

**중대사고시 충수된 Cavity 내 두상 자연대류 환경에서
노외 노심용융물 파편잔해층의 발달에 관한 연구**

**Development of Ex-Vessel Corium Debris Bed
under Two-Phase Natural Convection Flows
in Flooded Cavity Pool during Severe Accident**

김은호, 이문언, 박현선*

(발표자) 김은호, POSTECH 첨단원자력공학부 박사과정

2014. 10. 31

목 차

Introduction

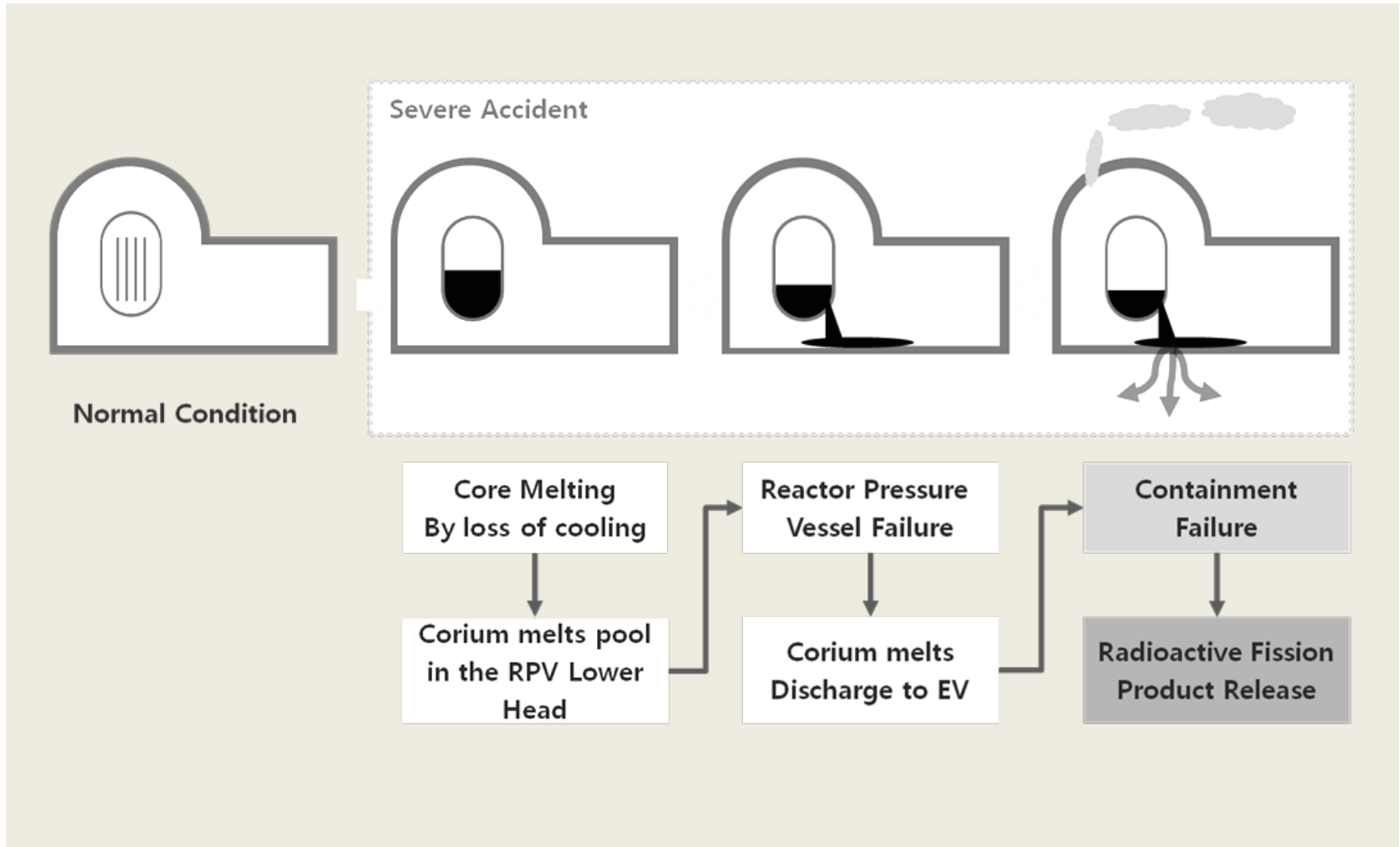
Motivation / Objective

Test facility / Approach method / Post-process

Experimental results 1 & 2

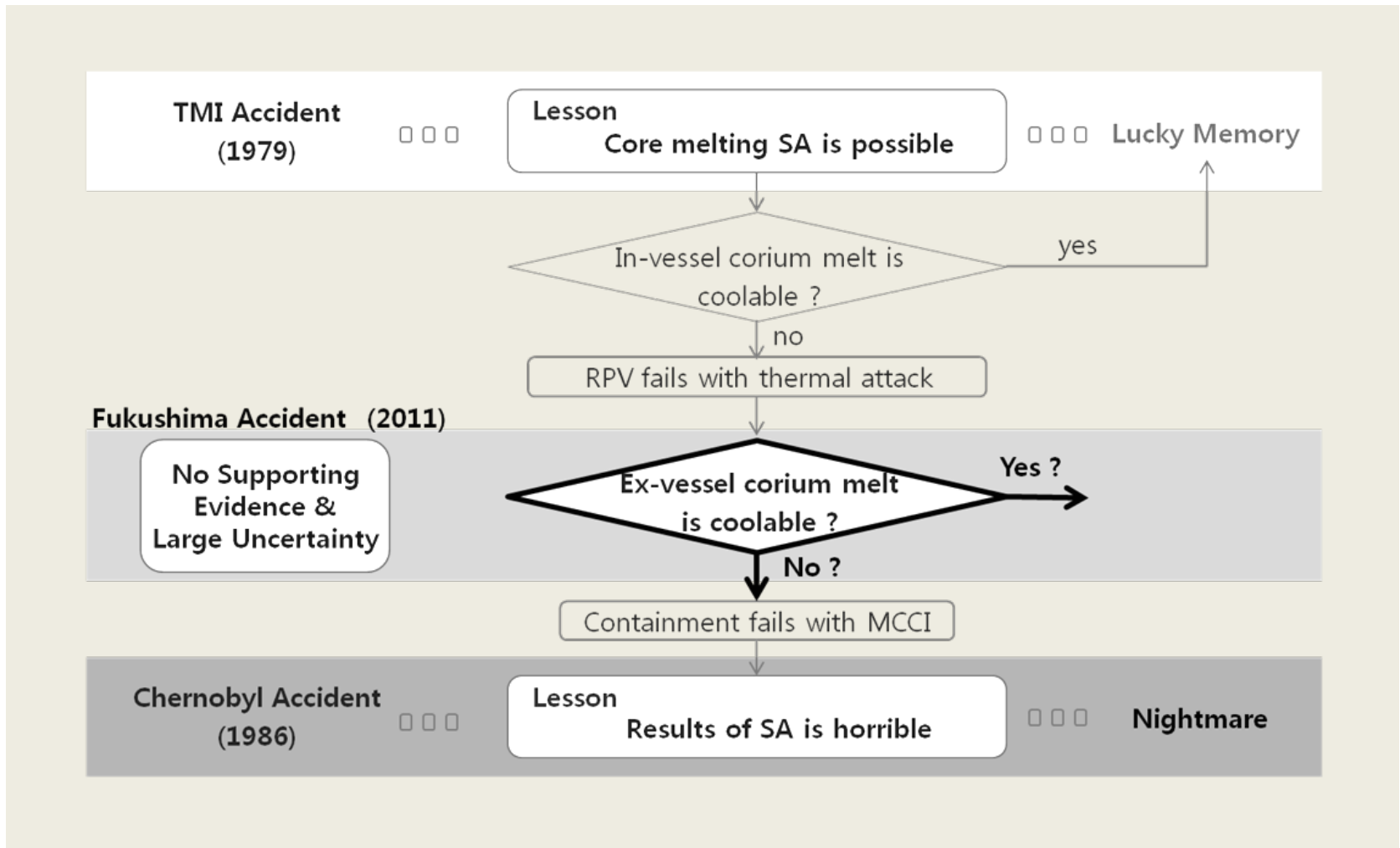
Introduction

중대사고는 원전의 설계 기준을 넘어서며 노심 손상을 동반하는 심각한 사고이다.

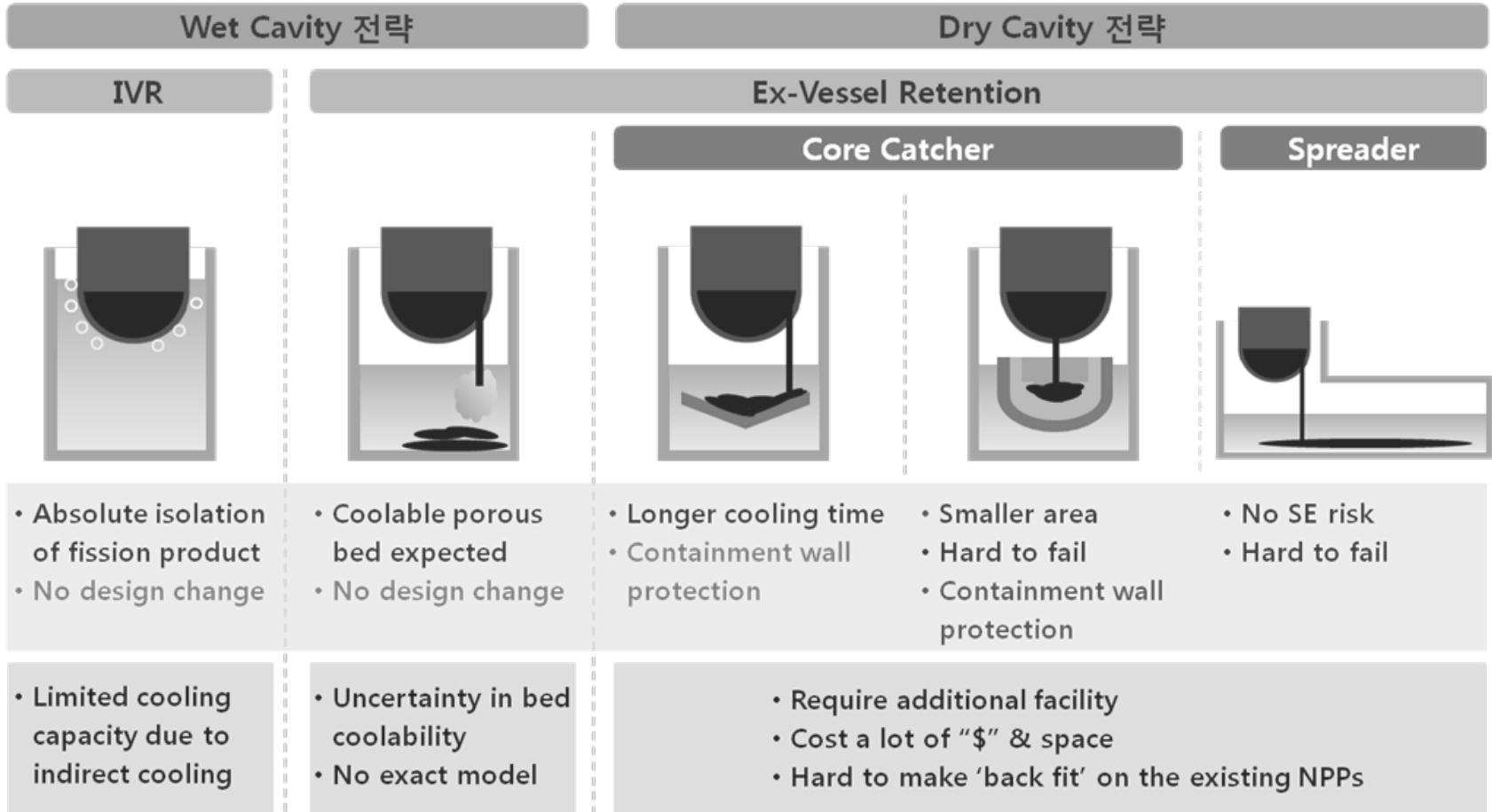


Introduction

중대사고의 종료는 노심 용융물의 냉각 가능성에 달려있다.

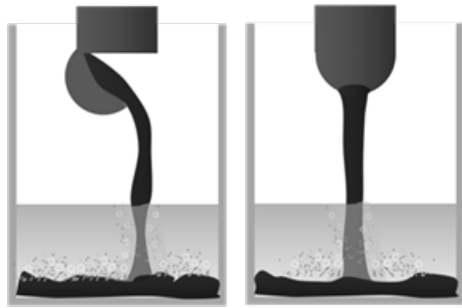


중대사고에서 노외 노심용융물을 냉각하기 위한 다양한 대응 전략이 있다.

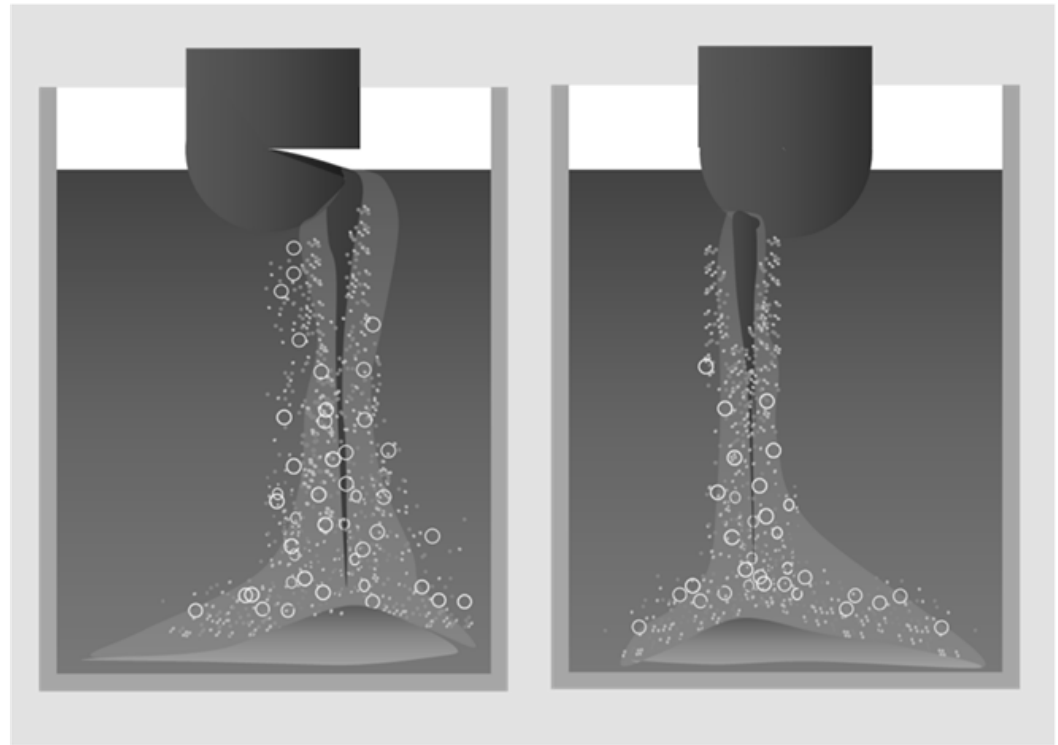


한국의 IVR 전략 북유럽의 BWR 모델

Wet cavity 전략에서 사고의 진행상황과 원전의 구조조건에 따라 접근 방향이 달라진다.



Big drop on the shallow pool



Full fragmentation in a deep cavity pool

다공 특성을 가지는 파편잔해층의 냉각성을 판단하기 위해서는 내/외부 구조정보가 필요하다.

<외부 구조의 영향: bed angle>

<내부 구조의 영향: 입자분포>

*S. Yakush, DECOSIM Simulation, ICONE20, 2012

*G.W. Mitchell, Experiment with UO_2 debris
in sodium, TMFRS, 1985

기존의 FCI에 집중한 실험에서는 Debris bed의 형상에 대한 결론을 내지 못하였다.

Magallon, FARO 실험, NED, 2006

편평한 형상 (실험 케이스 L-24)

더미 형상 (실험 케이스 L-28)

- $\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2$ melts
- $\sim 3,000\text{K}$, $\sim 170\text{ kg}$

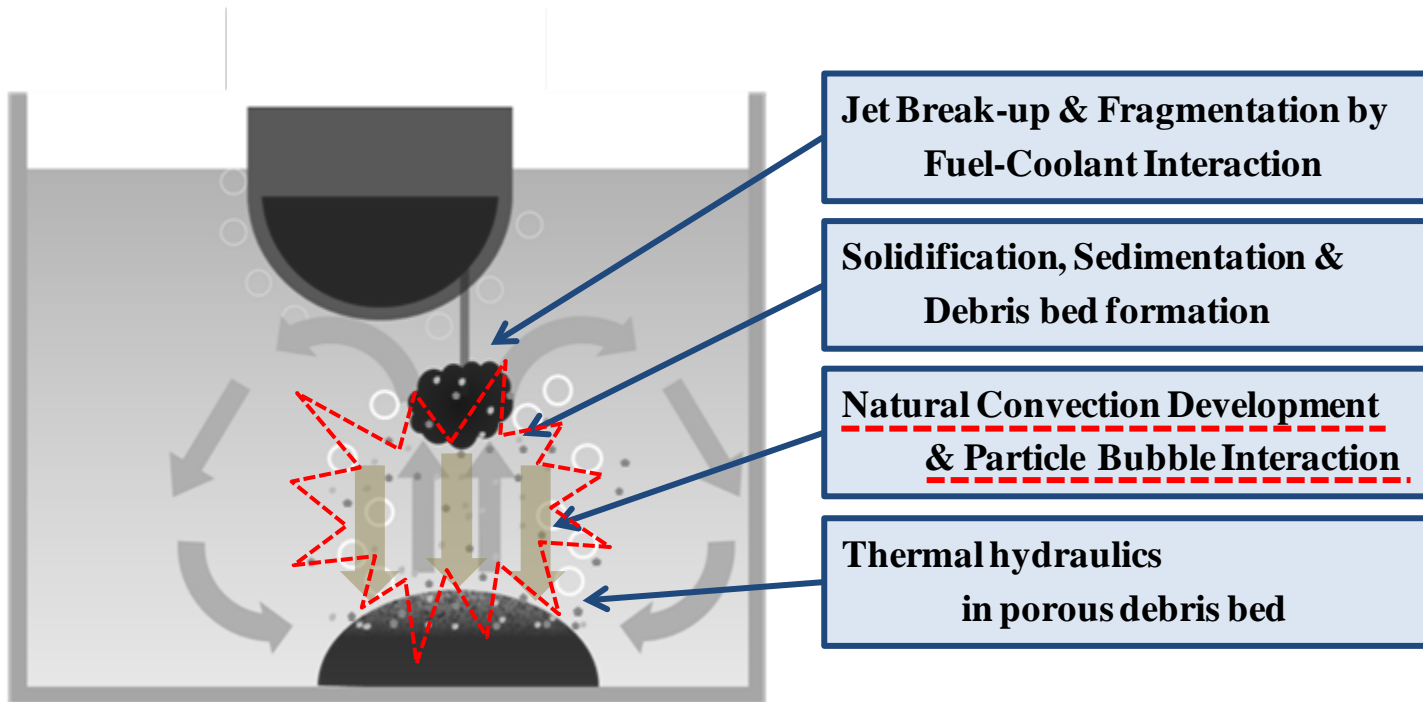
Karbojian et al., DEFOR 실험, NED, 2009

- $\text{WO}_3\text{-CaO}$ for E7
- $\text{CaO-B}_2\text{O}_3$ for E4
- $\sim 1,300\text{K}$, $8\sim 16\text{ kg}$

더미 형상

(좌) DEFOR-E4, (우) DEFOR-E7

노심용융물 파편 입자 잔해층은 복잡한 형성 과정을 거친다.



< 노심용융물 Debris bed의 형성 과정 >

최근 Two-phase 현상을 고려한 연구들이 Debris bed 의 평탄한 형상을 제기하였다.

B. Zhang et al., NED, 2011

- 격렬한 버블 생성에 따른 Self-leveling 현상

S. Yakush et al., ISAMM2009

- 공동수조 내부의 대류 현상에 따른 평탄화 Debris bed 형성

2009년 Yakush의 simulation 연구를 실험적으로 검증하기 위한 실험을 수행하였다.

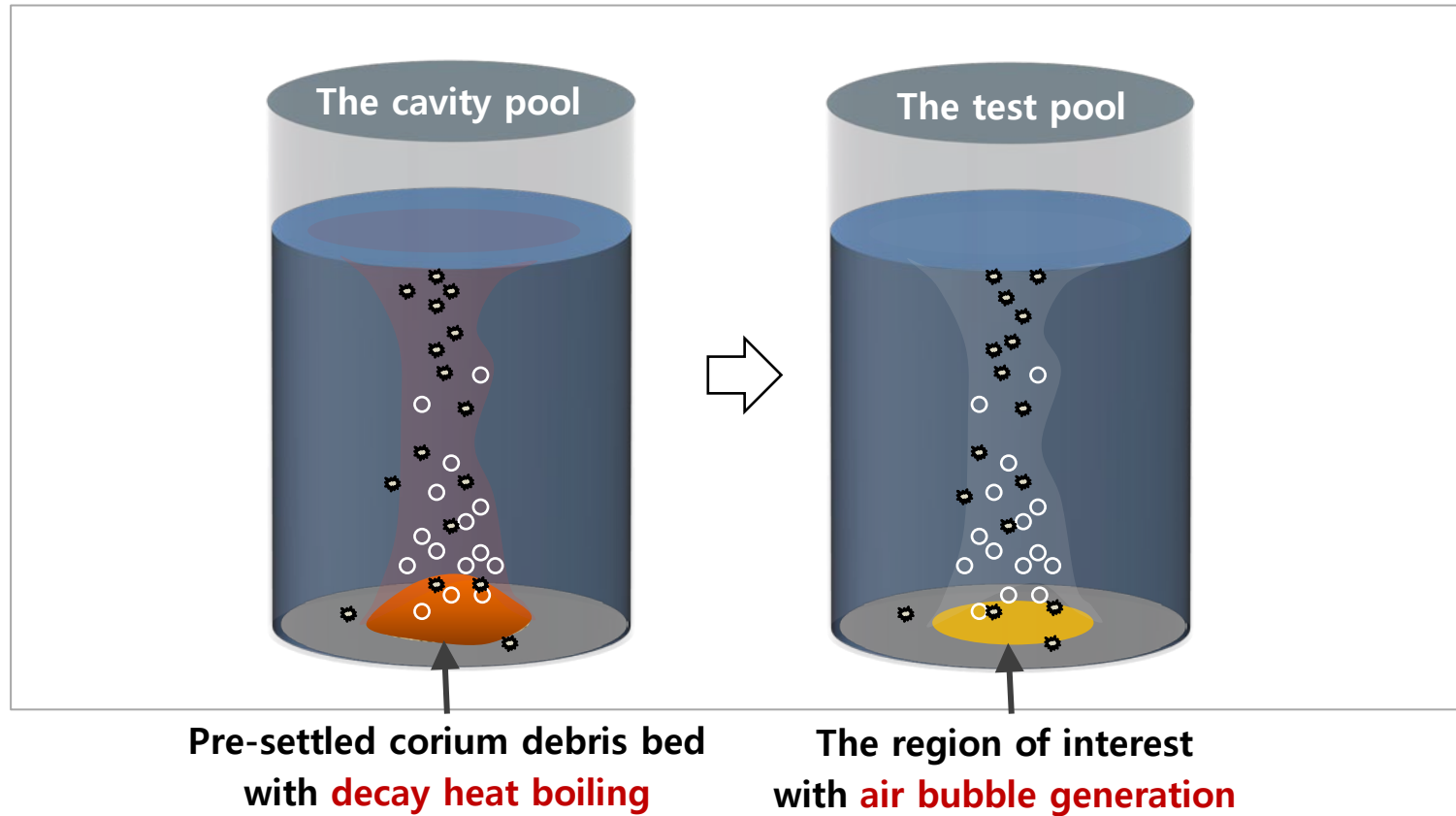
- Debris bed의 형상에 따라 Dryout Heat Flux가 달라질 수 있다.
- 기존의 single-phase 실험연구들은 Debris bed의 형상에 대한 답을 주지 못하였다.
- 최근의 실험 및 시뮬레이션 연구들은 two-phase 조건이 bed의 평탄화를 가져올 수 있다고 주장한다.

Cavity pool 내부의 two-phase 자연대류 영향을 모사 실험을 통하여 재현/검증한다.



Debris bed 외부 shape에 관한 형상 모델링에 기여하고,
이를 바탕으로 노외 노심용융물 Debris bed의 냉각성 판단에 도움이 되고자 한다.

바닥에 쌓인 debris bed의 열에 의한 이상(二相) 자연대류를 test pool 바닥의 air로 접근하였다.



Two-phase 조건 형성이 가능한 소규모 입자 침적 실험장치를 구축하였다.



구성

1. 아크릴수조
2. 입자공급 깔때기 및 노즐
3. 버블발생장치+입자 catcher plate



<실험 장면, (좌) 1-phase 조건, (우) 2-phase 조건>

Pool height : 1 m (Falling height: ~0.7 m)

Diameter : 0.6 m

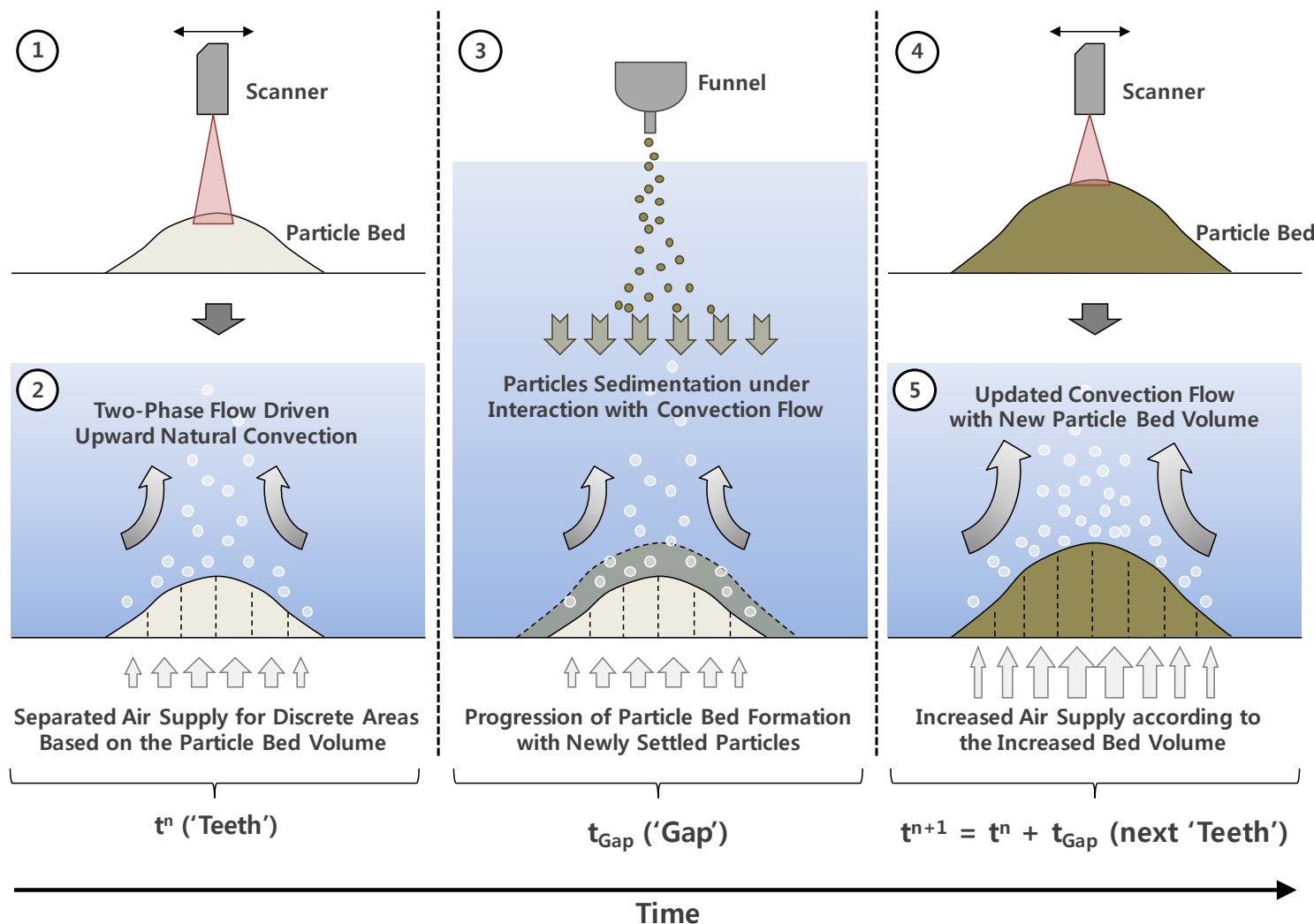
Max. Bubble rate : 10~100 LPM

실험 입자로는 Stainless Steel (304) cylindrical 입자를 사용하였다.



- 재료: Stainless steel 304
- 치수: $\Phi 2\text{mm} \times \text{H}2\text{mm}$
- 밀도: $8,000 \text{ kg/m}^3$
- 1회 사용량: 1.0 kg
- 표면처리: 무광 백색 스프레이

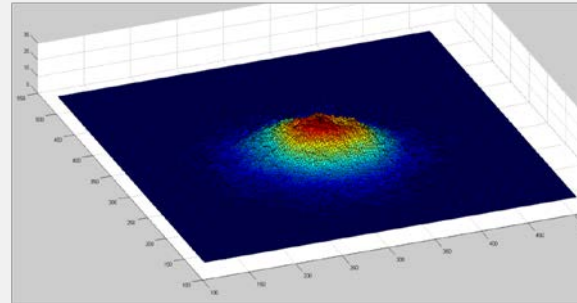
시간 순차적인 Debris Bed의 발달 특성을 보기 위하여, 'Gap-Tooth' approach를 실험에 적용하였다.



결과 입자 Debris bed의 외부 형상 및 부피를 측정하였다.



Resultant particle bed

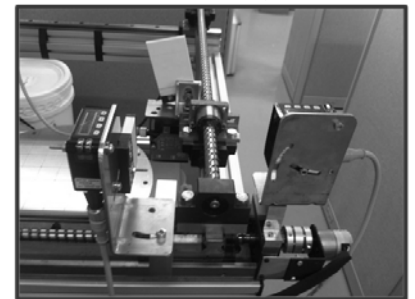
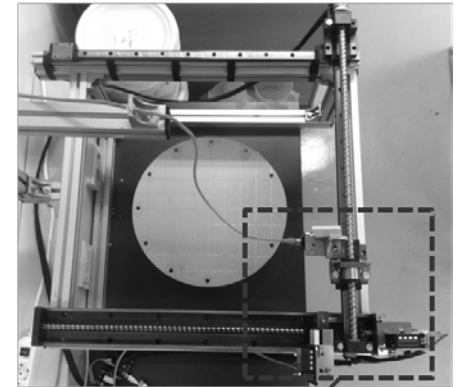


Reconstructed 3D image



#04-04	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
a	0.00	0.00	0.06	0.36	0.51	0.59	0.58	0.17	0.00	0.00
b	0.00	0.18	0.84	1.16	1.91	2.04	1.42	1.05	0.21	0.00
c	0.03	0.59	1.24	4.82	11.99	14.05	7.24	1.54	0.78	0.08
d	0.29	0.99	2.40	15.11	32.70	33.93	20.96	5.03	0.82	0.39
e	0.60	1.21	3.79	19.98	39.22	41.74	26.12	6.70	0.61	0.32
f	0.65	1.30	3.43	17.19	30.88	32.62	20.79	4.91	0.69	0.37
g	0.39	1.28	2.36	7.36	15.33	14.13	7.86	1.00	0.47	0.18
h	0.13	1.02	1.79	2.91	3.28	2.27	0.94	0.41	0.31	0.11
i	0.00	0.40	0.91	1.32	1.23	0.95	0.52	0.25	0.22	0.00
j	0.00	0.00	0.18	0.34	0.43	0.40	0.36	0.17	0.01	0.00

Calculated volume information of each cell



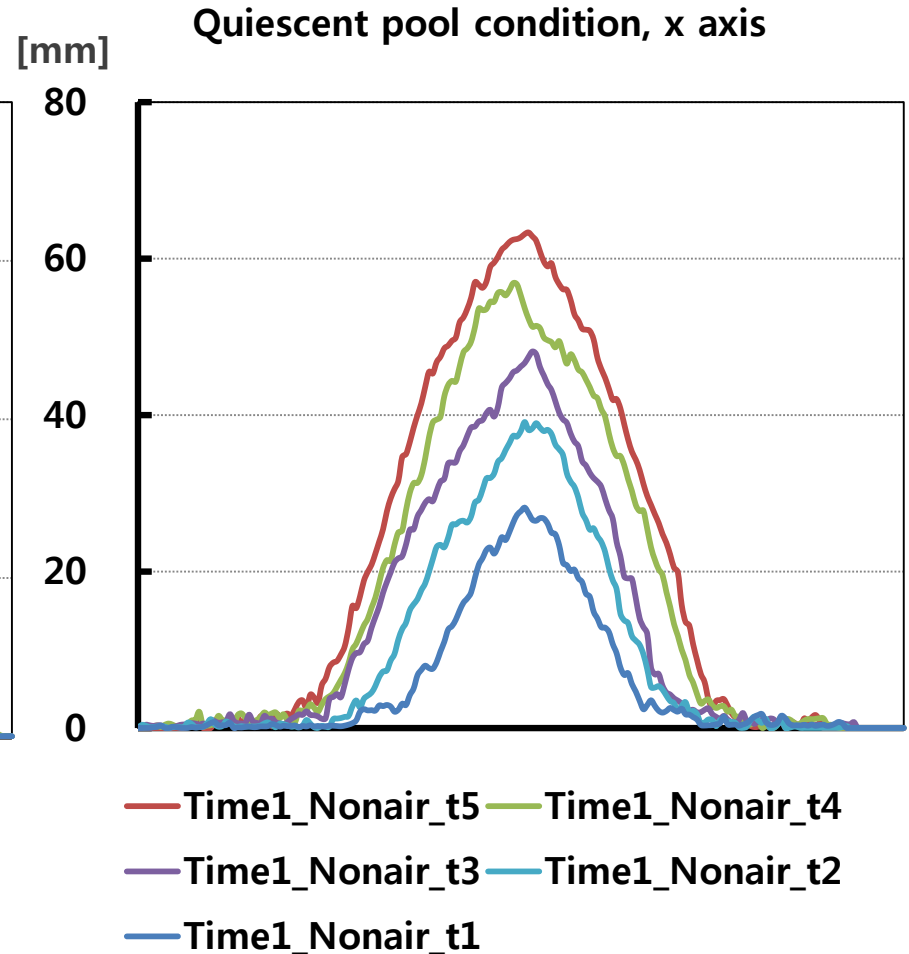
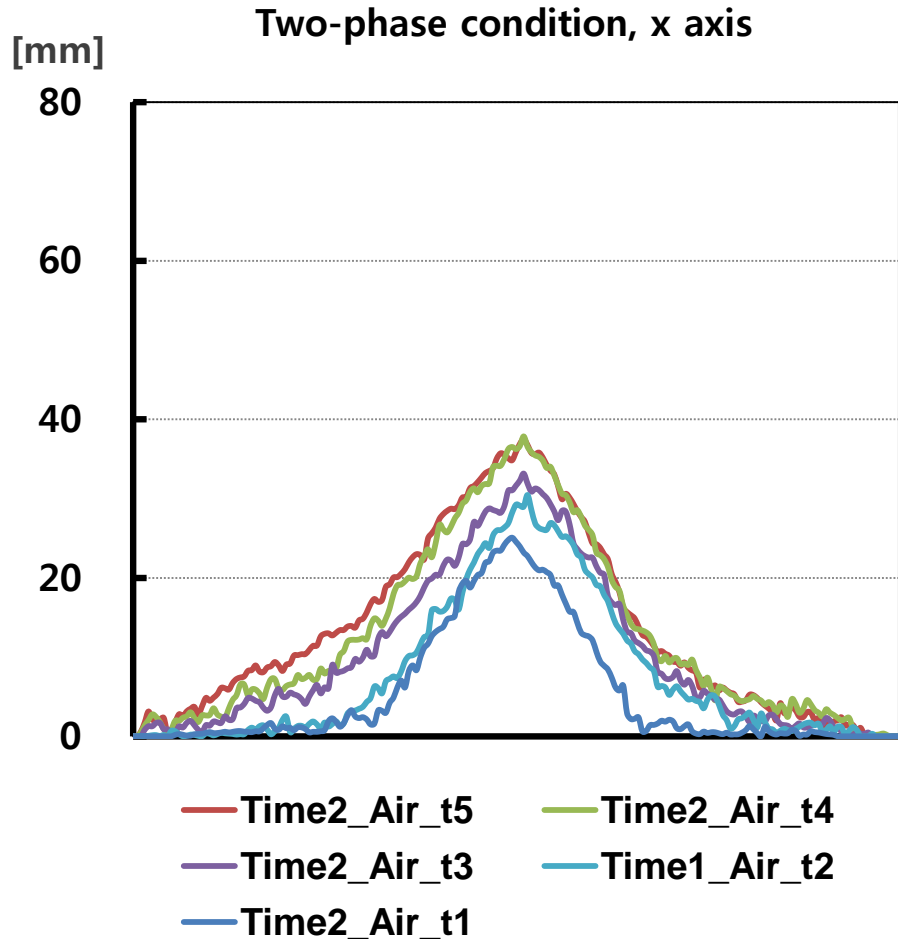
Scanning facility

대조군인 Quiescent pool condition과 함께 총 10회의 실험을 수행하였다.

Case	Time Sequence				
	t^1	t^2	t^3	t^4	t^5
Quiescent Pool Condition	0	0	0	0	0
Two-Phase Condition	0	35.4	66.5	94.7	120.9

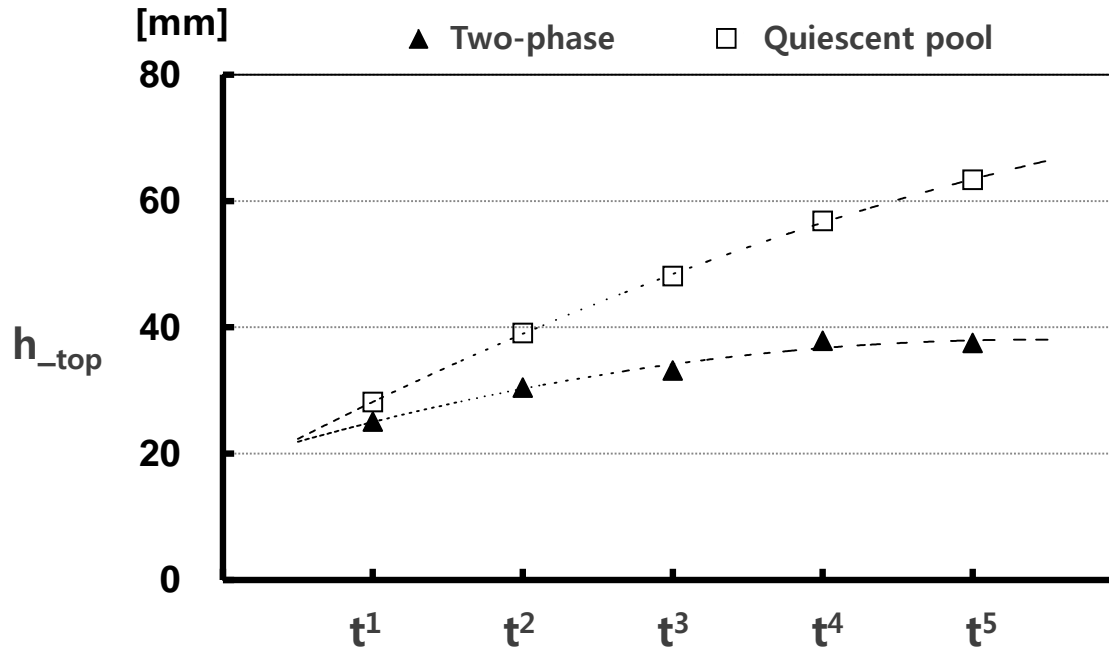
*Volumetric heat generation rate 가정: $\sim 4\text{MW/m}^3$

Resultant particle bed의 top 기준 X 축 단면 형상 비교



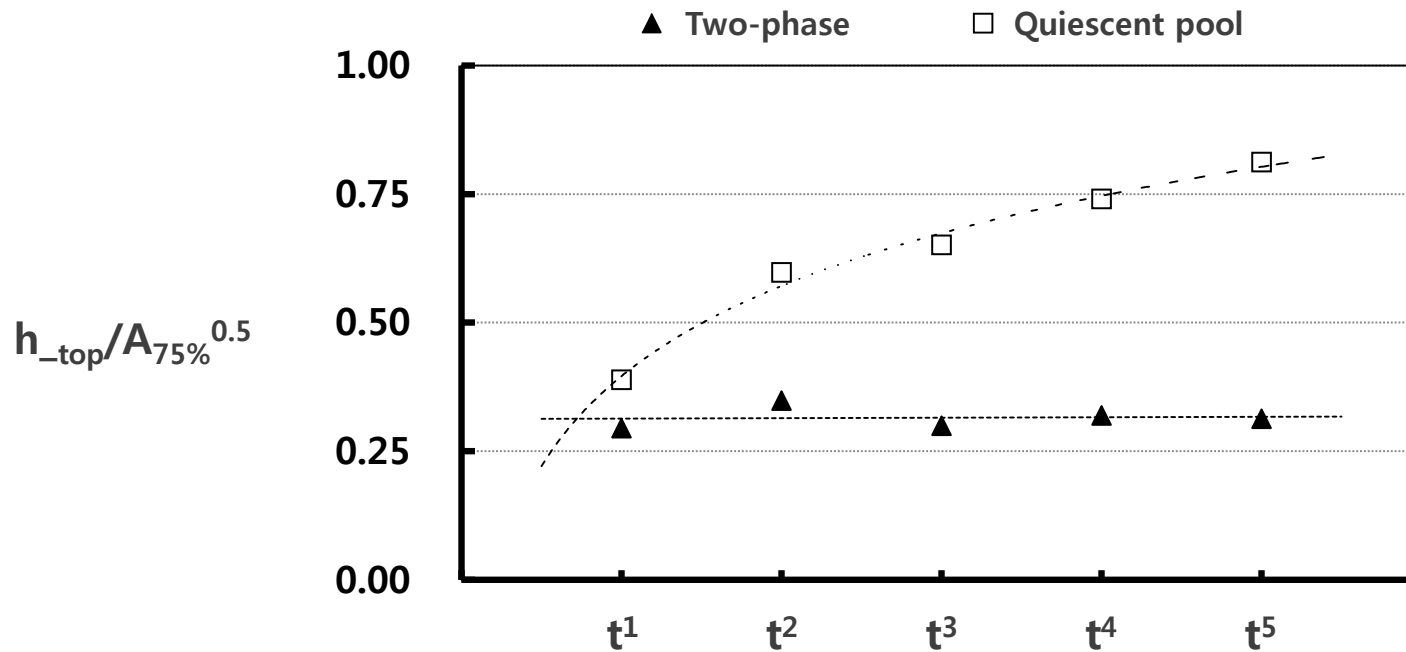
Experimental results

1. Cavity pool 내부의 이상(二相) 자연대류는 Debris Bed의 top height의 성장을 지연시킨다.



Delay of Dryout Occurrence

2. Cavity pool 내부의 이상(二相) 자연대류는 보다 편평한 Debris Bed 외부 구조를 만든다.



Higher Overall Debris Bed Coolability

감사합니다.

