

산업기술
환경예측

차세대
NEXT-GENERATION REACTOR
원자로



차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

Contents

I	산업 정의 및 범위	
	1. 산업 정의	08
	2. 분석 범위	09
	3. 분석 방법	15

II	산업환경 분석	
	1. 정책동향 분석	22
	2. 시장동향 분석	36
	3. 기술동향 분석	42
	4. 시사점	66

III	주요 이슈 및 선도기술 도출	
	1. 주요 이슈 도출	70
	2. 선도기술 도출	86

IV	기업현황 분석	
	1. 기업동향 분석	116
	2. 기업 현황조사(설문조사)	131

V	향후 전망	
	1. 차세대 원자로 산업 전반	138
	2. 경수로	144
	3. 고온가스로	149
	4. 액체금속냉각고속로	153
	5. 용융염원자로	156

VI	전략 과제	
	1. 과제도출 전략	160
	2. 전략 과제	162

표 목차

〈표 I-1〉 원전산업 밸류체인과 분야별 주요 역무	9
〈표 I-2〉 차세대 원자로 노형별 분류체계	10
〈표 I-3〉 차세대 원자로 적용 산업별 분류체계	13
〈표 I-4〉 생성형AI를 활용한 분석 자료의 신뢰성·적합성 검증 방안	16
〈표 I-5〉 대응전략 수립(전략과제 도출) 프로세스	18
〈표 II-1〉 국가별 SMR 정책 동향	29
〈표 II-2〉 국내 SMR 정책 동향	30
〈표 II-3〉 글로벌 SMR 시장 규모 전망	37
〈표 II-4〉 SMR 활용 분야별 세계 시장 전망('30~'40년)	38
〈표 II-5〉 아시아 태평양 지역 주요 국가 SMR 시장 현황 및 전망	39
〈표 II-6〉 국내 SMR 및 차세대 원자로 관련 국가 정책 및 예산 규모	40
〈표 II-7〉 국내 SMR 및 차세대 원자로 관련 국가 연구개발사업 및 예산('23~'24)	41
〈표 II-8〉 대형원전과 SMR의 비교	43
〈표 II-9〉 경수로(3세대)와 비경수로(4세대) 노형 비교	43
〈표 II-10〉 글로벌 주요 SMR 개발 현황	44
〈표 II-11〉 글로벌 주요 SMR 개발 현황	45
〈표 II-12〉 4세대 원자로 기술 선도국 연구개발 현황	46
〈표 II-13〉 경수로의 주요 기술 특성	48
〈표 II-14〉 해외 경수로 SMR 개발 현황	48
〈표 II-15〉 원자력을 활용한 수소 생산 기술	52
〈표 II-16〉 고온가스로의 주요 기술 특성	52
〈표 II-17〉 해외 고온가스로 SMR 개발 현황	53
〈표 II-18〉 액체금속냉각고속로의 주요 기술 특성	56
〈표 II-19〉 해외 액체금속냉각고속로 SMR 개발 현황	57
〈표 II-20〉 용융염원자로의 주요 기술 특성	59
〈표 II-21〉 해외 용융염 SMR 개발 현황	60
〈표 II-22〉 국내 SMR 개발 현황	61
〈표 II-23〉 REX-10 주요 특징	62
〈표 II-24〉 KAIST-MMR 주요 특징	64

〈표 II-25〉 URANUS 주요 특징	64
〈표 III-1〉 차세대 원자로 분야 뉴스 검색 키워드	71
〈표 III-2〉 2024년 중요도가 높은 Top 5 토픽 도출 산식	72
〈표 III-3〉 ‘차세대 원자로’ 분야 상위 30개 토픽	73
〈표 III-4〉 2024년 언론 동향 토픽 상위 5위	74
〈표 III-5〉 차세대 원자로 Top 5 토픽 보완 결과(전문가 검토)	74
〈표 III-6〉 ‘차세대 원자로’ 분야에서 도출된 Top 5 토픽별 관련 언론동향 파악	75
〈표 III-7〉 ‘차세대 원자로’ 분야 Top 5 토픽별 관련 주요 이슈 도출	79
〈표 III-8〉 관련 이슈에 대해 중복성, 유사성 등의 검토를 통한 최종 주요 이슈 후보군 도출	83
〈표 III-9〉 ‘차세대 원자로’ 산업 분야 주요 이슈(안)	84
〈표 III-10〉 차세대 원자로 분야 특허 분석 항목	86
〈표 III-11〉 차세대 원자로 분야 특허 분석 키워드 및 특허건수(총 3,583건)	87
〈표 III-12〉 출원인 국적별 차세대 원자로 분야 특허 출원집중도	89
〈표 III-13〉 차세대 원자로 분야 최근 5년간 기술별 출원집중도	90
〈표 III-14〉 차세대 원자로 분야 최근 5년간 기술별 시장확보력 및 특허영향력	91
〈표 III-15〉 차세대 원자로 분야 IPC 상위 10개(선도기술 후보군) 도출 결과	91
〈표 III-16〉 논문 분석 대상 기술분류 및 검색식	92
〈표 III-17〉 (참고) 연구경쟁력 지표 계산식	93
〈표 III-18〉 (참고) 국가경쟁력/한국 내 경쟁력 지표 계산식	94
〈표 III-19〉 기술분야별 논문 유효데이터 수	95
〈표 III-20〉 차세대 원자로 분야 국가별 연구 유효 데이터 및 점유율	95
〈표 III-21〉 차세대 원자로 산업 대분류별 최근 연구집중도	98
〈표 III-22〉 차세대 원자로 산업 대분류별 주요 저자집중도	99
〈표 III-23〉 차세대 원자로 산업 대분류별 주요 저자참여도	99
〈표 III-24〉 차세대 원자로 산업 대분류별 연구영향력	100
〈표 III-25〉 차세대 원자로 분야 국가별 최근 연구집중도	100
〈표 III-26〉 경수로 분야 국가별 최근 연구집중도	101
〈표 III-27〉 고온가스로 분야 국가별 최근 연구집중도	101
〈표 III-28〉 액체금속냉각고속로 분야 국가별 최근 연구집중도	102
〈표 III-29〉 용융염원자로 분야 국가별 최근 연구집중도	102
〈표 III-30〉 차세대 원자로 분야 국가별 연구주도력	103
〈표 III-31〉 차세대 원자로 분야 국가별 연구영향력	103
〈표 III-32〉 연구경쟁력, 국가경쟁력, 한국 내 경쟁력 도출 지표	104
〈표 III-33〉 차세대 원자로 산업 중점분야 도출 결과	106
〈표 III-34〉 (참고) 차세대 원자로 산업 중점분야 산출 결과	107
〈표 III-35〉 (참고) 차세대 원자로 산업의 국가별 경쟁력 산출 결과	107
〈표 III-36〉 특허 기반 선도기술 후보군 도출 결과	108
〈표 III-37〉 차세대 원자로 산업 논문 기반 선도기술 후보군 도출 결과	109
〈표 III-38〉 특허 기반 선도기술 후보군 및 논문 기반 선도기술 후보군 Mapping	110

〈표 III-39〉 1차 선도기술(안) 도출 결과	111
〈표 III-40〉 1차 선도기술(안) 수정·보완 및 그룹핑	112
〈표 III-41〉 최종 선도기술(안) 도출 결과	113
〈표 IV-1〉 글로벌 주요 SMR 개발사 동향	121
〈표 IV-2〉 국내 공기업의 SMR 개발 동향	122
〈표 IV-3〉 국내 민간기업의 해외 SMR 투자 및 협력 동향	122
〈표 IV-4〉 분야별 주요 플레이어	129
〈표 IV-5〉 (참고) 주요 이슈 및 선도기술 평가지표 정의	132
〈표 IV-6〉 주요 이슈(안) 설문조사 결과	133
〈표 IV-7〉 선도기술(안) 설문조사 결과	134
〈표 VI-1〉 주요 이슈 최종 도출 결과	160
〈표 VI-2〉 선도기술 최종 도출 결과	161
〈표 VI-3〉 전략 과제 총괄표	162

그림 목차

[그림 I-1] 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)의 개념도	8
[그림 I-2] SMR의 모듈화 건설공법 개념도	8
[그림 I-3] SMR 노형별 출구 온도 및 온도별 비전력 활용 분야	13
[그림 I-4] 산업기술 환경예측 분석 프레임워크	15
[그림 I-5] 생성형AI를 활용한 기초자료 조사 프로세스	16
[그림 II-1] 세계 SMR 개발 현황	45
[그림 III-1] 차세대 원자로 분야 연도별 뉴스 데이터 발생 규모(빈도수)	71
[그림 III-2] ‘차세대 원자로’ 분야 연도별 뉴스 주제 동향	73
[그림 III-3] 국적별·연도별(최근 10년) 차세대 원자로 분야 특허출원 동향	88
[그림 III-4] 기술별·연도별(최근 10년) 차세대 원자로 분야 특허출원 동향	89
[그림 III-5] 차세대 원자로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향	95
[그림 III-6] 차세대 원자로 분야 연도별 및 주제(대분류)별 연구 동향	96
[그림 III-7] 경수로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향	96
[그림 III-8] 고온가스로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향	97
[그림 III-9] 액체금속냉각고속로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향	97
[그림 III-10] 용융염원자로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향	98
[그림 III-11] 특허 DB에 대한 대분류 및 중분류 Mapping	109
[그림 IV-1] SMR 관련 글로벌 주요 공공 및 민간 기업 현황	116
[그림 V-1] IPCC 1.5℃ 달성을 위한 원자력 설치 시나리오(OECD/NEA)	139
[그림 V-2] 미국의 가동중 석탄 발전소 중 선진원자로로 대체 가능한 수	146
[그림 V-3] 산업부문 에너지 소비량 추이 및 주요 업종별 에너지 소비비중 추이	150

차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

I

Chapter

산업 정의 및 범위

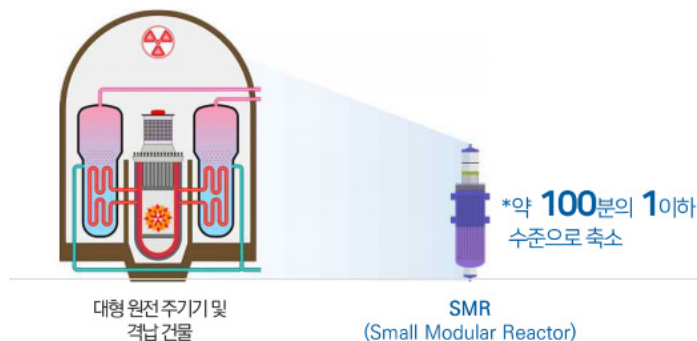
1. 산업 정의
2. 분석 범위
3. 분석 방법

산업 정의

1) 차세대 원자로 산업의 정의

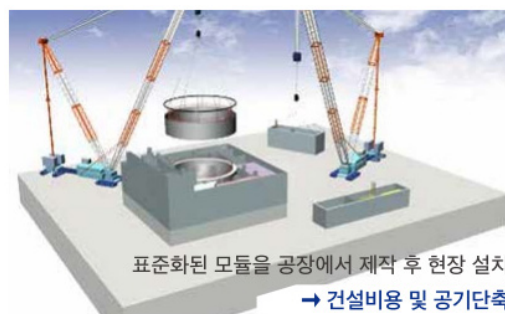
- 핵분열 반응을 이용하여 열에너지를 발생시키는 장치인 원자로 중 전기 출력 규모가 300MWe 이하이고 모듈* 개념으로 건설할 수 있는 소형모듈원자로의 설계, 제조·건설, 운영, 해체와 핵연료의 채광부터 처리까지의 전 과정을 포함하는 산업

*증기발생기, 원자로 냉각재 펌프, 가압기 등 원전 주요기기들을 일체형으로 설계·제작하고 공장에서 부분적으로 제조되고 시험을 거친 모듈을 현장에서 설치할 수 있도록 하는 건설공법



*출처 : 혁신형 SMR(한국원자력연구원, 2022)

[그림 1-1] 소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR)의 개념도



*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

[그림 1-2] SMR의 모듈화 건설공법 개념도

분석 범위

1) 밸류체인

- 기존 대형원전 산업은 거대 산업으로 밸류체인은 크게 설계, 제조·건설, 운영, 핵연료주기, 해체(폐기물관리) 등으로 구분되며, 차세대 원자로의 밸류체인은 전력생산에 활용될 경우 대형원전과 유사하나, 이용 분야에 따라 상이할 가능성 존재
- 원전산업 밸류체인은 높은 기술 장벽이 존재하고 고유 노형에 따라 공급 시장 대부분이 특정되는 소규모 고부가가치 성격의 특화 시장

〈표 1-1〉 원전산업 밸류체인과 분야별 주요 업무

밸류체인	업무 분야	역무
설계	종합설계(A/E)	•구조물 배치부터 상세구조 설계까지 원전 플랜트 건설 전반에 대한 설계
	계통설계(S/D)	•원자로 운전 관련 계통(원자로, 냉각계통, 제어계통, 정지계통, 안전보호계통)에 대한 설계
제조/건설	주기기	•핵증기공급계통(원자로, 증기발생기, 가압기, 원자로냉각펌프 등), 터빈발전기계통(고압/저압터빈, 발전기, 습분분리기, 재열기 등)을 제조 및 공급
	보조기기(BOP)	•주/보조급수계통, 전력계통, 계측제어계통 등 원전 주기기 운영에 필요한 각종 안전장치와 보조계통기기의 제조 및 공급
	시공	•원자로 설치와 토목, 건축, 기계, 전기 공사의 종합공정 등을 진행
운영	운영/정비	•예비품 공급, 원전의 운영 및 안전운전에 필요한 정비, 수리 보수 등
	설계개선	•가동 원전의 안전성 강화와 성능개선
핵연료주기	핵연료	•우라늄 채광, 정련, 변환, 농축, 성형/가공
해체	해체, 방사성 폐기물 관리	•가동중지 원전 해체 및 방사성 폐기물 관리

*출처 : 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석(한국원자력연구원, 2023)

- 차세대 원자로 산업은 원자로 제작 및 건설을 위한 원전기자재 산업이 후방산업이며, 발전, 수소 생산, 지역난방·공정 열, 담수 생산, 핵추진로켓·우주선, 위성·우주기지 등 다양한 전방산업에서 활용 가능

2) 범위 및 주요 품목

■ 차세대 원자로 산업과 관련이 있는 분류체계들을 참고하여 본 용역에서 분석할 범위에 대한 분류체계를 <표 1-2>와 같이 설정

- 각종 문헌조사¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾ 및 관련 전문가 의견을 통해 본 용역에서 차세대 원자로 산업의 분석 범위를 아래 표와 같이 4개의 대분류로 설정
 - 차세대 원자로 산업은 기존 대형원전의 냉각재 특성을 계승하면서 규모를 소형화하고 모듈화하는 것이 특징이므로 기존 대형원전과 같이 노형별 분류체계로 도출
 - 원자로는 냉각재에 따라 크게 물을 냉각재로 사용하는 수냉각과 물 이외의 물질을 냉각재로 사용하는 비수냉각*으로 분류되며, 비수냉각 원자로에는 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로 등이 포함

*수냉각 원자로와 비수냉각 원자로의 가장 큰 기술적 차이는 냉각재이며, 일반적으로 수냉각 원자로 중 경수로는 3세대 원자로, 비수냉각 원자로는 4세대 원자로로 분류

<표 1-2> 차세대 원자로 노형별 분류체계

대분류		내용
수냉각	경수로	•냉각재와 감속재로 경수를 사용하는 원자로
비수냉각	고온가스로	•헬륨, 아르곤 등 비활성 기체를 냉각재로 사용하며, 흑연을 감속재로 사용하는 원자로
	액체금속냉각고속로	•액체 상태의 금속(소듐, 납 등)을 냉각재로 사용하며, 고속중성자에 의한 핵분열 반응으로 발생한 열에너지를 이용하는 원자로
	용융염원자로	•불소 혹은 염소 화합물의 용융염을 냉각재로 사용하며, 핵연료 물질이 용융염에 용해된 상태로 운전되는 원자로

■ 전 세계 각국은 탄소배출권거래제*, 탄소세** 등의 제도를 통해 온실가스 배출량을 감축하여 2050년까지 전 산업 부문의 탄소중립을 추진 중이며, 이를 위해 SMR이 다양한 산업에서 활용될 전망***

- 1) 소형모듈원자로(SMR)(한국과학기술기획평가원, 2022)
- 2) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)
- 3) 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석(한국원자력연구원, 2023)
- 4) 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)
- 5) 소형모듈원전(SMR) 글로벌 산업 동향(KDB산업은행, 2022)
- 6) 세계원전시장인사이트(에너지경제연구원, 2020)
- 7) Advances in Small Modular Reactor Technology Developments(International Atomic Energy Agency, 2020)

*탄소배출권거래제(Emission Trading System, ETS) : 정부가 기업들에게 배출허용총량을 설정하여 배출권을 할당 또는 판매하고, 기업들은 배출권 거래를 통해 여분 또는 부족분에 대하여 관리할 수 있도록 한 제도

** 탄소세(Carbon Tax) : 화석연료의 탄소성분에 따라 제품을 생산하는 과정에서 배출되는 탄소에 대해 부과되는 소비세

*** SMR이 활용될 산업 분야는 용량, 출구 온도에 따라 다양하며, 특히 전력, 열, 수송, 수소 생산, 우주 산업에서 활용도가 높을 것으로 전망

- **(전력 부문)** 전 세계 탄소배출의 상당 부분을 차지하는 석탄 발전을 대체하여 기후 문제를 해결하고, 분산에너지*의 활성화를 위한 전력원으로 수소, 재생에너지**와 함께 SMR이 주목받는 상황

*분산에너지 활성화 특별법('24.06.14. 시행)에 따르면, 분산에너지를 공급하는 사업으로 중소형 원자력 발전사업, 신재생에너지사업, 연료전지발전사업, 수소발전사업 등을 포함

**재생에너지란 햇빛, 물, 지열, 강수, 생물유기체 등을 포함하는 재생가능한 에너지를 변환시켜 이용하는 에너지를 지칭⁸⁾

- 2016년 파리협정(Paris Climate Agreement)이 체결된 이후 전 세계적으로 탄소중립을 위한 노력이 가속화되면서 탄소배출 요인 중 상당 부분을 차지하는 석탄 발전을 대체할 무 탄소 에너지원으로 재생에너지와 함께 SMR이 대두
- 2024년 11월, 도널드 트럼프 미국 전 대통령이 재집권에 성공하면서 화석연료 생산 및 사용 확대, 친환경 정책의 대대적 후퇴, SMR에 대한 투자 확대가 예상
- 재생에너지의 발전 비중 증가에 따라 전력망 안정성 유지를 위해 부하추종 운전* 기술에 대한 수요가 발생하였고, 기존 대형원전**의 탄력운전 기능 확대와 부하추종 운전 능력이 강화된 SMR에 대한 관심 증대

*부하추종 운전(Load Following) : 전력수요의 변동에 대응하여 발전량을 조정하는 운전

**국내 대형원전의 경우에는 전력수요 변동에 제한적으로만 출력을 조절할 수 있어 기저 부하의 역할을 담당

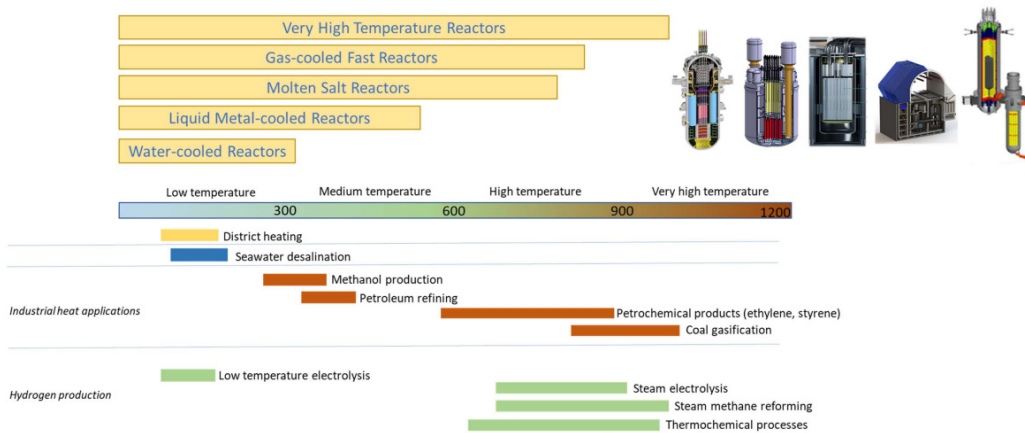
- 데이터센터, 산업단지, 스마트팜 등 일정량의 전력이 지속적으로 필요한 곳에 탄소배출을 절감하면서 경제적이고 안정적으로 전력을 공급하기 위한 분산에너지원으로 SMR이 대두

- **(열 부문)** 핵분열로 발생한 막대한 열에너지를 활용하여 난방을 공급하고 공장을 운영할 수 있으므로 SMR을 열 수요지 인근에 건설하면 고온의 대용량 열이 필요한 곳에 열에너지를 저렴하고 안정적으로 공급 가능

- 기존의 산업공정열원인 화석연료를 무탄소 에너지원으로 대체하는 데 수소 외에 대안이 마땅치 않은 상황에서 대규모 고온열을 생산할 수 있는 차세대 원자로는 산업 부문 탄소중립 달성에 큰 도움이 될 것으로 전망

8) 신에너지 및 재생에너지 개발·이용·보급 촉진법 제2조

- 특히, 고온가스로는 출구 온도가 700℃ 이상까지 올라가기 때문에 지역난방이나 해수 담수화뿐 아니라 펄프·제지, 석유정제, 암모니아 생산, 알루미늄 생산 등 산업공정에도 활용 가능
- **(수소 생산 부문)** 재생에너지, 원자력과 더불어 차세대 에너지원으로 부각되는 수소 생산의 해외 의존도를 낮추고 생산 과정에서 배출되는 탄소의 양을 절감하기 위한 대책으로 원전을 주목
 - 석유, 천연가스 등 화석연료를 개질하여 생산하는 ‘그레이수소’는 화석연료가 원료이기 때문에 해외 의존도가 높고 생산 과정에서 필연적으로 탄소가 발생하는데, 이에 대응하기 위해 일정 수준 이상의 탄소를 배출하지 않는 ‘청정수소’ 등장
 - 청정수소 중에서도 재생에너지로부터 생산된 전기를 사용하는 ‘그린수소’, 원자력으로부터 생산된 전기를 사용하는 ‘핑크수소’, 원자력 열을 이용하는 ‘레드수소’, 원자력 열과 전기를 모두 활용하는 ‘퍼플수소’ 등이 미래 수소 생산 방식으로 주목
- **(수송 부문)** 2024년 3월 22일 UN 산하 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO) 협약에 따라 2027년부터 전 세계 모든 선박이 배출한 온실가스에 대해 부담금을 부과하고 2050년부터는 무탄소 연료만 이용해야 하는 상황에서 원자력 추진 선박 기술에 주목
- **(우주 부문)** 로켓, 우주선, 인공위성, 우주기지 등 우주 공간에서 원자력은 높은 에너지 효율, 긴 연료교체 주기 등의 특징으로 인해 매우 효율적인 에너지원으로 각광
 - 핵추진로켓은 수소, 메탄 등과 산화제의 화학반응으로 추진력을 얻었던 기존의 화학 엔진과는 달리 추진체를 연소시키지 않아 별도의 산화제가 필요 없고 화학 엔진보다 2배 이상 높은 비추력* 보유
 - *로켓 연료의 효율성을 나타내는 단위로, 1kg의 연료가 1초 동안 연소될 때의 추력을 의미
 - 화석연료를 사용하는 로켓도 우주 탐사가 가능하나, 원자력의 에너지 효율이 화석연료에 비해 월등히 높아 연료비용 측면에서 유리하며 동시에 가벼워서 로켓이나 우주선 등 발사체에 신기에 적합
 - 군사위성, 통신위성 등 인공위성은 궤도 변경, 위치 유지 등을 위한 동력원이 필요한데, 원자력은 연료교체 주기가 길고 타 동력원에 비해 에너지 효율이 우수하므로 오랫동안 안정적으로 위성을 운영할 수 있는 동력원으로 기대
 - 우주기지는 생명 보조장치와 통신수단을 비롯한 다양한 장비를 장기간 작동시키기 위해 안정적으로 대량의 전력을 공급받아야 하므로 기존의 태양전지 대신 안정적으로 전력을 공급할 수 있는 우주용 원자로가 활발하게 개발 중



*출처 : Advances in Small Modular Reactor Technology Developments(International Atomic Energy Agency, 2022)

[그림 1-3] SMR 노형별 출구 온도 및 온도별 비전력 활용 분야

〈표 1-3〉 차세대 원자로 적용 산업별 분류체계

대분류	중분류	내용	주요 적용 노형
전력	석탄 발전 대체	•탄소배출량이 많은 석탄 발전을 대체할 청정 에너지원	경수로, 액체금속냉각고속로
	분산에너지	•데이터센터, 산업단지, 스마트팜 등 일정량의 전력이 지속적으로 필요한 곳에 전력 공급	경수로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로
열	산업공정열	•산업공정에 필요한 열에너지 공급	고온가스로
	지역난방	•SMR 핵에너지의 열로 지역난방 공급	경수로, 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로
수송	선박	•해상 운송 부문 탄소중립을 위한 대체 연료	용융염원자로
기타	수소 생산	•수소 생산의 해외 의존도를 낮추고 생산 과정에서 배출되는 탄소의 양을 절감하기 위한 대책	경수로, 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로
	우주	•원자로의 열 및 전기로 추진체를 가열하여 로켓 및 우주선의 추진력 발생 •우주용 원자로로부터 우주기지의 전기 및 열 확보	히트파이프 원자로*

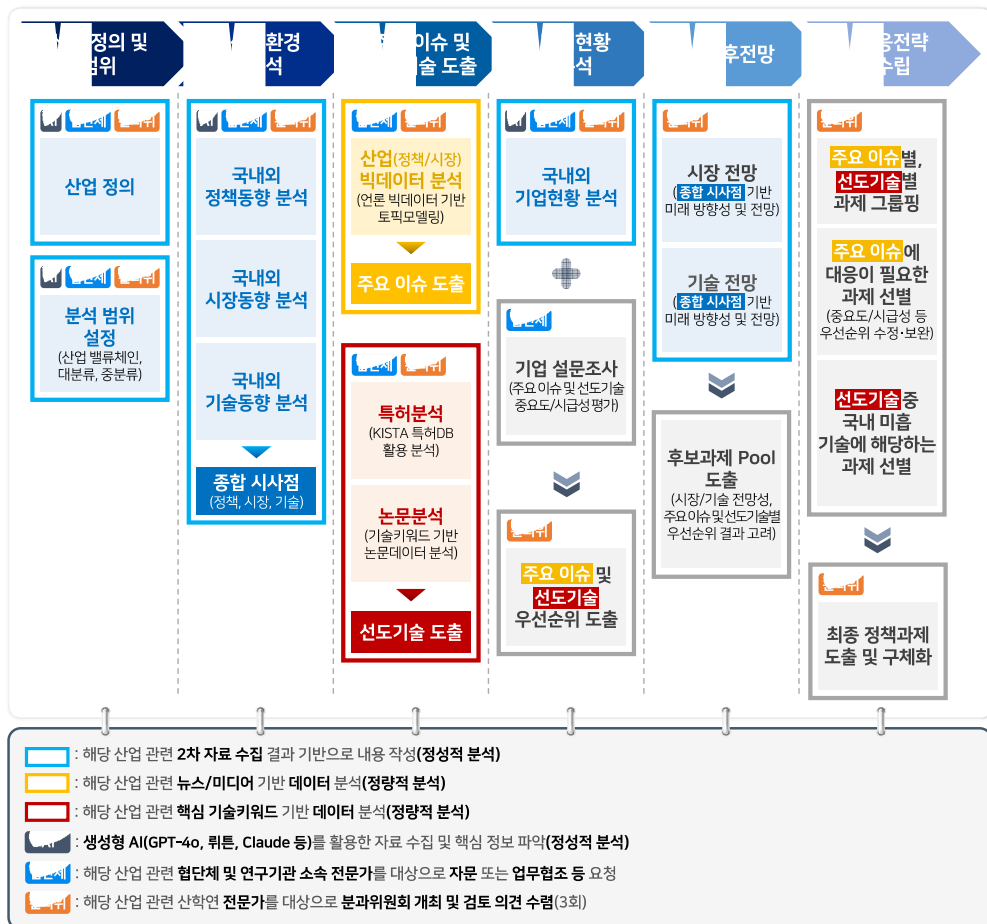
* '히트파이프 원자로'의 경우 본 사업의 분석 범위에 미포함

3) 분석 시 고려사항

- 차세대 원자로는 통상적으로 전기 출력 규모에 상관없이 3세대 원자로인 경수로, 4세대 원자로인 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로 등을 일컬으나 본 보고서에서는 SMR에 국한하여 분석 실시
 - 전 세계적으로 원자력을 다양한 산업에서 활용하기 위해 4세대 원자로 개발과 더불어 원자로의 설비용량 축소 및 모듈화에 관한 연구가 활발히 진행되고 있어 분석 범위를 SMR로 제한
- 시장동향 분석의 경우 노형별(중분류) 시장에 대한 자료를 확보하기 어려워 SMR 전체 시장동향 및 전망을 제시하고 SMR 활용 분야별 시장과 R&D 투자 동향 제시
 - 국외는 SMR이 향후 활발하게 활용될 것으로 예상되는 산업 부문에 대한 SMR 시장 전망을 제시하고, 국내는 정부에서 추진 중이거나 추진 예정인 SMR 관련 R&D 투자 규모 동향 제시

1) 분석 프레임워크

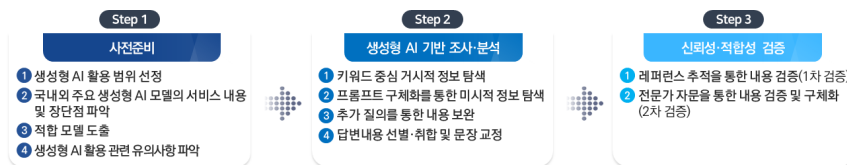
- (개요) 산업의 정책·기술·시장 현황에 대한 정성·정량적 조사 및 기업 설문조사 등 거시적·미시적 관점에서 산업환경을 파악할 수 있는 종합적인 분석을 통해 미래를 전망하고, 이에 기반한 정책과제를 도출해 효과적인 대응 전략 수립



[그림 1-4] 산업기술 환경예측 분석 프레임워크

2) 분석 방법 세부 내용

- **(① 산업 정의 및 범위)** 해당 산업을 포괄하는 상위 범주의 산업의 개념 및 정의, 벨류체인 및 연관 분류체계 등 기초자료 조사·분석을 통해 본 보고서 작성 목적과 해당 산업 선정 취지에 맞는 정의와 분석 범위를 선정
- **(검증 방안)** 산업 정의 및 범위에 대한 2차 자료 수집 및 생성형AI 활용을 통한 초안 작성 후, 해당 산업 분야의 협·단체 소속 전문가에게 자문(2회 이상) 요청을 통해 내용 검증 및 보완 실시
- **(② 산업환경 분석)** 신속하고 효율적인 조사·분석을 위해 생성형AI(챗GPT, 린튼 등) 활용을 통한 기초적인 국내외 정책·기술·시장 동향 조사 및 최신 2차 자료 기반 자료 보완 후 시사점을 도출하고, 전문가 자문을 통한 내용 신뢰성 확보
- **(생성형AI 활용 개요)** 본 분석에서의 생성형AI는 산업별 기초 자료 수집 및 주요 내용 파악 시 소요되는 시간의 획기적 단축을 위해 활용되었으며, 크게 ① 사전준비, ② 생성형AI 기반 조사·분석, ③ 신뢰성·적합성 검증의 3가지 단계로 진행



[그림 1-5] 생성형AI를 활용한 기초자료 조사 프로세스

- **(생성형AI 검증 방안)** 생성형AI 기반 자료조사 결과의 신뢰성 및 적합성 확보를 위해 제공된 출처의 역추적을 통한 사실 여부 판단, 전문가 자문을 통한 내용 검증·구체화 수행

<표 1-4> 생성형AI를 활용한 분석 자료의 신뢰성·적합성 검증 방안

구분	내용
레퍼런스 추적을 통한 내용 검증 (1차 검증)	• 생성형AI로부터 제공받은 답변의 출처 수집 • 기수집된 출처에 대해 역추적하여 제공받은 답변의 사실 여부 검증 • 검증되지 않은 자료는 배제하고, 추가적인 자료조사를 통해 내용 보완 실시 - 공식 문서 및 정책자료 참조를 통한 AI 모델 답변 신뢰성 검증 - 결과 데이터에 대한 최신 여부 확인을 통한 AI 모델 답변 유효성 검증 - 사용자의 상식 및 기본 지식 검토를 통한 AI 모델 답변 현실성 검증
전문가 자문을 통한 내용 검증 및 구체화 (2차 검증)	• 관련 협·단체, 분과위원회를 활용한 조사 결과 검증 및 구체화 실시 - 조사된 결과의 사실 여부 및 최신화 여부, 전문성 검증 - 생성형AI에서 제공된 레퍼런스의 신뢰성 검증 • 검증 후 배제된 내용에 대한 추가조사 및 보완 작성 실시 - 향후 생성형AI 기반으로 추가조사 시 배제되는 빈도 수가 높은 항목이나 내용에 대해 고려하여 조사

■ **(③ 주요 이슈 및 선도기술 도출)** 해당 산업의 기술적 범위에 포함되는 핵심 기술/이슈 키워드*를 기반으로 해당 산업 관련 언론 빅데이터 분석을 통해 주요 이슈를 발굴하고, 특허 및 논문 분석을 실시하여 산업 내 선도기술을 도출

*한국특허전략개발원의 기술 키워드, 정책·시장·기술 및 기업 동향 분석 내용 중 언급되는 빈도수가 높거나 자체적으로 중요하다고 판단되는 키워드 등을 활용·보완하여 도출

- **(주요 이슈 도출)** 2016년부터 2024년 7월까지 해당 산업의 핵심 키워드와 관련된 뉴스/미디어 관련 문서를 확보하여 하위 주제를 도출·분석하는 토픽 모델링*(BERTopic** 기법 활용)을 실시하여 해당 산업의 핵심 주요 이슈 3가지를 선별

*(토픽 모델링) 연도별 주요 주제의 변화를 식별하기 위해 대량의 문서 데이터를 분석하여 숨겨진 주제를 자동으로 추출하는 기법으로, 주로 자연어 처리(NLP)와 기계 학습을 활용하여 문서 내의 단어 패턴을 분석하고, 이 패턴을 바탕으로 서로 연관된 단어 그룹(토픽)을 식별

** (BERTopic) BERT 기반 사전학습 임베딩 계층을 활용하여 문서의 의미를 더 정확하게 반영한 벡터 표현을 생성하여 문서 간 관계를 다차원 공간에서 식별 가능하게 하며, UMAP(Uniform Manifold Approximation and Projection)과 HDBSCAN(Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 알고리즘을 활용하여 문서의 군집화를 체계적으로 수행 가능

- **(선도기술 도출)** 핵심 키워드를 기반으로 해당 산업의 대분류/중분류별 논문분석* (Web of Science 활용) 및 특허분석**(한국특허전략개발원의 특허 DB를 활용하여 분석)을 실시하여 현재의 출원/연구 동향 및 기술중요도 등을 간접적으로 평가 후 선도기술 도출

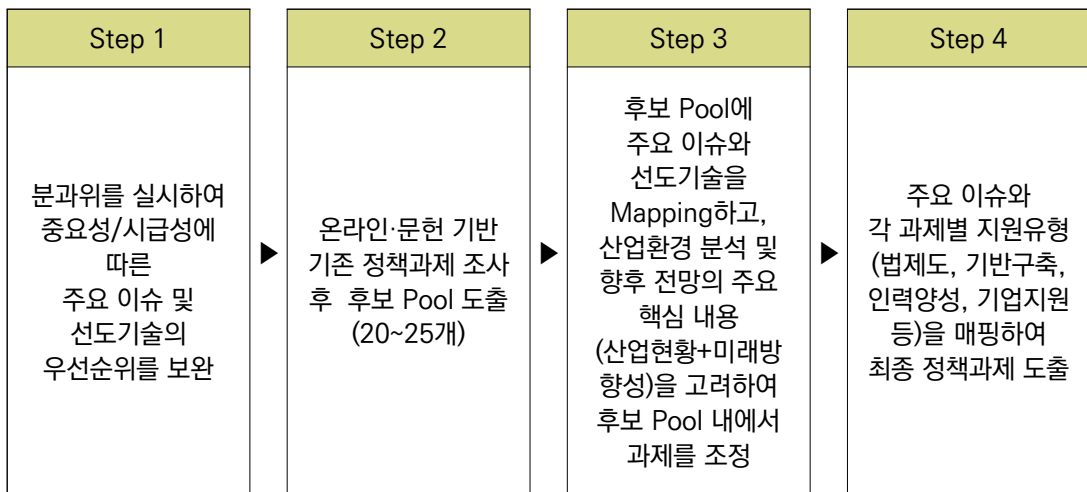
- (논문분석 항목) 국가별 및 연도별 논문 동향, 연구경쟁력, 연구점유율, 최근 연구집중도, 주요 저자집중도, 주요 저자참여도, 주요 연구영향력, 국가경쟁력, 한국 내 경쟁력, 국가별 연구주도력, 국가별 연구영향력 분석
- (특허분석 항목) 국적별 출원 동향(연도별, 최근 10년), 기술별 출원 동향(연도별, 최근 10년), 출원인 국적별 최근 출원집중도(최근 5년), 기술별(대분류, 중분류) 최근 출원집중도(최근5년), 기술별(대분류, 중분류) 시장확보력/특허영향력

■ **(④ 기업현황 분석)** 정성적 조사 기반으로 해당 산업에 종사하는 주요 Player 동향을 파악하고, 국내 기업 대상 설문을 통해 주요 이슈 및 선도기술에 대한 적합성·중요도 검증 및 대응방안과 애로사항 등 파악

- **(기업동향 분석)** 해당 산업에 종사하는 주요 기업의 기술/제품/서비스 개발 및 투자 현황, 매출액, 사업 현황 등과 관련된 2차 자료 및 생성형AI 등을 활용하여 기업현황에 대한 기초 분석 실시
- **(기업 현황조사(설문조사))** 해당 산업과 연관된 협·단체 회원사 리스트 확보를 통해 해당 기업에 종사하는 산업계 전문가 대상으로 주요 이슈(안) 및 선도기술(안)의 적합성·중요도에 따른 우선순위 파악 실시

- **(⑤ 향후 전망)** 산업환경 분석을 통해 기 도출된 정책·기술·시장 동향의 종합 시사점, 주요 이슈(안) 및 선도기술(안)을 기반으로 해당 산업의 핵심 내용을 도출하여 산업 전반의 성장 가능성 및 미래 방향성, 향후 전망을 제시
- **(⑥ 대응전략 수립)** 분과위원회 운영을 통해 주요 이슈 및 선도기술을 최종 선별하고, 이와 연계 및 대응하여 추진할 수 있는 후보과제 Pool 도출 및 최종과제 선별 후 구체화 실시

〈표 1-5〉 대응전략 수립(전략과제 도출) 프로세스



차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

2

Chapter

산업환경 분석

1. 정책동향 분석
2. 시장동향 분석
3. 기술동향 분석
4. 시사점

정책동향 분석

1) 국외 정책동향

가. 미국

- 기존 대형원전 위주의 원자력 활용 중심축을 SMR로 변화시켜 자국 원자력 산업 경쟁력을 회복시키려 하며 청정에너지 경제 전환을 위한 주요수단으로 SMR 제시⁹⁾
- SMR 연구개발 지원 정책은 기본적으로 3가지 연방정부 법에 근거하고 있으며 미래 핵심 에너지 기술 중 하나로 SMR을 주목
 - 2018년 발효된 ‘원자력혁신역량강화법(Nuclear Energy Innovation Capabilities Act, NEICA)’에 근거하여 다목적 시험로 건설, 국가 원자로혁신센터 설립, 선진원자로실증사업(Advanced Reactor Demonstration Program, ARDP) 착수 등 원자력 기술혁신을 위한 정책 추진
 - 2019년 발효된 ‘원자력혁신및현대화법(Nuclear Energy Innovation Modernization Act, NEIMA)’에 근거하여 SMR 등 선진원자로 인허가 규제기술의 선진화를 위해 규제기관이 인허가 기술역량을 확보하고 효율적으로 인허가 과정을 개선하도록 요구
 - 2020년 발효된 ‘에너지법(Energy Act)’은 선진원자력 연구개발-실증-상용화 관련 사업의 장기적 예산 지원 명시

9) 소형모듈원자로(한국과학기술기획평가원, 2022)

- 바이든 정부는 탄소중립 달성 및 청정에너지 경제 전환을 위한 혁신기술 중 하나로 SMR을 선정하고 관련 지원 정책 시행
 - 2021년 3월 발표하여 8년간 약 2.4조 달러 투자를 명시한 ‘미국 일자리 계획(The American Jobs Plan)’에 차세대 원자로기술개발 투자 등 원자력 관련 현안 포함
 - 2021년 4월 미국 국무부는 정부·산업계·학계 간 SMR 관련 기술협력 증진을 위해 FIRST 프로그램을 개시하고 초기 투자로 530만 달러 지원
 - 2021년 11월 미국 행정부는 ‘인프라 투자와 일자리 법안(Infrastructure Investment and Jobs Act, IIJA)’에 경제성 악화로 인한 원전의 조기 폐쇄방지와 미래 원전을 개발하는 내용이 담긴 상업원전 지원정책(Civil Nuclear Credit Program, CNC Program)을 포함하고 예산 60억 달러 배정
 - 2022년 2월 ‘재량지출 세출법안(Consolidated Appropriations Act 2022, HR 2471)’에 차세대 원자로 및 SMR R&D 등을 포함하고 예산 16억 5천만 달러 배정
- 미국 원자력규제위원회(Nuclear Regulatory Commission, NRC)는 ‘NuScale’ 인허가 과정에서 확인된 현재 인허가 체계의 다양한 이슈를 해결하기 위해 원자력 규제기술 선진화 추진
 - 기존 대형원전을 대상으로 확립된 인허가 규제가 SMR에 그대로 적용될 수는 없으며 새로운 기술의 적용을 위해 인허가 제도 자체 변경이 필요할 수 있음을 제기
- 2024년 6월 미국 에너지부(U.S. Department Of Energy, DOE)는 3세대(Gen III+) SMR의 미국 초기 배치를 지원하기 위해 최대 9억 달러를 지원하기 위한 의향 통지(Notice Of Intent, NOI) 발표
 - 청정에너지실증사무국(Office of Clean Energy Demonstrations, OCED)이 관리하는 Tier 1으로 분류된 업체나 단체는 3세대 SMR을 초기에 배치하는 데 전념하며 최대 2개의 팀에 최대 8억 달러를 지원할 계획
 - DOE 원자력국(Office of Nuclear Energy, NE)이 관리하는 Tier 2 그룹은 설계, 라이선스, 공급업체 개발 및 현장 준비 등에서 Tier 1 그룹과의 격차를 해결하고 추가 SMR 배포를 촉진하기 위해 최대 1억 달러를 지원할 계획
- 새로운 선진 원자력 기술의 개발 및 배치를 장려하고 지원하는 초당적인 ADVANCE* 법안이 2024년 6월 미국 상원 통과 후 7월 바이든 대통령 서명¹⁰⁾
 - *Accelerating Deployment of Versatile Advanced Nuclear for Clean Energy
 - 규제 승인 절차 간소화 조치를 통해 기업의 규제 비용을 절감할 뿐 아니라 차세대 원자로의 성공적인 배치에 대해 인센티브를 제공하는 방안 제공 예정

10) 과학기술&ICT 정책·기술 동향(한국과학기술기획평가원, 2024)

- 이 법에 근거해 NRC가 사고저항성 핵연료와 선진 핵연료의 자격화를 인증하고 허가할 수 있는 능력을 강화하도록 지시할 예정
- 또한 DOE가 핵비확산에 대한 강력한 기준을 유지하면서 국제 시장에 미국 기술 수출을 승인하는 절차를 개선하도록 지시할 예정

■ 2024년 11월 도널드 트럼프 미국 전 대통령이 재집권하면서 전통(화석연료) 에너지 산업에 대한 규제 완화·철폐, 화석연료 생산 및 사용 확대, 친환경 정책의 대대적 후퇴 등이 예고되고 있으나, SMR에 대한 투자 및 지원은 확대될 전망¹¹⁾

- 제조업 부흥과 인플레이션 압력 저하를 위한 에너지 비용 절감, 에너지 자립 제고, 에너지 지배력 강화, 기후변화 대응 철회 등에 초점
- 선거 기간 중 언급된 내용을 살펴보면 ① 화석연료, ② 재생에너지 ③ 기후협약·환경 규제, ④ 전기·전력 등 4가지 카테고리를 중심으로 정책 재편이 예상
- (화석연료) 연방 공유지에서의 시추 허용, 알래스카 북극 보호지역에서 시추 재개, 인프라(파이프라인, 수출터미널 등) 확대, 수압파쇄법 지지, 석탄산업 규제 폐지 등
- (재생에너지) 비용 대비 효율이 낮은 태양광의 보조금 철회, 특히 해양 생태계에 악영향을 미치는 해상 풍력발전을 중단하는 행정명령 발동
- (기후협약·환경 규제) 파리기후협약 재탈퇴 등 국제 기후 이니셔티브 불참, 관련 예산 삭감 및 인원 감축, 차량 및 가전기구 에너지 효율 기준 완화, IRA* 무력화 등
- *인플레이션감축법(Inflation Reduction Act, IRA) : 조 바이든 행정부에서 2022년 8월 16일 제정한 법안으로, 기후변화 대응, 보건 분야 복지 개선, 기업 과세 개편 등에 정부 예산(4,370억 달러)을 투입하여 미국의 재정적자 해소 및 친환경 경제로의 전환을 추진하는 법안
- (전기·전력) SMR에 대한 투자 확대, 발전소 건설 신속 승인 등

나. 유럽연합(EU)

■ 2022년 7월 EU 녹색분류체계(EU Green Taxonomy)*에 원자력 기술을 추가하였으며 주요국은 에너지 안보와 관련하여 SMR 개발 추진¹²⁾

*녹색분류체계(Green Taxonomy)는 환경 및 기후변화 대응에 적합한 경제활동의 기준이며 녹색 금융투자로 인정받을 시 친환경 투자에 적용되는 각종 인센티브 수령 가능

11) 트럼프 2기 행정부의 에너지·기후 정책과 시장평가(국제금융센터, 2024.11.13.)

12) 소형모듈원자로(한국과학기술기획평가원, 2022)

- 녹색분류체계에서 원자력 관련 경제활동이 인정받기 위해서는 유럽의 엄격한 안전요건 준수가 필수적이며 2가지 기준* 또한 충족 필요
 - *①2050년 고준위 방사성 폐기물 처분시설을 운영하기 위한 문서화된 계획 보유, ②2025년 이후 신규원전 건설과 가동원전 계속운전 프로젝트에서 사고저항성 핵연료 기술 적용
- EU 내에서도 아직까지는 원자력 포함 여부를 두고 탈원전을 추진하는 일부 반대 국가(독일, 오스트리아 등)들을 중심으로 분쟁이 계속되는 중
- **(프랑스)** 러시아 천연가스 관련 공급-수요 불일치로 발생한 에너지 위기에 대응하여 원자력 발전을 에너지 분야 중점 산업으로 육성하고 SMR 개발 지원
 - 2022년 마크롱 정부는 ‘프랑스 2030 투자전략’에서 산업 전반의 친환경 전환 및 미래산업 육성을 위한 10가지 전략 중 하나로 SMR 개발을 강조했으며 2030년까지 10억 유로를 집중적으로 투자할 계획
- **(이탈리아)** 이탈리아 정부는 SMR 투자 허용 법안을 발의하여 10년 이내에 SMR을 가동할 계획¹³⁾
 - 이탈리아는 1986년 체르노빌 원전 사고 이후 탈원전을 결정하였고, 1990년 마지막 원자로가 폐쇄되면서 대표적인 탈원전 국가 중 하나로 자리매김
 - 그러나, 2024년 7월 17일 환경·에너지안보부 Gilberto Pichetto Fratin 장관이 SMR에 대한 투자를 허용하는 법안을 발의할 계획임을 밝힘으로써 35년 만에 탈원전 철회*
 - *Gilberto Pichetto Fratin 장관은 이탈리아가 2050년까지 전력 소비량과 수입 화석연료에 대한 의존도를 낮추고 청정에너지의 연속성을 보장하기 위해서는 원자력이 국가 전체 전력 소비량의 최소 11%를 차지하여야 한다고 주장
- **(영국)** 태양광, 풍력 등 재생에너지 생산 부족으로 에너지 위기를 겪으면서 안정적 에너지 공급 및 탄소중립의 효율적 달성을 위해 새로운 대형원전 건설과 함께 SMR 개발 또한 전략적으로 추진 중¹⁴⁾
 - 2020년 11월 영국 정부는 2050년 탄소중립 목표 달성을 위한 ‘녹색산업 혁명을 위한 10대 중점계획’을 발표하였으며, 해당 계획을 통해 원자력 산업 부문에서 SMR에 대한 민간 투자 촉진(최대 3억 파운드 규모)을 목표로 설정
 - 2021년 넷제로 전략(Net Zero Strategy: Build Back Greener)*를 통해 10대 중점계획에서 설정한 분야별 정책목표의 추진 현황을 제시하고, 전력, 수소 생산, 산업, 난방, 운송 등 산업 전 분야에 걸쳐 넷제로를 위한 구체적 계획 제시¹⁵⁾

13) Italy to introduce legislation for investment in SMRs(Nuclear Engineering International, 2024.07.17.), URL : <https://www.neimagazine.com/news/italy-to-explore-smrs/?cf-view>

14) 소형모듈원자로(한국과학기술기획평가원, 2022)

15) 탄소중립 달성을 위한 영국 원전 산업 정책 동향(대한무역투자진흥공사, 2023)

*2035년까지 전력 시스템의 완전한 탈탄소화 추진

- 2022년 에너지 안보 전략(Energy Security Strategy)을 통해 영국의 에너지 독립성을 확보하고 2030년까지 영국 전력의 최대 95%를 저탄소 에너지원으로 공급하기 위한 중장기적인 원자력, 해상풍력, 북해 석유·가스 중심의 에너지 생산 계획 수립¹⁶⁾
- 2022년 3월 신규 원전 자금조달 모델인 규제자산기반(Regulated Asset Base, RAB)을 적용하는 원자력자금조달법(Nuclear Energy Financing Act 2022)이 시행되어 원전 건설 단계부터 소비자로부터 건설비용 조달 가능
- 2023년 에너지 안보 및 넷제로 성장전략(Powering up Britain)을 통해 안정적인 가스 공급 강화, 에너지 효율화 및 청정 난방, 원자력, 재생에너지, 전력망 효율화, 탄소 포집·활용·저장(CCUS) 기술, 수소에너지 등 7가지 부문에 대해서 에너지 안보 계획 수립¹⁷⁾
- 2023년 4월 1차를 시작으로, SMR 기술 선발을 위한 경쟁 입찰 착수
- 2030년대 초까지 차세대 원자력 기금을 통해 차세대 원자로(Advanced Modular Reactor, AMR) 실증 등 개발 지원

16) 탄소중립 달성을 위한 영국 원전 산업 정책 동향(대한무역투자진흥공사, 2023)

17) 탄소중립 달성을 위한 영국 원전 산업 정책 동향(대한무역투자진흥공사, 2023)

다. 일본

■ 일본 경제산업성 산하 원자력소위원회가 후쿠시마 원전 사고('11.03.) 이후의 원전 신·증설 미진행 원칙을 철회한 '향후 원자력 정책의 방향성과 실현을 위한 실행지침' 정리¹⁸⁾

- 원자력소위원회는 '원자력 개발·이용 기본원칙('22.08.)'을 제시하고, 본 기본원칙에 따라 일본의 원자력 정책을 검토한다는 방침 공표
- 지침은 ① 원전 재가동을 위한 관계자 총력 결집 ② 운전기간 연장 등 시설치 원전 활용 최대화 ③ 차세대 혁신로 개발·건설 ④ 재처리·폐로·최종처분 절차 가속화 ⑤ 공급망 유지·강화 ⑥ 국제적인 공통 과제 해결 지원 등을 규정

라. 중국

■ 기본적으로 대형원전 건설 및 관련 기술 국산화를 지원하면서 동시에 다양한 SMR 연구개발 및 실증 지원¹⁹⁾

- 2021년 7월 세계 최초 상업용 육상 SMR 건설(ACP100) 착수뿐 아니라 최근 대형원전 다수 건설을 공표하고 부유식 SMR 개발도 추진하는 등 다양한 원자로에 대한 연구개발 진행
- 제14차 국가5개년발전계획('21~'25)에 따르면 해상 부유식 SMR 개발, 차세대 원자로 실증사업 추진 등에 약 90억 달러 투자 예정
- 2006년 16대 국가 과학기술사업 중 하나인 고온가스냉각 페블베드 모듈형 원자로 HTR-PM이 2023년 12월 6일 4세대 원자로 중 최초로 상업운전 개시²⁰⁾
 - HTR-PM은 2012년에 착공하여 2021년에 전력망에 연결되었고 2023년 12월 상업운전 시작
 - 2024년 3월 27일, HTR-PM이 190,000㎡, 1,850가구에 난방을 공급할 수 있는 본격적인 지역난방 가동 시작²¹⁾

18) (정책동향) 일본 원자력 정책의 방향성과 실행지침(안)(한국산업기술진흥원, 2022), URL : https://www.kia.t.or.kr/front/board/boardContentsView.do?board_id=71&contents_id=311273450c9f4e639d7c125c4d98d04e&MenuId=49e713206ef642d5a1f9012f06bcc4d9

19) 소형모듈원자로(한국과학기술기획평가원, 2022)

20) The World's First Fourth-Generation Nuclear Power Plant Jointly Built by Shanghai Electric Put into Commercial Operation(Shanghai Electric, 2023.12.15.), URL : https://www.shanghai-electric.com/group_en/c/2023-12-15/569933.shtml

21) HTR-PM heating project commissioned(World Nuclear News, 2024.04.02.), URL : <https://world-nuclear-news.org/Articles/HTR-PM-heating-project-commissioned>

마. 기타

■ (캐나다) 연방정부와 주정부 모두 적극적으로 SMR 개발을 지원하는 정책을 추진하고 있으며 일종의 사전 인허가 제도를 운영 중²²⁾

- 연방정부는 2018년 SMR 개발 촉진 관련 로드맵을 발표하여 원자력 기술혁신을 장려하고 다양한 SMR의 특성 및 적합성 평가를 추진하고 있으며 2020년 SMR 로드맵 달성을 위한 국가 행동계획 수립 및 투자 확대
 - 2020년 10월 차세대 혁신기술인 SMR 개발 및 상용화 추진을 위해 2,000만CAD 투자 계획을 발표하고 캐나다 벤처기업인 Terrestrial Energy 지원
- 연방정부의 로드맵에 따라 2022년 3월 주정부 연합(4개 주)의 SMR 개발 및 실증 지원계획 발표
 - Ontario, Saskatchewan, New Brunswick, Alberta 주는 ‘SMR 개발 및 보급을 위한 전략적 협력 계획*(A Strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors)’을 발표
- 캐나다 원자력 규제기관인 CNSC(Canadian Nuclear Safety Commission)는 2016년부터 ‘사전 인허가 검토(Vendor Design Review, VDR)’ 사업 운영을 통해 선진원자로(SMR 포함)에 대한 인허가 가능성을 사전 검토하고 다른 나라 규제기관과 협력도 추진
 - 다양한 SMR 개발 기업들의 인허가 가능성 평가를 위한 일종의 허브가 되었으며 현재 10개 이상 기업들이 VDR 사업에 참여 중
 - NRC와 함께 SMR을 포함한 선진원자로에 대한 규제기술의 효율성을 높이고 선진화하기 위한 협력 선언
- 2019년부터 캐나다원자력연구소(Canadian Nuclear Laboratory, CNL)는 원자력연구이니셔티브(Canadian Nuclear Research Initiative) 프로그램을 운영하여 SMR 연구개발 지원과 실증사업 추진

22) 소형모듈원자로(한국과학기술기획평가원, 2022)

〈표 II-1〉 국가별 SMR 정책 동향

국가	정책 동향
 미국	•SMR 연구개발 지원 정책은 ‘원자력혁신역량강화법’, ‘원자력혁신및현대화법’, ‘에너지법’ 등 연방정부 법에 근거하고 있으며 미래 핵심 에너지 기술 중 하나로 SMR을 주목 •바이든 정부는 탄소중립 달성 및 청정에너지 경제 전환을 위한 혁신기술 중 하나로 SMR을 선정하고 관련 지원 정책 시행 •NRC는 SMR 개발 인허가 체계의 다양한 이슈를 해결하기 위해 원자력 규제기술 선진화 추진 •새로운 원자력 기술개발 및 배치 가속화를 위한 규제 개선(선진원자로 인허가 비용 지원, 선진원자로 실증 및 배치를 신속히 지원, 사전 인허가 신청 활동을 위한 자금 제공 등) •2024년 11월 도널드 트럼프 미국 전 대통령이 재집권하면서 전통 에너지산업에 대한 규제 완화·철폐, 화석연료 생산 및 사용 확대, 친환경 정책의 대대적 후퇴 등이 예고되는 상황에서 SMR에 대한 투자 및 지원은 확대될 전망
 유럽연합	•2022년 7월 EU 녹색분류체계에 원자력 기술을 추가하였으며, 주요국은 에너지 안보와 관련하여 SMR 개발 추진 •프랑스는 러시아 천연가스 관련 공급-수요 불일치로 발생한 에너지 위기에 대응하여 원자력 발전을 에너지 분야 중점 산업으로 선정하고 SMR 개발 지원 •영국은 태양광, 풍력 등 재생에너지 생산 부족으로 에너지 위기를 겪으면서 안정적 에너지 공급 및 탄소중립의 효율적 달성을 위해 새로운 대형원전 건설과 함께 SMR, AMR 개발 또한 전략적으로 추진 중
 일본	•일본 경제산업성 산하 원자력소위원회가 후쿠시마 원전 사고(‘11.03.) 이후의 원전 신·증설 미진행 원칙을 철회한 ‘향후 원자력 정책의 방향성과 실현을 위한 실행 지침’ 정리
 중국	•대형원전 건설 및 관련 기술 국산화를 지원하면서 동시에 다양한 SMR 연구개발 및 실증 지원
 캐나다	•연방정부는 2018년 SMR 개발 촉진 로드맵을 발표하여 원자력 기술혁신을 장려하고, 2020년 SMR 로드맵 달성을 위한 국가 행동계획 수립 및 투자 확대

2) 국내 정책동향

■ 국내에서는 에너지, 전력, 원자력 등과 관련된 종합계획을 통해 원전 생태계 전주기 지원을 바탕으로 원전 및 차세대 원자로 산업의 발전 도모

- SMR 개발과 상용화, 차세대 원자로 기술 확보, 안전규제 체계 마련, 민관협력 기반 강화, 연구개발 및 인력양성에 이르는 종합적인 전략 추진

〈표 II-2〉 국내 SMR 정책 동향

정책명	주요 내용	SMR 관련 내용
제3차 에너지기본 계획 (2019.06.)	•(비전) 에너지 전환을 통한 지속가능한 성장과 국민 삶의 질 제고 •(중점과제) ①에너지정책 패러다임을 소비구조 혁신 중심으로 전환, ②깨끗하고 안전한 에너지믹스로 전환, ③분산형·참여형 에너지 시스템 확대, ④에너지산업의 글로벌 경쟁력 강화, ⑤에너지전환을 위한 기반 확충	•원자력 분야의 미래 유망분야 중 하나로 중소형 원자로를 제시하고 연구·산업기반 조성 추진
제3차 원자력안전종합 계획 (2021.12.)	•(비전) 적극적인 국민 참여로 투명하고 신뢰할 수 있게 원자력·방사선 안전을 관리하는 사회 •(정책방향) ①국민참여와 알 권리가 보장되는 안전규제체계 구축, ②선제적이고 실효성있는 안전관리 혁신, ③방사선 걱정없는 빈틈없는 안전규제체계 구축, ④원자력 안전규제 인프라의 전략적 확충	•12대 추진전략 중 하나로 ‘전략적 R&D 확대 및 특성화된 국제협력으로 규제 전문성 강화’를 제시하였으며 SMR 관련 규제기술 R&D 추진 내용 포함
제6차 원자력진흥종합 계획 (2021.12.)	•(비전) 미래세대까지 안심하고 활용할 수 있는 청정에너지로서의 원자력 •(기본방향) ①가동원전 안전 강화 및 방폐물 환경부담 저감, ②해체·SMR 신시장 개척과 원전 수출시장 확장, ③원자력·방사선 융합기술을 활용한 혁신성과 창출, ④국민과 함께, 국가 위상을 높이는 정책 추진	•12대 정책방향 중 하나로 ‘4. 선도적 기술혁신과 정책지원으로 미래 원전 시장 선점’을 제시하였고 기술혁신에 i-SMR 개발이 포함 •해당 계획을 체계적으로 이행하기 위한 제6차 원자력연구개발 5개년 계획(‘22~’26)을 발표하고, ‘원자력시장 체제개편에 대비한 연구개발 본격 추진’을 명시

정책명	주요 내용	SMR 관련 내용
120대 국정과제 (2022.07.)	•(국정비전) 다시 도약하는 대한민국, 함께 잘 사는 국민의 나라 •(국정목표) ①상식이 회복된 반듯한 나라, ②민간이 끌고 정부가 미치는 역동적 경제, ③따뜻한 동행, 모두가 행복한 사회, ④자율과 창의로 만드는 담대한 미래, ⑤자유, 평화, 번영에 기여하는 글로벌 중추국가, ⑥대한민국 어디서나 살기 좋은 지방시대	•에너지 안보 및 탄소중립 수단으로 원전을 적극 활용하고, 독자 SMR 노형 개발 및 제4세대 원자로, 핵융합, 원전연계 수소 생산 등 차세대 원전기술 확보를 위한 R&D 집중 추진
탄소중립 녹색성장 기술 혁신 전략 (2022.10.)	•(목표) 기술 혁신을 통한 2030 NDC 및 2050 탄소중립 실현 •(세부 추진 방안) ①민간 주도의 임무 중심 탄소중립 기술 혁신, ②신속 유연한 탄소중립 R&D 투자 강화, ③혁신적 기술개발을 위한 선제적 기반 조성	•에너지 전환 부문에 차세대 원자력을 탄소중립 중점분야로 선정하고, SMR·선진원자력시스템·원자력 폐기물 관리 기술을 핵심기술로 포함
제5차 과학기술기본 계획 (2022.12.)	•(비전) 과학기술혁신이 선도하는 담대한 미래 - 행복한 국민, 역동적 경제, 강한 나라 - •(추진전략) ①질적 성장을 위한 과학기술 체계 고도화, ②혁신주체의 역량 제고 및 개방형 생태계 조성, ③과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응	•12대 중점 육성 기술(국가전략기술) 중 하나로 SMR을 포함한 차세대 원자력을 제시
소형모듈원자로 (SMR) 안전규제 방향 (2023.04.)	•(일반원칙) SMR도 모든 원자력 규제에 적용되는 기본안전원칙을 예외없이 준수하고, 과학기술과 전문성에 기반을 둔 합리적 안전규제를 이행한다는 것을 재확인 •(기본방향) ①SMR의 높아진 기술수준만큼 최상의 안전수준을 확보, ②혁신적 설계특성으로 기존 기술기준을 적용할 수 없는 경우, 규제기관이 다양한 평가방식을 활용한 안전성 확인방안 제시, ③규제협력을 통해 국제적으로 조화롭고 인정받는 기준 마련, ④선도(Leading), 소통(Interaticon), 준비(Readiness) 등 3가지 핵심전략을 통해 SMR의 새로운 설계특성을 고려한 규제체계 마련	•원자력안전위원회는 SMR의 기술수준 및 설계특성을 고려한 안전성 확인방향을 개발자에게 선제적으로 제시함으로써 규제차원의 적극적 준비를 이행하기 위한 ‘소형모듈원자로(SMR) 안전규제 방향’ 마련

정책명	주요 내용	SMR 관련 내용
민관합동 소형모듈원전 (SMR) 얼라이언스 (2023.07.)	•(비전) SMR 산업 경쟁력 강화를 위한 민·관의 역량 함양 •(전략) ①SMR 활용 비즈니스 모델 및 사업화 방안 수립, ②SMR 생태계 구축을 위한 제도 기반 조성	•소형모듈원전(SMR) 산업 활성화 방안 수립을 위해 31개 기업, 11개 공공기관이 참여하는 얼라이언스 출범
국가전략기술 임무중심 전략로드맵 (2024.01.)	•(수립 배경) 공급망, 신산업, 외교·안보의 통합적 관점에서 기술주권 확보가 필수적인 12대 국가전략기술 선정 및 특별법 제정 •(수립 주안점) ①개별부처 사업·과제기획 위한 기술로드맵(세부기술 나열)이 아닌, R&D 투자·평가의 국가 차원 우선순위 명확히 제시, ②기발표된 부처별 전략을 국가적 관점에서 정밀 분석하여 필요성·실현가능성을 고려한 전략적 정량 목표 제시, ③핵심기술 확보를 위한 중점 투자방향 및 인재·국제협력·인프라 등 생태계 조성 방안을 함께 제시, R&D 정책의 나침반으로 적극 활용, ④혁신본부 하 과기자문회의 전략기술 특위 및 기술별 전문가 조정위를 구성하여 로드맵(안) 마련	•12대 국가전략기술 중 하나로 '차세대 원자력'을 선정하였으며, 차세대 원자력의 기술확보를 위한 중점 투자방향 및 관련 생태계 조성방안 제시
제11차 전력수급기본 계획 실무안 (2024.06.)	•(특징) 11차 전기본은 재생에너지와 원자력의 조화로운 확대로 탄소중립에 적극 대응하고, 화석연료의 해외 의존도 감소를 통해 에너지안보 향상에 기여할 것으로 기대	•2024년부터 2038년까지의 발전원별 설비용량을 제시하였고, SMR의 상용화 실증을 위한 용량(0.7 GW) 할당
차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안(안) (2024.06.)	•(목표) 2030년대, 차세대 원자로 기술 확보(설계 전문기업 2개 육성) & 설계부터 완제품까지 전주기 사업화·수출 •(정책 방안) ①기술개발 및 실증 로드맵 수립, ②(가칭)K-ARDP 도입·추진, ③안전규제체계 적기 구축, ④전략적 국제협력, ⑤혁신성장 생태계 조성	•2030년대 세계 차세대 원자로 시장에 대응하기 위하여 차세대 원자력 기술개발 및 실증 로드맵 수립, 체계적·전략적인 R&D 프로젝트, 안전규제·인력양성·국제협력 등 종합적 지원기반 확충 등을 포함한 체계적인 지원방안 제시

- **(제3차 에너지기본계획)** 제3차 에너지기본계획에서 5대 중점 추진과제 중 하나인 ‘에너지 산업의 글로벌 경쟁력 강화’를 위해 ‘원전 산업 핵심 생태계 유지’를 제시
 - 원자력 분야의 미래 유망분야 중 하나로 중소형 원자로를 제시하고 연구·산업기반 조성 추진
- **(제3차 원자력안전종합계획)** 제3차 원자력안전종합계획(‘22~’26)의 12대 추진전략 중 하나로 ‘전략적 R&D 확대 및 특성화된 국제협력으로 규제 전문성 강화’를 제시하였으며 SMR 관련 규제기술 R&D 추진 내용 포함
 - 미래 SMR 관련 예상되는 규제(표준설계인증 등) 수요에 대비한 R&D 추진
- **(제6차 원자력진흥종합계획)** 제6차 원자력진흥종합계획(‘22~’26)의 기본방향으로 ‘SMR 新시장 개척과 원전 수출시장 확장’을 제시
 - 12대 정책방향 중 하나로 ‘4. 선도적 기술혁신과 정책지원으로 미래 원전 시장 선점’을 제시하였고 기술혁신에 i-SMR 개발이 포함*
 - *i-SMR 개발뿐 아니라 SMR 수출을 위한 제도적 기반(안전성 평가 방안, 인허가·규제분야 국제협력 등) 및 생태계 구축(중소·중견기업 SMR 분야 진출 촉진, 글로벌 SMR 프로젝트 입찰참여 지원 등) 또한 강조
 - 해당 계획을 체계적으로 이행하기 위한 제6차 원자력연구개발 5개년 계획(‘22~’26)을 발표하고, ‘원자력시장 체제개편에 대비한 연구개발 본격 추진’을 명시*
 - *원자력 R&D 5대 분야 중 하나로 SMR을 선정하고, 혁신형 SMR 표준설계 및 기술검증을 통한 핵심기술 확보, 미래성장동력 발굴을 위한 SMR 원천기술 개발, 원자력 에너지효율 혁신을 주요 내용으로 제시
- **(120대 국정과제)** 2022년 7월 정부는 120대 국정과제에 ‘탈원전 정책 폐기 및 원자력산업 생태계 강화’를 제시
 - 에너지 안보 및 탄소중립 수단으로 원전을 적극 활용하고, 독자 SMR 노형 개발 및 제4세대 원자로, 핵융합, 원전연계 수소 생산 등 차세대 원전기술 확보를 위한 R&D 집중 추진
- **(탄소중립 녹색성장 기술 혁신 전략)** 에너지 전환 부문에 차세대 원자력을 탄소중립 중점분야로 선정하고, SMR·선진원자력시스템·원자력 폐기물 관리 기술을 핵심기술로 포함
- **(제5차 과학기술기본계획)** ‘과학기술 기반 국가적 현안 해결 및 미래 대응’ 전략으로 탄소중립 및 공급망·자원 부분 포함
 - 12대 중점 육성 기술(국가전략기술) 중 하나로 SMR을 포함한 차세대 원자력을 제시
- **(소형모듈원자로(SMR) 안전규제 방향)** 원자력안전위원회는 SMR의 기술수준 및 설계특성을 고려한 안전성 확인방향을 개발자에게 선제적으로 제시함으로써 규제차원의 적극적 준비를 이행하기 위한 ‘소형모듈원자로(SMR) 안전규제 방향’ 마련

- SMR도 모든 원자력 규제에 적용되는 기본안전원칙을 예외없이 준수하고, 과학기술과 전문성에 기반을 둔 합리적 안전규제를 이행한다는 것을 재확인
- **(민관합동 소형모듈원전(SMR) 얼라이언스)** 소형모듈원전(SMR) 산업 활성화 방안 수립을 위해 31개 기업, 11개 공공기관이 참여하는 얼라이언스 출범
 - 산업통상자원부와 한국수력원자력·에너지경제연구원 등 정부 및 공공기관 11곳과 SK(주), 두산에너지빌리티 등 31개 기업, 총 42개 기관이 참여하여 소형모듈원전 분야 국가 경쟁력 강화를 위한 사업 전략과 제도 기반 조성을 위한 구체적 전략 수립
 - 2024년 7월, 'SMR 얼라이언스 1주년 총회'에서 회원사들은 제11차 전력수급기본계획 내 SMR 반영 등 사업화 여건이 조성됨에 따라, SMR 시장에서 민간이 주도적 역할을 하기 위해 향후 SMR 얼라이언스를 협회 형태로 전환하겠다는 비전 선포²³⁾
- **(국가전략기술 임무중심 전략로드맵)** 12대 국가전략기술 중 하나로 '차세대 원자력'을 선정 하였으며, 차세대 원자력의 기술확보를 위한 중점 투자방향 및 관련 생태계 조성방안 제시
 - '차세대 원자력 강국 도약'을 목표로 소형모듈원자로*와 선진원자력시스템**·폐기물관리***에 대한 임무 구체화
 - *소형모듈원자로로는 세계 최고 수준의 경수로형 소형모듈원자로 확보를 목표로, 노심의 안전성을 극대화하는 기술, 기존 대형원전보다 제작기간이 단축된 혁신제조 기술개발 등 혁신형 소형 모듈원자로 개발 및 조기 상용화를 위한 지원 집중
 - **선진원자력시스템은 탄소중립 구현에 필요한 다목적 산업용 원자로 개발을 목표로 고온가스로, 소듐냉각고속로, 용융염원자로 등 선진원자로 핵심기술 확보와 맞춤형 연료기술 확보에 집중
 - ***폐기물관리는 고준위 방사성 폐기물 전주기 기술 확보를 목표로 안전성이 높고 효율적인 처분기술과 우리나라의 지리적·사회적 환경 특성에 맞는 부지평가 기술 확보 등을 지원
 - 소형모듈원자로에 특화된 안전규제를 선제적으로 준비하고, 민·관 협력 활성화를 위한 상시 소통채널 구축 등 생태계 조성 예정
- **(제11차 전력수급기본계획 실무안)** 제11차 전력수급기본계획 실무안에서 2024년부터 2038년까지의 발전원별 설비용량을 제시하였고, SMR의 상용화 실증을 위한 용량(0.7GW) 할당
 - 2035년부터 2036년까지 2.2GW의 신규설비가 필요할 것으로 예상되며, 현재 개발 중인 SMR의 상용화 실증을 위해 0.7GW 분량을 할당하고, 1.5GW는 다양한 무탄소전원의 입찰시장을 도입하여 최적의 전원 결정 예정
- **(차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안(안))** 2030년대 본격적으로 형성될

23) 민간 주도로 소형모듈원전(SMR) 조기 사업화에 박차, 내년 'SMR 얼라이언스'는 정식 협회로 전환 추진(산업통상자원부, 2024.07.03.)

세계 차세대 원자로 시장에 대응하여 기술 및 시장 주도권을 적기에 확보할 수 있도록 체계적인 지원방안 제시

- 단기적으로 2025년 표준설계 완료를 목표로 혁신형 SMR(i-SMR)의 핵심기술을 확보하고, 중장기적으로 차세대 원자로의 체계적 추진을 위해 지원노형을 선정하여 연구개발 목표, 실증 일정을 제시하는 로드맵 마련
- 2026년부터 2034년까지 9년간 총 2조 4,810억 원을 투입하여 설계역량을 보유한 민간기업 육성 및 신속 상용화를 위해 민·관 합동으로 기술개발 및 실증까지 지원하는 프로그램 추진
- i-SMR에 적용된 혁신기술(일체형, 피동안전계통 등)의 안전성 확인을 위한 규제체계를 적기에 마련하고, 기존 경수로와 차별되는 비경수로의 새로운 설계 안전성 확인을 위해 노형별 개발·실증 일정을 고려해 규제 이행 준비
- 차세대 원자로 개발·실증에 필요한 공백기술 확보를 위해 국내·외 연구소 간 공동연구를 추진하고, 국내·외 기업 수요를 고려하여 연구소, 기업 간 전략적 협력 추진
- 차세대 원자력 분야의 연구 및 산업 인력 수요·공급전망을 바탕으로 체계적 인력양성 프로그램을 추진하고, 민간 기술역량 강화 및 민간 주도 차세대 원자력 상용화 촉진을 위해 ‘차세대 원자로 연구조합’ 신설

시장동향 분석

1) 국외 시장동향

가. SMR 시장

- **(시장규모)** 글로벌 SMR 전체 시장 규모는 2023년 기준 약 58억 달러~98억 8천만 달러(한화 약 7조 4,704억 원~12조 7,317억 원*)로 평가되고 있고 2032년까지 연평균 2.3%~9.1% 성장할 것으로 예상²⁴⁾²⁵⁾²⁶⁾²⁷⁾²⁸⁾

*기획재정부에서 발표한 2023년 평균 환율인 1,288원/달러 적용

- **(북미)** 미국의 주요 기술 개발과 상업화로 인해 북미는 SMR 시장에서 가장 큰 점유율을 차지하고 있으며, 연평균 성장률 8.9%를 기록할 것으로 예상
- **(아시아)** 아시아 지역은 중국과 인도의 주도로 기술 개발이 이루어지고 있으며, 가장 빠르게 성장하는 시장으로 연평균 성장률 9.4%를 기록할 것으로 예상
- **(유럽)** 유럽은 에너지 안보 및 탈탄소화 목표를 달성하기 위해 SMR 기술을 적극적으로 연구 중

24) Small Modular Reactor Global Forecast to 2030((Markets and Markets, 2023)

25) Global Small Modular Reactor Market Opportunities 2024, Forecast To 2033(The Business Research Company, 2024)

26) Small Modular Reactor Market Size, Share Global Analysis Report, 2024–2032(Polaris Market Research, 2024)

27) Small Modular Reactor Market(Straits Research, 2023)

28) Small Modular Reactor Market: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2023–2032(AI Allied Market Research, 2023)

〈표 II-3〉 글로벌 SMR 시장 규모 전망

예측 기관	현재 시장규모 (2023년 기준)	시장규모 전망	예측연도	연평균 성장률 (CAGR)
Markets and Markets ²⁹⁾	58억 달러 (한화 약 7조 4,704억 원)	68억 달러 (한화 약 8조 7,584억 원)	2030	2.3%
The Business Research Company ³⁰⁾	67억 8,000만 달러 (한화 약 8조 7,326억 원)	80억 5,000만 달러 (한화 약 10조 3,684억 원)	2028	3.2%
Polaris Market Research ³¹⁾	98억 8,488만 달러 (한화 약 12조 7,317억 원)	145억 8,241만 달러 (한화 약 18조 7,821억 원)	2032	3.6%
Straits Research ³²⁾	63억 달러 (한화 약 8조 1,144억 원)	138억 달러 (한화 약 17조 7,744억 원)	2032	9.1%
Allied Market Research ³³⁾	58억 달러 (한화 약 7조 4,704억 원)	134억 달러 (한화 약 17조 2,592억 원)	2032	8.7%

*출처 : 기관별 자료를 참고하여 (주)씨앤엘컨설팅 재구성

■ **(시장전망)** 최근 대형원전이 갖고 있는 자금조달, 건설기간, 지리적 리스크를 상쇄할 수 있는 SMR 수요가 국제적으로 확대되고 있으며, SMR 시장은 활성화되지 않았으나 지속적으로 확대될 전망³⁴⁾

- SMR이 갖고 있는 다양한 활용성에 기반하여 발전, 수소 생산, 지역난방 및 공정 열 공급, 담수 생산, 해양 선박추진 등 다양한 분야에 활용될 것으로 기대
- 특히 10MW 이하의 초소형모듈원자로(Micro Modular Reactor, MMR)는 핵추진로켓, 핵추진우주선, 위성 및 우주기지 등 우주 산업에 적용될 것으로 기대
- 영국의 Rolls-Royce는 2035년까지 전 세계의 SMR 시장 규모가 65~85GW까지 성장할 것으로 예측³⁵⁾
- 영국 싱크탱크 NNWI(New Nuclear Watch Institute)는 2050년 전 세계 SMR 용량이 낙관적인 시나리오의 경우 약 350GW에 달해 전체 원전의 최대 40%를 차지하고, 기본 시나리오에서는 150~170GW에 이를 것으로 추정³⁶⁾

29) Small Modular Reactor Global Forecast to 2030((Markets and Markets, 2023)

30) Global Small Modular Reactor Market Opportunities 2024, Forecast To 2033(The Business Research Company, 2024)

31) Small Modular Reactor Market Size, Share Global Analysis Report, 2024-2032(Polaris Market Research, 2024)

32) Small Modular Reactor Market(Straits Research, 2023)

33) Small Modular Reactor Market: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2023-2032(Allied Market Research, 2023)

34) 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석(한국원자력연구원, 2023)

35) Small Modular Reactors—once in a lifetime opportunity for the UK(Rolls-Royce, 2017)

- OECD Nuclear Energy Agency에 따르면, 에너지믹스 중 재생에너지 비중이 0%에서 20%로 증가 시 전체 원자력 발전설비 중 SMR의 비중은 16%에서 33%로 증가할 것으로 예측³⁷⁾
- 미국 국립연구소 Idaho National Laboratory에 따르면, 분산에너지 시스템에 대한 수요 확대로 2030년 신규원전 중 SMR이 차지하는 비중이 30% 수준으로 증가할 것이고, 2050년에 이르면 SMR이 글로벌 신규원전의 절반을 차지할 것으로 예측³⁸⁾

나. SMR 활용 분야별 시장

■ Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee에 따르면 전력 공급을 위한 SMR 세계 시장은 2030년부터 2040년까지 연간 1,300억 CAD(캐나다 달러) 규모로 형성될 것으로 전망³⁹⁾

- 2030년부터 2040년까지 석탄 화력발전 대체를 위한 SMR 세계 시장은 연간 1,000억 CAD 이상의 규모로 형성될 것으로 전망되고, 오지에 전력을 공급하기 위한 SMR 세계 시장은 연간 300억 CAD 규모로 형성될 것으로 전망
- 중공업에 증기를 공급하기 위한 SMR 세계 시장은 연간 120억 CAD 규모로 형성될 것으로 전망되고, 광산에 열과 전력을 공급하기 위한 SMR 시장은 연간 35억 CAD 규모로 형성될 것으로 전망

〈표 II-4〉 SMR 활용 분야별 세계 시장 전망('30~'40년)

잠재 시장	세계 시장 규모	적용 용량(MWe)	경쟁 에너지원
석탄 화력발전 대체	1,000억 CAD/년 이상	150~300	천연가스
Off-grid*	300억 CAD/년	1~10	디젤
중공업 증기 공급	120억 CAD/년	증기공급 : 25~50 오일샌드 : ~210	천연가스
광산(열, 전력)	35억 CAD/년	20	디젤

*기존의 중앙 집중식 전기, 상수도, 하수도, 가스 등 공공 서비스에 의존하지 않고 독립적으로 에너지를 생산하고 사용하는 시스템 혹은 지역을 의미

*출처 : 국내 원전산업 생태계 경쟁력 증진 방안 도출을 위한 원전 산업시장 및 공급망 분석(한국원자력연구원, 2023), A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors(Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018).

36) Scaling Success: Navigating the Future of Small Modular Reactors in Competitive Global Low-Carbon Energy Markets (New Nuclear Watch Institute, 2023.12.27.)

37) Small Modular Reactors Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment(OECD NEA, 2016)

38) Global Market Analysis of Microreactors(Idaho National Laboratory, 2021)

39) A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors(Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, 2018)

2) 국내 시장동향

가. SMR 시장

■ **(시장규모)** 국내 SMR 전체 시장 규모는 2023년 기준 약 1억 1,300만 달러(한화 1,455억 4,400만 원)로 평가되고 있고 2032년까지 연평균 0.8% 성장하여 약 1억 2,000만 달러(한화 1,545억 6,000만 원)를 기록할 것으로 전망⁴⁰⁾

- 아시아 태평양 지역 내에서는 중국이 가장 큰 시장으로 2023년 기준 지역 시장의 약 50.1%를 차지하고 있고 국내의 경우 약 5.7%를 점유하는 것으로 분석
- 국내 SMR 시장은 아직 초기 단계이고, 정부 주도로 재원 및 제도적 지원을 통해 i-SMR 기술개발을 추진 중이며 한국원자력연구원을 중심으로 비수냉각 SMR 설계 진행 중
- 이외 MicroURANUS 등 독자적 SMR 노형을 다양한 기관에서 개발 추진 중

〈표 II-5〉 아시아 태평양 지역 주요 국가 SMR 시장 현황 및 전망

(단위: 억 달러)

구분	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	CAGR ('22~'30)
중국	9.91	10.11	10.38	10.67	11.00	11.36	11.77	12.24	12.76	3.4%
일본	6.14	6.26	6.42	6.59	6.78	6.99	7.24	7.51	7.81	3.2%
인도	1.54	1.55	1.57	1.58	1.60	1.62	1.64	1.66	1.68	1.2%
한국	1.13	1.14	1.15	1.15	1.16	1.17	1.18	1.19	1.20	0.8%
기타	1.02	1.03	1.06	1.08	1.10	1.13	1.16	1.18	1.21	2.3%
계	19.75	20.10	20.57	21.08	21.64	22.27	22.98	23.78	24.67	3.0%

*출처 : 소형모듈원전(SMR)(한국과학기술정보연구원, 2023)

■ **(시장전망)** 국내 또한 SMR 시장이 제대로 형성되어 있지 않으나, 전력, 열, 해양 수송, 우주 등 다양한 분야에서 수요가 발생하고 있으므로 신속한 상용화를 위해 민간 중심의 산업생태계 형성이 요구되는 상황

- 대형경수로 공급망에 약 500개의 공공기관 및 민간업체가 참여 중이나 제조·건설을 제외한 대부분 분야는 공기업이 주도⁴¹⁾
- 전체 매출액 중 발전사업자(한수원)가 79%, 공급산업체는 16.2% 차지
- 국내 SMR 공급망은 아직 미형성 상태⁴²⁾
- 전력공급, 산업공정열, 해양, 우주 분야 등 다양한 시장에 신속하게 진입하기 위해 민간 중심의 확장적인 산업생태계 형성이 요구

40) Small Modular Reactor Global Forecast to 2030(Markets and Markets, 2023)

41) 차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안(관계부처 합동, 2024.06.)

42) 차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안(관계부처 합동, 2024.06.)

나. SMR 관련 R&D 투자 동향

- 연구기관 및 기업에서 개념 및 기본설계, 기술개발이 진행되고 있으나, SMR 실제 도입은 아직 이루어지지 않은 상황⁴³⁾
- 2023년 이후 SMR을 비롯한 차세대 원자력 기술 개발 및 실증 관련한 국가 R&D 지원 예산이 발표되어 활발한 정부와 민간부문의 투자 기대

〈표 II-6〉 국내 SMR 및 차세대 원자로 관련 국가 정책 및 예산 규모

정책	내용	기간	예산
제6차 원자력진흥종합계획	혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 개발	2023-2028	총 3,992억 원 (국비 2,737억 원, 민간 1,245억 원)
차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안	한국형 차세대 원자로 기술개발 및 실증 프로그램(K-ARDP)	2026-2034	총 2조 4,810억 원 (국비 1조 6,490억 원, 민간 8,320억 원)

*출처 : 소형모듈원자로(SMR)(서울시 녹색산업지원센터, 2024.09.)

43) 소형모듈원자로(SMR)(서울시 녹색산업지원센터, 2024.09.)

〈표 II-7〉 국내 SMR 및 차세대 원자로 관련 국가 연구개발사업 및 예산('23~'24)

(단위: 백만원)

사업명		'23	'24	소관
경수형 SMR	혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업	3,110	27,370	과기부/산업부
	SMR 사용후핵연료 발생량저감 핵연료 기반기술개발	-	1,000	과기부
	현장수요대응 원전 첨단제조기술 부품 장비개발사업	-	6,000	산업부
비경수형 SMR (K-ARDP)	용융염원자로(MSR) 원천기술개발사업	4,500	6,768	과기부/해수부
	민관합작 차세대 원자로 개발 프로젝트	-	6,000	과기부
	민관합작 선진원자로 수출기반 구축사업(SFR)	-	-	과기부
	극한환경 원자력 전원공급 시스템 개발(HPR)	-	-	과기부
기반기축	차세대 원자력 혁신 생태계 기반 조성 사업	-	-	과기부
	차세대 원자력 전문인력 양성센터	-	900	과기부
	미래 글로벌 원자력 전문인력양성	-	-	과기부
	소형모듈원자로 디지털 혁신 검증운영 기술개발	-	-	과기부
안전규제	중소형원자로 안전규제 기반기술 개발	2,480	6,780	원안위
	SMR 전주기 안전규제 기반기술 개발	-	-	원안위
	비경수로 등 안전규제 기초·기반기술 개발	-	-	원안위
	차세대 원자로 심·검사체계 구축	-	-	원안위
	대학(원) 원자력 안전 전문인력 양성	1,724	2,224	원안위
합계		11,814	57,042	

*출처 : 소형모듈원자로(SMR)(서울시 녹색산업지원센터, 2024.09.)

기술동향 분석

1) 국외 기술동향

가. SMR 기술동향

■ SMR은 기존 대형원전과 비교하여 안전성, 유연성의 대폭 향상을 지향

- **(안전성 제고)** 피동 안전시스템을 채택하고, 단순화된 설계, 일체형 설계로 배관 파단 사고 등의 가능성을 제거하여 높은 안전성 확보
- **(모듈형 설계)** 모듈화로 다수의 모듈을 동시 설치, 일괄 설치를 통해 시공 작업을 대폭 감소시켜 리스크를 최소화
- **(부지 수용성 증가)** 대형원전 대비 절반 이하의 부지에 건설이 가능하며, 안전성 확대로 방사선비상계획구역을 최소화하여 기존 화력발전소 부지에도 건설 가능
- **(부하추종 운전)** 태양광, 풍력과 같은 재생에너지의 간헐성을 보완하기 위해 부하추종 운전 기술을 채택하여 출력조절 가능
- **(다목적 활용)** 전력 생산뿐 아니라 수소 생산, 공정열 활용, 지역난방, 해양 탐사 등 다목적 이용이 가능하도록 설계
- **(사용후핵연료 관리)** 액체금속냉각고속로, 용융염원자로 등 비경수형 원자로의 경우 다양한 방법으로 사용후핵연료 발생량 최소화 가능

〈표 II-8〉 대형원전과 SMR의 비교

구분	대형원전	SMR
출력	600~1,600MW	300MW 이하
부지면적	573㎡/MW (APR1400 기준)	대형원전 대비 절반
건설 리스크	현장에서 발전소 건설	모듈형 생산방식
건설기간&사업비	긴 공기(6년 이상)와 높은 초기비용	짧은 공기(3년 이하)와 적은 초기비용
안전성	핵연료, 피복재, 냉각재가 분리되어 있어 냉각재상실사고(Loss of Coolant Accident, LOCA)에 의한 노심용융 사고발생 위험 존재	피동형 안전설계, 일체형 설계 등으로 사고발생 위험 절감
경제성 확보	규모의 경제	대량생산
운영 탄력성	대용량 출력 고정(기저부하)	부하추종 운전이 용이
활용 부문	발전	경수로로는 발전 부문에서 활용 가능, 비경수로로는 발전, 수송, 수소 생산, 공정열 등에 활용 가능

*출처 : 소형모듈원전 기술개발 및 사업화 현황(에너지경제연구원, 2021.10.22.), 국내 및 해외의 소형 원자로 (Small & Micro nuclear reactor) 개발 동향(에너지경제연구원, 2020.07.24.), 미래 에너지 시장의 올라온 더를 꿈꾸는 SMR(삼정KPMG, 2024.01.)

■ 4세대 원자로의 가장 큰 기술적 특징은 냉각재로, 물을 냉각재로 사용한 3세대 경수로와 달리 액체금속, 가스, 용융염 등 다양한 물질을 냉각재로 사용

- 냉각재로 물 이외의 다양한 물질을 사용함으로써 높은 경제성과 안전성을 기대 가능
 - (높은 경제성) 3세대 대비 더 높은 온도에서 운전이 가능하여 높은 발전 효율 달성이 가능하고, 3세대는 가압을 위한 추가적인 전력이 필요한 반면 4세대는 대기압에서 운전이 가능하여 추가전력 등이 불필요
 - (높은 안전성) 3세대는 가압을 통해 온도를 올리는 구조로 사고 발생 시 가압에 따른 추가적인 안전설비를 갖춰야 하는 반면, 4세대는 압력 차에 의한 방사성 물질 누출 우려가 상대적으로 적고, 안전설비가 비교적 단순

〈표 II-9〉 경수로(3세대)와 비경수로(4세대) 노형 비교

구분	경수로(3세대)	비경수로(4세대)		
	가압경수로	액체금속냉각 고속로	고온가스로	용융염원자로
중성자	열중성자	고속중성자	열중성자	열중성자/ 고속중성자
냉각재	물	소듐, 납 등 액체금속	헬륨가스	용융염
감속재	물	없음	흑연	흑연
핵연료	저농축우라늄 산화물연료	저농축우라늄 산화물 또는 금속연료	피복입자(TRISO)	액체연료
운전온도	~330℃	~550℃	~950℃	~700℃

*출처 : 제4세대 원자로 개발 동향(KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터, 2023.)

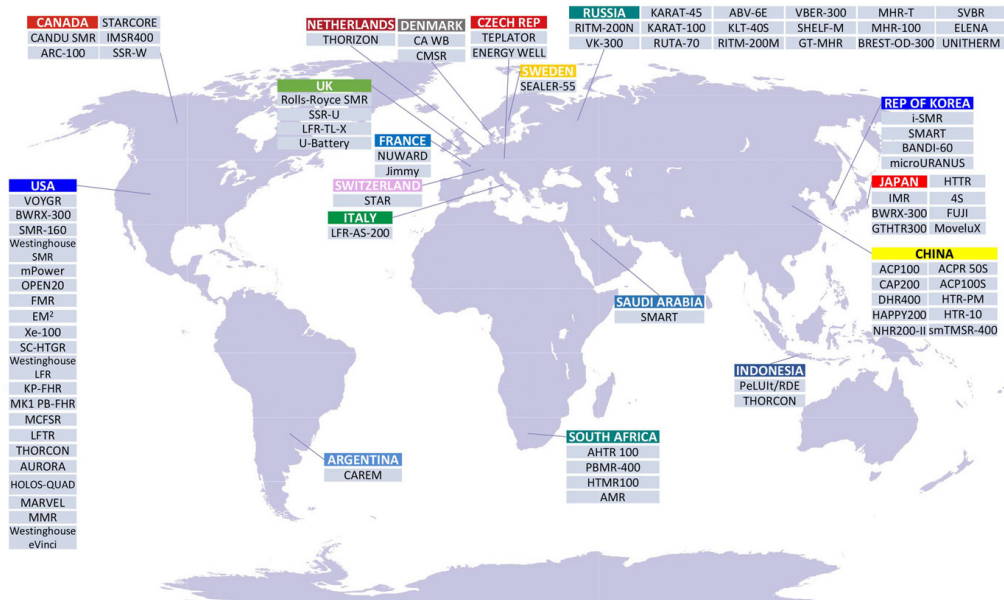
- SMR는 [그림 II-1]과 같이 북미, 동북아시아, 유럽 등에서 활발하게 개발되고 있으며, 대부분 정부 주도로 사업 진행 중⁴⁴⁾

〈표 II-10〉 글로벌 주요 SMR 개발 현황

명칭	노형	국가	개발기관(기업)	용량 (MWe)	개발 현황
SMART	경수로	대한민국	한국원자력연구원	121	상세설계
i-SMR	경수로	대한민국	한국수력원자력, 한국원자력연구원	170	개념설계
VOYGR	경수로	미국	NuScale Power	77	인허가완료
Xe-100	경수로	미국	X-Energy	82.5	기본설계
SMR-160	경수로	미국	Holtec	160	기본설계
AP 300	경수로	미국	Westinghouse Electric Company	300	개념설계
Sodium	소듐냉각고속로	미국	Terrapower	345	'24.06. 착공
ARC-100	소듐냉각고속로	미국	ARC	100	상세설계
KLT-40S	해상용 경수로	러시아	OKBM	35	운영 중
CAREM-25	경수로	아르헨티나	CNEA	30	건설 중
ACP100	경수로	중국	CNNC	125	건설 중
ACPR50S	해상용 경수로	중국	CGN	50	상세설계
HTR-PM	고온가스로	중국	INET	210	운영 중
Nuward	경수로	프랑스	CEA	170	개념설계
Rolls-Royce SMR	경수로	영국	Rolls-Royce	470	상세설계
CMSR	해상용 용융염원자로	덴마크	Seaborg	100	개념설계

*출처 : 세계 소형원자로 개발현황(한국수력원자력, 2024.04.).

44) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024.05.)



*출처 : Advances in Small Modular Reactor Technology Developments(International Atomic Energy Agency, 2022)

[그림 II-1] 세계 SMR 개발 현황

- 전 세계적으로 83종의 다양한 SMR 노형이 개발 중이고, 미국이 21개로 가장 적극적으로 움직이고 있으며 우리나라는 4개 노형 개발 중

〈표 II-11〉 글로벌 주요 SMR 개발 현황

노형	미국	러시아	중국	대한민국	기타*	합계
경수로	6	10	7	3	7	33
고온가스로	4	3	2	0	8	17
액체금속냉각고속로	1	2	0	1	4	8
용융염원자로	5	0	1	0	7	13
MMR	5	2	0	0	5	12
합계	21	17	10	4	31	83

*기타 : 아르헨티나, 캐나다, 체코, 프랑스, 일본, 스위스, 영국, 남아공, 인도네시아, 이탈리아, 스웨덴, 덴마크, 네덜란드

*출처 : Advances in Small Modular Reactor Technology Developments(International Atomic Energy Agency, 2022.09.)

- 경수로로는 기존 대형원전의 입증된 기술을 충분히 활용하면서 안전성과 경제성을 향상시키기 위해 혁신적인 개념과 기술 적용하고 있으며, SMR의 용량한계인 300MWe 근방의 원자로와 모듈 기술에 초점을 맞춘 50~150MWe 원자로가 주로 개발 중

- 국내외 원전 주요국은 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염냉각로 등 제4세대 원자로 개발을 위해 많은 예산과 노력을 투입, 장기간 연구를 수행하며 기술 개발 노력 중
- 미국, 프랑스 등 원전 주요국은 기존 대형원전의 기술력을 바탕으로 오랜 연구개발의 결과 현재 4세대 노형 중 소듐냉각고속로(Sodium-Cooled Fast Reactor, SFR), 초고온가스로(Very High Temperature Reactor, VHTR) 등의 실증사업을 진행 중

〈표 II-12〉 4세대 원자로 기술 선도국 연구개발 현황

국가	개발 현황
미국	• DOE는 '22년 제4세대 원자로 실증사업 예산으로 2.5억 달러 배정 • 정부가 지원하고 민간 기업이 기술개발을 주도하는 형태 • X-Energy사의 'Xe-100', TerraPower사의 'Natrium'이 실증사업으로 선정
프랑스	• SFR 실증에 대한 기술과 노하우를 보유 • '73년 실증로인 Phenix, '85년 상용로 Super-Phenix 운전 경험 보유
러시아	• SFR 실험로(BOR-60), 원형로(BN-600), 실증로(BN-800) 운영 중 • 새로운 다목적 SFR 실험로(MBIR)를 건설 중
중국	• '10년 SFR 실험로(CEFR) 운영, 현재 실증로(CFR-600)를 추가 건설 중 • '21년 VHTR 실증로 HTR-PM을 운전 중

*출처 : 제4세대 원자로 개발 동향(KDB산업은행 미래전략연구소, 2023.09.)

나. 경수로 기술동향

■ **(정의)** 원자로 내 핵연료인 우라늄이 핵분열할 때 발생하는 열에너지를 냉각재인 물(냉각수)로 전달하여 증기를 생산하고 그 증기를 통해 전기를 생산하는 원자로⁴⁵⁾

- **(핵연료)** 경수로의 핵연료로 주로 저농축우라늄(Low Enriched Uranium, LEU)* 사용

*천연 우라늄은 약 0.7%의 우라늄-235(235U)가 포함되어 있으며, 경수로에서 사용되는 저농축 우라늄은 우라늄-235의 농도가 약 3~5%로 농축된 형태

45) SMR 시장의 리드오프, '경수형' SMR(물리학과 첨단기술, 2022), URL : https://webzine.kps.or.kr/?p=5_view&idx=16717

- **(냉각재·감속재)** 경수로에서 사용되는 냉각재 및 감속재는 물(H₂O)이며, 물은 우수한 열 전달 능력과 중성자 감속 특성 보유
 - (우수한 열전달 능력) 물은 열용량이 커서 단위 질량당 많은 양의 열을 흡수할 수 있어 원자로에서 발생하는 열을 효과적으로 흡수하여 적절한 온도로 유지
 - (중성자 감속 효과) 중성자가 물의 수소 원자에 반복적으로 충돌하면서 속도가 줄어들어 열 중성자로 변환되고, 우라늄-235는 열중성자 반응단면적이 커서 연쇄적인 핵분열 반응 촉진
- **(장점) 기존 대형원전의 오랜 운전 경험을 통해 검증된 기술력과 인프라를 기반으로 상대적으로 신속하게 인허가 진행 가능**
 - **(검증된 기술)** 물리적 특성이 잘 알려진 물(경수)을 냉각재 및 감속재로 사용하며, 오랜 운전 경험을 통해 성능과 안전성이 충분히 검증
 - 높은 용융점과 안정적인 재료적 특성을 가지는 세라믹 핵연료 사용
 - 핵연료, 증기발생기, 원자로냉각재펌프 등 요소기술의 높은 완성도
 - 오랜 운전 경험 축적과 이를 지속적으로 반영·개선한 안전 시스템
 - **(경제성)** 경수로는 전 세계적으로 널리 보급되어 있어 부품의 표준화 및 대량 생산이 가능해 건설 및 운영 비용이 상대적으로 저렴
 - 핵연료의 안정적이고 경제적인 공급망 확보
 - 검증된 기술과 표준화 작업을 통해 효율적으로 구축된 설계·제작·건설 인프라 활용 가능
 - 최적화된 시스템을 통해 저렴한 기저부하용 전력 생산 가능
 - **(시장성과 인프라)** 요소기술들이 대부분 입증되어 있어 시장성이 높으며 인적·기술적 인프라 기구축
 - 입증된 기술을 통한 높은 시장 진출성
 - 넓은 인적·기술적 인프라 확보
- **(단점) 경수로는 경제적이고 안정적인 전력 생산이 가능하지만, 방사성 폐기물 관리, 사고 위험성 등의 단점 존재**
 - **(고준위 방사성 폐기물 문제)** 경수로의 사용후핵연료는 고준위 방사성 폐기물로, 방사선 준위가 천연 우라늄 수준으로 감소되는 데까지 약 30만 년 소요
 - **(사고 위험성)** 경수로가 높은 안전 기준을 가지고 있으나, 격납건물 파손 사고 발생 시 방사성 물질의 대량 방출로 주변 환경과 인체에 치명적인 영향

〈표 II-13〉 경수로의 주요 기술 특성

구분	내용
검증된 기술	• 높은 용융점과 안정한 재료적 특성을 가지는 세라믹 핵연료 사용 • 핵연료, 증기발생기, 원자로냉각재펌프 등 요소기술의 높은 완성도 • 오랜 운전 경험 축적과 이를 지속적으로 반영·개선한 안전 시스템
경제성	• 핵연료의 안정적이고 경제적인 공급망 확보 • 검증된 기술과 표준화 작업을 통해 효율적으로 구축된 설계·제작·건설 인프라 활용 가능 • 최적화된 시스템을 통한 저렴한 기저부하용 전력생산으로 활용
시장성과 인프라	• 입증된 기술을 통한 높은 시장 진출성 • 넓은 인적·기술적 인프라 확보
주요 이슈	• 부하추종 능력 강화 • 사용후핵연료 관리

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

- 경수로는 현재 SMR 중에서 가장 활발하게 개발되고 있으며, 미국 원자로 제작 기업인 NuScale Power의 NuScale이 상용화 측면에서 가장 앞서 있다고 평가

〈표 II-14〉 해외 경수로 SMR 개발 현황

모델명	주요 특징 및 개발 현황
NuScale (NuScale Power, 미국)	• 주요 특징 - 모듈당 77MWe의 모듈화·일체화·단순화 가압경수로형 SMR(12개 모듈 가능) - 미국 정부의 전폭적인 지원 아래, 전 세계에서 개발 중인 SMR 중 기술적·사업적 측면에서 가장 앞서있다고 평가되는 SMR - 핵연료 농축도 : 4.95% 이하, 재장전 주기 : 24개월, 설계수명 : 60년 • 개발 현황 - 50MWe 모듈에 대한 NRC의 최초 설계인증 심사 완료('20.08.) - 캐나다·유럽(체코, 폴란드, 우크라이나, 영국, 불가리아, 루마니아)·요르단·카자흐스탄 등과 NuScale 건설 및 기술협력을 위한 사업 추진 중 - 미국 에너지부의 건설 지원금 13억 5,550만 달러 승인('20.10.) 및 2029년 미국 아이다호국립연구소 부지에서 NuScale 최초 모듈의 운영 목표 - 77MWe 모듈에 대한 NRC 표준설계인가 사전 신청 활동 및 CNSC VDR Phase 2 진행 중 ※ 우리나라 기업과의 협력 현황 : 두산에너지빌리티는 원자로 모듈과 기타 기기 공급을 위한 사업 협력 및 SMR 활용 수소·담수 생산 분야 등 전략적 협력 체결('19.07.) : GS에너지·두산에너지빌리티·삼성물산과 SMR 건설·운영 사업개발을 공동으로 추진하기 위한 MOU 체결('22.04.)

모델명	주요 특징 및 개발 현황
SMR-160 (Holtec International, 미국)	•주요 특징 - 고유 안전성과 단순성을 핵심 목표로 설계한 160MWe급 가압경수로형 SMR - Holtec사는 원자력 산업용 기자재 제작 및 원전 해체 관련 기술·경험을 기 확보 중이며 SMR 설계·제작 인프라 보유 - 핵연료 농축도 : 4.95% 이하, 재장전주기 : 24개월(가변), 설계수명 : 80년 •개발 현황 - 미국 DOE의 ARDP로 향후 7년간 1억 1,600만 달러 지원금 수령('20.12.) - Mitsubishi사와 디지털계측 및 제어시스템 설계 용역 체결('22.03.) - 현재 Holtec사가 해체 중인 미국 New Jersey주의 Oyster Creek 원전 부지를 SMR-160 첫 호기의 건설 부지로 고려 중 - NRC 인허가 사전 신청 활동 진행 중 및 CNSC VDR Phase 1 완료
UK SMR (Rolls-Royce 컨소시엄, 영국)	•주요 특징 - Rolls-Royce社 중심의 컨소시엄이 개발 중인 영국 대표 470 MWe급 가압경수로형 SMR - 90%에 달하는 제조·조립 공정을 공장에서 수행할 수 있도록 모듈화를 강조한 설계로 건설 비용·시간 경감 및 경제성 제고 - 혁신기술보다는 대형원전에서 입증된 기술의 최적화를 추구하여 인허가 불확실성을 최소화 - 핵연료 농축도 : 4.95% 이하, 재장전주기 : 18~24개월, 설계수명 : 60년 •개발 현황 - 영국 기업·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)로부터 지원금 2.1억 파운드 수령('21.11.) - 압력용기 등 핵심 기기 제작을 위한 공장 부지 선정 절차 돌입('22.01.) - 영국원자력규제국(Office for Nuclear Regulation, ONR)의 일반설계평가(Generic Design Assessment, GDA) 과정 돌입('22.03) 및 2024년 중반 완료 예정 - 2029년 첫호기 운영이 목표이며, 부지는 북부 Wales 또는 서부 Cumbria 지역이 유력

모델명	주요 특징 및 개발 현황
ACP100 (China National Nuclear Corporation (CNNC), 중국)	•주요 특징 - 중국핵공업집단공사(CNNC)를 중심으로 2010년부터 개발한 125 MWe 급 일체형 가압경수로형 SMR - 핵연료 농축도 : 4.95% 이하, 재장전주기 : 24개월, 설계수명 : 60년 •개발 현황 - 국제원자력기구(International Atomic Energy Agency, IAEA)의 안전성 검토(Generic Reactor Safety Review) 세계 최초 통과('16년) - 중국국가발전개혁위원회(National Development and Reform Commission, NDRC)의 ACP100 실증로 건설계획 승인('21.06.) - 중국 남부 하이난성 창장 지역에 세계 최초 상업 육상용 경수로형 SMR인 링룽 1호 건설공사 착수('21.07.) - 높이 15m, 무게 450톤에 달하는 격납용기 하단부 설치 완료('22.02.)
KLT-40S (OKBM Afrikantov, 러시아)	•주요 특징 - 해양 부유식 발전함 'Akademik Lomonosov'호에 2기가 탑재되어 세계 최초로 상업운전을 시작한 35MWe급 해양용 가압경수로형 SMR - 핵연료 농축도 : 18.6%, 재장전주기 : 30~36개월, 설계수명 : 40년 - 피동형 냉각계통과 능동형 냉각계통이 동시 적용된 부분적 피동형 안전계통을 채택하여 정전 시 대처 능력이 저하될 가능성 존재
NUWARD (EDF 컨소시엄, 프랑스)	•주요 특징 - 프랑스전력공사(EDF) 컨소시엄이 개발 중인 340MWe급(170×2) 일체형 가압경수로형 SMR - 핵연료 농축도 : 5% 이하, 재장전주기 : 24개월, 설계수명 : 60년 •개발 현황 - 개념설계 착수('19.09.)표 서체 크기 통일 - Tractebel사의 개념설계 단계 합류('22.05.)교정지침 - 프랑스(ASN)·체코(SUJB)·핀란드(STUK) 원자력규제기관 협력 인허가 검토 대상으로 선정('22.06.) - 2025년까지 기본설계 완료 목표 - 2030년까지 설계 고도화, 인증 및 공급망 확보 목표 - 2030년 실증로 건설 착수 목표

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022).

다. 고온가스로 기술동향

■ **(정의)** 세라믹 피복입자 핵연료, 흑연 감속재, 헬륨 냉각재를 사용하여 경제적으로 약 700℃ 이상의 고온 열을 생산할 수 있는 원자로⁴⁶⁾

● **(핵연료)** 고온가스로의 핵분열생성물을 가두어 둘 수 있는 미세 피복 입자연료인 TRISO 연료(Tri-isotropic coated fuel) 사용

- 직경 0.5mm 내외의 구형 핵연료에 탄화규소(SiC)와 같은 세라믹을 피복한 것으로, 삼중 피복된 층이 핵분열에서 발생하는 대부분의 분열 파편을 차단하여 외부 누설되는 방사선량은 극히 미량*

*실제 1,600℃에서 수백 시간 운전 실험한 결과, 전체 핵분열 방사능량 대비 외부 누설 방사능량의 비율은 6~10% 이하로 보고됨

● **(냉각재·감속재)** 냉각재 헬륨은 화학적으로 안정한 불활성기체로 구조재 부식 우려가 적고, 감속재 흑연은 4,000℃까지 안정성이 유지되며, 열전도도와 비열이 높다는 특성 보유

- 헬륨은 방사화*되지 않는다는 특성을 지니고 있으므로 사고 시 외부로 누설되는 방사능 물질량은 무시 가능한 수준

*원자로 등에서 시료에 방사선(중성자선)을 조사하여 방사능을 띠게 되는 상태

■ **(장점)** 고온가스로의 장점으로 고유 안전성, 고온열에 따른 다양한 활용 분야, 핵비확산성 및 심층처분 용이성 등이 존재

● **(높은 안전성)** 냉각재 상실사고 시 흑연노심이 붕괴열을 흡수하여 사고 진행이 상대적으로 매우 느리고, 자연현상인 열전도 및 복사 현상만으로 붕괴열을 핵연료에서 원자로 용기로 쉽게 전달

- 원자로 용기에 전달된 붕괴열은 자연순환으로 운전되는 원자로공동냉각 계통을 통해 별도의 인위적 조치 없이 원자로 건물 밖으로 제거

● **(다양한 분야 활용)** 고온가스로의 높은 운전온도는 기존 전력생산 외 산업단지 고온 공정열 공급, 수소 생산, 합성연료 생산 등 다양한 분야에 활용 가능

- (수소 생산) 현재는 경수로에서 생산되는 전기를 활용하여 저온의 물을 전기분해하여 수소를 생산하지만 4세대 원자로를 활용할 경우 700℃ 이상의 고온열을 활용하여 더 많은 수소 생산 가능

46) 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022).

〈표 II-15〉 원자력을 활용한 수소 생산 기술

원전 활용 방법	수소 생산 기술	적합한 원자로형
원전에서 생산한 전기를 이용한 저온 수전해	알칼라인 수전해(Alkaline Electrolysis, AEC) 또는 고분자 전해질 수전해(Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell, PEMEC)	경수로
원전에서 생산된 고온열(700~850℃)과 전기를 이용한 고온 수전해	고체산화물 수전해(Solid Oxide Electrolysis Cell, SOEC)	경수로, 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로
초고온열(850℃ 이상)을 이용한 열화학 공정	열화학공정	초고온가스로

*출처 : 제4세대 원자로 개발 동향(KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터, 2023)

- **(핵비확산 및 심층처분*)** 피복입자 핵연료는 핵물질이 외부로 누출되기 위해서는 피복된 세 라믹층을 파쇄해야 하므로 핵비확산성이 뛰어나며, 이로 인해 심층 처분 시 방사능 물질의 외부 누출 위험도가 낮다는 특성 존재

*지하 깊은 곳의 안정한 지층구조에 천연방벽 또는 공학적 방벽으로 방사성 폐기물을 처분하는 방식으로, 고준위 방사성 폐기물(사용후핵연료 포함)의 처분을 위해 보통 지하 300~1,000m 깊이의 암반에 처분시설을 만들어 위해도가 높은 방사성 폐기물을 안전하게 처분

- 피복입자 핵연료는 직경 1mm 내외의 TRISO로서 높은 핵비확산성을 가지고 있어 향후 MMR 개발에 고온가스로가 활용되는 중

■ **(단점) 사용후핵연료 등 방폐물 부피가 경수로보다 크며, 낮은 출력밀도 및 기체 냉각재 사용으로 인하여 원자로용기가 두꺼워지는 단점 존재**

- **(방폐물 부피)** 고온가스로의 감속재로 사용되는 흑연은 노심 내에서 방사화한 후 운전 중 혹은 폐로 시에 폐기물로 방출되는데, 이 폐기물이 고준위 방사성 폐기물로 분류되어 처분 될 경우 엄청난 양의 방사성 폐기물 발생
- 전 세계적으로 흑연 방사성 폐기물이 160,000㎥이 존재하고 제염을 통한 흑연 재활용 연구가 진행되는 중

〈표 II-16〉 고온가스로의 주요 기술 특성

구분	내용
고유 안전성	• 피복입자핵연료는 우라늄 커널을 세라믹으로 3종 코팅하여 약 1,800℃에서도 녹지 않고 방사성 물질을 누출하지 않음 • 흑연 감속재를 포함한 노심/내부 구조물은 냉각재 상실사고 시에도 노심의 잔열을 충분히 수용하여 급격한 사고 진행 방지 • 냉각재인 헬륨은 방사능을 띠지 않고 물과 달리 상태변화가 없으므로 고온 생성 가능 • 후쿠시마 사고와 같은 사고에서도 자연 현상만으로 원자로가 냉각되어 안전상태 유지
고온열 공급으로 인한 이용 다변화	• 물분해 및 증기개질 수소 생산, 합성연료 생산, 고효율 분산 발전, 산업단지 공정열 공급 가능 • 고온열 생산으로 비전력분야에서 기존 화석연료를 대체하여 온실가스 저감 가능
주요 이슈	• 고온에서 장기간 작동하는 소재·부품·기기의 성능과 건전성 확보 • 폐기물 부피 저감을 위해 흑연과 핵연료 분리 및 흑연 재활용 기술개발 필요

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

■ 고온가스로는 현재 미국의 Xe-100, 중국의 HTR-PM 등이 활발하게 개발되고 있는 상황

〈표 II-17〉 해외 고온가스로 SMR 개발 현황

모델명	주요 특징 및 개발 현황
Xe-100 (X-Energy, 미국)	• 주요 특징 - 냉각재는 헬륨 기체이며 펄스형 핵연료*를 사용하는 80MWe급 고온가스로(4기 모듈로 확장 시 최대 전기 출력 320MWe) * 직경 0.6mm의 이산화우라늄핵(UO₂)을 탄소와 탄화규소(SiC) 세라믹으로 삼중 피복한 TRISO 핵연료 입자를 구형으로 뭉친 다음 열분해탄소(PyC)로 다시 한 번 피복한 형태의 핵연료 - 핵연료 농축도 : 15.5%, 출구온도 : 750℃, 열효율 : 42.3% • 개발 현황 - 미국 DOE의 ARDP로 초기 지원금 8,000만 달러 수령('20.10.) - 첫 실증로를 미국 Washington주 Richland 지역에 건설한다고 발표('21.04.) - Xe-100 실증을 위한 원자로보호계통 프로토타입 제작('22.03.) - NRC 인허가 사전 신청 활동 및 CNSC VDR Phase 1&2 동시 진행 중 ※ 우리나라 기업과의 협력 현황 : 두산에너지빌리티와 SMR 주기기의 제작 방안 연구, 시제품 제작, 설계 최적화 방안 연구 등 SMR 설계 용역 체결('21.08.)

모델명	주요 특징 및 개발 현황
HTR-PM (Tsinghua University, 중국)	•주요 특징 - 흑연과 헬륨 기체를 각각 감속재와 냉각재로 사용하는 210MWe급 페블베드형* 고온가스로 *페블형 핵연료를 사용하는 고온가스를 페블형 고온가스로 또는 페블베드형 고온가스로라 명명 - 핵연료 농축도 : 8.5%, 출구온도 : 750℃ •개발 현황 - 중국 INET의 고온가스로형 시험로 HTR-10 운전 경험을 토대로 개발 - Shandong 지역에 건설 착수('12.12.) 및 완료('18) - 임계 달성('21.09.) 및 전력망 연결 완료('21.12.) - 4세대 원자로 기술을 사용한 원전 중 최초로 시운전을 마치고 상업운전 개시('23.12.) - 후속으로 전력 및 고온·고압 증기 공급을 위한 HTR-PM600 사업 추진 중
Micro Modular Reactor(MMR) (USNC, 미국)	•주요 특징 - 흑연과 헬륨 기체를 각각 감속재와 냉각재로 사용하는 고온가스로 기반의 5MWe급 MMR - 핵연료 농축도 : 19.75%, 출구온도 : 630℃ •개발 현황 - 캐나다 Chalk River 부지 환경영향평가 사업 설명서 제출('19.07.) 및 MMR 실증로 건설 사업 추진 중 - CNSC VDR Phase 1 완료('19.02.) 및 Phase 2 진행 중 - 미국 일리노이대학교(Urbana-Champaign)와 캠퍼스 내 시험로 건설 허가 신청 의향서를 NRC에 제출('21.06.) - 미국 Tennessee주 Oak Ridge 지역에 핵연료 제조·시험 시설 건설 발표('22.03.) ※ 우리나라 기업과의 협력 현황 : 현대엔지니어링과 MMR 개발 협력 MOU 체결('15년), 글로벌 EPC 사업 독점권 확보를 위한 지분투자 계약 체결('22.01.)

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

라. 액체금속냉각고속로 기술동향

■ **(정의)** 높은 열전도도와 비등점을 갖는 소듐(Na), 납(Pb), 납-비스무트(Pb-Bi)와 같은 액체금속을 냉각재로 사용하고 고속중성자에 의한 핵분열을 이용하는 원자로⁴⁷⁾⁴⁸⁾

- **(고속중성자)** 고속중성자*를 이용하여 사용후핵연료**에 포함된 고독성·장수명 핵종을 분열시켜 단수명 또는 안정된 핵종으로 변환 용이

*핵분열에서 방출된 2MeV의 에너지를 가진 중성자로, 이를 감속재로 속도를 느리게 하면 0.1eV 이하의 에너지를 가진 열중성자로 변환

**우라늄(235U 및 238U)만 포함된 핵연료의 핵분열 반응 이후에는 세슘(Cs), 스트론튬(Sr) 등의 높은 방사능 및 열을 방출하는 핵분열생성물(Fission Products, FP)과 플루토늄(Pu) 등 우라늄보다 더 무거운 초우라늄원소(Transuranic Elements, TRU)가 생성

■ **(장점)** 액체금속냉각고속로는 사용한 연료를 재활용함으로써 핵연료 이용률 극대화 가능

- 높은 에너지의 고속중성자를 이용한 핵종변환 기술과 재처리(파이로) 기술을 활용한 사용후핵연료 관리 기술을 통해 핵연료의 순환형 원자력 시스템 가능
 - 건식재처리 공정을 통해 사용후핵연료에 포함된 TRU를 분리·회수하여 액체금속냉각고속로의 핵연료로 재사용, 핵종 변환에 의해 소각

■ **(단점)** 냉각재로 사용되는 액체금속에 따라 사고위험성이 높거나 취급이 까다로워 냉각재 유지관리를 위한 건설·운영 비용이 높은 상황

- **(원자로 제어 문제)** 고속중성자로 사용되는 액체금속 냉각재는 수은, 소듐, 납, 납-비스무트, 나트륨-칼륨 합금 등이 있는데 액체금속은 물과 달리 사용 경험이 적어 유지관리에 어려움 존재
 - 수은은 유독하고, 납은 녹는점과 끓는점이 높아 유지관리가 어려우며, 나트륨-칼륨 합금이나 소듐은 공기 혹은 물과 접촉 시 폭발 위험 존재
- **(경제성 문제)** 연료의 재활용이 액체금속냉각고속로의 큰 장점이나, 발전 시 연료비의 비중이 크지 않으며 액체금속 냉각재의 취급 문제로 인해 건설단가가 높은 편
 - 액체금속냉각고속로는 사용후핵연료를 재활용하여 핵연료의 활용도를 높일 수 있으나, 원자력 발전에서 연료비의 비중은 총 건설비의 약 9~10%로 낮은 편
 - 소듐의 경우 물, 공기와 접촉 시 폭발·화재의 위험이 있어 취급에 주의해야 하며, 이를 위해 냉각재를 2계통으로 분리하여야 하므로 안전설계가 복잡하여 건설비가 매우 높은 편

47) 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

48) 제4세대 원자로 개발 동향(KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터, 2023.)

〈표 II-18〉 액체금속냉각고속로의 주요 기술 특성

구분	내용
액체금속 냉각재 사용	• 물에 비해 열전도도가 매우 높고 열전도 성능이 우수하여 노심을 효율적으로 냉각 가능 • 금속과의 양립성이 우수하여 구조재와 기기들의 부식 문제없이 높은 신뢰도로 운전 가능
고속중성자 사용	• 고독성·장수명의 악티나이드 소각에 효과적 • U238을 Pu239로 변환시킬 수 있어, 사용후핵연료 재활용 등에 적용하여 우라늄 이용률의 향상 가능
원자로 안전성 향상	• 풀형 시스템의 경우, 원자로 노심, 중간 열교환기, 냉각재펌프 등 주요 기기와 배관이 원자로 용기 내부에 설치되어 배관 파단에 의한 냉각재 상실 가능성 배제 • 원자로 용기 내에 다량의 액체금속 냉각재가 존재하여, 출력 과도 시에도 냉각재의 열관성에 의해 온도변화가 심하지 않으며 상당 부분의 초기 붕괴열을 1차 열전달 계통 액체금속 냉각재가 흡수
주요 이슈	• 소듐은 열전달 특성은 뛰어나지만 공기나 물과 반응하는 특성이 있으므로, 공기/물과 소듐의 반응을 방지하기 위한 대처 설계 및 제반 설비 필요 • 납이나 납-비스무트는 부식성이 크므로, 부식 저항성이 있는 재료의 사용 필요

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

■ 액체금속냉각고속로는 미국·일본의 Natrium, 캐나다의 ARC-100 등이 활발하게 개발되고 있는 상황

〈표 II-19〉 해외 액체금속냉각고속로 SMR 개발 현황

모델명	주요 특징 및 개발 현황
Natrium (TerraPower· GE-Hitachi, 미국·일본)	•주요 특징 - 액체 소듐을 냉각재로 사용하고 금속핵연료(U-Zr)를 사용하는 정상상태 출력이 345MWe인 소듐냉각고속로 - 전력수요에 따른 가변성이 높아(100~500MWe) 재생에너지 발전과 호환성 우수 - 장수명 방사성동위원소를 연소시킴으로써 핵연료 이용률 증대 및 방사성 폐기물 감용 가능 •개발 현황 - 미국 DOE의 ARDP로 초기 지원금 8,000만 달러 수령('20.10.) - 미국 Wyoming주 Kemmerer 지역에 첫 실증로 건설 결정('21.11.) - Xe-100 실증을 위한 원자로보호계통 프로토타입 제작('22.03.) - NRC 인허가 사전 신청 활동 진행 중 ※ 우리나라 기업과의 협력 현황 : SK(주), SK이노베이션과 차세대 SMR 기술개발 등 포괄적 사업 협력을 위한 MOU 체결('22.05.)
ARC-100 (ARC, 캐나다)	•주요 특징 - 액체 소듐을 냉각재로 사용하고 금속핵연료(U-Zr)를 사용하는 정상상태 출력이 100MWe인 소듐냉각고속로 - 20MWe급 소듐냉각고속로인 EBR-II의 30년 운전 경험을 바탕으로 설계 - 핵연료 농축도 : 8.5%, 출구온도 : 750℃ •개발 현황 - 고순도저농축우라늄(HALEU) 개발·공급업체인 Centrus Energy와 협력 의향 발표('20.04.) - 캐나다 New Brunswick주로부터 기술개발 지원금 2천만 달러 수령('21.02.) - New Brunswick주 Point Lepreau 원전부지 내에서 2029년까지 건설할 계획 - CNSC VDR Phase 1 완료('19.10.) 및 Phase 2 진행 중

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

마. 용융염원자로 기술동향

■ (정의) 고체의 염을 고온으로 녹인 용융염(용융 상태의 불소 또는 염소 이온결합 화합물)을 냉각재로 사용하는 원자로⁴⁹⁾

- (핵연료&냉각재) 우라늄 등 고체 핵연료 대신 고온의 염을 녹인 액체연료*를 염소 또는 불소 기반의 운반체 염(Carrier salt)**과 결합하여 원자로의 연료 및 냉각재로 활용

*U(우라늄), Th(토륨), Pu(플루토늄) 등 악티나이드 계열 원소와 불소(F)와 염소(Cl) 화합물 형태인 악티나이드 연료염(UF₄, ThF₄, UCl₃, PuCl₃)으로, 고체 핵연료에 비해 온도에 따른 부피 팽창률이 커 온도가 증가함에 따라 즉각적인 노심의 출력 온도 변화 조절 가능

- **금속성의 양이온(Li⁺, Be²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺ 등)과 비금속성의 음이온(F⁻, Cl⁻)이 이온결합하여 구성
- 액체연료와 혼합된 용융염은 대기압에서 약 400~500℃의 녹는점과 약 1,400℃의 끓는점을 가지며, 화학적으로 안정되고 우수한 열-물리학적 특성 보유

■ (장점) 기존 경수로 대비 높은 안전성, 방사선 외부 유출 원천 방지, 사용후핵연료 처리 가능성, 소형화 가능성 등의 장점 보유

- (안전성) 핵연료를 냉각재인 용융염과 혼합한 일체형으로 냉각재 상실 사고 발생이 원천적으로 배제
 - 고체핵연료를 사용하는 대부분의 원자로에서는 핵연료와 냉각재가 분리되어 있기 때문에 매우 낮은 확률이라 할지라도 냉각재 상실사고에 따른 노심용융(Meltdown) 사고가 발생할 가능성 존재
 - 용융염이 외부로 누설되더라도 1, 2차 격납용기 내에서 누출 즉시 고체화되어 방사능 유출을 원천적으로 방지 가능
 - (사용후핵연료처리) 사용후핵연료에서 파이로프로세스 처리를 통해 얻은 우라늄, 초우라늄 원소 금속을 용융염에 혼합하여 연료로 재사용하고 사용후핵연료 소각 가능
 - (소형화) 냉각재와 핵연료의 일체화 및 대기압 운전 등으로 각종 장치 및 기기들을 생략할 수 있어 소형화* 및 모듈화에 용이
 - 핵연료 이송·교환 장치, 가압기, 다수의 제어봉 등이 불필요하며, 대기압 운전으로 2.5cm 두께의 원자로 용기로 운전이 가능
- *소형화로 극지, 해양, 우주, 군사기지, 선박 등 소규모 분산 전원으로 활용 가능
- (경제성) 소형화 및 모듈화에 따른 건설비 절감, 경수로 대비 높은 열효율 등으로 경제성을 확보할 수 있는 노형으로 기대

49) 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

- 각종 장치 생략 등에 따른 소형화 및 모듈화가 가능하며, 경수로의 열효율 33% 대비 용융염원자로의 열효율은 45~50%로 높음

■ **(단점) 전 세계적으로 고속중성자 기반 용융염원자로 운전경험이 없어 기술개발 및 상용화에 많은 시간과 비용이 소요될 것으로 예상**

- 내열성, 내식성, 원자로 수명과 안전을 보장할 수 있는 재료의 개발 필요
- 용융염이 핵연료와 냉각재로 동시에 사용되므로 다양한 물리학적·화학적 기준이 요구되며, 원자로를 안정적으로 운용하기 위한 용융염 물성 연구 필요

〈표 II-20〉 용융염원자로의 주요 기술 특성

구분	내용
매우 높은 안전성	• 액체 핵연료 자체의 물리적 특성에 의해 원자로 출력을 자율적으로 조절 • 화학적으로 안정적인 용융염은 수소가 발생하지 않아 폭발 위험 감소 • 대기압에서 운전되므로 두꺼운 원자로 용기나 커다란 격납용기가 불필요 • 액체 핵연료인 용융염은 대기 노출 즉시 굳어 외부 환경으로의 방사성 물질 누출 위험 감소
고준위 방사성 폐기물 최소화	• 핵분열의 가능한 모든 방사성 물질을 연소시키므로 고준위 방사성 폐기물 배출 최소화
낮은 건설단가와 유지비	• 구조가 단순하여 건설단가가 낮고, 핵연료 가공·제조 공정이 없어 핵연료 비용이 저렴 • 핵연료 이용 효율이 극도로 높아 핵연료 교체 혹은 원자로 정지 없이 장기간 운전 가능
주요 이슈	• 용융염의 물성 및 구조재료의 부식 특성 연구 필요 • 높은 열과 불화염의 강한 부식성을 견딜 수 있는 내열·내식 재료 확보 필요

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

■ 용융염원자로는 미국의 KP-FHR, 캐나다의 Integral MSR 등이 활발하게 개발되고 있는 상황

〈표 II-21〉 해외 용융염 SMR 개발 현황

모델명	주요 특징 및 개발 현황
KP-FHR(Kairo s Power, 미국)	•주요 특징 - 페블 핵연료를 혼합한 용융염을 냉각재로 사용하는 140MWe급 발전용 페블베드형 용융염로 - 가동 중 페블 핵연료 보급·제거 가능 - 연소된 페블은 그 자체가 핵분열생성물을 가두는 저장용기 역할 수행 - 핵연료 농축도 : 19.75%, 출구온도 : 650℃, 열효율 : 45% •개발 현황 - 미국 Oak Ridge 부지 내 35 MWt급 저출력 연구로(Hermes)에 대한 건설허가 신청서 제출('21.09.) 및 NRC의 신청서 접수('21.11.) - Bruce Power, Constellation, Southern Company 및 TVA와 첨단 원자력 개발 컨소시엄 결성('22.04.)
Integral MSR (Terrestrial Energy, 캐나다)	•주요 특징 - 흑연을 감속재로 사용하는 195MWe급 발전 및 열 응용 가능 용융염로 (모듈 2기로 확장 시 최대 전기출력 390MWe) - 핵연료 농축도 : 5%, 출구온도 : 700℃, 열효율 : 44% 이상 •개발 현황 - 미국 DOE로부터 인허가·상업화 지원금 300만 달러 수령('21.11.) - 미국아르곤국립연구소(Argonne National Laboratory, ANL)와 핵연료염 특성 측정 프로그램 착수('22.01.) - 호주원자력과학기술기구(Australian Nuclear Science and Technology Organisation, ANSTO)와 사용후핵연료 관리를 위한 처리 기술 개발 협력 체결('22.02.) - NRC 인허가 사전 신청 활동 및 CNSC VDR Phase 2 진행 중
Stable Salt Reactor – Wasteburner (SSR-WB) (Moltex Energy, 캐나다·영국)	•주요 특징 - 사용후핵연료를 재활용하여 핵연료로 사용하는 300MWe급 용융염원자로 - 고속중성자를 활용하여 고준위 방사성 폐기물의 부피 및 독성 저감 가능 - 핵연료 농축도 : 4.95%, 출구온도 : 590℃ •개발 현황 - 캐나다 정부로부터 원자로 설계 및 상용화 지원금 5,050만 달러 수령('21.03.) - SNC-Lavalin과 SMR 개발에 대한 전략적 파트너십 체결('22.04.) - CNSC VDR Phase 2 진행 중 - 2030년 초 캐나다 New Brunswick 주 Point Legreau 원전부지 내 운영 계획

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 해외 기술개발 동향(한국원자력연구원, 2022)

2) 국내 기술동향

가. SMR 기술동향

- 국내에서는 SMART-100, BANDI-60S, 혁신형SMR(i-SMR) 등 다양한 SMR이 개발되고 있으며, MMR 및 4세대 원자로는 출연연과 학계를 중심으로 개념설계가 완료되었거나 진행 중

〈표 II-22〉 국내 SMR 개발 현황

원자로	개발자	노형	출력(MWe)
SMART-100	한국원자력연구원	경수로	110
BANDI-60S	한국전력기술	경수로	60
i-SMR	한국수력원자력/ 한국원자력연구원	경수로	170 (4기 모듈)
KAIST-MMR	한국과학기술원	MMR (초임계이산화탄소 고속로)	12
URANUS	울산과학기술원	MMR (납-비스무트 고속로)	18
REX-10	서울대	MMR (경수로)	10

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024.)

나. 경수로 기술동향

■ (SMART-100) 한국원자력연구원이 개발하는 SMART-100은 육상용 일체형 소형 가압경수로로 노심, 증기발생기, 가압기, 원자로 냉각재 펌프 등 주요 기기가 원자로 압력용기에 내장된 형태

- 완전피동 안전계통, 카세트형 헬리컬 증기발생기, 캔드모터 RCP 등을 개발·검증
- 후쿠시마 사고 대처 설비가 마련되어 발전소 소내정전(Station Blackout, SBO)* 시에도 3일간 안전상태 유지 가능

*터빈 정지와 동시에 소외전원의 상실과 소내 비상교류전원(비상디젤발전기 등)의 상실

■ (i-SMR) 국내 산·학·연이 개발하고 있는 i-SMR은 안전성과 경제성 향상을 위하여 완전피동 개념과 철제 격납용기를 채택하여 EPZ(Emergency Planning Zone, 방사선비상계획구역)*를 부지경계 내로 한정할 수 있는 육상용 일체형 가압경수로

*원자력 시설에서 방사능 누출 사고가 발생할 경우를 대비해 대피·소개 등과 같은 주민보호대책을 사전에 집중적으로 마련하기 위해 설정하는 구역

- PECCS(Passive Emergency Core Cooling System, 피동 비상 노심 냉각 계통), PCCS(Passive Containment Cooling System, 피동 격납용기 냉각 계통), PAFS(Passive Auxiliary Feedwater System, 피동 보조급수 계통) 등 철제 격납용기와 함께 완전피동 안전계통 구성
- 무봉산 노심, 내장형 제어봉 구동장치, 0.5g 내진 설비 도입

■ (BANDI-60S) BANDI-60S는 한국전력기술이 개발하고 있는 해상용 블록형 소형 가압경수로로, 원자로와 증기발생기를 대형 배관 없이 노즐-노즐로 직접 연결하여 대형 냉각재상실사고 배제 가능

- 주기기가 분리되어 있으므로 일체형에 비해 유지보수 용이
- 대규모 전력시장보다 격오지나 도서 지역의 분산에너지, 난방열, 해수담수화 등 다양한 분야에 적용 기대
- 무봉산 노심, 내장형 제어봉 구동장치, 블록형 설계 등 진보된 기술 도입

■ (REX-10) 서울대는 소규모 분산에너지, 지역난방 등에 적합한 열출력 10MW의 자연순환로 REX-10의 개념 설계 완료

〈표 II-23〉 REX-10 주요 특징

노형	연료 재장전 주기	기타 특징
경수로	약 20년	질소가압기 내장

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024.)

다. 고온가스로 기술동향

■ (고온가스로를 이용한 수소 생산 기술개발) 한국원자력연구원은 2004년부터 수소 경제시대를 대비하여 고온가스로를 이용한 원자력수소 생산 기술개발 연구 수행

- 2006년부터 원자력진흥종합계획의 일환으로 해외기술 도입이 어려운 핵심기술을 중심으로 기술개발에 착수하였으며, 2019년에는 출구온도 750℃ 고온가스로 개념설계 사업 착수가 가능한 기술 수준 도달
 - 원자로 개념설계가 가능한 고온가스로 설계코드, 기술성숙도 4~5 수준의 기기 성능 시험이 가능한 헬륨루프, 실험실규모(20g/batch) 피복입자핵연료 제조 기술, 50NL/hr 규모 가압 SI 열화학공정 8시간 연속운전, 중간열교환기를 위한 인쇄기판형 열교환기 기술 등의 성과 달성
 - 고온가스로 노심설계 및 안전해석 기술은 우수성을 국제적으로 인정받아, 2000년대 중반 미국의 차세대 원전 개발 프로젝트, USNC의 MMR 실증사업을 위한 고온가스로 설계에 활용 중
- 2020년부터는 미래선진원자로 핵심요소기술개발사업의 내역사업으로 초고온시스템 핵심 기술 개발 과제 사업 수행 중
 - 수소 생산 고온가스로를 위한 원자로 설계기술, 재료성능검증기술, 고온수전해 연계기술 개발 중

■ (국내 주요 기업의 고온가스로 사업) 현대엔지니어링, 두산에너지빌리티, DL이앤씨는 해외 고온가스로 실증사업에 참여 중

- 현대엔지니어링은 초크리버 캐나다 원자력연구소 부지에서 추진 중인 USNC의 MMR 실증사업*에 참여 중
 - *해당 사업에서 한국원자력연구원이 개발한 설계코드를 활용하여 노심 및 안전해석 지원
 - 현대엔지니어링은 MMR 원자로 PC(조달, 건설), 비원자력플랜트 EPC(엔지니어링, 조달, 건설)을 수행하고 있으며, 발전설비, 냉각시스템, 방사성장비 등을 공급할 예정
 - 2022년 8월 현대엔지니어링은 USNC에 3천만 달러 투자를 결정하였고, USNC와 협력하여 MMR 폴란드 진출과 공정열 공급용 고온가스로 MMR2+ 국내 실증 사업을 준비 중
- 2021년 8월 두산중공업은 미국의 X-Energy의 Xe-100 주기기 및 주요 부품 제작 연구를 위한 엔지니어링 용역을 계약하였고, 2023년 1월 두산에너지빌리티, DL이앤씨 등 국내 기업 컨소시엄은 X-Energy에 2,500만 달러 규모의 전략적 투자 결정

라. 액체금속냉각고속로 기술동향

■ (국내 소듐냉각고속로 개발 방향) 국가 사용후핵연료 관리정책 결정을 위한 기술 옵션 제공을 목표로 경수로 사용후핵연료의 고독성 장반감기 핵종 소멸 처리를 위한 소각용 SFR 개념으로 개발

- 소듐냉각고속로 기술은 파이로프로세싱* 기술과 연계하여 국내 사용후핵연료 문제를 해결할 수 있는 해법으로 제시되었으며 2020년에 공학적 설계 완료

*사용후핵연료 중 연료로 다시 사용할 수 있는 물질을 별도 분리하여 재사용이 가능하게 만드는 기술로 이론상 사용후핵연료의 부피를 1/20 수준으로 감소 가능

- 1997년 원자력 연구개발 중장기 계획사업 내 액체금속로 개발 단위 연구과제를 통해 본격적인 연구개발에 착수하여 2001년 소형 소듐냉각고속로인 KALIMER-150 (150MWe) 설계개념 완성
- 2006년에는 국내 독자적인 기술을 바탕으로 중형 소듐냉각고속로인 KALIMER-600 (600MWe)의 개념설계를 완성하였으며, 제4세대 소듐냉각고속로 참조노형으로 선정되면서 기술력 인정
- 2020년에는 사용후핵연료의 부피·독성 저감을 극대화할 수 있는 핵심기술 개발

■ (KAIST-MMR) 한국과학기술원은 초임계이산화탄소(SCO2)를 열전달 매질로 원자로와 동력변환계통을 중간열교환기 없이 직접 연결한 MMR 개념 설계 완료

■ (URANUS) 울산과학기술원은 초소형원전연구단을 설립하고, 냉각재가 납-비스무트인 MMR URANUS를 개발 중

〈표 II-24〉 KAIST-MMR 주요 특징

노형	연료 재장전 주기	계통 전체 무게	길이	직경	기타 특징
초임계 이산화탄소 고속로	40년	약 155톤	7m	약 3.7m	공장에서 조립된 완성품을 트럭이나 선박으로 이송 가능

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024.)

〈표 II-25〉 URANUS 주요 특징

노형	연료 재장전 주기	활용처
납-비스무트 고속로	40년	쇄빙선이나 해양부유식 원전 등에 활용 가능

*출처 : 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024.)

다. 용융염원자로 기술동향

■ (해양 용융염원자로 원천기술개발 계획) 과학기술정보통신부·해양수산부가 해양 용융염원자로 원천기술개발에 2023~2026년(4년간) 총 사업비 290억 원 투입 예정

- 해양용 염소염 기반 MSR의 핵심기술 개발, 해양환경 중대사고 차단 혁신기술 개발, 해양 환경 특수성 고려한 해양 적용 기술 개발 목표
 - 한국원자력연구원의 원자로 노심 설계역량, 파이로 공정 연구를 통해 획득한 염화염제조·취급 기술, 선박해양플랜트 연구소의 해양 분야 기술 역량을 기반으로 100MWt급의 해양용 용융염원자로 개념설계에 착수 계획
 - 실험실 규모의 용융염 제조 장치, 실험실 규모의 구조재 부식 방지 공정 개발, 용융염원자로 성능 해석 및 안전 해석 전산 프로그램을 개발하고, 용융염 누출 사고 시 용융염 거동, 시험루프에서의 용융염 핵분열생성물 제거 등에 대한 실험 수행 예정

시사점

1) 정책동향 시사점

- **국내 SMR 관련 규제**는 여전히 대형원전 위주의 기존 지침에 머물러 있어 인허가 절차가 복잡하고 원전 정책 기조의 일관성이 부족하여 SMR에 대한 안정적인 투자가 어려운 상황
 - **(규제 환경의 복잡성)** 현재 미국, 유럽 등 주요 선진국들은 SMR과 같은 차세대 원자로에 대해 규제 완화를 포함한 다양한 지원 정책을 펼치고 있으나, 국내의 규제 환경은 여전히 대형원전 위주의 기존 지침에 머물러 있어 인허가 절차가 복잡
 - **(원전 정책 일관성 부족)** 전 정부의 탈원전 정책과 현 정부 원전 확대 정책이 교차하는 불안정한 정책 기조는 산업계의 불확실성을 증가
- **SMR 관련 규제를 새롭게 제·개정하여 인허가 절차를 간소화하고, 장기적인 원전 정책의 일관성을 유지하여 안정적인 투자 환경 조성 필요**
 - **(규제 완화 및 효율화)** SMR의 인허가 절차를 간소화하고, 규제기관 간의 협력을 강화하여 효율적인 규제 환경 구축 필요
 - **(원전 정책의 일관성 유지)** 장기적인 원전 정책의 일관성을 유지하여 산업계가 예측 가능하고 안정적인 환경에서 투자할 수 있도록 지원 필요

2) 시장동향 시사점

- **국내 기업의 기술 및 상용화 경쟁력 부족으로 인해 글로벌 SMR 시장에 비해 SMR 시장 성장 가능성이 적은 것으로 전망**
 - **(SMR 시장의 초기 단계)** 국내 SMR 시장은 아직 초기 단계에 있으며, 글로벌 시장과 비교하여 규모가 매우 작은 상황
 - **(기술 및 상용화 경쟁력 부족)** 주요 경쟁국들에 비해 기술 개발 및 상용화 속도가 느리며, 시장 진입 전략이 미흡
- **SMR 시장 확대 및 국내 기업의 시장 진입을 위한 연구개발 지원 및 실증 프로젝트 적극 추진 필요**
 - **(시장 확대를 위한 지원)** 초기 시장을 확대하기 위한 정부의 적극적인 지원 정책이 필요하며, 해외시장 진출을 위한 전략적 지원이 필요
 - **(기술 및 상용화 촉진)** 국내 기업들이 기술 개발에 집중할 수 있도록 연구개발(R&D) 지원을 강화하고, 상용화를 위한 실증 프로젝트를 적극 추진 필요

3) 기술동향 시사점

- **우리나라는 선진국에 비해 핵연료 및 방사성 폐기물 관리 기술, 냉각재 등 4세대 원자로 핵심 기술 개발 속도가 느린 상황**
 - **(혁신 기술의 개발 속도 저하)** 선진국들이 4세대 원자로 기술을 빠르게 개발하고 실증하고 있는 반면, 국내는 상대적으로 기술 개발 속도가 느린 상황
 - **(핵연료 및 폐기물 관리 기술 부족)** 비경수로 등 선진원자로의 핵연료 및 방사성 폐기물 관리 기술이 부족
- **연구개발 투자 확대, 지속적인 국제 협력 등을 통해 4세대 원자로의 기술 격차 해소 및 경쟁력 강화 필요**
 - **(기술 개발 촉진)** SMR과 4세대 원자로의 기술 개발을 가속화하기 위해 연구개발(R&D) 투자를 확대하고, 국제 협력을 통해 기술적 격차 해소 필요
 - **(폐기물 관리 기술 강화)** 방사성 폐기물 관리 및 처분 기술 개발에 투자하고, 관련 인프라를 구축하여 기술적인 경쟁력 강화 필요

차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

3

Chapter

주요 이슈 및 선도기술 도출

1. 주요 이슈 도출
2. 선도기술 도출

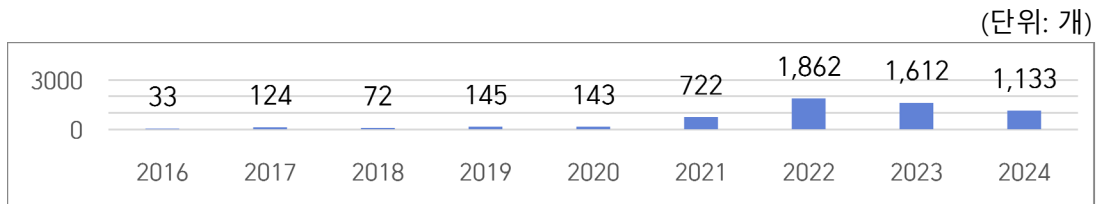
주요 이슈 도출

1) 주요 이슈 도출 개요

- **(분석 목적)** 언론 빅데이터 기반의 차세대 원자로 산업 동향 분석을 통해 연도별 주요 토픽의 변화 추이를 파악하고, 현시점을 기준으로 차세대 원자로 산업 내에서 중요하게 언급되고 있는 이슈를 도출
 - 각 산업 분야의 변화 추이에 대한 심층적 이해 및 향후 트렌드 예상을 통해 전략적 의사결정에 필요한 인사이트를 제공
- **(분석 기간)** 2016년 1월부터 2024년 7월까지 등재된 주요 일간지 및 주간지의 뉴스 기사를 총 5,846건 수집하여 분석 실시
 - 연도별 뉴스 발생 빈도를 살펴보면, 전체 뉴스 데이터 중 59.4%(3,474건)가 2022, 2023년에 집중
- **(분석 대상)** 데이터의 노이즈를 통제하기 위해 수집된 뉴스 중 ‘경제’, ‘IT과학’, ‘세계’ 지면에 기고된 기사만을 분석 대상으로 선정
 - **(키워드 도출 방법)** 본 보고서의 정책·시장·기술·기업 동향 분석 내용에 대해 생성형AI를 활용하여 언급 빈도수 기반의 키워드 초안을 추출하고, 전문가 검토의견 수렴 후 보고서 분석 범위(대분류, 중분류)에 맞게 최종적으로 키워드를 보완

〈표 III-1〉 차세대 원자로 분야 뉴스 검색 키워드

구분	검색식
차세대 원자로	‘차세대 원자로’ OR ‘미래 원자로’ OR ‘미래형 원전’ OR ‘차세대 원전’ OR ‘경수로’ OR ‘육상 경수로’ OR ‘육지 경수로’ OR ‘해양용 경수로’ OR ‘해양 경수로’ OR ‘해상 경수로’ OR ‘고온 가스로’ OR ‘고속로’ OR ‘융융염원자로’ OR ‘초소형 원자로’ OR ‘고온도핵연료’ OR ‘석탄발전대체 소형 모듈 원자로’ OR ‘소형 모듈 원자로’ OR ‘소형 모듈 원자로 수소’ OR ‘소형 모듈 원자로 열’ OR ‘수소 원자로’ OR ‘액체금속냉각고속로’ OR ‘원자력 수송’ OR ‘원자력 열’ OR ‘원자력수소’ OR ‘한국형 녹색분류체계’ OR ‘SMR 규제’ OR ‘SMR 부지’ OR ‘SMR 안전 규제’ OR ‘SMR 인력 양성’ OR ‘SMR 인허가’ OR ‘SMR 주민수용성’ OR ‘SMR 지원사업’



[그림 III-1] 차세대 원자로 분야 연도별 뉴스 데이터 발생 규모(빈도수)

■ **(분석 방법)** 분석 기간 내 수집된 차세대 원자로 관련 뉴스 데이터에 대해 토픽 모델링* (BERTopic**)을 수행하여 30개 주요 토픽을 도출하고, 그중 2024년 높은 비중으로 언급되는 상위 5위 토픽을 선별하여 토픽별 이슈화 진행

*연도별 주요 주제의 변화를 식별하기 위해 대량의 문서 데이터를 분석하여 숨겨진 주제를 자동으로 추출하는 기법으로 주로 자연어 처리(NLP)와 기계 학습을 활용하여 문서 내의 단어 패턴을 분석하고, 이 패턴을 바탕으로 서로 연관된 단어 그룹(토픽)을 식별

**BERT 기반 사전학습 임베딩 계층을 활용하여 문서의 의미를 더 정확하게 반영한 벡터 표현을 생성하여 문서 간 관계를 다차원 공간에서 식별 가능하게 하며, UMAP(Uniform Manifold Approximation and Projection)과 HDBSCAN(Hierarchical Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 알고리즘을 활용하여 문서의 군집화를 체계적으로 수행 가능

- ① **(30개 주요 토픽 도출)** 전체 분석 기간(2016.01~2024.07) 내 수집된 데이터를 기반으로 연도별 토픽 변화 추이 분석을 통해 SDV 산업을 대표하는 30개 주요 토픽을 식별
- ② **(2024년 Top 5 토픽 도출)** 기도출된 30개 주요 토픽 중 2024년 언급 빈도수를 기반으로 중요도를 분석하여 가장 주요하게 언급되는 상위 5개 토픽 도출 후, 각 토픽과 관련한 언론기사 수집 및 동향 파악 실시

〈표 III-2〉 2024년 중요도가 높은 Top 5 토픽 도출 산식

i. 각 토픽 t 의 월별 발생 빈도의 평균 μ_t 을 계산

$$\mu_t = \frac{1}{N_m} \sum_{m=1}^{N_m} freq_{t,m}$$

ii. 각 월에 대해 해당 토픽의 발생 빈도와 해당 토픽의 전체 기간 월별 평균 발생량을 감산

$$d_{t,m} = freq_{t,m} - \mu_t$$

iii. 2024년의 각 토픽 t 의 월별 초과 발생량의 합계를 구해, 2024년에 높은 양의 누적 초과 발생량을 갖는 상위 5개 주제를 도출

$$Cumulative\ Excess_{t,2024} = \sum_{m=1}^{m_{2024}} d_{t,m}$$

③ (주요 이슈 후보군 도출) 2024년 Top 5 토픽별 수집된 주요 뉴스기사(언론동향) 내용을 토대로 각 토픽별 관련 이슈 후보군을 작성하고, 해당 이슈에 대한 정의(설명)를 작성

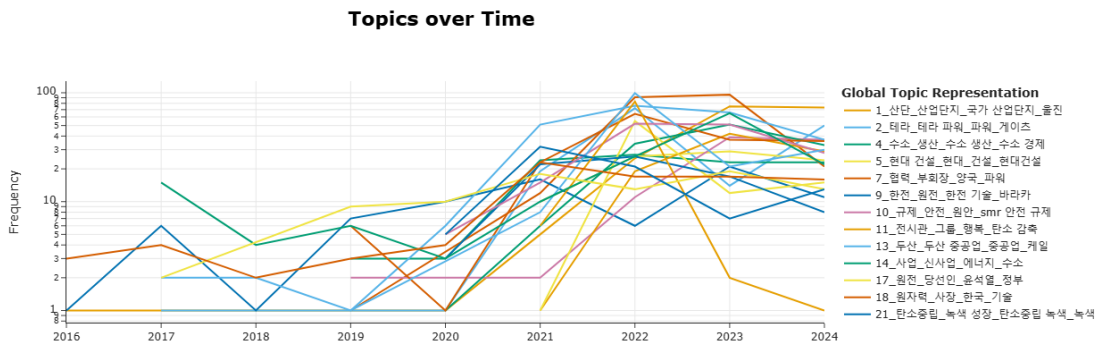
④ (주요 이슈(안) 도출) SDV 분야의 주요 이슈 후보군에 대한 전문가 자문 및 기업 설문조사 등을 통해 주요 이슈(안) 도출

■ (검증 방안) ① 2024 Top 5 토픽 및 주요 이슈 후보군에 대해 전문가 검토 후 수정·보완, ② 차세대 원자로 관련 기업을 대상으로 중요성·시급성에 대한 설문조사를 실시하여 이슈별 우선순위 도출, ③ 분과위원회(2차) 운영을 통한 이슈(안) 도출

2) 주요 이슈 도출 결과

가. 토픽 모델링 분석 결과

- (① 30개 주요 토픽 도출) 분석 기간 내 뉴스 데이터의 연도별 토픽 변화 추이를 분석한 결과, 총 34개의 하위 주제가 토픽모델을 통해 식별되었으며, 이 중 상위 30위 토픽이 전체의 92.0%를 차지



[그림 III-2] '차세대 원자로' 분야 연도별 뉴스 주제 동향

〈표 III-3〉 '차세대 원자로' 분야 상위 30개 토픽

No.	하위 주제	No.	하위 주제
Topic 1	포스코 원자력 가속기 사업 협약	Topic 16	전력 인프라 투자와 기술 개발
Topic 2	원자력 수소 생산 기지 개발	Topic 17	미국 원자력 설계 인증 취득
Topic 3	나트륨 원자로 기술 개발 추진	Topic 18	한국 원전 및 산업 정책 강화
Topic 4	중국 원전 및 고속로 개발	Topic 19	한국 기술 혁신 국회포럼 논의
Topic 5	청정수소 생산	Topic 20	분산 에너지 전력요금제 개편
Topic 6	현대건설 원자력 사업 확대	Topic 21	핵연료 임시 저장소 문제
Topic 7	현대엔지니어링 원자력 협력	Topic 22	탄소중립 에너지 기술 활용
Topic 8	테라파워 기술 협력 강화	Topic 23	녹색 채권발행 탄소중립 투자
Topic 9	일본 고속로 및 원자력 기술 개발	Topic 24	환경부 원전 포함 녹색분류체계
Topic 10	바라카 원전 르완다 협력	Topic 25	국가 전략 기술연구
Topic 11	SMR 안전규제 방향	Topic 26	원전 관련 예산 삼각
Topic 12	라스베이거스 전시회 탄소 감축 기술	Topic 27	고온가스로 기술 개발
Topic 13	자율운행 선박기술	Topic 28	파이프로세싱 핵연료 처리기술
Topic 14	두산중공업 엑스에너지 협력강화	Topic 29	원전 수출지원
Topic 15	에너지 신사업 수소 관련 로젝트	Topic 30	미국 스마트 원전 관련 주가 상승

■ (② 2024년 Top 5 토픽 도출) 전체 분석 기간(2016.01~2024.07)에서 도출된 30개 주요 토픽 중 빈도수 기반으로 2024년 기준 중요도를 분석하여 가장 주요하게 언급되는 Top 5 토픽 도출 후, 각 토픽과 관련한 언론기사 수집 및 동향 파악 실시

- (Top 5 토픽 도출) 2024년 Top 5 토픽은 ‘원자력 수소 생산 기지 개발’, ‘나트륨 원자로 기술 개발 추진’, ‘두산중공업 엑스에너지 협력 강화’, ‘라스베이거스 전시회 탄소 감축 기술’, ‘자율운항 선박기술’ 등 상위 5개의 토픽 도출

〈표 III-4〉 2024년 언론 동향 토픽 상위 5위

No.	하위 주제	빈도수(개)
Topic 2	원자력 수소 생산 기지 개발	73
Topic 3	나트륨 원자로 기술 개발 추진	51
Topic 14	두산중공업 엑스에너지 협력 강화	38
Topic 12	라스베이거스 전시회 탄소 감축 기술	34
Topic 13	자율운항 선박기술	32

- (Top 5 토픽 보완) 기 도출된 Top 5 토픽에 대해 전문가 검토 후 관련성이 적은 2개 토픽을 제외하고, 제외된 2개 토픽은 기도출된 30개 주요 토픽 중 전문가가 재선별하여 Top 5 토픽을 보완

– 전문가 의견 수렴 결과 ‘라스베이거스 전시회 탄소 감축 기술(Topic 12)’과 ‘자율운항 선박 기술(Topic 13)’은 차세대 원자로 분야와 관련성이 적으며, 이를 ‘SMR 안전규제 방향(Topic 11)’과 ‘미국 원자력 설계 인증 취득(Topic 17)’으로 대체

〈표 III-5〉 차세대 원자로 Top 5 토픽 보완 결과(전문가 검토)

No.	토픽명	No.	토픽명
Topic 2	원자력 수소 생산 기지 개발	Topic 2	원자력 수소 생산 기지 개발
Topic 3	나트륨 원자로 기술 개발 추진	Topic 3	나트륨 원자로 기술 개발 추진
Topic 14	두산중공업 엑스에너지 협력 강화	Topic 14	두산중공업 엑스에너지 협력 강화
Topic 12	라스베이거스 전시회 탄소 감축 기술	Topic 11	SMR 안전규제 방향
Topic 13	자율운항 선박기술	Topic 17	미국 원자력 설계 인증 취득

〈표 III-6〉 ‘차세대 원자로’ 분야에서 도출된 Top 5 토픽별 관련 언론동향 파악

순위	토픽명	토픽 관련 뉴스기사(언론동향)	출처
1	(Topic 2) 원자력 수소 생산 기지 개발	•한수원 등 8개 기업·기관은 원자력 청정수소 생산·사업화 업무협약을 체결함으로써 원자력 청정수소 생산 대용량 상용 플랜트 구축·운영, 국내 및 수출형 원자력 청정수소 생산 사업모델 개발, 국내 청정수소 생산·활용을 위한 사업 기반 조성 등을 통해 원자력 청정수소 생산 사업화 적극 추진	김동규, “한수원 등 8개 기업·기관, ‘원자력 청정수소 생산·사업화 MOU’”, 연합뉴스, 2024.06.19., URL : https://www.yna.co.kr/view/AKR202406191283000003.
		•울진군에 세워진 원전 10기에서 생산되는 전기와 고온 열을 활용해 연간 30만 톤의 청정수소를 생산, 저장, 운송, 활용하는 산업단지를 조성하는 사업인 ‘울진 원자력수소 국가 산업단지 조성사업’의 예비타당성조사 면제 최종 확정	박상우, “청정수소 활용 앞당길 원자력수소 시대 머지않았다”, 월간수소경제, 2024.07.17., URL : https://www.h2news.kr/news/articleView.html?idxno=12703.
		•일본 원자력개발기구(JAEA)는 실험용 고온가스로인 HTTR(고온 엔지니어링 원자로)의 안정성 테스트에 성공했다고 밝혔으며, HTTR에서 발생한 열로 청정수소를 생산할 계획이고 이르면 2028년 원자력으로 수소를 생산하기 위한 현장 실증 실험에 들어갈 예정	이재영, “일본, 원자력으로 청정수소 생산 추진…고온가스로 원자로 안전성 테스트 통과”, 임팩트온, 2024.04.05., URL : https://www.impacton.net/news/articleView.html?idxno=11254.
		•한국산업기술진흥협회가 주최한 ‘민간 연구개발(R&D) 협의체 규제혁신 간담회’에서 참여기업들은 산업계 정책 수요로 원자력 발전과 연계한 수소 생산 시설 기준 마련, 해양 원자력 발전의 인허가 및 규제 체계 수립, 정부 주도 실증로 건설 추진 등을 선택	조승한, “SMR 개발기업 ”수소 생산·해양 원전 규제 체계 마련해야“”, 연합뉴스, 2024.07.11., URL : https://www.yna.co.kr/view/AKR202407110660000017.
		•DL이앤씨는 SMR 사업과 접목한 친환경 에너지 가치사슬(밸류체인)	김인애, “‘아마존도 점찍은 SMR’ 국내외 관심 뜨거워, DL이앤씨

순위	토픽명	토픽 관련 뉴스기사(언론동향)	출처
		을 구축해 신사업 포트폴리오 확장 추진 중이며, 특히 SMR을 가동할 때 발생하는 600℃ 이상의 높은 열을 또 다른 친환경 에너지원인 수소 및 암모니아 생산에 활용 구상 중	신사업 기대 커진다”, 비즈니스포스트, 2024.10.29., URL : https://www.businesspost.co.kr/BP?command=article_view&num=370686 .
2	(Topic 3) 나트륨 원자로 기술 개발 추진	•빌 게이츠가 설립하고 SK그룹이 2억 5,000만 달러 투자한 미국의 SMR 기업 TerraPower가 개발한 소듐 냉각고속로인 'Natrium(나트륨) 원자로'가 와이오밍주에서 건설 시작	강병한, “‘SK투자’ 테라파워, 미국 첫 소형원자로 착공...빌게이츠 참석”, 경향신문, 2024.06.11., URL : https://www.khan.co.kr/economy/economy-general/article/202406111126001 .
		•현대건설과 한국원자력연구원은 '민관합작 소듐냉각고속로 개발사업에 관한 업무협약'을 체결하여 소듐냉각고속로(SFR) 관련 개발사업, 국내외 실증사업, 수출 기반 상용화 및 수출에 대한 상호 독점적 사업 참여, 공동연구 및 지식재산권(IP) 기술이전, 인력지원 및 상호협업체 운영 등에 대해 협력 추진	김현정, “현대건설, 한국원자력연구원과 차세대 SMR ‘소듐냉각고속로’ 상용화 맞손”, 공생공사, 2024.06.12., URL : https://www.public25.com/news/articleView.html?idxno=15896 .
		•정부가 민간과 함께 차세대 원자력 기술 신속 확보를 위해 2조 5천억 원을 투입한다는 ‘차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안’을 발표하였으며, 소듐냉각고속로의 경우 2025년부터 설계와 부지조사를 거쳐 2036년 말에는 시운전을 개시 계획	조승한, “소듐고속냉각로 등 차세대 원자로 개발·실증에 2조 5천억 원 투입”, 연합뉴스, 2024.06.04. URL : https://www.yna.co.kr/view/AKR20240604101300017 .
3	(Topic 14) 두산중공업 엑스에너지 협력 강화	•아마존이 인공지능 기술 개발 등으로 인해 급증한 데이터센터 전력 수요에 대응하기 위해 두산에너지빌리티가 약 500만 달러를 투자한 X-Energy와 약 5억 달러(6,822억 원) 규모 지분 투자 계약 체결하였으며, 이에 따라 두산에너지빌리티의 SMR 관련 사업 확장 기대	이종화, “두산에너지빌이 투자한 SMR기업 엑스에너지, 아마존서 5억 달러 투자 유치”, 매일경제, 2024.10.17., URL : https://www.mk.co.kr/news/business/11142778 .

순위	토픽명	토픽 관련 뉴스기사(언론동향)	출처
4	(Topic 11) SMR 안전규제 방향	•두산에너지빌리티의 협력사인 미국 NuScale Power는 미국 IT인프라기업 스탠더드파워에 24기의 SMR을 공급하기 위한 협약을 체결하였으며, 두산에너지빌리티도 NuScale Power를 통해 약 2조원 규모의 원전 주기기 등 기자재 납품 진행 예정 •두산에너지빌리티는 2021년부터 X-Energy가 추진하는 고온가스로 SMR 제작 설계에 참여하였고, 핵심 기자재 공급을 위한 협약 체결	류근영, “두산 원전으로 올라가 웃는다, 박정원 SMR 파운드리로 그룹 위상 되찾는다”, 2024.05.28., 비즈니스포스트, URL : https://www.businesspost.co.kr/BP?command=article_view&num=353661.
		•2024년 10월 22일 경남 창원시에서 열린 ‘경남 SMR 국제 컨퍼런스’에서는 해외 기업 5곳의 임원진이 발표자로 나서 한국 원전 기업이 글로벌 SMR 밸류체인에서 핵심적인 역할을 하고 있다고 언급	정재현, “테라파워·뉴스케일”韓, SMR 공급망 핵심“, 2024.10.22., 조선비즈, URL : https://biz.chosun.com/industry/company/2024/10/22/4WAZPVZ56JAULHCKV6LTYLHTPU/.
		•주요 원자력 선도국의 기술 개발 경쟁이 치열한 가운데 차세대 SMR의 발빠른 안착을 위해서는 제도적 기반 마련이 선행되어야 하고, 노형별로 구조나 특성에 조금씩 차이가 있어 규제도 맞춤형으로 필요	박정연, “냉각재로 물 안쓰는 원자로?...”차세대 SMR 맞춤형 규제 마련 시급”, 동아사이언스, 2024.08.08., URL : https://www.dongascience.com/news.php?idx=66896.
		•NRC는 대형원전 위주의 기존 규제 지침에 소형모듈원전 관련 내용을 새롭게 포함시키고 NuScale Power, TerraPower 등 SMR 개발업체의 노형 배치를 뒷받침 중 •NRC는 2023년 12월 ‘성능기반 비상대비 규제 지침’을 발효해 대형원전 대비 SMR의 EPZ 범위를 더욱 좁게 설정하기 위한 세부적인 방법론 제시 •그에 반해 우리나라는 여전히 대형 원전 규제 지침만 갖추고 있는 상황 이므로 SMR 사업화를 위한 규제 개선 필요	정세영, “”SMR에 대형원전 ‘복불’ 규제? 미국은 싹 뜯어고쳤다“...한국과 탄판”, 전기신문, 2024.06.26., URL : https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=339252.

순위	토픽명	토픽 관련 뉴스기사(언론동향)	출처
5		•원자력안전위원회는 한국형 SMR의 설계 안전규제 기준 마련을 위한 '소형모듈원자로 규제연구 추진단'을 출범하였으며, 2026년 예정인 한국형 SMR의 표준설계인가 신청에 대비해 SMR 안전성 검증기술과 인허가를 위한 규제 개발 추진	이병구, “소형모듈원자로 안전 규제기준 마련 착수”, 동아사이언스, 2024.06.04., URL : https://m.dongascience.com/news.php?idx=65761.
		•국내 원전 비중 확대에 따라 원전 10기의 계속운전 및 SMR 도입 등으로 규제기관의 인허가 수요가 증가하고 있으며, 특히 탄력운전 및 방사선 비상계획구역(EPZ) 개선이 필요해 규제와 기술 개발이 병행될 전망	정세영, “원전 계속운전, SMR, 그리고 탄력운전 “...규제 수요 치솟는다”, 전기신문, 2024.06.29., URL : https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=339375.
	(Topic 17) 미국 원자력 설계 인증 취득	•한국수력원자력과 원자력연구원이 개발한 완전 피동형 SMR 'SMART 100'이 규제당국의 표준설계인가를 획득했으며, 이를 통해 사우디를 비롯한 중동 및 캐나다 등지로의 수출 가능성 증가	이상복, “110MW 소형모듈원전 원안위 표준설계인가 획득”, 이투뉴스, 2024.09.26., URL : https://www.e2news.com/news/articleView.html?idxno=312849.
		•한국수력원자력과 한국원자력연구원은 한국형 SMR의 기술 개발과 상업화를 위한 협력을 강화하는 양해각서(MOU)를 체결했으며, 이를 통해 SMR 개발과 표준설계 인가를 목표로 공동 연구와 기술 교류를 추진할 예정	이재용, “한수원·한국원자력연구원, SMR 협력 MOU 체결”, 일렉트릭파워, 2024.08.27., URL : https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=34868.
		•두산에너지빌리티는 루마니아 원자력 규제기관으로부터 대형원전과 SMR 사업을 위한 인증을 획득했으며, 이를 기반으로 루마니아 체르나보다 원전 설비 개선과 신규 SMR 건설 사업에 참여할 예정	이승연, “두산에너지빌, 루마니아 원전 기자재 설계·제작·시공 인증 획득”, 연합뉴스, 2024.07.31., URL : https://www.yna.co.kr/view/AKR202407310396000003.

순위	토픽명	토픽 관련 뉴스기사(언론동향)	출처
		•정부는 ‘차세대 원자력 확보를 위한 기술개발 및 실증 추진방안’을 통해 2030년대에 차세대 원자력 기술과 시장을 선점하기 위해 오는 2025년 까지 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR) 설계를 완료하고, 2030년대 상용화를 추진	홍재화, “i-SMR 추진 일정...2025년까지 설계 완료, 2030년대 상용화”, 헬로디디, 2024.06.04., URL : https://www.hellodd.com/news/articleView.html?idxno=104333.
		•한국수력원자력은 i-SMR의 운전 적합성을 검증하기 위한 시뮬레이터 초기 버전을 구축하여 설계 및 운전 검증을 진행 중이며, 이를 통해 2025년 표준설계 완료와 향후 표준설계 인가를 위한 자료로 활용할 계획	이재용, “한수원, I-SMR 운전 검증용 시뮬레이터 구축”, 일렉트릭파워, 2024.06.28., URL : https://www.epj.co.kr/news/articleView.html?idxno=34599.

■ (③ 토픽별 이슈화 진행) Top 5 토픽별 수집된 주요 뉴스기사(언론동향) 내용을 토대로 사회적, 경제적, 기술적 관점으로 각 토픽별 이슈화 문장을 작성하고, 해당 이슈에 대한 정의(설명)를 작성

- 각 토픽별 이슈화 작업 시 GPT-4o 등 생성형AI를 활용하여 관련 기사 내용 학습 후, 해당 토픽과 관련된 주요 이슈 후보군을 도출하되 각 토픽별 이슈는 3~5개 이내로 작성

〈표 III-7〉 ‘차세대 원자로’ 분야 Top 5 토픽별 관련 주요 이슈 도출

순위	토픽명	관련 이슈	세부 설명
1	(Topic 2) 원자력 수소 생산 기지 개발	정책 및 규제 체계 미비	•현재 한국을 비롯한 여러 나라에서는 SMR을 활용한 수소 생산과 해양 원자력 발전을 포함한 SMR 관련 인허가 체계와 규제 기준이 초기 단계에 머물러 있는 상황 •이런 규제 공백은 SMR 기술의 조기 상용화를 방해하고 있으며, 관련 기업들은 이를 해소하기 위해 정부의 지속적인 지원과 관심을 요청
		수소 생산 단가 경쟁력	•SMR은 탄소를 배출하지 않고도 고온의 열과 전기를 지속적으로 생성할 수 있어 재생 에너지를 활용한 수전해 방식에 비해 안정적이고 상대적으로 저렴한 청정수소 생산 가능 •SMR을 활용한 수소 생산단가는 비교적 저렴하지만, 이는 전력 생산과 전환 과정에서 발생하는 잉여전력을 최대한 활용해야 가능

순위	토픽명	관련 이슈	세부 설명
		SMR을 활용한 저온 수전해 기술	•SMR을 활용한 저온 수전해 기술은 100℃ 이하의 물을 SMR에서 생산된 전기로 전기 분해하는 방식으로, 장치의 안정성이 높아 대규모 수소를 안정적으로 생산하는 데 효과적 •SMR 기반 저온 수전해 시스템 기반의 수소 생산 플랜트 구축을 위한 기술개발 추진 중
2	(Topic 3) 나트륨 원자로 기술 개발 추진	국제 협력 및 민관 협력 필요성	•한국은 소듐냉각고속로 등 차세대 원자로 개발 및 상용화를 위해 미국, 영국 등 여러 국가와 공동 연구 사업을 추진하여 국제 협력 체계를 구축하고, 민관 협력 형태로 차세대 원자로에 대한 안전규제체계 마련 추진
		에너지 안보와 청정에너지 확대 필요성	•글로벌 청정에너지 수요 증가와 탄소중립 목표에 따라 원자력 발전, 특히 SMR이 중요한 청정 에너지원으로 부각 •SMR은 기존 원전보다 안전성이 높고 소규모 부지에도 설치 가능해 도심이나 산업단지에서도 사용될 수 있어, 에너지 안보와 청정 에너지의 수요를 충족시키는 데 기여
		높은 초기 투자 비용	•SMR은 설계와 인프라 구축에 상당한 초기 비용이 소요되며, 특히 실증 단계에서 자금 조달이 중요한 문제로 대두 •여러 국가와 민간 기업이 SMR 개발에 투자하고 있으나, 대규모 초기 자본이 필요해 정부 지원과 민간 협력, 국제 공동 투자가 필수적
		해외 진출 및 산업 생태계 구축	•국내 SMR 기업들은 해외 기업과의 협력 관계를 기반으로 해외 시장 진출을 계획하고 있으며, 이를 통해 새로운 에너지 시장에서의 경제적 입지를 강화하고자 하고 있으나, 각국의 안전 규제와 기술 표준이 다르기 때문에 글로벌 시장 진출에 따른 법적·경제적 도전 과제가 존재
		비수냉각 원자로의 기술적 도전	•소듐냉각고속로는 기존 경수로와 달리 냉각재로 물이 아닌 액체 나트륨을 사용하므로, 나트륨은 높은 온도에서 끓지 않고 열전도율이 좋아 효율적인 냉각이 가능하지만, 공기

순위	토픽명	관련 이슈	세부 설명
			나 접촉 시 발화 및 폭발할 수 있는 특성이 있어 안전 관리 필수
3	(Topic 14) 두산중공업 엑스에너지 협력 강화	지속적인 에너지 수요 증가에 따른 원자력 수용성	•인공지능(AI)와 데이터센터 산업의 급성장으로 인해 전력 수요가 급증하고 있으며, 탄소 중립 목표를 달성하기 위한 청정에너지원으로 원자력이 주목 •글로벌 기업들이 SMR에 투자하며 원자력이 기존 화석연료를 대체하는 주요 에너지원으로 수용될 가능성 증가
		글로벌 협력과 파트너십 추진	•국내 SMR 기업들은 글로벌 SMR 기업들과 협력을 통해 기자재를 공급하고 투자를 확대하는 등 글로벌 SMR 공급망에서 중요한 역할 수행 •이를 통해 한국 기업들은 SMR 기술 개발 및 상용화 과정에서 이윤을 창출하고 공급망 확장 기회로 작용
		글로벌 표준화 및 규제 대응 기술 확보	•SMR 상용화는 국가별로 상이한 규제와 안전 기준에 부합해야 하므로, 국제 표준화와 규제 요건에 맞춘 기술 개발이 필수 •SMR의 글로벌 확산을 위해서는 다양한 기술 인증과 안전 기준을 충족할 수 있는 범세계적 표준화 대응 기술이 요구
4	(Topic 11) SMR 안전규제 방향	규제 환경의 미비와 규제 개혁 필요성	•SMR 기술 발전에 따라 기존 대형원전 중심의 규제가 SMR의 특성에 맞지 않는다는 문제 제기 •특히, 미국 등 주요 국가들이 SMR에 맞춘 유연한 규제 지침을 마련하고 있는 반면, 한국의 규제 체계는 대형원전 위주로 남아 있어 SMR 상용화에 걸림돌
		해외 수출을 위한 규제 기준의 국제화 필요성	•글로벌 SMR 시장에 진출하기 위해서는 국제적으로 통용되는 규제 기준 충족 필요 •국내 SMR 규제가 글로벌 표준과 일치하지 않으면, 수출 시 추가적인 비용이나 인증 절차가 필요해져 경제적 부담 가능성

순위	토픽명	관련 이슈	세부 설명
5	(Topic 17) 미국 원자력 설계 인증 취득	노형별 안전 규제 개발 필요성	•SMR은 소듐냉각고속로(SFR), 고온가스로 (HTGR), 용융염원자로(MSR) 등 다양한 설계와 냉각 방식을 사용하므로, 각 노형에 맞춘 안전 기준 필요 •기존 경수로 중심의 규제는 적용이 어려워, 노형별 특성에 맞는 맞춤형 안전 규제 마련 필요
		재생에너지와 공존을 위한 출력 조정 기술 개발	•재생에너지의 간헐성을 보완하기 위해 SMR의 탄력 운전이 필요하며, 이에 따라 핵연료 안정성 및 출력 조정 기술 개발 필요
		에너지 전환 시대를 위한 신뢰 기반의 규제 혁신	•SMR은 탄소중립 시대를 실현할 핵심 에너지원 중 하나로, 이를 성공적으로 도입하려면 사회적 신뢰를 기반으로 한 규제 혁신이 필수 •SMR이 기존 원자로와 달리 소형화되고 분산 배치가 가능하다는 특성을 고려하여 맞춤형 안전 규제를 도입함으로써 국민의 신뢰를 얻는 것이 중요
		글로벌 에너지 시장에서의 주도권 확보를 위한 규제 표준화	•SMR이 차세대 에너지원으로 자리 잡기 위해서는 국제 시장에서 통용될 수 있는 규제 표준화가 필수 •미국 NRC의 인증은 국제적으로 인정받는 안전 기준으로 자리 잡고 있으며, 이러한 표준에 부합하는 규제 체계를 마련하는 것은 한국이 SMR 시장에서 경쟁력을 높이는 중요한 기반
		디지털 기반 SMR 운전 안전성 및 효율성 혁신	•SMR이 미래 에너지원으로서 안정적이고 효율적으로 운영되기 위한 디지털 기반 에너지 관리 체계가 필요 •- 실시간 모니터링, 원격 운영, 피동안전계통 등 안전성을 강화하는 기술적 기반을 제공하며, 운영 효율성까지 높이는 필수 요소 •SMR 기술의 디지털 혁신은 단순한 안전성을 넘어 에너지 관리와 운영 효율을 극대화하는 기술적 토대가 되어야 하며, 이는 SMR이 미래 에너지 인프라의 핵심 요소로 자리 잡는 데 기여

■ (④ 주요 이슈 후보군 도출) 차세대 원자로 분야의 Top 5 토픽에서 도출된 18개의 관련 이슈들을 중복성, 유사성 등을 검토하여 최종적으로 총 10개의 주요 이슈 후보군을 선정

- 18개의 관련 이슈들에 대하여 통합, 범주 확대, 명칭 변경 등을 수행하여 총 10개의 주요 이슈 후보군을 도출

〈표 III-8〉 관련 이슈에 대해 중복성, 유사성 등의 검토를 통한 최종 주요 이슈 후보군 도출

구분	관련 이슈	구분	주요 이슈 후보군
1	에너지 안보와 청정에너지 확대 필요성	1	청정에너지 공급 안정성
2	지속적인 에너지 수요 증가에 따른 원자력 수용성	2	차세대 원자로 규제 마련 신속화
3	정책 및 규제 체계 미비	3	글로벌 표준 규제 대응 필요성 확대
4	규제 환경의 미비와 규제 개혁 필요성	4	국제 협력 및 민관 협력 추진
5	에너지 전환 시대를 위한 신뢰 기반의 규제 혁신	5	차세대 원자로 공급망 선점
6	글로벌 에너지 시장에서의 주도권 확보를 위한 규제 표준화	6	차세대 원자로 경제성 확보
7	해외 수출을 위한 규제 기준의 국제화 필요성	7	원자력수소 생산 단가 경쟁력 확보
8	글로벌 표준화 및 규제 대응 기술 확보	8	탄력운전 기술 개발
9	국제 협력 및 민관 협력 필요성	9	비수냉각 원자로의 기술적 도전
10	해외 진출 및 산업 생태계 구축	10	시장경쟁력 확보를 위한 노형별 안전성 검증 기술 개발
11	글로벌 협력과 파트너십 추진		
12	높은 초기 투자 비용		
13	수소 생산 단가 경쟁력		
14	SMR을 활용한 저온 수전해 기술		
15	재생에너지와 공존을 위한 출력 조정 기술 개발		
16	비수냉각 원자로의 기술적 도전		
17	노형별 안전 규제 개발 필요성		
18	디지털 기반 SMR 운전 안전성 및 효율성 혁신		

나. 주요 이슈(안) 도출 결과

■ 차세대 원자로 분야의 Top 5 토픽에서 도출된 18개의 관련 이슈들을 중복성, 유사성 등을 검토하여 최종적으로 총 10개의 주요 이슈(안)을 선정

- 최종 주요 이슈는 기업 설문조사 및 분과위원회를 통한 전문가 자문 의견을 반영하여 도출

〈표 III-9〉 ‘차세대 원자로’ 산업 분야 주요 이슈(안)

구분	No.	주요 이슈 후보군	세부 설명
기술적 이슈	1	비수냉각 원자로의 기술적 도전	•SMR 비수냉각 노형은 기존 경수로 대비 인허가 시 현성이 낮아 원자로 실증이 필수 •경수로 대비 높은 온도의 증기 생산이 가능하고 폐기물 발생량이 적은 장점이 있으나, 기기를 공급할 수 있는 기업이 없어 공급망 형성 필요
	2	탄력운전 기술 개발	•재생에너지의 간헐성을 보완하기 위해 SMR의 탄력적 운전이 필요하므로, 주파수 제어, 자동발전제어 등 실시간 출력 증감발을 위한 핵연료 안정성 등 추가 기술 개발 필요
	3	시장경쟁력 확보를 위한 노형별 안전성 검증 기술 개발	•SMR은 소듐냉각고속로, 고온가스로, 용융염원자로 등 다양한 설계와 냉각 방식을 사용하므로 노형별 안전성을 검증할 수 있는 기술 개발이 필요하며, 나아가 노형별 안전규제체계 확립 필요
경제적 이슈	4	차세대 원자로 공급망 선점	•국내 SMR 기업들은 글로벌 기업들과의 협력을 통해 기자재 공급과 투자 확대를 추진하며 해외시장 진출을 계획함으로써 글로벌 SMR 공급망 선점 도모
	5	차세대 원자로 경제성 확보	•SMR은 설계와 인프라 구축에 상당한 초기 비용이 소요되며, 특히 실증 단계에서 자금 조달이 중요한 문제로 대두
	6	원자력수소 생산 단가 경쟁력 확보	•대량의 열과 전기를 안정적으로 공급 가능한 원전은 저온수전해(대형원전)뿐 아니라 고온수전해 (고온가스로 + 대형원전)에도 적용하여 다른 무탄소원 대비 경제적인 수소 생산 가능

구분	No.	주요 이슈 후보군	세부 설명
사회적 이슈	7	청정에너지 공급 안정성	•도심 및 산업단지에 적합한 무탄소 분산에너지로서 SMR이 활용될 수 있도록 높은 안전성과 소규모 부지에 설치할 수 있는 기술력과 경제성 확보 •반도체공장과 데이터센터에 전기 및 열에너지를 공급하여 가스 발전을 대체할 수 있는 능력을 보유
	8	차세대 원자로 규제 마련 신속화	•SMR 상용화를 위해서는 소형화 및 분산 설치 특성을 반영한 맞춤형 규제와 인허가 체계의 정비 필요 •대형원전과 기술적 특성이 다른 차세대 SMR에 적합한 전문 규제 기술 및 조직 확보 요구
	9	글로벌 표준 규제 대응 필요성 확대	•SMR이 국제 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 미국 NRC와 같은 국제적으로 인정받는 규제 기준에 부합하는 표준화된 안전 규제 체계 마련이 필수적
	10	국제 협력 및 민간 협력 추진	•한국은 SMR을 포함한 차세대 원자로 개발 및 상용화를 위해 미국, 영국 등 여러 국가와 공동 연구를 추진 중 •국내외 민간 기업과 차세대 원자로 설계 및 공급망 확보를 위한 기업 간 협력 체계 마련 필요

선도기술 도출

1) 특허동향 분석

가. 특허동향 분석 개요

- **(분석 목적)** 본 보고서 분석 범위(대분류, 중분류)별 기술 키워드에 대한 최근 10년 이내의 특허출원 동향, 출원집중도, 시장확보력, 특허영향력 등에 대한 분석을 실시하여 차세대 원자로 분야 선도기술(유망기술) 도출의 근거자료로 활용
- **(분석 항목)** 차세대 원자로 분야의 최근 10년 이내 국적별/기술별 출원 동향, 최근 5년 이내 출원인 국적별 출원집중도, 기술별(대분류, 중분류) 출원집중도/시장확보력/특허영향력 분석

〈표 Ⅲ-10〉 차세대 원자로 분야 특허 분석 항목

항목	세부 항목
1. 차세대 원자로 분야 특허동향	국적별 출원 동향(연도별) (최근 10년)
	기술별 출원 동향(연도별) (최근 10년)
2. 차세대 원자로 분야 국가경쟁력	출원인 국적별 최근 출원집중도(최근 5년)
3. 차세대 원자로 분야 기술별 중요도	기술별(대분류, 중분류) 최근 출원집중도(최근 5년)
	기술별(대분류, 중분류) 시장확보력/특허영향력

■ **(분석 절차)** 한국특허전략개발원(KISTA)의 협조*를 통해 본 보고서의 분석 범위(대분류, 중분류)에 해당하는 기술 키워드를 기반으로 특허 DB를 활용하여 분석 수행

*특허 빅데이터 기반 산업혁신 지원사업(KISTA)

- 키워드 관련 전문가 의견수렴, IPC/키워드 도출, 검색식 수립, 검색 결과 필터링, DB 구축 및 정제 등을 통해 도출

■ **(분석 기간 및 대상)** 최근 10년 이내(2013~2022년) 출원된 차세대 원자로 산업 대분류* 기술 키워드를 포함하는 특허 유효데이터

*차세대 원자로 산업 분류체계 및 분석 범위가 최종적으로 확정되기 이전에 KISTA 특허분석이 진행되어 분석 결과가 본 보고서의 최종 분석 범위와 일부 상이한 부분이 존재하나, 논문분석 결과와 종합하여 보완하고 최종적으로 전문가 검토를 통해 도출 결과에 대한 적합성 및 신뢰성 확보

〈표 Ⅲ-11〉 차세대 원자로 분야 특허 분석 키워드 및 특허건수(총 3,583건)

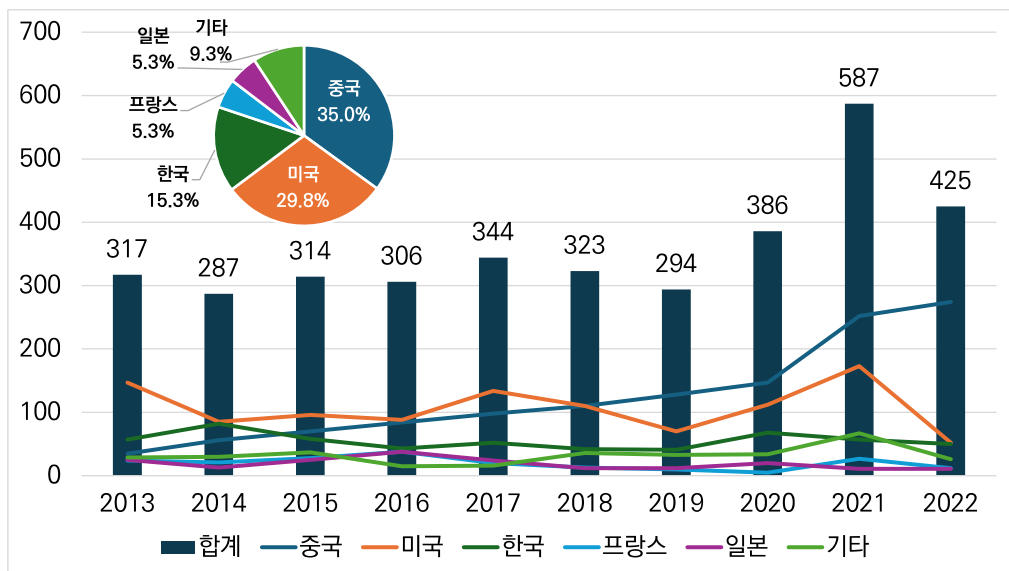
대분류		키워드	특허건수
수냉각	경수로	소형모듈원자로(Small Modular Reactor, SMR), 피동 냉각(passive cooling), 부하추종운전(Load Following Operation), 사고저항성핵연료(Accident-Tolerant Fuel, ATF), 공장사전제작(in-factory, offsite prefabrication), 부유식원전(Floating nuclear power plants), 해양플랜트(Offshore plant)	2,582
비수냉각	고온가스로	초고온가스로(Very High Temperature gas-cooled Reactor, VHTR), 고온가스로(High Temperature Gas-cooled Reactor, HTGR), 가스 냉각(Gas-cooled), 흑연 감속재(graphite moderator), 헬륨 냉각재(helium coolant)	284
	액체금속 냉각 고속로	소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR), 납냉각고속로(Lead-cooled Fast Reactor, LFR), 액체금속(Liquid metal), 고속중성자(fast neutron), 중성자 반사체(neutron reflector)	554
	용융염 원자로	용융염원자로(Molten Salt Reactor(MSR), Molten Chloride Fast Reactor(MCFR)), 용융염(molten salts), 액체핵연료(liquid (nuclear) fuel), 냉각염(Coolant Salt), 핵연료순환(circulating nuclear fuel)	163

나. 차세대 원자로 분야 특허동향 분석 결과⁵⁰⁾

■ 차세대 원자로 분야 특허동향

- **(국적별 출원 동향)** 차세대 원자로 분야의 국적별 전체 특허출원 동향을 살펴본 결과 중국의 점유율이 35.0%로 가장 높고, 미국(29.8%), 한국(15.3%), 기타(9.3%), 프랑스, 일본(이상 5.3%) 순의 점유율 기록

– 중국 국적의 출원은 지속적으로 증가세를 나타내고 있고, 미국과 일본 국적의 출원은 각각 '21년, '16년 이후 감소 추세



[그림 III-3 국적별·연도별(최근 10년) 차세대 원자로 분야 특허출원 동향]

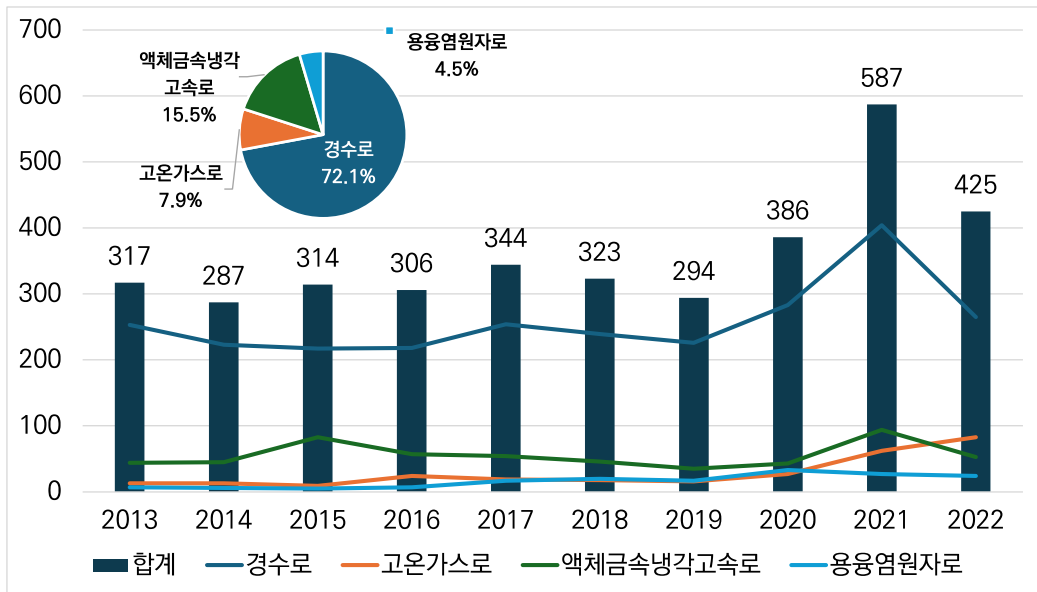
- **(기술별 출원 동향)** 차세대 원자로 분야의 기술별 전체 특허출원 동향을 살펴본 결과, 경수로의 점유율이 72.1%로 가장 높고, 액체금속냉각고속로(15.5%), 고온가스(7.9%), 용융염원자로(4.5%) 순의 점유율 기록

– 경수로의 출원은 '21년까지 지속적으로 증가하다가 '22년에 다소 감소

– 액체금속냉각고속로의 출원은 '15년 이후 감소하다가 '21년에 증가하였으며 '22년에는 다시 감소

– 용융염원자로는 '16년 이후로 특허가 본격적으로 출원되기 시작하였으며, 고온가스로는 '22년까지 지속적으로 증가하는 추세

50) 특허동향 분석의 지표 및 결과 해석은 '정부 R&D 특허기술동향조사사업 기본 분석 실무 자료집(KISTA, 2016)'을 참고하여 작성



[그림 III-4] 기술별·연도별(최근 10년) 차세대 원자로 분야 특허출원 동향

■ 차세대 원자로 분야 국가경쟁력

- (출원인 국적별 최근 출원집중도) 차세대 원자로 분야 국적별 출원집중도를 살펴본 결과, 최근 5년('18~'22)간 중국이 0.73으로 가장 높은 출원집중도를 나타내고 있으며 일본과 프랑스가 가장 낮은 0.35인 것으로 조사
 - 출원집중도는 분석 기간 전체('13~'22) 동안 출원된 특허건수 중 최근 5년('18~'22)간 출원된 특허 건수의 비중으로, 출원인 국적별 출원집중도가 1에 가까울수록 해당 국가에서 차세대 원자로가 최근 5년 동안 활발하게 연구 및 개발되었음을 의미
 - 즉, 최근 5년간 중국이 가장 활발하게 차세대 원자로 분야를 개척하고 있으며, 일본과 프랑스의 경우에는 비교적 과거에 특허 집중

〈표 III-12〉 출원인 국적별 차세대 원자로 분야 특허 출원집중도

국적	전체 구간 ('13~'22)		최근 5년 ('18~'22)		
	특허건수	점유율(%)	특허건수	점유율(%)	출원집중도
중국	1254	35.0	911	45.2	0.73
미국	1067	29.8	517	25.7	0.48
한국	550	15.4	258	12.8	0.47
프랑스	189	5.3	67	3.3	0.35
일본	191	5.3	66	3.3	0.35

■ 차세대 원자로 분야 기술별 중요도

- **(기술별(대분류) 최근 출원집중도)** 차세대 원자로 분야 기술별(대분류) 출원집중도를 살펴본 결과, 최근 5년('18~'22)간 용융염원자로가 0.74로 가장 높은 출원집중도를 나타냈고, 액체금속냉각고속로가 0.49로 가장 낮은 출원집중도를 나타낸 것으로 조사
 - 기술별 출원집중도가 1에 가까울수록 해당 기술이 최근 5년 동안 세계적으로 활발하게 연구 및 개발되었음을 의미
 - 즉, 최근 5년간 용융염원자로가 가장 활발하게 연구 및 개발되었으며 고온가스로의 경우에는 비교적 과거에 특히 집중

〈표 III-13〉 차세대 원자로 분야 최근 5년간 기술별 출원집중도

기술		전체 구간 ('13~'22)		최근 5년 ('18~'22)		
대분류	중분류	특허건수	점유율(%)	특허건수	점유율(%)	출원집중도
수냉각	경수로	2,582	72.1	1,417	70.3	0.55
비수냉각	고온가스로	284	7.9	206	10.2	0.73
	액체금속냉각고속로	554	15.5	271	13.4	0.49
	용융염원자로	163	4.5	121	6.0	0.74

- **(기술별(대분류) 시장확보력 및 특허영향력)** 차세대 원자로 분야 기술별(대분류) 시장확보력과 특허영향력을 살펴본 결과, 시장확보력은 용융염원자로가 1.51로 가장 높게 나타났고, 특허영향력은 경수로가 1.33으로 가장 높게 나타난 것으로 조사
 - 기술별 시장확보력은 기술별 등록특허의 평균 패밀리 국가 수를 전체 등록특허의 평균 패밀리 국가 수로 나눈 값으로, 특정 기술의 패밀리 국가 수가 많을수록(패밀리 특허가 출원된 국가의 수가 많을수록) 여러 국가에서의 지적재산권을 확보하였음을 의미
 - 시장확보력에는 차세대 원자로 분야에서 특정 기술을 얼마나 많은 국가에서 관련 특허를 출원하였는지에 대한 분석이 포함되므로 시장확보력이 높은 기술은 상업적 가치가 큰 것으로 해석 가능
 - 용융염원자로는 차세대 원자로 분야에서 상업적 가치가 가장 큰 기술인 것으로 조사
 - 기술별 특허영향력은 기술별 피인용도지수*를 전체 등록특허의 피인용도지수로 나눈 값이며, 차세대 원자로 분야에서 특정 기술의 질적 수준을 측정하는 지수

*기술별 피인용도지수 = 기술별 등록특허의 피인용 횟수/기술별 등록특허 수
 - 특허영향력이 1인 경우 차세대 원자로 분야에서 해당 기술이 평균적인 수준임을 의미하고 1 이상일 경우에는 질적 수준의 우위를, 1 이하일 경우에는 질적 수준의 열위 의미

- 경수로는 차세대 원자로 분야에서 질적으로 평균 이상의 우수한 수준인 것으로 조사

〈표 III-14〉 차세대 원자로 분야 최근 5년간 기술별 시장확보력 및 특허영향력

기술		시장확보력(PFS)	특허영향력(PII)
대분류	중분류		
수냉각	경수로	0.96	1.33
비수냉각	고온가스로	0.60	0.07
	액체금속냉각고속로	1.25	0.16
	용융염원자로	1.51	0.18

다. 특허 기반 선도기술 후보군 도출 결과

■ (개요) 차세대 원자로 분야의 특허 유효데이터 중 최근 3년('20~'22년)간 다수 특허가 분류되어 있는 상위 10개 IPC 분류를 선별하여 특허 기반 선도기술 후보군 도출

■ (후보군 도출 결과) 차세대 원자로 분야의 최근 3년 이내 상위 10개 IPC를 선별한 결과, '원자로 정지 후 발생 열 제거 기술(23.4%)'에 가장 많은 특허가 분포되어 있는 것으로 조사*

*다수 특허가 분류되어 있는 상위 10개 국제특허분류(IPC) 서브그룹 2자리 1도트 기준

(예) G06F8/60 : G06F 전기에 의한 디지털 데이터처리 - G06F8/00 소프트웨어 엔지니어링을 위한 장치

G06F8/60 소프트웨어 배치 (하부 G06F8/658까지 포함하는 분류)

〈표 III-15〉 차세대 원자로 분야 IPC 상위 10개(선도기술 후보군) 도출 결과

순위	특허 기반 선도기술 후보군	특허분류(IPC)	특허 수	비중(%)
1	원자로 정지 후 발생 열 제거 기술	G21C15/18	158	23.4%
2	원자로 연료 요소 세부 구조 및 소재 기술	G21C3/02 ~ 3/20	121	17.9%
3	중성자 흡수재 관련 기술	G21C7/06 ~ 7/24	59	8.7%
4	노심의 열 순환 촉진 기술(냉각재 흐름 등)	G21C15/243 ~ 15/26	58	8.6%
5	설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술	G06F30/20 ~ 30/28	54	8.0%
6	원자력 발전소의 제어 안전장치 기술	G21D3/04 ~ 3/06	51	7.5%
7	열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술	G21C15/02 ~ 15/14	48	7.1%
8	고체상 및 세라믹 핵연료 기술	G21C3/54 ~ 3/64	47	7.0%
9	원자로 노심·설비·압력용기 등 감시 시험 기술	G21C17/00	41	6.1%
10	열중성자로 유체·기체상 연료 사용 기술	G21C1/04 ~ 1/22	39	5.8%
합계			676	100.0%

2) 논문동향 분석

가. 분석 개요

- **(분석 목적)** 차세대 원자로 산업 관련 SCIE 논문 데이터를 기반으로 논문 게재 현황 파악 및 연구 분야별 주요 동향 분석을 실시하고, 이를 통해 주요 분야별 기술경쟁력을 간접적으로 평가하여 차세대 원자로 분야의 선도기술 도출 시 근거자료로 활용
- 본 보고서의 분석 범위 중 대분류(경수로, 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 용융염원자로)를 대상으로 SCIE 논문 DB 확보·정제 후 분석 실시
- **(분석 방법)** 학술논문 검색사이트(Web of Science)에서 차세대 원자로 산업 관련 기술 키워드를 활용하여 SCIE 논문 DB 확보 및 노이즈 제거를 실시하고, 데이터 분석을 통해 각 분야별 논문 동향 및 기술경쟁력(연구경쟁력, 국가경쟁력, 한국 내 경쟁력) 파악
- **(키워드 도출 방법)** 본 보고서의 정책·시장·기술·기업 동향 분석 내용에 대해 생성형AI를 활용하여 언급 빈도수 기반의 키워드 초안을 추출하고, 전문가 검토의견 수렴 후 보고서 분석 범위(대분류, 중분류)에 맞게 최종적으로 키워드를 보완

〈표 III-16〉 논문 분석 대상 기술분류 및 검색식

구분		검색식
수냉각	경수로	("Reactor" or "Reactors" or "LWR" or "light-water reactor") and ("Small Modular Reactor" or "Small Modular Reactors" or "SMR" or "SMRs" or "passive cooling" or "Load Following Operation" or "Accident Tolerant Fuel" or "Accident Tolerant Fuels" or "ATF" or "ATFs" or "in-factory" or "offsite prefabrication" or "Floating nuclear power plants" or "Offshore plant")
비수냉각	고온가스로	("Reactor" or "Reactors" or "High Temperature gas-cooled Reactor" or "High Temperature gas-cooled Reactors" or "HTGR" or "HTGRs") and ("Very High Temperature gas-cooled Reactor" or "Very High Temperature gas-cooled Reactors" or "VHTR" or "VHTRs" or "High Temperature gas-cooled Reactor" or "High Temperature gas-cooled Reactors" or "HTGR" or "HTGRs" or "Gas-cooled" or "graphite moderator" or "helium coolant")
	액체금속 냉각 고속로	("Reactor" or "Reactors" or "Fast Reactor" or "Fast Reactors") and ("Sodium-cooled Fast Reactor" or "Sodium-cooled Fast Reactors" or "SFR" or "SFRs" or "Lead-cooled Fast Reactor" or "Lead-cooled Fast Reactors" or "LFR" or "LFRs" or "Liquid Metal Fast Reactor" or "Liquid Metal Fast Reactors" or "LMFR" or "LMFRs" or "fast neutron" or "neutron reflector")
	용융염 원자로	("Reactor" or "Reactors" or "Molten Salt Reactor" or "Molten Salt Reactors" or "Molten Chloride Fast Reactor" or "Molten Chloride Fast Reactors" or "MCFR" or "MCFRs") and ("molten salts" or "liquid fuel" or "nuclear fuel" or "Coolant Salt" or "circulating nuclear fuel")

- **(분석 항목)** 차세대 원자로 분야의 국가별 및 연도별 연구 동향, 연구경쟁력, 연구 점유율, 최근 연구집중도, 주요 저자집중도, 주요 저자참여도, 주요 연구영향력, 국가경쟁력, 한국 내 경쟁력, 국가별 연구주도력, 국가별 연구 영향력 분석

〈표 III-17〉 (참고) 연구경쟁력 지표 계산식

연구경쟁력 지표	지표 설명
연구점유율	• 특정 산업 해당 분야의 연구 비중 • 특정 산업 해당 분야의 상대적 점유율을 파악\ $(\text{연구점유율}) = \frac{\text{특정 산업 에서 해당 분야 논문 발간 건수}}{\text{특정 산업의 전체 논문 발간 건수}}$
최근 연구집중도	• 특정 산업 해당 분야에서 전체 논문건수 대비 4년 논문건수 • 특정 산업 해당 분야에서 상대적인 최근 연구 집중도를 파악하여 최근 집중하고 있는 분야를 파악 $(\text{최근 연구집중도}) = \frac{\text{특정 산업 에서 해당 분야 최근 4년 연구 건수}}{\text{특정 산업 해당 분야 전체 연구 건수}}$
주요 저자집중도	• 상위 저자가 특정 산업 해당 분야에서 차지하는 연구 비중 • 특정 산업을 연구하는 저자의 연구 규모를 파악하여 상대적 집중도 파악 $(\text{주요 저자집중도}) = \frac{\text{특정 산업 해당 분야 주요 논문 출간 횟수 상위 50인 이내 점유율}}{\text{특정 산업 주요 논문 출간 횟수 상위 50인 이내 점유율}}$
주요 저자참여도	• 특정 분야에 유입된 상위 저자의 수 • 특정 산업을 연구하는 저자수를 파악하여 상대적 연구 매력도 분석 $(\text{주요 저자참여도}) = \frac{\text{주요 저자 50인 중 특정 산업 해당 분야에 출간한 저자의 수}}{50}$
연구영향력	• 특정 산업 해당 분야 연구의 피인용수를 분석 • 피인용율이 높은 연구일수록 연구의 학술적 가치, 중요도, 영향력이 높다고 판단 $(\text{연구영향력}) = \frac{\text{특정 산업 해당 분야의 평균 피인용수}}{\text{특정 산업 전체의 평균 피인용수}}$

〈표 III-18〉 (참고) 국가경쟁력/한국 내 경쟁력 지표 계산식

국가경쟁력/ 한국 내 경쟁력 지표	지표 설명
연구점유율	•특정 산업 해당 분야에서 특정국가 저자의 연구 비중 $\text{(연구점유율)} = \frac{\text{특정 산업 에서 해당 분야의 특정국가 저자 논문 발간 건수}}{\text{특정 산업의 전체 논문 발간 건수}}$
최근 연구집중도	•특정 산업 해당 분야에서 특정국가 저자의 전체 논문건수 대비 4년 논문건수 $\text{(최근 연구집중도)} = \frac{\text{특정 산업 에서 해당 분야의 특정국가 저자 최근 4년 연구 건수}}{\text{특정 산업 해당 분야 전체 연구 건수}}$
연구주도력	•상위 저자 50인 중 특정국가 저자가 특정 산업 해당 분야에서 차지하는 연구 비중 $\text{(연구주도력)} = \frac{\text{해당 분야 논문 출간 횟수 상위 50인 중 특정국가 저자의 출간 건수}}{\text{특정 산업 주요 논문 출간 횟수 상위 50인의 전체 출간 건수}}$
연구영향력	•특정 산업 해당 분야 연구의 특정국가 저자의 피인용수를 분석 •피인용률이 높은 연구일수록 연구의 학술적 가치, 중요도 및 영향력이 높다고 판단 $\text{(연구영향력)} = \frac{\text{특정 산업 해당 분야의 특정국가 저자의 평균 피인용수}}{\text{특정 산업 전체의 평균 피인용수}}$

나. 대분류 논문동향 분석 결과

- **(논문 동향)** 차세대 원자로 산업의 전체 논문건수는 22,180건, 국가별 연구점유율은 미국이 25.0%로 1위이며 유럽(24.6%), 중국(23.3%), 한국(11%), 일본(10.9%), 영국(5.2%) 순으로 확인
- **(연도별 현황)** 차세대 원자로 산업의 연구 동향은 꾸준히 증가하는 추세이며, 2017년 이전에는 미국과 유럽이, 2017년 이후로는 중국이 양적으로 주도하고 있는 상황

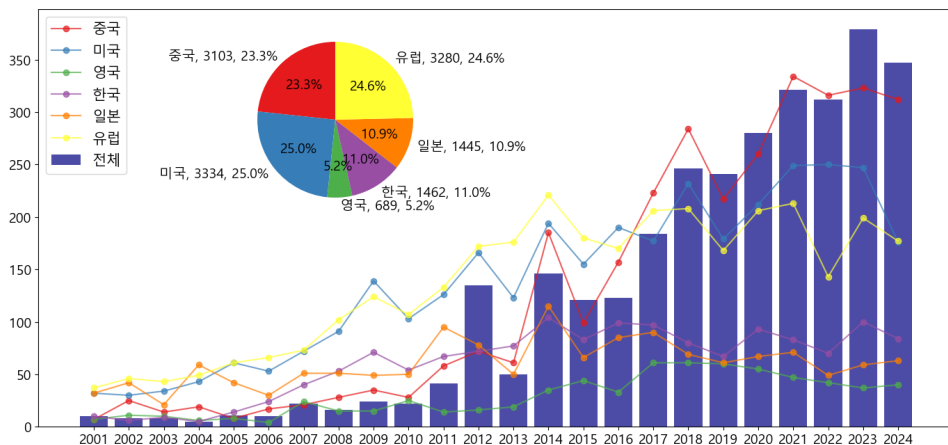
〈표 III-19〉 기술분야별 논문 유효데이터 수

구분	수냉각	비수냉각			총계
	경수로	고온가스로	액체금속냉각 고속로	용융염원자로	
유효데이터	3,001	4,020	3,877	6,336	17,234

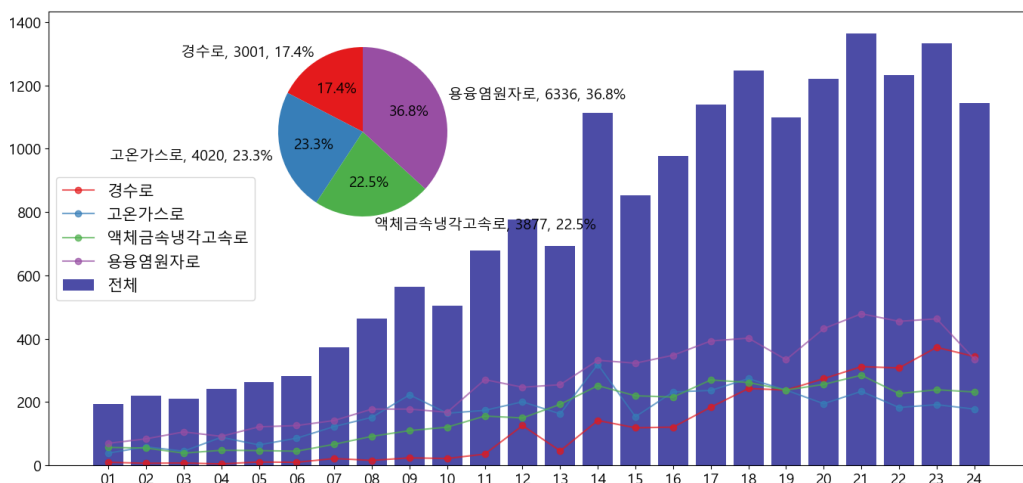
〈표 III-20〉 차세대 원자로 분야 국가별 연구 유효 데이터 및 점유율

구분	유효데이터 수	연구 점유율	연평균 증가율	
			전체('01~'24)	최근 3년('22~'24)
한국	1,462	11.0%	11.0%	2.4%
미국	3,334	25.0%	9.7%	5.2%
일본	1,445	10.9%	2.8%	-4.1%
중국	3,103	23.3%	19.0%	7.5%
유럽	3,280	24.6%	7.9%	-1.1%
영국*	689	5.2%	7.8%	-12.3%

*영국의 EU 탈퇴로 인하여 별도 표기

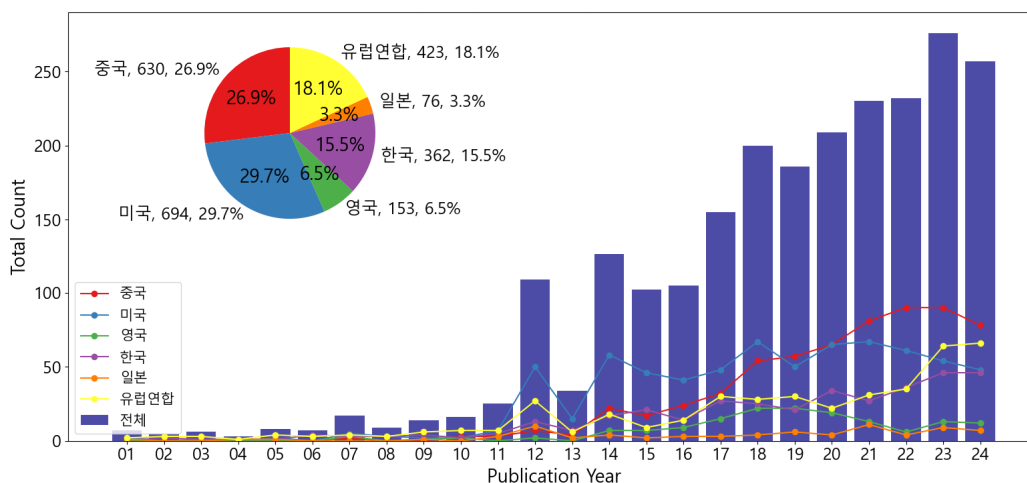


[그림 III-5] 차세대 원자로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향



[그림 III-6] 차세대 원자로 분야 연도별 및 주제(대분류)별 연구 동향

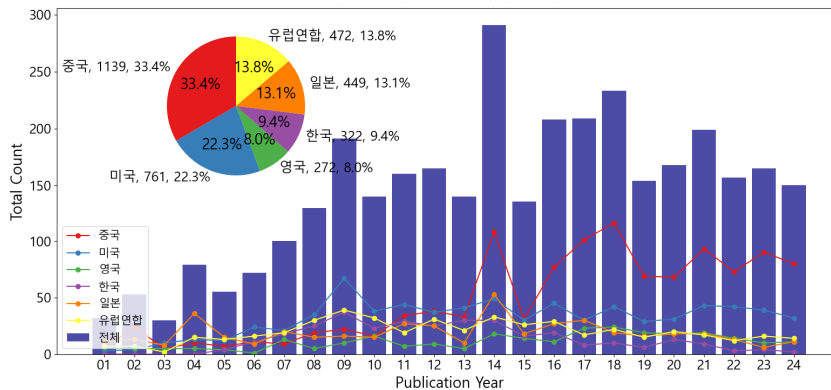
- **(경수로)** 경수로 분야의 논문건수는 총 3,001건으로, 차세대 원자로 산업 연구 전체의 약 17.4%에 해당
- **(연구점유율)** 미국이 29.7%로 1위이며, 중국(26.9%), 유럽(18.1%), 한국(15.5%), 영국(6.5%), 일본(3.3%) 순으로 확인
- **(연도별 현황)** 2018년도 전까지 미국의 논문건수가 크게 증가하는 추세였으나, 2018년도 이후 중국의 논문건수가 미국보다 많은 것으로 확인



[그림 III-7] 경수로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향

■ **(고온가스로)** 고온가스로 분야의 논문건수는 총 4,020건으로, 차세대 원자로 산업 연구 전체의 약 23.3%에 해당

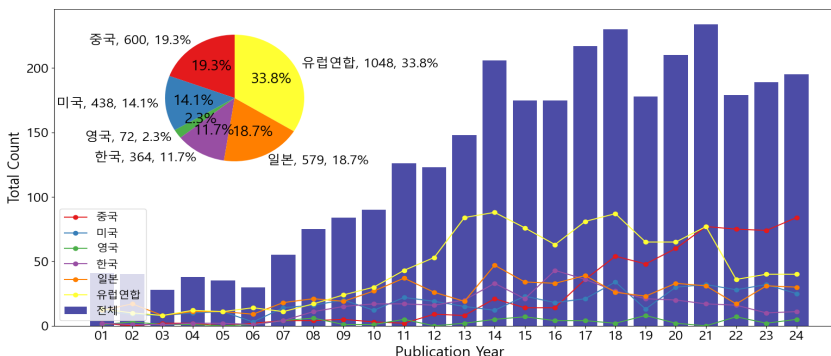
- **(연구점유율)** 중국이 33.4%로 1위이며, 미국(22.3%), 유럽(13.9%), 일본(13.1%), 한국(9.4%), 영국(8.0%) 순으로 확인
- **(연도별 현황)** 2014년도 전까지 미국의 논문건수가 증가하는 추세였으나, 이후 중국의 논문건수가 미국보다 크게 증가하는 추세



[그림 III-8] 고온가스로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향

■ **(액체금속냉각고속로)** 액체금속냉각고속로 분야의 논문건수는 총 3,877건으로, 차세대 원자로 산업 연구 전체의 약 22.5%에 해당

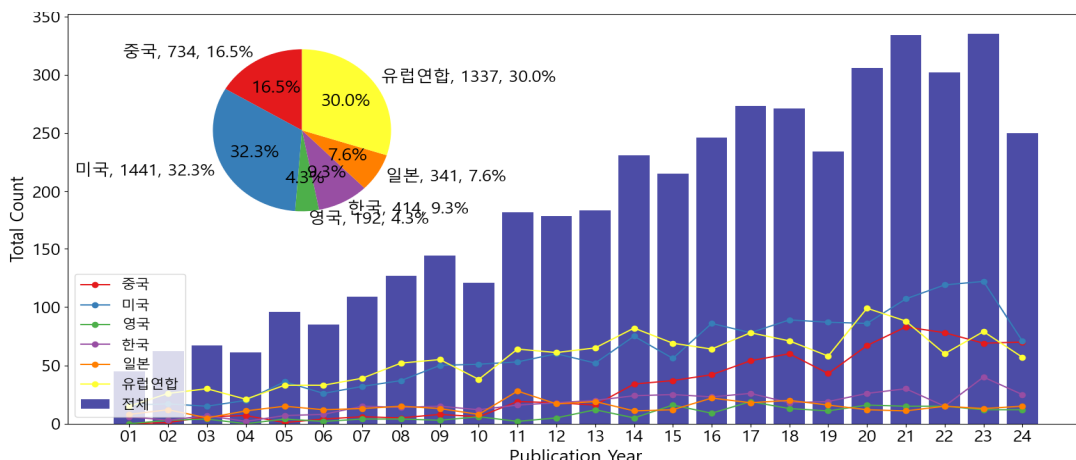
- **(연구점유율)** 유럽이 33.8%로 1위이며, 중국(19.3%), 일본(18.7%), 미국(14.1%), 한국(11.7%), 영국(2.3%) 순으로 확인
- **(연도별 현황)** 2021년도 전까지 유럽의 논문건수가 증가하는 추세였으나, 2021년도 이후 중국의 논문건수가 유럽보다 증가하는 추세



[그림 III-9] 액체금속냉각고속로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향

■ **(용융염원자로) 용융염원자로 분야의 논문건수는 총 6,336건으로, 차세대 원자로 산업 연구 전체의 약 36.8%에 해당**

- **(연구점유율)** 미국이 32.3%로 1위이며, 유럽(30.0%), 중국(16.5%), 한국(9.3%), 일본(7.6%), 영국(4.3%) 순으로 확인
- **(연도별 현황)** 2015년도 전까지 유럽의 논문건수가 가장 많이 증가하는 추세였으나, 2015년도 이후 미국의 논문건수가 유럽보다 증가하는 추세



[그림 Ⅲ-10] 용융염원자로 분야 국가별 및 연도별 연구 동향

■ **(차세대 원자로 산업 최근 연구집중도 분석) 차세대 원자로 산업의 대분류별 최근 연구집중도를 살펴보면 경수로가 가장 높게 나타났고 용융염원자로, 액체금속냉각 고속로, 고온가스로 순으로 확인**

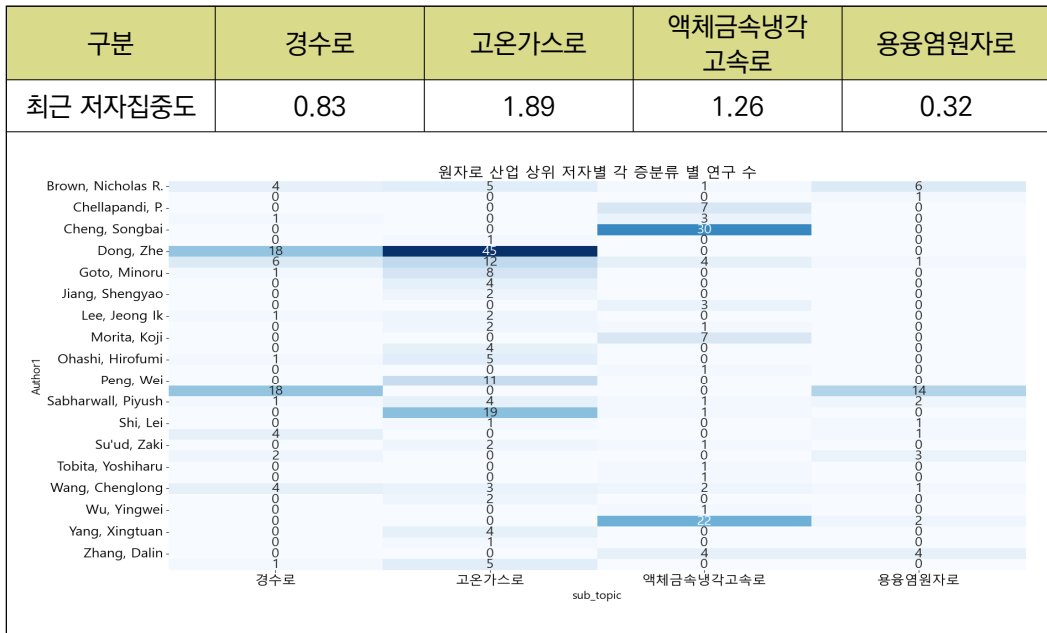
〈표 Ⅲ-21〉 차세대 원자로 산업 대분류별 최근 연구집중도

구분	경수로	고온가스로	액체금속냉각 고속로	용융염원자로
최근 연구집중도	0.4438	0.1954	0.2523	0.2726

구분	집중도
경수로	0.444
액체금속냉각고속로	0.252
고온가스로	0.195
용융염원자로	0.273

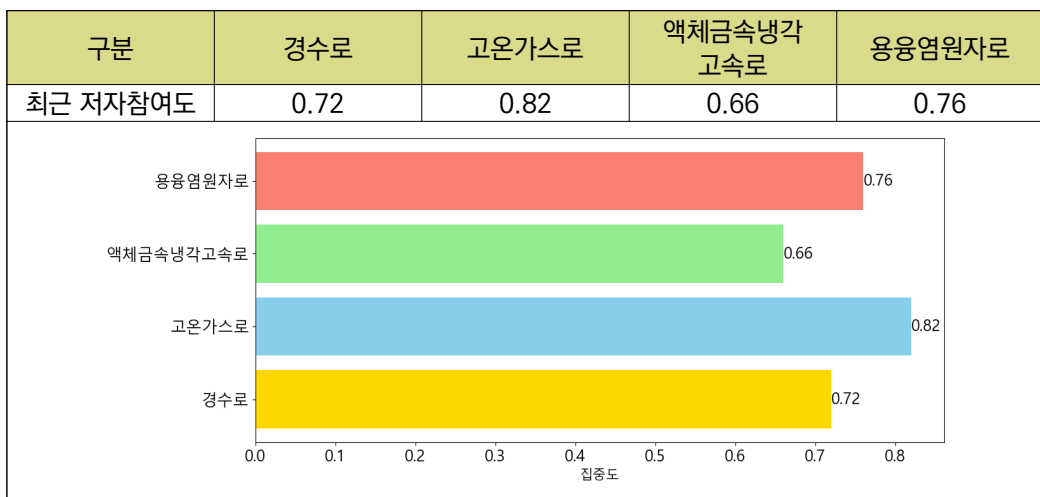
- **(차세대 원자로 산업 주요 저자집중도 분석)** 차세대 원자로 산업에서 SCIE 논문 발간 횟수가 가장 많은 Top 50인의 각 산업별 집중도를 살펴보면 고온가스로, 액체금속냉각고속로, 경수로, 용융염원자로 순으로 집중

〈표 III-22〉 차세대 원자로 산업 대분류별 주요 저자집중도



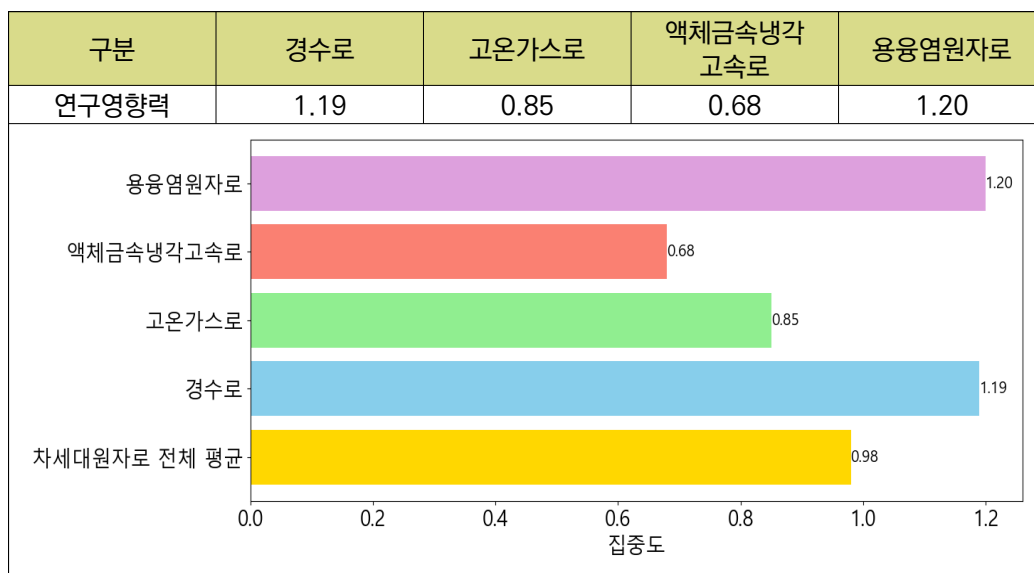
- **(차세대 원자로 산업 주요 저자참여도 분석)** 차세대 원자로 산업의 대분류별 주요 저자참여도를 살펴보면 고온가스로, 용융원자로, 경수로, 액체금속냉각고속로 순으로 확인

〈표 III-23〉 차세대 원자로 산업 대분류별 주요 저자참여도



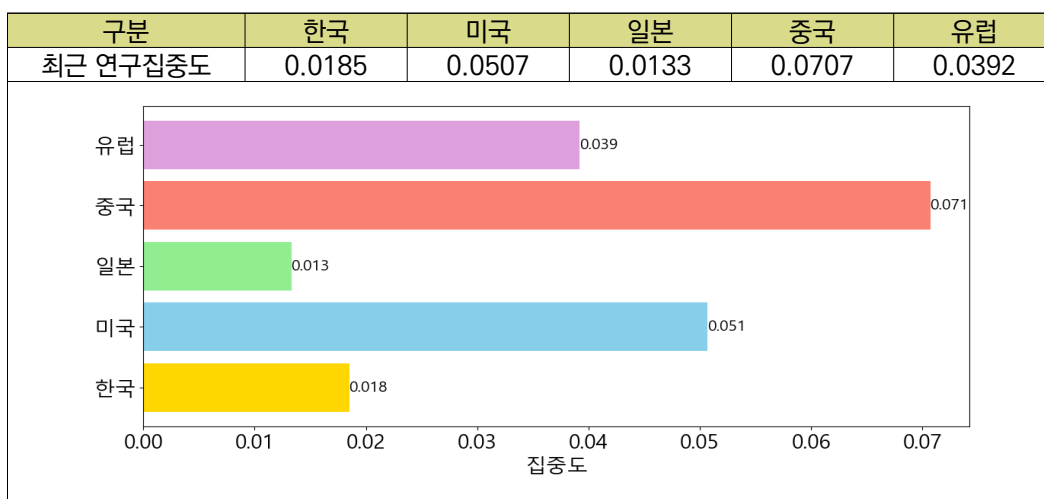
- (차세대 원자로 산업 주요 연구영향력 분석) 차세대 원자로 산업의 대분류별 연구영향력을 살펴보면 용융염원자로가 가장 높게 나타났고 경수로, 고온가스로, 액체금속냉각고속로 순으로 확인

〈표 III-24〉 차세대 원자로 산업 대분류별 연구영향력



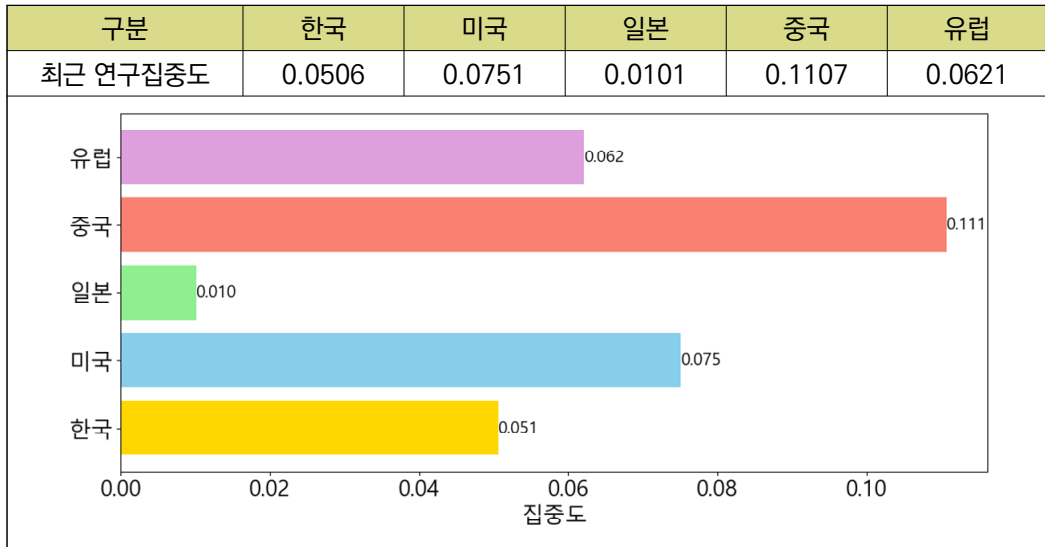
- (차세대 원자로 산업 국가별 최근 연구집중도 분석) 차세대 원자로 산업의 국가별 최근 연구집중도는 중국, 미국, 유럽, 한국, 일본 순이며 한국의 최근 연구집중도는 0.0185으로 확인

〈표 III-25〉 차세대 원자로 분야 국가별 최근 연구집중도



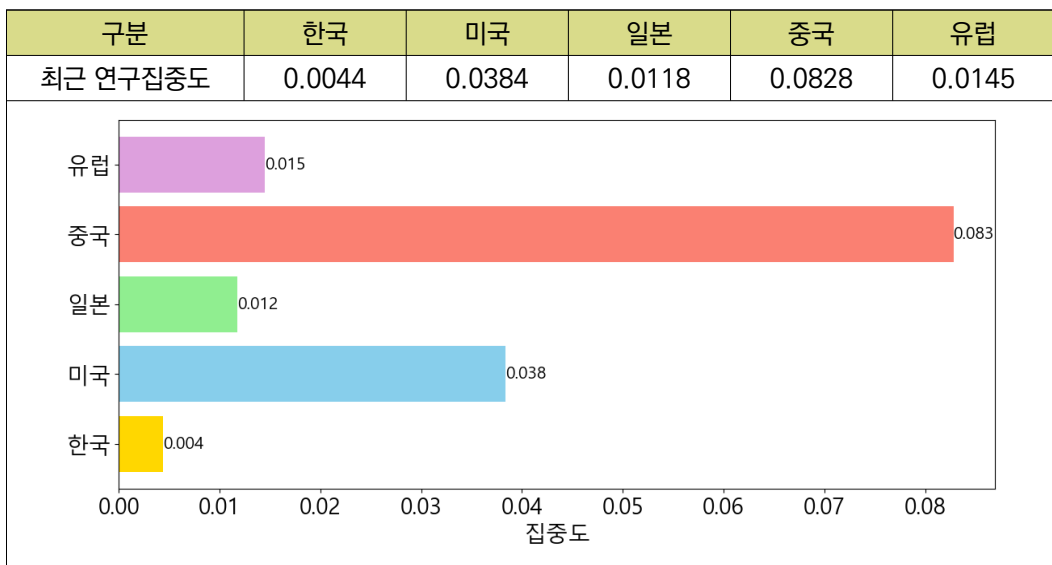
- **(경수로 분야 국가별 최근 연구집중도 분석)** 경수로 분야 국가별 최근 연구집중도는 중국, 미국, 유럽, 한국, 일본 순이며 한국의 최근 연구집중도는 0.0506으로 확인

〈표 Ⅲ-26〉 경수로 분야 국가별 최근 연구집중도



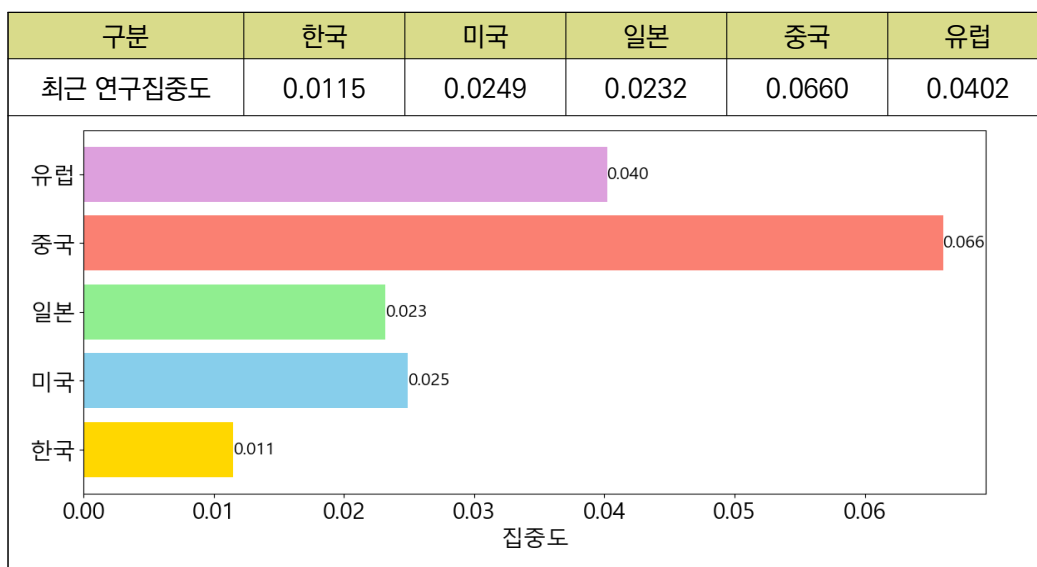
- **(고온가스로 분야 국가별 최근 연구집중도 분석)** 고온가스로 분야 국가별 최근 연구집중도는 중국, 미국, 유럽, 일본, 한국 순이며 한국의 최근 연구집중도는 0.0044로 확인

〈표 Ⅲ-27〉 고온가스로 분야 국가별 최근 연구집중도



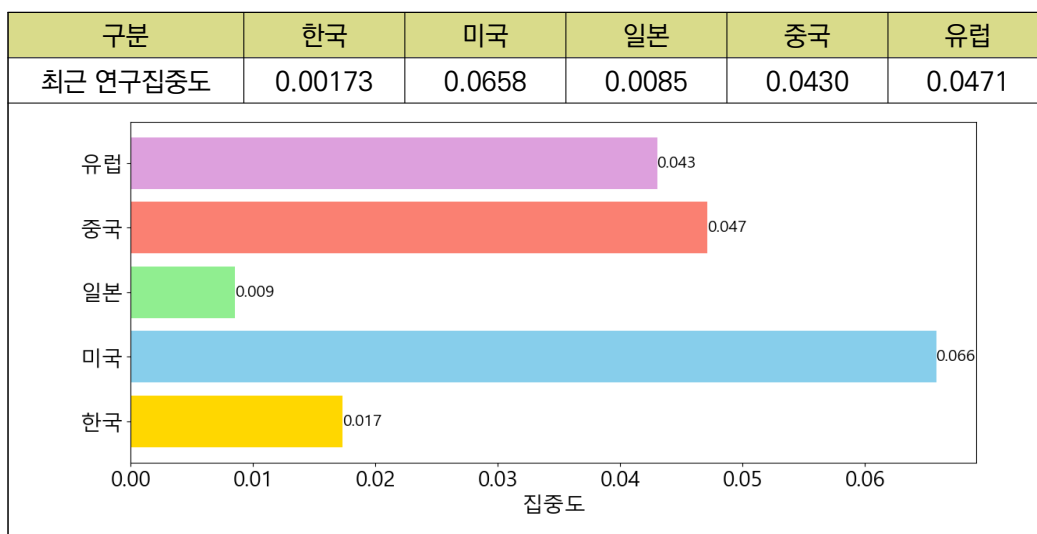
- (액체금속냉각고속로 분야 국가별 최근 연구집중도 분석) 액체금속냉각고속로 분야 국가별 최근 연구집중도는 중국, 유럽, 미국, 일본, 한국 순이며 한국의 최근 연구집중도는 0.0115로 확인

〈표 III-28〉 액체금속냉각고속로 분야 국가별 최근 연구집중도



- (용융염원자로 분야 국가별 최근 연구집중도 분석) 용융염원자로 분야 국가별 최근 연구집중도는 미국, 중국, 유럽, 한국, 일본 순이며 한국의 최근 연구집중도는 0.0173로 확인

〈표 III-29〉 용융염원자로 분야 국가별 최근 연구집중도



■ **(차세대 원자로 산업 국가별 연구주도력 분석) 차세대 원자로 산업 국가별 연구주도력은 중국, 일본, 미국, 한국, 유럽 순으로 확인**

- **(경수로)** 경수로 분야 국가별 연구주도력은 중국, 미국, 한국, 유럽, 일본 순으로 확인
- **(고온가스로)** 고온가스로 분야 국가별 연구주도력은 중국, 일본, 미국, 한국, 유럽 순으로 확인
- **(액체금속냉각고속로)** 액체금속냉각고속로 분야 국가별 연구주도력은 일본, 중국, 한국, 유럽, 미국 순으로 확인
- **(용융염원자로)** 용융염원자로 분야 국가별 연구주도력은 중국, 미국, 유럽, 한국, 일본 순으로 확인

〈표 III-30〉 차세대 원자로 분야 국가별 연구주도력

구분	한국	미국	일본	중국	유럽
차세대 원자로	0.1119	0.1231	0.1479	0.4456	0.0609
경수로	0.2326	0.2829	0.0233	0.3953	0.0388
고온가스로	0.0824	0.0882	0.1412	0.6235	0.0132
액체금속냉각고속로	0.0811	0.0154	0.2873	0.2697	0.0811
용융염원자로	0.1256	0.2698	0.0233	0.3163	0.1953

■ **(차세대 원자로 산업 국가별 연구영향력 분석) 차세대 원자로 산업의 국가별 연구영향력은 미국, 유럽, 중국, 한국, 일본 순으로 확인**

- **(경수로)** 경수로 분야의 국가별 연구영향력은 한국, 중국, 미국, 유럽, 일본 순으로 확인
- **(고온가스로)** 고온가스로 분야의 국가별 연구영향력은 중국, 일본, 한국, 유럽, 미국 순으로 확인
- **(액체금속냉각고속로)** 액체금속냉각고속로 분야의 국가별 연구영향력은 일본, 유럽, 한국, 중국, 미국 순으로 확인
- **(용융염원자로)** 용융염원자로 분야의 국가별 연구영향력은 미국, 중국, 유럽, 한국, 일본 순으로 확인

〈표 III-31〉 차세대 원자로 분야 국가별 연구영향력

구분	한국	미국	일본	중국	유럽
차세대 원자로	0.85	3.56	0.75	2.09	2.45
경수로	1.88	1.33	0.34	1.37	1.03
고온가스로	0.99	0.35	1.08	1.26	0.63
액체금속냉각고속로	0.79	0.35	1.08	0.46	0.92
용융염원자로	0.74	1.35	0.28	1.06	1.02

다. 차세대 원자로 분야 중점분야 도출 결과

- **(개요)** 차세대 원자로 분야의 기술경쟁력 진단을 위해 분석 항목 중 연구경쟁력, 국가경쟁력, 한국 내 경쟁력 지표를 활용하여 Z-Score(표준화점수)*를 통한 중점분야 정량화를 실시하고 경쟁력 순위를 도출

*Z-Score는 데이터가 평균으로부터 얼마나 떨어져 있는지를 표준편차 단위로 도출한 값으로, 이를 통해 데이터가 평균보다 얼마나 높거나 낮은지를 상대적 비교 가능

<표 Ⅲ-32> 연구경쟁력, 국가경쟁력, 한국 내 경쟁력 도출 지표

[연구경쟁력 지표]		[국가경쟁력 지표]	
연구(대분류) 간 상대적 중요도를 평가하는 지표		국가(주요국, 한국) 간 상대적 중요도를 평가하는 지표	
•대분류 기준 연구점유율, 최근 연구집중도, 주요 저자집중도, 주요 저자참여도, 연구영향력 각각의 Z-Score를 산출하고, 각 수치의 평균을 연구경쟁력으로 도출		•대분류 기준 각 국가별 연구점유율, 최근 연구집중도, 연구주도력, 연구영향력 각각의 Z-Score를 산출하고, 각 수치의 평균을 국가경쟁력으로 도출	
연구점유율	전 산업 대비 해당 분야의 점유율	연구점유율	전 산업 대비 해당 분야 특정국가 저자의 점유율
최근 연구집중도	전 구간 대비 최근 구간 연구집중률	최근 연구집중도	전 구간 대비 특정국가 저자의 최근 구간 연구집중률
주요 저자집중도	TOP 50 저자 중 해당 분야 연구 비율	연구주도력	TOP 50 저자 중 해당 분야 특정국가 저자의 연구 비율
주요 저자참여도	TOP 50 저자 중 해당 분야에 연구한 저자 수	연구영향력	전체 연구 대비 해당 분야의 특정국가 저자의 평균 피인용 수
연구영향력	전체 연구 대비 해당 분야의 평균 피인용 수		
[한국 내 경쟁력 지표]			
연구(대분류)에 대한 한국 내 경쟁력을 파악하기 위해 한국 내 연구(대분류) 간 상대적 중요도를 평가하는 지표			
•대분류 기준 연구점유율, 최근 연구집중도, 연구주도력, 연구영향력 각각의 Z-Score를 산출하고, 각 수치의 평균을 한국 내 경쟁력으로 도출			
연구점유율	전 산업 대비 해당 분야 한국저자의 점유율		
최근 연구집중도	전 구간 대비 한국저자의 최근 구간 연구 집중률		
연구주도력	TOP 50 저자 중 해당 분야 한국저자의 연구 비율		
연구영향력	전체 연구 대비 해당 분야의 한국저자의 평균 피인용 수		

참고

‘각 지표별 합계’ 및 ‘Z-Score’ 도출 및 순위 선정 방법

① 각 지표별 합계 도출 방법 : 각 지표별 도출 값의 합계로 계산

- 연구경쟁력 = (해당 분야 연구점유율) + (해당 분야 최근 연구집중도) + (해당 분야 주요 저자집중도) + (해당 분야 주요 저자참여도) + (해당 분야 연구영향력)
- 국가경쟁력 = (특정 국가의 해당 분야 연구점유율) + (특정 국가의 해당 분야 최근 연구집중도) + (특정 국가의 해당 분야 연구주도력) + (특정 국가의 해당 분야 연구영향력)
- 한국 내 경쟁력 = (한국 내 해당 분야 연구점유율) + (한국 내 해당 분야 최근 연구집중도) + (한국 내 해당 분야 연구주도력) + (한국 내 해당 분야 연구영향력)

② Z-Score 도출 방법 : 각 지표별 Z-Score의 합계를 각 지표 수의 평균으로 나누어 계산

- 연구경쟁력 = {(해당 분야 연구점유율의 Z-Score) + (해당 분야 최근 연구집중도의 Z-Score) + (해당 분야 주요 저자집중도의 Z-Score) + (해당 분야 주요 저자참여도의 Z-Score) + (해당 분야 연구영향력의 Z-Score)} ÷ 5
- 국가경쟁력 = {(특정 국가의 해당 분야 연구점유율의 Z-Score) + (특정 국가의 해당 분야 최근 연구집중도의 Z-Score) + (특정 국가의 해당 분야 연구주도력의 Z-Score) + (특정 국가의 해당 분야 연구영향력의 Z-Score)} ÷ 4
- 한국 내 경쟁력 = {(한국 내 해당 분야 연구점유율의 Z-Score) + (한국 내 해당 분야 최근 연구집중도의 Z-Score) + (한국 내 해당 분야 연구주도력의 Z-Score) + (한국 내 해당 분야 연구영향력의 Z-Score)} ÷ 4

③ ‘Z-Score’ 도출 결과를 통한 경쟁력 순위 선정 방법

- Z-Score 값은 각 지표별 합계에 대한 표준화 점수이므로, 각 지표(연구점유율, 연구집중도, 연구영향력 등)가 상이하더라도 표준화된 값을 통해 분야 간 상대적인 경쟁력 비교가 가능
- 따라서, Z-Score 값이 높은 순으로 경쟁력 순위를 선정

■ **(중점분야 도출)** 대분류 기준으로 중점분야 도출 결과, 차세대 원자로 산업에서 중점분야로 ‘고온가스로’, ‘액체금속냉각고속로’를 선정

- 연구경쟁력이 1위이나 국가경쟁력이 4위인 ‘고온가스로’는 선정하고, 연구경쟁력은 2위이나 국가경쟁력이 2위이고 한국 내 경쟁력이 1위인 ‘경수로’는 제외하였으며 차순위인 ‘액체금속냉각고속로’ 선정

참고	중점분야 선정 기준
① 연구경쟁력의 Z-Score 순위가 가장 높은 Top 2 분야(대분류)를 선정	
② 해당 분야의 국가경쟁력 중 한국의 순위를 파악(5개국 중 한국의 위치를 파악)	
③ 연구경쟁력 순위는 상위권이지만 한국의 국가경쟁력이 낮은 분야(대분류)를 선정하고, 그중에서 한국 내 경쟁력 순위가 높은 경우*에는 Top 2에서 제외	
*연구경쟁력 순위 대비 한국 내 경쟁력 순위가 높은 경우 제외(예를 들어, 연구경쟁력은 2위이나 한국 내 경쟁력이 1위인 경우 제외)	

참고	Z-Score 결과 값 해석 방법
① Z-Score가 0인 경우, 해당 연구(대분류)의 경쟁력이 평균값과 동일함을 의미*	
*Z-Score가 0에 가까울수록 평균값에 근접함을 의미	
② Z-Score가 1 이상인 경우, 해당 연구(대분류)가 충분히 잘 진행되고 있음을 의미(평균 이상)	
③ 따라서, 해당 분야(대분류)의 한국 내 경쟁력 Z-Score가 1 이상인 경우는 중점분야 선정 시 제외	

〈표 III-33〉 차세대 원자로 산업 중점분야 도출 결과

중분류	출간 건수	연구 경쟁력 순위	국가경쟁력 순위					한국 내 경쟁력 순위
			미국	일본	중국	유럽	한국	
경수로	3,001	2	1	5	3	4	2	1
고온가스로	4,020	1	1	3	2	5	4	2
액체금속 냉각고속로	3,877	3	1	2	5	3	4	3
용융염원자로	6,336	4	1	4	3	2	5	4

〈표 III-34〉 (참고) 차세대 원자로 산업 중점분야 산출 결과

대분류	출간건수	각 지표별 합계		Z-Score	
		연구경쟁력	한국 내 경쟁력	연구경쟁력	한국 내 경쟁력
경수로	3,001	3.3538	2.2832	0.04	1.48
고온가스로	4,020	3.9754	1.1568	1.37	-0.29
액체금속 냉각 고속로	3,877	3.1123	0.9626	-0.48	-0.59
용융염원자로	6,336	2.9026	0.9529	-0.93	-0.61

〈표 III-35〉 (참고) 차세대 원자로 산업의 국가별 경쟁력 산출 결과

대분류	출간 건수	각 지표별 합계					Z-Score				
		미국	일본	중국	유럽	한국	미국	일본	중국	유럽	한국
경수로	3,001	5.9360	0.3934	2.0860	1.1809	2.2832	1.67	-0.93	-0.14	-0.56	-0.04
고온 가스로	4,020	4.6132	1.6330	2.2463	0.7777	1.1568	1.67	-0.30	0.11	-0.86	-0.61
액체금속 냉각 고속로	3,877	5.8406	1.5105	0.9257	1.2613	0.9626	1.78	-0.28	-0.56	-0.40	-0.54
용융염 원자로	6,336	5.6112	1.1018	1.5434	1.7283	0.9529	1.76	-0.56	-0.33	-0.24	-0.64

3) 특허·논문 기반 선도기술 도출

- **(개요)** 기도출된 특허 기반 선도기술 후보군, 논문 기반 선도기술 후보군 간 Mapping을 통해 특허 수 기준 상위 5개 선도기술(안)을 도출하고, 기업 설문조사 및 전문가 검토를 통해 선도기술 최종 확정

참고	선도기술 도출 개요
1. 선도기술 정의	주요국(미국, 일본, 중국, 유럽)을 중심으로 연구개발 및 특허출원이 활발하게 이루어지고 있는 기술 중, 주요국 대비 한국의 경쟁력이 미흡한 기술 분야
2. 선도기술 도출 기준	주요국 대비 국내의 연구개발 및 특허출원이 상대적으로 미흡하여 R&D/실증, 기반조성 등 국가 차원의 정책적 지원을 통해 기술경쟁력 확보가 필요한 분야
3. 선도기술 도출 방법	① 논문분석을 통해 도출된 중점분야 중 연구경쟁력 순위 Top 2에 해당하는 중분류(대분류)와 특허분석을 통해 도출된 상위 10위 IPC 분류 간 Mapping ② Mapping된 상위 10위 IPC 중 Top 2 중분류에 해당하는 특허데이터가 다수 분포되어 있는 IPC Top 5를 도출하여 선도기술(안)으로 선정

- **(특허 기반 선도기술 후보군 도출)** 차세대 원자로 분야의 최근 3년 이내 상위 10개 IPC를 선별하여 도출

〈표 III-36〉 특허 기반 선도기술 후보군 도출 결과

순위	특허 기반 선도기술 후보군	특허분류(IPC)	특허 수	비중(%)
1	원자로 정지 후 발생 열 제거 기술	G21C15/18	158	23.4%
2	원자로 연료 요소 세부 구조 및 소재 기술	G21C3/02 ~ 3/20	121	17.9%
3	중성자 흡수재 관련 기술	G21C7/06 ~ 7/24	59	8.7%
4	노심의 열 순환 촉진 기술(냉각재 흐름 등)	G21C15/243 ~ 15/26	58	8.6%
5	설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술	G06F30/20 ~ 30/28	54	8.0%
6	원자력 발전소의 제어 안전장치 기술	G21D3/04 ~ 3/06	51	7.5%
7	열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술	G21C15/02 ~ 15/14	48	7.1%
8	고체상 및 세라믹 핵연료 기술	G21C3/54 ~ 3/64	47	7.0%
9	원자로 노심·설비·압력용기 등 감시 시험 기술	G21C17/00	41	6.1%
10	열중성자로 유체·기체상 연료 사용 기술	G21C1/04 ~ 1/22	39	5.8%
합계			676	100.0%

- (논문 기반 선도기술 후보군 도출) 차세대 원자로 분야의 중점분야 도출 결과, ‘고온가스로’, ‘액체금속냉각고속로’가 선정되었으며, 해당 분야를 선도기술 후보군으로 선별

〈표 III-37〉 차세대 원자로 산업 논문 기반 선도기술 후보군 도출 결과

중분류	출간 건수	연구 경쟁력 순위	국가경쟁력 순위					한국 내 경쟁력 순위
			미국	일본	중국	유럽	한국	
경수로	3,001	2	1	5	3	4	2	1
고온가스로	4,020	1	1	3	2	5	4	2
액체금속 냉각고속로	3,877	3	1	2	5	3	4	3
용융염원자로	6,336	4	1	4	3	2	5	4

- (선도기술 후보군 Mapping) ‘상위 10위 IPC 분류(특허 기반 선도기술 후보군)’에 해당하는 특허가 논문분석으로 도출된 ‘중분류 중점분야(논문 기반 선도기술 후보군)’와 Mapping되는지 여부를 판단

- 특허 분석 시 활용된 모든 특허 DB에 차세대 원자로 분야의 분석 범위(중분류)가 Mapping 되어 있으므로, 논문 분석을 통해 중점분야로 도출된 중분류별 특허DB 중 상위 10위 IPC와 Mapping되는 특허 수를 집계

대분류	중분류	출원연도	출원인	출원인국적	출원국(특허청)
고온가스로	-	2013	에로젯 로켓다인 오브 디이, 인크.	US	KR
고온가스로	-	2013	PRATT & WHITNEY ROCKETDYNE INC	US	CN
고온가스로	-	2013	AEROJET ROCKETDYNE INC	US	JP
고온가스로	-	2014	Alexander Prokopievich Zinoviev, Gennady	RU, RU, RU, RU	RU
고온가스로	-	2022	배 시스템즈 피엘시	GB	KR
고온가스로	-	2022	BRITISH AEROSPACE PUBLIC LTD COMPANY	GB	JP
고온가스로	-	2022	BAE SYSTEMS PLC	GB	CA
고온가스로	-	2022	BAE SYSTEMS plc	GB	US
고온가스로	-	2015	BEIJING SANCHAO NUCLEAR SCIENCE AND	CN	CN
고온가스로	-	2022	주식회사 Blossom Energy	JP	JP
고온가스로	-	2016	CHEN ZHIQIANG	CN	CN
고온가스로	-	2016	CHEN ZHIQIANG	CN	CN
고온가스로	-	2021	CHINA INST ATOMIC ENERGY	CN	CN
고온가스로	-	2017	CHINA NORTH NUCLEAR FUEL CO LTD	CN	CN
고온가스로	-	2019	CHINA NUCLEAR IND 23 CONSTR CO LTD	CN	CN
고온가스로	-	2019	CHINA NUCLEAR IND 23 CONSTR CO LTD	CN	CN
고온가스로	-	2018	CHINA NUCLEAR IND 23 CONSTR CO LTD	CN	CN

[그림 III-11] 특허 DB에 대한 대분류 및 중분류 Mapping

- 중분류 중점분야를 기준으로 상위 10위 IPC 내에서 다수 특허가 Mapping되는 상위 5위 선도기술 후보군을 도출
- 전체 특허 수 기준으로는 상위 5위 안에 포함되나, 중분류 중점분야 내 Mapping되는 특허 수가 적은 경우 선도기술 후보군에서 제외

〈표 III-38〉 특허 기반 선도기술 후보군 및 논문 기반 선도기술 후보군 Mapping

특허수 분포 순위	IPC 기반 선도기술명 (특허)	해당 특허수				선도기술 후보군
		연구경쟁력 순위 Top 2		그 외 기타	총계	
		고온가스로	액체금속냉각 고속로			
1	원자로 정지 후 발생 열 제거 기술	6	11	141	158	0
2	원자로 연료 요소 세부 구조 및 소재 기술	4	7	110	121	
3	중성자 흡수재 관련 기술	7	9	43	59	0
4	노심의 열 순환 촉진 기술(냉각재 흐름 등)	1	13	44	58	0
5	설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술	5	8	41	54	0
6	원자력 발전소의 제어 안전장치 기술	1	1	49	51	
7	열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술	6	12	30	48	0
8	고체상 및 세라믹 핵연료 기술	2	6	39	47	
9	원자로 노심·설비·압력용기 등 감시 시험 기술	5	5	31	41	
10	열중성자로 유체·기체상 연료 사용 기술	3	3	33	39	

■ **(선도기술(안) 도출)** ① 후보군 Mapping 결과 중 특허 수 기준 상위 5위 기술 도출,
② 기술 명칭 및 정의에 대한 분과위원회(2차) 검토 후 수정·보완을 통해 선도기술
(안) 도출

- 상위 5위로 선정된 특허 기반 선도기술 후보군의 IPC 분류 정의 등을 토대로 1차 선도기술
(안)을 작성하고, 해당 기술에 대한 정의(설명)를 작성

〈표 III-39〉 1차 선도기술(안) 도출 결과

순위	1차 선도기술(안)	정의
1	원자로 정지 후 발생 열 제거 기술	원자로가 정지된 후에도 방사성 물질의 안정화 과정에서 발생하는 잔열을 효율적이고 피동적으로 제거하는 시스템 및 기술적 방법
2	중성자 흡수재 관련 기술	원자로의 안전하고 효율적인 작동을 위해 중성자 흡수재를 활용하여 핵분열 반응을 조절하거나 정지시키는 기술로, 제어요소의 설계, 이동, 변위 및 흡수재 물질의 선택 등을 포함
3	노심의 열 순환 촉진 기술(냉각재 흐름 등)	냉각재 손실 사고(LOCA) 또는 원자로의 정상 운전 중 열 제거를 위해 다양한 상태(액체, 액체금속, 기체) 및 방식(제트펌프, 열파이프, 자연대류)을 활용하여 냉각재를 보충하거나 순환시키는 기술
4	설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술	원자력 시스템의 안전성, 신뢰성, 성능 최적화를 목표로 하는 시뮬레이션 기반의 분석 및 검증 기술로, 원자로 운영 중 발생할 수 있는 다양한 사고와 고장 상황에 대비하여 위험 예측, 사고 대응, 성능 평가, 고장 진단 등을 포함
5	열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술	원자로 내부에서 발생하는 열을 냉각재로 효과적으로 전달하고, 핵심 구성 요소(연료, 감속재, 반사재, 압력용기 등)로부터 열을 제거하여 시스템의 안정성과 효율성을 유지하기 위한 기술

- 전문가 자문 의견수렴 결과, 1차 선도기술(안)의 기술명과 정의가 서로 일치하지 않는 경우가 있으며 선도기술 간 의미가 중복되는 경우도 존재
- 특허 수 기반으로 도출된 상위 10개 선도기술의 기술명과 정의를 전문가 자문을 통해 수정·보완하고, 기술의 목적별로 그룹핑하여 상위 3개 기술로 도출

〈표 III-40〉 1차 선도기술(안) 수정·보완 및 그룹핑

No.	상위기술명	선도기술명	정의
1	원자로 안전 및 사고 대응 기술	원자로 정지 후 발생 잔열 제거 기술	원자로가 정지된 후에도 방사성 물질의 안정화 과정에서 발생하는 잔열을 효율적이고 피동적으로 제거하는 기술
2		원자력 발전소의 안전장치 기술	원자력 발전소 및 원자로 내에서 발생할 수 있는 사고와 이상 상황에 즉각적으로 대응하여 방사선 누출, 핵반응 제어 상실, 열폭주 등의 위험을 방지하고, 발전소 및 주변 환경의 안전성을 확보하기 위한 기술
3		원자로 설비 감시 및 검사 기술	원자력 설비와 원자로 내외부의 안전성과 성능을 확인하고 유지하기 위해 감시, 검사, 측정 장치 및 시스템을 설계하고 운영하는 기술로 원자로 용기와 배관, 냉각재 및 감속재의 상태 감시, 연료 요소 및 제어봉의 상대 점검, 온도, 반응도, 방사능, 중성자속 등의 물리적 특성 측정을 포함
4	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	중성자 흡수 및 제어요소 설계 기술	원자로의 핵반응 제어를 위해 중성자 흡수재 및 제어요소의 구조, 재료, 구동 메커니즘을 설계하고 최적화하는 기술로, 중성자 흡수를 통해 반응 속도를 조절하며, 고체 또는 유체 형태의 흡수재와 이를 이동시키거나 변위시키는 다양한 구동 방식을 포함
5		원자로 냉각재 흐름 촉진 및 열제어 기술	원자로의 정상 운전 중 열 제거를 위해 다양한 상태(액체, 액체금속, 기체) 및 방식(제트펌프, 열파이프, 자연대류)을 활용하여 냉각재를 보충하거나 순환시키는 기술
6		열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술	원자로의 노심과 압력용기 내부에서 발생하는 열을 효율적으로 제거하고 냉각재를 통한 열전달을 최적화하기 위한 기술로, 열 발생원(핵분열성 물질, 감속재, 반사재, 압력용기 등)에서 열을 냉각재로 전달하는 통로의 구조와 배치를 설계 및 개선하는 기술
7		열중성자로 설계 및 감속재·냉각재 최적화 기술	열중성자 기반 원자로의 성능과 안정성을 극대화하기 위해 감속재와 냉각재의 조합, 비균질 설계, 연료 배열, 압력 조건 등을 최적화하는 기술
8		원자로 연료요소 구조 및 열교환 최적화 기술	원자로 노심에 사용되는 연료요소의 설계와 관련된 기술로 연료 피복관 및 자켓의 재료, 구조적 세부사항, 열교환 효율 증진을 위한 외부 설계, 기체 관리, 팽창 보상, 코팅 기술 등을 포함
9		원자로 설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술	원자력 시스템의 안전성, 신뢰성, 성능 최적화를 목표로 하는 시뮬레이션 기반의 분석 및 검증 기술로, 원자로 운영 중 발생할 수 있는 다양한 사고와 고장 상황에 대비하여 위험 예측, 사고 대응, 성능 평가, 고장 진단 등을 포함
10	핵연료 설계 기술	고체상 및 세라믹 핵연료 설계 기술	원자로에 사용되는 고체상 연료 및 세라믹 기반 연료의 설계와 개발에 중점을 둔 기술로 금속연료, 금속 분산체, 세라믹 연료, 세라믹 분산연료(서멧 포함) 등의 다양한 고체상 연료 형태를 포함

- 최종적으로 ‘원자로 안전 및 사고 대응 기술’, ‘원자로 설계 및 운용 최적화 기술’, ‘핵연료 설계 기술’ 등의 3개 최종 선도기술(안) 도출
- 특히 수 기반으로 도출된 기존 10개 선도기술의 기술명과 정의를 기반으로 최종 선도기술의 정의 작성

〈표 Ⅲ-41〉 최종 선도기술(안) 도출 결과

No.	선도기술(안)	정의
1	원자로 안전 및 사고 대응 기술	• 원자로 및 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 사고와 이상 상황을 예방하고, 비상 시 신속하게 대응하기 위해 설계된 기술로 방사선 누출, 핵반응 제어 상실, 열폭주와 같은 위험 요소를 최소화하고 설비와 주변 환경의 안전성을 확보하는 것이 목표 • 원자로 정지 후 발생 잔열 제거 기술, 원자력 발전소의 안전장치 기술, 원자로 설비 감시 및 검사 기술 등 포함
2	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	• 원자로의 효율적이고 안정적인 운영을 위해 핵심 부품과 시스템을 설계하고 최적화하는 기술로, 원자로의 성능을 극대화하고 운용 안전성을 확보하기 위해 열 및 중성자 흐름의 조정, 구조적 설계 개선, 최적의 운전 조건 도출 등을 목표로 하며, 시뮬레이션과 데이터 기반 검증을 통해 설계의 신뢰성을 강화 • 중성자 흡수 및 제어요소 설계기술, 원자로 냉각재 흐름 촉진 및 열제어 기술, 열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술, 열중성자로 설계 및 감속재·냉각재 최적화 기술, 원자로 연료 요소 구조 및 열교환 최적화 기술, 원자로 설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술 등이 포함
3	핵연료 설계 기술	• 원자로에서 사용되는 핵연료의 성능과 안정성을 극대화하기 위해 연료의 형태, 재료, 조성 및 구조를 설계하고 개발하는 기술 • 고체상 및 세라믹 핵연료 설계 기술 등이 포함

차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

4

Chapter

기업현황 분석

1. 기업동향 분석
2. 기업 현황조사(설문조사)

기업동향 분석

1) 국외 기업동향

가. SMR 기업동향

- 글로벌 SMR 패권 경쟁에서 우위를 선점하기 위해 전 세계적으로 공공 또는 민간 기업들의 경쟁이 치열하게 전개되는 상황
- 다양한 형태의 노형, 용량, 활용 분야 등을 전략적으로 채택하고 안전성, 유용성, 경제성을 동시에 확보할 수 있는 방안 모색
- 시장 점유율을 높이고 지리적 입지를 확대하기 위해 투자, 파트너십, 협업, 합작 투자, 인수 및 확장 등에 중점



*출처 : Advances in Small Modular Reactor Technology Developments(International Atomic Energy Agency, 2022)

[그림 IV-1] SMR 관련 글로벌 주요 공공 및 민간 기업 현황

■ 글로벌 주요 SMR 개발사들은 고객 기반, 디자인 성숙도, 기술 역량, 지역적 입지 측면에서 비슷한 강점 보유

- 주요 플레이어들은 SMR 기술을 발전시키기 위해 광범위한 투자, 협업 체계 구축, 인허가·규제 분야 협력 등을 전략적으로 추진 중

나. 경수로 기업동향

■ 글로벌 경수로 SMR 기업은 대표적으로 NuScale Power(미국), Holtec(미국), Westinghouse(미국), Rolls-Royce(영국), China National Nuclear Corporation(중국) 등이 존재

- **(NuScale Power)** NuScale 경수로 기술을 기반으로 안전성과 경제성을 획기적으로 향상시켜 원자로, 증기발생기, 가압기와 같은 주기기를 하나의 모듈에 집약하고, 대형원전의 거대 콘크리트 돔인 격납 건물까지 모듈에 일체화⁵¹⁾
 - 미국 원자력규제위원회가 2020년 8월 최초로 SMR에 대한 설계인증을 승인함에 따라 NuScale은 다양한 실증시험을 통해 상용화 속도를 높이는 상황
- **(Holtec)** Holtec International은 경수로 SMR인 SMR-160을 개발하고 있으며, 첫 번째 SMR-160을 뉴저지주의 Oyster Creek 원전 해체 부지에 배치할 계획⁵²⁾
 - 현대건설이 SMR-160의 상업화를 위한 표준모델 상세설계에 참여하고 있으며, 설계가 완료되면 SMR-160 배치 예정
 - 우크라이나 원자력공사 Energoatom과 우크라이나 에너지 인프라 재건을 위해 SMR을 건설하는 협력계약을 체결하여, 2029년까지 우크라이나에 SMR-160 배치 예정
- **(Westinghouse)** Westinghouse는 자사의 대표적인 경수로 원자로인 AP1000 기술을 기반으로 300MWe의 출력을 가지는 AP300 개발 중⁵³⁾⁵⁴⁾
 - AP300은 영국의 원자력 신규 건설 프로그램에서 검토 대상으로 선정되며 기술력을 인정 받았으며, 2027년까지 설계 인증을 받고 2030년대 초 첫 운영 목표
- **(Rolls-Royce)** 1980년~1990년대 초 330MWe급 SIR(Safe Integral Reactor)을 개발 하였으며 2015년부터 신규 경수로형 SMR 개발을 진행 중⁵⁵⁾

51) 소형모듈원전(SMR)의 현황 및 전망(해외건설정책지원센터, 2023).

52) 박경남, [현대건설 SMR 시장 정조준](2) SMR-160 앞세워 글로벌 시장 겨냥, 대한경제, 2023.07.27.

53) Westinghouse Unveils Game-Changing AP300 Small Modular Reactor for Mid-Sized Nuclear Technology(Westinghouse, 2023.05.04.).

54) Great British Nuclear Selects the Westinghouse AP300 SMR for the United Kingdom's Newbuild Program(Westinghouse, 2023.10.02.).

- 원전운행사, 터빈설계사, 종합설계사, 연구기관 등 Rolls-Royce가 주도하는 UK SMR 컨소시엄(9개 업체 참여)이 개발에 협력 중이며, 영국의 30개 대학교도 기술제휴를 맺고 대학의 연구 프로그램 지원 중
- Rolls-Royce는 SMR 개발을 위해 영국 정부로부터 2019년 3,600만 파운드, 2021년 11월에 2.1억 파운드를 지원받았으며, 2030년부터 SMR 상업운전개시, 2050년까지 SMR 16기 건설 목표
- **(China National Nuclear Corporation(CNNC))** 중국의 CNNC는 전기 생산, 열 생산 및 해수 담수화용으로 125MWe 가압경수로형 SMR인 ACP100 건설 중⁵⁶⁾
- 세계 최초의 육상 상업용 ACP100의 건설은 2021년 7월 하이난성 Changjiang 원전 부지에서 시작되어 2026년 상업운전 개시 목표⁵⁷⁾

다. 고온가스로 기업동향

■ 글로벌 고온가스로 SMR 기업은 대표적으로 X-Energy(미국)가 존재

- **(X-Energy)** X-Energy는 헬륨을 냉각재로 사용하는 고온가스로 Xe-100을 개발 중이며, 2020년 10월에 미국 에너지부(DOE)의 차세대 원전 실증로 건설 프로그램에 선정되어 2027년까지 Xe-100 상업운전을 위한 개발 자금 지원받을 예정⁵⁸⁾
- 이를 통해 초기 지원금 8,000만 달러를 확보하였으며, DOE는 2027년까지 총 12억 달러를 지원할 계획
- X-Energy가 개발한 핵연료는 세라믹 등으로 3중 코팅된 입자를 테니스공 크기의 핵연료로 만든 것이며, Xe-100 원자로 1대당 핵연료 220,000개 장전 가능
- **(USNC)** MMR은 Ultra Safe Nuclear Corporation(USNC)이 개발한 5MWe 출력의 고온가스냉각로(HTGR)이며, 핵연료로는 Fully Ceramic Micro-encapsulated(FCM)* 연료 사용⁵⁹⁾
- *FCM은 우라늄 또는 플루토늄 등 핵연료 물질을 SiC로 코팅한 TRISO 입자들을 세라믹 매트릭스 안에 넣어 만든 펠렛 형태의 핵연료
- USNC는 캐나다 OPG와 컨소시엄을 구성하여 Global First Power(GFP)를 설립하고, CNL의 SMR 실증사업 경쟁에 참여
- 캐나다 이외에도 미국, 핀란드, 폴란드에서 MMR 상용화를 위한 노력을 전개 중

55) 소형모듈원전(SMR)의 현황 및 전망(해외건설정책지원센터, 2023)

56) 세계원전시장 인사이트(에너지경제연구원, 2020.07.24.)

57) 세계원전시장 인사이트(에너지경제연구원, 2024.04.05.)

58) 소형모듈원전(SMR)의 현황 및 전망(해외건설정책지원센터, 2023)

59) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)

라. 액체금속냉각고속로 기업동향

■ 글로벌 액체금속냉각고속로 SMR 기업은 대표적으로 TerraPower(미국), ARC(미국)가 존재

- **(TerraPower)** 소듐냉각고속로 Sodium 원자로를 개발 중이며 안전성과 핵연료 이용 측면에서 강점 보유⁶⁰⁾
 - TerraPower는 2006년 빌게이츠가 설립하였으며, 345MWe 규모의 소듐(나트륨)을 냉각재로 활용한 Sodium 원자로를 개발 중
 - 미국 DOE는 ARDP에 X-Energy와 더불어 TerraPower의 Sodium 원자로를 선정하여 설계 개발 및 초도호기 건설에 12억 달러(한화 약 1.4조 원) 지원 예정
- **(ARC)** 2018년 7월에 캐나다 뉴브런즈윅에 100MWe의 소듐냉각고속로 ARC-100 개발 착수⁶¹⁾ (2030년 상업운전 목표)
 - 2021년 2월 뉴브런즈윅주 정부로부터 ARC-100 개발을 위한 2,000만 캐나다달러 지원 계약 체결
 - 2029년 ARC-100 첫 호기 운전 시작을 목표로 개발 추진 중
- **(Oklo)** Oklo는 Compact Fast Reactor(액체금속냉각고속로)를 활용한 1.5MWe 출력의 원자로인 Aurora 개발 중⁶²⁾
 - 2016년 Oklo는 Aurora 기술 개발을 위해 DOE의 GAIN을 통해 자금 수령
 - Idaho National Laboratory(INL)은 EBR-II 사용후핵연료를 재활용하여 생산하는 고순도저농축우라늄(High-Assay Low-Enriched Uranium, HALEU)을 Oklo의 Aurora 개발과 실증에 활용할 계획
 - 2016년부터 Aurora 설계는 NRC의 사전인가가 검토를 받아왔으며, 2020년 3월 Aurora powerhouse에 대한 통합인가 신청서를 NRC에 제출
- **(Westinghouse)** eVinci는 Westinghouse에서 개발하고 있는 출력 200kW에서 15MW 범위의 MMR⁶³⁾
 - 2019년 6월부터 NRC의 사전인가신청 검토를 받고 있으며, 2021년 11월 NRC에 업데이트된 eVinci 사전인가신청 검토 규제참여 계획(Regulatory Engagement Plan, REP)을 제출

60) 소형모듈원전(SMR) 글로벌 산업 동향(KDB산업은행, 2022)

61) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)

62) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)

63) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)

- 2020년 10월 캐나다 Bruce Power와 캐나다의 넷제로 탄소배출 실현을 위해 eVinci 기술의 응용 분야를 조사하기로 합의

마. 용융염원자로 기업동향

■ 글로벌 용융염원자로 SMR 기업은 대표적으로 Terrestrial Energy(캐나다), Moltex(영국), Seaborg(덴마크)가 존재

- **(Terrestrial Energy)** Terrestrial Energy는 190MWe의 용융염원자로인 IMSR(Integral Molten Salt Reactor)을 개발 중
 - IMSR은 캐나다와 미국 NRC의 사전인허가를 진행하고 있으며, 미국-캐나다의 규제당국이 공동사전검토(joint review)를 진행하는 최초의 선진원자로
 - 캐나다 앨버타주와 영국에서도 ISMR 상용화를 위한 협력 파트너십을 모색 중
- **(Moltex)** 영국의 Moltex가 개발하고 있는 SSR(Stable Salt Reactor)은 모듈 하나의 출력이 150MWe이며, 한 플랜트에 8기의 원자로 모듈을 설치하여 1200MWe까지 출력을 낼 수 있도록 하는 용융염원자로⁶⁴⁾
 - Moltex는 2030년대 초까지 캐나다 뉴브런즈윅주 Point Lepreau 부지에 첫 원자로를 배치하는 것을 목표로 설정
 - 2018년 9월 영국 BEIS의 AMR R&D project의 하나로 선정되어 자금을 지원받았으며 2019년 9월 캐나다 CNSC VDR 신청 및 영국 내 SMR 사업 개발에 쓰일 자금 600만 파운드를 크라우드 펀딩을 통해 조달
- **(Seaborg)** 2014년 덴마크에서 설립된 Seaborg Technologies는 바지선에 배치될 수 있는 컴팩트형 용융염원자로(Compact Molten Salt Reactor, CMSR)를 개발 중⁶⁵⁾
 - 2020년 미국 해운국(American Bureau of Shipping, ABS)이 기술에 대한 타당성 보고서를 승인하였으며, 2026년에 상업 운영을 시작하려는 계획하에 계속해서 새로운 실험 시설을 건설 중
 - 2023년 7월 Seaborg는 노르웨이 Norsk Kjekraft와 CMSR의 노르웨이 내 배치를 조사하기 위한 의향서(LOI)에 서명

64) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)

65) 소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서(한국원자력학회, 2024)

〈표 IV-1〉 글로벌 주요 SMR 개발사 동향

주요 개발사	주요 동향
NuScale Power (미국)	•미 원자력규제위원회가 SMR 최초로 '20. 08 설계 인증 완료 (현재 지상 경수로 SMR 중 개발 진도가 가장 빠른 것으로 평가) •미 에너지부 지원, 전략적·재무적 투자자 유치, SPAC(기업인수목적회사) 상장 등을 통해 개발비 투자 유치 완료 •전 세계 12개 프로젝트(7개국)에 대한 사업협력을 체결하였으며, 추가 7개 국가에서 건설 검토 중
X-Energy (미국)	•고온가스로 기반의 4세대 SMR로 경수로 대비 고온의 증기를 활용하여 다목적 활용 가능 •미국 에너지부 '20. 10 차세대 원전 실증로 건설 프로그램(ARDP)에 선정, '27년까지 설계 및 초도호기 건설에 자금 지원 예정 •미국 발전사업자 Energy Northwest는 워싱턴 주 Columbia 원전 부지에 Xe-100을 건설하기 위해 X-Energy와 사업 양해각서 체결
TerraPower (미국)	•TerraPower사는 2006년 설립되어 345MWe 규모의 소듐(나트륨)을 냉각재로 활용한 NATRUM 원자로를 개발 중(빌게이츠 설립) •미국 에너지부 '20. 10 차세대 원전 실증로 건설 프로그램(ARDP)에 선정, '27년까지 설계 및 초도호기 건설에 자금 지원 예정 •미국 와이오밍주 석탄공장 부지에 2027년까지 Sodium 원자로를 건설 예정
Rolls-Royce (영국)	•기존 가압경수로와 유사한 설계 방식의 470MWe급 SMR을 개발하여 자국 내 대규모 건설 목표 •Rolls-Royce가 주도하는 UK SMR 컨소시엄에는 현재 9개 업체가 참여 중이며, 영국 내 인허가 취득을 준비 중
Terrestrial Energy (캐나다)	•에너지 벤처기업으로 용융염로 기반의 SMR 모델 'ISMR 400' 개발, 열저장 시스템과 연계하여 시스템 유연성 향상 가능 모델 •'17. 11 캐나다 규제기관 CNSC의 VDR(Vender Design Review) 1단계 완료, 2단계 진행 중 •ANL와 핵연료염 측정 프로그램 착수('21.01), ANSTO와 사용후핵연료관리 협력 체결('22.02)

*출처 : 소형모듈원전(SMR) 시장에서의 가치창출 전략(한국과학기술정보연구원, 2023)

2) 국내 기업동향

가. SMR 기업동향

- 한국수력원자력, 한국전력기술 등 국내 공기업을 중심으로 산·학·연이 협력하여 독자적인 SMR 개발을 추진 중

<표 IV-2> 국내 공기업의 SMR 개발 동향

주요 개발사	주요 동향
한국수력원자력	•한국수력원자력은 과학기술정보통신부의 지원을 받아 i-SMR(혁신형 SMR)의 표준설계 개발 추진 중
한국전력기술	•해양부유식 60MW급 가압경수로인 BANDI-60의 개념설계를 마치고 기본설계 진행 중

*출처 : 소형모듈원전(SMR)의 현황 및 전망(해외건설정책지원센터, 2023)

- 국내 민간 기업들은 해외 SMR 주요 기업들과 협업 및 지분투자를 비롯해 국내의 벨류체인 구축 등 협업 전선을 구축함으로써 SMR 사업을 구체화하기 시작
- 주로 에너지 유틸리티 또는 원자력 전문기업 위주로 SMR 사업에 진출하는 경향이 있으며, 미국이나 유럽과 다르게 스타트업 또는 벤처기업의 사업 진출은 전무한 실정

<표 IV-3> 국내 민간기업의 해외 SMR 투자 및 협력 동향

주요 개발사	주요 동향
두산에너지빌리티	•NuScale Power(미국)과 전략적 협력관계를 구축하여 미국 및 전 세계 시장에서 SMR 주요 기자재 공급 예정 - NuScale Power에 1억 400만 달러의 지분투자('19년 4,400만 달러, '21년 6,000만 달러) - NuScale Power의 370억 달러(약 50조 원) 규모의 SMR 건설 프로젝트에 원자로, 증기 발생기 튜브 등 주기기 납품 기대* *IT 인프라 기업 스탠더드파워에 2029년부터 SMR 24기를 공급하기로 합의 •X-Energy(미국)과 500만 달러의 지분투자 및 'Xe-100(고온가스로)' 핵심 기자재 공급을 위한 협약 체결('23년)

주요 개발사	주요 동향
현대엔지니어링	•USNC(캐나다)와 MMR 개발 MOU 체결('15), 글로벌 EPC 사업 독점권 지분투자 계약 체결('22.01) •캐나다 온타리오 초크리버 원자로연구소 부지 MMR(5MWe) 실증사업 상세설계 계약 체결('22.05) •폴란드 레그니차 경제 특별구역(LSEZ)과 MMR 사업 양해각서 체결('23.02)
현대건설	•Holtec International(미국)과 SMR 사업 동반 진출을 위한 협력 계약(Team Agreement) 체결('21.11)
삼성중공업	•덴마크 Seaborg Technologies와 기술협력 업무협약('22.04), 용융염원자로 기반 부유식 원자력 발전 설비 개발 중 •소형 용융염원자로의 파워 바지 개념 설계 완료, 미국선급협회(ABS) 인증 취득('23.01)
SK(주)·SK이노베이션	•TerraPower(미국)에 2억 5,000만 달러 지분 투자('22.08), 국내 및 동남아시아 등에서 상용화사업 공동추진 예정
GS에너지·삼성물산	•NuScale Power(미국)와 SMR EPC(설계·조달·시공) 건설·운영 공동 추진을 위한 MOU 체결('22.04)
HD현대 (HD한국조선해양)	•계열사 HD한국조선해양을 통해 TerraPower(미국)에 3,000만 달러 투자, SMR 기반 발전선 개발 추진 •HD한국조선해양은 미국 TerraPower, Southern Company, 영국 Core-Power와 미국 워싱턴주에서 용융염원자로 공동 개발을 위한 기술 교류회 개최('24.02.)

*출처 : 소형모듈원전(SMR) 시장에서의 가치창출 전략(한국과학기술정보연구원, 2023)

나. 경수로 기업동향

■ 국내 경수로 SMR 기업은 대표적으로 한국수력원자력, 한국전력기술 등 공기업과 두산에너빌리티, 현대건설, GS에너지, 삼성물산 등이 존재

- **(한국수력원자력)** 혁신형 SMR(i-SMR) 개발 계획을 발표하였으며 2028년까지 경수로 기반의 4-Module형 SMR 개발 예정⁶⁶⁾
 - 한국수력원자력은 2020년 4월 산학연 전문가로 구성된 ‘혁신형 SMR 추진위원회’를 출범하여 신형 SMR의 개발 방향 및 추진체계에 대한 논의와 최상위 요건 및 개념안 개발에 착수
 - 2021년 9월 정부 예비타당성 조사를 신청하였으며, 2022년 6월 총 사업비 3,992억 규모로 예타를 통과하여 2028년까지 인허가 획득을 목표로 개발 예정
- **(한국전력기술)** 해양부유식 60MW급 가압경수로인 BANDI-60의 개념설계를 마치고 기본설계를 진행 중⁶⁷⁾
- **(두산에너빌리티)** 두산에너빌리티는 에너지 안보와 기후변화 대응을 위한 친환경 에너지 공급을 위해 가스터빈, 차세대 원전(SMR), 재생에너지, 수소 사업을 중심으로 역량 집중⁶⁸⁾
 - 두산에너빌리티는 다년간의 원전 주기기 제작 경험을 기반으로 다양한 SMR을 위탁받아 제작해주는 SMR Foundry 사업 전략을 추진 중
- **(현대건설)** 현대건설은 토목, 건축, 주택, 플랜트, 에너지 등 다양한 사업 분야에서 경쟁력을 높여왔으며, 소형모듈원전(SMR)의 설계와 시공을 수행함으로써 원자력 사업의 전체 밸류체인을 강화하고자 노력 중⁶⁹⁾
 - 미국의 Holtec과 체결한 SMR 개발 및 사업 동반 진출 협력 계약을 바탕으로 미국 미시간주 펠리세이즈에 SMR-300 최초 호기 배치를 위한 상세 설계 진행
 - Energoatom과 우크라이나 에너지 인프라 재건 건설(대형원전, SMR 등) 협약 체결
 - Holtec, 한국무역보험공사, 한국수출입은행 등과 글로벌 SMR 사업 확대 금융지원 업무 협약 체결
- **(GS에너지)** GS에너지는 석유화학·LNG 등 화석 에너지 전문기업으로, 이와 더불어 그린 발전, 청정수소, 순환자원 등 친환경 에너지 사업으로 확장을 통해 에너지 시장 변화에 대응할 수 있는 신규 사업 기반 구축 중⁷⁰⁾

66) 소형모듈원전(SMR) 글로벌 산업 동향(KDB산업은행, 2022)

67) 소형모듈원전(SMR)의 현황 및 전망(해외건설정책지원센터, 2023)

68) 2024 Integrated Report of Doosan Enerbility(두산에너빌리티, 2024)

69) 2024 Hyundai Engineering & Construction Sustainability Report(현대건설, 2024)

70) GS에너지 홈페이지, URL : https://www.gsenergy.co.kr/beyond/green_power.php(접속일 : 2024.07.31.)

- 2021년 6월, NuScale Power에 대한 투자를 통해 한반도 내에서의 독점 사업권 확보
- 2022년 4월, NuScale Power, 두산에너지빌리티, 삼성물산과 함께 전 세계에 SMR 발전소를 건설하고 운영하는 사업개발을 공동으로 추진하기 위한 MOU 체결
- 2023년 5월, 울진군과 함께 울진 원자력수소 국가산단 내 NuScale SMR 도입 타당성 검토를 위한 MOU 체결
- **(삼성물산)** 삼성물산은 발전 EPC 사업 역량을 기반으로 태양광, 그린수소, SMR 등 미래 친환경 에너지 사업을 확대 중⁷¹⁾
- 삼성물산은 NuScale Power에 총 7,000만 달러(2021년 2,000만 달러, 2022년 5,000만 달러) 규모의 지분투자를 통해 전략적 파트너십 구축⁷²⁾
- 미국의 Flour, NuScale Power, Sargent & Lundy 등 글로벌 엔지니어링 기업 3개사와 루마니아 SMR 사업의 기본설계 공동 진행 계약 체결⁷³⁾

다. 고온가스로 기업동향

■ 국내 고온가스로 SMR 기업은 대표적으로 두산에너지빌리티, DL이앤씨, 포스코이앤씨, 현대엔지니어링이 존재

- **(두산에너지빌리티)** 두산에너지빌리티는 NuScale Power와의 전략적 협력관계 구축을 통한 경수로 제작 기술 개발뿐 아니라 X-Energy와의 협력을 통한 고온가스로 제작 기술 개발 또한 추진 중
- **(DL이앤씨)** DL이앤씨는 2023년 1월 미국 X-Energy에 2,000만 달러 규모의 전략적 투자를 진행하였고, 2024년 2월에는 한전KPS와 함께 미국 X-Energy와 고온가스로 Xe-100의 사업 개발과 시운전, 유지 보수 기술 개발을 위한 업무협약 체결⁷⁴⁾

71) 삼성물산 홈페이지, URL : <https://www.secc.co.kr/ko/business/future>(접속일 : 2024.07.31.)

72) 삼성물산, 소형모듈원전(SMR) 글로벌 사업 본격화(삼성물산, 2022.05.10.), URL : <https://news.samsungcnt.com/ko/%EC%A0%84%EC%B2%B4%EA%B8%B0%EC%82%AC/%EA%B1%B4%EC%84%A4%EB%B6%80%EB%AC%B8/2022-05-%EC%82%BC%EC%84%B1%EB%AC%BC%EC%82%B0-%EC%86%8C%ED%98%95%EB%AA%A8%EB%93%88%EC%9B%90%EC%A0%84smr-%EA%B8%80%EB%A1%9C%EB%B2%8C-%EC%82%AC%EC%97%85-%EB%B3%B8%EA%B2%A9%ED%99%94/>

73) 오은선, “삼성물산, 루마니아 소형모듈원전(SMR) 기본설계 참여… 본사업 ‘첫 발’”, 조선비즈, 2024.07.25., URL : https://biz.chosun.com/real_estate/real_estate_general/2024/07/25/HYKQOZPJ5VFZ7MXMJAY7JBLLTI/

74) DL이앤씨, SMR 사업 확장 및 기술 개발에 박차, (DL이앤씨, 2024.02.15.), URL : https://www.dlenc.co.kr/pr/InfoView.do?cd_scrmn_cl=&cd_advt_cl=tebbhgcmmw&searchword=¤tPage=3&no_n_tc_plte_sral=24401

- **(포스코이앤씨)** 포스코이앤씨는 2024년 7월 15일 한국원자력연구원과 ‘고온가스로 개발 사업 협력’을 위한 업무협약 체결⁷⁵⁾
 - 포스코이앤씨는 한국원자력연구원이 개발한 고온가스로 기술을 바탕으로 독자노형 확보를 위한 공동연구, 기술이전, 인력지원, 실증사업추진 및 수출 기반 상용화 등 전 영역에서 협력할 예정
- **(현대엔지니어링)** 현대엔지니어링은 플랜트, 건축, 자산관리 분야를 중심으로 성장해왔으며, 최근에는 친환경·에너지 분야로 사업영역 확대하여 탄소 저감과 수소경제 실현에 기여하는 것을 목표로 설정⁷⁶⁾
 - 현대엔지니어링은 생산과정에서 탄소를 발생시키지 않는 MMR과 재생에너지 사업을 추진하고 있으며, 이를 청정수소 생산과 연계하여 사업 간 시너지 창출 기대
 - 2022년 6월 미국 USNC와 ‘캐나다 초크리버 MMR 실증사업*’ 상세설계 계약 체결⁷⁷⁾
 - *현대엔지니어링이 USNC, 캐나다 건설회사 PCL, 캐나다 엔지니어링회사 HATCH와 함께 캐나다 온타리오 주 초크리버 원자력연구소 부지에 고온가스로 기반의 5MWe급 MMR를 건설하는 사업
- **(SK에코플랜트)** SK에코플랜트는 현대엔지니어링, USNC와 ‘수소 마이크로 허브’ 구축을 위한 3자간 MOU 체결⁷⁸⁾
 - *수소 마이크로 허브는 MMR에서 발생하는 전기와 고온의 증기에 SOEC의 고온수전해 공정을 적용해 수소를 생산하는 설비
 - 현대엔지니어링은 해당 사업에서 MMR 관련 BOP(Balance of Plant) 및 EPC(설계·조달·시공) 업무를 총괄하며, SK에코플랜트는 블루에너지의 SOEC를 통해 원전 기반의 수전해 수소 생산 시스템을 구성하고 수소 생산 설비를 공급

75) 포스코이앤씨, 한국원자력연구원과 민관합작 고온가스로(HTGR) 공동 개발 MOU 체결(포스코이앤씨, 2024.07.15.), URL : <https://newsroom.posco.com/kr/%ed%8f%ac%ec%8a%a4%ec%bd%94%ec%9d%b4%ec%95%a4%ec%94%a8-%ed%95%9c%ea%b5%ad%ec%9b%90%ec%9e%90%eb%a0%a5%ec%97%b0%ea%b5%ac%ec%9b%90%ea%b3%bc-%eb%af%bc%ea%b4%80%ed%95%a9%ec%9e%91-%ea%b3%a0%ec%98%a8/>

76) 2023 현대엔지니어링 지속가능경영보고서(현대엔지니어링, 2023)

77) 현대엔지니어링, 세계 최초 4세대 초소형모듈원전(MMR) 사업 본격 추진(현대엔지니어링, 2022.06.06.), URL : <https://www.hec.co.kr/ko/pr/press-news/press-release/5962>

78) SK에코플랜트-현대엔지니어링, 美 USNC와 초소형모듈원전(MMR) 기반 수소 생산 허브 구축 밀그림(SK에코플랜트, 2023.04.20.), URL : <https://news.skecoplant.com/sk-ecoplant/10376/>

라. 액체금속냉각고속로 기업동향

■ 국내 액체금속냉각고속로 SMR 기업은 대표적으로 SK그룹(SK㈜, SK이노베이션), 현대건설, HD현대 등이 존재

- **(SK그룹)** SK주식회사와 SK이노베이션은 전 세계의 탈탄소화를 향한 움직임에 발맞춰 화석 에너지원의 대체·청정화를 통해 무탄소 전력 생산·소비를 확대하는 데 기여하고자 노력 중⁷⁹⁾
 - 미국 소듐냉각고속로 설계업체 TerraPower에 SK㈜와 SK이노베이션의 공동투자를 통한 SMR 사업 진입
 - 2024년 5월 TerraPower가 소듐냉각고속로 건설 허가를 받으면서 고속로 SMR 기술 및 장비에서 시장 표준을 선점하는 효과를 거두었으며 미국 사업이 성공적으로 진행될 경우, 아시아 사업 진출에서도 주도권 소유
- **(현대건설)** 현대건설은 2024년 6월 11일 한국원자력연구원과 ‘민관합작 소듐냉각고속로 (SFR) 개발사업에 관한 업무협약’ 체결⁸⁰⁾
 - 양사는 소듐냉각고속로 관련 개발사업, 국내외 실증사업, 수출 기반 상용화 및 수출에 대한 상호 독점적 사업 참여, 공동연구 및 지식재산권 기술이전, 인력지원 및 상호협업체 운영 등에 대해 긴밀하게 협력할 계획
- **(HD현대)** HD현대 계열사인 한국조선해양은 2022년 TerraPower와 3,000만 달러 규모의 투자계약을 체결하며 차세대 에너지 기술 분야에 본격 진출⁸¹⁾

마. 용융염원자로 기업동향

■ 국내 용융염원자로 SMR 기업은 대표적으로 HD현대 계열사 HD한국조선해양, 삼성중공업 등이 존재

- **(HD현대)** HD현대는 조선사업을 시작으로 해양플랜트, 기계, 로봇, 에너지 등으로 사업 영역을 넓히며 성장했으며, 계열사인 HD한국조선해양은 SMR을 미래 선박 에너지원으로 연구개발 추진 중⁸²⁾

79) 2023 SK주식회사 지속가능경영보고서(SK㈜, 2023)

80) 현대건설, 한국원자력연구원과 차세대 SMR ‘소듐냉각고속로(SFR)’ 상용화 협력(현대건설, 2024.06.12.), URL : https://www.hdec.kr/kr/newsroom/news_view.aspx?NewsSeq=988&NewsType=TREND&NewsListType=news_list

81) 한국조선해양, 美 SMR 기업 테라파워에 기술 투자 나선다(HD한국조선해양, 2022.11.04.), URL : <https://e.sg.hd.com/ko/news/607>

82) HD한국조선해양 통합보고서 2023(HD한국조선해양, 2023)

- SMR 기반의 원자력 발전선·추진선 설계 및 상용화를 위해 글로벌 SMR 기업과 전략적 협력 관계 구축
- **(삼성중공업)** 삼성중공업은 원자력 추진 선박 기술 및 기자재 개발과 용융염원자로 기반의 부유식 원자력 발전 설비 개발 추진 중⁸³⁾
- 한국원자력연구원과 해양 원자로 공동연구 협약을 체결하여 원자력 추진 선박 기술 및 기자재 개발, 해양 원자력 설계와 비즈니스 모델 개발 추진 중
- Seaborg Technologies(덴마크)와 기술 협력 업무협약을 체결하여 용융염원자로 기반의 부유식 원자력 발전 설비 개발 추진 중

83) 소형모듈원전(SMR)의 현황 및 전망(해외건설정책지원센터, 2023)

3) 분야별 주요 플레이어

〈표 IV-4〉 분야별 주요 플레이어

구분	주요 플레이어	주요 내용
경수로	국외	NuScale Power (미국) •NuScale 경수로 기술을 기반으로 안정성과 경제성을 획기적으로 향상시켜서 원자로, 증기발생기, 가압기와 같은 주기기를 하나의 모듈에 집약시키고, 대형원전의 거대 콘크리트 돔인 격납 건물까지 모듈에 일체화
		Rolls-Royce (영국) •1980년~1990년대 초 330MWe급 SIR을 개발하였으며 2015년부터 신규 경수로형 SMR 개발을 진행 중
		Holtec (미국) •Holtec International은 경수로 SMR인 SMR-160을 개발하고 있으며, 첫 번째 SMR-160을 뉴저지주의 Oyster Creek 원전 해체 부지에 배치할 계획
		Westinghouse (미국) •Westinghouse는 자사의 대표적인 경수로 원자로인 AP 1000 기술을 기반으로 300MWe의 출력을 가지는 AP300 개발 중
	국내	CNNC(중국) •중국의 CNNC는 전기 생산, 열 생산 및 해수 담수화용으로 125MWe 가압경수로형 SMR인 ACP100 건설 중
		한국수력원자력 •혁신형 SMR 개발 계획을 발표하였으며 2028년까지 경수로 기반의 4-Module형 SMR 개발 예정
		한국전력기술 •해양부유식 60MW급 가압경수로인 BANDI-60의 개념설계를 마치고 기본설계를 진행 중
		두산에너지빌리티 •두산에너지빌리티는 에너지 안보와 기후변화 대응을 위한 친환경 에너지 공급을 위해 가스터빈, SMR, 재생에너지, 수소 사업을 중심으로 역량 집중
고온가스로	국외	현대건설 •현대건설은 토목, 건축, 주택, 플랜트, 에너지 등 다양한 사업 분야에서 경쟁력을 높여 왔으며, SMR의 설계와 시공을 수행함으로써 원자력 사업의 전체 밸류체인을 강화하고자 노력 중
		X-Energy (미국) •X-Energy는 헬륨을 냉각재로 사용하는 고온가스로 Xe-100을 개발 중이며, 2020년 10월에 미국 DOE의 차세대 원전 실증로 건설 프로그램에 선정되어 2027년까지 Xe-100 상업운전을 위한 개발 자금 지원 받을 예정
	국내	USNC (미국) •MMR은 USNC이 개발한 5MWe 출력의 고온가스냉각로이며, 핵연료로는 FCM 연료 사용
		두산에너지빌리티 •두산에너지빌리티는 NuScale Power와의 전략적 협력관계 구축을 통한 경수로 제작 기술 개발뿐 아니라 X-Energy와의 협력을 통한 고온가스로 제작 기술 개발 또한 추진 중
		포스코이앤씨 •포스코이앤씨는 2024년 7월 15일 한국원자력연구원과 ‘고온가스로(HTGR) 개발 사업 협력’을 위한 업무협약 체결

구분		주요 플레이어	주요 내용
액체 금속 냉각 고속로	국외	DL이앤씨	•DL이앤씨는 2023년 1월 미국 X-Energy에 2,000만 달러 규모의 전략적 투자를 진행하였고, 2024년 2월에는 한전KPS와 함께 미국 X-Energy와 고온가스로 Xe-100의 사업 개발과 시운전, 유지 보수 기술 개발을 위한 업무협약 체결
		SK에코플랜트	•SK에코플랜트는 현대엔지니어링, USNC와 '수소 마이크로 허브' 구축을 위한 3자간 MOU 체결
		TerraPower (미국)	•소듐냉각고속로 Natrium 원자로를 개발 중이며 안전성과 핵연료 이용 측면에서 강점 보유
	국내	ARC (캐나다)	•ARC는 2018년 7월 2030년 상업운전 목표로 캐나다 뉴브런즈윅에 100MWe의 소듐냉각고속로 ARC-100 개발 착수
		Westinghouse (미국)	•eVinci는 Westinghouse에서 개발하고 있는 출력 200kW에서 15MW 범위의 MMR
		SK그룹	•SK주식회사와 SK이노베이션은 전 세계의 탈탄소화를 향한 움직임에 발맞춰 화석 에너지원의 대체·청정화를 통해 무탄소 전력 생산·소비를 확대하는 데 기여하고자 노력 중
용융염 원자로	국외	현대건설	•현대건설은 2024년 6월 11일 한국원자력연구원과 '민관 합작 소듐냉각고속로(SFR) 개발사업에 관한 업무협약' 체결
		HD현대	•HD현대 계열사인 한국조선해양은 2022년 TerraPower와 3,000만 달러 규모의 투자계약을 체결하며 차세대 에너지 기술 분야에 본격 진출
		Terrestrial Energy (캐나다)	•Terrestrial Energy는 190MWe의 용융염원자로인 IMSR을 개발 중
	국내	Moltex (영국)	•영국의 Moltex가 개발하고 있는 SSR은 모듈 하나의 출력이 150MWe이며, 한 플랜트에 8기의 원자로 모듈을 설치하여 1,200MWe까지 출력을 낼 수 있도록 하는 용융염원자로
		Seaborg (덴마크)	•2014년 덴마크에서 설립된 Seaborg Technologies는 바지선에 배치될 수 있는 CMSR를 개발 중
		삼성중공업	•삼성중공업은 원자력 추진 선박 기술 및 기자재 개발과 용융염원자로 기반의 부유식 원자력 발전 설비 개발 추진 중
	HD현대	•HD현대는 조선사업을 시작으로 해양플랜트, 기계, 로봇, 에너지 등으로 사업 영역을 넓히며 성장했으며, 계열사인 HD한국조선해양은 SMR을 미래 선박 에너지원으로 연구 개발 추진 중	

기업 현황조사 (설문조사)

1) 기업 현황조사 개요

- **(설문 목적)** 기도출된 주요 이슈(안) 및 선도기술(안)의 우선순위 선정 및 기업의 주요 애로사항, 지원 필요사항에 대한 현황 파악을 위한 기업 설문조사를 실시하여 정책과 제 도출 시 근거자료로 활용
- **(설문 방법)** 차세대 원자로 산업에 종사하는 기업 전문가를 대상으로 주요 이슈(안) 및 선도기술(안)의 우선순위와 기업의 애로사항 등을 대해 파악할 수 있도록 설문조사지 설계 후 조사·분석 실시
- **(설문 대상)** 차세대 원자로 산업 관련 각종 협·단체 회원사 30명
- **(설문 기간)** 2024.11.11.(월) ~ 11.29.(금)(약 3주간)
- **(설문 항목)** 차세대 원자로 산업의 주요 이슈(안) 및 선도기술(안) 적합성·중요도, 그 외 산업 내 이슈/기술/정책 관점에서의 기업 현황 파악할 수 있도록 설문 항목 설계
 - **(주요 이슈)** 주요 이슈(안)에 대한 중요도, 시급성, 영향력을 종합적으로 고려하여 우선순위 평가
 - **(선도기술)** 선도기술(안)에 대한 유망성, 경제적 효과, 기술적 경쟁력을 종합적으로 고려하여 우선순위 평가

〈표 IV-5〉 (참고) 주요 이슈 및 선도기술 평가지표 정의

구분	평가지표	세부내용
주요 이슈	중요도 (Importance)	• 산업 내 이슈의 발생 빈도 및 지속 기간 • 시장 및 정책의 관심도(뉴스, 보고서, 언급 빈도) • 해당 산업 내 기업이 생각하는 이슈의 주목도
	시급성 (Urgency)	• 문제해결이 지연될 경우 발생가능한 피해 규모(경제적 손실, 규제 불이익 등)어간조절 • 경쟁국 대비 대응 속도 차이로 생기는 리스크 • 해당산업내 기업경영에서 생각하는 문제 해결 시급성
	영향력 (Impact)	• 산업 전반에 미치는 영향력의 크기(타 기술/기업 활동과의 연관성) • 이슈 해결 시 기대되는 국내 기업 내 파급 효과(경제 성장, 고용 창출 등)
선도 기술	유망성 (Promising Potential)	• 산업 내 국내 기업의 미래 성장을 위해 필요한 기술 및 투자분야 여부 • 최근 연구개발이 많이 이루어지는 분야
	경제적 효과 (Economic Impact)	• 기업경영에 있어서 비용 절감 효과(생산성 향상, 자원 효율성 증가 등) • 새로운 시장 창출 및 기존 시장 확장 가능성 • 기술 상용화로 인한 예상 매출 증가
	기술적 경쟁력 (Technological Competitiveness)	• 주요 경쟁국 대비하여 경쟁력 수준 • 글로벌 경쟁력 확보를 위해 필요한 부분

2) 기업 현황조사 결과

■ 주요 이슈(안) 설문조사 결과

- 정량 분석을 통해 도출된 차세대 원자로 산업의 주요 이슈(안) 10개에 대해 산업 전문가를 대상으로 중요도, 시급성, 영향력을 종합적으로 고려하여 우선순위에 대해 설문조사를 실시하여 아래와 같은 분석 결과를 도출
- 설문 분석 결과, 기업에서 중요하다고 응답한 상위 5위 주요 이슈(안)은 ‘차세대 원자로 규제 마련 신속화’, ‘청정에너지 공급 안정성’, ‘차세대 원자로 경제성 확보’, ‘차세대 원자로 공급망 선점’, ‘비수냉각 원자로의 기술적 도전’ 순으로 확인

〈표 IV-6〉 주요 이슈(안) 설문조사 결과

순위	구분	주요 이슈명	정의
1	사회적 이슈	차세대 원자로 규제 마련 신속화	•SMR 상용화를 위해서는 소형화 및 분산 설치 특성을 반영한 맞춤형 규제와 인허가 체계의 정비가 필수 •대형원전과 기술적 특성이 다른 SMR에 적합한 전문 규제 기술 및 조직 확보 요구
2	사회적 이슈	청정에너지 공급 안정성	•도심 및 산업단지에 적합한 무탄소 분산에너지로서 SMR이 활용될 수 있도록 높은 안전성과 소규모 부지에 설치할 수 있는 기술력과 경제성 확보 •반도체공장과 데이터센터에 전기 및 열에너지를 공급하여 가스 발전을 대체할 수 있는 능력을 보유
3	경제적 이슈	차세대 원자로 경제성 확보	•SMR은 설계와 인프라 구축에 상당한 비용이 소요되며, 특히 실증 단계에서 자금 조달이 중요한 문제로 대두
4	경제적 이슈	차세대 원자로 공급망 선점	•국내 SMR 기업들은 글로벌 기업들과의 협력을 통해 기자재 공급과 투자 확대를 추진하며 해외시장 진출을 계획함으로써 글로벌 SMR 공급망 선점 도모
5	기술적 이슈	비수냉각 원자로의 기술적 도전	•SMR 비수냉각 노형은 기존 경수로 대비 인허가 시 현성이 낮아 원자로 실증이 필수 •경수로 대비 높은 온도의 증기 생산이 가능하고 폐기물 발생량이 적은 장점이 있으나, 기기를 공급할 수 있는 기업이 없어 공급망 형성 필요
6	사회적 이슈	글로벌 표준 규제 대응 필요성 확대	•SMR이 국제 시장에서 경쟁력을 확보하기 위해서는 미국 NRC와 같은 국제적으로 인정받는 규제 기준에 부합하는 표준화된 안전 규제 체계 마련이 필수적

순위	구분	주요 이슈명	정의
7	사회적 이슈	국제 협력 및 민간 협력 추진	•한국은 SMR을 포함한 차세대 원자로 개발 및 상용화를 위해 미국, 영국 등 여러 국가와 공동 연구를 추진 중 •국내외 민간 기업과 차세대 원자로 설계 및 공급망 확보를 위한 기업 간 협력 체계 마련 필요
8	기술적 이슈	시장경쟁력 확보를 위한 노형별 안전성 검증 기술 개발	•SMR은 SFR, HTGR, MSR 등 다양한 설계와 냉각 방식을 사용하므로 노형별 안전성 검증 기술의 개발이 필요하며, 나아가 안전규제체계 확립 필요
9	기술적 이슈	탄력운전 기술 개발	•재생에너지의 간헐성을 보완하기 위해 SMR의 탄력적 운전이 필요하므로 주파수 제어, 자동발전제어 등 실시간 출력 증감발을 위한 핵연료 안정성 등 추가 기술 개발 필요
10	경제적 이슈	원자력수소 생산단가 경쟁력 확보	•대량의 열과 전기를 안정적으로 공급 가능한 원전은 저온수전해(대형원전)뿐 아니라 고온수전해(고온가스로 + 대형원전)에도 적용하여 다른 무탄소원 대비 경제적인 수소 생산 가능

■ 선도기술(안) 설문조사 결과

- 정량 분석을 통해 도출된 차세대 원자로 산업의 선도기술(안) 3개에 대해 기업 전문가를 대상으로 중요도, 시급성, 영향력을 종합적으로 고려하여 우선순위에 대해 설문조사를 실시, 아래와 같은 분석 결과를 도출*

*차세대 원자로 산업의 경우 기존 10개 선도기술의 우선순위에 대해 조사 후 각 기술이 속하는 선도기술(안)별로 조사 결과 평균을 산출하여 선도기술(안)의 우선순위 도출

- － 설문 분석 결과, 기업에서 중요하다고 응답한 선도기술(안)은 원자로 안전 및 사고 대응 기술, 원자로 설계 및 운용 최적화 기술, 핵연료 설계 기술 순으로 확인

〈표 IV-7〉 선도기술(안) 설문조사 결과

순위	선도기술명	정의
1	원자로 안전 및 사고 대응 기술	•원자로 및 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 사고와 이상 상황을 예방하고, 비상 시 신속하게 대응하기 위해 설계된 기술로, 방사선 누출, 핵반응 제어 상실, 열폭주와 같은 위험 요소를 최소화하고 설비와 주변 환경의 안전성을 확보하는 것이 목표 •원자로 정지 후 발생 잔열 제거 기술, 원자력 발전소의 안전장치 기술, 원자로 설비 감시 및 검사 기술 등 포함

순위	선도기술명	정의
2	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	•원자로의 효율적이고 안정적인 운영을 위해 핵심 부품과 시스템을 설계하고 최적화하는 기술로, 원자로의 성능을 극대화하고 운용 안전성을 확보하기 위해 열 및 중성자 흐름의 조정, 구조적 설계 개선, 최적의 운전 조건 도출 등을 목표로 하며, 시뮬레이션과 데이터 기반 검증을 통해 설계의 신뢰성을 강화 •중성자 흡수 및 제어요소 설계기술, 원자로 냉각재 흐름 촉진 및 열제어 기술, 열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술, 열중성자로 설계 및 감속재·냉각재 최적화 기술, 원자로 연료 요소 구조 및 열교환 최적화 기술, 원자로 설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술 등이 포함
3	핵연료 설계 기술	•원자로에서 사용되는 핵연료의 성능과 안정성을 극대화하기 위해 연료의 형태, 재료, 조성 및 구조를 설계하고 개발하는 기술 •고체상 및 세라믹 핵연료 설계 기술 등이 포함

차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

5

Chapter

향후 전망

1. 차세대 원자로 산업 전반
2. 경수로
3. 고온가스로
4. 액체금속냉각고속로
5. 용융염원자로

차세대 원자로 산업 전반

1) 시장 전망

가. 단기

■ 서구권에서는 인허가 기준 마련과 함께 시장 선점을 위한 실증사업에 집중 전망

- 뚜렷한 수요가 있는 석탄발전소 대체와 신규 원전 등 무탄소 발전 시장에 정부 지원을 통해 신규 원전 건설 사업 추진 예상
 - 상당부분의 무탄소 전원은 기존 대형원전과 재생에너지가 담당하고 차세대 원자로는 석탄 발전 대체, 데이터센터 등 신규 수요 목적으로 개발 중
 - 다양한 SMR 중 실증부지를 확보하고, 기술성숙도가 높으면서 판매처가 확보된 원자로가 실증사업을 추진할 수 있을 것으로 예상

*Holtec의 SMR-160 : 뉴저지주의 Oyster Creek 원전 부지에 실증 예정, 우크라이나 재건 협약
TerraPower의 Natrium : DOE는 설계 개발 및 초도호기 건설에 12억 달러 지원, 실증부지 확보
NuScale Power의 VOYGR : 가장 높은 인허가성('20년 8월 최초로 SMR에 대한 설계인증 확보)

- 산업공정열 분야는 기후협약 이행을 위해 무탄소 고온증기 공급열이 제공 가능한 가스로의 실증을 추진할 것으로 전망

*X-Energy의 Xe-100 : 다우 케미칼 화학공업단지에 고온 증기 공급 실증사업 추진 중

■ 장기간 대규모 투자가 요구되므로 기술력, 자금력이 건전한 기업 중심으로 재편

- 초도기는 건설비가 비싼 점을 고려하여 전기요금이 비싸거나 보조금 지원이 가능한 시장부터 진입 가능

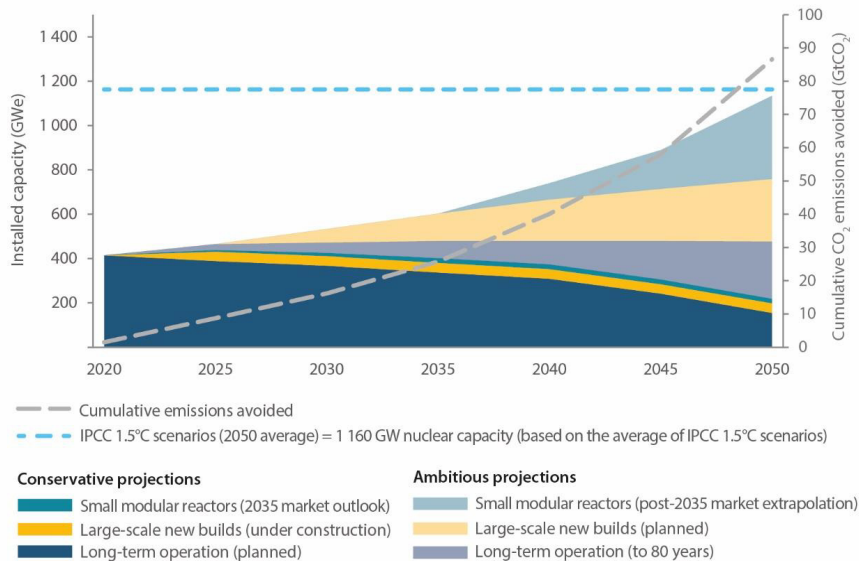
*NuScale Power가 추진한 유타사업은 재생에너지 발전단가가 낮고, 가스발전 등 경쟁에너지와 가격경쟁력이 뒤쳐진 상황에서 무리하게 추진한 것으로 평가

- 10년 이상 조단위의 투자가 이뤄져야하는 원자로 사업 특성상, 정부 지원을 받지 못하거나 기술력이 뒤처져 민간 자금 확보가 어려운 기업의 이탈 예상
 - 대부분의 SMR 개발 기업들은 기술기업으로, 자유 시장에서는 선두 기업에 투자하는 경향을 고려하면 기술력이 뒤처지는 회사들의 폐업 혹은 사업구조 재편 예상
 - * 최근 USNC는 추가자금 확보 실패로 핵연료 부문 매각과 원자로 설계 부문 폐쇄 결정
 - 그에 반해 X-Energy, TerraPower 등 정부 지원금을 확보하거나 Holtec 등 모기업의 지원을 받고 있는 원자로는 안정적인 사업 추진 예상
 - * X-Energy, TerraPower는 미국 에너지부(DOE)는 ARDP프로그램으로부터 초도기 건설사업 자금 확보

나. 장기

■ 전기화와 기후변화 협약 이행을 위해 무탄소 전원 공급시장 확대 지속

- IPCC 1.5°C 시나리오를 달성하기 위해서 대형원전뿐 아니라 신규 진입하는 전기 수요에 차세대 원자로가 필요하다고 평가⁸⁴⁾
 - 송전망이 연결된 시장에서는 대형원전이 기저부하를 담당하고, 차세대 원자로를 원자로에 따라 중간부하 혹은 첨두부하용 전원 역할



[그림 V-1] IPCC 1.5°C 달성을 위한 원자력 설치 시나리오(OECD/NEA)

84) Meeting Climate Change Targets: The Role of Nuclear Energy(NEA, 2022)

- 신규 대형원전, 차세대 원자로 등 원자로 산업 확대를 위해 인허가와 전문인력 공급이 병목으로 조사되어, 규제 및 교육 시장의 확대 예상

*OECD/NEA의 원전 기업 대상 설문조사 결과 전문인력, 규제가 원전확대의 걸림돌로 지적

- 차세대 원자로의 경우 노형이 다양함에 따라 그 특성에 맞는 규제 및 운영인력 확보를 위해 교육 및 인력 전환 등이 신시장으로 등장
- 제4세대 원자로에 대한 전공자가 제한적이므로 타 전공 전문가의 유입이 이뤄져야 하며, 개발 분야와 규제 분야의 전문인력 확보 경쟁이 치열해질 것으로 예상

■ 전력망 연결이 쉽지 않은 오지나 도서 지역의 에너지 공급시장이 열릴 전망

- 캐나다와 같이 기후협약을 준수하면서 광산 등 오지에 산업을 갖고 있는 국가나 도서 국가를 중심으로 무탄소 독립에너지원으로 SMR 도입 전망

- 캐나다는 CCUS와 SMR을 광산지역에 공급할 무탄소 에너지원으로 여기고 지원 정책을 추진 중이며, 현재는 CCUS 중심이나 SMR의 가치가 높아지는 중

*Capital Power社は '24년 5월 캐나다 앨버타주에 추진 중인 CCUS 프로젝트 포기 발표⁸⁵⁾
낮은 경제성과 목표대비 포집성능이 떨어지는 것이 CCUS의 병목으로 지적⁸⁶⁾

- 섬 간 전력망 연결이 쉽지 않은 인도네시아, 필리핀 등 섬나라와 사우디아라비아, 카자흐스탄 등 국토에 비해 인구 밀도가 낮은 국가가 잠재적인 시장으로 평가

*'24년 9월 사우디아라비아의 투자를 받아 설계한 SMART-100에 대한 표준설계인가 획득

■ 고온 산업공정열 시장은 비경수형 원자로 중심의 화석연료 대체 시장으로 부상

- 대량의 공정 스팀이 필요한 석유화학, 제철, 비철, 제지 산업을 중심으로 고온 공정열 공급이 가능한 원자로에 대한 수요 발생 예상

- 기후협약 목표를 달성하기 위해 작동온도가 600℃ 이상인 비경수로가 필요하며, 고온가스의 실증과 함께 이용기술에 대한 수요가 발생할 것으로 예상
- 반도체 공장도 중간 온도의 열원이 필요한 것을 고려하면, 열과 전기 공급이 동시에 가능한 SMR이 개발된다면 신시장 창출 가능

*공장에 인접하여 원자로를 설치할 수 있는 제도 마련 필수, 단, 수용성은 고려하지 않음

- 지역난방, 스마트팜 난방 등 낮은 온도의 열공급 시장은 기존 대형원전으로도 가능하며, 비경수형 원자로의 폐열을 활용하는 방안도 모색 가능

85) Theenergymix 기사, 2024. 5. 7

86) 글로벌 에너지동향, 한전 경영연구원, 22-40호

■ 수소경제가 활성화될 경우 대규모 수소 생산을 위한 에너지원으로 대형원전과 함께 차세대 원자로가 활용될 수 있을 것으로 기대

- 포스코의 수소환원제철 기술이 상용화될 경우 대량의 무탄소 수소 공급을 위해 원자로로부터 전기 혹은 열원 공급이 요구될 전망

*수소환원 공정: 100만 톤('30)→ 300만 톤('40)→ 수소환원설비 완전 전환('50), 연간 350만 톤 수소 필요⁸⁷⁾

- 대형원전은 저온수전해 방식으로 수소를 생산하기 위해 울진군과 실증 계획을 추진 중이며, 고온가스로 연계 고온수전해 기술이 상용화될 경우 무탄소 수소 공급망을 형성할 수 있을 것으로 기대

■ IMO의 2050년까지 해운 분야 무탄소 달성 정책에 따라 원자력 추진 선박이 미래 시장으로 조명

- 선박 개발회사들은 IMO 정책이행을 위해 (단기) LNG 선박, (중기) 암모니아 선박, (장기) 원자력 추진 선박을 고려 중
 - 현재는 항공모함, 쇄빙선 등 특수 시장 분야에 국한된 원자력 추진 선박이 민수 시장으로 확대될 것으로 전망
- 선박 추진용 원자로 개발 외에 해양 원자로 이용에 대한 규제 체계 마련, 모바일 하버 등 원자력 추진 선박을 수용할 수 있는 인프라 구축 등 파생 효과 기대

87) 제1차 수소경제 이행 기본계획, 2021. 11, 정부 합동

2) 기술 전망

가. 단기

■ 차세대 원자로 실증 기술과 기기 개발에 집중

- 서구권에서는 어떤 SMR도 상용화되지 않았기 때문에 시장 선점을 위해 실증을 위한 기술 개발에 집중하는 중
 - 규제체계의 성숙화와 함께 원자로별 기본설계 완성도를 높이는 한편 모듈화, 피동 안전성 검증 등 혁신기술의 검증 기술 필요
 - 실증사업이 착수되면 초도호기에 필요한 기기 개발 수요가 증가할 전망
 - 경수로형 SMR은 상당부분 대형원전의 공급업체를 활용할 수 있으나, 비경수로형 SMR은 기기 개발에 상당 부분 투자 필요
- *TerraPower, Seaborg 등 SMR 개발 선두기업은 국내 기업들의 제조 역량에 관심이 큼

■ 고농축 핵연료 제조 기술 수요 증가

- 실증로에 사용될 차세대 원자로 핵연료 제조를 위해 요구되는 조사 시험 및 분석 기술 수요 증가 예상
- 농축도가 높은 핵물질을 사용하는 세라믹 및 금속 핵연료, TRISO, 용융염 등 다양한 형태의 핵연료 개발 기술 필요

나. 장기

■ 실증 이후 상업화 단계에 들어서면 반복건설을 통한 경제성 향상에 집중 예상

- 공장제작 효과를 극대화하기 위해 제조기술의 표준화가 중요해질 전망
 - 단기간에 고품질의 기기를 대량 생산하기 위한 절차와 공법 개발이 요구
 - 다양한 원자로 간 공유 가능한 부품 개발이나 일괄 제작 기술개발도 필요할 것으로 예상
- 고온 환경이나 방사선 환경에서 내부식성을 갖는 특수 재료에 대한 수요가 증가할 전망
 - 대부분의 비경수로형 원자로가 고온환경에서 작동하는 것을 고려할 때 신재료는 경제성 향상에 전환점을 제공할 수 있을 것으로 전망

■ 가상원전, 무인 운전 등 혁신적인 비용 절감 기술 수요 발생

- 원자로 설계 기간을 단축하고, 개발 비용을 절감하기 위해 가상원전과 같은 IT기술을 도입하는 한편, 원자로 설계 전용 슈퍼컴 개발에 대한 요구 증가 예상
*사이버 보안을 고려하여 상용언어보다는 독자적인 컴퓨팅 구축 필요
- 운영인력의 최소화를 위해 자동화뿐 아니라 인공지능을 활용한 감시 및 자동 운전 기술에 대한 수요 발생 예상

1) 시장 전망

가. 단기

■ 선진국은 대형원전의 계속운전을 중심으로 넷제로 목표 달성 추진

- 미국, 유럽, 일본 등 기존 선진국들은 대형원전의 계속운전을 지원하면서 넷제로 정책을 이행함에 따라 계속운전 시장은 점차 확대 예상
 - 가동중인 대형원전의 계속운전은 가장 저렴한 무탄소 전원⁸⁸⁾으로 평가되어 OECD/NEA 등 국제기구도 계속운전 시장이 당분간 지속될 것으로 전망
 - *미국의 발전원별 LCOE[USD/MW]: 계속운전(32), 신규원전(142~222), 가스발전(45~108)
 - 계속운전을 활용해온 미국은 80년까지 운영하는 방안도 고려⁸⁹⁾하고 있으며, 일본도 탄소 중립 목표 달성을 위해 80년까지 계속운전을 허용⁹⁰⁾

■ 신규원전은 기존의 개발도상국뿐 아니라 선진국도 도입할 전망

- 중국을 중심으로 한 개발도상국은 신규 원전 도입을 통해 무탄소 정책을 이행하고 있으며, 최근 미국과 프랑스 등 선진국들도 신규 대형원전 도입 중
 - 재생에너지 가격 하락과 신규 원전의 건설비 상승으로 한동안 신규 원전 도입 시장이 주춤했으나, 인공지능 시장의 급성장에 따라 안정적인 전기 공급원이 필요해져 대형원전 건설 수요 발생
 - *예) 미국의 보글원전은 높은 발전단가에도 안정적인 전력공급원 확보를 위해 건설 진행⁹¹⁾
美 콘스텔레이션 에너지는 전력공급을 위해 TMI 1호기 재가동 결정⁹²⁾

88) Lazard's 2024 LCOE+ report, 2024

89) Going Long Term: US Nuclear Power Plants Could Extend Operating Life to 80 Years, IAEA, 2018

90) NRA approves use of Japanese reactors beyond 60 years, WNN, 2023

91) Plant Vogtle may be the most expensive energy plant in the world and Georgians are paying for it, WUGA(조지아 지역 뉴스), 2024

- 개발도상국의 경우 선진국에 비해 에너지 수요 증가세가 크기 때문에 재생에너지와 함께 대형원전 수요가 지속될 것으로 전망⁹³⁾
- 러-우 전쟁으로 에너지 안보가 주요 이슈로 떠오름에 따라 유럽을 중심으로 한 선진국들은 신규 원전 도입에 대한 강한 수요 형성
- 스웨덴, 네덜란드 등은 원전 확대 정책을 발표했으며 이탈리아, 스위스 등도 대형원전뿐 아니라 SMR 도입을 검토 중

■ 인허가 수준이 가장 높은 SMART는 캐나다 광산 등 단기 시장 진출에 유리

- 2012년 SMART 표준설계 인가획득, 2024년 SMART-100 표준설계인가 획득으로 다른 원자로 대비 인허가 수준이 높아 빠른 시장 진입에 유리
- 캐나다는 자국내 온실가스 저감을 위해 주력 산업인 광산 운영에 사용되는 디젤 발전기를 대체하기 위해 CCUS와 소형원자로를 고려 중이며, 이 중 SMR로 약 87%를 대체할 수 있을 것으로 평가⁹⁴⁾

나. 장기

■ 석탄발전소 대체는 차세대 원자로의 가장 큰 시장으로 평가

- 미국의 석탄발전소는 90GW로 이 중 70GW는 15년 내 저탄소 발전원으로 대체될 전망⁹⁵⁾이나 대부분 미국산 원자로로 대체될 것으로 예상
- 미국 DOE는 노후 석탄발전소를 대체하기 위해 NuScale(경수로)과 Natrium(소듐냉각고속로)를 개발하고 있으며, 이미 퇴출된 석탄발전소의 43%, 현재 가동 중인 석탄발전소의 68%가 대체 가능한 것으로 분석⁹⁶⁾

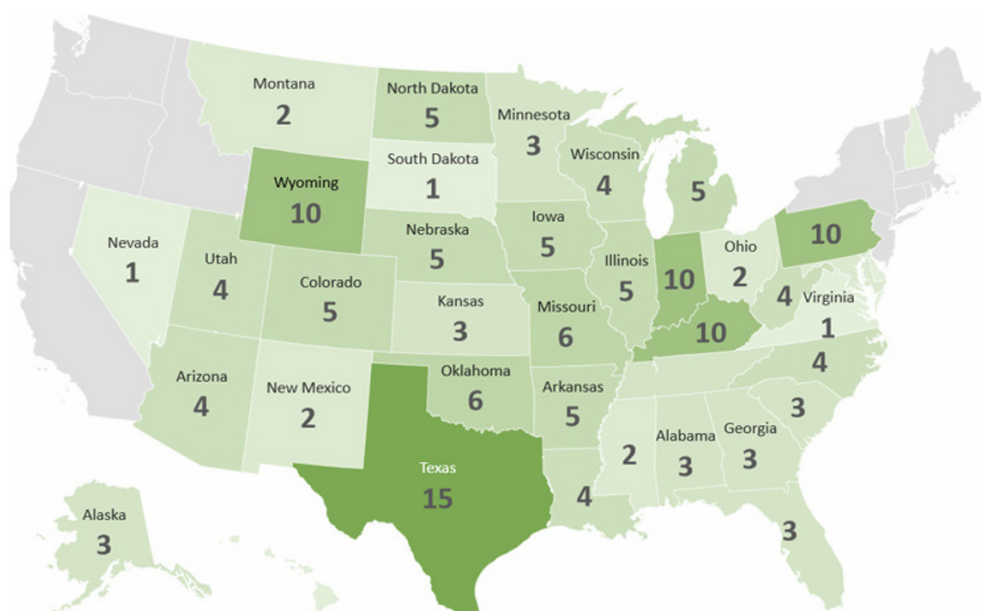
92) 미국 최악 원전사고 났던 스리마일, 원전 다시 돌린다, 조선일보, 2024

93) 케냐·남아공도 짓는다, 세계는 원전 전쟁 중, 조선일보, 2024

94) CNL charts path to net zero mining with small modular reactors, 2021, CNL

95) U.S. Energy Information Administration. "Form EIA-860 detailed data (2021 Early Release)." EIA.gov, June 2022.

96) Repowering Coal-Fired Power Plants for Advanced Nuclear Generation, EPRI, October, 2022



[그림 V-2] 미국의 가동중 석탄 발전소 중 선진원자로로 대체 가능한 수

- 전 세계적으로 노후 석탄발전소 폐쇄는 당분간 지속될 전망이며, 노후 화력발전소가 많은 국가들이 유망 시장으로 꼽히는 상황
 - 경수로 기반 SMR은 높은 수준의 인허가 준비도를 바탕으로 빠르면 2030년 중반에는 상용화가 가능하므로, 우리나라의 혁신형 SMR 용량(680MWe)과 운전특성을 고려하면 적합한 수출 상품으로 부상할 수 있을 것으로 기대
 - *혁신형 SMR은 현재 표준설계인가 사업 중으로, 빠르면 30년 중반 실증 가능
 - SMART-100을 공동개발한 사우디와 중동지역을 중심으로 해외시장 개척 시도 가능성 존재
 - *이집트, 요르단 등에 SMART-100 공급하는 방안에 대해 사우디와 협의

■ 대형 분산에너지 시장은 혁신형 SMR이 진입이 가능한 시장으로 분석⁹⁷⁾

- 혁신형 SMR을 반도체공장 인근에 지으면 추가 송전망 없이도 무탄소 전력 공급이 가능하여 반도체 수요기업이 요구하는 무탄소 목표 달성 가능
 - *용인 반도체 클러스터는 2050년까지 최소 10GW의 전력수요 발생 예상
- 구글, 애플 등 글로벌 IT 기업들의 요구에 따라 무탄소 전원을 이용해야 하나, 재생에너지 만으로는 경제적이고 안정적인 전원 공급이 현실적으로 어려움에 따라 수소 전소, 연료전지, 차세대 원자로 등이 대안으로 거론

97) K원자력에너지산업 비전 포럼, 2024

- 대형원전 대비 요구되는 냉각수량이 적고, 주요 기기들의 수송이 용이해 LNG 발전을 대체하는 수도권 분산에너지로 활용 가능
 - 다만, 주민 수용성 확보가 가장 큰 난관으로 작용할 것으로 보이며, 지역요금 차등제 등 인센티브 제공 방안이 마련되어야 시장 진입이 가능할 것으로 전망

■ KOPEC의 반디가 개발될 경우 바지선 이용 전력공급 시장 진출 가능

- 한화오션은 2020년 한국전력기술과 해양 원전 기술 공동 개발 장기협력 업무협약(MOU)을 맺고, 해양용 부유식 소형 원전인 BANDI-60을 개발 중
- 다만 국내 시장은 도서지역으로 한정되어 있어, 국내보다는 필리핀 등 해외의 도서지역 시장 진출이 적합할 것으로 전망

2) 기술 전망

가. 단기

■ 혁신형 SMR 표준설계 완성 및 초도기 건설 준비

- 혁신형 SMR 기술개발사업단을 중심으로 ‘혁신형 SMR’의 표준설계를 2028년까지 마무리하면서, 부지 선정 시 실증 기술개발 병행
 - 기존 경수로 인허가 체계에 없는 내장형 제어봉, 나선행 증기발생기 등 혁신 기술에 대한 인허가 시현성과 제작성을 입증하는 데 주력
- 초도기 실증기술의 경우 사업자 중심으로 수행되어야 하며, 주로 건설허가 신청 서류 작성에 필요한 기술 투자가 이뤄질 것으로 예상

■ SMART 수출 시 현지 건설에 필요한 기술개발 요구

- 현지 규제기관에서 요구하는 설계 기준을 만족시키기 위한 설계 보완 및 부지 상황에 맞는 수송 및 건설 방법 모색 필요
- 현지 및 국내 제작 등 기기 공급 최적화 기술 요구

나. 장기

■ 주요 기기 반복 제작 성능 확보

- 전자선 용접 등 주기기 제작 시간을 획기적으로 단축할 수 있는 첨단 제조 기술 개발
 - 개발된 기술의 인허가 시현성을 높이기 위해 비파괴 검사 및 성능평가 기술개발도 병행되어야 적기에 상용화가 가능
- 밸브, 펌프 등 비교적 많은 수가 요구되는 기기도 품질을 보증할 수 있는 공정 및 품질 관리 기술 도입 필요
 - 개발 단계부터 중소기업과 협업하여 자연스럽게 공급망을 구축할 수 있는 지원 필요

■ 혁신기기 대량생산 기술 상용화

- 내장형 제어봉, 나선행 증기발생기를 일정한 품질로 반복 생산 및 설치할 수 있는 기술 개발

1) 시장 전망

가. 단기

■ 고온가스로의 기술 개발 단계를 고려하면 원자로 실증에 주력

- 원자로에서 생산되는 고온 공정열을 이용해본 경험이 없어 원자로 실증에 집중하고 있는 상태
 - 고온가스로를 지어본 중국은 우선 전기 공급을 한 후 산업단지에 공정열을 제공할 예정
- *중국은 2023년 12월 6일 4세대 고온가스로(HTR-PM) 상업운전 개시

나. 장기

■ 전 세계적으로 중화학 공업에 무탄소 공정열을 공급하는 방안 모색 중

- 미국 내 석유화학 및 철강산업 탄소중립에 열에너지 16,681MWth, 수소 577만 톤/년이 필요하고 이를 위해서는 150MWth SMR 256기가 필요한 것으로 전망⁹⁸⁾
 - *미국은 다우 케미칼 화학공업단지에 고온 증기 공급을 위하여 X-Energy의 고온가스로인 Xe-100을 도입하는 실증사업을 진행 중⁹⁹⁾
- 캐나다 내 중공업 산업단지 증기공급 시장은 연간 120억 CAD 규모로 평가¹⁰⁰⁾
 - *화공단지, 석유정제 관련 총 85개의 중공업 단지 열에너지 대체, 평균 용량은 25~50MWe

98) Generation and Use of Thermal Energy in the U.S. Industrial Sector and Opportunities to Reduce its Carbon Emissions, INL/EXT-16-39680, 미 INL, 2016

99) Dow, X-Energy SMR deployment project progresses, March 2023, WNN

100) Canadian SMR Roadmap, Technology Working Group Report, issued October 26, 2018.

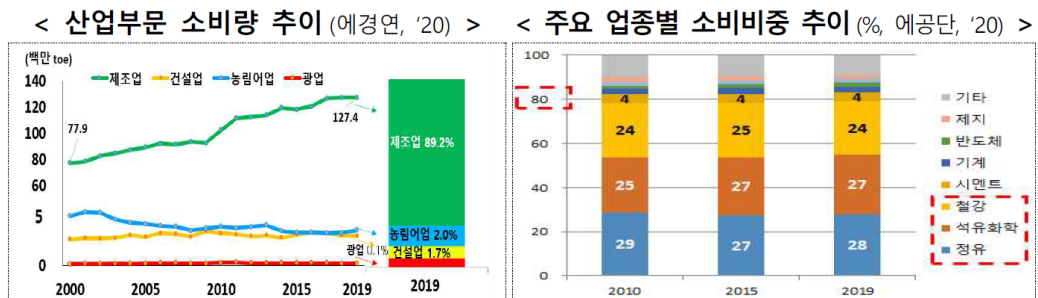
- 유럽연합의 산업공정열의 42%는 고온가스로를 활용한 500℃ 이상의 고온 공정열이며, 대부분 석유화학, 철강 및 비금속 광물 사업에 활용되는 것으로 분석¹⁰¹⁾

*연간 철강은 493TWh, 석유화학은 260TWh, 비금속광물은 240TWh의 고온열 필요 가정

- 영국의 산업공정열 시장은 연간 300TWh로 이 중 65%는 경수로보다 높은 온도의 열에너지로 150MWth SMR 228기가 필요한 것으로 조사¹⁰²⁾

■ 제조업 중심의 국내 산업환경 특성상 고온가스로의 활용 움직임 발생 중

- 국내 집단에너지사업자의 연료원별 사용량¹⁰³⁾에 따르면, 산업단지의 연료사용량이 전체의 54.8% 수준으로 절반 이상을 차지
 - 산업단지 내 연료사용량 중 LNG 및 유연탄의 사용량이 각각 404ktoe, 4,424ktoe에 해당
 - 2019년 기준, 제조업의 에너지 소비량은 1,274억toe이며 철강, 석유화학, 정유의 에너지 소비량은 각각 3,060만toe, 3,440만toe, 3,570만toe에 해당



[그림 V-3] 산업부문 에너지 소비량 추이 및 주요 업종별 에너지 소비비중 추이

- 열이용 협의체 등 고온가스로 수요 기업들이 고온가스로 기술개발 단계부터 참여하고 있으므로, 고온가스로 개발 시 시장의 상당부분을 점유할 것으로 예상
 - 시장의 빠른 형성을 위해 산업단지 인근 설치할 수 있도록 규제 체계 마련 및 지원제도가 수립 되는 한편, 원자력에서 생산된 증기를 산업체에 이용할 수 있는 기술과 기기 개발이 병행 요구

■ 공정열 외에 저온의 열이 요구되는 폐열시장도 기대 가능

- 지역난방, 농업용 난방, 양식 등 산업단지에서 1차 사용된 후 발생하는 폐열을 회수하여 이용하는 2차 시장도 잠재시장으로 분류

101) M. Rehfeldt, T. Fleiter, F. Toro, A bottom-up estimation of the heating and cooling demand in European industry, Energy Efficiency, 11(5), 1057, 2018.

102) A. I. Peakman and B. Merk, The Roles of Nuclear Power in Meeting Current and Future Industrial Process Heat Demands, Energies, 12, 3664, 2019

103) 2022 집단에너지사업자편람

- 단, 고온가스로에서 생산된 750℃ 이상의 증기를 사용하고 나오는 중저온의 폐열은 다양한 방식으로 활용 가능하나 아직은 원자로부터 발생한 폐열을 활용하는 제도적 장치가 부재

■ 친환경 연료 수요에 따라 e-Fuel* 생산 시장 진입 기대

- *재생에너지로 생산한 전력으로 전기분해하여 생산한 그린수소와 공기 중에서 포집한 이산화탄소와 결합하여 생산된 연료로, 수송 분야의 탄소배출저감에 기여할 청정연료로 기대
- 미국과 EU는 재생가능연료에 대한 구체적 목표를 제시하였으며, 이를 바탕으로 정부와 관련 기업의 e-Fuel 관련 투자가 활발하게 진행되는 중
 - 현재 발표된 프로젝트는 잠재적인 e-Fuel 공급량의 대부분이 암모니아(90%) 생산에 초점이 맞추어져 있으나, 추후 항공 및 해운 부문에서의 수요를 고려하면 FT* 연료(5%) 및 메탄올(4%)의 비중이 더욱 증가할 것으로 전망**
 - *Fischer-Tropsch(FT) 공정 : 일산화탄소와 수소를 함유한 합성가스를 액체 탄화수소로 전환시키는 과정
 - ****(독일) Haru-Oni 프로젝트**(포르쉐, Siemens Energy 참여)로 연간 130,000리터의 E-fuel 생산 예정,
(EU) Front-End Engineering and Design(FEED) 연구(Norsk e-Fuel 주도) RWGS-FTS 반응을 통해 항공 산업에 필요한 SAF 생산 프로젝트 수행 중, (EU) Arcadia efuel 컨소시엄 주도로 덴마크 보딩보르크에서 E-fuel 생산공정 시설 건설 중
- 우리나라는 탄소배출 규제에 의해 재생가능연료(SAF* 등)에 대한 수요가 항공 분야 및 정유·석유화학 분야를 중심으로 형성 중
 - *지속가능한 항공유(Sustainable Aviation Fuel, SAF) : 화석연료가 아닌 폐식용유/생활폐기물/산업 부생가스/바이오매스 등 대체 원료로 생산된 항공유로, SAF의 제조 공정에 수소 필요
 - 현재 국내 생산 중인 재생가능 연료는 없으며, 해외 에너지 기업(Shell 등) 및 물류기업을 통해 한정적으로 공급 중
 - 국내 생산 시설이 갖춰질 경우 항공사(대한항공 등) 및 정유회사(GS 칼텍스 등)에 공급 가능할 것으로 전망

2) 기술 전망

가. 단기

■ 민관 합작사업을 통해 기본설계 완성

- 출연연이 보유한 고온가스로 설계기술을 민간기업으로 이전하기 위한 민관합작 고온가스로 설계사업 추진 중
 - 포스코이앤씨를 중심으로 롯데케미컬 등 고온 산업공정열 이용에 관심이 큰 기업들이 컨소시엄을 이뤄 고온가스로 설계 기술개발 역량을 확보할 계획
 - 고온가스로용 핵연료 제조 기술은 국제협력과 국내 자체기술 개발을 병행하여 확보 예상
- *X-Energy, USNC 등은 고온가스로 핵연료 기술을 보유 중

나. 장기

■ 원자로 상세설계 및 초도기 건설기술 개발

- 주요 기기 및 핵연료 검증 등 건설허가에 필요한 기술과 함께 주요기기 배치 및 건설 기술 개발 요구
 - 부지 특성을 고려한 안전성 및 선원향 평가 기술 등 미보유 기술 확보 필요
- 고온가스로용 핵연료 제조 기술 및 조사 시험 데이터 확보

■ 주요 기기 및 이용 기술 확보

- 헬륨 공급 장치 등 고온가스로에만 요구되는 기기의 설계 및 제작 기술 확보
- 원자로에서 생산된 고온 증기의 수송 및 이용 기술 개발이 원자로 완성 시기에 맞춰 완성 필요

액체금속냉각 고속로

1) 시장 전망

가. 단기

■ 기술성을 고려하면 단기적으로 원자로 실증과 기술개발 시장만 존재

- 정부와 민간이 합작으로 기술 개발 중으로, 연구산업 중심으로 시장 형성 기대

나. 장기

■ 제11차 전력수급기본계획에서 언급된 무탄소용량시장에 진입 가능

- 열저장장치와 결합된 액체금속냉각고속로는 매우 유연한 전력공급이 가능하여 새롭게 열릴 무탄소용량시장에 적합한 것으로 판단
 - 2038년까지 10.6GW의 무탄소 전원이 추가로 필요할 것으로 예상하였고, 시장에 진입가능한 발전원으로 수소전소, 태양광+BESS, SMR 등이 고려

■ 반도체공장 및 데이터센터 에너지 공급원으로 활용 기대

- 반도체 기업들은 단기간엔 가스발전으로 전력수요에 대응할 것이나 대형원전과 함께 SMR을 통한 전력공급으로 무탄소 목표 달성을 고려 중
 - 용인 반도체 클러스터만 최소 10GW 전력이 필요하고 2029년까지 신규 데이터센터 전력 수요만 49GW에 달할 것으로 전망¹⁰⁴⁾

104) 금융소비자뉴스(<http://www.newsfc.co.kr>), 한국경제인협회 초청간담회 발언 내용

- 순간 정전도 용납되지 않는 반도체 공장 특성상 불시 정지에도 전력 공급이 가능한 열저장 장치 결합 액체금속냉각고속로는 최적의 에너지공급원으로 평가
- 점차 대형화되고 있는 데이터센터의 독립전원으로 활용하는 방안 논의 중
- 데이터센터의 대부분이 수도권에 위치할 것으로 예상되는바, 필요한 전력을 전력망에서 확보해야 하지만 송전망 확충이 지연되는 것이 사업 확장에 병목¹⁰⁵⁾
- 분산에너지에서 필요한 전력을 공급받을 경우 데이터센터 운영 패턴에 따른 부하 변동에 대응할 수 있어야 하며, 소듐냉각고속로가 기술적으로 적합

105) 반도체 생태계 종합지원 방안 추진상황 및 향후 계획, 2024, 기재부

2) 기술 전망

가. 단기

■ 민관 합작을 통한 기본설계 완성

- 분산형 전원 등 새로운 무탄소 전력시장에 진입할 목적의 소형원자로 개발에 민관합작 SMR 개발 사업 추진 예정
 - 민관합작 한국형 소듐냉각고속로 개발사업을 2025년부터 4년간 진행 예정
 - 핵연료 교체없이 20년 장주기 운전이 가능한 원자로와 열저장 시스템을 결합한 발전시스템에 대한 기본설계 추진

나. 장기

■ 민관합작 설계사업의 후속으로 초도기 건설사업 추진

- 초도기 건설에 필요한 건설허가 준비 및 상세설계 진행
 - 기본설계에 참여한 기업을 중심으로 정부의 지원을 받아 실증 준비사업을 추진
- 초도기 운영회사 확보 후 운영기술과 함께 건설 사업 추진
 - 국내외 운영 경험이 보유한 회사와 합작하여 운영허가에 필요한 기술력을 확보
 - *혁신형 SMR 운영 사례를 참조하여 운영회사 확보
- 초도기 건설에 필요한 기기 및 부품 개발

■ 고속로 이용 사용후핵연료 부피 및 독성 감용기술을 완성

- 초기에는 사용후핵연료 재활용 기술이 민간 사업으로 활용되지만, 민간 사업이 활성화된 후에는 기기 개발 핵연료 제조시설 등을 역으로 이용 가능
- 적기에 기술을 공급하기 위해서는 사용후핵연료 처분장 확보 일정에 맞춰야하므로 현재의 사용후핵연료 소각기술개발 사업을 지속
 - 원자로 기술 외에 사용후핵연료를 취급할 수 있는 후행핵주기(파이로) 기술 개발과 병행

1) 기술 전망

가. 단기

■ 다른 원자로형에 비해 기술수준이 가장 낮아 R&D 시장만 존재

- 현재 원천기술개발 단계로 향후 10년간 기술성숙도를 높이는 데 주력할 계획
 - 원천기술개발 단계부터 민간과 공동개발을 통해 시장 진입 시기를 최대한 앞당길 계획
- *해양 용융염원자로 원천기술개발사업에 현대건설, HD한국조선해양, 삼성중공업 등 참여 중

나. 장기

■ 대형 고속 컨테이너선 등 미래 선박 시장 진출 모색

- 해양환경 규제 정책을 이행하기 위해 무탄소 추진선박 시장이 열리는 중으로 2050년까지 해운분야 탄소중립 달성을 목표로 제시
 - IMO는 2016년 국제해운부문의 탄소중립(Net Zero) 목표연도를 2100년으로 설정하였으나, 2023년 7월 목표연도를 2050년으로 앞당김
 - 2021년 EU 의회 이사회 및 집행위원회는 EU Fit for 55 통합 법안을 통해 2024년부터 EU 배출권 거래 시스템(ETS)을 해운산업에까지 확대 적용 의결
- 2023년 2월 우리나라 정부는 국제해운부문의 온실가스 감축 강화 국제동향을 반영하여, 2050 국제해운 탄소중립 목표 설정¹⁰⁶⁾

*국제해운 탈탄소화 추진전략, 해양수산부

106) 2050 탄소중립녹색성장위원회(2023.2.), 국제해운 탈탄소화 추진전략

■ 미래 해양산업인 해양플랜트와 해양도시에 에너지 공급원으로 활용 가능

- 해양 플랜트는 대표적인 미래 해양산업으로 작은 시설에 비교적 많은 열 및 전기가 요구되는 산업으로 용융염원자로를 고려 중
 - 특별한 장치 없이 출력조절이 쉬워 독립전원으로 적합하므로, 해양플랜트에서 성능과 경제성이 입증된다면 장기적으로 육상의 분산에너지로 활용 가능
- 해양 산업의 최종 목표인 해양 및 해저 도시에 에너지 공급원으로 활용 가능

2) 기술 전망

가. 단기

■ 용융염원자로 개념 및 기본 설계 완성

- 해양용 용융염원자로 기술개발 사업단에 참여하고 있는 민간 기업과 합동으로 용융염원자로 개념 설계완성
 - '26년까지 핵심기술을 개발할 예정이며, 이를 기반으로 기본설계까지 완성할 신규 예타 사업 기획 중
- 전 세계적으로 운영된 경험이 없는 용융염고속로의 기초적인 인허가 데이터 확보를 위해 필요한 임계로 확보 추진

나. 장기

■ 개발된 용융염원자로의 상용화를 위한 기술개발 추진

- 중국은 토륨 기반 실험용 용융염원자로(2MWth) 운영허가 획득 후 노르웨이 선급협회(Det Norske Veritas, DNV)로부터 용융염원자로 탑재 24,000TEU급 컨테이너선 개념 설계 승인(Approval in Principle, AIP) 획득('23.12)
- 덴마크 Seaborg Technologies는 저농축우라늄을 이용한 불소염 기반의 CMSR를 28년 가동을 목표로 개발 중이며 24년의 설계 수명과 12년의 연료 교체 주기로 선박당 2~8기의 원자로(각 100MW)를 설치 계획
- 영국 CorePower社は 미국 TerraPower社에서 개발 중인 MSR을 해양에 적용하기 위해 세계 최대 해운사인 머스크社와 원자력선 안전 관련 연구 추진 발표('24.8)

차세대원자로

NEXT-GENERATION NUCLEAR REACTOR

6

Chapter

전략 과제

1. 과제도출 전략
2. 전략 과제

과제도출 전략

- **(도출 개요)** 차세대 원자로 산업 현황 파악 및 빅데이터 분석, 기업 현황조사 및 전문가 자문 결과를 종합하여 도출된 주요 이슈 및 선도기술, 향후 전망을 토대로 향후 산업경쟁력 향상을 위한 대응전략 차원의 정책과제 12개 도출

- 정책입안자가 산업정책 기획 시 기초자료로 활용할 수 있도록 일반적인 세부과제 단위보다 상위 사업 수준의 정책 방향 도출을 목표로 과제도출 추진

- **(도출 방안)** 과제 도출은 ① 주요 이슈 및 선도기술 최종 선별, ② 과제 후보 Pool 도출, ③ 이슈 및 기술 매칭, ④ 최종 과제 도출 총 4단계의 과정을 거쳐 진행

- ① **(주요 이슈 및 선도기술 최종 선별)** 빅데이터 분석 및 기업 현황조사를 통해 도출된 주요 이슈 및 선도기술 우선순위에 대한 차세대 원자로 분과위원회(3차) 검토의견을 종합하여 최종 선별

- 기업 설문 등을 통해 도출된 주요 이슈 및 선도기술 우선순위에 대해 분과위원회 검토의견을 수렴하여 보완하고, 최종적으로 과제 작성에 반영할 주요 이슈 및 선도기술을 도출

- ② **(과제 후보 Pool 도출)** 효과적이고 시의성 있는 정책 대응을 위한 과제 도출이 가능하도록, 현재 당면한 이슈·문제 해결과 기술경쟁력 확보 관점에서 대응할 수 있는 과제 후보 Pool을 구성

- ③ **(이슈 및 기술 매칭)** 주요 이슈 및 선도기술을 과제 후보 Pool에 매칭하고, 매칭 결과에 대한 분과위원회 검토를 통해 최종과제 후보를 선정

- ④ **(최종 과제 도출)** 주요 이슈 및 선도기술별로 매칭된 과제 후보군에 대해 분과위원회의 종합적인 논의를 거쳐 과제 작성을 위한 업무분장* 후 최종 12개의 과제를 도출

*과제마다 매칭된 주요 이슈 및 선도기술별로 높은 전문성을 보유한 분과위원이 해당 과제를 담당하여 작성 및 정리하고, 구체화(배경 및 필요성, 주요 내용, 기대효과) 실시

〈표 VI-1〉 주요 이슈 최종 도출 결과

주요 이슈	정의	우선순위
차세대 원자로 규제 마련 신속화	•SMR 상용화를 위해서는 소형화 및 분산 설치 특성을 반영한 맞춤형 규제와 인허가 체계의 정비 필요 •대형원전과 기술적 특성이 다른 차세대 SMR에 적합한 전문 규제 기술 및 조직 확보 요구	1
청정에너지 공급 안정성	•도심 및 산업단지에 적합한 무탄소 분산에너지로서 SMR이 활용될 수 있도록 높은 안전성과 소규모 부지에 설치할 수 있는 기술력과 경제성 확보 •반도체공장과 데이터센터에 전기 및 열에너지를 공급하여 가스 발전을 대체할 수 있는 능력을 보유	2
차세대 원자로 경제성 확보	•SMR은 설계와 인프라 구축에 상당한 초기 비용이 소요되며, 특히 실증 단계에서 자금 조달이 중요한 문제로 대두	3
차세대 원자로 공급망 선점	•국내 SMR 기업들은 글로벌 기업들과의 협력을 통해 기자재 공급과 투자 확대를 추진하며 해외 시장 진출을 계획함으로써 글로벌 SMR 공급망 선점 도모	4
비수냉각 원자로의 기술적 도전	•SMR 비수냉각 노형은 기존 경수로 대비 인허가 시현성이 낮아 원자로 실증이 필수 •경수로 대비 높은 온도의 증기 생산이 가능하고 폐기물 발생량이 적은 장점이 있으나, 기기를 공급할 수 있는 기업이 없어 공급망 형성 필요	5

〈표 VI-2〉 선도기술 최종 도출 결과

선도기술	정의	우선순위
원자로 안전 및 사고 대응 기술	•원자로 및 원자력 발전소에서 발생할 수 있는 사고와 이상 상황을 예방하고, 비상 시 신속하게 대응하기 위해 설계된 기술로, 방사선 누출, 핵반응 제어 상실, 열폭주와 같은 위험 요소를 최소화하고 설비와 주변 환경의 안전성을 확보하는 것이 목표 •원자로 정지 후 발생 잔열 제거 기술, 원자력 발전소의 안전장치 기술, 원자로 설비 감시 및 검사 기술 등 포함	1
원자로 설계 및 운용 최적화 기술	•원자로의 효율적이고 안정적인 운영을 위해 핵심 부품과 시스템을 설계하고 최적화하는 기술로, 원자로의 성능을 극대화하고 운용 안전성을 확보하기 위해 열 및 중성자 흐름의 조정, 구조적 설계 개선, 최적의 운전 조건 도출 등을 목표로 하며, 시뮬레이션과 데이터 기반 검증을 통해 설계의 신뢰성을 강화 •중성자 흡수 및 제어요소 설계기술, 원자로 냉각재 흐름 촉진 및 열제어 기술, 열을 냉각재에 이송하는 통로의 구조 또는 배치 기술, 열중성자로 설계 및 감속재·냉각재 최적화 기술, 원자로 연료 요소 구조 및 열교환 최적화 기술, 원자로 설계 최적화·검증·시뮬레이션 기술 등이 포함	2
핵연료 설계 기술	•원자로에서 사용되는 핵연료의 성능과 안정성을 극대화하기 위해 연료의 형태, 재료, 조성 및 구조를 설계하고 개발하는 기술 •고체상 및 세라믹 핵연료 설계 기술 등이 포함	3

전략 과제

〈표 VI-3〉 전략 과제 총괄표

산업	주요 이슈	선도기술	과제명	사업 유형
차세대 원자로	차세대 원자로 규제 마련 신속화	원자로 설계 및 최적화 기술	① 차세대 원자로 개발을 위한 설계-심사 디지털 전환 기술 연구	• 기반구축 • 법·제도·규제 개선
	차세대 원자로 규제 마련 신속화	-	② 해양 SMR 도입을 위한 법 및 규제 구축 방안 연구	• 법·제도·규제 개선
	청정에너지 공급 안정성	원자로 안전 및 사고 대응 기술	③ 혁신형 SMR 실증 지원 기술개발	• 기반구축
	청정에너지 공급 안정성	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	④ SMR 다목적 활용을 위한 최적화 알고리즘 개발	• 연구개발
	청정에너지 공급 안정성	-	⑤ 고온가스로 실증을 위한 인허가 기반 마련	• 기반구축 • 법·제도·규제 개선
	차세대 원자로 경제성 확보	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	⑥ SMR 경제성 향상을 위한 혁신제조 소재·장비·기술 개발	• 연구개발 • 인력양성
	차세대 원자로 경제성 확보	핵연료 설계 기술	⑦ 경수로형 SMR 및 대형원전의 경제성 향상을 위한 차세대핵연료(LEU+) 기술개발	• 연구개발 • 인력양성
	차세대 원자로 공급망 선점	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	⑧ 사용후핵연료 운반저장용 중성자 흡수 복합소재 기반구축 사업	• 기반구축
	차세대 원자로 공급망 선점	-	⑨ 선진원자로 산업 생태계 조성 사업	• 기반구축
	비수냉각 원자로의 기술적 도전	원자로 안전 및 사고 대응 기술	⑩ SMR을 포함한 차세대 원전의 구조물 안전성 향상 및 방사성 폐기물 최소화를 위한 저방사화 콘크리트 구조물 개발	• 기반구축
	비수냉각 원자로의 기술적 도전	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	⑪ 민관합작 무탄소 산업공정열 공급용 차세대 원자로 개발	• 연구개발 • 기반구축
	비수냉각 원자로의 기술적 도전	원자로 설계 및 운용 최적화 기술	⑫ 고온가스로 실증사업 개발 및 플랜트 종합설계 기술개발	• 기반구축

[과제 1] 차세대 원자로 개발을 위한 설계-심사 디지털 전환 기술 연구

관 련 이 슈	차세대 원자로 규제 마련 신속화
관련 선도기술	원자로 설계 및 최적화 기술
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선(✓) 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학() 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● **(산업현황)** 차세대 원자로는 안전성과 경제성을 개선하고, 다양한 활용분야를 통해 탄소중립 시대의 핵심 기술로 주목

- 경수형 SMR을 비롯하여 비경수형 원자로로서 SFR, MSR, VHTR 등은 각각이 지닌 고유의 특성으로 다양한 응용 가능성을 제시하며 전 세계에서 연구개발이 활발히 진행 중
- 국내에서도 경수형 SMR은 2030년을 전후하여 전력망에 연계될 수 있도록 정부차원의 지원이 이루어지고 있고, 비경수형 SMR의 경우에는 민관합작과 국제협력을 통한 R&D가 진행
- 그러나 신규 원자로는 최초 설계라는 점과 안전기준 강화로 인해 개발 및 인허가 과정에서 많은 시행착오를 겪을 것으로 예상
- 따라서 전통적인 문서 기반의 설계 및 인허가 심사 방식은 속도와 정확성이 필수적인 차세대 원자로 개발에 부적합

● **(주요이슈)** 차세대 원자로 설계는 경험이 부족한 만큼 반복적인 설계 수정과 인허가 요구사항 변화가 예상

- 문서 기반의 형상관리는 설계 변경 추적과 무결성 확보에 취약
- 개발 기간의 단축 및 품질 관리를 위한 디지털 전환의 필요성이 대두
- 글로벌 원자력 시장은 소프트웨어 중심의 형상관리와 디지털 트윈 기술을 적극 도입하는 추세
- 이러한 이슈에 대응하기 위하여 국내 형상관리 시스템의 도입 및 정착이 경쟁력 확보와 기술 수출에 중요 역할을 할 것으로 예상

● **(문제제기)** 문서 중심의 설계 및 심사 방식은 변경 이력 관리와 문서 간 정합성 검증에 한계를 갖고 있으며, 신뢰도 높은 형상관리는 차세대 원자로뿐 아니라 기존 원자력시설의 설계, 건설, 운영, 해체 등의 모든 수명 주기 동안에도 필수적인 요소

- 설계 변경 시 발생하는 시간 지연은 사업 비용 상승과 일정 차질을 초래할 가능성이 크고, 안전성 평가 및 규제 심사에서도 요구되는 높은 수준의 무결성을 확보하기 어렵다는 문제가 존재
- 디지털 전환이 지연될 경우 글로벌 차세대 원자로 개발 경쟁에서 뒤처질 우려가 있고, 이미 타 분야에서 성공사례가 있는 효율적인 형상관리 프로세스를 도입함으로써 이를 개선 가능
- 이러한 상황을 고려했을 때, 해당 이슈에 대응하기 위한 기반구축 연구 및 법·제도개선이 필요

주요내용

- **차세대 원자로 설계 및 인허가 전 과정에 소프트웨어 기반 형상관리 기법을 적용하는 프로세스 개발**
 - 형상관리 기술을 통한 설계 변경 이력 추적과 문서 무결성 자동 검증 시스템 구축
 - 디지털 형상관리의 프로토타입을 구현하여 차세대 원자로 개발에 적용 가능성 검증
- **형상관리 소프트웨어와 설계 데이터 간 연동을 위한 플랫폼 개발 및 운영**
 - 설계사 입장에서 형상관리 프로젝트 추진
 - 설계 변경 이력의 자동 기록 및 데이터 무결성을 확보하는 형상관리 시스템 설계 및 구현
 - 디지털 트윈 기반의 차세대 원자로 설계 검증 및 최적화 기술 개발
 - SFR, MSR, VHTR 등 각 원자로에 특화된 설계 데이터와 소프트웨어 간 연동 플랫폼 구축
- **디지털 트윈 기반의 설계 검증 및 규제 심사 지원 도구 개발**
 - 인허가 규제기관 입장에서 형상관리 프로젝트 추진
 - 형상관리 시스템을 활용한 설계 변경 추적성과 규제 준수 검증 절차 개발
 - 디지털 기반의 심사 효율화를 위한 데이터 검증 및 자동화 도구 개발
 - 디지털 형상관리 프로세스를 규제 요건에 맞추기 위한 표준화 및 심사 가이드라인 마련

기대효과 및 활용방안

- **(기대효과) 설계 변경 추적성과 문서 무결성 확보로 전체적인 개발 및 인허가 소요 시간 단축 가능**
 - 디지털 형상관리 기술을 통해 설계 품질과 안전성 향상
 - 프로젝트 효율성 증대와 비용 절감을 통해 산업 경쟁력 강화
 - 형상관리 기술을 활용한 글로벌 협력 및 기술 수출 가능성 증대
 - 차세대 원자로 개발을 위한 디지털 전환 모델 제시로 국내 산업 발전에 기여
- **(활용방안) 프로토타입 시스템을 차세대 원자로 설계와 인허가 과정에 즉시 적용하고, 여기에서 얻은 수범사례를 타 원자력시설로 공유**
 - 산업계와 학계의 협력을 통해 형상관리 기술을 다양한 프로젝트로 확대
 - 디지털 형상관리 플랫폼을 국내 원자력 기업 및 연구소에 배포 및 활용
 - 기술 표준화 및 국제 인증 취득을 통해 해외 시장 진출 기반 마련
 - 소프트웨어 기반 관리 모델을 다른 대규모 공학 프로젝트에도 적용 가능하도록 확장

[과제 2] 해양 SMR 도입을 위한 법 및 규제 구축 방안 연구

관 련 이 슈	차세대 원자로 규제 마련 신속화
관련 선도기술	-
사 업 유 형	연구개발() 기반구축() 인력양성() 법·제도·규제 개선(✓) 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관() 대학() 협·단체(✓) 기업() TP() 기타()

추진 배경

- (산업현황) 국내외의 SMR 개발사들은 기존의 육상 전력원뿐 아니라 해양 SMR으로 적용하여 사업 분야를 확장 중

- (러시아) Akademik Lomonosov(세계 최초 부유식 원전)에 가압경수형 SMR인 KLT-40S 2기 탑재하여 극지방의 소외지역에 70MW의 전력을 공급할 목적으로 2019년 정식 운영
- (영국) CorePower社가 美的 TerraPower社 개발사와 협력하여 해양 SMR 사업 시작
- (미국) 미국선급 ABS와 국가원자로혁신센터 NRIC는 해양원자력적용그룹 MNAG을 구성, 해양 SMR 시장분석과 사업에 대한 업계종사자 컨센서스에 대한 보고서 발간
- (한국) 부유식 발전소 및 동력선을 목적으로 한 해양 SMR 개발이 민·학을 중심으로 진행 중

- (주요이슈) IMO에서는 2023년에 회원국들을 대상으로 국제 해운에서의 온실가스 배출량 감소를 위한 개정 전략인 Resolution MEPC.377(80)을 채택

- 해당 결의안에서는 2050년까지 온실가스를 2008년 배출량 대비 50% 감축하기로 했던 기존 목표를 수정하여 2030년까지 최소 20%(목표치 30%), 2040년까지 최소 70%(목표치 80%), 2050년까지 Net-Zero를 달성하기로 상향 조정
- 온실가스 감축 범위는 선박 운항, 항만에서의 배출량을 모두 포함하고 있으며 이는 권고사항이 아닌 강제 사항
- 이와 같은 강력한 온실가스 배출량 저감 정책에 대해 해운업계는 ① 단기적으로는 중고선박 폐선, 저탄소 연료에탄올(탄소배출 65% 감소) 및 친환경 선박 발주, 해운의 효율화로 대응, ② 장기적으로는 해운 및 항만의 원자력화, 원자력을 이용한 무탄소 연료암모니아, 수소 등 해양·조선 산업의 SMR 도입을 고려
- 국제기구 IAEA, IMO에서 해양 SMR에 대한 규제개선을 준비하고, 미국, 영국 등 해외 선도국이 국제표준을 선점하기 위해 활발하게 움직이는 상황
- IAEA와 IMO가 협력하여 오래된 원자력선박 안전규정을 현대화하는 방안이 논의 중
- 2022년 DOE가 ABS에 신형원자로 기술의 상업용 해양실증 가속화를 위한 연구과제 지원

- 세계원자력운송협회(WNTI)와 영국선급(Lloyd) 주도하에 원자력 선박 관련 자국법 개정 (2022) 및 국제기준 현대화 촉진 중
- 민간회사의 참여 확대와 해양·조선업 참여에 따른 원자력-선박 관련 산업계 구조 변동 예상
- **(문제제기)** 한국은 상업적 원자로 및 선박 제조가 동시에 가능한 나라로 해양 SMR 산업잠재력을 가지고 있으나, 이러한 수요에 대응하기 위한 법·규제 제도 개선이 시급
- 차세대 원자로 대상 규제요건, 체계, 지침 등의 선제적 개발 및 제안, 인허가 법령·제도 관련 개선수요 발굴 및 해양 SMR 생태계 경쟁력 강화를 위한 효과적인 정부 지원 방안 마련 필요

주요내용

- **(해양 SMR 개발 및 정책 동향 조사)** 국내외 해양 SMR 기술개발 동향 및 사업화 모델 조사와 비교분석으로 현행 법·규제에서의 해양 SMR 쟁점 및 미비점 도출
 - SMR 기술과 해양 시스템 적용 시 고려가 필요한 현안 도출로 관련 규제·제도 마련
 - 2025년에 신규 착수 예정인 비경수로 규제 기반 기술개발과 연계하여 원자력안전법, 선박안전법에서 검토가 필요한 보완사항 점검으로 인허가 절차 마련
- **(쟁점 사항 및 미비점 해결을 위한 방안 제시)** 해양 SMR 사업화 모델 수립 시 고려 사항과 기술개발에 연계하여 실증-사업화 로드맵 제시
 - 항만시설·부유식·원자력추진선 등 해양 SMR 시스템별과 전력·공정열·수소 및 연료·담수화·선박 등 활용범위, 영해·공해 등 배치 위치에 따라 고려 사항 확인
 - 해양 SMR의 보안, 운송 형태, 책임(liability)에 대한 쟁점 사항 검토로 민간사업자의 사업 참여를 위한 사업화 모델 마련

기대효과 및 활용방안

- 관련 규제 및 제도 마련으로 선박 추진, 해양플랜트 탑재 등 해양 연료 쏠 분야에 관련 기술 접목과 실증-사업화로 해운분야 2050 탄소중립 목표 달성에 기여
- 우리나라의 우수한 조선업 분야 기술을 접목하여 차별화된 사업영역 도출과 SMR 시장 창출과 산업 활성화에 기여

[과제 3] 혁신형 SMR 실증 지원 기술개발	
관 련 이 슈	청정에너지 공급 안정성
관련 선도기술	원자로 안전 및 사고 대응 기술
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수행주체	공공연구기관() 대학() 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

- **(산업현황)** 혁신형 SMR 표준설계 및 검증을 위한 정부지원 사업 수행중
 - 사업기간 / 예산 : '23년~'28년(6년) / 총 3,992.4억 원*
 - * 국고 2,747.2억 원(과기부 1,510.4억 원, 산업부 1,236.8억 원), 민간 1,245.2억 원)
 - 사업목표 : 2028년 표준설계인가(Standard Design Approval, SDA) 취득
 - 혁신형 SMR : 전기출력 170MWe급 가압경수로형 원자로(4모듈 : 680MWe)
 - * 기존 원전 대비 안전성 1000배 향상(노심손상빈도 $<1.0e-9$ / 모듈·년) 및 경제성 향상 (건설 단가 \$3,500/kWe)
- **(주요이슈)** '34~'35년 700MWe급 SMR 실증로 건설·운영 제11차 전기본 실무(안) 반영
 - 경제성 검증 및 해외수출 촉진을 위해 최초 호기의 국내 건설 필요
- **(문제제기)** 최초 호기 적기건설을 위한 선행 기술개발 및 산업화 기반 확보 필요
 - 상세설계, 시공기술개발, 실규모 실험, 기기 검증, 공급망 구축 등

주요내용

- **(사업 분야)** 전력 수요의 증가와 에너지 안보를 위한 무탄소 분산형 SMR 실증
- **(목표)** 혁신형 SMR 실증로 2035년 준공을 위한 기반 구축
- **(경제성/건설성 향상)** 건설을 위해서는 반드시 수행해야 하는 과제로, 조기 착수 시 건설 기간 단축
 - 비안전 등급 디지털 계측제어 플랫폼(DCS) 최적화
 - 모듈형 원전 공기 최적화를 위한 구조형식 및 시공기술 개발
 - 혁신형 SMR 고강도 RV/CV 재료 인허가용 조사 취화 특성DB 구축
 - 혁신형 SMR 전력계통 신뢰성 증진을 위한 기술개발

● **(핵심기기 완성도 제고) 혁신형 SMR 핵심기기의 표준 설계에 대한 제작 및 성능 검증**
을 통하여 완성도 제고 및 건설 인허가 구현

- 원자로냉각재펌프 고온·고압 시험설비 구축 및 성능검증
- ECCS 밸브 제작성 검증 및 실규모·운전조건 성능 평가
- 피동안전계통 실규모 목업 제작 및 성능시험
- 증기발생기 나선형 전열관 내환경특성 실증시험 및 건전성 평가
- 관류식 나선형 증기발생기 복합 성능시험
- 종합효과실험 장치 2단계 실험
- 고민감도 노외중성자속 검출기 어셈블리 제작 및 디지털 계측장치 성능검증
- 중대사고 완화능력 검증 시험
- 혁신형 SMR 안전등급 공정 계측기 기기검증

● **(최초 기기 제작성 확인) 혁신형 기술 적용 기기에 대한 제작성 확인 및 성능 평가**

- 내장형 제어봉구동장치 시제품 제작 및 성능시험
- 자동·다단형 핵연료 재장전기 개발
- 무봉산 노심을 위한 가연성 흡수봉 개발 및 노내 성능 DB 구축

● **(운영 및 유지보수 기술) 다수모듈 운영 및 모듈형 기기 유지·보수 기술개발**

- 노심보호/감시계통 운전여유도 평가
- 탄력운전을 위한 PCI 성능 DB 구축 및 PCI 평가 도구 개발
- KOH 환경 핵연료 성능 검증 시험 및 평가
- 모듈형 원자로 원자로용기 및 격납용기 용접부 PAUT 자동검사 장비개발
- 증기발생기 나선형 전열관 검사기술 개발
- 혁신형 SMR 디지털트윈 플랫폼 및 통합 운영감시 시스템 개발
- 혁신형 SMR 자동화 운전 통합제어 기술개발
- 지능형 설비 원격 자동예측진단 및 상태기반정비 기술개발
- 스마트넷제로시티 연계 i-SMR 다목적활용을 위한 설계기술 개발

기대효과 및 활용방안

- 건설공기 단축(48개월 → 24개월) 및 경제성 향상(기존 SMR대비 건설비 1/2 ~ 1/3)
 - 모듈화 제작 및 건설, 검사, 정비를 위한 핵심 기술 확보
- 건설 및 운영허가를 위한 상세설계 및 검증 조기 수행을 통해 건설·운영허가 적기 취득
- 국내 건설 및 운영 실증을 통해 설계 적합성 확인 및 해외 수출 경쟁력 확보

[과제 4] SMR 다목적 활용을 위한 최적화 알고리즘 개발

관 련 이 슈	청정에너지 공급 안정성
관련 선도기술	원자로 설계 및 운용 최적화 기술
사 업 유 형	연구개발(✓) 기반구축() 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학() 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● 산업현황

- 전 세계 주요 SMR 개발사들은 전력공급과 그 외 열공급 등이 가능한 SMR을 개발 중
 - * 대형원전 기반 SMR은 지역난방 및 저온 열공급이 가능하며, 고온원자로 등 차세대 원자로는 산업에서 필요로 하는 500℃ 이상의 공정열을 공급 가능
 - * 또한 고온의 공정열에 수전해시설을 연결하여 고온수전해를 통해 무탄소수소 생산 가능
- 세계 주요 기업들이 무탄소전원을 기업활동에 필요한 에너지 공급에 직접적으로 활용하고자 하는 노력 중
 - * 마이크로소프트(MS)사는 자사 데이터센터에 무탄소전원 공급을 위해 미국 펜실베이니아 주의 쓰리마일 아일랜드 1호기 재가동을 통한 무탄소전력을 공급받기로 원전운영사인 컨스텔레이션사와 공급계약 체결('24년 11월)
 - * 세계적인 Dow Chemical사는 SMR 개발사인 X-Energy와 협력을 통해 자사 생산시설 부지에 SMR 건설 및 운영을 통한 무탄소 에너지 공급 추진
- 국내에서는 분산에너지 특별법 등을 통해 기존의 원거리 송전망을 통한 전력공급 대신 수요지 인근에 송전망 건설을 회피하면서 지역에 에너지 공급을 통한 에너지 자립이 가능하도록 에너지 설비 투자 유도 중
 - * 기존에 대형 발전설비가 입지한 곳과 수요지의 공간적 불일치로 이를 송전망으로 연결했으나, 분산형 전원은 수요지 인근에 500MW 이하로 설치되어 송전망 없이 인근에 전력, 열 등을 공급
- SMR을 분산형 전원으로 활용해 수요지 인근에 전기, 열 등을 복합적으로 공급할 수 있는 기반 구축 중

● 주요이슈

- SMR의 출력을 수요에 따라 변동할 시 발전량이 변화하며 경제성에 영향
 - * 현재 대부분의 SMR이 계통수요에 빠르게 대응할 수 있는 높은 ramp rate(출력 증감발률)을 목표로 개발 중이나, 고정출력 대비 이용률이 낮아지게 되는 단점 존재

- 즉, 출력을 일정하게 유지하면서 계통수요에 따라 전력 외에 수소/열 등을 병합생산해 경제성을 제고할 수 있는 운영방안 마련 필요

● 문제제기

- SMR이 분산형 전원으로서 입지 인근에 전력 외에 다양한 에너지를 공급하면서도 동시에 경제성을 제고할 수 있는 최적화 알고리즘 개발 필요
- 단순히 일정 출력을 유지하면서 출력조절 대신 부생에너지로 변환 또는 저장하는 방식은 부생 에너지 생산에 필요한 높은 고정비로 인해 전체적인 에너지 생산비용의 상승 초래 위험 존재
- 이에 따라 역으로 SMR이 지역에 제공가능한 에너지의 시간대별 시장가격과 수요전망을 선제적으로 전망하고, 이에 기반한 최적운영방식 고려 필요

주요내용

● SMR 분산에너지 공급 위한 최적화 프로그램 개발

- 지역의 산업 및 거주자 특성, 시간대별 전력수요 및 요금제도를 고려한 시간대별 전력가격 예측 알고리즘 개발
 - * 소매 전력요금의 경우 TOU(Time-Of-Use, 전력을 사용하는 계절과 시간대에 따라 요금을 차등 책정하는 제도)에 기반하여 수요와 가격을 연동, 가격이 결정
 - * 열요금과 수소가격의 경우 아직 시간대별 차등은 없는 상황
- 전력을 공급하면서 수요상황에 따라 발생하는 잉여전력을 수소 생산 또는 ESS에 저장하여 저수요시기에 재판매하는 알고리즘 개발
 - * ESS의 경우 높은 가격대에 충전하여 저수요 즉 낮은 가격시기에 판매하여 차익거래(arbitrage) 실현 및 부하 변동성 저하로 인한 SMR의 출력변동 감소에 SMR 출력변동을 위한 운영비 감소로 연결
- 상기 최적화를 위한 에너지공급비용 계산알고리즘 개발
 - * SMR 외에 수소, 열 등을 생산하거나 충전을 위한 ESS 기술발전에 따른 비용하락 및 주요 운영 parameter 변화를 반영하여 전체적인 에너지 공급단가 계산 가능

기대효과 및 활용방안

● 분산형 전원으로써 SMR 활용 촉진 기반 확충

- 단순 전력수요 변동에 따른 출력변동이 아닌, 타 에너지원 공급을 통한 종합에너지 공급 사업으로 활용 가능성 제시
- SMR의 전력 외 수소 생산으로의 활용 등을 제시하여 SMR의 탄소중립 달성 기여 측면 제시 가능

[과제 5] 고온가스로 실증을 위한 인허가 기반 마련

관 련 이 슈	청정에너지 공급 안정성
관련 선도기술	-
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선(✓) 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학() 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

- (추진배경) 고온가스로 초도호기(실증) 건설을 위한 부지확보 및 부지인허가 전략 수립 필요성 대두

- (주요이슈) 분산에너지 공급법은 있으나 도심, 산업단지 등에 건설 가능성 확인 필요

- 차세대 SMR의 EPZ*가 기존 대형원전에 비해 현저히 작다는 내용은 있으나, 구체적으로 고온가스로에 대해 정의되지 않은 상황
- 도심 또는 산업단지 건설에 대한 공감은 있으나 관련 법제도 및 기술적 내용 확인은 되지 않은 상태
- 고온가스로 초도호기(실증)를 유치하여 건설하고자 하는 지자체에서 건설부지의 사전조사를 조기에 실시하여 전체 건설공기를 단축할 수 있음(적어도 3년 이상 단축 예상)
- 인허가 기관의 부지 인허가 관련 제도가 현재까지 미비된 상태
- 원자력안전법 등 관련 법령 개정 필요

* 원자력 발전소에서 발생한 방사능이 밖으로 누출됐을 때를 대비, 주민보호를 위해 사전에 설정한 구역을 말하며, 원전시설을 보유한 모든 국가에서는 원전사고에 대비해 발전소를 중심으로 방사선비상계획구역을 설정

* IAEA의 비상계획구역 권고안에 따르면, 원전 가동국은 원전사고 우려가 있거나 발생하면 즉시 대피하는 예방적 보호조치구역(원전에서 반경 3~5km)과, 방사능 유출이 확인됐을 때 대피 또는 방호약품 등을 구비하거나 주민한테 지급해야 하는 긴급보호조치 계획구역(원전에서 반경 20~30km)을 설정 의무화

* 미국의 경우 원전에서 16km까지를 비상계획구역으로 지정해놓고 있으며, 벨기에·독일·헝가리 등 유럽 국가들은 반경 20~30km까지, 일본은 30km까지로 설정

* SMR의 경우 작게는 200~300m에서 600m 정도의 EPZ를 예상

주요내용

● 사업 분야 및 목표

- 고온가스로의 EPZ 설정 및 관련 인허가기관 협의
- 도심 또는 산업단지 건설에 대한 사전 준비사항 확인 및 전략 수립
- 고온가스로 초도호기(실증)를 유치하여 건설하고자 하는 지자체에 부지선정 관련 절차 및 준비 사항 전달
- 초도호기(실증)를 유치하여 건설하고자 하는 지자체 부지인허가 취득 착수
- 인허가 기관과 협의하여 관련 기준 마련에 협조
- 원자력안전법 등 입법이 필요한 부분에 대한 제안
- 고온가스로 EPZ 설정 방법 및 거리 확정

기대효과 및 활용방안

● 기대효과 및 활용방안

- 도심 또는 산업단지 건설에 대한 사전 준비사항 확인 및 전략 수립으로 관련 지자체 및 유관기관의 업무 효율성 증대 및 기간 단축
- 고온가스로 초도호기(실증) 건설 전체 공기 단축 가능(3년 이상 단축 가능)
- 초도호기(실증)를 유치하여 건설할 수 있음
- 인허가 기관 기준 마련에 필요한 자료 제공 가능
- 원자력안전법 등 입법이 필요한 부분에 대한 제안 가능
- 고온가스로 EPZ 설정 방법 및 거리 확정으로 건설 공기 단축

[과제 6] SMR 경제성 향상을 위한 혁신제조 소재·장비·기술 개발

관 련 이 슈	차세대 원자로 경제성 확보
관련 선도기술	원자로 설계 및 운용 최적화 기술
사 업 유 형	연구개발(✓) 기반구축() 인력양성(✓) 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학(✓) 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● 산업현황

- SMR 기술개발을 위한 글로벌 경쟁이 심화(전 세계적으로 80여 종이 개발 중, 30년대 중반 상용화 예상)
- 해외 선진사는 SMR 건설 및 제작의 경제성 확보를 위해 설계 단계부터 원가 절감을 위한 혁신 제조 기술개발을 동시 추진
 - * 미국 DOE 주도 AMM(Advanced Methods for Manufacturing) 프로그램을 통한 EPRI, NuScale Power 등 기관이 참여하여 PM-HIP(Powder Metallurgy Hot Isostatic Pressing), EBW(Electron Beam Welding), DLC(Diode Laser Cladding) 등 혁신제조 기술 연구 수행 중
 - * 영국 비즈니스·에너지·산업전략부 주도 Sheffield 대학, Forgemaster, Rolls-Royce, Nuclear AMRC 등 기관이 참여하여 PM-HIP, EBW, DLC 등 혁신제조 기술 연구 수행 중
- 국내 경우, '24년부터 산업부 지원 하에 두산에너지빌리티 주도로 PM-HIP, EBW, DLC 등 혁신제조 공정 개발 연구 중

● 주요이슈

- 기존 원전 선진국은 전통 중공업 제조기반이 약화되어 이에 대한 해결책으로 혁신제조 기술개발에 집중하고 있으며 원전 제조 중공업의 패러다임 전환 추진
- 원전 제조 선진국인 우리나라가 제조분야에서 선도적 지위를 유지하고 있으나 지난 정부의 탈 원전 정책기조의 영향으로 원전제조 생태계 약화

● 문제제기

- 혁신제조 기술 적용에 따른 세계 원전 중공업 시장의 헤게모니 쟁탈이 예상되는 향후 전망에서도 원전 제조분야에서의 선도적 지위를 유지하고 제조시장 선점을 위해서는 혁신 제조 관련 기술 개발에 적극적인 지원 필요
- 혁신제조 공정 기술개발에 올해부터 착수한 상황이나 혁신제조 기술의 완성도를 높이기 위해서는 소재 및 장비의 국산화와 더불어 구조건전성 관리 기술개발 등 혁신제조 관련 전주기 기술 개발 필요

주요내용

- 사업 분야 및 목표

- 원전 주요기기의 제작공기를 50% 저감할 수 있는 혁신제조 공정·소재·설비·기술 확보

- R&D

- SMR 소재 공급망 확보 핵심 기술개발

- SMR 혁신제조 공정·설비 국산화 개발

- SMR 소재 및 혁신제조 특성을 반영한 가동중건전성 관리 및 장기건전성 향상 기술개발

- 인력양성

- SMR 등 미래원전 혁신제조 기술인력 양성

기대효과 및 활용방안

- 선진국와의 기술격차 단축, 원전제조 관련 원천기술 자립화 등을 통해 국내 원전 제조의 기술력 혁신에 이바지

- SMR 및 차세대 원전 주기기 제작을 위한 혁신제조 기술 확보로 글로벌 원전 제조시장 선점 및 주도

- 획기적인 제작공기 단축 및 재료비 절감을 통해 i-SMR의 경제성 향상에 기여

[과제 7] 경수로형 SMR 및 대형원전의 경제성 향상을 위한 차세대핵연료(LEU+) 기술개발

관 련 이 슈	차세대 원자로 경제성 확보
관련 선도기술	핵연료 설계 기술
사 업 유 형	연구개발(✓) 기반구축() 인력양성(✓) 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수행주체	공공연구기관(✓) 대학(✓) 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● 산업현황

- 미국 등 원전 선진국은 사용후핵연료 발생량 저감, 원전 이용률 증대를 위해 235U 농축도를 기존 5% 미만에서 상향시킨 차세대핵연료 LEU+(농축도 5~10%)를 개발하는 추세
 - * 미국 등 원전 선진국은 이미 2010년대 후반 농축도가 상향된 차세대핵연료를 개발 중으로 2023년 9월 US NRC는 Vogtle 2호기에 농축도 6% 상향된 사고저항성 핵연료 ATF 사용 승인
- 국내 경우, '21년부터 산업부 지원하에 한전원자력연료 주도로 ATF 개발 연구 중

● 주요이슈

- 원전의 적극적 활용을 위해서는 장주기 운전 성능뿐 아니라 재생에너지의 간헐성을 보완할 수 있는 상시 탄력운전 성능 확보 필요
- 원전의 경제성 측면에서 사용후핵연료 중간저장 및 처분 등 관리 비용 감소 필요
- 원전의 주민수용성 측면에서도 사용후핵연료 발생량 저감 필요

● 문제제기

- 사용후핵연료 발생량 저감을 통한 관리부담 저감과 탄소중립 실현에 필수적인 원전이 경쟁력 제고를 위해서는 LEU+ 개발은 공익 목적의 국가 주도로 장기간에 수행되어야 하므로 국가적 지원이 절실히 필요

주요내용

● 사업 분야 및 목표

- 원전 지속가능성 및 경제성 제고를 위한 차세대핵연료 LEU+ 기술 개발

● R&D

- LEU+ 핵연료 기술개발
- LEU+ 핵연료 제조/운반/운영 기술개발

- 핵연료 연소도 증가 기술개발
- LEU+ 차세대핵연료 신소재 및 신공정 기술개발

- **인력양성**

- 차세대핵연료 기술인력 양성

기대효과 및 활용방안

- 원전 선진국과의 기술격차 단축, 차세대핵연료 관련 원천기술 자립화 등을 통해 국내 원전의 기술력 혁신 및 경제성 향상에 이바지
- 차세대핵연료 기술 확보로 글로벌 원전 수출시장 경쟁력 강화
- 사용후핵연료 관리비용 저감, 주민수용성 향상 및 원전의 경제성 향상에 기여

[과제 8] 사용후핵연료 운반저장용 중성자 흡수 복합소재 기반구축 사업

관 련 이 슈	차세대 원자로 공급망 선점
관련 선도기술	원자로 설계 및 운용 최적화 기술
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학(✓) 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● 산업현황

- 2050 탄소중립 및 재생에너지의 내재적 이슈로 인해, 원자력의 기저전원의 위상·역할은 유지될 것으로 전망되며, 원자력 발전에서 발생하는 고준위 방사성 폐기물인 사용후핵연료(Spent Nuclear Fuel, SNF)의 저장량 또한 지속적으로 증가하고 있어 수년 내 임시저장 시설의 포화가 예상
- 원자력 발전소 내 사용후핵연료 임시저장시설의 포화 시기가 임박함에 따라 사용후핵연료를 안전하게 이송, 저장하기 위한 설계기술은 확보되었으나, 중성자흡수재를 생산하는 국내 기업은 전무한 실정
- 정부는 국내 대규모 중간저장 시설 증축 계획을 수립한 상태로서 사용후핵연료의 저장 및 수송 설비 확충이 시급하고 방사능 누출의 위험 저감 방안 모색이 필요한 상황
- 원자력 안전의 핵심인 폐 연료 및 핵폐기물 저장/운송용 중성자 차폐 시장은 지속 성장 중이며, 글로벌 중성자 흡수재 관련 매출은 2022년 1.7억 달러(\$)에서 2029년 2.5억 달러로 향상될 것으로 전망
- 이 중 Al-B₄C 중성자 흡수소재의 경우 2022년 4,800만 달러에서 2029년 8,000만 달러로 향상될 것으로 전망(연평균 7.3% 향상)
- 현재 전 세계 중성자 흡수소재는 3M과 Holtec이 대부분을 생산하고 있으며 Orano와 Holtec이 국내를 포함하여 전 세계 발전소에 공급 중

● 주요이슈

- 재난 대응/예방을 위한 원자력 안전에 대한 관심이 높아지고 있으며, 지속적으로 증가하는 사용후핵연료 저장용 중성자 흡수 복합소재의 국산화 기술개발에 대한 니즈 증가
- 고밀도 저장시설 안전 규제 강화에 따라서 저장시설용 소재의 고기능화 및 수명제어 기술, 사용후핵연료 이송용 대용량 수송용기 소재 개발의 요구 증가
- 사용후핵연료 보관/수송에 사용되는 중성자 흡수용 핵심소재의 경우, 현재 전량 수입에 의존하고 있어 고준위 핵폐기물 보관의 안정성 확보를 위해 선결되어야 할 중요 과제
- 특히 사용후핵연료 운반·저장용 소재의 경우 프랑스, 미국, 일본 등 원자력 강국들이 용기 설계, 제작 및 소재 수급 등 전주기 생태계를 장악하고 있으며, 국내는 중공업체가 OEM 방식의 제작에 참여하는 수준

- 향후 국내 고유의 용기 제작을 위한 해외 의존 소재의 국산화와 함께 보다 우수한 성능을 담보할 수 있는 고유 합금 개발 및 인증이 중요한 기술적 이슈 사항

● 문제제기

- 알루미늄 복합재는 국내의 경우 연구소 및 대학을 중심으로 실험실 규모의 연구개발이 진행되어 왔으며, 일부 기업에서 기술개발을 진행하고 있으나 기반 설비 부족으로 국산 상용화 소재는 전무한 실정
- 중성자 흡수소재는 외국으로부터의 기술도입이 어려운 전략소재로서 기업이 장기간에 걸친 기술개발의 위험을 감수하여야하면서 투자하기가 현실적으로 어렵기 때문에 정부주도 하의 종합적인 지원이 필요
- 이러한 상황을 고려했을 때, 중성자 흡수소재 국산화 이슈에 대응하기 위한 국내 기반 구축이 필요한 상황

주요내용

● (중성자 흡수 알루미늄 복합소재 개발) 중성자 흡수능력이 우수하면서 가격 경쟁력을 가진 대형 중성자 흡수 알루미늄 복합소재 개발

- 중성자 흡수 능력이 우수하면서 가격 경쟁력을 가진 사용후핵연료 운반·저장용 5m급 중성자 흡수 알루미늄 복합소재 판재 개발 지원
- 기업, 연구기관, 인증기관 등이 협력하여 중성자 흡수 복합소재의 신뢰성 향상을 위한 평가기술을 확보하여 글로벌 기술경쟁력 확보

● (중성자 흡수 복합소재 대량생산 시스템 구축 및 상용화) 대규모 중성자 흡수 복합소재 플랜트 구축 및 상용화 기반 마련

- 사용후핵연료 운반·저장용 5m급 중성자 흡수 복합소재 판재 생산을 위한 대형 설비 확충 등 기반 구축
- 사용후핵연료 운반·저장용 중성자 흡수 복합소재 물성 평가를 위한 평가 설비 구축

기대효과 및 활용방안

● 기대효과

- 사용후핵연료의 중간 저장설비(건식저장)에 있어 핵심소재인 중성자 흡수소재의 생산 기반 구축을 통하여 원자력 산업의 안전성에 기여하며, 소재의 해외의존성 탈피 및 국내산업/시장 활성화 가능

● 활용방안

- 에너지산업, 사회안전 구조시설, 산업용 기기, 수송기기 등 다양한 분야에 적용이 가능하며, 기타 융복합소재 개발의 방법론으로 적극 활용 가능

[과제 9] 선진원자로 산업 생태계 조성 사업

관 련 이 슈	차세대 원자로 공급망 선점
관련 선도기술	-
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학(✓) 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● 산업현황

- 세계 각국과 기술기업들은 탄소 저감 목표를 달성하기 위해 2030년대 차세대 원자로 도입을 위한 대규모 예산을 투입하여 기술개발 경쟁을 본격 추진
- 우리 정부도 경제·외교·안보적 가치를 종합하여 차세대 원자력을 12대 국가전략기술로 선정, SMR 및 선진원자력시스템을 중점기술로 제시
- 원자력 발전에 대한 시장수요 다변화와 기존 전력공급 기능 외에 산업공정열 공급, 수소 생산, 해수담수화, 해양·우주환경 에너지원 등 다양한 산업 분야에서 원자력수요 증가 중

● 주요이슈

- 차세대 원자로 활용 산업 수요가 급증하고 있으며, 이를 공급하기 위해서는 민간주도로 사업을 선도할 산업계의 기술역량 증진이 필수
- 그간 정부주도 사업에 의존, 한정된 민간의 역할과 단기 성과창출의 어려움, 기술개발, 인허가 등 장기적인 투자 위험성 존재
- 경수로 대형원전 공급망은 존재하나, 비수냉각형 원자로에 대한 기기를 공급할 수 있는 산업체는 거의 없는 상황
- 민간이 주도하는 생태계 조성을 위해서는 민간의 역량 강화를 위한 기개발 기술의 이전 및 산업 역량 육성 필요

● 문제제기

- 정책지원을 통해 민간의 초기역량을 육성하고 원자로 개발 및 활용 수요를 구체화하여 점진적 민간주도형 개발이 가능하도록 지원 필요
- 기개발된 4세대 원자력시스템의 기술이전을 통해, 민간 주도의 시장 개척을 희망하며, 인허가에 소요되는 기간 중 실증로에 기기를 공급할 기업을 육성하여 적기에 원자로가 건설될 수 있는 공급망을 사전에 조성 필요
- 차세대 원자로 개발에 대한 민간 수요를 한목소리로 모아 적극적으로 정부 정책에 반영하고 수요기반의 기술개발 및 역량강화를 추진할 수 있는 민간주도 사업 구심점 필요

주요내용

- **(선진원자로연구조합) 차세대 원자로 연구개발 역량을 강화할 수 있는 민간 산업체 중심의 추진조직인 선진원자로산업기술연구조합 발족 및 운영**
 - 기획보 기술을 활용하고 공백·애로기술을 공동개발 하여 실질적 성과 창출까지의 소요 기간을 단축하고, 민간주도의 상용화 완성을 위한 기획 및 인허가 지원
- **(민간수요 사업기획) 민간수요에 기반을 둔 사업기획을 통해 차세대 원자로 기기 공급 및 이용 산업 생태계 조성을 위한 기술개발 및 사업 기획 수행**
 - 사업화를 위해 부족한 공백기술 및 실용화 애로기술을 공공연구기관-민간-대학 등이 협력하여 개발할 수 있는 공동연구 사업 기획
 - 국내 기관 또는 대학과 차세대 원자로 기술을 실현하고자 하는 민간 산업체 간 교류 활성화를 통해 개발자와 수요자간 이해 증진 및 협력연구 지원
- **(인프라 공동 활용) 출연연·대학 등의 R&D 인프라를 파악하고 이를 효과적으로 활용**
 - 차세대 원자로를 실증로 및 사업화하는 데 필요한 실험 데이터, 시험시설, 장비, 인프라 등 공동 활용 증진
 - 출연연·대학 등이 보유한 연구 인프라 공유를 위한 시설장비 공동 활용 플랫폼 구축
- **(사업화 지원) 정부 보유 지재권 이관 및 차세대 원자로 비즈니스 모델 기획**
 - 차세대 원자로 연구소기업 설립 시, 출연연-민간기업 간 협약 등 설립절차 컨설팅 및 기술가치 평가 지원 등을 통한 설립 장애요인 극복 지원
 - 차세대 원자로 이용 시장 분석 결과와 기업의 역량을 고려한 맞춤형 사업화방안 제시
 - 정부주도로 개발된 차세대 원자로 기술과 본 사업 내 공동연구를 통해 개발된 기술의 실시 장애요인 법률검토 지원
- **(인허가 대응) 차세대 원자로 개발자 주도의 실증 인허가 체계(안) 마련 및 실증사업 지원**
 - 설계문서, 실증시설 구축 계획 등을 기존 경수로 인허가 및 신규 개발 인허가 체계(안) 관점에서 검토하여 인허가 현안 및 극복전략 마련 지원
 - 국내 원자로 규제 및 인허가 기관과의 협력을 추진하고, 차세대 원자로 개발사에 대한 인허가 성 검토 서비스 제공
 - 핵심 이슈 관련 해외 전문기관의 자문을 통한 인허가 준비 검토 및 인허가 기관 사전 협의 등

기대효과 및 활용방안

- 원자력 투자리스크 완화, 민간의 차세대 원자로 R&D 및 사업화 역량강화
 - 차세대 원자로 분야 민간기업의 기술역량 증진, 차세대 원자로 실증 및 사업화를 위한 공백기술 확보, 기존 정부주도의 체계를 벗어나 민간이 주도할 수 있는 협력체계 구축
 - 차세대 원자로 연구개발 기관(기업, 연구소 등) 간 기술수요를 연결하는 통합적 창구 역할
 - 민간 기업으로 비경수로형 원자로 기술의 도입, 보급, 활용
 - 산학을 대상으로 차세대 원자로 연구 참여 확대
- 차세대 원자로 산업 밸류체인 형성을 통한 국가 新성장동력 확보
 - 범국가적 환경규제 강화, 지속가능한 에너지원 확보, 기후변화 등 국내외 메가트렌드 변화에 대응하여 국가적·산업적 이슈 해결에 기여
 - 높은 안전성에 기반한 미래지향적 차세대 원자로 기술로 신시장 개척과 시장선점 기회, 원자력 부문의 사회 수용성 제고 및 위상 강화의 돌파구로 활용

[과제 10] SMR을 포함한 차세대 원전의 구조물 안전성 향상 및 방사성 폐기물 최소화를 위한 저방사화 콘크리트 구조물 개발

관 련 이 슈	비수냉각 원자로의 기술적 도전
관련 선도기술	원자로 안전 및 사고 대응 기술
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학() 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

● **산업현황**

- 현 정부 12대 국가전략기술에 차세대 원자력이 포함되어 있으며 주요 내용으로는 SMR, 선진 원자력 시스템, 원전 폐기물 관리 등이 포함
- 제5차 과학기술기본계획에는 30년대 SMR 시장 진입을 목표로 SMR, 사용후핵연료 저장/처리/처분기술 등에 대해 29년까지 원천기술 확보 목표
- 저방사화 콘크리트 개발 연구는 Lab Scale 및 Engineering Scale에서만 진행되어 실제 원자로에 적용 가능한 상용규모 실증 연구가 필요하며, 상용규모에서 저방사화 콘크리트의 시공성, 강도 발현, 장기적 내구성 등이 분석·평가 필요

● **주요이슈**

- 원전 차폐 구조물은 원자로에서 발생하는 중성자에 의해 장시간 운영 시 방사화가 진행되어 원전 수명 만료 시점에 방사성 폐기물로 분리 처분 필요
- 차세대 원전의 높은 안전성과 긴 생애주기를 고려 방사화 진행을 혁신적으로 저감시킬 수 있는 콘크리트 구조물을 개발하고 이를 시공할 수 있는 기술 확보가 필요
- 특히 차세대 SMR 모듈 콘크리트 구조물에 적용 가능한 상용규모 저방사화 콘크리트를 개발하고 시공성, 강도 발현, 장기적 내구성 등의 분석·평가 및 관련 시공 기술 최적화 수행 필요

● **문제제기**

- 원자력은 에너지 안보 및 국가 산업 기반과 직결돼 있어 세계 각국은 정부 차원에서 기술 개발과 산업 활성화를 지원하고 있음. 우리나라도 SMR 및 제4세대 노형에 대한 연구개발을 정부가 지원하고 있으나 성공적 기술 상용화를 위해서는 지속적 지원이 필요
- SMR을 포함한 차세대 원전 개발 국가사업단에 구조물 분야 연구조직이 포함되어 설계 및 시공 기술 개발을 진행 필요
- 정부 주도로 관리되는 방사성 폐기물의 감축을 위해 원전 설계 시부터 방사성 폐기물 저감 기술을 구조물 설계 등에 반영할 수 있도록 관련 기술 개발에 정부가 지원

주요내용

- (사업 개요 및 목표) 차세대 SMR 모듈 콘크리트 구조물의 방사화 개념은 다음 그림과 같으며, 저방사화 시멘트 및 이를 평가하는 방사화 분석 시스템을 개발하여 방사성 폐기물을 혁신적으로 저감하는 구조물 기술 확보



- **단기(2028년 이내)**
 - 저방사화 시멘트 상용규모 제조
 - 저방사화 시멘트 품질 관리
 - 저방사화 콘크리트 배합 설계
- **중장기(2033년 이내)**
 - 저방사화 콘크리트 생산설비 구축
 - i-SMR 적용 인허가 및 수출형 해외 인허가 취득
 - 저방사화 콘크리트 시공관리 기준 구축

기대효과 및 활용방안

- 원자력을 활용한 탄소중립 이행 방안 마련 촉진
- 원자력시스템 설계 및 시공 분야 신산업/신시장 창출
- 원전 안전성 증가에 따른 주민 수용성 향상에 기여
- 원전 수출 경쟁력 향상
- 방사선 차폐시설, 방사성 폐기물 처분시설 등으로 활용 확대 가능

[과제 11] 민관합작 무탄소 산업공정열 공급용 차세대 원자로 개발

관 련 이 슈	비수냉각 원자로의 기술적 도전
관련 선도기술	원자로 설계 및 운용 최적화 기술
사 업 유 형	연구개발(☒) 기반구축(☒) 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수행주체	공공연구기관(☒) 대학(☒) 협·단체() 기업(☒) TP() 기타(☒)

추진 배경

● 산업현황

- 산업공정에 소요되는 열은 산업분야에 따라 필요로 하는 온도의 범위, 공정, 증기의 질 등이 다르며, 이에 필요한 열의 대부분은 석탄이나 가스 등 화석연료의 연소에 의존

* 펄프/제지 : 400℃ 이하, 석유 정제 : 350~800℃, 알루미늄 생산 : 800~1,000℃, 제철 : 1,300~2,500℃

- 산업 부문은 우리나라의 최대 에너지 소비 부문으로서 2021년 기준으로 최종 에너지 소비의 약 62%를 차지하며, 2020년 산업통상자원부 에너지총조사에 따르면 산업 부문에서 제조업이 차지하는 에너지 소비 비중은 거의 90% 차지

● 주요이슈

- 철강산업의 전기분해 공정, 석유화학산업의 전기가열 크래커, 시멘트산업의 킬른 공정 등의 전기화 R&D가 진행 중이지만 모든 공정열원을 전기로 대체하는 것은 어려운 상황

- 산업부문의 2030년 온실가스 감축목표는 2018년 대비 11.4%로 다른 부문에 비해 가장 낮은 수준이며, 2050년 탄소중립에서도 51.1백만 톤CO₂e를 배출하는 것으로 목표를 설정하여 다른 부문에 비해 가장 높은 수준으로 무탄소 신기술 필요

- 한국원자력연구원의 초고온가스로 계통 개념 연구를 통해 민간산업체와 공동으로 국내 공정열 시장을 조사한 결과, 여수와 울산 석유화학공단 열에너지 수요를 40GWth(150MWth SMR 267기)로 평가

● 문제제기

- 혁신적인 차세대 원자로 개발을 위해 주요국은 민간주도-정부지원 체계를 구축하고 실증을 강조하고 있으며, 특히 미국은 의회의 전폭적인 법적·제도적 지원에 힘입어 차세대 원자로 기술 혁신을 주도하고 있는바, 한국형 차세대 원자로 개발 사업 필요

- 제조업 중심의 국내 산업구조 특성을 고려할 때 대량의 무탄소 공정열원을 경제적으로 공급할 수 있는 고온가스로가 적합한 차세대 원자로형이며, 국내 탄소중립 실현 목표를 달성하기 위해 민관합동으로 실증사업의 조속한 추진이 필요

- 다른 국가들의 기술개발 속도를 감안하면 2035년에는 실증이 완료되고, 2040년에는 본격적인 공급이 일어나야 하는바, 신속한 기술개발과 시장 선점을 위해 정부와 민간 기업의 역량 결집이 필요

주요내용

● (최상위 목표) 열출력 90MWth, 출구온도 750℃, 설계수명 60년 이상의 고온열 생산용 고온가스로 개발 및 실증

- 민간 수요를 반영하여, 민간이 제안하는 기술개발 프로젝트에 정부가 매칭 형태로 추진
- 건설 사업 추진을 목표로 하므로, 고온가스로 건설을 위한 국내 규제 요건 先검토
- 고온가스로 기본설계 완료('29년), 초도기 건설 완료('35년), 본격 운영 시작('40년)

● (원자로 노심설계) 고온가스로 실증로의 요구 출력, 주기, 안전성 등을 만족하는 원자로 설계

- 원자로 및 플랜트 요건 수립 및 인허가 대응 문서 개발, 노심설계/핵연료설계/계통설계/기계설계/안전해석 등 기술 분야 간 유기적인 설계연계관리
- 노심 핵설계, 열유체 해석 및 노심 차폐 설계 및 안전해석에 필요한 연계자료 생산

● (계통설계 및 안전해석) 노심에서 생성된 열을 안전하고 효율적으로 전달하기 위한 원자로 계통 개념, 열수송계통, 안전계통의 기본설계 개발과 사용후핵연료 임시저장 계통의 개념 설계 개발, 그리고 연계 계통의 성능요건 수립

- 고유 안전성 입증하기 위한 설계기준사고 및 초과설계기준사고에 대한 안전성 평가
- 고온가스로 설계안에 대한 확률론적안전성평가(PSA)
- 고온가스로 최적화 디지털 계측제어 설계, 제어실 안전전략 및 인간공학 설계를 통한 각 세부 계통 설계 및 표준설계 입력생산

● (핵연료 및 기기설계) 고온 구조 건전성을 확보한 원자로 및 핵연료 주요기기 개발

- 핵연료 성능 및 안전성 해석, 사용후핵연료 발생량 및 특성 해석 등 핵연료 설계 기술
- 단순화·소형화·모듈화 목표를 달성할 수 있는 원자로용기, 내부구조물, 열교환기, 순환기, 고온 배관, 제어봉 구동장치, 핵연료재장전장치 등의 기기 개념설계 및 기본설계 개발

● (플랜트 설계) 원자로에서 발생한 열을 이용하기 위한 시설에 대한 설계

- 디지털 계측제어 설계, 각 세부계통 설계 및 표준설계 입력생산, 다목적 활용을 위한 각종 유틸리티 계통 및 전력계통, 에너지 변환계통에 대한 설계
- 플랜트 배치설계 및 포괄부지 특성을 고려한 구조물 설계
- 작업종사자의 피폭방지를 위한 방사선방호설계, 운영 중 발생하는 방사성 폐기물의 수집, 처리 및 감시계통 설계

기대효과 및 활용방안

- **산업분야 탈탄소화 달성 및 친환경에너지강국 실현**

- 정밀·석유화학 및 제철산업의 고온 공정열 수요에 대한 국내 자급 기반 마련으로 전 산업 분야의 탈탄소화 확대
- 에너지 자급도 개선으로 에너지수입대체효과 및 국내 일차에너지 소비구조를 지속가능한 친환경 환류 구조로 형성하는 데 기여

- **고온가스로 건설·실증사업에 산업체 참여를 유도하고 조기 상용화 기반 제공**

- 기존 공기업 중심의 원전 산업 생태계에서 민간 주도의 산업공정열 공급 원자로 시장 생태계 형성 가능

[과제 12] 고온가스로 실증사업 개발 및 플랜트 종합설계 기술개발

관 련 이 슈	비수냉각 원자로의 기술적 도전
관련 선도기술	원자로 설계 및 운용 최적화 기술
사 업 유 형	연구개발() 기반구축(✓) 인력양성() 법·제도·규제 개선() 기타()
지 원 대 상 및 수 행 주 체	공공연구기관(✓) 대학() 협·단체() 기업(✓) TP() 기타()

추진 배경

- **(산업현황)** 글로벌 탄소중립 목표 달성 및 전력 수요 증가 대응을 위한 무탄소 에너지 공급원에 대한 관심이 증대되고 있으며 특히, 차세대 원자로로는 석탄발전 대체, 데이터 센터 등 신규 전력 수요 및 무탄소 고온증기 공급열 활용 목적으로 개발 중
 - 고온 산업공정열 시장은 비경수형 원자로 중심의 화석연료 대체 시장으로 부상하고 있으며 대량의 공정 스팀이 필요한 석유화학, 제철, 비철, 제지 산업을 중심으로 고온가스로에 대한 수요 발생 예상
 - 효율적이고 경제적인 대규모 수소 생산을 위한 에너지원으로 원자로 출구 온도가 높은 고온가스로를 연계한 고온수전해 기술이 상용화될 경우 무탄소 수소 공급망을 형성할 수 있을 것으로 기대
- **(주요이슈)** 실증부지 확보와 기술성숙도가 높은 노형의 성공적 실증사업을 통해 시장 선정이 가능하며, 고온가스로 원자로의 요소 기술 개발이 지속되는 가운데 플랜트 종합 실증 추진이 시장 진입의 교두보가 될 것으로 전망
 - SMR의 경우, 실증부지를 확보하고, 기술성숙도가 높으면서 수요처가 확보된 노형이 성공적 실증사업을 통해 검증이 완료되면 시장을 선정할 수 있는 사업
 - 경수로 대비 높은 온도의 증기 생산이 가능한 고온가스로의 원자로 자체에 대한 요소 기술은 지속적으로 개발되고 있으나, 서구권에서는 플랜트 실증을 통한 검증 사례가 없으므로 원자로를 포함한 플랜트 종합 실증 추진이 시장 진입에 교두보가 될 것으로 전망
- **(문제제기)** 고온가스로 실증사업 가속화 필요
 - 고온가스로 원자로 기술개발과 동시에 플랜트 실증을 위한 플랜트 종합설계 기술개발, 기기 공급망 구축 및 시공성 평가 기술 확보가 필요

주요내용

- **고온가스로 실증사업 개발 및 플랜트 종합설계 기술개발**
 - 고온가스로 고온 공급열 수요처 및 부지 확보 기반 사업개발

- 원자로 주요 핵심기기 공급사 기반 제작성 평가 및 공급망 구축
- 원자로 외 플랜트 BOP 종합설계 기술개발
- **고온가스로 실증 부지 적합성 평가**
 - 수요처 기반 실증 후보부지 선정 및 적합성 평가 등 타당성 조사 추진
- **고온가스로 주요 핵심기기 제작성 평가**
 - 원자로 기술개발과 동시에 핵심기기 제작성 검토 및 공급망 구축
- **실증프로젝트에 대한 플랜트 BOP 종합설계 기술개발**
 - 원자로 연계 BOP 기본설계 기술개발을 통한 실증 플랜트 구축

기대효과 및 활용방안

- **고온가스로 실증사업 추진을 통한 고온 공정열 공급 시장 선도**
 - 원자로 기술개발과 연계된 실증사업 추진을 통하여 수요처에 적합한 공정열 공급 시장 선도 및 해외 수출 교두보 마련
 - 차세대 원자로 기기 공급 실증을 통한 공급망 구축
 - 차세대 원자로 설계기술 및 시공 인력양성

2025 산업기술환경예측

(차세대 원자로)

발 행 일 2025년 3월

발 행 처 한국산업기술진흥원
산업기술정책단 기술동향조사실

발 행 인 한국산업기술진흥원 민병주 원장

기획/진행 문희수 실장, 김상훈 책임연구원, 이제원 선임연구원

주 소 서울시 강남구 테헤란로 305 한국기술센터 4층
산업기술정책단 기술동향조사실
02-6009-3586
www.kiat.or.kr

※ 본 자료에 수록된 내용은 한국산업기술진흥원의 공식 견해가 아님을 밝힙니다.
※ 본 자료의 내용은 무단 전재할 수 없으며, 인용할 경우 반드시 원문 출처를 명시하여야 합니다.

