

# **Review of Failure Modes and Effects of IAB Valves in NuScale**

Donghwan Choi (presenter), Eunhee Jang, Hyungdae Kim, Gyunyoung Heo\*

2025 KNS Spring Conference

2025.05.22(Thu.)

## 목차

1. 서론
2. 문헌조사 및 밸브 작동원리 분석
3. FMEA
4. 결과 및 결론



## 연구 목적

- NuScale ECCS 밸브의 신뢰도를 현실적으로 산정하여 PSA 모델에 반영하고자 함
- ECCS를 구성하는 밸브의 고장 상태를 사건수목(Event Tree, ET)을 통해 식별하고, 그 결과를 고장수목(Fault Tree, FT)로 표현하여 고장 모드 및 영향 분석(Failure Modes and Effects Analysis, FMEA)를 수행함
- 공개된 NuScale 자료에서는 ECCS 밸브의 고장 모드는 확인할 수 없는 부분이므로 이를 분석하여 국내 SMR의 리스크 평가에 기여하고자 함

## 주요 확인사항

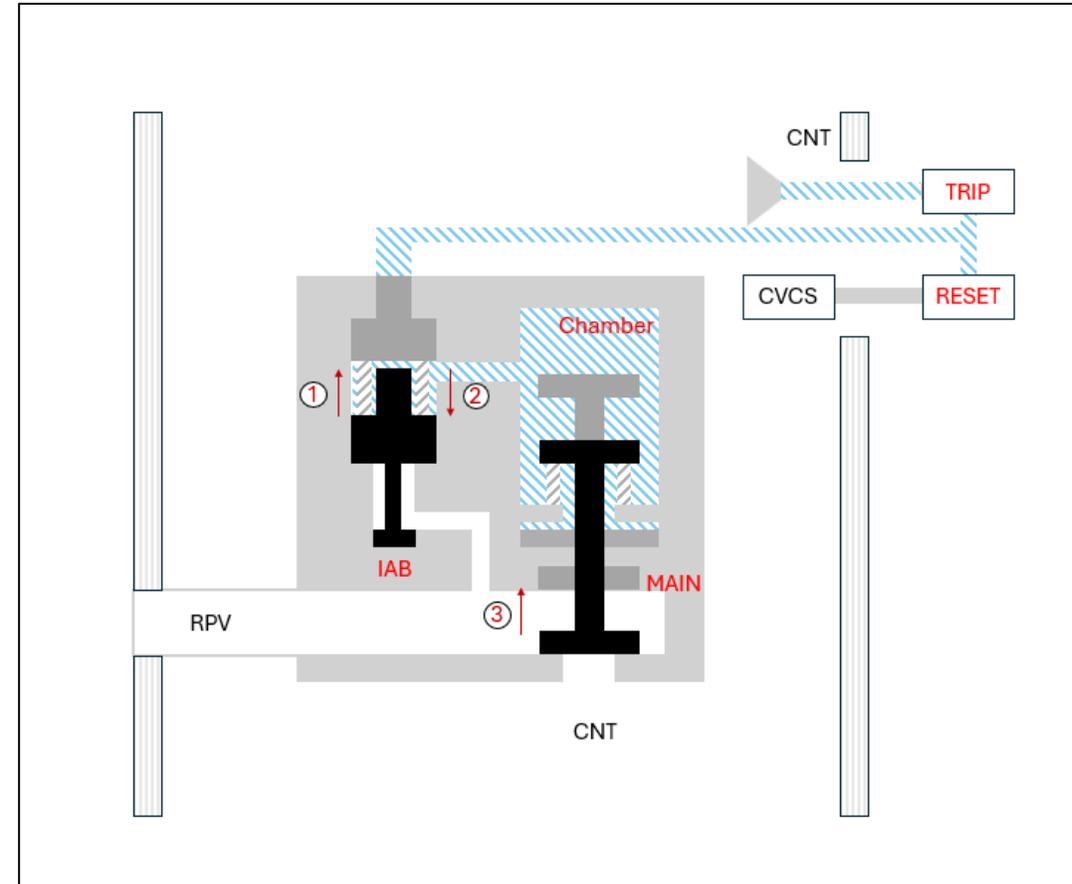
- NuScale사의 최종안전성분석보고서(Final Safety Analysis Report, FSAR) 19장에서 내부 사건용 ET에 "ECCS open" 항목이 반복적으로 등장하며, 대부분의 사고 상황에서 ECCS 작동이 요구됨
- ECCS 밸브의 비정상 개방이 사고 유발 가능성을 높일 수 있음
- 이에 따라 NuScale은 ECCS 밸브에 오작동방지(Inadvertent Actuation Block, IAB) 밸브를 추가하여 비정상 작동 빈도를 줄임

## 연구의 내용

- IAB 밸브의 추가 설치로 기존 구성과 달라짐에 따라 생기는 상호작용이 사고 완화에 방해가 될 수 있다는 우려가 있어 밸브의 고장 상태를 ET 분석을 통해 식별하고 이를 FMEA 수행하여 잠재적인 문제점들을 분석함

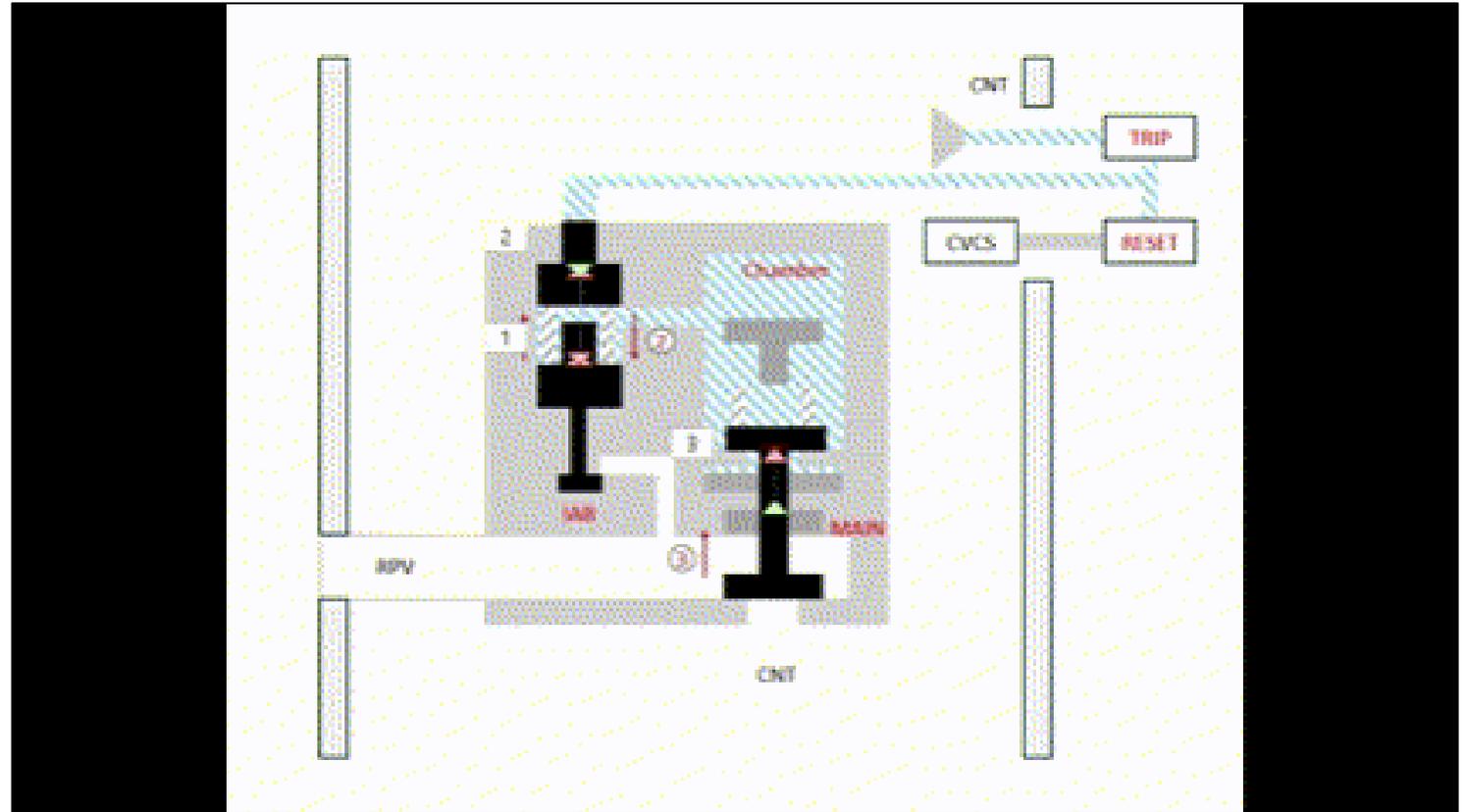
# 02 문헌조사 및 밸브 작동원리 분석

- ECCS는 사고 시 원자로용기(Reactor Vessel, RV)와 격납용기(Containment, CNT) 사이의 격리를 해제하여 냉각재의 자연순환을 가능하게 함으로써 냉각재 순환을 수행하도록 설계된 시스템
- ECCS Operation signal
  - LOW RCS P (below 800 psi)
  - HIGH CNT Lv. (above 252 in)
- ECCS 구성요소
  - Main valve : ECCS chamber의 압력 감소 시 개방함
  - IAB valve : 전원 오작동으로 인한 Main valve의 spurious open의 빈도를 줄이는 역할
  - Trip valve : fail-open 기능을 가지며 사고 시 압력경계를 CNT로 확장하여 ECCS 내 압력 감소시키는 역할
  - Reset valve : fail-close 기능을 가지며 CVCS로부터 유체를 공급받아 ECCS에 압력을 공급하는 역할



# 02 문헌조사 및 밸브 작동원리 분석

- ECCS IAB 밸브 작동원리
- 리셋 밸브 fail-close
- 트립 밸브 fail-open
- 1 . IAB close
- 2 . IAB open
- 3 . 메인 밸브 open



# 03 FMEA

- IAB valve는 단순 전원 오작동 사건이 냉각재상실사고로 이어지는 것을 방지하는 역할을 하며, 이로 인해 초기사건의 발생 빈도를 줄이는 효과를 가짐
- 초기사건 발생 빈도를 줄이기 위해 설치된 IAB valve로 인하여 사고 상황에서 ECCS가 작동하지 않는 경우에 대한 분석을 수행함
- ECCS를 구성하는 네 개의 밸브에 대하여 FMEA를 수행하여 ECCS가 정상적으로 작동하고 개방되는지 검토함
  - 성공기준 : 하나 이상의 RVV 및 하나 이상의 RRV 개방
- ECCS의 Main valve는 메인 챔버의 압력이 감소된 조건에서 작동하는 밸브임
- ECCS 밸브가 개방되지 않는 상황은 두 가지로 분류함
  1. Main valve 자체의 결함으로 인한 개방 실패
  2. 메인 챔버의 감압 실패로 인한 개방 실패

# 03

## FMEA

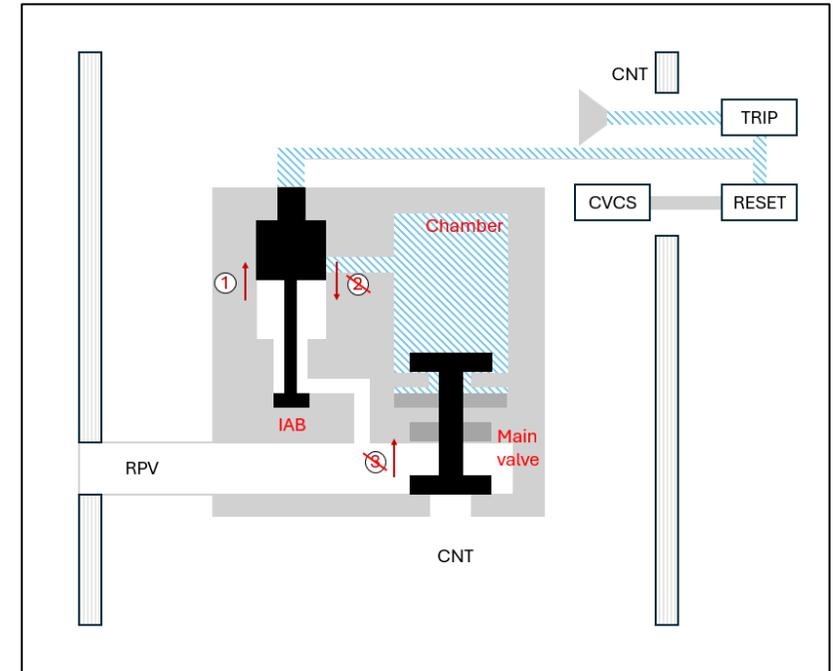
	Remains close under normal conditions and has a fail-close state	Remains close under normal conditions and has a fail-open state			Seq#	State	Frequency
ECCS Main Valve Open	Reset Close	Trip Open	IAB Close	IAB Reopen			
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>close</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>open</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>close</p> </div>	close(normal)	fail to reopen	1	fail to open	
			fail to close		2	open	
				reopen	3	not considered	
				fail to reopen	4	not considered	
				fail to close(normal)	5	fail to open	
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>open</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>close</p> </div>	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px;"> <p>open</p> </div>	close(normal)	reopen	6	open	
				fail to reopen	7	fail to open	
			fail to close		8	open	
				reopen	9	not considered	
				fail to reopen	10	not considered	
				fail to close(normal)	11	fail to open	

# 03 FMEA

ECCS – Reset valve – Trip valve open – IAB close(①) – IAB remain close (②X) – Main fail to open(③X)

Trip valve 개방으로 인해 ECCS 감압으로 IAB 닫힘, 하지만 IAB 개방 실패로 추가 감압에 실패하여 Main valve 개방 실패

	Remains close under normal conditions and has a fail-close state	Remains close under normal conditions and has a fail-open state			Seq#	State	Frequency	
ECCS Main Valve Open	Reset Close	Trip Open	IAB Close	IAB Reopen				
			close(normal)	fail to reopen	1	fail to open		
			fail to close		2	open		
			close	reopen		3	not considered	
				fail to reopen		4	not considered	
			fail to close(normal)			5	fail to open	
				reopen		6	open	
			close(normal)	fail to reopen		7	fail to open	
				fail to close		8	open	
			close	reopen		9	not considered	
				fail to reopen		10	not considered	
			fail to close(normal)			11	fail to open	

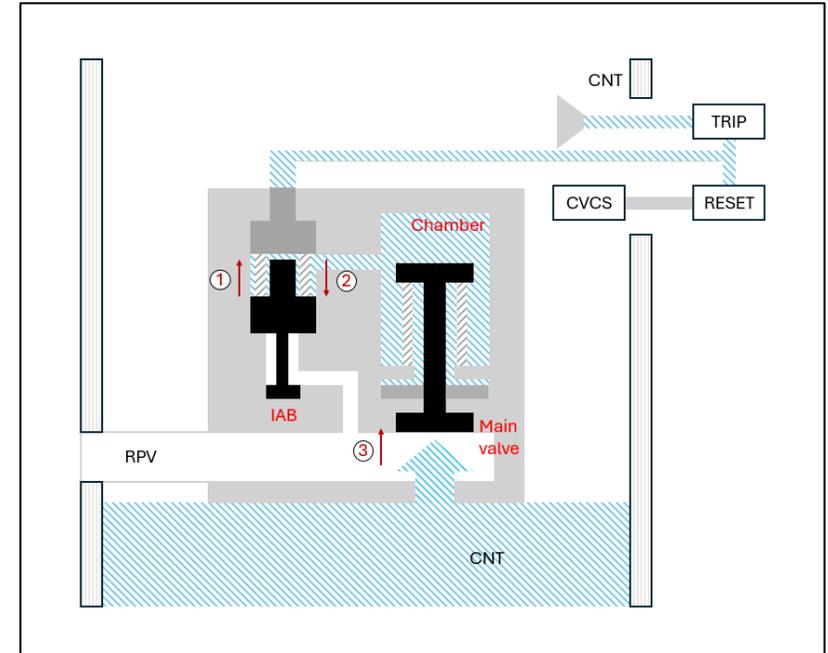


# 03 FMEA

ECCS – Reset valve – Trip valve open – IAB open(①) or close(①X) – IAB open(②) – Main open(③)

Trip valve 개방으로 인해 ECCS 내의 압력이 감소하고, IAB valve의 고장 유무와 무관하게 개방된 경우엔 메인 챔버의 감압이 진행되므로 Main valve 개방

	Remains close under normal conditions and has a fail-close state	Remains close under normal conditions and has a fail-open state			Seq#	State	Frequency	
ECCS Main Valve Open	Reset Close	Trip Open	IAB Close	IAB Reopen				
			close(normal)	fail to reopen	1	fail to open		
			fail to close		2	open		
				reopen		3	not considered	
			close	fail to reopen		4	not considered	
			fail to close(normal)			5	fail to open	
				reopen		6	open	
			close(normal)	fail to reopen		7	fail to open	
			fail to close			8	open	
				reopen		9	not considered	
			close	fail to reopen		10	not considered	
			fail to close(normal)			11	fail to open	

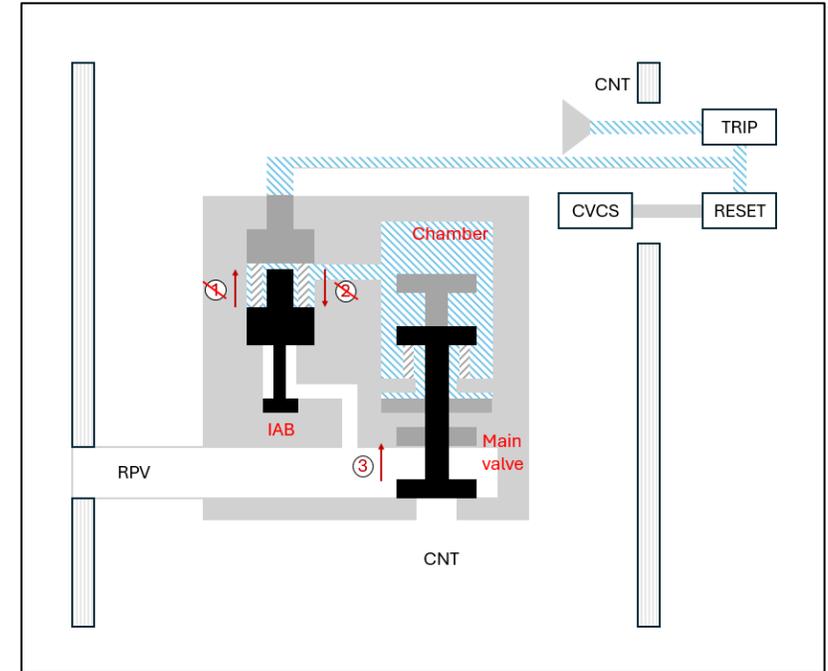


# 03 FMEA

ECCS – Reset valve – Trip valve close – IAB close(①X)(Not Considered)

Trip valve 닫힘으로 인해 ECCS 내의 감압 진행이 안됨으로 IAB valve 고장이 압력을 거스르는 방향으로 고장나는 것이 물리적으로 불가능하기에 고려하지 않음

	Remains close under normal conditions and has a fail-close state	Remains close under normal conditions and has a fail-open state			Seq#	State	Frequency
ECCS Main Valve Open	Reset Close	Trip Open	IAB Close	IAB Reopen			
			close(normal)	fail to reopen	1	fail to open	
		open	fail to close		2	open	
	close		close	reopen	3	not considered	
	close		fail to reopen		4	not considered	
	close		fail to close(normal)		5	fail to open	
	open		close(normal)	reopen	6	open	
	open		fail to reopen		7	fail to open	
	open		fail to close		8	open	
	open		close	reopen	9	not considered	
	open		fail to reopen		10	not considered	
	open		fail to close(normal)		11	fail to open	

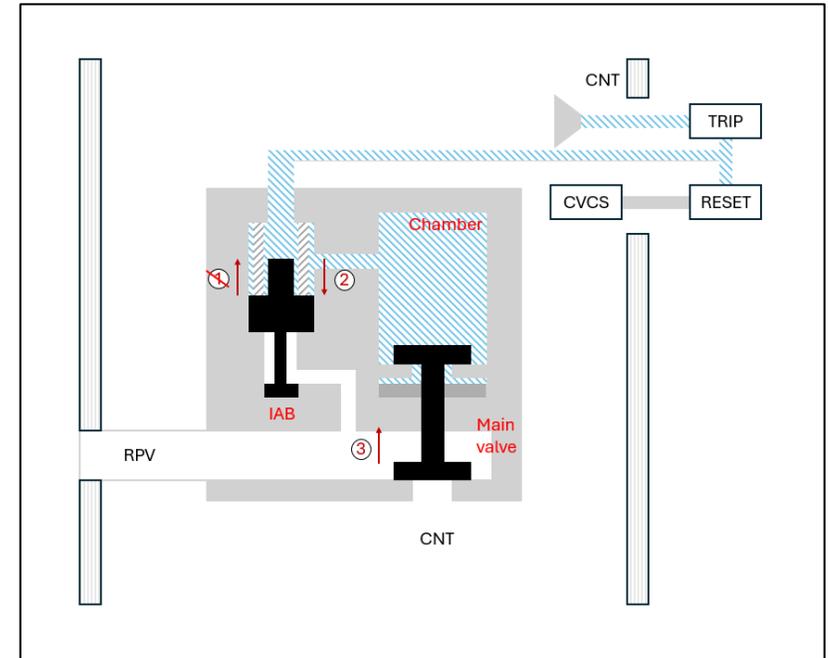


# 03 FMEA

ECCS – Reset valve – Trip valve close – IAB open(①X) – IAB remain open(②) – Main fail to open (③X)

Trip valve 개방 실패로 ECCS 내의 감압이 발생하지 않고, IAB 밸브가 열린 상태를 유지하고, 메인 챔버의 감압 실패로 Main valve 개방 실패

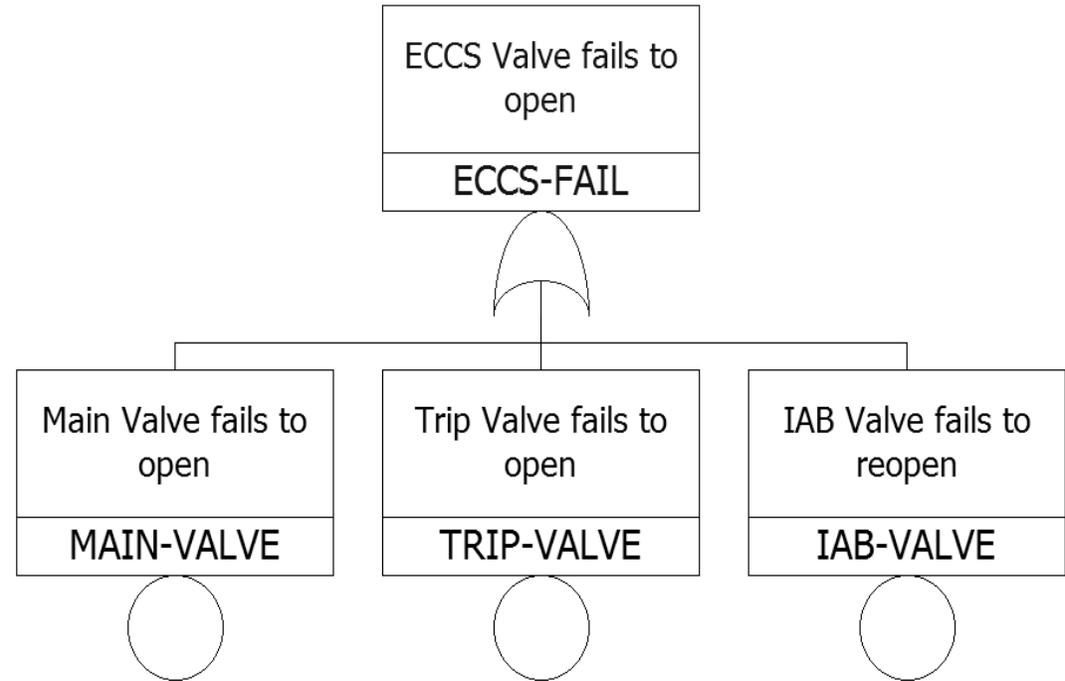
	Remains close under normal conditions and has a fail-close state	Remains close under normal conditions and has a fail-open state			Seq#	State	Frequency
ECCS Main Valve Open	Reset Close	Trip Open	IAB Close	IAB Reopen			
			close(normal)	fail to reopen	1	fail to open	
			fail to close		2	open	
			close	reopen	3	not considered	
			close	fail to reopen	4	not considered	
			fail to close(normal)		5	fail to open	
			close(normal)	reopen	6	open	
			fail to close	fail to reopen	7	fail to open	
			open		8	open	
			close	reopen	9	not considered	
			close	fail to reopen	10	not considered	
			fail to close(normal)		11	fail to open	



# 04 결과 및 결론

## 결과

- FMEA를 통해 ECCS를 구성하는 네 개의 밸브 개방 여부에 따른 모든 시나리오를 분석함
- 사고 상황에서 Main valve의 개방 실패(ECCS Failure)에 영향을 미치는 내용은 다음과 같음
  - Main valve 자체 결함
  - Trip valve의 개방 실패
  - IAB valve의 닫힘 이후 재 개방 실패



# 04 결과 및 결론

## 결론

- NuScale은 IAB 밸브를 추가 설치함으로써 ECCS의 비정상 개방의 초기사건 빈도를 낮춤
- 하지만 분석 결과, 추가로 설치된 IAB 밸브는 사고시 ECCS 밸브 개방 실패에 영향을 미치는 것으로 나타남
- 분석 결과를 바탕으로 ECCS Failure를 FT로 표현함
- 이를 통해 US600에서 제공한 ECCS 신뢰도 값을 본 연구를 통해 보다 현실적인 신뢰도 계산이 가능해짐
- i-SMR 신뢰도 분석을 하는데 참고 자료가 될 수 있도록 함

# Thank for your attention

Donghwan Choi

(Presenter)

[cdh2284@gmail.com](mailto:cdh2284@gmail.com)

Gyunyoung Heo\*

(Corresponding Author)

[gheo@khu.ac.kr](mailto:gheo@khu.ac.kr)

This work was supported by the Nuclear Safety Research Program through the Regulatory Research Management Agency for SMRS (RMAS) and the Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) of the Republic of Korea (No. 1500-1501-409).

We would like to express our sincere gratitude to Mr. Jinhee Park in Korea Atomic Energy Research Institute, specifically reviewing the valve failure mechanisms.