

# 소듐냉각고속로 기술 개발 현황

- 원자력정책전문가 -

2017. 02. 09

박 원 석



**소듐냉각고속로개발사업단**  
Sodium cooled Fast Reactor development Agency

## 목 차

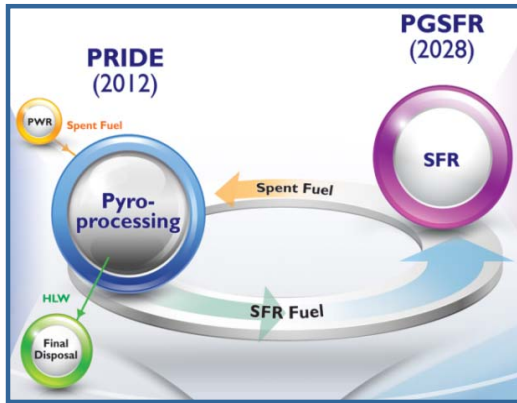
- 사업 개요
- 해외 현황
- 국내 개발 현황
- 향후 주요 계획

# 소듐냉각고속로 사업 개요

## 사용후핵연료 – 원자력산업의 현안



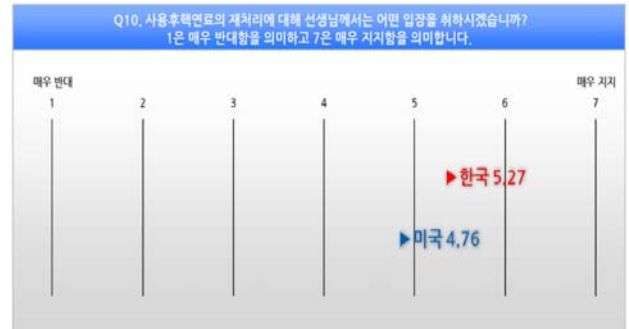
# 소듐냉각고속로 개발의 목적



## 재순환 실증

- 재순환의 경제성
- 재순환의 환경성
- 재순환의 안전성

## 최종처분 정책결정



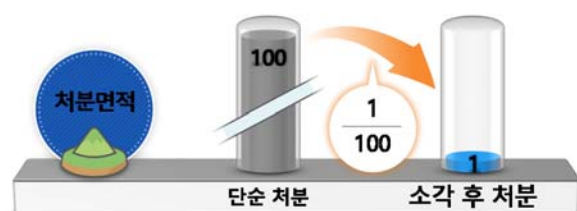
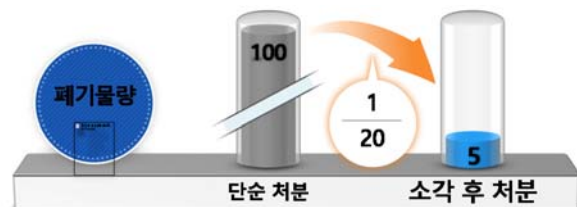
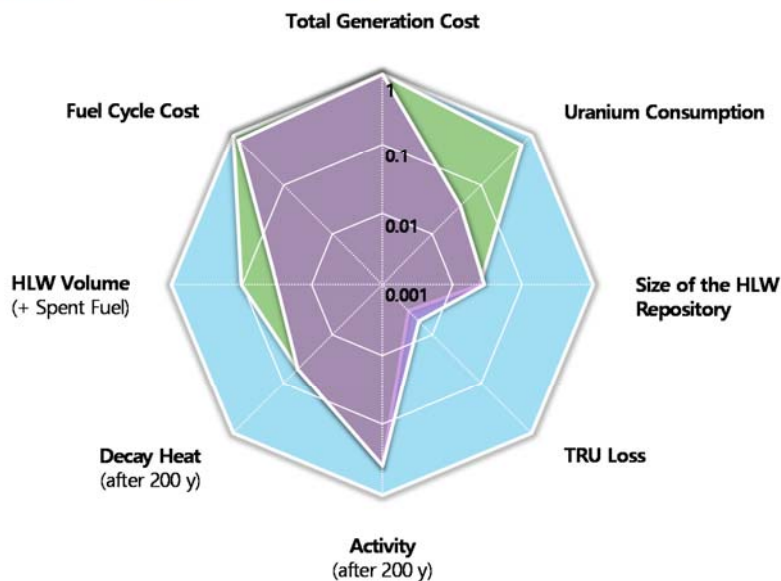
사용후공론화위원회  
한미 의식조사 비교, 2014

# 주요국가의 사용후핵연료 정책



# 재순환(분리/소각)의 장점

■ LWR 
 ■ LWR + FR 
 ■ FR 
 ※ Ref : OECD/NEA Report (2006)



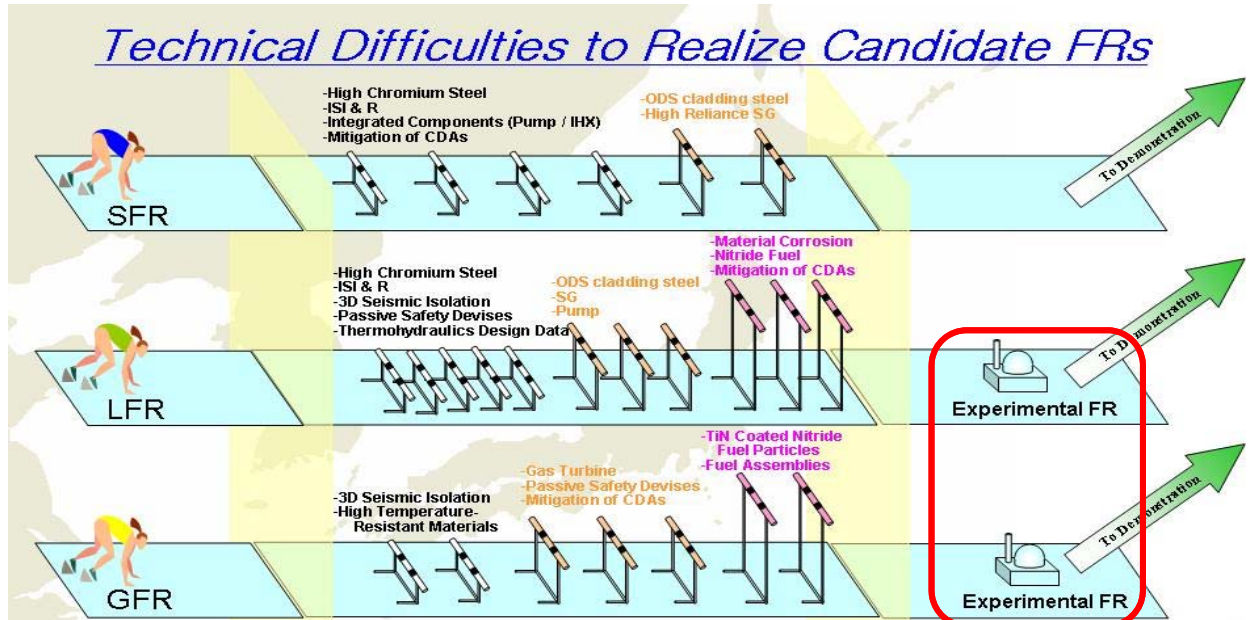
## 소듐냉각고속로 해외현황



# 왜 소듐냉각고속로인가 ?

- ❖ 소듐냉각고속로는 **상용단계**에 도달하여 가장 높은 기술 수준 보유(**고난이도 현안 기술 없음**)
  - 저난이도 기술: 고크롬강 구조재료, 펌프일체형 중간열교환기, 유지보수기술, 노심손상시 피동안전성
  - 중난이도 기술: 피복재(ODS강), 고신뢰도 증기발생기

↳ 실용화 전략조사연구 2단계 보고서, JAEA, 2006. 3.



## 소듐냉각고속로의 장점

- ❖ 기능: 사용후핵연료의 부피감소 및 방사성 독성 저감
- ❖ 소듐(냉각재): **저융점, 고비등점, 저밀도, 높은 열전달 특성, 구조재 및 피복관재료와 우수한 양립성**
  - 저융점/고비등점: 상압운전으로 원자로 운전 및 유지 보수에 유리
  - 저밀도: 물보다도 가벼워서 적은 펌프하중으로도 운전이 가능.
- 대형 원자로 개발과 내진 및 면진 설계 적용 용이
- 높은 열전달 특성: 작고 고성능인 원자로 설계 가능
- 재료 양립성 우수: 원자로 구조재와 피복관등을 부식시키는 문제 없음
- 방사화된 소듐(Na-24)의 반감기(15시간)가 짧다

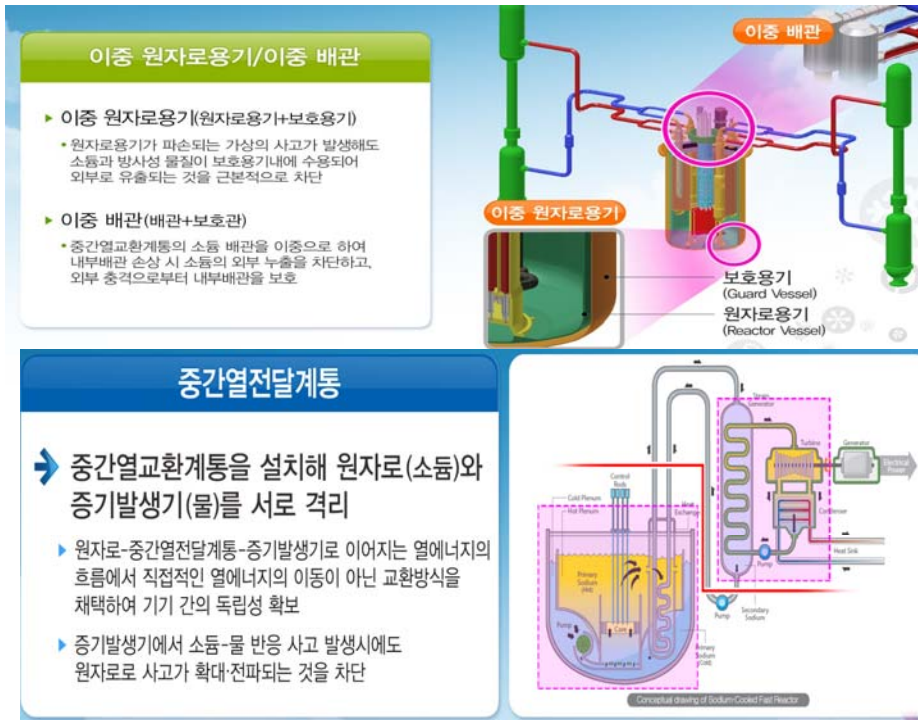
### 소듐(Sodium, Na)

- 은백색의 부드러운 금속으로, 지구상에 6번째로 많은 원소:지각의 2.8%
- 열을 잘 전달하는 특성
- 98°C-883°C에서 액체인 금속

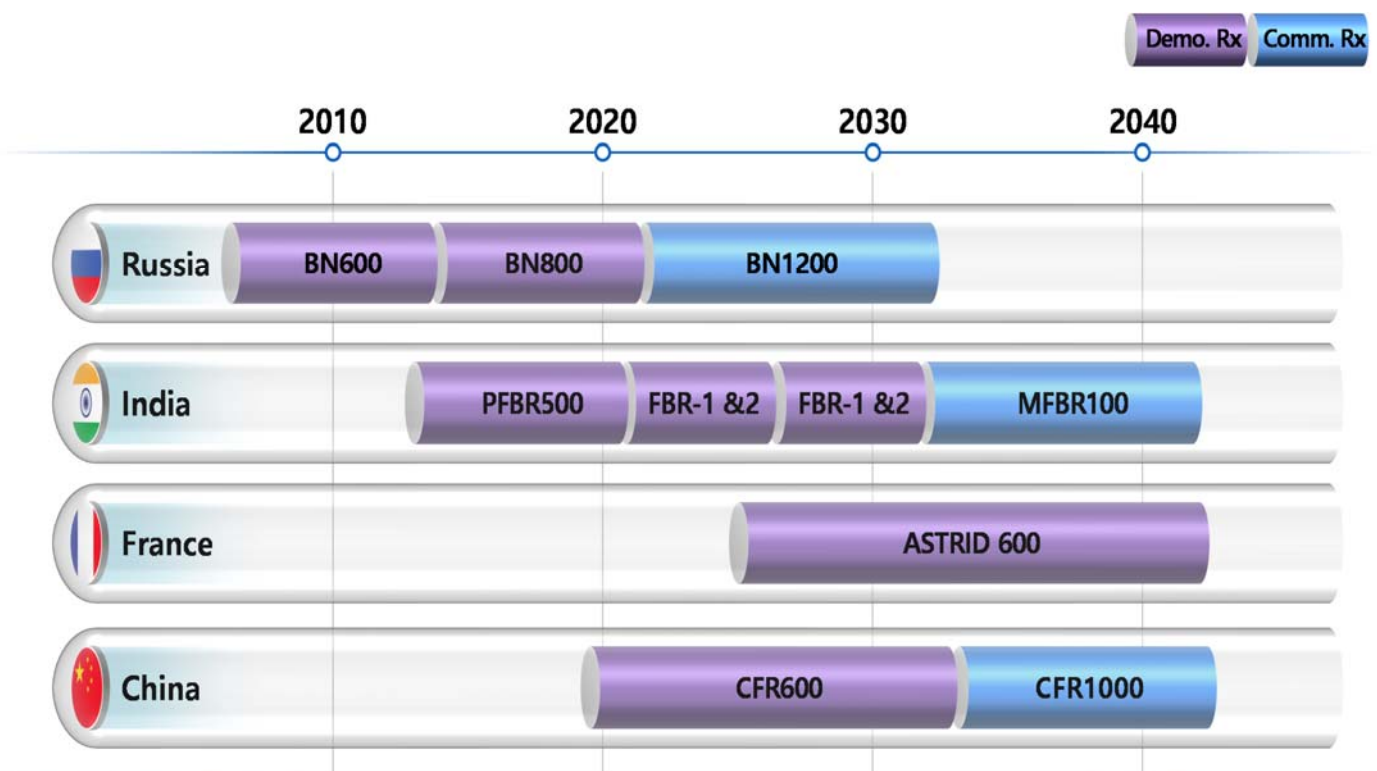
	소듐[Na]	물[H <sub>2</sub> O]
용융점(°C)	97.8	0
비등점(°C)	883	100
밀도(kg/m <sup>3</sup> )	927(100 °C)	958(100 °C)
열전도도(W/mK)	87.1(100 °C)	0.677(100 °C)
비열(kJ/kg · °C)	1.38(100 °C)	4.217(100 °C)

# 소듐냉각고속로 단점 및 대처방안

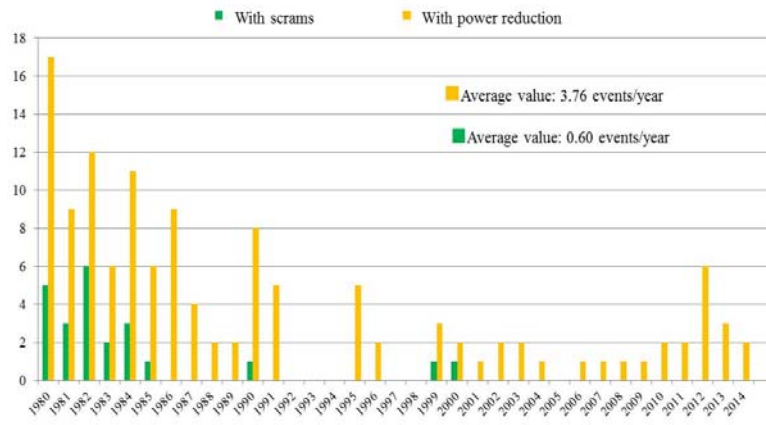
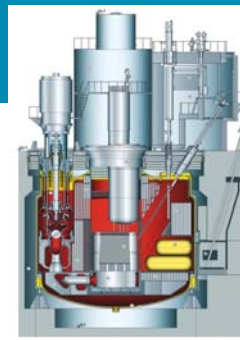
- ❖ 소듐-물 반응: 물과 접촉시 화학반응 발생
- ❖ 소듐화재: 고온의 소듐이 대기중에 노출시 자연 발화



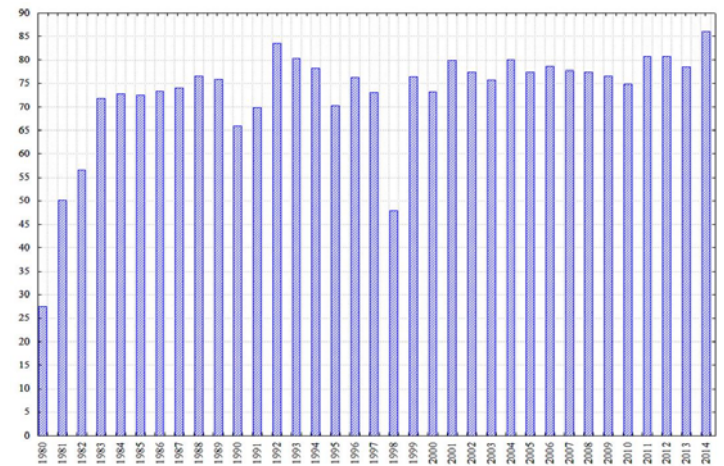
# 소듐냉각고속로 주요국 개발 현황



# BN-600 운전 이력



Number of Events



Availability

# 건설 비용

원자로	용량 (MWe)	건설비	비고
APR-1400	1400	3조2400억원	신문기사 참조
Monju	280	5조9천억원	
Phenix	250	2조2천억원	2008년 US\$기준 약 14억 유로
Super-Phenix	1200	11조4천억원	
PFBR	500	7750억원	인도 PHWR 건설단가 \$1371/kWe보다 건설단가가 낮음
VVER-1000	1000	2조8천억원	2006년 10월 건설 러시아 PWR
BN-600	600	2조3천억원	VVER-1000단가의 1.4배
BN-800	800	2조7천억원	VVER-1000단가의 1.2배



# 국내 개발 현황

## 소듐냉각고속로 국내 개발 실적

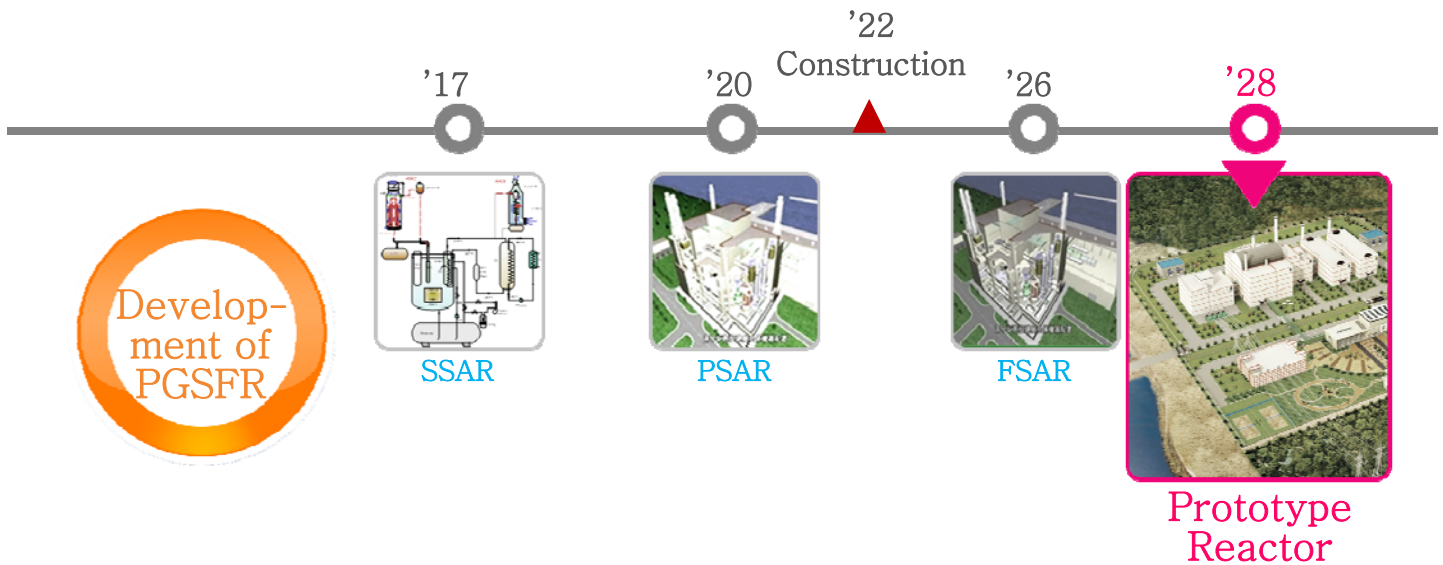
- ❖ '97년부터 원자력연구개발 중장기계획 사업을 통해 본격 개발 착수
- ❖ ('08.12, 원자력위원회) SFR-파이로 공정 연계 시스템의 로드맵을 제시한 「미래 원자력시스템 개발 장기 추진계획」 확정
- ❖ ('11.11, 원자력진흥위원회) 목표를 보다 구체화·현실화하기 위해 재정여건 등을 반영한 수정 계획안 마련  
⇒ 당초 SFR 실증로(300MWe이상) 건설에서 원형로(100MWe급) 건설로 변경





# 소듐냉각고속로 개발 계획

- ❖ 명확한 사업목표 달성을 위해 기존의 원자력(연) 중심의 과제수행 방식에서 성과중심의 개방형 사업 수행방식으로 개편 ⇒ 소듐냉각고속로 개발사업단 출범(2012. 05. 16)

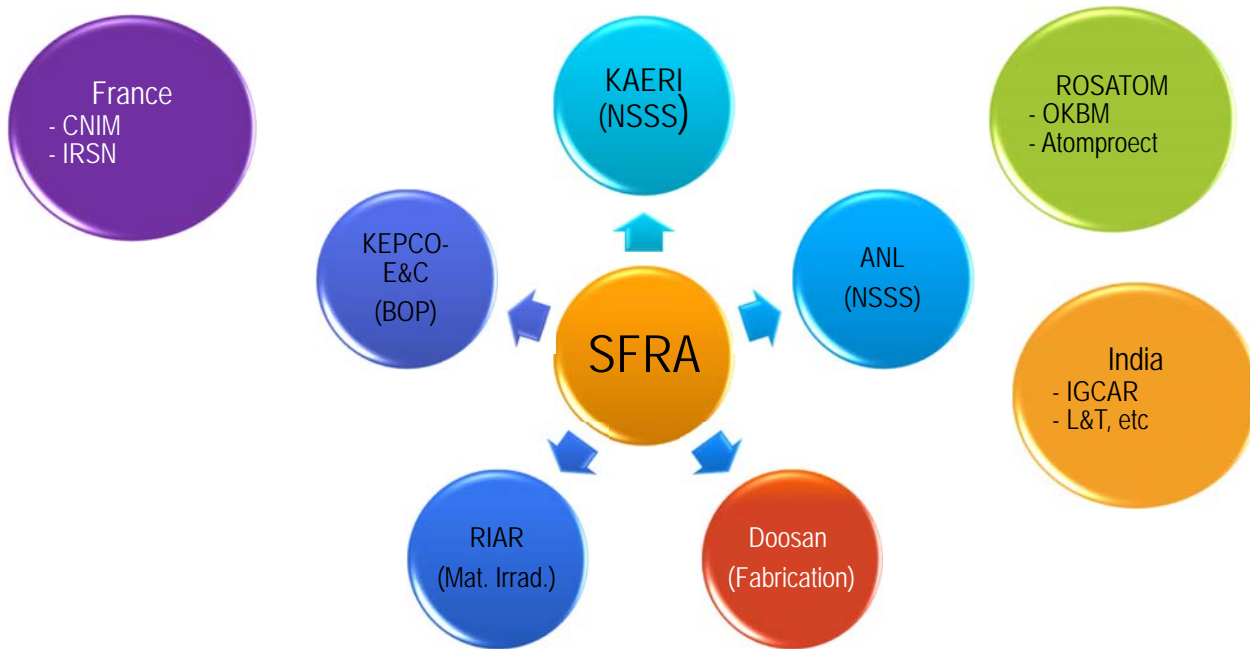


# 소듐냉각고속로 원형로 최상위 설계 요건

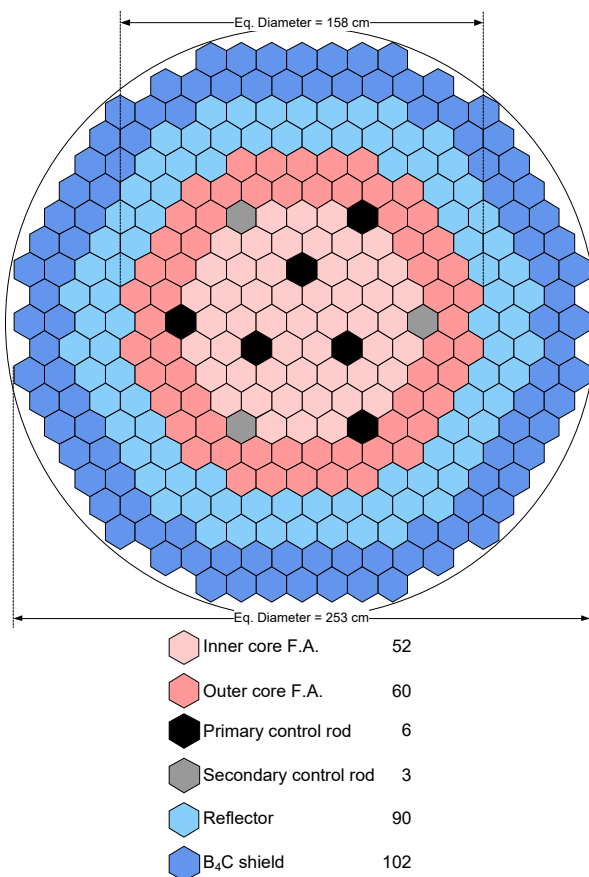
항목	설계요건
출력 용량	-정격 전기출력 150MWe
핵연료	-초기에는 U-Zr연료 장전 후 TRU-U-Zr연료로 대체
노심 출구온도	- 545° C
원자로 설계수명	- 60년
안전목표	-노심손상빈도 < 10 <sup>-6</sup> /원자로·년 -누적발생빈도 10 <sup>-7</sup> /원자로·년 이상의 중대사고 시 부지경계 방사선량 < 0.25 Sv
잔열제거계통	-피동형 잔열제거계통만으로 안전정지 냉각 가능하도록 구성
터어빈	-과열증기 Rankin 사이클을 기본형으로 채택
증기발생기	-Printed Circuit Steam Generator(PCSG) 적용 계획

# 주요 협력관계

- ❖ KAERI : NSSS 설계, 금속연료 설계, 주요기기 설계, 전산코드 및 주요기기 성능 검증실험
- ❖ 산업체 : BOP설계, 금속연료 제작, 주요기기 제작, 상세설계 및 건설



# 노심 사양



Parameter	
Core Power (MWt)	392.2
Inlet/outlet Temp. (°C)	390/545
Cycle length(EFPD)	290
Number of batch	4/5 (IC/OC)
Number of fuel assemblies	52/60 (IC/OC)
Enrichment of U (wt.%)	19.2
Heavy metal inventory (ton)	7.33
Average discharge burnup (MWd/kg)	66.1
Peak discharge burnup (MWd/kg)	104.7
Fast neutron flux (E > 1.0 MeV, #/cm <sup>2</sup> -sec)	1.44
Fast neutron fluence (E > 1.0 MeV, X10 <sup>23</sup> n/cm <sup>2</sup> )	2.88
Average/Peak linear power density (W/cm)	159.7/323.7
Average/Peak volumetric power density (W/cm <sup>3</sup> )	213.4/432.5
Peak cladding temperature (°C), 2σ	629
Bundle/Core pressure drop (MPa)	0.306/0.423
Maximum flow rate kg/sec	23.5

# 주요 설계 특성

## Fuel Handling System

Double Rotating Plug, Fuel Transfer Port, EVTM or IBC

## Reactor Enclosure System

RV & GV (20cm gap), RV (H: 15.4m, D: 8.7m), Forged Solid Head

## CRDM

6 Primary CRs, 3 Secondary CRs

Passive shutdown feature was implemented to secondary CRs

## Reactor Core and Fuel Design

U-Zr Fuel, 112 FAs, ~90cm Height, ~290EFPD (Eq. core)

## Decay Heat Removal System

2 PDHRS + 2 ADHRS, Cold Pool DHX, DC Conduction Pump for ADHRS

Active DHRS has more than 50% of passive decay heat removal capability

## Primary Heat Transport System

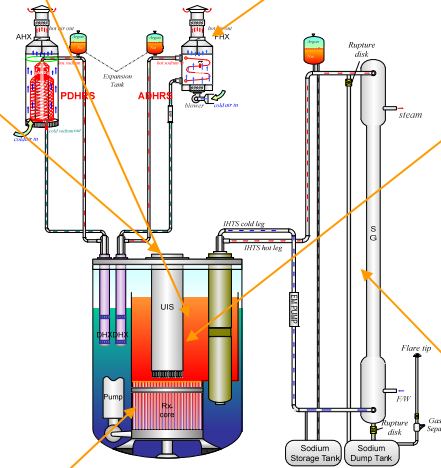
Pool type, 4 IHX, 2 Mechanical Pump, Redan (Peanut type)

## Intermediate Heat Transport System (IHTS)

2 Loops, 2 SGs(single wall tube), 2 EM Pumps, SWRPRS

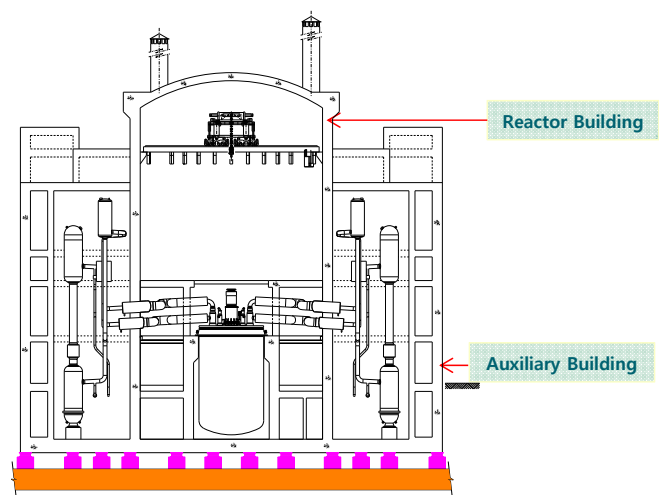
## Other system

SG Leak Detection System, Sodium Auxiliary System for PHTS / IHTS / DHRS, Primary / Intermediate Cover Gas Purification System



# General Arrangements

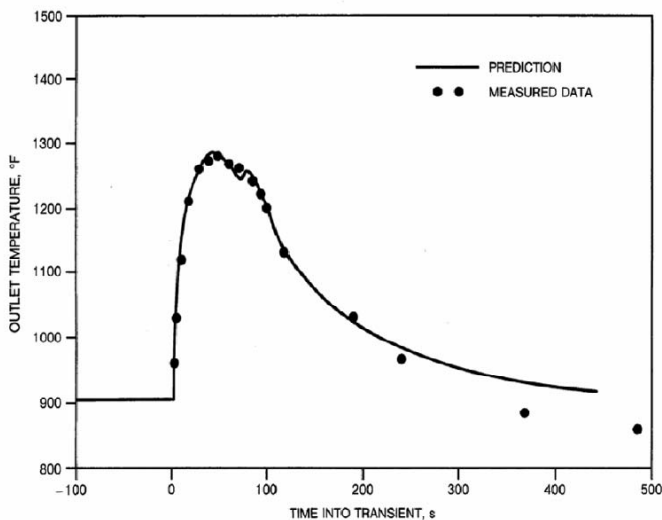
- Reactor and auxiliary building house NSSS and associated equipment
- Complies with the design criteria for reduction of Internal and external hazards
- Seismic isolation design
- Wraps around reactor building
- Common base mat
- Separation
  - Sodium and non-sodium area
  - Radiation and non-radiation area
- Divisional separation for 2 S/G
- Quadrant separation of DHRS (two passive and two active trains)
- Sufficient space for equipment Installation, replacement, and maintenance



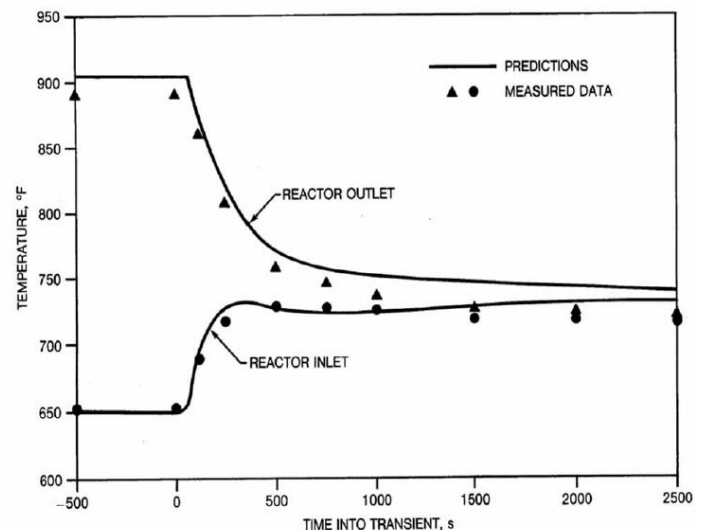
- ❖ Large margin to boiling temperature with sodium coolant
  - 출구온도 540 oC, 소듐비등 883 oC
- ❖ Pool design provides thermal inertia
- ❖ Low stored Doppler reactivity due to high thermal conductivity (hence, low temperature) of metal fuel
  - SFR  $\Delta T \sim 150$  oC , PWR  $\Delta T = 900$  oC

## Landmark Test of EBR-II (1986)

### Loss-of-Flow without Scram Test in EBR-II

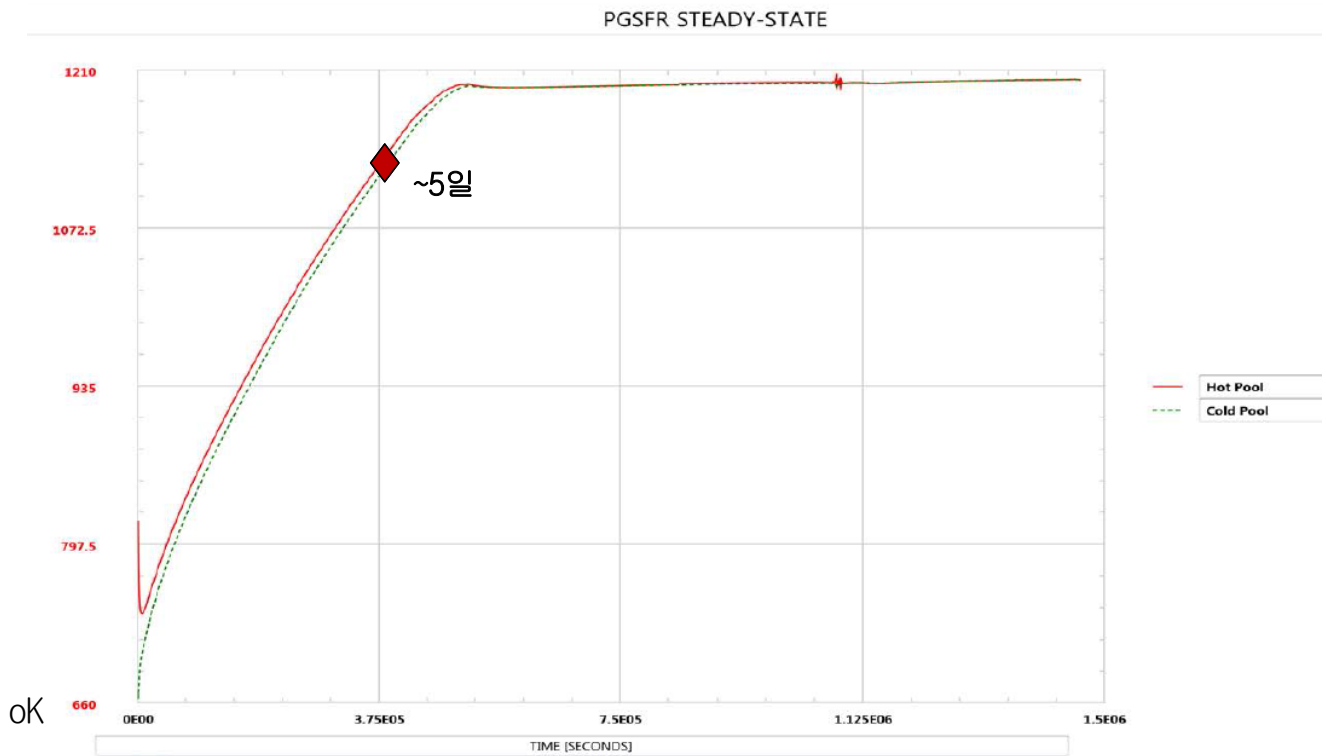


### Loss-of-Heat-Sink without Scram Test





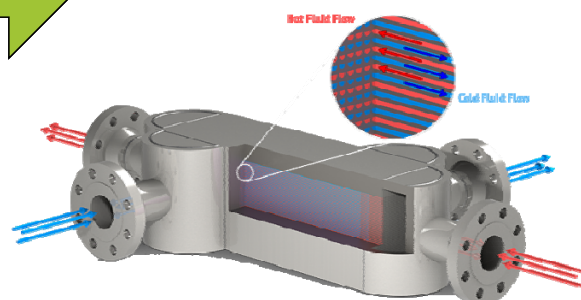
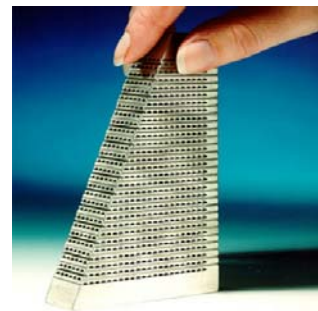
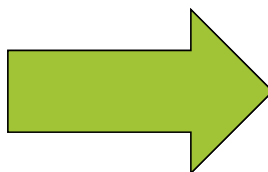
## SBO without Decay Heat Removal



## 향후 주요 계획



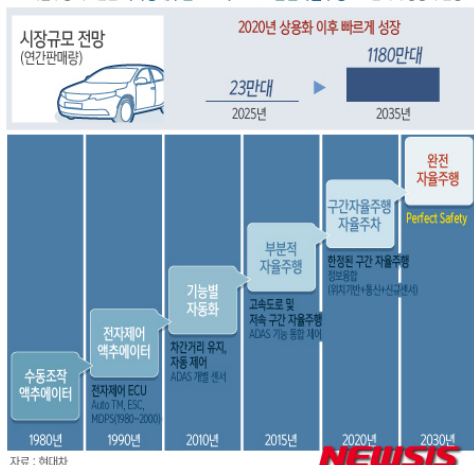
- 운전성 제고
- 소형화
- 모듈화



## 제 4차 산업혁명의 적용

### 스마트카 자율주행 시스템

자율주행 시스템은 저속정체구간 ▶ 고속도로 ▶ 완전자율주행으로 단계적 상용화 진행



자료 : 현대차, 뉴시스 그래픽 : 윤정아 기자 yoonja@newsis.com

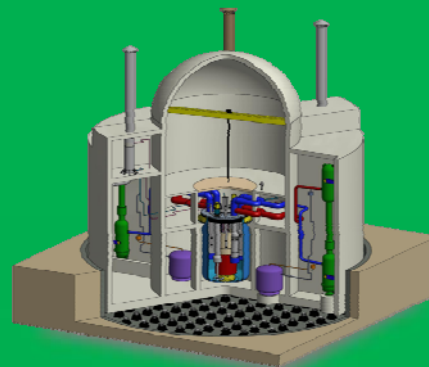
NEWSIS



안전성과 경제성의 혁신적 개선

### 세계원자력을 선도하는 제 5세대 지능형 원자로

- 다양한 센서의 채택(보다 투명한 원자로)
- 자율운전(인적오류 제거)
- 최적의 상황대처 등등



**감 사 합 니 다**

