

# 비경수형 원자로용 차세대핵연료 개발 현황

2021.10.20



천 진 식

차세대핵연료기술개발부

# 목 차



## 01 SMR과 핵연료

---

## 02 비경수형 SMR 핵연료 기술

---

## 03 혁신형 비경수형 SMR 핵연료 기술

---

## 04 국내 비경수형 SMR 핵연료 기술 개발

---

## 05 요약

---

# SMR과 핵연료

## ❖ SMR 개발과 핵연료 연구

- 상용로 핵연료 개발 경험 및 제4세대 원전 핵연료 연구 성과에 기반
- 비경수형 SMR 핵연료 설계 검토, 국내외 개발 현황 및 전망 리뷰
- 국내 SMR 핵연료 개발 방향 및 응용분야 확대시 연구방향 논의

## ❖ 비경수형 SMR 핵연료

- 왜 비경수형인가?
  - Gen IV: 경제성 (장주기, 고온), 안전성(고유), 지속가능성(사용후핵연료), 핵비확산성
- 다양한 방식의 비경수형 SMR과 핵연료
  - SMR 분류: 용도, 출력, 냉각재, 출력밀도, 출구온도, 핵연료, 주기, 중성자속, 조사량 등
  - 검증된 핵연료 (금속 핵연료, TRISO 입자 핵연료) 기술, HALEU 활용
  - 응용분야 확대: 핵연료, 피복관, 노심부품, 구조재 개발 및 검증 필요



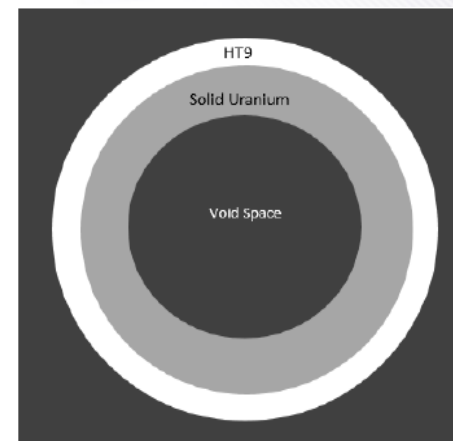
# 비경수형 SMR과 핵연료

핵연료	기반 기술	중소형원자로(>수십MW)	초소형원자로(수MW)
금속 핵연료	EBR-II, PGSFR  금속연료 안전성 + 풀형 원자로	SALUS, ARC-100, Sodium (장주기, 고온열저장, 연소로)  	4S, Aurora (초장주기, 저출력밀도, 자율운전)   
TRISO 핵연료	독일 고온가스로, 미 NGNP  TRISO 우수성 + 낮은 출력밀도	HTR-PM, GTHTR300, X-100, SC-HTGR (고온열이용, 온라인 핵연료 교체)  	MMR, eVinci, TCR (초장주기, 저출력밀도, 자율운전)   
기타	고속 가스로 세라믹 핵연료/ SiC 피복관	EM <sup>2</sup> (UC, 30년 재장전), FMR(UO <sub>2</sub> ) (초장주기, 고온열이용)   <p>UC kernel via sol-gel    200 μm diameter high density kernel    Annular pellet via hot pressing    Porous UC pellet</p>	

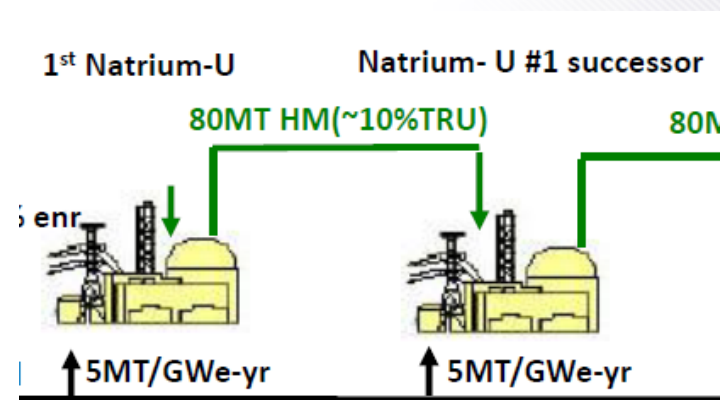
# 비경수형 SMR 핵연료 기술

## ❖ 해외 고속로 금속연료 기술

- 금속연료: 높은 열적여유도, 고유안전성
- 미국 금속연료 조사시험 DB
  - EBR-II: U-Zr 연료봉: >16,000개, U-Pu-Zr 연료봉: 660개, TRU 연료봉: 2개
  - FFTF: IFR-1 집합체, U-Zr 7개 집합체
- ARC-100 금속연료
  - U-Zr 집합체 길이 및 연료봉 직경 증가 → 20년 장주기
- 테라파워 Sodium 금속연료
  - 소듐본드 U-Zr 연료 (DEMO 초기) → 환형 U-Zr 핵연료 (DEMO) → 사용후핵연료집합체 새원자로 장전 (Ultimate)
  - Once-through fuel cycle with closed option



환형 금속연료



Sodium-U Fuel Cycle  
Using Successor

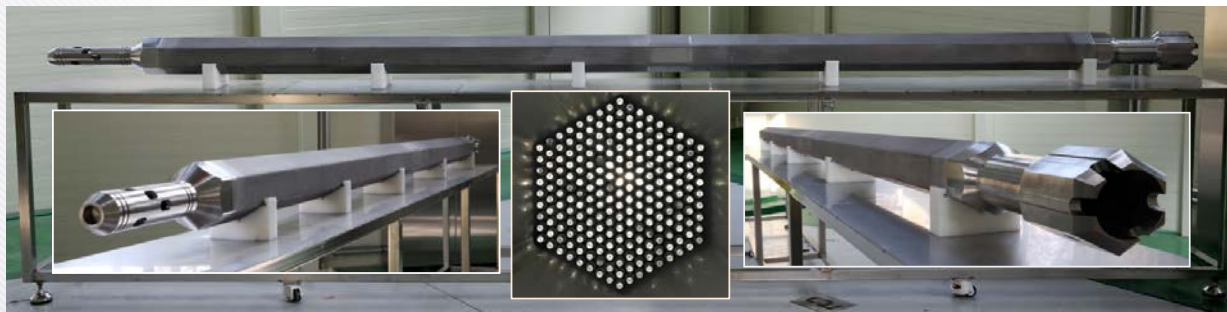


# 비경수형 SMR 핵연료 기술

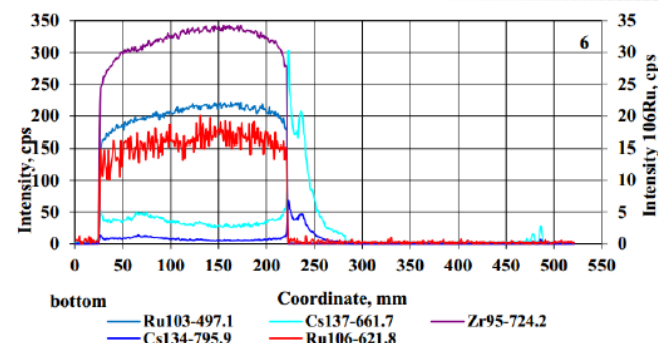
## ❖ 국내 고속로 금속연료 기술

– SFR 원형로 (PGSFR, 150MWe 연소로) 금속연료 기술 개발 → 초기노심 공급 가능

- 초기노심 U-Zr 연료심/연료봉 제조기술 확보 및 실규모 핵연료집합체 제작/시험 완료
- U-Zr 연료봉 성능검증(7at%) 및 성능코드 검증 완료
- FC92 신피복관 피복관 성능 노내외 검증 (75 dpa, 650 °C)
- TRU 모의연료심 원격제조 및 TRU 핵연료 ATR 3at% 성능 검증



실규모 U-Zr 금속연료 집합체



BOR-60 조사연료봉 감마스캐닝

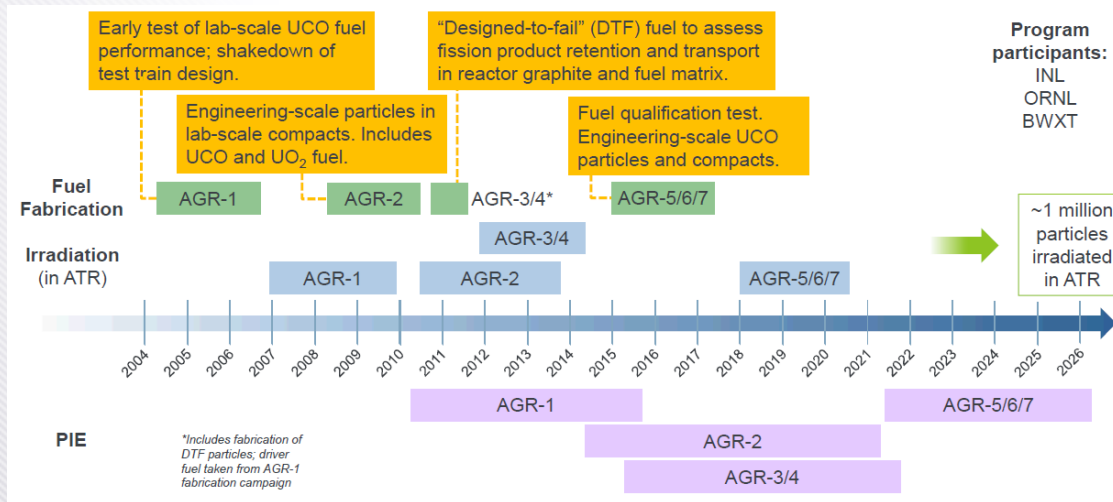
– SALUS (Small, Advanced, Long-cycled and Ultimate Safe SFR, 100MWe)

- U-Zr 연료 기술 활용 장주기 SMR → 전력, 고온 열이용, 열저장 → 캐나다 VDR 신청 목표

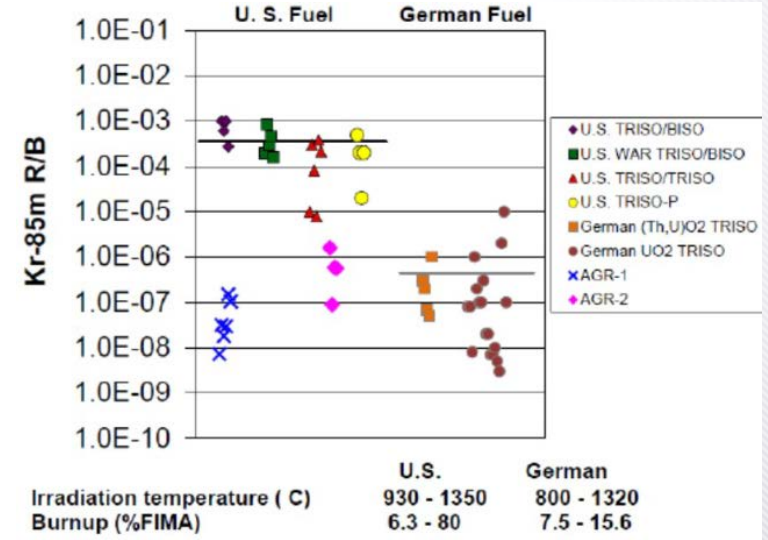
# 비경수형 SMR 핵연료 기술

## ❖ 해외 TRISO 피복입자연료 기술

- 피복입자연료의 기밀성: 영국, 독일, 중국, 일본, 남아공
- 미국은 핵연료 조사시험을 지속적으로 수행하여 SMR 산업 촉진
  - NGNP AGR 프로그램을 통하여 2004년 UCO 연료 조사시험 착수
  - 특정기술주제보고서 (TR) 2019년 신청 및 2021년 PSER 발행



AGR 조사시험 프로그램



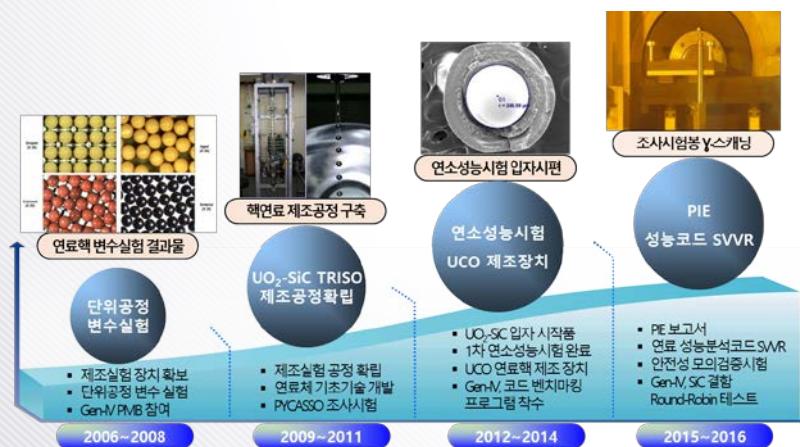
TRISO 연료 조사성능 비교



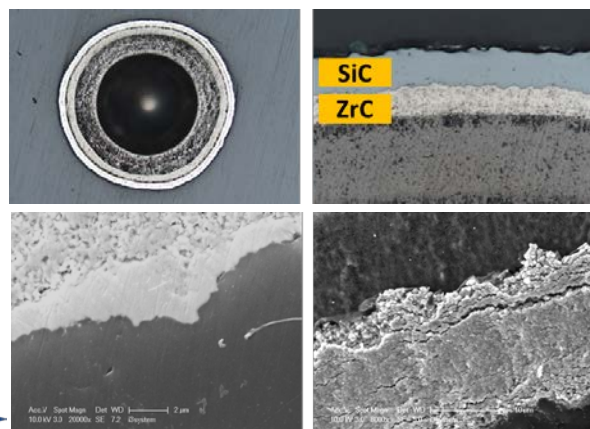
# 비경수형 SMR 핵연료 기술

## ❖ 국내 TRISO 피복입자연료 기술

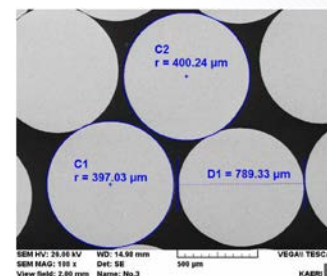
- 입자연료 실험실규모 (20g/batch)  $UO_2$  (~500 $\mu$ m) 연료핵 제조기술 확보
- 하나로에서 1차 연소성능시험 평가 (4 at%)
- 대형  $UO_2$  (~800  $\mu$ m) 연료핵 및 삼중피복 성능 향상
- KNF 경수로 ATF용 FCM 연료체 상압소결 기술 개발: 충진율 향상



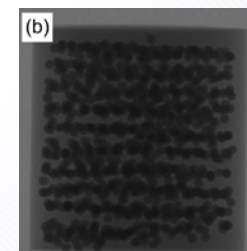
피복입자핵연료 기술개발 과제 주요 성과



ZrC/SiC 다중코팅 제조 및 계면 건전성 평가



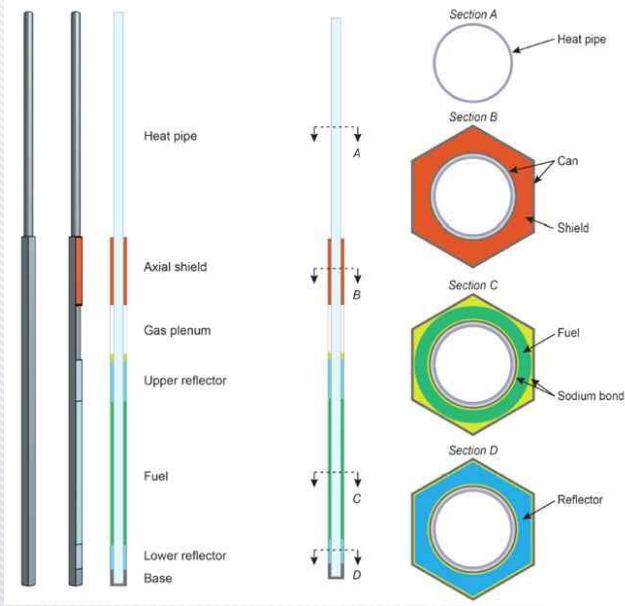
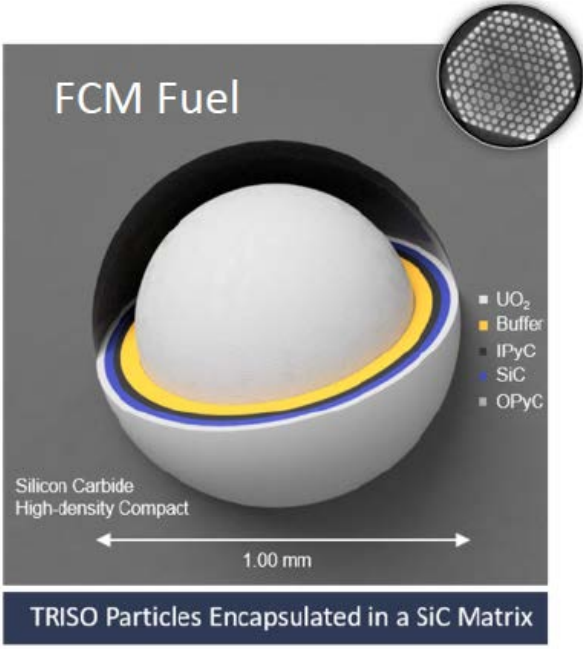

직경 0.8mm  $UO_2$  연료핵



상압소결 FCM 연료체



# 초소형원자로 핵연료기술

Oklo Aurora	USNC MMR	ORNL TCR
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 히트파이프 냉각, 3.9W/cc</li> <li>• U-Zr 연료, 소듐 본딩, HT9</li> <li>• 1 at% 연소도, 20년 주기</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가스냉각 방식, 1.24W/cc</li> <li>• FCM (TRISO+SiC)</li> <li>• 20년 주기 (연료핵, 충전율)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TRISO+SiC matrix, <math>\text{YH}_x</math></li> <li>• 적층제조 SiC shell</li> <li>• Chemical vapor infiltration</li> </ul>
		

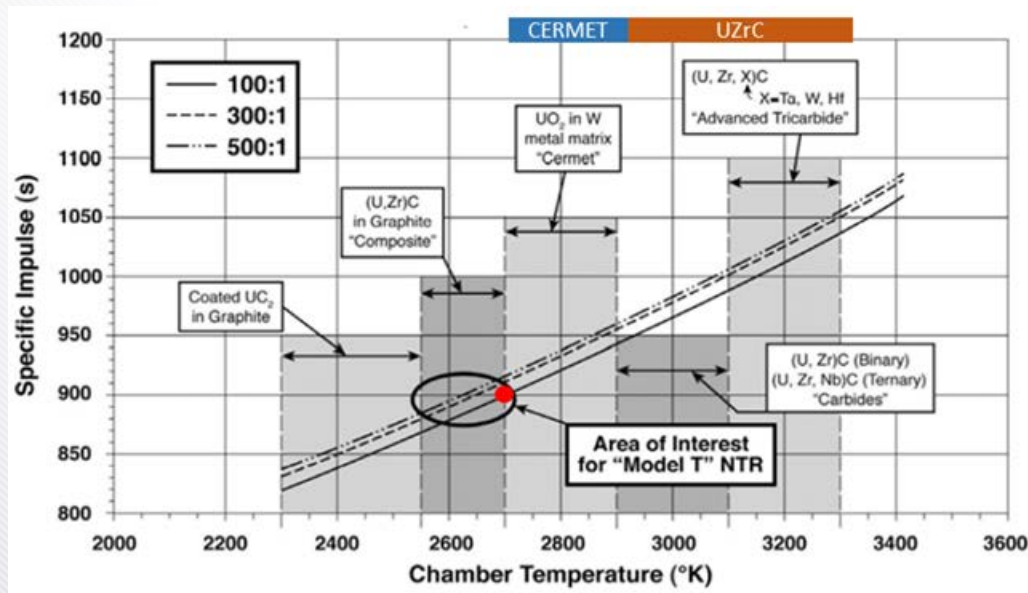
# 우주용 원자로 핵연료 기술

## ❖ 원자력 열추진(NTP, Nuclear thermal propulsion) 원자로 핵연료

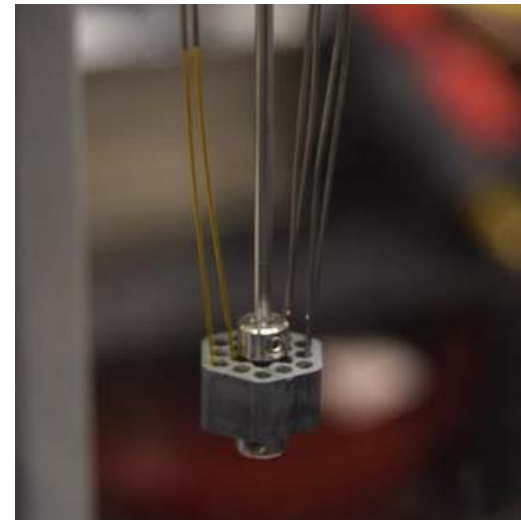
– 심우주 탐사에 화학추진체 대신 원자력 열추진 활용 → 비추력 2배 이상 증가

– 가혹한 핵연료 조건 → composite structure

- 조건: 출구온도 2700K, 수소 분위기, 1분내 100% 출력 상승 초고온 → 구조건전성, 부식
- HALEU 사용 분산연료 (HIP 제조): CERMET( $\text{UO}_2 + \text{W}$  기지) → CERCER( $\text{UN} + \text{ZrC}$  기지)



챔버 온도와 비추력 관계



TREAT 시험용 우주 핵연료



# 국내 비경수형 SMR 핵연료 기술 개발

## ❖고속로 금속연료 기술

– 장주기 노심 핵연료 개발, 조사시험 지속 추진, TRU 공백기술 개발

구분	연구 내용
핵연료 설계	· 장주기 노심 핵연료 설계 및 성능평가
핵연료 제조 기술	· 장주기 노심 핵연료 제조 혁신기술 개발 · 모의핵연료 활용 TRU 핵연료 손실률 저감기술 개발 · TRU 핵연료 제조 (국제공동)
피복관 제조 기술	· 실규모 Cr 배리어 피복관 기술 개발 · 고연소도 대응 조사된 FC92 피복관 DB 확보
핵연료 성능검증	· BOR-60 U-Zr 연료봉 조사시험 (10at.%) · TRU 핵연료 노내검증 (국제공동) · 핵연료 성능분석코드 검증

# 국내 비경수형 SMR 핵연료 기술 개발

## ❖ TRISO 피복입자연료

– 비산화물계 HALEU 연료핵, 공학규모 코팅기술, 고연소도 노내 검증

구분	연구 내용
핵연료 제조기술	<ul style="list-style-type: none"><li>· 고U밀도 비산화물계 HALEU 연료핵 제조 기술</li><li>· 공학규모 유동층 화학기상증착 피복 기술</li><li>· 고용점 탄화물 기반 연료체 제조 기술</li></ul>
핵연료 성능검증	<ul style="list-style-type: none"><li>· 고연소도 조사 시험</li><li>· 핵연료 성능분석코드 검증</li></ul>

## ❖ 우주·해양 핵연료

– 분산핵연료 공통기술 개발

- 분산 핵연료심 및 연료체 제조 기술 개발 (충진율, 코팅, 접합물질, HIP, AM)
- 핵연료/집합체 성능평가 및 검증 기술 개발



# 요약

- ❖ 원자로 기술의 응용분야가 비발전 분야로 확대됨에 따라 핵연료 및 재료 기술 수요가 증가하고 있음
- ❖ 새로운 핵연료 기술의 선행연구를 수행하고 기술을 지속적으로 검증하여야 SMR 기술 경쟁력을 확보할 수 있음
- ❖ 미래 핵연료 핵심기술 확보를 위하여 산학연 협력과 검증기반 확보가 필요함

---

감사합니다.