

(KNS Workshop 코드 D) SMR 용 핵연료/재료 개발 및 연구동향

# 경수형 원전용 핵연료 개발 현황 및 전망

2021. 10. 20

김현길, hgkim@kaeri.re.kr

핵연료안전연구부

# 목차



**01 경수형 원전, 핵연료**

---

**02 사고저항성핵연료 개발**

---

**03 사고저항성핵연료 규제**

---

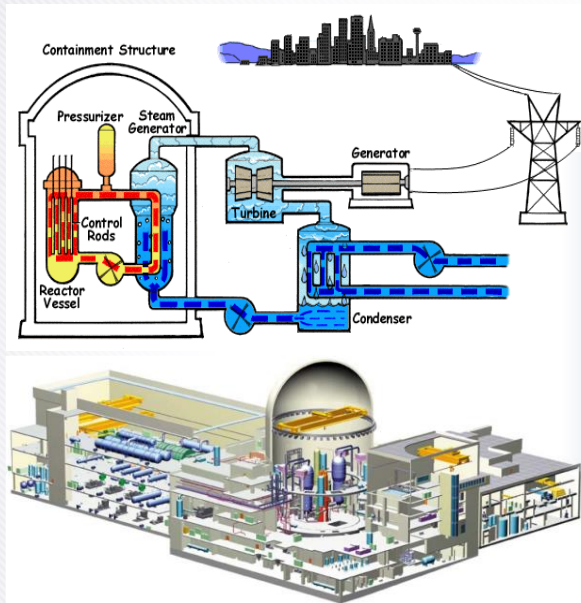
**04 4차 산업 적용 혁신 핵연료, 부품 개발**

---

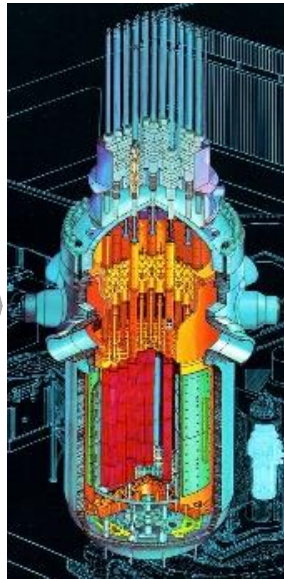


# 01. 경수형 원전 핵연료

## » 경수형 원전 핵연료 개념



원자력발전소



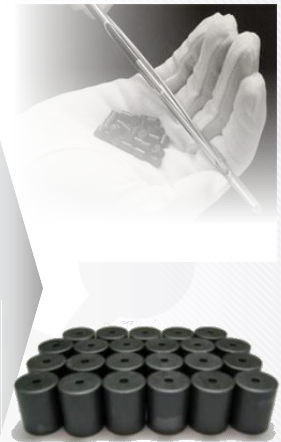
원자로



핵연료집합체



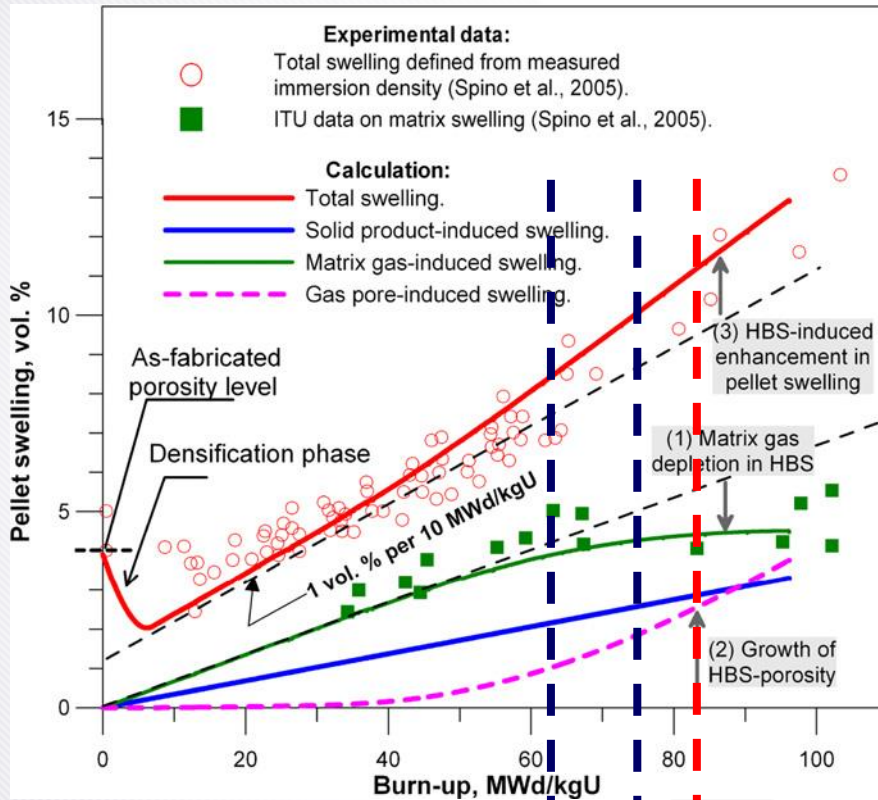
핵연료봉



핵연료소결체

# 01. 경수형 원전 핵연료

## » 핵연료 소결체 ( $\text{UO}_2$ )



### 소결체 기술현안

핵분열 기체 방출

소결체 팽윤

방사성/부식성 핵종 방출

핵분열 물질 고갈

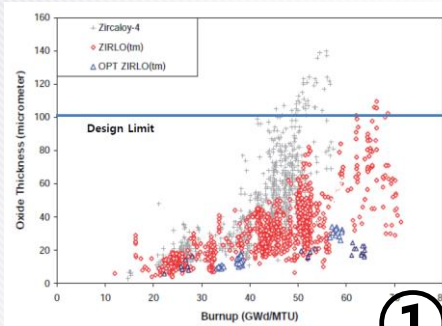
- ① ~62GWd/MTU  
⇒ 상용 핵연료 연소도 한계  
⇒ 큰 결정립 소결체 개발
- ② ~75GWd/MTU  
⇒ PCI 완화 소결체 개발
- ③ ~82GWd/MTU 혹은 그 이상  
⇒ 초장주기 초고연소도 소결체

① ② ③



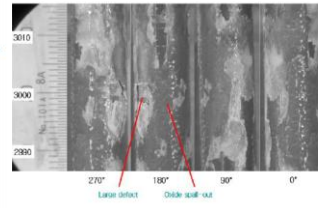
# 01. 경수형 원전 핵연료

## » 핵연료 피복관 (Zr alloy)



Clad Corrosion & Design Limit

①



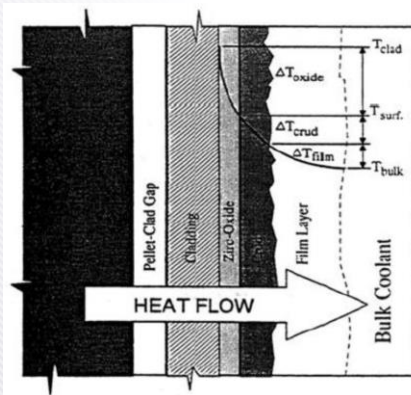
Clad Failure due to Corrosion & Hydride



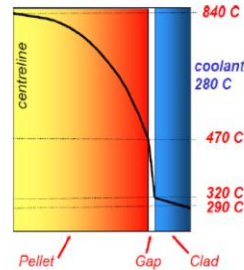
②

피복관  
기술현안

부식저항성 향상  
크립저항성 향상  
수소흡수, 수소화물 저감  
손상 저감



Typical temperature distribution  
(20 kW/m)



Heat flow resistances

1. coolant – cladding
2. oxide/crud layer
3. cladding wall
4. inner oxidation / bonding layer
5. fuel – cladding gap
  - numerous influences
6. fuel
  - conductivity
  - general porosity
  - high burnup porous rim
  - cracks

③

① ~55GWd/MTU

⇒ 경제성 향상 고연소도

⇒ 내부식 피복관 개발

② ~irradiation cycle

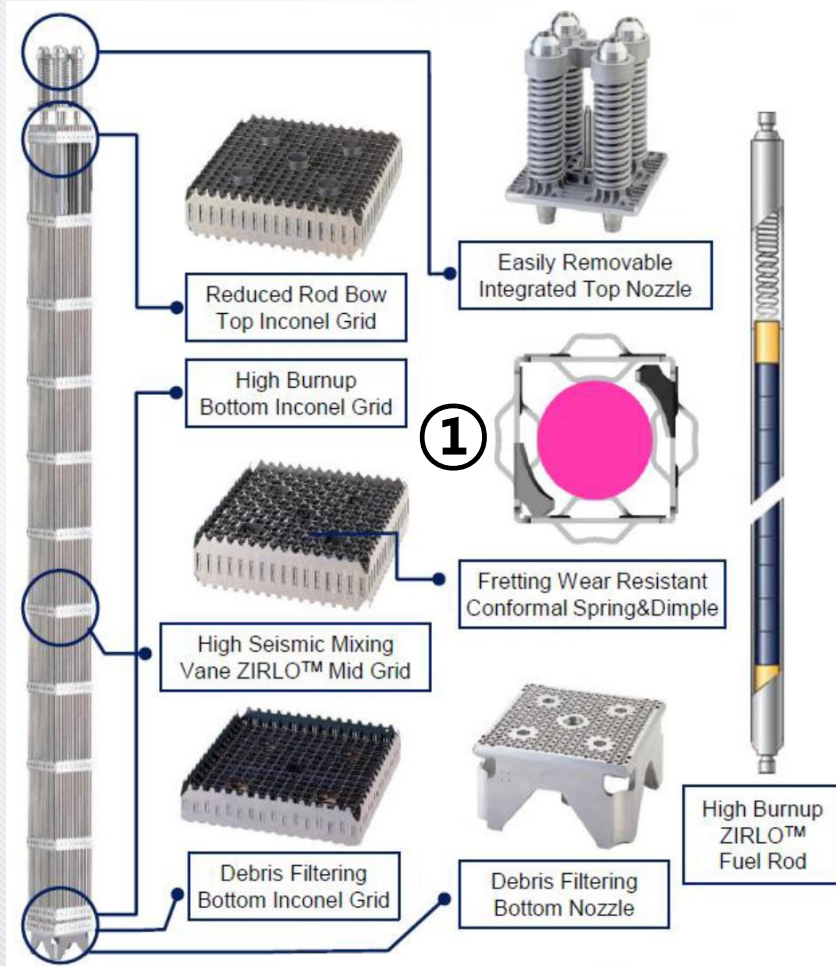
⇒ 수소 흡수, 방향성 제어

③ ~irradiation time

⇒ 손상 저감 피복관

# 01. 경수형 원전 핵연료

## » 핵연료 집합체 (Assembly)



### 집합체 기술현안

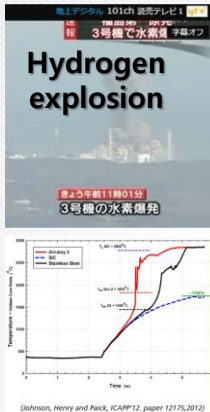
마모저항성 향상  
Debris 저감  
냉각능 향상  
조립 수리의 편의성

- ① ~irradiation time
- ⇒ 수소 흡수, 방향성 제어
  - ⇒ 마모 저항성 향상 디자인
  - ⇒ Debris Filtering 기능 향상
  - ⇒ 열적성능 향상 Mixing Vane
  - ⇒ Rod Bow 저감
  - ⇒ Easily Removable 디자인



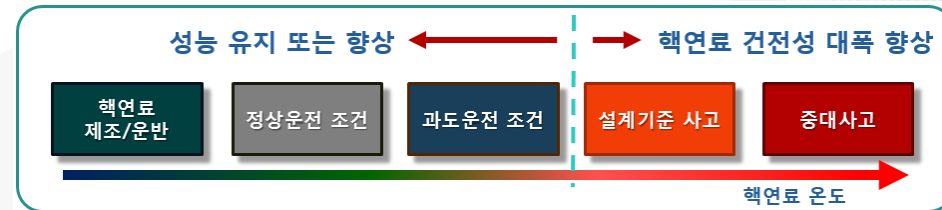
# 02. 사고저항성핵연료(ATF; Accident Tolerant Fuel)

## » 사고저항성핵연료(Accident Tolerant Fuel, ATF)



Fukushima Daiichi Accident ('11.03)

- ✓ 원전의 냉각기능이 손실된 상태에서  $\text{UO}_2\text{-Zr}$  핵연료 대비 상대적으로 핵연료의 건전성을 장시간 동안 유지할 수 있는 핵연료 (중대사고 시 사고전개 지연, 대처시간 확보)
- ✓ 동시에, 원전의 정상/과도 운전에서도 핵연료의 성능이  $\text{UO}_2\text{-Zr}$  핵연료와 동등 또는 우수한 핵연료



- ✓ ATF는 국제기구와 주요 원전 가동국들이 역량을 동원해 개발중인 원자력 핵심 안전 기술로 조기 실용화를 위한 경쟁 체계 돌입
- ✓ 향후 가동 원전의 모든 핵연료는 ATF가 되어야 함 → "Game Changer"



ATF Stakeholder Collaboration



## 02. ATF 연구방향

### » ATF 개요 및 성능 목표



*Fuels with **enhanced accident tolerance** are those that, in comparison with the standard  $\text{UO}_2\text{-Zr}$  system, can **tolerate loss of active cooling** in the core for a **considerably longer time period** (depending on the LWR system and accident scenario) while maintaining or improving the fuel performance during normal operations.*

#### Enhanced Tolerance to Loss of Active Core Cooling

##### Improved Reaction Kinetics with Steam

- Decreased heat of oxidation
- Lower oxidation rate
- Reduced hydrogen production (or other combustible gases)
- Reduced hydrogen embrittlement of cladding

##### Improved Fuel Properties

- Lower fuel operating temperatures
- Minimized cladding internal oxidation
- Minimized fuel relocation/dispersion
- Higher fuel melt temperature

##### Improved Cladding Properties

- Resilience to clad fracture
- Robust geometric stability
- Thermal shock resistance
- Higher cladding melt temperature
- Minimized fuel - cladding interactions

##### Enhanced Retention of Fission Products

- Gaseous fission products
- Solid/liquid fission products



# 02. ATF 기술개발 현황

## » 연구개발 대상의 기술개발 현황 (사고저항성 향상에 집중)

ATF 피복관			
Coated Zr-alloy	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zr 피복관 표면에 산화 방지막 코팅</li> <li>Metal-alloy, Max phase, oxides, ODS-layer</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>한국, 미국, 프랑스, 러시아, 중국</li> </ul>
Advanced Steels (FeCrAl)	<ul style="list-style-type: none"> <li>내산화 FeCrAl 소재 개발</li> <li>내산화, 고강도 FeCrAl-ODS 소재 개발</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>한국, 미국, 일본, 러시아</li> </ul>
Ceramic Claddings	<ul style="list-style-type: none"> <li>내산화 SiC에 기밀도 향상을 위한 hybrid 개념 도입</li> <li>표면 용해를 막기 위한 코팅기술 접목</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>한국, 미국, 프랑스, 중국</li> </ul>
Mo cladding	<ul style="list-style-type: none"> <li>고융점 고강도 Mo-alloy 사용</li> <li>내외면 산화방지를 위한 3중 구조</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>미국</li> </ul>
ATF 소결체			
Improved UO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>소량의 이종 물질 첨가</li> <li>열전도도, 핵분열 생성물 포집능 등 특성 향상</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>한국, 미국, 프랑스, 중국</li> </ul>
High fissile density fuel	<ul style="list-style-type: none"> <li>U-Zr, U-Mo, UN, Uranium silicide (U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>)</li> <li>복합재료 핵연료</li> <li>특정 ATF 개념에서의 경제성 향상, 열전도도 향상</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>한국, 미국, 프랑스, 러시아</li> </ul>
Coated Particle fuel	<ul style="list-style-type: none"> <li>TRISO encapsulated in SiC matrix (FCM)</li> <li>핵분열 생성물 방출 저감</li> <li>High U<sup>235</sup> enrichment, UN-TRISO</li> </ul>		<ul style="list-style-type: none"> <li>한국</li> </ul>

# 02. 미국 DOE 지원 ATF 개발 대상 기술

## » 고유 기술 개발 및 상용화 단계 진입



U.S. DEPARTMENT OF  
**ENERGY**

Nuclear Energy

## Industry-led Development of ATF Concepts

### Framatome

- Cr-coated M5 cladding
- Doped  $\text{UO}_2$  for improved thermal conductivity and performance
- SiC cladding



### General Electric

- Coated Zr cladding
- Iron-based cladding (FeCrAl)
- ODS variants for improved strength

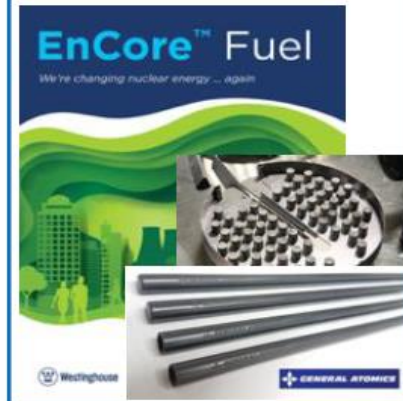


GE imagination at work



### Westinghouse

- Cr-coated Zirlo cladding
- SiC cladding
- Silicide fuel with improved thermal conductivity and high density



**AFC** Advanced Fuels Campaign

3



# 02. 단기적용을 위한 ATF 기술 대상 요약

» 단기적용 ATF 기술은 성능향상도는 낮지만 상용화가 용이

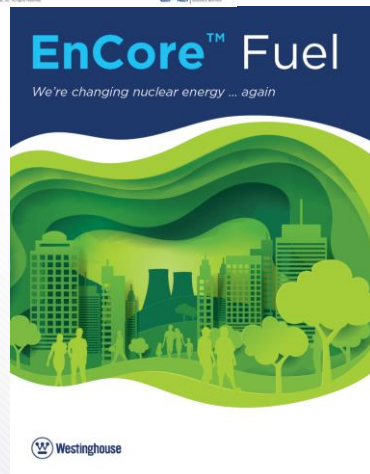
❖ **Coated (Cr, Cr-alloy, AMOR) Zr cladding (PWR)**

➤ Framatome, Westinghouse, GE-GNF, Rosatom, **CN, KO**

❖ **성능개선(열전도도 등)  $UO_2$**  : Framatome, Westinghouse, **CN, KO**

❖ **Fe-base cladding (BWR)** : GE-GNF, Rosatom, **JP, CN, KO**

## ATF Stakeholder Collaboration

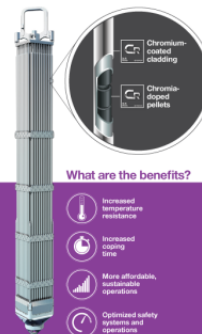


## EATF

The Next Evolution of Nuclear Fuel

### What is Enhanced Accident Tolerant Fuel?

Fuel designs that can tolerate loss of active cooling in the reactor core for longer time periods in light water reactors while maintaining or improving fuel performance during normal operations.



### What are the benefits?

- Increased temperature resistance
- Increased time
- More affordable, sustainable operations
- Optimized safety systems and operations

### Who does AREVA work with?



### How is AREVA bringing EATF to the industry?

- 2010 - AREVA, EDF & CEA research on enhanced safety margin materials
- 2011 - AREVA program for multiphase accident analysis (MARA) for gas in reactors
- 2012 - AREVA begins experimental work on DCC contact
- 2013 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2014 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2015 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2016 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2017 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2018 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2019 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2020 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2021 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2022 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2023 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2024 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2025 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2026 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2027 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2028 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2029 - AREVA begins EATF production in Hualien, China
- 2030 - AREVA begins EATF production in Hualien, China

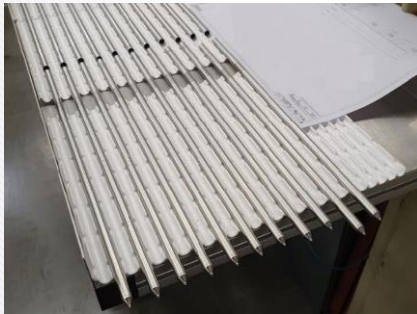




# 02. 중·장기적용을 위한 ATF 기술 대상 요약

## » 단기적용 ATF 기술 대비 높은 성능향상도 연구개발 추진

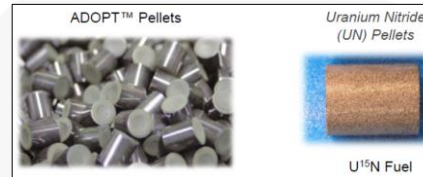
- ❖ **Coated Zr cladding, inner coating** : Framatome, CEA, Mitsubish, **CN, KO**
- ❖ **SiC cladding, channel box** : Framatome, CEA, General Atomics, ORNL, INL, Hitachi, **CN, KO**
- ❖ **Fe-base cladding, FeCrAl-ODS** : GE/GNF, JAEA, Hitachi, Toshiba, **CN, KO**
- ❖ **Fuel pellet with improved thermal conductivity** : Framatome, Westinghouse, INL, **CN, KO**
- ❖ **High U density pellet** : Westinghouse, LANL, INL, KTH, USTA, Rensselaer, **CN, KO**
- ❖ **Accident Tolerant Control Rod** : CRIEPI, Framatome, Westinghouse, Rosatome, **CN, KO**



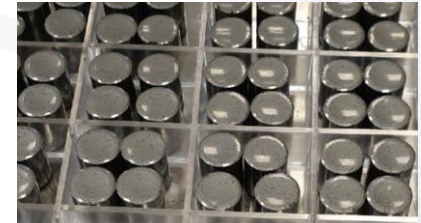
<Coated rods, Framatome>



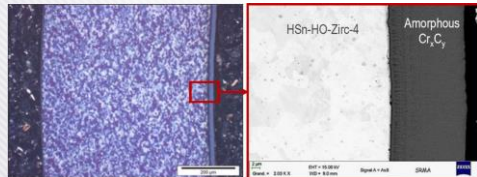
<SiC rodlets, Framatome>



<Advanced pellet, Westinghouse>



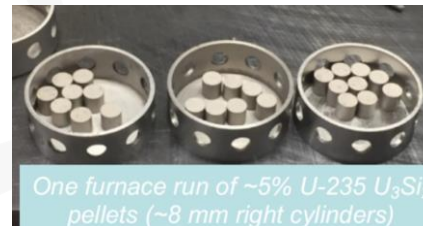
<Cr-variant pellet with high thermal conductivity, Framatome>



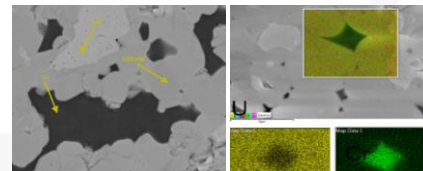
<Cladding inner coating, CEA>



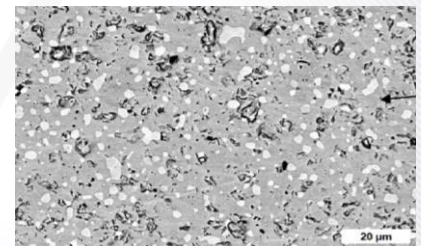
<SIGA™ SiC composite, GA>



<U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub> pellet, LANL>



<CrN/Cr-doped UN pellet, KTH/Rensselaer>



<UO<sub>2</sub>-UB<sub>2</sub> pellet with high thermal conductivity, Westinghouse>

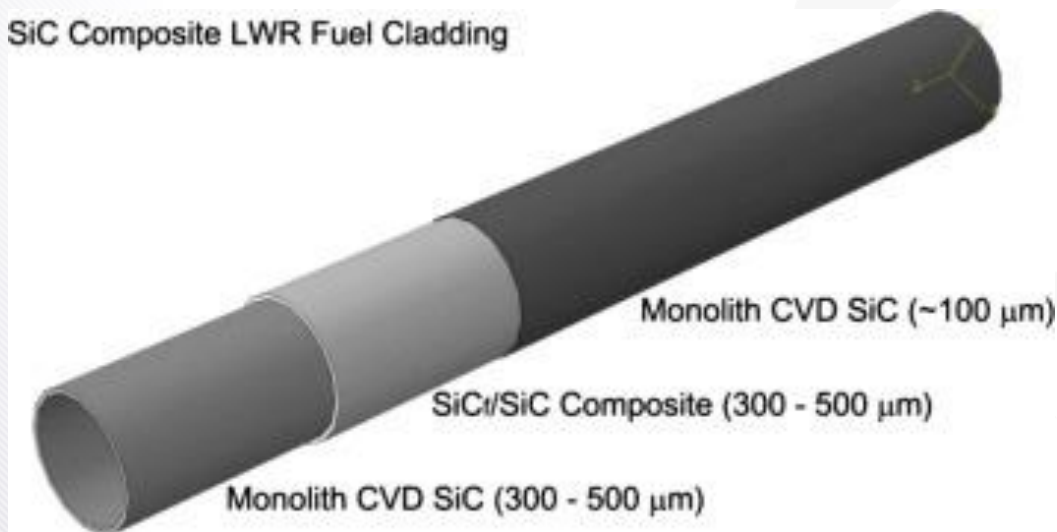


## 02. 장기적용을 위한 ATF 기술 대상 요약

» 장기적용 ATF 기술은 성능향상도는 높지만 추가 기술개발이 필요

- ❖ **Ceramic (SiC) cladding** : Westinghouse, Framotome, JP, CN, KO
- ❖ **High density pellets** : Westinghouse, Rosatom
- ❖ **Alternative metal tube(FeCrNiMo)** : Rosatom, KO
- ❖ **FeCrAl - ODS** : JP
- ❖ **Innovative concepts: All ?**

SiC Composite LWR Fuel Cladding

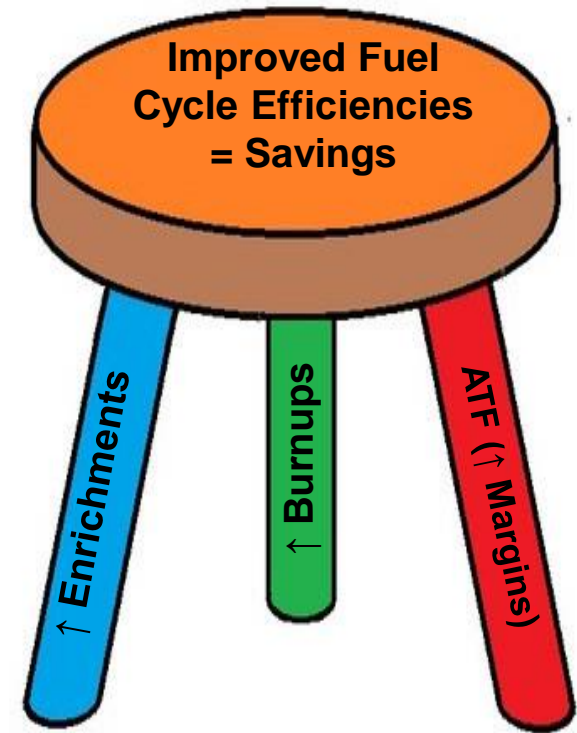


**Surface  
Coating**

## 02. ATF에 대한 원전 운영 편익 평가 (EPRI)

» ATF 기술은 정상 조건에서도 편익 발생이 가능

- Improved fuel cycle efficiencies:
  - Improved cladding performance
  - Potential increased burnups
  - Enables increased enrichments
  - Potentially yields longer cycle lengths
  - Reduced waste generation and costs
- EPRI Burnup/Enrichment Workshop:
  - Phased approach 62 to 65 to 75 GWD/MTU
  - ATF enabling higher burnups that enables cost effective use of increased enrichments

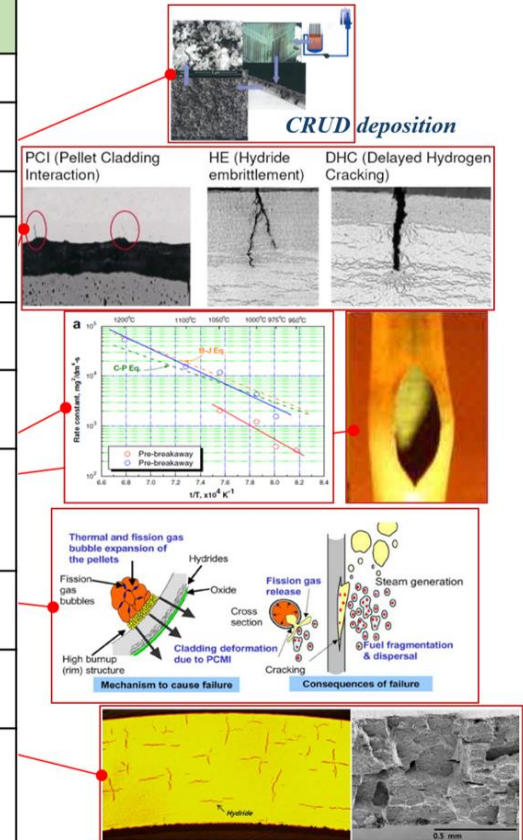




# 02. KAERI의 ATF 연구개발 내용

## » 현 핵연료의 문제점을 파악하고 개발대상 기술을 구체화

성능요건		Zr 피복관	UO <sub>2</sub> 소결체
제조		• 최적화됨	• 최적화됨
정상 운전	Corrosion	• 부식에 의한 산화막 두께증가 (OT<100mm) • 크리드 침작	• 냉각수와 반응성이 적음
	Creep	• 피복관 크립 변형량 (Strain<1%)	• 크립 변형이 적음
	Irradiation growth/swelling	• 조사성장 변형량 (Shoulder gap closure 방지)	• 조사 팽윤 (피복관 손상이내)
	Wear resistance	• Wear 손상량 (피복관 두께의 10%이내)	• 해당 없음
	PCMI/PCI	• PCMI/PCI에 의한 피복관 균열 및 파손	• 소결체 균열 및 소결체/피복관 확산접합
설계 기준 사고 (DBA)	LOCA	• 내압 상승으로 인한 Ballooning & Burst • 고온산화 발생: 다량의 수소 방출 • 고온산화/수소화물 형성으로 피복관 취화 (PCT<1204°C, ECR<17%)	• 피복관 손상시 핵분열 기체 방출 • 피복관 손상시 소결체 산화 • FFRD 발생으로 국부적 decay heat 증가
	RIA	• 출력 급상승으로 피복관 파손. • PCMI가 주 mechanism, 수소화물에 의한 취화 (Hydride rim)	• 핵분열 기체 및 소결체/피복관 확산접합
중대사고 (BDBA)		• 고온의 급격한 산화 발생: 다량의 수소 방출로 인한 수소폭발 • 산화발열 반응으로 산화속도가 급격히 증가	• 소결체 산화 및 용융
저장/ 처분	Damage	• 산화막 두께 증가 및 수소화물의 형성으로 취약 • 수소화물의 재배열로 취성 증가 (Fuel-clad interface temp.; drying: <570°C, storage:<400°C) (Clad hoop stress; <90MPa)	• 소결체 핵분열 기체량에 의한 내압증가



## 02. KAERI에서 연구 중인 ATF 기술

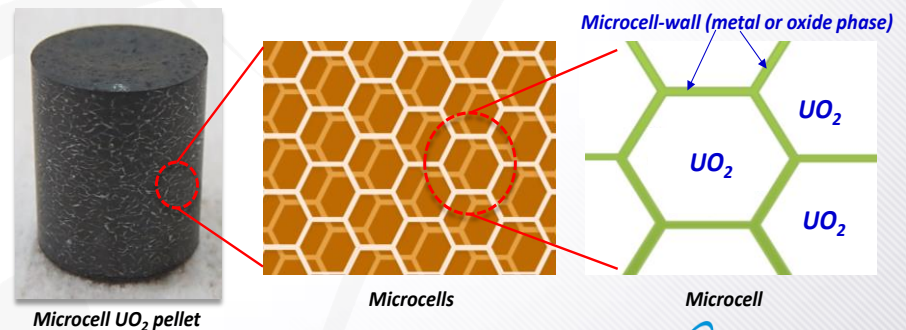
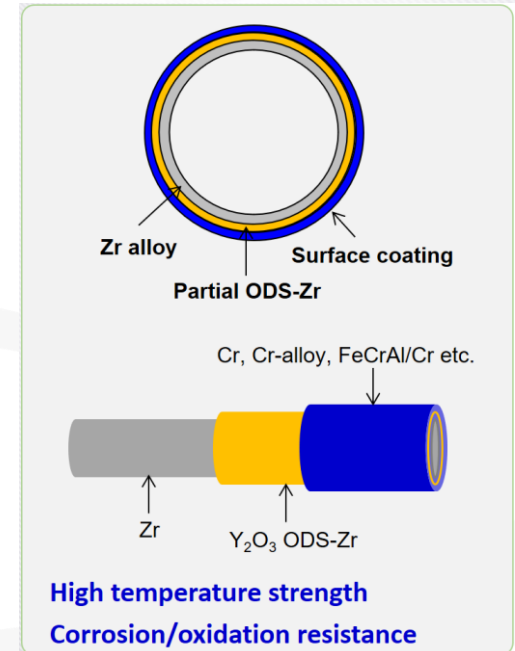
» 다양한 컨셉을 도출하고 고유 기술 확보를 고려

### ● ATF 피복관

- Surface Modified Zr
  - ✓ Cr, CrAl, FeCrAl coated Zr
  - ✓ 산화물 분산강화(ODS)
- Ceramic (SiC) cladding
- Metal-ceramic hybrid

### ● ATF 소결체

- Microcell-, Microplate-  $\text{UO}_2$
- High density pellets
- Composite pellets

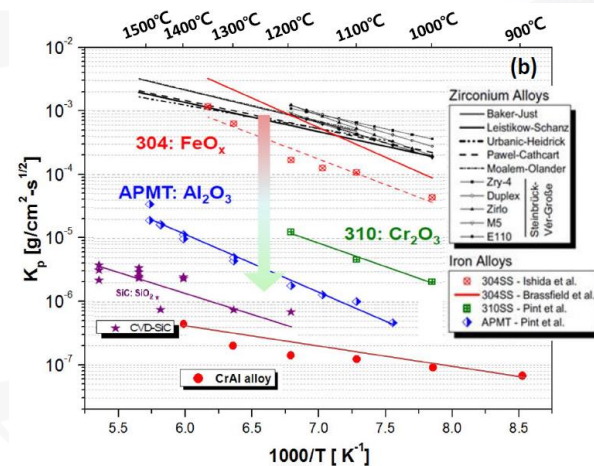
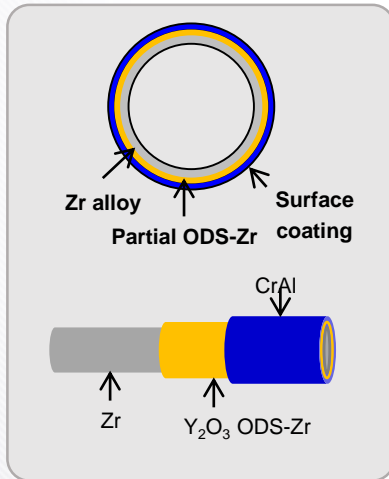




## 02. ATF 피복관; 다층구조 Zr 피복관 개념

### » 개발대상 기술의 구체화

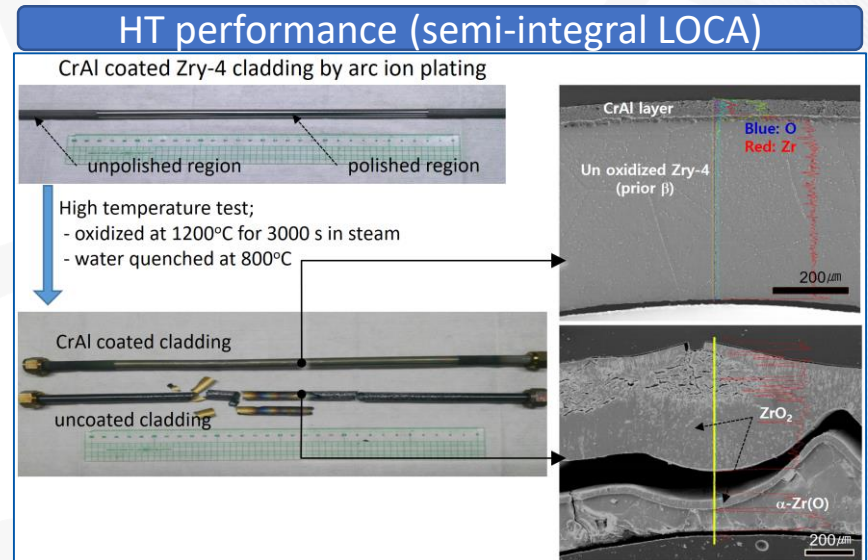
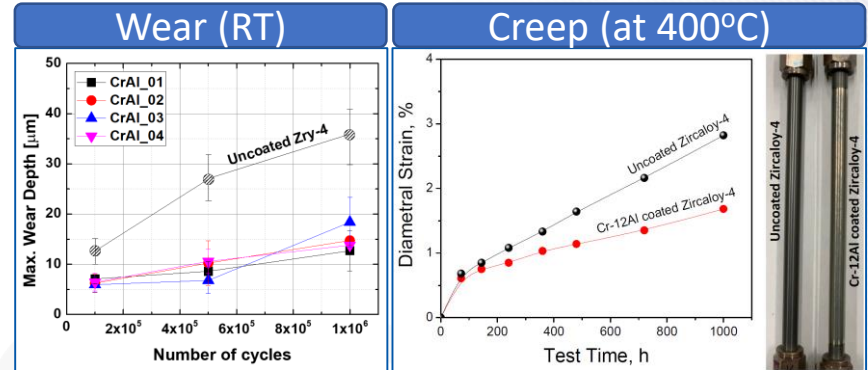
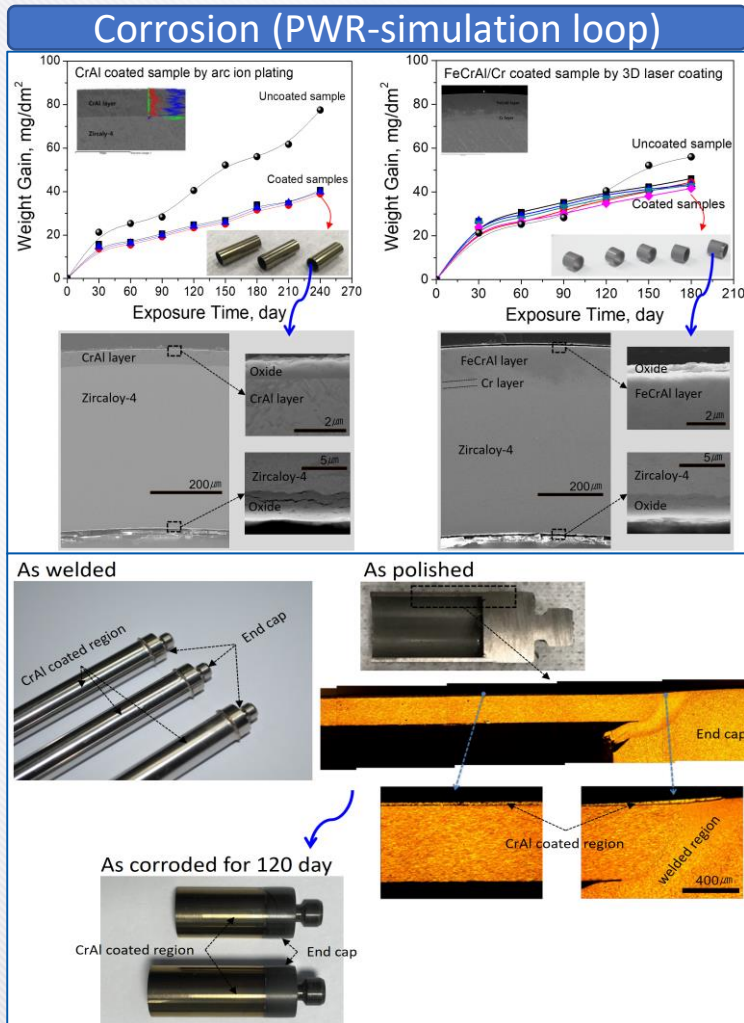
- 성능 목표 : 상용 피복관 대비 고온산화 저항성 100배, 고온변형 저항성 2배 향상
- 달성 수단 : Cr, CrAl, FeCrAl 합금기반 내산화 코팅 기술, ODS 강화 표면처리 기술
- 개발 내용 : 시작품 제조기술, 노외특성 시험/평가, 노내성능 평가
- 고려 사항 : 상용로 시험용 인허가 자료 확보, 실크기 시작품 제조 기반기술 개발



★ **ATF 피복관** → 사고조건에서 핵연료의 안전성을 강화할 뿐만 아니라 정상운전 조건에서도 피복관의 부식저항성/수소흡수저항성을 획기적으로 향상하여 기존 피복관 대비 원전의 경제성과 안전여유도를 확보

# 02. ATF 피복관 노외 성능 시험

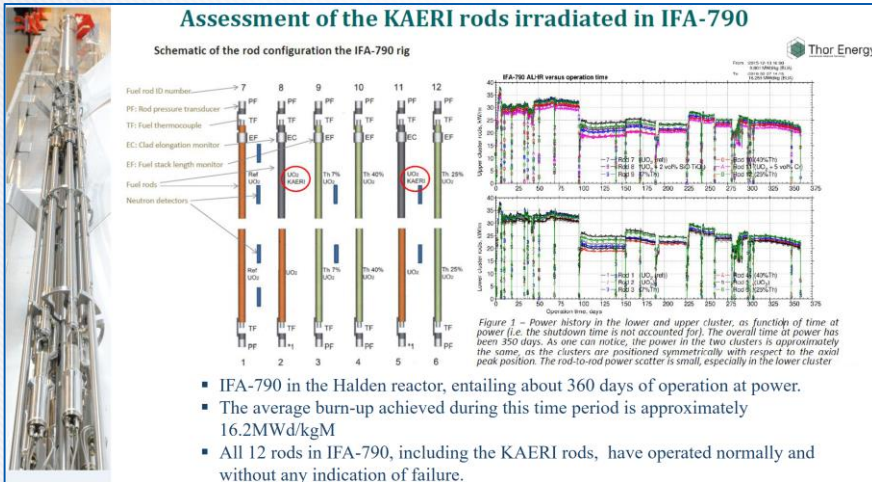
## » 다양한 조건에서 성능평가 분석



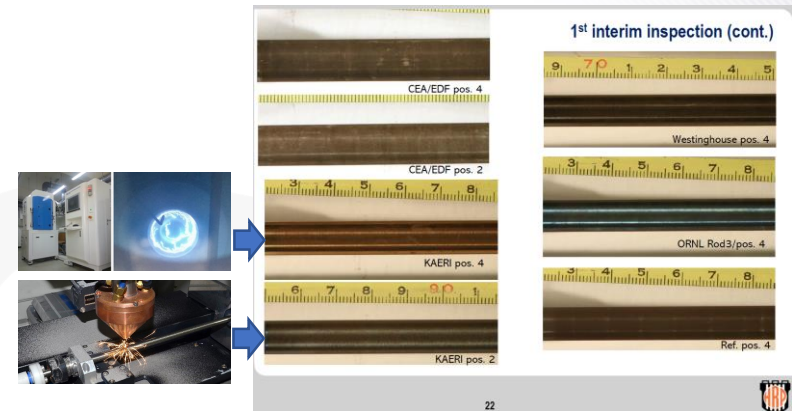


# 02. ATF 피복관 연구로 연소 성능 시험

## » Halen 연구로 연소시험



↓ ~5 MWd/kgU (~135 FPD) 피복관 건전성 및 우수한 내부식성 확인



↑ ~16 MWd/kgU (~360 EFPD)  
피복관 건전성 확인

- CrAl coated Zircaloy by AIP
- FeCrAl coated Zircaloy by 3DP

### INITIAL RESULTS FROM THE ACCIDENT TOLERANT CLADDING TEST IFA-796

Target operating conditions and instrumentation

The irradiation will last for 4-5 years with a target burn-up of ~ 40 MWd/kg  $UO_2$  with a target linear heat rate of 25 kW/m.

The water chemistry is 4.6 ppm Li with boron addition aimed at maintaining a pH300 of ~7.3.

#### Assembly instrumentation

- 3 inlet thermocouples
- 3 outlet thermocouples
- 3 downcomer thermocouples
- 4 Rh (+ 1 V) neutron detectors at four different elevations 100 mm ac fuel stack

#### Rod instrumentation

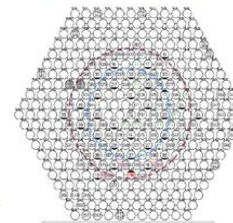
- cladding elongation (EC) on FeCrAl rod

- 6 rods > 5 segmented (4 segments)
  - 100 mm active fuel stack
  - fuelled with ~7.3 wt% enrichment  $UO_2$

#### General core map

Irradiation started in July, 2017

- Gently start-up, ~ 14 kW/m ALHR
- Ring 6, surrounded by CRs



FORM CORE LOADING No. 238, 2017/06/04

1	Control Rods (CR)	10
2	Shim rods (SR)	14
3	Instrumentation	15
4	Power Channel (PC)	16
5	Reflector	17
6	Drive assembly	4
7	Reflector	4
8	Drive assembly	4
9	Reflector	4
10	Drive assembly	4
11	Reflector	4
12	Drive assembly	4
13	Reflector	4
14	Drive assembly	4
15	Reflector	4
16	Drive assembly	4
17	Reflector	4

#### Test rods

Segment	CEA/EDF	KAERI	Westinghouse	ORNL	EPRI	Ref.
Top	Rod 1 Zr-7 μm Cr	Rod 2 Zr-40 μm Cr alloy (CrAl)	Rod 3 ZrCr	Rod 4 FeCrAl-1	Rod 5 Mo-Zr2Nb	Rod 6 Zr-4
Top-mid	MS-15 μm Cr	Zr-40 μm Cr (CrAl)	FeCrAl-2	FeCrAl-1	Mo-Zr2Nb	Zr-4
Bottom-mid	MS-15 μm Cr	Zr-15 μm Cr/FeCrAl	ZrCr	FeCrAl-1	Mo-Zr2Nb	Zr-4
Bottom	MS-7 μm Cr	Zr-15 μm Cr/FeCrAl	FeCrAl-2	FeCrAl-1	Mo-Zr2Nb	Zr-4





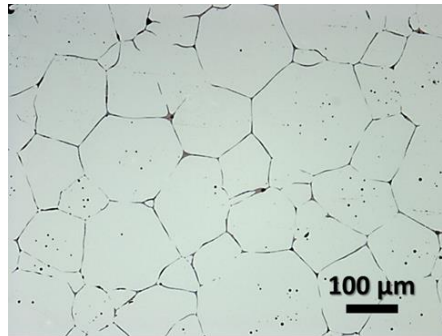
## 02. ATF 소결체; 미소셀 개념

### » 개발대상 기술의 구체화

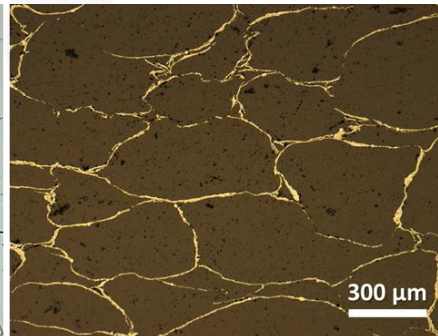
- 성능 목표 : 핵연료 온도 저감 및 핵분열생성물 방출 억제 기능 확보
- 달성 수단 : 미소셀/미소판 구조의 이중 물질로 열전도도 향상 및 FPs 포획
- 개발 기술 : 최적 조성 및 형상, 최적 제조 공정, 노내외 성능 평가
- 고려 사항 : 성능(노외/연소성능), 제조성(상용 공정), 경제성(최소 첨가량)



미소셀(microcell)

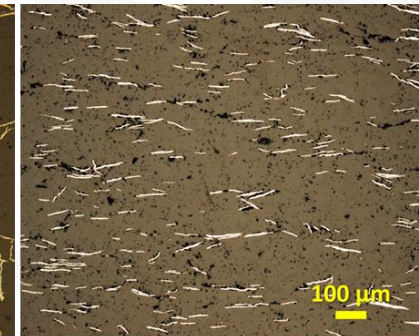


Ceramic microcell UO<sub>2</sub> pellet



Metallic microcell UO<sub>2</sub> pellet

미소판(microplate)



Metallic microplate UO<sub>2</sub> pellet

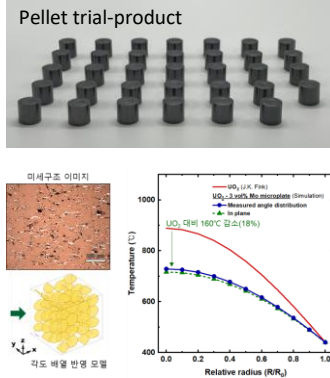
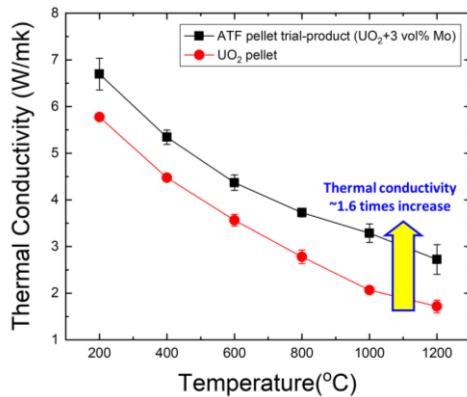
★ **ATF 소결체** → 핵연료 온도 15% 이상 저감하는 핵연료 소결체 고유 원천기술 확보(경쟁 기술 대비 최소 첨가량, 세계 최고 수준)



# 02. ATF 소결체 노외 성능 시험

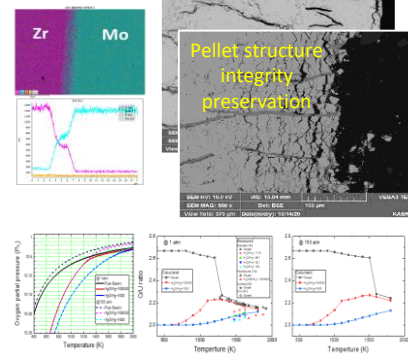
## » 다양한 조건에서 성능평가 분석

### Thermal conductivity of ATF pellet trial-product

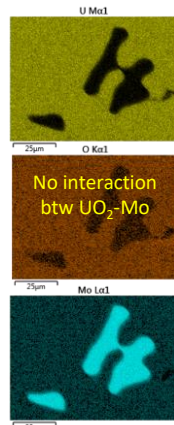
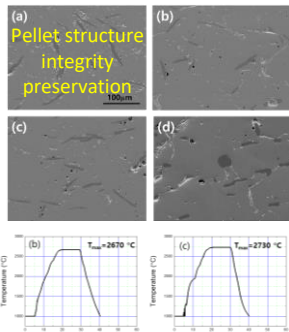


### ATF pellet oxidation test

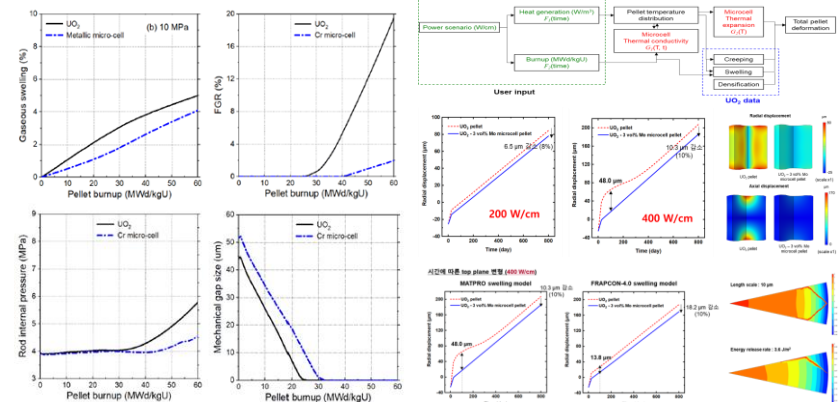
#### Compatibility btw Zr/Mo



### ATF pellet melting test



### Pellet deformation and fuel performance analysis

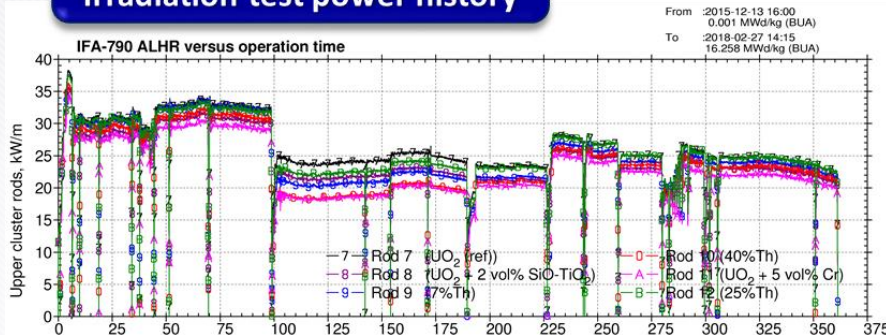




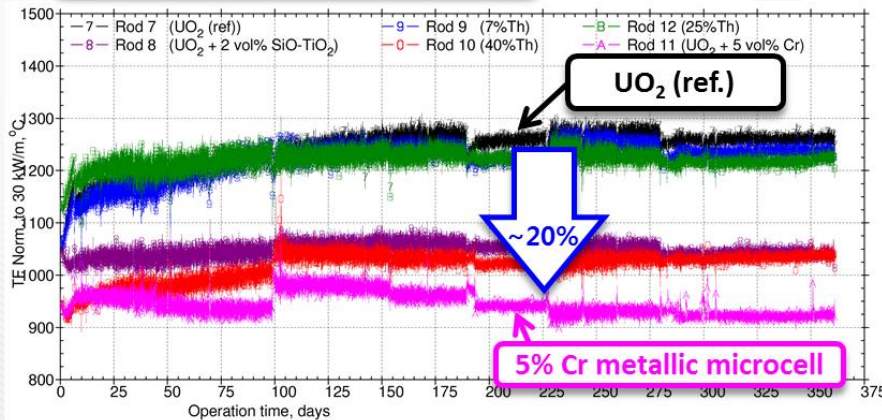
# 02. ATF 소결체 연구로 연소 성능 시험

## » Halen 연구로 연소시험

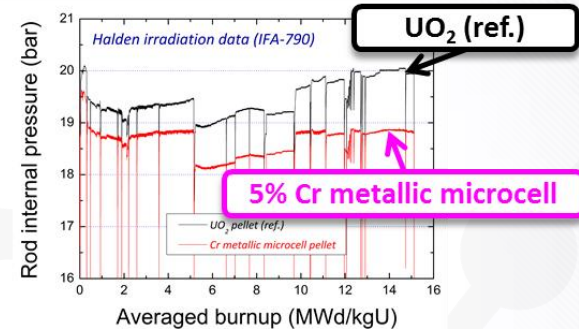
### Irradiation test power history



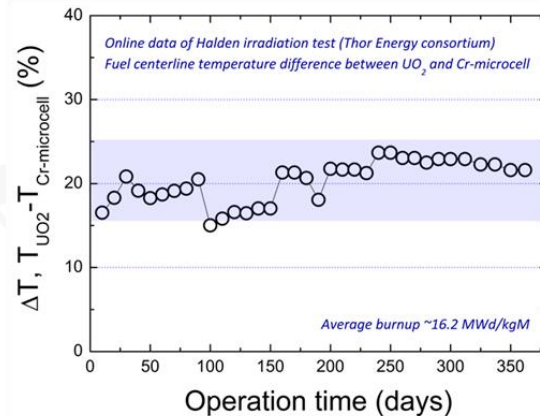
### Fuel centerline temperature



### Fuel rod internal pressure



### Fuel temperature decrease



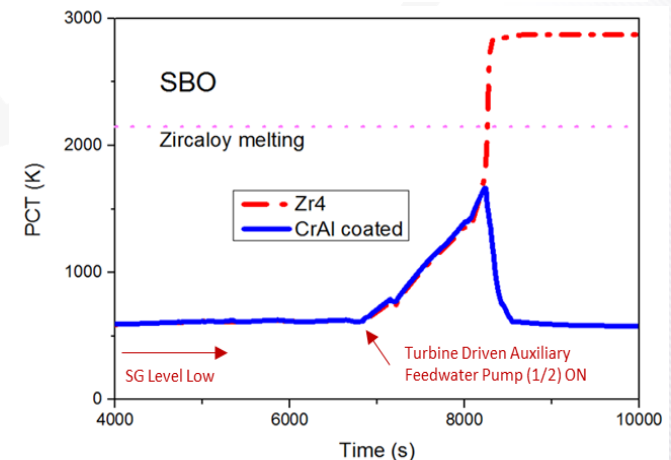
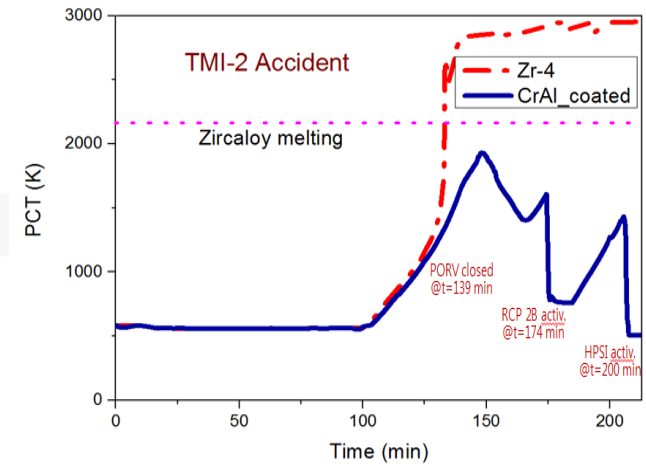
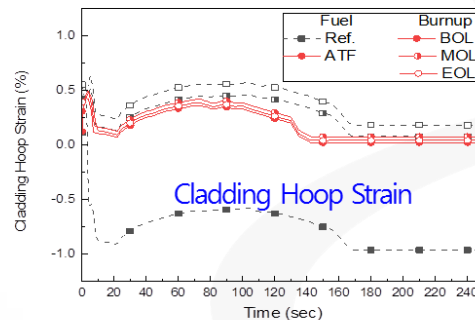
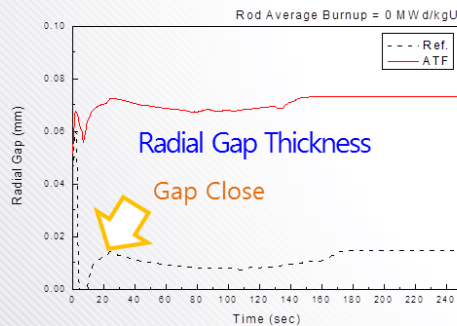
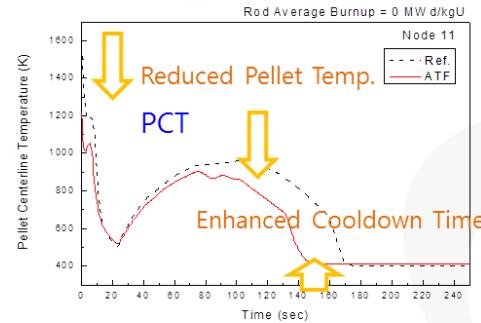
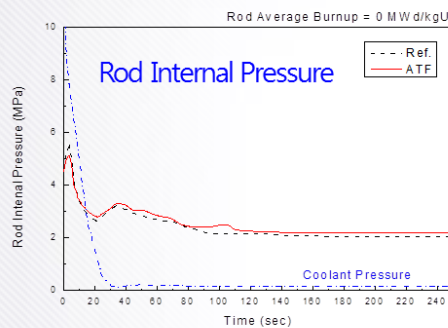
➤ ~16 MWd/kgU (~360 EFPD) 소결체 중심온도 저감 및 온도 차이 유지 확인



# 02. 사고 완화 효과 해석

## » 설계기준사고(LOCA) 및 설계기준초과사고(BDBA) 조건 해석

- LOCA: 연료봉 손상 저감 및 사고 완화 효과
- BDBA: 특정 사고 조건에서 사고완화 효과



# 03. 사고저항성핵연료 해외규제연구현황

<https://www.nrc.gov/reactors/atf.html>

## » What is Accident Tolerant Fuel?

- Accident tolerant fuels (ATF) are a set of new technologies that have the potential to enhance safety at U.S. nuclear power plants by offering better performance during normal operation, transient conditions, and accident scenarios.
- On January 14, 2019, the President signed the Nuclear Energy Innovation and Modernization Act (NEIMA). **NEIMA**, Section 107, "Commission Report On Accident Tolerant Fuel," which provides a definition of ATF as a new technology that:
  - ✓ makes an existing commercial nuclear reactor more resistant to a nuclear incident (as defined in section 11 of the Atomic Energy Act of 1954 (42 U.S.C. 2014)); and
  - ✓ lowers the cost of electricity over the licensed lifetime of an existing commercial nuclear reactor.



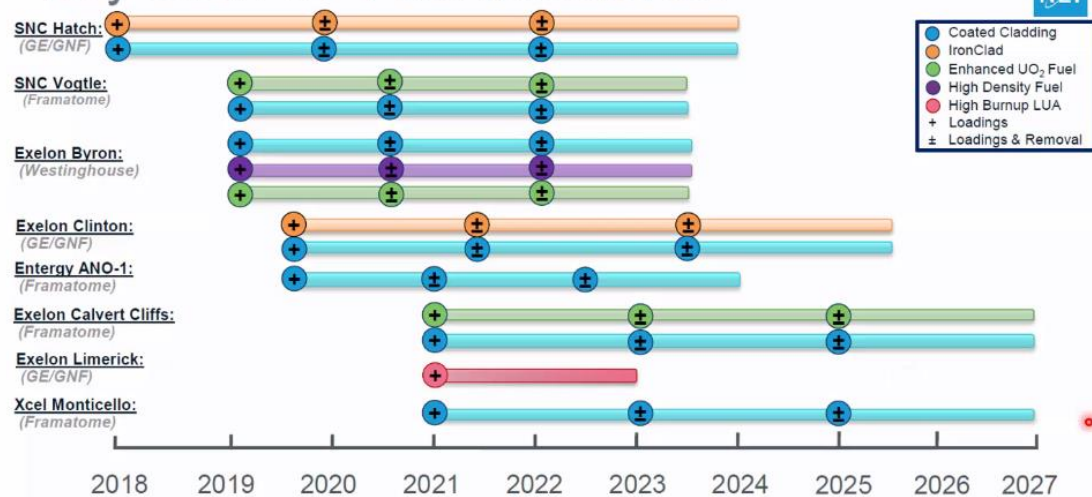
# 03. 사고저항성핵연료 해외규제연구현황

<https://www.nrc.gov/reactors/atf.html>

## » What is the NRC's Role?

- The NRC's role with ATF is to **review the new fuel technologies and their associated enrichment, fabrication, transportation, and storage aspects** to ensure that they maintain public health and safety when implemented by NRC licensees.
- The NRC reviews the technologies against all applicable **guidance**, available **data**, and past precedent applications to determine if the new fuel design continues to meet the NRC's regulations.

### Key U.S. ATF Fuel Milestones



©2021 Nuclear Energy Institute

# 03. 사고저항성핵연료 해외규제연구현황

<https://www.nrc.gov/reactors/atf.html>

## » Accident Tolerant Fuel Technologies



Coated Cladding

- Coated cladding is one of the three near-term technologies being pursued by nuclear fuel vendors.
- Image showing the internals of a nuclear reactor and the thin layer of Chromium on the outside of the fuel rod.
- Following advantages:
  - ✓ Enhanced protection of fuel rods against debris fretting
  - ✓ Oxidation resistance and superior material behavior over a range of conditions
- The NRC Activities; **This PIRT report** was then used to develop interim staff guidance



Doped Pellets

- Doped pellets is one of the three near-term technologies
- Possible advantages of "doped" pellets over existing designs include:
  - ✓ Reduced rigidity of the fuel pellet to reduce the risk of cladding damage
  - ✓ Increased ceramic grain size to promote fission gas retention
- Doped pellets **have already been approved** by the NRC for boiling water reactors
- Westinghouse and Framatome are currently developing doped pellets for pressurized water reactors



FeCrAl Cladding

- Iron-Chromium-Aluminum (FeCrAl) cladding is one of the three near-term technologies
- The possible advantages of FeCrAl cladding are:
  - ✓ Improved high-temperature steam oxidation
  - ✓ Improved strength at normal operating conditions and high-temperature accident conditions
  - ✓ Improved normal operation corrosion performance and no hydrides
- **Lead test assemblies containing FeCrAl cladding** have been inserted into U.S. power reactors.



# 04. i-SMR용 핵연료

## » 기술개발 목표

- '30년대 국제 원자력 시장을 선도하는 i-SMR 개발
- i-SMR 주요 최상위요건(안)
  - (노형) 160MWe급 일체형(SG, RCP, PRZ 내장) 가압경수로
  - (안전성) 주민소개 불필요 (EPZ=부지경계), 동격납용기냉각 등
  - (혁신성) 무봉산, 내장형 제어봉 구동장치, 탄력운전, 수소생산 등
  - (경제성) 건설단가 4,000\$/kW 목표. 24개월 공기, 육상운송 가능

★ 핵연료 조건은?

• 가압경수, 무봉산, 24개월 재장전...

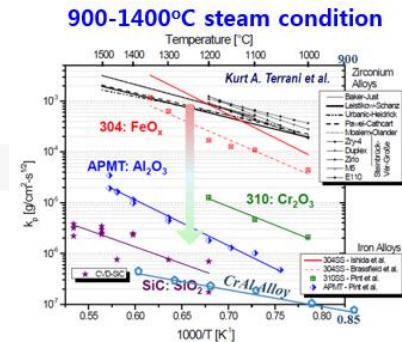
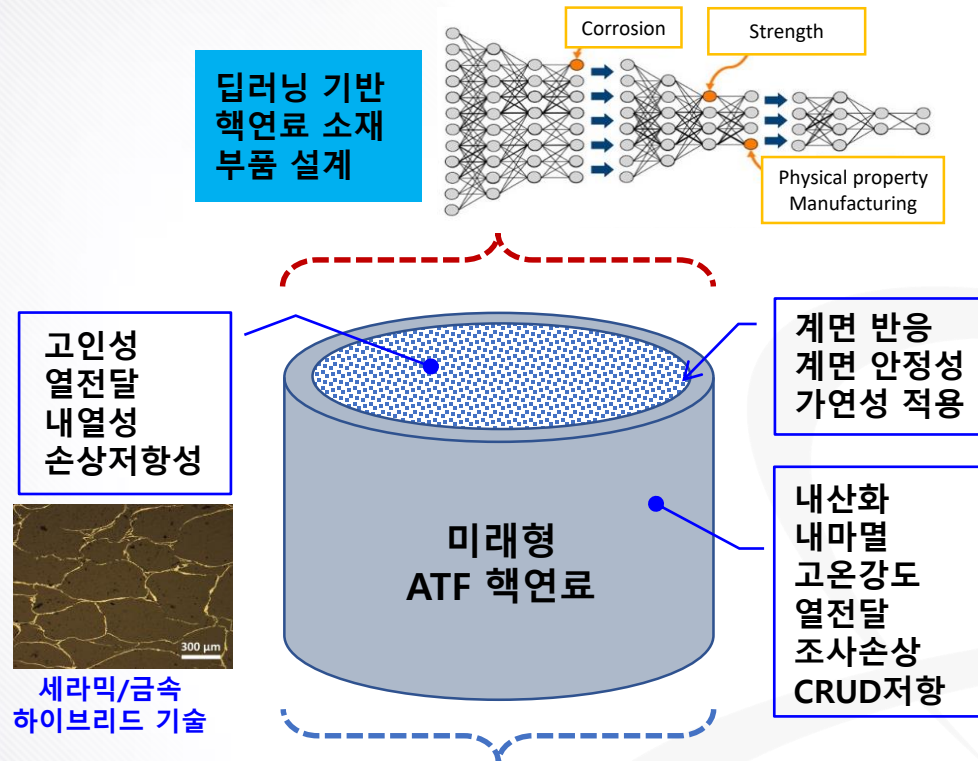
→ ATF +  $\alpha$

## » 노형간 비교

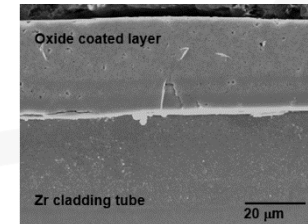
구분	SMART	혁신형 SMR	NuScale
전기출력 (총 출력)	110 MWe ( 220 MWe )	<b>160 MWe</b> ( 640 MWe )	60 MWe ( 720 MWe )
CDF	~ 1.0 e-8 /RY	1.0 e-9 /RY 이하	~ 0.3 e-9 /RY
건설단가	~ 10,000 \$/kW	4,000 \$/kW 이하	4 ~ 5,000 \$/kW
핵연료집합체	17×17, 2m, 57개	17×17, 2.4m, 69개	17×17, 2m, 37개
봉산	봉산 사용	<b>무봉산</b>	봉산 사용
제어봉구동장치	외장형	<b>내장형</b>	외장형
증기발생기	원통형, 헬리컬	환형, 헬리컬	환형, 헬리컬
RCP	4 개 (측면)	8 개 (상부)	없음
가압기	내장	내장	내장
RV 직경	6 m	4.5 m	2.7 m
RV 길이	16 m	17 m	20 m
재장전 주기	36개월	24개월	24개월
ECCS 형태	피동	피동	피동
1차측 주입계통	CMT, H-SIT 등	-	-
재순환 밸브	-	있음	있음
DC 전력	안전급	비안전	비안전
2차측 냉각	PAFS (PRHS)	PAFS	PAFS (PRHS)
격납용기 냉각	IRWST, ECT	외부침수 + PCCS HX	외부 침수
격납용기	콘크리트	철제	철제
모듈 배치	2	4	12
참고 그림			

# 04. 혁신 핵연료 기술 개념

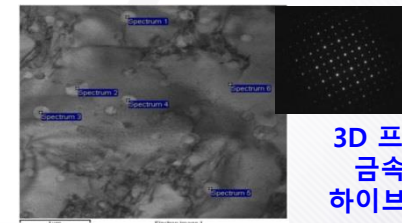
## ❖ Innovative concepts (multi-hybrid materials)



SiC보다 우수한  
내산화 물질

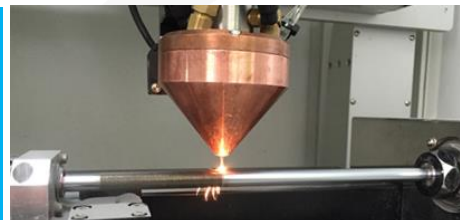


3D 프린팅 기반  
금속 표면에 열차단  
산화물 코팅 기술



3D 프린팅 기반  
금속/산화물  
하이브리드 기술

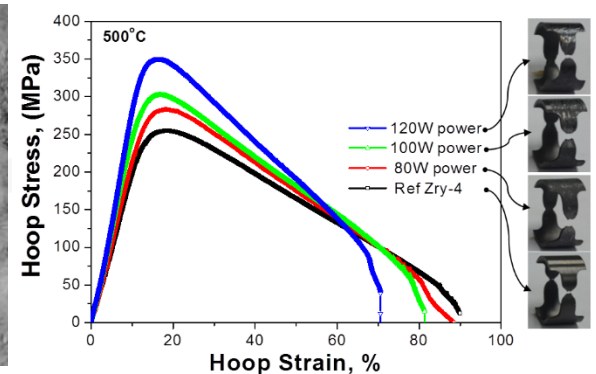
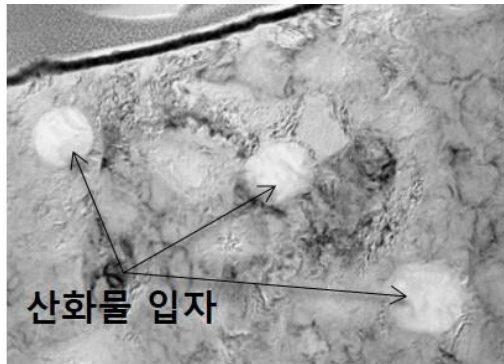
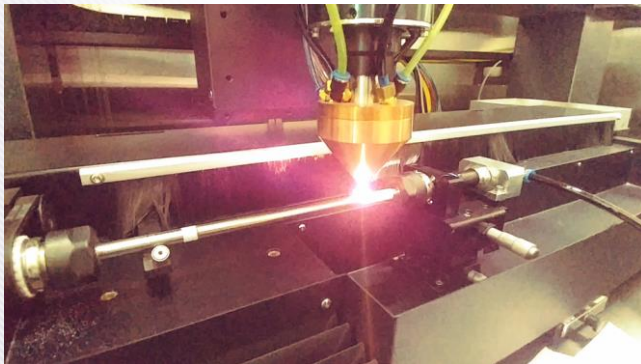
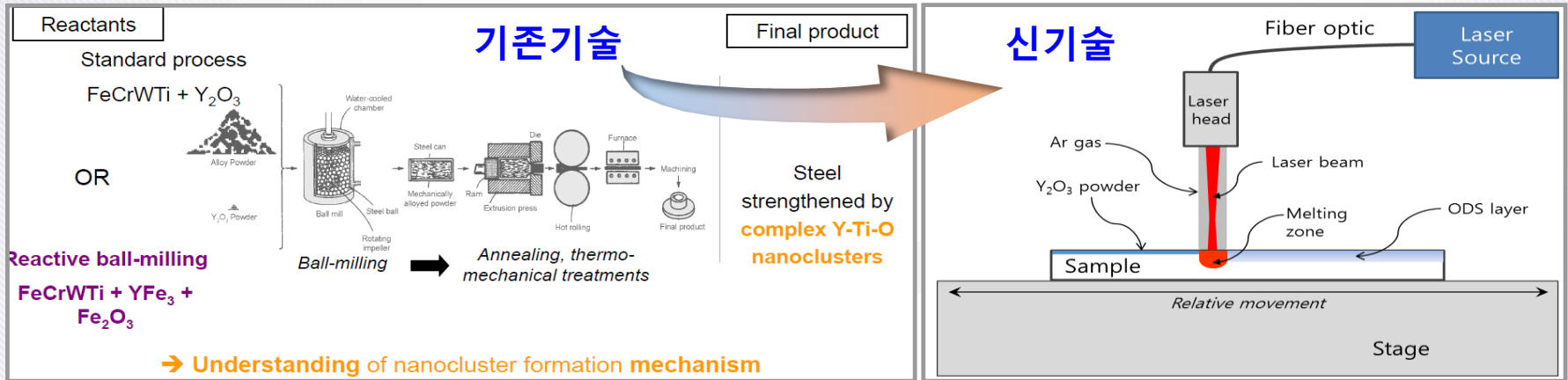
3D 레이저 프린팅 기술  
융합에 의한 경사기능기술  
구현으로 박리, 손상 방지  
핵연료/피복재 제조  
및 소재 하이브리드 구현





# 04. 3D 프린팅 기술의 적용

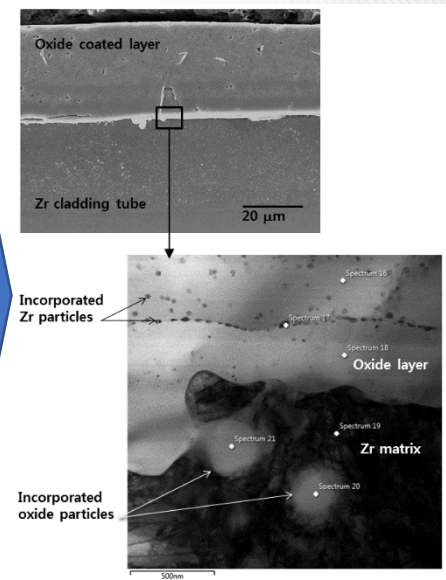
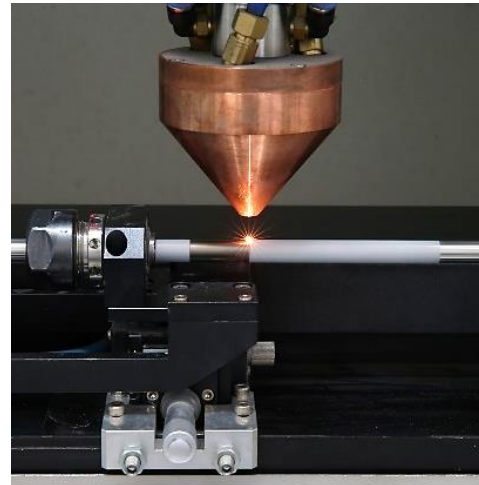
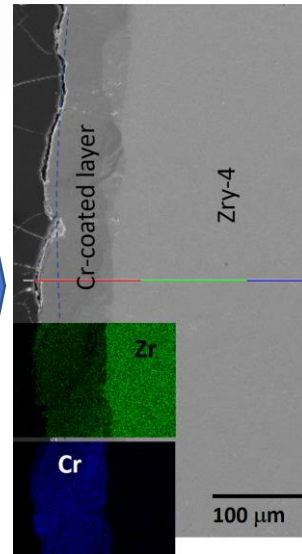
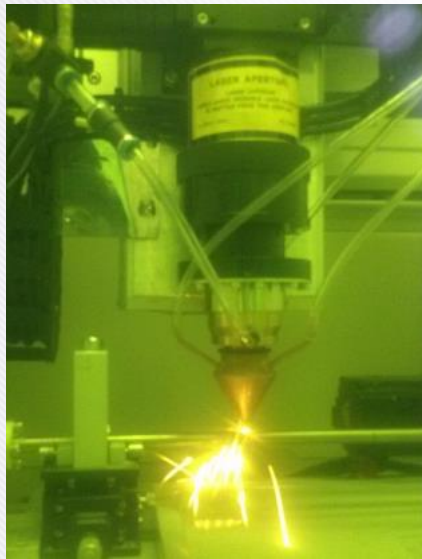
## 미래형 핵연료/원전부품 적용 hybrid (금속+산화물입자) 3D 프린팅 기술



ODS(oxide dispersion strengthened, 산화물분산강화) 기술 → 고온강도 향상

# 04. 3D 프린팅 기술의 적용

## 미래형 핵연료/원전부품 적용 hybrid (금속+산화물 적층) 3D 프린팅 기술



- 금속-이종금속 코팅기술

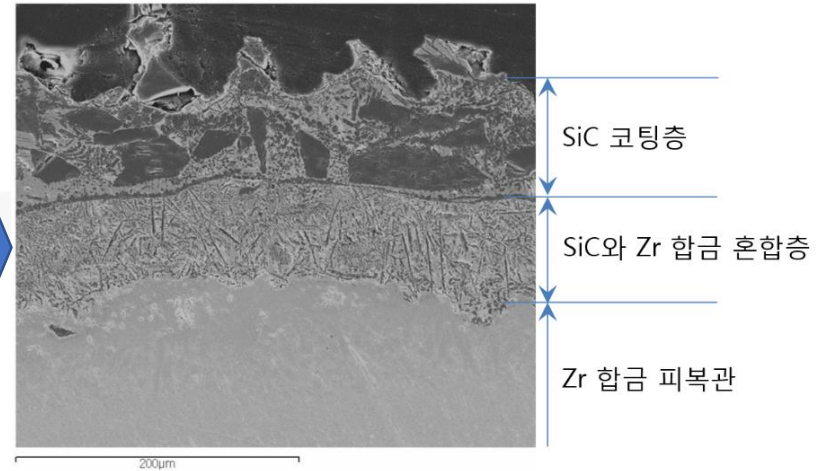
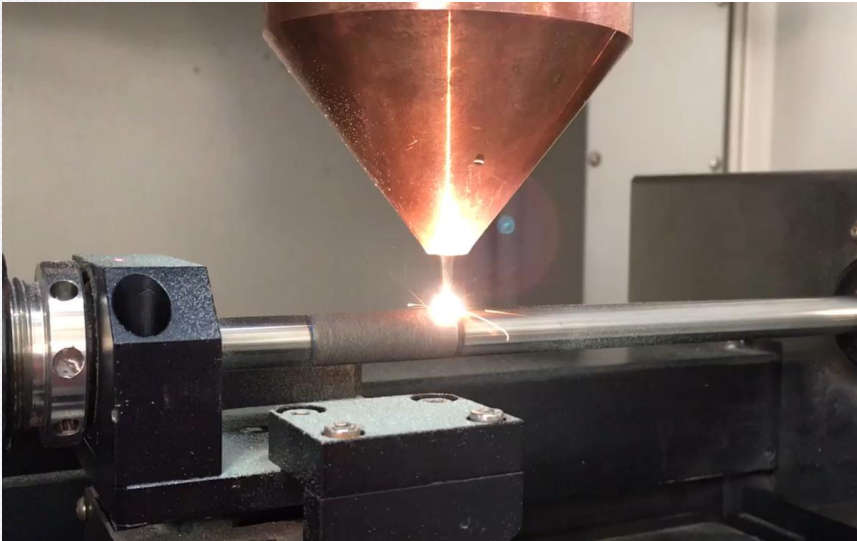
- 금속-세라믹 코팅기술

**Metal + Oxide (이종 소재 적층) 기술 → 산화, 마모 저항성 향상, 열차단 향상**  
**추고온 소재, 부품 및 핵연료에 적용 가능**



## 04. 3D 프린팅 기술의 적용

● 미래형 핵연료/원전부품 적용 hybrid (금속+SiC) 3D 프린팅 기술

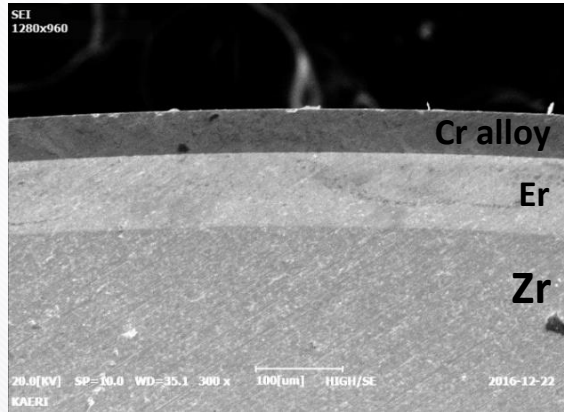
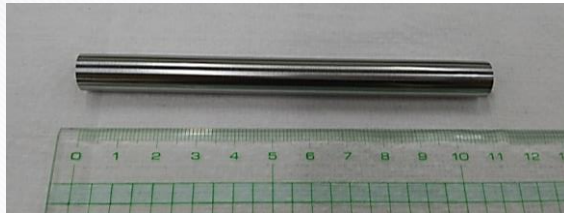


**Metal-SiC hybrid (이종 소재 융복합) 기술 → 산화, 마모 저항성 향상, 열전달 향상**  
**초고온 소재/부품 적용 및 핵연료 성능향상 가능**

# 04. 3D 프린팅 기술의 적용

## 미래형 핵연료 적용 hybrid (금속+이종소재) 3D 프린팅/PVD코팅 기술

<무봉산 혁신 핵연료 피복관 예비 모형 시편>



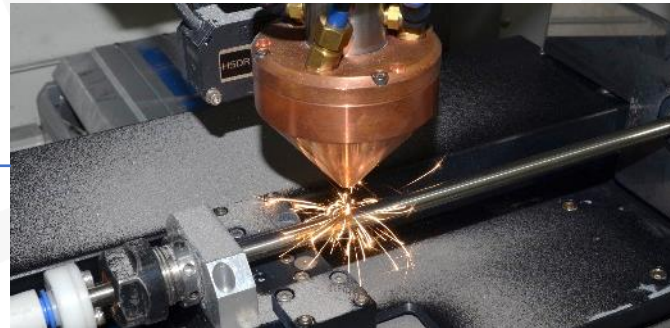
<무봉산 혁신 핵연료 피복관 단면 SEM 사진>

- Laser cladding 기술로 Zr합금 표면에 Er 층을 코팅하고 Arc ion plating으로 산화방지층을 추가

Arc ion plating



3D laser cladding

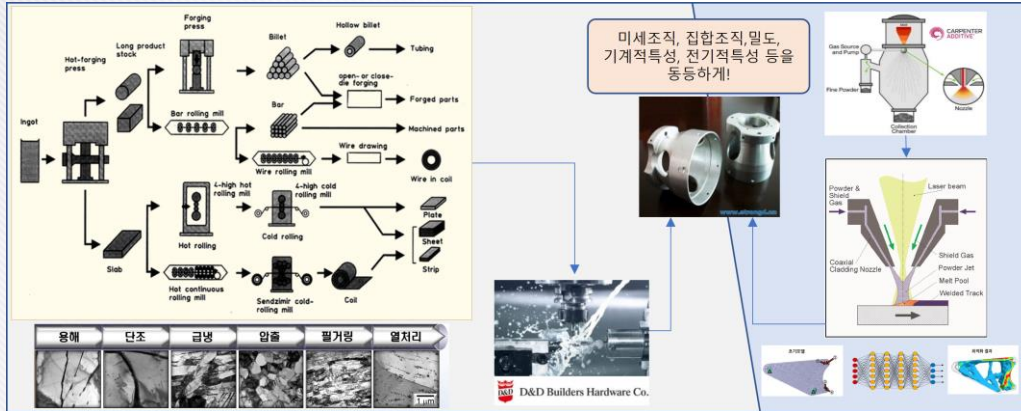


**Metal-독성물질-내산화물질 hybrid (이종 소재 융복합) 기술 → 무봉산 핵연료 적용 가능**



# 04. 3D 프린팅 기술의 적용

## 미래 원전용 소재 부품 제조를 위한 혁신기술 개발

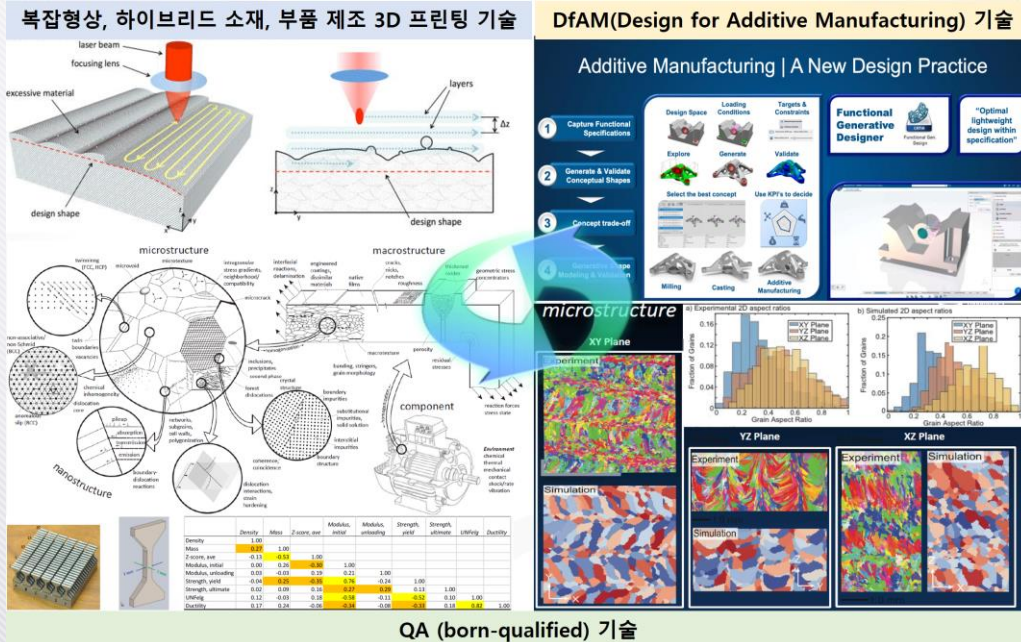


○ 3D 프린팅 제조기술과 AI를 이용한 최적 설계 기술을 결합하여 기존 제조기술의 한계를 극복할 수 있는 원자로 핵연료 소재, 부품, 모듈 제조 플랫폼 개발

➢ 기존 DfAM 기술에서는 제한된 해석 조건에서 단순한 물리량(부피, 강성 등)만 고려할 수 있으나, AI 기법을 이용하여 단순한 정적해석이 아닌 Multi-physics 기반 고속 설계 기술 구축

➢ 3D 프린팅 기술을 활용한 혁신 제조기술 개발을 통해, 원자로 구성품(핵연료, 구성 부품, 센서모듈)을 제작함으로써 기존 제조공정으로는 구현할 수 없었던 형태를 제조하고 성능과 안전성을 획기적으로 향상

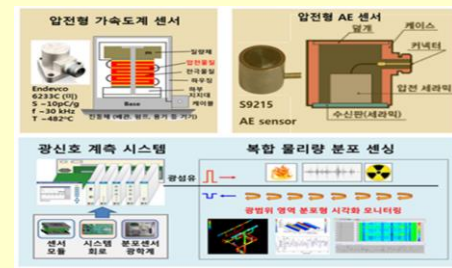
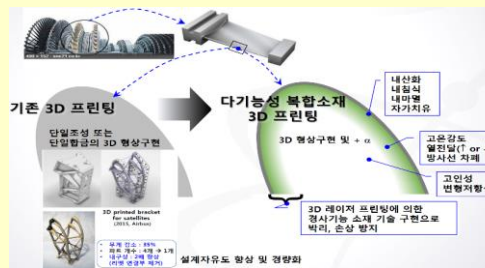
➢ 원자로 극한환경용 핵연료 및 부품소재의 초고온 구조안전성, 고온 냉각재 양립성, 열교환 효율성, 방사선 제어 등의 성능 극대화



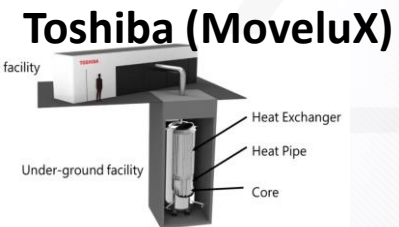
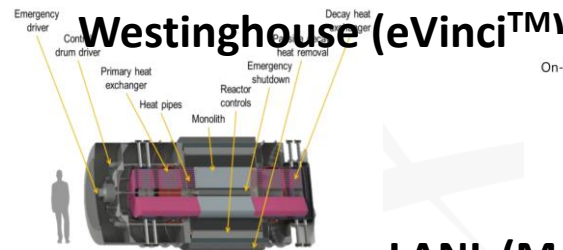
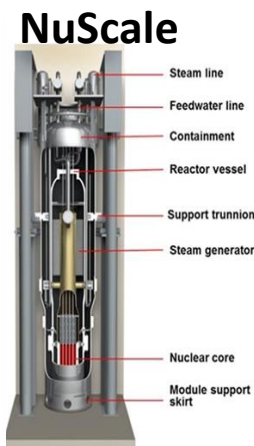
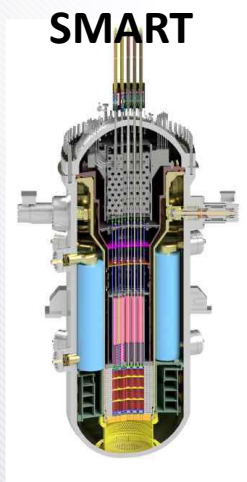


# 04. 3D 프린팅 기술의 적용

## 원자로 소재 부품 제조 3D 프린팅 기술의 적용 대상



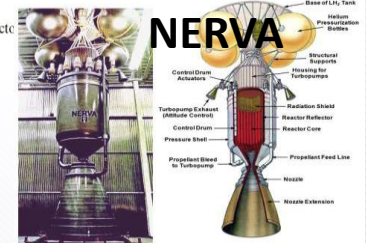
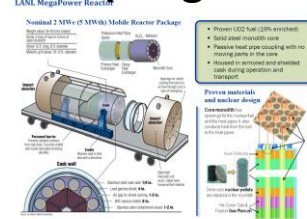
다양한 원자로 개념에 바로 적용 가능한 3D프린팅 제조 플랫폼 기술



**KAIST (MMR)**



**LANL (MegaPower)**





# 요약

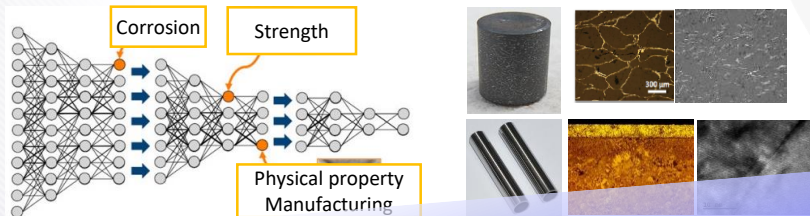
## » 사고저항성핵연료(ATF)

- 가동원전의 전주기 안전성 강화가 가능한 세계 최고 수준의 사고저항성 핵연료 기술 확보
- 핵연료의 초고연소도/장주기 운전 달성으로 가동원전의 경제성 향상 및 사용후 핵연료 발생량 감소
- 신개념 사고저항성 핵연료 기술은 해외 원자로 및 핵연료 수출시장 확대에 적용
- 우리나라 핵연료 기술의 선진화 달성

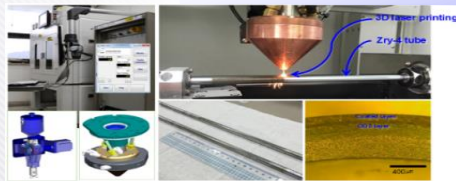
## » i-SMR용 4차 산업 적용 혁신형 핵연료

- ATF 기술과 4차 산업기술을 융복합 하여 i-SMR용 혁신 핵연료/원전부품 제조 공급에 활용하고 국내 핵연료/원자력 소재부품 기술을 한차원 spin-off

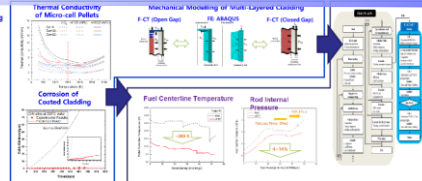
Deep learning 기반 첨단 핵연료 (연료, 피복재, 부품) 소재 설계 및 제조기술



가동원전 및 i-SMR용 핵연료의  
요구조건을 만족할 수 있는  
전주기 안전성 강화 핵연료 및  
부품



혁신 핵연료 제조 3D 프린팅 장치  
및 공정기술



핵연료 제조 공정 해석 및 평가  
기술

**감사합니다.**