FRAPCON Base Irradiation Input for FFRD Analysis

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

2021. 5. 12

Korea Atomic Energy Research Institute

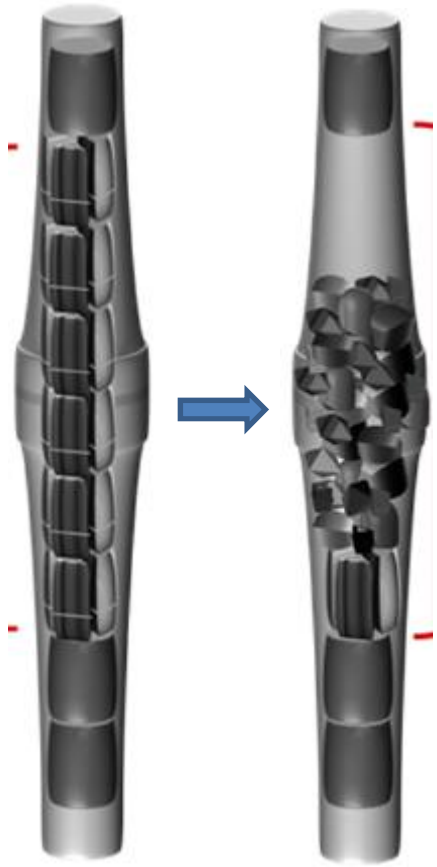
Yong Sik Yang, Jang Soo Oh

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

핵연료 파편화, 재배치 및 분산 현상

➢ FFRD(Fuel Fragmentation Relocation Dispersal)

현상	발생 기구
Fragmentation	정상 : 열응력에 의해 소결체가 부서지는 현상 사고 : 소결체 내부 기포 압력, 피복재와 소결체의 열적/기계적 응답 특성에 의해 소결체가 부서지는 현상
Relocation	파편화된 소결체의 연료봉내 이동 (주로 축방향)
Dispersal	파편화된 소결체가 손상부를 통해 외부로 유출

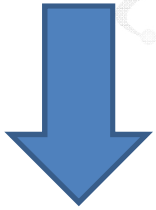


[K. Govers. Et al., Ballooning and Relocation during LOCA transients, SCK/CEN-ER-261]

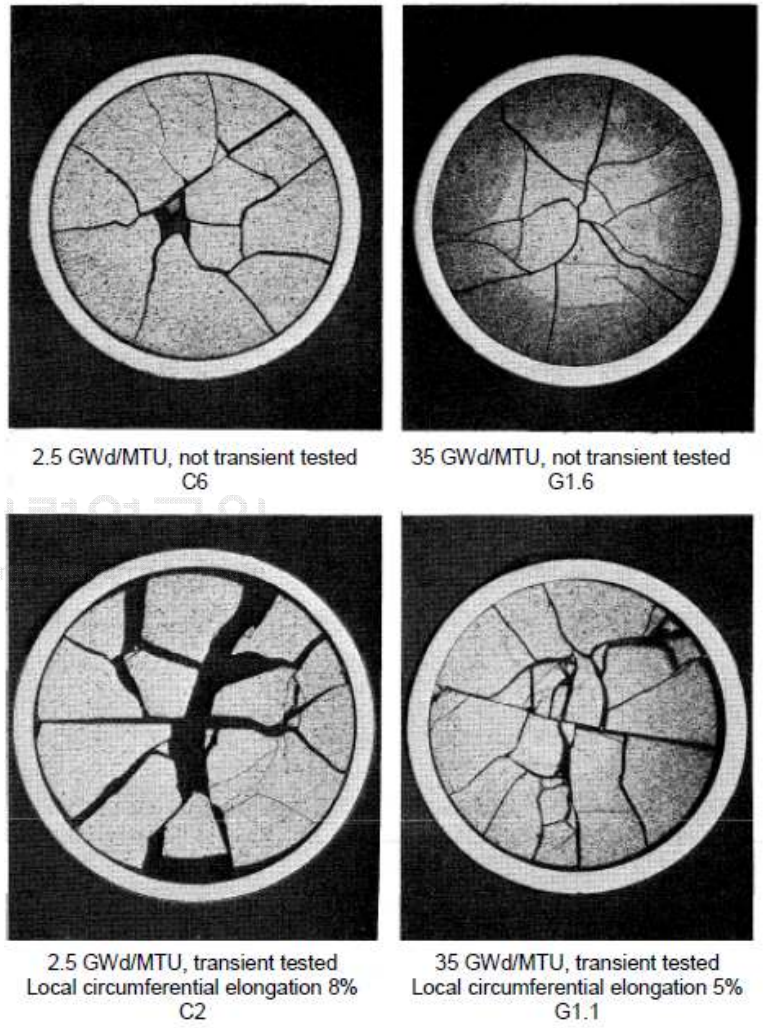
첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

주요 관심 사항 : 핵연료 관점 → 안전해석 관점

- 파편화가 발생할 것인가?
  - Yes
- Relocation이 언제/어디서/얼마나 발생할 것인가?
- Dispersal은 발생할 것인가?



- PCT/ECR 에는 어떤 영향을 끼칠 것인가?
- 냉각 성능은 유지될 것인가?

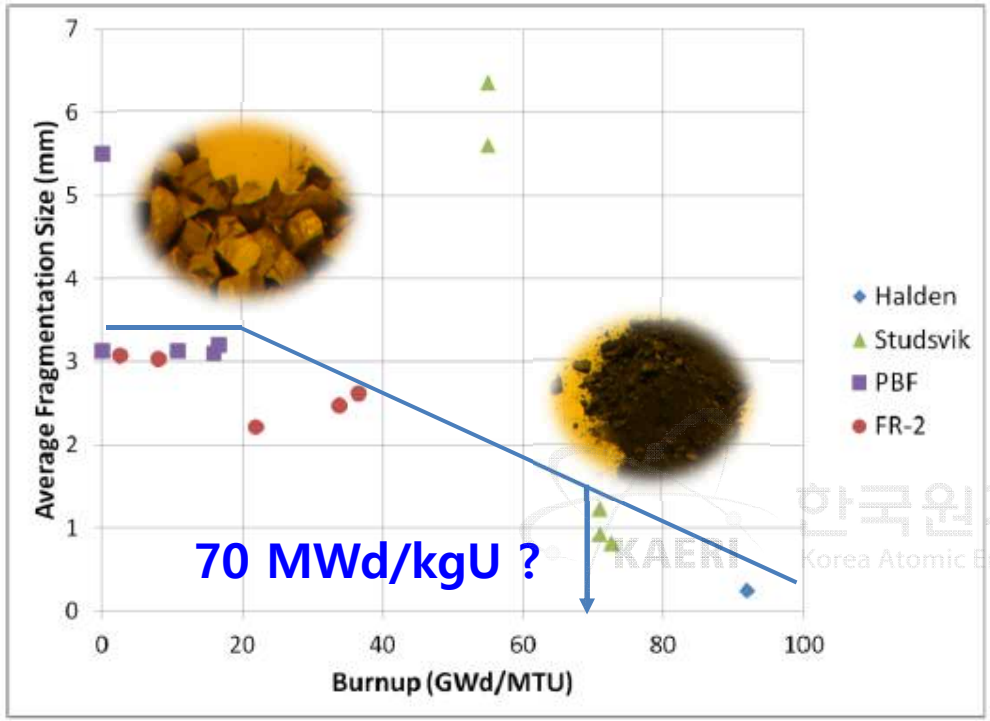


[FR-2 Test results]

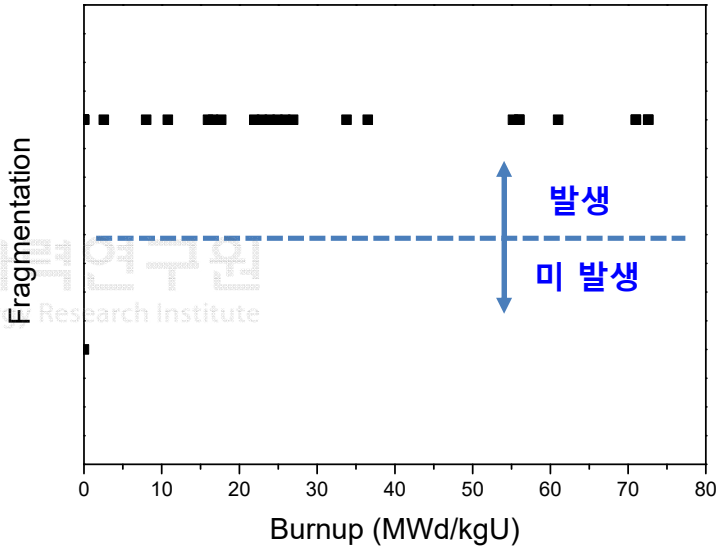
KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

파편화 : 연소도와 파편 크기



[전 연소도 구간에서 파편화 발생]

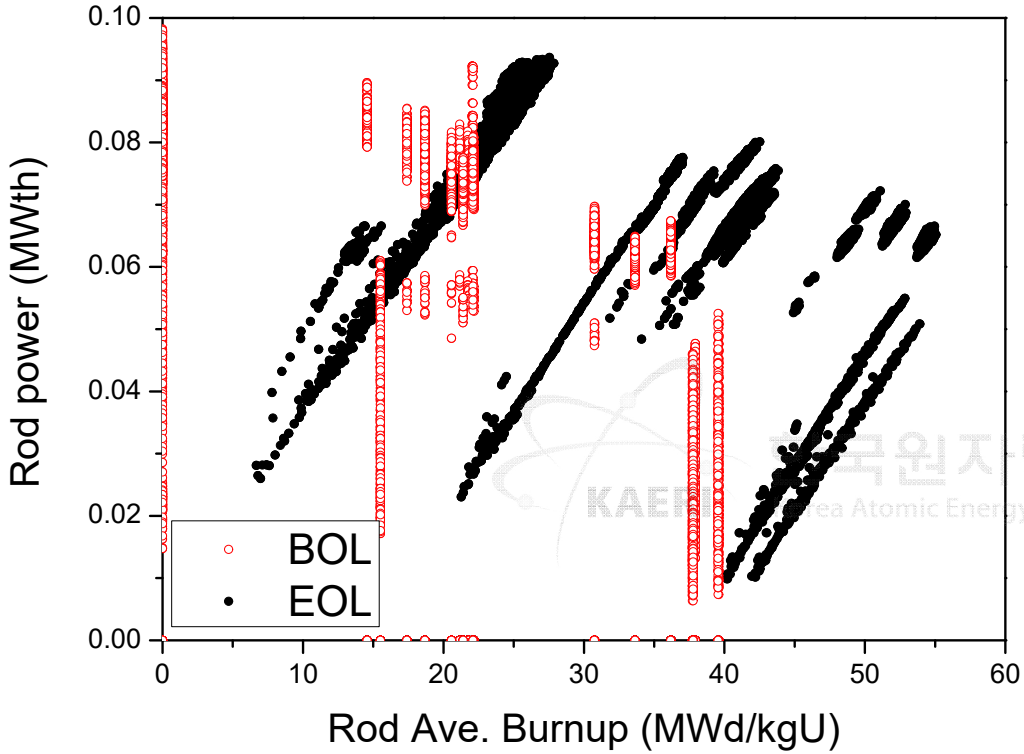


[Patric A.C. Raynaud., Fuel Fragmentation, Relocation, and Dispersal During the LOCA, NUREG-2121]

- 파편화 현상은 전 연소도 구간에서 확인됨
- 고연소도에서 파편 크기가 작아지는 경향이 나타남 : 핵분열 기체 누적, High burnup structure

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

Burnup Distribution



- 봉평균 연소도 기준
  - 미세 파편화 문턱에 여유
- 국부 연소도 기준
  - 노심 정밀 계산 필요

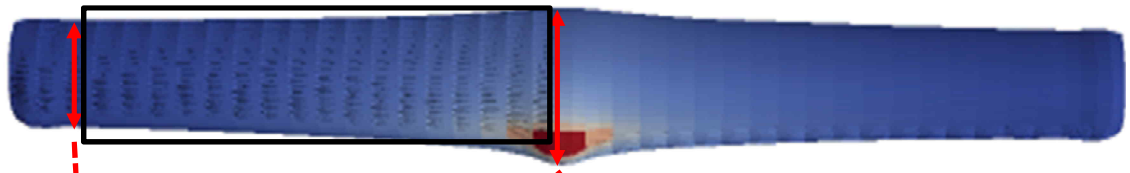
Whole core rod average burnup distribution, RASK-K result for OPR1000

[UNIST / KHNP]

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

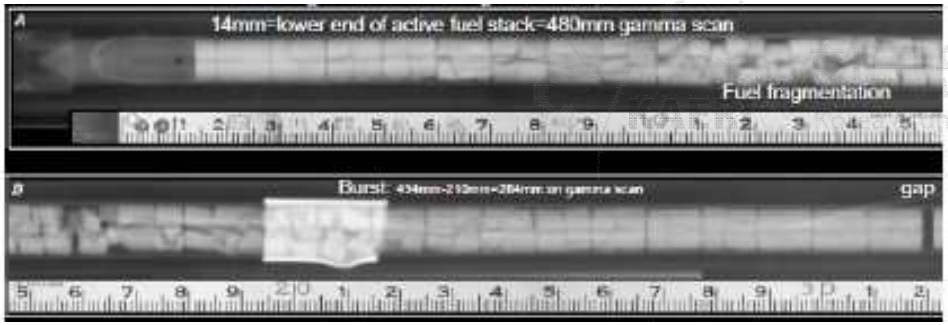
첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

Cladding Strain vs Relocation



Relocated fuel region

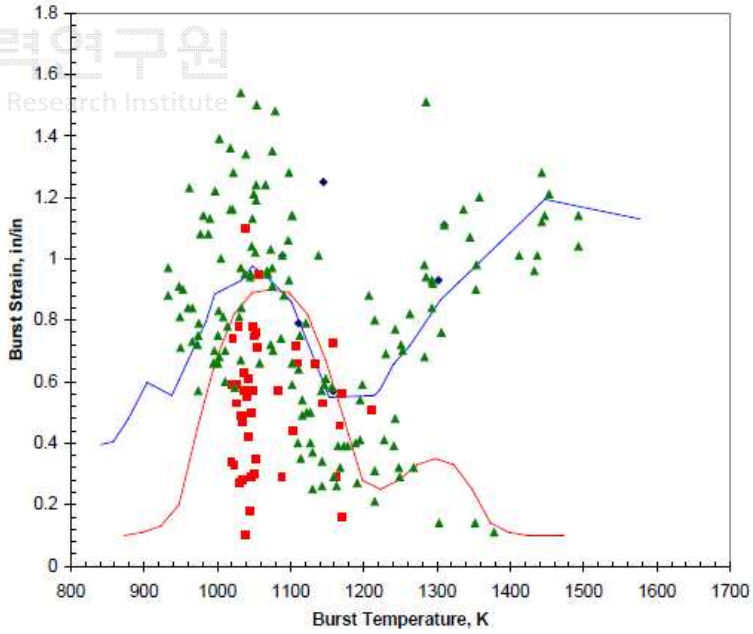
Fragmentation/Relocation threshold strain



[Halden IFA 650.11]

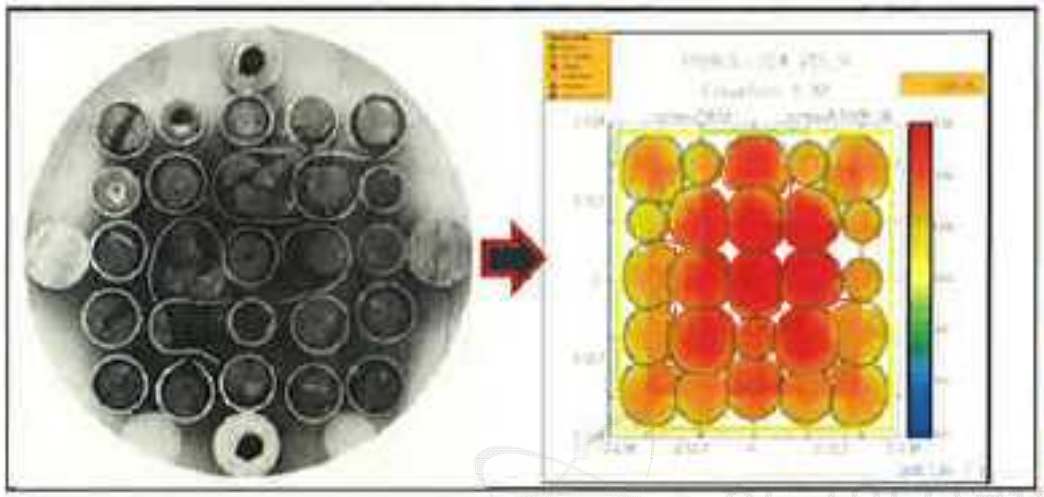
- FR-2 : ~10%
- Halden LOCA Test : 13~17%
- Studsvik LOCA Test : 4~12%

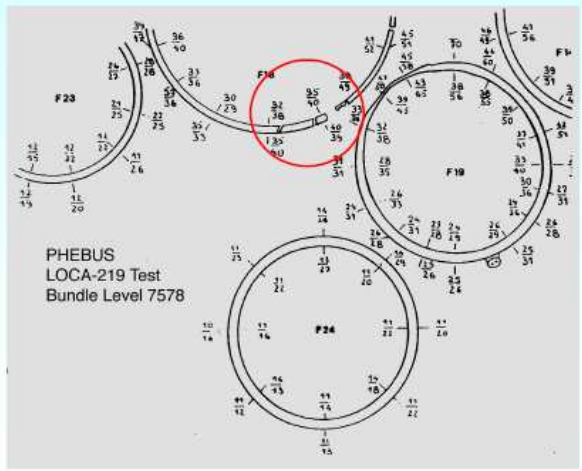
Maximum burst strain, NUREG-0630



첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

파손부와 Bundle 효과





[PHEBUS 215P, and M. Petit et al., IRSN]

- 파손부 형상 및 크기는 온도, 연료봉 내압에 크게 의존
- Bundle에서는 원주방향 온도 불균일성 연료봉 사이 기계적 접촉이 파손과 channel blockage에 큰 영향을 끼침
- 핵연료 변형, 파손 및 재배치가 온도 및 내압을 크게 변화시킴 → 궤환 효과

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

고정밀 FFRD 평가 기술 개발의 필요성

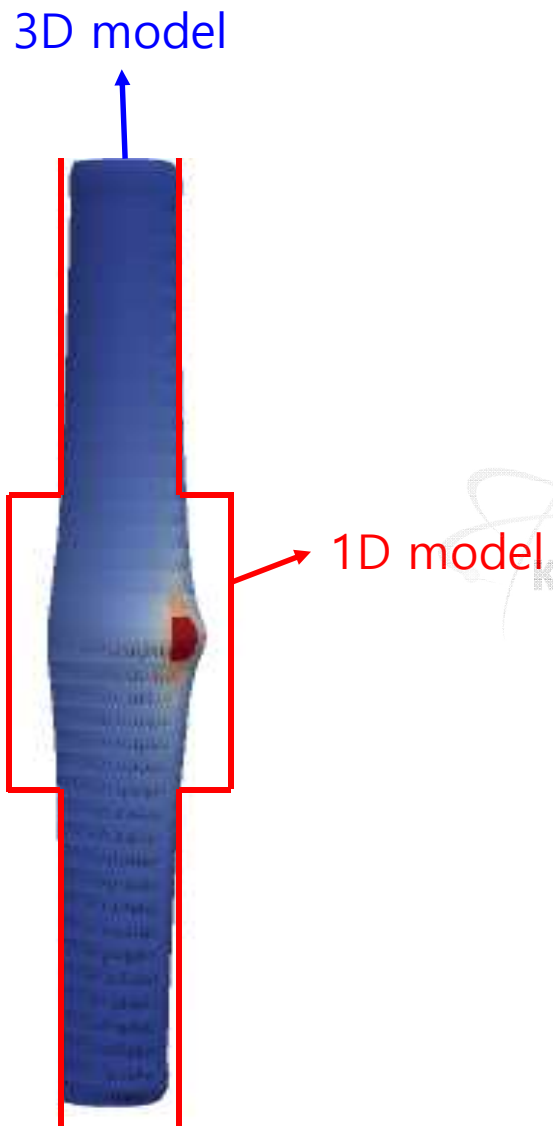
- 핵연료 기계적 변형에 대한 정확한 예측 필요
- 열수력 현상과 연계된 정확한 온도/변형 평가 필요

노심/열수력/핵연료를 종합적으로 고려한 정밀한 FFRD 해석 tool 개발 진행 중

상기 tool 검증에 필요한 검증 DB 확보 및 검증 입력 확보 → 논문 주제

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

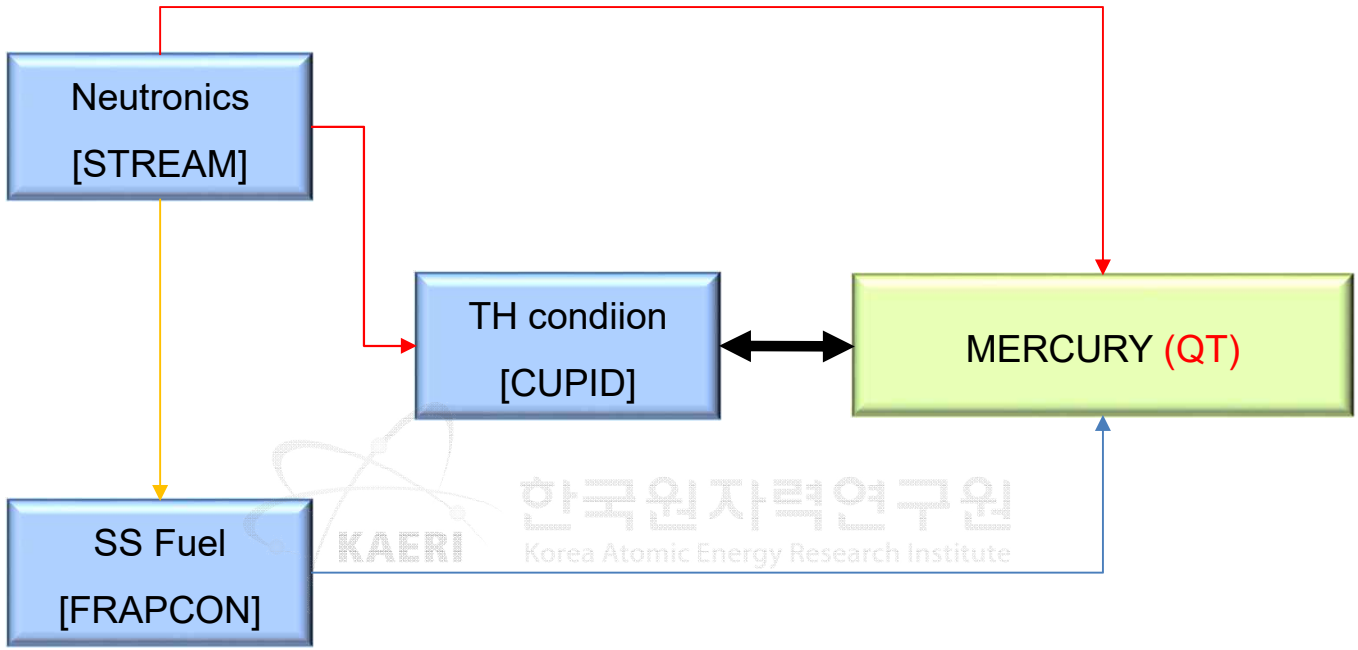
Fuel Mechanical Behavior Model 개선



- 1D 모델(FRAPTRAN)은 Max. burst strain을 보수적으로 평가하기 위한 모델로써, 실제 strain 분포 예측에 한계가 있음
- 사용자의 Axial nodalization에 의해 총 길이가 결정되는 문제점이 있음
- 상기 한계를 넘어서기 위해 유한요소법(FE)에 기반한 higher order 모델이 요구됨
- FFRD 및 냉각 가능 형상에 대한 전반적인 평가를 위해서는 multi-rod(Bundle)에 대해 확대되어야 함
- KAERI(과기정통부), 한수원(자체) 연구를 통해 수행하고 있으며 올해 하반기부터 본격적인 결과 발표 예정

한국원자력연구원
KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

고정밀 FFRD 평가체계

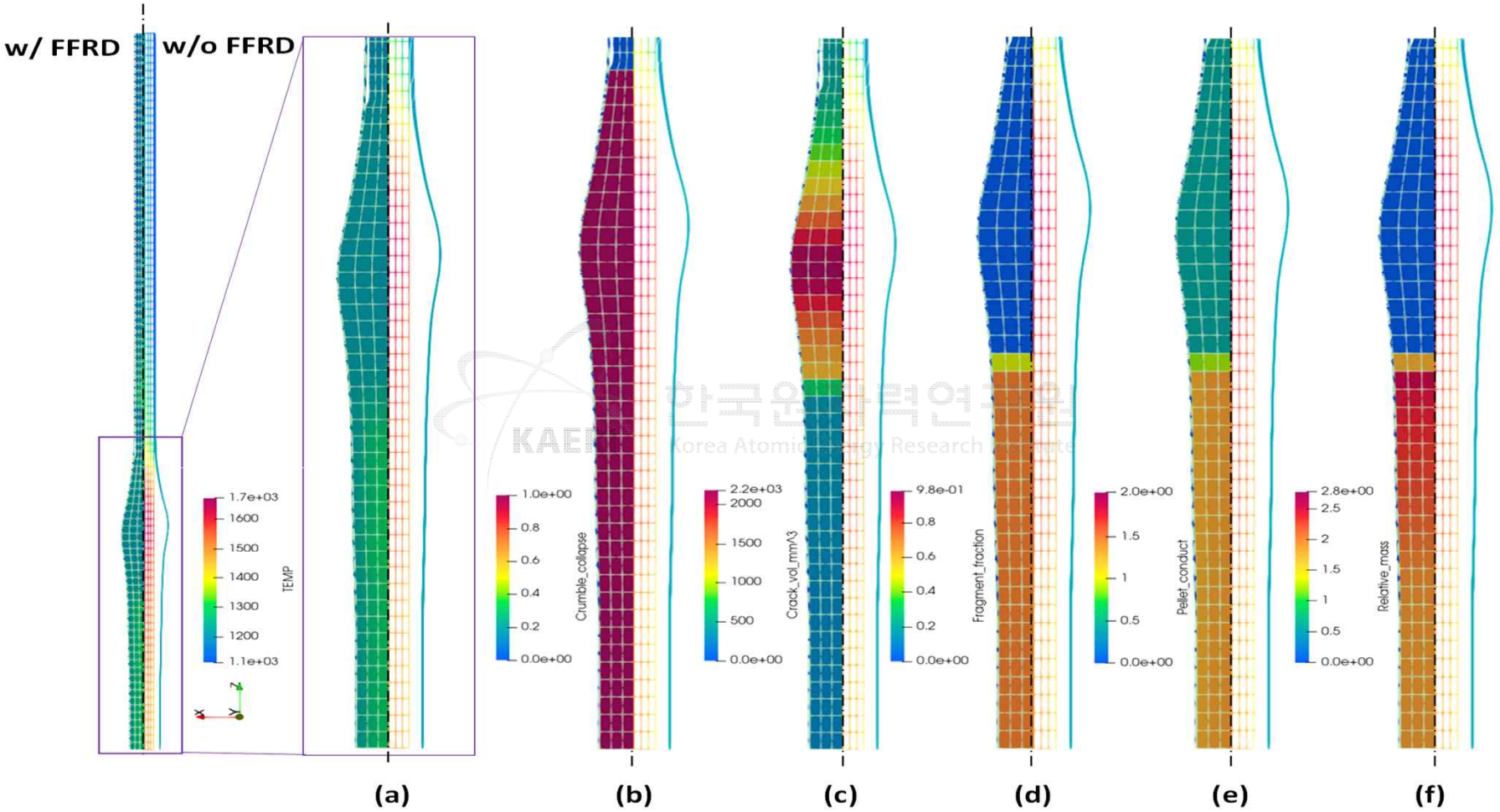


KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

- FE기반 사고 시 핵연료 거동평가코드 (MERCURY)
- QT(Quantumn Technology) 개발 FFR 모델
- MERCURY 경계 온도 설정을 위한 CUPID
- LOCA시 붕괴열과 초기 출력 계산을 위한 STREAM3D
- **LOCA 초기 핵연료 조건 생성을 위한 FRAPCON**

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

MERCURY(QT) 예비 해석 결과 : Simplified case



(a) 온도 (b) 크럼블 발생 영역 (c)크랙 부피 **(d) 파편화 비율** (e) 소결체 유효 열전도도 **(f) 소결체 상대 질량비**

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

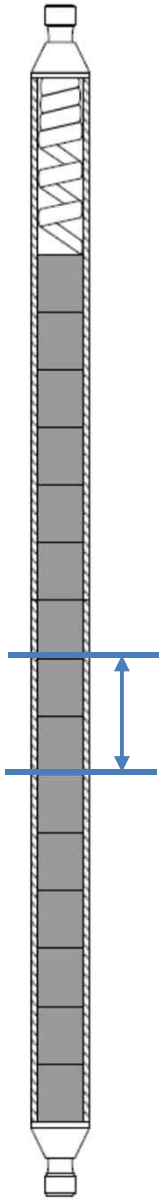
In-pile test : Halden IFA 650 series

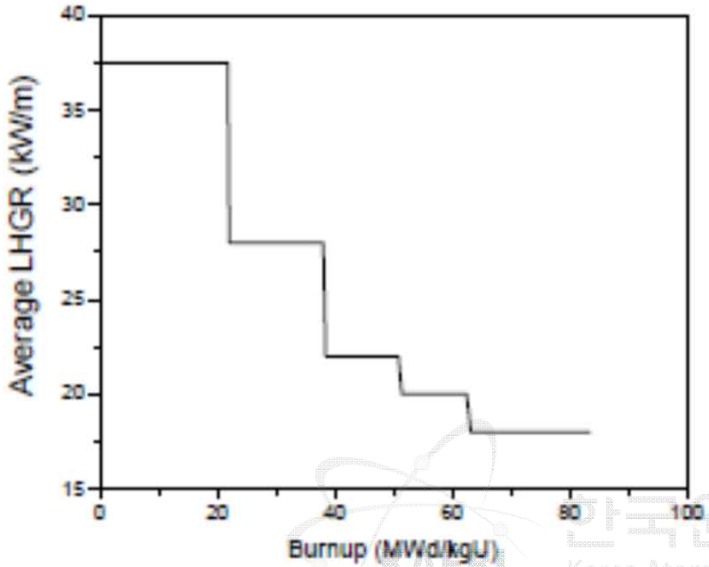
	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	14	15	16
Fuel Type	PWR	PWR	PWR	VVER	BWR	PWR	PWR	VVER	BWR	BWR	BWR	PWR	PWR
Burnup [MWD/kgU]	81.9	92.3	83.4	55.5	44.3	89.9	61	56	72.3	73.1	71.1	64.7	60
Oxide thickness	18-27	10	70-80	5	10	7-8	20-30	5	40	20	40	9	12
H2 ppm	250	50	650	100	44	30	150-220	100	300	300	300	71	99
Cladding material	Zr-4	Zr-4	Zr-4	E110	Zr-2 [LK3/L]	D4 Duplex	Zr-4	E110	Zr-2 [LK3/L]	Zr-2 [LK3/L]	Zr-2 [LK3/L]	M5	D4 Duplex
Test Pressure	40	40	40	30	6	40	40	30	20	20	20	40	40

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

Base irradiation information

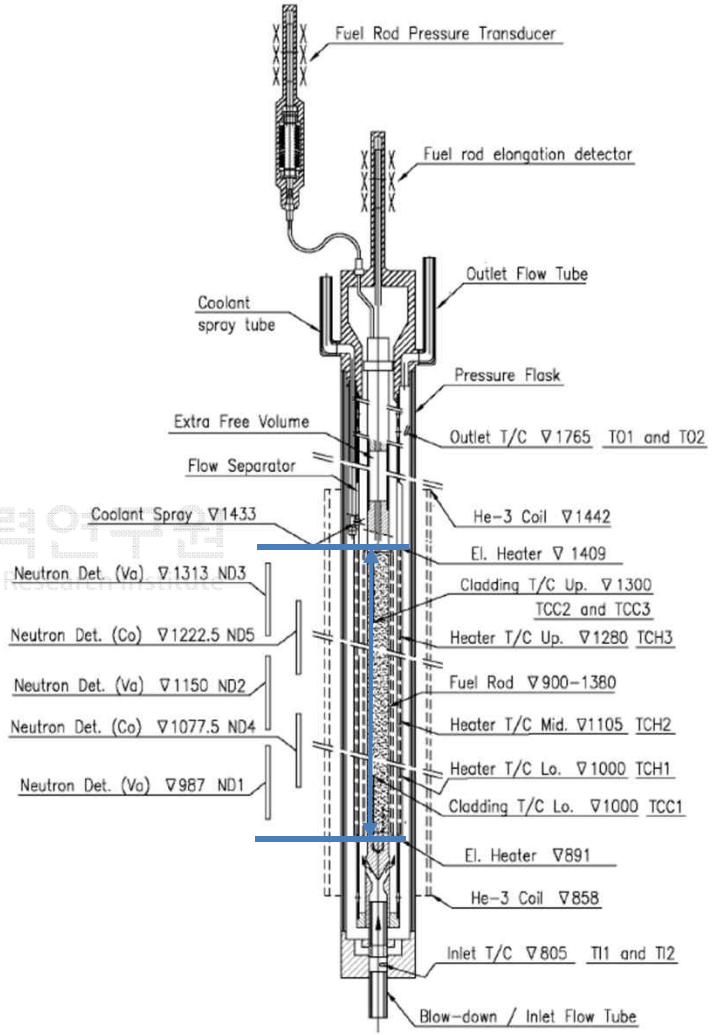




~480mm

5~6번 지지격자 사이 영역

재 계장(Re-instrumentation)



Schematic of LOCA Test Rig with Instrument levels 650-5

한국원자력연구원 KAERI Korea Atomic Energy Research Institute

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

입력 작성

cladding outside diameter	cm(in.)	1.0735E+00	(4.2264E-01)
cladding inside diameter	cm(in.)	9.2930E-01	(3.6587E-01)
cladding thickness	mm(in.)	7.2100E-01	(2.8386E-02)
clad arithmetic mean roughness	mm(mils)	5.0000E-03	(1.9685E-01)
diametral gap thickness	mm(mils)	1.6100E-01	(6.3386E+00)
fuel pellet diameter	cm(in.)	9.1320E-01	(3.5953E-01)
fuel pellet length	cm(in.)	1.1000E+00	(4.3307E-01)
fuel pellet dish depth	mm(in.)	2.8000E-01	(1.1024E-02)
fuel pellet dish shoulder width	mm(in.)	1.2000E+00	(4.7244E-02)
fuel pellet dish sperical radius	cm(in.)	2.0372E+00	(8.0205E-01)
fuel pellet core radius	mm(in.)	0.0000E+00	(0.0000E+00)
fuel pellet sintering temperature	K(F)	1.8726E+03	(2.9110E+03)
fuel pellet true density	percent	9.4800E+01	
fuel pellet resinter density chng	kg/cu.m	1.0000E+02	
fuel volume	cu.m(cu.in.)	3.1003E-05	(1.8919E+00)
fuel arithmetic mean roughness	mm(mils)	2.0000E-03	(7.8740E-02)
fuel stack height	m(ft.)	4.8000E-01	(1.5748E+00)
Uranium mass per unit length	kgU/m(kgU/ft.)	5.9155E-01	(1.8030E-01)
fuel dish volume fraction		1.3865E-02	
Fuel is UO2			
U-235 enrichment	at% in U	3.5000E+00	
Fuel is doped with	wt% Gd	0.0000E+00	
fuel fission atoms(Xe + Kr)/100 fissions		3.1000E+01	
fuel water concentration	ppm	0.0000E+00	
fuel nitrogen concentration	ppm	0.0000E+00	
plenum length	cm(in.)	2.2000E+01	(8.6614E+00)
plenum spring diameter	cm(in.)	9.1300E-01	(3.5945E-01)
plenum spring wire diameter	mm(in.)	1.0000E+00	(3.9370E-02)
plenum spring volume	cu.m(cu.in.)	4.0120E-07	(2.4483E-02)
plenum volume	cu.m(cu.in.)	1.4521E-05	(8.8611E-01)
plenum spring turns		2.0000E+01	
volume fraction of plenum occupied by spring		2.6887E-02	
rod total void volume	cu.m(cu.in.)	1.6152E-05	(9.8566E-01)
rod internal helium pressure	mpa(psia)	2.2500E+00	(3.2633E+02)
fuel rod pitch	cm(in.)	1.4000E+00	(5.5118E-01)
channel equivalent diameter	cm(in.)	1.2512E+00	(4.9259E-01)

- Cladding data
  - Halden Report
- Pellet data
  - Siemens Tech. Report
- Core data
  - Vandellos 2 FSAR
- Uncertain data
  - W type 15×15

KAERI Korea Atomic Energy Research Institute
한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

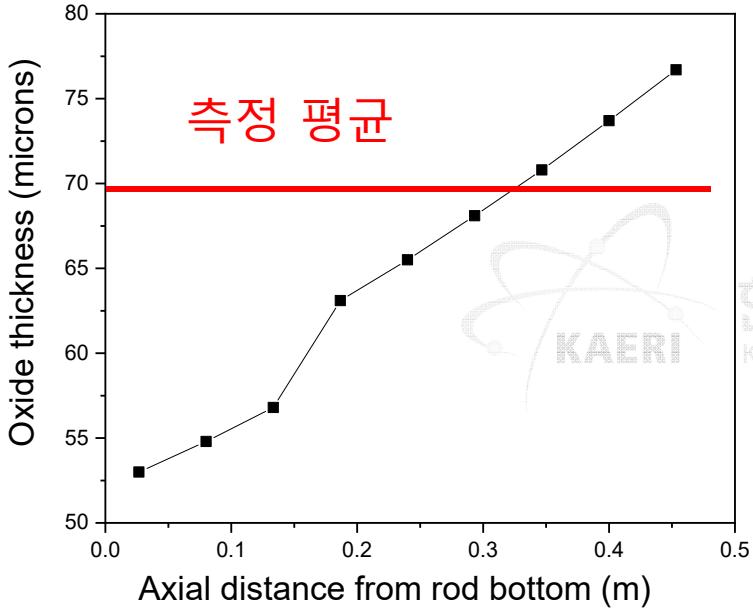
입력 수정 및 최종 입력 결정

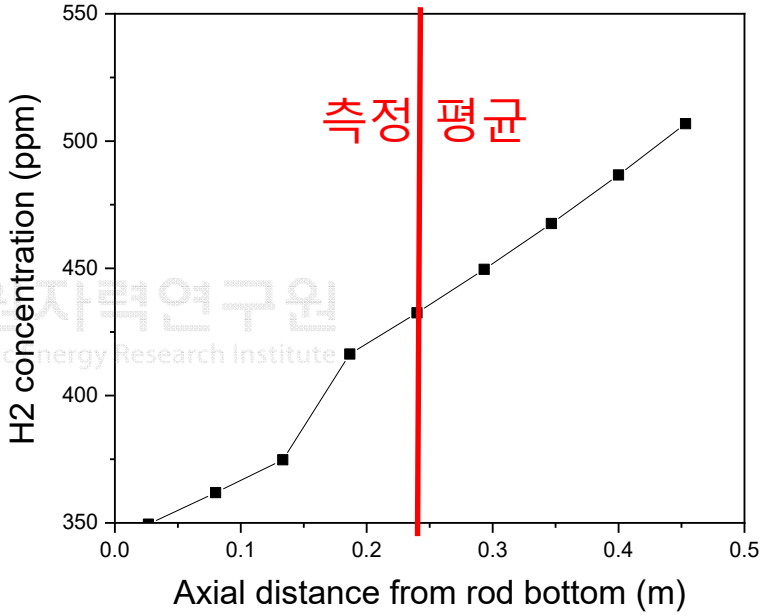
- LOCA 평가용 입력에서는 산화막/수소 함유량이 핵심 인자
- 봉내압도 주요 인자이지만, Halden re-intrumented 연료봉에서는 연소 주기말 봉내압은 의미가 없음
- Vandellos 2 FSAR의 평균 core 조건을 기본으로 유량과 입구 냉각수 온도를 조절
- Halden 시험 전 측정된 PIE 결과와 최대한 유사하도록 입력 수정
  - 산화막 두께 : 60~80μm (평균 70μm)
  - 수소 함유량 : ~550 ppm
- 산화막이 증가하면 수소함유량은 비례해서 증가하게 됨
- 산화막의 효과가 더 큰 점을 고려하여 **산화막 중심으로 입력을 결정**

한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

IFA 650.5 최종 입력 예측치





KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute

첨단3D프린팅기술개발부/2021-04-30 09:26

맺음말

- ECCS 규정개정의 주요 현안인 FFRD 대응을 위한 기술 개발이 진행 중임
  - 주관(한수원), 참여(KNF, KAERI…등)
- 특히, FFRD 현상에 대한 정밀한 해석을 위한 연구도 포함
  - FE base 정밀 핵연료 변형 코드
  - 상세 열수력 계산 및 노심 코드 결과 활용 LB-LOCA 해석 기반 기술
- 상기 정밀 코드체계 검증을 위한 입력 개발 진행 중
  - **IFA 650 series → base irradiation deck 완료 및 FRAPTRAN/MERCURY 입력 개발 진행 중**
  - Studsvik SCIP series
  - 발전소 입력 deck

KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute