

연구용 원자로 기술 개발 및 수출 현황

2023. 5. 17., 제주국제컨벤션센터

한국원자력학회 원자로시스템기술연구부회

## 연구용 원자로 판형핵연료 고정장치 개발

Development of a Plate-type Fuel Locking Mechanism  
for Research Reactors

5/17/2023

한국원자력연구원  
이진행



더 나은 세상을 위한 원자력기술  
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



## 01 연구 개요

## 02 설계/해석 및 평가

## 03 시제품/시험시설 제작 및 시험

## 04 요약 및 향후 계획

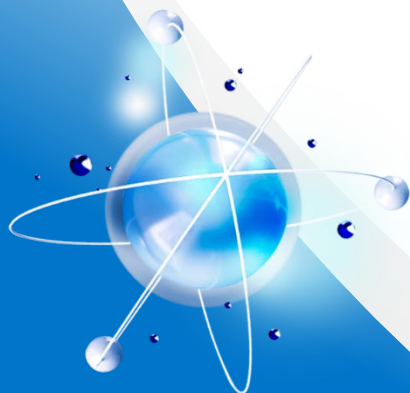
# CONTENTS



01



# 연구 개요



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

# 01 연구 개요

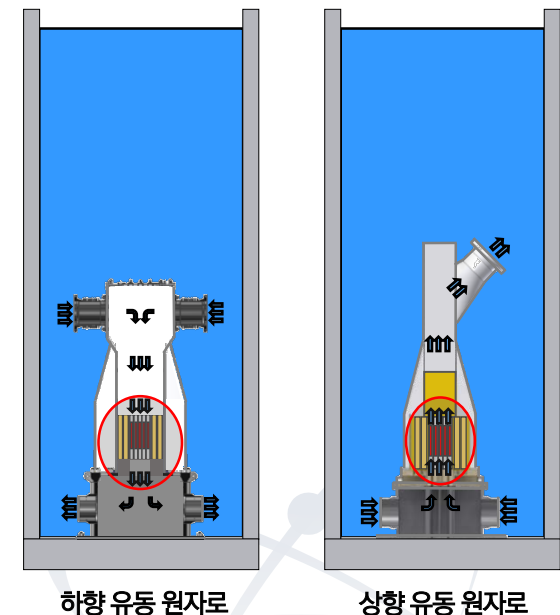
## ■ 판형핵연료 고정장치 개발 개요

### ■ 고출력 연구용 원자로 설계 추세

- 상향 유동 냉각설계
  - 상향 유동 원자로는 핵연료 이탈 방지 위한 고정 방안 필요
- 안정적 공급이 가능한 판형핵연료 선호
  - 판형핵연료 형상에 맞는 고정장치 필요

### ■ 판형핵연료 고정장치 개발 필요성

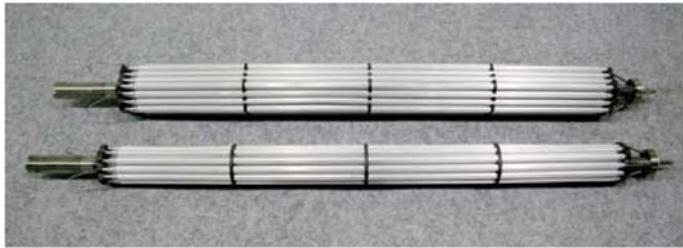
- 상향 유동 판형핵연료 국내 적용 사례 없음
  - HANARO는 상향 유동이나 판형핵연료 아님
    - 중앙봉 주위 육각/환형 배치 핵연료 사용
    - 중앙봉 회전 통한 핵연료 고정/해제
  - 판형핵연료는 형상 및 배치상 핵연료 회전 불가
- 판형핵연료 사용하는 JRTR, KJRR (기장로)는 하향 유동
  - 핵연료 고정장치 불필요
- 다양한 연구로 노심 배치 대응 위해 핵연료 고정기술 확보 필수
- 핵연료 고정기술의 안전성/편의성 향상 연구 통해 연구로 설계 경쟁력 강화



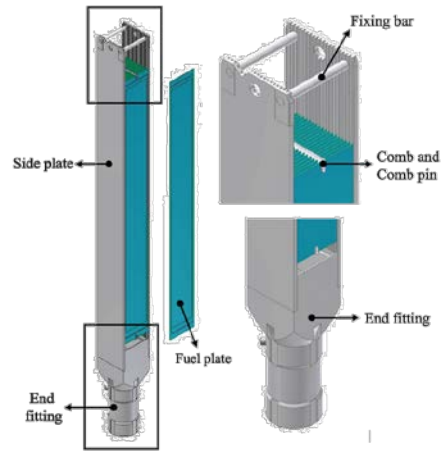


# 01 연구 개요

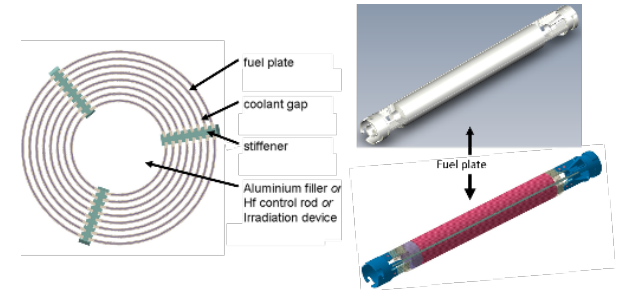
## 연구로 핵연료



HANARO 핵연료 집합체

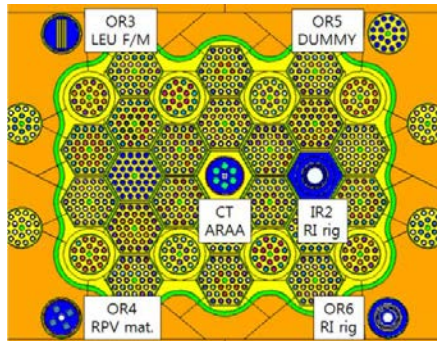


판형핵연료 집합체

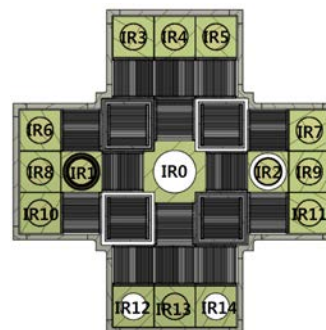


JHR 핵연료 집합체

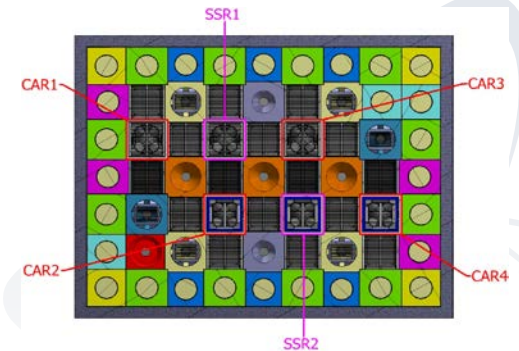
## HANARO/JRTR/KJRR 노심 배치



HANARO 노심 배치



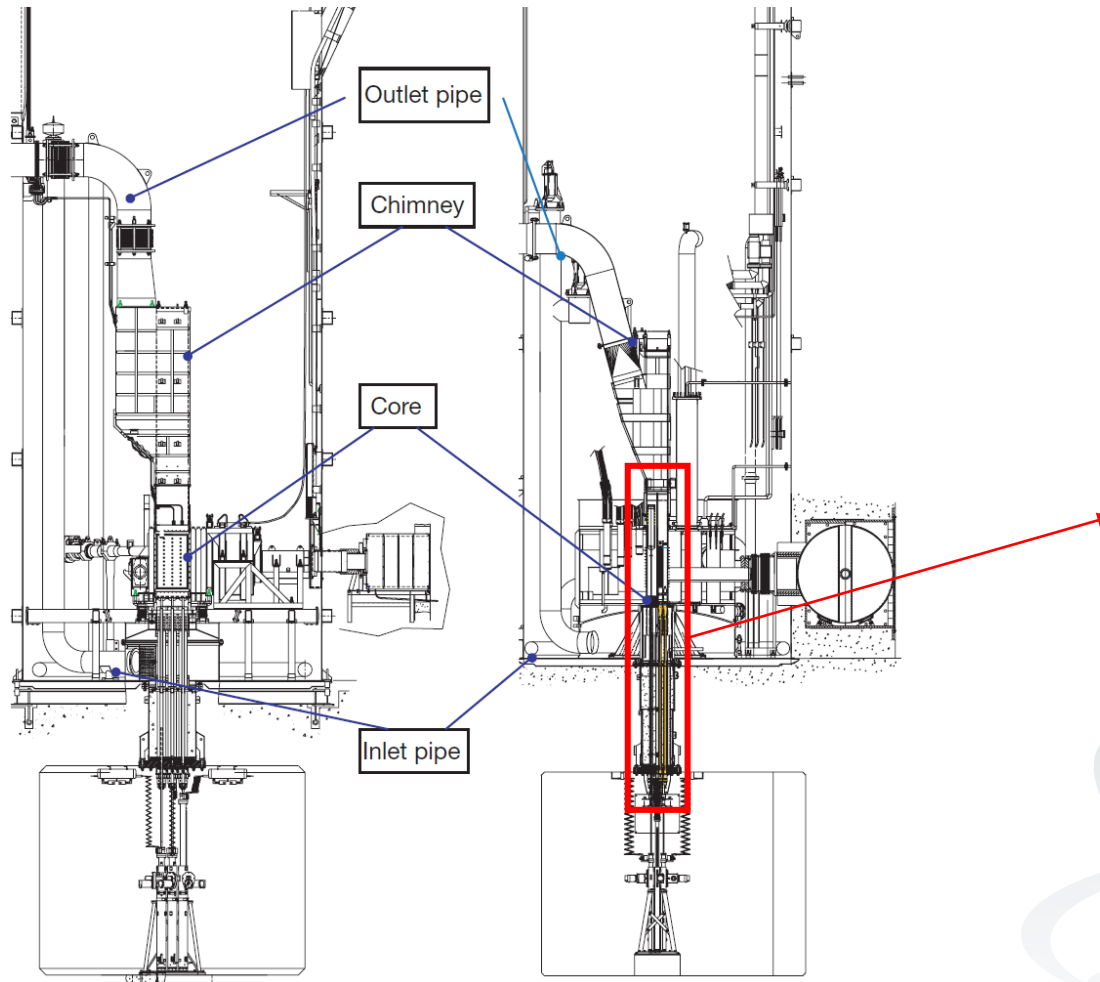
JRTR 노심 배치



KJRR(기장로) 노심 배치

# 01 연구 개요

## ■ 해외 연구로 핵연료 고정방안



ETRR-2 (이집트)

OPAL (호주)

# 01 연구 개요

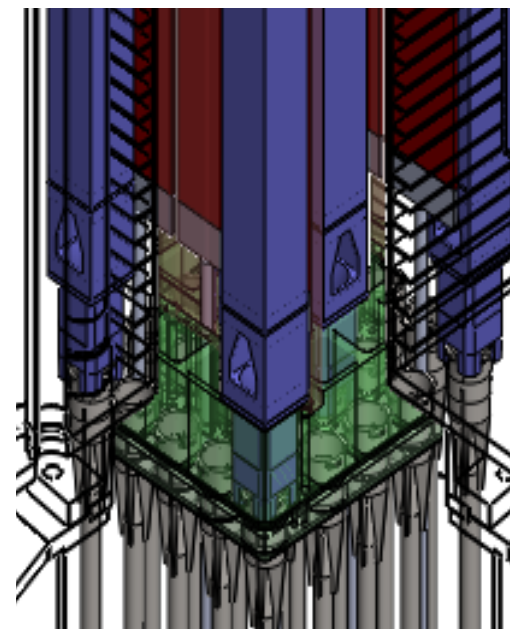
## ■ 해외 연구로 핵연료 고정방안



ETRR-2 (이집트)



OPAL (호주)



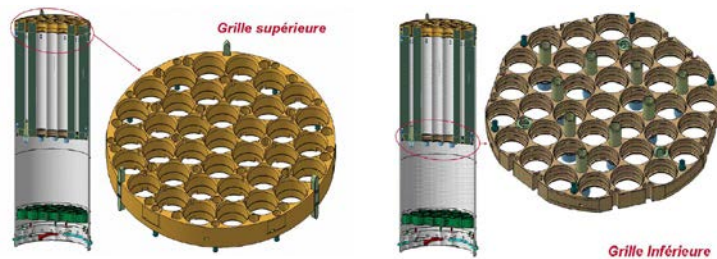
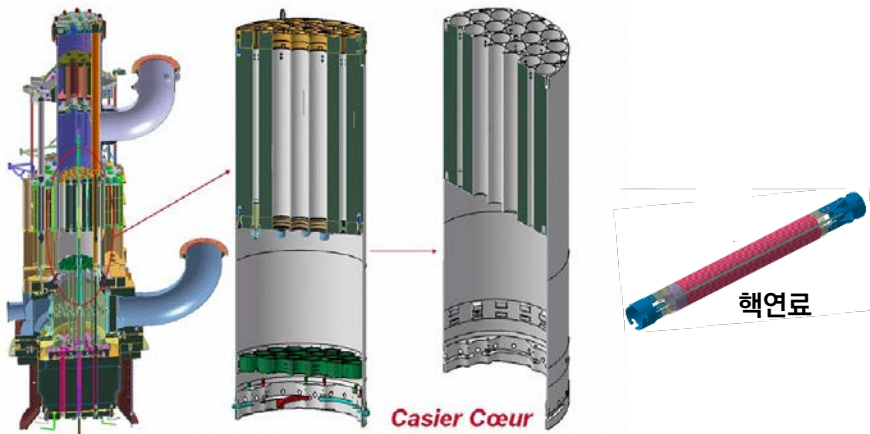
RA-10 (아르헨티나)

해외 상향 유동 연구로의 판형핵연료 고정부 형상 (INVAP)

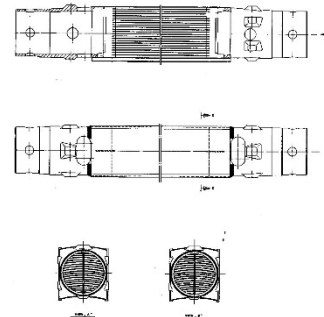
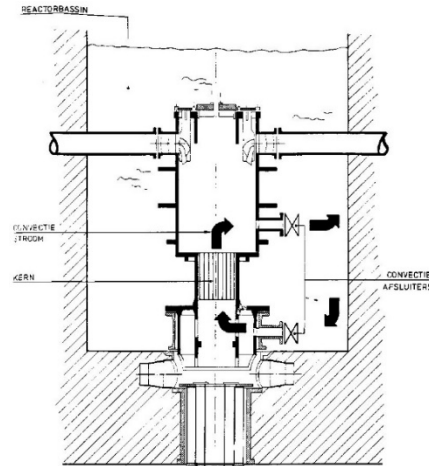


# 01 연구 개요

## ■ 해외 연구로 핵연료 고정방안



JHR (프랑스)



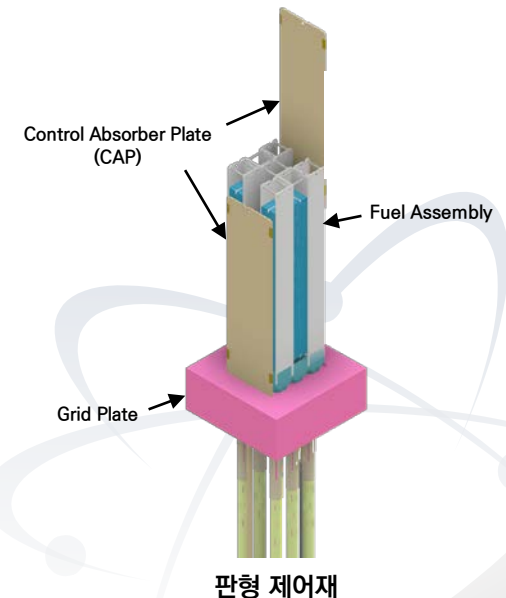
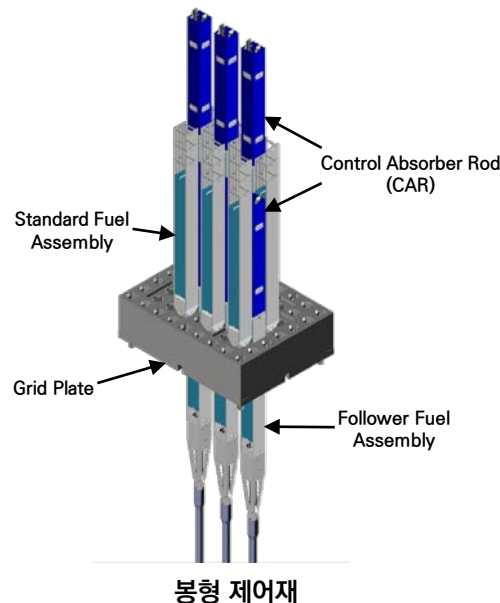
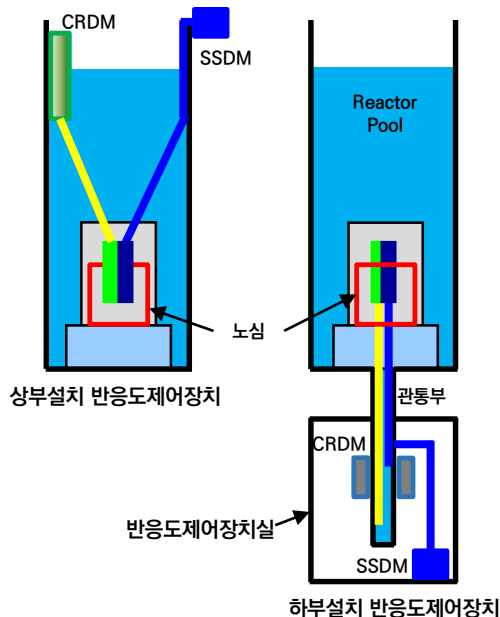
HFR (네덜란드)

해외 상향 유동 연구로의 핵연료 고정부 형상



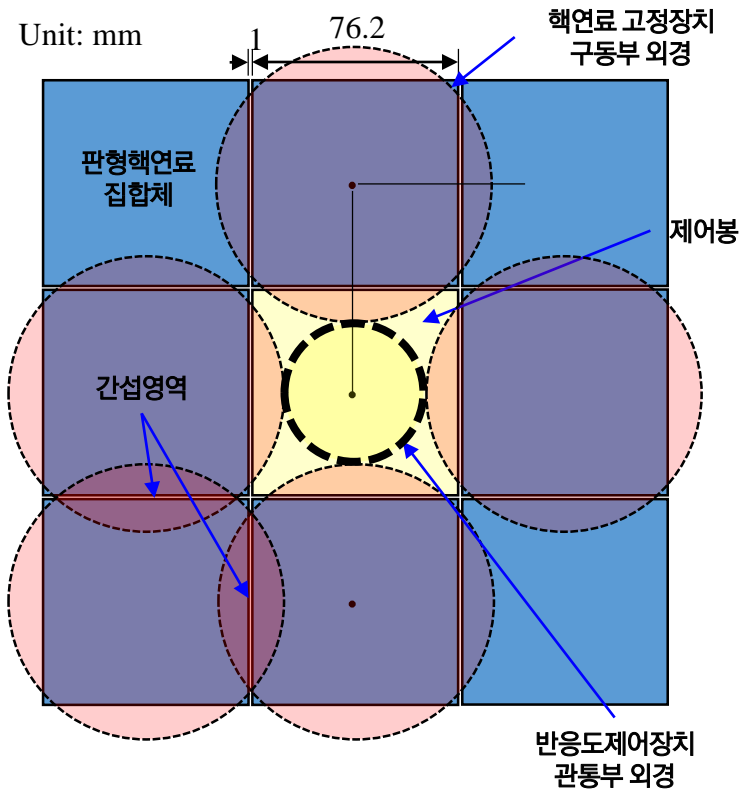
# 01 연구 개요

- ❑ 반응도제어장치 구동부 설치 위치에 따른 설계 제약
  - 하부설치 반응도제어장치 적용 시 기기간 간섭 유의
  - 설치공간 고려 형상 설계 필요
- ❑ 핵연료/제어재 노심 배치
  - 판형핵연료 + 봉형 제어재 (JRR-3, JMTR, CARR, KJRR)
  - 판형핵연료 + 판형 제어재 (ETRR-2, OPAL, RA-10, RMB)



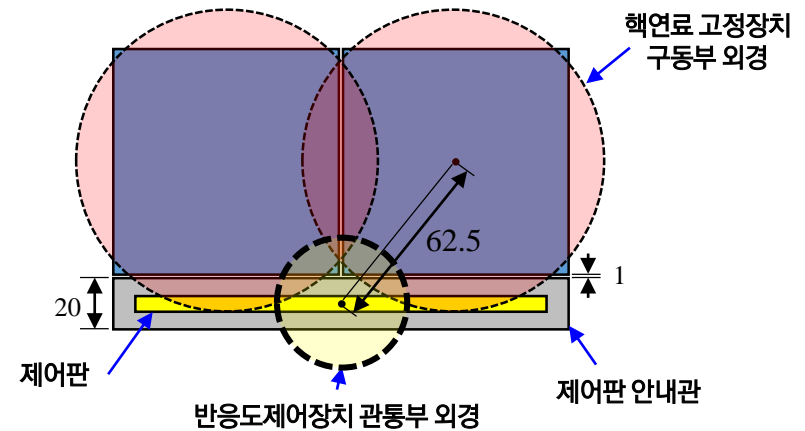
# 01 연구 개요

## ■ 노심 배치를 고려한 판형핵연료 고정장치 설계 제한 사항

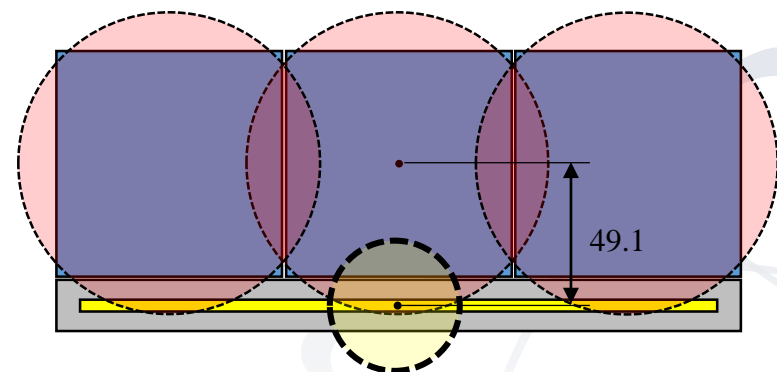


봉형 제어재 사용 시

CAP corresponding to two fuel assemblies



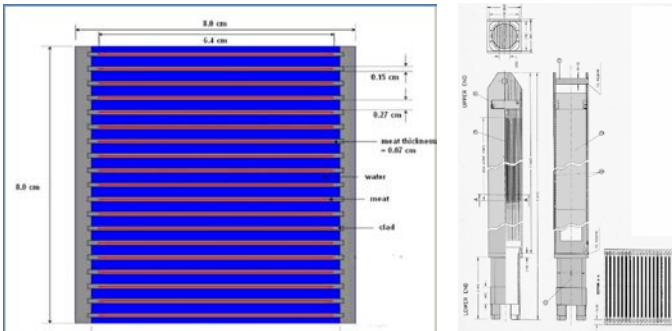
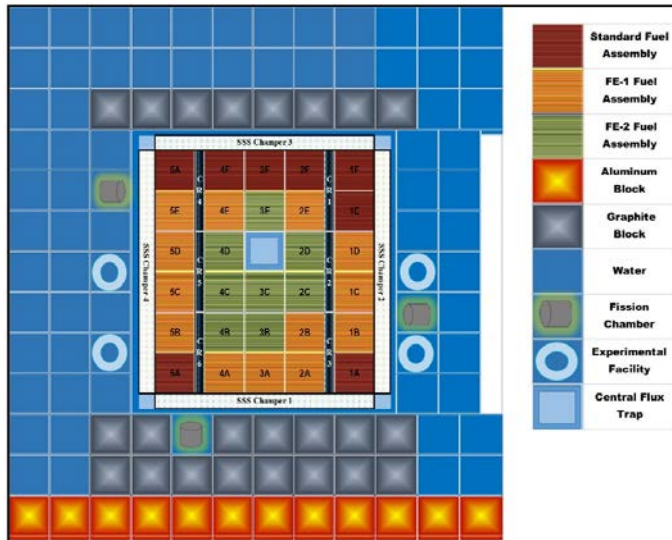
CAP corresponding to three fuel assemblies



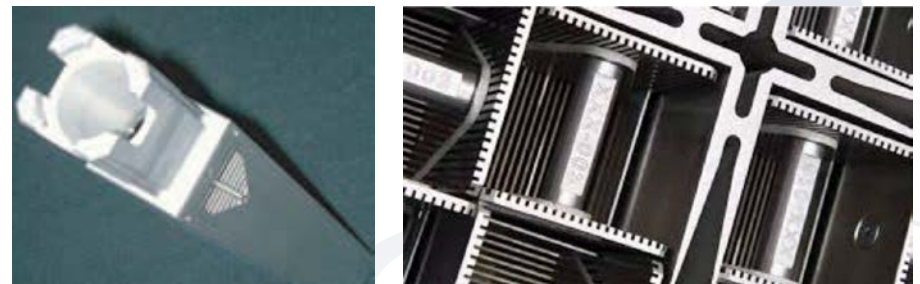
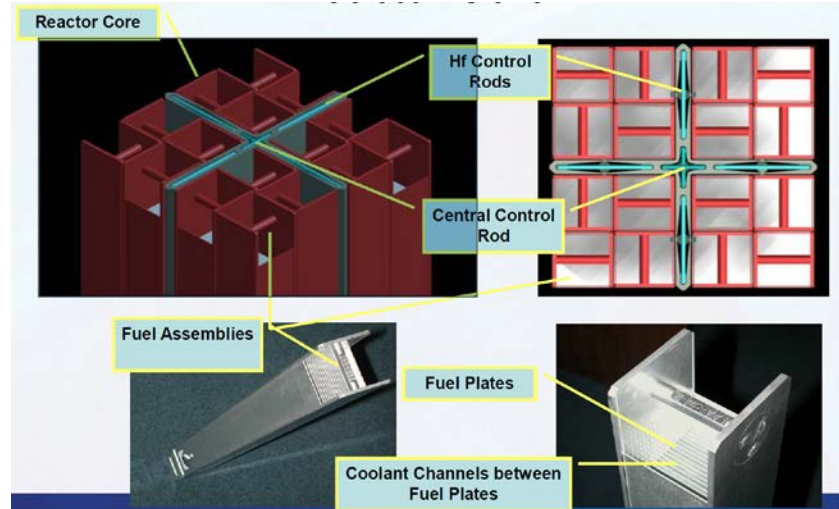
판형 제어재 사용 시

# 01 연구 개요

## ■ 판형핵연료 적용 상향 유동 연구로 노심배치



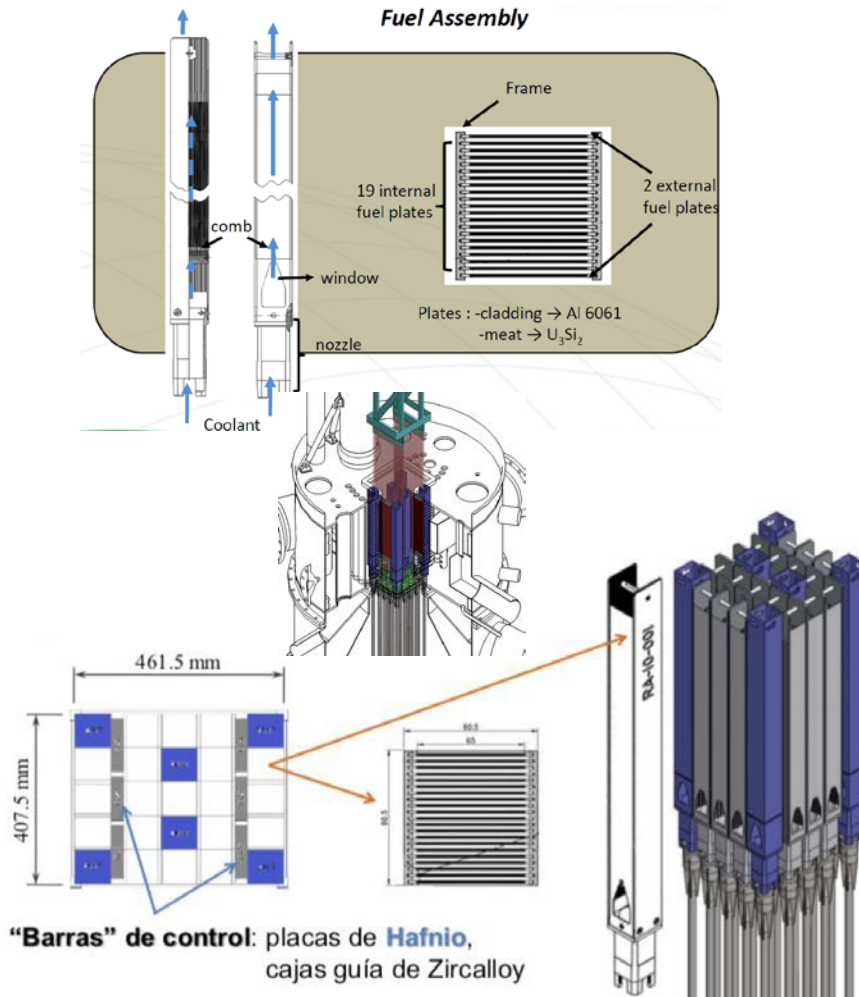
ETRR-2 (22 MW, 이집트, 1998)



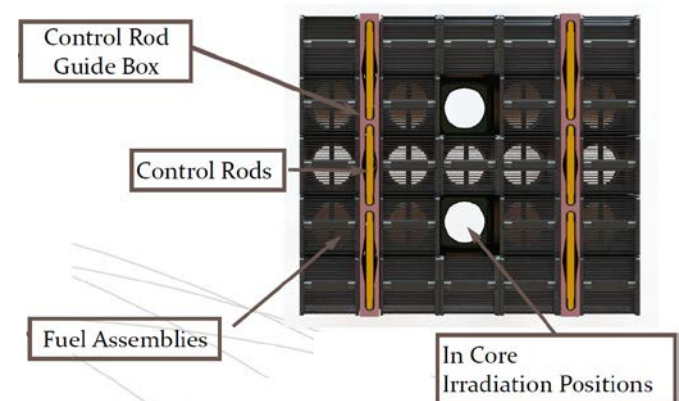
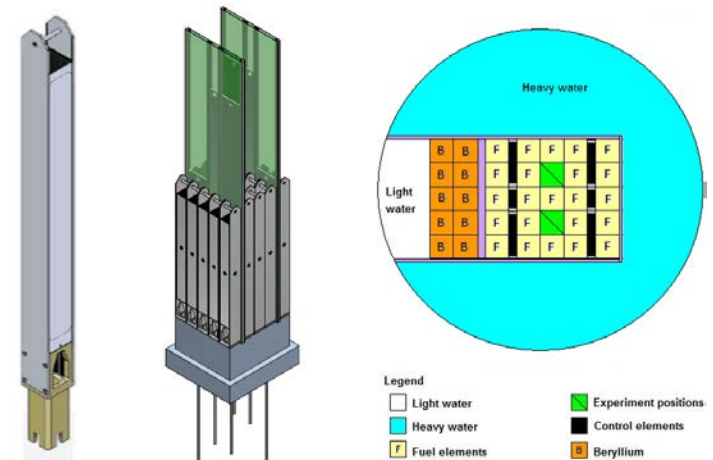
OPAL (20 MW, 호주, 2006)

# 01 연구 개요

## ■ 판형핵연료 적용 상향 유동 연구로 노심배치



RA-10 (30 MW, 아르헨티나)



RMB (30 MW, 브라질)



# 01 연구 개요

## ■ 핵연료 고정방안 적용 현황 요약

### ■ INVAP 연구로

- ETRR-2, OPAL, RA-10, RMB 모두 판형핵연료 사용
- 핵연료 아래에 봉을 연결, 원자로 하부를 관통하여 반응도제어장치실 천장에 고정
- 개별 고정장치 수동 회전을 통해 핵연료 고정 및 고정해제
- 반응도제어장치실 천장 돌출부(구동부) dimension
  - OPAL 기준 직경 70 mm, 길이 260 mm 예상

### ■ JHR, HFR

- 핵연료 상하 고정

### ■ HANARO

- 핵연료 회전을 통한 고정/고정해제
- 판형핵연료 아님

# 01 연구 개요

## ■ 한원연 핵연료 고정장치 기술개발 현황

### ■ 전자석을 사용한 원격제어 핵연료 고정장치 개념설계

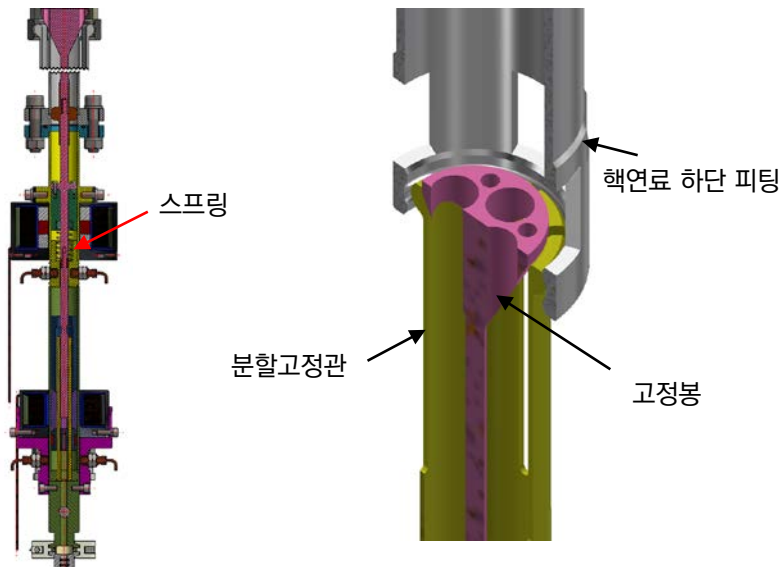
- 2016년: 전자석 활용 원격제어 핵연료고정장치 개념설계, 국내특허 출원
- 2017년: 개념설계에 대한 부분 검증시험, 국내특허 등록
- 2018년: 핵연료 하부 냉각수 유로 확보 형상 설계, 전체 3D 모델링
- 2019년: 안전잠금장치 추가 특허출원
- 2020년: 안전잠금장치 개념 검증장치 제작 및 시험, 러시아, 중국, 아르헨티나 특허 출원

### ■ 핵연료 고정장치 상세설계 및 시제품 제작/시험

- 2021년~2023년: 기본/상세설계, 시제품 제작, 성능/내구성 시험

# 01 연구 개요

- 한원연 판형핵연료 고정장치 기술 특성(~2020)
  - 전자석을 사용한 원격제어 가능
  - 이중 잠금을 통한 안전성 강화
  - 다단 배치로 고정장치간 간섭 회피
    - 판형 제어재 사용 노심 적용 불가 → 단순화 및 최적화 필요
  - 개념설계 단계





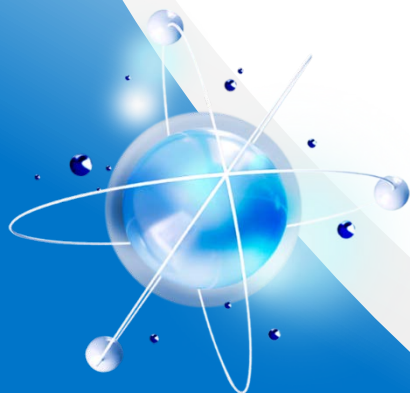




02



# 설계/해석 및 평가



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

## 02 설계/해석 및 평가

### ■ 핵연료 고정장치 설계요건

- 가장 공간 제약이 큰 핵연료 3개 대응 제어판 적용 가정

Items	Interface requirements
Pitch of the fuel	
Space for CAP guide tube	
Mass of the fuel assembly	
Height of the RCM Room	
Average flow velocity in the fuel channels	
Average flow velocity in CAP guide tube	
Outer diameter of the RCM penetration	

## 02 설계/해석 및 평가

### ■ 핵연료 고정장치 설계 목표

#### ■ 구동부 외경을 핵연료 피치보다 작은 50 mm로 제한

- 다단 배치를 1단으로 변경
- 제어판 사용 노심에 적용 가능
- 유지보수가 용이하도록 배치

#### ■ 구동부 길이를 800 mm 이하로 제한

- 반응도제어장치실 높이 증가 최소화

#### ■ 장치 구성 단순화

- 고장 발생 요소 감소

#### Simple

상하 두 개의 고정 개념을 하나로 합쳐 복잡한 설계 요소를 단순화  
운영 중 발생할 수 있는 고장 요인 최소화

#### Slim

전자석을 포함한 전체 핵연료 고정장치를 슬림화  
다양한 노심배치에 대응할 수 있는 설계기술 확보  
전자석의 전자기장 간섭 회피  
슬림화를 통해 유지보수 대차 향상

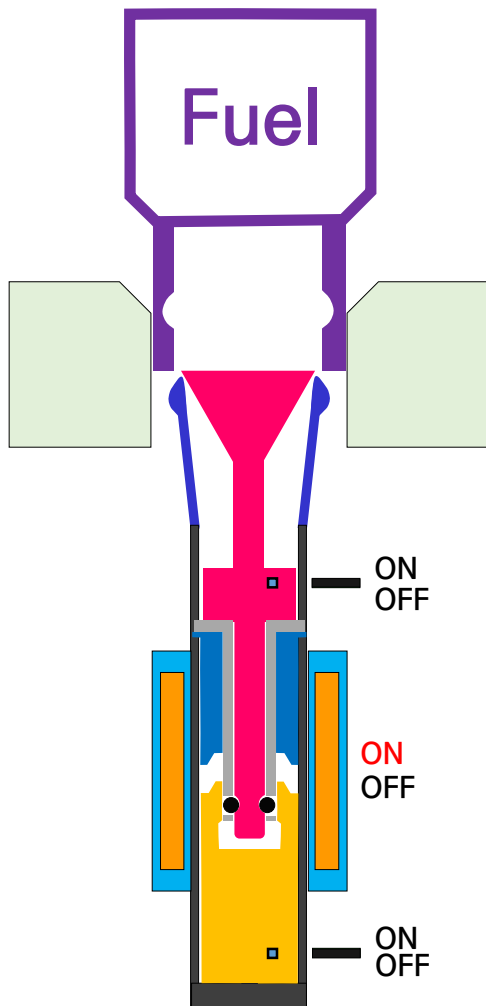
#### Short

1단 배치 및 개별 고정장치 길이 축소를 통해 전체 집합체 길이 축소  
고정장치 유지보수에 필요한 수직 공간 최소화

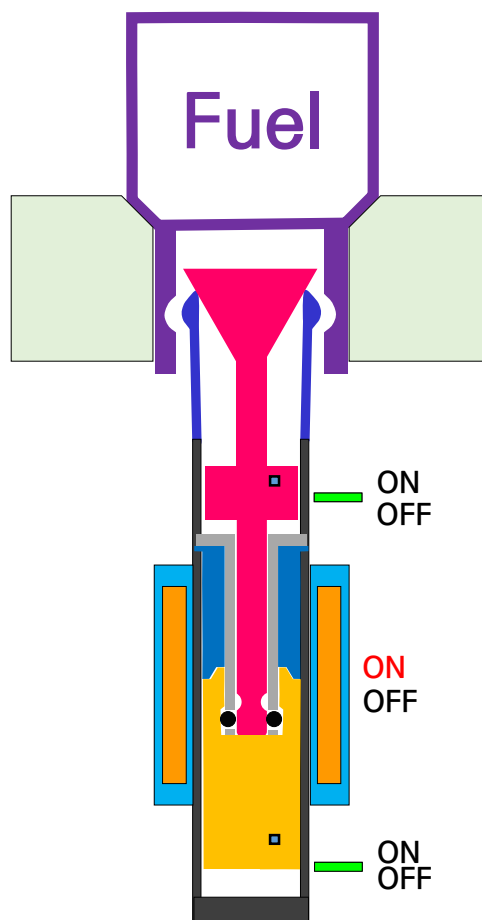
## 02 설계/해석 및 평가

### 핵연료 고정장치 설계개념

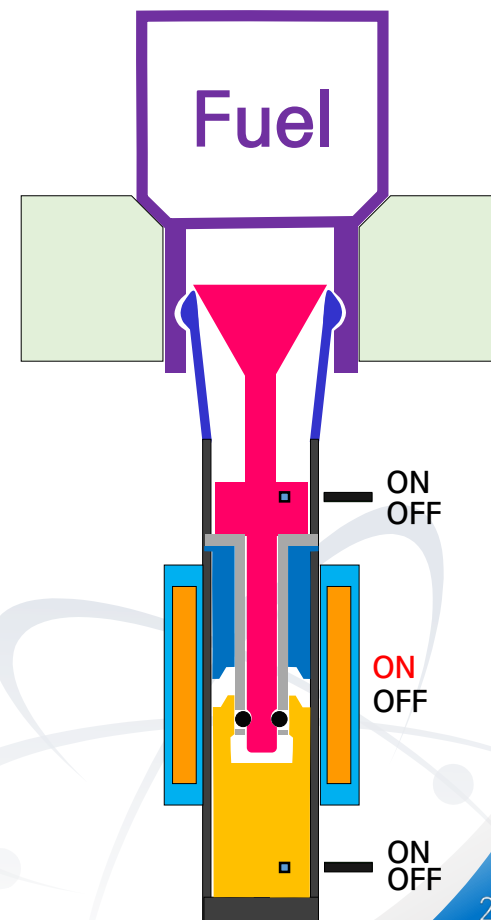
핵연료 장착



핵연료 고정



핵연료 고정 해제





## 02 설계/해석 및 평가

### 구동부 설계요건

- 고정장치 전자석 외경: 50 mm 고정
- 최대전류: 5 A
- 이동자 이동거리 15 mm 중
- 향후 다양한 연구로 설계에 대비, 5 A 기준 0 ~ 9 mm 위치까지 5 N, 9 mm 이상 위치에서 60 N의 지지력 확보를 목표로 설정

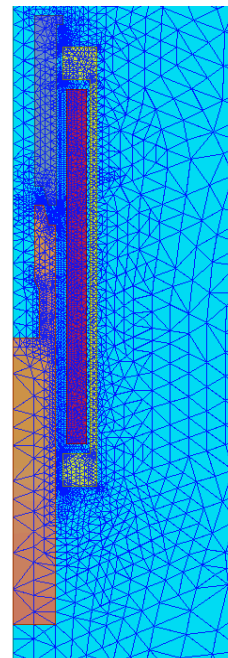
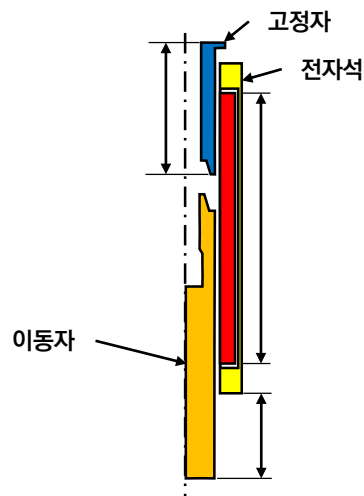
### 핵연료 고정장치 전자석부 설계

- 전자석, 고정자, 이동자의 다양한 형상에 대한 디자인
- 전자기장 해석을 통한 공간 대비 효율성 비교
- 선정된 전자석, 고정자, 이동자 기본 형상 이용 parameter study 수행

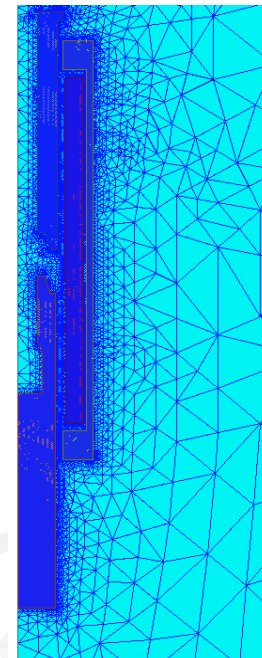
## 02 설계/해석 및 평가

### 전자기장 해석

- ANSYS Maxwell 이용 고정장치의 전자기장 해석 수행
- 다양한 설계 parameter에 대한 해석을 통해 설계 형상 선정
  - Coarse mesh를 이용한 해석을 통해 parameter 범위 축소
  - Refined mesh를 이용한 상세 해석을 수행하여 최종 형상 결정



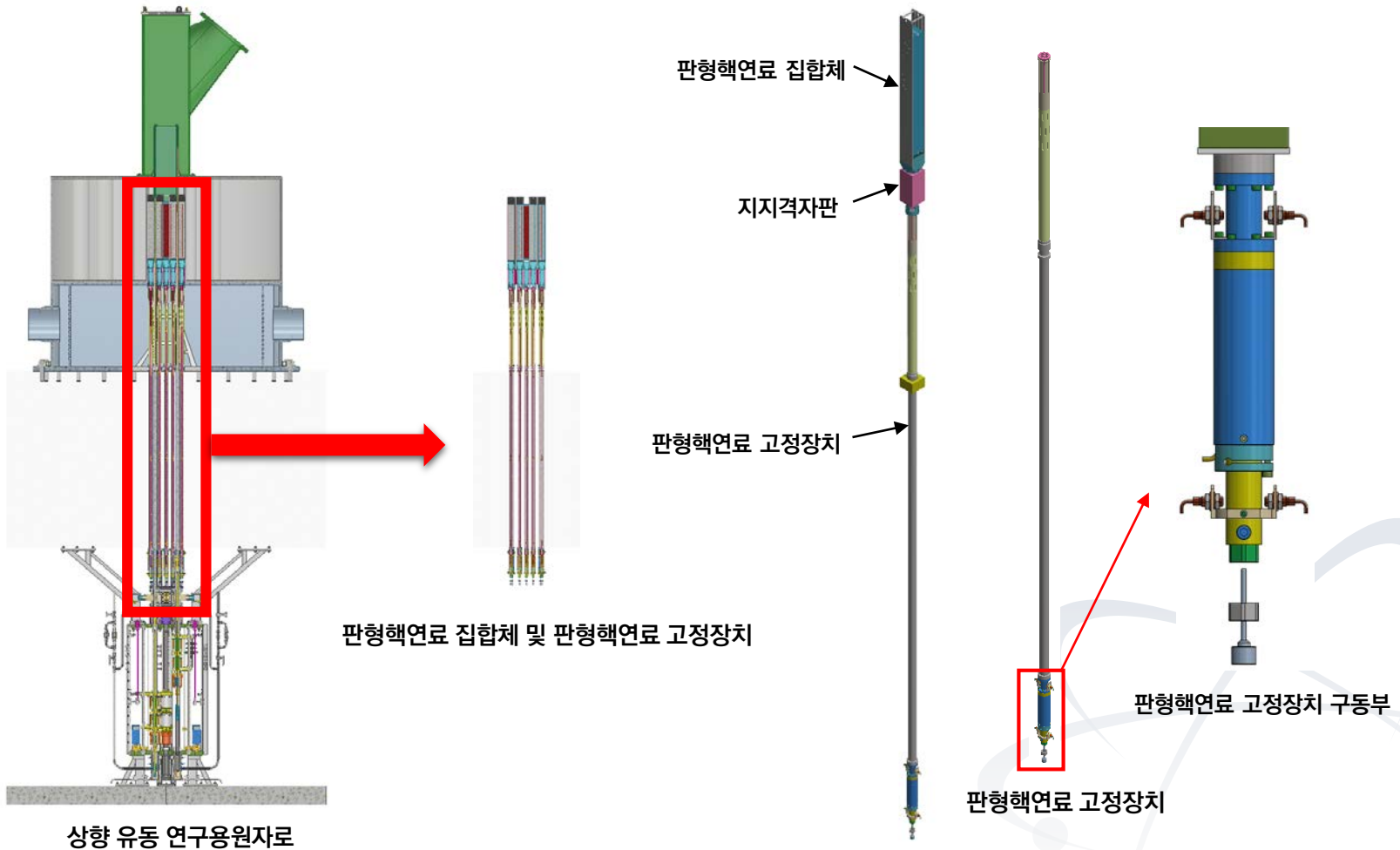
Coarse mesh



Refined mesh

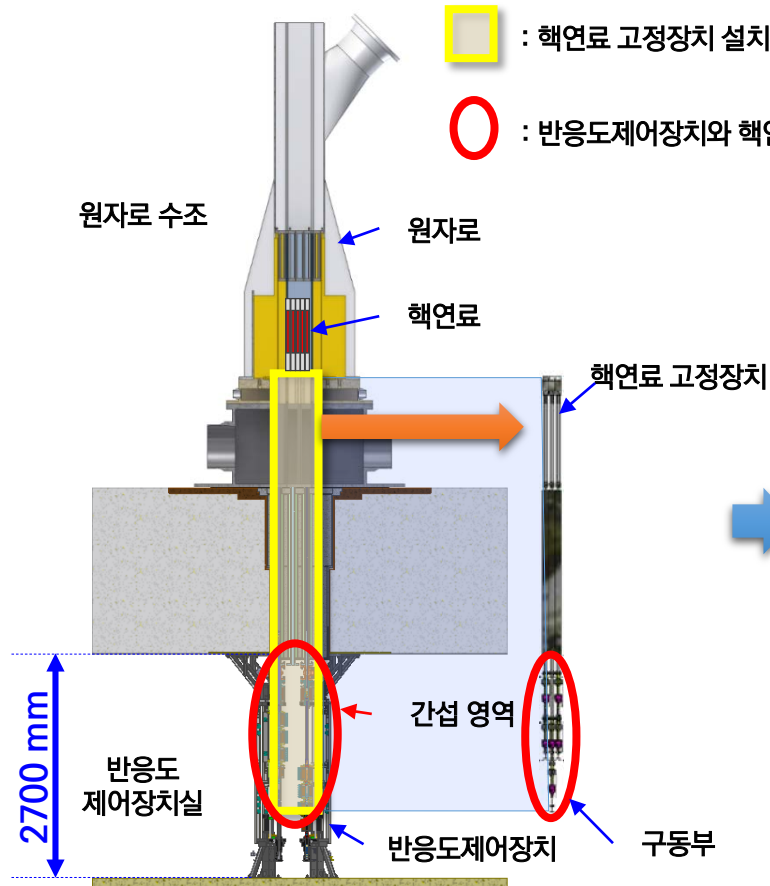
## 02 설계/해석 및 평가

### 핵연료 고정장치 설계 형상

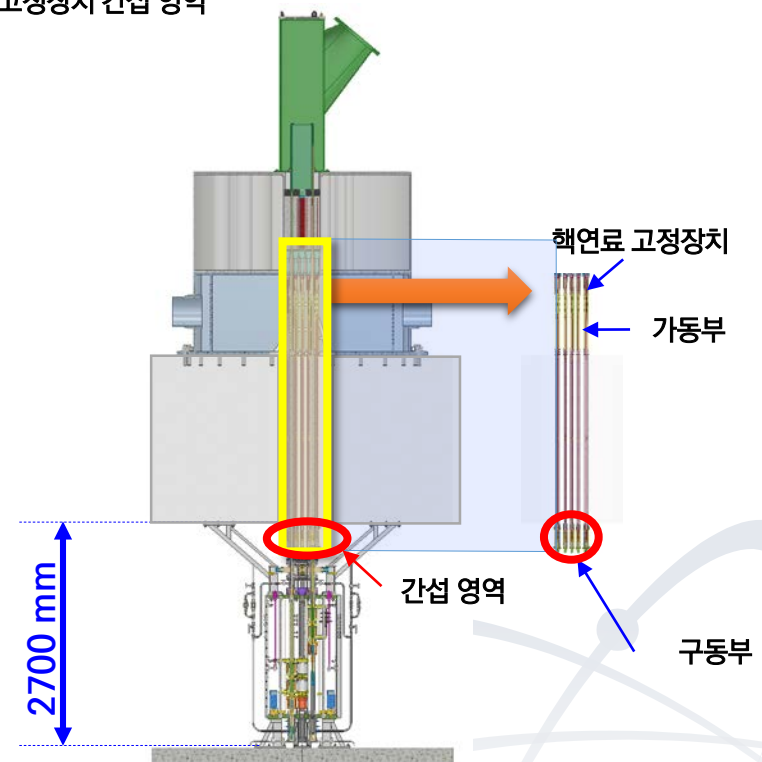


## 02 설계/해석 및 평가

### 핵연료 고정장치 설계 형상



~2020: 구동부 직경 102 mm, 길이 1905 mm



구동부 직경 50 mm, 길이 340 mm

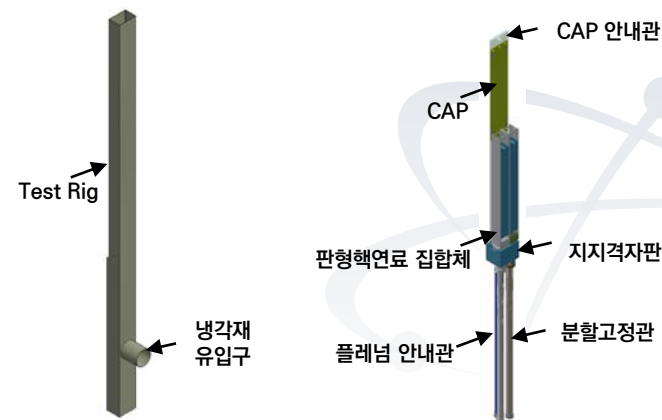
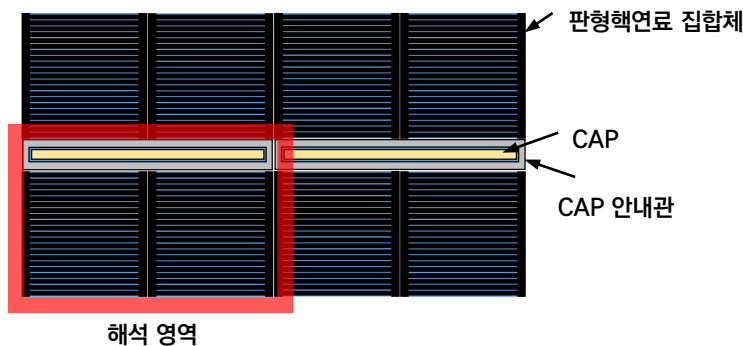
INVAP OPAL 수동장치 예상 치수:  
구동부 직경 70 mm, 길이 260 mm



## 02 설계/해석 및 평가

### 유동 해석

- 상향 유동에 의한 항력(drag force)이 가장 지배적인 하중임
- 구조건전성 평가를 위해서는 유동 항력 정량화 필요
- 유동해석 모델
  - ANSYS CFX 이용 유동해석 수행
  - 핵연료 2개, 제어판 1개 영역 한정
  - 다음 평균 유속 조건을 5% 이내에서 만족하도록 반복 해석 통한 유입구 형상 조정
    - 정상운전 조건에서 핵연료 채널 8.5 m/s, 제어판 안내관 내: 4.5 m/s
    - 최대유속 조건에서 핵연료 채널 9.8 m/s, 제어판 안내관 내: 5.5 m/s



# 02 설계/해석 및 평가

## 유동 해석

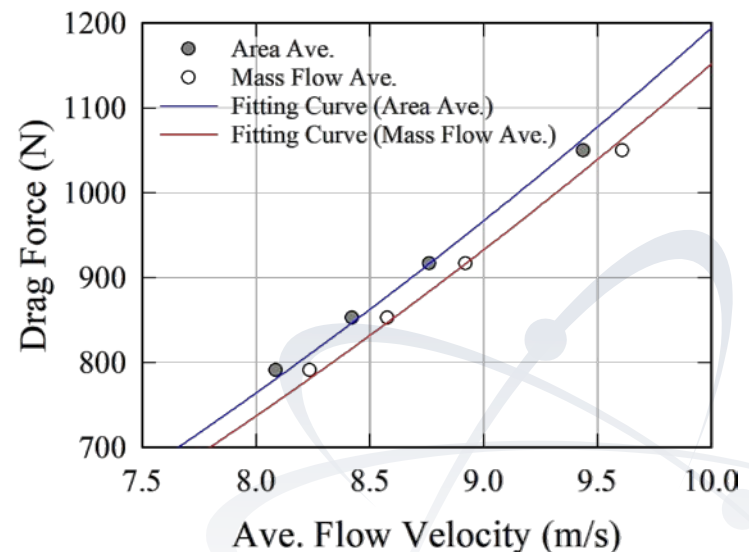
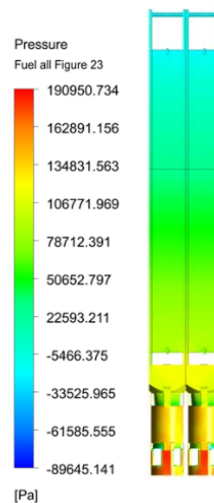
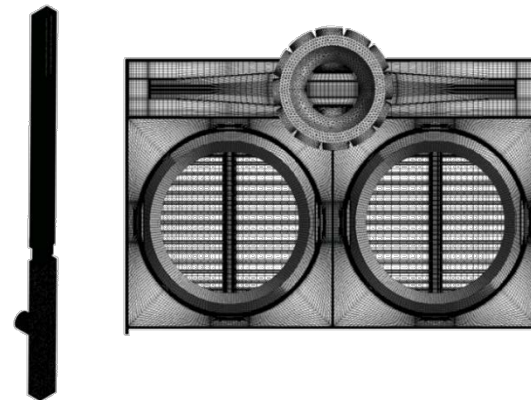
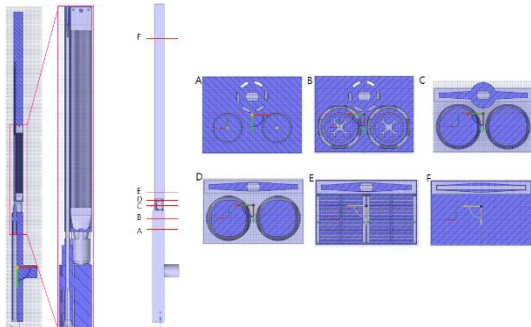
### 유량별 유속-항력 관계를 해석을 통해 도출하여 수식화

- $v_A$ : 면적평균 유속
- $v_M$ : 유량평균 유속

$$F = C_A v_A^2 = C_M v_M^2$$

$$C_A = 11.94 \text{ (N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2\text{)}$$

$$C_M = 11.51 \text{ (N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^2\text{)}$$

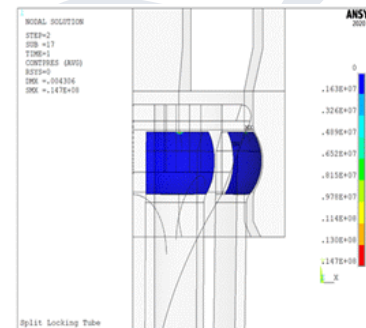
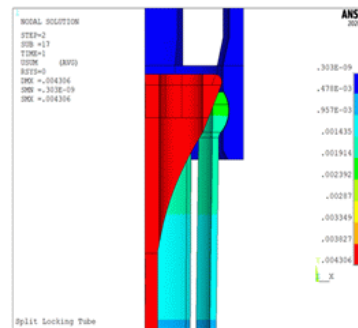
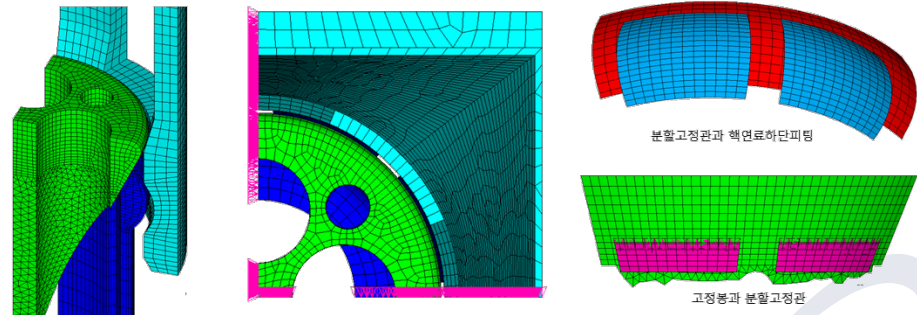
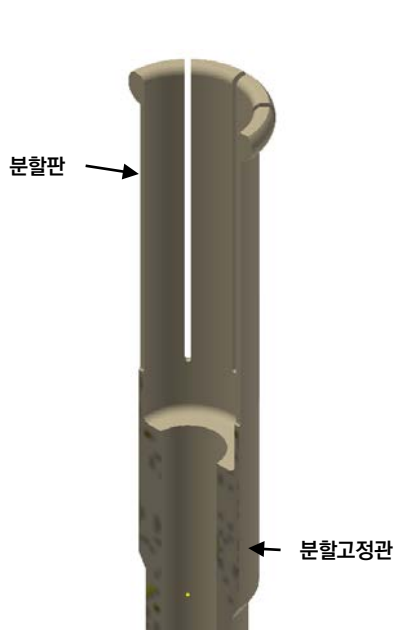


## 02 설계/해석 및 평가

### 구조 해석

#### 자중 작동 평가

- 분할고정관이 고정봉 자중으로 변형하여 핵연료를 지지할 수 있는 형상 결정 필요
- 빔 굽힘 이론을 바탕으로 분할고정관의 분할판수, 분할판 길이 및 폭 선정
- 선정된 형상을 이용한 ANSYS 구조해석을 통한 정상 작동 여부 확인

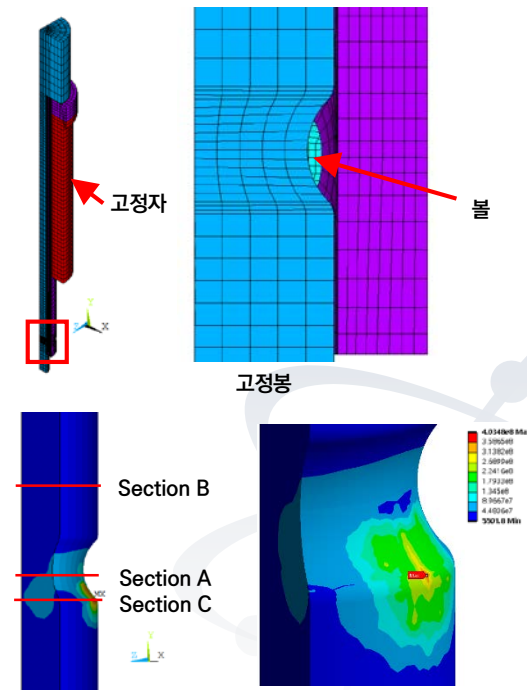
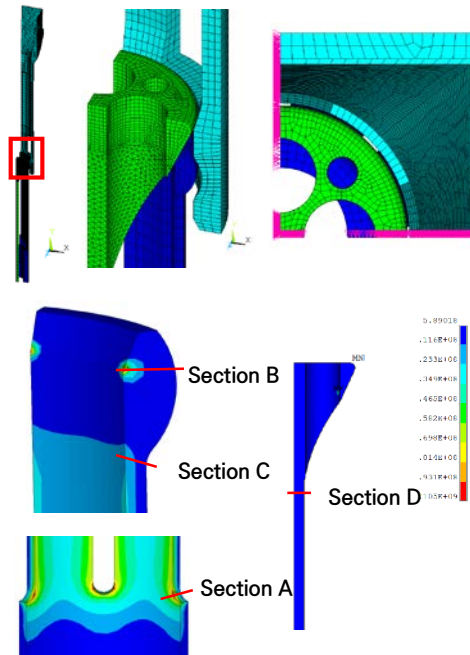


## 02 설계/해석 및 평가

### ■ 구조 해석 및 구조건전성 평가

#### ■ ASME 코드 기반 구조건전성 평가

- 고정봉 자중과 유동 항력 하중에 대한 해석 및 구조건전성 평가
- ASME Section III, NG 요건 적용
- 고정봉 자중 하중 및 최대유속 조건의 항력에 대한 해석 및 구조건전성 평가
- 50% 이상 설계 여유도 확보 확인





03



# 시제품/시험시설 제작 및 시험



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

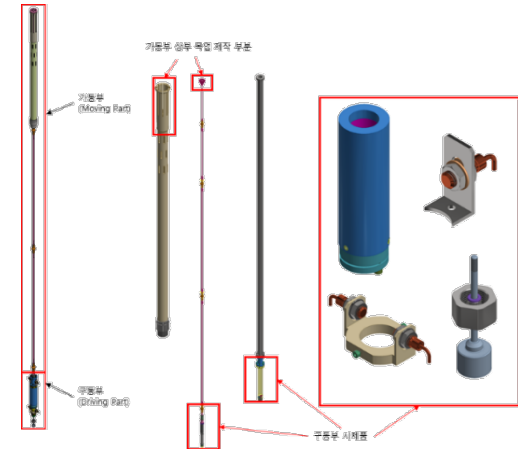


## 03 시제품/시험시설 제작 및 시험

### ■ 시제품 제작 및 작동시험

#### ■ 시제품 제작

- 개선된 설계를 적용한 핵심부품 선제작 및 작동시험 완료
- 핵연료 고정장치 시제품 제작
  - 실제 치수와 재료 사용
  - 원자력 품질보증 절차 적용
  - 구동부 시제품 및 시험용 가동부 상부 목업 제작 완료(22년)
    - 구동부: 전자석, 이동자, 고정자, 고정봉 하부, 센서 등
    - 가동부: 고정봉 상부, 분할고정관
  - 가동부 시제품은 23년 제작
- 작동시험장치 제작
  - 구동부, 가동부(목업) 및 핵연료 작동 점검 위한 시험장치

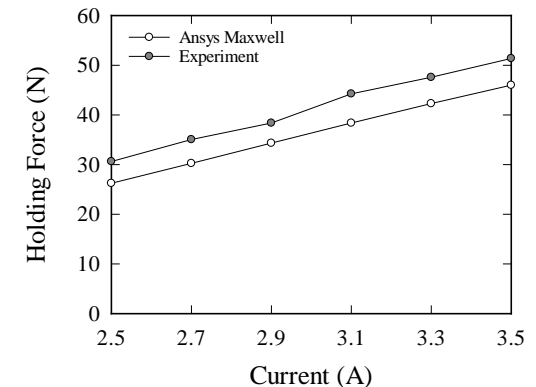
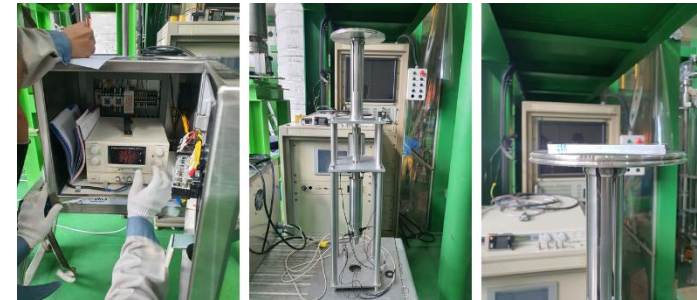


# 03 시제품/시험시설 제작 및 시험

## ■ 시제품 제작 및 작동시험

### ■ 구동부 시제품 작동시험

- 구성품
  - 구동부 시제품
  - 가동부 목업(길이 축소, 축소 영역 무게추 대체)
  - 모의 핵연료집합체
- 작동시험 항목
  - 위치지시 성능 시험
  - 최저작동전류 시험
    - 2.5 A 이상 작동(해석: 2.7 A 이상)
  - 입력 전류별 최대 지지력 측정 시험
    - 해석 대비 10% 이상 큰 지지력 측정
  - 비상 풀림장치 기능시험
    - 전자석 미작동시 비상 풀림기능 정상 수행 확인
  - 100 kgf 하중 시험



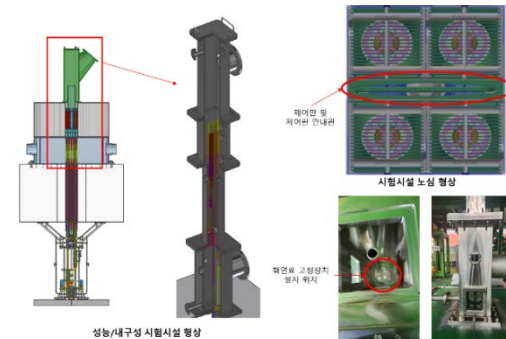
# 03 시제품/시험시설 제작 및 시험

## ■ 시험시설 설계

- 타과제(가속 안전정지장치 개발) 상향 유동 시험시설과 공유
  - 핵연료 4개 + 안전정지장치 1개 배치 시험시설 설계
- 성능/내구성 시험요건을 고려한 핵연료 고정장치 시험시설 설계
  - 모의 판형핵연료 집합체, 시험시설용 고정장치 부품 및 관련 구조물, 제어시스템

## ■ 시험시설 제작

- 모의 판형핵연료 집합체(22년)
  - 고정장치 결합용 1개
  - 차압측정용(압력도관 설치) 1개
- 고정장치 부품(23년)
  - 시제품 외 3개 핵연료 고정부
- 제어시스템(23년)



모의 판형핵연료 집합체



04



# 요약 및 향후 계획



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

## 04 요약 및 향후 계획

### ■ 판형핵연료 고정장치 개발 과제 요약

#### ■ 전자석을 이용한 초소형 원격제어 핵연료 고정 및 해제 설계기술 확보

- 판형 제어재 포함 다양한 노심 배치에 적용 가능한 초소형 판형핵연료 고정장치 설계 가능
- 전자석을 이용한 세계 최초 원격제어 연구로 핵연료 고정/해제 기술 완성
- 전자기장해석을 통한 고정장치 형상 최적화
- 유동해석으로부터 상향 유동 항력 정량화
- 구조해석을 통해 ASME 코드 요건에 대한 구조건전성 확인

#### ■ 핵연료 고정장치 구동부 시제품 제작 및 작동시험 완료

- 성능/내구성 시험에 사용될 고정장치 구동부 시제품 제작 완료
- 실재료를 사용한 구동부 제작절차 점검 및 제작성 확인
- 작동시험을 통한 설계/해석 적절성 확인



# 04 요약 및 향후 계획

## ■ 판형핵연료 고정장치 개발 과제 요약

### 해외기술(수동장치)

- **장점**
  - 고정장치 구동부 설치 공간 작음
  - 구조가 단순하여 누수 위험 외 고장 요소 적음
- **단점**
  - 작동부 누수 가능성 높음
  - 수동 작업에 따른 운전원 피폭/오작동 위험
  - 개별 핵연료 고정/해제 여부 확인 어려움
  - 핵연료 교체/shuffling에 상당한 작업시간 필요

### 국내기술(자동장치, ~20)

- **장점**
  - 자기력을 이용해 작동부 누수 위험 원천 차단
  - 원격 제어를 통한 운전원 피폭/오작동 감소
  - 개별 핵연료 고정/해제 여부 실시간 확인 가능
  - 핵연료 교체/shuffling 시간 단축
  - 안전성 향상을 위한 다양한 제어 로직 적용 가능
- **단점**
  - 과도한 구동부 설치공간으로 노심 배치설계 제약
  - 복잡한 구조로 인한 고장 요소 증가
  - 개념설계 단계

### 개선 기술 (21 ~ 23)

- 자기력을 이용해 작동부 누수 위험 원천 차단
- 원격 제어를 통한 운전원 피폭/오작동 감소
- 핵연료 교체/shuffling 시간 단축
- 핵연료 고정/해제 여부 실시간 확인 가능
- 안전성 향상을 위한 다양한 제어 로직 적용 가능
- 수동장치와 유사한 구동부 공간으로 다양한 노심 배치 가능
- 구조 단순화를 통한 고장 요인 최소화
- 개념설계 단계에서 시제품 성능평가 단계로 진입

# 04 요약 및 향후 계획

## ■ 향후 계획

- 핵연료 고정장치 가동부 시제품 제작
  - 실제 치수와 재료 사용
  - 원자력 품질보증 절차 적용
- 핵연료 고정장치 성능/내구성 시험시설 완성
- 성능/내구성 시험시설 시운전
- 핵연료 고정장치 성능/내구성 시험을 통한 성능평가 및 설계 검증 완료
- 내진해석을 통한 구조건전성 평가
- 설계 고도화 및 제원 확정
- 연구용 원자로 설계에 적용



한국원자력연구원  
Korea Atomic Energy Research Institute

# 감사합니다.

