

KNS(R)-001-2024



소형모듈원자로(SMR) 기술조사보고서

Technical Overview Report on Small Modular Reactor Technology

2024. 05

한국원자력학회
원자로시스템기술연구부회

본 보고서는 한국원자력학회 원자로시스템기술연구부회에서 연구부회 학술활동의 일부로서
발간한 공개 보고서입니다.

머릿말

다양한 적용성과 탄소중립에 기여할 수 있는 수단으로 소형모듈원자로(Small Modular Reactor; SMR)에 대한 관심이 뜨겁습니다. 이에 따라 활발한 기술개발과 더불어, 건설을 위한 치열한 사업개발 경쟁이 이루어지고 있습니다. 주요 원자력 선진국을 중심으로 SMR 도입이 적극적으로 추진되고 있으며, 후발 관심국들도 장기적으로 SMR을 에너지믹스에 포함하는 것을 적극적으로 고려하고 있습니다. 최근에는 SMR이 가지고 있는 여러 가지 장점으로 인해 SMR을 활용하는 사업에 투자하려는 기업들이 발 빠르게 움직이고 있으며, 실물화 가능성이 높아지고 있는 상황입니다. 그러나 한편으로는 경제성 부족, 새로운 기술의 리스크, 외부적 여건의 변화, 충분한 자금을 유치하기 위한 비즈니스 모델 확보의 어려움 등으로 인해 사업이 실패한 사례도 나타나고 있는 실정입니다. 또한 SMR을 건설하여 상업적으로 전기나 증기를 판매하는 비즈니스는 이제 시작하는 단계이므로 SMR 기술에 대한 정확한 인식을 바탕으로 시장을 냉철하게 바라보아야 할 필요도 있습니다.

SMR의 본격적인 등장과 함께 원자력 이용에 대한 점진적인 패러다임의 변화에 부응하고 원자력 기술의 연구개발에 기여하기 위해 원자력학회 원자로 시스템기술연구부회에서는 2020년에 소형 혁신원자로 기술조사보고서를 발간하였습니다. 본 보고서는 2020년에 발간된 보고서를 토대로 기술개발 부분에서는 최신현황을 반영하고, 시장전망, 사업현황, 각국의 개발전략 등 필요한 부분들을 보완한 개정·증보판이며, 원자로시스템기술연구부회의 전문위원장과 주제 별로 전문가 필진을 구성하여 작성하였습니다. SMR의 전체적인 시장 및 사업현황은 원자력연구원의 주형국, 권혁, 문주형 박사님들이 종합해 주셨으며, 수냉각형 SMR과 비수냉각형 SMR의 기술개발 동향은 한국원자력연구원의 강한옥, 정종엽, 어재혁, 김치형, 김찬수 박사님들과 한국전력기술(주)의 정병렬 박사님 그리고 UNIST의 이덕중, KAIST의 이정익 교수님들이 각 전문 노형별로 작성하셨습니다. 한국원자력통계기술원의 조성연 박사님과 한국원자력안전기술원의 이정재 박사님은 SMR의 핵안보 규제와 안전규제 동향을 정리하셨습니다. 보고서의 검토·편집은 권혁, 박현식, 김성균 박사님들과 박효인, 정서연 님이 수고해 주셨습니다. 작성에 참여해 주신 모든 분들께 깊은 감사를 드립니다.

SMR 기술 및 사업개발이 활발하게 진행되고 있습니다. 러시아, 중국은 SMR을 이미 건설하여 운전하고 있으며, 서방 원자력선진국 들도 20년대 말 또는 30년대 초 운전을 목표로 개발경쟁을 벌이고 있습니다. 이러한 상황에서 SMR은 단순한 연구개발이 아닌 향후 치열한 경쟁이 예상되는 시장에서 경쟁력 확보를 위한 기술 및 사업 개발이 필요하며, 이러한 개발 기획에 본 보고서가 참고자료로 활용되고, 앞으로도 최신현황을 반영하여 개정되기를 바랍니다.

원자력학회 원자로시스템기술연구부회장 이 태 호

목 차

머릿말	3
제1장 소형모듈원자로 시장 및 사업현황	13
제1절 소형모듈원자로	15
1. 개요	15
2. 소형모듈원자로 (SMR)의 정의	18
제2절 글로벌 소형모듈원자로 개발현황	24
1. 개요	24
2. 국가별 기술 개발현황	25
3. 세계 소형로 개발 동향 분석	41
제3절 시장전망	43
1. 리서치 네스터 (2023년 4월)	43
2. 폴라리스 마켓 리서치 (2023년 6월)	45
3. 마케츠앤마켓츠 (2023년 6월)	45
4. 프레시던스 리서치 (2023년 5월)	45
5. 아이다호 국립 연구소 (2021년 6월)	47
6. SMR Start (2021년 3월)	48
7. OECD NEA 보고서 (2021년 및 2016년)	48
8. 캐나다 소형모듈원자로 로드맵 (2018년 11월)	49
9. 영국 국립원자력연구소 (2014년 12월)	51
제4절 주요국의 개발전략	53
1. 미국	53
2. 캐나다	63
3. 영국	67
4. 러시아	71
5. 프랑스	72
6. 중국	73
7. 일본	74
제5절 주요 소형모듈원자로 사업현황	76
1. 수냉각형 소형 모듈원자로 사업현황	76

2. 비수냉각형 소형모듈원자로 사업현황	87
3. 초소형모듈원자로(MMR) 사업현황	100
제2장 수냉각형 소형모듈원자로	106
제1절 가압경수로형(PWR)	108
1. 일체형 소형모듈원자로	109
2. 블록형 소형모듈원자로	134
제2절 가압중수로형(PHWR)	141
1. 개량형 소형 중수로	141
제3장 비수냉각형 소형모듈원자로	150
제1절 액체금속냉각로형(LMR)	153
1. 소듐냉각고속로	153
2. 납냉각고속로	178
제2절 용융염원자로형(MSR)	209
1. 원자로 개념	209
2. 국내외 개발동향	220
3. 국내 기술개발 및 사업화 전략	226
제3절 가스냉각로형(GCR)	228
1. 원자로 개념	228
2. 국내외 개발동향	233
3. 국내 기술개발 및 사업화 전략	237
제4절 열전도관(Heat pipe) 원자로	247
1. 원자로 개념	247
2. 국내외 개발동향	250
3. 국내 기술개발 및 사업화 전략	253
제4장 소형모듈원자로 규제 현안 및 전망	256
제1절 소형모듈원자로 핵안보 규제	258
1. 소형모듈원자로의 핵안보 규제 필요성	258
2. SMR 핵안보 국제 논의 동향 및 규제 동향	260
3. SMR 설계 특성에 따른 핵안보 예상 규제 현안	267
4. 접근 전략 및 방안 - 설계 단계 핵안보 (Security By Design)	270
5. 핵안보 규제에 대한 제언	272

제2절 소형모듈원자로 안전규제 동향	273
1. 소형모듈원자로 인허가 현황	273
2. 소형모듈원자로 규제정책 방향	280
제5장 참고문헌	294
맺음말	306

표 목차

표 1.1.1 주요 수냉각형 원자로의 배치가능성 평가	21
표 1.1.2 진척도가 높은 수냉각형 원자로의 주요 제원	22
표 2.1.1 BANDI-60 주요 설계 특성	136
표 2.1.2 Rolls-Royce SMR 설계특성	139
표 2.2.1 AS-PHWR 주요 공정변수	143
표 3.1.1 조선해양용 전수명 초소형원전 MicroURANUS의 주요 설계 사양	186
표 3.1.2 주요 납냉각 소형 원전 주요 제원 비교표	203
표 3.1.3 원자력 추진 선박의 주요 안전 요건에 대한 LFR 소형원전 특성 평가	207
표 3.1.4 납-비스무스 냉각 고속로 MicroURANUS의 조선해양 적합성	208
표 3.2.1 용융염 핵연료 물질의 종류 및 특성	210
표 3.2.2 용융염원자로 다물리 해석 도구 비교	218
표 3.2.3 국외 주요 MSR 개발 현황	224
표 3.2.4 용융염원자로(MSR) 원천기술개발사업 중점 추진내용	226
표 3.2.5 용융염원자로(MSR) 원천기술개발사업 개발 대상 노형 성능 요건(안)	226
표 4.1.1 중소형원자로 안전규제기반기술 사업 개요	259
표 4.1.2 WINS SMR 워크숍 세션 구성 및 의제	261
표 4.1.3 DSRS Scope and Safety Review Matrix	263
표 4.1.4 NuScale 핵안보 심사 항목	263
표 4.1.5 VDR 핵안보 검토 내용	265
표 4.1.6 SMR 핵안보 측면 예상 규제 현안	269
표 4.2.1 CNSC의 사전 공급자설계검토 현황 ('22.11월)	279

그림 목차

그림 1.1.1 초창기 SMR에 대하여 소개한 보고서(OECD와 TECDOC-881)	16
그림 1.1.2 SMR의 용어 정의가 변경된 시점에서 IAEA ARIS 표제	17
그림 1.1.3 SMR 설계 및 건설 및 운영 현황	23
그림 1.2.1 세계 주요 소형원자로 개발 현황	24
그림 1.2.2 출력별 주요 수냉각형 소형모듈원자로	25
그림 1.2.3 SMART-100 개념도	26
그림 1.2.4 i-SMR 개념도	27
그림 1.2.5 BANDI-60S 개념도	27
그림 1.2.6 KAIST-MMR 개념도	28
그림 1.2.7 UNIST URANUS 개념도	28
그림 1.2.8 서울대 REX-10 개념도	29
그림 1.2.9 NuScale 개념도	31
그림 1.2.10 Westinghouse SMR 개념도	31
그림 1.2.11 eVinci 개념도	32
그림 1.2.12 mPower 개념도	32
그림 1.2.13 SMR-160 개념도	33
그림 1.2.14 BWRX-300 개념도	33
그림 1.2.15 UK-SMR 개념도	34
그림 1.2.16 Moltex SSR 개념도	34
그림 1.2.17 FLEXBLUE 개념도	35
그림 1.2.18 Nuward 개념도	36
그림 1.2.19 IMSR 개념도	37
그림 1.2.20 CAREM-25 개념도	37
그림 1.2.21 4S 개념도	38
그림 1.2.22 GTHTR300 개념도	39
그림 1.2.23 KLT-40S 개념도와 Akademik Lomonosov 호	40
그림 1.2.24 ACP100S 개념도	41
그림 1.2.25 ACPR50S 개념도	41
그림 1.3.1 리서치 네스터에서 추정된 지역별 세계 소형모듈원자로 시장 점유율 예상도	44
그림 1.3.2 폴라리츠 마켓 리서치에서 추정된 세계 소형모듈원자로 시장 크기 및 연평균 성장률 예측도	45

그림 1.3.3 마케츠앤마케츠에서 추정한 세계 소형모듈원자로 시장 크기 및 연평균 성장률 예측도	46
그림 1.3.4 프레시던스 리서치에서 추정한 세계 소형모듈원자로 시장 크기 예측도	46
그림 1.3.5 아이디어호 국립연구소에서 추정한 2030-2050 세계 신규 원전 건설 예측도	47
그림 1.3.6 SMART Start에서 추정한 2040년까지 소형모듈원자로의 발전용량 예측도	48
그림 1.3.7 OECD/NEA에서 추정한 2035년 지역별 소형모듈원자로 용량 예측도	49
그림 1.3.8 캐나다 로드맵의 세계 소형모듈원자로 시장 크기 예측도	50
그림 1.3.9 영국립원자력연구소에서 추정한 2035년 세계 소형모듈원자로 용량 예측도	52
그림 2.1.1. 일체형 소형모듈원자로의 특징	109
그림 2.1.2 일체형원자로	110
그림 2.1.3 일체형 소형원자로 피동안전계통	112
그림 2.1.4 SMART 핵연료	113
그림 2.1.5 RCS 냉각재 유로	115
그림 2.1.6 i-SMR 안전계통	116
그림 2.1.7 혁신형 SMR 개발 전략	124
그림 2.1.8 SMART의 비전력분야 활용	125
그림 2.1.9 Oil Sands Recovery Technology	127
그림 2.1.10 SMART 개발 경과 및 향후 계획	132
그림 2.1.11 혁신형 SMR 기술개발사업의 추진체계 및 추진일정	133
그림 2.1.12 AP300 원자로 개념도	137
그림 2.1.13 AP300 활용 개념도	137
그림 2.1.14 Rolls-Royce SMR RCS 개념도	138
그림 2.2.1 증수로 노심 및 일차계통 설계 개념	142
그림 2.2.2 기존 원통형 및 환형 핵연료 펠렛의 선출력에 따른 최대 온도 비교	145
그림 2.2.3 AS-PHWR 연료집합체 설계 개념	146
그림 2.2.4 냉각수 및 감속재 사이 개념도	146
그림 2.2.5 연료집합체 배치 개념도	147
그림 2.2.6 AS-PHWR 열수송계통의 개념 설계	148
그림 2.2.7 원자로건물 개념 설계	149
그림 3.1.1 풀형 소듐냉각고속로의 시스템 구성도	156
그림 3.1.2 핵증기공급계통 배치도	157
그림 3.1.3 핵연료봉 및 핵연료집합체 구성	158
그림 3.1.4 SFR원형로 노심 반경방향 구성	159
그림 3.1.5 SALUS 노심 반경방향 구성	159
그림 3.1.6 연소에 따른 집합체 출력변화	159

그림 3.1.7 SFR 기술개발 현황	161
그림 3.1.8 미국 선진원자로 개발 일정	162
그림 3.1.9 해외에서 개발 중인 SFR 기반 소형원자로	163
그림 3.1.10 유도가열벤딩 배관 개념 및 제작	166
그림 3.1.11 해외시장 비경수형 SMR 시장 사업화 모델	170
그림 3.1.12 US.NRC 10CFR53과 10CFR50/52 비교	175
그림 3.1.13 사용후핵연료 소각기술 연계 SFR 개발 로드맵	177
그림 3.1.14 GEN-IV에서 제시한 납냉각로 개념 설계 도식화	179
그림 3.1.15 개발 중인 납냉각로의 넓은 적용 온도 범위와 높은 신뢰성 및 효율성	181
그림 3.1.16 해양 초소형원전(MicroURANUS) 개념 설계도	184
그림 3.1.17 전수명 핵연료 무교체 MicroURANUS의 안정 출력 생산 원리도	187
그림 3.1.18 AFATi 첨단 신소재 시제품의 노외 부식 시험을 통한 450℃ 부식층 두께 예측 결과	188
그림 3.1.19 AFATi 첨단 신소재 시제품의 고온 가속기 조사 시험을 통한 조사팽윤 측정 결과 ...	188
그림 3.1.20 G4M 발전소 묘사	189
그림 3.1.21 W-LFR 원자로 묘사	190
그림 3.1.22 BREST-OD-300의 구성도	191
그림 3.1.23 SVBR-100의 구성도	192
그림 3.1.24 ALFRED의 구성도	193
그림 3.1.25 ELFR의 구성도	194
그림 3.1.26 ELECTRA의 주요 시스템 모델	195
그림 3.1.27 SEALER CAD 모형	196
그림 3.1.28 MYRRHA 노심 모형	197
그림 3.1.29 CLEAR-I 노심 모형	198
그림 3.1.30 PEACER 노심 CAD 모형	199
그림 3.1.31 개발 중인 납냉각고속로의 관계도	201
그림 3.1.32 Original EU Sustainable Nuclear Energy Industry Initiative (ESNII)-2021	201
그림 3.1.33 초소형원전(MicroURANUS) 실증 개념도	206
그림 3.1.34 초소형원전(MicroURANUS) 기반 해양 수전해 수소생산 플랜트	206
그림 3.2.1 개발 중인 여러 형태의 용융염원자로	209
그림 3.2.2 MSRE에 사용된 불화염소 용융염의 고상과 액상	210
그림 3.2.3 용융염원자로계통의 보편적 시스템 개형도	212
그림 3.2.4 Helium bubbling 효과 및 용융염원자로 On-line reprocessing	213
그림 3.2.5 용융염원자로 저장탱크 모식도	214
그림 3.2.6 노형별, 작동온도별 원자로 활용 범위	215

그림 3.2.7 소형 용융염 원자로의 다목적 활용 방안	215
그림 3.2.8 다양한 용량의 용융염원자로 설계 및 형상	217
그림 3.2.9 CFD 접근법 활용정상상태 용융염원자로 주요 거동 평가	218
그림 3.2.10 정상, 과도상태의 용융염 온도 거동 평가를 위한 실험장치	219
그림 3.2.11 용융염 원자로 상사를 위한 실험(예)	219
그림 3.2.12 ORNL에서 제안된 ARE 용융염 원자로의 모형도	221
그림 3.2.13 ORNL에서 제안된 MSRE 원자로 용기	221
그림 3.2.14 ORNL에서 제안된 MSBR 노심 단면도	222
그림 3.2.15 중성자 영역에 따른 주 활용되는 원자로	223
그림 3.2.16 TerraPower사의 용융염 화학실험실과 부식시험장치	225
그림 3.2.17 TerraPower사의 종합효과시험시설 개념도(IET)	225
그림 3.2.18 국내 용융염원자로 개발 로드맵	227
그림 3.3.1 가압경수로와 고온가스로의 특징 비교	229
그림 3.3.2 핵연료 집합체 형태에 의한 원자로 형태 구분	229
그림 3.3.3 고온가스로를 이용한 수소 생산 시스템의 주요 계통	230
그림 3.3.4 피복입자핵연료의 구조	231
그림 3.3.5 고온가스로의 고유 피동안전성 개념	232
그림 3.3.6 초고온시스템 핵심기술 개발 사업	233
그림 3.3.7 MMR 원자로 개념도	234
그림 3.3.8 MMR 비원자력플랜트 개념	235
그림 3.3.9 고온가스로의 핵심기술 분류	238
그림 3.3.10 수소 기술개발 로드맵의 기술 분류 체계(위) 및 부문별 추진전략(아래)	240
그림 3.3.11 초고온 시험로 기술개발 사업 개요도	245
그림 3.3.12 핵심 기술 개발 로드맵	246
그림 3.3.13 히트파이프 작동 원리	247
그림 3.3.14 히트파이프 원자로 개념도 (Kilo Power)	248
그림 3.3.15 히트파이프 이용 원자력 배터리 개념	250
그림 4.1.1 국내 핵안보 규제이행 체계	268
그림 4.1.2 설계단계 핵안보 구현에 필요한 주요 요소	271

제 1 장

소형모듈원자로 시장 및 사업현황

제1절 소형모듈원자로

제2절 글로벌 소형모듈원자로 개발현황

제3절 시장전망

제4절 주요국의 개발전략

제5절 주요 소형모듈원자로 사업현황

제1장 소형모듈원자로 시장 및 사업현황

소형모듈원자로는 역사적으로 오래된 개념이다. 초창기 원자로(1970년대 이전)는 전기출력이 500 MWe 이하의 원자로가 다수였으며, 수송수단의 동력원, 오지 및 극지 열원 공급, 분산전원, 담수생산을 위한 열원 제공 등 특수목적용으로 개발되었다. 화력에 비해 대형화가 쉽고, 우라늄 자원의 경제성과 함께 고밀도 에너지의 특성이 알려짐에 따라 원자력은 전력원으로서 각광 받으며 대형화가 급속하게 추진되었다. 원자력 산업계는 3번의 큰 사고(1979년 TMI, 1986년 체르노빌, 2011년 후쿠시마)를 통하여 안전성 향상과 원자력 산업의 르네상스를 위하여 새로운 원자로 개발 방향을 모색하였다.

소형모듈원자로는 원자력 산업계의 고민의 결과로써 제안된 노형이다. 수냉각형 원자로에서 비수냉각형 제4세대 원자로형태인 SFR, MSR 및 GCR에 이르기까지 SMR(Small Modular Reactor)이라 불리는 소형모듈원자로는 2020년대 이후의 원자력 산업계를 선도하는 원자로로써 각국에서 개발되고 있으며 새로운 시장을 개척하고 있다. 본 장에서는 소형모듈원자로의 정의를 되짚어 보면서 개발현황, 시장 및 사업현황 등을 기술하였다.

제1절 소형모듈원자로

소형모듈원자로는 Small Modular Reactor의 약자인 SMR로 통칭됨. 2010년 이전 자료에는 SMR은 Small and Medium Reactor로 조어되었으나 Module 설계가 SMR의 중요한 설계특성으로 인식됨에 따라 SMR의 조어는 현재 Small Modular Reactor를 일반적으로 사용함.

1. 개요

- 역사적으로 SMR은 중소형 원자로인 Small and Medium Reactor로 정의되었음. 그림 1.1.1에서처럼 1980년대까지 발간된 OECD 문서와 IAEA의 SMR 관련 문서에서는 Small and Medium Reactor를 SMR로 표기하고 있음[1.1-1~1.1-3].
 - IAEA의 1985년 TECDOC-347에서 SMPR(Small and Medium Power Reactor)이라는 용어를 최초로 사용한 것으로 추측됨.
 - OECD-NEA는 1991년 Small and Medium Reactor (SMR) 용어를 정의하며, SMR의 시장 전망을 아래의 5가지 요소로 평가하였으며 향후 원자력발전 시장의 주력이 SMR이 될 것으로 예상함. 여기서 SMR은 600 MWe 이하의 원자로를 지칭함.
 - 대중수용성의 향상 (Improving public acceptance)

- 전력시장에서 원자력 점유율 증가 (Increasing the nuclear share of the electricity market)
- 공정열 등 열원 공급 시장 수요 창출 (Opening up heat markets)
- 경제성에서 경쟁력 제고 필요 (Economic competitiveness)
- SMR의 적기 건설 및 운전 시급 (Lack of any operating plants)

○ IAEA는 1996년 TECDOC-881을 발간하면서 SMR이라는 용어를 본격적으로 사용하면서 SMR의 경쟁력을 아래의 6가지 요소로 분석함. IAEA는 전문가 의견수렴을 통하여 700 MWe 이하의 원자로를 중소형원자로인 SMR로 정의함.

- 설계 단순화 (Simpler design) : 건설공기 단축을 위한 모듈화, 대형보다 모듈화 용이
- 향상된 안전여유도 (Increased safety margin) : 더 낮은 CDF, 더 긴 grace period
- 수월한 그리드 적합성 (Better match to grid requirements)
- 전력 외 에너지 시장 수요창출 (Open up energy markets): process heat, desalination, district heat 등
- 다수기 공급의 수월성 (Easier multi-unit siting)
- 낮은 파이낸싱 위험 (Lower financing risk)

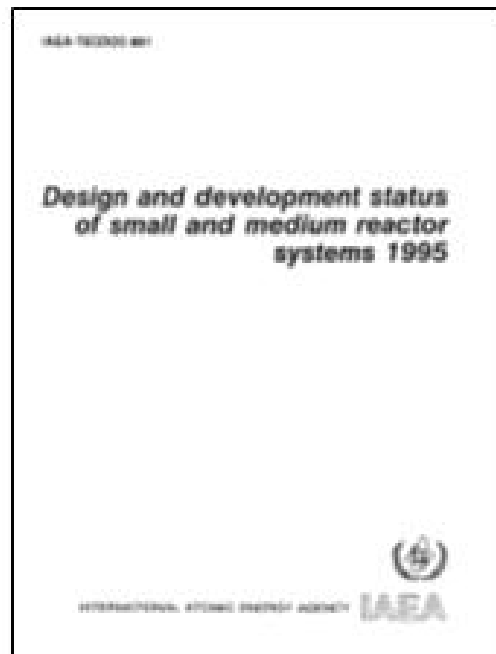
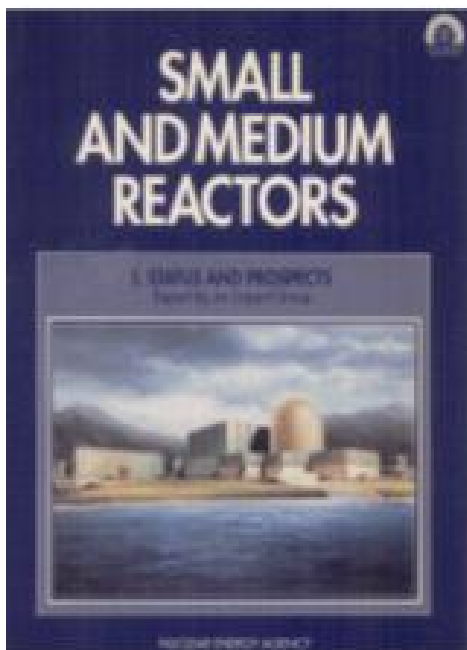


그림 1.1.1 초창기 SMR에 대하여 소개한 보고서(OECD와 TECDOC-881)

○ SMR의 정의에서 Modular의 의미가 강조된 시점은 DOE의 LTS 프로젝트 시작과 함께

NuScale 원자로의 선정으로 본격적으로 진행된 것으로 보임.

- 소형모듈원자로의 경제성은 모듈설계를 반영하여 공기단축, 물량저감, 유지/보수 비용 절감, 공장 내 제작 최대화, 육상운송성 등을 확보하는 것이 중요한 것으로 평가함[1.1-4].
- 미국 DOE에서는 Advanced Reactor 개발과 SMR (Small Modular Reactor)의 Detailed Design and Engineering (DD&E) 지원을 위한 SMR Licensing Technical Support (LTS) Program을 2012년 ~ 2017년까지 수행. LTS에서 NuScale을 선정한 DOE는 Small Reactor에서 Small Modular Reactor (SMR)를 공식용어로 사용하며 SMR의 개념 정의에서 모듈 개념을 SMR 개발의 중요한 요소로서 강조함[1.1-5].
 - 당시 DOE 장관인 Steven Chu는 Wall street Journal(2010. 3.)에서 Small Modular Reactor (SMR)이라는 용어를 공식적으로 사용하며 아래와 같이 정의함.
 “The small size makes them suitable to small electric grids so they are a good option for locations that cannot accommodate large-scale plants. The modular construction process would make them more affordable by reducing capital costs and construction time”[1.1-6].
- IAEA SMR 관련 현황 보고서인 ARIS에서 NuScale 원자로의 대두와 미국 DOE의 SMR에 대한 새로운 용어 정의가 본격적으로 소개되면서 SMR의 조어를 Small Modular Reactor로 변경한 것으로 유추됨.
 - Modular의 의미를 중소형 원자로가 가지는 설계특성(Design Feature) 중의 일부로 고려하였으며 CAREM과 SMART의 조어에 ‘Modular’가 포함되어 있음.
 - NuScale이 LTS에 선정된 이후 Modular 특성이 중소형 원자로가 경쟁력을 가지기 위한 필수요소로써 부각되기 시작함(그림 1.1.2 참고).

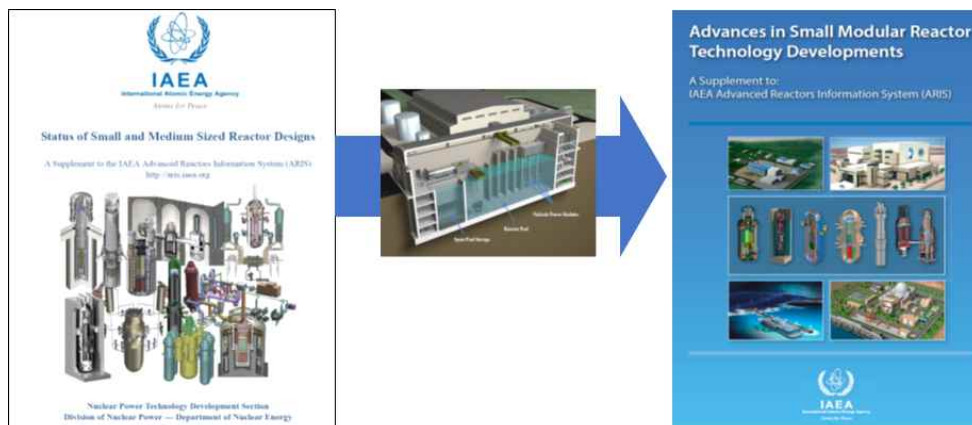


그림 1.1.2 SMR의 용어 정의가 변경된 시점에서 IAEA ARIS 포제

2. 소형모듈원자로 (SMR)의 정의

○ 소형모듈원자로는 IAEA, DOE, WNA, OECD-NEA등에서 아래와 같이 정의하고 있음.

- IAEA : 한기당 300 MWe 이하의 용량을 가지며 핵분열을 작동원리로 하는 모듈화된 원자로. 모듈화는 설치위치까지 수송이 용이하고, 계통 및 기기수준에서 공장내 조립이 가능하도록 단위화. IAEA는 공식적으로 SMR을 “Small and Medium Sized or Modular Reactor” 로 사용하고 있음[1.1-7].
- DOE : SMR은 안전하고(safe), 깨끗하고(clean), 합리적인 가격(affordable)을 제공하는 원자로. SMR의 크기는 10 ~ 100 MW 수준으로 다양하게 구상될 수 있으며 전력 생산이외의 공정열, 담수화 등 다양한 요청에 맞게 가변적임. SMR의 주요 장점은 모듈화, 낮은 자본투자, 부지 유연성, 우수한 효율성, 강화된 핵안보/안전조치/비확산성이며, 사회적 기여로 미국 산업생태계 및 경제성장의 기여를 강조함[1.1-8].
- WNA : SMR은 300 MWe 수준 및 그 이하의 용량을 가지고 모듈기술로 설계된 원자로. 모듈 기술은 모듈단위의 공장 내 제작, 다수기 제작과 공기 단축이 가능하도록 하여 대량생산 경제를 추구하는 기술임[1.1-9].
- OECD-NEA : Small은 출력용량 300 MWe 이하 10 MWe 이상을 의미하며 Modular는 모듈러 제작, 공장생산, 이송용이성과 용량별 배치가 가능한 설계이며, 원자로는 직접적으로 열을 생산하거나 전기를 생산하는 핵분열 원자로를 의미함[1.1-10].

○ 다양한 기관에서 설정한 소형모듈원자로의 정의에서 SMR은 용량(Small), 모듈(Modular), 그리고 원자로(Reactor) 관점에서 적합한 정의를 내릴 수 있음[1.1-4].

○ 용량 관점에서 소형(Small)은 전기출력 300 MWe 이하를 통상적으로 지칭함. 초기 중소형 원자로의 정의에서 승계된 것으로 유추되며, 중소형 원자로의 용량을 정의할 때 전문가들의 의견을 취합하여 결정함[1.1-3].

- 전기출력 관점에서 소형은 10 MWe ~ 300 MWe, 중형은 300 MWe ~ 700 MWe, 대형은 700 MWe 이상의 용량으로 구분됨. 10 MWe 이하의 원자로는 초소형원자로(Micro Reactor)라고 지칭함.

○ 소형모듈원자로에서 원자로의 기능적 정의를 강조하는 용어인 모듈은 좁게는 계통, 구조, 기기의 모듈화에서부터 넓게는 건설공기 단축을 위한 전 공정과정 중에 발생하는 모듈설계를 포함함. 소형모듈원자로의 경제성은 규모의 경제(출력의 규모) 관점에서 대형원자로에 비해 경쟁력이 없는 것으로 평가되나, 소형원자로의 용이한 모듈설계 및 모듈제작성은 소형모듈원자로의 경제성을 확보할 수 있는 수단을 제공함[1.1-10].

- DOE는 모듈화(modularity)를 NSSS의 주요 기기는 공장 내 제작이 가능하고 사용처까지 운송이 용이하게 하는 SMR의 특징으로 정의. 대형원전인 AP1000의 경우,

에서도 모듈화에 의한 주요기기들이 공장에 제작되고 있으나 대부분의 작업은 현장에서 조립, 제작되고 있음. SMR의 모듈화는 주요기기의 공장제작과 용이한 운송으로 인해 분명한 공기단축 효과가 있는 수준을 의미함 [1.1-8].

- WNA에서는 모듈화를 모듈건설(modular construction)로 특정하여 정의함. IRIS(~330 MWe) 연구에서 원자로 크기와 용량은 다수기 운영에 적합한 설비이고 모듈건설공법을 도입하기 적절한 크기로 평가함. 대형원자로 1기 건설에 비해 다수기로 제작되므로, 규모(용량)의 경제가 아닌 대량생산(serial production)의 경제가 SMR의 경제성 평가 시 작동할 수 있을 것으로 예상함. IRIS 연구진들은 대량생산에 의해 도달한 SMR의 경쟁력이 1000 MWe 대형 원자로와 유사한 수준의 경제성을 가질 수 있는 모델을 제시함[1.1-10].
- SMR의 모듈화에 대한 운송성, 건설성, 경제성 관점에서 분석한 최근 연구[1.1-11]에서는 SMR의 모듈화의 장점과 단점을 아래와 같이 분석하였으며, 모듈 수준이 80%에 도달할 경우 300 MWe 기준의 SMR의 건설비용(USD/kWe)은 45% 절감이 가능하여 약 5,470 USD/kWe로 평가함.
 - 장점 : 건설 공기의 단축, 건설비용의 감소, 반복성과 학습곡선의 향상, 향상된 건설성과 숙련 노동력 이용률, 환경영향의 감소
 - 단점 : 모듈 운송 및 설치(lifting과 supporting) 제약조건 부과, 모듈화를 위한 추가 설계 비용, 연속 제작의 필요성, 인허가 위험

○ 원자로 노형은 IAEA 자료에 의하면 단기 건설 목표 노형의 경우는 약 60%가 수냉각형 노형(PWR, BWR)이고 장기 건설 목표(2035년 이후 전망) 노형의 경우는 비수냉각형 제4세대 원자로형(MSR, GCR, LMR)까지 확장[1.1-7]. 최근 IAEA는 SMR TWG(Technical Working Group)를 통해 SMR 및 MMR(Micro Modular Reactor)의 개발현황을 그림 1.1.3과 같이 종합함.

- 모든 SMR은 핵분열을 적용하는 원자로이며, 고속로 9개(MSR, GCR 각 1개)와 열중성자로 50개로 IAEA는 조사함. 이 중 수냉각형 원자로는 59개 SMR 중 29개로 50%를 차지함*.

* 그림 1.1.3의 자료 중 MMR과 25 MWe 이하 SMR은 제외함.

○ OECD NEA는 조기 배치가능성이 있는 42개의 원자로를 선택하여 인허가성(Licensing), 배치(Siting), 재정(Financing), 공급망(Supply Chain), 관여활동(Engagement), 연료(Fuel) 등 6가지 항목에 대하여 원자로 실현성을 평가함[1.1-12~1.1-13].

- 평가된 SMR은 고속로 9개와 열중성자로 33개로 구성되며 이 중 수냉각형 원자로는 16개, GCR은 10개, SFR 9개, MSR은 6개이며 이중 MMR은 10개임.

- 수냉각형 원자로 16개 중 배치 가능성이 높은 원자로 10개(SMART, i-SMR, SMR-160, BWRX-300, ACP100, NUWARD, Rolls-Royce SMR, VOYGR, RITM-200, CAREM)의 실현성과 주요 제원을 표 1.1.1과 표 1.1.2와 같이 평가함.
 - 원자로의 실현성은 OECD-NEA의 dashboard 자료를 준용하여 평가하였으며, 6점 척도로 항목별 점수가 구성되며 각 항목의 단계는 아래 기준으로 측정함.

Licensing	No information	Pre-licensing	Licence/construction/design certification application submitted	Design approved	Licence to construct approved	Licence to operate approved
	* Bonus for multiple jurisdictions					
Siting	No information	Non-binding agreements/MOUs/non-binding announcements	Site owner has shortlisted the technology	Site owner has selected the technology	Received permit(s) and or licence(s) for construction on the site	Construction has started on the site
	* Bonus for multiple sites					
Financing ⁽¹⁾	No information	At least one announcement	Five or more announcements or USD 100 million	Ten or more announcements or USD 500 million	FOAK is fully financed	FOAK financed + progress for NOAK finance
Supply chain ⁽²⁾	No information	Supplier days/events/workshops/trade shows/non-binding agreements/MOUs/non-binding announcements	Binding contracts for services & materials	Partnerships/joint ventures/consortia - all with EPCs	FOAK construction ongoing/complete	NOAK construction ongoing
Fuel	No information	Non-binding agreements & studies with national labs for RDD/Lab-scale production of fuel	Contracts/agreements with fuel supply chain (uranium/conversion/enrichment/fabrication)	Operating fabrication facility producing fuel, or uses same fuel as existing/generation-III commercial reactors	Contracts for fuel for FOAK	Fuel loading has begun

표 1.1.1 주요 수냉각형 원자로의 배치가능성 평가*

원자로명	인허가성	배치	재정	공급망	연료	종합평가 (30점)
SMART	4	2	4	4	4	18
SMR-160	2	2	3	4	4	15
BWRX-300	3	4	5	4	4	20
ACP-100	5	6	5	5	4	25
NUWARD	2	2	4	4	4	16
Rolls-Royce SMR	2	3	4	4	4	17
VOYGER	4	4	4	4	4	20
RITM-200	3	4	5	4	4	20
CAREM	4	6	5	5	5	25

*OECD-NEA의 SMR dashboard의 평가를 참고함.

표 1.1.2 진척도가 높은 수냉각형 원자로의 주요 제원

원자로명	열출력 (MWth)	압력 (MPa)	출구온도 (섭씨)	순환방식	집합체수	압력용기 (H/D, m)	수용성붕산 사용 유무 (Y/N)	진척도*
SMART	365	15	322	강제순환	57	18.5/6.5	Y	상세설계 (표준설계완료)
i-SMR	540	15	320.9	강제순환	69	23.0/5.0	N	개념설계
SMR-160	525	15.5	321	자연순환	57	15.0/3.0	Y	상세설계
BWRX-300	870	7.2	287	자연순환	240	26/4.0	N	상세설계
ACP-100	385	15	326	강제순환	57	10/3.35	Y	건설 중
NUWARD	540	15	307	강제순환	76	15.0/5.0	N	개념설계
Rolls-Royce SMR	1358	15.5	325	강제순환	121	7.9/4.2	N	상세설계
VOYGER	250	13.8	321	자연순환	37	17.7/2.7	Y	상세설계 (표준설계완료)
RITM-200	190	15.7	321	강제순환	199	7.5/3.4	N	상세설계
CAREM	100	12.25	326	자연순환	61	11/3.2	Y	건설 중

*IAEA ARIS 2022의 진척도를 참고함.

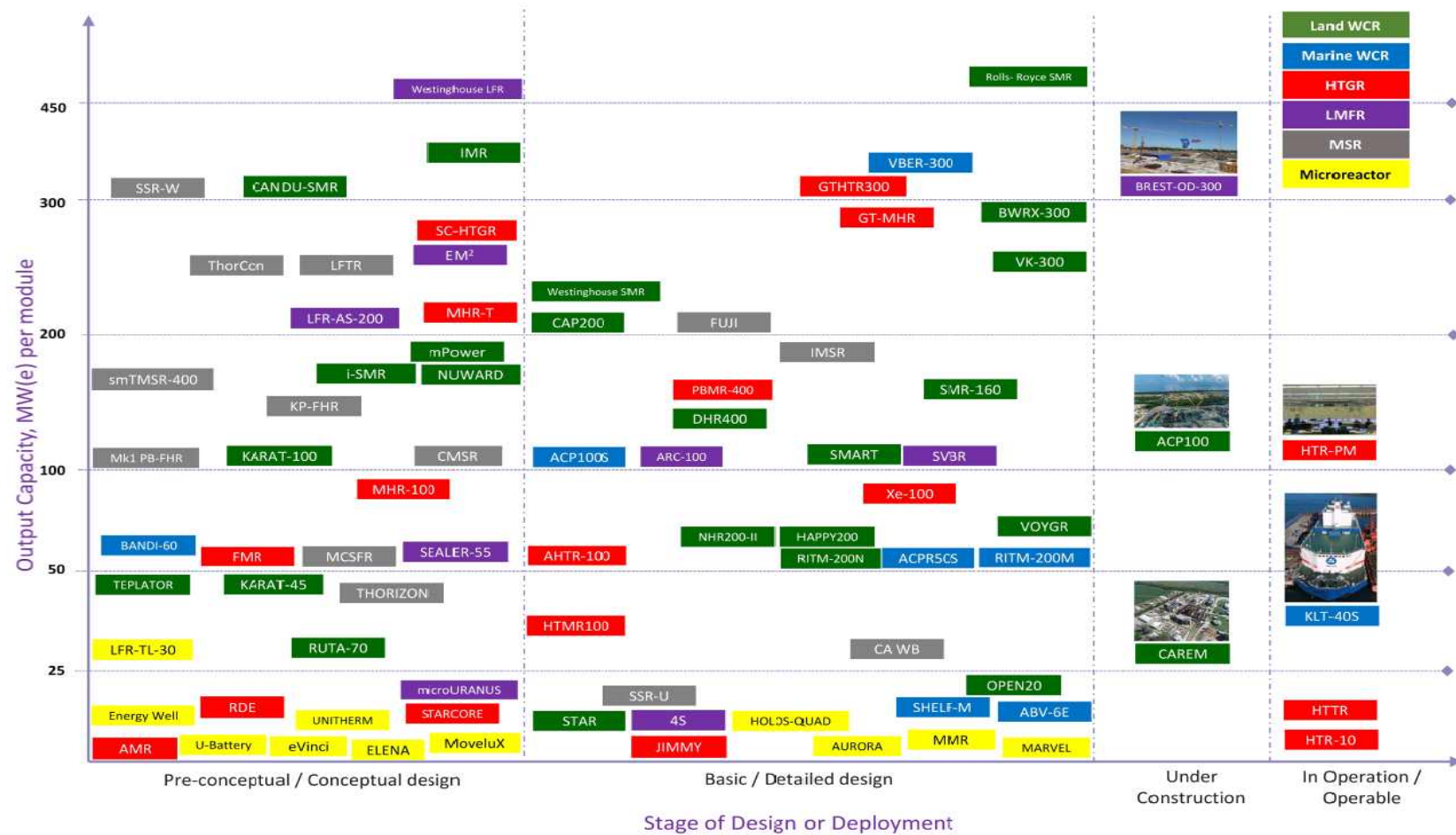


그림 1.1.3 SMR 설계 및 건설 및 운영 현황 [1.1-4]

제2절 글로벌 소형모듈원자로 개발현황

소형모듈원자로는 전 세계적으로 개발되고 있으며, 각국의 전문가들이 모여서 관련 정보를 IAEA의 SMR TWG에 보고하고, 최신자료를 갱신하면서 2년 주기마다 ARIS(Advanced Reactor Information System)를 발간하고 있음. 본 절에서는 각국의 주력 소형모듈원자로 개발현황을 개괄함.

1. 개요

- 소형모듈원자로는 그림 1.2.1과 같이 북미, 동북아시아 그리고 러시아등에서 활발하게 개발되고 있음. 미국과 유럽은 민간영역에서 개발과 사업을 주로 하고 있으며, 동북아시아(한국, 일본, 중국)와 러시아는 정부 주도로 개발이 수행되고 있음.
- 2022년 시점으로 전 세계적으로 다양한 소형원자로가 개발되고 있으며, 약 60개의 노형이 개발, 건설 및 운영 중에 있음[1.1-4].

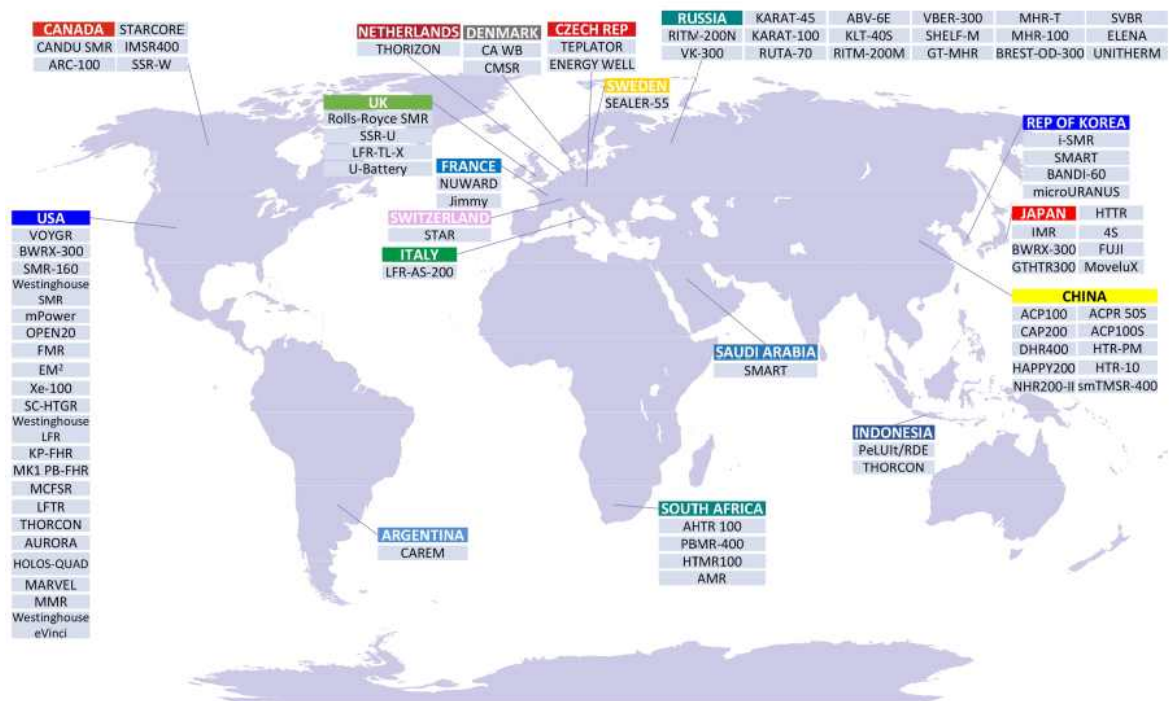


그림 1.2.1 세계 주요 소형원자로 개발 현황 [1.1-4]

- 소형모듈원자로들은 출력별로 다양하게 개발되고 있으며 수냉각형 원자로에 대하여 출력별 주요 소형모듈원자로는 그림 1.2.2와 같음. 출력은 수요자의 요구에 따라 결정되며 기존 대규모 전력망의 노후 화력발전소 대체, 원격지 소규모 분산전원, 난방열, 해수담수화, 수소생산 등 다양한 수요시장이 있음.

- 수냉각형 소형모듈원자로는 기존 상용원전의 입증된 기술을 충분히 활용하면서 안전성과 경제성을 높이기 위해 진보된 설계개념을 보완하고, 장기적으로 안전성과 경제성을 획기적으로 향상시키기 위해 혁신적인 개념과 기술을 적용함. 소형모듈원자로의 용량한계인 300 MWe 근방의 원자로와 모듈 기술에 초점을 맞춘 50~150 MWe 원자로가 수냉각형의 주종을 이루고 있음.
- 비수냉각형 소형모듈원자로는 MSR, GCR, SFR 3종의 원자로가 주종을 이루며 30여 개의 원자로가 개발 중에 있음. MSR은 연료 자체가 용융염 형태를 이룬 원자로와 TRISO 등의 고체연료를 기반으로 용융염을 냉각재로 사용하는 원자로형태로 구분됨.

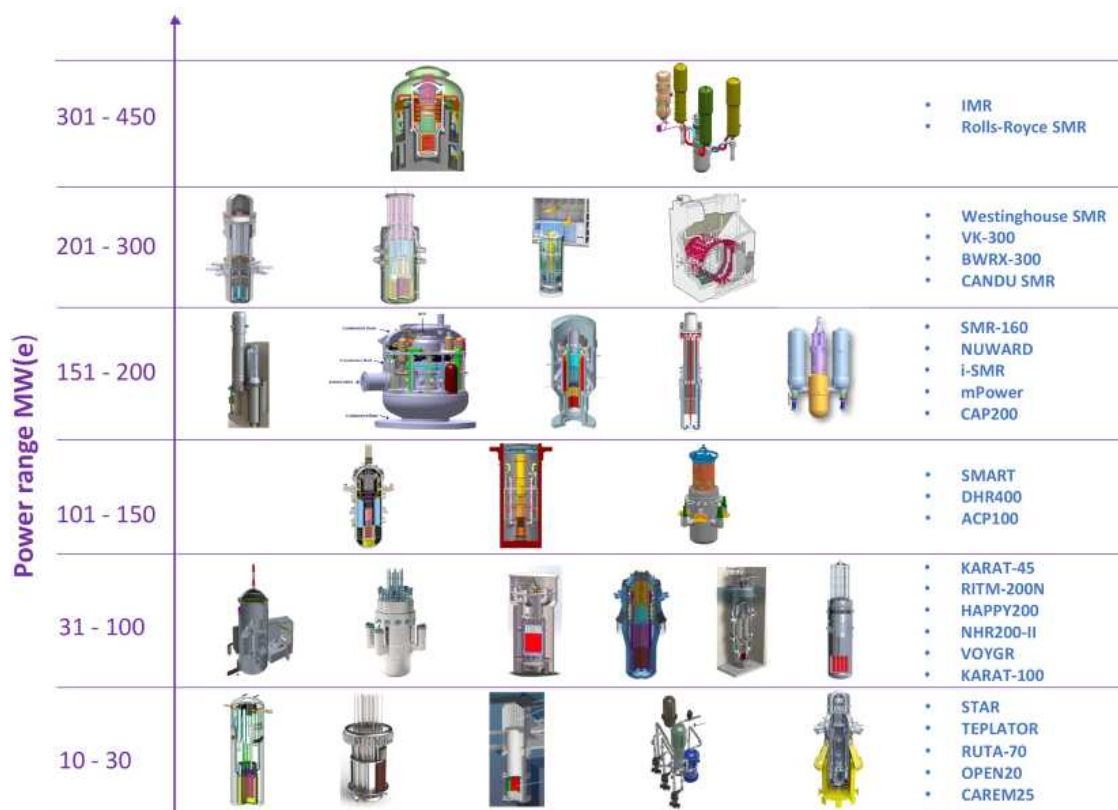


그림 1.2.2 출력별 주요 수냉각형 소형모듈원자로 [1.1-4]

2. 국가별 기술 개발현황

(1) 한국

- 한국원자력연구원의 SMART100을 시작으로 한전기술은 해양용으로 BANDI-60S를 개발하고 한국수력원자력(KHNP)과 한국원자력연구원(KAERI) 그리고 산업체 공동으로 혁신형 SMR(i-SMR) 등이 개발되고 있음. 초소형 원자로 및 선진원자로는 학계를 중심으로 개념이 완료되었거나 진행 중임.

원자로	개발자	노형	출력 (MWe)	비고
SMART-100	KAERI	PWR	110	일체형
BANDI-60S	한전기술	PWR	60	블록형/해양용
i-SMR	KHNP/KAERI	PWR	170 (4기 모듈)	일체형
KAIST-MMR	KAIST	SCO ₂ -cooled	12	일체형
URANUS	UNIST	LFR	18	일체형/해양용
REX-10	서울대	PWR	10 (열)	일체형/자연순환

- SMART-100은 KAERI가 개발하는 일체형 소형 가압경수로임. 노심, 증기발생기, 가압기, 원자로냉각재펌프 등 주요 기기가 원자로압력용기에 내장되어 있음[1.2-2].
- 완전피동 안전계통, 카세트형 헬리컬 증기발생기, 캔드모터 RCP 등을 개발·검증함.
 - 후쿠시마 사고 대처 설비가 마련되어 SBO 시에도 3일간 안전상태를 유지할 수 있음.

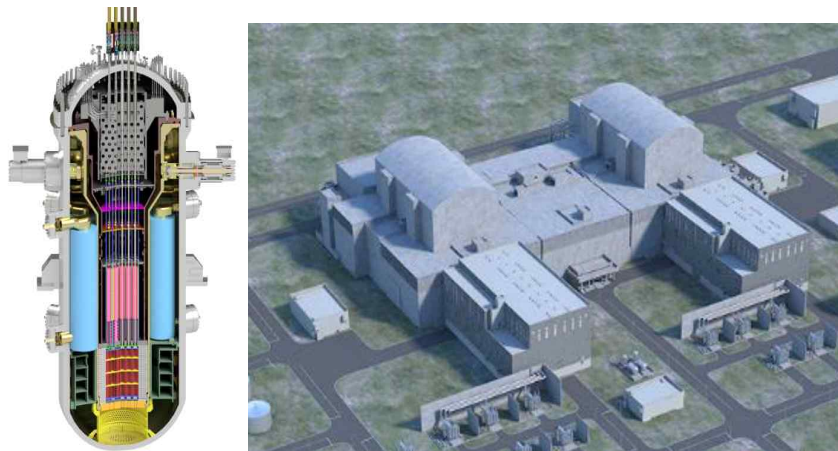


그림 1.2.3 SMART-100 개념도

- 국내 산-학-연이 개발하고 있는 i-SMR은 안전성과 경제성 향상을 위하여 완전피동 개념과 철제 격납용기를 채택하여 EPZ를 부지경계 내로 한정할 수 있는 일체형 가압경수로임.
- PECCS, PCCS, PAFS등 철제격납용기와 함께 완전피동 안전계통을 구성함.
 - 무봉산 노심, 내장형 제어봉 구동장치, 0.5 g 내진 설비가 도입됨.

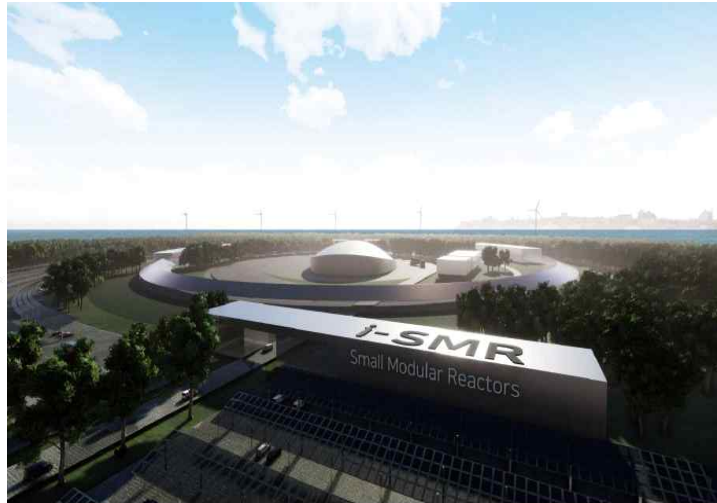
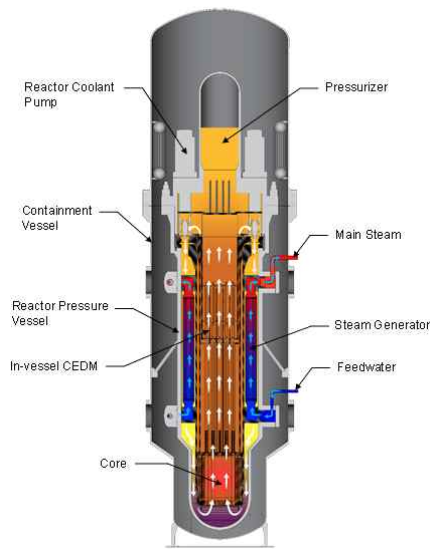


그림 1.2.4 i-SMR 개념도

○ BANDI-60S는 한전기술이 개발하는 소형 가압경수로로, 블록형(block-type) 설계 개념을 적용함. 원자로와 증기발생기를 대형 배관 없이 노즐-노즐로 직접 연결하여 일체형과 같이 대형 냉각재상실사고(LBLOCA)를 배제할 수 있음[1.2-3].

- 주기가 분리되어 있으므로 일체형에 비해 유지보수가 쉬움.
- 대규모 전력시장보다 원격지나 도서 지역의 분산전원, 난방열, 해수담수화 등 틈새시장 목표임.
- 무봉산노심, 내장형제어봉구동장치, 블록형 설계 개념 등 진보된 기술을 도입.

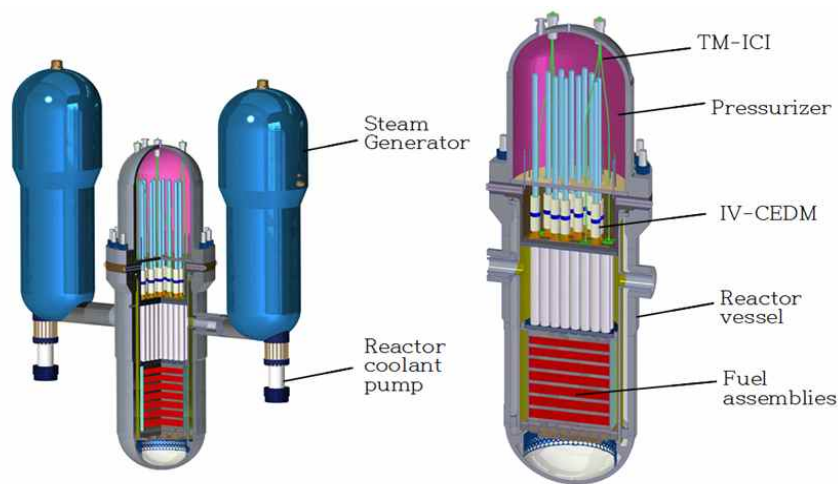


그림 1.2.5 BANDI-60S 개념도

○ KAIST는 초임계이산화탄소(SCO₂)를 열전달 매질로 원자로와 브레이튼 사이클 동력변환계통을 중간열교환기 없이 직접 연결한 초소형모듈형원자로(Micro Modular

Reactor, MMR)개념을 개발하였음[1.2-4].

- 고속로
- 재장전주기 : 20년 이상
- MMR 계통 전체 무게 : 약 155톤
- 길이 : 7 m
- 직경 : 약 3.7 m
- 공장에서 조립된 완성품을 트럭이나 선박으로 이송 가능

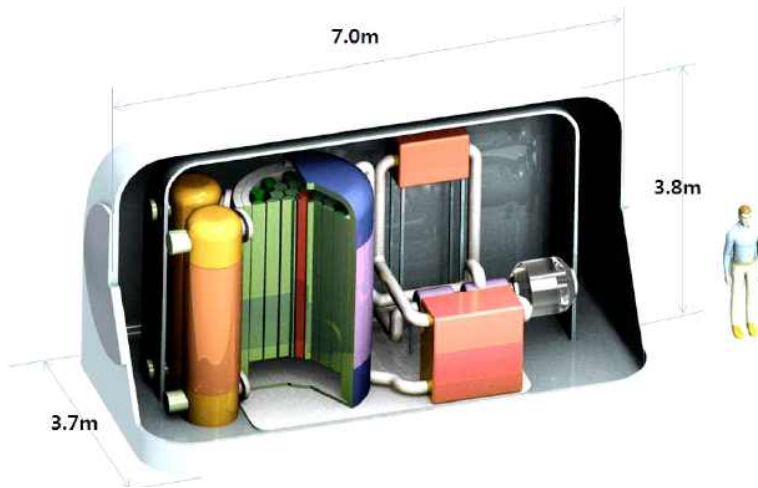


그림 1.2.6 KAIST-MMR 개념도

○ UNIST는 초소형원전연구단을 설립하고, 냉각재가 납-비스무스인 초소형원자로 URANUS를 개발 중임[1.2-5].

- 재장전주기 : 40년
- 쇄빙선이나 해양부유식 원전 등에 활용 가능

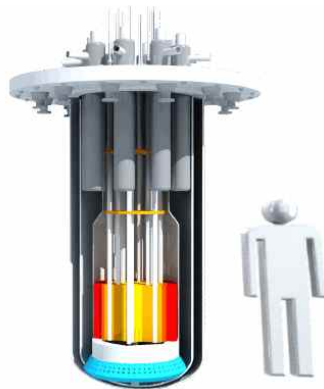


그림 1.2.7 UNIST URANUS 개념도

○ 서울대는 소규모 분산전원, 지역난방 등에 적합한 열출력 10 MW의 자연순환로 REX-10개념을 개발하였음[1.2-6].

- 핵연료 : 토륨
- 재장전주기 : 약 20년
- 일체형 원자로에는 질소가압기가 내장됨.
- RTF(REX-10 Test Facility)를 통한 자연순환 등 다양한 열수력 시험을 수행함[1.2-7].

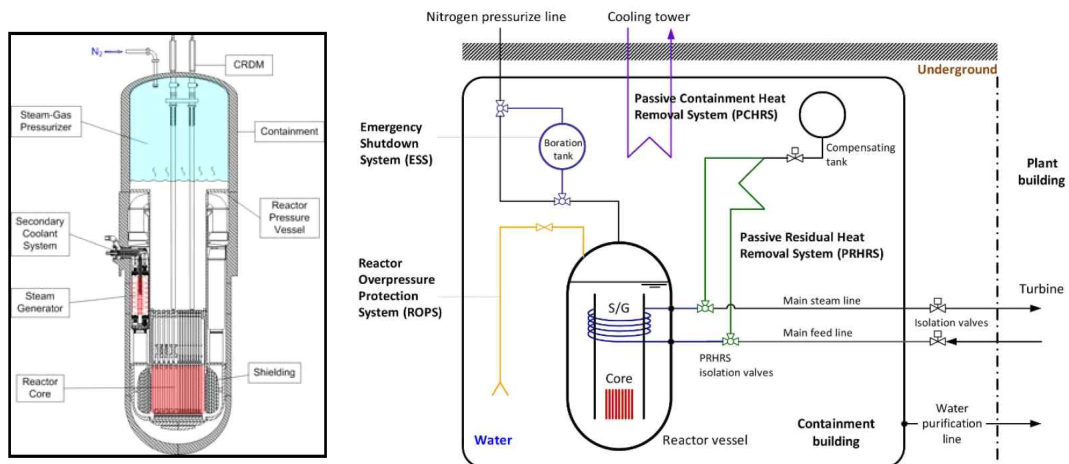


그림 1.2.8 서울대 REX-10 개념도

○ KAERI는 미래 수소경제에 대비한 대량수소생산 기술개발과 연계하여 초고온가스냉각로와 방사성폐기물을 획기적으로 줄이고 핵연료자원 이용을 극대화할 수 있는 소듐냉각고속로 및 해양 적용을 위한 용융염원자로를 개발하고 있음.

(2) 미국

○ 미국에서 개발되고 있는 주요 소형원자로들은 아래와 같음.

원자로	개발자	노형	출력(MWe)	비고
VOYAGR	NuScale Power	PWR	60	일체형/자연순환
W-SMR	Westinghouse	PWR	225	일체형
mPOWER	BWX	PWR	180	일체형
SMR-160	Holtec	PWR	160	블록형/자연순환
eVinci	Westinghouse	Heat Pipe	0.2~5	열전도관
SC-HTGR	Framatome	HTGR	272	블록형/Triso연료
Xe-100	X Energy	HTGR	75	블록형
EM ²	General Atomics	HTGR	265	블록형
SUPERSTAR	Argonne Lab.	LMFR	120	납냉각/자연순환
Lead Fast Reactor	Westinghouse	LMFR	450	납냉각
Liquid Fluoride Thorium Reactor	Flibe Energy	MSR	250	Fluoride salt
Mk1 PB-FHR	UC Berkley	MSR	100	Fluoride salt/TRISO fuel
Molten Chloride Salt Fast Reactor	Elysium Industries	MSR	50	Chloride salt/ 10~1,200MW까지 모듈 제작

○ NuScale은 일체형 자연순환 가압경수로임. 단위모듈의 전기출력은 60 MWe이며, 모듈을 다수 연결하여 출력을 720 MWe까지 확장할 수 있음[1.2-8~1.2-9].

- 자연순환 원자로
- 침수형 수조 냉각 및 철제 격납용기
- 2022년, 단위모듈 당 77 MWe로 출력 증강한 US-460모델을 NRC에 인허가 신청함.

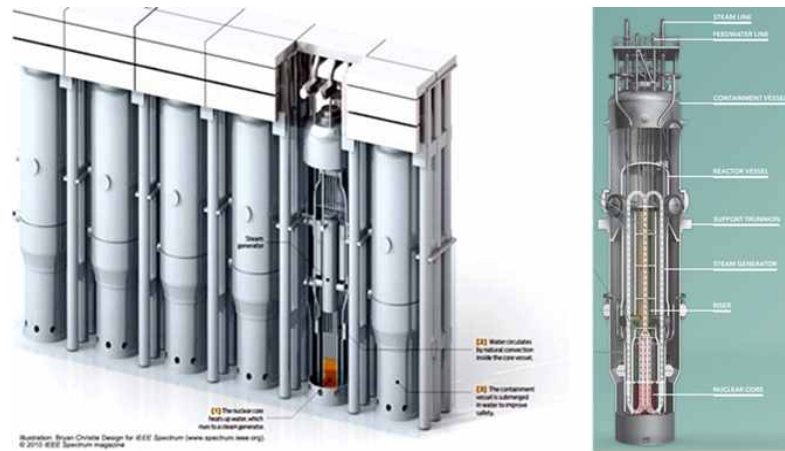


그림 1.2.9 NuScale 개념도

○ Westinghouse는 기존의 전기출력 225 MW의 일체형 소형 가압경수로를 포기하고 새로운 SMR인 300MWe 급의 1-loop 원자로인 AP300을 제시함[1.2-1].

- AP1000의 피동안전설계 개념을 계승하였음.
- AP1000을 1/3로 축소 설계하였으며, 1-loop 원자로 형태를 채택함.
- Nuclear Island는 미식축구장의 1/2 크기(약 50 m)에 모두 수용 가능한 소형 크기
- AP1000 기술을 바탕으로 한 원자로여서 인허가, 건설, 운용의 위험이 최소임을 강조

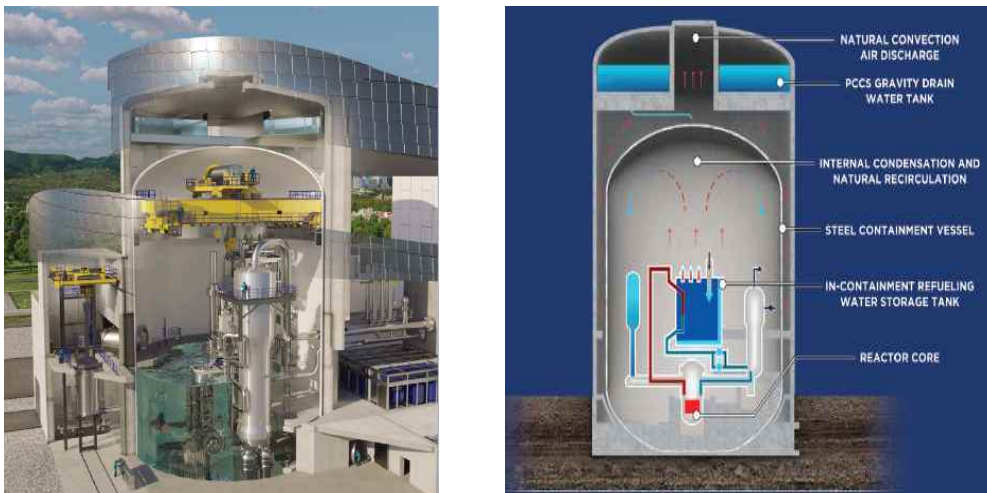


그림 1.2.10 Westinghouse SMR 개념도

○ eVinci는 Westinghouse가 개발 중인 초소형원자로임[1.2-10].

- 전기출력 : 0.2~5 MW
- heat pipe로 냉각함.
- 재장전주기 : 10년 이상

- SCO_2 브레이튼 사이클 방식임.

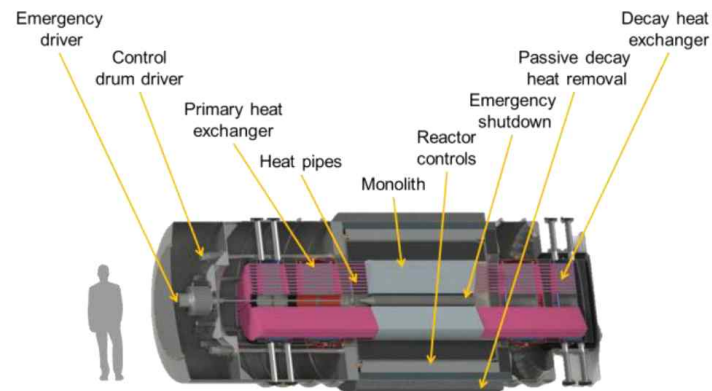


그림 1.2.11 eVinci 개념도

○ BWX Technology는 B&W 자회사로서 일체형 가압경수로 mPOWER를 개발하였음.

- 전체 원전 기본설계는 원자로 2개로 구성됨.
- 전기출력 : 390 MW
- 무봉산노심, 내장형제어봉구동장치, 직관형 과열증기발생기 방식을 채택함.
- 2017년 mPOWER 개발이 중단됨[1.2-11].

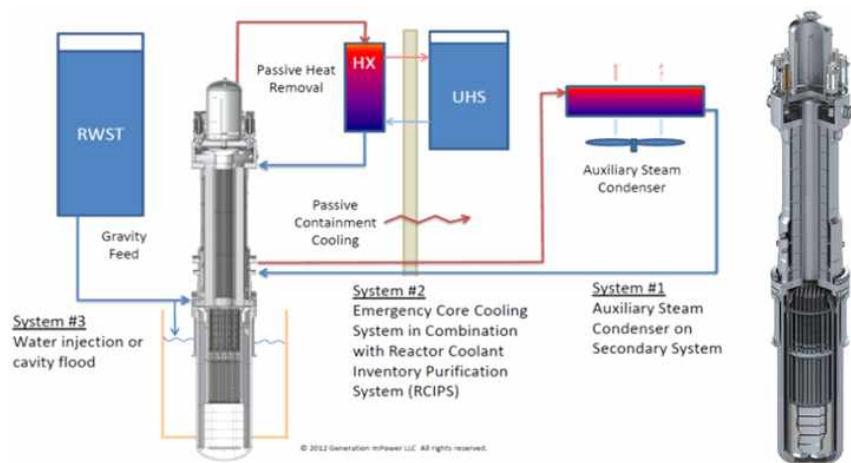


그림 1.2.12 mPower 개념도

○ SMR-160은 Holtec이 개발하는 블록형 자연순환 가압경수로임[1.2-12].

- 자연순환 방식의 PWR
- 전기출력 : 160 MW
- 재장전주기 : 18~24개월

- 설계수명 : 80년

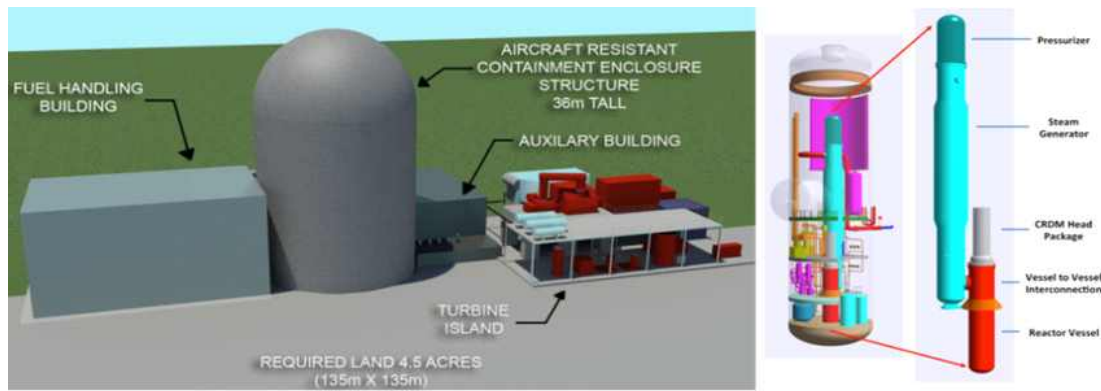


그림 1.2.13 SMR-160 개념도

- BWRX-300은 GE-Hitachi의 ESBWR 기술에 기반한 전기출력 300 MWe 비등경수로임[1.2-13].
- 자연순환 방식의 BWR
- 원자로 용기(D: 4 m, H: 26 m) 중량 : 약 485톤
- NRC 인증된 ESBWR(1,520 MWe)을 개량 및 소형화함.



그림 1.2.14 BWRX-300 개념도

(3) 영국

- 영국에서 개발되고 있는 주요 소형원자로들은 아래와 같음.

원자로	개발자	노형	출력(MWe)	비고
UK-SMR	Rolls-Royce	PWR	443	블록형/3-Loop
SSR	Moltex Energy	MSR	150	모듈 8개 연결 가능

○ UK-SMR은 소형 가압경수로이며, 개발에는 Rolls-Royce, Assystem, SNC Lavalin/Atkins 등 다수의 기업이 참여하고 있음[1.2-14].

- 전기출력 : 470 MWe
- 무봉산 노심, 피동안전계통, Canned Motor Pump, U-tube SG를 적용함.

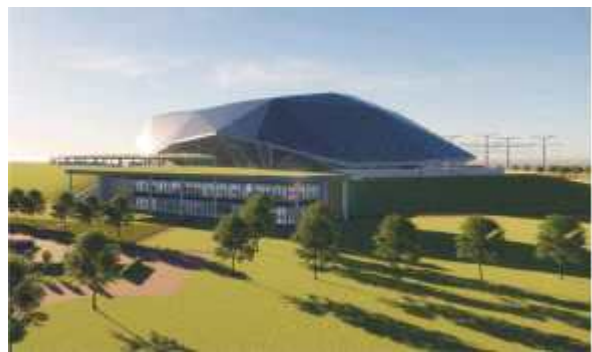
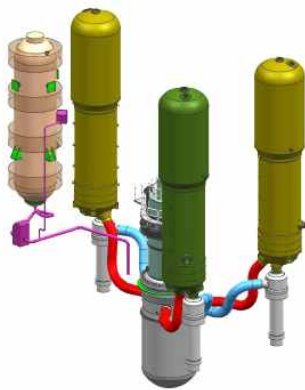


그림 1.2.15 UK-SMR 개념도

○ Moltex 사의 SSR은 혁신적 개념의 소형 용융염원자로임[1.2-15].

- 핵연료 종류에 따라 SSR-W(Pu연료), SSR-U(U연료), SSR-Th(Th연료)로 구분함.
- 전기출력 : 단위모듈 당 150 MW, 8개까지 연결하여 최대 1,200 MW까지 확장 가능함.

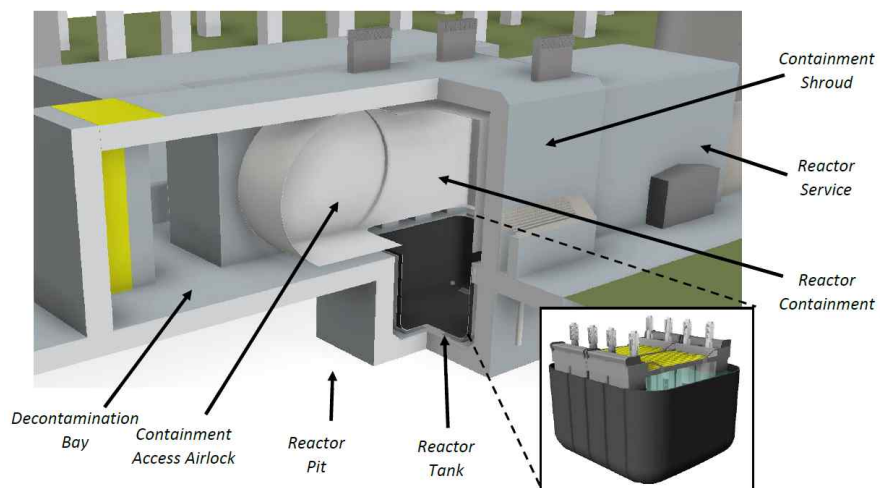


그림 1.2.16 Moltex SSR 개념도

(4) 프랑스

○ 프랑스에서 개발되고 있는 주요 소형원자로들은 아래와 같음.

원자로	개발자	노형	출력(MWe)	비고
Flexblue	DCNS	PWR	160	해저 설치, 수평형 SG
Nuward	TechnicAtome	PWR	170	내장형제어봉, 철제격납용기, 판형 SG

○ FLEXBLUE는 잠수함용 가압경수로 NP-300 기술을 기반으로 개발됨[1.2-16].

- 전기출력 : 50~250 MW
- 재장전주기 : 약 3년 (76개의 연료집합체로 노심 구성)
- 무봉산노심과 수평형 증기발생기를 채택함.
- 조선소에서 전체 모듈을 제작하여 연안의 100 m 해저에 설치함.

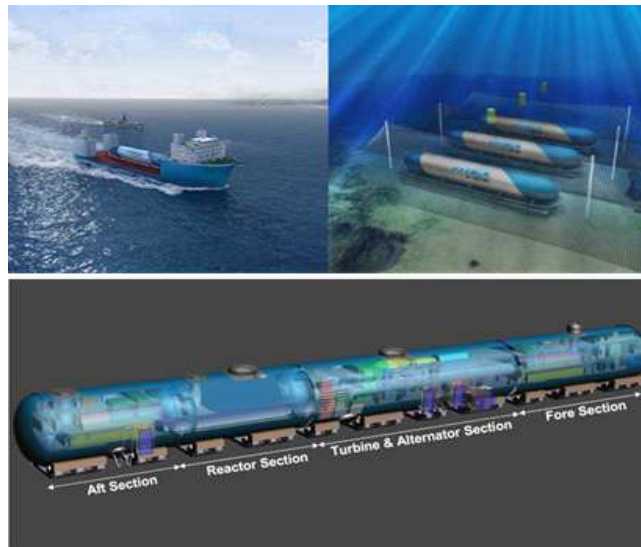


그림 1.2.17 FLEXBLUE 개념도

○ TechnicAtome 사는 CEA, EDF, Naval Group과 컨소시움을 이뤄 170 MWe급 원자로 Nuward를 개발 중이며, 최근 Westinghouse와도 협력하고 있음[1.2-17].

- 전기출력 : 170 MWe
- 무봉산 노심 (7 feet, 76 FAs), 피동안전계통, Canned Motor Pump, Compact Plate type SG를 적용함.

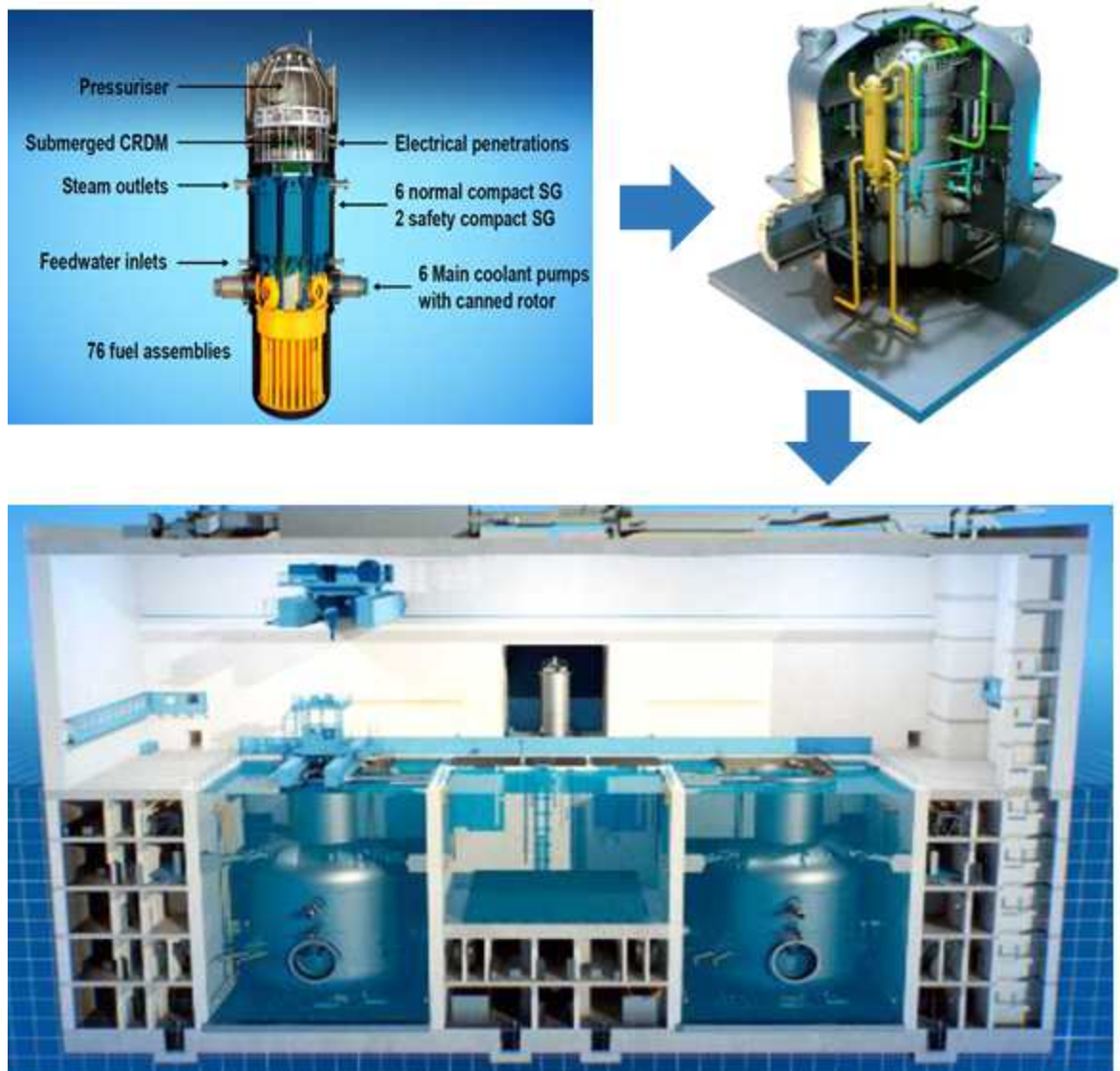


그림 1.2.18 Nuward 개념도

(5) 캐나다

○ Terrestrial Energy사는 IMSR(Integral Molten Salt Reactor)은 전기출력 190 MW 용융염원자로를 개발 중임[1.2-18~1.2-19].

- 흑연 감속재를 사용함.
- 전기출력 : 190 MW

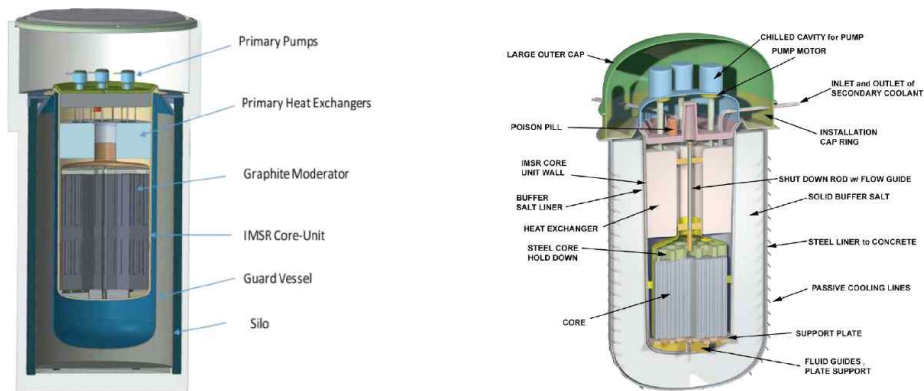


그림 1.2.19 IMSR 개념도

(6) 아르헨티나

○ CAREM은 아르헨티나 국립원자력연구소 CNEA가 개발하는 일체형 자연순환 가압경수로임.

- 전기출력 27 MW 원형로(CAREM-25)
- 출력운전 시 노심 출구의 냉각재는 포화상태에 약간 못 미치고 상승하면서 기포가 발달하여 자연순환을 활성화함.
- 내장형 제어봉구동장치, 무봉산노심, 나선형 과열증기발생기가 주요 특징임.

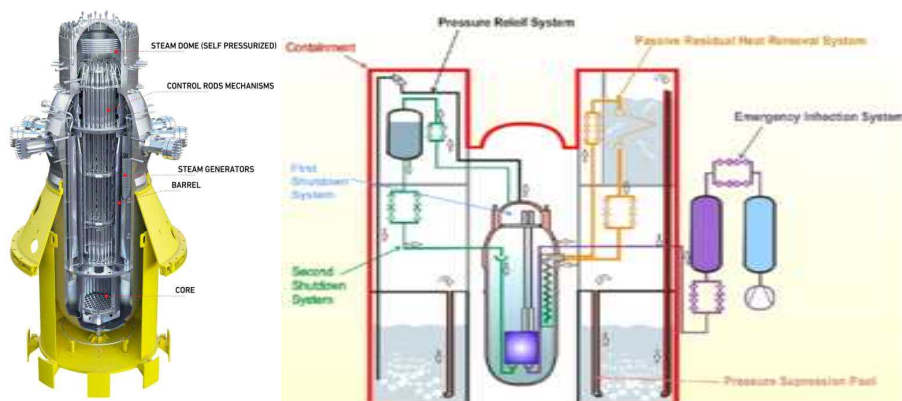


그림 1.2.20 CAREM-25 개념도

(7) 일본

○ 일본에서 개발되고 있는 주요 소형원자로들은 아래와 같음.

원자로	개발자	노형	출력(MWe)
DMS	GE-Hitachi	BWR	300
IMR	Mitsubishi	PWR	350
GTHTR300	JAEA	HTGR	100~300
4S	Toshiba	SFR	10
FUJI	ITMSF	MSR	200

○ 도시바의 4S는 일본 도시바가 개발 중인 전기출력 10 MW의 마이크로 원자로임.

- 향후 50 MW 원자로도 계획하고 있음.
- 제어봉 대신 노심 외곽에 설치된 반사판을 이용해 핵연료의 반응도를 조절함.
- 지하 30 m 깊이에 설치하고, 고농축 우라늄을 사용해 연료재장전 없이 30년 동안 사용함[1.2-20].

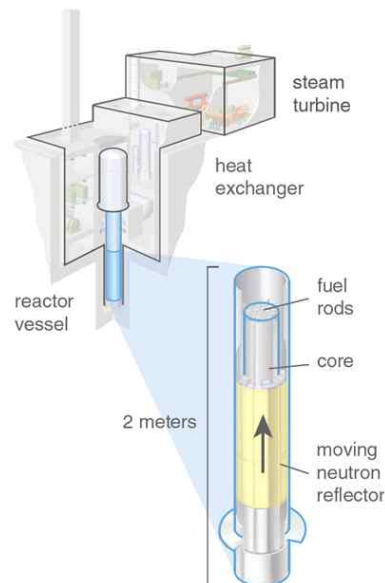


그림 1.2.21 4S 개념도

○ JAEA의 GTHTR300은 섭씨 950도까지 온도를 올릴 수 있는 초고온가스냉각로(VHTR)임.

- 열전달 매질은 헬륨임.
- 가스터빈으로 전기를 생산함.
- 고온열과 열화학적 물분해 IS 공정을 이용해 수소 생산 가능함[1.2-21].

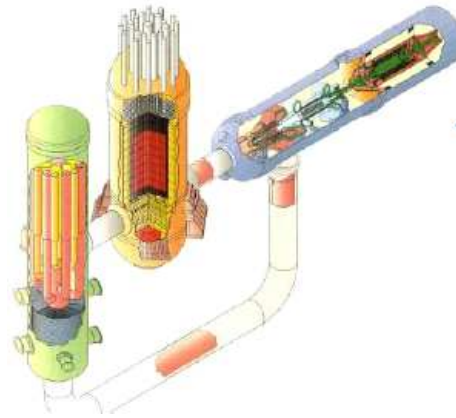


그림 1.2.22 GTHT300 개념도

- 일본은 1960~70년대에 열출력 36 MW급 선박용 원자로가 탑재된 상선 Mutsu를 진수하여 운용한 경험이 있고, 다양한 형태의 소형원자로 연구가 진행되고 있음.

(8) 러시아

- 러시아는 쇄빙선 동력원, 지역난방용, 이동식 전기공급용 등을 위해 중소형 원자로를 개발하고, 실제로 운용하고 있는 국가임. 러시아가 개발하는 다양한 중소형원자로들은 아래와 같음.

원자로	개발자	노형	출력(MWe)	비고
KLT-40S	OKBM	PWR	35 x 2	해양부유식/ Twin 설계
ELENA	Kurchatov Institute	PWR	0.068	자연순환
KARAT-45 KARAT-100	NIKIET	BWR	45/100	자연순환
RITM-200 RITM-200M	OKBM	PWR	50 x 2	일체형 해양부유식
RUTA-70	NIKIET	LWR	70 (열)	공정열 공급
UNITHERM	NIKIET	PWR	6.6	자연순환
VK-300	NIKIET	PWR	250	자연순환
ABV-6E	OKBM	PWR	6-9	해양부유식
SHELF	NIKIET	PWR	6.4	침수형
VBER-300	OKBM	PWR	325	해양부유식
GT-MHR	OKBM	HTGR	288	헬륨냉각
MHR-T MHR-100	OKBM	HTGR	205.5 x 4 25-87	헬륨냉각
BREST- OD-300	NIKIET	LMFR	300	납냉각
SVBR-100	JSC AKME Engineering	LMFR	100	납-비스무스 냉각

○ 러시아에서 개발되는 소형원자로 중에서 특히 주목할 만한 원자로는 KLT-40S임. 이 원자로는 해양부유식원전 아카데미 로모노소프(Akademik Lomonosov) 호에 2기가 탑재되어 2019년 말에 세계 최초로 상업운전을 시작함[1.2-22~1.2-23].

- 러시아 OKBM이 개발한 전기출력 35 MW 블록형 가압경수로임.
- 쇄빙선 추진용 원자로 KLT-40의 개량형임.
- 재장전주기 : 3~4년
- 전기출력 : 35 MW
- RITM-200M은 KLT-40S의 개량 원자로이며 Optimized Floating Power Unit(OFPU)에 2기가 탑재될 계획임[1.2-24].



그림 1.2.23 KLT-40S 개념도와 Akademik Lomonosov 호

(9) 중국

○ 중국은 수냉각형과 비수냉각형 SMR을 개발하고 실제로 배치하고 있으며 아래와 같은 다양한 원자로들을 개발하고 있음.

원자로	개발자	노형	출력(MWe)	비고
ACP100(S)	CNNC	PWR	125	일체형
CAP200	CGN	PWR	150/200	
DHR	CNNC	LWR	400 (열)	공정열 공급
ACPR50S	CGN	PWR	50	
HTR-PM	INET, Tsinghua Univ.	HTGR	210	

○ ACP100은 중국 CNNC가 개발한 일체형 소형 가압경수로임.

- 전기출력 : 125 MW
- 재장전주기 : 약 2년

- 해양부유식 원전 탑재용으로 ACP100S도 개발하여 인허가 중임.
- 중국 하이난 Changjiang 원전 부지에 2025년 준공 목표로 첫 데모 원전 건설이 진행 중임[1.2-24].



그림 1.2.24 ACP100S 개념도

○ ACPR50S는 중국 CGN이 개발하는 블록형 소형 가압경수로임[1.2-25].

- 전기출력 : 50 MW
- 재장전주기 : 약 30개월

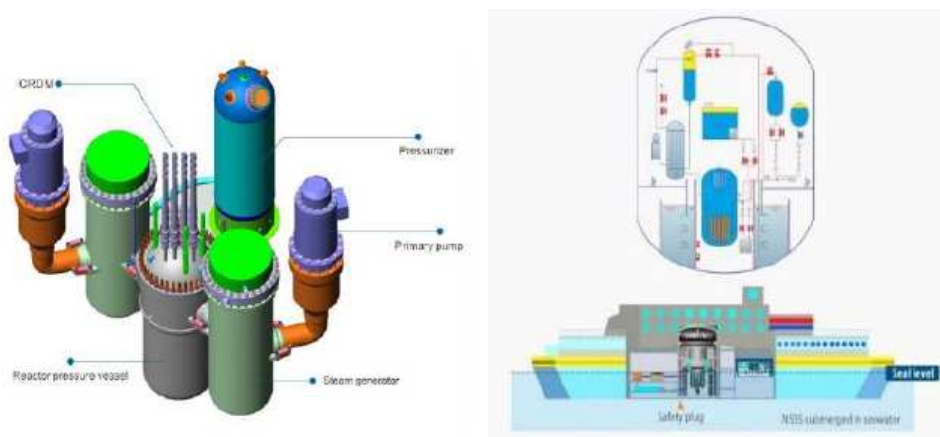


그림 1.2.25 ACPR50S 개념도

3. 세계 소형로 개발 동향 분석

○ 소형원자로는 기존 중앙집중식 전력망에 연결된 수백 MW급 노후 화력발전소를 대체하거나, 원격지의 소규모 분산전원, 난방열 공급, 해수담수화, 쇄빙선, 부유식해양원전 등 좀 더 넓고 다양한 분야에 활용할 수 있을 것으로 기대됨. 이런 새로운 미래 잠재시장과 기술을 선점하기 위해, 우리나라를 비롯해, 미국, 영국, 프랑스, 캐나다, 일본, 러시아, 중국, 아르헨티나 등이 경쟁적으로 다양한 소형원자로를 개발하고 있음.

- 잠재시장을 보는 관점에 따라, 기존 대규모 전력망의 노후 화력발전소 대체 등에는 출력인 큰 소형원자로가 유리하고, 원격지 및 소규모 분산전원 등의 다양한 활용에는 출력이 작은 쪽이 적합할 수 있음. 따라서 일부 개발자는 작은 용량의 모듈을 필요에 따라 여러 개 연결하여 원전 전체 용량을 조절할 수 있는 설계를 제안하고 있음.
- 기술적 관점에서는, 일부 개발자들은 미검증 기술로 인한 인허가 현안을 최소화하기 위해 기존 상용원전의 입증된 기술을 최대한 활용하면서 안전성을 보완하고, 일부는 장기적으로 좀 더 혁신적인 목표와 기술에 도전하고 있음. 현재 전 세계 상용원전의 약 70%를 차지하는 가압경수로 기술을 활용한 노형들이 전자에 속하고, 초고온가스냉각로(VHTR), 소듐냉각고속로(SFR), 납냉각고속로(LFR) 등 비수냉각형 4세대 노형들이 후자에 속함.
- 현재 전 세계에서 개발 중인 약 80종류의 주요 소형원자로 중에서 한국의 SMART, 미국의 NuScale, 러시아의 KLT-40S, 아르헨티나의 CAREM, 중국의 ACP100와 ACPR50S 등이 사업화 단계에 가장 근접한 것으로 보임. 이들 노형들의 공통점은 상용원전의 오랜 설계 및 운전 이력을 통해 기술적 안정성과 안전성이 입증된 가압경수로 기술이 근간을 이룬다는 점임. 비수냉각형 4세대 노형들 중에도 Moltex Energy사의 SSR 등 일부 노형은 앞선 설계 개념을 제안하며 현재 캐나다 CNSC 사전인허가설계검토와 같은 인허가 검증을 받고 있지만, 상용화되기까지 경수로 노형에 비해 좀 더 많은 난관을 극복해야 할 것으로 예상됨.

제3절 시장전망

- 세계 소형모듈원자로 시장 전망은 예측 기관에 따라 상이하며, 공통적으로 시장 자체의 불확실성이 높음. 본 절에서는 세계 소형모듈원자로 시장에 대해 예측한 외부 공개 자료 중 최신 자료 위주로 정리하였음. 절대적 수치보다는 경향성을 파악하는 데에 참고용으로 활용하는 것이 바람직함. 분석에 사용한 자료 목록은 다음과 같음.

- 리서치 네스터 보고서 (2023년)
- 폴라리스 마켓 리서치 보고서 (2023년)
- 마케츠앤마켓츠 보고서 (2023년)
- 프레시던스 리서치 보고서 (2023년)
- 아이다호 국립 연구소 보고서 (2021년)
- SMR Start 보고서 (2021년)
- OECD NEA 보고서 (2021년 및 2016년)
- 캐나다 소형모듈원자로 로드맵 (2018년)
- 영국 국립원자력연구소 보고서 (2014년)

1. 리서치 네스터 (2023년 4월)

- 인도 시장조사기관 리서치 네스터[1.3-1]에 따르면 세계 소형모듈원자로 시장은 2022년 66억 6,000만 달러에서 2035년 129억 5,000만 달러로 성장할 것으로 예상됨. 연평균 성장률은 약 5.7%로 추정됨.
- 시장의 성장은 소형모듈원자로의 개발 증가에 기인함. 전 세계적으로 전력 통합 에너지 시스템, 난방 담수화 및 산업용 증기를 포함한 다양한 출력 및 용도를 위해 70개 이상의 상업용 소형모듈원자로가 개발 중임. 러시아 최초의 부유식 원자력발전소인 아카데미 로모노소프는 2020년 5월에 상업 운전을 시작했으며 이 외에도 인허가 과정에 있는 다양한 소형모듈원자로 프로젝트가 한국, 캐나다, 아르헨티나 및 미국에 있음.
- 전 세계의 담수 고갈 증가는, 소형모듈원자로의 시장 성장을 촉진할 수 있음. 2002년 유네스코의 추정에 따르면 당시 세계 담수 격차는 $2,300\text{억 m}^3/\text{yr}$ 였으며 2025년까지 $20,000\text{억 m}^3/\text{yr}$ 로 증가할 것으로 예상됨. 원자력 담수화는 화석 연료를 사용하는 것보다 저렴함. 더욱이 가까운 장래에 원자력만이 대규모 담수화 프로젝트에 전력을 공급하는 데 필요한 막대한 양의 전기를 공급할 수 있음. 한편 석유, 가스 및 전기에 대한 수요 증가도 소형모듈원자로 시장 성장을 촉진할 것으로 예상됨.
- 북미 소형모듈원자로의 시장 점유율은 다른 모든 지역의 시장 중에서 2035년 말까지 약

33%의 점유율로 가장 클 것으로 예상됨. 시장의 성장은 주로 미 정부가 소형모듈원자로를 배치하기 위해 이니셔티브를 증가시킨 것에 기인함. 선진 소형모듈원자로 연구개발 프로그램은 2019년에 시작되어 미국에서 개발된 소형모듈원자로 기술의 상용화를 가속하기 위한 연구개발 및 배치 이니셔티브를 지원함. 또한 2023년 4월 미국 최초의 소형모듈원자로 설계가 원자력 규제위원회의 승인을 받았음.

- 유럽 소형모듈원자로 시장은 2035년 말까지 약 30%의 점유율을 기록하여 둘째로 큰 시장이 될 것으로 예상됨. 시장의 성장은 주로 이 지역의 탄소 배출량을 줄이기 위해 시작된 프로그램에 기인함. 대형 및 소형 그리고 선진 원자력 프로젝트 개발에 대한 유럽 정부의 약속은 녹색 산업 혁명을 위한 10대 계획과 2020년 에너지 백서에서 재확인되었음. 또한 10대 계획은 차세대 원자력 기술에 투자하기 위해 3억 9천만 달러의 선진 원자력 기금을 발표함. 국내 소규모 발전소 기술 설계를 구축하기 위해 소형모듈원자로에 최대 2억 3,515만 달러가 지출될 예정임. 이 외에도 2030년대 초까지 선진 모듈 원자로의 프로토타입을 완성하기 위한 개발 및 연구 프로그램에 약 1억 7천만 달러가 투자될 것으로 보임.
- 아시아 태평양 지역은 다른 모든 지역 시장 중에서 2035년 말까지 대부분의 점유율을 차지할 것으로 예상됨. 시장의 성장은 주로 에너지 수요 증가에 기인함. 전 세계 인구의 17%를 차지하는 인도는 지난 10년 동안 1차 에너지 소비가 4%의 속도로 증가했으며 이는 전 세계 성장률인 1.3%의 세 배에 해당함. 인도 정부는 민간 부문과 신생 기업에 소형모듈원자로의 연구개발을 늘릴 것을 요청함. 이것은 대략 300 MW의 용량으로 소형모듈원자로를 설립하려는 국가의 목표를 달성할 가능성이 높음.

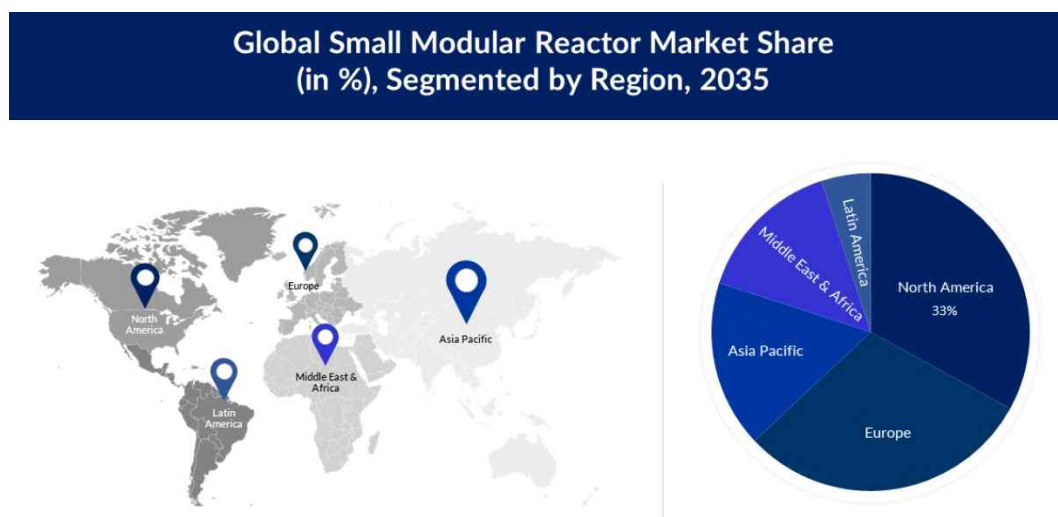


그림 1.3.1 리서치 네스터에서 추정한 지역별 세계 소형모듈원자로 시장 점유율 예상도 (북미 33%, 유럽 30%)[1.3-1]

2. 폴라리스 마켓 리서치 (2023년 6월)

미국 시장조사기관 폴라리스 마켓 리서치[1.3-2]에 따르면 세계 소형모듈원자로 시장은 2022년 96억 9,296만 달러에서 2032년 145억 8,231만 달러로 성장할 것으로 예상됨. 연평균 성장률은 약 3.6%로 추정됨. 이는 2022년도 발표 자료 (2021년 95억 4,000만 달러, 2030년 130억 달러, 그림 1.3.2 참조)에서 소폭 증가한 수치임.

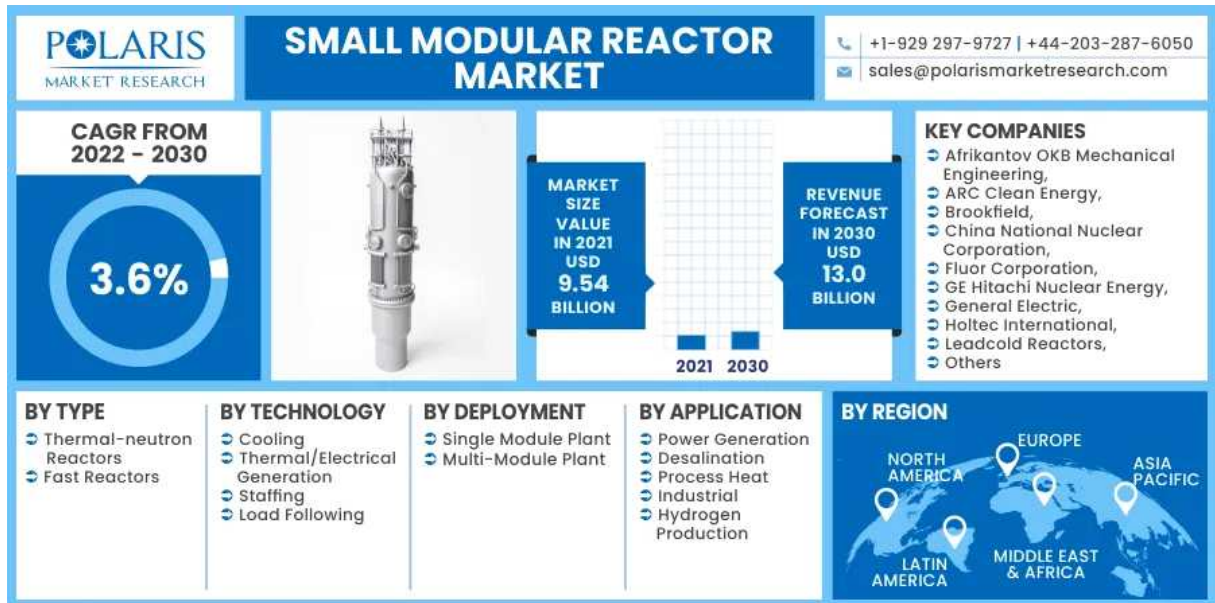


그림 1.3.2 폴라리스 마켓 리서치에서 추정한 세계 소형모듈원자로 시장 크기 및 연평균 성장률 예측도[1.3-2]

3. 마케츠앤마켓츠 (2023년 6월)

미국/영국 시장조사기관 마케츠앤마켓츠[1.3-3]에 따르면 세계 소형모듈원자로 시장은 2023년 58억 달러에서 2030년 68억 달러로 성장할 것으로 예상됨. 연평균 성장률은 약 2.3%로 추정됨.

4. 프레시던스 리서치 (2023년 5월)

캐나다/인도 시장조사기관 프레시던스 리서치[1.3-4]에 따르면 세계 소형모듈원자로 시장은 2022년 60.4억 달러에서 2032년 80.6억 달러로 성장할 것으로 예상됨. 연평균 성장률은 약 3%로 추정됨.

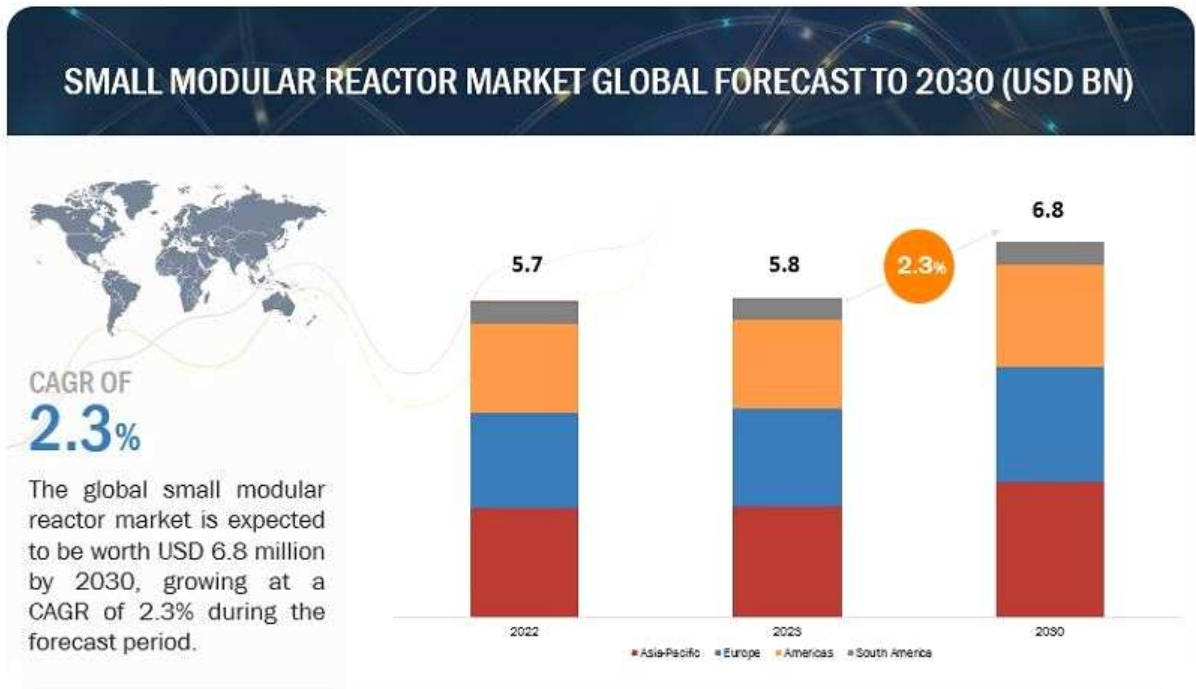


그림 1.3.3 마케츠앤마케츠에서 추정된 세계 소형모듈원자로 시장 크기 및 연평균 성장률 예측도[1.3-3]

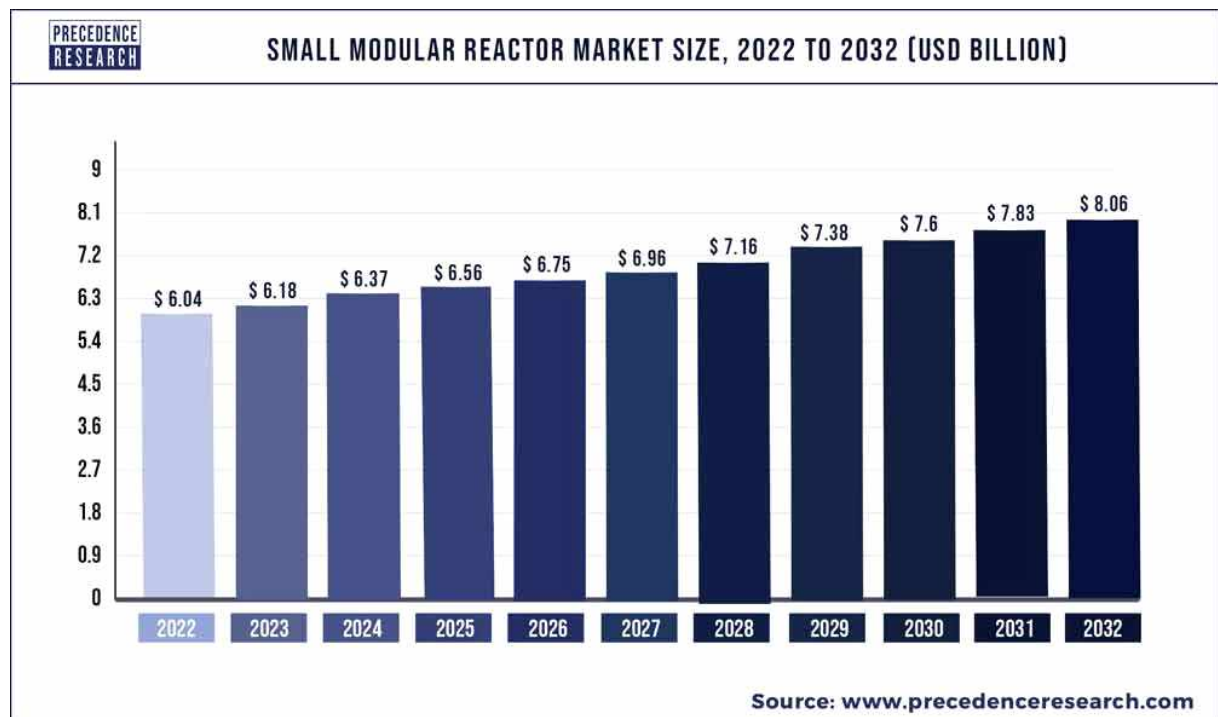
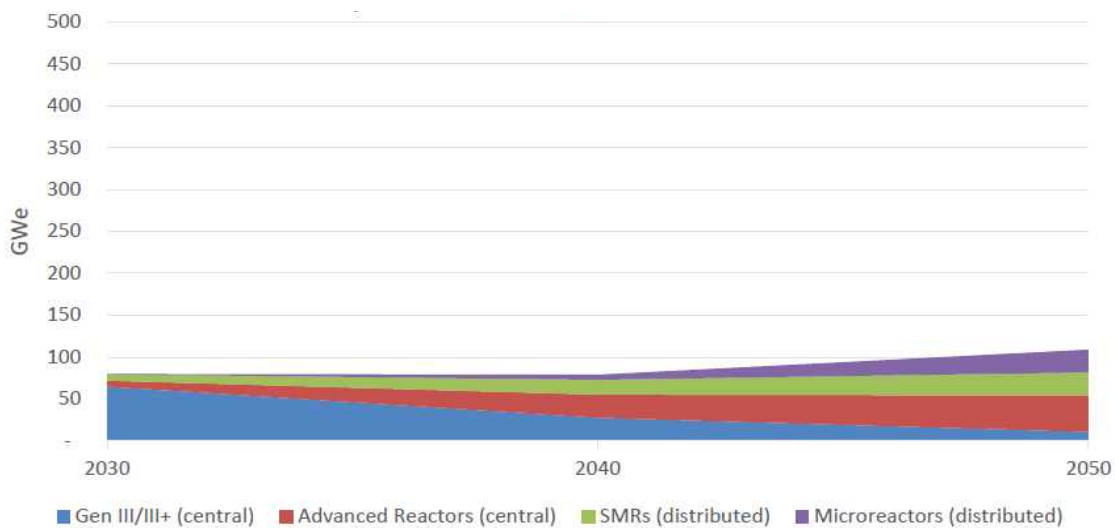


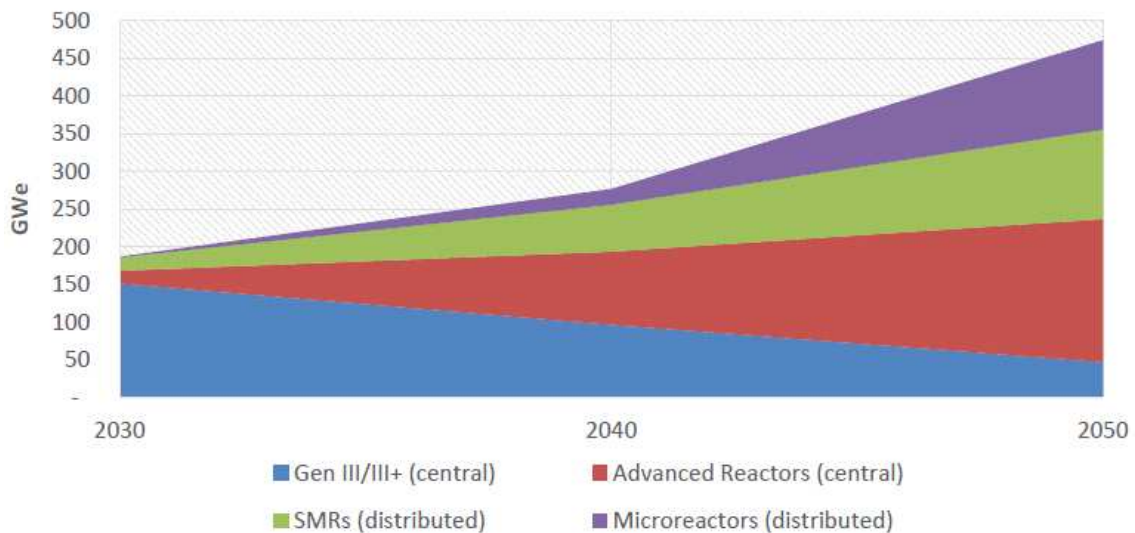
그림 1.3.4 프레시던스 리서치에서 추정된 세계 소형모듈원자로 시장 크기 예측도[1.3-4]

5. 아이다호 국립 연구소 (2021년 6월)

아이다호 국립 연구소는 글로벌 분산전원 시스템의 수요로 소형모듈원자로가 2030년 전체 신규원전 중 30%에서 2050년 50%로 비중 확대될 것으로 전망함. 또한 동연구소는 전체 원전 시장에서 건설되는 원전 종류별 비중이 대형원전의 경우 비수냉각형 제4세대 원전이 확대되는 방향으로, 소형모듈원자로의 경우 초소형 원자로가 확대되는 방향으로 진행될 것으로 전망함. 2030년부터 2050년까지 신규 건설될 원전을 보수적/우호적으로 예측한 결과는 그림 1.3.5와 같음[1.3-5].



(a) 가장 보수적인 시나리오



(b) 가장 우호적인 시나리오

그림 1.3.5 아이다호 국립연구소에서 추정한 2030-2050 세계 신규 원전 건설 예측도[1.3-5]

6. SMR Start (2021년 3월)

소형모듈원자로 개발에 투자하는 잠재적 고객 및 공급업체*로 구성된 SMR Start는 소형모듈원자로 경제성 평가 보고서[1.3-6]에서, 2035년 미국 내 소형모듈원자로 시장 규모를 보수적으로 6 GWe 또는 우호적인 여건에서는 13 GWe 이상의 규모로 평가함. 또한 2040년까지 최소 20%의 원자력 발전량을 유지하기 위하여 필요한 소형모듈원자로의 발전용량을 최소/기준/최상 시나리오로 나누어 예측함.

* AREVA, Bechtel, BWXT, Dominion, Duke Energy, Energy Northwest, Exelon Generation, GE Hitachi Nuclear Energy, Fluor, Holtec International, NuScale Power, Ontario Power Generation, Southern Nuclear, TVA, and UAMPS

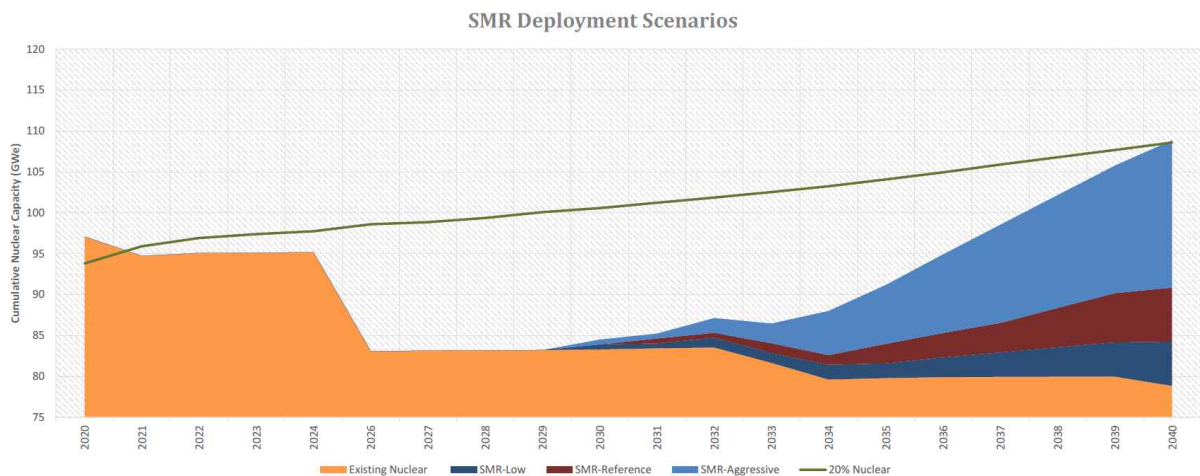


그림 1.3.6 SMART Start에서 추정된 2040년까지 소형모듈원자로의 발전용량 예측도[1.3-6]

7. OECD NEA 보고서 (2021년 및 2016년)

OECD NEA(Nuclear Energy Agency)[1.3-7, 1.3-8]에 따르면 2035년 예상되는 소형모듈원자로 시장은 보수적으로 1 GWe 미만 또는 인허가와 공장 설비 및 부품 공급선이 원활한 경우 낙관적으로 21 GWe로 추정됨. NEA는 2016년에 소형모듈원자로의 단기(2035년) 시장 잠재력을 조사하고[1.3-8] 시장 개발 측면의 불확실성을 반영한 두 가지 시나리오를 개발함.

- 낙관적인 높은 배치 시나리오 : 소형모듈원자로의 성공적인 허가와 공장 생산 및 관련 공급망의 구축이 비용 경쟁력으로 이어질 것으로 가정함.
- 보수적인 낮은 배치 시나리오 : 소형모듈원자로의 구축 및 운영에 큰 비용이 들에 따라 원격/고립 지역의 플랜트 및 원형로를 포함하여 제한된 수의 프로젝트만 완료된다고 가정함.

낙관적인 높은 배치 시나리오의 경우, 2035년까지 세계 여러 지역에 최대 21 GWe의 소형모듈원자로가 배치될 것이며, 이는 세계 전체 설치 원자력 용량의 약 3%에 해당함. 따라서, 2020-2035년 전체 원자력 신규 건설의 약 9%가 소형모듈원자로가 될 수 있음.

반면, 보수적인 낮은 배치 시나리오에서는 1 GWe 미만의 제한적인 배치를 볼 수 있는데, 이는 소형모듈원자로 프로그램이 진행 중인 국가에서 원형로를 추진하는 경우에 해당함.

2035년 이후 소형모듈원자로 시장은 저탄소 전기의 필요성을 촉진할 탈탄소화 목표에 따라 더욱 발전할 것으로 예상되므로, SMR의 다양한 시장 기회를 이해하는 것은 소형모듈원자로의 장기적인 시장 잠재력을 추정하는 데 중요함.

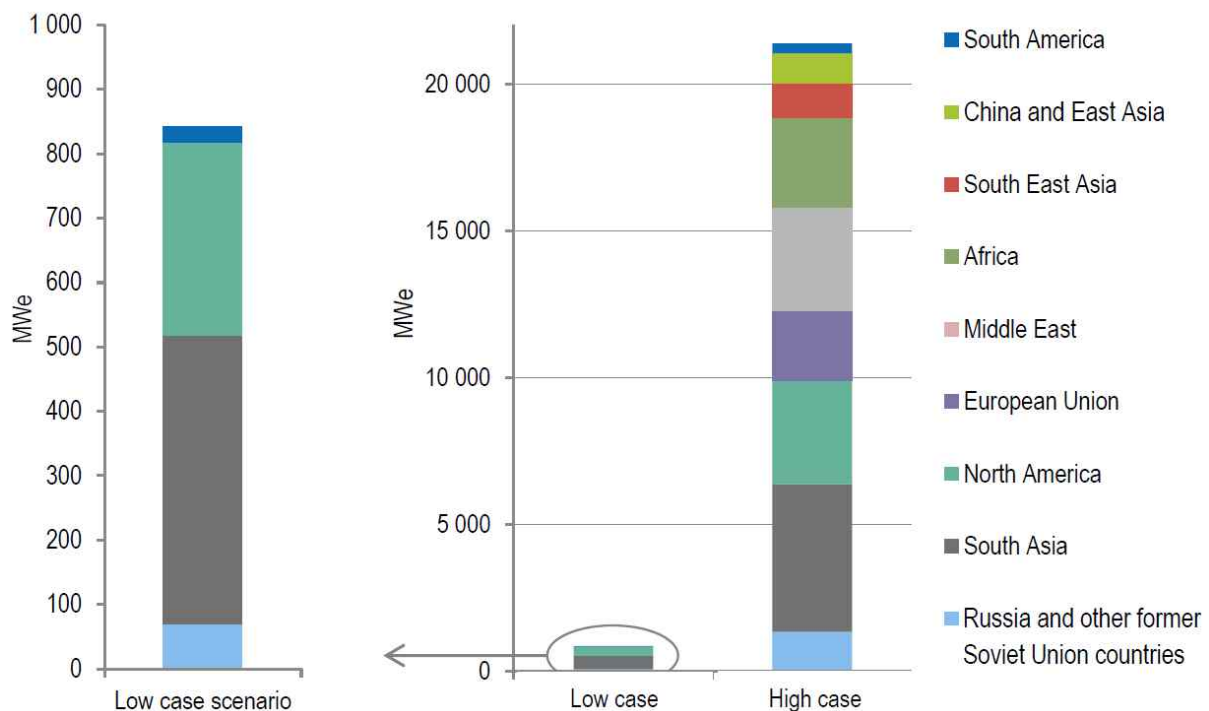


그림 1.3.7 OECD/NEA에서 추정한 2035년 지역별 소형모듈원자로 용량 예측도 (보수적 및 낙관적 시나리오)[1.3-8]

8. 캐나다 소형모듈원자로 로드맵 (2018년 11월)

캐나다 로드맵[1.3-9]은 소형모듈원자로의 글로벌 수출 잠재력을 2030년부터 2040년까지 연간 약 1,500억 캐나다 달러로 추산함. 여기에는 전력 생산, 원격지 광산, 도서 지역, 전력망이 없는 오프그리드 지역 등이 포함됨. 이 추정치는 보수적인 가정을 기반으로 하고 있으며, 소형모듈원자로가 세계적으로 전기 발전을 위한 화석 연료 사용을 줄이고 궁극적으로

없애면서 광범위한 상업적 성공을 거둘 경우, 소형모듈원자로의 세계 시장은 훨씬 더 커질 수 있음.

- 석탄화력 발전소 대체 : 지구 온도 2℃ 상승 시나리오를 만족하려면 IEA는 1,100 GWe의 수요를 예상했고, 이는 연간 1천억 달러가 넘는 잠재적 시장에 해당함.
- 원격 도서지방 및 전력망이 없는 지역사회 : 7만 개 이상의 지역이 해당하며 이는 연간 3백억 달러의 시장으로 평가됨.
- 광산지역을 위한 열 및 전기 생산 : 2040년까지 새로운 광산에 소형모듈원자로를 활용하면 연간 35억 달러 규모의 시장으로 평가됨.
- 중공업 산업단지에서의 증기 공급 : 연간 120억 달러 규모의 시장으로 평가됨.

Replace coal-fired power generation

- SMRs can further transition the power sector away from coal
- Even in a 2-degree scenario IEA projects 1100GWe
- Potential market over \$100B/year

Remote island nations and off-grid communities

- Large potential in over 70k communities
- \$30B/year market



Heat and power for mines

- SMRs powering of new mines between now and 2040 could yield total global value of \$3.5B/year market

Steam for heavy industry

- Potentially \$12B per year global market. Joint project from Idaho NL and NREL identified 850 facilities where SMRs could provide steam for US heavy industry.

Diesel generator photo © Ken Lane (2015). Photo has been modified. For source and licence: <https://www.flickr.com/photos/kenlane/23354939966>.

그림 1.3.8 캐나다 로드맵의 세계 소형모듈원자로 시장 크기 예측도[1.3-9]

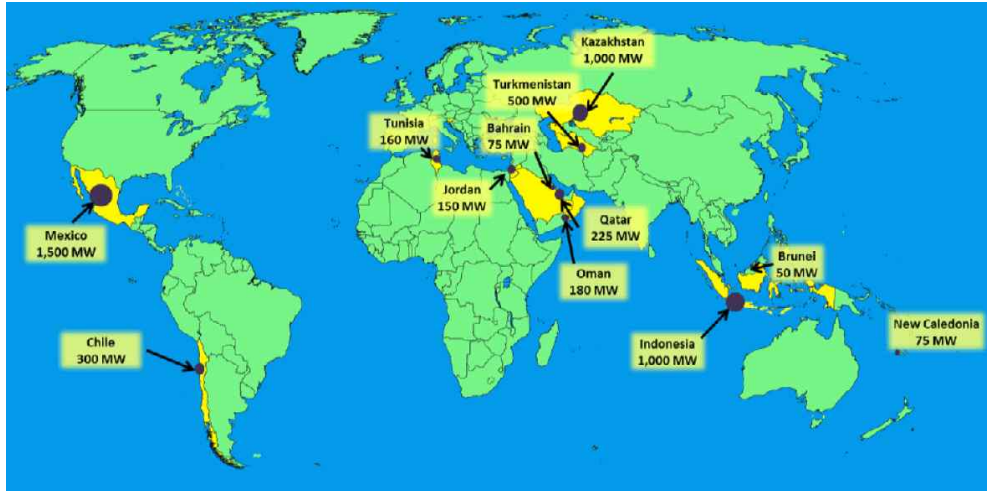
- 오일샌드 : 96개의 시설에 대해 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage) 공정을 위한 증기 및 전기공급을 위한 설비 개선 수요가 있음. 열·전기 생산설비 규모는 평균 210 MWe이며, 2030~2040년 사이에 5%를 SMR로 대체하는 경우 연간 3억 5천만 달러에서 4억 5천만 달러 사이로 평가함.
- 중공업을 위한 고온 증기 공급 : 85개의 중공업 시설(정유 및 화학공장)에 대해 설비 개선 수요가 있음. 설비 규모는 평균 20~50 MWe으로, 2030~2040년 사이에 5%를 SMR로 대체하는 경우 연간 4천6백만 달러로 평가함.

- 원격지 지방·광산을 위한 전기공급 : 79개의 오지 지방에 필요한 1 MWe 이상의 전력 공급을 SMR이 에너지 단가가 비싼 디젤이나 난방용 오일을 대체할 수요가 있는 것으로 평가됨. 또한, 전력망이 없는 24개의 광산지역에의 수요도 존재함.
- 이 로드맵에서는 SMR이 Canada 경제에 미치는 효과를 2030~2040년 사이에 연간 6천 개의 직·간접 일자리, 100억 불 규모의 직접 경제효과 및 연간 90억 불의 간접 경제효과가 있는 것으로 평가함.

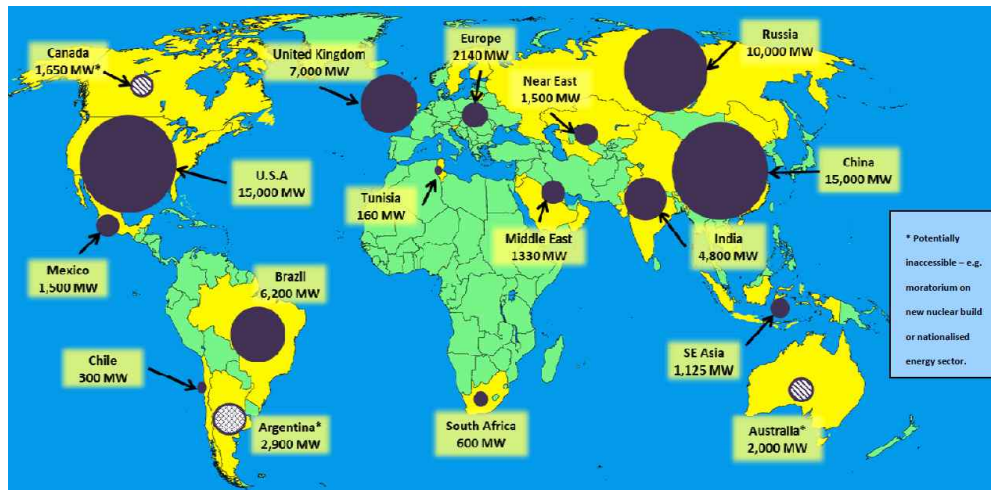
9. 영국 국립원자력연구소 (2014년 12월)

영국 국립원자력연구소(National Nuclear Laboratory)에 따르면 2035년의 SMR 시장은 아래와 같이 예측됨[1.3-10].

- 틈새시장 시나리오(대형원전에 비해 경제적 경쟁력을 확보하지 못한 경우) : 약 5.2 GWe
- 동등시장 시나리오(대형원전과 동등한 수준의 경쟁력을 확보한 경우) : 약 65~85 GWe



(a) 틈새시장 시나리오



(b) 동등시장 시나리오

그림 1.3.9 영국립원자력연구소에서 추정한 2035년 세계 소형모듈원자로 용량 예측도 [1.3-10]

제4절 주요국의 개발전략

소형원전 개발에 관심이 큰 국가는 미국, 영국, 캐나다, 러시아, 중국 등으로 대부분 SMR 연구개발에 많은 지원을 하고 있음. 이들 국가는 청정에너지 및 분산전원의 필요성이 커짐에 따라 대형원전이 기여하기 어려운 전력망이 없는 오지 광산, 원격지 주민주거지, 군사기지 등에서 독립에너지원으로 활용되거나 대형원전의 비상전원 등에 사용되는 디젤 발전을 대체할 목적으로 소형원자로를 개발하고 있음. 또한 이들 소형원자로 개발 국가는 완성된 기술을 앞세워 해외시장에의 진출을 적극 추진하고 있음. 본 절에 인용된 참고문헌은 대부분이 뉴스 기사 내용으로 각주로 기술하였음.

1. 미국

DOE는 2012년부터 SMR LTS(Licensing Technical Support) 프로그램, 2015년 GAIN (Gateway for Accelerated Innovation in Nuclear) Initiative, 2018년 Industry Opportunities for Advanced Nuclear Technology Development Funding, 2019년 Advanced SMR R&D 프로그램을 통하여 SMR 개발을 지원해 왔으며, 2020년에는 ARDP(Advanced Reactor Demonstration Program)에 착수하여 선진원자로 개발을 가속화하기 위한 본격적인 지원을 시작함. 또한 초소형원자로 및 우주용 원자력 추진시스템 개발도 활발히 추진 중임.

가. SMR LTS 및 Advanced SMR R&D 프로그램

- 2012년 DOE는 민간기업, 연구소, 국립연구소, 대학 등에 SMR의 설계인증, 인허가, 미국 내 부지허가, 그리고 일반적인 연구 및 분석을 지원하는 SMR LTS 프로그램에 착수함.
- LTS 프로그램은 유망한 SMR기술을 대상으로 조기에 설계, 검증 및 인허가 활동을 집중적으로 지원하는 것으로, SMR을 구현하는데 있어 경제적, 기술적, 규제적 장벽을 줄이는 것을 목적으로 함.
- 지원규모는 2012년부터 2017년까지 6년간 4.52억 달러이며, 우선 경수형 SMR 하나 또는 두 개의 노형을 지원함. FOA(Funding Opportunity Announcement)를 통해 사업자로부터 개발하려는 SMR에 대한 제안서를 받은 후, LTS 프로그램 수혜자를 선정하고, 선정된 업체와는 개별적인 계약을 통해 재원을 지원함.
- 2012년 11월 DOE는 첫 번째 FOA를 통해 B&W의 180 MWe mPower설계를 LTS 프로그램 수혜 대상으로 선정하였으며, 2013년 12월에 NuScale을 LTS 프로그램의 제2차 지원대상자로 선정하고 NuScale의 45 MWe SMR 설계개발, NRC 인허가를 지원하기로 함.

- SMR LTS 프로그램의 성공을 바탕으로 2019 회계연도에 시작된 Advanced SMR R&D 프로그램은 미국 기반 SMR 기술의 국내외 시장 진출을 가속화하기 위한 연구, 개발 및 배치 활동을 지원하는 프로그램임.
- 2020년대 말 또는 2030년대 초까지 SMR의 미국내 배치를 달성하기 위해서 시장에 출시하는 데는 상당한 기술 개발 및 인허가 위험이 남아 있는 선진 SMR 설계 및 개발을 정부가 지원하기 위한 사업임.
- DOE는 이 프로그램을 통해 NuScale Power 및 UAMPS(Utah Associated Municipal Power Systems)와 협력하여 10년 내에 아이다호 국립 연구소(Idaho National Laboratory, 이하 INL)에서 NuScale SMR 기술의 실증을 지원함.

나. GAIN Initiative

- 2015년 DOE 원자력실은 기존 미국 원자력발전소의 지속적인 안전성, 신뢰성 및 경제적 운영을 보장하면서 혁신적인 기술의 상용화를 촉진하는 기술적, 규제적, 재정적 지원을 제공하기 위해 GAIN Initiative에 착수함.
- GAIN은 원자력계로부터의 피드백을 바탕으로 만들어졌으며, DOE 및 국립연구소의 인력, 시설, 기반시설, 재료와 자료 등 다양한 자원에 접근할 수 있는 길을 제공함.
- GAIN은 또한 선진원자로 연구에 필요한 자금을 지원하는 바우처 시스템(voucher system)을 운영하여, 소규모 개발업체들이 DOE 산하 연구시설과 전문 지식을 공동비용 분담방식으로 이용할 수 있도록 지원함.
- 2022년도에 Curio Solutions, Elemental Power, Tennessee Valley Authority, Orano Federal Services, TerraPower, Elysium Industries, Kairos Power, Terrestrial Energy, Ultra Safe Nuclear Corp, Kinectrics AES, Engineered Solutions Group, Vega Wave Systems, Lightbridge, Oklo, Analysis and Measurement Services Corporation, Urbix Resources, ThorCon, Transatomic 등 여러 업체들이 바우처를 포함한 GAIN 이니셔티브의 수혜를 받음.

다. Industry Opportunities for Advanced Nuclear Technology Development Funding

- DOE 원자력실은 미국 원자력산업계의 선진원자로 개발을 지원하기 위한 예산을 선진원자력 기술개발 자금지원 산업체기회(Industry Opportunities for Advanced Nuclear Technology Development Funding)를 통하여 매칭펀드 형태로 3개의 분야에 지원함.
 - 첫 호기 원전 실증 준비 프로젝트(First of a Kind Nuclear Demonstration Readiness Projects)
 - 2020년대 중반 또는 후반까지 건설 가능성이 있는 선진원자로를 대상으로 최초 호기(FOAK) 설계인증

또는 인허가 획득, 이를 위한 설계 및 개발 사업 등을 지원하는 분야

- 선진 원자로 개발 프로젝트(Advanced Reactor Development Projects)
 - 선진원자로 설계 및 기술의 상용화 가능성과 성능을 높이기 위한 기술개발을 지원하는 분야
- 규제지원금(Regulatory Assistance Grant)
 - SMR을 포함한 선진원자로 일부 계통 설계, 설계인증 및 인허가를 위한 시험 등의 업무를 지원하며
규제지원금은 선진원자로 기술 및 인허가 현안을 해결하는 것과 관련된 연구개발을 지원하는 분야

○ DOE는 선진원자력 기술개발 자금지원 산업체기회를 통해 2018년부터 2022년까지 5년간 총 2.3억 달러를 투자함.

- NuScale SMR 실증사업을 위한 설계 완성 및 인허가준비, X-energy의 Xe-100 고온가스로 설계, 웨스팅하우스사의 eVinci 개발 및 실증, 푸에르토리코 SMR 부지 연구, Terrestrial Energy의 용융염 원자로 배출가스 모델링, American Bureau of Shipping의 선진원자로 기술의 상업용 해상 실증 프로젝트 가속화, General Atomics의 SiC 핵연료 피복관 모델링 및 시뮬레이션을 위한 디지털 트윈, Pittsburgh Technical의 선진 비등경수로의 선원향을 특성화하는 모델링 및 시뮬레이션 등 48개 프로젝트를 지원함.¹⁾

라. 선진원자로 실증사업(ARDP)

○ 2019년 12월 미 의회는 ‘선진원자로 실증사업(Advanced Reactor Demonstration Program, 이하 ARDP)’을 신설하여 2020년도 예산으로 2.3억 달러를 배정하고, DOE에 ‘ARDP’ 착수를 요구함.

○ 미국 원자력산업 부흥을 위한 것으로 많은 예산이 소요되는 선진원자로 개발과 실증에 필요한 재원을 연방정부의 예산과 산업체의 매칭펀드를 통해 지원함.

○ 2020년 5월 DOE는 ARDP에 본격적으로 착수하여 7년 동안 총 32억 달러에 달하는 선진원자로 기술개발과 실증을 수행할 산업체 선정을 위해 ARDP의 FOA를 기술수준에 따라 3가지 사업에 대하여 발표함.

- 실증사업 프로젝트(Advanced Reactor Demonstrations)
 - 5~7년 이내에 NRC의 허가를 받아 운영될 수 있는 선진 경수형 또는 비경수형 원자로를 개발·실증하는 것으로, DOE는 건설, 실증에 요구되는 모든 활동을 지원하며 2개 사업을 선정함.
- 위험감소 프로젝트(Risk Reduction for Future Demonstrations Program)
 - 개발 성숙도가 실증 준비까지는 아니지만 원자로 설계와 기술(실증사업에 선택되지 못한 설계 등)에 초점을 맞추어 단기 또는 중기(실증사업 후 약 5년) 내에 실증할 수 있도록 기술적인 준비(시험 시설 구축, 실험, 모델링 및 시뮬레이션, 안전시스템 개발 등)를 지원

1) DOE site, DOE Awards \$22.1 Million to Advance Promising Nuclear Technologies, 9 May 2023

- ARC 20 프로젝트(Advanced Reactor Concepts 2020²⁾)
 - 실증사업 프로젝트나 위험감소 프로젝트로 선택된 기술보다 기술 성숙도(TRL)가 낮고, 2030년대 중반에 상용화가 가능한 혁신적이고 다양한 설계에 초점을 맞춘 기술을 지원함.

(1) 실증사업 프로젝트(Advanced Reactor Demonstrations)

- 2020년 10월 DOE는 향후 7년 이내에 실증로를 가동하는 두 선진원자로로 TerraPower의 NatriumTM 원자로와 X-Energy의 X-100 고온가스로를 선정하고 초기 자금 8천만 달러를 양사에 각각 지원함.³⁾ DOE는 두 사업에 선진원자로 설계, 인허가, 건설을 지원하기 위해 32억 달러를 지원 예정임(사업별 구체 현황은 제5절 참조).

(2) 위험감소 프로젝트(Risk Reduction for Future Demonstrations Program)

- 2020년 12월 DOE는 ARDP 중 위험감소 프로젝트를 수행할 5개 팀을 아래와 같이 선정하고, 초기 지원금 총 3천만 달러를 지원함.⁴⁾
 - 전력 생산 외 활용과 외딴 지역에서 사용하려는 목적으로 TRISO 연료를 사용하는 운반가능 초소형원자로인 BWXT의 Advanced Nuclear Reactor(ANR)
 - TRISO를 사용하고 운반 가능한 열전도관 냉각 초소형원자로인 Westinghouse의 eVinci
 - Kairos Power의 불화염냉각 고온로(KP-FHR)의 축소 버전인 헤르메스(Hermes) 시험원자로
 - Holtec의 경수형 소형로인 SMR-160
 - Southern Company Services가 수행하는 TerraPower의 용융염화염 고속로 기반의 MCRE(Molten Chloride Reactor Experiment)

(3) ARC 20 프로젝트(Advanced Reactor Concepts 2020 Program)

- 2020년 12월 DOE는 ARC-20 프로젝트 하에서 예산을 지원받을 3개의 선진원자로 개발 분야 및 개발자를 선정하고 총 5,600만 달러의 예산을 지원⁵⁾
 - Advanced Reactor Concepts(ARC)의 ARC-100 고유안전 선진소형로(Inherently Safe Advanced SMR)는 100 MWe 출력의 ARC-100 원자로 예비 개념설계를 기반으로 ‘면진형(seismically isolated) 선진 소듐냉각원자로’의 개념설계를 수행할 예정으로 3년 반 동안 총 3,440만 달러를 투입할 예정이며,

2) Nuclear Newswire, DOE issues FOA for advanced reactor demos, 19 May 2020.

3) World Nuclear News, US DOE selects advanced reactor designs for demonstration plants, 14 October 2020.

4) World Nuclear News, Advanced reactor projects teams receive US federal risk reduction funding, 17 December 2020

5) World Nuclear News, DOE selects advanced reactor concepts for funding, 23 December 2020

DOE는 2,750만 달러를 지원함.

- General Atomics가 제안한 모듈형고속로(Fast Modular Reactor)는 핵연료, 안전성 및 운전 성능의 주요 측정기준 검증을 포함한 50 MWe FMR 원자로의 개념설계를 수행할 예정으로, 향후 3년 동안 3,110만 달러를 투입할 예정이며, DOE는 2,480만 달러를 지원함.
- MIT가 개발하는 수평형 소형 고온가스로(Horizontal Compact High Temperature Gas Reactor)는 개발된 모듈형 통합 가스냉각 고온로(MIGHTR, Modular Integrated Gas-Cooled High Temperature Reactor)를 사전개념 단계에서 상용화를 위한 개념설계 단계로 발전시킬 예정으로, 3년간 490만 달러를 투입할 예정이며, DOE는 390만 달러를 지원함.

마. 국방부의 초소형원자로 개발

- 국방부와 의회는 그간 군사기지에 사용하여 왔던 민간전력, 디젤발전기 및 석탄보일러를 초소형원자로로 대체하여 에너지원으로 활용하는 것에 관심을 가져왔고, 2010년 NDAA(National Defense Authorization Act)는 국방부가 원자로를 군사기지에 활용하는 것에 대한 타당성검토를 수행하도록 함.
- 2011년 CNA(Center for Naval Analysis)는 국방부에 300 MWe 이하의 소형원자로가 국방부의 임무 수행에 도움을 줄 능력이 있으나, 그 출력이 미국 내 군사기지에서 필요로 하는 수요에 비해 너무 크다는 내용도 수록함.
 - 이때부터 출력 10 MWe의 초소형원자로 개념이 등장하였고, 국방부 시설의 수요에 적합한 것으로 인식되기 시작함.
- 2016년 DSB(Defense Science Board)는 전진·원격 군사기지용 에너지시스템에 대한 연구를 수행하였으며, 이 연구는 원자력시스템이 지속적이고, 풍부하며, 신뢰성이 있는 에너지원으로 군사시설 운용에 필요하다고 보고함.⁶⁾
- 2018년 의회를 통과한 NDAA는 DOE로 하여금 미국 내 군사시설에 초소형원자로를 이용하는 시험 프로그램(pilot program)에 대해 연구를 수행하도록 하고 다음 사항들을 수행할 것을 요구함⁷⁾.
 - 2027년까지 초소형원자로가 설치될 국방부 또는 DOE 소유의 부지 위치, 국방에 활용할 수 있는 여러 가지 다양한 원자력기술에 대한 평가
 - 초소형원자로 건설과 운전 능력을 갖춘 민간 산업체에 대한 조사
 - 시험 프로그램에 소요되는 경비와 일정 등을 제시

6) DOD Defense Science Board Task Force Report on Energy Systems for Forward/Remote Operating Bases, August 1, 2016.

7) NEI, "Congress Directs DOE Study of Micro-Reactor Deployment", August 2, 2018.

- 2018년 10월 NEI(Nuclear Energy Institute)는 미국 내 군사기지에 초소형원자로를 최초로 활용하는 것에 대한 로드맵을 작성함.⁸⁾
 - 이 로드맵은 2027년에 초소형원자로를 제작하여 군사기지에 활용하는 계획을 세우고 이의 실행을 위한 일정, 예상되는 장벽 및 문제 해결 방안들을 수록하고 있음.
- 2019년 1월 국방부는 군사기지용으로 이동 가능한 소형원자로를 개발할 업체를 물색하기 위해 “small mobile reactor” 설계개념에 대한 RFI를 발행하고, 산업체들이 지원할 것을 요청하는 ‘Dilithium’ 프로젝트를 수립함⁹⁾. 이동 가능한 초소형원자로 설계개념 선정 등을 위한 첫 단계에서는 3개의 원자로 설계를 선정한 후, 2단계에서는 하나의 설계를 선정한다는 계획을 수립함.
 - 원자로의 요건은 출력이 1~10 MWe, 무게는 40톤을 넘지 않아야 하고, 트럭, 배 또는 C-17 항공기에 의해 운반이 가능하여야 함.
 - 파동공기냉각, 외부 전원 및 냉각원이 없는 상황에서도 원자로심이 용융되지 않는 고유안전성을 갖고 있어야 함.
 - 3일 이내에 설치되어야 하며, 운전 정지 및 철수에 걸리는 시간은 7일을 넘지 않아야 하며, 한번 재장전하면 최소한 3년은 운전 가능하여야 함.
 - 사람이 운전을 하지 않더라도 반자율적(semiautonomous)으로 운전할 수 있어야 하며, HALEU TRISO 핵연료를 사용하는 가스냉각로이어야 함.
- 국방부는 이동 가능한 초소형원자로의 원형로 건설 및 실증안과 관련하여 DOE와 공동으로 원형로에 대한 환경영향평가서(Environmental Impact Statement, EIS)를 개발하겠다고 밝히고, 2020년 3월 EIS에 대한 대중의 검토의견을 요청하면서 전략능력실(Strategic Capabilities Office, SCO) 주도로 작전기지에 사용할 목적으로 안전성과 이동성이 검토된 초소형원자로 원형로 개발을 착수함.¹⁰⁾
 - 미 국방부는 원격 및 전방 기지, 최신 함대와 무기체계에 안정적인 에너지 공급의 중요성을 인식하고 20 MWe 이하(주로 1~10 MWe)의 이동형 원자로(mobile nuclear reactor, MNR) 배치를 고려하여 민간 산업체와의 협력을 통해 혁신 원자력 기술의 개발과 배치의 가속화를 적극 지원함.
 - 이 초소형원자로 원형로 개발 프로젝트는 “Project Pele”로 불리며, DOE, NRC, NNSA(National Nuclear Security Administration) 및 산업체들과 협력 하에 이행될 것임.¹¹⁾

8) NEI, “Roadmap for the Deployment of Micro-Reactors for US Department of Defense Domestic Installations, October 4, 2018.

9) Military Aerospace Electronics, “Military eyes mobile nuclear reactor with semiautonomous operation for rapidly deployable atomic power” January 21, 2019.

10) World Nuclear News, US Defense Department awards microreactor contracts, 10 March 2020

11) ‘Project Pele’의 내용은 ‘Project Dilithium’과 같으며, Pele 프로젝트 수행을 위하여 DOE, NRC 등 다른 기관과의 기술 협력, 설계 및 인허가 자문 등 MOU를 체결함.

- 프로젝트 Pele에서 요구하는 원자로설계 요건은 출력이 1~5 MWe, 핵연료는 HALEU를 사용하는 TRISO, 핵연료주기는 3년 이상, 무게는 40톤 미만으로 트럭, 배 또는 C-17 항공기에 의해 운반이 가능하여야 한다는 것으로 Dilithium 요건과 동일함.
- 2020년 3월 국방부 SCO는 BWXT, Westinghouse Government Services, X-energy의 3개사를 MNR 원형로(prototype) 설계 대상으로 선정하고 각각 2년간 1.35천만 달러, 1.19천만 달러, 1.43천만 달러를 지원함.
- 2021년 3월 국방부 SCO는 위 3개사의 개념설계 평가를 수행하여 군사 전략기지에서 사용할 초소형원자로를 개발할 회사로 BWXT와 X-energy 2개사를 선정함.¹²⁾
- 2021년 9월 국방부는 이동형 초소형원자로 시제품의 건설 및 실증 단계에서 EIS 초안을 발표하고, 2022년 2월에 INL 부지의 이동형 초소형원자로의 건설 및 실증을 위한 최종 EIS를 발표함.¹³⁾
- 2022년 2월 INL은 이르면 2024년 미 국방부의 이동형 초소형원자로 시제품(prototype)의 시험을 시작할 예정임을 공표함.¹⁴⁾
 - 원자로는 외부에서 제작되어 INL로 운반되며, NRIC(National Reactor Innovation Center)의 초소형원자로 시험 실증운영 시설(Demonstration and Operation of Microreactor Experiments, DOME)로 활용되어 저출력 초기시험을 수행함.
- 2022년 4월 국방부 SCO는 INL 부지에 TRISO 연료가 장전된 이동형 초소형원자로 원형로(prototype)를 건설하고 실증하는 프로젝트를 진행할 것이라는 결정기록(Record of Decision, ROD)을 연방관보를 통해 발표함.¹⁵⁾
- 2022년 6월 국방부는 'Project Pele'의 원형로(시제품) 설계 업체로 BWXT를 최종 선정함.¹⁶⁾
 - 국방부 SCO는 BWXT와 2024년에 운반 가능한 초소형원자로의 실규모 시제품 제작을 완료하고 이를 납품하는 계약을 체결함.
 - 초소형원자로 시제품 프로젝트 제작에는 Northrop Grumman, Aerojet Rocketdyne, Rolls-Royce Liberty Works, 그리고 Torch Technologies Inc.이 참여하며 BWXT는 주 계약자로 전체 업무를 총괄하고 리드할 예정임.
 - 원자로 시제품 제작 업무는 BWXT Advanced Technologies LLC가 선택한 옵션에 따라 약 3억 달러 규모의 원가 계약으로 체결되었으며, 버지니아주 Lynchburg와 오하이오주 Euclid의 시설에서 제작함.

12) World Nuclear News, BWXT and X-energy selected to develop Project Pele mobile microreactor, 24 March 2021

13) Nuclear Newswire, Final EIS for Project Pele microreactor available, 26 February 2022

14) Post Register, INL to test mobile microreactor prototype using 'inherently safe' nuclear fuel, 12 February 2022.

15) World Nuclear News, Project Pele mobile microreactor to go ahead, 14 April 2022.

16) Nuclear Newswire, BWXT wins Project Pele contract to supply U.S.'s first microreactor, 10 June 2022.

- 2022년 12월 BWXT는 Project Pele에 따라 개발되는 미국 최초의 초소형원자로용 TRISO 핵연료를 버지니아주 Lynchburg 시설에서 생산에 착수함.¹⁷⁾

- 2021년 10월 미 공군은 알래스카 Eielson 공군기지를 고정형 초소형원자로 부지로 선정함.¹⁸⁾ 이에 따라 빠르면 2027년에 최대 5 MWe 출력의 초소형원자로가 가동될 예정이다.
 - Eielson 초소형원자로는 미 공군이 지원한 2018년 NEI 초소형원자로 배치 로드맵의 참조사례로, NEI 로드맵에서 규모 2~10 MWe 범위의 초소형원자로를 2027년 운영한다는 일정을 제안함.
 - Eielson 초소형원자로를 국방부 SCO가 진행하는 이동형 초소형원자로 개발 프로그램인 Project Pele와는 별개의 프로젝트임.

바. 우주용 원자력 추진시스템 개발

- 2020년 12월 미 정부는 우주임무를 위해 원자력을 이용한 전력과 추진력(Space Nuclear Power and Propulsion, SNPP)의 개발과 이용 필요성을 담고 있는 국가우주정책(National Space Policy)을 발표함.¹⁹⁾
 - SNPP는 안전성, 안정성, 안보성, 그리고 장기간 지속성(4S: Safety, Stability, Security, Sustainability)이 요구됨.
 - NASA 집행부 및 국방장관에 우주용 원자력시스템의 설계, 개발, 그리고 활용을 이행하고 지원할 것을 요청하고, 에너지부 장관에게는 우주용 원자력시스템의 설계, 개발, 그리고 활용을 지원할 것을 요청함.
 - SNPP는 방사성붕괴를 활용하여 전기와 열을 생산하는 RPS(Radioisotope Power Systems)와 핵분열을 이용하는 원자로를 포함하고 있으며, 태양에너지의 사용과 화학연료 공급이 어려운 환경에 사용될 예정이다.
- 2020년 12월 백악관은 우주에서의 원자력과 원자력추진력 이용에 대한 우주정책지침-6(Space Policy Directive-6)을 발행함.²⁰⁾
- 미국의 원자력 분야를 더욱 활성화하고 우주 탐사 프로그램을 다시 활발히 추진하기 위해 2021년 1월에는 미 행정부는 국방 및 우주 탐사를 위한 소형 모듈형 원자로 추진(Executive Order on Promoting Small Modular Reactors for National Defense and Space Exploration)에 관한 행정명령을 발표함.²¹⁾

17) World Nuclear News, BWXT starts fuel production for microreactor, 8 December 2022.

18) Nuclear Newswire, Microreactor planned for U.S. Air Force base in Alaska, 25 October 2021.

19) World Nuclear News, US looks to nuclear propulsion systems to achieve space ambitions, 10 December 2020

20) World Nuclear News, US Administration issues Space Policy Directive, 17 December 2020

21) World Nuclear News, US order promotes SMRs for space exploration and defence, 13 January 2021

(1) DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)

- 2020년 5월 국방고등연구계획청(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)의 전술기술실(Tactical Technology Office)은 우주궤도에서 원자력 열추진 시스템을 2025년까지 시험한다는 목표를 달성할 수 있는 연구개발을 여러 기관들이 제안해줄 것을 요청함.
- 2021년 4월 DARPA는 제너럴아토믹스(General Atomics, GA)를 ‘지구와 달 사이 우주 공간에서의 기민한 운영을 위한 실증 로켓(Demonstration Rocket for Agile Cislunar Operations, DRACO) 프로젝트’의 1단계 프로그램 수행기관으로 선정하고, 우주 추진용 소형원자로 설계를 위한 계약을 체결함.²²⁾
 - DRACO 프로젝트는 원자력열추진 또는 추진력을 위해 로켓연료를 가열하는 데 원자로를 실증함.
 - DRACO 프로그램의 1단계의 기간은 18개월이며, 2개의 트랙으로 구성됨.
 - 트랙 A는 원자력열추진 원자로의 예비 설계와 추진 하위시스템 개념 설계
 - 트랙 B는 우주 임무를 위한 우주선 개념에 대해 운영체제(OS)와 우주선 실증시스템(DS) 개념 설계
 - 2022년 5월 DARPA은 DRACO 2·3 단계 프로그램을 통해 액체수소 추진체를 가열할 수 있도록 고순도 저농축우라늄(HALEU)을 연료로 하는 원자력열로켓 엔진의 설계, 개발, 제작, 조립, 시험을 수행할 민간 업체를 찾기 위하여, 2단계와 3단계 사업 참여에 대한 요청서를 발행함.²³⁾
 - DRACO의 2단계는 24개월이 걸릴 것으로 예상되며, 원자로, 노즐, 제어기·연료탱크·원자로를 통해 추진체를 구동하기 위한 관련 장비를 포함하여 비행 엔진의 건설 및 실험 검증뿐만 아니라 실증에 대한 예비 설계와 상세설계를 완성하는 것임. 총 기간은 3~4년이 걸리고 2026 회계연도에 우주 내 NTP 실증이 될 것으로 예상됨.
 - 3단계는 2단계 직후에 진행되며 약 15개월 동안 지속될 것으로 예상되는데, 수소 탱크는 3단계 초기에 제작될 것이며, 완전히 적재된 상태에서 성능 시험을 수행 예정임.
 - 3단계는 전 출력과 전 추력에서의 NTP 엔진의 발사 및 궤도 내 실증이 포함됨.

(2) NASA(National Aeronautics and Space Administration)

- NASA와 DOE는 우주 원자력개발을 포함하여 미국의 우주정책 발전에 협력하기로 하고 달 표면 인프라, 우주 원자력 및 추진, 우주 안전과 행성 방어를 포함한 과학과 혁신에 초점을 맞춘 세 개의 워킹 그룹을 설립함.
 - 워킹 그룹은 달 표면의 아르테미스(Artemis) 달 기지에 필요한 인프라 계획 및 설계, 아르테미스 달 기지

22) Space News, General Atomics wins DARPA contract to develop nuclear reactor to power missions to the moon, 10 April 2021

23) Nuclear Newswire, DOD seeks in-space demo of nuclear rocket engine in FY 2026, 10 May 2022.

전력 공급 및 그리드 시스템 개발과 테스트 및 평가, 우주 비행을 태운 화성(Mars) 임무를 위한 수십억 달러 규모의 원자력 추진계통의 연구 및 개발과 시험 및 평가 계획을 작성할 예정이다.

- NASA는 NTP 기술 개발을 DRACO 프로그램과는 별도로 지원하며 2021년 7월 NTP 원자로에 대한 개념 연구를 실시하는 세 팀을 선정했으며, 한편으로는 행성 표면에서 원자력을 이용한 전력시스템 연구를 지원할 계획을 수립함.²⁴⁾
 - 선정된 것은 ①록히드 마틴 등의 BWXT팀, ②X-energy, Aerojet Rocketdyne 등의 제너럴아토믹스 전자시스템스(General Atomics Electromagnetic Systems)팀, ③Blue Origin, GEH, GE Research, Framatome, Materion 등의 USNC(Ultra Safe Nuclear Technologies)팀의 세 팀임.
 - 원자로는 HALEU 연료를 사용하는데, 2021년 12월 BWXT는 NASA의 Space Technology Mission Directorate 원자력열추진(NTP) 프로젝트를 지원하기 위한 시험용 피복입자 연료를 제작하여 NASA에 전달함.²⁵⁾
 - BWXT는 NASA의 시험에 사용될 피복연료를 공급하는 최초의 민간 회사가 되었으며, 이는 기존의 인가된 생산 시설뿐만 아니라 수십 년간의 전문성 및 피복연료 제조 경험을 활용하여 달성될 것으로 기대됨.
- 2021년 11월 NASA는 저농축우라늄으로 가동되는 소형 핵분열 원자로에 대한 아이디어를 발굴하기 위해 제안요청서(Request for Proposals, RFP)를 발간함.²⁶⁾
 - 달에서 활용할 동력으로 핵분열표면전력(Fission Surface Power, FSP) 시스템 혁신기술 개발을 위해 원자력 및 우주 산업계가 제안하는 방안 모색을 목적으로 함.
 - FSP 프로젝트는 2030년까지 달 탐사 및 후속 임무를 위한 지속적이고 태양과 무관한 동력 공급원을 구축하는 것으로 NASA가 DOE 및 INL과 협력하여 후원함.
 - FSP는 달 환경에서 40 kWe의 전력을 최소 10년 동안 지속적으로 공급할 수 있어야 하며, 장치의 지름은 4 m, 길이는 6 m, 무게는 6톤 미만으로 제한됨.
 - 사람의 도움 없이 시동이 자유로워야 하며 달 착륙선의 갑판에서 작동하거나 착륙선에서 분리되어 운반 시스템에 배치하고 작동을 위해 다른 현장으로도 이송 가능하여야 함.
 - 2022년 6월 21일 NASA는 핵분열원자력 시스템 개념 설계 업체로 록히드마틴(BWXT 및 Creare와 협력), 웨스팅하우스(Aerojet Rocketdyne과 협력), IX(Maxar, Boeing과 협력) 등 세 업체를 선정함.²⁷⁾
 - 선정된 3개 업체는 1단계로 12개월간 핵분열 발전시스템의 초기 개념 설계를 개발하며, 이는 아르테미스(Artemis) 프로그램 하에서 수행될 예정이다.

24) World Nuclear News, NASA selects reactor concepts for deep space exploration, 14 July 2021.

25) Nuclear Newswire, BWXT delivers reactor fuel that could power a roundtrip to Mars, 15 December 2021.

26) World Nuclear News, NASA seeks proposals for lunar reactor, 22 November 2021.

27) World Nuclear News, Nuclear power on the Moon: NASA selects three proposals, 22 June 2022.

2. 캐나다

- 캐나다는 소형원자로가 향후 원자력의 미래 산업을 주도할 것으로 판단하고 이들의 유치 및 개발을 적극 추진하고 있으며 특히 SMR을 전력원으로써 대규모 전력망에 연결하거나, 고립된 지역 또는 광산에서 필요한 전력의 생산, 오일샌드 처리 공정을 위한 고온의 열 생산 등 세 분야에서의 활용을 주로 고려함.
- 2018년 캐나다 정부는 SMR 건설을 위한 로드맵을 발표한 데 이어, 2020년 12월 SMR 로드맵 실현을 위한 SMR 실행계획(SMR Action Plan)을 수립함.

가. SMR 개발 로드맵 및 실행계획

- 2018년 캐나다는 자국이 국제 SMR 시장의 전략적인 교두보 역할을 할 것을 기대하면서 산업체, 정부, 발전사 및 관련 산업체 전문가들로 ‘SMR 로드맵 운영위원회(SMR Roadmap Steering Committee)²⁸⁾’를 구성함. 동 위원회에는 총 55개 기관이 참여하여 10개월간 전문가 워크숍, 원주민 지역사회와의 대화, 그리고 5개 실무그룹 전문가들의 평가 등 세 트랙의 작업을 통하여 SMR 개발 로드맵을 작성함.²⁹⁾
 - 5개 실무그룹은 기술(Technology), 경제 및 재정(Economics and Finance), 토착사회 및 공공 참여(Indigenous and Public Engagement), 폐기물 관리(Waste Management), 규제 준비(Regulatory Readiness)로 나누어 여러 방면에서 SMR을 평가함.
- SMR 로드맵은 4가지 주제(Pillars)별로 우선적으로 추진해야 할 사항들을 아래와 같이 제시함:
 - Pillar 1 (Demonstration and Deployment) : 산업체의 SMR 실증 프로그램을 위한 중앙/지방 정부의 재정지원이 필요하며, SMR 초기 건설을 촉진하기 위해 민간업체의 위험부담을 중앙/지방 정부가 같이 분담하는 것이 필요함.
 - Pillar 2 (Policy, Legislation, and Regulation) : SMR 개발 및 건설에 따른 영향을 중앙정부가 평가하고, SMR의 원자력 손해보상 한도를 보장하기 위한 손해보상 규정을 중앙정부가 검토해야 함. 규제기관인 CNSC는 산업체와 함께 위험도 정보 기준(risk-informed criteria)에 기반한 점진적인 규제방안 개선 노력에 동참해야 함. 사용후핵연료, 중/저준위 폐기물, 실증프로젝트에 대해 SMR 기술 개발자, 폐기물 분야 선도 포럼 및 중앙정부는 폐기물 관리 및 처분 규정이 지켜지도록 조치가 필요함.
 - Pillar 3 (Capacity, Engagement, and Public Confidence) : 중앙정부, 지방정부, 지자체와 산업체가

28) SMR Roadmap Steering Committee 구성 멤버: Natural Resources Canada (*Chair, non-voting*), Alberta Innovates, Bruce Power, New Brunswick Department of Energy and Resource Development, New Brunswick Power, Northwest Territories Department of Infrastructure, Ontario Ministry of Energy, Northern Development and Mines, Ontario Power Generation, Quilliq Energy Corporation, SaskPower, Atomic Energy of Canada Limited (*non-voting*)

29) A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, 2018.11.

해당 지역의 주민과 지역사회와의 SMR 사업과 관련하여 건설적인 대화가 필요함.

- Pillar 4 (International Partnerships and Markets) : 산업체, 연구소, 학계의 도움을 받아 SMR 프로젝트에 해외 업체들이 참여할 수 있도록 조치하는 노력이 필요함.

○ 2020년 12월 캐나다 정부는 SMR 실행계획을 발표하였는데, 이 실행 계획은 2018년 11월에 작성한 국가 SMR 로드맵에서 확인된 53개의 권고사항에 대한 실천 방안임.³⁰⁾

- 이 실행계획은 국내외에서 다양한 용도로 활용하려는 SMR의 개발, 실증 및 건설을 위해 해야 할 구체적인 업무 사항들을 제시함(총 497개의 조치사항).

○ 2020년 10월 캐나다 혁신과학산업부(Ministry for Innovation, Science & Industry)는 Terrestrial Energy사가 개발하고 있는 일체형 용융염원자로(IMSR) 개발을 가속화하기 위해 2천만 캐나다 달러를 투자함.

- 이는 전략혁신기금(Strategic Innovation Fund, SIF)으로 SMR 개발을 지원하는 첫 투자이며, 혁신적인 4세대 원자력기술 개발자를 대상으로 함.³¹⁾

○ 2021년 3월 캐나다 중앙정부는 뉴브런즈윅(New Brunswick)주의 SMR 관련 연구 및 기술 개발을 위하여 5,600만 캐나다달러 규모의 자금을 지원한다고 발표함.

- 이 중 5,050만 캐나다 달러(미화 4,040만 달러)는 Moltex Energy가 개발하는 300 MW급 SSR-W(Stable Salt Reactor-Waste Burner)에 투자될 예정임.
- New Brunswick Power사에 투자되는 500만 캐나다달러(미화 400만 달러)는 SMR 원자로가 건설될 뉴브런즈윅주 Saint John 소재의 Point Lepreau 부지를 준비하는 데 사용됨.³²⁾

○ 캐나다 정부는 그린본드 프레임워크(Green Bond Framework)에서 원자력을 제외했으나, 2022년 4월 하월에 제출한 2022년 예산안에는 SMR을 포함시켰으며, 2022년 캐나다 정부 예산은 SMR을 지원하기 위해 천연자원부(Natural Resources Canada)와 원자력안전위원회(CNSC)에 총 1억 2천만 캐나다 달러(미화 7,900만 달러)를 제안함.³³⁾

○ 2022년 3월 캐나다 정부는 초소형원자로 eVinci를 지원하기 위해 웨스팅하우스 캐나다(Westinghouse Electric Canada Inc.)에 2,720만 캐나다달러(미화 2,160만 달러)를 투자할 것이라고 발표함.³⁴⁾

- eVinci에 대한 지원은 전략혁신기금(SIF)의 Net Zero Accelerator 이니셔티브를 통한 지원인데, 2020년 10월 IMSR 원자로 개발 가속화를 위해 Terrestrial Energy에 2,000만 캐나다 달러, 2021년 3월

30) World Nuclear News, Canada sets out actions needed to commercialise SMRs, 21 December 2020

31) Green Car Congress, Canada investing \$20M in Terrestrial Energy to support development of Integral Molten Salt SMR, 18 October 2020.

32) World Nuclear News, Canadian government invests in SMR project, 18 March 2021.

33) Nuclear Newswire, Canada's 2022 budget plan includes backing for SMRs, 15 April 2022.

34) Power Engineering, Canada invests in Westinghouse micro nuclear reactor, 17 March 2022.

SSR-W 원자로 개발을 위해 Moltex Energy에 4,750만 캐나다 달러를 투자한 데 이는 세 번째 SMR 기술 투자임.

- 2023년 2월 캐나다 정부는 캐나다원자력협회(CNA) 연례 회의에서 SMR의 상업적 개발을 지원하는 Enabling Small Modular Reactors Program의 착수를 공표함.
 - 캐나다 정부는 SMR 제작, 핵연료 공급 확보를 위한 부품 공급망 개발, 안전하게 SMR 폐기물을 관리하는 방법 연구에 4년에 걸쳐 2,960만 캐나다 달러(2,180만 달러)의 자금을 지원할 예정임.³⁵⁾

나. CNL의 SMR 실증 사업과 CNRI

- 2017년 6월 캐나다 원자력연구소(Canadian Nuclear Laboratories, CNL)는 장기 전략에 따라 8개의 전략적 계획(initiatives)을 설정했는데, 그 가운데 CNL 부지에 SMR을 2026년까지 건설하는 계획이 포함됨.
 - CNL은 관련 업체들에게 참여의사 표명을 요청하였고, 캐나다 및 해외의 총 80개의 SMR 기술개발자, 잠재적 수요자, 관심 기관, 이해당사자로부터 SMR 개발에 관한 제안을 받음.³⁶⁾
- 2018년 4월 CNL은 SMR 프로젝트 추진자들에게 CNL 부지에 실증할 SMR 프로젝트의 건설 및 운영을 평가할 것을 요청함.
 - 2017년 6월에 시작된 CNL의 SMR 실증사업 참여의사 표명 요청에 따른 것으로, CNL은 이중 19개의 기술개발자로부터 SMR 원형로 또는 실증로 건설에 관심이 있다는 의사를 받고 이들 업체를 초청함.
- CNL SMR 실증사업은 캐나다 원자력안전위원회(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)의 인허가 절차와는 완전히 독립적으로 수행되며, 모든 프로젝트는 규제요건이 적용되며, CNL의 단계별 초청 과정은 4개의 단계로 구성됨.
 - 1단계와 2단계에서 CNL은 제안된 설계의 기술적, 사업적 장점, 프로젝트의 재정적 타당성 평가, 필요한 국가안보 및 건전성 요건 검토 등을 강화하여 평가함.
 - 3단계에는 부지 배치, 사업 위험 관리 및 계약 조건에 관해 사전적이고 비독점적인 논의가 포함됨.
 - 4단계인 프로젝트 실행에는 SMR의 건설, 시험 및 시운전, 운영 및 궁극적으로 폐로가 포함됨.
- CNL SMR 실증사업에 참여하는 설계 업체의 SMR 노형은 아래와 같음:
 - Global First Power(GFP)의 5 MWe 고온가스로인 MMR(Micro-Modular Reactor)을 Chalk River 부지에 건설할 것을 제안함.
 - 2019년 7월부터 Stage-3(3단계)가 시작됨.
 - CNSC의 EA(환경평가) 검토가 시작되었고 2019년 4월 CNSC에 실증원자로 부지인 Chalk River

35) World Nuclear News, Canadian government launches SMR support programme, 24 February 2023.

36) Nuclear Energy Insider, Global First Power Enters Stage-3 of CNL SMR Programme, 29 August 2019.

부지에 대한 “부지 준비 허가(Licence to Prepare Site)”를 신청함.

– 2023년 5월 캐나다원자력공사(Atomic Energy of Canada Limited, AECL), CNL 및 GFP는 Chalk River부지 내 주차장을 실증용 MMR을 건설할 부지로 선정함.³⁷⁾

- StarCore Nuclear가 14 MWe HTGR 2 기를 Whiteshell 및 Chalk River 부지 두 곳에 건설할 것을 제안함.
- Terrestrial Energy가 190MWe 용융염로IMSR(integral molten salt reactor) 개발 및 건설을 제안함.
- U-battery Canada가 4 MW 고온가스로인 U-battery 개발을 제안함.

다. 4개 주 정부(뉴브런즈윅, 온타리오, 서스캐처원, 앨버타)의 SMR 배치 추진

○ 2019년 12월 뉴브런즈윅(New Brunswick), 온타리오(Ontario), 서스캐처원(Saskatchewan) 3개 주는 기후 변화 및 지역 에너지 수요에 부응하고 경제개발 및 연구·혁신 기회를 촉진하기 위해 SMR의 개발과 배치를 발전시키고, SMR 배치를 위한 문제를 해결하기 위해 협력하기로 약속함.³⁸⁾

○ 2021년 4월 상기 3개 주는 그간 수행한 “소형 모듈형원자로 개발 및 배치의 실현 타당성” 결과를 공개하는 행사를 개최하고, SMR 프로젝트 개발을 위해 1) 2028년까지 그리드 규모의 300 MWe SMR 첫 호기 건설, 2) 이후 2 기의 4세대 선진 SMR의 실증로 건설 계획 고려, 3) 원격 지역 및 광산에서 새로운 유형의 초소형원자로 활용이라는 일정을 제시함.

- 이후 앨버타(Alberta)주도 3개 주가 체결한 SMR 개발 상호 협력 양해각서에 추가로 서명하고, SMR 개발에 동참하기로 함.

○ 2022년 3월 4개 주는 SMR 개발과 배치를 위한 전략계획인 ‘A Strategic Plan for the Deployment of Small Modular Reactors’란 제목의 보고서를 공개함.³⁹⁾

- SMR 전략계획은 2021년 SMR 타당성 조사를 바탕으로 주 정부가 SMR의 진행 여부를 결정할 수 있는 중요한 조치를 정하고, 진행 결정에 따라 SMR의 도입을 지원하기 위한 추가 조치를 개략적으로 설명함.
- 이 전략 계획에서 예상되는 SMR 기술 개발의 세 가지 흐름은 아래와 같음.
 - 스트림 1: 2028년까지 그리드 규모의 300 MWe SMR 발전소를 온타리오주 Darlington 원전 부지에 건설하고, 서스캐처원에 첫 호기를 2034년에 가동 예정임. 스트림 1에 대해 온타리오발전(Ontario Power Generation, OPG)은 Darlington SMR 원전의 우선 기술 개발자로 GEH를 선정하여 조기 부지 준비 작업에 착수함.

37) Nuclear Newswire, Canada’s first microreactor headed to a Chalk River labs parking lot, 18 May 2023.

38) World Nuclear News, Canadian provinces to collaborate on SMRs. 2 December 2019.

39) World Nuclear News, Canadian provinces release strategic plan for SMRs, 28 March 2022.

- 스트림 2: 뉴브런즈윅에서 개발될 2기의 4세대 선진 SMR 배치 관련, ARC는 2029년까지 Point Lepreau 원전 부지에서 ARC-100 소듐냉각로를 가동할 것을 목표로 하고 있으며, Moltex Energy는 2030년대 초까지 Point Lepreau에 사용후연료 회수 시스템과 SSR 원자로를 모두 가동하는 것을 목표로 함.
- 스트림 3: 원격 지역 및 광산에서의 디젤 사용을 대체하기 위한 초소형원자로의 활용. OPG와 USNC의 합작사인 Global First Power(GFP)는 2026년 가동을 목표로 온타리오주 Chalk River CNL 부지에 5 MWe MMR 건설을 제안함.

3. 영국

- 영국은 2013년 ‘영국 원자력의 미래(The UK’s Nuclear Future)’를 통해 원자력 활용 확대를 위한 국가계획과 함께 SMR 개발 필요성을 최초로 제시하였으며, 가압경수형 SMR과 AMR(Advanced Modular Reactor)의 두 가지 트랙으로 개발 중임.
 - 가압경수형 SMR은 Rolls-Royce사 주도의 컨소시엄이 2030년 최초 운전 및 2050년까지 16기 건설이라는 목표 아래 470 MW 용량의 SMR 개발을 주도중임.
 - AMR은 새로운 유형의 연료와 냉각재를 사용하는 원자로인데, 선진원자로 노형 및 개발 프로그램 타당성 조사를 통해 3개 노형을 선정하고 고온가스로의 개발을 우선 추진함.
- 2015년 11월 영국은 SMR을 포함한 차세대 원전 개발을 위해 향후 5년간 2.5억 파운드를 투자할 것이라고 발표하였으며, 그 후속 조치로 2016년 3월 에너지환경부는 (Department of Energy & Climate Change)가 영국에 가장 적합한 SMR을 선정하는 경쟁에 참여할 의향서(expressions of interest, EOI)를 제출하도록 산업체에 요청함.
 - SMR 개발요건은 출력이 300 MWe까지 가능하고, 모듈화된 기기 또는 계통을 공장에서 제작하여 발전소 건설가의 최소 40% 감축을 목표로 함.
- 에너지환경부의 후신인 비즈니스·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)는 2016년 11월 미래 원자로 시스템의 혁신, 개선 및 배치에 필요한 핵심 능력을 유지하기 위한 목적으로 ‘원자력 혁신 프로그램(Nuclear Innovation Program, NIP)’을 시작하여 1.8억 파운드 지원을 약속함.
 - NIP가 지원하는 분야는 디지털 원자로 설계(Digital Nuclear Reactor Design), 선진 원자력 제조 및 재료(Advanced Nuclear Manufacturing and Materials), 원자력 안전 및 보안 엔지니어링(Nuclear Safety and Security Engineering), 원자력 시설 및 전략적 툴킷(Nuclear Facilities and Strategic Toolkit), AMR 타당성 및 개발 연구(AMR Feasibility and Development Study), 선진핵연료 주기 프로그램(Advanced Fuel Cycle Programme) 등임.
- 2017년 12월 에너지산업부(BEIS)는 초기 정보수집 단계를 벗어나지 못한 SMR 경쟁을 종료하고, 보다 다양한 원자로형을 포함하여 총 예산 4.4천만 파운드 규모의 2 단계로

이루어지는 새로운 SMR 경쟁인 ‘Advanced Modular Reactor(AMR) Feasibility and Development(F&D)’에 착수한다고 발표함.

- 2018년 6월에는 총 2억 파운드 규모의 Nuclear Sector Deal을 발표하였는데, 개량형 모듈형 원자로 개발과 인허가를 위해 5.6천만 파운드, Canada의 SMR 경쟁을 위한 제조분야의 연구개발 지원금 3.2천만 파운드가 포함됨.
- 2018년 9월 Advanced Reactor Concepts(ARC), DBD, LeadCold, Moltex Energy, Tokamak Energy, U-Battery Developments, Ultra Safe Nuclear, Westinghouse Electric Company UK 등 8개의 기관이 선정됨.
- AMR F&D의 1단계 업무인 기술적 및 상업적 타당성 분석을 위해 총 4백만 파운드의 지원을 받았는데, 2019년 BEIS는 위 8개사 중 3~4개 업체에 원자로개발을 위해 2년간 총 4천만 파운드의 예산을 추가로 지원할 것을 발표함.

○ 2020년 BEIS가 4천만 파운드를 지원하면서 AMR F&D의 2단계 사업이 시작되었고, 3천만 파운드는 1단계 AMR 경쟁에 참가한 업체 중 2단계 지원사를 선정하여 각 1천만 파운드씩을 지원함.

- Oxfordshire 기반의 Tokamak Energy, Lancashire 기반의 Westinghouse
- Cheshire 기반의 U-Battery⁴⁰⁾⁴¹⁾

○ 2020년 영국 정부는 10대 중점계획인 “Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution”⁴²⁾과 “2020 Energy White Paper”⁴³⁾를 발표하면서 저탄소 경제사회 구현에 SMR과 선진 원자로의 중요성을 강조함.

- 2020년 11월 영국은 Ten Point Plan에 따라 차세대 원자력기술에 3.85억 파운드까지 투자하는 선진원자력기금(Advanced Nuclear Fund)을 발표함.
 - 이 중 2.15억 파운드는 공장에서 제작하여 부지 현장에서 조립하여 건설할 수 있는 영국의 소규모 원전인 SMR 개발에 할당되고, 나머지 1.7억 파운드는 선진 모듈형원자로(AMR)의 연구 및 개발에 할당됨.
- 가압경수형 SMR은 Rolls-Royce사 주도의 컨소시엄이 개발을 주도함.

○ 2021년 7월 영국 정부는 AMR 첫 호기를 건설하기 위한 접근방식을 제시하도록 Call for Evidence를 발행하였고,⁴⁴⁾ 선진원자로 실증 프로그램에 2030년대 초까지 1.7억 파운드를 투자하겠다고 발표함.

40) World Nuclear News, UK government support for modular reactor deployment, 13 July, 2020.

41) Reuters Events, UK government aims to kick start next-gen nuclear, 21 July, 2020.

42) UK Government, The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution, November 2020.

43) UK Government Energy White Paper, Powering our Net Zero Future, December 2020.

44) Potential of high temperature gas reactors to support the AMR R&D programs; Call for Evidence.

- 2021년 12월 영국 정부는 1.7억 파운드의 영국 선진 모듈형 원자로(AMR) 실증 프로그램에 고온가스냉각로(HTGR) 선정을 확정함.⁴⁵⁾
 - AMR 연구 프로그램의 목표는 선진 원자로의 가능성을 입증하고, 2030년대 초까지 실증로를 운전하는 데 있음.
 - AMR은 수소 생산에 사용될 수 있는 고온의 열을 생산하고, 전기 생산뿐만 아니라 산업 공정과 잠재적으로 지역 난방을 위한 열도 공급 가능해야 함.
- 2022년 9월 영국 정부는 선진 원자력 기술 개발을 지원하기 위해 330만 파운드를 지원을 발표함.⁴⁶⁾
 - 330만 파운드의 자금은 선진 원자력 기금(ANF)인 3.85억 파운드의 일부로, 2030년대 초까지 HTGR 기술 실증을 목표로 하는 AMR 연구 개발·실증(RD&D) 프로그램을 통해 지원되며 선진 모듈형 HTGR 기술을 개발하는 프로젝트와 HTGR 기술용 피복입자연료(CPF)를 개발하는 프로젝트로 나누어 지원될 것임.
 - 사전 선행 엔지니어링 설계(pre-front-end engineering and design, pre-FEED) 연구를 위한 6개 프로젝트를 총 250만 파운드의 자금 지원 수혜자로 선정함.
 - 또한 원자력 규제 사무소(Office for Nuclear Regulation)와 환경청(Environment Agency)에 HTGR에 대한 혁신적인 규제 접근법을 고려하고 그 역량을 개발하도록 최대 83만 파운드를 지원할 예정이다.
- 2021년 11월 영국 정부는 UK Research and Innovation의 “Low Cost Nuclear” 프로그램 2단계를 통하여 Rolls-Royce SMR이 2035년까지 무탄소 전력 생산 목표 달성에 기여하기를 희망하며 Rolls-Royce에 3년간 2.1억 파운드의 자금 지원을 승인함.⁴⁷⁾
- 2022년 5월 영국 정부는 새로운 원자력 프로젝트의 개발을 지원하고 업계의 경쟁을 장려하고 영국 전역에서 투자를 개방하기 위한 자금으로 1.2억 파운드의 미래 원자력 활성화 기금(Future Nuclear Enabling Fund, FNEF)을 조성한다고 발표함.⁴⁸⁾
 - 새로운 원자력 기술을 시장에 진입하도록 장려하는 동시에 이를 개방하고 가속화하기 위한 것으로, 2030년까지 8기의 새로운 원자로를 승인하려는 정부의 계획을 실현하기 위한 방안임.
 - 새로운 원자력 프로젝트의 가장 큰 장애물은 자금 조달로 FNEF는 SMR을 포함한 원전 건설 프로젝트들을 현실화하는 데 필요한 민간 투자 유치에 도움이 될 전망이다.
- 2022년 7월 BEIS는 영국 내 핵연료 생산을 늘리기 위해 7.5천만 파운드 규모의 핵연료

45) Nuclear Newswire, HTGR locked in for UK demonstration project, 8 December 2021.

46) World Nuclear News, UK government funding for advanced reactor development, 2 September 2022.

47) Reuters, Britain backs Rolls-Royce mini nuclear plants in net zero drive, 10 November 2021.

48) BNN Bloomberg, UK Starts £120 Million Fund to Develop Nuclear Power Technology, 12 May 2022.

기금(Nuclear Fuel Fund)을 조성함.⁴⁹⁾

- 핵연료가금으로 외국으로부터의 연료 수입을 줄이고 국내에서 핵연료를 제작하여 영국 내 핵연료 부문을 키우는 프로젝트에 보조금을 지급할 계획임.

○ 2022년 12월 영국 정부는 앞으로 10년 안에 고온가스원자로(HTGR) 실증로가 가동되도록 원자로와 핵연료 개발에 7.7천만 파운드를 지원한다고 발표함.⁵⁰⁾

- 이 중 6천만 파운드는 HTGR의 다음 단계인 Phase-B 단계 개발 업무를 착수하는 데 사용될 것임.⁵¹⁾
 - Phase-A는 이 전 6개의 개발 프로젝트에서 pre-FEED(Front End Engineering Design) 연구를 수행한 AMR R&D 프로그램임.
 - Phase-B 단계는 인허가 검토에 진입, 관련 연구개발을 수행, 그리고 Phase-C 단계를 위한 건설·배치 계획을 작성할 수 있을 정도로 성숙한 최대 2개의 HTGR FEED를 만들어낼 수 있도록 설계된 개방형 경쟁 기반 프로그램이며, 2025년 2월에 끝날 예정임.
 - 400만 파운드는 지식 캡처 및 공유를 촉진하여 AMR RD&D 프로그램 제공 시간, 위험 및 비용을 줄이는 Advanced Modular Reactor Knowledge Capture Project에 제공됨.
 - 1,300만 파운드는 재처리된 우라늄과 새로 채굴된 우라늄을 새로운 연료를 만들기 위한 전환 능력 개발을 돕기 위해 Westinghouse의 Springfields 시설에 제공됨.

○ 2023년 7월 영국 에너지안보·넷제로부는 새로운 원전 건설을 주도할 기관으로 GBN(Great British Nuclear)을 공식적으로 출범시키고 새로운 SMR 개발 경쟁에 착수함.

- GBN은 2022년 4월 영국 정부가 발표한 에너지안보전략(Energy Security Strategy)에 따라 8기의 신규 대형 원전과 SMR을 추가로 건설하여 2050년까지 영국 예상 전력 수요의 약 25%에 해당하는 24 GWe의 원자력 설비를 갖추기 위한 새로운 원자력 프로젝트를 주도하기 위해 독립기관으로 설립됨.
- 새로운 SMR 경쟁은 2023년 7월에 경쟁을 시작하여 2023년 가을에 최대 4기까지 SMR 후보 노형을 선정하고, 2029년에 1기 또는 2기의 SMR을 선정하여 건설을 위한 최종 투자를 결정할 예정임.
- 2030년대 초반 최초의 SMR을 가동하는 것이 목표인 SMR 경쟁에 지원되는 총 지원액은 200억 파운드(미화 260억 달러)에 이를 전망이며, 이미 2.1억 파운드(미화 2.75억 달러)의 정부 보조금을 받은 Rolls-Royce SMR도 이 SMR 경쟁에 참여할 예정임.
- 에너지안보·넷제로부는 SMR 경쟁 착수 발표와 함께 총 1.57억 파운드(미화 2.05억 달러)의 보조금 지원 계획을 발표하였는데, 여기에는 선진 원자로 사업 개발 가속화와 규제절차 진입을 위한 설계 지원에 투입될 7.71천만 파운드, AMR 및 차세대 연료의 개발·설계를 위한 5.8천만 파운드 지원과 2.23천만 파운드의 핵연료 기금(Nuclear Fuel Fund) 지원이 포함됨.

49) World Nuclear News, UK government fund to accelerate nuclear fuel supply, 19 July 2022.

50) Nuclear Newswire, U.K. backs nuclear innovation with £77 million, 23 December 2022.

51) World Nuclear News, UK opens applications for GBP60 million HTGR research, 13 December 2022.

4. 러시아

- 러시아는 오래전부터 선박용 원자로인 KLT-40을 개발하여 북극항로 유지를 위한 쇄빙선에 활용해왔으며, 현재로 쇄빙선과 해양부유식 원자력발전소를 중심으로 SMR을 배치하고 있음.
 - KLT-40 계열은 OK-150 및 OK-900 선박용 원자로로, Taymyr급 쇄빙선(KLT-40, 171 MW)과 LASH 운반선 Sevmorput(KLT-40, 135 MW)에 동력을 공급하기 위해 개발되었고 설계가 개선되어 RITM-200까지 발전됨.
- 특히 최초의 해양부유식 원자력발전소인 아카데미 로모노소프(Akademik Lomonosov)가 2019년 12월 전력망에 연결되면서 전력을 생산하는 세계 최초의 SMR로 기록됨.⁵²⁾
 - Baimskaya에 새로운 원자력발전선이 건설되는 2027년까지 20 MWe의 전력을 공급할 예정이며, 2027년 이후에는 폐쇄될 계획임.
 - 2020년 7월 동시베리아해의 항구인 페벡에 열을 공급하기 시작하였으며,⁵³⁾ 2022년 7월에는 페벡 지역 마을의 모든 가정에 난방 공급을 확대하는 작업이 진행됨.⁵⁴⁾
- 2020년 10월 러시아 대통령은 북극권 개발 및 국가 안보 보장을 위한 전략에 관한 행정명령에 서명하였는데, 2035년까지 최소한 5척의 Project 22220 계열의 원자력 쇄빙선과 3척의 Project 10510 계열 원자력 쇄빙선이 건조될 예정임.
 - 이 선박들은 북해 항로를 일년 내내 항해할 수 있도록 하기 위한 것으로 RITM-200 원자로를 장착한 러시아 최초의 LK-60 쇄빙선 Arktika가 2020년 11월 중순 Murmansk항을 출발하여 첫 항해를 시작한 이래,⁵⁵⁾ 시비르(Sibir)와 우랄(Ural)호도 각각 2021년과 2022년 운항을 시작함.
 - 같은 계열의 야쿠티아(Yakutia)와 추코트카(Chukotka) 두 척이 추가로 건조 중이며, 각각 2024년과 2026년 말에 북해 항로에 투입되어 광대한 북극과 극동 영토개발에 이용 예정임.
- 한편 2020년 12월 Rosatom은 Yakutia 자치공화국에 SMR을 건설하는 프로젝트에 참여한다는 협약을 체결함.⁵⁶⁾
 - RITM-200 원자로 2기를 러시아 극동지역 북극 연안에 있는 야쿠티아 공화국내의 인구 1000명의 마을인 우스트쿠이가(Ust-Kuyga)에 건설한다는 계획이며, 규쿠스(Kyuchus)에 있는 금광 개발에 필요한 동력도 Ust-Kuyga에 건설될 소형로가 공급할 예정임.⁵⁷⁾

52) World Nuclear News, Russian connects Floating Plant to Grid, 19 December 2019.

53) Global Construction Review, World's first floating nuclear plant starts heating Asia's northernmost town, 1 July 2020.

54) World Nuclear News, More nuclear heat for Arctic town, 22 July 2022.

55) World Nuclear News, Arktika icebreaker embarks on first mission, 17 November 2020.

56) Nuclear Engineering International, Rosatom to begin work on land-based SMR, 4 January 2021.

57) World Nuclear News, Nuclear to power remote gold mine, 12 October 2021.

- 2021년 5월 러시아 대통령은 극동 지방의 구리 광산에 최대 5기의 부유식 원전을 활용
해 전력을 공급한다는 계획을 승인함.⁵⁸⁾
 - Rosatom은 55 MWe RITM-200M 원자로 2기가 장착된 원자력발전 선박 4척을 건설하고, 이 중 3척을
구리광산에 사용할 것을 제안함.
 - 첫 번째 원자력발전선 2척은 2026년 말 차운스카야(Chaunskaya) 만의 나글린(Nagloynyn) 곳으로 인
도되어, 400 km 이상 떨어진 바임스카야 광산으로 이어지는 110kV 송전선에 연결될 것으로 예상됨.
 - 세 번째 원자력선은 2027년 말에 연결되어 전력 공급량은 약 330 MWe로 증가할 것이며, 네 번째 원자
력선은 수리 또는 핵연료재장전 기간에 대신 사용할 수 있는 예비용으로 계획됨.
- 세계 최초의 납냉각고속로 실증 발전로가 될 BREST-OD-300도 건설 중에 있음.
 - 300 MW 규모의 4세대 납냉각 고속로이며, 질화 우라늄-플루토늄 혼합 연료를 사용함.
 - BREST 발전소는 순환 핵연료주기 기술 개발을 위한 러시아의 'Breakthrough' 프로젝트 하에 있는 에너
지실증단지(Pilot Demonstration Energy Complex, PDEC)의 핵심임.
 - PDEC는 핵연료 제조 공장, 원자로, 그리고 조사된 핵연료 재처리 설비 등 3개의 주요 설비가 서로 연결된
클러스트로 순환형 핵연료주기를 실증한다는 계획임.

5. 프랑스

- 2019년 9월 프랑스 대체에너지·원자력위원회(Alternative Energies and Atomic
Energy Commission, CEA)는 EDF, Naval Group, TechnicAtome와 함께
NUWARD SMR 개발 프로젝트를 시작함.
 - 170 MWe의 원자로 2개로 구성되는 340 MWe의 EPWR(European Pressurized Water Reactor) 형
SMR 발전소인 NUWARDTM의 개발은 EDF가 주도함.⁵⁹⁾
 - NUWARDTM는 잠수함에 사용되었던 원자로를 바탕으로 설계되는데, CEA가 원자로설계, 원자력추진 잠수
함과 항공모함 제작사인 Naval Group이 구조 및 모듈화, TechnicAtome이 조밀한 원자로설계를 담당
함.
 - 2025년까지 기본설계를 마치고, 2030년까지 설계를 보완한 후 2030년부터 건설한다는 일정임.
 - 2019년 9월 EDF와 CEA는 미국의 Westinghouse Electric Company와 SMR 개발 협력 분야 탐색을
위한 framework agreement를 체결함.
 - 프랑스 NUWARD팀의 축적된 PWR기술과 웨스팅하우스의 SMR 설계개념을 통합, 피동 개념을 접목하
는 방안을 조사하고, 규제와 설계 표준화 방안 검토를 수행하고, 협력에 대한 구체적인 로드맵은 2020가

58) BELLONA, Russia eyes building five more floating nuclear plants, 4 May 2021.

59) World Nuclear News, French-developed SMR design unveiled, 17 September 2021.

지 마련하기로 합의함.⁶⁰⁾

- 2021년 10월 프랑스 대통령은 2030년까지 프랑스를 수소 강국으로 만들겠다고 미래 에너지믹스에서 원자력 수소 생산의 역할을 강조하는 자리에서 SMR 기술개발 추진을 약속함.⁶¹⁾

6. 중국

- 중국은 1960년대부터 1980년대까지의 혁신적인 원자로의 개발 경험을 바탕으로 만들어진 250 MWt의 고온가스냉각원자로(HTR) 2기로 구성된 210 MWe HTR-PM을 건설하여 운영중임.
 - 2012년 12월부터 산둥성 시다오완(Shidaowan)에 HTR-PM 실증발전소 건설을 시작하여, 2020년 7월부터 시운전, 2021년 12월 13일 송전망에 연결, 2022년 12월 9일 100% 출력 운전을 개시함.
- 중국의 경수형 SMR인 ACP100은 중국의 12번째 5개년 계획에서 '핵심 프로젝트'로 자리매김하였으며, 창장 프로젝트를 통해 건설이 진행되고 있음.
 - 링롱 원(Linglong One)이라고도 불리는 ACP100은 ACP1000으로부터 개발된 것으로, 125 MWe 출력의 전기 생산, 난방, 증기 생산 또는 해수 담수화 등 다목적으로 설계됨.
- 중구과학아카데미(CAS)는 2011년부터 토륨증식용융염원자로(Th-MSR 또는 TMSR)로 알려진 액체불화토륨원자로(LFTR) 개발을 위해 30억 위안 규모의 R&D 프로그램을 진행중임.
 - 불화염냉각고온로(FHR)로도 알려져 있으며, 상하이에 있는 상하이 응용물리연구소(SINAP)의 TMSR 센터가 개발과 운영을 담당함.
 - 2022년 8월부터 중국 생태환경부는 상하이 응용물리연구소가 2018년 9월 간수(Gansu)성 우웨이(Wuwei)시에서 착공한 실험용 토륨연료 용융염 원자로에 대한 운영을 승인함.⁶²⁾
 - 2 MWt의 TMSR-LF1 원자로는 2018년 9월에 건설이 시작되었으며, 2024년에 완공될 예정이었으나 건설 작업의 진행이 빨라 2021년 8월에 완공됨.
 - 2023년 6월 중국 국가핵안보국 상하이 응용물리연구소의 실험용 TMSR-LF1 토륨 용융염 원자로에 대한 운영 허가를 발급함.
 - TMSR-LF1 실증이 성공적으로 완료되면 373 MWt의 원자로를 2030년까지 건설할 계획임.

60) Nuclear Engineering International, French looks to develop SMRs, 24 September 2019.

61) Rechargenews, Macron hails pink hydrogen from nuclear as 'primary asset' for France, 21 October 2021.

62) World Nuclear News, Chinese molten-salt reactor cleared for start up, 9 August 2022.

7. 일본

- 일본의 SMR 개발은 정부의 민간 자금 지원 및 해외와의 연계를 통해 소형경수로 및 고온가스로, 고속로를 중심으로 기술개발을 추진 중임.
- 일본 정부는 SMR 개발을 대학·연구기관이 주도하는 기초연구와 민간기업이 주도하는 실용화 기술을 연계하는 NEXIP 프로젝트를 통해 다양한 혁신 원자력 기술을 개발하는 정책을 추진 중임.
 - NEXIP(Nuclear Energy × Innovation Promotion)은 2019년 4월부터 문부과학성, 경제산업성 및 JAEA가 공동으로 혁신적인 원자력 기술을 개발하는 민간기업을 지원하는 프로젝트임.
 - 일본원자력기구(JAEA)는 고온가스로/고속로의 연구개발 및 필요한 기술 기반을 정비하고 민간기업에 JAEA의 개발 기술과 시험연구시설을 제공하여 개발한다는 계획임.
- 경수형 SMR과 관련하여 일본은 미국 NuScale 개발에 투자, 미국과 BWRX-300 공동 개발, 자국 기업의 초소형원자로 개발 지원 등 직·간접적으로 소형경수로 개발에 참여해 왔음.
 - 엔지니어링 회사인 JGC 홀딩스와 일본중공업(IHI)은 2021년에 각각 4천만 달러와 1,840천만 달러를 투자함.
 - 일본 정부는 2021년 10월 의결한 '제6차 전략에너지 계획'에서 SMR 기술의 연구·개발·실증을 위한 국제 협력 노력을 추진한다는 입장을 확인하였으며, 그 일환으로 일본국제협력은행(JBIC)이 JGC 및 IHI와 합작 투자하여 2021년 설립한 일본 원자력이노베이션(JNI)은 2022년 4월 NuScale에 1.1억 달러를 투자함.⁶³⁾
 - 미·일·가나 3국은 2022년 10월 워싱턴 DC에서 개최된 IAEA 원자력 각료회의에서 가나에 미국 NuScale의 SMR을 보급하기로 합의하고, NuScale, 일본의 JGC와 IHI는 가나에서 SMR 건설 타당성을 두 개의 협정을 바탕으로 조사하기로 함.⁶⁴⁾
 - 일본은 GEH가 개발하고 있는 BWRX-300의 요소기술을 일본 내에서 실증 중임.
 - Mitsubishi 중공업은 2030년대 상용화 목표로 출력 0.5 MW, 높이 3m, 폭 4m, 중량 40t 미만의 초소형원자로 개발에 착수함.
- 일본은 고온가스를 통한 수소 생산과 관련한 핵심기술 확보를 위해 개발·가동에 필요한 노하우 축적과 실용화 규모의 시설을 확충하고 있음.
 - Mitsubishi 중공업은 JAEA와 공동으로 고온공학시험연구로(HTTR)에서 발생한 900℃ 이상의 고온 증기를 이용한 수소 생산 실증사업에 착수함.
 - 고온공학시험연구로(High Temperature engineering Test Reactor)는 JAEA가 보유한 고온가스로 실증로로 세계 최고온도인 950℃의 열을 내는데 성공했으며, 2030년까지 수소 제조를 계획함.

63) World Nuclear New, Japanese bank buys into NuScale, 4 April 2022.

64) World Nuclear News, USA, Japan partner with Ghana on SMR deployment, 28 October 2022.

- Toshiba와 Fuji는 축열 기능이 추가된 발전용 고온가스로를 개발 중에 있음.
- 일본은 미국과 공동으로 PRISM 및 비등경수냉각 고속로 RBWR를 개발하는 중이며 MCR-200는 자체 기술로 개발하고 있음.
- GEH는 소듐냉각고속로 PRISM(Power Reactor Innovative Small Reactor)과 Pu의 효율적 이용을 위한 RBWR(Resource-renewable BWR)를 설계 중임.
 - PRISM(Power Reactor Innovative Small Reactor)은 311 MWe (840 MWt) 규모의 소형모듈식 풀형 냉각로로서 붕괴열 제거를 위한 피동냉각 기능이 탑재됨.
 - RBWR(Resource-renewable BWR)는 효과적 자원활용과 사용후연료에 따른 환경에의 부담을 줄이기 위한 것으로 2027년 실증로, 2030년대 기준 원자로에 그 개념을 적용하려는 목표로 개발 중임.
 - 일본의 상용 고속증식로 개발사인 MFBR(Mitsubishi FBR Systems)가 개발하고 있는 소형 소듐냉각로 MCR-200은 전기출력 200 MWe(열출력 500 MWt)이며, 연료로는 입자형금속연료를 사용함.
 - 설계 수명은 60년인 모듈형태로 1,000 MW까지 출력증강이 가능함.
 - NEXIP 지원을 바탕으로 2029년에 개념설계, 2040년에 상용화를 목표로 추진중에 있음.

제5절 주요 소형모듈원자로 사업현황

소형모듈원자로로는 경수형 원자로 특히 일체형 원자로를 중심으로 건설경쟁이 치열함. 대형 원전의 주요 공급사인 Westinghouse, GE Hitachi, Areva, 한국수력원자력 등은 기존 사업 방식과 유사한 형태로 소형모듈원자로의 공급을 진행 중이나, NuScale을 필두로 한 신규 공급자들은 화학공업 플랜트 및 화력발전에서 도입한 사업모델을 소형모듈원자로 건설에 적용하고 있음. 본 절에서는 수냉각형 소형모듈원자로와 비수냉각형 소형모듈원자로, 초소형모듈원자로를 구분하여 원자로별 사업현황을 간략히 기술함.

1. 수냉각형 소형모듈원자로 사업현황

가. NuScale 원자로

- 미국 NuScale Power(이하 NuScale)사의 수냉각형(경수형) SMR로서, 전기출력 77MWe인 모듈(Nuscale Power Module, NPM) 4개, 6개 또는 12개가 발전소(일명 “VOYGR”)를 구성하게 됨.
 - NPM의 출력은 당초 45MWe로 개발되었다가 2018년 50MWe 및 60MWe, 2020년 70MWe로 증강되었는데, 이러한 설계 변경은 비용 상승의 한 요인으로 지목되기도 함.
- 아이다호국립연구소(Idaho National Laboratory, INL) 부지에 NuScale사의 SMR을 건설하는 ‘무탄소 전력 프로젝트(Carbon Free Power Project, CFPP)’는 민간기업이 주도하는 대표적인 SMR 건설사업으로 주목받았으나, 2023년 중단되었음.
 - CFPP는 유타주 발전사업자 연합(Utah Associated Municipal Power System, UAMPS)이 2015년부터 추진해온 저탄소 발전소사업으로, NuScale사의 77MWe 모듈 6개(총 462MWe) 건설 및 2029년 첫 번째 모듈의 상업 운전을 목표로 하여 추진되었음.
 - 2020년에는 미국 DOE가 10년에 걸쳐 13.5억불을 지원하기로 하면서 민간 주도의 SMR 실증건설을 실현하는 대표적인 사업으로 세계적인 주목을 받기도 하였음.
 - 그러나 목표 전력생산 비용 상승에 따른 전력구매자 확보에 난항을 겪으면서 NuScale사와 UAMPS는 2023년 11월 CFPP 사업의 중단을 결정함⁶⁵⁾.
- 한편, NuScale사는 2022년 5월 기업인수목적회사(SPAC)인 Spring Valley Acquisition Corp와 합병하여 NuScale Power Corporation (NPC)를 설립하였는데, NPC는 SMR의 설계와 배치를 중점사업으로 하는 세계 최초의 주식 상장사임.⁶⁶⁾

65) Reuters, NuScale ends Utah project, in blow to US nuclear power ambitions, 10 November 2023.

66) World Nuclear News, Completion of merger creates publicly traded SMR company, 3 May 2022.

- CFPP 사업의 중단에도 불구하고 NuScale사는 77MWe급 모듈로 구성된 발전소 VOYGR에 대한 설계인증은 진행한다는 입장으로, 주요 인허가 경과를 아래와 같음.
 - 기존 50 MWe 모듈은 2022년 7월 NRC의 설계인증을 받았는데,⁶⁷⁾ 이로써 미국에서 NRC가 승인한 첫 번째 SMR이 되었음.
 - 2023년 1월 77MWe 모듈 6기로 구성된 VOYGR-6 발전소를 기반으로 한 업데이트된 설계에 대한 표준 설계인가(SDA) 신청서가 제출되어 NRC 검토중에 있음⁶⁸⁾.
- 또한 NuScale사는 CFPP 사업 이외에도 SMR 건설을 위한 파트너십을 확대하면서 공격적으로 투자를 유치하고 있으며, 공급망 관련 협력관계(주제작사는 BWXT, 일부 주기기 제작은 두산에너지빌리티, 핵연료는 AREVA, SMR 운전은 Xcel사 등)도 확보해나가고 있음.
 - 주제작사로 BWXT, 일부 주기기 제작은 두산에너지빌리티, 핵연료는 AREVA와 협력하기로 하였으며, SMR 운전과 관련해서는 Xcel사와 협력하기로 함.
 - 2023년 5월 북미 철강 제조업체 Nucor Corporation과 VOYGR 발전소를 스크랩 기반 EAF(Electric Arc Furnace) 제철소에 활용하기 위한 양해각서(MOU)를 체결하였는데⁶⁹⁾, Nucor는 2022년 4월 NuScale사에 1,500만 달러를 투자한 바 있음.
 - 2022년 4월 미국 원자로단조컨소시엄(Reactor Forging Consortium, RFC)과 미국 내 기존의 단조 공급망을 활용하고, SMR 기술의 전 세계적 배치 및 미국의 제조산업 지원, 유지, 확장을 위해 NuScale을 지원하는 협력 계약을 체결함.⁷⁰⁾
 - 2022년 4월 두산에너지빌리티와 NuScale SMR의 상부 원자로 압력용기용 단조재 생산에 관한 협약을 체결함.⁷¹⁾
 - 2022년 7월 Paragon Energy Solutions과는 고도로 통합된 원자로 보호시스템인 HIPS(highly integrated protection system) 플랫폼을 잠재적으로 광범위하게 사용할 수 있도록 라이선스 계약을 체결함.⁷²⁾
 - 2022년 7월 NTS(National Technical Systems)와 기기검증시험챔버(Equipment Qualification Test Chamber)를 개발하는 비즈니스 협업 계약을 체결함.⁷³⁾
 - 2022년 9월 Reuter-Stokes사와 Paragon Energy Solutions는 NuScale SMR에 사용할 중성자 감시 계측기 설계 및 제조 계약을 체결함.⁷⁴⁾

67) Nuclear Engineering International, NRC certifies NuScale SMR for US use, 1 August 2022.

68) Nuclear Newswire, NRC docket application for updated NuScale design, 2 August 2023.

69) World Nuclear News, Steel maker considers use of NuScale SMRs at its mills, 16 May 2023.

70) World Nuclear News, NuScale collaborates with US forging companies, 22 April 2022.

71) World Nuclear News, Full-scale production of NuScale SMR to begin, 25 April 2022.

72) World Nuclear News, NuScale to make SMR safety platform widely available, 12 July 2022.

73) World Nuclear News, NuScale, NTS sign Equipment Qualification Test Chamber agreement, 28 July 2022.

74) Nuclear Engineering International, Reuter-Stokes and Paragon detection technology for NuScale

- 2022년 12월 프라마툼(Framatome)과는 VOYGR 발전소의 연료 취급 장비 및 연료 저장대 설계를 위한 2건의 신규 계약을 체결함.⁷⁵⁾

○ 아울러, NuScale사는 루마니아와 폴란드에서도 SMR 건설 프로젝트를 진행 중임.

- 루마니아 도이체티(Doicești) 석탄발전소 부지에 NuScale사의 SMR 발전소를 2028년까지 건설하는 사업을 추진중임.
 - 2021년 11월 루마니아 국영원자력회사인 Nuclearelectrica와 NuScale사가 루마니아에 NuScale사의 SMR을 건설할 계획임이 발표되었으며,⁷⁶⁾ 2022년 5월 NuScale, Nuclearelectrica, 루마니아부지 소유주인 E-INFRA간 부지 분석에 대한 양해각서가 체결됨.⁷⁷⁾
 - 또한 2022년 6월 미국 정부는 루마니아의 NuScale SMR 첫 호기 배치와 관련하여 프론트엔드 엔지니어링 및 설계(Front-End Engineering and Design, FEED) 연구에 1,400만 달러를 지원할 계획임을 밝힘.⁷⁸⁾
 - 2022년 12월 NuScale사는 루마니아의 RoPower Nuclear S.A.와 도이체티 부지내 VOYGR-6 배치를 위한 FEED 작업에 대한 계약을 체결함.⁷⁹⁾
- 폴란드에서는 기존 석탄화력발전소 부지에 NuScale SMR 발전소를 건설하는 사업을 추진중임.
 - 2021년 9월 폴란드 국영 구라는 생산업체인 KGHM Polska Miedź SA(KGHM)과 NuScale사의 SMR을 활용하여 기존 석탄발전소의 재출력 또는 용도를 변경하는 기술을 모색하는 협약을 체결함.⁸⁰⁾
 - 2022년 2월 KGHM과 VOYGR SMR 발전소 배치 업무를 시작하는 계약을 체결하였는데,⁸¹⁾ KGHM은 77 MWe 4기를 건설한 후 추후 12기로 확대한다는 계획이며 2029년 폴란드 최초의 VOYGR 발전소를 건설할 계획임.
 - 2023년 4월 KGHM은 VOYGR 발전소 건설에 위한 원칙적 결정 신청서를 폴란드 정부에 제출하였으며, 2023년 7월 NuScale사의 SMR에 기반한 원전 건설 계획이 폴란드 기후환경부로부터 승인을 받았음.⁸²⁾

나. BWRX-300 원자로

○ GE Hitachi(GEH)사의 BWRX-300은 2014년에 NRC 설계인증을 받은 1,520 MWe 비등경수로(Economic Simplified Boiling Water Reactor, ESBWR)를 기반으로 한

SMR, 15 September 2022.

75) World Nuclear News, Framatome to supply VOYGR fuel handling and storage equipment, 6 December 2022.

76) World Nuclear News, NuScale SMR planned for Romania, 3 November 2021.

77) Nuclear Newswire, NuScale takes next step toward SMR deployment in Romania, 26 May 2022.

78) World Nuclear News, Biden pledges USD 14 million for Romanian SMR project, 27 June 2022.

79) Nuclear Newswire, NuScale to begin FEED work for Romanian SMR plant, 6 January 2023.

80) Reuters, Poland's KGHM to work with NuScale on nuclear energy, 23 September 2021.

81) World Nuclear News, NuScale, KGHM agree to deploy SMRs in Poland, 14 February 2022.

82) World Nuclear News, Decision-in-principle for Polish SMR power plant, 13 July 2023.

수냉각 자연순환 피동안전 계통을 갖춘 300 MWe 출력의 SMR임.

- 캐나다 온타리오발전(Ontario Power Generation, OPG)은 2021년 12월 온타리오주 Darlington 부지에 건설할 전력망 규모의 SMR로 BWRX-300을 선정하고⁸³⁾, 이르면 2028년까지 건설한다는 계획을 갖고 있는데, 예정대로 건설·가동될 경우 BWRX-300은 북미지역에서 가동되는 최초의 SMR이 될 것임.
 - 2022년 10월 OPG는 BWRX-300 건설허가신청서를 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)에 제출함.⁸⁴⁾
 - 도로, 유틸리티 및 지원 건물을 짓기 위해 부지 정리, 등급 책정 등 비원자력 기반 시설 활동으로 구성된 부지 준비 작업(site preparation work)이 2022년 10월에 시작되었으며 2025년까지 계속될 계획임.
 - 2023년 1월 OPG, GEH, SNC-Lavalin, Aecon은 OPG의 Darlington 프로젝트에서 BWRX-300 개발, 엔지니어링 및 건설 통합 프로젝트 모델을 위해 협력하기로 상업적인 계약을 체결함.⁸⁵⁾
 - 2023년 7월 온타리오주정부는 OPG와 협력하여 Darlington 부지에 BWRX-300 SMR 3기를 추가로 건설하기 위한 인허가를 시작할 계획이라고 발표함.⁸⁶⁾
- GEH의 BWRX-300은 OPG와의 협력에 힘입어 캐나다 여타 지역 및 미국 등 북미지역 내에서 다수의 SMR 건설 프로젝트를 추진하면서 주목을 받고 있음.
 - 2022년 6월 캐나다 서스캐처원주 발전사인 SaskPower도 BWRX-300을 2030년대 중반 서스캐처원에 배치될 수 있는 SMR로 선정함.⁸⁷⁾
 - OPG가 선정한 BWRX-300과 동일한 기술을 선택함으로써 범캐나다적인 SMR 구축에 동일 원전에 기반한 접근 방식을 가능하게 하고, 규제, 건설 및 운영 비용, 초도호기의 위험도를 낮추는 이점이 있음.
 - 2022년 8월 미국 테네시밸리당국(Tennessee Valley Authority, TVA)은 테네시주 오크리지 인근 Clinch River 부지에 BWRX-300을 배치하기 위한 계획 및 예비 인허가를 지원하기 위한 협약을 GEH와 체결함.⁸⁸⁾
 - TVA는 2022년 2월부터 TVA의 기존 대형원전과 유사한 경수로 기반 설계가 향후 10년 이내에 상업적 인 배치에 더 가까울 것으로 기대하며 BWRX-300에 관심을 가지고 GEH와 논의를 해왔으며, 동년 4월 OPG와도 북미지역내 SMR 기술개발을 위해 협력한다는 내용의 협약을 체결한 바 있음.
 - 미국 TVA는 Clinch River 부지 내 BWRX-300 건설허가신청서를 NRC에 제출할 예정임.
- 인허가 관련, 미국, 캐나다, 영국, 폴란드에서 사전인허가신청 검토 및 건설허가 절차를

83) World Nuclear News, OPG chooses BWRX-300 SMR for Darlington new build, 2 December 2021.

84) Nucnet, OPG Applies for Licence to Build First SMR at Darlington Site, 2 November 2022.

85) Reuters, GE Hitachi to deploy SMR, 1 February 2023.

86) World Nuclear News, Additional SMRs in the pipeline for Darlington, 7 July 2023.

87) World Nuclear News, GE Hitachi Nuclear Energy's BWRX-300 SMR selected for Saskatchewan, 20 June 2022

88) Nuclear Engineering International, TVA and GEH co-operate on possible deployment of BWRX-300, 4 August 2022.

진행하고 있음.

- (미국) 건설허가와 운영허가의 2단계 인허가 과정을 통해 2027년 운전을 시작한다는 계획으로, 2019년 12월 BWRX-300 특정주제기술보고서(TR) 5건을 NRC에 제출하였으며, 2021년 1월 최종안전성평가보고서(FSER)가 발행됨.
- (캐나다) 2019년 3월 CNSC에 사업자설계검토(Vendor Design Review, VDR)의 1·2단계 통합을 신청하였으며, 2023년 3월 완료됨.⁸⁹⁾
- (영국) 2022년 12월 Jacobs UK Ltd의 도움을 받아 BWRX-300에 대한 일반설계평가(Generic Design Assessment, GDA) 신청서를 영국 비즈니스·에너지·산업전략부(Department for Business, Energy and Industrial Strategy, BEIS)에 제출함.⁹⁰⁾

○ GEH는 2019년 10월 폴란드의 Synthos SA, 2019년 10월 에스토니아의 Fermi Energia, 2020년 2월 체코의 CEZ와 BWRX-300 활용 타당성을 탐색하는 MOU를 체결하는 등 유럽지역에서도 시장 확보를 위한 노력을 전개하고 있음.

- 2022년 7월 폴란드 올렌 신토스 그린에너지(ORLEN Synthos Green Energy, OSGE)는 폴란드 원자력청에 BWRX-300 기술평가 신청서를 제출하는 등 사전인허가 절차를 시작함.
- 2023년 4월 OSGE는 GEH의 BWRX-300 부지 6곳을 기반으로 발전소 건설에 대한 원칙적 결정(decision-in-principle) 신청서를 폴란드 기후부에 제출함.⁹¹⁾
- 2022년 9월 에스토니아 Fermi Energia는 GEH, NuScale, Rolls-Royce 등 3개의 SMR 개발업체에 SMR 공급에 대한 입찰을 요청하였으며, 2023년 2월 BWRX-300을 2030년대 초까지 발트 국가에 잠재적으로 배치할 SMR로 선정하고 GEH와 프로젝트 개발 및 예비 작업 계약을 체결할 예정임.

다. Rolls-Royce SMR

○ 2013년 SMR 개발을 시작한 롤스로이스(Rolls Royce)는 잠수함 추진용 원자로의 경험을 활용하여 개발된 440MW 용량의 3-loop PWR인 Rolls-Royce SMR을 2017년에 발표함.

- 2021년 5월 Rolls-Royce SMR 컨소시엄은 1기당 470 MWe(당초 440 MWe에서 출력 증강)인 SMR 16기를 건설할 계획이며 2030년대 초에 1호기를 완성해 2035년까지 최대 10호기를 건설할 목표임을 발표함.
- Rolls-Royce는 SMR을 전력 공급뿐만 아니라, 항공기 연료를 포함한 에너지시스템의 탈탄소화 분야에도 적용할 계획임.

89) World Nuclear News, BWRX-300 completes Phases 1 & 2 of Canadian pre-licensing review, 15 March 2023.

90) Power Magazine, GE Hitachi Formally Enters BWRX-300 SMR in UK Race for New Nuclear, 22 December 2022.

91) World Nuclear news, OSGE seeks approval for SMRs at six Polish locations, 28 April 2023.

- Rolls-Royce사는 SMR 기술의 배치 및 상용화를 위한 새로운 사업체인 Rolls-Royce SMR Limited를 설립하고 영국내 SMR 건설사업을 추진중임.⁹²⁾
 - 2021년 11월 영국 정부로부터 3년간 2.1억 파운드(미화 약 2.83억 달러)의 지원과 민간으로부터 2.5억 파운드(미화 3.4억 달러) 이상의 투자 자금을 확보함.⁹³⁾
 - 2022년 11월 Rolls-Royce SMR이 입지할 영국 내 후보 부지에 대한 연구는 영국 원자력해체청 (Nuclear Decommissioning Authority, NDA)이 소유하고 있는 4개의 기존 원전 부지를 우선적으로 선정함.⁹⁴⁾
 - 2022년 11월 Solway Community Power Company는 영국 웨스트 컴브리아(West Cumbria) 지역에 배치할 원자로로 Rolls-Royce SMR을 선정하고 배치할 계획을 발표함.⁹⁵⁾
- 2021년 11월 영국의 일반설계평가(Generic Design Assessment, GDA)에 들어가기 위하여 470 MWe SMR 설계를 BEIS에 제출함.⁹⁶⁾
 - 2024년 안에 영국 규제기관과 함께 GDA를 완료하고, 2030년에는 전력망에 활용할 계획임.
 - 2022년 3월 BEIS는 원자력규제기관 ONR과 잉글랜드와 웨일즈 환경규제기관들에게 Rolls-Royce SMR에 대한 GDA에 착수하도록 요청하였으며,⁹⁷⁾ 2023년 3월 GDA 1단계가 완료되고 4월부터 2단계가 진행되고 있음.⁹⁸⁾
- Rolls-Royce는 2022년 1월부터 3개의 SMR 기기 제작을 위한 공장 설립을 추진하면서 후보 부지를 선정하는 등 공급망 확보에도 적극적으로 나서왔으나, 영국내 SMR 사업이 지연되면서 제작공장 건설이 축소될 가능성도 보도되고 있음.
 - 첫 번째 공장에서는 470 MWe 가압경수형 원자로의 용기를 생산하고, 나머지 두 공장은 토목 모듈과 기계·전기·배관 모듈을 생산할 예정임.
 - 2022년 12월 압력용기를 제조하는 첫 번째 공장의 부지로 Sunderland의 International Advanced Manufacturing Park, Teesside의 Teesworks, Deeside에 있는 Gateway 등 세 곳을 최종 후보부지 (shortlist)로 선정하였으나, 최종 공장부지 발표가 지연되고 있음⁹⁹⁾.
 - 한편 2021년 12월 Sheffield Forgemasters과 부품을 제작을 위한 단조체 제조기술 개발 계약을 체결한 데 이어,¹⁰⁰⁾ 2022년 2월 SNC-Lavalin을 엔지니어링 공급업체로 지명함.¹⁰¹⁾

92) World Nuclear News, Rolls-Royce secures funding for SMR deployment, 9 November 2021

93) Reuters, Britain backs Rolls-Royce mini nuclear plants in net zero drive, 10 November 2021

94) World Nuclear News, Study identifies potential Rolls-Royce SMR sites, 9 November 2022

95) World Nuclear News, Cumbrian development company chooses Rolls-Royce SMR, 11 November 2022

96) World Nuclear News, Rolls-Royce submits SMR design for UK assessment, 17 November 2021

97) Reuters, Britain to start approval process for Rolls-Royce mini nuclear reactor, 7 March 2022

98) World Nuclear News, UK assessment of Rolls-Royce SMR design progresses, 3 April 2023

99) The Telegraph, Rolls-Royce scales back plans to build nuclear factories in UK, 27 April 2024.

100) Rolls-Royce Homepage, Rolls-Royce SMR signs £3.7m contract with Sheffield Forgemasters, 21

- 체코내 SMR의 건설 타당성을 탐색하기 위해 체코 전력회사 ČEZ와도 협력중임.¹⁰²⁾
 - 2022년 9월 Rolls-Royce SMR은 Škoda JS와 양해각서를 체결하고, 유럽 전역에 Rolls-Royce SMR 발전소의 효율적인 배치를 위해 Škoda JS의 원자력 공학 및 제조 분야에서의 역량을 어떻게 활용할지를 찾기 위해 협력하기로 함.¹⁰³⁾

라. Holtec SMR-160

- Holtec International(이하 Holtec)은 2011년 SMR LLC란 자회사를 설립하고 160 MWe PWR인 SMR-160을 개발중에 있음.
 - SMR-160은 저농축 우라늄 연료를 사용하며, 피동형 노심냉각계를 적용함.
 - 원자로 등 주요기기는 공장에서 제작되며, 원자로는 지하에 설치하며, 발전소는 원자로 10기까지 클러스터화 하도록 설계됨.
 - Holtec은 SMR-160 설계, 엔지니어링 및 품질보증에 대하여 Shaw group, URS Corporation의 지원을 받고 있으며, 전력회사인 PSEG Power, 뉴저지(New Jersey) 주 Hope Creek과 Salem 발전소 운영자와는 전략적인 동반자 관계를 유지함.
- 2022년 12월 Holtec은 SMR-160 설계에 대한 GDA 신청서를 조만간 제출할 계획이라고 밝힘.¹⁰⁴⁾
 - 2022년 11월 규제 설계평가를 위한 자금지원 신청서를 BEIS에 제출하고 2023년 초에 GDA 절차 개시를 준비하고 있으며, 이르면 2028년에 영국 최초 호기 건설이 가능하다고 전망하며, 2050년까지 32기의 SMR-160을 배치할 계획임.
- 2022년 7월 뉴저지에 SMR-160 4기와 원자로 제작공장을 건설하는 74억 달러 규모의 계획을 지원하기 위해 두 번째 단계의 연방 대출(federal loan) 신청서를 제출함.¹⁰⁵⁾
 - 최초의 SMR-160을 뉴저지의 기존 Oyster Creek 발전소 부지에 건설할 것을 제안함.
 - 2022년 8월 SMR-160 첫 호기를 당초 계획보다 1년 앞당겨 2029년에 출시하는 것을 목표로 청정에너지 R&D 예산을 증액함.¹⁰⁶⁾

December 2021.

101) Nuclear Newswire, Rolls Royce SMR appoints SNC-Lavalin to new program phase, 7 February 2022.

102) World Nuclear News, Rolls-Royce and ČEZ to explore SMR deployment, 9 November 2020.

103) World Nuclear News, Rolls-Royce and Škoda JS to collaborate on SMR deployment, 6 September 2022.

104) World Nuclear News, GE Hitachi and Holtec submit SMR designs for UK assessment, 20 December 2022.

105) World Nuclear News, Holtec submits USD7.4bn SMR programme to federal loan programme, 21 July 2022

106) World Nuclear News, Holtec ramps up SMR programme, eyes 2029 startup, 24 August 2022

- 미국의 인플레이션 감축법 통과 등 정부의 지원에 힘입어 SMR-160과 청정에너지 저장발전기술 개발에 박차를 가하고 있는데, 에너지저장 시스템인 녹색보일러(Green Boiler) CESG(clean energy storage system)를 SMR-160 발전소와 결합하는 것을 계획 중에 있음.

○ 2015년 이후부터 Holtec은 Mitsubishi, SNC-Lavalin, GEH, 현대건설 등과 부품 및 엔지니어링 계획을 체결함.

- 2015년 8월 일본의 Mitsubishi Electric Power Products와 SMR-160의 계측제어계통 개발에 관한 협력협정을 체결하고, 2022년 4월 Mitsubishi 전기 미국 지사와 SMR-160 원자로 기술 개발을 위한 디지털 계측·제어(I&C)계통 설계 및 엔지니어링 계약을 체결함.¹⁰⁷⁾
 - NRC가 승인한 Mitsubishi의 MELTAC® Digital I&C Platform을 SMR-160에 사용할 계획임.
- 2017년 7월 캐나다 SNC-Lavalin과와 SMR-160 개발을 위해 팀을 구성하였으며, SNC-Lavalin으로부터 SMR-160 원자로의 인허가 취득을 포함한 원자력 엔지니어링 서비스를 제공받고 있음.
- 2018년 2월 GEH와 핵연료 개발과 제어봉구동장치 개발 분야에서 협력함.¹⁰⁸⁾
 - GEH와 Toshiba의 합작회사인 GNF는 핵연료 개발을, GEH는 제어봉구동장치 개발을 주도함.
- 2020년 4월 Framatome을 SMR-160의 핵연료 공급자로 선정함.¹⁰⁹⁾
- 2021년 11월 현대건설과 전 세계에 SMR-160 발전소를 공급하기 위한 협약을 체결함.
 - SMR-160 발전소의 BOP(Balance of Plant) 상세설계와 전체 발전소의 시방서를 작성할 예정임.
 - 2022년 10월 현대건설과 SMR-160 SMR의 BOP 시스템과 구조물의 설계를 완성하기 위한 프로그램을 가속화하기로 합의함.¹¹⁰⁾

○ 2018년 3월 우크라이나의 Energoatom과 우크라이나에 건설될 SMR-160의 부품의 제조 거점 설립에 관한 MOU를 체결함.¹¹¹⁾

- 2019년 7월 Energoatom 및 우크라이나 State Scientific and Technology Center(SSTC)와 우크라이나 내에 SMR-160을 건설하고 제작하는 컨소시엄을 구성하기로 함.¹¹²⁾
- 2023년 4월 향후 최대 20 기의 Holtec SMR-160 발전소를 우크라이나에 건설하기 위해 협력하는 협정을 우크라이나 Energoatom과 체결함.¹¹³⁾

107) Nucnet, US Company Signs Deal With Mitsubishi For SMR-160 I&C Systems Design, 25 March 2022

108) World Nuclear News, Holtec and GEH teamup on Advancing SMR-160, February 15, 2018.

109) World Nuclear News, Holtec SMR to use commercially-available Framatome fuel, 29 April 2020

110) Power Engineering, Holtec wants to pair SMR with 'green boiler' solar and storage, 20 October 2022

111) Holtec International, Energoatom and Holtec sign Historic Memorandum to Build SMR-160 Plants in Ukraine, March 1, 2018.

112) World Nuclear News, Consortium established for SMR-160 deployment in Ukraine, June 12, 2019.

113) World Nuclear News, Mass deployment of Holtec SMRs in Ukraine is part of accord's aims, 24 April 2023

- 2022년 10월 체코의 Škoda Praha, 현대건설과 함께 체코에 Holtec SMR-160 발전소 건설 계획을 진전시키는 협력각서(MOA)를 체결함.¹¹⁴⁾
 - 2022년 9월 Holtec은 체코 전력사 체즈(ČEZ)와 테멜린(Temelin)에 SMR-160 건설에 대한 평가를 계속하는 양해각서(MoU)를 체결함.
- 2022년 12월 영국에서 SMR-160의 건설 계획을 진전시키기 위한 공동 양해각서를 벨푸어 비티(Balfour Beatty) 및 현대건설과 체결함.

마. RITM-200

- Project 22220 쇄빙선은 KLT-40 설계가 개선된 60 MWe RITM-200 원자로 2기가 장착된 LK-60 쇄빙선으로, 현재까지 아크티카호(Arktika), 시비르호(Sibir), 우랄호(Ural)에 각각 2기씩 탑재(총 6기)되어 사용 중임.
 - 아크티카호는 2020년,¹¹⁵⁾ 시비르호는 2021년,¹¹⁶⁾ 우랄호는 2022년¹¹⁷⁾에 운항을 시작하였음.
 - 야쿠티아호(Yakutia)와 추코트카(Chukotka)호 두 척이 추가로 건조되고 있으며, 이들은 각각 2024년과 2026년 말에 북해 항로에 투입될 예정임.
 - 2022년 11월 22일 발트조선소(Baltic Shipyard)에서는 Project 22220의 네 번째 원자력추진 쇄빙선 야쿠티아호의 진수식이 거행됨.¹¹⁸⁾
 - 야쿠티아(Yakutia)의 오지에 전력을 공급하기 위한 육상 기반 RITM-200N 원자로의 실증 프로젝트와도 연계되어 있음.
- Project 10510 쇄빙선은 LK-110Ya, LK-120Ya, 또는 Leader라는 이름으로 알려져 있으며, 120MWe 출력의 프로펠러 가동을 위해 RITM-400 원자로 2기가 탑재됨.¹¹⁹⁾
 - 2027년에 운항을 시작할 예정¹²⁰⁾으로 Project 10510의 쇄빙선 Leader가 블라디보스토크 인근 즈베즈다(Zvezda) 조선단지에서 건조 중임.
 - 2020년 4월 Atomflot는 Zvezda와 'Project 10510' 쇄빙선인 리더의 건조 계약을 체결하였으며, 선박의 건조는 2020년 7월 강재절단식을 필두로 시작됨.
- 2021년 5월 러시아는 극동 지방의 구리광산에 최대 5기의 부유식 원전을 활용해 전력을 공급한다는 계획을 승인하고,¹²¹⁾ 현대화된 55 MWe RITM-200M 원자로 2기가 장

114) World Nuclear News, Holtec's team for Czech Republic grows, 26 October 2022

115) World Nuclear News, Arktika icebreaker embarks on first mission, 17 November 2020

116) World Nuclear News, Nuclear icebreaker Sibir enters service, 6 January 2022

117) World Nuclear News, Ceremony held for icebreaker Ural's first working journey, 5 December 2022.

118) World Nuclear News, Yakutia nuclear icebreaker launched, 25 November 2022.

119) World Nuclear News, Putin decrees development of Arctic with more nuclear icebreakers, 30 October 2020.

120) World Nuclear News, Manufacturing starts on largest ever marine reactor, 14 February 2022.

착된 원자력발전 선박 4척을 추진중임.

- 첫 번째 원자력발전선 2척은 2026년 말 차운스카야(Chaunskaya) 만의 나글린(Nagloynyn) 곳으로 인도되어, 400 km 이상 떨어진 바임스카야 광산으로 이어지는 110 kV 송전선에 연결 예정임.
- 세 번째 원자력선은 2027년 말에 연결되어 전력을 공급할 예정임(출력은 약 330MWe로 증량).
- 네 번째 원자력선은 수리 또는 핵연료재장전 기간에 대신 사용할 수 있는 예비용으로 계획되어 있음.

○ 한편, KLT-40S는 러시아의 최초의 해양부유식 원자력발전소인 아카데미 로모노소프(Akademik Lomonosov)에 사용되는 원자로로, OKBM Afrikantov가 개발하고 NMZ(Nizhniy Novgorod Machine Engineering Plant)가 제작함.

- 2009년 5월과 8월에 각각 원자로를 배치하여 2010년 6월 30일 Akademik Lomonosov를 진수함.
- 2019년 7월 러시아 정부의 원자력발전회사로 양도되었고 2019년 9월 영구 정박지인 Chukotka 지역으로 이동함.
- 2019년 12월 부유식 해상 원전인 Akademik Lomonosov이 극동 지역인 Pevek의 Chaun-Bilibino 전력망에 연결됨에 따라 전력을 생산하는 세계 최초의 SMR로 기록됨.¹²²⁾
- 부유식 원자력발전소는 Baimskaya에 새로운 원자력발전선이 건설되는 2027년까지 20 MWe의 전력을 공급할 예정이며, 2027년 이후에는 폐쇄될 계획임.
- 2020년 7월 Akademik Lomonosov가 동시베리아해의 항구인 페벡에 열을 공급하기 시작하였으며,¹²³⁾ 2022년 7월에는 페벡 지역 마을의 모든 가정에 난방 공급을 확대하는 작업이 진행 중임.¹²⁴⁾

○ 2020년 12월 Rosatom은 야쿠티아 자치공화국에 SMR을 건설하는 프로젝트에 참여한다는 협약을 체결하였는데,¹²⁵⁾ 우스크-쿠이가(Usk-Kuyga) 건설은 러시아 최초의 SMR 육상 건설이 될 전망이다.

- RITM-200 원자로 2기를 러시아 극동지역 북극 연안에 있는 야쿠티아 공화국내의 인구 1000명의 마을인 우스크-쿠이가에 건설할 계획임.
- 2021년 8월 우스크-쿠이가 발전소건설 부지의 조사 작업을 대부분 완료했으며, 환경영향평가의 예비 버전 및 인허가 입증 자료를 개발함.

바. ACP-100

○ ACP1000으로부터 개발된 일체형 가압경수로로서, 2010년부터 개발되어 2014년 예비설

121) BELLONA, Russia eyes building five more floating nuclear plants, 4 May 2021.

122) World Nuclear News, Russian connects Floating Plant to Grid, 19 December 2019.

123) Global Construction Review, World's first floating nuclear plant starts heating Asia's northernmost town, 1 July 2020.

124) World Nuclear News, More nuclear heat for Arctic town, 22 July 2022.

125) Nuclear Engineering International, Rosatom to begin work on land-based SMR, 4 January 2021.

계가 완료되었으며, 57개의 핵연료집합체와 일체형 증기발생기, 피동적 안전기능을 갖추고 지하에 건설하도록 설계됨.

- 설계수명은 60년, 재장전 주기는 24개월이며, 향후 2~6기의 ACP100으로 구성되는 발전소의 건설이 예상된다.

○ 중국국가원자력(CNNP)는 2021년부터 창장 원자력발전소 서북쪽 부지에 ACP100 실증로를 건설하고 있음.

- 2019년 3월 중국 환경부가 창장 원자력발전소 서북쪽 부지에 ACP100 실증 발전소가 건설될 것이라고 밝힌 데 이어, 2019년 7월 중국국가원자력(CNNP)이 ACP100 건설 프로젝트의 착수를 발표함.
- 2020년 4월 창장 ACP100 실증발전소 1기에 대한 예비안전성분석보고서(PSAR)가 승인되었으며, 2021년 6월 ACP100 실증로 건설에 대한 중국 국가발전개혁위원회(National Development and Reform Commission)의 최종 승인을 받음.¹²⁶⁾

○ 창장 프로젝트는 CNNC 자회사인 중국국가원자력(CNNP)이 소유·운영하고, 중국원자력연구소(NPIC)와 중국원자력공학그룹(China Nuclear Power Engineering Group)이 각각 설계와 발전소 건설을 맡았음.¹²⁷⁾

- 2021년 10월 ACP100 SMR 실증로의 강철 격납용기 하부 헤드가 설치됨.
- 2022년 2월 ACP100 원전의 강철 격납용기 하단부가 설치됨.¹²⁸⁾
- 2022년 4월에는 원자로공동 구역에 원자로 피트(pit),¹²⁹⁾ 7월에는 강철 격납용기 상단부가 설치됨.¹³⁰⁾
- 2022년 5월에는 터빈 건물의 기초 슬라브 콘크리트 타설이 완료됨.¹³¹⁾
- 2022년 8월 실증발전소의 2차측 건물 옹벽의 콘크리트 타설작업이 완료되고 옹벽 설치가 완료됨에 따라 BOP(balance of plant) 설치 등 후속 건설 작업이 이루어질 예정임.¹³²⁾
- 2022년 11월 원자로 건물 R11 구역의 JR 110 격실에서 용접을 필두로 장비 설치 작업이 시작됨.¹³³⁾
- 2023년 2월 원자로 건물내 주요 내부 구조물 벽이 완공됨.
- 2023년 7월 핵심 모듈인 압력용기와 증기발생기의 제작이 완료됨.¹³⁴⁾
- 2023년 8월 원자로 건물 내에 원자로 모듈의 설치를 완료하였음.

126) World Nuclear News, China approves construction of demonstration SMR, 7 June 2021.

127) World Nuclear News, China starts construction of demonstration SMR, 13 July 2021.

128) World Nuclear News, Chinese SMR containment takes shape, 28 February 2022.

129) World Nuclear News, Linglong One reactor pit installed at Changjiang, 11 April 2022.

130) World Nuclear News, Rapid construction of Chinese SMR containment shell continues, 7 July 2022.

131) World Nuclear News, Foundation completed for Chinese SMR turbine building, 6 May 2022.

132) World Nuclear News, Progress on conventional island of Chinese SMR, 19 August 2022.

133) World Nuclear News, Chinese SMR project enters installation phase, 5 December 2022.

134) World Nuclear News, Core module completed for Chinese SMR, 14 July 2023.

2. 비수냉각형 소형모듈원자로 사업현황

가. TerraPower Natrium™

- 2019년부터 TerraPower는 GEH와 Natrium™ 원자로를 공동으로 개발하기 시작함.¹³⁵⁾
 - 용융염 에너지저장시스템과 결합된 소듐냉각로이며, 기저부하가 345 MWe, 피크 수요 시에는 5시간 반 이상 동안 500 MWe까지 출력 증가가 가능하며, 총 에너지 저장 능력은 850 MWh 으로 알려짐.
 - 2020년 10월 미국 DOE의 선진원자로 실증프로그램(ARDP)의 수혜자로 선정되었으며, 7년 안에 Natrium™ 원자로 실증발전소를 건설하도록 초기 자금 8천만 달러를 지원받음.
 - Natrium™ 실증로 건설 프로젝트는 7년간 약 40억 달러가 소요될 것으로 추산됨.
- 2021년 6월 TerraPower는 PacifiCorp사와 함께 와이오밍주의 폐쇄된 석탄발전소 부지에 Natrium™ 원자로 실증프로젝트를 추진할 계획을 발표함.
 - 2021년 11월 TerraPower는 와이오밍주 Kemmerer를 Natrium™ 실증발전소 부지로 선정함.¹³⁶⁾
 - 부지에 대한 최종 계약과 관련된 허가, 인허가 및 지원 등의 업무를 수행하고 있으며, 건설허가 신청서는 2023년 중반 NRC에 제출할 계획임.
 - 2022년 12월 TerraPower는 Natrium 실증로의 운전 개시일이 목표보다 최소 2년 이상 지연될 것으로 예상함.¹³⁷⁾
 - Natrium에 사용할 HALEU의 미국 내 제조 역량이 실증로의 운전 목표연도인 2028년에 맞춰 상업적 용량에 도달하지 못하기 때문으로 파악됨.¹³⁸⁾
 - 2023년 4월 미국 전력사인 PacifiCorp는 와이오밍주 Kemmerer에 건설 예정인 Natrium™ 실증로 외에 2기를 유타주에 건설할 계획임.¹³⁹⁾
- 2021년 6월 TerraPower는 NRC에 Natrium™ 원자로의 규제참여 계획을 송부하였으며, 2023년 8월에 건설허가, 2026년 3월에 운영허가를 신청할 계획임.¹⁴⁰⁾
 - 2022년 초 TerraPower는 부지 지하조사를 완료함.
 - 2023년 미국 NRC에 Natrium™ 원전 건설허가 신청서를 제출, 2024년에 착공, 2028년에 가동할 계획임.
 - 용융 나트륨을 사용하여 발전소의 중요한 구성품을 시험하는 비원자력 건물인 대형 나트륨 테스트 시설 (Large Sodium Test Facility)의 건설 및 초기 토목 작업이 2023년도에 시작될 예정임.

135) Power Technology, TerraPower announces nuclear reactor with molten salt power storage, 28 August 2020.

136) World Nuclear News, 1Wyoming site chosen for Natrium plant, 7 November 2021.

137) World Nuclear News, HALEU fuel availability delays Natrium reactor project, 15 December 2022.

138) World Nuclear News, HALEU fuel availability delays Natrium reactor project, 15 December 2022.

139) World Nuclear News, Two more Natrium units for coal-to-nuclear switching, 4 April 2023.

140) World Nuclear News, TerraPower circles 2023 for Natrium construction permit, 18 June 2021.

- 2022년 10월 TerraPower는 Global Nuclear Fuel-Americas(GNF-A)와 노스캐롤라이나주의 GNF-A 부지에 Natrium™ 원자로용 연료 제조시설(Natrium Fuel Facility) 착공식을 거행함.¹⁴¹⁾
- 2022년 10월 TerraPower와 PacifiCorp는 2035년까지 PacifiCorp의 서비스 지역에 속하는 6개 주에 최대 5기의 Natrium™ 원자로 및 통합에너지저장 시스템을 추가로 배치할 가능성을 검토 중임.¹⁴²⁾

○ TerraPower는 해외협력 부문에서도 일본원자력연구개발기구(Japan Atomic Energy Agency, JAEA), SK, 한국조선해양 등과 협력하며 투자를 유치하고 있음.

- 2022년 1월 JAEA, Mitsubishi Heavy Industries와 소듐냉각고속로(SFR) 개발 협력을 위한 양해각서를 체결함.¹⁴³⁾
- 2022년 5월 TerraPower는 SK(주), SK이노베이션과 SMR에 필요한 차세대 기술을 공동 개발하는 양해각서를 체결하였으며,¹⁴⁴⁾ 2022년 8월 SK와 SK이노베이션으로부터 2.5억 달러의 투자를 받음.¹⁴⁵⁾
- 2022년 11월 한국조선해양(KSOE)이 TerraPower와 3천만 달러 규모의 투자 계약을 체결함.¹⁴⁶⁾

나. ARC-100

○ 2006년 미국 Delaware에서 창립된 Advanced Reactor Concepts(ARC)사가 개발한 100 MWe 소듐냉각고속로(SFR)로 1965부터 2005년까지 운전된 EBR-II(20 MWe)를 참조로 개발됨.

- 핵연료는 금속우라늄을 사용, 재장전 주기는 20년 이상이며, 사용후핵연료를 재순환하여 사용하도록 설계됨.

○ ARC-100은 2018년 7월에 2030년도 상업운전 목표로 캐나다 뉴브런즈윅에서 개발될 원자로 기술 중 하나로 선정되어 뉴브런즈윅파워(NB Power)와 뉴브런즈윅주 정부로부터 5백만 캐나다달러를 지원받음.¹⁴⁷⁾

- 2018년 10월 ARC Nuclear Canada가 SMR의 플랫폼 구축에 적극적인 주 중의 하나인 뉴브런즈윅주의 Saint John에 설립되었으며, NB Point Lepreau 부지에 첫 호기 건설 계획을 NB Power, 뉴브런즈윅주 정부와 공동으로 수립함.
- 2021년 2월에는 뉴브런즈윅주 정부로부터 ARC-100 개발을 위해 2천만 캐나다 달러(약 1,570만 미국

141) World Nuclear News, New advanced reactor fuel facility for expanding GEH site, 24 October 2022.

142) World Nuclear News, US companies look to expand Natrium reactor deployment, 28 October 2022..

143) World Nuclear News, US, Japanese firms agree to cooperate on fast reactors, 27 January 2022.

144) The Korea Herald, SK inks strategic ties with TerraPower, 17 May 2022.

145) World Nuclear News, South Korea's SK Group invests in TerraPower, 16 August 2022.

146) Maeil Business News Korea, KSOE signs \$30 mn investment deal with TerraPower for SMR collabo, 4 November 2022.

147) Businesswire, ARC Nuclear announces agreement to work with New Brunswick power and its affiliates to explore commercialization of the ARC advanced SMR in New Brunswick, Canada, 8 July 2018.

달러)를 지원받음.¹⁴⁸⁾

- 2021년 10월 ARC Canada는 캐나다원자력산업기구(Organization of Canadian Nuclear Industries, OCNI) 주최 행사에서 ARC-100을 2029년까지 캐나다 뉴브런즈윅주에 건설하여 운전을 시작하겠다고 발표함.
- ARC-100 배치는 2027~2030년 기간에 이루어지며, 원자로 초기노심이 2028년 말까지 발전소 부지로 이송될 것으로 예상됨.¹⁴⁹⁾

○ ARC-100은 2017년 9월 캐나다 CNSC VDR을 신청하여, 2019년 10월 VDR의 1단계 검토를 마쳤으며, 2022년 2월 VDR 2단계 검토에 착수함.

- 2023년 6월 NB Power는 ARC Canada와 협력하여 환경영향평가등록 문서를 환경부와 지방정부에 제출하고 선진 SMR 건설을 위한 Point Lepreau 부지 준비 인허가 신청서를 CNSC에 제출함.¹⁵⁰⁾

○ 2022년 7월 ARC Canada는 캐나다 엔지니어링 회사인 Hatch사와 협력하여 ARC-100 기술을 10년 내에 캐나다 뉴브런즈윅에 배치할 계획을 밝힘.¹⁵¹⁾

- 2022년 7월 CNL과 파트너십을 맺고 ARC-100의 핵연료 제조 공정의 기술 실증을 수행 중임.¹⁵²⁾
- 2030~2035년까지 수소 생산 및 기타 산업에 에너지를 제공하는 데 ARC-100을 활용할 수도 있다고 언급함.¹⁵³⁾
- 2023년 3월 ARC Canada는 캐나다 알버타주에서 ARC-100의 상용화 지원을 위해 알버타주 투자공사인 Invest Alberta Corporation(IAC)과 양해각서(MoU)를 체결함.¹⁵⁴⁾

다. X-energy Xe-100

○ Xe-100는 미국의 원자로 · 핵연료 엔지니어링 회사인 X-energy가 개발하고 있는 pebble bed형 고온가스냉각로임.

- 헬륨을 냉각재로 사용하며, 열출력은 200 MWt(전기출력 76 MWe)임.
- 표준발전소는 원자로 4기가 설치되어 300 MWe의 전력을 생산하도록 설계됨.

○ 2020년 10월 DOE의 선진원자로 실증프로그램(ARDP)의 수혜자로 선정되었고, 2021년

148) World Nuclear News, New Brunswick announces funds for SMR development, 11 February 2021.

149) Next Big Future, ARC 100 MWe Modular Reactor Targets 2029 Start in New Brunswick Canada, 7 October 2021.

150) World Nuclear News, Permitting submissions made for New Brunswick SMR, 3 July 2023.

151) Nuclear Engineering International, ARC Canada and Hatch to deploy advanced SMR technology, 5 July 2022.

152) World Nuclear News, ARC, CNL team up on SMR fuel fabrication, 27 July 2022.

153) World Nuclear News, ARC SMR proposed for green energy hub at Canadian port, 29 November 2022.

154) World Nuclear News, Alberta grows links with SMR sector, 24 March 2023.

3월 초 ARDP에 공식 참여를 시작하는 협력 협정에 서명함.¹⁵⁵⁾

- 상용 TRISO 핵연료 제조 시설과 더불어 Energy Northwest사의 Columbia 원자력발전소 부지에 Xe-100 원자로 4모듈의 발전소를 건설하기 위한 X-energy 프로젝트에 7년 동안 약 12억 3천만 달러를 미국 DOE로부터 지원받을 예정임.

○ 2021년 4월 X-energy는 미국 내 최초의 선진원자로 건설을 목표로 Xe-100의 개발 및 실증을 지원하는 TRi Energy Partnership을 위해 Energy Northwest, 그리고 워싱턴주 그랜트카운티(Grant County)의 공공유틸리티지구(Public Utility District, PUD)와의 양해각서에 서명함.¹⁵⁶⁾

- 실증 부지로는 Energy Northwest가 소유하고 있는 워싱턴주 리치랜드 소재의 콜롬비아 원전 인근 부지를 잠정 선정함.

○ 2022년 12월 X-energy사는 기업인수목적회사인 Ares Acquisition Corporation (AAC.N)과 합병하기로 하고 약 20억 달러 가치의 계약을 체결하였으나,¹⁵⁷⁾ 2023년 10월 합병 거래를 취소한다고 발표함.¹⁵⁸⁾

○ 2023년 3월 미국 재료과학기업 Dow와 Dow 소유의 걸프연안 부지 중 한 곳에 4기의 Xe-100 발전소 건설을 위한 공동개발협약(JDA)을 체결하고 엔지니어링 작업에 최대 5천만 달러를 제공하기로 함.

- 2023년 5월에는 텍사스주 걸프만(Gulf Coast) 지역에 있는 UCC Seadrift Operations 제조공장 부지를 X-energy의 Xe-100 건설 부지로 선정함.¹⁵⁹⁾
- Dow와 X-energy는 2026년 Xe-100 발전소 건설공사를 착수하고 2033년까지 운전을 시작한다는 계획이며, 이를 위해 양사는 건설허가신청서를 준비하여 미국 NRC에 제출할 예정임.

○ 한편, 원자로 부품, 핵연료, 설계 등을 위한 파트너십 확장에도 적극 나서도 있음.

- 2021년 8월 두산중공업과 Xe-100 원자로의 주요 부품 제작 연구를 위한 엔지니어링 용역 계약을 체결하고,¹⁶⁰⁾ 동년 9월 캐나다 핵연료기업인 Cameco와 핵연료 분야 협력을 모색하기 위한 MOU를 체결함.¹⁶¹⁾
- Xe-100에 사용되는 TRISO 핵연료는 2020년 5월부터 MIT 대학의 6 MW 연구용 원자로(MITR)에서

155) World Nuclear News, X-energy formally begins SMR partnership with DOE, 02 March 2021.

156) Nuclear Newswire, Partnership supports siting Xe-100 demo in Washington state, 3 April, 2021.

157) Reuters, X-energy to go public via \$2 billion blank-check deal, 7 December 2022.

158) X-Energy Business Update, X-energy and Ares Acquisition Corporation Mutually Agree to Terminate Business Combination Agreement, 31 October 2023

159) World Nuclear News, Dow's Seadrift site selected for X-energy SMR project, 11 May 2023.

160) World Nuclear News, Doosan to assess manufacturability of Xe-100, 1 September 2021.

161) Cameco, X-energy join up to support SMR deployment, World Nuclear News, 17 September 2021.

조사시험이 수행 중임.¹⁶²⁾

- 2022년 2월 Rock Creek Innovations과 협력하여 Xe-100 SMR용 원자로보호계통(Reactor Protection System, RPS)의 프로토타입 4세트 장비 중 첫 번째 세트를 제작하였으며,¹⁶³⁾ 동년 12월 Xe-100 원자로의 핵심 안전 기능을 수행하는 원자로보호계통(RPS) 시제품을 완성함.¹⁶⁴⁾
- 2022년 7월 Zachry Group과 Burns & McDonnell와 Day & Zimmermann 연합팀을 건설업체로 선정하고 Xe-100의 설계와 배치를 위한 단계의 업무에서부터 협력할 계획임.¹⁶⁵⁾
- 2022년 9월 Curtiss-Wright Corporation를 원자력 증가공급계통(NSSS)에서 중요한 세 가지 계통을 개발하고 제공하기 위한 우선 공급자로 선택하고, Xe-100의 설계 및 배치를 진전시키기 위해 전략적 공급업체 계약을 체결함.¹⁶⁶⁾

○ Xe-100은 2018년 9월부터 미 NRC의 사전인허가신청 검토(Pre-application Review)를 진행 중이며, 2020년 캐나다 CNSC의 VDR 과정을 시작함.

- 2019년 10월 캐나다 CNSC에 VDR을 신청하여, 2020년 8월 1, 2단계를 통합한 VDR의 검토에 착수함.

○ 2022년 4월 6일 X-energy의 연료부문 자회사 TRISO-X사는 상업용 고순도저농축우라늄(HALEU) 핵연료 제조시설에 대한 인허가 신청서를 NRC에 제출함.¹⁶⁷⁾

- TRISO-X 연료 제조 시설(TF3)은 미국 최초의 10 CFR 70 핵물질 II 등급(Category II) 연료 시설이며, X-energy의 Xe-100 설계를 포함한 선진원자로를 위해 최대 20% 농축 우라늄-235를 공급하도록 건설될 예정임.
 - TRISO-X의 핵연료 공장(TF3)은 미국 최초의 상업용 HALEU 기반 핵연료 제조 시설로 연간 8백만 톤의 우라늄을 생산할 예정임.
- 2022년 12월 미 NRC는 TRISO-X의 HALEU 연료 제조시설인 TF3에 대한 인허가 신청서를 검토하기로 결정함.¹⁶⁸⁾
- 2022년 4월 5일 TRISO-X의 모회사인 X-energy는 오크리지에 위치한 Horizon Center Industrial Park의 부지를 상용 HALEU 제조시설 부지로 선정 발표하였으며, 동년 6월 오크리지 산업개발위원회(Industrial Development Board)와 부지 양도 문서에 서명함.¹⁶⁹⁾
- 2022년 10월 TF3 시설의 착공식이 거행됨.¹⁷⁰⁾

162) World Nuclear News, X-energy TRISO-X fuel to be irradiated at MIT, 15 May 2020.

163) World Nuclear News, Prototype SMR safety system ready for field testing, 2 March 2022.

164) Power Engineering, X-energy completes safety system prototype for Xe-100 SMR, 21 December 2022.

165) World Nuclear News, X-energy selects constructors of initial Xe-100 reactors, 25 July 2022.

166) Nuclear Newswire, Curtiss-Wright, X-energy team up to advance Xe-100 deployment, 21 September 2022.

167) Nuclear Newswire, TRISO-X applies for advanced reactor fuel facility license, 12 April 2022.

168) Nuclear Engineering International, US NRC accepts TRISO-X's application for fuel fabrication facility, 20 December 2022.

169) Oak Ridger, Property transferred to nuclear fuel company, 23 June 2022.

라. HTR-PM

- 2012년 12월부터 중국 산둥성 시다오완에 고온가스로인 HTR-PM 실증발전소(210 MWe 터빈 하나에 원자로 2기가 연결) 건설을 시작으로 2022년 100% 출력 운전을 시작함.
 - 실증로 건설은 후안잉(Huaneng), 중국원자력공사(CNNC)의 자회사인 중국원자력엔지니어링공사(China Nuclear Engineering Corporation, CNEC), 칭화대, Chinergy로 구성된 컨소시엄이 참여하고 있으며, 후안잉이 컨소시엄을 주도함.
 - 실증발전소는 2020년 7월부터 시운전을 시작함.
 - 2020년 10월과 11월에 2개 HTR-PM 원자로 각각에서 원자로의 1차 루프계통 및 장비와 보조 파이프의 강도 및 기밀성을 검증하기 위한 냉간기능시험(Cold functional tests)이 완료됨.¹⁷¹⁾
 - 2021년 1월에는 고온기능시험(Hot functional tests)을 개시함.¹⁷²⁾
 - 2021년 8월 20일 중국의 원자력규제기관은 고온가스냉각로 실증로인 HTR-PM의 운영허가를 발급함.
 - HTR-PM 운영허가가 발급된 지 하루 만에 핵연료 장전을 시작하고¹⁷³⁾, 핵연료 장전을 시작한 지 23일 만인 9월 12일 1호기 최초 임계에 도달함.¹⁷⁴⁾ 11월 11일에는 2호기 최초 임계에 도달 후,¹⁷⁵⁾ 원자로심 및 제어봉 성능과 핵계측 감시시스템 장비의 가용성을 검증하기 위한 영출력 노물리 시험이 실시됨.
 - 2021년 12월 13일 HTR-PM 발전소는 송전망에 연결되었으며,¹⁷⁶⁾ 2022년 12월 9일 100% 출력 운전이 시작됨.¹⁷⁷⁾
- 시다오완 부지에는 추가적으로 18기의 HTR-PM 원자로 건설이 제안되고 있으며, HTR-PM을 넘어 6개 HTR-PM 원자로에 의해 구동되는 650 MWe의 대형 터빈 1개를 활용하는 확장형 HTR-PM600이 제안됨.
 - 저장성 쑤먼(Sanmen), 장시성 루이진(Ruijin), 푸젠 성 사푸(Xiapu) 및 완안(Wan'an) 및 광둥성 바이안(Bi'an)에 HTR-PM600 건설 타당성 조사가 진행 중임.

마. Kairos Power KP-FHR 및 Hermes

170) World Nuclear News, X-energy marks start of construction at US fuel plant, 17 October 2022.
171) World Nuclear News, Cold tests completed at first HTR-PM reactor, 20 October 2020.
172) World Nuclear News, Hot functional testing of HTR-PM reactors starts, 4 January 2021.
173) World Nuclear News, Fuel loading under way at China's HTR-PM, 23 August 2021.
174) World Nuclear News, China's HTR-PM reactor achieves first criticality, 13 September 2021.
175) Nuclear Newswire, China's HTR-PM demonstration project advances, 16 November 2021.
176) World Nuclear News, Demonstration HTR-PM grid connected, 16 December 2021.
177) World Nuclear News, China's demonstration HTR-PM reaches full power, 9 December 2022.

- Kairos Power는 140 MWe 용융염로인 KP-FHR (Kairos Power Fluoride Salt-Cooled High Temperature Reactor)를 개발 중이며, Hermes는 KP-FHR의 크기를 축소한 실증로임.
 - KP-FHR는 불화염 냉각재, 19.75 % 농축도의 TRISO 폐블형 연료를 사용함.
 - 2020년 12월 Kairos Power는 테네시주 오크리지의 K-33 가스확산농축공장 부지였던 East Tennessee Technology Park(ETTP)에 시험용 원자로인 열출력 35 MWt의 Hermes를 배치할 계획임을 발표함.
 - 2030년까지 KP-FHR의 전력 생산 실증을 수행할 계획을 발표함.¹⁷⁸⁾
 - Kairos Power는 2021년 5월 테네시밸리당국(TVA)와 상호협력하기로 협약을 맺고, ETTP에 Hermes 실증로를 설치할 수 있도록 엔지니어링, 운영 및 인허가 지원을 받기로 함.¹⁷⁹⁾
 - 2021년 7월 용융염로 개발 프로젝트에 1억 달러를 투자를 밝혔으며, 2021년 9월 말 오크리지 지역사회에서 2026년에 가동 예정인 용융염로 실증로 Hermes 건설계획에 대한 설명회를 개최함.
- 2021년 9월 테네시주 오크리지에 건설 예정인 저출력 실증로 Hermes의 건설허가 신청 일환으로 KP-FHR(불소냉각 고온원자로) 건설허가 신청 중 첫 번째 부분에 해당하는 자료를 NRC에 제출함.¹⁸⁰⁾
 - 2021년 11월 NRC는 Kairos Power의 건설허가 신청서 검토를 수락함.
 - 2022년 10월 NRC는 Kairos Power의 Hermes 원자로 건설허가 신청에 대해 환경영향보고서(EIS) 초안을 발표하였고,¹⁸¹⁾ 2023년 8월 최종환경영향보고서(Final Environmental Impact Statement, FEIS) 작성을 완료함.¹⁸²⁾
 - 2023년 6월 NRC는 Hermes 시험용 용융염로 건설허가신청서 검토를 완료하고 최종안전성평가보고서(FSER)를 발간함.¹⁸³⁾
- 2022년 4월 Kairos Power는 KP-FHR 기술 개발을 앞당기기 위해 Bruce Power, Constellation, Southern Company, TVA와 Kairos Power 운영·제조·개발 동맹(Kairos Power Operations, Manufacturing and Development Alliance, KP-OMADA)을 결성함.¹⁸⁴⁾

178) World Nuclear News, Kairos Power plans Hermes demonstration reactor at Oak Ridge, 16 July 2021.

179) World Nuclear News, TVA and Kairos Power to collaborate on demonstration reactor, 06 May 2021.

180) World Nuclear News, Kairos submits PSAR for Oak Ridge demonstration reactor, 5 October 2021.

181) Nuclear Newswire, Draft EIS for fluoride salt-cooled test reactor now out for public comment, 4 October 2022.

182) World Nuclear News, NRC completes Hermes environmental review, 18 August 2023.

183) World Nuclear News, US regulators conclude Hermes safety review, 16 June 2023.

184) World Nuclear News, Kairos consortium formed to help develop its reactor technology, 20

- 2022년 7월에는 KP-FHR에 사용될 고순도 불화염 냉각재를 생산할 용융염정화공장(Molten Salt Purification Plant, MSPP)을 오하이오주 Elmore에 있는 Materion 캠퍼스에 건설함.¹⁸⁵⁾

○ 2023년 7월 14일 Kairos Power는 테네시주 오크리지에 Hermes 2호기 실증 발전소의 건설허가 신청서를 NRC에 제출함.¹⁸⁶⁾

- 원자로 2기로 구성되고 발전 시스템을 공유하는 Hermes 2호기 실증 발전소는 향후 건설 예정인 Hermes 시험로 부지 옆에 건설될 계획이며, 전기를 생산하고 판매할 예정임.
- 건설허가 신청서에 따르면 Hermes 2호기는 이르면 2025년 7월 건설이 착수되어, 첫 번째 원자로는 빠르면 2027년 7월, 늦어도 2027년 12월 완공될 예정이며, 이후 두 번째 원자로도 1년 후에 완공될 예정이다.

바. Terrestrial Energy IMSR-400

○ 2013년 창립된 Terrestrial Energy사는 열출력 400 MWt(전기출력 190 MWe)의 용융염 원자로인 IMSR(Integral Molten Salt Reactor)을 개발하고 있음.

- IMSR은 기존 원전과 동일한 농축 수준(5% U-235 미만)의 저농축 우라늄 연료를 사용하며, 감속재로는 흑연을 사용하고 원자로심 교체 주기는 7년임.
- 원자로 유닛(core unit)은 실린더 용기 내에 원자로, 냉각재, 감속재, 증기발생기가 들어가 있는 일체형으로 전체를 교체 가능함.
- 핵연료염과 원자로 열을 전력생산계통에 전달하는 냉각재염의 두 가지 용융염 유로가 있으며, 중간계통으로 2차 및 3차 용융염 루프 2개 존재함.

○ 2020년 11월 아르곤 국립연구소(Argonne National Laboratory, ANL)와 IMSR 원자로용 핵연료염에 대한 상세시험에 착수하여 IMSR 운전주기 중에 나타나는 핵연료 조성을 대표할 수 있는 핵연료염 혼합체를 만들고 용융점, 밀도, 점성, 열용량 및 열확산률 측정 등 시험을 수행하기로 함.¹⁸⁷⁾

- 2020년 11월에는 네덜란드 NRG(Nuclear Research and Consultancy Group)의 HFR(High Flux Reactor)에서 그래파이트 조사시험을 착수함.¹⁸⁸⁾
- 2021년 4월 벨기에 ENGIE Lobilec과 부식 테스트뿐 아니라 전기화학 및 열물리 측정을 포함한 Terrestrial Energy의 IMSR 용융염핵연료 자격인증 프로그램의 일부로 기술 서비스 계약을 체결함.¹⁸⁹⁾

April 2022.

185) World Nuclear News, Kairos and Materion commission molten salt purification plant, 20 July 2022.

186) World Nuclear News, Kairos seeks construction licence for two-unit Hermes plant, 25 July 2023.

187) World Nuclear News, Detailed testing of IMSR fuel salt starts, 11 November 2020.

188) World Nuclear News, Irradiation testing of IMSR moderator graphite begins, 13 November 2020.

- 2022년 6월 암모니아 생산기술 공급업체 KBR과 IMSR 열병합발전 기술을 암모니아 및 수소 생산에도 통합하여 적용할 수 있는지 그 활용 방안을 탐구하기 위한 협약을 체결함.¹⁹⁰⁾
- IMSR은 캐나다와 미국 NRC의 사전인허가를 진행하고 있으며, 미국-캐나다의 규제당국이 공동사전검토(joint review)를 진행하는 최초의 선진원자로임.
- 2016년 캐나다 CNSC의 VDR을 신청하여, 2017년 11월에 1단계 검토가 완료되었고, 2023년 4월 2단계 검토가 완료됨.
 - 미국 NRC의 사전인허가검토는 2019년 10월부터 시작되었는데, NRC와 CNSC는 2019년 12월 Terrestrial Energy사가 설계한 Integral Molten Salt Reactor (IMSR)을 공동으로 검토하는 최초의 원자로로 선정하여 IMSR의 가상 초기사건 분석 및 방법론을 공동으로 검토하였으며, 2022년 6월에 1차 공동 기술검토를 완료함.¹⁹¹⁾
- 한편 Terrestrial Energy는 캐나다 앨버타주와 영국에서도 ISMR 상용화를 위한 협력 파트너십을 모색하고 있음.
- 2022년 8월 캐나다 앨버타주 투자공사인 Invest Alberta와 IMSR의 상용화를 지원하기 위한 양해각서를 체결함.¹⁹²⁾
 - 2022년 11월 영국의 기후 솔루션 전문 비영리 단체인 TerraPraxis와 Repowering Coal(석탄발전소 부지 재활용) 프로그램에 협력하는 의향서(LOI)에 서명함.¹⁹³⁾

사. Moltex사의 SSR

- 영국의 Moltex Energy가 개발하고 있는 SSR(Stable Salt Reactor)는 모듈 하나의 출력이 150 MWe이며, 한 플랜트에 8기의 원자로 모듈을 설치하여 1200 MWe까지 출력을 낼 수 있도록 하는 용융염원자로임.
- 핵연료는 용융염과 PWR 핵연료집합체 개념을 혼합한 형태로, 핵연료 봉안에 액상염상태의 핵연료($2/3$ sodium chloride + $1/3$ Pu trichloride의 mixture)가 내장됨.
 - 집합체의 형태로 액상염 상태의 냉각재(sodium zirconium fluoride mixture) 풀에 담겨있음.
- 2018년 9월 영국 BEIS의 AMR F&D project의 하나로 선정되어 자금을 지원받았으며,

189) Terrestrial Energy press release, Terrestrial Energy and ENGIE Laborelec to Advance Development of IMSR, a Small Modular Reactor Power Plant that Uses Molten Salt Technology, 8 April, 2021.

190) World Nuclear News, IMSR to be considered for ammonia production, 10 June 2022.

191) World Nuclear News, US and Canadian regulators complete joint review of Terrestrial's IMSR, 8 June 2022.

192) World Nuclear News, Terrestrial Energy to work with Alberta on SMR commercialisation, 12 August 2022.

193) World Nuclear News, Terrestrial joins TerraPraxis coal-to-nuclear initiative, 9 November 2022.

2019년 9월 캐나다 CNSC VDR 신청 및 영국 내 SMR 사업 개발에 쓰일 자금 6백만 파운드를 크라우드 펀딩(crowd funding)을 통해 조달하기도 함.¹⁹⁴⁾

○ Moltex는 2030년대 초까지 캐나다 뉴브런즈윅주 Point Lepreau 부지에 첫 원자로를 배치하는 것을 목표로 하고 있음.

- 2019년 7월 캐나다 NB Power 및 뉴브런즈윅주정부와 양해각서를 체결하고 300 MWe SSR-W300을 실증하는 계획을 수립함.
- 2021년 3월 뉴브런즈윅주는 Moltex가 Point Lepreau 부지에 건설하려는 SSR-W와 WATSS(Waste To Stable Salts)의 설계·기술 검증을 위해 5,050만 캐나다달러를 지원하겠다고 발표함.¹⁹⁵⁾
 - CANDU 사용후핵연료를 SSR핵연료로 전환하는 WATSS의 상업적 타당성을 탐색하는 Oxide Nuclear Waste Reduction Demonstration (ONWARD) project의 1단계의 일환임.
- 2021년 3월 OPG는 Moltex와 CANDU 원자로 사용후핵연료를 재활용하기 위한 프로젝트에 협력하기로 하고 CANDU 사용후핵연료 재활용 공정의 기술성을 입증할 수 있도록 Moltex에 1백만 캐나다달러를 제공함.¹⁹⁶⁾
- 2017년 11월 Moltex는 CNSC와 Moltex SSR 설계에 대한 VDR 검토를 시작하기로 공식 합의했고, 42개월에 걸쳐 19개 기술검토 중점 분야를 다루는 50건의 서류를 제출함.
 - 2017년 12월 CNSC의 VDR 1단계 및 2단계에 대한 검토가 시작되었으며, 2021년 5월 1단계검토가 완료됨.¹⁹⁷⁾

아. TerraPower와 Southern Company의 용융염화물 고속로(MCFR) 개발 및 원자로실험(MCRE)

○ TerraPower는 용해된 염화염을 원자로 냉각수와 연료로 모두 사용하여 고속중성자를 활용하는 용융염화염 고속로(Molten Chloride Fast Reactor, MCFR)를 개발 중임.

- MCFR은 기존 원자로보다 높은 온도에서 작동해 전력을 더 효율적으로 생산하고, 공정 열 활용 및 열저장에 대한 잠재력을 제공함.
- 2015년에 MCFR 기술의 초기 개발을 지원하는 데 필요한 통합 인프라를 구축하기 위해 미국 DOE 자금 4천만 달러를 지원받음.
- 2016년에는 미국 DOE의 선진원자로개념(Advanced Reactor Concepts, ARC-15)을 통해 MCFR의 종합효과시험장치(IET)를 구축하는 6,800만 달러 규모의 프로젝트를 시작함.

194) World Nuclear News, Moltex Energy raises USD7.5 million through crowdfunding, 16 September 2019.

195) World Nuclear News, Canadian government invests in SMR project, 18 March 2021.

196) Nucnet, OPG And Moltex Launch Project To Recycle Used Fuel From Candu Reactors, 31 March 2021.

197) World Nuclear News, Moltex SMR clears first phase of regulatory review, 26 May 2021.

- 2022년 10월 워싱턴주 에버렛(Everett)에 있는 TerraPower의 연구소에 MCFR 개발에 필요한 종합효과시험(Integrated Effects Test, IET)에 사용될 새로운 시험시설의 건설과 설치를 완료함.¹⁹⁸⁾
 - INL에서 수행되는 MCRE의 개발과 운영도 지원하며, 200 kW 미만의 원자로 실험 및 운전 자료를 제공할 예정임.
 - IET와 MCRE는 모두 2030년대 초에 운전 예정인 180 MW의 MCFR 원자로의 실증을 위한 설계, 면허 및 운영을 위한 자료 제공에 사용될 예정임.

○ 한편, Southern Company는 세계 최초로 임계에 도달하는 고속로인 MCRE를 INL에 건설하기 위한 공동 프로젝트를 주도하고 있음.

- MCRE는 TerraPower가 개발한 용융염화학 고속로(MCFR)를 실증하는 것으로, 규모는 500 kW이며, 5년 이내에 설계, 구축, 운영될 계획임.
- MCRE는 중요한 운전자료를 제공함으로써 향후 TerraPower의 MCFR 실증로의 설계, 허가 및 운전에 필요한 정보를 지원할 것임.
 - MCRE를 순환하는 용융염화물(36%PuCl₃-64%NaCl)은 용해된 연료를 포함하여 냉각재와 연료 운반체 역할을 함.
 - 핵분열 에너지가 원자로와 냉각재의 온도를 높이면 액체연료혼합물이 팽창하여 연료 내 핵분열성 원소사이의 거리를 서로 멀리 떨어뜨려 운전원의 조작 없이 피동적으로 핵분열 연쇄 반응 속도를 낮출 수 있음.
- MCRE 프로젝트에는 TerraPower, INL, Core Power, Orano Federal Services, 전력연구소(EPRI) 및 3M Company이 공동 연구기관으로 참여함.

자. 중국 과학아카데미의 액체불화토륨원자로(LFTR) 개발

○ 중국과학아카데미(Chinese Academy of Sciences, CAS)는 2011년 1월부터 토륨증식 용융염원자로(Th-MSR 또는 TMSR)로 알려진 액체불화토륨원자로(LFTR) 개발을 위해 30억 위안(4.44억 달러) 규모의 연구개발 프로그램을 시작함.

- 2018년 9월 중국과학아카데미에 속해있는 상하이 응용물리연구소(Shanghai Institute of Applied Physics, SINAP)는 간수(Gansu)성 우웨이(Wuwei)시에서 실험용 토륨연료 용융염원자로(TMSR-LF1) 건설에 착공함.
- 2022년 8월 중국 생태환경부(Ministry of Ecology and Environment)는 TMSR-LF1의 운영을 승인함.¹⁹⁹⁾
- 2 MWt의 TMSR-LF1 원자로는 2024년에 완공될 예정이었으나 건설 작업이 빨라져 2021년 8월에 완공

198) World Nuclear News, World's largest chloride salt system in place, 19 October 2022.

199) World Nuclear News, Chinese molten-salt reactor cleared for start up, 9 August 2022.

된 것으로 알려져 있음. 불화염냉각고온로(FHR)로도 알려져 있는 이 원자로는 SINAP의 TMSR 센터가 개발과 운영을 담당함.

- TMSR-LF1은 U-235가 20% 이하로 농축된 연료를 사용하며, 토륨 장전량은 약 50kg, 전환비율이 약 0.1이며, 연료 재료는 UF₄, 불랭킷은 99.95% 순도의 Li-7를 사용한 불화리튬(FLiBe)이 사용됨.
- 배치 단위로 장전된 연료로 운전을 시작하고, 연료 재장전과 기체 핵분열생성물 제거는 온라인으로 수행함.
- 5~8년 후에는 모든 연료염을 인출하여 악티나이드는 재처리를 통해 분리하고, 분리된 핵분열생성물은 저장하는 방식으로 운영할 예정임.
- TMSR-LF1의 핵연료관리는 염, 우라늄, 토륨을 재활용하는 순환 과정으로 진행되며, 핵분열에 대한 토륨의 기여는 20%에서 약 80%로 증가할 것으로 예상됨.
- TMSR-LF1 실증이 성공적으로 완료되면 373 MWt의 원자로를 2030년까지 건설할 계획임.

차. Seaborg사의 CMSR

○ 2014년 덴마크에서 설립된 Seaborg Technologies(이하 Seaborg)사는 바지선에 배치될 수 있는 컴팩트형 용융염원자로(compact molten salt reactor, CMSR)를 개발 중임.

- 전기출력 100 MWe(열출력 250 MWth)의 열중성자스펙트럼 원자로인 CMSR은 우라늄 기반 불화연료를 사용하고 원자로 냉각재 역할도 수행함.
- CMSR은 감속재로 용융 수산화나트륨(NaOH)을 사용하고 있으며, 이 용융 수산화나트륨을 고급 재료 및 부식 제어 방법과 함께 사용하면 단일 CMSR의 수명을 12년으로 연장 가능함.
 - 감속재로 흑연 대신 용융 수산화나트륨을 사용하여 감속재가 조사손상되지 않도록 하였으나, 수산화나트륨이 제어되지 않을 경우 고온에서 원자로 용기와 튜브를 부식시키는 가능성을 연구 중임.
 - 수산화나트륨의 부식성 제어에 대해 광범위한 실험 캠페인을 수행 중임.
- 모듈러 CMSR은 전력 바지선을 위한 것으로, 200 MW에서 800 MW 사이의 전기 생산이 가능함(24년의 작동 수명).
 - 바지선에 장착되는 각 전원 모듈은 2기의 CMSR으로 구성되며, 최초의 원자로 2기는 조선소에서 건조되는 전력 바지선에 미리 설치되며, 전원 모듈에는 두 기의 추가 CMSR을 위한 공간을 배치함.
- 2023년 6월 Seaborg사는 계획된 일정에 맞추기 위해 초기의 부유식 원전용 핵연료를 HALEU에서 저농축우라늄(LEU)으로 변경하기로 결정함.²⁰⁰⁾

○ 2020년 미국 해운국(American Bureau of Shipping, ABS)이 기술에 대한 타당성 보고서를 승인하였으며, 2026년에 상업 운영을 시작하려는 계획 하에 계속해서 새로운 실

200) World Nuclear News, Seaborg switches fuel plans because of HALEU timeline risks, 5 July 2023.

험 시설을 건설 중임.

- 2022년 4월 7일 삼성중공업과 CMSR를 이용한 원자력발전소를 제작하여 판매한다는 양해각서를 체결함.
 - 삼성중공업의 조선 전문성과 Seaborg의 CMSR 기술을 결합하여 터키 발전소를 제조·판매하는 것이며, 수소와 암모니아 생산 공장의 개발도 다루고 있음.
 - 2021년 6월 삼성중공업은 한국원자력연구원과 해상용융염냉각로 개발 및 연구를 위한 협약을 체결하였으며, 2023년 4월 Seaborg, 한수원, 삼성중공업은 Seaborg의 CMSR 기술을 적용한 부유식 원전 개발을 위한 컨소시엄을 설립하였음.
 - 2023년 6월 한전원자력연료(KNF) 및 GS건설과 파트너십을 체결하고 CMSR 용융염로용 저농축우라늄(LEU) 연료염 생산시설 개발 타당성 조사에 합의함.

- 2023년 7월 Seaborg는 노르웨이 Norsk Kjernekraft와 CMSR의 노르웨이내 배치를 조사하기 위한 의향서(LOI)에 서명²⁰¹⁾
- 인도네시아 전력사 Pertamina NRE와 인도네시아에 CMSR 파워 바지선의 배치를 조사·검토하기 위한 양해각서를 체결함.²⁰²⁾

201) World Nuclear News, Seaborg SMR to be considered for use in Norway, 18 July 2023.

202) World Nuclear News, Seaborg power barge considered for use in Indonesia, 12 September 2023.

3. 초소형모듈원자로(MMR) 사업현황

가. USNC MMR

○ MMR(Micro Modular Reactor)은 Ultra Safe Nuclear Corporation(USNC)이 개발한 5 MWe 출력의 고온가스냉각로(HTGR)이며, 핵연료로는 Fully Ceramic Micro-encapsulated (FCM) 연료를 사용함.

- FCM은 우라늄 또는 플루토늄 등 핵연료 물질을 SiC로 코팅한 TRISO 입자들을 세라믹매트릭스 안에 넣어 만든 펠렛 형태의 핵연료임.
- 세라믹핵연료 펠렛은 그래파이트 블록 안에 장전되며, 블록 내부의 냉각홀을 헬륨이 통과하며 열을 중간 열 전달 계통인 용융염 계통에 전달하여 노심을 냉각시킴.
- 용융염을 매체로 하는 중간열 전달 계통은 전기 또는 공정열 생산계통에 고온의 열을 다시 전달함.

○ USNC는 캐나다 OPG와 컨소시움을 구성하여 Global First Power(GFP)를 설립하고, CNL의 SMR 실증사업 경쟁에 참여하고 있음.

- GFP가 주도하여 CNL이 보유한 온타리오주 Chalk River 부지에 MMR을 건설하려는 프로젝트로 CNSC의 환경평가 검토 단계에 있음.
- 2019년 3월 GFP는 Chalk River 연구소 부지에 대해 부지사용 허가를 CNSC에 신청하여, CNSC의 검토 단계에 있음.
- 2023년 5월 캐나다원자력공사(Atomic Energy of Canada Limited, AECL)와 CNL, GFP는 Chalk River 부지 내 주차장을 실증용 MMR을 건설할 부지로 선정함.²⁰³⁾
- 한편, 2016년부터 CNSC의 VDR에도 참여하여 1단계를 완료하였으나, 2단계 착수는 현재 유보 상태임.

○ 캐나다 이외에도 미국, 핀란드, 폴란드에서 MMR 상용화를 위한 노력을 전개중임.

- 2021년 7월 미국 일리노이대학교는 USNC의 MMR을 캠퍼스 내에 건설할 의향이 있음(LOI)을 NRC에 통보함.
- 2022년 12월 핀란드 라펜란타(Lappeenranta) 공과대학과 MMR을 라펜란타시에 배치하는 것을 검토한다는 양해각서를 체결함.²⁰⁴⁾
- 2023년 3월 폴란드 화학제품 생산업체 Grupa Azoty Police 및 웨스트 포메라니안 공과대학(West Pomeranian University of Technology)과 폴란드 북서부 웨스트 포메라니안 주에 있는 마을 Police에 USNC의 MMR 기반의 연구 시설을 개발하고 건설하기로 합의함.²⁰⁵⁾

203) World Nuclear News, Staff car park unveiled as Canadian MMR's planned location, 15 May 2023.

204) World Nuclear News, Agreements for microreactor deployment in Finland and further afield, 16 December 2022.

205) World Nuclear News, Polish-US nuclear cooperation expands to USNC microreactors, 31 March 2023.

나. Oklo Aurora

- Oklo사의 Aurora 발전소는 compact fast reactor(liquid metal-cooled fast reactor)를 활용한 1.5 MWe 출력의 원자로이며, fission battery로 알려짐.
 - 열생산도 가능하며, 금속연료를 사용하며, 핵연료 교체주기는 20년, 핵연료 재순환도 가능함.
 - 노심의 열은 열전도관(heat pipe)을 통해 2차 계통으로 전달되며, 원자력과 재생에너지의 결합도 가능하다는 것을 입증하기 위해 태양광 패널을 발전소 건물 지붕에 부착함.
 - 발전소 건설에 필요한 부지 면적은 1/4 에이커(약 1000 m²) 이하로 평가됨.
- 2016년 Oklo는 Aurora 기술 개발을 위해 DOE의 GAIN을 통해 자금을 지원받음.
 - 2019년 12월 Oklo는 Aurora를 건설하기 위해 INL 부지에 대한 부지사용허가(Site Use Permit)를 DOE로부터 받았으며 이 부지에 Aurora 초도호기를 2020년대 중반까지 건설할 계획임.
 - 2023년 5월 Oklo는 오하이오주 남부에 두 번째와 세 번째 상업용 Aurora Powerhouse 발전소를 건설할 계획이라고 발표함.
 - Southern Ohio Diversification Initiative(SODI) 소유의 오하이오주 남부 Piketon 인근 Portsmouth 부지에 15 MWe로 출력이 증강된 두 기의 Aurora 발전소를 건설하기 위한 토지매입 계약에 서명함.²⁰⁶⁾
 - 2023년 8월 Oklo는 Aurora powerhouse 개발과 HALEU 연료 공급에 대한 양해각서를 Centrus Energy와 체결하고 파트너십을 확대하였음.²⁰⁷⁾
 - 양해각서에 따라 Centrus는 자회사인 ACO가 오하이오주 Piketon 소재의 원심분리 농축공장에서 HALEU의 생산 역량을 확보하고 Aurora powerhouse 부품을 생산할 계획임.
 - 2023년 8월 미 공군은 군사시설에 연료 공급을 담당하는 국방물류국 에너지(Defense Logistics Agency Energy)와 협력하여 알래스카의 Eielson 공군 기지에 건설할 초소형원자로 공급업체로 Oklo를 선정함.²⁰⁸⁾
- 2020년 2월 INL은 EBR-II 사용후핵연료를 재활용하여 생산하는 HALEU를 Oklo의 Aurora 개발과 실증에 활용할 수 있을 것이라고 발표함.²⁰⁹⁾
 - HALEU의 소유권은 DOE가 가지며 Oklo에는 사용권한이 제공되며 2021년 11월 Centrus와 HALEU 생산시설 건설에 협력한다는 의향서(LOI)에 서명함.²¹⁰⁾

206) Nuclear Newswire, Oklo to deploy two Aurora plants in Ohio, 19 May 2023.

207) World Nuclear News, Oklo and Centrus Energy broaden links with MoU, 29 August 2023.

208) Nuclear Newswire, Oklo unit tentatively picked to power Air Force base in Alaska, 1 September 2023.

209) World Nuclear News, Oklo wins access to used fuel for Aurora SMR, Feb. 20, 2020.

210) Nucnet, Oklo and Centrus Announce Plans to Cooperate on HALEU Production Facility, 17 November 2021.

- 2022년 2월 ANL과 전기정련 기술을 사용하는 핵연료재활용 기술을 공동으로 상용화하는 협약을 체결함.²¹¹⁾
- 2022년 5월 Oklo는 원자로 개발자로는 처음으로 ANL의 새로운 열수력시험세트 THETA(Thermal Hydraulic Experimental Test Article)에서 시험을 수행함.²¹²⁾
 - 시험은 유량 및 자연순환과 관련된 상세 해석 도구를 검증하기 위한 데이터를 제공하기 위해 액체금속로에서의 비보호유량손실 사고를 포함한 다양한 조건을 모사할 예정이다.

○ 2016년부터 Aurora 설계는 NRC의 사전인허가 검토를 받아왔으며, 2020년 3월 Aurora powerhouse에 대한 통합인허가(COL) 신청서를 NRC에 제출함.²¹³⁾

- 2020년 6월 NRC는 Oklo가 INL 부지에 Aurora 원자로를 건설하고 운영하기 위한 통합인허가 신청을 검토하기로 결정하였으나,²¹⁴⁾ 2022년 1월 통합인허가(COLA) 발급을 거절함.²¹⁵⁾
 - NRC의 통합인허가 거절 사유는 Oklo가 제공한 정보가 인허가 검토를 진전시킬 수 있는 수준과 차이가 있다는 것임.
 - 2021년 7월과 10월 몇 개 주제(Maximum Credible Accident Methodology 및 Performance Based Licensing Methodology)에 대한 보고서와 보충 정보를 제출했지만, NRC는 정보의 공백을 해소하기에는 부족했다고 결론을 내림.
 - NRC는 인허가 발급 거부가 인허가신청서의 안전성, 보안성 또는 기술적 장점에 대한 판단은 아니며 추후 Oklo사가 인허가신청서를 다시 제출하는 것을 배제하지 않는다고 밝힘.
 - 2022년 9월 Oklo사는 Aurora 원자로에 대한 향후 인허가 활동 다시 시작하기 위한 인허가프로젝트 계획(Licensing Project Plan, LPP)을 NRC에 제출함.²¹⁶⁾

다. Westinghouse eVinciTM

○ eVinci는 Westinghouse에서 개발하고 있는 출력 200 kW에서 15 MW 범위의 초소형 원자로이며, 원자로심은 열전도관과 핵연료 펠렛이 들어갈 채널이 있는 solid steel monolith 형태임.

- 정상운전 시 열제거나 운전 정지 시 잔열 제거는 열전도관의 열전도현상을 통하여 이루어짐.
- 핵연료는 19.5% 이하의 농축우라늄을 사용하며, 핵연료재장전 주기는 10년 이상임.
- 공장에서 제작, 핵연료 장전까지 완성되어 수요지까지 운송이 가능함.

211) Nucnet, Oklo signs agreement on commercialisation of fuel recycling technology, 9 February 2022.

212) World Nuclear News, First tests under way at new US liquid metal facility, 12 May 2022.

213) World nuclear news, Oklo submits first advanced reactor licence application, 18 March 2020.

214) World Nuclear News, NRC to begin first-of-a-kind licence review, June 16, 2020.

215) Nuclear Newswire, License Application for Oklo unit denied, 8 January 2022.

216) Power Engineering, Oklo Relaunches NRC Licensing Process for Nuclear Microreactor, 20 September 2022.

- 2018년 DOE로부터 eVinci 원자로를 설계, 분석, 제작을 위한 시험 및 인허가, 현장에서의 원자로 조립 및 설치, 그리고 2023년까지 일련의 시험을 수행하는 eVinci의 NDU(Nuclear Demonstration Unit) 건설 준비에 필요한 재원의 일부인 1,290만 달러를 지원받음.
 - 2020년 3월 미 국방부로부터 Project Pele를 통해 운반 가능한 초소형원자로 원형로(prototype) 엔지니어링 설계를 위한 2년간의 계약을 체결하고, 1,195만 달러를 지원받음.
- 2020년 10월 캐나다 Bruce Power와 캐나다의 순제로 탄소배출 실현을 위해 eVinci 기술의 응용 분야를 조사하기로 합의함.²¹⁷⁾
 - 2021년 10월 Bruce Power는 eVinci 초소형원자로가 캐나다의 분산형 오프그리드 시장에 필수적이고 가격 경쟁력 있는 청정에너지를 제공할 수 있다고 타당성분석 보고서를 통해 밝힘.²¹⁸⁾
 - 2022년 3월 캐나다 정부는 초소형원자로 eVinci를 지원하기 위해 웨스팅하우스 캐나다(Westinghouse Electric Canada)에 2,720만 캐나다달러를 투자할 것을 밝힘.²¹⁹⁾
 - 2022년 4월경 웨스팅하우스는 알래스카를 방문하여 주요 의사결정권자들과 eVinci 초소형원자로 배치에 대해 논의함.²²⁰⁾
- 2019년 6월부터 NRC의 사전인허가신청 검토를 받고 있으며, 2021년 11월 NRC에 업데이트된 eVinci 사전인허가신청 검토 규제참여 계획(regulatory engagement plan, REP)을 제출함.²²¹⁾
- 2018년 2월에는 캐나다 CNSC의 VDR에 2단계 검토를 신청하였으며, 2022년 10월부터 검토에 착수함.
 - 2023년 7월 Westinghouse는 eVinci 초소형원자로의 사전 인허가 사업자설계검토(VDR)를 위한 첫 번째 문서 세트를 캐나다 CNSC에 제출함.²²²⁾

라. Project Pele 이동형 초소형원자로

- 2020년 3월 미국 국방부는 원격지의 작전기지에 전력원으로 사용할 목적으로 안전성과 이동성이 검증된 초소형원자로 원형로 개발을 착수함.²²³⁾

217) World Nuclear News, Bruce Power to help explore use of eVinci in Canada, 12 October 2020.

218) World Nuclear news, Westinghouse micro-reactor feasible option for Canada, study finds, 27 October 2021.

219) Power Engineering, Canada invests in Westinghouse micro nuclear reactor, 17 March 2022.

220) Alaska Journal of Commerce, Going nuclear: Alaska is a big target for small reactors, 20 April 2022.

221) World Nuclear News, Westinghouse prepares for US licensing of eVinci, 15 December 2021.

222) World Nuclear News, First submissions for Canadian review of eVinci design, 6 July 2023.

223) World Nuclear News, US Defense Department awards microreactor contracts, 10 March 2020.

- 원격 및 전방 기지, 최신 함대와 무기체계에 안정적인 에너지를 공급할 수 있는 20 MWe 이하급(주로 1~10 MWe) 이동형 원자로(mobile nuclear reactor, MNR) 배치를 목표로 하는 개발 프로젝트로, “Project Pele”로 명명됨.
- 미국 DOE, NRC, NNSA(National Nuclear Security Administration) 및 민간 산업체들과 협력하여 이행될 계획임.²²⁴⁾
 - 원자로 설계 요건은 출력이 1~5 MWe, 핵연료는 HALEU를 사용하는 TRISO, 핵연료 재장전 주기는 3년 이상, 무게는 40톤 미만으로 트럭, 배 또는 C-17 항공기에 의해 운반이 가능하여야 함.
- 상용 프로젝트가 아닌 원형 원자로의 시험과 운영에 대한 규제는 NRC가 아닌 DOE에 의해 이루어짐.

○ 2021년 3월 미 국방부는 BWX Technologies(BWXT)와 X-energy의 2개사를 MNR 원형로(prototype)의 설계 대상자로 선정하였는데,²²⁵⁾ 2개의 설계옵션을 양사가 각각 설계하는 방식으로 진행되고 있음.

- 2022년 6월 원형로(시제품)의 설계 업체로 BWXT가 선정하고,²²⁶⁾ 2024년에 운반 가능한 초소형 원자로의 실규모 시제품 제작을 완료하고 납품하는 계약을 체결함.
 - 초소형 원자로 시제품 프로젝트 제작에는 Northrop Grumman, Aerojet Rocketdyne, Rolls-Royce Liberty Works, Torch Technologies Inc.가 참여하며 BWXT는 주 계약자로 전체 업무를 총괄하고 리드할 예정임.
 - 2022년 12월 BWXT는 프로젝트 펠레에 따라 개발되는 미국 최초의 초소형 원자로용 TRISO 핵연료를 버지니아주 린치버그(Lynchburg) 시설에서 생산에 착수함.²²⁷⁾
- 2023년 9월 미 국방부는 두 번째 설계 업체로 X-energy를 선정함.²²⁸⁾
 - X-energy의 두 번째 설계 옵션은 BWXT 시제품에 대한 보완책임.
 - Project Pele 하에서 이미 수행된 X-energy의 업무를 기반으로 실행하고 있으며, X-energy가 상업용과 군사용 목적에 맞는 원자로 설계를 NRC의 인허가를 받도록 개발하기 위한 자금을 계속 지원할 예정임.

○ 2021년 9월 미국 국방부는 MNR 시제품의 건설 및 실증 단계의 환경영향보고서(EIS) 초안을 발표하였으며,²²⁹⁾ 2022년 2월에 INL 부지에서의 이동형 초소형 원자로의 건설

224) ‘Project Pele’의 내용은 ‘Project Dilithium’과 같으며, Pele 프로젝트 수행을 위하여 DOE, NRC 등 다른 기관과의 기술 협력, 설계 및 인허가 자문 등 MOU를 체결함.

225) World Nuclear News, BWXT and X-Energy selected to develop Project Pele mobile microreactor, 24 March 2021.

226) Nuclear Newswire, BWXT wins Project Pele contract to supply U.S.'s first microreactor, 10 June 2022.

227) World Nuclear News, BWXT starts fuel production for microreactor, 8 December 2022.

228) World Nuclear News, X-energy to develop second Project Pele microreactor design, 14 September 2023.

229) World Nuclear News, US DOD invites public comment on Project Pele draft EIS, 20 September 2021.

및 실증에 대한 최종 환경영향평가서를 확정함.²³⁰⁾

- 2022년 2월 INL은 이르면 2024년 미 국방부의 시제품(prototype) 시험을 시작할 예정임.²³¹⁾
 - 원자로는 외부에서 제작되어 INL로 운반되며, NRIC(National Reactor Innovation Center)의 초소형원자로 시험 실증·운영 시설(Demonstration and Operation of Microreactor Experiments, DOME)로 활용되어 저출력 초기시험이 수행될 예정임.

230) Nuclear Newswire, Final EIS for Project Pele microreactor available, 26 February 2022.

231) Post Register, INL to test mobile microreactor prototype using 'inherently safe' nuclear fuel, 12 February 2022.

제 2 장

수냉각형 소형모듈원자로

제1절 가압경수로형(PWR)

제2절 가압중수로형(PHWR)

제2장 수냉각형 소형모듈원자로

수냉각형 소형모듈원자로(SMR)은 가압경수로형 및 가압중수로형으로 구분된다. 가압경수로형 SMR은 원자로심 내 냉각재의 비등 허용 여부에 따라 가압경수로(Pressurized Water Reactor, PWR)형과 비등경수로(Boiling Water Reactor, BWR)형으로 구분된다. 가압경수로형 원자로에서 핵분열반응은 열중성자 영역에서 주로 발생하며 최근 개발되는 대부분의 가압경수로형 SMR은 일체형 원자로 또는 블록형 원자로이지만, 목적에 따라 루프형 및 수조형 SMR도 개발 중에 있다. 또한 가압중수로형 SMR로는 개량형 소형 중수로가 개발 중에 있다.

제1절 가압경수로형(PWR)

- IAEA에서 매년 발간하는 ARIS(Advanced Reactors Information System)에는 각국의 원자로 개발 현황이 가장 잘 정리되어 있음. ARIS에 의하면 총 31개의 신형 원자로가 물을 냉각재로 사용하는 원자로이며, 이 중 77%가 가압경수로형임[2.1-1].
- 국내외 가압경수로형 소형원자로 연구개발 현황은 2020년 발간된 한국원자력학회의 소형 혁신원자로 기술조사보고서[2.1-2]에 정리되어 있으며, 한국원자력연구원에서 1997년부터 개발한 SMART와 산업체의 BANDI 그리고 서울대학교의 지역난방용 REX-10과 최근 KAIST의 ATOM이 개념개발단계 이후까지 진행된 대표적인 원자로임.
- 우리나라는 2012년 한국원자력연구원이 최초로 SMART 소형모듈원자로에 대한 국내 표준설계인가를 획득한 바 있으며 최근 안전성과 경제성을 향상시킨 SMART100에 대한 표준설계인가 심사를 진행 중임. 우리나라에서 독자 개발하여 건설을 추진하고 있는 SMART 노형은 기술의 성숙도 측면에서 국제적 경쟁력을 갖고 있음. SMART의 가장 큰 특징은 일체형 가압경수로이며, 2010년 당시 인허가기준을 만족하는 혁신기술들을 토대로 개발되어 세계 최초의 표준설계인가를 받은 일체형원자로임.
- 한국수력원자력(주)은 한국원자력연구원을 비롯하여 국내 유관기관과 협력하여 혁신형 소형모듈원전(i-SMR) 개발에 착수하였음. 혁신형 소형모듈원전은 안전성, 경제성, 유연성의 획기적인 향상을 위해 혁신적 기술들을 탑재하여 2028년 국내 표준설계인가를 획득하고 해외시장에 진출할 예정이며, 혁신형 소형모듈원전에는 모듈화된 일체형 소형원자로, 완전피동안전계통, 무봉산 노심, 내장형 제어봉구동 장치, 운전자동화 기술 등의 혁신기술이 적용됨.
- BANDI-60은 한국전력기술(주)이 주도하여 개발한 블록형 원자로로서 배관 없이

노즐-노즐로 연결하여 일체형과 같이 대형배관과단사고를 원천적으로 배제할 수 있음. 일체형과 달리 각각의 주요기기들이 분리되어 있으므로 유지보수 및 재장전이 용이한 장점을 가지며 상용로에서 기입증된 기술인 U-tube 형 증기발생기를 사용하고 철제 격납용기 외벽냉각을 통한 완전피동형 안전계통과 SMART에 비해 무봉산 노심, 내장형제어봉구동장치 등 혁신적인 기술들을 채택하고 있음.

1. 일체형 소형모듈원자로

가. 원자로 개념

(1) 개발 목적 및 활용 예상 분야

- 우리나라는 '90년대부터 정부·민간의 꾸준한 기술개발 투자를 통해, 현재 세계수준의 원자력 기술개발 능력을 보유하고 있으며 이를 바탕으로, 국내 독자기술로 2002년 APR1400을 개발하고, 국내 건설 및 해외수출에 이어 유럽과 미국에서 설계인증을 획득하여 해외수출을 위한 기반을 확보하는 등 원전 설계뿐 아니라 제조 및 시공 분야에서도 세계 최고의 경쟁력 보유하고 있음.
- 1997년 한국형 소형원자로 기술개발에 착수하여 2012년 세계 최초로 소형원자로 SMART의 표준설계인가를 취득하며 소형원자로 관련 원천기술을 확보하였으며 최근 '한-사우디 SMART 파트너십 추진 MOU' 체결을 바탕으로, 'SMART 기술 공유 및 사우디 내 첫 호기 건설을 위한 공동 설계'를 완료하고 글로벌 상용화를 추진 중임.

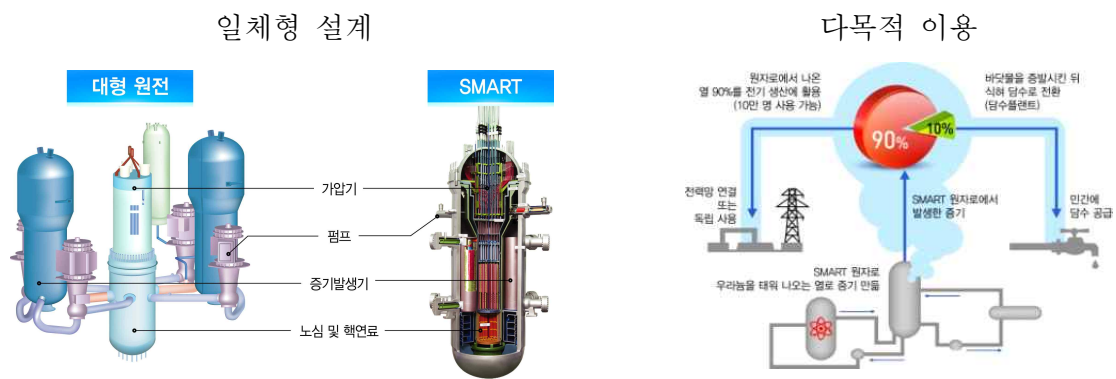


그림 2.1.1. 일체형 소형모듈원자로의 특징

- SMART 원천기술을 활용하고 APR1400의 상용기술을 접목하여 2030년대 세계시장을 선점하기 위한 혁신형 SMR의 개발이 추진 중임.
- 최근 주요국의 SMR 기술개발 가속화로 한국형 소형원자로 SMART로는 2030년 이후의 글로벌 SMR 시장에서 수출경쟁력 확보에 한계가 있어 이를 극복하기 위해 수출전략형

SMR 개발이 필요하게 되었으며 SMART 개발을 통해 확보한 원천기술을 활용하고 안전성·경제성·유연성 향상을 위한 혁신기술개발을 통해 글로벌 SMR 시장에서 경쟁력을 확보하고자 함.

- 혁신형 SMR 개발로 세계 최고 수준의 기술력을 유지·강화하고 국내 원자력산업 내 제조·시공 분야 중소·중견기업의 해외 진출 확대 및 생태계 활성화를 도모할 것으로 기대함.

① SMART

㉓ 핵증기공급계통

- 우리나라가 개발한 대표적인 경수로형 소형원자로인 SMART는 안전성 향상을 위해 일체형 원자로로 설계됨. 일체형 원자로는 기존의 분리형(loop type) 원자로와는 달리 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 가압기 등 원자로 주요 기기가 원자로용기 내에 내장된 원자로로서 이들 주요 기기를 연결하는 대형 배관이 없으며, 따라서 분리형 원자로의 주요한 설계기준사고인 대형냉각재상실사고(Large Break Loss of Coolant Accident, LBLOCA)를 근원적으로 배제하는 특성을 가지고 있음.

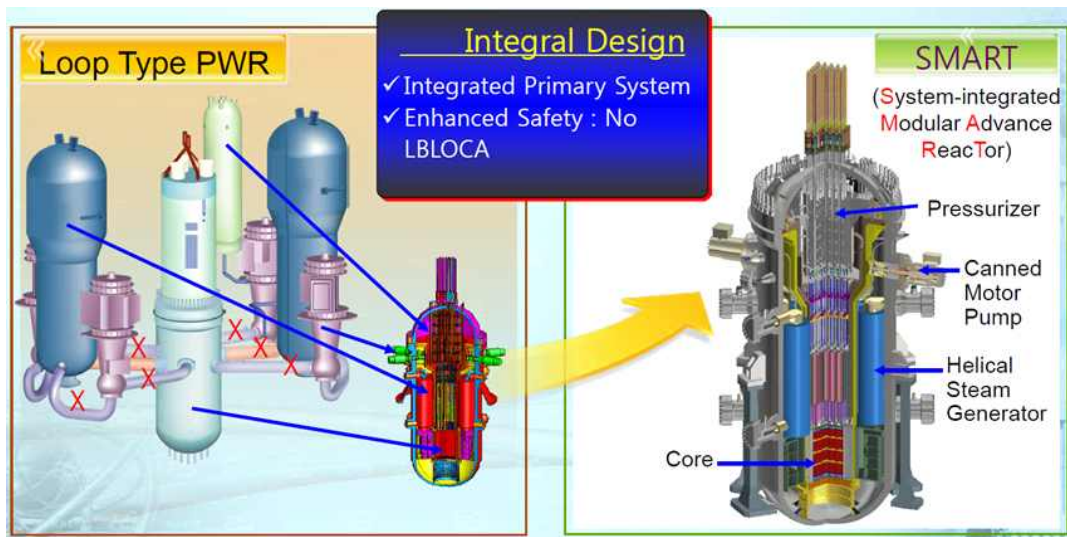


그림 2.1.2 일체형원자로

- 원자로냉각재계통(RCS)은 노심에서 생성된 열을 증기발생기를 통해 2차측으로 전달해주는 기능을 수행하며, 원자로냉각재 압력경계를 유지함. 원자로냉각재계통은 원자로냉각재 및 방사성 물질이 제어되지 않고 격납영역으로 방출되는 것을 방지하기 위한 방벽 역할을 수행함. 원자로냉각재계통은 노심, 8대의 증기발생기(SG), 4대의

원자로냉각재펌프(RCP), 가압기 공간을 포함하고 있는 원자로용기집합체와 관련 배관, 밸브, 계측기들로 구성되며 주요 기기가 원자로용기 내에 설치됨.

- 원자로용기 내부에 설치되는 원자로내부구조물은 노심지지배럴집합체(core support barrel assembly), 상부안내구조물집합체(upper guide structure assembly), 유동혼합헤더집합체(flow mixing header assembly, FMHA), 노내핵계측기 지지구조물집합체(ICI support structure assembly) 그리고 유동분배통(flow skirt) 등으로 구성됨.
- SMART 핵증기공급계통은 원자로냉각재계통과 피동안전주입계통, 피동잔열제거계통, 안전감압계통, 화학 및 체적제어계통 등으로 이루어져 있음.
- 피동안전주입계통은 4개의 독립 계열로 구성되어 있으며, 소형냉각재상실사고(Small Break Loss of Coolant Accident, SBLOCA) 등의 경우에 노심의 안전성 확보를 위해 냉각수 주입을 통한 노심냉각 기능을 수행함.
- 피동잔열제거계통 또한 4개의 독립 계열로 구성되어 있으며 급수공급 중단사고, 전원공급 상실사고 등의 경우에 원자로 노심붕괴열을 제거하는 기능을 수행함.
- 화학 및 체적제어계통은 1개의 계열로 구성되어 있으며, 충전 및 유출에 의한 가압기 수위제어를 통해 원자로냉각재의 재고량을 제어하고 화학제 첨가를 통해 원자로냉각재계통의 부식을 제어함. 또한 붕소 농도를 제어하여 반응도 제어기능을 수행함.
- 정지냉각기능은 원자로정지 후 원자로냉각재계통의 온도와 압력이 감소하였을 때 원자로냉각재계통으로부터 열을 제거하여 기기냉각수계통으로 전달시키는 비안전관련 기능임.

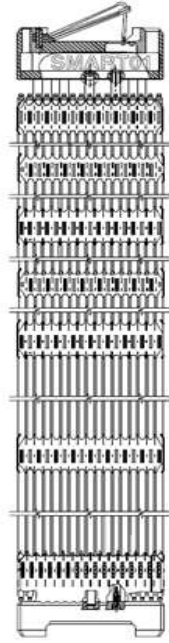


그림 2.1.4 SMART 핵연료

㉔ 종합설계

- 원자로 격납 및 보조건물은 안전관련 기기를 수용, 보호, 지지하며, 기기 및 작업자의 출입에 필요한 공간 제공, 운전하중 하에서 계통 및 구성요소들에 대한 지지 및 방사선 차폐, 설계기준 내외부 사건에 의한 하중을 지지할 수 있는 구조물, 안전관련 기기 설치 구역간의 물리적 격리, 방사성물질 누출의 방지 및 최소화를 위한 차폐방벽을 제공하도록 설계됨.
- 원자로격납 및 보조건물의 격납영역은 직사각형 벽체와 아치 형태의 지붕을 갖는 철근콘크리트 구조물로서 내측면은 강재 라이너플레이트로 피복되며 보조영역과 연결된 철근콘크리트 기초슬래브에 의하여 지지됨. 원자로격납 및 보조건물의 격납영역과 주변 구조물은 관통부 및 지지구조물들을 포함하여 모두 구조적으로 연결되어 있으며 원자로격납 및 보조건물의 격납영역은 설계기준 누설률을 초과하지 않도록 설계되고, 설계기준사고와 관련된 압력 및 온도에서 건전성을 유지될 수 있도록 설계함.
- 복합건물은 양 호기 원자로격납 및 보조건물 사이에 위치하는 비안전관련 철근 콘크리트 건물로서 기체, 액체 및 고체방사성폐기물을 처리하는 계통 및 기기를 수용하고, 방사성폐기물 용기의 설치공간을 제공함.
- 원자로건물압력및방사능저감계통(CPRSS)은 소형냉각재상실사고 또는 주증기관과단사고 등의 설계기준사고시 하부격납영역과 상부격납영역의 압력차로 형성되는 유동에 의해 하부격납영역의 열에너지 및 핵분열생성물을 제거함. 원자로건물내재장전수탱크를 통해

사고 초기 원자로냉각재계통 또는 2차계통 파단부로부터 하부격납영역 대기로 방출된 대용량의 에너지를 흡수하고, 열제거계통을 통해 하부격납영역 내 열에너지를 원자로격납영역 외부로 제거함. 그리고 방사성물질제거탱크를 통해 원자로격납영역 내 핵분열생성물을 포집함.

- 가연성기체제어계통은 격납영역수소제어계통이며, 격납영역수소제어계통은 중대사고 시 격납영역 내 수소 폭발을 방지하기 위해 격납영역 내 수소농도를 제한함.

② i-SMR

㉠ 핵증기공급계통

- i-SMR은 원자로냉각재계통(Reactor Coolant System; RCS)을 일체형으로 설계함으로써 기기 간 연결을 위한 대형 배관을 제거하였음. 원자로냉각재계통은 69개 핵연료집합체를 가진 노심, 4개의 원자로냉각재펌프(Reactor Coolant Pump; RCP), 나선 전열관 구조의 증기발생기(Steam Generator; SG), 가압기(Pressurizer; PZR) 등으로 구성되며, 이들은 단일 원자로용기(Reactor Pressure Vessel; RPV)에 설치되고 철제 격납용기(Containment Vessel; CV)에 내장함. 특히 일체형으로 고안되어 대형 냉각재상실사고(Large Break Loss of Coolant Accident; LBLOCA)의 가능성을 원천적으로 배제하였음.
- 원자로냉각재계통은 노심에서 발생하는 열을 증기발생기를 통해 2차 계통으로 전달하고, 원자로냉각재와 방사성물질이 외부로 누출되는 것을 방지하는 방호벽 역할을 수행하며, 원자로냉각재계통 및 연결계통은 정상운전 및 예상운전과도(Anticipated Operational Occurrences; AOO) 상황에서 원자로를 노심손상으로 부터 보호하기 위해 충분한 열적 여유도를 갖고 설계됨. 그림 2.1.5와 같이 원자로냉각재는 노심 상부를 거쳐 하부 플레넘으로 회수되는 유로를 형성하게 되며, 이 과정에서 상부안내구조물(Upper Guide Structure; UGS) 배럴을 포함한 노심지지배럴(Core Support Barrel, CSB) 내부, 원자로냉각재펌프, 증기발생기를 경유하게 됨. 원자로냉각재는 원자로용기 상부에 설치된 4개의 원자로냉각재펌프에 의해 강제순환되고, 이 냉각재 순환으로 노심에서 생성된 열은 증기발생기를 통해 2차계통으로 전달됨.

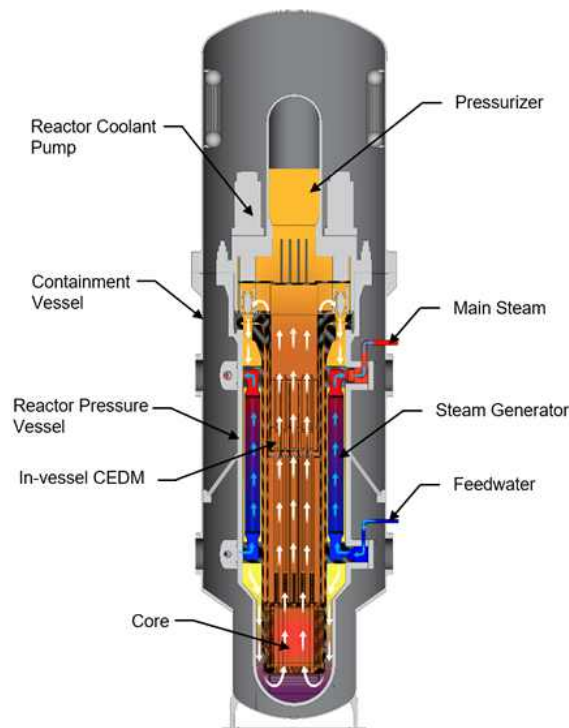


그림 2.1.5 RCS 냉각재 유로

- 피동보조급수계통(Passive Auxiliary Feedwater System; PAFS)은 정상적인 증기의 생산 및 급수의 공급이 불가능한 비상상황에서 자연순환으로 원자로냉각재계통의 열을 제거함. 동 계통은 사고 후 36시간 이내에 원자로냉각재계통을 안전정지 상태로 냉각시키고, 이후 최소 36시간 동안 이 상태를 유지하므로 운전원 조치 또는 Class 1E 안전등급의 교류/직류전원 없이도 최소 72시간 동안 안전기능을 수행함.
- 비상노심냉각계통(Emergency Core Cooling System; ECCS)은 원자로용기(RPV), 격납용기(CV), 비상감압밸브(Emergency Depressurization Valve; EDV), 비상재순환밸브(Emergency Recirculation Valve; ERV) 및 열교환기로 구성됨. 비상재순환밸브와 비상감압밸브)는 정상운전중 원자로냉각재 압력경계(Reactor Coolant Pressure Boundary; RCPB)의 건전성을 제공하며, 원자로용기와 격납용기 간 압력차가 설정압력(정상운전 중 압력차보다 훨씬 낮은)에 도달하면 개방됨.

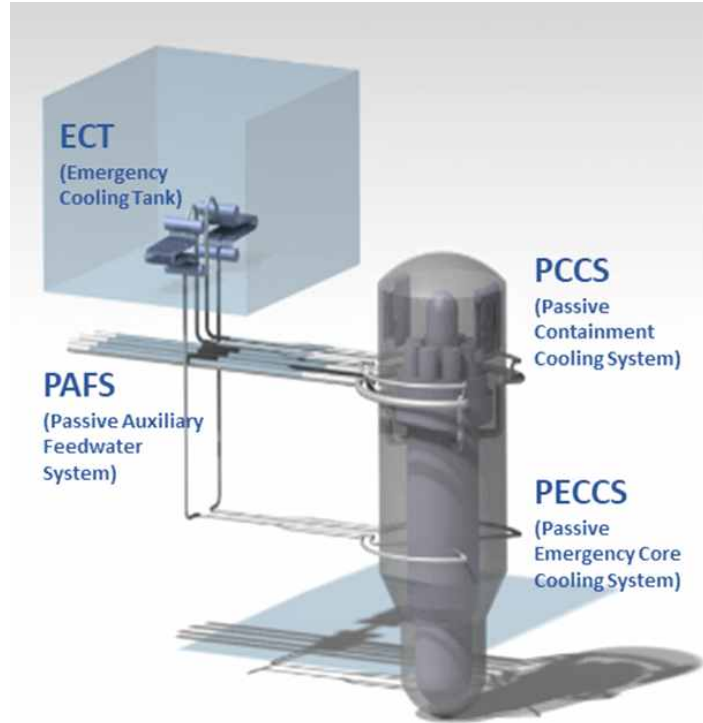


그림 2.1.6 i-SMR 안전계통

㉠ 핵연료

- 핵연료집합체는 상업용 가압경수로에서 검증된 17 x 17 격자구조의 이산화우라늄(UO_2) 핵연료봉으로 설계되며, 각각의 핵연료집합체는 2.4 m의 유효 높이를 가진 260개의 핵연료봉, 28개의 안내관, 1개의 계측관이 사각형 배열로 구성됨. 핵연료집합체는 20~100% 운전 범위에서 출력변화를 수용할 수 있도록 설계되었으며, i-SMR 핵연료의 최대연소도는 62,000 MWD/MTU 이내임.
- i-SMR의 노심은 69개의 핵연료집합체로 구성되어 있으며, 원자로심은 24개월의 운전기간 동안 693일 이상의 유효전출력운전일(Effective Full Power Day, EFPD)을 달성하도록 설계되었음. 노심의 잉여반응도는 주로 제어봉 집합체와 가연성흡수봉에 의해 제어되며, 수용성붕산은 반응도제어 목적으로 사용되지 않음.

㉡ 종합설계

- i-SMR은 일체화된 원자로 및 격납용기 집합체 4기, 구조물, 관련계통 및 기기들을 수용할 수 있도록 설계되며, 주요 건물로는 원자로건물, 제어건물, 터빈발전기건물 및 복합건물이 있음.
- 원자로건물에는 일체화된 원자로 및 격납용기 집합체 4기, 피동보조급수계통(PAFS), 피동격납용기냉각계통(PCCS) 및 20년 저장용량의 사용후연료저장조가 배치됨.

제어건물은 원자로건물과 인접하게 배치되며, 통합주제어실(IMCR), 기술지원센터(Technical Support Center; TSC) 및 전기설비 등을 수용함. 복합건물은 출입통제구역, 방사성폐기물처리구역, 방사성기기공작실, 운전지원센터(OSC) 등으로 구성됨. 터빈발전기건물은 터빈, 발전기, 전기스위치기어 및 배전 설비를 수용하며 주증기 및 급수배관의 길이를 최소화할 위하여 원자로건물과 인접하게 배치됨.

- 원자로건물은 내진범주 I 철근콘크리트 구조물로 매트기초, 전단벽 및 슬래브로 구성되며, 구조적 기능 이외에도 안전 관련 계통 및 기기들이 외부 자연현상으로부터 방호역할을 할 수 있도록 설계됨. 건설공기 단축을 위해 원자로건물 내 일부 구조물에 강판콘크리트(Steel-Plate Concrete) 구조가 고려됨.
- Turbine Island는 터빈 및 발전기와 전력 배분을 위한 전기 스위치기어 구역을 수용하는 건물들로 구성되며 Nuclear Island에 인접하게 배치되어 있음. 터빈발전기건물은 터빈 비산물에 의한 안전관련 계통 영향을 방지하도록 배치되어 있고 주변 구조물인 원자로건물과 제어건물에 지진으로 인한 영향이 발생하지 않도록 내진 간극을 갖는 내진범주 II 구조물임.
- 전력계통은 주 발전기를 작동시켜 생성된 전력을 발전소 내 모든 전기적 보조 부하장치와 외부 송전망에 제공하며 소외와 소내 전력계통으로 구분됨. 소외전력은 스위치야드(Switchyard, SWYD)계통과 송전계통으로 구성되며, 소내전력은 발전소 주전력(Main Power, MP)계통, 발전소 보조전력(Auxiliary Power, AP)계통, 직류배전/계측제어전력(DC Distribution/Instrumentation & control Power, DC/IP)계통으로 구성됨.

나. 국내외 개발동향

(1) 국내현황

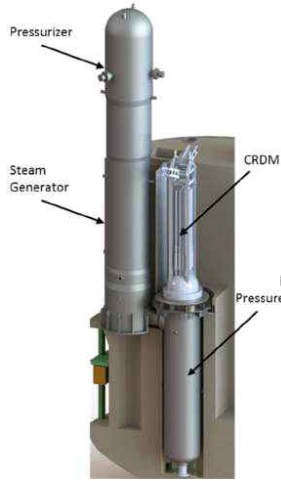
SMART (한국원자력연구원-한국수력원자력(주)-K.A.CARE 한국·사우디)	
	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - (성능) 전기출력 약 110 MWe(열출력 약 365 MWt)로 대형 원전(1,000 MWe 이상)의 약 1/10 수준의 소형 원전 - (안전성) 일체형원자로 설계를 통해 배관파손 사고 위험성을 줄이고, 전원 없이 자연의 힘으로 작동하는 안전시스템을 적용해 노심용융 방지 - (활용성) 전력 생산뿐만 아니라 해수담수화, 지역난방, 공정열 공급 등 다양하게 활용이 가능한 다목적 원자로 - (고유기술) SMART는 국내 원자력 기술을 집대성하여 독자기술로 개발하고 해외 기술에 의존하지 않았기 때문에 수출에 제약이 없음 • 개발 현황 <ul style="list-style-type: none"> - '97년 개발에 착수하여, SMART 기본설계 및 검증을 완료하고 일체형 원자로 중 세계 최초로 표준설계인가 획득('12.7) - '18년, 사우디 내 시범원자로(FOAK Plant) 건설을 위한 'SMART 건설전 설계(PPE)' 완료(예비안전성분석보고서 등 작성) - 사우디 내 SMART FOAK호기 건설 및 제3국 추가수출 등을 위해 PPE 사업 결과물에 대한 KAERI-한수원-K.A.CARE 공동 표준설계인가 신청('19년) - 캐나다 오일샌드 탄소제로 열증기공급 시장 진입을 위해, 앨버타주와 SMART 협력 MOU 체결('23.4월)
i-SMR (한국수력원자력(주)-한국원자력연구원, 한국)	
	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - (혁신 설계)노심손상빈도(CDF)가 대형원전 대비 1/1000로 낮아 사고 저항성 향상, 무봉산 노심설계로 CVCS 계통 축소 및 액체폐기물 감소, 내장형 제어봉구동장치 적용으로 제어봉 이탈사고 배제 - (전력공급) 대형원전 대비 초기 투자비용 부담이 작아 전력 그리드가 작은 국가의 신규 발전원은 물론 노후 화력발전 대체, 고립·해안·도서지역의 분산발전 등의 발전원으로서의 활용 범위 확대 - (다목적 활용) 각 모듈에서 발생하는 공정열을 담수, 지역 난방, 수소 생산 등에도 활용 가능 • 개발 현황 <ul style="list-style-type: none"> - '28년 표준설계인가 획득, 2030년 첫호기 사업 착수를 통해 2034년 혁신형 SMR의 최초 상업운전에 이르는 사업화 전략 추진 - '21년부터 '23년까지 한수원, 원자력(연) 및 주요 민간기업들이 참여하여 혁신형 SMR의 개념 및 기본설계 수행 (한수원 주관)

(2) 국외현황

본 절의 국외 현황 자료는 원자력정책 Brief Report 2022-02호(통권 64호), '소형모듈원자로(SMR)해외 기술개발 동향'에 기반하여 작성되었음.

NuScale (NuScale Power社, 미국)	
 <p>※ 출처: NuScale Power</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 모듈당 77 MWe의 모듈화·일체화·단순화 가압경수로형 SMR(12개 모듈 가능) - 미국 정부의 전폭적인 지원 아래 개발되어, 전 세계에서 개발 중인 SMR 중 기술적·사업적 측면에서 가장 앞서있다고 평가되는 SMR - 핵연료 농축도: 4.95% 이하, 재장전주기: 24개월, 설계수명: 60년 • 개발 현황 <ul style="list-style-type: none"> - 50 MWe 모듈에 대한 NRC의 최초 설계승인(Design Certificate) 완료('20.8월) - 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('20.10월) 및 2029년 미국 아이다호국립연구소(INL) 부지에서 NuScale 최초 모듈의 운영을 목표로 함. - 77 MWe 모듈에 대한 NRC 표준설계인가(SDA) 사전 신청 활동 및 CNSC VDR Phase 2 진행 중
BWRX-300 (GE-Hitachi社, 미국·일본)	
 <p>※ 출처: GE-Hitachi</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 고장 발생 시, 초기 7일 동안 어떠한 조치없이도 안전이 보장되는 300 MWe급 일체형 비등경수로형 SMR - 1955년부터 원자로 개발을 시작한 GE社가 개발하고 미국 NRC가 인증한 ESBWR(232)을 기반으로 설계한 SMR - 핵연료 농축도: 4.95% 이하, 재장전주기: 12~24개월, 설계수명: 60년 • 개발 현황 <ul style="list-style-type: none"> - Fermi Energia社와 에스토니아에 BWRX-300을 건설하기 위한 경제성 평가 등 협력 MOU 체결('21.3월) - Cameco社, Synthos Green Energy社 등과 폴란드에 BWRX-300 건설 및 우라늄 핵연료 공급망 구축 가능성 평가를 위한 MOU 체결('21.9월) - 온타리오발전회사(OPG)는 캐나다 Ontario주 Darlington 부지에 2028년까지 BWRX-300을 건설하기로 결정('21.12월) - NRC 인허가 사전 신청 활동 및 CNSC VDR Phase 2 진행 중

SMR-160 (Holtec International社, 미국)



※ 출처: IAEA (2020.9.)

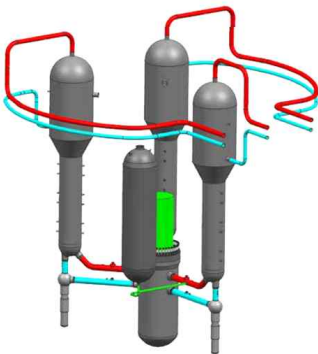
• 주요 특징

- 고유 안전성과 단순성을 핵심 목표로 설계한 160 MWe급 가압경수로형 SMR
- Holtec社는 원자력 산업용 기자재 제작 및 원전 해체 관련 기술·경험을 확보 중이며 SMR 설계·제작 인프라 보유
- 핵연료 농축도: 4.95% 이하, 재장전주기: 24개월(가변), 설계수명: 80년

• 개발 현황

- 미국 에너지부의 차세대원자로 실증사업(ARDP)으로 향후 7년간 1억 1,600만 달러 지원금 수령('20.12월)
- Mitsubishi社와 디지털계측 및 제어시스템 설계 용역 체결('22.3월)
- 현재 Holtec社가 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)



※ 출처: Rolls-Royce

• 주요 특징

- Rolls-Royce社 중심의 컨소시엄이 개발 중인 영국 대표 470 MWe급²³³⁾ 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(BEIS)로부터 지원금 2.1억 파운드 수령('21.11월)
- 압력용기 등 핵심 기기 제작을 위한 공장 부지 선정 절차 돌입('22.1월)
- 영국원자력규제국(Office for Nuclear Regulation)의 일반설계평가(Generic Design Assessment) 과정 돌입('22.3월) 및 2024년 중반 완료 예정
- 2029년 첫호기 운영이 목표이며, 부지는 북부 Wales 또는 서부 Cumbria 지역이 유력

ACP100 (China National Nuclear Corporation (CNNC), 중국)	
 <p>※ 출처: IAEA (2020.9.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 중국핵공업집단공사(CNNC)를 중심으로 2010년부터 개발한 125 MWe급 일체형 가압경수로형 SMR - 핵연료 농축도: 4.95% 이하, 재장전주기: 24개월, 설계수명: 60년 • 개발 현황 <ul style="list-style-type: none"> - 국제원자력기구(IAEA)의 안전성검토(Generic Reactor Safety Review) 세계 최초 통과('16년) - 중국국가발전개혁위원회(NDRC)의 ACP100 실증로 건설계획 승인('21.6월) - 중국 남부 하이난성 창장 지역에 세계 최초 상업 육상용 경수형 SMR인 링룽 1호 건설공사 착수('21.7월) - 높이 15 m, 무게 450톤에 달하는 격납용기 하단부 설치 완료('22.2월)
KLT-40S (OKBM Afrikantov社, 러시아)	
 <p>※ 출처: IAEA (2020.9.)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 해양 부유식 발전함 'Akademik Lomonosov'호에 2기가 탑재되어 세계 최초로 상업운전을 시작한 35 MWe급 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)	
 <p>※ 출처: EDF</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 특징 <ul style="list-style-type: none"> - 프랑스전력공사(EDF) 컨소시엄이 개발 중인 340 MWe급(170×2) 일체형 가압경수로형 SMR - 핵연료 농축도: 5% 이하, 재장전주기: 24개월, 설계수명: 60년 • 개발 현황 <ul style="list-style-type: none"> - 개념설계 착수('19.9월) - Tractebel社²³⁴⁾의 개념설계 단계 합류('22.5월) - 프랑스(ASN)·체코(SUJB)·핀란드(STUK) 원자력규제기관 협력 인허가 검토 대상으로 선정('22.6월) - 2025년까지 기본설계 완료 목표 - 2030년까지 설계 고도화, 인증 및 공급망 확보 목표 - 2030년 실증로 건설 착수 목표

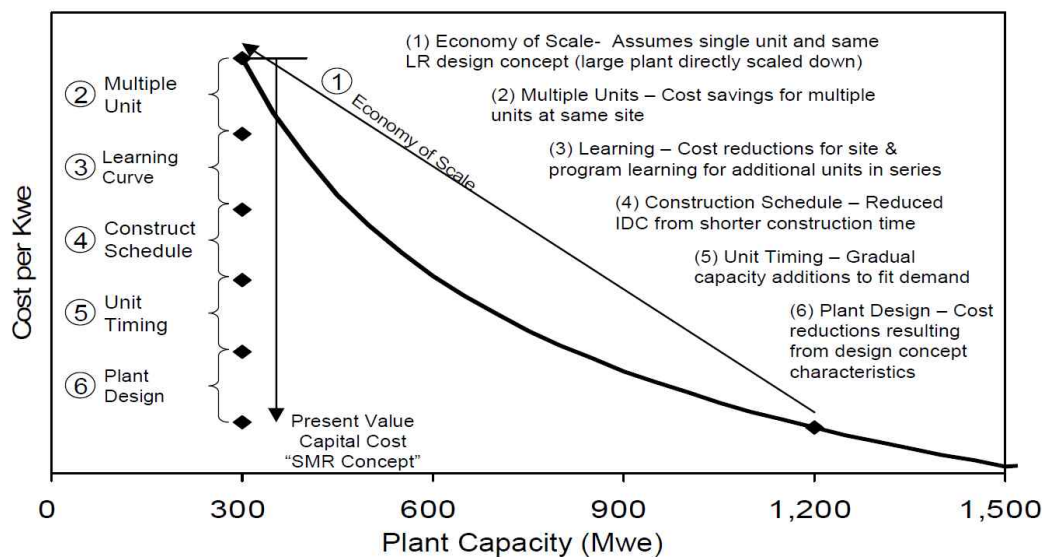
232) Economic Simplified Boiling Water Reactor (ESBWR): 1,500 MWe급 비등경수로

233) 전기출력을 443 MWe에서 470 MWe로 상향('21.5월)

234) 1862년 설립된 벨기에 국적의 세계적인 기업으로, 원자력을 포함한 다양한 분야의 컨설팅 및 엔지니어링 서비스 제공

다. 국내 기술개발 및 사업화 전략

현재까지 주로 운영되고 있는 대형 원자력발전소는 경제성 측면에서 장점을 가지고 있지만 시스템이 너무 복잡해지면서 건설비 및 건설공기가 크게 증가하고 인허가 리스크가 커지는 단점을 가지고 있음. 또한 기존의 화력발전소 대비 높은 출력에 따라 별도의 대용량 송전설비를 건설해야 하는 단점이 존재하며 이러한 배경에서 대형원전이 기존에 추구해 온 ‘규모의 경제’에서 소형화, 모듈화, 표준화를 통한 경제성 달성이 새로운 방안으로 대두되고 있음. 아래 그림은 소형원전이 다수모듈, 건설공기 단축, 순차적 증설 등을 통해 대형원전 수준의 경제성을 달성할 수 있음을 보여주고 있음.



※ 참고문헌: Mycoff, C.; Carelli, M.; Petrovic, B.; Miller, K. Strategies to Demonstrate Competitiveness of SMRs in World Markets; In Methodologies and Decision Criteria for Demonstrating Competitiveness of SMRs; IAEA: Vienna, Austria, 2007.

○ 원자력발전소에 사용되는 기기는 매우 높은 수준의 신뢰성이 요구되며 철저한 검증시험을 거쳐 공급되며 이에 따라 타 산업분야에서 사용되는 기기에 비해 상대적으로 공급가격이 높으며 기기 공급사 입장에서는 매우 매력적인 산업임. 하지만 대형원전의 경우 규모가 너무 커서 지속적인 발주가 나오기 어려우며 최근 전 세계적으로 전력산업이 정부 주도에서 민간 주도로 변화되고 있는 상황에서 파이낸싱이 힘들어지고 있어 결과적으로 대형원전 건설사업은 지속적으로 유지되기보다는 전력 용량 증가 필요에 따라 비정기적으로 발생하며, 기기 공급사가 안정적으로 기기 제작 설비를 유지하기 어려움.

- 반면에 소형모듈원전(SMR)은 목표로 하는 경제성 목표를 달성할 경우 기기의 표준화 및 모듈화 수준이 높고, 지속적인 발주가 용이함. 비정기적으로 발주되는 1400 MW 대형 원전 건설사업을 170 MW SMR 사업으로 대체할 경우 8기로 대체할 수 있으며, 기기 공급사 입장에서는 좀 더 안정적이고 지속적인 공급체계 유지가 가능하다는 장점이 있음.

(1) 기술개발 현황 및 추진방안

- (일반현황) 우리나라는 '90년대부터 정부·민간의 기술개발 투자로 현재 세계 수준의 원자력 에너지 기술개발 능력을 보유하고 있음.
- 국내 원자력 산업은 독자기술로 2002년 APR1400을 개발하였으며, 국내 건설 및 해외 수출에 이어 유럽과 미국에서 설계인증을 획득하여 해외수출을 위한 기반을 확보함.
- 원전 설계뿐 아니라 제조 및 시공 분야에서도 세계 최고의 경쟁력을 보유함.
- 1997년 한국형 소형원자로 기술개발에 착수하여 2012년 세계 최초로 소형원자로 SMART의 표준설계인가를 취득하며 소형원자로 원천기술을 확보하였음.
- (SMART) 1997년부터 독자적으로 개발해온 고유 원자로 모델로, 출력은 대형 상용원전의 10분의 1 수준임. 특히, 원자로 1차 계통의 주요 기기들이 대형 배관으로 연결된 일반 상용원전과 달리 SMART는 주요 계통 기기를 한 개의 압력용기 안에 설치하여 대형 배관 파단사고 가능성을 원천적으로 없애고 안전성을 획기적으로 향상시킨 일체형 원자로임.
- 2009년부터 SMART 기술검증 및 표준설계인가 획득사업을 추진하여 2012년 7월에 일체형원자로 중 세계최초로 인허가를 획득하였음. 2015년 3월에 한국과 사우디아라비아 간의 '한-사우디SMART 동반자협력 양해각서'를 체결하고, 양국 간 첫 협력단계로 SMART 건설전설계(PPE)사업을 수행하여, 사우디 건설예정부지 환경조건을 반영한 SMART 기본설계 및 기술검증을 완료한 바 있으며 이후 양국은 향후 사우디 건설 시 인허가 부담을 완화하고 제3국 추가 수출 추진 시 국제적 신뢰도 증진 및 홍보 차원에서 국내 인허가 기관으로부터 안전성 인증이 필요한 것으로 판단하여 현재 SMART100 표준설계변경인가사업을 수행중임. 최근 SMART를 활용하여 캐나다 앨버타 오일샌드 채굴에 필요한 열증기를 공급하기 위한 협력사업을 추진 중.
- (혁신형 SMR) 국내 원자력 산업은 SMART 원천기술을 활용하고 APR1400의 상용기술을 접목하여 2030년대 세계시장을 선점하기 위한 SMR의 혁신기술 개발을 추진 중임.

- 혁신형 SMR 개발로 세계 최고 수준의 기술력을 유지·강화하고 국내 원자력산업 내 제조·시공 분야 중소·중견기업의 해외 진출 확대 및 생태계 활성화를 도모함.
- 최근 주요국의 SMR 기술개발 가속화로 한국형 소형원자로 SMART로는 2030년 이후의 발전분야 노후화력 대체 시장에서 수출경쟁력 확보에 한계가 있어 이를 극복하기 위한 수출전략형 SMR 개발 필요하게 되었으며 SMART 개발을 통해 확보한 원천기술을 활용하고 안전성·경제성·유연성 향상을 위한 혁신기술개발을 통해 글로벌 SMR 시장에서 경쟁력 확보가 필요함.



그림 2.1.7 혁신형 SMR 개발 전략

- 혁신형 SMR의 경제성 제고를 위한 핵심기술은 다음과 같음.
 - (자율운전) 고수준 원자로 자율운전: 주제어실 상주 운전원 수를 최소화하고 기존 운전원이 수행했던 직무를 자동화하거나 단순화하여 혁신형 SMR의 유지보수 비용을 최소화함.
 - (모듈화) 건설공기 단축을 위한 모듈화: 다양한 기능을 수행하는 구조물, 계통 및 시스템의 일부분을 부품으로 사전에 제작 후 현장에서 조립 및 완성함.
 - (통합형제어실) 다수모듈 통합제어: 혁신형 SMR에 적용되는 다수 원자로모듈을 한 공간의 제어실에서 통합 감시 및 제어하는 기술로 4개 모듈을 3인의 운전원만으로도 원자력 발전소 운영이 가능함.
 - (디지털트윈) 혁신형 SMR 디지털트윈 구축 및 운영: 실제 시스템과 가상원자로 내의 시스템을 동기화하여 실제 시스템의 계측값을 토대로 가상원자로내의 시스템을 통하여 실제시스템의 상태를 감시·진단·예측하여 고장 및 사고 발생 전에 선제적으로 유지·보수가 가능하도록 구현함.
 - (혁신제조기술) 전자빔용접, PM-HIP, 다이오드레이저클래딩: 일체형 원자로압력용기 제작기간을 획기적인 단축시키고, 가동중 검사 요건을 완화함.
- 그 외에 혁신형 SMR의 경제성 제고를 위한 추진 전략은 다음과 같음.
 - 소형원전 장점을 최대한 활용하여 모듈 극대화, 즉 “현장건설” 개념에서

“공장제작/현장조립” 개념으로의 시공 패러다임 전환을 시도함.

- 대형원전 대비 계통 개수 축소, 건설기간 획기적 단축에 따른 건설 중 발생하는 금융이자 감소를 통해 시공비 및 기자재 비용 절감 및 피동형 개념설계 적극 반영을 통한 원전 계열 시스템을 최적화함.
- 단순화된 피동안전계통 적용 및 안전등급 전력계통 필요성 제거를 통해 Q class 기기의 비안전등급화를 추진함.
- 장주기 운전 설계로 핵연료 교체주기를 현행 18개월에서 24개월로 연장함.
- 소내 소비 전력 감소 및 정비기간 단축으로 이용률 상승에 따른 발전원가를 절감시킴.

○ (비전력분야) 소형모듈원자로는 기존의 대형원전이 담당해 온 전력생산뿐만 아니라, 뛰어난 안전성 및 유연성을 바탕으로 하여 해수담수화, 지역난방, 수소생산 등과 같은 비전력분야가 유망한 적용분야로 고려되고 있음.

- SMART를 개발해 오는 과정 중 해수담수화 및 지역난방 분야 적용을 위한 연구개발이 추진되었으며, SMART는 인구 10만 명 규모의 도시에 100 MW의 전기와 4만 톤의 담수를 공급할 수 있음을 확인함.

* 이창건 박사는 한국이 갖고 있던 세계 유일의 발전 겸 해수담수화용 SMART 원자로에 냉동, 냉방 기능을 추가했으며, 그것을 전기에 의존하지 않고 SMART 원자로의 고온·고압 증기로 냉매를 직접 압축, 팽창시켜 에너지를 절약하는 방법을 만들어내어 특허를 획득하였음.

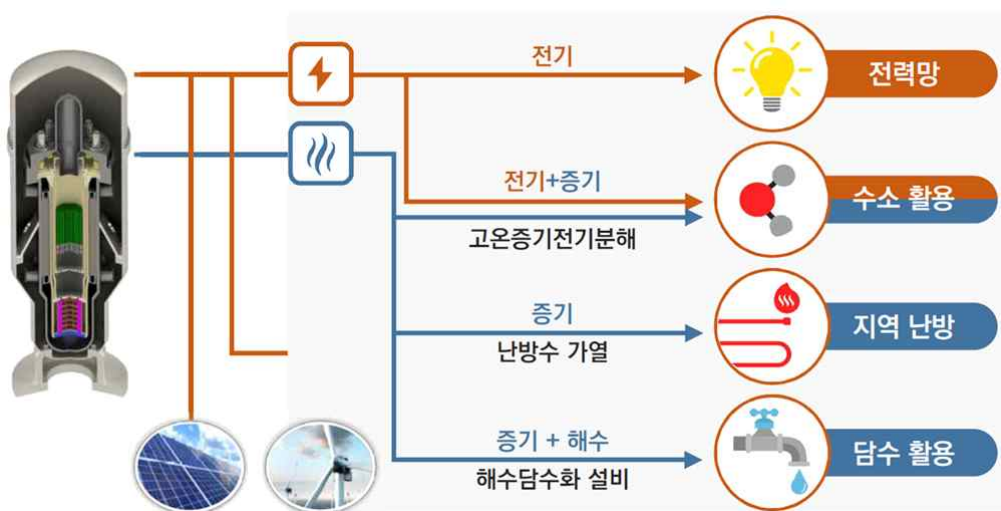


그림 2.1.8 SMART의 비전력분야 활용

- 경수형 SMR의 유력한 적용분야 중 하나가 청정 수소생산임. 원자력을 활용하여 수소를 생산할 경우 지구 온난화 가스를 발생시키지 않으면서 청정한 수소를 생산할 수 있음. 기존에는 자체적으로 700℃ 이상의 증기를 만들 수 있는 고온가스로 위주로 수소생산이 연구되었지만 최근 미국 뉴케일사에서 증기 압축-가열 방법을 활용하여 경제적으로

수소를 생산할 수 있다고 발표한 바 있음.

* NuScale touts potential use of SMRs for steam production, WNN 01 June 2023

- 최근 국내에서 논의되고 있는 소형모듈원자로를 적용한 스마트 넷제로 시티는 지속가능한 에너지 혁신과 친환경 에너지 기반 도시 경제혁신을 통해 탄소중립 실현을 위한 에너지 혁신 플랫폼이 될 수 있음. SMR 기반 스마트 넷제로 시티는 SMR, 태양광, 연료전기를 통해 활용 도시에 전기, 열, 수소를 동시에 공급하며 SMR과 신재생에너지의 조화를 통한 안정적인 전력공급 및 탄소중립 실현 가능함.

(2) 사업화 추진방안

① SMART

- '23.4월 한국원자력연구원은 캐나다 앨버타주(州) 정부와 SMART를 포함한 SMR을 앨버타주 탄소 감축에 활용하기 위한 상호협력 협약을 체결함.

- 이번 상호협력 협약은 앨버타주 오일샌드* 채굴 지역에 스마트 건설 가능 여부 및 타당성 등을 논의하기 위해 추진됐으며 양측은 이번 협약을 바탕으로 스마트 건설 타당성 확인, 나아가 인허가 획득에 필요한 정보를 사전에 공유할 계획임.

* 오일샌드 : 지하에서 생성된 원유가 지표면 근처까지 올라오던 중 수분이 빠지면서 돌, 모래와 함께 굳은 형태의 원유

- 캐나다 정부는 2030년까지 탄소 배출을 2005년 대비 40% 수준으로 감축하기 위해 탄소세를 도입하는 등 기후변화 대응에 적극적으로 나서고 있으며 이러한 탄소 감축 목표를 달성하기 위해 온타리오, 뉴브런즈윅, 서스캐처원, 앨버타 등 4개 주는 SMR 도입 전략을 발표하고 실증 배치 계획을 추진 중.

- 특히 앨버타주는 오일샌드 산업 및 화력 발전소에서 발생하는 대량의 CO₂를 감축하기 위해 SMR 도입 방안을 수립하고 실증 배치를 위한 전략을 추진해 왔으며, 이번 한국원자력연구원과의 협력을 통해 오일샌드 산업의 탄소 감축을 기대하고 있음.

- 양국은 이번 상호협력 협약을 통해 스마트 앨버타 사업을 추진하는 양국 기업들의 논의와 협력을 가속화 할 수 있을 것으로 기대하고 있으며 특히 현대엔지니어링을 비롯한 우리나라 기업들은 이미 앨버타 오일샌드 채굴에 스마트를 활용하는 사업을 추진해 오고 있어 이번 상호협력 협약은 이러한 기업들의 활동을 촉진할 것으로 전망됨.

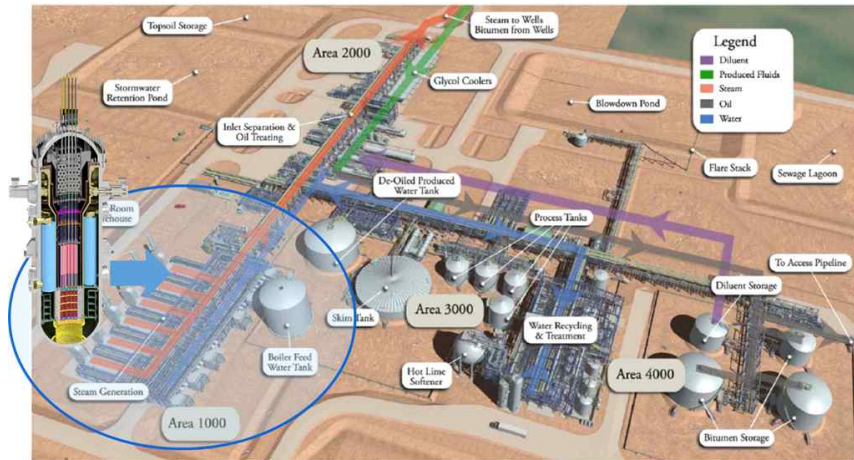


그림 2.1.9 Oil Sands Recovery Technology (신현돈, 인하대학교, 2022)

○ (수출 추진 전략) 정부의 원전수출을 위한 정책·재정 지원 및 민간기업 협력 강화를 통해 SMART 기술 특성(용량, 설치지역, 용도, 안전성, 경제성, 배치시기 등)에 적합한 건설시장 개척, 즉, 한수원과 민간기업의 사업개발 경험 및 네트워크를 충분히 활용하여 SMART 기술 특성에 적합한 시장을 대상으로 마케팅 및 사업모델 개발 중.

- SMART 해외건설에 대한 국내 기업의 지분투자를 유도함.
- 턴키 방식의 SMART 원자로 공급보다는 도입국 상황에 따라 IP 지분을 공유하고, 원자력인프라 개발을 지원하며, 가능한 범위에서 건설·제작을 현지화하는 방식 등을 감안하여 수출경쟁력을 극대화하는 수출 전략을 추진함.
- 해외의 SMART 첫호기 건설을 위한 국내 사업자 및 도입국에 대한 정부 지원이 필요함. SMART 건설을 위한 기기 공급망이 충분히 준비되지 않은 상태에서 첫호기는 후속 호기에 비해 기기제작설비 구축 등 추가 비용이 요구될 수 있음. 이러한 재정적 부담을 사업자가 모두 감당하기 어렵기 때문에 이에 대한 지원과 도입국의 상황을 고려한 재정·정책 지원이 필요함. SMART 첫호기 건설 추진 시, 국내 기기제작업체 참여와 연동하여 해당 사업 건에 대한 대출프로그램 등이 지원내용이 될 수 있으며, 장기적인 관점에서 국내 SMART 기기공급망 구축을 위한 비용 중 일부를 정부가 지원하여 가격 경쟁력 확보하는 것도 고려해 볼 수 있음. 또한 첫호기 도입국에 대한 차관 제공 등 적절한 금융지원도 필요할 수 있음.
- 우리나라 원전 수출을 위한 민·관합동 지원체계인 원전수출전략 추진위원회가 발족하였음. 이를 통해 SMART 수출 촉진을 위한 관계부처 간 정책 조정, 자금조달 방안 확보 등 해외 수출경쟁력 강화를 위한 정부차원의 주요 정책 추진이 필요함.

② i-SMR

- 미국, 유럽 등 선진국에서는 공장 설립의 조건으로 탄소중립, RE100 등 저탄소 전력공급방안 조치를 요구하고 있는 추세임. 이에 대규모의 에너지 공급이 필요한 제조공장 또는 산업 플랜트에서는 저탄소 전력 공급원인 i-SMR이 좋은 대안이 될 수 있을 것으로 판단되며, 더 나아가 이러한 용도의 SMR 수요는 지속적으로 증가할 것으로 예상됨.
- 기존 대형원전이 특정국가를 대상으로 집중적인 마케팅을 수행하여 성과를 창출하는 것과 다르게 혁신형 SMR은 용량과 프로젝트 비용이 작은 점(투자용이성이 높음)을 고려하여 다양한 국가를 상대로 다차원적 전략을 가지고 동시다발적인 마케팅을 수행할 필요가 있음. 따라서, 적기에 많은 성과를 창출하기 위해서는 국내 글로벌 기업과 다음과 같은 다양한 방식의 협력이 필요함.
 - 국내 글로벌 기업이 해외에 건설하는 공장의 전원공급원으로 혁신형 SMR을 건설하는 방식.
 - * 세계적으로 국내 글로벌 기업이 추진중인 해외공장을 유치하고자 다양한 인센티브를 제공하는 등 치열한 경쟁을 벌이고 있음. 혁신형 SMR 사업 추진주체와 국내 글로벌 기업이 협약을 맺고 해외 공장의 전력공급원으로 i-SMR을 활용한다는 조건을 받아들이는 국가 및 도시에 해외 공장을 건설하는 조건을 바탕으로 마케팅 추진.
 - 해외 플랜트 건설 프로젝트와 연계하여 i-SMR 프로젝트 수주 추진하는 방식
 - 석유화학, 담수 등 해외 건설 플랜트 프로젝트에서 전력공급 및 공정열 공급목적의 i-SMR 건설을 추진하는 방식
- 해외국가의 공장 및 산업단지 연계 SMR 건설 계획
 - CANADA SMR 로드맵에 따르면 캐나다는 210 MWe 규모의 Heat와 Power의 공급이 필요한 Oil Sand 공장, 평균 25~60 MWe의 전력이 소모되는 High Temperature Steam을 필요로 하는 중공업 산업단지에 SMR 건설을 통해 에너지를 공급할 계획을 수립하고 실현하고자 노력하고 있음.
 - NuScale에서 발행된 연구논문 ‘NuScale Energy Supply for Oil Recovery and Refining Applications’에 따르면 NuScale SMR은 에너지 소모가 많은 산업인 석유 정제 플랜트에 사용할 경우 에너지 사용 측면에서 여러 가지 장점이 있다고 기술하면서 적극적인 기술개발과 산업현장에 적용이 필요하다고 주장하고 있음.
- 국내 글로벌 기업이 적극적으로 i-SMR 마케팅 활동참여를 유도하기 위해 해당기업이 프로젝트 수주에 기여하는 경우 다음과 같은 혜택 부여 가능
 - 해당 프로젝트 수주에 대한 기여도에 따라 공동 사업권 부여를 통한 수익공유
 - 건설 사업권 보장 및 기자재 우선공급권 부여 등

- 대형원전 수주경험(UAE)을 활용하고 및 현재 추진 중인 대형원전 수주활동(체코, 폴란드 등)과 연계한 혁신형 SMR 마케팅을 추진하여 시너지를 창출할 예정임. 더불어 대형원전과 다른 소형원전의 특성을 고려한 다차원적인 수출전략을 개발함.

(3) 장애요인 및 대책방안

- 우리나라는 지속적인 국내건설 및 해외수출을 통해 대형원전 분야에서 세계 최고 수준의 경쟁력을 가지고 있으며, '97부터 개발에 착수하여 세계 최초로 표준설계인가를 획득한 SMART와 최근 개발에 착수한 i-SMR 등을 통해 SMR 분야에서도 우수한 경쟁력을 가지고 있어 최근 기후 위기 해결을 위한 게임체인저로 떠오르고 있는 SMR 분야에서 세계적인 기술경쟁력을 가지고 있음.
- 이러한 기술우위를 바탕으로, 최근 방산분야(K2, K9, FA50 등)의 성공과 유사한 해외수출 성과를 달성하기 위해서는, 인공지능, 혁신제조, 디지털트윈과 같이 수출경쟁력을 획기적으로 향상시킬 수 있지만, 기술개발을 위해 민간기업들이 개별적으로 확보하기 어려운 대규모 시험설비 구축/운영이 필요한 경우 정부의 적극적이고 지속적인 지원이 요구됨.
 - 개발 초기부터 SMR 도입에 관심을 가진 국가와 적극적인 네트워크 구축 및 협력사업 추진을 통해 그들의 니즈를 설계에 반영하고, 기술개발 완료 후 수출로 이어질 수 있도록 해외 협력 방안을 수립해나가는 것.
 - 개발 초기단계부터 설계, 제작, 시공 분야 전문기관의 적극적인 논의와 긴밀한 상호협력을 통해 한국형 SMR 경쟁력 강화를 위한 방안과 로드맵을 개발하는 것.
 - SMR은 개발자는 많으나 기기를 공급할 수 있는 기업은 많지 않으므로 SMR 파운드리 기업 육성을 통해 반도체의 TSMC처럼 제조에 특화된 기업 전략을 수립하는 것. 중소기업도 파운드리 전략이 가능하나 글로벌 시장에 진출하기는 쉽지 않으므로 정부가 SMR 파운드리 육성을 위한 초격차 기술개발을 지원하고, 글로벌 네트워크를 갖춘 대기업이 중소기업과 같이 글로벌 SMR 공급기지를 구축해야 함.
- 최근 SMR 분야에서의 건설을 위한 협력은 정부보다는 민간부문들이 주도하고 있지만, 국내에서는 아직 한전, 한수원을 제외한 민간부문이 SMR 해외수출을 위한 주도적인 역할을 하기에는 부족한 상황임. 따라서 우선은 정부-공공기업-민간부분의 SMR 얼라이언스 활성화를 통해, 수출사업 창출과 해외협력을 추진하는 것이 필요하며 장기적으로 민간부분의 주도적인 역할 수행을 위한 국내 원자력사업 체계에 대한 논의가 필요함.
 - 현재 원자력안전법은 공기업이 원전 사업을 수행하는 것을 전제로 하고 있으며 원전 건설과 운영의 주체를 사실상 공기업으로 한정하고 있음. SMR은 전력 생산 외에 여러

가지 다른 상업적 용도로 사용할 수 있으며 민간기업이 주관해 SMR을 건설·운영할 수 있도록 하기 위한 지원이 필요함.

- SMR의 해외수출을 위해서는 많은 수입국가가 국내 실증로 경험을 요구하고 있어, SMR 해외수출을 촉진하기 위한 수단으로서 국내 첫호기 건설 방안에 대한 초기 단계 논의가 필요함.
- 한국원자력연구원은 3.5세대 SMR인 SMART와 i-SMR뿐만 아니라, 4세대 SMR인 액체금속로, 초고온가스로, 용융염 원자로에 대한 원천기술을 확보하고 있으며 이와 동시에 혁신기술을 실증하기 위한 대규모 인프라 또한 구비하고 있어, 우리나라가 개발하고자 하는 SMR이 세계 최고 수준의 경쟁력을 가지기 위한 종합적인 연구/개발/검증의 수행이 가능하므로 이를 적극적으로 활용하는 것이 필요함.
- 우리나라는 혁신형 소형모듈원자로(i-SMR)의 기본설계를 진행 중이며, '26년 인허가(표준설계인가) 신청을 계획하고 있어 현행 대형 상용 원자로 중심의 안전규제기준의 변화 필요성이 있음.
- 소형·모듈형·다목적의 SMR 설계특성을 고려한 규제체계 정비와 함께 안전규제기술 개발 추진이 필요하며, 이에 따라 원안위는 규제기관-개발자에게 모두 새로운 시도임을 고려하여 SMR 설계개념과 규제요건 등에 대한 상호 이해를 제고할 수 있는 절차를 마련하고 있음.
 - SMR을 미래 원자력안전분야의 도전과제로 인식하고 SMR 개발 수요에 적극적 대응을 위해 규제방향을 선제적으로 제시하고, 다양하게 개발 중인 SMR의 설계특성을 포괄할 수 있는 규제체계를 만들어 나가야 할 시점임.
- '23.4월 원안위 「소형모듈원자로(SMR:Small Modular Reactor, 이하 'SMR') 안전규제 방향 선포식」을 개최하고, SMR 안전규제 방향을 처음으로 공개한 바 있음.
 - 전 세계적으로 SMR 개발경쟁이 가속화되고 있는 가운데, 원안위는 SMR의 기술수준 및 설계특성을 고려한 안전성 확인방향을 개발자에게 선제적으로 제시함으로써 규제차원의 적극적 준비를 이행하고, 최상의 안전성 확보라는 안전규제의 목표를 일반 국민들에게 널리 알리기 위해 SMR 안전규제 방향을 마련함.
- 원안위는 표준설계인가 신청 이전 기초설계자료 등에 대한 검토를 통해 (1) 규제기관-사업자 간 설계개념과 규제요건 등에 대한 상호 이해를 제고하고, (2) 규제기관의 제도정비 등 제반 준비를 통해 향후 효과적이고 효율적인 본심사 수행 기반을 마련, (3) 사업자의 기술개발 불확실성을 최소화하기 위해 '사전설계검토'를 추진함.
 - i-SMR 규제준비단 등 규제자-개발자 간 소통 체계를 활용하여 예상되는 인허가 현안을

초기 설계단계부터 사전에 검토함.

- 사전설계검토를 통해 규제현안을 식별하고 안전성 확인 방안을 논의·검토하여 현안별 규제 입장을 마련함.

(4) 개발 로드맵

① SMART

- SMART는 대형원전의 약 10분의 1 규모인 110 MWe 출력을 내며, 원자로 주요 기기를 단일 용기 안에 배치한 일체형 원자로로서, 순수 토종기술로 세계에서 가장 먼저 개발된 대한민국 대표 소형원자로임.

- 대형원전과 동일한 Stand Alone 설계(콘크리트 격납용기)를 채택하여 100 MW급 소규모 전력시장 및 비전력분야(오일샌드 등)에서 경쟁력을 확보함.

- 특히 캐나다 앨버타 오일샌드 시장은 SAGD(Steam Assisted Gravity Drainage)에 요구되는 용량이 SMART와 유사하여, SMART의 장점(기술검증 완료, 조기 상용화 가능, 인허가 시현성 등)이 극대화될 수 있음.

* 캐나다는 자국 산업 활성화 및 탄소제로 달성을 위해 해외 SMR 건설 지원 정책을 추진 중이며, 이를 적극적으로 활용하여 SMART 건설을 추진함.

- (SMART 캐나다 수출) CNL 부지 프로그램을 통한 첫호기 건설 및 앨버타 오일샌드 탄소제로 증기공급 플랜트 진출

- (SMART 경쟁력) 가동 중인 경수로 인허가 체계에 맞춰 설계되어 인허가 장벽이 낮으며, 경쟁노형보다 빠르게 상용화가 가능
- (현지 협력) 한-캐 양국 기업들이 투자한 캐나다 특수목적법인(SPC)을 조속히 설립하여 현지 맞춤형 전략 수립 및 마케팅 활동 추진

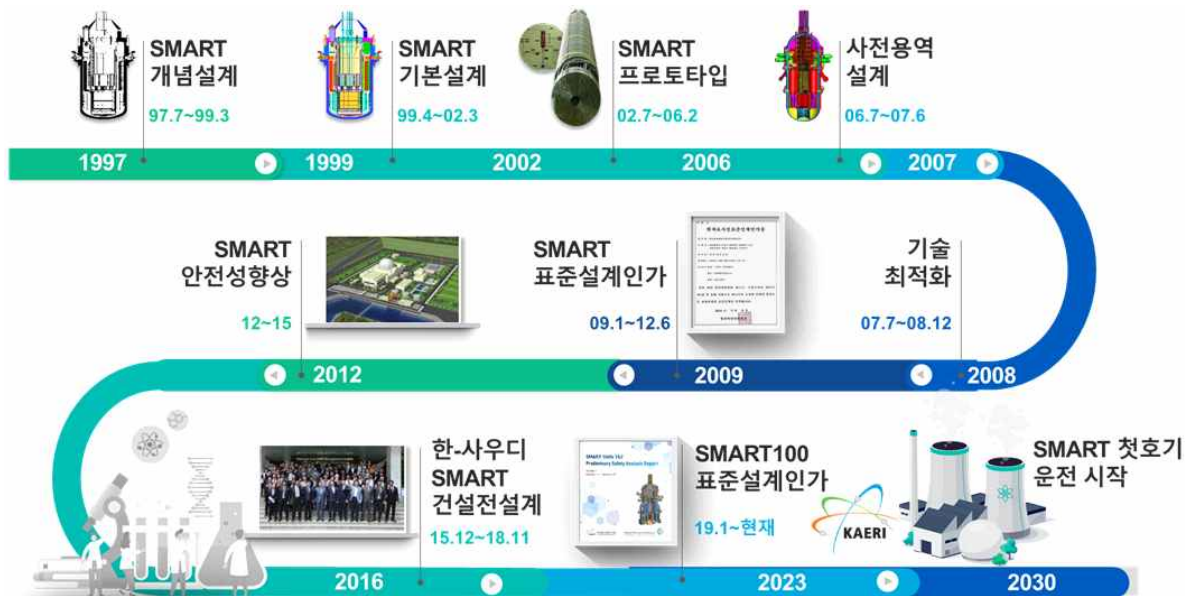


그림 2.1.10 SMART 개발 경과 및 향후 계획

② i-SMR

- i-SMR은 '28년 표준설계 취득을 바탕으로 '30년대 노후화력 대체 전력시장 진입을 위해 개발에 착수한 혁신형 원자로'
 - (목표 시장) 탄소배출 저감 정책, 노후화 등으로 폐쇄될 전 세계 600 MWe급 석탄 및 가스발전소 대체용 소형원자로 시장
 - * 혁신형 SMR 4기 결합($170 \times 4 = 680$ MW)을 통해 대체 가능
 - (재생에너지) 재생에너지와 연계, 분산형 전원 등 대형원전이 진입하기 어려운 가능한 모든 원전 시장에 진입 목표
 - (경쟁력 확보) 세계적 수준인 경수로 기술력과 공급망을 총 결집하여 신속한 상용화 및 원가 경쟁력 유지
- 2030년대 세계 SMR 시장에서 요구되는 안전성·경제성·유연성을 갖춘 혁신형 SMR의 핵심기술을 개발하고 2028년까지 표준설계 및 기술 검증을 완료하는 '혁신형 SMR 기술개발사업' '23년 착수
 - 글로벌 SMR 시장에서 안전성·경제성·유연성을 향상시켜 수출 사업을 도모하고, 2028년 시장경쟁력 있는 혁신형 SMR 핵심기술을 개발하여 표준설계·기술 개발·검증을 수행함
- '혁신형 SMR 기술개발사업'의 쏠분야를 설계, 혁신, 제조의 3개 분야로 구성하고, 각 분야별로 세부사업이 구성됨.
 - (설계분야) 혁신형 SMR의 표준설계 완성을 목표로 노심, 계통, 종합설계의 3개

설계분야로 구성하여 사업을 진행함.

- (혁신기술분야) 설계분야의 계통 및 핵심기기 등의 기술검증과 표준설계에 필요한 혁신요소기술개발로 구성함.
- (제조기술분야) 원자로 노심의 핵심부품 및 핵연료 개발과 적기의 원자로 제조에 필요한 혁신적인 제작공법을 개발하여 혁신형 SMR의 건설공기 24개월 달성을 위해 필수적인 기술을 개발함.



그림 2.1.11 혁신형 SMR 기술개발사업의 추진체계 및 추진일정

2. 블록형 소형모듈원자로

블록형 소형모듈원자로에는 해외 노형 중 영국 롤스로이스 SMR, 미국 AP300이 있으며 국내 노형으로는 반디-60S가 있음.

가. 원자로 개념

(1) 개발목적 및 활용 예상 분야

① 모듈화 또는 표준화가 가능한 발전소 소형화를 추구하여 조기 시장진입 목적

② 육상 및 해양용

③ 활용 예상분야

- 육상 전력생산(석탄 화력발전 등의 대체)
- 공정열 및 지역난방
- 수소 생산
- 담수 전력
- 에너지 저장
- 해양 전력선 또는 상선 추진

(2) 노형 개념 및 특성

① 블록형 SMR의 경우 기존의 운전 중인 대형 경수로의 성숙된 기술 최대한 활용

② 기존 입증된 기술의 최적 사용 및 소형화를 통하여 최소한의 인허가 부담 경감 및 경제성 제고로 조기 건설 가능성 제고

③ 기존 루프형의 단순 소형화 또는 연결 배관을 완전히 제거한 블록형 형태

④ 기본적인 노형 개념은 기존의 운전 중인 경수로 특성과 차이 없음.

나. 국내외 개발동향

블록형으로 분류할 수 있는 SMR 노형으로는 대표적으로 다음과 같음.

- BANDI-60 (KEPCO E&C, South Korea)
- AP300 (Westinghouse, USA)
- Rolls-Royce SMR (UK)

※ AP300과 Rolls-Royce SMR은 기존의 루프형의 PWR를 소형화한 개념임.

(1) 국내현황

- ① 블록형 SMR 노형으로 BANDI-60이 대표적이며, 대형배관 없이 원자로와 증기발생기를 노즐-노즐로 직접 연결하는 반-일체형 원자로 형태
- ② 대규모 전력시장보다는 도서지역 또는 격·오지 전력공급, 난방·공정열, 담수화 공급 및 상전 추진력 등의 틈새시장 목표
- ③ 조기 시장진입을 목표로 입증된 가압경수로 기술의 최적 활용 가능

주요 특성은 다음과 같음.

○ 안전성을 높이기 위해 무봉산노심, 내장형 제어봉구동장치, 블록형 설계 개념 등 진보된 기술 도입

- (원자로) 대형냉각수상실사고를 배제하는 블록형 가압경수로형 SMR
- (출력/설계수명) 열출력 200 MWth, 전기출력 60 MWe / 60년
- (핵연료 및 노심) 농축도 5% 이하의 17×17 봉형 UO₂ 사용, 유효핵연료 길이: 2 m, 재장전 주기: 4~5년
- (반응도 제어) 무봉산 노심설계*로 설계의 단순화·간결화 추구 및 내장형 제어봉구동장치 설계로 제어봉이탈사고 배제

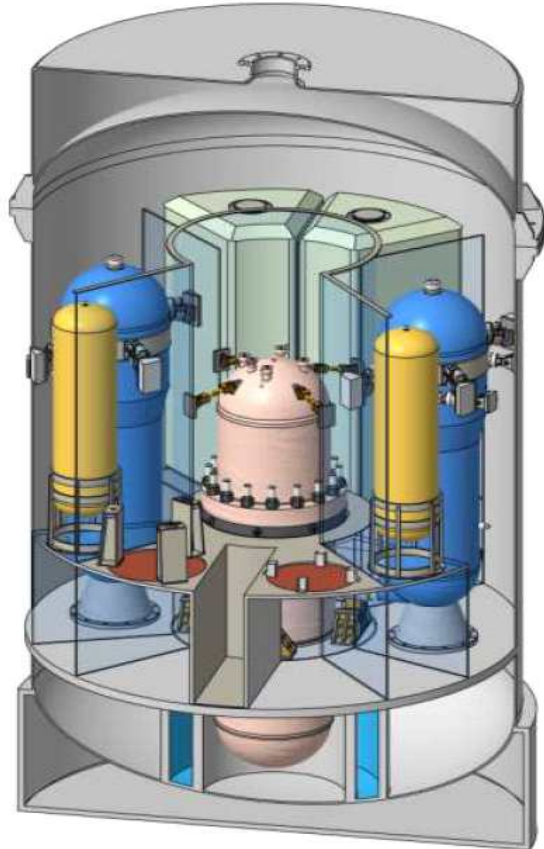
* 봉산에 의한 부식 문제 원천적으로 배제, 복잡한 봉산계통 제거로 설계 단순화

- (안전계통) 외부 동력이나 운전원 조치 없이도 원자로의 안전을 보장할 수 있도록 완전 피동형 설계 채택
- (노내계측계통) 원자로용기 상부탐재형*을 채택하여 안전성 향상

* 중대사고 시 노심용융물에 의한 원자로용기 하부의 계측기 파손 사고 배제

표 2.1.1 BANDI-60 주요 설계 특성

원자로	블록형(semi-integral) (노즐-노즐 직접연결)
출력	기본: 60 MWe (200 MWt) 응용: 30~200 MWe
냉각재순환	강제순환 (캐드모터)
노심	17X17 봉형 UO ₂ ≤5% U-235 유효핵연료 길이 2 m 4~5년 재장전주기
반응도제어	무붕산 / 가연성독물질 IV-CEDM/ MTC 기반
증기발생기	나선형 과열증기 (관형 SG option)
안전주입	피동
잔열제거	피동(안전) / 능동보조(비안전)
설계수명	60년



(2) 국외현황

① AP300 (WEC, Westinghouse Electric, USA)

- AP300은 중국에 건설된 AP1000을 소형화한 버전으로서 조기 건설이 가능한 것을 목표로 하는 노형임.
- 열출력 900 MWth의 AP300은 1-loop의 PWR(일체형 또는 블록형으로 분류 어려움)임.
- 일부 단순화 및 모듈화 추구하고 기존 입증된 설계 활용으로 인허가 부담을 줄이고, 조기 시장진입을 목표로 하는 것이 특징임.

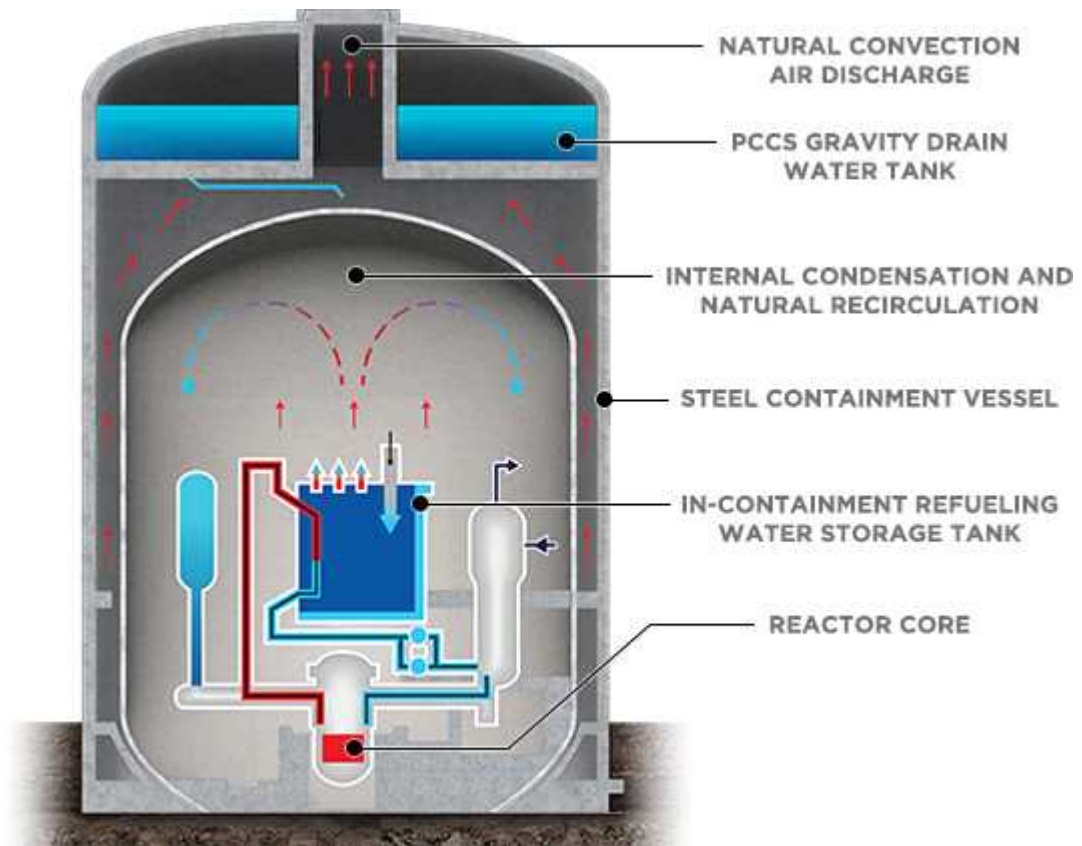


그림 2.1.12 AP300 원자로 개념도

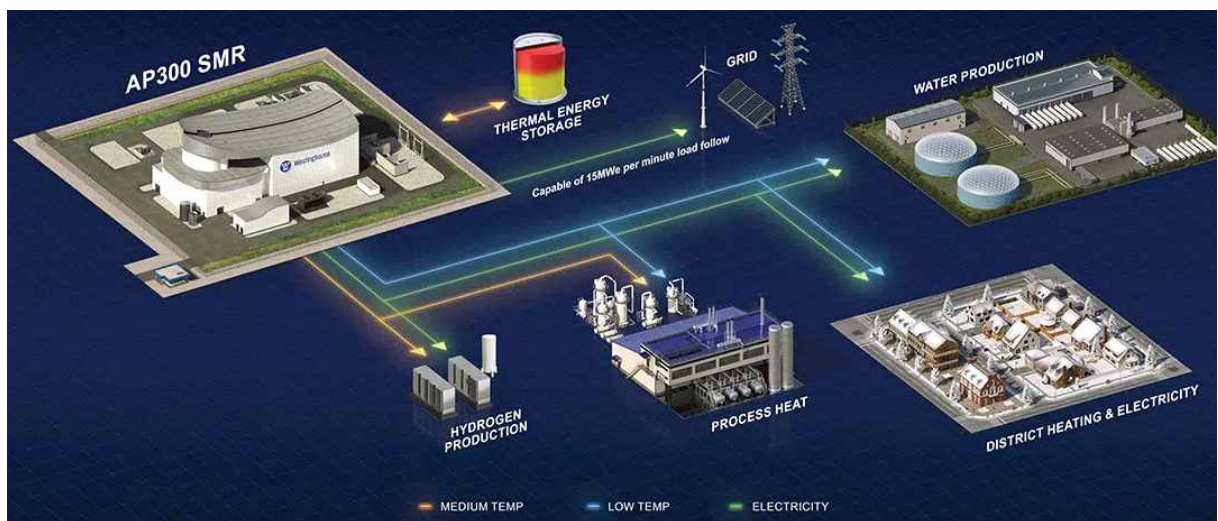
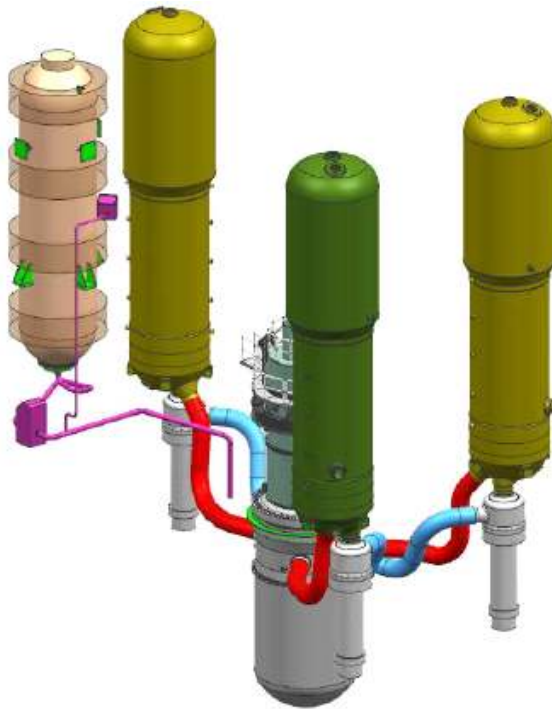


그림 2.1.13 AP300 활용 개념도

② Rolls-Royce SMR (UK)

- 역국의 Rolls-Royce SMR은 육상용의 기존 경수로의 기술을 기본으로 육상용으로 개발중이며, 육상용 기저전력, 공정열 생산 등에 활용을 목표로 하고 있음.
- 전기출력 470 MWe (열출력 1,358 MWth)의 3-loop의 PWR임.
- 3대의 U-tube 증기발생기와 3대의 RCP(sealless design)로 구성되어 강제순환이 가능함.
- 철제 격납용기(steel containment)를 채택함.
- 원자로는 4.95% 이하의 표준 UO_2 연료를 채택하고 있으며, 반응도 제어에는 가돌리니아 독물질 사용함.
- 무봉산 방식을 채택함.
- 2026년에 초도호기 건설을 예상하고 있으며, 2030년 사업운전을 계획하고 있음.



Reactor Coolant System

그림 2.1.14 Rolls-Royce SMR RCS 개념도

표 2.1.2 Rolls-Royce SMR 설계특성

Parameter	Value
Technology developer, country of origin	Rolls-Royce SMR Ltd, United Kingdom
Reactor type	3-loop PWR
Coolant/moderator	Light water
Thermal/electrical capacity, MW(t)/MW(e)	1 358 / 470
Primary circulation	Forced circulation
NSSS operating pressure (primary/secondary), MPa	15.5 / 7.8
Core inlet/outlet coolant temperature (°C)	295 / 325
Fuel type/assembly array	UO ₂ / 17 × 17 Square
Number of fuel assemblies in the core	121
Fuel enrichment (%)	<4.95
Refuelling cycle (months)	18
Core discharge burnup (GWd/ton)	50 – 60
Reactivity control mechanism	Control rods
Approach to safety systems	Passive and Active
Design life (years)	60
Plant footprint (m ²)	40 000
RPV height/diameter (m)	7.9 / 4.2
RPV weight (metric ton)	150
Seismic design (SSE)	>0.3g
Fuel cycle requirements/approach	Open cycle
Distinguishing features	Modular approach facilitating rapid and cost-effective build.
Design status	Detailed design

다. 국내 기술개발 및 사업화 전략

(1) 기술개발 현황 및 추진방안

해양용 SMR인 BANDI-60은 2016년부터 1차계통(NSSS) 개념정립을 시작으로 기본적인 최상위 요건 개발을 완료하고 후속 기술개발을 진행 중임.

○ 해양 SMR 계통 설계 및 핵심요소기술개발 진행 중

- (설계 개선 및 계통 단순화) 주요기기 및 계통의 최적 설계 및 배치를 통한 성능 향상
- (피동안전 성능 향상) 원자로/피동안전계통/금속격납용기 등 설계구조의 열수력 상호작용에 따른 피동안전 특성 및 냉각 성능 변화 해석
- (구조 최적화) 원자로의 선체 배치, 핵연료재장전 및 저장 구조배치 등 선박 탑재 개념 설정
- (2차계통) BOP 영역의 개념 평가를 위하여 조선해양업계와 협업
- (기술융합 연구) 재생에너지 간헐성 보완, 열 저장 및 활용, 그린수소 생산 등 원자력-재생 융합 에너지 시스템 구축 연구

(2) 사업화 추진방안

- (틈새시장) 대규모 중앙집중식 전력망 외에, 섬, 원격 해안소도시, 자원탐사기지, 해양플랜트 등의 분산전원, 난방 및 공정열, 해수 담수화 등 소형원자로가 적합한 다양한 분야의 특수시장을 사업 목표로 설정함.

(3) 장애요인 및 대처방안

(4) 개발 로드맵

- 개념 및 기본설계 완성을 목표로 기술개발 진행 중임.

- 2030년대 해외시장 진출 목표로 SMR 요소기술 실증 및 해양 부유체 탑재기술을 개발 중임.

- 원자력, 조선해양 협업을 통한 시장 맞춤형 SMR 상세설계

제2절 가압중수로형(PHWR)

1. 개량형 소형 중수로

○ 중수로²³⁵⁾는 U-235를 농축시켜 핵연료로 사용하는 다른 원자로(PWR, BWR, AGR, RBMK, HTGR)와 달리 천연우라늄(0.7% U-235)을 핵연료로 이용하며, 천연우라늄 이용에 따른 중성자 연쇄반응을 위해 냉각재와 감속재로 중수(heavy water)를 사용함. 천연우라늄을 연료로 사용하기 때문에 연소도가 적을 수밖에 없고, 따라서 가동 중 연료교환을 용이하게 할 수 있도록 노심이 다수의 수평 연료채널로 구성됨. 각각 연료채널 내부에는 핵연료 다발이 장입되고 1차 냉각수가 연료로부터 열을 제거하여 2차 계통에 전달함. 그림 2.2.1은 중수로 노심과 일차계통의 설계 개념을 보여줌.

- 가동 중에 연료를 교체하는 중수로는 주기적인 연료교체를 위해 장시간 가동을 중지해야 하는 경수로 등과 비교하여 상대적으로 높은 이용률(capacity factor)로 원자로를 가동할 수 있는 이점이 있음. 또한 천연우라늄 이용에 따른 연료비 자체의 낮은 비용²³⁶⁾의 장점도 있고, 경수로에서 연소되어 나온 사용후연료의 재처리를 통해 생산되는 순환 우라늄 또는 저농축우라늄 등을 사용할 수 있는 연료 유연성 관점의 장점도 있음.
- 중수로는 두 개의 독립적인 정지계통²³⁷⁾ 및 비상노심냉각계통(ECC: Emergency Core Cooling)과 다수의 공학적 설비를 통해 사고 발생 시 안전을 확보할 수 있도록 설계되었고, 심층 방호(defence in depth) 개념을 도입하여 방사선 위험으로부터 작업자, 주민, 환경을 보호할 수 있도록 가동됨.

○ AS-PHWR(Advanced Simple Pressurized Heavy Water Reactor) 개념은 천연우라늄(natural uranium) 및 중수(heavy water)를 이용하여 전기를 생산하는 기존 중수원전의 고유한 이점(inherent advantage)을 활용하되, 기존 중수로 설계와 달리 노심을 수직으로 구성하여 기존 중수로에서 발생하는 복잡한 부품(피더관, 수평 압력관 등)의 노후화에 따른 안전문제를 해결할 수 있는 소형 원자로 개념임.

235) 중수로는 보통 가압중수로 (PHWR: Pressurized Heavy Water Reactor)를 의미하며, 캐나다에서 기술이 개발되어 우리나라를 포함하여 중국, 아르헨티나, 루마니아 등에서 가동되고 있는 중수로는 700MWe 출력을 갖는 CANDU-6 (CANadian Deuterium Uranium) 중수로임. 인도에서는 독자적으로 개발한 중수로를 가동하고 있음.

236) 천연우라늄 사용에 따라 연료비용은 낮지만, 냉각재와 감속재로 고가의 중수를 사용해야 하므로 전체적인 연료 경제성이 낮다고 확인할 수 없음.

237) 두 개의 정지계통 (shut down system)이 독립적으로 작동함. SDS1은 노심에 수직으로 설치된 정지봉 (shut off rod)으로 정지신호 (trip signal)가 발생하면 중력에 의해 노심 내로 투하되어 원자로를 정지시키며, SDS2는 노심에 수평으로 설치된 관을 통해 정지신호가 발생하면 가돌리늄 (gadolinium) 분사를 통해 원자로를 정지시킴.

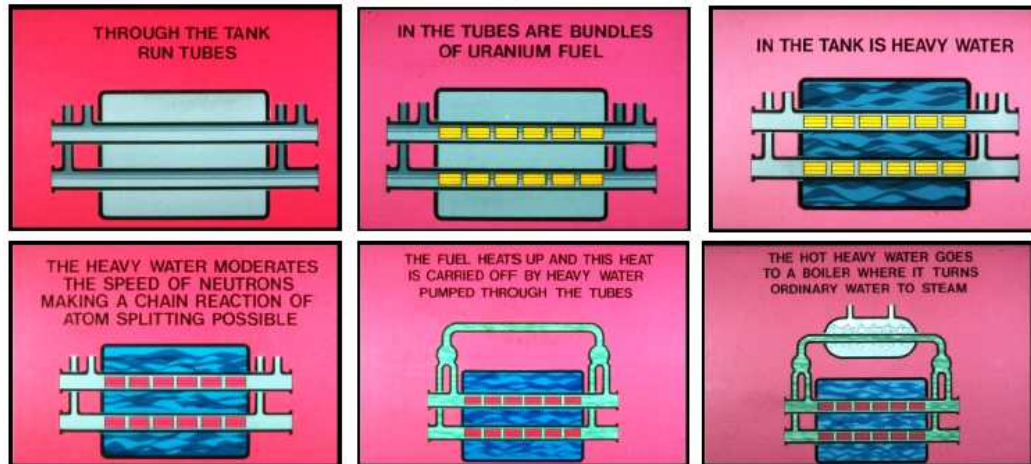


그림 2.2.1 중수로 노심 및 일차계통 설계 개념 [2.2-1]

가. 원자로 개념

- 아르헨티나의 Atucha II 원전²³⁸⁾은 중수로 이지만 경수로와 마찬가지로 노심이 수직의 압력용기(pressure vessel)로 설계되어 피더관, 압력관 등의 복잡한 노심 부품이 제거되어 있으며, 저농축우라늄²³⁹⁾을 연료로 이용하여 연소도가 기존 중수로 연료에 비해 약 2배 정도 증가하는 장점도 가지고 있음.
- 기본적으로는 농축 우라늄 연료의 공급이 어려운 환경을 대상으로 하지만, 기존의 중수로와 마찬가지로 SEU(slightly enriched uranium), MOX(mixed oxide), RU(recycled uranium) 연료 등과 같은 다양한 연료도 수용할 수 있도록 설계하고, 천연우라늄 연료가 갖는 낮은 연소도 한계도 극복할 수 있음.
- AS-PHWR는 최근 많은 관심을 받으며 연구되고 있는 이중냉각 환형연료(annular fuel), 사고저항성 연료(accident tolerant fuel) 등과 같은 개량형 연료 개념을 활용할 수 있도록 고안되었고, 피동안전계통을 적용함으로써 근본적인 안전성 향상에 중점을 두어 안전 관련 사회적 수용성을 높일 수 있도록 설계하였음.
 - AS-PHWR은 1960년대에 설계되어 적용된 수평 연료채널(horizontal fuel channel) 노심이 갖는 단점을 대부분 보완한 설계 개념으로, 피더관 등의 복잡한 노심 부품에 발생하는 조기 노화 문제 그리고 아직 해결되지 않은 많은 안전문제 등을 극복할 수 있는 방법을 제시함.
 - 기본적인 AS-PHWR의 설계 개념을 적용하여 600 MW의 열출력 용량을 갖는 AS-PHWR 설계안이 제안됨. 출력 용량은 유동적으로 설계할 수 있으며, 각각 기능하는

238) 아르헨티나에서 가동 중인 Atucha II 원전은 Siemens/KWU가 설계한 중수로이며, 캐나다의 CANDU 노형과 달리 노심이 수직으로 구성되어 있음.

239) Atucha II 중수로에서 이용하는 저농축우라늄 연료는 U 235 농축도가 약 0.85%로 14,000 MWd/tonU의 연소도를 가지며, 0.7% 천연우라늄 연료의 평균 연소도인 6500 MWd/tonU에 비해 약 2배의 연소도를 가짐.

독립 모듈을 통합하여 전체적인 원자로를 구성하도록 하였음.

- 주요 계통에 대한 기본적인 설계 개념을 소개하며, 향후 추가의 연구를 통해 세부적인 설계가 완료될 것으로 기대함. AS-PHWR의 주요 공정변수는 표 2.2.1과 같음.

표 2.2.1 AS-PHWR 주요 공정변수

MAJOR TECHNICAL PARAMETERS	
Parameter	Value
Reactor type	Advanced Simple PHWR
Coolant/Moderator	Heavy water/Heavy water
Thermal/Electrical capacity, MW(th)/MW(e)	600/200
Primary circulation	Natural circulation, pump backup
System pressure (MPa)	15
Core inlet/exit temperatures (°C)	250/325
Fuel type/assembly array	UO ₂ Annular/Isolator hexagonal
Number of fuel assemblies	98
Fuel enrichment (%)	0.7 (natural)
Fuel burnup (GWd/ton)	7 (prototype)
Fuel cycle	On-line refueling
Main reactivity control mechanism	Control rod, Poison injection
Approach to engineered safety systems	Passive, redundancy
Design life (years)	40
Plant footprint (m ²)	Not available
RPV height/diameter (m)	5/4
Reflector Vessel diameter/height (m)	6/5
Seismic design (g)	0.35
Distinguishing features	Annular fuel in reactor vessel isolator hexagonal assemblies; advanced safety features and accident tolerance
Design status	Conceptual

(1) 개발목적 및 활용 예상 분야

○ 농축 우라늄을 적용하는 PWR과 달리 저농축 우라늄, SEU, MOX, RU등과 같은 다양한

연료를 적용할 수 있는 중수로는 농축우라늄 연료제조가 어렵거나 비교적 천연우라늄 자원이 풍부한 국가에서 선호됨.

- 경수형 소형모듈원자로가 활용되는 난방, 수소생산, 전기생산 등에 동일하게 활용될 것으로 예상됨.

(2) 노형 개념 및 특성

○ 연료 개념 설계 (Conceptual Design of Fuel)

- 이중냉각 환형 핵연료 (Annular Fuel) [2.2-2]
 - 이중냉각 환형 핵연료는 체적 대비 높은 표면적율을 갖기 때문에 기존 연료 대비 더 많은 출력 밀도(power density)를 가질 수 있음. 환형 핵연료는 정상운전조건에서 동일한 출력 밀도를 갖는 기존 원통형 연료에 비해 최대 연료온도가 수백도 낮은 장점이 있지만, 환형 핵연료 내부 표면과 외부 표면에서의 갭 전도도 비대칭(gap conductance asymmetry) 등의 문제가 제기되기도 함.
 - 사고 시 수소 생성 등의 문제를 해결하기 위하여 사고저항성 연료 피복재(accident tolerant fuel sheath) 개념을 도입함.
 - 환형 핵연료는 기존 원통형 연료에 비해 낮은 평균 온도로 가동됨. 예를 들어 12.154 mm의 지름을 갖는 기존 중수로 연료 펠렛을 동일한 UO_2 부피를 갖는 내경 9,116 mm, 외경 15.193 mm의 환형 핵연료로 대체할 경우, 최대 연료 평균 온도는 그림 2.2.2와 같이 선출력 (linear power)에 따라 약 1,000°C 정도 차이가 발생함.
- 사고저항성 연료 (Accident Tolerant Fuel)
 - 지르칼로이 피복재 표면을 사전에 산화 처리하여 산화 반응이 발생하는 온도(반응 가속 임계값)를 증가시키는 사고저항성 연료에 대한 많은 연구들이 수행되고 있음. AS-PHWR도 이러한 사고저항성 연료를 이용하면 대량의 지르칼로이 사용에 따른 수소 발생 등의 문제를 해결할 수 있으며, 또한 UO_2 펠렛 표면에 대한 사전 산화처리를 통해 추가적인 사고저항성을 도출할 수도 있을 것임.

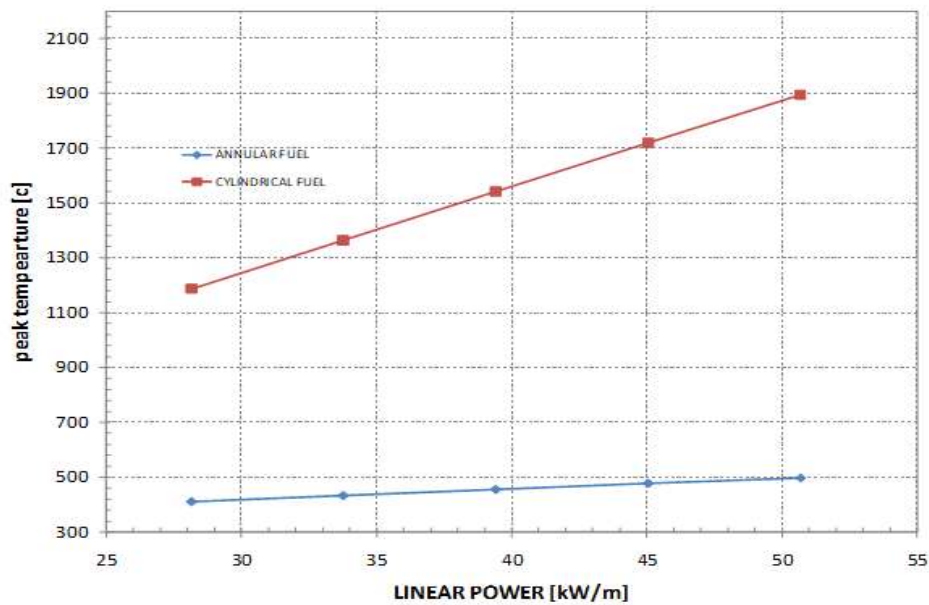


그림 2.2.2 기존 원통형 및 환형 핵연료 펠렛의 선출력에 따른 최대 온도 비교

○ 연료 집합체 개념 설계 (Conceptual Design of Fuel Assembly)

- 다양한 노심 및 연료 다발, 연료집합체에 대한 설계 옵션을 검토한 후, 그림 2.2.3과 같이 연료 집합체에 대한 최적 형상을 설계하였음. 수직의 육각형 매트릭스 안에 19개의 환형 핵연료다발을 배치하고 이를 이중벽의 측판(shroud)으로 감싸 감속재(moderator)와 열적으로 분리하도록 함. 이때, 감속재는 연료 집합체와 동일한 압력을 유지하며 다만 온도만 다름. 각각의 연료집합체 출력 그룹을 통한 유동은 일정 범위의 유동-출력 매칭이 유지되도록 하부의 공통 플레넘(common plenum)에서 제어됨.
- 열수송 계통(heat transport system)에서는 펌프를 사용하지 않고 자연 순환에만 의존하는 것을 고려하고 있지만, 개념 설계 단계에서는 우회 펌프(bypass pump)를 포함하도록 함. 압력 제어는 히터와 스프레이 조합을 이용하는 전통적인 가압기(pressurizer)를 이용함. 열수송계통(HTS, Heat Transport System) 압력은 감속재 계통과 공유되며 큰 용량의 감속재 탱크는 비상노심냉각수 탱크와 같은 기능을 담당함.
- 육각형의 연료 집합체는 육각 셀 패턴을 갖는 노심에 위치됨. 감속재는 냉각재와 열적으로 분리되어 있지만, 그림 2.2.4에 나타난 바와 같이 냉각수와 상호 연결되어 압력을 유지함.

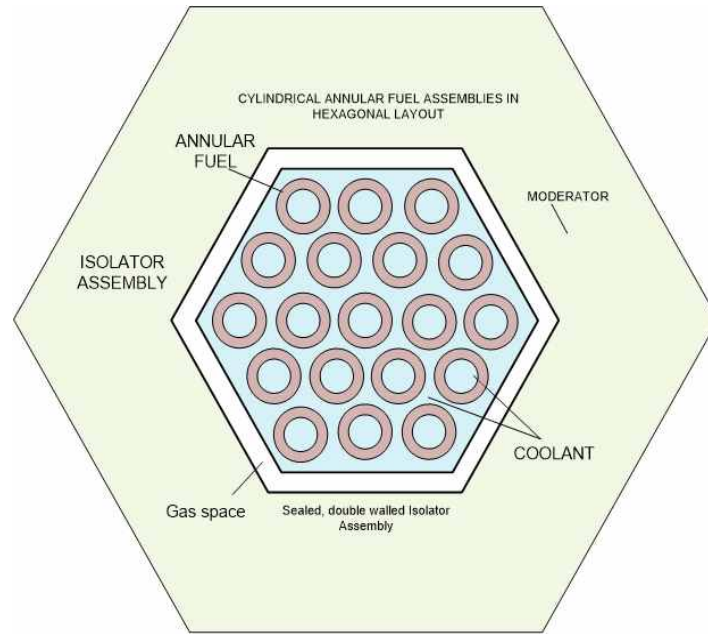


그림 2.2.3 AS-PHWR 연료집합체 설계 개념

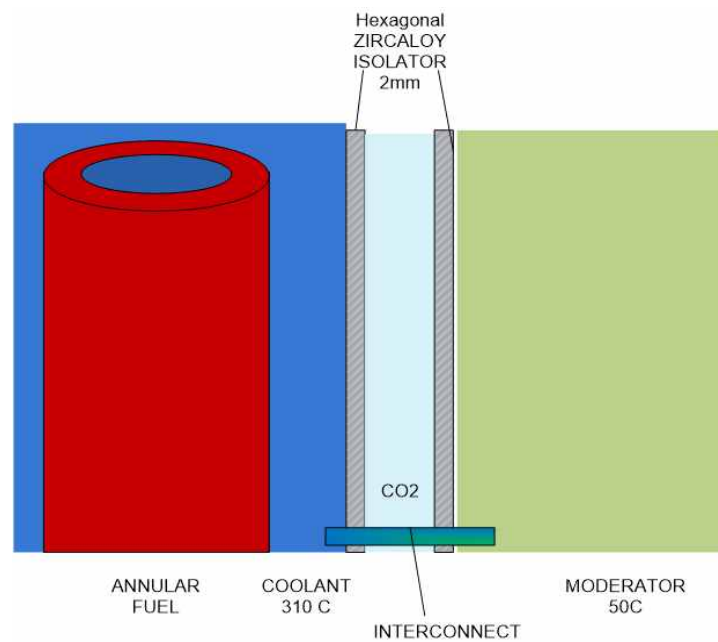


그림 2.2.4 냉각수 및 감속재 사이 개념도

○ 노심 개념 설계(Conceptual Design of Core)

- 동일한 압력용기 내부에 감속재와 연료집합체가 수직으로 위치하는 AS-PHWR 노심은 그림 2.2.5와 같음. 감속재와 냉각수는 동일한 압력을 유지할 수 있도록 노심 하단부에서 서로 연결되도록 설계되었음. 이때, 감속재 탱크는 피동 비상노심냉각(passive ECC)

기능도 동시에 가짐.

- 각각의 연료집합체에 대한 출력-유동 비율(power to flow ratio)을 맞추기 위해 입구 플레넘으로부터의 냉각수 유동이 연료집합체 인터커넥트를 통해 조절되며, 출구 플레넘에서 냉각수는 다시 혼합됨. 연료교환기를 이용하여 노심 상단에서 연료집합체의 인출/재장전/재배치 등의 작업이 수행됨.

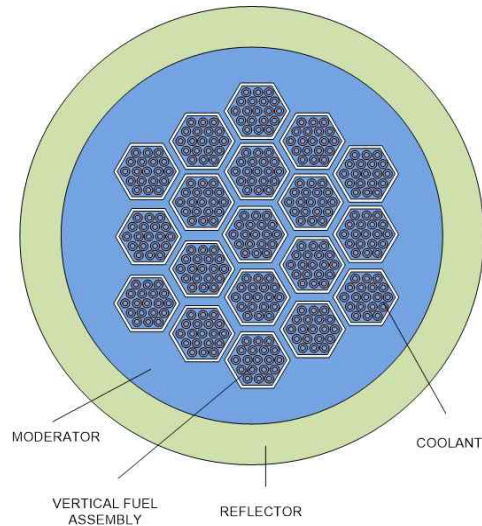


그림 2.2.5 연료집합체 배치 개념도

○ 열수송계통 개념 설계(Conceptual Design of Heat Transport System)

- 개략적인 열수송 계통은 그림 2.2.6과 같음. 일차 열수송계통(primary heat transport system)은 2개의 루프(loop)로 구성되어 2개의 증기발생기를 통해 고온 증기를 2차 계통으로 배출하고, 감속재 계통은 노심 하부에서 일차계통과 연결되어 동일한 압력을 유지함. 이때 시스템 압력은 약 15 MPa 정도이며, 피동 기능을 갖는 비상냉각계통도 노심과 연결되어 있음.

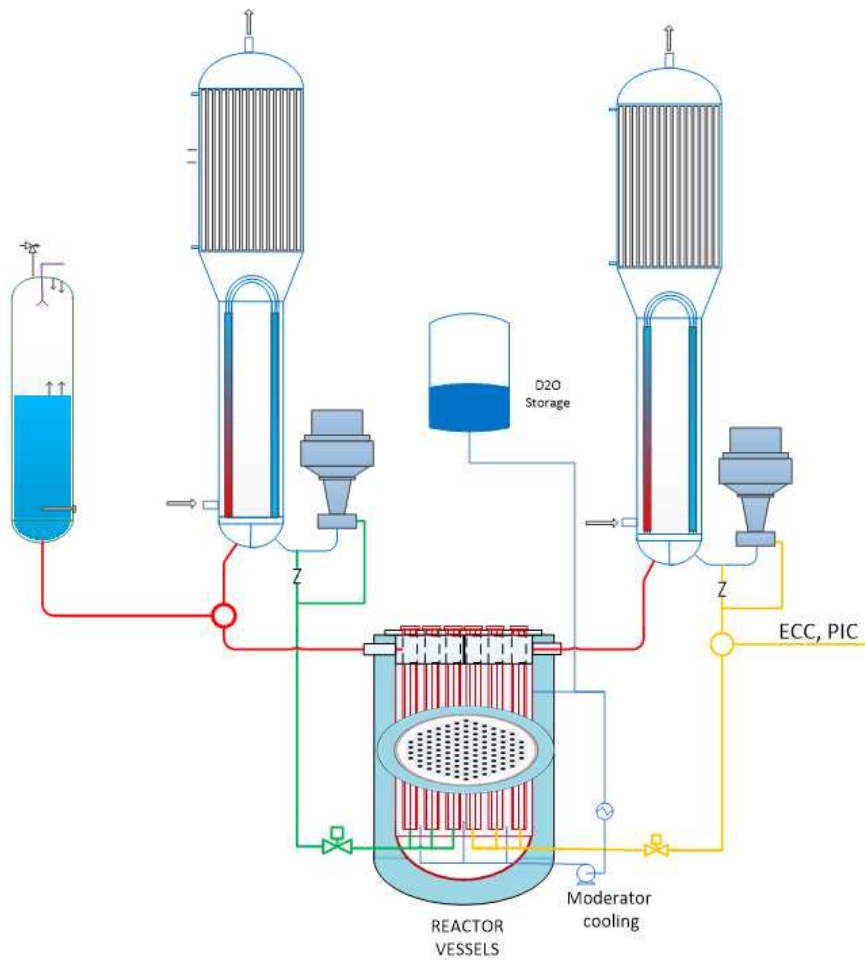


그림 2.2.6 AS-PHWR 열수송계통의 개념 설계

○ 원자로건물 개념 설계 (Conceptual Design of Containment)

- 원자로건물 (containment)은 이중벽으로 구성되며, 압력 억제를 위한 추가의 공간을 그림 2.2.7에 도식적으로 나타낸 것처럼 원자로건물 외부의 지하공간(external subterranean emergency vent volume)에 설계함.

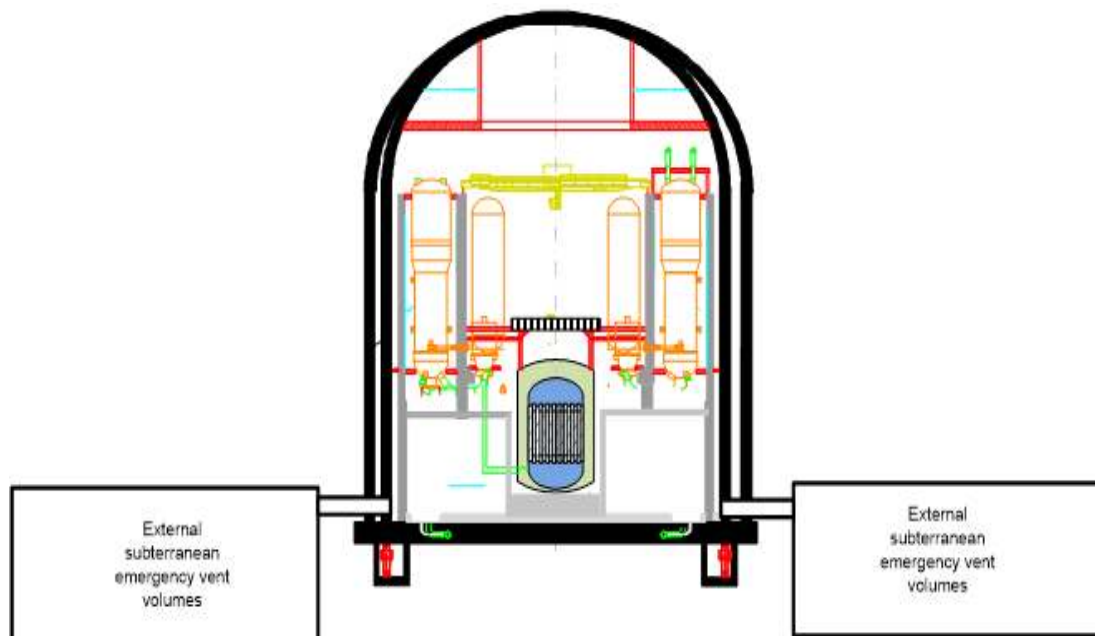


그림 2.2.7 원자로건물 개념 설계

제 3 장

비수냉각형 소형모듈원자로

제1절 액체금속냉각로형(LMR)

제2절 용융염원자로형(MSR)

제3절 가스냉각로형(VHTR)

제4절 열전도관(Heat pipe) 원자로

제3장 비수냉각형 소형모듈원자로

원자력발전소는 핵분열반응을 일정하게 유지하면서 생성되는 열에너지를 이용하여 전기를 생산하는 가장 안정적 열원(Heat source) 중 하나로, 일반적으로 원자로는 핵분열반응에 사용되는 중성자의 에너지 영역 및 냉각재의 종류에 따라 분류할 수 있다. 현재 국내에서 가동 중인 상업용 원자력발전소는 가압경수형 원자로(Pressurized Water Reactor: PWR)가 대부분을 차지하며 가압중수로(Pressurized Heavy Water Reactor: PHWR)도 일부 포함된다.

수냉각형 원자로(LWR)와 대비되는 미래형 선진원자로(Advanced Reactors) 개념으로서 제4세대 원자력시스템(Generation IV Nuclear Systems)에 대한 연구개발도 활발히 진행 중이며, 주로 물 이외의 냉각재를 사용하는 개념이므로 비수냉각형 원자로(Non-LWR type Reactors)라 불리기도 한다. 국내에서는 제4세대 원자력시스템 중에서 액체금속로, 가스냉각로, 용융염원자로 등에 대한 연구개발이 진행 중이다.

액체금속로(Liquid Metal-cooled Reactor, LMR)는 소듐, 납, 납-비스무스 등 액체금속을 냉각재로 사용하며 경수로에 비해 고에너지의 중성자가 사용된다. 고에너지 영역에서는 중성자의 핵분열반응단면적이 현저하게 감소하므로 고농축 핵연료를 사용하며, 이러한 특성으로 인해 경수로 사용후핵연료에 포함된 장수명 고독성 플루토늄과 마이너 악티나이드(MA)를 관리가 용이한 핵종으로 변환시켜 사용후핵연료의 처분 부하 경감에 활용할 수 있다.

가스냉각로(High-Temperature Gas Reactor, HTGR)는 CO₂, He 등의 가스를 냉각재로 사용하며, 흑연 등을 감속재로 사용하는 가스냉각 열중성자로와 감속재 없이 고속중성자를 사용하는 가스냉각 고속로로 분류된다. 열중성자형 가스냉각로의 경우 비교적 단순한 개념을 바탕으로 단순한 계통 구성이 가능하며 특히 입자형 핵연료를 사용하는 핵연료 특성을 반영하여 안전성이 매우 높은 것으로 평가된다.

용융염원자로(Molten Salt Reactor, MSR)는 액체 상태의 염에 핵연료를 용해시킨 용융염을 연료와 냉각재로 동시에 활용하는 원자로를 일컫는다. 고체 핵연료를 사용하는 기존 원자로 형태들과 달리 액체 핵연료를 사용하기 때문에, 원자로 중대사고 가능성을 근본적으로 제거하거나 사용후핵연료 관리 옵션을 제공하는 등 기존 수냉각형 및 비수냉각형 원자로들과는 차별화된 기술적 특징들을 가진다.

제1절 액체금속냉각로형(LMR)

1. 소듐냉각고속로

- 소듐냉각고속로(Sodium-cooled Fast Reactor, SFR)는 액체소듐을 냉각재로 사용하고, 핵분열 시 생성되는 고에너지 중성자를 이용해 장수명·고독성 방사성 핵종 소멸과 우라늄 자원 이용률을 증대시킬 수 있는 안전성, 경제성, 지속성 및 핵비확산성이 확보된 제4세대(Gen-IV) 원자력시스템임.
- 소듐냉각고속로 개발의 필요성 :
 - 후쿠시마 원전사고 이후에도 경제성 및 환경문제로 인하여 원자력에 대한 수요는 줄어들지 않고 오히려 증가(미국, 중국, 러시아 주도)
 - 원자력발전이 지속됨에 따른 사용후핵연료 관리의 중요성은 이미 사회적 문제로 대두되고 있으며, 특히 국민의 안전에 대한 인식이 높아짐에 따라 반감기가 긴 사용후핵연료의 방사선 및 장기 관리 문제 해결 요구가 증대
 - 고유 안전성이 확보된 소듐냉각고속로 실증을 통한 사용후핵연료 관리 방안을 제시함으로써 국민이 안심하는 지속가능한 원자력 이용환경 구현 가능
 - 파이로공정(pyroprocessing 또는 파이로프로세싱) 기술과 소듐냉각고속로가 연계된 재순환원자력시스템의 완성은 사용후핵연료에 기인한 사회적 비용 및 미래세대의 부담 최소화
- 소듐냉각고속로 개발의 기대 효과 :
 - 사용후핵연료를 재순환으로 고준위방사성폐기물 처분장의 면적과 관리기간을 크게 줄여 국가의 경제적 부담 경감
 - 경수로 사용후핵연료 내 고독성물질(TRU) 연소기술 타당성 입증과 전력생산 병행을 통한 경제성 제고
 - 재순환원자력시스템 구현으로 고준위폐기물 양을 1/20로 줄일 뿐만 아니라 처분장 규모 축소로 고준위방사성폐기물 최종 처분장 부지확보에 직접 기여
- 국내에서는 2012년부터 2020년까지 한국원자력연구원의 소듐냉각고속로개발사업단을 통해 소듐냉각고속로 원형로(Prototype Gen-IV SFR, PGSFR 또는 SFR원형로) 개발이 추진되었음. SFR원형로는 사용후핵연료에서 추출한 연료물질을 연소하고, 장수명 고독성 방사성 핵종의 단수명·저독성 방사성 핵종으로의 변환 특성을 실증하기 위한 150 MWe급 전기 출력의 제4세대 소듐냉각고속로임.

○ 소형 발전로 방식의 소듐냉각고속로 개발 추진

- 최근 세계 원자력시장은 대형원전(규모경제) 중심에서 투자 리스크 감소 및 다양한 활용성을 갖는 중소형 원전으로 전환되는 추세임. 특히, 1,000 MWe 용량 이상 대형원전의 건설비가 약 8~10조에 이르는 반면, 100 MWe급 중소형원전의 건설비는 약 1조 내외로 평가됨.
- 상대적으로 적은 투자비용에 경제성 및 안전성 향상이 가능한 선진 소형원자로(Small Modular Reactor, SMR)의 잠재적 수요가 증가함.
- SFR원형로의 계통개념과 설계기술을 바탕으로 금속연료 및 소듐냉각고속로 특성에 부하추종 능력, 금속연료의 사고 저항성, 원자로 고유안전성과 최종 열침원의 장점을 장주기 특성과 접목하고, 개발된 병목기술을 검증함으로써 시장경쟁력을 갖춘 非경수형 SMR 기술을 단기간에 확보하기 위한 연구개발이 2021년부터 추진됨.

가. 원자로 개념

(1) 개발목적 및 활용 예상 분야

- 국내 SFR 연구개발의 중심이었던 SFR원형로 기술개발은 정부의 정책결정에 따라 '20년 한미 핵연료주기공동연구(JFCS)가 가시화되는 시점까지 SFR원형로 설계역무의 진전을 보류하는 것으로 결정됨.
- 이에 파이로공정 기술과 이미 개발된 SFR원형로 기술을 접목, TRU((TRansUranics: 초우라늄) 고연소를 통한 사용후핵연료 부피·독성을 획기적으로 저감할 수 있는 핵심기술을 개발함으로써, 국내 사용후핵연료 안전관리 기술 적기 확보 및 후행핵연료주기 국가 정책결정을 위한 현실적 방안 제시로 목적이 변경됨.
 - 핵심기술 개발 목표 :
 - 사용후핵연료 독성물질 소각을 기술적으로 실증하기 위한 고함량 TRU 금속연료 기술 개발로 구현 가능성 제고
 - 既확보 SFR 설계/계통 핵심 기술의 TRU 소각로로의 적용으로 개발기간 단축 및 계통 안전성 향상
 - 운전 신뢰성 향상, 실시간 감시를 위한 계측 시스템의 제작 및 검증으로 운전/유지보수 편의성 향상
- 세계적으로 대두되는 신규 SMR 원전시장에서 전력생산 및 열공급원 등의 다목적 활용과 사용후핵연료 처리 문제의 해결책으로서 활용할 수 있는 非경수형 소형원자로 개념 제시 및 관련 기술경쟁력 강화의 목표를 설정함.

- 고품량 TRU 핵연료 기술 및 소각성능 입증자료를 확보하여 세계 최고 수준의 사용후핵연료 독성 저감 기술을 선도
- 안전성 증대, 대형로에서 소형로로 재편되는 해외 원자로 개발 동향에 부응하는 원자로 기술을 개발하여 수출 경쟁력 제고 및 기술 선점

○ 캐나다는 국가 전력망의 발전원과 오지/격지/광산지역의 전력 공급, 오일샌드 처리를 겨냥한 고온 공정열 생산 등의 목적으로 소형원자로 배치를 적극적으로 지원 및 투자하고 있음. SFR원형로 기술개념을 바탕으로 핵연료교환을 최소화하는 SFR 기반 장주기 소형원자로(SALUS-100)를 개발함과 동시에 이의 타당성을 객관적으로 검토하기 위한 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)의 사전설계검토(Vendor Design Review, VDR)를 병행 추진함.

- SFR원형로의 설계개념에 기반함으로써 장주기 운전을 구현할 수 있는 SFR 소형 발전로의 개념 및 핵심기술을 비교적 단기간에 확보하는 전략
- 개발된 SFR원형로의 병목기술을 검증하고 다양한 목적으로 활용할 수 있는 선진원자력 기술을 접목함으로써 추가적인 시장경쟁력 확보를 지향

(2) 노형 개념 및 특성

국내에서 본격적인 연구개발이 수행된 소듐냉각고속로는 SFR원형로이며, 최근 소형원자로 시장에 대응하기 위해 추진되는 SALUS-100은 SFR원형로의 계통개념 및 설계기술에 기반함. 따라서 두 원자로는 노형 개념과 특성이 유사하므로 여기서는 SFR원형로를 중심으로 기술함.

① 핵증기공급계통(Nuclear Steam Supply System, NSSS)

○ 2012년부터 우리나라가 본격적인 개발에 착수한 대표적인 소듐냉각고속로인 SFR원형로는 150 MWe 용량의 풀형(pool type) 원자로로서 TRU 연소를 통한 사용후핵연료 독성 저감능을 실증하기 위한 원형로로 설계됨. 소듐냉각고속로의 핵증기공급계통은 일차열전달계통(Primary Heat Transport System, PHTS), 중간열전달계통(Intermediate Heat Transport System, IHTS), 잔열제거계통(Decay Heat Removal System, DHRS)과 동력변환계통으로 구성됨. 핵증기공급계통(NSSS)은 아래 그림과 같이 주요기기들과 배관이 원자로용기 내부에 설치되어 배관과단에 의한 냉각재 상실 가능성이 근본적으로 배제되며, 충분한 열적관성(thermal inertia)을 가지도록 설계되어 사고 시 예상되는 급격한 열적과도(thermal transient) 현상을 완화시키는 안전성을 확보함. 또한 원자로의 고유안전성을 높일 수 있는 금속연료를 채택하여 사고 저항성을 향상시킴.

- 일차열전달계통(PHTS)에서는 원자로 노심에서 발생하는 열을 일차소듐냉각재로 전달하고, 중간열전달계통은 일차소듐냉각재의 열을 중간소듐냉각재로 전달하고 이를 증기발생기와 열교환하여 터빈구동에 사용되는 증기를 생산함.
- 중간열전달계통(IHTS)은 2개의 독립된 루프(loop)로 구성되며, 루프 당 1대의 증기발생기가 설치됨. 일차열전달계통은 일차냉각재경계를 형성하며, 중간열전달계통은 만약의 경우 증기발생기에서 일어날 수 있는 소듐-물 반응이 원자로의 안전에 미치는 영향을 방지 및 일차열전달계통의 방사화 소듐의 누출을 억제하는 역할을 함.

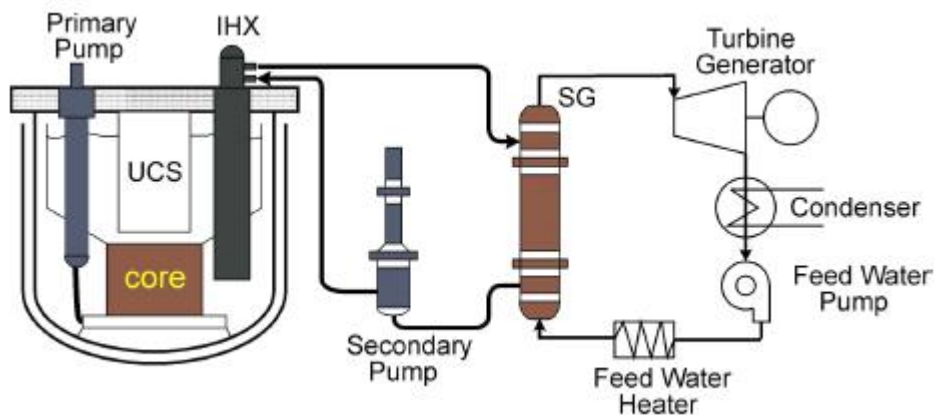


그림 3.1.1 풀형 소듐냉각고속로의 시스템 구성도

- 잔열제거계통은 일차열전달계통을 고온정지운전이나 재장전운전이 가능한 상태에 도달할 때까지 잔열열교환기(Decay Heat Exchanger, DHX)를 통해 전달된 노심의 잔열(decay heat)과 일차열전달계통의 현열(sensible heat)을 제거하는 기능을 수행함. 잔열제거계통은 단일고장을 고려하여 피동잔열제거계통 두 계열과 능동잔열제거계통 두 계열의 총 네 계열로 구성되며 어떠한 출력준위에서 원자로가 정지되어도 두 계열을 이용해 일차열전달계통 펌프가 정지된 상태에서 72시간 이내에 일차열전달계통의 온도를 고온정지운전 온도까지 냉각시킬 수 있음.

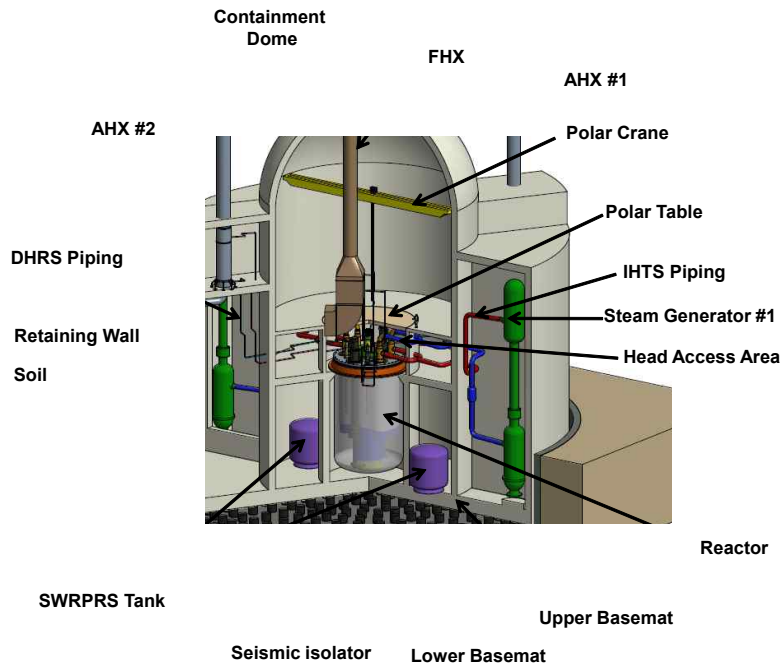


그림 3.1.2 핵증기공급계통 배치도

② 핵연료 및 노심

- SFR원형로에는 농축도가 20% 이하인 U-10Zr 금속연료를 초기노심에 사용하며 향후 파이로공정에서 생산된 TRU 함유 금속연료로 전환함. 금속연료는 정상운전 중 산화물연료에 비하여 핵연료 온도가 낮으며, 도플러 반응도량이 상대적으로 작아 사고 시 고유안전성이 우수함. 핵연료봉은 피복관에 금속연료심을 장전한 형태로 구성하며 피복관은 고온에서 강도가 높으며 고속중성자 환경에서도 낮은 팽윤을 갖는 FMS(Ferritic Martensitic Stainless)강인 FC92를 사용함. 핵분열기체 방출에 대한 핵연료봉의 건전성을 확보하기 위하여 충분한 플레넘을 두며 핵연료봉 외면에 와이어를 나선형으로 감아 핵연료봉 사이의 간극을 유지함. 핵연료집합체는 취급 소켓, 상부 반사체, 육각 덕트, 217개의 핵연료봉, 마운팅 레일, 하부 반사체, 노즈피스로 구성되어 있으며, 피복관을 제외한 핵연료집합체의 구조재는 HT9이 적용됨.

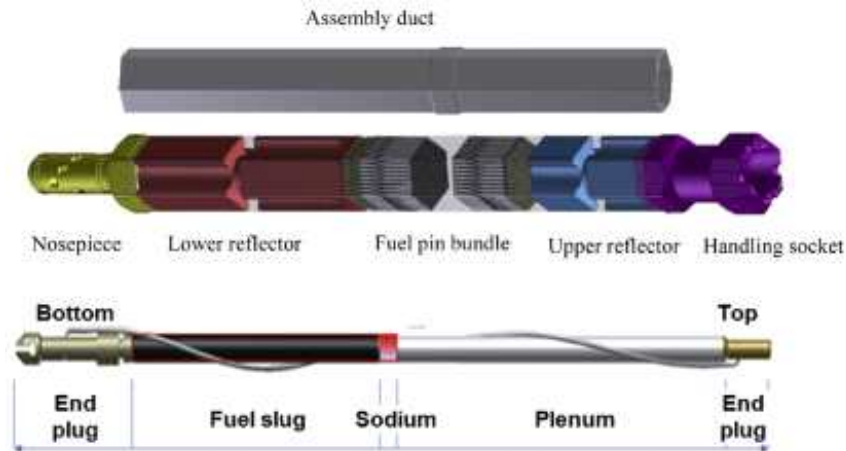


그림 3.1.3 핵연료봉 및 핵연료집합체 구성

- 비연료집합체의 구조재는 HT9 강을 사용함. 제어봉집합체는 핵연료집합체와 동일한 제원 및 형상을 지닌 덕트로 구성되며 제어봉집합체는 클램핑 헤드, 상/하부 어댑터, 마운팅 레일, 내부 육각 덕트, 피스톤 헤드 및 19개의 제어봉으로 구성됨. 반사집합체는 핵연료집합체와 동일한 외곽 구조부품과 HT9 재질의 37개의 반사봉으로 구성됨. 차폐집합체는 핵연료집합체와 동일한 외곽 구조부품과 7개의 B_4C 차폐봉으로 구성됨. 9개로 구성되는 제어봉집합체는 개별적으로 구동이 가능하며, 이들은 일차 및 이차제어봉집합체로 구분됨. 제어봉집합체는 노심에 장전된 제어집합체 덕트 안에서 상하로 움직임. 일차제어봉집합체는 총 6개로 구성되어 있으며, 정상운전 중 반응도 제어 및 원자로 정지기능을 수행함. 이차제어봉집합체는 총 3개로 구성되어 있으며, 사고 시 원자로 정지기능을 수행함.
- SFR원형로 노심은 핵연료집합체와 반사집합체, 차폐집합체, 노내저장소, 그리고 제어집합체 등으로 구성됨. 육각 형상의 단면을 갖는 핵연료집합체는 원통형 노심이 되도록 적절히 배치되어 등가직경과 유효높이를 설정하여 설계 열출력을 생산함. 반사집합체는 노심을 이중으로 둘러싸 노심 외부로 중성자 누출을 감소시켜 노심 성능을 향상시키며, 차폐집합체는 원자로 내부구조물 및 기기가 중성자 조사로 손상되는 것을 방지하기 위해 노심을 이중으로 둘러싸고 있음. 연소된 사용후핵연료집합체를 냉각하기 위한 노내저장소가 노심 외곽에 위치하고 있으며, 최외곽에 사용후핵연료집합체에 의한 중성자 조사를 차폐하기 위해 추가적인 차폐집합체가 배치됨.

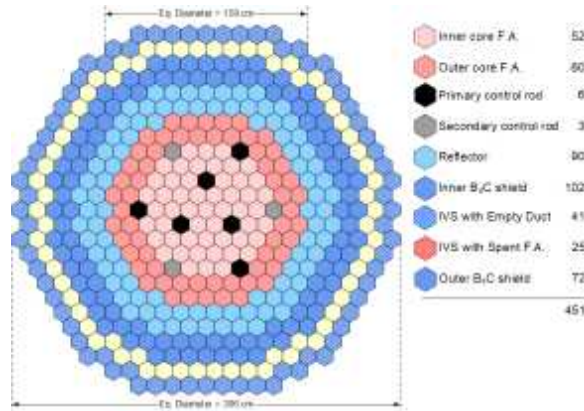


그림 3.1.4 SFR원형로 노심 반경방향 구성

- 장주기 소형모듈형 원자로의 연구개발에 대한 세계적인 관심도가 높아짐에 따라 개발된 SFR원형로의 Spin-off 개념으로 20년 핵연료 교체주기를 갖는 장주기용 소듐냉각고속로 노심개념을 개발함. 다양한 기기 계통에 대한 설계변경을 최소화하기 위하여 노심 반경은 SFR원형로 core shroud 크기를 넘지 않도록 제한되었으며, 노심의 높이 또한 원자로용기 사이즈 변경을 최소화하기 위해 최대한 억제함.

BOC

MOC

그림 3.1.5 SALUS 노심 반경방향 구성 그림 3.1.6 연소에 따른 집합체 출력변화

- 장주기 운전을 위해 요구되는 추가적인 핵연료 장전은 핵연료집합체 크기 증가 및 큰 직경의 핵연료봉 장전, 유효노심 높이 증가를 통해 확보하였으며, 내부/중간/외부 노심 및 축방향에 각기 다른 농축도의 U-10%Zr 연료를 장전함으로써 효과적인 핵연료 증식을 통해 작은 연소결손반응도가를 가짐에도 불구하고 20년 동안 핵연료 무교체 운전이 가능함을 확인함. 장주기 운전동안 핵연료피복관의 건전성을 입증하기 위하여 전 핵연료봉에 대한 누적손상분율을 평가한 결과, 약 19년 동안 누적손상분율 제한치를 만족함을 확인하였으며, 현재 누적손상분율을 추가적으로 줄일 수 있는 최적화 작업을 수행 중임.

나. 국내외 개발동향

(1) 국내현황

- 우리나라의 소듐냉각고속로 연구는 선진국보다 늦은 1980년대에 한국원자력연구원의 소규모 기초기술 연구로 시작하였으며, 1997년부터 국가 원자력연구개발 중장기계획사업을 통해 본격적인 연구개발에 착수하여 미국 GE사와의 기술협력을 통해 2001년에 소형 소듐냉각고속로인 KALIMER-150(150 MWe) 설계개념을 완성함.
- 2002년부터 2006년까지는 중형 소듐냉각고속로인 KALIMER-600(600MWe)의 개념설계를 완성하였으며, KALIMER-600은 우리 기술력을 바탕으로 한 독창적 개념의 원자로로서 제4세대 소듐냉각고속로 참조 개념으로 선정된 바 있음.
- 2007년부터 2011년까지는 KALIMER-600 개념설계 경험을 바탕으로 제4세대 기술목표를 달성하기 위해 제시된 복수 후보개념의 설계사양에 대한 기술적 타당성 평가를 수행하여 최종적으로 1,200 MWe급 자체순환로와 600 MWe급 연소로 두 가지 노형을 최적 후보개념으로 선정하고 고유개념 계통설계에 필요한 핵심기반기술을 개발함.
- `11년 11월 21일 제1차 원자력진흥위원회에서 정책적 환경 변화에 능동적으로 대응하기 위하여 미래원자력시스템 장기 추진 계획 수정안이 의결되었음. 이후 종합적인 기술개발 계획 수립과 연구 목표 관리를 위하여 소듐냉각고속로개발사업단이 `12년 5월에 출범하고, 사용후핵연료를 안전하고 경제적으로 처리할 수 있는 제4세대 소듐냉각고속로의 핵심기술을 실증하기 위한 소듐냉각고속로 원형로 기술개발을 수행하였음.
- 1단계로 `12년에 원형로 설계개념을 설정하고, `13년도부터 예비특정설계를 수행하여, `15년 사전안전성분석보고서를 중간 결과물로 생산함.
- 2단계(`16~`17년)에서는 특정설계 수행을 통해 설계수준을 향상시켜 특정설계안전성분석보고서(Specific Design Safety Analysis Report: SDSAR)를 발행하였으며, 설계 전산코드(금속연료설계, 노심 핵/열유체설계, 안전해석) 및 방법론(열교환기, 상부내부구조물 동특성, 면진설계 방법론 등) 등에 대한 특정기술주제보고서(Topical Report, TR) 10건을 생산하였음.
- 기존의 소듐냉각고속로 개발 및 운영국가에서 사용하고 있는 산화물연료에 비해 고유 안전성이 우수한 SFR원형로의 금속연료 제조 기술, 핵연료 피복관 재료 및 금속연료 성능의 핵심기반 기술을 개발하여 공학규모 연료심 제조기술 및 크리프 성능이 향상된 고유 피복관 기술과 금속연료 설계기술을 확보함.

- BOR-60 원자로에서 U-10Zr 금속연료와 FC92 피복관 조사시험을 수행하여 2020년까지 금속연료 목표 연소도인 7.0 at.%와 피복관 목표 조사량인 75 dpa에 도달하였음.
- 원형로 고유의 잔열제거시스템의 성능검증을 위해 이전 단계에서 소듐 개별효과 시험시설(STELLA-1)을 구축하고 이를 이용하여 열교환기에 대한 성능효과 시험을 수행함. 시스템 설계를 마친 원자로의 안전성을 종합적으로 검증하기 위하여 소듐 열유동 종합효과 시험시설(STELLA-2)의 구축을 2020년 완료함.
- 3단계('18~'20년)에서는 정부의 원자력정책(에너지전환)에 부합해서 「한미 핵연료주기 공동연구의 파이로타당성 평가결과 도출('20년)」 까지 SFR원형로 실증을 위한 설계심화 및 대규모 투자의 연구개발 역무를 보류하고 설계기술 인증 및 사용후핵연료의 부피·독성 저감을 극대화할 수 있는 핵심기술 개발에 집중하는 방향으로 연구를 전환함.

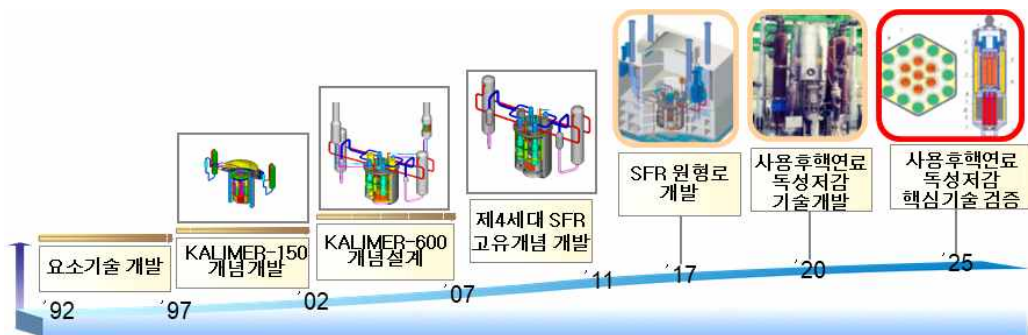


그림 3.1.7 SFR 기술개발 현황

- 제5차 원자력진흥종합계획('17.01) 및 8차 원자력진흥위원회('19.11)를 통하여 정부 에너지 정책 전환에 부응하는 창의·혁신형 원자력 신기술 발굴·지원체계 구축 전략이 제시됨. 이에 따라 2021년에 착수된 ‘해외시장 맞춤형 미래선진원자로 검증기술개발’ 사업에서는 SFR원형로 설계를 활용한 선진 소형원자로(SALUS-100) 개념 및 핵심기술의 확보, SFR원형로를 통해 개발된 병목기술의 검증, 발전로 분야의 기술 경쟁력을 강화할 수 있는 연구개발 분야에 대한 국제협력 등을 추진함. 또한 SFR원형로와 연계되는 특정기술주제보고서 인허가 심사, 핵연료 조사시험 및 열유동 종합효과실험 등을 향후 인허가 기술 확보 차원에서 동 사업에서 함께 추진됨.
- 원자로 시설 인허가의 의무적 심사(건설허가 및 운영허가) 전에 핵심기술(방법론 및 전산코드)을 검토하여 개발 중 소듐냉각고속로의 기술성 및 안전성 확인이 가능하므로, 이를 위해 '18년부터 SFR 핵심기술 10종에 대한 특정기술주제보고서 (TR)를 작성하여 원자력안전위원회에 승인을 신청함. '23년 12월 현재, 서류적합성을 통과한 총 9종의 TR 중 2종에 대한 승인이 완료되었고 나머지는 심사가 진행 중임.

- 핵연료 조사시험은 2021년부터 BOR-60 원자로에서 10.0 at.% 수준의 고연소도 금속연료봉 조사시험을 재개하여 2024년까지 조사시험 및 비파괴검사까지 완료할 예정임. 열유동 종합효과실험 장치는 예비시험을 완료하고 시스템코드 검증용 시험으로 DB 확보를 추진하고 있음.

(2) 국외현황

- 원자력선진국은 근 미래의 원자로로서 안전성, 경제성, 지속가능성, 핵비확산성 등이 우수한 非경수로형 선진원자로(SMR 포함) 개발에 대한 비전, 로드맵과 전략을 발표하고, 미래 시장 창출과 기술 선점에 주력하고 있음.
- 미국은 안전성, 경제성, 지속가능성, 핵비확산성 등의 장점을 지닌 선진원자로가 2050년까지 미국과 전 세계의 에너지 구성에서 중요한 비중을 차지할 것으로 예상하고, 2030년대 초반까지 최소 2개의 非경수형 선진원자로에 대한 NRC의 건설 인허가 검토를 완료할 예정임. SFR의 현재 기술은 성숙된 고온 가스로와 함께 非경수형 선진원자로의 유력한 후보이며 TerraPower, Oklo, General Electric, ARC Clean Technology 등의 민간기업에서 주도하고 있음.
 - TerraPower는 한국수력원자력, SK그룹과 NatriumTM 원자로 및 통합 에너지 시스템의 실증 및 상용화를 지원하는 협력 협약을 체결하는 등 국내 기업과 적극적인 협력을 추진.



그림 3.1.8 미국 선진원자로 개발 일정, 2016

- 캐나다는 자국의 소규모 전력망 또는 비전력망 지역에 전력 또는 열공급을 위해 소형경수로와 선진원자로를 포괄하는 소형원자로 개발 로드맵을 수립함('18.12). 캐나다

원자력규제기관(CNSC)은 산업체(ARC Clean Energy Canada)가 제안한 100 MWe 용량의 SFR 타입 소형원자로인 ARC-100 대한 사전인허가검토(VDR)의 Phase 1을 완료하였고, 2022년 현재 Phase 2를 진행 중임.

- ARC Clean Technology Canada(ARC Canada)는 캐나다 앨버타주에서 ARC-100의 상용화 지원을 위해 주정부 소유의 Invest Alberta Corporation(IAC)과 양해각서(MoU)를 체결('23.03)

○ 일본은 도시바사와 전력중앙연구소(CRIEPI) 공동으로 10 MWe 용량의 SFR 타입 소형원자로인 4S를 개발하였으며 크기는 22×16×12 m 임. 또한 50 MWe 용량의 원자로 설계도 보유함.

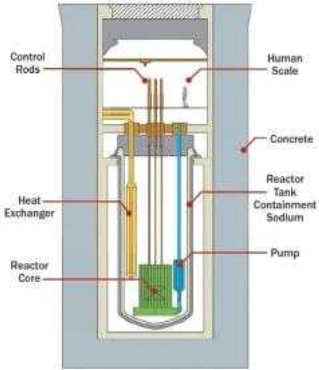
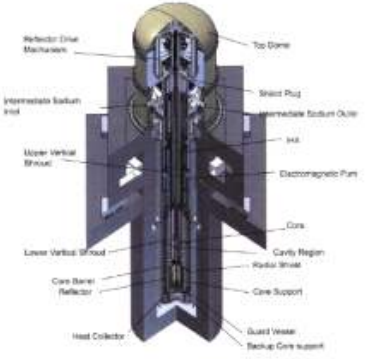
명칭	ARC-100	4S
원자로 형태		
방식	소듐냉각고속로	소듐냉각고속로
출력전기	100 MWe	10 MWe

그림 3.1.9 해외에서 개발 중인 SFR 기반 소형원자로

○ 미국 INL은 ATR(Advanced Test Reactor) 연구로를 이용하여 선진 핵연료 및 재료의 지속적인 조사시험을 수행하고 있음. 특히 미국의 선진 핵연료 및 재료를 시험할 다목적 소듐냉각 고속중성자 연구로인 VTR(Versatile Test Reactor)을 2026년 가동을 목표로 개발을 착수함. VTR은 연간 30 dpa의 중성자 조사량을 가지며 capsule 및 다양한 환경(Na, Pb, LBE, He, Salt)에서 시험이 가능한 loop-type 시설을 갖춘 다목적 연구로임. VTR 노심/핵연료/안전계통 관련 연구는 DOE 산하 국립연구소가 수행하고, 원자로 개념설계 및 경제성 평가는 산업체가 수행하며 관련 실험 연구는 산-학-연 연계하여 개발함. VTR의 초기 구동 핵연료는 기존 DB를 보유한 U-Pu-Zr(또는 U-Zr)이며, 차기 단계 핵연료는 Annular 핵연료로서 이에 대한 예비성능평가, 제조,

조사시험을 진행 중임.

- 일본은 경제산업성(Ministry of Economy, Trade and Industry, METI) 주관으로 고속로 개발 계획을 수립함. 21세기 중반 운전을 목표로 하여 실증로를 건설하며 민간기업이 참여하고 SFR을 포함한 모든 고속로형을 대상으로 향후 10년간 3단계에 걸쳐 고속로 개발 방향을 설정함. 핵연료 및 재료 시험을 위한 JOYO의 가동과 관련하여 2023년 재가동을 목표로 안전성 보고서를 2017년 3월에 제출함. MONJU 해체와 관련하여 2017년 12월 해체계획을 신청하여 2018년 3월에 승인됨. 2018~2022년 핵연료를 제거하고 2047년까지 단계적인 해체를 목표로 함.
- 프랑스는 원전 축소 정책과 우라늄 가격 하락에 따라 상업용 고속로 도입 시기를 늦추었음. 이에 따라 ASTRID도 건설을 보류하고 계획을 재검토 중에 있음. ASTRID도 원자로 용량을 줄여 핵연료의 Pu 농축도는 증가하게 될 예정임. ASTRID는 2019년까지 기존의 기반 및 핵심 연구(ASTRID 설계, 핵연료 제조시설, 수지해석 툴, 검증시험, 중대사고 실험)는 진행하며, 2020년 이후에 실험/실증로 개발에 필요한 연구역량 확보를 위하여 해외 원자력연구기관과의 협력 확대는 물론 해외 고속로(BOR-60, MBIR, JHR, JOYO, CEFR)을 이용한 R&D를 추진하기로 함.
- 러시아는 고속로 관련하여 유일하게 상용 원전(BN-600, BN-800)을 건설, 운영하고 있으며 연구로(BOR-60) 운영과 다목적 원자로(MBIR) 건설, 대형 소듐냉각 고속로(BN-1200)와 납냉각 고속로(BREST-300) 건설과 같이 고속로 관련 다양한 포트폴리오를 구축함. 고속로에 적용하기 위한 질화물 핵연료 연구를 진행하고 있음.
- EU는 2017년도부터 2021년까지 SFR 핵연료 연구 관련 2개의 주요 프로젝트(INSPIRE, ESRF-SMART)를 수행함. INSPIRE는 ESNII 원형로에 혼합산화물 핵연료(MOX)를 적용하기 위한 타당성 연구로 14개 기관이 800만 유로를 출자하여 수행하는 연구이며 핵연료 설계, 제조 및 성능평가 관련 연구를 수행함. ESRF-SMART는 상용급 European Sodium Fast Reactor(ESFR)을 개발하기 위한 국제 공동 연구로 19개 기관이 800만 유로의 규모로 수행하는 연구임.

다. 국내 기술개발 및 사업화 전략

(1) 기술개발 현황 및 추진방안

① TRU 소각성능 검증

- TRU 소각성능을 극대화하기 위하여 핵연료 내 TRU 함량을 높인 고함량 TRU 핵연료의 소각로 적용이 필요하며 이를 구현하기 위한 고함량 TRU 핵연료심 및 핵연료봉 제조기술개발이 필요함.

- 고함량 TRU 핵연료 적용 시 핵연료-피복관 화학적 상호반응 개시온도가 감소하여 정상상태 및 과도상태 핵연료 안전성을 저하함. 이에 상호반응을 원천적으로 차단하고 핵연료 안전성을 향상하게 하는 혁신 개념의 배리어 피복관 제조기술을 개발함.
- 고함량 TRU 핵연료의 성능을 평가하기 위한 핵연료 성능 모델 구축 및 전산코드 검증 기술을 개발함.
- 고함량 TRU 핵연료의 원자로 내 소각성능을 검증하기 위한 고에너지 중성자 조사시험 기술을 개발함.

② TRU 소각로 핵심기술 검증

○ TRU 노심 설계코드 예비검증

- 경수로 사용후핵연료의 처분은 직접처분과 고속로를 활용하여 사용후핵연료의 독성과 부피를 저감한 후 처분하는 방법으로 구분이 됨. 두 번째 방법인 사용후핵연료의 독성저감을 위해서는 주 독성물질인 TRU의 소각이 필수적이며, 이를 위한 TRU 소각 및 독성 저감 연구가 진행 중임. TRU 소각능을 판별하기 위한 핵심기술은 TRU 노심 설계 및 이에 사용되는 노심 설계코드의 정확성과 검증이며, 향후 국가 사용후핵연료 처분 정책에 유연하게 대응하기 위한 사전 필수 연구에 해당함.

○ 안전해석 및 전산코드 교차검증

- TRU 소각로의 정상 및 과도 상태에서의 신뢰성 높은 안전성 확인이 필요하고, 예비 안전성 분석 수행 결과 피드백 및 안전 관련 대표 설계기준사건에 대한 계통의 안전성 분석이 필요함. TRU 소각로는 반응도 특성이 U 노심에 비해 민감하여 음의 반응도계환 모델들에 대한 엄밀하고 정확한 평가 및 비교검증이 필요함. 설계기준사고에서 TRU 소각로에 대한 노심붕괴열 모델은 원자로정지 후 핵심 주요 변수로서 안전해석 전산코드의 ANS 노심붕괴열 모델들의 비교검증을 통한 신뢰성을 확보함. VTR 원자로 설계데이터 및 안전해석 결과를 분석을 통해 선진국 수준의 TRU 소각로의 안전해석 전산코드의 검증과 안전해석 방법론을 구축함.

○ 이중배관 적용성 확보

- 소듐이 대기에 노출되면 대기의 산소 및 수분과 반응하여 화재와 연무가 발생하므로 소듐 누설을 방지하는 기술개발이 필요함. 소듐 누설에 가장 취약한 구조물인 배관의 용접부를 줄여 소듐누설 가능성을 극소화할 수 있는 유도가열벤딩 기술을 확인함. 유도가열벤딩 공정에 따른 가열 및 냉각, 후열처리에 따른 재료물성 변화로 인한 피로 및 크립 특성

변화에 대한 물성을 확보함하고 유도가열벤딩으로 주요 부위의 두께 변화, 재료 물성 변화에 따른 피로 및 크립 거동 특성을 분석하여 구조시험 및 검증 자료를 확보함.

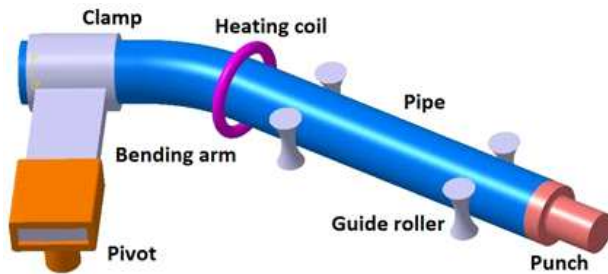


그림 3.1.10 유도가열벤딩 배관 개념 및 제작

③ 제4세대 선진 소형원자로기술 개발

○ 선진 소형원자로 장주기 핵연료 및 노심 개념개발

- SFR원형로의 금속연료 설계기술을 바탕으로 SFR원형로와 동일한 U-Zr 금속연료가 적용되는 장주기 노심의 금속연료봉, 핵연료/비연료 집합체에 대해 기존 자료 및 설계기술을 이용하여 최소한의 설계변경으로 핵연료봉/집합체/노심에 대한 개념설계를 추진함.
- SFR원형로 기반 장주기 (~20년) 노심의 예비 평가 결과, 핵연료 연소도는 약 10 at.%로 평가됨. 기존 BOR-60에서 조사시험한 7 at.% 금속연료봉을 활용한 추가 조사시험으로 10 at.% 조사시험 자료를 확보함. 조사후 비파괴 시험을 통하여 국내 제조 금속연료봉의 고연소도 성능 입증자료를 확보하여 비경수형 SMR의 기술경쟁력을 강화함.

○ 선진 소형원자로 계통개념 개발 및 안전성 평가

- SFR원형로 개발을 통하여 확보한 연구인력, 계통설계 기술, 전산코드, 실험시설 및 DB를 활용하여 고속로 기반 소형원자로 계통개념을 개발하고, 안전성 및 경쟁력 강화에 필요한 선진원자력 기술을 계통설계에 도입하여 비경수형 소형원자로의 상품성을 향상시킴.

○ 선진 소형원자로 구조개념 개발 및 기술성 종합 검토

- SFR원형로의 기계구조설계 및 건전성평가 기술을 바탕으로 장주기 노심의 소형원자로에 적합한 구조계통 및 기기에 개념설계를 개발하여 미래수요의 소형원자로에 대한 기술경쟁력을 확보함.
- 고속로 기반 소형원자로의 기술성과 인허가 시현성을 조기에 평가하고 실효적인 해외시장 진출을 추진하기 위한 해외 사전설계검토(VDR)를 추진함. 독자적인 기술과

네트워크를 활용한 해외시장 적기 진출을 추진하기 위하여 해외기관과 협업을 통해 시장 진출을 위한 사업모델 개발이 향후 요구됨.

④ 선진 소형원자로 안전성 강화 핵심기술 개발 및 검증

○ 선진 열유체 해석방법론 개발 및 주요 전산코드 검증

- 유체-구조 통합 해석을 위한 연계 프로그램을 적용하여 설계분야간 연계사항을 최소화하고 기기의 수명을 결정하는 열기계적 부하 해석의 정확도 향상을 추진함.
- 사용자 편의성을 증대시키며 정확하고 효율적인 노심 열유체 계산을 위해 노심형상에 최적화된 격자생성 프로그램을 개발하고 검증자료와 비교를 수행하여 개발된 프로그램의 신뢰성 및 우수성 입증 추진함.
- 안전해석 전산코드 교차검증을 통해 소형 원자로의 고유 안전해석 평가체제를 확보하고 나아가 안전해석 결과의 신뢰성 향상을 추진함.

○ 제4세대 원자력시스템 선진 검증기반 구축

- 분포형 계측기 선행연구 결과 및 경험을 기반으로 OFDR(Optical Frequency Domain Reflectometry) 및 OTDR(Optical Time Domain Reflectometry) 기술을 활용하여 계측 대상에 특화된 고정밀 분포형 계측시스템 개발을 추진함.
- 既 확보 불투명 소동 냉각재 내부 가시화 센서 원천기술을 기반으로 다수개의 가시화 센서를 동시에 적용하여 고분해능의 검사 결과를 획득할 수 있는 배열형 불투명 환경 가시화 시스템 개발을 추진함.
- 고온 비접촉 초음파 센서와 관련하여 축적된 기술력을 기반으로 센서의 소형화, 모듈화 및 실시간 유량 측정 알고리즘을 적용하여 고온 환경에 특화된 비접촉 초음파 유량 계측 시스템 개발을 추진함.

○ 선진 소형원자로 기술성 입증

- 사용후핵연료 처리기술 적정성 분석보고서, JFCS 결과보고서 및 SFR 성과분석보고서 등의 작성 및 검토를 통해 사용후핵연료 처리기술 연구개발사업에 대한 적정성 검토위원회(가칭)에 대응하는 기술자료와 위원회의 질의에 대한 답변서를 작성함.
- 특정기술주제보고서(TR)의 심사 과정에서 예상되는 기술 현안에 대한 사전 기술검토와 각각의 TR 별로 본 심사 질의에 대한 답변서 작성 및 검토를 통해 규제전문기관의 심사계획에 따라 맞춤형 대응을 준비하여 인허가 심사보고서 획득을 추진함.

○ 금속연료 혁신기술 개발 및 검증기반 구축

- 혁신 환경 금속연료는 기존 원통형 금속연료 대비 개선된 연소 성능을 가지며 VTR

차세대 구동 핵연료로 개발 중임. 기존에 확보한 원통형 금속연료 기술을 바탕으로 환형 금속연료 제조 핵심 기술 개발 및 성능평가를 수행하고 국제 공동 연구를 통하여 노내 조사시험을 통한 성능 검증에 필요한 안전성 평가 및 시제품 제조를 공동으로 추진함.

⑤ TRU 핵연료 제조기술 및 소각로 안전성 검증기술 개발

○ 원자력발전소 사용후핵연료 처리기술에 대한 연구개발 적정성을 검토하기 위한 위원회('21.9~12월)가 파이로-SFR 연계시스템이 기술성, 안전성 및 핵비확산성을 갖춘 사용후핵연료 관리기술로서 가능성이 있다고 판단하고 파이로-SFR을 기초·원천기술 확보단계까지 연구개발 추진할 것을 권고함에 따라 원자력진흥위원회(제10차)에서 사용후핵연료 처리기술 연구개발 지속을 의결함. 이에 '사용후핵연료 처리기술 고도화 연구개발 사업'을 통하여 SFR 소각로 적용을 위한 TRU 핵연료 제조기술 및 소각로 안전성 검증기술 개발을 2026년까지 추진 예정.

○ TRU 핵연료 및 피복관 제조기술 개발

- TRU 적용에 따른 핵심 제조기술을 개발하고 향후 국제공동연구를 통한 핵연료 성능 검증을 추진함. 이를 위해 TRU 핵연료 재순환 공정향상을 위한 고반응방지 핵연료 제조부품(도가니) 기술 확보와 연료심 원격공정 최적화 기술개발을 추진함.
- 또한 TRU 핵연료의 소각성능 저하를 방지하기 위한 피복관 내면의 배리어 코팅층 개질 기술과 실규모 피복관 코팅기술을 개발하고, TRU 핵연료 신피복관의 고연소도 노내성능 검증을 위하여 조사 피복관에 대한 물성자료를 확보를 추진함.

○ TRU 소각로 안전성 검증기술 개발

- TRU 핵연료 성능분석 코드 예비검증을 통해 금속연료 코드 적용범위를 기존 U 연료에서 TRU 연료에 적용 가능하도록 확장함으로써 핵연료 성능평가 체제 완성도를 향상을 위한 연구개발을 추진함.
- 기 확보한 SFR원형로 우라늄 초기 노심의 핵설계 불확도 평가방법 및 불확도에 추가로 TRU 연료 장전 노심에 대한 불확도 평가방법 및 예비 불확도 생산으로 노심 핵설계 전산체제 완성도를 제고하는 연구개발을 추진함.
- SFR의 소듐냉각재 누설에 가장 취약한 배관의 용접부 감축을 통한 소듐누설 가능성을 극소화하는 유도가열벤딩 적용 이중배관 기술 확보를 목표로 함. 이를 위해 유도가열벤딩 주배관엘로우 및 이중배관시스템에 대한 고온환경 등의 실운전 조건에 대한 최종 구조건전성 시험으로 TRU 소각로 안전성 검증기술 개발을 추진함.

(2) 사업화 추진방안

○ 既 확보 SFR 기술을 활용하여 세계 SMR 시장에 진출하기 위한 상업화 방안

- 현지 SMR 사업자 주관으로 진행 중인 SFR 기반 소형원자로 실증사업에 한국원자력연구원(KAERI)이 지적재산 및 연구인력 제공 등의 현물투자 형태로 참여하는 방식임.
 - 실증 이후 확보할 기술적 성과를 국내 SFR 개발 사업에 활용할 수 있는 권리를 확보할 수 있음.
 - KAERI가 단독으로 해외 실증사업에 참여하기보다는 국내 민간 사업자의 직접투자를 통해 공동으로 참여하는 형태임.
- 선진 소형원자로에 투자할 국내 민간 사업자가 주관하는 해외 SFR 기반 소형원자로 실증사업에 SFR 기술을 보유한 KAERI가 컨소시엄 형태로 참여하는 방식임.
 - 이 경우 KAERI는 원자로 계통 관련 핵심기술을 공급하고 민간 사업자는 설계, 인허가, 조달, 건설 등 EPC 업무와 전체 실증사업을 주도함.
 - 민간 사업자는 실증 이후 사업에 대한 원자로 및 보조계통설계, 기기공급 및 건설 등의 제반 사업권을 확보하게 되며, 실증이 완료된 SFR 전체 기술에 대한 기술적 성과를 IP화하여 향후 국내 사업에도 활용할 수 있음.
 - 다만 국내 독자 SFR 모델로 해외 실증사업에 참여하기 위해서는 현시점에서 가용한 해외 사전인허가검토(IAEA TSR²⁴⁰⁾ 등을 활용하여 원자로 건설까지의 제반 인허가 현안에 대응할 수 있는 역량을 갖추거나 또는 고속로 핵연료 분야 민감기술 등과 같은 국내 미확보 핵심기술에 대한 적기 확보 방안을 선제적으로 수립하는 전략이 필요함.
- 상기 국내 미확보 핵심기술을 확보하기 위한 방안
 - 우리나라가 미확보 핵심기술을 적기에 확보하기 위해서는 국내 민간 사업자와 KAERI가 특수목적법인(SPC)을 설립하고, SPC가 직접적인 재원 투자를 통해 미국 현지 SMR 사업자와 공동으로 실증사업을 추진하는 방안이 가장 현실적임.
 - 이 경우 우리나라는 투자를 통해 지분참여를 하게 되므로 실증 이후의 기술확보 및 사용권 문제 등에서 유리한 협상이 가능함.
 - 실증사업이 성공적으로 완료된다면 경수로 사용후핵연료 처리를 위한 국내 SFR 건설사업 재개가 결정되는 시점에서 핵심기술의 적기 공급이 가능하다는 측면에서 기술적으로 큰 도움이 될 것으로 전망됨.

240) IAEA 기술안전검토 (Technical Safety Review, TSR): 원자로 설계에 대한 제3자 독립검토를 통해 종합적인 안전성을 평가하고, 원자로 설계 안전성 강화 및 개선을 위한 권고사항 등을 제공하는 회원국 맞춤형 서비스

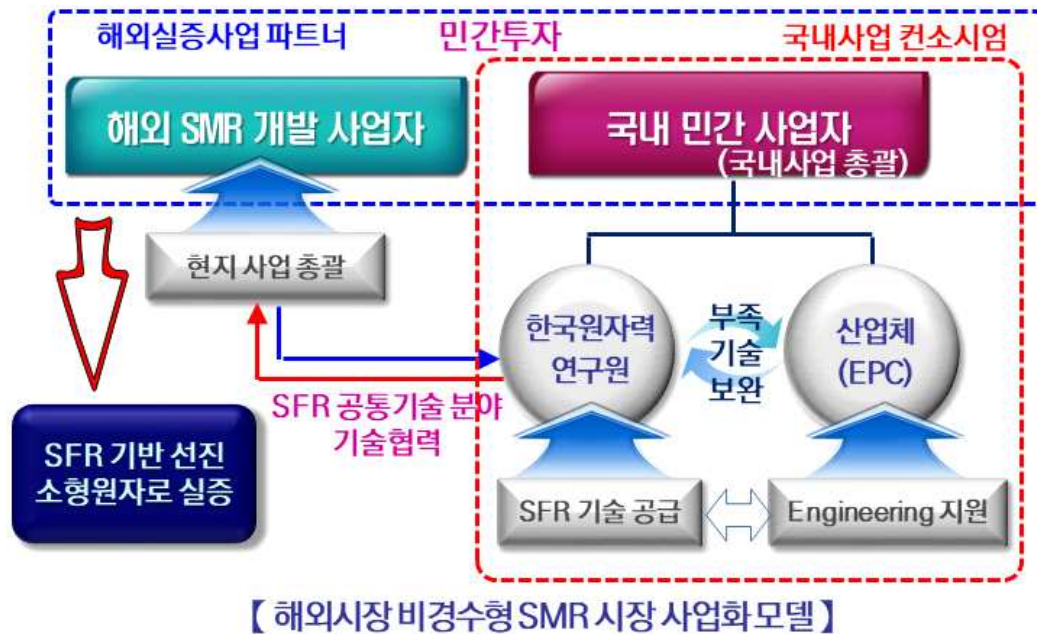


그림 3.1.11 해외시장 비경수형 SMR 시장 사업화 모델

- 이 밖에도 비경수형 SMR 도입에 대해 큰 관심을 가지고 있는 캐나다의 경우 CNL²⁴¹⁾을 중심으로 원자력 연구이니셔티브 참여 등 SMR 배치 가속화를 위해 노력하고 있으므로, KAERI의 SFR 분야 기술 역량을 토대로 KAERI-CNЛ 간 MOU 체결 등 협력 플랫폼을 구축하여 비경수형 SMR 시장에서 정부 간 협력을 통해 공동으로 기술협력 및 사업화를 모색하는 방안이 있음.
 - 캐나다 SMR 시장이 구체화되고 있는 현 상황에서, 이와 같은 협력은 국내 소형원자로 기술개발 촉진뿐만 아니라 세계 SMR 시장 진출을 위한 우리나라 민간기업의 사업화 전략에도 도움이 될 것으로 전망됨.

(3) 장애요인 및 대처방안

① 선진 소형원자로 핵연료 공급망(Supply chain) 현안

- SFR 기반 소형원자로를 비롯한 대부분의 비경수형 SMR에 사용되는 고순도저농축 핵연료(HALEU)의 공급 문제는 증가하는 SMR 수요를 고려할 때 가장 시급히 해결되어야 함.
- HALEU는 농축도가 5~20% 미만의 핵연료로 선진 소형원자로의 소형화 및 초고연소도, 초장주기 운전을 위해 사용되며, HALEU 핵연료 원료물질은 크게 고농축우라늄을

241) Canadian Nuclear Laboratory

회석하여 제조하거나 저농축우라늄을 농축하여 제작됨.

- 기존에 러시아가 주로 제공하던 공급망이 우크라이나와의 전쟁 등의 다양한 이유로 현재 붕괴된 상황에서 다양한 형태의 소형원자로에 공급할 HALEU의 공급망 확보가 시급함.
 - 미국 내 경수로(LWR)에 사용되고 있는 농축도 5% 미만의 저농축우라늄(LEU) 중 약 20%는 러시아의 국영업체 로사톰의 자회사인 테넥스(Tenex)로부터 수입되고 있는 현실에서 미국의 원자력 관련 산업계 CEO들은 러시아로부터 시작된 핵연료 공급망 이슈가 결국 DOE의 선진원자로 실증프로그램(ARDP)의 위험 요인으로 평가됨.
 - HALEU를 상업적으로 생산하기 위한 포괄적인 계획을 시급히 시작해야 한다고 주장함²⁴²⁾.
 - 현재 (美)DOE의 ARDP 자금 지원을 받는 선진 소형원자로 10기 중 9기는 HALEU를 필요로 함.
 - 러시아에 대한 광범위한 제재가 내려지면서 서방의 러시아 원자력기술과 핵연료 공급망에 대한 과도한 의존에 대한 우려의 목소리가 커지고 있음.
 - 각 노형별 첫 호기는 어쩔 수 없이 러시아산 HALEU에 의존할 수밖에 없을 것으로 예상함.
- 최근 선진 소형원자로의 가동이 임박함에 따라 HALEU의 필요성은 빠르게 증가할 것으로 전망되며, 향후 건설될 선진 소형원자로에 사용되는 산화물 및 금속 형태의 핵연료 역시 러시아 테넥스사가 공급하는 국제 시장에서 구입하는 것으로 계획되어 있음.
 - 미국 센트리스(Centrus)사와 미국 에너지정보국 (Energy Information Administration)의 통계에 따르면, 미국의 국내 우라늄 농축능력은 1985년 연간 2,730만 SWU에서 2015년에는 0으로 떨어진 반면, 수요량은 1,500만 SWU로 두 배로 증가한 것으로 보고 있음.
 - 세계원자력협회(World Nuclear Association, WNA)의 통계에 따르면 현재 미국의 우라늄 농축능력은 유렌코(Urenco)의 뉴멕시코 공장뿐으로, 2020년 기준으로 연간 약 470만 SWU의 생산 능력을 갖추고 있음.
 - 한편 러시아의 우라늄 농축능력은 1985년 300만 SWU에서 2020년에는 2,870만 SWU로 증가했으며, 우크라이나 침공 이후 국제적 고립에 직면한 러시아의 2020년 생산량은 전 세계 우라늄 생산량의 6%에 불과하지만, 전 세계의 41%를 생산한 카자흐스탄은 생산한 우라늄 공급량의 절반가량을 러시아를 통해 운송하고 있기 때문에

242) US urges haste on domestic HALEU plan as Russia faces isolation, Reuters Event, 22 March 2022, <https://www.reutersevents.com/nuclear/us-urges-haste-domestic-haleu-plan-russia-faces-isolation>

여전히 러시아 이슈가 HALEU 공급망에 큰 영향을 미치고 있는 것이 현실임.

- 미국의 경우에는 자국 내 사고저항성핵연료(ATF) 제조시설을 기반으로 저농축우라늄을 농축하여 HALEU를 공급하는 방안을 추진 중이며 이는 미국 내 규제기관(NRC)의 인허가에 따라 결정될 예정임.
- 러시아를 제외한 미국 외 HALEU 공급 가능 국가는 없으며 미국은 현재 4가지의 HALEU 농축 옵션을 가지고 있음.
 - 미국에서 유일하게 허가된 농축 시설을 운영하고 있는 Urenco社의 농축도 범위는 5.5%까지이며, 필요한 자금 조달 및 유통보장을 가정하에 美NRC에 농축도 한계를 10%로 증가할 수 있도록 하는 인가를 신청.
 - 미국에서 유일하게 우라늄 20%까지 농축을 허가받은 Centrus社는 올해 최대 1 MTU의 HALEU를 생산하는 실증 프로젝트를 진행하고 있으며, 자금 조달이나 유통보장을 전제로 4년 이내에 연간 12 MTU의 용량 생산을 계획.
 - Global Laser Enrichment (GLE)은 100% 규모 농축시설에 대한 NRC 면허를 보유하고 있으나 아직 시설 구축이 완료되지 않아 실질적인 공급망에 포함될 수 있을지는 미지수임.
 - Orano(舊 AREVA)도 관련 면허를 보유하고 있으나, 불확실한 시장 상황으로 인해 면허를 종료할 것을 요청함.
- 미국의 단기적인 HALEU 공급 능력 및 장기적 확보 방안에 대한 다양한 계획이 수립되고 있음. NEI는 HALEU를 생산하기 위해 새로운 농축시설을 건설하거나 또는 기존 시설을 변경하는 NRC 면허 획득에만 24~36개월의 장시간이 소요될 것으로 전망됨.
 - DOE는 현재 EBR-II의 사용후핵연료로부터 회수한 농축우라늄을 20% 미만으로 낮추는 희석작업(downblending)을 수행하고 있으며, 이를 통해 10 MTU가 가용하며, 가용시기는 2025년까지 5 MTU, 나머지 5 MTU는 2028년까지 사용할 수 있을 것으로 예상됨.
 - Savannah River 부지 저장소에 있는 고농축 우라늄(HEU)을 처리한다면 2년 이내에 연간 약 1~2 MTU 생산이 가능하며, 또한 美의회가 자금지원에 동의한다면 아이다호 국립연구소(INL)의 사용후핵연료 처리를 통해 연간 1 MTU를 추가로 확보 가능
 - 의회는 HALEU 생산을 위한 지출을 늘려야 한다는 요구에 귀를 기울이고 있으며, 2022 회계연도 옴니버스 세출 법안 중 HALEU 프로그램에 4,500만 달러의 예산을 배정 승인함.

○ 한편, SFR 기반 선진 소형원자로에서 HALEU를 사용하기 위해서는 피복관, 덕트, wire 등 HALEU 핵연료봉 부품에 대한 준비도 필요함.

- SFR에 사용되는 핵연료봉 부품은 Ferrite-Martensite 강(이하 FM강)인 HT9(12Cr-1Mo 계열)을 사용하며, FM강은 종래의 Austenite 스테인리스강에 비해 고속중성자 swelling²⁴³⁾에 대해 우수한 저항성이 있음.
 - HT9은 1960년대에 개발하여 화력발전소 터빈 로터 등에 사용된 재료로 상기의 이유로 미국 고속로(EBR-II, FFTF) 핵연료 피복관으로 사용하여 최대 약 200 dpa²⁴⁴⁾의 사용 경험을 지닌 재료이며 고속중성자 기반 원자로 핵연료 부품의 reference로 사용됨.
 - 고속중성자 환경에서의 관련 시험자료가 충분히 축적되어 있으며 SFR의 핵연료 사용에 필요한 인허가 획득이 충분히 가능한 수준의 기술력을 보유함.
- FM강 계열의 핵연료 부품(잉곳 원소재부터 완제품 제작 망라)을 제조할 수 있는 국가로는 일본(Kobe Steel), 프랑스(Vallourec), 인도(NFC)가 있고, 특히 우리나라의 세아창원특수강, 일진제강, KOS-Wire 등은 관련 infra를 충분히 확보하고 있어 SFR 기반 소형원자로 관련 핵연료 공급망에 크게 기여할 것으로 예측됨.

○ HALEU 핵연료봉 제조를 위해서는 HALEU 핵물질을 이용한 핵연료심 제조, 부품 결합 및 용접, 핵연료 검사와 함께 각 항목에 대한 자격화(qualification)가 필요함.

- 금속연료심 제조기술은 미국(INL) 및 일본(CRIEPI)이 보유하고 있으며 저방사선을 갖는 HALEU 특성상 상대적으로 적은 비용 투자로 단기간에 시설이 구축될 수 있음.
- 한국은 한국원자력연구원을 중심으로 원통형(cylinder) 핵연료 제조기술의 일환으로 공학규모 핵연료심 제조기술을 보유함.
 - 제작한 핵연료봉/집합체의 건전성은 비파괴 검사(UT, ECT 등)를 통해 검사하며, 이와 같은 일련의 핵연료 제조 공정에 대한 제반 기술은 원자력 및 비원자력 분야에서 보편화된 기술로 관련 infra는 충분함.
- HALEU 핵연료 자체의 공급망 문제만 해결된다면 SFR 기반 소형원자로에 적용하는 핵연료 기술 및 관련 Infra는 적기 공급이 가능한 상황임.

○ SFR 기반 선진 소형원자로에 사용될 환형 HALEU 금속연료와 HT9 피복관은 공차 없이 접촉하고 있어서 원자로 가동, 또는 과도상태시 HALEU 금속연료와 HT9 피복관의 상호반응(FCCI)²⁴⁵⁾ 현상이 예상되므로 이를 방지하기 위한 배리어 피복관 개념을

243) 재료가 중성자와 반응 시 재료 내 발생하는 결합에 의하여 재료의 부피가 팽창하는 현상. Swelling 발생 시 핵연료의 치수 변화가 발생하여 핵연료 안정성이 감소함

244) displacement per atom, 중성자 조사량 척도

245) Fuel Cladding Chemical Interaction: 핵연료심 내에서 핵분열후 발생하는 핵분열생성물 중 주로 란타나

적용함.

- 배리어 피복관은 피복관 내면에 핵물질과의 확산방지용 기능성 물질을 처리한 피복관으로 선진 SFR의 경우, HT9 피복관 내면에 기능성 재료 튜브를 라이닝하여 제조한 liner 피복관을 적용함.
- 배리어 제조기술로는 전해도금, 증착법, 라이닝 기술이 개발되고 있으며, Nuclear-grade 라이너 피복관의 상용 공급을 위해서는 정밀관 생산이 가능한 제강회사를 포함하는 산업체의 높은 기술 수준이 요구됨.

○ 선진 소형원자로에 대한 HALEU 공급 방안은 결국 수요/공급 기반의 채산성 문제의 해결

- 비경수형 SMR의 도입 시기 자체가 아직은 불확실한 상황이므로 채산성 측면에서 공급망 구축이 요구됨.
- 미국 선진원자로실증 프로그램(ARDP)에서 필요로 하는 HALEU 수요가 700 톤정도로 예상되지만, 현재 자국 내에서 공급 가능한 양은 고작 12톤에 불과함 (Energy Act of 2020²⁴⁶)).
- (美)DOE가 투자 및 인허가 지원을 해야만 2030년대 비경수형 선진 소형원자로에 필요한 HALEU 공급망 현안을 해결할 수 있을 것으로 예상됨.

② 선진원자로 규제 현안 및 인허가 체계

○ 현재 원자력발전소 인허가신청서 작성 및 규제검토에 필요한 10CFR50 또는 10CFR52에 기술된 요건은 상업용 대형경수로 위주로 작성된 규정적인(prescriptive) 내용으로, 기존 상업용 원자로와는 다른 냉각재 및 핵연료를 사용하는 등 그 유형이 다른 다양한 선진원자로에 대한 규제사항을 포괄하지 못함.

- SFR 기반 소형원자로를 포함하는 비경수형 선진원자로의 안전성을 검토하기 위해서는 일부 요건들의 적용이 불가능하거나(예를 들어 물을 냉각재로 사용하지 않는 원자로에서의 대형배관 파단 사고 요건 등) 선진원자로 설계특성에 따른 추가 요건이 미비(SFR의 경우 소듐 취급 요건 등)한 경우가 빈번히 발생함.
- 비경수형 선진 소형원자로의 적기 도입을 위해서는 다양한 해당 기술이 안전하고, 보다 효율적으로 승인될 수 있도록 선진원자로에 대한 인허가 체제의 적기 제정이 요구됨.
- 원자로 설계 안전성에 대해 상세한 수준으로 검토하는 운영허가 심사 단계에서는 원자로

이드 계열의 희토류 원소들과 HT9 피복관의 철(Fe) 원소가 화학적으로 반응하는 현상
246) DOE should expeditiously establish the Advanced Nuclear Fuel Availability Program as authorized in the Energy Act of 2020 and immediately begin the funding opportunity or request for proposal process

유형별로 적용할 수 있는 전용 체계가 있어야 인허가 신청자와 검토자가 안전성 기준에 대한 공감을 가지고 신청한 원자로의 안전성 평가를 효율적으로 수행할 수 있음.

- 미국 NRC는 2019년 1월에 시행된 원자력 혁신 및 현대화법에 따라 선진원자로(비경수형인 고온가스로, 액체금속로, 용융염원자로 등) 규제를 위한 10CFR53을 수립함.

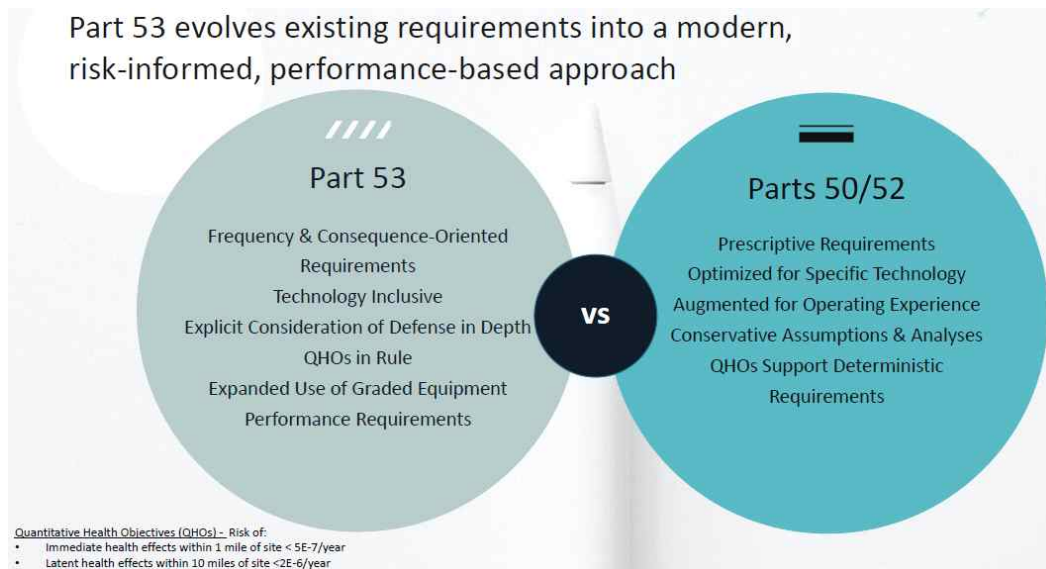


그림 3.1.12 US.NRC 10CFR53과 10CFR50/52 비교

- 10CFR53은 미국 NRC가 기존 경수로와는 다른 냉각재 및 핵연료를 사용하는 등 그 유형이 다른 선진원자로기술에 대해 효율적인 인허가 방법을 수립하기 위한 제도로, 신기술에 대해 다양한 기술이 안전하고 효율적으로 승인될 수 있도록 지원하고 불필요한 부담 없이 안전을 보장하며 위험도 정보에 기반한 성과 기반의 접근법을 활용하는 것이 목표임.
- 10 CFR 53 방법론의 근간인 NRC 규제지침 RG-1.233²⁴⁷⁾은 2020년 6월에 발간됨.
 - RG-1.233은 다양한 열출력을 갖는 MSR(Molten Salt Reactors), HTGR(High-Temperature Gas cooled Reactors), 고속로(Fast Reactors) 등의 비경수형 원자로(non-light water reactors, non-LWRs)의 인가신청 시, 인허가 근거(licensing basis)와 인허가 신청 내용(contents of application)에 대하여 TI-RIPB²⁴⁸⁾ 방법의 사용에 대한 NRC staff의 지침을 제공하기 위함.

247) Guidance for a Technology-Inclusive, Risk-Informed, and Performance-Based Methodology to Inform the Licensing Basis and Content of Applications for Licenses, Certifications, and Approvals for Non-Light-Water-Reactor

- 비경수형 원자로에 대해 10CFR50 및 10CFR52를 따라 permit, licenses, certifications 및 approval을 신청하는 경우에 함께 활용 가능함.
- 비경수형 원자로의 안전설계의 기본이 되는 LBE(Licensing Basis Events)의 선정, SSC(Structures, Systems, and Components)의 안전등급분류(safety classification)와 특별취급(special treatments), 심층방호(DID, Defense-In-Depth)의 평가는 비경수형 원자로 개발자 및 신청자가 licenses, certifications 및 approval을 신청할 경우 신청문서에 기재해야 하는 정보의 깊이 및 범위의 적절성을 확인하는 데 도움을 줄 수 있음.
- 계통설계와 안전성평가는 해당 원자로가 NRC 규제요건과의 적합성 또는 규제요건의 면제(exemption)가 필요한 사항에 대한 정당성을 입증 가능.
 - Technology-inclusive 방법이 LBE 선정, SSC 등급분류, 심층방호의 평가를 위한 공통적인 접근방식을 제공하고 있으나, NRC 규제규정 내의 특정한 기술요건을 적용하거나 또는 추가적인 기술요건 정의의 필요성은 각 비경수형 원자로별 case-by-case로 다루어야 할 필요성이 존재함.
 - NRC 위원회의 선진원자로 규제에 관한 정책성명(Policy Statement)에 따라 선진원자로는 향상된 안전여유도, 단순화, 고유안전성, 피동적인 계통을 갖거나 또는 안전성이나 안보를 보장하기 위한 다른 혁신적인 수단을 가질 것으로 전망됨.
- 선진원자로 규제체계의 확립 노력을 통해 비경수형 SMR의 도입에 가장 큰 걸림돌인 인허가 현안에 대한 선제적 해결이 가능해질 것으로 보임.

(4) 개발 로드맵

- 국내 소각용 SFR은 파이로공정과 연계하여 사용후핵연료 소각기술 개발 계획을 수립함.

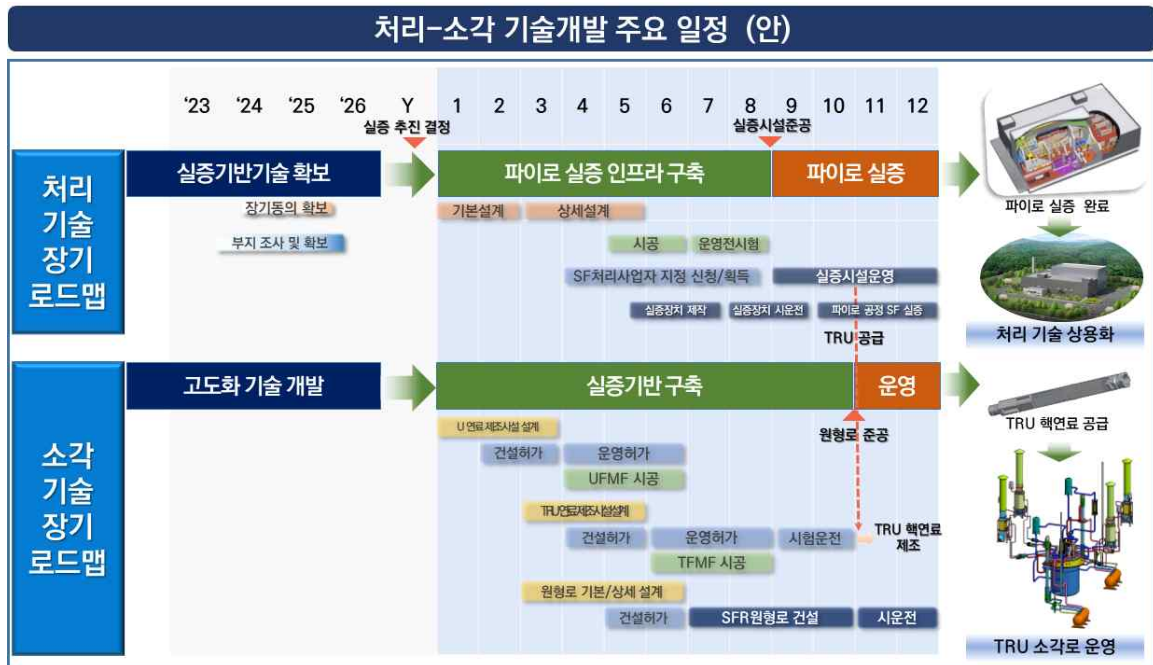


그림 3.1.13 사용후핵연료 소각기술 연계 SFR 개발 로드맵

○ SFR 소형 발전로 (SALUS-100)

- SFR 소형 발전로는 민간으로의 기술이전을 목표로 민간 주도 하에 사업모델 개발 및 사업화를 우선 추진한 후, 민간 주도 하에 국외 실증사업 및 상용모델의 사업화를 추진할 계획이다.

구분	(단기) 민간기술이전			(장기) 민간주도 국외 실증사업 추진			
연도	' 24	' 25	' 26	' 27	' 28	' 29	~' 33
추진 계획	▶ 사전인허가 검토	▶ 미확보 핵심기술 공동개발 ▶ SALUS 설계수준 향상		▶ SALUS-100 기본설계 완료 ▶ 차세대핵연료 제조 기본설계 완료			▶ 상세설계 ~
마일 스톤	▶ 연구협력 협의체 구성			▶ 경제성 평가 및 공급망 확보		▶ 해외실증사업 건설추진	
	사업모델 수립 ▲			인허가 설계 보완 ▲		PSAR 제출 ▲	

2. 납냉각고속로

납냉각고속로는 납, 납-비스무스등 소듐이외의 액체금속로를 냉각재로 활용하는 고속로를 의미함.

가. 원자로 개념

(1) 개발목적 및 활용 예상 분야

- 납(Lead)이나 납-비스무스(Lead-Bismuth)합금 액체금속을 냉각재로 하는 고속로로서 사용후핵연료 재활용, 최종 방사능 저감, 선박 추진, 수소, 공정열 생산을 위해 개발중
- 납냉각 고속로의 조선해양 환경에서 탁월한 적합성이 확인되었으며 이를 통하여 최근 미국, 영국, 스웨덴, 룩셈부르크, 이태리 등에서 납냉각 소형원전을 선박 추진용으로 개발을 추진 중에 있음[3.1-1].

(2) 노형 개념 및 특성

○ 정의 및 개념

- LFR은 제4세대 원자력시스템 국제포럼(GEN-IV)의 6개의 미래원자로 노형중 하나로, 사용후핵연료 소각, 선박 동력, 전력생산 등 다목적 실증이 착수됨[3.1-2].

○ 원리

- 액체의 납(Lead, Pb) 또는 납-비스무스(Bismuth, Bi) 합금을 냉각재로 사용하고 고속중성자로써 우라늄, 플루토늄 등을 핵분열시켜 에너지를 발생함.
- 사용후핵연료의 고준위폐기물의 소각과 미연소 우라늄의 재활용 및 저농축우라늄(<20%)으로 장주기 운전을 핵연료 교체 없이 연쇄반응의 지속이 가능함.

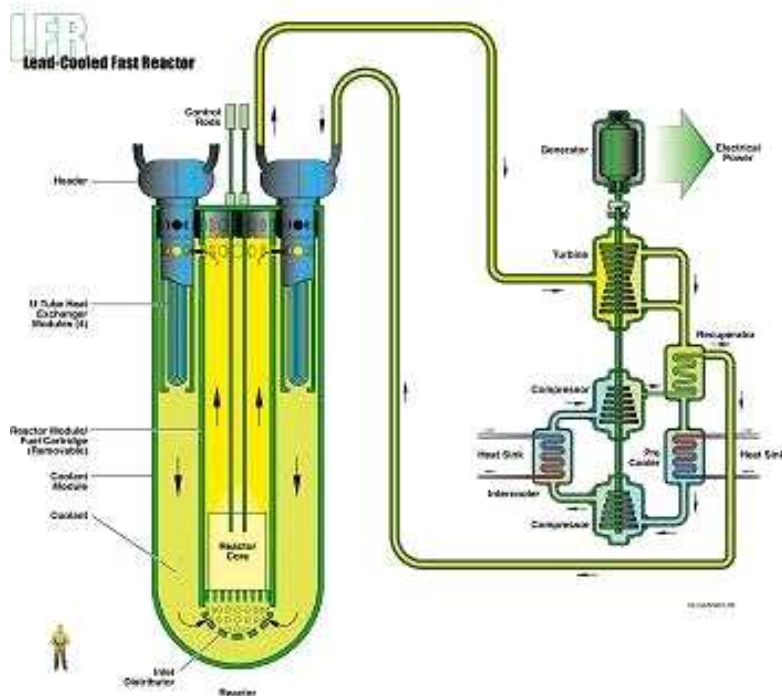


그림 3.1.14 GEN-IV에서 제시한 납냉각로 개념 설계 도식화 [3.1-2]

○ 기술 역사[3.1-2]

- 납냉각고속로는 1941년 맨하탄 프로젝트 도중 레오 실라드에 의해 제안되었음. 이에 따라 미국이 1950년대 납-비스무스 냉각로 개발 추진 중, 부식문제를 해결하지 못하고 중단함.
- 소련이 북극함대용 납-비스무스 냉각 원자로 사용하여 핵잠수함 Alfa를 1960년대에 개발 성공함. 북극해에서 총 80 원자로-년 가동 후, 1990년 소련 붕괴로 중단함.

○ 장점[3.1-2]

- 높은 비등(1670°C)으로 안전성, 열효율, 작동온도 높음.
- 사고 시, 납의 고화로 방사성물질 고착 및 방사선 차폐 가능.
- 물-공기 반응 없음.
- 장주기 운전을 핵연료 무고체로 조선해양환경에서 안전성과 핵비확산성이 우수함.

○ 단점[3.1-2]

- 재료 부식에 약함.
- 납의 높은 비중 지진에 취약함.
- 폴로늄 방사능 위험이 높음.
- 납의 생물학적 독성인 높음.

○ 안전성

- 비상 냉각되면 납이 고화되어 고압에서도 원자로 파손 우려 없이 납 속에 갇힌 핵연료 및 방사능이 차폐되고, 또한 장기간 냉각수에 용해 없이 환경피해 예방함.
- 납냉각고속로 특성으로 장주기 가동이 가능하며, 핵연료 교체를 제거하여 재장전 사고 근절함.
- Po-210로 인한 방사능 위험이 있으나, 핵연료 무교체 방식이므로 원자로용기 밀봉 유지로 해결 가능함.
- 영국 Lloyd's Register 등으로부터 조선해양용 원전으로서 안전성을 높이 평가 받음[3.1-1].
 - 핵연료 무교체 방식이므로 핵연료 교체 사고의 원천 차단이 가능함.
 - 침몰 시 냉각재가 고화되므로 심해 고압에서도 원자로용기 함몰을 억지하고 방사능 유출을 방지하는 특성이 있음.
- 이에 따라 미국 Gen4M, 한국 MicroURANUS, 스웨덴 LeadCold 및 이태리 LFR-TL-X가 해양용으로 개발되고 있음[3.1-1].

○ 핵비확산성

- 고속핵분열을 이용하여 초기 장전한 저농축 우라늄으로 핵물질 유출 위험을 근절함.
- 고속로 문제인 플루토늄 증식이 상대적으로 느리므로 핵개발 전용이 어려움.

○ 사용후핵연료 및 고준위폐기물

- 사용후핵연료의 장수명 고준위폐기물의 핵변환 소멸 능력 우수함.
- 핵적 안정성으로 다양한 조성의 고준위폐기물의 소멸 처리가 가능하여 사용후핵연료 처리를 위한 목적으로 러시아와 유럽에서 원자력 연구개발 사업으로 진행 중임.

○ 경제성

- 탁월한 안전성으로 복잡한 안전 설비를 줄이고 단순 설계로 경제성을 향상시킬 수 있음.
- 부식성 문제가 가동 수명을 제약하였으나, 최근 500°C까지 문제없는 신소재가 개발되어 문제 해결됨. 이후 러시아 BREST가 535°C에서 30년 가동 설계 조건으로 규제기관 건설허가를 받고 착공함[3.1-1].
- 미국 Westinghouse는 최고 600°C를 정상 가동 온도 목표로 재료를 개발 중임[3.1-1].
- 납냉각고속로는 다른 원전 대비, 가장 활용성이 높은 온도영역 (350~600°C)을 포함하여 시장성이 높음.

- 납의 비등점이 1700°C로 매우 높아 비등 우려가 없으며, 대기압에서 가동하므로 원자로 용기의 설계 압력이 낮아 제작에 고비용 대형 설비가 불필요하며 단기간에 완성될 수 있음.
- 납의 무게로 인한 내진 설계 비용 부담 문제는 700 MWe 이상 대형원전에만 해당함.

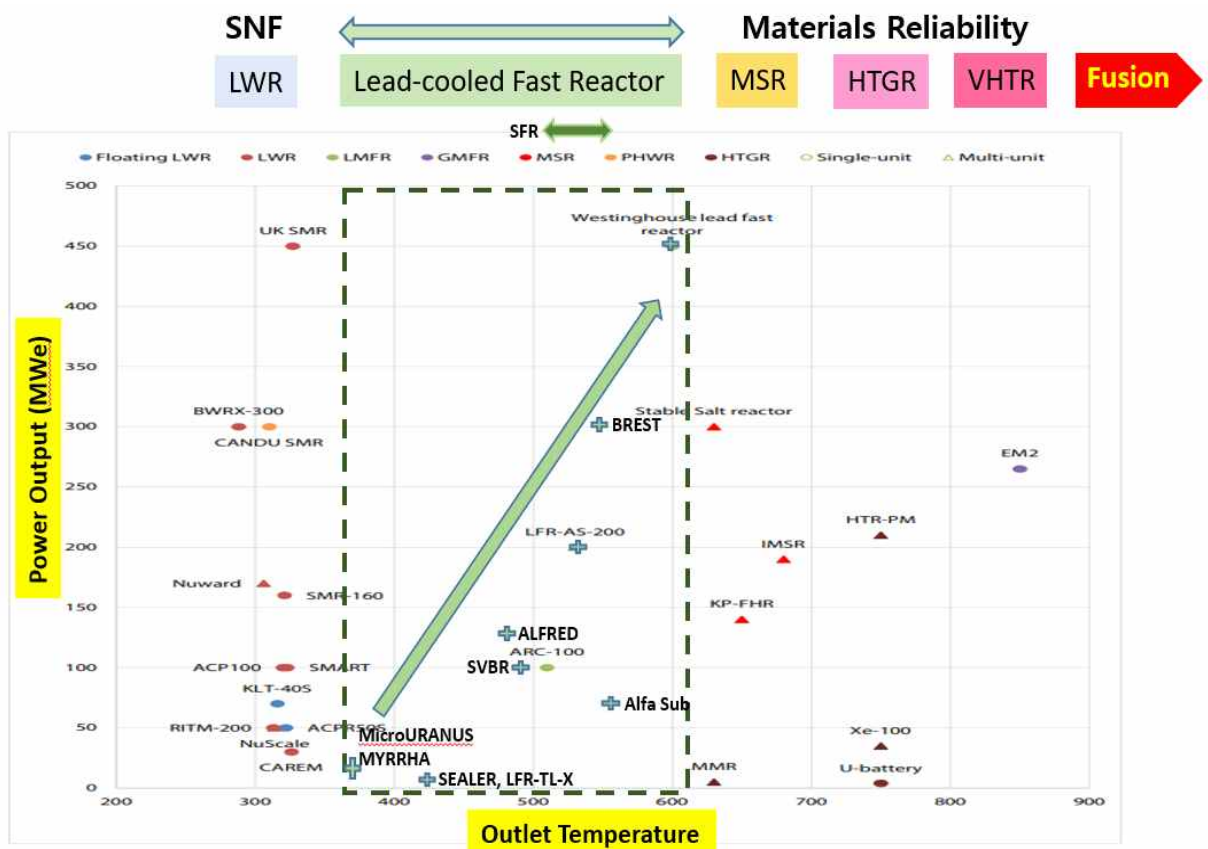


그림 3.1.15 개발 중인 납냉각로의 넓은 적용 온도 범위와 높은 신뢰성 및 효율성 [3.1-1]

○ 납냉각고속로의 단점과 대책은 다음과 같음.

단점	대책
납 환경에서 재료 부식	UNIST-서울대가 AFATi 신소재 개발(500배 부식 저감)으로 40년간 부식층 두께 5 micrometer 이하로 억제 [3.1-1]
폴로늄 방사능	핵연료 무교체로 원자로 용기를 용접으로 밀봉하여 기화성 폴로늄의 방출 배제
고비중으로 인한 지진 및 충돌시 충격	소형화와 면진설계 도입 [3.1-1]
납의 독성	원자로 용기 밀봉 및 증기발생기 튜브 이중화 도입
납 환경에서 원자로 내부 부품 검사 및 보수	설계 개선으로 검사 및 보수 문제를 해결 가능 (SFR과 동일한 문제이므로 미국 SFR 경험 활용 가능)

나. 국내외 개발동향

제4세대 소형원자로(SMR) 중 LFR 기술 특성은 다음과 같으며, MicroURANUS를 중심으로 기술하였음.

○ 국내 개발 중인 LFR의 주요 구성 [3.1-2]

구분	LFR (MicroURANUS)
핵분열	고속중성자
냉각재	납/납-비스무스
핵연료주기	재순환
주요 기술 특성	<ul style="list-style-type: none"> • 기술 육상 및 해상 실증 • 산화물/질화물 • 사용후핵연료 처리에 유리 • 조선해양용 유리
출구온도	350-550℃
국내 연구 이력	약 25년

○ 국내 개발 중인 LFR의 주요 기술 특성

- 납(Lead)이나 납-비스무스(Lead-Bismuth) 합금 액체금속을 냉각재로 하는 고속로로서 사용후핵연료 재활용 및 최종 방사능 저감을 위해 상용 1기가 착공되었고, 3기 사전인허가 중임. 선박 추진용, 수소 생산용, 공정열용 개발 중임.

○ 조선해양용 LFR의 주요 현안 분석 결과는 다음과 같음[3.1-3].

현안 분류	주요 현안	MicroURANUS
원자력 안전	선박 침몰 시 환경 안전	납 고화 및 핵연료 밀봉으로 수십 년 내 회수 시 안전함
	노심용융사고 (중대사고)	노심용융 근절
	비상계획구역 (EPZ) 반경	~ 0 m (납고화 및 해수에 불용)
	충격 안전성	舊소련 핵잠수함 8기 (80원자로-년) 입증
	경사 운동 안전성	舊소련 원자력잠수함에서 안전성 입증
	사고 중 원전 가동성	2기 설치로 확보 (핵잠수함 검증)
	원자로 물리 복잡성	비교적 단순
	핵연료 교체 (해상 교체 시 폭발 위험)	40년 무교체
핵안보-비확산	원자로 개봉 주기	40년 무개봉
	핵연료 인출 소요 시간	최소 수개월 냉각 (원자로 용접 절단)
인허가	설계, 제작, 검사기술 기준	기술기준 확립
	핵연료 품질보장 기준	제도 확립
	가동 경험	핵잠수함 8기 (80원자로-년), 육상 연구로 3기 가동
계통 운영	운영 복잡성	1차 원자로계통, 2차 터빈
	정비 난이성	정비 용이
	해체 난이성	해체 용이
사업 타당성	상용화 시기	2030년대 초
	경제성	선박용으로 디젤, 청정연료 대비 탁월한 경제성

(1) 국내현황

- 아래 그림은 해양 그린 수소생산 플랜트용 초소형원전(MicroURANUS) 개념설계도이며 최신 기준설계(Reference Design) 2.8 Version임[3.1-4].

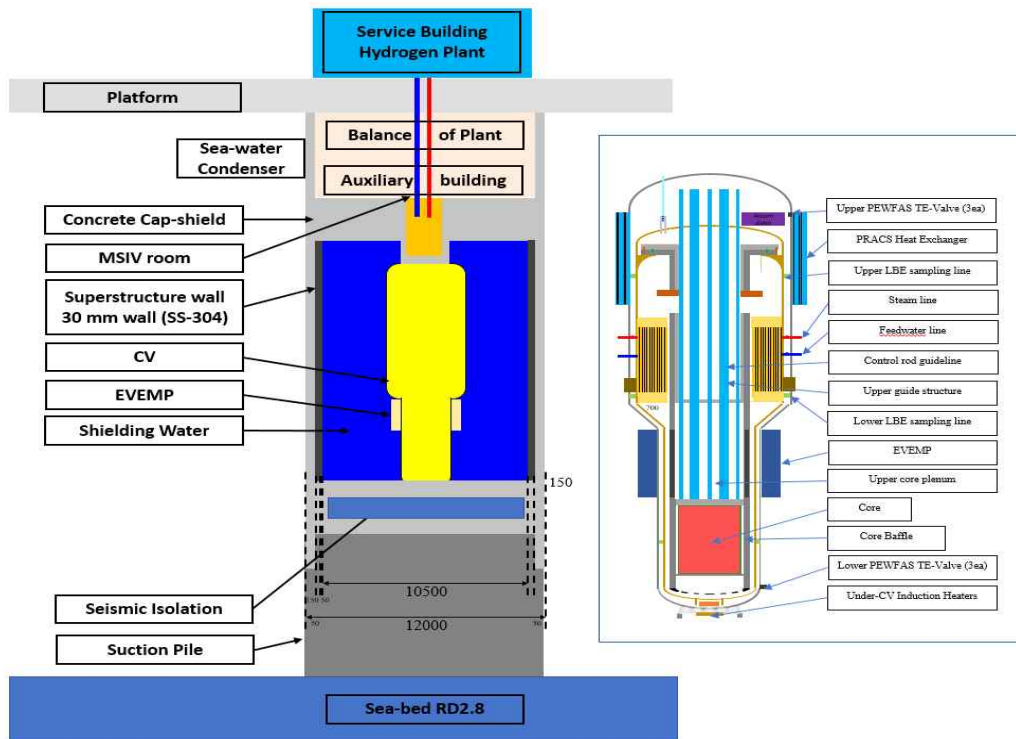


그림 3.1.16 해양 초소형원전(MicroURANUS) 개념 설계도 [3.1-4]

- 초소형원자로 MicroURANUS는 일체형 원자로로서 원자로 용기의 하부에 원자로 노심이 위치하고, 원자로 상부에 증기발생기가 배치되어 있음. 원자로는 격납용기 안에 설치되며 전체 모듈이 Superstructure Vessel 내의 차폐수 안에 설치됨. 그리고 Superstructure Vessel은 다시 Suction Pile 내부의 면진 플랫폼 위에 설치됨.
- MicroURANUS 원자로는 하단 직경 2.2 m, 상단의 직경 3.7 m이며 총 높이는 12.9 m에 달하며, 원자로 용기와 격납용기 사이의 진공 단열 공간이 있는 격납용기가 위치하며 격납용기 외부는 물로 채워진 초월 용기(Superstructure Vessel)로 차폐되어 있음.
- 원자로 냉각재인 납-비스무스의 높은 열전달 능력과 항상 냉각수가 존재하는 해양 환경의 결합으로 MicroURANUS는 가상사고 조건에서도 원자로 용융사고와 수소폭발이

원천적으로 근절됨. MicroURANUS를 이용하여 해양플랜트를 건설하여 해수로부터 그린수소 및 그린암모니아를 경제적으로 생산할 수 있음.

- 납-비스무스(LBE, Lead-Bismuth Eutectic) 냉각재의 우수한 자연 순환 능력을 이용하여 출력의 50%까지 운전할 수 있으며, 그 이상의 출력 영역에서는 격납용기 외부 하단에 부착된 전자기 펌프(EVEMP)가 작동하여 출력범위의 100%까지 가동 가능함. 전자기 펌프는 신속한 부하추종 운전을 가능하게 함.
- 원자로 노심은 농축도 평균 13%의 UO₂ 핵연료 소자와 피복관으로 구성되어 있음. 핵연료 소자는 내부에 피복관이 지나가는 반전 설계로서, 구조적으로 압축될 수 없는 단일체를 이루어 내구성을 강화하였음.
 - 피복관 내부로 냉각재 납-비스무스가 상향류를 형성하고 있으며, 단일체 노심이 노심 용기(Baffle Vessel) 내에 밀폐되어 있음.
 - 제어봉은 정지용과 제어용의 두 그룹으로 구성되었으며, 모두 삽입 시 임계상수가 0.95 이하가 되어 10 CFR 71의 수송 안전 기준을 만족함.
 - 노심의 반응도는 40년의 전 수명기간 동안 0.2 dollar를 넘지 않으며, 상온 영출력에서 고온 전 출력 사이의 반응도 변화가 1.0 dollar를 넘지 않도록 설계됨.
- 고속중성자 핵분열, 핵변환 및 출력집중 복합 현상을 체계적 전산 모사로 도출한 MicroURANUS의 주요 설계 사양을 아래 표로 나타냄.

표 3.1.1 조선해양용 전수명 초소형원전 MicroURANUS의 주요 설계 사양 [3.1-4]

번호	항목	주요 설계 사양
01	원전 명칭	MicroURANUS
02	출력	20 MWe (60 MWth)
03	개발자 (공동포함)	UNIST (KAIST, 서울대, 경희대, KINGS, 무진기연)
04	냉각재	Lead Bismuth Eutectic (LBE, Pb 45-Bi 55)
05	가동 온도	250~ 350 °C (재료 성능 입증 후, 고온부 500°C로 상승)
06	가동 압력	대기압
07	원전 면적 및 높이	면적 300 m ² 및 높이 12.9 m
08	부지	제작 공장, 해양 플랜트, 선박 동력실 및 극지
09	핵연료	평균 13% 저농축 UO ₂
10	제어봉	B4C (Shutdown 및 Regulation)
11	설계수명	40년 이상 (최대 60년)
12	핵연료교체	전수명 무교체
13	노심 반응도	전수명 40년간 노심 반응도 변동 0.2 Dollar 이내
14	노심 용융	Practical Elimination of Severe Accident (PESA)
15	수소 폭발	냉각재의 화학적 안정성으로 수소 생성 원천 근절
16	사용후핵연료	파이로 재활용으로 고준위폐기물 근절
17	해저 침몰시 안전	냉각재 고화로 장기간(~1,000년) 방사능 유출 방지
18	Polonium 방사능	원자로 밀봉 및 저온 운전으로 유출 근절
19	원자로 재료 내구성	부식, 마모, 피로, 조사팽윤, 크리프, 취화 허용 범위 이내
20	핵연료 연소도	노심 평균 50 MWD/MTU
21	핵연료 무게	Heavy Metal 16.2 ton
22	증기발생기	이중 직관형 전열관의 원통 설계 (12개 배치)
23	격납 용기	원자로 용기 진공 밀봉형 (반경 방향 5 cm 이격)
24	발전 계통	증기 터빈(해양, 극지), 초임계 CO ₂ 임계 터빈 (쇄빙선)
25	가동율	90% 이상
26	붕괴열 냉각	무한 자연냉각
27	냉각재 상실사고	무한 자연냉각
28	비상계획구역(EPZ)	Zero Emergency Planning Zone (ZEPZ)
29	소외 전원	불필요
30	외부 충격 허용치	3차원 면진 설계로 최대 2.0 g 허용
31	해양 가동 경험	80 원자로-년 (구소련 Alfa 핵잠수함)
32	EU Taxonomy	최종폐기물 처리대책 만족

- 농축도 13%의 저농축 우라늄을 사용하여 핵연료 교체 없이 40년간 가동하는 납냉각 초소형원전임.
- MicroURANUS 개념설계는 전기 출력 20 MWe로서 원자로 직경 2.2 m, 증기발생기 위치에서 원자로 직경 3.7m, 격납 용기 높이 12.9 m, 무게 800톤으로 공장에서 완제품을 생산하여 수송이 가능한 Type C 수송용기를 설계 개발하였음.
- 경수로를 사용하는 러시아와 중국의 조선해양 원전은 19.9%의 우라늄 농축도를 사용하면서도 핵연료를 7년 주기로 교체해야 하며, 국내의 SMART-100 원전은 3년 주기 그리고 BANDI-60은 4년 주기로 교체해야 함. 미국 최신 핵잠수함

Columbia-class는 42년간 전 수명 동안 핵연료 교체가 없지만 핵무기급인 93.5%의 고농축 우라늄 연료를 사용하므로 일반 산업분야의 상용화가 불가능함.

- 해외에서 개발 중인 납냉각 소형원전 모델의 핵연료 교체 수명은 미국 G4M이 10년, 러시아 SVBR-100이 8년, 스웨덴 SEALER가 30년임. 그러나 MicroURANUS는 40 EFPY(Effective Full Power Year)이므로 실제 수명은 50년 이상 도달할 수 있음.
- 전수명 핵연료 무교체 MicroURANUS의 안정적인 출력 생산 원리의 핵심은 아래 그림과 같이, 고속 중성자가 일으키는 우라늄-238 및 플루토늄-239와의 핵분열반응이 가동 시간에 따라 증가하여, 줄어드는 우라늄-235의 반응을 상쇄시키는 데 있음.
 - 우라늄-235만 주로 연소시키는 경수로와 달리 우라늄-235 연소, 우라늄-238 연소 및 내부 핵변환 (플루토늄-239)을 활용하여 원자로 임계상수의 수명기간 편평화를 극대화함. 고속로 원전에서는 출력 분포의 축방향 제어가 설계 복잡성으로 인해 안전성과 경제성이 저하되지만, MicroURANUS는 침투출력밀도 영역의 Radial Travelling 기법을 복합하여 제어봉 구동 없이 40년 일정한 반응도 달성이 가능함.

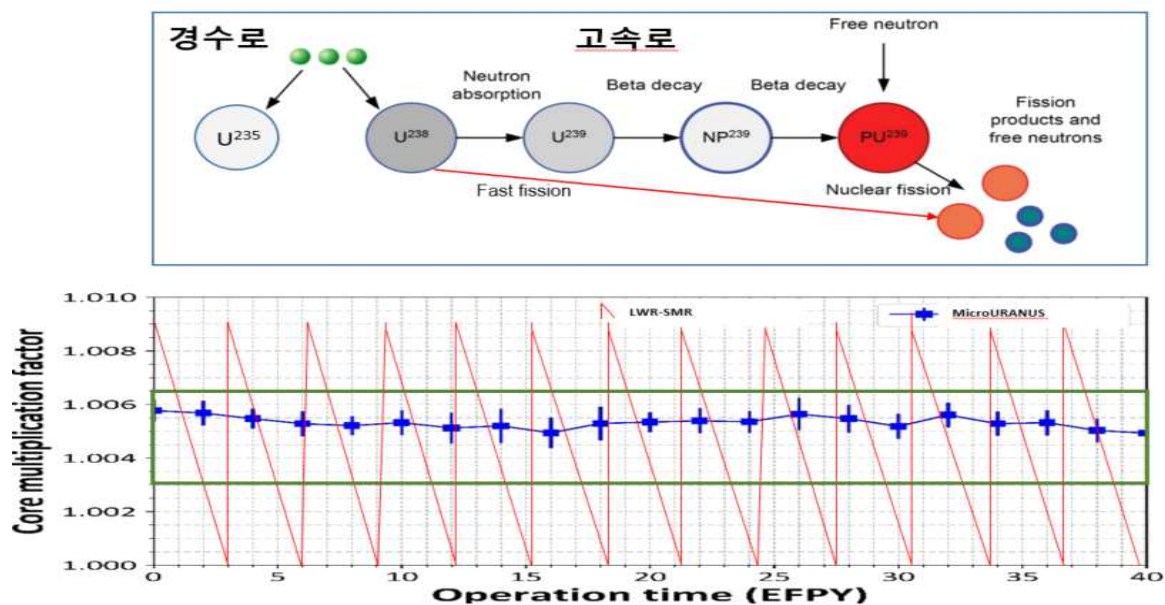


그림 3.1.17 전수명 핵연료 무교체 MicroURANUS의 안정 출력 생산 원리도[3.1-4]

- 핵연료 장수명 손상의 75% 이상이 핵연료봉과 Grid Fretting에 의하여 발생하고 있음. 납 냉각재는 밀도가 높아 유동 유발 진동이 심하므로 이 경향이 심화할 수 있음.
 - 40년의 초장수 설계수명을 가능케 하는 6각형의 UO_2 반전 핵연료를 개발하여 시제품을 제작하였고 전산모델을 이용하여 예비 성능 평가를 수행하였음.
 - 과거 조선해양용 원전에는 판형 Cermet 핵연료가 필수적으로 간주 되었고 이에 높은

비용이 소요되었음.

- 충격 시 노심 압축이 일어나지 않고, 40년 내구성을 갖추며, 제3세대 원전 핵연료 생산 방식을 적용할 수 있는 저비용의 UO_2 반전 핵연료를 개발함.

○ 전수명 납냉각 고속로용 내부식 및 내조사 팽윤 복합 소재 개발. AFATi로 명명된 첨단 신소재의 시제품을 제작하여 노외 부식 시험을 수행한 결과, 아래의 그림과 같이 450℃에서 초기의 소규모 부식 이후에 부식이 중단되어 40년의 수명기간에 부식층의 두께가 5 micrometer에 국한됨[3.1-4].

○ AFATi 재료에 대해 가속기를 이용한 내방사능 시험의 1단계(40 dpa)를 아래 그림과 같이 통과함.

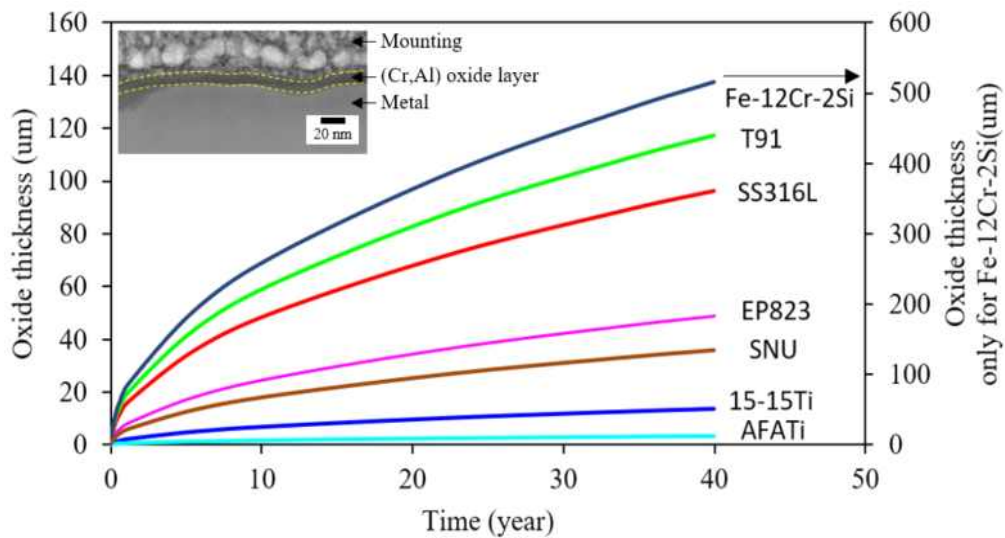


그림 3.1.18 AFATi 첨단 신소재 시제품의 노외 부식 시험을 통한 450℃ 부식층 두께 예측 결과 [3.1-1]

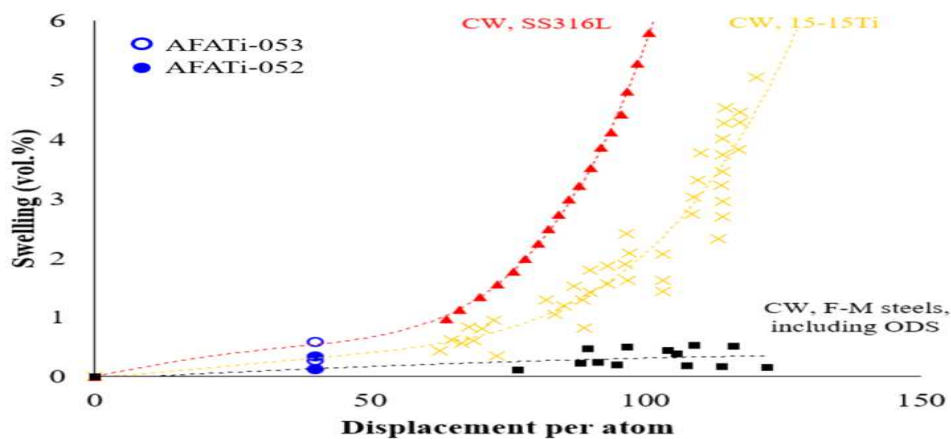


그림 3.1.19 AFATi 첨단 신소재 시제품의 고온 가속기 조사 시험을 통한 조사팽윤 측정 결과 [3.1-1]

(2) 국외현황

세계 각 나라에서 추진하고 있는 납냉각고속로(LFR) 개발 현황은 다음과 같음.

○ 미국

- G4M (Gen4 Module)
 - 설계 기관: Gen4 Energy Inc.
 - 출력: 70 MWth
 - 핵연료 물질: Uranium nitride
 - 냉각재: LBE (Lead Bismuth Eutectic alloy)
 - 설계 수명: 5-10년
 - 주요 설계 내용: 2007년에 Hyperion Power Generation Inc.으로 설립된 Gen4 Energy는 New Mexico의 Los Alamos National Laboratory (LANL)에서 처음으로 고안한 Gen4 Module (G4M)을 개발하기 위해 형성됨. LANL의 기술 이전 부문에서 진행된 상업화 프로그램을 통해 Hyperion Power Generation은 지적 재산을 활용하고 이 모듈을 개발하는 독점 라이선스를 수여 받음[3.1-5].

Conceptual Drawing of Gen4 Module (G4M)-based 25MWe Electric Power Plant

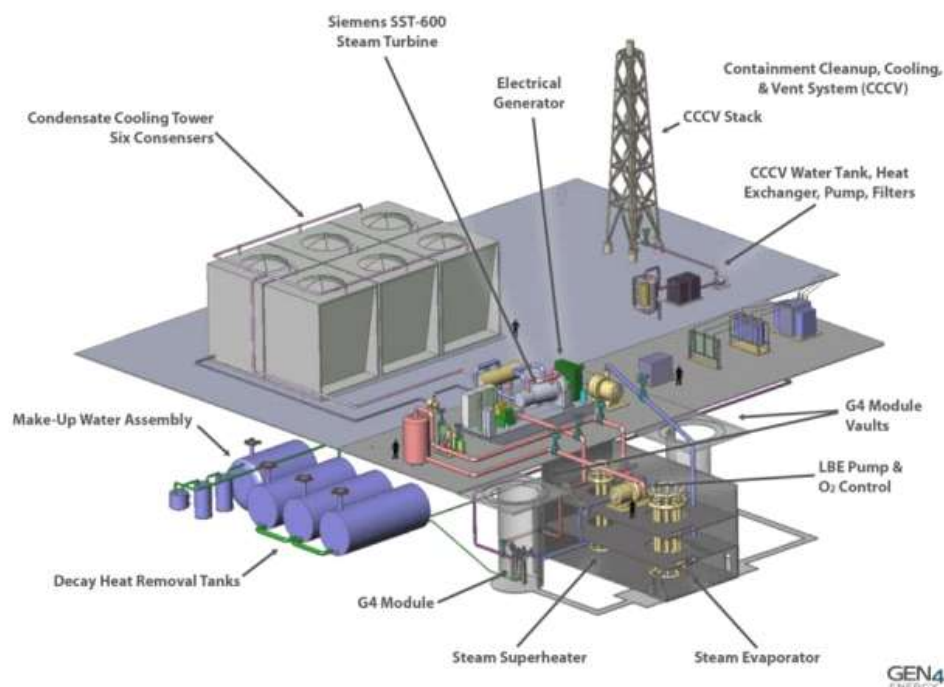


그림 3.1.20 G4M 발전소 묘사 [3.1-5]

- W-LFR (Westinghouse Lead-cooled Fast Reactor)
 - 설계 기관: Westinghouse Electric Company LLC
 - 출력: 950 MWth
 - 핵연료 물질: Oxide (UO_2 반전 핵연료 or MOX) (prototype) Advanced fuel(commercial)
 - 냉각재: Lead
 - 설계 수명: 60년
 - 주요 설계 내용: W-LFR은 중간 출력의 모듈형 발전소로, 고온에서 운영되는 풀 구조에 원자로를 운영하며, 납 냉각 및 고속 스펙트럼 노심으로 설계됨. 고온 운전, 작은 원자로 용기(RV)와 가드 용기(GV)의 특이한 구성은 계측 및 제어 신호나 움직이는 부품 없이 자동 작동되는 수동 냉각 기능을 제공하는 것임. 세계 PWR 기술의 총본산인 웨스팅하우스사가 차세대 원전의 가장 유망한 기술로서 LFR을 정하고 개념설계 완성하고 표준설계 추진 중임 [3.1-6, 3.1-7].

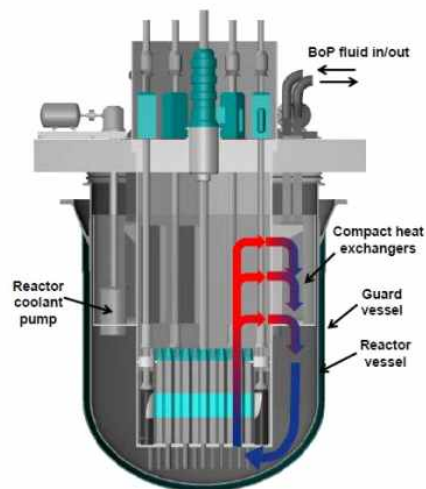


그림 3.1.21 W-LFR 원자로 묘사 [3.1-6]

- ENHS: 미국 버클리대학에서 서울대 등과 국제 공동으로 개발한 자연순환형 장수명 원전 [3.1-8]
- SSTAR: 미국 ANL에서 개발되었고, 현재 유럽과 국제 공동 연구중인 수소생산용 원전 [3.1-9]

○ 러시아

- BREST-OD-300
 - 설계 기관: RDIPE
 - 출력: 700 MWth

- 핵연료 물질: PuN-UN
- 냉각재: Lead
- 설계 수명: 30년
- 주요 설계 내용: BREST는 우라늄 플루토늄 모노니트라이드(PuN-UN) 연료 사용 납 냉각 고속 원자로로, 열을 스팀 터빈에 전달하기 위해 이중 회로 열 수송 시스템을 사용함. 러시아의 사용후핵연료 소멸처리용 납냉각 실증로로서 2021년 2월에 인허가를 취득하고, 6월에 Tomsk지역의 Siberia Chemical Combine부지에 착공되어 2026년에 가동이 예상됨. 우라늄질화물을 핵연료로 사용하며, 납환경에서 부식방지를 위하여 Si-기반 Ferritic-Martensitic Stainless Steel을 피복관과 노내 구조재로 사용함. 500°C에서 가동되며 핵연료를 5년마다 교체할 계획이며 설계 수명은 30년임 [3.1-9, 3.1-10].

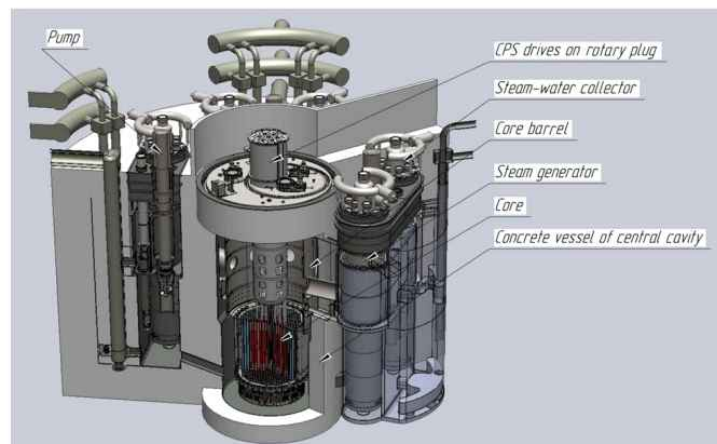


그림 3.1.22 BREST-OD-300의 구성도 [3.1-10]

- BREST-OD-1200: BREST-OD-300의 실증 후 상용 핵변환로로서 개념설계됨.
- SVBR-100
 - 설계 기관: AKME Engineering
 - 출력: 700 MWth
 - 핵연료 물질: UO_2
 - 냉각재: LBE (Lead Bismuth Eutectic alloy)
 - 설계 수명: 60년
 - 주요 설계 내용: HLMC (고유 재료 냉각 원자로)를 사용한 15개 원자로 추진 설치와 나트륨 냉각재를 사용한 고속 원자로 개발 및 운영을 통해 얻은 경험을 바탕으로 설계됨. 이러한 경험은 구조 재료의 부식 저항 보장, LBC(Lead Bismuth Coolant) 품질 및 원자로 회로에서의 물질 이동 과정 제어, ^{210}Po 방사능 핵종으로 오염된 장비를 다루는 인원의 안전 보장의 장점이 있음. 구소련 핵잠수함기술을 기반으로

개발된 납-비스무스 냉각 SMR임. 개념설계를 완료하고, 2015년에 부지허가를 취득하였고, 표준설계를 추진 중임[3.1-11].

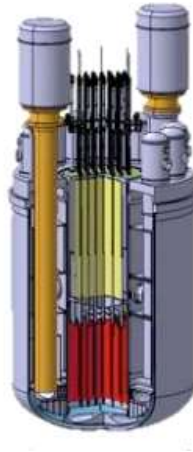


그림 3.1.23 SVBR-100의 구성도 [3.1-11]

○ 유럽연합(EU)

- ALFREAD (Advanced Lead Fast Reactor European Demonstrator)
 - 설계 기관: Ansaldo Nucleare
 - 출력: 300 MWth
 - 핵연료 물질: MOX
 - 냉각재: Lead
 - 설계 수명: 40년
 - 주요 설계 내용: 개념설계가 EU FP7 LEADER (Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor) 프로젝트의 일환으로 수행됨. ALFRED는 유럽 LFR (ELFR) 기술의 미래 상업용 발전소에서 사용 가능성을 입증하기 위해 개발된 300 MWth pool 시스템으로 고안됨. ALFRED의 설계는 가능한 한 기존의 기술 솔루션을 사용하여 단기간 내에 건설을 진행할 수 있도록 ELFR을 참조하여 가까운 형태로 설계됨. 2013년 3월 파리에서 열린 pSSC(the LFR-provisional System Steering Committee) 회의에서 위원회는 ALFRED-100 디자인을 사용하기로 결정됨. ELFR 산업 발전소용 디자인에 비해 축소된 원자로 형태인 ALFRED를 선택하였으며, ELFR 및 ALFRED 두 디자인 모두 LEADER (Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor) 프로젝트의 7차 프레임워크 프로그램 (FP7) 활동의 일부로 수행됨[3.1-9, 3.1-12].

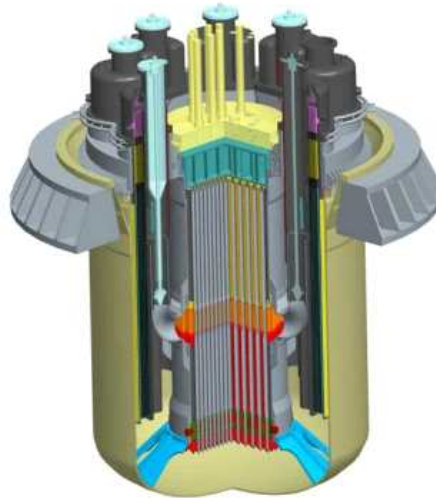


그림 3.1.24 ALFRED의 구성도 [3.1-12]

- ALFRED-100
 - 설계 기관: FALCON
 - 주요 설계 내용: EU 납냉각로 개발 컨소시엄이 개념설계를 마치고, 표준설계에 진입하였음. 루마니아 정부가 50% 재원을 부담하여 부쿠레시티 인근에 부지를 결정함[3.1-9].

- ELFR(European Lead Fast Reactor)
 - 설계 기관: Ansaldo Nucleare
 - 출력: 1500 MWth
 - 핵연료 물질: MOX
 - 냉각재: Lead
 - 설계 수명: 60년
 - 주요 설계 내용: ELFR의 개념설계는 EU FP7 LEADER (Lead-cooled European Advanced Demonstration Reactor) 프로젝트의 일환으로 개발됨. ELFR은 미래 산업용 규모 발전소의 첫 번째 유형 (FOAK First Of Kind)인 1500 MWth pool 시스템임. ELFR 설계는 모든 GEN IV 목표를 준수하며, 폐쇄형 연료 주기(흔히 adiabatic core라고 불림) 갖추고 있음. 명목 전력은 1500 MWth이며 선택된 초과 열 증기 사이클의 순 열효율을 고려하면 전기 발전 용량은 약 630 MWe 로 설계됨[3.1-13].

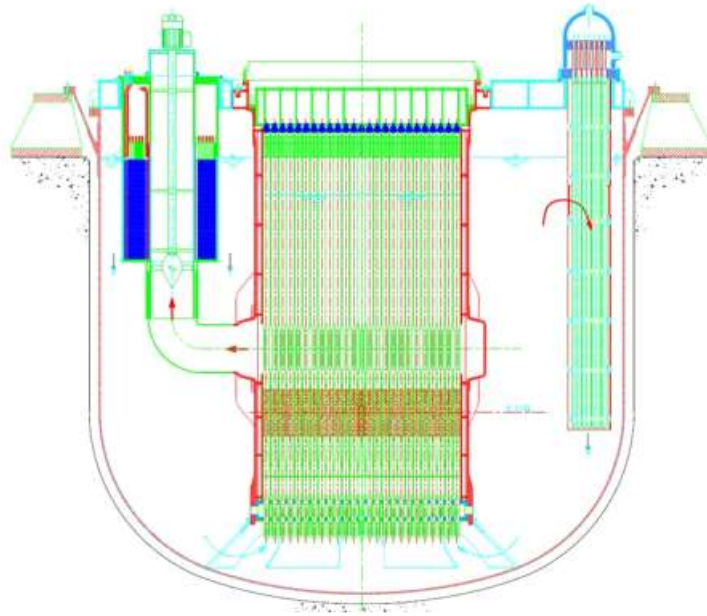


그림 3.1.25 ELFR의 구성도 [3.1-13]

○ 이탈리아

- LFR-TL-X(Newcleo): 이탈리아 신흥 기업 Newcleo는 노벨 물리학상 수상자 Carlo Rubbia가 소장하고 있던 유럽 가속기 연구소(CERN)의 Energy Amplifier에서 도출되었음. 미국 Hydromine사의 LFR-TL-X를 인수하여 납냉각 SMR기반의 조선-해양용 원전을 개발 중임 [3.1-8].
- LFR-AS-200(Newcleo): 이태리 신흥 기업 Newcleo의 상용 소형 발전로 설계로서 펌프로 구동되며, 사고 시 비상냉각에 전력을 필요로 한다는 점에서 한세대 뒤흔친 것으로 판단됨[3.1-8].

○ 스웨덴

- ELECTRA(European Lead Cooled Training Reactor)
 - 설계 기관: KTH
 - 출력: 0.5 MWth
 - 핵연료 물질: inert matrix (Pu,Zr)N
 - 냉각재: Lead
 - 설계 수명: 30년 (평균 사용량 50%)
 - 주요 설계 내용: ELECTRA는 연구, 교육, 훈련 및 기술 데모 목적으로 설계된 저출력 고속 원자로임. 이 원자로 개념 개발은 2009년부터 스웨덴의 로열 공과 대학교 (Royal Institute of Technology), 우프살라 대학교 (Uppsala University), 찰머스

공과 대학교 (Chalmers University of Technology)에서 진행되었으며, 지난 15년간 진행된 질화물 연료, 액체 납 냉각 및 고급 피복관 재료에 대한 연구 및 개발 결과를 위해 활용하고 있음 [3.1-14].

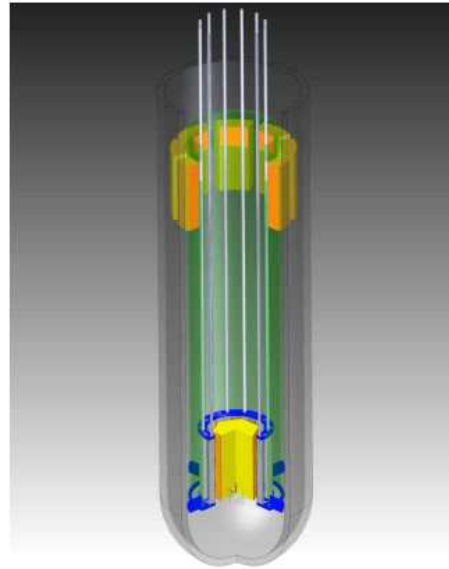


그림 3.1.26 ELECTRA의 주요 시스템 모델 [3.1-14]

- SEALER(Swedish Advanced Lead Reactor)
 - 설계 기관: LeadCold
 - 출력: 140 MWth
 - 핵연료 물질: UN
 - 냉각재: Lead
 - 설계 수명: 25년
 - 주요 설계 내용: 영국 전력망에서 베이스로드 전력을 생산하기 위해 고안된 SEALER는 공장에서 자동화된 제조가 가능하도록 설계되었으며, 주문부터 운영까지의 목표 리드 타임은 24개월임. 4개의 단위로 구성된 기준 구성에서 SEALER-UK 발전소는 220 MW의 전기를 생산할 수 있음. 예상 비용은 MWh 당 £50로 추정됨. 단일 연료로 22.5년 동안 출력을 유지할 수 있으며, 이는 25년간의 운영 기간을 의미함. 스웨덴 왕립공대 주관으로 소형 LFR로서 개념설계를 완료하고 표준설계에 진입하여 5~10 MWe 출력의 극지 및 선박 추진용으로 개발되고 있음 [3.1-15~ 3.1-16].

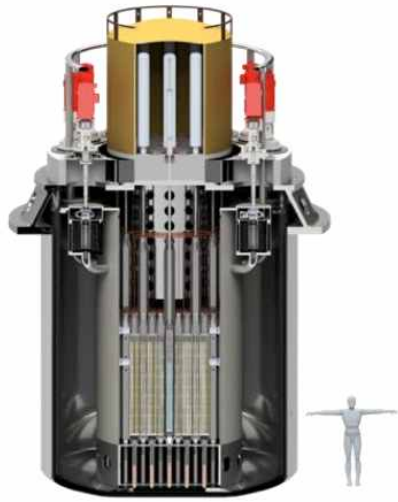


그림 3.1.27 SEALER CAD 모형 [3.1-15]

○ 벨기에

- MYRRHA(Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications)
 - 설계 기관: Belgian Nuclear Research Centre (SCK·CEN)
 - 출력: 100 MWth
 - 핵연료 물질: MOX
 - 냉각재: LBE (Lead Bismuth Eutectic alloy)
 - 설계 수명: 40년
 - 주요 설계 내용: MYRRHA는 현재 SCK·CEN에서 개발 중인 혁신적인 다목적 연구용 원자로로, 가속기 구동 시스템으로 고안되었지만 스파레이션 타겟을 제거하고 제어 및 안전봉을 삽입함으로써 임계 모드에서도 운영 가능하도록 설계됨. 사용후핵연료 핵변환용 가속기구동 납-비스무스 냉각 미임계로를 1990년대부터 개발하여, 2010년에 정부 정책사업으로 결정되었음. 2018에 사전인허가 심가를 거쳐, 벨기에 정부로부터 8,000억 원의 연구비를 받아 표준설계를 진행 중임[3.1-17~ 3.1-18].

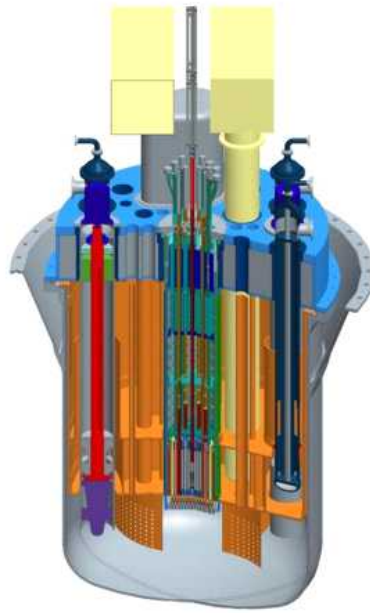


그림 3.1.28 MYRRHA 노심 모형 [3.1-18]

○ 룩셈부르크

- LFR-AS-200(Lead-cooled Fast Reactor Amphora-Shaped 200)
 - 설계 기관: Hydromine Energy S.a.r.l
 - 냉각재: Lead
 - 감속재: 없음
 - 주요 설계 내용: LFR-AS-200은 용융된 납으로 냉각되는 혁신 원자로. AS는 내부 용기의 모양을 가리키는 Amphora-Shaped의 약자이며, 200은 전력을 MW 단위를 의미. 이 원자로는 납의 특성을 활용하고 공장 단순화 및 조밀성을 강화함으로써 미래 배치의 잠재력을 향상시키는 동시에 수동으로 안전하게 작동하게 함. 이태리 신흥 기업 Newcleo의 상용 소형 발전로 설계로서 펌프로 구동되며, 사고 시 비상 냉각에 전력을 필요로 한다는 점에서 한세대 뒤쳐진 것으로 판단됨[3.1-17].

○ 중국

- CLEAR-I(China LEAd-based Research Reactor)
 - 설계 기관: Institute of Nuclear Energy Safety Technology, Chinese Academy of Sciences
 - 출력: 10 MWth
 - 핵연료 물질: UO₂
 - 냉각재: LBE (Lead Bismuth Eutectic alloy)

- 설계 수명: 30년
- 주요 설계 내용: 중국과학원(CAS)은 중성자 활성화 분석 및 원자로 안전 공학 연구에 관한 프로젝트를 시작하여 중국 리드 기반 원자로 (CLEAR) 시리즈로 명명함. 제1 단계에서는 중성자 활성화 분석 및 원자로 안전 공학에 관한 연구원에서 개발될 10 MWth 리드-비스무트 냉각 연구 원자로 (CLEAR-I)가 개발될 예정임. CLEAR-I는 무거운 액체 금속 고속 원자로 기술 시험을 위한 임계 작동 모드와, 가속기 구동 하부임계 작동 모드(ADS 시스템)로 운영될 수 있도록 설계됨. 이러한 설계는 중성자 활성화 분석 및 원자로 안전 공학 연구의 중요한 단계로, 중국에서 납 기반 고속 원자로 및 가속기 구동 시스템 (ADS 시스템) 기술 개발을 추진하는 데 사용됨 [3.1-19].

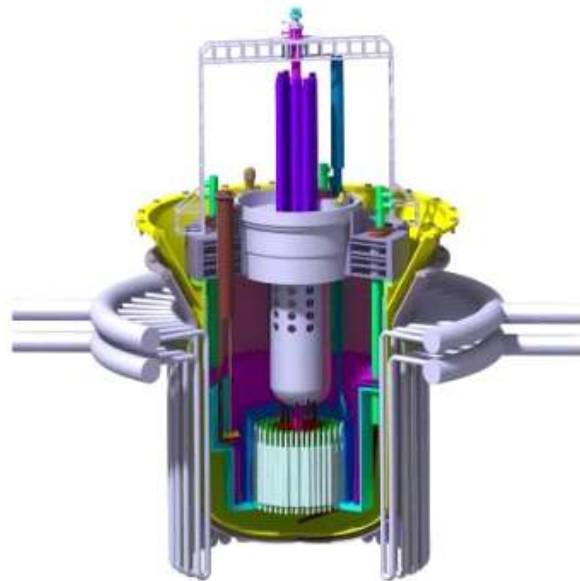


그림 3.1.29 CLEAR-I 노심 모형 [3.1-19]

- China LFR: 중국원자력연구원의 가속기 구동 핵변환 연구로(CiADS) 개발의 일환으로 납-비스무스 임계 영출력 원자로가 완공되어 2019년에 가동을 시작하였음[3.1-17].
- CGN 원자력발전사가 사용후핵연료 처리를 위하여 광동 원전 부지에 가속기 구동 미임계 핵변환로를 건설하기 위하여 납-비스무스 고속로 설계를 개발 중임[3.1-17].
- INEST가 소형 LFR 및 가속기 구동 핵변환로 개발에 많은 투자 중임. 최근 칭다오시에 제2연구소를 설립하고 조선-해양용 원전을 개발중으로 보이나, 상세 정보가 비공개 상태임.

○ 한국

- PEACER(Proliferation-resistant Environment-friendly Accident-tolerant Continuable and Economical Reactor)
 - 설계 기관: Seoul National University
 - 출력: 850 MWth
 - 핵연료 물질: U-TRU-Zr Alloy (58.04-31.07-10.88 Wt. %)
 - 냉각재: LBE (Lead Bismuth Eutectic alloy)
 - 설계 수명: 60년
 - 주요 설계 내용: 서울대학교(SNU)의 연구진은 1990년대 초에 가속기 구동 핵폐기물 변형 개념에 대한 실현 가능성 연구를 수행하였으며, SNU의 핵 물질 연구실(SNUMAT)은 핵폐기물 변형 시스템에 사용하기 위한 대안 냉각재로 Pb-Bi 유틸렉틱 합금에 대한 실험적 조사를 진행하였음. 이러한 고려 사항 아래 안정된 물리화학적 특성이 검증되었으며, 이로써 SNUMAT은 1997년 PEACER로 명명된 LBE로 냉각된 최초의 특별한 핵폐기물 변형 고속 원자로 설계를 개발하기 시작함. 최초의 PEACER 설계는 다국적 통제하에서 원전 폐기물로부터 추출된 트랜스우라늄(TRU) 원소를 포함하는 금속 연료로 팬케이크 모양의 고속 원자로 노심 형태를 가짐. 550 MWe의 정격 출력을 갖춘 PEACER-550의 냉각재 온도는 LBE의 잘 알려진 높은 부식성에도 불구하고 구조 재료 및 증기 발생기 등의 60년 설계수명 및 연료 포장 재료의 3년 수명을 보장하기 위해 400°C로 낮추어졌음[3.1-20].

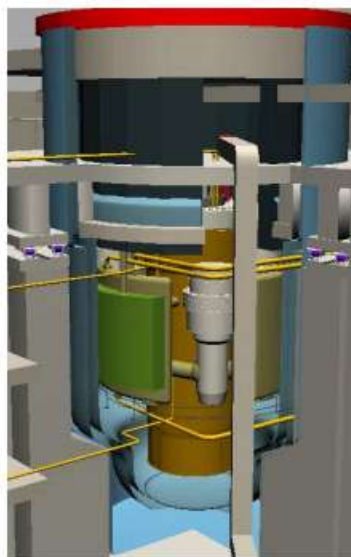


그림 3.1.30 PEACER 노심 CAD 모형 [3.1-20]

- MicroURANUS

- 설계 기관: Ulsan National Institute of Science and Technology
- 출력: 60 MWth
- 핵연료 물질: UO_2
- 냉각재: LBE (Lead Bismuth Eutectic alloy)
- 설계 수명: 40년
- 주요 설계 내용: 저농축 우라늄으로 40년 이상 가동이 가능한 초소형 원전으로서
공장에서 완제품을 제작하고 핵연료 장전 후, 인허가 시험을 수행하도록 설계됨.
선박에 장착 후 최종 인허가 시험을 종료하고 40년간의 운항하도록 설계됨[3.1-1].

○ 대표 국외 LFR 디자인의 개념도와 디자인 파라미터 비교를 정리하면 아래와 같음.

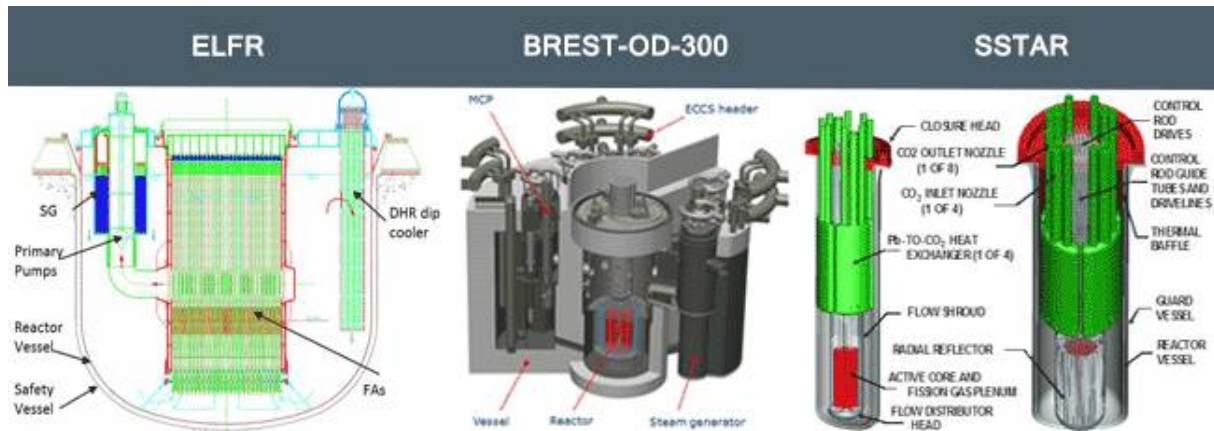


Table 2.4: Summary Parameters of ALFRED vs. LFR-PSSC systems

	ALFRED	ELFR	BREST	SSTAR
Core power (MWt)	300	1500	700	45
Electrical Power (MWe)	125	600	300	20
Primary System type	Pool	Pool	Pool	Pool
Core Inlet T (°C)	400	400	420	420
Core outlet T (°C)	480	480	540	567
Secondary cycle	Superheated Steam	Superheated Steam	Superheated Steam	CO ₂
Net Efficiency (%)	42	42	42	44
Turbine Inlet Pressure (bar)	180	180	180	20
Feed Temperature (°C)	335	335	340	402
Turbine Inlet T (°C)	450	450	505	553

○ 다음 그림은 세계 각 나라에서 개발 중인 납냉각고속로(LFR)의 관계도임.

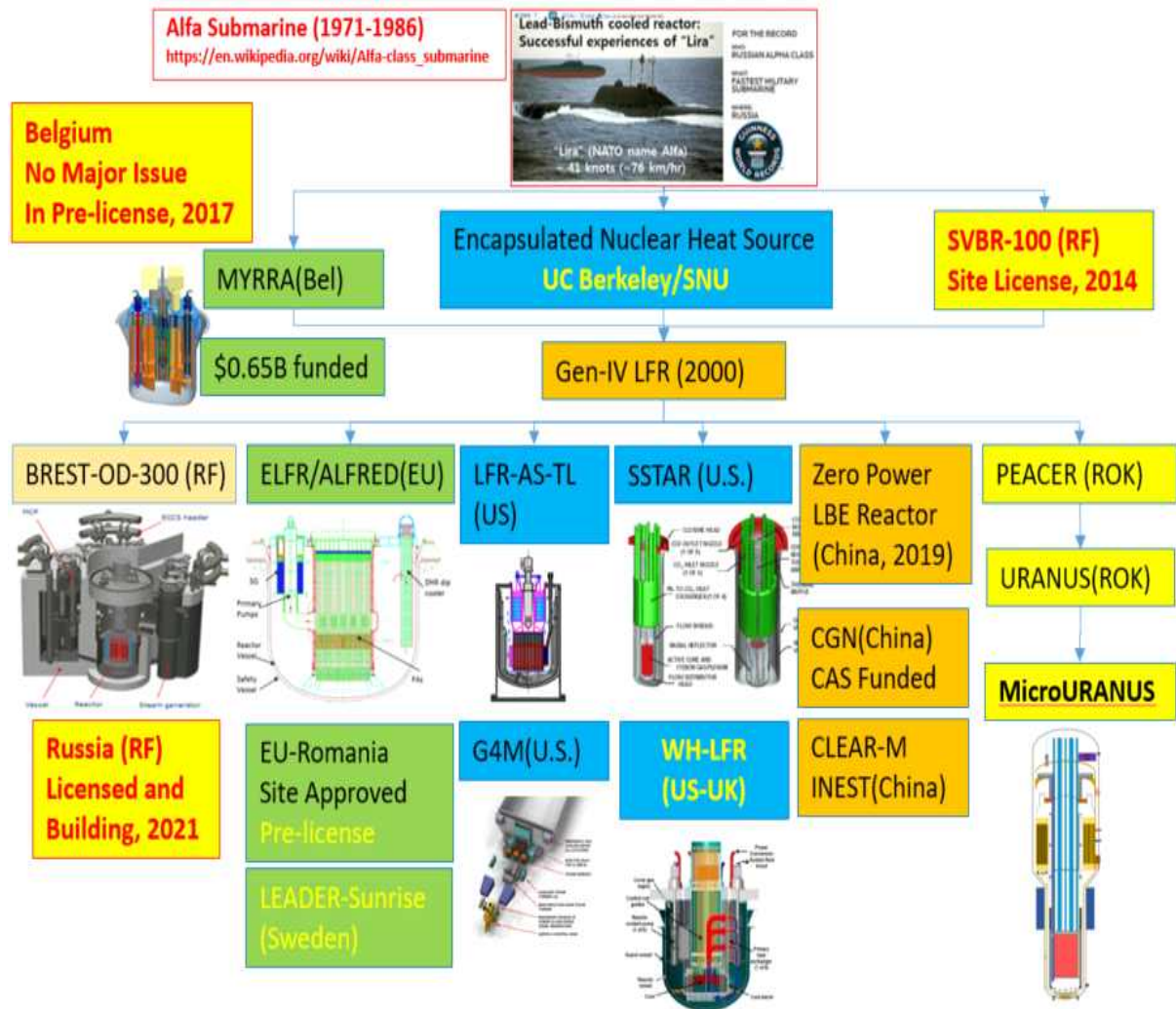


그림 3.1.31 개발 중인 납냉각고속로의 관계도 [3.1-1]

ESNII Technologies	2015	2020	2025	2030	2035	2040
LFR-ADS Belgium	Concept Pre-License	Design License	Construction in 3 Phases		Commissioning & Operations	
LFR-SMR Belgium				Construction		
LFR-SMR Romania				Construction		
LFR-SMR Sweden				Construction		
LFR-SMR France		Licensing		Construction		
SFR France		Engineering Studies and R&D			<No Construction planned till 2090>	
MSR France			<No engineering work planned for MSR till 2050>			
LFR UK (Westinghouse)		Pre-license		Construction		

그림 3.1.32 Original EU Sustainable Nuclear Energy Industry Initiative (ESNII)–2021 [3.1-21]

- 유럽 원자력 산업계는 납냉각고속로(LFR)를 지속 가능한 원자력 발전원 중 하나로 선정했으며, 안전과 사용후핵연료 재활용 문제를 해결할 수 있는 성숙한 기술로 인정함[3.1-21].
 - 그림 3.1.32에 나타낸 바와 같이 프랑스는 소듐고속로와 용융염 원자로를 포함한 다른 옵션에 대한 계획을 2050년 이후로 미루고 LFR의 조기 건설을 결정
- 웨스팅하우스는 LFR 개발자의 적극적인 일원이 되어 유럽 파트너들과 긴밀히 협력하여 영국에 첫 번째 웨스팅하우스가 개발한 LFR을 건설하기 위한 사전 인허가 절차를 진행함[3.1-21].

표 3.1.2 주요 납냉각 소형 원전 주요 제원 비교표 (IAEA 등, 2020)

주요 기술		한국	미국	유럽			러시아		
원전 명칭		MicroURANUS	W-LFR	SEALER	LFR-TL-X	ALFRE D	MYRRH A	BREST-300	SVBR
개발자		UNIST	Westing-house	KTH	Nucleo	EC	SCK-CEN	Rosatom	AKME
공동개발자		KAIST 등	ENEA	한전기술	Newcleo	FALCON	EC	Kurchatov	IPPE
유사 기술		Alfa Sub	없음	없음	없음	없음	Alfa Sub	없음	Alfa Sub
가동 경험		80 로-년	없음	없음	없음	없음	80 로-년	없음	80 로-년
냉각재		Pb-Bi	Pb	Pb	Pb	Pb	Pb-Bi	Pb	Pb-Bi
가동온도, °C		250~350	420~600	390~432	390/430	400~480	250~350	420~535	340~485
가동 압력		대기압	대기압	대기압	대기압	대기압	대기압	대기압	대기압
핵연료		UO2	UO2	UN	UN	(U-Pu)O	(U-Pu)O2	(U-Pu)N	UO2
출력(MWe)		20	450	3	5~20	125	64 열출력	300	100
설계 수명		40	60	30	30	40	—	30	60
우라늄 농축도		평균 13	19.75	19.75	19.75	30 max	—	14.5	19.3
연소, GWD/t		54	100	33	40	—	—	61.5	60
핵연료 교체, y		무교체 > 40	2	27	> 8	5	—	2.5~4	7~8
사용후핵연료		재활용	미정	재활용	미정	재활용	재활용	재활용	재활용
붕괴열 냉각		피동	피동	피동	피동	피동	—	피동	피동
원자 로	직경, m	3	8	2.75	2	8.1	8.3	26	4.5
	높이, m	12	7.5	6	3.5	10.1	16.3	17.5	8.2
	무게, t	1,000	—	—	—	—	6,682	27,000	280+
원전 면적, m ²		300	—	10,000	—	—	—	6,400	150,000
사업 현황		개념설계 가동 '31	개념설계 가동 '30	표준설계 진행중	개념 설계	표준설계 진행 중	개념설계 진행중	착공 '21 가동 '26	표준설계 진행 중
건설 단 가*	1 호기	4,000	—	—	—	—	—	—	6,000
	n 호기	2,000	—	—	—	—	—	—	3,000
형상									
EU Taxonomy**		만족	보완필요	만족	보완필요	만족	만족	만족	만족
총투자액 (억원)***		200	—	—	—	~10,000	~8,000	~10,000	—
총연구기간(년)		25	6	20	5	20	25	30	30

* 건설단가 US \$/kWe

** 사용후핵연료 대책 (수소 폭발은 근절됨)

*** 비공개 정보를 토대로 추정(2021)

다. 국내 기술개발 및 사업화 전략

(1) 기술개발 현황 및 추진방안

○ 국내 납냉각 고속로형 SMR MicroURANUS 개발 추진 계획은 다음과 같음[3.1-4].

사업단계	사업기간	사업명	주요 사업 내용
제1단계	2019~2022 (4년간)	개념설계 연구개발	1) MicroURANUS(20 MWe급) 개념설계 개발
제2단계	2023~2027 (5년간)	표준설계 및 사전인허가 심사 연구개발	1) MicroURANUS(20 MWe급) 표준설계 개발 2) 핵연료 및 대형 Mockup 시험 및 검증 3) MicroURANUS NRC 사전인허가 심사 완료 4) MicroURANUS 실증용 해양설비 표준설계 개발 5) 원자력추진선박 인허가 요건 분석
제3단계	2028~2031 (4년간)	실증로 건설 및 운영	1) MicroURANUS 표준설계인가(미국 DC) 취득 2) MicroURANUS 실증로 건설허가/제작/설치/운영 3) MicroURANUS 실증용 해양설비 설계/제작/설치/운영
제4단계	2032~	사업화	1) 원자력수소생산설비(해수 수전해) 수주 2) 원자력추진선박 인허가 취득 및 수주

(2) 사업화 추진방안

○ 국내 납냉각 고속로형 SMR MicroURANUS 개발 및 상용화 계획은 다음과 같음.

○ 제1단계, 개념설계 연구개발 사업

- 사업명 : 핵연료 무교체 전수명 해양용 원자로 개념설계 핵심기술 개발연구
- 사업내용 : 조선해양 초소형원전(MicroURANUS) 개념설계 연구개발
- 사업비 : 38.4억 원 (국비 30, 시비 6, 민자 2.4)
- 사업기간 : 2019. 04. ~ 2022. 12. (45개월)
- 주관기관 : 울산과학기술원(UNIST)
- 참여기관 : KAIST, 서울대, 경희대, KINGS, 무진기연

- 주요성과 :

- 조선해양용 초소형 원전 성능 요건 및 인허가성 연구(인허가 기준 연구는 범위 아님)
- 원자로 용기, 격납용기, 증기발생기, 면진 및 지지 구조 설계
- 40년 핵연료 무교체 원자로 핵설계, 제어봉 설계 및 차폐 설계
- 전수명 핵연료 소자 설계, 제작 및 수명 평가
- 40년 내부식 및 내중성자 피복관 및 노내 구조 재료 개발
- 40년 내구성 냉각재 전자기 펌프 및 유도 가열 용융 장치 설계
- 피동 안전 계통 설계, 안전 해석, PSA 및 비상대피구역 평가
- 원전 계측/제어, 감시, 검사 및 폐기물 처리 계통 설계
- BOP(증기터빈 및 초월임계 CO2 사이클) 및 수소 생산 계통 설계
- 원자로 제작, 조립, 공장 시험 절차 및 수송 Cask 설계
- 핵비확산, 안전 조치, 물리적 방호, 중대사고 대책
- 40년 수명 후, 해체, 사용후핵연료 재활용 및 폐기물 처리 설계

- 제2단계, 표준설계 및 사전인허가 심사 연구개발 사업

- 사업명 : 수출형 조선해양 소형원전(SMR) 기술개발 사업
- 참여기관 : KRISO, 관련 기업 등

- 제3단계, 실증로 건설 및 운영 사업

- 사업내용 : 해양 실증용 초소형 원전 건설허가 취득, 건설 및 운영 (원자력선박 설계, Mockup 시험-검증 및 인허가 취득 병행)
- 참여기관 : 추후 결정

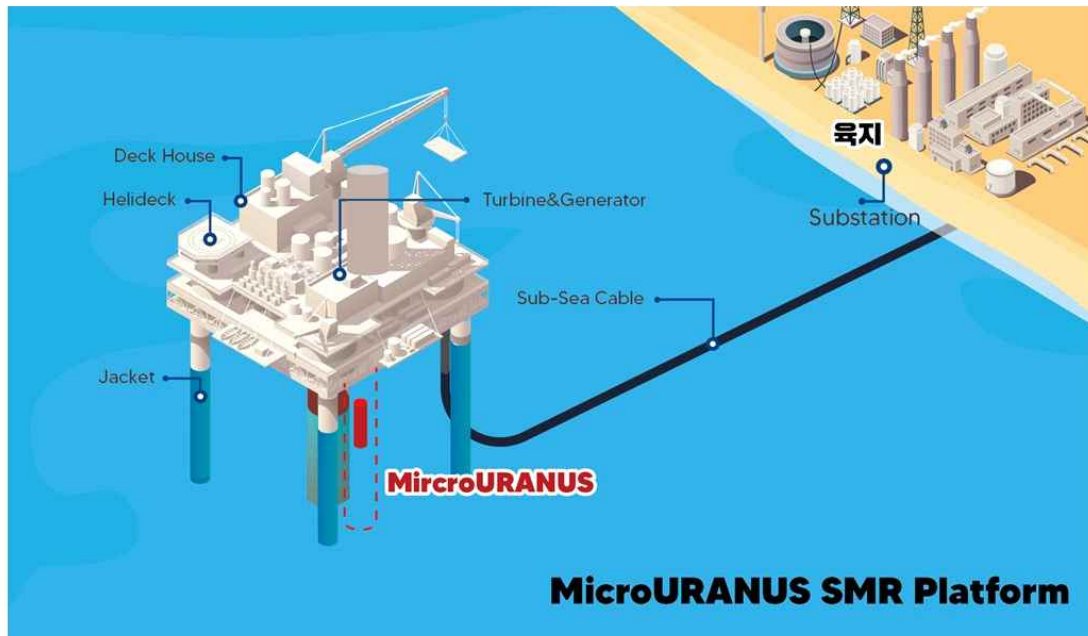


그림 3.1.33 초소형원전(MicroURANUS) 실증 개념도 [3.1-4]

○ 제4단계, 사업화

- 단기적: 해양 원자력 수소생산 플랜트 건설에 활용 계획
- 장기적: 원자력 추진 무탄소 선박에 활용 계획

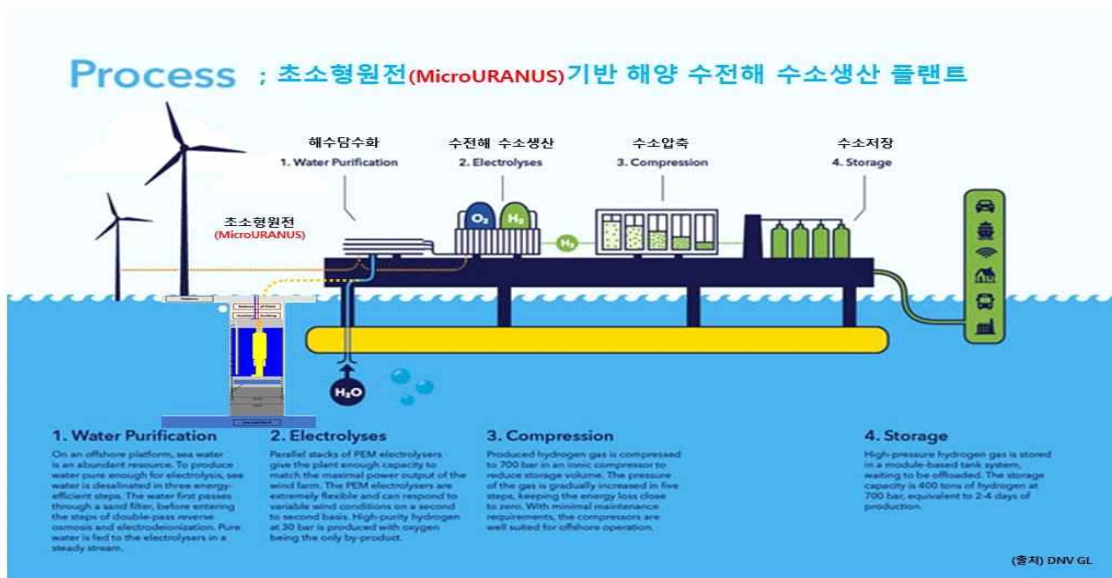


그림 3.1.34 초소형원전(MicroURANUS) 기반 해양 수전해 수소생산 플랜트 [3.1-4]

○ 기대효과

- 수소생산: 임해 공단 인접 해안에 수소 생산설비의 전력원
- 기술숙련: 제작·건설, 운영 경험 축적으로 해상 산업설비 전력원
- 독립운영: 스마트시티, 해상도시 전력원 활용
- 시장전망: 대형선박 추진 동력원 활용

(3) 장애요인 및 대처방안

- 조선해양용 소형원전으로 대두되고 있는 제4세대 납냉각고속로(LFR) 사업화의 장애요인을 파악하고 대처방안을 모색하였음.
- 국제해사기구의 원자력 선박 안전기준(1981년), 러시아의 원자력 선박 규제 기준(2017년), 그리고 영국의 원자력 선박 규제기준(2021년) 등 세계 주요 원전력 선박 안전기준을 토대로 10대 주요 안전 요건을 도출하였으며, 이를 토대로 LFR 원전 기술을 평가하였음.

표 3.1.3 원자력 추진 선박의 주요 안전 요건에 대한 LFR 소형원전 특성 평가

원자력 추진 선박 주요 안전 요건	LFR(고체연료)
1. 선박 유실 및 회수	납 고화로 소규모 누설 및 부식 억제로 회수 가능
2. 최소 가속도 2.0g (vertical down) 1.0g (vertical up), 1.5g(longitudinal& transvers)	舊소련 원자력 잠수함에서 실증완료
3. 경사도 45도 Rolling, 30도 Pitching	舊소련 원자력 잠수함에서 실증완료
4. 사고 중 원전 가동성	자연순환으로 출력 50% 유지
5. 고속 부하 추종	OK
6. 독립 재기동	OK
7. 원격 제어실	OK
8. 항공기 충돌	OK
9. 비상 운전 절차	OK
10. 물리적 방호	OK
※ 핵연료 교체	40년 무교체
※ 핵확산 위험	No (수명 기간 핵물질 외부 방출 없음)

○ MicroURANUS 개념설계 결과 납냉각 고속로의 조선해양 환경에서 적합성 확인
표 3.1.4 납-비스무스 냉각 고속로 MicroURANUS의 조선해양 적합성

목표	납-비스무스 냉각 고속로의 적합성
안전성	냉각재 기화 온도가 매우 높음 (1기압에서 1,670℃)
	화학적으로 안정된 냉각재로 화재나 폭발 없음
	자연 대류 능력이 우수하여 잔열을 무한 자연 냉각할 수 있음
	원자로 용융을 실질적으로 배제함 (PESA)
	방사성 물질을 냉각재에 용해하여 방출이 매우 적음
	열전달 능력이 우수하여 비상 냉각수 주입 시 24시간 이내에 고화됨
	우수한 안전성으로 침출방어로 비상계획구역 제로화 (ZEPZ)
	바다에 침몰 후 고화 시, 방사능 유출을 억제함
	심해저에 침몰하면 고화되어 고압에서 원자로가 붕괴되지 않음
	출력 정지 후에, 납이 감마 방사능을 차폐하여, 방사능 피폭이 적음
사용후핵연료	U-235만 이용하는 3세대 원전과 달리 저농축 우라늄 핵연료로써 수십 년간 핵연료 교체 없이 가동함
	경수로 사용후핵연료를 재활용하여 고준위폐기물 소멸이 가능함
	대량의 열화 우라늄 폐기물을 연료로 사용하여 자원을 100배 확대함
	토륨을 핵연료로 사용하여 지속가능한 원자력 기술로 발전 가능
핵비확산성	소듐냉각 고속로 대비 플루토늄 생산속도가 낮아 핵무기 개발에 불리
	사용후핵연료 재활용하면, 민감한 우라늄 농축을 중단시킬 수 있음
	핵연료 교체를 근절하여 민감 핵물질인 사용후핵연료가 축적되지 않음
	지역별 다국 공동의 사용후핵연료 재활용 체제가 용이함
다용성	해양에서 고온 스팀 생산으로 저비용 그린 수소 생산이 가능함
	장수명으로 30~40년 수명의 선박 추진 동력으로 적합함
	높은 부하 추종 속도로 재생에너지와 연동에 적합
	독립 공단, 도시, 섬, 사막 등의 송전망이 없는 독립 지역에너지로 적합
	달, 화성 등 우주 장기 대규모 동력으로 적합
경제성	저압 소형의 원자로를 자동으로 대량 제작 가능함
	핵연료 무교체로써 원전 설비를 단순화하고 가동률을 상승시킴
	핵연료 장기 사용으로 사용후핵연료 관리 비용 절감
	사용후핵연료 재활용으로 연료비 및 방사성폐기물 처리비용 절감
	해저 부지 사용으로 부지 비용 및 민원 절감
	수명 만료 후 해체 단순화로 해체 시간 및 비용 절감

○ MicroURANUS는 40년 이상 핵연료 무교체 특성을 지니고 있고, 해양 침몰 시 납의 고화로 원자로가 고압을 견딜 수 있으며, 해수에서 납의 화학적 안정성으로 방사능 유출이 억제되어 해양 방사선 오염 가능성이 낮으므로 조선해양에 적합한 것으로 판단됨.

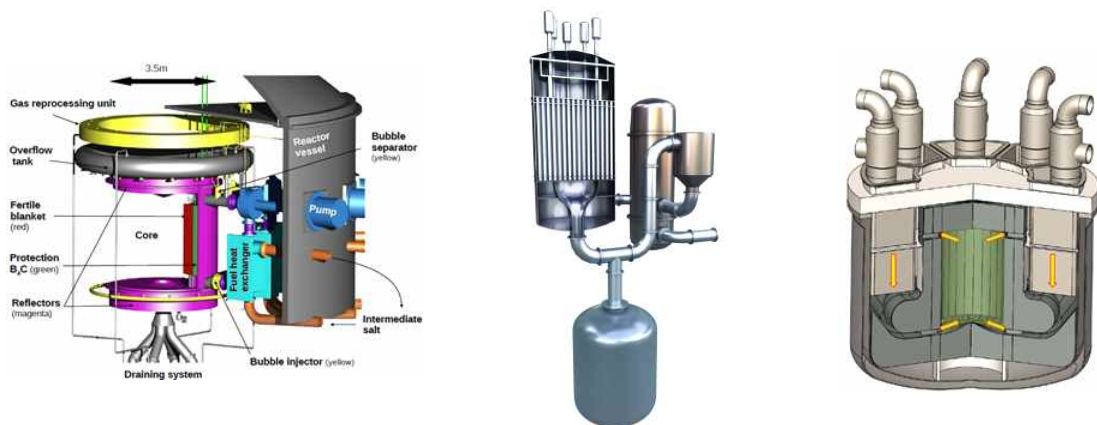
(4) 개발 로드맵

○ 국가 차원에서 정해진 로드맵은 없으며, 앞 절에 기술한 바와 같이 (주)마이크로우라너스가 제안하는 4단계 사업 개발계획에 맞추어 개발 로드맵을 자체적으로 보유함.

제2절 용융염원자로형(MSR)

1. 원자로 개념

- 용융염원자로(Molten Salt Reactor)는 제4세대 원자로 노형 중 하나로, 전통적인 원자로가 대부분 고체핵연료를 채택하는 것과 달리 고온에서 염을 녹인 형태인 용융 불화물 혹은 염화물에 핵연료를 녹여, 원자로의 연료 및 냉각재로 활용하는 형태의 원자로임.
- 액체핵연료를 사용함에 따라 기존의 원자로에 나타나지 않는 혁신적인 개념을 적용하면 노심용융사고를 원천적으로 배제할 수 있고, 다양한 설계를 통하여 핵변환 및 방사성폐기물 연소 등의 여러 목적을 달성할 수 있음. 또한, 원자로 계통을 소형화하고 구조물을 줄여 간단한 계통을 구성할 수 있으며, 좋은 열물성 덕에 고출력 밀도를 달성할 수 있어 발전용 원자로 성능요건에 제일 적합할 뿐만 아니라, 소형 원자로로서 유망한 차세대 원자로 중 하나임.



(a) MSFR (SAMOFAR, EU) (b) CMSR (Seaborg) (c) MCFR (Terrapower)

그림 3.2.1 개발 중인 여러 형태의 용융염원자로

가. 개발목적 및 활용 예상 분야

- 후쿠시마 원전사고 이후, 전력 생산의 효율뿐 아니라 피동안전계통 및 높은 고유안전성을 갖춰 중대사고에도 방사선 누출 사고를 배제할 수 있는 극한의 안전성을 갖춘 노형에 대한 관심이 높아짐.
- 분산형 전력 시장의 수요가 높아짐에 따른 경제성, 전력 공급 유연성 및 지속 가능성 등 최소한의 유지 보수만으로 운영이 가능한 소형모듈원자로에 대한 관심이 증대됨.
- 에너지를 단순히 저장하는 것에만 국한하지 않고, 저장한 에너지를 다양한 용도로 활용할 수 있는 하이브리드 에너지 시스템에 대한 관심이 높아지고 있음. 열에너지 및

전력의 효율적인 에너지 전달 체계를 설계함으로써 해수 담수화, 수소 생산 등의 다중 활용성을 가짐과 동시에, 필요에 따라 재생 에너지 및 에너지 저장장치와 더불어 안정적으로 에너지를 공급할 수 있는 원자력 기술을 융복합한 하이브리드 에너지 시스템에 대한 관심 증대됨.

- 용융염 원자로는 핵연료 물질인 토륨, 우라늄, 플루토늄 등이 불소 또는 염소와 화학적으로 결합하여 ThF_4 , UF_4 , TRUF_3 , UCl , PuCl 형태의 염을 형성하고, 냉각재 용융염 속에 용해(공용)되어 있는 형태의 유체를 활용하는 원자로임.
- 기저염(Base Salt)으로 사용되는 물질은 표와 같이 중성자 흡수 단면적과 증기압이 작은 Li, Be, K 등이 주로 활용된 2종 혹은 3종 혼합의 공용염이 활용됨. 그림 3.2.2는 ORNL에서 운행되었던 MSRE 용융염원자로의 핵연료 사진으로 $350\sim 500^\circ\text{C}$ 의 융점, 1400°C 이상의 높은 비등점, 매우 낮은 증기압 등 열전달매개체로 사용되기에 좋은 열유체적 특성을 가지고 있어 높은 작동온도와 열적 여유도를 만족함.

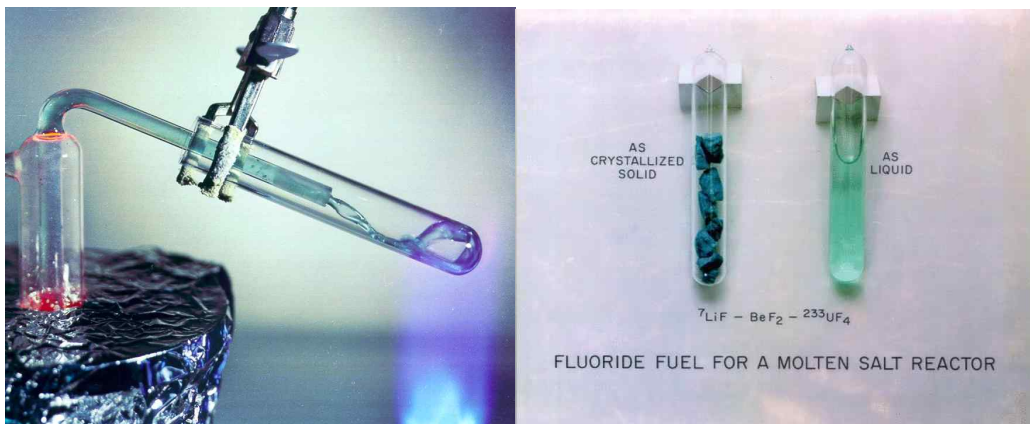


그림 3.2.2 MSRE에 사용된 불화염소 용융염의 고상과 액상

표 3.2.1 용융염 핵연료 물질의 종류 및 특성

기저염	융점 ($^\circ\text{C}$)	950°C 에서 증기압 (mmHg)	중성자 흡수율 (대 흑연)	감속비
$\text{LiF}-\text{BeF}_2$	460	1.2	8	60
$\text{NaF}-\text{BeF}_2$	340	1.4	28	15
$\text{LiF}-\text{NaF}-\text{BeF}_2$	315	1.7	20	22
$\text{LiF}-\text{ZrF}_4$	509	77	9	29
$\text{NaF}-\text{ZrF}_4$	500	5	24	10
$\text{KF}-\text{ZrF}_4$	390		67	3
$\text{RbF}-\text{ZrF}_4$	410	1.3	14	13
$\text{LiF}-\text{NaF}-\text{ZrF}_4$	436	~ 5	20	13
$\text{LiF}-\text{NaF}-\text{KF}$	454	~ 0.7	90	2
$\text{LiF}-\text{NaF}-\text{RbF}$	435	~ 0.8	20	8

○ 용융염원자로가 주목 받는 주 이유는 냉각재 및 연료가 액체형태의 용해된 염이라는 형태에서 기인하는 높은 열효율, 안전성, 계통의 간소화 등임.

- 고체연료와 달리, 핵연료를 담고 있는 피복관이 없어서 유체 내 균일한(homogeneous) 열 분포를 가지며, 가동 중에 연속적으로 핵연료 물질을 주입하거나, 가동 중에 생기는 핵분열생성물질을 분리 추출할 수 있어 사용후핵연료의 개념이 존재하지 않으며, 노심의 구성 성분을 연소나 시간에 무관하게 일정하게 유지할 수 있음.
- 노심을 구성하고 있는 감속재와 핵연료의 선택에 있어 자유도가 높아, 단순한 기하학적 구조변경으로도 열(Thermal)중성자, 아열(Epi-thermal)중성자, 또는 속중성자 에너지 스펙트럼 특성을 시스템을 구성할 수 있어 개발 목적에 따라 융통성이 매우 큼.
- 액체 연료는 온도에 대한 부피변화율이 고체에 비하여 커 고유안전성 측면에서 유리하다고 할 수 있음. 또한, 온도가 증가에 따른 부피 팽창량만큼 노심 장전량이 감소하므로 음의 반응도온도계수를 작게 설계할 수 있음.
- 고온의 염화물에 핵연료를 녹여 원자로의 연료 및 냉각재로 활용하여, 노심용융을 일으키는 냉각재 상실사고를 원천적으로 배제할 수 있음.
- 고체 연료의 경우 운전정지는 안전봉 삽입에 의존하지만, 용융염원자로의 경우 원자로 용기 하단에 덤프탱크를 설치하여 과도 상태 시에 상승하는 온도로 인해 덤프탱크와 연결되는 배관에 설치된 결빙밸브의 개방으로 중력에 의해 배수되도록 설계함으로써 사고 발생 시 연료를 안전하게 고립시킬 수 있는 피동안전성이 높음.
- 용융염은 화학적으로 고온과 고방사선 환경 아래에서도 매우 안정적이며, 물이나 공기와의 급격하게 반응하지 않아 계통이 노출되는 환경에서도 위험이 적음.
- 용융염은 고온에서 물과 유사한 열유체학적 특성을 가지는데, 낮은 융점($350\sim 500^{\circ}\text{C}$)에 비해 높은 비등점($\sim 1,400^{\circ}\text{C}$)을 가지어 기존의 원자로와 달리 고온에서 원자로를 작동할 수 있으므로 열적효율과 열적 여유도가 커 질량 유량이 적어서 대형 펌프가 요구되지 않고, 증기압이 1 mmHg 정도로 매우 낮아 열전달 매개체로서 제약조건이 낮아 계통을 간소하고 안전하게 만족할 수 있음.

나. 용융염원자로의 노형 개념

○ 그림 3.2.3은 대표적인 용융염원자로의 시스템 개형도임. 용융염은 액체연료라는 혁신적인 개념을 채택하여 기존의 고체연료를 사용하는 일반적인 경수로와는 원자로 구성 시스템에 차이가 존재함. 예를 들어, 용융염원자로는 핵연료물질을 밀봉하는 피복관이 없으며, 고온의 핵연료가 열에너지를 수송하는 열전달 매체로서 원자로계통을 순환하는 원자로시스템이므로 다양한 계통들이 존재함. 그 중, 경수로와 차별화되는

점들을 위주로 정리하면 다음과 같음.

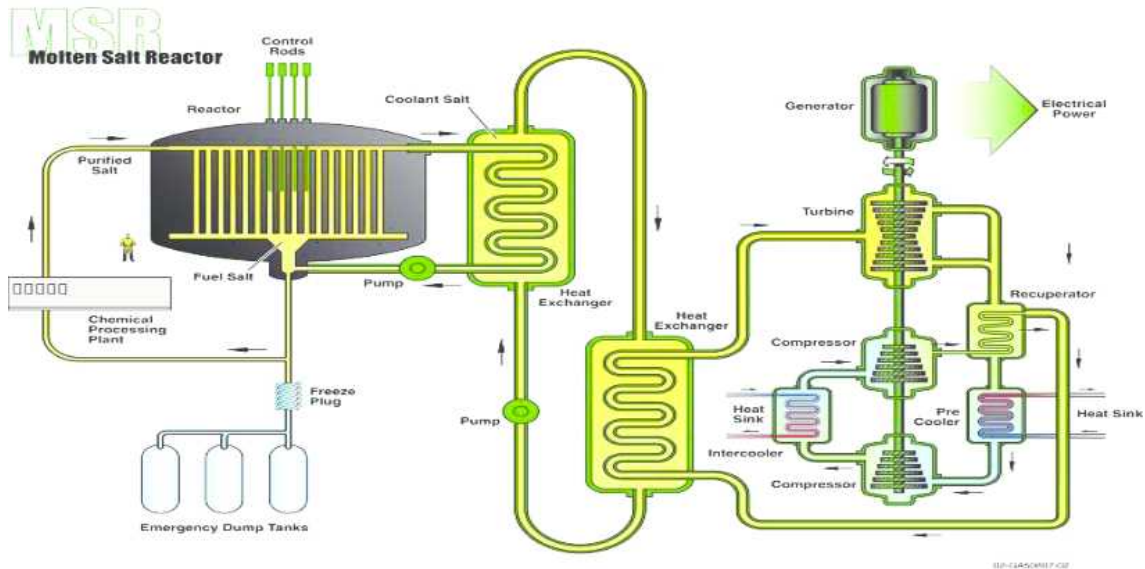


그림 3.2.3 용융염원자로계통의 보편적 시스템 개형도

(1) 원자로 열전달 계통

○ 원자로 계통은 크게 두 가지로 구분할 수 있음.

- 회로(loop)형: 원자로, 펌프, 중간열교환기 등이 짧은 배관으로 서로 연결되어 있는 형태
- 순환(pool)형: 펌프, 배관이 아닌 원자로 용기 그 내부자체에 용융염이 순환하는 형태

○ 용융염의 높은 열효율 때문에 낮은 질량 유량으로도 발전이 가능하여 펌프의 크기도 경수로에 비하여 작게 디자인할 수 있음. 연료의 선택에 있어서 자유도가 높아 열중성자, 아열중성자 그리고 속중성자의 영역에 이르기까지, 연료의 형태에 따른 원자로 용기의 디자인 자유도가 높아 초소형 원자로의 개념으로 많이 채택

○ 용융염에 핵연료가 용해되어 있는 용융염 원자로는 직접적으로 열교환기를 거칠 수 없어 중간열교환기를 두어 열을 전달하게 됨. 용융염에 용해되어 있을 수 있는 방사성물질이 사고 시 직접 환경에 방출되어 환경이 오염될 가능성을 근본적으로 배제하기 위함. 따라서 용융염 원자로 중간열전달계통은 원자로 건설 시 방사선 영역 제한요건 관점에서 경수로 1차 계통과 같다고 볼 수 있음. 중간열전달계통의 유체는 열전달 효율과 안전성을 높이기 위하여, 핵연료 용융염의 기저염과 유사하면서 융점과 가격이 상대적으로 낮은 공용할로젠염 ($\text{LiF}-\text{BeF}_2$, $\text{LiF}-\text{NaF}-\text{KF}$, $\text{NaF}-\text{NaBF}_4$, $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{MgCl}_2$) 가운데 핵연료 용융염과의 양립성을 고려하여 선정하는 것이 보편적임.

(2) 화학적 처리 계통

- 액체연료라는 혁신적인 개념을 채택한 용융염 원자로의 가장 큰 장점은 가동 중 연료 충전(On-line Refueling)이 가능하다는 것임. 용융염 원자로의 핵심 계통으로, 가동 중에 발생하는 핵분열 생성물 및 불순물들을 연속적으로 제거하면서 방사선원에 의해 생길 수 있는 위험도를 낮출 수 있음.
- 핵분열로 생성되는 기체 핵분열생성물의 유속과 부력에 의해 노심으로부터 운반기체로 분사되는 헬륨기포에 실려 원자로 탈기계통(Off-gas System)에 포집·제거됨. 용융염 액체연료 내 핵분열생성물은 대부분 연료 염에 녹아 안정적인 상태로 원자로 내에 체류할 수 있으나, 일부 Nb, Mo, Ru 등 조건에 따라 입자 형태로 석출되는 물질과 Kr, Xe과 같은 기체 상태로 존재하는 핵분열생성물의 경우 그림 3.2.4와 같이 Helium bubbling을 통한 gas-liquid separation 및 flotation 원리를 활용하여 제거할 수 있으므로 용융염 유체연료의 열전달 계통 및 원자로설계 관점의 핵심 현상임.

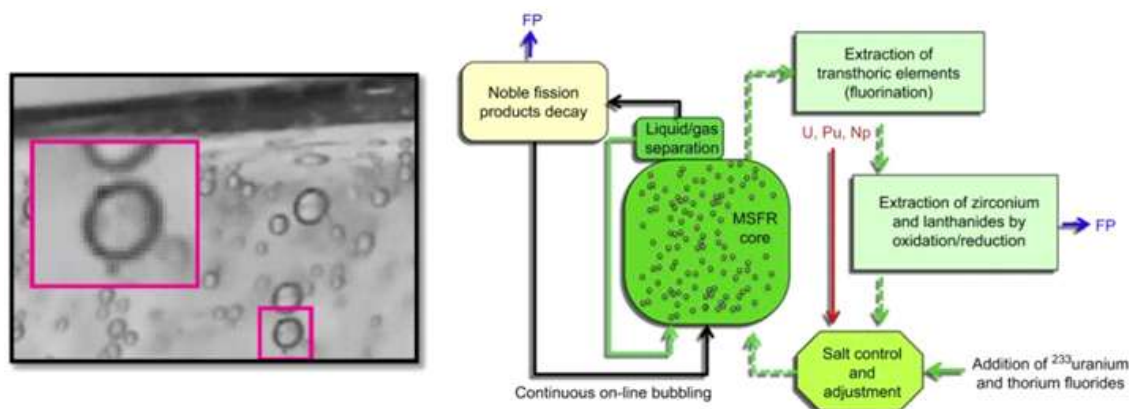


그림 3.2.4 Helium bubbling 효과 및 용융염원자로 On-line reprocessing

- 핵분열 생성물을 지속적으로 제거하여 액체연료의 균질성을 유지할 수 있으며 원자로 정지 시에 발생하는 잔열 또한 고체연료에 비하여 낮게 유지할 수 있어 작은 부피의 잔열제거계통만으로 원자로를 안전하게 유지할 수 있음. 우라늄, 넵투늄(Np), 플루토늄 등은 전기화학적으로 분리된 후, 염소화 또는 불소화를 거쳐 용융염과 혼합되어 원자로 내부로 재순환됨.

(3) 반응도 제어 계통

- 액체연료를 사용할 경우, 기존 원자로 노형에 대부분 사용되는 제어봉의 개념을 간소화할 수 있음. 가동 중에 생성되는 핵분열생성물은 지속해서 제거되고 연료의 충전 또한 연속적으로 이루어지므로, 연료펌프의 회전수 혹은 냉각재 용융염의 온도 및 농축도만으로 임계도 조절이 가능함.
- 실제로 과거 1950년대 ORNL에서 실험한 MSRE로 제어봉이 필요 없는 운전의

가능성을 확인하였음. 이는 원자로 계통을 간소화할 뿐 아니라 제어봉 관리 시 인출 혹은 삽입 오류로 인한 인적 사고의 가능성도 배제할 수 있음을 의미함.

(4) 원자로 정지 및 잔열 제거 계통

- 기존의 고체연료를 채택하는 원자로의 경우는, 중대사고 발생 시 연료가 녹아 액체형태로 존재하게 되는데, 용융염원자로는 액체형태의 연료가 중대사고시에는 고체 상태로 변하기 때문에 사고 대처의 안전성이 높다고 할 수 있음.
- 용융염원자로 노심 바닥에 존재하는 결빙 밸브는 정상 상태 시에는 전기를 흘려 낮은 온도를 유지하다, 원자로 정지 시에는 밸브를 개방하고, 사고 발생 시에는 고온의 액체연료로 인해 녹아 방사선을 방출할 수 있는 액체 염을 그림 3.2.5와 같이 배출저장탱크에 방출함으로써 사고 시에 대처가 용이함. 저장탱크에서는 잔열 제거 계통을 통해 액체 염의 잔열을 제거하며 가동 중에 발생하는 사용후핵연료는 지속적으로 제거되어 큰 부피가 필요하지 않아 물이나 공기 같은 안전한 유체로 열 제거가 가능함.

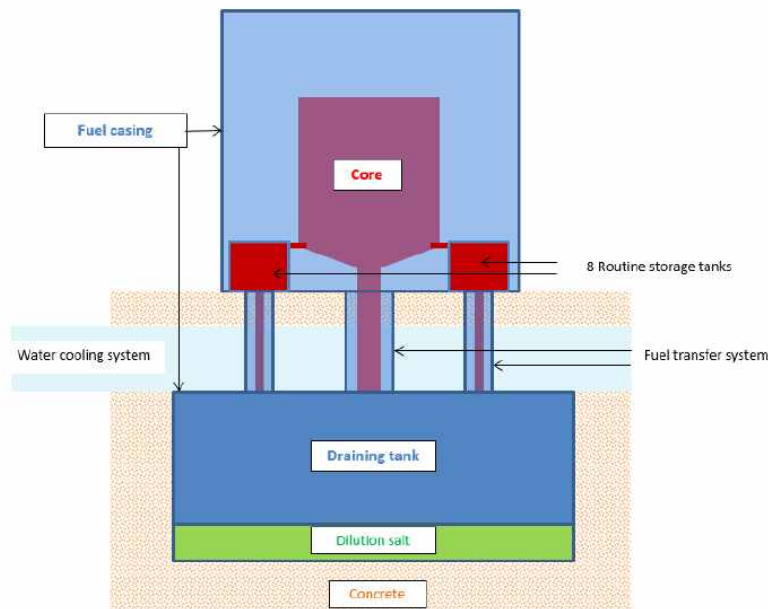


그림 3.2.5 용융염원자로 저장탱크 모식도

(5) 원자로 전기변환 계통

- 고온의 열에너지를 전기에너지로 변환하는 BoP(Balance of Plant)의 경우, 초임계 Rankine 사이클(열효율; ~44%) 또는 헬륨 Bryton 사이클을 집중적으로 선택하거나 열효율 향상을 목적으로 복합사이클(열효율; ~48%)을 보편적으로 제안함.
- 초임계 Rankine 사이클을 사용할 경우 터빈 사이즈를 경수로에 비하여 1/10 정도까지 축소할 수 있으며, 복합사이클을 사용할 경우 그림 3.2.6과 같이 원자로를 수소 생산

등의 다목적으로 활용할 수 있어 기존의 발전용 경수로와 달리 다목적 및 소형화에 목적을 두어 연구가 많이 진행되고 있음(그림 3.2.7).

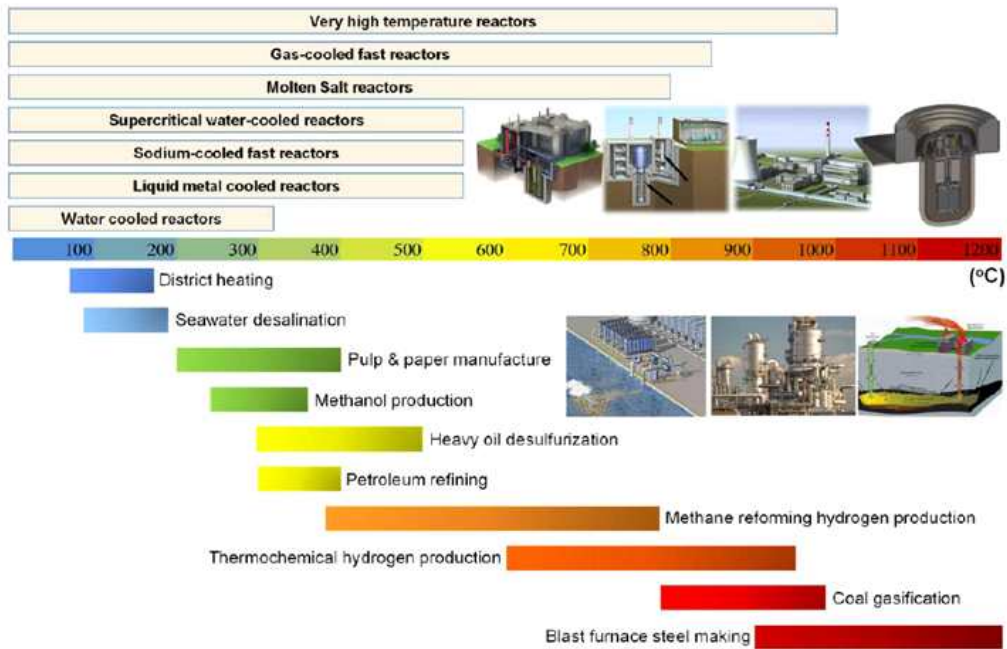


그림 3.2.6 노형별, 작동온도별 원자로 활용 범위

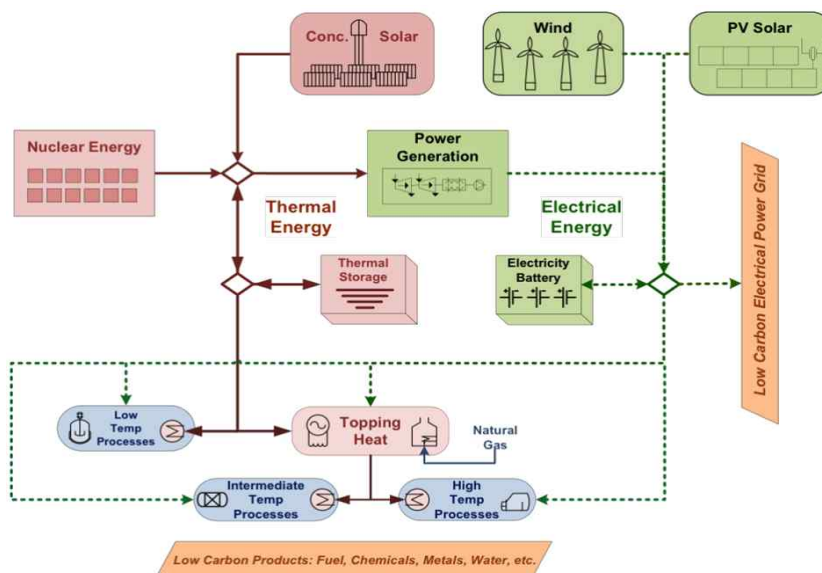


그림 3.2.7 소형 용융염 원자로의 다목적 활용 방안

다. 용융염원자로 핵심 요소기술

(1) 원자로 재료 및 기기개발

- 원자로의 운영을 위해선 장기간 동안의 재료 건전성이 보장되어야 함. 용융염의 경우 물보다 부식성이 강하고 활용 및 운영의 경험이 적어, 부식내성이 강한 Hastelloy-N 합금을 주요로 하여 재료 및 기기개발의 연구가 주요 진행되고 있음.

(2) 핵연료용융염 및 용융염 화학 및 물성

- 용융염원자로는 핵연료가 액체 염에 녹아 2개, 3개의 물질이 공융형태를 이루어 화학적으로 안정한 화합물임. 이때 어떠한 기저 염을 사용할 것인지 어떠한 연료조합을 사용할 것인지에 따라 녹는점과 물성이 다르며 이는 원자로 운전에서 핵심적으로 파악해야 하는 요소임.

(3) 안전해석 및 안전계통

- 액체연료를 사용하면 기존의 고체연료를 사용하는 노형에 비해 계통을 간소화하고 안전하게 설계할 수 있음. 더 효과적이고 안전한 노형 설계를 위하여 연구가 진행 중인데, 특히 경수로의 경우에는 시스템 코드 및 실험로가 많이 개발되어 연구가 진행 중이지만 용융염의 경우에는 3차원 고속원자로 설계용 코드와 열수력학설계 코드를 통합하는 연구, 동적 거동 및 안전관련 파라미터의 특성에 관한 연구 등 기반기술 확보를 위한 노력이 계속되고 있음.

(4) 용융염 열 거동 평가

- 용융염원자로에서 가장 중요하게 파악해야 하는 지표는 온도임. 용융염의 온도는 녹는점보다 높아야 하고 부식이 가속화되는 온도보다는 낮은 상태를 유지해야 하므로 정상, 과도상태에서의 용융염 온도를 평가하는 것은 중요한 연구과제임. 특히 물보다 프란틀수가 높다는 열물성적 특징이 있어, 벽면에서의 급격한 온도변화로 인한 벽면과 중심부와의 온도 차이가 존재하고, 용융염의 입구온도와 출구온도에도 큰 차이가 존재함. 이는 물성 및 핵분열생성물에 의한 조성의 변화를 불러일으킬 수 있어 온도를 명확하게 평가하여야 함.

라. 주요 연구개발 분야

(1) 다물리 현상 해석 도구

- 용융염 기반 액체 연료를 활용하는 용융염원자로는 고체연료 원자로와는 달리, 중성자와 잔열 생성 핵종들의 이송과 연료염의 유동에 따른 열수력학이 서로 밀접하게 연관되어 있음. 예를 들어, 연료염의 유동에 따른 온도장의 변화 및 이에 대한 지발중성자 핵종의 위치 변화 및 분포를 예측하는 것은 출력 밀도 분포에 영향을 미치며, 이는 또한 핵반응단면적에 영향을 미침. 용융염원자로의 on-line reprocessing, helium bubbling을 포함하여 고체 입자 및 핵분열 생성물의 분포 예측 등을 위하여 용융염원자로 다물리 체계는 시스템 범위의 모든 중요한 현상을 포함하도록 연구가 진행되고 있음.
- 이에 유럽그룹을 선두로 용융염원자로 다물리 해석 도구에 대한 연구개발은 시스템 분석 코드의 단순 변형부터 시작하여 3차원 형상 및 난류 효과를 고려하는 전산유체역학 (CFD) 접근법을 결합하는 전략이 첨단 기술이라 평가되며, 현재 MSFR의 해석을 위하여 많은 연구가 진행 중에 있음. 또한 미국을 중심으로 용융염 원자로의 시스템 코드를 개발하기 위하여, 기존의 경수로 기존의 시스템 코드에 모듈형으로 용융염 내에서 일어나는 여러 현상 및 물성 등의 변화를 반영한 코드를 개발 중에 있음.

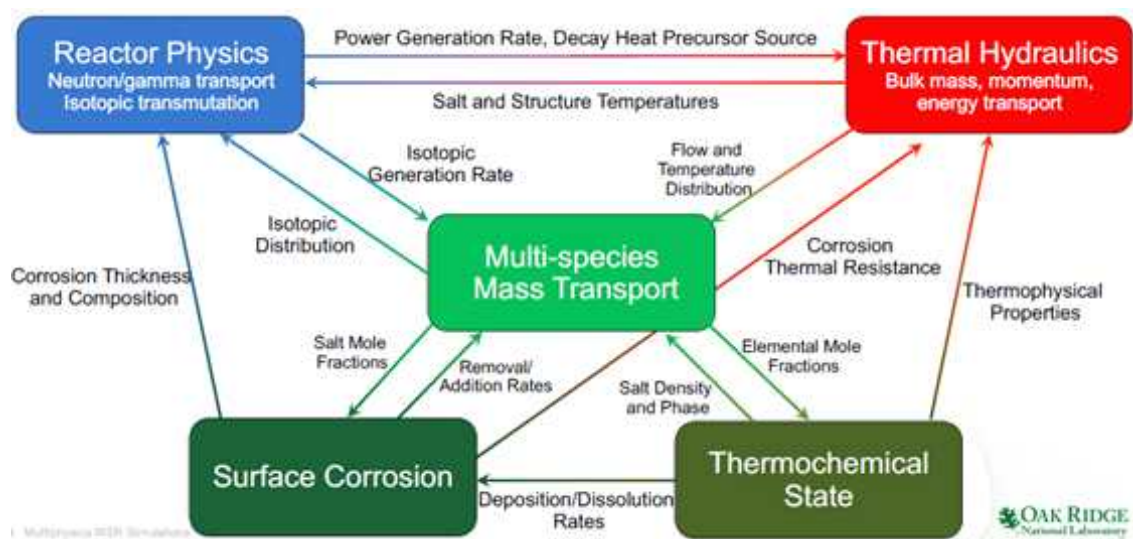


그림 3.2.8 다양한 용량의 용융염원자로 설계 및 형상

표 3.2.2 용융염원자로 다물리 해석 도구 비교

국가/기관	원자로	해석 도구	다물리	참고문헌
독일 (KIT)	MOSART	SIMMER (정상상태, 2D)	Netronics/Thermal hydraulic	Wang et al.,2006
미국 (INL)	MSRE	MOOSE (과도상태 2D/3D)	Netronics/Thermal hydraulic	Lindsay et al.,2018
이탈리아 (Politecnico di Milano)	MSBR	COMSOL (과도상태 대칭적 2D)	Netronics/Thermal hydraulic	Cammi et al., 2011
이탈리아 (Politecnico di Milano)	MSFR	OpenFOAM (과도상태 3D)	Netronics/Thermal hydraulic	Aufiero et al., 2014 Cervi et al., 2019
스위스 (PSI)	SFR	OpenFOAM (과도상태 3D)	Netronics/Thermal hydraulic	Fiornia et al., 2015

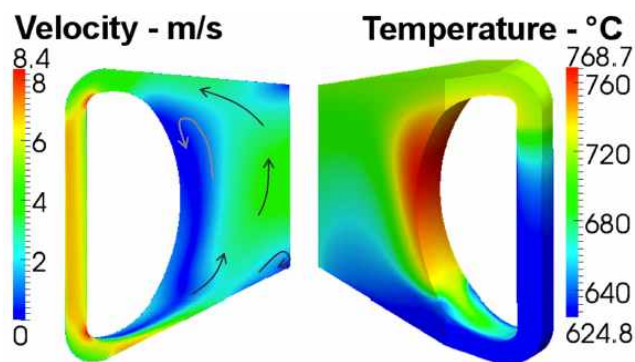


그림 3.2.9 CFD 접근법 활용정상상태 용융염원자로 주요 거동 평가

(2) 용융염원자로 실험

- 그림 3.2.10과 같이 용융염원자로의 개념설계와 함께 잔열제거계통, 안전계통 및 용융염 누출(leakage)사고 같은 정상, 과도상태에서의 용융염의 온도 및 상변화 특성을 파악하기 위한 실험 연구가 진행되고 있음. 용융염의 경우 작동온도가 높고 부식 등의 문제로 인해 연구실 단위에서 진행하기에 어려워 상사유체(그림 3.2.11)를 활용하여 온도를 평가하기 위한 상사연구 또한 진행되고 있음.



그림 3.2.10 정상, 과도상태의 용융염 온도 거동 평가를 위한 실험장치

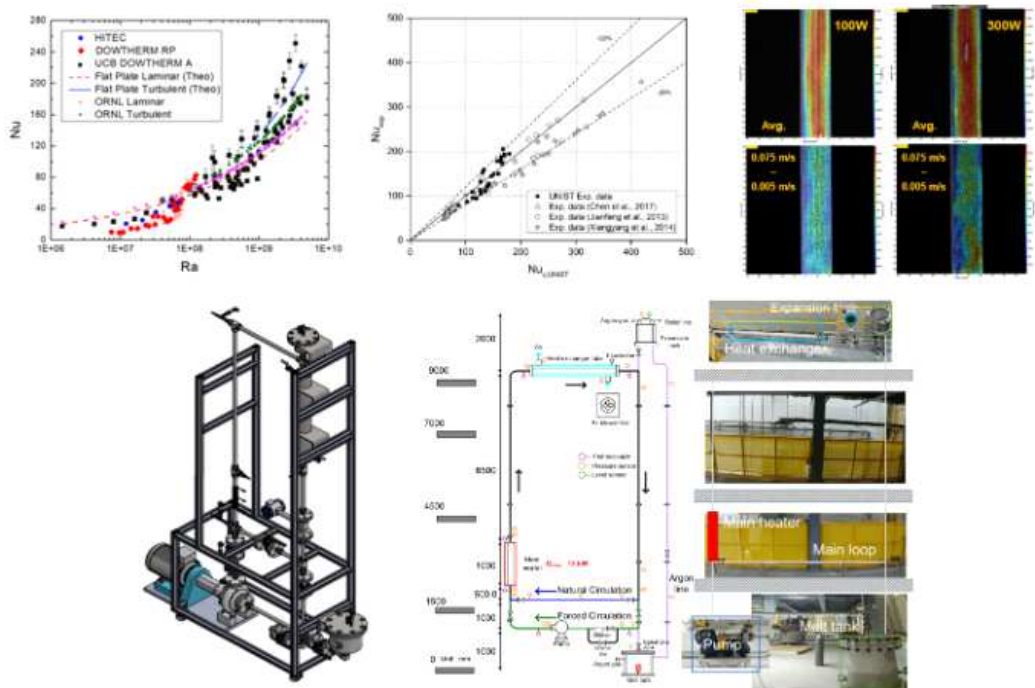


그림 3.2.11 용융염 원자로 상사를 위한 실험(예)

2. 국내외 개발동향

가. 국내현황

국내에서는 한국원자력연구원(이하 한원연)의 `22년 기본사업을 통해 염소기반 용융염원자로 전산해석 체계/개념/공정안 수립 중심 예비 연구가 수행된 바 있음.

나. 국외현황

(1) 과거 연구 동향

- 초기 용융염원자로는 $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ 핵연료 주기를 활용한 열중성자 에너지 영역으로 설계되었음. 감속재로는 BeO 혹은 흑연이 주로 사용되어, 연료가 녹아있는 용융염이 감속재를 지날 때 중성자의 감속이 이루어져 반응이 일어나는 원리로 연구가 진행되어 왔음.
- 용융염원자로의 개념이 등장한 후, 초반부에 주로 연구되었던 $^{232}\text{Th}/^{233}\text{U}$ 연료를 주로 활용한 열중성자 스펙트럼영역의 용융염 원자로와 달리, $^{238}\text{U}/^{239}\text{Pu}$ 핵연료 주기를 활용한 속중성자 에너지 영역의 고속 용융염원자로(FS-MSR)는 미국 MIT에서 처음으로 제안되었으며 핵분열생성물의 독성 효과가 열중성자 에너지 영역의 환경에서보다 미미하여 노심 반응도에 미치는 영향은 거의 없어, 발생 가능한 구조물 부식을 낮출 수 있다는 장점 때문에 제4세대 원자로로 채택되어 집중 연구가 진행 중임.

① ARE(Aircraft Reactor Experiment)

- MSR 연구의 기술적 토대는 1950년대와 60년대 동안 ORNL(Oak Ridge National Laboratory)에서 두 개의 실험용 원자로를 성공적으로 건설하고 가동함으로써 기술의 성공적인 시연에 있음. 초기에는 추가 연료 주입 없이 항공기에 전력을 공급할 수 있는 추진 시스템을 목표로 개발되었으므로, 첫 번째 용융염 원자로의 검증 실험은 항공기원자로 실험로였음. ARE(그림 3.2.12)는 아열중성자 스펙트럼의 중성자를 활용하여, 핵연료 튜브를 순환하는 $\text{NaF}-\text{ZrF}_4-\text{UF}_4$ (53.0-41.0-6.0 mol%) 핵연료 용융염을 기반으로 BeO 감속재를 사용하였고, 최대 860℃의 출구 온도로 100시간까지 안정적인 용융염 원자로의 작동을 보여주었음.

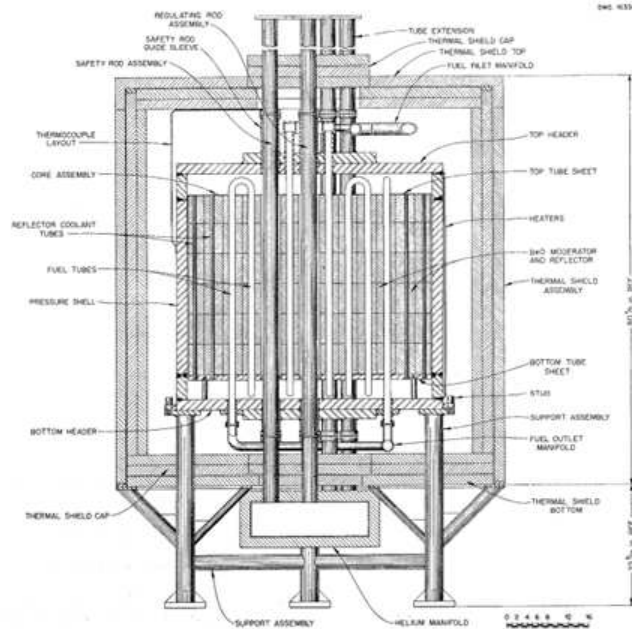


그림 3.2.12 ORNL에서 제안된 ARE 용융염 원자로의 모형도

② MSRE(Molten-Salt Reactor Experiment)

○ MSRE(그림 3.2.13)는 ARE에 뒤이어 진행된 실험으로, 1960년도에 ORNL은 연구용 용융염 원자로 (MSRE)를 건설하였음. MSRE는 흑연 감속재를 기반으로 단일 노심으로 이루어져 있고 구조체로는 부식저항성이 높은 Hastelloy-N을 사용하였고 펌프에 의해 유체가 순환하고 열은 2차 냉각 용융염을 통해 제거됨. 발전소에 사용하기 위한 기술을 평가하기 위해 더 긴 시간 동안, 더 큰 규모로 2만 시간까지 운행되었고 핵연료 온도 650℃로 8 MWth 열출력을 달성하였음.

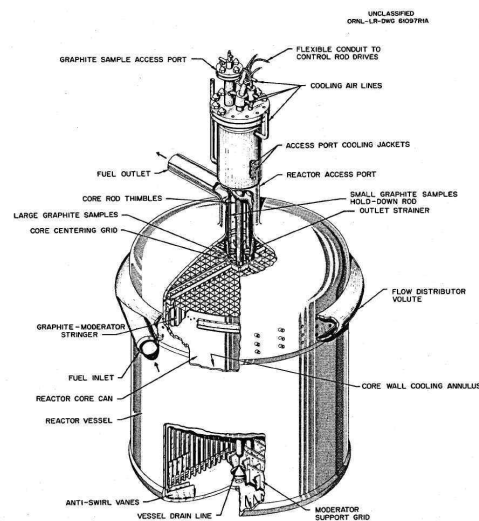


그림 3.2.13 ORNL에서 제안된 MSRE 원자로 용기

③ MSBR(Molten-Salt Breeder Reactor)

- ARE, MSRE 등 20년의 용융염 원자로 연구를 바탕으로 미국은 MSBR 개념을 설계하였음. MSBR 이전까지는 핵연료 용융염의 실시간 재처리 기능 한계로 노심 중앙부에는 토륨을 사용할 수 없었음. 하지만 화학적 처리 기술 개선으로 우라늄과 프로트악티늄(Pa) 분리 및 핵분열생성물 제거가 가능해짐. MSBR은 2,250 MWth 열출력을 생산하는 것으로 설계되어 $7\text{LiF}-\text{BeF}_2-\text{ThF}_4-\text{UF}_4$ (71.7-16.0-12.0-0.3 mol%) 핵연료 용융염을 사용하고, 핵연료 용융염은 열교환기에서 2차 냉각 용융염인 $\text{NaF}-\text{NaBF}_4$ 로 열을 전달함. 조사 한계로 인해 흑연 감속재는 4년마다 교체가 필요하고, 원자로에서 사용하는 원자로용기, 배관, 펌프 등의 구조물은 부식에 저항성이 좋은 Hastelloy-N 물질로 만들어짐. 그림 3.2.14은 MSBR 원자로의 노심의 단면도를 나타냄.

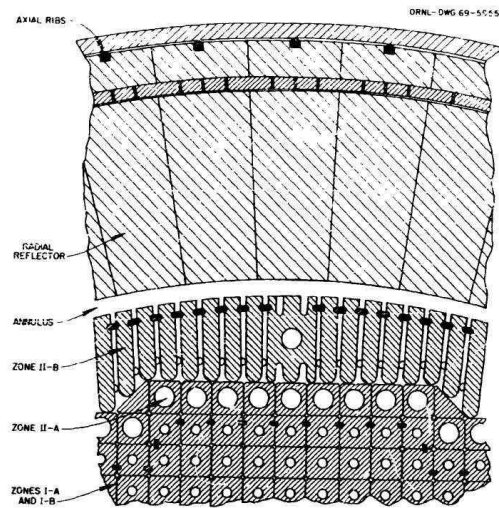


그림 3.2.14 ORNL에서 제안된 MSBR 노심 단면도

④ TMSR/MSFR

- 1990년대에 시작한 Gen-IV 프로그램에서 용융염 원자로 개발 대상 노형은 주로 FS-MSR에 속하는 것으로서, 총칭하여 MSFR이라 하고 이들 가운데서 토륨 이용을 강조하는 노형을 TMSR로 구별하여 명칭함.
- MSFR에 속하는 용융염 원자로의 중성자 에너지 스펙트럼은 그림 3.2.15에서 비교하듯 고속중성자로와 매우 유사한 반면, 핵연료 성분을 가동 중에 지속적으로 조정할 수 있어 원자력시장의 환경변화에 적응력이 우수하여 많은 연구가 진행 중임.

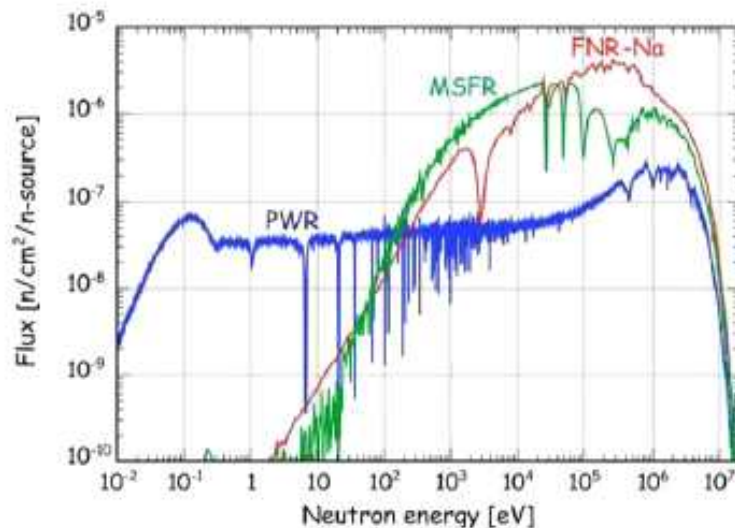
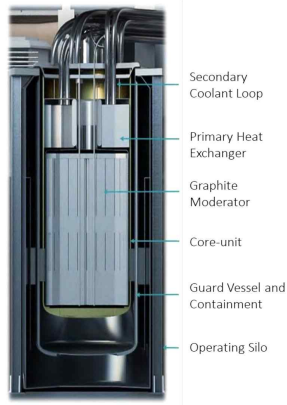
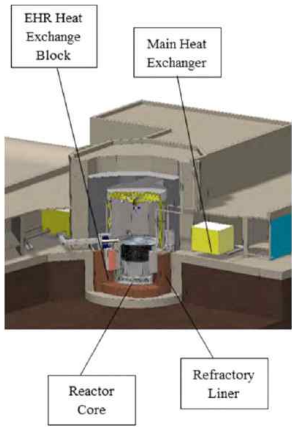
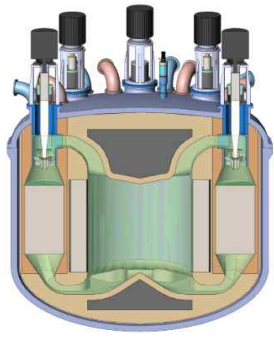


그림 3.2.15 중성자 영역에 따른 주 활용되는 원자로

(2) 최신 연구 동향

- 최근 용융염원자로로는 유망 차세대원자로(Gen-IV) 노형 중 하나로, 미국, 유럽, 중국, 일본 등에서 지속 가능한 원자력 에너지원으로써 사용후핵연료 문제를 해결하기 위한 설계, 관련 기술을 개발 중에 있음. 대부분의 연구는 1950년대 후반부터 1970년대 초반까지 ORNL에서 수행한 용융염원자로 설계 및 실험에 크게 뿌리를 두고 있음. 다른 제4세대 원자로 개념과 유사하게, 물이 아닌 새로운 냉각재를 500°C도 이상 고온에서 사용하는 원자로의 성공적인 상용화를 위해 해결해야 할 새로운 신뢰성, 성능, 검사 및 유지관리의 기준과 다른 정리가 필요함. 예를 들어, 경수로의 경우 중대사고의 개념은 핵연료가 과도상태에 따른 용융(melting)이 발생하였을 경우라면, 용융염원자로의 경우는 이미 연료가 녹아있는 상태로 운행되기 때문에 중대사고에 대한 재정의가 필요함. 따라서 이러한 복잡성, 새로움 및 입증 자료의 질과 원자로 특성에 상응하는 변화를 수용할 수 있는 안전평가 등의 새로운 척도가 필요하다고 할 수 있음.
- 현재 다양한 용량을 가지는 용융염원자로가 연구되고 있으며 실증실험보다는 개념설계연구가 많이 진행되고 있음. 프랑스의 경우 전기발전의 목적뿐 아니라, 경수로의 사용후핵연료 처리 방안의 목적으로 용융염 원자로의 개념설계가 진행되고 있음. 네덜란드는 용융염 원자로의 효율이 최대가 되는 노심 구조 조건 및 요구 조건을 찾는 연구가 진행되고 있음.

표 3.2.3 국외 주요 MSR 개발 현황

모델명	IMSR	SSR-W	MCFR*
			
국가	캐나다	캐나다, 영국	미국
개발사	Terrestrial Energy	Moltex Energy	TerraPower
냉각재/감속재	불소염/흑연	불소염/없음(고속로)	염소염/없음(고속로)
핵연료	우라늄(5% 미만)	재처리 사용후핵연료	고순도 저농축우라늄
출력 (열/전기)	440MWth/195MWe	750MWth/300MWe	300kWth(ˆ25), 30MWe(ˆ30), 500MWe(ˆ35)
원자로 수명(년)	56	60	20~50년(미공개)
주요 특징	매 84개월 마다 원자로 유닛(Core unit) 전체 교체	용융염이 순환하지 않고, 핵연료봉 속에 용융염이 담겨있는 설계, 운영 중 핵연료 교체 수행	염소염 사용, 필요 시 사용후핵연료 소각도 가능,
개발 상태	기초공학 설계 진행 중, 캐나다 VDR 1단계 완료(ˆ17.11.), 2단계 진행 중	개념설계~공학설계, 캐나다 VDR 1단계 완료(ˆ21.5.)	미국 ARDP 프로그램을 통해 ˆ25년 임계 목표로 임계실험 시설(MCRE) 구축 진행 중

* MCFR의 경우 IAEA(2020)에 포함되어 있지는 않으나, 언론 및 TerraPower사 공개 내용을 기반으로 조사하여 작성
 ※ IAEA(2020), Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 내 10개 MSR 노형 중 개발 진도가 공개된 노형 현황 요약. 이외 CA Waste Burner 0.2.5(덴마크), smTMSR-400(중국), ThorCon(미국, 인도네시아), FUJI(일본), LFTR(미국), KP-FHR, MK1 PB-FHR(미국), MCSFR(미국, 캐나다)이 있음

○ 열중성자 기반 용융염원자로 개발사 중에서는 덴마크 SEABORG사의 개발진도가 언론에 알려진 바 있음, 삼성중공업에서 SEABORG사의 CMSR(Compact Molten Salt Reactor)를 탑재한 선박 설계에 대해 미국선급협회(ABS)의 AIP 인증을 받은 바 있음.

○ 고속로 기반 용융염원자로 개념 개발사 중 염소기반 용융염을 이용하는 미국

TerraPower사의 개발 진도가 가장 빠른 것으로 보임. TerraPower사는 용융염화학 전용 실험실, 광범위한 부식시험장치, 핵심구성요소의 신뢰성 확보 시험장치 등을 갖추고, 용융염의 물성과 부식 문제 해결을 선제적으로 추진하고 있는 것으로 보임. 또한, 2022년에는 핵연료 없이 종합성능 시험 장치(Integrated Effects Test) 구축을 완료하였고, ARDP 프로그램을 통해 '25년 임계달성을 목표로 미국 아이다호국립연구소에 실험로(MCRE)를 건설 중이며. IET와 MCRE의 유기적 연계를 통해 염소기반 용융염원자로 실증을 추진함.



그림 3.2.16 TerraPower사의 용융염 화학실험실(좌)과 부식시험장치(우)

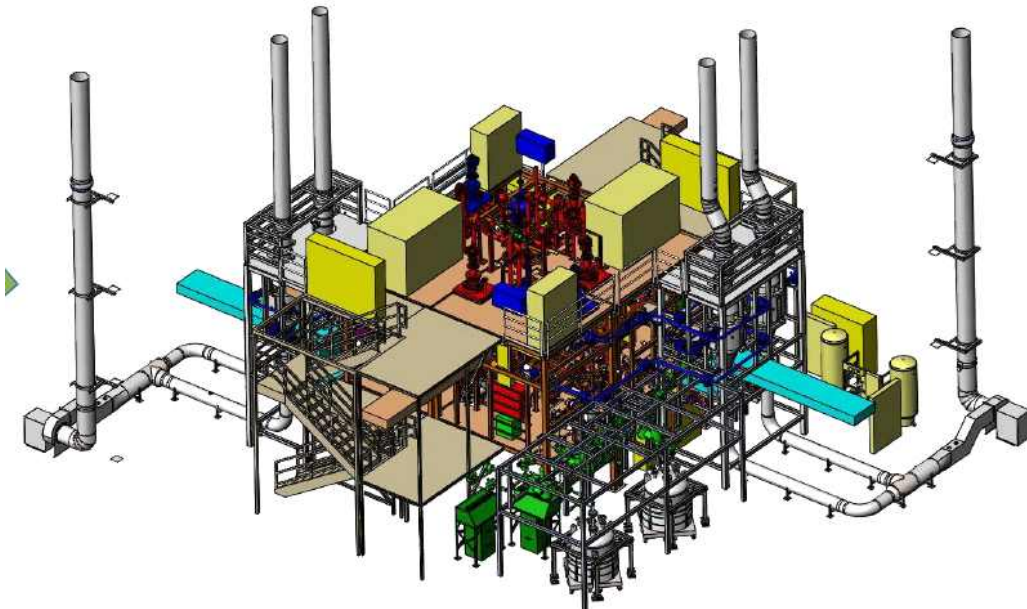


그림 3.2.17 TerraPower사의 종합효과시험시설 개념도(IET)

3. 국내 기술개발 및 사업화 전략

가. 기술개발 현황 및 추진방안

- 국내에서는 한국원자력연구원(이하 한원연) 주도로 다양한 산업체 수요를 고려하여 2030년대 실증을 목표로 염소기반 용융염원자로 개발이 `23년 5월 본격 착수됨.

※ 한원연에서 수행중인 용융염원자로 사업의 주요 내용은 한원연 웹사이트 내 기타 간행물 중 URECA 브로셔 참조 (<https://kaeri.re.kr/board?menuId=MENU00407&siteId=null#>)

- 사업명 : 용융염원자로(MSR) 원천기술개발사업
- 사업목적 : 무탄소 해양시스템(선박 추진, 부유식 원전, 해양 플랜트 등) 등에 적합한 용융염원자로(MSR)의 핵심 원천기술 확보
- 기간/예산 : `23~`26(4년) / 정부출연금 290억 원(과기정통부 270억, 해수부 20억)
- 참여기관 : 한원연(주관), 현대건설(공동), 삼성중공업(주관/공동), HD한국조선해양(공동), 선박해양플랜트연구소(공동), 센추리(공동)

표 3.2.4 용융염원자로(MSR) 원천기술개발사업 중점 추진내용

세부 과제	수행내용
① 해양용 MSR 노심 기술 (과기정통부)	해양용 MSR 노심 및 방사성 차폐 개념설계 완성
② 용융염 연료 및 재료기술 (과기정통부)	염소기반 MSR 액체핵연료 및 재료 분야 기술성 입증
③ 해양용 MSR 계통 기술 (과기정통부)	해양용 MSR 계통 개념설계 완성
④ 해양용 MSR 안전성 기술 (과기정통부)	MSR 고유의 안전전략 수립 및 개략적 확률론적 안전성 평가 수행
⑤ MSR 해양 적용 기술 (해수부)	MSR 해양 적용을 위한 운영환경 및 전력 네트워크 모델 도출

- 해양 활용을 목표로 하므로, 선박 또는 해양 플랜트 수명 기간 동안 핵연료 교체가 없고, 용융염 처리 필요성을 최소화하기 위해 염소기반 용융염을 사용하는 고속로 형태 설계 목표 수립함.

표 3.2.5 용융염원자로(MSR) 원천기술개발사업 개발 대상 노형 성능 요건(안)

성능인자	값
열출력	100 MWth (전기출력 35 MWe 급)
중성자 스펙트럼	고속
냉각재	염소기반 용융염
출구온도	650℃
핵연료	고순도저농축우라늄

나. 사업화 추진방안

○ 한국의 강점분야인 조선과 원자력 분야 협업을 통한 시너지 극대화를 위해 조선/해양 분야-원자력 연구기관 간 MOU 체결이 다수 이루어지고 있으며, 이를 통해 수요 맞춤형 용융염원자로 기술개발을 추진 중임.

- 삼성중공업-한원연 (`21.6.)
- 현대건설-한원연 (`22.6.)
- 선박해양플랜트연구소-한원연 (`22.4.)
- 해운사*-한국선급-선박해양플랜트연구소-한원연-경상북도-경주시 (`23.2.)

*에이치엠엠(주), 장금상선(주), 에이치라인해운(주), 우양산선(주)

○ 본 사업에 참여하는 민간 기업들의 역할을 강화하여 MSR 기술 개발 속도를 높이고 상용화 및 현장 적용을 염두에 둔 기술개발을 추진 중임.

다. 장애요인 및 대처방안

○ 원천기술 개발 단계부터 특허 등 지식재산권의 소유 및 실시에 대한 구체적 방안을 선제적으로 마련하여, 상용화 시점 기술 실시 관련 장애요인을 제거함.

○ 선급기관 및 원자력 규제기관과의 협력을 통해 해양 및 원자력 분야 규제 체계 마련 추진을 통해 원자로 인허가/규제 및 선급 인증 관련 장애요인을 제거함.

○ 핵물질 이용 등 국내 단독 개발이 어려운 기술의 경우, 국제협력을 통해 선진기술 확보 및 개발기술 독립 검증을 추진함.

- GIF(Generation IV International Forum) 에서 참관인(Observer) 자격으로 MSR 협력을 진행 중이며, 현재 러시아의 GIF 회원국 자격 이슈로 논의가 정체되어 있으나, 향후 기본협정(Framework Agreement) 개정 시 MoU 혹은 시스템 약정 체결 고려 중

라. 개발 로드맵



그림 3.2.18 국내 용융염원자로 개발 로드맵

제3절 가스냉각로형(GCR)*

1. 원자로 개념

가. 개발목적 및 활용 예상 분야

- 고온가스로(고온가스냉각원자로)는 사고 시 자연냉각만으로 잔열을 제거할 수 있어서 고도의 안전성을 확보할 수 있음.
- 경수형 원자로보다 훨씬 높은 고온(750℃) 열원을 제공할 수 있어 고효율의 전력 생산뿐만 아니라 수소 생산 및 공정열 공급 등 비발전 분야에도 활용할 수 있음.
- 주요 활용 예상 분야
 - 전기/수소 병합 생산기반 부하추종
 - 화공산업단지 전력 및 고온증기(550℃) 공급
 - 열화학(S-I) 공정 또는 고온수전해(SOEC) 기반 대량 수소생산

나. 노형 개념 및 특성

○ 가압경수로와 고온가스로의 차이점

- 기존 가압경수로는 봉다발 형태의 핵연료집합체를 사용하며, 물을 냉각재인 동시에 중성자 감속재로 사용하여 약 150기압과 320℃의 운전 조건을 가지며, 증기터빈을 이용한 대규모 전력 생산에 주로 활용됨.
- 고온가스로는 TRISO라고 불리는 세라믹 피복입자 핵연료, 헬륨을 냉각재, 흑연을 중성자 감속재로 사용하여 운전압력 약 70기압, 운전 온도 750℃ 이상의 운전 조건을 가지며, 증기터빈 또는 가스터빈을 이용한 고효율 전력 생산뿐만 아니라 수소 생산 및 공정열 공급에도 활용할 수 있음.

*해당 절의 참고문헌 [3.3.1~3.3-33]까지 적용되었으며, 본 문중에는 별도 표시를 생략함.



그림 3.3.1 가압경수로와 고온가스로의 특징 비교

○ 원자로 노심(블록형, 펄블형)

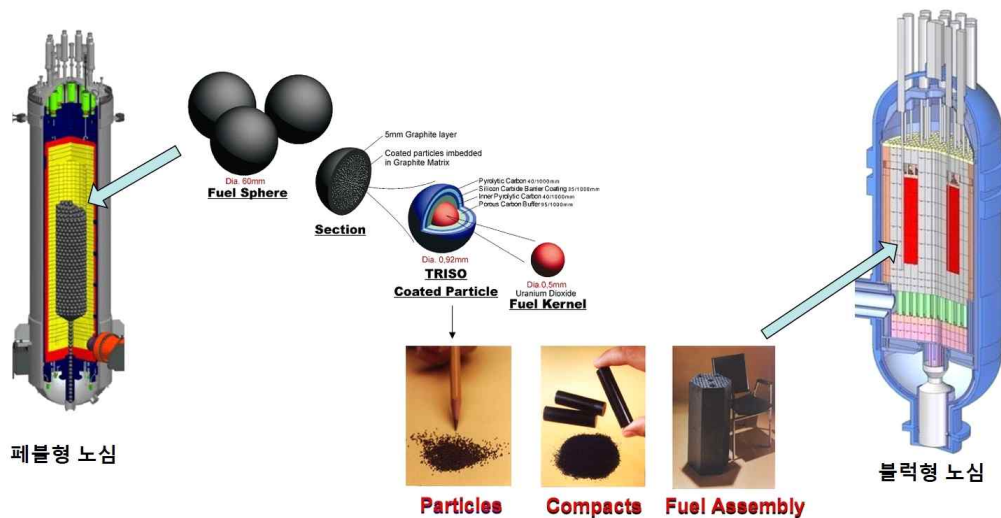


그림 3.3.2 핵연료 집합체 형태에 의한 원자로 형태 구분

- 작은 입자(1 mm 이하) 형태의 피복입자연료를 원자로에 장전하기 위하여 핵연료를 성형하게 되는데, 성형하는 방법에 따라 블록형(block-type) 노심 또는 펄블형(pebble-type) 노심으로 분류함.
- 블록형 노심은 피복입자연료를 약 1 cm 직경의 분필 형태의 컴팩트(compact)로 만들고 흑연 블록(graphite block)에 삽입한 핵연료 집합체를 사용하며, 펄블형 노심은 피복입자연료를 포함한 흑연 매트릭스를 약 6 cm 직경의 구형으로 성형하여 사용함.
- 고온가스로의 압력용기 내부 대부분은 감속재와 반사체 역할을 하는 흑연 블록으로 채워져 있으며 흑연은 2,200°C의 고온에서도 안전성을 유지하고, 열전도도와 비열이

높은 재료임. 육각평면형 결정구조를 갖는 흑연은 중성자 조사에 의해 이방성 변형이 일어나고 장기 사용 시 흑연 블록의 구조적 변형이 발생하므로 중성자속이 높은 노심 중앙부 흑연 블록은 주기적으로 교체가 필요함.

○ 원자로 및 열이용 계통

- 고온가스로는 고온에 견딜 수 있는 흑연 또는 세라믹을 노심 재료로 사용하기 때문에 950℃까지의 높은 열을 생산할 수 있으며, 이를 이용한 고효율 발전, 고온·고압 증기 생산, 고효율 수소 생산 등에 활용 가능함.
- 고효율 수소 생산을 위해서는 ①원자로 계통에서 헬륨 냉각재가 노심을 지나면서 고온으로 가열 ②고온으로 가열된 헬륨은 중간열교환 계통으로 열전달 후 노심으로 회귀 ③중간열교환 계통은 원자로 계통의 열을 전달받아 수소 생산계통으로 열을 이송함. 이를 위하여 원자로 계통과 중간열교환 계통 사이에 900℃ 이상의 고온에 견딜 수 있는 중간열교환기(intermediate heat exchanger)가 필요함.
- 수소 생산 계통은 물분해 방법 중에서 고온전기분해(HTSE) 또는 황-요오드(S-I) 열화학 사이클 방법을 사용하여 고온가스로의 경제적 대량 수소 생산이 가능하게 함.

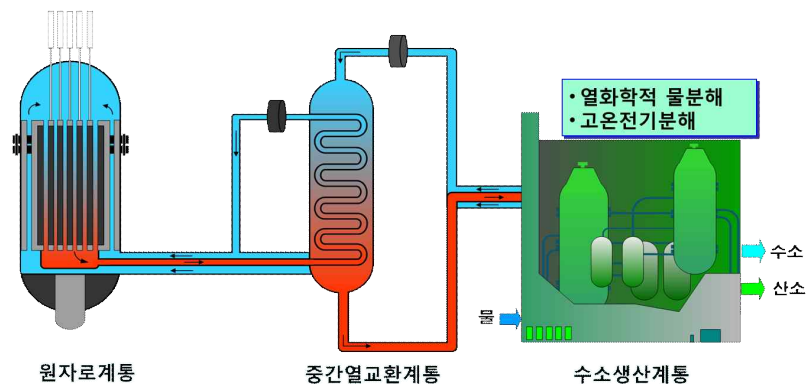


그림 3.3.3 고온가스로를 이용한 수소 생산 시스템의 주요 계통

○ 피복입자핵연료 (TRISO)

- 고온가스로에 사용되는 핵연료는 피복입자핵연료라고 불리며, 미세한 입자 형태의 우라늄의 표면에 열분해탄소(Pyrolytic Carbon: PyC)층과 탄화규소(Silicon Carbide: SiC)층을 조합으로 하여 피복 후 입자 형태로 제조한 것임.
- UO₂ 또는 UCO 형태의 연료핵(kernel)을 중심으로 외부에 완충(buffer) 영역, 내부 열분해탄소층(I-PyC layer), 탄화규소층(SiC layer), 외부 열분해탄소층(O-PyC alyer)을 차례로 피복한 상태의 핵연료임.

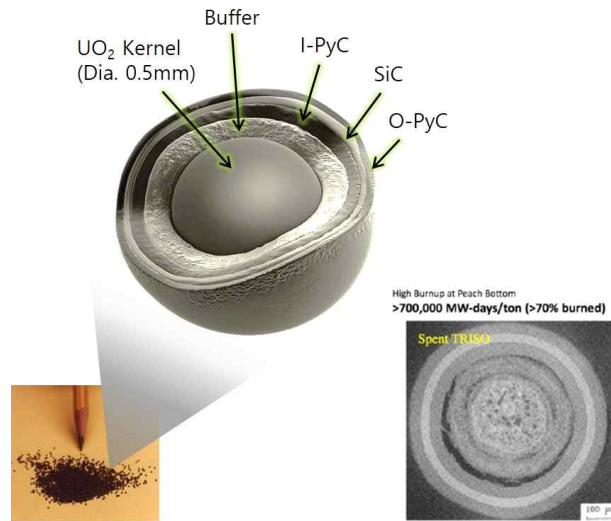


그림 3.3.4 피복입자핵연료의 구조

- 연료핵은 핵분열 열공급원이며 방사성의 핵분열생성물을 산화물로 변화시켜 확산을 억제하는 방호벽 역할을 함.
- 완충 영역은 핵분열생성 가스를 포집하고 연료핵의 부피팽창을 흡수하며 핵분열생성물(fission product)에 의한 다른 피복층의 손상을 막는 역할을 함.
- 고밀도의 I-PyC 층은 실질적인 첫 번째 기밀 층으로 다음 층인 SiC 층을 피복할 때 부산물로 발생하는 염소가스로부터 연료핵을 보호하고, 금속상의 핵분열생성물의 확산방지 벽 역할을 수행할 뿐만 아니라 SiC 층에 가해지는 인장응력을 감소시키는 역할을 함.
- SiC 층은 피복층의 핵심으로 금속상의 핵분열생성물의 확산을 막는 방호역할과 내부에서 발생하는 모든 압력을 지탱하는 압력용기 역할을 함.
- O-PyC 층은 가스 및 금속상의 핵분열생성물의 확산방지와 SiC 층의 인장응력을 감소시키는 역할과 함께 컴팩트 또는 펄스형 연료를 만들 때 흑연분말 기지(matrix)와 결합을 위한 추가 코팅(over coating)에 필요한 표면을 제공함.

○ 안전 개념

- 초고온가스로는 제4세대 원자로 중에서도 최고의 안전성을 갖는 원자로이며 후쿠시마 사고와 같은 원자로 노심 용융 사고를 근원적으로 배제함.
- 전 출력영역에 걸쳐 음의 반응도 계수를 갖기 때문에 사고 시 운전원 비상조치 없이도 출력폭주 없이 원자로의 안전 정지가 가능함.
- 가스인 헬륨을 냉각재로 사용하기 때문에 계통을 구성하는 재료와 화학적 반응이 적으며

재료의 부식 문제가 상대적으로 완화되어 물을 냉각재로 사용할 때 예상되는 고온 금속-물 반응에 의한 수소 발생이 없음.

- 원자로 내부 구조물의 대부분을 차지하는 흑연의 고온 저항성과 높은 열전도도와 비열은 사고 시 노심 붕괴열을 흡수 저장하는 효과를 가져와서 핵연료 온도 상승을 완만하게 만들고 최고 온도 도달 시간을 수십 시간으로 지연시킴. 즉, 사고 발생 후 며칠간 원자로에 별다른 조치 없이 방치하여도 노심 손상 없이 안전하게 유지됨.
- 삼중피복입자핵연료의 고온 저항성은 고온가스로 안전의 핵심이며 핵분열생성물 누출을 차단하는 1차 방호벽으로써 2,300℃까지 급작스러운 파손이 발생하지 않으며, SiC 피복층의 열화온도인 1,800℃까지 핵분열생성물의 누설이 없어서 보수적으로 1,600℃를 설계기준사고의 핵연료 온도 제한치로 설정함.
- 상기 안전 특성이 복합적으로 작용하여 고온가스로의 피동냉각 안전성이 보장되는데 냉각재가 없어도 핵연료의 고온저항성, 낮은 출력밀도의 노심에 의한 붕괴열, 흑연의 열흡수 및 전도, 원자로압력용기 외벽을 통한 복사 냉각이 복합적으로 작용하여 외부 열침원(공기 또는 물)을 활용한 원자로 공동 냉각 계통의 자연순환력에 의한 작동만으로도 사고 시 잔열제거가 가능하여 원자로를 안전한 상태로 유지함.

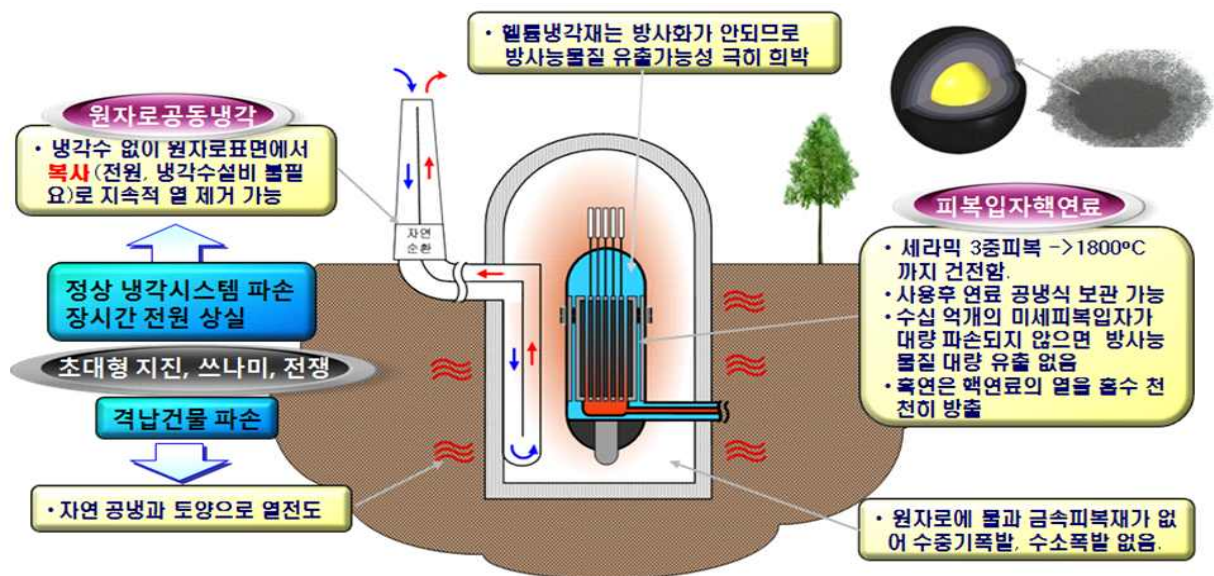


그림 3.3.5 고온가스로의 고유 피동안전성 개념

2. 국내외 개발동향

가. 국내현황

○ 고온가스로 핵심기술개발

- 2006년부터 3차 및 4차 원자력진흥계획의 일환으로 원자력연구개발사업에 포함하여 본격 추진됨. 2008년에는 미래원자력시스템 개발 장기추진계획(제255차 원자력위원회, '11년 수정)을 수립하여 핵심기술개발과 함께 2030년까지 원자력 수소생산 건설/실증이라는 장기 비전이 제시됨.
- 핵심기술개발은 해외 기술도입이 쉽지 않은 기술영역을 중심으로 2006년부터 2016년까지 연구 개발됨.
- 주요 핵심기술로 원자로 핵심설계 및 해석코드 기술, 피복입자 핵연료 제조기술, 고온재료기술, 핵심기기 설계 및 제작기술, 초고온 실험 기술, S-I 열화학 수소생산 공정기술에 대한 개발을 수행하였으며 실험실 수준에서 핵심기술 검증연구를 수행함.
- 2016년 핵심기술개발사업이 종료한 후 부족기술을 보완하면서 실증사업을 위한 '열이용원자로(VHTR) 핵심기술 성능향상' 연구를 2017년부터 2019년까지 수행함.
- 2020년부터는 미래선진원자로 핵심요소기술개발 사업의 내역사업으로 초고온시스템 핵심 기술 개발 사업을 수행함.

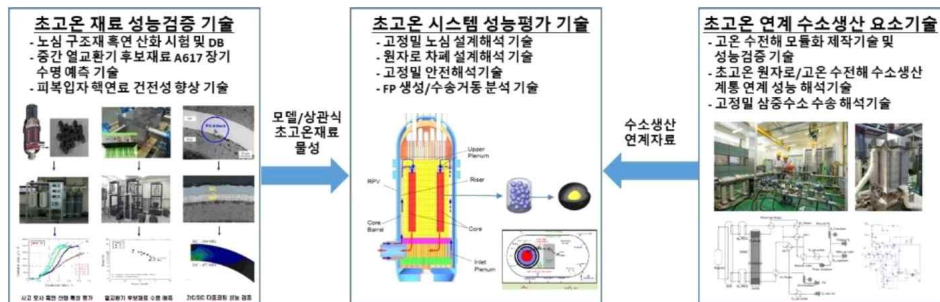


그림 3.3.6 초고온시스템 핵심기술 개발 사업

○ 원자력수소 실증사업

- 원자력수소 실증사업 추진을 위하여 한국원자력연구원은 산업체와 공동으로 2012년부터 2014년까지 계통개념연구를 진행함. 참여 산업체는 포스코, 현대건설, 현대중공업, STX중공업, 현대엔지니어링이며 초고온가스로 계통개념을 개발하고 실증사업계획을 수립함.
- 제시된 실증사업계획은 750℃ 성숙기술(전력/공정열 생산)을 먼저 실증하고, 이후 950℃ 미래기술(수소 생산)을 실증하는 2단계 실증방안을 제시함.

- 2016년 실증로 설계인가 사업 착수를 위하여 예비타당성조사를 신청하였으며, 기술성평가는 통과하였지만 기재부의 대상사업으로 선정되지 못함.

○ 현대엔지니어링 고온가스로 사업

- 현대엔지니어링社와 USNC社(美)는 15/30 MWth 초소형 블록형 고온가스로(MMR, Micro Modular Reactor) 실증사업을 초크리버(Chalk River) 캐나다원자력연구소(CNL) 부지에서 추진하고 있음.
- 현대엔지니어링社는 노심을 제외한 EPC(설계, 조달, 건설) 업무를 담당하고 있음.
- 원자로에서 발생한 열은 헬륨-용융염-물(또는 증기) 순으로 전달되며, 용융염 탱크에 열을 저장하였다가 수요에 따라 증기 발전 사이클에 열을 공급하여 유연한 전력 생산이 가능한 개념을 적용함.
- 핵연료는 고순도저농축(19.75%) 피복입자핵연료(TRISO)를 적용하고 있으며, 고연소도 방식을 적용하여 사용 후 핵연료 양을 기존 대비 50% 이하로 낮춘 것이 특징임.
- 또한 핵연료는 펠릿 형태로 가공하여 흑연 구조체에 결합하는 Prismatic 방식을 적용하고 있으며, 원자로의 열 출력 밀도를 1.24 W/cm^3 로 낮게 설계하여 노심 용융 사고를 원천 봉쇄하도록 설계함.
- 현재 캐나다 규제기관 CNSC의 VDR(Vendor Design Review) 2단계 진행 중임.
- MMR 초도기는 전력 생산을 실증하고, 이후 후속 사업으로 공정 열 공급/고온수전해(HTSE)이 가능한 다목적 원자로 사업을 추진 중임.

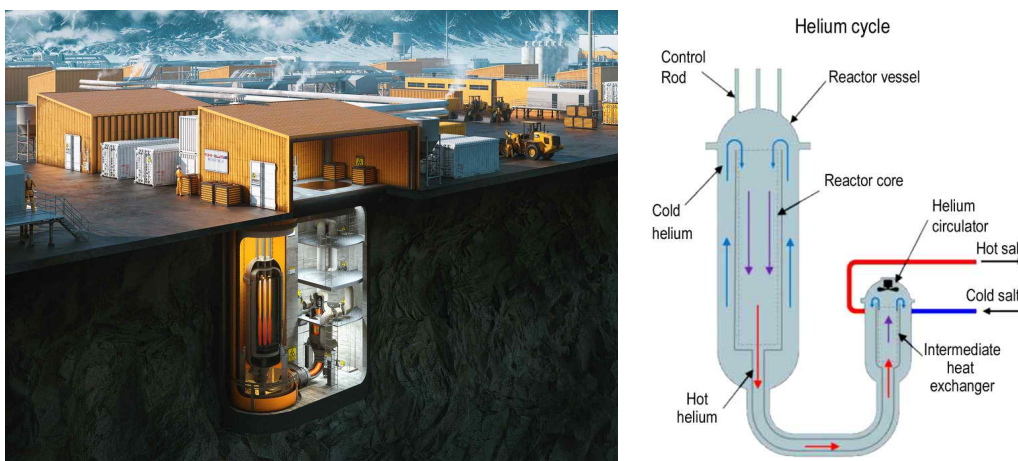


그림 3.3.7 MMR 원자로 개념도

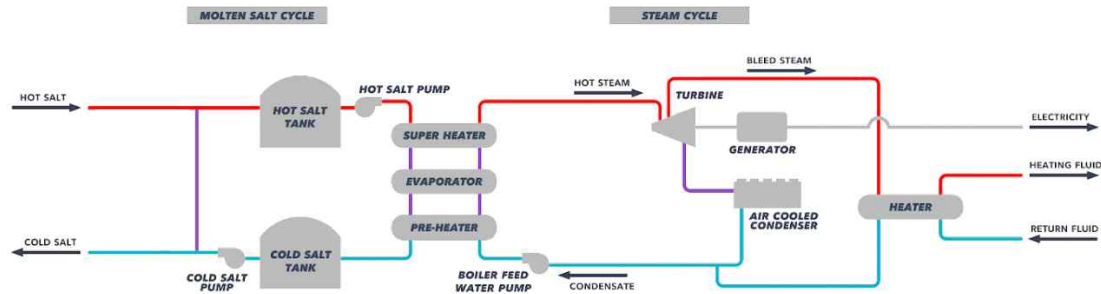


그림 3.3.8 MMR 비원자력플랜트 개념

나. 국외현황

○ 중국

- 1970년대 고온가스로 연구개발을 시작하였으며 HTR-10 시험로를 건설(2000년) 후 임계 운전 및 안전성 검증시험에 성공함.
- 시험로 기술을 기반으로 열출력 250 MWth 2기로 구성된 HTR-PM 실증로를 건설 중이며, 2021년 전력망에 연결하여 상업운전에 들어감.
- HTR-PM 실증로를 이용한 상용로 HTR600(전기출력 600 MWe급)을 개발하고 있으며 5개 부지에 대한 타당성 검토와 기본설계를 완료함.
- HTR-10 시험로의 운전온도를 950℃ 초고온으로 높이는 설계 개선과 함께 시험로와 연계한 고효율 전력생산과 수소생산 기술 실증을 위하여 헬륨 가스 터빈 기술, 수소생산용 S-I 열화학 공정 및 고온수전해 기술을 동시 개발 중임.
- 고효율 수소생산 공정 연계 연구를 위한 헬륨 루프(100 kW급, 870℃ 4 MPa) 설계 및 건조 추진 중임.

○ 일본

- 1970년에 기술개발에 착수하여 고온가스시험로 HTTR을 건설하고 세계 최초로 950℃ 초고온에서 50일간 운전을 수행(2010년)함.
- 2018년 국가성장전략과 국가에너지계획에 초고온가스로 연구개발과 국제협력사업 지원 내용을 적시하고 문부과학성과 경제산업성이 기술개발을 지원 중임.
- 2030년 목표로 HTTR을 이용한 헬륨 가스터빈 기반 고효율 전력생산과 S-I 열화학 공정을 이용한 수소생산 실증 연구에 주력하고 있음.
- 2014년 S-I 열화학 수소생산 시설을 건조하였으면 2019년 1월 150시간 연속운전(30 L/hr 규모 수소 생산)에 성공함.

○ 미국

- ‘Energy Policy Act, 2005’에 따라 차세대원자로사업(NGNP)의 대상 원자로로

초고온가스로를 선택하고 NGNP 예비개념연구(2007년), 개념연구(2008~2009년), 개념설계(2010~2011년)를 수행함.

- 세일가스 채굴 기술 혁신으로 저렴한 천연가스 기반 수소생산 때문에 NGNP사업의 수소생산 목표는 경제성이 부족하여 750℃ 열원의 고온가스로를 활용한 산업용 전력과 공정열 공급으로 목표를 변경함.
- 현재 에너지부(DOE) 지원으로 X-energy가 100MWe급 고온가스로에 대한 개념설계를 진행하고 있음. X-energy는 Dow Chemical의 Texas UCC seadrift 사이트에 열을 공급하는 원자로를 2030년 전에 가동할 수 있는 일정으로 프로젝트를 진행 중임.
- 고온가스로에 사용되는 피복입자핵연료 제조기술 확보를 위한 연구(AGR 프로그램)를 아이다호국립연구소(INL)에서 수행 중이며, 이와 별도로 소형 및 초소형 고온가스로에 장전될 피복입자핵연료 제조를 위한 파일럿 규모 핵연료 제조설비를 오크리지국립연구소(ORNL)에 건설하고 있음.
- 미국 원자력규제위원회(NRC)는 고온가스로 등 비경수형 원자로의 인허가를 위한 일반설계요건(GCD)를 제정함.

○ 유럽

- 2000년대 초반부터 고온가스로 관련 프로젝트가 진행됨. RAPHAEL 프로젝트(2005~2009년) 제4세대 원자력시스템인 초고온가스로 설계를 지원하기 위한 연구개발이 수행되었으며, 이후 EUROPAIRS(2009~2011년), ARCHER(2011~2014년) 프로젝트가 진행됨.
- 최근 유럽연합의 고온가스로협의체 NC2I(Nuclear Cogeneration Industrial Initiative)가 결성된 후 고온가스로 실증로 개발사업을 추진 중에 있음.
- NC2I 의장국인 폴란드는 자국의 화학산업단지의 석탄 보일러를 대체하기 위하여 고온가스로 개발을 정부보고서에 명시('17년 10월)하고 유럽연합의 Horizon2020 자금 지원으로 고온가스로 개념개발을 위한 GEMINI Plus 프로젝트를 수행함. 연계하여서 유럽 산업계 참여로 진행하는 GEMINI 4.0 프로젝트가 2022에 시작하여 현재 진행 중임.

○ 영국

- 정부의 원전 건설 재개 결정과 함께 비즈니스·에너지·산업전략부(BEIS) 주도로 미래 원자력핵심 프로그램을 착수하였으며 고온가스로를 후보 노형의 하나로 고려함.
- 2019년 BEIS는 제4세대원자로 국제포럼(GIF)의 초고온가스로 공동연구에 참여하기로 결정함.

- 2022년 고온가스로 기반의 Advanced Modular Reactor (AMR) 프로젝트를 시작하였으며, 목표는 2030년까지 건설하여 운영하는 것임. 전체 미화 7,400만 불 규모의 프로젝트임. 현재 Phase 1에서 EDF, Nuclear National Lab, U-Battery, USNC 사 4곳이 영국 정부의 지원을 받아 프로젝트 수행 중임.

○ 캐나다

- 2018년 소규모 전력망 또는 비전력망 지역에 전력 또는 열 공급을 위하여 소형경수로와 선진원자료를 포함하는 소형원자로 개발 로드맵을 수립함.
- 캐나다연구소(CNL)는 초크리버 부지에 소형원자로 실증사업을 추진 중이며 2018년 공모를 시작하여 19년 1월 기준 6개 업체가 신청하였으며, 이 중에서 초소형 고온가스로를 제안한 미국의 USNC(Ultra Safe Nuclear Corporation)는 실증로 건설을 위한 부지 준비 인가(License to Prepare Site, LTPS) 신청서를 캐나다 원자력안전위원회(Canadian Nuclear Safety Commission, CNSC)에 제출함.
- 캐나다 소형원자로 사업에 참여하고자 11개('19년 3월 기준) 산업체에서 CNSC에 사전인허가 검토 과정인 Vendor Design Review를 신청 중이며, 이 중에서 3개 업체(USNC, StarCore Nuclear, URENCO)가 고온가스로 노형을 제안함.
- 2020년에 Ontario Power Generation(OPG)과 USNC사는 Joint Venture인 Global First Power Ltd.를 설립하여 USNC사의 MMR 사업개발을 진행 중임.

3. 국내 기술개발 및 사업화 전략

가. 기술개발 현황 및 추진방안

- 2004년부터 수소경제시대를 대비하여 고온가스로를 이용한 원자력수소생산 기술개발 연구를 착수함.
- 2006년부터 해외 기술 도입이 어려운 핵심기술 개발에 본격 착수하였으며 2016년까지 실증로 개념설계 착수가 가능한 기술 수준 도달하였지만 다음 단계로 기술 수준을 향상을 위한 실증로 설계와 기술검증을 위한 후속 사업 착수가 지연되고 있음.
- 기 투자된 핵심기술은 고유 설계해석코드, 피복입자핵연료제조, 초고온 재료·기기·시험, 황-요오드 열화학 수소생산공정 기술이며 주요 개발현황은 다음과 같음.

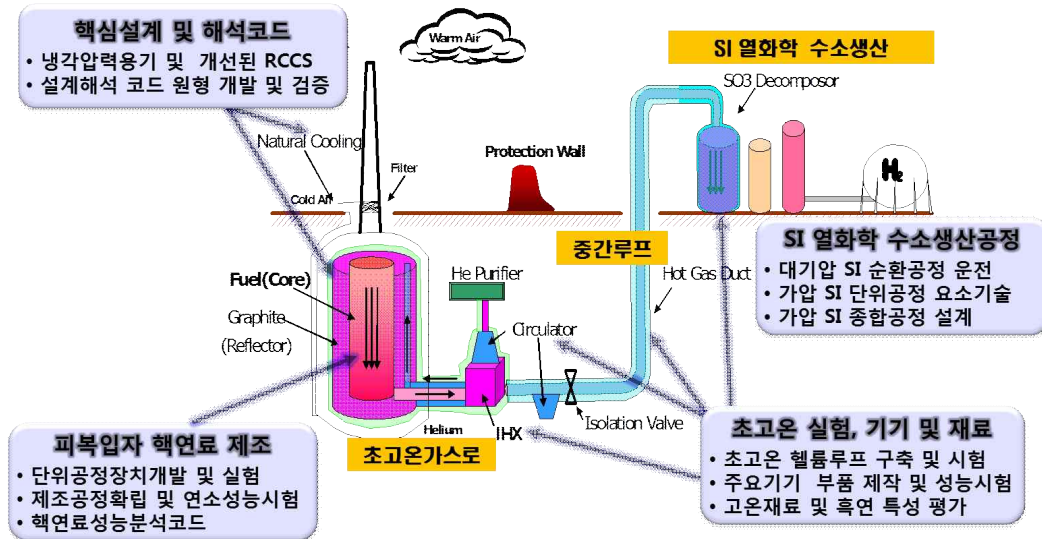


그림 3.3.9 고온가스로의 핵심기술 분류

- 핵심설계 및 해석코드 기술에서는 초고온가스로 설계하고 해석하는데 필요한 전산 코드(노심, 열유체, 안전해석 등)를 국내 독자 기술로 개발하여 개념설계 활용가능 수준에 도달하였으며, 또한 냉각압력용기 및 개선된 RCCS 설계 등 고온의 열을 안전하게 공급하기 위한 고유 설계 개념을 도출하였음.
- 피복입자 핵연료 제조기술은 2011년 UO₂-TRISO 제조공정을 확보하고 2013년 시작품을 완성하였으며, 2014년 하나로 연구로에서 1차 연소성능시험(4% FIMA)을 수행하고 2016년 조사후시험을 완료함.
- 고온재료기술은 재료 물성 데이터베이스(DB) 확보에 중점을 두고 GIF 국제공동연구에서 국제협력으로 구축하고 있는 데이터베이스 기여 연구를 통하여 국제공동 DB 이용 권한을 확보.
- 초고온 기기 기술개발은 초고온 기기 기술개발은 VHTR의 고온열을 중간계통으로 전달하는 중간열교환기와 그 열을 다시 중간계통에서 수소생산계통으로 전달하는 공정열교환기 제작 기술개발에 중점을 둠.
- 초고온 중간열교환기는 인쇄기관형 열교환기를 사용하는데 설계 및 확산접합 제조 기술을 개발하고 부분 시작품을 설계·제작하여 헬륨루프에서 성능 시험을 수행함.
- 공정열교환기는 S-I열화학 공정에서 활용되기 때문에 고압 부식 환경에서 활용될 수 있도록 실리콘 카바이드 코팅 기술을 접목한 인쇄기관형 열교환기를 개발하고 부분 시작품의 성능 시험을 수행하여 개발기술의 타당성을 확인함.
- 초고온 실험기술은 그 동안 국내 경험이 없던 고온·고압의 중형(0.6MW급) 헬륨루프를 국내기술로 설계·제작하고 중간열교환기 부분 시작품을 설치하여 고온(900℃),

고압(20기압) 조건에서 성능시험에 성공하여 향후 종합실증시험장치 설계·운영에 필요한 기반 기술을 확보함.

- 헬륨루프와 별도로 고온가스로의 안전성 확인을 위한 자연냉각시험장치를 구축하고 성능시험으로 자연냉각 잔열제거 성능을 확인함.

○ 원자력 공정열 생산/이용 기술 개발 및 사업 기반 조성과 원자력 공정열 시스템 실증사업을 촉진하기 위해 2023년 8월 11일에는 원자력열이용협의체가 출범함.

- 원자력 열 생산 이용에 대한 정보 교류 및 사업 기획 모색, 원자력 공정열 생산 및 이용 시스템의 실증 사업 추진 계획 수립 협의, 원자력 공정열 생산 시스템의 실용화 기술 개발 촉진 및 인허가 방안 협의 등의 주요 업무를 진행할 계획임.
- 참여기관으로는 한국원자력연구원, 경상북도, 롯데건설, 롯데케미칼, 어프로티움, 현대엔지니어링, DL이앤씨, DL케미칼, GS건설, SK에코플랜트, SK인천석유화학이 있음.

나. 사업화 추진방안

○ 국내에서는 2004년 원자력 수소생산을 목적으로 고온가스로 기술개발에 착수하여 국내 확보가 필수적인 핵심기술에 대한 개발을 수행하여 선진국과 기술격차를 축소하였지만 후속 실증사업이 진행되지 못하여 기술개발이 정체되고 있음.

○ ‘수소경제 활성화 로드맵’(2019년 1월) 발표되고 로드맵 이행에 필요한 ‘수소 기술개발 로드맵’이 수립(2019년 10월)되었으며, 수소생산의 미래기술의 하나로 초고온가스로 기술이 고려되고 부문별 추진전략에 초고온가스로를 이용한 수소생산 기술 검증을 위한 초고온시험로 기술개발의 필요성이 제시됨.

○ 국외에 고온가스로 기술에 대한 관심이 증가하고 기술개발 및 실증을 위한 투자가 증가하고 있으며 국내에서 수소경제와 연계한 고온가스로 기술이 요구되는 상황을 고려할 때, 적극적으로 고온가스로의 기술검증과 실용화에 나서서 고유 핵심기술을 확보해야 함.

- (원자로설계) 설계에 필요한 핵심 설계해석 코드의 인허가 문서 발간, 안전성 평가기술 확립 및 원자로 설계 인허가성 검토를 위한 백서 발간과 함께 원자로 개념·기본 설계 수행과 안전성분석보고서 작성을 통하여 원자로 설계 및 해석코드의 부족한 기술을 보완할 필요성이 있음.
- (피복입자핵연료) 실험실 수준에서 확립된 피복입자제조기술의 실용화를 위하여 파일럿 규모 제조공정 개발과 고연소도 성능검증을 위한 조사시험 수행이 필요함.
- (고온재료) 초고온 및 중성자 조사 환경에 노출되는 핵심 기기 및 기계 설계 및

구조건전성 평가가 필수적인 재료를 선정하고 노내 물성 데이터 확보와 더불어 초고온용 복합재료 부품 제조기술 개발이 필요함.

- (기기 및 기계) 고온 열원의 다목적 활용을 위해서 고온 헬륨 환경에서 사용할 초고온중간열교환기/헬륨-물 증기발생기, 고효율 전력생산(헬륨 브레이튼 사이클) 압축기 및 터빈, 압력용기/노심구조물 및 순환기/CRDM/격리밸브 등 주요 핵심 기기·기계 설계 및 제작 기술 개발이 필요함.
- (수소생산) SI 열화학공정은 실험실 규모에서 실증되었으나 경제성 확보를 위해서 공정개선의 필요성이 있으며, 고온수전해 기술수준 향상에 따라 고온가스로와 연계할 수 있는 스택 모듈화 기술 개발과 검증이 필요하며, 원자로와 수소생산 계통 간의 연계를 위한 공정시스템 개발이 필요함.

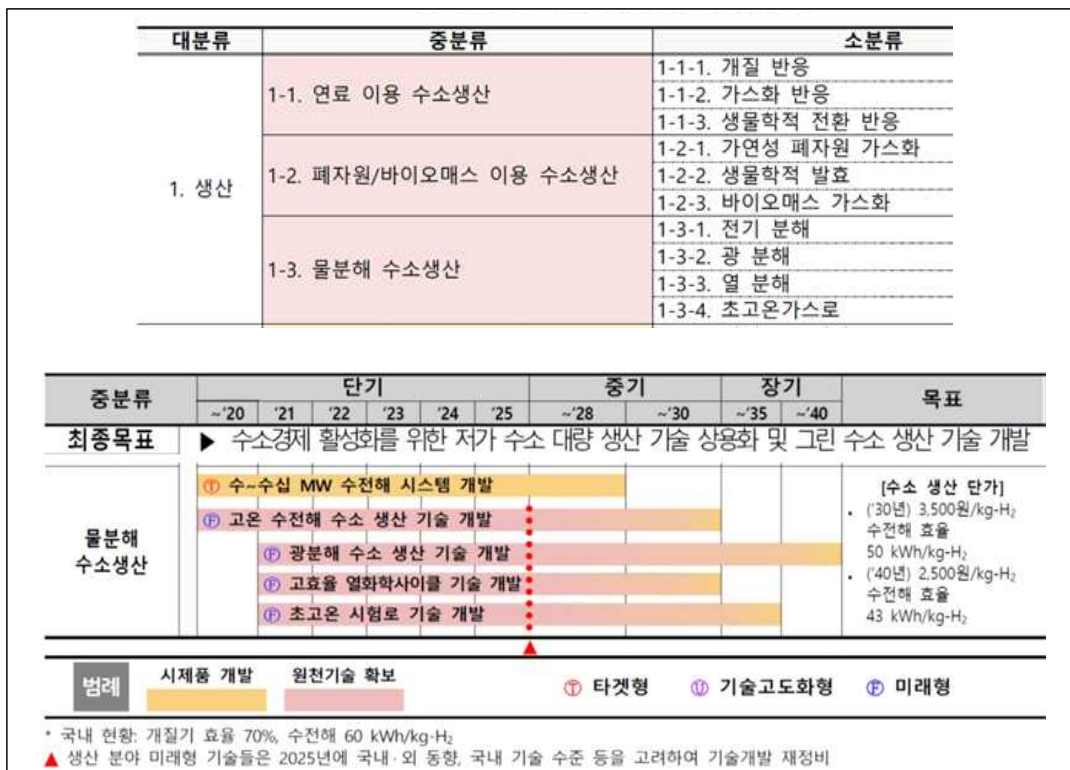


그림 3.3.10 수소 기술개발 로드맵의 기술 분류 체계(위) 및 부문별 추진전략(아래)

다. 장애요인 및 대처방안

○ 미국은 고온가스로를 선진원자로 노형 후보의 하나로 선정하고 산업체(예: X-energy)와 개념설계를 진행 중이며 관련 기술수준 향상에 박차를 가하고 있으며, 캐나다는 소형원자로 로드맵을 수립하고 소형 선진원자로 실증을 지원하고 있음.

- 캐나다 규제기관의 사전설계검토 절차에 11개 사가 신청하였으며 이 중 3개 노형이

고온가스로임.

- 원전건설을 재개한 영국도 미래 소형원자로 후보 노형으로 고온가스로 기술개발에 착수하고 GIF공동연구에 참여하고 있으며, 유럽연합은 폴란드 온실가스 감축을 위해 산업단지의 석탄보일러를 대체할 고온가스로를 개발하는 등 고온가스로에 대한 국제적 관심이 고조되고 있음.

- 일본, 중국과 같은 주변 경쟁국은 약 40년 동안 고온가스로 기술개발에 대한 투자로 우리나라보다 높은 기술수준을 보유하고 있으며 기술 선도국이 되기 위한 기술개발 및 실증사업을 진행하고 있음.
- 원자로 설계 국외 기술개발 수준: 중국은 고온가스로 실증로 HTR-PM 건설 완공 단계로 2020년까지 실증이 완료되면 성숙기술인 고온(750℃) 시스템 설계 기술을 확보, 일본은 고온가스시험로 HTTR을 설계하고 950℃ 장기운전까지 수행하여 미래기술인 초고온(950℃) 시스템 설계기술을 개발하였으며 상용로 HTR300C 기본설계 수준을 확보, 미국은 750℃ 원자로 기본 설계와 950℃ 원자로 개념설계 수준을 확보함.
- 피복입자핵연료 국외 기술개발 수준: 중국은 상용화 규모의 피복입자핵연료(UO₂) 제조시설을 건설·운영하고 있으며, 일본은 상용화 수준의 피복입자핵연료(UO₂) 제조기술을 확보하고 있으며 미국은 2002년부터 DOE 지원으로 개량 피복입자핵연료(UCO) 기술을 개발하고 있으며 2018년 파일럿 규모 제조시설 건설에 착수한 상태임.
- 고온재료 국외 기술개발 수준: 2세대 고온가스로 운전을 통하여 700℃이하 재료에 대한 물성자료와 제조 기술은 확보되어 있지만 750℃~950℃에 대한 연구는 계속되고 있으며 제4세대 원자력시스템 국제공동연구를 통하여 고온 재료 데이터베이스를 구축하고 있음. 원자로급 흑연의 경우 미국과 일본은 자국에서 생산된 흑연의 중성자 조사 체적변형 및 크리프 데이터를 장기적으로 확보하고 있으며 중국은 시험로 HTR-10 및 HTR-PM 개발 과정에서 흑연 부품 시험 기술을 확보함. 미국 INL을 중심으로 초고온 금속재료 피로, 크리프 특성 평가 시험자료를 확보하여 ASME 코드 제정 업무를 수행 중이며 탄소 및 탄화규소 복합체 제조와 표준화 기술은 미국 ORNL과 프랑스의 CEA가 선도하고 있음.
- 핵심 기기 및 기계 국외 기술개발 수준: 미국은 FSV 상용로 운전으로 700℃ 수준의 고온 기기 관련기술은 보유하고 있으며 950℃ 수준의 초고온 기기 기술은 장기개발계획으로 추진하며 헬륨 가스터빈 개념설계 수행 경험 보유, 일본은 HTTR 개발과정에서 미쓰비시 및 도시바가 헬륨 순환기, 헬륨 압축기, 격리밸브 등에 대한 일부 기술을 확보, 중국은 HTR-PM 개발을 통하여 750℃ 설계온도에 대한 고온 기기 관련 기술을 확보함.

- 수소생산 국외 기술개발 수준: 열화학 수소생산 기술의 경우, 일본 JAEA는 2014년에 구축한 200 L/hr 규모의 SI 열화학 가압조건 수소생산 시설에서 2019년 2월 150시간 동안 30 L/hr 규모의 장기 운전을 성공하여 열화학 수소생산 기술을 선도하고 있으며 중국은 2014년 105L/hr 상압 수소생산 실험을 62시간 수행하였으며 후속으로 가압조건 실증시설 구축 및 실증 계획 수립 중에 있음. 고온수전해 수소생산 기술의 경우, 미국은 초고온가스로와 연계할 고온 수전해 기술을 개발하여 왔으며 2009년 실험실 규모 고온 수전해 기술을 실증(15 kW급, 5,000 L/hr, 1,000시간)하였으며 2018년 파일럿 규모 고온 수전해 실증연구에 착수하였음. 중국은 2014년 단위 스택(단위 셀 10 cm x 10 cm, 10셀 적층)으로 105 L/h, 62시간 시험을 수행하여 실험실 수준의 기술을 보유하고 있음.
- 기존의 국내에서 개발한 고온가스로 기술을 적극 활용하여 해외기업과 협력 강화를 통해 국내에 개발된 고온가스로 핵심기술이 해외시장에서 적극 활용될 수 있게 진행할 수 있게 해야 함. 또한 국내에서 자체적으로 고온가스로의 기술검증과 실용화에 적극적으로 나서서 고유 핵심기술을 확보해야 함.
- 다음 표에서와 같이 고온가스로 분야에는 국내외 기술격차가 존재하며 이를 해소 하기 위한 노력이 필요함. 원자력의 비발전 분야에 적용될 수 있게 더 적극적으로 민간사업자들이 참여하는 원자력 열이용 협의체를 활용하여 비전력부문에서의 탈탄소에도 고온가스로 기반의 원자력 기술이 적용될 수 있게 연구개발이 진행되어야 함.

기술 분야	선진국 기술 수준		국내 기술 수준
설계해석 코드	미국, 중국, 일본, 독일	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 8) 설계/해석코드를 활용하여 750℃ 고온가스로 설계/인허가 경험 보유 (미국, 중국, 일본, 독일) • (TRL 8) 950℃ 고온가스로 시험로 설계/인허가 경험 보유 (일본) 	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 6) 750℃ 고온가스로 설계에 활용 가능 • (TRL 4) 950℃ 고온가스로의 설계 여유도 확보를 위해 고정밀 해석기술 개발 필요
원자로 설계	미국, 중국, 일본	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 7) 미국은 750℃ 설계·운영 경험, 중국은 750℃ 실증로 설계 경험, 일본은 950℃ 시험로 설계·운영 경험 보유 중 	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 3.5) 개념연구 수행 후 개념설계 미수행 (해외 개념설계 사업 참여 경험 보유)
피복입자 핵연료 제조기술	미국, 일본, 중국	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 7) 파일럿 규모 피복입자핵연료를 제조 기술과 설비를 보유 중이며 상용화를 기술 검증 착수 	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 3.5) UO₂ 피복입자핵연료 제조기술의 기술격차는 작으나, 제조 설비 규모와 성능평가가 실험실 수준에서 수행
초고온 재료 성능검증 기술	미국, 일본, 중국	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 6) 각국의 연구로 설계/가동 및 R&D 프로그램을 통해 흑연 중성자 조사 시험자료 및 초고온금속재료 코드 개발에 필요한 시험자료 확보 중 	<ul style="list-style-type: none"> • (TRL 3.5) 고온재료 특성 평가 시험시설을 구축 및 비조사 시험자료를 확보하여 GIF 국제공동연구에 참여함으로써 고온 시험기술 및 DB 확보

초고온 실험	일본, 독일		<ul style="list-style-type: none"> (TRL 7) 일본은 대형 초고온헬륨루프(10 MW)를 건조하고 초고온 조건에서 기기 및 설계 검증 경험 보유 	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 5) 대형 실증시험시설의 전단계인 중형헬륨루프(0.6 MW)를 건조하여 운영기술 확보
핵심기기 및 기계	증기발생기	중국	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 8) HTR-PM 실증로에 사용될 증기발생기 개발 완료 	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 4) 경수로 튜브형 증기발생기 설계, 제작 기술 보유, 헬륨-물 증기발생기 설계, 제작 경험 없음
	중간열교환기	미국, 일본, 영국	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 8) 일본은 튜브형 중간열교환기 기술 보유 (TRL 8) 영국 Heatric사는 상용 인쇄기관형 열교환기 설계 기술을 보유 중 (TRL5) 고온가스로 연계 인쇄기관형 열교환기는 개념설계 완료 수준 	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 5) 튜브형 증기발생기 경험 기반으로 중간열교환기 설계 착수 가능 (TRL 5) 인쇄기관형 열교환기에 필요한 초고온 재료 확산접합공정 기술 및 인쇄기관형 열교환기 개념설계 가능
	헬륨터빈	일본, 중국, 영국	<ul style="list-style-type: none"> (TRL6) 기본설계 완료 및 헬륨압축기 성능시험 수행 	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 3) 관련 기술 개발 경험이 없지만 기술 개념이나 사이클 개념 검증은 가능
S-I 열화학 수소 생산	일본		<ul style="list-style-type: none"> (TRL 5.5) 200L/hr 규모 가압 수소 생산 공정 시설 보유, 30 L/hr 규모 150시간 장기 운전 수행 	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 3.5) 실험실 규모(50 L/hr) 가압 수소생산 공정 8시간 실증, 장기간 운전 미수행
고온 수전해 (HTSE) 수소 생산	미국		<ul style="list-style-type: none"> (TRL 4) 고온수전해셀(SOEC) 스택 모듈화 기술 개발 중, 가압 750℃ 장기 운전성능과 열화거동 평가 수행 	<ul style="list-style-type: none"> (TRL 3) 산업부(한수원) 실험실 수준 SOEC 스택(10층) 시험 장치로 상압 750℃ 장기 운전성능 수행

핵심기술명		현재기술수준	목표
원자로 설계	설계해석 코드기술	<ul style="list-style-type: none"> 독자개발 핵심 설계해석 코드 개발 및 검증 (TRL 5) 	<ul style="list-style-type: none"> 독자개발 핵심 설계설계 코드 인가 (TRL 8)
	설계기술	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 계통개념 정립 (TRL 3) 초고온 운전을 위한 냉각압력용기 설계 개념, 안전성향상을 위한 공기-물 혼합형 원자로공동냉각계통 개념 정립(TRL 3) 	<ul style="list-style-type: none"> 개념설계 및 기본설계 수행을 통한 안전성분석보고서 발간 (TRL6) 시험을 통한 설계개념 검증 (TRL6)
	안전성 평가 및 인허가 기술	<ul style="list-style-type: none"> 주요 안전해석 방법론 체계 구축, 성능 관련 설계기준사고, 안전관련 설계기준사고, 설계기준초과사고 등의 안정성 평가 수행을 위한 설계코드 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 안전성 평가기술을 확립 기술검증시험을 통한 안전성 종합검증 주요 인허가 이슈에 대한 백서 (White Paper) 발간
피복입자핵연료		<ul style="list-style-type: none"> 실험실 규모 제조기술 (TRL 3) 저농축(4.0 w/o) 피복입자핵연료 조사 및 조사후 시험 	<ul style="list-style-type: none"> Pilot 규모 피복입자핵연료 공정 설계/건설 (TRL7) 피복입자핵연료 고연소 (130~150 GWd/MHM) 성능 확인을 위한 조사 및 조사후 시험

고온재료	흑연	<ul style="list-style-type: none"> Gen IV 국제공동연구를 통한 비조사 흑연 물성 평가 기술 확보 (TRL 3) 	<ul style="list-style-type: none"> 원자로급 흑연 물성 품질보증 체계 및 중성자 조사 환경 물성 평가 및 DB 구축 (TRL 5)
	금속재료	<ul style="list-style-type: none"> Alloy 800H, 617 합금의 초고온 피로, 크리프(균열성장) 평가 기술 확보 (TRL 4) 	<ul style="list-style-type: none"> 초고온 금속 재료의 열시효에 따른 특성 열화 평가 및 DB 구축 (TRL 5)
	복합재료	<ul style="list-style-type: none"> C/C 복합체의 산화 및 기계적 특성 평가 기술 (TRL 3) 	<ul style="list-style-type: none"> 노심용 초고온 C/C 및 SiC/SiC 복합체 제조 기술 개발 (TRL 5)
기기·기계	초고온 중간열교환기 및 헬륨-물 증기발생기	<ul style="list-style-type: none"> 초고온중간열교환기 설계 기술 확보 (TRL 4) 헬륨-물 증기발생기 상용화 기술 개발 필요 	<ul style="list-style-type: none"> 중간열교환기 및 증기발생기 설계 데이터 생산 및 프로그램 개발 초고온 중간열교환기 및 증기발생기 설계 프로그램 검증 및 원형 실증 기술 (TRL 6)
	헬륨 브레이튼 사이클	<ul style="list-style-type: none"> 기술의 개념 검증이 가능한 수준 (TRL 3) 	<ul style="list-style-type: none"> 최적 헬륨브레이튼사이클 설계 핵심 터보 기기 설계/제작 기술 및 시제품 성능 검증 (TRL 6)
	압력용기·노심 구조물 설계	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 고온설계 (TRL 5) 흑연, 복합체 노심구조물 설계기술 개발 필요 (TRL 2) 	<ul style="list-style-type: none"> ASME 고온로 설계기준에 준한 원자로 고온설계 및 노심구조물 초고온 설계기술 (TRL 6)
	순환기, 제어봉구동장치, 격리밸브 설계	<ul style="list-style-type: none"> 경수로 CRDM 기술 보유 고온헬륨환경 설계기술 비확보 (TRL2) 	<ul style="list-style-type: none"> 순환기, CRDM (제어봉은 초고온 요소기술 선행), 격리밸브 설계기술 (TRL 6)
고효율 수소생산	수소생산 공정	<ul style="list-style-type: none"> SI 열화학공정 설계 및 계통 설계 기술 보유(TRL 3) 10bar 운전조건에서의 HTSE 공정개념설계 및 모사 완료 (TRL 2) 	<ul style="list-style-type: none"> SI 열화학 수소생산 효율 향상 공정 개발 (TRL 5) 고온전기분해 계통 설계 및 스택 모듈화 기술 개발 및 검증 (TRL 6)
	원자로 연계	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 고온열 온도에 따른 수소생산 연계공정 시스템 공정 흐름도 확보(TRL 2) 	<ul style="list-style-type: none"> 수소생산 공정 실증시스템 연계 계통 설계기술 확보 (TRL 6)

라. 개발 로드맵

○ 원자로설계

- 국내 독자 개발 기술의 검증이 가능하고 향후 상용로 활용·확장을 고려한 초고온 시험로의 핵심 설계를 개발하고 검증
- 그동안 개발된 핵심 설계해석코드를 이용하여 초고온 시험로 예비 설계를 수행하고 핵심 설계에 대한 성능 검증

- 국내 고유 설계 개념(다중코팅 피복입자연료, 다중냉각 핵연료 블록, 냉각압력용기, Hybrid RCCS 등)과 핵심 기술을 적용한 초고온 시험로 설계(안)을 확보
- 설계(안) 확보 후 국내 초고온 시험로 기술 실증사업이 진행되지 못하더라도 초고온 시험로 설계는 비전력망 지역의 에너지(전력, 열, 수소)를 공급하는 초소형 원자로 개발에 즉시 활용이 가능하기 때문에 설계개발 초기부터 산업체 참여를 유도하여 민관 공동으로 사업화 추진 전략을 수립

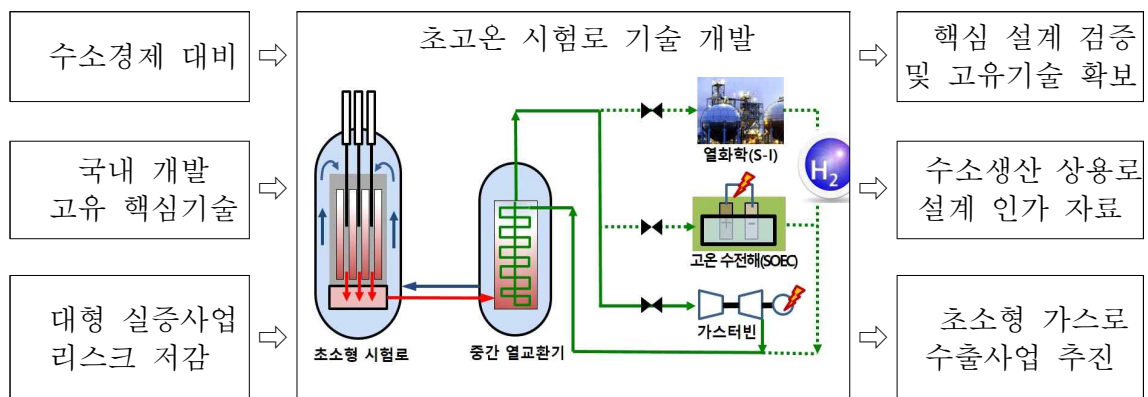


그림 3.3.11 초고온 시험로 기술개발 사업 개요도

○ 피복입자핵연료

- 확보된 실험실 규모(20 g/batch) UO₂ 피복입자핵연료 제조기술에 대한 고연소 조사시험 수행 및 파일럿규모 스케일업 기술 개발
- 초고온 연소성능 향상을 위한 다중(ZrC-SiC) 코팅 기술과 장주기 노심에 요구되는 핵연료 장전량을 높이기 위한 대형 커널(최대 800 μm) 제조기술 확보
- 고연소도 피복입자핵연료의 성능분석 기술 확보

○ 고온재료

- 고온재료 DB는 예산과 기간을 고려할 때 국내 독자 개발이 어렵기 때문에 GIF 국제공동연구에 지속 참여하여 공동 DB 구축에 기여하면서 DB 사용권을 확보
- 원자로급 흑연은 DB의 설계 적용을 위한 물성자료 품질보증 체계와 중성자 조사 환경에 대한 물성 자료를 구축
- 고온 재료는 장기 물성 열화 자료 구축과 중간열교환기 소재의 확산접합부의 건전성 평가에 필요한 크리프 특성 자료 확보 추진
- 복합 재료는 노심용 부품 제조를 위한 요소기술을 개발에 주력

○ 기기 및 기계

- 초고온 중간열교환기는 그 동안 개발한 설계 방법론과 확산접합기술을 심화 완성하고 중간열교환기 설계 및 성능 검증을 수행
- 고효율 전력변환을 위한 헬륨 브레이튼 사이클 기술개발수행
- 압력용기와 노심구조물 설계기술은 산업체와 협력으로 국내 고유 개념을 도입한 설계 방법론을 개발.

○ 수소생산

- SI 열화학 기술은 실험실 규모 실증시험 결과를 기반으로 효율성 향상 연구를 추진하고 이후 공학규모 실증연구를 추진
- 최근 주목받는 고온수전해 기술은 해외 셀 기술을 기반으로 모듈화 기술개발하고 향후 국내 기술 확보된 셀로 대체
- 고온가스로와 수소생산 연계를 위한 계통 설계 기술을 개발하고 연계 시스템 개발과 기술검증을 통한 기술 확보

핵심 기술	단기					중기		장기
	'21	'22	'23	'24	'25	~ '28	~ '30	~ '35
원자로설계	초고온 시험로 기술 개발 (핵심 설계 검증 및 고유설계 개발) ▶ 수소 기술개발 로드맵 연계					정책 결정시 초고온시험로 건설 및 수소생산 기술 실증		
						해외 초소형원자로 기술 수출사업		
피복입자핵연료	고연소 핵연료 조사/조사후 시험					공학규모 핵연료 제조 공정, 설계, 건설		
고온재료	흑연 물성 품질보증 체계, 중성자 조사 환경 물성 DB							
	고온 금속 재료 장기 물성 열화 DB							
핵심 기기/기계	노심용 복합재료 부품 제조 기술					복합체 부품 상용화		
	중간열교환기/증기발생기 설계기술					원형 설계/제작/검증		
	고온/고효율 전력변환시스템 설계 및 핵심기기 요소기술 확보					제작 및 시제품 성능검증		
	압력용기 노심구조물 설계 방법론							
수소생산	순환기, CRDM, 격리밸브 설계요소기술							
	SI열화학 사이클 효율 향상 기술개발					고효율 SI 열화학 기술 실증		
	고효율 대용량 고온수전해 기반기술					MW급 고온수전해 기술개발		
	원자로 연계 수소생산 공정 설계기술							

그림 3.3.12 핵심 기술 개발 로드맵

제4절 열전도관(Heat pipe) 원자로

1. 원자로 개념

- Heat Pipe(히트파이프)는 1962년 미국 NASA에서 우주선의 내부열을 전력공급과 중력의 도움 없이 외부로 방출하기 위해 개발됨.
- 히트파이프 용기 내부는 진공상태이며, 증발부에서 작동유체는 가열/증발되고, 응축부에서 냉각/응축된 후 모세관력, 중력 등에 의해 다시 증발부로 순환되는 방식으로 열에너지를 이송하는 기기
 - 특히 워구조물이 설치된 모세관 방식의 경우 전력공급이나 중력의 도움 없이 작동유체가 히트파이프 내부에서 자연적으로 순환될 수 있음.
 - 아래의 그림은 일반적인 히트파이프 내부 구조를 보여주고 있음. 모세관 구조의 히트파이프는 작동유체, 용기, 모세관 구조의 워, 불응축 가스 등으로 구성됨.
 - 히트파이프의 작동유체는 일반적으로 사용온도에 따라 결정되며, 고온용 히트파이프에서는 알칼리금속인 NaK, 포타슘, 소듐 등이 작동유체로 사용되고 작동유체와 운전조건에 따라 용기 재료가 선정됨. 내부 워구조물 설계는 설치 위치 및 열이송 용량, 직경 등에 따라 결정됨.

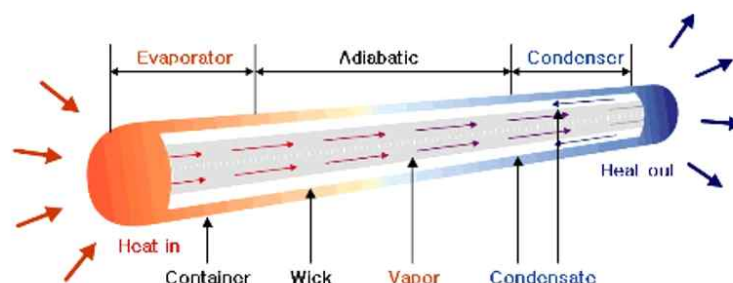


그림 3.3.13 히트파이프 작동 원리

- 히트파이프 원자로(Heat Pipe cooled Reactor)는 그림 3.3.14와 같이 고체 노심의 냉각홀에 히트파이프를 설치하여 노심의 핵분열 열을 전력변환계통으로 전달하는 원자로형임.
 - 일반적인 원자로는 터보 기기를 통해 강제순환되는 냉각재가 노심의 핵분열열을 전력변환계통으로 이송시킴. 그러나, 히트파이프 원자로는 고체 노심에 설치된 히트파이프가 별도의 전력 공급이나 중력의 도움 없이 핵분열열을 전력변환계통으로 이송함.

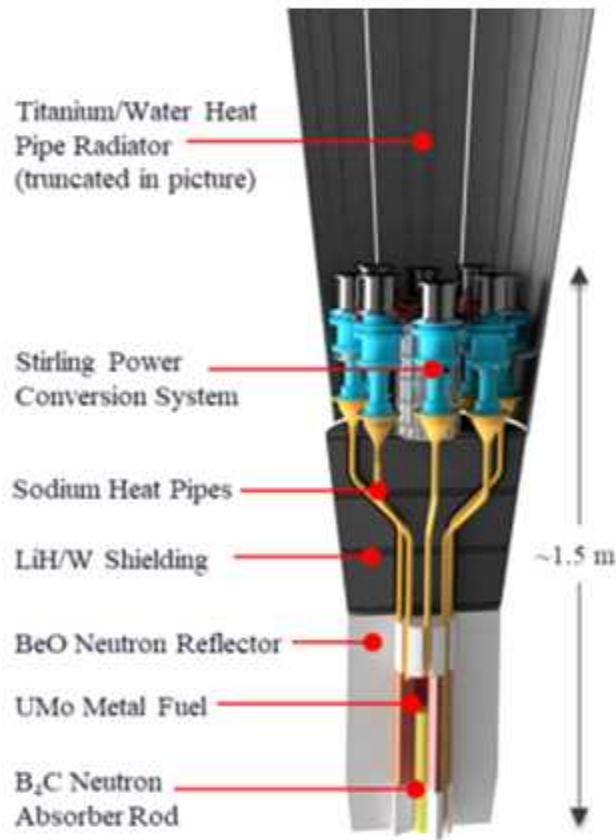


그림 3.3.14 히트파이프 원자로 개념도 (Kilo Power)

가. 개발목적 및 활용 예상 분야

○ 히트파이프 원자로는 주로 특수목적용 초소형원자로로 개발이 되고 있으며, 주로 아래와 같은 목적으로 활용할 수 있음.

- 달/화성 표면 유인기지 전력 및 열 생산
- 원자력 전기추진 우주선 전력원
- 군사기지, 재해 지역과 같은 트레일러로 운송이 가능한 특수목적 초소형 원자로
- 오지, 극지, 심해 등 비전력망 지역 에너지 공급원

나. 노형 개념 및 특성

○ 히트파이프 원자로의 설계 목적은 다른 원자로에 비해 단순하고 안전한 원자로 설계임. 원자로 내부는 대부분 고체 상태이고, 냉각재 순환기기, 내부 압력, 수위 등 여러 가지 복잡한 안전성 문제들이 원천적으로 배제되며 다음과 같은 히트파이프 원자로의 장점들이 원자로 설계에 반영함.

- 히트파이프 사용으로 원자로 노심이 경수로와 액체금속로와 달리 항상 수직일 필요가 없고, 원자로 내 냉각재 수위와 냉각재 자연순환을 고려한 원자로 설계가 필요 없음.
- 다른 원자로의 경우 1차계통의 배관 파단이나 순환기의 성능 저하가 원자로 안전성에 큰 영향을 주므로, 여분의 펌프나 발전기, 피동안전설비들을 필요로 하나, 히트파이프는 외부 전력 공급이 필요 없고, 작동을 위한 기계적인 구동부가 없어 다른 유체 기기들에 비해 고장확률이 크게 낮음.
- 히트파이프 원자로 노심 내부를 포함한 1차계통에는 고온가스로나 경수로와 같은 고압계통이 존재하지 않으므로, 고압계통의 감압 사고나 냉각재상실사고(LOCA)가 고려되지 않음.
- 1차계통에 펌프, 밸브, 배관 등이 필요 없고, 잔열제거계통을 외부 공기의 자연순환으로 제거하게 되면, 원자로 설계의 신뢰성과 안전성이 전반적으로 크게 향상됨. 특히, 반응도 제어장치인 제어봉이나 제어드럼 이외의 구동부는 원자로 1차계통에 없음.
- 히트파이프 냉각 원자로의 노심은 고반사 고속로/열외중성자로이기 때문에 부하추종이 가능한 반응도 피드백은 열팽창과 도플러효과에 의해 출력이 조절가능하며, 이는 특히 전력변환계통의 고장에 대한 원자로 설계내구성을 향상시킴.
- 다른 원자로와 달리 냉각재가 핵연료와 직접적으로 접촉하지 않고, 냉각재 양 자체가 타 원자로에 비해 매우 작음(MWe급 히트파이프 냉각 원자로의 소듐 무게: 100 kg 이하). 따라서 냉각재가 중성자 흡수와 같이 노심 설계에 미치는 영향이 타 노형에 비해 작음.
- 알칼리금속 히트파이프의 작동온도가 매우 높아 원자로 응용분야가 전력 생산에만 국한되지 않을 수 있음.
- 히트파이프 원자로는 노심 형태에 따라 열중성자로와 고속로 모두 구성이 가능하며, 사용할 수 있는 핵연료는 현재 활용가능한 모든 형태의 핵연료를 사용할 수 있음.
- 감속재와 반사체는 작동온도에 따라 재료를 선정할 수 있으며, 수화물 감속재는 별도의 제어봉 구동 없이 출력을 제어할 수 있음.
- 전력변환계통은 출력 조건에 따라 열전소자, 스텔링엔진, 브레이튼 사이클, 랭킨 사이클 전부 적용 가능함.

2. 국내외 개발동향

- 1980년대에 미국 NASA는 당시 실증과제를 수행하던 SP100의 대안 설계 중 하나로 관련 개념을 특허 출원함²⁴⁹⁾.
- 1980년대 미국 LANL과 캐나다 AECL이 공동으로 캐나다 북부의 원격 레이다 기지용으로 히트파이프 개념을 도입한 그림 3.3.15와 같은 20 kWe 출력의 원자력배터리를 개발하는 연구를 수행한 바 있음.
- 후속으로 분산전력용으로 600 kWe 출력의 초소형원자로 개발연구까지 수행하였음. 감속재는 흑연이었고, 핵연료는 삼중포복입자핵연료였음.
 - 전력변환 계통은 유기랭킨사이클이나 고온 증기사이클을 활용하였으며 이후 전출력 검증시험 일정이 북부 레이다 기지 구축 일정과 맞지 않아 관련 연구가 중단됨²⁵⁰⁾.
 - 이 과정에서 미국 LANL과 ANL은 히트파이프 해석코드인 HTPIPE와 ANLHTP를 개발하였고, 코드 검증을 위한 소규모 히트파이프 열성능 시험 자료를 생산함.

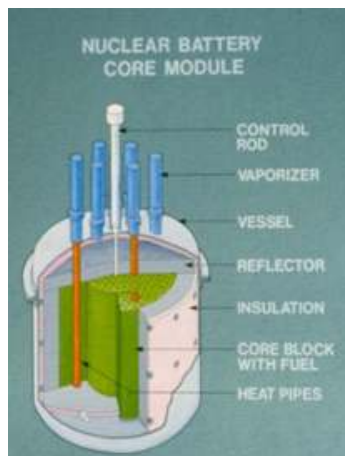


그림 3.3.15 히트파이프 이용 원자력 배터리 개념

- 미국 NASA는 미국 에너지부와 협력하여 100 kWe 출력의 액체금속순환원자로 SP100을 개발해왔으나, 예산문제로 1990년대 초반에 관련 연구가 중단됨.
- 1990년대에 방사성동위원소 열전지의 연료인 Pu-238 생산량 감소와 우주기지/우주선 추진 등을 위한 요구 전기출력 증가(kWe 이상) 때문에 노심경량화 및 장수명 노심 설계를 고려할 수 있고 실증비용이 상대적으로 저렴할 것으로 예상되는 히트파이프 원자로 개념에 대한 기초연구를 시작함.

249) NASA, High Thermal Power Density Heat Transfer Apparatus Providing Electrical Isolation at High Temperature Using Heat Pipes, US 4506183, 1983.6.24.(출원)

250) K. S. Kozier, "The Nuclear Battery: A Very Small Reactor Power Supply for Remote Locations," Energy, Vol. 16, No. 1/2, pp. 583-591, 1991.

- 토성 위성 탐사와 화성 유인 탐사 과제가 가시화되면서, 미국 NASA는 기초연구를 수행한 LANL과 공동으로 kWe급 우주용 히트파이프 원자로 실증을 위한 Kilo Power 과제를 2010년대부터 수행함.
 - 2012년도에 DUFF (Demonstration Using Flattop Fissions)라는 실험장치를 통해 기존 임계시험장치에 스텔링엔진과 물 히트파이프 1개를 연결하여 실제 전기 생산과 노심 개념 및 설계 코드 검증 자료를 생산함.
 - 이후 KRUSTY (Kilopower Reactor Using Stirling Technology) 실험을 통해 2018년 kWe급 소듐 히트파이프 원자로 실증에 성공하였으며 이것은 미국의 우주 원자력 연구개발 50년 역사에서 최초로 지상에서 실증된 우주 원자로임.
 - 이후 미국 원자력계는 우주용 히트파이프 원자로 기술을 바탕으로 지상용 MWe급 히트파이프 원자로 기술 개발에 주력하고 있음. Kilo Power 실증과정에서 획득한 지상용 히트파이프 원자로 기술 수준은 TRL 5로 평가되고 있음.
- LANL은 그동안 축적된 우주용 원자로 기술을 바탕으로 2 MWe 출력의 초소형 히트파이프 원자로(MegaPower) 개념을 개발함.
- 미국의 산업체인 Oklo社와 웨스팅하우스社 등은 오지/군사기지용 MWe 출력 원자로를 개발 중임.
- 미국의 국립연구소들은 히트파이프 원자로 설계 및 실증을 위한 다양한 연구개발 과제를 수행하고 있고, 2020년도에 미국의 대학교들도 관련 연구과제들을 착수함.

가. 국내현황

- 국내에서 히트파이프 원자로 관련 연구는 2010년대부터 착수되어, 용융염원자로와 더불어 개발된 역사가 매우 짧음.
- 히트파이프 원자로의 핵심기기인 알칼리금속 히트파이프는 대흥기업(주)은 한국항공대학교와 공동으로 2000년대 중반에 폐열회수 열교환계통 개발을 위해 국내 최초로 소듐 히트파이프 제조 기술 개발 및 열성능 시험자료를 생산한 바 있음.
- 한국에너지기술연구원은 접시형 태양열 발전용 AMTEC(Alkali-Metal Thermal to Electric Converter) 핵심기술의 일환으로 고온 루프형 히트파이프 개발하였음.
- 한국표준과학기술연구원은 알칼리금속 히트파이프를 표준온도 측정을 위해 개발하였음.
- 원자력분야에서는 경희대학교와 울산과학기술원이 사용후핵연료 및 제어봉 피동 냉각시스템을 위해 히트파이프 연구를 2010년대에 수행하였음.

- 국내 히트파이프 원자로 연구는 한국원자력연구원이 2019년 4월에 원자력융복합기술개발의 일환으로 관련 기초연구를 착수하면서 본격적으로 시작되었으나, 시스템 개발 사업은 아직 착수되지 않았음.
- 서울대학교, 경희대학교, 울산과학기술원, 포스텍도 MWe급 히트파이프 원자로 개발을 위한 설계기술, 초장축 히트파이프, 전력변환계통 연계 기술을 개별적으로 개발하고 있음.

나. 국외현황

- 미국 정부는 2019년부터 NSPM-20, SPD-6, EO 13972를 통해 원자력시스템의 발사 승인 및 관련 기술 개발 촉진을 위한 정책을 발표하였음.
- 우주용 원자로의 핵연료는 상업화 및 보안비용 절감을 위해 고농축우라늄에서 고품질저농축우라늄(HALEU) 활용이 결정되었으며, 기술개발 비용 및 기간 최적화를 위해 국방용 SMR과 공통기술개발로드맵 도출을 권고하였음.
- 미국 에너지부는 NASA의 요청으로 '29년 달기지 실증을 목표로 40 kWe급 히트파이프 원자로 개발을 수행하고 있으며, 아이다호국립연구소가 관련 사업을 관리하고 있음.
- 원자로 설계사양은 40 kWe 전기출력, 6.5톤 이하의 질량, 미국 발사체 탑재 가능 크기, 1년 실증 후 10년 운전 등이며, 미국의 원자력산업체 X-energy, Westinghouse, BWXT가 참여하고 있으며, 2023년 12월에 2단계 사업 참여업체가 선정될 예정임.
- NASA와 로스알라모스국립연구소는 달기지 원자로 사업 지원을 위해 참조 설계를 제시하고, 스텔링엔진 장기 성능시험, 히트파이프-스텔링엔진 연계기술, 핵연료 및 감속재 관련 기술을 제공하고 있음.
- 미시간대학교, 텍사스A&M 등의 미국 대학교들은 다양한 히트파이프 원자로 기초 연구를 수행 중에 있음.
- 달기지용 히트파이프 원자로는 영국의 롤스로이스, 프랑스의 CEA, 중국도 현재 개발 중에 있으나, 아직까지 개념설계 및 개별 성능 시험 자료 확보 수준으로 국내와 기술격차가 거의 없음.
- MWe급 히트파이프 원자로는 미국의 산업체 Oklo와 Westinghouse가 주도하고 있으며, Oklo의 Aurora는 NRC 설계인증 실패 후 재신청을 준비 중이고 Westinghouse의 eVINCI는 2024년까지 NRC 인허가를 신청할 계획임.
- 미국의 NuScale, Micro Nuclear와 일본 도시바도 MWe급 히트파이프 원자로 개발을

수행하고 있으나, Aurora와 eVINCI와 달리 공개된 정보가 거의 없음.

3. 국내 기술개발 및 사업화 전략

가. 기술개발 현황 및 추진방안

- 한국원자력연구원은 원자력융복합기술개발을 통해 1 kWe급 우주용 원자로 개념 및 설계기술을 개발하고, 한국원자력연구원이 개발하고 국내기술로 제작한 곱힘가공된 알칼리금속 히트파이프가 미국 Kilo Power 과제를 개발된 히트파이프 2.5배 이상의 열이송 능력을 가지고 있음을 실험적으로 보였음.
- 현재 한국원자력연구원은 2023년 7월부터 창의형융합연구사업으로 달기지용 히트파이프 원자로 설계/고정밀 해석기술 개발하고 히트파이프 집합체 시험을 통해 이를 검증할 계획임. 한국기계연구원은 공동연구기관으로 참여하여 250 We 스텔링엔진 시작품을 제작하여 성능시험을 수행하고, 최종적으로 한국원자력연구원의 알칼리금속 히트파이프 집합체 시험과 연계된 기술 검증 시험을 수행할 계획임.
- 원자로 설계요건 도출을 위해서는 원자로의 전력과 열 활용을 위해 한국지질자원연구원의 현지자원활용시스템, 한국에너지기술연구원의 수전해시스템과 현대자동차의 로버용 배터리와의 원자로-연계 기술 개발도 필요하며, 최종적으로 상기 모든 시스템이 연계된 달기지용 통합에너지시스템 실증 융합연구도 필요함.

나. 사업화 추진방안

- 대한민국은 2021년에 아르테미스 협정에 서명하면서, 미국 주도의 유인 달탐사에 참여할 수 있게 되었음.
- 2022년 12월에 제4차 국가우주개발진흥기본계획이 발표되었으며, 발사체와 위성 위주의 이전 기본계획과는 달리 우주 탐사, 안보, 과학 등 다양한 기술 분야가 포함되어 있음.
- 현재 수행 중인 2030년 초 달착륙선 이외에 2035년 달기지 건설 참여, 2045년 화성 탐사 등의 목표가 포함되어 있으며, 이를 실현하기 위한 기술들에 우주 원자력 전력 및 추진이 포함되어 있음.
- 국가우주정책센터는 제4차 국가우주개발진흥기본계획 실현을 위한 제3차 우주기술로드맵을 준비 중이며, 달기지용 원자로는 우주 에너지 분야에 원자력 추진은 차세대 추진시스템에 포함되어 있음.
- 달기지 건설계획이 확정되면, 우주용 원자로 개발에는 국내 달탐사사업에 참여하고 있는

한화에어로스페이스나 현대자동차도 참여할 수 있을 것으로 보이며, 관련 기술 개발 경험을 바탕으로 MWe급 초소형원자로 개발 및 관련 사업 개발도 가능할 것으로 예상됨.

- 달기지 히트파이프 원자로 개발 및 아르테미스 국제 유인 달기지 참여는 한국의 국제우주탐사 분야의 파이를 키우는 데 큰 역할을 할 것으로 기대되며, 원자로에서 생산된 에너지와 전기는 국제 우주 탐사에서 상업적 활용도 가능할 것임.
- 국제우주탐사조정그룹의 달기지 건설계획에 따르면, 300~400 kWe 전력이 필요할 것으로 예상됨. 미국이 모든 원자로를 자국의 예산으로 달기지에 보내지는 못할 것이며, 국제협력이 요구될 것임.

다. 장애요인 및 대처방안

- 우주 탐사 계획은 타 사업과 달리 예산 및 국제 환경에 따라 지연되는 경우가 많으며, 이에 따라 민간 주도의 사업으로 진행하기 매우 어려워, 미국과 달리 국내에서는 정부 주도의 시스템 개발사업은 필수적임.
- 지상 실증 및 발사에는 국민 수용성 및 예산 문제가 예상되며, 우주 탐사에 관심있는 UAE등 타 국가와 공동사업을 수행하는 방법도 있음.
- 타 노형과 마찬가지로 히트파이프 원자로 역시 국내 인허가 경험이 없으므로, 인허가기관 국제협력 및 시스템 개발 시 입증된 핵연료와 재료 활용으로 개발기간 및 인허가 대비 연구를 최소화할 계획임.

라. 개발 로드맵

- 개발로드맵은 우주 관련 타 분야와 공동으로 도출해야 하며, 2035년 달기지 착수 시 최소 지상실증 및 비행 모델 개발은 완료되어야 함.

제 4 장

소형모듈원자로 규제 현안 및 전망

제1절 소형모듈원자로 핵안보규제

제2절 소형모듈원자로 안전규제 동향

제4장 소형모듈원자로 규제 현안 및 전망

제1절 소형모듈원자로 핵안보 규제

1. 소형모듈원자로의 핵안보 규제 필요성

- 현재 개발 중인 대부분의 소형모듈원자로들은 건설, 운영 측면에서 유연성을 발휘할 수 있는 설계를 추구하고 있고, 이를 구현하기 위해 혁신 기술의 채용을 도모하고 있어 개발자 입장뿐만 아니라 규제자 입장에서든 매우 큰 도전과제임. 소형모듈원자로에 대해서는 기존의 규정적(Prescriptive)인 규제 접근 방식에서 벗어나 설계 특성을 충분히 반영할 수 있도록 규제 측면의 유연성을 발휘하는 것이 필요하며, 그 대표적인 사례가 미국 NRC의 NuScale 설계인증 과정이라고 할 수 있음(2020년 2월 SD 승인)[4.1-1].
- NRC가 NuScale 심사 기준으로 작성한 DSRS(Design Specific Regulatory Standards)는 NuScale 원자로의 설계 특성을 고려하여, 심사를 면제하거나 별도의 기준을 제시하고 있으나 기존 대형 경수로 기반의 NUREG-0800(SRP: Standard Review Plans)을 근간으로 하고 있음. 이는 기존 규제 기준이 SMR에도 적용 가능할 뿐만 아니라, 규제자의 접근 전략에 따라 인허가 과정에서 기술혁신성을 충분히 반영하는 것이 가능함을 시사하고 있음[4.1-2, 4.1-3].
- 우리나라는 2023년 4월부터 혁신형 소형모듈형원자로(i-SMR) 개발사업을 본격 착수하였고, 2026년 설계인증을 신청하고, 2028년 설계인증을 취득, 2030년에는 세계시장에 진출한다는 도전적인 목표를 수립하였음. 현재 우리나라의 원자력 규제 체제 또한 대형 경수로 기반으로, 보수적이며 규정적인 관행을 가지고 있기 때문에 i-SMR이 지향하는 혁신성을 반영하는 것은 매우 어려움.
- 그러나 규제자 그룹(원자력안전위원회, 원자력안전재단, 원자력안전기술원, 원자력통제기술원)에서는 이와 같은 문제점을 인식하고, 선제적인 대응 차원에서 혁신형 SMR 규제기준 개발에 필요한 연구 수행을 위해 2022년 4월 독자적인 안전규제 연구사업을 착수하였음. 동 연구사업에는 안전 규제와 함께 핵비확산, 핵안보 규제 기준 개발에 필요한 연구도 포함되어 있음.

표 4.1.1 중소형 원자로 안전규제기반기술 사업 개요

사업명	중소형 원자로 안전규제기반기술 개발사업		
사업주관기관	원자력안전위원회 (원자력안전재단)		
총사업비	360억 원	사업기간	'22.04~'28.12
사업목적	<ul style="list-style-type: none"> • 국제 선도적인 SMR 규제체계 구축 및 규제기술 확보 • '26년까지 iSMR 인허가 대비를 위한 규제체계 및 기준기반 연구 • 예상현안 해결 중심의 규제현장 적용 규제기술 개발 		
핵비확산/핵안보 분야 세부 과제	과제명	경수형 SMR 핵비확산 규제 기술개발 및 규제체계 구축	핵안보 측면의 경수형 SMR 규제 방안 연구
	예산	27억 원	37.5억 원
	연구내용	i-SMR 안전조치, 핵물질 검증장비 설계, 실증, 적용 등	물리적방호 규제전략 도출, 방호요건, 설계기준위협 규제현안 도출, 핵안보 규제기준(안) 개발 등

- 우리나라의 원자력규제체제는 ‘안전’ 규제를 중심으로 구축되어 있고 미국, 캐나다 등 선진규제 선진국 대비 핵안보 및 핵물질 계량관리에 대한 사항이 충분히 반영되어 있지 못하며, 현행 i-SMR 주요 규제 현안 또한 피동형 안전계통, 비안전등급 전력계통, 무봉산 운전 등 안전 현안에 집중되어 있음. 혁신형 SMR 기술개발사업 기획보고서에서는 특정 기술주제보고서 12건, 기술보고서 35건이 필요할 것으로 예상하였으며, 이중 명시적으로 핵안보와 관련된 사안은 물리적보안 시스템에 대한 기술보고서 1건에 불과함[4.1-4].
- 전 세계적으로 SMR 개발이 활발히 진행되고 있는 이유는 기존 대형 경수로의 확장이 어려운 환경이 되었기 때문이며, SMR과 같은 신형로에 대해서는 외부환경의 변화를 고려한 규제 이행이 필요함. 주요한 환경변화 요인은 정보통신, 인공지능 등 첨단 기술 발전에 따른 신규위협이 다양한 형태로 발생하고 있는 것으로 대부분 ‘핵안보’와 관련된 사항임.
- IAEA를 비롯, 규제 선진국인 미국, 캐나다 등에서는 안전, 안보, 안전조치를 설계 초기 단계에 반영(Safety, Security, Safeguards by Design)할 것을 요구하고 있으며, 이를 규제 과정에 적용하고 있음. 또한 안전-안보 간 규제 간섭(SSi, Safety-Security Interface)이 발생할 수 있는 사안을 사전에 식별하여 시너지 효과를 얻을 수 있는 시스템이 되도록 설계할 것을 권고하고 있음.
- 국제 시장에서의 SMR 상품 경쟁력은 기능적인 측면에 차이가 크지 않을 경우, 도입국의 요구사항의 반영 정도에 따라 좌우될 것으로 예상됨. 특히 현재 개발 중인 대부분의 SMR이 가지고 있는 안전 목표, 다목적 활용성 등에서 상호 차별성이 크지 않기 때문에 도입국의 SMR 운영에 필요한 환경적인 요인을 설계에 충실히 반영하는 것이 필요함. 예상되는 주요 현안은 안전보다는 핵안보 관련사항이 대부분으로서, 부지의 물리적인 특성, 수입국의 지정학적 여건, 그리고 정치외교적인 요인까지 고려되어야 함.

- 우리나라 i-SMR 또한 세계시장을 지향하고 있는 만큼, 안전과 경제성을 확보하는 것은 수출경쟁력을 가지기 위한 필수적인 전제조건이며, 이에 더하여 i-SMR 핵안보 규제 요건을 체계적으로 수립하고 이를 설계에 반영할 수 있는 역량을 확보하는 것이 필요함.

2. SMR 핵안보 국제 논의 동향 및 규제 동향

- 핵안보 규제는 원전의 운전변수를 특정할 수 있는 안전규제와 달리 원칙적, 선언적, 절차적 성격을 가지고 있어 국가별 안보환경에 따라 적용되는 법과 규제기준에 차이가 발생할 수 있음. SMR 개발이 시작된 이래 안전과 핵안보 규제에 대해 SMR 개발자, 제조자, 운영자 등 모든 이해 당사자들 간 다양한 논의가 이루어져 왔으며, SMR 설계 특성에서 비롯되는 규제 원칙과의 충돌, 국제 규약 저축 문제 등이 심각하게 논의되었음. 특히 핵안보 규제에 대해서는 국제 분쟁 유발 가능성이 있으므로 현재 진행 중인 논의 현안에 대해 규제 측면의 검토가 필요함.
- IAEA는 기술지침(NP-T-3.19 SMR I&C 설계, Draft TECDOC SMR 보안 고려)을 통해 SMR 설계 시 사이버보안 및 물리적방호가 구현될 것을 권고하고 있으며, SMR 국제 규제를 선도하고 있는 미국 NRC와 캐나다 CNSC는 SMR 표준설계 심사과정에서 원자력 안전과 핵안보 통합설계에 대한 심사를 수행하고 있으며, 관련 심사지침서를 개발 및 보유하고 있음[4.1-5, 4.1-6].

가. WINS²⁵¹⁾ SMR 핵안보 워크숍

- 2019년 3월 오스트리아 비엔나에서 개최된 SMR 핵안보 규제 현안에 대한 대규모 최초 논의로서 IAEA 전문가를 비롯, 개발자, 공급자, 연구자, 그리고 규제기관까지 참여하여 다양한 SMR 핵안보 규제 현안이 다루어짐[4.1-7]. 당시 논의된 사항은 SMR 전 수명 주기에 걸쳐 발생할 수 있는 예상 현안과 해결을 위한 접근 방안 등이 논의되었으며, 현재에도 동 의제에 대한 논의가 이어지고 있음.
 - SMR 주요 기술 및 핵안보에 미치는 영향
 - 설계단계 핵안보 적용 및 안전/안보 연계
 - 내부자 관점의 사이버보안
 - 운전주기에 따른 영향
 - 규제체제 영향

- 참석자들의 SMR 핵안보에 대한 기본 인식 설문조사 결과, 잠재 고객들은 핵안보를 주요

251) WINS (World Institute of Nuclear Security) - 2008년 52차 IAEA 총회에서 핵안보 논의를 위한 비정부 기구로 발족하였으며, 노르웨이, 영국, 미국, 캐나다 정부기관에서 재정을 지원하고 있음. 핵안보 관련 정보 및 동향을 공유하기 위한 노력과 함께 핵안보 국제 규제 논의를 주도하고 있으며 규제자/시설운영자 입장에서 핵안보 현안에 대한 해결책을 모색하고 있음.

현안으로 인식하고 있었고, 육상 경수로 타입 SMR이 다른 기술과 대비해 볼 때 핵안보에 불리할 것으로 예상함. 핵안보에 소요되는 비용이 절감될 것을 기대하면서도 시스템 특성 상 사이버 공격에 취약할 수 있다는 우려를 표명함. SMR의 보급 확대를 위해서는 핵안보가 중요하며, 해결해야 할 주요 현안으로 다음과 같은 의견이 제시되었음.

- SMR 핵안보를 위한 새로운 규제 요건 개발 필요성
- 기존 경수로 대비 SMR 핵안보 설비 견고성 수준
- SMR 핵안보 시 차등 접근법 적용
- SMR에 대한 지역/국가 DBT 또는 위협 평가
- URC / HRC 에 대한 사보타주 분석 (NSS-13)
- 부지 내 신연료 보관 (NSS-13)
- 지중, 지상, 수중 부지 및 이동 가능 유닛에 대한 핵안보 고려사항
- IAEA 등 국제기구의 역할

표 4.1.2 WINS SMR 워크숍 세션 구성 및 의제

Session 주제	논의 의제
Session 1 SMR 주요기술 및 핵 안보 영향	<ul style="list-style-type: none"> • 모듈화 및 시스템 통합에 따른 설계 단순화 • 다중 모듈 발전소 설계 • 지진 대비 및 물리적 보안성 증진을 위한 지중화 • 피동형 안전계통 채택
Session 2 설계단계 핵안보 적용 및 안전/안보 연계	<ul style="list-style-type: none"> • 진화하는 위협에 대한 이해 필요 • 방어해야 할 위협 식별 • 비용/효용 관점에서 안보에 대한 투자 범위 • 물리적방호 시스템 분석에 PSA 도구 적용
Session 3 내부자 관점의 사이버보안	<ul style="list-style-type: none"> • 제작 후 이동 설치 과정에서의 공급망 보안 문제 • 원격 감시와 관련한 망 연결 보안 문제 • 내부자 위협에 대한 수준 평가
Session 4 운전주기에 따른 영향	<ul style="list-style-type: none"> • 이동형 SMR(TNPP)에 필요한 규제 • 재장전 주기, 원격/자율 운전 문제 • MOX 연료 사용의 경우 보안 등급 • 사용후핵연료 이송/폐기 SMR 모듈 이동
Session 5 규제 체제 영향	<ul style="list-style-type: none"> • 설계 초기 단계에서 핵안보 현안 개입 • 시설 설계/ESF를 통해 핵안보 현안 해결 / 운전원 행위 의존 ↓ • 현행 규제 요건이 불필요한 부담 발생 여부 판단 • Prescriptive → Outcome-based Approach

- 워크숍의 주요한 결론은 설계에 대한 요구사항으로 설계단계 핵안보(SeBD)를 구현할 것, 핵안보 기능을 ESF에 반영하여 운전원의 인적행위에 의존을 줄일 것, 안전-안보 기능을 통합 설계할 것 등을 주문하였고, 규제에 대한 요구사항으로 국제사회가 공통적으로 적용할 수 있는 규제 기준 개발, 설계기준위협 정보 접근 필요성, 설계 특성을 반영하는 유연성 있는 규제 접근 등이 제시되었음. 이외에도 안전-안보 비용 효과 분석, 핵안보 구현 실제 비용 산출, 사이버 위협에 대한 협력 등이 제안되었음.

나. US NRC - NuScale 사례를 중심으로

- NuScale SMR은 미국 NRC로부터 최초로 설계인증을 획득한 경수로형 모델로서 전체 심사과정에서 DOE 인허가 지원프로그램 등 정부 차원의 적극적인 지원이 있었으며, 개발자와 규제자 간 협력을 통해 규제 현안을 해결하기 위해 노력하였다는 점에 주목할 필요가 있음.
- NRC는 NuScale SMR 설계에 대해 2008년~2016년의 기간 중 사전신청검토(PAR, Pre-application Review)를 수행하였으며, NuScale 사는 잠재적인 규제 현안을 식별하고 향후 인허가 절차를 가속하기 위한 목적으로 격차분석보고서(Gap Analysis Report)를 제출함. 동 보고서에는 안전 현안뿐만 아니라, 핵안보 현안에 대한 내용이 포함되어 있음[4.1-8].
- NRC는 DOE, 설계사, 공급자들과 협의를 통해 SMR 설계에 영향을 미칠 수 있는 17개 현안을 식별하였으며(SECY-10-0034), 그중 SMR 운영 현안으로 SMR 핵안보 및 안전조치가 중요 현안에 포함됨. 핵안보에 대한 평가 및 설계가 설계 초기 단계부터 반영되어야 하며, 설계기준위협(Design Basis Threat)이 고려되어야 함을 주문함[4.1-9].
- NuScale의 표준설계인증 신청(2016년) 이전에 NRC는 NuScale SMR 설계 개념 및 특성에 대해 사전 설계검토(Pre-Application Review)를 수행하였으며, 대형 경수로 기반의 심사지침을 근간으로 NuScale에 적용할 수 있는 별도의 심사지침(DSRS, Design Specific Review Standards)를 개발함.
- NRC는 경수로형에 대해서는 표준심사지침(NUREG-8000 Standard Review Plan)에서 원전 각 인허가 단계에 필요한 수용기준을 제시하고 있으며, 핵안보는 13.6 Physical Security, 14.3 Physical Security Hardware ITAAC 부분에 해당됨. NuScale에 적용된 DSRS의 핵안보 부분은 대부분 SRP를 준용하고 있으며(표 4.1.3 참조)[4.1-10], 심사과정에서 70여 건의 핵안보 관련 질의가 있었음[4.1-11].

표 4.1.3 DSRS Scope and Safety Review Matrix (부분 발췌)

NuScale Design-Specific Review Standard Scope and Safety Review Matrix This DSRS Matrix is applicable to a NuScale design-related DC, COL, or ESP application under 10 CFR Part 52.				
SRP/DSRS Section Number	SRP/DSRS Section Title	REFERENCE (Final DSRS) ¹	Applicability of SRP (June 2016) ²	Comment
13.5.1.1	Administrative Procedures - General	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.5.1.2	Administrative Procedures - Initial Test Program	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.5.2.1	Operating and Emergency Operating Procedures	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.5.2.2	Maintenance and Other Operating Procedures	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.6	Physical Security	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.6.1	Physical Security - Combined License and Operating Reactors	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.6.2	Physical Security - Design Certification	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.6.3	Physical Security - Early Site Permit	NUREG-0800	A) Use SRP Section	
13.6.4	Access Authorization Operational Program	NUREG-0800	A) Use SRP Section	

ADAMS Accession No. ML17102A698

50

April 2017

○ NuScale SMR의 핵안보 분야 심사 항목은 다음 사항을 포함함.

표 4.1.4 NuScale 핵안보 심사 항목

FSAR Ch.	심사 내용
1~21	<ul style="list-style-type: none"> 분야별 예외사항(Exemption)에 대한 보안 영향
7 (I&C 시스템)	<ul style="list-style-type: none"> 디지털 I&C시스템 보안아키텍처/등급 설계 유무선 접근/보안특성/보안설계요건 I&C시스템 개발 및 운영환경 보안 등
9.5 (보조시스템)	<ul style="list-style-type: none"> 제어실, 화재/통신/조명시스템 보안연계 사항
13.2 (교육 훈련)	<ul style="list-style-type: none"> 건설 참여자들의 보안 절차 및 교육 사항
13.6 (물리적방호/사이버보안) ※ 보안시스템 (TR-0416-48929)	<ul style="list-style-type: none"> 보안시스템 설계 사항 핵심구역/기기 평가 및 분석 사항 보안컴퓨터/물리적 방벽/핵심도어/차량방벽 설계사항
14.3.12 (보안시스템 시험기준)	<ul style="list-style-type: none"> 보안시스템들에 대한 검사, 시험, 분석 및 수용기준에 대한 사항

다. CNSC

- 캐나다는 SMR 개발 촉진을 위해 ‘캐나다 SMR 로드맵(A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors)’을 발간하는 등 범정부 차원의 노력과 함께 규제 측면에서도 ‘공급자설계검토(VDR, Vendor Design Review)’라는 독특한 사전검토 서비스를 제공하고 있음.
- SMR 로드맵에서는 핵안보 규제에 대해서는 규정적 접근방식에서 벗어나 다른 규제분야와 유사하게 고수준의 원칙을 포괄할 수 있도록 핵안보 규정의 개정과 함께 차등 접근을 적극적으로 고려할 것을 요구하고 있음[4.1-12]. 원자로 설계에 있어 안전, 안보, 안전조치 간 상호 연계를 매우 중요하게 고려하고 있으며, 3개 영역의 기능과 필요한 조치들이 가능한 상충되지 않도록 설계에 반영되고 이행되어야 함을 강조하고 있음[4.1-13].
- CNSC는 원자로 설계 시 위험정보에 기반한 설계단계 핵안보와 차등 접근을 고려하고 있으며, 사이버 공격 등 진화하는 위협에 대응할 수 있도록 기존의 규정적 접근방식에서 벗어나 성능기반 접근방식으로 이행하고 있음. 방사선물질 누출 발생 시 피해정도와 보건안전에 미치는 영향 분석 시 좀 더 유연성 있는 규제 접근을 하겠다는 의도로서, 향후 차등 접근이 고려된 보안 등급이 수립될 것으로 보임.
- CNSC는 공급자, 설계자와의 의사소통을 통해 적극적으로 산업계의 의견을 적극적으로 수용하고 있음. 여러 차례의 워크숍을 통해 산업계는 다양한 규제 개선 요구사항을 제기함[4.1-14].
 - 규제는 좀 더 성능기반으로 이행되어야 하며, 설계기준위협 및 위협평가가 그 기준으로 사용되어야 함.
 - 핵안보 규제기준(Nuclear Security Regulations)[4.1-15]에서 설계단계 핵안보가 강조되어야 함.
 - 오지 건설 SMR에 대해 물리적 보안에 필요한 추가 지침이나 정보 제공이 필요함.
 - 지하 설치 원자로, 지상 접근 경로의 제한성, 고유의 피동 안전성, 견고한 안전 방벽 등 안전-안보 측면에 유리한 특성이 규제과정에서 고려되어야 함.
 - 소내 대응군 운영을 대신하여, 공학적 안전-안보 설비와 소외 대응군을 조합하는 방안이 고려되어야 함.
 - 민감한 핵안보 관련 정보의 식별, 처리, 전송, 저장과 관련한 지침이 필요함.
- CNSC가 공급자들에게 제공하는 VDR 서비스는 원자로 설계 기술에 대해 초기 단계에서 검토의견을 제시함으로써, 향후 실제 인허가 과정을 촉진하기 위한 목적을 가지고 있음. VDR 서비스는 Phase 1 - 규제 요건과의 부합성 평가, Phase 2 - 잠재적인 규제 현안

식별 및 평가, Phase 3 - Phase 2에서 식별된 현안에 대한 추가 정보 취득 및 후속조치로 진행되며, 핵안보에 대한 검토 사항은 다음과 같음

표 4.1.5 VDR 핵안보 검토 내용

	Phase 1	Phase 2	Phase 3
SMR 개발자 제시 요건	<ul style="list-style-type: none"> • 시설 특성 • 핵물질 등급 • 핵심구역 식별 • 설계기준위협 적용 • 핵안보 요건, 규정, 코드 및 표준에 대한 이해 	<ul style="list-style-type: none"> • 물리적방호 시스템 설계, 개념, 역할 책임 • 위협/취약성 평가, 설계기준 위협 평가 • 설계단계 핵안보-시설 보안, 핵심구역 보안 • 중앙통제실, 감시초소 설계 • 시설보안계획(안), 사이버보안 계획(안) 	<ul style="list-style-type: none"> • 보안시스템 통합 설계 검증 • 보안 프로그램 및 절차 개발 • 대응군 보안계획/비상 계획 • 최종시설보안계획 • 최종사이버보안계획
일반 요건	<ul style="list-style-type: none"> • 민감 핵안보 정보 보호를 위한 프로그램 수립 • 인적보안, 신원 평가 • 디지털 장비 보안조치 • 공급망 사이버보안 		

○ SMR VDR에서는 반드시 설계단계 핵안보를 검토하였으며, 구조물, 계통, 격납시설의 견고성 등을 반영하여 안전, 핵물질 안전조치 연계성을 검토하고 있음. 이 과정에서 물리적 보안과 사이버보안이 종합적으로 검토되도록 보안 전문가와 시스템 엔지니어링 전문가를 동시에 참여토록 하고 있음. 이는 설계자로 하여금 물리적 타격을 완화할 수 있는 핵안보 시스템 설계 및 물리적 타격/사이버 공격이 복합된 위협 대응에도 도움이 됨.

라. IAEA SMR 규제자 포럼

○ 2015년 IAEA의 지원 아래, 미국과 캐나다가 주도하여 SMR 규제현안 논의를 위한 포럼을 결성하였으며, 우리나라를 비롯하여 미국, 캐나다 등 총 12개국이 참여하고 있음. 기술혁신성을 지향하는 SMR은 기존 원자력 규제체제의 적용이 어렵다는 공통인식에서 출발하여 규제 현안을 식별하고 해결책을 모색하는 노력을 진행 중임.

- Phase 1 (2015~2017) 주요 규제 공통현안에 대한 식별, 논의
- Phase 2 (2018~2020) 인허가, 설계/안전해석, 제조/가동/운영
- Phase 3 (2021~2023) Phase 2 사항에 대한 논의 지속
- Phase 4 (2024~) 착수 예정

- SMR 포럼에서의 논의는 각 회원국의 규제 입장과 관행에 차이가 있기 때문에 완전한 합의에 이르는 것은 어려운 한계를 가지고 있으나, 공통적으로 해결해야 할 현안을 식별하고 회원국 간 규제 경험을 공유할 수 있는 기회를 제공하였다는 데 큰 의미가 있음. Phase 1에서는 안전/안보 측면에서 모두 중요한 3가지 공통 현안이 식별되었음.
 - 차등접근법 (Graded Approach)
 - 심층방어 (Defence-in-depth)
 - 비상계획구역 (Emergency Planning Zone)
- SMR Phase 2에서는 인허가, 설계, 운영 등 실질적인 현안에 대해 실무그룹을 구성하여 논의를 진행하였으며, SMR 수명기간 동안 주요 규제 개입, 다중 모듈 인허가, 피동형/고유 안전성에 대한 고려사항, 제작용이성, 유지보수 등에 대한 권고사항을 제시한 보고서를 발간하였음. 2023년 말에 3단계가 종료될 예정이며, 2024년부터 4단계가 착수될 예정임.

마. IAEA NHSI (Nuclear Harmonization and Standardization Initiative)

- '22년 4월 Rafael IAEA 사무총장은 온실가스 감축을 통해 지구온난화에 대응할 수 있는 수단으로서 원자력의 역할을 강조하고, SMR을 비롯한 신형 원전 보급을 전세계적으로 확대하기 위해 국제적인 규제 기준의 표준화를 제안함.
- 각 회원국 정책 결정자, 규제자, 설계/제작사, 운영자 참여를 통해 SMR에 필요한 규제 및 산업계 측면에서 접근 방향 모색하고 있으며, 규제와 산업계 2개의 논의 트랙 하에 실무그룹을 구성하여 운영하고 있음.
 - 규제 트랙: WG1 정보공유, WG2 사전인허가, WG3 규제자 간 정보활용
 - 산업계 트랙: WG1 사용자요건의 고수준 조화, WG2 코드/표준에 대한 공통접근, WG3 설계 및 안전성분석코드 실험/검증, WG4 SMR 인프라 구축 및 실행 가속
- 23년 6월 개최된 IAEA NHSI 전체회의에서 Rafael 사무총장은 NHSI를 통해 규제 과정의 불확정성 해소, SMR 건설비용 감소, 국제표준 준수에 따라 SMR 교역 확대, 좀 더 높은 안전/안보 기준 수립에 따른 사고 및 악의적인 공격의 위험성 감소 등을 기대할 수 있음을 강조함. 그러나 WG 회의에서는 각 회원국 간, 그리고 규제자와 공급자 간 정보 공유의 범위에 대해 아직까지 상당한 견해 차이가 존재함. 24년 중으로 규제 트랙에서는 WG 별 기술문서(IAEA TECDOC)가 발간될 예정이며, 공통적으로 추진할 규제 방향에 대한 윤곽이 드러날 것으로 보임.

3. SMR 설계 특성에 따른 핵안보 예상 규제 현안

가. 핵안보 목적 및 규제이행 체계

- SMR이 추구하는 설계 특성은 대형 경수로와 많은 다른 점을 가지고 있어 핵안보 규제 시 그 특성을 충분히 반영한 규제접근(Outcome-Based Approach)이 이루어져야 함은 당연하나, 핵안보 규제의 목적은 동일하게 달성되어야 함. IAEA 핵안보 자문그룹(IAEA Advisory Group on Nuclear Security)에서는 핵안보를 다음과 같이 정의하고 있음.

The prevention and detection of, and response to, theft, sabotage, unauthorized access, illegal transfer or other malicious acts involving nuclear material, other radioactive substances or their associated facilities

핵물질 (방사성물질) 또는 관련시설에 대해 핵물질 탈취, 사보타주, 인가받지 않은 접근, 불법 이전 또는 기타 악의적인 행동을 예방, 탐지, 지연, 대응하는 활동

- IAEA 핵안보시리즈 기술문서 (NSS-13, INFCIRC/225)에서는 핵안보의 4대 목적을 다음과 같이 기술하고 있음[4.1-16].
 - 핵물질의 미인가 이동 방지: 핵물질의 탈취, 불법적 취득을 방지
 - 분실 핵물질 소재 확인 및 회수: 분실 또는 도난 핵물질의 회수를 위한 신속하고 포괄적인 조치
 - 사보타주 대응: 물리적 공격에 대응하여 핵물질 및 원자력시설 보호
 - 사보타주 결과 완화/최소화: 외부 타격이 성공하여 방사성물질 유출 시 피해를 최소화
- 핵안보 목적은 국내 핵안보 규제이행 목적과 동일하며, 사업자는 핵안보 목적 달성을 위한 물리적방호 시스템을 구축, 운영하여야 함[4.1-17]. 우리나라 핵안보 규제는 원자력안전위원회가 책임부처로서 원자력발전소, 핵연료제조시설, 원자력연구시설, 방사성 폐기물 처분시설, 그리고 대용량 방사선 조사시설이 규제 대상임.
- 원자력통제기술원은 원자력안전법과 방사능방재법에 따라 국가 사무를 위탁받아, 원자력시설의 물리적방호와 사이버보안에 대해 규정 심사, 시설 검사, 훈련 평가, 위협평가를 시행하고 있고 관련 심사·검사 기준 및 지침, 법령 및 제도 개선과 함께 핵안보 규제 기술을 개발하고 있음.

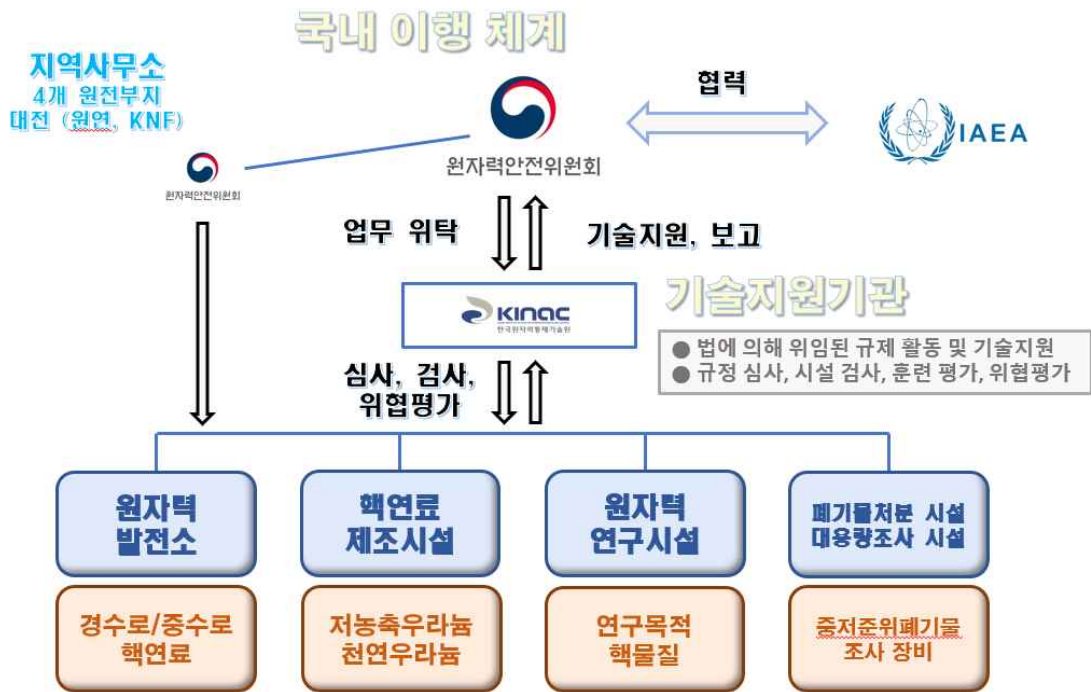


그림 4.1.1 국내 핵안보 규제이행 체계

나. 핵안보 측면 예상 규제 현안

- 핵안보의 목적은 핵물질의 불법적인 탈취를 막고, 원자력시설을 외부의 악의적인 공격으로부터 보호하는 것으로 전력생산을 위한 내부 계통보다는 외곽 구조물 형상 및 핵심설비까지의 접근경로에 많은 영향을 받게 됨. SMR은 기존 경수로와 비교해 볼 때 건물, 기기, 계통의 물리적인 배치와 형태에 많은 차이를 가지고 있어 이에 대한 면밀한 검토가 필요함.
- SMR은 원자로 격납건물을 지하에 설치하는 개념을 대부분 채택하고 있어, 항공기 충돌이나 기타 직접적인 물리적인 공격에 대해 물리적방호 측면에서 유리할 것으로 예측됨. 그러나 SMR의 운영 유연성을 확보하기 위해 고려하고 있는 원격지 건설, EPZ 축소, 운전원 감축, 원격감시/원격운전 등의 설계개념은 악의적인 공격자에게 새로운 공격 기회를 제공할 수 있는 요인이 될 수 있음.
- SMR 경제성 확보를 위해서는 인적의존도를 가능한 줄이는 것이 관건이며, 기존 경수로 대비 디지털 장비를 확대 적용하는 설계가 필요하며, 시스템 네트워크 구성 상 상용제품 (Off-the-Shelf)을 사용하는 것이 불가피하기 때문에 사이버보안은 공급망 보안, 내부자

위협 측면에서 다루어야 할 새로운 규제 현안임. 원격운전/원격감시, 부하추종, 부대설비와의 연동운전/자율 운전 등의 설계 개념 구현을 위해서는 외부망으로부터 내부제어망으로 디지털 신호의 유입을 허용하는 개방 네트워크를 채택하여야 하는데, 이는 사이버보안 측면에서 불리하게 작용할 수 있음.

○ 핵안보 측면에서 예상되는 규제현안을 정리하면 다음과 같음.

표 4.1.6 SMR 핵안보 측면 예상 규제 현안

물리적방호 분야		
구조물설계	<ul style="list-style-type: none"> 핵심구역 및 설계기준위협 설정 물리적 방벽 강도 (항공기 충돌 등) 	(-) 단순화 설계 개념은 공격자가 침투하는 데 유리
원자로설치위치	<ul style="list-style-type: none"> 지하, 수중, 해상 등 원자로 설치 위치에 따른 물리적 방호 	(+) 지중화의 경우 물리적방호 측면에서 유리 (-) 수중, 해상, 이동식의 경우 공격자의 공격기회를 확대
부지내 인력 감축	<ul style="list-style-type: none"> 보안, 대응 인력 감축에 따른 사보타주 대응 	(+) 내부자 위협 요인 감소 (-) 자체적인 대응 능력 약화
노심 방사선 재고량	<ul style="list-style-type: none"> 방사선원 재고량 감소에 따른 방사선적 영향 (차등접근법 검토) 	(+) 방사선적 결과 및 완화에 유리
사이버보안 분야		
모듈간 자원공유	<ul style="list-style-type: none"> 주제어실 및 기기/계통/설비 공유에 따른 사이버보안 위험성 평가 	(-) 사이버 공격 시 취약성 증대
일체형 설계	<ul style="list-style-type: none"> 모듈 내부 계측기 (압력/온도/유량 etc.) 보정 방안 	(-) 공급망 취약성, 내부자 위협요인
공간 최적화 설계	<ul style="list-style-type: none"> I&C 장비 수량 및 복잡성 증대 평가 계측장비 유지보수 방안 	(-) 사이버 공격 시 취약성 증대 (-) 공급망 취약성, 내부자 위협요인
원격/자율 운전	<ul style="list-style-type: none"> 개방형 네트워크 보안 방안 	(-) 사이버 공격 시 취약성 증대

4. 접근 전략 및 방안 - 설계 단계 핵안보 (Security By Design)

가. 기본 접근 전략

- SMR 역시 핵물질을 가지고 있는 원자로이며, 핵물질 불법이전이나 탈취, 사보타주의 대상이 될 수 있기 때문에 기본적인 핵안보 목적을 달성할 수 있어야 함. 부지나 원자로의 물리적 위치 등 설계 특성과 함께 발전, 열생산, 수소생산 등 다목적 운영 특성이 핵안보에 미치는 영향을 분석하여 외부의 물리적 공격에 대한 방어 대책 수립이 최우선적으로 이루어져야 함.
- SMR이 지향하는 설계 특성과 현행 규제기준/법령과의 부합성을 검토하여 SMR 설계를 구현하기 위해 해소해야 할 격차(Gap)를 우선적으로 분석하여야 함. 기본적인 안전/안보 원칙에 어긋난다면 개발자 측면에서 새로운 ‘기술적 대안’을 발굴하는 것이 필요하며, 그렇지 않다면 SMR 설계 특성을 수용할 수 있도록 규제자 측면에서 ‘제도적 대안’을 마련하는 것이 필요함.
- 미국 NRC, 캐나다 CNSC 등 선진 규제기관의 접근방식과 같이 설계단계 핵안보 (SeBD)를 기본적으로 적용하여야 하며, 운전원 감축, 원격감시/운전 등과 같은 설계 특성이 가져올 수 있는 취약성은 안전/안보 ESF 등 시스템을 통해 구현하는 것이 필요함.
- 기술 발전의 속도, 진화하는 위협의 다양성을 고려하여 물리적방호 시스템을 구현하고, 방사선적 결과에 대응 시 구조물과 핵연료의 특성이 반영되도록 차등접근이 충분히 고려되어야 함.

나. 설계단계 핵안보 (SeBD: Security by Design) 반영

- 설계단계 핵안보는 ‘물리적방호를 원자력발전소 설계에 통합하는 접근 방법’으로 정의할 수 있으며 안전, 안전조치 및 운영에 대한 사항을 전체적으로 포괄하여야 함[4.1-18]. 설계단계 핵안보는 원자력발전소의 전 수명 주기에 대해서 고려되어야 하며, 안보, 안전, 안전조치 및 운영에 필요한 기능을 설계단계에서 충분히 반영함으로써, 효율적인 시설의 운영 및 비용 절감 효과를 기대할 수 있음.
- 원자력발전소는 시공이 완료된 이후에는 재설치나 재시공이 어려운 경직성을 가지고 있어 시행착오가 발생하지 않도록 설계단계 핵안보를 가능한 초기 단계에 반영하는 것이 관건임. SMR의 경우 혁신적인 설계 개념이 도입됨에 따라 기존 경수로와는 다른 형태와 수준의 위협이 예상되기 때문에 설계 단계 핵안보가 더욱 중요하게 고려되어야 하며, 향후 기술발전에 따라 진화하는 위협에 대해서도 대응이 가능하도록 반영할 필요가 있음.

○ 설계단계 핵안보 성공적인 반영될 경우 견고한 물리적 방호인프라 구축이 가능해지며, 그 특징은 다음과 같이 요약됨[4.1-18].

- 핵물질에 대한 내부자 접근 제한, 외부로부터의 물리적인 공격 기회 제한
- 변화하는 위협 환경에 유연한 대처
- 시스템에 통합하여 인력의존성을 줄임으로써 비용 절감
- 외부공격 발생 시 대응군의 효율적인 운영

○ 설계단계 핵안보가 성공적으로 반영되기 위해서는 설계자와 규제자 간의 협업이 중요하며 초기 단계부터 상세 설계정보를 공유하고 규제 현안을 공동으로 해결하는 것이 필요함. 특히 SMR의 경우에는 규제 및 시스템 공학 측면에서의 원칙과 모범사례를 토대로 기술 특성을 고려한 유연성 있는 규제접근 방식 및 규제기준이 조기에 마련되어야 함[4.1-19].

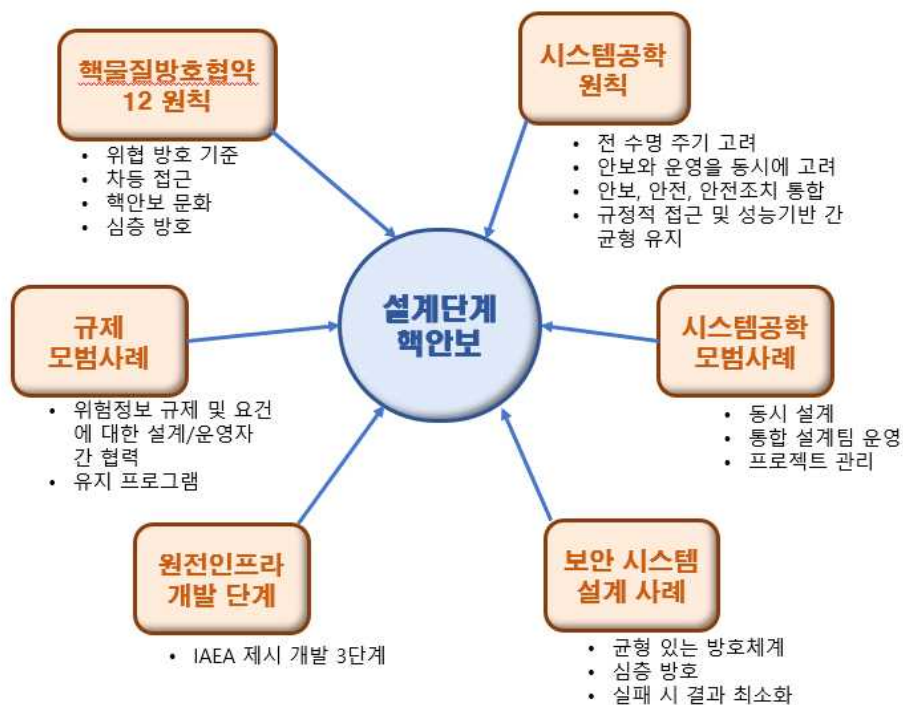


그림 4.1.2 설계단계 핵안보 구현에 필요한 주요 요소

5. 핵안보 규제에 대한 제언

- SMR은 개발자와 규제자 모두에게 도전 과제로서 기존 경수로 기반의 관행을 타파하는 것이 매우 중요함. 개발자 입장에서는 SMR의 획기적으로 향상된 안전성과 기술혁신성을 고려 규제 면제나 완화를 요구하는 반면, 규제자는 현행 규제 체제가 수십 년간의 경험을 통해 높은 신뢰성을 가지고 있어 SMR에 대해서도 규제의 출발점이 되어야 한다는 것이 기본 입장임.
- SMR 개발의 관건은 대표적인 성공 사례인 NRC NuScale에서 보여주듯이 개발자와 규제자 간 긴밀한 협력으로써 기존의 설계 관행 및 규제 관행이 동시에 개선되어야 함. 개발자는 설계정보와 예상되는 규제현안을 규제자에게 적극적으로 제공하고 규제자는 기존의 규정적 접근방식에서 위험기반, 성능기반 접근방식으로 유연성을 발휘하는 것이 필요함.
- 현재 개발 중인 대부분의 SMR은 안전 목표, 다목적 활용 등 경쟁자 간 유사한 설계 및 운영 특성을 지향하고 있음. 따라서 국제시장 경쟁력은 고객(수입국)의 핵안보 요건 구현 수준에 따라 좌우될 가능성이 높기 때문에 핵안보가 SMR의 고유한 기능으로 작동할 수 있도록 설계에 충분히 반영되어야 함.
- 설계단계 핵안보는 안전/안전조치/운영에 대한 사항을 통합하여 구현되어야 하며, SMR의 설계 특성에 따라 유발될 수 있는 위협요인을 사전에 효과적으로 회피할 수 있는 방안임. 설계단계 핵안보가 잘 구현되면 물리적방호에 소요되는 인적, 물적 비용이 절감될 뿐만 아니라 다양한 위협에 대한 대처능력이 확보될 것으로 기대됨.

제2절 소형모듈원자로 안전규제 동향

이 절에서는 국내 현황에 대한 이해를 높이기 위해 그간 진행되어 온 인허가 현황을 정리하고, 해외 주요 인허가 현황을 소개하였다. 또한 원자력안전위원회가 제시한 SMR 규제 정책방향의 세부 내용을 살펴보고 해외 주요국의 규제정책 방향을 조사하였다.

1. 소형모듈원자로 인허가 현황

- 우리나라는 발전용 및 연구용을 포함한 원자로시설에 대하여 건설허가 및 운영허가의 2단계 인허가 단계를 설정하고 있으며, 발전용 원자로시설을 반복적으로 건설하고자 할 때는 그 설계에 관해 표준설계인가를 받을 수 있도록 함[4.2-1~4.2-2].
 - 건설허가, 운영허가 및 표준설계인가에 적용되는 기술기준은 대체로 경수로 중심으로 설정되어 있으며, 위치, 구조·설비 및 성능, 운영, 품질보증, 해체, 사고관리 등에 대한 기술기준을 규정함.
 - 경수형 혹은 비경수형 소형모듈원자로(SMR)에 대해서는 별도의 기술기준을 설정하지는 않고 있으며, 특히 비경수형 SMR에 특화된 기술기준은 원자력안전법령 체계 내에 구비되어 있지 않아 다양한 노력을 통해 이의 마련이 필요한 상황임.
 - 현행 원자력안전법령에서 규정한 기술기준 중 당해 원자로시설의 사용목적, 원리적 차이 또는 설계의 특성상 그대로 적용할 수 없거나 적용하지 않더라도 안전상 지장이 없다고 원자력안전위원회가 인정하는 경우에는 일부규정을 적용하지 않을 수 있도록 허용하고 있어 인허가를 포함하는 현행 원자력안전법령 체계가 SMR 등 다양한 원자로시설에 통용될 수 있다는 전제는 열려 있음.
- SMR의 특성상 기존의 대형원전을 대상으로 설정되어 있는 규제체계 및 기술기준을 그대로 적용하기에는 그 한계를 갖고 있으며, 특히 안전성 증진을 위한 신기술의 적용 등에 어려움이 예상됨.
 - 국제원자력기구(IAEA)와 미국 원자력규제위원회(USNRC)의 사례에서 경험한 바와 같이 기존 대형원전 중심의 기술기준을 경수형 또는 비경수형 SMR에 적용 시 상당한 격차 발생이 불가피하고, 이 차이를 메꾸기에는 세부기준이 제시되어 있지 않기 때문임.
 - 국내 안전규제 체계에서는 건설허가 혹은 운영허가 신청 이전에 공식적인 사전 검토 및 소통장치 등의 제도적 체계가 마련되어 있지 않아 인허가에 대한 규제자 및 사업자의 사업추진 안정성과 예측성에도 상당한 어려움이 발생 가능함.
 - 사업자의 요청에 따라 비공식적인 사전안전성검토를 수행한 사례가 있어 그 경험을 활용할 수 있으나, SMR에 대한 인허가 안정성과 예측성의 근본적인 해결방안으로 보기 어려움.
- 원자력안전위원회는 2022년부터 ‘중소형원자로 안전규제 기반기술 개발’ 사업의 시행을 통하여 향후 예상되는 SMR 인허가 신청에 선제적으로 대비하기 위하여 SMR의 특성과

안전성 증진을 위한 신기술을 수용할 수 있는 규제체계 및 인허가 절차의 개선을 위한 연구를 착수하였음.

- 한국원자력안전기술원(KINS)은 ‘경수형SMR 인허가를 위한 국내 규제체계 개선(안) 개발’ 과제를 수행함.
- 원자력안전위원회는 SMR에 대한 규제수요가 발생함에 따라 관련 사무를 담당하는 부서를 2023년에 신설함.

○ 우리나라는 비록 SMR에 특화된 규제체계 및 인허가 절차를 갖고 있지는 않으나, 대형원전을 대상으로 설정되어 있는 규제체계 및 인허가 절차를 토대로 SMART 표준설계인가(2012년 승인), SMART100 표준설계인가 심사(2019.12~) 등의 수행을 통하여 중소형 일체형원자로, 피동안전계통 적용 등 SMR의 특성을 갖고 있는 원자로시설에 대한 심사경험을 보유함.

- SMR의 대표적 설계특성인 모듈형을 포함한 안전성 증진을 위해 신기술이 적용된 설계·제작·건설·운영 측면의 특성들에 대하여는 규제체계 및 기술기준의 개발 혹은 정비가 필요함.
- 최근 국내 원자력 관련 산업계 및 학계를 중심으로 ‘혁신형 SMR’ 등 다양한 SMR의 개발이 착수 또는 시도됨에 따라 원자력안전위원회도 이에 발맞추어 SMR에 대한 안전규제 방향을 제시하는 ‘소형모듈원자로 안전규제 방향 선포식(2023.4.18.)’을 갖고 개발자가 어려움을 겪지 않고 효율적으로 SMR을 개발할 수 있도록 역량을 집중하겠다고 밝힘.
 - SMR 안전규제에 대한 일반원칙, 기본방향, 설계 가이드라인이 제시됨.
- 한국원자력안전기술원은 SMR 규제의 예측가능성을 높이기 위해 개발 및 설계 과정에서 ‘안전, 안보 및 안전조치 간 통합된 방식의 설계를 통해 핵안보, 핵확산저항성이 확보되고 안전성이 증진되도록 필요한 요소들이 설계에 고려되어야 함’을 강조함.
- ‘2023 원자력안전규제정보회의’에서 원자력안전위원회는 ‘우리나라 SMR 규제 준비 현황’ 발표를 통해 선포식에서 제시한 사항들을 보다 상세하게 제시함.

가. 국내 인허가 현황

(1) SMART-P 건설·운영허가 심사 (‘05.7월~‘06.9월)

○ SMART-P 원자로는 330 MWt 용량의 일체형 원자로(SMART)의 연구개발을 위해 한국원자력연구원(KAERI, 舊 한국원자력연구소)이 추진한 65 MWt 용량의 원자로로, 주요 구조물은 원자로건물, 보조건물, 복합건물 및 터빈건물로 구성되는 본관건물과 부속건물로 구성됨.

- 한국원자력안전기술원은 2005년 7월 안전심사에 착수하였으며, 원자력법 및 관련규정에 근거하여 전문 분야별 안전심사를 수행함.
- SMART-P 원자로에 대하여 안전기술원에서 수행한 안전심사의 주요 내용:
 - SMART-P 원자로 및 관계시설 설계/운영에 대한 안전성 확인

- 건설예정부지의 안전성 검토를 통한 부지 적합성 확인
 - SMART-P 원자로 및 관계시설의 건설과 운영으로 발생 가능한 방사선/능이 주변 환경에 미치는 영향 분석의 적합성 확인
- SMART-P 원자로는 일체형 원자로 연구개발사업 기간이 만료(2006.2.28.)되고 일체형 원자로 실용화사업 추진 방향이 변경됨에 따라, 舊과학기술부는 SMART-P 건설·운영허가 심사 종결을 한국원자력안전기술원에 요청함(2006.9.11.).
- 이에 따라 건설·운영허가 심사가 중간 단계에서 종료됨.
 - 심사가 중단되었으나, SMART-P 인허가 사업은 국내 SMR 안전규제의 첫 사례임.
 - 이후에 진행될 SMR 안전규제에 대한 다양한 논의거리를 제공함.

(2) SMART 표준설계인가 심사 ('10.12월~'12.7월)

- SMART는 가압경수형 원자로로, 증기발생기, 원자로냉각재펌프, 가압기 등의 주요기기를 원자로용기 내에 배치한 일체형 원자로임.
- SMART는 피동 개념의 피동잔열제거계통을 도입하여 발전소정전사고 시에도 추가적인 냉각재 보충 없이 20일 이상을 견딜 수 있도록 설계
 - 대형 원자로건물을 채택하여 설계기준사고 시 에너지 방출에 따른 압력 및 온도의 영향을 기존원전 대비 크게 완화될 수 있도록 설계
- 한국원자력연구원과 한국전력공사는 舊원자력법 제12조(표준설계인가), 동법 시행규칙 제11조(표준설계인가 신청 등) 및 제12조(표준설계인가 첨부서류의 작성)에 따라 SMART에 대한 표준설계인가를 2010년 12월 30일에 신청함.
- 한국원자력안전기술원에서는 원자력법 및 관련규정에 근거하여 전문 분야별 안전심사를 수행함.
 - 한국원자력안전기술원은 SMART 표준설계가 세계시장으로의 수출을 목표로 추진된 것임을 고려하여 기존의 업무체계를 변경하고 SMART 및 또 다른 표준설계인가 심사가 진행되었던 APR+ 원전에 대한 심사를 전담하는 조직을 신설하여 운영함.
 - SMART 원자로에 대하여 한국원자력안전기술원에서 수행한 안전심사의 주요 내용:
 - 일체형 원자로의 특성을 갖고 있는 SMART 원자로에 대해 발전소의 구조물, 계통 및 기기의 설계에 대한 종합적인 안전성이 확보되는지 평가
 - 피동잔열제거계통 및 항공기 충돌 설계 등과 같은 SMART 원자로에 도입된 신기술의 타당성이 확인되었는지 평가
 - 표준설계인가 심사 과정에서 도출된 주요 현안들이 적절하게 해결되었는지 평가
 - 표준설계인가 신청 후 발생한 일본 후쿠시마 원전 사고에 대해 사업자 대책의 타당성 평가

○ 한국원자력안전기술원은 SMART 표준설계 내용이 원자력법 제12조제5항의 인가기준을 만족시키고 있는지 확인하였으며, 심사과정에서 약 1,500여 건의 심사질의가 발행됨.

- 원자력안전기술부는 SMART 표준설계인가를 2012.7.4.에 최종 승인함.
- SMART 표준설계인가 승인은 국내 최초의 SMR 승인 사례임.

(3) SMART100 표준설계인가 심사 ('19.12월~'23.9월 현재)

○ 한국수력원자력, 한국원자력연구원 및 K.A.CARE(사우디아라비아 왕립 원자력·신재생에너지원)은 2012년에 표준설계인가 받은 SMART 표준설계를 토대로 원자로 출력을 증가(330 MWt → 365 MWt), 피동형 안전계통 전면도입, 수출을 위한 신규·개선 전산코드 사용 등 다양한 설계 개선을 수행하고 SMART100 표준설계인가를 2019.12.30.에 3자 공동으로 신청함.

- 후쿠시마 후속조치를 반영한 완전 피동안전계통 도입과 DC 배터리 및 비상운전 단순화 안전성 향상
- 출력증강 및 건물체적 축소, 기기 수 및 크기 감소를 통해 경제성 향상
- 설계수명 60년, 노심손상빈도(CDF) < 1.0E-6/년 및 내진설계 0.3g를 적용

○ 한국원자력안전기술원은 SMART100이 수출노형임을 고려해 설계 개선사항 등에 대한 사전검토 필요성을 인식하고, 원자력안전위원회와 사전검토에 대한 절차·형식 및 내용에 대한 협의를 거쳐, 2019년 4월부터 사전검토에 착수함.

- 사전검토를 통해, 주요 심사주안점 및 예상 심사현안을 도출:
 - 심사지침 개정(피동형안전계통 설계에 대한 규제지침 등)을 통한 심사 기반 구축
 - 국내 규제요건 만족 여부 또는 기술적 동등성 확인
 - 새롭게 개발된 설비 및 코드·방법론 확인
 - 일체형 원자로용기 가동중검사 수행 가능 여부 검토
 - 개정 원자력안전법(2015)에 따른 사고관리계획서 작성계획서 심사

○ SMART100의 표준설계인가는 국내 또는 해외(사우디 등) 건설, 그리고 제3국 수출을 추진하기 위해 신청함.

- 2023년 9월 현재 SMART100 표준설계인가 심사 진행 중임.

(4) 기타 SMR

○ 가압경수로형 SMR로 한국전력기술은 부유식 원자로인 BANDI-60과 한국수력원자력과 한국원자력연구원의 혁신형 SMR(i-SMR) 개발 진행 중임.

- 혁신형 SMR의 기본설계 단계까지 진행됨에 따라 원자력안전위원회와 한국원자력안전기술원을 중심으로 인허가 신청에 대비한 법령, 기술기준 및 인허가체계에 대한 개선 논의가 활발히 진행 중임.

○ 비가압경수로형(Non-PWR) SMR로는 한국과학기술원(KAIST)의 MMR, 울산과학기술원(UNIST)의 MicroURANUS, 한국원자력연구원의 VHTGR과 SFR 등이 있음.

- 대부분의 원자로로는 개념설계 단계로 인허가 신청 前 단계임.

나. 해외 인허가 현황

(1) 미국

① NuScale

○ NuScale US600 원자로는 NuScale Power가 설계한 일체형 가압경수로임 [4.2-3~4.2-4].

- 2000년대 초 오레곤 주립대학에서 개발된 다용도 소형 경수로를 기반으로 하며, 원자로용기 내에 노심과 나선형 코일 증기발생기가 위치해 자연순환으로 냉각재를 순환시키는 가압경수형 원자로임.
- 원자로용기 격납 모듈은 원자로건물 지하의 안전관련 수조에 잠겨있는데, 최대 12개의 원자로 모듈을 수용할 수 있으며 수조의 물은 최종열제거원 기능을 수행함.
- NuScale US600의 정격 열출력은 160 MWt, 전기출력은 50 MWe로, 12개 모듈 설치시 총 용량은 600 MWe임.

○ 2000년부터 미국 에너지부(Department Of Energy, DOE)의 SMR 개발 지원을 바탕으로 NuScale Power사는 2003년 NuScale SMR 개념 개발을 시작하고, 2016년 12월에 NuScale US600에 대한 설계인증신청서(DCA)를 NRC에 제출하여 최초로 SMR 표준설계인가(SDA)를 취득함.

- 2020년 7월, 심사가 진행 중인 과정에서 NuScale Power사는 표준설계인가를 요청하였으며, NRC는 2020년 9월 표준설계인가를 승인함.
- 표준설계인가는 향후 10CFR 50에 따른 건설허가·운영허가 신청 혹은 10CFR 52에 따른 통합인허가(Combined License) 신청 시 참고 가능함(유효기간 15년).
 - 표준설계인가 승인이 건설허가, 운영허가, 설계인증(DC)을 보장하는 것은 아님.
- 2022년에 250 MWt까지 열출력 증강을 신청함.
 - 2024년에 NRC 검토가 완료되는 것을 목표로 진행 예정임.
- NuScale의 최초 SMR 건설은 아이다호처에 위치한 유타연합전력시스템(UAMPS) 소유의 6 모듈 VOYGR-6 SMR로 2029년 상업운전을 목표로 추진 중.

- 2003년 : 초기 개념 개발 및 통합시험시설 운영
- 2007년 : NuScale Power사 설립
- 2008년 : NRC에 사전 신청 개시
- 2013년 : 미국 DOE와 SMR 협력 협정 서명
- 2016년 : 미국 NRC에 설계인증(DC) 신청
- 2020년 : NRC로부터 표준설계인가(SDA) 획득
- 2023년 : NRC에 최초 호기 건설을 위한 통합인허가(COL) 신청
- 2025년 : 아이다호에 최초 VOYGR-6 건설 착수
- 2029년 : 최초 상용 NuScale 발전소 상업운전 개시

② 기타 원자로 사전검토

- 미국 NRC는 인허가 지침 제공, 잠재적인 인허가 문제의 초기 식별 및 해결 등을 위해 잠재적 신청자(전력회사, 원자로 설계자 등)와의 조기 논의(인허가 신청서 제출 전 사전검토)를 정책적으로 장려함[4.2-9~4.2-12].
 - NRC staff와 사전 논의 또는 사전검토 신청을 준비하고자 하는 SMR 개발자는 NRC가 적기에 자원 활용을 계획할 수 있도록 ‘DRAFT Pre-application Engagement to Optimize Advanced Reactors Application Review’를 검토할 필요가 있음.
 - ‘RIS-20-02(Review of New Licensing Applications for Light-Water Reactors and Non-Light Water Reactors)’을 제출할 필요가 있음.
 - NRC가 수행중인 SMR에 대한 사전검토 활동 :
 - Clinch River 원전(TVA사) 건설허가 신청 관련 사전검토 (2019년 부지사전승인(ESP) 이후 착수)
 - NuScale US460(UAMPS) 설계에 대한 표준설계인가
 - SMR-160(SMR, LCC사) 원자로 설계에 대한 사전검토
 - BWRX-300(GEH사) 관련 설계 방법론 관련 특정기술주제보고서 심사 등 사전검토

(2) 캐나다

- 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)는 용량이 3~300 MWe 범위인 소형원자로에 대해 사전 공급자설계검토(VDR: Pre-licensing Vendor Design Review)를 수행 중임[4.2-13~4.2-14].
 - VDR은 캐나다의 사전인허가 검토의 일환으로 CNSC가 공급자의 원자로설계 평가를 제공하는 선택적인 서비스로, 공급자의 설계 및 활동이 캐나다 규제요건과 기대치를 충족하는지 검토하여 잠재적인 규제 및 안전 문제를 식별하여 해소하고자 하는 프로세스임.
 - 2017년 11월에 CNSC는 Terrestrial Energy의 IMSR-400에 대해 1단계 검토를 완료함.

- 2019년 2월에 ‘초소형 모듈원자로’(MMR)로 불리는 Ultra-Safe Nuclear Corporation의 5 MWe HTR에 대한 1단계 검토를 완료함.
- 2019년 3월에 Global First Power는 Chalk River에서 MMR에 대한 부지준비허가(Site Preparation License, 부지사전승인과 유사) 신청서를 제출함.
- 2019년 10월에 ARC Nuclear Canada의 ARC-100 설계에 대한 1단계 검토를 완료함.

- 새로운 원자로 설계에 대한 VDR 프로세스를 사용하여 사전 인허가를 위해 CNSC와 서비스 계약을 체결한 공급자와 공급자 설계검토 세부현황은 CNSC 홈페이지에 상세하게 소개되어 있으며, 주요 현황은 표 4.2.1에 소개됨.
- 검토기간은 공급자가 제안한 일정에 따라 추진하되, 일반적으로 1단계 검토는 12-18개월, 2단계 검토는 24개월가량 소요됨.

표 4.2.1 CNSC의 사전 공급자설계검토 현황 ('22.11월)

공급자	원자로	용량	검토현황
Terrestrial Energy Inc.	ISMR	200	2단계
Ultra Safe Nuclear Corp.	MMR-5/10	5-10	2단계
LeadCold Nuclear Inc.	SEALER	3	1단계(보류)
ARC Nuclear Canada Inc.	ARC-100	100	2단계
Moltex Energy	SSR-W300	300	2단계
Holtec International Comp.	SMR-160	160	1단계(완료)
NuScale Power LLC.	NuScale	60	2단계
U-Battery Ltd.	U-Battery	4	1단계(보류)
GE-Hitachi Nuclear Energy	BWRX-300	300	2단계
X-Energy LLC.	Xe-100	80	2단계
WEC	e-Vindi	25	2단계
StarCore Nuclear	StarCore	10	2단계
Candu Energy	EC-6	600	3단계(완료)
WEC	AP1000		2단계(완료)
ATMEA	ATMEA 1		1단계(완료)
AREVA	EPR		1단계(완료)
AECL	ACR1000		3단계(완료)

(3) 영국의 소형모듈원자로 인허가 현황

- 2014년 영국 정부는 영국의 SMR 개념, 실행 가능성 및 잠재력에 대해 국립원자력연구소(NNL: National Nuclear Laboratory) 컨소시엄에서 작성한 보고서를 발표하였고, SMR에 대한 정책 결정을 지원하는 데 필요한 기술적, 재정적 및 경제적

기반 제공을 위한 작업을 진행함[4.2-15~4.2-18].

- SMR 개발 및 건설을 진행하는 것으로 결정되는 경우 정책적 및 상업적 측면의 추가 작업을 거쳐, 노형 선정과 이에 대한 일반설계평가(GDA, General Design Assessment)로 이어짐.
- SMR에 대해 규제기관의 설계 검토 제도로서 일반설계평가를 운영함.
 - UK-HPR1000에 대한 GDA 적용

○ HPR1000은 중국의 CGN(China General Nuclear Power Group)과 CNNC(China National Nuclear Coporation)가 공동으로 개발한 Hualong One(PWR, 1170 MWe)의 해외 수출형 모델임[4.2-19~4.2-22].

- CGN과 EDF와 이들의 대리인인 GNIL이 공동으로 2017년 1월 GDA 1단계 신청함.
 - 2017년 11월 2단계 신청
 - 2018년 11월 3단계 신청
 - 2020년 2월에 4단계 신청
- 제출된 설계문서 :
 - Pre-construction Safety Report (33개 장으로 구성)
 - Generic Security Report
 - Design Reference Report
 - Pre-construction Environmental Report
 - Master Document Submission List
- 영국 규제기관인 ONR과 환경청은 각 단계 종료 후 평가 의견서를 신청인에게 제공함.
 - GDA 신청 제출자료에 대한 평가를 토대로 2022년 1월에 ONR이 설계수락확인서 (DAC)를 발행함.
 - 환경청(Environmental Agency)이 설계수락서(SoDA; Statement of Design Acceptability)를 발행함.

2. 소형모듈원자로 규제정책 방향

가. 국내정책

○ 과학기술부와 산업통상자원부 주도로 혁신형 SMR(i-SMR)의 개발이 진행 중이며, 이외에도 다양한 SMR의 개발이 추진 중임[4.2-2].

- 한국원자력안전기술원과 개발자 간의 소통과 정보교류를 위한 워크숍이 2022년 5월 및 11월에 개최됨.
 - 새로운 설계개념을 적용한 SMR의 안전성 확인을 위해 원자력안전위원회는 SMR 안전규제 방향(안)을 마련함.
 - 국회, 관련 전문가 및 개발자, 일반국민 등을 대상으로 다양한 방식의 의견수렴을 수행함.
- 혁신형소형모듈원자로(i-SMR) 안전규제 방향 정립 전문가 세미나('22.12월)를 통해 SMR 안전규제

방향(안) 초안에 대한 의견수렴 및 개선 방향 도출함.

- SMR 안전규제 방향 마련을 위한 전문가 세미나('23.1월)를 개최해 SMR 안전규제 방향(안)에 대한 의견수렴 및 i-SMR 개발현황 공유, 해외동향 발표 등을 논의함.
- 제4회 혁신형 SMR 국회포럼('23.2월)에서 'SMR 안전규제 방향(안)' 발제 및 패널토의를 진행함.
- 원자력안전전문위원회 워크숍('23.2월)을 통해 SMR 안전규제 방향(안) 발표하고 의견을 수렴함.
- 국민신문고 '국민생각함'을 통해 일반국민 대상 의견 청취함('23.3월).
- 원자력안전 국민참여단 대상 SMR 안전규제 방향(안) 설명 및 의견 청취를 진행함('23.3월 및 4월).

○ 원자력안전위원회는 이러한 소통 노력 및 의견수렴의 결과로 '소형모듈원자로 안전규제 방향 선포식(2023.4.18.)'을 갖고 그 결과를 원자력안전위원회 회의에 보고(2023.4.27.)하는 한편, '2023 원자력안전규제정보회의(2023.6.20.)'에서 SMR 규제 준비 현황을 상세하게 제시함.

- SMR의 기술수준과 설계특성을 반영한 안전규제체계 구축 목표를 설정
 - － '국민과 환경 보호'를 위한 최상의 안전성 확보
 - － 규제방향의 제시, 사전설계검토 처리규정 관련 절차화, 연구개발, 국제협력 측면에서 구체적인 계획을 포함

(1) SMR 안전규제 방향(안)

○ SMR 안전규제 방향은 일반원칙으로 IAEA 기본안전원칙(Fundamental Safety Principles), 원자력안전협약 등 국제규범 및 기본원칙을 준수함[4.2-19].

- 객관적 과학기술과 전문성에 기반을 둔 합리적 기준을 바탕으로 원자력 시설의 안전성을 확인하는 안전규제를 추구함.
- 원자력안전위원회는 SMR 안전규제 기본방향을 다음과 같이 제시함:
 - － 혁신적 설계가 적용된 SMR은 높아진 기술 수준에 걸맞은 「최상의 안전성을 확보」 한다는 규제관점 견지
 - － SMR에 활용된 고유한 설계특성으로 인해 기존 기술기준을 적용할 수 없는 경우, 과학기술적 근거를 바탕으로 다양한 평가방식을 활용하여 해당기술의 안전성 확인방안을 제시하는 규제 방식 적용
 - － IAEA 등 국제기구와 SMR 개발국가와의 규제협력을 공고히 하여 국제적으로 인정받고 조화로운 규제기준을 마련
 - － 일반원칙을 근간으로 선도(Leading), 소통(Interaction), 준비(Readiness)를 통해 안전성 확인을 위한 규제체계를 마련

○ 원자력안전위원회는 이러한 기본방향에 따른 SMR 설계 가이드라인을 제시함.

- “SMR은 현세대 최신 원자로보다 높은 수준의 안전성 확보를 목표로 설계하여야 하며, 비엔나 선언 등 방사선으로부터 국민과 환경에 미치는 영향을 최소화하기 위한 국제적 안전목표의 성실한 이행과 함께 다음 사항이 설계에 고려되어야 한다”는 것임.
 - SMR은 사고 예방 및 완화 능력을 확보해야 하며, 이를 위해, 고유안전성 확보, 심층방어 적용, 높은 신뢰성의 안전기능 구현, 안전성 종합평가가 필요함.
 - SMR에 새롭게 적용되는 기술의 타당성 및 신뢰성을 확보하기 위해 설계 입증, 진단 및 관리, 혁신적 설계의 신뢰성의 확보가 필요함.
 - 종사자 및 주민에 대한 잠재적 피폭이 낮게 유지되도록 최적화되어야 하며, 방사성폐기물의 발생 및 방사성물질의 환경방출이 가능한 한 최소화되어야 하고 해체 용이성의 고려가 필요함.
 - 안전, 안보 및 안전조치간 통합된 방식의 설계를 통해 핵안보, 핵확산저항성이 확보되고 안전성이 증진되도록 필요한 요소들이 고려되어야 함.

(2) 사전설계검토(안)

- 원자력안전위원회는 표준설계인가 신청 이전 기초설계자료 등을 통해 규제기관-개발자 간 설계개념과 규제요건 등에 대한 상호 이해를 바탕으로 규제기관은 효과적·효율적인 본심사 수행 기반을 마련하고, 개발자는 기술개발의 불확실성을 최소화할 수 있도록 사전설계검토를 도입할 예정임[4.2-2].
 - SMR 안전규제 방향을 바탕으로, 선제적으로 규제기반기술 개발을 위한 R&D에 착수하고 SMR의 설계 특성과 기존 기술기준과의 격차 분석
 - 규제 현안별 R&D, 개발자 보고서 검토, 전문가 그룹 자문·검토 등을 실시하여 안전성 입증방안 검토
 - 안전성 입증 및 기준 적용에 대한 규제 입장에 따라, 규제기관은 법령·규칙·고시·심사지침 등을 정비하고 개발자는 이를 표준설계에 반영
- 사전설계검토 수행을 위해 원자력안전위원회, 관계부처, 규제전문기관, 개발자, 전문가 그룹 등으로 구성된 ‘i-SMR 규제준비단’을 운영 방안이 논의됨.
 - 기술개발 진행현황을 공유
 - 제도개선 사항을 기술적·실무적으로 논의
 - 독립성과 객관성이 담보된 안전성 확인방안 및 현안에 대한 논의의 진행을 추진

(3) 국제협력

- 원자력안전위원회는 국제적으로 인정받는 SMR 규제기준 마련을 위해 IAEA 등 국제기구 및 SMR 개발국가들과 협력을 강화할 방침을 계획함[4.2-21~4.2-23].
 - 우선, IAEA 주도로 진행 중인 IAEA NHSI(Nuclear Harmonization and Standardization

Initiative)에 참여해 SMR 안전에 대한 인허가 절차 조화방안을 논의하는 것.

- 2015년부터 진행되어 온 IAEA SMR 규제자 포럼에 지속 참여해 SMR 규제현안의 지식과 경험을 공유하고, 규제입장 등에 대해 논의하는 것.
 - SMR 규제자 포럼에는 한국원자력안전기술원이 수년째 참여하여 관련 논의 진행 중임.
- OECD/NEA 원자력규제활동위원회(CNRA)에서 논의하는 원자력 규제정책 및 인허가 사항에 대한 협력활동에 참여하는 것[4.2-24~4.2-25].
 - CNRA 회의는 연 2회 개최되며, 2023년에 개편·발족한 ‘New Technology Working Group’에 참여 중임.
- 한-미 간 양자회의에 SMR 의제를 신규로 채택하여 SMR에 대한 규제정책 및 기술현안을 공유하는 것.

나. 미국

○ 미국의 비경수로(Non-LWR)의 소형모듈 원자로를 포함한 신형원자로의 3가지 규제정책은 아래와 같음[4.2-5]

- 1986년 제정되어 2008년까지 몇 차례 개정되어 공표된 신형원자로의 규제에 관한 NRC의 정책성명
- 2016년 12월 비경수로 기술의 향후 예상되는 인허가 신청에 효과적이고 효율적으로 대비(Readiness)하고 있음을 보장하기 위하여 공표된 NRC의 ‘비경수로에 대한 NRC 비전과 전략(NRC Vision and Strategy: Safely Achieving Effective and Efficient Non-Light Water Reactor Mission Readiness)’
- 2019년 1월 의회에서 제정한 ‘원자력 혁신 및 현대화법(Nuclear Energy Innovation and Modernization Act; NEIMA)’

(1) 신형원자로 정책성명

○ 미국 NRC는 2008년 10월 ‘신형원자로 규제에 관한 정책성명(Policy Statement on the Regulation of Advanced Reactors)’을 공표함[4.2-9].

- 신청자, 공급자, 다른 정부부처와의 가능한 조기 접촉을 유지
- 신형원자로 설계의 바람직한 특성에 관한 위원회의 견해를 대중을 포함한 이해관계자에게 제공
- 설계가 안전과 규제프로세스에 미치는 영향에 대해 적시에 의견을 제시하려는 의도를 표현

○ 정책성명에서는 보다 적시의 효과적인 신형원자로 규제를 위하여 신청자, 공급자, 다른 정부부처와의 가능한 조기의 접촉을 통하여 신형원자로 안전현안의 조기 도출과 신형원자로 설계의 안전과 보안 특성에 관한 적시의 독립적인 평가를 대중을 포함한 이해관계자에게 제공할 것을 장려함.

- 설계프로세스의 조기에 이러한 인허가 사항에 대한 접촉과 지침은 신형원자로의 인허가와 규제에서 복잡성을 최소화하고 안정성과 예측성을 제공하는 데 기여할 것으로 언급함.

○ NRC는 이와 연계하여 2008년 8월 의회에 제출한 보고서(Next Generation Nuclear Plant Licensing Strategy)에서 차세대원전의 정책적, 규제관점의 그리고 핵심적인 기술현안을 도출하고 해결하기 위하여 사전신청검토(Pre-application Review)의 수행 필요성을 제시함[4.2-6~4.2-9].

- NRC는 사전신청검토의 일환으로 2001년부터 2020년 9월까지 55건의 SECY 보고서를 발행함.
- SECY-10-0034(Potential Policy, Licensing, and Key Technical Issues for Small Modular Nuclear Reactor Designs): 4의 범주(인허가절차 현안, 설계요건 관련 현안, 운영현안, 재정현안)에서 17개의 현안을 도출하고 이의 해결방안을 모색함.

(2) 비경수형 원자로에 대한 NRC 비전과 전략

○ NRC는 2016년 12월 비경수로(Non-LWR) 기술의 향후 예상되는 인허가 신청에 효과적이고 효율적으로 대비(Readiness)하고 있음을 보장하기 위하여 ‘비경수로에 대한 NRC 비전과 전략(NRC Vision and Strategy: Safely Achieving Effective and Efficient Non-Light Water Reactor Mission Readiness)’을 제시함[4.2-10].

- 비경수로의 인허가가 현재 신청된다고 하더라도 안전과 보안 그리고 환경에 대한 심사와는 달리 기존의 경수로에 대하여 설정하고 있는 규제로 비경수로를 다루는 데는 잠재적인 비효율성이 있다는 점을 인식함.
- 비전과 전략을 통하여 이를 극복하고 비경수로의 이해관계자들에게 규제 명확성을 제고하고자 함.

○ ‘비경수로에 대한 NRC 비전과 전략’은 2단계로 구성됨[4.2-11].

- 1단계: 비경수로의 전략적 목적(Goal)과 목표(Objectives) 그리고 전략(Strategies)과 기여활동(Contributing Activities)을 수립하는 개념적 기획 과정
 - 전략적 목적과 목표를 달성하기 위한 전략과 기여활동은 단기(0~5년), 중기(5~10년), 장기(10년 이후) 등의 기간으로 구분
- 2단계: 이행활동계획(Implementation Action Plan: IAP)을 수립하고 이행하는 과정
 - 1단계의 전략과 기여활동으로부터 작업시간 추정, 예상 작업기간, 조직별 지원이 필요한 예상 직원 등을 포함하는 이행수준의 상세한 사항을 포함함.

○ NRC는 전략적 목적을 비경수로를 효율적이고 효과적으로 심사하고 규제하는 데 필요한 NRC의 대비상태를 보장하는 것으로 규정하고, 3대 전략 목표를 설정함.

- 기술적 대비태세의 향상(Enhance Technical Readiness)
- 규제 대비태세의 최적화(Optimize Regulatory Readiness)

- 소통의 최적화(Optimize Communication)

○ NRC는 ‘비경수로에 대한 NRC 비전과 전략’에서 규정하고 있는 목표와 목적을 달성하기 위하여 2017년 7월 단기(Near-Term) 및 중·장기(Mid-Term and Long-Term) 이행조치계획(Implementation Action Plans; IAPs)을 제시함[4.2-11~4.2-12].

- 2018년 1월 25일 SECY-18-0011를 통하여 이들의 추진현황을 소개함.
 - 6개의 단기 이행조치계획의 수행 활동과 향후 계획(Advanced Reactor Program Status)
- 매년 1월에 추진현황을 SECY 보고서를 통하여 소개함.

(3) 원자력 혁신 및 현대화법

○ 미국 의회는 2019년 1월 14일 상원과 하원에서 “원자력 혁신 및 현대화법(Nuclear Energy Innovation and Modernization Act; NEIMA)”을 제정함[4.2-5].

- 신형원자로의 혁신과 상업화를 가능하게 하는데 필요한 전문성과 규제프로세스를 개발하기 위한 프로그램을 제공함.
- 부정확한 작업량 예측이나 기존 원자로의 조기 폐쇄에 대하여 기존의 허가소지자에게 부당하게 부담을 주지 않으면서 산업계의 요구를 충족할 수 있는 자원의 가용성을 보장하기 위한 수수료 징수구조(Fee Recovery Structure)를 개정함.
- 우라늄 회수(Uranium Recovery)에 대한 보다 효율적인 규제를 제공함.

○ ‘신형로(Advanced Nuclear Reactor)’를 이 법 제정시 건설중인 상용원자로에 비하여 상당히 개선된 핵분열 또는 핵융합원자로로서 원형로를 포함하는 것으로 정의함[4.2-10].

- ‘기술범용 규제체계(Technology-Inclusive Regulatory Framework)’를 다양한 원자로 기술에 적용하기 위하여 유연하고 실행가능한 평가방법을 사용하여 개발된 규제체계로서, 적절한 경우, 위험도정보활용 및 성능기반 기술과 기타 도구 및 방법의 사용을 포함하는 것으로 정의함.
- 신형로의 인허가와 관련하여 5가지를 규정함.
 - 단계적 인허가(Staged Licensing)
 - 위험도정보활용 기반 인허가(Risk-Informed Licensing)
 - 연구용/시험용 원자로 인허가(Research and Test Reactor Licensing)
 - 기술범용 규제체계(Technology-Inclusive Regulatory Framework)
 - 훈련 및 기술역량(Training and Expertise)

(4) 신형원자로 인허가 및 규제에 관한 연방규정(10CFR 53) 제정

○ NRC는 2027년 12월 31일까지 새로운 상용 신형로의 인허가 신청에 선택적으로 사용할 수 있는 ‘위험도정보활용 기술범용 규제체계’의 수립을 위한 일련의 규칙을 제정함[4.2-8].

- 2020년 4월 1일 SECY-20-0032(Rulemaking Plan on “Risk-Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors”)
 - 규칙제정(10CFR 53-Licensing and Regulation of Advanced Nuclear Reactors)을 위한 계획을 수립함.
 - 2020년 10월 2일 위원회의 승인을 받음.
- 규칙제정은 기존 규제(10CFR Part 50 및 10CFR Part 52)의 인허가 프로세스와 구별되거나 추가적으로 신형로의 인허가신청자가 대체 사용할 수 있도록 새로운 프로세스의 개발을 포함함.
 - 경수형 소형모듈원자로, 비경수로, 핵융합로 설계를 포함하는 상용 신형로에 적용하고, 대형 경수로에는 적용하지 않음.
 - 다양한 신형로 기술의 신청에 대하여 위험도정보활용 및 성능기반 방법을 포함하는 유연하고 실행가능한 평가방법을 사용함.
 - 신형로 인허가를 위하여 선택적으로 사용할 수 있는 대체 규제체계(Alternative Regulatory Framework)를 수립하자는 것을 주요 골자로 함.

다. 캐나다

(1) 신형원자로 규제대비 전략

○ 캐나다 원자력안전위원회(CNSC)는 신형원자로 기술을 규제하고 규제 노력의 우선순위를 정하기 위하여 CNSC의 규제대비전략보고서(The Canadian Nuclear Safety Commission’s Strategy for Readiness to Regulate Advanced Reactor Technologies)를 발간함[4.2-13~4.2-14].

- CNSC의 신형원자로 규제 대비전략 목표:
 - CNSC의 기술적 대비, 활동의 우선순위 부여 및 의사결정을 지원
- 대비전략의 3가지 핵심요소:
 - 유연한 규제체계 확립
 - 위험도정보활용 프로세스 적용
 - 충분한 역량과 기술 전문성을 가진 지식과 인력 확보

○ 규제 활동으로 단계적 접근방식과 대안적 접근방식을 고려하고, 규제체계의 우선순위를 부여함.

- 위험도정보활용 프로세스 적용은 사전 인허가 프로세스, 문제 해결 절차 및 정보 처리의 우선순위를 부여

- CNSC와 공급자가 캐나다의 인허가에 필요한 잠재적 규제 및 기술적 문제들을 조기에 식별하고 해결할 수 있도록 함.

(2) 사전 공급자설계검토

○ 공급자의 원자로 설계를 평가하기 위해 제공하는 공급자 사전 공급자설계검토(VDR)는 CNSC의 규제문서(REGDOC-3.5.4)에 상세하게 기술되어 있음.

- VDR은 공급자가 요청할 때 CNSC가 제공하는 선택적 서비스이고 공급자의 원자로 기술을 기반으로 설계 프로세스 초기에 피드백을 제공함.
- 원자력발전소 설계에는 SMR, 신형원자로 또는 전통적인 원자력발전소 설계가 포함됨.
- VDR은 부지 준비나 원자력시설 건설 또는 운영 면허 신청도 아니며, 사업 진행 의향의 표시가 아님.
 - 원자로설계를 인증하거나 원자력 안전 및 통제법에 따른 인허가 발급을 수반하지 않음.
 - 신규 원자력발전소 인허가 절차의 일부로 필요하지 않음.
 - 설계검토의 결론은 위원회의 결정을 구속하거나 영향을 미치지 않음.

○ VDR은 사전 인허가 검토의 일부로 CNSC가 공급자의 원자로 설계를 평가하기 위해 제공하는 선택적 서비스임.

- CNSC는 정해진 작업 범위에 따라 공급자와 서비스 계약을 체결함.
- VDR은 설계 프로세스, 특히 설계 또는 안전 사례에 중대한 변경을 초래할 수 있는 잠재적 규제 또는 기술 문제를 조기에 식별하고 해결함.
- CNSC는 건설허가 신청 및 운영허가 신청 시 설계 및 안전 사례에 대한 상세한 검토를 수행함.
- VDR 평가를 통하여 공급자는 캐나다 규제요건 및 기대치를 이해함.
 - CNSC 규제문서 REGDOC-2.4.2 혹은 RD-367과 적용 가능한 규제문서 및 국가 표준을 준수하는 설계를 개발하도록 지원함.
 - VDR에서 확인된 모든 설계 문제에 대한 해결방안을 개발하도록 지원함.

○ VDR 심사는 세 단계로 이루어지며, 각 단계는 관련 CNSC 규제문서와 캐나다 코드 및 표준에 대하여 수행되며 VDR에 대한 상세한 내용은 REGDOC-3.5.4에 기술됨.

- 1단계(규제요건 준수에 대한 사전 인허가 평가)는 CNSC 규제문서 원자로 시설 설계(REGDOC-2.4.2) 및 소형원자로시설의 설계(RD-367), 기타 모든 관련 CNSC 규제문서 및 캐나다 법규 및 표준에 따라 캐나다의 신규 원자력발전소에 대한 최신 CNSC 설계요건에 대하여 공급자 원자력발전소 설계의 전반적인 평가를 수행함.
- 2단계(인허가에 대한 잠재적인 기본 장벽에 대한 사전 인허가 평가)는 캐나다에 있는 공급자의 원자력발전소 설계 인허가에 대한 잠재적 기본 장벽을 식별하는 데 중점을 두고 추가 세부 사항을 기술함.

- 3단계(후속 조치)는 공급자가 2단계 조사 결과의 특정 측면에 대해 아래와 같이 후속조치(CNSC에서 2단계 주제에 대한 추가 정보 조사, 2단계 완료 후 원자로 설계 준비를 위해 공급자에 의해 요구된 활동을 검토하도록 CNSC에 요청)를 취할 수 있음.

라. 영국

(1) 신형원자로 기술 규제 정책

○ 영국 원자력 규제기관인 원자력규제국(Office for Nuclear Regulation, ONR)은 에너지법에 따라 의회에 보고한 2020~2025 기관전략서에서 제시한 혁신기술수용 규제개혁 이행방안을 2020년 발간함[4.2-15~4.2-16].

- ONR의 규제체제는 목표 설정 방식에 기반하기 때문에 기술중립적이며, 따라서 혁신기술을 수용하기에 구조적으로 용이하며 이미 기술혁신에 많은 기여를 하고 있는 것으로 기술함.
- 산업체, 공급망, 투자자와의 긴밀한 협의를 통하여 원자력 규제가 혁신의 걸림돌이 아니라 선도역할을 할 수 있도록 보다 창조적인 사고와 해결방식을 고양하는 환경을 조성한다고 밝히고 있음.

○ 한편 영국 정부는 4차 산업혁명을 위한 규제혁신 백서를 2019년 발간하여 6가지 규제개혁 방향을 제시하였고, ONR은 정부의 6가지 방향 각각에 대하여 실천적 혁신 방안을 제시함.

- 기술혁신에 대응하여 한발 앞선 규제개혁
- 혁신이 이루어지도록 충분히 유연하고 결과물 중심의 규제체계를 보장
- 더 많은 혁신 실험, 시험, 훈련이 규제 감독하에 이루어지도록 함
- 혁신사업자가 규제방안을 찾을 수 있도록 지원
- 혁신기술 규제 방법에 대하여 사회와 산업체와의 소통
- 혁신제품 및 서비스 교역과 규제장벽 저감을 위하여 해외와 협업

(2) 일반설계평가 프로세스

○ 일반설계평가(Generic Design Assessment, GDA) 프로세스는 정부의 2006년 Energy Review의 권고에 따라 표준설계 원전의 규제경험을 반영하여 개발되어 2007년부터 시행된 부지 인가신청 전 규제 프로세스임.

- 법적 의무사항은 아니나 규제 효율성 제고와 인허가 불확실성을 감소할 수 있기에 제도 도입 이후 신규 원전 사업 예정자는 모두 이를 활용함.
- EDF와 웨스팅하우스는 UK-EPR과 AP1000에 대한 GDC를 신청하여 2012년과 2017년에 심사가 각각

완료되어 설계수락확인서(Design Acceptance Confirmation; DAC)를 발급받음.

- 2013년에는 GE-Hitachi의 ABWR에 대한 GDA 심사가 시작되어 2017년에 완료됨.
- 중국의 HPR1000에 대한 심사가 2017년 시작되어 2022년에 DAC를 발급받음.

○ GDA 지침은 제정 이후 여러 차례 개정되어 오다 2019년에는 정부와 원자력산업체 사이의 정책약정과 급부상하고 있는 신형로 기술을 반영하여 기존의 4단계에서 3단계로 개정한 사업자용 GDA 지침을 새로 발간함.

- 2022년 4월에는 폴스로이스가 개정 GDA에 따라 신청한 경수로형 SMR(470 MW)의 1단계 GDA 심사를 ONR이 착수함.

○ 사업자에게 제공된 GDA 결과물의 유효기간은 10년이지만 어떤 GDA 결과물도 부지 인허가에서 법적 구속력을 갖지는 않음.

- GDA가 현행 원자력 인허가체계에서 법적으로 요구되는 규제사항이 아니며 이것을 거치지 않고도 부지인가 신청이 가능함.
- GDA를 통하여 규제 확실성이 제고되고 이에 따라 프로젝트 리스크가 줄어들 것이기 때문에 사업자는 GDA를 신청함.
- 3단계 결과물인 DAC는 일반 안전·보안자료집의 평가에 근거하여 신청시설이 안전하게 건설 운영될 것이라는 ONR의 확신을 기술함.
- 부지인가본 심사시 DAC가 고려되기 때문에 인허가 효율이 제고될 수 있다. 즉 일반안전·보안자료집 일부가 특정 부지인가 신청 시 제출 자료와 동일할 경우 해당 부분은 더 이상 평가하지 않음.

마. IAEA

(1) 설계안전요건 격차 분석

○ IAEA는 설계안전요건으로 제시하고 있는 SSR-2/1(Rev.1)을 기반으로 현재 개발이 진행되고 있는 소형모듈원자로에 대한 적용가능성을 포함한 격차분석을 수행한 바 있음[4.2-19].

- SSR-2/1은 수냉각로를 대상으로 하는 82개 안전요건으로 구성됨.
 - 판단에 따라 다른 노형에도 적용 가능
- 격차분석은 경수로형 및 비경수로형의 고온가스냉각원자로(HTGR)를 대상으로 함.

○ 경수로형의 경우 격차분석결과 변경이나 해석이 필요한 항목 8개, 추가요건이 필요한 사항 5개, 그리고 다중모듈 호기(Multi-module unit)와 원자로 모듈(Reactor module)에 대한 정의가 추가되어야 하는 것으로 분석함.

- 5개의 추가요건이 필요한 사항 :

- Interconnections among the reactor modules: 모듈 간의 상호 연결이 개개 모듈과 전체 발전소에 위험을 초래하지 않을 것
- Control and protection systems: 한 모듈에서 발생한 사건이 다른 모듈로 전파되지 않도록 제어 및 보호계통을 설치
- Human factors engineering: 다수 모듈 호기에서의 주제어실, 비상대응설비 등 운전원의 역할
- Emergency preparedness and response: 다수 모듈 호기에서의 비상대응 조치
- Capacity for the addition of future modules, plant lay-out and construction: 모듈의 연속적 설치에 따른 발전소 배치와 출력의 확장에 따른 기기의 수용능력

(2) IAEA SMR 규제자 포럼

○ IAEA에서 운용하고 있는 SMR Regulators' Forum은 2015년 3월부터 국제적 전문가로 구성하여 활동 중임[4.2-21].

- 규제현안에 대한 입장 표명, IAEA 문서의 개정/제정에 대한 제안, 규제체계 개선을 위한 규제자 지원 정보 제공, 규제현안의 향후 방향에 대한 보고서 발간, 국제 규격 및 표준의 변경에 대한 제안 등을 포함함.

○ 포럼은 2017년 12월 인허가 현안(Licensing Issues), 설계 및 안전해석(Design and Safety Analysis), 그리고 제작, 시운전, 운전(Manufacturing, Commissioning and Operations) 등 3개의 워킹그룹(Working Groups)을 구성함[4.2-22~4.2-23].

- Interim reports on Key Regulatory Interventions during a Small Modular Reactor Lifecycle
 - IAEA에서 기존의 원자력시설에 대하여 제시하고 있는 7단계의 인허가 프로세스를 SMR에 대하여는 11단계로 구분하여 제시함.
- Interim reports on manufacturability, supply chain management and commissioning of Small Modular Reactors
- Interim reports on Multi-unit/Multi-module aspects specific to SMRs
 - SMR에 특징적인 다수기/다중모듈 관련 안전특성과 관련하여 ①심층방어(Defence in Depth), ②내부 및 외부 재해(Internal and External Hazards), ③초기사건의 선정(Selection of Initiating Events), ④구조물·계통·기기의 공유(Shared SSCs), ⑤다수기/다중모듈 부지의 위험도 평가(Risk Assessment for Multi-Unit/Multi-Module Sites), ⑥인간공학(Human Factors), ⑦비상대응(Emergency Preparedness) 등 7개 현안을 도출하고, 이에 대한 입장을 제시함.

바. OECD/NEA

○ 원자력규제활동위원회(CNRA)는 신형로 규제를 포함하여 6개의 소주제에 대한 활동을 진행 중임[4.2-24].

- 2019년 10월 원자력기술개발경제국이 NEA Steering Committee에서 설명한 소형모듈원자로 정책브리핑 자료를 토대로 ‘SMR의 도전과 기회’가 2021년 발간됨.
 - SMR의 기술 경제적 특성 설명과 함께 인허가규제체제 개선과 규제 프로세스의 국제조화가 강조됨.
- SMR 규제 프로세스의 국제조화는 2020년 12월 전문가 워크숍을 거쳐 2022년에 별도의 문건으로 발간
 - 인허가체제의 개선과 규제 프로세스의 조화(Harmonization)에 대해 논의됨.

(1) SMR 인허가체제 개선

○ NEA는 SMR을 전기 출력 용량이 10 MW에서 300 MW 사이의 원자로로 정의함.

- 연속제작을 통한 경제성 제고를 위하여 더 높은 수준의 모듈화, 표준화, 공장제작 건설 방식을 채택함.
- 더 많은 고유안전 특성 채택과 설계 단순화를 통하여 전반적인 안전성이 크게 향상함.
- 다수모듈 SMR 설계: 공유 계통이 이용되고 제작 건설이 현장에서 공장으로 이전하기 때문에 안전을 위하여 특정한 고려를 요구
- 기존 원전 대비 다양한 변화들에 대한 인허가 영향:
 - 발전소 시험에 영향
 - SMR 인허가 단계에도 영향을 주어 전통적 인허가 접근방식과는 차이가 발생

○ 규제체제는 규제지침의 규정 수준 측면에서 나라마다 크게 상이함.

- 각국은 안전요건이 규제기관의 결정에 대한 대중적 신뢰를 유지하면서 자국의 이익과 관행이 존중되도록 함.
- 주어진 설계에 대한 전 세계 규제기관 간 인허가협력이 가능할 것으로 기대됨.
 - 국제설계평가프로그램(MDEP) 체제는 세계 인허가 협력의 실례 중 하나

(2) 원자력 규제 프로세스의 조화(Harmonization)

○ 원자력 안전이 규제기관의 일차적 목적이지만 비용과 편익을 일정 부문 고려해야 하는 규제자는 안전성과 경제성의 교차점에 서 있는 경우가 종종 발생함[4.2-25].

- 혁신기술이 원전의 경제성과 안전성 제고의 기회를 주지만 디지털 계측, 데이터 보안과 같은 분야에서 알지 못한 새로운 리스크 가능성 있음.
- 혁신의 편익을 취하면서 불필요한 리스크로부터 국민을 보호하기 위해서는 규제자와 사업자가 함께 고민해야 함.

- NEA는 이런 이슈들을 다루기 위하여 2020년 12월 캐나다 CNSC와 공동으로 ‘떠오르는 기술을 위한 원자력 인허가 프로세스의 조화: 세계가 같길’이라는 주제로 워크숍을 개최함.
 - 요건정립, 교훈활용, 조화와 주권의 균형, 국제조화방안 등 4가지 주제에 대해 발표와 논의함.
 - － 혁신 원자력기술 규제프로세스는 이해관계자를 더 빨리 더 자주 관여시키는 방향으로 개선
 - － 독립성과 투명성을 지속하기 위해서는 대중, 규제자, 산업체 간의 신뢰 증진이 필수
 - － 규제 우수성이 유지되려면 기술과 같이 진화하는 규제자가 필요
 - － 글로벌 코드·표준과 국제 규제조화 추진

제 5 장

참고문헌

제5장 참고문헌

- [1.1-1] IAEA, Small and Medium Power Reactors: Project initiation study phase 1, IAEA-TECDOC-347, 1985
- [1.1-2] OECD, NEA, Small and Medium Reactors: I. Status and Prospects, OECD, 1991
- [1.1-3] IAEA, Design and development status of small and medium Reactor systems 1995, IAEA-TECDOC-881, 1996
- [1.1-4] IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to : IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2022 Edition, IAEA, Sep. 2022
- [1.1-5] DOE, SMR Licensing Technical Support (LTS) Program, <https://www.energy.gov/ne/smr-licensing-technical-support-lts-program>, contact with Sep. 2023
- [1.1-6] Steven, Chu, “America’s New Nuclear Option”, Wall Street Journal, March, 23, 2010, quoted in ‘Chu gives a boost for small reactors’ Nuclear Engineering International, March, 24, 2010
- [1.1-7] IAEA, <https://iaea.org/newcenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>, IAEA, contact with Sep. 2023
- [1.1-8] DOE, <https://energy.gov/ne/advanced-small-modular-reactors-smrs>, DOE, contact with Sep. 2023
- [1.1-9] World Nuclear Association (WNA) (2021) ‘Small Nuclear Power Reactors’, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, Updated July 2023.
- [1.1-10] D. T. Ingersoll, Deliberately small reactors and the second nuclear era, Progress in Nuclear Energy, Vol. 51, pp. 589-603, 2009
- [1.1-11] C. A. Lloyd, T. Roulstone, R. E. Lyons, Transport, Constructability, and economic advantages of SMR modularization, Progress in Nuclear Energy, Vol. 134, 2021
- [1.1-12] OECD, NEA, The NEA Small Modular Reactor Dashboard, NEA-7650, 2023
- [1.1-13] OECD, NEA, The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Volume II, NEA-7657, 2023
- [1.2-1] AP300 SMR Flysheet, 23 April 2023, <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap300-smr>
- [1.2-2] “South Korea and Saudi Arabia strengthen cooperation on SMART reactor”, Nuclear Engineering Magazine, 9 January 2020, <https://www.neimagazine.com/news/newssouth-korea-and-saudi-arabia-strengthen-cooperation-on-smart-reactor-7591629>
- [1.2-3] Ilhwan Kim et al, Development of BANDI-60S for a Floating Nuclear Power Plant, Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Goyang, Korea, October 24-25, 2019
- [1.2-4] Seong Gu Kim, Seung Joon Baik, Jangsik Moon, Hwanyael Yu, Yong Hoon Jeong, Yonghee Kim, Jeong Ik Lee, “Conceptual System Design of a Supercritical CO2

- cooled Micro Modular Reactor”, Proceedings of ICAPP 2015, Nice, France, May 3–6, 2015 Paper 15557
- [1.2–5] Ji Hyun Kim, Il Soon Hwang et al, Current Status of Small & Modular Reactor R&D in Republic of Korea, The 17th IAEA INPRO Dialogue Forum on Opportunities and Challenges in Small Modular Reactors, Ulsan, July 3, 2019
- [1.2–6] Jong–Won Kim et al, Design Features of Regional Energy Reactor, REX–10, Transactions of the Korean Nuclear Society Spring Meeting, Jeju, Korea, May 22, 2009
- [1.2–7] Yeon–Gun Lee, Il–Woong Park, Goon–Cherl Park, SBLOCA and LOFW Experiments In a Scaled–down IET Facility of REX–10 Reactor, Nuclear Engineering and Technology, Volume 45, Issue 3, June 2013, Pages 347–360
- [1.2–8] “NuScale submits its SMR for Canadian vendor design review”, Nuclear Engineering, 9 January 2020,
<https://www.neimagazine.com/news/newsnuscale-submits-its-smr-for-canadian-vendor-design-review-7591537>
- [1.2–9] “Doosan heavy Industries to enter small module nuclear power plant business”, Korea IT Times, 24 December 2019,
<http://www.koreaittimes.com/news/articleView.html?idxno=94777>
- [1.2–10] “Bagging DOE Support, Westinghouse Eyes Demonstration for Nuclear Micro–reactor by 2022”, POWER magazine, 28 March 2019,
<https://www.powermag.com/bagging-doe-support-westinghouse-eyes-demonstration-for-nuclear-micro-reactor-by-2022/>
- [1.2–11] “Bechtel and BWXT Quietly Terminate mPOWER Reactor Project”, Forbes, 13 March 2017,
<https://www.forbes.com/sites/rodadams/2017/03/13/bechtel-and-bwxt-quietly-terminate-mpower-reactor-project/>
- [1.2–12] “Consortium established for SMR–160 deployment in Ukraine”, World Nuclear News, 12 June 2019,
<https://world-nuclear-news.org/Articles/Consortium-established-for-SMR-160-deployment-in-U>
- [1.2–13] “GEH & the BWRX–300” David Sledzik, GE Hitachi Nuclear Energy, October 17, 2019
- [1.2–14] “Rolls–Royce plans mini nuclear reactors by 2029”, BBC NEWS, 24 January 2020,
<https://www.bbc.com/news/business-51233444>
- [1.2–15] “An Introduction to the Moltex Energy Technology Portfolio”, January 2018,
https://www.moltexenergy.com/learnmore/An_Introduction_Moltex_Energy_Technology_Portfolio.pdf
- [1.2–16] “Flexblue, Innovative Power,” DCNS, Nuclear Power Asia, Jan. 2013
- [1.2–17] “EDF and Westinghouse in talks to develop SMR nuclear reactor”, REUTERS, 17 September 2019,
<https://www.reuters.com/article/us-edf-nuclearpower-smr/edf-and-westinghouse-in-talks-to-develop-smr-nuclear-reactor-idUSKBN1W21JM>

- [1.2-18] “Canada and USA select molten salt reactor for joint technical review”, Nuclear Engineering International, 6 December 2019,
<https://www.neimagazine.com/news/newscanada-and-usa-select-molten-salt-reactor-for-joint-technical-review-7551906>
- [1.2-19] CNSC Pre-licensing Design Review,
<https://nuclearsafety.gc.ca/eng/reactors/power-plants/pre-licensing-vendor-design-review/index.cfm?pedisable=true>
- [1.2-20] Toshiba 4S. <https://www.americanscientist.org/article/a-nuke-on-the-yukon>
- [1.2-21] “HTGR Brayton Cycle-Technology and Operations”, Xing L. Yan, JAEA, MIT Workshop on New Cross-cutting Technologies for Nuclear Power Plants, Cambridge, USA, January 30-31, 2017.
<https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/2-3.-HTGR-Brayton-Cycle-YAN-MIT-talk-r1-min.pdf>
- [1.2-22] “Russia’s floating Nuclear Power Plant generates electricity on 2019 December 19”, Indian Power Section News, 20 December 2019.
<https://kseboa.org/12/2019/russias-floating-npp-generates-its-first-electricity-on-2019-december-19.html>
- [1.2-23] “Russian floating nuclear plant supplies 10GWh of electricity to Chukotka”, Nuclear Engineering International, 27 January 2020,
<https://www.neimagazine.com/news/newsrussian-floating-nuclear-plant-supplies-10gwh-of-electricity-to-chukotka-7741808>
- [1.2-24] “CNNC launches demonstration SMR project”, World Nuclear News, 22 July 2019,
<https://world-nuclear-news.org/Articles/CNNC-launches-demonstration-SMR-project>
- [1.2-25] “CGN starts construction of offshore reactor”, World Nuclear News, 07 November 2016,
<https://www.world-nuclear-news.org/NN-CGN-starts-construction-of-offshore-reactor-0711164.html>
- [1.3-1] Small Modular Reactor Market Size & Share, by Reactor (HWR, LWR, HTR, FNR, MSR); Connectivity (Grid, Off-Grid); Operation (Stationary, Portable); Location (Land, Marine); Application (Chemical & Petrochemical, Food & Beverages, Mining & Metals, Automotive, Oil & Gas, Power) – Global Supply & Demand Analysis, Growth Forecasts, Statistics Report 2023-2035,
<https://www.researchnester.com/reports/small-modular-reactor-market/4846>
- [1.3-2] Small Modular Reactor Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Type (Thermal-neutron Reactors and Fast Reactors); By Technology; By Deployment; By Application; By Region; Segment Forecast, 2023 - 2032,
<https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/small-modular-reactor-market>
- [1.3-3] Small Modular Reactor Market by Reactor (HWR, LWR, HTR, FNR, MSR), Application (Power Generation, Desalination, Hydrogen Generation, Industrial), Deployment (Single, Multi), Connectivity, Location, Coolant, Power Rating & Region – Global Forecast to 2030,
<https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/small-modular-reactor-market-50>

01546.html

- [1.3-4] Small Modular Reactor Market (By Reactor Type Heavy water Reactor (HWR), Light water Reactor (LWR), Fast neutron Reactor (FNR); By Application: Desalination, Power Generation, Process Heat) – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends, Regional Outlook, and Forecast 2023–2032,
<https://www.precedenceresearch.com/small-modular-reactor-market>
- [1.3-5] Idaho National Laboratory, Global Market Analysis of Microreactors, 2021,
<https://gain.inl.gov/MicroreactorProgramTechnicalReports/Document-INL-EXT-21-63214.pdf>
- [1.3-6] SMR Start, The Economics of Small Modular Reactors, 2021,
<http://smrstart.org/wp-content/uploads/2021/03/SMR-Start-Economic-Analysis-2021-APPROVED-2021-03-22.pdf>
- [1.3-7] OECD NEA, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, 2021,
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_57979/small-modular-reactors-challenges-and-opportunities?details=true
- [1.3-8] OECD NEA, Small Modular Reactors: Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment, 2016,
https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_14924/small-modular-reactors-nuclear-energy-market-potential-for-near-term-deployment?details=true
- [1.3-9] A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors, 2018,
https://smrroadmap.ca/wp-content/uploads/2018/11/SMRroadmap_EN_nov6_Web-1.pdf?x93402
- [1.3-10] National Nuclear Laboratory, Small Modular Reactors Feasibility Study, 2014,
<https://namrc.co.uk/wp-content/uploads/2015/01/smr-feasibility-study-december-2014.pdf>
- [2.1-1] IAEA, Advanced in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, Sep. 2020
- [2.1-2] 한국원자력학회 (2020), 소형혁신원자로 기술조사보고서, 원자로시스템기술연구부회, 2020
- [2.2-1] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, IAEA, 2016
- [2.2-2] Wm. J. Garland, The Essential CANDU, A Text Book on the CANDU Nuclear Power Plant Technology, UNENE, ISBN 0-9730040, 2014.
- [2.2-3] Y. S. Yang, C. H. Shin, T. H. Chun & K. W. Song, Evaluation of a Dual-Cooled Annular Fuel Heat Split and Temperature Distribution, Journal of Nuclear Science and Technology, 2009.
- [3.1-1] 울산과학기술원, 제4세대 소형원전(SMR) 납냉각고속로 개발 동향, 울산시-울산과학기술원 공개자료, 2022년 6월 27일
- [3.1-2] Gen-IV International Forum, “Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems,” OECD/NEA, 2014
- [3.1-3] 울산과학기술원, “수출형 조선해양 초소형원전 표준설계 및 인허가 연구개발 사업기획연구보고서,” 초소형원전 기획TF팀 한국연구재단 제출, 2022년 4월 27일
- [3.1-4] 하이파트너스, “울산 소형원전(SMR) 기업기술수요조사”, 2022년 7월 31일
- [3.1-5] IAEA, “IAEA Report DOC: G4M”, IAEA Advanced Reactors Information System

- (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-6] IAEA, “Advances in Small Modular Reactor Technology Developments 2018 Edition”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-7] Alexander I. Orlov¹, Boris A. Gabaraev, “Heavy liquid metal cooled fast reactors: peculiarities and development status of the major projects”, Nuclear Energy and Technology, Vol. 9, No.1, pp. 1-18, Mar. 2023
- [3.1-8] Gen-IV International Forum, GIF 2020 Annual Report, OECD/NEA, 2020
- [3.1-9] Alemberti A., Frogheri M., Mansani L., The lead fast reactor: demonstrator (ALFRED) and ELFR design [presentation]. In: International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13); 2013 Mar 4-7; Paris, France.
- [3.1-10] IAEA, “IAEA Report DOC: BREST-OD-300”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-11] IAEA, “IAEA Report DOC: SVBR-100”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-12] IAEA, “IAEA Report DOC: ALFRED”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-13] IAEA, “IAEA Report DOC: ELFR”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-14] IAEA, “IAEA Report DOC: ELECTRA”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-15] IAEA, “IAEA Report DOC: SEALER”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-16] J. Wallenius, S. Qvist, I. Mickus, S. Bortot, J. Ejenstam, P. Szakalos, “SEALER: a small lead-cooled reactor for power production in the Canadian Arctic [presentation]”, FR17, Jun 26 - 29, 2017 Yekaterinburg.
- [3.1-17] Gen-IV International Forum, GIF 2021 Annual Report, OECD/NEA, 2021
- [3.1-18] IAEA, “IAEA Report DOC: MYRRHA”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-19] IAEA, “IAEA Report DOC: CLEAR-I”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-20] IAEA, “IAEA Report DOC: PEACER”, IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), <http://aris.iaea.org>
- [3.1-21] 마이크로우라네스, “MicroURANUS는 무엇을 위해 왔을까요?”, 2023년 7월
- [3.2-1] 한국원자력학회 (2020), 소형혁신원자로 기술조사보고서, 원자로서스템기술연구부회
- [3.2-2] World Nuclear Association (WNA) (2021) ‘Small Nuclear Power Reactors’, <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, Updated June 2021.
- [3.2-3] MacPherson, H. G.(1985), “The Molten Salt Reactor Adventure”
- [3.2-4] Engel, J.R.;Bauman, H.F.; Dearing, J.F.; Grimes, W.R.; McCoy,H.E.; Rhoades, W.A. (1 July 1980). "Conceptual design characteristics of a denatured molten-salt reactor

with once-through fueling"

- [3.2-5] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to : IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition, IAEA
- [3.2-6] Latkowski, J. (2021) 'TerraPower's Molten Chloride Fast Reactor (MCFR)', Presentation Material, February 22, 2021.
- [3.3-1] 한국원자력학회 (2020), 소형혁신원자로 기술조사보고서, 원자로서스템기술연구부회
- [3.3-2] World Nuclear Association (WNA) (2021) 'Small Nuclear Power Reactors', <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/small-nuclear-power-reactors.aspx>, Updated June 2021.
- [3.3-3] Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, A Supplement to : IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS) 2020 Edition, IAEA
- [3.3-4] "HTGR Brayton Cycle-Technology and Operations", Xing L. Yan, JAEA, MIT Workshop on New Cross-cutting Technologies for Nuclear Power Plants, cambridge, USA, January 30-31, 2017. <https://energy.mit.edu/wp-content/uploads/2017/02/2-3.-HTGR-Brayton-Cycle-YAN-MIT-talk-r1-min.pdf>
- [3.3-5] World Nuclear News, X-energy formally begins SMR partnership with DOE, 02 March 2021
- [3.3-6] Nuclear Newswire, Partnership supports siting Xe-100 demo in Washington state, 3 April, 2021
- [3.3-7] Reuters, X-energy to go public via \$2 billion blank-check deal, 7 December 2022
- [3.3-8] World Nuclear News, Dow's Seadrift site selected for X-energy SMR project, 11 May 2023
- [3.3-10] World Nuclear News, Doosan to assess manufacturability of Xe-100, 1 September 2021
- [3.3-11] Cameco, X-energy join up to support SMR deployment, World Nuclear News, 17 September 2021
- [3.3-12] World Nuclear News, X-energy TRISO-X fuel to be irradiated at MIT, 15 May 2020.
- [3.3-13] World Nuclear News, Prototype SMR safety system ready for field testing, 2 March 2022
- [3.3-14] Power Engineering, X-energy completes safety system prototype for Xe-100 SMR, 21 December 2022
- [3.3-15] World Nuclear News, X-energy selects constructors of initial Xe-100 reactors, 25 July 2022
- [3.3-16] Nuclear Newswire, Curtiss-Wright, X-energy team up to advance Xe-100 deployment, 21 September 2022
- [3.3-17] Nuclear Newswire, TRISO-X applies for advanced reactor fuel facility license, 12 April 2022
- [3.3-18] Nuclear Engineering International, US NRC accepts TRISO-X's application for fuel fabrication facility, 20 December 2022
- [3.3-19] Oak Ridger, Property transferred to nuclear fuel company, 23 June 2022

- [3.3-20] World Nuclear News, X-energy marks start of construction at US fuel plant, 17 October 2022
- [3.3-21] World Nuclear News, Cold tests completed at first HTR-PM reactor, 20 October 2020
- [3.3-22] World Nuclear News, Hot functional testing of HTR-PM reactors starts, 4 January 2021
- [3.3-23] World Nuclear News, Fuel loading under way at China's HTR-PM, 23 August 2021
- [3.3-24] World Nuclear News, China's HTR-PM reactor achieves first criticality, 13 September 2021
- [3.3-25] Nuclear Newswire, China's HTR-PM demonstration project advances, 16 November 2021
- [3.3-26] World Nuclear News, Demonstration HTR-PM grid connected, 16 December 2021
- [3.3-27] World Nuclear News, China's demonstration HTR-PM reaches full power, 9 December 2022
- [3.3-28] World Nuclear News, Agreements for microreactor deployment in Finland and further afield, 16 December 2022
- [3.3-29] World Nuclear News, Polish-US nuclear cooperation expands to USNC microreactors, 31 March 2023
- [3.3-30] World Nuclear News, Staff car park unveiled as Canadian MMR's planned location, 15 May 2023
- [3.3-31] World Nuclear News, USNC licenses 3D printing for reactor component manufacture, 11 January 2022
- [3.3-32] World Nuclear News, 3D printers to be used in fuel manufacture, 10 March 2022
- [3.3-33] World Nuclear News, Pilot TRISO fuel manufacturing plant opens in Tennessee, 22 August 2022
- [4.1-1] NRC, "Standard Design Approval for the NuScale Power Plant Based on the NuScale Standard Plant Design Certification Application", MIL20247J564, 2020
- [4.1-2] NRC, "Standard Review Plan 13.6", NUREG-0800 13.6.1-3, 2021
- [4.1-3] NRC, "NuScale Design-Specific Review Standard(DSRS) Scope and Safety Review Matrix", ADAMS ML17102A698 50-54, 2017
- [4.1-4] 과학기술정보통신부, 산업통상자원부 "혁신형소형모듈원자로(i-SMR) 기술개발사업 기획보고서", 372~373, 2022
- [4.1-5] M.M. Doane (NRC), "Options and Recommendations for Physical Security for Advanced Reactors", SECY-18-0076, 2018
- [4.1-6] CNSC, "Nuclear Security Regulations", SOR/2000-209, 2015
- [4.1-7] WINS, "Security of Small Modular Reactors", Workshop Report, Vienna, 2019
- [4.1-8] NuScale, "Gap Analysis Summary Report", NP-RP-0612-023, 2012
- [4.1-9] NRC, "Potential Policy, Licensing, and Key Technical Issues for Small Modular Nuclear Reactor Designs", SECY-10-0034, 2010
- [4.1-10] NRC, "NuScale Design-Specific Review Standard(DSRS) Scope and Safety Review Matrix", ML17102A698, 2017
- [4.1-11] NRC, "Final Safety Evaluation Report for NuScale Standard Plant Design

- Certification Application”, ML1919A196, 2020
- [4.1-12] Canadian Small Modular Reactor Roadmap Steering Committee, “A Call to Action: A Canadian Roadmap for Small Modular Reactors”, 2018
- [4.1-13] CNSC, “Design of Reactor Facilities: Nuclear Power Plants” REGDOC-2.4.2, 2014
- [4.1-14] CNSC, “Stakeholder Workshop Report: Periodic Review of the Nuclear Security Regulations”, 2017
- [4.1-15] CNSC, “Nuclear Security Regulations” SOR/2000-209, 2015
- [4.1-16] IAEA “Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facility”, INFCIRC/225/Rev.5, 2011
- [4.1-17] 원자력안전위원회, “원자력시설등의 방호 및 방사능방재 대책법” 제1조(목적), 제2조(정의), 제9조(물리적방호에 대한 원자력사업자의 책임), 2022
- [4.1-18] DOS, “Security by Design in the United States”, Bureau of International Security and Non-proliferation, 2012
- [4.1-19] M. Snell, C. Jaeger, C. Scharmer, S. Jordan, K. Tanumna, K. Ochiai, T. Iida, “Security by Design Handbook”, SAND2013-0038, 2013
- [4.2-1] KINS/RR-2101, 중소형원자로 심사기반 마련을 위한 기술현황분석 보고서, 2020.12.31
- [4.2-2] KINS/HR-1890, 국내외 SMR 관련 규제동향 조사를 통한 DB 구축, 2022.12.31
- [4.2-3] Small Nuclear Power Reactors, World Nuclear Association, 2020.8
- [4.2-4] IAEA, Advances in Small Modular Reactor Technology Developments, 2020
- [4.2-5] 미국의회, Nuclear Energy Innovation and Modernization Act, Public Law 115-439 115th Congress, January 14, 2019
- [4.2-6] USNRC, Potential Policy, Licensing, and Key Technical Issues for Small Modular Nuclear Reactor Designs, SECY-10-0034, March 28, 2010
- [4.2-7] USNRC, Advanced Reactor Program Status, SECY-18-0011, January 25, 2018
- [4.2-8] USNRC, Rulemaking Plan on “Risk-Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors”, SECY-20-0032, April 13, 2020
- [4.2-9] USNRC, Policy Statement on the Regulation of Advanced Reactors: Final Policy Statement, 73 Federal Register 60,612~60,616, October 14, 2008
- [4.2-10] USNRC, NRC Vision and Strategy: Safely Achieving Effective and Efficient Non-Light Water Reactor Mission Readiness, ML16356A670, December 2016
- [4.2-11] USNRC, NRC Non-Light Water Reactor Near-Term Implementation Action Plans, ML17165A069, July 2017
- [4.2-12] USNRC, NRC Non-Light Water Reactor Mid-Term and Long-Term Implementation Action Plans, ML17164A173, July 2017
- [4.2-13] CNSC, The Canadian Nuclear Safety Commission’s Strategy for Readiness to Regulate Advanced Reactor Technologies
- [4.2-14] CNSC, RD-367 Design of Small Reactor Facilities
- [4.2-15] ONR, New Nuclear Power Plants: Generic Design Assessment Guidance to Requesting Parties, ONR-GDA-GD-008 Revision 0, October 2019
- [4.2-16] ONR, Approach to regulating innovation, September 2020
- [4.2-17] Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Regulation for the Fourth Industrial Revolution, June 2019

- [4.2–18] Department for Business, Energy & Industrial Strategy, Nuclear Sector Deal, June 27, 2018
- [4.2–19] IAEA, Safety of Nuclear Power Plants: Design, IAEA Safety Standards Series No. SSR–2/1(Rev. 1), February 2016
- [4.2–20] IAEA, Applicability of Design Safety Requirements to Small Modular Reactor Technologies Intended for Near Term Deployment, TECDOC–1936, December 2020
- [4.2–21] IAEA, Key Regulatory Interventions during a Small Modular Reactor Lifecycle, Small Modular Reactors Regulators’ Forum: Licensing Issues Working Group, INTERIM REPORT, December 15, 2019
- [4.2–22] IAEA, Phase 2 REPORT, Small Modular Reactors Regulators’ Forum: Working Group on Manufacturing, Construction, Commissioning and Operation, June 2021
- [4.2–23] IAEA, Multi–unit/Multi–module aspects specific to SMRs, Small Modular Reactors Regulators’ Forum: Design and Safety Analysis Working Group, INTERIM REPORT, December 15, 2019
- [4.2–24] OECD–NEA, Small Modular Reactors: Challenges and Opportunities, 2021
- [4.2–25] OECD–NEA, Harmonizing Nuclear Licensing Process for Emerging Technologies: A Global Path Forward, 2022

맺음말

향후 원전시장은 용도, 지역특성 등에 따라 대형원전 시장과 소형원전 시장으로 차별화될 것으로 예상됩니다. SMR은 대형원전 대비 우수한 안전성, 비교적 낮은 건설비, 초기투자 용이성, 다양한 활용성, 설치지역 유연성, 기존 전력망 활용 가능성 등으로 인해 수요 확산이 기대되고 있어 세계의 다양한 전문기관에서도 SMR 시장에 대해 긍정적인 예측을 제시하고 있습니다. 이에 따라 SMR이 부각되는 세계 원전 시장에서 우위를 점하기 위한 개발경쟁이 심화되고 있는 가운데 SMR 개발 선진국들은 자국 내 첫호기 건설을 발판으로 해외시장을 공략하고 있으며, 정부의 다양한 지원을 받으면서 수출경쟁력을 강화하고 있습니다. 대형원전에 비해 상대적으로 사업위험이 적은 SMR의 경우 상업적 경쟁력이 성패를 좌우하는 시장이 주로 형성될 가능성이 높으며, 상업적 프로젝트의 성격이 더욱 강해질 것입니다. 특히, 미국, 캐나다, 유럽 등 원자력 관련 제반 인프라가 잘 구축되어 있는 지역에 건설되는 SMR 사업의 경우 정부의 지원을 받는 민간기업 주도로 진행되고 있으며, 이러한 사업은 저위험 및 사업성공에 대한 기대로 우리나라의 민간기업도 적극적인 투자를 하고 있습니다.

우리나라는 원전의 지속적인 국내건설 및 해외수출을 통해 대용량 가압경수로 분야에서 세계 최고 수준의 경쟁력을 가지고 있으며, 소형 경수로 기술분야에서도 우수한 경쟁력을 가지고 있습니다. 또한 비수냉각형 원자로 분야에서도 향후 기술검증과 실용화에 적극적으로 나서서 고유 핵심기술을 확보해야 할 것입니다. 국내 SMR 개발은 민간기업이 주도하기는 아직 어려운 상황입니다. 우선은 정부-공공기관-민간기업 협력을 통해 기술개발과 사업을 추진하고 민간기업의 역량을 키우는 것이 필요하며, 장기적으로 민간기업의 주도적 역할 수행을 위한 국내 원자력사업 체계에 대한 논의도 필요할 것입니다.

현재 해외에서 약 80종 이상의 SMR이 개발되고 있으나, 대부분이 기술 개발 초·중기 단계이고, 인허가성, 경제성, 안전성 등에 불확실성을 내포하고 있으므로 빠른 시일 내에 건설되어 실증된 원자로가 향후 시장에서 살아남을 수 있을 것으로 판단됩니다. 특히, 잠재적인 SMR 도입국들이 실증 경험을 요구하고 있어 국내 개발 SMR의 첫 호기 건설·실증 방안에 대한 논의도 필요할 것입니다. 더 나아가 우리나라 원전 산업계가 수출시장 개척으로 한 단계 도약하는 성장동력을 창출하고, 상품성 있는 기술 확보 및 경쟁력 있는 비즈니스 모델 창출을 위한 지속적인 노력을 통해 새로운 블루오션인 소형원전 시장을 주도할 수 있는 능력을 확보해야 할 것입니다.

주 의

1. 이 보고서는 한국원자력학회 원자로시스템기술연구부회에서 연구부회 학술활동의 일부로서 발간한 공개 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 한국원자력학회에서 시행한 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 보고서의 특성상 인용 또는 활용 시점에 따라 보고서에 기술된 내용의 변화가 있을 수 있으며, 학회 회원 및 비회원의 본 보고서 활용 및 인용에 따른 책임은 활용자 또는 인용자에게 있음을 밝힙니다.