



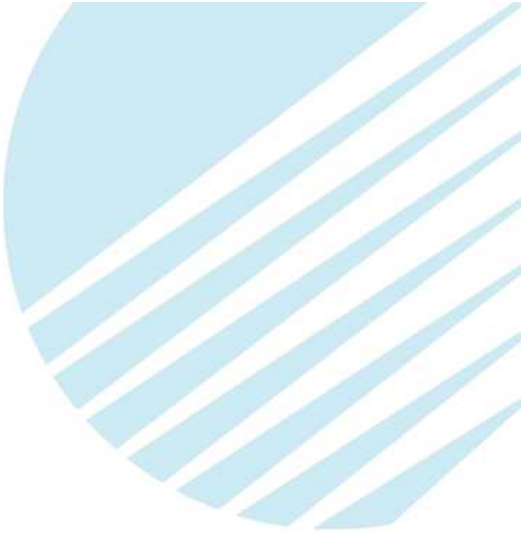
워크샵 C. 사고저항성 핵연료 : 단기 및 장기전략

## KNF Cr-coated 피복관 개발 현황 및 상용화 계획

2022.05.18 (수)

장 훈

한전원자력연료(주)

- 
- 
- 
- I. 코팅 피복관 제조/검사 기술 개발 현황
  - II. 코팅 피복관 노외성능 평가 결과
  - III. 범부처 안전예타 과제 개요
  - IV. 맺은말

# KNF 사고저항성 향상 핵연료 개발 추진경과



# KNF Near-term ATF Concept

## HANA-6™ Cladding Tube

- ✓ No change to tube specification

## Cr-coated layer (10 - 20 $\mu\text{m}$ )

- ✓ Using Arc Ion Plating Technology
- ✓ 10 times better oxidation resistance
- ✓ Excellent corrosion resistance
- ✓ Improved creep properties

## $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (LAS) Doped $\text{UO}_2$

- ✓ Using existing manufacturing plant
- ✓ Higher plasticity at high temperature
- ✓ Better fission gas retention
- ✓ Improved PCI resistance

Shoulder Dish

1<sup>st</sup> chamfer

2<sup>nd</sup> chamfer

0.1 wt.% LAS

# 코팅 피복관 제조/검사 기술 개발 현황

---

- Full-scale 코팅장비 개발
- 코팅 공정 기술 개발
- 코팅 피복관 제조기술 개발
- 코팅 피복관 검사기술 개발



# 코팅 피복관 피복관 제조기술 현황

We are Here !

Small-scale coating (Lab.)

Full-scale coating (Prototype)

Commercial production (Plant)

## Small-scale 코팅 기술 개발 (~'21.12)

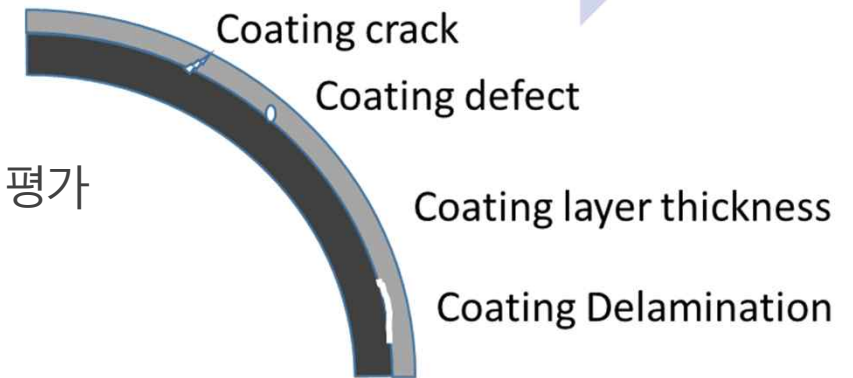
- 1m 급 코팅 공정기술 개발 완료
- 코팅 공정변수에 따른 코팅 피복관 코팅층 미세구조/핵심특성 평가

## Full-scale 코팅장비 및 코팅 기술 개발

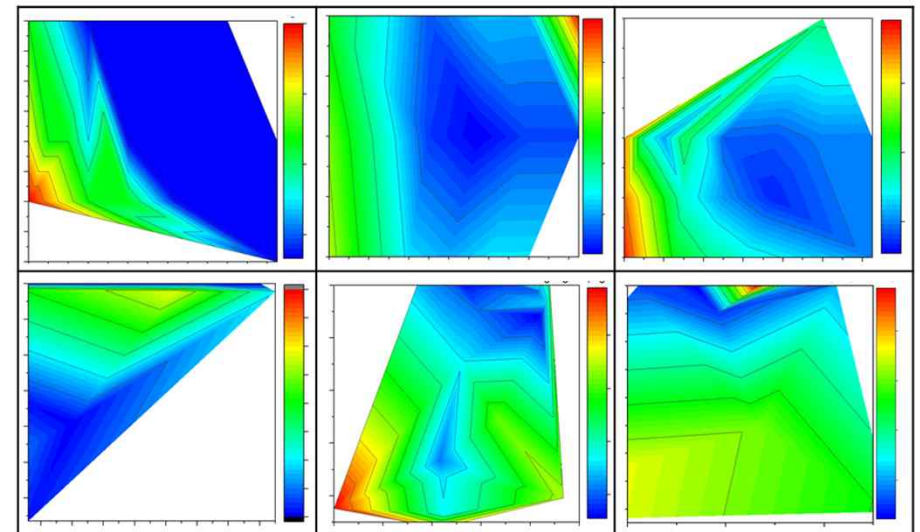
- Full-scale 코팅 장비 개발 완료 ('20.12)
- Full-scale 코팅 공정기술 개발 중 ('22.06)
- 연료봉 제조기술 개발 중 ('22.12)
- 비파괴 검사기술 개발 (품질 : '24.12, 소내 : '26.12)

## 대량 상용생산을 위한 코팅장비 개발 착수

- 250 개이상 피복관 코팅용 코팅장비 구축 완료 ('24.12)



코팅 공정변수에 따른 피복관 핵심특성 맵





# Cr 코팅 장비 및 공정기술 개발

## Full-scale Cr-coating Facility





# 코팅 두께 균질도

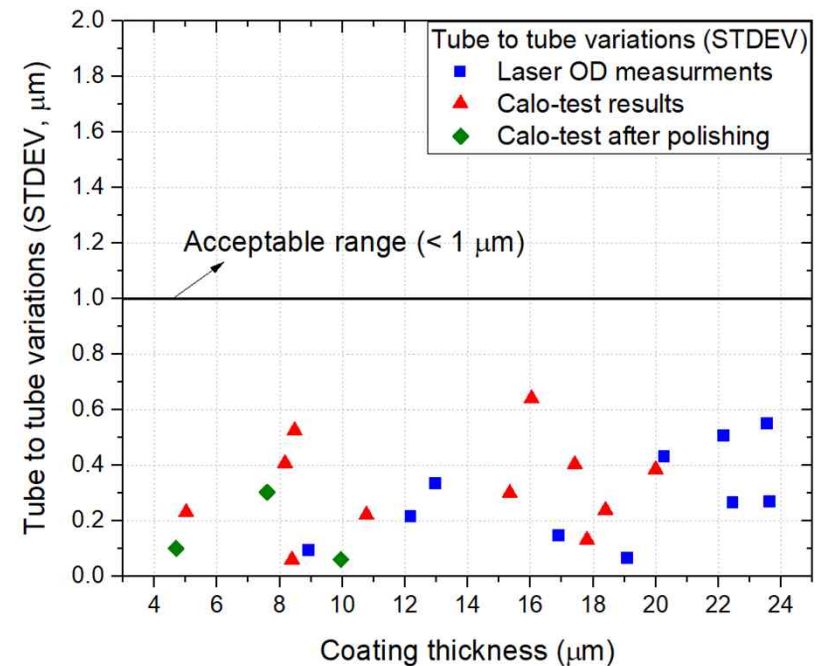
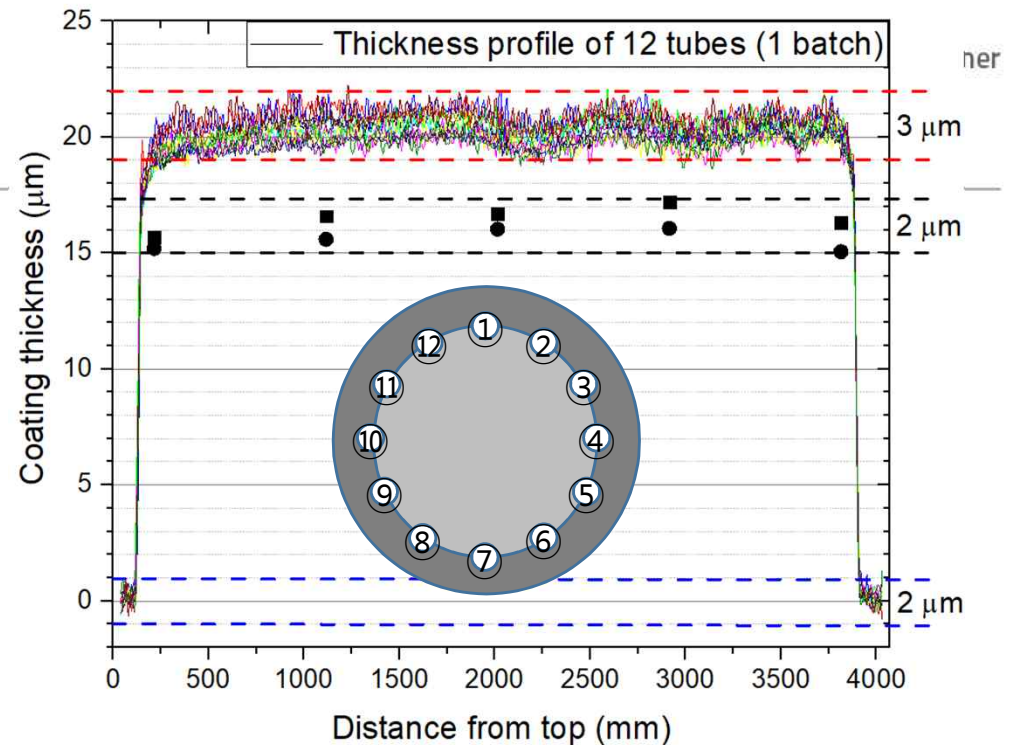
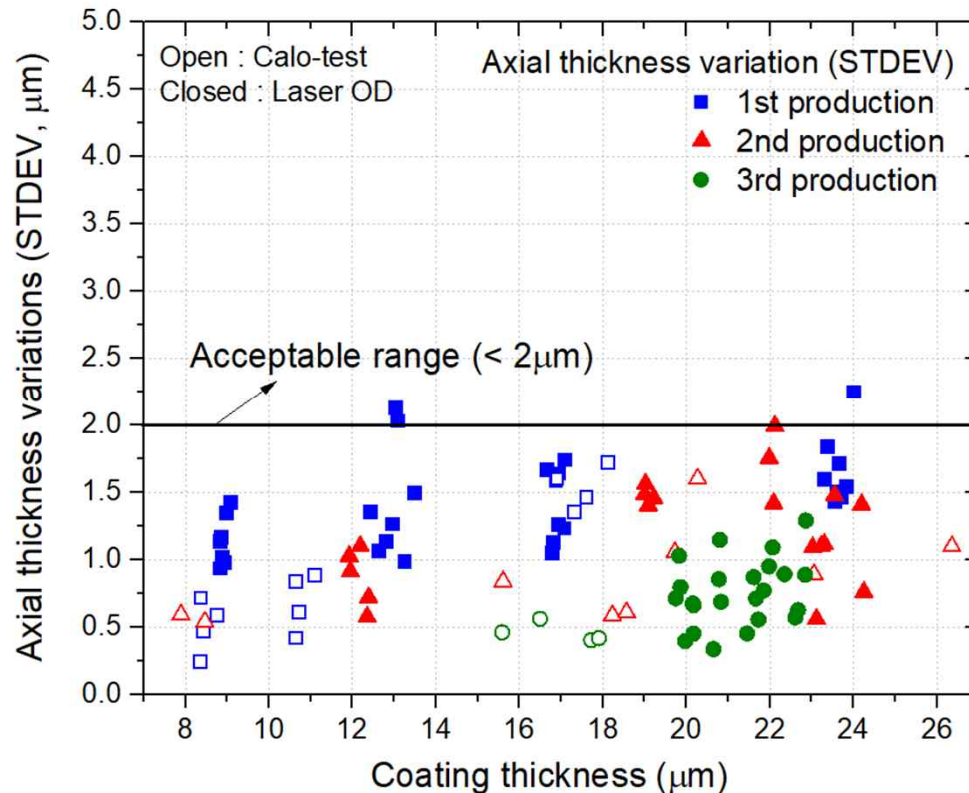
## 1m 급 코팅장비의 코팅 균질도 참고

## 길이방향 및 튜브별 두께 편차

- 표준편차 :  $1 \mu\text{m}$  미만 (최대차이 :  $3 \mu\text{m}$ )

## Minimize coating thickness

- 공정시간 단축, 외면연마 공정 용이, 집합체 장입 유리, 균질한 피복관 물성





# 봉단마개 용접 공정기술 개발

Field welding test

Welding PQT w/ partially coated cladding

Welding PQT w fully coated cladding



## ● 봉단마개 용접 PQT (Proc. Qualification Test) 추진 중

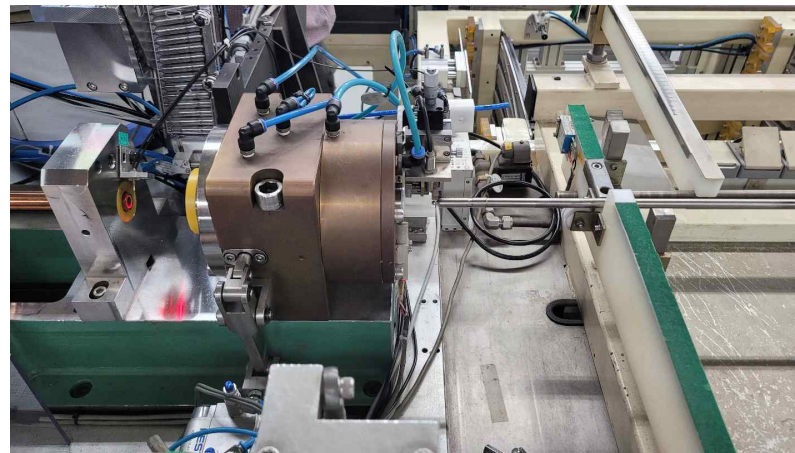
- HIPER16 기반 봉단마개 용접 기반
- 상하부 봉단마개 용접 공정별 용접 수행
- 품질검사 (파열, 조직, 부식, 고온산화) 시험 완료
- 미코팅 부분 용접 PQT 수행 예정

Partially coated

Fully coated



용접시방서 기준 만족 확인

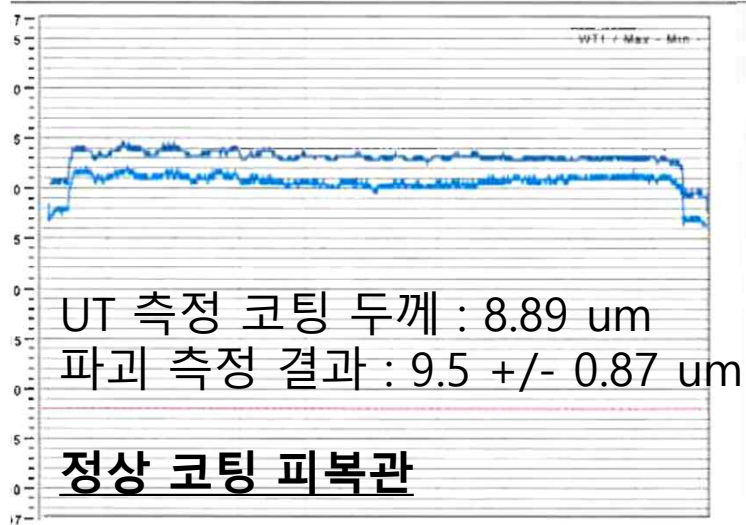


KNF TSA 코팅피복관 봉단마개 용접

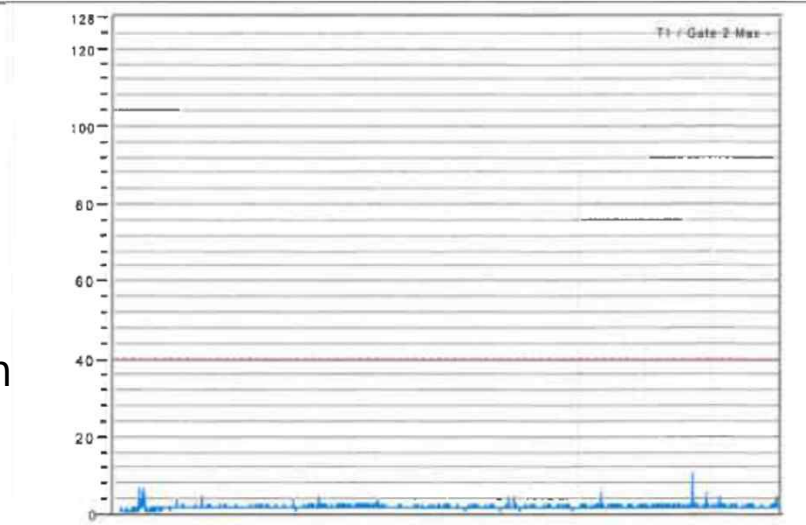


# 상용 UT 검사 적용성 평가 (TSA)

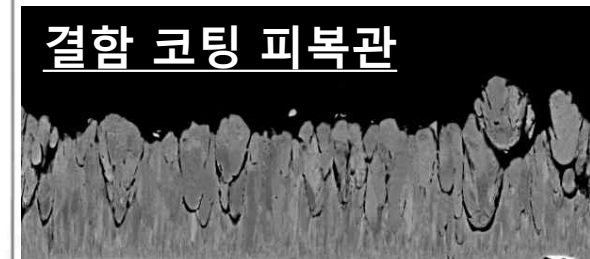
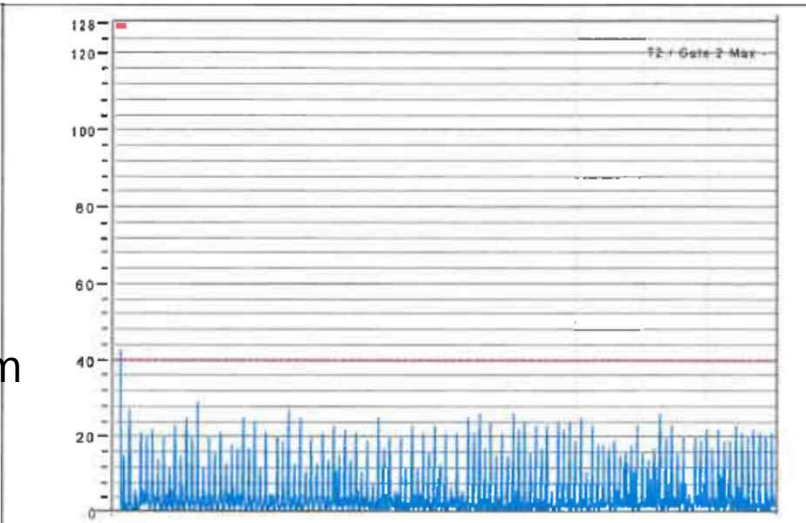
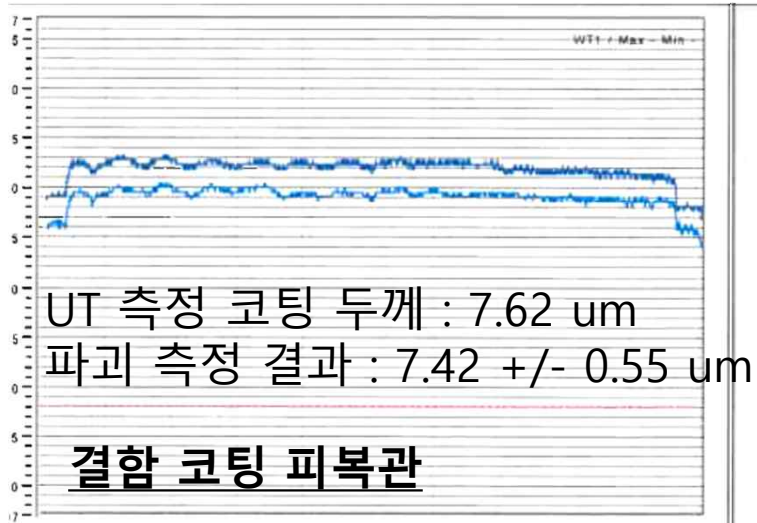
## 코팅 피복관 두께 검사 결과



## 코팅 피복관 결함 검사 결과



HV 10.00 kV WD 11.2 mm mag 3 500 x det CBS 20  $\mu\text{m}$  Quattro S



HV 10.00 kV WD 8.8 mm mag 3 500 x det CBS 20  $\mu\text{m}$  Quattro S

## II 코팅 피복관 노외성능 평가 결과

---



# 코팅 피복관 종합성능 결과 (기존 Zr 피복관 대비)

물성	특성변화	물성	특성변화
열팽창	X	경도	↗
열전도도*	↗	부식	↗
밀도*	X	고온산화	↗
비열*	X	PQD	↗
상변태 온도*	X	고온크립*	X
표면방사율*	X	고온파열	↗
인장	Δ	박리산화	↗
크립 저항성	↗	피로	Δ

X : 변화 없음 Δ : 코팅공정 영향 ↗ : 특성 향상

\* 예측결과

# Potential New Damage Mechanisms (Highly Ranked)

## ○ New degradation mechanisms

- 코팅 피복관의 신규 특성을 반영하기 위한 재료성능 모델 및 코드 개선 필요
- 기존 설계 기준을 활용하여 설계 반영 또는 추가적인 신규제한치 설정 필요

### ▶ 1. Coating defect/cracking

- 제조/정상운전/사고조건에서 발생가능
- 피복관 변형, 피로, 수소침투, 산화속도 등에 영향을 줄 수 있어 균열개시 전후, 설계제한치 변경 필요
- Impact on SAFDL : strain limit, fatigue limit, ballooning, oxidation rate, embrittlement limit
- Vendor Specific 문제

### ▶ 2. Coating delamination

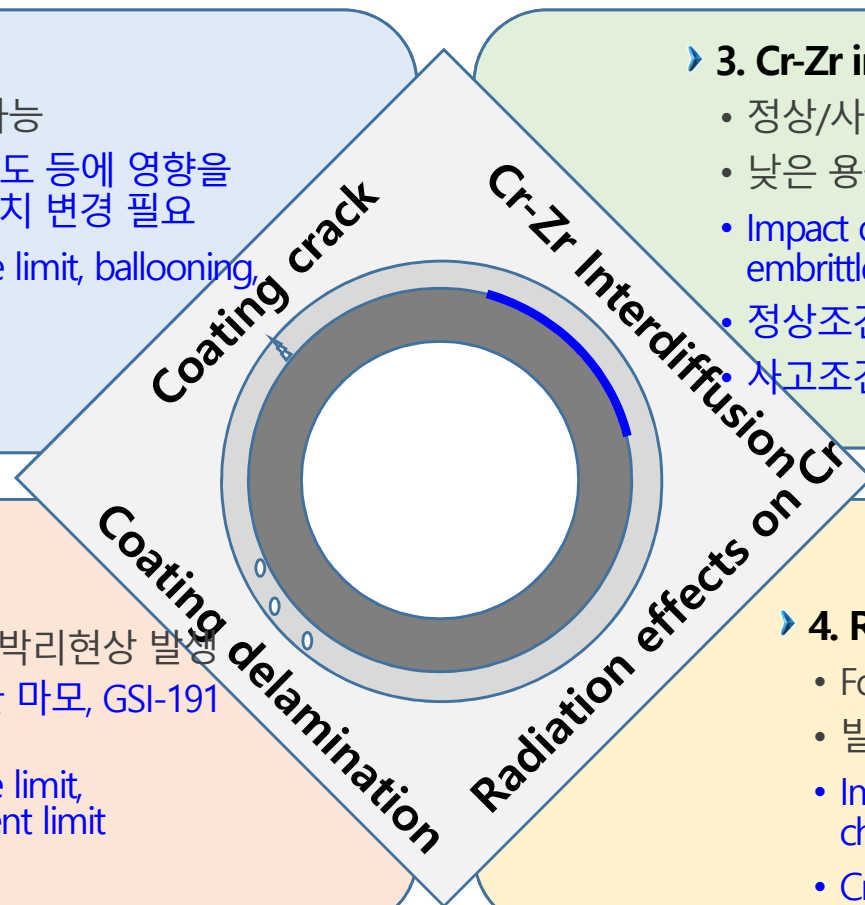
- 코팅층 접합력 부족시, 균열과 함께 박리현상 발생
- 수소침투, 국부산화도, Debris에 의한 마모, GSI-191 현상 등
- Impact on SAFDL : strain limit, fatigue limit, ballooning, oxidation rate, embrittlement limit
- Vendor Specific 문제

### ▶ 3. Cr-Zr interdiffusion

- 정상/사고조건에서 발생가능함
- 낮은 용융점, 취성, 낮은 부식저항성(코팅균열시)
- Impact on SAFDL : overheating of cladding, embrittlement, eutectic formation between Cr-Zr
- 정상조건 : Vendor Specific
- 사고조건 : Cr 코팅 피복관에서 동일함

### ▶ 4. Radiation Effects on Cr

- Formed Cr-51 with a half-life of 28 days
- 발전소 선량 증가 요인 가능성
- Impact on SAFDL : dose release limits, coolant chemistry
- Cr 코팅 피복관에서 동일함



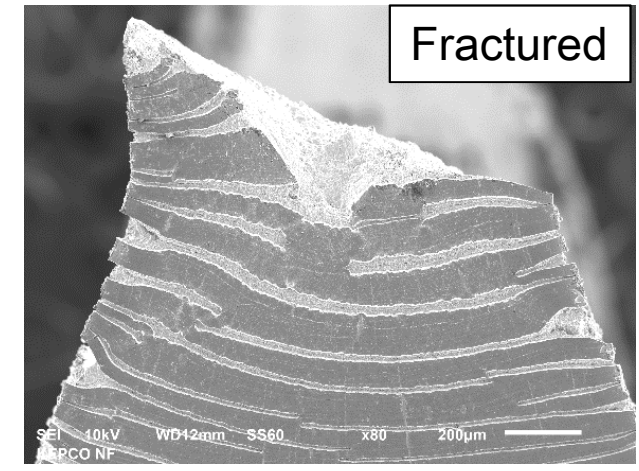
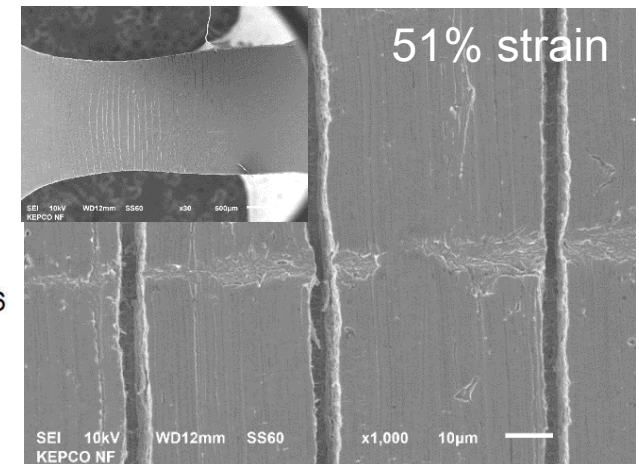
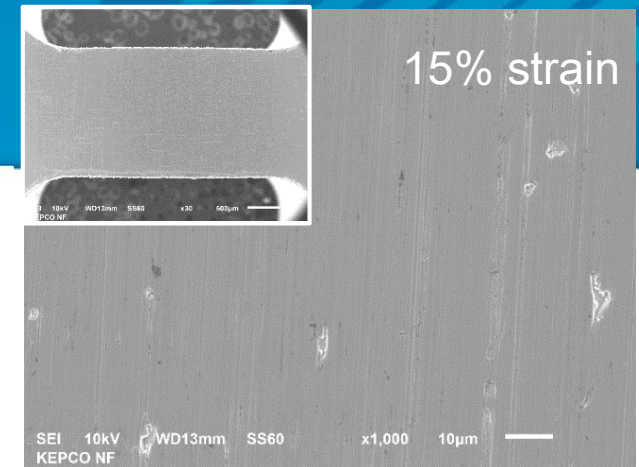
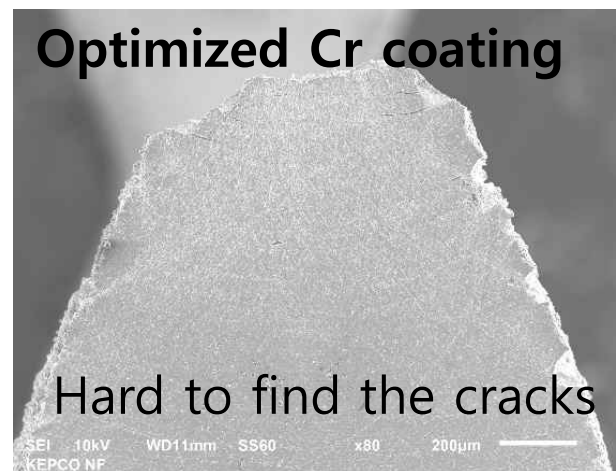
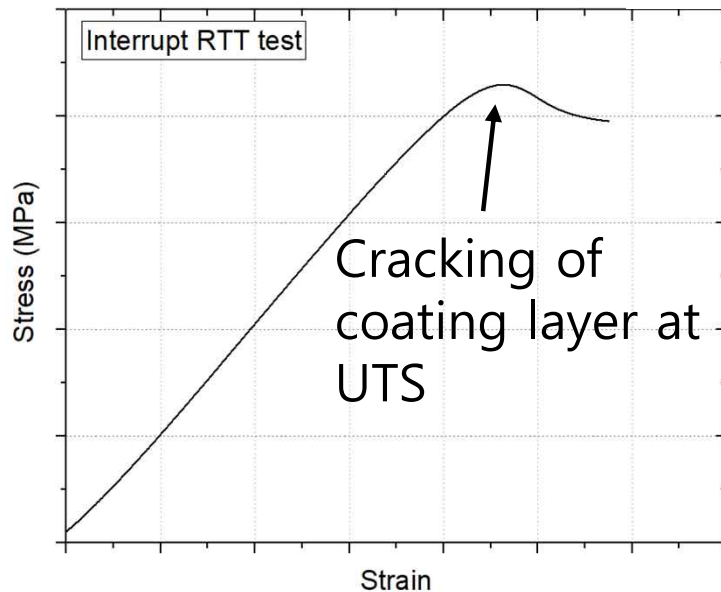
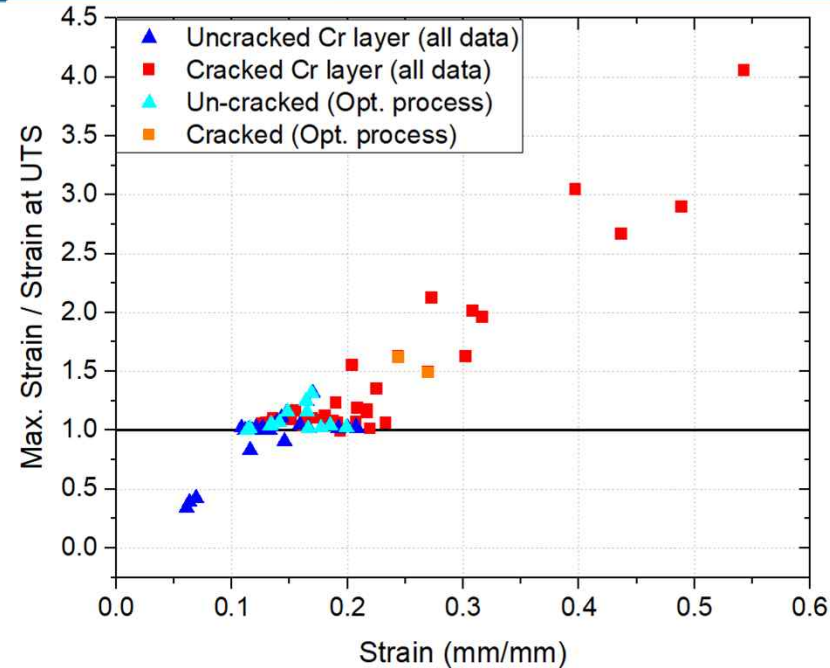
# 코팅층 균열저항성

## 코팅층 균열 발생 시점

- UTS 변형율에서 발생
- 코팅층 균열저항성에 따라 UTS 증가 경향

## 균열 형상 변화

- 코팅층 특성 (코팅 공정조건)에 따라 균열 형상 및 밀도 변화
- 최적 공정시, 파단시에도 균열 관찰 어려움





# 코팅층 균열저항성 및 접합성

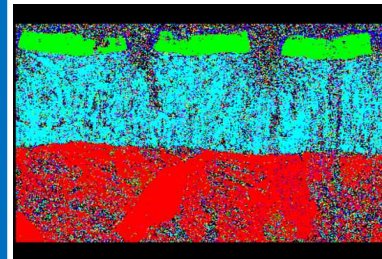
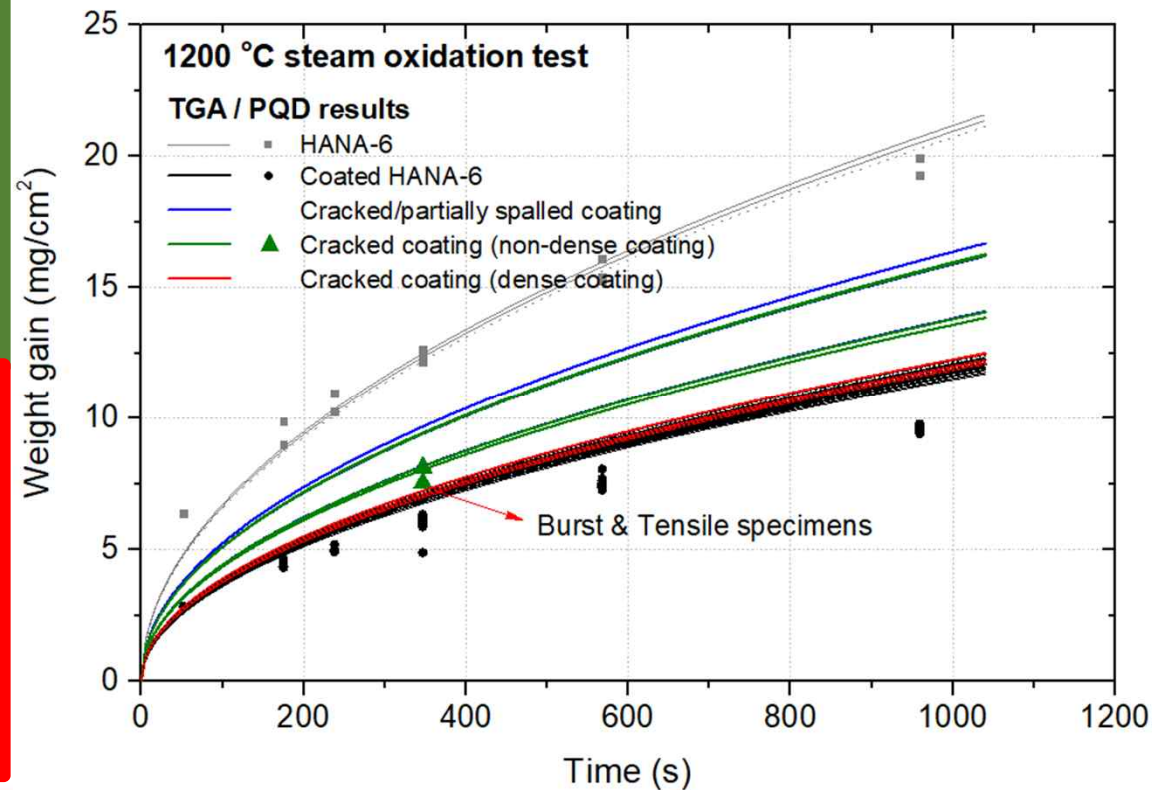
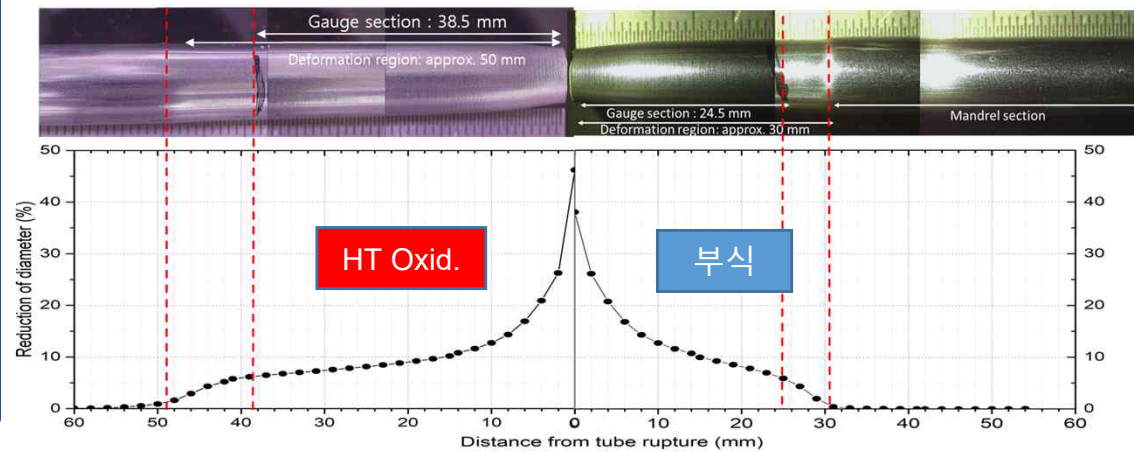
Cracked/spalled coating



Cracked/non-dense coating



Cracked/dense coating



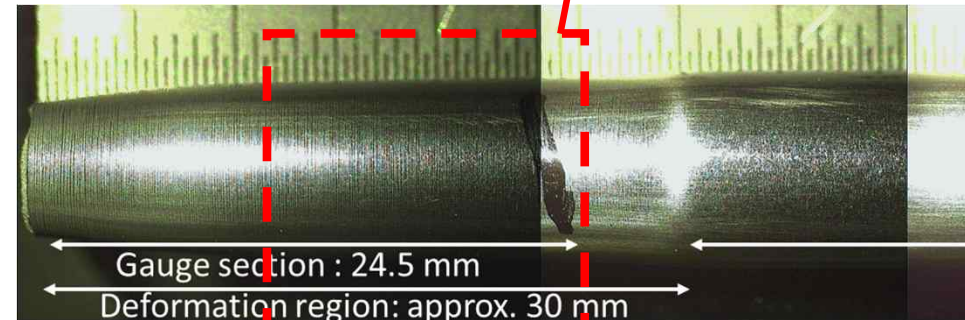
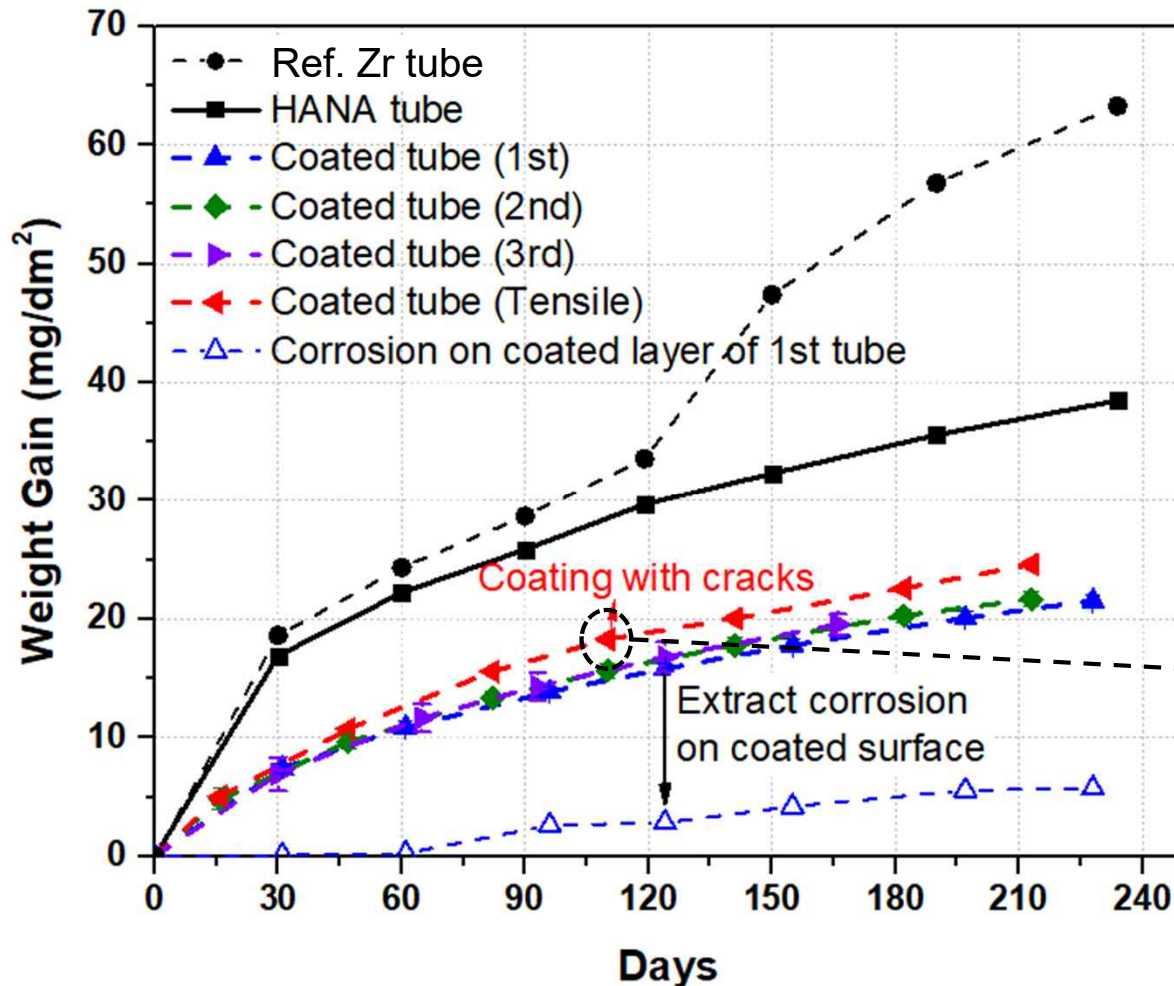
Name Date Time  
IPFYMap 2020-07-10 오후 4:10:03



# 부식저항성

## Corrosion test in 360°C water with PWR water chemistry

- Excellent and reproducible corrosion resistance in Cr-coated HANA-6
- Reasonable corrosion WG despite of cracking of coating layer



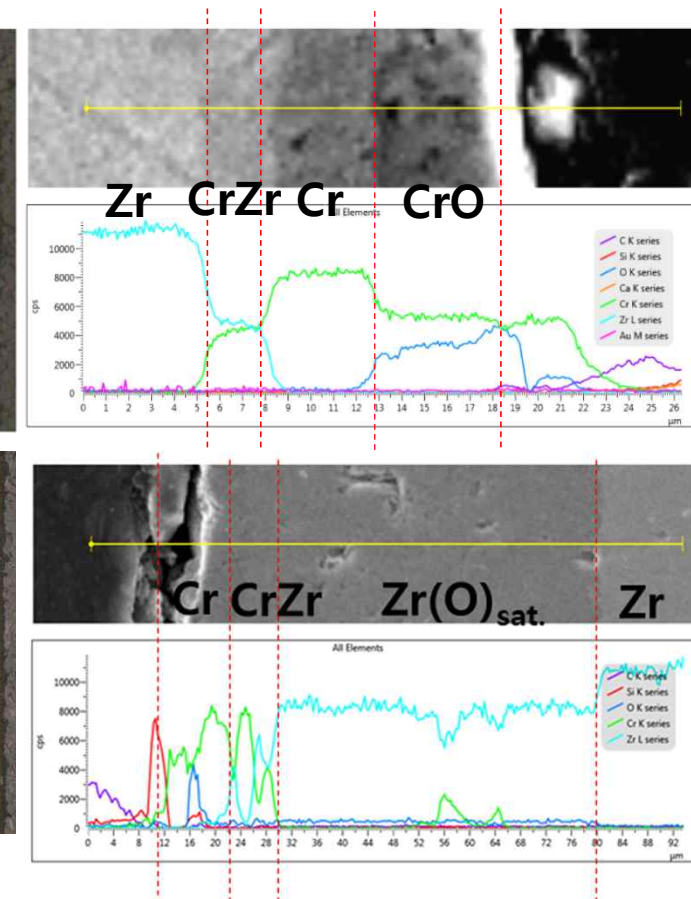
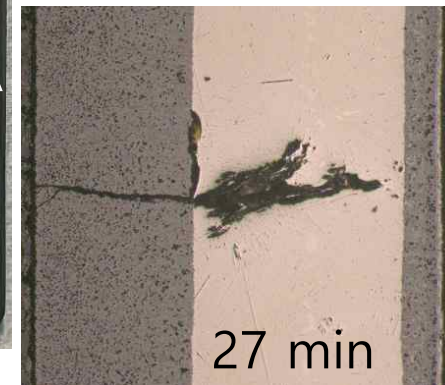
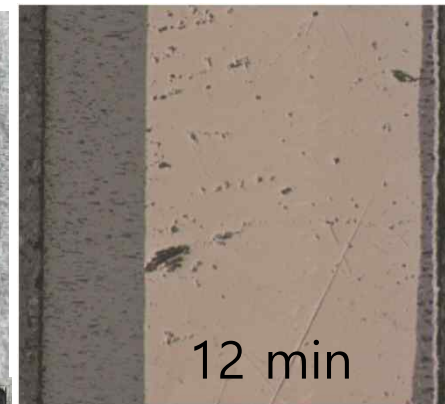
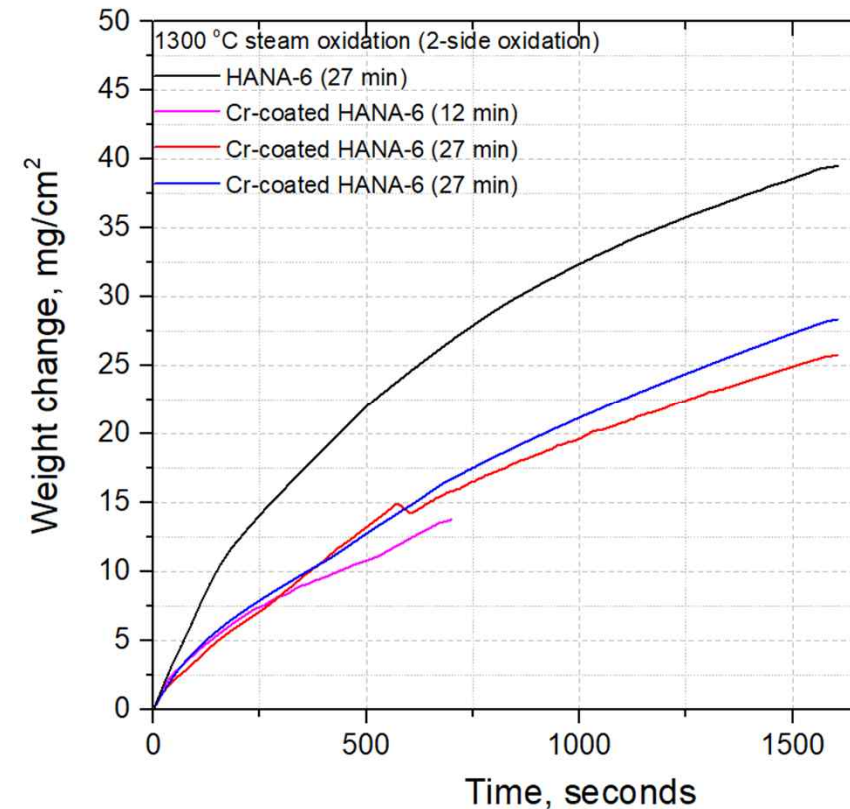
After 82 days in 360°C water



# 1300°C 고온수증기산화 특성

## KNF 보유 고온고압 수증기환경 동시열중량분석기 활용

- HANA-6 판재 및 판재코팅 시편(한쪽면코팅)을 활용한 고온산화
- 시험시간 : 12 min 및 27 min.
- 결과 : 12 min 까지 Cr 층 보호막 역할 이후, 내부산화 진행
- 내부산화 진행되어도 코팅층 박리 관찰되지 않음





# III 범부처 가동원전 안전성향상 핵심기술개발 사업 사고저항성 향상 핵연료 상용화 기술 개발 과제

# 과제 목표 및 구성

**최종목표 : 상용화 수준에 도달할 수 있는 사고저항성 향상 핵연료 개발**

Task 1 : 상용 비파괴 검사기술 개발

Task 2 : 상용 대량 제조기술 개발

Task 3 : 상용 제조/검사 기술 최적화

Task 4 : 노내외 성능시험 및 인허가 DB 구축

Task 5 : 설계기술 개발

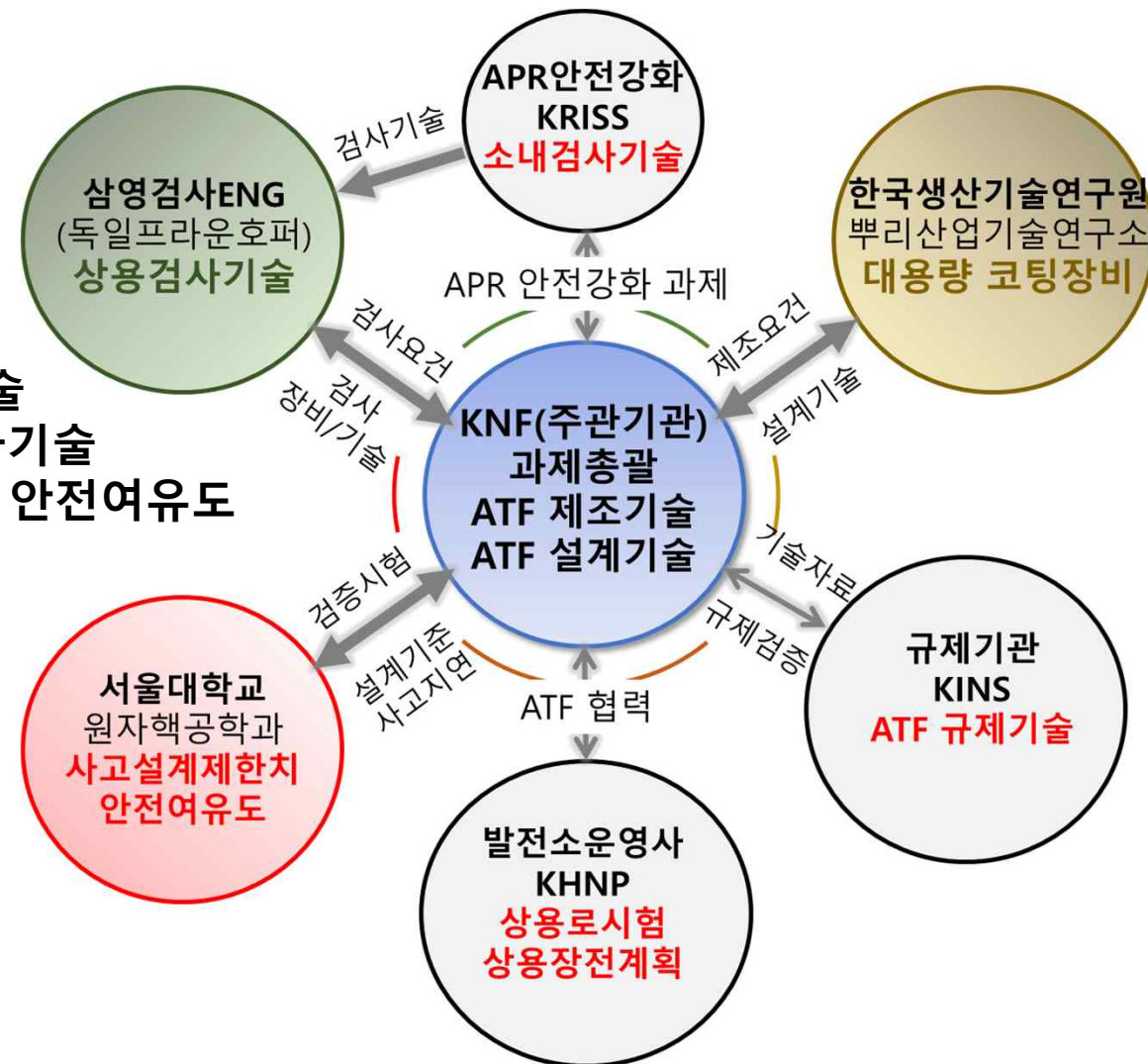
한국생산기술연구원 : 대용량 코팅장비 및 기술

삼영검사엔지니어링 : 상용검사기술, 소내검사기술

서울대학교 : 코팅 피복관 설계인자 독립검증, 안전여유도

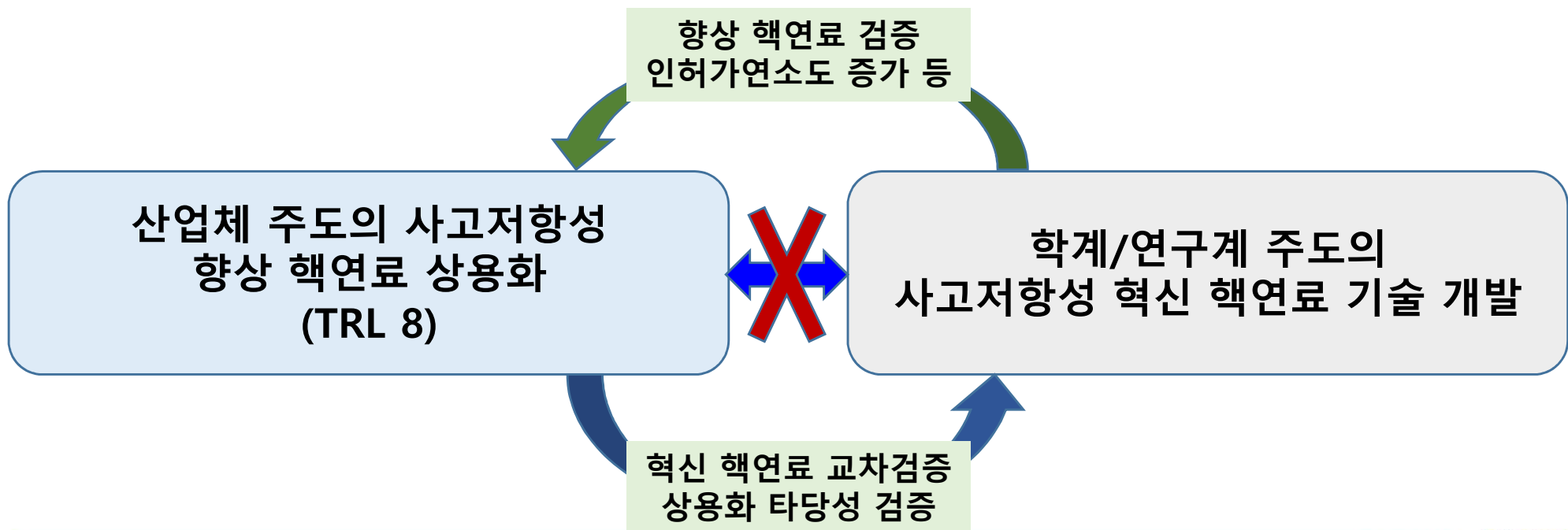
## 유관기관 협력 강화 추진

- 규제기관과의 협력 강화를 통한 사고저항성 향상 핵연료 인허가 현안 선제적 대응 및 사전독립검증
- 국제기구(OECD/NEA, IAEA), 핵연료공급사(WEC/Framatome), 연구로 운영기관(SCK-CEN, RIAR), 시험기관(Studsvik)과 협약 완료 및 협력 추진 중



# 맺은말

- KNF는 '29년까지 사고저항성 향상 핵연료 상용화 기술 확보를 목표로 개발 추진중
  - 공격적인 상용화 일정 준수를 위해 발전소 운영사 및 규제기관 협력 강화 추진
  - 원자력 전문기관 이외에 타산업 분야 관련 기술보유 기관과 공동연구를 통한 핵심 요소 기술 개발 추진 중.
  - 사고저항성 향상 핵연료 상용화 성공을 위하여 독립적으로 검증할 수 있는 학계/연구계 협력 추진 (KNF-서울대 MOU)
- 중장기 적용 사고저항성 혁신 핵연료 기술 개발 산업체 협력 필요
- ATF 활용 인허가연소도 증가 및 우라늄 농축도 증가 기술 개발 협력 필요



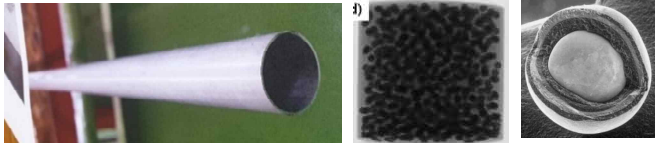


# 맺은말 – 혁신 핵연료

## 핵연료 공급사에서 고려하는 중장기 적용 혁신 핵연료 개념



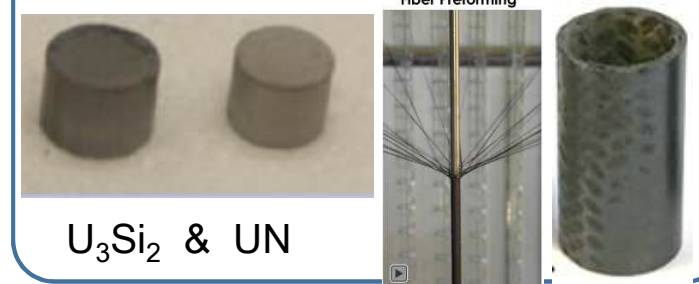
- FeCrAl cladding (GE-Hitachi)
- SiC cladding
- Metal-ceramic hybrid  $\text{UO}_2$
- TRISO-SiC pellet



- SiC cladding
- Cr-Variant Pellets



- SiC cladding (SiGA, GA)
- Metallic pellet ( $\text{UN}$  or  $\text{U}_3\text{Si}_2$ )



## ◉ 향상/혁신 핵연료 개발 협력 추진 계획

- 혁신 핵연료 소결체(Metal-ceramic hybrid  $\text{UO}_2$ ) 교차검증 시험, 상용제조성 평가 등 협력
- 혁신 핵연료 소재 자체 검증 및 상용화 타당성 평가 (소재/부품 제공 시, 혁신 핵연료 부합 시)
- 향상 핵연료 설계방법론 타당성 검증 (코드 성능평가 결과 비교)

**감사합니다**

