




2021년도 한국원자력학회 추계학술대회
핵연료 및 원자력재료 워크숍, '21.10.20.

KNF 사고저항성 핵연료 개발 현황

장훈

핵연료연구실/기술연구원

- 
- 
- 
- I. 국외 사고저항성 핵연료 개발 동향
 - II. KNF 경수로용 핵연료 개발 계획
 - III. 사고저항성 피복관 개발 현황
 - IV. 사고저항성 소결체 개발 현황
 - V. 향후계획

I 국외 사고저항성 핵연료 개발 동향

ATF Valuation 1.0/2.0 studies (#3002012250, 2018)

- For severe accident case, enhanced coping times of 1 ~ 3 hours
- For DBA/AOO case, greater benefits through safety margin improvements
- With FLEX operation, significant improvement of safety margin

Utility ATF business case template (#3002018373, 2020)

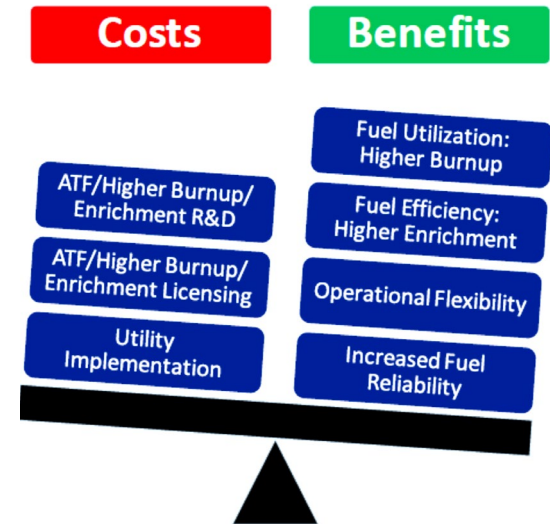
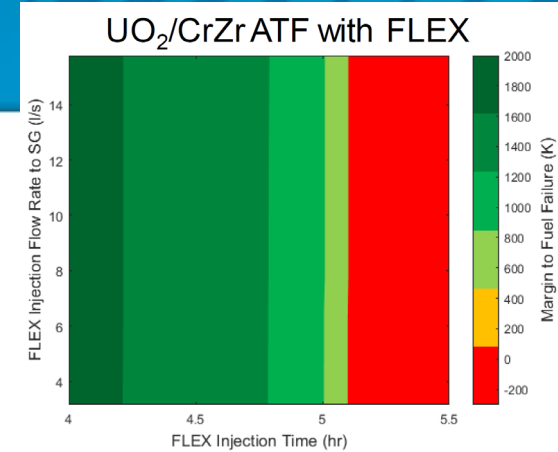
- Leverage ATF and high enrichment/high burnup feasibility studies to assess anticipated costs and benefits from the deployment of ATF
- Generic assessment methodology to support plant specific business cases

EPRI Coated cladding gap analysis (#3002014603, 2018)

- Current technical licensing criteria and licensed fuel performance codes are applicable
- Suggested new degradation mechanisms

High burnup/enrichment with Vendors, Utility, NRC

- Proposed phased approach (No clad burst, FFRD criteria)
- Study on HPUF of coating, high BU FGR, FFRD
- Alternative licensing strategy (#3002018457, 2020)
 - Risk informed analysis of LOCA induced FFRD



Deployment Strategy

| | Today | 2023 | 2026 |
|-------------------|-------|--------|-------------------------------|
| Enrichment (wt.%) | <5% | >5% | ~6-7.5% |
| Burnup (GWD/MTU) | 62 | ~66-68 | ~66-68 (non-ATF) ~75 (ATF) |

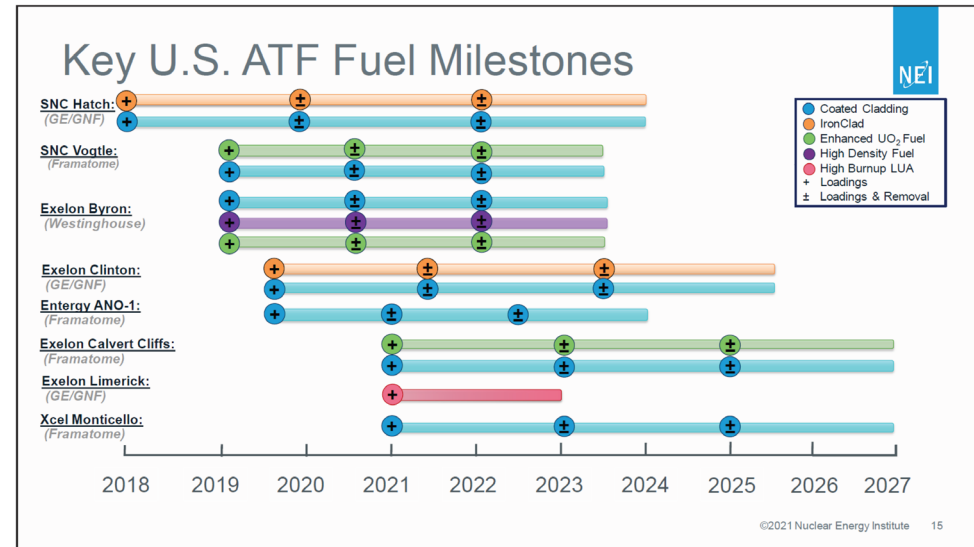
해외 핵연료 공급사 ATF 개발 현황 (EPRI 10th ATF Workshop)

● Framatome (Cr-coating Zr cladding, Cr-doped pellet)

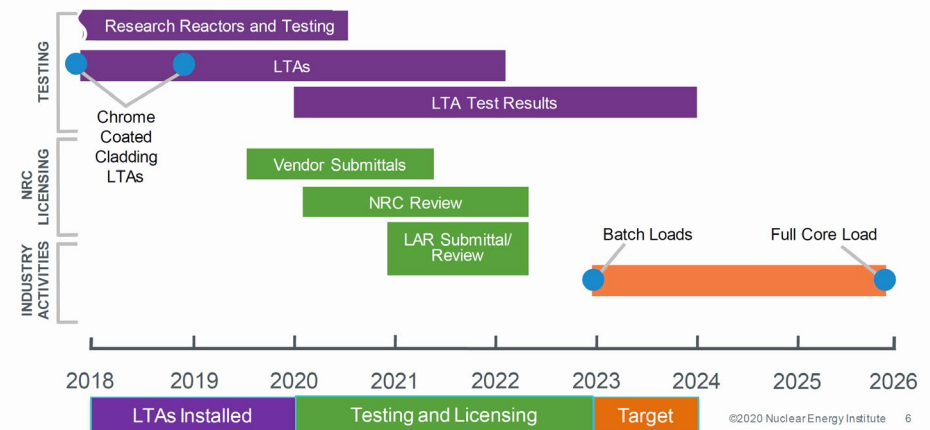
- Full-scale coating machine upgraded
- Additional two new prototype machines and plant design work is ongoing
- For HBU/E, licensing activity underway in cooperation with industry, utility, and NRC
- Internal plant assessment and detailed design for fabrication plant upgrades in progress

● Westinghouse (Cr-coating Zr cladding, ADOPT pellet)

- Scale up for production and developing additional PVD coating technique for Cr-coating
- For HBU/E, impact of enrichment > 5 wt.% on manufacturing facilities, transport, on site storage
- Several licensing works are underway
 - Extended BU level up to 68 GWd/MTU
 - ADOPT fuel and coating topical reports



ATF Approval Timeline – Coated Cladding



HBU/E : high burnup uranium and high enrichment

NRC ATF 규제기술 개발 동향

○ NRC Project Plan ver. 1.2 ('21.06)

- Proactive licensing activities, stakeholder engagement, independent calculation
- Recently new ver.1.2 issued due to change in industry plans (high BU and high enrichment)
- Evaluate the applicability of existing regulations and guidance on ATF/HBU/HE
- Continue engagement with industries, utility, and institutes by public workshops
 - High BU, Alternative licensing strategy, FFRD

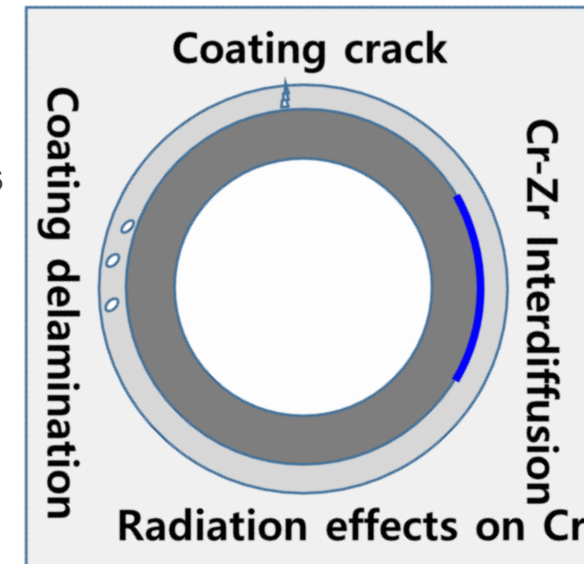
(Month) 2021

○ Interim Staff Guideline ('20.01)

- Based on PIRT on Cr-coating (PNNL)
- Supplementary guidance of SRP Chap. 4 and 15.
- Suggested new degradation mechanisms and impact on SAFDLs
- Second PIRT on Severe accidents

○ New RIL reports on FFRD (fuel fragmentation, relocation and dispersals)

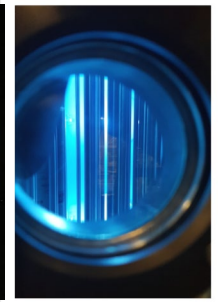
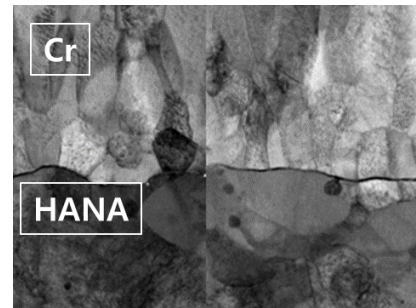
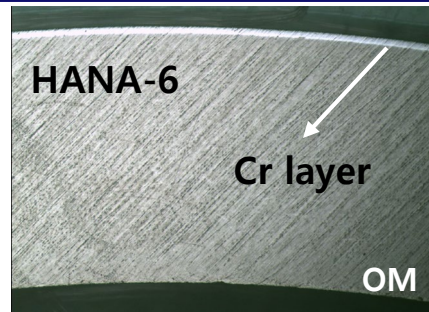
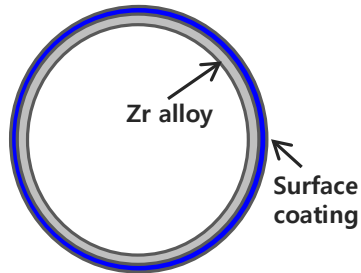
- SECY-15-0148 (2015) concluded that rulemaking was not needed to address FFRD at that time
- Address recent FFRD research finding and NRC's interpretations



II KNF 경수로용 핵연료 개발 계획

KNF 경수로용 핵연료 소재 개요

Cr-coated HANA-6 cladding

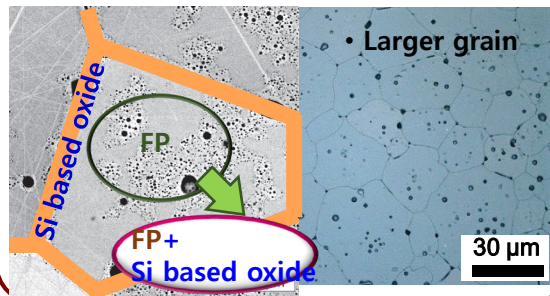


- 10 times better oxidation resistance
- Excellent corrosion resistance
- Arc Ion Plating technology

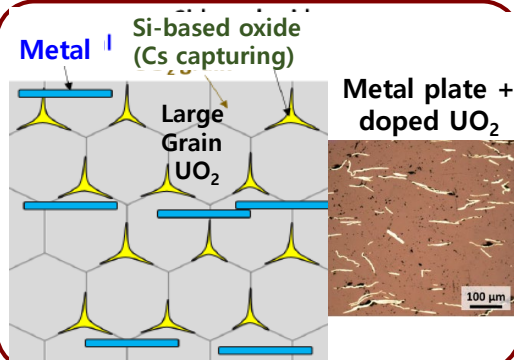
Advanced UO_2 Pellet

Si-based oxide Doped UO_2

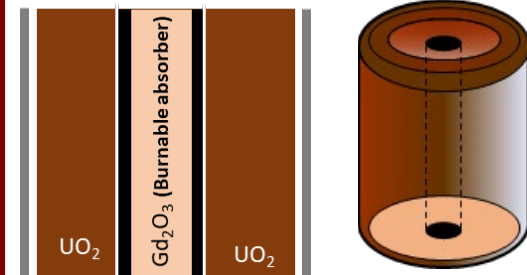
- Improved FG retention



Advanced Thermal Conductivity UO_2



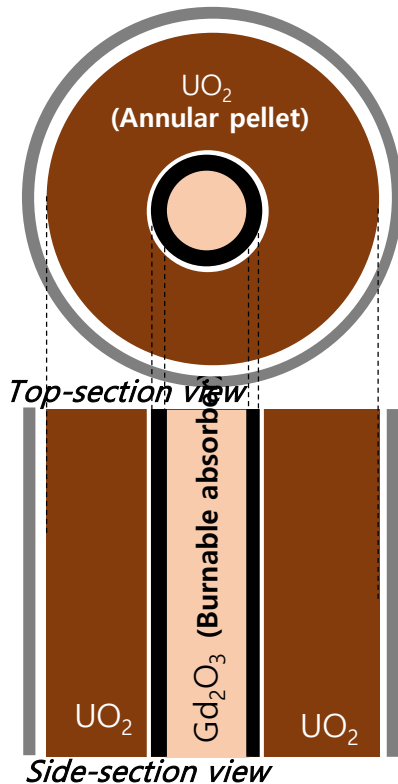
CIMBA Pellet



- Enable reactor operation w/o B
- Safety enhancement by decrease in cent. temp

iSMR 무봉산 운전을 위한 일체형가연성흡수봉

CIMBA components and manufacturing



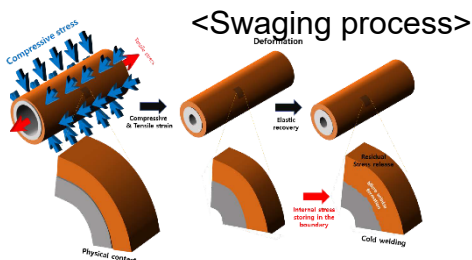
< CIMBA components >

1. Burnable absorber
: Gd_2O_3 with Mo or Nb
2. Annular pellet: UO_2
3. Cladding: HANA-6™ Zr alloy

CIMBA parts production

1. Burnable absorber

- Produced by (주) 우진
- Procurement after production



2. 환형 소결체

Produced by KNF & KAERI
Technology development and production

<KAERI double-cooled annular pellet>

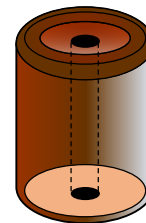
02 KAERI 환형 소결체 제조기술(3/4)

② 자동 프레스 적용 제조



<하나로 연소시험용 소결체 및 연소 후 소결체 단면>
* 연소도 약 39,600 MWd/MTU

- 상용 핵연료 소결체 제조 프레스와 동일 개념인 double acting press 장비 구축 및 소결체 제조 경험
- 하나로 연소시험용 소결체 제조



Parts Assembly



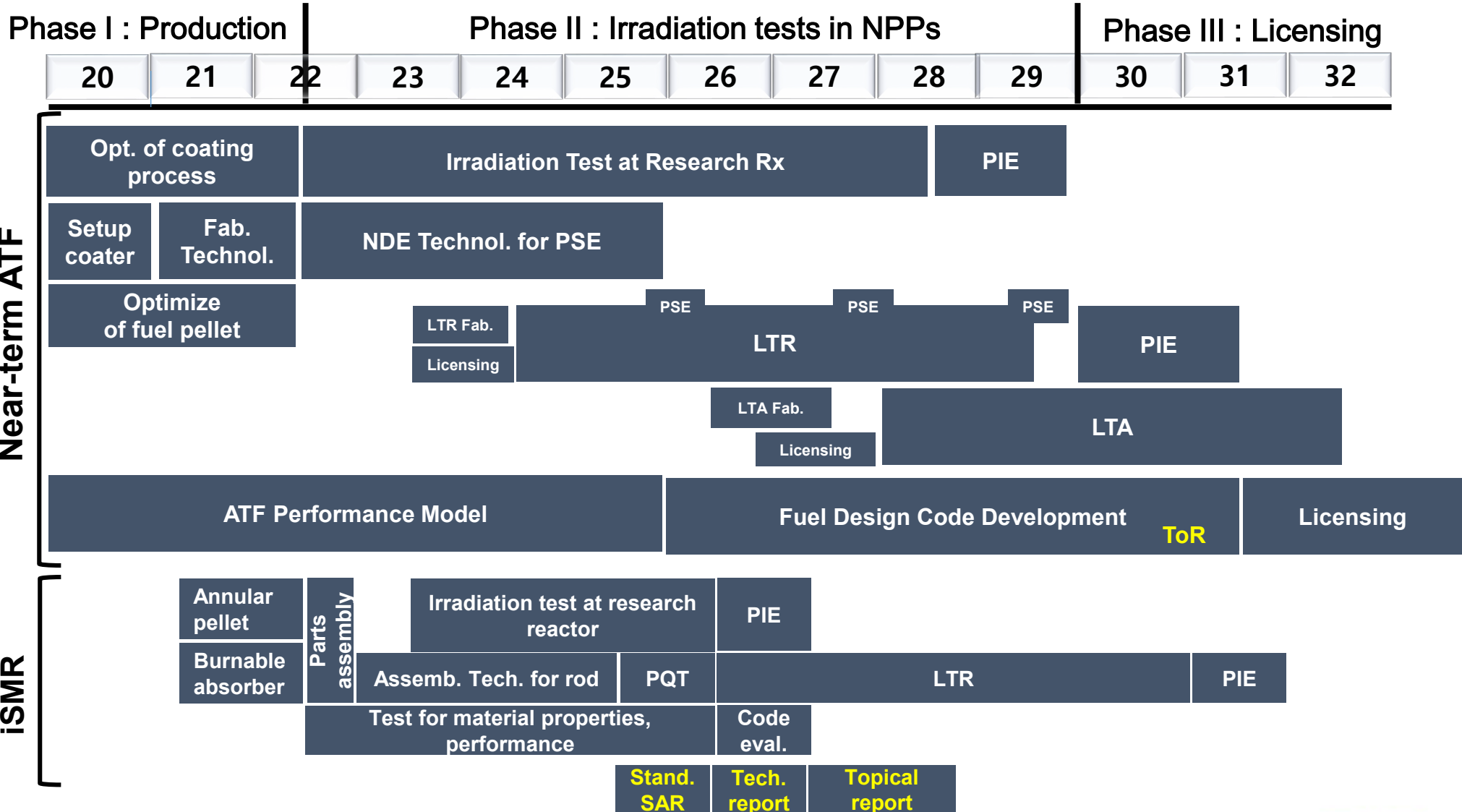
Rod Assembly



Active height
2.45 m
(250 ea)

FA
height
2.85 m

KNF ATF 및 CIMBA 상용화 추진계획



III 사고저항성 피복관 개발 현황

피복관 코팅 공정 기술 개발 추진현황

We are Here !

Small-scale coating (Lab.)

Full-scale coating (Prototype)

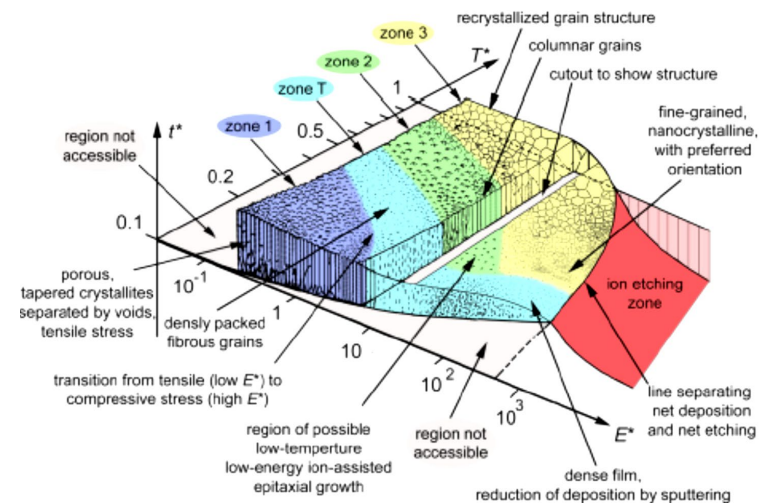
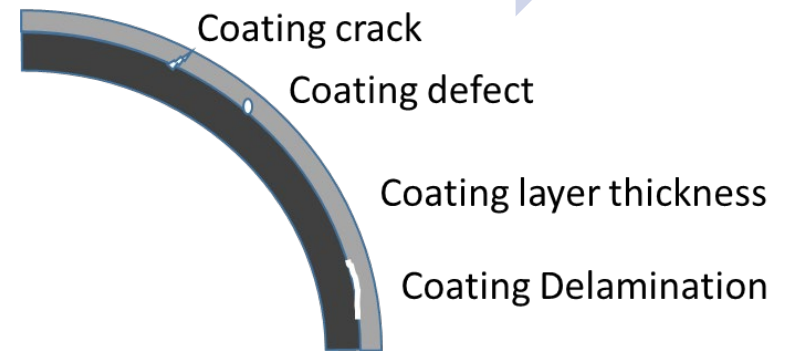
Commercial production (Plant)

▶ Small-scale 코팅 기술 개발

- 1m 급 HANA-6 피복관 기반 코팅 공정기술 개발 완료
- 코팅 공정변수에 따른 코팅 피복관 핵심특성 평가
- 코팅층 미세구조 특성에 따른 코팅 피복관 핵심특성 비교 평가
- 코팅 두께 균질도, 시편 배치, 원자재 제조사에 따른 영향 평가

▶ Full-scale 코팅장비 및 코팅 기술 개발

- Small-scale 코팅장비 기반 Full-scale 코팅 장비 개발 완료
- Full-scale HANA-6 피복관 기반 코팅 공정기술 개발 중
 - 1m 급 코팅공정 적용성 평가 및 공정개선
 - 피복관 길이방향 및 위치별 코팅 두께 및 특성 평가
- Cr-코팅 HANA-6 피복관 제조/검사기술 개발
 - 원자재(Cr target) 공급자자격인증 완료
 - 외면연마, 용접, 집합체 장입 등 후속 공정 기술 개발 중
 - Cr 코팅 층 결함 및 두께 검사기술 개발 (품질검사, 소내검사)
- 코팅 공정기술 최적화 및 시제품 제조

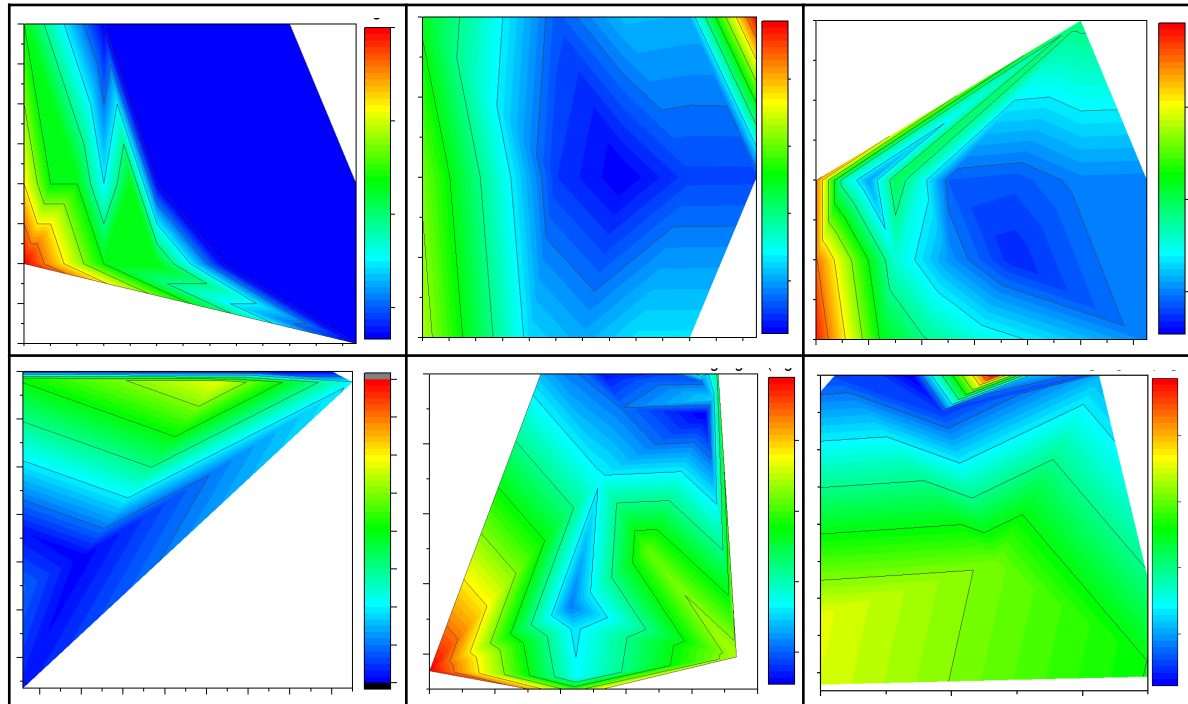


A. Anders, *Thin Solid Films*, 518, p.4087, 2010

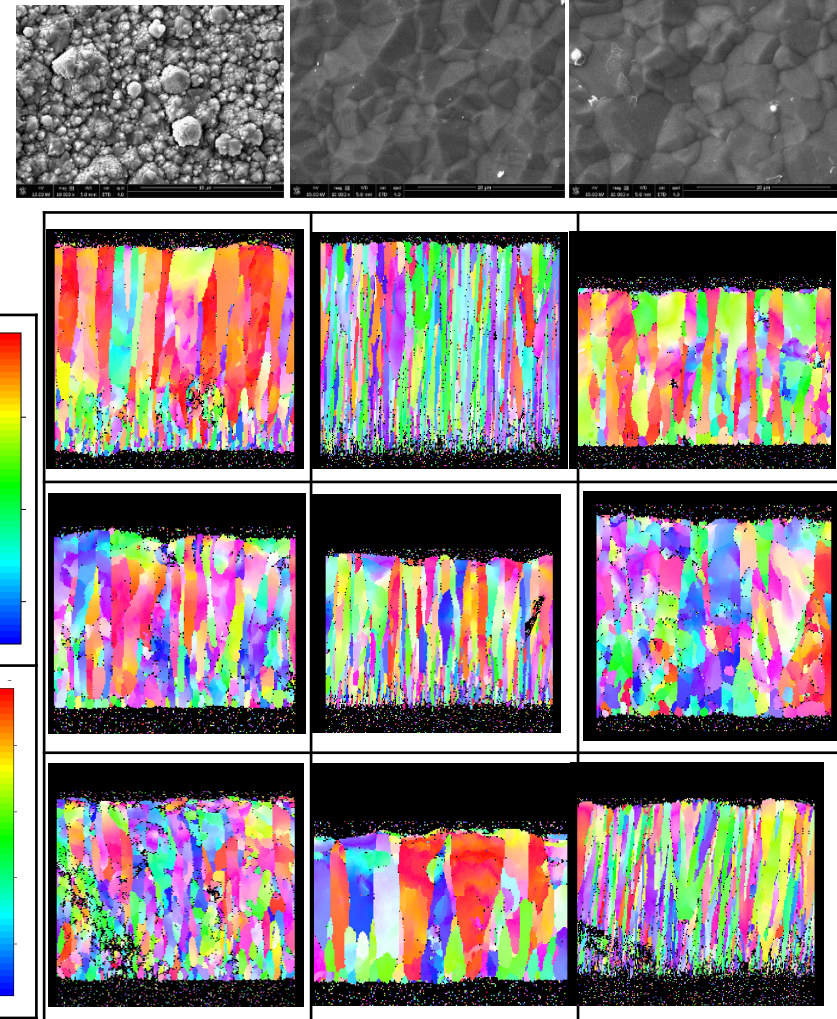
1m 급 피복관 코팅 공정기술 개발 완료

- 1m 급 피복관 기반 후보 공정변수 적용 시험제조
 - 코팅 공정변수에 따른 피복관 핵심 특성 Map 도출
 - 코팅 공정변수에 따른 미세구조 특성 Map 도출
 - 피복관 핵심 특성 및 미세구조 기반 최종후보 공정 도출
- 4m 급 피복관 코팅 공정 적용성 평가 중

코팅 공정변수에 따른 피복관 핵심특성 맵



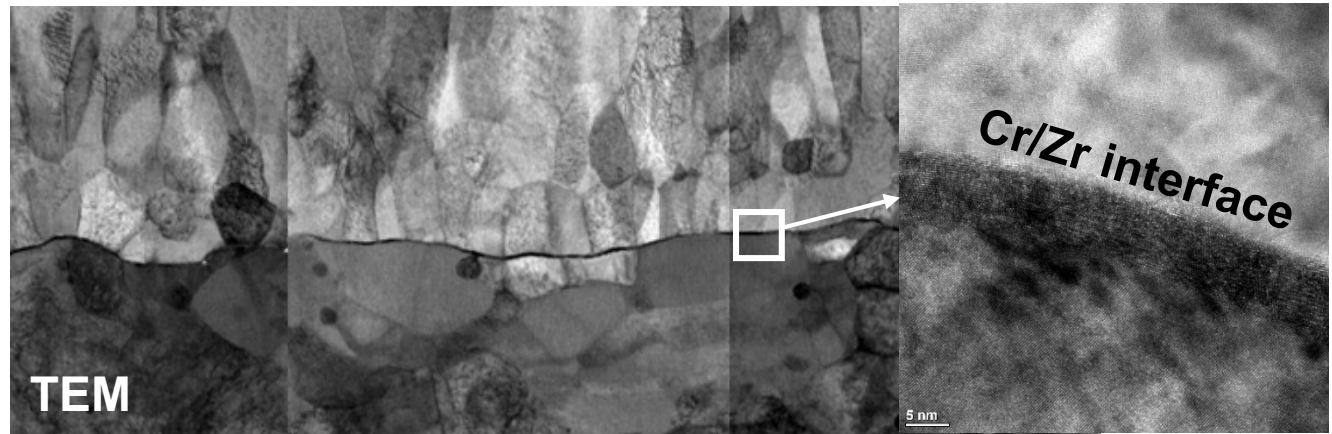
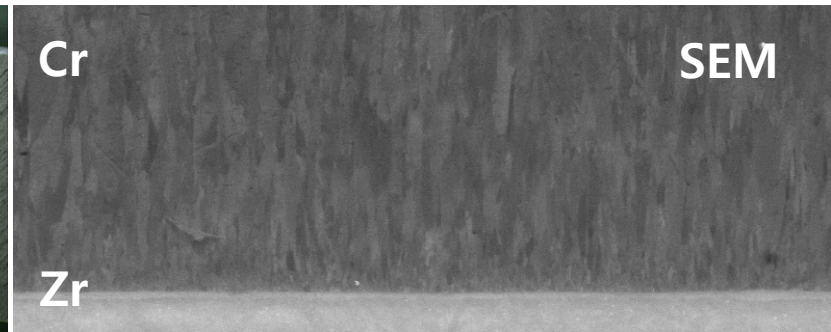
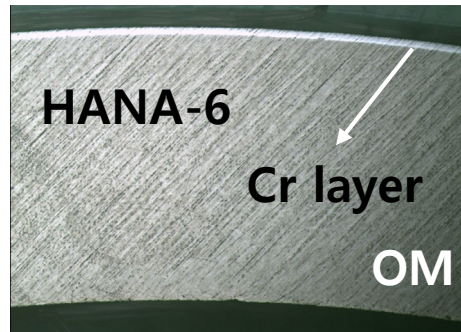
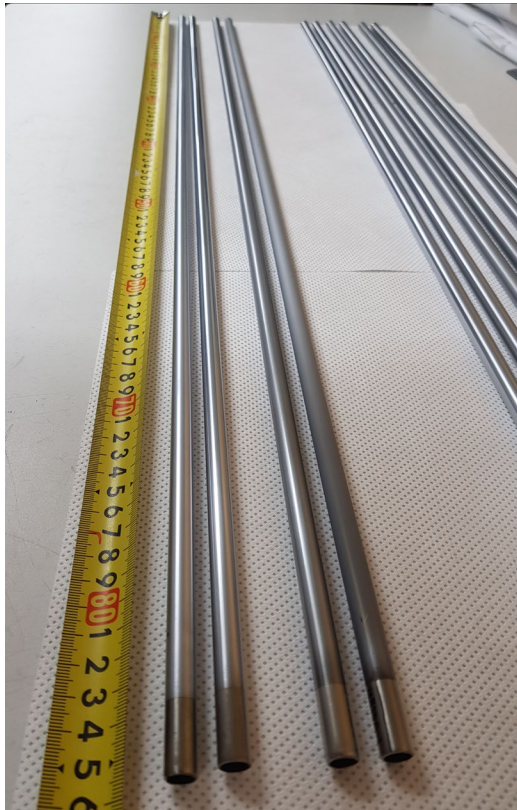
코팅 공정변수에 따른 미세구조 특성 맵



Cr 코팅 HANA-6 피복관

1m long Cr-coated HANA-6 cladding is already available

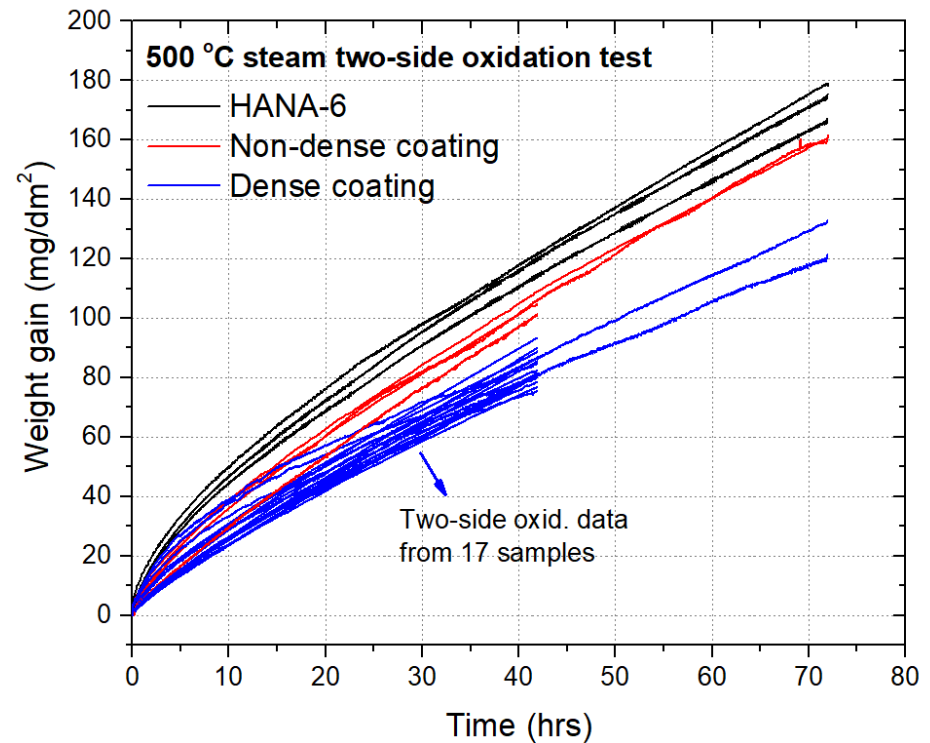
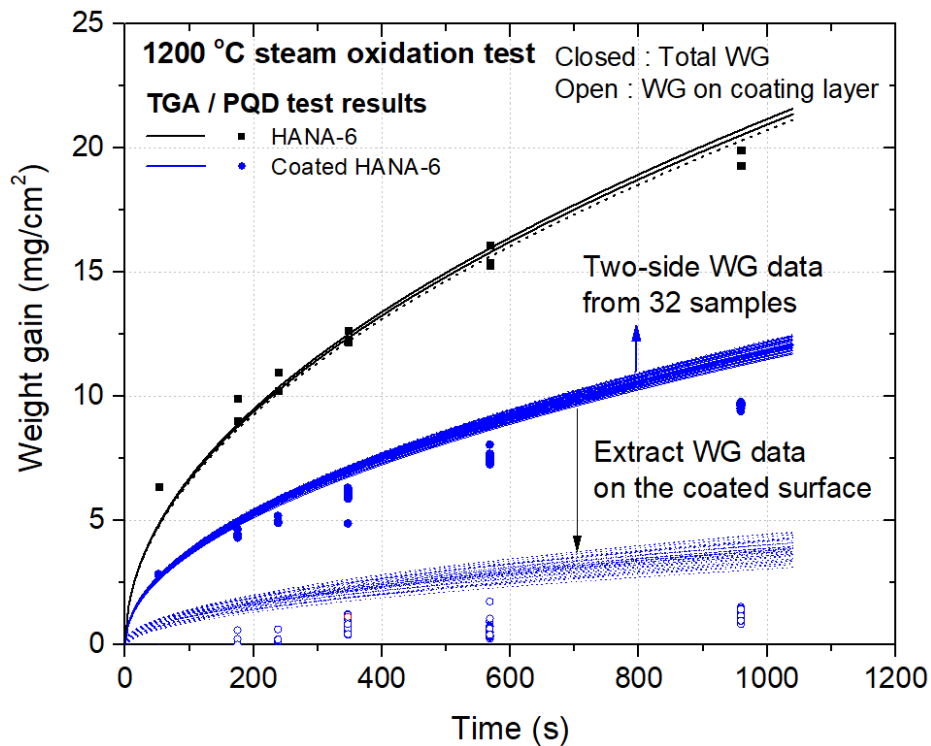
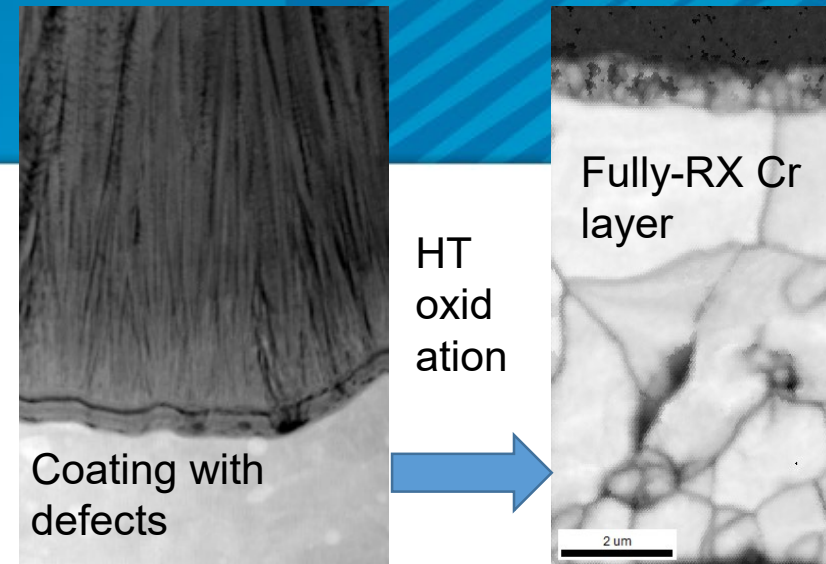
- Dense and very homogenous coating layer with strong adhesion on HANA-6 tube
- Uniform coating thickness in axial and circum. direction (less than $\pm 2 \mu\text{m}$)



고온산화저항성

1200 and 500 °C 수증기 양면 고온산화 시험

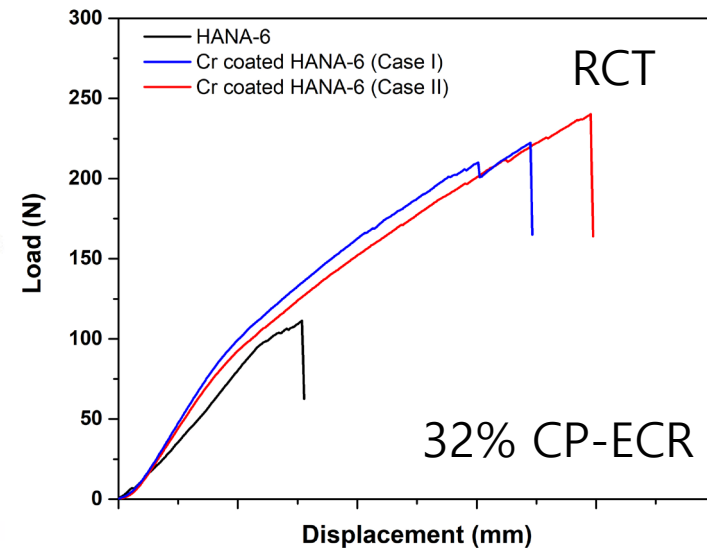
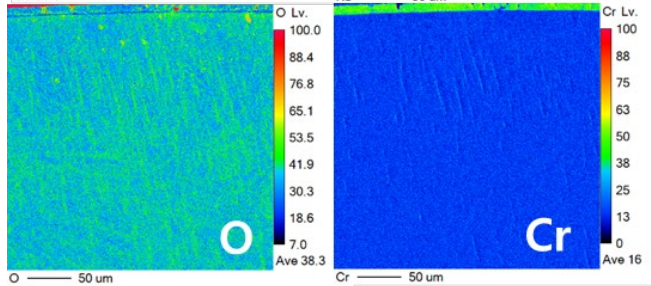
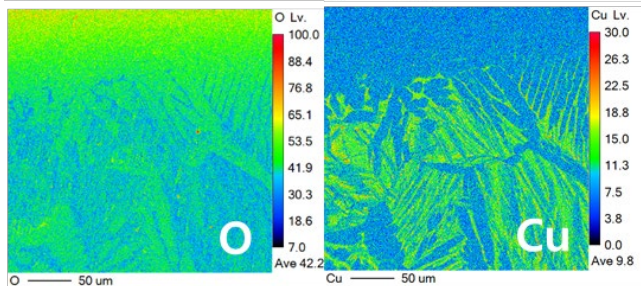
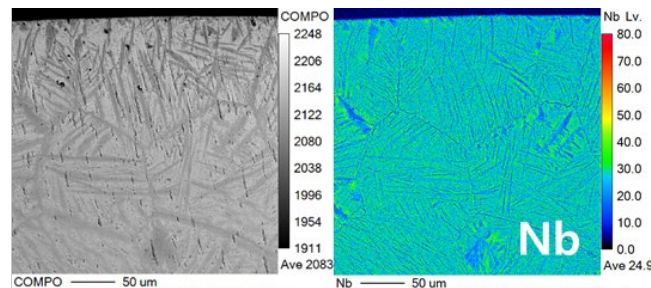
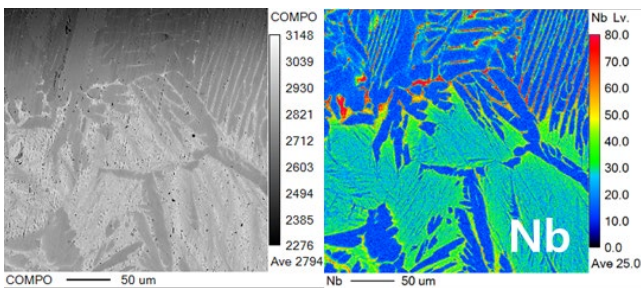
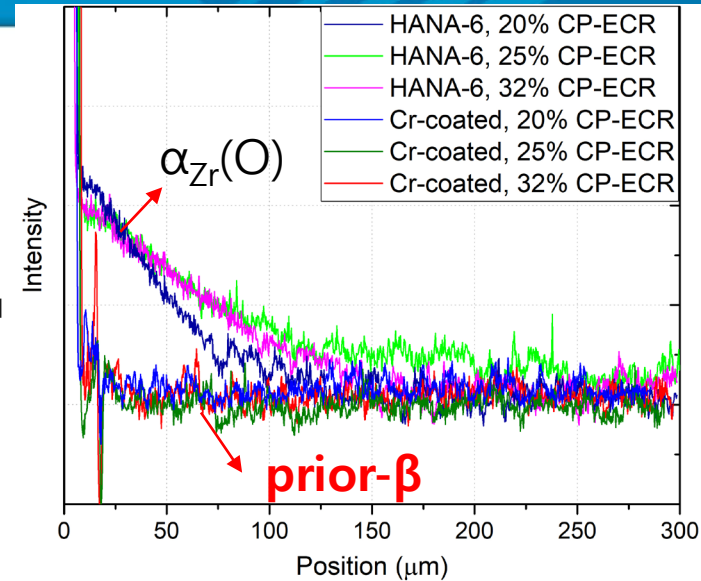
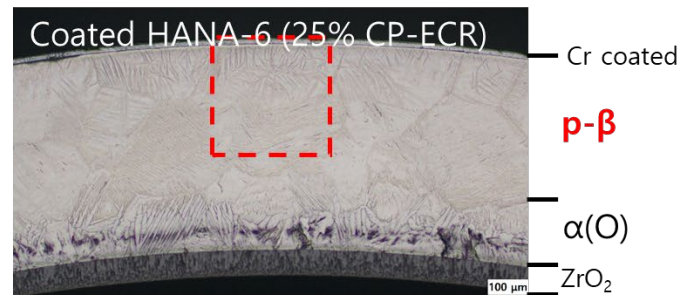
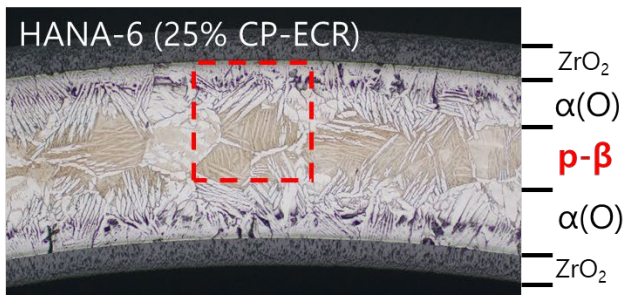
- 1200 °C에서 약 10배의 고온산화 저항성 증가
- 코팅층 재결정온도 이상에서는 코팅공정에 따른 고온산화 특성영향이 없음
- 코팅층 재결정온도 이하에서는 코팅 공정에 따른 고온산화 저항성 변화가 나타남



고온산화저항성

코팅 후, Zr 합금의 취성을 유발하는 Oxygen rich α -상 성장 지연

- 코팅층이 내부 산소침투를 효과적으로 지연시킴
- 코팅층 결함 존재 시, 코팅층 계면 아래에 국부적인 $\alpha_{Zr}(O)$ 상의 형성
- CP-ECR 기준으로 32 %까지 효과적인 산소침투 형성 지연 효과 확인



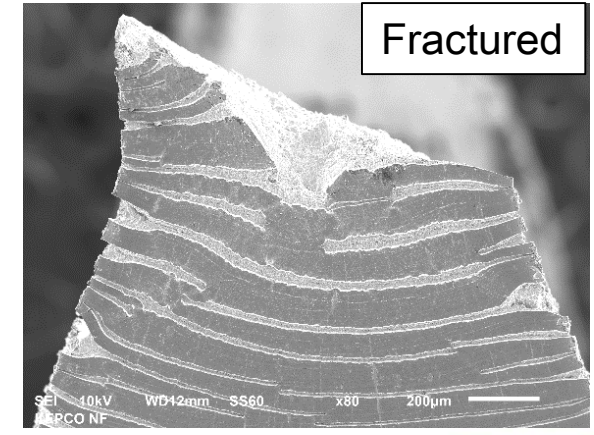
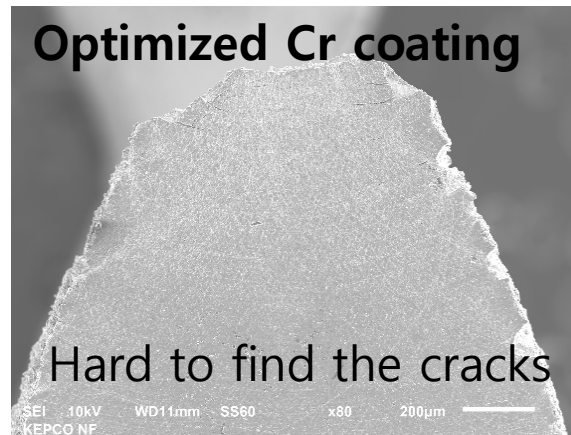
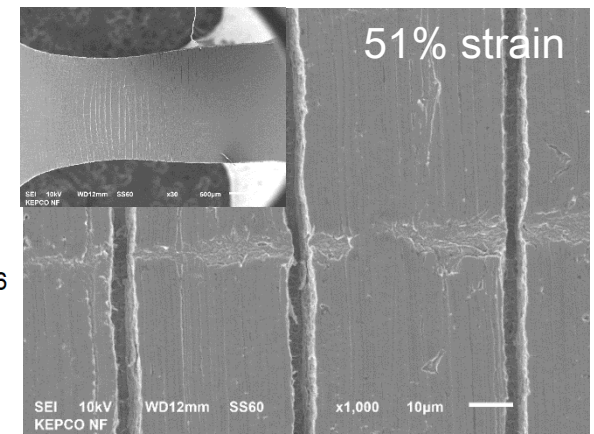
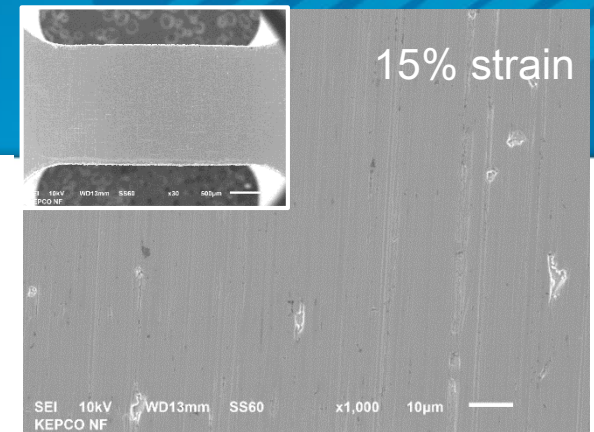
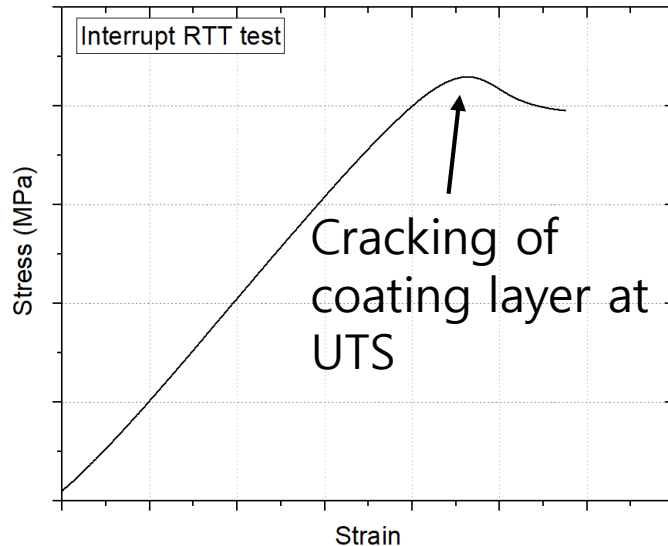
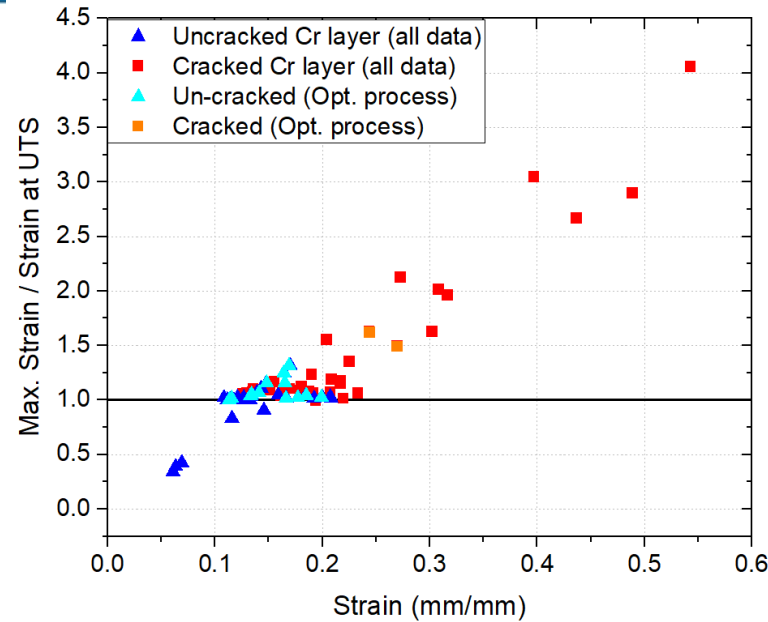
코팅층 균열저항성

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

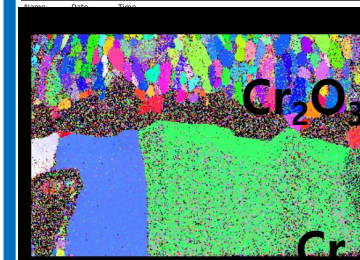
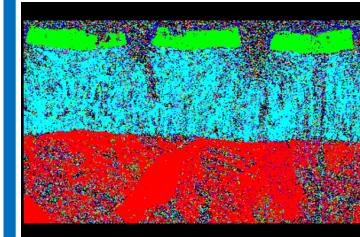
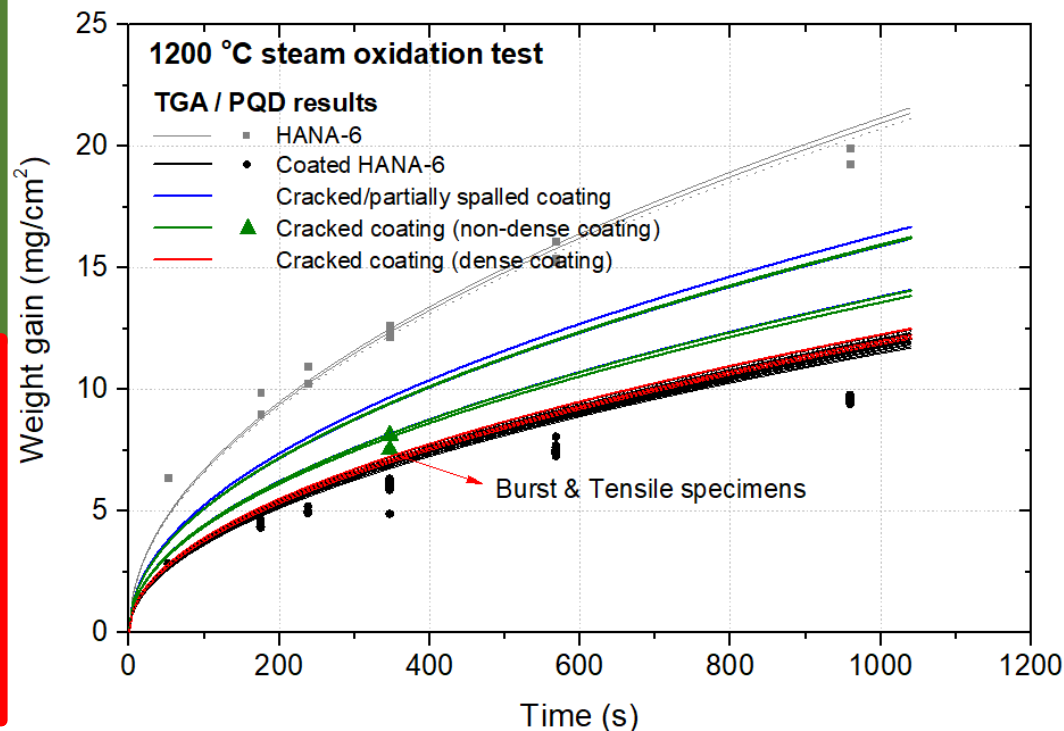
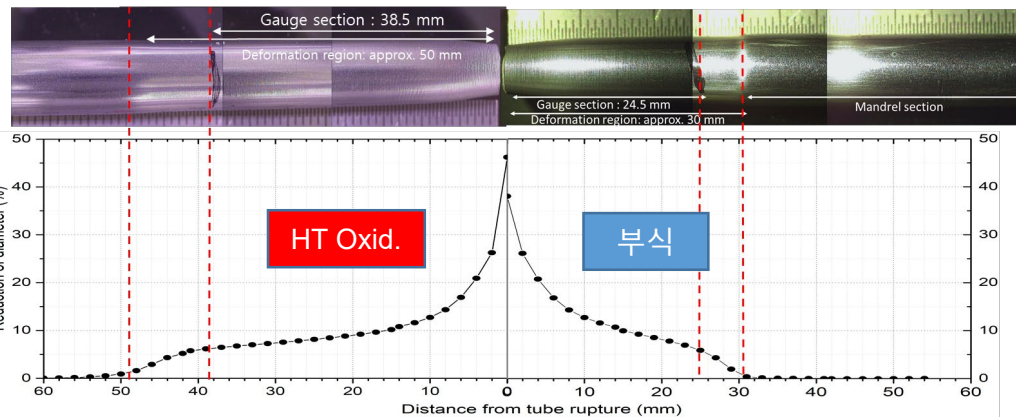
Cracked/spalled coating



Cracked/non-dense coating



Cracked/dense coating

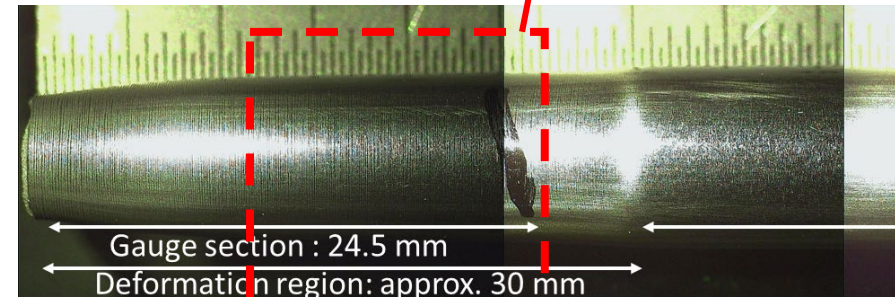
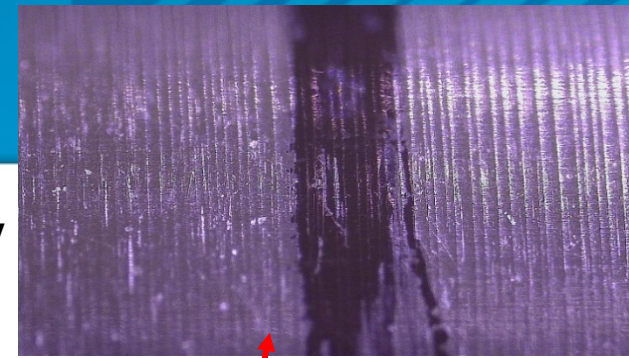
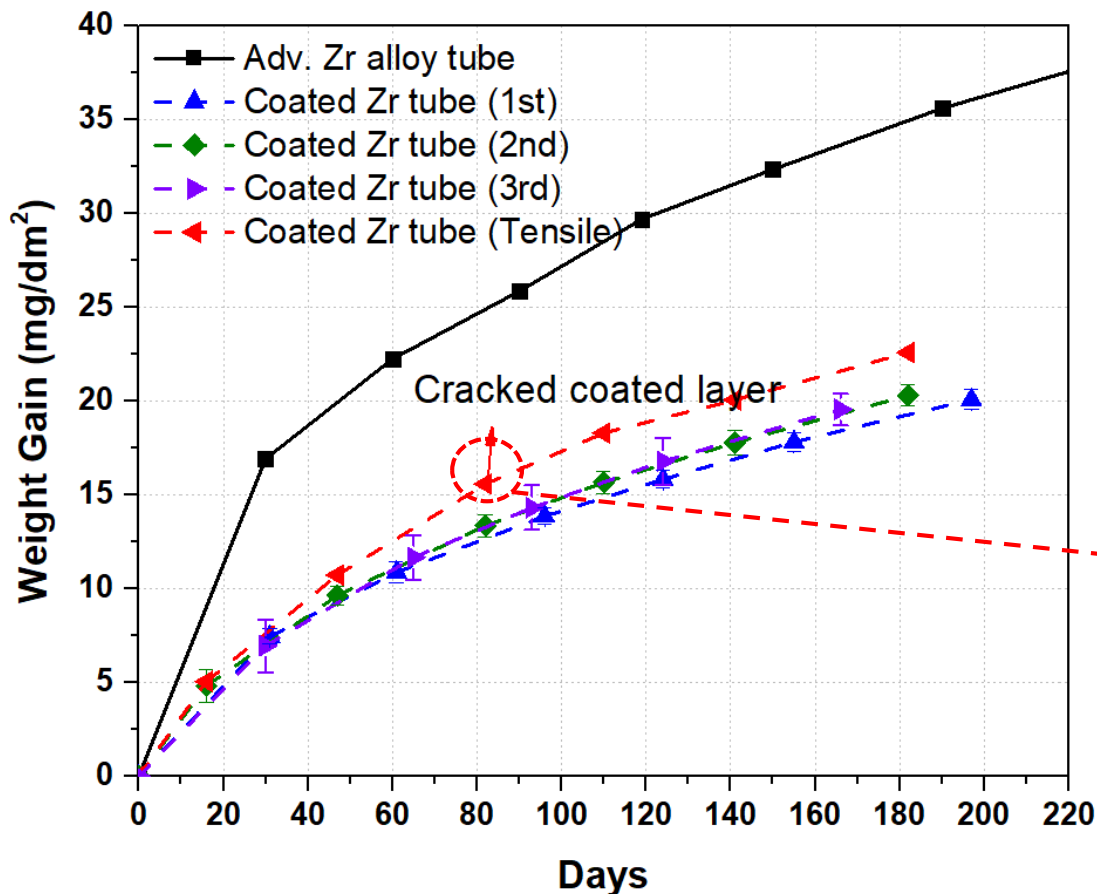


Name Date Time
IPFYMap 2020-07-10 9:8 4:10:03

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



코팅 피복관 종합특성 예상 결과

X : 변화 없음
 Δ : 코팅공정에 따라 다름
 ↗ : 특성 향상

* 예측결과

| | 특성변화 | | 특성변화 |
|---------|------|------------|-------|
| 열팽창 | X | 경도 | ↗ |
| 열전도도 | ↗ | 부식 | ↗ |
| 밀도* | X | 고온산화 | ↗ |
| 비열* | X | PQD | ↗ |
| 상변태 온도* | X | 고온크립* | X |
| 재결정도 | Δ | 고온파열 | X |
| 표면방사율* | X | 박리산화 | ↗ |
| 인장 | Δ | 피로 | Δ |
| 크립 저항성* | ↗ | PCI*/PCMI* | X (↗) |

Full-scale Cr 코팅 공정기술 개발

Full-scale Cr-coating Facility

Cr-coated Tubes

As-R tube

↓
세척/건조

↓
외경측정

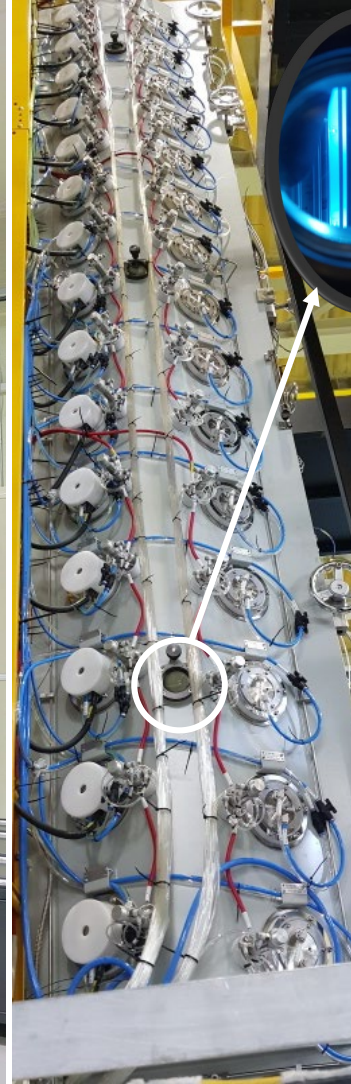
↓
AIP 코팅

↓
외경측정

↓
코팅두께

↓
외면연마/세척

↓
UT 검사



코팅 두께 균질도

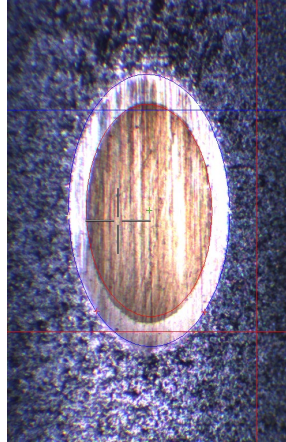
육안검사



외경측정

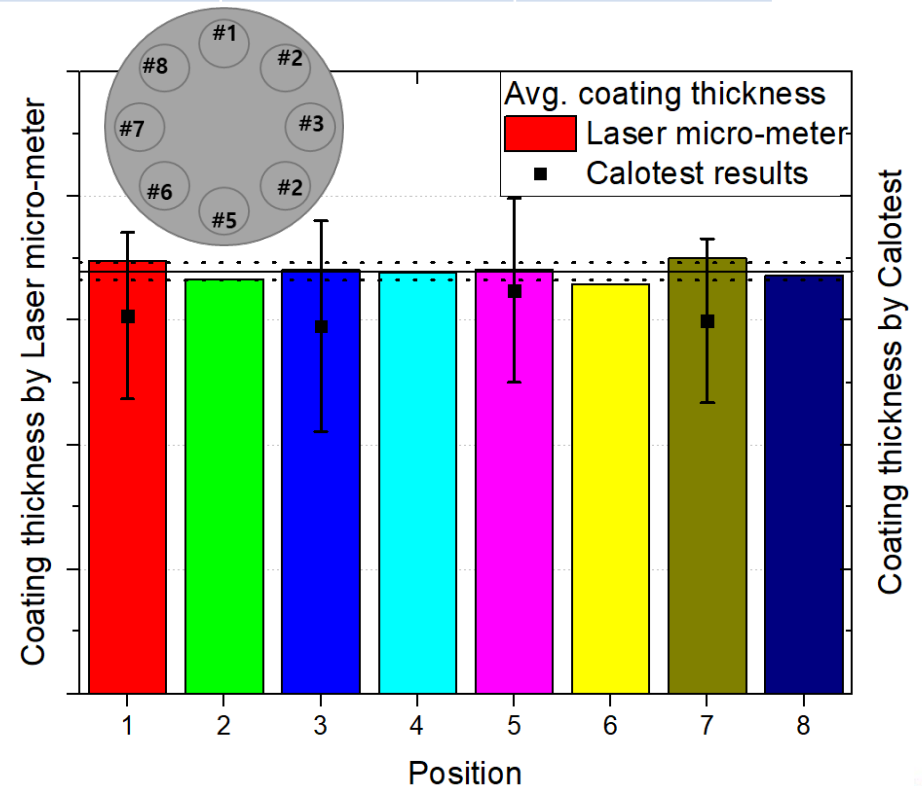
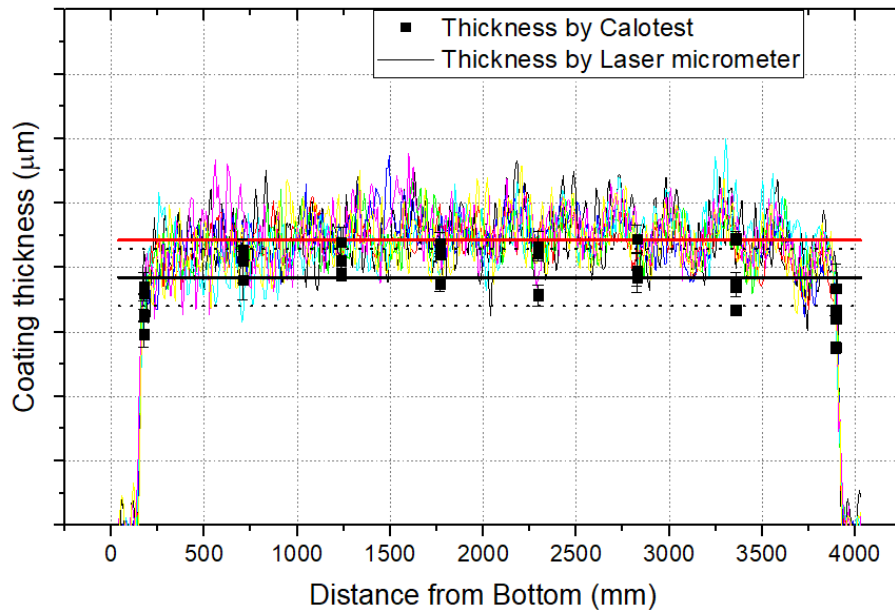


두께(Calo)



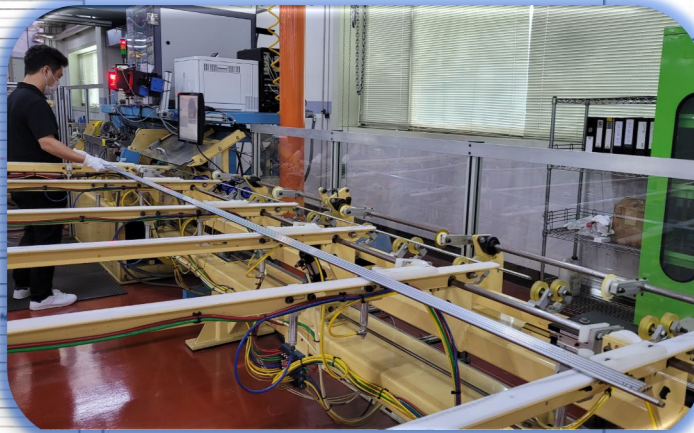
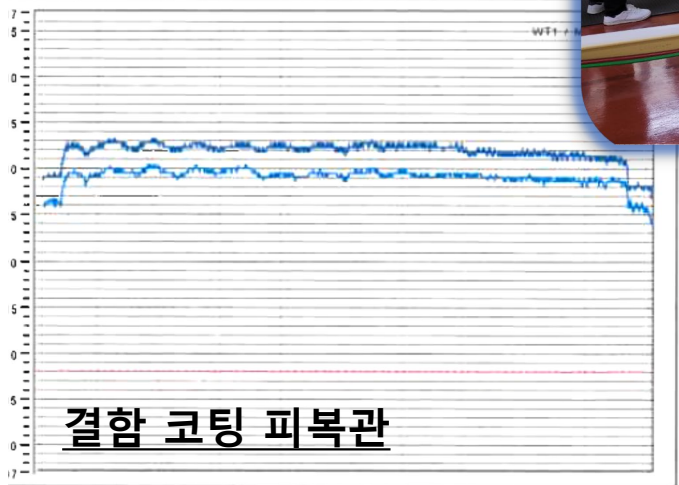
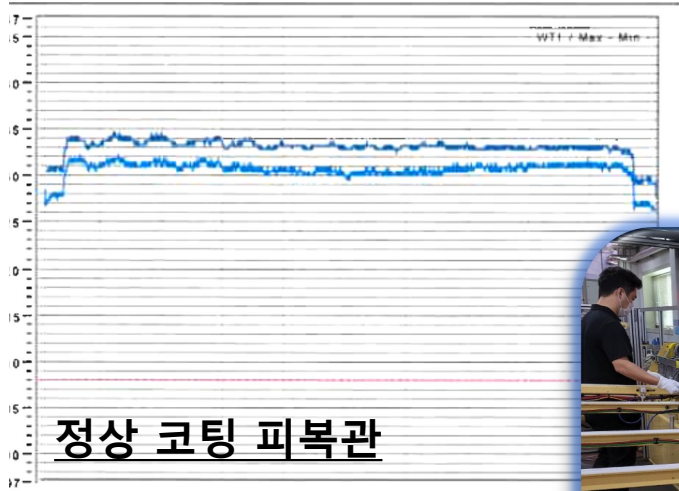
코팅 공정별 길이/시편간 편차 (um)

| | Axial | Tubes |
|----------|-------|-------|
| Case I | 0.53 | 0.55 |
| Case II | 1.13 | 1.08 |
| Case III | 1.46 | 0.25 |

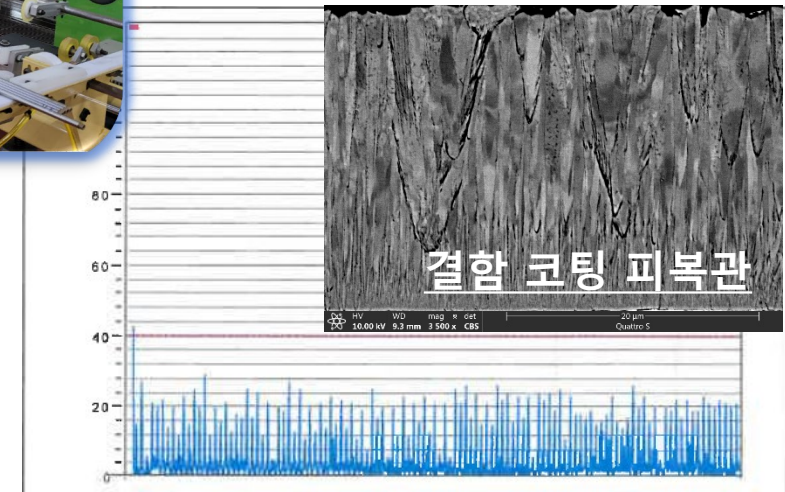
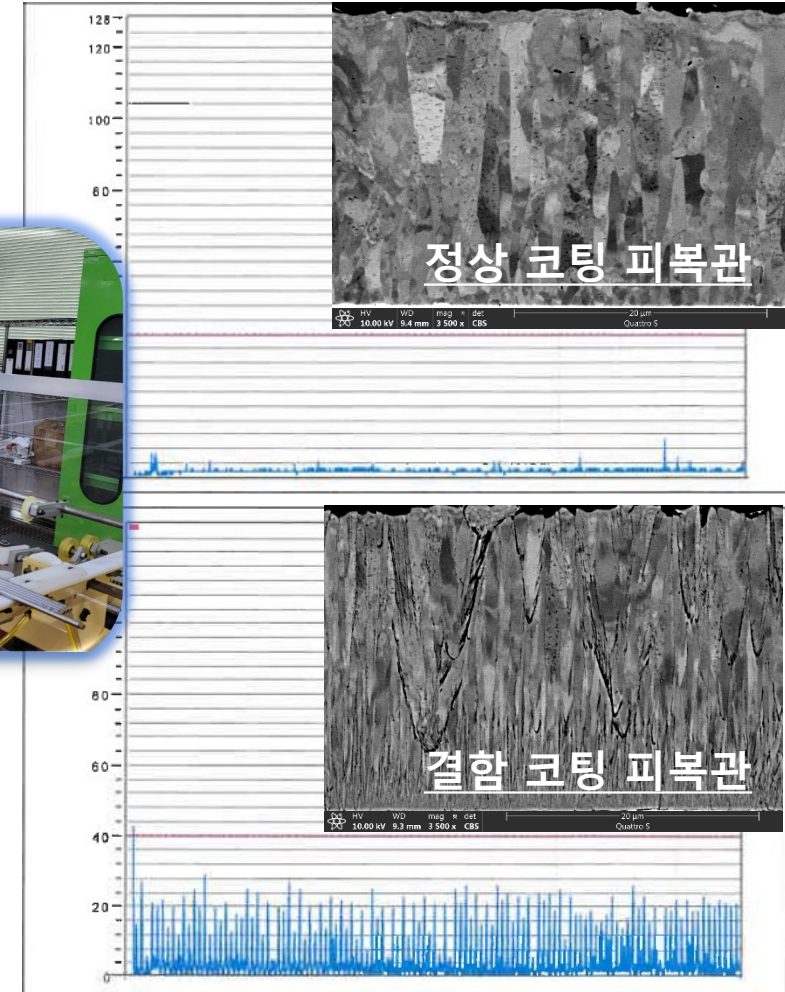


UT 검사 (TSA)

코팅 피복관 두께 검사 결과



코팅 피복관 결함 검사 결과



봉단마개 용접 공정기술 개발

Field welding test

Welding PQT w/ partially coated cladding

Welding PQT w/ fully coated cladding

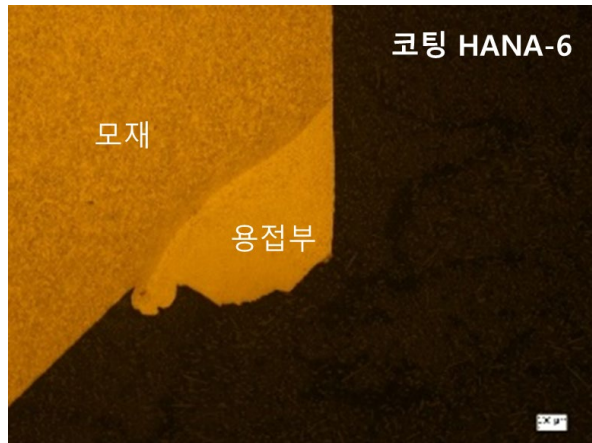


● 봉단마개 용접 PQT (Proc. Qualification Test) 추진 중

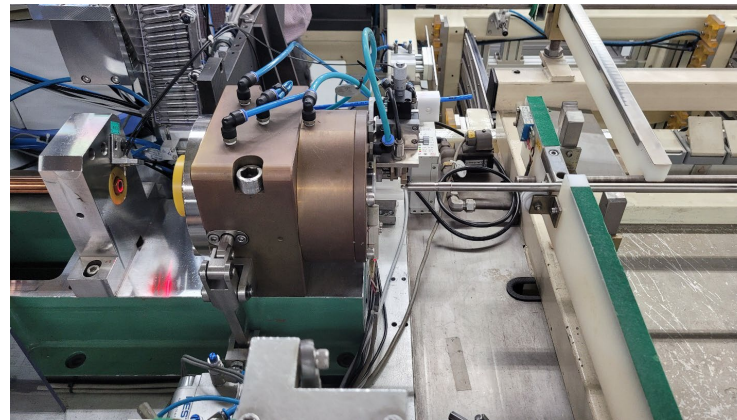
- HIPER16 기반 봉단마개 용접 기반
- 상하부 봉단마개 용접 공정별 용접 수행
- 품질검사 (파열, 조직, 부식, 고온산화) 시험 중
- 공정 수립 후, 미코팅 부분 용접 PQT 수행 예정

Partially coated

Fully coated



용접시방서 기준 만족 확인



KNF TSA 코팅피복관 봉단마개 용접



요약 (Major Achievement)

Small-scale coating (Lab.)

▶ 1m 급 피복관 기반 코팅기술 개발

- 코팅 공정변수에 따른 피복관 핵심특성 및 미세조직 특성 맵 도출
- 코팅 후보공정 도출 및 4m 코팅 공정 적용성 평가
- 코팅 원자재 특성에 따른 코팅 특성 평가
- 피복관 배치에 따른 코팅 공정영향 평가
- 코팅 두께 균질도, 아크건 설계 등 4m 급 코팅 장비 개발 활용

Full-scale coating (Prototype)

▶ 4m 급 코팅 피복관 제조기술 개발

- Full-scale 코팅 장비 개발 완료
- KNF NSA(논산공장) 부지내 코팅 시설 구축 완료
- 코팅 공정기술 개발 및 최적화 추진 중
- 용접, 외면연마, 초음파검사 등 후속공정 영향 평가 중

Commercial production (Plant)

▶ 대용량 상용 제조기술 개발

- 현 Full-scale 코팅 장비 기반 대용량 제조기술 개발 준비 중 (일부 착수)

▶ 핵연료 설계기술 개발

- 코팅 피복관 성능 모델 개발 및 설계영향 평가
- 노심/연료봉/열수력/안전해석 분야별 설계기술 개발 착수 ('21.05 ~)

IV 사고저항성 소결체 개발 현황

ATF UO₂ 소결체 (LAS Doped UO₂)

전략적 이득

제조 & qualification 용이성
인허가 용이성

추진적 이득

낮은 원전 운전부담
(0.1 wt% + 기존 UO₂)
LTR 용이성

안전성능 이득

안전 여유도 확보 (FGR, 변형률)
주기말 safety margin 향상 (RIP감소)
과도상태시 Bust & ballooning 위험 감소
과도상태에서 PCI margin 제고

Doped UO₂

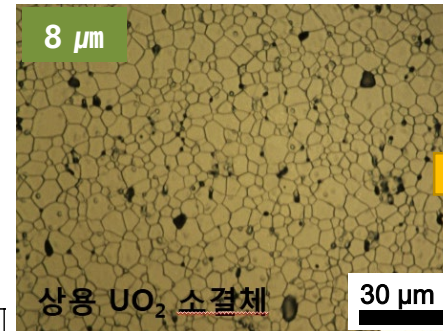
경제적 이득

경제적 손실 없이, 추가적인 경
제 이득 가능
(고연소 장주기 & 부하추종)

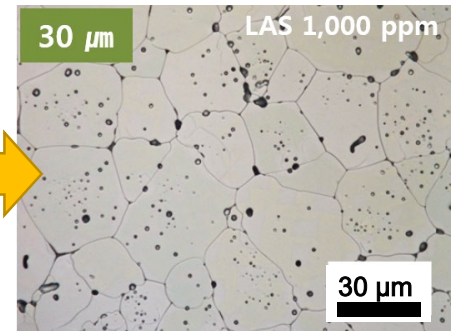
소결첨가제 조성

- ✓ La₂O₃-Al₂O₃-SiO₂ (LAS) doped UO₂
- ✓ 1,000 ppm 첨가 (99.9 wt% UO₂ + 0.1 wt% LAS)
- ✓ 대용량 상용 공정 적용성 평가 완료

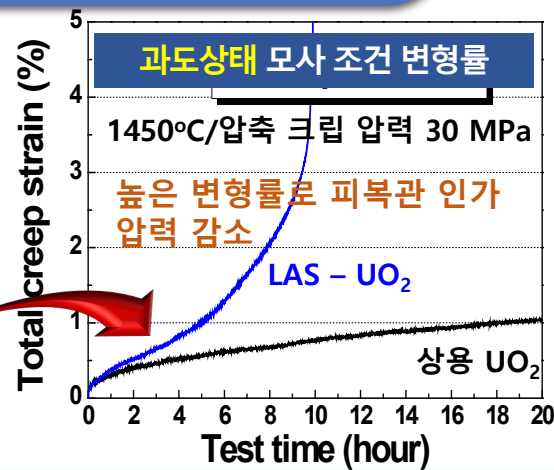
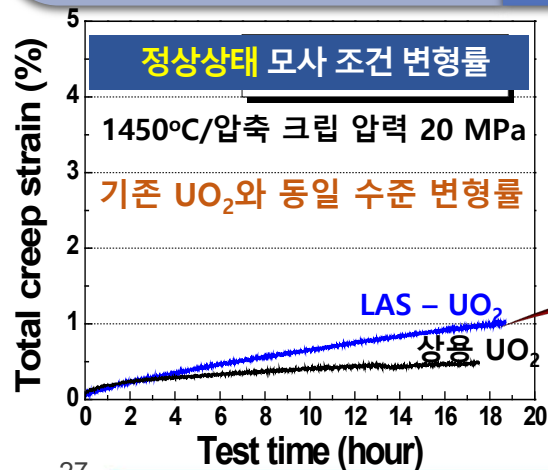
Commercial UO₂



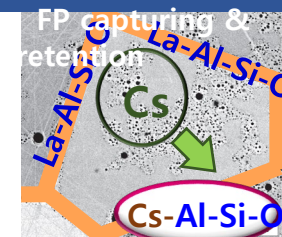
LAS Doped UO₂



Grain size 3배 이상 향상



- Capturing material at GB ⇒



- Pilot scale fabrication



ATF UO₂ 소결체 (LAS Doped UO₂ 성능)

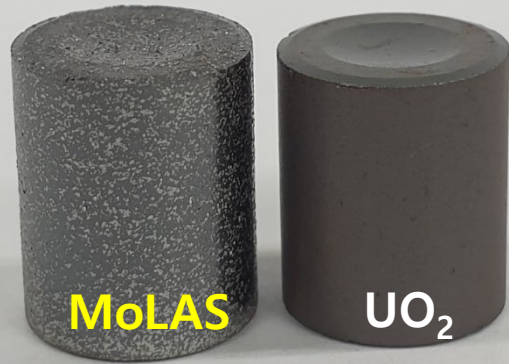
극미량원소 추가 → 주요 특성 유지 & 핵심 성능만을 향상 → 운전부담 저감 및 인허가 최소화

| 항목 | 성능 |
|--------------|---|
| ➤ 첨가제 첨가 함량 | 500 ~ 1500 ppm (Al, Si 함량 ASTM 기준 이하) (La ASTM 항목 없음) |
| ➤ 밀도 | 기존 UO ₂ 동일 또는 향상 |
| ➤ 열팽창 | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ 열전도도 | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ 재소결도 | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ 주기길이 | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ Washout | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ 정상조건에서 변형률 | 기존 UO ₂ 동일 |

| 항목 | 성능 |
|---------------------------------|---|
| ➤ 입자 크기 | ~ 30 μm (상용 8 μm) |
| ➤ U 함량 및 연소능 | 소결밀도 97% 사용 가능 (기존 UO ₂ 소결밀도 95%) |
| ➤ FGR (정상 & 과도) | 기존 UO ₂ 대비 1/3 저감 예상 |
| ➤ Cs 포집 기능 | 기존 UO ₂ 대비 향상 예상 |
| ➤ HBS 억제 기능 | 기존 UO ₂ 대비 향상 예상 |
| ➤ 수증기산화저항성 | 기존 UO ₂ 대비 향상 |
| ➤ 상용 공정성 | 상용공정에 바로 적용 가능 (qualification 적용 가능) |
| ➤ 1시간 동안 변형률 (1450°C/40 MPa) | 약 4% (상용 UO ₂ = 0.3%), 부하추종운전 가능 예상 |

ATF 소결체 (Thermal Conductivity/FGR (T/F) 개선 UO₂)

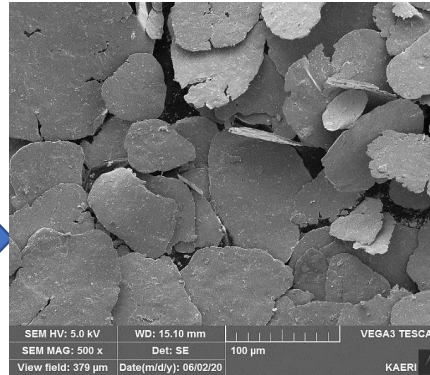
TF 개선 UO₂



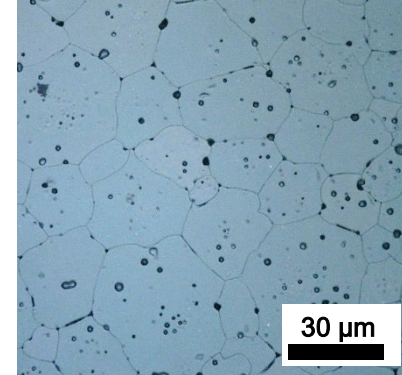
Mo plate (KAERI 기술) +

LAS 조성 (KNF 기술) =

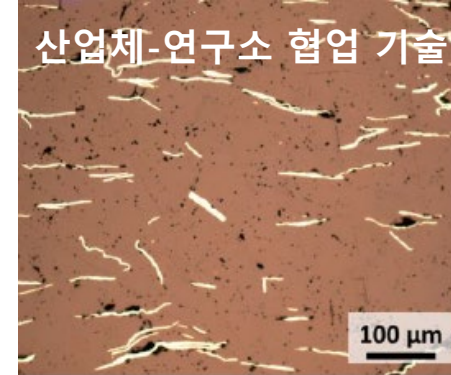
T/F UO₂ (MoLAS)



+



=

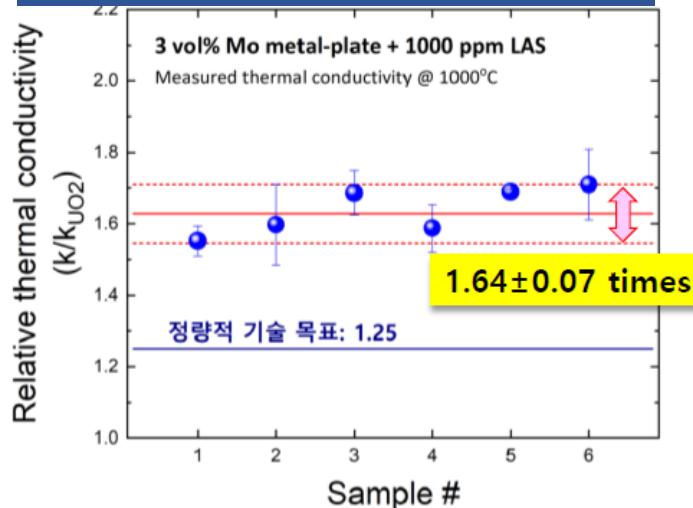


열전도도 증가 &
FP 확산속도 감소

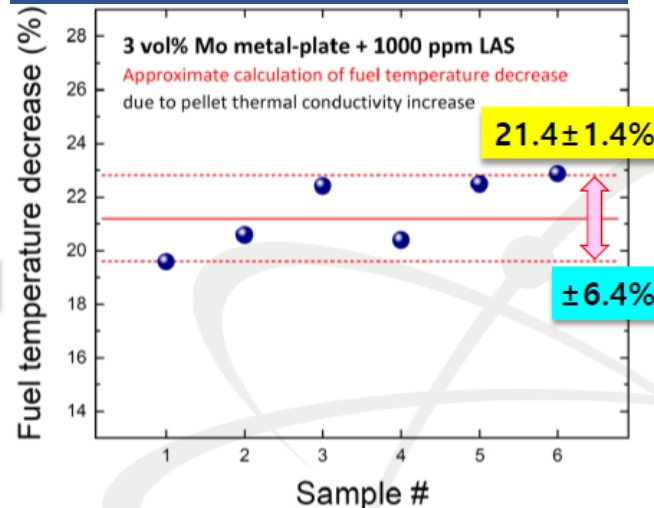
결정립 크기 증가 &
Si based 결정립계

주요 안전성능 극대화
(연료 중심온도 및 FGR 저감)

열전도도 기존 UO₂ 대비 1.6배 증가



핵연료 중심온도 20% 감소



FGR 저감 극대화를 통한 봉내압 저감

열전도도 증가를 통한 FP 확산속도 감소

+

큰 결정립을 통한 FP 확산 거리 증가

+

Si 기반 결정립계를 통한 FP capturing

✓ 대용량 상용 공정 적용성 평가 완료

✓ 공정 최적화 진행 중

ATF 소결체 (T/F 개선 UO₂ 성능)

약 3 vol% 이종 물질 첨가 → 주요 안전 성능 극대화 → 획기적 안전여유도 확보

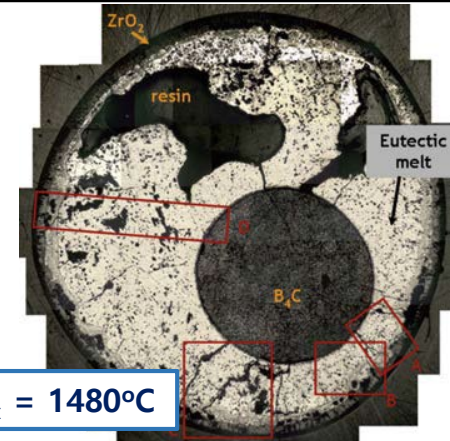
| 항목 | 성능 |
|---------------|--|
| ➤ 첨가제 조성 및 함량 | 1000 ppm La-Al-Si-O + 3 vol% Mo metal |
| ➤ 밀도 | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ 열팽창 | 동일 출력변동 시 소결체 팽창 UO ₂ 대비 약 30% 저감 예상 |
| ➤ 열전도도 | 기존 UO ₂ 대비 약 1.7배 향상 (핵연료 온도 약 20% 저감) |
| ➤ 재소결 밀도 변화 | 기존 UO ₂ 동일 |
| ➤ 주기길이 | 장전패턴 및 설계 최적화 필요 (현 주기길이 충족 가능) |
| ➤ Washout | 기존 UO ₂ 대비 향상 |
| ➤ 정상조건 변형률 | 기존 UO ₂ 대비 향상 (소결체 팽윤 저감) |

| 항목 | 성능 |
|------------------|--|
| ➤ 결정립 크기 | 약 27 μ m (상용 8 μ m) |
| ➤ U 함량 및 연소능 | 연료봉 최적 설계 필요 (안전여유도 향상으로 현재 수준 충족 가능) |
| ➤ FGR (정상&과도) | 기존 UO ₂ 대비 1/4 수준으로 저감 예상(30 GWd/mtU 이상) |
| ➤ Cs 포집 기능 | 기존 UO ₂ 대비 향상 예상 |
| ➤ LOCA 시 안전 성능 | 열전도도 향상 및 온도 저감으로 PCT 약 10-20% 저감 예상 |
| ➤ 수증기 산화 거동 | 소결체 구조건전성 유지 |
| ➤ 상용 공정성 | 기존 상용 공정 및 장비 활용 가능 (공정변수 최적화 및 qualification 필요) |
| ➤ 과도상태 소결체 변형 거동 | 과도상태 안전여유도 향상 (부하추종운전 수용가능) |

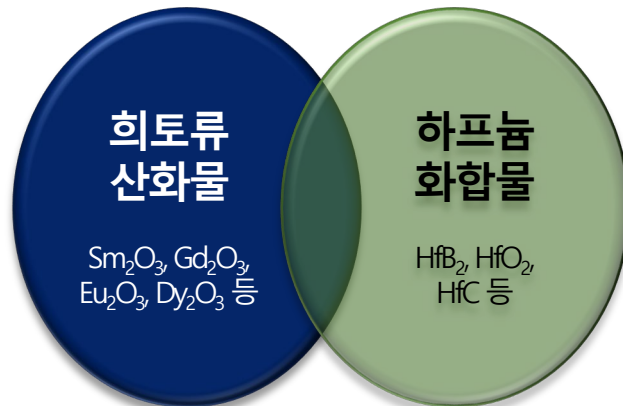
ATF 제어봉 중성자흡수체 개발 착수 (KAERI/KNF)

기존 기술

- 기존 제어봉용 중성자 흡수체(B_4C)와 피복재(Inconel-625) 공용반응 (약 $1080^{\circ}C$ 부터)
- 산소/수증기 분위기에서 산화반응(약 $700^{\circ}C$ 부터) 및 수소 발생
- 사고 시 제어봉 손상이 핵연료보다 선행하여 안전강화 핵연료 효과 감소
- 용융사고 시 재임계(recriticality) 상황 가능성



개발 기술



* 기존 중성자 흡수체 B_4C 대체 소재

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

제어봉용
신소재
중성자흡수체
고유핵심기술



IV. 향후 계획

사고저항성 피복관 기술 개발

▶ 코팅 피복관 제조기술 개발

- 4m 급 코팅 최종 공정기술 도출 및 최적화
- 코팅 피복관 후속 제조공정 기술 개발 (용접, 연마, 초음파, 집합체 조립 등)

▶ 코팅 피복관 검사기술 개발 (품질검사/소내검사)

- 국내외 협력을 통한 검사기술 개발 추진체계 수립 및 착수
- KNF TSA UT 검사기술 적용성 평가 중

사고저항성 소결체 기술 개발

▶ 소결체 제조 공정기술 최적화

- 생산 공정기술 및 스크랩 처리 공정 최적화
- 국내 고유 MPS 저감 형상 적용

▶ 소결체 상용 공정 기술 고도화

- 신규 평가 기술 개발 및 시방서 개발
- 톤 급 단위 규모의 시작품 제조 및 PQT 진행

연구로/상용로 연소 시험

▶ 연구로 연소시험 및 조사후시험 추진

- 해외 연구로 운영기관과 연소시험 상세 사양서 및 계약 협의 중
- 사고저항성 핵연료 시제품 제조 및 연구로연소시험 착수 ('22~)

▶ 상용로 연소시험 및 조사후시험 추진

- 연구로 연소시험 1주기 완료 후, LTR 안전성평가보고서 제출 ('24)

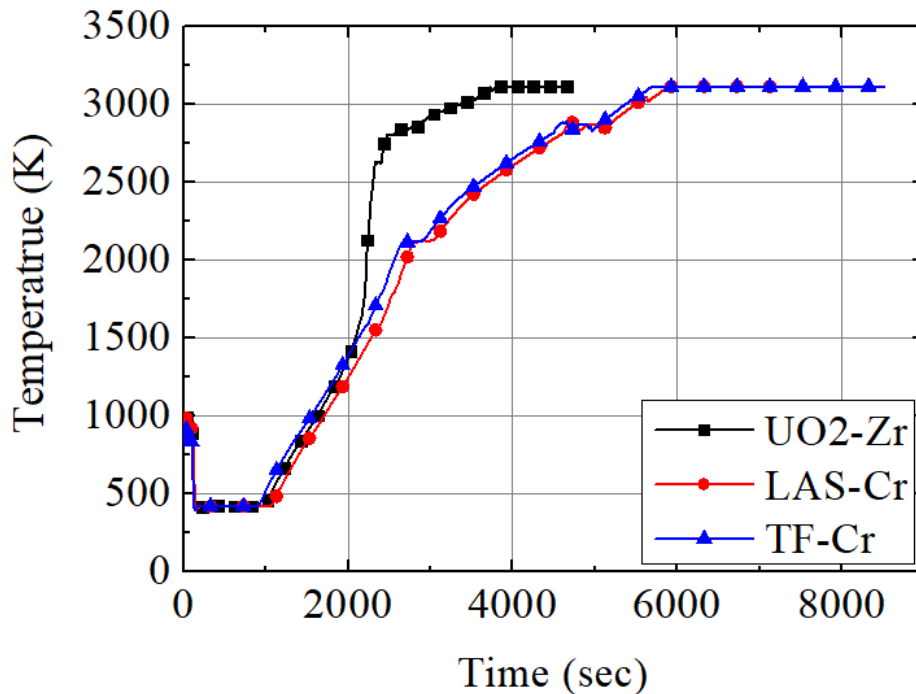
감사합니다



ATF 적용 중대사고 해석 (Preliminary)

- Safety analysis for candidate ATFs in LBLOCA and SBO without active cooling system (MAAP)
- The rate of temperature rise and hydrogen generation could be remarkably reduced by application of ATFs

Max. Core Temperature



H₂ generation

