

제4세대 원자로 개발 동향

KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터
윤정길 선임연구원(jayun2014@kdb.co.kr)

I. 원자력발전의 변천

III. 제4세대 원자로 개발을 위한 과제

II. 제4세대 원자로 개발 동향

원자력 발전 시스템은 1950년 상업적 이용을 시작으로 시대 변화와 요구에 따라 기술적 진보를 거듭하여 진화해왔다. 현재는 2030년 이후를 겨냥한 혁신 개념의 원자력 시스템이 개발되고 있는데 이를 제4세대 원자로(GenIV)라 한다. 냉각재로 물을 사용했던 3세대의 경수로형과 달리 제4세대 원자로는 다양한 물질을 냉각재로 사용하며 비(非)경수로형 원자로라고도 불린다.

높은 안전성, 경제성, 지속가능성 등의 기술적 목표로 개발중인 4세대 원자로는 우리나라를 비롯 미국, 프랑스, 일본 등 원자력선진국 11개국으로 결성된 「제4세대원자력시스템 국제포럼(GIF)」을 통해 국제 공동 연구개발로 추진하고 있으며, 우리나라는 GIF에서 제시된 6개 개념 노형 중 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스로(VHTR)의 개발과 함께 최근 용융염원자로(MSR)의 원천기술을 개발 중이다.

소듐냉각고속로(SFR)는 우리나라의 주요 현안인 사용후핵연료 처리 문제를 해결할 수 있는 기술로 주목받고 있으나, 원자로 제어와 경제성 문제를 해결해야 하며 정치·외교적 요소가 작용하는 이슈도 있다. 초고온가스로(VHTR)는 수소생산, 산업 공정열 제공 등 다양한 산업에 활용이 가능한 원자로로, 초고온 소재 개발 등이 필요한 상황이다. 용융염원자로(MSR)는 냉각재와 핵연료를 일체화된 용융염 형태로 활용하며 소형화가 가능하여 해양, 우주, 선박 등 소규모 분산 전원용으로 활용이 가능한 원자로로 높은 열과 부식을 견딜 수 있는 재료와 용융염 물성 연구가 진행 중이다.

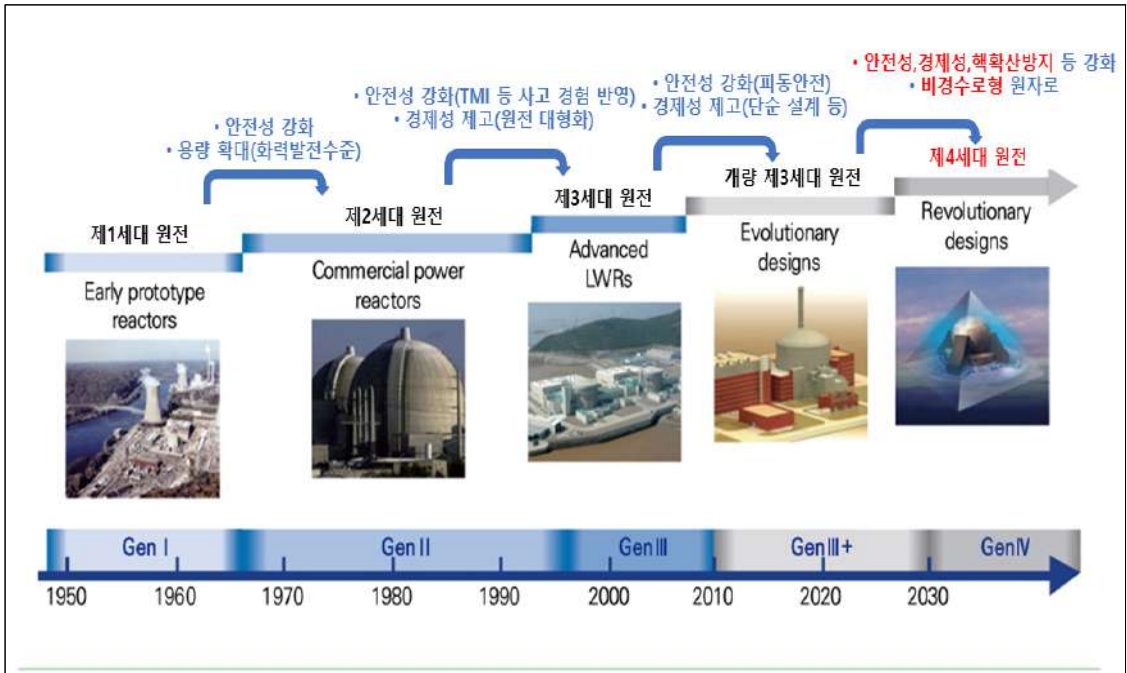
제4세대 원자로는 안정적인 전력 공급뿐만 아니라 무탄소 발전, 사용후핵연료 감소, 분산 에너지원으로서의 활용, 대량의 열에너지를 활용한 수소생산 등 장점이 많으므로, 이를 적극 활용할 수 있도록 경쟁력을 확보해야 할 것이다.

* 본고의 내용은 집필자 견해로 당행의 공식입장이 아님

I. 원자력발전의 변천

- 원자력 발전 시스템은 시대 변화와 요구에 따라 기술적 진보를 거듭하며 더욱 안전하고 경제적인 원자로를 향해 진화를 거듭 중
- 1950년대 초기 군사용 원자로를 상업용으로 이용하며 제1세대가 시작된 이래 안전성, 경제성, 핵비확산성, 지속 가능성 등을 높이는 방향으로 발전해 왔으며 현재의 3세대 및 3.5세대보다 더 진보한 제4세대(GenIV)¹⁾ 원자로가 개발 중
 - 4세대 원자로의 기술적 목표는 높은 안전성(Safety and Reliability), 경제성(Economics), 지속가능성(Sustainability)과 핵확산 저항성 및 물리적 방호(Proliferation Resistance and Physical Protection)

<그림 1> 원자력발전의 변천사



자료 : www.gen-4.org 등 내용 재구성

1) 2001년 7월 제4세대 원자로(GenIV) 개발 협력을 위해 미국을 중심으로 국제 협력체 GIF(GenIV International Forum)가 결성되었고, 2002년 소듐냉각고속로(SFR), 초고온가스(VHTR), 납냉각고속로(LFR), 초임계압수냉각로(SCWR), 가스냉각고속로(GFR), 용융염원자로(MSR) 총 6개 노형을 제시

- 4세대의 가장 큰 기술적 특징은 “냉각재*”로, 물(Water)을 냉각재로 사용한 3세대 경수로형과 달리 액체금속(Liquid Metal), 가스(Gas), 염(Salt) 등 그 외 다양한 물질을 냉각재로 사용하는 비(非)경수로형 원자로라는 점임

* 핵분열시 고온의 핵연료를 냉각시키며 생산된 열에너지를 운반하는 매체

- 냉각재로 물 이외의 다양한 물질을 사용함으로써 높은 경제성과 안전성을 기대할 수 있음
- (높은 경제성) 3세대 대비 더 높은 온도에서 운전이 가능하여 높은 발전 효율 달성이 가능하며, 3세대는 가압을 위한 추가적인 전력이 필요한 반면, 4세대는 대기압에서 운전이 가능하여 추가전력 등이 필요 없음
 - (높은 안전성) 3세대는 가압을 통해 온도를 올리는 구조로 사고발생시 가압에 따른 추가적인 안전설비²⁾를 갖춰야하는 반면, 4세대는 압력차에 의한 방사성 물질 누출 우려가 상대적으로 적고, 안전설비가 비교적 단순

〈표 1〉 경수로형(3세대)과 비경수로형(4세대) 노형 비교

구분	경수로형(제3세대)	비경수로형(제4세대)		
	가압경수로(PWR)	소듐냉각고속로(SFR)	초고온가스냉각로(VHTR)	용융염원자로(MSR)
중성자	열중성자	고속중성자	열중성자	열중성자
냉각재	물(H ₂ O)	소듐(Na) [금속액체]	헬륨가스(He) [기체]	용융염
감속재	물(H ₂ O)	없음	흑연	흑연
핵연료	저농축우라늄 산화물연료	저농축우라늄 산화물 또는 금속연료	피복입자(Triso)	액체연료
운전온도	~330°C	~ 550°C	~950°C	~700°C

자료 : 에너지경제연구원(2021) 자료 내용 재구성

2) 후쿠시마 제1원전(3세대 원자로) 사고의 경우 전원 상실 등으로 원자로 냉각시스템이 제대로 작동하지 않아 원자로의 열이 격납용기로 방출되면서 내부 압력이 증가하게 되었고, 지속된 고온, 고압 상태로 배관 등 손상이 발생했으며 이로 인해 수소가스가 원자로 건물 내부로 누출된 후 원자로 건물 상부에 모여 폭발을 일으켰을 가능성이 높음.

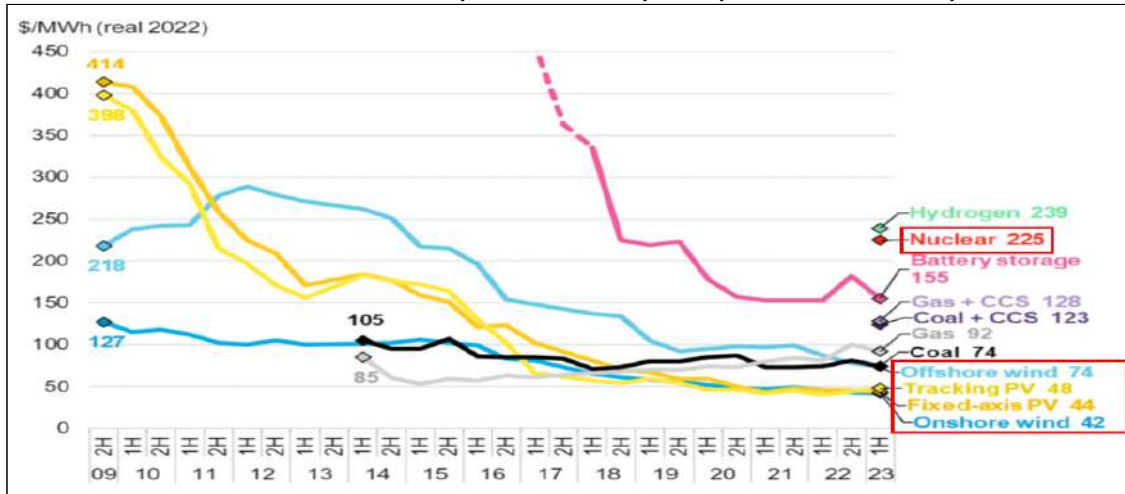
- **현재 원자력은 재생에너지 대비 높은 균등화발전비용(LCOE)*에도 불구하고, 4세대 원자로의 높은 안전성과 경제성, 다목적 활용성 극대화 등의 장점으로 대형원전, 소형모듈원자로(SMR)**, 초소형원자로(MMR)**까지 활용이 가능한 미래형 원자로의 장점을 보유**

* 균등화발전비용(Levelized Cost of Electricity) : 전력을 생산하는 준비단계부터 생산 이후 단계까지 모든 비용을 감안해 책정한 단위 전력량당 발전 비용

** SMR³⁾과 MMR⁴⁾은 출력용량을 기준으로 대형원전과 구분되며 단순화한 시스템과 운전 인력의 최소화 등으로 경제성, 안전성을 더욱 향상시킨 차세대 원자로. 현재 국내에서는 3세대 경수로형 SMR(i-SMR)이 개발 중이나 전 세계적으로 4세대 비경수로형 SMR 개발도 활발히 진행 중

- 원자력은 현재 재생에너지 대비 균등화발전비용(LCOE)⁵⁾이 높아 발전량 대비 비용이 높은 상황이나, 생산한 에너지의 가치는 비용 측면뿐만 아니라 전력 시스템의 신뢰도(Reliability), 복원력(Resilience) 등의 요소도 포함하여 결정됨
- 풍력, 태양광 등 재생에너지가 가지는 간헐성과 지역 편차성을 원자력은 안정적 전력 공급으로 보완할 수 있으며, 날씨에 대한 복원력 역시 우수함

〈그림 2〉 발전원별 LCOE(균등화발전비용) 비교('23.1Q 글로벌 기준)



자료 : BloombergNEF(2023), '1H 2023 LCOE update'

- 3) SMR : Small Modular Reactor, 출력용량 300MWe 이하의 소형 원자로
- 4) MMR : Micro Modular Reactor, 출력용량 10MWe 이하의 초소형 원자로
- 5) 한국의 경우, 원자력(약 \$20/MWh) LCOE가 태양광(약 \$56~57/MWh), 풍력(약 \$56/MWh, 육상기준) 등 재생에너지 LCOE보다 낮은 편(IEA, 'Projected Costs of Generating Electricity', 2020)

- 4세대 원자로는 전력 생산 외 다양한 에너지 서비스를 제공할 수 있으며, 특히 대량의 열에너지 생산을 통한 여러 유용한 용도로의 활용이 가능
- 원자력 발전으로 생산된 전기나 열에너지를 활용하여 수소생산, 공정열, 시멘트 생산 등에 활용가능

〈표 2〉 4세대 원자로가 생산에 기여할 수 있는 분야

산업용제품	기술 완성도	온도 범위(°C)
수소	대표적인 수전해 기술인 고분해 전해질(PEM)과 고체산화물(SOEC) 외에 고온 열화학 분해를 활용한 수소 생산시 제4세대 원자로의 열이 적용되기 용이	~100(PEM) 500~1,000(SOEC) 500~2,000(열화학분해)
고온공정열	암모니아 합성, 증기매탄개질에 고온공정열 필요	> 500
저온공정열	종이, 펄프 제조 및 다양한 공정 등에 저온공정열 필요	~ 300
철강생산	철광석 펠릿(pellet, 탄소배출저감을 위한 주요 원료)을 약 850°C로 예열하기 위한 열에너지가 필요.	~ 850
시멘트생산	석회석 함유 원료를 변환하기 위한 열 제공	600 ~ 1,450

자료 : National Academies(2023)

□ 국내외 원전 주요국은 제4세대 원자로 개발을 위해 많은 예산과 노력을 투입, 장기간 연구를 수행하며 기술 개발 노력 중

- 미국, 프랑스 등 원전 주요국은 기존 대형원전의 기술력을 바탕으로 오랜 연구 개발의 결과 현재 제4세대 노형 중 소듐냉각고속로(SFR)⁶⁾, 초고온가스로(VHTR)⁷⁾ 등 실증 사업을 진행 중

〈표 3〉 4세대 원자로 기술 선도국 연구개발 현황

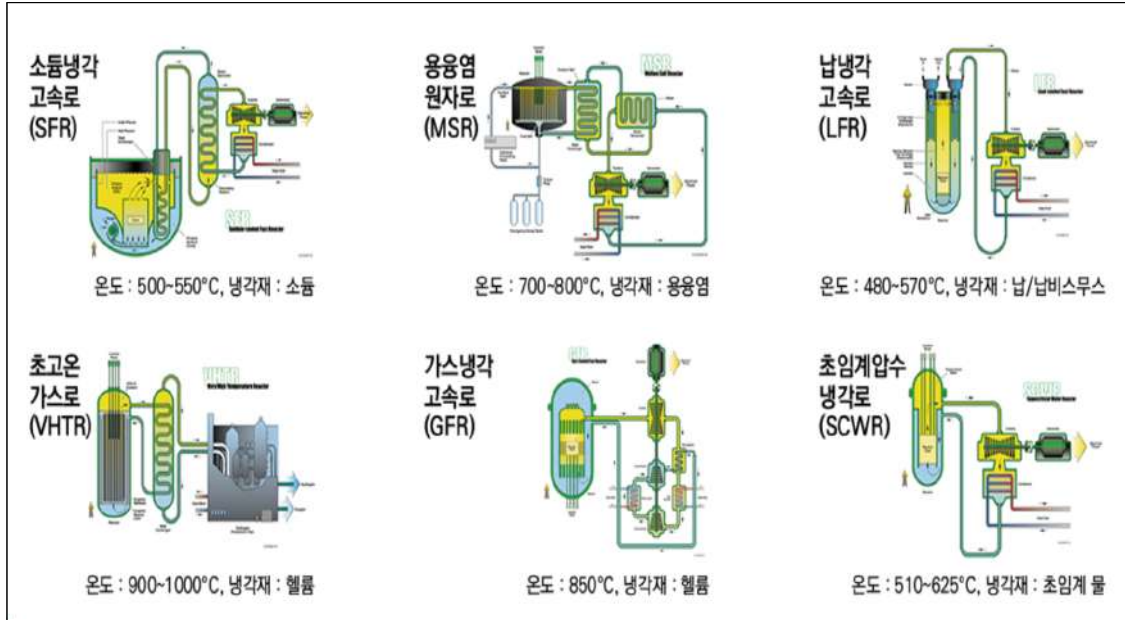
국가	개발 현황
미국	- 에너지청(DOE)은 '22년 제4세대 원자로 실증사업 예산으로 \$2.5억 배정 - 정부가 지원하고 민간 기업이 기술개발을 주도하는 형태 - X-energy社의 'Xe-100', TerraPower社의 'Natrium'이 실증사업으로 선정
프랑스	- SFR(소듐냉각고속로) 실증에 대한 기술과 노하우를 보유 · '73년 실증로인 Phenix, '85 상용로 Super-Phenix 운전 경험 보유
러시아	- SFR 실험로(BOR-60), 원형로(BN-600), 실증로(BN-800) 운영 중 - 새로운 다목적 SFR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

자료 : 한국산업기술진흥협회 내용 재구성

6) SFR : Sodium-Cooled Fast Reactor

7) VHTR : Very High Temperature Reactor

〈그림 3〉 제4세대 원자로(Gen IV)의 6개 노형 개념도



자료 : 한국산업기술진흥협회

- 국내의 경우 4세대 원자로는 지속성, 안전성, 경제성, 핵확산 저항성 측면에서 기술이 앞선 소듐냉각고속로(SFR)과 초고온가스로(VHTR), 용융염원자로(MSR)⁸⁾ 개발에 집중하여 기술개발 중
 - 소듐냉각고속로(SFR) 기술은 파이로프로세싱* 기술과 연계하여 국내 사용후 핵연료 문제를 해결할 수 있는 해법으로 제시되었으며 '20년에 공학적 설계를 완료함
 - * 사용후핵연료 중 연료로 다시 사용할 수 있는 물질을 별도 분리하여 재사용이 가능하게 만드는 기술로 이론상 사용후핵연료의 부피를 1/20수준으로 감소 가능
 - 초고온가스로(VHTR) 기술은 '04년부터 수소경제시대를 대비하여 연구를 수행하고 있으며 '19년 출구온도 750°C 고온 가스ro 개념설계 사업 착수가 가능한 기술 수준에 도달
 - 용융염원자로(MSR) 기술은 100MW급 해양 MSR 원천기술개발을 위해 총 사업비 290억원을 투입하여 '26년까지 개념설계 완료, '30년까지 인허가 진행하는 것을 목표로 국가지원사업 진행 중

8) MSR : Molten Salt Reactor

II. 제4세대 원자로(Gen IV) 개발 동향

1. 사용후핵연료 처리의 대안, “소듐냉각고속로(SFR)”

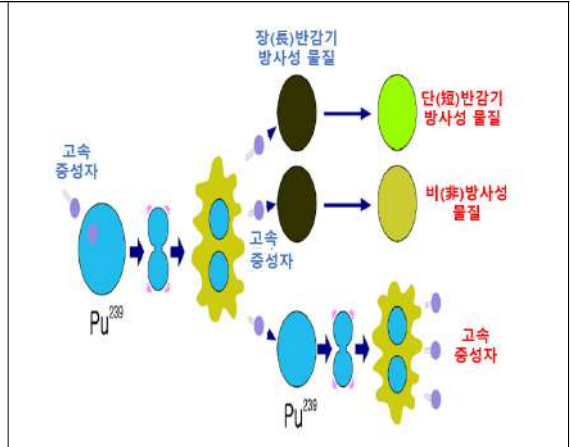
- (원리) 냉각재로 액체 소듐(Sodium)을 사용하고 경수로에 비해 높은 에너지를 갖는 고속중성자의 핵분열 반응을 이용하는 원자로
- (냉각재 소듐) 소듐(나트륨)은 지구에서 6번째로 많은 금속 원소로 약 98℃에서 녹고, 약 883℃에서 비등하여, 대기압 조건에서 고온(500~550℃)운전을 통해 높은 열효율 달성 가능
- (고속중성자) 고속중성자*를 이용하여 사용후핵연료**에 포함된 고(高)독성·장(長)수명 핵종을 핵분열시켜 단수명 또는 안정된 핵종으로 변환이 용이
 - * 핵분열에서 방출된 2MeV의 에너지를 가진 중성자로, 이를 감속재에 의해 속도를 느리게 하면 0.1eV이하의 에너지를 가진 열중성자가 됨
 - ** 우라늄(²³⁵U 및 ²³⁸U)만 포함된 핵연료의 핵분열 반응 이후에는 세슘(Cs), 스트론튬(Sr) 등의 높은 방사능 및 열을 방출하는 핵분열 생성물(FP, Fission Products)과 플루토늄(Pu) 등 우라늄보다 더 무거운 초우라늄원소(TRU, Transuranic Elements)가 생김

<그림 4> 액체 소듐 금속



자료 : www.whatisnuclear.com

<그림 5> 장수명핵종 핵변환원리



자료 : 한국원자력연구원(KAERI) 자료 재구성

□ (장점) 현재 가동중인 경수로로는 핵연료를 한 번 사용하고 처분하는데 비해, SFR은 사용한 연료를 재활용함으로써, 우라늄 이용률을 최대로 올릴 수 있음

- 높은 에너지의 고속중성자를 이용한 핵종변환 기술과 재처리(파이로) 기술을 활용한 사용후핵연료 관리기술을 통해 핵연료의 순환형 원자력 시스템 가능
 - 건식재처리 공정을 통해 사용후핵연료에 포함된 초우라늄원소(TRU)를 분리·회수하여 SFR의 핵연료로 제조 후 재사용하여 핵종 변환에 의해 소각
 - 핵폐기물의 부피를 1/20정도로 줄일 수 있으며, 고속로로 재사용하면 가압 경수로 기준 30만 년의 폐기물 반감기를 300년 정도로 줄일 수 있음

〈그림 6〉 파이로프로세싱(Pyroprocessing) 공정도



자료 : 한국원자력연구원(KAERI) 자료 재구성

- 국내는 '23.1월 제10차 전력수급기본계획'을 통해 원전 발전량 확대에 따른 향후 사용후핵연료 포화시점이 기존대비 1~2년 단축될 전망으로 사용후핵연료 처분시설 확보 등 관리방안에 대한 중요성이 강조되고 있음

〈표 4〉 제10차 전력수급기본계획 반영 사용후핵연료 포화시점

구분	고리 (경수로)	한빛 (경수로)	한울 (경수로)	새울 (경수로)	신원성 (경수로)	월성 (중수로)
제10차 전력수급기본계획 기준	'32년	30년	31년	66년	42년	37년

자료 : 산업통상자원부

9) '23.1월 제10차 전력수급기본계획'에 1. 계획기간 내 운영허가 만료 설비의 계속운전 2. 신한울 3,4호기 준공(각 2032, 2033년) 3. 원전 총 32기 가동(영구정지 원전 2기 포함) 등을 반영

□ (단점) 소듐은 물·산소와의 높은 반응성으로 불안정하며 사고위험성이 높고, 취급이 까다로워 건설·운영 비용이 높은 편임

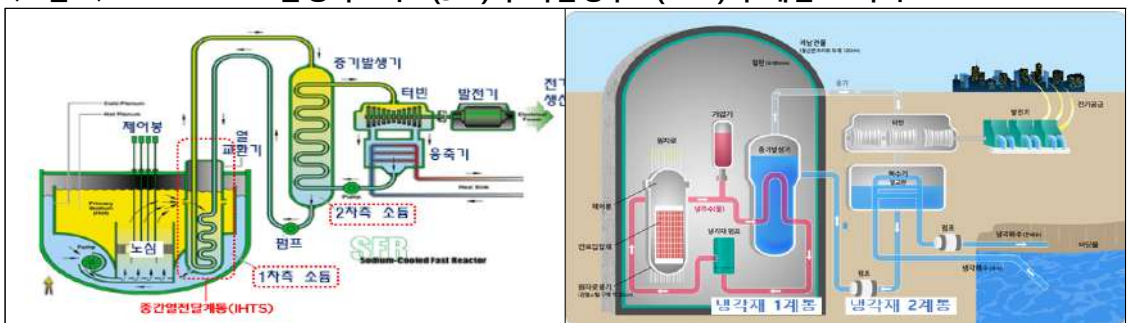
○ (원자로 제어 문제) 고속증식로에 사용되는 액체금속 냉각재는 수은, 소듐, 나트륨-칼륨 합금, 납 등이 있는데 액체금속은 물과 달리 사용 경험이 적어 유지관리에 어려움

- 수은의 경우 유독하고, 납은 녹는점과 끓는점이 높아 유지관리가 어려웠으며, 나트륨-칼륨의 경우 공기 혹은 물과 접촉시 폭발 위험이 있음
- 일본 몬주 고속증식로의 경우에도 국비 1조엔(약 10조원)이 소요되었으나, 냉각재(나트륨) 누출 사고 등 관리의 어려움으로 '16년 폐로 결정되었으며 '47년까지 총 3천7백억엔(약3조7천억)이 추가적으로 발생할 예정

○ (경제성 문제) 연료의 재활용이 SFR의 큰 장점이나 발전시 연료비의 비중이 그다지 크지 않으며, 소듐의 취급 주의로 건설단가가 높은 편임

- 고속증식로는 연료의 활용도를 높이는 방식이나 실제 원자력 발전에서 연료비의 비중은 총 건설비의 약 9~10%정도로 낮은 편임
- 또한, 우라늄의 채굴지가 추가로 발견되는 등 우라늄 고갈 우려가 줄어들고 있어 우라늄 매장량 한계에 대한 대안으로서의 SFR개발이 매력에 덜 해짐
- '22.5월 중국은 200만t이상¹⁰⁾의 추정 매장량을 가진 광상 발견을 발표
- 소듐(Na)은 물,공기와 접촉시 폭발·화재의 가능성이 있어 취급에 주의해야 하며 이를 위해 SFR에서는 소듐을 2계통으로 분리해야하며, 중간계통까지 총 3계통으로 안전설계가 복잡하여 건설비도 매우 비싼 편임

<그림 7> 소듐냉각고속로(SFR)과 가압경수로(PWR)의 개념도 차이

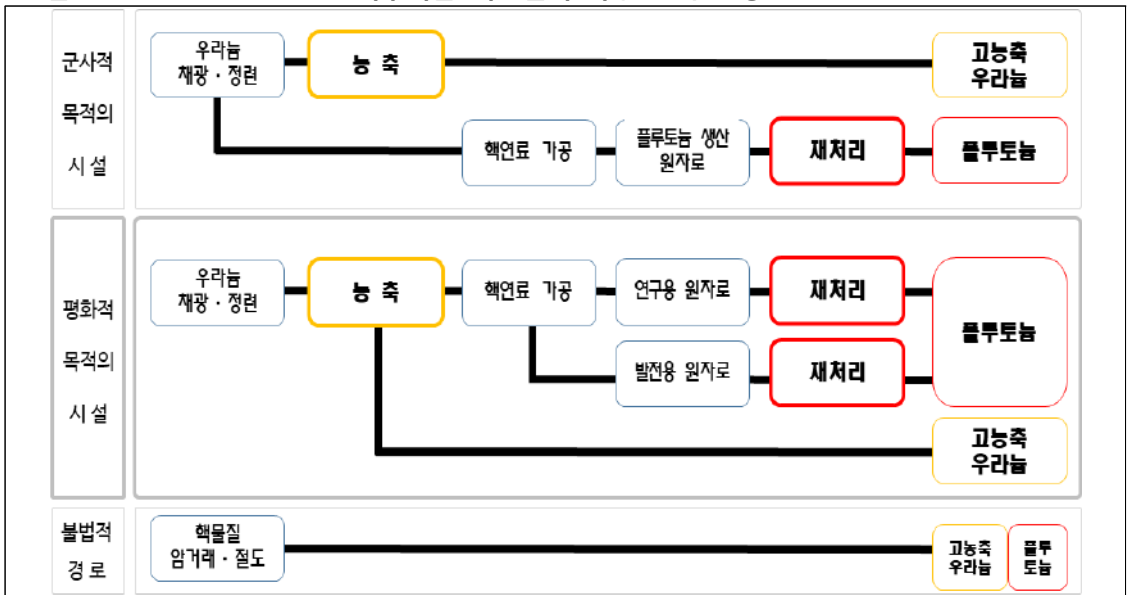


자료 : Gen.IV International Forum, 'Generation IV Systems' 등

10) 2021년 전세계 확인된 우라늄 매장량(Identified Resources)은 약 792만톤 수준(IAEA, NEA기준)

- (주요 이슈) 국가별 사용후핵연료 관리정책에 대해서는 정치·경제·외교적 요소 등을 종합적으로 고려해야 하는 복잡한 문제로 SFR은 이런 국가 정책 결정을 위한 기술 옵션 중 하나로 제시되고 있음
- (플루토늄 생산 및 핵연료 재처리 문제) 고속증식로의 연료인 플루토늄은 핵연료 재처리라는 기술을 필요로 하며 이는 국제 핵비확산체제(International Nuclear Non-Proliferation Regime)下에서 민감기술임
 - 사용후핵연료의 재처리(Reprocessing) 기술은 우라늄 농축기술과 더불어 핵무기를 제작하기 위한 핵심기술로 플루토늄은 핵무기 재료로 전용이 가능
 - 국제조약에 따라 영국, 프랑스, 러시아, 중국 등 일부 국가에서만 재처리를 허용하고 있음
 - 우리나라는 그동안 재처리가 허용되지 않았으나, '15년 한·미원자력협력 협정을 통해 건식재처리법(파이로프로세싱)에 대한 연구활동과 위탁재처리 허용
 - 한·미원자력협력협정상 파이로프로세싱 공정 중 전해환원 공정까지만 허용되며 이후의 우라늄과 플루토늄을 추출하는 전해정련, 전해제련 공정은 한미 공동연구로 진행 중[그림6참조]

<그림 8> 핵무기급 핵물질의 가능한 확보 방법



자료 : 한국원자력연구원(1998), '국제 핵비확산 체제의 의미와 구성' 내용 재구성

2. 수소생산, 공정열 등 고열의 다양한 활용, 초고온가스로(VHTR)

□ (정의) 세라믹 피복입자 핵연료를 사용하고 흑연 감속재와 헬륨 냉각재를 사용하는 원자로

○ (핵연료) 고온가스로의 핵분열생성물을 가두어 둘 수 있는 미세 피복 입자 연료인 TRISO(Tri-isotropic coated fuel)를 사용

- 직경 0.5mm 내외의 구형 핵연료에 탄화규소(SiC)와 같은 세라믹을 피복한 것으로, 삼중 피복된 층이 핵분열에서 발생하는 대부분의 분열 과편을 차단하여 외부 누설되는 방사선량이 극히 적음
- 실제 1,600℃에서 수백 시간 운전 실험한 결과, 전체 핵분열 방사능량 대비 외부 누설 방사능량의 비율은 10^{-6} 이하로 보고됨

○ (냉각재·감속재) 냉각재 헬륨은 화학적으로 안정한 불활성기체로 구조재 부식 우려가 적고, 감속재 흑연은 4,000℃까지 안정성이 유지되며, 열전도도와 비열이 높음

- 헬륨은 방사화(放射化)*되지 않은 특성으로 누설 시 방사능 물질 외부 누출이 무시 가능한 수준임

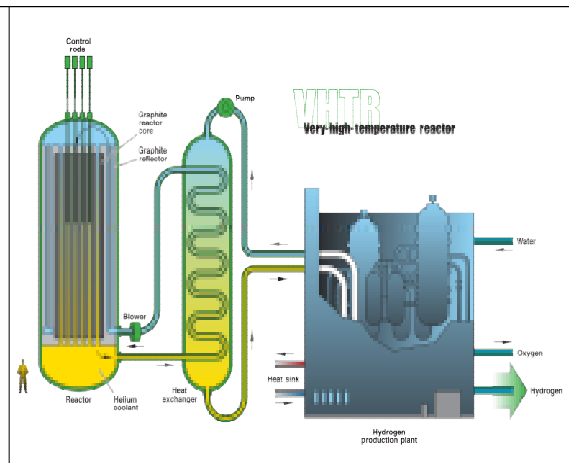
* 원자로 등에서 시료에 방사선(중성자선)을 조사(照射)하여 방사능을 띄게 되는 상태

<그림 9> 피복입자핵연료(TRISO)



자료 : www.x-energy.com

<그림 10> 초고온가스로 구조도



자료 : <http://www.gen-4.org>

- (장점) 고온가스로의 장점은 고유 안전성, 고온열에 따른 다양한 활용 분야, 핵비확산성 및 심층처분 용이성 등이 있음
 - (높은 안전성) 냉각재 상실사고 시 흑연노심이 붕괴열을 흡수하여 사고 진행이 상대적으로 매우 느리고, 자연현상인 열전도 및 복사 현상만으로 붕괴열을 핵연료에서 원자로 용기로 쉽게 전달
 - 원자로 용기에 전달된 붕괴열은 자연순환으로 운전되는 원자로공동냉각 계통을 통해 별도의 인위적 조치 없이 원자로 건물 밖으로 제거
 - (다양한 분야 활용) 고온가스로의 높은 운전온도는 기존 전력생산 외 산업단지 고온 공정열공급, 수소생산, 합성연료 생산 등 다양한 분야에 활용이 가능
 - '23.2월 글로벌 컨설팅 기업 Mckinsey는 한국수력원자력이 의뢰한 경영컨설팅 보고서에서 4세대 SMR 중 초고온가스로(VHTR)를 수소 시대와 맞물려 유망한 노형으로 강조

〈표 5〉 원자력 열 활용이 가능한 산업분야

산업분야	공정온도(°C)	비고
지역난방	80-150	기존 증기 배관 사용
해수담수화	70-130	기존 증기 배관 사용
펄프 및 제지	100-400	휘발성 열부하 고려 필요
석유 정제	350-500, 600-800(catalytic cracking)	공정 계통 재설계 필요(단기)
화학 공단	250-600, 600-800(Naphta cracking)	기존 증기 배관 사용
솔베이공정	300-400	기존 증기 배관 사용
알루미늄생산	100-300(Al hydration) 800-1,000(Al calcination)	공정 계통 재설계 필요
암모니아생산	600-800(Steam reforming), 400-500(NH3 synthesis)	공정 계통 재설계 필요(단기)
		주공정 재설계 필요(단기)
석회,유리,시멘트, 비철금속,세라믹	800-1,500	많은 연구 필요
제철	1,300-2,500	많은 연구 필요

자료 : 에너지경제연구원

- **(수소생산)** 현재는 경수로형 원자로에서 나오는 전기를 활용하여 저온($\leq 100^{\circ}\text{C}$)의 물을 전기분해하여 수소를 생산하지만 4세대원자로를 활용할 경우 700°C 이상의 고온열을 활용하여 더 많은 수소 생산이 가능
 - 높은 열에너지의 초고온가스로(VHTR)를 이용하여 천연가스 개질시 천연가스 연소를 통한 열에너지 공급 과정을 거치지 않기 때문에 기존 대비 효율적인 탄소포집(CCU)¹¹⁾도 가능

〈표 6〉 원자력을 활용한 수소생산 기술

원전 활용 방법	수소 생산 기술	적합한 원자로형
① 원전에서 생산한 전기를 이용한 저온수전해	알카라인수전해(AEC) 또는 고분자전해질수전해(PEMEC)	3세대원자로(경수로)
② 원전에서 생산된 고온열($700\sim 850^{\circ}\text{C}$)과 전기를 이용한 고온수전해	고체산화물수전해(SOEC)	3세대원자로(경수로), 4세대원자로(고온가스로, 소듐냉각고속로, 용융염원자로)
③ 초고온열(850°C 이상)을 이용한 열화학 공정	열화학공정	4세대원자로(초고온가스로)

자료 : 한국원자력연구원 등

- **(핵비확산 및 심층처분)** 피복입자핵연료는 핵물질 획득을 위해서는 피복된 세라믹층을 파쇄해야 하므로 핵비확산성이 뛰어나며, 이로 인해 심층 처분에도 방사능 물질의 외부 누출을 크게 고려하지 않아도 됨
 - 피복입자 핵연료는 직경 1mm 내외의 TRISO로서 높은 핵비확산성을 가지고 있어 향후 초소형원자로(MMR) 개발에 고온가스로가 활용되는 중
- **(단점) 사용후핵연료 등 방폐물 부피가 경수로보다 크며, 낮은 출력밀도 및 기체 냉각재 활용으로 인하여 원자로용기가 두꺼워짐**
 - **(방폐물 부피)** 초고온가스로는 엄청난 양의 흑연이 사용되는데 흑연은 노심 내에서 방사화한후 운전 중 혹은 폐로 시에 폐기물로 방출되며 이 폐기물이 고준위 폐기물로 분류되어 처분될 경우 엄청난 양의 폐기물 발생
 - 전 세계적으로 흑연 방사능 폐기물이 $160,000\text{m}^3$ 이 존재하고 제염(除染)을 통한 흑연 재활용 연구가 진행되는 중

11) 산업공정에서 배출된 이산화탄소를 포집하여 포집된 이산화탄소를 화학적·생물학적 등의 전환과정을 통해 부가가치가 높은 유용한 자원으로 전환하는 기술

□ (주요 이슈) 850도 이상의 환경에서도 견딜 수 있는 초고온 소재 확보가 필요

- 원자로에는 원자력 기술기준에 등재된 소재만 사용 가능하여 새로운 소재를 개발하고 입증하여 등재하는 데에는 수십 년 이상이 소요됨
- 일반 산업에서 입증된 흑연, 초고온합금, 세라믹 등 초고온 소재를 활용한 실증실험 등이 필요

3. 원전 소형화, 용융염원자로(MSR)

□ (원리) 고온에서 액체로 존재하는 용융(鎔融) 상태의 염(Salt)을 원자로 핵연료 및 냉각재로 사용하는 원자로

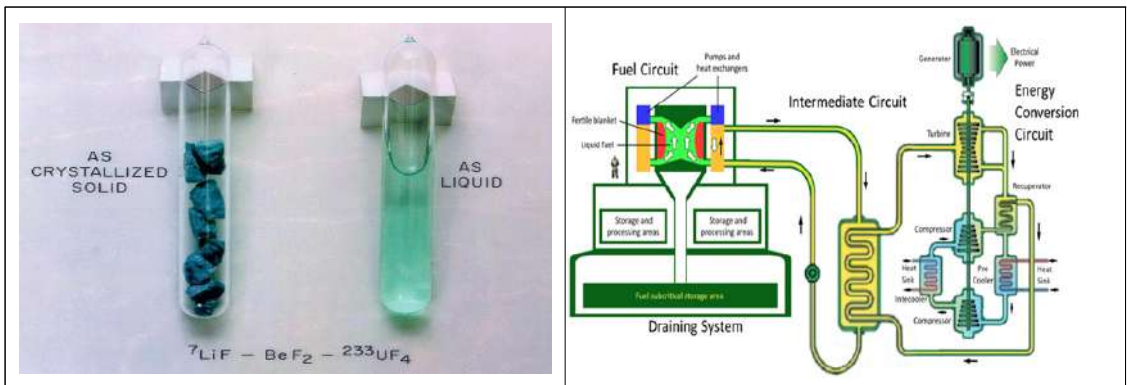
- (핵연료&냉각재) 우라늄 등 고체 핵연료 대신 고온의 염을 녹인 액체연료*를 염소 또는 불소 기반의 운반체 염(Carrier salt)**에 녹인 용융염을 원자로의 연료 및 냉각재로 활용

* U(우라늄), Th(토륨), Pu(플루토늄) 등 악티나이드 계열 원소와 불소(F)와 염소(Cl) 화합물 형태인 악티나이드 연료염(UF₄, ThF₄, PuF₄, UCl₃, PuCl₃)으로 고체 핵연료에 비해 온도에 대한 부피 팽창률이 훨씬 커 온도가 증가함에 따라 즉각적인 노심의 출력 온도 변화 조절이 가능

** 금속성의 양이온(Li⁺, Be²⁺, K⁺, Na⁺, Mg²⁺ 등)과 비금속성의 음이온(F⁻, Cl⁻)이 이온결합하여 구성

- 액체연료와 혼합된 용융염은 대기압에서 약 400~500℃의 녹는점과 약 1,400℃의 끓는점을 가지며, 화학적으로 안정되고 우수한 열-물리학적 특성을 가지고 있음

<그림 11> 용융염 액체 핵연료의 응고-용융 상태 <그림 12> 용융염 원자로 구조도



자료 : 에너지경제연구원

자료 : <http://www.gen-4.org>

□ (장점) 기존 경수로형 원전 대비 높은 안전성, 방사선 외부 유출 원천 방지, 사용후핵연료 처리 가능성, 소형화 가능성 등의 장점 보유

- (안전성) 핵연료를 냉각재인 용융염과 혼합한 일체형으로 냉각재 상실 사고 (LOCA, Loss of Coolant accident) 발생이 원천적으로 배제
 - 고체핵연료를 사용하는 대부분의 원자로에서는 핵연료와 냉각재가 분리되어 있기 때문에 매우 낮은 확률이라 할지라도 냉각재 상실사고에 따른 노심용융 (Meltdown) 사고가 발생할 가능성이 있음
 - 용융염이 외부로 누설되더라도 1,2차 격납용기 내에서 누출 즉시 고체화되어 방사능 유출을 원천적으로 방지 가능
- (사용후핵연료처리) 금속 우라늄(U) 뿐만 아니라 사용후핵연료에서 피로프로세스 처리[그림6참조]를 통해 얻은 U, TRU(초우라늄원소) 금속을 용융염에 혼합하여 연료로 다시 재사용이 가능
 - 초우라늄원소(TRU)를 연료로 사용할 경우 경수로에서 발생하는 사용후핵연료 (고준위폐기물)의 양을 줄일 수 있음
- (소형화) 냉각재와 핵연료의 일체화 및 대기압 운전 등으로 각종 장치 및 기기들이 생략 가능하여 소형화 및 모듈화에 용이
 - 핵연료 이송·교환 장치, 가압기, 다수의 제어봉 등이 불필요하며, 대기압 운전으로 2.5cm두께의 원자로 용기로 운전이 가능(PWR¹² 원자로 두께는 20~30cm)
 - 소형화로 극지, 해양, 우주, 군사기지, 선박 등 소규모 분산 전원용 활용 가능

〈그림 13〉 용융염원자로(MSR)의 상대적 크기



자료 : Oak Ridge National Laboratory(ORNL) 자료 재구성

12) Pressurized Water Reactor, 가압경수로 : 압력을 가한 물을 냉각재로 쓰는 원자로로 가압에 견디기 위해 원자로 용기가 두꺼워짐

- **(경제성)** 소형화 및 모듈화에 따른 건설비 절감, 경수로 대비 높은 열효율 등으로 경제성을 확보할 수 있는 노형으로 기대
 - 각종 장치 생략 등에 따른 소형화 및 모듈화가 가능하며, 경수로의 열효율 33% 대비 MSR의 열효율은 45~50%로 높음
 - 용융염원자로(MSR)의 균등화발전비용(LCOE)은 동일한 출력용량의 경수로와 비교하여 비슷하거나 보다 적은 수준으로 분석된 연구 결과 존재

〈표 7〉 MSR와 경수로 LCOE(균등화발전비용, \$/MWh) 비교 (1,000MWe급 기준)

구분	MSR (20%농축)	MSR (100%농축)	PWR (경수로)	Coal (석탄)
Capital(투자비)	20.1	20.1	20.7	15.8
O&M(운영관리)	5.8	5.8	11.3	8.0
Fuel(핵연료)	11.1	4.0	7.4	17.2
Waste Disposal(폐기물처리)	1.0	1.0	1.0	0.9
Decomposition(해체)	0.4	0.4	0.7	-
LCOE(\$/MWh)	38.4	31.3	41.1	41.9

자료 : Recommendations for a restart of molten salt reactor development(Moir, 2008)

□ **(주요 이슈) 높은 열과 불화염의 강한 부식성을 견딜 수 있는 내열·내식 재료 확보와 용융염 물성 연구가 시급**

- 내열성, 내식성 그리고 원자로 수명과 안전을 보장할 수 있는 재료의 개발이 시급
 - 미국의 원자력 규제기관인 NRC는 액체상의 핵연료는 충분히 검증되지 않았다는 이유로 상업적 운전을 금지하고 있어 관련 규제의 개정이 필요하고 허가를 얻으려면 많은 시간과 비용이 소요될 것으로 예상
- MSR의 용융염은 연료와 냉각재로 동시에 사용되기 때문에 다양한 물리학적·화학적 기준이 요구되며 이를 위해 용융염의 물성 연구가 핵심 요소
 - 국내에서는 건식재처리(파이로프로세싱) 연구개발 경험을 통해 다양한 물성 측정기술 개발 경험을 보유하고 있어 이를 활용한 물성 연구 수행 중

Ⅲ. 4세대 원자로 개발을 위한 과제

- 제4세대 원자로의 경쟁력 확보를 위해 무탄소 발전원, 사용후핵연료 발생량의 감소 등 제4세대 원자로의 차별화된 장점에 대해 시장에서 가치를 인정 받는 것이 중요
 - 현재 지속적으로 설치비용이 감소 중인 풍력, 태양광 등 경쟁 재생에너지원의 대표적인 단점인 간헐성 및 변동성을 보완할 수 있는 안정적 전력 공급이 가능하다는 장점 부각 필요
 - 또한 재생에너지가 가지고 있는 지역 편차성을 원자력은 분산 에너지원으로서 보완이 가능하여 미래 에너지원으로서 활용 가치가 매우 높음
- 제4세대 원자로는 전력 생산 외 대량의 열에너지를 활용하여 수소 및 합성 연료 생산 등의 산업부문에 제공할 수 있어 이를 적극 활용할 필요가 있음
 - 수소생산에 필요한 초고온 열을 제공하는 수소생산 원자로로 제4세대 초고온 가스로(VHTR) 노형이 적합하며 이를 위한 설계해석코드 기술, 피복입자핵연료 제조 기술 등의 안전성 검증이 필요
 - 미국의 경우 2010년대 중반부터 원전을 이용한 원자력 수소생산 타당성 연구를 해오고 있으며, 바이든 행정부에 들어서는 온실가스 감축의 핵심 수단으로 청정수소 기술개발과 산업화를 정부가 적극 지원 중
- 전 세계적으로 탈탄소화가 계속 진행 중이며, 전력 수요의 지속적인 증가로 제4세대 원자로의 사업화 기회 또한 지속적으로 창출될 것에 대한 준비가 필요
 - 제4세대 원자로의 사업화를 위해서는 기술 실증, 비발전분야 활용 등 신규 사업 모델 검증, 다른 저탄소 대비 경쟁력 확보, 기존 경수로 대비 건설 및 프로젝트 관리 개선, 고유의 금융조달 모델 개발, 주민 수용성 확보, 시의적절한 규제 승인 등이 있음

참고문헌

[국문자료]

- 주형국·어재혁(2022), “소듐냉각고속로 기반 SMR 개발 동향”, 한국물리학회
김용완·박병하·김찬수(2022), “안전하고 다양한 에너지공급원 초고온가스로”, 한국물리학회
이창화·김태형·윤달성(2022), “발상의 전환, 용융염원자로(MSR)”, 한국물리학회
김상지(2023), “용융염원자로 국내외 개발 동향”, 에너지경제연구원
어재혁(2023), “소듐냉각고속로(SFR)개발 현황 및 전망”, 에너지경제연구원
김찬수(2023), “고온가스로 기술개발 현황 및 시사점”, 에너지경제연구원
김창훈(2023), “선진 원자로 보급 확대의 조건 1.”, 에너지경제연구원
박찬오(2022), “미국의 원자력 수소 개발 동향과 시사점”, 에너지경제연구원
노재만(2009), “초고온가스로”, 화학공학연구정보센터
박근엽(2022), “제4세대 원자로(GenIV) 미래의 기술인가”, 한국산업기술진흥협회
한국원자력학회 후쿠시마위원회(2012), “후쿠시마 원전 사고 분석”
박환서(2016), “파이로 폐기물 처리기술 개발”, News & Information for Chemical Engineers(NICE), Vol34

[영문자료]

- National Academies(2023), “Laying the Foundation for New and Advanced Nuclear Reactors in the United States”
BloombergNEF(2023), “1H 2023 LCOE Update”
Benito Mignacca, Giorgio Locatelli(2020), “Economics and finance of Molten Salt Reactors”, Elsevier, Vol 129
X Energy, <http://www.x-energy.com>
Whatisnuclear, <http://www.whatisnuclear.com>
GenIV International Forum, <http://www.gen-4.org>
Oak Ridge National Laboratory(ORNL), <http://ornl.gov>