



스트레스테스트 규제검증 현황

2019. 5.

이현우

한국원자력안전기술원

스트레스테스트PM

(heanu@kins.re.kr)





개요

검증 신뢰도 제고 노력

스트레스테스트 검증 현황 요약

04

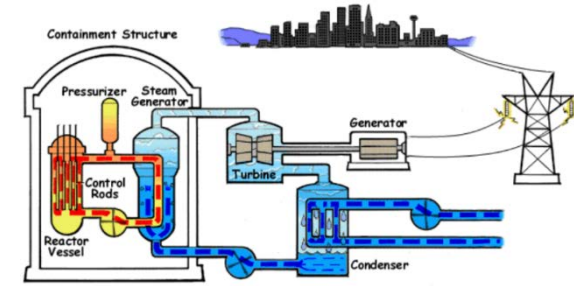
결언_도전과제



개요

스트레스 테스트 수행이유

후쿠시마원전 사고(2011.3.11)



지진발생(규모 9.0)

소외전원
상실



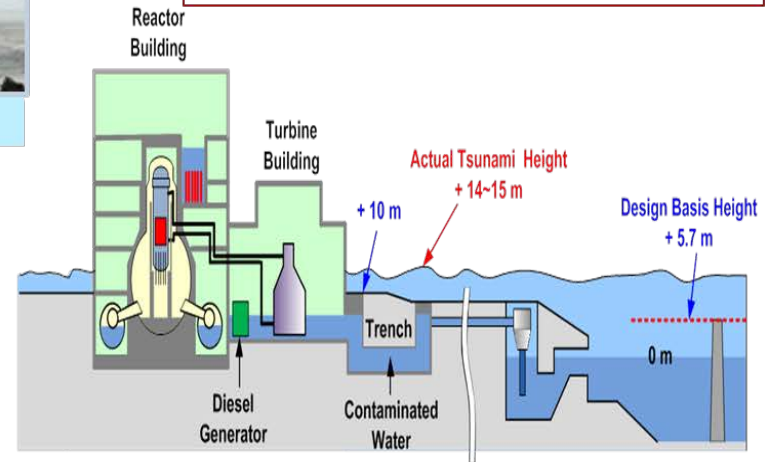
쓰나미(15m)

- 설계기준 지진 : 0.6g (규모 7.1)

해일로 인한 침수
(전원공급 상실)



냉각 기능 상실



총리(관저)가
위기 대응 주도
→ 지휘명령
계통 혼란

노심손상



수소 폭발

격납용기 손상



방사능 확산

스트레스테스트 개요

목 표

[근거 : 제45회 및 60회 원안위]

- ❖ 노후원전 스트레스테스트 경험을 바탕으로 **가동 중 전체 원전의 안전성 증진**
- ❖ **설계초과 극한자연재해**에 대한 원전의 **대응능력 점검** 및 **안전개선사항 도출 · 이행**

평가 대상	22개 가동 중 원전 (※ 월성1호가 및 고리1호가 기 완료)
평가 분야	① 극한자연재해 평가 ② 구조물 · 계통 · 기기 건전성 ③ 핵심안전기능상실 (전력, 냉각) ④ 중대사고 ⑤ 방재 및 비상대응 ⑥ 운영기술능력
평가 기준	스트레스테스트 수행지침 (원안위/KINS, 2016년 10월) ※ 유럽연합 스트레스테스트 지침 + 일본, 미국, IAEA, 그린피스의 후쿠시마 안전조치 및 권고 참조

1단계 : 원자로형 및 부지를 고려하여 대표 원전에 대해 종합 평가

- ✓ 검증 완료: 한울3,4 (한국표준형)
- ✓ 검증 중: 고리2 (W/H 2-loop), 한빛1,2 (W/H 3-loop), **한울1,2 (프라마툼)**, 월성2 (중수로형)

차이분석 : 대표원전과 유사원전 간의 시설, 안전기능, 사고대응 등의 차이점을 분석

2단계 : 1단계 평가결과를 활용하여 대표 원전과 유사 원전의 차이점 중심으로 평가

⇒ 2020년 말까지 전 원전에 대한 스트레스테스트 완료 추진

KINS 검증 일정

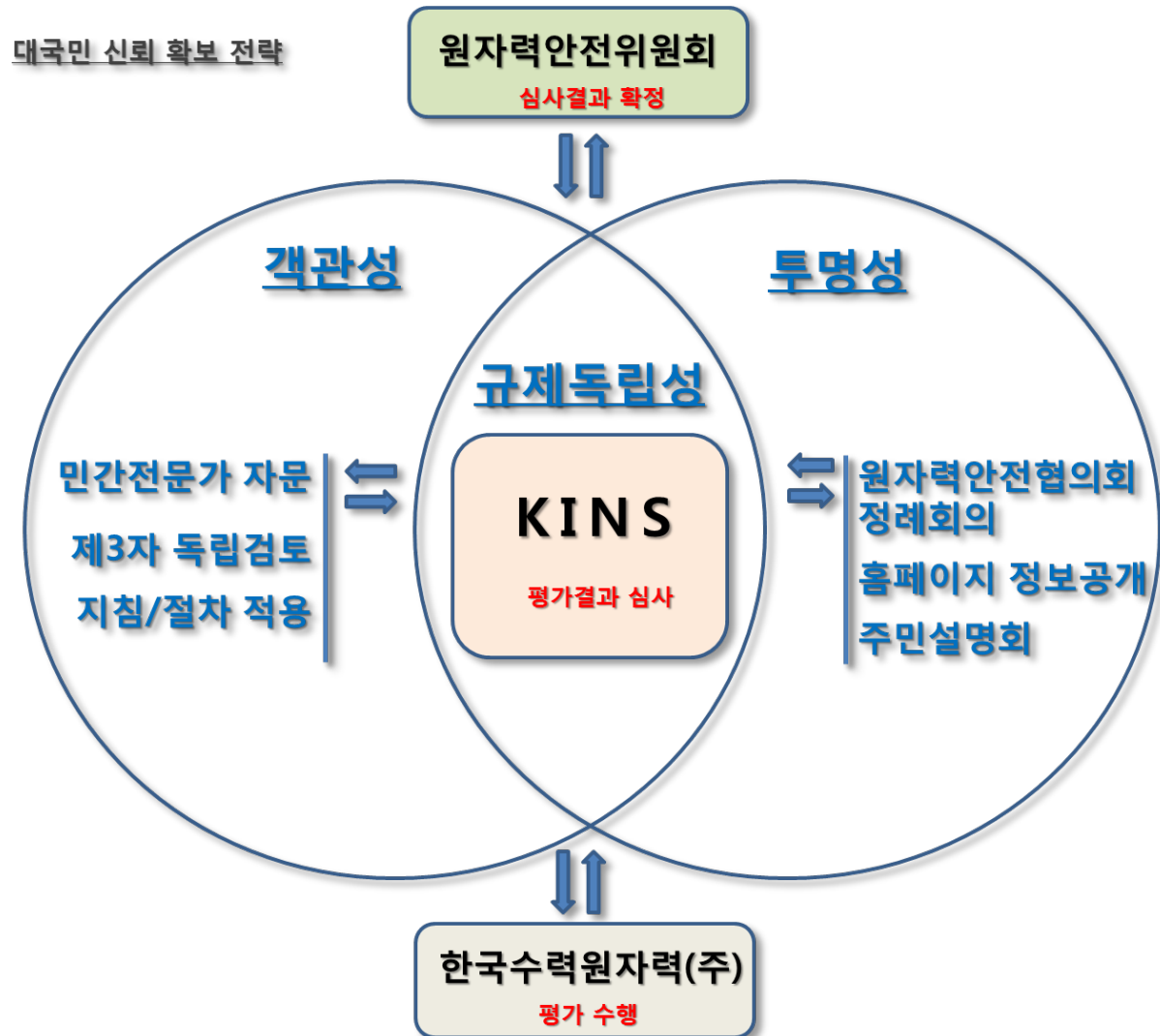
스트레스테스트 검증 일정(안)

구 분		2017				2018				2019				2020				비고
SI검증	대 상	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
노후완전	월성1, 고리1	안전개선사항																- 반기이행실적 검토 - 항목별 조치결과 심사
전원전 1단계	한울3,4	사업자평가				본검증 (‘17.11/’18.3~’18.10)				안전개선사항								서류적합성 검토 본검증(6개월/건 원칙) - 현장검증(종합/개별) - 민간전문가자문 - 안전협의회참석 - IAEA독립검토(한울3) 안전개선사항 검토 - 반기이행실적 검토 - 항목별 조치결과 심사
	한빛1,2	사업자평가								본검증 (‘18.9/’18.12~’19.6)				안전개선사항				
	고리2	사업자평가								본검증 (‘18.9/’18.12~’19.6)				안전개선사항				
	한울1,2	사업자평가								본검증 (‘18.11/’18.12~’19.6)				안전개선사항				
	월성2	사업자평가								본검증 (‘19.1/’19.3~’19.9)				안전개선사항				
전원전 차이분석		사업자평가				차이분석방법 검증 (‘17.11~’18.9)				차이분석 검증 (‘18.11~’19.5)								방법론, 분석결과 검증
전원전 2단계	월성부지 (월성3,4, 신월성1,2)	사업자평가								본검증 (‘19.6~’20.2)				안전개선사항				서류적합성 검토 본검증 안전개선사항 검토
	고리부지 (고리3,4,신고리1,2)	사업자평가								본검증 (‘19.6~’20.2)				안전개선사항				
	한빛부지 (한빛3,4,5,6)	사업자평가								본검증 (‘19.7~’20.3)				안전개선사항				
	한울부지 (한울5,6)	사업자평가								본검증 (‘19.7~’20.3)				안전개선사항				

※ 1단계 검증결과 원안위
회의 보고(‘19.10 예상)

검증 신뢰도 제고 노력 국민수용성 증진 방안

- 규제독립성, 검증의 기술적 객관성 및 과정의 투명성



검증 신뢰도 제고 노력

국민수용성증진방안, 기술적 객관성, 과정의 투명성

검증 신뢰도 제고 노력_기술적 객관성 IAEA 독립 검토(1/2)

- ▶ **기간** : 2018. 8(서류검토), 9. 3-11(현장실사)
- ▶ **대상** : 스트레스 테스트 지침, 한울#3
- ▶ **점검단** : IAEA 전문가 5인
 - ✓ 외부재해, 구조물·계통·기기 건전성, 안전기능(전력, 냉각)
 - ✓ 중대사고, 방재 및 방사선비상
- ▶ **검토기준** : IAEA 안전기준, 지침 및 기술문서
- ▶ **검토활동** : 서류검토, 면담, 현장확인



✓ 주요 결론

- 설계기준초과 자연재해/사고에 대한 원전 안전성개선을 위한 **건전하고 체계적인 평가방법**
- **규제의 독립성을 유지**하면서 국내외 전문가자문을 통한 **기술적 객관성제고**와 홈페이지 등을 통한 **대외 소통 병행**하는 **검증 체계는 우수**
- **한국의 Stress Test** 지침과 사업자의 평가결과는 **IAEA 안전기준과 지침에 부합함**.
 - 안전기준이나 지침을 위반한 Recommendation과 Suggestion은 없음.
 - Good Practice 4건
 - IAEA 기준과는 관계없는 기타 제언(Advice) 16건

✓ 결과 활용

- IAEA가 제시한 기타 제언에 대해 스트레스테스트 후속 검증 및 기타 원자력 규제심사*에 반영하여 국내 원전의 안전성 향상에 제고 추진. * **AMP, 방재훈련 등**

검증 신뢰도 제고 노력_기술적 객관성

IAEA 독립 검토(2/2)

▶ 우수사례(Good Practices) 요약

- ▶ PSR을 활용한 지진평가결과의 주기적 개선
- ▶ Stress Test에 외부사건 PSA를 적극 활용
- ▶ 사고대응전략 이행가능성 확인을 통한 안전기능 대응능력 향상
- ▶ MACST 이행을 위한 현장운전원에 인간공학유효성평가의 적용

▶ 기타 제언(Advices) 요약

▶ 외부재해 및 취약도 평가

- ▶ PSHA 평가결과에 대한 국내외 전문가의 3자 검증
- ▶ Stress Test 수행보고서에 자연재해 선별과정 상세 명시
- ▶ PSA-based SMA를 통한 실질적인 Plant-level HCLPF 평가
- ▶ 극한 재해 시 장애물 대비 이동형발전기 이동경로 가용성 확보

▶ 안전기능 대응능력

- ▶ 심층방어 측면에서 설계상의 안전 계통 개선 필요 여부 검토
- ▶ 좀더 다양한 운전조건 및 가정사항을 고려한 사고시나리오 검토
- ▶ 이동형대체설비 시나리오의 불확실성 저감을 위한 검토

▶ 중대사고, 소내비상대응 및 운영기술능력

- ▶ 중대사고 및 소내비상 대응능력 평가 시 한계상황 분석 확대
- ▶ 다수기 동시사고를 포함하는 대응 시나리오에 대한 소내 방사선 환경평가 등

검증 신뢰도 제고 노력_기술적 객관성

민간전문가Pool 기술자문(1/2)

• 자문 내역

- ✓ 분야별 및 지역별 35인 전문가 pool 구성
 - 분야별 : 지진(4인), 해일(2인), 기상(2인), 구조(3인), 기계(3인), 계측전기(5인), 지진PSA(1인), 화재(2인), 계통(2인), 중대사고(4인), 방재(3인), 운영능력(4인)
 - 지역별 : 경상(12인), 경인(8인), 충청·호남(16인)
- ✓ 전문가 활용 절차
 - (민간전문가) 사업자 스트레스테스트 수행보고서의 해당분야 검토 후 자문보고서 제출
 - (KINS검증단) 분야별 자문보고서 검토 및 검증에 활용
- ✓ 활용 현황 : 한울3('18.4), 한빛1,2('18.12), 고리2('18.12), 한울1,2('19.1), 월성2('19.4)

• 자문결과 활용

- ✓ 전문가 검토의견 질의 반영
 - 한울3호기 67건, 한빛1,2호기 92건, 고리2호기 79건, 한울1,2호기 93건, 월성2호기 82건
- ✓ 스트레스테스트 범위 이외의 검토의견 활용
 - 여타 안전규제 심사 시 활용(예, 사고관리계획서, PSR, 방재훈련 등)

검증 신뢰도 제고 노력_기술적 객관성

민간전문가Pool 기술자문(2/2)

• 전문가 자문 주요 사례 요약

- ✓ 극한자연재해 평가 및 SSCs 건전성
 - **지진**, 최근 지진정보(경주지진, 포항지진, 양산단층 등)를 고려한 평가
 - **홍수**, 평가(입력자료, 평가방법, 모델 등)의 구체화 및 다양화
 - **기타 재해**, 산불, 폭설, 해양생물/개펄 유입 등 고려
 - **내진**, 근거자료(FRS 등) 제시, 내진현장점검 전문가의 자격 및 경력 확인
 - **풍하중**, 태풍 비산물에 의한 안전기능 영향 검토

- ✓ 안전기능 및 중대사고 관리
 - **전력**, 성능(Functional) HCLPF 구체화, 추가 도입 이동형 설비(1Mw 발전기 등) 설치계획 구체화, 복수의 이동형 발전기(1Mw, 3.2Mw 등)의 병렬운전 가능성 검토
 - **냉각**, 이동형 설비 시나리오에 포함되는 고정형 설비(배관, 펌프 등) 유효성 확인
 - **중대사고**, 원자로공동 침수를 통한 노심용융물냉각 방안 검토, 격납건물 직접가열 대비 감압 시간 평가, 운전원 교육/훈련 프로그램 구체화

- ✓ 방재 및 운영기술능력
 - **방재**, 다수호기동시사고 시 호기 간 지원 및 명령체계 구체화, SAMG 훈련 내용에 불확실한 상황에서의 의사결정 포함, 현장운전원에 필요한 구체적인 절차서 개발
 - **운영**, 비정상적 도로상황을 고려한 대응능력(인력, 장비 등) 확보, 사고의 장기화에 대비한 운전원의 장기적인 거주성 및 통신수단 확보, 해수를 장기적 수원으로 이용할 경우에 대한 절차의 구체화, 사고대응 시나리오의 시작점 명확화(사고발생 시점, 사고발생 확인 시점 등)

검증 신뢰도 제고 노력_과정의 투명성

홈페이지운영 및 지역과의 소통

• 스트레스테스트 홈페이지 운영

- ✓ '스트레스테스트 정보공개' 홈페이지 확대 운영 실시 ('18.3~)
 - 기본정보, 수행결과, 질의/답변, 현장점검결과, 주요회의결과, 검증결과, Q&A 등
 - 정보공개 내용(한빛원전 사례)
 - ✓ 한빛1,2호기 스트레스테스트 수행보고서(초안) 서류적합성 검토착수('18.9)
 - ✓ 한빛1,2호기 스트레스테스트 수행보고서 공개 및 검증착수 알림('18.12)
 - ✓ 현장 종합현장검증 결과보고서 공개('18.12)
 - ✓ 한수원 평가결과에 대한 보완요구(종합질의)('19.1)
 - ✓ 한빛1,2호기 스트레스테스트 종합질의 답변자료(공개본) 접수('19.3)
 - ✓ 한빛1,2호기 스트레스테스트 보완질의 발송('19.4)
- ✓ 스트레스테스트 새소식 알림
 - 원자력안전협의회, 민간환경감시기구 대상 신청요청공문 발송('18.6)
 - 새소식 알림 신청 및 수신자 현황 : 총원 약 100여명
 - ✓ 원자력안전협의회 : 고리(12인), 월성(12인), 한울(12인), 영광(11인), 고창(10인)
 - ✓ 민간환경감시기구 : 월성(23인), 한울(9인), 한빛(1인), 새울(1인)
 - ✓ 기타 : 원안위, KINS, 한수원 등
- 지역 원자력안전협의회 참석
 - 추진현황, 검증방향, 검증결과 등에 관한 사항을 정례회의에서 보고
 - ✓ 고리('18.1, '18.10, '19.4), 한빛('17.4, '19.5), 월성('17.7, '18.10, '19.4), 한울('17.12, '18.7, '18.11)

스트레스테스트 검증현황 요약

평가항목, 사업자 평가결과, KINS 검증 질의, 안전개선사항

스트레스테스트 검증현황 요약

설계기준초과 극한자연재해 및 발전소의 건전성

❁ 평가항목

- 지진, 해일(지진/폭풍), 강우, 강풍 등 자연현상을 설계기준보다 큰 극한재해 수준까지(10,000년주기) 평가 (※ 지진은 최소 0.3g, 홍수는 설계기준의 1.5배 적용)
- 극한자연재해에 대한 발전소 구조물·계통·기기의 건전성 검토

❁ 사업자 평가결과

- **지진** 0.3g 적용(※ 월성2호기의 경우 0.32g). 안전기능 수행 설비들은 대부분 이 보다 큰 내진성능을 확보. 다만, ASME/ANS Std. 2009 적용 등에 따라 일부 설비 정밀 평가 중.
- **지진화재** 화재취약지역 도출. 초기화재순찰·진화, 소화전추가, 자동화재탐지설비 설치, 케이블 래핑 등에 관한 안전개선사항 도출.
- **해일** 부지고(10~12m)가 극한재해수준(최대 8.3m)보다 높음.
- **홍수** 극한재해수준(설계기준 가능최대강수량의 1.5배)에서 **문턱 표고 약 3cm~1.4m 초과** ⇒ (후쿠시마후속조치) 안전관련구조물 입구에 방수문 설치 중(~'19.12) ※ 운영절차서 개정(건물 입구 물리적인 방호조치) 추진
- **강풍압** 극한재해수준 풍압이 **설계기준의 약 3~4배**, 설계지진하중압력의 최대 약 40% 미만이므로 안전성 영향 없음.
- **해수온도** 극한재해수준 해수온도는 발전소 기기냉각수온도 기준 이하

스트레스테스트 검증현황 요약

설계기준초과 극한자연재해 및 발전소의 건전성

주요 검증 질의

- 극한자연재해 평가
 - 경주지진을 고려한 PSHA 수행절차, 입력자료 등의 적절성
 - 이동형 대체설비 이동경로(도로, 지반 및 사면) 유효성 및 장애요인 평가
 - 해일(지진 및 폭풍) 평가시 사용된 가정, 입력값, 모델 등의 적절성
- 극한자연재해 대비 SSCs 건전성 평가
 - SSCs 지진취약도 분석에 사용된 입력지진의 적절성
 - 설계기준초과 지진 시 안전기능 계전기의 가용성(예, 채터링 오동작 여부)
 - 극한재해 시 현장운전원 이동경로에 대한 지진영향 평가의 적절성
 - 내진, 홍수 등과 관련한 Walk-down 보고서의 현장 일치성
 - 대체열제거원 용수저장설비(예, RWST)의 유효성(내진능력, 비산물 영향 등) 입증
 - 지진에 의한 내부홍수 상세평가의 가정 및 결과의 적절성
 - 부지내 홍수 대비 물리적 방호조치 및 관련 절차의 적절성
 - 지진화재시 현장 운전원의 방화지역 접근로 및 우회로 확보

스트레스테스트 검증현황 요약

안전기능 상실, 중대사고, 방재 대응능력 및 운영기술능력

평가항목

- 10개 사고시나리오*에 대해 원전의 안전이 유지될 수 있는지 평가
 - * 전력상실, 냉각기능상실, 중대사고, 자연재해(지진,해일)의 다양한 조합
- 방사선비상 사고대응조치와 주민보호능력을 적절하게 확보하는지 평가
- 운영기술능력 및 유효성 평가를 통한 대응전략의 실현 가능성 확인

사업자 평가결과

- 전력공급이 중단된 상태에서 고정형 설비에 의한 전기공급기능 상실
 - 초기 8시간까지(비필수부하차단) 내진축전지 즉시 투입으로 초기대응
 - 초기 3일간 소내 이동형발전기(소형, 중형, 1Mw) 대응
 - 3일 이후 소외 이동형발전기(3.2Mw) 도입으로 장기간 대응능력 확보
- 냉각능력을 상실한 상태에서도
 - 초기에는 내부의 물(증기발생기, 복수저장탱크, 원수저장탱크 등)로 냉각유지
 - 이동형펌프, 2차 냉각수원 등을 이용하여 안전 상태 유지 가능(약 7일 이상)
 - 3일 이후 고유량이동형펌프를 이용하여 안정적인 냉각기능 확보계획
- 중대사고대비 핵심 안전기능 확보
 - 중대사고관리지침 강화, 수소폭발 방지설비(PAR), 냉각수외부주입유로설치 등
- 방재 비상대응능력 강화 및 사고전략 등의 유효성 확인
 - 비상계획구역확대, 방호물품 지급확대, 강화된 방재훈련(대규모 지진 등), 환경방사선감시능력 강화(다수기동시사고 대비 주민예상피폭선량 평가프로그램 S-REDAP 개발 등), 비상대응전문가팀구성(SAFE-T), 소내비상대응거점신축(~'22), 사고전략-인간공학 유효성 등 확인

스트레스테스트 검증현황 요약

안전기능 상실, 중대사고, 방재 대응능력 및 운영기술능력

주요 검증 질의

- 안전기능 상실 및 중대사고 대응능력
 - 이동형대체설비의 유효성(극한재해 시 건전성, 운영단계의 품질등급/관리방안 등)
 - 축전지 용량 확보를 위한 필수부하 선별의 적절성
 - 필수대처설비 경계 설정 및 대상 기기 선정의 적절성
 - 이동형 대체설비 목표신뢰도(0.95) 확보 방안의 적절성
 - 사용후핵연료저장조 냉각 상실시 저장조 냉각평가방법의 적절성
 - 출력증강 발전소의 경우 변경된 정보 사용 여부 확인
- 방재 및 비상대응능력
 - 적색비상 발령시 부지내로 투입되는 지원인력의 방호 대책의 적절성
 - 전원상실(UPS 포함) 시 현장 작업자에 대한 피폭선량 관리기능의 유효성
 - 외부지원 인력/장비의 유효성(부지 접근성, 운영계획/절차 등)
 - 장기 소내정전사고를 고려한 통신체계(위성전화기 등) 건전성 확보 방안
 - 방재 및 비상대응능력 확보 계획/일정의 구체성
 - 비상대응시설 거주성 상실 시 비상대응능력 유지 가능성 및 대안(소내비상대응거점 등)
- 운영기술능력
 - 중대사고 시 TSC 운영 핵심요원 교육훈련의 적절성
 - 극한자연재해 상황에서의 발전소 상태 감시 수단의 유효성
 - 유효성평가 및 현장검증 시 현장운전원의 시나리오별 대응 시간의 적정성
 - 원자로냉각재펌프 밀봉누설 발생 시 격납건물 건전성 확보 가능성
 - 종합현장검증에 따른 후속조치 필요사항 이행의 적절성

스트레스테스트 검증현황 요약

안전개선사항 도출 및 이행 관리

• 이행 목적

- ✓ 평가결과의 불확실성 저감 및 평가기준 불만족 사항 보완/개선
- ✓ 극한자연재해 대응시나리오의 실현가능성 및 안전 여유도 향상

• 이행 현황

- ✓ 월성1호기: 19개 안전개선사항의 45개 세부이행사항 중 24건 종결
- ✓ 고리1호기: 14개 안전개선사항의 23개 세부이행사항 중 7건 종결
- ✓ 한울3,4호기: 27개 안전개선사항 도출(IAEA 2건 포함) 및 이행계획 검토 중

• 이행 관리

- ✓ 현행 관리 현황
 - 반기이행실적 검토를 통하여 이행실적 관리
 - 과제 종결 시 항목별로 기술검토를 통하여 이행 결과의 적절성 확인
- ✓ 향후 관리 방안
 - 안전개선사항 종합관리방안 수립 및 확정(1단계 검증결과 원안위 보고서)
 - ⇒ 중장기적으로 효율적인 이행 및 관리방안 마련 추진

결언

도전과제

결언_도전과제

- 스트레스테스트 검증의 적기 완료

- ✓ '20.12월까지 검증(1단계-'19.9; 2단계-'20.3) 및 안전개선사항 이행점검
⇒ 1단계 검증 완료 후 원안위 전체회의 결과 및 추진계획 보고·확정

- 안전개선사항의 효율적 이행관리

- ✓ 3개 원전 검증결과, 95건 도출. 현재 31건 종료 및 64건 이행 중
- ✓ 장기적인 노력/투자 필요 항목에 대한 중장기적 추진계획 수립 추진
⇒ 향후 후속 호기 안전개선사항 감안, 효율적 이행/검토 방안 마련 필요

- 사고관리계획서와의 규제 일관성

- ✓ 사고관리계획서 심사단과 스트레스테스트 검증단 이원화
⇒ 규제정보 공유 및 일관성 유지를 위한 기능/장치 수립·이행 필요

감사합니다

