

소형모듈형원자로(SMR) 설계특성 관련 규제기술 개발 방향



국민에게 신뢰받는 안전 최우선의 KINS

2022.5.18.(수)

한국원자력안전기술원 SMR규제연구PM

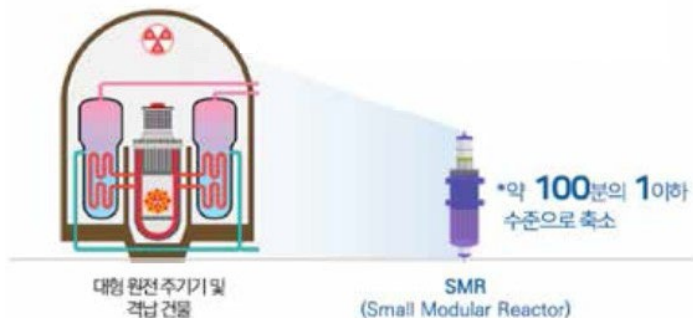
Contents

1. 소형모듈형원자로(SMR, Small Modular Reactor)
2. 중소형원자로 안전규제 기반기술 개발 사업 소개
3. 경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발
4. 2022년 연구 수행 내용
5. 맺음말

1 소형모듈형원자로(SMR, Small Modular Reactor)

소형모듈형원자로(SMR, Small Modular Reactor)

- 기존 대형 원전(1400MW_e)의 용량과 크기를 크게 줄인 것으로 전기출력 300MW_e 이하의 원자로
- 운송이 가능한 정도의 모듈형 크기로 설계/제작하여 원자로를 조립하는 방식
- 제작, 이송 및 건설이 가능하여 건설공기 단축과 건설비용 절감 가능
- 석탄 화력발전 대체(on-grid)/도서산간지역 전기 공급(off-grid)/해수 담수화 및 수소생산 등이 목표



< 공장 작업 최대화 >



< 수송: 트럭, 철도, 선박 >



(부유식)

< 건설 작업 최소화 >



(모듈형(NuScale))

국내 SMR 인허가 경험

➤ SMART 일체형원자로 표준설계인가 (인가, 2012)

- ✓ 2005년~2010년 일체형원자로 규제기술개발을 통한 경수기반의 일체형원자로에 대한 심사경험 확보

➤ SMART100 일체형원자로 표준설계인가 (심사중, 2019~)

- ✓ 기존 표준설계(2012)에서 안전계통을 모두 피동화
- ✓ 피동안전계통에 대한 규제지침 신설(2019.12)하여 심사 준비

➤ SMR 규제경험 반영

- ✓ 경수기반의 일체형원자로 → 기존 국내 규제체계를 적용하여 심사가능 (예외적용에 대한 다수의 현안 해결 필요)
- ✓ 비경수로, 모듈형 원자로 → 특성을 고려한 규제체계 개선/신설 검토필요

SMR 관련 최신 News

저탄소시대 해결사로 뜬 '소형원자로'¹⁾

탄소 배출 없고, 안전성과 경제성 갖춰
차세대 원자로 기술로 선진국 개발경쟁
韓, 혁신형 SMR 추진...2030년 시장 진출



미국 뉴스케일의 SMR 조감도

<두산중공업 제공>

혁신형 SMR, 규제 R&D 본격 착수... “미래 인허가 수요 대비”²⁾

‘중소형 원자로 안전규제 기반기술 개발사업’ 착수
내년부터 오는 2028년까지 7년간 총 360억원 규모
범용 SMR 규제안 마련 예고, 모듈형 개념 수용 관건



미국 뉴스케일의 SMR 모형도. 하나의 격납용 건물 안에 복수의 원자로가 설치돼 규제 마련에 큰 난점으로 떠오를 전망이다.

1) http://www.dt.co.kr/contents.html?article_no=2021110302100331731001&ref=naver

2) <https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=224722>

2 중소형원자로 안전규제 기반기술 개발 사업 소개

사업 소개

- **사업명** : 중소형원자로 안전규제 기반기술 개발
- **사업목적** : 중소형원자로(SMR) 인허가 심사 등을 위한 규제체계 정비 및 고유규제기술개발을 통한 예상 안전현안 해결 연구
- **사업기간/규모** : '22~'28년(7년) / 총 사업비 360억원('22년 20억원)
- **주관부처** : 원자력안전위원회
- **연구내용**
 - ✓ 원자력시설 안전성 차원의 규제기술개발(안전연구, KINS 수행)
 - 경수형 SMR 인허가를 위한 규제체계 개선, 설계특성(소형화·모듈화)관련 규제검증기술 개발, 국내외 동향 조사 연구 등
 - ✓ 핵비확산, 핵안보 차원의 규제기술개발(안보연구, KINAC 수행)
 - 경수형 SMR 핵비확산 규제체계 구축, 핵안보 측면의 SMR규제요건 개발, 관련 기술동향 조사 연구 등

전체 연구내용

1. 경수형 SMR 안전규제 체계, 규제전략 및 지원 프로그램 개발

[1-1] 경수형 SMR 인허가를 위한 국내 규제체계 개선(안) 개발

2. 안전현안 도출 및 해결을 위한 규제기술(안전성 평가·검증 기술) 개발

[2-1] 경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발

[2-2] i-SMR 주요 설계요건 분석 및 고유 규제검증기술개발(i-SMR 계획 확정 후, '24년~)

KINS

3. 핵비확산·핵안보 측면의 SMR 규제요건 개발 및 규제체계 구축

[3-1] 경수형 SMR 핵비확산 규제기술 개발 및 규제체계 구축

[3-2] 핵안보 측면의 경수형 SMR 규제방안 연구

KINAC

KINS 수행 연구 내용

1. 경수형 SMR 안전규제 체계, 규제전략 및 지원 프로그램 개발

[1-1] 경수형 SMR 인허가를 위한 국내 규제체계 개선(안) 개발

- ✓ 안전분야 SMR 기술개발 동향분석 및 전략수립
- ✓ SMR 설계특성기반 현행 규제체계 분석 및 개선방안 수립
- ✓ SMR 지원 프로그램 개발

2. 안전현안 도출 및 해결을 위한 규제기술(안전성 평가·검증 기술) 개발

[2-1] 경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발

- ✓ 원자로 소형화/모듈형 설계특성 등에 따른 안전현안 평가·검증 기술 개발

[2-2] i-SMR 주요 설계요건 분석 및 고유 규제검증기술개발(i-SMR 계획 확정 후, '24년~)

- ✓ i-SMR 설계단계별 규제검증모델 개발 및 예비평가
- ✓ 기술현안도출 및 예상기술현안 설계자/규제자 상호대응 방안 마련

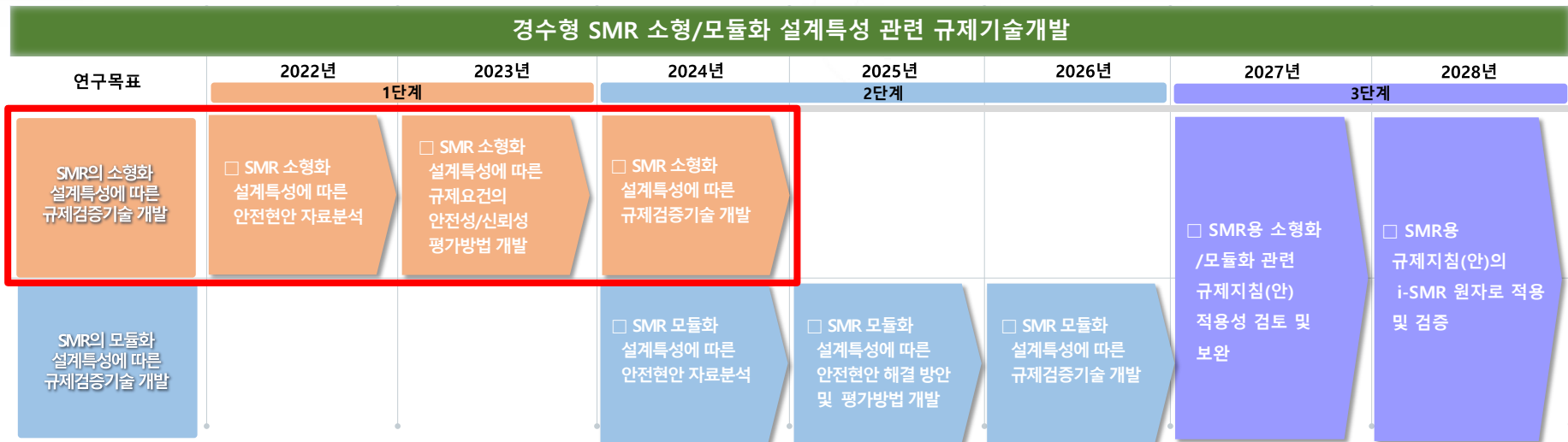
KINS

3 경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발

연구과제 소개

- 과제명 : 경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발
- 과제기간 : 2022.04.01.~2028.12.31.(7년)
- 과제비 : 총 35.1억원 ('22년 3.9억원)
- 과제목표 : 국내에서 개발 중인 경수형 SMR의 소형화 및 모듈화 설계특성에 따른 규제검증 기술 개발
 - ✓ 1단계: SMR의 소형화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발
 - ✓ 2단계: SMR의 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발
 - ✓ 3단계: SMR용 규제지침(안)의 i-SMR 원자로 인허가심사 적용 및 검증

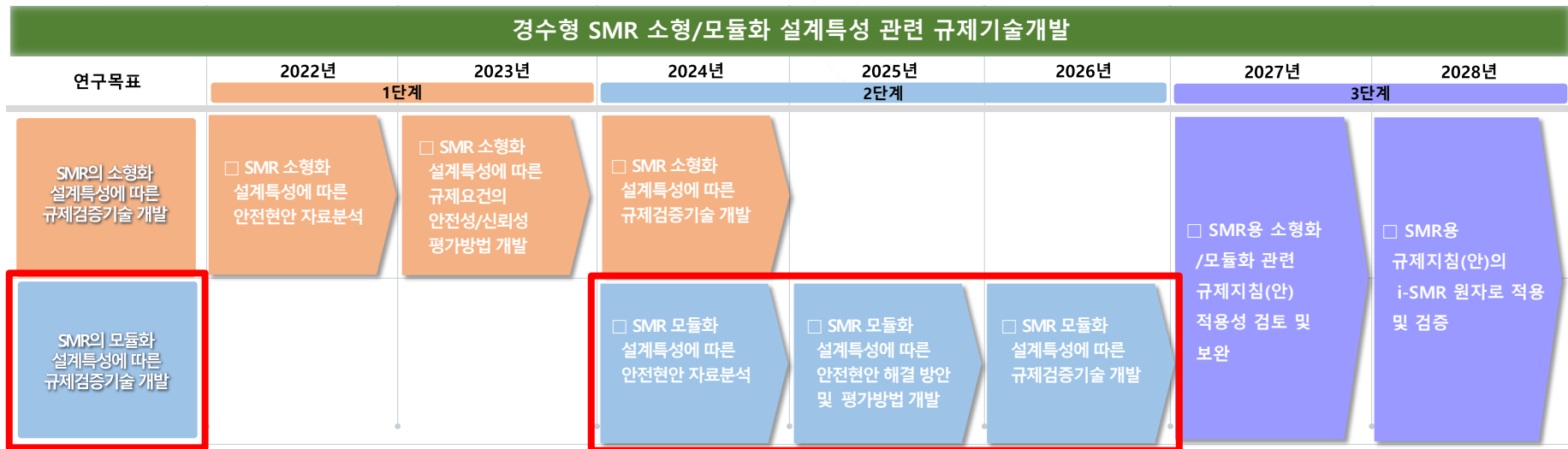
연구 수행 계획(1단계)



➤ 1단계(2022년 ~ 2023년)

- ✓ SMR 소형화 설계특성에 따른 안전현안 자료분석
- ✓ SMR 소형화 설계특성에 따른 규제요건의 안전성/신뢰성 평가방법 개발
- ✓ SMR 소형화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발

연구 수행 계획(2단계)



➤ 2단계(2024년 ~ 2026년)

- ✓ SMR 모듈화 설계특성에 따른 안전현안 자료분석
- ✓ SMR 모듈화 설계특성에 따른 규제요건의 안전성/신뢰성 평가방법 개발
- ✓ SMR 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발

연구 수행 계획(3단계)

경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발							
연구목표	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	2027년	2028년
	1단계		2단계			3단계	
SMR의 소형화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발	□ SMR 소형화 설계특성에 따른 안전현안 자료분석	□ SMR 소형화 설계특성에 따른 규제요건의 안전성/신뢰성 평가방법 개발	□ SMR 소형화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발			□ SMR용 소형화 /모듈화 관련 규제지침(안) 적용성 검토 및 보완	□ SMR용 규제지침(안)의 i-SMR 원자로 적용 및 검증
SMR의 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발			□ SMR 모듈화 설계특성에 따른 안전현안 자료분석	□ SMR 모듈화 설계특성에 따른 안전현안 해결 방안 및 평가방법 개발	□ SMR 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발		

➤ 3단계(2027년 ~ 2028년)

- ✓ SMR 소형화/모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 검토 및 보완
- ✓ SMR용 규제지침(안)의 i-SMR 원자로 인허가심사 적용 및 검증

연구 내용(1단계)

경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발							
연구내용	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	2027년	2028년
	1단계		2단계			3단계	
SMR의 소형화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발	<div><input type="checkbox"/> 봉산을 사용하지 않는 반응도제어계통 규제검증기술 개발 - 반응도제어계통의 다양성/다중성/신뢰성을 검증하기 위한 규제지침(안) 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 규제관리대상 비안전계통(RTNSS) 및 공통원인고장 규제검증기술 개발 - 규제관리대상 비안전계통의 선정기준 수립 및 신뢰성을 검증하기 위한 규제지침(안) 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 원안위 인정규격 외 재료/기기 적용을 위한 안전성평가 및 규제검증기술 개발 - 국외 미등재 재료/기기의 국내적용 및 호환성 향상을 위한 규제지침(안) 개발</div>					<div><input type="checkbox"/> SMR용 소형화 /모듈화 관련 규제지침(안) 적용성 검토 및 보완</div>	<div><input type="checkbox"/> SMR용 규제지침(안)의 i-SMR 원자로 적용 및 검증</div>
SMR의 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발			<div><input type="checkbox"/> 모듈형 원자로의 제작/시험/운반/설치검사 관련 규제검증기술 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 모듈형 원자로의 핵연료/가동중검사/운영/해체 관련 규제검증기술 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 다수호기 모듈 운영/인적요인 변동 관련 규제검증기술 개발</div>				

- 심사 진행중인 소형원자로(SMART100, ARA연구로)의 안전현안 해결을 위한 규제검증기술 개발
- ✓ 봉산을 사용하지 않는 반응도제어계통 규제검증기술 개발
 - ✓ 규제관리대상 비안전계통(RTNSS) 및 공통원인고장 규제검증기술 개발
 - ✓ 원안위 인정규격 외 재료/기기 적용을 위한 안전성평가 및 규제검증기술 개발

연구 내용(2단계)

경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발							
연구내용	2022년	2023년	2024년	2025년	2026년	2027년	2028년
	1단계		2단계			3단계	
SMR의 소형화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발	<div><input type="checkbox"/> 봉산을 사용하지 않는 반응도제어계통 규제검증기술 개발 - 반응도제어계통의 다양성/다중성/신뢰성을 검증하기 위한 규제지침(안) 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 규제관리대상 비안전계통(RTNSS) 및 공통원인고장 규제검증기술 개발 - 규제관리대상 비안전계통의 선정기준 수립 및 신뢰성을 검증하기 위한 규제지침(안) 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 원안위 인정규격 외 재료/기기 적용을 위한 안전성평가 및 규제검증기술 개발 - 국외 미등재 재료/기기의 국내적용 및 호환성 향상을 위한 규제지침(안) 개발</div>					<div><input type="checkbox"/> SMR용 소형화 /모듈화 관련 규제지침(안) 적용성 검토 및 보완</div>	<div><input type="checkbox"/> SMR용 규제지침(안)의 i-SMR 원자로 적용 및 검증</div>
SMR의 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발			<div><input type="checkbox"/> 모듈형 원자로의 제작/시험/운반/설치검사 관련 규제검증기술 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 모듈형 원자로의 핵연료/가동중검사/운영/해체 관련 규제검증기술 개발</div> <div><input type="checkbox"/> 다수호기 모듈 운영/인적요인 변동 관련 규제검증기술 개발</div>				

➤ SMR의 모듈화 설계특성에 따른 규제검증기술 개발

- ✓ 모듈형 원자로의 제작/시험/운반/설치검사 관련 규제검증기술 개발
- ✓ 모듈형 원자로의 핵연료/가동중검사/운영/해체 관련 규제검증기술 개발
- ✓ 다수호기 모듈 운영/인적요인 변동 관련 규제검증기술 개발

4 2022년 연구 수행 내용

연구 내용(2022년)

○ SMR 소형화 설계특성에 따른 안전현안 자료분석

➤ 반응도제어계통의 국내/외 설계 적용사례 및 기술기준 분석 및 안전현안 도출

- ✓ 현행 법령(원안법 등) 및 국외 법령(GDC 등)에서 정의하고 있는 반응도제어계통 설계 요건 분석
- ✓ 대형 원전 등 국·내외 원자로시설에서 적용하고 있는 반응도제어계통의 설계 사례 분석

➤ 규제관리대상 비안전계통(RTNSS) 적용현황 분석 및 공통원인고장 관련 안전현안 도출

- ✓ 안전기능을 수행하는 계통의 규제관리대상 비안전계통(RTNSS) 적용사례 분석
- ✓ SMR의 소형화에 따라 정의되는 단일고장/공통원인고장의 정의 및 적용사례 분석

➤ 원안위 인정규격 외 재료/기기 적용 관련 안전현안에 대한 내용 분석

- ✓ 기존 원자로시설 등에서 원안위 인정규격 외 재료/기기의 적용 사례 조사
- ✓ 국외 원자로시설 등에서 산업기술기준 미등재 재료 및 신규 재료/기기의 적용 사례 조사

국내/외 법령 내 반응도제어계통의 정의

원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

제28조(반응도 제어계통) ① 원자로시설에는 다음 각호에 적합한 반응도 제어계통(제어봉에 의한 제어계통 및 액체제어재의 주입 또는 1차 냉각재의 유량조정 등에 의한 반응도를 제어하는 계통을 말한다. 이하 같다)을 설치하여야 한다.

1. 정상운전 및 예상운전과도에서 예상되는 반응도 변화를 신뢰성 있게 제어할 수 있는 능력과 연료허용손상한계를 초과하지 아니하고 운전상태를 유지할 수 있는 능력을 갖출 것
 2. 서로 다른 설계원리를 가진 두 개의 독립적인 반응도 제어계통이 제공되어야 하며, 그 중 하나는 제어봉을 사용할 것
 3. 제2호의 두 계통 중 하나는 정상운전의 원자로를 저온조건하에서 미 임계 상태로 유지할 수 있을 것
- ② 제어봉에 의한 제어계통은 운전 중에 어떠한 하나의 제어봉이 고착된 경우에도 연료허용손상한계를 초과시키지 아니하고 즉시 기능을 발휘하고 안전상 필요한 여유를 가지고 반응도 변화를 제어할 수 있는 반응도억제효과를 가진 것이어야 한다.
- ③ 액체제어재 등에 의한 제어계통은 계획적인 출력변화에 의한 반응도변화를 연료허용손상한계를 초과하지 아니하고 제어할 수 있는 반응도억제기능을 가진 것이어야 한다.

10CFR50 Appendix. A General Design Criteria

Criterion 26 - Reactivity control system redundancy and capability.

Two independent reactivity control systems of different design principles shall be provided. One of the systems shall use control rods, preferably including a positive means for inserting the rods, and shall be capable of reliably controlling reactivity changes to assure that under conditions of normal operation, including anticipated operational occurrences, and with appropriate margin for malfunctions such as stuck rods, specified acceptable fuel design limits are not exceeded. The second reactivity control system shall be capable of reliably controlling the rate of reactivity changes resulting from planned, normal power changes (including xenon burnout) to assure acceptable fuel design limits are not exceeded. One of the systems shall be capable of holding the reactor core subcritical under cold conditions.

원자력산업의 재료 사용 관련 현행 기술기준

원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

제12조(안전등급 및 규격) 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.

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.

원자로시설의 안전등급과 등급별 규격에 관한 규정(원안위 고시 제2018-06호)

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.

제9조(등급별 규격) ① 제5조·제6조 및 제7조에 따라 안전등급이 부여된 설비는 다음 각 호의 규격에 적합하여야 한다. 다만, 각 호의 기술기준 중 일부를 적용하고자 할 경우에는 원자력안전위원회의 기술적 검토 및 평가를 받아야 한다.

1. 안전등급 1, 2, 3의 기계설비 : KEPIC MN(2000년판부터 2009년 추록까지의 발행년판 및 추록) 또는 이에 상응하는 ASME Code Sec. III(1995년판부터 2008년 추록까지의 발행년판 및 추록)

KEPIC(2009년판 추록), MNA 1220 재료

재료는 KEPIC-MDF(철강재료), KEPIC-MDN(비철금속재료) 및 KEPIC-MDW(용접재료) 재료규격 또는 KEPIC-MN에서 허용하는 다른 재료규격(KEPIC-MNX 2121 참조)에 따라 제조된 금속재료를 말한다. 재료는 KEPIC-MN의 요건에 따라 제조, 식별 및 인증하여야 한다.

원자력산업의 재료 사용 관련 현행 기술기준(II)

원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

제12조(안전등급 및 규격) 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.

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.

➤ 산업기술기준(ASME, KEPIC) 미 등재 재료사양의 적용성에 관한 정보

✓ 기기의 안전기능을 보장하기 위한 기능적 측면의 적용 가능성

➤ 산업기술기준(ASME, KEPIC) 미 등재 재료사양의 적합성에 관한 정보

✓ 기기의 안전기능을 보장하기 위한 환경조건(압력, 온도, 중성자조사, 부식 등)에 대한 적합 여부

➤ 산업기술기준(ASME, KEPIC) 미 등재 재료사양의 충분성에 관한 정보

✓ 기기의 안전기능을 보장하기 위한 경험적 구체성(운전경험)

5 맺음말

○ 국내 경수형 SMR 규제개선 R&D 수행으로 적시에 인허가 대응

- SMR에 대한 현재 규제체계 적용성 검토 및 개선을 통한 경수형 SMR의 규제체계 개발
- 사업자(한수원 등)의 i-SMR 개발에 따른 규제현안 검토 및 대응 필요

○ 국내 SMR 인허가 경험 반영

- SMART(2012), SMART100(2019), 일체형원자로 및 피동형안전계통에 대한 규제요건 개정
- i-SMR의 설계특성에 따른 현안은 개발 단계에 따라 규제요건 개정에 반영 예정

○ SMR 규제개선 R&D를 활용한 규제자와 사업자간의 원활한 정보 교류 수행

- 국내 경수형 SMR 개발관련 산.학.연 관계기관의 Workshop 개최(연 2회)

감사합니다



한국원자력안전기술원
KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY