

# 원자력재료연구실 소개

부산대학교  
반치범 교수님

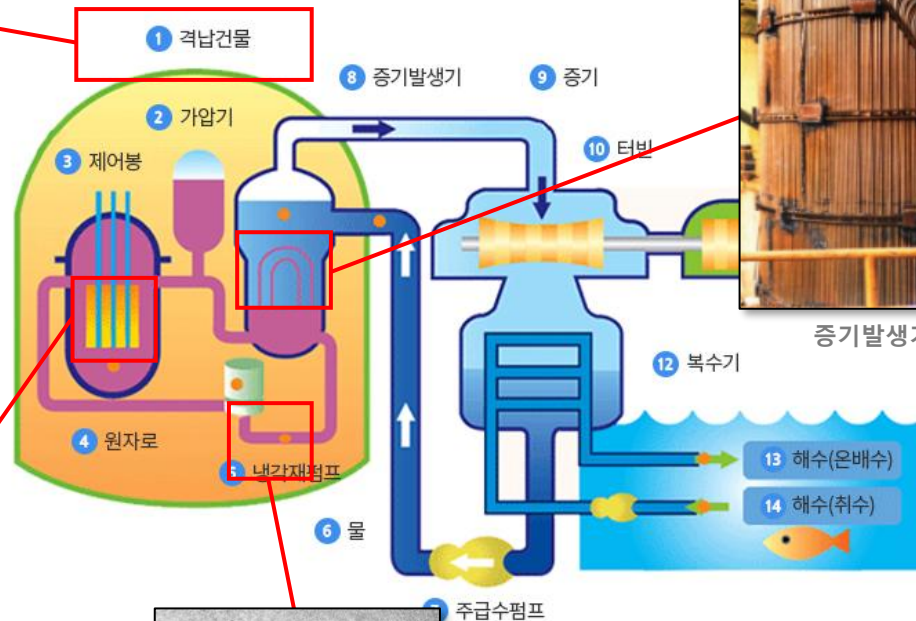
# 주요 연구 분야

## 원자력재료연구실

원자력 발전소에 사용되는 금속 재료의 부식, 손상, 원인 규명 및 해결  
새로운 재료 개발 연구



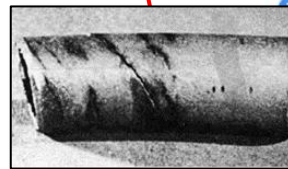
원자로 격납건물 라이너플레이트



증기발생기 전열관



핵연료 피복관



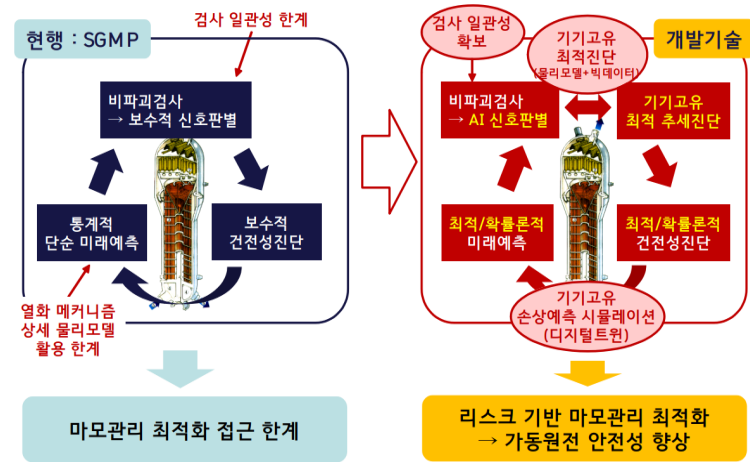
배관의 응력부식균열

# 연구 배경 및 주요 연구내용

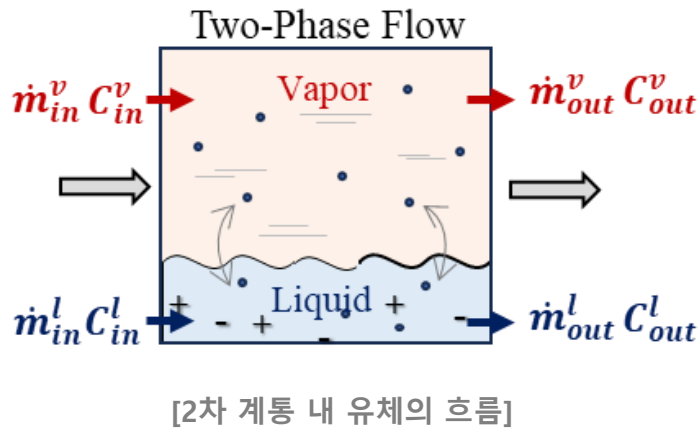
## 응력부식균열 개시 환경 및 특성 평가



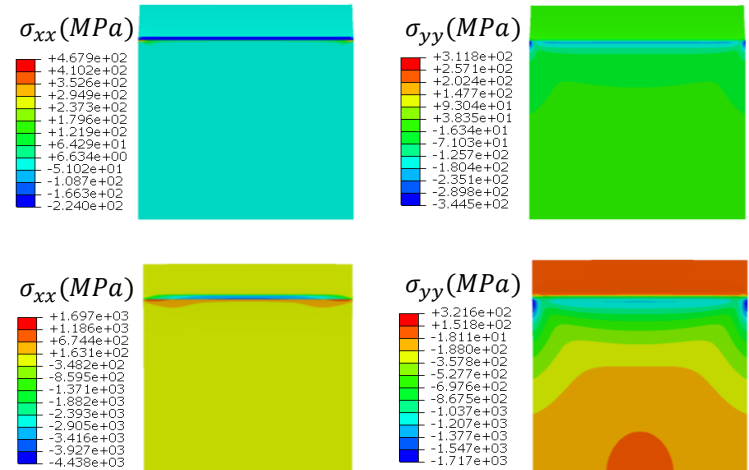
## 증기발생기 전열관 최적 마모관리 알고리즘 개발



## 원전 2차측 수화학 예측 모델 개발



## 고온 산화 응력 유한요소해석



# 주요 연구 실적 및 논문 실적(일부)

과제명	키워드	연구개발기간
소형 모듈형 원자로(SMR) 구조재료의 내구성 평가	원자력재료, <b>부식</b>	2022 – 2024
지역원자력산업 기반 에너지기술공유대학	인력양성	2024 – 2029
가동원전 증기발생기 전열관 마모 및 2차 계통 배관 감육손상 지능형 예측진단 기술개발	AI, <b>마모</b>	2023 – 2029
BMI 노즐 PWSCC 완화를 위한 초음파 피닝 재료 분석 및 PWSCC 개시 특성 평가	표면 처리, <b>균열</b>	2025 – 2027

## 주요 논문 및 수상 내역

- Materials Research Express (2025)→ Electroless Pd/Ni-P plating for fouling mitigation
- Nuclear Engineering and Technology (2025)→ Peening effects on residual stress & microstructure (Alloy 600/690)
- npj Materials Degradation (2025)→ ML-based modeling of IGSCC with uncertainty & explainability
- Nuclear Engineering and Design (2025)→ Probabilistic burst pressure model for SG tubes (fretting wear)
- Nuclear Engineering and Technology (2026)→ Thermodynamic modeling of PWR secondary-side water chemistry
- 우수 논문/포스터 상: 한국원자력학회(KNS), 대한기계학회(KSME), 한국압력기기공학회(KPVP)

# 연구실 인원 및 졸업생 현황

## 연구실 인원 (2026.03 기준)

구분	박사과정	석박통합과정	석사과정	학부연구생	합계
원자력재료연구실	1	4	2	1	8

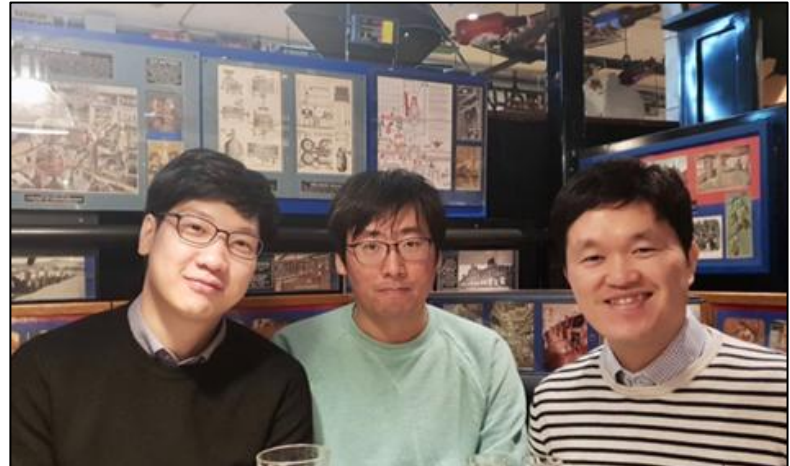
## 졸업생 현황(7 명)

- 박사 1 명: 한국자동차연구원 선임연구원
- 박사 1 명: 한국핵융합에너지연구원 박사후연구원
- 박사 1 명: 한국원자력연구원 박사후연구원
- 박사 1 명: 일본원자력연구개발기구(JAEA) 박사후연구원
- 석사 1 명: HAESEUNG
- 석사 1 명: 한국남부발전
- 석사 1 명: 포항공대 박사과정

# 해외 학회 및 연구활동



미국 MIT 연수 (2017, 2018)



미국 시애틀 학회 참석 (2018)



중국 상해 쑤저우 연구회의 (2018)

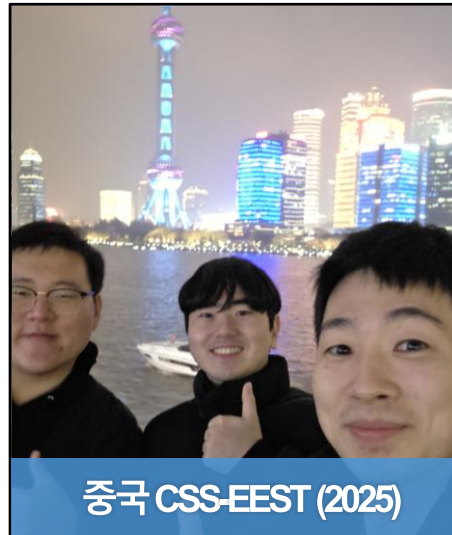
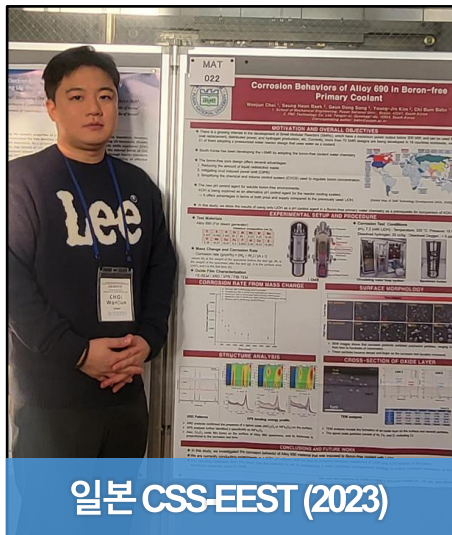
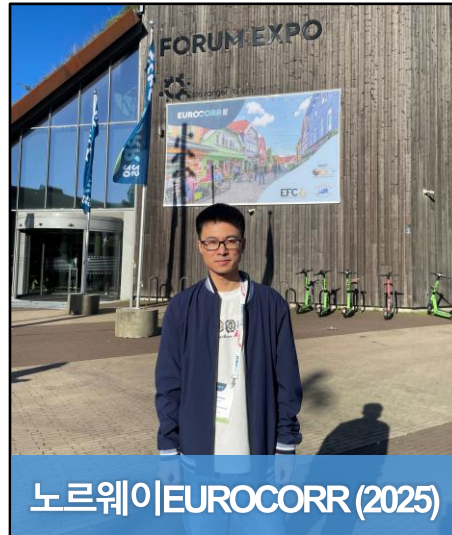
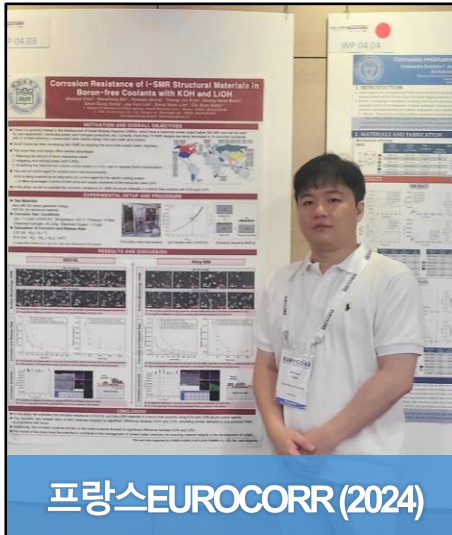


프랑스 INSTN 계절학기 (2019)



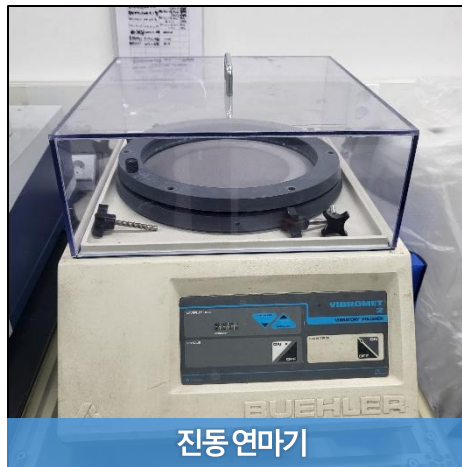
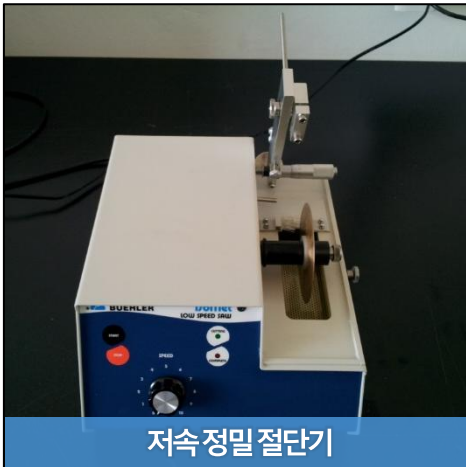
미국 ANL 연수 (2018, 2019)

# 해외 학회 및 연구활동



# 시편 가공 및 전처리

## 시편 가공 및 전처리 설비



# 실험 및 분석 설비

## 실험 및 분석 설비/소프트웨어



고온 산화장비



고온/고압 순환 오토클레이브



고온/고압 오토클레이브



광학현미경



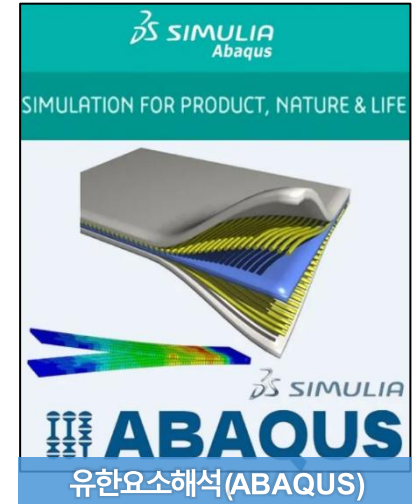
고온/고압 오토클레이브



고온/고압 오토클레이브



포텐시오스텍



# 감사합니다

<https://corrosion.pusan.ac.kr/>

wogjs20386@pusan.ac.kr

교수님 E-mail: bahn@pusan.ac.kr

TEL: 051-510-1033

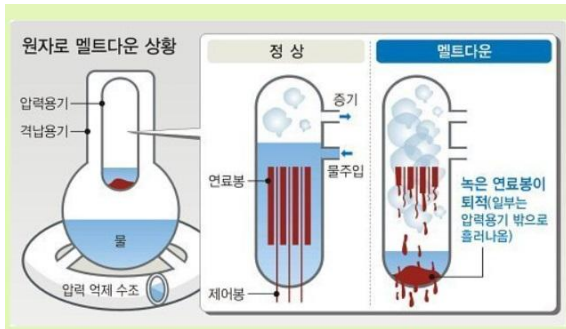
Chapter 2

# 부록

---

# 경수로 핵연료 피복관 개발

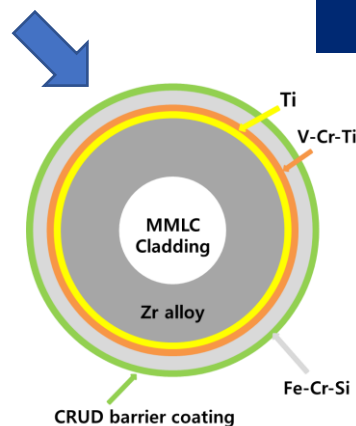
- 기존의 지르코늄 합금 핵연료 피복관은 원전 가동 조건에서는 좋은 특성을 가지나 일본 후쿠시마 원전 사고와 같은 냉각재 누설 사고 시 취약한 단점이 있음.
- 사고저항성 및 성능 향상된 핵연료 피복관 개발 목표
- 원전 사고환경 재료 평가 및 분석



고온산화환경 모사 장비 (1200°C)



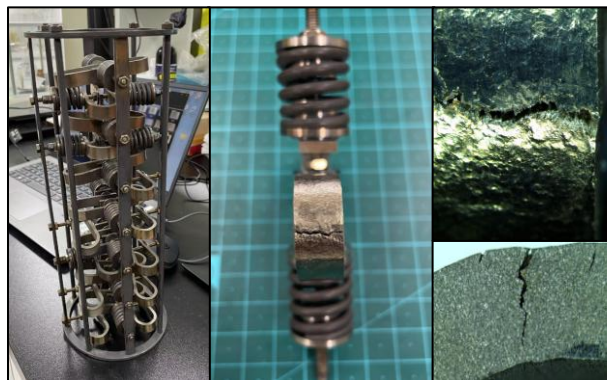
FeCrAl 피복관



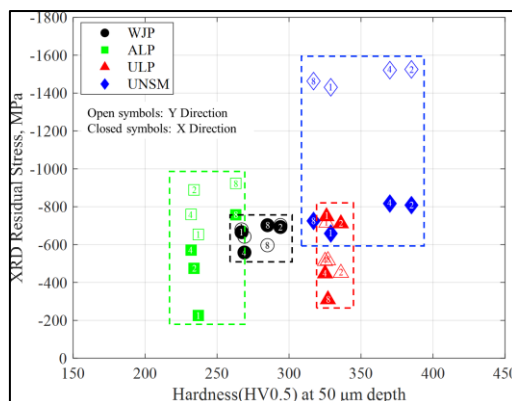
다중금속층 피복관

# 응력부식균열 개시 환경 및 특성 평가

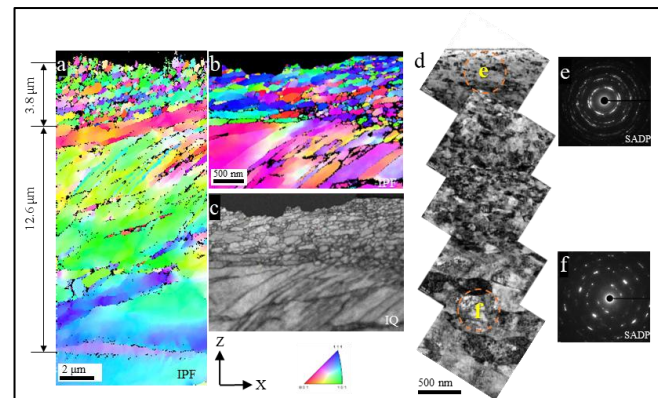
- 원자력발전소 구조 재료의 응력 부식 균열 연구
  - 가압경수로 1차측 환경을 모사하여, 금속재료의 장기 부식 평가
- 표면 처리 (피닝)을 통한 표면 특성 변화를 이용, 응력부식균열 손상 방지 연구.
  - 혁신형 소형모듈형 원자로 (i-SMR) 의 무붕산 KOH 수화학 환경에 대한 연구.



1차수환경에서 U-bend 시편  
응력부식균열 예시



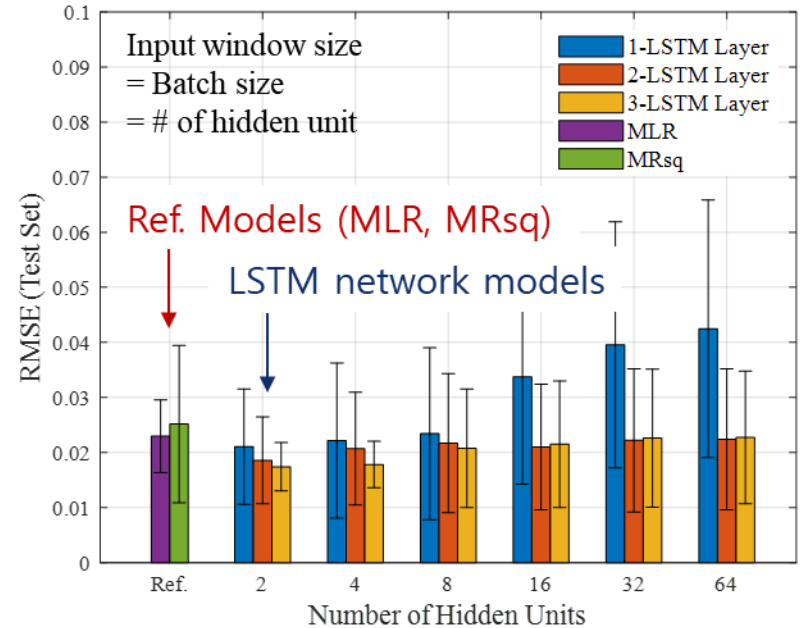
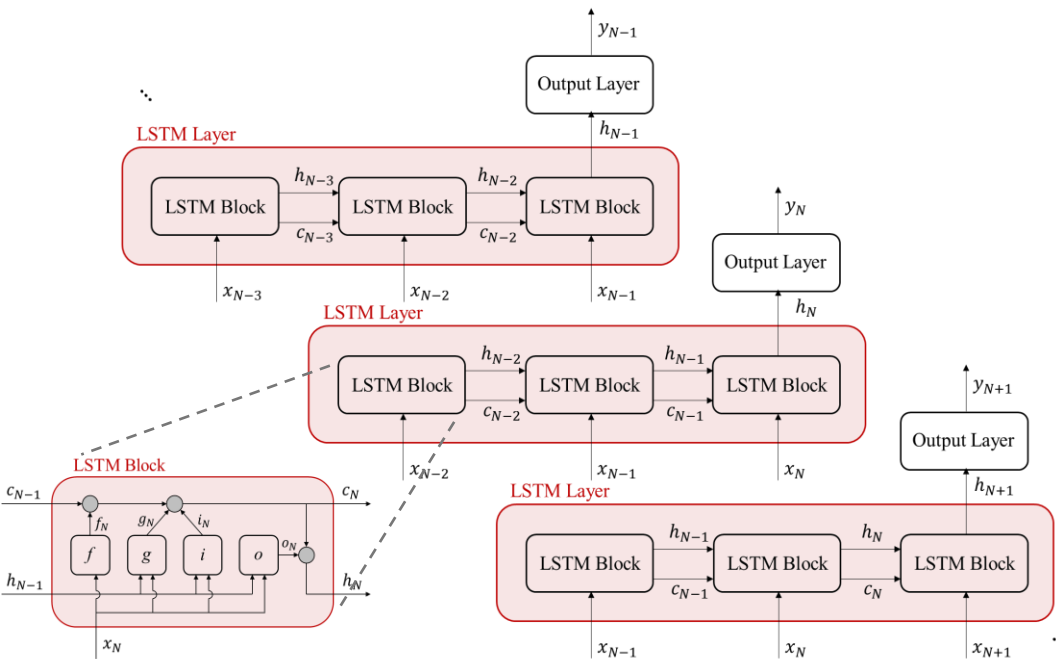
표면 잔류응력 및  
경도 측정 결과 예시



미세조직 특성 분석결과 예시  
(EBSD, TEM)

# 시계열 피로데이터를 활용한 잔여수명 예측

- 원자력발전소 주요 구조재의 피로 데이터를 가공 후, 잔여수명 예측 연구 수행
- 재료 부식 실험 수행뿐만 아니라, 결과를 통한 연구
- 딥러닝을 활용하여 부식 모델을 개발하여, 원자력발전소 주요 구조재료 수명을 확인함



# 무봉산 KOH 수화학 모사환경에서의 i-SMR 구조재료 내구성 평가

## ● 연구배경

- SMR은 간소화, 재료의 안전성 및 경제성 확보를 위해 무봉산 운전 채택
- SMR 수화학 제어는 구조 재료의 부식 손상을 최소화하는 것이 목적
- 단순화가 요구되는 잠수함 및 선박용 원자로는 무봉산 pH 제어제로 LiOH에서 KOH를 사용하는 추세

» SMR의 수화학 관리 전략을 위한 무봉산 KOH 환경에서 구조재료의 부식 거동에 대한 자료 확보 필요

### 무봉산 노심 설계의 장점

 피복관 축방향 출력 불균형 완화 → 안전성

 화학적 체적 계통(CVCS) 간소화 → 간소화

 액체 폐기물의 발생량 감소 → 경제성

 원자로 고유안전성 향상 (음의 감속재온도계수)

### pH 조절제 KOH의 적용

 LiOH(Li-7) 수급 문제 해결 → 경제성 향상

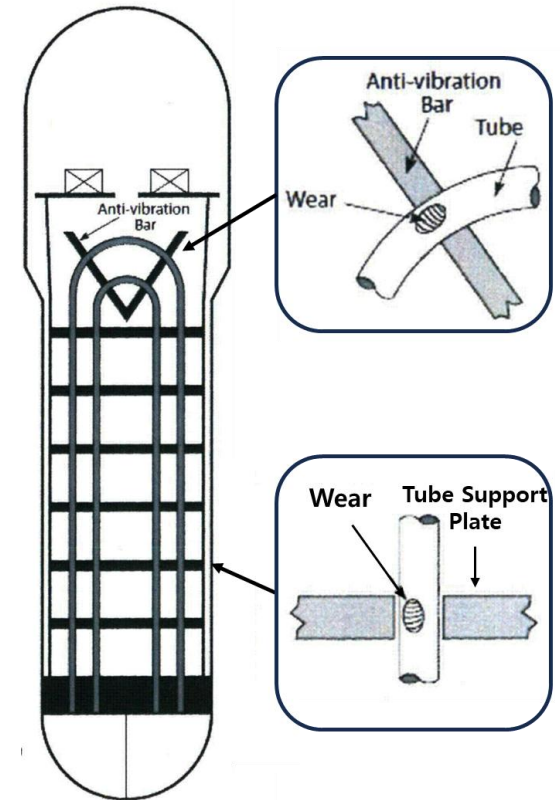
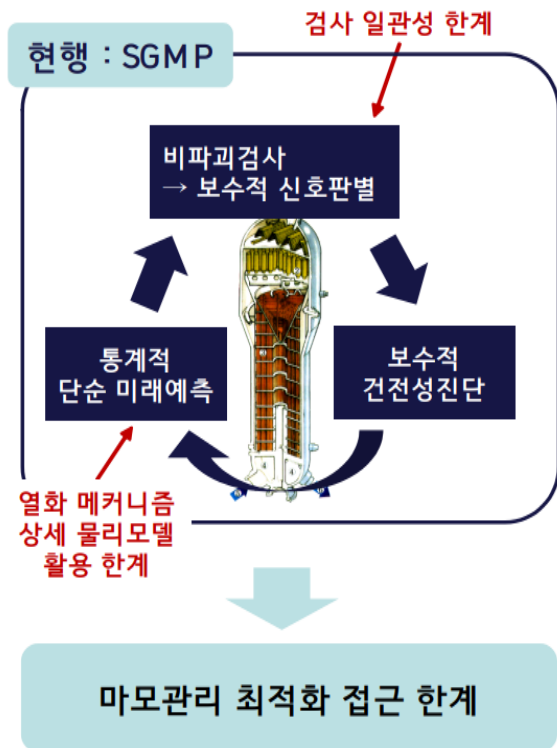
 Zr 합금 부식속도 완화 → 피복관 건전성 향상

 구조 재료의 일반 부식 및 SCC에 관한 자료

 틸새 수화학 및 부식 거동에 관한 자료

# 가동원전 증기발생기 전열관 최적 마모관리 알고리즘 개발

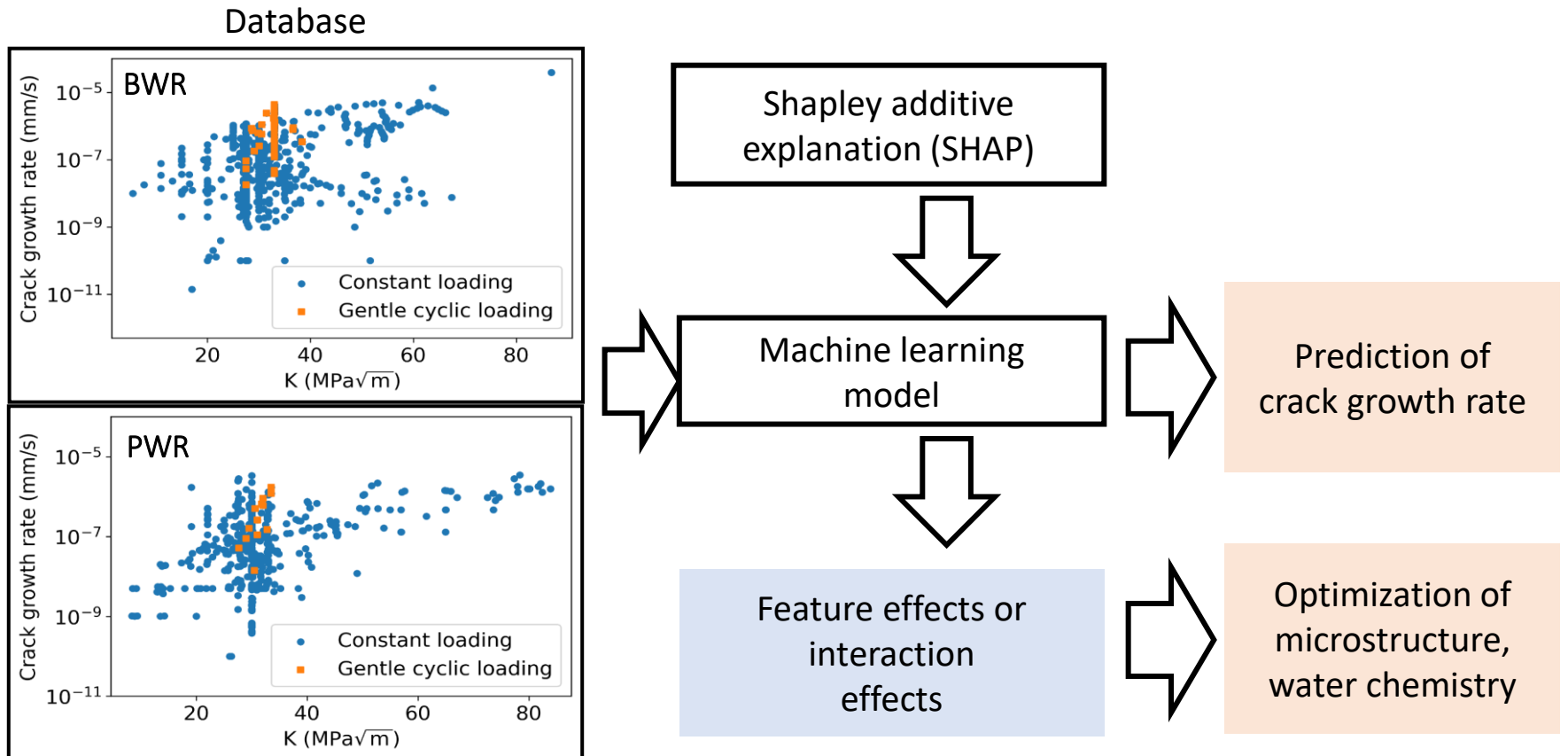
- 증기발생기 전열관과 지지 구조물 접촉으로 인한 마모 발생
- 비파괴검사 데이터를 기반으로 하는 전열관 마모 예측
- 마모 예측을 통해 증기발생기 전열관 건전성 확보 및 안전성 향상



증기발생기 전열관 마모

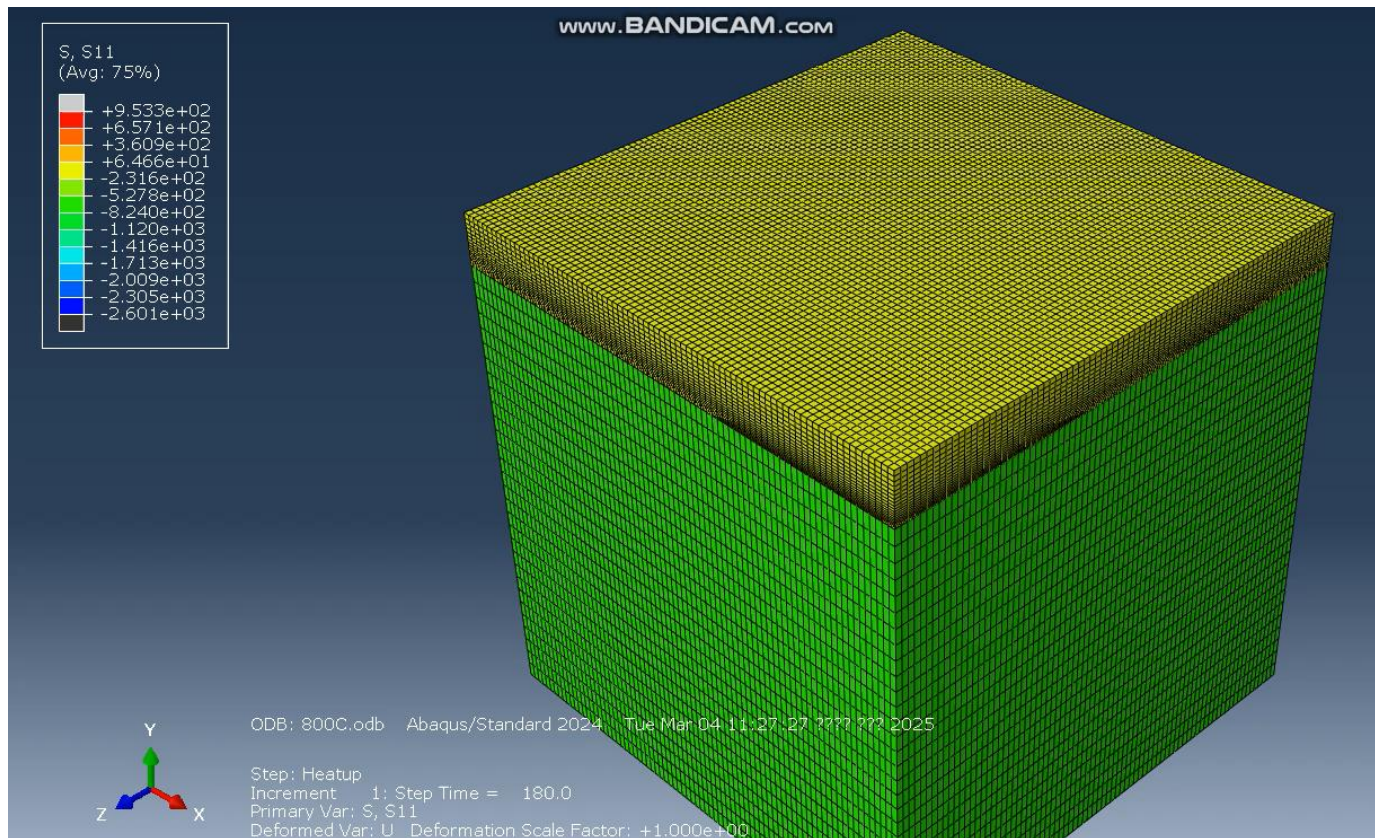
# 머신러닝기반 응력부식균열 수명 예측

- 응력부식균열 (SCC)은 여러 변수의 복잡한 상호 작용으로 인해 발생함.
- 설명 가능한 머신 러닝을 통해 정확한 예측할 수 있음.
- SCC에 대한 이해를 높이고 더 나은 예방 솔루션을 개발할 수도 있음.



# 고온 산화 응력 유한요소 해석

- 금속 재료는 고온에서 산화가 급속하게 진행됨
- 재료의 부식 가속화로 구조물 및 부품의 Failure 발생 가능
- Failure를 예측하기 위한 고온 데이터 확보 필요. But 고온에서 in-situ 데이터 확보 어려움.
- 유한요소해석을 통한 고온 산화 시의 응력 분석

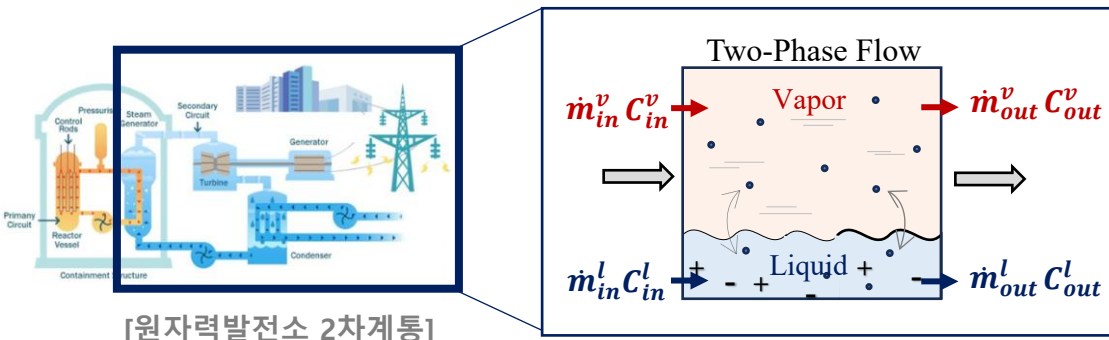


# 원전 2차측 수화학 예측 모델 개발

## 연구 배경

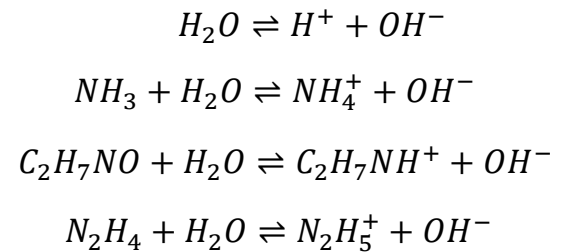
- pH 및 용존산소 농도는 재료의 부식 및 계통의 신뢰성 확보에 중요한 역할을 함.
- 현재 원전 2차계통에는 pH 조절제로 ETA(ethanolamine) 또는 암모니아를, 용존산소 제거 및 환원성 환경을 유지하기 위해 하이드라진(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>) 주입.
- 그러나, 원전 2차계통에서는 위치에 따라 온도, 압력, 증기 품질 등이 달라지며 첨가된 화학물질은 분배계수에 따라 증기상과 액체상에 분포함. 이로 인해 2차 계통의 위치에 따라 pH가 달라지는 현상이 발생함.

» 2차계통의 2상 유동(two-phase flow) 환경에서 steam quality, 유량, 분배계수 및 화학물질의 분해를 고려하여 pH 예측 계산 모델 개발



[원자력발전소 2차계통]

[2차 계통 내 유체의 흐름]



$$pH = -\log([H^+])$$

[2차 계통 내 주요 화학반응식]