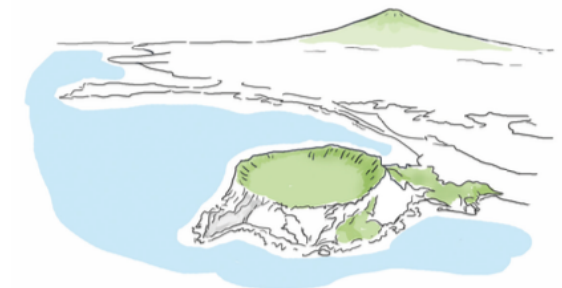


# ATF 관련 국내외 규제현황 및 현안



2022.05.18(수)  
제주 국제컨벤션센터

이 주 석  
한국원자력안전기술원  
[jslee2@kins.re.kr](mailto:jslee2@kins.re.kr)

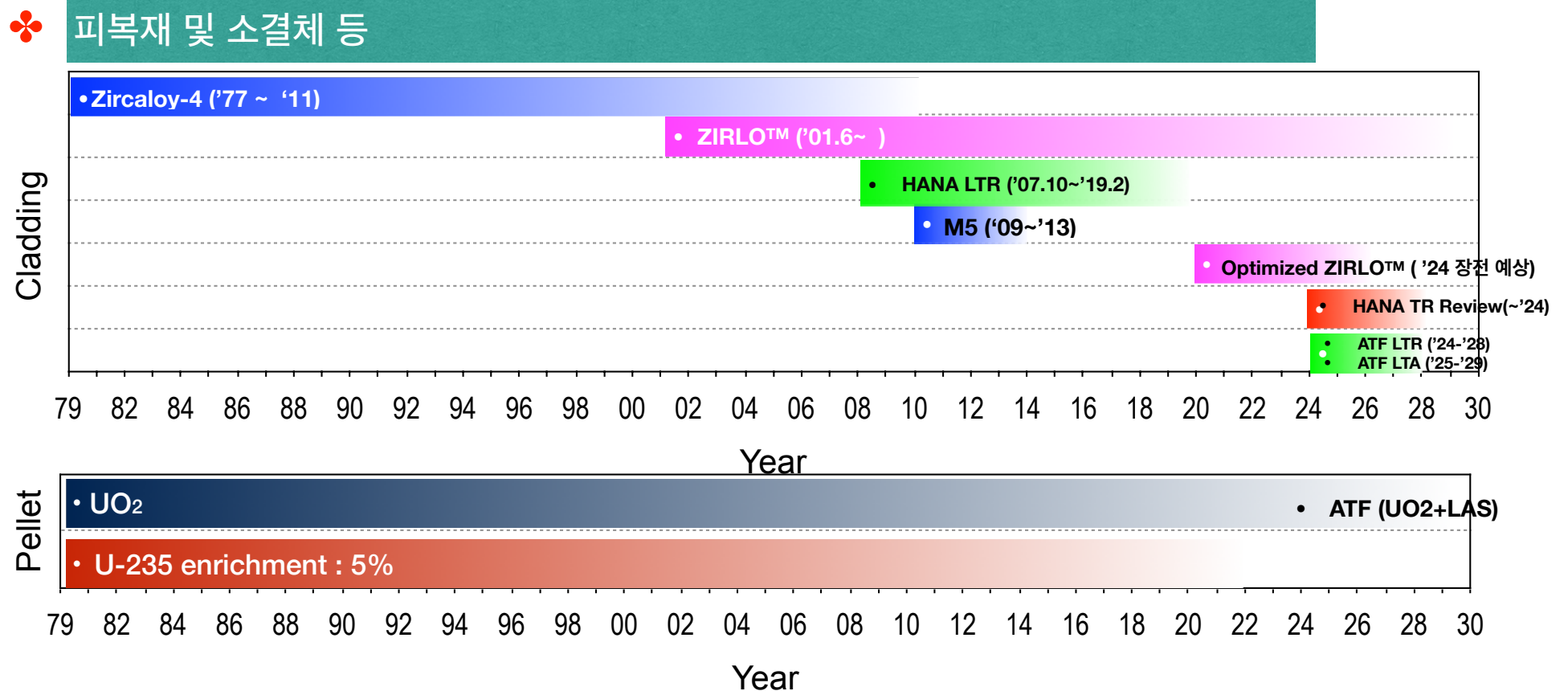


# 목 차

- I. 일반
- II. 국외 규제현황
- III. 국내 규제기술 현황 및 계획
- IV. 마무리

# I. 일반

## 1. 국내 핵연료 소재



- 인허가 연소도: 60MWd/kgU(최대봉평균)

# 1. 일반

## 2. 사고저항성핵연료(ATF)



### 정의

- ▶ 미국 : NEIMA, Section 107
  - Makes an existing commercial nuclear reactor ① **more resistant to a nuclear incident**
  - ② **Lowers the cost of electricity** over the licensed lifetime of an existing commercial nuclear reactor
- ▶ OECD/NEA : NEA No. 7317
  - The goal of ATF development is to identify alternative fuel system technologies to ① **further enhance the safety**, ② **competitiveness and economics** of commercial nuclear power.
- ▶ 국내 :
  - 한수원('22.2): 현재 Zr-UO<sub>2</sub> 기반 핵연료에 비해 냉각 기능이 상실된 상태에서 ① **중대사고 대응 시간을 추가 확보**할 수 있는 핵연료

# 1. 일반

## 3. 국내 사고저항성핵연료(ATF) 개발



### 핵연료 개발

#### ▶ 기술 현황

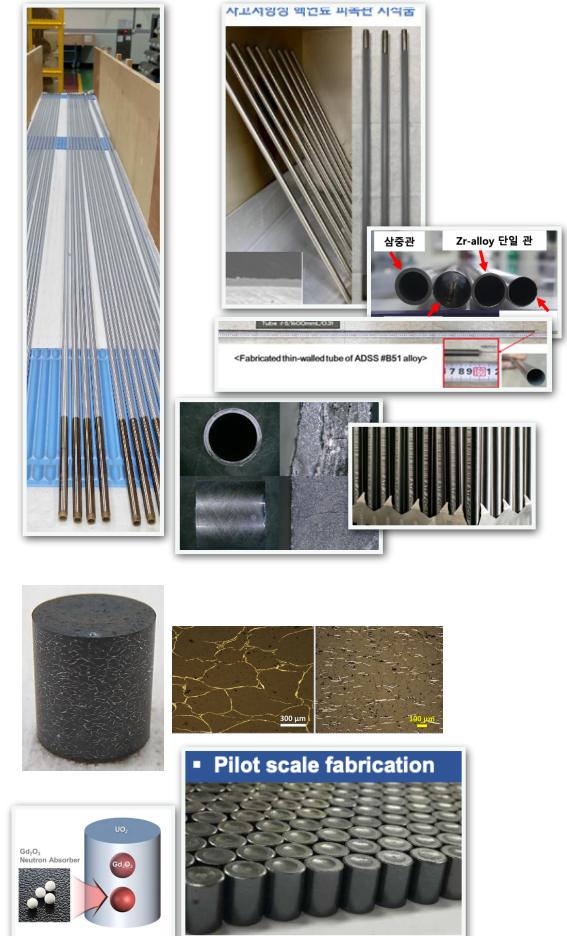
- ▶ Pilot/Lab Scale ATF 핵연료 생산
- ▶ 노외성능시험/제한적인 연구로 조사시험
- ▶ 상용로 선행시험연료장전('24) 준비
- ▶ 선진 기술사 대비 5~10년 기술 격차

#### ▶ 피복재 종류

- ▶ Zr 합금 기반 : Cr coating(KNF), CrAl coating(KAERI), Swaging(가천대)
- ▶ 신소재 : FeCrAl(KAERI/PNU), ADSS(KAIST), SiC/SiC Composite(KAERI)

#### ▶ 소결체 종류

- ▶ LAS doped (KNF)
- ▶ Micro cell/Metal Plate (KAERI)
- ▶ Burnable Absorber(KAIST/KAERI)

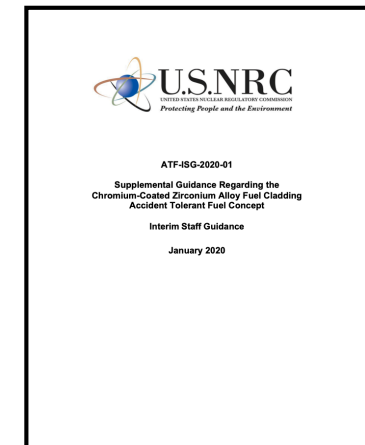
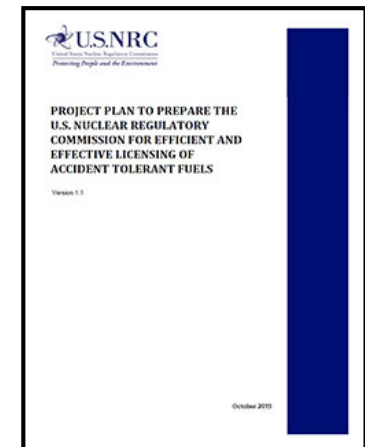


# II. 국외 규제현황

## 1. 미국 USNRC

### ❖ USNRC 규제계획 및 지침

- ▶ ATF Project Plan
  - ▶ PROJECT PLAN TO PREPARE THE U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION FOR EFFICIENT AND EFFECTIVE LICENSING OF ACCIDENT TOLERANT FUELS
  - ▶ 1.0: September, 2018
  - ▶ 1.1: October, 2019
    - ▶ Appendix A, "Fuel Burnup and Enrichment Extension Preparation Strategy"
  - ▶ 1.2: September, 2021
    - ▶ Changes to streamline the document and better align with the industry's increased emphasis on higher burnup and increased enrichment fuels.
- ▶ Interim Staff Guidance: Cr-coated Cladding (January 2020)
  - ▶ Supplemental Guidance Regarding the Chromium-Coated Zirconium Alloy Fuel Cladding Accident Tolerant Fuel Concept



## II. 국외 규제현황

### 1. 미국 USNRC



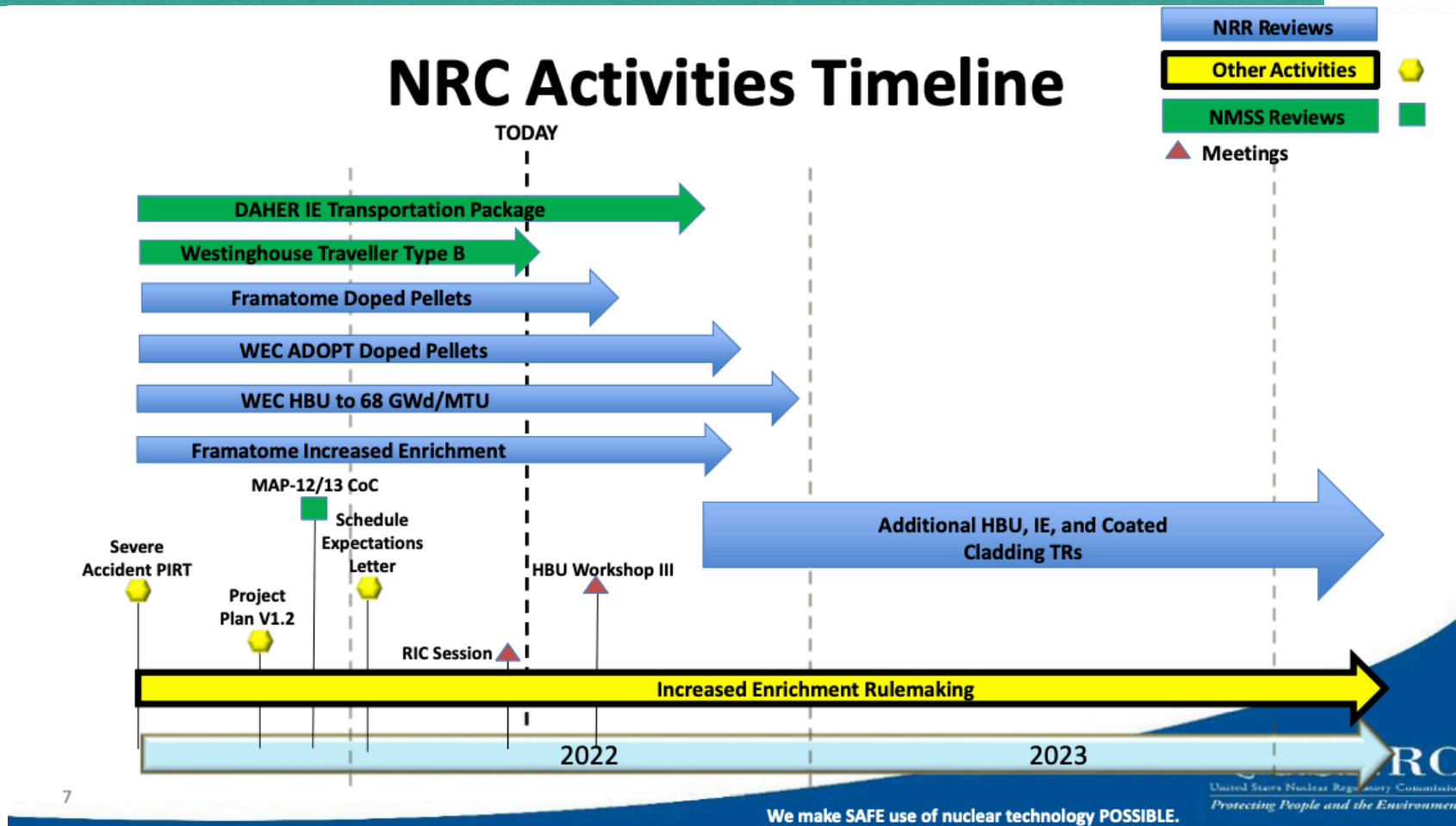
#### USNRC 규제활동

- Increased Enrichment & Higher Burnup
  - Letter to NEI:
    - Preparing for Efficient and Effective Licensing of Accident Tolerant Fuel with Higher Enrichment (August 26, 2019)
    - Scheduling Expectations Regarding the Licensing of Accident Tolerant, Increased Enrichment and Higher Burnup Fuels (January 11, 2022)
  - HALEU Rulemaking: ~3.5 years to complete
    - NRC commissioners approve rulemaking to develop HALEU licensing process (March 16, 2022),
    - 10CFR50.68(criticality) and 71.55(package) (5% limit)

## II. 국외 규제현황

### 1. 미국 USNRC

#### ❖ USNRC 규제활동



NRC-EPRI-DOE ATF WS (March 28, 2022)



# II. 국외 규제현황

## 2. 시범연료장전 (LTA)

### ❖ 미국

- ▶ 피복재 2종 및 소결체 2종 (Fuel Vendor 3사)
- ▶ Coated cladding
  - ▶ Hatch (GNF, Spring 2018), Byron (Westinghouse, Spring 2019),
  - ▶ Vogtle (Framatome, Spring 2019), ANO (Framatome, Fall 2019),
  - ▶ Clinton(GNF, Fall 2019)
- ▶ FeCrAl cladding
  - ▶ Hatch (GNF, Spring 2019), Clinton (GNF, Fall 2019)
- ▶ Doped Pellet
  - ▶ Byron (Westinghouse, Spring 2019), Voltle (Framatome, Spring 2019),
  - ▶ ANO (Framatome, Fall 2019)
- ▶ Uranium Silicide Pellet
  - ▶ Byron (Westinghouse, Spring 2019)

# II. 국외 규제현황

## 3. 독립규제검증



### USNRC ATF 전산코드체계

- ▶ 핵연료설계
  - ▶ **FAST**: currently includes properties for some ATF concepts – included Cr-coated cladding and FeCrAl cladding
- ▶ 열수력설계
  - ▶ **TRACE**: perform best-estimate analyses of LOCAs, operational transients, and other accident scenarios, coupled with FAST
- ▶ 핵설계
  - ▶ **SCALE**: SCALE 6.3 will have additional ATF compositions and new dopant properties
  - ▶ **PARCS**: calculate the reactor power as a function of time and position in the core
- ▶ 중대사고 및 선원항
  - ▶ **MELCORE**: include estimation of severe accident source terms and their sensitivities and uncertainties. FeCrAl and Cr-Coated cladding have recently been incorporated in MELCOR

# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 1. 기술검토



### 검토방향 및 분야

#### ▶ 검토방향

- 일반적인 신재료 핵연료 인허가와 동일/유사 수준의 절차 및 기술기준 적용
- 시범연료봉장전안전성, 특정기술주제보고서(소재, 안전성평가), 천이노심평가 등

#### ▶ 검토분야: 안전성분석보고서 등

- 제4.2절 핵연료계통 설계
- 제4.3절 핵설계
- 제4.4절 열수력 설계
- 제15장 사고해석
- 사고관리계획서

#### ▶ 검토방법: 독립규제검증

- 규제검증 전산코드체계
- 규제검증방법론 활용

# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 2. 규제요건



### 검토요건

#### ▶ 원자로시설등의 기술기준에 관한 규칙

- 제13조(외적 요인에 관한 설계기준), 제15조(환경영향 등에 관한 설계기준)
- 제17조(원자로의 설계), 제28조(반응도 제어계통)
- 제30조(비상노심냉각장치), 제35조(원자로의 노심 등) 등

#### ▶ 원자력안전위원회 고시

- 제2017-23호(원자로.24), '가압경수로의 비상노심냉각계통의 성능에 관한 기준'

#### ▶ 경수로형 원전 안전심사지침 (KINS/GE N001)

- 제4.2절 핵연료계통 설계
- 부록 4.2-1 외력에 대한 핵연료집합체 구조응답 평가
- 부록 4.2-2 혼합노심 안전성 평가지침
- 부록 4.2-3 금속핵연료봉 파손 및 냉각능력에 대한 규제입장
- 부록 4.2-x (가칭) '코팅 지르코늄합금 피복관에 대한 규제입장' 신설

# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 2. 규제요건



### 선행시험집합체(LTA) 장전

#### ▶ 시험장전 근거:

- 운영기술지침서(TS), 4.2.1 핵연료집합체
  - “표본시험을 완료하지 않은 선행 시험 핵연료집합체는 1) 한계 노심영역이 아닌 곳에 2) 한정된 수량을 장전할 수 있다.”
- 배경:
  - 인허가를 위해 상용로 연소성능을 검증하고 노내성능 자료를 취득하기 위함
    - 전산코드 모델 개발 등
  - 기존의 안전해석에 포괄되는 범위에서 시험핵연료의 장전이 가능
    - 안전해석에 포괄되지 않는 경우 운영변경허가 필요
  - 시험연료의 노내 성능에 대한 자료가 제한적이므로 기존의 인허가 된 방법론 보다 보수적인 평가가 필요

# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 3. 심사지침 개선



### 검토요건

#### ▶ (가칭) ‘코팅 지르코늄합금 피복관에 대한 규제입장’ 기술 내용(안)

1. 정상운전 및 예상운전과도 연료손상허용한계(SAFDL) 적용성 검토
2. 노심냉각성능 허용기준 적용성 검토: 예) ECCS 허용기준
3. 신규 손상기구 반영 (예: NRC ATF-ISG-2020-01)
  - (1) 코팅 균열
  - (2) 코팅층 박리(Delamination)
  - (3) Cr-Zr 확산 : CrZr intermetallic 형성
  - (4) Cr 층 조사효과
  - (5) Subsurface 손상
  - (6) 잔류응력
  - (7) Galvanic 부식
  - (8) 결함
  - (9) 공융(Eutectic) 형성 등

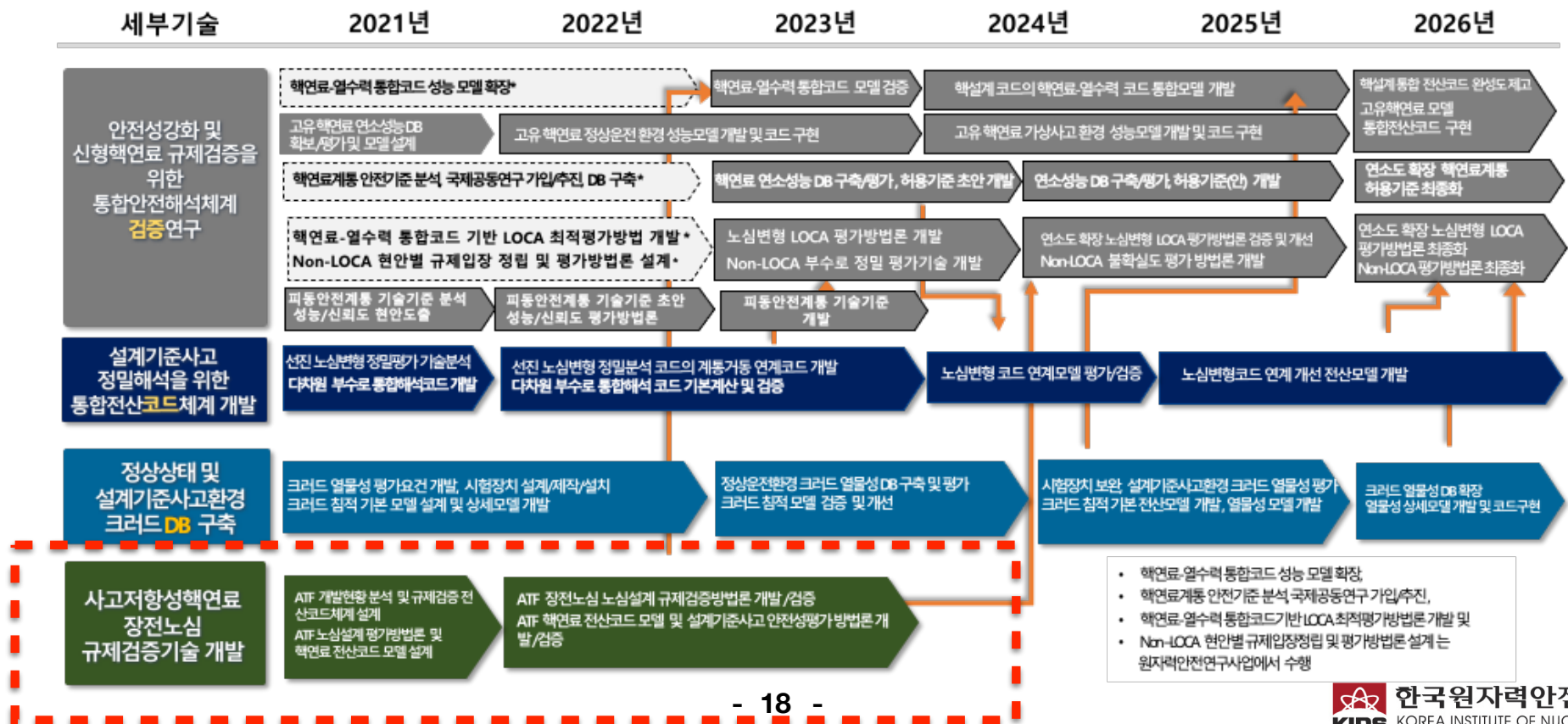
# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 4. 독립규제검증체계 개발

### ❖ 전산코드체계

원자력안전연구사업/원자력 안전규제 검증기술 고도화 사업

1. 연소도 효과를 고려한 설계기준사고 규제검증기술 개발 ('18-'22)
2. 안전성강화 및 신형핵연료 규제검증을 위한 통합안전해석체계 개발('21-'26)



# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 4. 독립규제검증체계 개발



### 전산코드체계

#### 1) 핵연료설계

- **FRAPCON**: Cr 코팅 피복재 성능평가 기능 개발 중

#### 2) 열수력 및 사고해석

- **FAMILY (혹은 MARS-KS)**: FRAPCON과 연계한 Cr 코팅 피복재 핵연료의 사고해석이 가능하도록 개발 예정

#### 3) 핵설계

- **SCALE(혹은 Serpent)/PARCS**: Cr 코팅 반영 핵단면적 생산, 입력모델 개발 중

#### 4) 중대사고

- **MELCORE**: Cr 코팅 핵연료 평가를 위한 기능 확인/개선 필요



# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

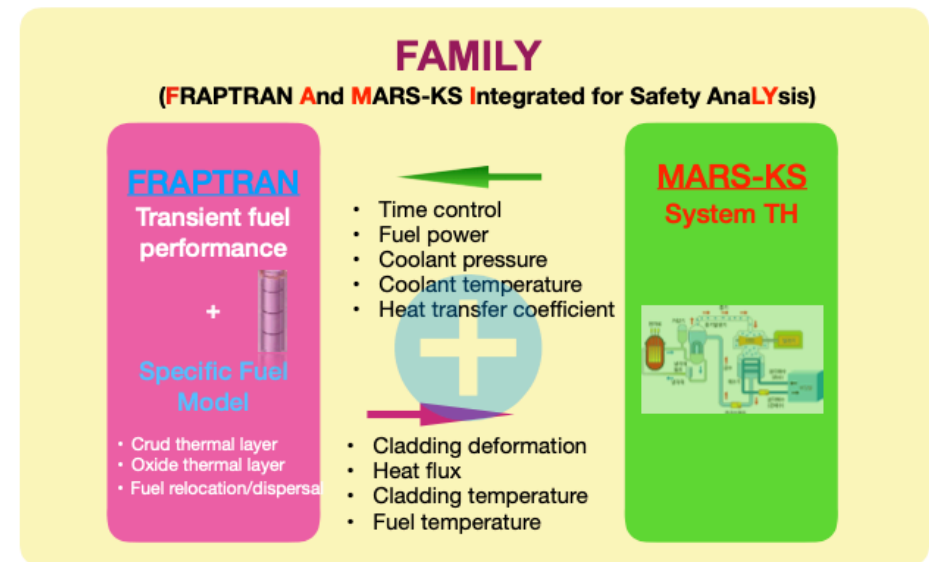
## 4. 독립규제검증체계 개발

### ❖ 사고해석 전산코드 개선

#### ▶ FAMILY 전산코드 개선 분야(안)

- ▶ Material Property
- ▶ Thermal/Mechanical Model
  - ▶ Multi Layer or Composite
  - ▶ High temperature creep, etc.
- ▶ Oxidation Model
  - ▶ High temp oxidation
  - ▶ ZrCr Inter diffusion, etc.
- ▶ Cladding Burst model
  - ▶ Burst strain/stress

핵연료/열수력 통합전산코드 FAMILY



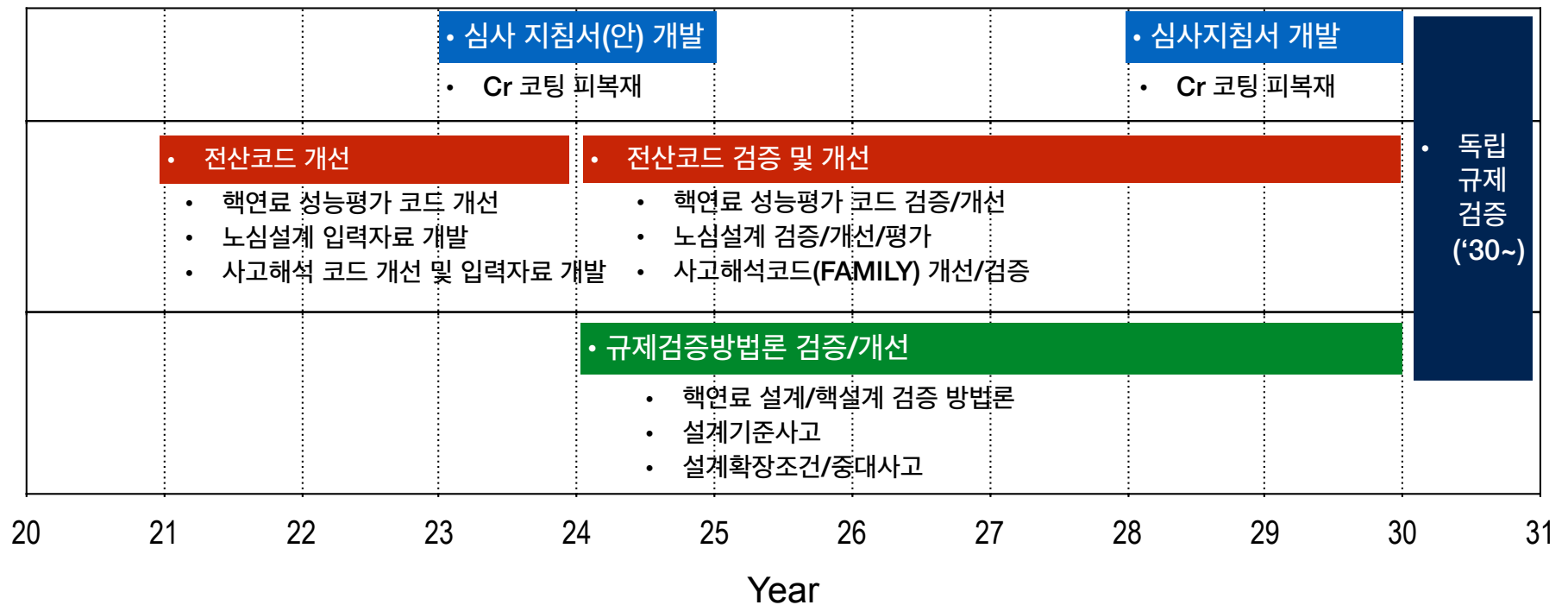
# III. 국내 규제기술 현황 및 계획

## 4. 독립규제검증체계 개발

### ❖ ATF 장전 노심안전성평가 기술개발

#### ▶ 심사지침/전산코드/방법론 개발(안)

##### ▶ Cr coating 피복재/UO2+LAS 중심



## IV. 마무리

- 국내에서도 지난 10여 년간 다양한 사고저항성핵연료 개발이 진행되어 왔으며, 현재 상용로 적용과 관련하여 **시범 연료봉 장전을 준비하는 기술수준에 도달**
- 규제기관에서도 사고저항성핵연료의 원활한 인허가를 위한 규제 R&D가 일부 진행중. **전산코드 모델 개발 및 검증을 위한 실험 및 평가 자료의 적절한 공유가 필요**
- 원자력 선진국 및 선진사 대비하여 **기술격차가 존재하는 바** 이를 극복하기 위한 적극적인 **협력과 노력이 설계사/운영사/규제기관 모두 필요**
- 국내의 핵연료주기 시설에서도 ATF의 활용도를 높이고 고준위 방사성폐기물의 부피를 줄이기 위해 **인허가 우라늄 농축도 상향을 동반한 고연소도 핵연료 적용**에 관한 연구를 추진할 필요성이 있으며, 규제기관에서도 이의 준비가 필요



*Safety together, Better tomorrow*