

# KNF의 ATF용 소결체 개발현황

한전원자력연료  
연료연구실, 소재개발부

임 광 영

[kylim@knfc.co.kr](mailto:kylim@knfc.co.kr)

# Contents



I. Introduction

II. Long-Term Accident Tolerance Fuel(ATF) 연구개발 현황

III. Mid-Term ATF 연구개발 현황

IV. Near-Term ATF 연구개발 현황

V. Accident Tolerant Control Rod (ATCR) 연구개발 현황

# I

---

## Introduction

# Accident Tolerance Fuel (ATF) 소재개발 Phase 2 진입

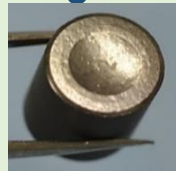
## ● 사고저항성 핵연료 (Accident Tolerant Fuel, ATF)의 정의

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

Accident Tolerance = 소재 기술 + 원자력 계통

### Near/Mid-term Technologies

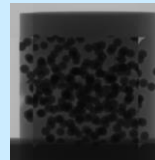
- Surface-Modified Zr Cladding
- Fe-base Alloy Cladding (Mid-term)
- Doped  $\text{UO}_2$  Pellet (Near-term)
- Advanced Thermal/FGR  $\text{UO}_2$  Pellet (Mid-term)



안전성  
<  
적용성  
>

### Long-term Perspectives

- SiC-SiC<sub>f</sub> Composite Cladding
- Metal-Ceramic Hybrid Cladding
- High U Density Pellet
- TRISO-SiC Pellet

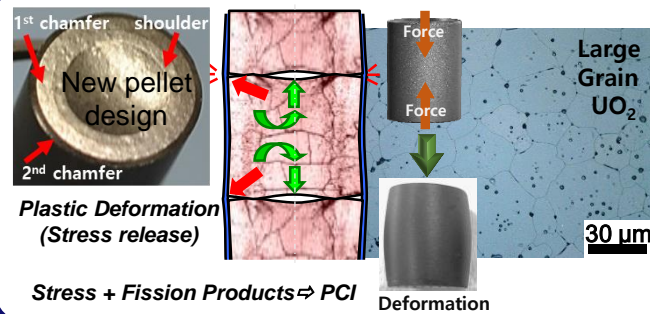


# KNF의 ATF 개발 소재

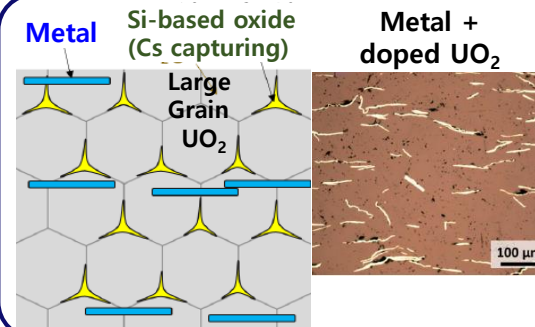
## ● 사고저항성 핵연료 펠릿 개발

### Advanced UO<sub>2</sub> Pellet

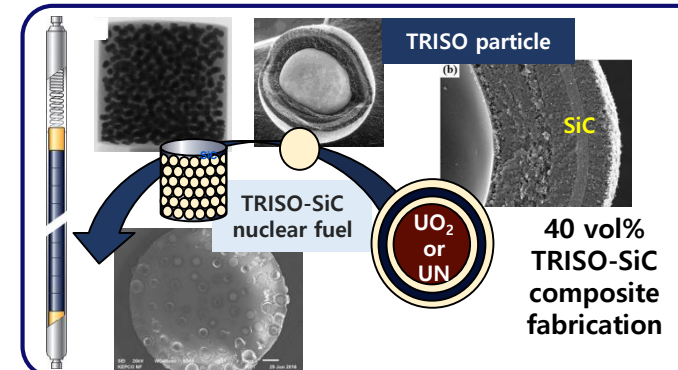
**Near-term** : Doped UO<sub>2</sub> & Double Chamfer



**Mid-term** : Improved TC UO<sub>2</sub>

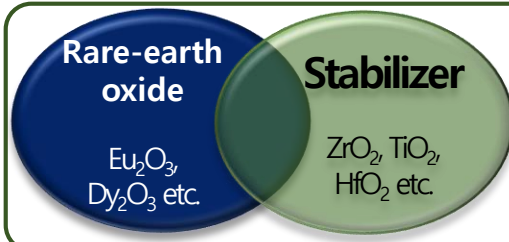
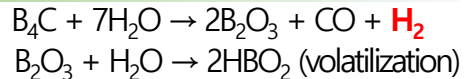
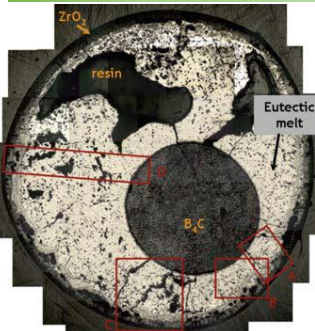


### TRISO-SiC Composite Long-term



## ● 사고저항성 중성자 흡수체 개발

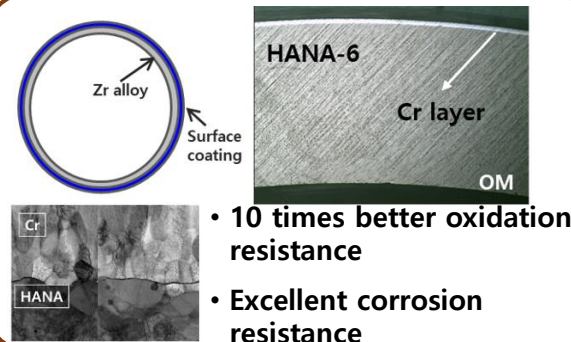
### Rare-Earth Based ATCR



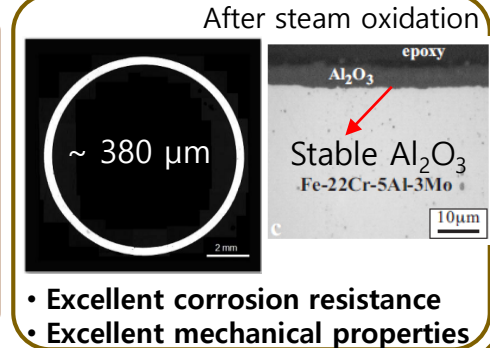
Eutectic reaction between B<sub>4</sub>C & Inconel at 1080°C

## ● 사고저항성 피복관 개발

### Cr Coated Zr Cladding Near-term



### Fe Based Cladding Mid-term



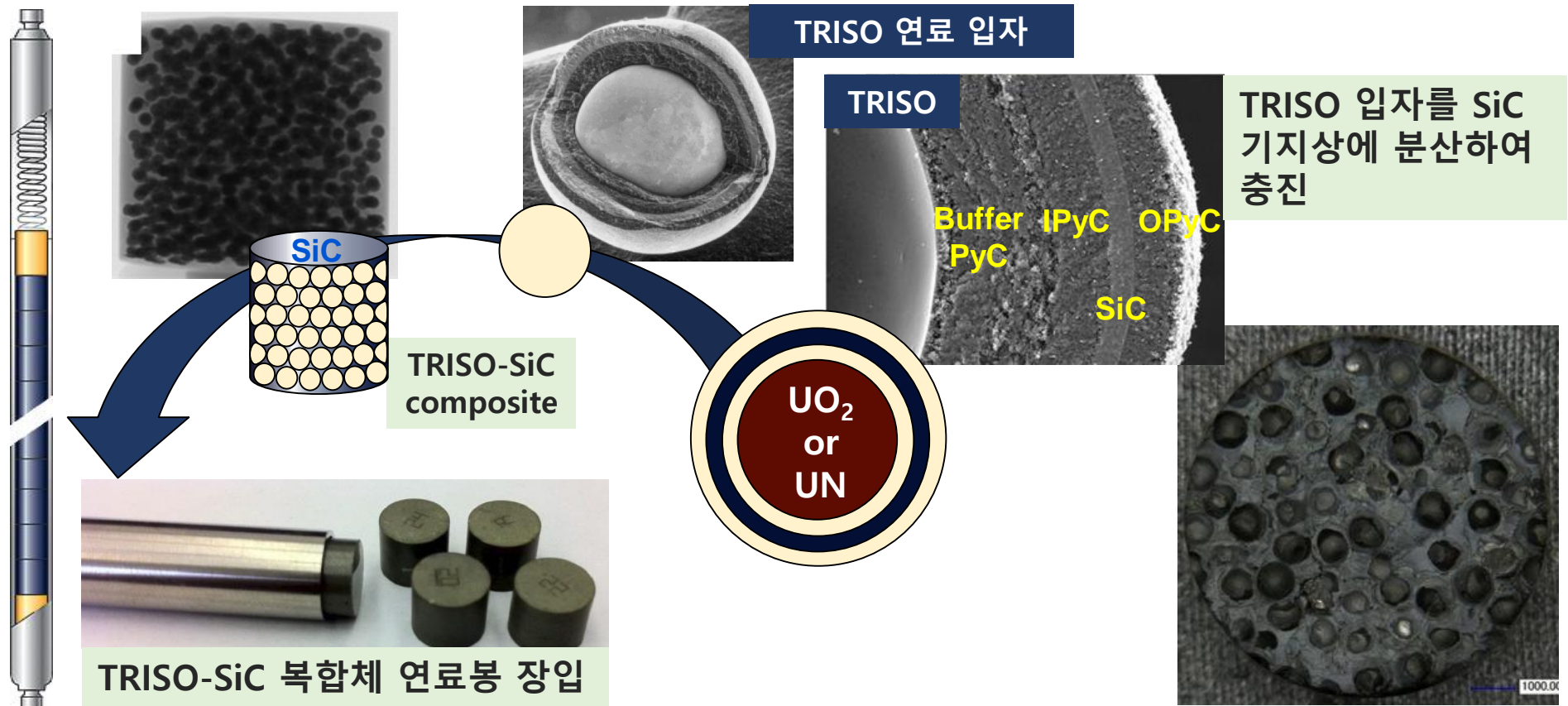
# II

---

## Long-Term ATF 연구개발 현황

# TRISO-SiC Composite

## ● TRISO-SiC 복합체 개념

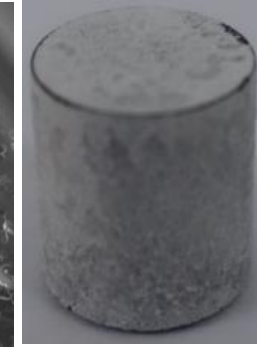
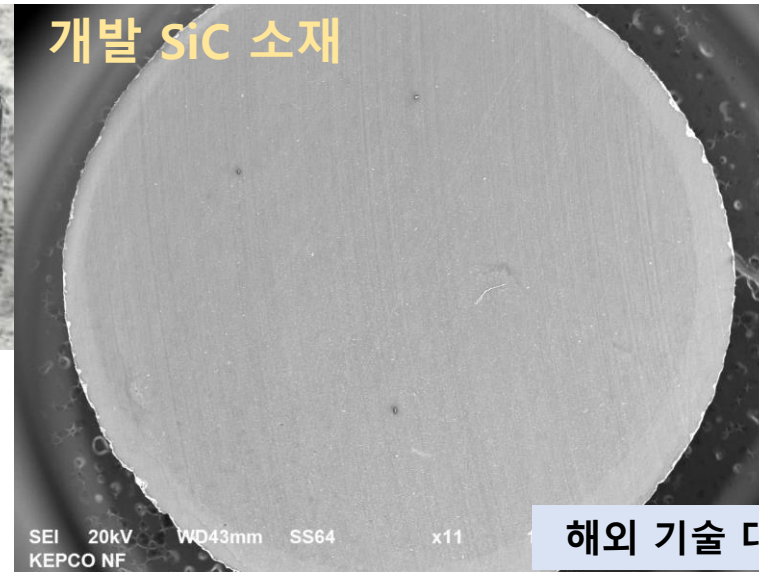
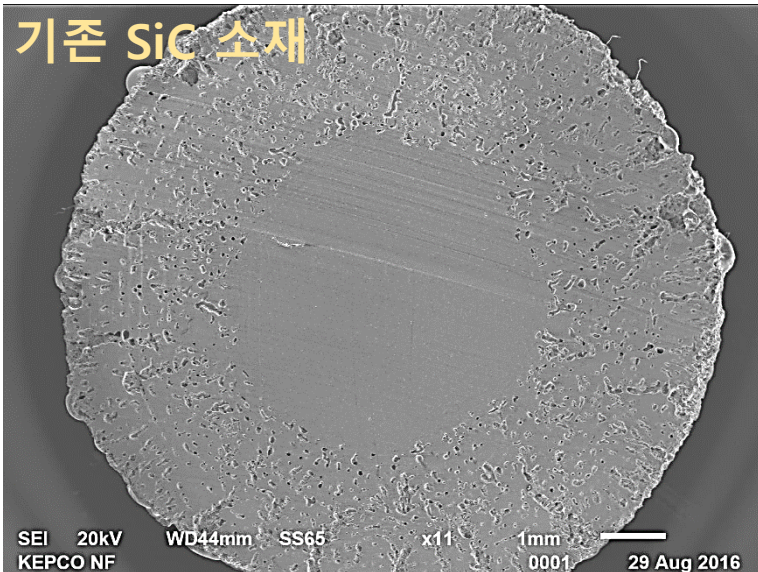


TRISO 입자 내부의 SiC 층과 TRISO-SiC의 치밀한 SiC 기지상이 다중보호 역할을 하여 핵분열 물질 방출을 억제 시키고 핵연료 용융을 지연시킴.



# TRISO-SiC Composite 개발

- Temperature : 1700 °C
- Steam flow speed : 200 cm/s
- Oxidation time : 50 hr

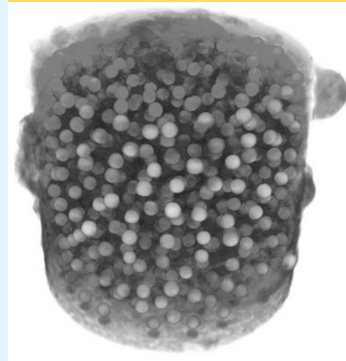


해외 기술 대비 선점 기술

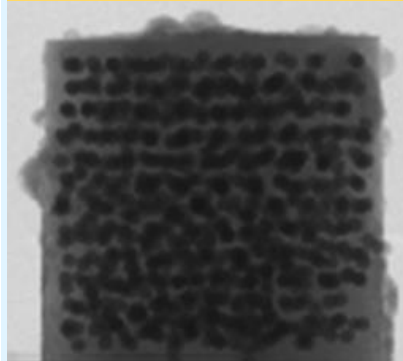
개발 조성 적용 TRISO-SiC 중대사고 모사 조건 안전성능 평가 (1700°C/50hr/2m/s)

국내 및 일본 특허 등록  
(미국 유럽 심사중)

Micro CT 3D 촬영



Micro CT 단층 촬영



평가 후 외관



외부 산화막 제거 후



(11) 등록번호 10-2012004  
(24) 등록일자 2019년08월12일

(73) 특허권자

한전원자력연료 주식회사

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)  
C04B 36/678 (2006, 01) C04B 36/628 (2006, 01)  
C04B 36/63 (2006, 01)

(52) CPC특허분류  
C04B 36/678 (2013, 01)  
C04B 36/62826 (2013, 01)

(21) 출원번호 10-2018-0062658  
(22) 출원일자 2018년05월31일  
심사청구일자 2018년05월31일

(56) 선행기술조사문헌  
JP20011061470 A\*  
(첫면에 계속)

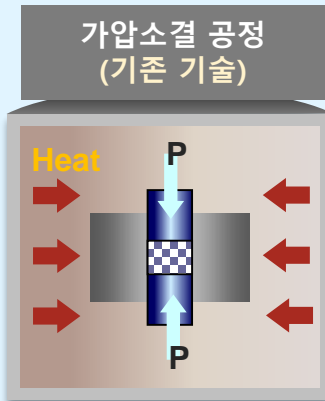
전체 청구항 수 : 총 9 항

(64) 발명의 명칭 내 산화층이 형성된 탄화규소 소결체

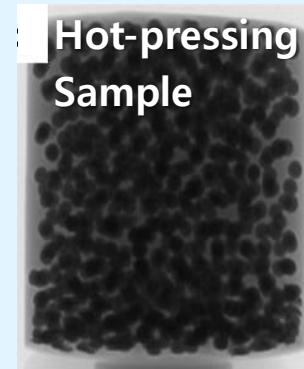


# TRISO-SiC Composite 개발

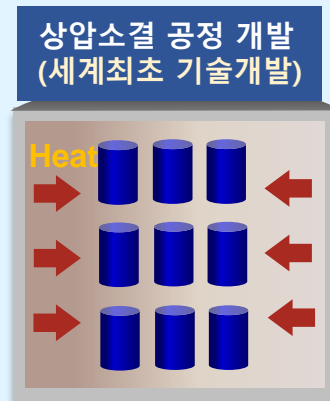
## ● 대량 생산 제조 공정 개발 (with 서울시립대)



대량 제조 및 상용성 낮음



- 45 vol% TRISO for hot-pressed



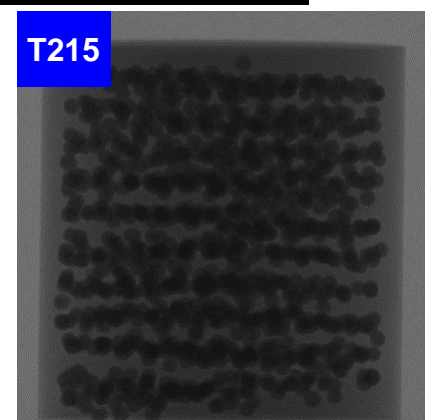
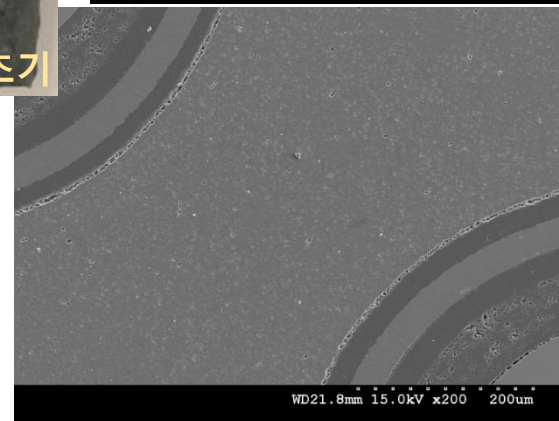
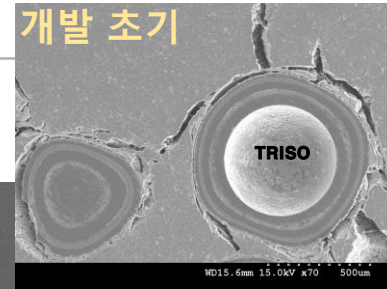
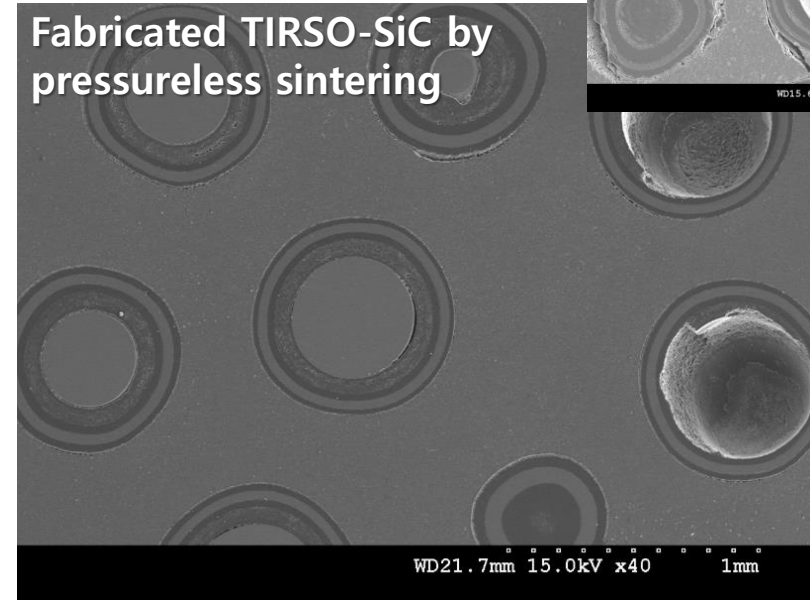
대량 제조 가능 & 상용성 높음



개발 초기

- 33 ~ 40 vol% TRISO for pressureless sintering

Fabricated TRISO-SiC by  
pressureless sintering



# TRISO-SiC Composites

- 실험실 단위 시제품



# III

---

## Mid-Term ATF 연구개발 현황

# Accident Tolerance Cladding 개발

## ● Fe-base Alloy Cladding 개발 (with KAIST)

- 후보합금 중 성능, 제조성 등을 종합평가하여 최종후보합금 선정  
→ ADSS alloy : Duplex + NiAl 석출상으로 구성
- 주요 특성
  - 정상운전조건 : 우수한 부식저항성 및 크리프 저항성
  - 사고조건 : 우수한 고온산화특성 및 낮은 고온변형률

## Concepts of ADSS alloy



## ● 4m Full-scale Fe-base 피복관 제조

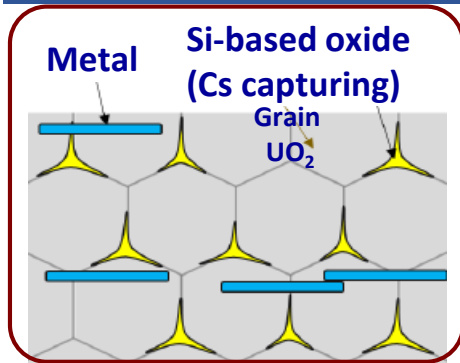
- 국내/국외 제조기술을 이용하여 4m Full-scale 피복관 제조 완료 (2020)
- 향후 국내 인프라 구축 및 양산성 확보 필요





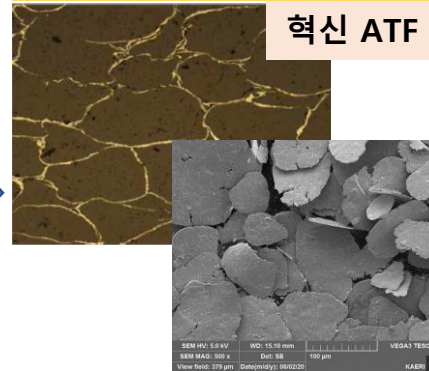
# Improved Thermal Conductivity $\text{UO}_2$

## MoLAS 설계

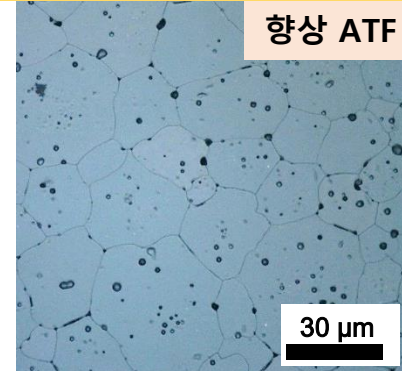


산업부 + 과기부 기술의 병합을 통한 성능 극대화 설계

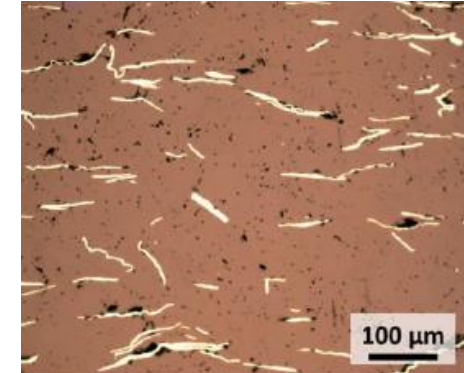
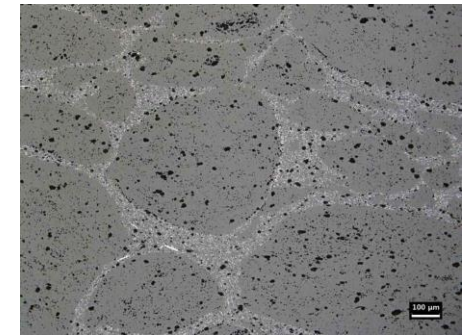
Mo 활용 (KAERI 기술) + LAS 조성 (KNF 기술) = 열전도도 개선  $\text{UO}_2$



열전도도 증가 & FP 확산속도 감소



결정립 크기 증가 & Si based 결정립계



주요 안전성능 극대화  
(연료 중심온도 및 FGR 저감)

## 대용량 제조성 평가 및 공정 개선 중



제조된 열전도도개선  $\text{UO}_2$



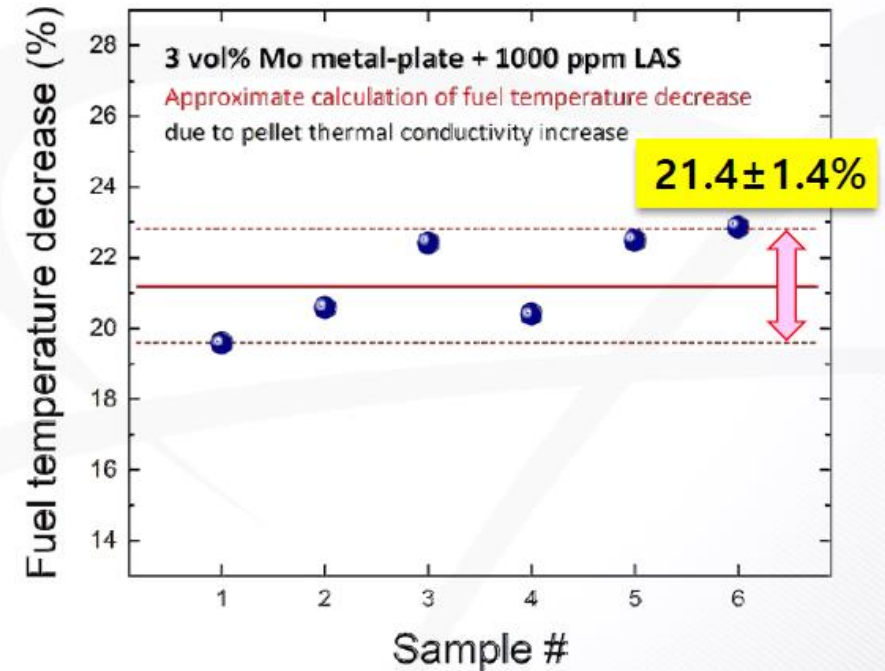
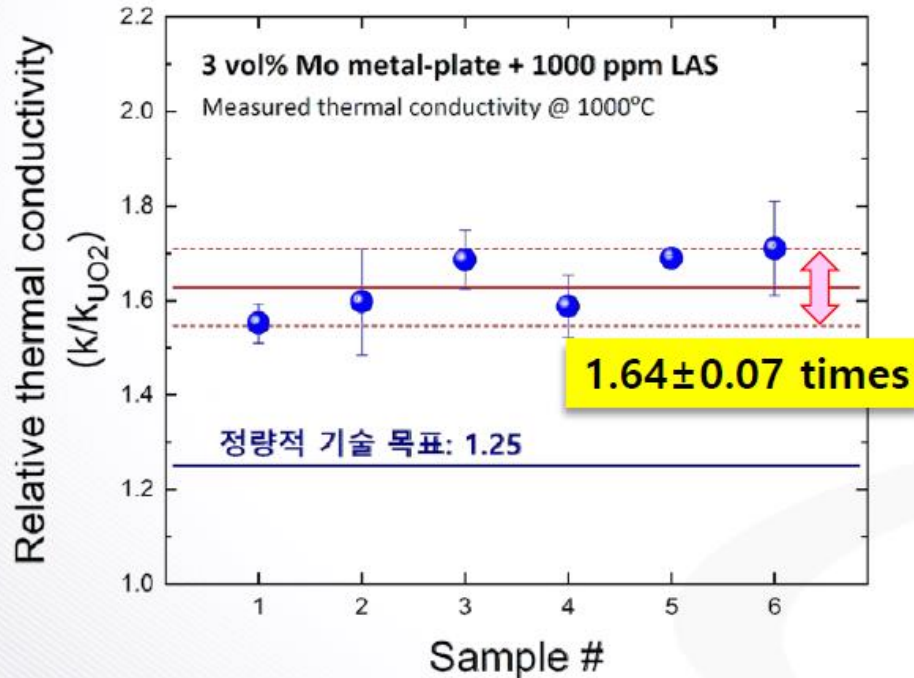
해외 기술 대비 선점 기술

예타 과제 협력 Item  
(상용제조 공정 평가 및 개발 협력)



# Improved Thermal Conductivity $\text{UO}_2$

- 향상된 열전도도 (1.6 배) & 핵연료 중심온도 감소 (20%) – 실험실 규모 KAERI 결과



- 상용 제조공정 최적화 및 노외성능 평가 수행 중
- 연구로 연소시험 및 LTR 추진 방안 고려
- Near-term 적용 기술 이후의 경쟁사 대비 열전도도 향상  $\text{UO}_2$  기술 선점에 활용

# IV

---

**Near-Term ATF 연구개발 현황 (Doped UO<sub>2</sub>)**

# Doped $\text{UO}_2$ Fuel의 ATF 적용 시도

## ● 해외 기관의 Near Term 상용화 기술 선점



Westinghouse

- Cr-coated Zr cladding
- **Doped  $\text{UO}_2$  fuel(Cr-Al)**

**EnCore™ Fuel**

*We're changing nuclear energy ... again*

**framatome**

- Cr-coated Zr cladding
- **Doped  $\text{UO}_2$  fuel(Cr)**



- 2019년 3월 LTR (4 rodlets) 시험 (Byron 2)
- 2022~23년 LTA 예정



- 2021년 11월 세계 최초로 LTA (176 rodlets) 시험 착수 (Calvert Cliffs NPP)
- **Cr doped  $\text{UO}_2$  2020년 유럽 PWR 교체노심을 위한 연료 이송**

# Doped UO<sub>2</sub> 상용화 현황

## ● 핵연료 제조사별 Doped UO<sub>2</sub> 소결체 개발현황

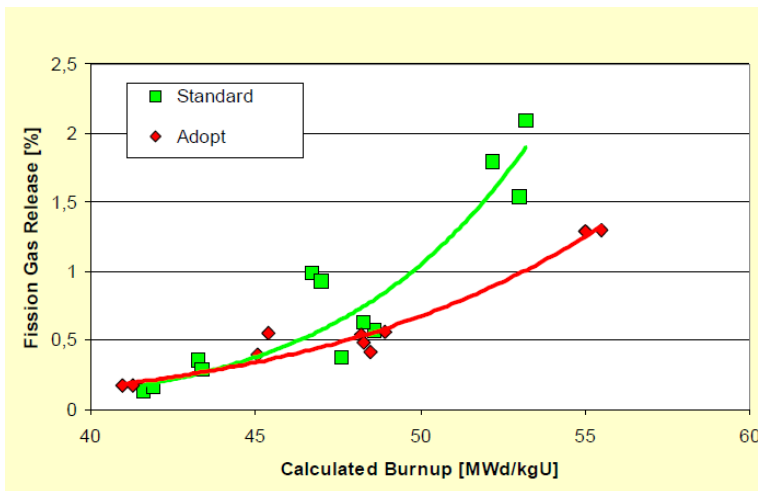
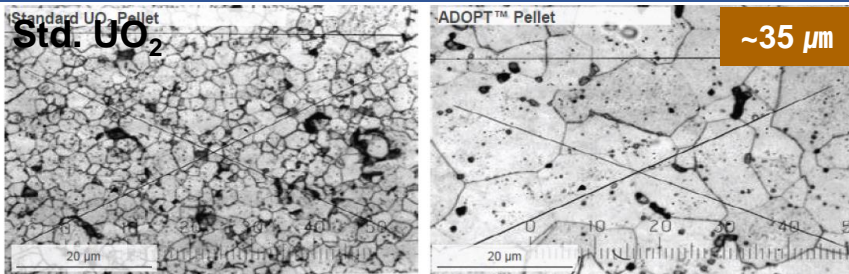
→ 해외 주요 경쟁사들은 Doped UO<sub>2</sub> 소결체를 유럽 BWR에 상용화 및 미국 PWR 인허가 진행

기관	BWR			PWR	Doped 조성
	LTA 착수	ToR	상용화		
 	'12년 독일	유럽 ToR 정보 없음	'14년 중순 상용공급 (유럽)	'20년 유럽 PWR 교체노심을 위한 연료 이송,  '21년 6월 ToR 제출 완료 (NRC)	0.16 wt% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
	'13년 스위스 '14년 노르웨이				
	'15년 미국	'16년 ToR 제출 및 '18년 승인 (NRC)	-		
 	'99년 스웨덴	유럽 ToR 정보 없음	'05년 상용공급 (유럽)	'20년 5월 ToR 제출 완료 (NRC)	0.05 wt% Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 0.02 wt% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

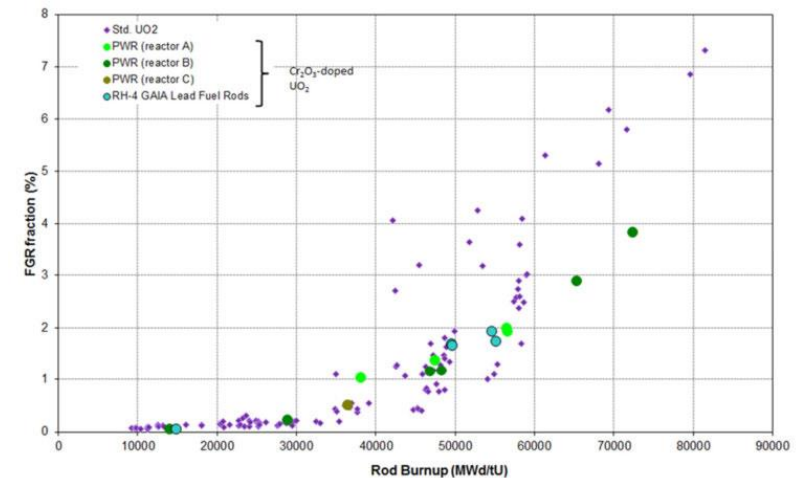
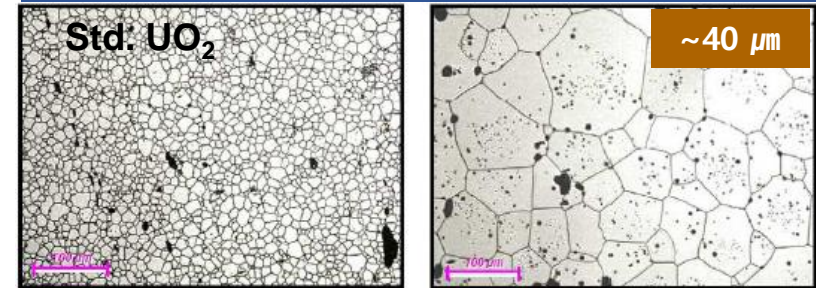
BWR 상용화를 기반으로 2026년 PWR 상용화를 계획

# Doped $\text{UO}_2$ Fuel의 FGR 저감 성능

## Westinghouse : ADOPT fuel



## Framatome : Cr doped $\text{UO}_2$ fuel

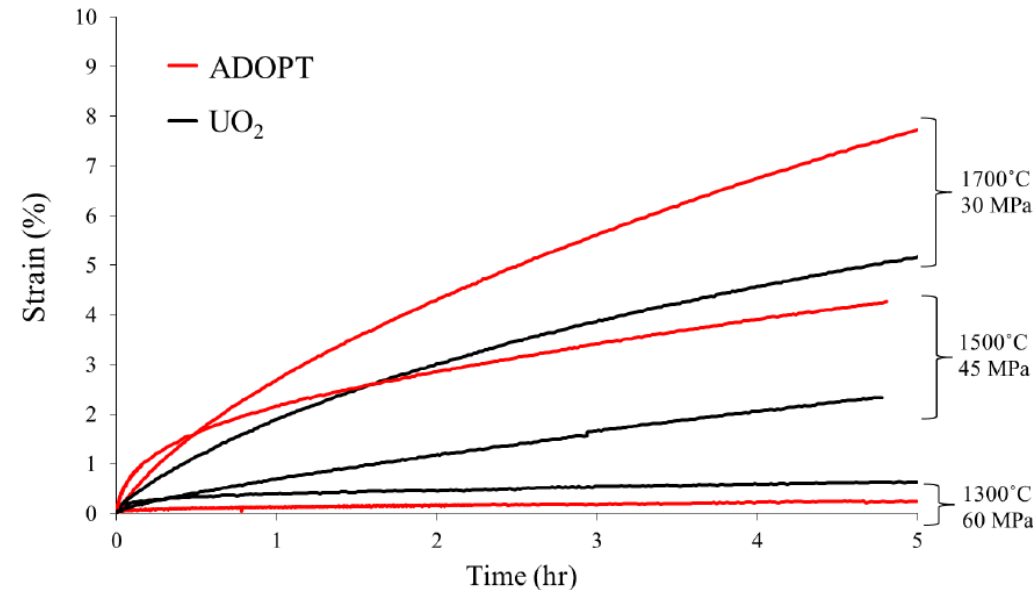


Reported data of actual working conditions shows suppressing of FGR for doped large grain  $\text{UO}_2$ .



# Doped $\text{UO}_2$ Fuel의 Creep 특징 성능

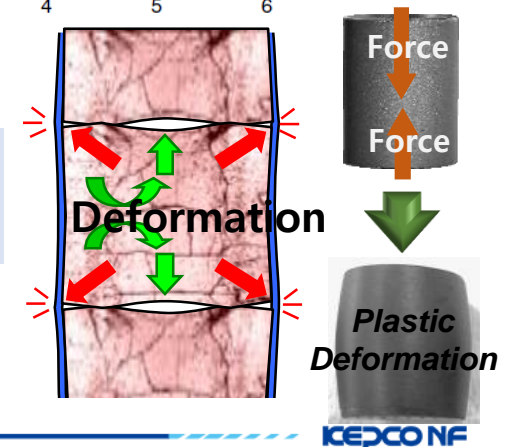
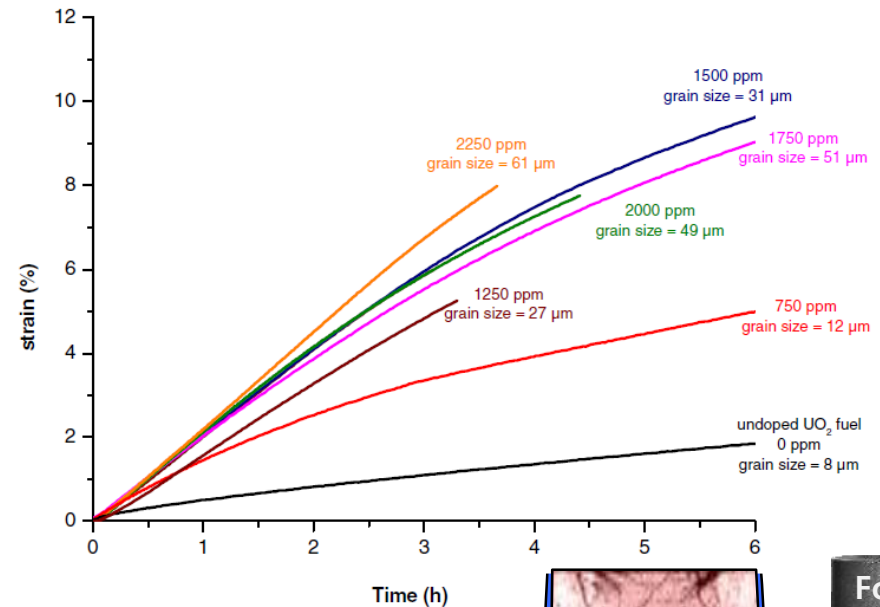
## Westinghouse : ADOPT fuel



Doped  $\text{UO}_2$ 의 우수한 Creep 변형 성능 → 과도 상태에서의 피복관 안전성 향상.

## Framatome : Cr doped $\text{UO}_2$ fuel

### 3. Effect of $\text{Cr}_2\text{O}_3$ addition on fuel creep behaviour at 1 470°C and 45 MPa



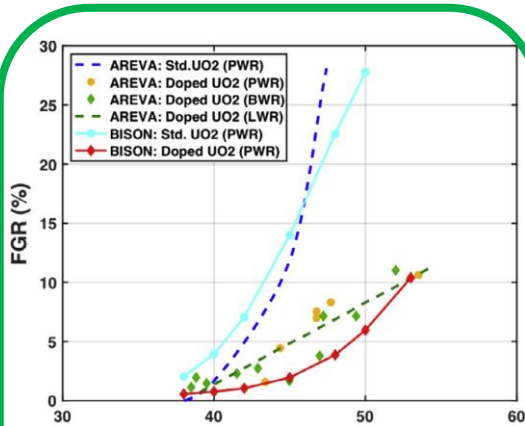
# Cr-Doped $\text{UO}_2$ 안전성능

## Safety enhancement

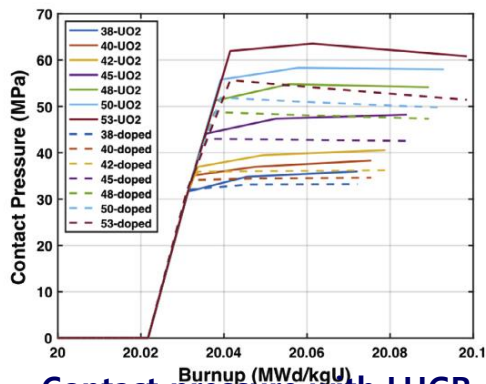
(IFA-667.1 ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$  doped fuel) benchmark with BISON/REALAP5)

Y. Che et al., Nucl. Eng. Design. (2018), 271-278

### RAMP

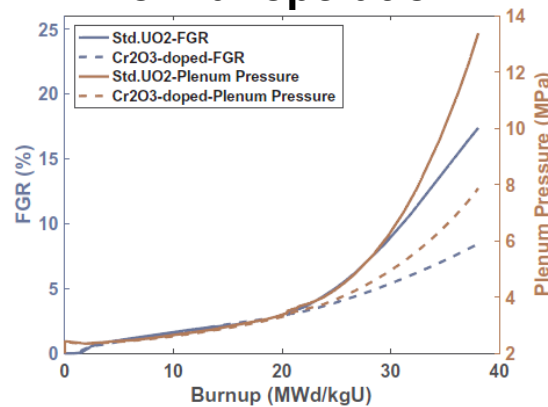


Ramp Terminal Level (kW/m)  
FGR with LHGR

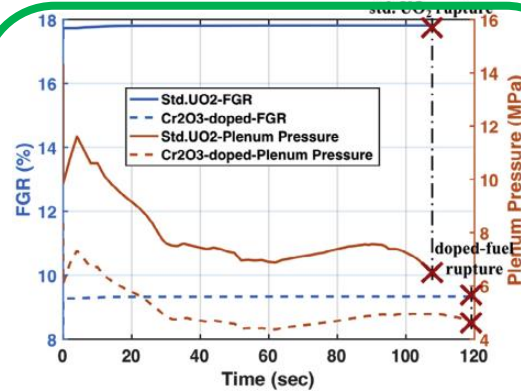


Contact pressure with LHGR

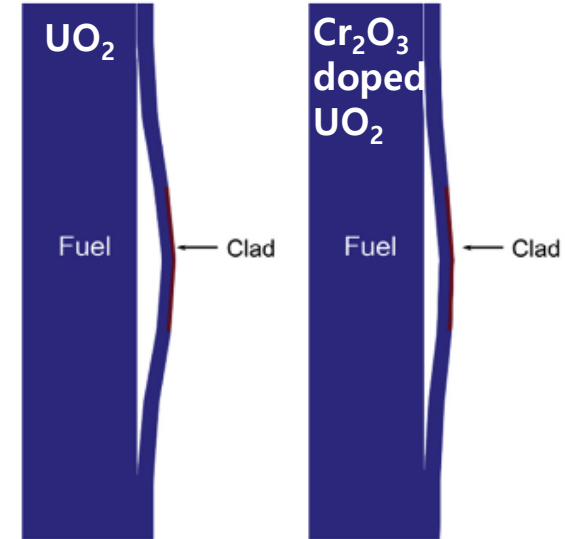
### Normal operation



### LBLOCA



Contact pressure with LHGR



### Ballooning result

- ✓ FGR retention (17 % → 8 %)
- ✓ Plenum pressure (14 MPa → 8 MPa)
- ✓ Ballooning 효과 억제 (Blockage ↓)

# Near Term 적용 Doped UO<sub>2</sub>

## ● 해외 핵연료 제조사의 Doped UO<sub>2</sub> 소결체 선택 이유

### ■ 안전성능 향상

- 큰결정립에 의한 FGR 저감  
(Bust & ballooning 파괴 위험 감소)
- 우수한 creep 변형 성능  
(PCI margin 제고)
- 과도상태에서 FGR 저감
- 주기말 safety margin 향상  
(피복관 내압 감소)

외부 안전여유도 향상 Cr 코팅 피복관 +  
내부 안전여유도 향상 Doped UO<sub>2</sub>

### ■ 경제적 이득

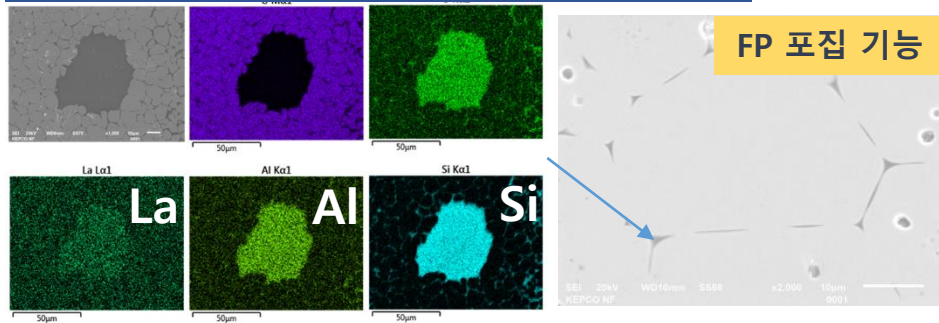
- 부하추종 운전 가능  
(doped UO<sub>2</sub> 특징에 기인)
- 고연소 장주기(농축도 증가)에 따른 기존 대비  
안전성능 향상 요구 충족

### ■ 전략적 이득

- 기존 상용생산과 동일한 제조공정  
(the same qualification control)
- 인허가 전략의 용이성 (BWR 검증 완료)
- 극미량 첨가제를 통한 기존 UO<sub>2</sub> 특성을 활용
- 상용화 기간 (LTR/LTA 연소시험 용이성)

# La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (LAS) Doped UO<sub>2</sub> Fuel

## LAS Amorphous (입계 & junction)

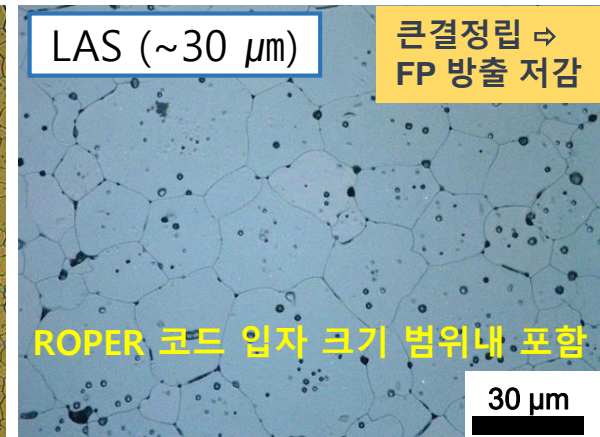
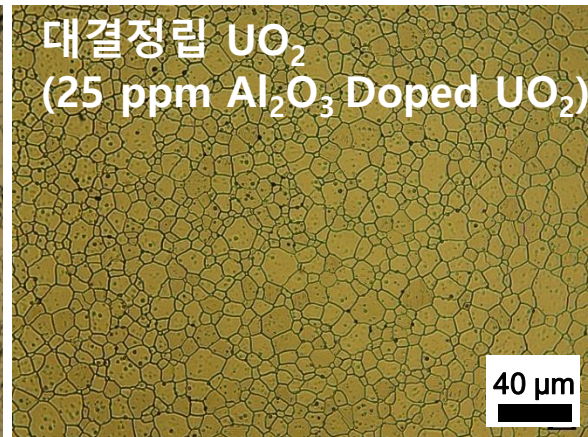
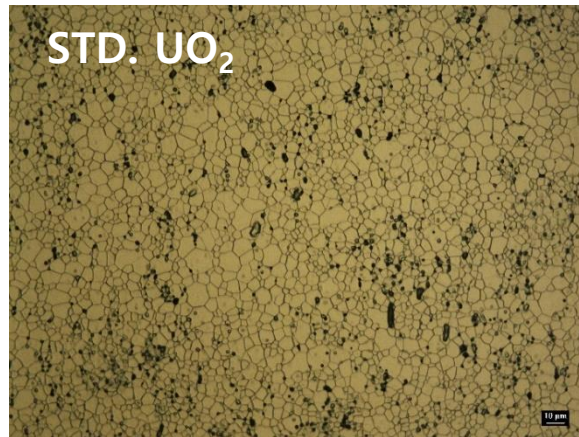


## 주기길이 핵종 평가

CASE	농축도 [wt%]	Fuel Type	Pellet Radius [cm]	Zircaloy-4 피복관 두께 [cm]	Cycle Length [EFPD]	감소 주기 길이 [EFPD]
(Ref.) PLUS7	4.65/4.10	UO <sub>2</sub>	0.40958	0.05727	511.9	-
LAS	4.65/4.10	LAS-UO <sub>2</sub> (0.1 wt%)	0.40958	0.05727	511.8	0.1

KARMA 코드: 노심계산을 위한 핵자료 생산 → ASTRA 노심 예비설계 평가

- 주 목표 함량 : 0.1 wt% (1,000 ppm)
- 1,000 ppm 기준시 **La 원소 43 ppm, Al & Si 원소는 ASTM 기준 이내**
- LAS의 핵설계 및 핵종 변화 검토 결과 문제 없음



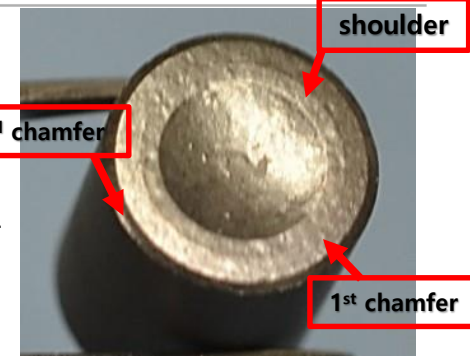
- 국내 특허 등록 및 일본, 유럽, 미국 심사 중 (KNF 고유 개발 원천특허 확보)



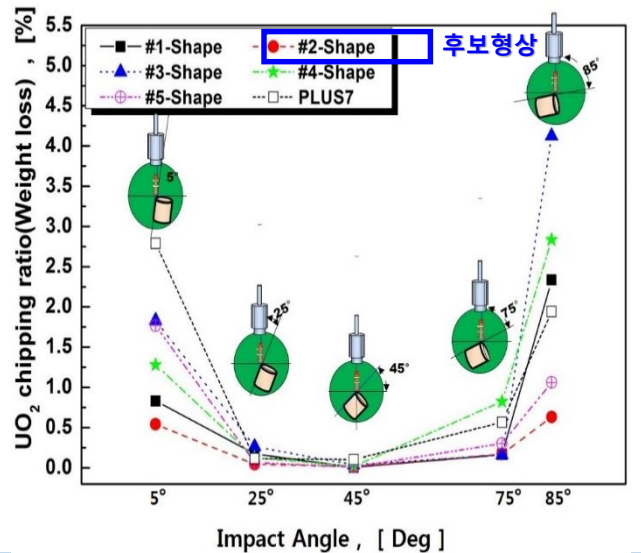
# New Pellet Design for LAS Doped UO<sub>2</sub>

## Double chamfer 형상 적용에 따른 특성 향상

- 고품질의 UO<sub>2</sub> 소결체 제조 및 제조성 향상
- 소결체 표면결함에 의한 PCI 핵연료 손상 확률 저감
- LAS 첨가제의 재료 물성 장점 & MPS 형상의 기하학적 장점의 융합을 통한 LAS 소결체의 성능 극대화
- 국내 기술소유권 확보 (미국, 유럽, 중국, UAE 심사 중)**
- MPS 형상 영향 평가 확인**

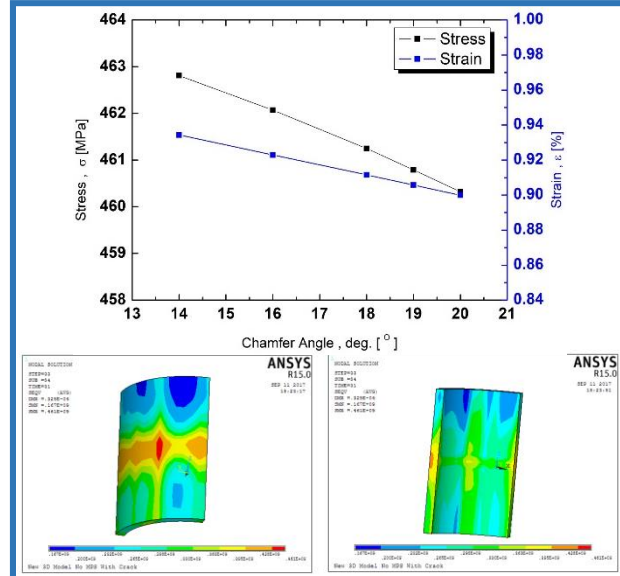


## 외부충격에 의한 충격저항성 평가



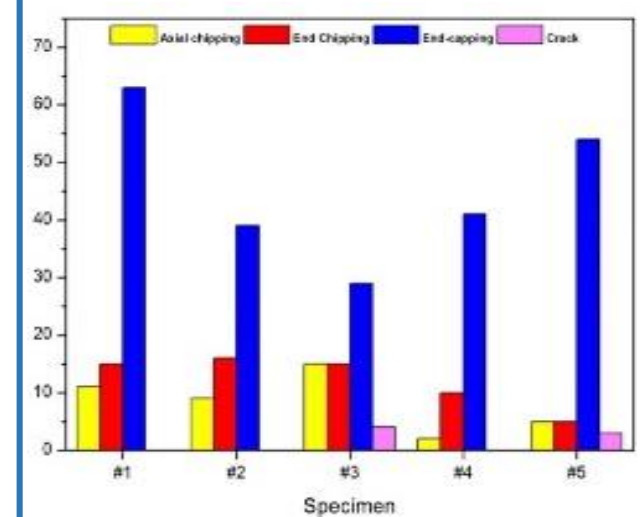
다양한 각도에 충격 저항성 보유 확인  
→ 기존대비 30% 충격 저항성 향상

## 피복관 응력거동성 평가



기존 형상 대비 피복관 내부 응력완화  
가능성 확인

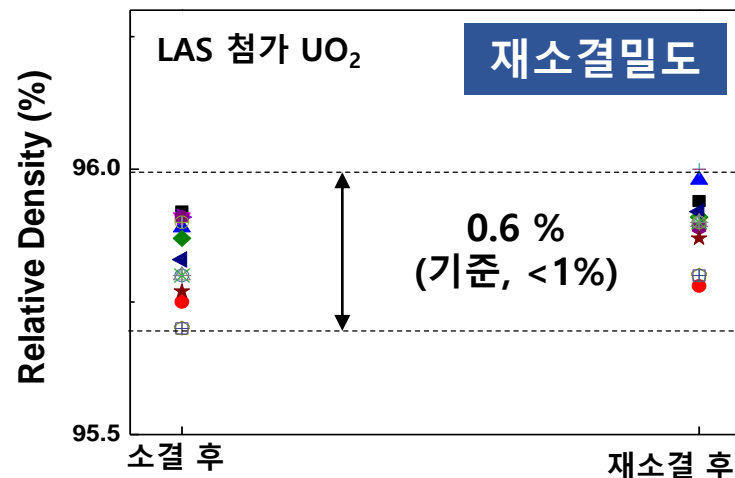
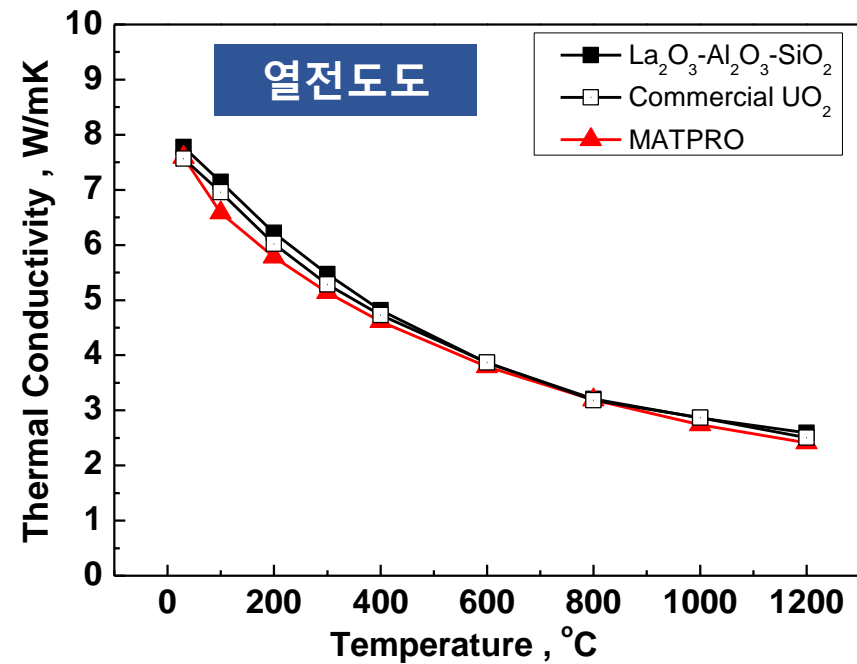
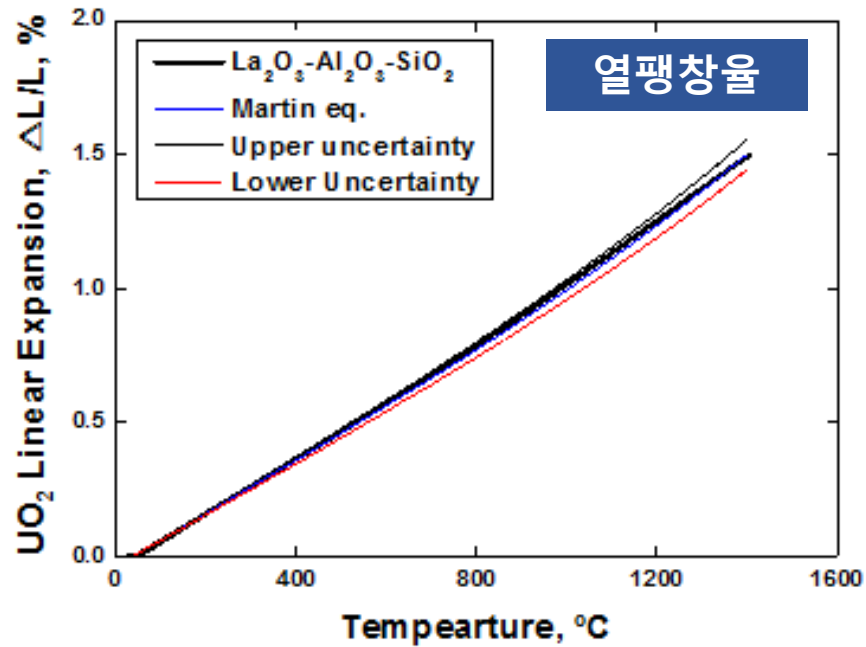
## MPS 결함 소결체 발생을 저감 평가



50 kg 단위 평가 시 기존생산 대비  
불량률 20% 저감 가능성 확인

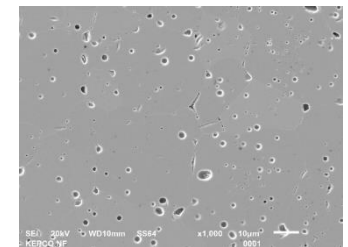
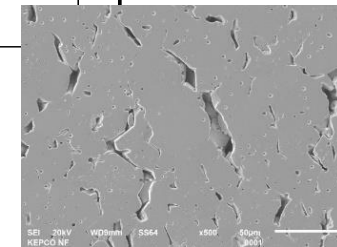
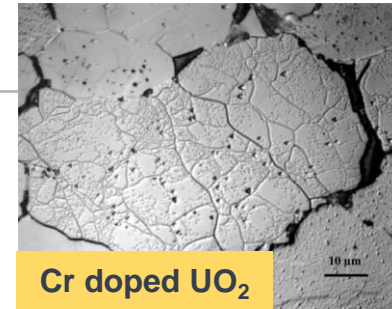
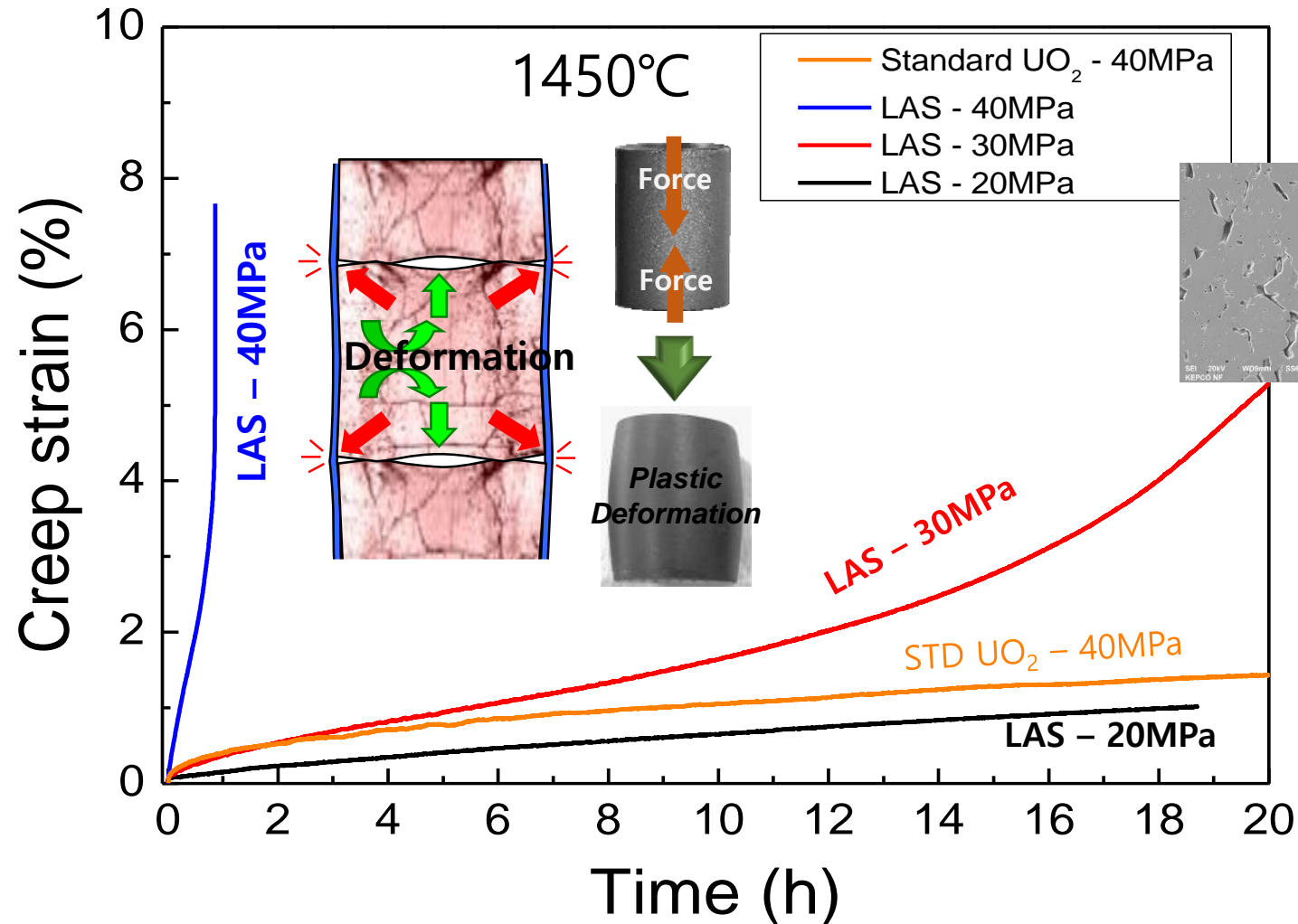


# LAS-Doped $\text{UO}_2$ 열적 물성



→ STD UO<sub>2</sub>와 거의 동일  
→ 기존모델 변경 최소화

# LAS-Doped $\text{UO}_2$ 고온변형성능 (Creep)



# 상용 $\text{UO}_2$ 대비 LAS-Doped $\text{UO}_2$ 비교

극미량원소 추가 → 주요 특성 유지 & 핵심 성능만을 향상 → 운전부담 저감 및 인허가 최소화

항목	성능
➤ 첨가제 첨가 함량	500 ~ 1500 ppm (Al, Si 함량 ASTM 기준 이하) (La ASTM 항목 없음)
➤ 밀도	기존 $\text{UO}_2$ 동일 또는 향상
➤ 열팽창	기존 $\text{UO}_2$ 동일
➤ 열전도도	기존 $\text{UO}_2$ 동일
➤ 재소결도	기존 $\text{UO}_2$ 동일
➤ 주기길이	기존 $\text{UO}_2$ 동일
➤ Washout	기존 $\text{UO}_2$ 동일
➤ 정상조건에서 변형률	기존 $\text{UO}_2$ 동일

항목	성능
➤ 입자 크기	~ 30 $\mu\text{m}$ (상용 8 $\mu\text{m}$ )
➤ U 함량 및 연소능	농축도 증가 시도 가능 예상
➤ FGR (정상 & 과도)	기존 $\text{UO}_2$ 대비 1/3 저감 예상
➤ Cs 포집 기능	기존 $\text{UO}_2$ 대비 향상 예상
➤ HBS 억제 기능	기존 $\text{UO}_2$ 대비 향상 예상
➤ 수증기산화저항성	기존 $\text{UO}_2$ 대비 향상
➤ 상용 공정성	상용공정에 바로 적용 가능 (qualification 적용 가능)
➤ 고온 변형률	기존 $\text{UO}_2$ 대비 향상

✓ LAS doped  $\text{UO}_2$ 는 안전성능 향상을 기반으로 안전여유도 확보가 가능한 사고저항성 핵연료

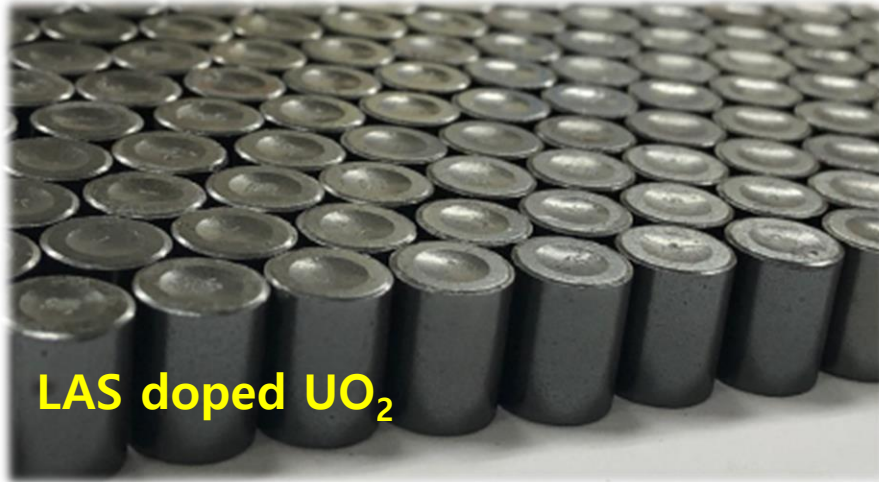
# Doped UO<sub>2</sub> 비교

		Framatome	WEC	KNF
첨가제		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> (LAS)
로형		BWR, PWR	BWR, PWR	PWR
함량 (ppm)		1600	900	1000 ~ 1500
특허 보유 유무		O	O	O
특징	결정립 크기 (μm) * 일반 UO <sub>2</sub> : < 10 μm	33.3 ~ 40	34.6	20 ~ 30.3
	밀도 (TD %) * 일반 UO <sub>2</sub> : 약 95.5%	>96.0	97.4	95.0 ~ 96.0
성능	고온 소성변형율 (%)	5.9 (1500°C, 45MPa)	2.3 (1500°C, 45MPa)	> 6.0 (1450°C, 40MPa)
	FGR 방출 저감	기존 UO <sub>2</sub> 대비 약 1/3 저감	기존 UO <sub>2</sub> 대비 약 1/3 저감	기존 UO <sub>2</sub> 대비 약 1/3 저감 기대
인허가 보고서 제출		'16.04. (BWR) '21.06. (PWR)	'20.05.	'29 예정
인허가 보고서 승인		'18.05. (BWR) 심사 중 (PWR)	심사 중	'30~'31 추정

✓ 해외 경쟁 기관에서 추진 중인 농축도 향상은 doped UO<sub>2</sub>의 안전성능을 기반으로 가능

# LTR/LTA를 위한 소결체 생산 계획

## LAS doped $\text{UO}_2$ 소결체 상용공정성 평가



LAS doped  $\text{UO}_2$

- ✓ 대용량 단위 규모 시작품 제작 완료
- ✓ 노외 물성 평가 확인
- ✓ 재현성 평가 완료
- ✓ 연소시험용 소결체 제조 중 (20 kg)

## 유관 기관 협력 필요

- ✓ 데이터 신뢰도 제고를 위한 교차검증시험 (KAERI, 예타 협력 item)
- ✓ LTR/LTA 시험 착수 (KHNP)
- ✓ 인허가를 위한 정기 설명회 (KINS)
- ✓ 설계 및 재료 고찰 (학계)

## PQT를 위한 준비 단계 돌입

- ✓ Dopant 물질 품질등급 승인 완료 ('22)
- ✓ 시방서 작성 ('22)
- ✓ Pre-PQT 작업 계획 ('22)
- ✓ 2022년 12월 PQT 수행 계획

## LTR/LTA 생산 계획

- ✓ LTR/LTA 계획 수립
- ✓ 2023년 LTR/LTA를 위한 소결체 생산

## 2024년 4월 LTR 시험 착수

## 2025년 2월 LTA 시험 착수

- ✓ Framatome '21.11 LTA 장전 대비 약 3년 격차로 기존 상용화 계획 단축



# V

---

## **Accident Tolerant Control Rod (ATCR)** **연구개발 현황**

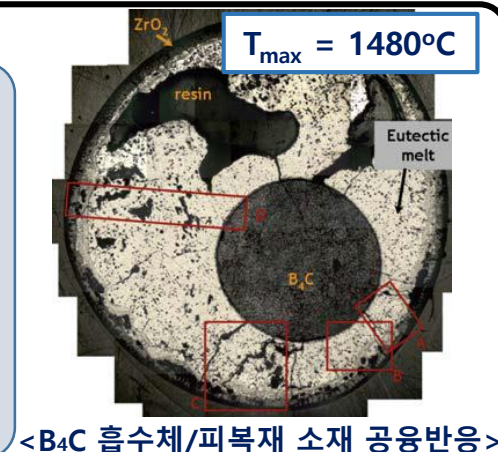
# ATCR 소재 개발 (2021년 5월 개발 착수)

## 기존 기술

- 기존 중성자 흡수체(B<sub>4</sub>C)와 피복재(Inconel-625) 공용반응 (약 1080°C부터)
- 산소/수증기 분위기에서 산화반응(약 700 °C부터) 및 수소 발생  

$$\text{B}_4\text{C} + 7\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{B}_2\text{O}_3 + \text{CO} + \text{H}_2$$
- 사고 시 제어봉 손상이 핵연료보다 선행하여 안전강화 핵연료 효과 감소
- 용융사고 시 재임계(recriticality) 상황 가능성  

$$\text{B}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{HBO}_2 \text{ (휘발)}$$



## 개발 기술



\* 기존 중성자 흡수체 B<sub>4</sub>C 대체 소재

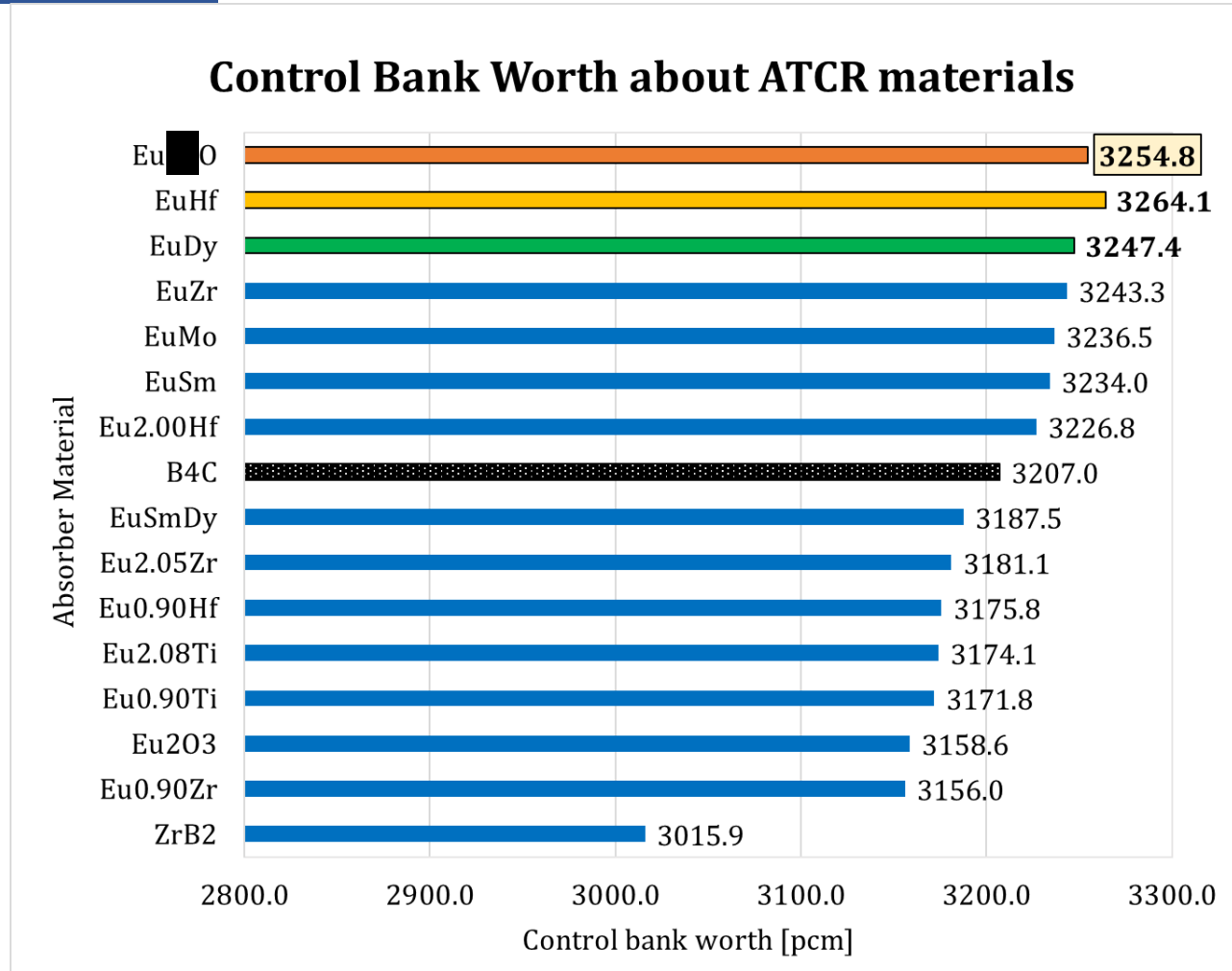
- 열적안정성 확보 및 공용반응방지
- 기존 제어봉가 적용성 확보
- 수증기 산화 저항성 향상
- 조사팽윤 안정성 및 Life-time 향상
- 높은 용융/휘발온도

제어봉용  
신소재  
중성자흡수체  
고유핵심기술



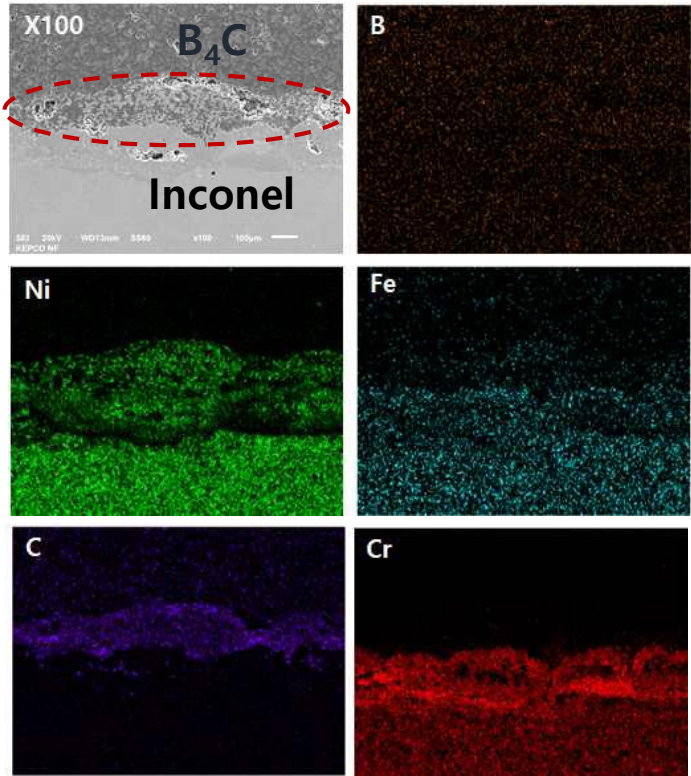
# ATCR 소재 개발

## 후보소재의 CR worth 계산



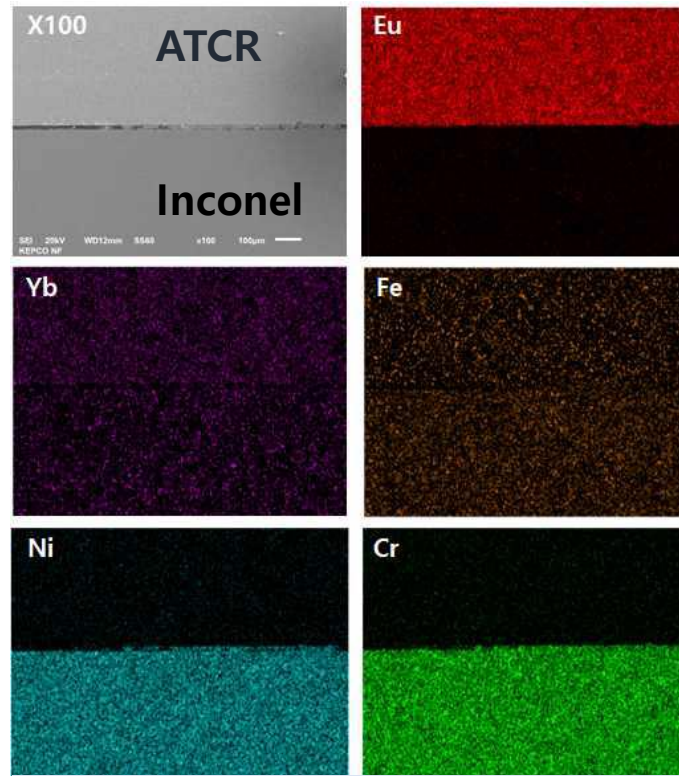
# ATCR 소재 개발

## B<sub>4</sub>C – Inconel 반응성 평가



1100°C/2hr/Ar 공융 반응 확인

## ATCR – Inconel 반응성 평가



1100°C/2hr/Ar 공융 반응 없음

## ATCR 후보제조



- 안정제 설계 및 후보소재군 도출
- 2022년 말 하나로 조사시험 예정 (22년 말 ~ 24년 초 까지)



# 결론

- ✓KNF는 단기 적용 ATF부터 중장기 적용 ATF까지 연구개발을 수행 및 해외 경쟁사 기술에 대응하고 있음.
  - 장기 적용 ATF : TRISO-SiC 복합체 (실험실 규모 단위 제조 및 최고 기술 보유)
  - 중기 적용 ATF : 열전도도 향상  $\text{UO}_2$ , Fe기반 피복관
  - 단기 적용 ATF 소결체 : LAS Doped  $\text{UO}_2$  (2024년 LTR, 2025년 LTA를 계획 중)
  - ATCR 개발 수행 중이며, 2022년 하반기 하나로 조사시험 추진 중
- ✓LAS doped  $\text{UO}_2$ 는 0.1 wt%의 극미량으로 핵심 성능을 향상 시킴으로써 안전여유도를 증가시킬 수 있는 ATF 임.
- ✓개발된 LAS doped  $\text{UO}_2$ 는 해외 경쟁사 대비 동등 이상의 성능을 보유할 것으로 예상
- ✓단기 적용 ATF 상용화 기간 단축 및 중장기 적용 ATF의 상용화 선점을 위해서 유관기관들의 협력이 필수적임.

**감사합니다.**

