

한국원자력학회 2022 추계학술대회 핵연료 분과
Workshop

핵연료 해석 기술 활용 현황 및
개발 방향

...

2022. 10. 19.

한국원자력연구원 핵연료안전연구부
김효찬

CONTENTS



01 핵연료 해석 기술

02 핵연료 해석의 범위

03 핵연료 해석 기술의 활용

04 핵연료 해석 기술 개발 방향

05 맺음말

01 핵연료 해석 기술

□ 해석 모델 개발 과정

- 가설
- 실험 현상의 발견 및 이해
- 실험 현상의 주요 인자 분석
- 현상의 메커니즘 이해 및 단순화
- 모델 개발
- 모델 검증
- 코드에 모델 적용
- 모델 민감도 및 불확도 평가
- 모델을 활용한 설계 및 안전성 평가 (인허가)
- 모델 유지 보수
- 모델 개선 (Debug)

현상 발견

모델 개발

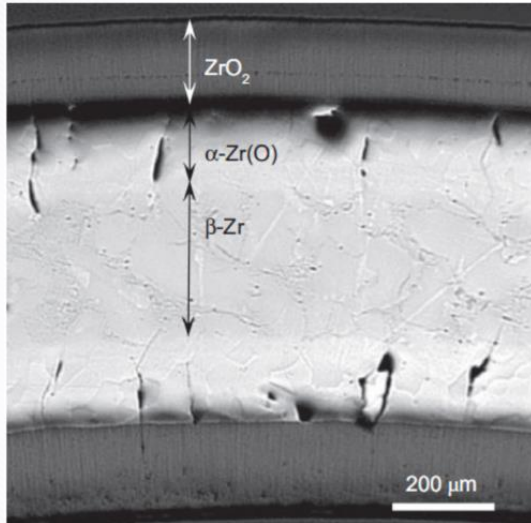
모델 활용

01 핵연료 해석 기술

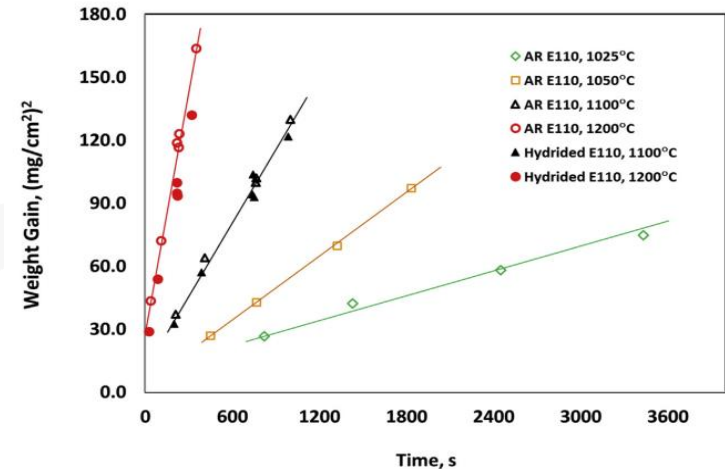
Malik Mamoon, Thesis of
Master degree at the MIT, 2018

□ 해석 모델 개발 과정 (예시; 고온 산화 모델)

① 실험적 발견



② Parameter study



④ Coding

```
CASE (Cathcart_Pawel)
!! From here down is the inner oxide layer.
!! OOT0 statement above also means there is no calculation done here?
! Cathcart-Pawel equations/calculation
! Convert oxidation energy from watts/m to kW/ft
emetat = powcnv * OxiPowerGan(k) / (3.28084_r8k * 1000.0_r8k)
WatrMetlEnrgy(k) = emetat / powcnv
! Check to see if metal-water reaction occurring at inside surface of cladding
! Use Cathcart-Pawel equations in QHITQX to calculate ID oxidation

IF (rod_failed .AND. node_within_burst_zone) THEN
! Failed Cladding and node ANode is within the zone that receives water through the cladding breach
tk1 = tffk(EOSTemp(ncld1,k))
tk2 = tffk(EOSTemp(ncld1,k))
dmw11 = OxiThk1(k) * 0.0254_r8k
w1 = OxiUptakeID1(k) / 10.0_r8k
! Use deformed inner diameter
dromdw = DefCID / 3.28084_r8k
IF (dmw11 < thkoxm) dmw11 = thkoxm
!
CALL chitox (tk1, tk2, dmw22, dmw11, TimeIncrement, AlphaThk22(k), AlphaThk11(k), &
& dromdw2, dromdw, emeti, w1, w2, iStoicGrad)
!
OxiThk2(k) = dmw22 / 0.0254_r8k
OxiUptakeID2(k) = w2 * 10.0_r8k
```

③ Correlation

The isothermal reaction rates of steam and Zircaloy-4 were determined at 50°C (90°F) intervals from 900 to 1500°C (1652–2732°F). The following correlations were obtained for oxide, alpha, and Xi layer growth and for total oxygen consumption:

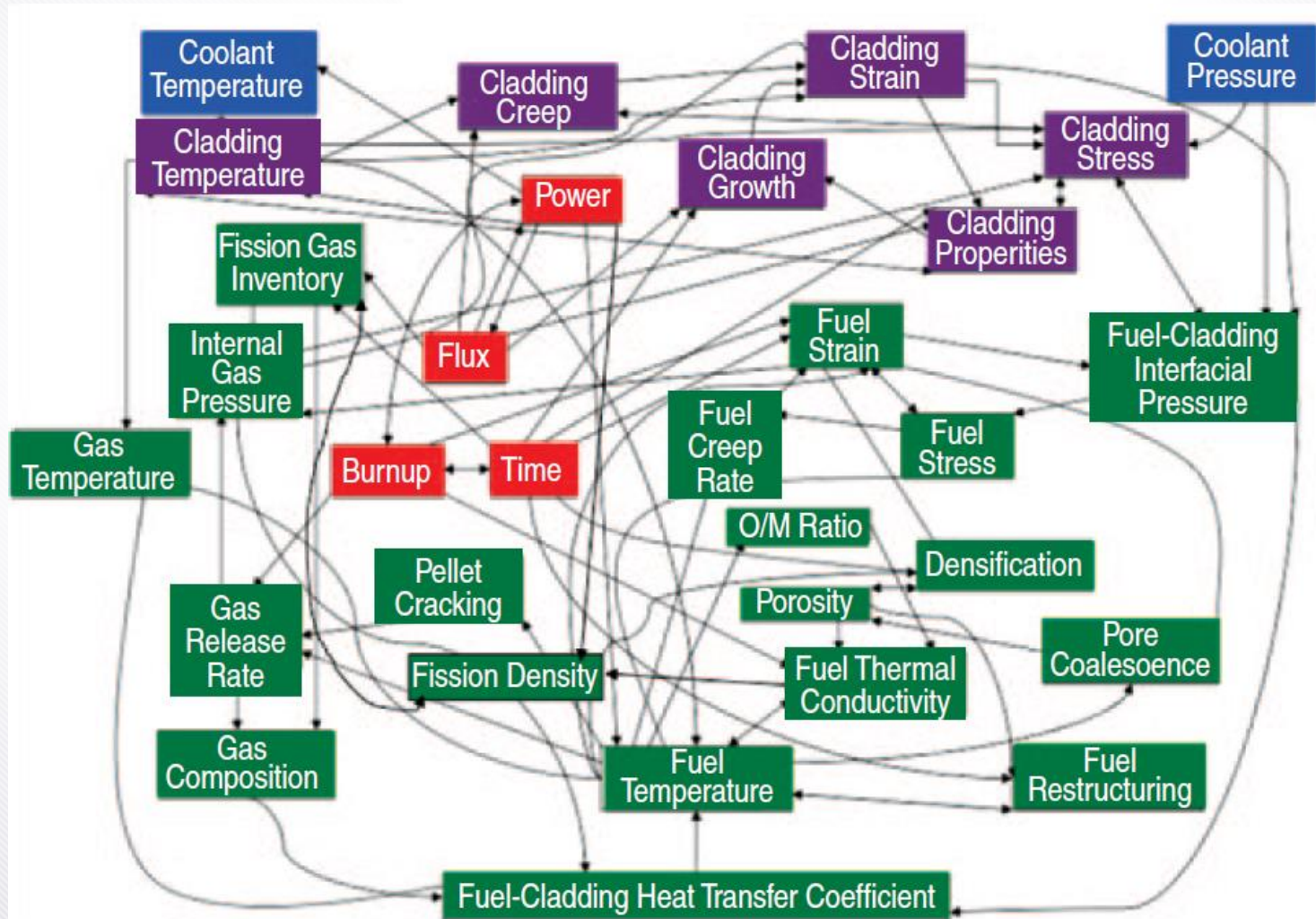
$$\begin{aligned} \delta_o^2/2 &= 0.01126 \exp(-35890/RT) \text{ cm}^2/\text{s} \text{ for } 1000^\circ\text{C} < T \leq 1500^\circ\text{C}, \text{ oxide} \\ \delta_\alpha^2/2 &= 0.7615 \exp(-48140/RT) \text{ cm}^2/\text{s} \text{ for } 900^\circ\text{C} \leq T \leq 1500^\circ\text{C}, \alpha \\ \delta_\xi^2/2 &= 0.3412 \exp(-41700/RT) \text{ cm}^2/\text{s} \text{ for } 1000^\circ\text{C} < T \leq 1500^\circ\text{C}, \xi \\ \tau &= 0.1811 \exp(-39940/RT) (\text{g}/\text{cm}^2)^2/\text{s} \text{ for } 1000^\circ\text{C} < T \leq 1500^\circ\text{C}, \text{ total} \end{aligned}$$

where the $\delta_k^2/2$ are the parabolic rate constants ($\delta_k^2/2 = K \, dK/dt$), ϕ , α , ξ refer to oxide, alpha and Xi layer growth, respectively, and τ represents total oxygen consumed. The correlations for ϕ , ξ , and τ are not valid below $\sim 1000^\circ\text{C}$ (1832°F) because below this temperature the oxide layer growth does not follow parabolic kinetics.

01 핵연료 해석 기술

BISON Workshop, 2022

□ 해석 코드 개발 과정 : 모델간 상관관계 분석, 해석 범위 등



01 핵연료 해석 기술

KJ Geelhood et al., FRAPCON-4.0
manual, 2015

□ 해석 코드 개발 과정

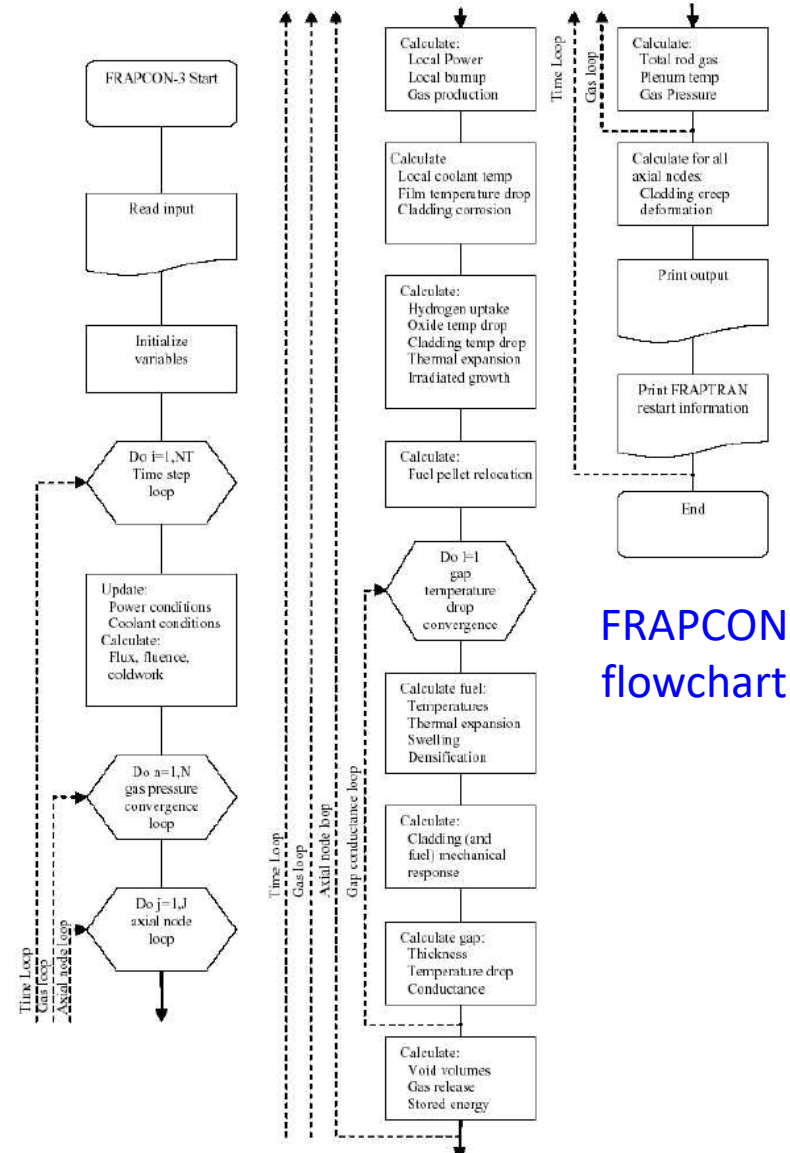
- 모델간 상관관계 및 Flowchart 구성
 - 개발자에 의한 해석 코드의 타당한 가정 수립
 - 모델간 전달 변수 및 calling sequence 설계

Fast neutron fluence
Material properties

Stress?
Temperature?

Irradiation growth
model

Irradiation
growth length



FRAPCON
flowchart

□ 핵연료 해석 코드 특징

- **Multiphysics**

- Full coupled nonlinear thermo-mechanics
- Multiple species diffusion (FGR cal.)
- Neutronics (Burnup cal.)
- Thermal-hydraulics (Boundary Con.)
- Chemistry (Corrosion)

- **Multi-space scale**

- Important physics at the atomistic and micro-structural levels
- Practical engineering simulations require the continuum level

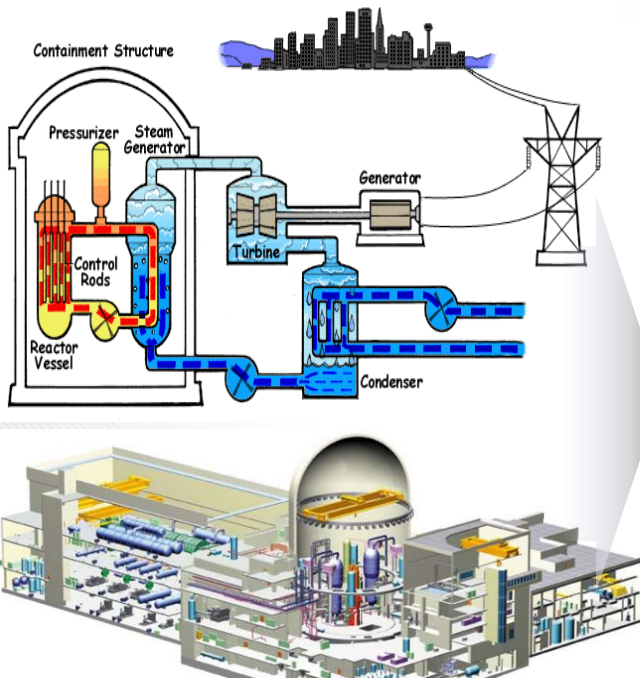
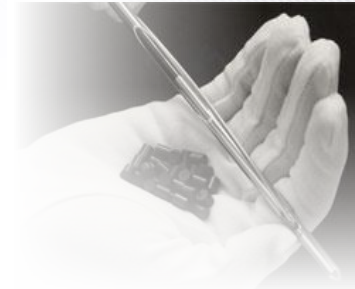
- **Multi-time scale**

- Steady operation ($\Delta t > 1$ week)
- Power ramps/accidents ($\Delta t < 0.1$ s)

02 핵연료 해석의 범위

백원필, 원자력과 안전, 2019

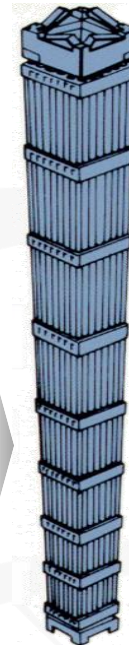
대부분의 방사성물질을 함유하고 있는 핵연료는 다중 방벽 개념에서 **1차 방벽(소결체)**과 **2차 방벽(피복관)**이 포함하고 있어 **건전성 평가**에 핵심이 되는 부품



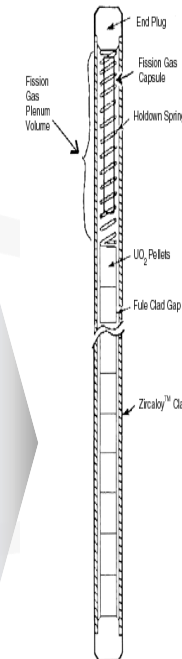
원자력발전소



원자로



핵연료집합체



핵연료봉
방사성물질의
대부분 함유



핵연료소결체



원전 안전의 핵심은 핵연료의 건전성

02 핵연료 해석의 범위

EVENT FREQUENCY RANGE	CATAGORIZATION SCHEMES		
	U.S. NRC		ANS
	NUREG-0800	RG 1.70(rev.2)	ANSI- N18.2
Planned Operation	Normal AOO	Normal	CONDITION-I (Planned Operation)
10^{-1} /RY	(Anticipated Operational Occurrences)	Moderate Frequency Incidents	CONDITION-II (Once a Year)
10^{-2} /RY		Infrequent Incidents	CONDITION-III (Once during Plant Life)
$< 10^{-2}$ /RY		Limiting Faults	CONDITION-IV (Not Occur during Plant Life)

NRC : National Regulatory Commission

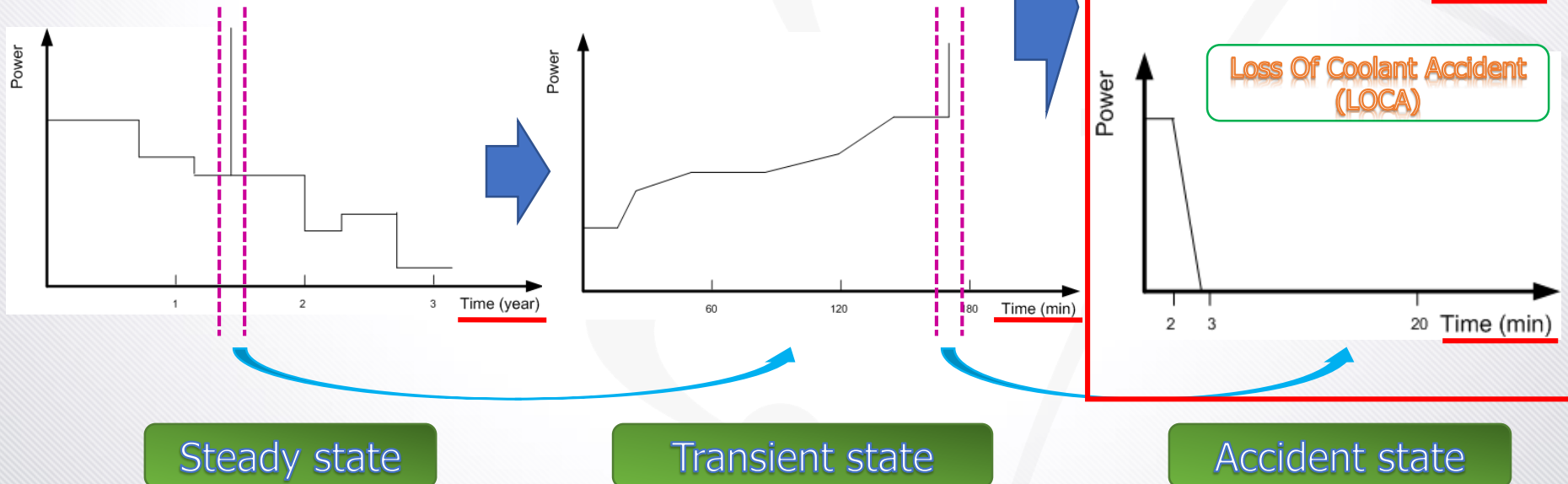
ANS : America Nuclear Society

RY : Reactor Year

02 핵연료 해석의 범위

□ Steady / Transient / Accident state

- Steady state : Normal operation
- Transient state : Power ramp, Slow transient
- Accident state (Design Based Accident) : LOCA, RIA



02 핵연료 해석의 범위

□ CONDITION I & II

- 국내 활용 대표 코드 : FRAPCON, ROPER
- 주요 현상 및 모델
 - Material properties of pellet and cladding model
 - Steady state Heat transfer
 - Pellet swelling and densification
 - Gap conductance model
 - Fission gas release
 - Rod internal pressure
 - Cladding irradiation growth
 - Cladding corrosion
 - Cladding deformation (elastic, plastic, creep)
 - Hydrogen pickup in cladding
 - etc... (Thermal hydraulic model..)

02 핵연료 해석의 범위

□ CONDITION III & IV

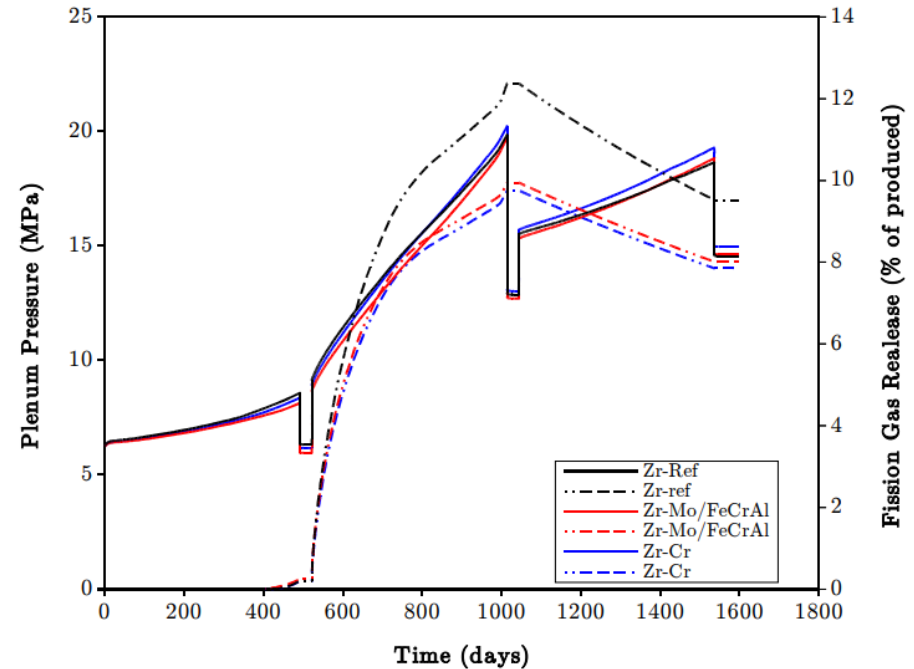
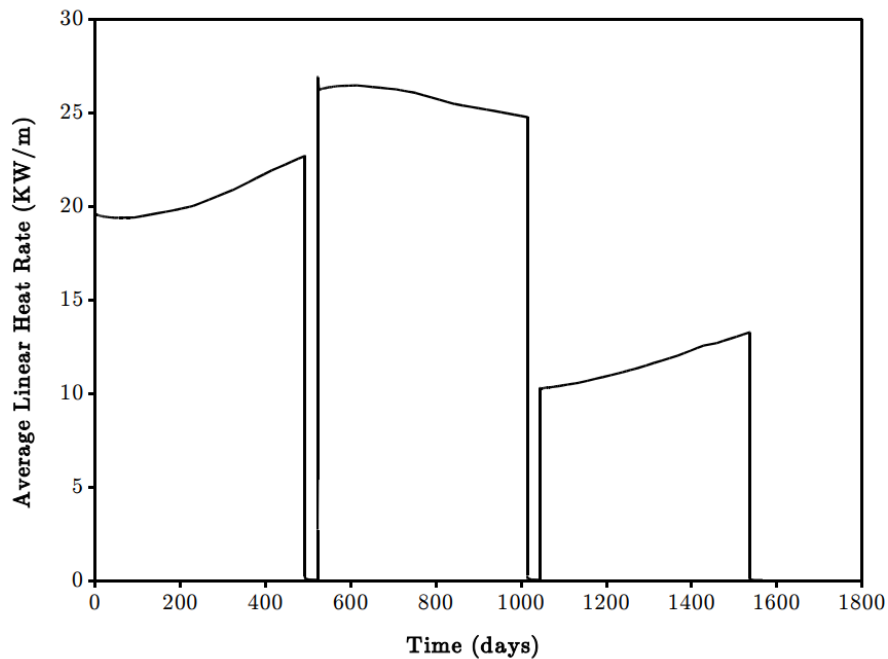
- 국내 활용 대표 코드 : FRAPTRAN, MERCURY, FROST
- 주요 현상 및 모델
 - Material properties of pellet and cladding
 - Transient Heat transfer
 - Pellet thermal expansion
 - Gap conductance
 - Cladding ballooning
 - Cladding rupture
 - Cladding oxidation at high temperature
 - Fuel fragmentation, Relocation and Dispersal
 - Transient Fission Gas Release model
 - Axial Gas flow model
 - etc....

03 핵연료 해석 기술 활용

Malik Mamoon, Thesis of
Master degree at the MIT, 2018

□ 핵연료 성능 및 설계 평가

- 설계된 핵연료 제원 및 재료 기반 핵연료 성능 평가
- 성능 평가 결과를 활용한 설계 제한 준수 여부 평가
- 적용되는 코드 및 모델의 타당성 확보 필수이므로 인허가 코드에서는 관련 자료 Review 및 방법론 Review 진행

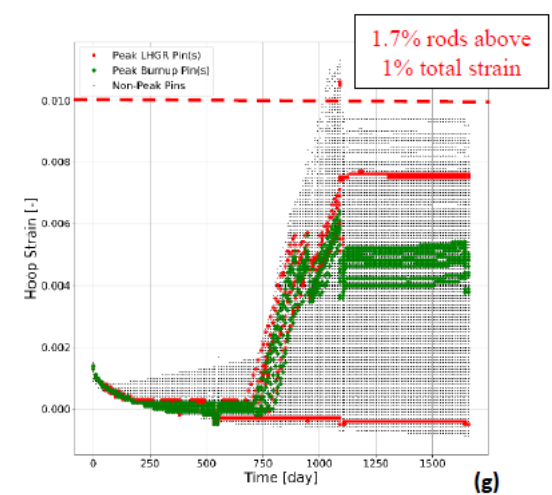
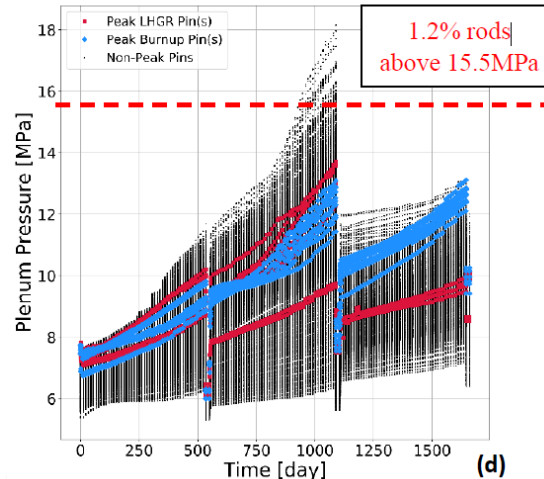
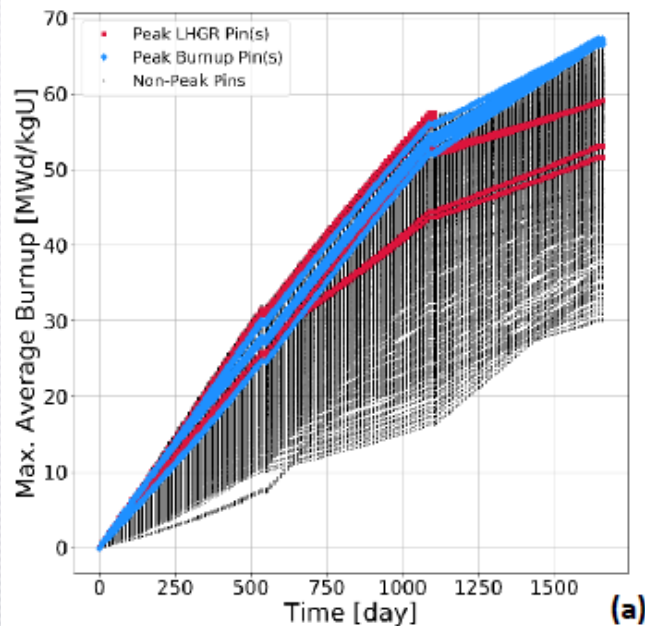


03 핵연료 해석 기술 활용

Assil Halimi et al., Investigation of Achievable Peak Rod Average Burnup with Full Core Fuel Performance for 4-Loop PWRs, Topfuel2022

□ 새로운 설계 요건에 따른 핵연료 성능 평가

- ATF 개발에 따라 피복관 건전성(산화막, 수소) 향상으로 연소도 상향 및 농축도 상향에 대한 연구 진행
- 규제 검증용 코드인 FRAPCON을 활용하여 6.8% 농축, Peak 연소도 75 MWd/MTU 설계에 대한 Full core 계산 결과

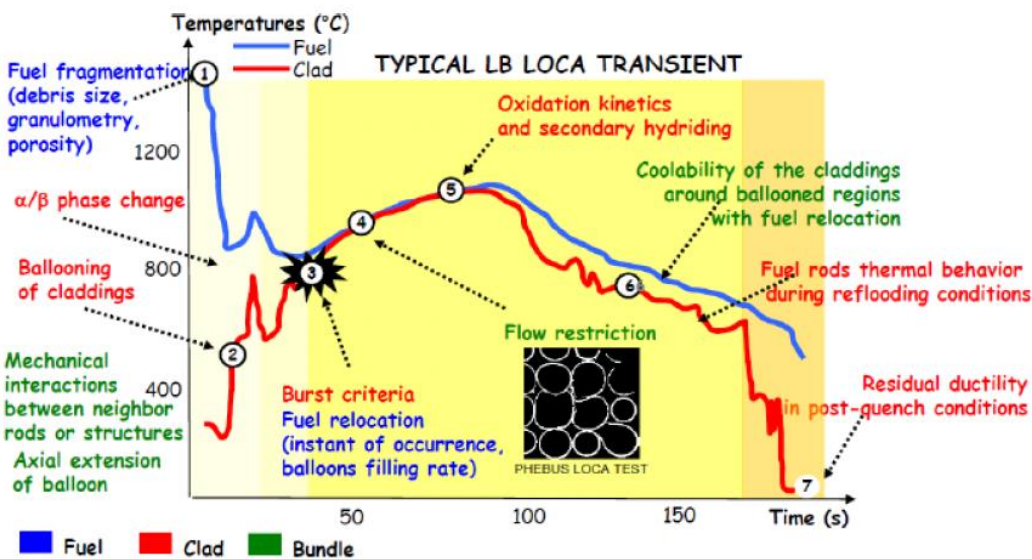


설계 제안치인 냉각재 압력 및 Hoop strain 1%를 넘는 성능 결과 예측
-> 관련 모델 개선 및 방법론 연구 필요

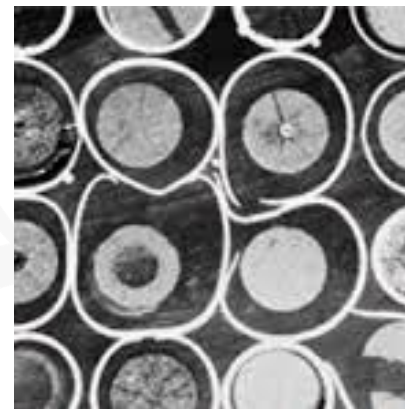
03 핵연료 해석 기술 활용

□ 사고조건시 핵연료 원자로 안전성능 영향

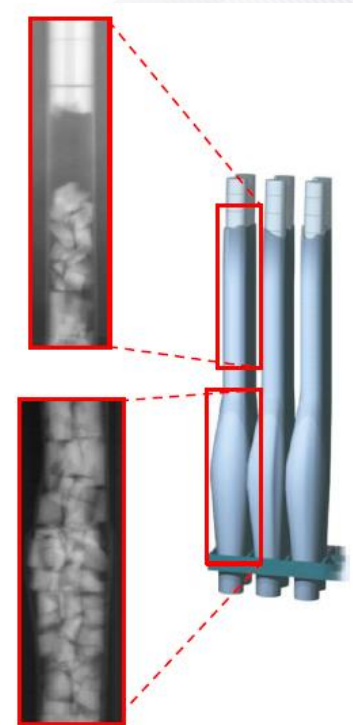
- 연소도에 따른 핵연료 물성/성능 변화
- 피복관 고온 산화에 의한 연성/취성 변화
- 피복관 팽창으로 유로 막힘에 의한 냉각성능 영향
- 소결체 파편화 및 재배치로 국부 출력 상승



(G.Repetto, IRSN)



Flow blockage due to Ballooning (PHEBUS@IRSN)



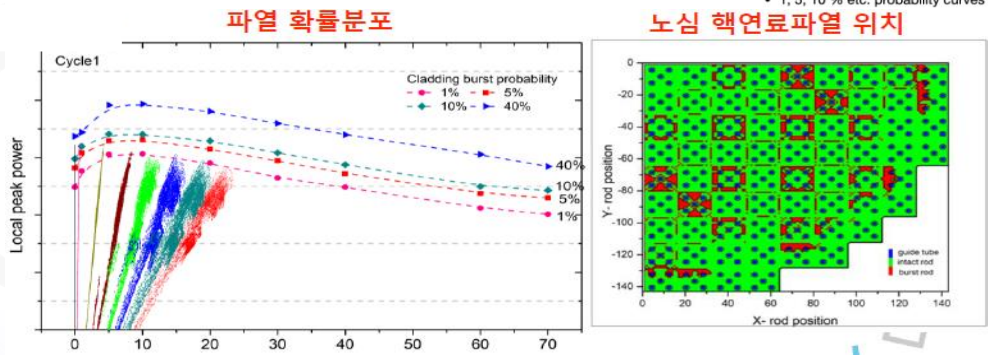
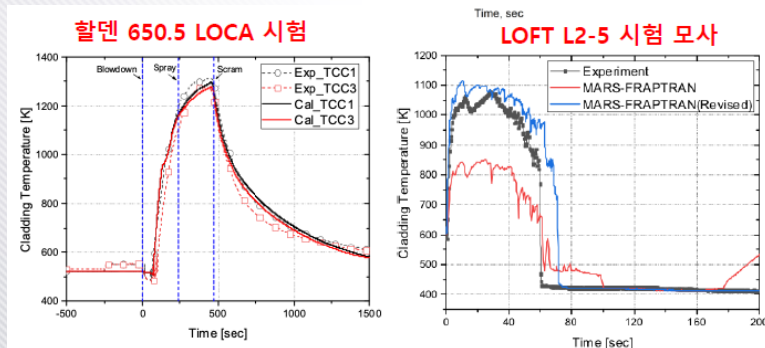
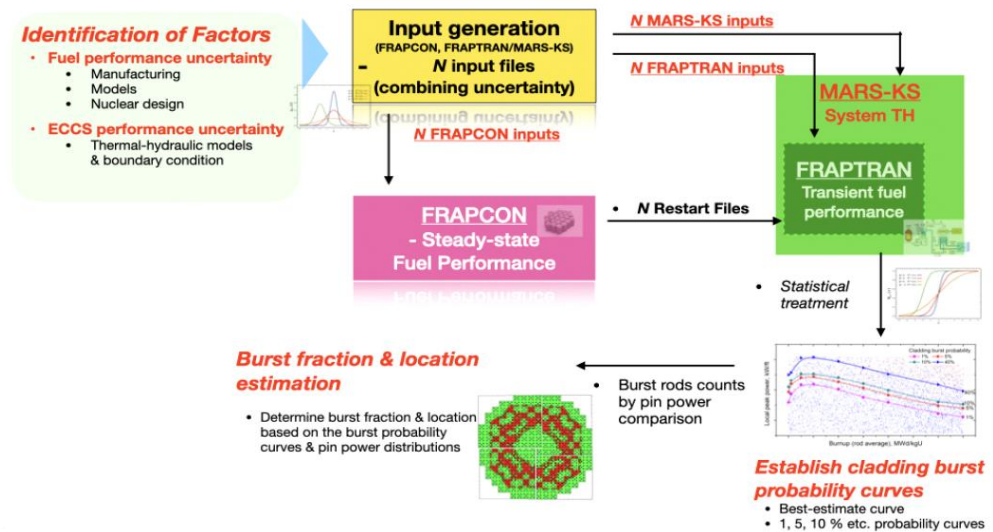
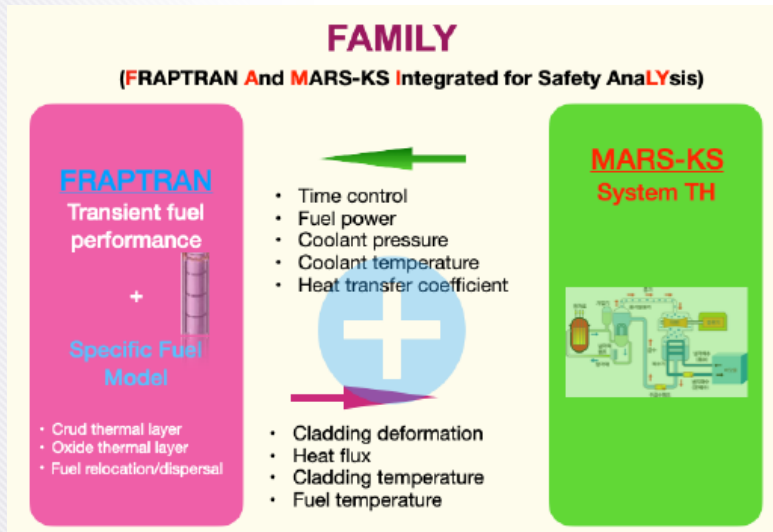
Fuel relocation & flow blockage (Anna et al.(SSM), Sweden, 2016)

03 핵연료 해석 기술 활용

J.S. Lee et. al, KINS/RR-2067
J.S. Lee, ECCS 규제기술 개발현황 및 규제 방향,
2020 원자력안전규제정보회의, 2020

□ MARS-KS/FRAPTRAN (FAMILY) 개발

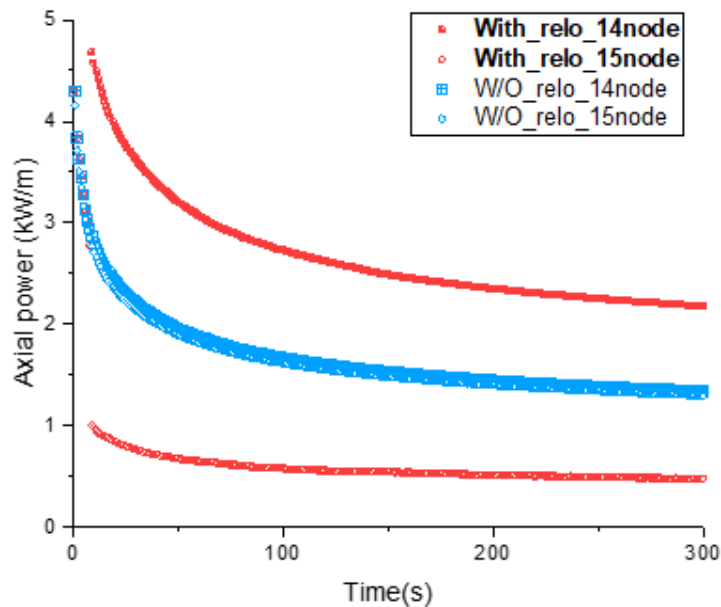
- 국내외에서 최초로 FRAPTRAN을 Embedded 형태로 계통 코드(MARS-KS)와 연계 체계를 구축, 검증, 평가를 수행함



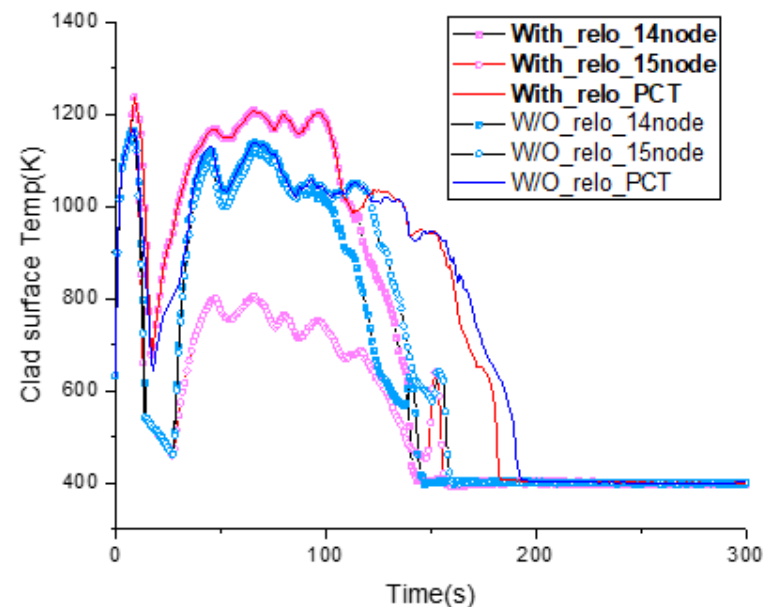
03 핵연료 해석 기술 활용

□ 통합코드 핵연료 재배치 모델 적용 결과

- 60 MWd/MTU 핵연료 보수적 출력 조건에서 재배치 발생
- 핵연료 파편화, 재배치 발생으로 출력 변화 및 PCT가 높아짐
- 고연소도 핵연료 거동을 고려하기 위해 통합코드에 핵연료 재배치 모델 적용이 필요함



재배치에 의한 출력 변화



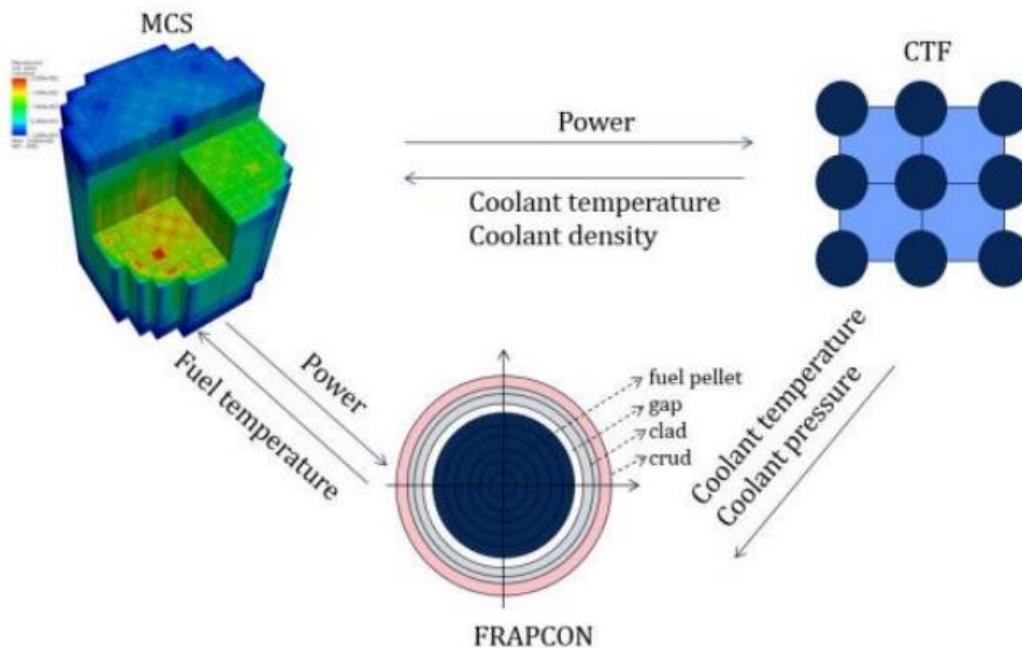
재배치에 의한 온도 변화

04 핵연료 해석 기술 개발 방향

K.A.Gamble et. al, CASL-U-2019-1870-000 REV.0, 2019
Multiscale Investigation of Fission Gas for development of
fuel performance materials models, INL/LANL
J. Yu et al., Computer physics communications
238, 2019

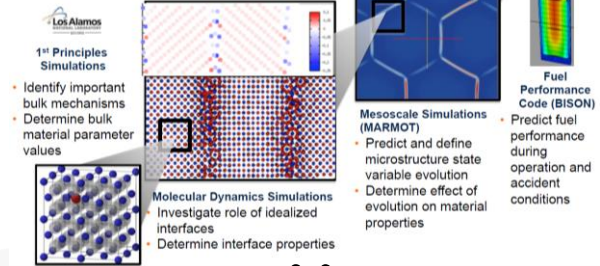
□ 다물리 및 다중스케일 해석 기술 개발

- 노심에서 핵연료-노심-열수력은 높은 상관 관계를 가지므로
긴밀한 연계 해석 체계 및 방법론 개발 필요
- 핵연료 거동에 다중 스케일 기반 모델이 영향을 미치므로
핵심기술 개발 및 적용



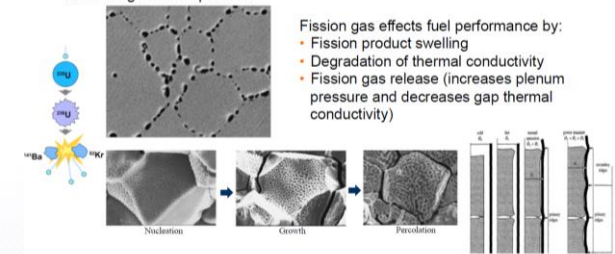
Multiscale Materials Modeling Approach

Modeling Approach: Physics-based materials models are developed using a hierarchical multiscale approach ranging from the atomistic to the macroscale



Effects of Gaseous Fission Products

- We demonstrate our multiscale approach by focusing on fission gas behavior, due to its large impact on the fuel performance.
- Gaseous fission products and point defects are constantly generated within the fuel during reactor operation



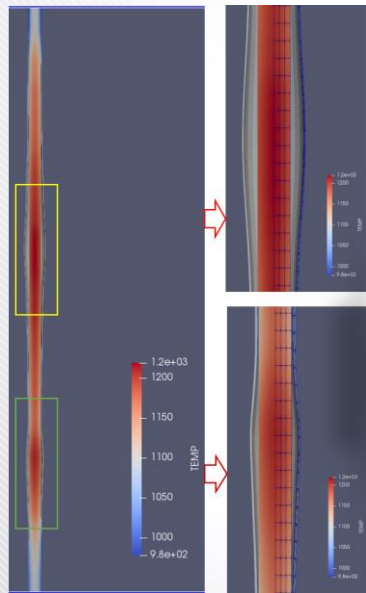
04 핵연료 해석 기술 개발 방향

안영규, 해석기반 디지털 트윈과 Ansys Twin builder, 2021

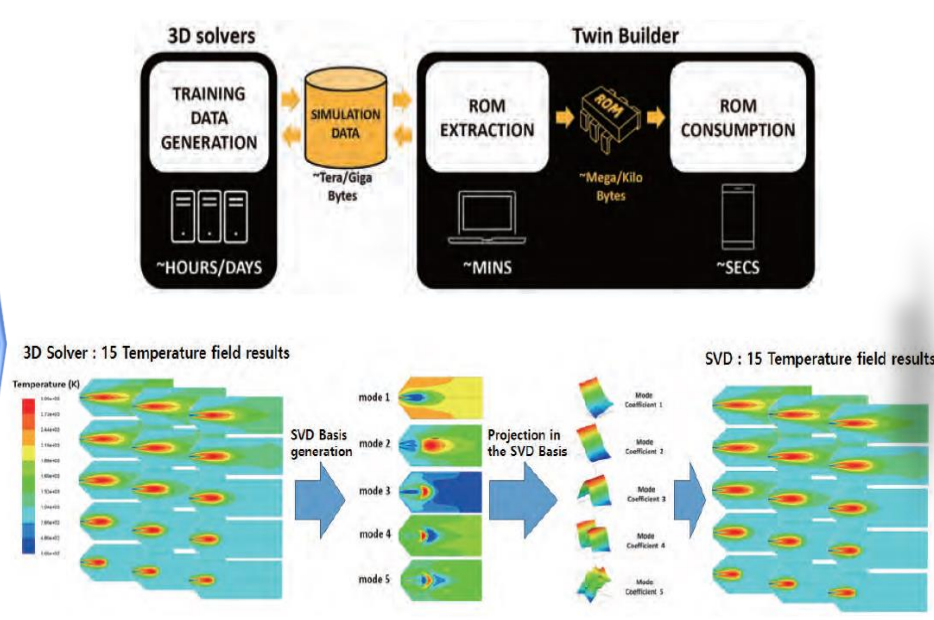
박장근, 서울대 석사 학위 논문, 2021

□ 실시간 핵연료 거동 예측을 위한 ML 기반 해석 기술 개발

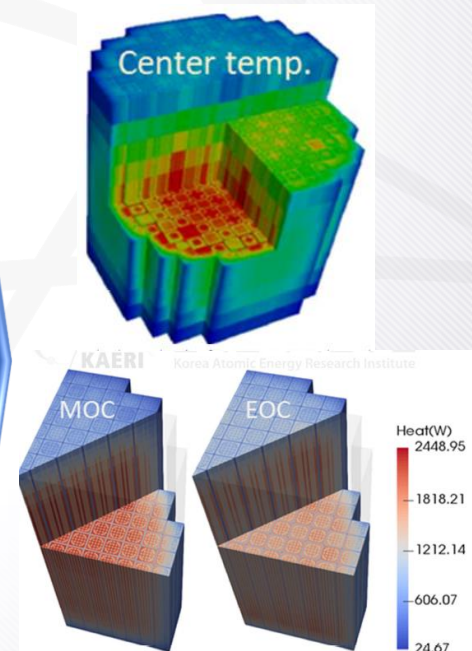
- Full core wide 실시간 노심 예측을 위해서는 빠른 핵연료 해석 기술 개발 필요 (노심 시뮬레이터 등)
- 물리 모델 기반 고정밀 핵연료 해석 코드를 활용하여 빠른 예측이 가능한 Machine learning 핵연료 해석 기술 개발



고정밀 핵연료 해석
(MERCURY)



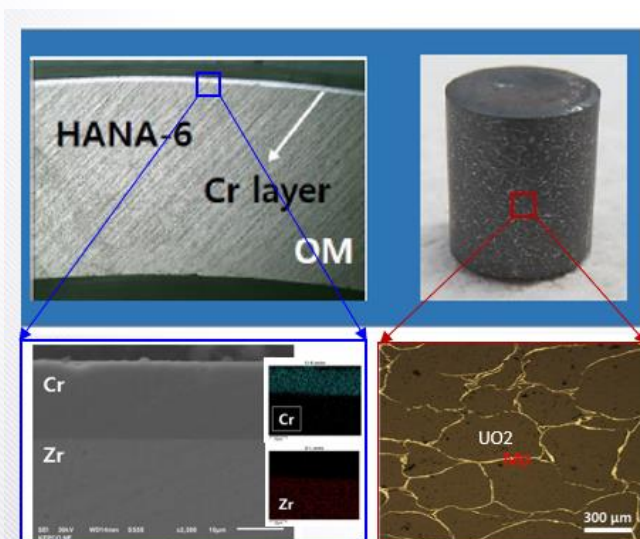
ML 기반 핵연료 모델 구성안



Core wide 노심 거동 예측

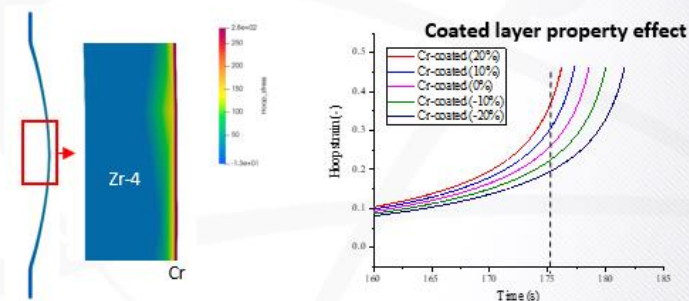
□ 핵연료 해석 기술 및 활용 현황

- 핵연료 해석 코드는 다양한 물리적 모델을 기반으로 하여 구성되어 있으며, 각 모델은 이론 및 실험을 기반으로 개발되고 검증됨
- 핵연료 해석 기술은 핵연료 설계 변경 (소재 변경, 제원 변경 등) 시 설계 및 안전성 평가에 활용됨
- 핵연료 해석 기술은 다물리, 다중 스케일 해석 기술 뿐만 아니라 빠른 예측을 위한 AI 기술을 활용한 모델을 개발 예정

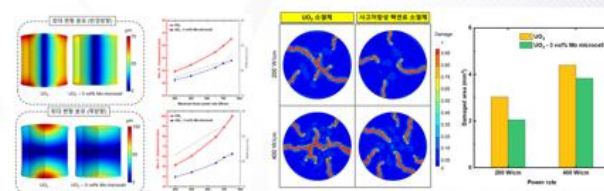


국내 개발 ATF 예시

Multilayer stress of ATF cladding @ballooning



이종 소재
거동 고려
ATF
소재해석



이종 소재로 구성된 ATF 해석 방향

감사합니다

김효찬 (hyochankim@kaeri.re.kr)