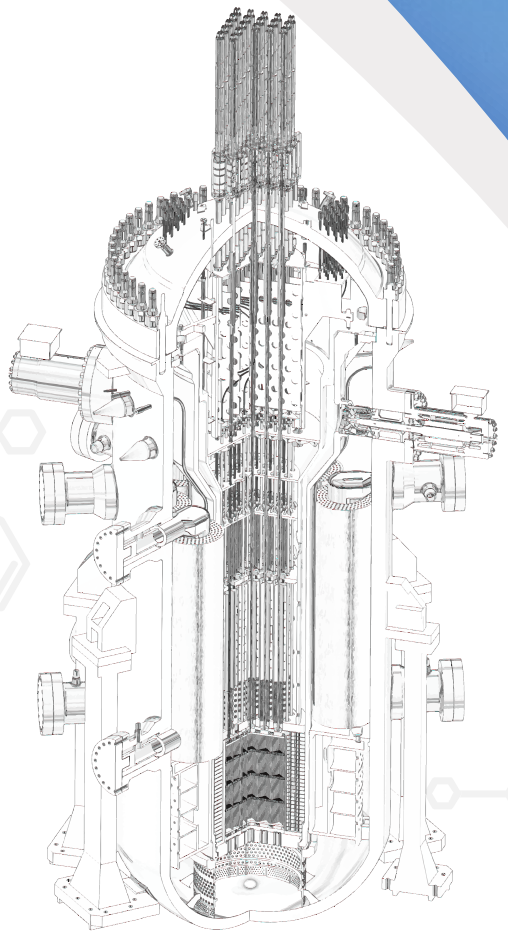
[B] 인공지능이 여는 원자로 해석의 새로운 패러다임

더 나은 세상을 위한 원자력기술,
국민과 세계가 지지하는 **한국원자력연구원**

한국원자력연구원
AI 활용 선진원자로 TFT 활동 성과



한국원자력연구원
장 성 동

2026.10.28.(수)

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute



더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

CONTENTS

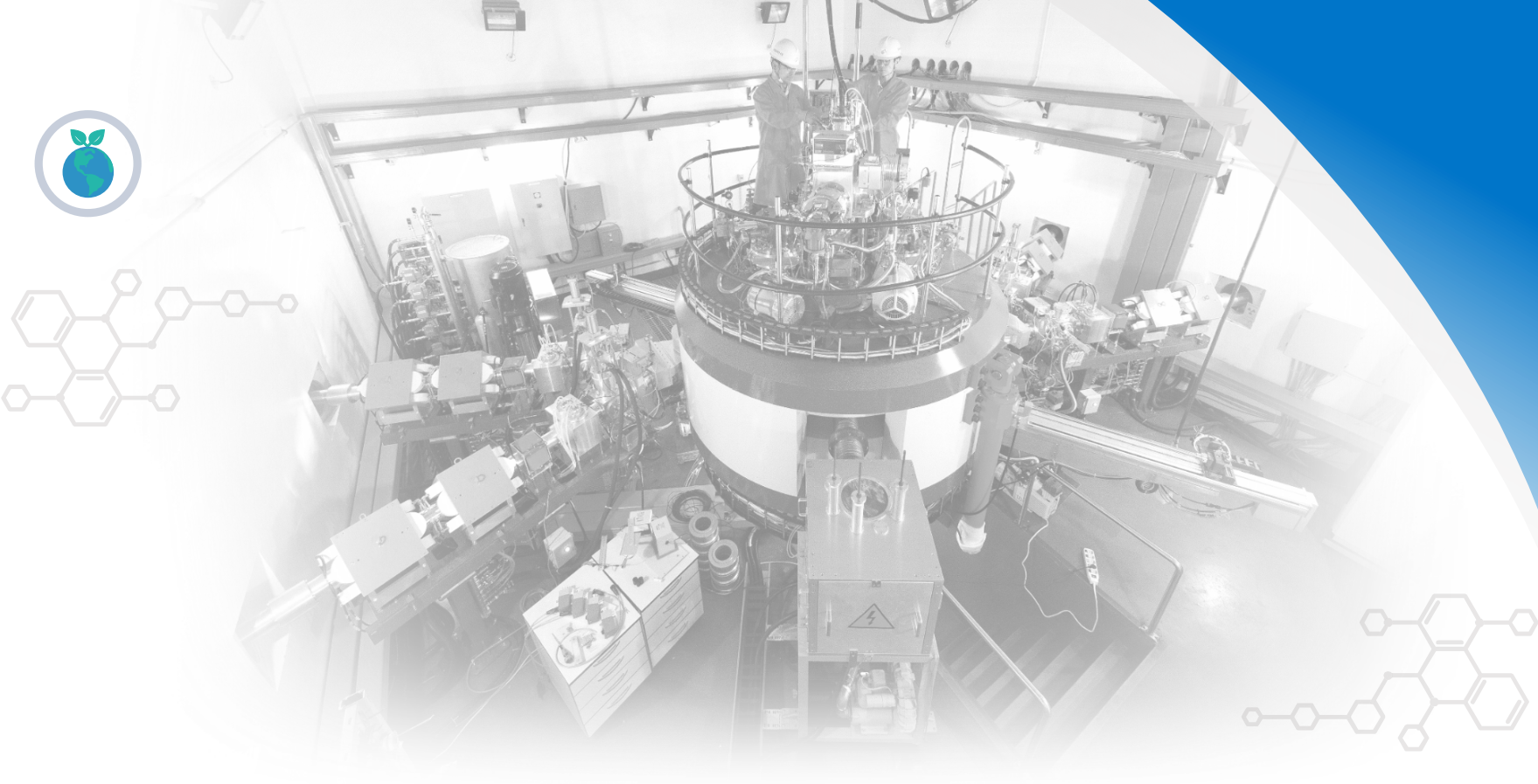
01 AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

03 (참고) AI 연구윤리 가이드

04 요약 및 결언

05 질의응답



[B] 인공지능이 여는 원자로 해석의 새로운 패러다임

AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

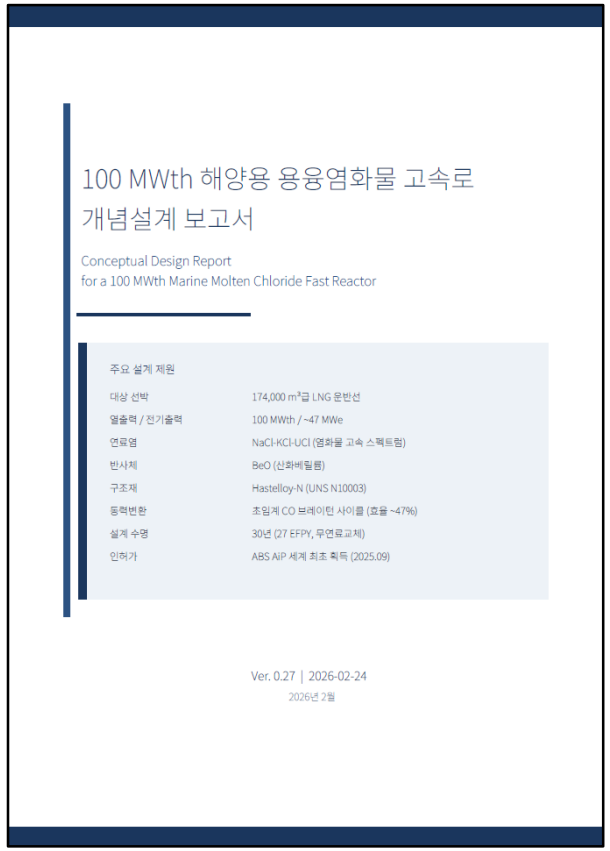
01

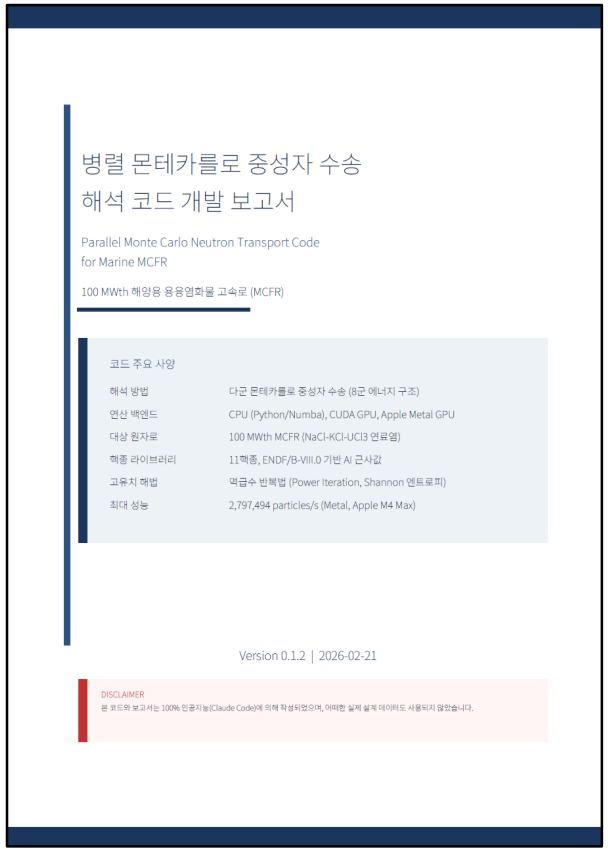
한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

01 AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

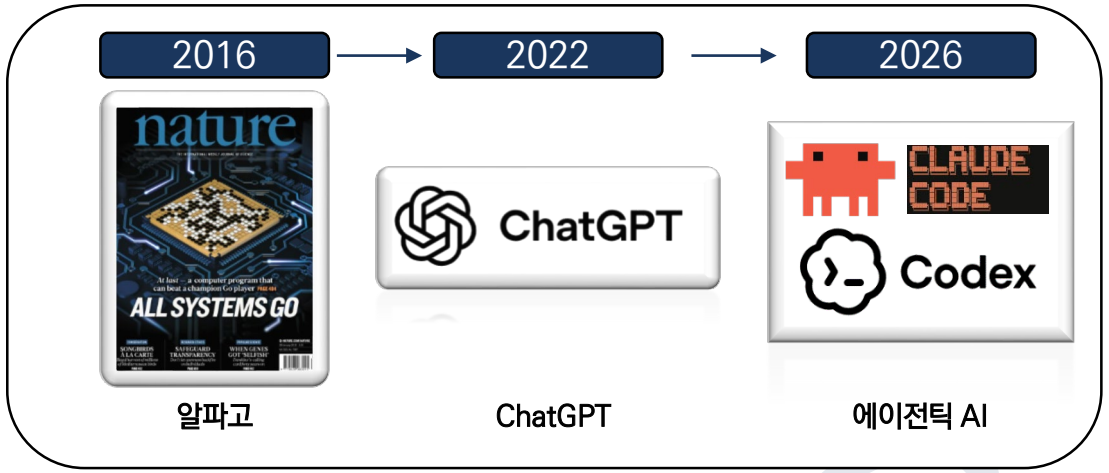
AI TFT 추진 배경

인공지능의 3번째 흐름 : 지적 작업 자동화 에이전트 (2026년 2월)





인공지능응용연구실 유용균 (전)실장
(현 국가과학AI연구센터(NAIS) 센터장)



인공지능 동향과 선진 원자로 운영 및 설계 적용 방안

일시 : 2026. 3. 13. (금) 13:30 ~ 15:00
장소 : INTEC 중강의실(103호)

클로드 코드를 활용한 자율 연구 에이전트 맛보기

일시 : 2026. 5. 6. (수) 17:30 ~ 18:00
장소 : 제주국제컨벤션센터(한국원자력학회) 3층 삼다홀B

"Reprinted with permission from Springer Nature: Nature, Vol. 529, Cover (2016) / Copyright 2016 Macmillan Publishers Limited."

01 AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

AI TFT 개요

추진배경

- 선진원자로 개념설계에 요구되는 코드 개발, 반복 계산, 다변수 최적화, 대량 문서화 작업 등에 AI 활용 시 효율성 향상 기대
  - 코드 생성, 설계 자동화, 문서 작성 자동화 관련 AI 기술이 최근 비약적으로 발전하였으나, 결과물에 대한 전문 검증 체계 부재
  - 보안·망분리, AI 모델 운용 및 인프라 구축 비용 부족 등의 제약 사항으로 인해 KAERI 내 AI 활용은 제한적

활동내용

- KAERI 내 선진원자로 개념설계 전 과정에서의 AI 활용 방안 수립
  - (기술적) KAERI 내 선진원자로 개발 전문인력을 활용한 AI 생산 결과물의 검증 및 개선 필요사항 도출
  - (절차적) 사이버보안, 경영행정 관련 부서와의 협의를 통해 KAERI 내 AI 활용을 위한 절차적 방안 수립

활동기간

- 2026.04.13. ~ 2026.07.31.

분과위원 구성

- 반장: 이민재 책임연구원(4세대원자로기술개발부)

순번	분과	소속	성함	직급(직위)
1	기반지식 고도화	4세대원자로기술개발부	윤승현	선임연구원
2		4세대원자로기술개발부	이승보	선임연구원
3		재료안전기술연구부	김채원	선임연구원
4		디지털원자로AI연구센터 인공지능응용연구실	전병일	선임기술원
5	전산·해석능력 확충	4세대원자로기술개발부	장성동	선임연구원
6		4세대원자로기술개발부	여동열	선임연구원
7		지능형사고대응연구부	이병희	책임연구원
8		선진핵주기기술개발부	이주호	책임연구원
9		디지털원자로AI연구센터 가상원자로연구실	임재욱	석박사후연수생
10		디지털원자로AI연구센터 가상원자로연구실	최재현	선임연구원
11	설계 체계 효율화	4세대원자로기술개발부	예휘열	책임연구원
12		디지털원자로AI연구센터 인공지능응용연구실	김승근	선임연구원
13	AI 에이전트 플랫폼	디지털원자로AI연구센터 인공지능응용연구실	서호건	선임연구원
14		디지털경영정보보안부 사이버보안팀	이용주	선임기술원
15		디지털경영정보보안부 사이버보안팀	박기현	기술원

01 AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

AI TFT 분과별 과제 소개

(1분과) 기반지식 고도화

- 감포 GPU 서버 활용, 자체 AI 모델 구축
- AI 학습을 위한 KAERI 보고서 파싱 스크립트 개발
- 보고서 파싱 자료 기반 학습 데이터 생성
- 보고서 기반 학습을 위한 최적 학습 전략 설정
- 병렬 AI 학습 및 학습 결과에 대한 전문가 피드백
- AI 활용 기반지식 고도화 연구 정리

(2분과) 전산·해석능력 확충

- AI를 활용한 전산 코드 개발·디버깅 사례 발굴
- AI 활용 다물리 해석 전산코드 개발 연구
- AI로 개발한 전산코드 검증 방안 연구
- 실제 전산코드 개발 및 검증 사례를 통한 AI활용 가이드라인 개발
- AI 활용 전산·해석 능력 확충 방안 제시

예상 업무

주요 성과

MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능평가

194문항 이중평가	5개 모델 규모별 비교	RAG lift 정량화
동결밸브(FV) (50문항) 동결플랜지(FF) (50문항) 안전해석 (50문항) 재료/설계 (44문항)	Nemotron3-4B Nemotron3-30B Nemotron3-120B Nemotron3-550B AtomicGPT-32B	+0.173 (+158%) +0.210 (+99%) +0.198 (+61%) +0.143 (+41%) +0.195 (+89%)

상세 성과자료 22건

노심해석 기반	다물리 해석	계통·기기	안전해석	코드개선/V&V
단면적 생산 코드 TPEN 대시보드 VVER-440 벤치마크 MOOSE 1편-활용 MOOSE 2편-해부 MOOSE 3편-확장	다물리 시뮬레이터 열화학-CFD 커플링 커플링 데모 단방향 커플링 상세	열교환기 설계 사이클· 엑서지	MSR-50 최종 MSR-50 중간 비상배출 이론 비상배출 결과 비상배출 V&V AI 경험기	커널 최적화 파싱 최적화 GUI 개선 V&V 벤치마크 DB

01 AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

AI TFT 분과별 과제 소개

(3분과) 설계 체계 효율화

- 설계문서·계산서 등 보고서 작성 자동화 방안 검토
- 보고서 양식 개발 및 AI 활용 초안 작성 연습
- 자동 작성 보고서 Template 개발
- 보고서 입력 형식 개발 및 검토
- 보고서 자동 작성 테스트 및 절차 보완
- 자동화 워크플로우 사례 개발 및 가이드라인 제시

(4분과) AI 에이전트 플랫폼

- 망분리환경에서 AI 사용 시 보안성 문제 확인
- 외부망 AI 사용 시 보안 강화를 위한 보안 Gateway 도입 절차 확인 및 연구원 환경 적용 타당성 검토
- 장비 확충 및 사용성 개선 등을 통한 내부망 자체 AI 모델 개선 방안 탐색
- 연구원 보유 자료 기반 내부망 AI 모델 학습 방안 모색
- 연구원 AI 시스템 개선을 위한 제언 정리

예상 업무

주요 성과

문서 작성 · 취합 · 지식 보존의 자동화 실증

AI 기반 문서 작성	문서 취합 자동화	설계지식 보존
• 인공지능 기반 문서 작성 – PPT 작성 가이드 • 회의록 작성 자동화 • 인간-AI 커뮤니케이션 오류 분류 체계 연구(심화)	• 다인 작성 보고서 취합 – HWPX 스킬 개발 여정 • 연구성과물 증빙 취합	• 世界原子力情勢 (세계원자력정세) 디지털 복원 작업 보고서

AI 활용에 따른 보안대책

핵심 원칙 3가지	활용 유형별 준수사항	자료 등급별 기준
• 자료 등급에 맞게 • 활용 유형에 맞게 • 착수 전 확인	• 기관에서 AI 시스템을 구축하는 경우 • 상용 AI를 사용하는 경우 • API 연계·에이전틱 AI를 활용하는 경우	• 기밀 (유출 시 피해 우려) • 민감 (비공개 업무자료) • 공개 (외부 공개가 가능)

01 AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 개요

AI TFT 최종 산출물

AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 활동 보고 (2026년 8월)

- AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT 최종보고서(HTML) 업로드 완료



1. AI TFT 개요

추진 배경과 목표

「AI 활용 선진원자로 개념설계 TFT」는 2026년 4월, 4세대원자로기술개발부의 주관으로 출범하였다. 추진 배경은 다음과 같다.

- 선진원자로 개념설계에 요구되는 **코드 개발·반복 계산·다변수 최적화·대량 문서화** 작업에 AI를 활용하면 효율이 크게 오를 것으로 기대됨
- 다만 AI가 생산한 결과물에 대한 **전문 검증 체계가 부재**함
- 보안·망분리, AI 모델 운용·인프라 비용 등의 제약으로 KAERI 내 AI 활용이 제한적임

이에 따라 TFT의 활동은 두 갈래로 설정되었다.

기술적 갈래	절차적 갈래
KAERI 내 선진원자로 전문인력이 직접 AI 결과물을 검증하고 개선 필요사항을 도출	사이버보안·경영·행정 부서와 협의해 KAERI 내 AI 활용을 위한 절차적 방안을 수립

활동 기간과 참여 규모

활동 기간	2026.04.13 ~ 2026.07.31 (착수 회의 2026.04.21)
참여 인원	4개 분과 16명
참여 부서	4세대원자로기술개발부, 재료안전기술연구부, 지능형사고대응연구부, 선진핵주기기술개발부, 디지털원자로·AI연구센터, 디지털경영·정보보안부
운영 방식	월 1회 전체 회의 + 분과별 자율 회의
자료 공유	markdown으로 시작 → **HTML 보고서가 더 효율적**임을 확인, HTML 중심으로 전환 (일부 markdown 병행)



2. 분과별 최종보고서

각 카드에서 분과별 통합 보고서로 이동한다.

분과 1 · 기반지식 고도화

전문가 피드백을 통한 AI 훈련

MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 평가

폐쇄망에서 구동 가능한 오픈웨이트 LLM이 MSR 전문 도메인을 사전 지식만으로 얼마나 답하는지, 도메인 문서를 붙이면(RAG) 얼마나 개선되는지를 정량 측정하였다. 194문항 이중평가(일반 vs RAG)로 5개 모델(Nemotron 4B~550B, AtomicGPT)을 비교해 RAG의 효과가 영역·모델 크기에 따라 어떻게 달라지는지 밝혔다.

194문항 이중평가 | 5개 모델 규모별 비교 | RAG lift 정량화

보고서 보기 →

분과 2 · 전산·해석능력 확충

AI 기반 전산코드 개발·검증, 다물리 코드 통합

AI 기반 전산·해석능력 확충

연구원 각자가 자기 전문 분야의 해석 코드를 AI와 함께 개발·개선하였다. 핵데이터 생산부터 노심해석, 다물리 연계, 계통·기기 설계, 안전해석, V&V까지 MSR 설계 전 주기에서 AI 협업 개발의 가능성을 확인하였다. "AI로 코드를 짜되 그 코드를 어떻게 믿을 것인가"가 공통의 화두였다.

3D 다물리 결합 솔버 | 상세 성과자료 22건 | 전 주기 가능성 확인

보고서 보기 →

분과 3 · 설계 체계 효율화

보고서 작성 자동화, 그래프·이미지 자동 생성

AI 기반 설계 체계 효율화

설계 문서·계산서·보고서를 만드는 일 자체에 AI를 끌어들였다. 문서 작성 자동화, 보고서·실적 취합, 한글(HWPX) 문서 자동 생성 Skill 개발, 60년 전 손글씨 보고서의 디지털 복원까지 — "글과 문서를 만드는 일"의 자동화를 네 주제에서 실증하였다.

문서 자동화 | HWPX 스킬 | 지식 보존

보고서 보기 →

분과 4 · AI 에이전트 플랫폼

망분리 환경 AI 활용, 보안 자료 AI 활용법 모색

AI 활용에 따른 보안대책

다른 세 분과가 "AI로 무엇을 할 수 있는가"를 보여준다면, 4분과는 그것을 실제 연구 환경에서 안전하게 가능하게 만드는 인프라·보안의 토대를 다룬다. 기관 구축형·상용 AI·API 연계/에이전틱 AI의 세 활용 유형별로 자료 등급에 따른 활용 기준과 준수 사항, 금지·제한 사항을 정리하였다.

핵심 원칙 3가지 | 활용 유형별 준수사항 | 자료 등급별 기준

보고서 보기 →



[B] 인공지능이 여는 원자로 해석의 새로운 패러다임

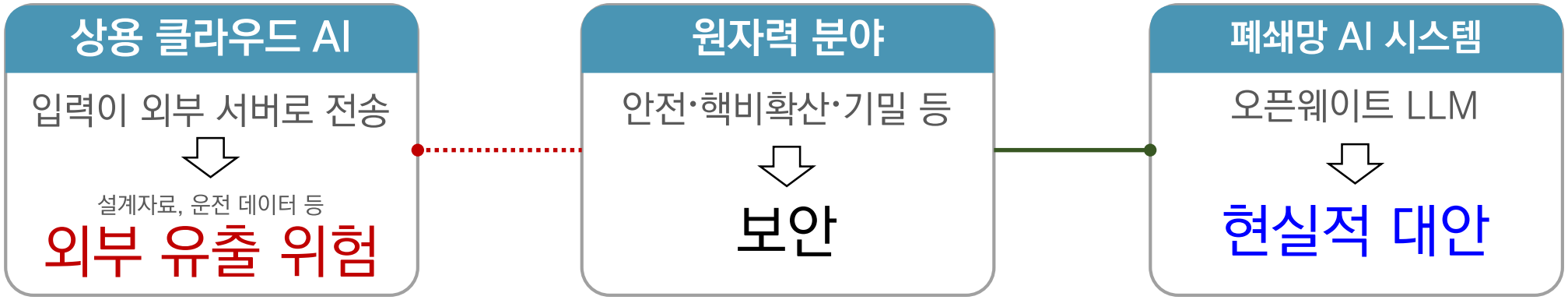
02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(1분과) 기반지식 고도화–MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 평가

연구 배경 및 목적



- 다만, 오픈웨이트 LLM은 용융염 원자로(Molten Salt Reactor, MSR) 같은 협소 전문 분야의 사전지식이 부족함
  - 생성형 AI가 도메인 지식을 충분히 갖추지 못한 채 답하면 부정확·환각의 위험 존재
- 이를 보완하는 대표적 방법이 **검색 증강 생성(Retrieval-Augmented Generation, RAG)**이며, 도메인 문서를 검색해 답변에 근거를 제공
- 본 프로젝트는 MSR 도메인 기반 오픈웨이트 LLM의 정량적 성능평가를 목표로 함
  ① 사전지식만으로 얼마나 답하는지
  ② RAG로 문서를 보강하면 얼마나 개선되는지

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(1분과) 기반지식 고도화–MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 평가

배경지식

오픈웨이트 LLM
(Open-weight LLM)

- 가중치(weights)가 공개되어 누구나 내려받아 자체 서버에서 구동할 수 있는 대형 언어 모델
- Nemotron, Exaone, Llama, Qwen 등
- 인터넷 연결 없이 폐쇄망(on-premise)으로 운용 할 수 있는 것이 핵심 장점

RAG, 검색 증강 생성
(Retrieval-Augmented Generation)

- 모델이 답하기 전에 관련 문서를 검색해 프롬프트에 함께 넣어주는 기법
- 모델의 부족한 지식을 외부 문서로 보강
- 파이프라인:
  ① 청킹(chunking): 참조 PDF를 일정 길이 조각으로 분할
  ② 임베딩(embedding): 각 조각을 의미 벡터로 변환(본 평가: bge-m3, 1024차원)
  ③ 검색(retrieval): 질문 벡터와 코사인 유사도가 높은 상위 조각(top-6)을 찾음
  ④ 증강 생성: 찾은 조각을 프롬프트에 추가하여 모델이 답변 생성

이중평가
(일반 vs RAG)

- 같은 질문을 두 조건으로 평가해 RAG의 순수 효과를 측정한다
- 일반(Closed-book)
  : 참고자료 없이 모델의 사전지식만으로 답
  → 이 모델이 원래 얼마나 아는가?
- RAG(Open-book)
  : 검색 문서와 함께 답
  → 자료를 주면 얼마나 잘하는가?

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(1분과) 기반지식 고도화–MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 평가

평가 모델

약칭	모델	베이스/계열	파라미터	생성 모드
Nemotron3-4B	Nemotron-3 Nano 4B	NVIDIA Nemotron-3	4B	직접 응답
Nemotron3-30B	Nemotron-3 Nano 30B-A3B	NVIDIA Nemotron-3	30B (A3B)	직접 응답
Nemotron3-120B	Nemotron-3 Super 120B	NVIDIA Nemotron-3	120B (A12B)	직접 응답
Nemotron3-550B	Nemotron-3 Ultra 550B	NVIDIA Nemotron-3	550B (A55B)	직접 응답
AtomicGPT	*AtomicGPT-Exaone-32B	LG Exaone-4.0	32B	Reasoning ON

*AtomicGPT-Exaone-32B는 2025년에 튜닝된 모델로, LG Exaone-4.0을 KAERI가 원자력 도메인에 미세조정한 것

채점 모델

약칭	모델	베이스/계열	파라미터	생성 모드
gpt-oss-120b	gpt-oss-120b	OpenAI gpt-oss	117B	-

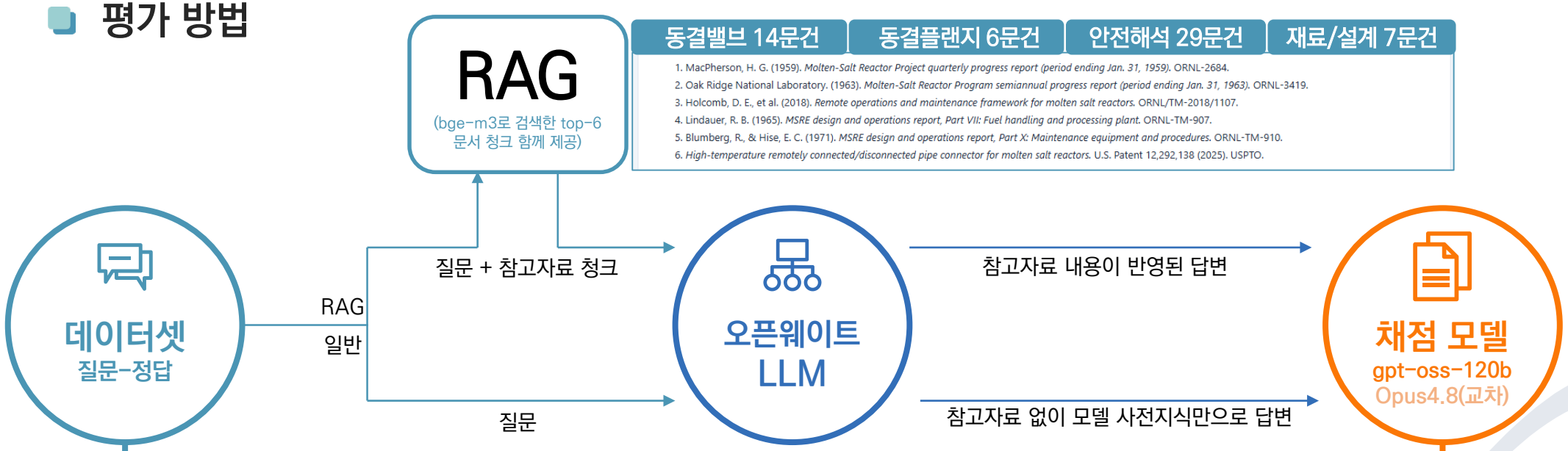
교차검증 모델

약칭	모델	베이스/계열	파라미터	생성 모드
Opus4.8	Claude Opus 4.8	Claude Opus	-	-

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(1분과) 기반지식 고도화–MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 평가

평가 방법



동결밸브(FV) 50문항	동결플랜지(FF) 50문항	안전해석 50문항	재료/설계 44문항

A1

질문

MSRE의 "freeze valve(동결밸브)"가 유로를 차단·개방하는 원리를, 일반 기계식 밸브와의 핵심 차이를 포함해 한두 문장으로 기술하라.

정답

배관의 한 구간(편평 제한부)에 흐르는 salt를 외부 공기 냉각으로 동결시켜 고체 plug를 만들어 차단하고, 그 구간을 가열·융해하여 개방한다. 핵심 차이는 **salt 자체가 밀봉재이고, salt와 접하는 가동부(moving part)가 없다**는 점이다.

채점 기준

① 환각 게이트
(정답과 명백 모순 시 0.0)

② 사실 정확도 5단계
(1.0/0.8/0.5/0.3/0.0)

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(1분과) 기반지식 고도화–MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 평가

주요 결과

모델	일반	RAG	절대 Lift	상대 Lift
Nemotron3-4B	0.110	0.283	+0.173	+158%
Nemotron3-30B	0.213	0.423	+0.210	+99%
Nemotron3-120B	0.326	0.524	+0.198	+61%
Nemotron3-550B	0.353	0.496	+0.143	+41%
AtomicGPT-32B	0.219	0.414	+0.195	+89%

일반 = RAG 없음(사전지식) · 상대 Lift = 절대 Lift ÷ 일반. 저사양 모델일수록 상대 Lift가 크다 → RAG가 부족한 사전지식을 크게 보강

영역 × 모델 — RAG lift 매트릭스

Nemotron3 모델 클로드 교차검증 결과 피어슨 상관계수 0.791, 편향(gpt-Claude) -0.092
: gpt-oss가 claude보다 박하게 채점하였고 두 채점이 대체로 일관됨

영역 \ 모델	Nemotron3-4B	Nemotron3-30B	Nemotron3-120B	Nemotron3-550B	AtomicGPT-32B
동결밸브	+0.180	+0.202	+0.087	+0.086	+0.180
동결플랜지	+0.072	+0.122	+0.186	+0.120	+0.134
안전해석	+0.426	+0.500	+0.470	+0.466	+0.454
재료/설계	-0.007	-0.011	+0.030	-0.132	-0.011
전체	**+0.173**	**+0.210**	**+0.198**	**+0.143**	**+0.195**

값 = RAG lift(RAG − 일반). 음영이 진할수록 보강 효과가 크다: ≥+0.3 | +0.1~+0.3 | 0.0~+0.1 | −0.1~0.0 | ≤−0.1(역효과) · 셀에 마우스를 올리면 일반→RAG 원점수가 보인다.

주요 내용

- RAG는 전 모델에서 유효하며, 상대 lift는 저사양 모델일수록 큼
- 대형 모델이 일반 지식 영역에서는 RAG가 역효과 날 가능성 존재
  - Nemotron3-550B 모델의 경우 사전지식이 이미 높아, 검색 문맥이 오히려 정답을 흐리는 역효과가 관측됨

권고안

보고서 특화 수치 영역은 모델 크기 미세조정과 무관하게 RAG를 적용

대형 모델이 숙달한 일반지식 영역은 RAG를 선택적으로 적용

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(2분과) 전산·해석능력 확충–원자로 노달 해석 코드 개발(TPEN)

Claude Code를 활용한 바이브 코딩 예시

- 사전 준비한 TPEN 방법론 문서를 시작으로 바이브 코딩 구현

"이 폴더에 TPEN 방법론 코드를 Python으로 구현해 줄래?"

사용자 입력: 단 1줄. 폴더에는 방법론 문서(md) 하나뿐, 코드는 0줄.

곧바로 코딩하지 않고, 먼저 준비를 했습니다:

- 방법론 문서 642줄을 끝까지 읽음
- 구현 규모(~1,000줄)와 모듈 분할안, 검증 케이스를 제안
- **문서에서 모호하거나 미완성인 부분 3곳을 목록으로 정리**
- 결정이 필요한 두 가지를 역으로 질문: "CMFD 가속을 포함할까요?", "누락된 부분은 어떻게 채울까요?"

"일단 CMFD는 넣지 말고 구현해줘. 누락된 부분은 표준 노달법을 활용해서 구현해줘."

사용자 입력: 2줄. 하지만 이 두 줄이 이후 모든 작업의 방향을 정했습니다.

모듈 5개를 순서대로 작성했습니다. 각 모듈 끝에 **자체 테스트를 넣고 그 자리에서 실행**해 확인하며 진행:

- 기하·다항식 기저 모듈 — 문서 부록의 해석값과 수치적분 비교 ✓
- 솔버 — **첫 설계가 발산!** 원인을 진단하고 보고 → 총 4번 재설계 끝에 수렴
- 단위 테스트 22개 작성, 전부 통과

발산 과정과 진단은 아래 02절에서 자세히 재생됩니다.

"방법론 md 파일 업데이트 해 줄래?"

사용자 입력: 1줄.

코드와 일치하도록 문서의 6개 절을 재작성했습니다. 그리고:

- **부록 A의 수식 오류를 정정** — 코드의 자체 수치검증에서 (u^3) 계수가 문서 값과 다름을 발견, 직접 적분으로 새 값을 증명
- 솔버가 발산했던 이유(수학적 함정)까지 문서에 그대로 기록

세션 종료 요약 — 사용자 메시지 6번(실질 지시는 2번), 산출물: 코드 5개 모듈 + 테스트 22개(전부 통과) + 예제 2개 + 수식 오류가 정정된 방법론 문서. 소요 시간 1~2시간.

이후 별도 세션에서 다군 확장과 VVER-440 벤치마크 검증(+68.5 pcm)까지 진행.

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

TPEN_P1_1group

TPEN 방법론 정리 — P1, 1-Group, 2D, Quadratic Expansion

대상: 고속로 노심해석용 TPEN (Triangle-based Polynomial Expansion Nodal) 방법
범위: P1 근사, 1 에너지군, 2D 반경방향(육각형 단면), 삼각형 내 2차 다항식 전개 — § 11에서 다군(multi-group) 확장 포함
목적: 수식 유도를 따라가며 코드 구현이 가능한 수준의 정리

---

1. 배경 및 개요

1.1 왜 TPEN인가?

고속로(SFR, LFR 등)는 일반적으로 **육각형 핵연료 집합체**를 사용한다. 경수로용으로 발달된 직사각형 노달 코드(NEM, ANM 등)는 육각형 기하학에 직접 적용하기 어렵다. 육각형 노드를 그대로 다루는 방법으로는 다음이 있다:

- **HENM** (Hexagonal Nodal Expansion Method): 육각형 전체에서 다항식 전개 → 면 6개 처리, 면 사이의 결합이 복잡
- **AFEN** (Analytic Function Expansion Nodal): 해석해 기저 사용 → 정확하나 복잡
- **TPEN**: 육각형을 **6개의 정삼각형**으로 분할 → 각 삼각형 내에서 다항식 전개

TPEN의 장점:
- 삼각형 노드는 인접 노드와 **단 3개의 면**으로만 결합 → 결합 행렬이 단순
- 육각형 내부에서도 부분적 출력 분포(intra-assembly)를 자연스럽게 표현
- Pin-by-pin 정보까지는 아니지만 sub-assembly 수준의 분해능 제공
- 직사각형 노달의 transverse integration 아이디어를 거의 그대로 차용 가능

1.2 핵심 아이디어 요약

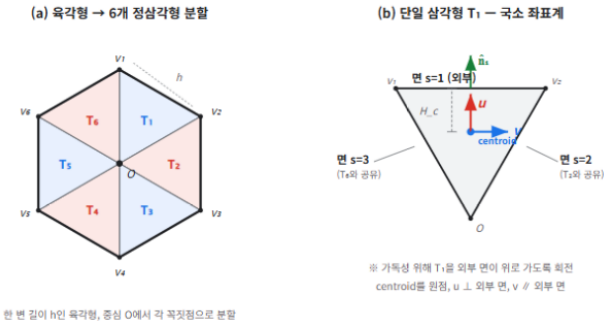
1. 육각형 → 6개 정삼각형 분할 (중심에서 각 꼭짓점으로 선)
2. 각 삼각형 내부에서 flux φ(x,y)를 **2차 다항식**으로 전개
3. **모멘트 방정식**(Galerkin 투영)으로 다항식 계수 결정
4. 인접 삼각형 사이에서 **flux 연속**과 **net current 연속** 조건 부과
5. 외부 경계에서는 albedo / 진공 / 반사 조건 적용
6. Power iteration으로 k_eff와 flux 동시 결정

3. 기하학 및 좌표계

3.1 육각형의 삼각형 분할

육각형 한 변의 길이를 h라 하자 (= flat-to-flat 거리 $/\sqrt{3}$). 중심에서 각 꼭짓점으로 6개의 선을 그으면 6개의 정삼각형이 생긴다. 각 정삼각형은:

- 한 변의 길이: h
- 면적: $A = \frac{\sqrt{3}}{4}h^2$
- 높이 (꼭짓점에서 대변까지): $H = \frac{\sqrt{3}}{2}h$



한 변 길이 h인 육각형, 중심 O에서 각 꼭짓점으로 분할

※ 가독성 위해 T₁을 외부 면이 위로 가도록 회전
centroid를 원점, u ⊥ 외부 면, v // 외부 면

4. 다항식 전개

4.1 2차 다항식 기저

삼각형 내부에서 flux를 다음과 같이 전개한다 (총 6개 항, 2차 완전 다항식):

$$\phi(u,v) = c_0 + c_1 u + c_2 v + c_3(u^2 - \langle u^2 \rangle) + c_4(v^2 - \langle v^2 \rangle) + c_5(uv - \langle uv \rangle) \qquad (6)$$

여기서 $\langle \cdot \rangle$는 삼각형 위에서의 평균:

$$\langle f \rangle = \frac{1}{A}\iint_T f(u,v)\,du\,dv \qquad (7)$$

기저함수를 평균이 0이 되도록 (예: $u^2 - \langle u^2 \rangle$) 빼주면 $c_0 = \langle \phi \rangle$이 된다 (노드 평균 flux).

5. 모멘트 방정식의 유도

식 (3)에 가중함수 $w_i(u,v)$를 곱하고 삼각형 위에서 적분한다 (Galerkin 투영):

$$\iint_T w_i(u,v)\left[-\nabla\cdot(D\nabla\phi) + \Sigma_r\phi - \frac{1}{k}\nu\Sigma_f\phi\right]du\,dv = 0 \qquad (8)$$

5.1 0차 모멘트 ($w_0 = 1$, 노드 평균 균형식)

식 (8)에 $w_0 = 1$을 대입:

$$-\iint_T \nabla\cdot(D\nabla\phi)\,dA + \Sigma_r\iint_T \phi\,dA = \frac{1}{k}\nu\Sigma_f\iint_T \phi\,dA \qquad (9)$$

좌변 첫 항에 발산정리(divergence theorem) 적용:

$$\iint_T \nabla\cdot(D\nabla\phi)\,dA = \oint_{\partial T}(D\nabla\phi)\cdot\hat{\mathbf{n}}\,d\ell = -\oint_{\partial T}\mathbf{J}\cdot\hat{\mathbf{n}}\,d\ell = -\sum_{s=1}^{3} L_s \bar{J}_s \qquad (10)$$

여기서:
- L_s: 면 s의 길이 (= h, 정삼각형이므로 모든 면 동일)
- $\bar{J}_s$: 면 s에서의 평균 외향 net current (= $\frac{1}{L_s}\int_{\text{face}_s}\mathbf{J}\cdot\hat{\mathbf{n}}\,d\ell$)

식 (9), (10)을 합치면 **노드 균형식**:

$$\boxed{\sum_{s=1}^{3} L_s\bar{J}_s + \Sigma_r A\bar{\phi} = \frac{1}{k}\nu\Sigma_f A\bar{\phi}} \qquad (11)$$

여기서 $\bar{\phi} = c_0 = \langle\phi\rangle$, A는 삼각형 면적.

> **물리적 의미**: 식 (11)은 "삼각형으로 들어오고 나가는 모든 중성자의 균형"이다. 좌변 1항은 누설(leakage), 좌변 2항은 흡수+산란이탈, 우변은 핵분열 생성.

02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(2분과) 전산·해석능력 확충–원자로 노달 해석 코드 개발(TPEN)

Claude Code를 활용한 바이브 코딩 예시

- 사전 준비한 TPEN 방법론 문서를 시작으로 바이브 코딩 구현

별도 세션 요청사항

① md 수식 점검하고, 오류 없으면 코드로

② 다군 문제로 바꾸려면?

③ 육각형 노심 다군 벤치마크 찾아줘

④ 검증 테스트 만들고 결과 업데이트

워크플로우

① 수식 독립 검증 (sympy)

② 1군 솔버 v1 구현

③ 디버깅

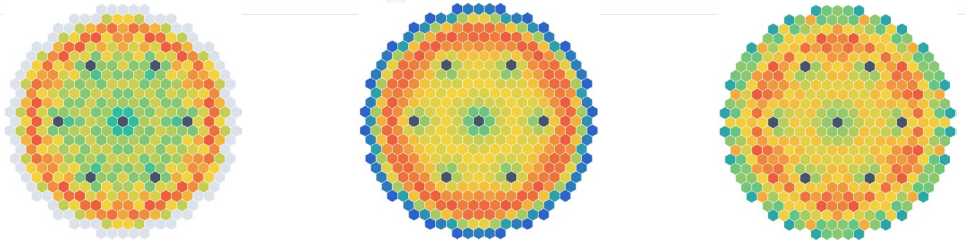
④ 다군 확장

⑤ 벤치마크 문헌 조사

⑥ VVER-440 2D 검증

VVER-440 2D 벤치마크 결과





출력 분포 | 고속중성자속 분포 | 열중성자속 분포

k_eff=1.0104266, PARCS(TPEN) 대비 +68.5 pcm, 중성자 균형 10^{-9}. 차이의 원인(폐쇄 방식 차이: corner point balance vs 면 모멘트 교환)까지 문서에 해석을 남김

TPEN 솔버 대시보드

리팩터링 진행상황 & 솔버 수렴 모니터 검증 전체 통과

생성: 2026-06-10 20:51:46

① 리팩터링 진행상황

tpen_geometry.py
기하·구적 primitive (Triangle, build_geometry, hex, 구적)
126 줄 done

tpen_xs.py
다군 단면적 XSData (1군 = one_group, kinf)
62 줄 done

tpen_kernel.py
노드 커널 사전계산 (기하적분 1회 + 군별 D·Σr 조립)
182 줄 done

tpen_iteration.py
TPENSolver + GS/벡터화 sweeper + outer 드라이버
246 줄 done

tests_tpen.py
검증 테스트 + 미니 노심 데모
221 줄 done

benchmark_vver440_2d.py
VVER-440 2D 2군 벤치마크
148 줄 done

검증 (실제 테스트 실행 결과)

항목	상태	계산값	기준값	비고
1군 k_inf (반사)	PASS	1.249999999	1.250000000	해석값 nuSf/Sa
1군 7-hex 진공	PASS	0.805754313	0.805754313	회귀 기준값
GS vs 벡터화 일치	PASS	0.826520263	0.826520260	|Δk| = 3.1e-09
2군 k_inf (downscatter)	PASS	1.259259260	1.259259259	해석값
upscatter k_inf	PASS	1.254427646	1.254427646	스펙트럼 고유값

② 솔버 수렴 진행상황

k_eff (본 코드)
1.0104266

k_eff (PARCS/TPEN)
1.0097415
기준

차이
+68.5 pcm

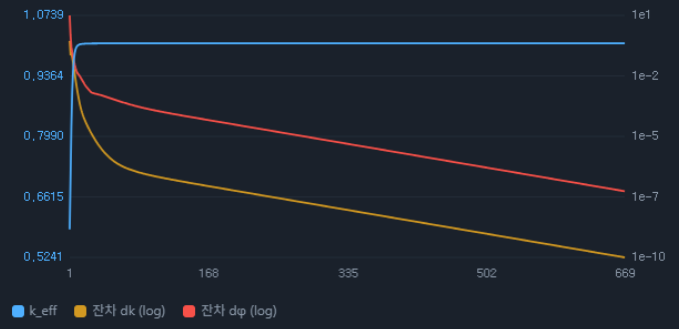
중성자 균형 잔차
-1.08e-9

외부 반복 수
669 outer

삼각형 / 육각형
2526 / 421
노드

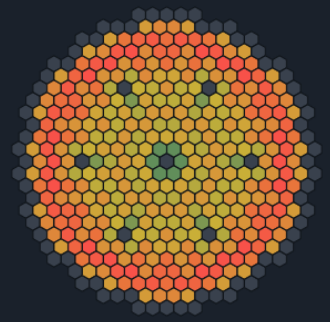
수렴 이력

VVER-440 2D (Seidel) — 2군 · sweep: vectorized (block-Jacobi)



집합체 상대출력 분포

상대출력 max 1.532, min 0.510 (연료 평균=1)

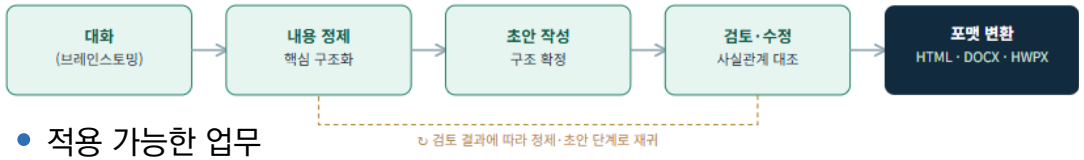


02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(3분과) 설계 체계 효율화–인공지능 기반 문서 작성

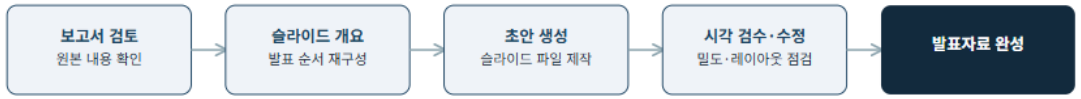
자동화 파이프라인 구성 및 도구 활용

보고서 작성 자동화 방안



- 적용 가능한 업무
  - 기술보고서, 연구계획서, 성과보고서 등 정형 문서의 초안 작성
  - 회의록·세미나 내용을 정리한 요약 문서 작성
  - 여러 차례의 실험/검토 논의를 하나의 기술 노트로 통합하는 작업
  - 기존 보고서를 다른 형식(예: 발표자료, 요약본)으로 재구성하는 작업

프리젠테이션 자료(PPT) 작성 자동화 방안



- 적용 가능한 업무
  - 학회·세미나 발표자료, 임원 보고용 요약 슬라이드 제작
  - 기술보고서를 부서 내 공유용 요약 자료로 재구성
  - 연구 진행 상황을 정기적으로 보고하는 슬라이드의 반복 제작

다인 작성 보고서 취합 – HWPX 자동 병합 도구

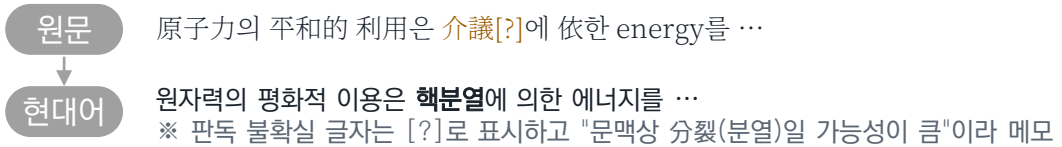
- 마커 표시 후 배포 및 취합 방법

```
//원본 배포시 – 담당 구역을 이름이 포함된 마커로 표시
(#담당:ㅇㅇㅇ#시작)
   담당자는 여기에 내용을 채워서 회신해주세요
(#담당:ㅇㅇㅇ#끝)
```

  - 담당 구역 마커로 표시 후 배포 → 담당자 해당 구역 작성 후 회신
    → 도구가 해당 구역 자동 편집
  - 그림·표는 개체 기반으로 판별하여 번호를 통합 재정렬

과거 설계지식 디지털 복원 – 손글씨 원자력 문헌의 자산화





02 분과별 대표 AI 활용 사례와 주요 결과

(4분과) AI 에이전트 플랫폼-AI 활용에 따른 보안대책

AI에 별도 보안대책이 필요한 이유

- 일반 시스템과 달리 **모델**과 **학습자료** 자체가 공격 대상
- 자료 오염 시 잘못된 결과 생성, 대화 과정에서 내부 자료 유출 가능
- 구축부터 폐기까지 전 수명주기에 걸친 대비 필요

핵심 원칙 3가지

자료 등급에 맞게

- AI에 입력하는 자료가 공개 가능한 자료인지 확인
- 등급이 높은 자료일수록 통제된 환경에서만 활용

활용 유형에 맞게

- 직접 구축/상용 이용/연계 활용에 따라 준수 사항 상이
- 해당 유형의 체크리스트 확인 후 적용

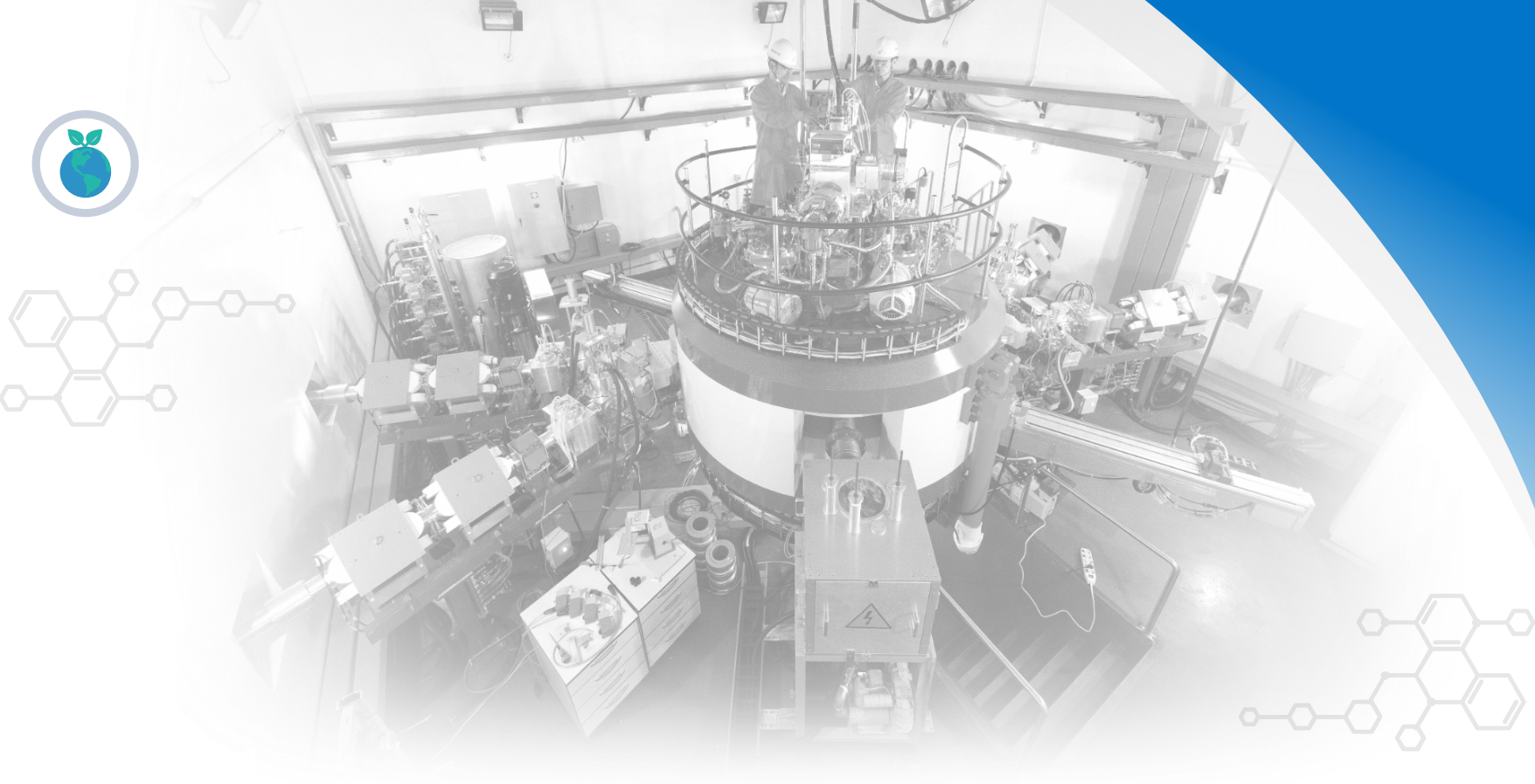
착수 전에 확인

- AI 도입 사업은 착수 전 국가정보원 보안성검토가 원칙
- 소규모/단순 사업은 사전 협의로 기관 위임 가능

금기 및 제한사항

민감·기밀 자료의 외부 AI입력 금지	신뢰성 미검증 오픈소스 모델 사용 지양	목적이 다른 AI 시스템의 통합 구성 금지
외부 공개 AI에 대한 내부 자료 학습 금지	보안정책 없는 상용 AI 이용 금지	AI 탑재 PC의 무단 공용 사용 제한

국가·공공기관 AI보안 가이드북 참고



[B] 인공지능이 여는 원자로 해석의 새로운 패러다임

(참고) AI 연구윤리 가이드

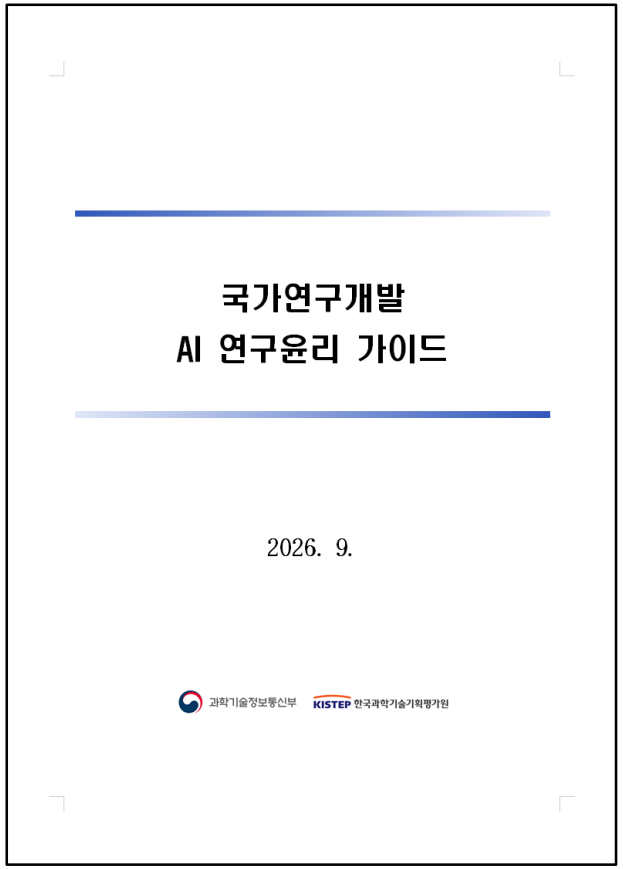
03

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

03 (참고) AI 연구윤리 가이드

AI 연구윤리 가이드 준수하기

국가연구개발 AI 연구윤리 가이드(과학기술정보통신부, 한국과학기술기획평가원)



국가연구개발 AI 활용 기본원칙

국가연구개발에서 AI의 역할은 도구로 제한되며,
최종 결과물에 대한 책임과 관리는 AI를 활용한 연구자에게 귀속됨

AI 활용 권고사항

AI는 연구 기회를 확대하는 동시에 **윤리적 위험 요인**을 내포하고 있으므로, **위험 요인에 대한 주의**와 **기본원칙**에 기반한 **권고사항 준수**를 통해 **책임** 있는 AI 활용을 도모

연구자는 연구 수행 전 AI 활용 권고사항의 내용을 사전에 확인하고, 최종 결과물을 제출(또는 발표)하기 전, AI 활용 권고사항의 준수 여부를 점검할 수 있도록 **‘〈연구자 자가진단표〉’**를 활용할 것을 권장

☐ [서식] AI 활용 연구자 자가진단표(예시)

연구 수행 전 각 항목의 내용을 사전에 확인하고, 최종 결과물 제출 전 실제 준수 여부를 점검하시기 바랍니다.

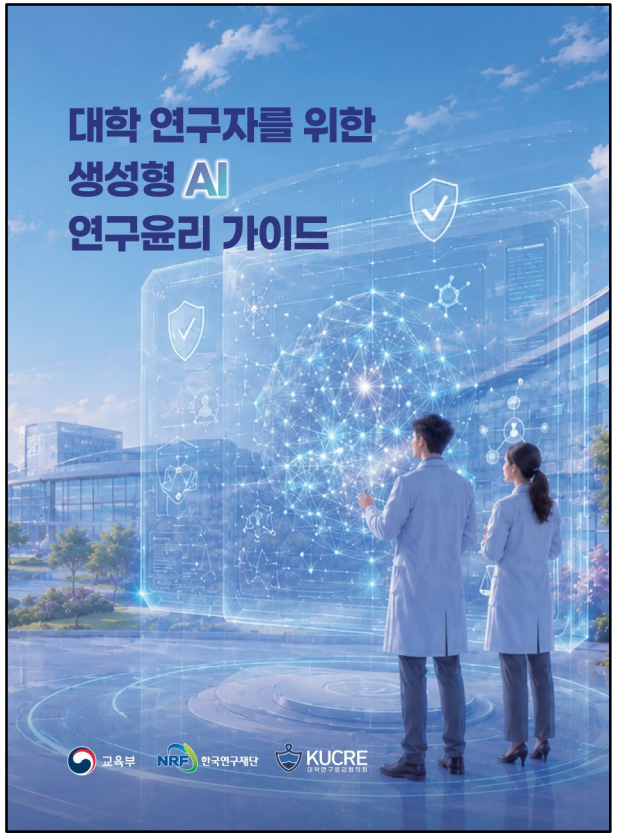
〈연구자 자가진단표〉

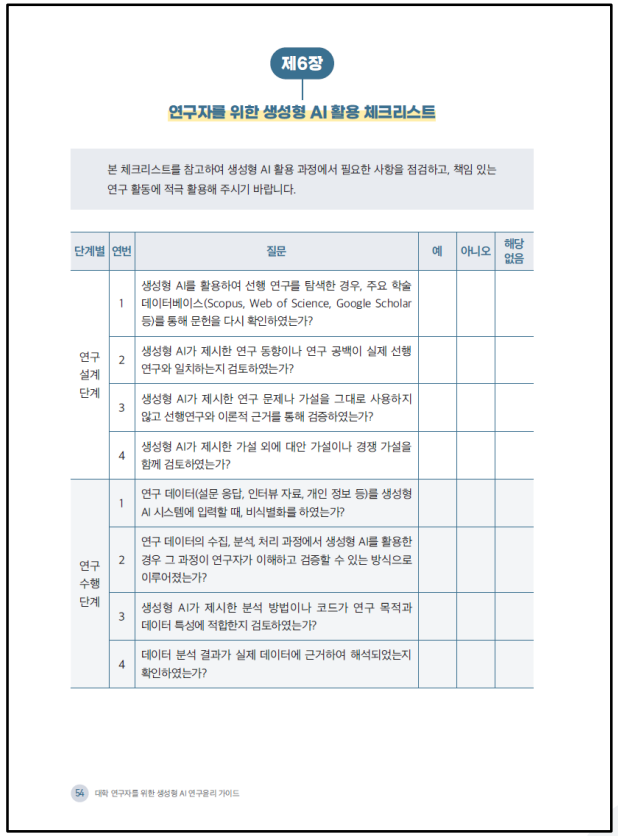
		사전 확인	사후 점검
주체적인 검증과 판단	1. 허위 참고문헌, 변형된 데이터 및 왜곡된 이미지 등이 포함되지 않도록 검토하고 출처 표기 및 원본 자료를 확인하였는가	☐	☐
	2. 연구개발 과정에서 핵심 분석과 판단을 연구자가 직접 수행하여 맥락과 내용, 독창성 및 자별성 등을 검토하였는가	☐	☐
부적절한 연구행위 예방	3. AI 도구의 기술적 한계와 윤리적 위험 요소를 사전에 파악하고, 이를 경감하기 위한 방안을 미리 고려했는가	☐	☐
	4. AI를 동원한 부적절한 행위(은닉 프롬프트 삽입 등) 및 저작권 침해 문제 등이 발생할 가능성을 인식하고 유의하였는가	☐	☐
투명성 확보	5. AI 도구의 사용 여부, 모델 이름·버전, 활용 기간 및 활용 방법 등을 관련 규정에 따라 투명하게 공개하였는가	☐	☐
결과 신뢰성 관리	6. AI를 활용한 연구 결과가 주어진 조건에서 재현될 수 있는지 유의하였는가	☐	☐
규정 준수	7. 소속 기관·학술지·전문기관의 AI 관련 규정 및 지침이 지속적으로 개정·보완됨을 인식하고, 주기적으로 확인하여 최신 기준을 준수하였는가	☐	☐
연구보안 확보	8. 보안이 요구되는 자료(예: 미발표 연구 데이터, 원 자료(raw data), 특허 출원 예정 기술 등)를 상용 AI 서비스에 업로드하지 않도록 유의하였는가	☐	☐
	9. 보안 및 민감과제의 연구에서 AI를 활용하는 경우 관련 기관의 절차와 규정을 준수하였는가	☐	☐
개인정보 보호	10. AI에 데이터 입력 전 개인정보 및 민감정보에 비식별화 및 보안 조치를 수행하였는가	☐	☐

03 (참고) AI 연구윤리 가이드

AI 연구윤리 가이드 준수하기

국가연구개발 AI 연구윤리 가이드(교육부, 한국연구재단)





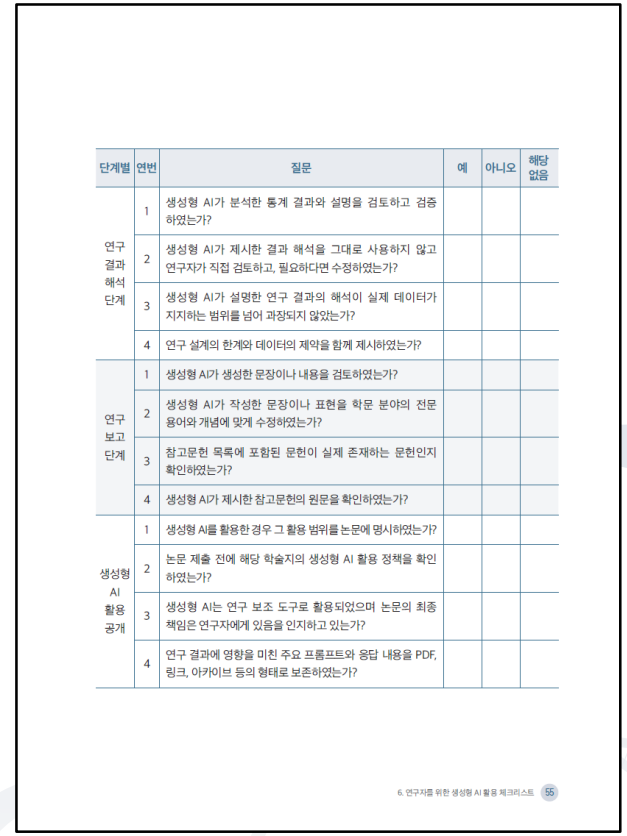
제6장

연구자를 위한 생성형 AI 활용 체크리스트

본 체크리스트를 참고하여 생성형 AI 활용 과정에서 필요한 사항을 점검하고, 책임 있는 연구 활동에 적극 활용해 주시기 바랍니다.

단계별	연번	질문	예	아니오	해당 없음
연구 설계 단계	1	생성형 AI를 활용하여 선행 연구를 탐색한 경우, 주요 학술 데이터베이스(Scopus, Web of Science, Google Scholar 등)를 통해 문헌을 다시 확인하였는가?			
	2	생성형 AI가 제시한 연구 동향이나 연구 공백이 실제 선행 연구와 일치하는지 검토하였는가?			
	3	생성형 AI가 제시한 연구 문제나 가설을 그대로 사용하지 않고 선행연구와 이론적 근거를 통해 검증하였는가?			
	4	생성형 AI가 제시한 가설 외에 대안 가설이나 경쟁 가설을 함께 검토하였는가?			
연구 수행 단계	1	연구 데이터(설문 응답, 인터뷰 자료, 개인 정보 등)를 생성형 AI 시스템에 입력할 때, 비식별화를 하였는가?			
	2	연구 데이터의 수집, 분석, 처리 과정에서 생성형 AI를 활용한 경우 그 과정이 연구자가 이해하고 검증할 수 있는 방식으로 이루어졌는가?			
	3	생성형 AI가 제시한 분석 방법이나 코드가 연구 목적과 데이터 특성에 적합한지 검토하였는가?			
	4	데이터 분석 결과가 실제 데이터에 근거하여 해석되었는지 확인하였는가?			

54 대학 연구자를 위한 생성형 AI 연구윤리 가이드



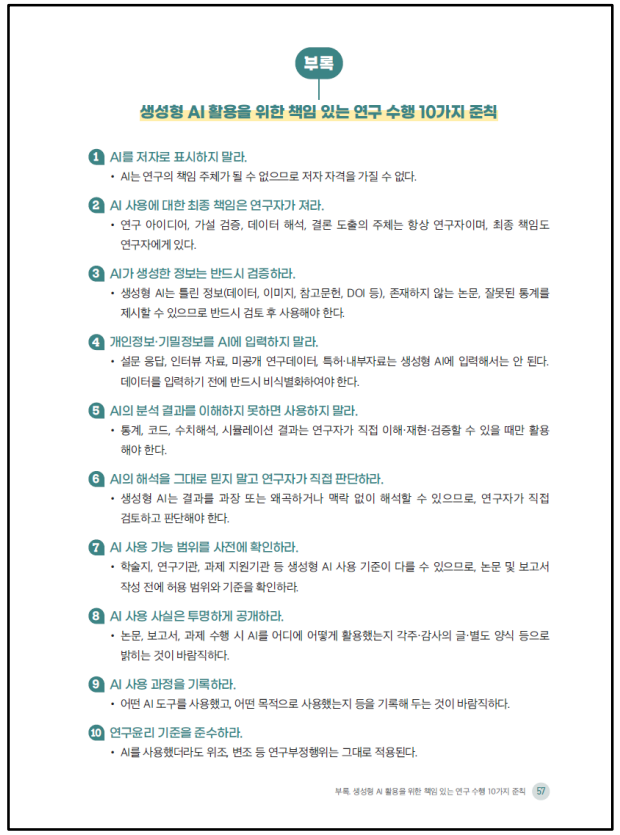
단계별	연번	질문	예	아니오	해당 없음
연구 결과 해석 단계	1	생성형 AI가 분석한 통계 결과와 설명을 검토하고 검증하였는가?			
	2	생성형 AI가 제시한 결과 해석을 그대로 사용하지 않고 연구자가 직접 검토하고, 필요하다면 수정하였는가?			
	3	생성형 AI가 설명한 연구 결과의 해석이 실제 데이터가 지지하는 범위를 넘어 과장되지 않았는가?			
	4	연구 설계의 한계와 데이터의 제약을 함께 제시하였는가?			
연구 보고 단계	1	생성형 AI가 생성한 문장이나 내용을 검토하였는가?			
	2	생성형 AI가 작성한 문장이나 표현을 학문 분야의 전문 용어와 개념에 맞게 수정하였는가?			
	3	참고문헌 목록에 포함된 문헌이 실제 존재하는 문헌인지 확인하였는가?			
	4	생성형 AI가 제시한 참고문헌의 원문을 확인하였는가?			
생성형 AI 활용 공개	1	생성형 AI를 활용한 경우 그 활용 범위를 논문에 명시하였는가?			
	2	논문 제출 전에 해당 학술지의 생성형 AI 활용 정책을 확인하였는가?			
	3	생성형 AI는 연구 보조 도구로 활용되었으며 논문의 최종 책임은 연구자에게 있음을 인지하고 있는가?			
	4	연구 결과에 영향을 미친 주요 프롬프트와 응답 내용을 PDF, 링크, 아카이브 등의 형태로 보존하였는가?			

6. 연구자를 위한 생성형 AI 활용 체크리스트 55

03 (참고) AI 연구윤리 가이드

AI 연구윤리 가이드 준수하기

국가연구개발 AI 연구윤리 가이드(교육부, 한국연구재단)



부록

생성형 AI 활용을 위한 책임 있는 연구 수행 10가지 준칙

1. AI를 저자로 표시하지 말라.
   - AI는 연구의 책임 주체가 될 수 없으므로 저자 자격을 가질 수 없다.
2. AI 사용에 대한 최종 책임은 연구자가 져라.
   - 연구 아이디어, 가설 검증, 데이터 해석, 결론 도출의 주체는 항상 연구자이며, 최종 책임도 연구자에게 있다.
3. AI가 생성한 정보는 반드시 검증하라.
   - 생성형 AI는 틀린 정보(데이터, 이미지, 참고문헌, DOI 등), 존재하지 않는 논문, 잘못된 통계를 제시할 수 있으므로 반드시 검토 후 사용해야 한다.
4. 개인정보·기밀정보를 AI에 입력하지 말라.
   - 설문 응답, 인터뷰 자료, 미공개 연구데이터, 특허·내부자료는 생성형 AI에 입력해서는 안 된다. 데이터를 입력하기 전에 반드시 비식별화하여야 한다.
5. AI의 분석 결과를 이해하지 못하면 사용하지 말라.
   - 통계, 코드, 수치해석, 시뮬레이션 결과는 연구자가 직접 이해·재현·검증할 수 있을 때만 활용해야 한다.
6. AI의 해석을 그대로 믿지 말고 연구자가 직접 판단하라.
   - 생성형 AI는 결과를 과장 또는 왜곡하거나 맥락 없이 해석할 수 있으므로, 연구자가 직접 검토하고 판단해야 한다.
7. AI 사용 가능 범위를 사전에 확인하라.
   - 학술지, 연구기관, 과제 지원기관 등 생성형 AI 사용 기준이 다를 수 있으므로, 논문 및 보고서 작성 전에 허용 범위와 기준을 확인하라.
8. AI 사용 사실은 투명하게 공개하라.
   - 논문, 보고서, 과제 수행 시 AI를 어디에 어떻게 활용했는지 각주·감사의 글·별도 양식 등으로 밝히는 것이 바람직하다.
9. AI 사용 과정을 기록하라.
   - 어떤 AI 도구를 사용했고, 어떤 목적으로 사용했는지 등을 기록해 두는 것이 바람직하다.
10. 연구윤리 기준을 준수하라.
    - AI를 사용했더라도 위조, 변조 등 연구부정행위는 그대로 적용된다.

부록 생성형 AI 활용을 위한 책임 있는 연구 수행 10가지 준칙 57

- AI를 **저자**로 표시하지 말라
- AI 사용에 대한 최종 **책임은 연구자**가 져라.
- AI가 생성한 정보는 반드시 **검증**하라.
- **개인정보·기밀정보**를 AI에 입력하지 말라.
- AI의 분석 결과를 이해하지 못하면 사용하지 말라.
- AI의 해석을 그대로 믿지 말고 **연구자가 직접 판단**하라.
- AI 사용 가능 범위를 사전에 확인하라.
- AI 사용 사실은 **투명하게 공개**하라.
- AI 사용 과정을 기록하라.
- **연구윤리 기준을 준수**하라.



[B] 인공지능이 여는 원자로 해석의 새로운 패러다임

요약 및 결언

04

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

04 요약 및 결언

분과별 성과 요약

(1분과) 기반지식 고도화

- MSR 도메인 지식기반(RAG) 성능 정량평가 완료

  : 대형 모델이 숙달한 일반 지식 영역(RAG 선택적 적용 권고)

  : 보고서 특화 수치 영역(RAG 항상 적용 권고)

(2분과) AI 기반 전산·해석능력 확충

- MSR 설계 전 주기에서 AI 협업 개발의 가능성을 확인함 (상세 성과자료 22건)

  : 핵데이터 생산 → 노심해석 → 다물리 연계 → 계통 및 기기 설계 → 안전해석 → V&V

(3분과) AI 기반 설계 체계 효율화

- 인공지능 기반 문서 작성 (자동화 파이프라인 방안 제시)

(4분과) AI 에이전트 플렛폼

- AI 활용에 따른 보안대책 안내

AI 도입에 따른 업무 효율성 향상 확인
선진원자로 개념설계 분야의 AI 적용성 확인



AI 활용 사례 특강

질의응답

05

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

내용을 입력하세요.

감사합니다.

