

---

# 원전운영자 관점에서의 사고저항성연료 개발 방향 제언

[ 한국수력원자력 ]

---

2022.05.18(수)

노심관리부장 이 종 선



# 목 차

I. 개발 배경

II. 개발 현황

III. 규제동향

IV. 개발 일정

V. 제안 사항

# I. 개발 배경

## 1. 미국

- 상원의회: 사고저항성핵연료(ATF)\* 개발 권고('12)
- DOE-산업체-규제기관 협력체제로 R&D 진행

## 2. 국내

- 제5차 원자력진흥종합계획('17) : ATF 개발 선정
- ATF 개발 유관기관 협의회 발족.로드맵 수립('18)



Fukushima Daiichi Accident  
(‘11.03)

\* ATF:  $\text{UO}_2\text{-Zr}$  핵연료 대비 능동적인 냉각기능이 손실된 상태에서 상대적으로 핵연료의 건전성을 장시간 동안 유지할 수 있는 핵연료 (중대사고: 사고전개 지연, Coping Time 확보)

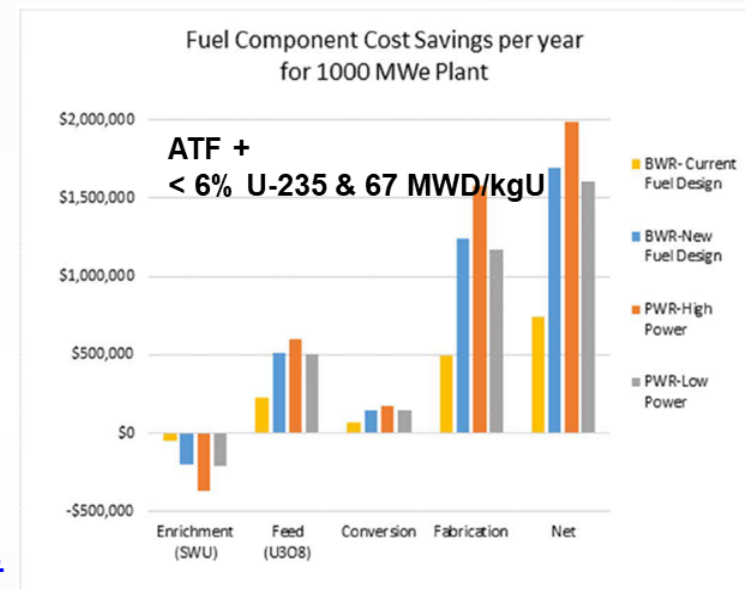
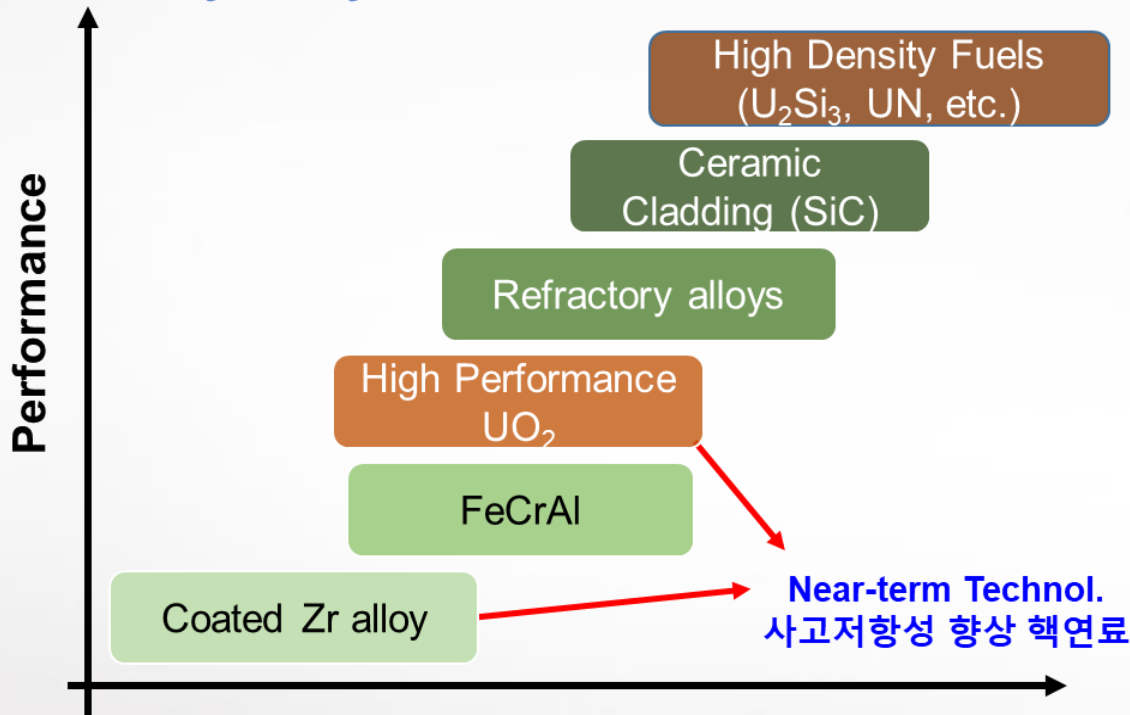


## II. 개발 현황

### 1. 개발 동향

- 단기: Cr 코팅 피복관 및 성능개선 UO<sub>2</sub> 소결체 상용화 기술 개발
- 중장기: FeCrAl 또는 SiC 복합체 피복관 및 금속 고밀도 소결체 또는 금속-세라믹 하이브리드 소결체가 후보소재로 개발 중

Quantify Safety/Economic Benefits vs. Time to Development



PWR(high-power) : 2백만불/년

EPRI #3002018373, 2020

## II. 개발 현황

### 2. 해외 핵연료공급사

#### ■ Framatome 개발 현황

- '19년부터 상용로연소시험 착수 (LTR/LTA)
- 대량 코팅장비 2대 개발 및 생산시설 설계 중
- PWR용 고성능  $UO_2$  소결체 인허가 심사 중

#### ■ WEC 개발 현황

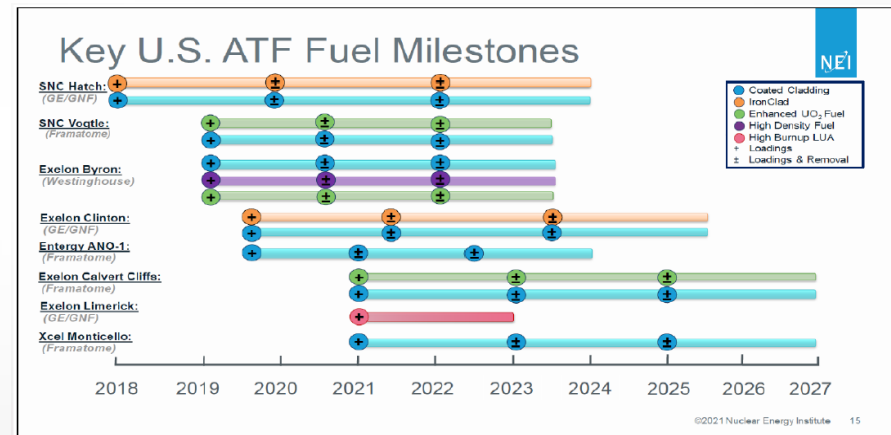
- '19년부터 상용로연소시험 착수 (LTR)
- Cold-spray 코팅 생산량 Scale-up 및 PVD 코팅 기술 개발 중
- 6% 이상 농축도 및 ATF LTA 계획
- PWR용 고성능  $UO_2$  소결체 인허가 심사 중

#### ■ Framatome/WEC 상용적용 계획

- ATF : 2020년대 중반 상용적용 목표
- 인허가연소도/농축도 증가 : 2023년 운영변경 허가 신청

### 해외 상용로연소시험 현황

연소시험			피복관	소결체
Framatome	LTR	GOCHROM('19.06)	Cr 코팅 피복관	X
		ANO-1('19.11)		X
		Vogtle('19.03)		Cr-doped $UO_2$
	LTA	Calvert Cliffs('21.11)	Cr 코팅 피복관	Cr-doped $UO_2$
WEC	LTR	Byron 2('19.03)	Cr 코팅피복관	ADOPT/ $U_3Si_2$
		Doel 4('20.09)		X
	LTA	Planned('22~'23)	Cr 코팅피복관	ADOPT (6%-enriched)

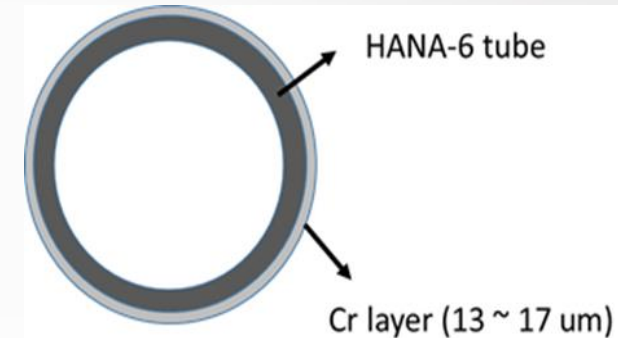


## II. 개발 현황

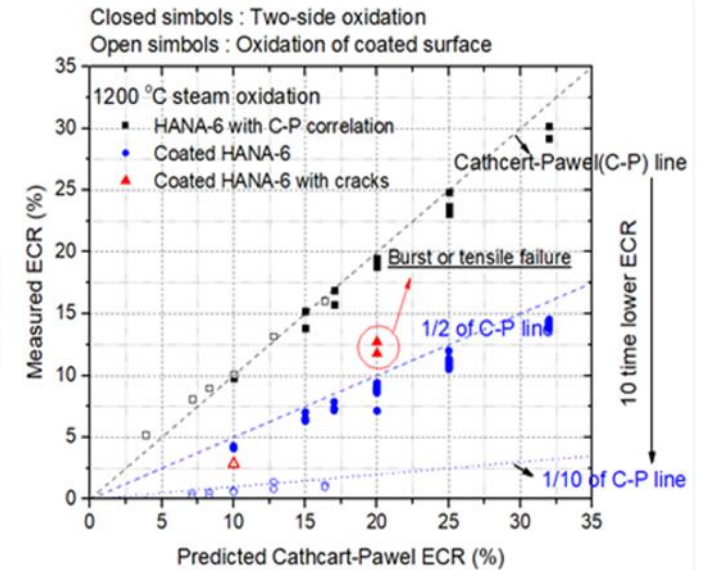
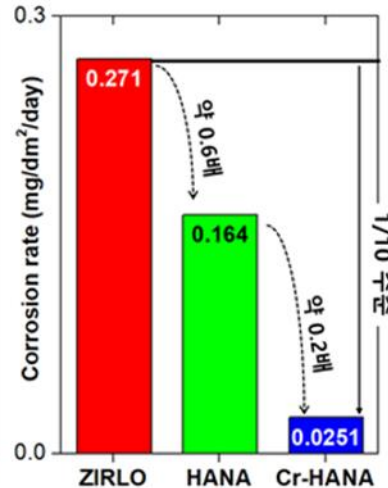
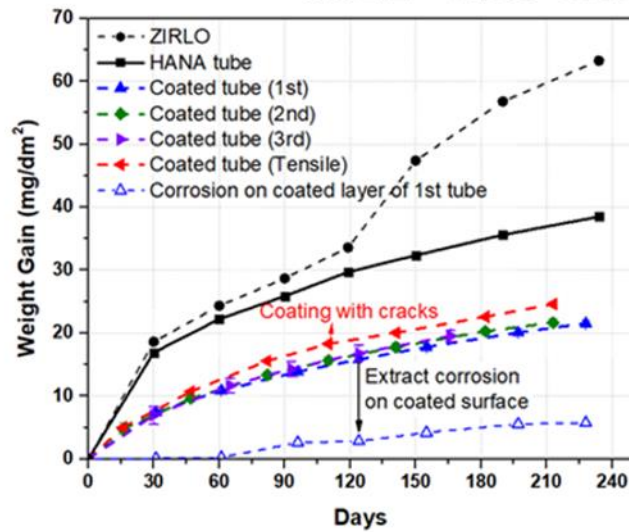
### 3. 국내(Team Korea)

#### ■ 피복관

- HANA 피복관 표면층에 Cr or CrAl 계열 합금 코팅
- 정상운전시 부식량 감소 및 사고시 수소 발생량 감소
- (특징) 현재의 피복관 생산 및 설계기술 적용 상용화 적용성이 우수하며, 수출 제약 없음



정상운전 조건(360 °C PWR) 부식시험 결과

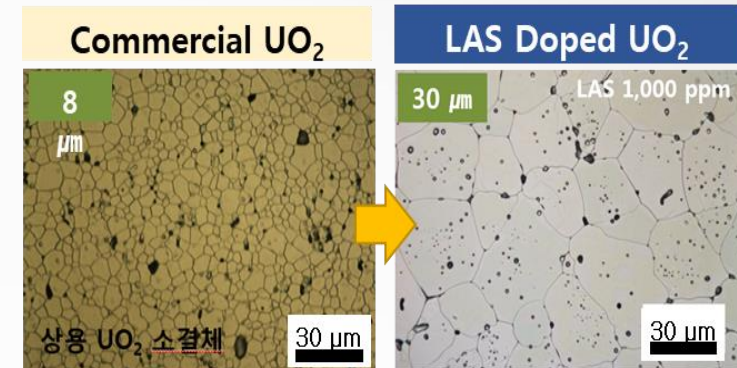


## II. 개발 현황

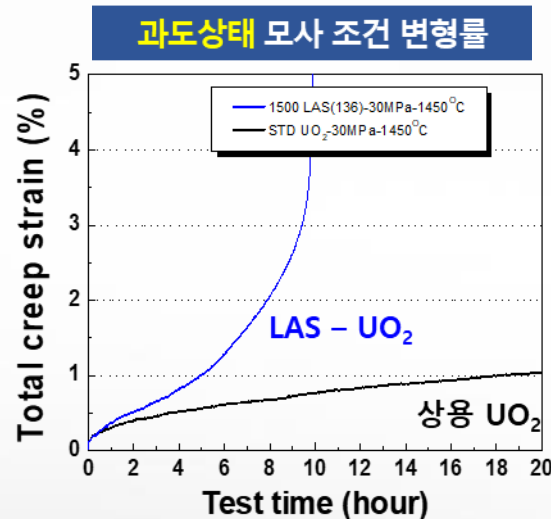
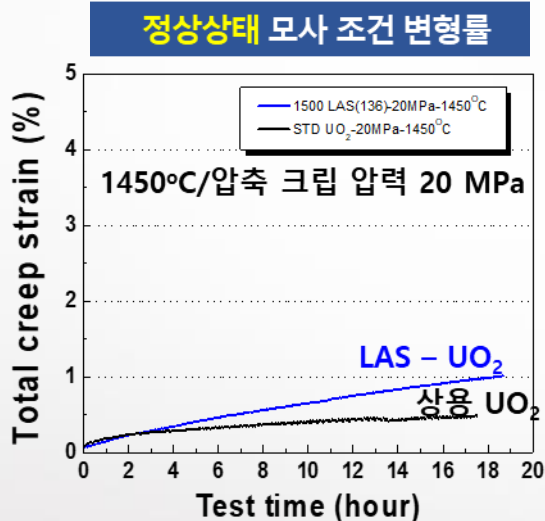
### 3. 국내(Team Korea)

#### ■ 소결체1

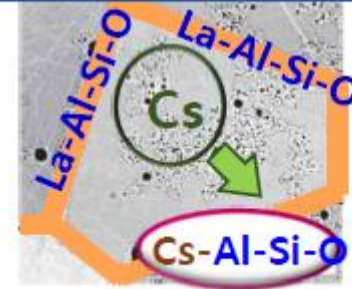
- LAS-doped  $\text{UO}_2$  소결체 ( $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ )
- 소량(1000 ppm)의 첨가제를 통해 고온변형 및 핵분열 가스 누출량 감소
- 열전도도와 열팽창율 등 기존 설계기준과 동일하여 인허가 영향 최소화



Grain size 3배 이상 향상



▪ Capturing material at GB  $\Rightarrow$  FP capturing & retention



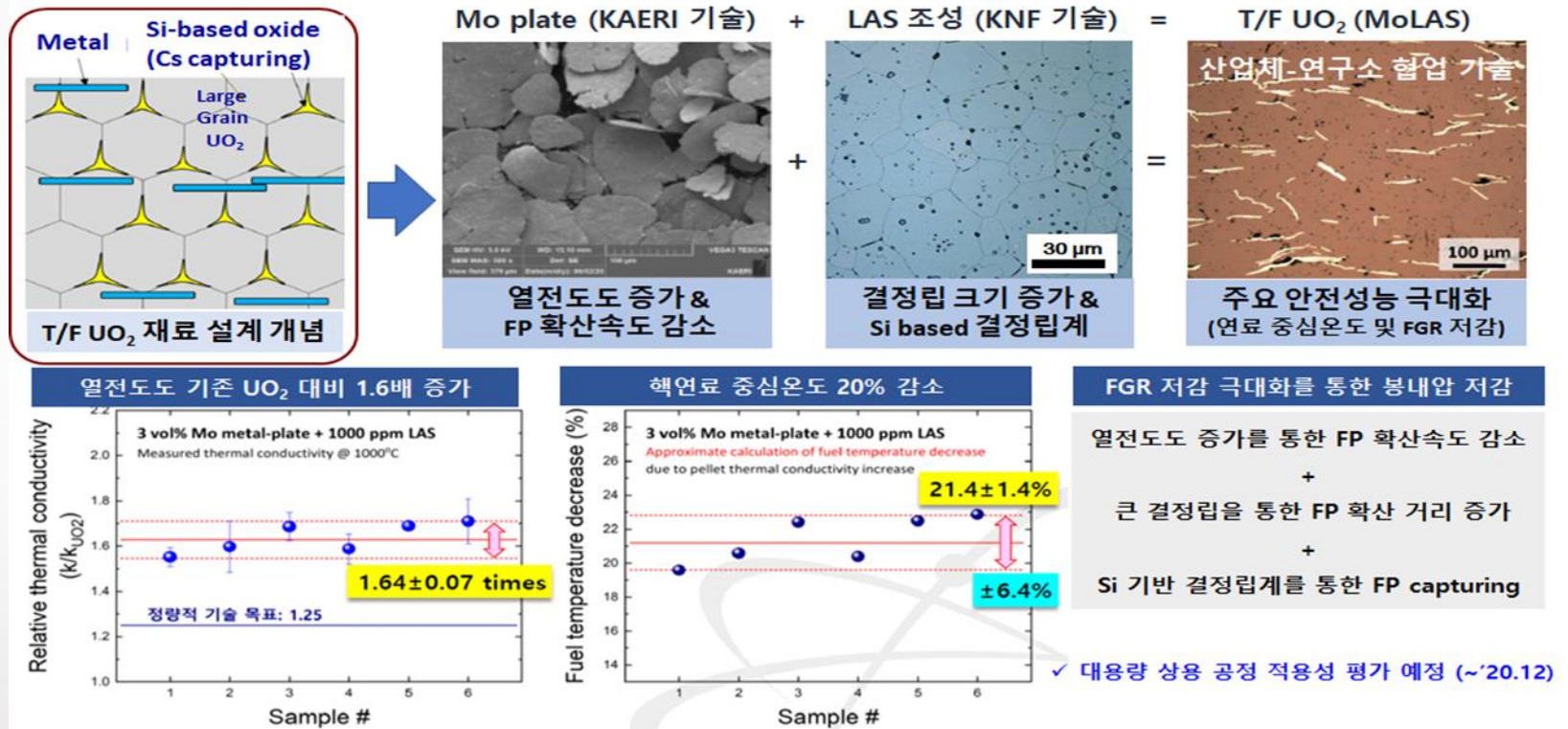


## II. 개발 현황

### 3. 국내(Team Korea)

#### ■ 소결체2

- LAS 화합물에 Mo 금속 Plate를 배열시켜 열전도도 향상
- 핵연료 중심온도 20% 감소 및 FP 방출 개선으로 안전여유도 증가





## II. 개발 현황

### 4. 주요 특징

주요 특징	Cr(CrAl) 코팅 피복관	LAS 첨가 소결체	MoLAS 첨가 소결체
원전양립성	현 상용제조 기술활용	좌 동 (0.1 w% 극미량 첨가)	좌 동 (3 vol% Mo Plate 첨가)
노 심 경제성	EFPD 6일 감소	EFPD 감소 없음	EFPD 30일 감소
정상운전 성 능	부식/수소흡수 저항성 10배 증가	봉내압 1/3감소	봉내압 3/4감소
사고조건 성 능	고온산화 속도 (수소발생량) 10배 감소	연료봉 파열확률 1/3 감소, 수증기 산화 저항성 7배 향상	핵연료 중심온도 20% 저감
중대사고 대응시간	중대사고 발생 전 대응시간 추가 50분 확보(2hr→2.9hr)		

\* AC/DC 전원상실 조건에서 냉각기능을 상실하여 핵연료 손상에 따른 방사능 물질의 외부 누출이 발생하는 시간을 평가한 결과

(EPRI Accident Tolerant Fuel Valuation : Safety and Economic Benefits(Rev.1), 3002015091, 2019)

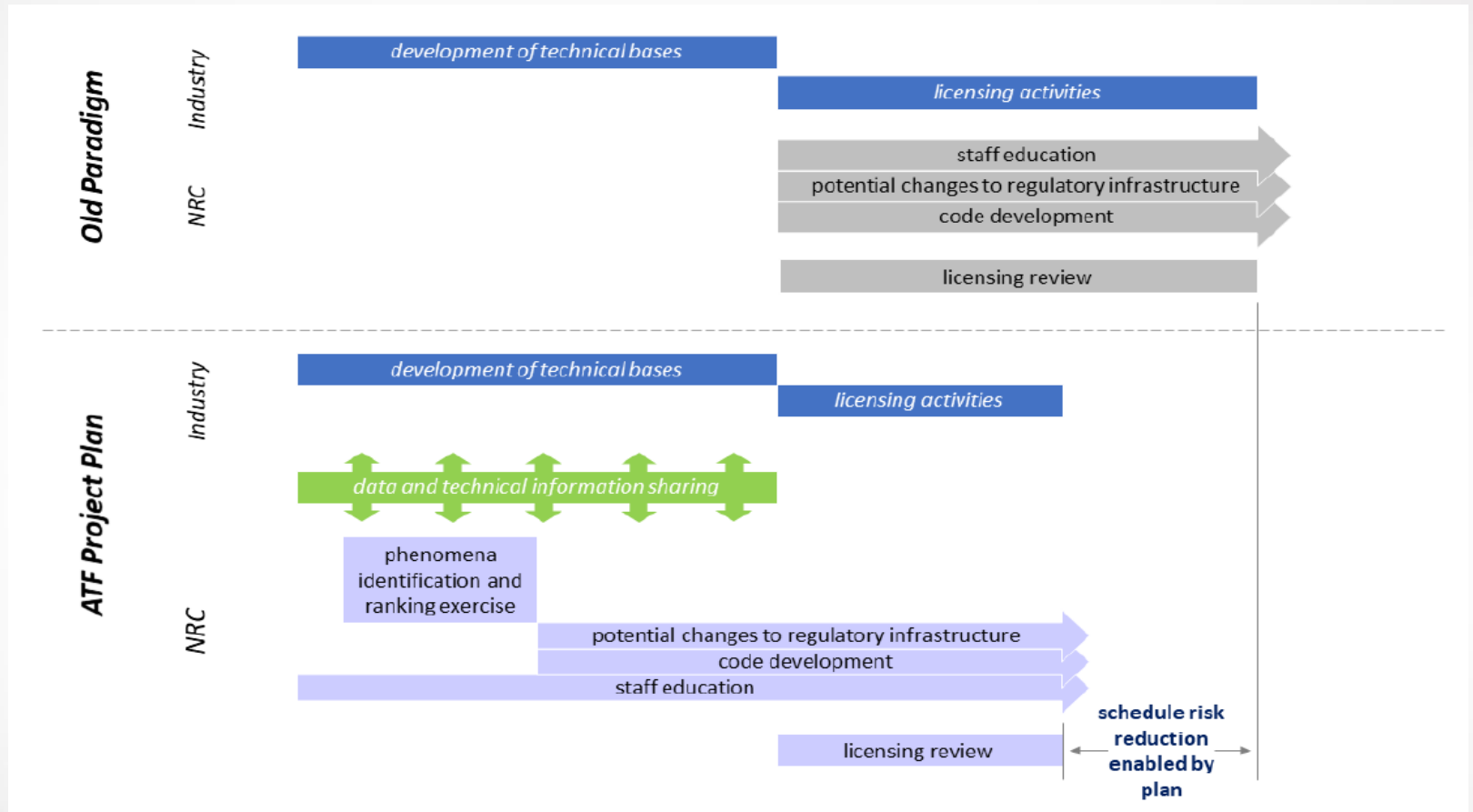
### III. 규제동향

#### 1. NRC 규제 인프라

- ATF Project Plan v.1.0('18.9): 산업계 ATF 상용화 대비 인허가 체계 발표
  - 연구개발 단계에서 산업체와 기술정보 및 시험결과 공유
    - 규제 인프라의 조기 변경 및 검증 코드 개발 등 사전 인프라 구축
    - 규제 현안 사전 제공으로 산업체의 ToR 완성도 및 심사 효율성 제고
- 사전심사지침서 발행
  - PIRT(Phenomena Identification and Ranking Table) 수행(PNNL-28437)
    - Cr 코팅 피복관에 대한 국내외 성능시험 자료 기반
  - Cr 코팅 피복관 사전심사지침서 발행(ATF-ISG-2020-01)
    - PNNL-28437, EPRI Cr 코팅 Gap 분석보고서 기반
  - FeCrAl 합금 피복관, 중대사고 등 분야에서 PIRT 수행 중
  - 고연소도 핵연료 파편화, 재배치 및 분산(FFRD) 이해 발행(RIL 2021-13)
    - 산업계의 인허가 연소도 증가 계획 반영

### III. 규제동향

#### 1. NRC 규제 인프라



### III. 규제동향

## 2. NRC-DOE 협력

- 원자력 안전 연구 협력 MOU 체결('14.5)
  - DOE: 산하 연구로(ATR, TREAT, HFIR, SATS) 및 ATF 과제 시험결과 제공
  - NRC: ATF 규제기술 및 독립검증 기술 개발 기반 확보
    - 인허가 신청 전 기술 현안 사전공지 및 검증된 기술개발
- MOU 협력안건
  - 연구로/상용로 연소시험 계획 단계부터 DOE 산하 수행기관과의 협력
  - NRC는 DOE 과제 시험데이터 사용권 확보(DOE ATF 서버 접속권한 확보)
  - NRC의 ATF 평가를 기반 설계제한치 및 주요 규제정책에 대한 정보를 DOE 산하 과제에 공유
  - 성능해석 코드 결과 비교 및 검증 연습, 모델링 비교 등 사전 검토

# III. 규제동향

## 3. NRC-산업체 협력

- NRC-EPRI MOU 체결('16.9)
  - EPRI 시험자료·기술자료 공유를 통한 중복 연구투자 방지 및 기간 단축
  - 협력범위:
    - 시험자료의 공유 및 시험자료 신뢰성·유효성 검토 협력
    - ATF 성능에 대한 독립적인 기술개발 및 검증·정보 공유
  - 협력활동
    - 분기별 공개 회의: 총 43회 개최, 일반대중에게 기술협력 상황 공개
    - 비공개 회의: 상세한 기술정보 논의 및 성능결과
  - 종합
    - 기술개발 단계에서 ToR 사전회의를 진행
    - 인허가 심사 시 발생하는 현안해소 및 인허가 심사 효율성 증대

## IV. 개발 일정

### 1. 고려사항

#### ■ K-Taxonomy

- '21.12 환경부 K-Taxonomy 초안 발표  
"원전을 논의에서 배제하는 게 아니라  
EU-Taxonomy를 참고로 최종안을 확정"
- '22. 4 환경부 대통령직 인수위원회 업무 보고  
'탄소중립·K-Taxonomy' 수정 보완 논의'

'탄소중립·K-Taxonomy' 수정 보완 논의...환경  
부 인수위 업무보고

중앙일보 | 입력 2022.03.25 18:23

정종훈 기자 구독

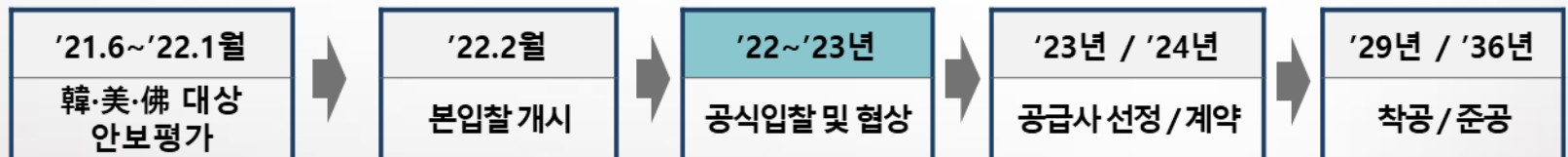


윤석열 대통령 당선인이 25일 취임직후를 위해 서울 종로구 독립문 인수위 업무실을 나가고 있다. (공화위 제공)

#### ■ 해외 원전수출

- '한미 원자력 동맹'을 통해 2030년까지 원전 10기 수출
- 체코 두코바니 신규원전

#### ❖ 체코 신규원전사업 예상 추진일정





## IV. 개발 일정

### ■ EU Taxonomy

EU 분류체계 중 원자력 관련 주요내용 및 국제협력관점에서의 시사점 **현안이슈** 13

- 2050년 EU 탄소중립 목표 달성을 위한 Green Taxonomy법 확정('22.2)
  - 신규 건설 및 계속운전: '25년부터 사고저항성연료 인허가 취득
  - 원전공통: '50년까지 고준위폐기물 처분시설 운영계획 보유
- EU 의회/이사회 검토 후 '23.1월 발효 예정

• 이와 같이 아직 유럽연합 의회의 결정이 남아있어 원자력의 분류체계 포함 여부는 유럽 의회 투표 결과까지 지켜봐야 할 것으로 보임.

■ 금번 유럽연합의 결정은 탄소중립을 달성이라는 목표달성에는 공동의 목표를 달성하는 과정에서 활용될 수단으로써 원자력과 천연가스를 활용할 것인지 여부와 그 활용 기간과 조건에 대한 견해 차이로 의사결정이 늦어졌다고 정리할 수 있음. 특히 이러한 견해차이를 통해 원자력의 고유한 이슈인 원전의 안전성과 방사성폐기물의 중장기적 대응에 대한 일부의 우려가 극적인 수준으로까지는 불식되지 않았음을 반증한다고 볼 수 있음.

• 유럽은 체르노빌 사고에 의한 영향을 직·간접적으로 경험하였을 뿐 아니라, 이후 후쿠시마 원전 사고로 인해 원전에서의 최악의 사고에 대한 깊은 우려가 잠재되어 있음.

• 안전성에 대한 불신이 증폭된 국가들도 존재함. 체르노빌과 후쿠시마 사고를 경험한 유럽인들의 원전의 “안전성”에 대한 우려를 획기적으로 불식시킬만한 사항이 반영되었다고 볼 수 있음.

• 금번 개정안에서도 첨단 원자력 기술 개발에 대해서도 원전의 안전성을 향상시킬 수 있는 최선의 기술을 활용하고, 향후 건설되거나 계속운전을 통해 가동될 원전에서 사고저항성 연료 사용을 조건으로 제시한 것은 이러한 맥락으로 볼 수 있음.

■ 금번에 발표된 안이 수정 없이 유럽의회를 통과한다면, 유럽에서 신규원전 도입을 추진하고자 하거나 계획중인 국가들을 대상으로 한 수주전은 2045년까지 건설허가 취득이라는 주요한 조건 때문에 더욱 치열해 질 것으로 보임.

• 분류체계 포함을 통해 금융조달 부문의 큰 장애물은 통과한 것으로 보임,

• 또한 2045년까지 건설허가 취득을 위한 원전사업자의 대응역량과 건설허가 규제인허가 관련 규제기관의 역량 또한 중요해질 것으로 보임.

**\* 세계원전시장 인사이트('22.2.18)**

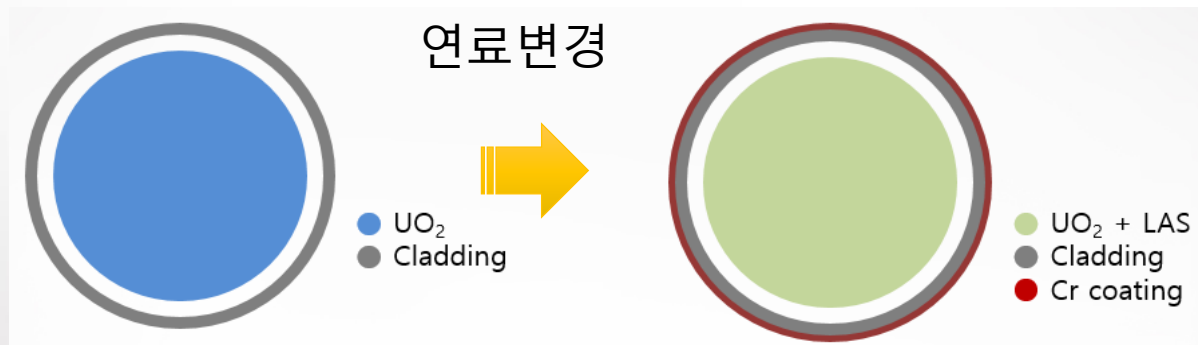
## IV. 개발 일정

### 2. 추진전략

- (개발목표) 해외사 ATF와 동등수준 이상의 피복관과 소결체 개발

주요 특징	WEC사	Framatome사	팀 Korea
피복관	Cr 코팅 (Cold Spray 기술)	Cr 코팅 (HiPIMS 기술)	Cr 코팅 (AIP 기술)
소결체	소량 $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$ 첨가	소량 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 첨가	소량 $\text{La}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 첨가
특 징	·고온산화 저항성 ·부하추종 운전 수용	·고온산화 저항성 ·부하추종 운전 수용	·고온산화 저항성 ·부하추종 운전 수용
비 고	'20 소결체 인허가 신청 (피복관 3년 신청 지연)	'21 소결체 인허가 신청 (피복관 3년 신청 지연)	'29 인허가 신청예정 ('24 상용로 연소시험예정)

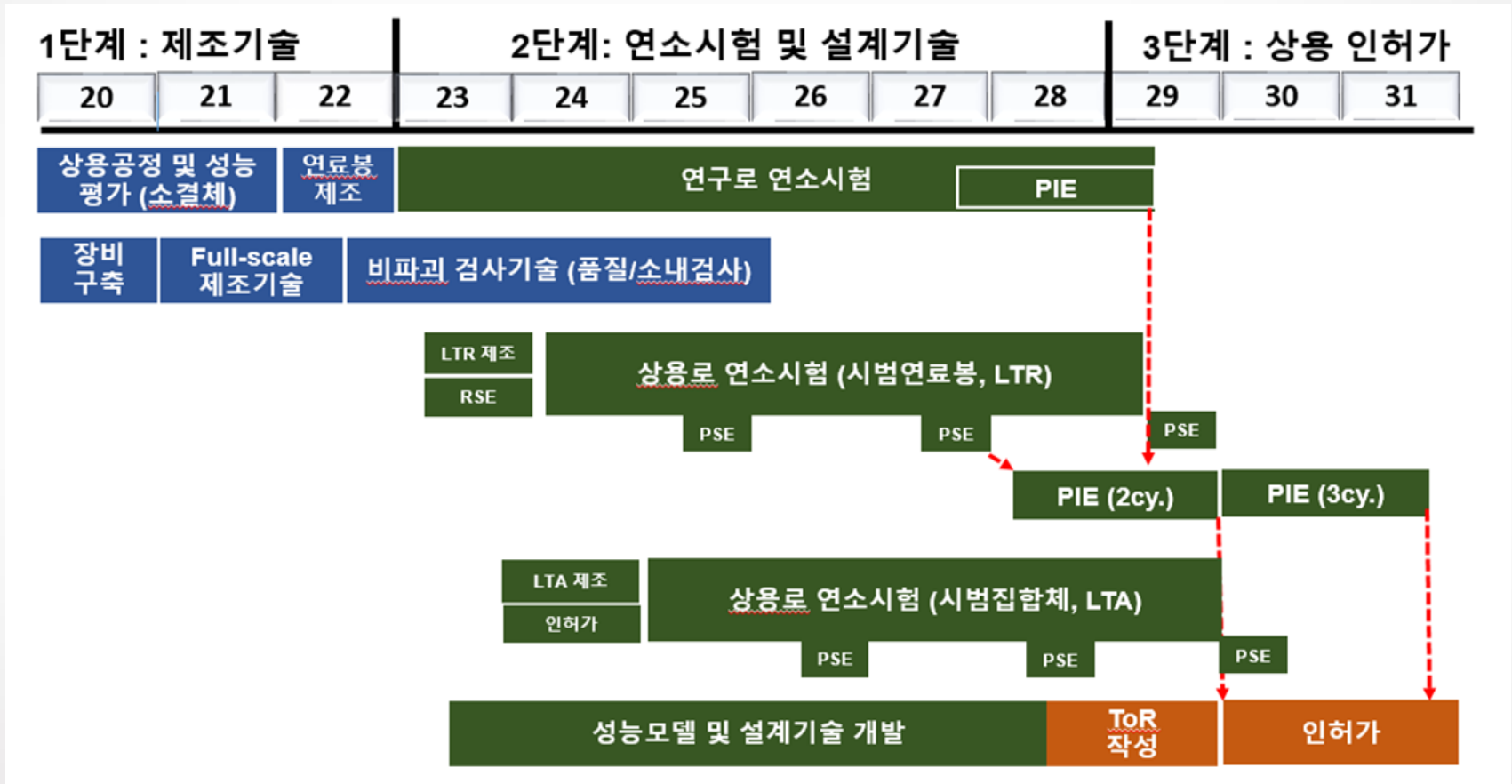
- (국내 기술적용) 현재 확보된 고유연료(HIPER16/HANA), 고유설계코드 기반



# IV. 개발 일정

## 2. 추진전략

- (조기 상용화) 해외사 현황, 원전수출 일정 고려



## V. 제안사항

### 1. 협업체계 구축

- ATF 개발 유관기관 간 유기적 협력관계 유지
  - (장기간 소요) 연료개발 부터 상용화까지 약10년 이상 소요되는 사업
  - (입체적 연계) 연구로 및 상용로 연소시험, 설계기술, 규제기술 개발 등
  - (진행사업 영향) 해외 원전수출, i-SMR 등 FSAR 반영 예정

### 2. 우선순위 발굴 및 협조 요청사항

- ATF 연구로 연소시험: Major Concerns으로 원자력계의 관심과 지원 필요
- 상용로 연소시험: 시험연료봉·집합체 노내성능시험관련 현행 요건 준용
  - 운영기술지침서 4.2.1(핵연료집합체), 5.5(교체노심 안전성평가 보고서)시험
- ATF 도입 Positive 결과와 사고해석 Benefits 활용 방안
- 주기비 향상위한 농축도·방출연소도 상향 노심기술 개발

---

# Q & A

---