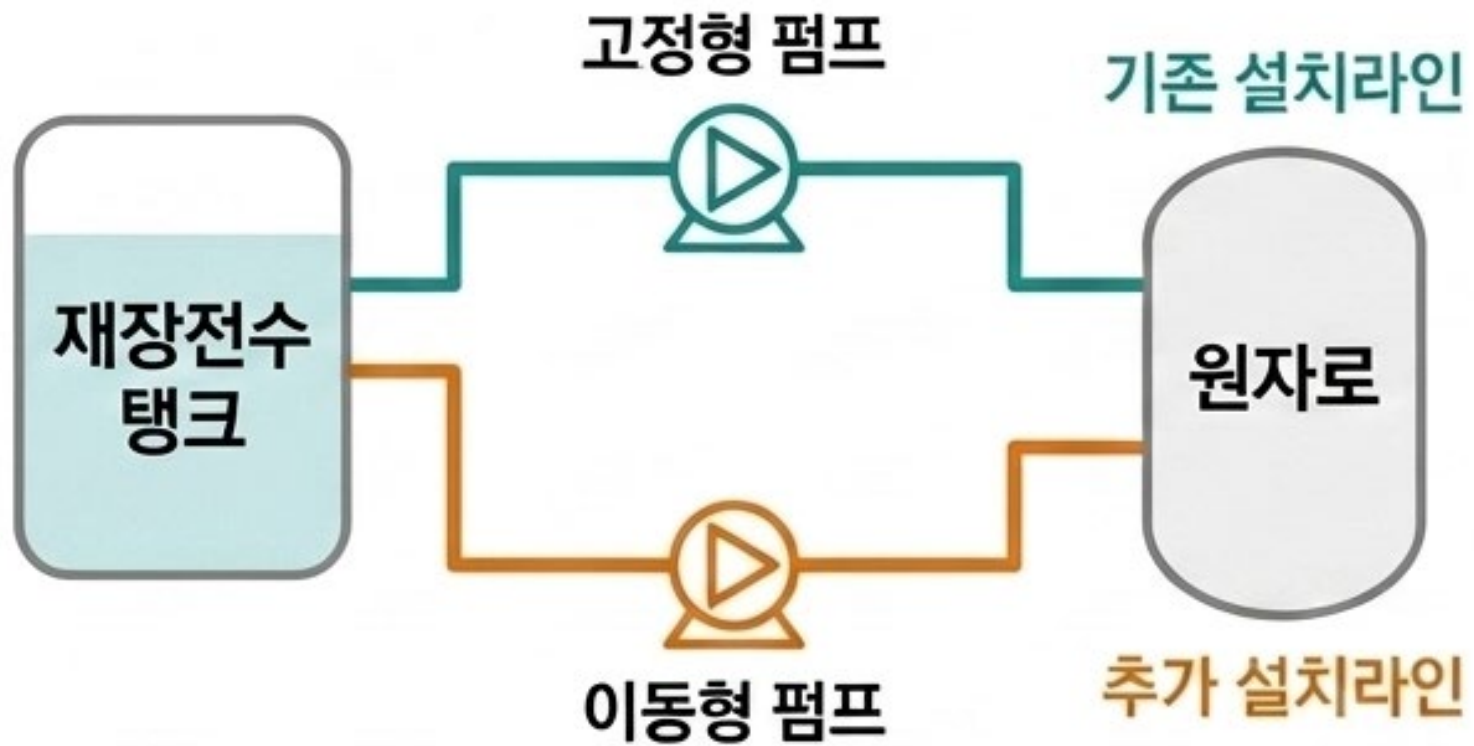


- 보호계전기 디지털 교체
- 원자로보호설비 교체
- 지진감시설비 주요 모듈 교체
- 공정제어설비 디지털화

최신기술기준 및 수명평가 반영 설비개선 (총 6건)

- ✓ 1. 지진계측기 전면 교체 (신뢰도 향상)
- ✓ 2. 사용후연료저장조 열교환기 용량 증설
- ✓ 3. 격납건물 배기계통 격리신호 추가 (다양성 확보)
- ✓ 4. 내환경검증(EQ) 유효성 평가 결과에 따른 설비 교체.
- ✓ 5. 신규 인증 방호도장재 개발
- ✓ 6. 인간-기계 연계 평가 결과를 반영한 설비 개선

[설비 개선] 사고관리계획서 요건 만족을 위한 조치



통합보관고



3.2MW / 1MW 이동형 발전차



고유량 이동형 펌프차 및 살수차



연료유 이송차 및 이동형 통신 중계차

사고관리 설비 연결을 위한 설계변경
(인허가 9건, 신고 7건)

사고관리 설비 구매 및 배치

전력설비	냉각설비	보조설비
3.2MW 이동형 발전차	저압 이동형 펌프차	이동형 공기압축기
1MW 이동형 발전차	고압 이동형 펌프차	이동형 송풍기
500kW 이동형 발전차	고유량 이동형 펌프차	이동형 비상조명
30kW 견인식 발전기	이동형 살수차	이동형 통신중계차
10kW 이동형 발전기	이동형 열교환기	연료유 이송차
5.5kW 이동형 발전기		견인차, 지게차 등

고리2호기 경험을 바탕으로 더욱 안전하고 신뢰할 수 있는 후속호기 계속운전 지속 추진

과거 40년의 지속적인 관리노력 + 현재의 철저한 안전성 평가 및 인허가 심사

[기술기준]
종합 안전성평가 및 안전조치 이행

[수명평가]
철저한 검사 및 후속조치 수행

[사고관리]
설계기준 초과 및 중대사고 대응강화

제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

고리2호기 계속운전 심사 경험

한국원자력안전기술원 원자력심사단장 이상민

sangmin.lee@kins.re.kr

Contents

- 계속운전 심사 개요
- 계속운전을 고려한 주요기기 수명평가
- 운영허가 이후 변화된 방사선환경영향평가
- 종합안전성 평가
- 운영변경 허가
- 계속운전 심사 결과

계속운전 심사 개요 (1/2)

계속운전 심사 = ① 계속운전 주기적안전성평가 심사 + ② 운영변경허가 심사

① 계속운전 주기적안전성평가 심사

- 원자력안전법(이하 '원안법') 제23조 및 같은 법 시행령 제36조제4항에 따라 원자로시설을 설계수명기간이 만료된 이후에 계속운전하기 위해 한국수력원자력(이하 '한수원')이 제출한 계속운전 주기적안전성평가(이하 '계속운전 PSR')의 적합성 확인(원안법 시행령 제37조 및 제38조)
- 계통·구조물·기기 및 방사선환경영향평가에 대해 최신 기술기준을 활용한 평가의 적합성 확인(원안법 시행령 제38조제2항)

② 운영변경허가 심사

- 원전 운전기간 등 허가받은 사항의 변경 관련 최종안전성분석보고서(이하 'FSAR')와 방사선환경영향평가서(이하 'RER') 등 운영변경허가(이하 '운변') 서류의 적합성 확인(원안법 제20조제1항)

계속운전 심사 개요 (2/2)

■ 계속운전 PSR 심사 - 16개 평가항목

평가항목	
① 원자로시설의 설계	② 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기의 실제 상태
③ 결정론적 안전성분석	④ 확률론적 안전성평가
⑤ 위해도 분석	⑥ 기기검증
⑦ 경년열화	⑧ 안전성능
⑨ 원자력발전소 운전경험 및 연구결과의 활용	⑩ 운영 및 보수 등의 절차서
⑪ 조직, 관리체계 및 안전문화	⑫ 인적 요소
⑬ 방사선비상계획	⑭ 방사선환경영향에 관한 사항
⑮ 계속운전기간을 고려한 주요기기에 대한 수명평가	⑯ 운영허가 이후 변화된 방사선환경영향평가

■ 운영변경허가 심사 – FSAR 및 RER 변경

※ 고리 2호기 계속운전 주요 경과

- (계속운전 PSR) 신청서류 접수('22.4.4.), 본 심사('22.12.-'25.7.)
- (운영변경허가) 신청서류 접수('23.3.30.), 본 심사('23.3.-'25.7.)

} 원안위 허가('25.11.13.)

계속운전 기간을 고려한 주요기기 수명평가 (1/4)

■ 경년열화관리 대상선정 평가

- 계속운전 고시에 따라 경년열화관리 대상이 적합하게 선정되었는지 여부를 **서류검토·현장점검**을 통해 확인

범위(scoping) 선정 기준	대상(screening) 선정 기준
① 안전등급 구조물·계통·기기	범위 ①, ②, ③에 포함되는 구조물·계통·기기 중 피동형, 장수명 기기
② 안전등급 구조물·계통·기기 기능에 방해가 될 수 있는 비안전등급 구조물·계통·기기	
③ 화재방호, 내환경검증, 원자로용기 가압열충격 보호, 원자로정지불능 위험도 저감, 소내정전사고 대처설비	

- 안전등급** : FSAR 3.2절(구조물·계통 기기 분류)의 안전등급 설비(원자로용기, 강재격납용기 등) 포함됨을 확인
- 비안전등급** : 서류검토·현장점검을 통해 선정 적합성 확인
- 화재방호, 내환경검증, 원자로용기 가압열충격 보호, 원자로정지불능 위험도 저감, 소내정전사고 대처설비가** 포함됨을 확인

계속운전 기간을 고려한 주요기기 수명평가 (2/4)

■ 경년열화관리계획 평가

- 계속운전 고시에 규정된 **43개 경년열화관리계획 세부사항**이 적합하게 수립되었는지 확인
- 경년열화관리 대상 설비의 **재질, 운전환경, 경년열화영향**이 고려되었는지 확인
- **40개 경년열화관리계획**에 대해 NUREG-1801을 반영하여 **10개 구성요소**가 구성되었는지 확인
 - ①적용범위, ②예방조치, ③감시 및 검사변수, ④경년열화탐지, ⑤감시 및 경향분석, ⑥허용기준, ⑦시정조치, ⑧확인절차, ⑨행정적통제, ⑩운전경험
- **3개 경년열화관리계획**에 대해 관련 설비가 없거나 경년열화영향이 없어 계획수립이 불필요함을 서류검토·현장 점검을 통해 확인
 - ①원자로격납건물, ②조적벽, ③중성자흡수재 감시

계속운전 기간을 고려한 주요기기 수명평가 (3/4)

■ 계속운전을 위한 수명평가 (1/2)

- 계속운전 고시에서 규정한 평가에 따라 계속운전 기간동안 **안전 여유도를 확보**하는지 여부를 확인
- 원자로용기 증성자 조사취화

평가항목	기준	평가결과
원자로용기 노심영역 재료의 최대흡수에너지	68J 이상	86.1J
가압열충격 기준온도	132.2°C 이하	27.1°C

• 금속피로평가

평가항목	기준	평가결과
안전등급1 기기·배관 예상 과도상태 발생 횟수	가열: 200회 이하	65회
안전등급2.3 기기·배관 예상 과도상태 발생 횟수	7,000회 미만	화학 및 체적제어계통 : 4,350회

계속운전 기간을 고려한 주요기기 수명평가 (4/4)

■ 계속운전을 위한 수명평가 (2/2)

• 내환경검증

- 기기·케이블의 검증수명과 교체 관련 내환경검증 문서 적합성 확인

대상	검증수명 확보된 경우		검증수명 확보 미흡인 경우
	기교체 확인	재평가 결과 확인	교체를 통해 검증수명 확보
기기(총 959개)	453개	280개	226개
케이블(총 1,202라인)	125라인	1,055라인	22라인

운영허가 이후 변화된 방사선환경영향평가 (1/2)

■ 계속운전으로 인한 영향에 관한 사항

- 기체·액체 방출물 및 동일부지 내 다수기를 고려한 선량이 기준을 만족함을 확인

		평가항목	기준	평가결과	비율
기체 방출물	제한구역 경계 개인최대 피폭선량	감마선에 의한 공기의 흡수선량(mGy/yr)	0.1	9.53E-5	0.10%
		베타선에 의한 공기의 흡수선량(mGy/yr)	0.2	2.55E-4	0.13%
		외부피폭에 의한 유효선량(mSv/yr)	0.05	3.26E-5	0.07%
		외부피폭에 의한 피부등가선량(mSv/yr)	0.15	1.08E-4	0.07%
		입자상 방사성물질, H-3, C-14 및 방사성옥소에 의한 인체 장기 등가선량(mSv/yr)	0.15	1.47E-2	9.80%
액체 방출물	제한구역경계 개인최대 피폭선량(유효선량)(mSv/yr)	0.03	1.03E-5	0.03%	
		동일부지 내 다수기 고려시 제한구역 경계 연간 유효선량(mSv/yr)	0.25	8.90E-2	35.60%

운영허가 이후 변화된 방사선환경영향평가 (2/2)

■ 사고로 인한 영향에 관한 사항

- 설계기준 사고시 선량이 기준을 만족함을 확인

평가항목		기준	평가결과		비율
설계기준 사고	제한구역경계 개인최대 피폭선량 (전신선량, mSv)	250	대형냉각재 상실사고	1.91E-01	0.08%

- 설계기준 초과 사고시 선량평가 결과의 적합성 확인
 - 사고관리계획서의 '사고의 영향평가 내용' 내용과 연계 검토

종합안전성 평가

- 평가항목별 개별적인 평가 및 상호 연관성이 있는 항목에 대한 복합적인 평가를 수행하고, 평가에 따른 안전조치 결과를 고려하여 **종합적인 안전성을 평가**
- **차이분석**
 - 고리 2호기 유효한 기술기준과 평가시점에서 최신 기술기준을 비교·분석한 결과의 적합성 확인
 - USNRC Reg. Guides 82건과 산업표준(ACI, ASME B&PV Code Sec. III, IEEE Std. 등) 5건 대상
- **안전중요도 평가 및 안전조치**
 - 차이별 **안전중요도 평가**(높음, 중간, 낮음, 영향없음)가 타당한지와 안전중요도에 따른 **안전조치**(설비개선, 재해석, 절차·지침 개선 등)의 적합성 확인

운영변경 허가

■ 최종안전성분석보고서(FSAR)

- 운영변경 신청내용의 적합성 확인

- 운영변경 : 운전기간 변경, 경년열화관리계획, 시간제한 경년열화 분석, 내환경검증 평가 및 후속조치 기재사항

- 경년열화관리계획, 시간제한 경년열화 분석은 계속운전 PSR ⑮번 항목(‘계속운전기간을 고려한 주요기기에 대한 수명평가’)과의 일치성 확인

■ 방사선환경영향평가서(RER)

- 계속운전 PSR ⑯번 항목(‘운영허가 이후 변화된 방사선환경영향평가’)과의 일치성 확인

- RER 초안에 대한 주민의견수렴 반영 내용 및 미반영 사유에 대한 적합성 확인

계속운전 심사 결과

■ 계속운전 주기적안전성평가

- 원안법 시행령 제37조·제38조 같은 법 시행규칙 제20조·제21조, 계속운전 고시에 따라 **고리2호기 계속운전 주기적안전성평가(PSR) 16개 평가항목에 대한 안전성평가가 적합하게 수행되었음을 확인**
- **최신 기술기준 등을 활용한 평가를 통해 안전조치 20건이 도출되었음을 확인**

■ 운영변경 허가

- **고리2호기 최종안전성분석보고서(FSAR)에 계속운전 PSR 결과 및 계속운전 기간을 고려하여 운전기간 등이 적합하게 반영되었음을 확인**
- **고리2호기 방사선환경영향평가서(RER)에 운영허가 이후 변화된 방사선환경영향 평가내용이 적합하게 반영되었음을 확인**

Q&A

점심식사 장소 안내



글로벌공학교육센터
지하1층 “락구정”

입구

입구

서울대학교 실전문제연구단

글로벌공학교육센터 컨벤션

BBQ치킨

입출구

공과대학

체력단련실

39동

대학원교육연구동
39동

건축도시
이론연구실

제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍 선진원자로 안전규제의 현재와 미래

일시 2026년 6월 26일(금), 10:00~17:30

장소 서울대학교 39동 B103호 BK다목적홀

주최 서울대학교 원자력미래기술정책연구소 원자력정책센터,
서울대학교 공과대학 원자핵공학과, 비즈(주)

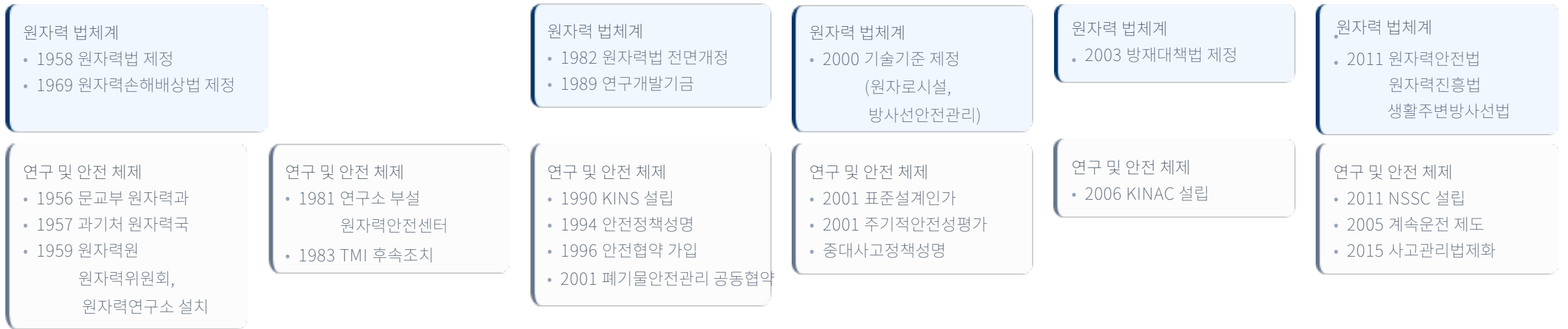
제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

선진원자로 SSC 등급분류 방법
(NEI 18-04를 중심으로)

경희대학교 허균영
gheo@khu.ac.kr



대한민국 원자력 연표



배경 및 목적

비-수냉각로 안전규제의 특성

- 다양한 설계특성 존재 → 이를 포괄할 수 있는 규제 체계 구축의 필요성

국내환경의 변화

- 글로벌 산업환경을 고려한 국내 안전규제 체계의 개선 요구
- Risk-Informed, Performance-Based 방법론의 적극적 도입 가능성 타진



15696 Federal Register / Vol. 91, No. 60 / Monday, March 30, 2026 / Rules and Regulations

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION

10 CFR Parts 1, 2, 10, 11, 19, 20, 21, 25, 26, 30, 40, 50, 51, 53, 70, 72, 73, 74, 75, 95, 140, 150, 170, and 171

[NRC-2019-0062]

RIN 3150-AK31

Risk-Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors

AGENCY: Nuclear Regulatory Commission.

ACTION: Final rule.

reader, instructions about obtaining materials referenced in this document are provided in the "Availability of Documents" section.

- *NRC's PDR*: The PDR, where you may examine and order copies of publicly available documents, is open by appointment. To make an appointment to visit the PDR, please send an email to PDR.Resource@nrc.gov or call 1-800-397-4209 or 301-415-4737, between 8 a.m. and 4 p.m. eastern time, Monday through Friday, except Federal holidays.

FOR FURTHER INFORMATION CONTACT: Nicole Fields, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, telephone: 630-

NEIMA, as further amended by the Accelerating Deployment of Versatile, Advanced Nuclear for Clean Energy Act of 2024 (ADVANCE Act), defines the term "advanced nuclear reactor" as "a nuclear fission reactor or fusion machine, including a prototype plant (as defined in sections 50.2 and 52.1 of title 10 of the *Code of Federal Regulations* (10 CFR) (as in effect on the date of enactment of [NEIMA])), with significant improvements compared to commercial nuclear reactors under construction as of the date of enactment of [NEIMA]."

The NRC initially considered



23628 Federal Register / Vol. 91, No. 84 / Friday, May 1, 2026 / Proposed Rules

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION

10 CFR Parts 1, 2, 10, 11, 19, 20, 21, 25, 26, 30, 40, 50, 51, 57, 70, 72, 73, 74, 75, 95, 140, 150

[NRC-2025-0379]

RIN 3150-AL36

Licensing Requirements for Microreactors and Other Reactors With Comparable Risk Profiles

AGENCY: Nuclear Regulatory Commission.

ACTION: Proposed rule; guidance; and request for comment.

FOR FURTHER INFORMATION CONTACT: George Tartal, Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, telephone: 301-415-0016, email: George.Tartal@nrc.gov; Elijah Dickson, Office of Nuclear Reactor Regulation, telephone: 301-415-7647, email: Elijah.Dickson@nrc.gov; Michael Balazik, Office of Nuclear Reactor Regulation, telephone: 301-415-2856, email: Michael.Balazik@nrc.gov; and William Kennedy, telephone: 301-415-2313, email: William.Kennedy@nrc.gov. All are staff of the U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001.

SUPPLEMENTARY INFORMATION: Executive Summary

reactors or components thereof should be regulated through general licenses." That E.O. set February 23, 2026, as the deadline for issuing this proposed rule, and the final rule must be issued by November 23, 2026.

In developing this proposed rule, the NRC considered whether to establish the rule's scope within the amended non-power production or utilization facility (NPUF) licensing framework set out in the NRC's final rule, "Non-Power Production or Utilization Facility License Renewal," issued on December 30, 2024 (89 FR 106234). That NPUF rulemaking was primarily intended to revise and streamline the license renewal process for facilities such as research and test reactors and medical

SSC 안전등급분류의 중요성

- 원자력시설의 설계 및 운영 전반에 영향을 주고, 특히 설계기준사고(DBA) 해석의 보수성을 유지
- 국내 안전등급분류 규제요건은 미국의 GDC에 해당되는 「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙」을 따름
- 단, 등급분류 위임규정은 RIPB 방법론(예: RG 1.233)의 도입을 위한 개정이 필수적이고, 이로 인해 연계되는 상하위 규정(예: 안전법 정의, 허용기준 등) 및 타 법률에 대한 제·개정 과정이 필요함

GDC/ARDC	원자로규칙
<p>기준 1: 품질 기준 및 기록</p> <p>안전에 중요한 SSC는 수행될 안전 기능의 중요도에 상응하는 품질 기준에 따라 설계, 제작, 설치 및 시험되어야 한다. 일반적으로 승인된 기준 및 표준을 사용할 경우, 해당 기준 및 표준의 적용 가능성, 적절성 및 충분성을 확인하기 위해 이를 식별하고 평가해야 하며, 요구되는 안전 기능에 부합하는 품질의 제품을 보장하기 위해 필요한 경우 이를 보완하거나 수정해야 한다. 이러한 SSC가 안전 기능을 만족스럽게 수행할 수 있도록 적절한 보증을 제공하기 위해 품질보증 프로그램을 수립하고 시행해야 한다. 안전관련 SSC의 설계, 제작, 설치 및 시험에 관한 적절한 기록은 원자력발전소 면허 소지자가 발전소 수명 기간 동안 유지하거나 관리해야 한다.</p>	<p>제12조(안전등급 및 규격)</p> <p>① 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기는 안전기능의 중요도에 상응하는 안전등급 및 규격에 따라 설계·제작·설치·시험·검사되어야 한다. 안전등급 및 등급별 규격은 원자력안전위원회가 정하여 고시한다.</p> <p>② 제1항의 규정에 의하여 원자력안전위원회가 정하여 고시한 규격외의 것은 그 적용성·적합성 및 충분성에 대하여 원자력안전위원회의 검토 및 평가를 거쳐 승인을 받은 후에 적용하여야 한다. 이 경우 원자력안전위원회가 원자로시설의 안전성확보를 위하여 필요하다고 인정하는 때에는 해당 규격을 보완 또는 수정하여 적용하여야 한다.</p>

원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정

[시행 2026. 1. 20.] [원자력안전위원회고시 제2026-7호, 2026. 1. 20., 일부개정]

원자력안전위원회(원자력안전과), 02-397-7302

- 제1조(목적) 이 규정은 「원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙」 제12조제1항에 따른 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기에 관한 안전등급과 등급별 규격 및 제41조제3항에 따른 압력용기(보조보일러를 제외한다), 배관, 주요 펌프 및 밸브의 내압시험에 관한 사항을 규정함을 목적으로 한다.
- 제2조(적용대상) 이 규정은 가압경수로 원자로시설 중 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기에 대하여 적용한다. 다만, 가압중수형 원자로시설의 설비에 대하여는 CSA/CAN3-N285.0 및 CSA/CAN3-N285.1을 적용한다.

주요 현안

	규제 체계 공식 인정 여부	확률론적 방법론 사용 여부	안전/비안전 분류 방식	주요 방법론	적용 가능 노형
IAEA	X	△	안전등급 1~3 비안전등급	결정론적 방법론을 주로 사용하고, 확률론적 방법을 조건부로 허용	수냉각로
ANSI/ANS 51.1	NUREG-0800 국내 원자력 법령	X	안전등급 1~3 비안전등급	각 안전등급에 해당하는 설비 또는 안전기능 만을 명시적으로 규정	1983년 기준 경수로
ANSI/ANS 58.14	RG 1.26(내진설계) RG 1.29(품질등급)	X	안전등급, 특별 취급이 필요한 비안전등급, 비안전등급	특별 취급을 요하는 비안전등급을 새로 정의 해, 사고 예방 및 완화를 균형있게 고려	경수로
ANSI/ANS 30.3	X	O	RISC 1 ~ 4	RIPB 방법을 최초로 도입한 기술 표준. Risk Significant의 정량적 기준 (F-V, RAW)을 명시해 등급분류를 진행	경수로
NEI 00-04	RG 1.201 (SSC 범주화)	O	RISC 1 ~ 4	기존 경수로 SSC 분류 및 관리. RG 1.201(Trial Use)에서 공식 승인	경수로
NEI 18-04	RG 1.233 (TI-RIPB)	O	SR, NSRST, NST	빈도-결말 곡선을 이용해 SSC의 안전등급분 류 및 성능 요건을 설정	노형 무관

인허가기반사건(LBE) 선정

LBE 선정 프로세스 개요

- LBE(Licensing Basis Events): 원자로의 안전 설계를 평가하고 허가 기준 준수 여부를 확인하기 위해 선정된 일련의 사건 시나리오
- 통합 프로세스: LBE 선정은 PRA(Probabilistic Risk Assessment)를 중심으로 결정론적 분석과 설계 정보를 통합하여 인허가 기반을 구축하는 반복적인 과정임
- 체계적 식별: 전출력 운전뿐만 아니라 정지 및 저출력(LPSD) 상태를 포함하여, 설계 특성에 따른 모든 잠재적인 초기사건 시나리오를 식별해야 함
- LBE 범주: 식별된 사고 시나리오는 연간 발생 빈도에 따라 다음과 같이 세 가지 범주로 분류함
 - AOO(Anticipated Operational Occurrences, 예상운전과도)
 - DBE(Design Basis Events, 설계기준사고)
 - BDBE(Beyond Design Basis Events, 설계기준초과사고)

인허가기반사건(LBE) 선정

F-C Target 곡선

- F-C Target의 정의: NEI 18-04에서 제시하는 리스크 목표치로, 개별 LBE 시나리오의 빈도와 위험도가 수용 가능한 수준인지 판단하는 기준선
- 평가 기준: 개별 LBE 시나리오를 X축에 부지 경계(EAB)에서의 총 유효선량(TEDE), Y축에 연간 평균 발생 빈도를 나타내는 좌표계에 위치시킴
 - AOO: 정상 운전 선량 제한치 준수 여부 확인
 - DBE: 사고 시 선량 제한치(25rem) 준수 및 안전 기능 유효성 평가
 - BDBE: 중대사고 방지 및 완화 능력 정량적 평가
- 성능 기반 목표: 빈도가 높은 사건은 낮은 선량을 가져야 하며, 빈도가 매우 낮은 사건이라 하더라도 설정된 안전 제한치를 초과하지 않도록 설계 적정성을 판별함

인허가기반사건(LBE) 선정

LBE 분류 및 그룹화 로직

- 빈도 기반 분류(연간 평균 빈도 기준)
- 사건 경위 그룹: 유사한 물리적 현상과 계통 응답을 가진 개별 시나리오들을 그룹화하여 대표 사건으로 평가함으로써 심사의 효율성을 높임
 - AOO: Mean Frequency $\geq 10^{-2}$ /plant-year
 - DBE: $10^{-2} > \text{Mean Frequency} \geq 10^{-4}$ /plant-year
 - BDBE: $10^{-4} > \text{Mean Frequency} \geq 10^{-7}$ /plant-year
- DBA 선별: 설계기준사고(DBA)는 DBE 시나리오에서 파생되며 오직 SR(Safety Related, 안전 관련) SSC만을 사용하여 분석함으로써 10 CFR 50.34 준수 여부를 입증하는 데 사용됨

구분	25 rem TEDE 적용	1 rem TEDE 적용
주요 대상	대형 상용 발전용 원자로 (LWR)	비발전용 원자로, SMR 및 비경수로
규제적 성격	안전설비 성능 및 부지 적합성 검증용 참조값	비상대응(대피) 필요성 판단 임계점 / 시설 분류 기준
관련 규정	10 CFR 50.34(a)(1) 10 CFR Part 100	10 CFR 50.34(a)(1)(i) EPA PAGs, 10 CFR 50.160
평가 경계	EAB (초기 2시간) 및 LPZ (전체 사고 기간)	부지경계(SMR EPZ 축소 시) 또는 제한구역(Unrestricted Area)
정책적 목표	중대사고 시나리오에서의 최후 방어벽(격납) 확보 입증	RIPB 적용 및 비상계획구역(EPZ) 최적화

인허가기반사건(LBE) 선정

PSF와 RSF

- PSF(PRA Safety Functions): PRA 모델 내에서 방사성 물질의 방출을 방지·완화하기 위해 정의된 기능, 초기사건에 대응하는 SSC들의 성공 경로를 나타냄
- RSF(Required Safety Functions, 필수안전기능): 모든 DBE 및 고빈도 BDBE 시나리오에서 10 CFR 50.34 선량 한도(25 rem)를 초과하지 않도록 보장하기 위해 반드시 수행되어야 한다고 결정된 핵심 PSF
- RSF는 안전 관련 SSC를 식별하고 등급을 부여하는 가장 직접적인 판단 기준이 됨

인허가기반사건(LBE) 선정

DBA 선량 기준(10 CFR 50.34)

- 규제 요건: 10 CFR 50.34는 원자로 부지 적합성과 설계 승인 가능성을 평가하기 위한 법적 선량 기준을 규정함
- 25 rem (250 mSv) TEDE(Total Effective Dose Equivalent) 제한치: 사고 발생 후 초기 방출 시점부터 2시간 동안 부지 경계(EAB)에서 개인이 받는 총 유효선량이 25 rem을 초과해서는 안 된다는 결정론적 한도
- DBA는 보수적인 가정을 바탕으로 분석하며, 비안전 계통의 도움 없이 오직 SR 등급 기기만으로 이 25 rem 기준을 만족해야 함

인허가기반사건(LBE) 선정

F-C Target 곡선 Anchor 및 규제적 근거

- **Anchor(기준점):** 연간 빈도 1일 때 선량 0.1 rem 또는 0.1일 때 선량 1 rem으로 설정됨, 이는 10 CFR Part 20의 일반인 연간 선량 한도와 일치하며 빈번한 사건이 일상적 피폭 한도 내에서 관리되도록 함
- **1 rem 변곡점(EPA PAG):** 빈도 10^{-1} 에서 10^{-2} 부근에서 곡선은 등선량 라인을 따르지 않고 1 rem 수준에서 수직으로 꺾이는 변곡점을 가짐
- **규제적 의도:** EPA PAG(Protective Action Guides)에 근거함. AOO 영역에서는 결과(선량)를 1 rem 이하로 억제하여 사고 시 주민 대피나 옥내 대피와 같은 부지 외부 비상 조치가 불필요한(No off-site EP) 설계를 입증하려는 전략적 목표를 가짐

인허가기반사건(LBE) 선정

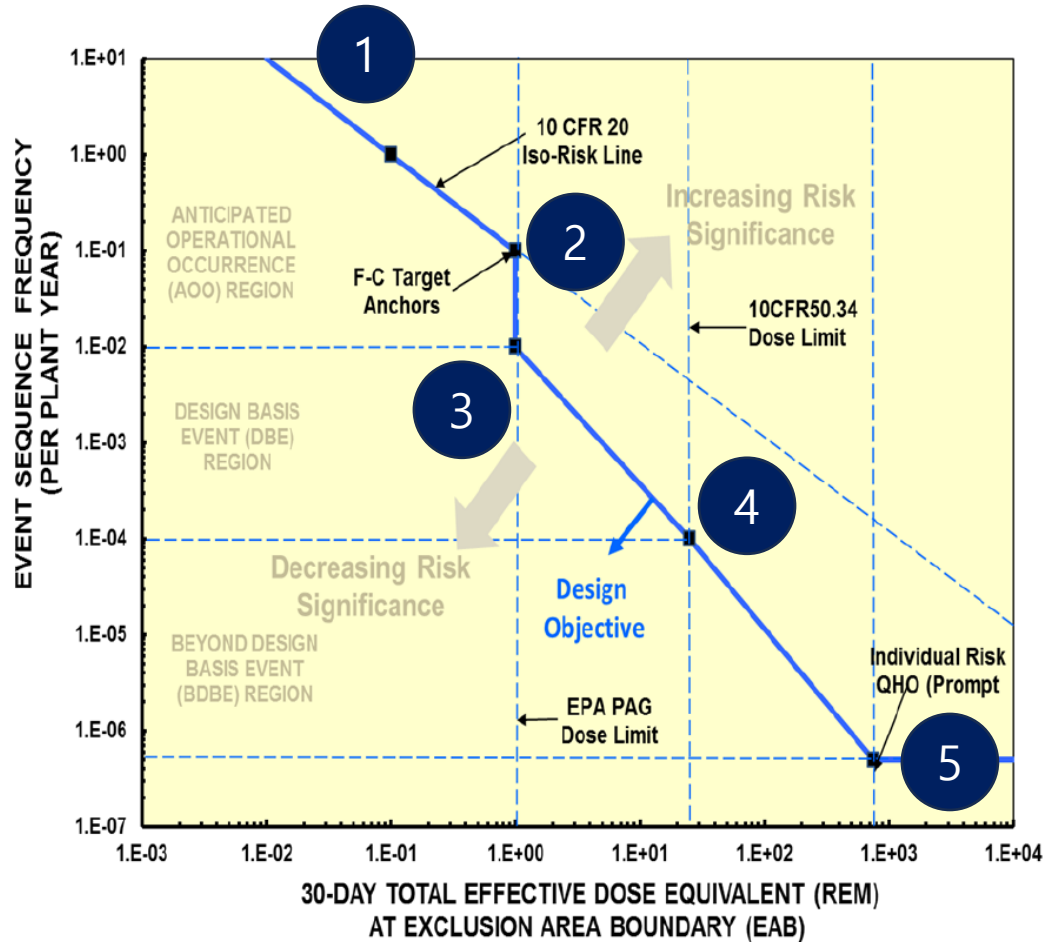


Figure 3-1. Frequency-Consequence Target

Anchor	빈도 (Per Plant-Year)	TEDE 선량 (REM)	주요 근거 및 의미
지점 1	1E+0	0.1	Part 20 연간 피폭 제한치 (100 mrem/year) 준수
지점 2	1E-1	1	Part 20 등가 리스크 라인 (Iso-Risk Line) 유지
지점 3	1E-2	1	EPA PAG 선량 제한치 준수 및 부지 외부 비상 대응 방지
지점 4	1E-4	25	Part 50.34 설계 기준 사고 (DBA) 선량 한도와 정합
지점 5	5×1E-7	750	조기 사망 리스크 QHO (Prompt Fatality QHO) 미초과 보장

인허가기반사건(LBE) 선정

AOO(예상운전과도)

- **심사 목적:** 원전 수명 기간 중 한 번 이상 발생할 것으로 예상되는 시나리오들이 10 CFR 20 한도 내에서 적절히 관리되는지 확인함
- **고빈도 사건 확인:** 빈도가 10^{-2} 이상인 모든 시나리오가 누락 없이 식별되었는지, 개별 AOO의 점 추정치가 F-C Target(100 mrem 라인) 아래에 위치하는지 검토함
- AOO는 운전 제한치(LCO)를 설정하고 정상 운전 범위가 충분히 안전함을 보장하는 근거가 됨

인허가기반사건(LBE) 선정

DBE(설계기준사고) 및 RSF 선정

- **심사 목적:** 개별 원전의 수명 중에는 발생할 가능성이 낮지만 설계 시 반드시 고려해야 하는 사고들의 타당성을 평가함
- **중빈도 사건 확인:** 10^{-2} ~ 10^{-4} 구간의 시나리오 빈도가 적절히 산정되었는지, 결과가 F-C Target 이내인지 검증함
- 각 DBE 시나리오에서 선량을 25 rem 이하로 유지하기 위해 성공해야 하는 기능을 RSF로 선정하며, 이는 제4장 SSC 분류의 직접적인 입력값이 됨

인허가기반사건(LBE) 선정

BDBE(설계기준초과사고) 및 Cliff Edge 효과

- 심사 목적: 매우 낮은 빈도의 사건에 대한 복원력을 평가하고 심층방어(DiD)의 적절성을 확인함
- 저빈도 사건 확인: 10^{-4} ~ 10^{-7} 구간의 시나리오가 750 rem 기준을 만족하는지 검토함
- Cliff Edge 평가: 하한선(5×10^{-7}) 미만인 사건은 인허가기반에서 제외되지만, 만약 빈도가 5×10^{-7} 에 근접하면서 결과가 큰 경위를 식별함, 이는 빈도나 모델 가정의 미세한 변화가 리스크의 급격한 상승(Cliff Edge)을 유발하지 않는지 확인하기 위함

인허가기반사건(LBE) 선정

기계적 선원항(Mechanistic Source Term, MST)

- 정의: 특정 사고 시나리오(LBE) 하에서 방사성 물질이 연료에서 부지 경계까지 이동하는 물리적/화학적 과정을 제1원리(First-principles)에 기반하여 계산한 선원항
- 성능 기반 접근: 기존 경수로의 고정된 방출 분율 방식과 달리, 각 노형의 고유 특성(연료 유지 성능, 냉각재 화학, 배관 내 침적 등)을 시간의 흐름에 따라 모델링

인허가기반사건(LBE) 선정

DBA 선정 및 단일고장기준(SFC)의 역할

- DBA 도출: DBA는 DBE 시나리오에서 비안전 계통의 기여를 배제하고 오직 SR 등급 기기만을 사용하여 분석한 보수적 사고 세트
- 단일고장기준(SFC) 적용이 불필요한 이유: NEI 18-04 체계에서는 다음과 같은 이유로 명시적인 SFC를 요구하지 않음
 - PRA가 모든 단일 고장, 다중 고장, 공통원인고장(CCF)을 발생 빈도 계산에 이미 통합하여 반영함
 - 제5장의 심층방어(DiD) 평가를 통해 단일 고장에 대한 내성을 정성적/정량적으로 별도 검증

인허가기반사건(LBE) 선정

DBE vs. DBA

- **DBE (설계기준사건):** PRA를 통해 식별된 실제 발생 가능한 사건 경위. 발전소의 모든 계통(SR, NSRST, NST)이 설계된 대로 작동한다고 가정하며, 현실적인(Realistic/Mechanistic) 분석을 수행
- **DBA (설계기준사고):** 오직 SR(Safety-Related) SSC만이 작동한다고 가정하는 보수적인 시나리오. 비안전 계통이 모두 실패했다는 가정하에 안전 계통의 정량적 성능을 확인하기 위한 결정론적(Deterministic) 분석 대상

구분	DBE 평가 (Task 7a)	DBA 평가 (Task 7d)
분석 목적	리스크 정보 활용 및 성능 기반 설계 검증	법적 선량 한도 준수 입증 (결정론적 안전성)
적용 기기	모든 SSC (Full Plant Response)	SR SSC 전용 (Only SR SSCs)
선량 기준	F-C Target (빈도에 비례)	10 CFR 50.34 (25 rem)
분석 방법	Mechanistic Source Term (평균값 중심)	보수적 가정 기반 (95th Percentile)

인허가기반사건(LBE) 선정

DBA 선별 및 도출

- Step 1: RSF(Required Safety Function, 필수안전기능)의 식별 (Task 5a)
 - 모든 DBE 시나리오를 검토하여, 10 CFR 50.34의 선량 한도(25 rem)를 준수하고 F-C Target 내에 머물기 위해 반드시 수행되어야 하는 '최소한의 기능'을 확인
- Step 2: SR(안전 관련) SSC의 선택 (Task 5b)
 - 식별된 RSF를 물리적으로 수행할 수 있는 기기들을 선택
 - 설계자는 가용한 기기 중 RSF를 수행할 특정 조합을 선택하여 SR SSC로 분류
- Step 3: DBE에서 DBA로의 변환 (Task 6)
 - 식별된 각 DBE에 대해 다음과 같은 규제적 가정을 적용하여 DBA를 생성
 - SR SSC만 가동: RSF를 수행하는 안전 관련 계통만 작동한다고 가정
 - 비안전 계통 배제: 동일한 기능을 수행할 수 있는 비안전 관련 계통(NSRST, NST)은 모두 가용하지 않은 것으로 간주
 - 보수적 분석 수행: DBE에서 사용했던 현실적 가정 대신, 불확실성을 고려한 보수적인 가정을 적용하여 선량 평가를 수행

인허가기반사건(LBE) 선정

DBE에서 DBA로의 이동

- 이동의 방향: 우측 수평 이동 (결과값의 증가)
 - 작동 기기의 제한 (SR SSC Only): DBE는 발전소의 모든 계통(안전 및 비안전)이 가동되어 사고를 완화하는 상태. 완화 수단이 줄어들기 때문에 선량 결과값(X축)은 자연스럽게 우측으로 이동
 - 분석 가정의 보수화: DBE는 '평균적/현실적(Realistic)'인 메커니즘을 따르지만, DBA는 불확실성을 포함한 '보수적(Conservative)' 가정 및 상위 95 백분위수 선원량을 적용. 계산된 선량은 다시 한번 우측으로 이동
- 빈도(Frequency)의 변화: 고정 또는 삭제
 - 결정론적 고정: DBA는 빈도(Y축)에 따라 안전성을 평가하는 항목이 아님
 - DBA는 특정 DBE의 시나리오를 '가정'하여 안전 계통의 성능을 확인하는 결정론적 분석이므로, F-C Curve상의 빈도 논리에서 벗어나 10 CFR 50.34의 절대적 한계선(25 rem)에 도달하는지를 확인

인허가기반사건(LBE) 선정

설계 기준 외부 재해 강도 (DBEHL)

- 선정 기준: 안전 관련(SR) SSC가 필수안전기능(RSF)을 수행할 수 있도록 설계 시 반영해야 하는 외부 재해(지진, 홍수 등)의 강도는 연간 초과 빈도 1×10^{-4} 이하를 기준으로 선정(근거: NEI 18-04, Section 3.5.4)
- 구조적 건전성: SR 기기는 이러한 DBEHL 하중 조건에서도 기능을 상실하지 않고 RSF를 완수할 수 있도록 설계되어야 함

인허가기반사건(LBE) 선정

통합 리스크(Aggregate Risk) 및 리스크 중요도(Risk-Significance)

- 정량적 안전 목표 (QHOs): 모든 LBE의 리스크 합계는 다음 NRC 안전 목표를 만족해야 함
 - 조기 사망 리스크: 1마일 이내 개인에 대해 연간 5×10^{-7} 이하
 - 암 사망 리스크: 10마일 이내 개인에 대해 연간 2×10^{-6} 이하
- 10 CFR 20 준수: 모든 AOO에 의한 연간 누적 선량 총합은 100 mrem/yr 이하(EAB 기준)여야 함
- 리스크 중요도 기준: 다음 중 하나라도 해당하면 'Risk-Significant' LBE로 분류함
 - F-C Target 커브의 1% 이내에 위치하는 경우
 - 전체 리스크 합계가 어느 하나의 QHO 목표치의 10%를 초과할 때, 해당 리스크의 1% 이상을 기여하는 경우

인허가기반사건(LBE) 선정

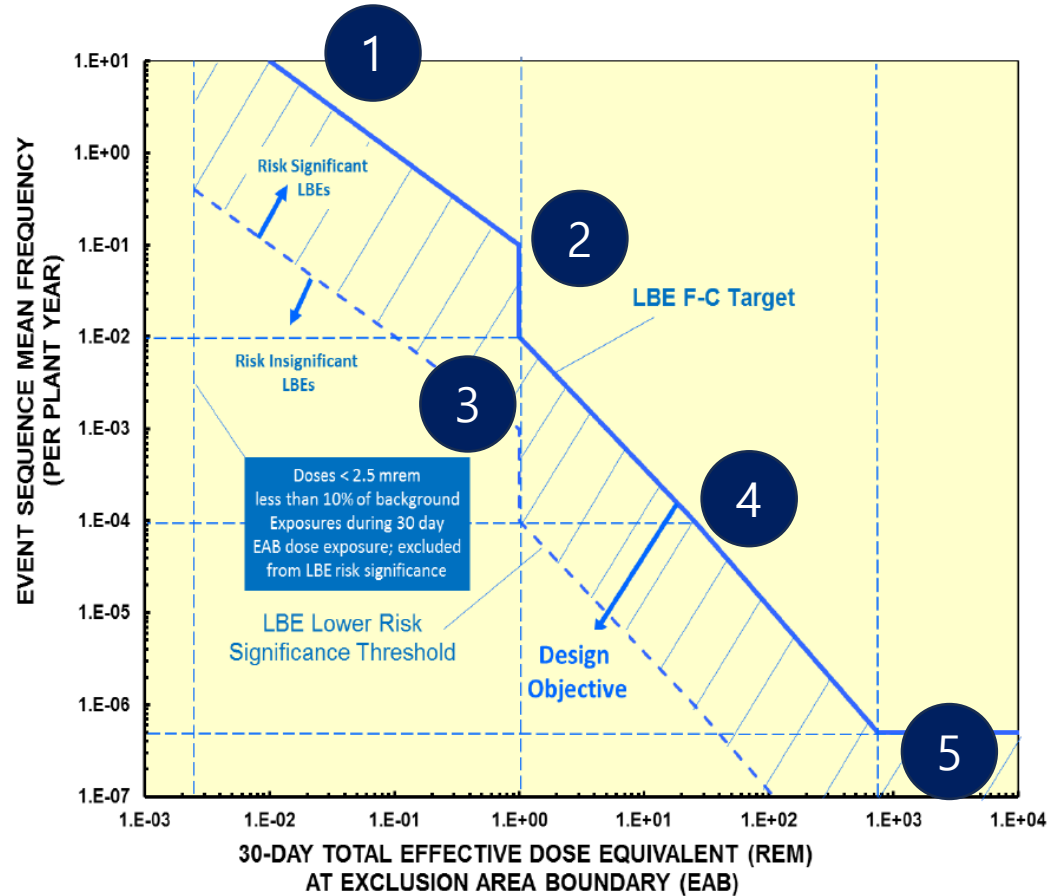


Figure 3-4. Use of the F-C Target to Define Risk-Significant LBEs

Anchor	빈도 (Per Plant-Year)	TEDE 선량 (REM)	주요 근거 및 의미
지점 1	1E+0	0.1	Part 20 연간 피폭 제한치 (100 mrem/year) 준수
지점 2	1E-1	1	Part 20 등가 리스크 라인 (Iso-Risk Line) 유지
지점 3	1E-2	1	EPA PAG 선량 제한치 준수 및 부지 외부 비상 대응 방지
지점 4	1E-4	25	Part 50.34 설계 기준 사고(DBA) 선량 한도와 정합
지점 5	5×1E-7	750	조기 사망 리스크 QHO (Prompt Fatality QHO) 미초과 보장

인허가기반사건(LBE) 선정

불확실성 및 민감도 분석(Uncertainty & Sensitivity)

- 불확실성 정량화
 - 모든 LBE 평가 시 빈도와 결과 계산에 사용된 데이터의 불확실성을 반드시 반영해야 함
- 상위 95% 신뢰구간 평가
 - F-C Target 만족 여부를 판단할 때 평균값(Mean)뿐만 아니라 상위 95% 신뢰구간(95th percentile) 값도 Target 아래에 위치하는지 검토하여 충분한 안전 마진을 확보해야 함
- 민감도 분석
 - 어떤 파라미터나 모델 가정이 리스크 프로파일 및 LBE 분류에 가장 큰 영향을 미치는지 식별함

인허가기반사건(LBE) 선정

LBE 선정의 반복적 특성

- Feedback Loop
 - LBE 선정은 고정된 작업이 아니라 설계가 구체화됨에 따라 지속적으로 반복되는 '살아있는(Living)' 과정임
- 업데이트 트리거
 - 주요 설계 변경, PRA 모델의 고도화, 혹은 MST 계산 관련 최신 실험 데이터가 확보될 경우 LBE 목록과 분류를 재평가해야 함
- 최종 확정
 - 최종 설계가 반영된 최신 PRA 결과가 F-C Target과 QHO를 모두 만족함을 입증할 때 인허가 기반이 완성함



**Modernization of Technical Requirements
for Licensing of Advanced Non-Light Water Reactors**

**High Temperature, Gas-Cooled Pebble Bed Reactor
Licensing Modernization Project Demonstration**

Project Report
Issued Final

Authors: Brandon Waites, Karl Fleming, Fred Silady, Alex Huning, and Jason Redd

Document Number
SC-29980-200 Rev 0

August 2018

Prepared for:
U.S. Department of Energy (DOE)
Office of Nuclear Energy
Under DOE Idaho Operations Office
Contract DE-AC07-05ID14517

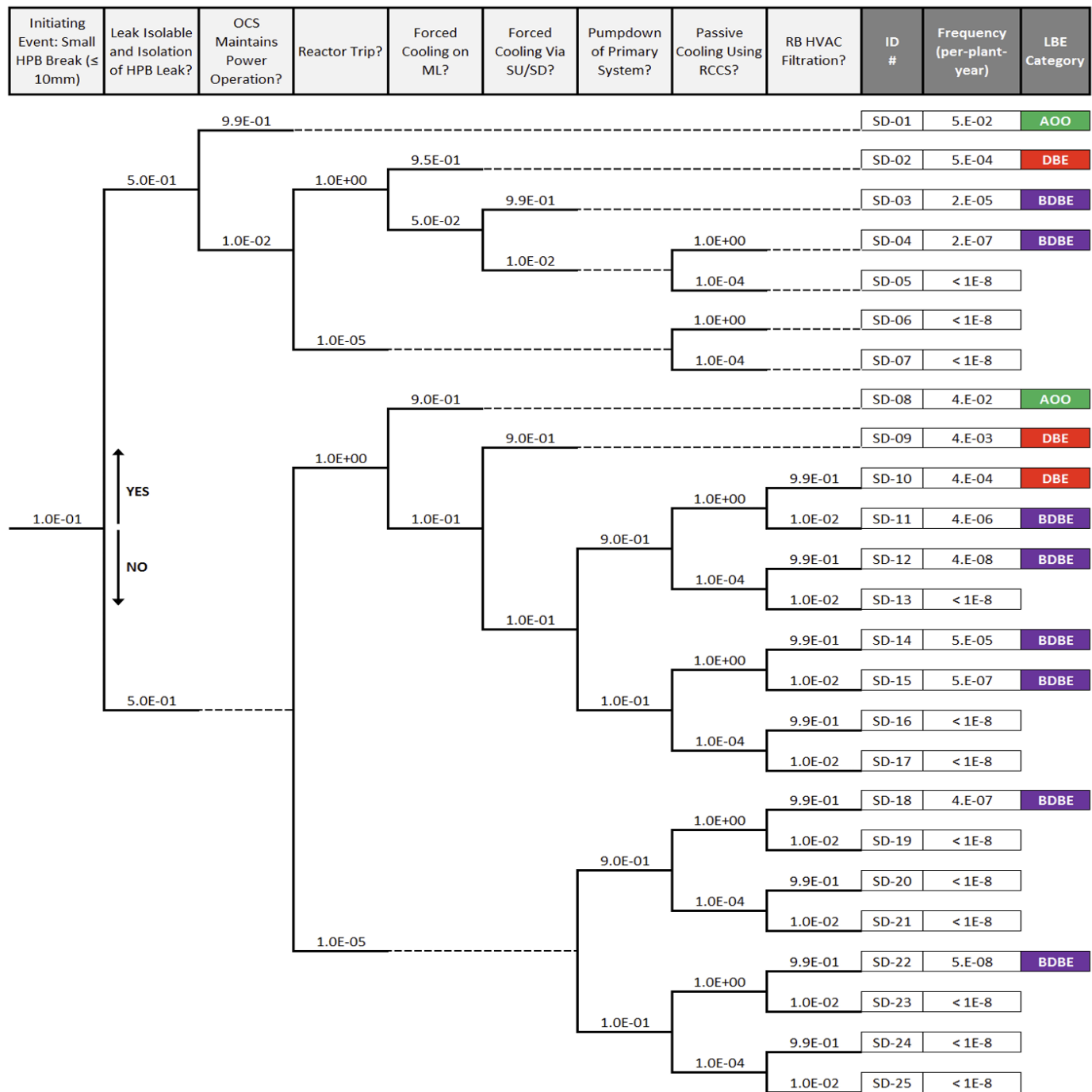


Figure 3. Small Helium Depressurization Event Tree with Associated LBEs

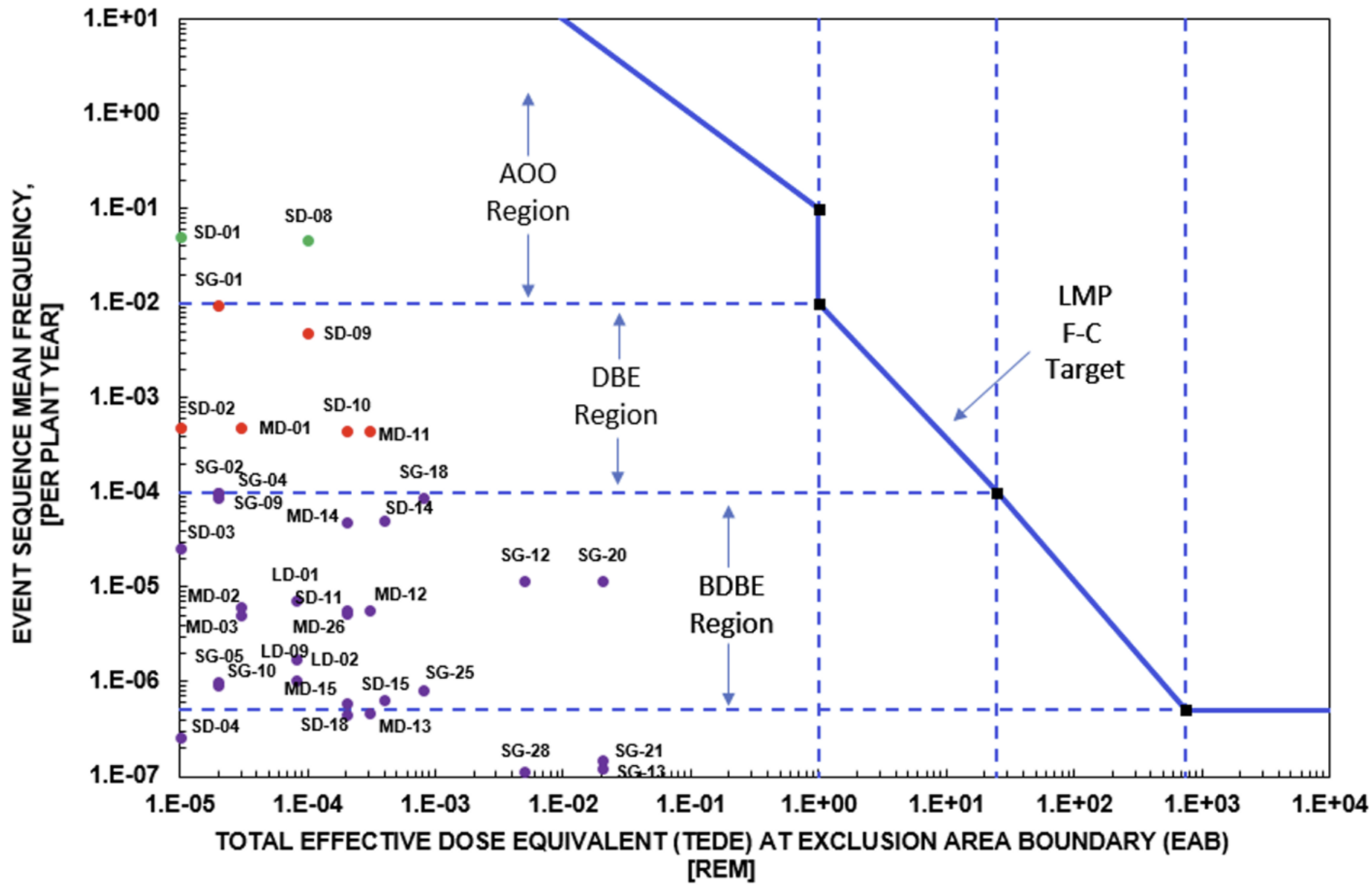


Figure 4. Xe-100 LBEs Plotted Against the LMP F-C Target

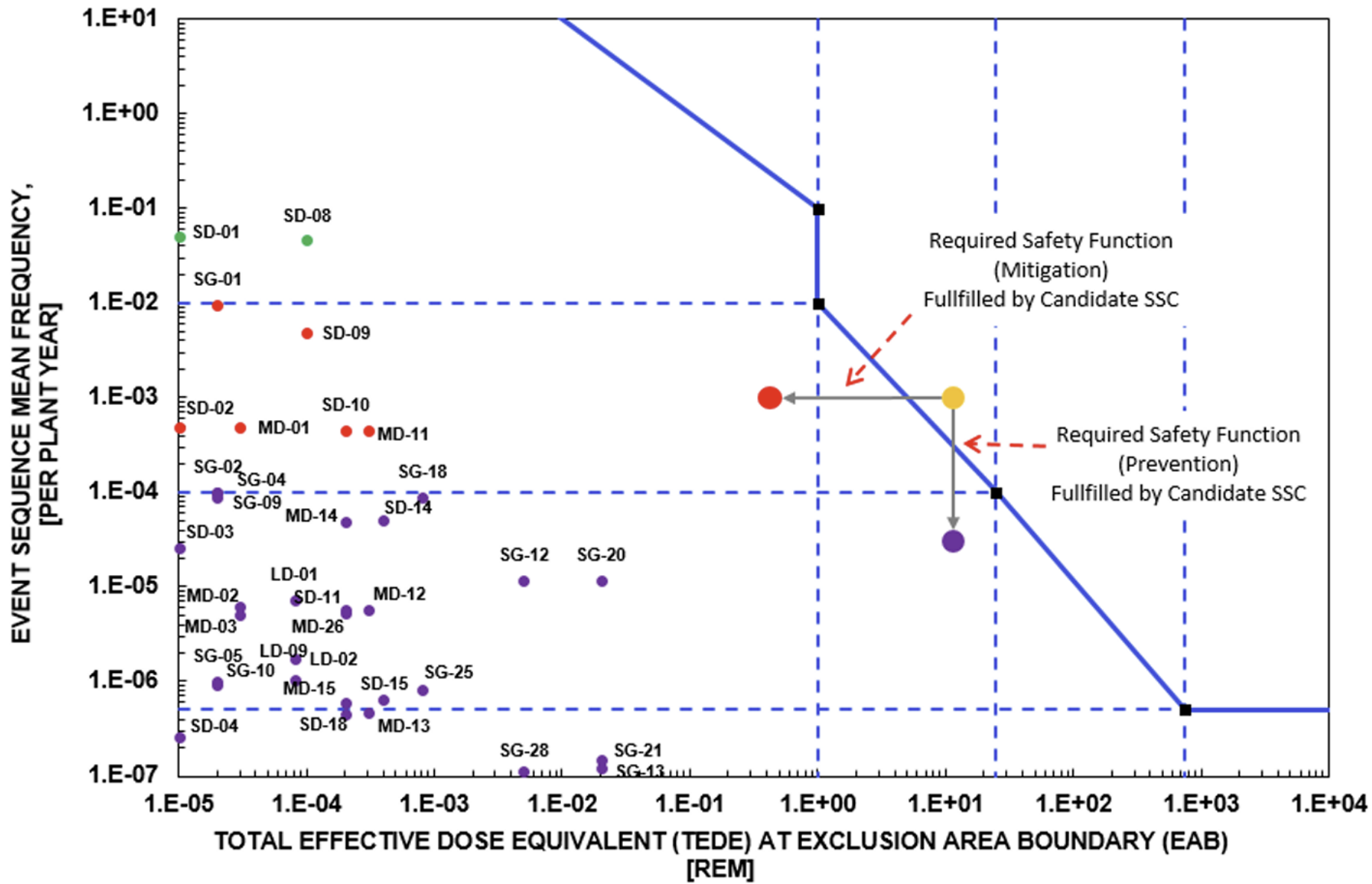


Figure 6. Concept of Safety Functions for Mitigation of DBEs and Prevention of High Consequence BDBEs

SSC 분류 및 성능기준

SSC 분류 개요 및 범주

- **분류의 목적**
 - 리스크 정보 활용 및 성능 기반(RIPB*) 접근 방식을 통해, 각 SSC의 안전 중요도에 부합하는 규제적 통제와 특별 조치(Special Treatment) 수준을 결정
- **LBE와의 연계**
 - 제3장에서 식별된 LBE 시나리오의 빈도와 결과, 필수 안전 기능(RSF) 수행 여부가 분류의 직접적인 입력 데이터가 됨
- **SSC 범주**
 - **SR (Safety-Related):** 필수 안전 기능(RSF)을 수행하거나 BDBE의 빈도/결과를 억제하기 위해 필수적인 기기
 - **NSRST (Non-Safety-Related with Special Treatment**):** SR은 아니지만 위험도 측면에서 중요(Risk-Significant)하거나, 심층방어(DiD) 강화를 위해 특별 조치가 필요한 기기
 - **NST (Non-Safety-Related):** 일반적인 산업 표준(Commercial Grade)으로 관리되는 기타 기기

*RIPB(Risk-Informed Performance-Based) : 규정된 절차 준수보다 실제 리스크와 달성해야 할 성능 목표에 집중하는 규제 방식

**Special Treatment : 기기가 설계된 대로의 신뢰도와 성능을 유지할 수 있도록 설계, 제작, 설치, 시험, 유지보수 등에 부여되는 추가적인 품질 및 기술 요건을 의미

SSC 분류 및 성능기준

SSC 분류 프로세스 및 통합 의사결정(IDP)

- 분류 단계
 - SF 수행 여부 확인 → 리스크 중요도 평가 → 심층방어(DiD) 적절성 검토 → 최종 범주 결정
- IDP* (Integrated Decision-making Process)
 - SSC 분류는 단순히 PRA 수치에만 의존하지 않으며, 설계 전문가, PRA 전문가, 운영 전문가로 구성된 패널의 정성적·정량적 검토를 거쳐 최종 확정됨

*IDP 구성의 법적 요건

- 참고문헌: 10 CFR 50.69(c)(2) (Designation of RISC categories), NEI 00-04 (10 CFR 50.69 SSC Categorization Guideline), Regulatory Guide 1.201
- 법적 요건 및 절차: IDP는 "다학제적 전문가 패널(Multi-disciplinary Expert Panel)"로 구성되어야 하며, 각 위원은 설계, PRA, 운영, 유지보수, 품질보증 분야에서 최소 5~10년 이상의 전문 경력을 보유. 모든 결정은 개별 위원의 주관적 판단을 넘어 공식적인 훈련(Formal Training)을 이수한 후, 문서화된 합의(Consensus) 또는 다수결 절차를 통해 이루어져야 하며, 소수 의견(Dissenting Views) 역시 반드시 기록으로 남겨야 함.

SSC 분류 및 성능기준

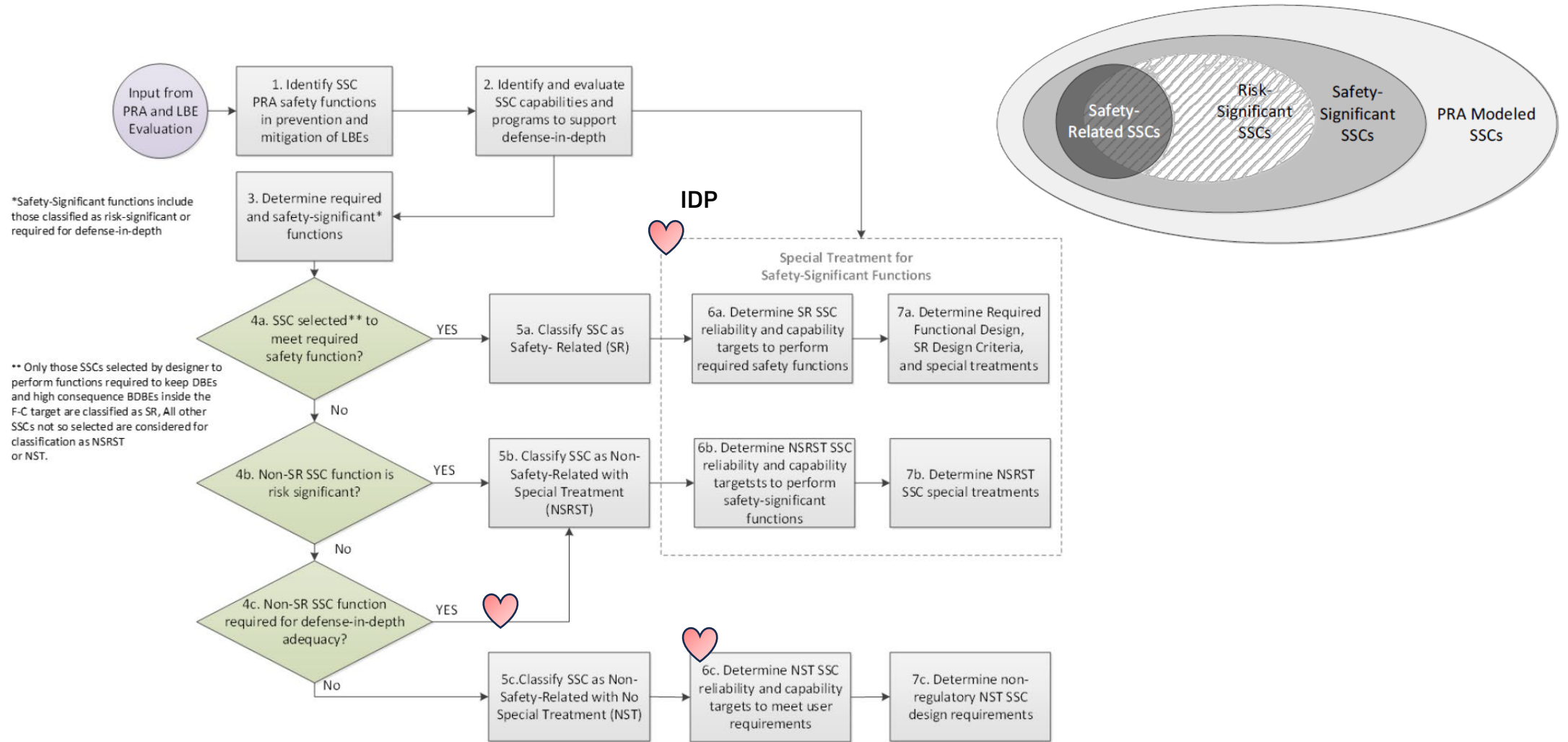


Figure 4-1. SSC Function Safety Classification Process

안전 관련(SR) SSC의 식별 기준

- 구체적 식별 기준
 - DBE 완화: DBE 시나리오에서 10 CFR 50.34 선량 한도(25 rem) 준수를 위해 필요한 RSF를 수행하는 경우
 - BDBE 방지: 고빈도 BDBE가 F-C Target을 초과하지 않도록 억제하거나, 해당 사건의 빈도를 BDBE 영역으로 유지하는 데 필수적인 경우

NSRST(특별 조치 대상 비안전 기기) 식별 기준

- NSRST의 정의
 - SR 범주에는 해당하지 않으나, 원전 전체 리스크를 낮게 유지하거나 심층방어(DiD) 적절성을 보장하기 위해 특별 조치가 필요한 SSC
- 구체적 식별 기준: 다음 중 하나를 만족하면 NSRST로 분류
 - 리스크 중요(Risk-Significant): 해당 SSC의 고장이 전체 리스크를 F-C Target 또는 QHO 임계치 이상으로 올릴 수 있는 경우
 - 심층방어 중요(DiD-Significant): 정성적/정량적 DiD 평가 결과, 특정 방어벽의 독립성 유지나 다중성 확보를 위해 신뢰도가 보장되어야 하는 경우

SSC 분류 및 성능기준

리스크 중요도(Risk-Significance) 평가 방법 및 근거

- 평가 원칙: 개별 LBE의 위치(F-C Target 대비)와 통합 리스크(Aggregate Risk)에 대한 기여도를 모두 고려하여 결정
- 정량적 판단 기준 및 상세 출처

기준 항목	상세 내용 (Threshold)	원문 출처 (Section)
F-C Target 근접도	개별 LBE의 빈도 또는 선량 결과값이 F-C Target 커브의 1% 이내에 위치하는 경우 (해당 LBE에 관여하는 SSC는 리스크 중요함)	Section 3.3.4 (7c)
누적 리스크 기여도	모든 LBE의 누적 리스크가 어느 하나의 QHO 목표치의 10%를 초과하는 상황에서, 해당 QHO 리스크의 1% 이상을 기여하는 개별 LBE 및 관련 SSC	Section 3.3.4 (7c)
QHO 한도 유지	특정 SSC의 기능이 어느 하나의 QHO 리스크를 10% 한도 이내로 유지하는 데 필수적인 경우 (해당 기능을 상실할 때 리스크가 10%를 상회하게 됨)	Section 4.2.1 (Item 2)
PRA 중요도 지수	PRA 모델에서 산출된 RAW 또는 F-V 지수가 IDP(통합 의사결정 프로세스)에서 설정한 임계치를 초과하는 경우	Section 4.2.1 (Item 3)

SSC 분류 및 성능기준

DiD(심층방어) 강화를 위한 SSC 분류

- 심층방어(DiD)의 역할
 - PRA 수치의 불확실성을 보완하기 위해 방어 체계를 다중화하는 결정론적 안전 전략
- NSRST 선정 로직 (DiD 관점)
 - 독립성: 사고 방지 기능과 완화 기능이 서로 다른 계통에 의해 수행되도록 보장하기 위해 특정 보조 계통을 NSRST로 지정.
 - 여유도: 단일 계통 고장 시에도 선량 한도를 넘지 않도록 다양성(Diversity)을 제공하는 설비를 NSRST로 지정.
- IDP(통합 의사결정 프로세스)의 역할
 - 수치상으로는 리스크 중요도가 낮더라도, 전문가 패널이 "심층방어 강화를 위해 이 기기의 신뢰도가 필요하다"고 판단하면 NSRST로 분류됨

SSC 분류 및 성능기준

SR vs NSRST 특별 조치 적용 원칙

- 범주별 관리 전략: 등급이 높을수록 규제적 통제의 강도가 높아지는 '등급별 접근 방식(Graded Approach)'을 적용

구분	SR (Safety-Related)	NSRST (NSR with Special Treatment)
품질 요건	10 CFR 50 Appendix B (원자력 품질보증) 준수 필수	상용 표준을 기본으로 하되, 리스크 관리에 필요한 특정 조치 추가
설계 표준	ASME Class 등 엄격한 원자력 코드 및 지침 적용	산업 표준(Non-Nuclear Code) 사용 가능하나, 신뢰도 입증 필요
재해 보호	DBEHL(지진 등) 하중 하에서의 기능 유지 필수	해당 기기가 방어하는 시나리오에 따라 차등 적용
성능 확인	정기적인 감시 시험(Surveillance) 및 엄격한 성능 입증	상태 감시(Condition Monitoring) 및 신뢰도 분석 보고

심층방어(DiD) 철학* 및 정의

- DiD의 정의: 방사성 물질 방출을 초래하는 사고를 예방하고 완화하기 위해 여러 독립적이고 중복된 방어 계층을 만드는 발전소 설계 및 운영함
- 핵심 원칙: 특정 계층이 아무리 견고하더라도 단일 계층에만 전적으로 의존하지 않으며, 인적·기계적 실패를 보완하기 위해 여러 층의 보호 조치를 유지함
- 주요 수단: 접근 제어, 물리적 방벽, 중복 및 다양성을 갖춘 핵심 안전 기능, 비상 대응 조치를 포함함

* 심층방어: PSA 모델의 한계나 데이터의 불확실성 등 '알려지지 않은 위험(Unknowns)'에 대비한 결정론적 보완책

DiD 적절성 수립 프레임워크

- 발전소 역량 DiD (Plant Capability DiD): 피동/능동 SSC, 물리적 방벽, 신뢰성 및 설계 마진 등 하드웨어적 방어 능력임
- 프로그램적 DiD (Programmatic DiD): 성능 목표 달성을 위한 제조, 건설, 정비 프로그램 및 운영 절차 등 행정적 조치임
- 리스크 정보 활용 DiD 평가 (RIPB Evaluation): LBE 선정, SSC 분류, 리스크 마진 평가를 통해 전체 DiD의 충분성을 분석하는 프로세스임

* 상호 작용: 리스크 통찰력과 판단(IDP)을 통해 발전소 역량과 프로그램적 확신을 지속적으로 강화하는 구조임

발전소 역량 DiD 적절성 지침

- 일반 지침: 각 방어 계층은 기능적으로 독립적이어야 하며, 단일 특징에 전적으로 의존해서는 안됨
- 계층별 정량적/정성적 지침:
 - 계층 1 & 2: 이상 상태 탐지 및 제어를 통해 DBE로의 전이를 방지함
 - 계층 3 (DBE 제어): 모든 DBE 빈도를 0.01/plant-year 미만으로 유지하고 F-C Target을 준수함
 - 계층 4 (BDBE 완화): 모든 BDBE 빈도를 0.0001/plant-year 미만으로 유지하고 QHO를 준수함

발전소 역량 DID 속성

- 평가 주안점 (Evaluation Focus):
 - 완결성: PRA의 기인 사건 선정 및 시퀀스 모델링이 논리적으로 타당한가?
 - 방어 계층: 물리적/기능적 방벽*과 수동/능동 SSC가 다중성 및 다양성을 확보하고 있는가?
 - 신뢰성: 예방(Prevention)과 완화(Mitigation) 기능이 조화를 이루고 있는가?
 - 독립성: 특정 계층이나 특징이 안전 목표 달성을 위해 독립적으로 신뢰되지 않는가?

* 방벽(Barriers): 원문에서 방벽은 물리적 장벽뿐만 아니라 방출을 지연시키거나 양을 줄이는 기능적 특징까지 포함함

LBE 및 발전소 리스크 마진 평가

- 마진 평가 방식:
 - 평균치 기반 마진: LBE 빈도 및 선량 평균값을 F-C Target과 비교한 비율임
 - 보수적 마진: 불확실성을 고려하여 상위 95% 값(Upper Bound)을 기준으로 평가함
- 리스크 중요도: 마진이 작을수록 해당 LBE의 불확실성이 리스크 수용성에 미치는 영향이 크다고 판단함

SSC 등급분류에서 IDP의 역할 (Figure 4-1의 번호 참조)

- 심층방어(DiD) 역량 식별 및 평가 (Task 2)
 - 프로세스의 초기 단계로서, PRA 결과가 입력된 직후 수행
 - 발전소의 심층방어 적절성을 보장하기 위해 필요한 SSC의 기능, 신뢰도, 역량을 식별하는 피드백 루프 역할
 - PRA에서 충분히 다루지지 않은 불확실성을 고려하여, 어떤 기기가 '안전 중요(Safety-significant)'한 기능을 수행하는지 정성적으로 판단
- 리스크 중요도 외의 안전 중요 SSC 판정 (Task 4c)
 - 기기가 '안전 관련(SR)'도 아니고 '리스크 중요(Risk-significant)'도 아닐 때 거치는 마지막 필터
 - 리스크 수치상으로는 낮더라도, 심층방어의 적절성을 확립하기 위해 특별 조치가 필요한지를 최종 결정
- 특별 조치(Special Treatment) 요건의 확정 (Task 7a, 7b, 7c)
 - 분류가 완료된 후 각 등급별로 구체적인 요건을 부여하는 단계
 - SR 및 NSRST 기기에 대해 PRA에서 가정한 신뢰도와 역량을 수명 기간 동안 유지할 수 있도록, 구체적으로 어떤 특별 조치(시험, 감시, 정비 등)를 적용할지 결정함
 - SSC 분류의 근거와 적용된 특별 조치의 타당성을 검토하고 이를 공식적인 품질 기록으로 남김

NEI 18-04의 활용

SSC 안전등급분류 → 품질등급, 내진등급, 전기등급 등

설계기준사고 정의 → 국내에서는 다중고장 정의 등 사고관리계획서에서 요구하는 추가 분석 지원

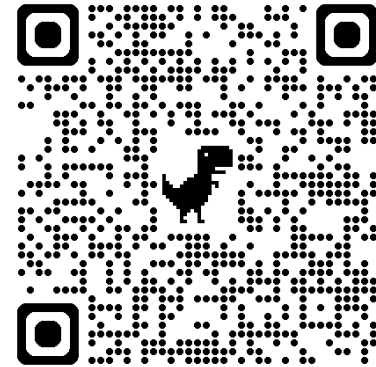
운영단계에서의 검사, 교육/훈련 차등화

RIPB 방호 → 물리적방호, 사이버보안에서 핵심자산 식별, 검사, 교육/훈련 차등화

RIPB 방재 → 비상계획 및 EPZ 설정

원자력리스크연구회 “기술포용 리스크정보활용 성과기반 방법론” 워크숍

- 주관: 연구회 'F-C 커브 특별위원회'
- 일시/장소: 26.07.02-03 / 청주 오스코
- 내용: TI-RIPB 방법론 기술배경 설명 및 국내규정에 부합하는 F-C 커브 개발 연구 현황 공유



제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

선진원자로 핵안보 규제 미래

한국원자력통제기술원 이나영
leeny@kinac.re.kr

핵심 원자력 규범의 조화 (3S Harmonization)



안전, 안보, 안전조치 간 통합된 방식의 설계와 규제 조화 필수

3S Harmonization



《 SMR 안전규제방향 주요 내용 》

▶ 일반원칙

- SMR도 모든 원자력 규제에 적용되는 기본안전원칙을 예외없이 준수하고, 과학기술과 전문성에 기반을 둔 합리적 안전규제를 이행한다는 것을 재확인

▶ 기본방향

- SMR의 높아진 기술수준만큼 최상의 안전수준을 확보 (규제관점)
- 혁신적 설계특성으로 기존 기술기준을 적용할 수 없는 경우, 규제기관이 다양한 평가 방식을 활용한 안전성 확인방안 제시 (규제방식)
- 규제협력을 통해 국제적으로 조화롭고 인정받는 기준 마련 (규제기준)
- 선도(Leading), 소통(Interaction), 준비(Readiness) 등 3가지 핵심전략을 통해 SMR의 새로운 설계특성을 고려한 규제체계 마련 (규제체계)

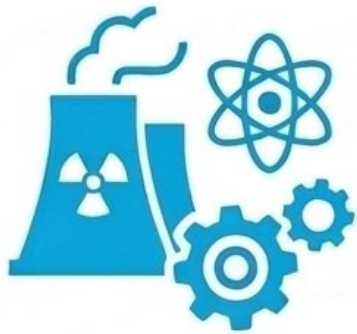
▶ 설계 가이드라인

- SMR개발의 시행착오를 줄이고 규제의 예측가능성을 높이기 위해 개발과정의 고려사항 제시

※ 사고예방및 원화능력 확보 SMR에 새롭게 적용되는 기술의 안전성 및 신뢰성 확보, 방사선방호 최적화 및 환경영향 등의 최소화 **안전·안보·안전조치간 통합된 방식의 설계 등**

핵비확산

(Nuclear Nonproliferation)



핵물질, 원자력시설 및
장비 등에 사용되는 원자력
관련 기술이나 물자



핵비보유국에 핵무기
또는 핵폭발 장치로
전용

3S의 이해-안전조치

- 1975년 NPT 가입
- 1975년 전면안전조치협정 서명(1976년 발효)
- NPT, 평화적 이용 보증, IAEA 전면안전조치협정, 추가의정서
- 양자 조약인 원자력협력협정 체결을 통해 전면안전조치협정 이행 의무화
- 전면안전조치협정의 이행은 원자력 시설의 계량관리 보고서, 설계정보서 (Design Information Questionnaire), 격납·감시 및 검사의 수검 등

설계단계안전조치(Safeguards By Design) 사례

- MACSTOR-400 건설 사례
 - MACTROR-200 타입을 변형한 400 타입에 대한 건설허가 획득 및 건설 착수
 - 2004년 3월 한국은 IAEA에 MACSTOR-400 건설 계획 통보
 - 2004년 12월 합동실무그룹(한-IAEA) 구성하여 실무회의 착수 -->재검증 튜브 설치 및 봉인
 - 2006년 3월 최종 설계안을 IAEA에 송부하고, IAEA가 수용하여 2007년 7월 공사 재개
- 검토 의견
 - 기존 시설이라도 구조 변경 있을 시 가급적 미리 IAEA와 협의를 통해 안전조치 어프로치 확인 필요
 - IAEA 안전조치 적용이 불가능할 경우 이를 이용하는 것은 불가 (NPT, 전면안전조치협정, 원자력협력협정)

설계정보서

계량관리보고

격납 및 감시

검사

핵안보의 이해

물리적방호 개념

방지 (Prevention)



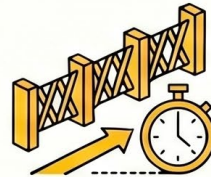
위협 요인을 사전에 식별하여 원천적으로 차단합니다.

탐지 (Detection)



무단 접근이나 악의적 행위를 신속하고 정확하게 인지합니다.

지연 (Delay)



물리적 장벽으로 침입자의 이동을 늦춰 대응 시간을 확보합니다.

대응 (Response)



인력과 장비를 투입하여 불법 행위를 물리적으로 저지하고 무력화합니다.

피해 최소화 (Mitigation)



사고 발생 후 2차 피해 확산을 방지하고 수습합니다.

“핵물질, 방사성물질 및 관련시설 또는 활동과 직접 또는 관련 있는 **내·외적 위협을 사전에 방지**하고, 위협이 발생한 경우에는 **불법행위에 대한 탐지·지연 및 대응수단**으로 이를 저지하며, 사고로 인한 **피해를 최소화** 하기 위한 일체의 **행정적·기술적 조치.**”

(원자력시설 등의 방호 및 방사능 방재 대책법 기반)

물리적방호의 대상



불법이전 (Unauthorized Removal)

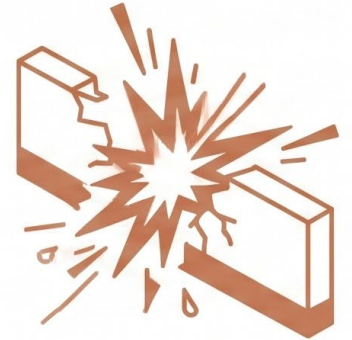
A 정의

정당한 권한 없이 핵물질을 수수, 소지, 소유, 보관, 사용, 운안, 개조, 처분 또는 분산하는 행위

B 주요 목적

농축 우라늄이나 플루토늄을 이용한 핵폭발장치(Nuclear Explosive Device) 제조 또는 고방사선 물질을 이용한 방사능 비산 장치(Dirty Bomb) 제조

사보타주 (Sabotage)



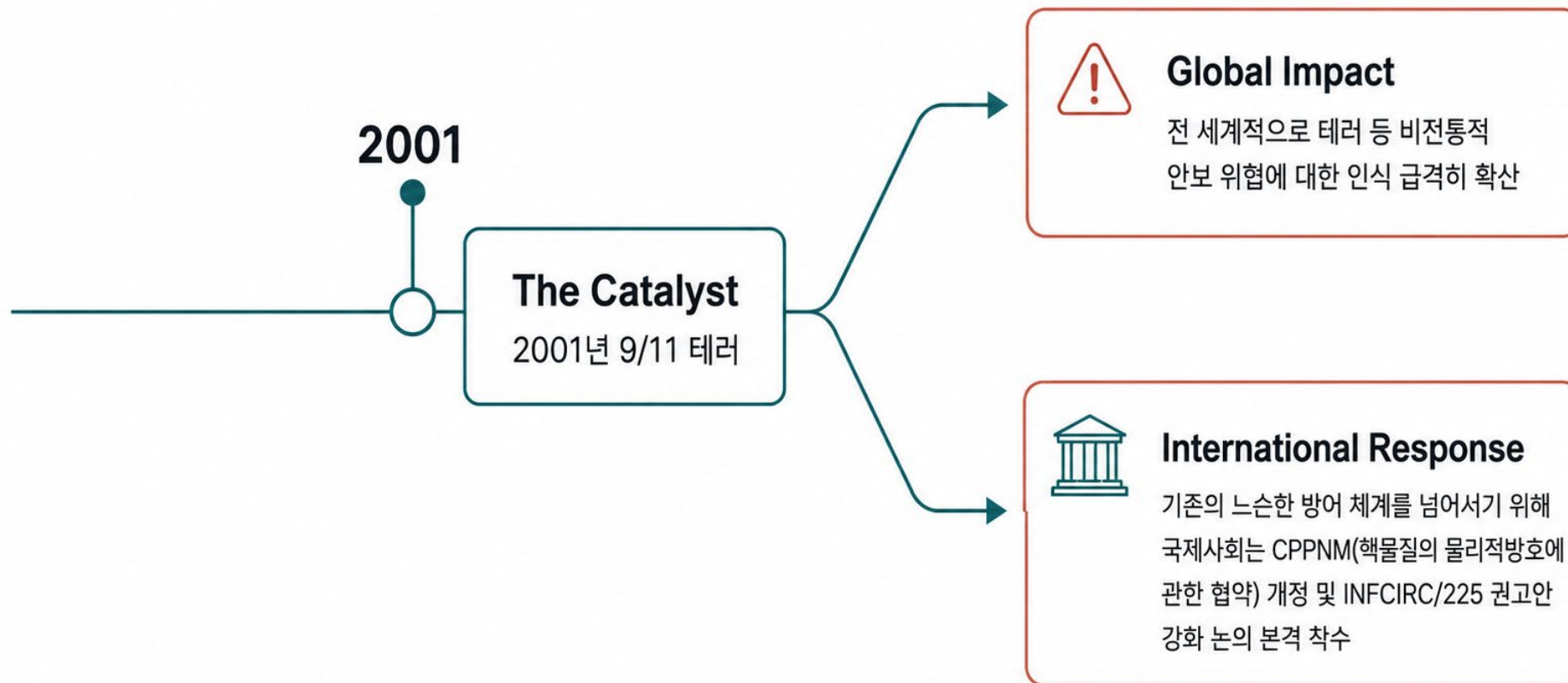
C 정의

핵물질 또는 원자력시설을 파괴·손상하거나 정상운전을 방해하는 행위

D 주요 목적

정당한 권한 없이 방사성물질을 배출하거나 방사선을 노출하여 사람의 안전, 재산, 환경을 위태롭게 함

핵안보 패러다임의 대전환 (2001)



국가 물리적방호 체제 법제화 : 방사능방재법 시행(2004)



2004년 4월, 「원자력시설 등의 방호 및 방사능방재대책법」 발효



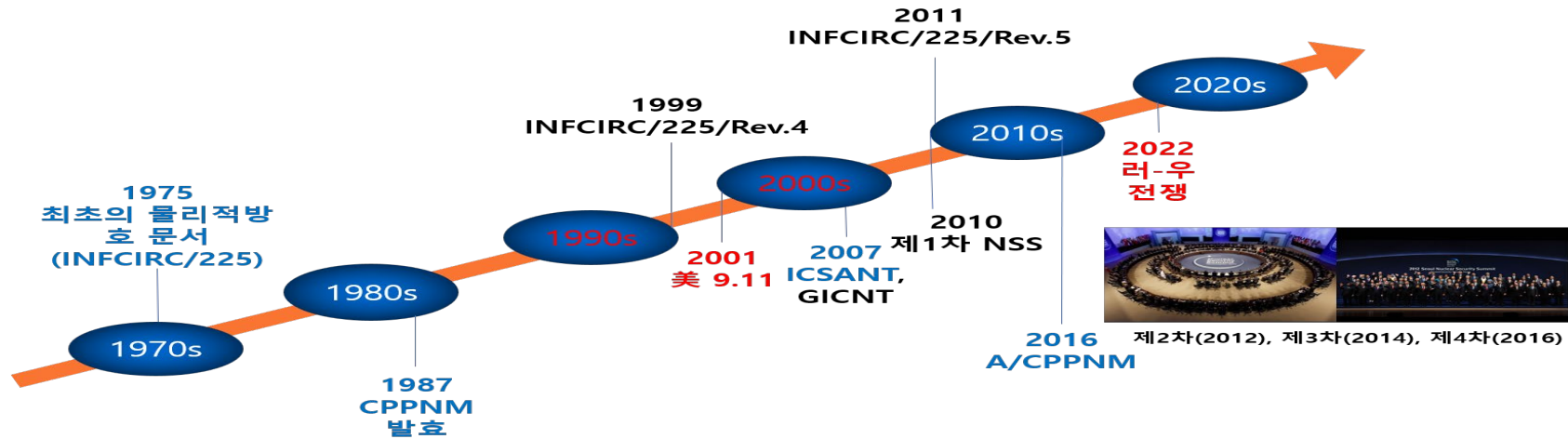
- 한국 내 핵안보 이행 체제에 필요한 요소들의 명문화 필요성 인식
- 강화된 국제지침과 개정된 CPPNM의 핵심 내용을 국내법에 선제적 반영



원자력사업자가 내·외부 위협에 대처할 수 있는 물리적방호 체계를 의무적으로 구축하게 함으로써, 핵물질/시설을 방호하고 방사선재해로부터 국민의 생명과 건강을 보호



핵안보 국제체제와 한국



핵안보 체제의 확립과 초기 대응 (1970년대 - 1990년대)



'1970~1975

국제적 규범의 시작

NPT 발효와 최초의 물리적 방호 문서(INFCIRC/225)가 제정된 시기입니다.



'1987

핵물질 물리적 방호 협약(CPPNM) 발효

핵물질의 안전한 운송과 관리를 위한 국제적 기준이 마련되었습니다.



'1991~1999

냉전 종식과 체제 정비

구소련 해체 이후 핵안보의 중요성이 대두되며 관련 지침이 개정되었습니다.

현대 핵안보의 위기와 협력의 심화 (2000년대 - 2020년대)



2001~2010

테러 위협과 국제 협력 강화

9·11 테러 이후 ICSANT 발족 및 제1차 핵안보정상회의(NSS)가 개최되었습니다.



2011~2016

규제 체계의 현대화

후쿠시마 사고 이후 NSSC 출범 및 물리적 방호 지침(Rev.5)이 강화되었습니다.



2020년대~현재

새로운 안보 환경의 도래

러시아-우크라이나 전쟁 등 급변하는 국제 정세 속 핵안보의 중요성이 재부각되었습니다.

위협 진화와 한국의 핵안보

위협 진화와 핵안보 규제 대응

9/11 테러



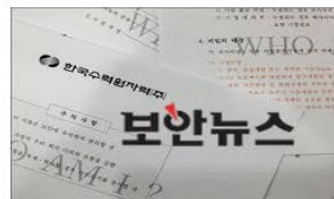
2001년

STUXNET



2010년

Who am I



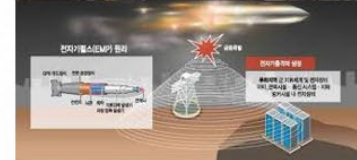
2014년

터키공항폭발테러 차량강습테러



'15-'19

우크라이나 드론전 EMP 테러 사우디유전드론테러



'20-'26

핵안보규제, 새로운 요구사항

‘핵안보 규제 패러다임의 전환: 위협 대응에서 성능기반 체계로’

규제 측면

위협 진화에 따른 DBT 대응 강화



9.11 테러 라-우 전쟁

9.11 테러 및 라-우 전쟁과 같은 실질적 위협에 대응하기 위한 설계기준위협(DBT) 요건 강화.

개발/운영 측면

SMR 도입 및 운영 최적화



SMR의 높은 안전성을 바탕으로 사고 확률을 낮추고, 방호구역 및 보안 인력을 효율적으로 축소 운영.

최종 결론: 새로운 보안 체계의 도입

성능기반 물리적방호 및 사이버보안 체계 구축

규제 강화와 운영 효율성을 동시에 달성하기 위해 유연하고 과학적인 보안 체계 도입이 필수적임.

성능기반 체계



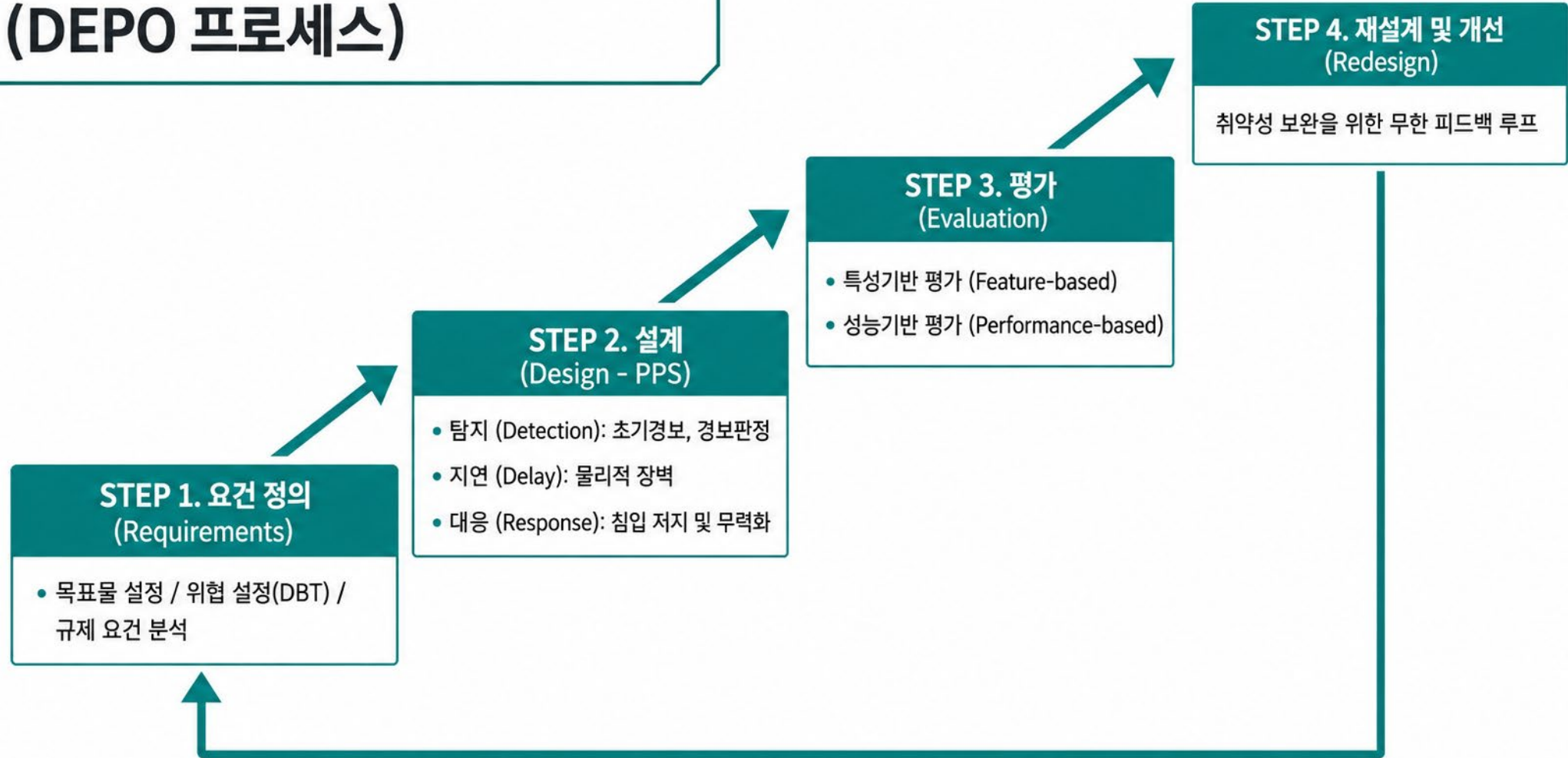
국제 핵안보 환경 변화의 주요 변곡점

2001년 / 2022년 (9.11 테러 / 라-우 전쟁)	2011년 / 2016년 (INFCIRC/225 Rev.5 / A/CPPNM)	2020년대~ (SMR 기술 대두 및 디지털 전환)
위험의 실제화 및 물리적방호 필요성 증대	국제 핵안보 규범의 구속력 및 요건 강화	효율적이고 통합적인 보안 체계 요구 발생

물리적방호 시스템 설계

물리적방호 시스템 설계 및 평가 체계

물리적방호 시스템 설계 및 평가 (DEPO 프로세스)



요건 정의-DBT(설계기준위협)



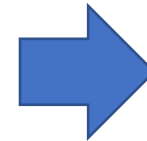
●설계기준위협(DBT: Design Basis Threat)

: 국제 물리적방호 권고(INFCIRC/225 Rev.5)에서 회원국의 물리적방호시스템의 필수적인 요소로서 핵물질 및 원자력 시설의 핵물질의 불법이전 및 사보타주의 위협에 대한 평가를 통해 설계기준위협(DBT)을 설정하도록 권고

DBT 예시

❖ 설계기준위협 (예시)

	고정핵물질 불법이전	운반중 핵물질 불법이전	원자력시설등 사보타주	운반 중 핵물질 사보타주
위협의 동기	정치적	금전적	이념	종교
침입자 성향	항의(시위대)		죽음각오	죽음각오
침입자수	15명	8명	20명(3조)	10명
휴대무기	공기총	소총	기관단총 폭발물, 드론	자동화 무기 바주카포
이동수단	차량, 선박	차량	도보	차량
내부자	3명, 수동적, 전직 직원	3명, 능동적, 직원	3명, 수동적, 전직 직원	3명, 수동적, 전직 직원
사이버위협	보안시스템 해킹		악성코드	
...(중략)...				



❖ 시설별 위협/대응 시나리오

- 시설별 침투시나리오 및 대응 시나리오 작성
- 물리적방호시스템의 성능 및 취약성 점검
- 물리적방호 시설별 보완 요구 사항 도출에 활용

물리적방호 시스템 설계

(2단계) 물리적방호시스템의 설계

물리적방호 시스템의 설계에 있어 방호를 최적화 할 수 있는 방호울타리, 상황실, 센서, 절차, 통신 장치 및 대응군 등을 조화롭게 결합하는 방법을 결정하는 것임. 기본적으로 물리적방호시스템의 설계 시 운영, 안전 및 시설의 경제성을 충분히 고려해야 함



[탐지 시간 + 대응 시간] < [지연시간]



평가 및 개선

(3단계) 물리적방호시스템의 설계 평가

설계된 물리적방호시스템의 평가는 요구조건을 바탕으로 설계를 평가함

- **특성기반 평가(Featured-based Evaluation)**
: 침입 감지, 출입 통제, 접근 지연, 대응 통신, 대응인력 등에 대해 요구되는 특성들을 점검하여 간단하게 평가 함
- **성능기반 평가(Performance-based Evaluation)**
: 물리적방호 시스템의 모든 요소(탐지, 지연, 대응)들이 적정 수준의 성능을 갖고 효과적인 시스템으로 구성되어 있는지를 평가

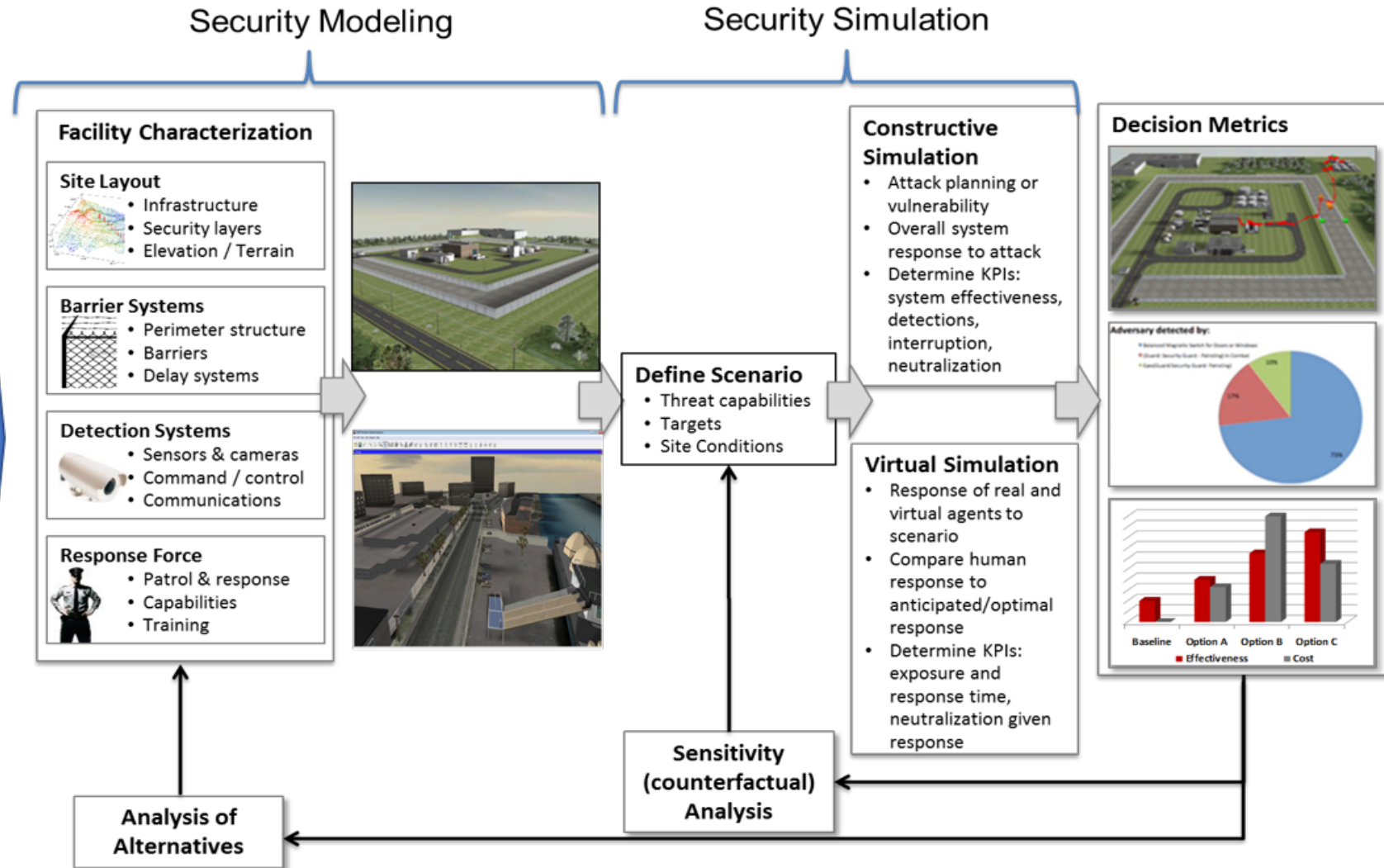
(4단계) 물리적방호시스템의 재설계 및 개선

시스템의 평가를 통해 취약성 발견, 이에 대해 적절한 보완/개선을 위한 재설계를 수행

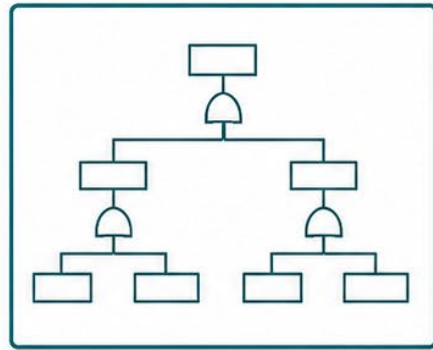
- 물리적방호시스템에 대한 요건 및 제약 등을 재평가 하고, 방호 요구조건을 모두 만족할 때까지 DEPO(Design and Evaluation Process Outline) 프로세스를 반복하여 수행 함

물리적방호 시스템 평가 사례

2D CAD 정보
 3D CAD 정보
 GIS 정보
 항공사진
 인공위성 이미지
 시설 기록 도면
 시설 보안 시스템
 보안 성능 데이터
 - 물리적
 - 시스템/센서
 - 방호인력
 적군 성능 데이터
 환경기준
 내부 운영 기준
 위협시나리오 기준
 시설물 취약성

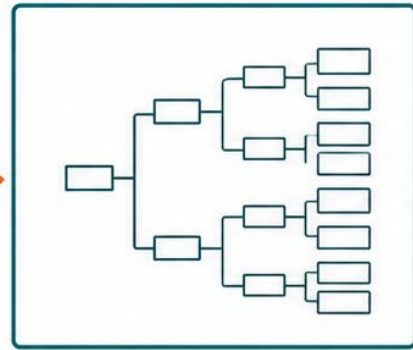


핵심구역의 설정



고장수목(Fault Tree)

기기 고장 데이터 기반
개별 고장 사건 식별



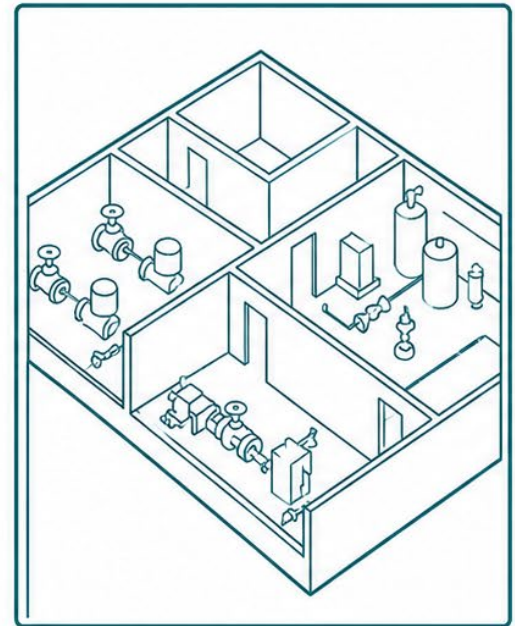
사건수목(Event Tree)

사고 시나리오 전개 과정 및
사고 경위 파악



손상 유발 조합 식별

노심 손상을 유발하는
최소 절단셋(Cut-set) 도출



격실 단위 맵핑(Mapping)

도출된 기기를 도면상 격실로 위치화하여
핵심구역(Vital Area) 최종 파악



고 방사선적 영향(HRC)

수용할 수 없는 방사선적 영향(URC)

자율적 방호

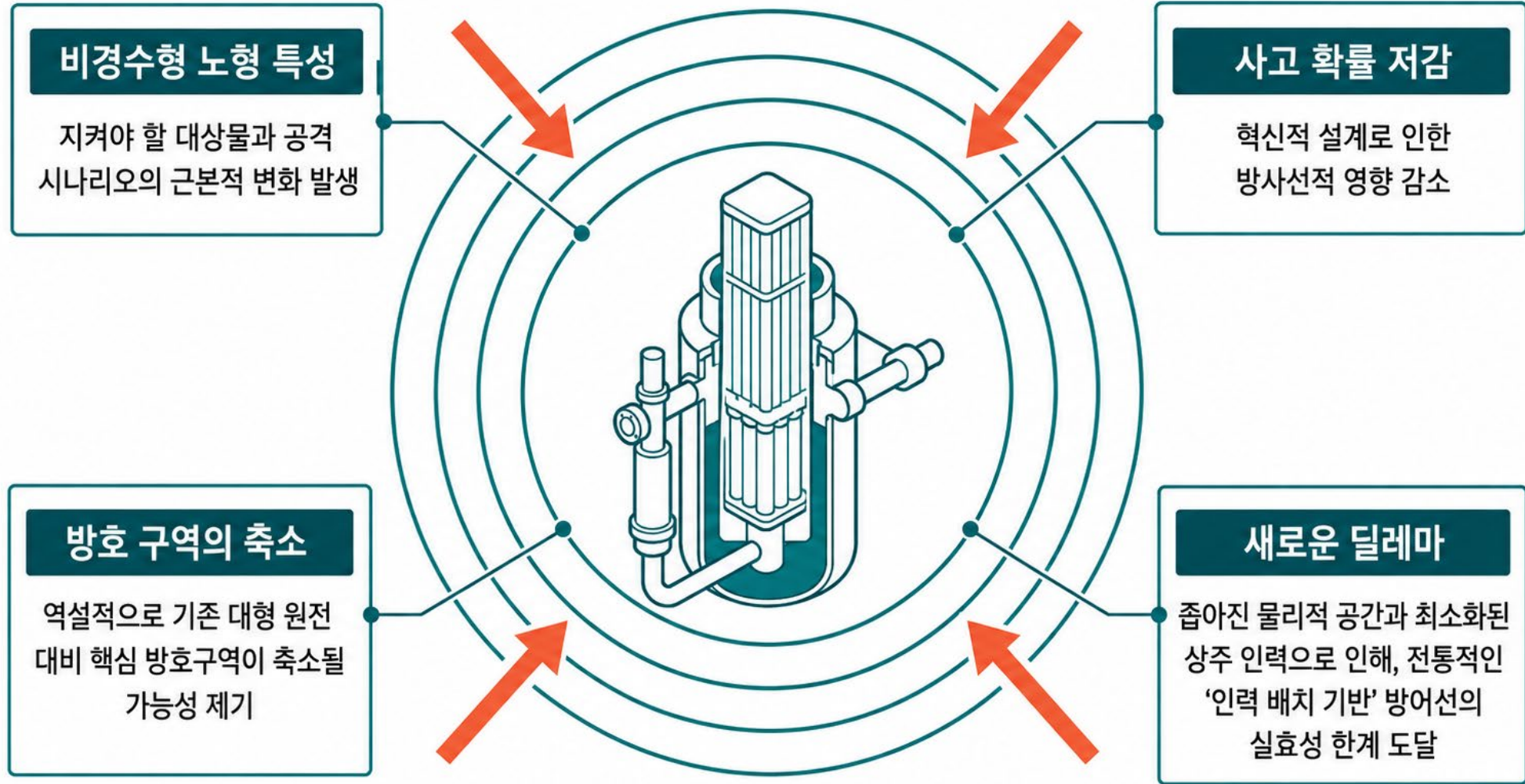


설계단계핵안보 (Security By Design) 사례

- HANARO 핵연료 공급중단 사건
 - 2002년 10월, 한미 JSCNEC 합의에 따라 미국 물리적방호 대표단 연구소 방문
 - 2003년 6월, 미 대사관은 연구소의 물리적방호 체제에 대한 미측 검토의견을 과기부에 통보
 - 2003년 8월, 연구소는 미측의 검토의견에 대한 후속조치 계획 통보
 - 2004년 7월, JSCNEC에서 미측은 우리 물리적방호 체제 개선 요구 및 미측 전문가 연구소 방문
 - 2004년 8월, 물리적방호 권고사항 이행 미흡을 이유로 하나로 핵연료제조용 LEU의 수출승인 무기한 연기
 - 2004년 9월, 미국 SNL의 물리적방호 전문가를 연구소로 초청하여 보완 방안 협의
 - 2004년 11월, 과기부는 연구소 물리적방호 보완계획을 미국정부(DOE, NRC)에 송부
 - 2004년 12월, 미국측에서 물리적방호 사전조치 사항 점검후 NRC는 하나로 핵연료 제조용 LEU 수출 승인
 - 2005년 1월 하나로 핵연료 제조용 LEU 수입
- 검토 의견
 - 원자력협력협정에 물리적방호 이행 미흡시 협력 중단(당시 협정에는 물리적방호 문안 부재)
 - 미국법에 물리적방호 이행 현황을 주기적으로 확인할 것을 적시

SMR과 핵안보

SMR : 핵안보 규제 패러다임의 전환



현 핵안보 체제의 문제점

[기존 대형 원전의 한계 (Labor-Intensive)]



높은 O&M 비중

전체 O&M(운영/유지보수) 예산의
7~10%가 물리적방호 비용



인력 편중

전체 상주 인력 중 보안 인력
최대 20% 이상 차지



비용 구조

방호 투입 비용 중
순수 인건비 비율 40~50%

[SMR 방호 혁신 방향 (Tech-Centric)]



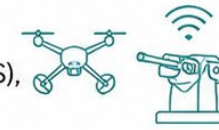
가상화 기반 검증

Force-on-Force 훈련(경비대 침투 저지)
및 시뮬레이션 고도화로 병력 최적화



첨단 무인 기술 도입

농동형 센서, 원격 무기 시스템(RWS),
보안 드론 네트워크



혁신 효과













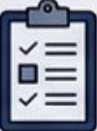

인건비 비중의 혁신적 축소 및
탐지/대응 속도 극대화



Ref) An Evaluation of The Dynamic Physical Security Risk Assessment Methodology for Fleet-Wide Applications (INL, 2024)

Ref) Security by Design Business Case Development (Oak Ridge National Laboratory / INL, 2024)

핵안보 체제 개선을 위해...

	<p>대형 원전 (Legacy NPP)</p> 	 <p>차세대 SMR (Next-Gen SMR)</p> 
<p>핵심 의존 자원</p>	<p>인력 중심 (Labor-Intensive)</p> 	<p>기술/데이터 중심 (Tech-Centric)</p> 
<p>비용 구조 (O&M)</p>	<p>전체 O&M의 7~10% 점유 (인건비 비중 40~50%)</p> 	<p>무인화 기술 투자를 통한 운영 인건비 혁신적 축소</p> 
<p>운전 방식</p>	<p>아날로그/독립망 (Air-gapped)</p> 	<p>높은 디지털화, 자율 운전 및 원격 제어 (Remote Operation)</p> 
<p>주요 위협 형태</p>	<p>물리적 침투 및 사보타주</p> 	<p>사이버-피지컬 복합 공격, 드론, 공급망 위협</p> 
<p>평가 기법</p>	<p>특성 기반 물리적 점검 (Feature-based)</p> 	<p>성능 평가 (Force-on-Force 시뮬레이션)</p> 

Command & Control 중심의 차세대 지능형 보안 시스템



첨단 감시 체계 도입 (Advanced Surveillance)



사각지대 없는 실시간 지능형 감시
능동형 센서와 지능형 CCTV를 통해
현장 데이터를 수집합니다.



디지털 트윈 기반 현장 모니터링
가상 공간에 현장을 복제하여 실시간으로
모니터링하고 가시성을 확보합니다.

무인 대응 시스템 배치 (Unmanned Response)



초소형 무인항공기(드론) 방어 체계
안티 드론 시스템을 구축하여
공중 위협에 즉각 대응합니다.



원격 무기 시스템(RWS) 운용
원격 제어를 통해 위협 요소를
즉각적으로 무력화합니다.

운영 최적화 목표 (Operational Optimization)

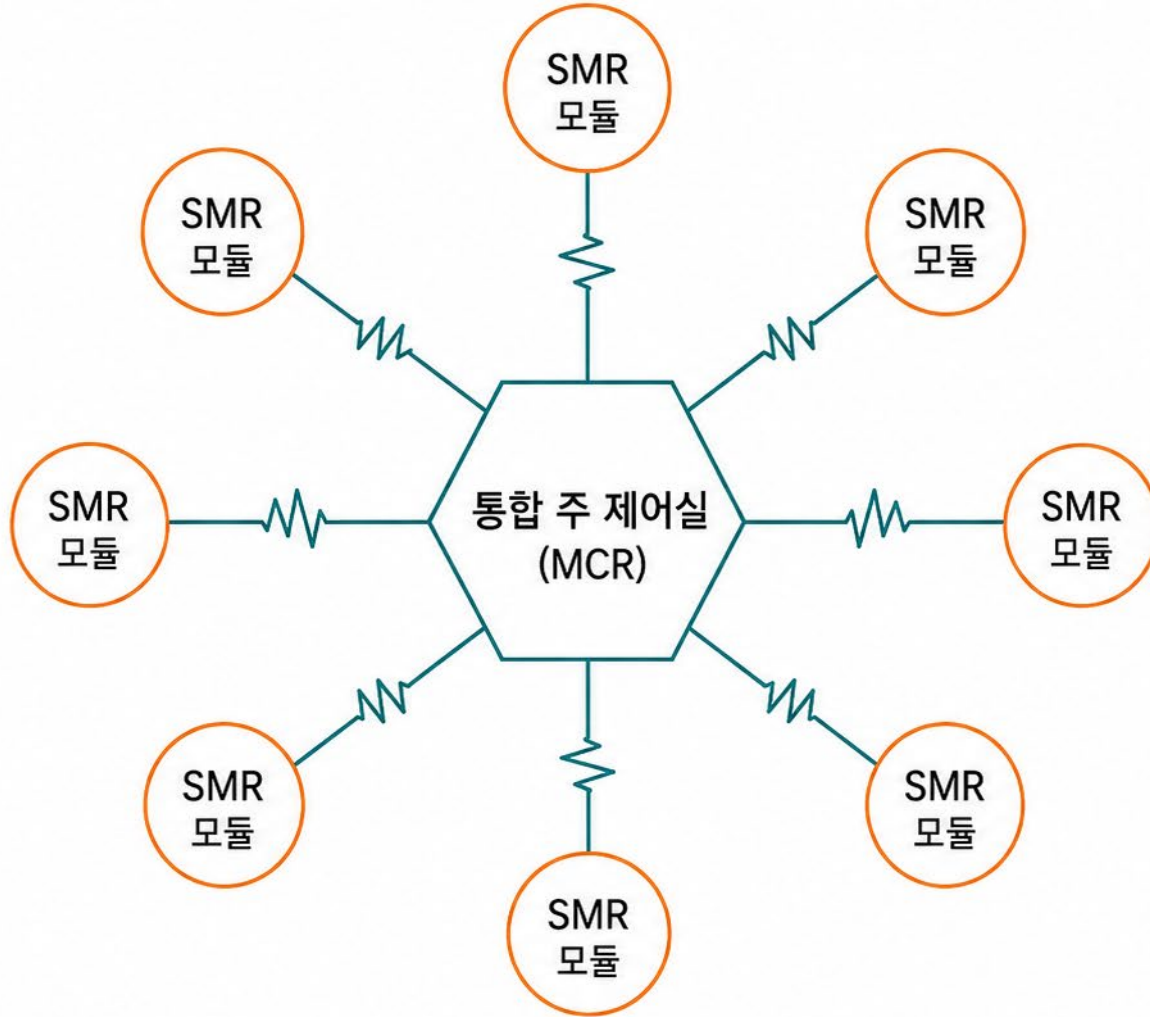


인력 편중 해소 및 효율화
기존 보안 인력 비중을 20% 이상 절감하여
소수 정예 체제로 전환합니다.



SMR 경제성 및 최고 수준 보안 달성
비용 효율성을 확보하는 동시에
최상의 보안 안전성을 동시에 실현합니다.

SMR 특성을 고려한 핵안보 체제 구축



집적화의 리스크

SMR은 부지 효율성을 위해 다수호기가 근접 배치되며, 전력망 및 제어 시설을 공유하는 구조가 많음



동시 다발적 공격 (Common-Cause Threat)

- 특정 모듈에 대한 공격이 타 모듈로 확산되는 연쇄 효과 분석이 필요.
- 시나리오: 통합 주 제어실(MCR)이 물리적/사이버 공격을 받을 경우, 제어망을 공유하는 모든 호기가 통제 불능 상태에 빠질 위험



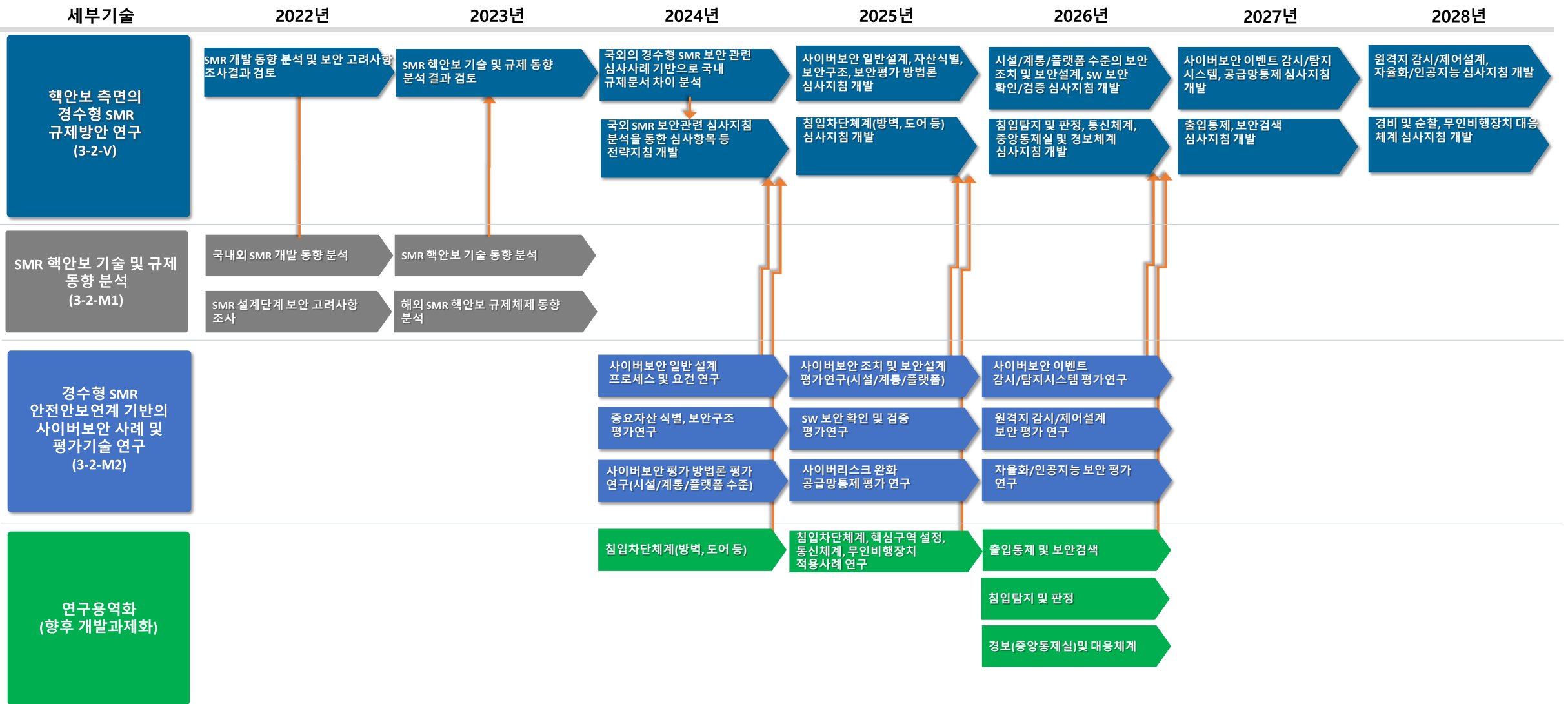
규제 대응 방향

- 모듈 간 물리적·네트워크적 완벽한 격리(Isolation) 설계 검증, 개별 모듈 단위의 독립적 비상 정지 및 냉각 시스템 구축 의무화

결론

i-SMR 핵안보 규제 연구 현황

(규제검증과제) 핵안보 측면의 경수형 SMR 규제방안 연구



선진 원자로에 대비한 규제 준비 사항



기존 규제에 디테일을 더하기

법령 정비
안전 안보 규제의 조화
대응 체제 효과성 확인을 위한 훈련 평가 고도화

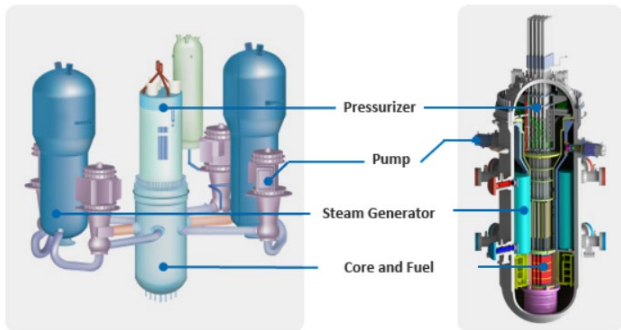


신규 시설 및 위협에 대한 규제 역량 확보

사이버 위협 및 드론 대응 체제 및 대응 역량
지속적으로 진화하는 위협에 대한 대응
SMR 등 신규 시설 특성 반영한 규제 방안

Conventional Type

SMART



핵안보 문화 확산과 국제 위상 확보

국내 핵안보 규제 인식 제고
핵안보 국제규범 선도를 통한 국제 위상 확보

감사합니다.



제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

선진원자로 개발을 위한 국내외 정책환경

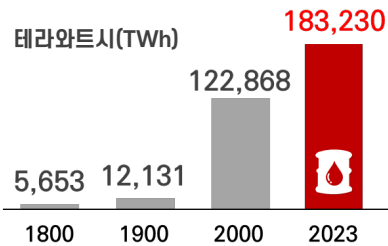
한국원자력연구원 이 영 우
leeyoungwoo@kaeri.re.kr



SMR은 왜 떠오르고 있을까?

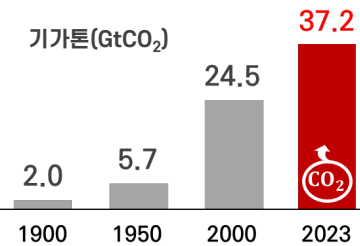
세계 경제 성장 및 에너지 소비 폭증

1차 에너지 소비



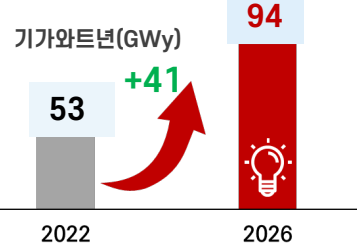
탄소감축 노력에도 여전히 CO₂ 배출 증가

에너지부문 CO₂ 배출



AI 산업 성장 및 전력 수요 급증

데이터센터 전력 수요



전 세계적 원자력 확대 이행의지



빅테크 기업은 365일 안정적인 원자력에 투자

쓰리마일 원전 1호기 생산 전력 20년 독점 구매 계약



MS

2027년 가동 목표 SMR기업 오를로 투자



오픈AI

960MW급 원전 기반 데이터센터 인수



아마존

SMR기업 카이로스파워 500MW 전력 구매 계약



구글

원자력 도입 사업 추진 RFP 공개



메타

다시 찾아온 르네상스

원전 확대 기조 뚜렷해진 전세계



일본 '원전 회귀' 본격화...14년 유지 '원전 의존도 낮춘다' 삭제

홍석재 기자

수정 2025-02-18 11:39 | 등록 2025-02-18 11:22

'탈원전 1호국' 이탈리아...35년만에 원전 재도입 추진

입력 2024-07-15 15:30

이나영 기자

홈 > 정책 > EU/북미

독일, 탈원전 입장 선화...프랑스와 원자력 포함 8개 분야 경제협력 합의

김환이 editor | 입력 2025.09.02 23:16 | 수정 2025.09.03 22:54 | 댓글 0



대만, 원전 재가동 이어 SMR 연구착수..."이르면 2035년 전력생산"

송고 2026-04-07 12:14

미국의 원자력 지원 정책


뉴스A 라이브 2부
트럼프, 원전 빛장 풀었다

4개 행정명령

Channel A LIVE

이 시각 사전투표율	
전국	10.5
경남	9.2
제주	10.8

- ✓ 원자력규제위원회 개혁
- ✓ 원자력 에너지 연구 개혁
- ✓ 연방 정부 토지 내 원전 건립
- ✓ 미국 내 우라늄 채굴·농축 확대



미국 원자력 산업의 문제를 해결하기 위해 산업계의 의견 수용



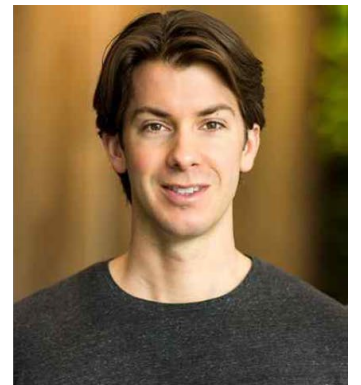
Joseph Dominguez
Constellation Energy社



Maria Korsnick
NEI



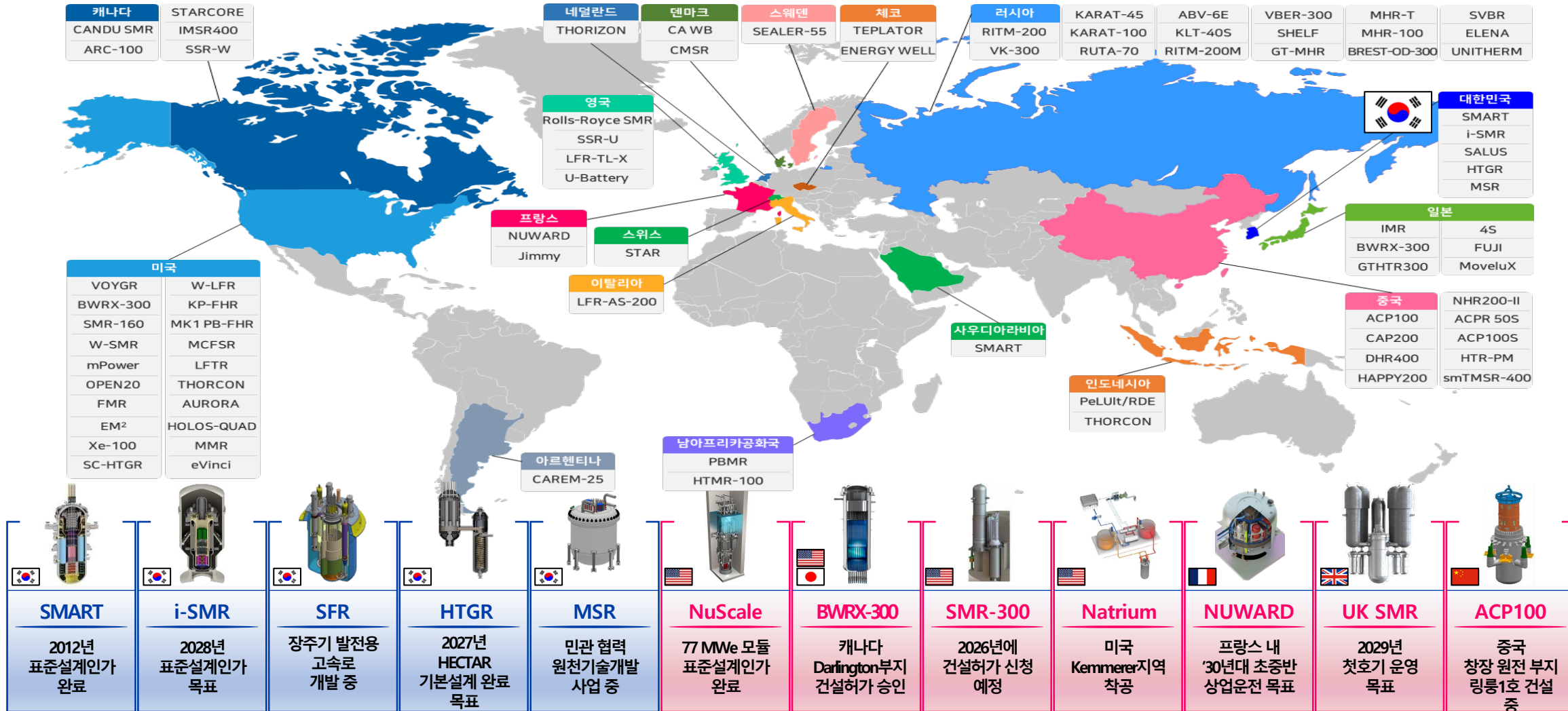
Jacob DeWitte
Oklo Inc



Scott Nolan
General Matter

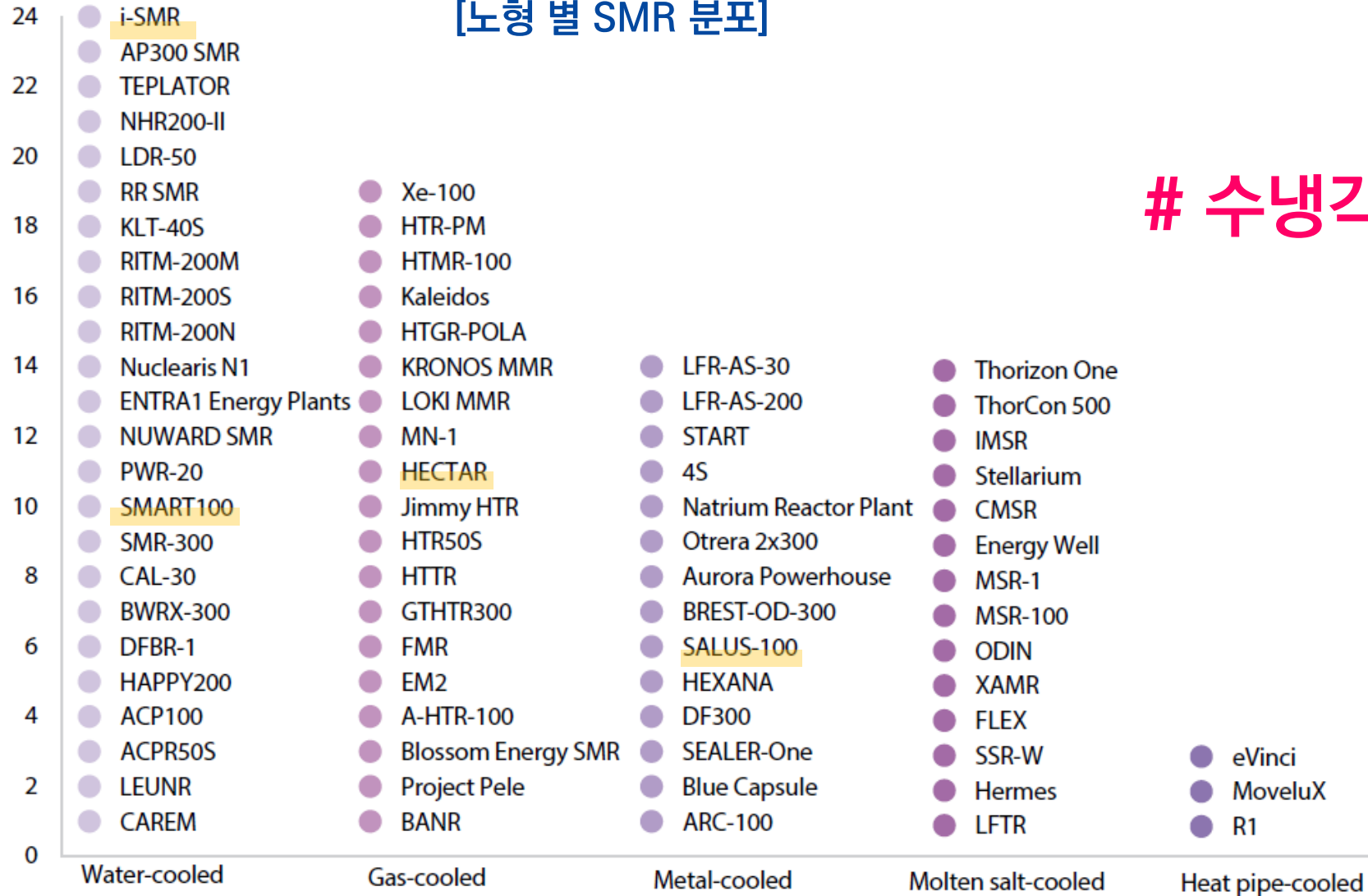
치열해진 SMR 개발 경쟁

68종 Active Design (IAEA, '24.10.)



[참고] 개발중인 SMR 노형별 분포

[노형 별 SMR 분포]



수냉각 < # 비수냉각

한국 개발노형

해외의 주요 SMR 사업 현황

ENTRA1 Energy Plant (NuScale)



- 모듈당 77 MWe의 모듈화·일체화·단순화 가압경수로형 SMR
- CFPP 사업 무산됨 (경제성 이슈)
- **NRC로부터 77 MWe모듈 표준설계인증 획득 ('25.5.)**
- 미국, 루마니아, 가나 등 글로벌 사업 추진 중



BWRX-300 (GE-Hitachi)

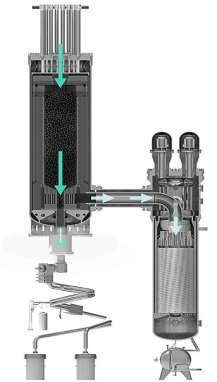


- 300 MWe급 일체형 비등경수로형 SMR
- 온타리오발전회사(OPG)는 캐나다 Darlington 부지에 2028년까지 건설하기로 결정
- 서방세계 최초의 SMR 가능성
- **: 캐나다 CNSC 건설허가 승인 ('25.4.)**



해외의 주요 SMR 사업 현황

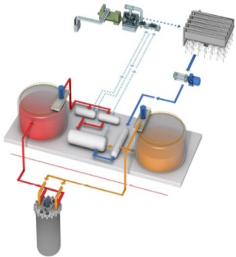
Xe-100 (X-Energy)



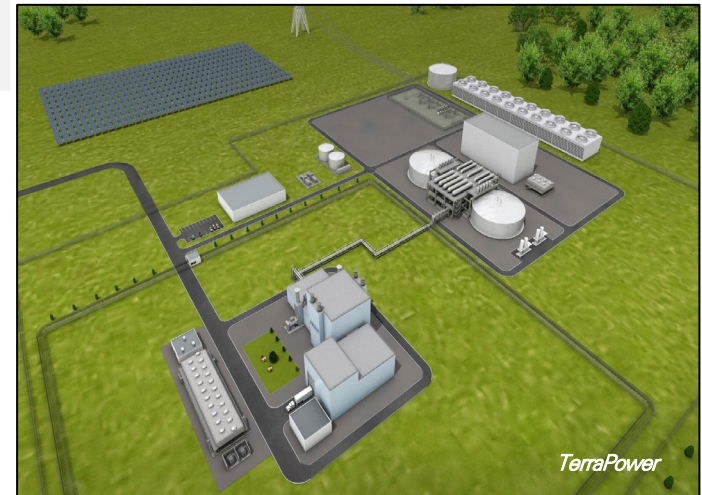
- 200 MWth (82.5 MWe)급 펄스형 고온가스로
- 헬륨으로 냉각하고 UCO 삼중피복입자핵연료 사용
- 캐나다 VDR 1&2 완료 ('24.1.)
- **Dow 화학공단 내 건설허가 신청 ('25.3.)**
- NRC 검토일정 단축 발표 (일반적 36개월 → **18개월**)
- **아마존의 투자** (2039년까지 미국 내 5 GW 배치 목표)



Natrium (TerraPower)

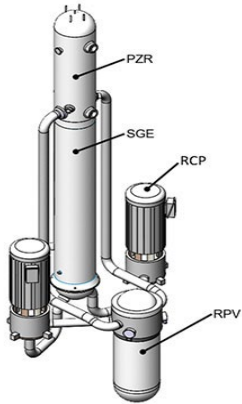


- 정상상태 출력이 345 MWe인 소듐냉각고속로
- 액체 소듐으로 냉각하고 U-Zr 금속핵연료 사용
- NRC에 건설허가 신청서 제출 ('24.3.)
- **NRC 검토일정 단축 발표 (19개월)**
- 첫 실증로(비핵 부문)를 미국 Kemmerer 지역에 착공 ('24.6.)



해외의 주요 SMR 사업 현황

SMR-300 (Holtec)



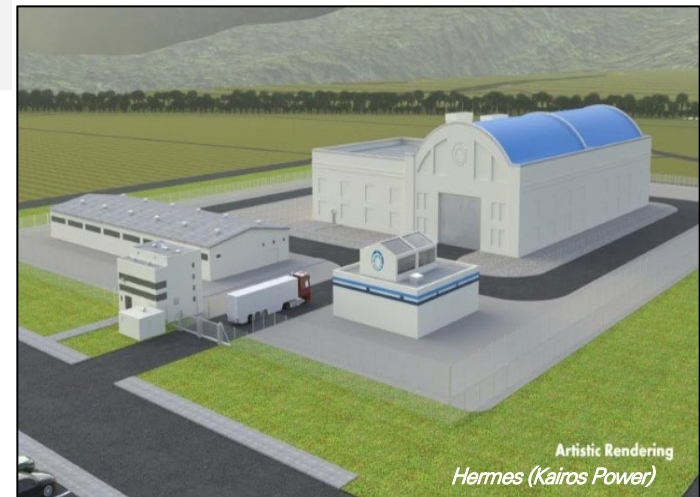
- 200 MWe급 가압경수로형 SMR
- 고유 안전성과 단순성을 핵심 목표로 설계
- 영국 GDA 1단계 완료('23.1.) 및 2단계 진행 중
- 미국 미시간주 Palisades 원전 부지: **2026년 NRC에 건설허가 신청 계획**
- 미국 뉴저지주 Oyster Creek 원전 부지도 고려 중



KP-FHR (Kairos Power)



- 140 MWe급 펄베드형 용융염원자로
- 펄블 핵연료를 혼합한 용융염을 냉각재로 사용: 핵연료를 실시간 보급·제거 가능
- **실증로 Hermes의 NRC 건설허가 승인('23)** 및 미국 테네시주 Oak Ridge 부지에 **착공('24.7.)**

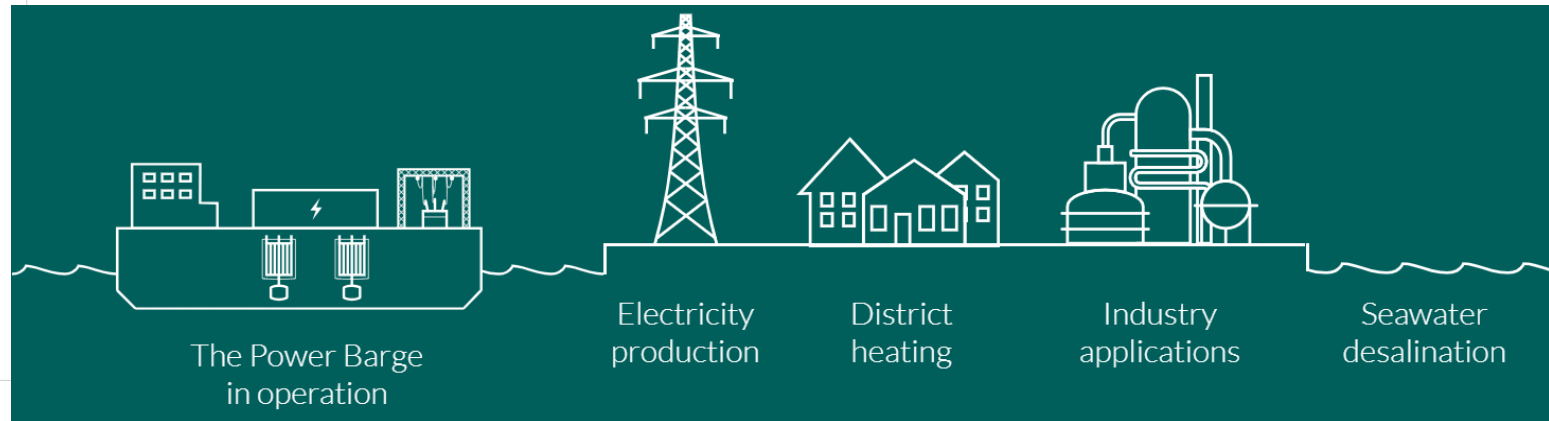


해외의 주요 SMR 사업 현황

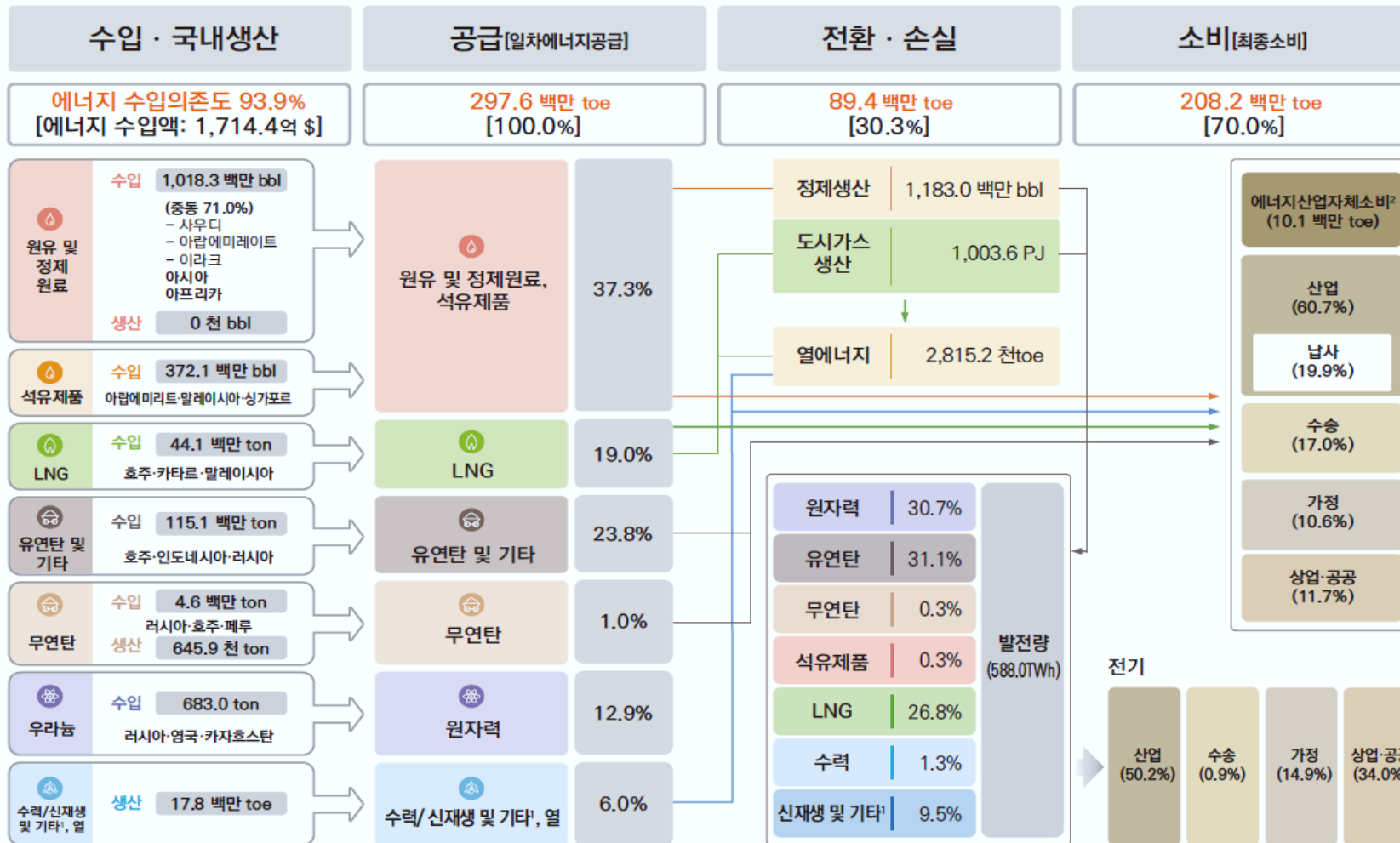
CMSR (SaltFoss)



- 불화염 기반 110 MWe급 용융염원자로
- 미국선급협회(ABS)의 'Approval in Principle' 획득('22)
: 초기단계 기술 인증으로 향후 인허가 진행의 기반
- 5% 저농축우라늄 활용 결정 ('23.1.)
- **현재 개념설계 진행 중**
- 한수원-삼성중공업과 컨소시엄 협약 체결 ('23.4.)
: CMSR 기반 부유식 원전 개발, 건설, 운영
- 2033년 최초 발전바지선 가동 목표



우리나라의 에너지 이용 현황 (수급 밸런스)



1차에너지공급
세계 8위
(292백만toe)

최종에너지소비
세계 10위
(181백만toe)

전력소비
세계 6위
(592TWh)

이산화탄소 배출
세계 9위
(563백만tCO₂eq)

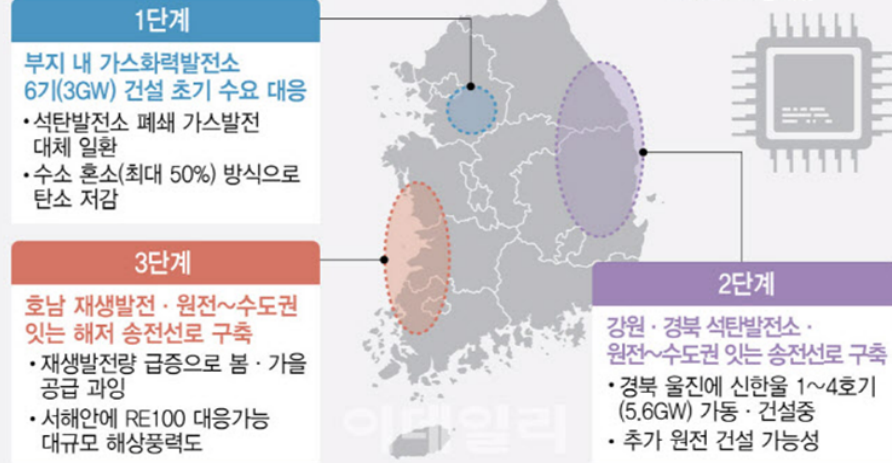
(21년 기준)

우리나라에 SMR이 필요한 이유: 전력수요 급증

반도체 인프라

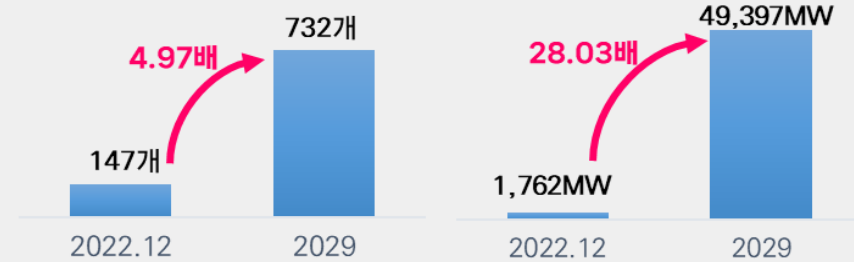
- ✓ 용인 반도체 클러스터 조성에 50년까지 10GW 이상의 전력수요 예상 (현재 수도권 전력 수요 1/4)
- ✓ 전력 공급 방안: (1) LNG 발전소 신설(3GW)
(반도체 생태계 지원 강화 방안, 관계부처 합동, 2024.11)
(2) 내륙관통/해저 송전선로 보강
(3) 향후 개발되는 전력기술 활용

용인 반도체 클러스터 10GW 전력공급 3단계 방안 개요 *정부, 연내 기업 수요조사 거쳐 구체적 로드맵 확정



데이터센터

- ✓ 2029년 데이터 센터는 732개, 49,397MW 증가 전망



- ✓ 이 중 80%가 수도권에 집중 예상:
전력 계통 수급 불안정, 사고발생에 따른 인프라 마비,
지역간 균형발전 저해 문제 야기

완화방안

✓ 지역 분산

- 계통포화지역 입지 제한
- 비수도권 입지 인센티브

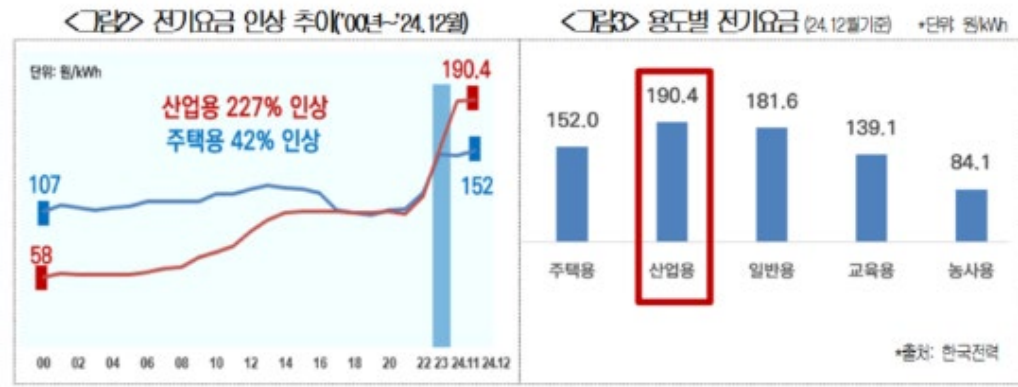
✓ 분산에너지

- 출력 증·감발 대처
- 송전망/입지 사용 최소화

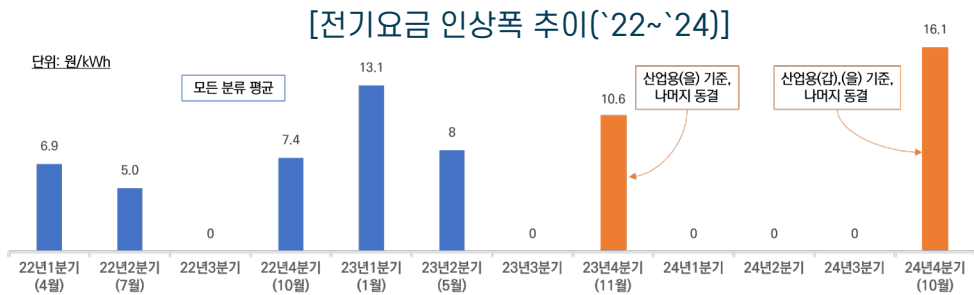
(데이터센터 수도권 집중 완화 방안, 산업부, 2023.3)

우리나라에 SMR이 필요한 이유: 분산전원 수요 증가

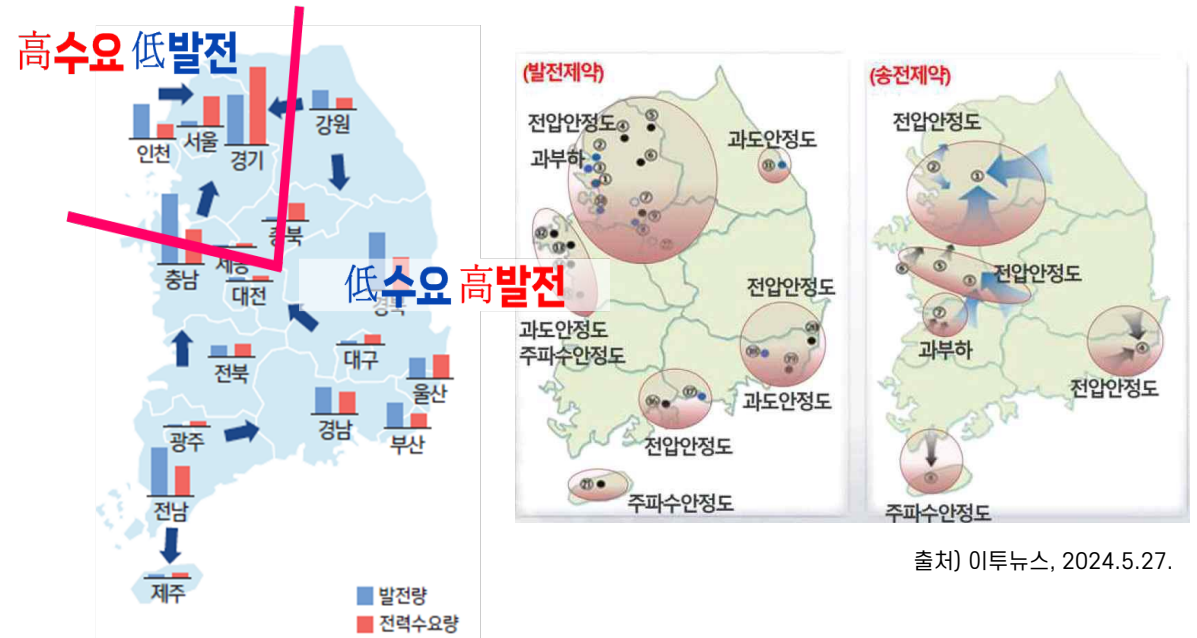
■ 산업용 전기요금의 급격한 상승



출처) 대한상공회의소, 2025.3.4.



■ 수도권 vs 비수도권 간 전력수급 불균형



우리나라에 SMR이 필요한 이유: 무탄소 공정열(유일한 대안)

- 2035 NDC 목표: 전력(전환) 부문 68.8~75.3%, **산업 부문: 24.3~31.0% (기존 '30년까지 11.4%)**

[2035 NDC 총괄 및 부문별 목표 배출량(단위: 백만톤CO₂eq.)]

구분	2018년	2024년 (`18년 대비 감축률)	2035년 (`18년 대비 감축률)		비고(2030년 ⁽¹⁾)	
총괄(순배출량)	742.3	651.4(△12.2%)	348.9(△53.0%)	289.5(△61.0%)	△40.0%	
배출	전력	283.0	218.3(△22.9%)	88.3(△68.8%)	70.0(△75.3%)	△44.4%
	산업	276.3	250.9(△9.2%)	209.1(△24.3%)	190.6(△31.0%)	△14.5%
	건물	52.1	43.6(△16.3%)	24.2(△53.6%)	22.8(△56.2%)	△32.8%
	수송	98.8	97.5(△1.3%)	39.3(△60.2%)	36.8(△62.8%)	△37.8%
	냉매	23.1	35.0(+51.5%)	27.4(+18.6%)	25.5(+10.4%)	- ⁽²⁾
	농축수산	27.6	25.6(△7.2%)	20.2(△27.5%)	19.5(△29.3%)	△27.1%
	폐기물	19.4	17.5(△9.8%)	9.2(△52.6%)	9.0(△53.6%)	△46.8%
	탈루	3.7	3.2(△13.5%)	2.6(△29.7%)	2.4(△35.1%)	+5.4%
	수소	0	0	8.1	6.5	8.4
흡수 및 제거	흡수원	-41.6	-40.2	-38.3	-39.3	-26.7
	CCUS			-11.2	-20.3	-11.2
	국제감축			-29.8	-34.0	-37.5

(1) `23.3월 발표된 2030 NDC의 총배출량 기준 감축률 또는 배출량

(2) 2035 NDC에 새롭게 신설된 부문으로 기존 산업 부문에서 분리

우리나라에 SMR이 필요한 이유:조선업계의 미래

국제해사기구(IMO) 온실가스 감축 전략('23)

'30년: ^{최소} 20%, 40년: ^{최소} 70%, 50년: 순배출량 '0'
 ('18년 기준, 온실가스 1,076 백만 톤 배출)

우리나라 해운분야 탄소중립 전략

제1차 친환경 선박 개발 기본계획 ('20.12)

- 온실가스 70% 감축기술 개발
- 친환경 선박 전환율 15% (3,542척 중 528척)

해양수산분야 탄소중립 로드맵 ('21.12)

- 해운분야 탄소배출 목표 30.7만톤 ('18년 대비 69.9% 감축)

국제해운 탈탄소화 추진전략 ('23.2)

- 규제 대상 외항선 867척 친환경 선박 전환
- 국적선 탄소배출 감축 '30년 60% → '40년 80% → '50년 100% 달성

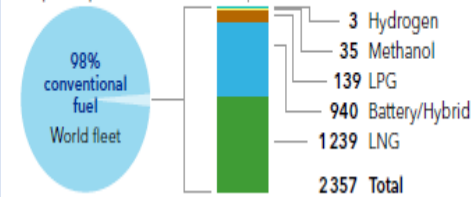
K-조선 초격차 VISION 2040 ('24.7)

- 2040년 세계 최고 조선 기술 강국 목표
- LNG선 이후 친환경 선박 시장 확보를 위한 원천기술 확보와 해상 실증

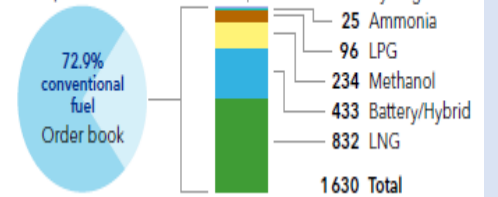
친환경 선박 현황

NUMBER OF SHIPS

Ships in operation



Ships on order

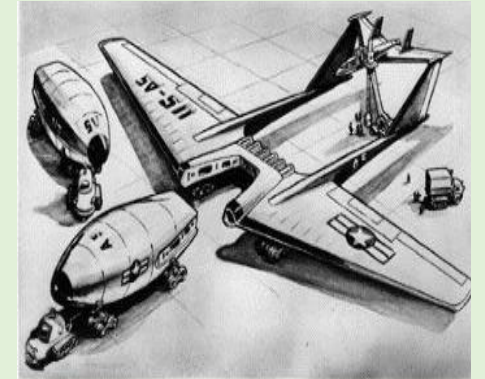


[DVN, 2024]

원자로의 기원



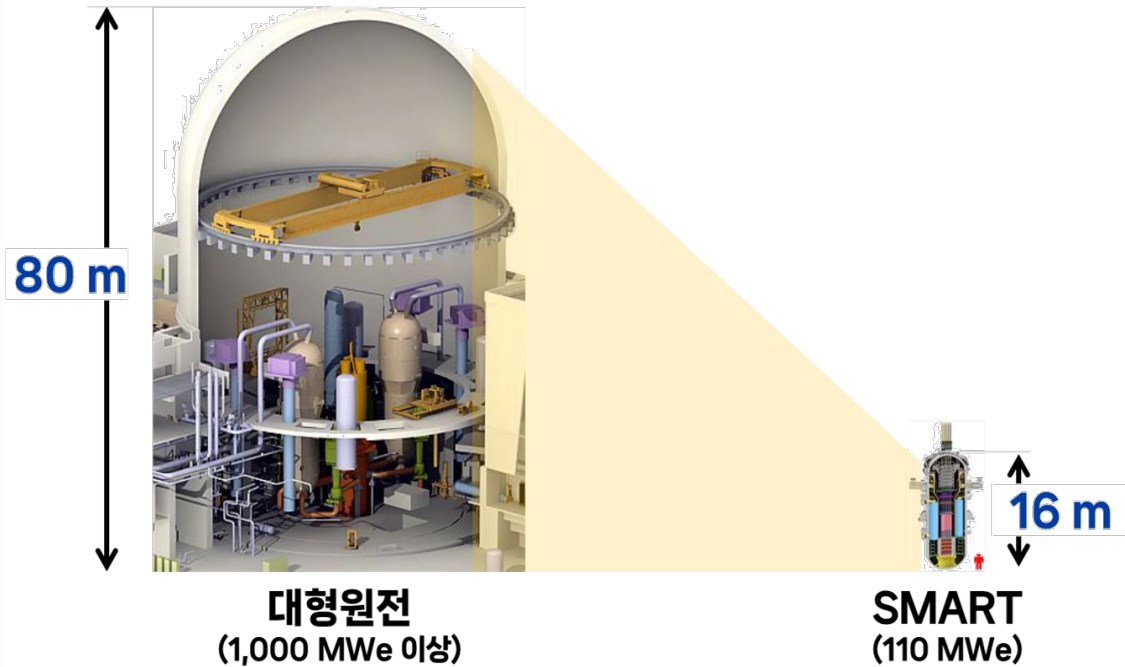
[USS Nautilus, 1954]



[ARE, 1954]

요구되는 SMR 범주

주요기기를 모듈화하여
공장제작이 가능한 300 MWe 이하의 원자로



무탄소 에너지 시장 경쟁력 확보



- 중대사고 배제로 수용성 증대
- 자연력만으로 노심냉각 가능

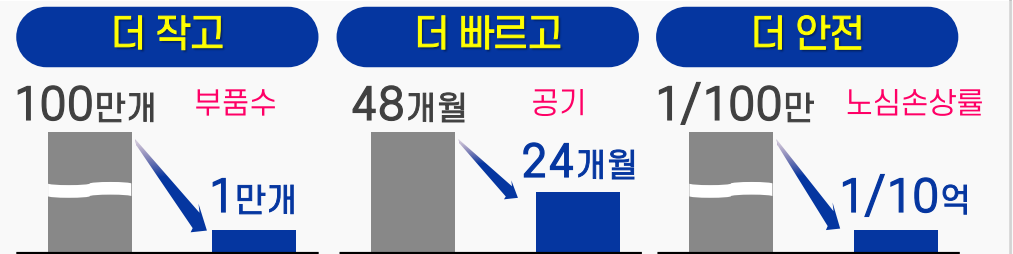


- 신재생에너지와 유연한 연계
- 전력생산 외 다목적 활용

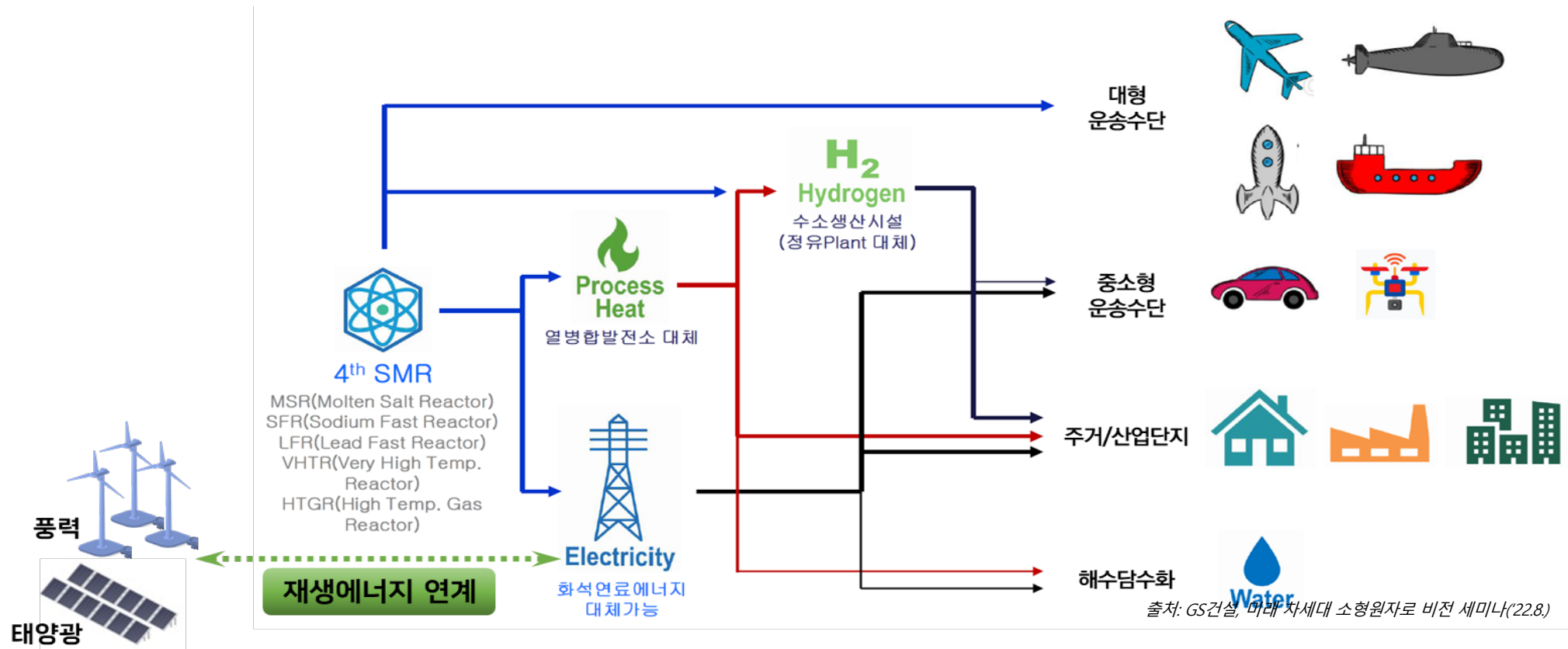


- 공장제작/현장설치 강화: 건설 비용 저감
- 투자용이성 확보

공장제작 최대화, 현장설치 최소화



SMR의 강점: 이용 다양성



노후 석탄화력발전 교체



중공업 활용 고온증기



해수 담수화



수소 생산



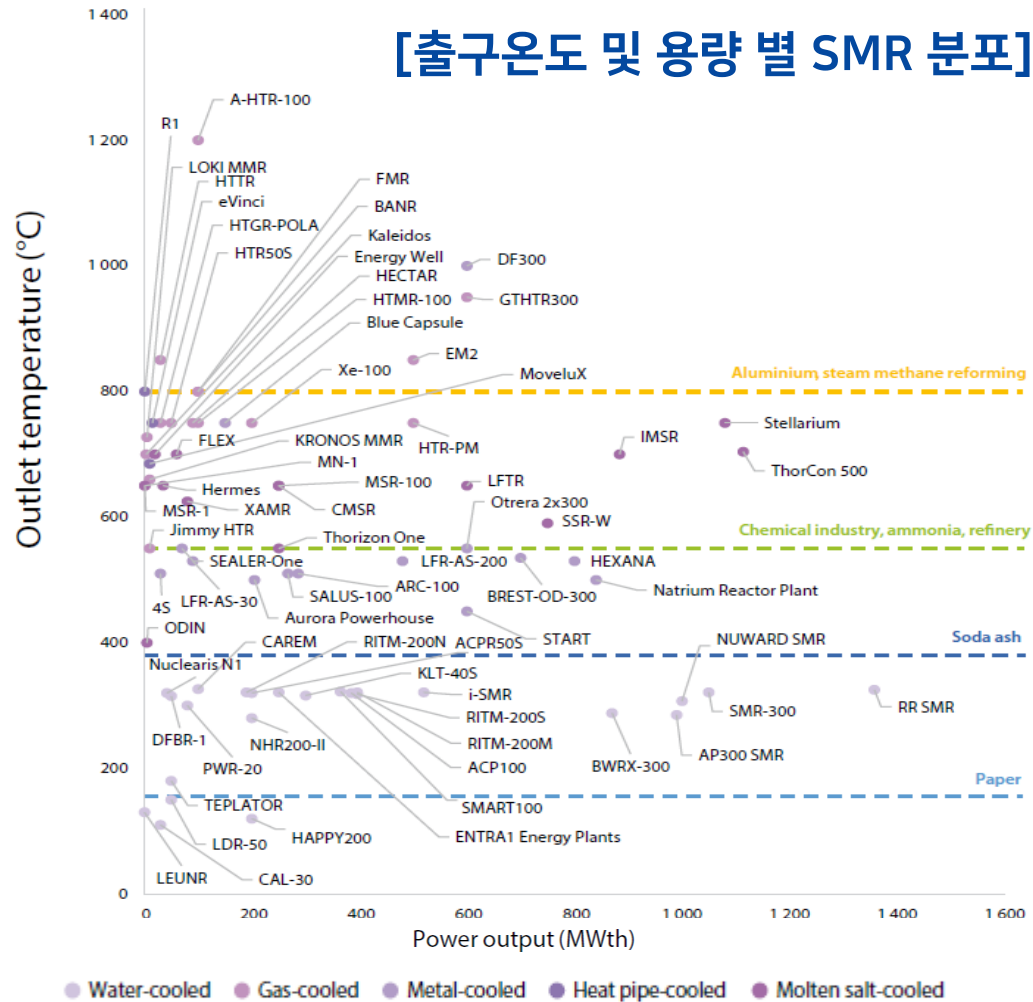
광산 지역



도서 및 오지 지역



SMR의 강점: 이용 다양성



출구온도 \propto 전기생산 효율성
열이용 범위

공정온도 별 활용가능 산업분야

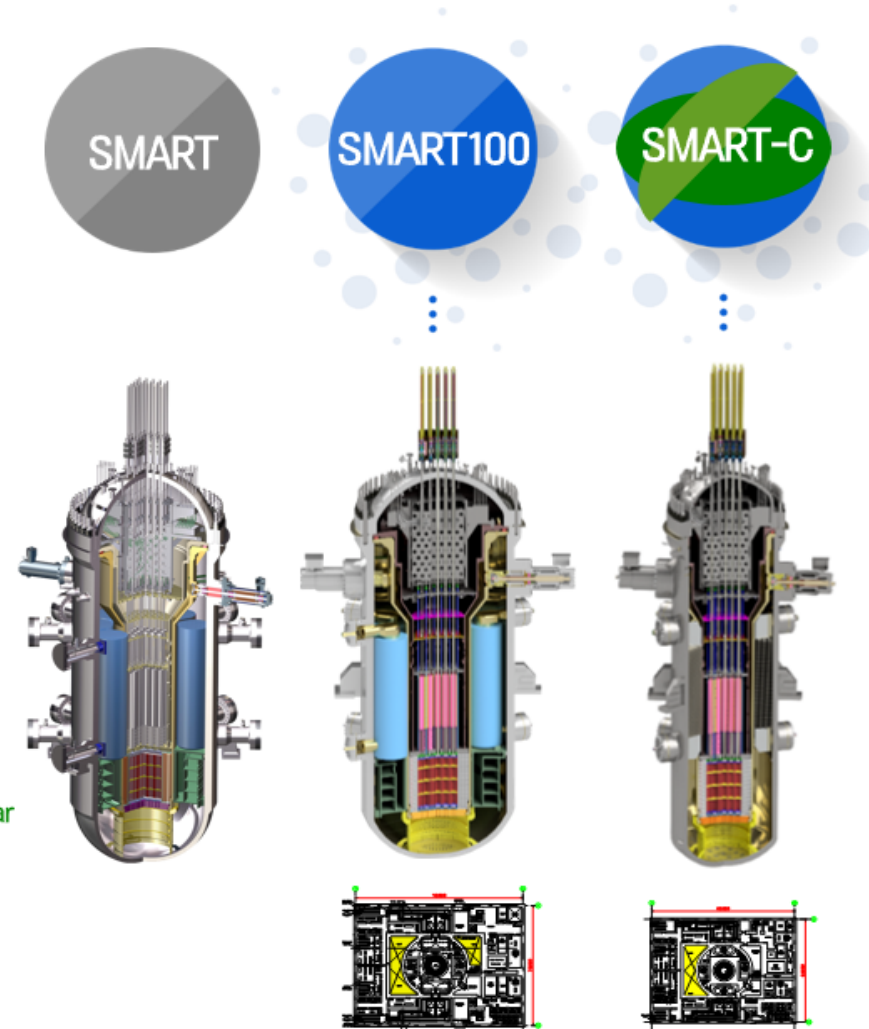
공정온도 (°C)	지역 난방	해수 담수화	펄프·제지	석유 정제	화학 공단	암모니아 생산·분해	천연가스 증기개질
0~100	●	●					
100~200	●	●	●				
200~300			●				
300~400			●		●		
400~500			●	●	●	●	
500~600				●	●	●	
600~700				●	●	●	
700~800				●	●		●

SMR의 강점: AI 적용 가능성



우리나라의 SMR 역량: 빠른 설계

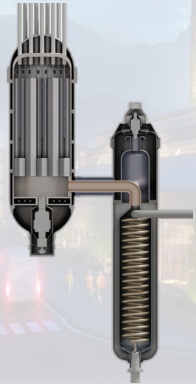
	• SMART	• SMART100	• SMART-C
Thermal Output	330 MWt	365 MWt	365 MWt
Electrical Output	100 MWe	110 MWe	110 MWe
Reactor Type	Integral PWR	Integral PWR	Integral PWR
RV Diameter	Appr. 6 m	Appr. 6 m	Appr. 4.5 m
Refueling Cycle	36 Months	30 Months	30 Months
SG Type	8 Helical OTSG	8 Helical OTSG	1 Helical OTSG
Safety System	Partially Passive	Fully Passive (4 Trains)	Fully Passive (2 Trains)
Emergency Power	EDG	Battery	Battery
Driving Forces	AC + Natural	DC + Natural	DC + Natural
Grace Time	30 Min.	72 Hours	72 Hours
Core Damage Frequency	$< 1.0 \times 10^{-6} / \text{RY}$	$< 1.0 \times 10^{-7} / \text{RY}$	$< 1.0 \times 10^{-7} / \text{RY}$
Containment Building	Dome/Cylinder	Arch / Rectangular	Reduced ¹⁾ Arch / Rectangular



우리나라의 SMR 역량: 우수한 선진원자로 개발 능력

고온가스로

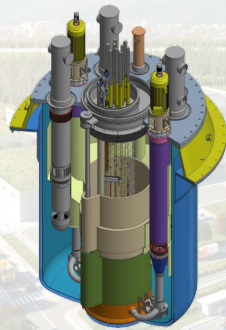
청정 고온 열 생산 시스템



산업공정열 공급 및 수소생산

소듐냉각고속로

장기 운전으로 핵연료 교체 최소화



신재생 연계 유연성 분산전원

용융염원자로

액체 핵연료 사용 및 소형화 유리



해양 친환경연료 시스템



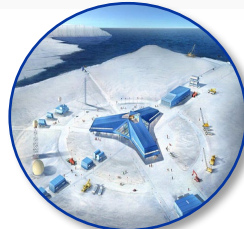
철강



석유·화학



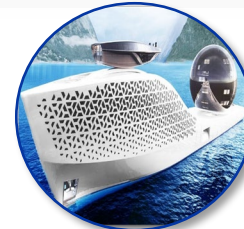
수소생산



격오지 전원



데이터센터

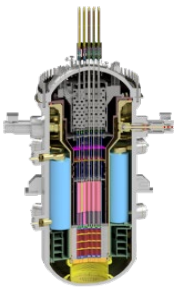
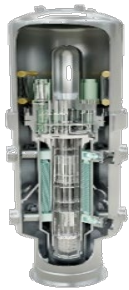
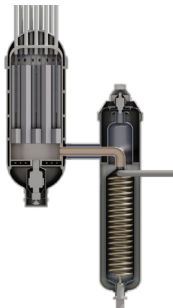
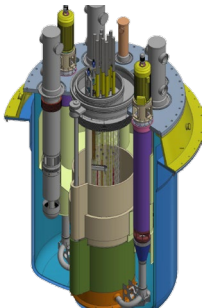
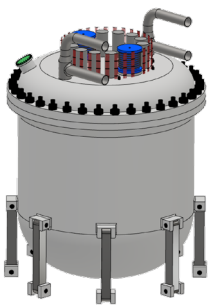



선박 추진

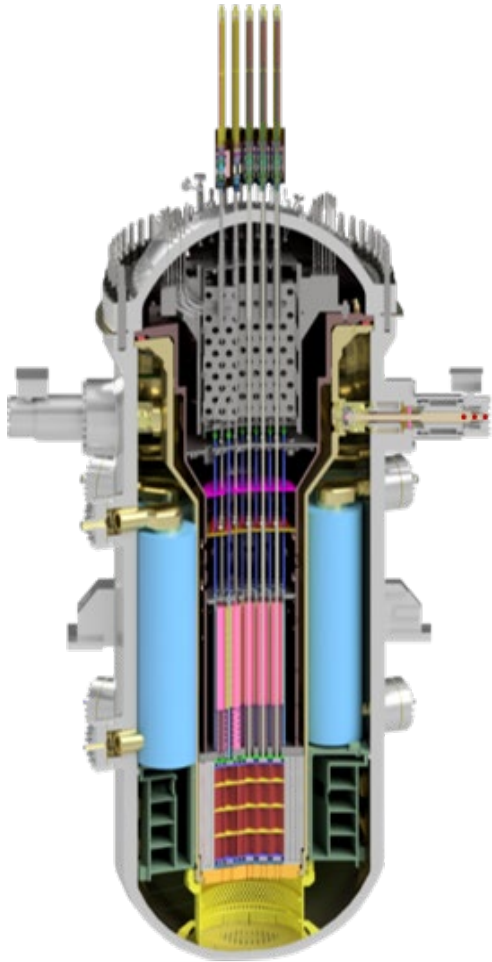


부유식 해양시스템

[참고] 다양한 원자로 개발 현황

구분	소형모듈원자로					초소형원자로
	수냉각형		비-수냉각형			
	SMART	i-SMR	고온가스로	소듐냉각고속로	용융염원자로	히트파이프 원자로
냉각재	물(경수)	물(경수)	헬륨	액체소듐	용융염	알칼리금속
출력	110 MW	170 MW/모듈	90 MWth	100 MW	35 MW	100 kWth
주 활용분야	분산전원	분산전원	공정 열 공급	분산전원	선박추진, 해양	우주, 극한환경
국내 연구개발 경과 및 현황	· 세계최초 표준설계인가(12) · 개량형 표준설계인가(24)	· 표준설계(23~28)	· 주요 핵심기술 확보(~'23) · 개념설계(24~)	· 기확보 대형 SFR 기술을 SMR 로 전환중 · 기본설계(25~)	· 개념설계(23~)	· 개념설계(25~)
모델						

우리나라의 SMR 역량: 사업화 추진 경험



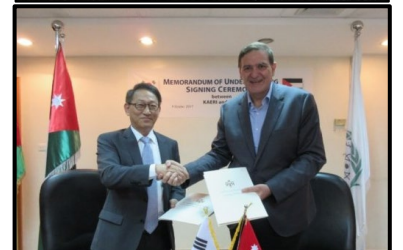
100 MWe급 가압경수로형 일체형 SMR

개발 현황

- 설계가 완성된 국가 전략 상품
- 일체형원자로 중 세계 최초로 표준설계인가 획득 ('12.7.) ('97년 개발 착수)
- 주요 성능 개선 (완전피동 안전계통, 출력 증강 등)
 - 원자력연-한수원-사우디 공동
- 개선 모델(SMART100) 표준설계인가 완료

사업화 추진

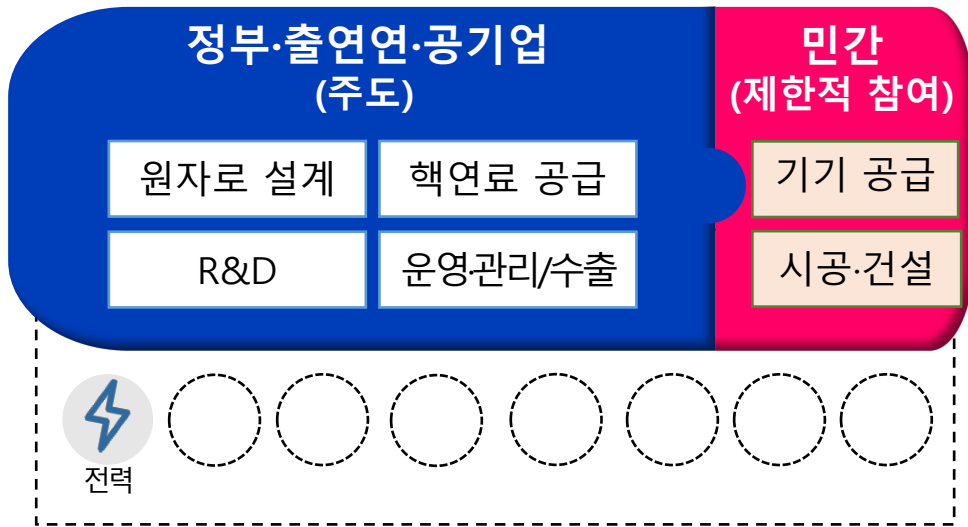
- 사우디아라비아에 담수와 전력생산 겸용 SMART 건설 실증
 - 건설전설계 완료 ('18.11.), 사우디 여건 변화로 건설 실증 중단
- 캐나다 앨버타 주에 샌드오일 채굴 증기 공급용 SMART 건설 추진
 - AECL과 KAERI 간 SMART 캐나다 실증 MOU 체결 ('23.9.)
- 인도 산업단지 전기/열 공급, 동남아 바지선 탑재 발전소 등 수요 발굴중



우리나라의 SMR 정책 방향

• 다양한 노형을 개발하기 위한 민간 기업 발굴과 육성 중

[기존] 공공주도 경수형 대형원전 산업

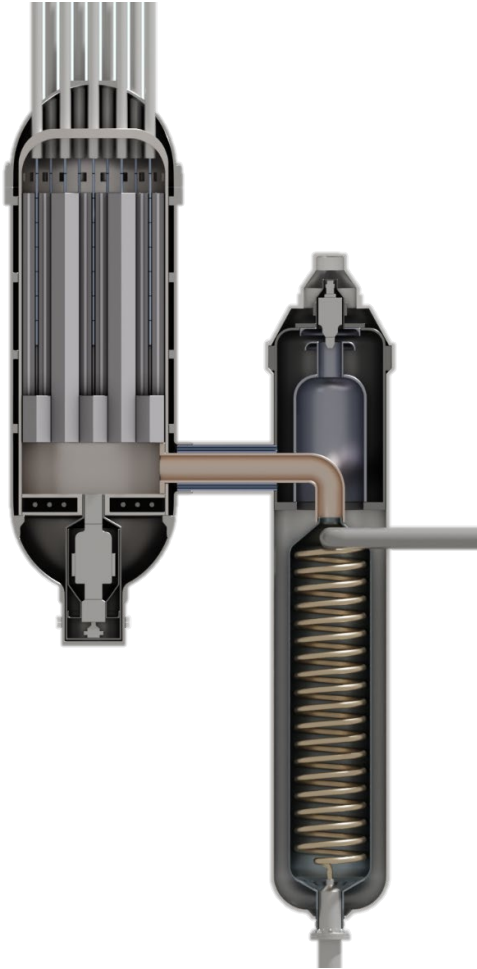


[향후] 민간주도 SMR 산업



- 신규 벨류체인 참여기업 확대
- 첨단 제조 기술
 - 3D 프린팅
 - 소부장 뿌리기술
 - 디지털 기술
 - 통신, 보안
 - AI, 로봇, 컴퓨팅
 - 파생·융합 기술
 - 수소생산 연계
 - 해양·우주 연계
 - 거대 패키지 사업
 - 데이터센터
 - 해상 도시

민간 합작 프로젝트 예시(고온가스로)



750°C 이상 청정 산업공정열 공급 (90 MWth)

개발 현황

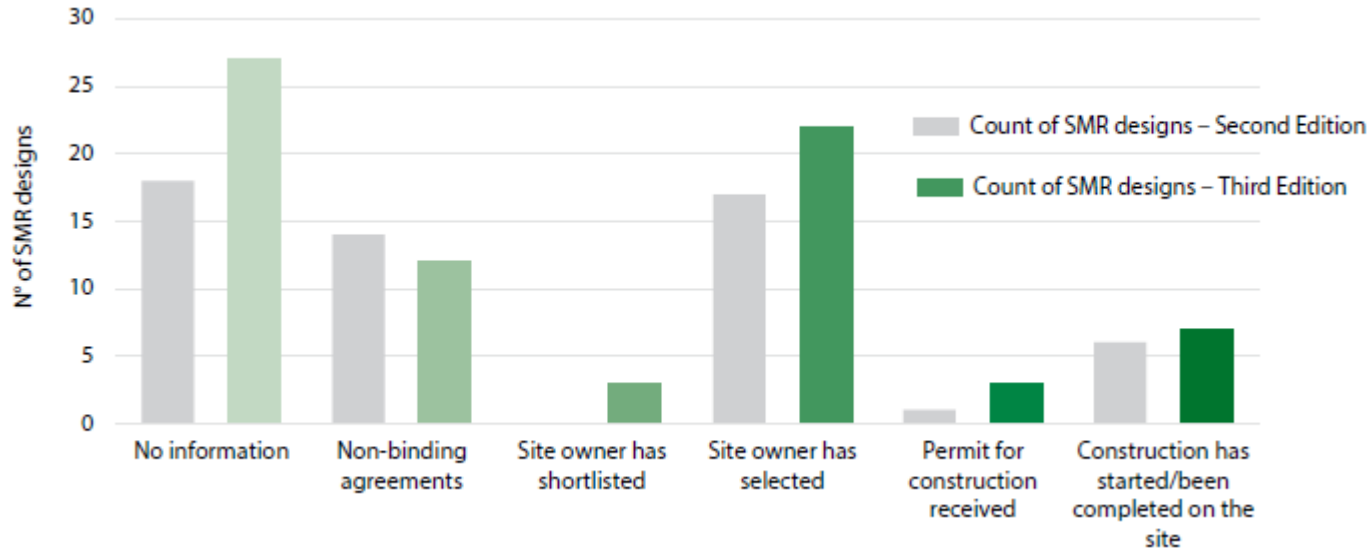
- 고온수전해 기술과 연계한 고온가스로 실증 협의 중
- **민관 합작 고온가스로 개발 프로젝트 수행 중 ('24~'27)**
: (목표) 2027년 기본설계 완료
- **변경된 제도에 맞춰 대형 연구사업 기획 중 ('27년 착수 목표)**

개발 참여 기관 및 역할

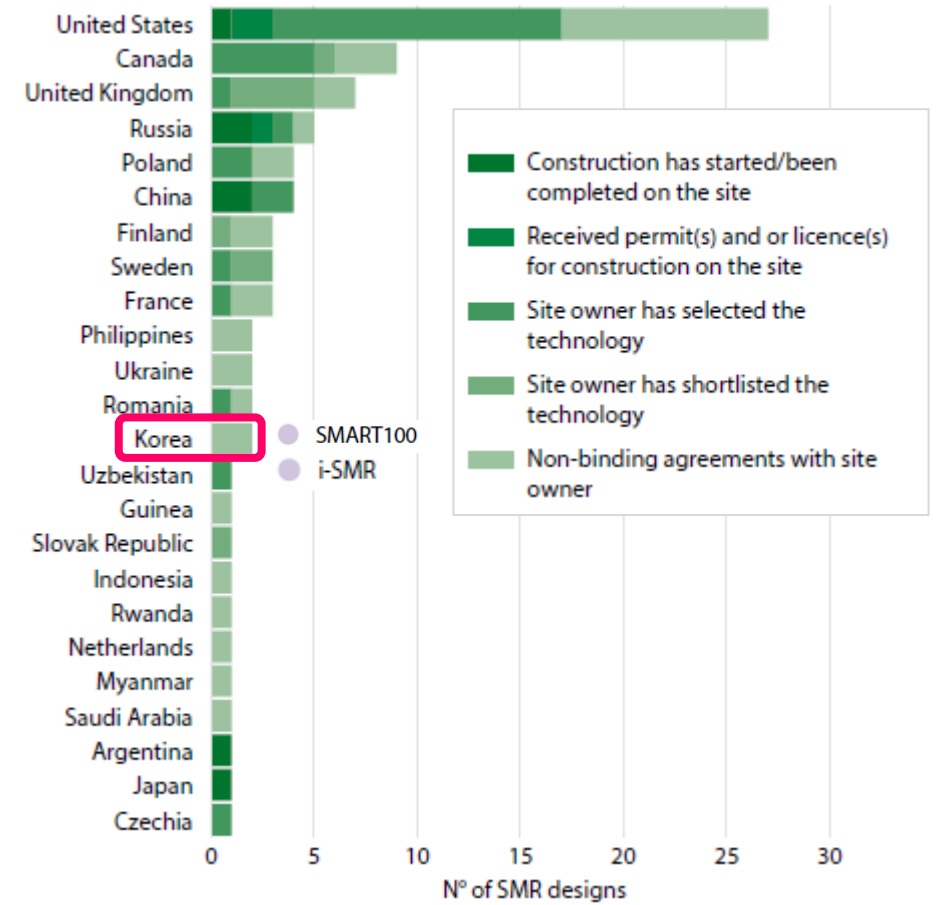
- 한국원자력연구원: 원자로 노심·계통 설계, 핵연료 설계, 노내구조물 설계
- 포스코이앤씨: 사업관리 및 플랜트 설계
- 대우건설: 폐기물 계통 방사선 방호
- SK에코플랜트: SOEC 연계 수소사업 기획
- 롯데케미칼: 화학산업 연계 공정열 사업 기획

SMR 개발 현안: 부지

[부지 확보 단계 별 SMR 수]



[국가 별 부지 단계 진행의 SMR 수]



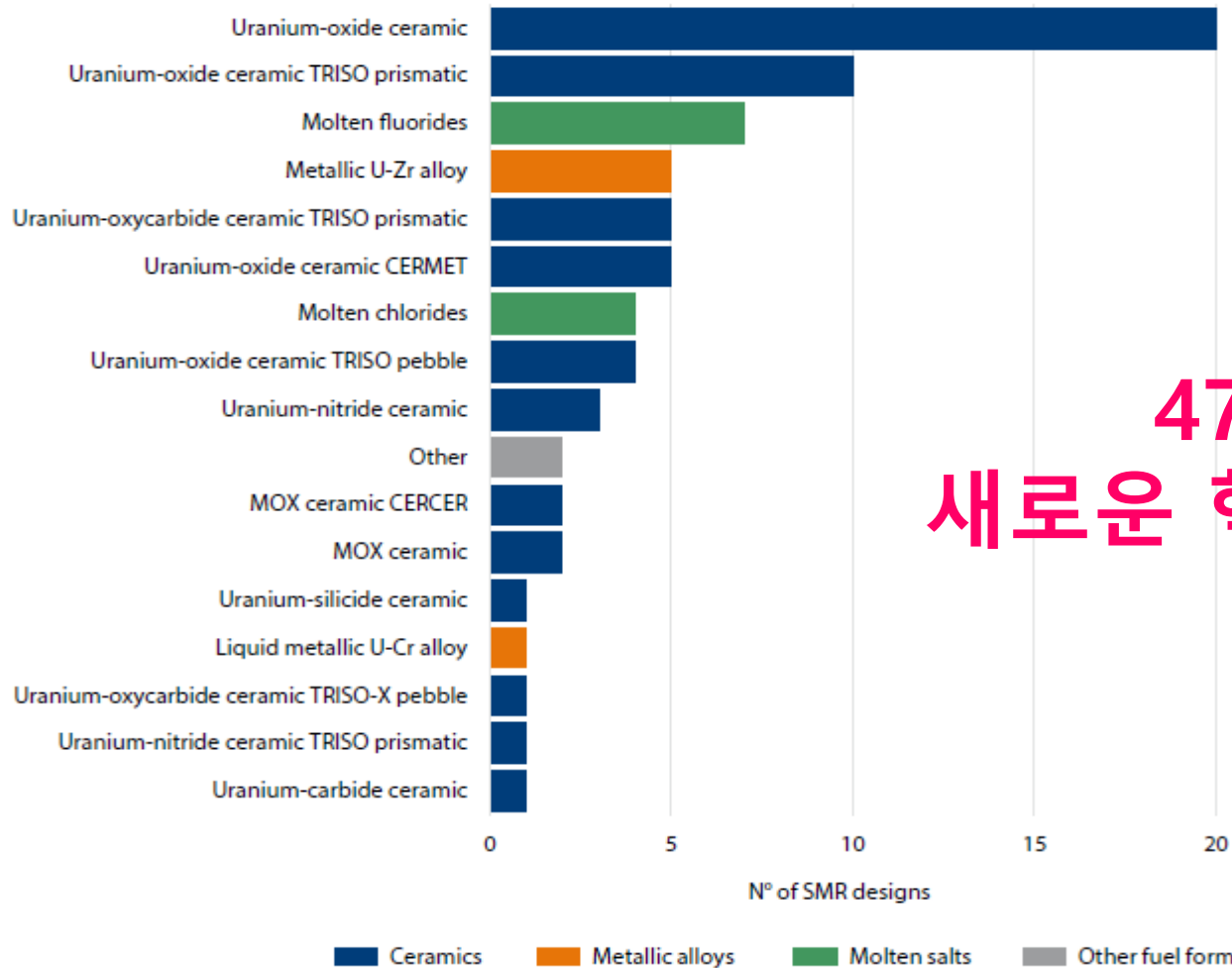
선도 SMR은 대부분 부지 확보

- RITM-200N
- Project Pele
- MSR-1
- HTR-PM
- KLT-40S
- HTR
- CAREM
- ACP100
- BREST-OD-300
- Hermes

- Water-cooled
- Gas-cooled
- Metal-cooled
- Heat pipe-cooled
- Molten salt-cooled

SMR 개발 현안: 핵연료 개발

[핵연료 종류 별 SMR 수]



47종(~63%)이
새로운 핵연료 타입을 개발
중

SMR 개발 현안: HALEU 수급

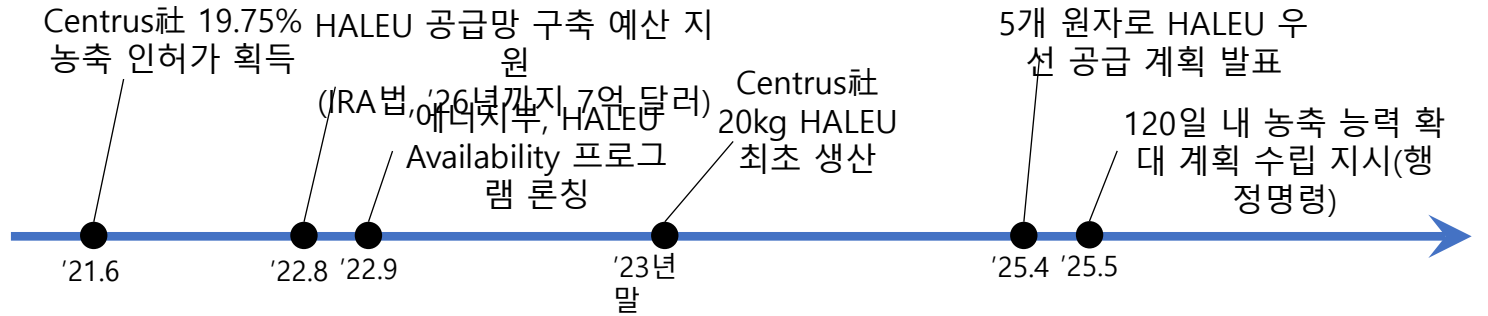
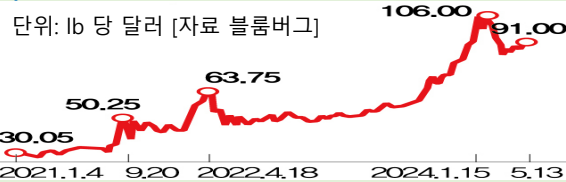
미국 핵연료 공급 현황

[KOTRA, 2024]

미국 운영사의 자국 우라늄 활용농축 공정 대외 의존도 HALEU 공급 역량
 : 약 5%('19~'23) : 약 60%('23) : 연간 470 SWU
 (러 2660만 SWU/yr)

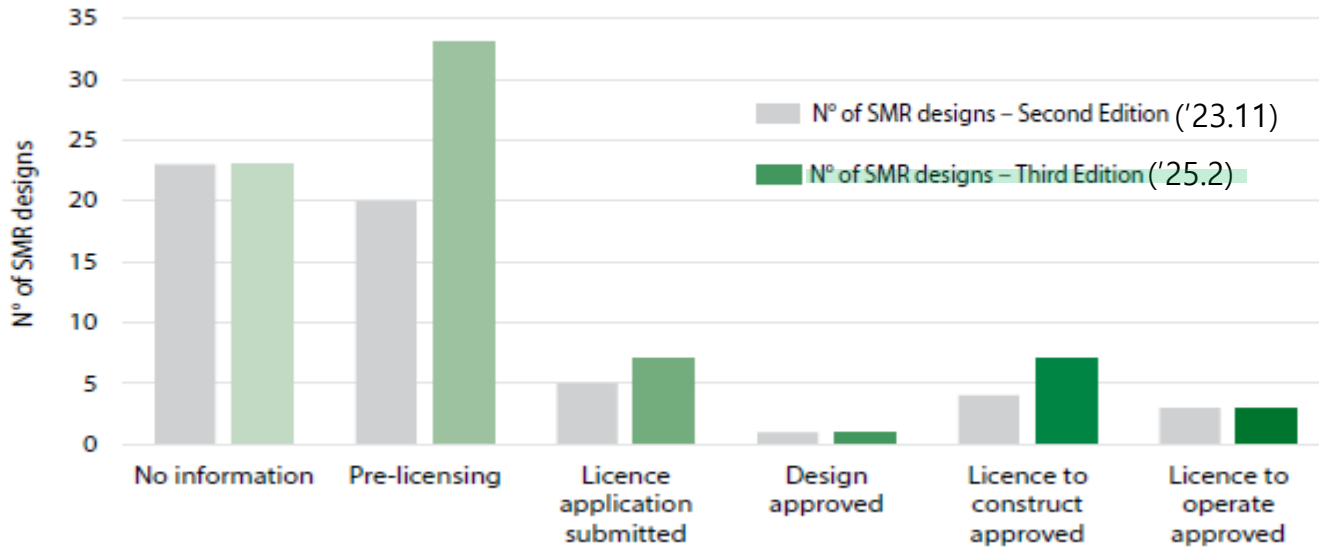
미국의 핵연료 공급망 확대 노력

세계 우라늄 가격 상승 (민간 참여 기회)



SMR 개발 현안: 인허가 진척도

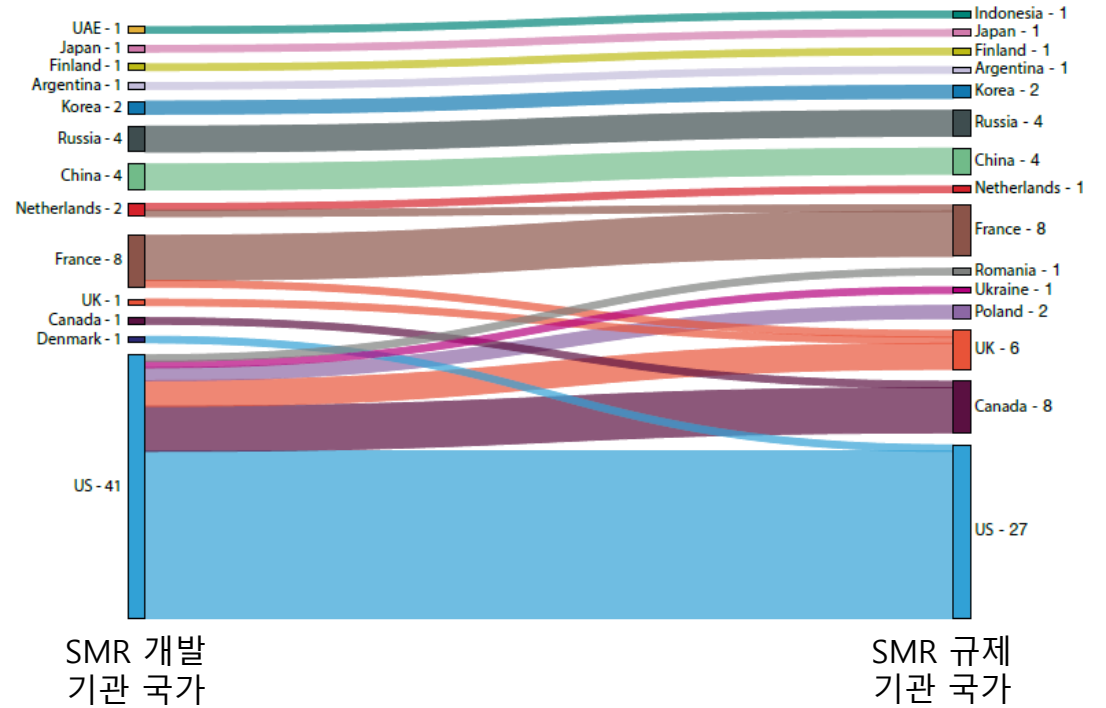
[인허가 절차 별 SMR 수]



- ACPR50S
- SMART100
- CAREM
- HTR-PM
- BWRX-300
- ACP100
- KLT-40S
- ENTRA1 Energy Plants
- RITM-200N
- HTTR
- RITM-200S
- BREST-OD-300
- RR SMR
- Project Pele
- Jimmy HTR
- Hermes
- Natrium Reactor Plant
- MSR-1

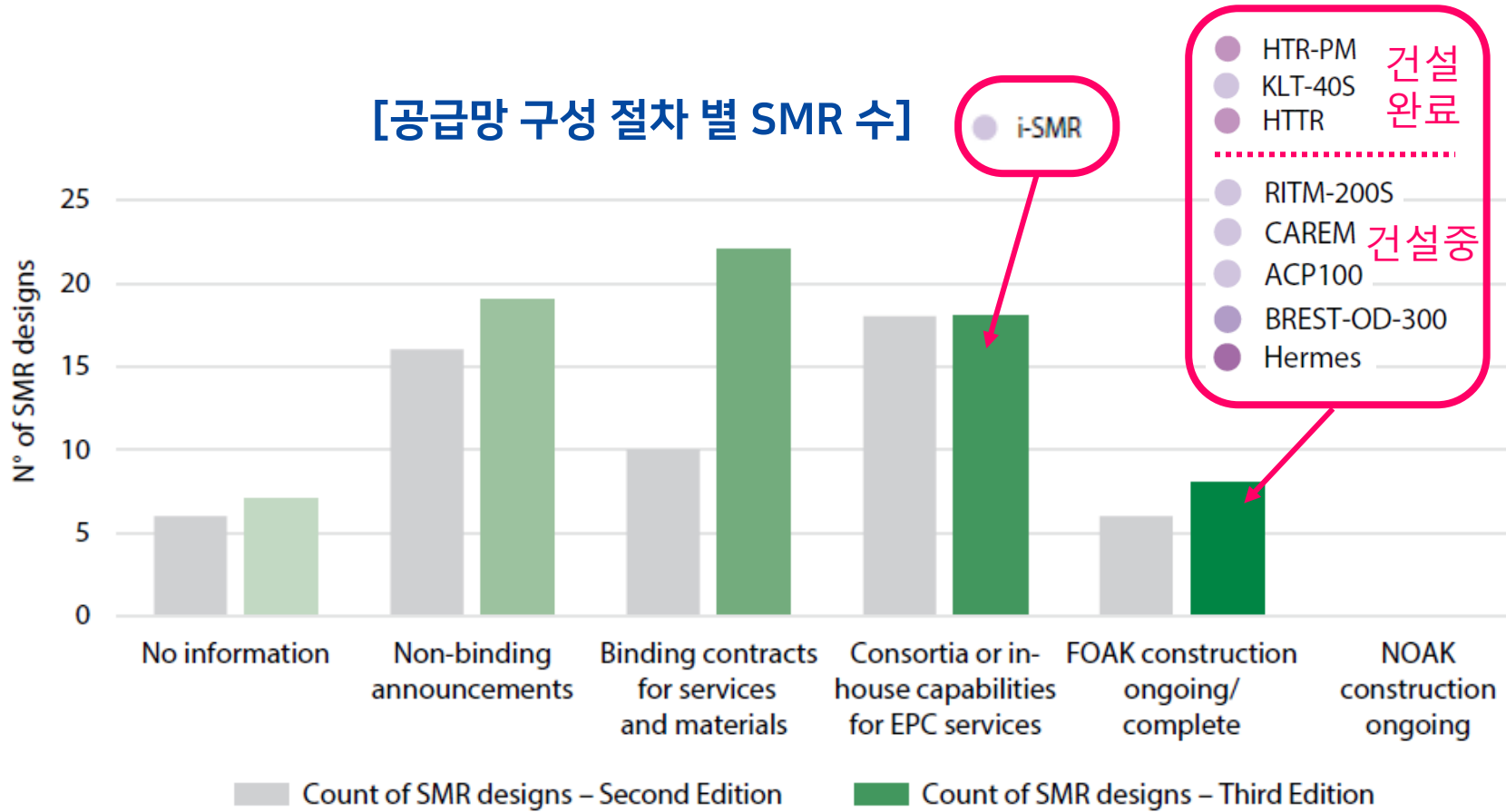
● Water-cooled ● Gas-cooled ● Metal-cooled ● Heat pipe-cooled ● Molten salt-cooled

[SMR 개발 국가 및 규제 국가 연결]

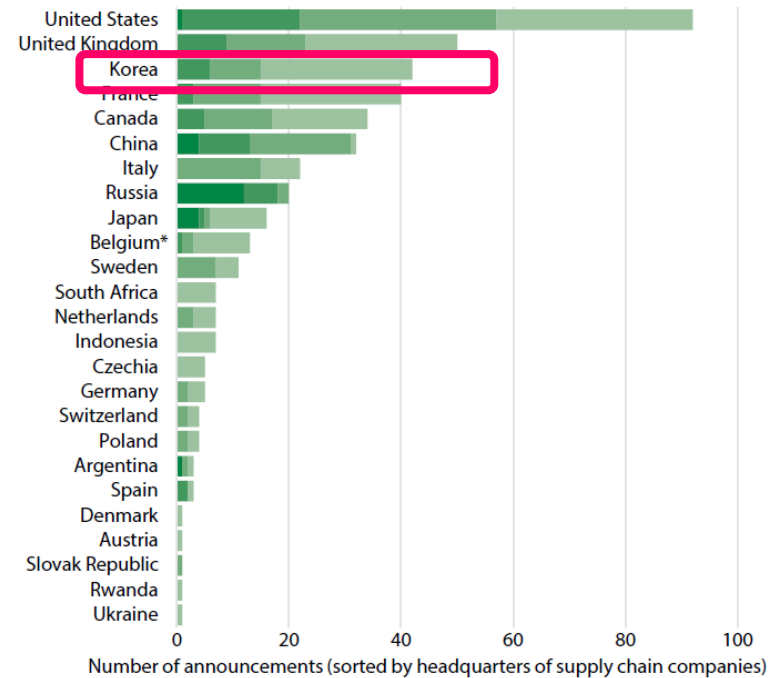


SMR 개발 현안: 사업 진척도

[공급망 구성 절차 별 SMR 수]



[국가별 공급망 구성 발표 수]



결언: 적극적인 제도 지원 절실

- 원안법, 방재법 외에도 이용관련 법(집단에너지사업법, 전기사업법 등) 정비 필수

원자력안전법 [개정 필요]

열 사업 원자로 인허가 제도 공백

⇒ 발전용·연구용원자로 허가사항외의 별도 법령 필요

인구밀집지역 설치금지 규칙

⇒ 인구밀집지역 정의 및 규제 격차 해소 필요

집단에너지사업법 [사례 필요]

집단에너지원에 원자력의 적용 가능성

⇒ 현재까지 원자력 열원이 활용된 전례가 없음

⇒ 사업허가 심의 시, 원자력안전법, 환경영향평가법, 기술심의기준 등 상충 확인 필요

분산에너지 활성화 특별법 [완료]

SMR 사업이 분산에너지 사업에 포함

⇒ '중소형원자로 발전사업'으로 반영

중소형원자로 발전사업의 규모와 요건

⇒ 현재 개발 중인 SMR 충족(모듈 당 500MW 이하)

전기사업법 [개정 필요]

원자력 발전의 전력구매계약(PPA)

⇒ 현재는 재생에너지 전기공급 사업자 및 재생에너지 전 기저장 판매사업자만 가능한 상황

SMR 특별법만으로는 부족, 제도 개선이 뒷받침 되어야 SMR 적기 개발 가능

패널토의

선진원자로 안전규제 현안과 극복방안



제5차 원자력안전규제의 미래 워크숍
선진원자로 안전규제의 현재와 미래

SMR 특별법 주요내용 및
한국 SMR의 도전적 과제

법무법인 (유) 광장
권순엽 국제업무대표 (sam@leeko.com)

SMR 특별법 제정 및 주요 내용

- 원자력 산업에 민간 참여 필요성: 국내 원자력 산업의 지속적인 발전과 성장을 위해 민간의 적극적인 원자력 업계 참여 필요. 특히 비교적 투자 리스크가 적은 **SMR 개발사업부터 민간 참여를 적극 진작 필요**
- 원자력 선진국의 SMR개발 지원: 미국, 캐나다, 영국 등 해외 원자력 선진국은 이미 SMR 개발을 위한 정부 지원 정책을 천명하고, SMR개발을 지원하는 법, 제도의 개선은 물론, 개발 비용 일부 지원
- SMR 특별법 (국회통과: 2026.02.12; 제정·공포: 2026.03.10; 시행일: 2026.09.11)
 - 1) 제2조: SMR정의: 300 MWe(열출력 1,000 MWt)이하 (TerraPower Natrium: 345 MWe; Rolls-Royce: 470 MWe);
 - 2) 제5조: SMR 개발 기본계획(5-yr) 수립; SMR 개발 시행계획 매년 수립
 - 3) 제6조: SMR 개발 기본계획 이행 점검
 - 4) 제8조: SMR 개발 촉진위원회 (차관급): 과기부 장관이 위원장; (i) SMR 개발 및 실증 지원 관한 사항; (ii) SMR 연구 특구 지정에 관한 사항 등에 대해 심의
 - 5) 제9조: 정부에 SMR 개발, 구축, 운영, 수요 확충, 원활한 이용 촉진을 위해 제도 개선 노력 의무 부과

SMR 특별법 제정 및 주요 내용

▪ SMR 특별법 주요 내용

- 6) 제10조: SMR 개발 촉진을 위해 SMR 개발 기관/업체에 행정적, 기술적, 재정적 지원 (정부 예산으로 개발 비용 지원 가능)
- 7) 제11조: SMR의 신속한 실증을 위해 부지 지원 포함, 행정적, 기술적, 재정적 지원 (정부 예산으로 개발 비용 지원 가능)
- 8) 제12조: 공공기관(KAERI)와 민간기업 간의 협력을 위해 공동출자회사 설립 가능 (연구소기업 형태 포함)
- 9) 제13조: SMR 연구개발특구 지정; 지자체의 특구 지정 요청 가능 (실증으로 인한 supply chain 구축 가능)
- 10) 제15조: 정부에 SMR 기술표준 관련 국제협력 증진 의무 부과
- 11) 제16조: 국내 SMR 구축을 위해 사회적 수용성 확보 노력

▪ SMR 특별법에 빠진 내용

- 1) **SMR 개발 비용 및 시설투자에 대한 세제 혜택**
- 2) **SMR의 기본적 수요 확보를 위한 방안 제시 (관련 제도 개선 노력 의무 수준)**
- 3) **SMR용 핵연료 확충 방안**

한국 SMR 개발 프로젝트의 도전적 과제

■ 한국 SMR 개발 프로젝트에 대한 도전적 요소

- Global Competition: IAEA 83 SMR designs; OECD NEA 127 SMR designs; 90+ SMR designs under active development → 2050년까지는 5-10 designs 정도가 global시장에서 commercial winner 가 될 가능성
- Need to be Adequately Differentiated from Competitors' Designs: Any competitive analysis before developing?
- Time-to-Market Issue: SMR개발에서 한국은 후발 주자: (i) 경수형; NuScale: 2030년경 / i-SMR: 2034년; (ii) 비경수형; Kairos: 2030년 / 한국 MSR: 2037년; (iii) SMR 인허가 (Under NEIMA, 미국 NRC는 risk-informed, performance-based, and technology-inclusive regulatory system을 2027.12.31까지 수립해야 함)
- Concern about Limited Domestic Demand for SMR: (i) Korea's globally-recognized grid; (ii) Korea's proliferation of large nuclear power plants (APR-1400) (26 units in operation—25.2 GWe) → By 2030: 새울 3,4 호기 건설 중; 신한울 3,4 호기 착공 → 2030년 이후 33, 34호기 건설 예정 (경북 영덕 등이 후보지) → not much room for SMRs
- 충분한 국내 시장 수요 확보 중요: (i) 11차 전기본: 1 SMR; (ii) AI데이터센터법: PPA; (iii) 분산에너지법하에서 분산특구 내 중소형 원자력(500 MW이하) PPA 가능; (iv) 원자력안전법은 발전로/연구로만 규정 (산업용 SMR 규정 필요); (v) 국민수용성 확보 이슈
- 수출시장 확보 노력: (i) SMR 기술표준 국제화 노력 (미국/영국/캐나다 표준화 협의); (ii) 국제 공조를 통한 SMR 개발 노력 필요