

2019 추계원자력학회 핵연료 및 원자력재료 Workshop
<최신 핵연료 및 원자력재료 연구 현황>

사고저항성핵연료(ATF) 기술 현황과 4차 산업 적용 미래형 핵연료 개발 방향

2019. 10. 23

김현길, hgkim@kaeri.re.kr

ATF기술개발부

발표 목차



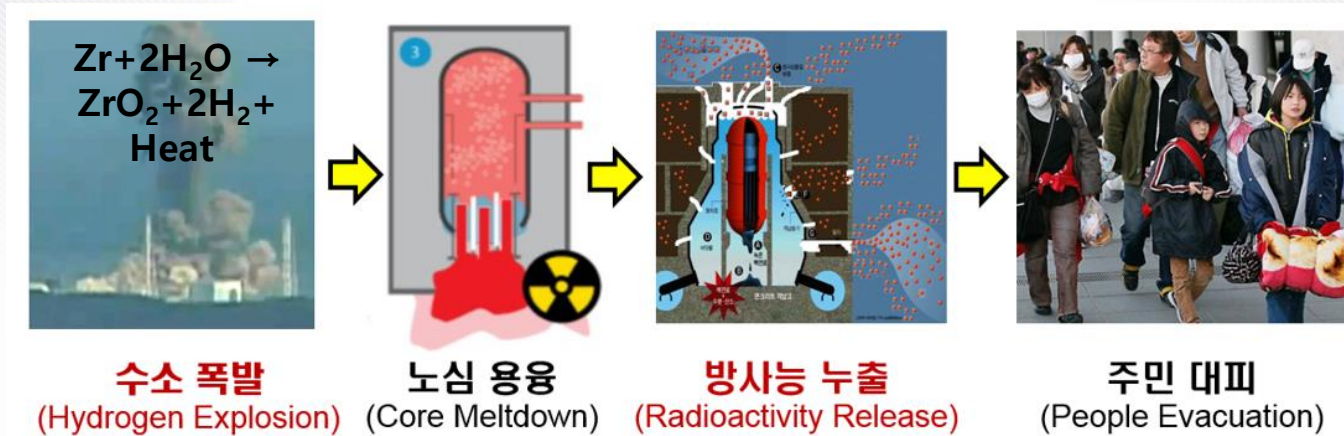
01 사고저항성핵연료 개념

02 사고저항성핵연료 기술개발 현황

03 미래형 핵연료 기술 개념

04 4차 산업 적용 미래형 핵연료

사고저항성핵연료(ATF; Accident Tolerant Fuel)



- 현재 -

후쿠시마 사고 이후, 세계적 패러다임 변화
경제성 향상에 주력 → 사고 안전성의 획기적 증진

- 미래 -

원전 사고시 핵연료 안전성 강화가 좋은 대안인가?
[타 에너지 산업과의 경쟁력, 현실적 문제의 해소 방안]
경제성 + 전주기 안전성을 동시에 해결하는 사고저항성 핵연료!
미래형 원전에 적용 가능한 신개념 핵연료!

ATF 연구 개발의 중요성

» 중요성

- 후쿠시마 사고 이전의 가동원전 핵연료의 성능목표는 경제성 향상이었고, 사고 이후에는 사고환경에서의 수소폭발 방지를 위한 사고안전성 향상이 주요 이슈가 됨
- 미국 DOE를 중심으로 발전사들은 사고저항성핵연료 개발에 최선을 다하고 있음
- 원자력 발전소의 안전성에 대한 국민들의 이해도와 지식수준이 높아지고 있으며, 이에 대한 합리적인 문제해결을 위한 기술적 대안이 요구됨
- 국내 원자력발전소에도 사고안전성이 강화된 핵연료 수요가 현실화 되어 있음 (2017. 11 한수원이 원자력 안전성 강화 대책으로 3대 방향 16개 과제로 국내원전에 사고저항성 핵연료의 적용을 명시함)
- 수출 원자로(UAE)의 적용 핵연료가 사고저항성 핵연료로 변화될 수 있고, 향후 원자로 수출에 사고저항성 핵연료의 공급이 기본옵션으로 선택될 수 있음

→ 후쿠시마 사고 이후, ATF는 원자력 핵연료 산업의 game changer

ATF 기술개발 현황

» 연구개발 대상의 기술개발 현황 (사고저항성 향상에 집중)

사고저항성 피복관		
Coated Zr-alloy	<ul style="list-style-type: none"> Zr 피복관 표면에 산화 방지막 코팅 Metal-alloy, Max phase, oxides, ODS-layer 	<ul style="list-style-type: none"> 한국, 미국, 프랑스, 러시아, 중국
Advanced Steels (FeCrAl)	<ul style="list-style-type: none"> 내산화 FeCrAl 소재 개발 내산화, 고강도 FeCrAl-ODS 소재 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 한국, 미국, 일본, 러시아
Ceramic Claddings	<ul style="list-style-type: none"> 내산화 SiC에 기밀도 향상을 위한 hybrid 개념 도입 표면 용해를 막기 위한 코팅기술 접목 	<ul style="list-style-type: none"> 한국, 미국, 프랑스, 중국
Mo cladding	<ul style="list-style-type: none"> 고융점 고강도 Mo-alloy 사용 내외면 산화방지를 위한 3중 구조 	<ul style="list-style-type: none"> 미국
사고저항성 소결체		
Improved UO ₂	<ul style="list-style-type: none"> 소량의 이종 물질 첨가 열전도도, 핵분열 생성물 포집능 등 특성 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 한국, 미국, 프랑스, 중국
High fissile density fuel	<ul style="list-style-type: none"> U-Zr, U-Mo, UN, Uranium silicide (U₃Si₂) 복합재료 핵연료 특정 ATF 개념에서의 경제성 향상, 열전도도 향상 	<ul style="list-style-type: none"> 한국, 미국, 프랑스, 러시아
Coated Particle fuel	<ul style="list-style-type: none"> TRISO encapsulated in SiC matrix (FCM) 핵분열 생성물 방출 저감 High U²³⁵ enrichment, UN-TRISO 	<ul style="list-style-type: none"> 한국

미국 DOE 지원 ATF 개발 대상 기술



U.S. DEPARTMENT OF
ENERGY

Nuclear Energy

Industry-led Development of ATF Concepts

Framatome

- Cr-coated M5 cladding
- Doped UO_2 for improved thermal conductivity and performance
- SiC cladding



AFC Advanced Fuels Campaign

General Electric

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

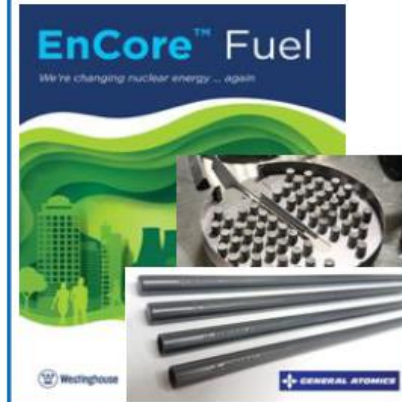


GE imagination at work



Westinghouse

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



3

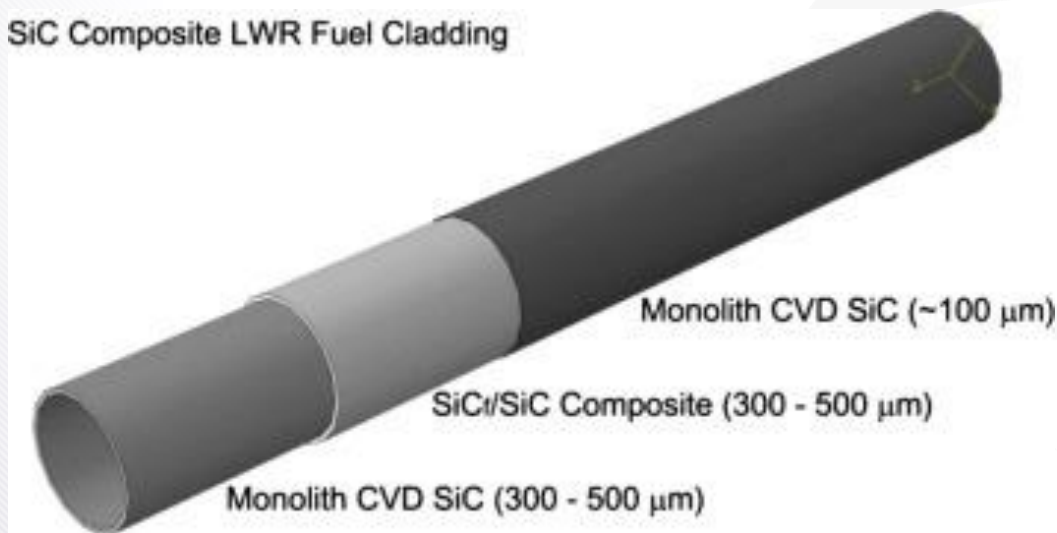
- ❖ **Coated (Cr, Cr-alloy, AMOR) Zr cladding (PWR)**
 - Framatome, Westinghouse, GE-GNF, Rosatom, **CN, KO**
- ❖ **성능개선(열전도도 등) UO_2 : Framatome, Westinghouse, **CN, KO****
- ❖ **Fe-base cladding (BWR) : GE-GNF, Rosatom, **JP, CN, KO****



장기적용을 위한 ATF 기술 대상 요약

- ❖ **Ceramic (SiC) cladding** : Westinghouse, Framatome, **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

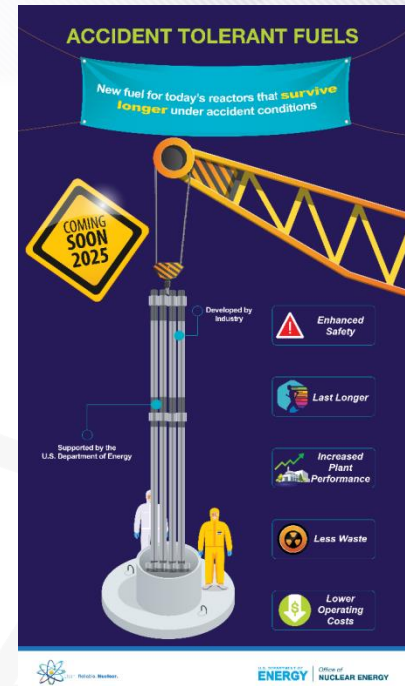
국외 기술 개발 진행 현황 요약

● 미국 ATF 개발 프로그램 (DOE)

- '25년까지 단기적용 ATF 연료봉 집합체 가동원전 인허가
- '35년까지 혁신 ATF 기술 개발
- '18~'19년 시범연료봉 가동원전 성능시험 착수
- 연간 약 600~700억 원 지원

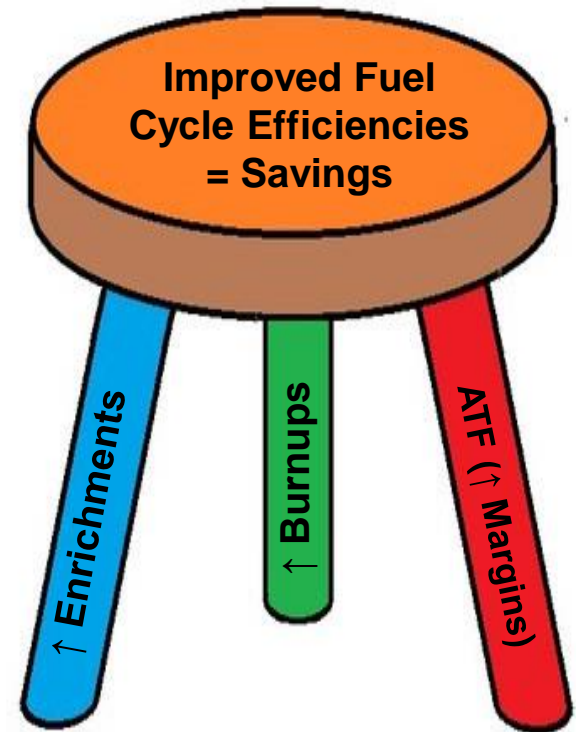
● 주요국 개발 현황

- 프랑스: '25년 까지 단기적용 기술 실용화
- 일본 : '21년 까지 개발 후보 선정
- 중국 : 상용로 시험 계획 수립
- 러시아 : '19년 시장 공급 가능 발표



원전 운영 편익 평가-미국 EPRI

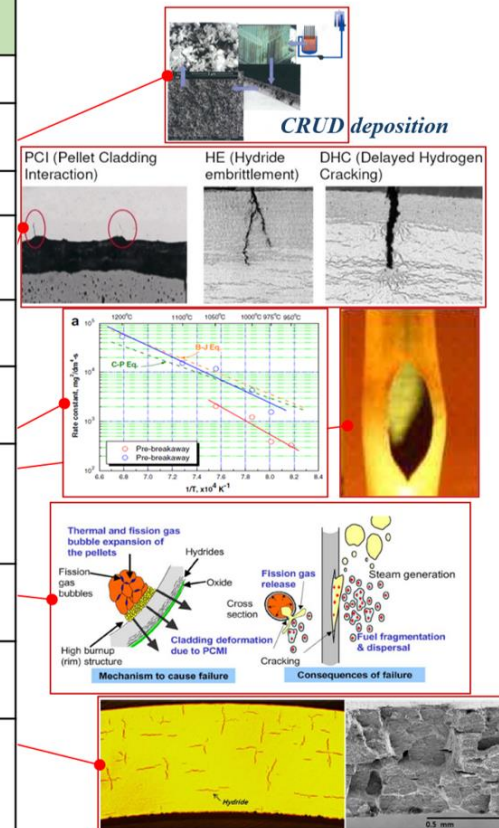
- Improved fuel cycle efficiencies:
 - Improved cladding performance
 - Potential increased burnups
 - Enables increased enrichments
 - Potentially yields longer cycle lengths
 - Reduced waste generation and costs
- EPRI Burnup/Enrichment Workshop:
 - Phased approach 62 to 65 to 75 GWD/MTU
 - ATF enabling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



국내 KAERI의 ATF 연구개발 내용

» 현 핵연료의 문제점을 파악하고 개발대상 기술을 구체화

성능요건		Zr 피복관	UO ₂ 소결체
제조		• 최적화됨	• 최적화됨
정상 운전	Corrosion	• 부식에 의한 산화막 두께증가 (OT<100mm) • 크러드 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



KAERI에서 연구 중인 ATF 기술

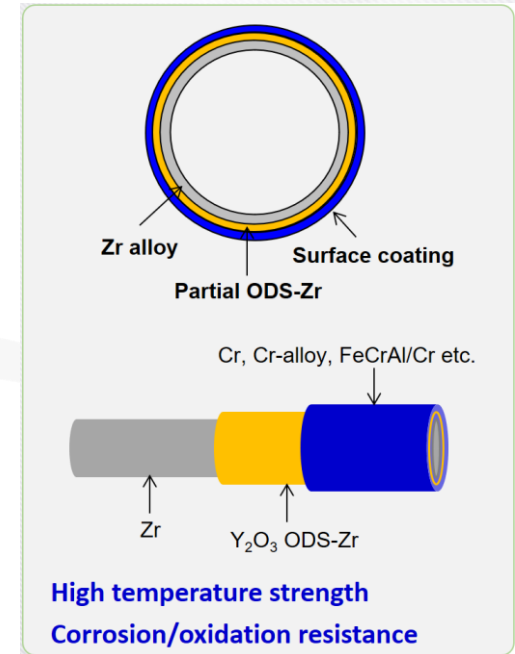


● ATF 피복관

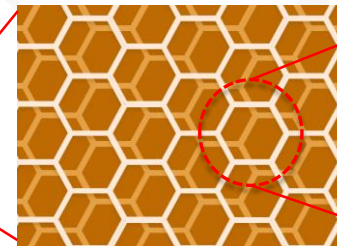
- Surface Modified Zr
 - ✓ CrAl coated Zr
 - ✓ 산화물 분산강화(ODS)
- Ceramic (SiC) cladding
- Metal-ceramic hybrid

● ATF 소결체

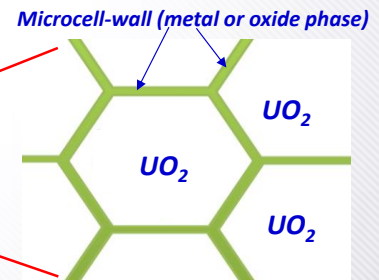
- Microcell-, Microplate- UO_2
- High density pellets
- Composite pellets



Microcell UO_2 pellet



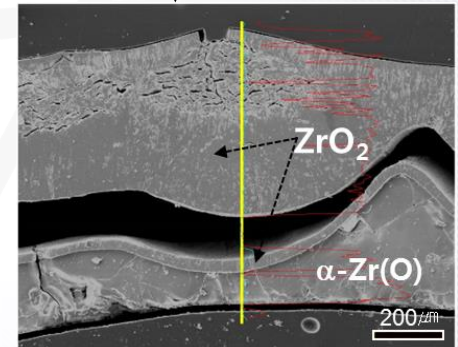
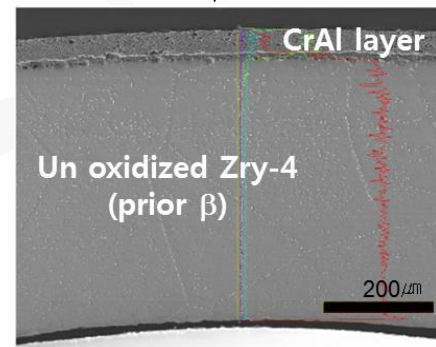
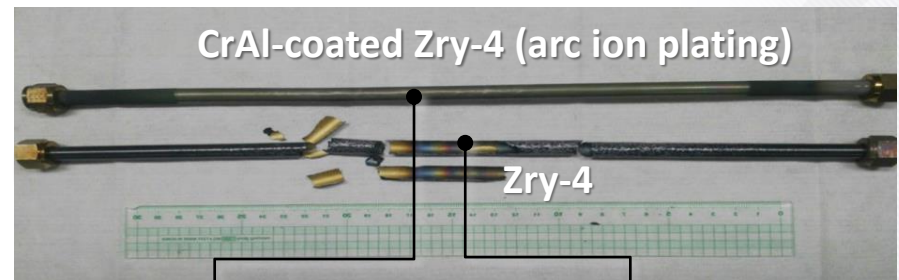
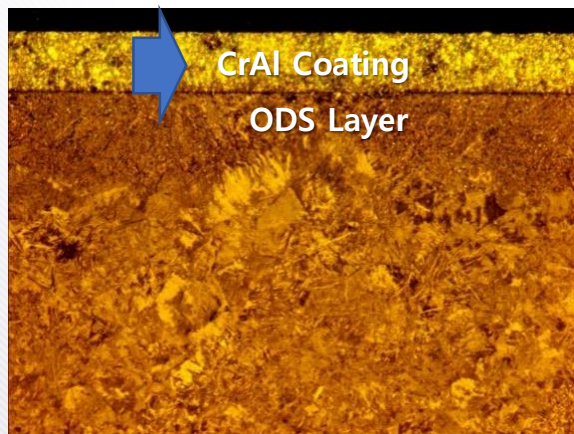
Microcells



Microcell

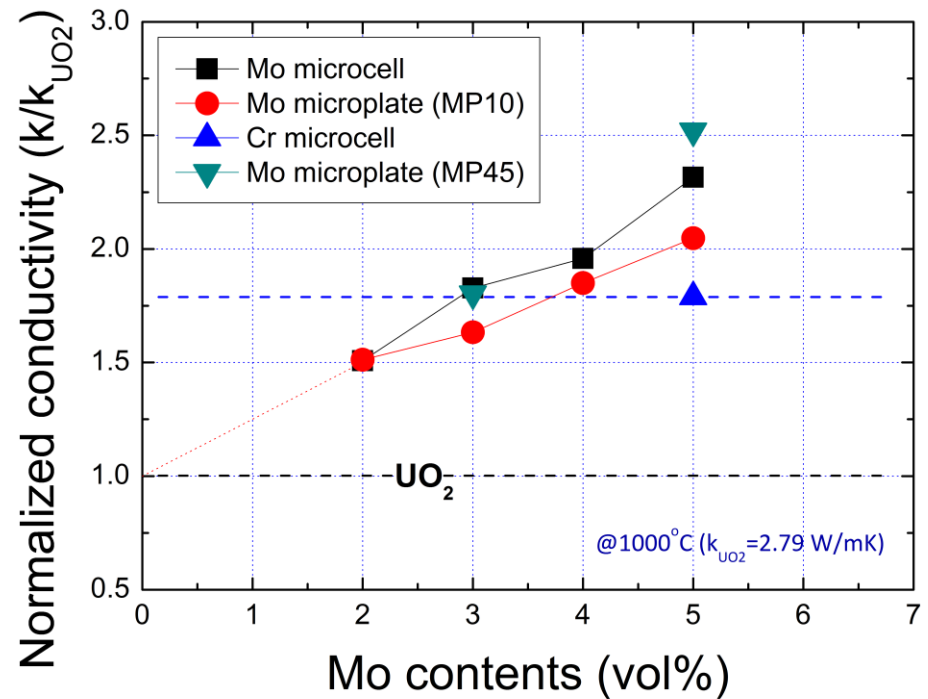
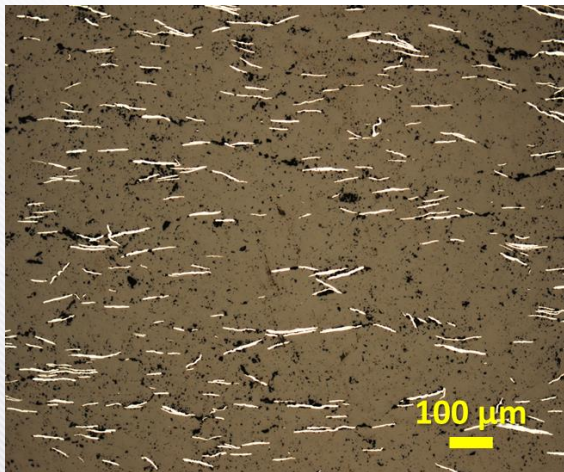
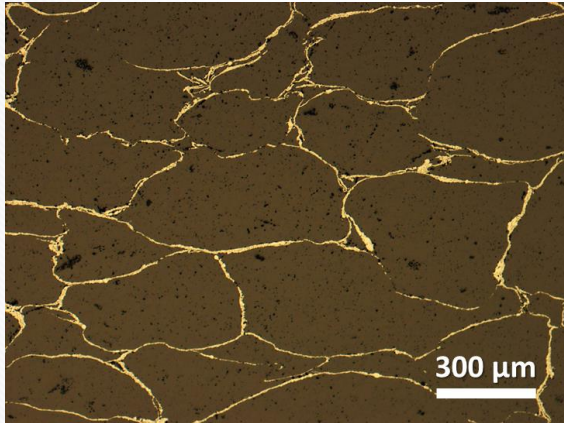
사고저항성 피복관; CrAl 코팅 Zr 피복관 개념

- ✓ 수소 발생량을 1/100로 줄여 수소폭발을 억제하고, 고온 변형 저항성을 2배 이상 향상하여 오랫동안 구조를 유지하는 표면처리 지르코늄 피복관



사고저항성 소결체; 미소셀 개념

- ✓ 핵연료 온도를 낮추고 (~20% 이상) 방사성 물질 방출을 저감하는 고성능 미소셀 UO_2 소결체

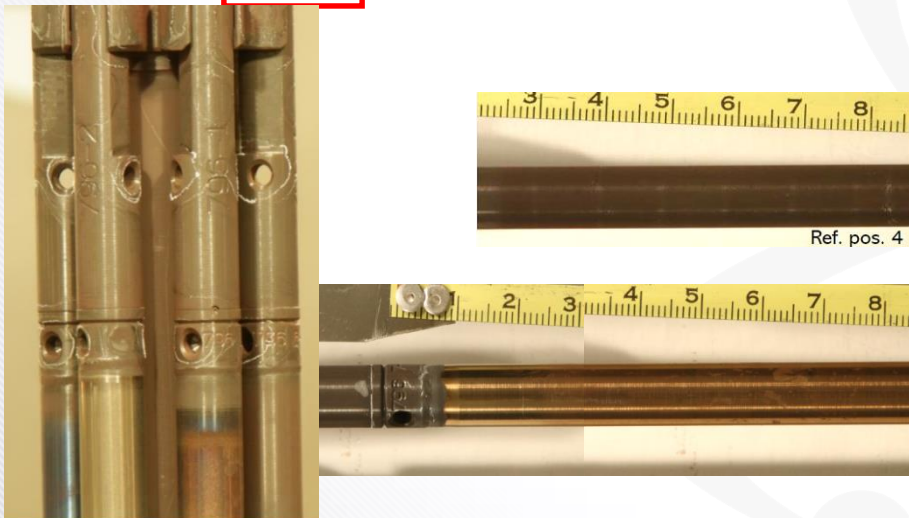


연구로 연소 성능 시험

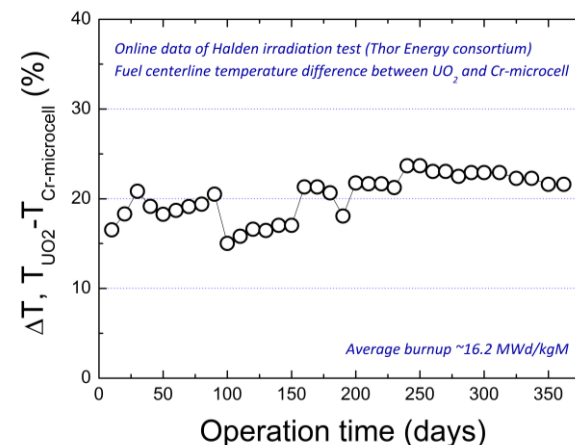
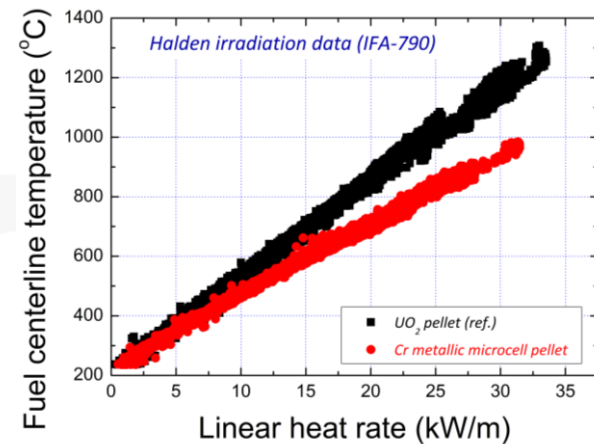
- 국제공동연구를 통해 연소시험 수행 (Halden 연구로 연소 시험)

코팅 층 건전성 유지

Test rods						
Segment	CEA/AREVA	KAERI	Westinghouse	ORNL	EPRI	Ref.
	Rod 1	Rod 2	Rod 3	Rod 4	Rod 5	Rod 6
Top	Zr/7 μm Cr	Zr/40 μm Cr alloy (CrAl)	Zr/Cr	FeCrAl-1	Mo-Zr2.6Nb	Zry-4
Top-mid	MS/15 μm Cr	Zr/40 μm Cr (CrAl)	FeCrAl-2		Mo-Zr2.6Nb	Zry-4
Bottom-mid	MS/15 μm Cr	Zr/15 μm Cr/FeCrAl	Zr/Cr		Mo-Zr2.6Nb	Zry-4
Bottom	MS/7 μm Cr	Zr/15 μm Cr/FeCrAl	FeCrAl-2		Mo-Zr2.6Nb	Zry-4



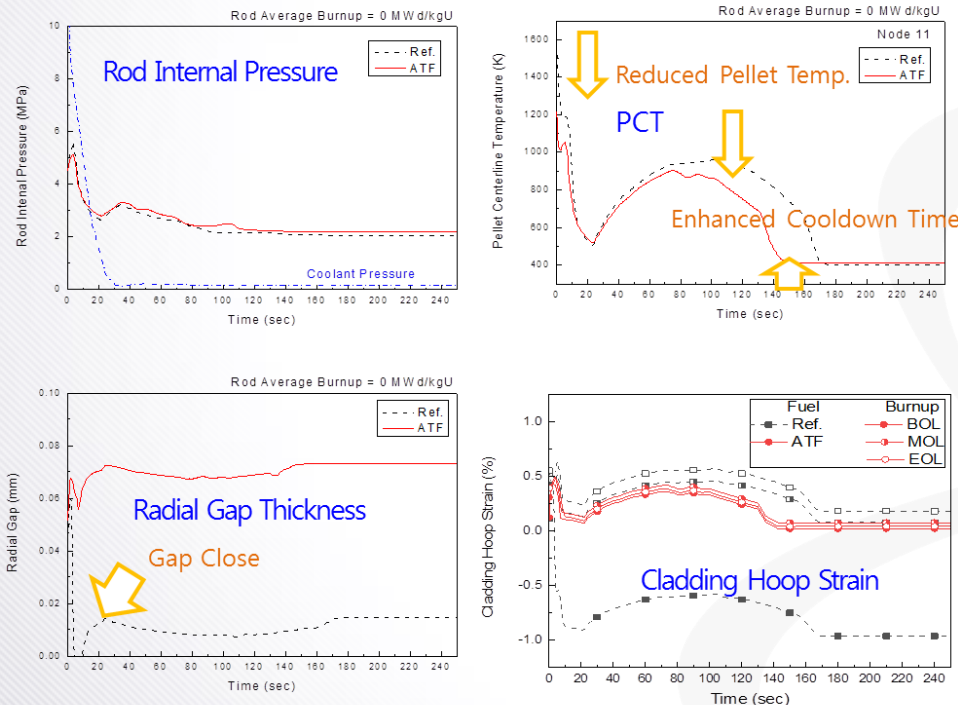
핵연료 온도 저감



사고 완화 효과 해석

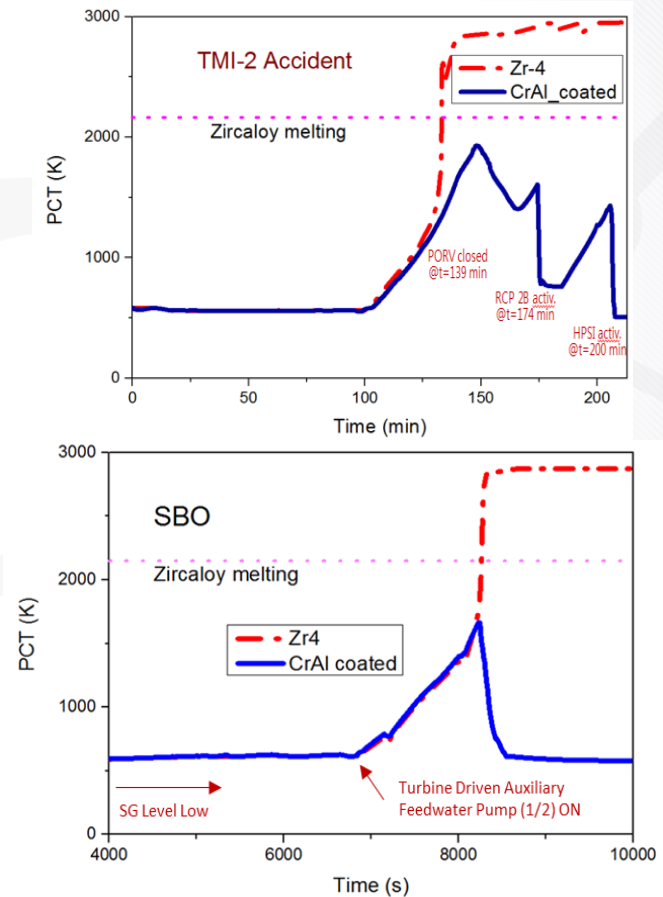
● 설계 기준 사고(LOCA)

- 연료봉 손상 저감 및 사고 완화 효과



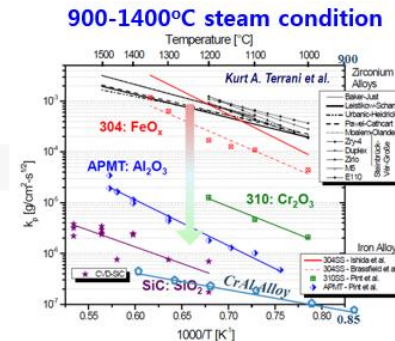
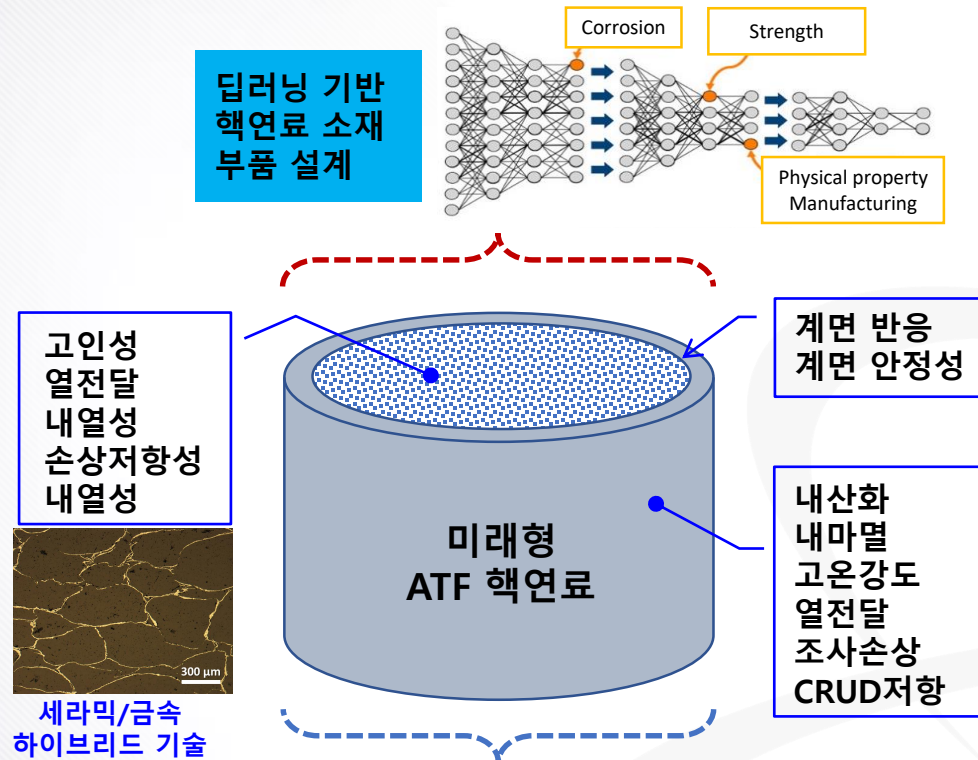
● 설계기준초과 사고(BDBA)

- 특정 사고 조건에서 사고완화 효과

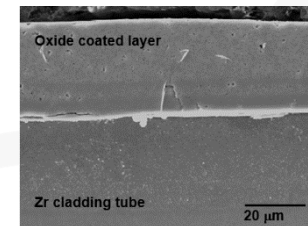


KAERI의 장기 개발기술 개념

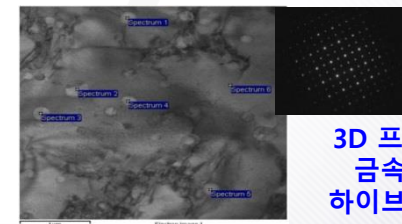
❖ Innovative concepts (multi-hybrid materials)



SiC보다 우수한
내산화 물질

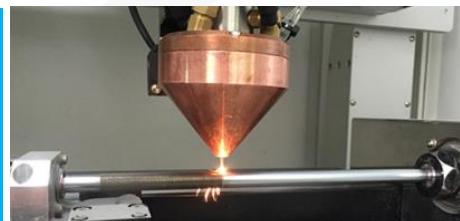


3D 프린팅 기반
금속 표면에 열차단
산화물 코팅 기술



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

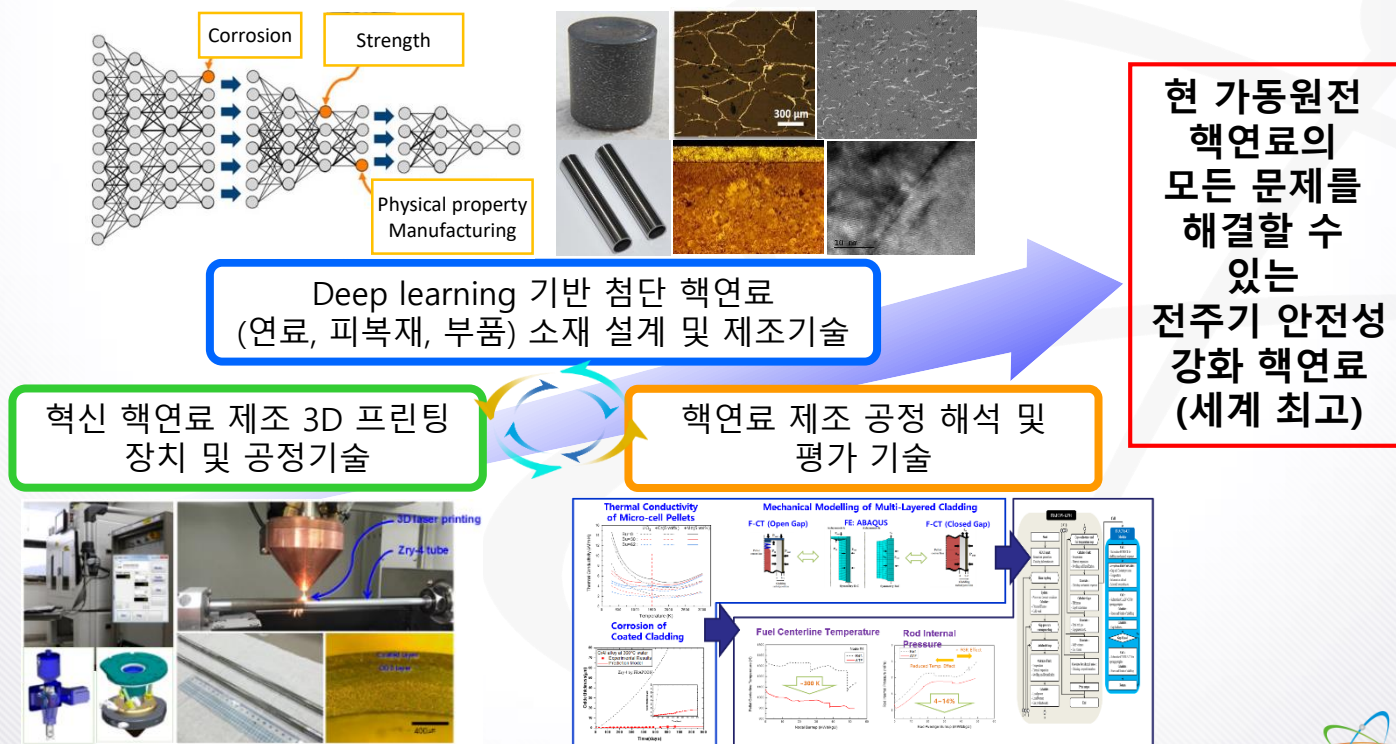


장기 기술개발 내용 및 추진 체계

» 기술개발 내용

- 가동원전 전주기 안전성 향상 신개념 사고저항성 핵연료 기술 개발
 - Deep learning을 통한 사고저항성 핵연료 첨단 소재, 부품 설계기술 개발
 - 3D printing 기반 사고저항성 핵연료 혁신 제조기술 개발
 - 3D printing 핵연료 제조 공정 수치해석 모델 개발

» 추진 체계





01 사고저항성핵연료 개념

02 사고저항성핵연료 기술개발 현황

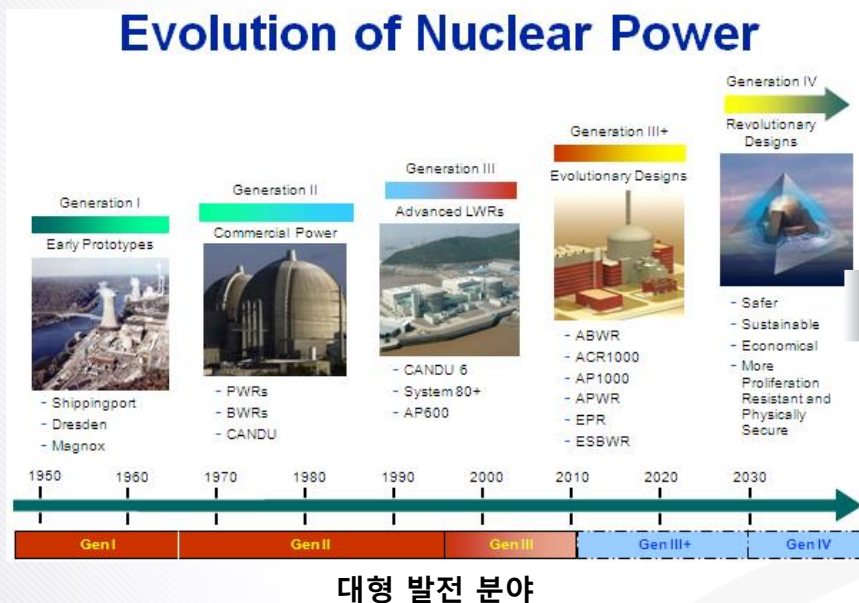
03 미래형 핵연료 기술 개념

04 4차 산업 적용 미래형 핵연료

미래형 핵연료 기술의 개요

● 연구 개발의 개요

● 원자력연구개발 패러다임의 변화



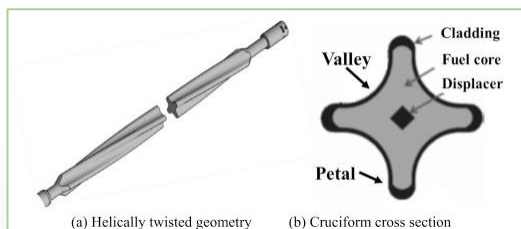
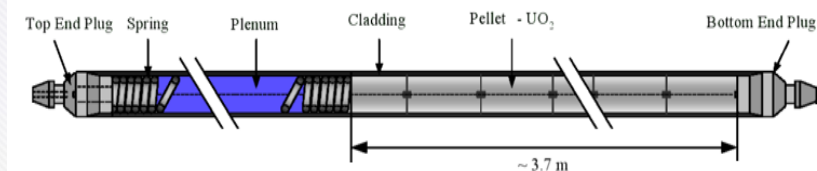
소형 전력원/추진체 분야

- 원자력산업의 미래 전략은 현재의 중, 대형 발전분야뿐만 아니라 우주, 심해, 극지탐사 등에 필요한 초소형 고성능의 안전한 원자력 에너지원 및 핵심부품을 제공하여야 함

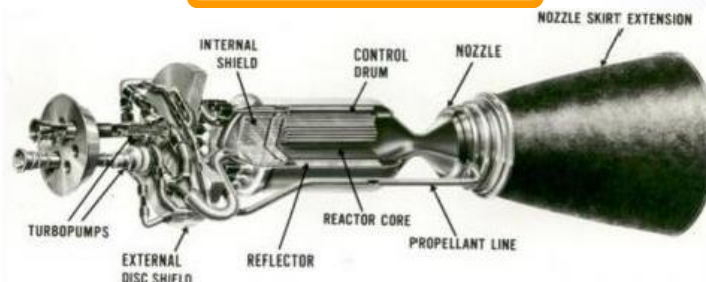
미래형 핵연료 기술 적용대상

● 연구 개발 대상의 국내외 현황

다양한 형태의 핵연료



우주 추진체 핵연료

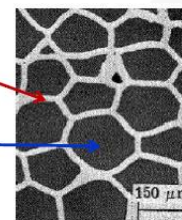


과거 NASA가 추진했던 핵 추진 로켓의 설계도 © NASA

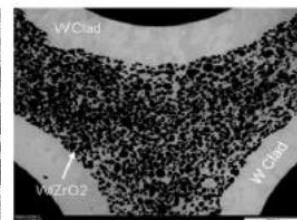


Tungsten (white)

UO₂ (dark)



[HIPing, now developing]



연구개발 방향의 전환



4m

*Large size,
Mass production
Simple shape*



*Small size,
Small quantity
Complex shape*

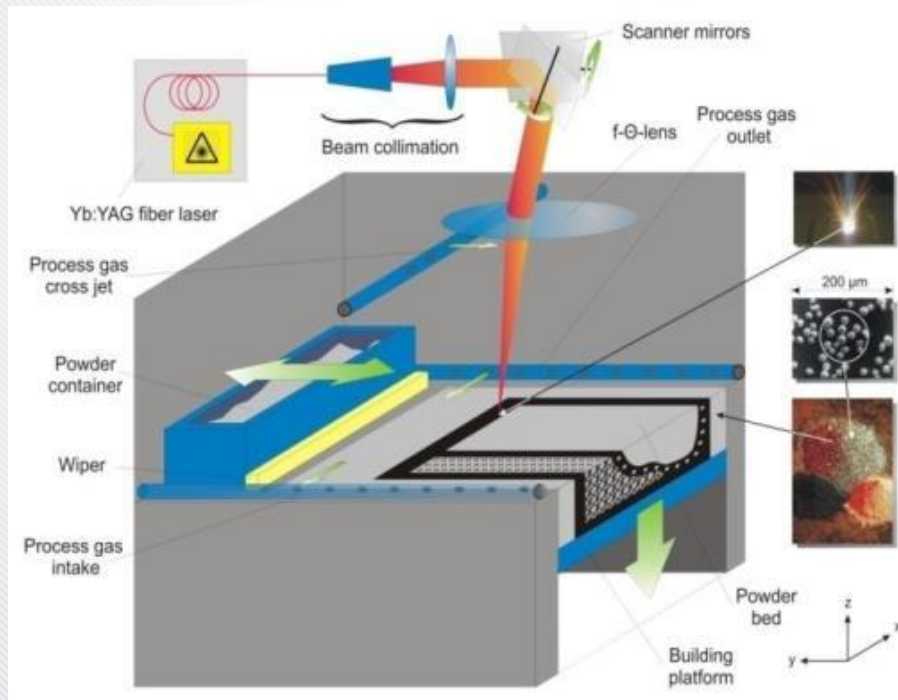
- 초소형 고성능 원자로 핵연료의 다품종 소량생산에 적합한 기술개발
- 다양하고 복잡한 설계 조건을 만족하기 위한 맞춤형 핵연료 기술개발
- 극한 환경에서 성능을 만족할 수 있는 소재 기술 및 제조의 용이성 확보

→ 3D 프린팅 등과 같은 4차 산업 혁신 기술 도입이 필요

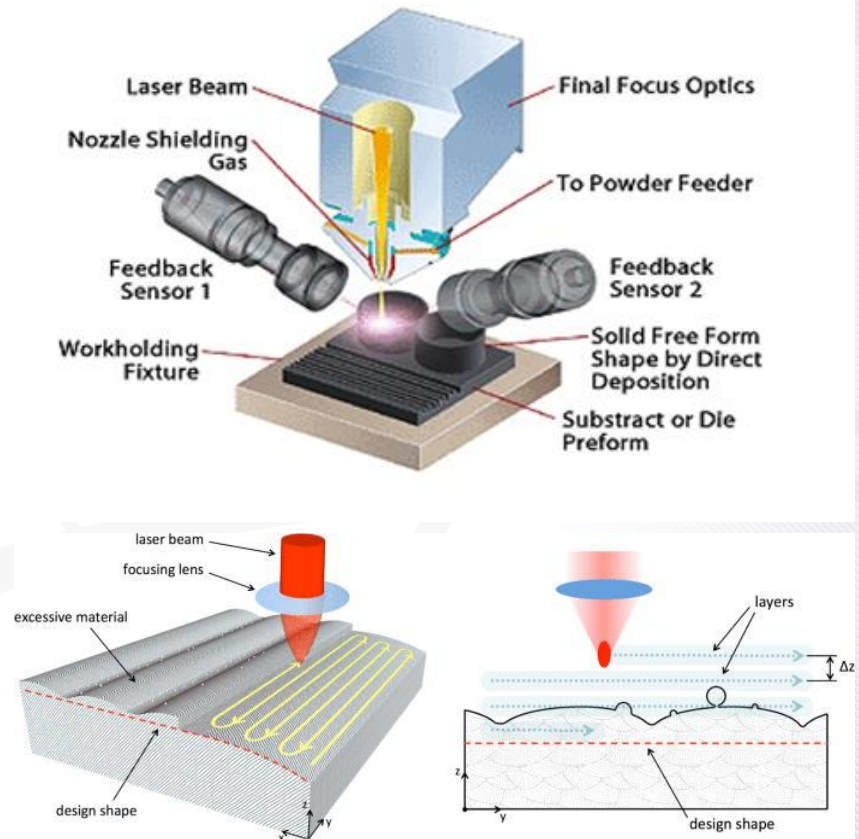
4차 산업 연계 혁신 제조기술 도입

3D 프린팅(AM; Additive Manufacturing) 기술 개요

PBF(powder bed fusion)

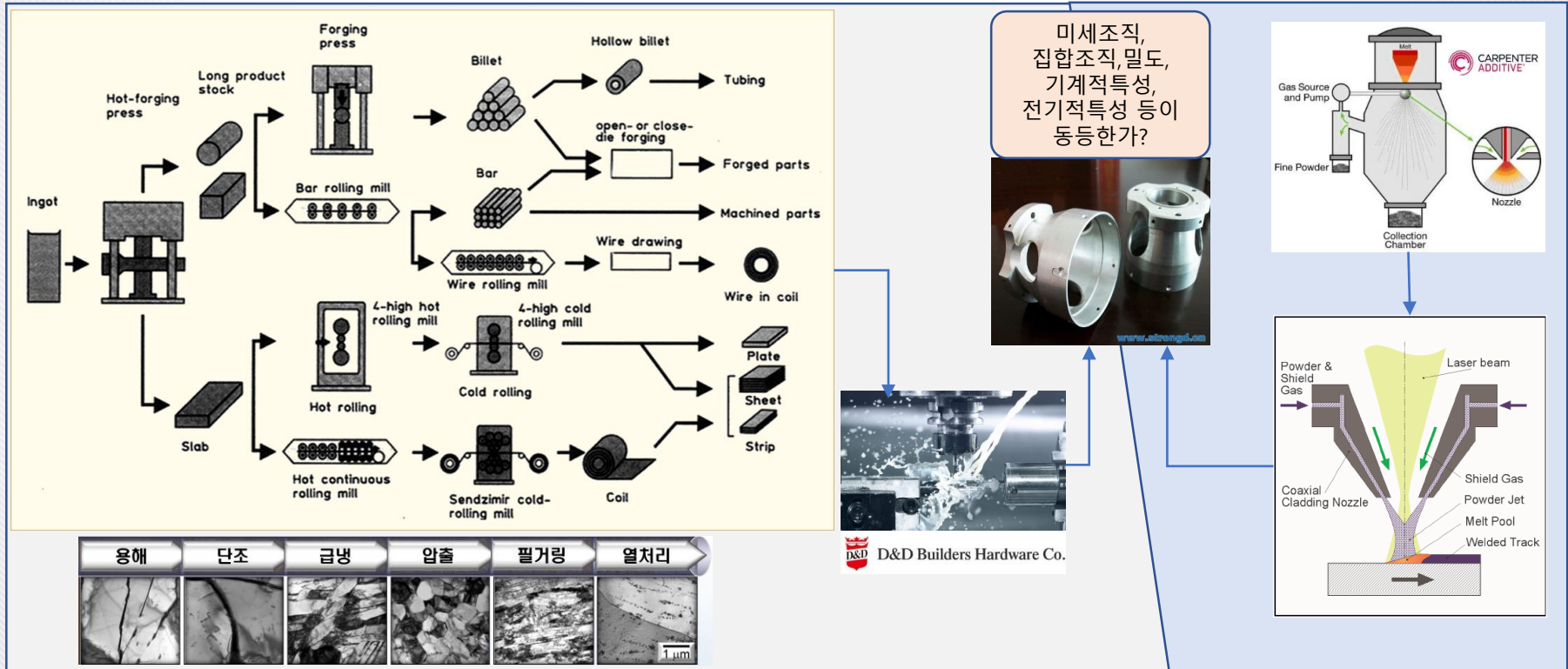


DED(direct energy deposition)



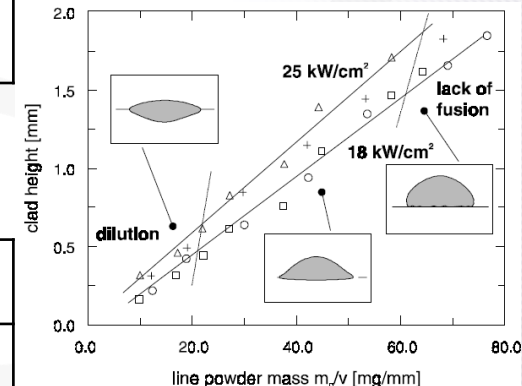
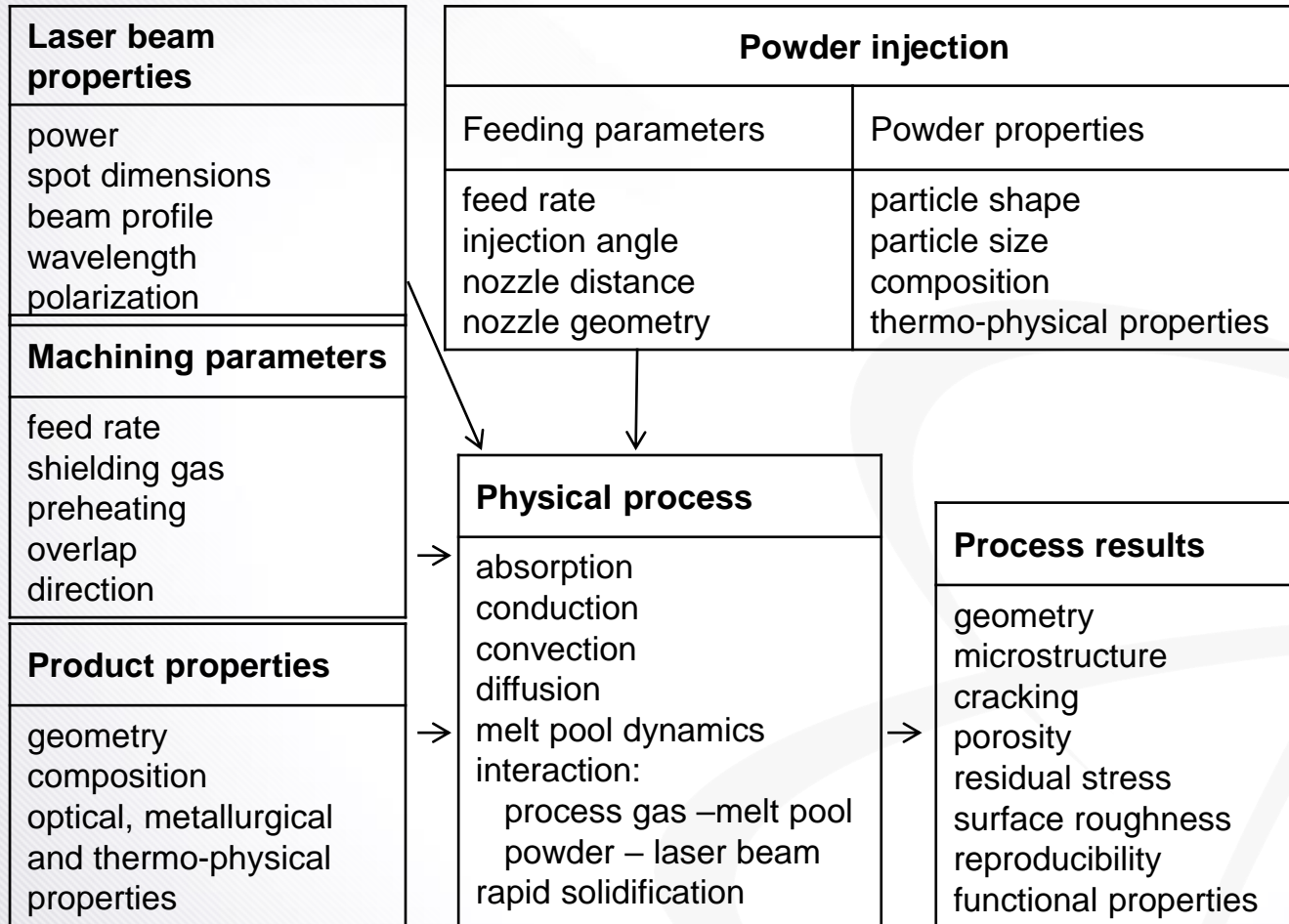
3D 프린팅 기술의 장점과 과제

기존 공정 제조부품과 3D 프린팅 제조부품의 물성차이?

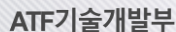


3D 프린팅 기술의 해결 과제

핵연료 적용 3D 레이저 프린팅 공정기술 개발 및 표준화

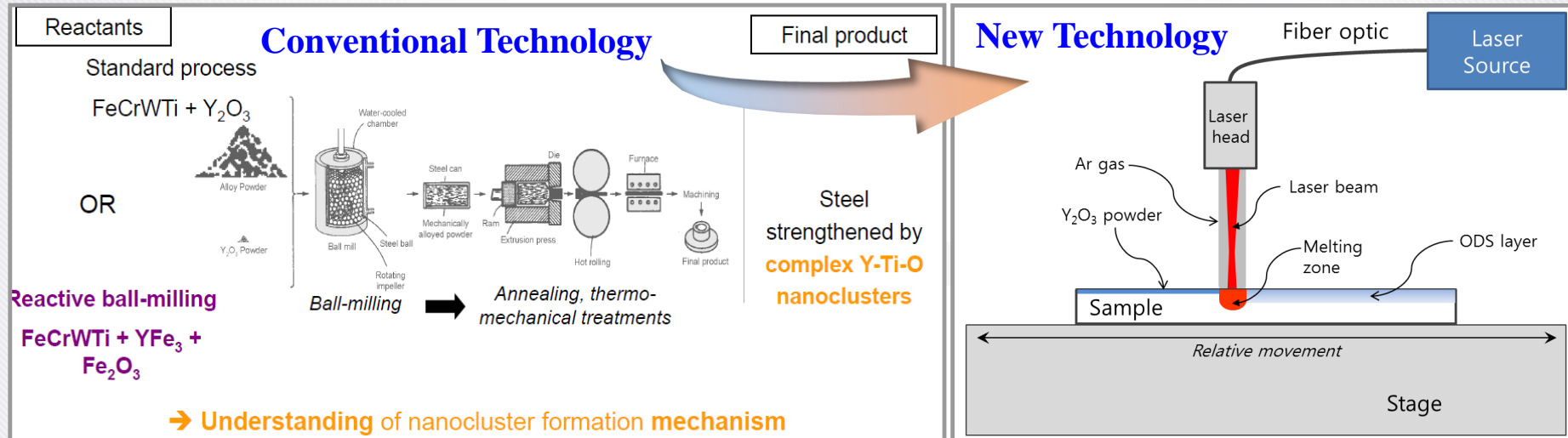


3D 레이저 프린팅 적용 하이브리드 소재기술 개념 적용

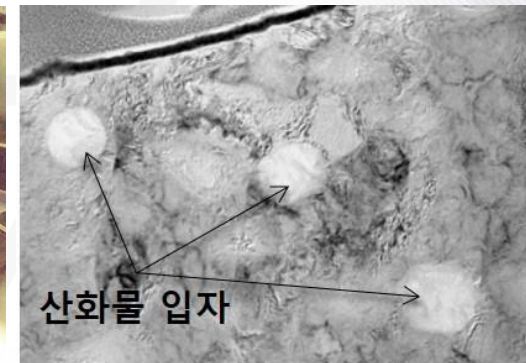
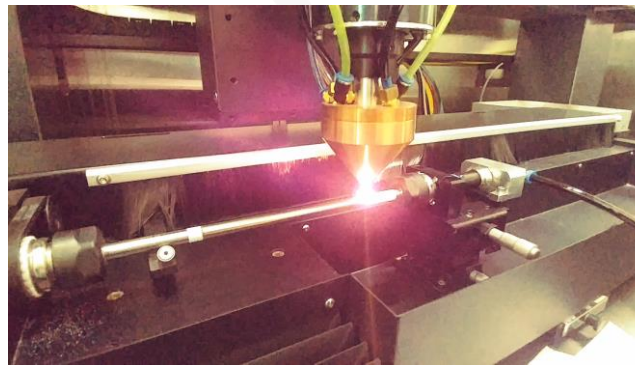


3D 프린팅 기술의 적용 방법

미래형 핵연료 적용 hybrid (금속+산화물입자) 3D 프린팅 공정기술



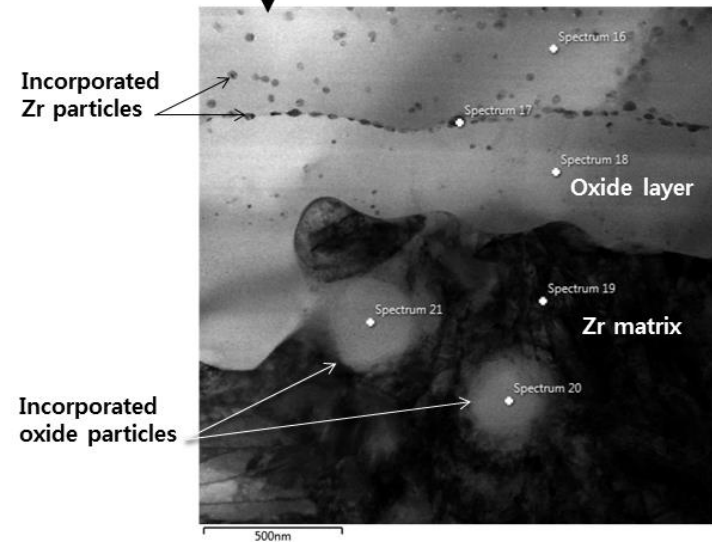
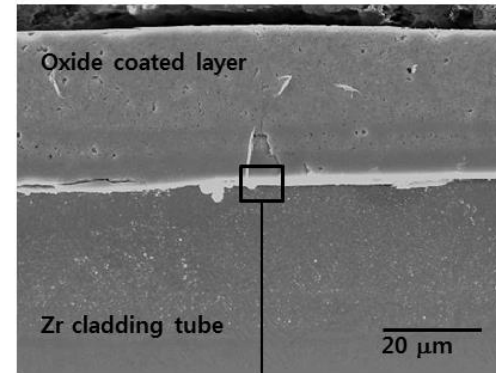
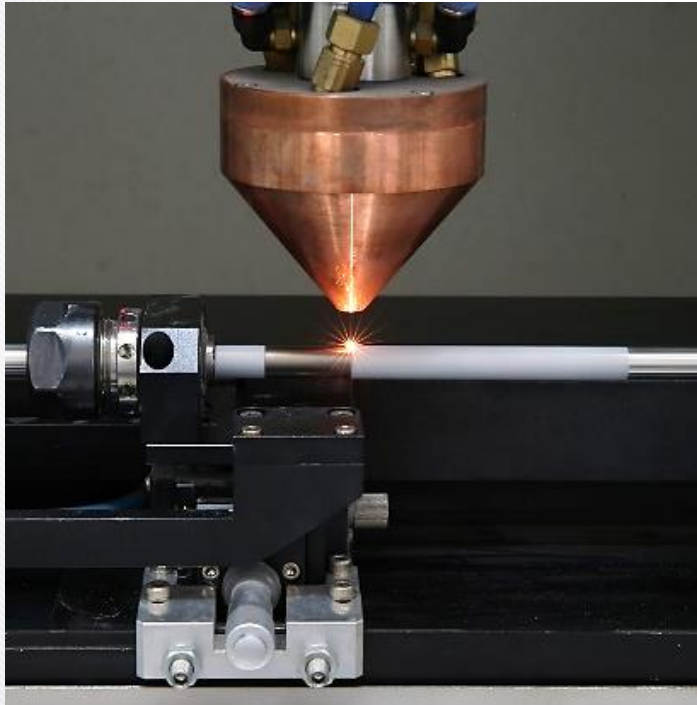
- 레이저를 이용하여 ODS 조직을 형성
- 금속모재에 목적하는 산화물을 직접 주입
- 금속소재의 고온강도가 크게 향상됨
- 이미 제조된 부품에 ODS 처리 가능
- 산화물 코팅도 가능



ODS(oxide dispersion strengthened, 산화물분산강화) 기술

3D 프린팅 기술의 적용 방법

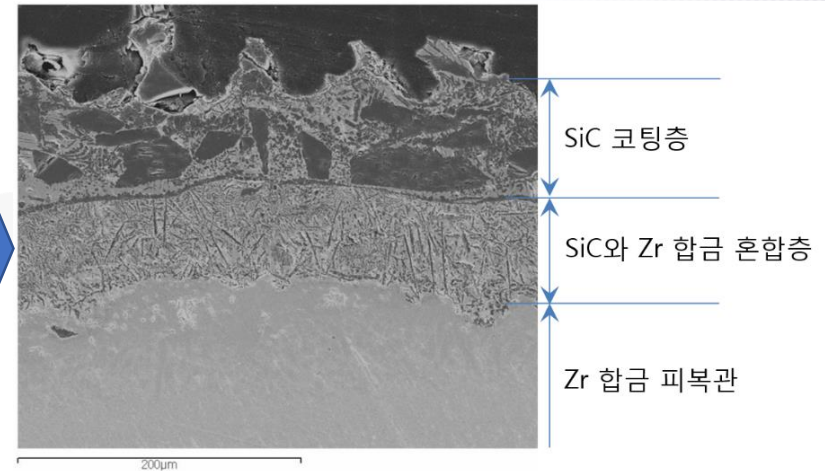
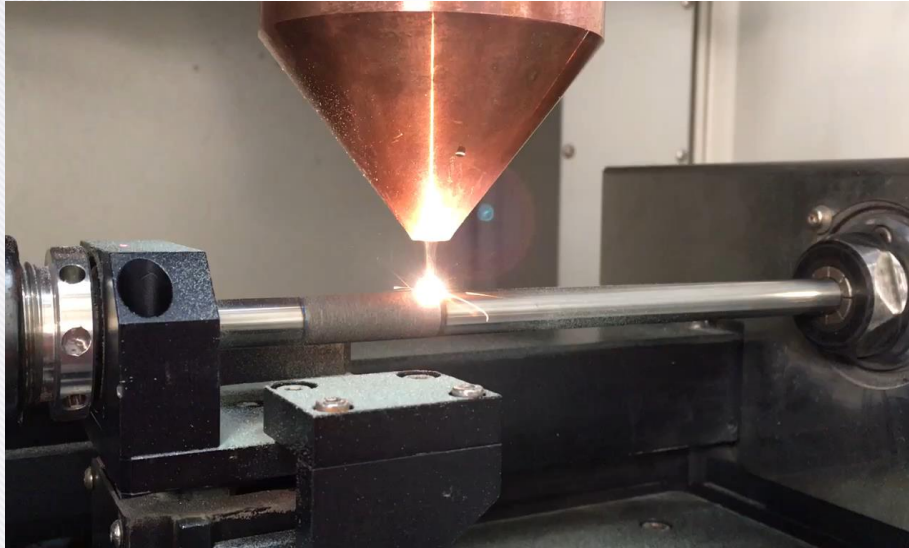
미래형 핵연료 적용 hybrid (금속+산화물 적층) 3D 프린팅 공정기술



Metal + Oxide (이종 소재 적층) 기술

3D 프린팅 기술의 적용 방법

미래형 핵연료 적용 hybrid (금속+SiC) 3D 프린팅 공정기술



Metal-SiC hybrid (이종 소재 융복합) 기술

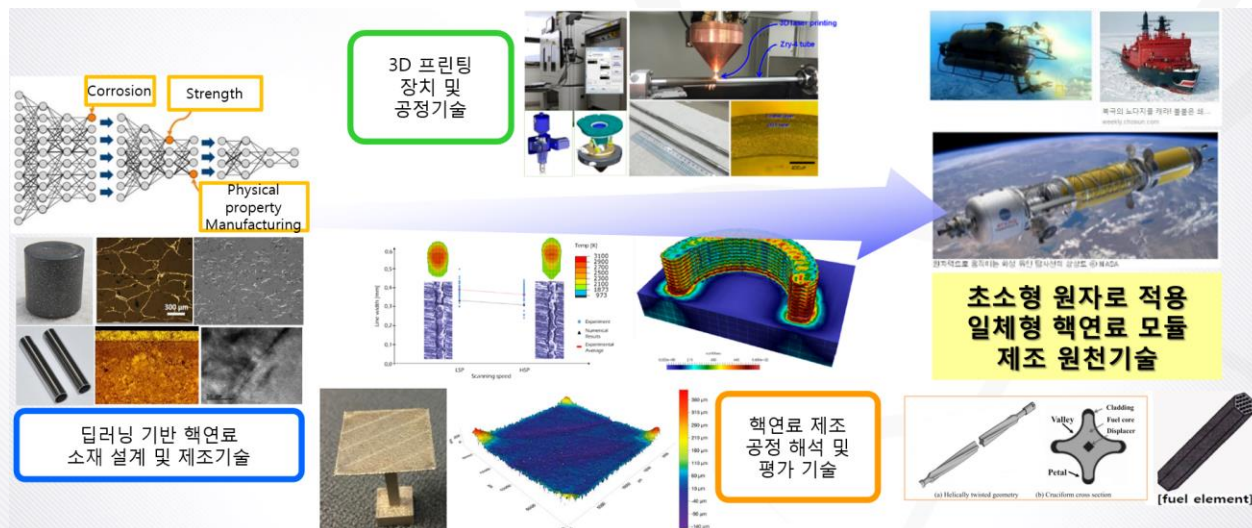
요약

» 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 발생량을 감소
- 신개념 사고저항성 핵연료 기술은 해외 원자로 및 핵연료 수출시장 확대에 적용
- 우리나라 핵연료 기술의 선진화 달성

» 4차 산업 적용 미래형 핵연료

- ATF 기술과 4차 산업기술을 융복합 하여 미래형 핵연료 제조 공급에 활용하고 국내 핵연료 기술을 한차원 spin-off



감사합니다.