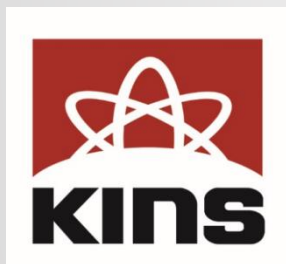


피동안전계통 국내·외 규제경험

박 주엽 (k385pjy@kins.re.kr)



한국원자력안전기술원

2022년 7월 8일

피동안전계통 기술혁신 워크숍
한국원자력연구원 국제원자력연수관

발표순서

- 표준설계인가 제도
- 국내·외 표준설계(피동안전계통) 심사 내용
- 국내·외 피동안전계통 규제 지침 현황
- 국내 피동안전계통 관련 규제 연구 현황
 - 규제 지침 연구 현황
 - 피동안전계통 도입에 따른 도전 사항
 - 성능 및 신뢰도평가 방안 연구 현황
- 맺음말

표준설계인가 제도 (1/3)

- 미국 표준설계인증(10CFR52, Design Certificate) 제도를 참조로 국내 도입
- 표준설계인가 신청(원자력안전법 제12조 1항)
 - 같은 설계의 발전용원자로 및 관계시설을 반복적으로 건설하고자 할 때
- 표준설계인가 제출서류(원자력안전법 시행규칙 제9조 2항 및 3항)
 - 표준설계기술서
 - 원자로의 사용목적에 관한 설명서
 - 원자로의 설계에 관한 기술능력의 설명서
 - **표준설계안전성분석보고서**
 - 사고관리계획서 작성계획서
 - 정관
- 표준설계 유효기간(원자력안전법 제12조 3항)
 - 10년
- 표준설계안전성분석보고서 수준(원자력안전법 시행규칙 제 9조 5항)
 - 표준설계에 대한 안전성을 확인할 수 있는 수준의 상세한 기술정보를 기술하여야 함

표준설계인가 제도 (2/3)

- 표준설계인가제도는 표준설계인가 → 건설허가 → 운영허가로 이어지는 3단계 인허가 절차가 아님
- 표준설계인가는 신형 원전의 인허가 시현성을 높이기 위한 것
 - 신고리34/신울진12(APR1400노형)의 경우, 표준설계 승인 이후, 건설허가 및 운영허가 심사를 추가로 수행함
- APR1400 표준설계인가
 - 사전안전성 심사 ('00~'01.7)
 - 표준설계인가 심사('01.8~'02.7)
- **SMART 표준설계인가**
 - 사전안전성 심사 ('10.2~'10.12)
 - 표준설계인가심사('10.12~'12.7)
- **APR+ 표준설계인가**
 - 사전안전성 심사('10.8~'11.11)
 - 표준설계인가심사('11.12~'14.8)
- **SMART100 표준설계인가**
 - 사전안전성 심사 ('19.4~'20.1)
 - 표준설계인가심사 신청('20.1); 표준설계인가심사 개정자료 제출('21.3~)

표준설계인가 제도 (3/3)

- **AP600 표준설계인가**

- 표준설계인가심사 신청('92.6)
- 안전성심사보고서 및 SDA 발행('98.8, '98.9)
- DC 취득('99.12)

- **AP1000 표준설계인가**

- 표준설계인가심사 신청('02.3)
- 안전성심사보고서 및 SDA 발행('11.9)
- DC 취득('11.12)

- **APR1400 표준설계인가**

- 표준설계인가심사 신청('14.12)
- 안전성심사보고서 및 SDA 발행('18.9)
- DC 취득('19.8)

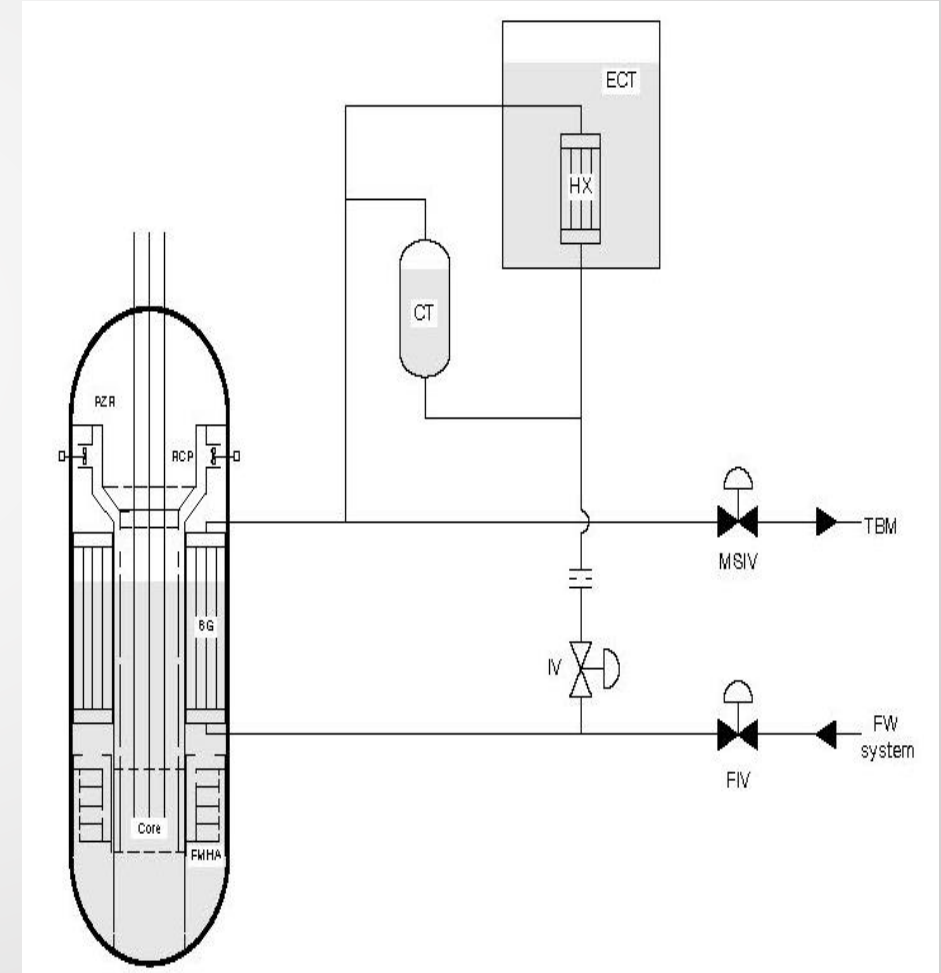
- **NuScale 표준설계인가**

- 사전인가검토(Pre-application review)('08~'16)
- 표준설계인가심사 신청('17.1)
- 안전성심사보고서 및 SDA 발행('20.8, '20.9)
- 현재 Rulemaking 단계 진행 중

SMART (피동잔열제거계통:PRHRS) 주요 심사 내용

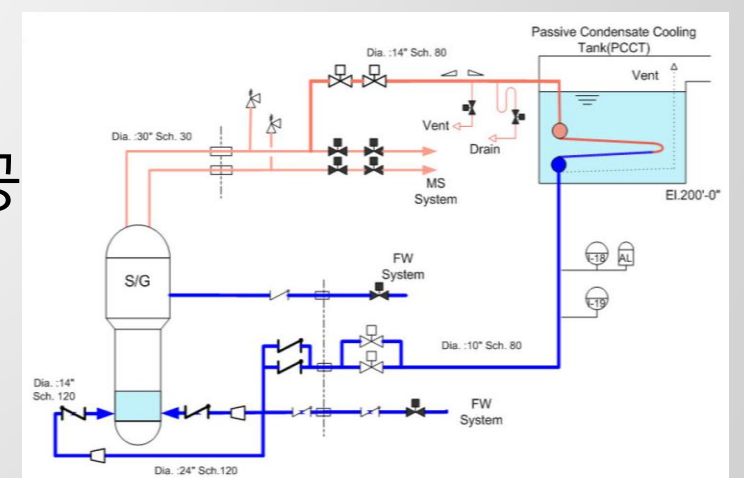
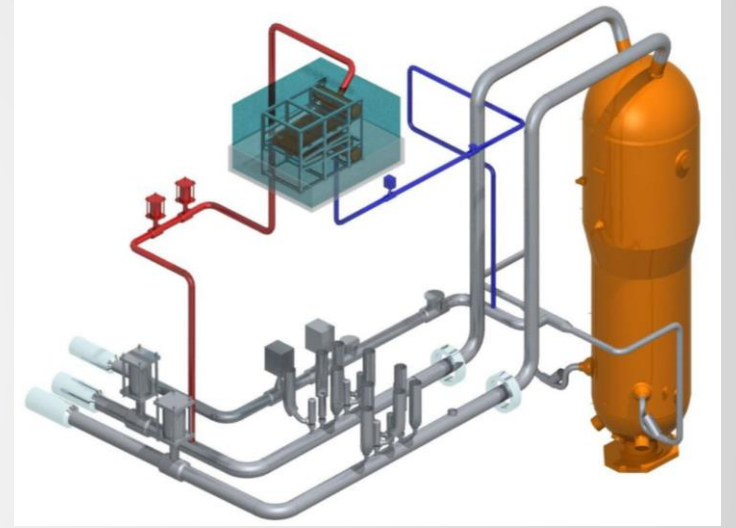
PRHRS: 사고 시 36시간 이내에 정지냉각
진입 조건까지 냉각재계통을 냉각

- PRHRS 수격현상/유동의 불안정성
- PRHRS **비응축성개스**에 의한 응축열교환
기의 열전달 감소를 고려한 설계마진 상수
0.8 적용
- PRHRS 내 **비응축성개스** 축적을 제한하기
위한 PRHRS 최상단부에 배기밸브 설치 및
주기적 감시요건 수립
- PRHRS의 **이용불능도** 평가 (TMI action)
 - 1.836×10^{-5}



APR+ (피동보조급수계통:PAFS) 주요 심사 내용

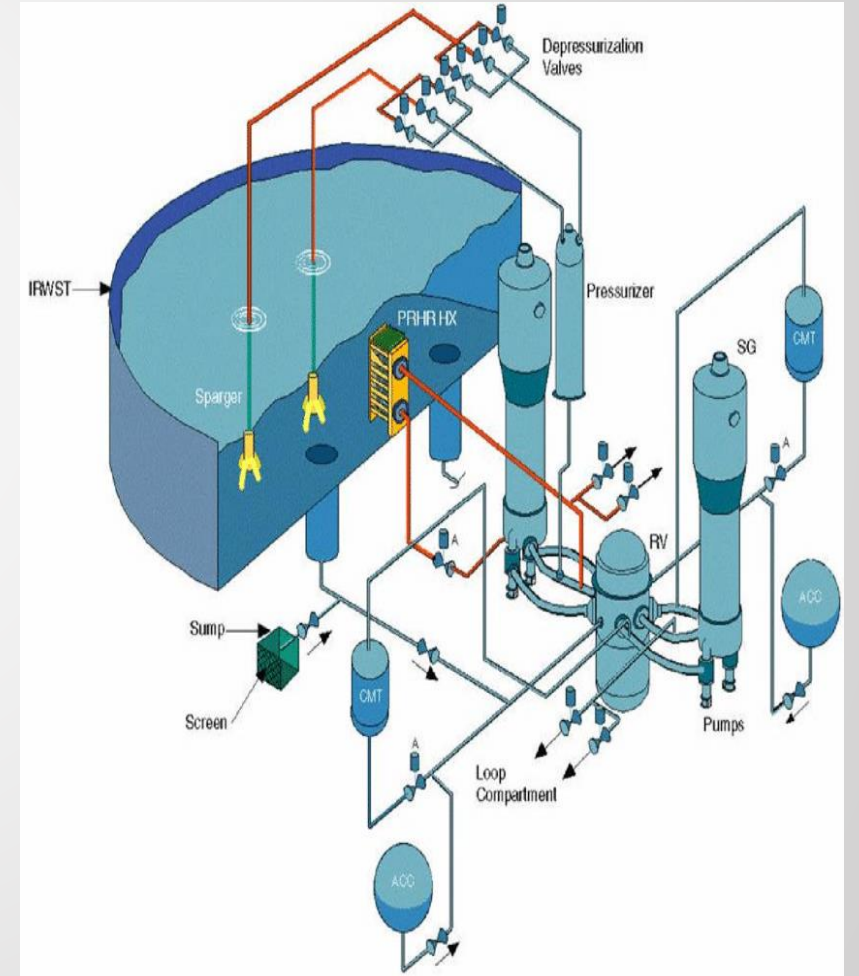
- PAFS: 사고 시 8시간 이내에 정지냉각진입 조건까지 냉각재계통을 냉각
 - PAFS 기술정보 교류회의(3회)
 - PAFS 수격현상/유동불안전성
 - PAFS 누설감지(온도감지기)
 - PAFS의 **이용불능도** 평가 (TMI action)
 - ✓ 5.950×10^{-5}
 - PAFS **운전 수두 확보**(발전소 기동시)
 - PAFS 운전 불능 시 보완(EDG로부터 전원을 공급받는 내진등급1 대체보조급수펌프 추가 설치)



AP600/AP1000 (피동잔열제거계통:PRHRS, 노심보충수탱크:CMT, 피동격납건물냉각계통:PCCS) 피동안전계통 관련 주요 규제입장

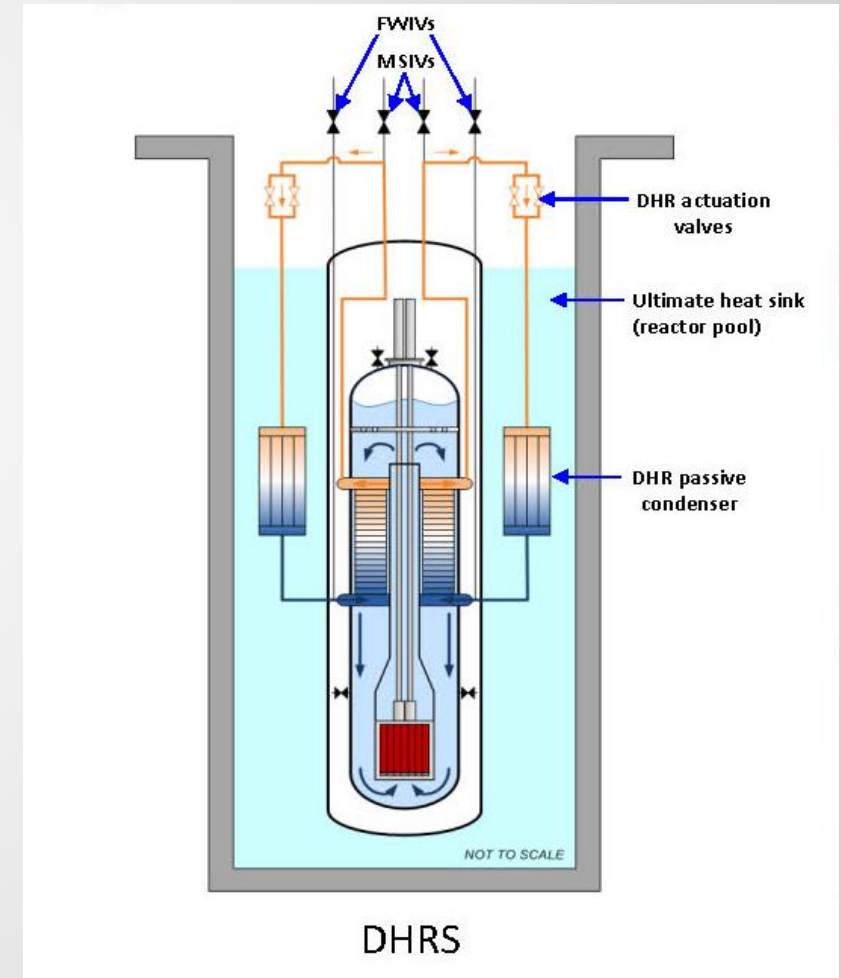
- **SECY 문서 발행을 통해 피동안전계통에 대한 규제입장을 정리**

- Regulatory Treatment of Non Safety System (RTNSS)
 - ✓ 피동안전계통의 제한적 운영경험과 열수력적 불확실도를 감안하여 심층방어 성능 및 기준을 만족할 수 있는 능동 비안전계통의 도입이 반드시 필요하다고 판단
- Post-72 Hour Actions
 - ✓ 설계기준사고 발생 후 피동안전계통의 동작만으로 72시간 동안 안전 상태를 유지해야 함 (72시간 이후 운전원조치 허용)
- Redefinition of Passive Failure for Check valve
 - ✓ 피동안전계통이 발생시키는 저유량 및 저압력 조건에서 안전등급 체크밸브의 정상적인 동작에 대한 우려가 있으므로 해당 체크밸브에 단일고장기준을 적용
- Safe Shutdown Requirement
 - ✓ 피동안전계통이 장기냉각관점에서 높은 신뢰도가 있으므로 안전 정지 조건을 cold shutdown (200°F) 상태가 아닌 보다 높은 온도를 허용 (within 36hrs 420°F)



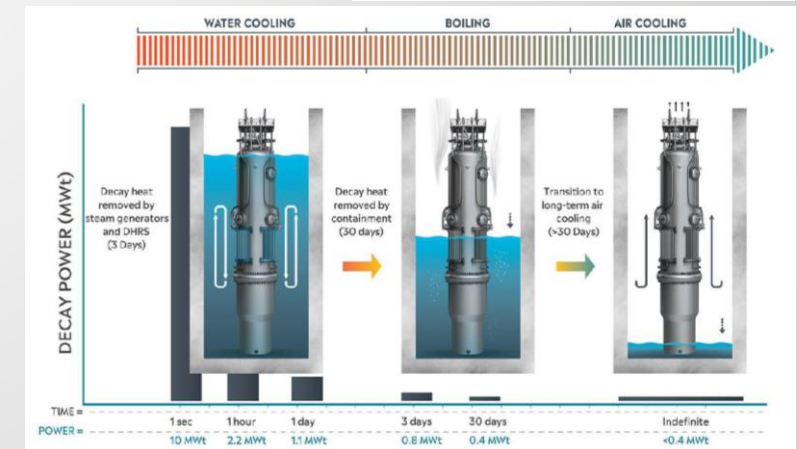
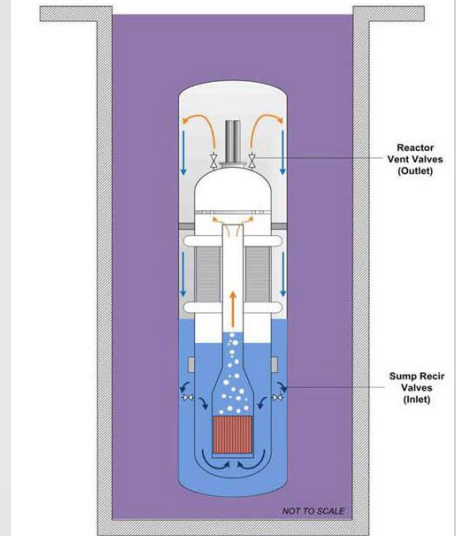
NuScale (피동잔열제거계통:DHRS) 주요 심사 내용

- 응축열교환기 **오염계수** 확인
 - Fouling factor of the condenser for DHRS
- **비응축성가스** 영향
 - No high-point venting capability in DHRS
 - A limiting amount of gas above the level sensors + conservative high amount of dissolved gas in the loop fluid
- 피동계통 성능검증
 - **Use of experimental a facility to demonstrate as-built DHRS performance**
- 피동특성을 반영한 안전 정지 요건 (Within 36hrs 420°F)
- **운전수두 확보**
 - DHRS inventory shall be filled as assumed in the safety analysis (Surveillance Requirement)
- **수격현상**
 - During the establishment of flow when DHRS is actuated



NuScale (비상노심냉각계통:ECCS, 격납건물냉각계통:CHRS) 주요 심사 내용

- 의도하지 않은 ECCS의 동작
- ECCS의 장기냉각능력(보론석출)
 - Boron precipitation may interrupt the natural circulation flow in the core
- ECCS 수격현상
- 원자로수조 공유 특성을 감안하여 CHRS 심사
 - 12개 원자로 모듈이 1개의 원자로수조를 공유
- CHRS의 장기냉각능력(GSI-191)
 - Linked with ECCS
 - NuScale adopts minimize debris design
 - Flow blockage due to debris may stop the natural circulation in ECCS



피동안전계통 관련 국내 규제지침 (1/2)

- 규제지침: **피동형 안전계통 설계 (KINS/RG-N07.12, '21.6)**
- 개발 배경
 - 국내외 피동형 안전계통의 활발한 도입(예: SMRs) 추세를 반영하여 피동형 안전계통 설계에 대한 규제지침이 필요성이 제기됨
- 적용범위
 - 중력, 유체의 밀도 차이 또는 압력 차이 등 자연현상을 구동력으로 하여 사고시 ①원자로 냉각재 보충 ②원자로심 잔열 제거 및 냉각 ③격납건물 내부 압력 감소 ④핵분열생성물 제거 등의 안전기능을 수행하는 피동형 안전계통의 설계에 적용
- 용어정의
 - ①피동형 기기 ②안전기능 ③피동형 계통 ④피동형 안전계통

피동안전계통 관련 국내 규제지침 (2/2)


- 세부지침

- (능동비안전계통) 피동형 안전계통 도입에 따른 설계 특성으로 인해 능동형 비안전계통이 안전기능의 일부 또는 전체를 수행하도록 설계할 경우, 선정된 비안전등급 계통은 높은 신뢰성과 이용성을 지녀야 함
- (안전정지 조건) 피동형 잔열제거계통 운전으로 도달 가능한 운전모드를 안전정지 상태로 정하고자 하는 경우, 해당 운전모드에서 충분한 시간동안 붕괴열을 포함한 잔열을 제거할 수 있으며 또한 원자로의 점검보수가 가능한 상온정지까지 원자로를 냉각할 수 있어야 함
- (역지밸브 단일고장 적용) 피동형 안전계통의 역지밸브는 시험자료 또는 운전경험 자료에 의해 작동성이 보증되는 경우를 제외하고는 단일고장기준을 적용해야 함
- (가동중시험) 피동형 안전계통을 작동하게 하는 구동력의 크기가 상대적으로 작으므로 부식, 이물질 등 운전조건 변화에 따른 영향에도 개별 기기들의 운전 가능성 및 성능이 유지됨을 확인할 수 있는 주기적 가동중 시험이 가능하도록 설계에 고려해야 함


- AP600/1000 피동안전계통 규제입장(SECY 문서)과 유사

피동안전계통 관련 국외 규제지침

- USNRC SECY

- AP600 표준설계 인허가('92) 시 사용된 피동안전계통 관련 규제결정 사항
- 주요 SECY 문서 

- Design-Specific Review
Standard-NuScale

- NuScale 표준설계 인허가 시 도입된 심사지침서 ('16)
- 표준심사지침서(NUREG-0800)를 NuScale 노형에 맞게 일부 수정하여 심사에 사용
- DSRS-BWXT(mPower)도 개발완료
- 주요 DSRS-NuScale 문서 

Report No.	Title	Date
SECY-93-083	"Policy and Technical Issues Associated with the Regulatory Treatment of Safety Systems in Passive Plant Designs"	N/A
SECY-93-087	"Policy, Technical ,and Licensing Issues Pertaining to Evolutionary and Advanced Light-Water Reactor (LWR) Designs,"	02-Apr-93
SECY-94-084	"Policy and Technical Issues Associated with the Regulatory Treatment of Non-Safety Systems in Passive Plant Designs,"	28-Mar-94
SECY-94-302	"Source Term - Related Technical and Licensing Issues Relating to Evolutionary and Passive Light-Water-Reactor Designs,"	19-Dec-94
SECY-95-132	"Policy and Technical Issues Associated with the Regulatory Treatment of Non-Safety Systems (RTNSS) in Passive Plant Designs (SECY-94-084),"	22-May-95
SECY-95-172	"Key Technical Issues Pertaining to the Westinghouse AP600 Standardized Passive Reactor Design,"	30-Jun-95
SECY-96-128	Policy And Key Technical Issues Pertaining to the Westinghouse Ap600 Standardized Passive Reactor Design	12-Jun-96
SECY-97-044	"Policy and Key Technical Issues Pertaining to the Westinghouse AP600 Standardized Passive Reactor Design,"	18-Feb-97

관련 안전규제 연구 활동

- 원자력 안전규제 검증기술 고도화 사업
 - 사업기간: '21~'26(6년)
 - **“안전성 강화 및 신형핵연료 규제검증을 위한 통합안전해석체계 개발 연구”**
 - ✓ 피동안전계통 성능/신뢰도 평가방법론 및 기술기준 개발('21~'23)
- 중소형원자로 안전규제 기반기술 개발 사업
 - 사업기간: '22~'28년(7년)
 - “경수형 SMR 인허가를 위한 국내 규제체계 개선(안) 개발 연구”
 - “경수형 SMR 소형/모듈화 설계특성 관련 규제기술개발 연구”
 - ✓ 규제관리대상 비안전계통(RTNSS) 및 공통원인고장 규제검증기술 개발('22~'24)
 - “i-SMR 주요 설계요건 분석 및 고유 규제검증기술개발 연구”
 - ✓ I-SMR 계획확정 후('24년~)

피동안전계통 규제지침(규제주안점) 개발 연구 (1/2)


• 연구 배경

- 최근 국내외에서 개발되고 있는 신형원자로 및 중소형원자로는 피동 안전계통을 폭넓게 채택하고 있음
- 현행 피동안전계통에 대한 국내 규제지침(KINS/RG-N07.12)은 AP600/AP1000 개발 시 수립된 내용 기반으로 수립
- 미국의 경우, 비교적 최근에 심사대상 노형에 맞는 심사지침이 개발되었으나 (DSRS-NuScale) 명시적인 피동안전계통에 대한 규제지침이 아닌 기존 SRP 형식을 따르고 있으며 일반적인 피동안전계통에 대한 규제지침으로 바로 사용하기에는 부적합
- 따라서 피동안전계통에 대한 국외의 최신 안전심사 방향(설계지침 포함)을 파악하여 이를 피동안전계통 안전심사에 활용할 수 있는 포괄적 규제지침을 개발하고자 함('21~'23)

피동안전계통 규제지침(규제주안점) 개발 연구 (2/2)

- 참조 대상 문서
 - US NRC SECY
 - EPRI URD (Utility Requirement Documents)
 - EUR (European Utilities Requirements)
 - OECD/NEA report
 - WENRA report
 - IRSN report
 - IAEA CRPs & **SMR Regulatory Forum**
 - **US NRC DSRS-NuScale (including SERs)**
 - **KINS/GR-486 ('12) 피동 열제거 신규설비의 안전성 평가기술 및 기술기준 개발**
 - KINS/RR-2101('20) 중소형원자로 심사기반 마련을 위한 기술현황분석보고서

1차년도('21) 연구 결과 (NSTAR-21NS21-83) (1/5)

- 최근까지 발행된 US NRC SECY를 검토한 결과, AP600/1000 당시에 제시된 규제입장 이외에 신규로 추가할 만한 내용은 확인되지 않음
- EPRI URD 또한 '12년도 시점 버전과 동일한 것으로 확인되어 신규로 추가할 만한 내용은 확인되지 않음
- EUR 검토 결과
 - 설계 시 피동안전계통에 대한 **공통원인고장의 발생 가능성을 고려하고 공통원인고장을 고려한 신뢰도 평가를 수행** 할 것
 - 피동안전계통의 **내진 특성**을 평가할 것
- IRSN Report 내용의 상당부분은 WENRA report에 포함
- IAEA CRPs는 참조할 만한 내용이 없음
- OECD/NEA, WENRA reports 및 국내규제지침 비교 검토 결과 

1차년도('21) 연구 결과 (NSTAR-21NS21-83) (2/5)

• 규제 경향 비교 분석표 (13항목)

번호	항목	OECD/NEA-WGRNR	WENRA-RHWG	KINS Regulatory Guide	추가 규제 주안점
1	단일고장기준적용	피동안전계통이라도 충분한 수준의 신뢰성을 입증할 수 없다면 단일고장기준을 적용해야 함 (2.2.1)		피동형 안전계통의 역지벨브는 시험자료 또는 운전경험 자료에 의해 작동성이 보증되는 경우를 제외하고는 단일고장 기준을 적용해야 함	해당없음 (KINS Regulatory Guide [1]에 이미 포함됨)
2	발전소 안정상태		발전소 최종 안전 상태에 대한 적절한 정의 및 도달 조항을 수립해야 함 (3.2.4-다)	피동형 잔열제거계통 운전으로 도달 가능한 운전모드를 안전정지 상태로 정하고자 하는 경우, 원자로규칙 제29조 만족 여부와 안전정지의 기술적 정당성을 제시할 것 지진을 포함한 내·외부 사고 발생 시에도 원자로를 정지한 후에 점검·보수가 가능한 상온정지 조건까지 냉각할 수 있음을 보일 것	해당없음 (KINS Regulatory Guide [1]에 이미 포함됨)
3	피동안전계통 성능입증 일반 고려 사항	피동안전계통 성능입증에는 컴퓨터 프로그램을 이용한 해석적 방법보다는 성능검증 실험 수행을 선호함 (2.2.2)	성능입증에 사용된 컴퓨터 프로그램의 적용범위를 확인하고 필요시 검증 시험을 수행할 것 (3.2.4-나)		피동안전계통 성능입증에 사용된 컴퓨터 프로그램의 적용 범위가 적절한 지 확인하고 필요시 검증 시험을 수행 (검증 시험 시 Reciprocal Influence 및 Scaling 효과를 고려할 것)
4	다수(다중계열) 피동안전계통 동시운전	해석적 방법 또는 실증 실험에 의해 다수(다중계열)의 피동안전계통 동시 운전의 영향을 평가 (2.2.3)			해석적 방법 또는 실증 실험에 의해 다수(다중계열)의 피동안전계통 동시 운전이 피동안전계통 안전기능 수행에 미치는 영향을 평가
5	피동안전계통과 능동계통 동시운전	해석적 방법 또는 실증 실험에 의해 피동안전계통과 능동안전계통의 동시 운전의 영향을 평가 (2.2.4)	능동계통 및 비안전계통이 피동안전계통의 안전기능 수행에 미치는 영향을 평가 (3.2.4-가)		해석적 방법 또는 실증 실험에 의해 피동안전계통과 능동계통(비안전계통) 동시 운전이 피동안전계통의 안전기능 수행에 미치는 영향을 평가
6	신뢰도 평가	피동안전계통의 고유한 특성을 고려하여 적절한 신뢰도 모델을 사용할 것 (2.2.5)	신뢰도 평가 시 피동안전계통 기능상실을 고려하고 도출된 근본원인을 신뢰도 모델에 반영할 것 (3.2.7)		피동안전계통 신뢰도 평가 시 기능상실 (Functional Failure)을 고려하고 도출된 고장 근본 원인 (Root Causes)을 신뢰도 모델에 반영할 것
7	피동안전계통 오작동 영향 평가	피동안전계통의 오작동 및 도되지 않는 작동의 영향을 평가 (2.2.6)	의도되지 않은 피동안전계통 작동의 영향을 평가 (3.2.2)		피동안전계통의 오작동 및 의도되지 않는 작동의 영향을 평가할 것

번호	항목	OECD/NEA-WGRNR	WENRA-RHWG	KINS Regulatory Guide	추가 규제 주안점
8	사용전/운전중 시험	사용전/운전중 시험이 수행되어야 하며 특히 피동안전계통에 포함된 능동기기에 대해서는 사용전/운전중 시험이 수행되어야 함 (2.2.7)	적절한 사용전 및 운전중 시험 계획이 수립되어야 함 (3.2.4-라)	원자로규칙 제41조에 따라 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기는 수명기간 동안 기능수행 능력 및 작동성을 보장하기 위해 시험, 감시, 검사 또는 보수가 가능해야 함.	해당없음 (KINS Regulatory Guide [1]에 이미 포함됨)
9	피동안전계통 구동성 평가		피동안전계통의 구동성을 종합적인 분석 및 관련 기기의 운전 가능성도 평가를 통해 보증할 것 (특히 역지벨브) (3.2.1)		피동안전계통의 구동성을 종합적인 분석 및 관련 기기 (역지벨브)의 운전 가능성도 평가 등을 통해 보증할 것
10	약한 구동력을 지닌 피동안전계통 성능 입증에 대한 고려 사항		구동력관점에서 피동안전계통의 성능 또는 고장에 영향을 줄 수 있는 현상 및 인자에 대한 평가가 필요 (비응축성 가스, 계통 누설) 환경영향 고려(대기온도) 여유도개념 적용 (절벽효과 방지, 경년열화에 의한 인자 변화) 피동안전계통의 동적거동을 고려한 성능입증 피동안전계통 배열형상이 격납건물 격리 기능에 미치는 영향 (3.2.3)		구동력관점에서 피동안전계통의 성능 또는 고장에 영향을 미치는 현상 및 인자에 대한 평가 (비응축성 가스, 계통 누설) 환경영향 평가(대기온도) 절벽효과 방지를 위한 여유도개념 적용 (경년열화에 의한 인자 변화) 동적거동을 고려한 성능입증 계통 배열형상이 격납건물 격리 기능에 미치는 영향 평가
11	내·외부 사고 발생 시의 피동안전계통 고려 사항		내·외부 사고로 피동안전계통이 작동되는 환경조건이 (대기 열침원, 온도·화재, 배관형상-지진) 변화해도 본래의 안전기능을 수행할 수 있어야 함		내·외부 사고로 피동안전계통이 작동되는 환경조건이 (대기 열침원, 온도·화재, 배관형상-지진) 변화해도 본래의 안전기능을 수행할 수 있어야 함
12	인적요소에 대한 고려 사항		인적실수에 대한 피동안전계통 민감도 평가 (설계, 건설, 운전) 운전원 개입의 잠재적 이득 또는 필요성에 대한 평가 및 성능확인 장치 설치 (3.2.6)		인적실수에 대한 피동안전계통 민감도를 계통의 설계, 건설, 운전단계에서부터 고려 운전원 개입의 잠재적 이득 또는 필요성에 대한 평가 및 피동안전계통 성능확인 장치 설치
	운전경험 활용		사용전 및 운전중 시험 결과를 활용하여 운전경험을 반영		사용전 및 운전중 시험 결과를 활용하여 운전경험을 반영

1차년도('21) 연구 결과 (NSTAR-21NS21-83) (3/5)

• 추가 규제 주안점에 대한 평가 방안 (안전해석 관점) 도출

- 열수력 계통 해석코드에 포함된 Model 및 Correlation의 적용범위가 대상 피동안전계통을 해석하는 데 적절한가? (대상 피동안전계통에서 발생가능한 열수력현상에 대한 PIRT가 작성되고 이를 활용하여 해석코드에 대한 평가가 수행되었는가?)
- 피동안전계통에 존재할 가능성이 있는 비응축성가스 및 계통 누설의 영향 등을 포함하여 안전해석을 수행하였는가?
- 대기 열침원의 영향(온도)을 고려하여 안전해석을 수행하였는가?
- 오염에 의한 배관 직경 감소 등과 같은 경년열화에 의한 영향을 고려하여 안전해석을 수행하였는가?
- 운전 시간이 경과할수록 피동안전계통의 성능이 저하되는 것을 감안하며 안전해석은 충분히 긴 시간에 대해서 수행하여 피동안전계통 성능에 대한 결론을 도출하였는가?
- 피동안전계통 성능 평가에 포함된 불확실도로 인해 발생할 수 있는 절벽효과를 방지하기 위해 충분한 정도의 여유도가 있음이 안전해석을 통해 입증되었는가?
- 피동안전계통의 오작동 및 의도되지 않은 작동에 대한 안전해석이 수행되어 그 영향이 평가되었는가?

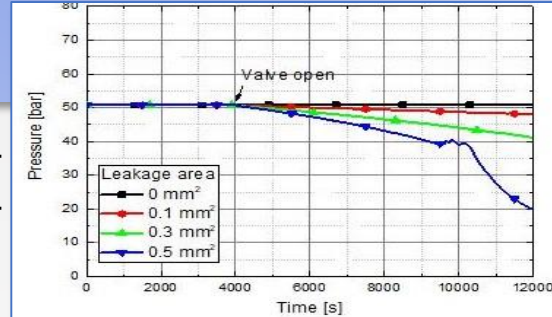
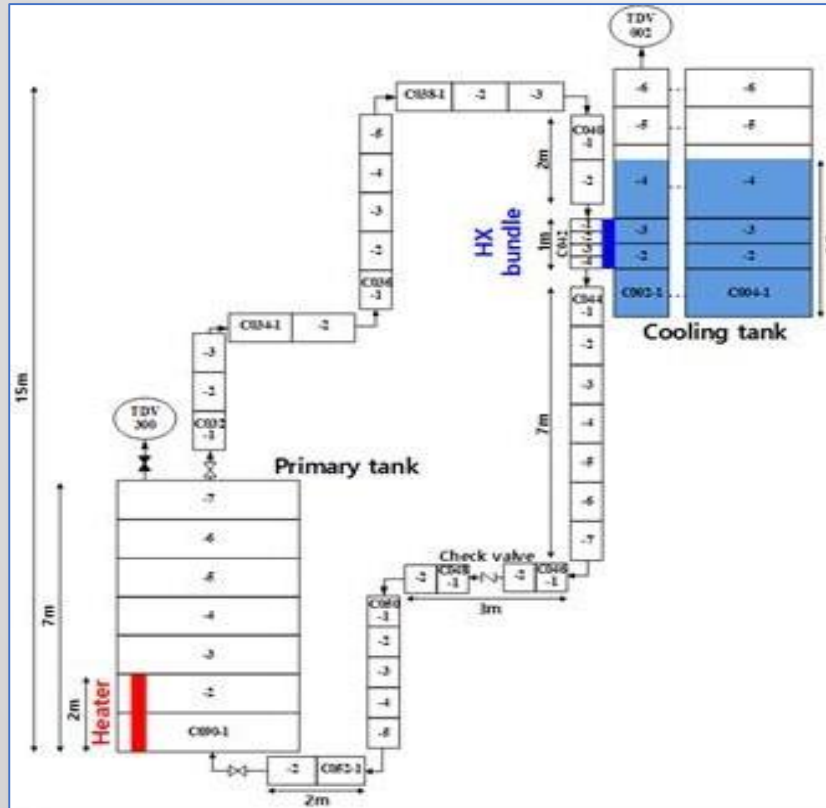
1차년도('21) 연구 결과 (NSTAR-21NS21-83) (4/5)

• 추가 규제 주안점에 대한 평가 방안 (안전해석 관점) 도출

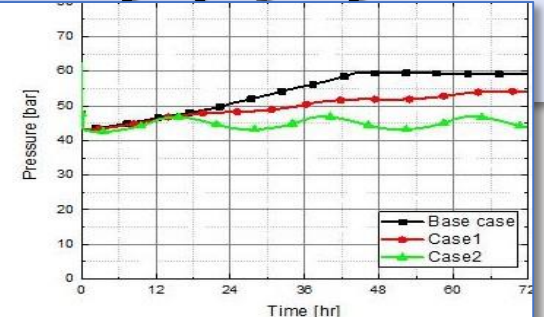
- 피동안전계통의 약한 구동력을 감안하여 적절한 역지밸브 모델이 안전해석에 사용되었는가?
- 사고후 예상되는 가장 열악한 대기열침원 조건(온도, 습도 및 입자농도)을 가정하여 안전해석이 수행되었는가?
- 화재로 인해 피동안전계통 순환배관의 온도분포가 자연순환을 저해하는 가장 열악한 조건이 되었을 때를 가정하여 안전해석이 수행되었는가?
- 지진으로 인해 피동안전계통 순환배관의 형상이 변형되어 자연순환을 저해하는 가장 열악한 조건이 되었을 때를 가정하여 안전해석이 수행되었는가?
- 기능상실을 고려하여 도출된 고장 근본원인을 피동안전계통 신뢰도 모델에 반영하였는가?
- 다수(다중계열) 피동안전계통 동시 운전에 대한 안전해석이 수행되어 그 영향이 평가되었는가?
- 피동안전계통과 능동계통(비안전계통) 동시 운전에 대한 안전해석이 수행되어 그 영향이 평가되었는가?
- 운전원 조치의 영향을 피동안전계통에 대한 안전해석 시에 평가하였는가?

1차년도('21) 연구 결과 (NSTAR-21NS22-360) (5/5)

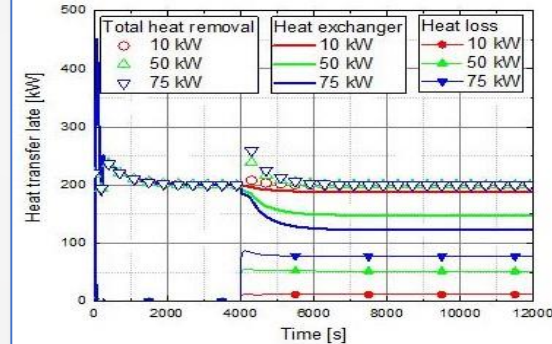
- 단순화된 분석 모델을 사용하여 추가 규제 주안점에 대한 평가계산을 수행하고 추가 규제 주안점이 안전해석에 미치는 영향을 파악



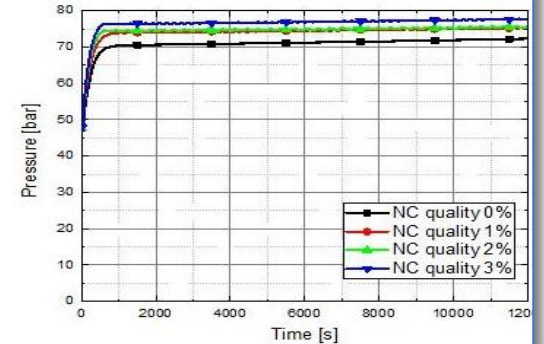
(a) 작동유체누설 영향 평가



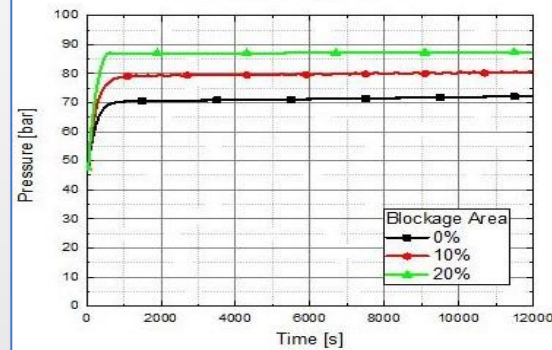
(b) 대기온도 영향 평가



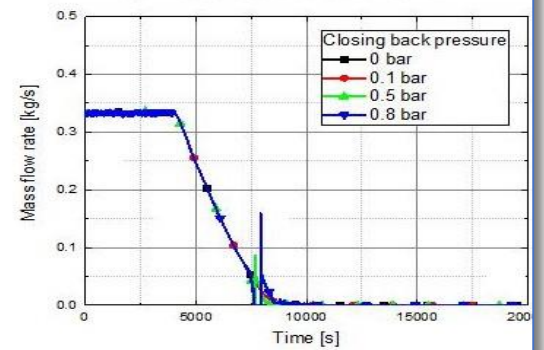
(c) 열손실 영향 평가



(d) 비음축성기체 영향 평가



(e) 경년열화 영향 평가



(f) 역지밸브 영향 평가

2차년도('22) 연구 현황:규제지침(규제 주안점) 개발 관련

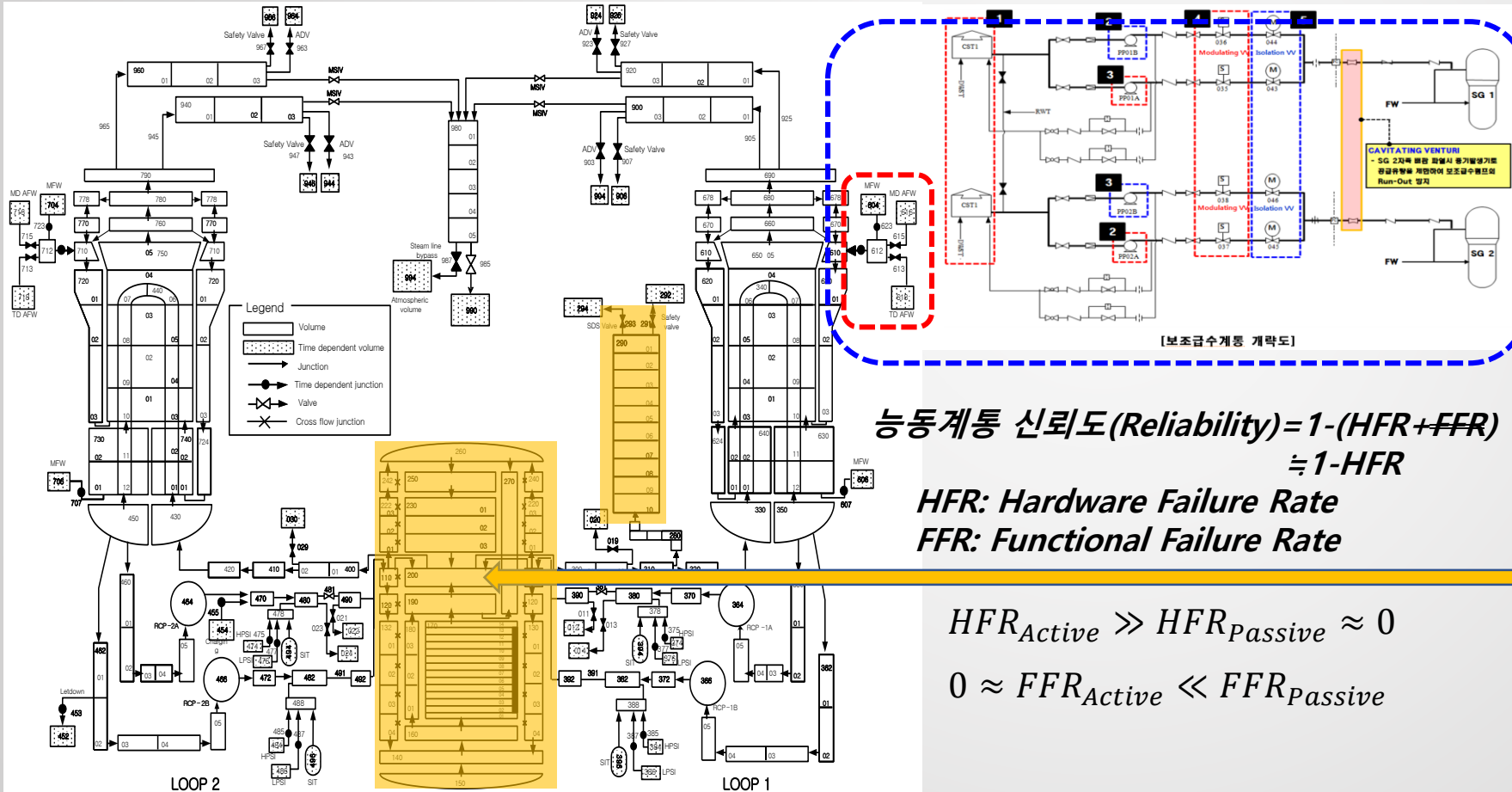
- IAEA Regulatory Forum 보고서 검토('22)
- US NRC DSRS-NuScale (including SERs) 검토('22)
- KINS/GR-486 ('12) “피동 열제거 신규설비의 안전성 평가기술 및 기술기준 개발” 재검토('22)
- 현재까지 추가로 확인된 추가 규제주안점 관련 사항
 - 피동안전계통 기동 시 초기 **운전수두 확보** 방안
 - 피동안전계통의 **장기냉각성능입증 (보론석출, GSI-191 현안)**
 - 피동안전계통 **수격현상** 평가
 - 피동안전계통 **유동 불안정성** 평가
- 1/2차년도 연구결과+국내 기개발 규제기준 등을 통합하여 피동안전계통 안전심사에 활용할 수 있는 상세 규제지침(규제 주안점) 개발 완료 예정('23)

피동안전계통 도입에 따른 도전 사항 (1/4)

- **피동안전계통은 자연대류와 같은 작은 크기의 구동력에 의지하므로 다양한 요인에 의해 작동이 영향 받을 수 있음**
 - 작동에 관여하는 모든 물리현상에 대한 높은 수준의 이해가 필요
 - 개별 물리현상에 영향을 미치는 주요 요인에 대한 명확한 이해가 요구
 - 신뢰할 만한 해석결과를 도출할 수 있는 해석코드가 필요 (구동력 자체가 해석 대상)
 - **각각의 피동안전계통에 대한 PIRT 수행 및 관련 주요 열수력 현상에 대한 해석코드의 검증능력 (불확실도) 확인 필요**
- **피동안전계통의 작은 구동력으로 인하여 피동안전계통이 설치된 지역의 대기조건(예:사고 후 상승하는 격납건물온도), 외부사건 (기후변화, 지진 등) 및 다양한 요인 (계통누설, 경년열화, 비응축성 개스, 역지밸브 작동성, 열손실 등)에 의해서 성능이 영향받을 수 있음**
 - 피동안전계통 성능입증은 동작이 수행되는 전기간에 걸쳐서 수행
 - 발전소 수명기간에 예상되는 기후변화 등도 성능 입증 시 반영이 필요
- **기존 능동안전계통에 적용된 안전해석 방법의 변경이 필요**
- **피동안전계통의 신뢰도(기능고장률;Functional Failure Rate)가 확률론적(PSA) 및 결정론적(안전해석) 평가에서 매우 중요하게 대두됨**
 - **Functional Failure Rate of Passive Safety System < Hardware Failure Rate of Active Safety System**

피동안전계통 도입에 따른 도전 사항 (2/4)

OPR1000 with Active AFWS



$$\text{능동계통 신뢰도 (Reliability)} = 1 - (\text{HFR} + \text{FFR}) \approx 1 - \text{HFR}$$

HFR: Hardware Failure Rate
FFR: Functional Failure Rate

$$\text{HFR}_{\text{Active}} \gg \text{HFR}_{\text{Passive}} \approx 0$$

$$0 \approx \text{FFR}_{\text{Active}} \ll \text{FFR}_{\text{Passive}}$$

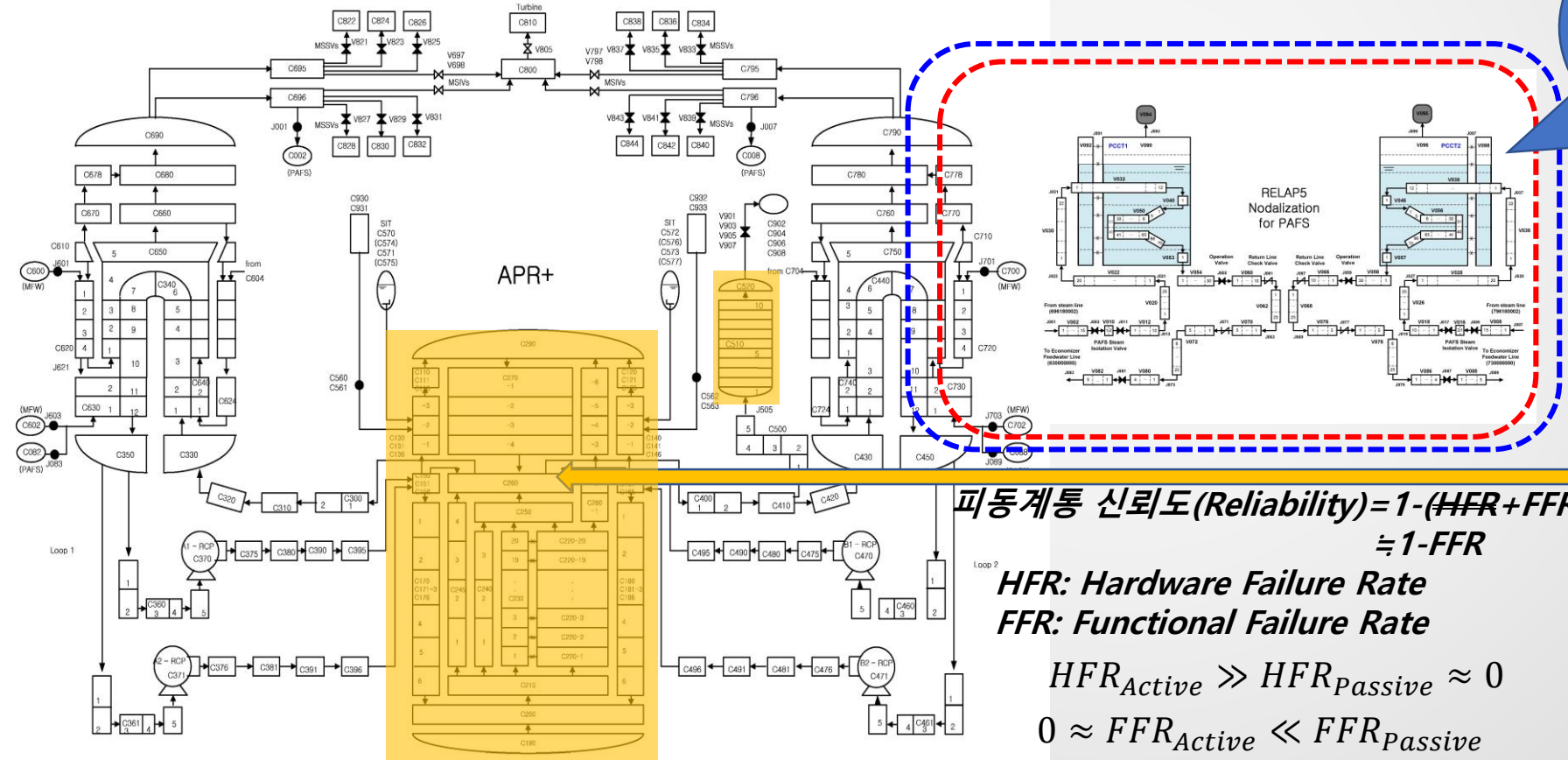
Table 15.6.6-1: Initial Conditions and Input Parameters for the Inadvertent Operation of ECCS Event

Model Parameter	Applicant's Assumption	Basis
Initial power level	Biased high	Maximize core power to minimize MCHFR
Initial RCS average temperature	Biased high	Sensitivity analysis
RCS flow	Biased low	Sensitivity analysis
PZR pressure	Biased low	Sensitivity analysis
PZR level	Biased high	Sensitivity analysis
Reactivity feedback coefficients	Minimal	TR-0516-49422
Kinetics parameters	Beginning of cycle + additional biasing	TR-0516-49422
Scram characteristics	Maximum time delay, bounding scram worth with most reactive rod stuck, bounding control rod drop rate	Minimize reactivity insertion for limiting MCHFR
Axial power distribution	Bounding middle peaked shape	Sensitivity analysis
Radial power distribution	Changed as part of LOCA EM changes to analyze this event	TR-0516-49422
Limiting ECCS valve	RVV	Sensitivity analysis

피동안전계통 도입에 따른 도전 사항 (3/4)

APR+ with Passive AFWS

대기온도, 경년열화, 누설률, 열손실, 역지밸브 작동성, 코드불확실도, 화재 및 지진영향 등



피동계통 신뢰도(Reliability) = 1 - (HFR + FFR)

$$\approx 1 - FFR$$

HFR: Hardware Failure Rate

FFR: Functional Failure Rate

$$HFR_{Active} \gg HFR_{Passive} \approx 0$$

$$0 \approx FFR_{Active} \ll FFR_{Passive}$$

Table 15.6.6-1: Initial Conditions and Input Parameters for the Inadvertent Operation of ECCS Event

Model Parameter	Applicant's Assumption	Basis
Initial power level	Biased high	Maximize core power to minimize MCHFR
Initial RCS average temperature	Biased high	Sensitivity analysis
RCS flow	Biased low	Sensitivity analysis
PZR pressure	Biased low	Sensitivity analysis
PZR level	Biased high	Sensitivity analysis
Reactivity feedback coefficients	Minimal	TR-0516-49422
Kinetics parameters	Beginning of cycle + additional biasing	TR-0516-49422
Scram characteristics	Maximum time delay, bounding scram worth with most reactive rod stuck, bounding control rod drop rate	Minimize reactivity insertion for limiting MCHFR
Axial power distribution	Bounding middle peaked shape	Sensitivity analysis
Radial power distribution	Changed as part of LOCA EM changes to analyze this event	TR-0516-49422
Limiting ECCS valve	RVV	Sensitivity analysis

피동안전계통 도입에 따른 도전 사항 (4/4)

- 현재까지 연구결과, 다수의 피동안전계통에 대한 규제 주안점이 추가로 파악되었으며 현재 진행 중인 연구에 따라 규제 주안점은 증가할 것으로 예상됨
 - 비응축성개스, 계통누설, 수격/유동의 불안정성, 초기 기동 시 운전수두 확보
 - 장기냉각문제(Boron석출, GSI-191), 대기열침원의 영향(온도, 습도, 입자농도), 경년 열화 의한 열전달 감소 및 차압변화, 역지밸브 수리모델, 화재 및 지진으로 인한 영향, 계통해석코드 모델 불확실도 등
 - 다중계열 운전 영향, 비안전계통 운전 영향, 계통 오작동, 운전원 조치 등
 - 계통 이용불능도, 공통원인고장 신뢰도 반영 등
- 피동안전계통에 대해서 도출된 규제 주안점 (열수력코드 해석과 관련된)이 다수이므로 능동안전계통에 대한 안전해석과 같이 민감도 해석을 통해 보수적인 안전해석 결과를 담보하기에는 한계가 있음
- 도출된 규제 주안점을 피동안전계통에 대한 성능평가(안전해석) 및 신뢰도 평가에 체계적으로 반영할 수 있는 방안이 필요

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 (1/2)

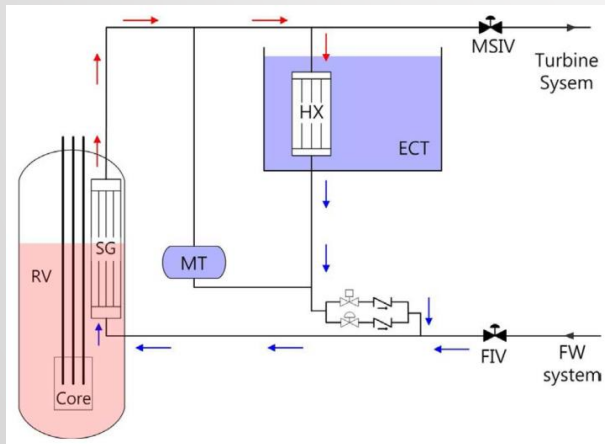
- REPAS (Reliability Evaluation of Passive Safety Systems)
 - 피동안전계통(PSS)의 기능고장률(FFR)을 정량화하기 위해 개발된 여러가지 방법 중의 하나 (Ricotti et al. 2002)
 - PSS 신뢰도 정의: 주어진 임무시간 $[0, T]$ 동안 PSS가 정의된 기능을 수행할 확률
 - PSS 성능지표 설정: 예) 누적 열제거량 $[0, T]$
 - **PSS 분석 (Mission, Phenomenology, Link with Main System) 및 PSS 주요 매개 변수 (Design Parameters+Critical Parameters) 선정**
 - ✓ Expert Judgment
 - PSS 고장기준 (Failure Criteria) 선정: 예) 평균 열제거율이 공칭 열제거율의 80% 이하
 - 최적 열수력해석 코드 모델링 (BE Code Modeling)
 - 기준사례(Nominal Cases)에 대한 BE Code 해석
 - 주요 매개 변수에 대한 확률분포 설정
 - 매개 변수 추출을 통하여 다수의 매개 변수 확률집합 (Probabilistic Sets) 구성 및 최적 열수력해석 코드를 이용한 Probabilistic Sets 해석
 - PSS 고장기준에 따른 각각의 Probabilistic Sets의 성공, 실패를 판정
 - PSS 신뢰도 ($=1-FFR$)을 정량화

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 (2/2)

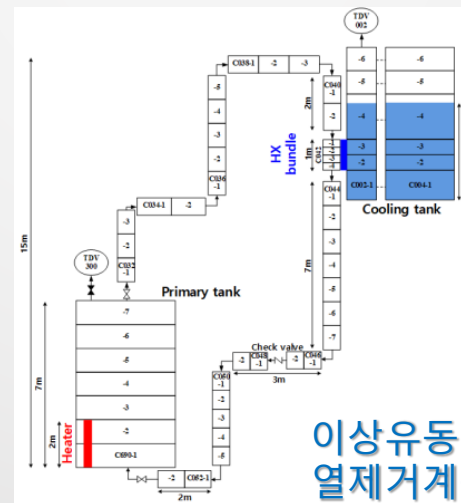
- 주요 매개 변수
 - **Design Parameters:** Those Parameters coming from the connection between the Passive System and the Complete System
 - ✓ Example: Pressures, Levels etc.
 - **Critical Parameters:** Passive System Parameters which identify the Passive System behavior, taken as indicators **for the system failure causes or joint causes**
 - ✓ Example: Non-condensable gas
- 현재까지 연구를 통해 밝혀진 **규제 주안점 (열수력코드 해석과 관계된)은 REPAS 방법의 Critical Parameters로 간주할 수 있음**
 - 비응축성가스, 계통누설, 초기 기동 시 운전수두 확보, 대기열침원의 영향(온도, 습도, 입자농도), 경년열화 의한 열전달 감소 및 차압변화, 역지밸브 수리모델, 화재 및 지진으로 인한 영향, 계통해석코드 모델 불확실도 등
- **Critical Parameters를 확장한 REPAS 방법을 피동안전계통 성능 및 신뢰도 평가 방안으로 채택**

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (1/10)

- 이상유동 열제거계통
 - PRHRS 예시 분석모델
 - ✓ PAFS 및 PRHRS 형상정보 고려, SG 단순화, MT (X)
 - ✓ SG 열출력: 선형 감소 / 냉각탱크 초기온도: 상온
 - ✓ 증기발생기 수위 3.6 m 도달 시 기동밸브 개방
 - ✓ 열교환기 응축을 통한 자연순환 냉각으로 일차계통 감압
 - 성능지표
 - ✓ 열교환기 평균 열제거율, 누적 열제거량, 일차계통 압력



PRHRS



이상유동 열제거계통 노딩

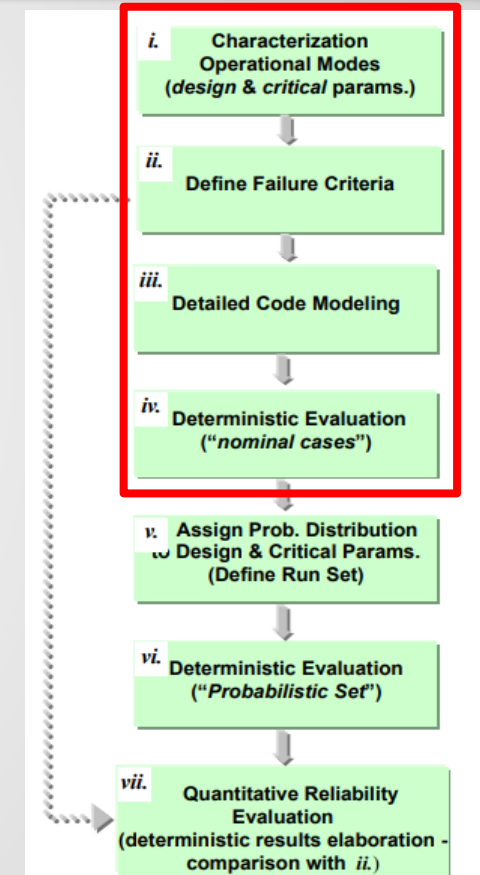
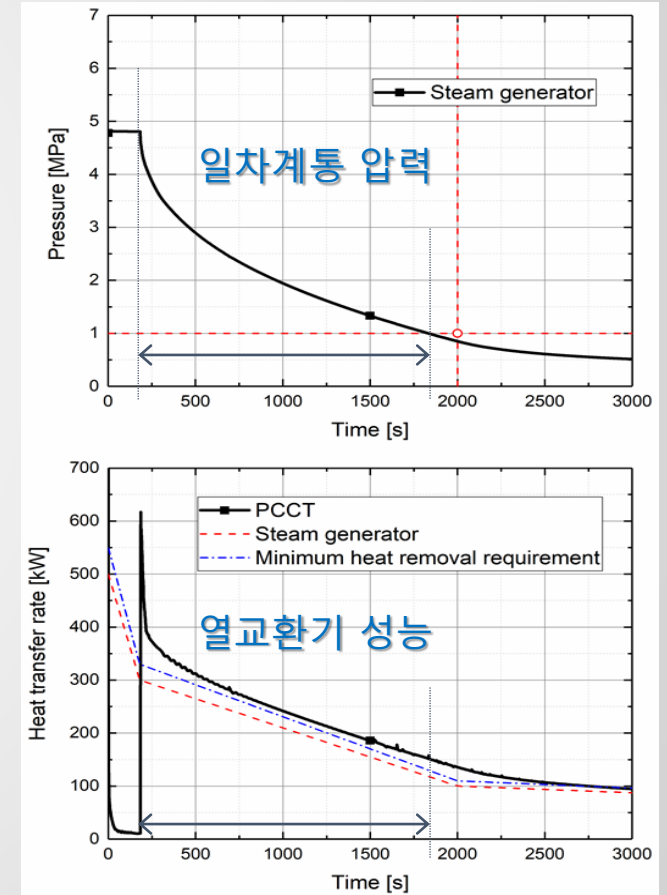


Fig. 1 - REPAS methodology roadmap.

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (2/10)

- PRHRS 기준입력모델 해석결과
 - 185초: 열교환기 작동
 - 1834초: 증기발생기 압력 1 MPa 도달
 - 열교환기 작동 후 1 MPa 도달까지 열제거량
 - ✓ 열교환기 열제거량 (Q_{PCHX}): 412 MJ
 - 열원 대비 ~1.2배의 성능을 보여줌.
 - 증기발생기 발열량 (Q_{SG}): 345 MJ
 - 감압을 위한 현열 제거 요구량 (Q_{DP}): 37.6 MJ
- Failure Criterion (FC, PRHRS 실패기준)
 - FC_1) SG 감압시간
 - ✓ FC_1 = SG 압력 10 bar 도달시간 ≥ 2000 s
 - FC_2) 열교환기 누적 열제거량 (@ 2000 s)
 - ✓ FC_2 = $Q_{PCHX} / (Q_{SG} + Q_{DP}) \leq 1.05$



2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (3/10)

- 주요 변수 선정 및 확률분포 할당
 - 5개 매개변수 선정
 - ✓ 설계변수 (Design Parameters): SG 초기압력, 수조 초기온도
 - ✓ 성능변수 (Critical Parameters): 열손실, 유동면적, 열전달모델 불확실도
 - 변수 범위 및 분포: 임의 산정

변수	단위	기호	기준 값	변수	
증기발생기 초기 압력	MPa	P	4.78	5.78	6.78
	발생확률		0.85	0.1	0.05
냉각수조 초기온도	℃	T	25	20	30
	발생확률		0.5	0.25	0.25
배관 열손실 (열전달계수)	W/m ² K	HTC	2.0	10.0	20.0
	발생확률		0.7	0.2	0.1
유동면적 (경년열화)	%	A	100 (0.002027 m ²)	95	90
	발생확률		0.9	0.07	0.03
열전달모델 불확실도	%	U	0.0	-10.0	-20.0
	발생확률		0.8	0.13	0.07

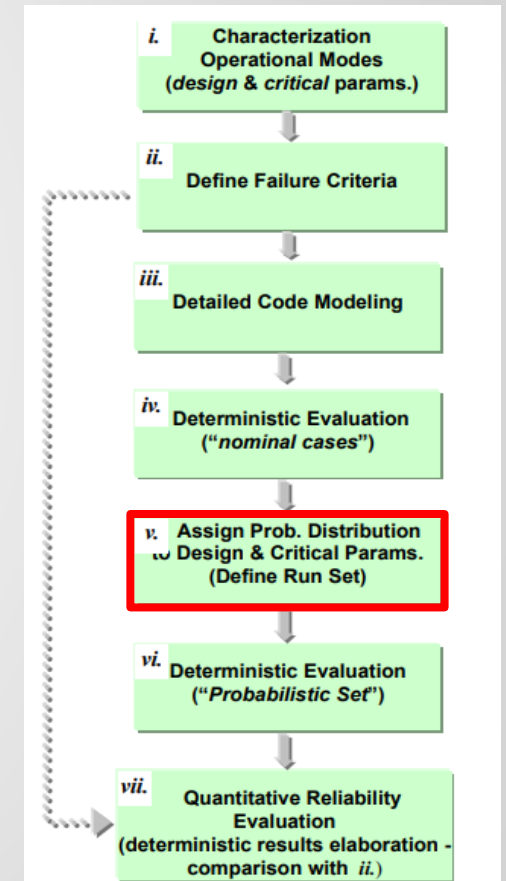
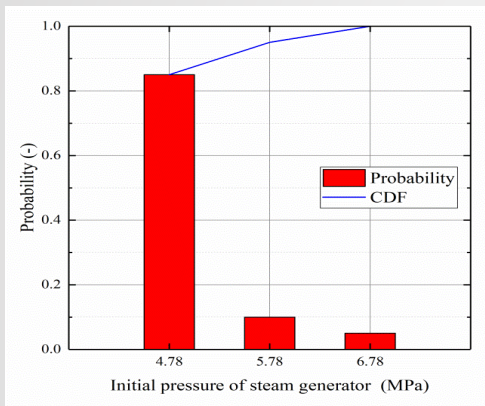


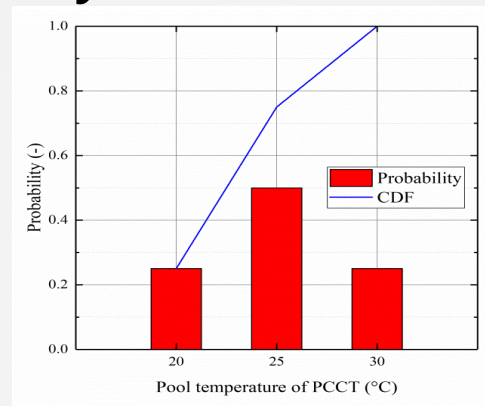
Fig. 1 – REPAS methodology roadmap.

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (4/10)

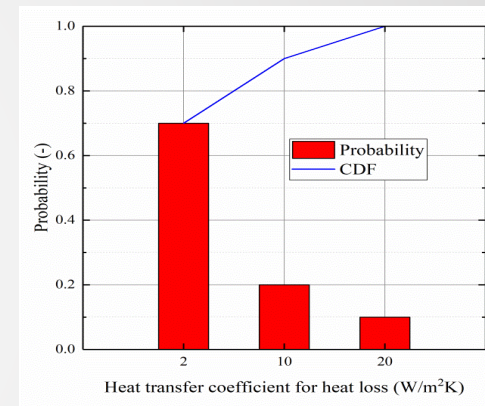
- 주요 변수 PDF (Probability Distribution Function)



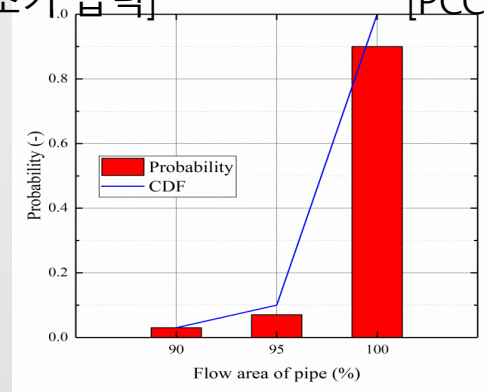
[증기발생기 초기 압력]



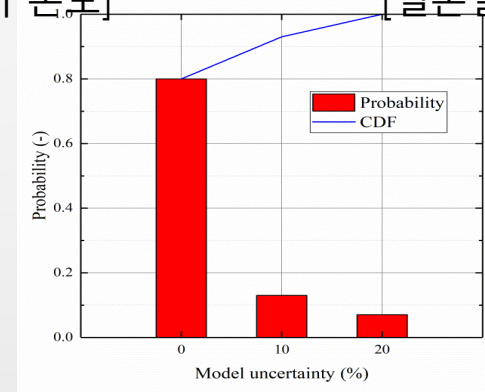
[PCCT 초기 온도]



[열손실(열전달계수)]



[유동면적(경년열화)]



[모델 불확실도]

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (5/10)

- Probabilistic Set 결정 (1/2)
 - 개별 영향 평가 (평가자 선정, deterministic configuration): 7개 Case + 기준 Case

Run No.	초기 압력 (MPa)	초기 온도 (°C)	열손실계수 (W/m²K)	유동면적 (%)	모델 불확실도 (%)	발생확률	Note
Run_00	47.8	25	2	100	0	2.142.E-01	기준입력
Run_01	67.8	25	2	100	0	1.260.E-02	SG 압력 영향
Run_02	47.8	40	2	100	0	1.071.E-01	PCCT 온도 영향
Run_03	47.8	25	20	100	0	3.060.E-02	열손실 최대
Run_04	47.8	25	2	90	0	7.140.E-03	유동면적 최소
Run_05	47.8	25	2	100	-20	1.874.E-02	열전달 모델 불확실도 최대
Run_06	67.8	40	20	90	-20	2.625.E-06	보수적 조건
Run_07	47.8	15	2	100	0	1.071.E-01	최대 열전달 조건

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (6/10)

- Probabilistic Set 결정 (2/2)
 - 복합 영향 평가 (무작위 추출, probabilistic configuration): 16개 Case

Run No.	초기 압력 (MPa)	초기 온도 (°C)	열전달계수 (W/m²K)	유동면적 (%)	모델 불확실도 (%)	발생확률
Run_11	47.8	40	10	90	-20	8.925.E-05
Run_12	57.8	15	20	100	-10	2.925.E-04
Run_13	47.8	40	20	90	0	5.100.E-04
Run_14	47.8	40	10	90	0	1.020.E-03
Run_15	67.8	15	20	90	0	3.000.E-05
Run_16	57.8	25	20	90	-10	1.950.E-05
Run_17	67.8	40	2	90	-20	1.838.E-05
Run_18	57.8	25	2	95	-10	3.185.E-04
Run_19	57.8	25	20	100	0	3.600.E-03
Run_20	47.8	40	2	95	-10	1.354.E-03
Run_21	57.8	25	2	100	-10	4.095.E-03
Run_22	57.8	40	10	100	0	3.600.E-03
Run_23	57.8	25	2	90	0	8.400.E-04
Run_24	67.8	25	10	95	-20	2.450.E-05
Run_25	67.8	40	2	90	-10	3.413.E-05
Run_26	47.8	15	2	95	-20	7.289.E-04

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (7/10)

- 신뢰도 평가결과 (FC_1: 감압시간)
 - 예시분석 결과: 0.948

Run No.	FC_1 (sec) (감압시간)	AR	발생확률	누적확률	정규화
Run_19	1602	Y	3.60.E-03	3.60.E-03	6.99.E-03
Run_03	1610	Y	3.06.E-02	3.42.E-02	6.64.E-02
Run_15	1616	Y	3.00.E-05	3.42.E-02	6.64.E-02
Run_13	1734	Y	5.10.E-04	3.47.E-02	6.74.E-02
Run_16	1816	Y	1.95.E-05	3.48.E-02	6.74.E-02
Run_23	1820	Y	8.40.E-04	3.56.E-02	6.91.E-02
Run_01	1826	Y	1.26.E-02	4.82.E-02	9.35.E-02
Run_04	1828	Y	7.14.E-03	5.53.E-02	1.07.E-01
Run_12	1830	Y	2.93.E-04	5.56.E-02	1.08.E-01
Run_00	1834	Y	2.14.E-01	2.70.E-01	5.24.E-01
Run_22	1846	Y	3.60.E-03	2.73.E-01	5.31.E-01
Run_07	1848	Y	1.07.E-01	3.81.E-01	7.38.E-01
Run_14	1850	Y	1.02.E-03	3.82.E-01	7.40.E-01
Run_02	1952	Y	1.07.E-01	4.89.E-01	9.48.E-01
Run_18	2036	N	3.19.E-04	4.89.E-01	9.49.E-01
Run_21	2038	N	4.10.E-03	4.93.E-01	9.57.E-01
Run_06	2152	N	2.63.E-06	4.93.E-01	9.57.E-01
Run_25	2164	N	3.41.E-05	4.93.E-01	9.57.E-01
Run_20	2180	N	1.35.E-03	4.94.E-01	9.59.E-01
Run_20	2180	N	1.35.E-03	4.96.E-01	9.62.E-01
Run_11	2344	N	8.93.E-05	4.96.E-01	9.62.E-01
Run_05	2352	N	1.87.E-02	5.15.E-01	9.99.E-01
Run_26	2366	N	7.29.E-04	5.15.E-01	1.00.E+00
Run_17	2512	N	1.84.E-05	5.15.E-01	1.00.E+00

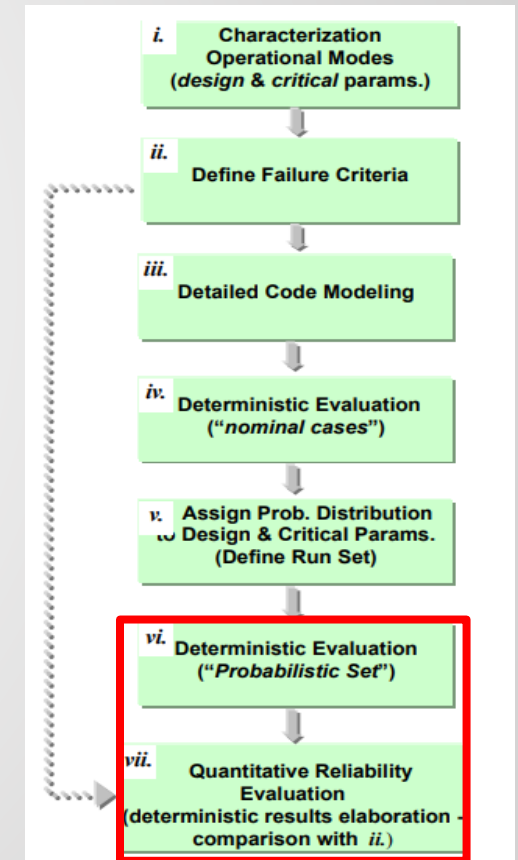
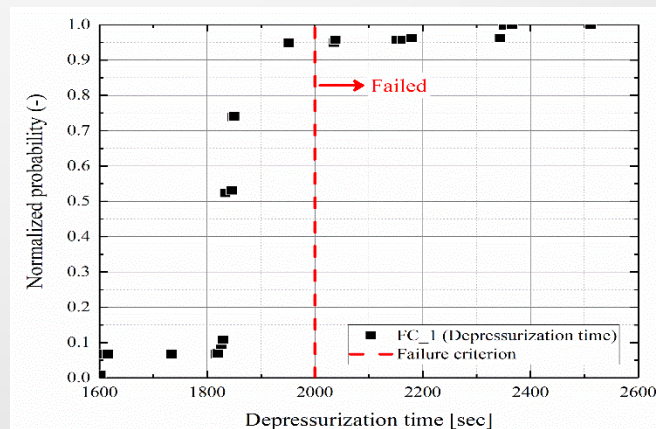
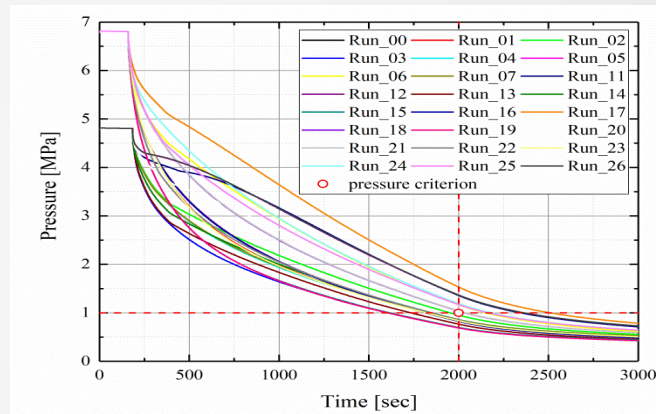


Fig. 1 – REPAS methodology roadmap.

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (8/10)

- 신뢰도 평가결과 (FC_2: 열제거율)
 - 예시분석 결과: 0.930

Run No.	FC_2 (제거율)	AR	발생확률	누적확률	정규화
Run_00	1.200	Y	2.14.E-01	2.14.E-01	4.17.E-01
Run_01	1.103	Y	1.26.E-02	2.27.E-01	4.41.E-01
Run_23	1.101	Y	8.40.E-04	2.28.E-01	4.43.E-01
Run_21	1.093	Y	4.10.E-03	2.32.E-01	4.51.E-01
Run_18	1.093	Y	3.19.E-04	2.32.E-01	4.51.E-01
Run_25	1.087	Y	3.41.E-05	2.32.E-01	4.51.E-01
Run_07	1.078	Y	1.07.E-01	3.39.E-01	6.60.E-01
Run_04	1.077	Y	7.14.E-03	3.46.E-01	6.74.E-01
Run_02	1.075	Y	1.07.E-01	4.53.E-01	8.82.E-01
Run_17	1.074	Y	1.84.E-05	4.53.E-01	8.82.E-01
Run_20	1.063	Y	1.35.E-03	4.55.E-01	8.85.E-01
Run_22	1.059	Y	3.60.E-03	4.58.E-01	8.92.E-01
Run_05	1.057	Y	1.87.E-02	4.77.E-01	9.28.E-01
Run_26	1.056	Y	7.29.E-04	4.78.E-01	9.30.E-01
Run_24	1.040	N	2.45.E-05	4.78.E-01	9.30.E-01
Run_14	1.031	N	1.02.E-03	4.79.E-01	9.32.E-01
Run_19	1.017	N	3.60.E-03	4.83.E-01	9.39.E-01
Run_15	1.014	N	3.00.E-05	4.83.E-01	9.39.E-01
Run_11	1.006	N	8.93.E-05	4.83.E-01	9.39.E-01
Run_12	1.003	N	2.93.E-04	4.83.E-01	9.39.E-01
Run_16	1.003	N	1.95.E-05	4.83.E-01	9.39.E-01
Run_03	0.991	N	3.06.E-02	5.14.E-01	9.99.E-01
Run_13	0.983	N	5.10.E-04	5.14.E-01	1.00.E+00
Run_06	0.979	N	2.63.E-06	5.14.E-01	1.00.E+00

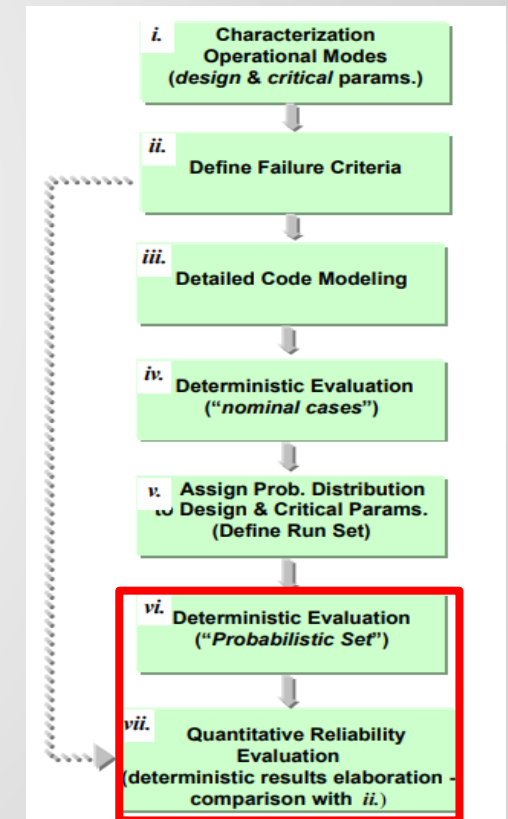
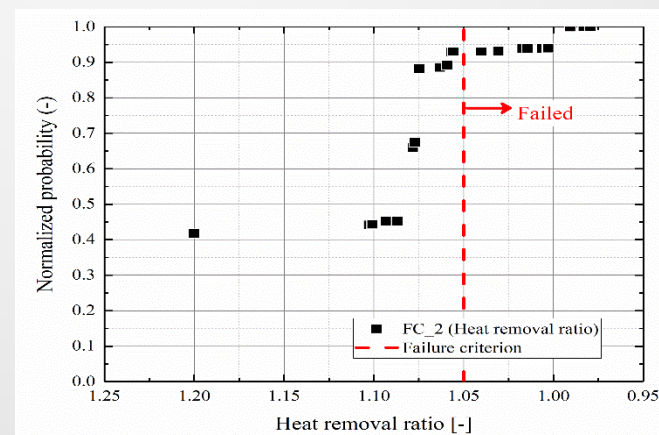
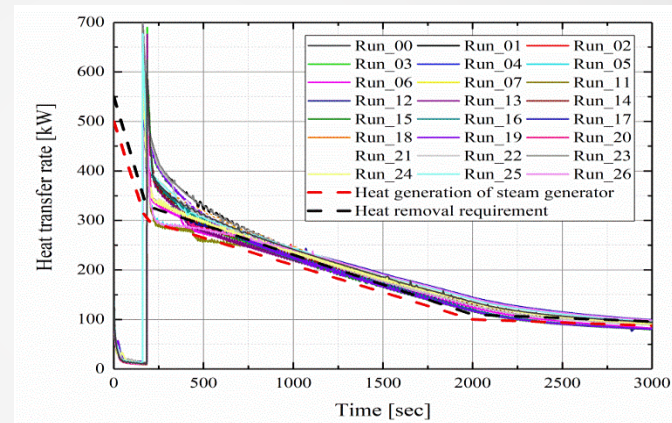


Fig. 1 – REPAS methodology roadmap.

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (9/10)

- 신뢰도 종합 평가결과
 - 종합적 성공 여부 판단
 - ✓ 모든 FC가 성공일 경우 종합 성공
 - 종합 신뢰도: P_y/P_{tot}
 - ✓ P_y : FC를 모두 만족하는 조건의 발생확률 합계 = 0.4526
 - ✓ P_{tot} : 해석이 수행된 모든 조건의 발생확률 합계 ($P_Y + P_N$) = 0.5141
 - PRHRS 예시분석모델의
종합 신뢰도 (예시평가): 0.880

Run No.	FC_1 (sec) (감압시간)		FC_2 (%) (열 제거율)		AR	발생확률	누적확률	정규화
Run_00	1834	Y	1.200	Y	Y	2.14.E-01	2.142.E-01	4.167.E-01
Run_02	1952	Y	1.075	Y	Y	1.07.E-01	3.213.E-01	6.250.E-01
Run_02	1952	Y	1.075	Y	Y	1.07.E-01	4.284.E-01	8.334.E-01
Run_01	1826	Y	1.103	Y	Y	1.26.E-02	4.410.E-01	8.579.E-01
Run_04	1828	Y	1.077	Y	Y	7.14.E-03	4.481.E-01	8.718.E-01
Run_22	1846	Y	1.059	Y	Y	3.60.E-03	4.517.E-01	8.788.E-01
Run_23	1820	Y	1.101	Y	Y	8.40.E-04	4.526.E-01	8.804.E-01
Run_03	1610	Y	0.991	N	N	3.06.E-02	4.832.E-01	9.399.E-01
Run_05	2352	N	1.057	Y	N	1.87.E-02	5.019.E-01	9.764.E-01
Run_21	2038	N	1.093	Y	N	4.10.E-03	5.060.E-01	9.844.E-01
Run_19	1602	Y	1.017	N	N	3.60.E-03	5.096.E-01	9.914.E-01
Run_20	2180	N	1.063	Y	N	1.35.E-03	5.110.E-01	9.940.E-01
Run_14	1850	Y	1.031	N	N	1.02.E-03	5.120.E-01	9.960.E-01
Run_26	2366	N	1.056	Y	N	7.29.E-04	5.127.E-01	9.974.E-01
Run_13	1734	Y	0.983	N	N	5.10.E-04	5.132.E-01	9.984.E-01
Run_18	2036	N	1.093	Y	N	3.19.E-04	5.135.E-01	9.990.E-01
Run_12	1830	Y	1.003	N	N	2.93.E-04	5.138.E-01	9.996.E-01
Run_11	2344	N	1.006	N	N	8.93.E-05	5.139.E-01	9.997.E-01
Run_25	2164	N	1.087	Y	N	3.41.E-05	5.140.E-01	9.998.E-01
Run_15	1616	Y	1.014	N	N	3.00.E-05	5.140.E-01	9.999.E-01
Run_24	2180	N	1.040	N	N	2.45.E-05	5.140.E-01	9.999.E-01
Run_16	1816	Y	1.003	N	N	1.95.E-05	5.140.E-01	1.000.E+00
Run_17	2512	N	1.074	Y	N	1.84.E-05	5.141.E-01	1.000.E+00
Run_06	2152	N	0.979	N	N	2.63.E-06	5.141.E-01	1.000.E+00

2차년도('22) 연구 현황: REPAS 방법을 이용한 피동안전 계통 성능 및 신뢰도평가 방안 개발 - PRHRS (10/10)

- REPAS 결과 활용 방안(계통 성능 관점)
 - 기능고장발생 확률이 높은 Cases가 도출됨
 - 다수의 규제 주안점 (Critical Parameters) 중에서 기능고장에 영향이 큰 주안점을 체계적으로 확인할 수 있음
 - 해당 Cases (열손실최대, 모델 불확실도 최대)에 대해서는 추가 안전해석을 통해 PSS의 냉각성능 재평가 필요
 - ✓ 냉각실패 시 설계개선이 요구됨
- REPAS 결과 활용 방안(신뢰도 관점)
 - Critical Parameters를 확장하여 보다 현실적인 PSS 계통 신뢰도를 정량적으로 도출
 - REPAS 평가 결과에서 얻은 통찰을 바탕으로 보다 강건한 (Robust) 피동안전계통 설계 방안 도출에 활용
 - ✓ 가령 열손실 최소화가 가능하도록 설계할 경우, PSS 신뢰도 향상을 기대할 수 있음

Run No.	FC 1 (sec) (감압시간)		FC 2 (%) (열 제거율)		AR	발생확률	누적확률	정규화
Run_00	1834	Y	1.200	Y	Y	2.14.E-01	2.142.E-01	4.167.E-01
Run_02	1952	Y	1.075	Y	Y	1.07.E-01	3.213.E-01	6.250.E-01
Run_02	1952	Y	1.075	Y	Y	1.07.E-01	4.284.E-01	8.334.E-01
Run_01	1826	Y	1.103	Y	Y	1.26.E-02	4.410.E-01	8.579.E-01
Run_04	1828	Y	1.077	Y	Y	7.14.E-03	4.481.E-01	8.718.E-01
Run_22	1846	Y	1.059	Y	Y	3.60.E-03	4.517.E-01	8.788.E-01
Run_23	1820	Y	1.101	Y	Y	8.40.E-04	4.526.E-01	8.804.E-01
Run_03	1610	Y	0.991	N	N	3.06.E-02	4.832.E-01	9.399.E-01
Run_05	2352	N	1.057	Y	N	1.87.E-02	5.019.E-01	9.764.E-01
Run_21	2038	N	1.093	Y	N	4.10.E-03	5.060.E-01	9.844.E-01
Run_19	1602	Y	1.017	N	N	3.60.E-03	5.096.E-01	9.914.E-01
Run_20	2180	N	1.063	Y	N	1.35.E-03	5.110.E-01	9.940.E-01
Run_14	1850	Y	1.031	N	N	1.02.E-03	5.120.E-01	9.960.E-01

Run No.	초기 압력 (MPa)	초기 온도 (°C)	열손실계수 (W/m²K)	유동면적 (%)	모델 불확실도 (%)	발생확률	Note	PRHRS 실패 원인
Run_00	47.8	25	2	100	0	2.142.E-01	기준입력	
Run_03	47.8	25	20	100	0	3.060.E-02	열손실 최대	열제거율 미달
Run_05	47.8	25	2	100	-20	1.874.E-02	열전달 모델 불확실도 최대	감압시간 초과
Run_21	57.8	25	2	100	-10	4.095.E-03	초기압력 증가 + 열전달 모델 불확실도	감압시간 초과

맺음말

- 표준설계인가 제도를 통하여 피동안전계통을 포함하고 있는 다양한 원자로에 대한 규제심사가 국내·외에서 수행되었거나 (APR+, SMART, AP600/1000, NuScale) 현재 진행 중에 있음 (SMART100)
- 국내에서는 최근 피동안전계통 설계심사를 위한 규제지침(KINS/RG-N07.12, '21.6)를 발행하였으며 국외(미국)의 경우 SECY 문서 및 DSRS를 발행하여 AP600/1000 및 NuScale 원자로의 피동안전계통에 대한 심사를 수행하였음
- 피동안전계통에 대한 안전심사경험(규제) 및 설계 및 운전경험(사업자)이 제한적이지만 최근 SMRs 등 피동안전계통을 채택하는 신형원자로의 개발은 활발히 이루어지고 있는 상황임
- 따라서 피동안전계통 안전심사(안전해석)에 적용될 수 있는 보다 구체적인 규제지침을 최신 규제경향을 반영하여 현재 개발 중에 있음
- 피동안전계통은 능동안전계통에 비해 성능입증을 위해 기술적으로 보다 높은 수준의 해석코드, 새로운 안전해석 방법론 등이 요구되며 계통 신뢰도에 대한 적절한 평가가 반드시 필요함
- 피동안전계통에 대한 다수의 규제 주안점이 기 도출되었으며 현재 추가로 도출 중에 있으며 이를 활용하여 성능 및 신뢰도를 평가할 수 있는 방안을 마련하였음