

대표원전 스트레스테스트 검증결과(안)

2019. 10.

이현우

한국원자력안전기술원

스트레스테스트PM

(heanu@kins.re.kr)



개요

대표원전 검증결과(안)

검증신뢰도 제고 노력

04

결언



개요

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 (※ 월성1호기 및 고리1호기 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)

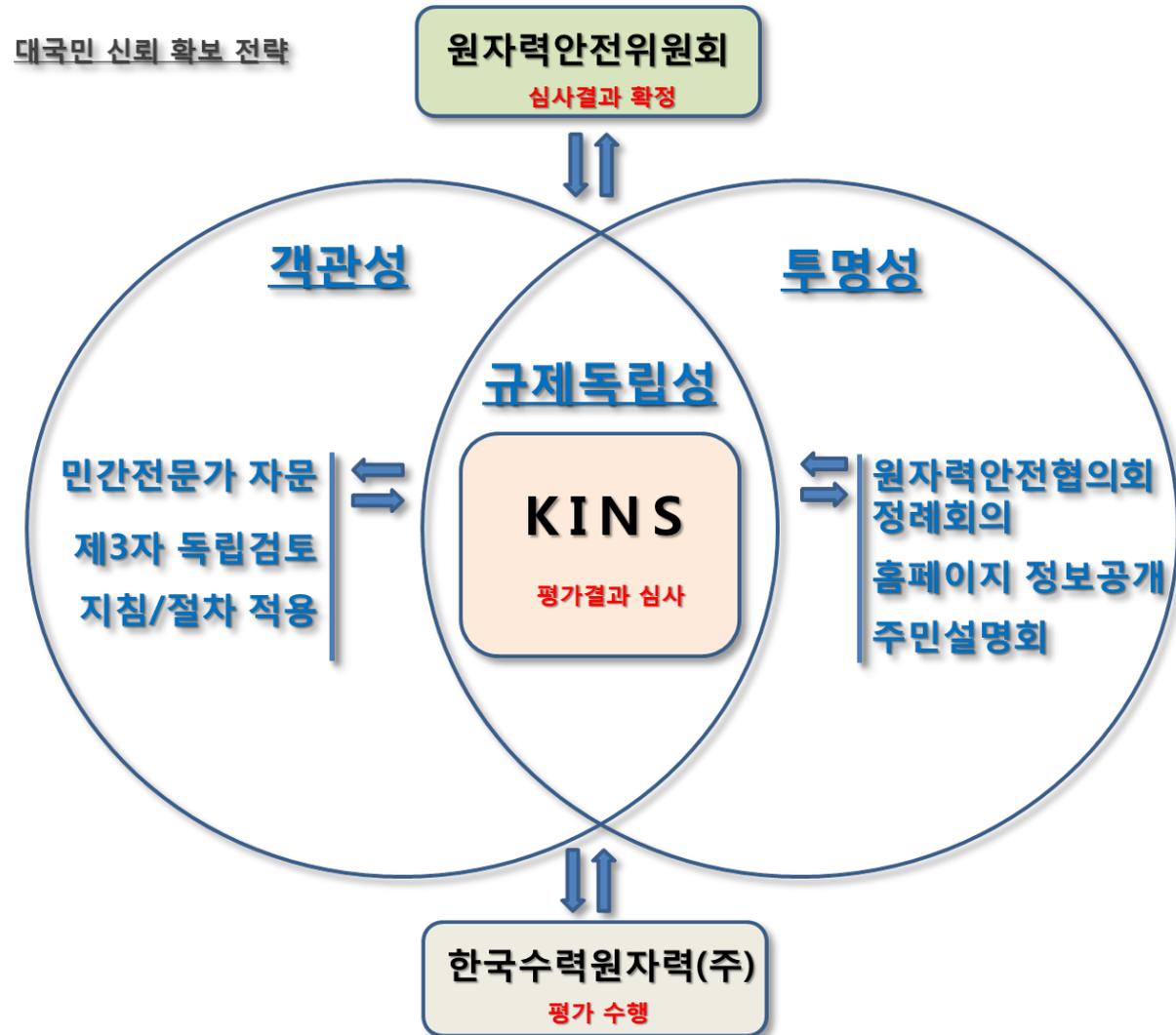
차이분석 : 대표원전과 유사원전 간의 시설, 안전기능, 사고대응 등의 차이점을 분석

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

⇒ 2020년 말까지 전 원전에 대한 스트레스테스트 완료 추진

검증 신뢰도 제고 노력 국민수용성 증진 방안

- 규제독립성, 검증의 기술적 객관성 및 과정의 투명성



대표원전 ST 검증결과(안)

평가항목, KINS 검증 결과(안) , 안전개선사항(안)

대표원전 ST 검증결과(안)

설계기준초과 극한자연재해 및 발전소의 건전성(1,2분야)

평가항목

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

검증결과(안)

- **지진 극한재해수준**(0.11g (한빛1,2)~0.32g (월성2)). 대비 안전 기능 수행 대부분 설비 내진성능 **최소 0.3g** 확보.
- **지진화재** 화재취약지역 적절히 도출. 지진화재 대응조치(초기화재순찰·진화, 자동화재탐지설비 설치, 케이블 래핑 등) 안전개선사항 적절히 도출.
- **최고해수위 극한재해수준**(최대 약 8.9m (폭풍해일, 고리2) 및 약5.2m(지진해일, 한울3,4)). 대응 능력 확보(부지고: 월성2-12m, 그 외 10m)
- **최저해수위 극한재해수준**(-1.3~-5.5m)최대 약 8.9m (폭풍해일, 고리2) 및 약5.2m(지진해일, 한울 3,4)). 대응능력 **상실(한울3,4; 0.32m 미달)**, 또는 확보(나머지: 0.8~2.4m 여유)
- **홍수 극한재해수준**(안전관련 구조물 문턱표고 **최대 1.3m 초과(고리2)**). ⇒ 방수문 설치 (~'19.12) * 운영절차서 개정(건물 입구 물리적인 방호조치) 추진
- **강풍압 극한재해수준**(476~636kg/cm²). 설계하중 미만(약 13(월성2)~40% 미만(고리2))
- **해수온도 극한재해수준**(약 29~35℃). 기기냉각수온도 기준(약 30~36℃) 이하

대표원전 ST 검증결과(안)

설계기준초과 극한자연재해 및 발전소의 건전성

안전개선사항(안)_극한자연재해 평가

지진

- 경주지진 등을 고려한 PSHA 수행 및 설계기준·초과 지진동 적정성 확인(1)
- 설계기준초과 지진 대비 안전관련 기초지반, 이동형발전기 경로의 건전성 확보(공통)

홍수

- 설계기준 및 설계기준초과 국지강우에 의한 부지 내 2-D 홍수영향 평가(3,4,5)
- 설계기준·초과 홍수영향 평가를 위한 유효한 방법론 개발(2,4,5)

기타 자연재해

- 해수온도 변화에 대한 주기적 평가기반 수립·이행(2,3,4,5)

대표원전 ST 검증결과(안)

설계기준초과 극한자연재해 및 발전소의 건전성

안전개선사항(안)_극한자연재해 대비 SSCs 건전성

지진

- ASME/ANS PRA Std. 2009, 내진현장점검결과 등에 따라 일부 SSCs (cliff-edge 기기 등)에 대한 내진성능 유효성 확인 또는 추가 내진성능평가(공통)
- 재현주기 만년 수준 지진동(0.32g) 이상 내진성능 유효성 확인(4)
- 설계기준초과 지진 대비 이동형대체설비 통합보관고 내진성능 확보(공통)

지진에 의한 내부홍수와 지진화재

- 비내진 배관파단에 따른 유체분출에 의한 안전정지기기 영향평가(5)
- 지진발생 시 내진 옥내소화전의 이용을 위한 내진범주 I 소화수펌프 전원확보(1,2)
- 지진화재시 현장 운전원의 방화지역 접근로 및 우회로의 구체화 절차화(2,3,4,5)

홍수와 강풍

- 부지내 홍수 대비 안전조치(안전관련구조물 침수방호조치, 비상급수저장조 물리적 방호조치, 지하 관통부 밀봉재 건전성 확인, 관련 절차 수립·이행 등) 이행(1,2,4,5)
- 설계기준초과 강풍 대비 비산물(비안전 설비, 가건물 등) 안전영향평가(공통)

대표원전 ST 검증결과(안)

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

검증결과(안)

- (안전기능상실대응) 소내전력, 최종 열제거원 상실 상황에서 안전기능 유지, 복구 설비(축전지, 이동형발전기, 이동형펌프 등을 이용한 냉각)의 가용성과 안전기능 상실 시 **대응능력을 확보 확인** 및 **대응능력 확보계획 적합**
(전력상실) 초기 8시간까지(비필수부하차단) 내진축전지 즉시 투입으로 초기대응; 초기 3일간 소내 이동형발전기(소형, 중형, 1Mw) 대응; 3일 이내 소외 이동형발전기(3.2Mw) 공급을 통해 **장기간 대응능력 확보 가능 확인**
(냉각기능상실) 초기에는 내부의 물(증기발생기, 복수저장탱크, 원수저장탱크 등)로 냉각유지; 이동형펌프, 2차 냉각수원 등을 이용하여 안전 상태 유지 가능(약 7일 이상); 3일 이후 고유량이동형펌프 등을 이용하여 **안정적인 냉각기능 확보계획 확인**
- (중대사고관리) 원자로 내 연료손상 완화, 원자로건물 건전성 유지, 사용후핵연료저장조 냉각기능 확보 등 중대사고 완화 대응능력을 확보(PAR 등) 또는 대응능력 확보계획 적합성 확인
 - 중대사고관리지침 강화, 수소폭발 방지설비(PAR), 냉각수외부주입유로설치

대표원전 ST 검증결과(안)

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

검증결과(안)

- (방재 및 비상대응능력) 원자로건물과 사용후핵연료저장조 밖으로 방사성물질이 유출되어 주민소개 등이 필요한 상황에서 비상조직의 대응능력, 의사결정의 적절성, 비상대응시설 거주성 등 **대응능력 확보** 또는 **대응능력 확보계획 적합**
 - 비상계획구역확대, 방호물품 지급확대, 강화된 방재훈련(대규모 지진 등), 환경방사선감시능력 강화(다수기동시사고 대비 주민예상피폭선량 평가프로그램 S-REDAP 개발 등),
- (운영기술능력) 사고대응전략, 사고대응 조직 및 인원의 적절성, 필수 대처능력 확보방안, 인간공학평가결과, 다수호기동시사고 **대응능력 확보** 또는 **대응능력 확보계획 적합**
 - 다중방호사고관리전략(MACST), 다중방어운영지침(MOG), 비상대응전문가팀구성(SAFE-T), 소내비상대응거점신축(~'23), 사고전략-인간공학 유효성 등 적합

대표원전 ST 검증결과(안)

안전기능 상실, 중대사고, 방재 대응능력 및 운영기술능력

안전개선사항(안)

안전기능상실 대응능력

- 축전지 비상충전 확보(4)
- 이동형 대체설비의 성능 등 상세설계 내용 확인(1)
- 이동형발전설비 전원공급을 위한 케이블 연결함 체결방식 변경(2)
- 최종열제거원 복구용 이동형고유량펌프 확보 및 성능검증 수행(2,3,4)
- 보조급수펌프 격실문 개방 조건에 대한 보조급수펌프 격실 온도 분석 및 보조급수펌프의 운전가능성 확인(1,3)

중대사고 관리능력

- 극한자연재해 시 1차측 감압성능 개선을 위한 가압기 PORV 작동 방안 보완(2)
- 이동형고유량펌프를 이용한 원자로건물 내부살수 및 핵분열생성물 방출제어 기능 확보(2)
- 전산코드 간 거동 차이에 대한 상세 추가평가 수행(2,5)

방재 및 비상대응능력

- 외부 지원계획에 따른 대응능력 추가확보 유효성 평가(공통)
- 위성통신의 생존성 평가 및 통신음영 최소화방안 평가(공통)
- 통신설비 추가확보, 상세운영절차(수령방법·위치, 사용자, 사용시점 등) 수립(2,3,4,5)
- 비상발령기준 검토·발령에 관한 일반사항(지침) 작성(2)
- 비상운영지원실의 개선을 통한 비상대응능력 확대방안 수립(2)
- 추가확보 예정설비의 절차서 연계 적절성 평가(1)
- 제2제어실 거주성 개선을 위한 이동형 공기정화기 확보(4)

대표원전 ST 검증결과(안)

안전기능 상실, 중대사고, 방재 대응능력 및 운영기술능력

안전개선사항(안)

방재 및 비상대응능력(계속)

- 제2제어실 거주성 개선을 위한 이동형 공기정화기 확보(4)
- 비상대응시설 거주성 재확보를 위한 회복방안 결정기준 및 절차 수립(1,2,3,4)
- 비상대응시설 내 요원의 내·외부피폭 대비능력 재확인(1)
- 설계기준초과 사고시 운전원 및 비상대응요원의 피폭선량 평가(2)
- 다수기 사고 시 안전정보표시계통 기능유지 방안 평가(2,3,5)

운영기술능력

- 사고대응전략에 따른 1MW 및 3.2MW 이동형발전기 연결시점 및 방법 등이 명시된 운영전략 및 절차 수립(1)
- 이동형대체설비 시나리오에서 발생 가능한 인적오류 및 의사결정오류 분석(3,4,5)
- 다중방어운영지침서 수립 및 기존 절차/지침과의 연계성 확보(1,3,4,5)
- 이동형대체설비 상세 실증평가, 운영계획 및 교육훈련 수립·이행(공통)
- 주제어실, 비상기술지원실 및 현장 간의 의사소통능력 강화(1)
- 지진 혹은 비상발령 시 현장운전원 대기 위치가 명시된 절차서 수립(1)
- 이동형발전기 차고지 및 연결지점 조명기구류의 확보·관리방안 수립이행(1)
- 다수호기 동시사고 대응능력 확보방안 구체화(1)
- 다수기 동시사고 상황에서 발생 가능한 인적오류/의사결정오류 분석 및 대응방안 수립(2,3,4,5)
- 다수기 동시사고 시 주요 운전원 조치별 의사 결정 조직 및 인력의 적합성 평가(4,5)
- 다수기 동시사고 고려 사고대응전략, 주요 운전원조치, 자원에 대한 실증평가(공통)

대표원전 ST 검증결과(안) 안전개선사항 도출 및 이행 관리

목적

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

현황

(한수원/KINS검증단)

	1분야	2분야	3분야	4분야	5분야	6분야	안전개선
한울3·4	2/3	5/7	4/2	2/0	1/5	5/8	19/25
한빛1·2	0/4	4/6	3/2	2/0	1/5	5/7	15/24
고리2	0/3	4/8	3/3	3/3	1/8	5/7	16/32
한울1·2	1/4	4/9	3/0	3/1	1/4	3/8	15/26
월성2	0/5	6/9	2/2	1/0	0/5	4/8	13/29
차이분석	0	0	2	4	1	0	7

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 보고 시)
⇒ 중장기적으로 효율적인 이행 및 관리방안 마련 추진

검증 신뢰도 제고 노력

국민수용성증진방안, 기술적 객관성, 과정의 투명성

검증 신뢰도 제고 노력_기술적 객관성 IAEA 독립 검토

- ▶ **기간** : 2018. 8(서류검토), 9. 3-11(현장실사)
- ▶ **대상** : 스트레스테스트 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

민간전문가Pool 기술자문

• 자문 내역

- ✓ 분야별 및 지역별 35인 전문가 pool 구성
 - 분야별 : 지진(4), 해일(2), 기상(2), 구조(3), 기계(3), 계측전기(5), 지진PSA(1), 화재(2), 계통(2), 중대사고(4), 방재(3), 운영능력(4)
 - 지역별 : 경상(12), 경인(8), 충청·호남(16)
- ✓ 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 87건
- ✓ 스트레스테스트 범위 이외의 검토의견 활용
 - 여타 안전규제 심사 시 활용(예, 사고관리계획서, PSR, 방재훈련 등)

검증 신뢰도 제고 노력_과정의 투명성

홈페이지운영 및 지역과의 소통

스트레스테스트 홈페이지 운영

- ✓ '[스트레스테스트 정보공개](#)' 홈페이지 확대 운영 실시('18.3~)
 - 공개정보: 기본정보, 수행결과, 질의/답변, 현장점검결과, 검증결과, Q&A 등
- ✓ 스트레스테스트 새소식 알림 ※ ST 홈페이지를 통해 신청가능
 - 원자력안전협의회, 민간환경감시기구 대상 신청요청공문 발송('18.6)
 - 새소식 알림 신청 및 수신자 현황 : 총원 약 120여명
 - ✓ 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, 한수원 수행결과, 검증결과 등에 관한 사항을 정례회의에서 보고
 - ✓ 한울('17.12, '18.7, '18.11, '19.7, '19.10), 고리('18.1, '18.10, '19.4), 고창·영광('17.4, '19.5), 월성('17.7, '18.10, '19.4)

검증결과 여론수렴

- 검증보고서(초안) [원자력안전정보공개센터](#)를 통하여 여론수렴(4주)
 - ✓ 고리2, 한빛1,2, 한울1,2: '19.8.13~9.5
 - ✓ 월성2: '19.10.15~11.11

결언

종합결론(안)

결언

KINS검증단은 한수원이 1단계 대표원전에 대해 스트레스테스트 수행지침에 따라 평가하였으며, 전반적으로는 극한 자연재해 발생시 해당 원전을 안전하게 유지할 수 있는 필수대응능력을 갖춘 것으로 판단

- 다만, 극한자연재해와 다양한 복합사고의 가능성 및 불확실성을 고려하여 보다 안정적이고 효과적인 대응능력 확보에 필요한 개선필요사항 또는 추가 확인 필요사항 확인됨
- 개선필요사항에 대해서는 **안전개선사항***을 도출하였으며, 한수원이 계획에 따라 이행하여 최종적으로 **극한재해대응 능력을 완성하도록 할 예정임.**

*** 한울3,4-25건; 한빛1,2-24건; 고리2-32건; 한울1,2-26건; 월성2-29건(※ 1단계 통합 53건)**

원전별 안전개선사항은 통합하여 종합이행계획 수립 예정

- 대표원전 검증 안전개선사항에 대한 종합이행계획수립 및 우선 시행
- 사안에 따라 단기, 중기 및 장기로 구분하여 단계적, 체계적 이행 관리

감사합니다

