

KNF-  
FUEL-07

# 사고저항성 연료 (Accident-Tolerant Fuel)

소재개발부 장훈  
T. 042-869-1151 E. janghoon@knfc.co.kr

사고저항성 연료는 원전 사고조건인 고온 수증기 환경에서 피복관-수증기와의 급속한 산화반응에 의한 대량의 수소발생 및 수소폭발 가능성을 획기적으로 낮추고, 핵분열 가스 방출량을 감소시킬 수 있어 원전 사고 발생시 원자력연료의 건전성을 장시간 유지함으로써 사고 대처시간을 확보할 수 있는 원자력연료 기술임.

## 기술 내용

### ● 배경 및 필요성

- 사고저항성 연료(Accident Tolerant Fuel, ATF)는 현재 Zr-UO<sub>2</sub>(지르코늄 피복관-산화 우라늄 소결체) 연료 대비 원전의 능동적인 냉각기능이 손실된 상태에서 상대적으로 연료의 건전성을 장시간 동안 유지할 수 있는 원자력연료(중대사고시 사고전개 지연, 사고 대처시간 확보)로 정의됨.
- 사고저항성 연료는 원전 사고 시, 수소폭발, 방사능 누출 및 노심 용융 등 중대사고의 확장을 방지 또는 지연시킬 수 있는 기술로 원전의 안전성 향상을 가능하게 하고 부하 추종 및 고연소장주기 원전 운영을 통해 원전의 경제성을 제고시킬 수 있는 기술로써 후쿠시마 원전 사고 이후, 원전의 안전성 향상을 위해 미국, 프랑스, 일본, 러시아 등 대부분의 주요 원전 선진국에서 국가정책으로 사고저항성 연료 개발이 진행되고 있음.
- 특히 2022년 EU-Taxonomy 법안이 통과되어 사고 저항성 연료가 적용된 원전이 그린에너지에 포함되었으며, 이를 만족하기 위한 사고저항성 연료 상용화를 위해 2029년 인허가보고서 제출을 목표로 기술 개발을 수행 중임.

### ● 기술 구성

- 사고저항성 연료 피복관
  - 지르코늄 기반 HANA-6 피복관 외면에 고온산화 성능이 우수한 Cr을 수 마이크론 두께로 코팅한 피복관

- 아크이온플레이팅(Arc Ion Plating) 방법을 사용한 코팅 적용으로 치밀한 코팅층을 통해 부식 및 수소취하 저항성 및 사고시 산화억제 성능이 향상된 피복관임.

### • 사고저항성 연료 소결체

- 핵분열물질 방출억제 및 소결체의 변형을 증가 목적으로 0.1 wt.% 미만의 LAS(La<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) 원소를 UO<sub>2</sub>에 첨가하여 기존 UO<sub>2</sub> 소결체의 물성을 유지하면서, FGR(Fission Gas Release, 핵분열가스방출) 및 PCI(Pellet Clad Interaction, 소결체-피복관간 상호반응) 저감 성능을 개선하여 원자력연료의 안전성능을 향상시키는 소결체임.



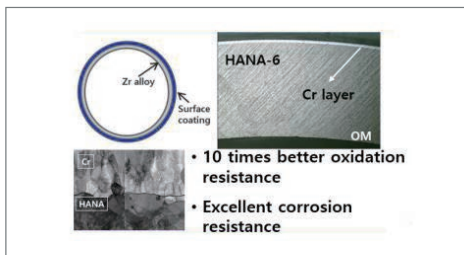
## 기술 우수성

### ● 사고저항성 연료 피복관 기술

- 아크이온플레이팅(Arc Ion Plating, AIP) 기술은 물리증착방식(Physical Vapor Deposition, PVD)의 일종으로 코팅 입자(플라즈마)를 Ar 가스 분위기에서 아크방전을 이용하여 발생시킨 후 전기장 속에서 이온입자를 가속하여 이를 모재에 증착하는 코팅 방법임. 아크방전은 일반적인 증기증착방법 및 스퍼터링 방법에 비해 저전압/고전류 조건에서 플라즈마를 대량으로 발생시키므로 코팅 속도(10 μm/h)가 매우 빨라서 대량제조에 용이하며 코팅 계면의 접합성이 우수함.
- 고온산화저항성 : 발전소 사고 시, 수소발생량에 직접적인 영향을 미치는 특성인자로 KNF 코팅 피복관은 기존 지르코늄 연료 피복관 대비 1/10 수준의 고온산화량을 나

타법. 이는 경쟁사의 코팅 피복관과 유사하거나 약간 우수한 특성을 보임.

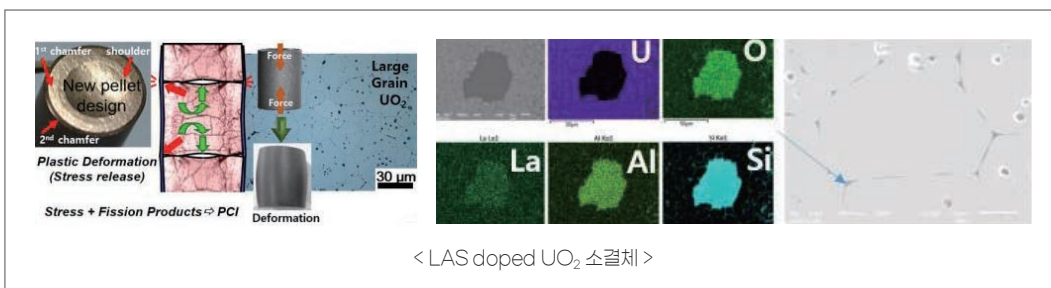
- 정상운전 부식 : 원전 정상운전에서 피복관의 부식량은 피복관의 건전성을 해치는 핵심특성으로 KNF 코팅 피복관은 기존 지르코늄 피복관의 부식량 대비 1/10로 매우 우수함
- 정상운전 크리프 변형률 : 원전 정상운전에서 피복관의 변형을 발생시키는 핵심특성으로 기존 지르코늄 피복관 대비 크리프 변형률이 대폭 감소할 것으로 기대됨.
- 고온파열 저항성 : 원전 사고조건에서 피복관의 파손 저항성을 나타내며 경쟁사의 코팅 피복관과 유사한 효과가 나타남.



< Cr 코팅 피복관 >

### ● 사고저항성 연료 소결체 기술

- $La_2O_3-Al_2O_3-SiO_2(LAS)$ 를 공용시킨 액상을 통해  $UO_2$ 의 입자크기를 증가시키고 입계 및 삼중점(junction)에 LAS를 위치시키는 기술임.
- $UO_2$ 에 고용도가 높은 Cr 기반 조성 대비 고용도가 낮고  $UO_2$  확산계수를 낮출 수 있는 Al, Si 등과 같은 조성을 통해  $UO_2$ 의 결정 균질성을 제고시킬 수 있어 핵분열 기체의 확산을 효과적으로 억제할 수 있음. 또한,  $UO_2$ 의 고온변형이 입계 미끄러짐에 의해 빠르게 나타남.
- $UO_2$  입자 크기 : 원전 정상운전에서 핵분열물질 방출을 억제할 수 있는 주요 기구로 작용하는 핵심특성으로 KNF 개발  $UO_2$ 는 경쟁사와 비교하여 작은 경향을 보이나, 경쟁사 대비  $UO_2$  입자의 핵분열물질 확산이 억제되는 물질로 보고된 첨가조성을 적용함으로써 동등 수준의 핵분열물질 방출 거동을 나타낼 것으로 판단됨.
- 고온소성변형률 : 원전 정상운전 또는 사고 시 소결체 팽윤에 의한 피복관 인가 응력 발생에 따른 파괴 위험 요소에 직접적인 영향을 미치는 특성 인자로 KNF 개발  $UO_2$ 는 경쟁사 대비 동등 이상의 특성을 보임.
- 안전강화 형상: 기존 단일 chamfer에서 이중 chamfer 형상을 적용함으로써 피복관과 소결체의 접촉 응력을 완화시킬 수 있음.



< LAS doped  $UO_2$  소결체 >

| 주요 특징     | Cr 코팅 피복관                             | LAS 첨가 소결체                        |
|-----------|---------------------------------------|-----------------------------------|
| 원전 양립성    | 현 상용 제조/설계기술 활용                       | 좌 동 (0.1 w% 극미량 첨가)               |
| 정상운전 성능   | 부식/수소흡수 저항성 10배 증가                    | 봉내압 1/3 감소                        |
| 사고조건 성능   | 고온산화 속도 (수소발생량) 10배 감소                | 연료봉 파열확률 1/3 감소, 수증기 산화 저항성 7배 향상 |
| 중대사고 대응시간 | 중대사고 추가 대응시간 50분 확보 (현 2시간 ⇒ 2시간 50분) |                                   |

< 사고저항성 연료의 주요 특징 >

### ● 기대효과

- 사고저항성 연료 적용을 통한 원전 안전성 및 경제성 향상
- 안전성 강화 원자력연료 상용화로 국내외 원전운영사 요건 충족 및 국민수용성 증진
- EU Green Taxonomy 사고저항성 연료 상용화 요건 충족으로 해외시장 진출
- 원전 안전성 향상으로 국내 안정적인 원자력에너지 공급 및 에너지 전환 정책 이행

### 기술 적용현황

- 사고저항성 연료용 피복관 개발 완료(~21.12)
  - Cr 코팅을 위한 4m 코팅장비 구축 완료(~20.12)
  - 1m 코팅피복관 제조공정 개발 및 노외시험 평가 완료(~21.12)
  - 4m 코팅 제조공정 최적화 및 상용제조기술 확보(~22.12)
- 사고저항성 연료용 소결체 개발 완료(~21.12)
  - KNF 고유 소결체(LAS doped  $UO_2$ ) 원천특허 획득('18.5)
  - LAS doped  $UO_2$  소결체 상용제조기술 확보(~22.12)

### 제공 가능 품목

- 다양한 타입의 원자력에 적용 할 수 있는 사고저항성 연료
- 코팅 피복관 제조기술 및 검사기술
- Doped  $UO_2$  소결체 제조기술 및 검사기술

### 기술완성도 (TRL)

- 파일럿 현장실증

### 사업 방향

기술 이전

라이선싱

공동 연구

용역 수행

기타