

SMR 기술기준 현황 및 KEPIC 개발 계획

2021.10.28

조 종 철

원자력안전기술표준연구소

Jo, Jong Chull

Nuclear Safety Technology & Standards Research

jongcjo@nstr.com

SMR 분야 한수원 CRI-KEPIC 공동 워크숍

SMR 개발 현황: 국제

- 당면 글로벌 이슈
 - 기후 변화, 에너지 부족, 원전의 잠재적 방사선누출사고 우려
- 해결 방안
 - 탄소 배출 저감, 안정적 에너지원 공급원 확보 및 방사선누출사고 잠재성 제거를 가능하게 하는 SMR 개발·이용
- 많은 국가들이 SMR의 개발 또는 자국 건설에 관심
- 16개국에서 독자적 또는 공동으로 90 여종의 SMR 설계가 개발 추진
 - 미국(28), 러시아(17), 중국(12), 일본(9), 캐나다(6), 한국(4), 영국(3), 남아공(3), 프랑스(2), 룩셈부르크(2), 덴마크(2), 인도(2), 체코(2), 아르헨티나(1), 스웨덴(1), 인도네시아(1), 다국적/국제 컨소시엄(3)
 - LWR (대략 35), HTR(대략 21), FNR(대략 17), MSR(대략 14), 기타

SMR 개발 현황: 우리나라

- 우리나라는 원자력기술 선진국 반열에 들기는 하였지만,
 - 최근 탈 원전 정책 추진으로 기술 진보가 정체
- 원전 산업 발전을 위한 조속한 R&D 진흥 조치를 취하지 않으면
 - 미래에는 원자력기술 수입국으로 전락 가능
- 이러한 상황을 우려하여
 - 최근 SMR 개발 추진을 위한 움직임이 시작

LWR 기반 SMR의 장점

- 고유 안전 기능 (피동계통 채용, 저출력, 저압운전 등)
- 탁월한 신뢰성
- 폐기물 발생 감소
- 핵비확산성
- 연료 이용율 향상
- 열효율 향상
- 발전 및 비발전 용도의 통합 능력
- 현세대의 경수로 대비 신형로의 건설 공기 단축
- 첨단 제작 기술 도입 및 모듈식 건설 장점 활용으로
 - 수작업 인건비 대폭 절감
 - 대부분의 작업은 통제된 공장에서 수행
 - 반복성 및 품질 향상, 부품 검사 시간 및 불량률 감소
- 설계의 단순성으로 계통 및 기기의 단순화
- 계통 소형화와 저압 운전으로 재료비(철강, 콘크리트 및 철근) 절감

SMR 인허가 현황: 우리나라

- SMART 설계에 대한 표준설계인가(Standard Design Approval; SDA) 심사 신청(2010년 12월) 및 SDA 발급(2012년 7월)
- 모든 능동안전설비를 피동형으로 대체한 개량형 SMART 설계에 대한 SDA 신청 (2016년) 및 현재 심사중

SMR 인허가 현황: 미국

설계 명칭	신청 형식	신청업체
NuScale (50 MWe)	SDA* '20년 9월 발급	NuScale Power, LLC
	Design Certification (DC)** '17년 1월 신청	NuScale Power, LLC
NuScale720 (77 MWe)	SDA, Pre-Application '22년 4분기 SDA 신청예정	NuScale Power, LLC
BWXT mPower™	경수 일체형 PWR (iPWR)에 대한 Pre-Application '09년 신청준비활동 시작 및 '14년에 보류	BWXT mPower, Inc.
SMR-160	인허가 주제 보고서에 대한 Pre-Application '20년 신청	SMR, LLC, a subsidiary of Holtec Int'l
Clinch River Nuclear Site	Early Site Permit (ESP) 2기 이상의 SMR 모듈 (최대 800 MWe, 2420 MWt) 에 대한 ESP 를 '16년 5월에 신청하여 '19년 12월에 NRC로부터 ESP-006을 발급 받았음	Tennessee Valley Authority (TVA)
BWRX-300	피동안전설비를 갖춘 수냉각 자연순환 SMR (300MWe) 관련 인허가 주제 보고서에 대한 Pre-Application '19년 912월 신청 및 현재 심사 진행 중	GE-Hitachi Nuclear Energy (GEH)

SMR 인허가 현황: 미국

❖ SMR 및 비경수로 NRC 규제 현안 (해결 완료)

1. 비경수로 격납용기 기능적 성능
2. 원형로 인허가
3. 복수 모듈 시설에 대한 인허가 체계
4. 가변적 연회비
5. 미래 원자로 제작 면허 요건
6. 인허가 과정에서 PRA 사용
7. 주요 기기 및 계통 설계
8. 소형 또는 복수 모듈 시설에 대한 운전원 채용
9. 소형 또는 복수 모듈 시설에 대한 운영 프로그램
10. 복수 모듈 시설 운전 중 원자로 모듈의 설치
11. 원자력 발생 공정 열을 사용하는 산업 시설
12. 폐로 기금 보장
13. 신형로에 대한 심층방어 (DiD) 철학 이행
14. 항공기 충돌 평가

SMR 인허가 현황: 미국

❖ SMR 및 비경수로 NRC 규제 현안 (해결 중)

1. **적정 선원항, 선량 계산 및 부지선정:** 인구 밀도 관련 부지선정 지침의 개정 추진 중
2. **소외비상계획(Offsite EP) 요건:** 비경수로 및 의료용 방사성 동위원소 시설을 포함하여 미래의 SMR 및 기타 새로운 원자로 기술에 대한 EP 현안을 다룰 규칙 제정 추진 중
3. **보험 및 법적책임:** Price-Anderson 법의 최신 버전에 따라 NRC는 2021년 12월 31일까지 Price-Anderson 법 조항의 유지 지속 또는 수정 필요성을 권고하는 대 의회 보고서와 NRC 위원회의 심의를 위한 관련 SECY 문서 준비 중
4. **보안 및 안전조치 요건:** NRC는 신형로에 대한 물리적 보안과 관련된 규정 및 지침에 대한 제한된 범위의 개정하고 관련된 규칙 제정(rulemaking)을 추진 중

SMR 인허가 현황: 캐나다

- 캐나다는 SMR을 포함하는 신규 원전의 건설 및 운영을 위해 사업자가 부지허가, 건설허가 및 운영허가를 단계별로 신청하는 분리 인허가 제도를 채용
- 2020년 말에 SMR 기술 보급 진흥을 위한 국가 사업 계획에 착수하였으나 아직까지는 SMR 노형 개발단계에 있고 자국내 건설을 위한 인허가 신청 건이 없음
- SMR 노형 공급자들이 향후 캐나다에서의 SMR 건설 및 운영 허가를 신청하게 될 경우 인허가의 효율성 제고를 위해 CNSC는 사전 인허가 공급자 설계 심사((Pre-licensing Vendor Design Review; PL VDR)라는 규제기술서비스를 제공

SMR 인허가 현황: 캐나다

❖ 사전인허가 공급자설계심사 ((Pre-licensing Vendor Design Review; PL VDR)

- 목적: 캐나다의 규정 및 표준 뿐만 아니라 캐나다 원자력 규제 요건 및 기대치와 관한 원전 설계의 수용성을 높은 수준으로 확인하는 것
- Nuclear Safety and Control Act 하에서 원자로 설계를 인증하거나 인허가 발급을 포함하지 않음
- 신규 원전에 대한 인허가 절차의 일부로 요구되지 않음
- 설계 심사의 결론은 위원회의 결정을 구속하거나 좌우하지 않음

SMR 인허가 현황: 캐나다

❖ 사전인허가 공급자설계심사 ((Pre-licensing Vendor Design Review; PL VDR)

- 목적: 캐나다의 규정 및 표준 뿐만 아니라 캐나다 원자력 규제 요건 및 기대치와 관한 원전 설계의 수용성을 높은 수준으로 확인하는 것
- Nuclear Safety and Control Act 하에서 원자로 설계를 인증하거나 인허가 발급을 포함하지 않음
- 신규 원전에 대한 인허가 절차의 일부로 요구되지 않음
- 설계 심사의 결론은 위원회의 결정을 구속하거나 좌우하지 않음
- 구성: 심사는 3단계로 진행되며, 각 단계는 관련 CNSC 규제 문서와 캐나다 규정 및 표준과의 대조를 통해서 수행
 - 1단계 (규제 요건 준수에 대한 사전 인허가 평가)
 - 2단계 (인허가에 대한 모든 잠재적 근본 장애요소에 대한 인허가 사전 평가)
 - 3단계 (후속 조치)

SMR 인허가 현황: 캐나다

❖ 공급자와 CNSC 간 유효한 PL VDR 용역

공급자	원자로 명 및 냉각형식	출력 (MWe)	심사단계	심사착수일	상황
Terrestrial Energy Inc.	IMSR 일체형 용융염로	200	1 단계	2016. 04	완료
			2 단계	2018. 12	평가 중
Ultra Safe Nuclear Corporation	MMR-5 and MMR-10 고온가스	5-10	1 단계	2016. 12	완료
			2 단계	미정	개시 미정
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER 용융연(Lead)	3	1 단계	2017. 01	공급자 요청으로 연기(정지)
ARC Nuclear Canada Inc.	ARC-100 액체소듐	100	1 단계	2017. 09	완료
Moltex Energy	Moltex Energy 안정염 용융염	300	1, 2 단계 연속	2017. 12	1 단계 완료
SMR, LLC. (A Holtec Int'l Company)	SMR-160 가압경수	160	1 단계	2018. 07	완료
NuScale Power, LLC	NuScale 일체형 가압수로	60	2 단계*	2020. 01	평가 중
U-Battery Canada Ltd.	U-Battery 고온가스	4	1 단계	2019 말 미정	개시 미정
GE-Hitachi Nuclear Energy	BWRX-300 비동수로	300	2 단계*	2020. 01	평가 중
X Energy, LLC	Xe-100 고온가스	80	2 단계*	2020. 07	평가 중

SMR 인허가 현황: 캐나다

❖ 공급자와 CNSC 간 유효한 PL VDR 용역 계약

공급자	원자로 명 및 냉각형식	출력(MWe)	신청일	신청 심사단계
Westinghouse Electric Company, LLC	eVinci Micro Reactor 고체 노심 및 히트파이프	최대 25 MWe 까지의 다양한 출력	2018.02	2 단계*
StarCore Nuclear	StarCore Module 고온가스로	10	2016.10	1,2 단계 연속

SMR 인허가 현황: 영국

❖ 일반 설계 평가(Generic Design Assessment; GDA)

- 원자력 규제국(Office for Nuclear Regulation; ONR) 및 환경청(Environment Agency; EA)은 2019년 10월 현대화된 일반 설계 평가(Generic Design Assessment; GDA) 프로세스에 대한 지침을 발표
- 규제 프로세스 (건설 전 6년 이상 소요)는 다음 세 가지 요소로 구성
 - 사전 인허가 기간 동안 GDA는 ONR과 EA에서 수행. (평가 목적: 위험도가 대중과 환경의 안전과 보안을 위해 합리적으로 가능한 한 낮은 수준임을 보증)
 - 부지가 적합한지 여부를 결정하는 SSA(Site Specific Assessment)는 ONR, EA, Scottish Environment Protection 및 Natural Resources Wales에서 수행
 - 규제 기관은 건설 중 추가 모니터링을 수행
- 영국의 인허가 심사(GDA) 예정 SMR : 2021년 하반기
 - UK-SMR, PWR (440-470 MWe), Rolls-Royce & Partners

국가별 원자력 규제 체제

- **목표 기반의 규제 체제 (Goal-based regulatory regime)**
 - 영국과 유럽의 일부 국가들
 - 규제기관이 목표를 설정하고 그 목표가 어떻게 달성되었는지 입증하는 것은 사업자 (Licensee) 책임
- **규범적인 규제 체제(Prescriptive regulatory regime)**
 - 미국, 한국, 프랑스, 일본 등
 - 규제를 만족하는 방법과 기준을 규제자가 보다 엄밀하게 규정
- **목표 기반 규제와 규범적 규제의 혼합 체계**
 - 캐나다
 - SMR 상업화에서 세계를 주도할 가능성이 높을 것으로 예상
 - 2020년 말에 캐나다는 SMR 기술 보급 진흥을 위한 야심 찬 국가 사업 계획에 착수

규범적 규제체제에서 현행 합의표준의 기능

- 규범적 규제 체제에서는 규제를 만족시키는 규정, 기준, 지침을 규제자가 엄밀하게 규정해야 함
- 최초의 실증 발전소가 건설 및 운영 된 이후 상용 원전의 설계, 건설 및 운영에 대한 규칙, 규정, 기술기준 및 지침을 제정 또는 개발하여 인허가 심사 및 운영 규제에 적용
- 규범적 규제 체제를 채용하는 미국, 한국, 프랑스, 일본 등 에서 운영되는 대부분의 상용 원전은 경수로 설계이기 때문에 경수로에 초점을 두고 규칙, 규제 지침 및 정책의 규제 인프라가 구축되어 있음.
- 미국의 경우 ASME, ACI, ANS, ASTM, IEEE, ISA, ISO 및 NFPA 등과 같은 표준 개발 단체에서 개발하고 유지 관리되는 합의 코드와 표준은 원자력 규제기관인 USNRC의 규칙과 규제 지침(RG)에서 인용되며 경수로 규제 인프라에서 핵심적인 기능을 함
- 이러한 합의 코드 및 표준은 경수로에 초점을 맞추기 때문에 대부분이 비경수로 기술에 적용될 수 없음

규범적 규제체제에서 합의표준의 적용 이점

- 역사적으로 경수로의 인허가 심사에서 중요한 역할
- 불필요한 설계, 제작, 건설 변경을 방지하여 경제적 부담을 경감
- O & M 비용 경감에 기여
- 신형 원자로 공급자의 인허가 부담과 신종 노형 완성의 도전 관련 리스크의 대폭 감소를 입증하고 출시하는데 기여
- 국제적으로 신형 원자로 마케팅에 대한 신뢰성을 제공

SMR 개발 관련 표준 현안

- 신형로 설계의 다양성과 기기의 재료, 제조 및 건설 기술의 급속 진화로 신규 코드 및 표준 개발 수요 증가
- 필요한 코드 및 표준 개발에 소요되는 시간 장기화는 신형로 개발 일정에 영향을 미침
- SDO 및 신형 원자로 개발자가 필요한 코드와 표준을 원하는 일정에 맞추어 완전히 개발하는데 투입할 수 있는 인적/물적 자원의 확보 필요
- 신규 표준의 초기 개발을 위해 필요한 정보의 확보 필요
- 규제자가 관심사의 관련 신규 코드 및 표준의 승인에 주도적으로 대처할 필요

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

- ❖ 신형로에 대한 코드 및 표준을 수립하는 데 필요한 작업의 규모와 범위를 이해하기 위해 DOE 자금 지원을 받는 ORNL이 SFR의 코드 및 표준에 초점을 둔 범위 지정 연구를 수행하여 다음 결과 제시
 - 규제 지침에 인용된 모든 표준 수: 865 가지
 - SFR에 대한 적용 가능한 심층 검토 대상 표준의 수: 114 가지
 - 그 중 IEEE의 43 개 표준은 기술 중립적으로 판단
 - 세부 검토가 필요한 표준 수 (나머지 71 개 표준 중 11 개는 중복): 60개
 - SFR에 대한 적용 가능성 관련 60 개의 표준을 검토하고 SFR에 고유한 신규 표준의 필요성을 확인
 - RG가 승인한 60 개 표준 중 46 개는 자발적 합의 표준이었고 14 개는 원자력 산업계 주도로 개발한 것임
 - 46 개의 합의 표준 중 17 개는 개정이 필요하지 않음
 - 나머지 표준 중 13 개는 제한적인 개정이 필요
 - 13 개는 상당한 개정이 필요
 - 3 개는 적용 가능성 평가에 필요한 정보가 부족

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ 신형로 설계에 대한 연구·개발 필요 최상위 기술 영역 (NEI 보고서)

• HTGRs (고온 현안)

- 고온 설계: ASME 섹션 III 및 VIII 구성 재료에 대한 초기 하중 및 주기적 응력-변형 곡선 개발 및 해석에 의한 크리프-피로 평가를 위한 개선된 설계 방법론 개발
- 광섬유 (특히) 및 계측 및 제어 (I & C)의 고온 적응성
- 고온에서의 ASME 섹션 XI ISI 방법

• LMFRs 및 FNRs

- 관심 온도 범위 및 플루언스에 대한 구조물 합금, 피복 및 도장 재료의 적합성 검증
- 높은 온도 및 플루언스의 콘크리트 압축 및 인장 강도와 탄성계수에 미치는 영향
- 고온 나트륨 환경에서의 중성자 속 감시계통 설계 및 시험 방법/기술
- LMFR 연료 이송, 장전, 인출, 저장 및 세정을 위해 연료 취급 계통 (연료 취급 계통들에 대한 표준 설계는 없음)
- 고속 스펙트럼, 다양한 냉각수, 변환 비율을 포함한 연료 관리 관행 및 연료 형상을 다루기 위해 ANSI / ANS 5.1-1979 LWR 붕괴 열 곡선과는 다른 표준 필요

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ 신형로 설계에 대한 연구·개발 필요 최상위 기술 영역 (NEI 보고서)

• MSRs

- 고속 중성자속 환경에서 노심 부품을 위한 재료 옵션 (금속, 흑연 등) 현안
- 내식성 재료로 피복되거나 라이닝된 구조물 부품의 설계, 재료 및 제작 현안
- 내열성(Refractory) 합금의 용접, 제작 및 접합 기술 확보 및 취성 및 파괴 거동 이해

• All

- 대다수 신형로 설계에 대해서 고온에서의 구조물 적용을 위한 승인 재료 선택의 폭을 넓히기 위해서는 고강도 니켈 합금과 같은 추가 재료 옵션 필요

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ SMR 개발지원을 위해 개정/개발 필요 주요 표준 (NEI 보고서)

1. 비경수로 SMR에 대한 PRA 표준(ASME/ANS RA-S-1.4-2020)
2. 위험도 및 성능 목표를 SMR 원자력 안전 설계에 통합(ANS-30.1)
3. 신규 원전의 SSCs 등급 분류(ANS-30.2)
4. 모듈식 헬륨 냉각 원전을 위한 원자력 안전 설계 공정(ANS-53.1)
5. 원자력 안전성 관련 콘크리트 구조물에 대한 코드 요건(ACI 349)
6. 비경수로 SMR 신뢰성 및 건전성 요건(ASME BPVC Sec. XI Div. 2)
7. 피동장치의 품질에 대한 등가 QME-1 (ASME BPVC Sec. III Div. 1 and Div. 2)

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ ANS 주관 개발 필요 신형로 코드/표준 (NEI 보고서)

- 중요도: 높음
 - ANSI/ANS 6.4-2006: 피동 열제거 계통용 콘크리트-조사 및 열적 제한
 - ANS-30.1-201x: 위험도정보- 성능 기반 원칙 및 방법
 - ANS-30.2-201x: SSCs의 범주 및 등급 분류
 - ANSI/ANS 53.1: 모듈식 헬륨냉각로 발전소에 대한 원자력안전설계 과정
 - ANS 56.2-1984 (ANSI N271-1976) : 유체계통에 대한 격납용기 격리
 - 나트륨 누설 탐지 및 완화 (RG 1.232) 에 대한 SFR-DC 73에 등가 신규 표준
 - ANS-20.2: 액체 연료 MSR 발전소의 원자력 안전 설계 기준 및 기능 성능 요건
- 중요도: 보통
 - ANSI/ANS 6.3.1-1987 (R2007) : 시험 방사선 차폐
- 중요도: 낮음
 - ANSI/ANS 3.1-2014: 직원의 채용, 자격검증 및 훈련
 - ANSI/ANS 3.2-2012: 관리 및 행정 통제
 - ANSI/ANS 3.4-1996: 원자로 운전원과 운전 감독자의 신체적 및 정신적 건강 요건
 - ANSI/ANS 3.5-2009: 운전원 훈련 및 시험 용도의 발전소 시뮬레이터
- 중요도: 보류
 - ANS-20.1-201x: 불소염 냉각 고온로의 원자력 안전 기준 및 설계 기준

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ ASME 주관 개발 필요 신형로 코드/표준 (NEI 보고서)

- 중요도: 높음

- ASME BPVC Division 1 and 2, Subsection NCA: 기능적 격납용기 개념 반영
- ASME AG-1-2009: 공기 및 기체 처리
- ASME BPVC Section III: 발전소 기기 건조(건설)
- 적층 제조를 포함한 첨단 제작 기술에 대한 신규 표준
- ASME BPVC Section III Division 1, Subsection NE, and Division 2: 격납용기
- ASME QME-1-2007: 능동기계기기 품질보증
- ASME N509-2002: 공기정화 장치 및 기기
- ASME/ANS RA-S-1.4-2013: 비-LWRs에 대한 PRA 시범 사용 (ANS와 공동 주관)
- ASME BPVC Section III, Division 5: 고온로

- 중요도: 보통

- ASME QME-1: 피동 기기의 품질보증: 품질보증의 원칙, 절차 및 방법

- 중요도: 낮음

- ASME BPVC Section XI: 기기의 가동중검사(ISI)
- ASME N510-2007: 공기처리계통의 시험
- ASME N511-2007: HVAC 계통의 가동중시험 (IST)

ASME Codes & Standards의 SMR 상세 규정 필요 여부

- CONAGT – Nuclear Air and Gas Treatment (No)
- QME – Qualification of Mechanical Equipment (No)
- CNF – Cranes for Nuclear Facilities (No)
- **CNRM – Nuclear Risk Management (Yes)**
- **BPV III – Boiler and Pressure Vessel Code, Section III (Yes)**
- NQA – Nuclear Quality Assurance (No)
- BPV XI – Boiler and Pressure Vessel Code, Section XI (No)
- **OM – Operation and Maintenance (Yes)**
- CNC – Nuclear Certification (No)

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ ASME BPVC Sec. III 현행 개발 활동 (1/3)

● 피로 조치계획 이행

조기 목표

- 보수성을 줄이기 위한 단순화된 탄소성 해석을 위한 코드 케이스(발행 승인)
- 배관의 두께 관통 응력 구배 고려를 위한 코드 케이스(발행 승인)
- 소성해석 결과 사용 절차 개정
- 새로운 피로 설계 곡선에 대한 절차 및 최소 데이터 요건
- NUREG/CR 6909-1의 탄소강 및 저합금강에 대해 제안된 설계 곡선 채택

장기 목표

- EAF의 변형 진폭 문턱 값(threshold)에 대한 타당성 검토
- 주기 계산을 위한 대체 방법 평가
- 재료 사양 또는 극한 인장 강도에 근거한 탄소강 및 저합금강에 대한 다중 최적 맞춤 곡선(multiple best fit curves) 개발
- Ni-Cr-Fe 및 스테인리스에 대한 다중 최적 곡선 개발
- 평균응력효과 보정 방법 개발
- 주기 및 응력에 대한 새로운 설계 인자 평가 및 선택
- 기계적으로 중요한 균열의 성장에 대한 응력/변형 진폭 문턱 값의 합병 평가
- NUREG/CR 6909-1을 기반으로 CC N-792 업데이트

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ ASME BPVC Sec. III 현행 개발 활동 (2/3)

● 비탄성 설계 방법

1. 탄성 완전 소성 방법 (Elastic Perfectly Plastic Methods)

- 탄성 완전 소성 응력 해석을 사용하여 다음 범위로 제한: 지속적 하중 하에서 크리프 파열, 주기적 하중 하에서 변형 및 크리프 피로
- 응력 분류 또는 선형화 없음
- 전체 온도 범위에 적용 가능
- 복잡한 형상의 설계 및 해석 단순화

2. 비탄성 해석법

- 새로운 부록 HBB-Z
 - Part 1: 비탄성 재료 모델에 대한 지침
 - Part II: 명시적 공식 및 매개변수를 갖는 구성 모델
 - 현행: Grade 91; 개발중: 316H, Alloy 617
 - 미래: remaining Class A materials

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ ASME BPVC Sec. III 현행 개발 활동 (3/3)

● 내진설계규정 현대화

- 내진 규정은 고에너지배관파단(HELB), Seismic II/I 설계 등과 같은 발전소 설계에 막대한 영향 미침
- 목표는 기존 내진 설계 규칙을 개정 및 개선하는 것: 필요시 신규 규정 개발
- 내진 규정은 여러 유형의 신형 원자로 설계를 제어 가능-어떻게 다를 것인가?
- 기존 코드설계 요건 조정 및 수정으로 신규 요건을 추가하지 않기
- 이행 로드맵 개발

● 첨단 제조

- 복잡한 기하학적 형상의 기기 제조 실현, 설계 유연성 증대 및 설계 효율성 제고를 가능하게 함
- 기존 제조 공정에 비해 부품 제조 단계 수를 줄여 상당한 비용 절감
- AM 방식으로 처리된 재료 검증과 기기에 대한 허용 기준을 명시할 위한 방법을 결정하기 위해 새로운 작업그룹(Division 5 AM 기기)이 구성됨

● 코드 가치 부과

- 목표: 비용만 증가시키고 안전에는 영향을 거의 미치지 않는 불필요한 요건을 제거하는 것
- 안전성 중요도가 낮은 기기에 대한 차등 QA 모색
- 비용은 추가로 들지만 안전성 증진에는 아주 작은 가치를 갖는 인증, 문서화 및 기타 영역 조사

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ ASTM 주관 개발 필요 신형로 코드/표준 (NEI 보고서)

- 중요도: 높음
 - None
- 중요도: 보통
 - None
- 중요도: 낮음
 - ASTM D3911-16: 코팅 평가를 위한 시험방법
 - ASTM D7491-08: 부적합 코팅의 관리
 - ASTM D4286-08: 코팅 계약자 자격 검증
 - ASTM D4538-05: 보호 코팅의 용어
 - ASTM D5144-08: 보호 코팅의 사용
 - ASTM D7167-05: 안전관련 도장의 감시 성능

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ NFPA, ACI, ISA 주관 개발 필요 신형로 코드/표준 (NEI 보고서)

- 중요도: 높음
 - NFPA 251: 건물 건축 및 재료의 내화력 시험 방법
 - ACI 349.1R-07: 열적 영향 대비 철근 콘크리트 설계
 - ACI 349-2013: 원자력 안전 관련 콘크리트 구조물 및 구조물 부재 (Structures and Structural Members)
- 중요도: 보통
 - ANSI/ISA-67.02.01-2014: 안전성 관련 계기 감지선 (Safety-related Instrument Sensing Lines)
- 중요도: 낮음
 - None

각국의 SMR 기술기준 현황: 미국

❖ 신형로 코드/표준 개발 일정 및 추진 전략

- 배경: 2050년까지 신형로가 미국내 및 전 세계적으로 원자력 에너지 믹스의 중요하고 성장하는 구성 요소를 제공할 것이라는 비전
- 인허가 심사 목표 설정: 2030년대 초까지 최소 2개의 비경수 신형로 개념이 기술적 성숙도에 도달하여 안전 및 경제적 이점을 입증하고 건설을 시작하기에 충분하도록 인허가 심사를 완료할 수 있도록 대처
- 신형로 설계의 조기 배치에 가장 우선 순위가 높은 코드 및 표준 개발에 산업계 및 정부 자원 집중 및 시급한 코드 및 표준 개발 또는 개정을 위한 민-관 파트너십을 결성

각국의 SMR 기술기준 현황: 캐나다

❖ 신형로 규제요건 개발 방향

- 목표 기반 규제와 규범적 규제의 중간 위치에 있어 규범적 규제 제도를 채용하는 미국, 프랑스, 한국 등과 같은 국가들과 같은 정도로 상세한 자체 규제요건을 갖추고 있지는 않음
- CSA(캐나다 규격협회) 그룹: 캐나다 국민의 안전 및 정부, 산업계의 편익을 위해 설립된 표준 개발, 시험, 검사 및 인증 업무를 수행하는 비영리민간단체
- CSA(캐나다 규격협회) 그룹은 캐나다 원자력 산업의 안전하고 신뢰할 수 있는 운영 증진을 위한 주요 표준 및 지침을 개발하기 위하여 CSA 원자력 프로그램을 설치·운영 (참고로 CSA 그룹은 캐나다표준위원회 (SCC)와 미국국가표준협회 (ANSI)의 인증을 받았음)

각국의 SMR 기술기준 현황: 캐나다

❖ CSA 원자력 표준 개발 방향

- CSA 원자력 프로그램을 통해 개발된 표준은 캐나다 원자력 규정을 준수하기 위한 기술요건
- 이러한 표준은 캐나다 원자력안전위원회 (CNSC)에 의해 캐나다 전역의 원전 및 시설 규제에 인용 또는 적용 (현재 CSA 원자력 표준의 약 90%가 인허가, 인허가 조건 핸드북 또는 CNSC 규제 문서에서 인용)
- CSA 표준 개발 프로세스에는 국제적으로 허용되는 요건 및 관행과의 벤치마킹 및 조화가 포함 (다수의 CSA 표준이 국제 표준에서 파생된 것으로서 캐나다의 고유한 요건에 맞게 조정되었음)
- 2008년경에 캐나다에서 비 CANDU 설계에 대한 인허가 신청 가능성이 높아짐에 따라 보다 기술 독립적인 요건을 통합하기 위한 표준의 필요성 증대

각국의 SMR 기술기준 현황: 캐나다

❖ SMR에 대한 CSA 원자력 표준 개발 방향

- CSA 원자력 프로그램의 원자력전략운영위원회는 SMR을 포함한 소형원자로의 요건 개발에 관한 권고사항 도출·제시를 위하여 2015년 12월에 CSA 소형원자로 TF를 구성
- TF는 캐나다의 소형원자로 활동을 모니터링하고, 영향을 받는 이해관계자와 교류하고, 새로운 개발 정보를 얻고, 원자력전략운영위원회에 최신 정보를 제공
- CSA 그룹은 다양한 이해관계자들과 견해들이 모이고, 합의 프로세스 사용으로 최소 요건과 모범 사례가 반영된 표준이 개발되는 포럼을 제공
- 다음과 같은 다양한 메커니즘으로 SMR 관계자들을 포함한 관련 이해관계자들이 CSA 표준 개발 프로세스에 참여 가능
 - 원자력 커뮤니티 웹사이트를 통한 CSA 활동 정보 제공
 - 위원회 실무에 직접 참여
 - 공개 검토를 위해 발표된 표준 초안에 대한 의견 제출
 - 출판된 모든 표준의 특정 조항에 대한 해석/설명 요청
 - 공표된 표준에 대한 변경 제안서 제출
 - 특급 문서, 워크샵 또는 연구 프로젝트에 대한 제안서 제출

각국의 SMR 기술기준 현황: 캐나다

❖ SMR을 위한 향후 원자력 표준 개발 방향

- 기술 중립적 방법을 취하고 새로운 범위와 이해관계자를 프로그램에 통합
- 규제 기관, 운영자, 공급자 및 학계를 비롯한 기존 원자력 커뮤니티의 많은 구성원이 CSA 포럼에 참여
- SMR 기술에 따라 요건 및 지침이 기존 CSA 표준에 합병 및 통합될 수 있음.
- 또한 SMR 기술-특이 및 설계-특이 신규 표준을 개발해야 할 수도 있음
- CSA는 소형원자로 커뮤니티의 요건을 충족하는데 필요한 표준을 정하기 위한 COG 및 NRCCan과 협력하고 CNSC와 협력 지속

각국의 SMR 기술기준 현황: 캐나다

❖ 규제적용 코드/표준 개발 현황

- 모든 기존 발전용 원자로가 CANDU 원자로이므로 거의 모든 CSA 원자력 표준은 초기에 CANDU 기술을 위해 주로 CANDU 전문가와 함께 개발
- 지난 10년 동안 비 CANDU 설계인 신규 건설 노형에 대한 인허가 적용의 가능성을 다루기 위해 기술 중립적인 표준을 제정
- CSA는 전체 안전 목표를 충족함에 있어 가능한 범위에서 CANDU 특이 요건을 포착하고, 다른 국제 표준을 벤치마킹하며, CANDU 특이 요건을 구별해 내기 위한 방법을 채용하는데 적극적으로 대처
- 지난 수십 년 동안 CSA는 원전 분야에서 일하는 사람들 외에도 새로운 이해관계자들을 프로그램에 참여시켜 광산 및 공장과 같은 다른 시설에 대한 표준을 포함시키기 위해 범위를 확장
- 관리 계통(CSA N286), 환경 관리(CSA N288) 및 폐로(CSA N294)와 같은 일부 표준 주제 영역은 대학, 병원 및 실험실과 같은 소규모 시설을 다룸.
- CSA N290.7 (Cyber security for nuclear power plants and small reactor facilities)을 포함한 특정 표준들은 특히 소형원자로에 적용하기 위해 개발되었음.
- CSA의 평가에 따르면 현재 CSA 표준 세트의 80%는 기술 중립적 (여기서 "중립"은 규정들이 중수 또는 경수로 설계에 공통 적용됨을 의미)이고 표준의 20%가 CANDU 설계-특이 표준

각국의 SMR 기술기준 현황: 캐나다

❖ 현행 CSA 표준의 SMR 적용성

현재 CSA 원자력 표준의 약 절반이 SMR에 적용될 수 있고 나머지 대부분은 SMR의 설계 상세 사항에 따라 전체 또는 부분적으로 적용될 수 있는 것으로 추정

- CSA 표준 세트의 57%가 SMR에 적용 가능 (이러한 표준 중 일부에는 CSA N286, CSA N290.7 및 CSA N1600이 포함됨)
- CSA 표준 세트의 40%가 설계에 따라 전체 또는 부분적으로 SMR에 적용될 수 있음 (예를 들어, 콘크리트 격납에 대한 요건을 다루는 N287 표준 또는 CSA N290.2-17과 같은 수냉식 원자로에 특별히 적용되는 표준, 원전의 비상노심냉각계통에 대한 요건)
- CSA 표준 세트의 3%는 SMR에 적용 불가 (이러한 표준에는 CSA N285.8-15, CANDU 원자로에서 지르코늄 합금 압력 튜브의 가동중 평가에 관한 기술 요건이 포함됨)

SMR 설계 개념 및 상세 사항은 현재 개발 중이므로 현시점에서 모든 표준에 대한 심층 SMR 적용 가능성을 확인하기는 어려우므로 특정 표준의 적용 가능성에 대한 보다 완전한 평가 수행을 위해서는 SMR 공급자로부터의 상세 설계 정보 제공 필요

각국의 SMR 기술기준 현황: 영국

- ❖ 영국과 유럽의 일부 국가들은 목표 기반의 규제 체제 (Goal-based regulatory regime)를 채용
 - 규제기관은 원자로의 설계, 건설 및 운영에 필요한 상세 기술요건 대신에 안전목표만을 설정·제시
 - 사업자가 그 목표가 어떻게 달성되었는 지를 입증
- ❖ 자체 원자력산업 코드/표준을 갖추지 않고 있어 원자로 건설, 건설 및 운영허가 신청시 규제기관은 원자력 시설 인허가 심사제도인 일반설계평가 (Generic Design Assessment; GDA) 과정에서 심사 대상 원자로 설계, 건설 및 운영에 적용한 공급자 산업코드/ 표준을 적용하여 심사
- ❖ 현재 영국의 GDA 인허가심사제도에 의해 평가되고 있는 단 두 개의 원자로 설계인 프랑스 원자로 AREVA EPR 및 미국 원자로 AP1000을 구성하는 기기(부품)들의 설계 및 제조에 여러 코드와 표준이 사용 (예를 들어 원자력 안전 핵심 기기의 설계, 제조 및 설치에는 프랑스 AFCEN 코드 RCC-M, RCC-E 및 보일러 및 압력 용기 코드(BPVC) ASME III와 같은 원자력 건설 코드가 사용)
- ❖ 향후 신규 원자로 시스템에 대해서는 ASME BPVC ASME III 코드와 프랑스 코드 RCC-M 및 RCC-MRx 를 사용할 가능성이 높음 (RCC-M 코드가 ASME III의 초기 버전에서 파생되었기 때문에 ASME III 및 RCC-M 코드는 일부 영역에서 매우 유사하지만 품질이 보장되는 방식이 달라서 RCC-M으로 제조된 기기가 자동으로 ASME III에 부합할 것이라고 말할 수 없으며 그 반대의 경우도 마찬가지임)

IAEA의 SMR 설계안전요건

❖ IAEA는 대형경수원전 설계안전요건 82개 (IAEA SSR-2/1, Rev. 1)의 육상용 SMR인 경수냉각 및 고온가스 냉각 SMR에 대한 적용성 검토하고 'IAEA TECDOC-1936 조기 배치를 위한 SMR 기술에 대한 IAEA 기존 설계안전요건 (SSR-2/1)의 적용성 검토' 보고서 발간

❖ 경수냉각-SMR 적용 안전요건

- 동일한 원자로 기술을 사용하는 경수냉각 대형 원전과 경수냉각-SMR 사이의 유사성으로 경수냉각-SMR에 적용하기 위해서는 경수냉각 대형원전에 대한 총 기존 요건 82개 중 7개 기존 안전요건들을 수정하고 1건을 추가 개발 필요

수정 필요

1. Provision for construction (4.19)
2. Internal and external hazards (5.15A–5.22)
3. Safety systems, and safety features for design extension conditions, of units of a multiple unit nuclear power plant (5.63)
4. Air conditioning systems and ventilation systems (6.48–6.49)
5. Overhead lifting equipment (6.55)
6. Systems for treatment and control of waste
7. Definitions

추가 개발 필요

8. Additional five aspects regarding multi-module units for which new safety requirements could be provided

IAEA의 SMR 설계안전요건

❖ 고온가스냉각-SMR 적용 안전요건

- 원자로 경수냉각 원전과 고온가스냉각-SMR의 설계 특성의 상당한 차이로 인하여 고온가스냉각-SMR에 대해서는 경수냉각 대형 원전에 대한 다음 29개 기존 안전요건들을 수정하고 1건을 추가 개발해야 하는 것으로 평가

수정 필요

1. Provision for construction (4.19)
2. Categories of plant states (5.1–5.2)
3. Internal and external hazards (5.15A–5.22)
4. Design extension conditions (5.27–5.32)
5. Qualification of items important to safety (5.48–5.50)
6. Safety systems, and safety features for design extension conditions, of units of a multiple unit nuclear power plant (5.63)
7. Nuclear power plants used for cogeneration of heat and power, heat generation or desalination
8. Safety analysis of the plant design (5.71–5.76)
9. Performance of fuel elements and assemblies (6.1–6.3)
10. Structural capability of the reactor core
11. Control of the reactor core (6.4–6.6)
12. Reactor shutdown (6.7–6.12)
13. Design of reactor coolant systems (6.13–6.16)
14. Overpressure protection of the reactor coolant pressure boundary
15. Cleanup of reactor coolant (6.17)

IAEA의 SMR 설계안전요건

❖ 고온가스냉각-SMR 적용 안전요건

수정 필요

16. Emergency cooling of the reactor core (6.18– 6.19)
17. Containment system for the reactor
18. Control of radioactive releases from the containment (6.20–6.21)
19. Isolation of the containment (6.22–6.24)
20. Access to the containment (6.25–6.26)
21. Supplementary control room (6.41)
22. Design for withstanding the loss of off-site power (6.43–6.45A)
23. Air conditioning systems and ventilation systems (6.48–6.49)
24. Overhead lifting equipment (6.55)
25. Steam supply system, feedwater system and turbine generators (6.56–6.58)
26. Systems for treatment and control of waste
27. Fuel handling and storage systems (6.64– 6.68A)
28. Design for radiation protection (6.69–6.76)
29. Definitions

추가 개발 필요

30. Additional five aspects regarding multi-module units for which new safety requirements could be provided

IAEA의 SMR 설계안전요건

❖ 다중 모듈 원자로 관련 추가 안전요건 개발시 고려 사항

- 1) 원자로 모듈 간의 상호 연결
- 2) 제어 및 보호 계통
- 3) 인적 인자 공학
- 4) 비상사태 대비 및 대응
- 5) 미래 모듈 추가를 위한 용량, 공장 배치 및 건설

국내 개발 SMR 에 대한 기존 KEPIC의 적용성

- ❖ 국내 개발 추진 중인 iSMR과 해상용 SMR은 지난 2012년 4월에 NSSC로부터 SDA를 받은 소형 경수로인 SMART 설계에 기반을 둔 혁신 노형이므로 입증된 경수로 설계에 해당
- ❖ 따라서 대부분의 기존 경수로 KEPIC 표준이 iSMR 설계, 제조/건설 및 시험/점검에 적용가능
- ❖ 다만, 다음 사유로 일부 표준을 개정·보완하거나 신규로 개발 필요
 - 기기 소형화 및 조밀 배치
 - 기존 경수로와 다른 주기기 (금속핵연료 노심, 헬리컬 튜브 증기발생기 등) 채용
 - 육상 발전용이 아닌 선체추진 용도의 운전 환경

SMR 설계적용 국내혁신기술 표준 수요

❖ 경수 SMR 금속핵연료 안전 설계 표준

● 개요

- U-235의 농축도가 20%에 가까운 SMR 금속핵연료는 Zr-U (Zr-65.9wt%, U-34.1wt%; Zr-62wt%, U-38wt%) 심재와, Zr-1%Nb 피복재로 구성
- 정방형 단면의 나선형인 핵연료봉 심재와 피복재가 금속학적으로 접합되어 양 재질 간 gap이 없고 기체 핵분열 생성물의 포집을 위한 플레넘도 미존재

● 현안

- 금속핵연료는 산화우라늄 핵연료에 비해서 열전도가 높아서 핵연료 내부 축적 에너지가 적다는 장점이 있지만 높은 팽윤거동, 연료 성분원소의 확산 및 이동, 연료-피복재의 화학적 반응, 상변태 등 산화우라늄과는 상이한 특성 예상
- Zr-1%Nb 피복재질의 특성이 일반 경수로 핵연료용 지르칼로이-4와는 달라 다양한 조합의 피복재-연료 구성의 금속핵연료를 사용하는 SMR의 노심냉각계통에 대한 (기술중립적) 성능 허용 표준의 개발 필요

SMR 설계적용 국내혁신기술 표준 수요

❖ 인쇄회로기판형 증기발생기(PCSG)의 건전성점검 (가동중검사 대체)

● 개요

- 인쇄회로기판형 증기발생기(Printed Circuit Steam Generator; PCSG)는 유체가 통과하는 미세한 유로를 화학적 에칭 방법으로 형성하고, 유로들이 형성된 유로판을 확산접합공정을 이용하여 적층 및 접합된 열교환기의 한 형태로서 PCSG의 각 유로 채널이 원자로냉각재 압력경계가 됨
- 높은 열전달 효율로 소형화할 수 있고, 고온·고압 조건에서 운전 가능

● 현안

- 원자로냉각재 압력경계인 상용원전의 증기발생기 전열관의 설계/제작 및 가동중검사에 각각 적용하고 있는 KEPIC MN (또는 ASME B&PV Code Section III) 및 KEPIC MI (또는 ASME B&PV Code Section XI)를 PCSG에 적용 불가능.
 - 특히 PCSG의 각 유로 채널은 얇은 금속판에 화학적 식각을 한 후 다른 금속판과 겹쳐 확산접합을 통해 제작하기 때문에 각 유로채널 단면적 모양이 전열관처럼 원형이 아닌 반원 형상을 갖게 되는데 이러한 반원 형상 유로의 응력계산방법이 KEPIC MN (또는 ASME B&PV Code Section III)에 제시되어 있지 않음.
 - 확산접합 관련 joint efficiency 값과 유로판의 화학적 식각 기준 (최소 지름 크기 등), 확산접합 압력/온도 등 제작기준이 KEPIC MN (또는 ASME B&PV Code Section III)에는 제시되어 있지 않음.
- PCSG의 개발과 인허가를 위해서는 설계, 제작, 운영, 성능시험 및 건전성 점검 표준 개발 vlfdy

국내 SMR 분야 KEPIC (ISO, ASME B&PV) 개발 목록(안)

1. 위험도정보 및 성능-기반 기술 중립 SSCs 등급 분류 표준
2. 기기 가동중시험(IST) 표준
3. 경수 SMR 금속핵연료 안전 설계 표준
4. 단일 SMR당 복수 원자로 모듈의 설치
5. 복수 원자로 모듈의 단일 안전설비 공유
6. 헬리컬튜브 증기발생기 튜브 건전성점검
7. 방사선 영향 평가 방법론에서 대체 선원항 적용
8. 방사선비상계획구역 설정
9. 반응도제어의 다중성
10. 인쇄기판형 열교환기(증기발생기)의 성능시험
11. 인쇄기판형 열교환기(증기발생기)의 건전성점검
12. 사용중 및 사용후 SMR 모듈의 운송
13. SMR 모듈의 폐로 처분
14. 비경수형 SMR에 대한 PRA 표준

SMR 분야 KEPIC 개발 계획(안)

- ❖ KEPIC 원전설계분과 위원회 산하 SMR 분야 소위원회 설치/운영
 - SMR 분야 표준 개발 수요 조사 및 개발 대상 선정
 - 표준 개발을 위한 R&D 수행
 - 개발 항목별 표준(안)의 개발

SMR 분야 KEPIC 개발 계획(안)

1. 중요도/시급성 : 상

- 위험도정보 및 성능-기반 기술 중립 SSCs 등급 분류 표준
- 기기 가동중시험(IST) 표준
- 경수 SMR 금속핵연료 안전 설계 표준
- 단일 SMR당 복수 원자로 모듈의 설치
- 복수 원자로 모듈의 단일 안전설비 공유
- 헬리컬튜브 증기발생기 튜브 건전성점검
- 방사선 영향 평가 방법론에서 대체 선원항 적용
- 방사선비상계획구역 설정

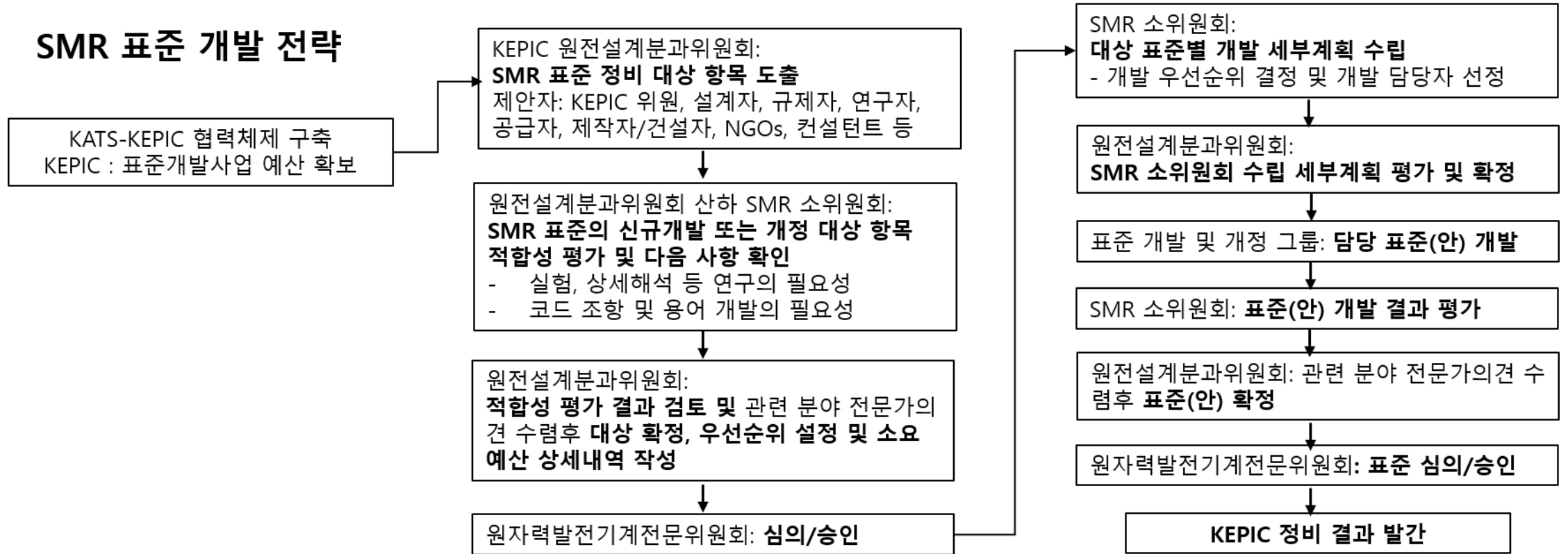
2. 중요도/시급성 : 중

- 인쇄기판형 열교환기(증기발생기)의 성능시험
- 인쇄기판형 열교환기(증기발생기)의 건전성점검
- 비경수형 SMR에 대한 PRA 표준

3. 중요도/시급성 : 하

- 사용중 및 사용후 SMR 모듈의 운송
- SMR 모듈의 폐로 처분

SMR 분야 KEPIC 개발 절차(안)



국내 SMR 개발 사업 성공의 전제조건

- ❖ SMR 개발 촉진을 위해서는 모든 원자력산업 이해관계자들의 적극적 지원과 협력이 필수
 - 산업자원부 (KATS)
 - SMR 표준 개발이 SMR 개발 및 실용화 사업의 일부이므로 규제 (인허가) 체계를 조기 구축하는데 필요한 핵심 산업표준을 SDO (KEPIC 본부 등)가 신속히 정비할 수 있도록 정부의 전폭적 지원이 필요
 - 원자로 개발자 (KAERI, KEPCO E&C, UNIST, 두중, 포항제철, 대우해양조선, 현대건설 등)
 - SMR 개발자는 표준의 중요성을 이해 및 인식하고 각자의 영역에서 신규 표준의 수요와 시급성을 파악해서 SDO에게 알려야 하며 SMR 개발 실무자들을 표준 개발 활동에 적극 참여하도록 지원
 - 규제기관 (NSSC, KINS)
 - 규제기관은 SMR 원자로 표준의 적시 채택에 필요한 자원을 제공해야 하고, 규제기관은 승인된 표준의 여유도를 초과하는 여유도를 부과할 필요성을 재평가하고 공공의 보건 및 안전의 적절한 보호에 대한 합리적인 보증 관점에서 그것이 정당한지 여부를 판정
 - 정부 및/또는 규제기관은 신규 개발 및/또는 개정된 합의 표준들 간 안전 여유도의 조화 달성을 위하여 SDO와 공식 절차를 합리적으로 수립
 - 표준개발단체 (KEPIC)
 - 정부로부터 위탁 받은 SMR 표준 개발 활동 주관 (표준 개발 활동에는 외국 또는 국제 SDO가 기 개발한 표준의 국내 적용을 위한 국산화 활동 포함)
 - SMR 개발자를 비롯한 이해관계자들로부터 개발/개정이 필요한 주요 코드 및 표준의 개발 수요 및 규제 수용을 위한 기간을 파악하고 우선 순위 설정과 표준 개발 계획 수립과 추진

결언

- SMR에 대한 세계 각국의 개발 동향, 인허가 추진 현황, 기술기준(표준) 적용 현황 및 신규 표준 개발 동향 조사
- 국내 개발 예정인 소형모듈원자로 (SMRs) 설계에 채용되는 신기술 관련 인허가 현안 해결을 위한 표준 개정/개발의 필요성 및 동 SMRs 설계에 대한 기존 KEPIC의 적용성에 관한 평가
- 조사·평가 결과에 기초하여 국내 개발 SMRs의 설계 및 운영을 위해 선제적 해결이 필요할 것으로 판단되는 14건의 표준개발항목(안)을 도출
- 중요성과 시급성 수준을 3단계로 분류하여 작성한 표준개발항목 목록(안)을 제시
- 또한 이러한 SMR 표준 정비를 위한 KEPIC 조항의 개정 또는 신규개발 사업계획에 관한 추진 방안을 논의
- 시의 적절한 SMR 분야 KEPIC의 정비 및 향후 국제표준개발 주도 기대

REFERENCES(1/5)

- United Nations Website, United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), <https://unfccc.int/>.
- IAEA (International Atomic Energy Agency) Website, The 1986 Chornobyl nuclear power plant accident, <https://www.iaea.org/topics/chornobyl>.
- IAEA Website, Fukushima Nuclear Accident, <https://www.iaea.org/newscenter/focus/fukushima>.
- IAEA Website, Small Modular Reactors, <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>.
- OECD NEA (Nuclear Energy Agency) Website, Small modular reactors, https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_26297/small-modular-reactors.
- WNA (World Nuclear Association), [Facilitating International Licensing of Small Modular Reactors](#), Cooperation in Reactor Design Evaluation and Licensing (CORDEL) Working Group of the World Nuclear Association, Aug. 2015.
- OECD NEA, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, NEA No. 7560, 2021.
- World Nuclear Association Website, 2021, Small Nuclear Power Reactors, <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>.
- IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition, 2020.
- 한국원자력학회 원자로시스템기술연구부회, 2020, 소형 혁신원자로 기술조사보고서.
- 원자력안전위원회 웹사이트, 제5회 원자력안전위원회 회의록: 스마트(SMART) 표준설계인가(안), https://www.nssc.go.kr/ko/cms/FR_CON/index.do?MENU_ID=170.
- NuScale Website, licensing, <https://www.nuscalepower.com/technology/licensing>.
- USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission) Federal Register, Vol. 86, No. 124, Proposed Rule, NuScale Small Modular Reactor Design, July 01, 2021.
- USNRC Website, Nuclear Reactors, Small Modular Reactors (LWR designs), <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html>.
- CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission) Website, Reactors, Pre-Licensing Vendor Design Review, <https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/>.

REFERENCES(2/5)

- UK ONR (Office of Nuclear Regulation) Website, Generic Design Assessment (GDA) of new nuclear power stations, <https://www.onr.org.uk/new-reactors/index.htm>.
- NUCNET Website, Nuclear Politics, UK / Government Says It will open GDA to SMR technologies in 2021, <https://www.nucnet.org/news/wuk-says-it-will-open-gda-to-smr-technologies-in-2021-12-2-2020>.
- [Shubharthi Baru](#), [Xiaodan Gao](#), and [M.S.Mannan](#), "Comparison of prescriptive and performance-based regulatory regimes in the U.S.A and the U.K.," J. Loss Prevention in the Process Industries, [Volume 44](#), November 2016, Pages 764-769.
- Rolls-Royce Website, Small Modular Reactors - once in a lifetime opportunity for the UK, <https://www.rolls-royce.com/~media/Files/R/Rolls-Royce/documents/customers/nuclear/smr-brochure-july-2017.pdf>
- IAEA Website, Status Report – UK SMR (Rolls-Royce and Partners), https://aris.iaea.org/PDF/UK-SMR_2020.pdf.
- S&P Global Website, S&P Global Market Intelligence, Slated retirements to cut US coal fleet to less than half 2015 capacity by 2035, 29 July 2021, <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/latest-news-headlines/slated-retirements-to-cut-us-coal-fleet-to-less-than-half-2015-capacity-by-2035-65741012>.
- Robert Rosner and Stephen Goldberg, Small Modular Reactors – Key to Future Nuclear Power Generation in the U.S., Energy Policy Institute at Chicago (EPIC), The University of Chicago, The Harris School of Public Policy Studies, November, 2011.
- American Nuclear Society, INTERIM REPORT OF THE ANS PRESIDENT'S SPECIAL COMMITTEE ON SMR GENERIC LICENSING ISSUES, July 2010.
- SMART Power Co., Ltd Website, [SMR : SMART Technology](#) : Development History, http://smart-nuclear.com/tech/d_history.php.
- 국무조정실 국무총리비서실, [보도자료] 제9차 원자력진흥위원회, 2020. 12. 28.
- Sang Gyu Lim et al., "Preliminary Analysis of SBLOCA for Innovative Small Modular Reactor (iSMR) using MARS-KS code," Trans. the Korean Nuclear Society Virtual Spring Meeting, May 13-14, 2021.
- OECD/Nuclear Energy Agency, 2021, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, NEA No. 7560.
- Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018, A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors. Ottawa, Ontario, Canada.
- UK(United Kingdom) [Department for Business, Energy & Industrial Strategy](#), Policy Paper, Advanced Nuclear Technologies, <https://www.gov.uk/government/publications/advanced-nuclear-technologies/advanced-nuclear-technologies#small-modular-reactors>.
- ROSATOM Website, ROSATOM: world's only floating nuclear power plant enters full commercial exploitation, <https://rosatom.ru/en/press-centre/news/rosatom-world-s-only-floating-nuclear-power-plant-enters-full-commercial-exploitation/>

REFERENCES(3/5)

- Nuclear Engineering International, France looks to develop SMRs (24 September 2019), <https://www.neimagazine.com/news/newsfrance-looks-to-develop-smrs-7420820>.
- 기계신문 온라인판, 한-사우디, 소형원전 '스마트' 건설 탄력... SMART 표준설계인가 공동 추진 협약 (2020. 01. 03), <http://www.mtnews.net/m/view.php?idx=7609>.
- United States Federal Register Vol. 86, No.124, July 1, 2021, Proposed Rules: Nuclear Regulatory Commission 10CFR Part 52 [NRC-2017-0029], RIN 3150-AJ98, NuScale Small Modular Reactor Design Certification.
- USNRC Website, Small Modular Reactor and Non-Light Water Reactor Technical and Policy Issues, <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr.html>.
- UK Office for Nuclear Regulation, New Nuclear Power Plants: Generic Design Assessment Guidance to Requesting Parties, ONR-GDA-GD-006 Revision 0, October 2019.
- UK [Environment Agency](#), 2019, Guidance, New nuclear power plants: Generic Design Assessment guidance for Requesting Parties.
- UK Houses of Parliament, Small Modular Nuclear Reactors, Postnote, Parliament Office of Science and Technology, Number 580 July 2018.
- Dennis Demoss, Stefan J. Janusz, and Richard P. Niemer, 2014, "ASME Codes and Small Modular Reactors," SMR2014-3345, Proc. the ASME 2014 Small Modular Reactors Symposium, April 15-17, 2014, Washington, D.C., USA.
- Clayton T. Smith, George Beltz, and Dennis K. Williams, 2012, "ASME Applicability for Small Modular Reactors," ICONE 20 POWER 2012-54920, Proc. the 20th International Conference on Nuclear Engineering, July 30 - August 3, 2012, Anaheim, California, USA.
- Kevin Ennis, ASME Nuclear Codes and Standards: Overview, ASME Nuclear Codes & Standards,
- Richard Black, 2014, "ASME SMR Roadmap (STP-NU-072)," Nuclear Energy Standards Steering Collaborative, November 3, 2014.
- Nuclear Energy Institute, "Advanced Reactor Codes and Standards Needs Assessment," NEI 19-03 (Rev. 1), March 2020.
- Nuclear Energy Institute, "Risk-Informed Performance-Based Technology Inclusive Guidance for Advanced Reactor Licensing Basis Development," NEI Technical Report 18-04, April 2019.
- USNRC, 2019, Technology-inclusive, Risk-informed, and Performance-based Methodology to Inform the Licensing Basis and Content of Applications for Licenses, Certifications, and Approval for Non-Light Water Reactors," SECY-19-0117.
- USNRC, 2020, Rulemaking Plan on "Risk-informed, Technology-inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors (RIN-3150-AK31; NRC-2019-0062)," SECY-20-0032.

REFERENCES(4/5)

- U.S. Department of Energy, "Assessment of Applicability of Standards Endorsed by Regulatory Guides to Sodium Fast Reactors," ORNL/SR-2017/520, prepared by Oak Ridge National Laboratory, September 2017.
- ASME, "Roadmap to Develop ASME Code Rules for the Construction of High Temperature Gas-Cooled Reactors (HTGRs)," STP-NU-045-1, 2012.
- Korsah, Kofi, Ramuhalli, Pradeep, Vlim, R., Kisner, Roger A., Britton, Jr, Charles L., Wootan, D. W., Anheier, Jr, N. C., Diaz, A. A., Hirt, E. H., Chien, H. T., Sheen, S., Bakhtiari, Sasan, Gopalsami, S., Heifetz, A., Tam, S. W., Park, Y., Upadhyaya, B. R., and Stanford, A. Assessment of Sensor Technologies for Advanced Reactors. United States: N. p., 2016. Web. doi:10.2172/1345781.
- ASME, "Non-Destructive Examination (NDE) and In-Service Inspection (ISI) Technology for High Temperature Reactors," STP-NU-044 – 2011, 2011.
- Gray, B. S., "The Effect of Reactor Radiation on Cements and Concrete," in Proceedings of the Conference on Prestressed Concrete Pressure Vessels, pp. 17–39, Commission of European Communities, Luxembourg City, Luxembourg, 1972.
- U.S. Department of Energy, "Research and Development Roadmaps for Liquid Metal Cooled Fast Reactors – Draft for Public Comment," Argonne National Laboratory, ANL/ART-88 Rev. 02, June 5, 2018.
- U.S. Department of Energy, "Compatibility Studies of Potential Molten-Salt Breeder Reactor Materials in Molten Fluoride Salts," Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-5783, May 1977.
- Olson, L. C. et al., "Materials Corrosion in Molten LiF-NaF-KF Salt," J. Fluorine Chem. 130, 67, 2009.
- ANS/NRC Workshop to Develop a Strategic Vision for Advanced Reactor Standards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Three White Flint North, North Bethesda, MD, USA, May 2, 2018.
- ORNL MSR2020 Website, The 2020 Molten Salt Reactor Workshop, Oak Ridge National Laboratory, October 14–15, 2020, <https://msrworkshop.ornl.gov/msr2020/>.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Guidelines on the Treatment of Uncertainties Associated with PRAs in Risk-Informed Decision-Making," NUREG-1855, Revision 1, March 2017.
- Canadian Nuclear Safety Commission Website, Small modular reactors, https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/research-reactors/other-reactor-facilities/small-modular-reactors.cfm#_CNSC's_involvement_withRegulating.
- Logan, L., Grava, J., and Iqbal, S., 2019, "CSA Group Nuclear Standards and Applicability to Small Modular Reactors," Division X, Transactions, SMiRT-25, Charlotte, NC, USA, August 4-9, 2019.
- CSA Group, Standards Research Report, The Role of Standards in Facilitating Deployment of SMRs in Canada, Aug. 2021.
- UK(United Kingdom) [Department for Business, Energy & Industrial Strategy](https://www.gov.uk/government/publications/advanced-nuclear-technologies/advanced-nuclear-technologies#small-modular-reactors), Policy Paper, Advanced Nuclear Technologies, <https://www.gov.uk/government/publications/advanced-nuclear-technologies/advanced-nuclear-technologies#small-modular-reactors>.

REFERENCES(5/5)

- UK HM Government, 2020, Energy White Paper, Powering our Net Zero Future, Presented to Parliament by the Secretary of State for Business, Energy and Industrial Strategy by Command of Her Majesty, APS Group on behalf of the Controller of Her Majesty's Stationery Office.
- P. M. James, J. K. Sharples and N. J. Underwood, "UK Programme on Codes, Standards and Procedure Needs for SMR and Gen IV Reactors," PVP2018-85075, Proc. ASME 2018 Pressure Vessels and Piping Conference, Prague, Czech Republic, 2018.
- P. M. James, N. J. Underwood, and J. K. Sharples "UK Programme on Codes, Standards and Procedure Needs for SMR and Gen IV Reactors: Phase 1 Output," PVP2019-93861, Proc. ASME 2019 Pressure Vessels and Piping Conference, San Antonio, Texas, 2019.
- IAEA, 2020, Applicability of Design Safety Requirements to Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment: Light Water Reactors and High Temperature Gas Cooled Reactors, IAEA-TECDOC-1936.
- 조종철 등, KINS/GR-332, 상세보고서 2, 일체형원자로 규제기술 요건 및 지침 개발, 과학기술부, 2007. 02.
- 강한옥, 한훈식, 김영인, "일체형원자로 인쇄회로형 증기발생기 열수력학적 설계,"1) 한국유체기계학회 논문집: 제17권, 제6호, pp. 77~83, 2014.
- 특허 등록 제10-1534497호, 증기발생기용 열교환기 및 이를 구비하는 증기발생기, 한국원자력연구원 (윤주현, 김영인), 2015; US Patent No. 10,488,123 B2, Heat exchanger for steam generator and steam generator comprising same, 2019.
- Heatric Website, [Heatric Printed Circuit Heat Exchangers](https://www.heatric.com/heat-exchangers/): What is a Heatric Printed Circuit Heat Exchanger?, <https://www.heatric.com/heat-exchangers/>.
- Korea Electric Power Industry Code, KEPIC MN 원자력 기계, 2020.
- American Society for Mechanical Engineers, ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III - Rules for Construction of Nuclear Facility Components, ASME, 2015.
- Regulatory Guide 1.83, "Inservice Inspection of Pressurized Water Reactor Steam Generator Tubes," Revision 1, US NRC, July 1975
- Federal Register, Vol. 74, No. 217, "US NRC [NRC-2009-0488] Withdrawal of Regulatory Guide 1.83," Nov. 12, 2009.
- Nuclear Energy Institute, NEI 97-06, Rev. 3, "Steam Generator Program Guidelines," Jan. 2011.
- TID-14844, "Calculation of Distance Factors for Power and Test Reactor Sites", US AEC, 1962.
- Regulatory Guide 1.183, "Alternative Radiological Source Terms for Evaluating Design Basis Accidents at Nuclear Power Reactors", US NRC, 2000.
- Regulatory Guide 1.195, "Method and assumptions for evaluating radiological consequences of design basis accidents at light-water nuclear power reactors, US NRC 2003.
- ICRP Publication 60, 1990 Recommendations of the International Commission on Radiologic Protection, 1991.
- Roland Backhaus, Up& Atom NRC Staff - Scalable EPZs for SMRs are feasible, 2018, <https://www.morganlewis.comblogsupandatom201808nrc-staff-scalable-epzs-for-smrs-are-feasible>.
- U.S. Nuclear Regulatory Commission, "NuScale Final Safety Evaluation Report," Aug. 2020, <https://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/smr/nuscale/ser-open-items.html>.

감사합니다.