

**혁신형 SMR 기술개발사업 '23년도 신규연구개발과제(과기부) 기술개요서
(품목공모형)**

RFP번호	2-6-과	공모유형	품목공모형
사업명	혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업 - 혁신기술 사업		
RFP명	즉발형 노내계측기 및 3차원 노심출력분포 합성법 개발		
PM분야	원자력	보안과제 여부	일반

1. 추진배경

☐ 추진배경

- 노내 핵계측기는 노심 내부의 국부적인 중성자속 크기, 변화율 및 분포를 측정하여 노심 안전인자를 감시하는 원전 안전운영의 핵심장비임.
- 3차원 노심출력분포 합성은 한정된 위치와 수량의 노내계측기 측정신호를 이용하여 노심의 상세정보와 안전인자를 평가하는 기술로, 새로운 출력분포 합성법 개발을 통하여 합성 불확실도를 감소시키고 운전여유도를 향상하는 기술개발이 필요함.
- 기존 노내 핵계측기에 사용되는 로듐 또는 바나듐 에미터 방사성 붕괴의 특성으로, 실제 중성자속 대비 최소 30초 이상의 신호지연이 발생하여 실시간 노심보호계통에 부적합함.
- 혁신형 SMR은 장주기, 탄력운전, 무봉산 운전 및 제어봉 삽입운전 등 기존 상용 원전 대비 노심운전의 어려움 및 운전제한치 감소 등이 예상되는 바, 충분한 운전여유도 및 안전여유도 확보가 필요함.
- 원전수출 경쟁사(WEC, AREVA)들이 주도하는 노내계측기 기반 노심보호계통 분야의 후발주자로서 기술경쟁력을 확보할 수 있도록 시급히 혁신적 원전기술 개발이 필요함.
 - 미국 WEC사는 로듐 SPND(Self-Powered Neutron Detector)와 백금 SPND를 일체형으로 하는 OPACELL을 개발한 경험 보유함.
 - 프랑스 AREVA사는 즉발형 노내계측기 기반의 노심보호계통을 개발하여 미국 NRC로부터 US-EPR 인허가 승인을 받음.
 - 미국 WEC사는 3차원 노심분석코드를 기반으로 실시간 노심감시, 분석 및 예측기능을 갖는 BEACON을 개발하여 미국 내 다수의 WH형 원전에 적용하여 운용되고 있음.
 - 향후, 즉발형 노내계측기 기술과 노심분석코드와 연계한 3차원 노심출력분포 측정은 향후 기술개발의 대세가 될 전망이다.
- 세계 최고의 즉발응답 및 안전등급 노내계측기와 3차원 출력분포합성법을 개발하여, 기존 원전의 노외계측기 신호를 사용하는 노심보호계통의 과도한 보수성을 제거함으로 혁신형 SMR의 운전여유도 및 안전여유도를 향상시키는 기술개발이 필요함.
- 한수원의 장수명 노내계측기 개발 사례에서 알 수 있듯이, 안전등급의 노내계측기 개발은 설계, 제작, 기기검증(EQ) 및 인허가 승인까지 최소 6년 이상의 기간이 필요함.
- 원전수출 경쟁사(WEC, AREVA)들이 주도하는 노내계측기 기반 노심보호계통 분야의 후발주자로서 기술경쟁력을 확보할 수 있도록 시급히 혁신적 원전기술 개발이 필요함.

2. 연구개발목표

○ 최종 목표 : 혁신형 SMR 노심보호감시용 즉발형 안전등급 노내계측계통 및 3차원 노심출력분포 합성법 개발 (목표 TRL: 6 (현재 TRL 수준 4))

○ 세부기술별 목표

세부기술	목표
세부기술 1	○ 즉발형 노내계측기 집합체(ICI) 개발 및 검증 ▶ 즉발형 노내계측기/열전대 설계 및 제작 ▶ 즉발형 노내계측기 연소특성 및 신호특성 평가 ▶ 즉발형 노내계측기 연구로 실증시험 및 민감도 결정법 개발 ▶ 즉발형 노내계측기 정적 및 동적 보상필터 개발 ▶ 즉발형 노내계측기 시작품 제작 및 기기검증(내진, 내환경) 시험 ▶ 즉발형 노내계측기/열전대 신호취득장비 개발
세부기술 2	○ 3차원 노심출력분포 합성법 개발 ▶ 실시간 노심설계코드 기반 출력연계계수 생산 방법론 ▶ 축방향 측정 노심출력분포 전개 방법론 개발 ▶ 3차원 노심출력분포 합성법 개발 ▶ 3차원 노심출력분포 합성법 불확실도 평가 ▶ 노내계측기 신호-중성자속-Box출력 변환 모듈 개발 ▶ 3차원 노심출력분포 합성 프로그램 구현 및 검증 ▶ 운영기술지침서 노심안전인자 및 안전여유도 계산 모듈 개발

3. 연구개발내용 및 성과목표

□ 연구개발내용

[1단계]

(1차연도)

- SPND(검출기), TC(열전대), Background(보상) wire 설계
 - 노내계측기 에미터(로듐, 바나듐, 코발트) 결정
 - 일체형 혼합구조 SPND, TC, Background 기본 설계
 - SPND 수량 및 위치 최적화 방법론 개발
- 노심설계코드 기반 출력연계계수 생산 방법론 개발
 - 노내계측기 핵단면적 생산 및 노심연소코드 개선
 - 3차원 출력연계계수 생산 방법론 개발
- 정밀도 5nA급 PDAS 및 TC(열전대) 신호처리 회로 설계

(2차연도)

- 채널별 즉발형, 장수명 SPND 최적화 및 불확실도 평가
 - SPND, TC의 채널내 최적 배치 및 출력분포 합성 불확실도 평가
- SPND wire 연구로 특성시험용 및 노내계측기 집합체 상세 설계
 - SPND 민감도 결정법 개발
 - 일체형 구조 노내계측기 집합체 상세 설계

- 시범 일체형 혼합구조 SPND wire 제작
- 즉발형 혼합구조 노내계측기용 커넥터 제작
- SPND wire 단위 실험실 특성시험
- SPND + 커넥터 + 케이블 연결 성능시험
- 3차원 노심출력분포 합성 알고리즘 개발
- 정밀도 5nA급 PDAS 및 TC(열전대) 신호처리 회로단위 성능 시험

(3차연도)

- 기기검증용 일체형 혼합구조 노내계측기집합체 Mockup 설계 및 제작
 - 기기검증용 Mockup 설계 및 제작
 - 기기검증용 커넥터 제작
- 시범 노내계측기 제작 및 성능시험
 - 혁신형 SMR용 시범 노내계측기 시작품 제작
 - 시작품 노내계측기 집합체 제작 검사(전기, 밀봉 등)
 - 노내계측기집합체 신호증폭기 성능 검증
- 기계적 노화시험 조건 결정 및 이론적 수명평가
 - 이론적 계측기 수명 평가
 - 기계적 수명 평가
- 일체형 혼합구조 노내계측기 기기검증(내진, 내환경) 시험
 - 계측기 집합체 + 커넥터 기기검증
- 노심내 노내계측기 집합체 장전 최적화 및 불확실도 평가
 - 노심내 노내계측기 집합체 장전 수량 변화에 따른 노심출력분포 계산
 - 노내계측기 수량에 따른 침투출력 및 침투값 불확실도 평가
- 3차원 노심출력분포 합성 프로그램 구현 및 검증

[2단계]

(4차연도)

- SPND 및 시작품 노내계측기 집합체 연구로 실증시험
 - SPND 및 노내계측기 연구로 동적 및 정적 성능시험 수행
 - SPND 동적 및 정적 동적보상 필터 개발
- 발전소 운전조건 적용 응력해석
 - 발전소 운전조건 결정
 - ASME 코드 적용여부 평가
 - 연계 계통 영향 평가
- SPND, TC 신호 취득용 시스템 및 캐비넷 제작

(5차연도)

- 3차원 노심출력분포 합성법 불확실도 평가
- 운영기술지침서 노심안전인자 및 안전여유도 계산 모듈 개발

□ 성과목표

세부 기술	단계	목 표	
세부 기술 1	1단계	1차년도	▶ 일체형 혼합구조 노내계측기 집합체 기본 설계
		2차년도	▶ 노내계측기 설계 민감도 ($> 1 \times 10^{-22} \text{Amp/nv}$)
		3차년도	▶ 노내계측기 집합체 기기검증(내진, 내환경) 시험 100% 만족
	2단계	4차년도	▶ 노내계측기 PDAS 신호처리 회로 정확도($< \pm 1\%$) 및 정밀도($\pm 5 \text{nA}$) ▶ 노내계측기 집합체 기능시험 (절연저항 $> 10^{11} \Omega$)
		5차년도	▶ 노내계측기 SPND 신호지연($< 0.1 \text{Sec}$) 및 선형성($< \pm 5\%$)
세부 기술 2	1단계	1차년도	▶ 노내계측기 핵단면적코드 정확도($< \pm 5\%$)
		2차년도	▶ 3차원 노심출력분포 합성법 불확실도($< \pm 0.1\%$)
		3차년도	▶ 3차원 노심출력분포 합성법 측정 불확실도($< \pm 10\%$)
	2단계	4차년도	▶ 3차원 노심출력분포 합성 프로그램 V&V 100% 만족
		5차년도	▶ 운영기술지침서 노심안전인자 및 안전여유도 계산 모듈 개발

4. 특기사항

○ 주관기관: 기업 (중소기업 참여 필수)

○ 특기 사항

- 2023년 3/4분기 기준으로 확정된 설계 내용을 반영하여 2차년도 이후의 사업계획서가 작성되어야 함. 설계의 변경으로 인해 연구내용의 중대한 변경이 예상될 경우, 사업단의 사전 검토 및 승인이 필요함

○ 기타 사항 : 없음

5. 연구개발기간 및 연구개발비

- 총 연구기간/정부출연금 : '23.5 ~ '27.12(총 56개월, , 3년+2년의 2단계)) / 31.5억원 내외 (민간부담금 18.5억원 내외)
- '23년 연구기간/정부출연금 : 9개월(1차년도 '23.5~'24.1) / 1.3억원 내외
 - * 2차년도는 '24.02~'24.12 (11개월)로 회계연도 일치
- 정부출연금 연차별 예산(안)

(단위: 억 원 내외)

기술개발 내용	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	합계
즉발형 노내계측기 및 3차원 노심출력분포 합성법 개발	1.3	6.3	8.2	9.4	6.3	31.5

※ 예산현황에 따라 변경 가능성 있음