

세부기술(과제)별 대상원전, 성능목표 및 안전여유도

○ (예측분야)

세부기술 (과제)	대상원전	성능목표(①현재수준, ②개발수준)	측정방법 (객관적근거)	안전여유도 달성 목표 (①CDF 기여, ②대상기기)
1-1-1 원전환경 이상상태 스마트 센싱 기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 이상상태 감시 정확도 및 감시영역 2배 향상 ①현재수준: 격납건물 내의 원자로냉각재계통 이외의 주증기계통, 안전주입계통 등에는 현재 구조상태감시용 센서 미설치 ②개발수준: 탐지 위치 분해능 1m 이내, 감시 사각지대(원자로냉각재계통 외 구조상태감시용 센서 미설치) 1/2수준 저감)	공인시험평가 기관을 통하여 현재 가동 중 원전에 적용된 외산 센서와 비교평가(감시정확도: 공인인증기관 정상상태 오차율 기준 <0.25% (오차율 = (교정센서감도값-실제측정감도값)/교정센서감도값×100%), KEPIC END-1100 및 IEEE Std-323 기준 내환경 검사 조건: 온도(사고 온도 조건 +8 ℃), 방사선(사고조건 TID +10%))	- 달성목표: 1차계통 핵심설비 고장·결함 안전 여유도 30% 향상 ①CDF기여 : 핵심설비 고장·결함 초기발생 유발 CDF 1/6 감소 ②대상기기: 원자로 용기, RCP 펌프, 증기발생기, 배관
1-1-2 회전설비 인공지능형 진동 감시 시스템 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 사고 대응시간 10배 향상 ①현재수준: 사고 대응시간 10일 ②개발수준: 사고 대응시간 1일	원전 이상 발생시 기존 전문가 투입에 따른 소요시간 평균 10일에서 실시간 인공지능 진단으로 1일 이내 진단	- 달성목표: 회전설비 상태감시 회전설비 고장 안전 여유도 40% 향상 ①CDF 기여: 회전설비 초기사건 유발 CDF 1/4 감소 ②대상기기: 터빈, 주급수 펌프, 대기기기 등 주요 회전설비 약 900대
1-2-1 설비 이상/고장 빅데이터 생산 및 고장진단 지능화 기술개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 1)고장진단 정확도 향상 ①현재수준: 70% ②개발수준: 90%이상 2)신속대처를 위한 누출 조기진단 ①현재수준: 1gpm 이상 누출을 1시간이내에 진단 가능 ②개발수준: 0.25gpm 이상의 일차계통 누출을 10분이내에 조기 진단	- 실규모 테스트베드에서의 진단 정확도 성능 검증(국내 연구소보유 대규모 시험인프라 활용, 진단정확도=진위판별 성공개수/총판별개수×100%) - 발전소 전주기점검 데이터를 이용한 진단정확도 90%이상 달성 검증 (진단설비 경보기능 점검용 데이터 활용)	- 달성목표: 일차계통 기기·구조물 고장·사고에 방관련 안전여유도 25% 향상 ① CDF 기여: 일차계통 냉각재상실사고/원자로 파손/주증기관 파단 발생빈도 저감을 통해 내부위험 CDF 1/6 저감 ② 대상기기: 원자로용기, 증기발생기, 가압기, 주증기관

세부기술 (과제)	대상원전	성능목표(①현재수준, ②개발수준)	측정방법 (객관적근거)	안전여유도 달성 목표 (①CDF 기여, ②대상기기)
1-2-2 엠텔컴퓨팅 기반 원격진단 기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: ①현재수준: 초저전력 무선센싱 기술 없음, 기기 진단 정확도 70%수준, 무중단 원격진단 기술 없음 ②개발수준: 배터리 하나로 18개월 이상 무선센싱(무선센서 적용으로 광역 감시체계구축), 지능형 원격진단 정확도 90% 이상, 초저가의 임베디드 컴퓨터들을 이용한 클라우드 네이티브 환경 개발을 통해 무중단 원격진단 수행 환경구현	- 무선통신 기반 초저전력 무선센싱과 지능형 진단정확도는 국제표준에 근거하여, 3자 독립검증을 통해 성능 입증(RFI/EMI 인증, 지능형 진단정확도 90% 이상, 9,000 mAh 배터리로 무선센서 모듈 18개월 이상구동) - 클라우드 네이티브 인증기관의 무중단 원격진단 프로세스 인증취득으로 성능입증(전체 컴퓨터의 80%가 정지된 경우에도 원격진단 지속 수행) - 인증 받은 기술은 KINS 인허가를 취득	- 달성목표: 이차계통 사건발생빈도 저감을 통해 이차계통기기 장기가동 관련 안전여유도 26% 향상 ① CDF 기여: 이차계통(주급수상실/복수기진공상실 및 세관파단) 사건발생빈도 저감을 통해 내부위험 CDF 1/10 감소에 기여 ② 대상기기: 주급수기, 복수기, 압력용기, 펌프, 안전밸브, 증기발생기 세관
1-2-3 원자로제어 계통 및 디지털 I&C 손상진단 기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: ①현재수준: 계측제어계통 부품 등 고장 및 손상탐지는 주기시험 등을 통한 운전원 판단에 의존, 계측제어계통 신뢰도 분석결과 기준으로 교체 주기마다 교체 ②개발수준: 계측제어계통 등 부품 고장탐지율 95%, 계측제어계통 환경변화에 따른 고장예측율 95%	- 계측제어계통 부품 등 고장 탐지율 측정 방법: Test case (부품 등의 고장)를 활용한 성능시험을 통해 고장탐지율 측정 $((\text{탐지율}) = (\text{탐지성공개수} / \text{총 Test case}) \times 100\%)$ - 계측제어계통 고장 예측율 측정 방법: Test case (운용 환경 변화, 노화 등에 의한 고장)를 활용한 성능시험을 통한 고장예측율 측정 $(\text{예측율}) = (\text{예측성공개수} / \text{총 Test case}) \times 100\%$	- 달성목표: 계측제어계통 고장을 조기 예측하여 조치함으로써 계측제어 관련 안전여유도 15% 향상 ① CDF 기여: 내부위험 CDF 1/8 저감 ② 대상기기: 계측계통, 제어봉제어계통, 공정제어계통, 보호계통
1-2-4 원전 사이버위협 탐지 및 대처 기술 개발	APR1400	- 성능목표: 사이버위협 대비 90%이상 탐지율 확보 ①현재수준: 10%미만 ②개발수준: 90%이상 탐지	- 현존 사이버위협 발생으로 인한 탐지율 $\left(\frac{B}{A} \times 100(\%) \right)$ 검증 $(90\% \text{ 이상}), \text{ 사이버위협 탐지율} = \frac{B}{A} \times 100(\%)$ *B:악성코드로탐지된 사건수 A:악성코드에의한 전체사건수	- 달성목표: LOCA 및 일반과도사건 안전여유도 25% 향상 ① CDF 기여: 내부위험 CDF 1/10 저감 ② 대상기기: 디지털 안전/비안전 계통 및 제어시스템
1-2-5 AI 기반 인적오류 방지기술 고도화	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 인적오류로 인한 불시정지 50% 저감 ①현재수준: 인적실수로 인한 불시정지 25% 수준 ②개발수준: 인적실수로 인한 불시정지 1/2 저감(과거 인적실수 사건·사고에 대한 의사결정 대응 2배 향상)	- 인적실수로 인한 불시정지 발생건수 (OPIS 분석 기준 과거 사건·사고수 (A) 대비 기술 개발 후 대응 가능한 사건·사고수 (B) : $\left[1 - \left(\frac{B}{A} \right) \right] \times 100(\%)$	- 달성목표: 인적오류 사고 여유도 35% 향상 ①CDF 기여: 1/10 저감 ②대상기기: 계측제어시스템(MMIS)

○ (예방분야)

세부기술 (과제)	대상원전	성능목표(①현재수준, ②개발수준)	측정방법 (객관적근거)	안전여유도 달성 목표 (①CDF 기여, ②대상기기)
2-1-1 사고저항성 향상 혁신 핵연료 소재 부품 개발 및 상용화	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 현 상용핵연료 대비 수소폭발 저항성 10배 향상(고온산화속도 10배 저감) 및 방사성물질 방출억제 10배 향상 ①현재수준: 피복관 산화반응속도상수(K_p)값 6.5×10^{-4} (@1200°C), 소결체 방사성물질 방출율 6.47×10^{-8} (@1300°C) ②개발수준: 피복관 산화반응속도상수(K_p)값 6.5×10^{-5} (@1200°C), 소결체 방사성물질 방출율 6.08×10^{-9} (@1300°C)	- 정비기간중 비파괴 방법(ECT)으로 핵연료 피복관 산화막 두께 측정(현재 최대산화막 두께 100 μm) - 핵연료 소결체 고온 열전도도 측정(온도) 및 방사성물질 방출을 평가 [$D=D_{th}(T)+D_{ath}(T)+D_{mix}(T)$, $f=3(D/\lambda a^2)^{1/2}$] - 정상/사고조건시 핵연료 성능 목표(수소폭발 저항성, 방사성물질 억제) 평가(사고환경 고온산화속도 측정, C-P 관계식, $K_p=6020 \exp(-83600/RT)$, $g/cm^2/s^{1/2}$) 적용평가	- 달성목표: 정상상태 여유도 100% 향상, 사고여유도(PCT, ECR) 50% 향상 ①CDF 기여: 장기가동 및 인적요인 CDF 1/2 감소 ②대상기기: 핵연료
2-2-1 노심구조부 품 손상예방 크러드 저감기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 원자로 냉각계통 부품 고장시간 30% 향상 ①현재수준: 가동중 냉각계통 부품 고장시간 예측 불가, WH 원전 노심부품 손상볼트 정비기술 확보 ②개발수준: 가동중에 발생하는 부품의 고장시간 30% 향상, 노심부품 보수기술 범위 100% 확대 (WH 원전 → 전 원전 (OPR/APR))	- 복합환경 냉각계통 부품손상 DB 구축 및 저감기술 평가 (연구기간 내 확보되는 DB를 통해 성능예측 곡선 산출 후, 저감기술 적용에 따른 고장시간 개선율을 수치화($=t(\text{적용 후})-t(\text{적용 전})/t(\text{적용 전}) \times 100$)) - Mockup 활용 보수시연 및 상용 비파괴 검사를 통한 성능검증 (보수성공율($\%$) = 보수후 탐지된 결함수/보수전 결함수 $\times 100$)	- 달성목표: 원자로 냉각계통 구조부품 고장 안전여유도 30% 향상 ①CDF 기여: 장기가동 및 지진위험 부품 고장 CDF 3/10 감소 ②대상기기: 원자로 노심구조부품, 1차 냉각계통

세부기술 (과제)	대상원전	성능목표(①현재수준, ②개발수준)	측정방법 (객관적근거)	안전여유도 달성 목표 (①CDF 기여, ②대상기기)
2-3-1 다중고장사고 예방 원자로 계통 안전강화 기술개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 노심손상빈도 1/2 이하로 저감 및 대형냉각재상실사고 발생확률 1/100 이하 저감 ①현재수준: 노심손상빈도 2.69×10^{-6} (내부 위험기준) - 대형냉각재상실사고 발생빈도: 2.89×10^{-6} ②개발수준: 노심손상빈도, 9.29×10^{-7} (내부 위험기준); 대형냉각재상실사고 발생빈도, 2.89×10^{-8} 이하	- 안전해석코드 활용 노심손상빈도 위험도 평가: 다양한 사고경위에 대한 위험도(Risk) 분석 $(\text{Risk}) = \sum_i (F_i \times C_i)$ Fi는 다양한 사고의 발생가능성, Ci는 사고경위에 따른 결말 추정) - 대형파단 배제설비 성능평가: 1) 발생빈도: NUREG 보고서 (NUREG/CR-2189, Vol. 5)의 산식을 이용함. (배관의 물성치, 하중, 응력 등을 통해 계산된 미세파단 크기가 문턱파단 크기보다 큰 경우 대형파단이 일어난다는 논리) 2) 노심손상빈도 위험도 평가: 대형파단 배제설비 설치에 따른 노심의 건전성 증대 정량적 평가는 위험도로 분석함. $(\text{Risk}) = F \times C$ F는 대형파단 사고 발생빈도, C는 대형파단사고가 노심손상으로 이어질 확률)	- 달성목표: 원자로계통 안전여유도 증가에 따른 조건부 노심손상확률 (CCDP) 1/2 이하 저감 및 대형냉각재상실사고 발생확률 1/100 이하 저감 ①CDF 기여: 내부위험 노심손상빈도 1/2 이하로 저감 ②대상기기: 노심, 원자로 계통, 격납 건물, 안전계통 및 대형파단 배제설비
2-3-2 계통영향 정보 기반 원전 화재 사고 저항성 강화 기술	OPR1000/ APR1400	- 개발내용: 계통영향 정보 (화재 발생이 계통/기기 의 기능 상실 및 오작동, 운전원 오류에 미치는 영향) 기반 원전 화재사고 저항성 강화기술 개발 - 성능목표: 기존 가동원전 대비 화재사고 안전성 2배 향상 (화재 CDF 1/2 감소) ①현재수준: 1.5×10^{-5}/년 (CDF) ②개발수준: 7.5×10^{-6}/년 (CDF)	화재발생빈도, 화재진압 실패확률, 조건부 노심손상확률 각각의 감소 효과 평가 (기존의 80% 수준: $0.8 \times 0.8 \times 0.8 \approx 0.5$)를 통한 화재유발 CDF 7.5×10^{-6}/년 수준 저감 확인	- 달성목표: 화재사고 여유도 100% 향상 ①CDF 기여: 화재유발 CDF 1/2 감소 ②대상기기: 전체 계통/ 기기

세부기술 (과제)	대상원전	성능목표(①현재수준, ②개발수준)	측정방법 (객관적근거)	안전여유도 달성 목표 (①CDF 기여, ②대상기기)
2-4-1 극한/복합 자연재해 대비 원전 구조물/기 기 안전성 향상기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: ①현재수준: 외부재해 유발 노심손상빈도 4.74×10^{-7} ②개발수준: 외부재해 유발 노심손상빈도 2.37×10^{-7}	극한/복합재해 대비 사고완 화설비 신뢰도(취약도 성 능) 향상(예: 현재 설계 극 한풍속 51 m/s → 설계초 과 안전성확보목표 풍속 약 85 m/s 등)으로 1·2 차측 열제거원 상실사고 발생확률 50% 저감 (CCDP 기준 2.24×10^{-3} → 1.12×10^{-3})	- 달성목표: 극한/복합 자연재해 대비 원전 안전여유도 50% 향 상 ①CDF 기여: 극한/복 합재해 유발 CDF 1/2 감소 ②대상기기: 옥외 안 전정지계통 설비 일체
2-4-2 설계초과 강진 대비 기기 안전성 향상기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 입력지진적합 성 50%향상/지진대응시 간 50%저감 ①현재수준: 부지고유응 답스펙트럼 부재, 조 기 지진대응시간 8시간 (지진유발 CDF 1.44×10^{-5}) ②개발수준: 부지고유응 답스펙트럼 개발, 조기 지진대응시간 4시간 (내진보강을 통한 지진유 발 CDF 5.23×10^{-6})	- 지진재해도 최적평가를 통한 재해도 불확실성 저감 ($\langle$활성단층 중복고려 배제)$\rangle$/ ($\langle$활성단층 고려 재해도)$\rangle$ = 0.8) 20% 이상 저감 - 취약설비 내진성능 보강 (현 재 OPR1000 기기취약도 수준 0.3g→APR1400 기 기취약도 0.5g수준) 으로 인한 지진취약도 50%이상 향상	- 달성목표: 내진 안전 여유도 30% 향상 ①CDF 기여: 지진유 발 CDF 1/2 감소 ②대상기기: 노심설비, 안전정지계통
2-4-3 사고진행 다변성 반영 다수기사고 확대 방지기술	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: 기존 가동원전 대비 다수기 안전성 2배 향상 (다수기 CDF 1/2 로 저감) ①현재수준: 2×10^{-5}/년 (부지별) ②개발수준: 1×10^{-5}/년 (부지별)	국내 원전 부지별 맞춤형 다수기사고 확대 방지기술의 안전성 향상효과 평가 (방지 기술 도입 전과 도입 후의 다수기 CDF 비교)	- 달성목표: 국내 원전 부지별 다수기사고 여 유도 100% 향상 ①CDF 기여: 다수기 CDF 1/2 감소 ②대상기기: 전체 계 통/기기

○ (대응분야)

세부기술 (과제)	대상원전	성능목표(①현재수준, ②개발수준)	측정방법 (객관적근거)	안전여유도 달성 목표 (①CDF 기여, ②대상기기)
3-2-1 격납건물 내 부유 방사성물질 저감설비 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: ①현재수준: 중대사고 시 격납건물 내 방사성 물질 저감 설비 없음(제염계수 1) ②개발수준: 에어로졸 필터 제염계수 90, 요오드 흡착제 효율 50 이상	- 중대사고 조건에서 에어로졸 필터(ASME- AG-1 또는 KEPIC- MH 방법), 요오드 흡착제(ASTM D 3803 방법) 제염계수 측정, (제염계수 = 흡착제입구농도/흡착제출구농도) - 방사성물질 저감설비 성능: 중대사고 환경을 모사할 수 있는 실증 실험장치 구축 및 제염계수 측정 (제염계수=입구농도/출구농도)	- 달성목표: 격납건물 내 방사성물질 98% 저감 ① LERF 기여: 격납 건물 파손 유발 LERF 10% 저감 ②대상기기: 격납건물
3-2-2 격납건물 내 부유 방사성물질 저감설비 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: ①현재수준: 실내 비상작업 수행 불가, 실외 누출차단 작업 수행 불가 ②개발수준: 실내 비상작업의 50%, 실외 누출차단 작업 50% 이상 수행 가능한 무인지원 플랫폼 개발	리스크가 높은 사고 중에서 LERF 저감효과가 높은 유효 비상작업 군(실내 20종, 실외 4종)을 도출하고 (개수 N), 유사환경 시험검증을 통해 실제 지원 가능한 비상 작업 개수 M의 비율을 산출 (=M/N*100)	- 달성목표: 실내 비상작업, 실외 누출차단 작업 50% 향상 ①LERF 기여: 격납건물 파손 유발 LERF 10% 저감 ②대상기기: 1차/2차 냉각계통 배관/주요밸브 등, 원자로/보조/연료건물 외벽
3-2-3 사고시 소외방사선 실시간 계측 및 대응 기술 개발	OPR1000/ APR1400	- 성능목표: ①현재수준: 초저전력 및 내방사선 계측기 미 적용, 현장 감마분석 정확도(40% 수준), 기존 해양 해석기법은 2차원, 평균 5% 오차, 선량 역추적 현재 약 7일 소요 ②개발수준: 300Gy 내 방사성 및 핵종판별 1분 이내, 정확도 2배 향상, 해양 자연재해 재현 정확도 1% 이내, 선량 역추적 판독속도 5배 향상	- 초저전력계측기 동작 유무 평가: 300 Gy 이상 (IAEA 후쿠시마 사고 2011년 3월 15일 Log 참조 소외 선량 최대 400 mGy/h 에서 한달 운용 기준) - 초저전력계측기 핵종판별 시간: 1분 이내 판별 (표준 선원 기준, 현존 기술은 30분 소요) - 다공간 특성화된 무인탐사 시스템 측정오차: 20% 이내 (IAEA 실험실 방사능교차분석 평가기준 Maximum acceptable bias 20% 준용) - 태풍의 해일 관측자료 비교 검증: 오차 1% 이내 *최대 파고 재현율 = (계산치-관측치)÷관측치 × 100% - 불확도 20% 이내 수준 및 판독속도 5배 향상된 선량 역추적 (현존기술 7일 소요)	- 달성목표: 소외 실시간 방사선계측 공백 100% 저감, 신속대응 및 피폭관리 20% 강화 ①LERF 기여: 환경방출 유발 LERF 5% 저감 ②대상기기: 소외