

원전 성능/안전 평가 위한 CUPID 코드 적용 현황 (KAERI-KISTI 공동연구)

이재룡
한국원자력연구원

한국원자력학회 2016 추계 학술대회
워크숍 F 계산과학 활용 원전 모델 및 시뮬레이션 기술개발
2016. 10. 26(수) 화백컨벤션센터, 경주

목차

- 연구 개요
- 원전 열수력 안전 및 성능해석
 - 원자로 형상(ROCOM) 실험 해석
 - 가압기 안전 해석
 - 습분분리기 성능 해석
- 맺음말

계산과학 기반 R&D 효율화

□ 본과제

○ 계산과학공학 기반 국가 R&D 사업 효율화 기술 개발 및 적용

- ▶ 계산과학을 통한 실험대체 (보완) 수단 활용
- ▶ KISTI 슈퍼컴퓨터 자원 무상 제공

□ 출연연 계산과학 활성화 MoU 체결 및 워크숍

○ 계산과학 활용 공동연구, 기술협약



전자신문

2016년 06월 01일 수요일 024면 전국

디지털뉴스

2016년 06월 01일 수요일 021면 피플



KISTI 등 4곳, 슈퍼컴퓨팅 기반 계산과학 활용 업무협약
한국과학기술정보연구원(KISTI)과 한국에너지기술연구원, 한국원자력연구원, 한국화학연구원 31일 슈퍼컴퓨팅 기반 계산과학 활용을 위한 업무협약을 체결했다. 이규호 화학연 원장, 한선화 KISTI 원장, 이상천 국가과학기술연구회 이사장, 이기우 에너지연 원장, 백필원 원자력연 부원장(왼쪽부터)이 기념촬영했다.

출연연, 계산과학 활용 공동연구·기술협력 협약

과학기술 분야 정부출연연구기관들이 연구개발(R&D) 효율성과 생산성을 높이기 위해 슈퍼컴퓨터 활용을 늘린다.

한국과학기술정보연구원(KISTI)은 지난달 31일 대전 유성구 연구원에서 한국에너지기술연구원, 한국원자력연구원, 한국화학연구원 등과 이 같은 내용의 업무협약을 체결했다고 밝혔다.

이 협약으로 4개 기관은 계산과학을 활용한 공동연구와 기술협력을 추진하고, 계산과학 데이터를 공유하는 플랫폼 개발 및 교육·기술지원 등을 진행하기로 했다. 대전=이준기기자

3.3 출연연(연) 계산과학 활성화 MoU 체결 및 워크숍('05.31)

- 주관: 과학기술연구회
- 주최 및 연구발표: KISTI 에너지(연), 원자력(연), 화학(연)
- 초청강연: LG 화학(연) 알레온 연구위원
- 대령부, 출연연(연) 연구자 70여명 참가

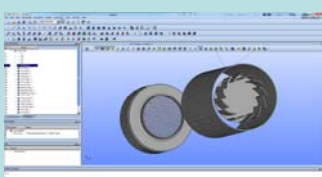


<http://www.kaeri.re.kr>

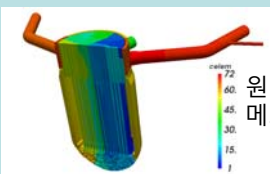
Thermal Hydraulics Safety Research 3/41

KAERI-KISTI 협력체계

Pre-processing



Open source 기반 (SALOME)



원자로 데이터 메모리 최적화

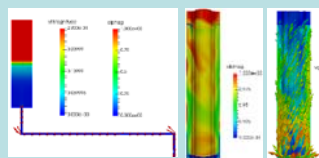
슈퍼컴 사용 기반 구축



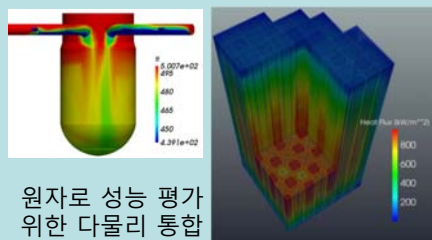
Solver



CUPID 코드 최적화

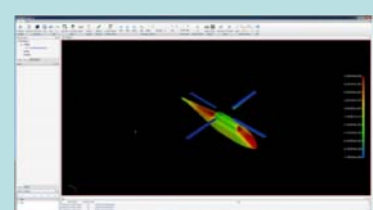


CUPID 코드 활용, 원자로 성능 해석



원자로 성능 평가 위한 다물리 통합

Post-processing



대용량 데이터 후처리 기반 구축

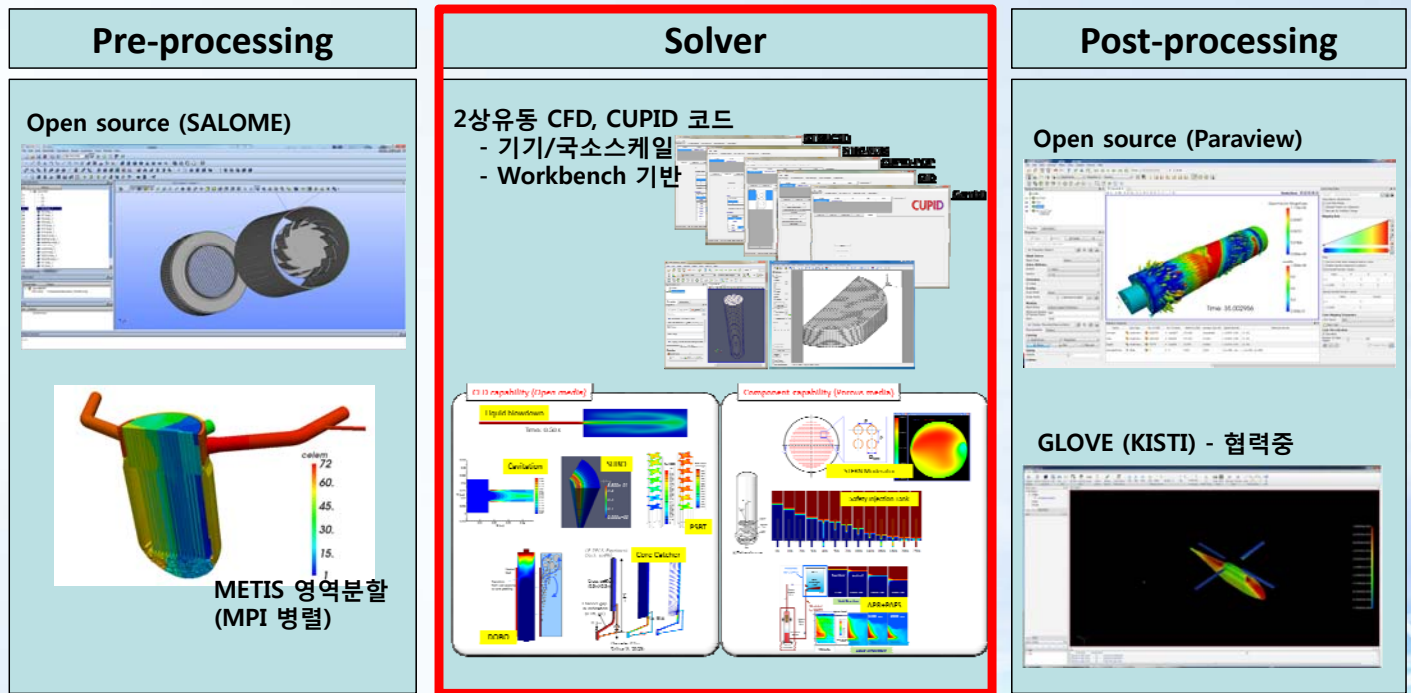
KAERI

KISTI

KISTI

해석 도구 - CUPID

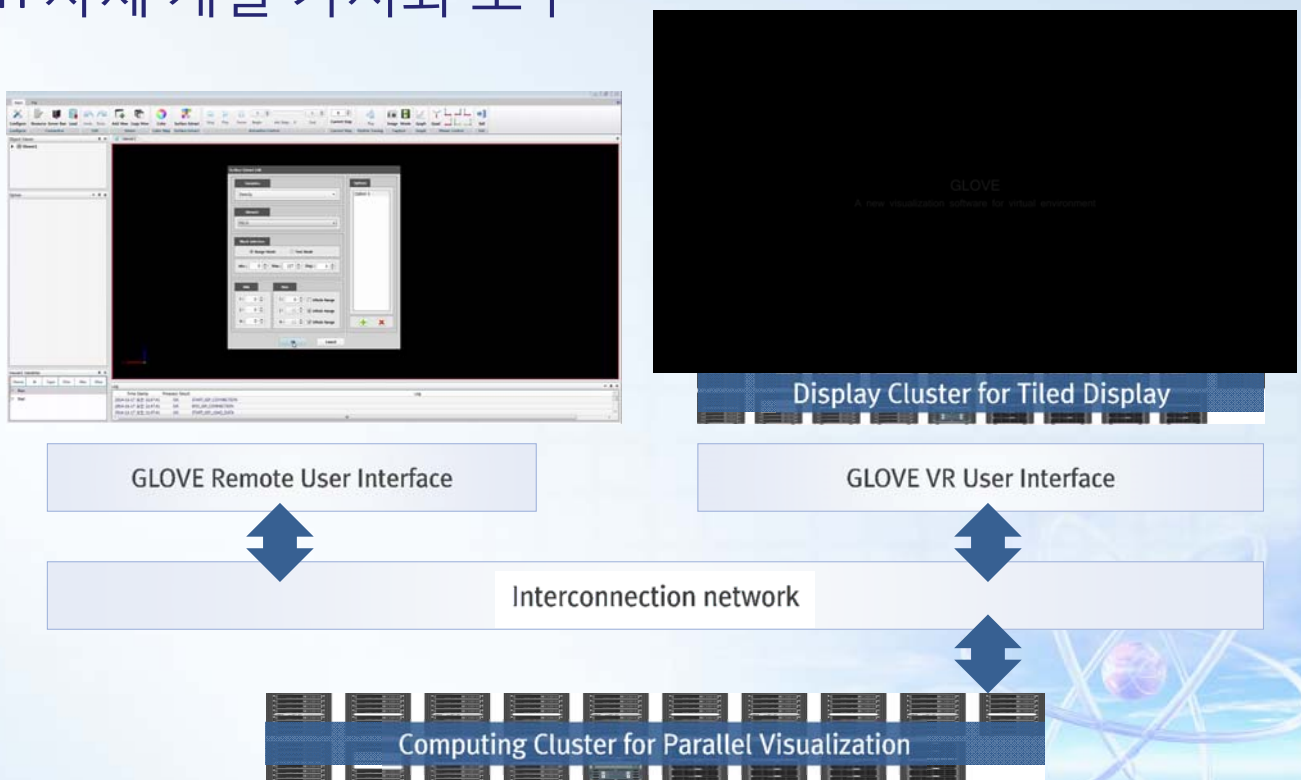
□ 오픈소스 기반 해석 체계 구축



대용량 데이터 가시화 도구 - GLOVE

□ KISTI 자체 개발 가시화 도구

※ 김민아 (KISTI), 원자력연구원 세미나, 2016.6.13



대용량 데이터 가시화 도구 - GLOVE

□ GLOVE 성능 및 사용성/안정성

※ 김민아 (KISTI), 원자력연구원 세미나, 2016.6.13

성능

1억 개 격자 Slice 가시화 시 사용자 요청 응답 시간 2초 이내
1억 개 격자 iso-surface 가시화 시 40 frame/sec 이상

Tera-scale Rotor Simulation (135M 격자)

가시화 기법	Cutting Plane	Surface	Iso-Surface
GLOVE 계산	0.601111	0.071476	0.830783
GIVI 렌더링	0.006561	0.003535	0.004122
전체시간	0.607672	0.075011	0.834905



수준

사용 성 상용 도구 대비 156% 수준
오류 율 POFOD 0.006%

항목	측정요소	GLOVE	Ensign
Effectiveness	도움요청 횟수	2회	12회
	조작에러 발생 횟수	5회	6회
Efficiency	주요 테스트 평균 수행 시간	53.22초	74.21초
	전체 테스트 수행 시간	638.8초	1136.65초
Satisfaction	SUS 점수	69.5점	44.5점

	GLOVE	VisIT	VisIT/GLOVE
POFOD	0.006	0.1	16

안정성 검증을 위한 POFOD 테스트 결과

- POFOD (Probability Of Failure On Demand) 측정 (오류발생 횟수/150 operation)
- 세계 수준의 대용량 데이터 가시화 도구 대비 16배 안정적

- 새로운 VR 사용자 인터페이스 개발
- 안정적인 상태 관리를 위한 FSM 적용

<http://www.kaeri.re.kr>

Thermal Hydraulics Safety Research 7/41

원자로 형상 실험 열수력 해석

□ 원자로 형상 해석 수행

- 원자로 형상 대형 실험
- 해석 코드의 물리모델, 가시화 능력



<http://www.kaeri.re.kr>

Thermal Hydraulics Safety Research 8/41

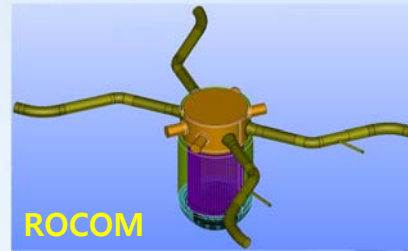
원자로 형상 실험 열수력 해석

□ ROCOM 실험해석

○ OCED PKL 2 국제공동연구

▶ 난류열혼합 실험

- 분지관 (Branch pipe)
- 하반구 공동 (Lower plenum)



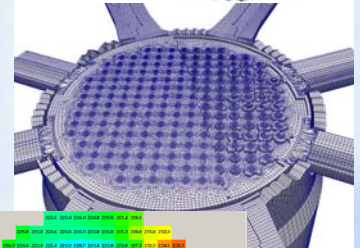
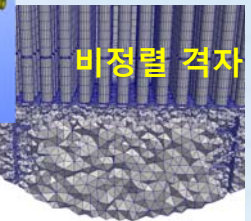
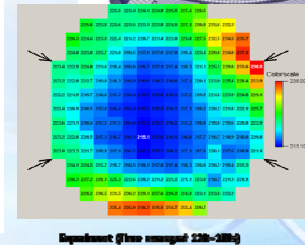
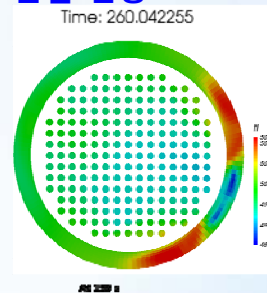
○ CUPID 코드 적용

- ▶ Two-fluid three-field model
- ▶ Standard k-e turbulent model

○ 해석 범위

- ▶ 정량적 평가 (against 실험)
- ▶ 추가 계산 (2상 유동 - 비등)

실험 검증



원자로 형상 실험 열수력 해석

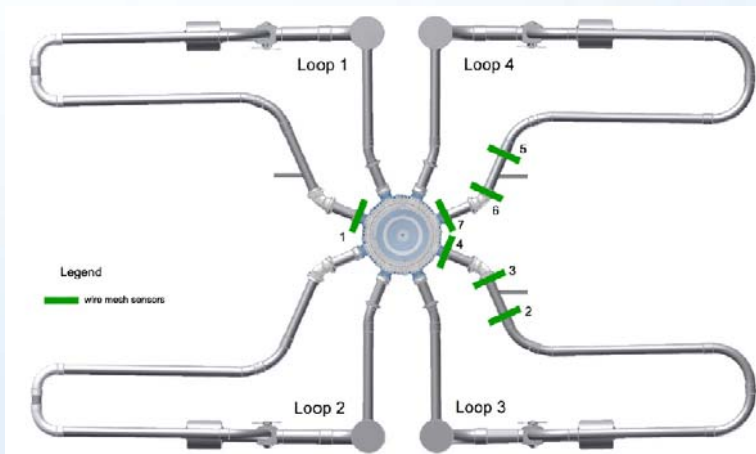
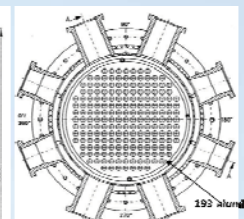
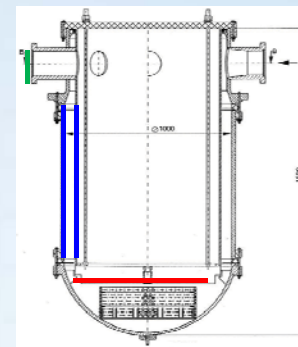
□ ROCOM 실험 해석

○ OECD PKL 2 Project

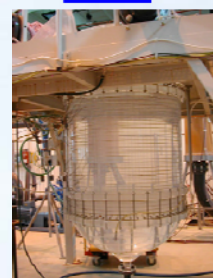
- ▶ PKL test: fast cool down transient
- ▶ ROCOM: coolant mixing in RPV

○ Overview of ROCOM

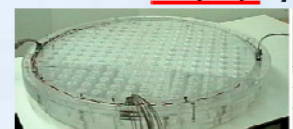
- ▶ German KONVOI type PWR (1:5 length scale)



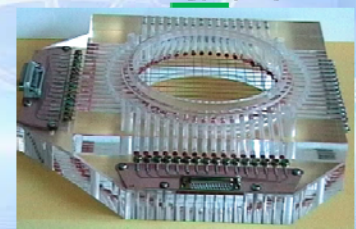
Downcomer (54x25)



Core inlet plane (15x15)



Cold leg (216 points)

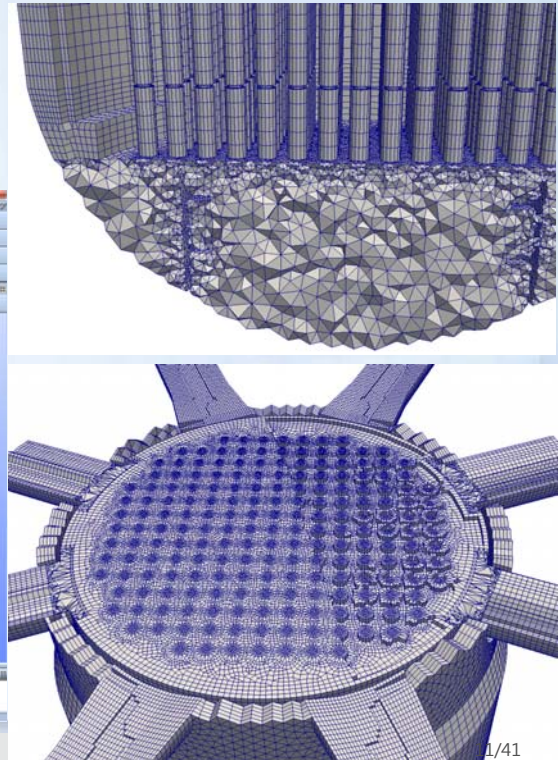
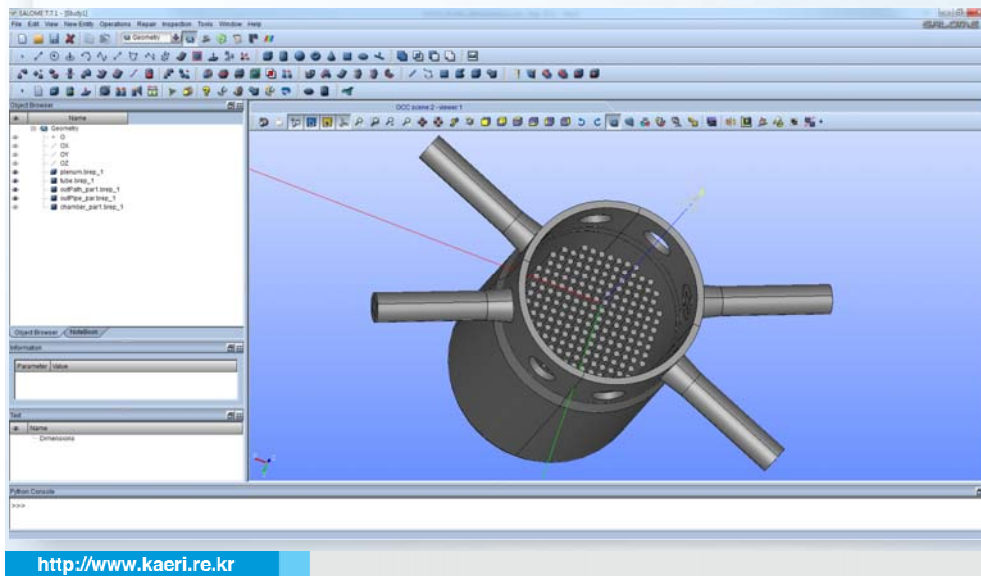


원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

○ Salome Open Source Software

- ▶ Developed by CEA/DEN, EDF R&D and OPEN CASCADE
- ▶ SALOME 7.7.1 (Current version = 7.8.0)
- ▶ Hexahedron + Tetrahedron (3,434,527 cells)



1/41

원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

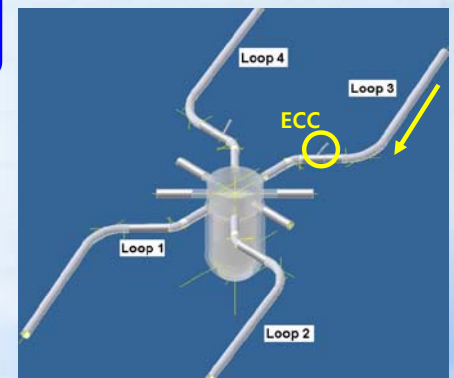
○ Test 1.2: MSLB with ECC water injection

Loop	1	2	3	4	ECC
Normalized volume flow rate ¹ [%]	2.28	2.28	6.08	2.28	-
Volume flow rate [m ³ /h]	4.22	4.22	11.25	4.22	1.87
Volume flow rate [l/s]	1.17	1.17	3.12	1.17	0.52
Relative density [-]	1.00	1.00	1.00	1.00	1.20

○ Test 2.1: MSLB scenario

- ▶ Overcooling in one broken loop

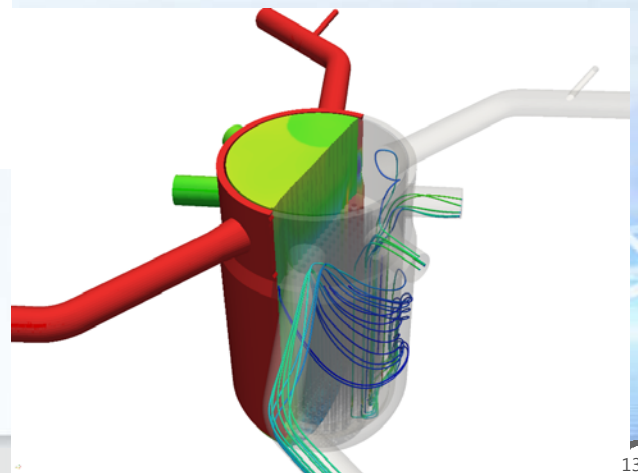
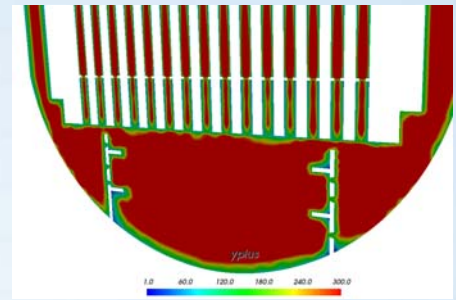
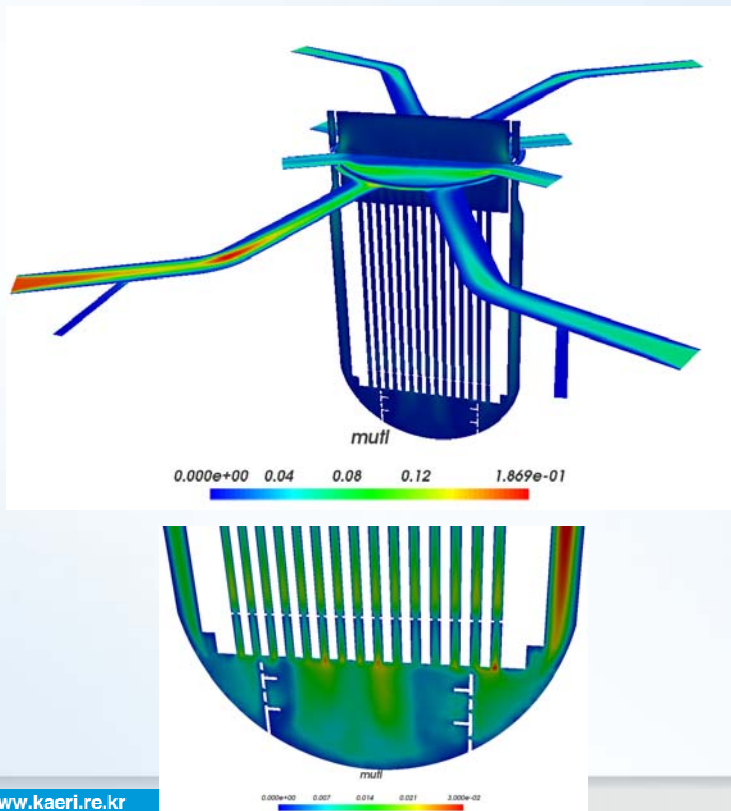
Loop	1	2	3	4
Normalized volume flow rate [-]	10.2	4.8	4.8	4.8
Volume flow rate [l/s]	5.24	2.47	2.47	2.47
Relative density [-]	1.0128	1.00	1.00	1.00
Temperature [°C] (PKL)	199.3	241.0	241.0	241.0



원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

○Steady State Calculation (T1.2)



<http://www.kaeri.re.kr>

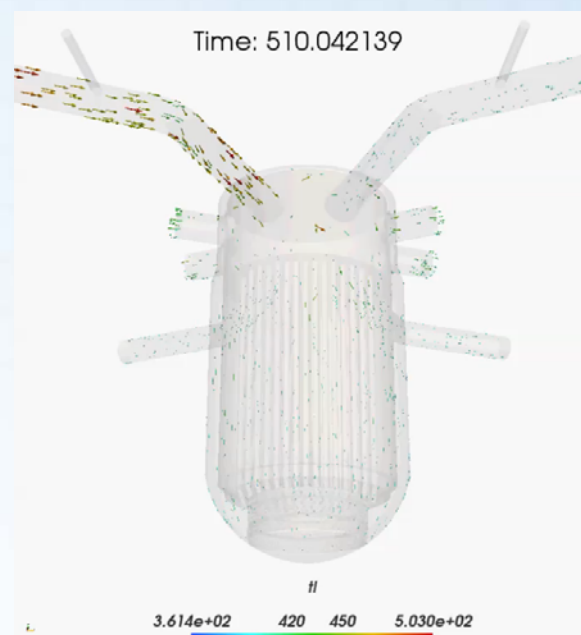
13/41

원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

○Transient Calculation (T1.2)

▶▶ECC injection: from 510 s to 620 s



<http://www.kaeri.re.kr>

Thermal Hydraulics Safety Research

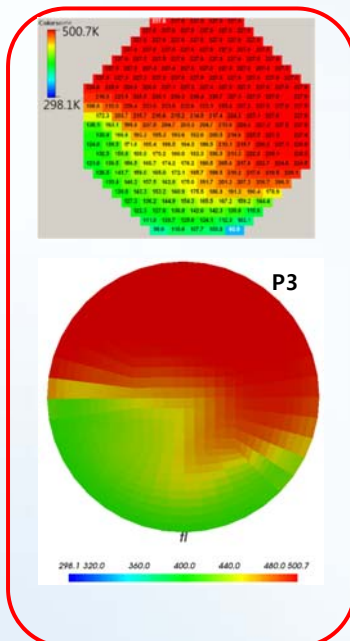
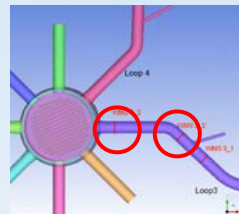
14/41

원자로 형상 실험 열수력 해석

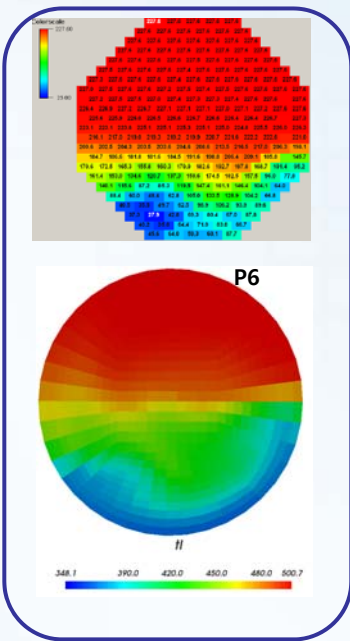
□ROCOM 실험 해석

○Transient Calculation (T1.2)

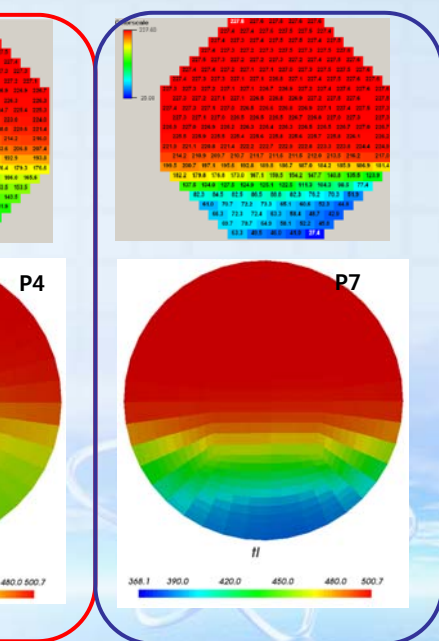
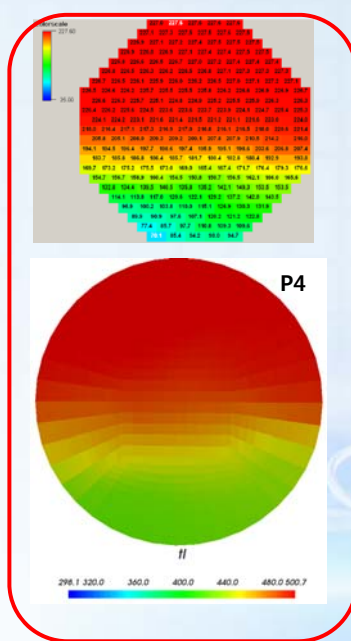
▶▶Temperature field in cold leg



Loop3(High flow rate)



Loop4(Low flow rate)



<http://www.kaeri.re.kr> Downstream of ECC injection position

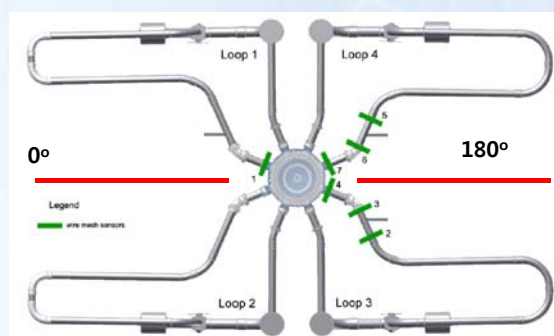
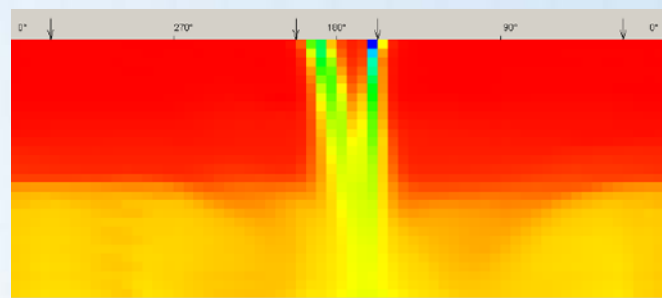
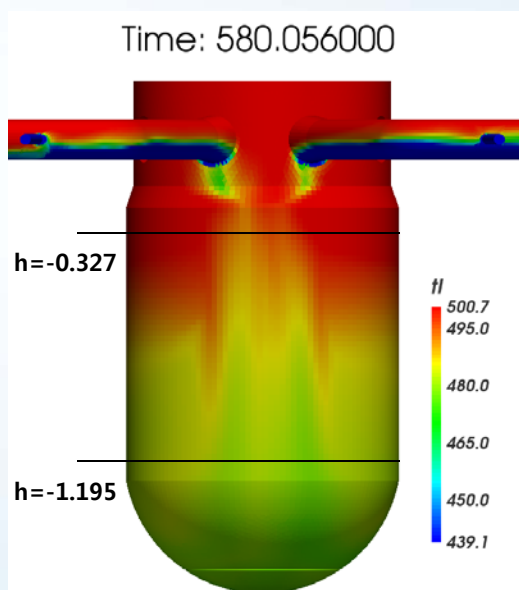
End of cold leg Thermal Hydraulics Safety Research 15/41

원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

○Transient Calculation (T1.2)

▶▶Temperature field in downcomer



<http://www.kaeri.re.kr>

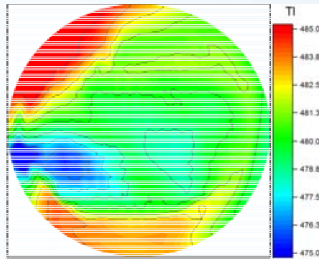
Thermal Hydraulics Safety Research 16/41

원자로 형상 실험 열수력 해석

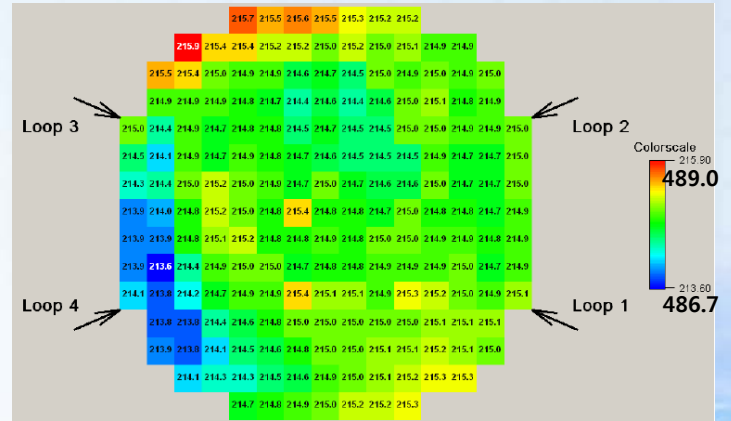
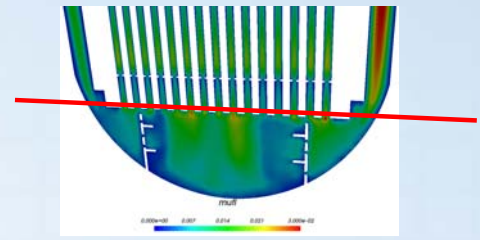
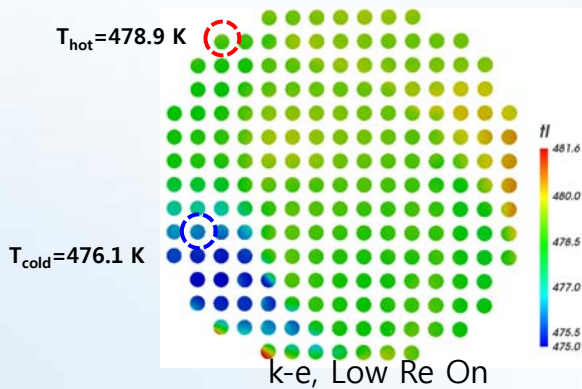
□ROCOM 실험 해석

○Transient Calculation (T1.2)

▶▶ Temperature field in core inlet



CUPID (Time averaged 60 ~ 70 s)



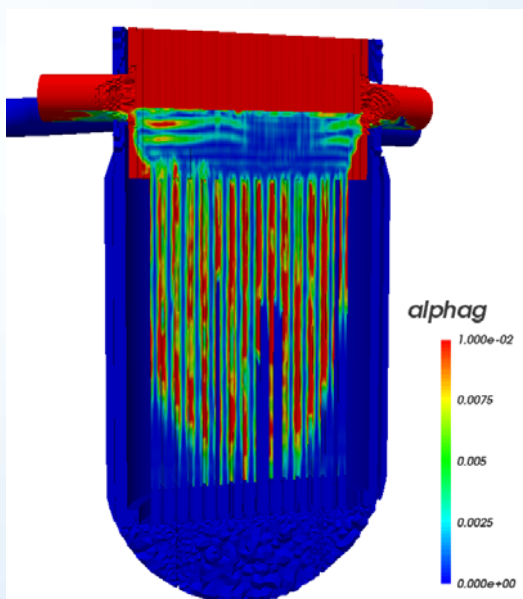
Experiment (Time averaged 60~70s)

원자로 형상 실험 열수력 해석

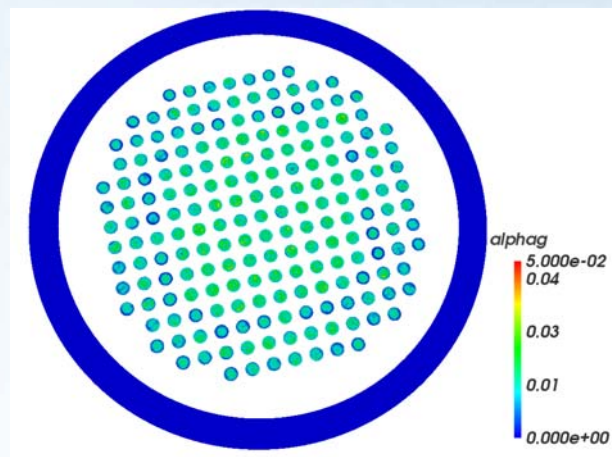
□ROCOM 실험 해석

○실험 대체 해석

▶▶ Boiling flow from rod bundle



Void fraction in tubes and upper chamber

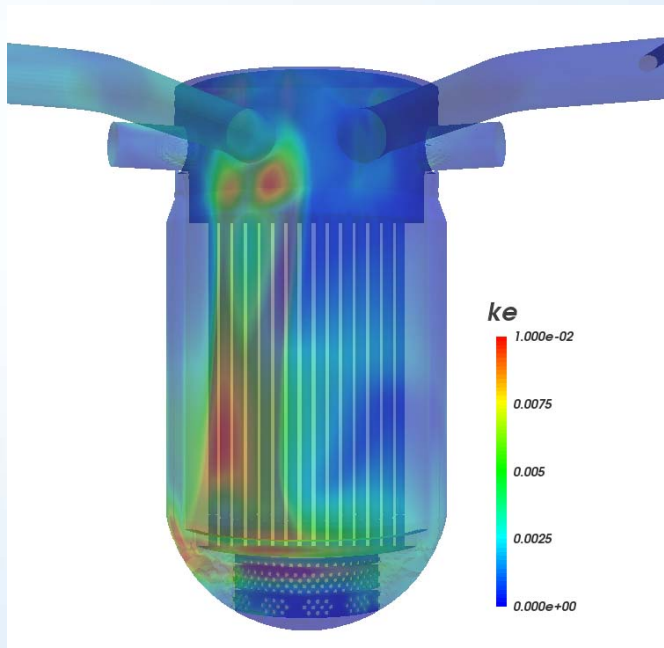


Void fraction at the upper region of tubes

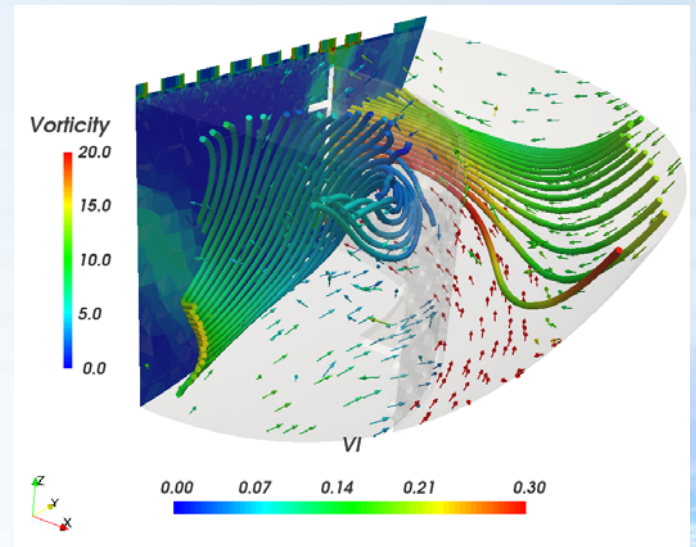
원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

○ Turbulence and local flow information



Turbulence kinetic energy



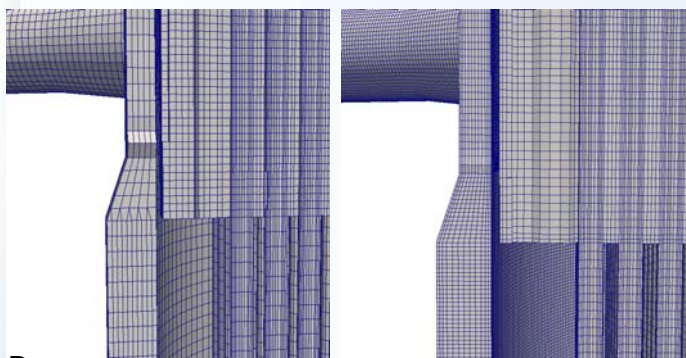
Liquid velocity vector and vorticity

원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

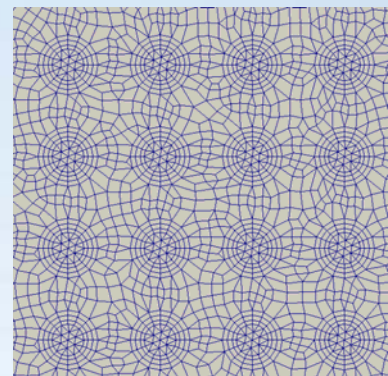
○ 격자 Refinement

▶ Hexahedron + Tetrahedron (13,956,965 cells)

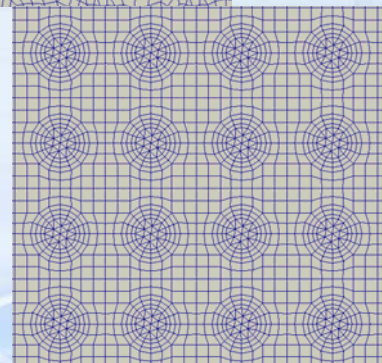


Downcomer

Lower Plenum



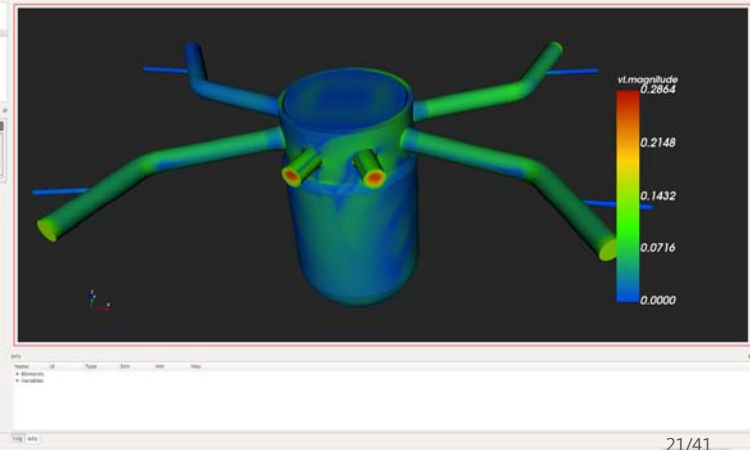
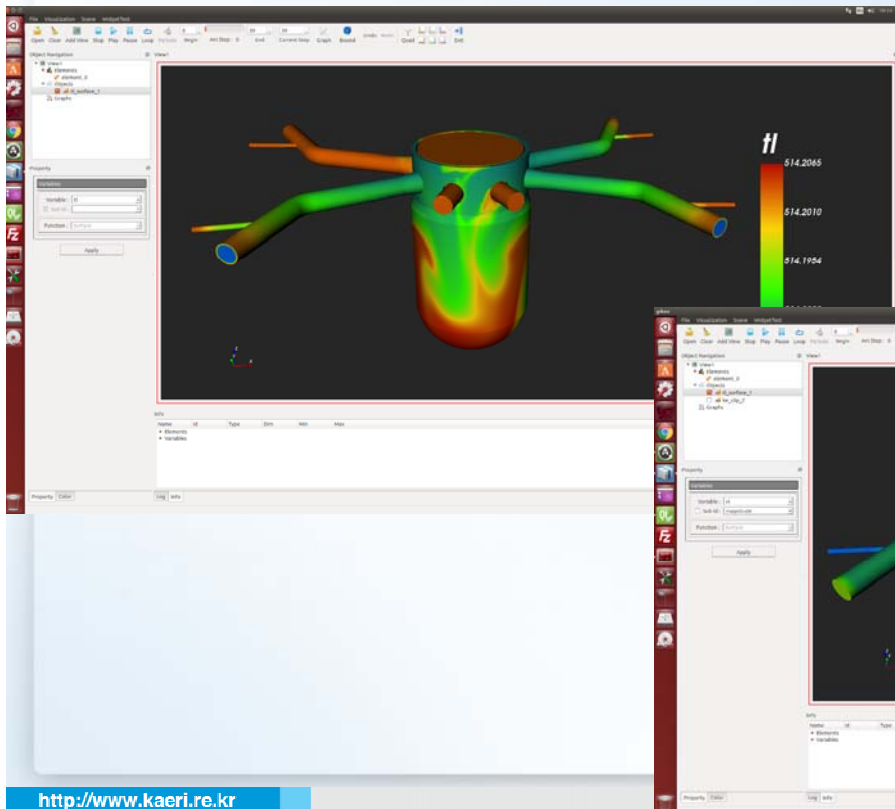
Rod Bundle



원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

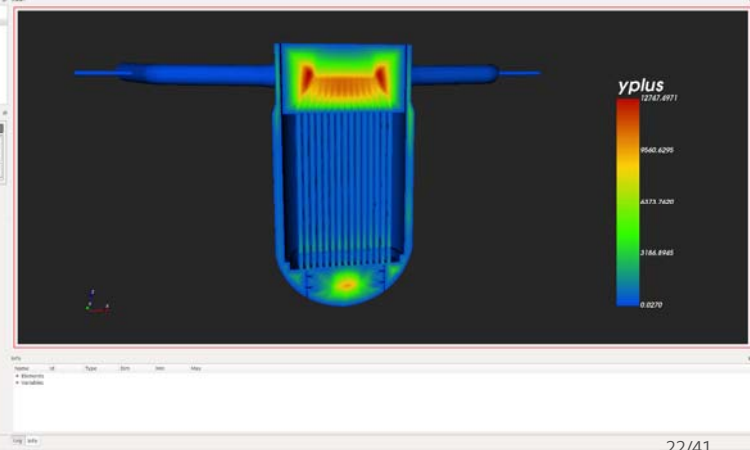
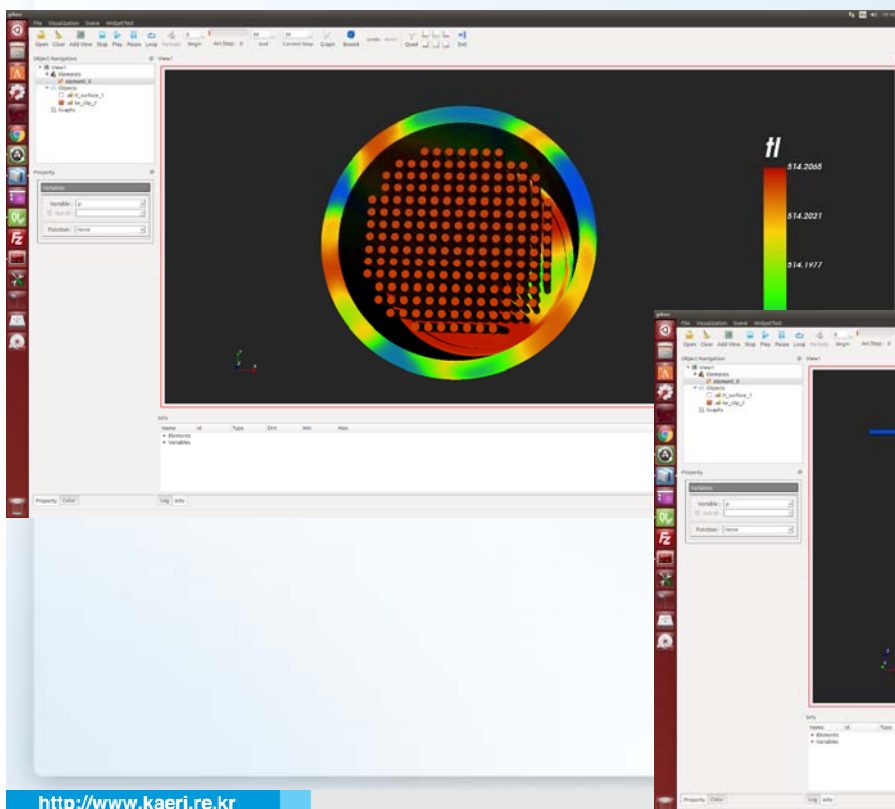
○ GLOVE Visualization (On-going collaboration)



원자로 형상 실험 열수력 해석

□ROCOM 실험 해석

○ GLOVE Visualization (On-going collaboration)



실험대체 열수력 안전 해석

□ 가압기 다차원 해석

○ PSRV 건정성에 대한 규제기관 (KINS) 질의

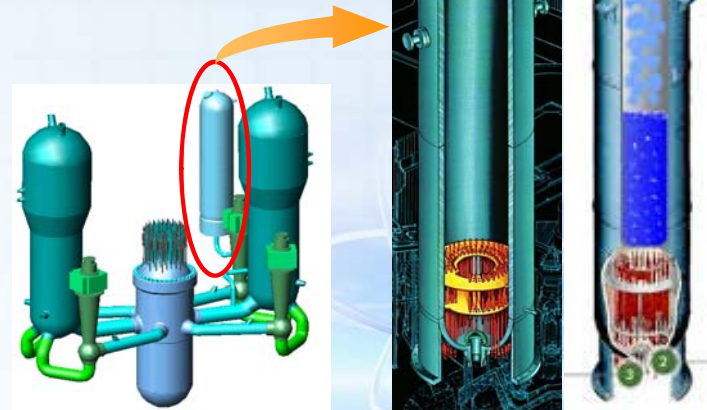
- ▶ 가압기 상부 PSRV 개방시
- ▶ PSRV 방출 유체의 습분 (Void fraction) 여부 (없어야함)

○ 다차원 열수력 해석 필요성

- ▶ 실험적 증명 어려움
- ▶ 시스템코드: 과도한 보수적 예측

○ 계산 진행

- ▶ CUPID 코드 활용

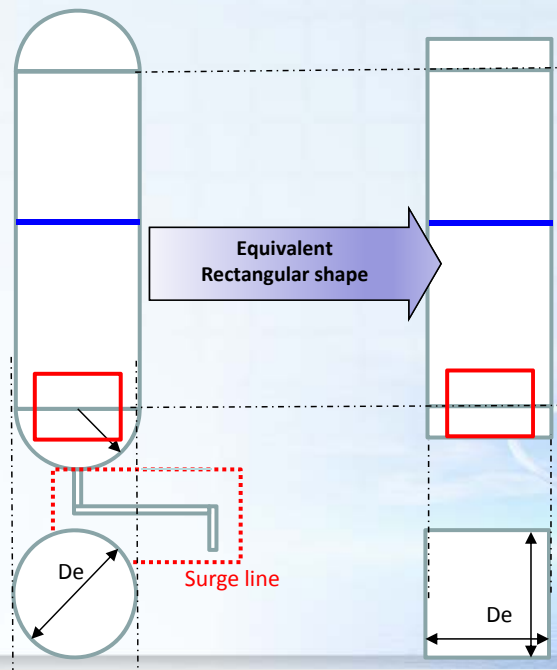
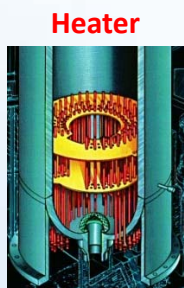


실험대체 열수력 안전 해석

□ 가압기 다차원 해석

○ 계산 형상

- ▶ Simplification of geometry
- ▶ 원형 실린더 → 사각 실린더
- ▶ 수력직경, 부피 보존
- ▶ Heater 고려안함



실험대체 열수력 안전 해석

□ 가압기 다차원 해석

○ 경계 조건

▶▶ 방출밸브

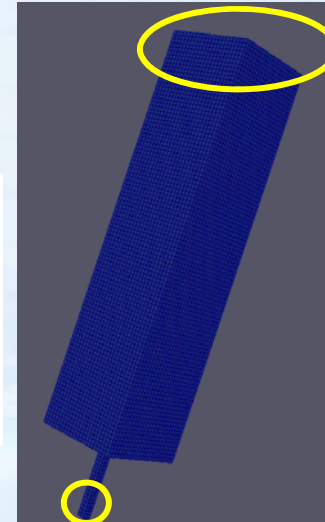
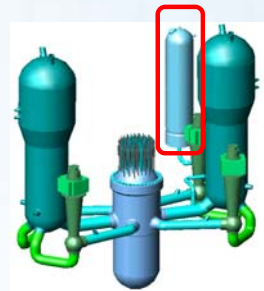
- 3EA 밸브 Open시, critical flow 조건
- homogeneous equilibrium model (HEM)

▶▶ RCS

- Pressure 경계조건 (to total volume to RCS)

○ 계산 격자

- ▶▶ 정렬격자 (약 50,000개)
- ▶▶ 밀림관: 추가 격자 (단위 길이)
- ▶▶ PC 기반 (Window) 병렬계산



Big Volume: Equivalent to RCS

실험대체 열수력 안전 해석

□ 가압기 다차원 해석

○ 해석 범위

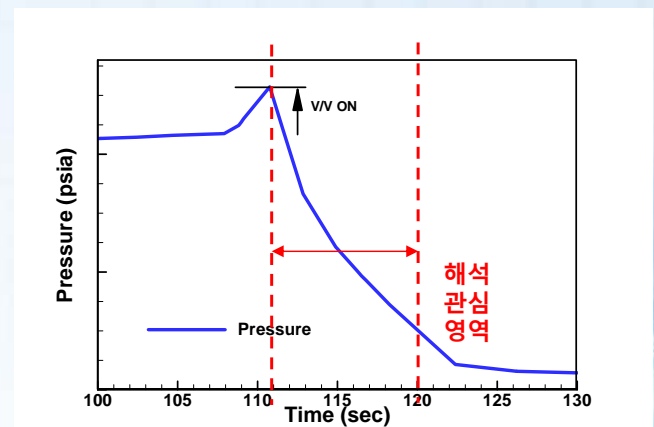
▶▶ 밸브 개방 시점

- 초기 압력 : $P_v/v_{On} - \Delta P$
- 밸브 개방 후, 가압기 내 2상 유동 거동 파악
- 초기 온도
 - » 미포화도 유동패턴에 영향인자

○ 민감도 분석

▶▶ 주요 인자

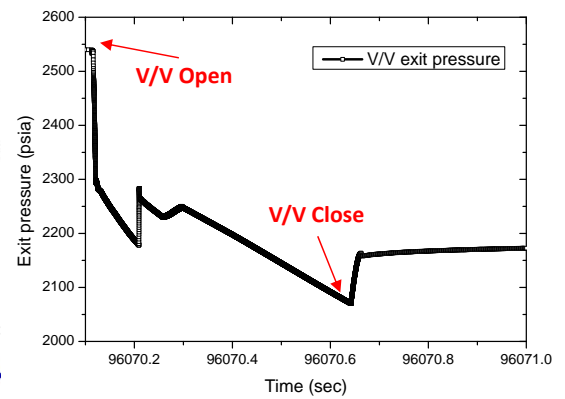
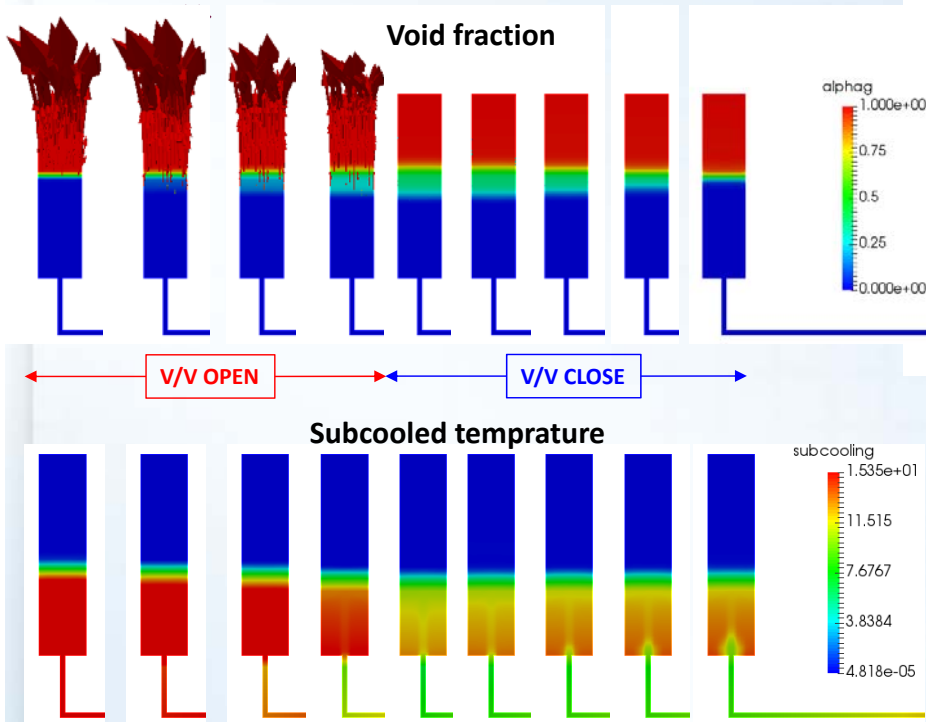
- 내부 미포화도
- 상간 (계면) 열전달 계수



실험대체 열수력 안전 해석

□ 가압기 다차원 해석

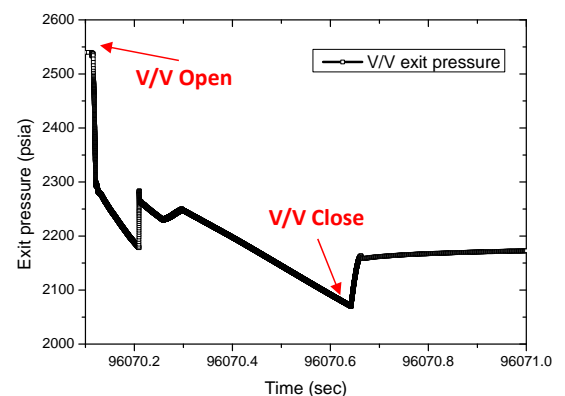
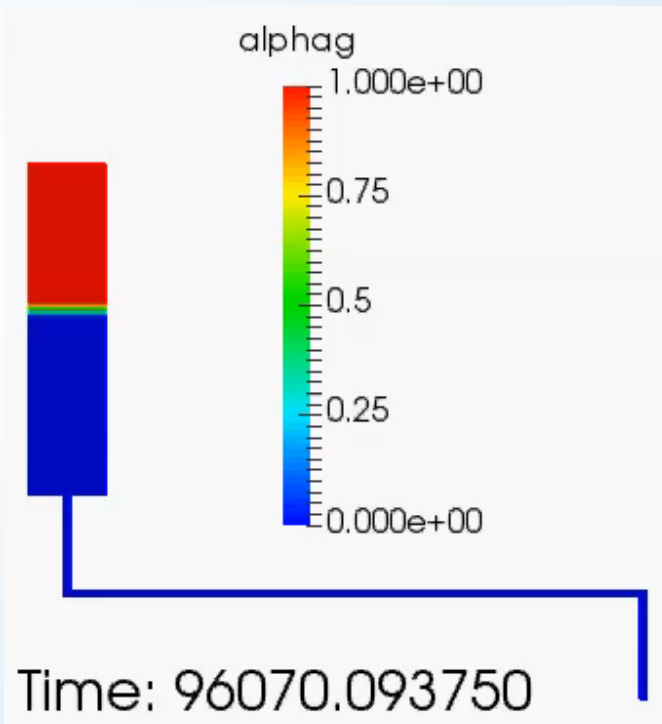
○ 해석 결과 (미포화도 25K)



실험대체 열수력 안전 해석

□ 가압기 다차원 해석

○ 해석 결과



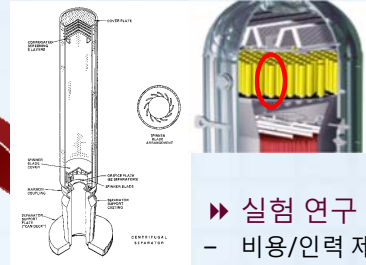
실험대체 열수력 성능 해석

□ CUPID 코드 활용, 실험 대체 열수력 해석

○ 증기발생기 습분분리기 열수력 해석

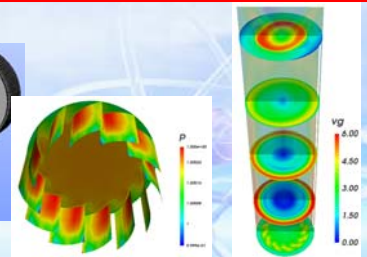
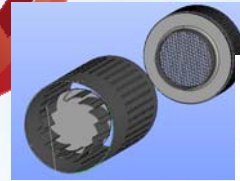


- ▶ 습분분리기 (Separator) 고정밀 해석 요구
 - 과도 상태시 증기발생기 정밀 해석 요구
 - 증기발생기 파트 (습분분리기, 습분증발기) 모델의 부정확
 - 국내 증기발생기에 고유 물리모델 개발 필요



▶ 실험 연구 어려움

- 비용/인력 제한으로 인한 실험연구 어려움
- 실험 대체할 수 있는 계산 도구 필요성 대두



▶ 계산 진행

- 한국원자력연료 (KEPCO NF) 계산 의뢰.
- 2상유동 해석 (액적 거동) 필요로 인해 CUPID 코드 적용

실험대체 열수력 성능 해석

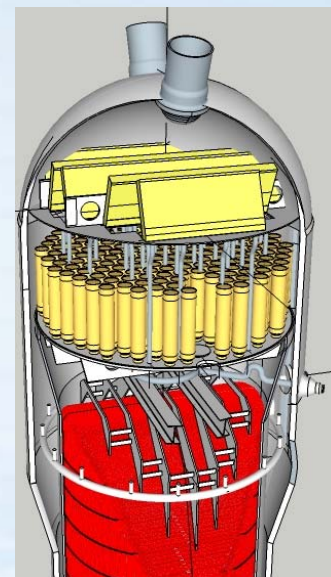
□ 증기발생기 습분분리기 열수력 해석

○ 습분분리기 구성

- ▶ 약 200개
- ▶ 원심력 이용, 습분 제거
- ▶ 옆면: 다공판 (perforated plate)
- ▶ 상부: Wire mesh

○ 습분분리기 기능

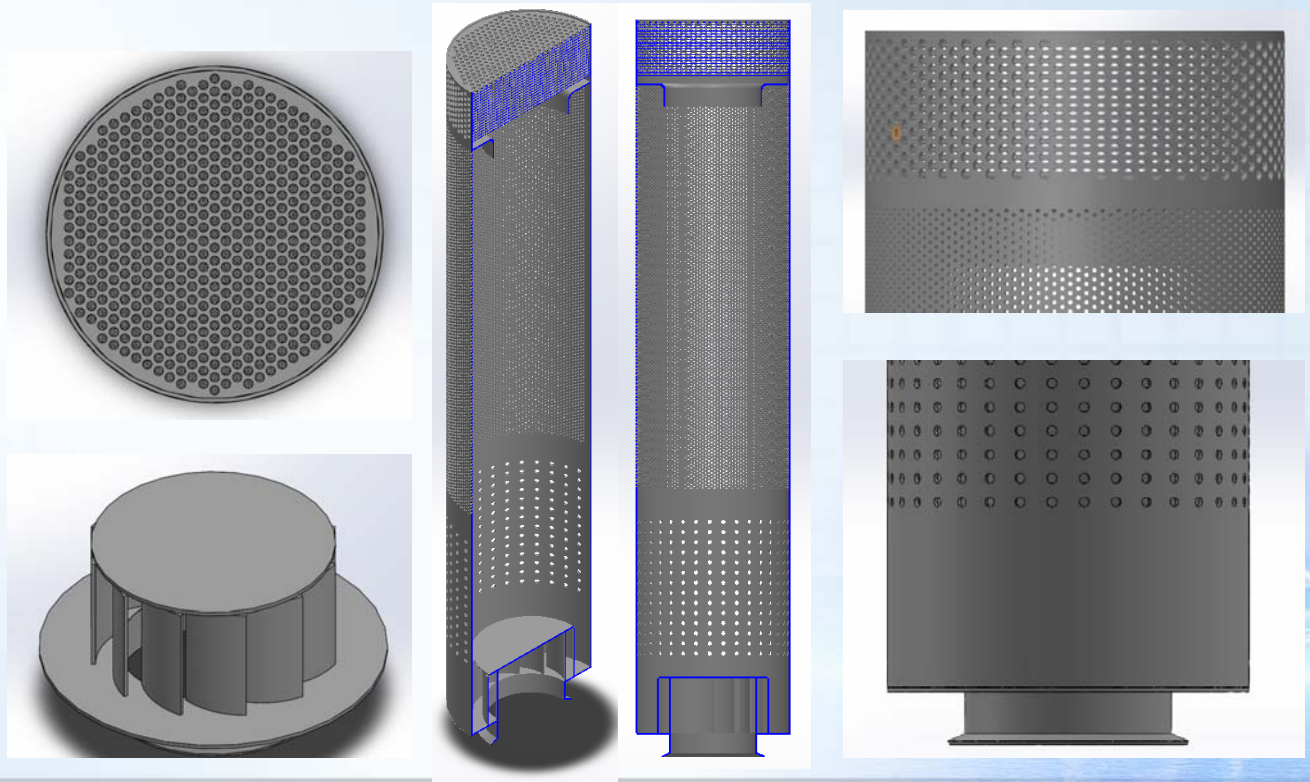
- ▶ Steam and water mixture
 - Leaving the tube bundle **25%** quality
- ▶ Steam exiting the steam generator
 - Higher than **99.75%** quality



실험대체 열수력 성능 해석

□ 증기발생기 습분분리기 열수력 해석

○ 3D CAD

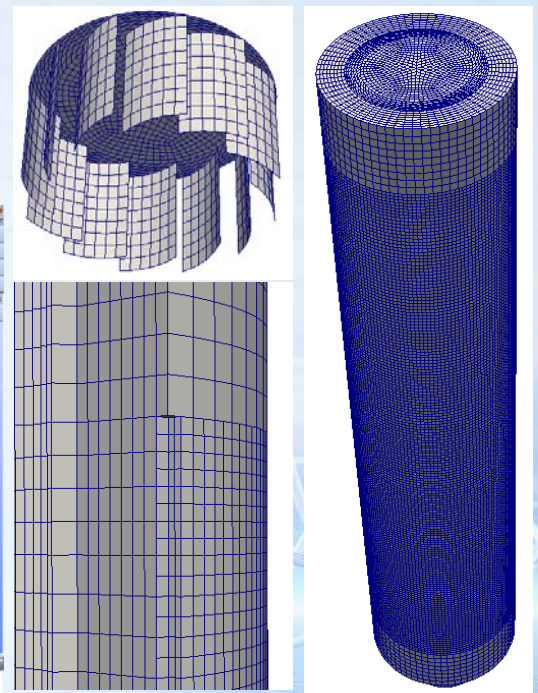
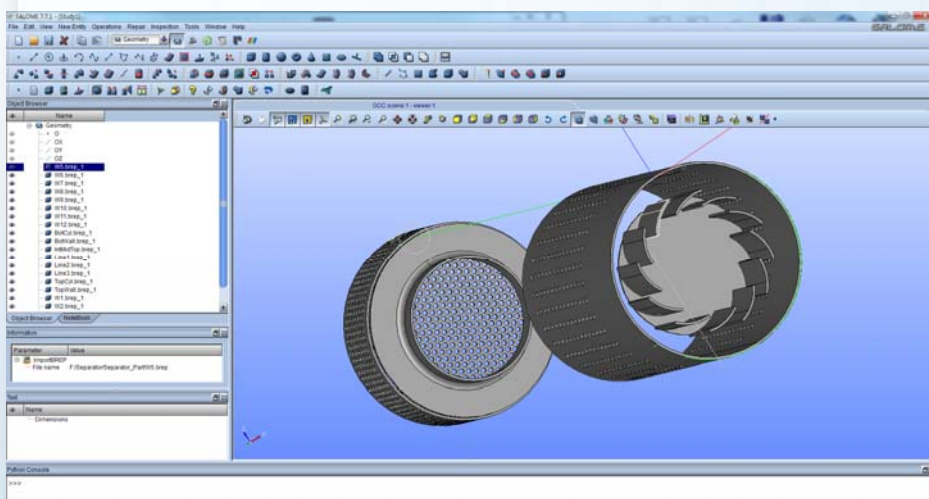


실험대체 열수력 성능 해석

□ 증기발생기 습분분리기 열수력 해석

○ 격자생성

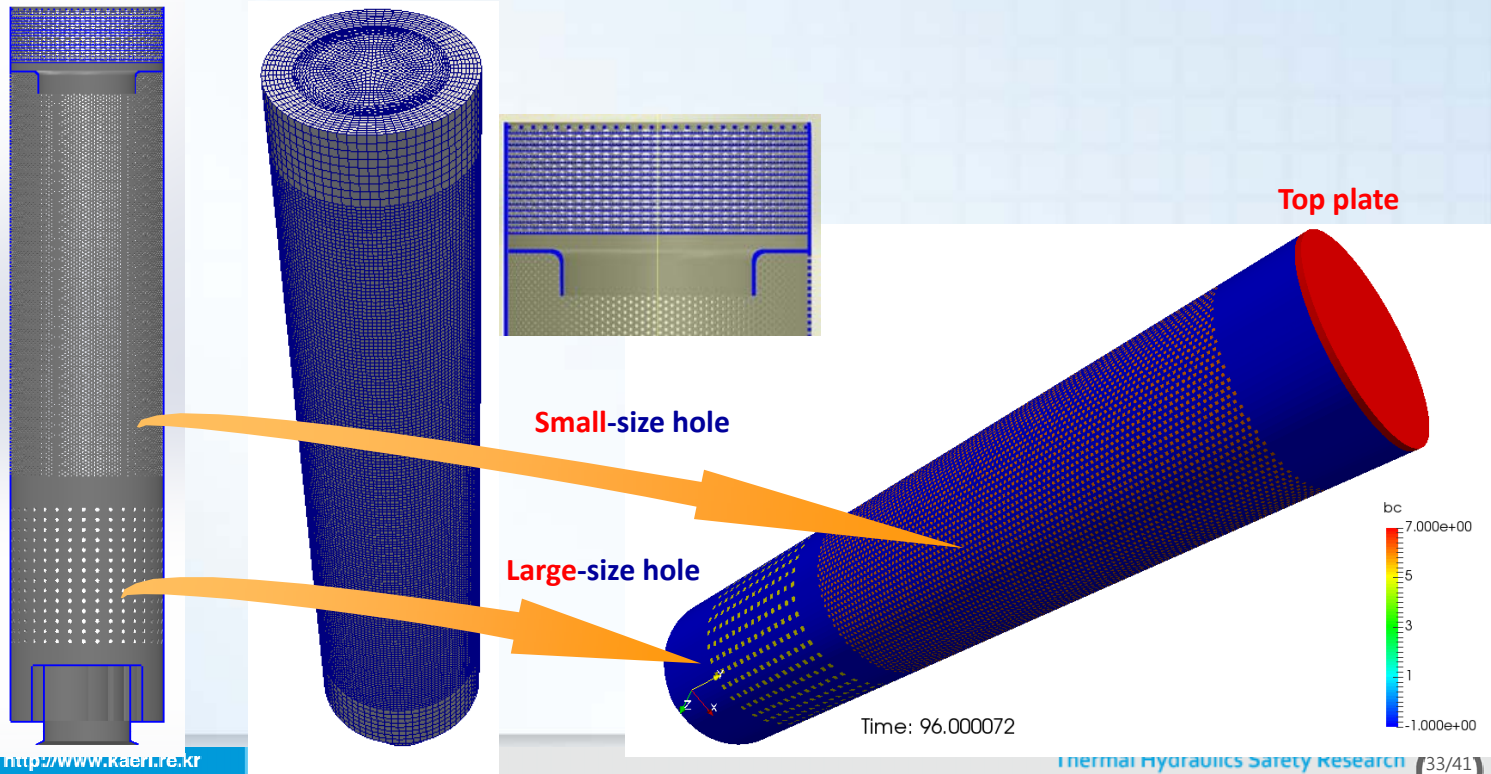
- ▶▶ SALOME Open Source Software
- ▶▶ Wall 부분 mesh refinement
- ▶▶ Vane 및 내부 구조물: Thin wall
- ▶▶ 총격자: 1,413,214개



실험대체 열수력 성능 해석

□ 증기발생기 습분분리기 열수력 해석

○ 경계조건 (perforated hole)

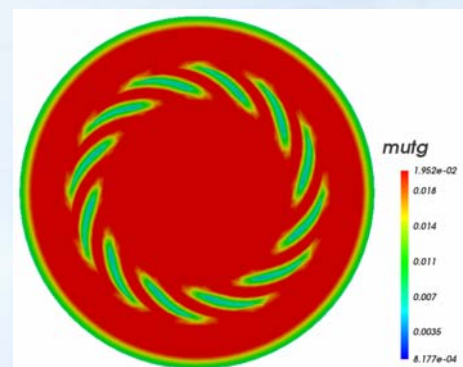
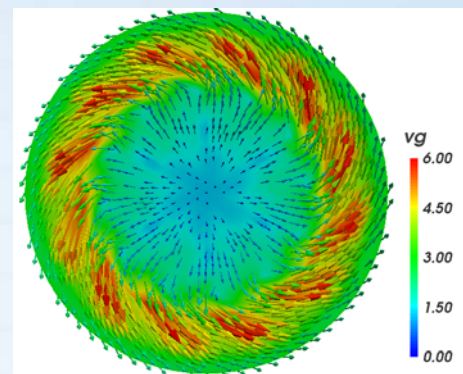
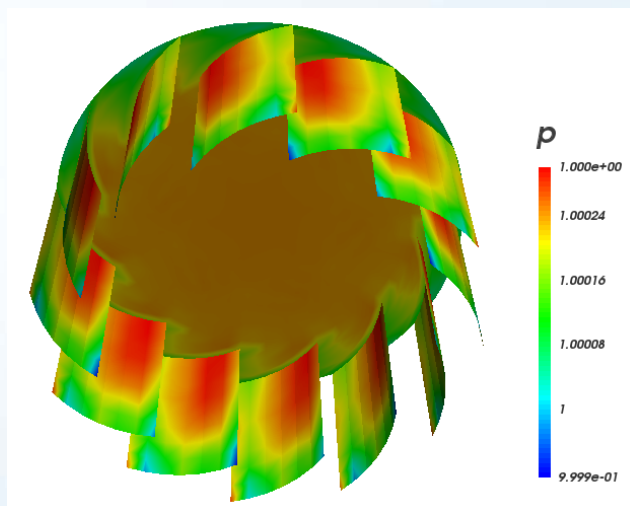


실험대체 열수력 성능 해석

□ 증기발생기 습분분리기 열수력 해석

○ Feasibility

▶▶ for thin-wall treatment

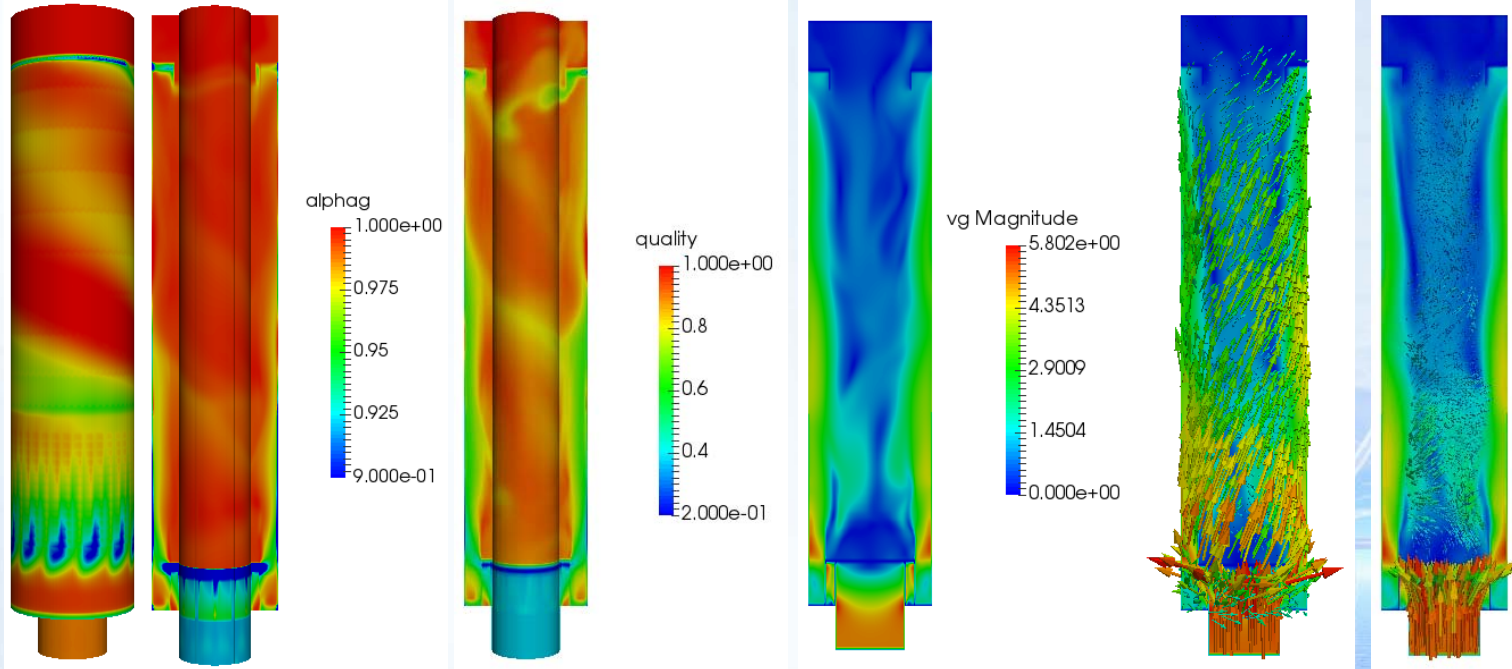


실험대체 열수력 성능 해석

증기발생기 습분분리기 열수력 해석

기포율/건도 분포

입구 속도 ($v_{g,in}=5.0$ m/s)

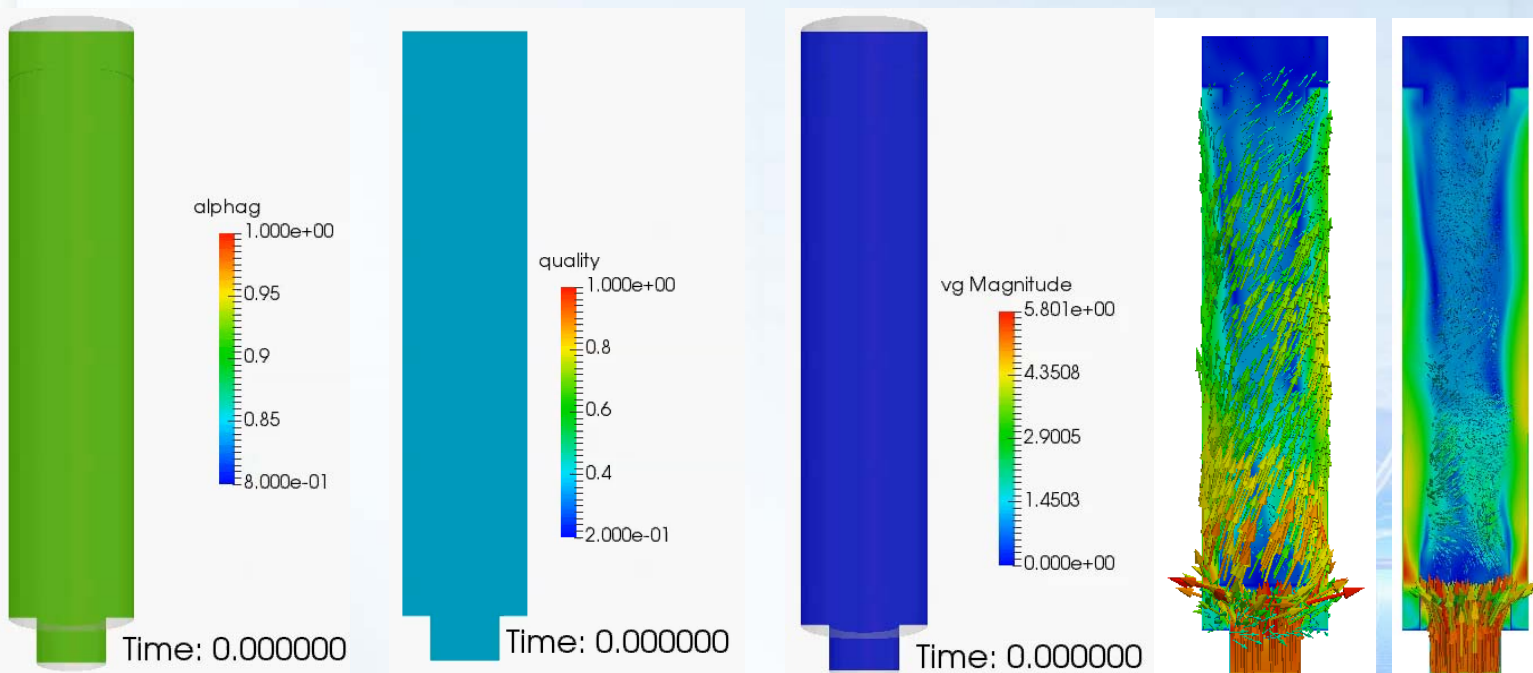


실험대체 열수력 성능 해석

증기발생기 습분분리기 열수력 해석

기포율/건도 분포

입구 속도 ($v_{g,in}=5.0$ m/s)

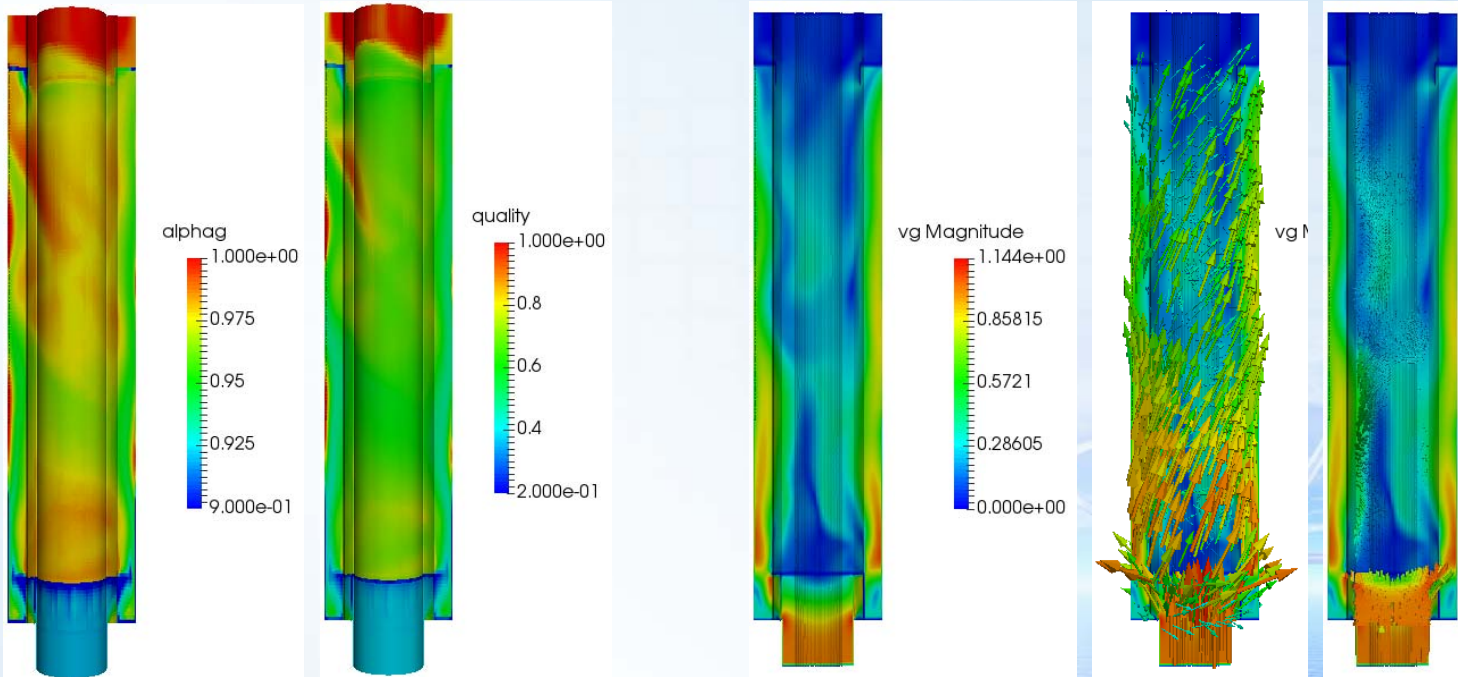


실험대체 열수력 성능 해석

증기발생기 습분분리기 열수력 해석

기포율/건도 분포

입구 속도 ($v_{g,in}=1.0$ m/s)

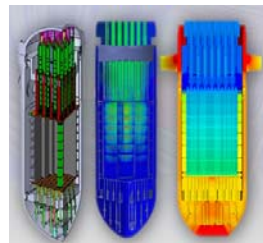


맺음말

연구동향

미 DOE CASL 프로젝트

Phase 1: 2010~2014 (\$110M/5yrs)
Phase 2: 2015~2019 (\$121.5M/5yrs)



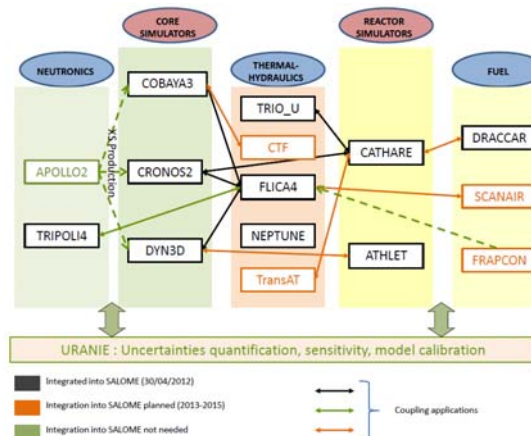
통합 M&S 활용, 가상원자로 구현



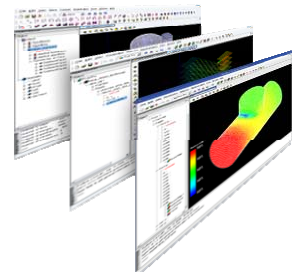
빅데이터 가시화

유럽연합 NURESIM 프로젝트

- 다중스케일 다분야 안전해석



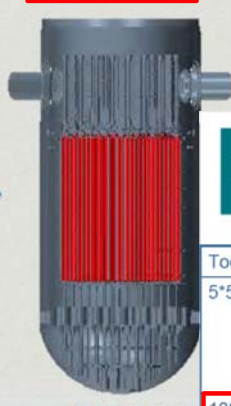
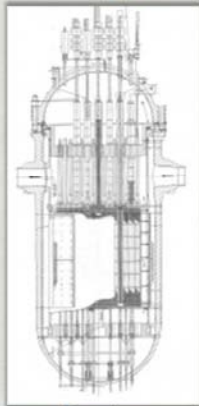
SALOME 플랫폼



□ 계산과학 필요성

4-Loop Westinghouse PWR Multi-Physics Model Development

- RPV ID 173", 193/4 Fuel Assemblies, 13,944 fuel rods (fuel pellets, helium gap), 434 spacers, 148,224 mixing vanes, **1.2 billion cells**



CASL

CAD Model

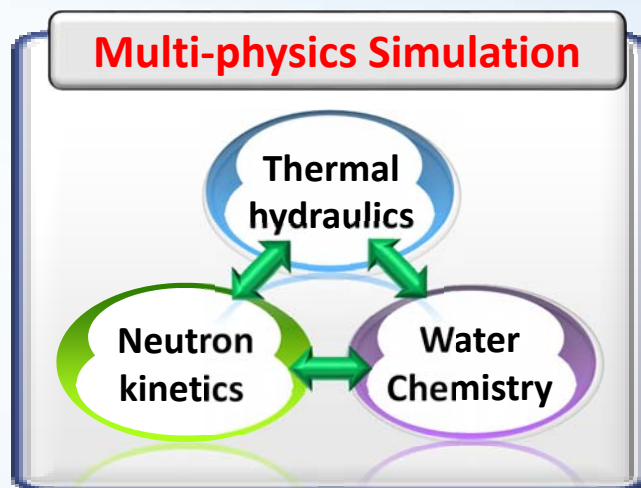
CFD Model

Roadmap

Today	Tomorrow	Later On
5*5 grid	17*17 grid	Full core vessel : • 17*17 grids • 10 grids per assembly • 196 assemblies
100 million tetrahedra	220 million hexahedra	300 billion hexahedra
Volume data (full analysis): 4 Gb on disk → 30 Gb RAM	Volume data: 40 Gb/step=10Tb 40 Gb (1 step) → 300 Gb RAM	Volume data: 60 Tb/step=15Pb 60 Tb (1 step) → 500 Tb RAM
Skin data (rod interaction only): 75 Mb on disk → 1 Gb RAM	Skin data: 750 Mb / step = 15 Gb → 10 Gb RAM	Skin data: 1 Tb / step = 200 Tb → 15 Tb RAM
1 SMP machine 32 Gb RAM	64 SMP nodes 8 Gb / node = 512 Gb RAM	8000 SMP nodes 64 Gb / node = 512 Tb RAM

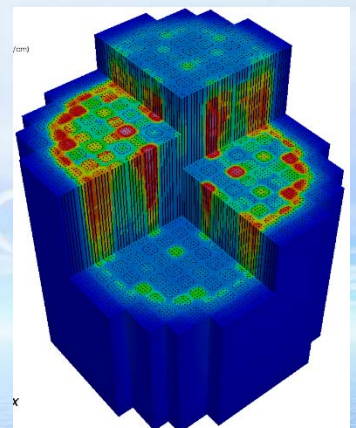
맺음말

- 원자로 성능평가를 위한 대용량 다물리 해석 체계 구축
- '17~'19
- KAERI-KISTI 공동연구



Target

- * 원자로 성능 평가 (full core)
- * 열수력-중성자동역학-수화학
- * 다물리 해석
- * 슈퍼컴 기반 사용환경 구축



경청해 주셔서 감사합니다.

