

# 소듐냉각고속로 기반 SMR 개발 현황

2023.10.25



어재혁



한국원자력연구원

Korea Atomic Energy Research Institute

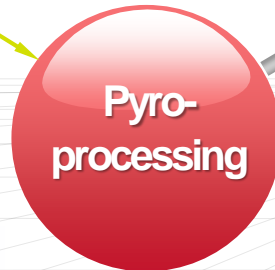
# 우리나라의 선진원자로 개발 프로그램

## » Development of Gen IV Reactors (AMRs) & Advanced Fuel Cycle

### » Multi-purpose applications for decarbonization

- e.g., Electricity, Process heat, H<sub>2</sub> production, etc.

### ❖ SNF Management Option

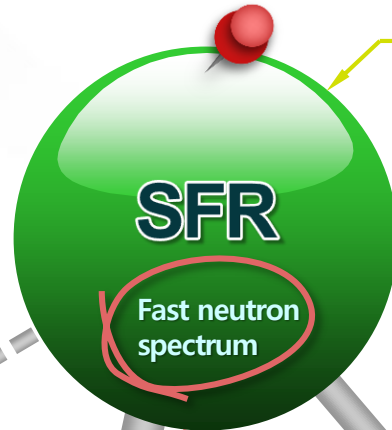


### ❖ National Program (since the early 2000s)

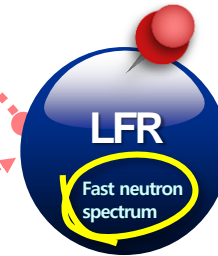
- Participating member in GIF
- Signatory of a System Arrangement

### ❖ National Program (since the mid-1990s)

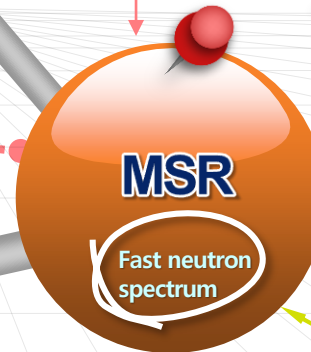
- Participating member in GIF
- Signatory of a System Arrangement



Fast Reactor Program



- ❖ University Program
- Conceptual design for maturing its technology level (Maritime applications, etc.)

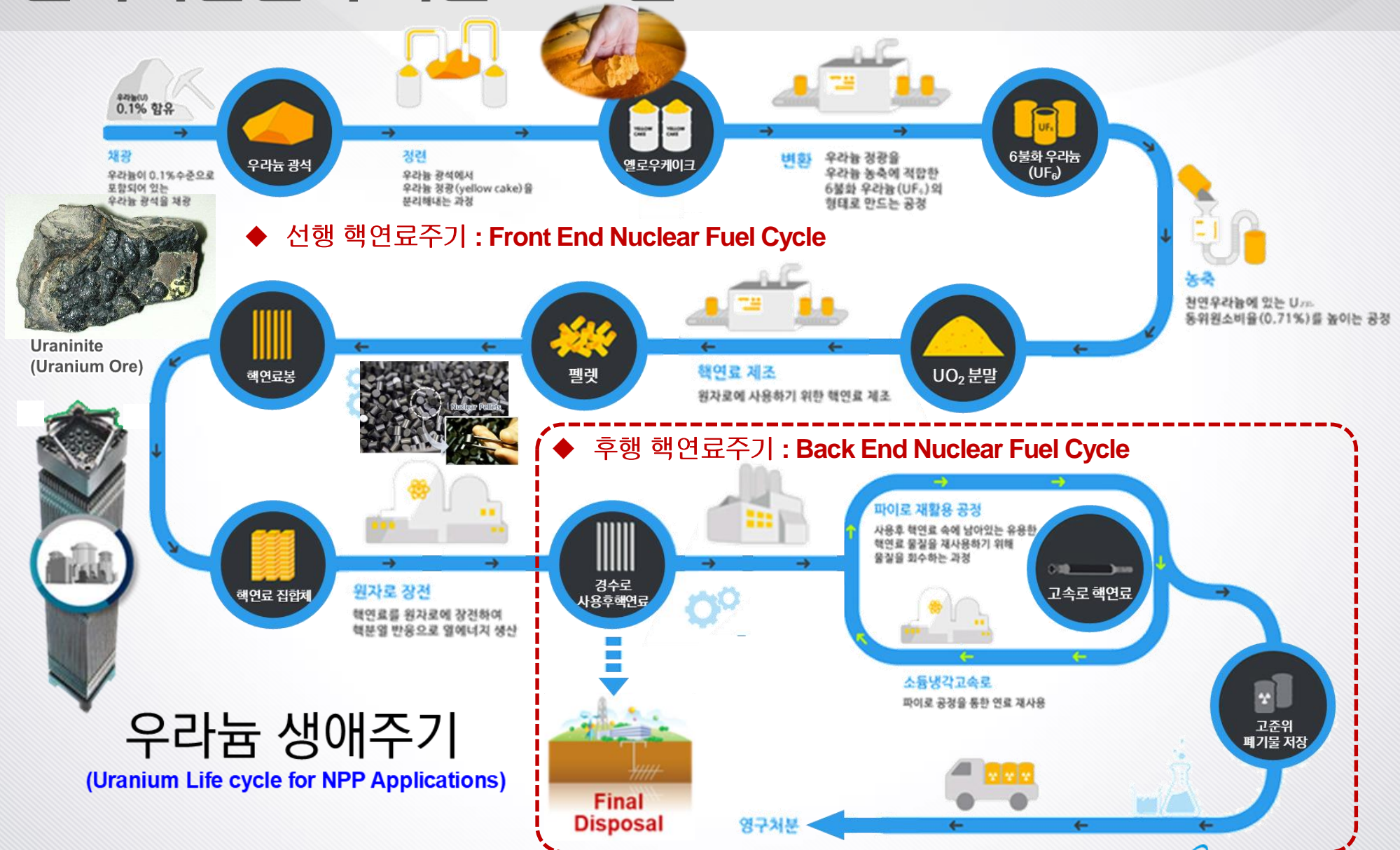


### ❖ National Program (2023~)

- Diversified applications (Maritime, SNF management, etc.)
- Negotiation in GIF pSSC



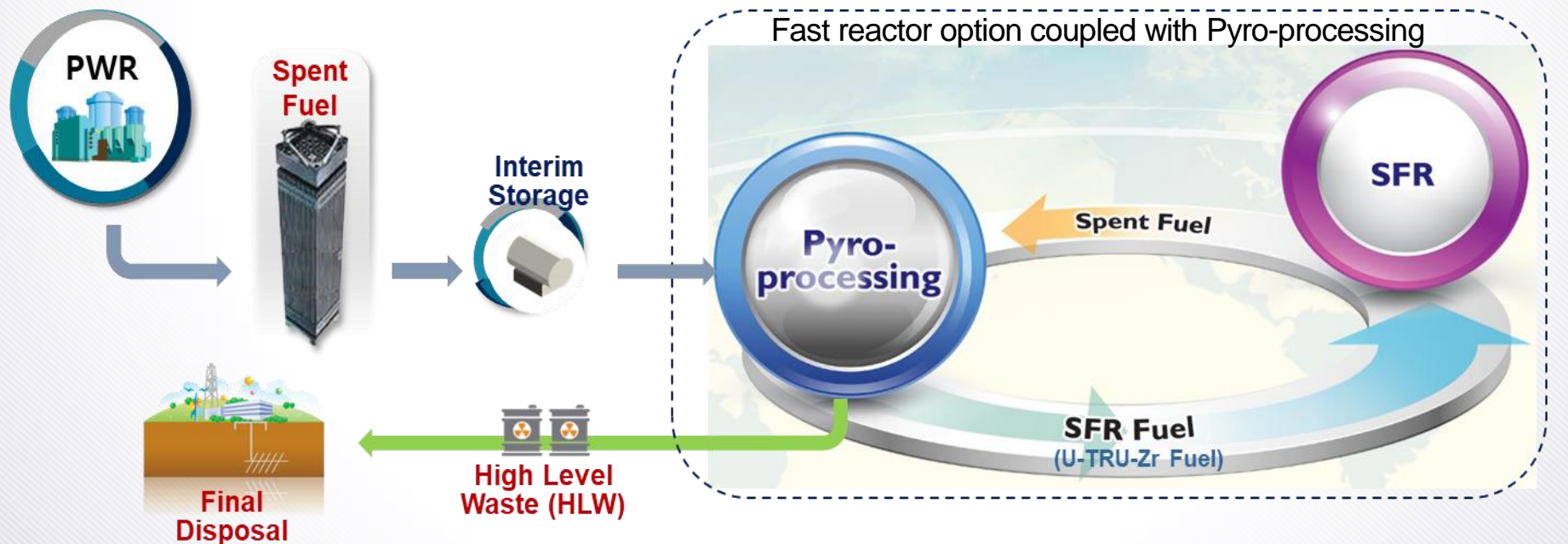
# 원자력발전의 핵연료 흐름



# 소듐냉각고속로(SFR) 필요성

## ❖ 사용후핵연료 처분 및 안전관리를 위한 기술 옵션

- 사용후핵연료 관리는 고비용이 소요되고 장기간 관리 필요
- 사회적 파급효과 및 비가역성으로 현 세대의 정책결정 과정에서 다양한 대안 요구
- 사용후핵연료 고독성 물질의 부파·독성 저감을 위해 파이로공정(분리기술)과 연계한 대안(소각기술) 개발 필요



TRU: TransUranics (Pu+MA), MA: Minor Actinides (Np, Am, Cm), FP: Fission Products



# 소듐냉각고속로 개요



- ✓ 소듐을 냉각재로 사용하고, 경·중수로에 비해 높은 에너지의 중성자(고속중성자)를 이용하여 핵분열을 일으키며, 이때 발생하는 열을 액체 소듐이 열전달매체가 되어 2차계통에 전달하여 증기를 생산하고 이 증기로 터빈을 돌려 전기를 생산하는 원자로



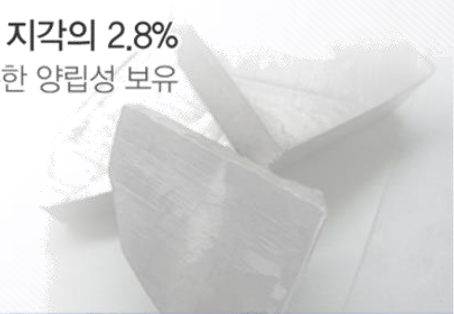
- ✓ 주요특징
  - ▶ 대기압 운전으로 원자로 운전 및 유지 보수 용이
  - ▶ 대형 원자로 개발과 면진 설계 적용 용이
  - ▶ 열효율(약 40%)이 높아 작은 고성능 원자로 설계 가능
  - ▶ 높은 고유안전성을 보유(후쿠시마 원전 유사사고 발생 불가능)

냉각재	소듐
중성자 에너지	고속중성자
핵연료	금속연료 산화물연료
원자로 출구온도	510~550℃
최대용량	2,000MWe
연료주기	재순환



- ✓ 은백색의 부드러운 금속으로 지구상에 6번째로 많은 원소 : 지각의 2.8%
  - ▶ 저융점, 고비등점, 높은 열전달 특성, 구조재 및 피복관재료와 우수한 양립성 보유

	소듐[Na]	물[H <sub>2</sub> O]
응융점(℃)	97.8	0
비등점(℃)	883	100
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	927(100℃)	958(100℃)
열전도도(W/mK)	87.1(100℃)	0.677(100℃)
비열(kJ/kg·℃)	1.38(100℃)	4.217(100℃)

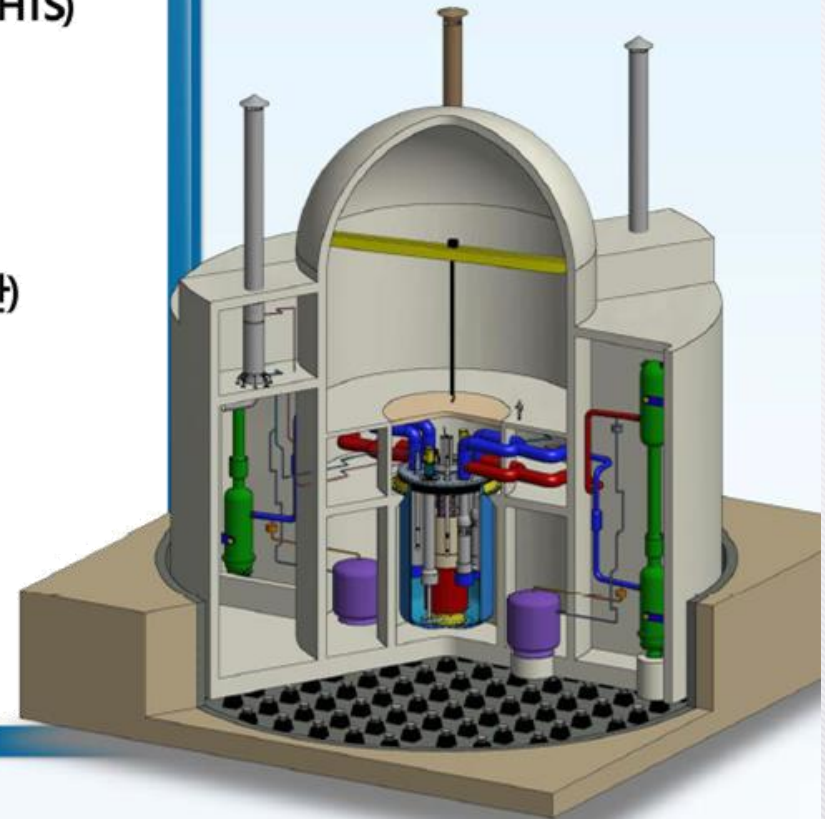


# 소듐냉각고속로 설계 특성

- 원자로 형태: 풀(pool) 형 소듐냉각고속로(SFR)
- 냉각재: 액체소듐(liquid sodium)
- 열전달계통구성: 1차계통(PHTS) - 중간계통(IHTS) - 2차계통(SHTS)
- 용량(전기출력): 150 MWe
- 원자로 압력: 대기압(~1bar)
- 냉각재 온도: 입구 390°C, 출구 545°C
- 핵연료: 금속연료(초기노심 U-Zr에서 U-TRU-Zr으로 점진 전환)
- 핵연료 교체주기: 12개월
- 비상안전계통 구성: 피동(passive) + 능동(active)
- 잔열제거계통 구성: 피동(passive) + 능동(active)
- 설계수명: 60년
- 중대사고: 후쿠시마 및 TMI 유사사고(SBO 등) 대처설계 반영

SFR원형로(PGSFR\*) 기준

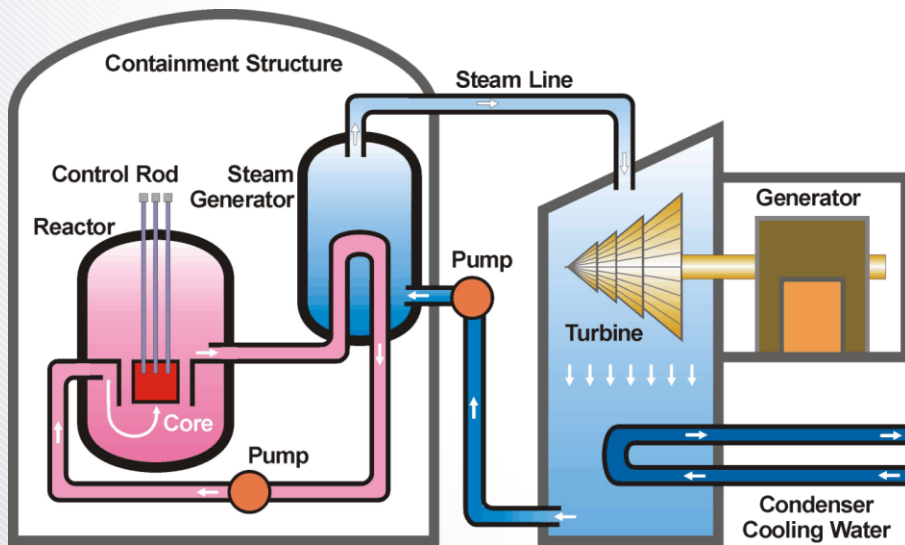
\* Prototype Generation IV SFR



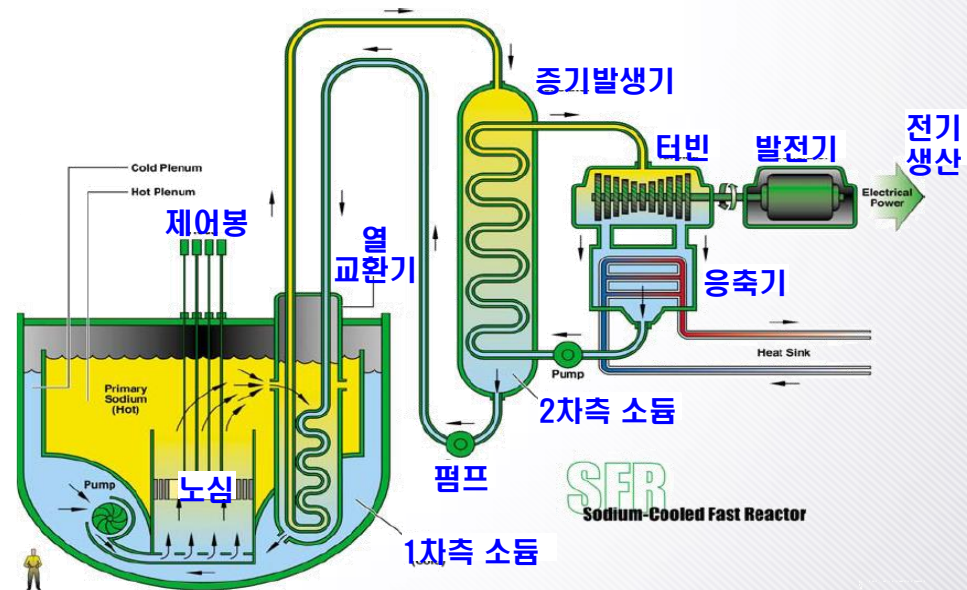


# 경수로 vs. 소듐냉각고속로 - 설계특성 비교

	경수로(PWR)	소듐냉각고속로(SFR)
중성자	열중성자	고속중성자
냉각재 / 감속재	물 (H <sub>2</sub> O) / 물 (H <sub>2</sub> O)	소듐 (Na) / 없음
핵연료	저농축 산화연료	고농축 산화/금속연료
원자로 운전온도 / 계통 압력	~ 330 °C / ~ 150 기압	~ 550 °C / 1 기압 (대기압 수준)
열효율(%)	~ 34%	~ 38% ↑
전환비 = (생성/소비)핵분열성 물질	연소로 (<1.0)	증식로(>1.0), 자체순환로(=1.0), 연소로(<1.0)



경수로 (PWR)



소듐냉각고속로 (SFR)

# 소듐냉각고속로 개발 역사 (1/2)

□ Approx. 20 fast reactors built around the world had a mixed record of operation

- Lessons learned from mistakes and failures yielded confidence that fast reactors can be designed properly to be inherently safe, reliable, and easy to operate and maintain
  - ✓ Design mistakes, component failures, sodium leaks and fires, particularly in non-nuclear portions

## ◆ EBR-I (Experimental Breeder Reactor-I)

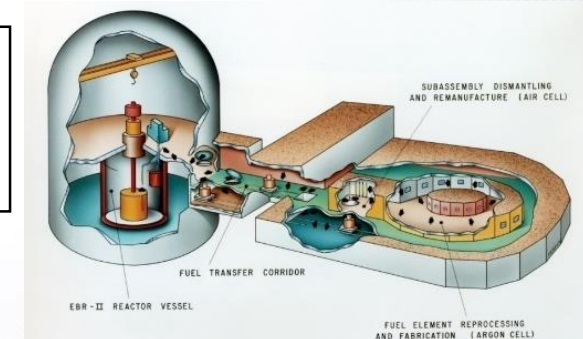
- The world's first fast reactor Clementine achieved criticality in 1946
- CP-4 was a fast breeder reactor, renamed Experimental Breeder Reactor-I (EBR-I) and constructed at NRTS in Idaho (ANL-West, later INL)
- EBR-I achieved the first electricity generation from nuclear reactor in 1951



## ◆ EBR-II (Experimental Breeder Reactor-II)

- The first pool-type SFR EBR-II started operation in 1964
- Successfully operated over 30 years: No steam generator tube leak, reliability of sodium components due to compatibility with sodium, etc.

⇒ Monumental outcome in the World SFR History





# 소듐냉각고속로 개발 역사 (2/2)

- ❑ In the 1970s, very strong fast reactor development programs were launched in the U.S., U.K., Russia, France, and Japan
  - The **CRBR** project started in 1970 and continued about 13 years with up and down funding until it was finally abandoned in the mid.1980s
- ❑ **TMI-2 accident** in 1979 led to cancellations of nuclear power plant orders and slowdown of nuclear power expansion around the world
- ❑ **IFR (Integral Fast Reactor)** initiative was launched at ANL in 1984 to develop new technology to enable fast reactors deployment to complete entire fuel cycle
  - However, the program was canceled in 1994 for non-technical reasons
- ❑ Demonstration fast reactor **Superphenix (SPX)** reached first criticality in Sep.1985
  - The first grid connection in Jan.1986, and was decommissioned
- ❑ Prototype fast reactor **MONJU** was constructed in Oct.1985, reached first criticality in April 1994, and shutdown due to secondary sodium leakage incident in Dec.1995
  - Restart plan of MONJU was abandoned and it was determined to be decommissioned by Japanese Gov. in 2020

# 국외 SFR 개발 현황

## Status

- ☐ Operating experience
  - ~ 400 reactor·year
- ☐ Construction and operation experience
  - Decommissioned after operation: 15 units
  - **Operation** : 6 units
  - **Construction** 2 units

## Challenges

- ☐ Economic Competitiveness
- ☐ Safety Enhancement

**Generation IV  
Sodium-cooled Fast Reactor**

Country	Plant		Capacity	Year							
				'45	'50	'60	'70	'80	'90	'00	'10
USA	Clementine	Exp.	25kWth	<div><div></div><div>'46</div><div></div></div> <div>'52 운전종료</div> <div><div></div><div>'48</div><div>'51</div><div></div></div> <div>'63 운전종료</div> <div><div></div><div>'59</div><div>'61</div><div></div></div> <div>'65 운전종료</div> <div><div></div><div>'57</div><div>'63('65)</div><div></div></div> <div>'91 운전종료</div> <div><div></div><div>'56</div><div>'63('65)</div><div></div></div> <div>'72 운전종료</div> <div><div></div><div>'65</div><div>'69</div><div></div></div> <div>'72 운전종료</div> <div><div></div><div>'70</div><div></div></div> <div>'80</div> <div>'93 운전종료</div> <div><div></div><div>'82</div><div></div></div> <div>'83 계획종료</div> <div><div></div><div>'88</div><div></div></div> <div>'94 계획종료</div>							
	EBR-I	Exp.	0.2MWe								
	LAMPRE	Exp.	1MWth								
	EBR-II	Exp.	20MWe								
	E.Fermi	Exp.	61MWe								
	SEFOR	Exp.	20MWe								
	FFTF	Exp.	400MWth								
	CRBR	Proto.	380MWe								
	PRISM	Demo.	155MWe								
UK	DFR	Exp.	15MWe	<div><div></div><div>'55</div><div>'59('63)</div><div></div></div> <div>'77 운전종료</div> <div><div></div><div>'66</div><div>'74('76)</div><div></div></div> <div>'94 운전종료</div>							
	PFR	Proto.	250MWe								
France	Rapsodie	Exp.	40MWth	<div><div></div><div>'62</div><div>'67</div><div></div></div> <div>'83 운전종료</div> <div><div></div><div>'68</div><div>'73('74)</div><div></div></div> <div>'09 수명종료</div> <div><div></div><div>'77</div><div>'85('86)</div><div></div></div> <div>'97 운전종료</div>							
	Phenix	Proto.	250MWe								
	S-Phenix	Demo.	1240MWe								
Germany	KNK-II (I 개조)	Exp.	20MWe	<div><div></div><div>'75</div><div>'77('79)</div><div></div></div> <div>'91 운전종료</div> <div><div></div><div>'73</div><div></div></div> <div>'91 계획중지</div>							
	SNR-300	Proto.	327MWe								
Italy	PEC	Exp.	120MWth	<div><div></div><div>'76</div><div></div></div> <div>'87 계획중지</div> <div><div></div><div>'88</div><div></div></div> <div>'98 계획중지</div>							
EU	EFR	Demo.	1580MWe								
Japan	JOYO	Exp.	100MWth	<div><div></div><div>'70</div><div>'77</div><div></div></div> <div>'08 일시정지</div> <div><div></div><div>'80</div><div>'94(완공)</div><div>'16 폐쇄결정</div></div> <div><div></div><div>'90</div><div></div></div> <div>'18 계획수립</div>							
	MONJU	Proto.	280MWe								
	DFBR	Demo.	660MWe								
Russia	BR-5/BR-10	Exp.	5/10MWth	<div><div></div><div>'57</div><div>'58</div><div>BR-5</div><div>'73</div><div>BR-10</div><div></div></div> <div>'02 운전종료</div> <div><div></div><div>'65</div><div>'69('70)</div><div></div></div> <div><div></div><div>'70</div><div>'80</div><div></div></div> <div><div></div><div>'84</div><div>'86</div><div></div></div> <div>'06</div> <div>'16</div>							
	BOR-60	Exp.	12MWe								
	BN-600	Proto.	600MWe								
	BN-800	Demo.	880MWe								
Kazakhstan	BN-350	Proto.	130MWe	<div><div></div><div>'65</div><div>'72('73)</div><div></div></div> <div>'99</div>							
India	FBTR	Exp.	15MWe								
	PFBR	Proto.	500MWe	<div><div></div><div>'03</div><div></div></div>							
China	CEFR	Exp.	20MWe								

Construction completed

Criticality - Termination

Planning

Criticality - Operation

Under construction



# 최근 SFR 건설 현황 (국외)



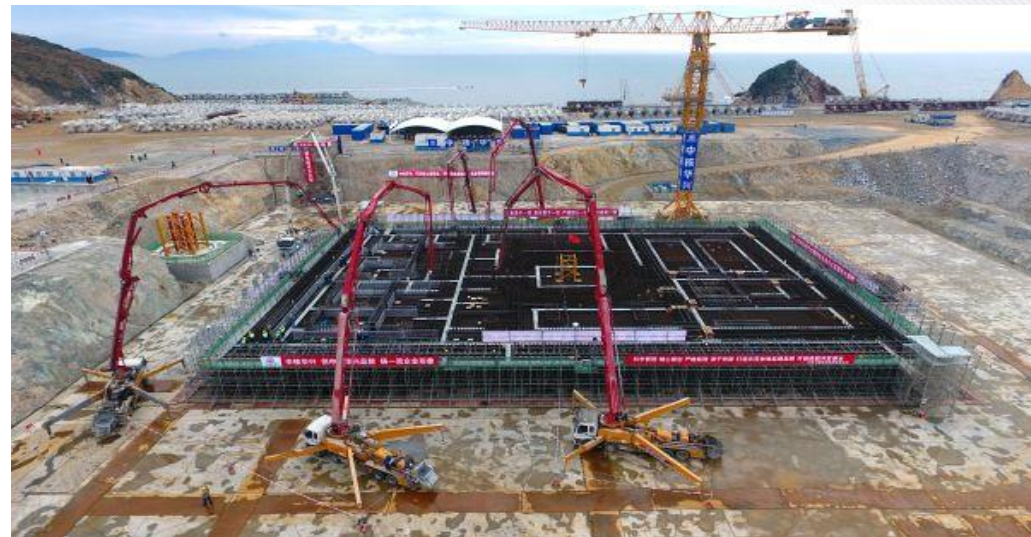
< BN-800, Russia, in operation ('16~) >



< MBIR, Russia, under construction (commissioning in '28) >



< PFBR, India, Test run ('15~) >

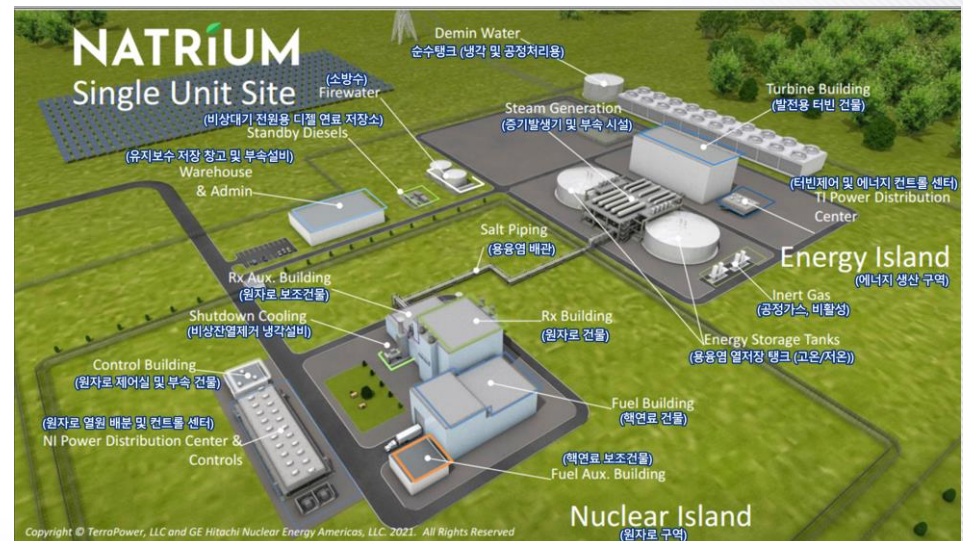
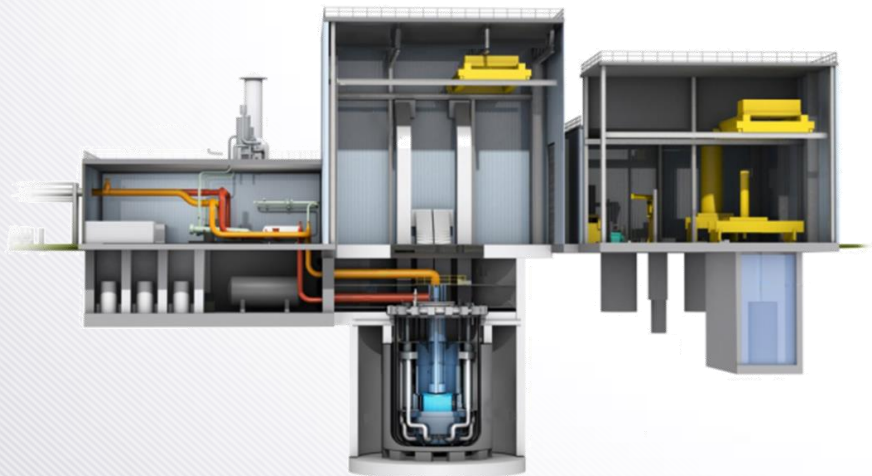


< CFR-600, China, under construction (to be completed in '23) >



# 미국 NATRIUM 원자로

- » 최근 TerraPower와 GE-Hitachi가 새롭게 제안한 선진원자로 개념
    - ▶ SFR과 용융염 열저장 개념을 결합하여 소규모 열원 또는 전력원으로 활용
      - 전기출력 345MWe 발전용량과 500MWe 용융염 열에너지 저장시스템 결합 개념
    - ▶ 원자력-재생에너지 하이브리드 에너지시스템 개념으로 운용 가능
      - 재생에너지원의 간헐성을 보완하는 유연한 전력생산 추구
    - ▶ 고순도저농축우라늄 연료 장전 및 20년 이상의 장주기 노심/핵연료 탑재
      - 원자로 수요와 수명에 따라 초기 연료 장전 후 핵연료 교체가 없도록 설계
  - » 美에너지부(DOE) 선진원자로 실증프로그램(ARDP) 사업으로, 향후 7년내 가동 가능한 실증원자로 건설 추진 (TerraPower社 선정)



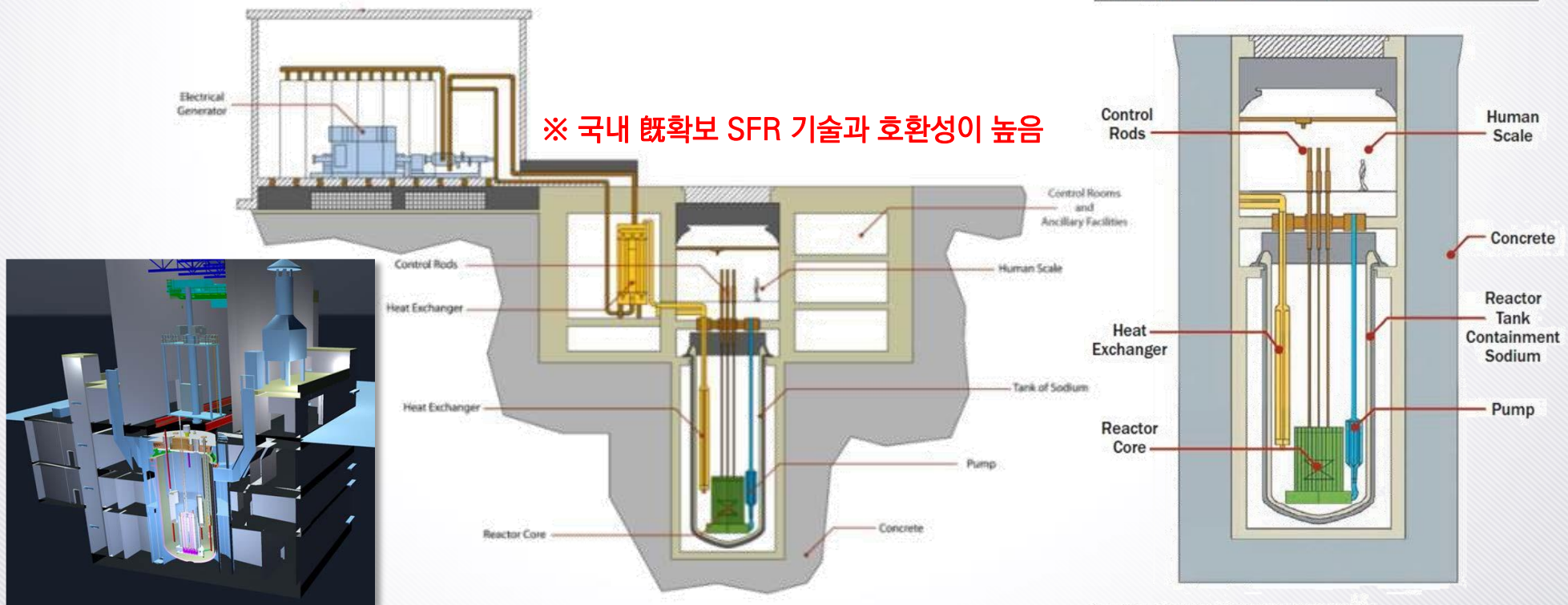


# 미국 ARC-100 원자로

## » 미국 ARC (Advanced Reactor Concept) 社の SFR 기반 소형모듈원자로

- Canada New Brunswick 주정부와 협의를 통해 건설 추진
  - 금속연료를 사용하는 전기출력 100 MWe 일체형 소듐냉각고속로 (GE PRISM 개념 및 EBR-II 설계 기반)
- 2017년 9월에 캐나다 CNSC에 pre-licensing 신청, 사전설계검토 1단계 (VDR Phase1) 통과 (19.10)
  - 실증로 건설 : 뉴브런즈윅 주 Point Lepreau 부지에 건설 계획 (2029년)

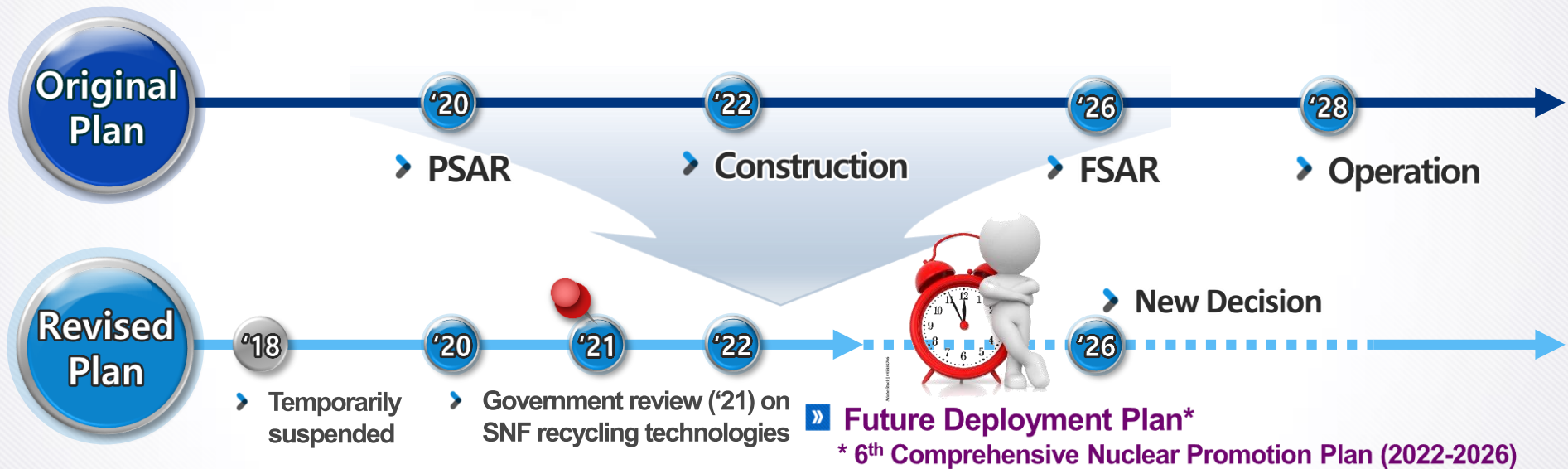
Advanced Reactor Concepts'  
ARC-100 Power Module



Source: © Advanced Reactor Concepts, LLC

# 국내 SFR 연구개발 연혁 및 현황

- '08.12. 소듐냉각고속로의 중장기 로드맵을 담은 미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획 확정 (제255차 원자력위원회)
- '11.11. 정책환경 변화를 반영한 「미래 원자력시스템 개발 장기추진계획 수정안」 확정 (제1차 원자력진흥위원회)



» 既 확보 SFR 기술 역량을 유지하고 응용할 수 있는 최소한의 연구개발 사업 진행 중

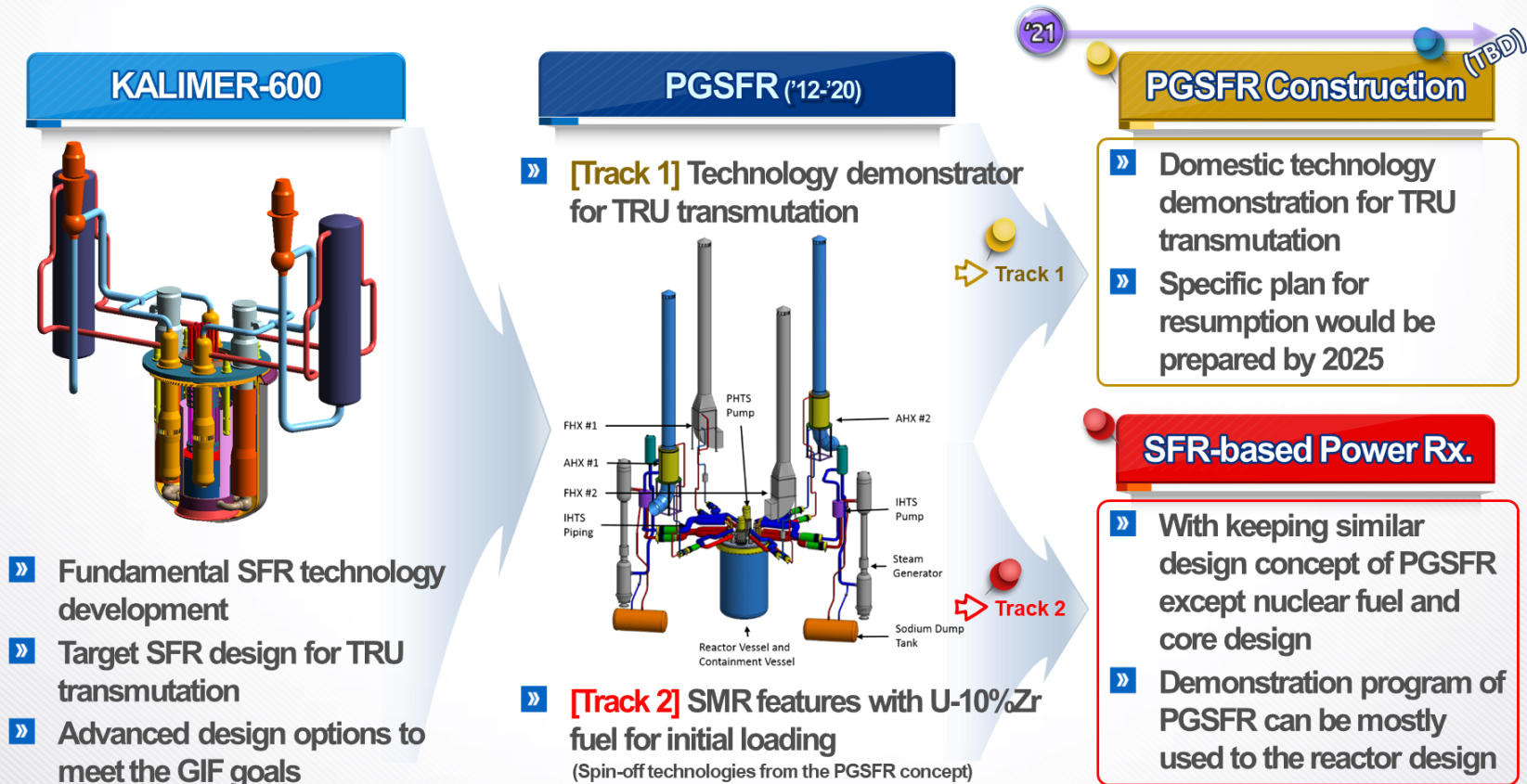
- ▶ 소듐냉각고속로 기반 SMR 개발 사업 (21~24)
- ▶ 사용후핵연료 처리기술 고도화 사업 (TRU 핵연료 및 SFR 안전성 이슈) (22~24)



# 소듐냉각고속로 개발 경과

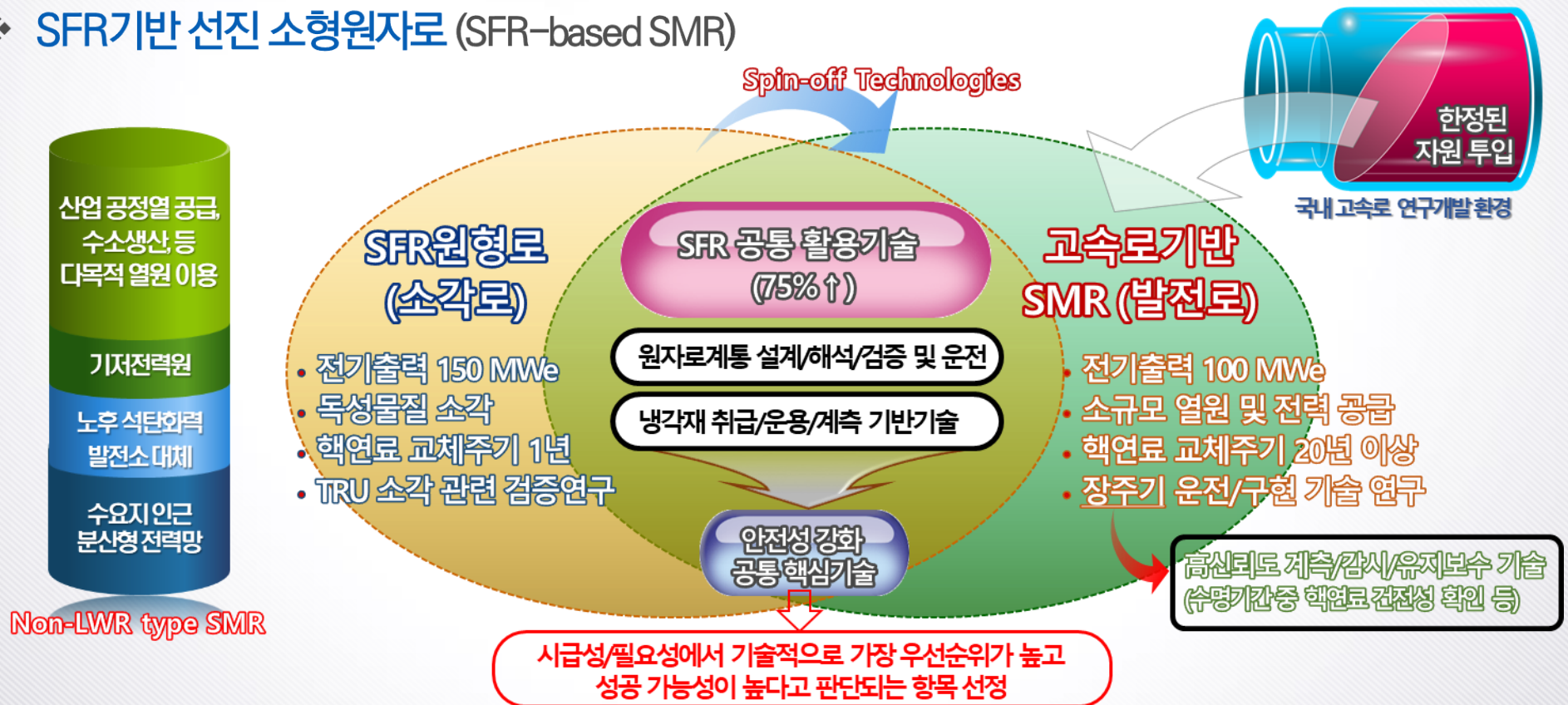
\* Prototype Generation-IV SFR

- » Development of TRU-transmutation demonstrator (PGSFR\*) coupled with pyro-processing
- » Development of an SFR-based advanced SMR for facilitating global export
  - SALUS (Small, Advanced, Long-cycled, and Ultimate Safe SFR, Electric power output: 100 MWe)



# 해외시장맞춤형 미래선진원자로 검증기술개발 사업 (21~24)

- ❖ 해외 소형원자로(SMR) 시장 수출용 노형으로 Spin-off
  - ✓ 기존 소각로 SFR(PGSFR)와 대비되는 **장주기 100MWe** 급 소듐냉각고속로 (非경수형 선진원자로)
  - ✓ 열악한 국내 도입 여건을 고려하여 해외시장 진출을 통한 기술 실증 후 국내 건설 Track으로 회귀 전략
- ❖ **SFR기반 선진 소형원자로 (SFR-based SMR)**





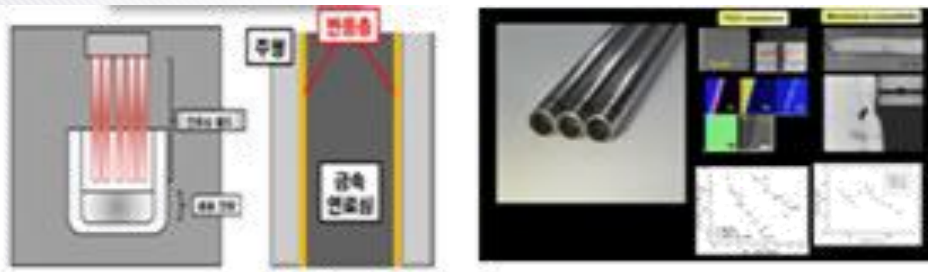
# 사용후핵연료 처리기술 고도화 사업 (’22~’26)

사업목표	사용후핵연료 처리기술 고도화를 위한 파이로-SFR 연계시스템 원천기술 및 공백기술 확보
<b>파이로 공정 공백 원천기술</b> ▪ 파이로 핵비확산성 강화 및 원천기술 고도화	파이로공정 및 핵비확산 강화 원천기술 확보 및 공백기술 보완 - (원천기술) 계량/모니터링/운전제어를 연계한 통합 안전조치기술 확보를 통한 고유 핵비확산성 강화 - (공백기술) 공정간 연계/효율/장기운전성 향상을 위한 미확보 공백기술 개발
<b>소각로 공백 원천기술</b> ▪ TRU 핵연료 안전성 평가기술 및 소듐 위험도 저감기술 고도화	파이로공정 기술과 연계한 TRU 핵연료/소각로 공백 원천기술 확보 - (원천기술) TRU 소각 실증시 요구되는 TRU 핵연료/노심 안전성 검증기술 고도화 - (공백기술) 소듐위험 저감을 위한 이중배관 구조 건전성 검증 관련 공백기술 확보

## ❖ 소듐냉각고속로 소각로 기술 분야

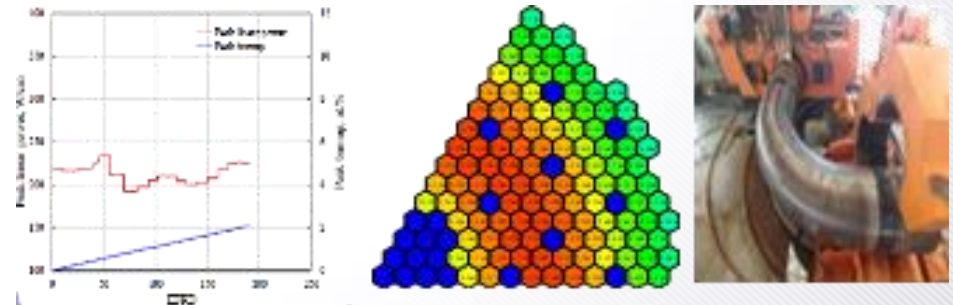
- TRU 핵연료 제조기술 및 소각로 안전성 검증기술 개발

### TRU 핵연료 및 피복관 제조기술 개발



[TRU 핵연료 제조수율 향상 및 TRU 전용 피복관 개발]

### TRU 소각로 안전성 검증기술 개발



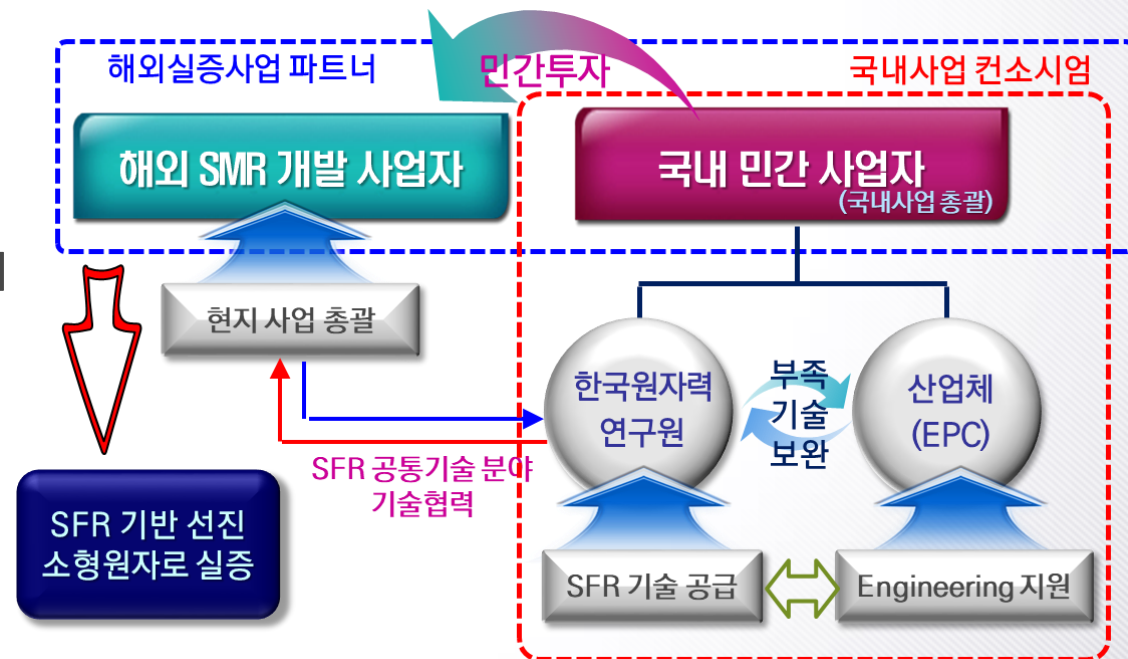
[TRU 핵연료 전산코드/TRU 노심 불확도 예비검증 및 이중배관 구조안전성 검증]

# SFR기반 선진 소형원자로 사업화 전략

□ 북미 지역 SMR 실증사업 대부분이 현지 SMR 사업자 주관으로 진행 중

- 한국원자력연구원(KAERI)이 확보한 지적재산 및 연구인력 제공 등의 현물투자 형태를 활용하여 국내 민간 사업자와 협력을 통해 Team Korea로 해외 실증사업에 참여하는 방식의 사업화 전략 필요
- 선진 소형원자로에 투자할 국내 민간 사업자가 주관하는 해외 SFR 기반 소형원자로 실증사업에 SFR 기술을 보유한 KAERI가 컨소시엄 형태로 참여하는 방식
- 즉, KAERI가 단독으로 해외 실증사업에 참여하기보다는 국내 민간 사업자의 직접투자를 통해 공동으로 해외 실증사업에 참여하는 형태가 효과적임
- 이와 같은 기술 협력 플랫폼을 통해 해외에서의 성공적 실증 이후 확보 가능한 기술적 성과를 국내 SFR 개발 사업에 직접적으로 활용할 수 있는 기회 및 권리 확보 가능

【 해외시장 SFR기반 SMR 시장 사업화 모델 】 ▶





# SFR기반 선진 소형원자로 사업화 전략

□ 민간 사업자는 실증 이후 해당 사업에 대한 제반 사업권을 확보하게 되며, 실증이 완료된 SFR 전체 또는 일부 핵심 기술에 대한 기술적 성과를 IP화하여 향후 국내 사업에 활용함으로써 핵심 사업권 확보

- 이 경우 KAERI는 원자로 계통 관련 핵심기술을 공급하고 민간 사업자는 설계, 인허가, 조달, 건설 등 EPC 업무와 전체 실증사업을 주도하는 효율적 역할 분담 가능

\* 캐나다 VDR, IAEA TSR 등

□ 국내 독자 SFR 모델로 해외 실증사업에 참여하기 위해서는 現시점에서 가용한 국외 사전인허가검토 제도\*를 적극 활용하여 대상 원자로 인허가성의 사전 확인 및 주요 인허가 현안에 대한 선제적 기술 대응 전략 필요

- 원자로 인허가 심사 과정에서 예상되는 주요 기술 현안에 대응할 수 있는 역량을 갖추거나 고속로 핵연료 분야 민감기술 등과 같은 국내 미확보 핵심기술에 대한 적기 확보 방안을 선제적으로 수립하는 전략 필요
- 우리나라가 미확보 핵심기술의 적기 확보를 위해서는 국외 실증사업에 직접 자원 투자를 했거나 계획 중인 국내 민간 사업자를 통해 Team Korea 사업모델 하에서 국외 주요 기관과의 협력을 추진하는 것이 가장 현실적 방안임
- 이 경우 우리나라 민간 사업자는 투자를 통해 실증사업에 지분참여를 하므로, 실증 이후의 기술확보 및 사용권 문제 등에서 유리한 협상이 가능
- 해외 실증사업이 성공적으로 완료된다면 향후 경수로 사용후핵연료 처리를 위한 국내 SFR 건설사업 재개가 결정되는 시점에 핵심기술의 적기 공급이 가능할 것으로 전망