

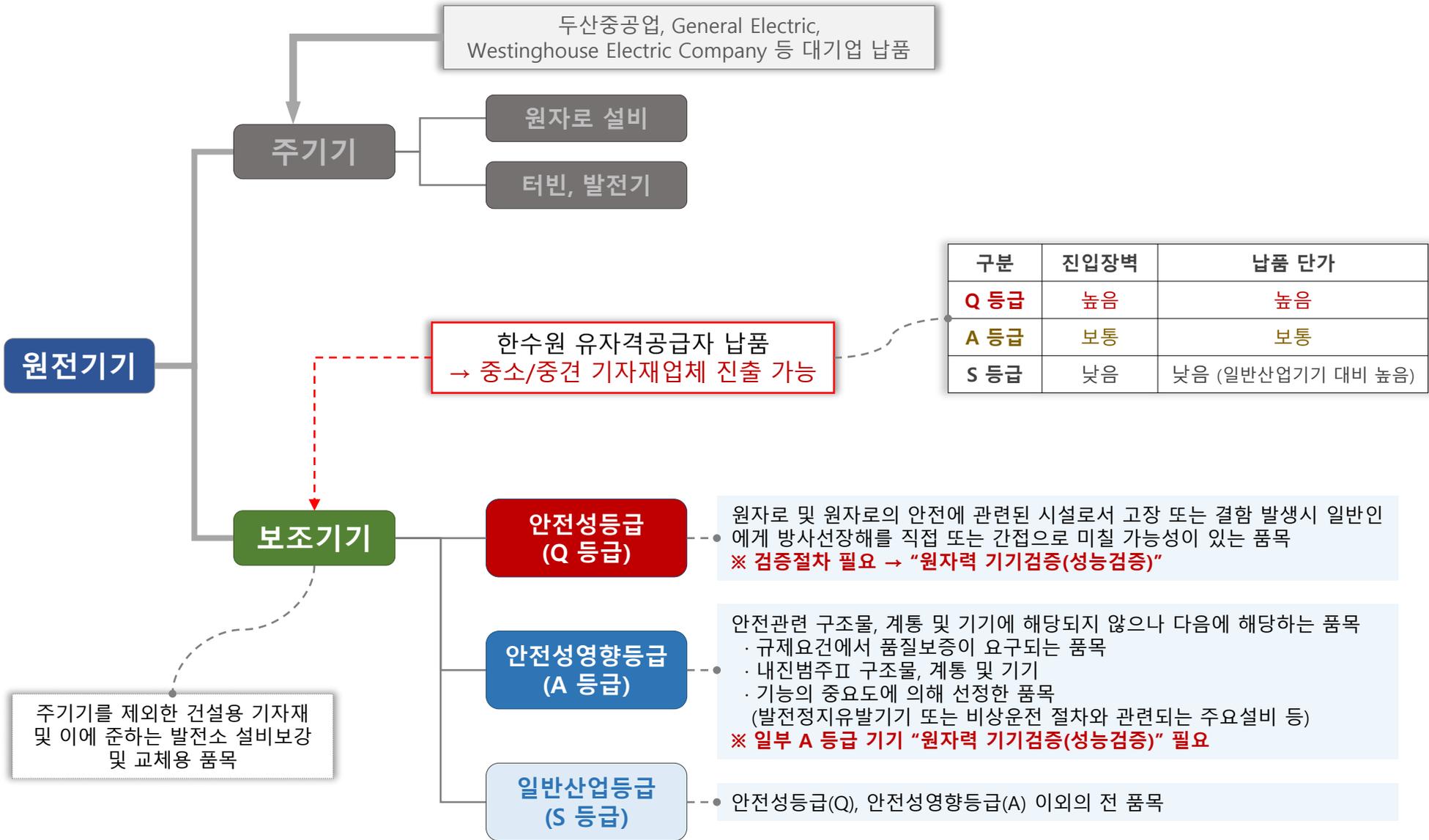
SMR 보조기기 개발을 위한 내환경 요건 및 고려사항

- 한국기계연구원 원전기기검증연구실 -

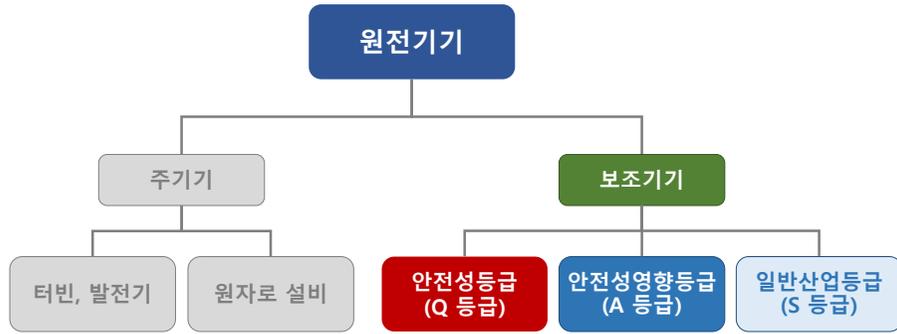
2023.09.07.



원전기기 구분



원전 보조기기 및 관련 법령



APR1400 원전기기 구분

원자력안전법

[시행 2023. 3. 11.] [법률 제18972호, 2022. 6. 10., 일부개정]

- 제15조의2(안전관련설비 계약 신고) 제10조제2항에 따라 허가신청서를 제출한 자 또는 발전용원자로설치자가 안전관련설비에 대하여 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 계약(도급을 받는 자의 하도급거래를 포함한다)을 체결할 때에는 계약을 체결한 날부터 30일 이내에 **출력**으로 정하는 바에 따라 위원회에 신고하여야 한다. 신고한 사항을 변경하려는 때에도 또한 같다.
 1. 안전관련설비의 설계에 관한 사항(건설과 관련된 설계를 포함한다)
 2. 안전관련설비의 제작에 관한 사항
 3. 안전관련설비의 성능검증에 관한 사항
[본조신설 2014. 5. 21.]
- 제15조의3(부적합사항 보고) 다음 각 호의 어느 하나에 해당하는 자는 안전관련설비 및 제20조제2항의 사고관리계획서에 따른 사고관리에 필요한 설비에서 제11조 및 제21조의 허가기준에 적합하지 아니한 사항을 발견하면 **위원회가 정하여 고시하는** 바에 따라 위원회에 보고하여야 한다. <개정 2021. 12. 28.>
 1. 제10조제2항에 따라 허가신청서를 제출한 자
 2. 발전용원자로설치자
 3. 제15조의2에 따른 안전관련설비의 설계자·제작자(이하 "공급자"라 한다)
 4. 제15조의2에 따른 안전관련설비의 성능검증을 수행하는 자(이하 "성능검증기관"이라 한다)
[본조신설 2014. 5. 21.]

+ 위임 행정규칙

- 제15조의4(성능검증관리기관 지정 등) ① 위원회는 성능검증기관을 효율적으로 관리하기 위하여 제111조에 따라 그 권한을 위탁할 수 있는 기관 중에서 관리기관(이하 "성능검증관리기관"이라 한다)을 지정할 수 있다.

원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙

[시행 2022. 12. 9.] [원자력안전위원회규칙 제31호, 2022. 12. 9., 일부개정]

- 제40조(성능검증 부품의 사용) 원자로시설의 부품중 원자로의 가동 기간 동안 성능유지가 필요하다고 인정되는 부품은 그 성능을 경험에 의한 방법, 해석에 의한 방법, 또는 시험에 의한 방법중 적절한 방법으로 검증한 후 원자로시설에 이를 설치하여야 한다.
- 제41조(시험·감시·검사 및 보수) ① 원자로시설의 안전에 중요한 구조물·계통 및 기기는 구조적 건전성·누설밀봉·기능수행 능력 및 작동성을 수명기간 동안 보장하기 위하여 안전기능의 중요도에 따른 시험·감시·검사 및 보수가 가능하도록 설계되어야 한다.
 - ② 주기적인 시험·감시·검사 또는 보수를 할 수 없거나 현저히 제약을 받는 기기는 예상 가능한 고장에 대처할 수 있도록 설계되어야 한다.
 - ③ 원자로시설에 속하는 압력용기(보조보일러를 제외한다), 배관, 주요펌프 및 주요밸브는 원자력안전위원회가 정하여 고시하는 내압시험 누설기준에 적합하여야 한다.
- 제42조(설계기준사고) ① 원자로시설은 내부 및 외부사건을 포함한 설계기준사고로 인한 주민의 방사선 피폭이 원자력안전위원회가 정하는 방사선량 이하로 유지될 수 있도록 설계되어야 한다.
 - ② 설계기준사고에 대한 평가는 결정론적 방법에 의해 수행되어야 하며, 그에 따른 발전소 설계에는 설계여유도를 포함한 보수적 규정 및 기준을 적용하여야 한다.

원전 보조기기 관련 법령

성능검증 기술기준 [END1100]

• 한국원자력안전재단 '성능검증기관의 인증 및 관리에 관한 규정' 및 KEPIC END 1100 (전기 1급 기기 검증)

성능검증 분야		인증 범위	기술기준 ^{주1)}
1	열적노화 시험	온도 범위 (°C)	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323)
2	열적노화 해석	해당 없음	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323)
3	열적주기 시험	온도 범위 (°C)	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323) KEPIC ENB6430 (IEEE Std. 317) KEPIC END3830 (IEEE Std. 572)
4	온습도 시험	온도 범위(°C) 및 습도(% R.H)	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323) KEPIC END3600 (IEEE Std. 650)
5	방사선노화 시험	조사선량률 범위(Gy/h)	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323)
6	방사선노화 해석	해당 없음	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323)
7	진동노화 시험 ^{주2)}	최대 무게(kgf), 최대 주파수(Hz) 무부하 100Hz의 최대 가속도(m/s ²) ^{주3)}	KEPIC END3700 (IEEE Std. 382)
8	냉각재상실사고(LOCA) 시험	최대 온도(°C), 최대 압력(Pa) 최대 화학적 살수 유량(L/h)	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323)
9	배관파단사고(MSLB, HELB) 시험	최대 온도(°C), 최대 압력(Pa)	KEPIC END1100 (IEEE Std. 323)
10	화염 시험	최대 열량(kW)	KEPIC END3810 (IEEE Std. 383,1202) CSA C22.2 No. 0.3-01
11	전자기 장애(RE, CE) 시험	주파수 범위(Hz)	Reg.Guide 1.180, MIL461
12	전자기 내성(RS, CS, ESD) 시험	주파수 범위(Hz), 최대 시험 레벨(kV)	Reg.Guide 1.180, MIL461
13	내진 시험 ^{주2)}	최대 무게(kgf), 최대 주파수(Hz) 무부하 40Hz의 수평/수직 최대 가속도(m/s ²) ^{주3)}	KEPIC END2000 (IEEE Std. 344)
14	내진 해석 ^{주2)}	해당 없음	KEPIC END2000 (IEEE Std. 344)
15	펌프 성능시험	수력성능시험	최대 유량(m ³ /h)
		과도조건성능시험	
		터빈구동자 성능시험	
16	밸브 성능시험	능동동력구동 밸브시험	최대 온도(°C) 최대 압력(Pa) 최대 유량(m ³ /h)
		능동자기구동 체크밸브시험	
		능동압력방출 밸브시험	

END 1100 전기 1급 기기 검증

6.2 검증 프로그램 계획(qualification program plan)

6.2.1 노화(aging)

안전기능을 수행하기위한 전기 1급기기의 능력(ability)은 시간이 경과함에 따라, 환경 및 운전조건들로 인한 변화들에 의해 영향을 받을 수 있다. 검증 프로그램은 그러한 변화들의 중요성을 평가하기 위해서 노화의 영향을 자세히 설명해야 한다. 노화의 영향을 설명하는 데 사용될 수 있는 기법에는 운전 경험, 시험, 해석, 사용중 감시, 상태 감시 및 보수 활동 등이 있다.

6.2.1.1 주요 노화 메커니즘(significant aging mechanisms)

잠재적인 주요 노화 메커니즘을 식별하기 위하여, 기기는 명시된 설계, 기능, 자재 및 환경의 관점에서 검토되어야 한다. 만일 제작된 후 보관 중이거나 정상 및 비정상 사용 환경동안 그 기기가 설계기준 사건 조건 하에서 점진적이고 현저하게 안전기능 수행을 실패하도록 하는 기능저하를 야기 시키면 이것은 주요 노화 메커니즘이다. 주요 노화 메커니즘의 예를 들면 마모, 손상, 산화 그리고 자재의 내구력 저하 등이 있다. 잠재적인 주요 노화 메커니즘에 대한 추가 정보는 IEEE Std 1205-2000 [B23]에 기술되어 있다.

6.2.1.2 노화 고려사항(aging consideration)

만일 기기가 주요 노화메커니즘을 갖는 것으로 확정되는 경우, 주요 노화 메커니즘은 검증 프로그램에서 고려되어야 한다. 노화는 검증 프로그램의 일부로서, 설계기준사건 시험 전에 시험표본에 대한 노

6.3 검증 프로그램 수행(qualification program implementation)

6.3.1.8 노화(aging)

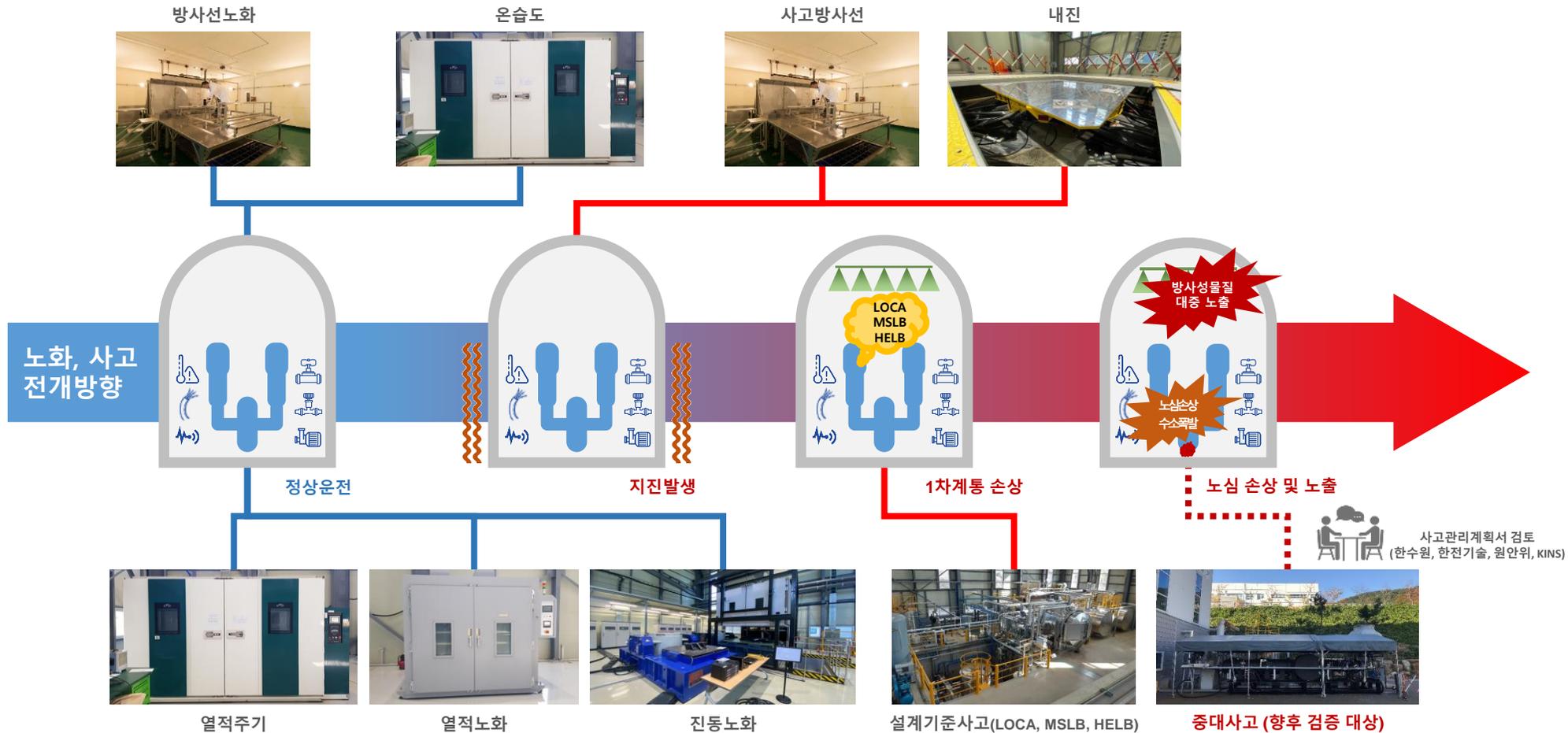
노화가 운전성에 주요한 영향을 미치는 지를 결정하기 위해 형식시험 계획과 연계된 기기 노화 영향 평가가 필요하다. 반드시 여기에 국한될 필요는 없지만, 노화의 유형에는 열, 방사선, 마모(wear) 및 진동이 있다. 평가에 고려되는 설계기준사건에 대해서 기기 성능과 연관된 잠재적 주요 노화 메커니즘이 확인되어야 한다. 주요한 노화 메커니즘이 식별되었다면 적절한 노화 처리가 형식시험에 포함되어야 한다.

6.3.1.8.2 노화 처리(age conditioning)

노화 처리란 일정기간 동안 주요 노화 메커니즘에서 비롯된 기기의 기능저하를 가능한 정확하게 시험표본에 모의하는 과정이다. 일반적으로 노화처리 과정에서 예상되는 가동 중 수준보다는 크지만 정상적인 사용에서 나타나지 않는 노화 메커니즘을 유발하는 수준보다는 다소 낮은 크기 또는 정격에서의 모의 가동 중 응력(일반적으로 열, 방사선, 마모, 진동)을 적용한다. 노화 처리 과정의 목적은 설계기준사건 전에 검증수명 동안 경험할 수 있는 최악의 기능저하 상태로 시험 표본을 만들어 두는 것이다. 노화 처리의 순서는 최악의 기능저하 상태에 도달하기 위해서 순차적(sequential), 동시적

현행 원전기기 성능검증 절차

- **형식시험(Type Test): 대표 표본 대상 운전 기간 동안 안전기능 수행 입증**
 - 설계기준사건(DBE) 전 검증수명 동안 경험할 수 있는 최악의 기능저하 상태로 시편 노화
 - 복합 노화 (열, 방사선 등) 환경 동시 구현 불가 → 보수적 기준 적용 시험 절차 수립 (열노화 후 방사선노화 등)
 - 가속 노화 방법 적용 (열노화: Arrhenius 방정식 기반 고온환경 적용, 방사선노화: 누적방사선량 조사)



원전기기 관점 SMR 장단점

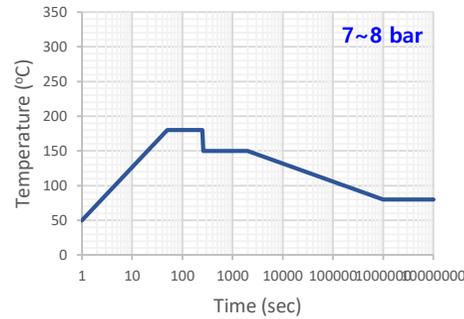
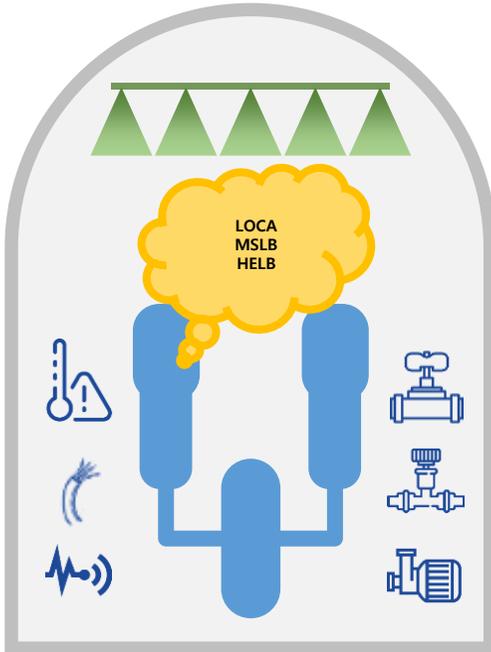
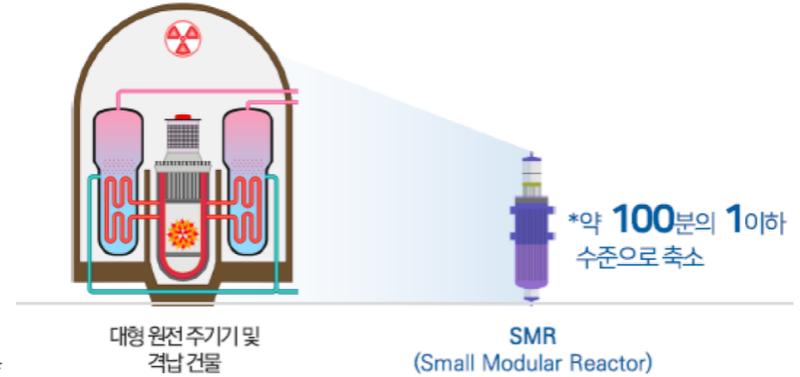
• 격납용기 체적 감소(1/100) → 대형 원전 대비 장단점 존재

◦ 장점

- 계통 단순화 → 보조기기 감소
- 적극적인 면진설계 적용 가능
- 설계기준사고 발생 가능성 저감

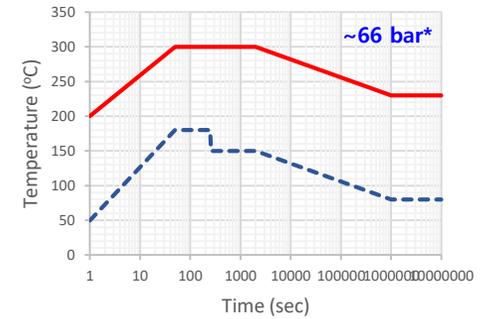
◦ 단점

- (노화) 격납용기 내부 온도 상승 (50°C → 200°C)
- (설계기준사고) 1차계통 손상 시 온도/압력 상승 (7 bar, 220 °C → 66 bar, 288°C)*



APR1400

- 용량: 1400MWe
- 열출력: 4000MWt
- 격납건물 체적: 94,000m³
- 설계수명: 60년
- 내진설계기준: 0.3g



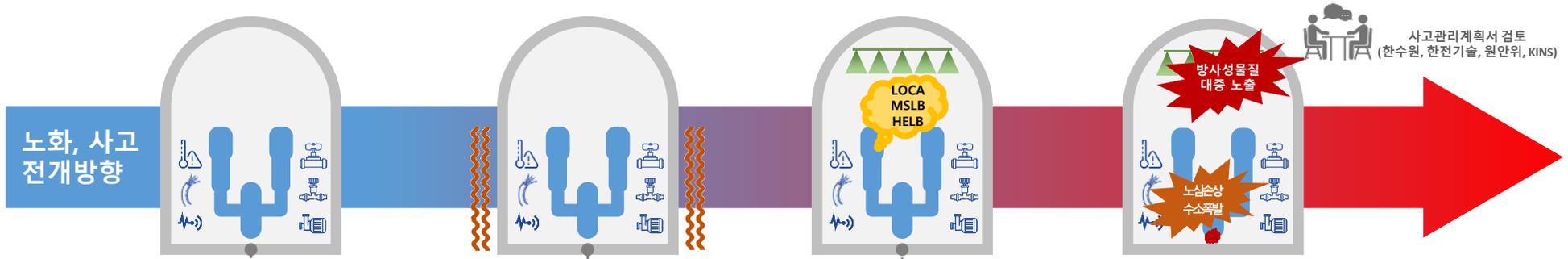
혁신형 SMR

- 용량: 170MWe
- 열출력: 540MWt
- 격납건물 체적: ≤ 9,400m³
- 설계수명: 100년(검토 중)
- 내진설계기준: 0.5g

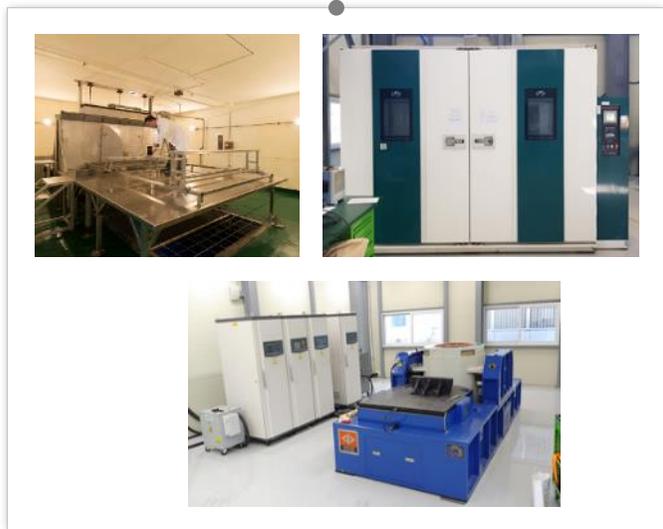
SMR 성능검증 공백기술 [1/2]

붙임 2 참조

- [대형 원전] 노화, 사고 시나리오 수립 완료 → 성능검증(EQ) 기술 및 인프라 개발 완료 → 원전기기 국산화



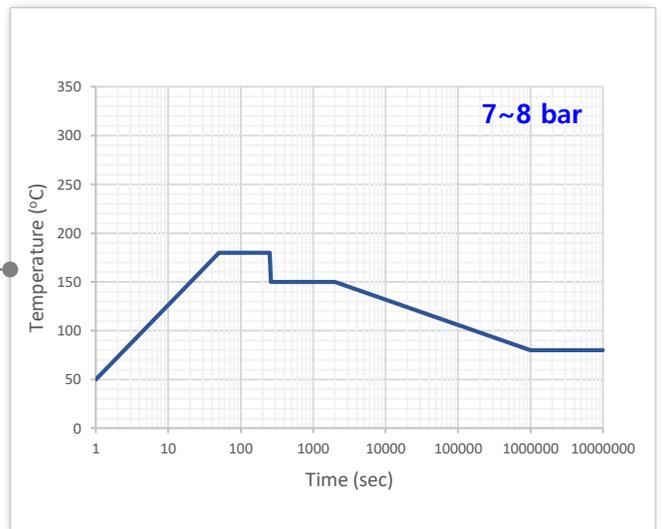
사고관리계획서 검토
(한수원, 한전기술, 원안위, KINS)



노화 시험장비 (방사선, 열, 열적주기, 온습도, 진동)



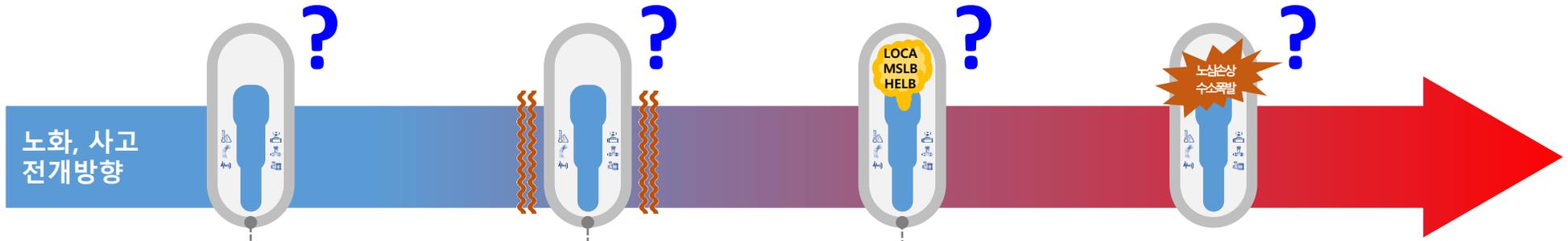
설계기준사고 시험장비 (내진, LOCA, MSLB, HELB)



현행 설계기준사고 시험요건

SMR 성능검증 공백기술 [2/2]

- [SMR] 노화, 사고 시나리오 수립 중 → 신규 검증기술과 SMR 보조기기 개발 연계 필요 ※ SMR기기 국산화 필요조건

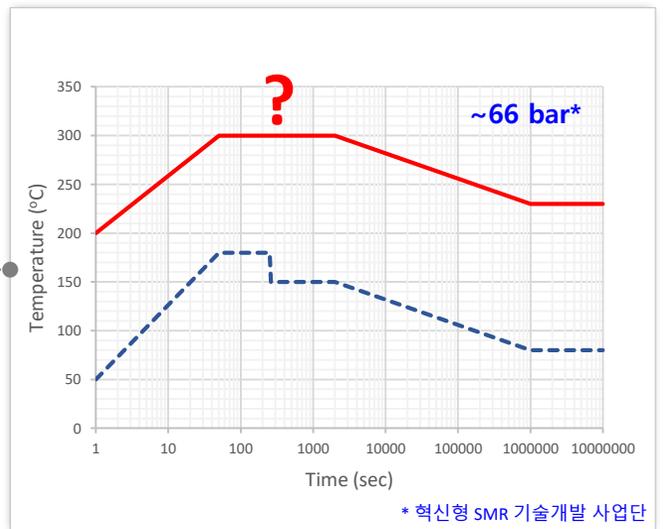


< 공백기술 1 >
SMR 가속열노화 모사 기술

노화 시험장비 (방사선, 열, 열적주기, 온습도, 진동)

< 공백기술 2 >
SMR 설계기준사고 환경 모사 기술

설계기준사고 시험장비 (내진, LOCA, MSLB, HELB)



SMR 설계기준사고 시험요건

SMR 성능검증 고려사항 [1/2]

열노화 시험 기술 및 비금속 소재 개발

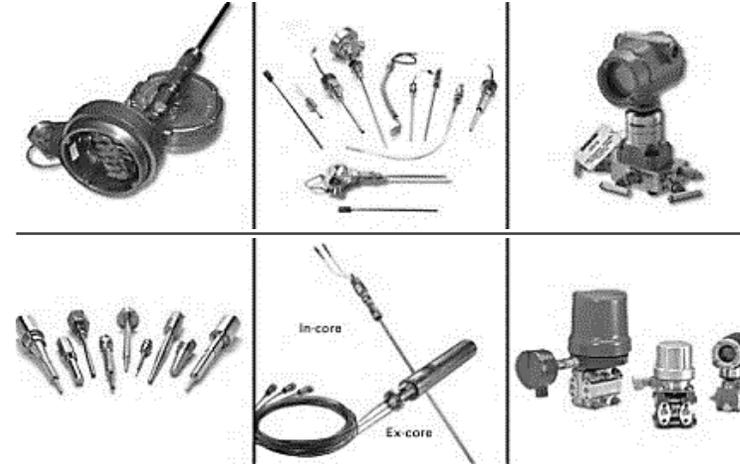
- 보조기기 비금속 소재 확보 필요
 - 현 소재 최고 220°C, 7 bar 노출 (NBR, FKM 등)
 - 고온/고압 + 방사선 적용 가능 소재 검토 필요 (FFKM, PTFE 등)
- 가속열노화 시험기술 개발 필요
 - 원전 Code, Arrhenius Equation 기반 가속노화 적용

$$t_2 = t_1 \times \exp\left\{\frac{E_a}{k} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right\}$$

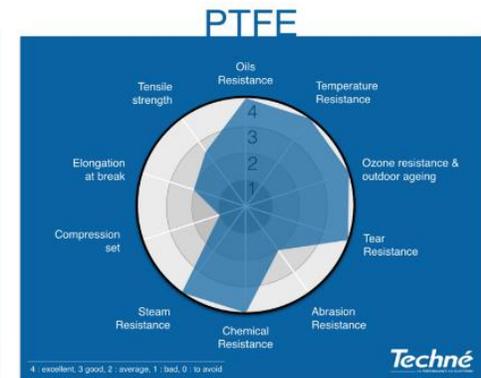
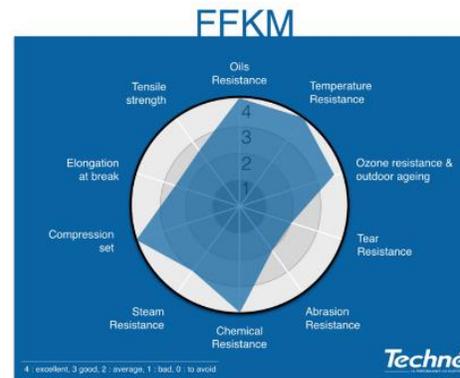
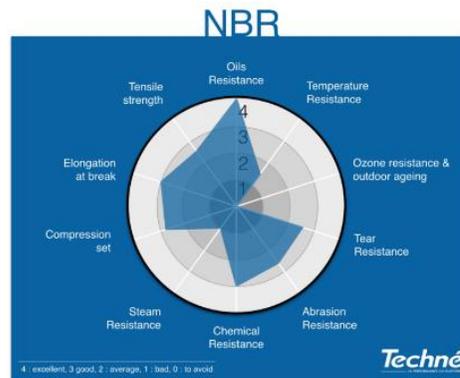
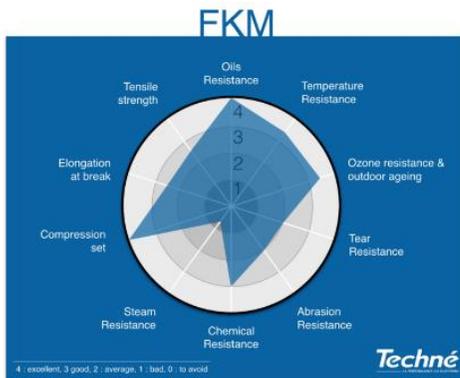
t₂: design life (h)
 t₁: acceleration aging time (h)
 T₂: acceleration aging temperature (K)
 T₁: environment temperature (K)
 E_a: activation energy (eV)
 k: Boltzmann constant (8.617x10⁻⁵ eV/K)

- 적용 가능 시험조건 검토 필요

예) E_a: 1.09eV 50°C, 40년 → 110°C, 32일 소요
 ☞ 200°C, 40년 → 280°C, 306일 소요



원전 보조기기 (Temperature Sensor, RTD, TC, Pressure transmitter, Neutron Detector 등)

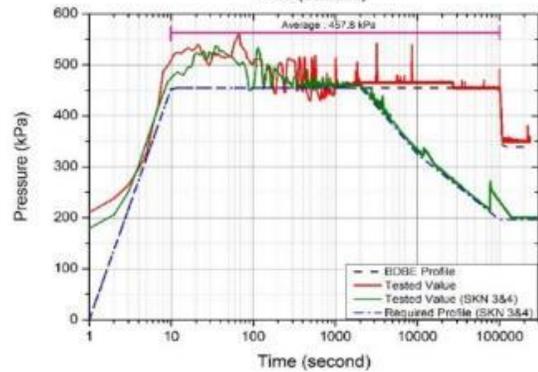
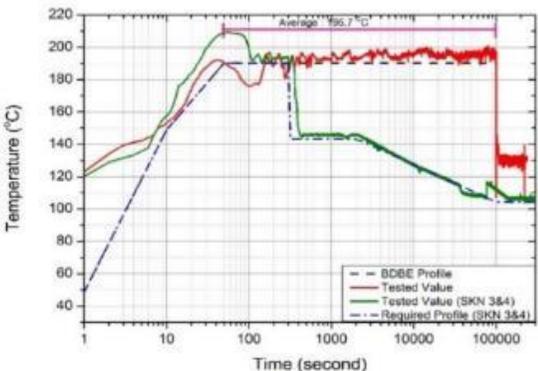


대표적인 내환경 고분자 성능 특성

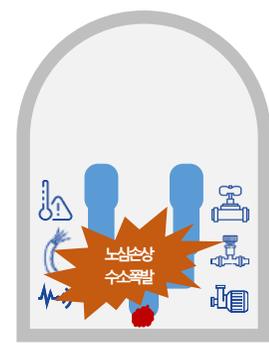
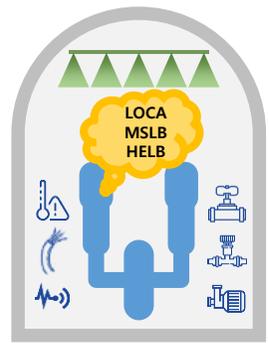
SMR 성능검증 고려사항 [2/2]

설계기준사고 시험 기술 및 비금속 소재 개발

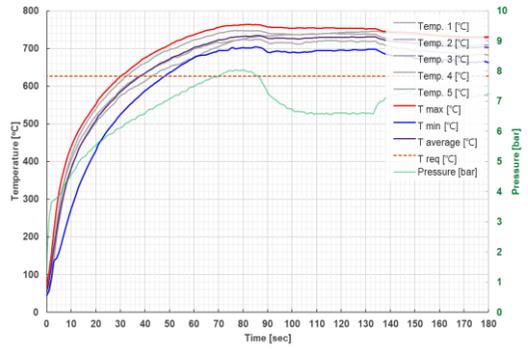
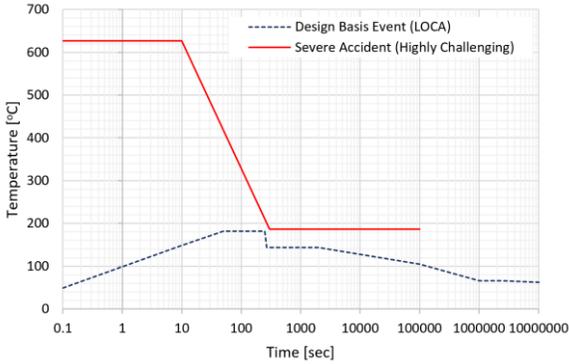
- 설계기준사고(LOCA) 시험기술 개발 필요
 - SMR LOCA 압력 50 bar 예상 (현 LOCA 시험 사양 250°C, 7 bar)
 - SMR Q-Class 기기 spec. 中 LOCA 시험 포함 → 실증시험 기술 및 장비 필요
- 예) 원전 중대사고 관련 규제 신설 → 실증시험 기술 개발 (한국기계연구원)



대형원전 설계기준 초과사고 모사 시험 예



사고관리계획서 검토 中
(한수원, 한전기술, 원안위, KINS)



원전 중대사고 온도요건 및 KIMM 개발 실증시험장비 시험결과

- **SMR 기기 성능 평가**

- SMR 성능 평가 조건 등 선제적으로 수립
- 열노화, DBE에 대한 검증 실험 기술 개발

- **비금속 소재 개발**

- 기존 비금속 소재에 대한 SMR 조건 기기 건전성 평가
- SMR 조건에 사용 가능한 비금속 소재 개발

· · · **경청해주셔서 감사합니다** · · ·