

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

RFP번호	2-2-과	공모유형	품목공모형
사업명	혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업 - 혁신기술 사업		
RFP명	다물리통합 혁신형 SMR 3차원 노심검증 및 안전/성능해석 플랫폼 개발		
PM분야	원자력	보안과제 여부	일반
1. 추진배경 ☐ 추진배경 ○(제안 배경 및 사유) -혁신형 SMR은 노심, 증기발생기, 냉각재 펌프, 가압기 등이 모두 원자로 압력용기 내에 위치하는 일체형 원자로이므로 기존 가압경수로에 비해 내부 구조가 매우 복잡함. 이와 같은 계통을 해석하기 위해서는 압력용기 내에서 발생하는 냉각재 혼합 등 국부적인 3차원 현상을 모사하는 정밀 열수력 코드를 포함한 다중스케일 해석기술이 요구됨. -전력 간헐성에 따른 원자로 탄력운전과 무봉산노심의 열적여유도 평가를 위해 다차원(부수 스케일 이상) 다물리 노심 코드체계 확보가 필수적이며, 설계용으로 적용되는 노심코드 체계를 확인 및 검증할 수 있는 검증체계가 필요함. ○(기술개발의 시급성 측면) -2030년 SMR 상용화를 위해 국제적 기술개발 경쟁이 심화되고 있는 상황에서, 경쟁력 있는 설계를 위해 SMR 계통의 정밀 3차원 성능 및 안전해석 기술개발이 시급함. -기존 설계방법론의 보수성과 계산정확도 검증 및 불확실도 평가 등에 활용할 수 있는 참조 계산결과를 SMR 설계요구에 맞추어 적기에 제공해야 함. ○(정부지원의 필요성 측면) -수출을 목표로 하는 혁신형 SMR 사업은 원자로의 설계, 공사 등에 종합적인 기술개발이 요구되므로 국가 주도의 체계적인 계획 수립과 재정적 지원이 필요함. -세계 SMR 시장을 선도하기 위해서는 혁신형 SMR의 안전성과 열적여유도를 신속하고 정확하게 확인하는 등의 안전하면서도 효율적인 원자로 시스템 개발이 요구됨. -안전해석을 위한 계산 도구 확보 및 이를 활용한 안전한 노심 설계는 원전 수출과도 직결되는 기술이므로, 정부 주도의 신속한 개발이 요구됨. -추후 디지털트윈과 같은 차세대 기술 확보를 위해서도 본 3차원 노심검증 및 안전/성능해석 플랫폼 구축은 필수적임. ☐ 추진방향 ○(국외현황) -미국 NuScale은 1차원 열수력 코드를 확장한 nRELAP5를 사용하여 2020년 U.S.NRC로부터 소형모듈원자로에 대한 표준설계인허가를 획득하였음. SMR은 3차원적 현상이 중요함에도 불구하고 전 세계적으로 SMR 성능 및 사고해석 시 고정밀 통합해석을 수행하지 않았음. -미국에서는 CASL 프로젝트에서 다중스케일-다물리해석체계를 개발하여, 노심의 전주기			

연소도 동안의 모든 연료봉의 연료거동 및 출력분포를 추적계산하고, 부수로 단위의 열수력 조건을 평가하여 노심의 열적여유도 변화와 피복재온도에 대한 다물리 해석을 수행하였음. 또한, 코드 해석의 민감도와 불확실도를 평가하는 DAKOTA를 개발하여 원자로 해석을 정당화하는 도구로 사용하였음.

-미국 ANL 주관 NEAMS 과제는 미래형원전 설계, 이행 및 운전에 필수적인 시뮬레이션 능력을 갖추는 것을 목표로 하여, 여러 분야에서 성능/안전 해석 통합 코드 체계(IPSC)를 개발하고 이를 지원하는 여러 가지 연구가 수행 중임.

-EU의 NURESIM 과제에서는 중성자확산 코드(DYN3D) 또는 SPN 수송계산 코드(CRONOS-2)를 사용하여 부수로 단위에서 열수력 궤환효과를 적용하여 다물리 해석을 수행함.

○(국내현황)

-한국원자력연구원은 중소형원전 계통 해석코드인 TASS를 이용하여 SMART 원전에 대한 표준설계인허가를 획득하였으나 SMR 성능해석을 위한 3차원 고정밀 코드는 아직 개발된 바 없음.

-한국원자력연구원은 3차원 열수력 해석코드 CUPID를 개발하여 APR+ 원자로의 피동안전보조급수계통(PAFS) 자연대류 현상을 정확히 예측하였고, OPR1000 증기관파단사고와 APR1400 대형냉각재파단사고에 대한 3차원 사고해석을 수행하였음. 또한, 노물리 코드인 MASTER, DeCART, nTER와 핵연료 코드인 FRAPTRAN, MERCURY와 같은 고정밀 코드와의 연계를 통한 다물리 해석기술을 개발하였음.

-한국원자력연구원에서는 HEM(Homogeneous Equilibrium Model)에 근거한 부수로 해석코드 MATRA를 개발하고 SMART 노심 열수력 설계에 적용함. MATRA 코드 모델 수정 보완을 통해 SFR, 연구로, 블록형 고온가스로 노심 등으로 적용성을 확장함.

-한국원자력연구원에서는 미국 ANL과 I-NERI 과제를 통하여 DeCART-CFD 연계해석을 수행하였으며, 후속으로 서울대에서 수치원자로 개발 연구를 수행하여 2013년 첨단시뮬레이션 체계 TFT를 통해 원자로 전 계통을 포함하는 다물리 해석체계 구축 방안을 수립함. 또한 2015년 이후 SMART의 동시공학적 고정밀 시뮬레이터 개발 연구에서 다물리 연계를 통한 3차원 노심 상세해석 체계 구축을 위한 연구를 수행함.

-KEPCO-NF에서는 국내 가압경수로 노심 열수력 설계 적용을 위하여 HEM에 근거한 부수로 해석코드 THALES를 개발함.

○(추진방향 1) 3차원 정밀유동해석이 가능한 다물리 통합해석체계 개발

-혁신형 SMR은 사고 시 피동안전계통에 의하여 노심이 냉각되므로, 낮은 구동력과 복잡한 내부 구조물로 인한 복잡한 열유동 현상을 해석할 수 있는 능력이 필수적으로 요구됨.

-3차원 정밀 열수력 해석코드를 기반으로 나선형 증기발생기, 비상냉각수조 및 피동안전계통(예: PCCS)의 설계 및 안전해석에 활용할 수 있는 다중스케일 연계해석 체계를 개발함.

-다중스케일 해석 기능과 함께 열수력/노물리/핵연료 코드 기반의 다물리 통합해석체계를 개발하여 혁신형 SMR의 성능평가체계를 개발하고 최적화된 운전여유도를 도출하고자 함.

○(추진방향 2) 설계검증을 위한 고성능 다물리 노심해석체계 개발

-2030년대 SMR 세계시장을 선점하기 위하여, SMART 원천기술 및 APR1400의 상용기술을 접목한 SMR 혁신기술을 개발하고, 무봉산 노심의 탄력운전 능력, 노심의 안전성과 열적여유도를 극대화하여 경제성과 안전성 목표를 달성하고자 함.

-노심설계 분야에서 수행하는 ‘무봉산운전 노심해석코드체계 및 방법론 고도화’ 과제의 코드 검증용 자료와 인허가 지원자료를 제공하기 위하여 인허가 된 설계코드를 기반으로 한 다차원, 고정밀 노심해석체계를 개발하고자 함.

-탄력운전과 무봉산 노심 조건하에서 반응도 부가 사고의 강화된 규제요건을 만족하기 위해서는

고성능 다물리 노심해석체계가 요구됨. 한국원자력연구원에서 개발하고 유용성이 확인된 MATRA-FRAPCON, MATRA-MASTER 해석체계를 활용하여 탄력운전 중의 노심최적운전점과 노심설계코드 검증에 필요한 자료를 제공하려 함.

2. 연구개발목표

- 최종 목표: 혁신형 SMR의 3차원 현상을 정밀하게 모사하는 고정밀
노물리/핵연료/열수력 통합해석 플랫폼 개발을 통한 원자로 설계 검증 및 안전성 확보
(목표 TRL: 7 (현재 TRL 수준 5))
- 단계별 또는 기술별 목표

기술개발 내용	1단계('23~'25)	2단계('26~'28)
혁신형 SMR 3차원 고정밀 열수력 예측 및 검증 기술	○ 다공매질/부수로 모델 기반 전노심 3차원 열수력 해석기술 개발	○ 3차원 정밀 열수력 해석 기반 SMR 성능분석 및 안전현안 해결
다중스케일-다물리 통합 해석기술 및 설계검증 기술 개발	○ 혁신형 SMR 3차원 안전해석 및 성능 통합 플랫폼 구현 ○ 설계코드 기반 다차원 고정밀 노심 통합 플랫폼 구현	○ 다중스케일-다물리 통합해석 기반 혁신형 SMR 노심/유체계통 설계 검증체계 개발
혁신형 SMR 다물리 코드 기반 사고해석 방법론 및 인허가 지원 기술 개발	○ 다물리 통합해석기술 기반 유체/제어계통 모델링 및 안전해석기술 개발	○ 다물리 코드 기반 안전해석 방법론 개발 및 인허가 지원

3. 성과목표

□ 연구개발내용

- 1세부기술 : 혁신형 SMR 3차원 고정밀 열수력 예측 및 검증 기술
 - 혁신형 SMR 3차원 고정밀 열수력 해석코드 기능요건 정의
 - 피동냉각수조 및 원자로 3차원 자연대류/강제대류 해석기술 개발 및 검증
 - 고정밀 열수력 모델 기반 노심 유동분포 정밀해석기술 개발 및 검증
 - 성능해석을 위한 제어계통 및 유체기계 (펌프 등 특수기기) 모델링 기술
 - 운전조건에 따른 3차원 원자로 성능분석기술 개발 및 운전여유도 향상 기술
 - 3차원 이상유동해석 인공지능솔버 적용성 평가
- 2세부기술 : 다물리-다중스케일 통합해석 및 설계 검증기술 개발
 - 혁신형 SMR 3차원 다물리-다중스케일 통합해석기술 기능요건 정의
 - 부수로 기반 1차원 및 3차원 열수력 모델 연계 다중스케일 전노심 해석체계 개발
 - 다물리(노물리/핵연료/열수력) 통합연계기술 개발
 - 전노심 단위 다물리 설계해석 방법론 구축
 - 혁신형 SMR 설계검증용 노심해석체계 개발
 - 고정밀 설계해석을 위한 집합체 CHF 최적 예측 방법론 개선
- 3세부기술 : 혁신형 SMR 다물리 코드 기반 안전해석 방법론 및 인허가 지원 기술 개발
 - 원자로 하부공동 및 나선형 증기발생기 3차원 기기스케일 열수력해석 모델 개발
 - 일체형 원자로 및 피동안전계통 다중스케일 유동해석기술 개발 및 검증
 - 다중스케일-다물리 코드 기반 안전해석기술 개발
 - 다중스케일-다물리 해석방법론의 불확실도 평가 및 주요인자 분포 예측 기술

- 다중스케일-다물리 통합해석 기술 기반 안전해석 방법론 개발 (기술보고서 작성) 및 인허가 지원

□ 성과목표

○ 1세부기술 : 혁신형 SMR 3차원 고정밀 열수력 예측 및 검증 기술

단계		목표	
1단계 (‘23~‘25)	정량	1차년도	▶ 기술보고서(1건): 혁신형 SMR 3차원 고정밀 열수력 해석기술 기능 요건서
		2차년도	▶ 기술보고서(3건): 3차원 피동냉각수조 단상 및 2상 자연대류 해석기술 개발 보고서, 혁신형 SMR 고성능 슈퍼컴퓨팅 기술 개발 보고서, 정상 및 사고조건 3차원 열수력 2상유동 모델 개발 및 검증 보고서
		3차년도	▶ SCI 논문 평균 mrrIF 66.42이상 기술보고서(33건): 유체기계 및 제어계통 모델링 보고서, 일체형 원자로 강제 및 자연대류 해석기술 개발 보고서, 3차원 2상유동 인공지능 해석솔버 기술 개발 보고서
	정성	1차년도	▶ TRL 4 수준 (고정밀 열수력 코드의 성능 확인)
		2차년도	▶ TRL 4 수준 (고정밀 열수력 코드의 성능 검증)
		3차년도	▶ TRL 5 수준 (고정밀 열수력 코드의 성능 개선)
2단계 (‘26~‘28)	정량	1차년도	▶ 기술보고서(2건): 기기스케일 3차원 노심 유동분포 해석 및 검증 보고서, 3차원 전체 원자로 및 피동안전계통 연계 해석 보고서, 노심유동분포 예측 오차 10% 이내
		2차년도	▶ 원자로 해석 공간 해상도 0.001m 이하 기술보고서(2건): 3차원 노심 유동분포 고차정확도 해석 기술 개발 보고서, 혁신형 SMR 주요기기 고정밀 성능평가 보고서
		3차년도	▶ SCI 논문 평균 mrrIF 66.42이상 기술보고서(2건): 통합기술기반 일체형 원자로 성능평가 기술 개발 보고서, 혁신형 SMR 운전 여유도 평가 기술 개발 보고서
	정성	1차년도	▶ TRL 5 수준 (정밀 열수력 코드의 성능 개선)
		2차년도	▶ TRL 6 수준 (정밀 열수력 코드의 성능 검증)
		3차년도	▶ TRL 7 수준 (정밀 열수력 코드의 성능 검증)

○ 2세부기술 : 다중스케일-다물리 통합해석 코드 플랫폼 개발 및 통합 설계 검증기술 개발

단계		목표	
1단계 (‘23~‘25)	정량	1차년도	▶ 기술보고서(1건): 통합해석기술 기능 요건서, 설계문서 (1건)
		2차년도	▶ 기술보고서(2건): 통합연계기술 개발 보고서, 부수로 기반 전노심 해석체계 개발 보고서, 설계문서 (2건)
		3차년도	▶ SCI 논문 평균 mrrIF 66.42이상, 기술보고서(2건): 전노심 단위 다물리 설계해석 방법론 개발 보고서, 설계 검증용 노심해석체계 개발 보고서, 설계문서(2건): 고정밀 설계해석을 위한 집합체 CHF 최적 예측 방법론 개발
	정성	1차년도	▶ TRL 4 수준 (개별 다중스케일-다물리 코드의 확인)
		2차년도	▶ TRL 4 수준 (개별 다중스케일-다물리 코드의 검증)
		3차년도	▶ TRL 5 수준 (개별 다중스케일-다물리 코드의 검증)
2단계 (‘26~‘28)	정량	1차년도	▶ 기술보고서(1건): 다물리 통합연계기술 평가 보고서
		2차년도	▶ 기술보고서(1건): 전노심 단위 다물리 설계해석 방법론 평가 보고서,

		3차년도	핵비등이탈률 안전여유도 20%. 설계문서(2건), ▶ SCI 논문 평균 mmlF 66.42이상, 기술보고서(2건): 부수로 기반 전노심 해석체계 평가 보고서, 설계 검증용 노심해석체계 평가 보고서, 설계문서(1건): 고정밀 설계해석을 위한 집합체 CHF 최적 예측 방법론 평가
		1차년도	▶ TRL 5 수준 (다중스케일-다물리 연계코드의 확인)
		2차년도	▶ TRL 6 수준 (다중스케일-다물리 연계코드의 검증)
		3차년도	▶ TRL 7 수준 (다중스케일-다물리 체계 완성 및 검증)
	정성		

○ 세부기술 : 혁신형 SMR 다물리 코드 기반 안전해석 방법론 개발 및 인허가 지원 기술 개발

단계		목표	
1단계 (‘23~‘25)	정량	1차년도	▶ 기술보고서(1건): 원자로하부공동 3차원 기기스케일 열수력 모델 개발 보고서
		2차년도	▶ 기술보고서(2건): 나선형 증기발생기 3차원 기기스케일 열수력 모델 개발 보고서, 피동안전계통 다중스케일 유동해석 기술 개발 보고서
		3차년도	▶ SCI 논문 평균 mmlF 66.42이상 기술보고서(2건): 다중스케일-다물리 통합해석 기술 개발 보고서, 일체형 원자로 다중스케일 유동해석 기술 개발 보고서
	정성	1차년도	▶ TRL 4 수준 (개별 단위 코드의 검증 및 확인)
		2차년도	▶ TRL 5 수준 (다물리 코드 기반 안전해석기술 개발)
		3차년도	▶ TRL 5 수준 (다물리 코드 기반 안전해석기술 개발)
2단계 (‘26~‘28)	정량	1차년도	▶ 기술보고서(1건): 다중스케일-다물리 해석 불확실도 주요인자 분포 예측 기술 개발 보고서
		2차년도	▶ 기술보고서(1건): 다중스케일-다물리 해석 불확실도 평가 기술 개발 보고서 특정주제기술보고서(TeR,1건): 다중스케일-다물리 통합해석 기술 기반 안전해석 방법론 개발 보고서
		3차년도	▶ SCI 논문 평균 mmlF 66.42이상 기술보고서(2건): 다중스케일-다물리 코드 기반 안전해석 기술 개발 보고서, 다중스케일-다물리 코드 기반 안전해석 검증 보고서
	정성	1차년도	▶ TRL 5 수준 (다물리 코드 기반 안전해석기술 검증)
		2차년도	▶ TRL 6 수준 (다물리 통합 연계코드 적용: 안전해석 방법론 개발)
		3차년도	▶ TRL 7 수준 (다물리 통합 연계코드 적용: 인허가 지원)

4. 특기사항

○ 주관기관: 연구기관 (산업계, 학계 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
- 본 과제의 해석코드 선정은 사업단과 협의 필요

※ 예타 대비 세부기술별 이동·통합 내역

- 사유 : 연구 내용 연계 및 통일성 제고를 위해 세부기술의 통합 및 연구주제 이관

예타기준 6개 세부기술		개발체계에 따라 3개 세부기술로 분류	
○ 1세부기술 : 혁신형 SMR 정상운전 및 사고조건에 대한 3차원 정밀 열수력 예측기술	○ 2세부기술 : 다중 스케일 연계기술 및 혁신형 SMR 사고해석체계 검증	○ 1세부기술 : 혁신형 SMR 3차원 고정밀 열수력 예측 및 검증 기술 - 기존 3세부기술 중 고정밀 해석 및 성능해석과 관련된 3개 하위기술을 1세부기술로 편입함. - 기존 5세부 기술 내용을 ‘3차원 이상유동해석 인공지능술버 적용성 평가’ 주제로 통합하여 이관	
○ 3세부기술 : 성능해석 3차원 다물리 통합해석 코드개발		○ 2세부기술 : 다물리-다중스케일 통합해석 및 설계 검증기술 개발 - 다물리 연계가 공통기술임을 고려하여 기존 3세부 기술의 ‘다물리(노물리/핵연료/열수력) 통합연계기술 개발’을 2세부기술로 이관 - 기존 3세부기술과 6세부기술 병합	
○ 4세부기술 : 다중스케일-다물리 통합 해석 코드 불확실도 평가기술 개발		○ 3세부기술 : 혁신형 SMR 다물리 코드 기반 안전해석 방법론 개발 및 인허가 지원 기술 개발 - 기존 3세부기술과 4세부 기술 내용을 통합. 기존 4세부기술은 불확실도 평가기술은 3세부 기술의 하위 개념으로 축소하여 이관함. - 산업계의 요구에 대응하여 안전해석 방법론 개발과 인허가 지원 기술 개발 내용을 명시적으로 작성함. - 기존 1세부기술의 ‘원자로 하부공동 및 나선형 증기발생기 3차원 기기스케일 열수력해석 모델 개발’ 내용을 안전해석의 기반 기술로 고려하여 3세부기술로 편입함. - 기존 2세부기술의 ‘일체형 원자로 및 피동안전계통 다중스케일 유동해석기술 개발 및 검증’ 내용을 안전해석의 기반 기술로 고려하여 3세부기술로 편입함.	
○ 5세부기술 : 인공지능술버 기반 안전 해석코드기술개발			
○ 6세부기술 : 다차원 고정밀 설계검증용 노심 해석체계 개발			

5. 연구개발기간 및 연구개발비

○ 총 연구기간/정부출연금: ‘23.04 ~ ’ 28.12(총 69개월, 3년+3년의 2단계) /108.2억원 내외

○ ‘23년 연구기간/정부출연금: 9개월(1차년도 9개월) / 1.1억원 내외

○ 정부출연금 연차별 예산(안)

(단위: 억 원 내외)

기술개발 내용	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도	합계
다물리통합 혁신형 SMR 3차원 노심검증 및 안전/성능해석 플랫폼 개발	1.1	18	22.9	22.9	22.3	21.0	108.2

※ 예산현황에 따라 변경 가능성 있음