

가스냉각로 SMR 현황

이정익

KAIST 원자력 및 양자공학과

원자력 발전 및 동력 연구실 (Nuclear Power and Propulsion Lab)

jeongiklee@kaist.ac.kr

초고온가스로 (VHTR) / 고온가스로(HTR)

□ 핵연료

- ▣ 피복입자핵연료 (TRISO)

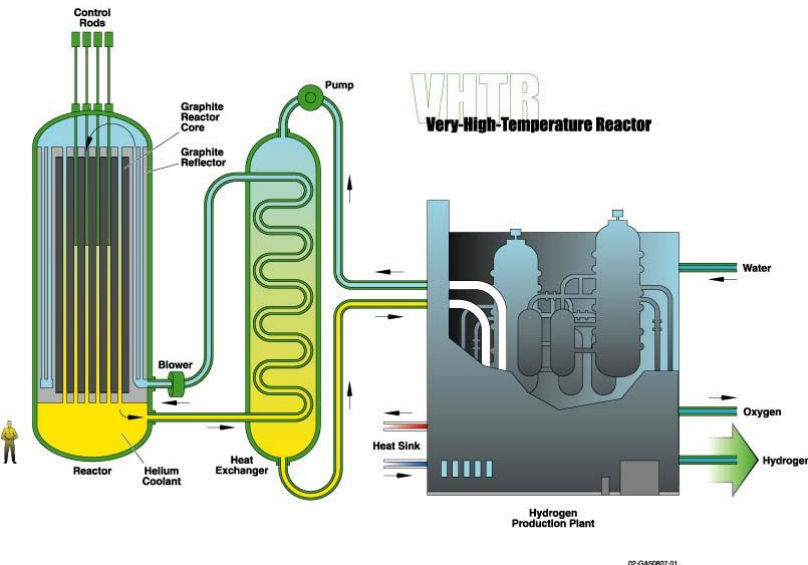
□ 원자로

- ▣ 흑연 감속재
- ▣ 헬륨 냉각재

□ 계통

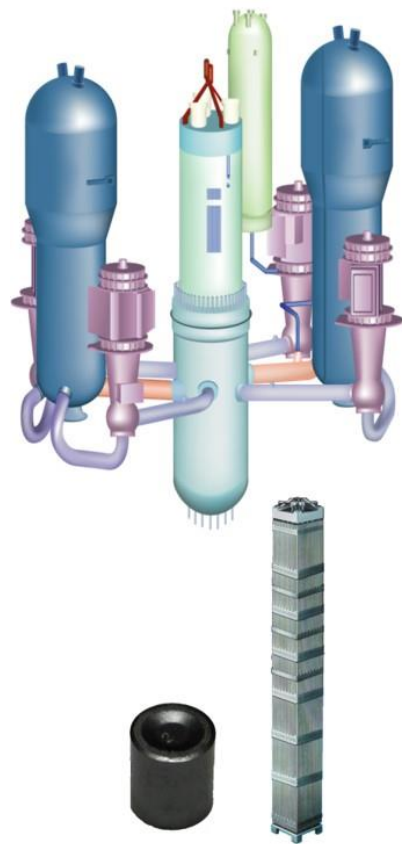
- ▣ HTGR은 950°C 이하의 노심출구 온도
- ▣ VHTR은 950°C 이상의 노심출구 온도
- ▣ 최근에 개발된 HTGR과 VHTR은 모두 GENIV 기술로 인정

- ▣ 출력밀도가 낮아서 전도와 복사 열전달로도 잔열제거 구성이 가능
- ▣ TRISO 입자가 가압경수로의 격납건물이 수행하는 방사성핵종의 밀봉기능을 수행

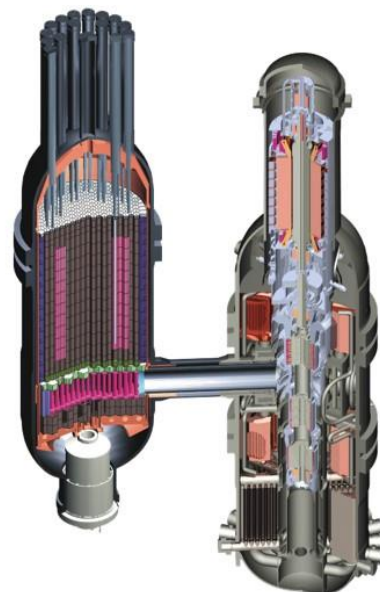


VHTR: Very High Temperature Reactor
HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor

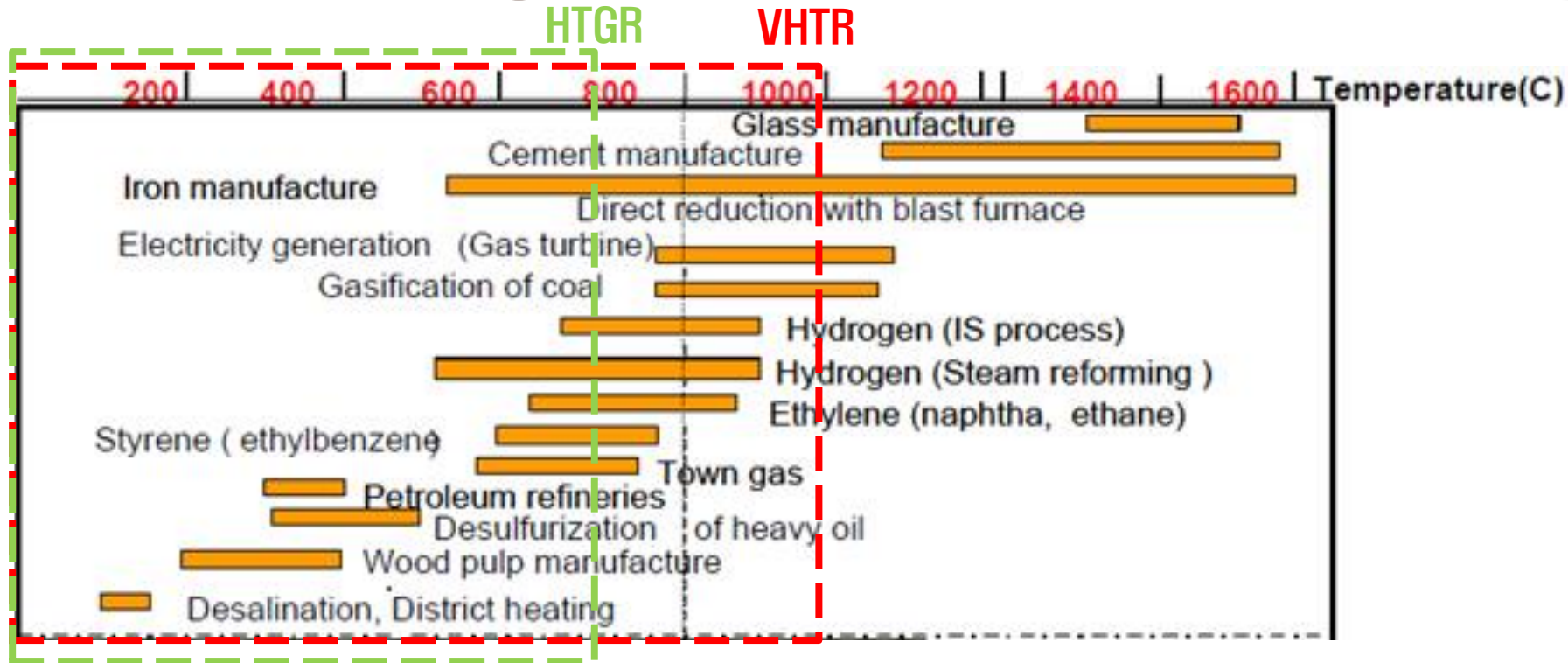
가압경수로 vs. 고온가스로



항 목	가압경수로	고온가스로
냉각재	물	헬륨가스
출구온도	320°C	750~950°C
냉각재압력	150기압	70기압
감속재	물	흑연
핵연료	집합체	피복입자
안전계통	능동/피동	자연냉각
전력변환	증기터빈 (효율~30%)	가스터빈 (효율~50%)
열 이용	담수, 난방	수소생산, 공정열



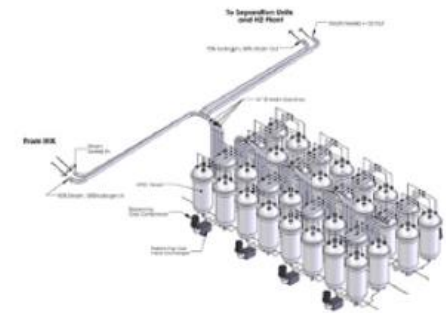
원자력 열이용



제철



석유화학



수소생산

고온가스로를 이용한 수소생산

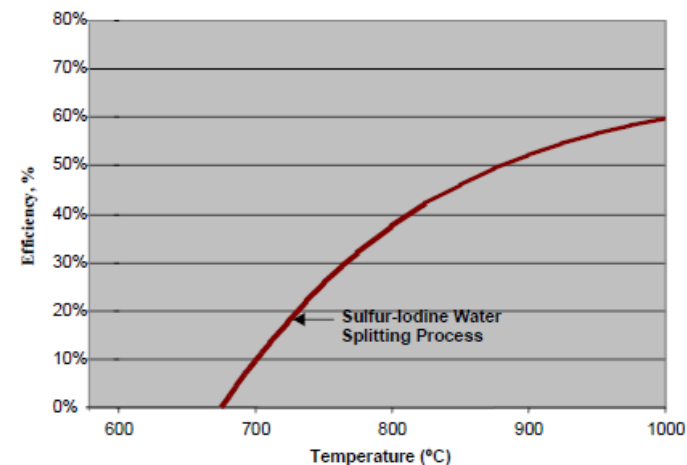
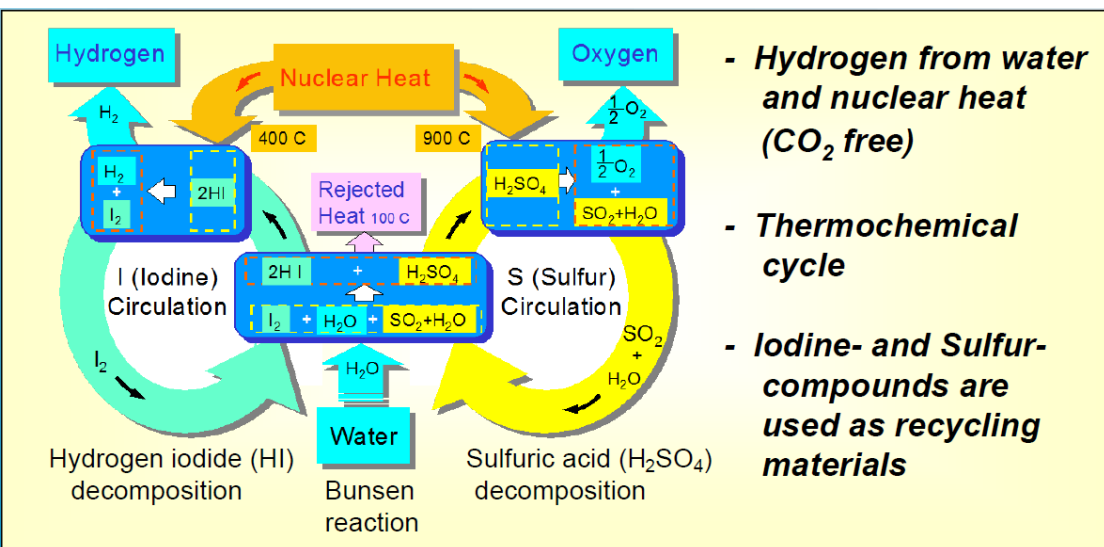
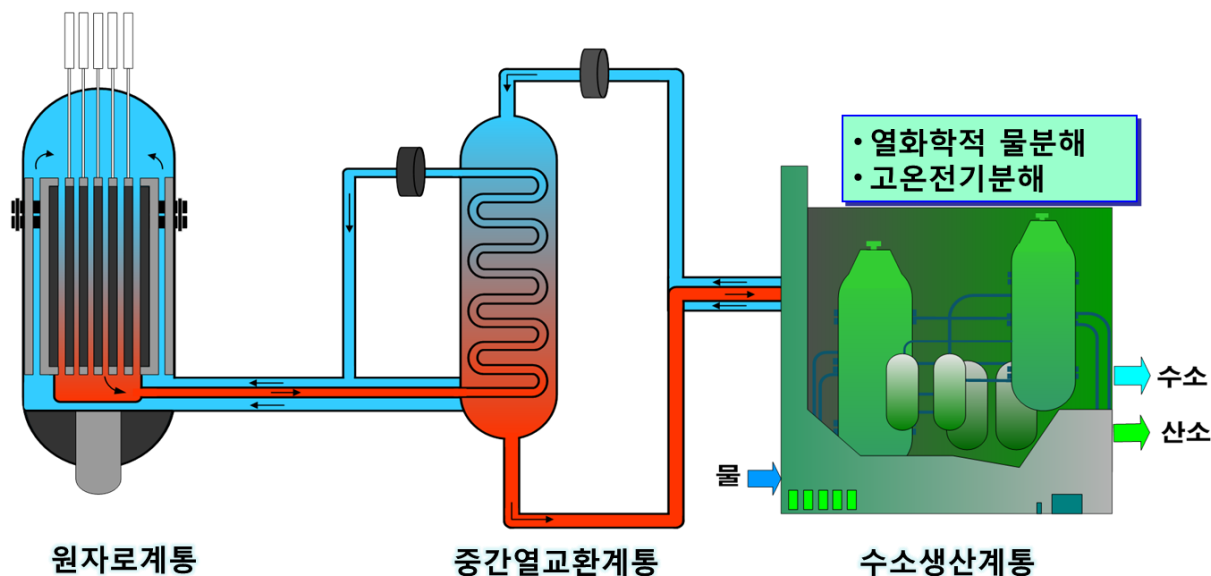
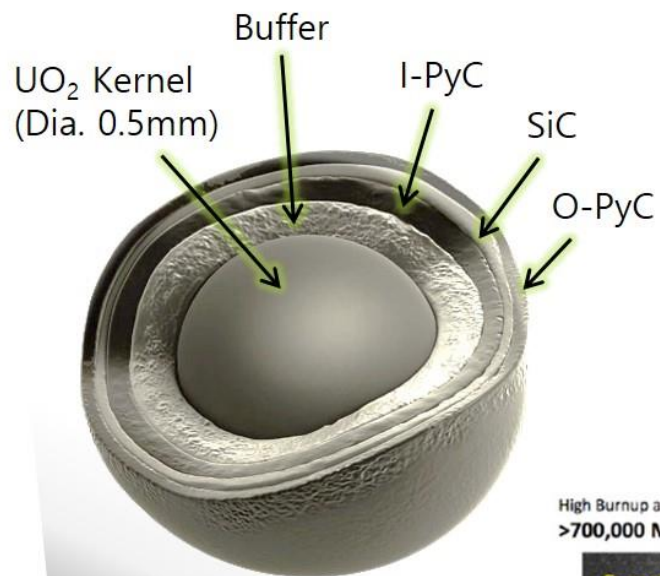


Figure 5. Hydrogen production process energy efficiency as a function of process heat input maximum temperature.

고온가스로 핵연료

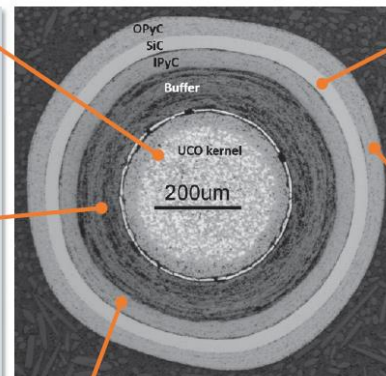


• Kernel (350-500 μm)

- UO₂ or UCO
- Retention of fission products

• Buffer (~100 μm)

- ~50% dense pyrolytic carbon
- Provides space for fission gas and CO(g) accumulation
- Accommodates fission recoils



• SiC (~35 μm)

- Main structural layer
- Primary coating layer for retaining non-gaseous fission products

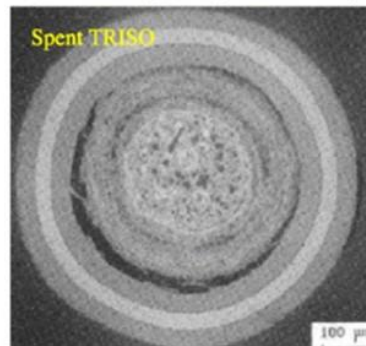
• OPyC (~40 μm)

- Contributes to fission gas retention
- Surface for bonding to matrix
- Protects SiC layer during handling

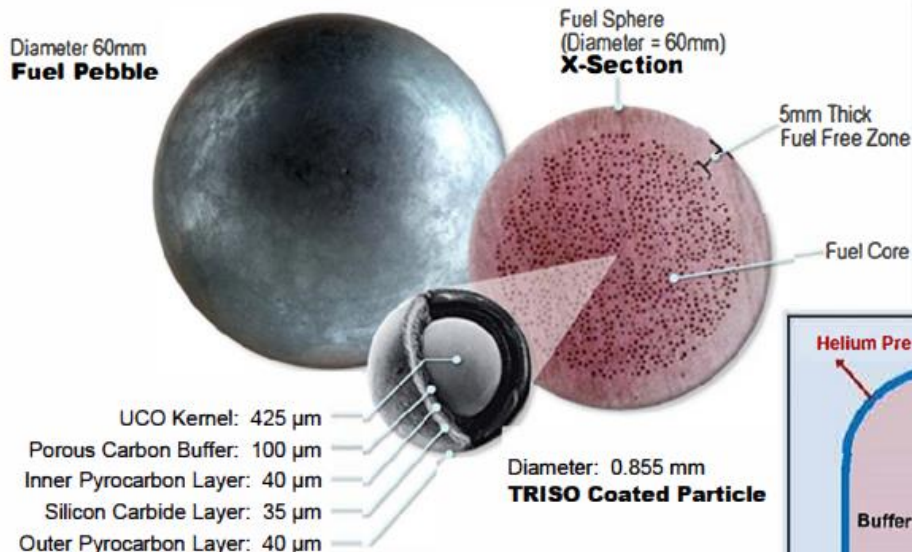
• IPyC (~40 μm)

- Protects kernel from chloride during SiC deposition
- Surface for SiC deposition
- Contributes to fission gas retention

High Burnup at Peach Bottom
>700,000 MW-days/ton (>70% burned)



TRISO 핵연료

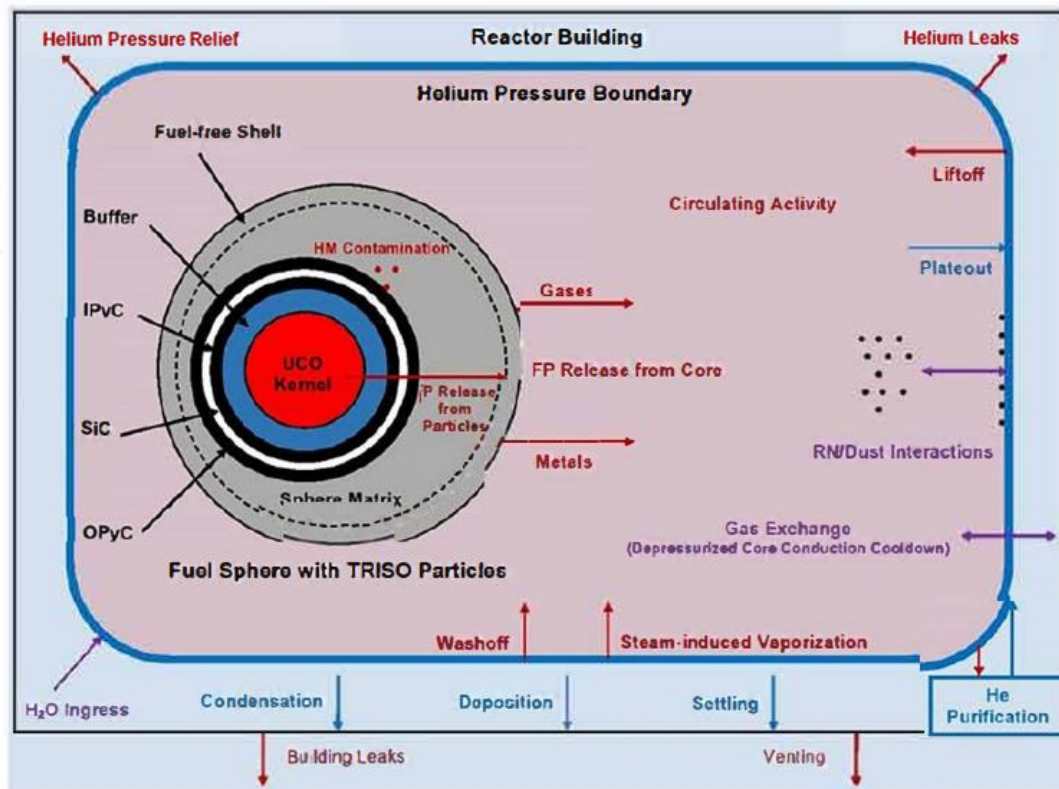


핵연료의 다중코팅을 통한 방사능
물질 격리 기능 강화

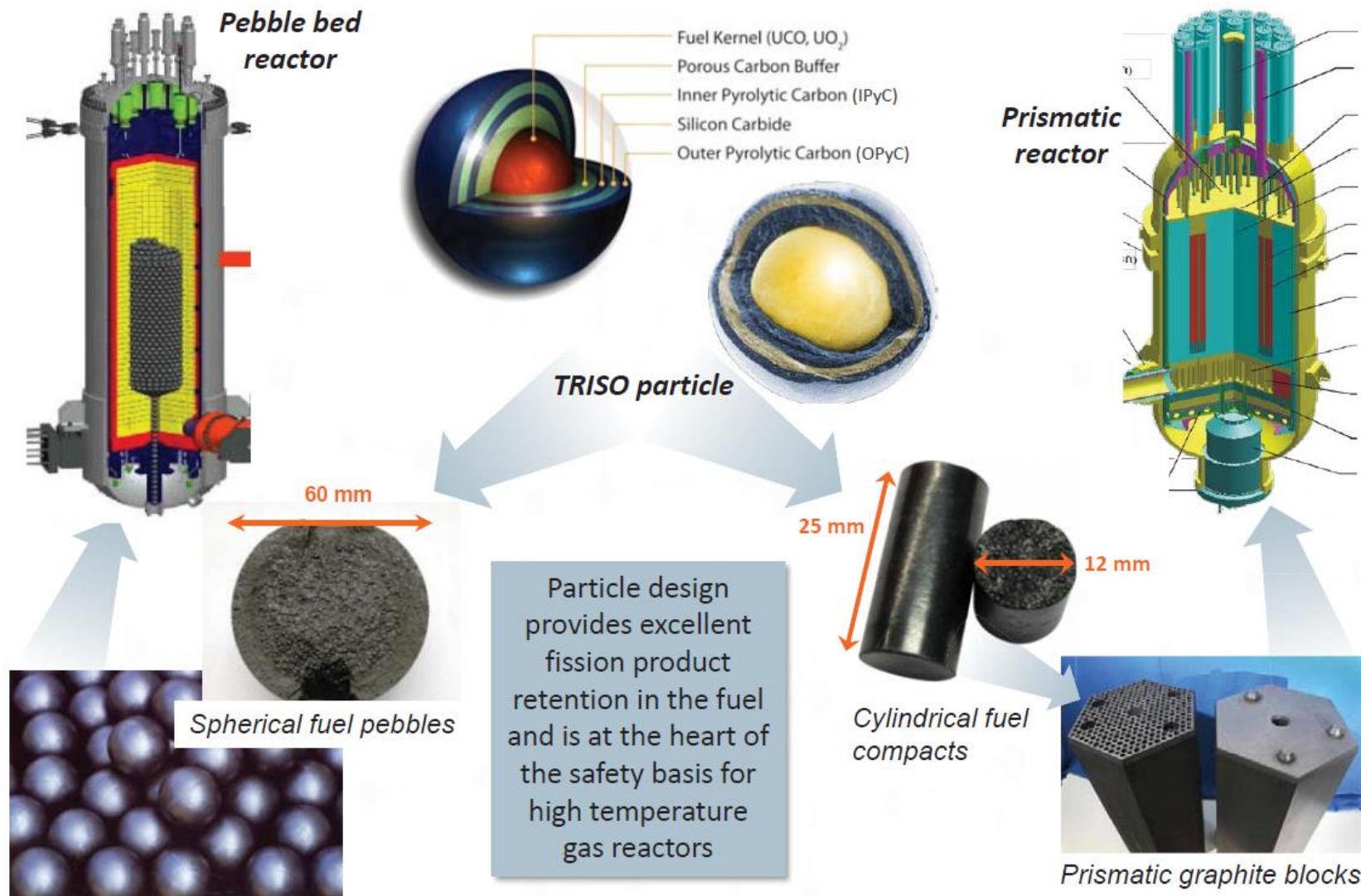
→ 격납건물의 누설여부 중요성 ↓

핵연료의 품질보증이 중요

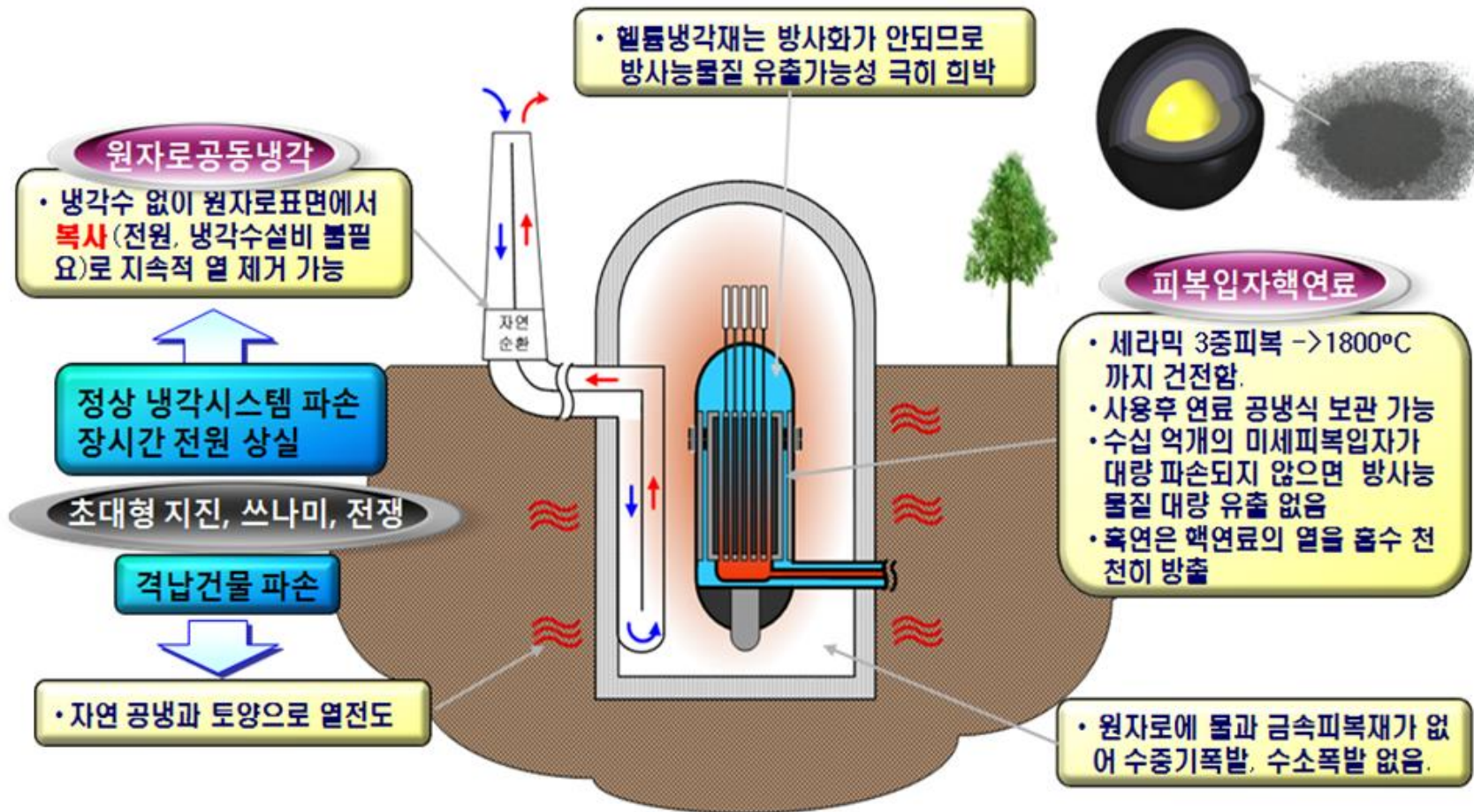
→ 핵연료 생산비용 ↑



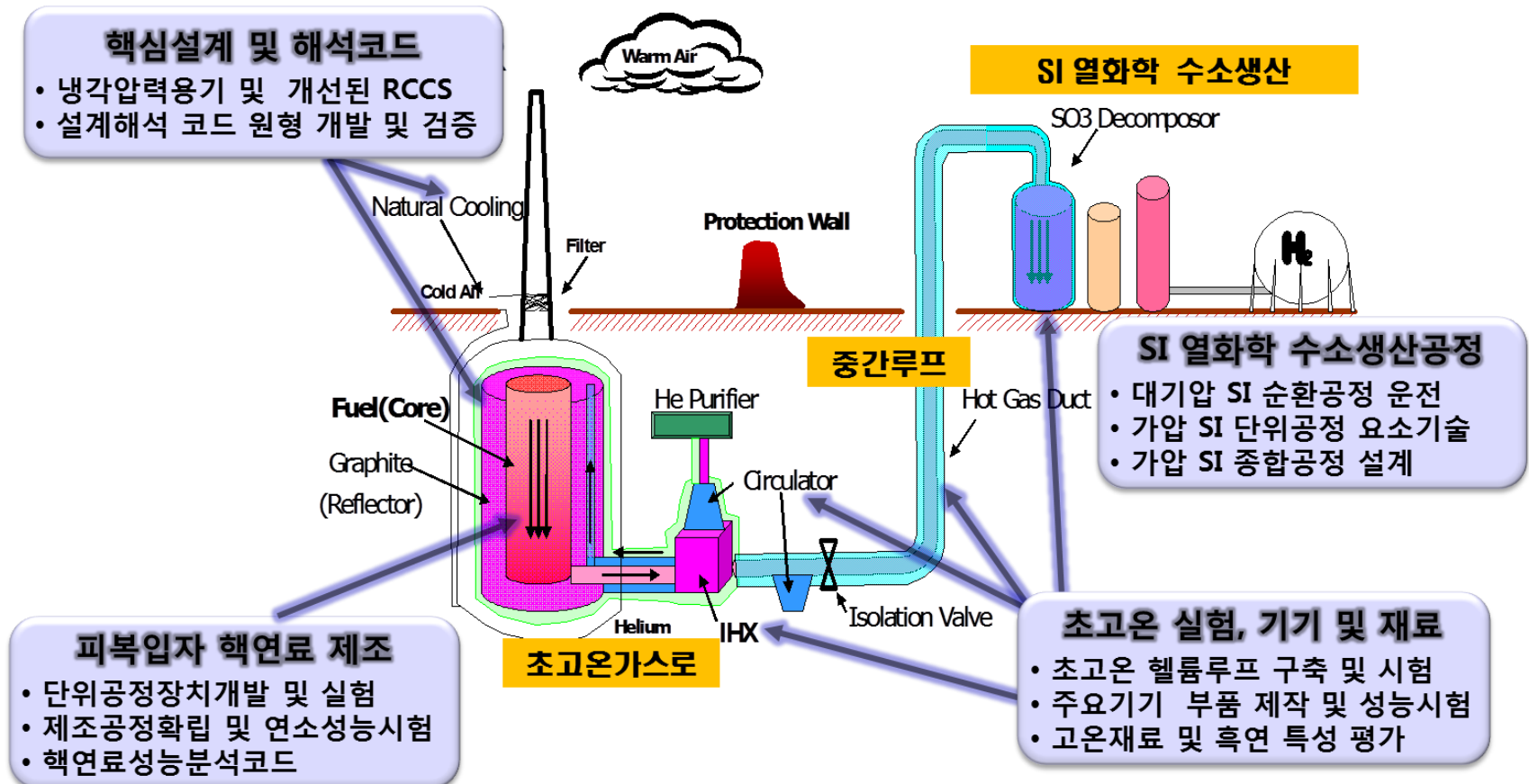
고온가스로 핵연료



고온가스로 피동안전개념



고온가스로 핵심기술



고온가스로 개발역사

- HTGR 원자로는 실제 건설 및 운영이 다수 이루어짐
→ 현재도 SMR 기술과의 접목을 통한 상용화 진행
- VHTR 원자로는 고온재료가 최근에 해결되면서 개발 진행 중

Demonstration Plants



Peach Bottom 1
1966-1974

Fort St Vrain
1976-1989

THTR
1986-1989

Engineering-Scale Prototypes



Dragon
1966-1975

AVR
1967-1988

HTTR
2000-

HTR-10
2003-

	Peach Bottom 1 1966-1974	Fort St Vrain 1976-1989	THTR 1986-1989	Dragon 1966-1975	AVR 1967-1988	HTTR 2000-	HTR-10 2003-
Power Level:							
MW(t)	115	842	750	20	46	30	10
MW(e)	40	330	300		15		
Coolant:							
Pressure, Mpa	2.5	4.8	4	2	1.1	4	3
Inlet Temp. °C	344°C	406°C	250°C	350°C	270°C	395°C	250°C/300°C
Outlet Temp. °C	750°C	785°C	750°C	750°C	950°C	850°C/950°C	700°C/900°C
Fuel type	(U-Th)C ₂ PyC coated particles	(U-Th)C ₂ TRISO	(U-Th)O ₂ TRISO	(U-Th)C ₂ PyC particles	(U-Th)O ₂ TRISO	(U-Th)C ₂ PyC particles	(U-Th)O ₂ PyC particles
Peak fuel temp. °C	~1000°C	1260°C	1350°C	~1000°C	1350°C	~1250°C	
Fuel form	Graphite compacts in hollow rods	Graphite Compacts in Hex blocks	Graphite Pebbles	Graphite Hex blocks	Graphite Pebbles	Graphite compacts in Hex blocks	Graphite Pebbles

** More than 30 CO₂-cooled, graphite-moderated reactors have been built and 10 are now operating in the United Kingdom for power production.

TRISO particles are fuel kernels coated with SiC and PyC

HTGR 개발현황

□ [중국] HTR-PM (211MW)

▣ China Huaneng, CNNC, CNEC, Tsing Hua Univ.



wnn
world nuclear news

Energy & Environment | **New Nuclear** | Regulation & Safety | Nuclear Policies | Corporate | Uranium & Fuel | V

Dual criticality for Chinese demonstration HTR-PM

12 November 2021



The second reactor of the High Temperature Gas Cooled Reactor-Pebble-bed Module (HTR-PM) at the Shidaowan plant in China's Shandong province has reached criticality for the first time, China Huaneng has announced. The first of the unit's twin reactors achieved first criticality in September.



Inside the control room of the HTR-PM (Image: China Huaneng)

HTGR 개발현황

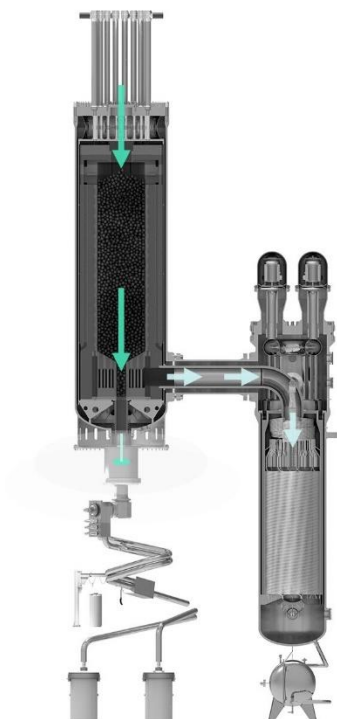
- [미국] MMR (3.5–15MWe)
 - ▣ Ultra Safe Nuclear Company (USNC), 현대엔지니어링 참여



HTGR 개발현황

□ [미국] Xe-100 (100MWe)

- ▣ X Energy는 최근 Dow Chemical과 열이용 원자로 건설 공동 추진
- ▣ 두산에너지빌리티 주기기 중 일부 제작



wnn
world nuclear news

Energy & Environment | [New Nuclear](#) | Regulation & Safety | Nuclear Policies | Corporate | Uranium & Fuel | V

Dow's Seadrift site selected for X-energy SMR project

11 May 2023

[Share](#)

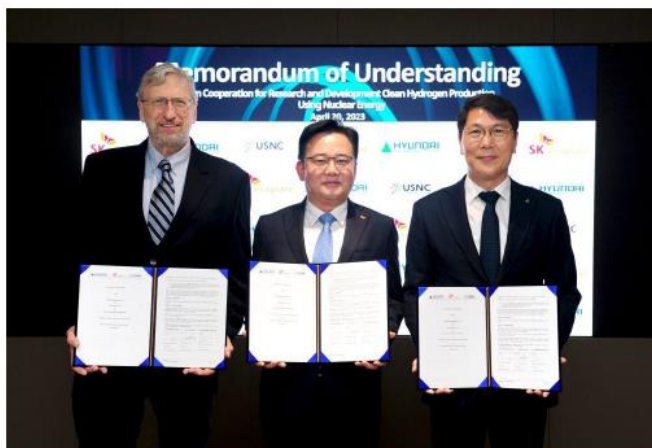
Dow has selected its UCC Seadrift Operations manufacturing site in Texas for its proposed advanced small modular reactor (SMR) project with X-Energy Reactor Company. The aim is for the project to be completed by the end of the decade.



How the Xe-100 plant could look (Image: X-energy/Dow)

HTGR 개발현황

□ 국내



고온가스로 SMR 국내 개발 방향

- 국외에 고온가스로 기술에 대한 관심이 증가하고 기술개발 및 실증을 위한 투자가 증가하고 있으며 국내에서 수소경제와 연계한 고온가스로 기술이 요구되는 상황.
- 기존의 국내에서 개발한 고온가스로 기술을 적극 활용하여 해외기업과 협력 강화를 통해 국내에 개발된 고온가스로 핵심기술이 해외시장에서 적극 활용될 수 있게 진행 필요.
- 해외와의 핵연료 및 인허가 경험 활용으로 시스템 실증 가속화 필요, 초호기 실증 후 핵연료 국산화 요구
- 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.

THANK YOU!